

물 분야 2050

**탄소중립 이행을 위한
로드맵 구축 연구**



I 추진 배경 및 로드맵 개요

1. 탄소중립 추진배경 및 경과

■ 2050 탄소중립이 글로벌 新패러다임으로 대두

- 파리협정('16년 발효), UN 기후정상회의('19.9) 이후 121개 국가가 기후목표 상향동맹*에 가입하면서 '2050 탄소중립'이 글로벌 의제로 대두
* 2050 탄소중립 목표 기후동맹('19년 기후변화당사국총회 의장국인 칠레 주도 설립)
- 기후변화의 심각성 인식이 확대되고 '장기저탄소발전전략(LEDs)'의 UN 제출 시한('20.12월) 도래함에 따라 주요국의 탄소중립 선언 가속화
* EU('19.12)·中('20.9)·日('20.10)·韓('20.10.28), 美 바이든 당선자도 공약으로 탄소중립 제시

■ 2050 탄소중립 이행 추진

- 우리나라의 탄소중립 선언('20.10.28) 이후, 이를 이행하기 위해 '2050 탄소중립 추진전략*'을 수립('20.12.7)하는 한편,
* 적응·기회·공정 및 기반 등 3대(+1) 전략, 10대 중점과제 제시
- 대통령 직속 탄소중립위원회 출범('21.5.29) 및 탄소중립기본법 제정('21.9.24 공포)로 탄소중립 사회로 전환하기 위한 범국가적 기반 구축

■ 중장기 온실가스 감축목표(2030 NDC) 확정

- 탄소중립기본법 제정의 후속 조치로 2018년 대비 2030년까지 온실가스를 40% 감축하는 것으로 확정('21.10.27)
- 이후, 국가전략 및 기본계획을 수립하고 기후대응기금(2.5조원 규모)이 신설되는 등 실행 기반이 마련되고 있는 상황

☞ 물관리 분야는 2050 탄소중립 추진전략 및 2030 NDC에 미포함, 따라서 온실가스 배출량 등 별도 분석 후 탄소중립 기여 필요

2. 해외 물분야 탄소중립 동향

- 국제적으로 탄소중립 이행 전략은 에너지, 산업, 수송, 건물, 농축수산 및 폐기물 등을 중심으로 수립되어 물 부문 단독의 정책 수립은 활발하지 않은 편
 - (UNFCCC) 다만, 전 세계 84개의 대규모 물공급·처리 사업자들이 자발적으로 UNFCCC Race to Zero 챌린지를 통해 '25~'50년까지 탄소중립 선언
- 영국·호주 등 일부 국가들을 중심으로 물분야 탄소중립 전략 및 이행 계획을 수립하고 있는 추세
 - (영국) 물관리 시설이 전체 에너지 소비의 3%, 국가 온실가스 총 배출량의 1%를 차지하여 상하수도 사업자들의 탄소중립 목표 및 전략 수립
 - (호주) 빅토리아 주의 물관리 부문이 배출하는 온실가스는 공공부문 배출량의 25%를 차지함에 따라 물관리 분야의 2050 탄소중립을 선언

3. 국내 물분야 탄소중립 추진여건

- 우리나라의 국가 온실가스 인벤토리 상 물분야 미편제
 - 국제 지침*에 따라 우리나라도 온실가스 배출 분야를 △에너지, △산업공정, △농업, △토지이용, 토지이용 변화 및 임업**, △폐기물로 구분
 - * 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC)에서 개발한 '국가 온실가스 인벤토리 작성 가이드라인'으로 파리협정의 모든 당사국이 국가 온실가스 배출량 UN 제출시 적용
 - ** Land Use, Land Use Change and Forestry → LULUCF로 약칭
 - 국가 온실가스 인벤토리* 구성 상 물분야가 개별부문으로 미편제**, 물분야 온실가스 배출량 현황 및 전망, 감축잠재량 등 파악 미흡
- 우리나라의 탄소중립 추진의 이정표인 '2050 탄소중립 추진전략' 및 '2050 탄소중립 시나리오'에 물분야 감축수단 반영 미비
 - 탄소중립 선언('20.10.28) 이후 우리나라는 이를 이행하기 위하여 2050 탄소중립 추진전략을 수립('20.12.7)하여 3+1 실행전략* 제시
 - * △경제구조의 저탄소화, △新유망 저탄소산업 생태계 조성, △탄소중립 사회로의 공정전환 + △탄소중립 인프라 강화

- 다만, 에너지 전환 및 산업구조 전환이 주요 핵심과제로 설정되어 있어 물분야의 탄소중립 추진방안은 미포함

- 이후, 2050 탄소중립 시나리오를 수립('21.10.18)하여 부문별 방향성 제시, 배출을 최소화하는 A안과 제거기술을 적극 활용하는 B안으로 구성

- 수변 녹지 조성, 댐 유휴수면 인공수초섬 조성 등 일부 물분야 감축수단이 시나리오에 반영되어 있으나 제한된 수준으로 반영

* (예시) 시나리오상 하폐수처리의 경우 '18년 대비 '50년까지 배출량이 18% 감소하나, 이는 장래 인구 감소 전망치를 반영한 것으로 적극적 감축수단이 적용된 것이 아님

■ 2030 국가 온실가스 감축목표에도 물분야 감축수단 반영 미흡

- 정부는 2050 탄소중립의 중간목표로 2030 국가 온실가스 감축목표를 2018년 대비 2030년까지 40% 감축하는 것으로 확정('21.10.27)

- 2030 국가 온실가스 감축목표의 달성방안은 전환(에너지), 산업, 건물, 농축수산, 흡수원(CCUS 포함) 등 주요 배출 분야를 중심으로 구성

- 다만, 물분야의 경우 논물 관리방식 개선, 가축분뇨 자원순환 확대 등 농축수산 부문에 일부 반영된 것을 제외하고 제한적으로 접근

☞ **현행 탄소중립 추진정책에 물분야 고려 불충분 → 탄소중립은 도전적인 국가과제로 물분야 탄소중립 기여 방안 적극 마련 필요**

4. 물분야 탄소중립 로드맵 개요

■ (로드맵 성격) 본 물분야 로드맵은 물분야 탄소중립 이행을 위해 공동연구 차원*의 제시

- (수립계기) 국가물관리위원회 통합물관리협의체 연구기관 중 한국환경연구원, 한국건설기술연구원, 국토연구원, 한국농촌경제연구원, 국립재난안전연구원의 공동연구 '물 분야 2050 탄소중립 이행을 위한 로드맵 구축 연구' 수행

- (계획기간) 탄소중립 목표연도('50) 등을 감안하여 로드맵의 계획기간은 '22년~'50년으로 설정

- (계획수준) 2050 시나리오, 2030 NDC의 계획시기를 고려하여 중기(22~'30), 장기('30~'50) 방안으로 전략 수립

II

물분야 온실가스 배출 현황

- 우리나라 국가 온실가스 인벤토리 상 물분야 미편제 → 본 연구에서 물 분야 조직 및 운영경계 설정 [참고 1]
- (총 량) '18년 물분야 온실가스 총 배출량은 12.87 백만톤 CO₂eq.
- (부문별) 물공급관리 3.15 백만톤, 물환경관리 9.72 백만톤(간접배출 50.4만톤 포함), 수자원관리 -1.28 백만톤

- (총량) 물분야의 '18년 총 배출량은 총 12.87 백만톤 CO₂eq.(국가 배출량의 1.77%)이며, 수변구역 및 습지 등 LULUCF 탄소흡수/배출원을 고려 시 순배출량은 11.49 백만톤 CO₂eq.

물서비스/관리		배출활동	배출량/흡수량	비율(%)
부문	세부부문			
물공급 관리	생활·공업용수	연소배출	0.11	0.9
		전력사용	2.50	19.4
	농업용수	전력사용	0.54	4.2
물환경 관리	하·폐수·분뇨처리	연소배출	0.02	0.1
		처리공정	1.87	14.5
		전력사용	2.80	21.8
	가축분뇨 처리	처리공정	4.94	38.4
		전력사용	0.09	0.7
수자원 관리	수자원 확보·공급, 홍수조절	습지 (인공침수지)	0.28	-
	수자원 수질 확보	산림지 (수변구역·상수원보호구역)	-1.56	-
물관리 분야 총 배출량('18 LULUCF 미포함)			12.87 ('18년 국가 전체 온실가스 총 배출량(727.6)의 1.77%)	100.0
물관리 분야 총 배출량('18 LULUCF 포함)			11.59 ('18년 국가 전체 온실가스 순 배출량(685)의 1.69%)	-

- (물공급) '18년 배출량은 3.15 백만톤으로, 유류사용에 따른 직접배출량 0.11 백만톤(3.6%)과 전력사용에 따른 간접배출량 3.04 백만톤(96.4%)으로 구분
- 직접배출보다는 간접배출이 압도적으로 높으며, 간접배출에서 생활공업 용수공급이 2.5백만톤 (82.2%), 농업 용수공급에서 0.54 백만톤 (17.8%)

- (물환경) '18년 배출량은 9.72 백만톤으로, 처리공정 등 직접배출량 6.83 백만톤(70.3%)과 전력사용에 따른 간접배출량 2.89 백만톤(29.7%)으로 구분
 - 직접배출의 경우에는 가축분뇨 처리(72.4%)>> 하·폐수·분뇨 처리(27.6%), 간접배출의 경우에는 하수폐수분뇨 처리(96.8%)>>가축분뇨 처리(3.2%)

- (수자원) 수자원 사용 및 보호를 위해 조성된 LULUCF의 '18년 순흡수량은 -1.28 백만톤으로 습지(하천, 구거, 유지, 양어장 등)에 따른 직접배출량 0.28 백만톤과 하천주변 임목에 따른 흡수량은 -1.56 백만톤
 - 배출량 0.28 백만톤은 유지에서 55.3%, 구거에서 44%, 양어장에서 0.7%
 - 흡수량 -1.56 백만톤은 수변구역(50.9%), 상수원 보호구역에서 49.1% 차지

- (시사점) 상하수도시설 전력소비와 하·폐수가축분뇨처리가 주요 배출원
 - 물환경 관리를 위한 하·폐수가축분뇨 시설에서 대부분의 온실가스가 배출(75.5%)되며, 생·농·공 물이용 공급에 따른 배출이 나머지 차지
 - 물분야의 직접배출(53.9%)과 간접배출(46.1%) 비율은 유사하여, 물분야 주요 배출량 저감을 위해 공정처리 시 직접 배출량 삭감 뿐만 아니라 물관리 기초시설 에너지 효율화도 집중 필요
 - 물수요관리, 유기성 바이오가스 사업, 식생대 조성 등 물관리와 탄소관리 모두에게 편익을 주는 공편익 탄소감축 사업의 집중 확대 필요
 - 아울러, 탄소중립 달성을 위해 신재생에너지 발전 사업과 탄소흡수원 확충 등을 통해 잔여 배출량 상쇄 필요

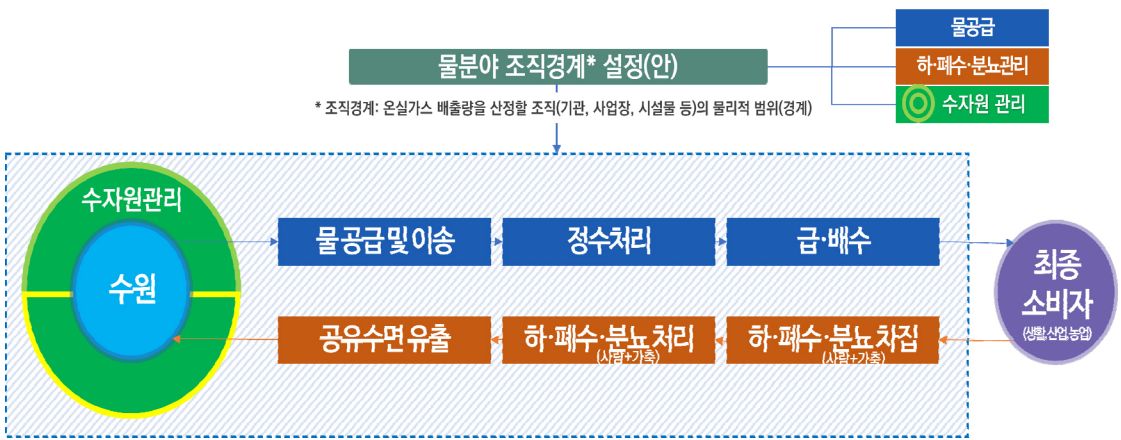
[참고 1] 물분야 온실가스 배출량 산정방법

■ (산정범위) 조직·운영경계를 설정, 경계 내 온실가스 배출량 산정

- (조직경계* 설정) 물분야 온실가스 배출량의 조직경계를 생·농·공 물공급관리 시설, 하·폐수·분뇨 처리 및 가축분뇨 처리 시설 등 물환경관리 시설, 인공저수지, 하천공간 등 수자원관리 시설 및 공간으로 한정
- * 온실가스 배출량을 산정할 조직의 물리적 범위(경계)

물분야 온실가스 배출 개념의 정의

- **물관련 서비스 제공 및 관리**하는 인간 활동에 수반하여 발생하는 온실가스를 대기 중에 배출, 방출 또는 누출시키는 **직접배출** 및
- **물관련 서비스 제공 및 관리**하는 인간 활동을 위해 외부로부터 공급된 전기 또는 열(연료 또는 전기를 열원으로 하는 것만 해당)을 사용함으로써 온실가스가 배출되도록 하는 **간접배출**



[참고] 조직경계 설정에 따른 물분야의 배출산정 대상

분류	대상시설
물공급관리	- 수요자에게 생활용수, 농업용수, 공업용수 등을 공급하기 위하여 물을 취수, 집수, 정수하고 이를 수로, 배관 등 시설에 의하여 급수하는 활동하는 기관, 사업장 또는 시설물
물환경관리	- 하수 및 산업 폐수, 사람과 가축의 분뇨를 수집, 운반, 보관 및 처리, 공유수면으로 유출 등 물환경오염을 방지하는 활동과 하수범람으로 인한 침수피해를 예방하는 활동하는 기관, 사업장 또는 시설물
수자원관리	- 수자원 확보 및 공급, 홍수조절 등을 위해 조성된 구거, 유지(홍수터), 양어장 등 인공침수지, 물환경보전을 위해 조성된 수변구역 및 상수원보호구역 내 산림지

- (운영경계* 설정) 연료연소, 공정을 통한 직접배출(Scope1), 물공급 및 처리시설 전력사용으로 인한 간접배출(Scope2) 등으로 구분

* 조직경계 내 배출원을 확인하고 배출유형을 결정하는 단계

※ Scope2 간접배출은 조직의 통제 범위 밖에서 발생하는 온실가스 배출로 미산정

[참고] 배출유형 구분

분류	주요 대상
Scope1 직접배출	- 에너지의 사용과 공정내 온실가스의 배출이 모두 조직경계 내에서 발생 예) 보일러에서 화석연료를 연소, 소화조에서 온실가스 배출
Scope2 간접배출	- 에너지의 사용은 조직경계 내에서 온실가스 배출은 밖에서 발생 예) 화력발전소에서 생산된 전력을 구매하여 사용
Scope3 간접배출	- 에너지의 사용과 온실가스의 배출이 모두 조직경계 밖에서 발생 예) 주요 활동을 아웃소싱하는 경우

[참고] 물분야 온실가스 배출원별 배출유형 구분

배출유형	물관리 분야 주요 배출원
Scope1 직접배출	- (물공급관리)연소배출 - (물환경관리) 연소배출, 하폐수·분뇨처리(처리과정), 가축분뇨처리 - (수자원관리(LULUCF)) 산림지(수변구역), 인공침수지(습지)
Scope2 간접배출	- (물공급관리) 생공용수(전력사용), 농업용수(전력사용) - (물환경관리) 하폐수·분뇨처리(전력사용), 가축분뇨처리(전력사용)

III

물분야 2050 탄소중립 비전 및 중점 추진과제

비 전	2050 물분야 탄소네거티브 달성	
목 표	● 2050 물분야 탄소네거티브 달성	
	<div>(물이용) -0.47 백만톤 (18년 배출량 대비 114.9 % 감축)</div> <div>(수자원) -1.48 백만톤 (18년 흡수량 대비 15.6% 증가)</div>	<div>(물환경) 1.71 백만톤 (18년 배출량 대비 82.4% 감축)</div>
	● 2018년 총배출량 12.87 백만톤 전량 감축 및 흡수하고 ‘50년 순배출량 -0.24 백만톤 탄소네거티브 달성	
추진 방향	● 기후위기로부터 안전하고 지속가능한 물분야 탄소중립 달성 ● 저탄소 물관리시설 운영 등 공공부문 주도 온실가스감축 ● 탄소중립 지향 물관리를 통한 공편익 온실가스감축 지향	
추진 과제	물이용	→ ① 물수요 저감을 통한 에너지 소비 절감 ② 유수율 제고로 저에너지 고효율 물공급 실현 ③ 공급 효율화를 통한 에너지 소비 절감
	물환경	→ ① 수요관리 및 에너지 절감 ② 재생에너지 활용 및 소화조 개선 ③ 가축분뇨 처리 개선을 통한 가축분뇨 처리량 감소 ④ 생산성 향상 및 수요관리를 통한 가축 사육두수 관리
	수자원	→ ① 하천·수변공간 내 수변생태벨트 조성 ② 인공침수지 토지 전용 및 완충녹지 조성
	재난관리	→ ① 저탄소 재난안전관리사업 시행 ② 탄소중립사업의 수재해 영향 평가 및 저감
이행 기반	● (법·제도) 국가 내 물분야 탄소중립 체계 마련 및 주류화 필요 ● (기술 등) R&D 투자 확대, 물관련 계획 탄소중립 요소 강화, 국외 감축사업 적극 발굴	

■ 물분야 2050 탄소중립 미래상



■ 물분야 2050 탄소중립 시나리오 및 추진방향

- 3대 부문(물이용, 물환경, 수자원관리) 중심 온실가스 감축 강화와 흡수원 확대로 2050 물분야 탄소 중립 달성
 - 2050 목표배출량은 물이용관리 -0.47 백만톤으로 네거티브 달성, 물환경관리 1.71 백만톤 배출, 수자원관리(LULUCF)에서 -1.48 백만톤으로 잉여분 흡수로 상쇄
 - 2018 물분야 배출량 12.87 백만톤 대비 전량 감축 및 흡수하고 '50년 순배출량 -0.24 백만톤 탄소네거티브 달성
 - 기후위기로부터 안전하고 지속가능한 물분야 탄소중립 달성
 - 탄소중립사업의 수재해영향평가를 도입하여 물관리의 부정적 영향 없이 탄소중립 추구
 - 공공부문 주도의 물분야 탄소중립 달성
 - 물관리시설의 공공부문의 온실가스 배출 기여*가 큼을 감안하여 과감하고 신속한 정부 주도의 물관리시설 탄소중립 실현 추진
- * '20년 공공부문 목표관리 지자체 온실가스 배출량 자료 분석 시 물관리 부분 배출량 268 천톤으로 지자체 공공부문 총 배출량(1,527 천톤)의 18% 차지
- 공편익 기반 물분야 탄소중립 추진
 - 물수요관리, 자연형 기반 물관리시설 확충, 물-에너지 넥서스 사업(그린수소 및 유기물 바이오가스), 수변식생대 조성 확대 등 기후변화 적응 및 감축 모두 혜택을 주는 공편익기반 탄소중립 사업 확대
 - 물분야 온실가스 산정 및 관리 체계 마련하여 지속적인 이행기반 마련
 - 국가 온실가스 인벤토리에 물분야 미편제에 따라 현행 탄소중립 추진정책에 물분야 고려 불충분 → 탄소중립은 도전적인 국가과제로 물분야 탄소중립 기여 방안 적극 마련

IV 추진과제별 세부 이행방안

1. (물이용관리) 물공급 시설 탄소중립 성능개선

- 물공급시설은 전과정에서 많은 에너지를 사용하는 시설로, 고효율기기 및 에너지 절감형 운영방안 도입 등으로 온실가스 감축 추진
- 물사용량 자체를 줄여 용수 생산에 소비되는 에너지를 저감하는 동시에 기후위기에 대한 적응도 동시에 달성
- 댐 수면 수상태양광, 수열에너지 등 물분야 재생에너지를 생산하여 탄소중립 목표 기여
- (시나리오) ('18) 배출량 315 만 톤 ⇨ ('30) 75 만 톤 ⇨ ('50) - 47 만 톤 배출

구 분	18년 배출량	30년 배출량	50년 배출량
물공급관리	315 만 톤	75 만 톤('18 비 76%) ↓	47 만톤('18 비 115 %) ↓
생·공 용수	261 만 톤	37 만 톤('18 비 86 %) ↓	- 78 만 톤 ('18 비 130 %) ↓
농업 용수	54 만 톤	38 만 톤 ('18 비 30 %) ↓	31 만 톤 ('18 비 43 %) ↓

(1) 생활 및 공업용수

■ (추진목표) 2050년 물이용 부문(생·공용수) 목표배출량 -78 만톤

- 사용자 중심의 물 수요관리 및 공급관리를 통해 '18년 대비 1인 1일 물사용량 71리터 절감, 유수율 향상(84.9% → 96%)

* 2050년 예측 급수인구 적용 시 물사용 절약으로 연간 온실가스 50만톤 감축이 가능하며, 2020년 서울특별시 수준의 유수율을 전국단위로 달성

■ (정책수단) 수요 및 공급 측면의 물 수요관리를 병행하고 고효율 설비 개발, 보급 및 시설물 효율 운영 기술 개발 노력

- (물 수요관리) 수도요금 현실화, 가정용 절수기기 보급 및 맞춤형 물 절약사업 추진, 노후 상수도관 정비 및 ICT기반의 누수진단 시스템 구축하여 해당 물량을 생산하기 위해 사용되는 에너지 절감

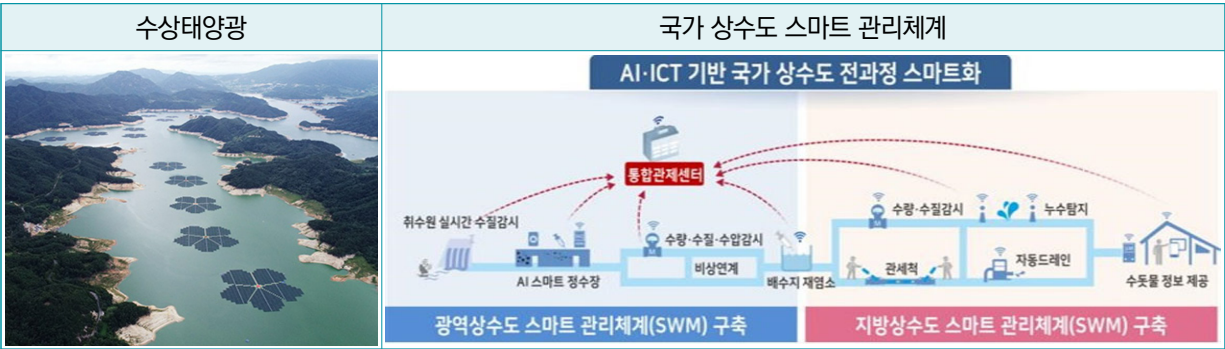
※ 수요관리 (2030) 66.8 만톤 감축 → (2050) 61.8 만톤 감축

- (에너지 절감 기술 개발) 고효율 펌프 개발과 보급 등 시설개선 및 데이터·AI 기반 시설 최적운영방안 도입 등 운영개선으로 에너지 효율 향상

- 지자체 펌프 교체 비용 보조 등 물공급시설 탄소배출 저감노력에 대한 인센티브 제공

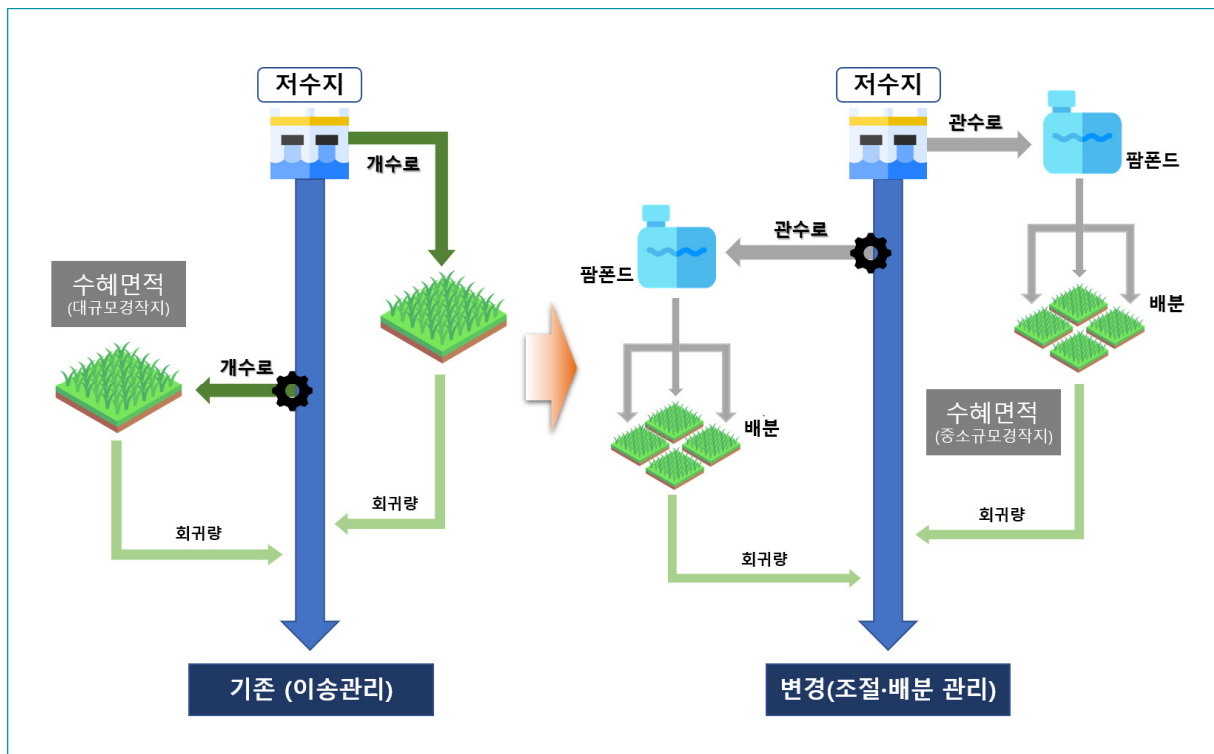
※ 기술개발 (2030) 10.2 만톤 감축 → (2050) 9.41 만톤 감축

- (재생에너지생산) 수상태양광 사업 지속 확대, 수열에너지 보급지원 및 클러스터 조성, 수열에너지 기술개발 및 보급지원 확대로 물분야 재생에너지 생산제고
- ※ 재생에너지 활용 (2030) 133.1만톤 감축 → (2050) 235.2만톤 감축(2030년 재생에너지 포함)



(2) 농업용수

- (추진방향) 2050년 농업용수 공급 부문 목표배출량 0.31백만톤 CO₂eq.
- 농업용수 공급관리 효율화 및 수요관리 효율화를 통해 농업용수 공급량과 이용량 그리고 사용량의 차이를 줄여, 농업용수 및 관련 에너지 사용량 절감
- (정책수단) 공급관리 효율화를 위한 기술개발 및 혁신, 수요관리 효율화를 위한 물관리 거버넌스 구축
- (물이용효율화) 용수로 관수로화 및 ICT 모니터링 관개 시스템 도입
- ※ 물이용효율화를 통한 감축 (2030) 28.9만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 89.9만톤 CO₂eq. 감축
- (거버넌스) 효과적인 농업용수 수요관리를 위한 농민참여 물 절약 거버넌스 구축
- (인센티브) 논물관리 등 공편익을 발생시키는 농업용수 물관리 활동에 대해 선택형직불금 등을 통한 인센티브 지급
- ※ 물관리를 통한 타부문의 공편익 감축: 논물관리를 통한 감축(2030) 54.0만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 54.0만톤 CO₂eq. 감축



자료: 농어촌연구원(2021b). 농업용수 효율화 관수로 설치 가이드라인 마련

2. (물환경) 물환경 시스템의 에너지 절감과 생산

- 물공급시설은 전과정에서 많은 에너지를 사용하는 시설로, 고효율기기 및 에너지 절감형 운영방안 도입 등으로 온실가스 감축 추진
- 물사용량 자체를 줄여 용수 생산에 소비되는 에너지를 저감하는 동시에 기후위기에 대한 적응도 동시에 달성
- 댐 수면 수상태양광, 수열에너지 등 물분야 재생에너지를 생산하여 탄소중립 목표 기여
- (시나리오) ('18) 배출량 315 만톤 ⇨ ('30) 75 만톤 ⇨ ('50) - 47 만톤 배출

구분	18년 배출량	30년 배출량	50년 배출량
하·폐수	469 만톤	- 54 만톤('18 比 112 %) ↓	-161 만톤('18 比 134 %) ↓
가축분뇨	503 만톤	400 만톤('18 比 20%) ↓	332 만톤('18 比 34 %) ↓

(1) 하폐수 처리 시설

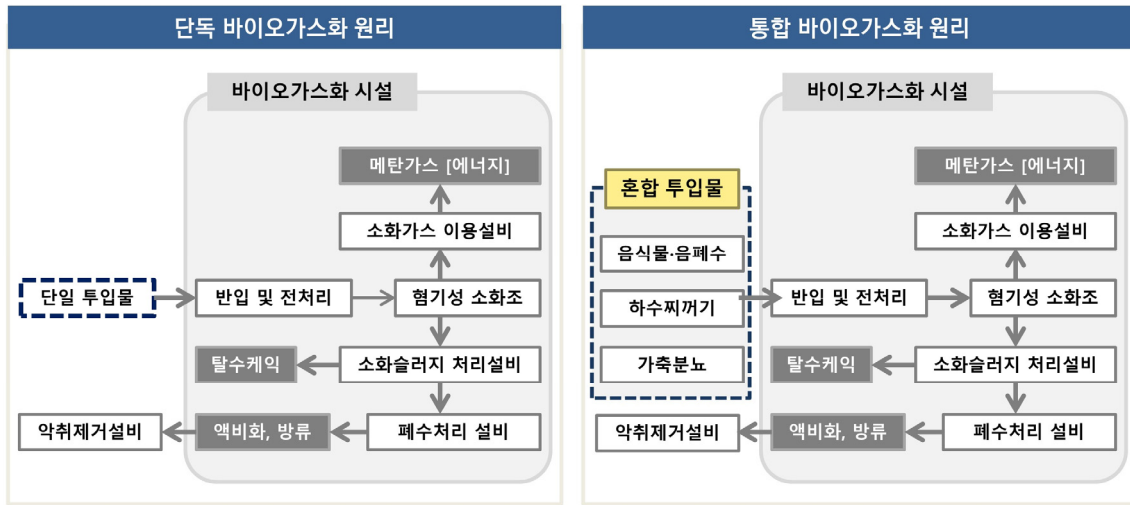
■ (추진방향) 2050년 하·폐수 목표배출량 -1.61 백만톤

- 하·폐수 기초시설 에너지 효율화, 공정 효율화를 통한 공정배출 감축, 하수슬러지 등 에너지자원화를 통해 탄소중립에 기여

■ (정책수단) 하수처리시설 내 고효율 기기 보급 확대, 디지털화 및 고효율공정 도입으로 효율 향상, 통합 바이오가스화 사업 추진으로 에너지 전환

- (물수요관리) 물수요관리를 통한 하수처리량 저감으로 하수처리 직·간접 배출량 저감
※ 수요관리 (2030) 0.5백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 0.5백만톤 CO₂eq. 감축
- (시설 및 운영개선) 하수처리시설 내 에너지 절감 설비 교체(인버터 설비, 고효율 송풍기, 유입펌프 등), 효율적인 제어로 에너지 사용량 절감(빅데이터 및 AI기술 활용) 등으로 인한 에너지 절감
※ 에너지절감 (2030) 0.3백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 0.4백만톤 CO₂eq. 감축
- (고효율 공정) 단축질소제거(Anammox)* 공정 도입 등 반류수 처리와 소화조 개선으로 저에너지 고소화효율을 달성하고 바이오가스 생산량 증가를 위한 바이오가스화 플랜트 도입
* 하수 내 질소 제거와 암모늄 산화 미생물 활용으로 기존 질산화/탈질 공정대비 에너지 절감, 소량의 약품 사용, 외부탄소원 절감 등 에너지 절감형 공정 활용
※ 소화조 개선 (2030) 1.4백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 1.5백만톤 CO₂eq. 감축
- (재생에너지) 유기성 폐자원의 혐기성소화에 의한 바이오가스(메탄가스) 생산과 하수처리장 유희부지 활용으로 태양광, 풍력 등 발전설비 설치에 의한 에너지원 활용으로 2050년 100%자립화 추진
※ 재생에너지 활용 (2030) 2.2백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 2.8백만톤 CO₂eq. 감축

[참고] 단독·통합 바이오가스화 공정 원리

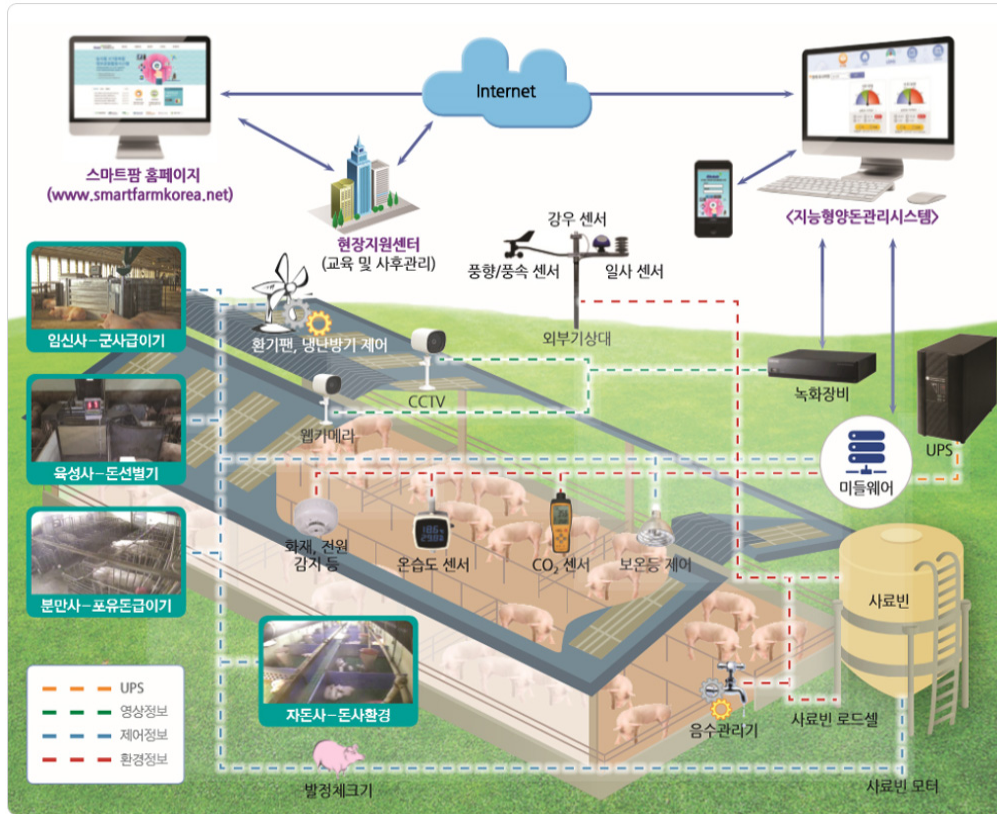


- (에너지관리 제도 개선) 유효자원 회수 및 하수 재활용 적극 추진을 위한 「하수도법」 개선과 에너지 효율성 비중 증가를 위한 「녹색건축물 조성 지원법」 및 「에너지이용 합리화법」에 근거한 에너지효율 진단 의무화 확대
- (이행 및 성과체계) 「하수도법」 제4조의2 및 제5조에 하수처리시설의 탄소중립 계획과 이행 및 성과체계에 관한 내용추가로 탄소중립 이행 및 성과체계 구축 기반 마련

(2) 가축분뇨

- (추진방향) 2050년 가축분뇨 처리 부문 목표배출량 3.32백만톤 CO₂eq.
 - 가축분뇨처리량 감소와 가축사육두수 관리를 통한 온실가스 감축 추진
- (정책수단) 가축분뇨처리량 감소를 위한 가축분뇨 처리 개선, 가축사육두수 관리를 위한 생산성 향상 및 수요관리 추진
 - (가축분뇨 처리 개선) 정화처리 및 에너지화 확대, 바이오 차 등 가축분뇨의 산업 소재 활용을 통한 퇴비 감축
 - ※ 퇴비감축, 정화처리 및 에너지화를 통한 분뇨처리 개선을 통한 감축
(2030) 205.8만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 235.5만톤 CO₂eq. 감축
 - (생산성 향상 및 수요관리) 대체식품 및 식단변화를 통한 육류 소비 감소, 스마트 축사를 통한 축산부문 생산성 향상 및 수요 대비 가축 사육두수 감소
 - ※ 스마트 축사 보급 통한 가축 사육두수 관리 (2030)21.9만톤 CO₂eq.감축 → (2050)53.1만톤 CO₂eq. 감축
 - ※ 수요관리를 통한 가축사육두수 관리 (2030) 1.8만톤 CO₂eq.감축 → (2050)61.4만톤 CO₂eq. 감축

- (인센티브) 공동자원화시설지원사업 예산 실집행률 및 에너지화시설의 수익성 제고
〈참고〉 스마트 축사 구성: 양돈 농가



3. (수자원관리) 수변녹지 확충을 통해 배출량 상쇄

- 수자원관리 관련 부지에 수변식생대를 적극 조성하여 탄소흡수 기능을 부여함으로써 탄소중립에 기여
- 댐홍수터, 폐천부지 등 하천공간 토지이용의 제고와 완충녹지 조성을 통해 온실가스 배출량 감축과 흡수원 동시 확보
- (시나리오) ('18) 흡수량 128만톤 ⇨ ('30) 125만톤 흡수 ⇨ ('50) 148만톤 흡수
- (주요수단) 수변생태벨트 조성, 인공침수지(댐홍수터) 토지 전용

(1) 수변녹지

■ (추진방향) 2050년 수변녹지 목표흡수량 175.7만톤

- 수변녹지는 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)* 상 주요 탄소흡수원으로, 수변생태벨트 조성을 주요 수단으로 하여 추진

* 댐홍수터 및 하천 수변구역 녹지조성 등을 통해 2030년까지 10만톤의 흡수량 추가 확보가 가능한 것으로 평가됨

- (정책수단) 수변구역을 중심으로 하천인접 녹지의 탄소흡수능력 증진과 함께 하천공간 내 토지이용 제고를 통해 신규 흡수원 발굴
 - (흡수능력 증진) 수변구역·상수원보호구역 토지매수 및 수변생태벨트 조성을 통해 수변공간의 흡수능력 및 생태 건전성 확보
 - 수변녹지 조성을 통해 탄소흡수원을 확보하고, 이를 다목적으로 활용할 수 있는 자연성기반(NbS)* 수변공간 관리방안 모색

※ 수변생태벨트 (2030) 1,655km², 1,49.3 만톤 흡수 → (2050) 2,138km², 164.9 만톤 흡수

* NbS(Nature-based Solution)은 수변공간 관리에 있어 홍수방어, 수질개선, 생태 연결성 및 다양성, 탄소흡수원 확대 등 공편의 효과를 도모하는 방식
 - (흡수원 발굴) 댐홍수터·폐천부지·4대강 친수공원(연평균 이용객 2,000명 미만) 등 토지활용 제고가 필요한 하천부지의 탄소흡수 능력 극대화
 - 하천공간 내 토지 전용 및 수변녹지 조성을 통해 탄소흡수원 창출

※ 완충녹지 (2030) 36.3km², 3.8 만톤 흡수 → (2050) 97km², 10.7 만톤 흡수

〈 하천공간 내 잠재적 탄소흡수원 〉



- (하천기본계획) 하천기본계획 수립 시 하천구역 내 보전지구 지정기준에 기후변화 적응(홍수방어) 및 완화(온실가스 흡·배출) 관련 기준을 반영

(2) 인공침수지

- (추진방향) 2050년 인공침수지 목표배출량 27.2만톤
 - 유지*의 토지이용 제고 및 수변녹지 조성을 통해 메탄 발생량 감축과 동시에 흡수원 확대를 추진

* 2006 IPCC GL 상 유지는 홍수조절지 등과 같은 습지로 구분되며, 우리나라 국가 온실가스 인벤토리에서 메탄 발생량을 산정하고 있음
- (정책수단) 댐홍수터-수변구역 연계형 수변생태벨트 추진을 통해 자연형 수변완충지대 확충
 - (댐홍수터 복원) 댐홍수터 부지를 유수지에서 수변완충지대로 전환하여 메탄발생 감축 및 탄소흡수 기능 부여

- 홍수기에는 홍수조절지, 평상시에는 자연성 회복(수질개선, 생물서식처 보전) 및 사회적 가치 창출(생태관광·교육, 지역소득창출) 기능 제공

※ 유지 토지 전용 (2030) 23.1km², 0.27 만톤 감축 → (2050) 61.6km², 0.8 만톤 감축

- (디지털 트윈) 댐-하천 디지털 트윈 구축 등 선제적 홍수방어 체계를 마련하여 홍수피해 복구 시 발생하는 탄소 배출량 최소화
- (거버넌스) 댐홍수터 내 무단 경작지 등 훼손구역 관리에 주민을 포함한 다양한 주체가 참여할 수 있는 지역 협치 체계 구축

4. (재난관리) 기후위기에 재난안전 보장하는 탄소중립

(1) 재난안전관리사업 탄소중립 방안

- (정책수단) 국내 재난안전관리사업을 저탄소 사업으로 단계적 전환하기 위한 기술개발, 보급 및 기반 확충
 - (재난관리) 물재해저감으로 복구·개선사업 수행에 따른 에너지 소비 절감
 - 물재해를 저감함으로써 기반시설피해 복구·개선을 위한 직접사업 수행과 재료생산에 소요되는 에너지 절감
 - (기술개발) 온실가스 저감을 위한 친자연 기반 인프라 구축 기술개발 및 실증
 - 탄소발생·흡수량 산정 지원 Tool-kit 개발로 친자연 기술(Natural Based Solution, Low Impact Development, Green Infrastructure 등)별 재난안전 및 탄소중립 효과 검증

(2) 탄소중립사업의 수재해 영향 평가 및 저감

- (정책수단) 탄소중립 사업 수행을 통해 재난영향을 저감하고 지속가능한 발전을 지원하며 재난탄력성을 강화하는 평가체계 구축
 - (재난영향평가) 탄소중립 사업의 재난영향평가를 위해 국내·외 환경여건 조사를 통한 법·제도·조직 마련 등 실용적 추진체계 구축
 - (기후변화영향평가*) 물분야 특성을 고려한 기후변화 현황·전망, 수재해 영향 분석, 취약성·위험성 평가 방법론 마련

* 「탄소중립법」에 의한 국가계획·사업 추진시 기후변화 영향(감축 및 적응) 등을 사전 분석 및 평가하는 제도로 물 분야에서는 「환경영향평가법」 하천의 이용 및 개발 사업 대상(하천정비사업)으로 포함됨



물분야 탄소중립 이행기반

- (기초조사) 물분야 특성에 맞는 온실가스 배출 및 흡수 관측분석으로 물분야 탄소 데이터 기반 마련
 - (물이용관리) 물공급시설 전력·에너지 사용량 보고 대상 및 항목 확대와 집계방식 표준화, 농업용수 및 에너지 사용량 통계 구축
 - (물환경관리) 하·폐수처리시설 에너지 통계자료 신뢰성 제고
 - (수자원관리) 수변녹지 내 정확한 탄소흡수량 산정을 위해 버드나무 등 수변 우점 식생의 국가 고유 흡수계수에 대한 조사 확대
 - (재난관리) 재난안전관리 사업 탄소발생·흡수량 원단위 도출 항목 확대
- (통계) 물분야 탄소배출 실태조사 및 방법론 개발을 통해 국가 온실가스 통계에 반영하고 탄소저감 실적 확보
 - (물공급관리) 상업·공공시설 및 가정내 온수사용 계측 방법을 개발 및 물분야 온실가스배출에 포함하여 관리
 - (가축분뇨관리) 가축분뇨 정화처리 배출계수 개발
 - (수자원관리) 수변생태벨트 등 산림지 내 토양탄소 축적량 관련 활동자료 구축 및 산정방법 개발을 통해 국가 온실가스 통계에 반영
 - (재난관리) 재난안전관리 탄소배출 국가 온실가스 통계에 반영
- (재정) 온실가스감축인지 예산제도 및 기후대응기금 등 탄소중립기본법 체계에서 신설되는 재정운용제도의 적극 활용
 - (물환경) 공공예산투자에 대한 부담을 줄이기 위해 지자체에서는 민간사업자, 지역에너지사업가의 공동 투자 및 건설·운영 등 다자간 협력모델 도입 필요
 - PPP(Public-Private Partnership)모델을 활용하여 지자체는 필요한 부지 제공과 행정절차를 지원하고 민간부문은 설계·시공·운영·관리에 필요한 사업비 투자 후 생산되는 에너지 판매로 수익 창출
 - 관리기금을 수변구역 토지매수 및 수변생태벨트 조성에 적극 활용하고, 관련 기술 개발을 위한 신규사업 재원 확보
 - 하천수입금('10년 ~ '19년 연평균 473억 원 발생)을 물공급 시설 현대화 및 관리체계 개선에 활용할 수 있도록 근거 마련

- 농업용수 공급효율화를 위해서는 농업용수관리를 위해 사용되고 있는 농촌용수개발(특별회계)를 통해 재원확보
 - 가축분뇨처리지원사업을 위해 사용되고 있는 축산발전기금, 스마트 축사 보급의 재원인 FTA 기금 등을 가축분뇨처리개선을 위한 재원 확보
- (국내외 협력)물관리 기초시설 관할 지자체와 관련 물산업 업체(국내), UN, OECD등 국제기구와 물분야 전략적 탄소감축수단 관심 국가(국외) 협력
- (거버넌스 체계) 정부와 기업, 시민사회의 다양한 주체들이 참여와 협력, 소통의 과정을 통해 공동의 문제인 물환경부문 탄소중립을 달성하기 위해서는 공정 및 지속 가능한 시스템 개발
 - 지속가능한 발전정책에 대한 추진체제로 시민참여 탄소중립 시범사업 프로그램 지원
 - 새로운 성장 동력사업으로 기술 개발보급 확대에 따른 관련 일자리 창출에도 이바지함으로 탄소중립 과정에서의 공정 체계 이점 확인
 - 수변생태벨트 조성 계획 수립 시 시민체감형 수변공간 창출 측면에서 시민·지자체의 적극적 참여를 독려하기 위한 민·관협의체 구성
 - (농업용수) 점진적이고 지속적으로 발전·확장해 가는 소규모 거버넌스 구축, 소규모 거버넌스에서 유역단위 거버넌스까지 각 단계별 거버넌스와 상위단계 거버넌스와의 결합을 통한 농업용수 관리 효율화 달성
 - (국제협력) 글로벌 거버넌스에 적극 동참하고, 저탄소 물관리 SOC 구축사업, 하천습지 등 수생태계 기반 블루카본 탄소흡수력 사업, 수열에너지 전환사업 등 탄소중립 미래 성장 분야에 대해 적극적인 기술교류와 공동사업 추진
 - 하천습지 등 수생태계 기반 블루카본의 탄소 흡수력 국제 공인(IPCC) 확대를 위한 주요국 중심 의제 공동대응 및 기술교류 확대
 - 그린뉴딜 공적개발원조 사업 확대를 통해 수상태양광 및 수열에너지 기술을 해외로 확대 보급
- (기술 개발) 2050 탄소중립에 도달할 수 있는 기술·관리 개발 및 R&D 지원 확대 필요
- (물이용) ICT 기술 도입을 통한 기존 시설의 기능개선과 개수로의 관수로 전환, 인버터 펌프 설치 등 공급효율 제고를 위한 기술 개발 및 확산 필요
 - (물환경) 수질·에너지·탄소배출량 평가 기술, 공정 자동제어 시스템, 저탄소 고도 하수처리 기술, 재생에너지 활용 극대화 모델 등 등 기술개발 필요
 - (수자원관리) 수변생태벨트 조성 부지의 합리적 선정절차 마련을 위해 수변공간의 다목적성을 고려한 GIS기반의 토지 활용성 및 잔존가치 평가기법 개발이 필요

VI

물분야 3대 부문 탄소중립 추진목표

(단위 : 만톤 CO₂eq.)

부문	2018년 배출량		감축·흡수 수단	2030년 배출량	2050년 배출량
물이용 관리	생·공용수	2.61	(생공) 물수요 절감 및 유수율 개선	0.37	-0.78
			에너지 효율 기술 적용 및 효율 개선		
			수상태양광 및 수열에너지 등 보급 확산		
	농업용수	0.54	농업용수 물공급 및 이용효율화	0.38	0.31
	소계	3.15		0.75	-0.47
물환경 관리	하·폐수·분뇨	4.69	하·폐수 처리시설 수요관리	-0.54	-1.61
			바이오가스 등의 재생에너지 활용		
			고효율 공정을 위한 소화조 개선		
			시설 및 운영 개선을 통한 에너지 절감		
	가축분뇨	5.03	가축분뇨처리 개선	4.00	3.32
			생산성 향상 및 수요관리		
	소계	9.72		3.46	1.71
수자원 관리	-1.28		수변구역 녹지 확충	-1.25	-1.48
			하천부지 토지이용 제고 및 수변녹지 조성		
			인공침수지(유지 등) 토지 전용		
합계	11.59			2.96	-0.24

제 출 문

환경부 장관 귀하

본 보고서를 「물 분야 2050 탄소중립 이행을 위한 로드맵
구축 연구」용역의 완료 보고서로 제출합니다.

2022년 10월

한국환경연구원

원장 이 창 훈

국토연구원

원장 강 현 수

한국건설기술연구원

원장 김 병 석

한국농촌경제연구원

원장 김 홍 상

국립재난안전연구원

원장 이 종 설

참여연구진

주관연구기관 한국환경연구원

연구책임자 참여연구원	한혜진	한국환경연구원 선임연구위원
	정기철	한국환경연구원 부연구위원
	현윤정	한국환경연구원 연구위원
	조을생	한국환경연구원 선임연구위원
	김호정	한국환경연구원 선임연구위원
	정우현	한국환경연구원 연구위원
	이문환	한국환경연구원 부연구위원
	정아영	한국환경연구원 전문연구원
	김나희	한국환경연구원 위촉연구원

공동연구기관 한국건설기술연구원

연구책임자 참여연구원	강성규	한국건설기술연구원 수석연구원
	김주훈	한국건설기술연구원 연구위원
	최윤석	한국건설기술연구원 연구위원
	최시중	한국건설기술연구원 수석연구원



공동연구기관 한국농촌경제연구원

연구책임자	성재훈	한국농촌경제연구원 연구위원
참여연구원	정선화	한국농촌경제연구원 위촉연구원
	이세진	한국농촌경제연구원 위촉연구원

공동연구기관 국토연구원

연구책임자	김준성	국토연구원 부연구위원
참여연구원	이상은	국토연구원 안전국토연구센터장
	조만석	국토연구원 연구위원
	김창현	국토연구원 선임연구위원
	이승연	국토연구원 연구원
	표희진	국토연구원 연구원

공동연구기관 국립재난안전연구원

연구책임자	정태성	국립재난안전연구원 박사
-------	-----	--------------

Contents

SECTION

01 | 서론

제1절 연구의 배경 및 목적	40
1. 기후위기와 국내외 대응노력	40
2. 탄소중립 목표 달성을 위한 물 분야 역할 및 필요성	47
3. 연구 목적 및 수행 체계	50
제2절 국내외 물 분야 탄소중립 동향 및 여건	51
1. 해외 물 분야 탄소중립 정책 및 연구 동향	51
2. 국내 물관리 탄소중립 이행 현황 및 여건	70
3. 시사점	81

SECTION

02 | 물 분야 온실가스 인벤토리 구축

제1절 물 분야 온실가스 인벤토리 구축 방법론	86
1. 온실가스 인벤토리 개념 및 구축 방법	86
2. 물 분야 조직 및 운영 경계 설정	90
3. 물 분야 세부부문 온실가스 산정 방법	93
제2절 물 분야 온실가스 배출현황('18년)	107
1. 물이용 관리 부문	107
2. 물환경 관리 부문	109
3. 수자원 관리 부문	110
4. 종합분석	112



SECTION

03 | 물 분야 2050 탄소중립 시나리오 구축 방법

제1절 시나리오 개념 및 국내외 관련 시나리오 분석	120
1. 시나리오 개념 및 의의	120
2. 국가 2050 탄소중립 시나리오 분석 및 시사점	120
3. UK 물 분야 탄소중립 시나리오 사례 분석 및 시사점	122
제2절 물 분야 탄소중립 시나리오 구축 방안	124
1. 물 분야 4개의 시나리오 개요 및 구축 방법	124
2. 물 분야 세부 부문별 탄소중립 시나리오 구축 방법	129

SECTION

04 | 물 분야 2050 탄소중립 시나리오 주요 내용

제1절 물 분야 탄소중립 시나리오 개요	142
1. 물 분야 2050 탄소중립 시나리오 미래상	142
2. 물 분야 2050 탄소중립 시나리오별 온실가스 배출량 전망	143
제2절 물이용 부문	149
1. 현황('18년, 시계열)	149
2. 전망 (BAU, 시나리오3)	158
3. 감축수단	161
4. 정책제언	164

C

ontents

제3절 물환경 부문 166

- 1. 현황 166
- 2. 전망 (BAU, 시나리오3) 171
- 3. 감축수단 173
- 4. 정책제언 179

제4절 수자원 관리 부문 180

- 1. 현황 180
- 2. 전망 (BAU, 시나리오3) 181
- 3. 감축수단 182
- 4. 정책제언 182

제5절 물 분야 감축수단 공편익 감축 184

- 1. 배재배 물관리 온실가스 감축량 184
- 2. 농경지 토양의 비점오염원 관리를 통한 온실가스 감축량 189
- 3. 가축사육두수 감소를 통한 온실가스 감축량 192
- 4. 온수 물 수요관리를 통한 가정 내 에너지 온실가스 감축량 194

SECTION

05 | 물 분야 2050 탄소중립 이행기반 마련

제1절 공편익 기반의 물부문 탄소중립 전략 마련 200

- 1. 공편익 기반 탄소중립 전략의 개념 200
- 2. 물 수요관리 중심 탄소중립 방안 201
- 3. 가축분뇨 탄소중립 방안 203
- 4. NbS 기반 탄소중립 방안 206



제2절 탄소중립 사업수행에 따른 재난영향평가 마련	210
1. 국내외 재난영향평가 관련 법 및 제도	210
2. 재난영향평가 운영 방안	212
제3절 물 분야 탄소중립 이행을 위한 제도 기반	214
1. 법률 재·개정 기반	214
2. 자원 확보 방안	223
3. 탄소중립 이행 및 성과체계	231
4. 공정 및 지속 가능 거버넌스 체계 방안	237
5. 기술 및 개발 전략	243

SECTION

06 | 물 분야 2050 탄소중립 로드맵 구축

제1절 물 분야 2050 탄소중립 로드맵 구축	252
참고문헌	265
부록	273

C Contents

| 표목차 |

〈표 1-1〉 2050 탄소중립 시나리오 최종(안) 총괄표	45
〈표 1-2〉 NDC 상향안 부문별 총괄표	46
〈표 1-3〉 영국 Xylem의 연구에 따른 비용에 따른 하수처리장 온실가스 삭감량	48
〈표 1-4〉 영국의 물 분야 활동 범위	52
〈표 1-5〉 영국의 물 분야 탄소중립을 위한 다섯 가지 목표	53
〈표 1-6〉 영국의 물 분야 탄소중립을 위한 세 가지 계획	54
〈표 1-7〉 호주 Net Zero Water Cycle	54
〈표 1-8〉 WaCClim(Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation)	56
〈표 1-9〉 온실가스 배출량 추정을 위한 연도별 탄소배출계수	57
〈표 1-10〉 캘리포니아주 2015년 대비 2035년 물 관련 에너지 및 온실가스 변화 추정	58
〈표 1-11〉 UK 2030 Water 탄소중립 로드맵 주요 목표	61
〈표 1-12〉 UK 하수처리시설 탄소배출 저감 방안	62
〈표 1-13〉 미국 하수처리시설 온실가스 CH ₄ 및 N ₂ O 배출량	62
〈표 1-14〉 일본 하수처리시설의 자원에너지 이용 현황	66
〈표 1-15〉 미국 정부의 2050 탄소중립 달성을 위한 5대 정책방향	67
〈표 1-16〉 녹색 전환 주요 사업	72
〈표 1-17〉 지방상수도 탄소중립 목표	75
〈표 1-18〉 2050 농식품 탄소중립 장단기 로드맵	75
〈표 1-19〉 2021년 농어촌용수이용합리화계획의 비전 및 목표	77
〈표 1-20〉 축산분야 온실가스 배출량 목표 산정(안)	78
〈표 1-21〉 축산환경 개선대책 기본 방향 및 추진 전략	78
〈표 1-22〉 2030 가축분뇨처리 방식 개선 목표 산정(안)	79
〈표 2-1〉 온실가스 지구온난화지수(GWP)	87
〈표 2-2〉 온실가스 인벤토리 운영 경계의 배출 유형 구분	89
〈표 2-3〉 물 분야 온실가스 운영경계 설정(안)	92
〈표 2-4〉 물 분야 온실가스 배출량 산정 활용자료	94
〈표 2-5〉 2018년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수 중 전력배출계수	95
〈표 2-6〉 한국전력공사 수도업 전력 판매량	96
〈표 2-7〉 2018년 수도 부문 직접배출 현황	96
〈표 2-8〉 농업 분야 전력사용량 활동자료	97
〈표 2-9〉 조정전력 배출계수	97
〈표 2-10〉 축종별 가축 사육두수 활동자료(Population _i , N(T))	99
〈표 2-11〉 축종별 가축분뇨처리시설 이용 비율(MS(T,S))	99



〈표 2-〉 가축분뇨처리 부문 축종별 CH ₄ 배출계수()	100
〈표 2-13〉 축종별 분뇨 내 연평균 질소량()	101
〈표 2-14〉 가축분뇨처리시설별 N ₂ O 배출계수()	101
〈표 2-15〉 온실가스별 지구온난화지수(GWP)	101
〈표 2-16〉 2006 IPCC GL상 LULUCF 부문 토지이용 범주	104
〈표 2-17〉 2006 IPCC GL상 LULUCF 부문 하천공간 하위범주 설정	105
〈표 2-18〉 주요 수종별 흡수계수	106
〈표 2-19〉 물 분야 국가 온실가스 배출 현황(2018년)	107
〈표 2-20〉 2018년 생활공업용수 부문 온실가스 배출량	109
〈표 2-21〉 2018년 가축분뇨처리 축종별 배출량	110
〈표 2-22〉 우리나라 하수처리시설 현황	111
〈표 2-23〉 4대강 수계별 수변구역 지정 범위 및 면적	112
〈표 2-24〉 전국 상수원보호구역 지정 범위	113
〈표 2-25〉 전국 상수원보호구역 면적	113
〈표 2-26〉 임상도 속성(영급) 정보	114
〈표 2-27〉 수변구역 내 수종 및 임령별 면적 산정 결과	115
〈표 2-28〉 상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적 산정 결과	116
〈표 3-1〉 UK 2030 로드맵 시나리오별 감축량 및 비용	123
〈표 3-2〉 장래인구 추정치	128
〈표 3-3〉 목표연도별 급수인구	129
〈표 3-4〉 시나리오별 유수율	130
〈표 3-5〉 시나리오별 물 사용량	130
〈표 3-6〉 시나리오 구성 및 시나리오별 총급수량	131
〈표 3-7〉 농업 여건 변화 전망	132
〈표 3-8〉 효율화 목표에 따른 방안	133
〈표 3-9〉 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)상 흡수원 현황	136
〈표 3-10〉 2021년 4대강 수계관리기금 주요 사업별 지원 현황	138
〈표 3-11〉 유역별 폐천부지 현황	139
〈표 3-12〉 4대강 친수공원 중 연평균 이용자수 2,000명 미만 부지 현황	139
〈표 4-1〉 연도별 온실가스 배출량(생공용수, 전력판매량 기준)	150
〈표 4-2〉 연도별 취수시설 전력사용량 및 온실가스 배출량	150
〈표 4-3〉 연도별 정수시설 전력사용량 및 온실가스 배출량	152
〈표 4-4〉 연도별 공업용 정수시설 전력사용량 및 온실가스 배출량	154

C Contents

〈표 4-5〉 연도별 가압장 전력사용량 및 온실가스 배출량	155
〈표 4-6〉 수도사업자별 전력사용량 및 온실가스 배출량	157
〈표 4-7〉 농업용수 공급으로 인한 온실가스 배출량	158
〈표 4-8〉 농업용수 온실가스 배출량	159
〈표 4-9〉 시나리오별 온실가스 배출량	160
〈표 4-10〉 수요관리주도 시나리오 온실가스 배출량 예측치	161
〈표 4-11〉 기술혁신주도 시나리오 온실가스 배출량 예측치	161
〈표 4-12〉 에너지원별 감축가능량 예측치	162
〈표 4-13〉 에너지원별 설비용량 및 감축가능량 예측치	163
〈표 4-14〉 각 목표연도의 시나리오별 배출 종합 전망	163
〈표 4-15〉 수요관리주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 농업용수	163
〈표 4-16〉 기술혁신주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 농업용수	164
〈표 4-17〉 가축분뇨 관련 온실가스 배출량	167
〈표 4-18〉 규모별 재생에너지원	170
〈표 4-19〉 가축분뇨처리 및 분뇨처리 전력 온실가스 배출량	172
〈표 4-20〉 수요관리주도 시나리오 주요 가정: 가축분뇨처리	174
〈표 4-21〉 수요관리주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 가축분뇨처리	174
〈표 4-22〉 수요관리주도 시나리오 주요 가정: 가축분뇨처리	175
〈표 4-23〉 기술혁신주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 가축분뇨처리	175
〈표 4-24〉 하이브리드 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 가축분뇨처리	176
〈표 4-25〉 버, 맥류 재배면적 3년 평균자료	185
〈표 4-26〉 볏짚·보릿짚 유기물 환원 면적 비율	185
〈표 4-27〉 유기물 시용·무시용 면적 비율	186
〈표 4-28〉 벼재배 논의 물관리 방법별 면적 비율	186
〈표 4-29〉 유기물 시용 및 물관리 방법별 벼재배 면적(3개년 평균)	187
〈표 4-30〉 벼재배 물관리 방법 및 유기물 시용 보정계수	188
〈표 4-31〉 벼재배 부문 온실가스 배출량 및 목표 감축량	188
〈표 4-32〉 축종별 가축분뇨 질소 투입량	190
〈표 4-33〉 가축분뇨 투입 N2O 직접 배출계수	191
〈표 4-34〉 농경지토양 부문 가축분뇨 투입의 온실가스 배출량 및 목표 감축량	191
〈표 4-35〉 축종별 가축 사육두수 활동자료(Populationi)	193
〈표 4-36〉 장내발효 부문 축종별 CH4 배출계수(EFi)	193
〈표 4-37〉 가축 사육두수 감소로 인한 장내발효 부문의 온실가스 감축량	194
〈표 4-38〉 연도별 가정 내 에너지 사용 및 온실가스 배출량 추정	195



〈표 4-39〉 시나리오별 온실가스 배출량	197
〈표 5-1〉 정책의 우선순위 및 기대효과에 따른 공편익 분류	200
〈표 5-2〉 논물관리 체계화 관련 장단기 로드맵	202
〈표 5-3〉 논물관리 체계화 관련 장단기 로드맵	203
〈표 5-4〉 가축분뇨처리 개선 세부 추진계획	203
〈표 5-5〉 가축분뇨처리 개선 장단기 로드맵	204
〈표 5-6〉 스마트 축사 보급, 농식품 수요관리 세부 추진계획	204
〈표 5-7〉 가축분뇨처리 개선 장단기 로드맵	205
〈표 5-8〉 토양관리 세부 추진계획	205
〈표 5-9〉 농업자원(토양) 관리 강화 관련 장단기 로드맵	205
〈표 5-10〉 환경위기별 NbS를 통한 접근법	206
〈표 5-11〉 국내 재난영향평가 관련 제도	210
〈표 5-12〉 우리나라 방재 관련 위험구역 관련 규정	211
〈표 5-13〉 해외 방재 관련 위험구역 관련 규정	211
〈표 5-14〉 탄소중립 관련 법률 현황	214
〈표 5-15〉 농업 부문 탄소중립 관련 법률 현황	218
〈표 5-16〉 하수도법 제1조 개선안	221
〈표 5-17〉 에너지관리 관련 제도	221
〈표 5-18〉 하천법 시행령 제49조(보전지구 등의 지정기준)	222
〈표 5-19〉 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제69조 및 제70조	223
〈표 5-20〉 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제43조	223
〈표 5-21〉 하천법 시행령 제77조	224
〈표 5-22〉 연도별 하천수입금 현황	224
〈표 5-23〉 2022년 농업생산기반정비 예산 변화	225
〈표 5-24〉 농업생산기반정비 세부 사업별 예산액	226
〈표 5-25〉 연도별 가축분뇨처리지원사업 재정투입 현황	227
〈표 5-26〉 가축분뇨처리지원사업 지원 비율	227
〈표 5-27〉 가축분뇨공공처리시설 설치사업 지원 비율	228
〈표 5-28〉 연도별 가축분뇨공공처리시설 설치사업 재정투입 현황	228
〈표 5-29〉 연도별 축사시설현대화사업 재정투입 현황	229
〈표 5-30〉 한강수계법 시행령 제28조(기금의 용도)	231
〈표 5-31〉 농업기반시설 안전관리 및 안정적 농업용수 공급 성과지표 및 달성도	232
〈표 5-32〉 가축분뇨처리 관련 성과지표 및 달성도	233
〈표 5-33〉 환경부 농업용수 관련 성과지표 실적 및 목표치	234

C Contents

〈표 5-34〉 하수도법 제4조의2 및 제5조 개선안	236
〈표 5-35〉 하수도법 시행규칙 제14조(기술진단의 대상 및 내용 등) 개선안	237
〈표 5-36〉 공정전환 이슈 분석에 따른 한계점과 부정적 영향	238
〈표 5-37〉 물절약 거버넌스 주체별 역할(안)	238
〈표 5-38〉 NbS 기반 수변공간 관리 관련 중앙부처·지자체·시민의 역할	242
〈표 5-39〉 가축분뇨처리부문의 축종별 N2O 배출계수	246
〈표 5-40〉 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령 제2조 [별표 1] 개선안	246
〈표 6-1〉 물공급 관리 시나리오	255
〈표 6-2〉 물환경 관리 시나리오	257
〈표 6-3〉 수자원 관리 시나리오	259
〈표 6-4〉 물 분야 3대 부문 탄소중립 추진목표	264



| 그림목차 |

〈그림 1-1〉 물 관련 재해 경제 손실과 재해 인명 피해	40
〈그림 1-2〉 폭염 및 가뭄으로 바닥을 드러낸 중국 남부지역 포양호와 폭우 및 홍수로 잠긴 파키스탄 남서부지역 소바트 푸르시	41
〈그림 1-3〉 국가별 탄소중립 동향	43
〈그림 1-4〉 2050 탄소중립 사회 미래상 및 부문별 전환 내용	44
〈그림 1-5〉 NDC 상향(안) 목표	46
〈그림 1-6〉 물 분야 탄소중립의 중요성 및 기대효과	48
〈그림 1-7〉 연구 체계도	50
〈그림 1-8〉 Ofwat이 설정하는 물 사업자의 조직경계	53
〈그림 1-9〉 도시 물순환의 적응 및 완화	55
〈그림 1-10〉 WaCClim 해외 시범사업 내 주요 결과	55
〈그림 1-11〉 UNFCCC Race To Zero 전 세계 물산업의 넷제로 선언	56
〈그림 1-12〉 물 순환 과정 및 에너지 사용	57
〈그림 1-13〉 물 순환 과정의 탄소배출 비율	59
〈그림 1-14〉 UK 물기업 1인당 전력사용량 및 탄소배출량	60
〈표 1-11〉 UK 2030 Water 탄소중립 로드맵 주요 목표	61
〈그림 1-15〉 오렌지카운티 하수처리장 에너지 흐름	63
〈그림 1-16〉 콜로라도 2005~2019년 탄소배출량	64
〈그림 1-17〉 콜로라도 2020~2050년 탄소감축 목표량	64
〈그림 1-18〉 콜로라도 2005~2019년 탄소배출량	64
〈그림 1-19〉 콜로라도 2020년 부문별 온실가스 배출률	65
〈그림 1-20〉 수처리시설 온실가스 배출량과 2030 온실가스 예측량	65
〈그림 1-21〉 일본 하수슬러지 이용 현황	66
〈그림 1-22〉 Wetland Carbon Sequestration 개념도	68
〈그림 1-23〉 유역관리 차원의 기후변화 적응을 위한 GI 적용 개념도	69
〈그림 1-24〉 다뉴브강 유역 내 하천 복원 구간	70
〈그림 1-25〉 2021 환경부 탄소중립 이행계획	71
〈그림 1-26〉 국내 물 분야 온실가스 정책 현황 및 여건 분석	72
〈그림 1-27〉 지방상수도 온실가스 감축 방안	74
〈그림 1-28〉 국외 물 분야 온실가스 정책 현황 및 시사점	81
〈그림 1-29〉 국내 물 분야 탄소중립 이행 여건	82
〈그림 2-1〉 조직 경계에 따른 온실가스 인벤토리 유형	86
〈그림 2-2〉 국가 온실가스 인벤토리 공통보고 양식	88

C Contents

〈그림 2-3〉 온실가스 인벤토리 구축 과정	89
〈그림 2-4〉 지자체 기후정책 활용을 위한 인벤토리 구성	90
〈그림 2-5〉 물 분야 온실가스 배출 개념 정의 및 조직 경계	91
〈그림 2-6〉 조직경계 설정에 따른 물 분야의 배출 산정 대상	92
〈그림 2-7〉 수변구역·상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적 산정 방법론	114
〈그림 2-8〉 수변구역 내 수종 및 임령별 면적 비	115
〈그림 2-9〉 상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적 비	116
〈그림 3-1〉 2050 탄소중립 시나리오 A안과 B안의 비교	121
〈그림 3-2〉 물 분야 탄소중립 시나리오 작성 절차	124
〈그림 3-3〉 물 분야 탄소중립 시나리오의 구성	127
〈그림 3-4〉 2050 BAU 전망을 위한 주요 가정	127
〈그림 3-5〉 물환경 온실가스 배출량 산정을 위한 Scope 1과 Scope 2	135
〈그림 3-6〉 수변생태벨트 녹지조성 사례(A: 숲형, B: 초지형, C: 습지형, D: 복합형)	137
〈그림 3-7〉 4대강 수계별 수변생태벨트 조성사업비 및 누적 면적 변화	137
〈그림 4-1〉 물 분야 2050 탄소중립 세부 부문별 미래상(하이브리드 시나리오 기반)	142
〈그림 4-2〉 물 분야 2030년 및 2050년 탄소중립 배출량 총괄표	143
〈그림 4-3〉 2030년 수요관리주도 시나리오(A안) 배출량 전망	145
〈그림 4-4〉 2050년 수요관리주도 시나리오(A안) 배출량 전망	146
〈그림 4-5〉 2030년 기술혁신주도 시나리오(B안) 배출량 전망	146
〈그림 4-6〉 2050년 기술혁신주도 시나리오(B안) 배출량 전망	147
〈그림 4-7〉 2030년 하이브리드 시나리오(C안) 배출량 전망	148
〈그림 4-8〉 2050년 하이브리드 시나리오(C안) 배출량 전망	148
〈그림 4-9〉 2018년 물이용 관리 부문 온실가스 배출 현황	149
〈그림 4-10〉 수원별 취수량-전력사용량 관계	151
〈그림 4-11〉 처리방법별 생산량-전력사용량 관계	153
〈그림 4-12〉 공업용 정수장 생산량-전력사용량 관계	154
〈그림 4-13〉 가압장 설계배수량-전력사용량 관계	155
〈그림 4-14〉 연도별 물공급 시설 전력사용량 및 온실가스 배출량 추이	156
〈그림 4-15〉 수도사업자별 온실가스 배출량	156
〈그림 4-16〉 2030년 및 2040년 시나리오별 배출량 전망 총괄	158
〈그림 4-17〉 생공용수 공급 부문 목표연도 시나리오별 온실가스 배출량 전망	159
〈그림 4-18〉 2018년 물환경 관리 부문 온실가스 배출 현황	166
〈그림 4-19〉 국가 하·폐수처리 온실가스 배출량	167



〈그림 4-20〉 하수처리 에너지 사용에 따른 배출량	168
〈그림 4-21〉 지자체별 하·폐수처리 온실가스 배출량	169
〈그림 4-22〉 하수처리시설 용량별 재생에너지 생산량	170
〈그림 4-23〉 2030년 및 2040년 시나리오별 배출량 전망 총괄	171
〈그림 4-24〉 2030 및 2050 BAU와 온실가스 감축 후 배출량	173
〈그림 4-25〉 2030년 및 2050년 수요주도형 배출량 분석	177
〈그림 4-26〉 2030년 및 2050년 기술주도형 배출량 분석	178
〈그림 4-27〉 2018년 수자원 관리 부문 온실가스 배출 및 흡수 현황	180
〈그림 4-28〉 2030년 및 2040년 시나리오별 흡수 및 배출 전망 총괄	181
〈그림 4-29〉 2003~2020년 4대강 수계별 매수토지 면적 및 매수금액 변화	183
〈그림 4-30〉 유럽연합(좌) 및 미국(우) 가정 내 용도별 에너지 사용 비율	194
〈그림 5-1〉 탄소중립-물관리 공편익 전략 개념도	201
〈그림 5-2〉 제방 중심의 하천관리 방식과 NbS 기반 하천관리 방식의 비교	207
〈그림 5-3〉 수변완충 녹지 조성에 의한 하천 내 질소 유입 저감 개념도	208
〈그림 5-4〉 순천시 동천변 저류지 생활 숲 조감도	209
〈그림 5-5〉 충북 옥천군 이백리 복원 계획	209
〈그림 5-6〉 EU의 농업환경지불정책 예시: 온실가스 감축 중심으로	220
〈그림 5-7〉 Public-Private Partnership의 특징	230
〈그림 5-8〉 Water UK의 온실가스 배출량 산정	232
〈그림 5-9〉 캘리포니아주의 물관리 기관의 에너지 사용량 집계표	235
〈그림 5-10〉 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 모델	239
〈그림 5-11〉 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 구축 단계	239
〈그림 5-12〉 새만금 농업 비점오염관리 거버넌스 구조 개념도	240
〈그림 5-13〉 물관리 탄소중립 기술 및 연구개발 예시(안)	243
〈그림 5-14〉 지하수 스마트 관리 시스템 모식도	244
〈그림 5-15〉 농업용수 공급체계 개편	245
〈그림 5-16〉 한국건설기술연구원 안동하천실험센터 바이오폴리머 제방 실험 전경	247
〈그림 5-17〉 토지이용의 다목적성을 고려한 수변완충녹지 적용 우선지역 선정 예시	248
〈그림 6-1〉 물 분야 2050 탄소중립 로드맵	253
〈그림 6-2〉 수상태양광과 국가상수도 스마트 관리체계	256
〈그림 6-3〉 논물관리를 통한 감축	256
〈그림 6-4〉 [참고] 단독·통합 바이오가스화 공정 원리	258
〈그림 6-5〉 [참고] 스마트 축사 구성: 양돈 농가	259
〈그림 6-6〉 하천공간 내 잠재적 탄소흡수원	260

물 분야 2050

탄소중립 이행을 위한
로드맵 구축 연구



01

SECTION

서론

제1절 연구의 배경 및 목적

제2절 국내·외 물 분야 탄소중립 동향 및 여건

제1절

연구의 배경 및 목적

1 기후위기와 국내외 대응노력

1.1 물부문의 기후위기 심각성

UN 재난 보고서는 지난 20년(1995~2015년) 동안 발생한 재난 중 90%는 수문 기상 변화와 관련이 있다고 분석하였다.¹⁾ 또한 2021년 세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization)는 지난 50년간(1970~2019년) 전 세계에서 발생한 재해 중 가뭄, 폭염, 태풍, 홍수 등 물 관련 재해로 인한 재산 및 인명 피해가 가장 크다는 연구 결과를 발표하면서 물 부문(water sector) 기후위기²⁾ 피해의 심각성을 강조하였다.

〈그림 1-1〉 물 관련 재해 경제 손실과 재해 인명 피해



자료: Zhongming et al. (20212) 자료를 활용하여 연구진 작성.

최근에도 물 관련 재해로 인한 각종 피해가 전 세계에서 빈번하게 발생하고 있다. 2022년 7월에 중국 남부지역은 60여 년 만에 찾아온 기록적인 폭염과 가뭄으로 약 27억 3,000만 위안의 경제 손실이 발생했으며, 550만 명이 넘는 인구가 피해를 보았다. 2022년 8월에 파키스탄에서도 역대급 폭우 및 홍수로 국토의 3분의 1이 물에 잠기며 약 44억 달러의 경제 손실이 발생하였고, 사망자가 1,100명을 넘고 이재민이 수백만 명에

1) UN Sustainable development Goals, “UN Report Finds 90 Per Cent of Disasters Are Weather-Related”, 검색일: 2022.08.05.

2) 기후위기: 기후변화가 극단적인 날씨뿐만 아니라 물 부족, 식량 부족, 생태계 붕괴, 해수면 상승 등 인류 문명에 회복할 수 없는 위험을 초래하여 획기적인 온실가스 감축이 필요한 상태를 의미한다.

달하였다.

〈그림 1-2〉 폭염 및 가뭄으로 바닥을 드러낸 중국 남부지역 포양호와 폭우 및 홍수로 잠긴 파키스탄 남서부지역 소바트 푸르시



자료: 뉴스트리(2022.8.25), “바닥드러낸 中 양쯔강과 호수... 물과 전기 부족한데 식량까지 걱정?”. 검색일: 2022.09.23; 아주경제(2022.9.7), “‘국토 3분의 1 잠겼다’ 파키스탄...세계 면화 가격 상승세 지속 전망”, 검색일: 2022.09.23.

우리나라도 기상 관측 이래로 2018년에 역대 최장기간의 폭염과 2020년에 최장기간의 장마를 기록하는 등 극단적인 기상 현상이 갈수록 빈번해지고 있다. 또한 2022년 한 해 동안 여름에는 80년 만에 중부지방 일대에 최대 400mm의 집중폭우로 9명이 숨지고 7명이 실종되었으며, 늦가을에는 호남과 제주지역에 50년 만에 전례 없는 가뭄으로 식수원과 농업용수 확보에 비상이 걸리는 등 기후위기에 의한 홍수와 가뭄 피해를 동시에 겪기도 하였다.

1.2 국내외 대응 노력

● 국제사회의 탄소중립 동향

전 세계는 기후위기에 의한 다양한 문제점을 극복하고 대응하기 위한 전환 패러다임으로 탄소중립(carbon neutrality) 사회 구축을 지향한다.

1992년 5월에 국제사회는 기후변화를 전 지구적 의제로 다룬 ‘기후변화에 관한 유엔 기본 협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)’과 1997년 12월 UNFCCC 제3차 당사국총회에서 ‘교토의정서(Kyoto Protocol)’에 이어 2015년 12월 UNFCCC 제21차 당사국총회에서 파리협정(Paris Agreement)을 채택하였다. 파리협정은 지구온난화 완화 목표인 2100년까지 지구의 평균온도 상승을 산업화 이전 대비 2°C 이하 온도상승 폭을 1.5°C 이하로 제한하자는 국제 협약으로 이를 위한 포괄적 정책 방향으로서 탄소중립을 선언하였다.

2018년 10월 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)는 제48차 총회에서 승인된 지구온난화 1.5℃ 특별보고서³⁾에서 지구 온도 상승 1.5℃ 이내 제한과 2050년 탄소중립을 강조하였으며, 2019년 유엔환경계획(UNEP: UN Environment Programme)은 배출량 격차 보고서에서 현재와 같은 온실가스 배출 추세라면 금세기 말 지구의 평균온도가 3.2℃까지 오를 것으로 전망하며, 국제사회의 온실가스 감축 행동 강화를 촉구하였다. 국제사회는 탄소중립을 위한 다양한 정책을 적극적으로 마련 및 추진하고 있으며, 특히 국제사회의 탄소중립 동향은 미국이 바이든 행정부 출범과 동시에 2021년 1월 20일 파리협정에 복귀하며 본격화되었다.

● 국가별 탄소중립 동향

유럽연합은 2019년 12월에 유럽연합이 출범한 직후, 유럽 그린딜(European Green Deal)을 통해 2050년까지 탄소중립 목표를 공식화하며 청정에너지, 순환경제, 에너지 효율적 건축, 지속가능한 수송 등의 각 분야에 대한 정책 패키지와 실행 로드맵을 제안하였다. 또한 2020년 9월에 2030 기후목표 계획에서는 탄소중립 달성을 위한 구체적인 실행계획을 발표하였다.

미국은 바이든 행정부가 2021년 1월 20일 파리협정에 복귀한 동시에 청정에너지·인프라 계획의 수립 및 추진을 통해 2050년까지 경제 전반에 걸친 탄소배출 목표 달성 계획을 제시하였다. 5대 투자 부문으로 구성된 청정에너지·인프라 계획은 바이든 행정부의 기후변화 대응을 위한 핵심 대선공약이었으며, 임기 4년간 2조 달러 규모의 예산 투입으로 일자리 100만 개를 창출한다는 목표를 제시하였다.

중국은 2020년 9월에 정부 차원에서는 처음으로 2030년까지 탄소배출량을 감축하고, 2060년까지 탄소중립을 달성한다는 탄소중립에 관한 목표연도를 제시하였다. 2020년 12월에 중국 국무원은 '탄소배출권 거래시장 관리방법(碳排放权交易管理办法)'을 발표하였으며, 생태환경부는 적법한 전국 탄소배출권 등록 및 거래 기관을 조직하고 관련 시스템을 구축하였다. 또한 경제성장, 산업구조 조정, 에너지 구조 최적화, 대기오염물질 배출 규제 등을 고려하여 탄소배출량 총량 확정 및 배분 방안도 마련하였다.

일본은 2019년 6월 파리협정에 근거하여 2050년까지 국가 온실가스 배출량의 80% 저감을 목표로 하는 '2050년 장기 저탄소 발전전략'을 발표하였다. 이후 2020년 10월에 스가 총리는 적극적인 기후변화 대책이 경제사회를 변혁하여 더 큰 성장으로 이어질 것이라고 언급하며, 2050년에 탄소중립을 실현하겠다고 선언하였다. 탄소중립의 핵심으로 차세대 태양전지, 탄소 순환(carbon recycle) 등 이노베이션을 언급하였으며, 이를 위해 ① 실용화를 감안한 연구개발 가속화, ② 환경 관련 규제개혁, ③ 에너지 소비효율 향상, ④ 재생에너지 도입 등을 통해 기존의 석탄화력발전예 의존한 정책을 근본적으로 전환하겠다고 강조하였다. 이처럼 각국에서는 탄소중립 선언과 제도화가 확대되고 있으며, 2021년 말 138개국이 탄소중립을 선언하였다(그림 1-3 참조).

3) 지구온난화 1.5℃ 특별보고서: 2030년까지 전지구 인위적 CO₂ 순배출량을 2010년 대비 최소 45% 감소하고, 2050년에는 탄소중립(carbon neutrality)에 도달하는 1.5℃ 지구온난화 제한 모델에 관한 내용을 포함한다.

〈그림 1-3〉 국가별 탄소중립 동향

각국의 탄소중립 선언과 정책

- 각 국에서는 탄소중립 선언과 제도화가 확대 중
- 2021년 말 현재, 138개국이 탄소중립을 선언함



유럽연합



미국



중국



일본

정책	유럽연합	미국	중국	일본
	<ul style="list-style-type: none"> • 유럽 그린 딜('19~) <ul style="list-style-type: none"> - 지속가능한미래의경제전환을 촉진하기위한정책패키지 • Fit for 55('19~) <ul style="list-style-type: none"> - 2030년까지 1990년 대비 최소 55% 감축 추진 • 탄소국경조정제도입('23~) <ul style="list-style-type: none"> - '23년부터 철강, 알루미늄 등 일부, '28년부터 본격 적용 	<ul style="list-style-type: none"> • 파리기후변화협약 재가입('21) <ul style="list-style-type: none"> - 바이든 대통령 취임 직후 탈퇴를 취소하고 가입 복귀 • 탄소중립 목표('21) <ul style="list-style-type: none"> - 2050년 탄소중립목표 발표 - 교통, 에너지 중점 • 탄소국경조정 및 탄소세 도입 논의 <ul style="list-style-type: none"> - 오염유발자 수입수수료 부과 및 탄소세 관련 법률안 발의 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립 목표 설정('20) <ul style="list-style-type: none"> - 2030년 이전 탄소배출 정점 - 2060년 이전 탄소중립 목표 • 탄소중립 전략 1+N 체계 발표('21) <ul style="list-style-type: none"> - (1) 탄소중립 전략 - (N) 분야별 정책 조치로 구성 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립 목표 설정('20) <ul style="list-style-type: none"> - 2050년 탄소중립목표 선언 • 그린성장전략 발표('20) <ul style="list-style-type: none"> - 에너지, 운송·제조, 주택·건물 등 중점 사업 정부 지원
예산	탄소중립 투자비용	기후변화대응 투자('21)	탄소중립 투자비용	녹색혁신기금으로 예산마련
	<ul style="list-style-type: none"> - 향후 10년간 1조 유로 신규 투자 	<ul style="list-style-type: none"> - 10년간 1조 7천 억 달러 투자 예정 	<ul style="list-style-type: none"> - 2060년까지 139조 위안 - 연평균 3.5조 위안(2020년 GDP의 3.4%) 신규 투자 	<ul style="list-style-type: none"> - 10년간 12조 엔 규모의 기금 조성 - 15조 엔의 민간 투자 유치 예정

자료: 이창훈(2022) 2050 탄소중립 5년의 성과와 과제, 대통령 보고자료

1.3 국내 탄소중립 동향

● 2050 탄소중립 목표 및 시나리오 확정

우리나라 역시 국제사회의 기후변화 대응 노력에 적극 동참하고 온실가스의 감축 및 탄소중립을 위한 정책을 선제적으로 마련하였다.

2021년 10월 27일에 탄소중립위원회는 탄소중립이 실현된 미래상과 부문별(전환, 수송, 산업, 건물, 농축수산, 폐기물) 전환 내용을 전망하는 2050 탄소중립 시나리오를 확정하였다. 탄소중립을 위한 기술혁신 및 상용화, 국민인식 및 생활양식 변화를 전제로 하여 경제적 부담과 편익, 식량·에너지 안보, 국제사회에서의 역사적 책임 등을 종합적으로 고려하였다.

〈그림 1-4〉 2050 탄소중립 사회 미래상 및 부문별 전환 내용



자료: 관계부처 합동(2021).

2050 탄소중립 시나리오의 비전은 ‘기후위기로부터 안전하고 지속가능한 탄소중립 사회’로 책임성, 포용성, 공정성, 합리성, 혁신성 등 다섯 가지 원칙⁴⁾에 기반하여 탄소중립 시나리오를 수립하였다.

탄소중립 시나리오는 IPCC 1.5℃ 특별보고서를 토대로 모든 국가가 2050년 탄소중립을 추진한다는 전제하에 국외 감축분이 없는 2050년을 가정하였으며, 국내 순배출량을 0으로 하는 A안과 B안 등 두 가지 시나리오로 구성하였다. A안은 화력발전을 전면 중단하는 등 배출 자체를 최대한 감축하는 시나리오이며, B안은 화력발전을 일부 활용하되 탄소 포집·활용·저장 기술(CCUS: Carbon Capture, Utilization, and Storage) 등의 신기술을 적극 활용하는 시나리오이다. 〈표 1-1〉은 배출과 흡수 및 제거의 부문별 A안 시나리오와 B안 시나리오에 따른 배출량을 나타냈으며, 이 중 전환, 수송, 수소, 탈루, CCUS 부문은 시나리오 간에 배출량이 상이하다.

4) 책임성 원칙은 사회구성원 전체가 지구촌의 책임 있는 일원으로 참여하는 것이며, 포용성의 원칙은 미래세대와 인류 외 다른 생물종까지 배려하는 것이다. 공정성의 원칙은 취약 집단을 보호하고 소외된 자 없이 모두의 참여를 보장하는 원칙이며 합리성의 원칙은 객관적인 자료에 바탕을 둔 실현 가능성이 높은 미래상을 도출하는 것이다. 마지막으로 혁신성의 원칙은 과학기술과 제도의 혁신을 통한 미래성장동력 발굴에 관한 원칙이다.

〈표 1-1〉 2050 탄소중립 시나리오 최종(안) 총괄표

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

구분	부문	2018년	A안	B안	비고
배출량		686.3	0	0	-
배출	전환	269.6	0	20.7	- (A안) 화력발전 전면 중단 - (B안) 화력발전 중 LNG 일부 잔존가정
	산업	260.5	51.1	51.1	- 철강공정에서 수소환원제철방식 도입 및 화석 연·원료를 재생 연·원료로 전환
	건물	52.1	6.2	6.2	- 건물물 에너지 효율 향상(제로에너지 건축물, 그린 리모델링 등)
	수송	98.1	2.8	9.2	- (A안) 도로 부문 전기·수송차 등으로 전면 전환 - (B안) 도로 부문 내연기관차의 대체연료 사용 가정
	농축수산	24.7	15.4	15.4	- 화학비료 저감, 영농법 개선, 저탄소·무탄소 어선보급 등 온실가스 발생 최소화, 가축분뇨 자원순환 등
	폐기물	17.1	4.4	4.4	- 폐기물 감량
	수소	-	0	9	- (A안) 국내 생산수소 전량 수전해수소로 공급 - (B안) 국내 생산수소 일부 부생·추출 수소로 공급
	탈루	5.6	0.5	1.3	-
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-25.3	-25.3	- 이산화탄소 포집 및 저장·활용(CCUS) 기술 상용화
	CCUS	-	-55.1	-84.6	- 산림·해양·하천 등 흡수원 조성
	DAC	-	-	-7.4	- 포집 탄소는 차량용 대체 연료로 활용 가정

자료: 관계부처 합동(2021).

● 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향(안) 발표

2050 탄소중립 시나리오가 확정된 2021년 10월 27일에 2030년 국가 온실가스 감축 목표(NDC: Nationally Determined Contribution)도 국제 동향, 국내 여건 등을 고려하여 2050년 탄소중립 달성을 위한 중간 목표를 설정하였다. 탄소중립 중간 목표는 기존의 NDC를 상향하여 2030년에는 2018년 727.6백만톤 배출 대비 291백만톤(40%)이 감소된 436.6백만톤을 배출하는 것으로 결정하였으며, 이는 탄소중립 실현을 위한 강력한 정책 의지가 반영된 도전적인 감축목표로 볼 수 있다.

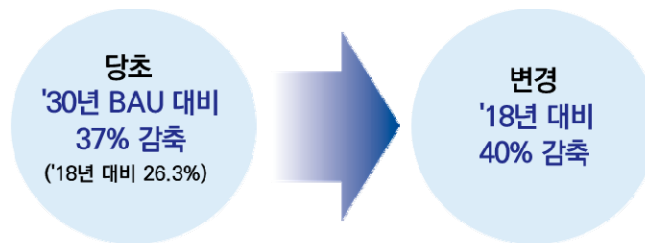
〈표 1-2〉 NDC 상향안 부문별 총괄표

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

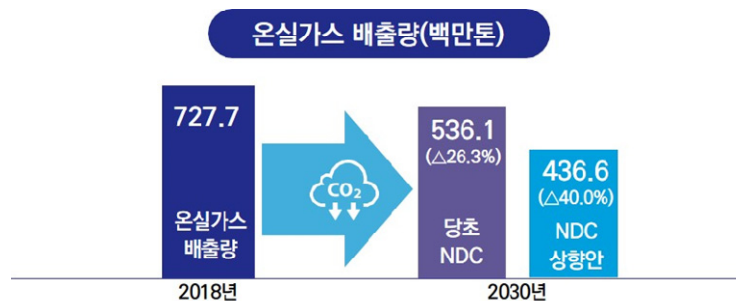
구분	부문	2018년	現 NDC (2018년 比 감축률)	NDC 상향안 (2018년 比 감축률)
배출량		727.6	536.1 (△191.5, △26.3%)	436.6 (△291.1, △40.0%)
배출	전환	269.6	192.7 (△28.5%)	149.9 (△44.4%)
	산업	260.5	243.8 (△6.4%)	222.6 (△14.5%)
	건물	52.1	41.9 (△19.5%)	35.0 (△32.8%)
	수송	98.1	70.6 (△28.1%)	61.0 (△37.8%)
	농축수산	24.7	19.4 (△21.6%)	18.0 (△27.1%)
	폐기물	17.1	11.0 (△35.6%)	9.1 (△46.8%)
	수소	-	-	7.6
	탈루	5.6	5.2	3.9
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-22.1	-26.7
	CCUS	-	-10.3	-10.3
	국외 감축	-	-16.2	-33.5

자료: 관계부처 합동(2021).

〈그림 1-5〉 NDC 상향(안) 목표



탄소중립 실현을 위한 강력한 정책 의지가 반영된
도전적인 감축 목표



자료: 이창훈(2022).

2 탄소중립 목표 달성을 위한 물 분야의 역할 및 필요성

물 분야의 기후위기 대응은 온실가스 감축(mitigation)보다는 기후위기에 의한 물 분야의 취약성에 대응 또는 적응(adaptation)하기 위한 물관리 노력에 집중된 정책 및 제도가 수립 및 이행되었다.

전 세계적으로 IPCC의 지침(Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines, 이하 'IPCC GL')의 분류에 따라 국가 온실가스 인벤토리⁵⁾는 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land Use Change and Forestry, 이하 'LULUCF'), 폐기물 분야로 구분하여 산정되며, 이에 국가의 탄소중립 추진 전략 및 감축 목표 설정도 에너지, 산업, 수송, 건물, 농축산 및 폐기물 등을 중심으로 수립된다.

국가 온실가스 인벤토리에 물 분야(water sector)가 따로 편제되어 있지 않아 국가 물 분야의 온실가스 배출 현황도 정량적으로 파악하기 어려운 실정인바 물 분야의 탄소중립 정책 수립 및 이행이 활발하지 않은 실정이다.

본 연구에서는 물 분야 탄소 감축 노력이 국가 차원에서 필요한 이유를 파악하고자 공공부문 온실가스에너지 목표관리 대상 시설 중 물관리 시설의 온실가스 배출량 분석 및 해외 사례 등을 검토 분석하였다.

● 물관리시설이 지방자치단체 공공부문 온실가스 배출량의 20%를 차지

2020년 국가온실가스 종합관리시스템(NGIMS)의 공공부문⁶⁾ 중 지방자치단체(광역+기초) 배출량 통계자료⁷⁾와 지자체 공공부문 목표관리 대상 물관리 관련 사업자(예: 상수도, 가축분뇨처리, 분뇨·하수처리·공공폐수 처리장)의 배출량 자료를 분석하였다. 그 결과 물관리 부문의 온실가스 총배출량은 318천톤 CO₂eq.으로 지자체 공공부문 온실가스 총배출량(1,527천톤 CO₂eq.)의 20.8%를 차지하였다. 이를 볼 때 탄소중립을 위해서 공공부문에서 다방면에서 노력하는 공공병원(115천톤 CO₂eq.), 국/공립대학(191천톤 CO₂eq.), 시도교육청(111천톤 CO₂eq.)보다 지자체 물관리 시설들의 온실가스 배출량이 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

공공부문의 온실가스 목표관리 제도⁸⁾는 국가 중장기 온실가스 감축목표 달성을 위해 공공부문이 먼저 타 민간부문보다 목표를 높게 설정하여 성공 사례를 만든다는 취지로 마련되었다. 우리나라 물 관련 시설들이 대부분 공공부문 관할로 운영된다는 점과 물 분야의 공공부문 내 온실가스 배출 비율이 높다는 것을 고려할 때 국가 차원에서 온실가스 배출량을 감축하려면 온실가스 배출 비율이 높은 물 분야에 관한 구체적이고 명확한 정책목표 및 전략 수립이 필요하다.

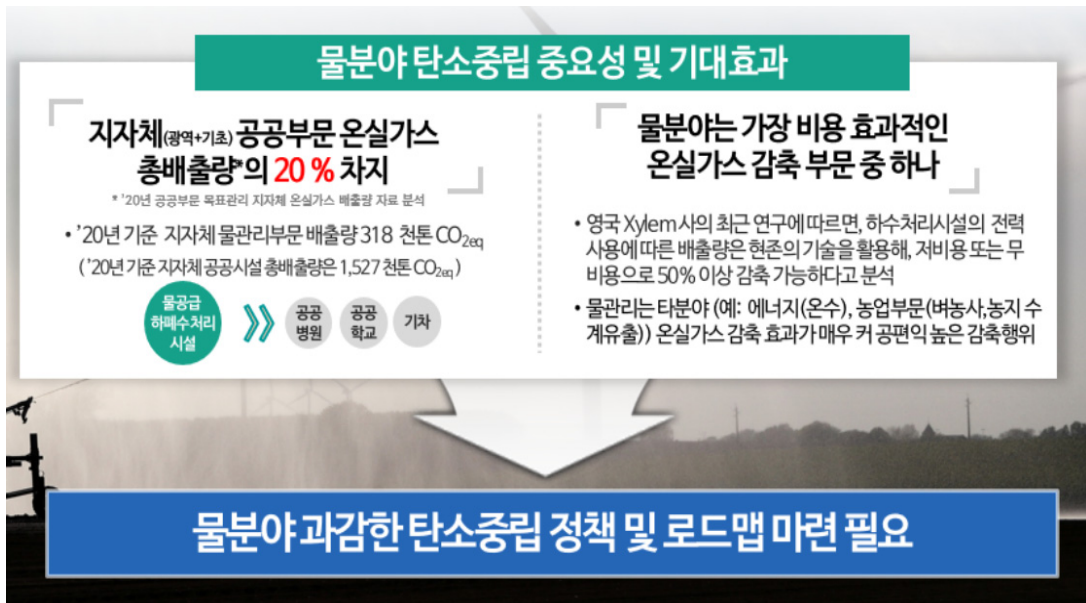
5) 기후변화에 대응하여 정책을 수립하고 이행하기 위해서 국내 온실가스 배출원 및 흡수원을 파악하고 각 배출원과 흡수원에서의 배출량과 흡수량을 체계적으로 구성한 목록을 말한다.

6) 공공부문은 중앙행정기관, 지자체(광역, 기초), 시도교육청, 공공기관, 지방공사/공단, 국/공립대학, 국립대학병원 및 치과병원)으로 구분할 수 있다. 2020년 기준 공공부문의 온실가스 총배출량은 3,700천톤 CO₂eq.이다.

7) 국가온실가스 종합관리시스템, "공공부문 배출량 통계", 검색일: 2022.07.14.

8) 공공부문 온실가스-에너지 목표관리제는 「저탄소 녹색성장 기본법」에 근거하여 중앙행정기관, 지방자치단체, 공공기관, 국공립대학 등 공공부문의 기관에 대해 매년 온실가스 감축목표를 설정하고 이에 대한 이행실적을 관리해 나가는 제도이다.

〈그림 1-6〉 물 분야 탄소중립의 중요성 및 기대효과



자료: 저자 작성.

● 물 분야에서 가장 비용 효과적인 온실가스 감축 부문

영국 주요 물관리 사업자인 Xylem사의 최근 연구⁹⁾에 따르면 기존의 기술을 사용해서 하수처리 부문의 전력사용에 의한 온실가스 배출량의 50%를 무비용 또는 부의 비용(negative cost)으로 줄일 수 있다는 연구 결과를 발표하였다. 이 연구는 18개의 전력 절감 및 온실가스 저감기술로 온실가스 삭감량과 무비용으로 가능한 온실가스 삭감량을 산정하였다. 이 기술은 한계저감비용곡선(MACC: Marginal Abatement Cost Curve) 및 내부수익률 개념(IRR: Internal Rate of Return)을 이용한 모델링을 활용하였고, 미국, 유럽, 중국의 하수처리장에 도입할 수 있다(표 1-3 참조).

〈표 1-3〉 영국 Xylem의 연구에 따른 비용에 따른 하수처리장 온실가스 삭감량

지역	2015년 전력사용 온실가스 배출량 (백만톤 CO ₂ eq.)	총 감축산정량 (백만톤 CO ₂ eq.)	마이너스 비용 (negative cost) 감축량 (백만톤 CO ₂ eq.)	마이너스 비용 감축 비율 (100%)
미국	15.5	6	5.1	86
유럽	8.5	2.8	2.6	94
중국	21.8	12.9	12.9	100

주: 5.5% 실질 할인율을 사용하여 추정된 절감비용을 산정함.

자료: Xylem(2015)의 결과를 재구성함.

9) Xylem Inc.(2015).

Xylem 보고서는 하수처리 시 발생하는 온실가스 절감은 새로운 기술개발이 아니라, 에너지 효율을 높이는 기존 기술(예: 지능형 하·폐수 펌핑 시스템, 가변 속도 드라이브가 장착된 적응형 혼합기, 실시간 의사결정 시스템)의 신속한 채택이 중요하다고 다시 한번 강조한다. 이는 국내 물 분야의 온실가스 감축도 재정 지출이 많이 드는 신기술 개발이 아닌 기존 기술을 활용한 빠른 실행이 필요하다는 시사점을 준다.

● 물관리 부문 온실가스 감축의 공편익성

공편익은 특정 정책 혹은 수단을 실행할 때 원래의 목적과는 별개로 부가적으로 발생하는 편익(benefit)을 의미하는데, 물 분야의 온실가스 대책은 에너지(온수), 농업(벼농사, 농지 수계유출) 등 타 부문의 온실가스 감축이라는 공편익이 발생한다.¹⁰⁾

아울러 일부 물관리 부문 온실가스 대책은 온실가스 저감[또는 완화(mitigation)] 및 적응(adaptation) 효과를 동시에 볼 수 있다.

물관리 부문 공편익 전략은 크게 두 가지로, 자연기반 전략과 기술기반 전략이다. 자연기반 전략으로는 수원함양림 조성 및 육림, 물관리보호구역 탄소 흡수원 확장, 습지 및 수변지역 보호, 저탄소기법 논 경작지 확대, 그린인프라(Green Infrastructure) 및 저영향개발(Low Impact development) 등이 있다. 이러한 전략들은 생태계가 탄소 흡수원인 동시에 홍수 방지, 생물 다양성을 유지·향상한다는 측면에서 시너지 효과를 가진다.¹¹⁾ 기술기반 전략은 물수요 관리, 에너지-물 넥서스 기술, 에너지-물-농업 넥서스, 가축분뇨 에너지화, 하·폐수 관리 및 처리, 물 재사용 및 재활용 순환시스템 등이다.¹²⁾

종합하면, 공공부문 온실가스 배출에서 차지하는 물 분야의 비율이 20%로 높고, 타 부문에 공편익을 가지며, 기후변화로 인한 물 관련 재해 대비 효과가 있다는 점에서 물 분야 탄소감축 전략은 비용 효과적이다.

심각해지는 기후위기 시대, 기후위기로 인한 대부분의 인명적·재난적 피해가 물 분야에서 일어나는 상황에서, 물 분야도 ‘온실가스 감축’이라는 적극적인 정책 추진으로 국가적으로 더 나아가 전 지구적으로 탄소중립의 달성이라는 목표를 달성하고자 주체적이며 능동적인 역할을 수행할 필요가 있다.

10) 한혜진, 정아영(2021).

11) 한혜진, 정아영(2021).

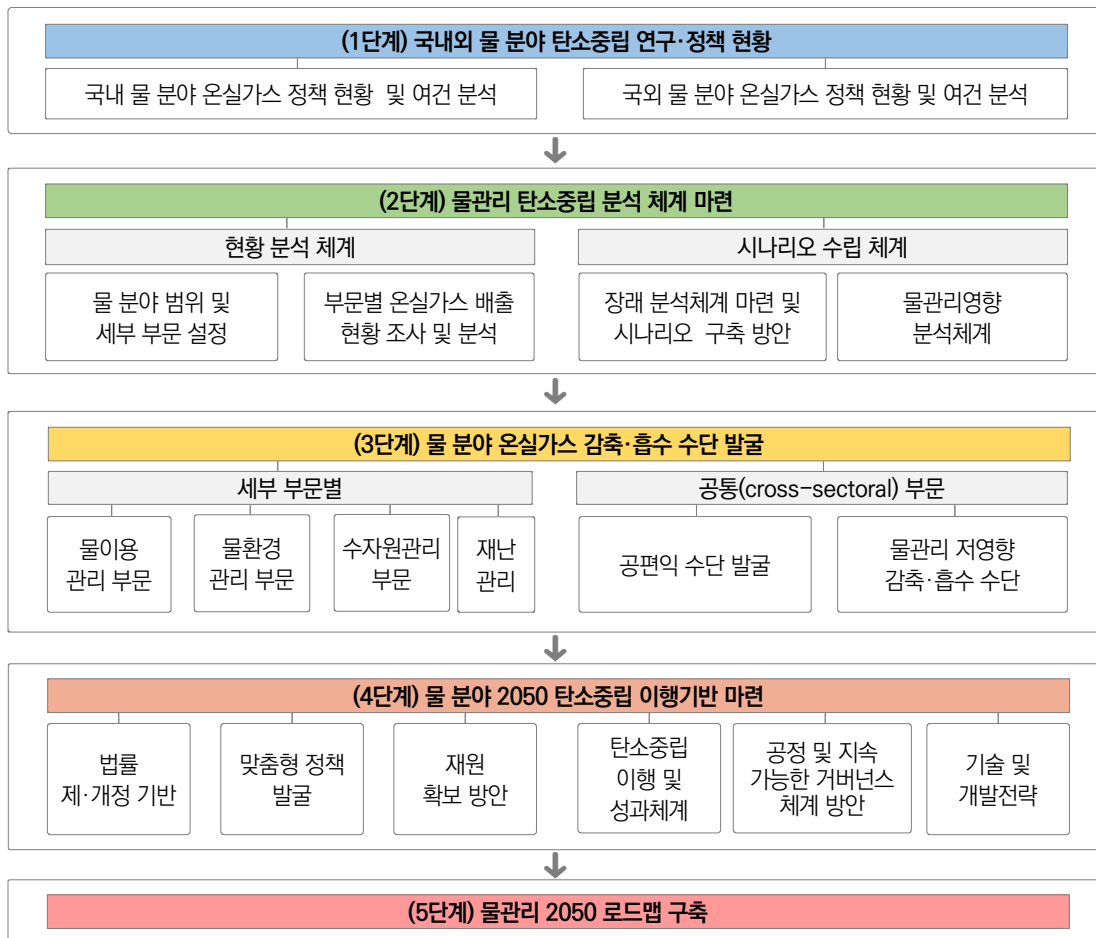
12) 한혜진·정아영(2021).

3 연구 목적 및 수행 체계

본 연구는 2050년까지 물 분야 탄소중립 목표 달성을 위해 물 분야의 온실가스 배출 현황을 파악하고, 2050년 탄소중립 시나리오를 마련하여 이를 실현하기 위한 물 분야 부문별 온실가스 감축 및 흡수 수단을 발굴하는 ‘물 분야 2050 탄소중립 이행기반 전략 및 로드맵’ 수립을 목표로 한다.

본 연구는 <그림 1-7>과 같이 5단계로 수행된다. 1단계는 국내외 물 분야의 탄소중립 연구 및 정책 현황을 분석하고, 2단계는 물 분야 탄소중립을 위한 분석 체계를 마련한다. 이때 탄소중립 분석 체계는 두 가지로, 물 분야의 온실가스 발생 현황을 분석하는 ‘현황 분석 체계’와 장래 2050 ‘시나리오 수립 체계’이다. 3단계는 물 분야를 크게 물이용(생활, 농업, 공업), 물환경(가축분뇨처리, 하·폐수처리), 수자원관리(하천공간)로 나누어서 온실가스 감축 및 흡수 수단을 파악하고 타 부문과의 공편익이 발생하는 감축 전략도 함께 분석하였다. 4단계는 3단계에서 도출한 온실가스 감축 전략 실행에 필요한 법, 제도, 기술, 재정 등의 전략을 제시하였다. 마지막으로 2050 물 분야 탄소중립 시나리오를 실현하기 위한 로드맵을 제시하였다.

<그림 1-7> 연구 체계도



자료: 저자 작성.

제2절

국내외 물 분야 탄소중립 동향 및 여건

1

국외 물 분야 탄소중립 정책 및 연구 동향

1.1 국가별 물 분야 탄소중립 정책 및 연구 동향

● 영국

영국 정부는 1990년 기준 대비 2035년까지 78% 감축이라는 중간 목표와 함께 2050년까지 순제로를 달성하겠다는 구속력 있는 탄소중립 목표를 법제화하였다.¹³⁾ 영국의 물 분야는 국가가 생산하는 전기의 3%를 소비하고 영국 온실가스 배출량의 약 1%를 차지하며, 이는 다시 영국 산업 및 폐기물 공정 배출량의 거의 3분의 1을 차지한다.¹⁴⁾

영국은 지난 2005년부터 수집한 물 분야의 온실가스 배출 및 에너지 사용 자료를 바탕으로 인벤토리 작업을 추진하며 절약을 통한 수자원 및 에너지 분야 온실가스 저감 시너지 효과를 노리는 전략을 강조한다. 특히 수자원 분야와 관련하여 영국환경청은 CFP 산정 가이드라인을 배포하고 물 회사로 하여금 CFP 산정과 온실가스 저감계획을 수립하도록 요구한다.

영국은 국가 온실가스 인벤토리 작성 표준 및 가이드라인을 공표하여 탄소 배출량 산정 지침으로 활용하고 있다. 또한 국제사회에서 검증된 탄소배출계수를 사용하고 국가 실정에 적합한 산정방식을 적용하고 있으며, 국제표준화에 대비하여 산정기준을 꾸준히 개정하고 있다. 각 단계의 온실가스 배출량은 산정 주체 기업이 관측이 가능한 경우(직접 배출량)와 관측이 불가능한 경우(간접 배출량)로 구분하며, 물 분야 활동 범위는 <표 1-4>에 제시된 바와 같다.

영국 물산업 연구소(UKWIR: UK Water Industry Research)는 일관성 있고 정확한 영국 물산업 전반의 온실가스 배출량 추정을 위해 표준화된 탄소 회계 워크북(CAW: Carbon Accounting Workbook, 2020)을 개발하였다. CAW는 영국 환경식품농무부(Defra: Department for Environment, Food and Rural Affairs)와 영국 사업·에너지·산업전략부(BEIS: Department for Business, Energy & Industrial Strategy)가 발표한 온실가스 산정 가이드라인, 필요한 경우 국제 가이드라인을 기준으로 영국의 물관리 부문 온실가스 배출량을 산정한다.

CAW는 배출을 직접배출(Scope 1),¹⁵⁾ 간접배출(Scope 2)¹⁶⁾ 및 기타 간접배출(Scope 3)¹⁷⁾로 구분하여

13) 영국의 Climate Change Act 2008의 section 10에 선언되어 있다.

14) Ofwat(2022).

15) 직접배출(Scope 1)은 사업자가 소유 및 통제하는 배출원에서 발생하는 온실가스 배출을 의미한다.

16) 간접배출(Scope 2)은 사업자가 소비하는 구매 전력 생성으로 인해 발생하는 온실가스 배출을 의미한다.

17) 기타 간접배출(Scope 3)은 운영자 활동의 결과이지만 회사가 소유 및 통제하지 않는 온실가스 배출로서 모든 기타 간접배출을 의미한다. CAW 14 내에서 아웃소싱 운영자가 수행하는 모든 활동은 Scope 3 배출로 구분한다.

산정하며, 영국의 물 관련 정부 및 감독기관의 개별 가이드라인(Ofwat¹⁸⁾, Defra¹⁹⁾, DECC²⁰⁾)에 맞게 온실가스 배출량 산정 보고서를 작성할 수 있다.

〈표 1-4〉 영국의 물 분야 활동 범위

구분	활동 범위	비고
Scope 1 (직접배출)	<ul style="list-style-type: none"> 연료 직접배출(Fuel direct emission) 냉매(Refrigerants) 슬러지 처리(Sludge Treatment) 토지에 슬러지 처리(Sludge Disposal to your land) W&WW 처리(W&WW Treatment) 운송(Transport) 	운송은 모두 해당
Scope 2 (간접배출)	<ul style="list-style-type: none"> 전기 및 난방(Electricity & Heat) 운송(Transport) 	
Scope 3 (기타 간접배출)	<ul style="list-style-type: none"> 화학 물질(Chemicals) 전기 및 난방 WTT(Electricity & Heat WTT) 연료 WTT 배출량(Fuel WTT emissions) 운송 WTT(Transport WTT) 사무실 폐기물(Office waste) 매립지에 슬러지 처리(Sludge Disposal to landfill) W&WW 남의 땅에 대한 대우(W&WW Treatment to other's land) 다운스트림 N2O(Downstream N2O) 아웃소싱 운영자(Outsourced Operators) 슬러지 타인의 토지로의 처리(Sludge Disposal to others land) 슬러지 소각처리(Sludge Disposal to incineration) 전기 및 난방 T&D(Electricity & Heat T&D) 운송(Transport) 	

자료: Water UK(2020).

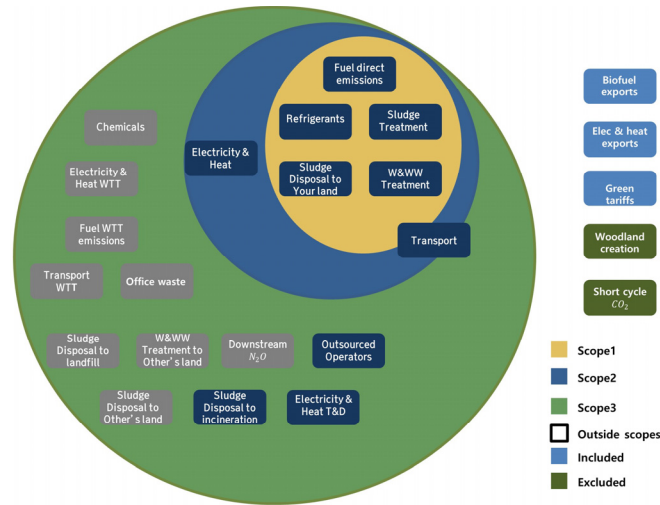
Ofwat의 경우 〈그림 1-8〉과 같이 AMP6(제6차 자산관리계획)에서 정의하는 물기업조직경계를 준용하여 조직 및 운영 경계를 설정한다. 물 분야에서 온실가스가 배출되는 주요 활동으로는 물공급(wholesome water), 하수처리(Wastewater Services), 바이오자원/슬러지관리, 물관리를 위한 행정 활동 및 업무이동(administration activities and Business Travel) 등이 있다.

18) Ofwat 보고서에는 위치 및 시장 기반 회계(Location and market-abased accounting) 방법과 물(Water), 폐기물 및 소매(Waste and Retail)의 물 회사 총배출량(Gross emissions) 및 순배출량(Net emissions)이 포함된다.

19) Defra 보고서는 총배출량(Gross emissions) 및 순배출량(Net emissions)으로 구분되며, Ofwat 보고서와 달리 위치 및 시장 기반 산정(Location and market-abased accounting)은 포함되지 않는다.

20) DECC 보고서에는 폐수 처리(wastewater treatment), 하수 슬러지 처리(sewage sludge treatment), 바이오가스 연소(combustion of biogas)로 인한 CH4 및 N2O Scope 1 배출량에 대해서만 보고한다.

〈그림 1-8〉 Ofwat이 설정하는 물 사업자의 조직경계



자료: Water UK(2020).

영국과 웨일스 정부의 2050년 탄소중립 목표를 달성하려면 국가 온실가스 배출량 5위인 ‘상수도, 하수도, 폐기물 관리 및 정화’ 부문의 온실가스 감축이 매우 중요하며, 물 서비스가 민영화되어 있는 영국의 실정에서 온실가스 감축에 대한 물 서비스 사업자들의 책임이 막중하다.²¹⁾ 이에 Ofwat²²⁾은 2019년에 ‘Time to act, together’ 전략을 통해 2030년까지 물서비스 사업자의 넷제로 달성을 독려했고, 2020년 Water UK²³⁾는 2030년까지 물 분야의 넷제로를 달성하기 위한 ‘Net Zero Route Map’을 수립하였다.

Water UK가 수립한 이 로드맵에서 2030년 넷제로를 달성하기 위해서 제시한 주요 감축 전략은 〈표 1-5〉와 같다. 하지만 로드맵의 시나리오에 따르면 2030년까지 탄소중립은 이루어지지 않기 때문에, 이후 잉여분의 감축을 위해서 추가적인 전략으로 〈표 1-6〉을 제시한다.

〈표 1-5〉 영국의 물 분야 탄소중립을 위한 다섯 가지 목표

목표	주요 내용
저공해 차량	- 차량용 승용차 100% 전기화 - 상업용 차량(LGV, HGV) 80% 대체 연료로 전환
물과 에너지 절약	- 누수 문제 해결 및 물 절약을 위한 새로운 전략과 스마트하고 효율적인 네트워크 및 집수(Catchment)
공정 배출	- 2030년까지 2018-2019년 기준선에서 최대 60% 감소를 목표로 배출 모니터링을 통해 PR24의 연구 및 상세한 경로 제공
재생 가능 전력	- 최대 3GW 새로운 태양광 및 풍력발전 저장 장치를 활용하여 부문 수요의 최대 80%까지 제공하여 그리드 발전기에 대한 부담 완화 및 오프셋 필요성을 최소화
그린가스	- 하수폐기물에서 발생하는 바이오 메탄을 전력망에 주입하여 최대 15만 가구에 난방 제공 - 탈탄소화하기 어려운 부문 또는 재생 가능 에너지 생성이 낮은 곳에 그린가스 사용

자료: Water UK(2020).

21) Ofwat(2022).

22) Ofwat(office of Water Service Regulation Authority)은 영국의 물관리가 민영화되면서 잉글랜드와 웨일스의 상하수도 사업자의 경영 및 운영 규제를 담당하는 규제 기관이다.

23) Water UK는 영국의 모든 수도 및 하수처리 사업자들이 회원으로 등록되어 있는 회원 기관이다.

〈표 1-6〉 영국의 물 분야 탄소중립을 위한 세 가지 계획

계획	주요 내용
토착 서식지 복원	- 20,000ha 이탄지대 및 습지대 등 국토환경의 탄소흡수원 확대 - 초원지대 복원과 식목 등 산림 활용을 통한 흡수원 확대 및 온실가스 배출 저감
목표 혁신	- 공정 배출은 매우 중요한 과제이나 현재 구체적인 답을 가지고 있지 않음. 효율적인 해결 방안을 찾는 것이 중요
잔여 배출량 상쇄	- 잔여 배출량 상쇄 및 탄소중립 달성을 위해 기업이 탄소 상쇄를 조달할 수 있는 영국 내 시장 개발 및 관리

자료: Water UK(2020).

● 호주

2016년에 호주 빅토리아주 정부는 'Water for Victoria'라는 호주 최초 주 정부 차원의 물 분야 탄소중립 계획을 수립하였다. Water for Victoria는 물 분야 온실가스 배출량을 2025년까지 42.4% 감축, 2030년까지 93.7% 감축, 2035년까지 100.0% 감축이라는 목표를 세웠다. 호주 빅토리아주의 18개 물서비스 사업장은 각각 자체적으로 2035년까지 탄소중립 달성을 위한 온실가스 감축 목표를 세웠다.

〈표 1-7〉 호주 Net Zero Water Cycle

구분	내용
개요	호주 빅토리아주 정부의 물 분야의 탄소중립 계획 수립
현황	매년 872,633톤 CO ₂ eq./yr 배출 및 2025년 504,828톤 CO ₂ eq./yr 배출 전망
목표	물 분야 온실가스 배출량 2025년까지 42.4% 감축, 2030년까지 93.7% 감축, 2050년까지 100.0% 감축
정책	주의 물계획(Water For Victoria)에 따라 19개의 도시물시설탄소중립 의무화

자료: Department of Environment Land Water and Planning (Vic). (2016).

● 독일

독일 기후 완화를 위한 물 및 폐수 회사(WaCCliM: Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation)는 도시 내 물 공급 및 폐수 재이용 등 물순환의 적응 및 완화를 고려한 로드맵을 제공하였다.

WaCCliM는 독일 국제협력협회(GIZ: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)와 국제물협회(IWA: International Water Association) 간의 국제 기후 이니셔티브(IKI: International Climate Initiative) 사업의 일부로 에너지 성능 및 탄소배출 평가 및 모니터링 도구(ECAM: Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool)를 개발하였다.

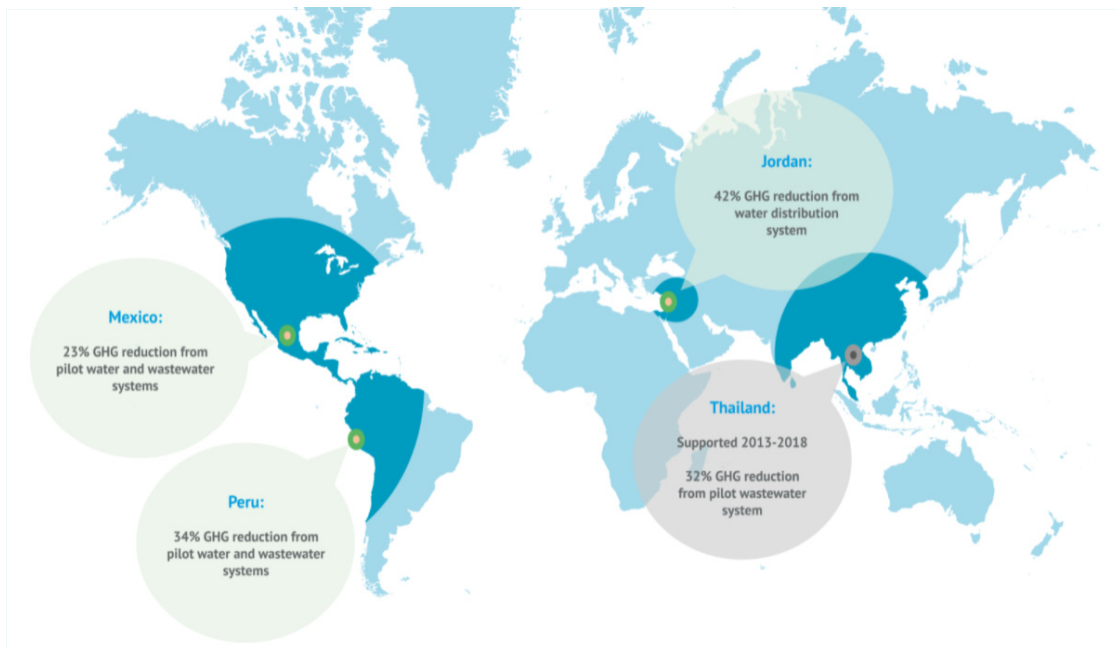
ECAM은 다국적 도시 내 물기업의 수도시설 온실가스 감축을 위한 도구로서 탄소 발자국, 에너지 소비 및 서비스 수준을 평가하고, 운영비용을 감소시켜 주며 성과 모니터링 및 의사결정의 강화를 돕는다. 또한 ECAM은 NDC에 대한 물 분야 온실가스 감축 기여도를 기여도 모니터링을 위해 일반적으로 개발도상국 및 신흥 경제국에서 사용할 수 있는 데이터만 사용한다. 현재 ECAM을 통해 해외 도시 단위의 물 분야 탄소중립 전략을 수립하였으며, 시범사업을 수행 및 완료하였다.

〈그림 1-9〉 도시 물순환의 적응 및 완화



자료: IWA, "The Urban Water Utility of the Future: 'The Roadmap to a Low-Carbon Urban Water Utility', 검색일 2022.09.23;

〈그림 1-10〉 WaCClim 해외 시범사업 내 주요 결과



자료: IWA, "The Urban Water Utility of the Future: 'The Roadmap to a Low-Carbon Urban Water Utility', 검색일 2022.09.23;

ECAM은 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인 및 관련 문헌과 일치하도록 개발되었으나 가이드라인에 제시되지 않은 일부 내용의 경우에는 BEAM 방법론(SYLVIS Environmental, 2009) 등을 참고하여 개발하였다. 현재는 ECAM version 3.0까지 활성화되고 있으나 방법론 등 상세 설명은 ECAM version 2.2까지만 제공한다.

〈표 1-8〉 WaCClim(Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation)

구분	내용
개요	다국적 도시 내 물기업의 탄소중립 프로젝트 수행-페루, 멕시코, 태국, 요르단
감축목표 (실현)	(페루) Cusco 지역 5,300톤 CO ₂ eq./yr 감축 달성 (멕시코) San Francisco del Rincón 지역 2,500톤 CO ₂ eq./yr 감축 달성 (태국) 치앙마이 지역 400톤 CO ₂ eq./yr(12%) 감축 달성 (요르단) Madaba 지역 1,000톤 CO ₂ eq./yr 감축 달성
배출 정량화	ECAM(Energy Performance and Carbon Emission Assessment and Monitoring Tool) 사용
전략	하수처리 최적화/수리 및 펌프 에너지 효율화

자료: 저자 작성.

UNFCCC Race To Zero

UNFCCC Race To Zero는 기업, 도시, 지역 및 투자자의 리더십을 한데 모아 포괄적이고 지속가능한 발전을 위해 건강하고 탄력적인 탄소제로를 달성하자는 국제 캠페인이다. 733개의 도시, 31개의 지역, 3,067개의 기업, 173개의 대형 투자자 및 622개의 고등 교육 기관이 참여하여 넷제로 이니셔티브를 이끌고 있다. 해당 캠페인 참여 시 친환경적 생활 확산, 친환경 연료로의 전환, 탄소제로 건물의 보급, 청정에너지 생산 등을 약속하고 이행해야 하며, 매년 탄소중립 이행 성과를 국내외에 공개하고 우수 사례 등을 공유한다. 물 분야에서는 전 세계적으로 주요 물 시설 84개소가 참여하고 있으며, 참여 시설의 물서비스 사용자 수는 7,200만 명에 달하고, 2025~2050년까지 탄소중립 실현을 선언하였다.

〈그림 1-11〉 UNFCCC Race To Zero 전 세계 물산업의 넷제로 선언



자료: Water UK. “Race to Zero” 자료를 활용하여 저자작성

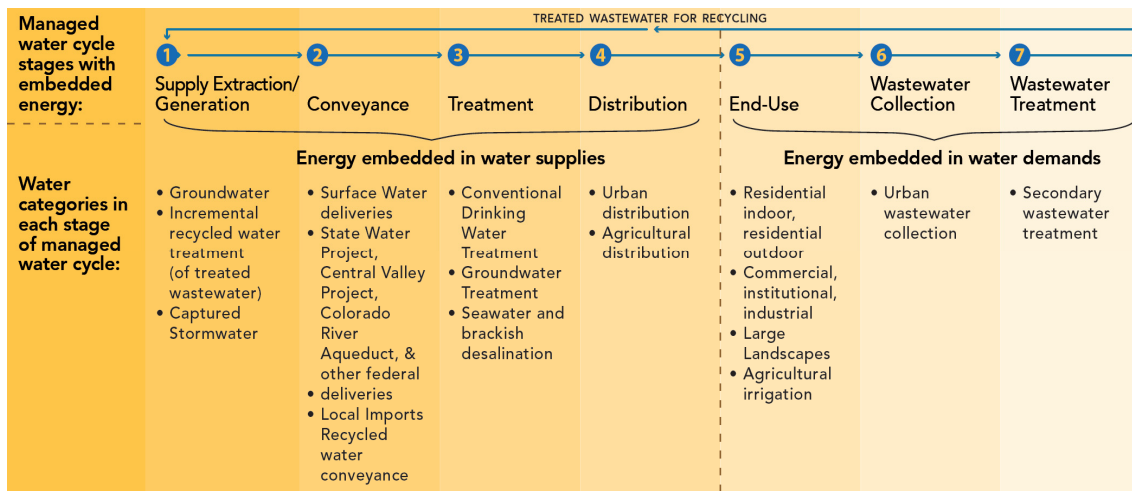
1.2 물 분야 부문별 탄소중립 정책 및 연구 동향

가. 물이용 부문

● 미국

미국 캘리포니아주의 정치중립적 비영리기구인 NEXT 10(2021)은 캘리포니아에서의 물과 에너지의 관계, 시나리오에 따른 물 관련 전기 사용 및 탄소배출 전망을 발표하였다.

〈그림 1-12〉 물 순환 과정 및 에너지 사용



자료: NEXT 10(2021).

캘리포니아주 전체를 수문학적으로 동질적인 공간으로 묶어 구분하고 물이용 순환 과정을 〈그림 1-12〉와 같이 ① 취수와 생산, ② 송수, ③ 정수처리, ④ 분배, ⑤ 수용가, ⑥ 하수 차집, ⑦ 하수처리로 구분하여 단위 수량당 전력사용량을 계산하였으며, 천연가스는 ⑤ 수용가 단위에서 온수사용에 들어가는 사용량만을 활용하여 단위 수량당 열량을 산출하였다.

〈표 1-9〉 온실가스 배출량 추정을 위한 연도별 탄소배출계수

(단위: 톤 CO₂eq./MWh)

측정자료					예측자료(측정자료 선형 보간)									
2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2035
0.26	0.21	0.18	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.13	0.10

자료: NEXT 10(2021).

이후 시나리오에 따른 온실가스 배출량은 우리나라와 같은 방식인 이산화탄소 환산톤 변환계수를 〈표 1-9〉와 같이 활용하여 현황을 분석하고 전망하였다. 도시용수 수요량은 캘리포니아 수자원국에서 5년마다 수립하는 도시수자원관리계획(UWMP: Urban Water Management Plans)의 자료를 사용하는데 감소 시나리오는

연 2%씩 수요량이 감소하는 상황을, 증가 시나리오는 물 공급자들의 예측 시나리오를 반영한다. 농업용수는 2018년에 수립된 캘리포니아주 수자원 계획(California Water Plan Update)의 자료를 반영한다.

〈표 1-10〉 캘리포니아주 2015년 대비 2035년 물 관련 에너지 및 온실가스 변화 추정 (단위: %)

구분		물 사용량 감소	2015유지	물 공급자 개발 시나리오
도시용수 (생공용수)	도시용수 수요	-17	+24	+44
	도시용수 관련 전기 사용량	-19	+21	+40
	물 관련 천연가스 사용	-16	+25	+45
	온실가스 배출	-41	-12	+2
구분		저수요	중간수요	고수요
농업용수	농업용수 공급량	-3	-2	-5
	농업용수 관련 전기 사용량	-5	-4	-6
	온실가스 배출	-62	-62	-62

자료: NEXT 10(2021).

분석한 결과 농업용수 관련 온실가스는 크게 줄어들 것으로 전망하고 있으나 도시용수의 경우 시나리오에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 〈표 1-10〉을 통해 알 수 있다.

결론적으로 캘리포니아주는 에너지 및 온실가스 배출 목표 달성을 위해 세 가지 분야와 다섯 가지 정책을 제안한다. 세 가지의 분야는 먼저 최종 사용자가 동참하는 물과 에너지 사용 및 온실가스 배출량 감축으로 아래와 같은 세 가지 실천 방안을 제시하고 있으며, 두 번째는 상하수도 사업자의 탄소배출량 감축에 대한 경제적 인센티브의 제공이고, 세 번째는 물 관련 자료의 표준화와 에너지 사용 추적 보고 체계 마련이다.

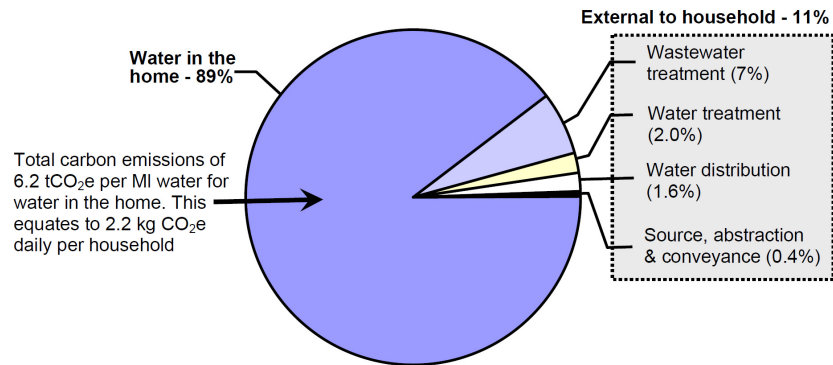
- 생공용수 사용 분야에서의 효율 증대와 물 절약: 물의 취수와 처리, 운송과 배분의 효율성 증대(가정, 건물 외부) 및 온수 사용 과정, 하수의 차집과 처리 과정의 물절약(가정, 건물 내부)
- 전기를 사용하는 온수 생산: 초기 투자비용이 있으나 천연가스 사용에 비해 열량의 측면에서 5배 이상의 효율
- 지하 수위를 적정 수준으로 유지하고 양정에 고효율 펌프를 사용

영국

영국의 기후변화 법률(Climate Change Bill)은 1990년 대비 2020년까지 최소 26%, 2050년까지 60% 이상의 이산화탄소 배출량 감축을 목표로 설정하였다. 이에 영국 환경청(Environment Agency, 2008)은 물공급 및 하수처리 전반에 걸쳐 에너지 효율 증대 및 탄소배출 감축 가능성을 공급과 수요의 측면에서 평가하고 조사하는 ‘물공급 및 물수요 관리 옵션에 따른 온실가스 배출’ 평가 프로젝트를 수행하였다. 이 프로젝트의 주된 내용은 다음과 같다.

- 물공급 및 물수요 관리 옵션에 따른 에너지 사용 및 탄소배출 자료 구축
- 물공급 및 물수요 관리 옵션의 반영이 가능한 탄소비용 평가 모델 개발
- 영국 남동부 지역 수자원 계획에 대한 시범 적용

〈그림 1-13〉 물 순환 과정의 탄소배출 비율



자료: EA(2008).

프로젝트 결과 영국의 경우 물산업 분야에서 영국 전체의 온실가스 배출량의 0.8%를 배출하고 있으며, 가정 내 온수 사용을 고려하면 이 수치는 5.5%까지 증가한다. 〈그림 1-13〉은 영국의 물 순환 과정에서 발생하는 탄소 배출원별 비율을 나타낸다. 2008년 기준 영국 내 물 관련 온실가스 배출량은 총 4,000만 탄소환산톤이며, 탄소비용은 영국 환경식품농무부(Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2007)의 잠재탄소비용 방법론을 활용하고 있으며 2008년 기준 탄소배출량 톤당 26파운드로 매년 2%씩 인상되는 것으로 가정한다. 이 프로젝트에서 고려하는 수요와 공급의 옵션은 다음과 같다.

- 공급 옵션: 저수지, 물공급 네트워크, 담수화설비, 물 재이용, 지하수 및 하천수
- 수요관리 옵션: 가정 내 절수장치, 수도 계량, 물 절약이 가능한 가전제품 사용, 빗물이용설비, 중수도, 누수 방지

주요 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 물이용 순환 과정에서 배출되는 탄소 중 89%는 가정 내 온수에서 발생
2. 물수요 관리는 단순하지만 물이용과 에너지 효율을 증진하며 물이용 순환 과정에서 배출되는 탄소를 획기적으로 줄일 수 있음. 잉글랜드와 웨일스 지방의 우수율을 100%로 증대한다면 연간 탄소배출량을 110만톤에서 160만톤까지 감축 가능
3. 물공급은 탄소배출을 증가시키므로 공급계획에는 탄소배출량에 대한 평가 필요
4. 수요의 관리가 공급의 관리보다 탄소배출 측면에서 유리
5. 가정에서의 물 재이용(빗물 포함)-탄소배출량 관계에 대한 추가 연구가 필요
6. 수요관리를 통해 하천 취수를 근본적으로 감소시킬 수 있음

7. 향후 물 분야 탄소배출 감축 정책에서 중요한 것은 물이용 순환 과정 전체에 대한 탄소배출을 함께 평가하고 중복 계산을 피하는 것임
8. 향후 물 사업자는 경제성 분석에 잠재탄소비용을 포함해야 함

영국 환경청은 이 프로젝트를 통해 ① 계량과 같은 간단한 수요관리가 물이용 순환 과정에서 배출되는 탄소배출량을 크게 줄일 수 있는 중요한 조치라는 수단의 측면, ② 물수요 관리 및 저탄소 물공급 솔루션 개발을 통한 저탄소 물산업 생태계 구축이라는 앞으로의 방향성을 강조한다.

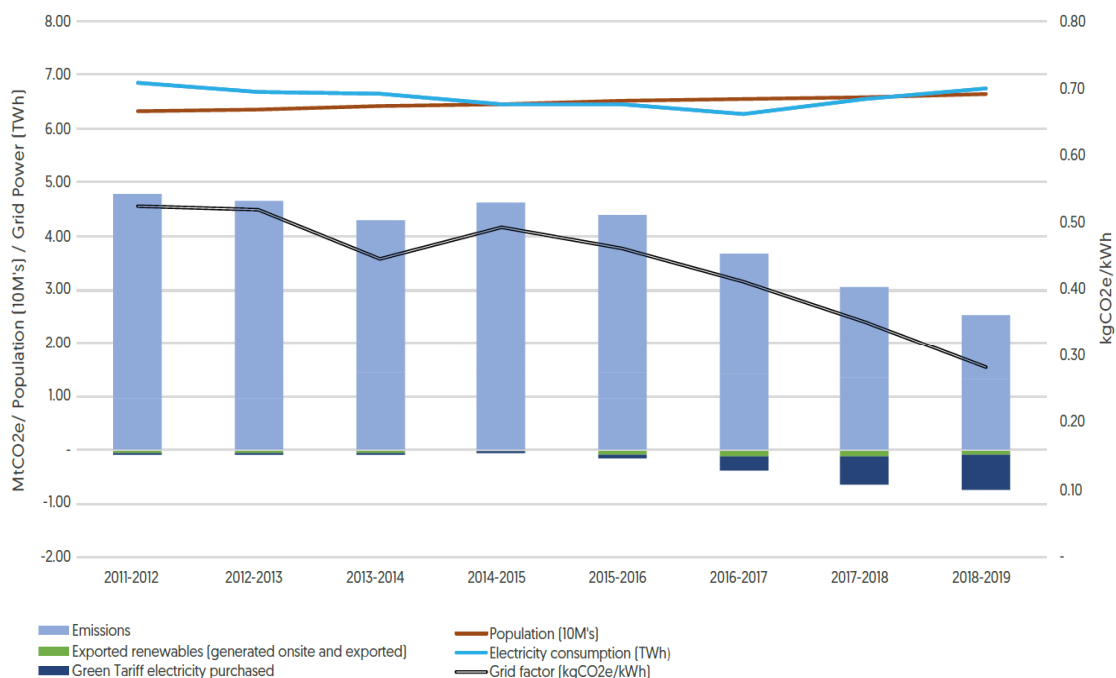
나. 물환경 부문

● 영국

2008년에 영국은 「기후변화법(Climate Change Act)」의 제정으로 2050년까지 1990년 대비 80%의 온실가스 배출량 감소를 목표로 세웠으며 2019년에 “2050년 탄소중립 목표” 상향 조정과 함께 「기후변화법」의 개정으로 2050 탄소중립 목표를 법제화하였다.

최근 2020년에 영국은 2030년까지 물 분야 탄소중립 달성을 위한 로드맵 “UK 2030 Water Net-zero Route Map(UK 2030 Water)”을 발표하였다. 영국 물 사업자는 20억 파운드에서 40억 파운드의 설비 투자를 예상하며, 20년 전 대비 최대 1,000만톤의 온실가스 저감 계획을 수행하고 있다.

〈그림 1-14〉 UK 물기업 1인당 전력사용량 및 탄소배출량



자료: Water UK(2020), p.11.

UK 2030 Water에서는 2030년 물 분야 탄소중립을 위해 다섯 가지 목표(저공해 차량 사용, 공공 배출량 감소, 물과 에너지 절약, 재생에너지 활용, 바이오가스 활용)를 제시하고 있으며 서식지 복원, 잔여 배출량 상쇄 등 추가 계획을 통해 다양한 방안을 모색하고 있다.

〈표 1-11〉 UK 2030 Water 탄소중립 로드맵 주요 목표

목표	주요 내용
저공해 차량	- 승용차 차량 100% 전기화 - 상업용 차량(LGV, HGV) 80% 대체 연료로 전환
물과 에너지 절약	- 누수 문제 해결 및 물 절약을 위한 새로운 전략과 스마트하고 효율적인 네트워크 및 집수(Catchment)
공정 배출	- 2030년까지 2018~2019년 대비 최대 60% 감소 목표
재생 가능 전력	- 최대 3GW의 태양광 및 풍력발전 저장 장치 신설을 통해 수요의 최대 80%까지 제공
그린가스	- 하수 혐기성 소화조에서 발생하는 바이오가스를 제공하여 최대 15만 가구에 난방

자료: Water UK(2020)

UK 2030 Water 하수처리(상수도 포함) 온실가스 저감과 탄소중립 달성을 위해 비용, 기술수준, 효과, 기간 등을 고려한 ① 수요주도형, ② 기술주도형, ③ 자연친화주도형, ④ 복합형의 방안을 제시하였다.

UK 하수처리 분야(상수도 포함)의 수요주도형 방안으로 2018~2019년 기준 총배출량 2.41백만톤 CO₂eq.에서 2030년까지 0.54백만톤 CO₂eq.으로 약 77% 감소효과 가능, 기술주도형 방안으로 총배출량에서 1.10백만톤 CO₂eq. 으로 약 96% 감소효과 가능, 자연친화주도형 방안으로 총배출량에서 0.88백만톤 CO₂eq.으로 약 63%의 감소효과를 기대하고 있다.

영국 환경청은 EU 물관리기본지침(WFD: Water Framework Directive)에 기반하여 하수처리장 운영에 필요한 에너지 및 공정으로부터 연간 11만톤 이상의 CO₂를 배출할 수 있지만 효율적인 운영 방안, 처리 최소화, 혐기성 소화가스 활용 증대, 에너지 손실 최소화 등으로 연간 10만 2,000톤 이상의 CO₂ 감축이 가능하다고 판단하였다.

영국 물환경관리기구(CIWEM: Chartered Institution of Water and Environmental Management)는 영국의 물 분야에 대한 탄소중립 청사진을 제시하였으며 하수처리시설에서는 하수열, 시설 최적화, 시설 공정 개선, 통합 혐기성 소화 확대, 소수력 발전 등을 통해 탄소배출 저감 방안을 모색 중이다.

〈표 1-12〉 UK 하수처리시설 탄소배출 저감 방안

부문	내용 및 사례
하수열 활용	<ul style="list-style-type: none"> - 하수처리수 열 활용(약 12~20℃) - 소규모 및 대규모 시스템 등의 온수난방으로 활용 - 에너지 효율 약 40% 향상, 탄소 60~65% 저감 - 현재 편익 대비 비용이 높으나, 장기적으로 유망 기대
처리시설 최적화	<ul style="list-style-type: none"> - 예측 제어 모델을 통해 46%(United Utilities사) 에너지 사용 절감 - 슬러지 회수율을 줄이기 위한 시설 최적화를 통해 53.6%(Northumbrian Water사) 절약 - 처리시설 개선 및 최적화를 통한 온실가스 배출량 약 20% 절감 기대
통합 혐기성 소화 확대	<ul style="list-style-type: none"> - 슬러지 소화 과정의 혐기성 소화 확대 - 바이오가스 최적화를 위한 공정 에너지 효율 개선, 음식물 쓰레기 등과 병합한 통합 바이오가스 생산 극대화
소수력발전 활용	<ul style="list-style-type: none"> - 미처리 하수 활용(예: Yorkshire Water사는 최대 180kW 전력 생산)
하수처리기준 및 탄소집약도 균형화	<ul style="list-style-type: none"> - 하수처리수 법적 방류수 수질기준보다 불필요한 추가적 처리에 따른 에너지 과소비 방지를 통한 탄소 배출 감소 - Yorkshire Water사 실시간 통합 이니셔티브 운영을 통해 하수처리수 수질기준 및 탄소집약도의 균형적 운영 달성
효율적인 공정 도입	<ul style="list-style-type: none"> - 하수처리 기술혁신 R&D 및 상용화 촉진 - 하수처리 습지 조성(갈대밭 조성), 혐기성 암모늄 산화 처리, 호기성 입상 슬러지 기술 등

자료: CIWEM(2013); 조을생 외(2021)를 참고하여 재작성.

미국

미국 하수처리시설의 CH₄ 온실가스 배출량은 2019년 기준 약 12.1백만톤 CO₂eq.으로 추정되며, 1990년 이후 지속적으로 감소하는 추세이다. 반면 N₂O 온실가스 배출량은 증가하는 추세를 보여 준다.

〈표 1-13〉 미국 하수처리시설 온실가스 CH₄ 및 N₂O 배출량

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

구분	1990	2005	2015	2016	2017	2018	2019
CH ₄	14.7	11.2	13.0	12.7	12.3	12.2	12.1
N ₂ O	18.3	22.5	24.9	25.3	25.8	25.6	25.9

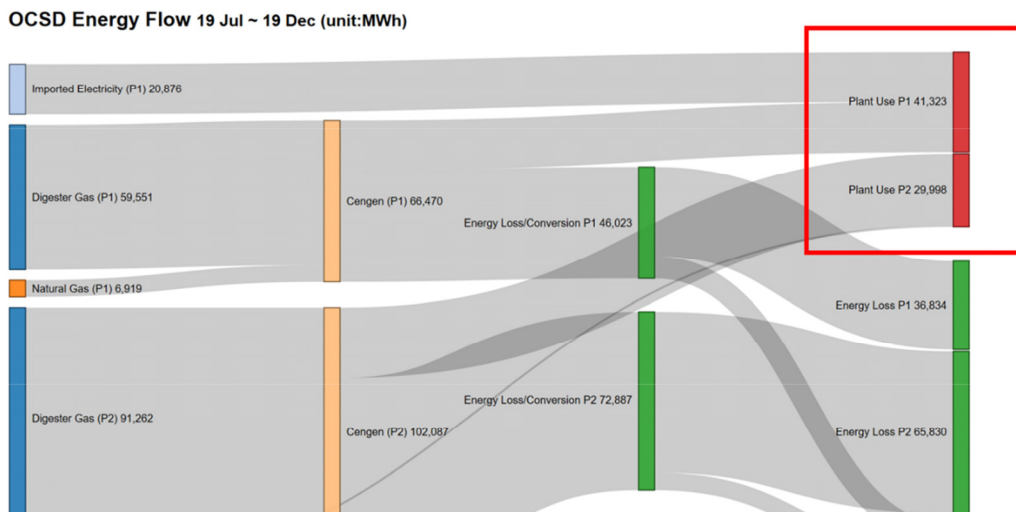
자료: US EPA(2021), pp.7-22.

2018년에 미국 물환경연맹(WEF: Water Environment Federation)에서는 하수처리시설의 에너지 자립화 및 자원회수 활성화를 위해 ReNEW Water 프로젝트를 수립하고 미국 내 109개소 하수처리시설을 대상으로 재생에너지, 하수 재이용 등에 대한 설문조사 분석으로 탄소중립 현황을 검토하였다.

2016년에 미국 캘리포니아주는 유기성 폐기물 매립량 감축을 위해 SB 1393법안을 제시하였고, 2025년까지 매립량 75% 감축 목표와 바이오 가스화를 통한 재생에너지 전환으로 2030년 온실가스 배출량을 1990년 대비 40% 감축할 계획을 수립하였다.

- 캘리포니아주 오렌지카운티 하수처리장의 하수처리용량은 68만톤/일(180MGD)이며 22기의 소화조 운영과 함께 발생하는 CH₄ 배출량은 101천톤/일(3.6 MCFD)으로 나타남
- 8기(총 22.5MW 용량)의 발전기 사용을 통한 재생에너지 생산으로 2021년 오렌지카운티 하수처리장 에너지 자립률은 70%에 달하며, 혐기성 통합소화(15% CH₄ 생산량 증대) 추진으로 에너지 자립률 증가와 함께 탄소중립 기여를 위한 계획들이 수행되고 있음
- 현재 오렌지카운티 물 재이용률은 약 70%(180MGD의 처리수 중 130MGD 물 재이용)이며, 재이용수는 지하수 함양에 사용되어 2024년까지 40MGD 추가 재이용으로 지하수 함양이 향상할 예정임

〈그림 1-15〉 오렌지카운티 하수처리장 에너지 흐름



자료: California Orange County Sanitation District(2021).

또한 미국 콜로라도(Colorado)주 하·폐수처리 온실가스 저감 대책 현황 및 하·폐수처리시설이 포함된 온실가스 오염 저감 로드맵을 제시하였다.

- 미국 콜로라도 주정부는 콜로라도 온실가스 저감 로드맵과 실행 방안을 수립함
- 콜로라도 주정부는 탄소배출량을 2005년 대비 2025년까지 26%, 2030년까지 50%, 그리고 2050년까지 90%의 감축을 목표로 하는 로드맵을 제시함
- 2030년의 배출량 감축 목표는 전력 부문의 3,290만톤을 포함하여 총 7,000만톤으로 농업, 매립지 및 하수처리장에서 발생하는 메탄 배출량 감소와 에너지 효율성 향상 및 전기화 등을 통한 배출량 저감을 추진함

〈그림 1-16〉 콜로라도 2005~2019년 탄소배출량

Exhibit ES 1: Estimated Colorado GHG Emissions by Sector 2005 - 2019				
Emissions by Sector (MMTCO ₂ e)	2005	2010	2015	2019
Electric Power	40.291	39.535	36.283	29.759
Transportation	30.433	29.563	28.380	27.436
Residential, Commercial & Industrial Fuel Use	24.645	26.305	25.791	27.176
Natural Gas and Oil Systems	19.945	27.849	18.572	20.260
Agriculture	11.266	11.753	12.171	10.661
Coal Mining & Abandoned Mines	6.839	8.154	1.865	1.823
Industrial Processes	3.291	3.800	4.442	4.656
Waste Management	2.623	3.236	3.434	4.403
Grand Total	139.333	150.195	130.938	126.174

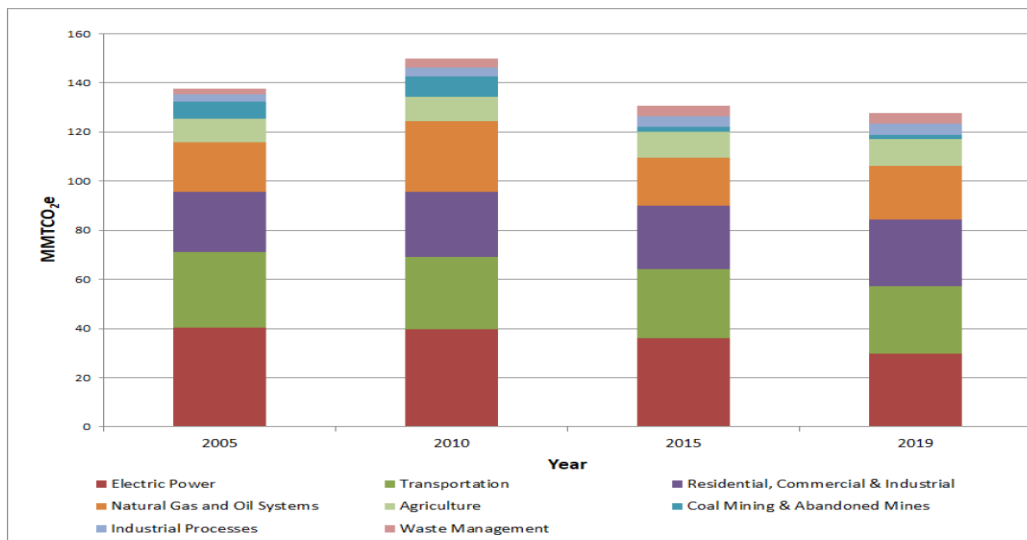
자료 : California Orange County Sanitation District(2021).

〈그림 1-17〉 콜로라도 2020~2050년 탄소감축 목표량

Emissions by Sector (MMTCO ₂ e)	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Electric Power	24.039	21.000	8.000	6.177	4.295	3.243	2.192
Transportation	25.483	23.000	18.000	9.287	5.245	2.406	0.206
Residential, Commercial & Industrial Fuel Use	27.582	26.000	20.000	13.886	8.492	4.934	2.597
Natural Gas and Oil Systems*	20.767	11.600	7.100	7.109	5.259	3.409	1.559
Agriculture	10.661	10.641	9.673	8.588	7.639	6.690	5.741
Coal Mining & Abandoned Mines	1.819	1.786	0.536	0.197	0.188	0.180	0.173
Industrial Processes	4.694	3.500	2.900	2.602	2.206	1.695	1.057
Waste Management	4.459	3.072	2.031	2.412	2.436	2.454	2.463
Negative Emissions Technologies	0.000	0.000	0.000	-1.056	-1.744	-2.431	-3.119
Grand Total	119.504	100.598	68.241	49.200	34.015	22.579	12.869

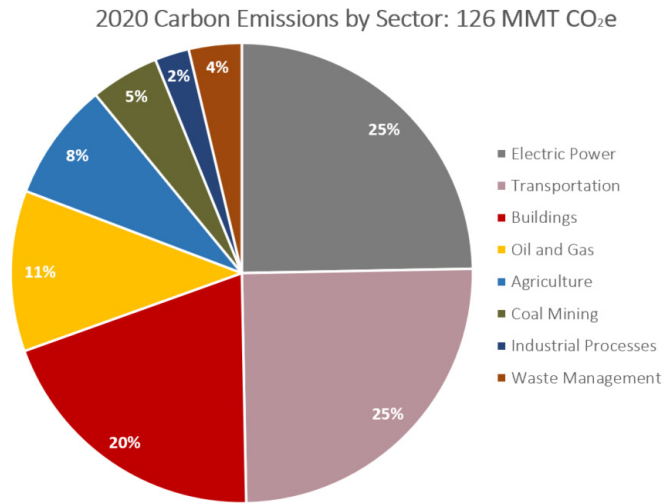
자료 : The Colorado Greenhouse Pollution Reduction Roadmap(2021).

〈그림 1-18〉 콜로라도 2005~2019년 탄소배출량



자료 : The Colorado Greenhouse Pollution Reduction Roadmap(2021).

〈그림 1-19〉 콜로라도 2020년 부문별 온실가스 배출률



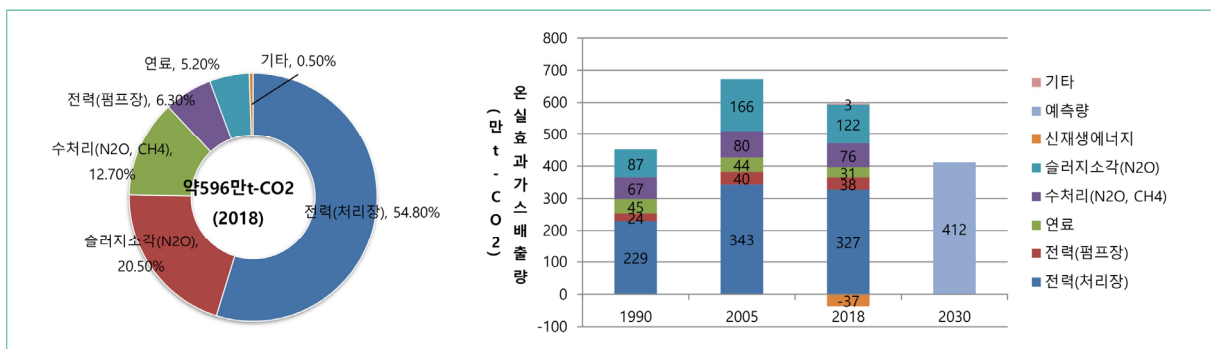
자료: The Colorado Greenhouse Pollution Reduction Roadmap(2021).

● 일본

일본은 2020년 '환경과 경제 선순환'과 함께 2050 탄소중립 선언으로 『2050년 탄소중립에 따른 녹색성장전략』을 수립하여 2030년 온실가스 배출량을 2013년 대비 46% 감축하기 위한 계획을 추진하였다.

- 2018년 147억m³ 하수처리에 필요한 전력은 약 75억kWh가 필요하며, 일본 전국 하수처리장 CO₂ 환산에 의한 온실가스 배출량은 596만톤 CO₂eq.로 수처리 및 슬러지 소각 과정에서 발생하는 직접배출원 33.1%와 전력 등의 간접배출원 66.3%의 비율과 함께 2030년까지 2018년 대비 약 26% 감축하는 것을 목표로 운영하고 있음

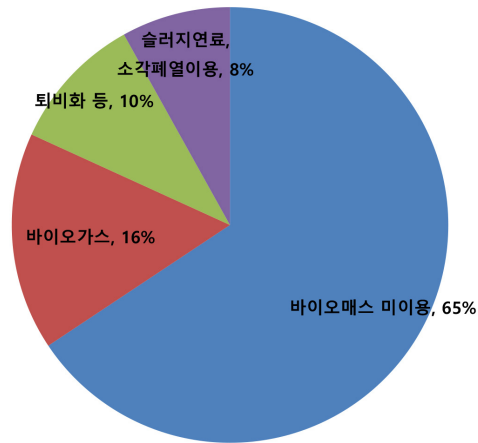
〈그림 1-20〉 수처리시설 온실가스 배출량과 2030 온실가스 예측량



자료: 조을생 외(2021a).

- 2019년 고형연료 및 바이오가스 활용은 약 24%이며, 슬러지 퇴비화 등의 활용은 약 10%의 비율을 보여 주고 있음

〈그림 1-21〉 일본 하수슬러지 이용 현황



자료: 조을생 외(2021a).

〈표 1-14〉 일본 하수처리시설의 자원에너지 이용 현황

구분	부존량	이용 현황
하수 슬러지	<ul style="list-style-type: none">하수슬러지발생량: 건조 기준 약 230만톤/년발전가능량: 40억kWh/년 → 약 110만 세대의 연간전력소비량에 해당	<ul style="list-style-type: none">에너지로 이용된 비율은 약 24% (바이오매스발전: 118개소, 2019년 기준)
하수열	<ul style="list-style-type: none">하수처리량: 약 155억㎥/년상업공업지역에서 이용하는 약 90만 세대의 연간냉난방열원에 해당	<ul style="list-style-type: none">하수열 이용은 32개소(2020년 8월 기준)

자료: 조을생 외(2021b).

다. 수자원 관리 부문

● 미국

전 지구적으로 온실가스 최대 배출국인 미국은 2030년까지 국가 온실가스 감축 목표와 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위한 미국의 장기적 전략을 담은 「The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050」 보고서(이하, 탄소중립 장기전략)를 2021년에 발표하였다. 해당 보고서는 2050년까지 탄소중립을 달성하는 과정에서 온실가스 배출량을 줄이고 경제 부문을 현대화하는 투자를 단행해 공공 보건 개선, 경제 성장 촉진, 사회적 갈등 감소, 미국인의 삶의 질 향상을 위한 다섯 가지 정책 방향을 제시하였으며, 그 내용은 〈표 1-15〉에 제시된 바와 같다.

〈표 1-15〉 미국 정부의 2050 탄소중립 달성을 위한 5대 정책방향

분야	내용
발전 탈탄소화	<ul style="list-style-type: none"> - 청정 전력 시스템으로의 전환은 태양광과 풍력 발전의 비용 하락, 연방 정부와 지방정부의 정책, 소비자의 수요변화로 인해 최근 빠르게 이루어져 왔음 - 최근의 성공에 힘입어 미국은 2035년까지 청정 발전을 달성할 목표를 제시하였으며, 이는 2050년까지 탄소중립을 달성하는 데 중요한 기반을 제공함
최종 사용 전기화 및 청정연료로의 전환	<ul style="list-style-type: none"> - 미국은 자동차에서 건축물, 산업 공정에 이르기까지 경제 대부분을 저렴하고 효율적으로 전기화할 수 있으며, 전기화에 대한 기술적 과제가 있는 항공, 선박, 일부 산업공정 등의 부문은 그린 수소나 지속가능한 바이오 연료 등의 청정연료를 우선 활용함
에너지 절약	<ul style="list-style-type: none"> - 에너지 효율 가전제품, 건축물의 효율성 개선, 지속가능한 제조 공정 등 다양하고 검증된 접근법을 통해 에너지를 절약하고 청정에너지로서의 전환을 촉진할 수 있음
메탄 및 비CO ₂ 배출 저감	<ul style="list-style-type: none"> - 석유나 가스 시스템에서 메탄 유출 방지, 냉방 기기에서 수소불화탄소 대체 냉매 사용 등 경제적인 비CO₂ 온실가스 감축 옵션이 많이 존재함 - 미국과 파트너는 글로벌 메탄 서약(Global Methane Pledge)을 통해 2030년까지 글로벌 메탄 배출을 최소 30% 저감하는 방안을 모색하고, 대폭적인 배출 저감을 위해 필요한 혁신을 가능하게 만드는 R&D를 우선 과제로 설정함
CO ₂ 제거 확대	<ul style="list-style-type: none"> - 2050년까지 남은 30년 동안 넷제로에 가까운 저감이 가능한 에너지 생산 부문에 비해, 농업 활동에서 배출되는 비CO₂ 온실가스 등 일부 분야에서는 완전한 탈탄소가 쉽지 않을 것임 - 해당 부문에서 탄소중립을 달성하려면 엄밀하게 평가되고 검증된 공정과 기술로 대기 중의 CO₂를 제거하는 것이 필요하며, 이는 토지 탄소 흡수를 확대하는 것은 물론이고 공학적인 전략이 필요함

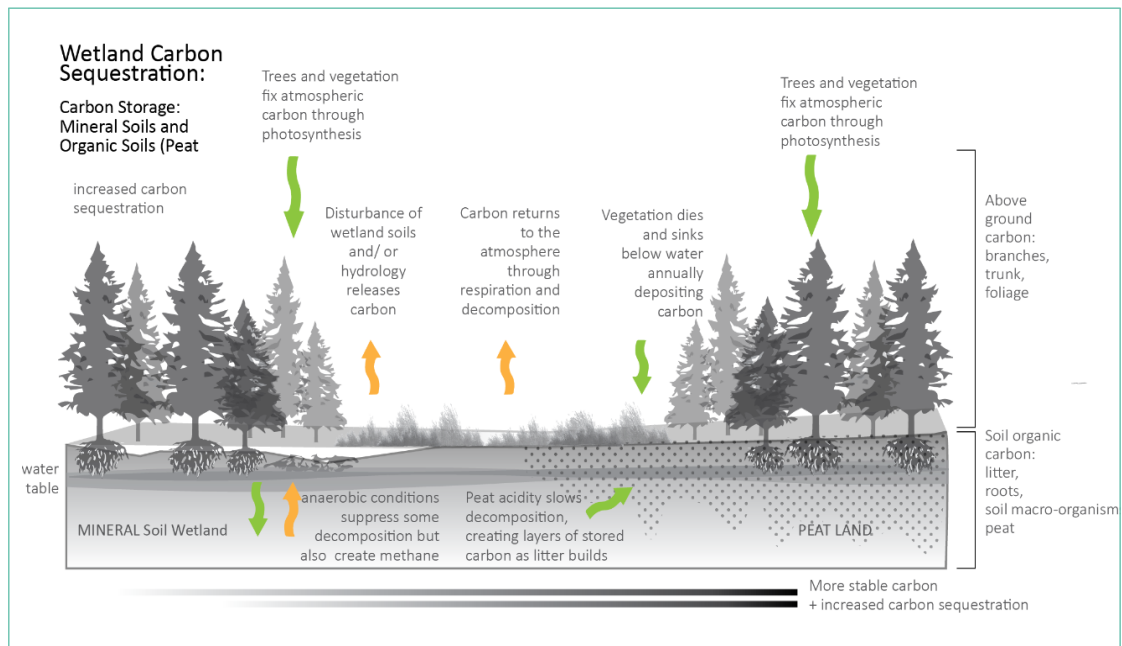
자료: U.S. Department of State(2021).

〈표 1-15〉에 정리된 바와 같이, 장기적인 탄소중립 목표를 달성하기 위한 주요 정책 중 하천 또는 수자원 분야에 대한 전략 및 방향은 명시되어 있지 않다. 다만 5대 정책방향에 부합하는 하천 분야 및 수자원에서의 대표적인 탄소중립 사례는 다음과 같다. 하천 분야의 수력발전은 전통적인 저탄소 재생에너지로 평가받고 있으며, 초기 투자비용이 높은 단점은 있으나, 지속가능한 청정 발전 수단이다. 미국의 수력발전은 미국 전체 전력생산량 중 6%에 해당하며, 신재생에너지 중에서는 32%에 해당한다. 그러나 현재 미국의 수력발전시설은 대부분 노후화되어, 효율성을 높이기 위한 성능 개선이 필요한 상황이다.

미국 정부는 2021년 11월에 통과된 초당적 인프라 투자 법안(Bipartisan Infrastructure Law)의 일환으로 탄소중립 2050을 위해 미국 전역을 대상으로 한 수력발전시설 현대화 프로그램인 ‘Maintaining and Enhancing Hydroelectricity Incentives’와 ‘Hydroelectric Efficiency Improvement Incentives’에 6억 3,000만 달러의 투자 계획을 발표한 바 있다. 탄소중립 장기전략상에서 이산화탄소 제거 확대 정책에서는 농업 분야에서 발생하는 비이산화탄소 온실가스의 감축이 어려운 점을 고려하여 대기 중의 이산화탄소를 제거하기 위한 공학적 기술개발의 필요성을 강조하고 있다. 이산화탄소 제거 확대 정책을 위한 하천 및 수환경에서는 구체적인 전략을 찾아볼 수 없으나, 해당 보고서에는 유사한 사례로 해양 기반 탄소제거 기술이 언급되어 있다. 하지만 이 기술은 아직 연구 초기 단계이므로 대규모로 적용하기에는 미흡하다. 하천 및 수환경에서의 CDR(Carbon Dioxide Removal) 기술로는 습지를 활용한 탄소제거 기술이 있다. 습지를

활용한 탄소제거와 관련하여, 미국 백악관(The White House, 2001)은 「Plan to Conserve Global Forests: Critical Carbon Sinks」 보고서에서 습지의 생태적 기능 및 탄소저감 효과에 대해 언급하고 있다.

〈그림 1-22〉 Wetland Carbon Sequestration 개념도



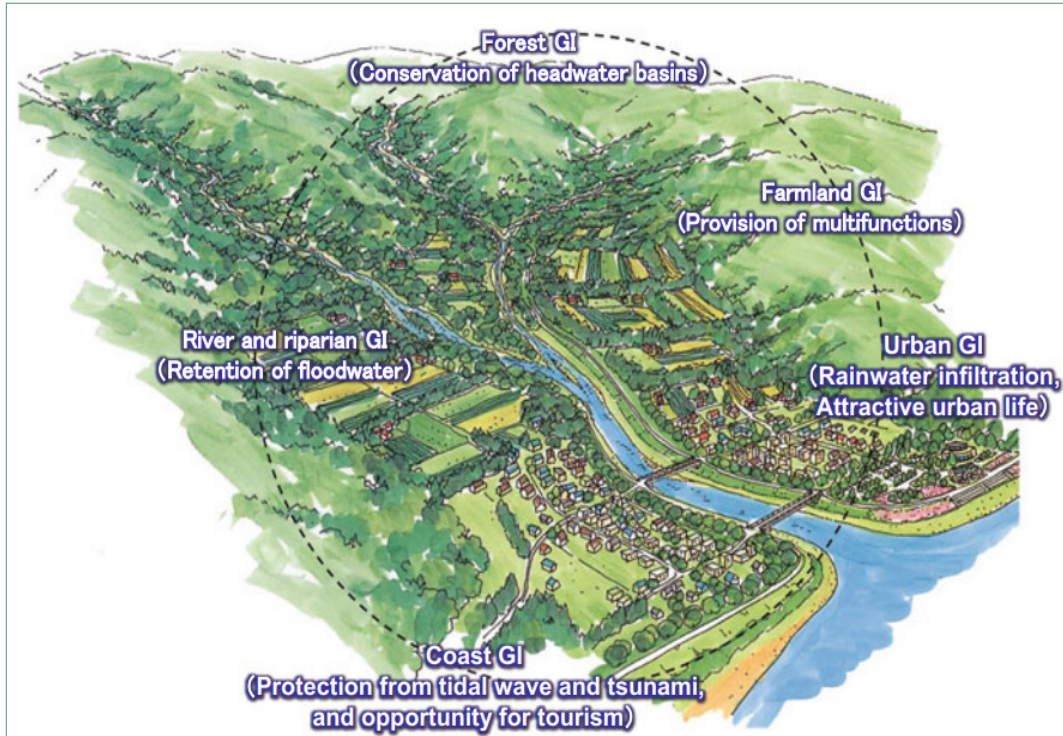
자료: Minnesota BWSR, "Carbon Sequestration in Wetlands", 검색일: 2022.08.17.

● 일본

일본의 물관리 부문은 탄소배출 저감보다 물관리를 통한 기후위기 적응이 더 효과적이라고 판단해 기후위기 적응을 정책 기조로 삼고 있다. 수자원 분야의 탄소 중립과 관련해서는 주로 수력발전으로 재생에너지원을 확보하여 탄소 저감을 실현하고자 한다.

최근 극한기후 발생빈도 증가로 인해 하천공간 내 홍수 위험이 증가함에 따라, GI (Green Infrastructure)를 활용한 홍수 위험 관리가 일본의 하천 관리자 및 생태학자들에게 주목을 받고 있다. GI는 생태계의 기능을 활용하는 전략 기획 인프라로, 최근에는 도심지에서부터 교외 지역까지 확장 적용되고 있다. 대표적 GI 수단인 홍수조절지는 홍수가 발생하면 범람한 하천수를 일시적으로 인접한 홍수조절지에 저장했다가 강우 사상 이후 천천히 물을 배수시킴으로써 피해를 줄인다. 평상시에는 습지 서식종의 대체 서식지가 된다. 일본 홍수조절지의 88%는 생태습지와 유사하게 조성되어 기본적인 홍수 방어 기능뿐 아니라 생물다양성 보존 및 탄소 저감 효과를 동시에 제공한다

〈그림 1-23〉 유역관리 차원의 기후변화 적응을 위한 GI 적용 개념도



자료: Nakamura(2022).

● 유럽

유럽 그린 딜(European Green Deal)은 2050년 기후 중립 달성을 목표로 2020년에 승인되었다. 이 계약은 기후에 관한 기존 법률을 각각 검토하고 순환 경제, 건물 개조, 생물 다양성, 농업 및 혁신에 관한 새로운 법률의 도입을 추진한다. 해당 정책은 하천을 주요 대상지에 포함하고 있으며, 자연기반해법(NbS: Nature-based Solutions for water)을 통해 기능이 약화된 하천을 복원함으로써 생태계 활성화와 경제적 효과를 주요 목표로 설정하였다. 대표적 사례로 다뉴브(Danube)강은 독일 남부에서 시작하여 유럽의 15개국을 관통하는 대형 하천이며 댐, 제방, 배수 시설 등으로 인해 생태계 기능이 매우 약화되어 있다. 따라서 기후변화에 적응하기 위한 하천 생태 복원을 추진하고자 ‘Lower Danube Green Corridor와 Ecological and Economic Resizing of Lower Danube Floodplain’ 등과 같은 프로젝트를 추진 중이다. 프로젝트가 완료된 복원 사업들을 분석한 결과, 배후 지구는 보호하지만 홍수 침투를 강화해 하류의 홍수 위험을 증가시키는 기존 제방의 단점을 보완했음을 확인하였다. 즉 하천 홍수터(범람원) 복원을 통해 하류에서의 홍수 피해가 크게 줄었고, 동시에 홍수터 내 생태계가 회복되어 생물 다양성 및 탄소 흡수 효과도 높아졌다.

〈그림 1-24〉 다뉴브강 유역 내 하천 복원 구간



자료: WWF EU(2015). "WWF works to bring over 12 million m³ water back to nature in the Danube basin". 검색일 2022.08.17.

2 국내 물관리 탄소중립 이행 현황 및 여건

2.1 국내 물 분야 온실가스 정책 현황

● 제1차 국가물관리기본계획 및 이행계획

2021년 6월에 확정된 「제1차 국가물관리기본계획」은 '자연과 인간이 함께 누리는 생명의 물'을 비전으로 ① 물순환 전 과정의 통합 물관리, ② 참여·협력·소통 기반의 유역 물관리, ③ 기후위기 시대 국민 안전 물관리 등 3대 혁신정책 기반을 제시하였다.

물관리 부문 탄소중립 실현을 위해 물이용, 물환경, 물안전, 물정보, 물기반시설, 물산업 등 6대 분야별 추진전략을 제시하였으며 2030년까지 이행할 주요 세부 이행계획 내에 과제를 마련하였다.

물관리 전 과정에서 발생하는 온실가스 발생량 산정 및 감축 목표량 설정을 위해 지방상수도 탄소중립 기본계획 수립(2022년), 물수요 관리를 통한 온실가스 감축 방안 마련 중(2021년), 물 생산공급 과정 온실가스 감축 목표량 설정(~2024년) 과제를 마련하였다.

수열, 수상 태양광, 하수 등 물 관련 재생에너지 생산 기반을 확대하고자 강원 수열에너지 융복합클러스터

설계 완료 및 공사 착수(2022~2027년), 2025년까지 6개 수상 태양광 사업 추진목표 달성, 2025년까지 3개의 하수열 시범사업 추진과제를 마련하였다. 또한 수변 생태벨트, 생태 마을 등 탄소 흡수 생태공간 확충을 위해 매수토지-댐홍수터-하천구역 연계 시범사업(2022~2024년), 연계사업 수변 생태벨트 반영 추진(2025년) 과제를 마련하였다.

● 2021년 환경부 탄소중립 이행계획

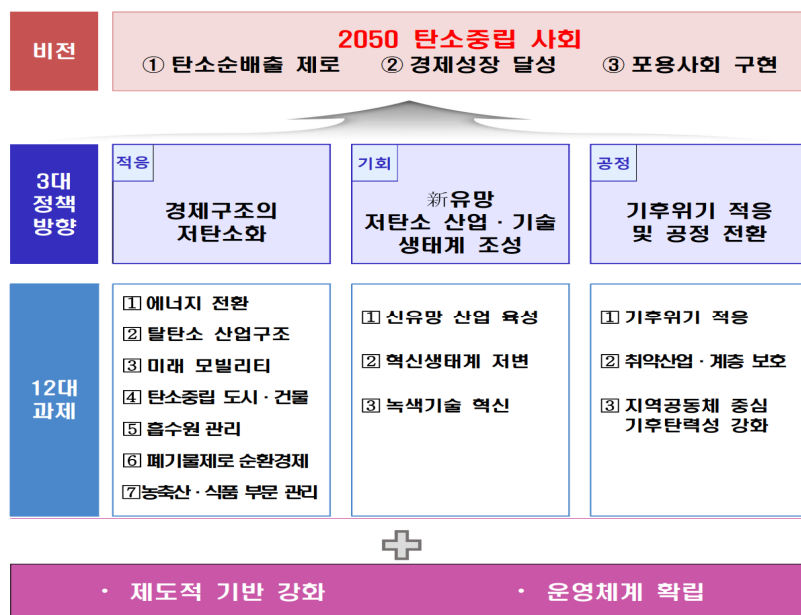
환경부는 「2021년 환경부 탄소중립 이행계획」을 통해 2050년까지 우리나라의 탄소중립 실현을 위한 세부 과제 및 주요 전략을 발표하였다. 이 중 물 분야의 탄소중립 전략은 대부분 에너지 전환 중심의 전략에 반영되어 있다.

수상 태양광 및 수열에너지 활성화 등 물 관련 자원을 활용한 재생에너지 보급 확대 및 중장기 로드맵을 수립하였다. 수상 태양광은 2030년까지 공급 목표가 2.1GW이고, 수열에너지는 2040년까지 공급 목표가 1GW이다.²⁴⁾

또한 하수 및 폐수처리장 등 신재생에너지 시설 설치방법론 발굴, 감축 잠재량 파악, 중장기 투자 계획을 마련하였다.

도시의 경우 탄소중립 그린 도시 사업에 물순환, 물안전 모형이 반영되었으며, 공공의 경우 한국수자원공사와 한국환경공단이 ‘2050년 탄소중립 추진전략’을 발표하였다. 마지막으로 흡수의 경우 기조성 수변녹지에 대한 탄소흡수원 산정 및 조성을 추진하였다.

〈그림 1-25〉 2021 환경부 탄소중립 이행계획



자료: 환경부(2021).

24) 「제9차 전력수급기본계획」에서 2030년까지 재생에너지 공급 목표는 58GW이다.

〈그림 1-26〉 국내 물 분야 온실가스 정책 현황 및 여건 분석

2021환경부 탄소중립 이행계획 (물부문)	제1차 국가물관리기본계획 & 이행계획
물부문은 에너지 전환 중심의 전략 반영	3대 혁신정책에 물관리부문 탄소중립 실현 수립 및 세부이행계획 마련
<ul style="list-style-type: none"> ▪ (전환) 수상태양광, 수열에너지 활성화 등 물관련 자원을 활용한 재생에너지 보급 확대 및 중장기 로드맵 수립 <ul style="list-style-type: none"> • 수상태양광- '30년까지 2.1 GW 공급 목표 • 수열에너지- '40년까지 1GW 공급 목표 ※ 제9차 전력수급기본계획- '30년까지 재생에너지 58GW ▪ (전환) 환경기초시설 탄소중립 중장기 로드맵 수립 중 ('21) <ul style="list-style-type: none"> • 하수 및 폐수처리장 등 신재생에너지 시설 설치방법론 발굴, 감축잠재량 파악, 중장기 투자계획 마련 ▪ (도시) 탄소중립 그린 도시사업에 물순환, 물안전 모형 반영 ▪ (공공) 수자원공사, 한국환경공단 2050 탄소중립 추진전략 ▪ (흡수) 기조성 수변녹지에 대한 탄소흡수원 산정 및 조성 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 물관리 전과정 온실가스 발생량 산정 및 감축 목표량 설정 <ul style="list-style-type: none"> • 지방상수도 탄소중립 기본계획 수립 ('22) • 물수요관리를 통한 온실가스 감축 방안 마련 중 ('21) • 물 생산공급 과정 온실가스 감축목표량 설정 (~'24) ▪ 수열, 수상태양광, 하수 등 물 관련 재생에너지 생산기반 확대 <ul style="list-style-type: none"> • 강원 수열 클러스터 설계 완료 및 공사 착수 ('22~'27) • '25년까지 6개 수상태양광 사업 추진목표 달성 • '25년까지 3개의 하수열 시범사업 추진 ▪ 수변생태벨트, 생태마을 등 탄소 흡수 생태공간 확충 <ul style="list-style-type: none"> • 매수토지-담홍수터-하천구역 연계 시범사업 ('22~24) • 연계사업 수변생태벨트 반영 추진 ('25)

자료: 저자 작성

● 물 분야 관련 그린뉴딜 사업

도시·공간·생활·인프라의 녹색 전환을 위한 물 분야 관련 그린뉴딜 사업으로는 친환경 수상태양광 사업, 수열에너지 활성화 지원사업(지속가능한 청정 수열에너지), 공공부문 탄소중립 선도사업, 댐유역생태계 복원사업(그린인프라 전환) 등이 선정되었다.

〈표 1-16〉 녹색 전환 주요 사업

사업 구분	예산(단위: 백만 원)			사업 개요	추진 현황 및 향후 계획	비고
	'20 예산	'21 예산	증감			
친환경 수상 태양광	-*	합천댐: 835억 원 충주댐: 56억 원 군위댐: 73.5억 원	-	- 35개 댐에 주민참여형 확대 추진	- '21년: 합천댐(40MW), 충주댐(2.4MW), 군위댐(3MW) 총 45.4 MW 사업 준공 - '22년: 소양강댐(8MW, 171억 원) 준공 - '23년: 임하댐(45MW, 941억 원), 충주댐(20MW, 368억 원), 소양강댐(9MW, 204억 원), 합천댐(20MW, 380억 원) 총 94MW 규모 사업 준공	환경부 K-Water
수열 에너지 활성화 지원 (지속 가능한 청정 수열 에너지)	3,220	5,540	2,320 (72.0%)	- 하천, 댐, 상수도 등 물의 열원을 냉난방에 활용	- 강원도 수열에너지 융복합 클러스터 공급 시스템 구축(7.9km) - 시범사업 3개소: 한강 홍수통제소(광역원수 활용), 한강 물환경 연구소(북한강 활용), 인천 종합환경 연구단지(아라천 활용)	환경부 K-Water

사업 구분	예산(단위: 백만 원)			사업 개요	추진 현황 및 향후 계획	비고
	'20 예산	'21 예산	증감			
공공 부문 탄소 중립 선도	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - 친환경 신재생에너지 개발 확대 및 온실가스 배출 저감을 통한 넷제로 수도사업장 구현, 물생산 탄소중립을 통한 공공부문 녹색 전환 선도 - 43개 광역(상) 탄소중립 달성을 제고: 태양광 신규·확대, 수열원 냉난방 도입 - 수도사업장 온실가스 배출 저감: 관리체계 정립, 원주권 광역(상) 시범사업 	-	K-Water 광역정수장 탄소중립 사업기간: '21~'23년 총사업비: 369억 원
댐유역 생태계 복원 사업 (그린 인프라 전환)	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - 댐 역할을 환경과 생태가치를 고려한 '지속가능한 그린인프라'로 전환 - 댐 유역 생태계 연결·보전: 단절·훼손된 댐 주변 생태를 연결·복원하여 건강한 댐으로 환류 		K-Water 사업기간: '21~'25년 총사업비: 495억 원

주) *: 데이터 없음

2.2 물 분야 부문별 탄소중립 정책 및 연구 동향

가. 물이용 부문

● 생·공용수: 광역정수장 탄소중립 계획

정부가 기후변화에 대응하고 지속가능한 녹색사회 실현을 위한 2050 장기 저탄소 발전전략(2020)을 확정함에 따라 환경부는물관리 부문에서 공공 주도의 탄소저감 정책을 추진하고 있다. 광역상수도 분야에서는 ① 에너지 절감, ② 신재생 에너지 사용을 핵심 수단으로 제시하고 있으며, 에너지 절감 계획은 AI 정수장 구현을 통한 정수처리공정 운영 자동화 및 에너지 관리시스템 도입을 계획하고 있다. 전력 설비와 수처리 설비의 효율을 높이고 관로 설비를 개선하여 저탄소 고효율 설비를 도입하는 계획을 통해 수돗물의 생산과 공급 과정에서 온실가스 배출을 최소화하고자 한다. 재생에너지 분야에서는 태양광과 소수력, 수열에너지를 이용하여 수돗물의 생산 및 공급에 필요한 전력의 대체효과를 꾀하고 있다.

한편 한국수자원공사는 광역상수도 탄소중립 추진방안(2022)을 수립하고 광역정수장 탄소중립 실현을 위해 현재 2개의 광역정수장(경기 시흥, 경산 자인)에서 사용하는 저에너지형 용수공급체계를 2025년까지 24개소, 2030년까지 현재 운영 중인 43개 전체 광역정수장으로 확대 적용할 계획이다. 2030년 최종 목표는 저탄소형

물생산 공급체계 구축을 통해 매년 8만톤 CO₂eq.의 온실가스의 저감하는 것이다. 재생에너지는 2030년까지 태양광 38GWh/연, 수열에너지 3GWh/연 및 소수력발전 15GWh/연을 생산할 예정이다.

● 생·공용수: 지방상수도 탄소중립 기본계획

환경부는 지방상수도 탄소중립 기본계획(2022)을 수립하여 전국 지방상수도 취수시설, 정수시설 등을 대상으로 온실가스 배출 현황 및 재생에너지 생산 현황을 분석하고, 온실가스 감축 방안과 재생에너지 설치 방안을 도출하는 지방상수도 탄소중립 기본계획을 제시하였다. 계획 대상 시설은 취수 및 정수시설 각 473개소, 가압시설 5,833개소이다. 제시된 바에 따르면 2019년 취수시설에서는 71만 2,996MWh를, 정수시설에서는 96만 3,627MWh를 사용하였고 물 1m³를 생산하는 데 사용되는 전력 원단위는 0.1977kWh/m³이다. 재생에너지는 태양광에너지, 소수력발전 및 지열에너지를 활용하여 발전량 7만 9,430MWh이다. 온실가스 감축 방안으로는 에너지 절감, 재생에너지 사용 및 물 수요관리, 기타 분야로 총 4개 분야 43개 기술을 제시하고 있다.

〈그림 1-27〉 지방상수도 온실가스 감축 방안



자료: 환경부(2022a).

이러한 감축 방안을 통해 2050년까지 에너지 저감 180GWh, 재생에너지 245GWh를 생산하여 19만 5,000톤 CO₂eq.의 온실가스를 감축하여 지방상수도 탄소중립률 목표 11.8%를 제시하고 있다. 이를 위해 사업비 4,600억 원을 예측하였으며, 에너지 절감비용을 고려할 때 투자 사업비는 11.8년에 회수될 것으로 전망하였다.

〈표 1-17〉 지방상수도 탄소중립 목표

구분	현재	목표	
	2019	2030	2050
에너지 사용량(GWh)	2,250	2,154	2,070
에너지 저감량(GWh)	-	96	180
재생에너지 생산량(GWh)	79	178	245
온실가스 감축(천톤 CO ₂ eq.)	36	126	195
탄소중립률	3.5%	8.3%	11.8%

자료: 환경부(2022a).

● 농업용수: 2050 농식품 탄소중립 추진전략

정부는 2050 탄소중립을 선언한 이후 「2050 국가 탄소중립 시나리오(2021.10)」와 「2030 국가 온실가스 감축 목표(NDC) 상향안(2021.11)」을 확정 및 발표하였으며, 이에 대응하여 농식품부 역시 「2050 농식품 탄소중립 추진전략(2021.12)」을 수립하고 농업 분야 온실가스 감축을 위한 장단기 로드맵을 발표하였다.

「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 탄소중립을 계기로 농업을 저탄소 및 친환경 산업으로 전환하여 농업의 지속가능성 향상 및 농촌경제 활성화를 위하여 수립되었다. 따라서 동 전략은 농업 분야의 식량안보를 고려한 잠재 감축량 수준까지 감축할 것을 목표로 농업 생산에서 소비에 이르는 농식품시스템에 대한 총체적인 감축을 계획하였다.

〈표 1-18〉 2050 농식품 탄소중립 장단기 로드맵

구분		지표	2030년		2040년		2050년	
			목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량
비 에 너 지	논물 관리	간단관개(중간 물떼기)(2주, %)	61.1	474	61.1	474	61.1	474
		논물 알게 대기(%)	10	66	10	66	10	66
		소계	540		540		540	
	농경지	질소비료 저감(kg/ha)	115	267	115	268	115	268
		바이오차 보급 (토양개량제 대비 보급률 %)	9	58	9.5	62	10	65
		농경지 투입 분뇨량 저감(%)	33	1,683	34	1,814	35	1,936
		소계	2,008		2,144		2,269	
	장내 발효	저메탄사로 보급(2세 이상 %)	30	121	65	261	100	402
		분뇨 내 질소 저감(%)	13.2	630	13.2	654	13.2	673
		소계	751		915		1,075	
	가축 분뇨	비농업계 이동 (에너지화 정화처리비율 %)	33	2,058	34	2,212	35	2,355

구분		지표	2030년		2040년		2050년		
			목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량	
	생산성 향상	식단 변화 가축 감소율(%)	-	-	-	-	10.2	995	
		축산생산성 향상 (스마트축사 보급률 %)	30	389	40	507	50	579	
		대체식품(%)	4.4	63	9.7	142	15	200	
		소계	452		649		1,773		
	합계		5,809		6,460		8,012		
에너지	에너지	고효율 에너지설비(등유감소 %)	9	14	30	28	50	41	
		농기계(경유/등유수요 %)	10/5	35	50/25	113	100/50	190	
	합계		49		141		231		
감축량 총계(A)				5,858		6,601		8,243	
배출전망(B)				24,653		24,401		24,450	
감축 후 배출량(B-A)*				17,940		46,744		15,454	

주: 감축 후 배출량(B-A)*은 수산을 포함한 농축수산물 전체 목표임.
 자료: 농림축산식품부(2021a), p.9.

「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 지금까지의 고투입 농법을 탈피하고 정밀농업 확산을 통한 저투입 농법으로의 전환을 기본방향으로 설정하였다. 또한 농업 생산에서의 비료 및 농약 사용 감축, 가축 사육에서의 저메탄사료 공급을 포함한 사양관리, 농업·농촌의 재생에너지 공급 확대를 통한 온실가스 배출원 감축과 농업구조 전환을 통한 탄소중립 달성을 추구한다.

농식품부는 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」을 바탕으로 농식품 탄소중립을 위해 2050년까지 3단계로 전략을 구축하고 이를 바탕으로 농업구조의 전환을 추진할 계획이다. 구체적으로 1단계(2030년)는 저탄소 농업 전환 및 감축 기술을 확립 등 기술적 토대를 마련하며, 2단계(2040년)는 농업환경 개선과 온실가스 감축 폭의 확대를 추진한다. 마지막으로 3단계(2050년)에서는 탄소중립과 지속가능한 농업을 실현한다.

추진전략으로는 저탄소 농업구조 전환, 온실가스 배출 저감, 화석에너지 사용 축소 및 에너지 전환, 재생에너지 확대라는 정책 방향을 토대로 온실가스 감축을 위한 농업구조 및 에너지 전환의 정책 방향과 관련된 핵심 과제가 제시되었다. 이 중 농업 분야 물관리와 관련된 감축전략으로는 간단관개(중간 물떼기), 논물 얇게 대기와 같은 논물관리와 농경지 투입 분뇨량 저감, 가축분뇨처리 및 축산생산성 향상이 있다.

● 농업용수: 농어촌용수합리화계획

농어촌용수 이용 합리화계획은 「농어촌정비법」 제15조(농어촌용수 이용 합리화계획 등)에 따라 농어촌 용수의 효율적 이용과 개발 및 보전을 목적으로 수립되고 있다. 1990년에 「농어촌발전특별조치법」이 제정된 뒤 농촌용수이용합리화계획(1999)을 수립하였다. 이후 2000년에 「농어촌정비법」이 개정되면서 농어촌용수 이용합리화계획(2014)으로 명칭을 변경하여 10년 단위 계획을 수립하고 있다. 농어촌용수이용합리화계획은

국가물관리기본계획 수립에 따른 물관리의 핵심가치 및 정책과 부합하는 관리계획 수립을 목적으로 수립되고 있다. 2021년에 수립된 계획은 ① 효율적인 농어촌용수 이용관리, ② 안정적인 농어촌용수 공급 관리, ③ 안전한 농어촌용수 관리, ④ 지속가능한 농어촌용수 개발의 계획 수립 방향을 토대로 세부 계획이 수립되었다(표 1-19 참조). 다만 2021년 농어촌용수이용합리화계획의 경우, 농업용수 관리 관련 온실가스 감축과 밀접히 연관된 농업용수 공급과 이용 효율화만을 제시할 뿐 농어촌용수이용합리화계획을 통한 온실가스 감축목표는 제시하지 않고 있다.

〈표 1-19〉 2021년 농어촌용수이용합리화계획의 비전 및 목표

구분	내용			
비전	공익적·다원적 가치 증진을 위한 농어촌용수 관리			
기본목표	| 총괄목표 | 농어촌용수의 효율적인 이용·개발과 보전·관리			
	1. 효율적 관리	2. 안정적 관리	3. 안전한 관리	4. 지속가능한 개발
수립방향	① 효율적인 농어촌용수 이용관리		② 안정적인 농어촌용수 공급 관리	
	<용수공급 효율 개선> - 용수구역특성 고려, 맞춤형농어촌용수 운영관리 기준 마련 - 한정된 수자원의 효율적인 물공급 체계 구축 및 고도화 - 타용수구역 체계 개편		<양적·질적 농어촌용수 공급> - 유역 간 물 수급 불균형 해소, 안정적 물이용 공급 체계 확립 - 지하수 개발·이용, 보전·관리 강화 - 저수지·호소에 대한 수질보전·개선·관리 방안 제시	
	③ 안전한 농어촌용수 관리		④ 지속가능한 농어촌용수 개발	
	<홍수 관리목표 설정 및 대응능력 강화> - 기후변화 대비 안전하고, 실용적인 재해 대응 기반 확보 - 저수지 치수 능력 증대		<농어촌용수 관리지표 산정 및 관리> - 관리지표에 따른 이행평가 - 신규 및 대체 수자원 개발 - 참여형 유역 거버넌스 운영	

자료: 농어촌연구원(2021a), p.3.

나. 물환경 부문

● 가축분뇨: 축산환경 개선 대책

농림축산식품부는 「축산환경 개선대책」에서 2030 국가 온실가스 감축 목표 상향안과 연계한 지속가능한 축산환경 조성대책을 마련하였다. 구체적으로 「축산환경 개선대책」은 2030년까지 축산 분야 전체 온실가스 배출량의 30% 감축을 목표로 추진한다: ① 정화처리·에너지화 등 가축분뇨의 비농업계 이용 확대를 통해 온실가스 23% 감축, ② 저메탄 사료 및 저단백질 사료의 개발·보급 등 가축사양 관리를 통해 7% 감축.

온실가스 감축을 위한 세부적인 정책 수단으로 반추동물의 장내발효 개선을 위한 저투입·저탄소 사양관리와 가축분뇨 적정처리, 축산악취 저감 및 축산환경 개선과 온실가스 감축을 위한 제도 정비, 기술개발 등 기반 구축을 위한 방안 등이 포함되었다.

〈표 1-20〉 축산분야 온실가스 배출량 목표 산정(안)

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

구분	'18	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30
예상 배출량 (BAU, A)	9.4	9.9	10.4	10.5	10.6	10.6	10.7	10.7	10.8	10.9	11	11
목표 배출량 (B)			9.8	9.7	9.6	9.5	9.3	9.1	8.7	8.5	8.2	7.7
장내발효	4.5	4.8	4.7	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5	4.4
가축분뇨처리	4.9	5.1	5.1	5.1	5.0	4.9	4.7	4.5	4.2	4.0	3.7	3.3
감축률 ((A-B)/A)			6%	7%	8%	10%	12%	15%	18%	22%	26%	30%

자료: 농림축산식품부(2021e).

〈표 1-21〉 축산환경 개선대책 기본 방향 및 추진 전략

구분	내용	
목표	<ul style="list-style-type: none"> 저탄소 사양관리 및 가축분뇨 적정처리 등을 통해 축산분야 온실가스 배출을 저감하고 지속가능한 축산환경관리 기반 구축 - '30년까지 축산 분야 온실가스 30% 감축(BAU 11백만톤 CO₂eq. → 목표 7.7) - 가축분뇨 퇴액비화 축소('20: 90% → '30: 67%) 및 에너지화 확대(1.3% → 15%) 	
정책 수단	① 저탄소 사양관리	② 가축분뇨 적정처리
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 저메탄 사료 개발 및 제도화 * 메탄저감제 등록사용 기준 마련 및 인센티브 제공 ▶ 사료 내 잉여질소 상한 기준 등 강화 * 사료공정서 개정: 양돈 → 양계 → 비육우 ▶ 사육방식 개선 → 사육기간 단축 * 소 사양관리 시범사업 실시('22~'24, 신규) ▶ 축산 분야 에너지 효율 제고 추진 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 가축분뇨 발생 감축을 위한 기준 및 관리강화 ▶ 대규모 농가 및 위탁시설의 정화처리 확대 * 정화처리 비율('20: 10% → '30: 25%) ▶ 퇴비의 비농업계 이용(바이오차, 고체연료 등) 확대 * 비농업계 처리 비율('20: 0.1% → '30: 8%) ▶ 에너지화 확대('20: 1.3% → '30: 15%) * 공공형 설치, 주민 수용성 제고(환경부 협업)
	③ 축산악취 저감	④ 축산환경 개선 기반 구축
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 시설기준 및 농가 준수사항 강화 * 악취방지시설 의무화, 슬러리피트 기준 등 ▶ 농촌 공간계획 연계, 축산지구 신설 * 스마트 축산단지 조성 확대 ▶ 축산악취 우려 지역 및 농가 관리 강화 * ICT 활용 악취 모니터링 강화 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 축산환경 개선 법적 근거 마련 * 축산법 내 축산환경 부문 신설 ▶ 축산환경 관련 통계 고도화 * 축산환경 실태조사(신규), 통합관리시스템 구축 ▶ 축산환경 개선 연구개발(R&D) 확대 ▶ 축산환경 전문 컨설턴트 양성 확대

자료: 농림축산식품부(2021e).

앞서 제시된 개선대책 중 농업 분야 물관리 관련 온실가스 감축과 관련된 정책은 '가축분뇨 적정처리'가 있다. 가축분뇨 적정 처리의 추진 방향 및 세부 계획에는 ① 적정 사육두수 관리를 위한 축산법 및 가축분뇨법

개정 등의 기준 설정, ② 농가 단위 사육밀도 관리 강화를 통한 가축분뇨 자체의 발생량 감축이 포함된다. 또한 가축분뇨처리의 퇴·액비화 처리 비율을 줄이고 2020년 기준 10%인 정화처리 비율을 2030년까지 25%로 확대할 계획이다. 이를 위해 대규모 양돈농장의 정화시설 설치 의무화와 기존 사업의 개편 등을 통해 개별농가 및 공동자원화시설의 정화처리 확대를 추진할 계획이다. 그동안 농가에 액비 중심으로 지급되던 가축분뇨처리지원사업에 정화시설 지원이 가능하도록 확대하며, 공동자원화시설에 매년 5개소 이상 정화시설을 지원하여 2030년까지 전체 시설의 90% 이상에서 정화처리가 병행되도록 한다는 방침이다.

또한 가축분뇨 적정처리는 농경지에 살포되는 퇴비 감축을 위해 고체분의 퇴비화 비율을 줄이고 가축분뇨를 활용한 고체연료, 바이오차, 바이오플라스틱 처리 비율을 확대할 계획이다.²⁵⁾ 퇴비의 비농업계 이용 확대를 위해 2020년 1.3%에 불과한 가축분뇨 신재생에너지의 생산 비율을 2030년까지 15%로 확대하기로 하였으며, 이와 관련하여 가축분뇨 에너지화 사업 개선과 지자체 및 공공기관 등이 운영하는 공공형 가축분뇨 에너지화 시설을 2030년까지 10개소 육성할 계획이다. 또한 환경부와 연계하여 지역 주민 친화 시설인 친환경 에너지 타운 조성사업을 지원하고, 기존 에너지화 시설의 발전여열을 시설온실에 공급하는 등 에너지 효율과 경제성 확보를 위한 상생 모델을 개발하고 확산할 계획이다.

〈표 1-22〉 2030 가축분뇨처리 방식 개선 목표 산정(안)

(단위: 만톤)

연도	가축분뇨 발생량(예상)	퇴·액비	비농업 이용		에너지화
			정화	퇴비 감축	
2020	5,194	4,655	538	1	68
		(90%)	(10%)	(0%)	(1.3%)
2021	5,256	4,686	569	1	80
		(89%)	(11%)	(0%)	(1.5%)
2025	5,373	4,456	850	67	350
		(84%)	(15%)	(1%)	(7%)
2030	5,562	3,747	1,365	450	830
		(67%)	(25%)	(8%)	(15%)

자료: 농림축산식품부 보도자료(2022.2.6).

● 하·폐수 및 분뇨

2018년에 발표된 「IPCC 1.5도 특별보고서」를 계기로 전 세계적으로 기후·환경 위기에 대응하기 위해 녹색 전환을 추진하고 탄소중립을 달성하고자 노력하고 있다. 이에 탄소배출량이 많은 물 분야에 대한 분석과 탄소 저감 방안의 필요성이 제기되면서 물환경 부문에서의 탄소중립이 중요하게 부각되었다.

25) 현재 가축분뇨는 퇴·액비, 고체연료, 정화, 바이오에너지로 처리되고 있다. 추가로 가축분뇨를 바이오차, 바이오플라스틱 등 산업용 소재로 처리하여 활용하기 위해 법적 근거를 마련하였다(가축분뇨법 개정, 2022).

국내에서는 ‘2030년 국가 온실가스 감축목표(NDC: Nationally Determined Contribution)’ 정부안 및 ‘2050 장기저탄소발전전략(LEDs: Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies)’과 같은 탄소중립을 위한 추진 전략을 내세웠고, 환경부 역시 하수처리 등 에너지 사용이 많은물관리 부문에서 탄소중립 노력이 필요함을 강조하며 하수처리시설 운영 관리의 패러다임 전환을 제시하고 있다.

우리나라 공공하수처리시설의 기능 및 역할은 사회적 여건에 따라 변화되어 왔으며, 이는 1960~1970년대 산업화로 인한 수질오염 증가로 처리시설의 수요 증가, 1990~2000년대 수질기준 강화와 생태계 보호를 위한 물환경 조정의 요구 증가, 2010년대 이후 유역 차원의 수질관리 하수도 계획 기반의 정책 추진과 「하수처리시설 에너지자립화 기본계획」 수립 등에서 확인할 수 있다.

2020년대에는 ‘2050 탄소중립’, ‘2050 탄소중립형 추진전략 확정 발표’, ‘2050 장기저탄소발전전략(LEDs)’, ‘2030년 국가 온실가스 감축목표(NDC)’ 등의 정부안과 함께 하수처리시설과 같은 환경기초시설을 위한 신재생에너지 개발, 처리 과정의 에너지 최적화 등으로 물환경 부문의 탄소중립을 지향하는 대전환 시대를 맞이하고 있다.

다. 수자원 관리 부문

● 하천공간

최근에는 하천공간을 제외지로 제한하는 대신 제내지와 홍수터 간의 생태 연결성 강화를 통한 횡적 공간의 확충 및 하천의 다면적 기능을 고려한 하천공간 활용 방안을 모색하고 있다. 서울시는 중랑천, 안양천, 양재천 등 주요 도심 강가의 나지에 10만 그루의 수목을 식재하는 등 지난 14년간(2006~2018년) ‘하천생태복원 및 녹화사업’의 일환으로 약 217ha(연간 최대 약 9,000톤 CO₂ 저감) 상당의 수변 녹지공간을 조성하여 탄소흡수면적 확대 효과를 추구하였다. 조현길, 박혜미(2015)의 선행연구에서는 IPCC 가이드라인 또는 국가 단위에서 제공하는 탄소흡수 배출량 산정 국제표준 방법에 근거하여 시나리오 및 예정 사업 기반의 흡수감축 잠재량을 산정하였다. 한국수자원공사가 2050 탄소중립과 관련하여 제안한 흡수원 분야 탄소중립 시나리오에 따르면 2050년에 하천 및 수변공간에서 총 8만 3,000톤(국내 온실가스 2020년 배출량 6억 5,000만 원) 정도의 탄소흡수가 가능할 것으로 전망하였다. 또한 환경부와 한국수자원공사에서는 임하댐 저수구역(송강리 일원, 약 14ha)을 시작으로 탄소흡수원인 댐 생태공간 복원을 통해 댐 지역의 온실가스 흡수 효과를 극대화하여 생태 기반 탄소중립 달성을 위한 ‘댐 저수구역 생태계 복원사업’을 추진 중이다.

3 시사점

3.1 국외 물 분야 탄소중립 정책 및 연구 동향 시사점

국제적으로도 물 분야에서 탄소중립 전략이 단독으로 세워지는 경우는 드물다. 주로 에너지, 산업, 수송, 건물, 농축수산 및 폐기물을 대상으로 수립되며, 물 분야는 일부에서만 다루어지고 있다. 하지만 전 세계 84개의 대규모 물공급·처리 사업자들이 자발적으로 UNFCCC Race to Zero 챌린지를 통해 2025~2050년까지 탄소중립을 달성하겠다는 선언을 하고 있다.

또한 영국, 호주, 독일 등 일부 국가들은 물 분야의 탄소중립 전략 및 이행 계획을 수립하는 추세이다. 영국의 경우 물관리시설이 전체 에너지 소비의 3%, 국가 온실가스 총배출량의 1%를 차지하여 상하수도 사업자들은 2030년까지 탄소중립 목표 및 전략을 실행하고 있다. 호주는 빅토리아주의 경우 물 서비스 사업자들이 배출하는 온실가스가 공공부문 배출량의 25%를 차지함에 따라 물 분야의 2050 탄소중립을 선언하였다. 이 국가들은 물 분야의 탄소중립 달성을 위해 물관리 사업장에 표준화된 온실가스 배출 정량화 도구를 가지고 있다는 특징이 있다.

〈그림 1-28〉 국외 물 분야 온실가스 정책 현황 및 시사점



자료: 저자 작성.

3.2 국내 물 분야 온실가스 저감 이행 현황 및 여건 시사점

기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC)에서 개발한 ‘국가 온실가스 인벤토리 작성 가이드라인’에 따르면 온실가스 배출 분야는 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업, 폐기물이다. 우리나라도 이 가이드라인을 따르므로 물 분야 온실가스 배출 현황 및 전망, 감축 잠재량 등의 파악이 어려운 실정이다. 독립적인 물 분야 탄소중립 전략은 없지만 관련 내용을 찾으면 다음과 같다.

우리나라의 탄소중립 추진의 이정표인 ‘2050 탄소중립 추진전략’ 및 ‘2050 탄소중립 시나리오’에 물 분야 감축수단 반영이 미비하다. 탄소중립 선언(2020.10.28) 이후 우리나라는 이를 이행하기 위하여 2050 탄소중립 추진전략을 수립(2020.12.7)하여 3+1 실행전략²⁶⁾ 제시하였다. 다만, 에너지 전환 및 산업구조 전환이 주요 핵심과제로 설정되어 있어 물 분야의 탄소중립 추진 방안은 포함하지 않았다. 이후, 2050 탄소중립 시나리오를 수립(2021.10.18)하여 부문별 방향성 제시, 배출을 최소화하는 A안과 제거기술을 적극 활용하는 B안으로 구성하였다. 이때 수변 녹지 조성, 댐 유희수면 인공수초섬 조성 등 일부 물 분야 감축수단이 시나리오에 반영되어 있으나 제한된 수준으로 반영되어 있다. 특히 하·폐수처리의 경우 2018년 기준 2050년까지 18% 삭감량을 제시하고 있지만 이는 별다른 감축 전략을 사용하지 않은 인구 감소분에 따른 하수처리량 감소분을 반영한 자연감축량만 반영했을 뿐이다.

〈그림 1-29〉 국내 물 분야 탄소중립 이행 여건



자료: 저자 작성.

26) △경제구조의 저탄소화, △新유망 저탄소산업 생태계 조성, △탄소중립 사회로의 공정전환 + △탄소중립 인프라 강화.

2030 국가 온실가스 감축목표에도 물 분야 감축수단 반영이 미흡한 실정이다. 정부는 2050 탄소중립의 중간목표로 2030 국가 온실가스 감축목표를 2018년 대비 2030년까지 40% 감축하는 것으로 확정 (2021.10.27)하였다. 2030 국가 온실가스 감축목표의 달성 방안은 전환(에너지), 산업, 건물, 농축수산, 흡수원(CCUS 포함) 등 주요 배출 분야를 중심으로 구성되었으나, 물 분야의 경우 논물 관리방식 개선, 가축분뇨 자원순환 확대 등 농축수산 분야에 일부 반영된 것을 제외하면 매우 제한적이다. 탄소중립은 전 지구적이며 국가적으로도 긴급하고 도전적인 과제이고, 물 분야의 탄소배출 비율이 높음에도 불구하고 현행 탄소중립 정책 및 계획은 물 분야에 대한 고려가 미흡하다. 이에 따라 물 분야 탄소중립 기여 방안이 적극적으로 마련될 필요가 있다.

3.3 소결

물 분야는 지금까지 IPCC 인벤토리 가이드에 개별 부문으로 편재되지 않고 있어 IPCC 가이드를 따르는 국가 정책도 물 분야를 전문적으로 다루진 않고, 타 부문에 분산되어 제한적으로 반영되고 있다. 결과적으로 물 분야를 전문으로 한 온실가스 감축 전략이 부재하고, 물 분야에 대한 합의된 정의가 없어 물 분야의 온실가스 배출 현황 및 전망, 감축 잠재량 등을 정확히 파악할 수 없다.

물 분야 2050

탄소중립 이행을 위한
로드맵 구축 연구



SECTION 02

물 분야 온실가스 인벤토리 구축

제1절 물 분야 온실가스 인벤토리 구축 방법론

제2절 물 분야 온실가스 배출현황('18년)

물 분야 온실가스 인벤토리 구축

제1절

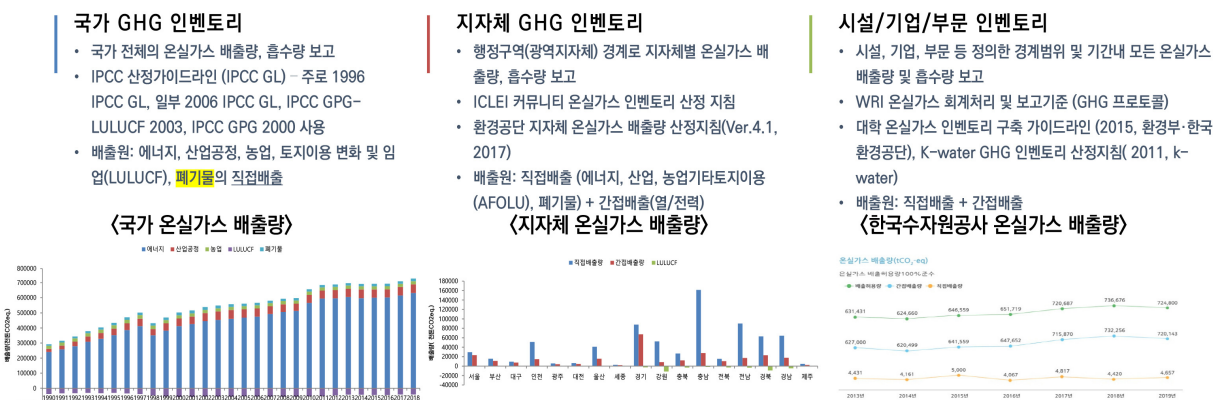
물 분야 온실가스 인벤토리 구축 방법론

1 온실가스 인벤토리 개념 및 구축 방법

1.1 온실가스 인벤토리 개요

기후변화에 대응하여 정책을 수립하고 이행하려면 온실가스 배출원 및 흡수원을 파악하고 각 배출원과 흡수원에서 배출량과 흡수량을 정확하게 산정하는 것이 매우 중요하다. 온실가스 인벤토리는 온실가스 배출량을 계산할 수 있도록 배출원을 규명하고 각 배출원에 따른 배출량을 산정할 수 있도록 하는 통계 시스템을 의미한다. 조직경계에 따라 국가, 지자체,²⁷⁾ 기업²⁸⁾ 등 다양한 단위에서 온실가스 인벤토리를 작성할 수 있다.

〈그림 2-1〉 조직 경계에 따른 온실가스 인벤토리 유형



자료: 저자 작성.

온실가스 인벤토리는 국내에서 인간 활동으로 인해 발생하고, 교토의정서에서 규정한 6대 직접 온실가스인 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)의 배출량 및 흡수량을 보고한다. 온실가스는 종류에 따라 대기 잔류 기간 동안 방열(radiative activity) 수준이

27) 지자체 인벤토리는 국가 인벤토리와 달리 지자체 간 물리적 경계를 사이에 두고 인적·물적 교류가 활발히 일어난다. 따라서 인벤토리 구축 시 지자체 관리 권한이나 구축 목적 등을 고려하여 배출량 산정 경계를 명확히 정의하는 것이 필요하다.

28) 기업 온실가스 인벤토리는 기업이 정한 조직경계 안에서 직간접적인 온실가스 배출원을 규명하고, 해당 배출원으로 인한 각각의 온실가스 배출량을 산정하여 총 온실가스 배출량을 목록화하는 인벤토리이다.

서로 달라서 배출량 수준을 파악하고 상호 비교를 하려면 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential)²⁹⁾를 사용하여 계산한 CO₂ 환산량(carbon dioxide equivalent, 이하 CO₂eq.)으로 온실가스 총배출량을 산정한다. 우리나라는 <표 2-1>에 제시된 바와 같이 IPCC 제2차 평가보고서³⁰⁾에서 제공하는 지구온난화지수를 사용하여 국가 온실가스 인벤토리 산정한다.

〈표 2-1〉 온실가스 지구온난화지수(GWP)

온실가스	화학식	지구온난화지수(GWP)
이산화탄소	CO ₂	1
메탄	CH ₄	21
아산화질소	N ₂ O	310
수소불화탄소	HFCs	140~11,700
과불화탄소	PFCs	6,500~9,200
육불화황	SF ₆	23,900

자료: IPCC(1995).

국가 온실가스 인벤토리는 기후변화에 관한 정부 간 협의체 지침(IPCC GL: Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines)에 따라 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(LULUCF: Land Use, Land-Use Change and Forestry), 폐기물 분야로 구분하여 온실가스 통계를 산정한다(그림 2-2 참조).

1.2 온실가스 인벤토리 구축 방법

온실가스 인벤토리 구축 과정은 배출량 산정기준 설정, 배출량 산정, 품질보증 및 품질관리(QA/QC: Quality Assurance and Quality Control) 체계 개발로 구분한다.

● 배출량 산정 기준 설정

배출량 산정 시 사업장의 범위를 나타내는 조직 경계를 설정하고, 온실가스 배출 유형을 나타내는 운영 경계를 설정한다(그림 2-3 참조). 여기에서 조직경계란 인위적인 온실가스 배출량의 산정 및 보고의 기준이 되는 조직의 범위를 의미한다. 조직경계를 구분하는 방법으로는 지분할당법과 통제접근법이 있다. 지분할당법은 기업이 운영상의 지분할당(소유 비율)에 따라 온실가스 배출량을 산정하는 방법이며, 통제접근법은 기업이 통제권

29) 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential): 이산화탄소가 지구온난화에 미치는 영향을 기준으로 각각의 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 수치로 표현한 것이다. 즉 이 지수는 단위 질량당 온난화 효과를 지수화한 것으로 IPCC 제2차 평가보고서(Second Assessment Report)에서 제시한 100년 기준 지구온난화지수(100-year GWPs)를 적용하고 있다.

30) IPCC(1995).

아래에 있는 운영으로부터 나오는 온실가스 배출량의 100%를 산정하는 방법으로, 통제권을 운영 통제³¹⁾와 재정통제³²⁾로 나눌 수 있다.

〈그림 2-2〉 국가 온실가스 인벤토리 공통보고 양식

참고	2018년 국가 온실가스 인벤토리(공통보고양식)						
배출·흡수원 (단위 : 백만톤 CO ₂ eq.)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆	합계
1.에너지	622.75	6.27	3.36				632.38
A. 연료연소	622.75	1.80	3.36				627.91
1. 에너지산업	285.70	0.15	1.76				287.61
2. 제조업 및 건설업	184.82	0.58	1.20				186.60
3. 수송	97.39	0.48	0.25				98.11
4. 기타	51.75	0.58	0.14				52.47
5. 미분류	3.10	0.01	0.01				3.12
B. 탈루	NE,NO	4.47	NO				4.47
1. 고체연료	NE,NO	0.34	NO				0.34
2. 석유 및 천연가스	NE,NO	4.13	NO				4.13
2.산업공정	35.17	0.60	0.36	9.30	3.18	8.37	56.97
A. 광물산업	35.01	NO	NO				35.01
B. 화학산업	0.001	0.60	0.36				0.96
C. 금속산업	0.16	IE,NA,NO	NO		NO	0.09	0.25
D. 기타산업	NA						NA
E. 할로카본 및 육불화황 생산				NO	NO	NE,NO	NO
F. 할로카본 및 육불화황 소비				9.30	3.18	8.28	20.77
4.농업		12.17	9.02				21.19
A. 장내발효		4.47					4.47
B. 가축분뇨처리		1.39	3.54				4.94
C. 비재배		6.30					6.30
D. 농경지토양			5.47				5.47
E. 사바나		NO	NO				NO
F. 작물잔사소각		0.01	0.004				0.01
5. LULUCF	-41.60	0.28	0.03				-41.29
A. 산림지	-45.60	NE,NO	NE,NO				-45.60
B. 농경지	3.98	NE,NO	0.03				4.01
C. 초지	-0.02	NE,NO	NE,NO				-0.02
D. 습지	0.04	0.28	NE,NO				0.32
E. 정주지	NE	NE	NE				NE
F. 기타토지	NE	NE	NE				NE
6.폐기물	6.81	8.64	1.64				17.09
A. 폐기물매립	NA,NO	7.83					7.83
B. 하폐수처리		0.70	1.04				1.74
C. 폐기물소각	6.81	NE	0.29				7.10
D. 기타	NA	0.11	0.31				0.42
LULUCF 제외 총배출량							727.63
LULUCF 포함 순배출량							686.35

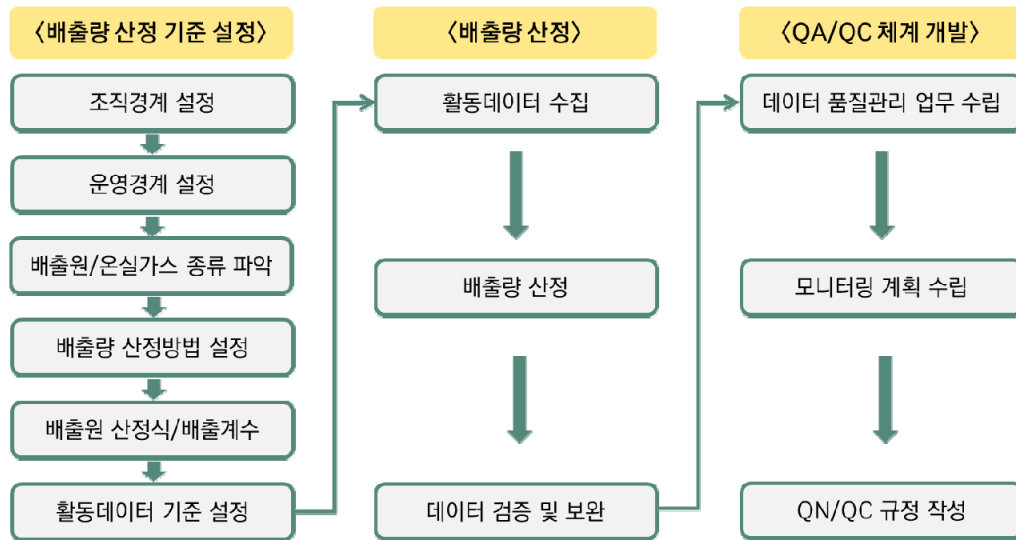
※ (NO) 배출·흡수원이 국내에 존재하지 않는 경우, (NE) 산정되지 않고 있는 배출·흡수량, (NA) 배출·흡수량이 자연과학적으로 발생하지 않는 경우, (IE) 해당 항목의 배출·흡수량이 다른 배출·흡수원 항목에서 이미 산정되고 있는 경우

자료: 환경부 온실가스종합정보센터(2019).

31) 운영 통제: 기업 혹은 종속기업 하나가 운영상의 정책 도입과 실행에 대한 모든 권리를 가지는 경우, 운영에 대한 통제권을 가진다.

32) 재정 통제: 기업 혹은 종속기업이 경영활동에서 경제적 이득에 대한 재정 운영상 정책을 이끄는 경우, 재정 통제권을 가진다.

〈그림 2-3〉 온실가스 인벤토리 구축 과정



자료: 이기원(2012), “온실가스 가스 감축을 위한 온실가스 인벤토리”, 검색일: 2022.06.08.

운영경계란 조직경계 내 배출원을 확인하고 배출 유형을 결정하는 단계를 의미한다. 이는 온실가스의 배출 특성과 활동 경계 등을 고려하여 배출원을 구분하는 것으로 인벤토리의 효율적 관리를 위해 필요하며 배출원 구분에 대한 정의와 구분은 지침에 따라 달라질 수 있다.

〈표 2-2〉 온실가스 인벤토리 운영 경계의 배출 유형 구분

세부설명	배출(흡수)시설 예시
Scope 1 (직접배출)	- 에너지의 사용과 공정 내 온실가스의 배출이 모두 조직경계 내에서 발생 예) 보일러에서 화석연료를 연소, 소화조에서 온실가스 배출
Scope 2 (간접배출)	- 에너지의 사용은 조직경계 내에서 발생하고 온실가스 배출은 밖에서 발생 예) 화력발전소에서 생산된 전력을 구매하여 사용
Scope 3 (기타 간접배출)	- 에너지의 사용과 온실가스의 배출이 모두 조직경계 밖에서 발생 예) 주요 활동을 아웃소싱하는 경우

자료: 저자 작성.

지자체의 경우 국가 온실가스 인벤토리³³⁾와는 달리 배출원별 관리 권한, 지역 외에 위치한 배출원, 간접 배출량 등에 관한 고려가 필요하다. 이에 〈그림 2-4〉에 제시된 바와 같은 다소 복잡한 조직 및 운영경계에 기반한 인벤토리 구성 체계를 가지게 된다.

33) 국가 온실가스 인벤토리는 직접배출만 고려하고 간접배출은 고려하지 않는다.

〈그림 2-4〉 지자체 기후정책 활용을 위한 인벤토리 구성

대분류	중분류	소분류
Scope1 (해당 지자체 행정구역 내에서 발생하는 직접 배출 및 흡수원)	Scope1-A (지자체 관리대상)	Scope1-A-a(직접관리)
		Scope1-A-b(간접관리)
	Scope1-B (지자체 비 관리대상)	
Scope2 (해당 지자체 행정구역 내에서 발생하는 간접 배출원)	Scope2-A (지자체 관리대상)	Scope2-A-a(직접관리)
		Scope2-A-b(간접관리)
	Scope2-B (지자체 비 관리대상)	
Scope3 (해당 지자체 행정구역 외에 위치한 지자체 관리대상 배출원)	Scope3-A(직접 배출원)	
	Scope3-B(간접 배출원)	

- 지자체 관리대상: 지자체에 관리권한이 있는 배출 및 흡수원
- 지자체 비 관리대상: 지자체에 관리권한이 없는 배출 및 흡수원
- 직접관리: 지자체에서 운영하거나 소유권이 있는 배출 및 흡수원
- 간접관리: 직접관리 대상은 아니나, 관련 정책수립 등의 대상이 될 수 있는 배출원
- 직접배출: 온실가스를 직접적으로 배출(예, 화력발전에 의한 전력 생산)
- 간접배출: 직접적인 온실가스 배출은 없으나, 이를 수반하는 인간의 활동(예, 전력의 사용)

운영경계가 설정되고 나면 온실가스 배출원과 온실가스 종류를 파악하고, 온실가스 배출량 산정방법 및 산정등급 설정, 활동자료 수집, 모니터링 수립 등의 다양한 단계를 거쳐 최종적으로 온실가스 인벤토리를 구축한다.

2 물 분야 조직 및 운영 경계 설정

2.1 물 분야 온실가스 조직경계 설정(안)

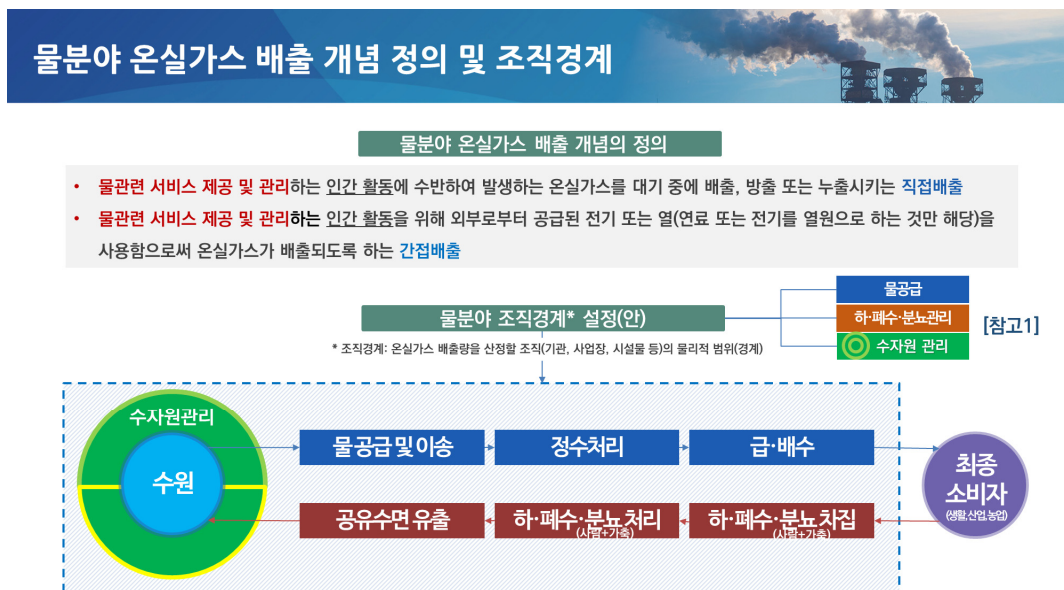
국제 지침³⁴⁾에 따라 우리나라도 온실가스 배출 분야를 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(LULUCF), 폐기물로 구분한다. 따라서 국가 온실가스 인벤토리의 구성상 물 분야가 개별 부문으로 편제되어 있지 않으며, 이에 물 분야의 온실가스 배출량은 하·폐수처리, 가축분뇨처리, 초지(하천구역), 습지(인공저수지), 에너지(상하수도시설의 전력·연료사용) 등 각 세부 분야에 혼재되어 있다.

본 연구에서는 물 분야의 온실가스 인벤토리를 구축하기 위한 조직경계를 설정하기 이전에 ‘물 분야 온실가스

34) 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC)에서 개발한 ‘국가 온실가스 인벤토리 작성 가이드라인’으로 파리협정의 모든 당사국이 국가 온실가스 배출량을 UN에 제출할 때 적용된다.

배출'의 개념을 다음과 같이 설정하였다. 물 분야 온실가스 배출이란 ① 물 관련 서비스 제공 및 관리하는 인간 활동에 수반하여 발생하는 온실가스를 대기 중에 배출, 방출 또는 누출시키는 직접배출과 ② 물 관련 서비스 제공 및 관리하는 인간 활동을 위해 외부로부터 공급된 전기 또는 열(연료 또는 전기를 열원으로 하는 것만 해당)을 사용함으로써 온실가스가 배출되도록 하는 간접배출을 의미한다.

〈그림 2-5〉 물 분야 온실가스 배출 개념 정의 및 조직 경계



자료: 저자 작성.

이에 물 분야 조직경계는 다시 세부적으로 3부분으로 나눌 수 있는데, 수원지에서 물을 취수해서 공급 및 이송, 정수처리, 급배수하여 최종 소비자까지 제공하는 물 공급관리 부문, 최종소비자가 물을 사용하고 오염물과 함께 배출하는 하·폐수분뇨(사람+가축)를 차집하고, 처리하고, 공유수면으로 유출시키는 물환경관리 부문, 그리고 수자원을 확보 및, 공급, 홍수조절 등을 위해 조성된 상수원 보호구역 및 수변구역 내 산림지를 관리하는 수자원 관리 부문으로 나누었다.

조직경계에 따른 물 분야 온실가스 배출 산정은 물공급 관리 부문의 경우 '수요자에게 생활용수, 농업용수, 공업용수 등을 공급하기 위하여 물을 취수, 집수, 정수하고 이를 수로, 배관 등 시설에 의하여 급수하는 활동하는 기관, 사업장 또는 시설물들을 대상'으로 산정한다. 물환경 관리 부문은 '하수 및 산업폐수, 사람과 가축의 분뇨를 수집, 운반, 보관 및 처리, 공유수면으로 유출 등 물환경 오염을 방지하는 활동과 하수범람으로 인한 침수피해를 예방하는 활동 기관, 사업장 또는 시설물'에 대해 산정한다. 마지막으로 수자원 관리 부문은 수자원 확보 및 공급, 홍수조절 등을 위해 조성된 구거, 유지(홍수터), 양어장과 같은 인공침수지, 물환경 보전을 위해 조성된 상수원 보호구역 및 수변구역 내 산림지에서 배출 또는 흡수되는 양을 산정한다.

〈그림 2-6〉 조직경계 설정에 따른 물 분야의 배출 산정 대상

[참고 1] 조직경계 설정에 따른 물분야의 배출산정 대상



자료: 저자 작성.

2.2 물 분야 온실가스 운영경계 설정(안)

물 분야 온실가스 운영경계는 조직경계 내 배출원을 확인하고, 배출 유형을 결정하는 단계이다. 물 분야 온실가스 배출은 직접배출(Scope 1)과 간접배출(Scope 2)로 구분하였다. 물 분야의 직접배출(Scope 1)은 ① 물 관련 서비스를 제공 및 관리를 위해 운영되는 건물과 차량 시설들의 연료 연소에 의한 직접배출, ② 하·폐수분뇨(사람+가축) 분뇨 처리 공정에서 나오는 직접배출, ③ 하천공간 또는 인공침수지에서 흡수되거나 배출되는 직접배출(흡수)을 포함한다. 물 분야의 간접배출은 물이용, 물환경 관리 시설이 운영되면서 외부로부터 구입하여 사용된 전력 또는 열을 사용하는 양을 포함한다.

〈표 2-3〉 물 분야 온실가스 운영경계 설정(안)

배출 유형 분류	온실가스 배출원	세부 설명		배출(흡수)시설 예
Scope 1 직접배출	연료연소	고정연소(기타)	가스레인지, 발전기, 보일러 등 물관리시설 관리범위 내 화석연료를 사용하는 설비의 온실가스 배출	<ul style="list-style-type: none"> - 발전용 내연기관 - 일반 보일러 시설 - 공정연소시설 - 대기오염물질 방지시설
		이동연소	원재료 공급 및 인력 수송 등을 위한 물관리시설 보유 차량 중 화석연료를 사용하는 수송수단에서 온실가스 배출	<ul style="list-style-type: none"> - 도로차량 - 비도로차량 - 선박

배출 유형 분류	온실가스 배출원	세부 설명		배출(흡수)시설 예
	처리과정	하·폐수 처리	하·폐수 처리 시 혐기성 공정에서 나오는 온실가스 배출(CH_4 , N_2O)	<ul style="list-style-type: none"> - 폐수처리시설 - 공공하수처리시설 - 분뇨처리시설 - 기타 하·폐수처리시설 - 개인하수도시설
		가축분뇨처리	소, 양, 염소, 말, 돼지, 가금류, 사슴 등 가축분뇨처리 과정에서 발생하는 온실가스 배출(N_2O)	- 가축분뇨공공처리시설
	LULUCF	하천공간	하천인접지역(수변구역, 하천구역 내 홍수터, 친수공원 등) 녹지에 의한 온실가스 흡수	- 수변구역 및 상수원 보호구역 산림지
		인공침수지	댐, 보, 제방 등 인위적 목적(간척, 위락, 발전, 용수저장 등)과 시설물에 의해 침수된 토지(구거, 유지, 양어장)에서 온실가스 배출량(CH_4)	- 인공침수지(구거, 유지, 양어장)
Scope 2	구매 전력·열	물이용시설 구매전력 및 열	취수, 송수, 가압, 정수 등 물관리 시설에서 사용되는 에너지 사용량의 간접배출	<ul style="list-style-type: none"> - 사업장 내 외부로부터 공급된 전기 사용 - 사업장 내 외부로부터 공급된 열 및 증기 사용
		하·폐수, 가축분뇨, 환경정화 처리시설 구매전력 및 열	하·폐수, 분뇨 및 가축분뇨, 환경정화 시설에서 사용되는 에너지 사용량의 간접배출	
		농업용수 관리시설 구매전력 및 열	농업용수 공급(취수, 이양, 배수 등) 농업용수 물관리시설에서 사용되는 에너지 사용량의 간접배출	

자료: 저자 작성.

3 물 분야 세부부문 온실가스 산정 방법

3.1 물 분야 온실가스 배출량 산정을 위해 활용된 자료

물 분야 온실가스 배출량 산정을 위해 활용된 자료는 <표 2-4>와 같다. 직접배출 중 처리공정에서 배출되는 직접 배출량과 LULUCF의 인공침수지의 직접 배출량은 국가 온실가스 인벤토리 자료를 그대로 활용하였고, 물이용 및 물환경 관리 시설에서 사용된 연료를 연소할 때 배출되는 직접 배출량은 산업통산자원부 전 부문 에너지 사용 및 온실가스 배출량 통계 중 36번 수도업과 37번 하수·폐수 및 분뇨 처리업의 배출량을 사용하였다. 직접배출의 LULUCF 중 수변구역 및 상수원 보호구역 내 흡수량은 IPCC GL에 따라 연구진이 산정하였다. 마지막으로, 간접배출의 경우는 36번과 37번 사업의 한국전력 전력판매량 통계를 사용하여 별도로 산정하였다.

〈표 2-4〉 물 분야 온실가스 배출량 산정 활용자료

배출 유형 분류	온실가스 배출원	활용자료	세부 자료 설명	
Scope 1 (직접배출)	직접연소	산업통상자원부 전 부문 에너지 사용 및 온실가스 배출량 통계 활용	36. 수도업 37. 하수·폐수 및 분뇨 처리업의 가수, 열, 석탄류, 기타 등의 사용을 통한 직접배출	
	처리공정	국가 온실가스 인벤토리 자료 활용	가축분뇨처리	CRF 4.B
			폐수처리	CRF 6.B.1
			공공하수처리	CRF 6.B.2
			분뇨처리	
			미처리/미차집	
	LULUCF	국가 온실가스 인벤토리 자료 활용	인공침수지 [구거, 유지(홍수터 포함), 양어장]	CRF 5.D
IPCC GL에 따라 연구진 산정		수변구역 및 상수원보호구역 내 토지이용현황도 임목지 면적		
Scope 2 (간접배출)	외부전력	한국전력 전력판매량	36. 수도업, 37. 하수·폐수 및 분뇨 처리업의 전력판매량	

자료: 저자 작성.

3.2 부문별 온실가스 산정 방법

가. 물이용 부문

물이용 부문의 온실가스 배출량은 간접배출과 직접배출로 구분하여 산정 및 조사하였다. 간접배출은 제10차 한국산업분류코드를 기준으로 수도업의 전력판매실적 및 국가승인 전력배출계수를 활용하여 추정하였다. 직접배출은 ‘2019 전부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계’(산업통상자원부, 2019)의 업종별, 에너지원별 온실가스 배출 현황 조사결과 중 수도업의 2018년 배출량 현황이다.

● 간접배출

환경부는 ‘공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침(2017)’에서 온실가스 배출량 및 에너지 사용량 산정방법을 규정하고 있다. 이 중 전기의 사용에 따른 온실가스 배출량과 에너지 사용량은 아래의 방법으로 산정한다.

온실가스 배출량($\text{tCO}_2\text{eq.}$)

$$= \sum [\text{전력사용량}(\text{MWh}) \times \text{배출계수}(\text{tGHG}(\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})/\text{MWh}) \times \text{지구온난화지수}]$$

에너지 사용량(TJ)

$$= \text{전력사용량}(\text{MWh}) \times 9 \times 10^{-3}$$

이때 전력사용량은 법정계량기 등으로 측정된 시설별 전력사용량(한국전력 등 전력공급자가 발행하고 전력사용량이 기입된 요금청구서의 전력사용량 등을 이용하여 산정)으로 정의한다.

〈표 2-5〉 2018년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수 중 전력배출계수

부문	항목	배출계수		
		계수	계숫값	단위
간접 배출량	발전단	CO ₂ 계수	0.4401	tCO ₂ /MWh
		CH ₄ 계수	0.0034	kgCH ₄ /MWh
		N ₂ O 계수	0.0082	kgN ₂ O/MWh
	소비단	CO ₂ 계수	0.4567	tCO ₂ /MWh
		CH ₄ 계수	0.0036	kgCH ₄ /MWh
		N ₂ O 계수	0.0085	kgN ₂ O/MWh

자료: 환경부 온실가스종합정보센터(2019).

배출계수는 해당연도의 국가 고유 전력배출계수를 사용하는 것으로 되어 있다. 현재는 환경부 온실가스 종합정보센터(<http://www.gir.go.kr/>)에서 국가 온실가스 배출·흡수계수를 제공하고 있다. 2018년 전력 배출계수는 〈표 2-75〉에 제시된 바와 같다. 여기에 지구온난화지수인 CO₂=1, CH₄=21, N₂O=310을 곱하여 합산한 값인 0.4594톤 CO₂eq./MWh을 환산 계수로 사용하였다. 이 전력배출계수는 해마다 달라질 수 있으나 과거의 온실가스 배출 실적은 2018년 전력배출계수를 동일하게 사용하였다. 장래 온실가스 감축량 예측의 경우 미래 배출계수를 알 수 없으므로 연구 수행 시점을 기준으로 가장 최근 자료인 2021년 국가승인 전력배출계수 0.4781톤 CO₂eq./MWh을 사용하여 추정하였다. 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 외에 온실가스를 구성하는 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs) 및 육불화황(SF₆)은 산업공정에서 전량 배출되므로 물이용 부문에서는 고려하지 않는다. 한편 「제3차 대한민국 격년갱신보고서」(대한민국정부, 2019)에 따르면 2016년 국가 전체 온실가스 배출량 중 이산화탄소가 91.9%를, 메탄이 3.7%를, 아산화질소가 2.1%를 차지하는 등 대부분의 온실가스는 이산화탄소, 메탄 및 아산화질소가 차지하고 있음을 알 수 있다.

〈표 2-6〉 한국전력공사 수도업 전력 판매량

(단위: MWh)

산업분류	2018	2019	2020
36. 수도업(중분류) - 360. 수도업(소분류)	5,444,482	5,405,323	5,397,945

자료: 한국전력공사 자료 직접 협조(2021).

한국전력공사의 산업분류코드별 판매실적 중 수도업에 대한 실적은 2018년부터 확보가 가능하며 〈표 2-6〉과 같다.

● 직접배출

산업통상자원부(2019)는 부문별 에너지 사용 및 온실가스 배출 현황 파악을 위해 전 부문(산업, 상업, 공공, 수송)에 대한 표본조사를 수행하고 전체 배출량을 예측하였다. 조사대상 기간은 2018년 1월 1일부터 2018년 12월 31일까지이며 8만 3,000여 건의 표본조사를 수행하였다. 온실가스 배출량은 1차 연소에 의한 부분으로 집계하고 있으며 2018년 국가 온실가스 배출계수 및 2006 IPCC 가이드라인 배출계수를 적용하였다.

〈표 2-7〉 2018년 수도 부문 직접배출 현황

(단위: 천톤 CO₂eq.)

합계	석유류	도시가스	열에너지
112.4	22.1	90.1	0.2

자료: 산업통상자원부, 한국에너지공단(2019).

이 결과에 따르면 제10차 한국표준산업 분류코드 중 수도업의 경우 온실가스 배출량은 〈표 2-7〉과 같으며 직접배출량은 112.4천톤 CO₂eq.임을 알 수 있다.

나. 농업 분야 전력사용 온실가스 배출량 산정

● 산정방법

전력사용으로 인한 온실가스 배출량은 부문별 전력사용량에 전력 간접배출계수를 곱하여 산정한다.

전력사용 배출량 산정식

$$\sum [\text{전력사용량 (MWh)} \times \text{배출 계수 (tGHG(CO}_2\text{/CH}_4\text{/N}_2\text{O)/MWh)} \times \text{지구온난화지수}]$$

● 활동자료

농업용수 관련 전력사용량에는 가축분뇨처리 과정과 농업용수 사용으로 인한 전력사용량이 포함된다. 한국전력에서 공표하는 시도별, 업종별 전력판매량을 사용량으로 가정하고 농업용수 관련 간접배출 계측의 활동자료로 활용한다.

가축분뇨처리의 전력사용량은 산업분류 중 '축산분뇨처리업'의 연간 가축분뇨 정화처리 전력판매량 자료를 이용하였다. 농업용수 공급에 따른 전력사용량은 계약종별 판매실적 자료 중 '농사용전력(갑)' 시도별 판매량 자료를 연도별로 합하여 활용하였다.

〈표 2-8〉 농업 분야 전력사용량 활동자료

(단위: MWh)

구분	2011	2012	2013	2014	2015
축산분뇨처리업	9,653	11,927	82,853	109,691	137,550
농사용전력(갑)	725,539	889,330	819,012	901,050	1,066,067
구분	2016	2017	2018	2019	2020
축산분뇨처리업	164,368	192,407	203,063	229,562	270,869
농사용전력(갑)	1,094,768	1,093,272	1,177,835	1,119,079	881,401

자료: 한국전력(2022).

● 배출계수

전력 간접배출계수는 한국전력거래소에서 제공하는 연도별 배출계수 중 최근 3개연도(2014~2016) 평균값을 전년도에 동일하게 적용하였다.

〈표 2-78〉 조정전력 배출계수

연도	배출계수 (톤 CO ₂ eq./MWh)
3개년 평균(2014~2016)	0.45941

자료: .

다. 물환경 부문: 가축분뇨처리 온실가스 배출량 산정

● 산정방법

가축분뇨를 처리하는 과정에서 배출되는 온실가스는 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)의 배출량을 산정한다. 배출량은 1996 IPCC GL의 Tier 1 방법을 이용하며, 활동자료와 관련 배출계수를 곱하여 산정한다. 가축분뇨처리 부문의 배출원은 IPCC GL에 따라 국내에 해당되는 축종으로 소(젖소, 한·육우), 양(면양, 산양),

말, 돼지, 닭, 오리, 사슴 등이 포함된다. 가축분뇨처리 과정에서 배출되는 CH₄와 N₂O는 아래 산정식을 각각 이용한다.

가축분뇨처리의 CH₄ 배출량 산정식

$$E_i = EF_i \times population_i \times (Gg/10^{-6}kg)$$

E_i : 가축종 i 의 CH₄ 배출량(천톤 CH₄/year)
 EF_i : 가축종 i 의 배출계수(kg CH₄/head/year)
 $population_i$: 가축종 i 의 사육두수(head)

가축분뇨처리의 N₂O 배출량 산정식

$$N_2O = \left[\sum_S \left[\sum_T (N_T \times Nex_{(T)} \times MS_{(T,S)}) \right] \times EF_{3(S)} \right] \times 44/28$$

$N_2O(mm)$: 가축분뇨처리시설의 N₂O 배출량(kg N₂O/year)
 $N_{(T)}$: 가축 종류와 분류에 따른 연간 사육두수(head)
 $Nex_{(T)}$: 축종별 분뇨로 배출하는 연평균 질소량(kg N/head/year)
 $MS_{(T,S)}$: 가축분뇨처리시설 S 의 이용비율
 $EF_{3(S)}$: 가축분뇨처리시설 S 의 아산화질소 배출계수(kg N₂O - N/kg N)
 S : 가축분뇨처리시설
 T : 가축의 종류
 $44/28$: N 을 N₂O로 전환하는 계수

가축분뇨처리 부문의 메탄 배출량은 축종별 사육두수와 축종별 배출계수를 이용하여 산정한다. 아산화질소 배출량은 축종별 연간 사육두수, 축종별 분뇨로 배출하는 연평균 질소량, 가축분뇨처리시설의 이용 비율 및 가축분뇨처리시설별 아산화질소 배출계수를 적용하여 산정한다.

● 활동자료

가축분뇨처리 부문의 배출량 산정을 위한 활동자료는 가축 사육두수로 통계청과 농림축산식품부의 통계자료를 이용하였다. 젓소, 한·육우, 돼지, 닭, 오리의 사육두수 자료는 통계청의 「가축동향조사」(통계청, 각 연도)의 분기별 자료를 이용하여 연도별 평균값을 계산하여 사용하였다. 젓소와 한·육우는 2014년부터 소이력제자료를 이용하였으며, 돼지는 2017년부터 돼지이력제자료를 활용하였다. 염소(산양), 양(면양), 사슴, 말의 사육두수는 농림축산식품부의 「농림축산식품통계연보」(농림축산식품부, 각 연도)의 연간 통계자료를 3년 평균하여 활용하였다.

〈표 2-10〉 축종별 가축 사육두수 활동자료(Population, N_m)

(단위: 천 마리)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
젖소	402	413	421	440	433	421	412	407	405
한·육우	2,982	3,063	2,998	3,091	2,946	2,942	3,015	3,086	3,202
양(면양)	4	4	3	3	3	2	2	2	2
염소(산양)	247	250	249	250	259	295	342	428	503
말	30	30	30	28	24	23	24	28	28
돼지	7,580	9,534	10,097	9,858	10,127	10,426	11,239	11,358	11,377
닭	152,895	149,750	148,883	158,987	170,543	168,642	161,208	175,962	180,907
오리	13,628	12,367	11,910	7,101	9,679	9,274	6,637	8,760	8,947
사슴	64	55	47	43	38	34	32	29	27

자료: 통계청(2009~2020), 「가축동향조사」; 농림수산식품부(2009~2013), 「농림수산식품통계연보」; 농림축산식품부(2014~2020), 「농림축산식품통계연보」.

가축분뇨처리 부문 N_2O 배출량 산정을 위한 축종별 가축분뇨처리 시설 이용 비율은 통계청의 농림어업조사(2011~2019)의 가축분뇨처리 및 분뇨수거 방법별 사육두수 마이크로데이터를 이용하여 계산하였다. 축종별 가축분뇨처리시설 이용 비율은 퇴비화처리, 액비화처리, 정화처리, 기타처리(기타 자체 처리, 위탁처리)로 구분하였다. 2015년은 신규 조사자료가 없으므로 2014년과 2016년의 시설이용 비율을 활용하여 내삽하였다. 양(면양), 염소(산양), 말, 사슴의 경우 사육시설이나 분뇨 수거시설이 없어 분뇨가 토지에 방치되므로 전량 퇴비로 활용한다고 판단하였다. 축종별 가축분뇨처리시설 이용 비율은 〈표 2-11〉에 제시된 바와 같다.

〈표 2-11〉 축종별 가축분뇨처리시설 이용 비율($MS_{(T,S)}$)

(단위: %)

분뇨 처리시설	연도	젖소	한·육우	돼지	닭	오리	기타 가축
퇴비화 시설	2011	86.84	87.04	22.60	43.60	32.90	100.00
	2014	81.27	89.11	11.46	31.36	28.45	100.00
	2017	75.16	78.86	10.82	23.06	57.76	100.00
	2018	78.35	81.48	10.93	30.43	57.31	100.00
	2019	79.52	80.98	7.51	35.69	83.89	100.00
액비화 시설	2011	0.08	0.75	28.16	0.58	0.04	0.00
	2014	0.12	0.40	31.23	4.08	8.59	0.00
	2017	0.00	0.36	13.34	0.00	0.00	0.00
	2018	0.00	0.21	11.43	0.00	0.00	0.00
	2019	0.00	0.12	26.80	0.00	0.00	0.00
정화시설	2011	2.77	0.22	5.19	1.55	0.00	0.00
	2014	0.86	0.31	9.67	0.00	0.03	0.00
	2017	0.00	0.18	12.72	2.23	0.00	0.00
	2018	0.00	0.26	11.91	2.74	0.00	0.00
	2019	0.00	0.31	14.03	0.01	0.00	0.00

분뇨 처리시설	연도	젖소	한·육우	돼지	닭	오리	기타 가축
기타 시설	2011	10.31	12.00	44.05	54.27	67.05	0.00
	2014	17.74	10.18	47.64	64.56	62.93	0.00
	2017	24.84	20.60	63.13	74.71	42.24	0.00
	2018	21.65	18.05	65.73	66.83	42.69	0.00
	2019	20.48	18.60	51.66	64.30	16.11	0.00

주: 1) 최근 3년(2017~2019) 이전 자료는 3년 단위로 제시함.

2) 기타 가축: 양(면양), 염소(산양), 말, 사슴을 포함함.

3) 기타 시설: 퇴액비화, 기타 처리, 위탁처리를 포함함.

4) 2015년은 신규조사 자료가 없으므로 2014년과 2016년 산정 비율을 이용하여 내삽함.

자료: 통계청(2012~2020), 2011~2019년 농림어업조사.

● 배출계수

가축분뇨처리 부문 CH_4 배출량 계산을 위한 배출계수는 IPCC 기본값을 이용하였다. 우리나라는 IPCC 기후조건에 따라 한대지역(cool climate region)에 속하므로 조건에 맞는 Tier 1 배출계수를 적용하였다. 젖소와 한·육우는 북미 기본값을 적용하며, 돼지는 서유럽의 기본값을 이용하였다. 닭·오리는 선진국의 배출계수를 적용하였으며 그 밖에 기타 축종은 개발도상국의 IPCC 기본값 배출계수를 적용하였다.

〈표 2-81〉 가축분뇨처리 부문 축종별 CH_4 배출계수(EF_i)

축종	배출계수 (kg CH_4 /두수/년)	배출계수 자료	배출계수 계산법
젖소	36	IPCC 기본값(북미, 한대)	IPCC, Tier 1
한·육우	1	IPCC 기본값(북미, 한대)	IPCC, Tier 1
돼지	3	IPCC 기본값(서유럽, 한대)	IPCC, Tier 1
닭·오리	0.078	IPCC 기본값(선진국, 한대)	IPCC, Tier 1
염소(산양)·사슴	0.11	IPCC 기본값(개발도상국, 한대)	IPCC, Tier 1
양(면양)	0.10	IPCC 기본값(개발도상국, 한대)	IPCC, Tier 1
말	1.09	IPCC 기본값(개발도상국, 한대)	IPCC, Tier 1

자료: IPCC(1996).

가축분뇨처리 부문의 N_2O 산정을 위한 배출계수는 축종별 분뇨로 배출하는 질소량, 가축분뇨처리시설의 아산화질소 배출계수를 이용하며, 질소(N)를 아산화질소(N_2O)로 전환하는 계수가 사용된다. 배출계수는 1996 IPCC GL의 기본값을 사용하며, 아산화질소 전환계수는 44/28를 적용하여 산정하였다.

축종별 분뇨 내 연평균 질소량에 대한 배출계수는 젖소와 한·육우의 경우 북미의 IPCC 기본값 배출계수를 적용하며, 돼지와 닭·오리는 서유럽의 배출계수를, 그 밖에 나머지 축종은 극동아시아의 기본값 배출계수를 적용하였다.

〈표 2-13〉 축종별 분뇨 내 연평균 질소량(Nex_T)

축종	분뇨 내 질소 배출량 (kg N/두수/년)	배출계수 출처
젖소	100	IPCC 기본값(북미)
한·육우	70	IPCC 기본값(북미)
돼지	20	IPCC 기본값(서유럽)
닭·오리	0.6	IPCC 기본값(서유럽)
염소(산양)·사슴·말	40	IPCC 기본값(극동아시아)
양(면양)	12	IPCC 기본값(극동아시아)

자료: IPCC(1996).

가축분뇨처리 과정에서 시설이용 부문의 N_2O 배출량 산정을 위한 배출계수는 1996 IPCC GL의 가축분뇨처리시설별 배출계수를 이용하였으며, 〈표 2-14〉에 제시된 바와 같다.

〈표 2-14〉 가축분뇨처리시설별 N_2O 배출계수($EF_{3(S)}$)

가축분뇨처리시설의 종류	배출계수 (kg N_2O -N/kg N)
퇴비화시설	0.001
액비화시설	0.02
정화시설·기타시설	0.005

주: 정화처리시설의 N_2O 배출계수가 없으므로 국가 온실가스 인벤토리에 따라 기타시설의 배출계수를 적용함.
자료: IPCC(1996).

가축분뇨처리 부문 활동자료와 배출계수로 CH_4 와 N_2O 의 배출량을 계산한 후, 배출량의 수준 파악 및 상호 비료를 위해 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential)를 적용하여 이산화탄소(CO_2)로 환산하여 배출량을 산정한다. 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 우리나라는 IPCC 제2차 평가보고서(IPCC, 1995)의 100년 기준지구온난화지수(100-year GWPs)를 사용한다³⁵⁾.

〈표 2-15〉 온실가스별 지구온난화지수(GWP)

온실가스	화학식	지구온난화지수(GWP)
이산화탄소	CO_2	1
메탄	CH_4	21
아산화질소	N_2O	310

자료: IPCC(1995).

35) 환경부 온실가스종합정보센터, 2022.

● 산정 방법

하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 산정 중 하수처리의 온실가스 배출량 산정은 하수처리 및 하수 미차집 과정에 배출되는 온실가스를 기반으로 산정한다. 하수처리장으로 유입되는 우수 및 오수 등의 하수를 처리하는 과정에서 CH₄, N₂O 등을 배출한다. 혐기성 처리 과정에서 CH₄가 발생하며 질산화와 같은 고도처리 과정에서 N₂O가 발생한다. 하수관거의 미설치 지역이나 기타 지역의 처리되지 않은 하수는 자연적인 혐기적 조건에서 CH₄를 발생시킬 수 있는데, 이러한 배출량은 미차집/미처리에서 산정할 수 있다. CO₂는 생물기원으로 배출량 산정에서 제외되며, 하수처리 후 발생하는 슬러지는 매립, 소각, 해역배출 등으로 처리되지만 하수처리 과정에서의 배출량으로 고려하지 않는다.

온실가스 배출량 산정 방법은 2006 IPCC G/L을 따르며 CH₄ 배출량은 다음 식을 기반으로 산정한다 (하수처리시설의 CH₄는 국가 배출계수를 적용함). 현재 하수처리시설의 온실가스 배출량은 CH₄만 고려하고 있으며 N₂O의 배출량도 온실가스 산정에 포함될 예정이다.

가축분뇨처리의 N₂O 배출량 산정식

$$CH_4 Emissions = \sum_{i,j} [(U_i \times T_{i,j} \times EF_j)] \times (TOW - S) \times 10^{-3} - R$$

CH ₄ Emissions	: 하수처리 시 CH ₄ 배출량, t CH ₄ /yr
U	: 해당 시설 유입 하수의 각 소득그룹별 이용 인구비율, Fraction
T	: 각 소득그룹 인구별(U) 하수처리시스템 유형별 이용률, Fraction
TOW	: 총 유기물질 부하량, kg BOD/yr
S	: 슬러지로서 제거되는 유기물질, kg BOD/yr
EF	: CH ₄ 배출계수, kg CH ₄ /kg BOD
R	: CH ₄ 회수량, t CH ₄ /yr
I	: 소득그룹(농촌, 도시 고소득, 도시 저소득)
j	: 각 처리시스템 유형(중앙집중 호기처리, 슬러지 처리, 정화조 등)

하수처리장에서의 CH₄ 산정 시 하수 및 하수 내 유기물질 양에 대한 자료를 활용하여 총 유기물질 양(TOW)을 구하고 인구 비율(U)과 인구 비율별/하수처리시스템 유형별 이용률(T)을 이용한다. 하수처리 CH₄ 배출계수(EF)는 CH₄ 최대 발생잠재량과 각 처리시스템의 CH₄ 전환계수를 기반으로 구하며, CH₄ 배출량 산정식과 같이 배출량 계산에 사용된다. 슬러지로서 제거되는 유기물질(S)과 CH₄ 회수량(R)의 기본값은 0이며 R의 경우 회수량에 자료에 있는 경우에만 고려한다.

미차집/미처리 배출량은 하수관거 미설치로 인한 방류 유기물질과 하수처리시설 내 미처리 방류 유기물질로 자연적으로 형성된 정체된/혐기적 조건에서 CH₄를 발생하는 것으로 나타낸다. 이러한 미차집/미처리는

해당하는 배출계수를 곱하여 산정하는데, 미차집 되는 하수발생량은 급수량과 하수도 보급률 등을 고려한 추정식에 의해 산정되며 미처리 하수는 처리시설의 처리 효율을 고려하여 산정된다. 미처리/미차집 부분의 배출량 산정 시 미차집은 해당 지역 인구 및 하수발생량, 하수도 보급률을 적용하여 산정하며, 미처리는 실제 처리시설이 있는 경우만 산정한다. 본 연구에서는 차집과 처리되는 배출량을 중심으로 물환경 부문 온실가스를 산정하였다.

산업폐수는 폐수처리시설에서 처리되고 산업단지 지역의 경우 종말처리시설을 통해 처리된다. 그 외 경우는 개별 처리시설에서 자체 처리된다. 산업폐수가 하수처리시설로 유입되어 처리된다면 그 배출량은 하수처리 부문에 포함되어야 한다. 산업폐수의 CH₄ 산정방법은 하수 부문과 유사하며 유기물질의 부하량에 근거하여 계산하지만 폐수 내 유기물질의 농도는 산업 유형별로 상이하여 유형에 따른 활동자료 및 배출계수를 고려하여 산정한다.

가축분뇨처리의 N₂O 배출량 산정식

$$CH_4 Emissions = \sum_{i,j} [(TOW_i - S_i) \times EF_i - R_i]$$

CH ₄ Emissions	: 폐수처리에 의한 CH ₄ 배출량, t CH ₄ /yr
TOW _i	: i 업종 폐수 내 유기물질 부하량, (t COD/yr 또는 t BOD/yr)
S _i	: 슬러지로서 제거되는 유기물질, (t COD/yr 또는 t BOD/yr)
EF _i	: 업종별 배출계수, (kg CH ₄ /kg BOD 또는 kg CH ₄ /kg BOD)
R	: CH ₄ 회수량, t CH ₄ /yr
I	: 산업 부문(화학, 전기전자, 피혁·신발, 음식료품 등)

환경부에서 발간하는 ‘산업폐수의 발생과 처리’에 유기물질 부하 발생 등에 대한 자료가 수록되어 있어 이를 참고할 수 있지만, 산업폐수 배출량 산정에 사용되는 유기물질 농도 및 발생 부하량에 대한 통계자료는 각 행정구역 내 업종별 자료를 포함하고 있지 않아 배출량 산정에 어려움이 있다. 또한 선진국이나 국내에서 폐수처리 부문의 탄소중립 및 배출량 감축에 대한 계획들이 미비한 상황이다. 본 연구에서는 하수처리시설의 탄소중립 목표를 통해 폐수처리에서 발생하는 배출량까지 상쇄할 수 있는 시나리오를 제시하여 하·폐수처리시설 부문의 탄소중립을 계획하고자 한다.

라. 수자원 관리 부문

● 하천 및 수변공간

LULUCF 부문은 2006 IPCC GL에서 제시한 여섯 가지 토지이용 분류(산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타토지)에 따라 온실가스 흡·배출량을 산정하고 있으며, 그 분류는 <표 2-16>에 제시된 바와 같다.

<표 2-16> 2006 IPCC GL상 LULUCF 부문 토지이용 범주

구분	분류 정의
5.A 산림지	목본식생으로 된 모든 토지를 포괄함. 현재 산림으로 정의할 수 있는 수준 이하의 식생이 분포하나 잠재적으로 산림으로 성장할 수 있는 경우 산림지에 포함함
5.B 농경지	경작이 가능한 토지를 포괄함. 산림지 분류에 속하기 어려운 수준의 식생이 재배되는 산림 재배지도 국가 재량에 따라 포함함
5.C 초지	농경지로 분류되지 않는 방목장과 목초지를 포괄함. 산림지로 분류할 수 있는 수준 이하의 식생이 분포하고, 관리가 없이 산림으로 성장하기 어려운 토지임
5.D 습지	산림지, 농경지, 초지, 정주지의 정의를 충족하지 않고, 연중 내내 혹은 연중 일부 기간 동안 침수되어 있는 토지임
5.E 정주지	다른 토지이용 분류에 포함되지 않는 모든 규모의 인간 거주지와 운송기반 시설 등을 포함하는 개발된 토지임. 도시 내에 속한 나무를 포함함
5.F 기타 토지	나지, 암석, 빙하를 포함하여 다른 다섯 가지 토지이용 분류에 속하지 않는 토지임

자료: IPCC(2006).

우리나라의 흡수원 중 산림지 부문의 흡수량은 -45.7백만톤 CO₂eq.으로 LULUCF 흡수 총량의 99.9%이며, 초지 부문은 0.1%, 습지 부문은 LULUCF 배출 총량의 7.9%를 차지한다(환경부, 2019). 하천공간은 2006 IPCC GL에 제시된 LULUCF 공간 정의에 따라 하천구역(하도 및 홍수터) 습지로 분류하고, 수변구역과 상수원보호구역은 산림지로 분류할 수 있다.

우리나라 지적통계(토지이용현황도)상 하도와 홍수터를 포함하는 제외지는 하천(토지이용현황도 코드 4210)으로 통합 분류되고, 2006 IPCC GL상 습지에 해당한다. 습지의 경우, 현재 국가 온실가스 인벤토리에 CH₄와 CO₂ 배출량(5.D.1 습지로 유지된 습지의 경우 CH₄ 배출량만 산정)만 산정되어 있다. 따라서 본 연구 역시 홍수터 내 임목지의 온실가스 흡수량 산정에서 제외하였다.

〈표 2-17〉 2006 IPCC GL상 LULUCF 부문 하천공간 하위범주 설정

구분	LULUCF 분류	사유	흡·배출 구분	토지이용현황도 코드 분류
하천(하도)	5.D 습지	상시 유수가 존재하는 토지로 습지 중 침수지로 구분	배출원(농경지, 하·폐수 부문에서 산정됨)	4210 하천
홍수터	5.D 습지	하도 범람 시 유수가 존재하는 토지로 습지 중 침수지로 구분	흡수원(산정되고 있지 않음)	4210 하천
상수원보호구역	5.A 산림지	현재 혹은 잠재적으로 목본식생이 성장하거나 성장 가능한 토지로 산림지로 구분	흡수원(산림지 부문 임목 바이오매스에서 산정됨)	2210 침엽수림 2220 활엽수림 2230 혼합수림
수변구역	5.A 산림지	현재 혹은 잠재적으로 목본식생이 성장하거나 성장 가능한 토지로 산림지로 구분	흡수원(산림지 부문 임목 바이오매스에서 산정됨)	2210 침엽수림 2220 활엽수림 2230 혼합수림

자료: IPCC(2006)를 바탕으로 저자 작성.

산림 부문 온실가스 흡수량(5.A.1 산림지로 유지된 산림지, 5.A.2 타 토지에서 전용된 산림지)은 산림지의 임목 바이오매스의 탄소 축적량을 이산화탄소량으로 환산한 것으로서, 2006 IPCC GL Tier 2를 산정원칙으로 한다. 다음 식을 이용하여 수변구역·상수원보호구역 내 임목지에 의한 온실가스 흡수량을 산정하였다.

수변구역·상수원 보호구역 내 임목지에 의한 온실가스 흡수량

$$C = \sum_{ij} [A_{ij} \times V_{i,j} \times BCEF_{i,j}] \times (1 + R_{i,j}) \times CF_{i,j}$$

C : 현존 바이오매스 탄소저장량

A : 산림면적

V : 단위면적당 재적

$BCEF$: 바이오매스 전환확장계수

R : 뿌리-지상부 비율

CF : 탄소전환계수

i : 임상 유형, j : 기후

여기서 대상 수종의 면적, 임상별 재적 증가량, 바이오매스 전환 및 확장계수, 뿌리-지상부 비율 및 탄소전환계수를 곱하여 1년간 수종별 탄소흡수량을 계산할 수 있다. 국가 온실가스 인벤토리에서 산림지 부문은 수종별 국가 고유 배출·흡수계수와 해당 수종의 면적을 이용하여 산림지의 온실가스 흡수량을 계산하고 있다.

따라서 본 연구에서는 산림청 임상도의 수종과 임령 정보를 바탕으로 수변구역과 상수원보호구역 내 수종(침엽수, 활엽수, 혼효림)·임령별 산림지 면적을 계산하고, 산출된 면적에 산림청의 ‘주요 산림수종의 표준 탄소흡수량(ver. 1.2)’에서 제시된 수종 및 임령별 국가 고유 흡수계수를 곱하여 온실가스 흡수량을 산정하였다.

혼효림의 경우, 국가 고유 배출계수가 부재하여 국가 온실가스 인벤토리와 동일하게 침엽수와 활엽수가 각각 50%씩 분포하는 것으로 가정하여 계산하였으며, 국가 고유 흡수계수가 부재한 임령의 흡수계수는 주변 임령값을 보간하여 흡수량 산정에 이용하였다.

〈표 2-18〉 주요 수종별 흡수계수 (단위: 톤 CO₂eq./ha/년)

수종	임령												
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
강원지방 소나무	7.5	9.6	10.1	10	9.6	9	8.2	7.5	6.7	6	5.4	4.7	4.2
충부지방 소나무	3.5	5.2	6.9	15.8	12.4	9	6.4	4.6	3.3	2.4	1.8	1.4	1.1
잣나무	5.4	10.6	11.8	11.6	10.8	9.9	9.1	8.3	7.6	7	6.5	6.1	5.7
낙엽송	9.1	9.4	10.5	10	9.5	8.9	8.5	8.1	7.9	7.6	7.5	7.3	7.2
리기다 소나무	4.5	10.5	13.9	13.8	12.4	10.5	8.7	7.1	5.8	4.8	4.1	3.5	3.1
편백	5.2	8	8.8	8.8	8.2	7.4	6.6	5.8	5.2	4.6	4.1	3.7	3.4
상수리 나무	11.2	13.1	15.9	14.9	14	13.1	12.3	11.6	10.9	10.4	9.8	9.3	8.9
신갈나무	8.6	11.9	15	11.8	9.3	9.1	8.4	7.9	7.5	7.1	6.8	6.5	6.3

자료: 국립산림과학원(2019).

● 인공침수지

2006 IPCC GL에서 5.D 습지는 배출원으로 분류되며, 관리되는 이탄지(managed peatlands)와 침수지(flooded land)를 포함한다. 우리나라 국가 온실가스 인벤토리는 침수지를 하천, 구거, 유지, 양어장으로 구분하고 인공침수지(구거, 유지, 양어장)의 CH₄ 배출량(국가 온실가스 인벤토리상 습지로 유지된 습지)에 대해 2006 IPCC GL Tier 1에 준하는 다음 식을 이용하여 산정하고 있다.

인공침수지 CH₄ 배출량 산정식

$$CH_4 = P \times E(CH_4)_{diff} \times A_{flood},$$

인공침수지 온실가스 배출량은 담수 이후 10년 동안 토양탄소 분해로 인해 실제적으로 발생하는 온실가스 배출량을 산정하는 것으로, 본 연구에서는 우리나라 국가 온실가스 인벤토리에서 제시한 방법과 동일하게 2006 IPCC GL에 제시된 난온대 습윤지역에 해당하는 확산 CH₄ 배출계수, 연도별 비결빙일수, 지적통계상 구거, 유지, 양어장 면적을 이용하여 온실가스 배출량을 산정하였다.

제2절

물 분야 온실가스 배출 현황(2018년)

1

2018년 기준 물 분야 국가 온실가스 배출 현황

국가 내 물 분야의 2018년 총배출량은 총 12.87백만톤 CO₂eq.(국가 배출량의 1.77%)이며, 수변구역 및 습지 등 LULUCF 탄소흡수/배출원을 고려하면 순배출량은 11.49백만톤 CO₂eq.이다.

〈표 2-19〉 물 분야 국가 온실가스 배출 현황(2018년)

물서비스/관리		배출활동	배출량/흡수량 (백만톤 CO ₂ eq)	비율(%)
부문	세부분문			
물공급 관리	생활·공업용수	연소배출	0.11	0.9
		전력사용	2.50	19.4
	농업용수	전력사용	0.54	4.2
물환경 관리	하·폐수·분뇨처리	연소배출	0.02	0.1
		처리공정	1.87	14.5
		전력사용	2.80	21.8
	가축분뇨처리	처리공정	4.94	38.4
		전력사용	0.09	0.7
수자원 관리	수자원 확보·공급, 홍수조절	습지 (인공침수지)	0.28	-
	수자원 수질 확보	산림지 (수변구역·상수원보호구역)	-1.56	-
물관리 부문 총배출량(218 LULUCF 미포함)			12.87 (‘18년 국가 전체 온실가스 총배출량(727.6)의 1.77%)	100.0
물관리 부문 순 배출량(‘18 LULUCF 포함)			11.59 (‘18년 국가 전체 온실가스 순 배출량(685)의 1.69%)	-

자료: 저자 작성.

1.1 물공급

2018년 배출량은 3.15백만톤으로, 유류 사용에 따른 직접 배출량 0.11백만톤(3.6%)과 전력사용에 따른 간접 배출량 3.04백만톤(96.4%)으로 구분한다. 직접배출보다는 간접배출이 압도적으로 높으며, 간접배출에서 생활공업 용수공급이 2.5백만톤(82.2%), 농업 용수공급에서 0.54백만톤(17.8%)이다.

1.2 물환경 관리

2018년 배출량은 9.72백만톤으로, 처리공정 등 직접 배출량 6.82백만톤(70.2%)과 전력사용에 따른 간접 배출량 2.90백만톤(29.8%)으로 구분한다. 직접배출의 경우에는 가축분뇨처리(72.4%) > 하·폐수·분뇨 처리(27.6%), 간접배출의 경우에는 하수폐수분뇨 처리(96.8%) > 가축분뇨처리(3.2%)이다.

1.3 수자원 관리

수자원 사용 및 보호를 위해 조성된 LULUCF의 2018년 순흡수량은 -1.28백만톤으로 습지(하천, 구거, 유지, 양어장 등)에 따른 직접 배출량 0.28백만톤과 하천주변 임목에 따른 흡수량은 -1.56백만톤이다. 배출량 0.28백만톤은 유지에서 55.3%, 구거에서 44%, 양어장에서 0.7%를 차지하며, 흡수량 -1.56백만톤은 수변구역(50.9%), 상수원 보호구역에서 49.1%를 차지한다.

1.4 상하수도시설 전력소비와 하·폐수가축분뇨처리가 주요 배출원

물환경 관리를 위한 하·폐수가축분뇨 시설에서 대부분의 온실가스가 배출(75.5%)되며, 생·농·공 물이용 공급에 따른 배출이 나머지를 차지한다.

물 분야의 직접배출(53.9%)과 간접배출(46.1%) 비율은 대동소이하며 물 분야 주요 배출량의 저감을 위해 공정처리 시 직접 배출량 삭감뿐만 아니라 물관리 기초시설 에너지 효율화도 집중적으로 필요함을 알 수 있다.

부처의 관리 담당으로 보았을 때 환경부의 관리 관할 배출량은 56.7%이고, 농림축산식품부의 관리 관할 배출량은 43.3%이다. 이로 미루어 물 분야 온실가스 배출 관리에 두 부처의 온실가스 감축에 대한 의지와 이행이 물 분야의 탄소중립에 크게 기여할 것으로 판단된다.

마지막으로, 물수요 관리, 유기성 바이오가스 사업, 식생대 조성 등 물관리와 탄소관리 모두에 편익을 주는 고평익 탄소감축 사업의 집중 확대가 필요하다. 아울러 탄소중립 달성을 위해 신재생에너지 발전 사업과 탄소흡수원 확충 등을 통해 잔여 배출량을 상쇄할 필요가 있다.

아래에서는 각 부문의 온실가스 배출 산정 결과에 대해서 자세히 설명한다.

2 물이용 부문

2.1 생·공업수

물이용 과정 중 생활용수 및 공업용수를 공급하는 과정에서 배출되는 온실가스는 두 가지 자료를 활용하여 추정할 수 있다. 먼저 한국전력공사의 해당 부문(수도업)에 대한 총 전력판매량을 기준으로 추정하는 방법이 있으며, 다음으로는 취수, 정수 및 가압장 등 물공급 시설의 전력사용량을 조사하여 분석하는 방법이 있다. 환경부 상수도통계에서 확인할 수 있는 단위 시설별 전력사용량은 대상 시설물을 모두 포함하지 않는 경우 혹은 연도별로 동일 시설에 대한 편차가 큰 경우 등이 발생할 수 있다.

〈표 2-20〉 2018년 생활공업용수 부문 온실가스 배출량

구분	자료출처	전력사용량 (MWh)	온실가스배출량 (천톤 CO ₂ eq.)	비고
간접 배출	환경부	3,198,794	1,585	상수도통계(전력사용량 자료)
	산업통상자원부	-	1,591	에너지사용 및 온실가스 배출량 통계
	한국전력공사	5,444,482	2,501	총 전력판매량(①)
직접 배출	산업통상자원부	-	112	에너지사용 및 온실가스 배출량 통계
계	-	-	2,613	간접배출(①)+직접배출

자료: 저자 작성.

전력 판매량은 정확한 계량이 이루어지므로 본 연구에서는 두 가지 방법 모두를 사용하여 산정하고 비교하되, 총 전력판매량을 기반으로 추정한 온실가스 배출량인 2,501천톤 CO₂eq.를 결과로 선택하였다. 자료 출처별 2018년 온실가스 배출량은 〈표 2-93〉에 제시된 바와 같다.

2.2 농업용수

농업용수 이용에 따른 온실가스 배출량은 한국전력통계의 농사용(갑) 자료와 2014~2016년 조정전력 배출계수의 평균값을 이용하여 계측하였다. 농업용수 이용으로 인한 2018년 온실가스 배출량은 0.541백만톤 CO₂eq.으로 나타났다.

3 물환경 부문

3.1 가축분뇨처리

가축분뇨처리 부문에서 배출되는 온실가스는 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)이다. 2018년 기준 가축분뇨처리 관련 온실가스 배출량은 5.03백만톤 CO₂eq.이다. 이 중 가축분뇨처리 과정의 온실가스 배출량은 약 4.94백만톤 CO₂eq.이며, 처리시설의 전력사용으로 인한 분뇨처리 전력은 2018년 기준 0.093백만톤 CO₂eq.으로 나타났다. 가축분뇨처리 과정에서 발생하는 온실가스 중 메탄 배출량이 약 1.39백만톤 CO₂eq.이며, 아산화질소 배출량이 약 3.54백만톤 CO₂eq.으로 나타났다.

〈표 2-21〉 2018년 가축분뇨처리 축종별 배출량

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

구분	소	양 (면양)	염소 (산양)	말	돼지	가금류	사슴	합계
CH ₄	0.37	0.000	0.001	0.001	0.72	0.30	0.000	1.39
N ₂ O	2.14	0.000	0.17	0.01	0.68	0.52	0.01	3.54
합계	2.52	0.00	0.17	0.01	1.40	0.83	0.01	4.94

주: 1) 축종별 배출량 자료는 소수점 셋째 자리에서 반올림함.

2) 소는 젖소와 한육우 배출량의 합, 가금류는 닭과 오리 배출량의 합임.

3) 양(면양), 염소(산양), 말, 사슴의 메탄 배출량은 다른 축종에 비해 적기 때문에 소수점 셋째 자리까지 명시함.

자료: 환경부 온실가스종합정보센터(2022).

3.2 하·폐수 및 분뇨처리

2018년 국가 하·폐수처리시설 메탄(CH₄) 온실가스 발생량은 1,741천톤 CO₂eq.³⁶⁾으로 산출되며, 하수처리시설 전력(6,104GWh/년) 사용에 의한 간접 온실가스 배출량은 2,804천톤 CO₂eq.³⁷⁾이다. 지자체별 하·폐수처리시설 배출량은 2001년, 2010년, 2019년(가장 최근 통계)과 같이 10년 단위로 구분하여 비교하면 서울과 경기도 계속적으로 높은 배출량을 나타내는 반면 부산 및 대구 등은 약간씩 감소하는 경향을 보인다.

우리나라 하수처리시설은 총 4,111개소(2018년 기준)이며, 시설용량이 500m³/일 이상인 시설은 671개소로 전체시설의 16.3%에 불과하지만 유입하수량 기준으로는 99.0%를 차지하여 거의 모든 하수처리를 담당하고 있다. ‘2018 하수도 통계’를 기반으로 유입하수량, BOB 부하량, 시설용량, 시설수를 500m³/일 미만 및 500m³/일 이상으로 구분하면 〈표 2-22〉에 제시된 바와 같다.

36) 공공하수처리 메탄(CH₄) 배출량 산정식은 CH₄ 배출량(tCH₄/yr) = {배출계수(tCH₄/tBOD) × 활동자료(tBOD/yr)} - 회수량(tCH₄/yr)와 같으며, 물리적처리(0.01532), 생물학적처리(0.018), 고도처리(0.0071)를 적용하였다.

37) 배출계수는 0.45941(kgCO₂/kWh)을 적용하였다.

〈표 2-22〉 우리나라 하수처리시설 현황

구분	유입하수량 (m ³ /일)	BOD 부하량 (kg/일)	시설용량 (m ³ /일)	시설수 (개소)
500m ³ /일 미만	236,349	26,015	277,670	3,440
500m ³ /일 이상	20,702,187	3,290,787	25,845,900	671
합계	20,906,964	3,316,801	26,123,570	4,111

자료: 저자 작성.

공공하수처리시설의 시설용량별 에너지원은 500m³/일~1만m³/일 시설용량의 경우 주로 태양광을 활용하여 에너지를 생산하고, 1만m³/일 이상 시설용량의 경우 바이오에너지(소화가스) 약 83%, 태양광 7% 등을 이용하여 에너지를 생산한다. 또한 5만m³/일 이상 시설용량에서 혐기성 소화조가 가스 발생량이 가장 높아 가스 자체 활용(약 50%)이 높은 것으로 확인되었다. 자세한 탄소배출 관련 내용은 제4장에서 확인할 수 있다.

4 수자원 관리 부문

4.1 수변구역·상수원보호구역 내 임목지

수변구역은 상수원 수질 보호를 위해 댐과 그 댐 상류지역의 일정한 구역을 지정하여 오염원의 신규 입지를 규제하는 제도이다. 녹지를 조성하여 강우유출을 통해 주거지역, 상업지역, 농경지, 지류 등에 축적된 오염물질이 하천에 직접 유입되기 이전에 수변녹지가 완충(buffer)작용을 하여 오염물질을 자연 정화하는 등 하천 유입 수질 개선을 도모하는 역할을 한다. 수변구역의 지정은 <표 2-23>에 제시된 바와 같이 4대강수계법에 따라 상이하며, 상수원보호구역, 개발제한구역, 군사기지 및 군사시설 보호구역, 하수처리구역, 도시지역, 지구단위계획구역과 그 밖에 대통령령으로 정하는 지역은 수변구역에서 제외된다.

<표 2-23> 4대강 수계별 수변구역 지정 범위 및 면적

(단위: km²)

구분	대상 호소 및 하천	지정 범위(너비기준)	면적
한강	팔당호, 남한강, 북한강, 경안천	특별대책지역 내에는 당해 하천 및 호소 경계로부터 양안 1km, 특별대책지역 외에는 500m	186.9
낙동강	상수원댐, 상수원댐 유입하천	하천 및 호소 경계로부터 양안 500m	329.6
금강	상수원댐, 금강본류, 금강본류 직접 유입하천	상수원댐과 특별대책지역 안은 금강 본류의 경계로부터 1km, 그 외 금강 본류는 500m, 금강 본류에 직접 유입되는 하천은 300m	372.8
영산강·섬진강	주암호, 동북호, 상사호, 수어호, 상수원댐, 상수원댐 유입하천	하천 및 호소 경계로부터 양안 500m	299.4

자료: 김준성(2021)

상수원보호구역은 상수원의 확보와 수질 보전을 위해 필요하다고 인정되는 지역을 의미한다. 1961년에 도입된 상수원보호구역제도는 도시화에 따른 오염발생원으로부터 음용수의 안정성을 확보하는 역할을 한다. 상수원보호구역의 지정은 <표 2-24>에 제시된 바와 같이 상수원관리규칙에 따라 취수원별로 상이하며, 향후 10년 이내 오염의 우려와 개발가능성이 없다고 인정되는 지역, 지질/지층 구조상 수질오염의 우려가 없다고 인정되는 지역, 공업용수로서 이용에 지장이 없다고 인정되는 지역, 도시지역의 상수원 주변지역으로 하수도 정비에 의해 오염물질이 상수원으로 흘러가지 않는 지역인 경우에는 보호구역으로 지정할 수 없다.

〈표 2-24〉 전국 상수원보호구역 지정 범위

구분	지정기준
하천수·복류수	취수지점을 기준으로 유하거리 4km가 표준거리 (표준거리가감 기준 평정표에 따라 표준거리를 가감할 수 있음)
호소수	상수원전용댐, 1일 취수량 10만톤 이상의 상수원 등 표준거리의 산정 기점이 호소의 만수위선(대부분은 하천수·복류수 지정 기준을 따름)
지하수·강변여과수	취수 지점을 기점으로 지하수는 반경 200m, 강변여과수는 유하거리 2km가 표준거리

자료: 국가법령정보센터, “수도법”, 검색일: 2022.08.02.

〈표 2-25〉 전국 상수원보호구역 면적

(단위: km²)

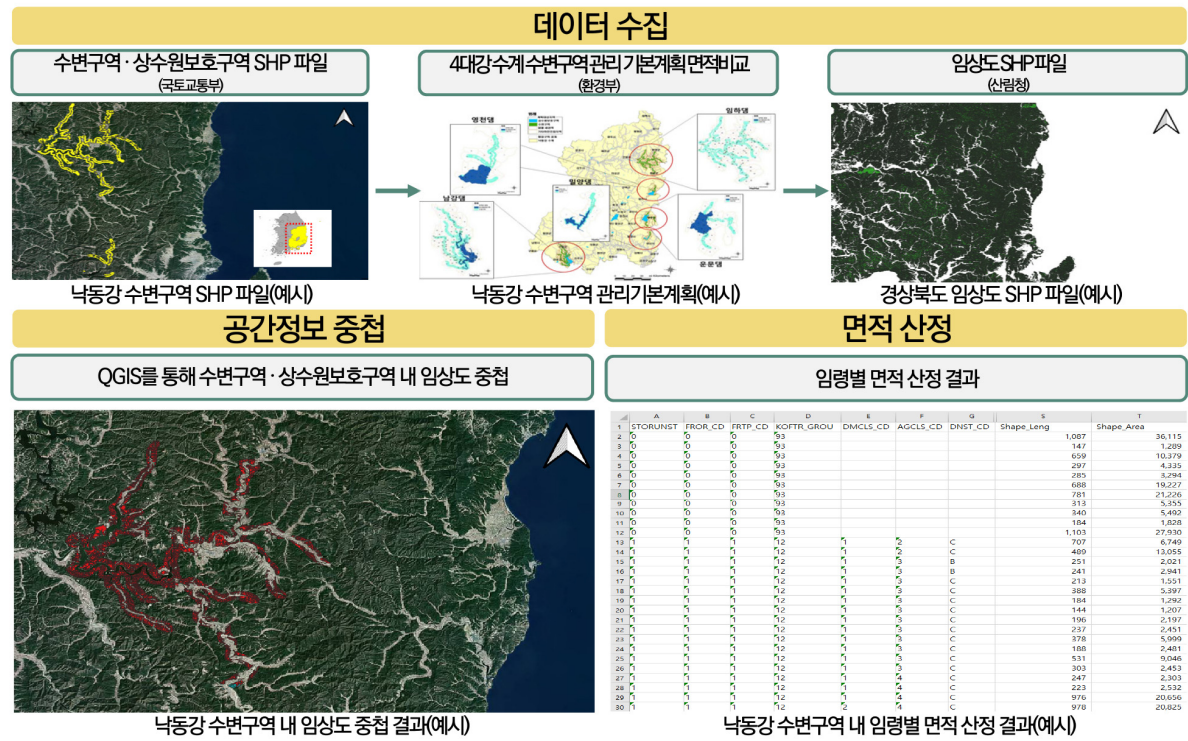
지역	상수원 면적
서울	6.5
경기	190.2
부산	88.5
대구	47.7
인천	-
광주	27.0
대전	77.7
울산	11.1
강원	95.7
충북	187.8
충남	5.5
전북	25.6
전남	184.4
경북	138.0
경남	358.2
제주	1.8
전체	1,445.5

자료: 환경부, “상수원보호구역 지정현황” 자료를 바탕으로 저자 작성. 검색일: 2022.08.02.

4대강 수계별 수변구역과 전국 상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적을 산정하는 방법은 다음과 같다. 총 세 가지 단계로 데이터 수집, 공간정보 중첩, 면적 산정의 순으로 이루어진다. 우선 국가공간정보포털에서 수변구역, 상수원보호구역 공간정보데이터를 수집하여 4대강 수계별 수변구역 관리 기본계획, 상수원보호구역 지정 현황과 비교한 후 데이터를 사용한다. 이후 GIS분석을 통해 산림청의 임상도(1:5000) 자료와 중첩하여

수변구역 및 상수원보호구역 내 임령별 면적을 산정한다. 수종은 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분되고
임상도 속성 중 하나인 영급은 산림의 임령으로 1~9영급으로 분류된다.

〈그림 2-7〉 수변구역·상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적 산정 방법론



자료: 저자 작성.

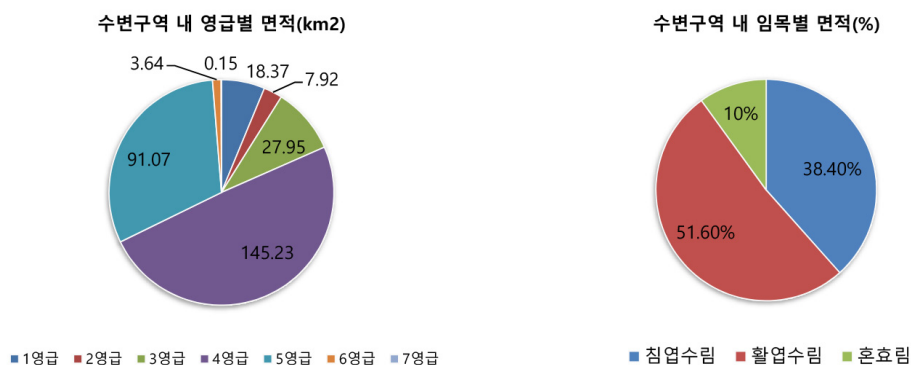
〈표 2-26〉 임상도 속성(영급) 정보

구분	내용
1영급	1~10년생의 수관점유 비율이 50% 이상
2영급	11~20년생의 수관점유 비율이 50% 이상
3영급	21~30년생의 수관점유 비율이 50% 이상
4영급	31~40년생의 수관점유 비율이 50% 이상
5영급	41~50년생의 수관점유 비율이 50% 이상
6영급	51~60년생의 수관점유 비율이 50% 이상
7영급	61~70년생의 수관점유 비율이 50% 이상
8영급	71~80년생의 수관점유 비율이 50% 이상
9영급	81년생 이상의 수관점유 비율이 50% 이상

자료: 국립산림과학원(2019).

전국 수변구역 내 수종 및 임령별 면적을 산정한 결과, 임목지 면적은 약 768km²로 나타났고 금강(39.8%), 영산강·섬진강(21.2%), 낙동강(20.6%), 한강(18.4%)의 순으로 면적이 크게 나타났다. 그중 4영급(31~40년생)과 5영급(41~50년생)의 면적 합이 전체의 약 76%를 차지하였고 침엽수, 활엽수, 혼효림 면적은 각각 전체의 약 38.4%, 51.6%, 10%로 분석되었다.

〈그림 2-8〉 수변구역 내 수종 및 임령별 면적 비



〈표 2-27〉 수변구역 내 수종 및 임령별 면적 산정 결과

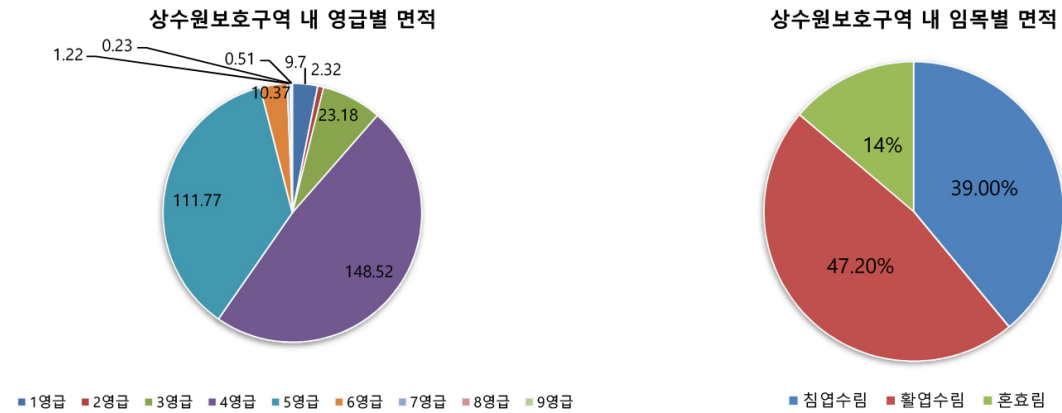
(단위: km²)

구분	면적(km ²)		
	침엽수	활엽수	혼효림
1영급	18.37	30.70	5.33
2영급	7.92	21.82	2.07
3영급	27.95	67.91	7.71
4영급	145.23	213.72	45.80
5영급	91.07	93.60	15.22
6영급	3.64	3.41	0.31
7영급	0.15	0.01	0.00
8영급	0.00	0.00	0.00
9영급	0.00	0.02	0.01
전체	294.3	431.2	76.4
흡수량(백만톤 CO ₂ eq.)	0.245	0.476	0.075

자료: 저자 작성.

전국 상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적을 산정한 결과, 임목지 면적은 약 796.4km²로 나타났고 경상남도(24.6%), 전라남도(21%), 충청북도(13.8%)의 순으로 면적이 컸으며 인천(0%), 서울(0%), 강원(0.1%)의 순으로 면적이 작게 나타났다. 그중 4영급(31~40년생)과 5영급(41~50년생) 면적 합이 전체의 약 83%를 차지하였고 침엽수, 활엽수, 혼효림 면적은 각각 전체의 약 39%, 47.2%, 13.8%로 분석되었다.

〈그림 2-9〉 상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적 비



〈표 2-28〉 상수원보호구역 내 수종 및 임령별 면적 산정 결과

(단위: km²)

구분	면적		
	침엽수	활엽수	혼효림
1영급	9.70	9.84	1.44
2영급	5.32	6.61	0.76
3영급	23.18	34.96	10.98
4영급	148.52	195.71	59.16
5영급	111.77	111.72	35.26
6영급	10.37	17.03	1.84
7영급	1.22	0.22	0.05
8영급	0.23	0.00	0.00
9영급	0.51	0.00	0.00
전체	310.8	376.1	109.5
흡수량(백만톤 CO ₂ eq.)	0.255	0.405	0.106

자료: 저자 작성.

위의 GIS분석을 통해 취득된 수종 및 임령별 면적을 이용하여 온실가스 흡수량을 계산하였고, 산정한 결과 수변구역과 상수원보호구역 내 임목지의 온실가스 흡수량은 각각 0.795백만톤 CO₂eq., 0.766백만톤 CO₂eq.으로 총량은 1.56백만톤 CO₂eq.으로 최종 산정되었다. 여기서 면적에 곱해진 흡수계수는 산림청 국가고유계수 자료에 기반하여 침엽수의 경우 6개 침엽수종의 평균값, 활엽수의 경우 2개 활엽수종의 평균값, 혼효림은 전체 8개 수종의 평균값을 이용하였다.

4.2 인공침수지

인공침수지는 구거, 유지, 양어장의 CH₄ 발생을 대상으로 온실가스 배출량을 추정하였으며, 이는 우리나라 지적통계상 해당 지목 면적에 기반함에 따라 국가 온실가스 인벤토리 보고서상 수치와 동일한 0.28백만톤 CO₂eq.의 온실가스 배출량이 산정되었다. 또한 국가 온실가스 인벤토리와 마찬가지로 인공침수지에서의 CO₂ 및 N₂O 배출량은 2006 IPCC GL에 산정방법이 제시되어 있지 않기 때문에 본 연구에서도 배출량 산정에서 제외하였다.

물 분야 2050

탄소중립 이행을 위한
로드맵 구축 연구



03

SECTION

물 분야 2050 탄소중립 시나리오 구축 방법

제1절 시나리오 개념 및 국내외 관련 시나리오 분석

제2절 물 분야 탄소중립 시나리오 구축 방안

제1절

시나리오 개념 및 국내외 관련 시나리오 분석

1

시나리오의 개념 및 의의

2050 탄소중립 시나리오는 탄소중립이 실현되었을 때의 우리 사회 미래상과 부문별 전환 내용을 구체화한 작업으로, 시나리오를 통해 사회 각 부문의 세부적인 정책 방향과 전환 속도 등을 가늠할 수 있다. 시나리오를 수립할 때 탄소중립을 위한 기술 혁신 및 상용화, 국민 인식 및 생활양식의 변화를 전제로 하고, 경제적 부담과 편익, 식량·에너지 안보, 국제사회에서의 역사적 책임 등을 종합적으로 고려해야 한다.

시나리오는 여러 가지 전제에 따른 미래의 불확실성을 구조화하고 이를 대비하기 위한 전략적 예측을 기반으로 계획을 세우는 방법으로 미래를 예견(forecasting)하는 것이 아니므로 법적 구속성이 없다. 더 잠재적인 미래의 발전이라는 관점에서 현재의 정책 수립 및 의사결정 시 고려할 수 있는 수단을 다양하게 제공하는 정책적 도구라고 할 수 있다.

시나리오는 단일 시나리오 분석으로는 미래의 불확실성을 대응하기 어렵기 때문에 둘 이상의 다양한 미래 가능성을 제시하는 복수 시나리오를 사용한다. 시나리오별로 상이한 발전 경로에 따라 특정 정책 및 전략적 대응의 건전성을 검증할 수 있기 때문에 시나리오는 효과적인 전략을 예측하는 역할을 한다.

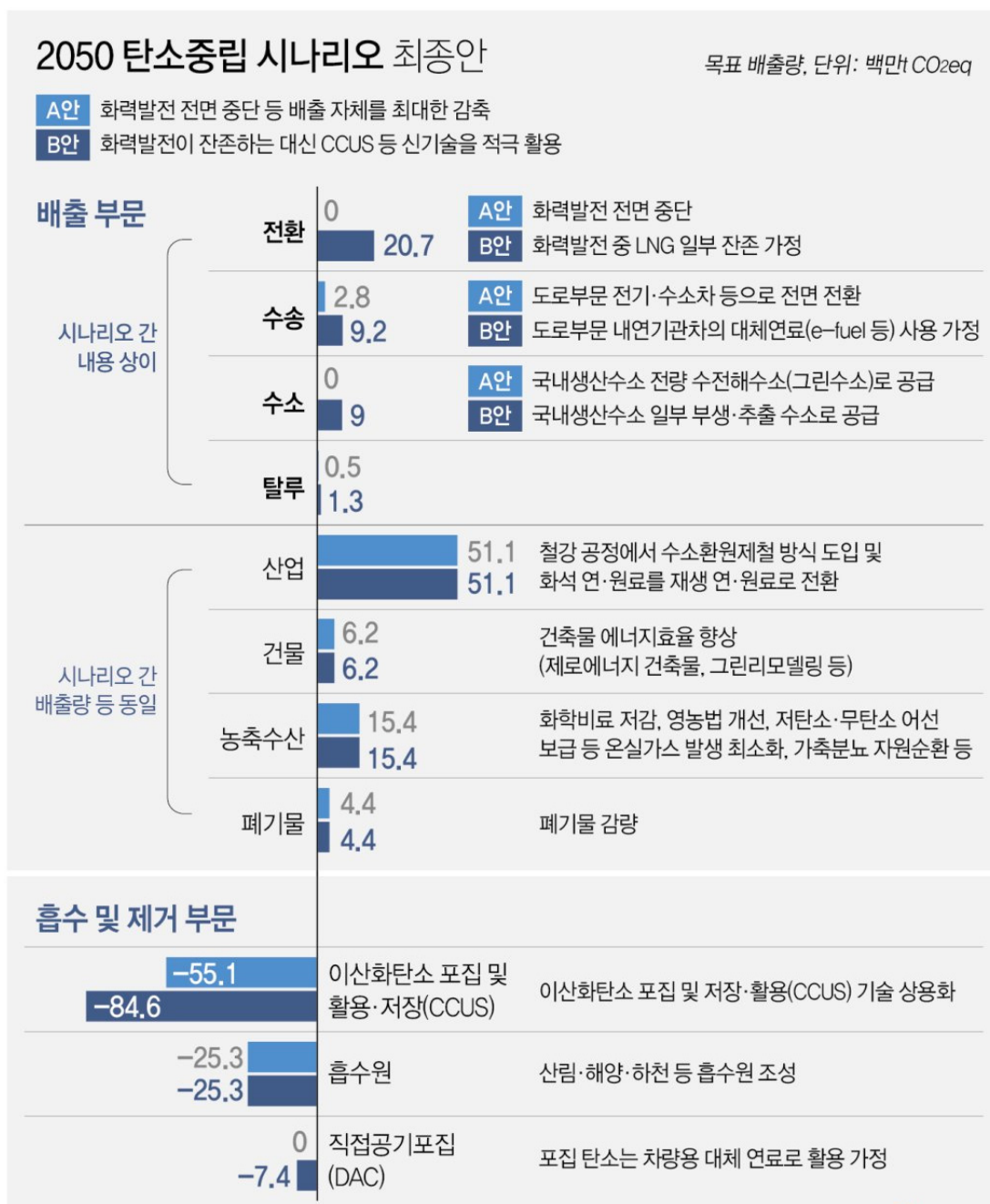
2

국가 2050 탄소중립 시나리오 분석

대한민국 2050 탄소중립 시나리오는 2050년 탄소중립 선언 및 후속 대응으로 2050 시나리오 수립이 추진되었다. ‘기후위기로부터 안전하고 지속가능한 탄소중립 사회’를 비전으로 제시하고 책임성, 포용성, 공정성, 합리성, 혁신성 등 다섯 가지 원칙에 기반하여 수립하였다.

국가 2050 탄소중립 시나리오는 2개 안으로 제시되었는데, A안은 화력발전 전면 중단(단 산업단지 및 가정 공공 열 공급열 LNG는 유지, 산업건물 부문에서 각각 배출량 포함) 등 배출 자체를 최대한 줄이는 것이다. B안의 경우 화력발전이 잔존하는 대신 CCUS 등 제거기술을 적극 활용하는 안으로, 화력발전을 일부 유지(석탄발전 중단, LNG 발전은 유연성 전원으로 활용)해 배출량을 잔존시킨다는 것이다.

〈그림 3-1〉 2050 탄소중립 시나리오 A안과 B안의 비교



탄소중립 시나리오에서는 물 분야와 관련되어 하천 등에 흡수원을 조성하는 내용이 포함되어 있고, A안과 B안에 들어간 내용도 다르지 않다.

국가 탄소중립 시나리오에서도 물 분야는 따로 다루지 않기 때문에, 탄소중립 시대의 물 분야 비전 또는 세부적인 정책 방향과 속도를 가늠할 수가 없다.

3 UK 물 분야 탄소중립 시나리오 사례 분석

영국은 2019년 기후변화위원회에서 2050년 탄소중립을 위한 세 가지 시나리오를 제시하였고, 2020년에는 제6차 탄소 예산에서 순배출량을 0으로 하는 다섯 가지 시나리오를 제시하였다. 각 시나리오는 저탄소 기술 발달 정도, 생활방식의 변화 정도, 탄소 포집 및 저장(CCS: Carbon Capture and Storage) 인프라 의존도 등에서 차이를 보인다.

물관리 서비스가 민영화되어 있는 영국은 상하수도 협회 격인 Water UK³⁸⁾를 중심으로 물 분야 2030 로드맵을 수립하면서 세부 시나리오 네 가지(① 수요주도형, ② 기술주도형, ③ 자연흡수형, ④ 복합형)를 제시하였다. 시나리오별 감축 정도는 <표 3-1>과 같다.

수요 중심의 시나리오는 가능하면 모든 에너지 효율 및 수요/1인당 소비(PCC) 감소 잠재력이 적용된다고 가정하며, 배출량, 재생에너지 및 배출량 상쇄 부문을 줄이기 위한 기술이 다소 낮은 규모로 적용된다고 가정한 시나리오이다. 수요주도 시나리오의 핵심은 지속가능한 소비를 위한 사회적 협력이며, 이 시나리오는 규제 당국이 온실가스 감축에 대해 활발하게 참여하고, 감축에 따른 트레이드오프(trade-off)를 충분히 이해할 준비가 되어 있다고 가정함으로써, PR24의 규제 영향으로 인한 배출량의 증가가 없을 것이라고 보고 있다. 수요주도 시나리오의 핵심은 물사용 및 하·폐수 서비스에 대한 수요를 관리하는 정도가 기존의 2030년 목표를 초과하고 이행을 가속화하는 감축 전략이라는 것이다.

기술 중심의 시나리오는 금융투자자들이 활발해져서 재생에너지, 지속가능한 운송 시스템 및 공정 배출을 감축하는 기술 혁신이 가속화된다고 가정한다. 이 시나리오상 규제기관인 Ofwat이 온실가스 감축기술에 대한 투자를 적극적으로 지원하며, 요금에 아닌 다양한 정부 자금을 지원받아서 기술을 혁신한다고 가정한다. 기술주도 시나리오의 핵심은 온실가스 배출량이 가장 높은 우선 부문에 대해 탈탄소를 목표로 하는 기술 혁신을 가속화하는 것이다.

자연흡수형의 시나리오는 물 분야 서비스에 대한 규제 품질 표준이 높아짐에 따라 추가 감축 및 재생 에너지 채택이 매우 느려진 사회를 가정한다. 따라서 CCUS와 같이 자연에 흡수 및 저장하거나 탄소배출권을 사거나 해서 넷제로를 달성하는 시나리오이며, 2030년 이후에 온실가스 감축에 들어갈 비용이 더 많아질 가능성이 매우 높은 시나리오이다. 이 시나리오는 물서비스 사업장 소유 토지와 나아가서 사업장 밖 영국 영토 내에서 자연 저장 능력을 향상하는 활동을 가속화하는 데 초점을 맞추고 있다.

마지막으로 복합 시나리오는 앞에서 설명한 세 가지 경로의 가장 실용적이거나 시기적절한 요소를 함께 적용할 수 있는 대표적 경로를 보여 준다. 사실 각 물서비스 사업자 사정에 따라 자신들만의 복합 시나리오를 생성해야 하기 때문에 물 분야에 대해 고정된 경로가 있는 것은 아니다. 복합형 시나리오의 경로는 세 가지 경로 중 개별 사업장의 통제 범위에서 위험 및 불확실성이 낮은 안전한 구현 전략들로 구성되어 있다.

38) Water UK(2021).

〈표 3-1〉 UK 2030 로드맵 시나리오별 감축량 및 비용

시나리오	온실가스 배출량 (백만톤 CO ₂ eq.)				자본투자 비용범위 (£M)	톤당 감축비용 (£/톤 CO ₂ eq.)
	기준 배출량 ('18~'19)	2030	감축	감축 비율 (%)		
BAU* 시나리오	2.41	1.68	-0.73	30		
수요주도	2.41	0.54	-1.87	77	1,700 - 3,300	70-180
기술주도	2.41	0.1	-2.31	96	1,800 - 3,200	30-100
자연흡수	2.41	0.88	-1.53	63	200 - 500	150-230
복합형	2.41	0.63	-1.78	74	1,000 - 1,900	-40-130

주: * BAU 시나리오: Business as Usual 시나리오로 온실가스 감축을 위한 인위적 조치를 취하지 않을 경우 예상되는 온실가스 배출량을 의미함.
 자료: Water UK(2021).

2030 로드맵상 수요주도 및 기술주도 시나리오는 최대 수준의 감축량을 달성하고 감축비용도 가장 많이 발생하나, 기술주도 시나리오의 경우 톤당 감축비용은 가장 낮았다. 자연흡수 시나리오는 최소의 감축량 및 초기비용을 보여 주지만 톤당 감축비용이 가장 높게 나타난다. 복합 시나리오는 자본 투자와 탄소 감축 잠재력 사이의 전반적인 균형을 보여 주며, 기술, 수요 및 자연흡수 시나리오보다 최소의 감축비용 범위를 갖는다. 하지만 모든 시나리오가 2030년까지 탄소중립을 달성하지 못함을 보여 주면서 이를 상쇄할 수 있는 추가적인 전략을 제시한다.

제2절

물 분야 탄소중립 시나리오 구축 방안

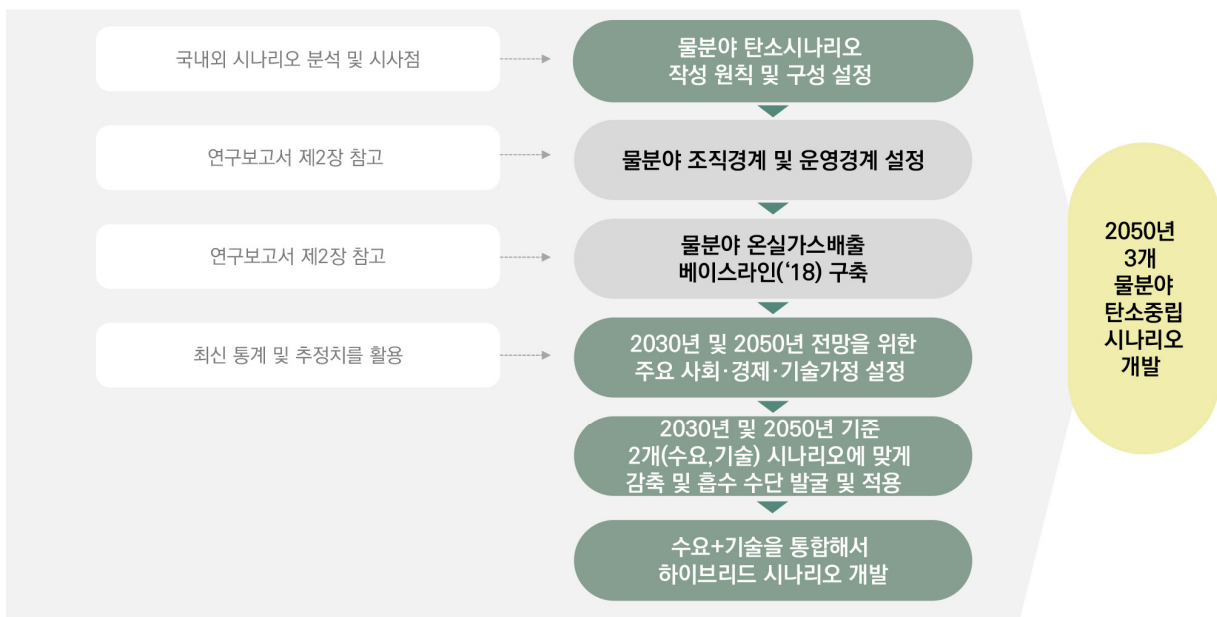
1

물 분야 탄소중립 시나리오 작성 방법

1.1 물 분야 탄소중립 시나리오 수립 절차

물 분야 탄소중립 시나리오는 <그림 3-2>와 같은 절차에 따라 작성되었다. 본 연구에서 기준연도(baseline)는 국가 탄소중립 시나리오, 2050 장기저탄소발전전략(LEDs)에서 사용한 것과 같이 2018년으로 설정하였다.

<그림 3-2> 물 분야 탄소중립 시나리오 작성 절차



자료: 저자 작성.

1.2 물 분야 탄소중립 시나리오 원칙

물 분야 2050 탄소중립 시나리오는 책임성, 공정성, 합리성, 혁신성 등 네 가지 원칙에 의거하여 수립되었다.

● 책임성의 원칙

2050 탄소중립에 동참할 것을 선언한 만큼 물 분야에서도 이를 지키려고 노력해야 한다.

또한 온실가스 배출은 국가들 사이에서만 아니라 한 국가 내 다양한 집단과 개인 사이에도 적용되며, 사회구성원은 모두 자신의 배출에 대해 책임을 져야 한다. 물을 사용하고 관리하는 모든 주체는 탄소중립을 위한 주체로서 정당한 비용의 부담과 행동양식의 변화를 통해 탄소중립을 위한 기후행동에 참여해야 한다.

● 공정성의 원칙

물 분야 탄소중립을 위한 전환 과정에서 누구도 소외되거나 배제되지 않도록 하기 위해 기후영향, 에너지·산업구조 전환에 따른 취약 산업·계층·노동·지역을 보호하고 불평등을 줄이는 공정하고 정의로운 전환을 추구해야 한다. 또한 전환과정에서 불이익을 받거나 소외되지 않도록 이해관계자를 모두 사회적 대화에 참여시켜 탄소중립을 이루어야 한다.

● 합리성의 원칙

합리적 예측이 가능하도록 타당하고 명확한 조건과 전제를 근거로 하여 실현 가능성이 높은 시나리오를 수립해야 한다. 또한 시나리오에 포함되는 탄소 배출량 및 감축량은 객관적 자료, 입증 가능한 과학적 방법론에 기반하여 산정된 것이어야 한다. 아울러 국가의 물리 정책이 정합성을 갖추게 만들고 그러한 국가계획을 이행함으로써 탄소중립을 실현해야 한다.

● 혁신성의 원칙

과학기술의 발전과 시장의 창의적 대응, 정부의 제도혁신을 통한 온실가스 감축으로 신산업을 육성하고, 기업의 경쟁력을 강화하며, 미래의 성장 동력을 발굴할 수 있어야 한다. 기후위기 대응 최적화 정책·기술의 선제적 개발과 생활양식의 혁신적 변화를 통해 우리 사회의 기후변화 회복탄력성을 강화하고, 기후위기에 안전한 사회를 만들어야 한다.

1.3 물 분야 탄소중립 시나리오 구성

물 분야 탄소중립 시나리오는 총 세 가지의 세부 시나리오로 구성된다. 수요관리주도 시나리오, 기술혁신주도 시나리오, 그리고 이 둘을 포괄하는 하이브리드 시나리오가 그것이다.

● 수요관리주도 시나리오(A안)

수요관리주도 시나리오(A안)는 물이용 효율, 누수관리, 기존 시설 에너지 효율 제고 등 재정적 투자를 많이 하지 않고 현재 충분히 도입할 수 있는 기술을 사용하여 온실가스를 감축하는 안이다.

물이용관리 부문에는 현재 국가물관리기본계획 핵심과제로 선정된 물이용 효율 제고, 농민과 시민들의 참여를 통한 물수요관리의 전략들이 포함된다. 전환 부문의 온실가스 감축을 위하여 수열에너지, 수상태양광 등 재생에너지 생산의 전략도 포함된다.

물환경관리 부문에는 물수요관리를 통한 하수량 저감에 따른 삭감량, 기존의 기술을 이용한 하·폐수의 메탄회수 등을 통한 에너지 자립화, 소화조 개선을 통한 공정배출 저감 등이 포함되어 있으며, 가축분뇨처리 부문에는 사람들이 육식 섭취를 지양하면서 가축분뇨발생 저감으로 수요가 절감되는 전략들이 포함된다.

마지막으로 수자원관리 부문에는 댐홍수터, 수변구역 등 수변생태벨트 사업을 유지하는 수준의 전략이 들어갔을 때 흡수량을 반영하였다.

● 기술혁신주도 시나리오(B안)

기술혁신 기반 시나리오는 물 분야에도 충분한 재정이 투입되고 민간투자가 일어나 혁신적인 기술이 도입되었을 때의 경로를 나타내는 시나리오이다.

물공급관리 부문과 관련해 충분한 투자가 이루어져서 스마트 관망 관리 등 물이용 효율이 최고로 높아졌을 때 수열에너지 및 수상태양광 등 재생에너지 생산량이 매우 높아진다고 가정한다.

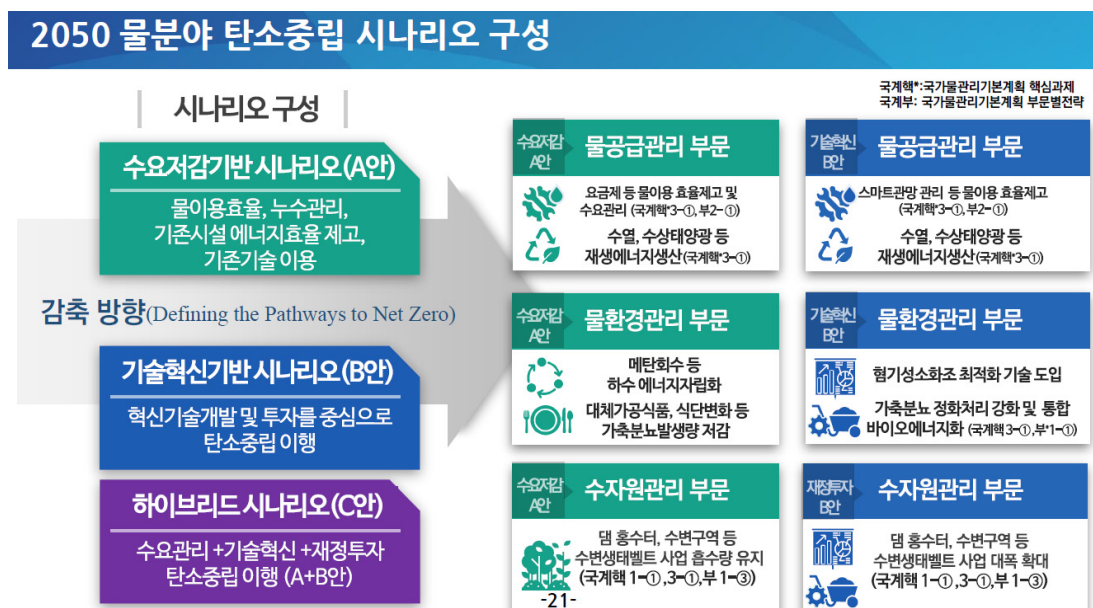
물환경관리 부문과 관련해 재정적 투자를 통해 혁신적인 혐기성 소화조의 최적화 기술이 도입이 되었을 때, 인버터 설비, 고효율 송풍기, 유입펌프 등 최대의 에너지 절감 기술, 빅데이터 및 AI 기술 활용을 통한 운영개선(안)이 반영되어 있다.

수자원 관리 부문에 대해서는 댐 홍수터, 수변구역 등 수변생태벨트 사업이 대폭 확대되었을 때 흡수량이 반영되어 있다.

● 하이브리드 시나리오(C안)

하이브리드 시나리오(C안)는 수요관리주도 시나리오(A안)와 기술혁신주도 시나리오(B안)를 결합한 시나리오이며, 물 분야에서 도입할 수 있는 최대의 기술 투자와 재정 투자, 그리고 물을 사용하는 사용자의 협력을 통해 수요관리가 동시에 일어났을 때 최대의 감축량 경로를 보이는 시나리오로, 물 분야의 순배출량 0을 목표로 하고 있다.

〈그림 3-3〉 물 분야 탄소중립 시나리오의 구성



자료: 저자 작성.

1.4 전망을 위한 주요 가정

본 연구에서는 물 분야 2050 BAU 시나리오를 구성하기 위해서 연구 당시의 최신 통계 및 추정치를 활용하여 인구, 사회, 경제에 대한 가정을 〈그림 3-4〉와 같이 설정하였다.

〈그림 3-4〉 2050 BAU 전망을 위한 주요 가정



자료: 저자 작성.

● 인구 및 가축두수

인구는 상수도보급률 자료를 활용하여 급수인구를 추정할 수 있는 기초자료로 사용하며, 본 연구에서 장래인구는 통계청(2021)의 “장래인구추계” 자료를 활용하였다. 국가통계포털(KOSIS)에 따르면 추계인구의 작성대상은 국적과 상관없이 대한민국에 상주하는 인구로 외국인도 포함되며, 2020년까지는 조사에 의한 확정인구이고 그 이후 시기는 중위추계에 의한 추정 인구수이다.

〈표 3-2〉 장래인구 추정치

(단위: 백만 명)

구분	2030년	2040년	2050년
탄소중립위원회	52.9	52.2	49.4
통계청(중위)	51.2	50.2	47.4

자료: 통계청(2021), “장래인구추계”.

〈표 3-2〉는 장래인구 추정치로 탄소중립위원회(2021)의 시나리오보다 통계청 추계인구자료가 최신 자료이므로 본 연구에서는 통계청 추계인구 자료를 장래 시나리오 구축에 사용하였다.

가축두수는 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」 구축 시 사용된 가축 사육두수 전망치를 사용하였다. 이 전략에 따르면 2018년에 188,584천 마리였던 가축의 수가 2050년에는 125% 증가하여 236,409천 마리가 될 것으로 전망된다.

● 토지이용

경지면적에 대한 전망은 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」 구축 시 활용한 농경지 면적 감소 전망 시나리오를 준용하였다. 농경지 면적은 2018년에 1,595천ha에서 2050년에 1,178천ha로 감소할 것으로 예상된다.

상수원 보호구역 및 수변구역 임목지 면적은 지금부터 50년 동안은 변화가 없을 것으로 가정하였다. 개별 부문별 BAU 시나리오 작성을 위해 사용한 다른 주요 가정(예: 급수인구, 하수도보급률 등)은 세부 부문별 시나리오 구축 방법에서 개별적으로 설명하도록 한다.

2 물 분야 세부 부문별 탄소중립 시나리오 구축 방법

2.1 물이용 관리 부문

물이용 분야에서 온실가스 배출량은 공급과정에 관여하는 기반시설에서 사용하는 전력량을 근거로 간접 배출량을 이용해 추정한다. 2018년을 기준으로 단위 물 급수량 당 배출되는 온실가스의 양을 산정($0.3758 \text{ kgCO}_2\text{eq./m}^3$) 하고 미래 시나리오에 따른 물 사용량을 근거로 온실가스 배출량을 추정하였다.

가. 생·공용수 관리 부문

● 상수도보급률 및 급수인구

상수도 통계(환경부, 2020)에 따르면 상수도보급률은 2018년 99.2%에서 2020년 99.4%로 나타난다. 한편 국가물관리기본계획(환경부, 2021)에서는 2030년 상수도보급률을 99.0%로 예측하고 있으나 이 목표치는 2020년 실적에서 이미 넘어섰고, 나머지(1% 미만)를 가지고 도서지역 및 산간지역의 상수도보급률이 최고치에 다다른 것으로 가정하였다. 본 연구는 2020년 실적자료인 99.4%의 상수도보급률이 2050년까지 일정하게 이어지는 상황에서 급수인구를 추정하였다. <표 3-3>은 장래 추정인구 및 상수도보급률 전망을 이용하여 장래 목표연도별 급수인구를 추정한 결과를 나타낸 것이다.

<표 3-3> 목표연도별 급수인구

(단위: 백만 명)

구분	2030년	2040년	2050년
인구	51.2	50.2	47.4
급수인구	50.9	49.9	47.1

자료: 저자 작성.

● 유수율, 1인 1일 물사용량 및 급수 필요량

국가수자원관리종합정보시스템의 수자원·물환경 실무용어사전에 따르면 유수율은 총 급수량 중 유수수량의 비율을 말하는 것으로 1일 물사용량을 유수율로 나누면 1일 급수량을 근사치로 추정할 수 있다. 상수도통계(환경부, 2020)에서는 2018년 유수율이 84.9%이며, 국가물관리기본계획(환경부, 2021)은 2030년 유수율 목표를 90.7%로 제시한다. 본 연구에서는 유수율 분석에 목표연도별로 세 가지 시나리오를 적용하였다.

<표 3-4>의 유수율 시나리오 중 시나리오 1은 국가물관리기본계획의 2030년 유수율이 지속적으로 유지되는 시나리오이며, 시나리오 3은 2020년 기준 세계 최고 수준으로 관리되는 서울특별시의 유수율인 95.5%

(상수도통계, 2020)를 고려하여 96%를 목표치로 설정하였다. 시나리오 2는 시나리오 1과 시나리오 3의 중간 수준인 93%를 유수율로 설정하였다.

〈표 3-4〉 시나리오별 유수율

구분	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
유수율(%)	90.7	93.0	96.0

자료: 저자 작성.

우리나라 1인 1일 물 사용량은 상수도통계(환경부, 2020)에 따르면 2018년부터 295L를 기록하고 있다. 국가지표체계에서는 해외 1인 1일 물 사용량을 2010년을 기준으로 제시하는데 미국(378L), 일본(311L), 호주(224L), 독일(150L)의 순이다.

〈표 3-5〉의 시나리오별 물 사용량은 현재 우리나라 1인 1일 물 사용량을 지속적으로 유지하는 경우(시나리오 1), 호주 수준으로 사용량을 절감하는 경우(시나리오 3), 시나리오 1과 시나리오 3의 중간값인 경우(시나리오 2)로 나누어 설정한 값이다.

〈표 3-5〉 시나리오별 물 사용량

구분	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
물사용량(L/인/일)	295	260	224

자료: 저자 작성.

현재까지 서술한 시나리오를 모두 종합하면 목표연도 3개, 상수도보급률 1개, 목표연도별 급수인구 1개, 유수율 3개 및 1인 물사용량에 따른 시나리오 3개가 도출되어 총 27가지(목표연도별 9가지)이다.

본 연구에서는 수도업 전체의 전력사용량과 총 급수량 간의 관계를 활용하여 목표연도의 시나리오별 전력사용량을 예측하는 방법을 사용하므로 생·공용수의 경우는 물의 용도별 급수량에 대해서 구분할 필요는 없다. 〈표 3-6〉에서와 같이 총 급수량은 시나리오에 따라 연간 최소 40억㎥에서 최대 60억㎥까지 도출되었다. 이를 기반으로 전력사용량과 시나리오별 온실가스 배출량이 추정된다. 국가물관리기본계획에서는 생·공용수 수요량이 2020년 94억㎥, 2030년 98억㎥로 예측된다. 실제 상수도 통계를 가지고 2020년 상수도를 통한 총 급수량을 67억㎥로 조사하였는데, 인구의 감소 및 자체수원을 가지는 생활, 공업용수 사용자를 고려하면 이 추정치는 합리적이라고 할 수 있다.

〈표 3-6〉 시나리오 구성 및 시나리오별 총급수량

목표 연도	인구 (천 명)	보급률 (%)	급수인구 (천 명)	유수율 (%)	사용량 (ℓ pcd)	급수량 (ℓ pcd)	총급수량 (백만㎥/년)
2030	51,199	99.4	50,892	90.7	295	325	6,042
					260	287	5,325
					224	247	4,588
				93.0	295	317	5,892
					260	280	5,193
					224	241	4,474
				96.0	295	307	5,708
					260	271	5,031
					224	233	4,334
2040	50,193	99.4	49,892	90.7	295	325	5,923
					260	287	5,220
					224	247	4,497
				93.0	295	317	5,776
					260	280	5,091
					224	241	4,386
				96.0	295	307	5,596
					260	271	4,932
					224	233	4,249
2050	47,359	99.4	47,074	90.7	295	325	5,588
					260	287	4,925
					224	247	4,243
				93.0	295	317	5,450
					260	280	4,804
					224	241	4,138
				96.0	295	307	5,280
					260	271	4,653
					224	233	4,009

자료: 저자 작성.

● 에너지 절감 시나리오

적용 가능한 에너지 절감 시나리오를 구축하려면 물공급시설의 설비 효율화 및 운영 최적화를 통한 전력사용량 변화를 조사하고 실현 가능한 수치를 제시해야 한다. 그러나 국내에서 운영되는 물공급시설 관련 사례를 찾기 어려웠다. 다만 우수율 기준으로 국내 시설 중 가장 효율적으로 운영되는 서울특별시의 정수장을 찾아 최대 효율을 보이는 에너지 절감 시나리오를 적용하였다. 서울특별시(2018)에 따르면 정수설비를 시간대별로 다르게 가동하여 3.8%에서 최대 4.3%의 비용 절감 효과를 볼 수 있었다. 엄밀히 따지면 동일한 전력량을 사용하되 시간대별 차등 요금 효과를 고려하여 운영하거나 절감한 비용을 온실가스 배출량 감축에 활용한다고 가정하고, 물 공급시설을 효율적으로 운영함으로써 수요관리주도 시나리오(A안)에 3.8%, 기술혁신주도 시나리오(B안)에 4.3%의 탄소배출량 감축 비율을 적용하였다. 에너지절감 시나리오는 물공급시설 운영에 적용하게 되므로 간접배출 추정에 한정하여 적용하였다.

● 직접배출 시나리오

목표연도별, 시나리오별 직접배출량은 기준이 되는 2018년의 총급수량 대비 목표 시나리오의 총급수량의 비율에 2018년 수도업의 온실가스 직접배출량을 곱하여 추정하였다.

나. 농업용수

● 농업용수 공급효율화

우선 농업용수 공급관리 기준 시나리오는 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」 구축 시 활용한 농경지 면적 감소 시나리오를 바탕으로 하였다. 구체적으로 본 연구에서는 2030년 그리고 2050년 경지면적 감소 비율만큼 농업용수 공급에 사용되는 전력량 역시 감소한다고 가정하였다.

〈표 3-7〉 농업 여건 변화 전망

(단위: 천ha, 천 마리)

구분		2018년	2030년	2040년	2050년
경지면적	논	844	644	627	623
	밭	751	574	559	555
	소계	1,595	1,218	1,186	1,178
가축 사육두수	소(젖소, 한육우)	3,497	3,797	3,800	3,800
	돼지	10,829	12,015	13,173	14,267
	닭	164,026	191,290	202,689	208,111
	기타	10,232	10,231	10,231	10,231
	소계	188,584	217,333	229,893	236,409

자료: 농림축산식품부(2021a), p.6.

농업용수 공급관리 시나리오는 2021년 농어촌용수이용합리화계획에 제시되어 있는 농어촌용수 공급효율화 계획³⁹⁾을 바탕으로 설정하였다.⁴⁰⁾ 구체적으로 2021년 농어촌용수이용합리화계획은 공급효율화 방안으로 공급관리 효율화 방안과 수요관리 효율화 방안을 제시하고 공급효율화 목표를 7%로 제시하였다. 본 연구는 2021년 농어촌용수이용합리화계획이 제시한 공급효율화 목표를 달성하기 위해 공급효율화 연평균 증가율을 바탕으로 농업용수 공급시나리오를 구축하였다. 마지막으로 농업용수 공급관리 시나리오를 통한 감축량은 기준 시나리오를 바탕으로 산정하였다.

〈표 3-8〉 효율화 목표에 따른 방안

효율화 목표	공급관리 효율화 방안	수요관리 효율화 방안
7%	<ul style="list-style-type: none"> - 용수로 관수로화 - ICT 모니터링 관개 시스템 도입 	<ul style="list-style-type: none"> - 물관리 목표 설정 및 인센티브 제공 - 물관리 거버넌스 확대 및 시민참여·소통 강화 - 물절약과 탄소저감(기후변화)에 대한 교육 및 대국민 홍보 시행
5%	<ul style="list-style-type: none"> - 자동수문 및 물꼬조작 관리 시스템 도입 - 용수 재이용 시설 도입 - ICT 모니터링 관개 시스템 도입 	<ul style="list-style-type: none"> - 물관리 거버넌스 확대 및 시민참여·소통 강화 - 물절약과 탄소저감(기후변화)에 대한 교육 및 대국민 홍보 시행
3%	<ul style="list-style-type: none"> - 용수로 개보수 - ICT 모니터링 관개 시스템 도입 	<ul style="list-style-type: none"> - 물절약과 탄소저감(기후변화)에 대한 교육 및 대국민 홍보 시행

자료: 농어촌연구원(2021a), p.164.

2.2 물환경 부문

가. 가축분뇨처리

가축분뇨처리 기준 시나리오 역시 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」 구축 시 사용된 가축 사육두수와 가축분뇨 처리량 변화를 바탕으로 하였다.⁴¹⁾ 가축분뇨처리 시나리오는 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」에 제시된 핵심 과제 중 가축분뇨처리 개선과 생산성 향상을 바탕으로 구축하였다.

우선, 가축분뇨처리 개선은 가축분뇨 정화처리 및 에너지화, 바이오 차 등을 통한 퇴비 감축으로 구성된다. 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 가축분뇨처리 개선의 정책 목표로 2050년 전체 가축분뇨량의 35.0% 감축을 제시하였다. 본 연구에서는 가축분뇨처리 개선을 통한 감축량 계측을 위해 축종별 가축분뇨 발생량이 일정한 비율로 감소하며, 가축분뇨처리시설 비율 역시 동일하다고 가정하였다.⁴²⁾

39) 농어촌연구원, 2021, pp161-164.

40) 다만 본 연구에서 이용한 2021년 농어촌용수이용합리화계획은 영산강권역, 섬진강권역, 새만금권역, 제주도권역에 속한 148개 농어촌용수구역만을 대상으로 한다. 따라서 향후 다른 권역의 농어촌용수이용합리화계획이 발표된다면 공급관리 효율화 목표는 변경될 수 있다.

41) 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 2050년 가축분뇨처리 기준 시나리오 구축을 위해 2016년 가축분뇨처리시설 이용 비율을 활용하였다. 이에 본 연구 역시 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」과의 정합성을 위해 2016년 가축분뇨처리시설 이용 비율을 활용하였다.

42) 비록 온실가스 인벤토리상의 정화처리는 기타시설에 포함되어 있지만 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 정화처리를 통한 가축분뇨처리 온실가스 배출량은 0으로 가정하였다. 따라서 본 연구 역시 이러한 가정을 바탕으로 시나리오를 구축하였다.

또 다른 핵심 과제 중 하나인 생산성 향상은 가축 사육두수를 줄여 가축분뇨를 감축하는 것을 의미하며, 이를 위한 방법으로 스마트 팜 보급, 식단 변화, 대체식품 개발 및 보급 등이 있다.⁴³⁾ 우선 스마트 팜을 통한 축산 생산성을 보면 양돈(한우) 농가의 생산성이 2030년, 2040년, 2050년 각각 14.8%(16.0%), 18.5%(20.0%), 22.2%(24.0%) 증가한다고 가정하였다. 또한 스마트 팜 도입에 의한 가축 사육두수 변화는 기준 시나리오의 축종별 사육두수에 스마트팜 보급률과 생산성 향상률을 고려하여 계측하였다. 식단 변화는 우리나라의 1인당 육류소비량과 권장량, 변화와 기준 시나리오를 바탕으로 계측한 육류 공급량으로 측정하였다. 분석한 결과 2042년에 처음으로 국내 육류 소비보다 국내 육류 공급이 많아지는 것으로 나타났으며, 과잉 공급된 육류의 양은 식생활 개선을 통해 줄인다고 가정하였다. 마지막으로 대체식품 개발 및 보급은 2020년 축산물 유통조사보고서(축산물품질평가원, 2021, p.23)에 제시되어 있는 품목별 2차 가공 및 기타 비율과 대체가공식품 시장 점유율을 곱한 비율만큼 육류의 소비와 이에 상응하는 가축사육두수가 준다고 가정하여 측정하였다.

나. 하·폐수, 분뇨 처리

물환경 부문의 메탄 온실가스 배출량 산정은 「IPCC 가이드라인(1996)」에 기반하고 있으며 하수 처리 과정에서 발생하는 메탄(CH_4), 이산화탄소(CO_2), 아산화질소(N_2O) 등이 주요 온실가스 직접 배출원으로 분류되고 있다. 현재는 온실가스 배출량 조사를 위해 CH_4 만 대상으로 하여 직접 배출량을 산정하고 있지만 N_2O 도 온실가스 배출량 감축 목표에 포함될 예정이다. CH_4 를 고려한 물환경 부문 탄소중립 시나리오 구축을 위해 먼저 Scope 1과 Scope 2를 구분하였으며 주요 특징은 <그림 3-5>에 제시된 바와 같다.

43) 스마트 팜 보급, 식단 변화, 그리고 대체식품 개발에 사용된 구체적인 가정과 방법론은 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」 수립에 사용된 농식품부 내부 자료를 활용하였다.

〈그림 3-5〉 물환경 온실가스 배출량 산정을 위한 Scope 1과 Scope 2

Scope 1

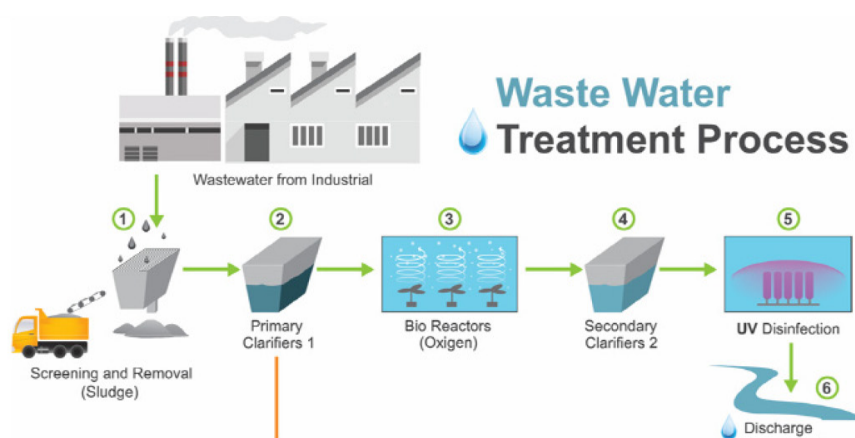
- 2019년 하수처리에서 CH₄ 발생량은 492.2천톤CO₂eq
- 하수처리시설의 온실가스는 주로 하수 유입시 나타나는 유기물질의 슬러지 처리과정 (1차 침전지, 농축조, 슬러지 탈수, 슬러지 매립, 소각 등)에서 발생함
- CH₄ 발생량은 매립, 소각, 부숙화 순으로 많이 배출되며 하수슬러지 처리방법에 따라 다르며 이는 적정 처리방법에 따라 직접 온실가스 배출량을 줄일 수 있음

〈국내 하수슬러지 처리 방법 및 처리량〉

구분	처리량
소각	1,155,123
매립	162,200
퇴비	268,550
부숙	146,953
고화	172,732
건조	982,231
기타	1,981,894

Scope 2

- 2019년 하수처리시설 운영을 위한 전력 사용량은 3,313GWh/년으로 온실가스 배출량은 약 1,522천톤CO₂eq
- 배출계수 0.45941(kgCO₂/kWh)을 적용
- 재생에너지 생산에 의한 온실가스감축량은 265천톤CO₂eq으로 산정되는 등 에너지자립 계획 중요



〈하수처리시설 과정〉

자료: 환경부(2021); Condalab, <https://www.condalab.com/>, 검색일: 2022.08.11.

물환경 부문 Scope 1과 Scope 2를 기반으로 한 온실가스 배출량 감소를 위해 2030년과 2050년의 목표 감축량 시나리오를 구축하였다. 2030년과 2050년 시나리오 구축을 위해 BAU(Business as usual)⁴⁴⁾를 3.9백만톤 CO₂eq, 3.6백만톤 CO₂eq.으로 고려하여 산정하였으며, 수요관리주도 시나리오, 기술혁신주도 시나리오, 하이브리드 시나리오를 기반으로 탄소중립을 위한 감축량 목표를 계획하였다. 하·폐수 부문 탄소중립을 위해 수요관리, 재생에너지 활용, 소화조 개선, 에너지 절감을 위주로 감축량을 제시하였다. 시나리오 방안과 감축량 목표를 위한 감축 방법은 다음 장에서 더 자세히 살펴보고자 한다.

2.3. 수자원 관리 부문

가. 수변구역 녹지 확충

수변생태벨트 조성은 ‘2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)’상 주요 흡수원 수단 중 하나로 언급되고 있으며, 4대강 수계관리기금의 토지매수 및 수변생태벨트 조성사업이 주요 이행수단이다. 수계관리기금은 1999년 8월에 처음으로 한강수계에 설치된 이후 2002년 7월에 낙동강, 금강, 영산강·섬진강 수계에 추가로 설치되었고, 2003년 이후 수질 개선 및 주민지원사업이 4대강 수계에서 진행되고 있다.

〈표 3-9〉 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)상 흡수원 현황

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

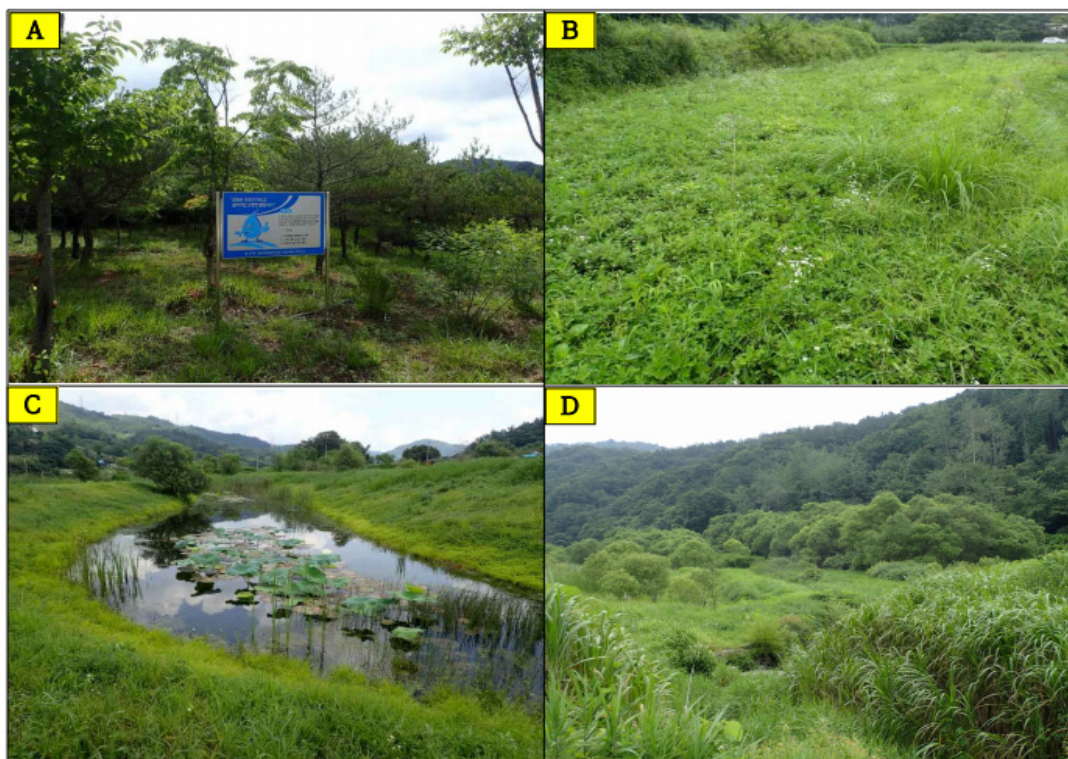
구분	흡수 수단	흡수량
산림	산림의 지속가능성 증진, 숲가꾸기, 목재 활용, 산림 보전·복원 등	25.5
해양	염습지, 잘피림, 갯벌복원, 보호구역 지정, 바다숲 조성, 굴패각 활용	1.1
기타	댐홍수터, 수변녹지 및 생태벨트 조성, 하천 침수구역, 수변공간 생태복원 등	0.1
도시녹지	그린벨트, 택지개발, 재개발 재건축 등	0.01
합계		26.7

자료: 관계부처합동(2021).

수변생태벨트는 수변구역에 녹지축을 조성하여 상수원관리지역에 위치한 건축물 등 오염원을 제거함으로써 비점오염원의 유입을 차단 및 정화하고, 육상생태계와 수생태계 간의 전이지역을 형성하는 방식이다. 금강 수계의 경우 농림지역, 마을, 산림 등 주변 토지의 이용과 조화를 고려하여 숲형(산림 인접지역), 초지형(농림지역, 습지형), 복합형(산림, 초지, 습지 등 다양한 서식처복원) 등으로 세부 유형을 구분하고 숲형, 초지형, 습지형 등의 조건, 목표, 기능과 유형별 도입 식물을 도출한다.

44) 온실가스 감축을 위한 인위적 조치를 취하지 않을 경우 예상되는 온실가스 배출량이다.

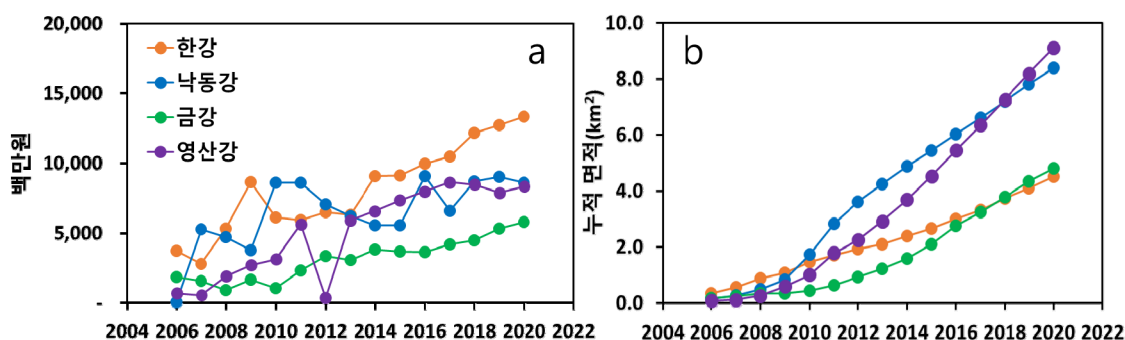
〈그림 3-6〉 수변생태벨트 녹지조성 사례(A: 숲형, B: 초지형, C: 습지형, D: 복합형)



자료: 환경부(2019).

수계관리기금 설치 이후 2020년까지 약 67.2km²의 토지가 매수되었는데, 여기에서 수변구역의 매수 면적이 약 42.3km²로 전체 면적의 약 63%에 해당하고 하천 1km 이내 매수토지가 전체 매수토지의 91%를 차지하는 점과 2006년 이후 2020년까지 지속적인 사업비 증가와 함께 26.8km² 규모의 수변생태벨트가 조성된 점을 고려할 때 수계관리기금 설치가 수자원 관리에서 중요한 탄소중립 정책 수단으로 분류될 수 있다.

〈그림 3-7〉 4대강 수계별 수변생태벨트 조성사업비 및 누적 면적 변화



자료: 저자 작성.

4대강 수계는 2021년에 상수원관리지역 토지매수 및 수변녹지조성사업에 전체 수계관리기금 예산 중 약 15~30%가 투자되는 것으로 나타났고, 특히 영산강·섬진강 수계의 경우 토지매수 및 녹지조성사업에 가장 많은 수계관리기금 예산이 편성되고 동시에 수변구역관리기본계획에도 수변구역의 지구온난화 저감 효과가 명시되고 탄소흡수 현황 및 전망 분석이 포함되는 것으로 나타난다. 즉 수변생태벨트 조성이 수자원 관리 차원의 탄소중립 전략으로 강조되고 있다.

이와 같은 정책 현황 및 기존 이행 수단에 기반하여 수변구역 내 수변생태벨트 조성을 수자원 관리 부문의 탄소중립 수단 중 하나로 설정하였다. 4대강 수계 수변구역관리기본계획상 수변생태벨트 연면적 상승률과 탄소 흡수율이 가장 높은 10년생 상수리나무 식재를 가정하여 목표연도 온실가스 흡수량을 산정하고, 이에 따라 수자원 관리 부문 탄소중립 시나리오를 구축하였다.

〈표 3-10〉 2021년 4대강 수계관리기금 주요 사업별 지원 현황 (단위: 억 원)

구분	한강	낙동강	금강	영산강·섬진강
총예산	6,589	2,641	1,566	1,176
주민지원사업	784(11.9%)	251(9.5%)	213(13.6%)	149(12.7%)
환경기초시설 관련 사업	2,594(39.4%)	1551(58.7%)	526(33.6%)	180(15.3%)
상수원관리지역 토지매수사업	960(14.6%)	355(13.4%)	199(12.7%)	350(29.8%)
수변녹지조성사업	133(2.0%)	98(3.7%)	48(3.1%)	
오염총량관리사업	101(1.5%)	67(2.5%)	74(4.7%)	41(3.5%)

자료: 기획재정부(2021) 자료를 바탕으로 저자 작성.

● 하천부지 토지전용을 통한 흡수원 확대

환경부와 관계부처 일동은 물 분야 탄소중립 이행계획을 수립하였으며, ‘2021 환경부 탄소중립 이행계획’에서는 하천공간 내 탄소흡수원 확대 및 생태계 복원을 세부과제의 주요 내용으로 강조하고 있다. ‘제1차 국가물관리기본계획’ 역시 물 분야 탄소중립 이행과 기후위기 대응책으로 수변생태벨트, 생태마을 조성 등 토지이용(비구조적 대책)에 기반한 온실가스 감축 전략을 포함하는 등 하천과 인접토지(댐 홍수터, 폐천부지 등)를 연계한 수변녹지 확충을 주요 수단으로 언급하고 있다.

〈표 3-11〉 유역별 폐천부지 현황

(단위: m²)

구분	국가하천	지방하천	합계
한강	15,059,756	8,969,274	24,029,030
낙동강	851,436	42,373	893,809
금강	415,075	146,630	561,705
영산강	608,710	2,296	611,006
섬진강	27,642	44,802	72,444
안성천	456,174	111,339	567,513
삼교천	199,682	-	-
만경강	219,961	44,802	264,763
동진강	95,362	118,215	213,577
형산강	9	-	-
합계	27,413,538	17,933,807	9,479,731

자료: 환경부(2016).

현재 국가 관리 댐의 홍수터, 4대강 하천 주변의 친수공원 중 이용률이 낮은 지역, 폐천부지 등 하천 및 홍수터(인공침수지) 부지의 임목지로의 토지전용 및 10년생 상수리나무 식재에 기반하여 온실가스 흡수원을 확대하는 방안을 수자원 관리 부문의 탄소중립 시나리오에 포함하였다.

〈표 3-12〉 4대강 친수공원 중 연평균 이용자수 2,000명 미만 부지 현황

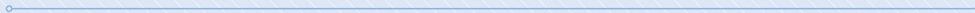
(단위: 개소, km²)

구분	한강	낙동강	금강	영산강·섬진강	합계
개소수	9	7	13	12	41
면적	2.182	1.292	2.371	2.163	8.008

자료: 환경부. “2050 탄소중립 실현을 위한 자연기반해법 포럼(2021.8.18.)”.

물 분야 2050

탄소중립 이행을 위한
로드맵 구축 연구



SECTION 04

물 분야 2050 탄소중립 시나리오 주요 내용

제1절 물 분야 탄소중립 시나리오 개요

제2절 물이용 부문

제3절 물환경 부문

제4절 수자원 관리 부문

제5절 물 분야 감축수단 공편익 감축

물 분야 2050 탄소중립 시나리오 주요 내용

제1절

물 분야 2050 탄소중립 시나리오 개요

1 물 분야 2050 탄소중립 시나리오 미래상

본 연구에서 제시한 세 가지 시나리오 중에서 2050년에 탄소중립을 실현하는(나아가서 네거티브를 달성하는) 시나리오는 하이브리드 시나리오(C안)이며, <그림 4-1>은 물 분야에서 탄소중립이 달성되었을 때 세부 부문별 배출량과 미래상을 보여 준다.

<그림 4-1> 물 분야 2050 탄소중립 세부 부문별 미래상(하이브리드 시나리오 기반)



자료: 저자 작성.

2 물 분야 2050 탄소중립 시나리오별 온실가스 배출량 전망

2.1 2030년 및 2050년 물 분야 탄소중립 배출량 총괄표

탄소중립 배출량 총괄표는 기준연도(baseline)를 2018년으로 하여 2030년 및 2050년의 BAU 시나리오, 그리고 세 가지 시나리오(A안: 수요관리주도, B안: 기술혁신주도, C안: 하이브리드)를 적용하였을 때 2030년 배출량과 2050년 배출량 전망을 보여 준다. 여기서 명심해야 할 것은 2030년 시나리오와 2050년 시나리오는 연속 시나리오가 아니라 개별 시나리오라는 것이다. 왜냐하면 본 연구에서는 2030년 및 2050년의 총감축량 산정을 위해 각 수단의 영향이 독립적임을 가정하였다. 이는 대상이 동일하더라도 각 수단의 영향이 다른 수단에 의해 줄어들거나 증가하지 않는다는 것을 의미한다.

2030년 및 2050년 물 분야 온실가스 총배출량은 배출원인 물공급 관리, 물환경 관리 부문과 흡수원인 수자원 관리 부문으로 구성하여 산정하였다. 물공급 관리 부문은 생활·공업용수와 농업용수로 세분하였으며, 물환경 관리 부문은 하수·폐수·분뇨와 가축분뇨로 세분하였다. 수자원 관리 부문은 연구 범위 내 유일한 온실가스 흡수원으로서 하천공간으로 세분하였다.

총괄표에서 보는 것과 같이 2018년(현재) 물 분야 온실가스 총배출량은 12.87백만톤 CO₂eq.이고 2050년(BAU) 물 분야 온실가스 총배출량은 13.09백만톤 CO₂eq.으로 2018년 대비 0.22백만톤 CO₂eq.이 증가하는 것으로 나타난다. A 시나리오와 B 시나리오는 2050년이 되어도 물 분야의 탄소중립을 달성하지 못하며, 기술혁신과 수요관리 등 모든 수단을 사용한 하이브리드 전략을 쓸 때 탄소중립을 넘어서 0.24백만톤 CO₂eq.의 네거티브를 달성할 수 있는 경로를 보여 준다.

〈그림 4-2〉 물 분야 2030년 및 2050년 탄소중립 배출량 총괄표

2030 & 2050 물분야 탄소중립 배출량 총괄표											
구분	부문	세부분문	'18년 (현재)	'30년 (BAU)	시나리오			'50년 (BAU)	시나리오		
					A안	B안	C안		A안	B안	C안
총 배출량			12.87	13.06	9.80	4.22	4.21	13.09	8.09	1.85	1.24
배출	물공급	생활·공업용수	2.61	2.46	1.55	0.37	0.37	2.28	0.88	-0.78	-0.78
		농업용수	0.54	0.41	0.38	0.38	0.38	0.40	0.31	0.31	0.31
	물환경	하수·폐수·분뇨	4.69	3.86	1.56	-0.54	-0.54	3.59	0.69	-1.61	-1.61
		가축분뇨	5.03	6.33	6.31	4.01	4.00	6.82	6.21	3.93	3.32
흡수	수자원관리	하천공간	- 1.28	-1.16	-1.23	-1.25	-1.25	-0.77	-0.41	-1.48	-1.48
순 배출량			11.59	11.90	8.57	2.97	2.96	12.32	7.68	0.37	-0.24

자료: 저자 작성

가. 물공급 관리 전망량

2018년(현재) 생활·공업용수와 농업용수 온실가스 배출량은 각각 2.61백만톤 CO₂eq.과 0.54백만톤 CO₂eq.이며, 2050년(BAU) 생활·공업용수와 농업용수 온실가스 배출량은 각각 2.28백만톤 CO₂eq.과 0.40백만톤 CO₂eq.이다. 생활·공업용수 온실가스 배출량은 2018년 대비 2050년에 0.33백만톤 CO₂eq.이 감소하며, 농업용수 온실가스 배출량은 2018년 대비 2050년에 0.14백만톤 CO₂eq.이 감소한다.

생활·공업용수 온실가스 배출량은 A안을 적용하면 0.88백만톤 CO₂eq.이 배출되고, B안을 적용하면 0.78백만톤 CO₂eq.이 흡수된다. C안을 적용할 경우에는 B안과 동일하게 0.78백만톤 CO₂eq.이 흡수된다.

나. 물환경 관리 전망량

2018년(현재) 하수·폐수·분뇨와 가축분뇨 온실가스 배출량은 각각 4.69백만톤 CO₂eq.과 5.03백만톤 CO₂eq.이며, 2050년(BAU) 하수·폐수·분뇨와 가축분뇨 온실가스 배출량은 각각 3.59백만톤 CO₂eq.과 6.82백만톤 CO₂eq.이다.

하수·폐수·분뇨 온실가스 배출량은 2018년 대비 2050년에 1.08백만톤 CO₂eq.이 감소한다. 전체 세부 부문 중, 가축분뇨에서 배출되는 온실가스의 양이 가장 많은 것으로 확인되며, 2018년 대비 2050년에 1.79백만톤 CO₂eq.이 증가한다. 하수·폐수·분뇨 온실가스 배출량은 A안을 적용하면 0.69백만톤 CO₂eq.이 배출되고, B안과 C안을 적용하면 둘 다 1.61백만톤 CO₂eq.이 흡수된다.

가축분뇨 온실가스 배출량은 A안을 적용하면 6.21백만톤 CO₂eq.이 배출된다. 이는 2018년(현재)보다 1.18백만톤 CO₂eq.이 더 배출되는 시나리오이다. 그러나 B안을 적용하면 A안에서 2.28백만톤 CO₂eq.이 감소된 3.93백만톤 CO₂eq.이 배출되고, C안을 적용하면 3.32백만톤 CO₂eq.이 배출된다.

다. 수자원 관리 전망량

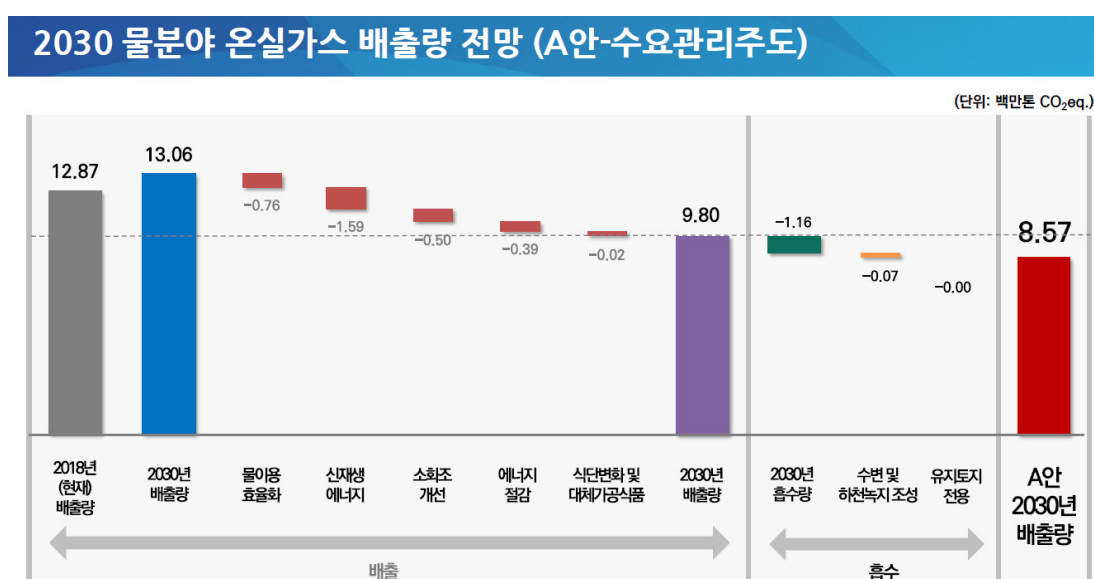
2018년(현재) 물 분야 온실가스 총흡수량은 1.28백만톤 CO₂eq.이며, 2050년(BAU) 물 분야 온실가스 총흡수량은 0.77백만톤 CO₂eq.이다. 향후 0.51백만톤 CO₂eq.의 물 분야 온실가스 흡수량이 감소하며, 수자원 관리 부문의 온실가스 흡수량은 A안을 적용하면 0.41백만톤 CO₂eq.이 흡수되고, B안을 적용하면 1.48백만톤 CO₂eq.이 흡수된다. C안을 적용할 경우에는 B안과 동일하게 1.48백만톤 CO₂eq.이 흡수된다.

2.2 2030년 및 2050년 수요관리주도 시나리오(A안)

가. 2030년 수요관리주도 시나리오(A안)

2030년 BAU 시나리오에 따르면 별다른 감축 행위를 실현하지 않았을 때 물 분야 2030년 온실가스 BAU는 기준연도(2018년)에서 다소 증가한 13.06백만톤 CO₂eq.으로, 여기에 수요관리주도 시나리오(A안)를 적용하면 34%가 감소한 8.57백만톤 CO₂eq.이 배출되는 것으로 나온다.

〈그림 4-3〉 2030년 수요관리주도 시나리오(A안) 배출량 전망

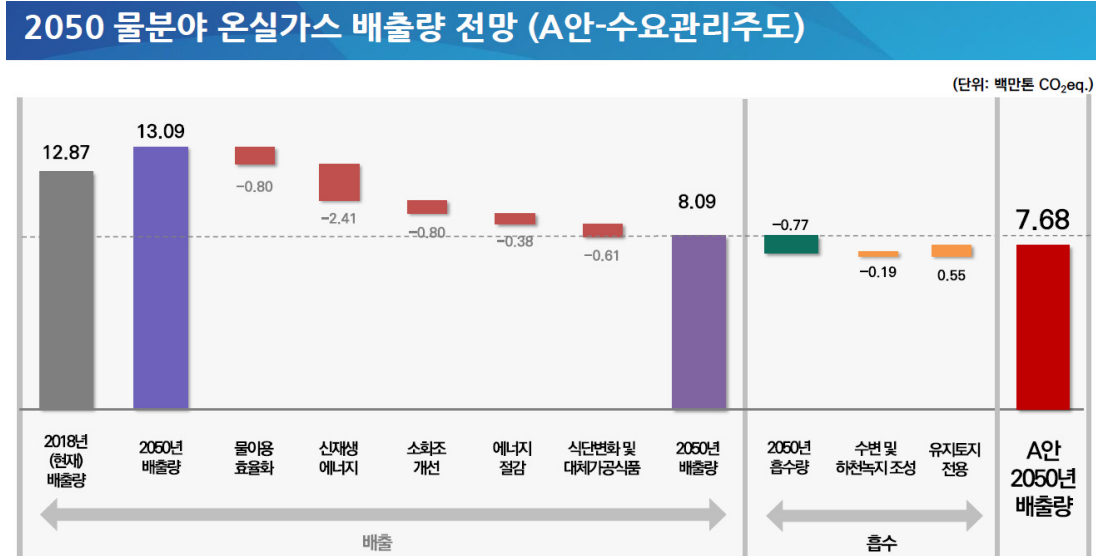


자료: 저자 작성.

나. 2050년 수요관리주도 시나리오(A안)

2050년 BAU 시나리오에 따르면 물 분야 2050년 온실가스 BAU는 13.09백만톤 CO₂eq.으로, 여기에 수요관리주도 시나리오(A안)를 적용하면 2050년에 5.41백만톤 CO₂eq.이 감소한 7.68백만톤 CO₂eq.이 배출되는 것으로 나온다.

〈그림 4-4〉 2050년 수요관리주도 시나리오(A안) 배출량 전망



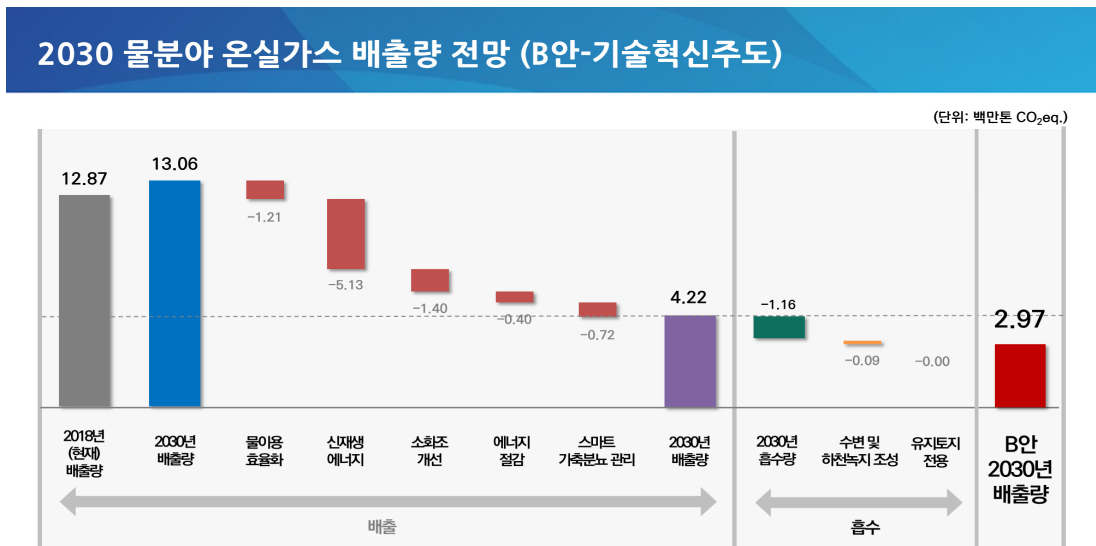
자료: 저자 작성.

2.3 2030년 및 2050년 기술혁신주도 시나리오(B안)

가. 2030년 기술혁신주도 시나리오(B안)

2030년 BAU 기반 물 분야 온실가스 BAU는 13.06백만톤 CO₂eq.으로, 여기에 기술혁신주도 시나리오(B안)을 적용하면, 2030년에 10.09백만톤 CO₂eq.이 감소한 2.97백만톤 CO₂eq.이 배출되는 것으로 나온다.

〈그림 4-5〉 2030년 기술혁신주도 시나리오(B안) 배출량 전망

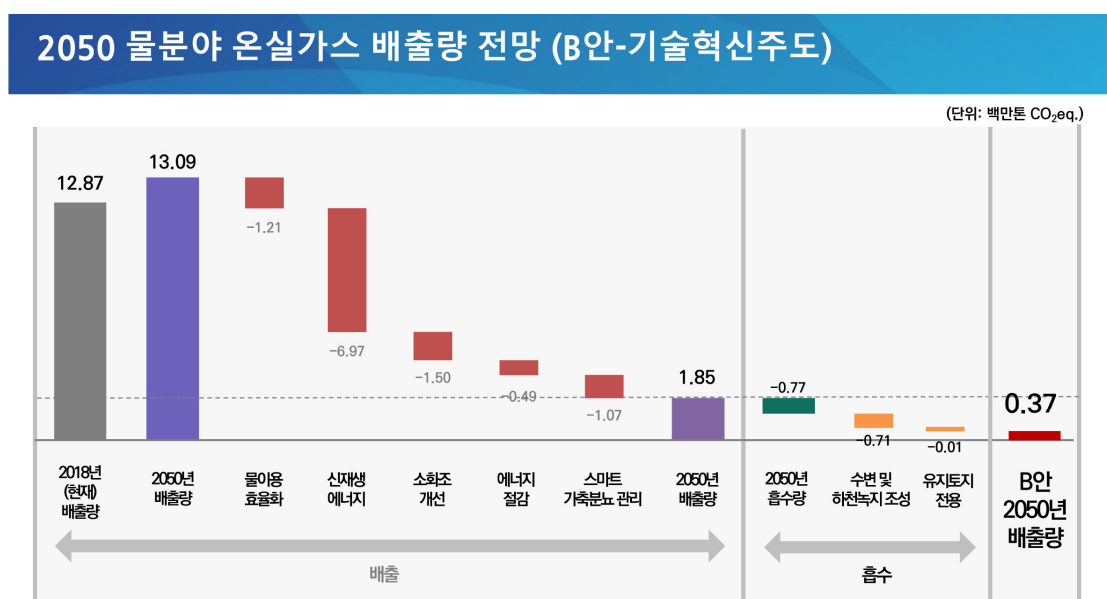


자료: 저자 작성.

나. 50년 기술혁신주도 시나리오(B안)

2050년 물 분야 온실가스 BAU는 13.09백만톤 CO₂eq.으로, 여기에 기술혁신주도 시나리오(B안)를 적용하면, 2050년에 12.72백만톤 CO₂eq.이 감소한 0.37백만톤 CO₂eq.이 배출되는 것으로 나온다. B안을 적용할 때는 물 분야 온실가스 배출량 및 흡수량 모두를 포함하였다.

〈그림 4-6〉 2050년 기술혁신주도 시나리오(B안) 배출량 전망



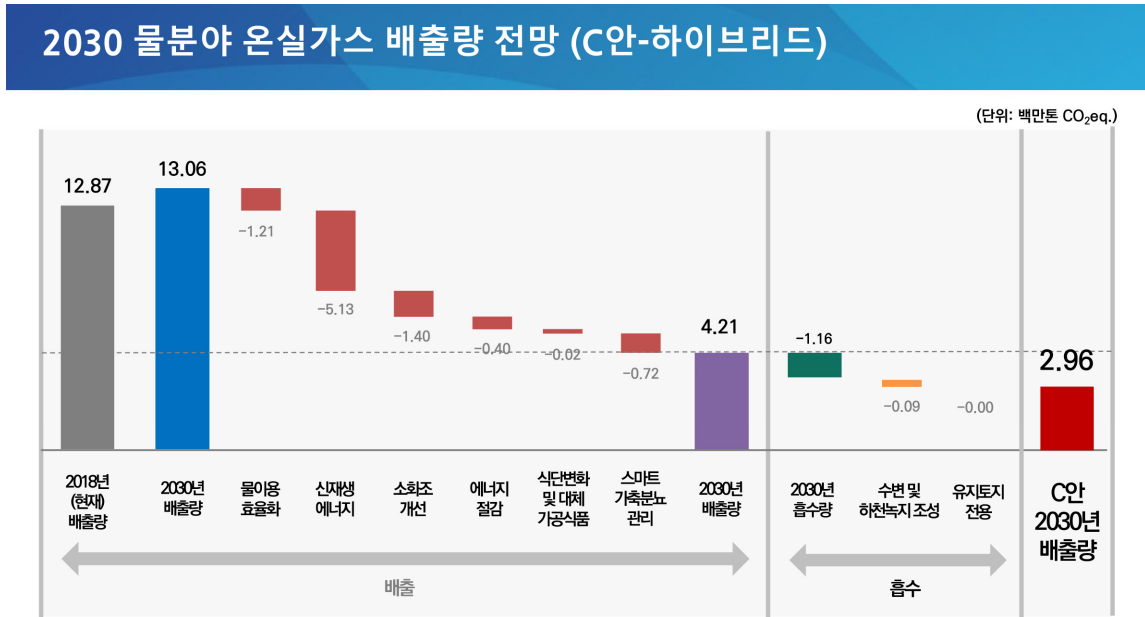
자료: 저자 작성.

2.4 하이브리드 시나리오(C안)

가. 2030년 하이브리드 시나리오(C안)

2030년 BAU 기반 물 분야 온실가스 BAU는 13.06백만톤 CO₂eq.으로, 여기에 하이브리드 시나리오(C안)를 적용하면 2030년에는 10.1백만톤 CO₂eq.이 감소한 2.96백만톤 CO₂eq.이 배출되는 것으로 나온다.

〈그림 4-7〉 2030년 하이브리드 시나리오(C안) 배출량 전망

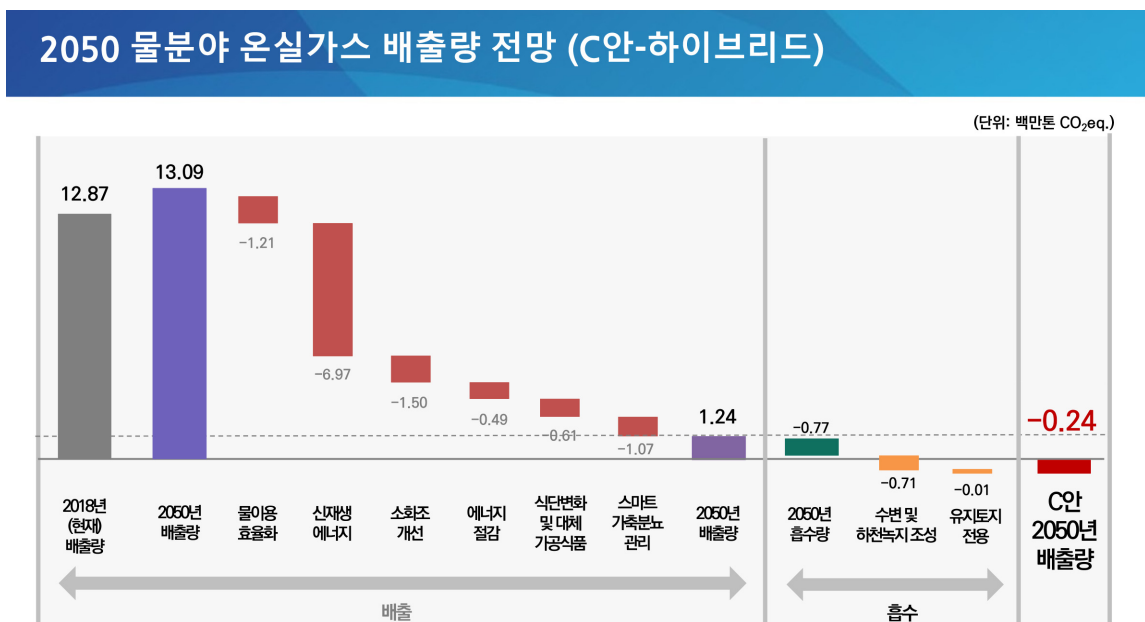


자료: 저자 작성.

나. 2050년 하이브리드 시나리오(C안)

2050년 물 분야 온실가스 BAU는 13.09백만톤 CO₂eq.으로, 여기에 하이브리드 시나리오(C안)을 적용하면, 물 분야 탄소중립을 달성하는 것은 물론이고 탄소중립에서 -0.24백만톤 CO₂eq.이 더 감소하는 결과가 나온다.

〈그림 4-8〉 2050년 하이브리드 시나리오(C안) 배출량 전망



자료: 저자 작성.

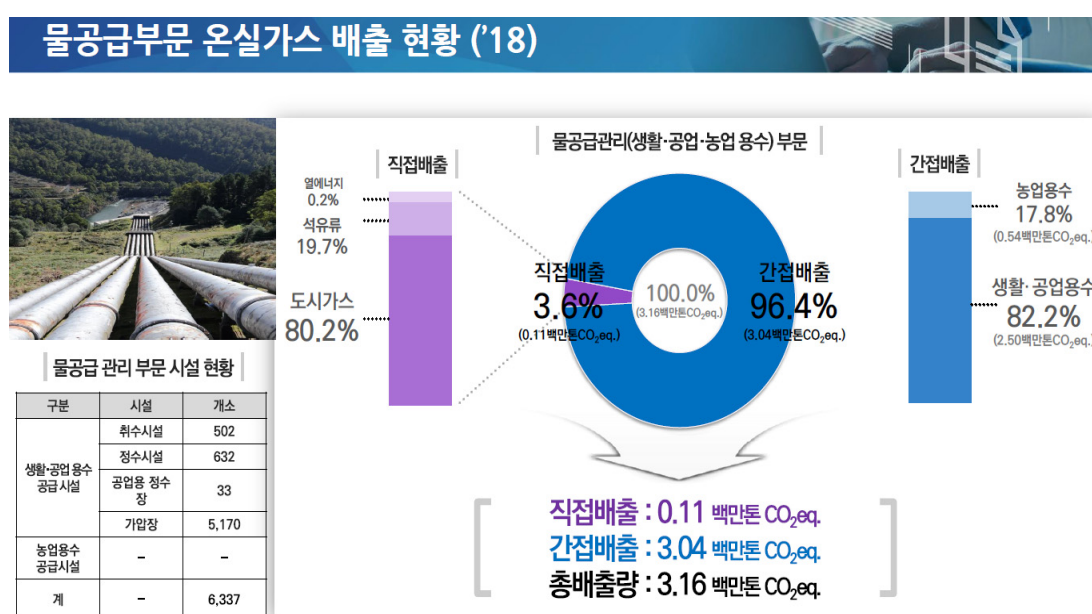
제2절

물이용 관리 부문

1 현황(기준연도 2018년)

물이용 관리 부문은 생활용수, 공업용수 및 농업용수 관리 부문으로 구성되어 있다. '2018년 물이용 관리 부문의 온실가스 배출은 3.15백만톤으로, 유류 사용에 따른 직접배출량 0.11백만톤(3.6%)과 전력사용에 따른 간접 배출량 3.04백만톤(96.4%)으로 구분할 수 있다. 직접배출보다는 간접배출이 압도적으로 높으며, 간접배출에서 생활공업용수 공급이 2.5백만톤(82.2%), 농업용수 공급이 0.54백만톤(17.8%)을 차지한다.

〈그림 4-9〉 2018년 물이용 관리 부문 온실가스 배출 현황



자료: 저자 작성.

1.1 생활·공업용수 관리

가. 수도업 전력판매량 통계치 활용 연도별 온실가스 배출량(생·공용수 종합)

한국전력공사의 수도업에 대한 전력판매량 실적은 2018년부터 2020년까지 집계 가능하며, 2018년의 전력배출계수(0.4594톤 CO₂eq./MWh)를 이용하여 연도별 온실가스 배출량을 산정하였다. 여기서 수도업의 전력판매량에는 생활용수와 공업용수가 모두 포함되어 있는 수치이다.

〈표 4-1〉 연도별 온실가스 배출량(생공용수, 전력판매량 기준)

구분		2018	2019	2020
간접배출 부문	전력판매량 (GWh)	5,444	5,405	5,398
	온실가스배출량 (천톤 CO ₂ eq.)	2,501	2,483	2,480
직접배출 부문	총 급수량 (백만㎥/년)	6,656	6,667	6,651
	온실가스배출량 (천톤 CO ₂ eq.)	112	113*	112*
온실가스배출량 합계 (천톤 CO ₂ eq.)		2,614	2,606	2,592

주: * 추정치임.
자료: 저자 작성.

〈표 4-1〉에 제시된 직접 배출량은 앞서 설명한 바와 같이 상수도통계의 2018년 총급수량 대비 2019년 및 2020년 총급수량의 비율을 2018년 직접 배출량에 곱하여 다른 연도의 직접 배출량을 추정하였다. 본 연구에서 기준이 되는 2018년 생공용수 공급을 위한 온실가스 배출량은 〈표 4-1〉의 2018년 합계값인 2,614천톤 CO₂eq.이다.

나. 물공급 시설물 종류별 전력사용량 및 온실가스 배출량

시설물 종류별 온실가스 배출 현황 및 단위 수량과의 관계는 상수도통계 자료를 조사하여 살펴볼 수 있다. 직접배출은 2018년 자료를 기초로 추정한 것이므로 시설물 종류별로 나누어 계산하는 것에는 한계가 있다. 따라서 시설물 종류별 온실가스 배출량 통계에는 직접 배출량이 제외되어 있으며, 최근 10년간(2011~2020년) 온실가스 배출량 증감 추이를 판단하기 위한 참고치로 제시하고자 한다. 또한 신고된 시설만을 대상으로 하기 때문에 수도업의 전력판매량 기준 온실가스 배출량과는 차이가 있다. 분석 전 기간에 걸쳐 전력배출계수는 0.4594톤 CO₂eq./MWh으로 동일하게 적용하였다.

취수시설은 2018년 상수도통계를 기준으로 502개소의 자료가 제공되고 있다. 자료 목록은 취수장별 수도사업자, 설계용량, 연간 총 취수량, 수원별 취수량, 취수장 전력사용량 등이다. 이 중 사용전력량 자료가 없는 시설 등 자료로 사용하기 어려운 시설을 제외할 때 실제 분석에 사용된 취수장은 361개소이다. 전력사용량을 조사하고 온실가스 배출량을 산정하였으며, 총취수량 대비 전력사용량 관계도 함께 살펴보았다.

〈표 4-2〉 연도별 취수시설 전력사용량 및 온실가스 배출량

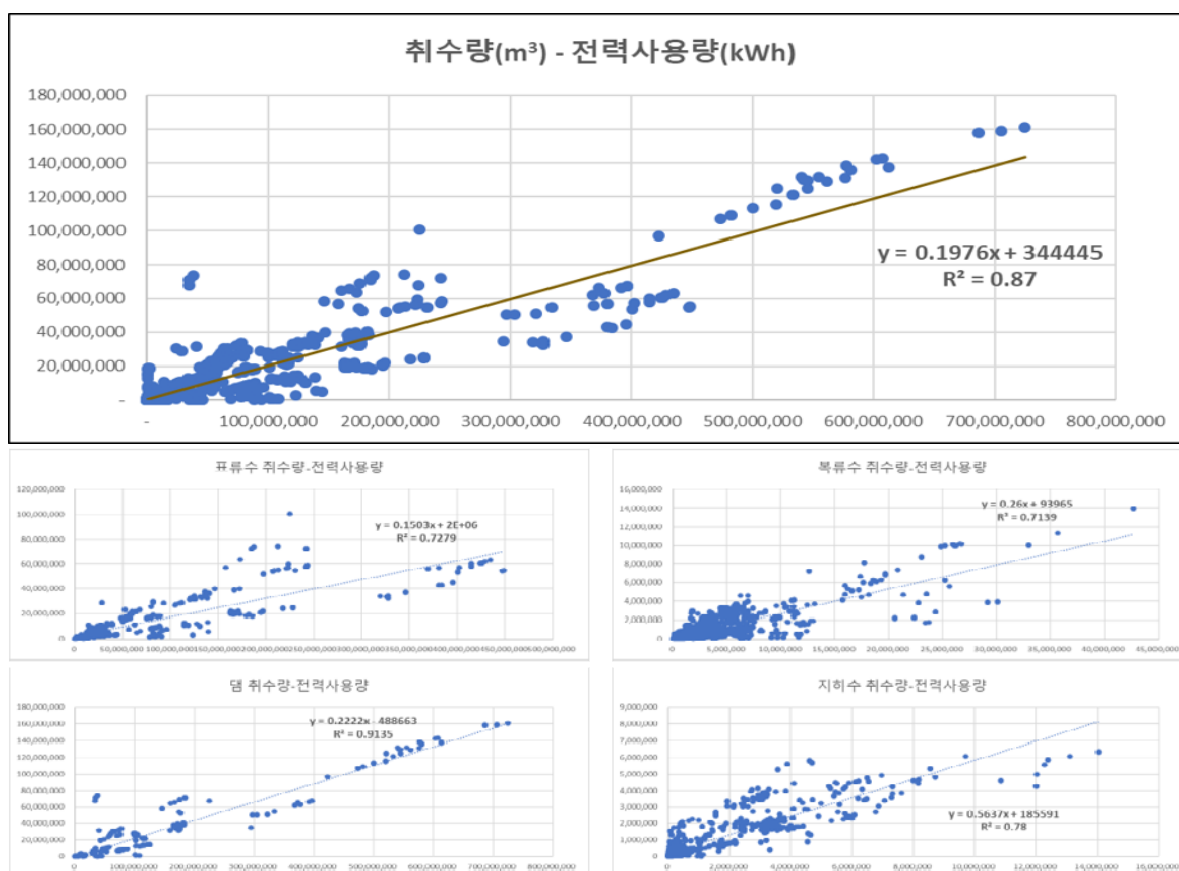
연도	연간 총 취수량 (합계, 백만㎥/년)	연간 전력사용량 (합계, GWh)	연간 온실가스 배출량 (합계, 천톤 CO ₂ eq.)
2011	7,072	1,228	608
2012	7,175	1,315	652
2013	7,280	1,341	664
2014	7,300	2,051	1,016

연도	연간 총 취수량 (합계, 백만㎥/년)	연간 전력사용량 (합계, GWh)	연간 온실가스 배출량 (합계, 천톤 CO ₂ eq.)
2015	6,552	1,278	633
2016	6,672	1,265	627
2017	6,692	1,525	755
2018	6,918	1,329	659
2019	6,958	1,267	628
2020	6,943	1,284	636
평균	6,956	1,388	688

자료: 저자 작성.

최근 10년간 취수시설에서 사용한 전력사용량은 <표 4-2>에 제시된 바와 같이 연 평균 1,388GWh이며, 온실가스 배출량은 688천톤 CO₂eq.이다. 한편 취수시설의 경우 수원에 따라 취수량과 전력사용량 간의 관계를 추정할 수 있으며 이 결과치 중 상관관계가 높은 경우는 향후 물관리 관련 계획에서 근거 자료로 사용될 것으로 기대된다.

<그림 4-10> 수원별 취수량-전력사용량 관계



자료: 저자 작성.

〈그림 4-10〉의 가장 상단 그림은 수원과 관계없이 모든 취수시설 자료를 활용하여 취수량-전력사용량 관계를 도식한 것이다. 이 그래프에서 결정계수는 0.87로 유의한 상관관계를 보인다. 수원별로 표류수와 복류수, 댐과 지하수 취수량 및 전력사용량 관계도 결정계수가 0.7 이상으로 나타난다. 특히 비교적 계측이 용이하고 대형 시설물에 속하는 댐의 경우 결정계수가 0.9 이상으로 취수량을 근거로 전력사용량을 예측할 수 있으며, 전력배출계수를 활용하여 온실가스 배출량을 추정할 수 있다.

정수시설은 2018년 상수도통계를 기준으로 632개소의 자료가 제공되고 있다. 정수장에서의 전력사용량은 정수처리 방식에 따라 다를 수 있음에 착안하여 정수처리 방식을 다섯 가지로 구분하고 연간 총생산량과 전력사용량 간의 관계를 살펴보았다. 정수처리 방식의 구분은 환경부(2011)의 정수처리기준 등에 관한 규정 및 상수도통계 자료목록을 고려하여 완속여과, 급속여과, 오존 및 활성탄을 사용하는 고도정수처리, 소독 및 기타 처리방법 등 다섯 가지로 구분하였다.

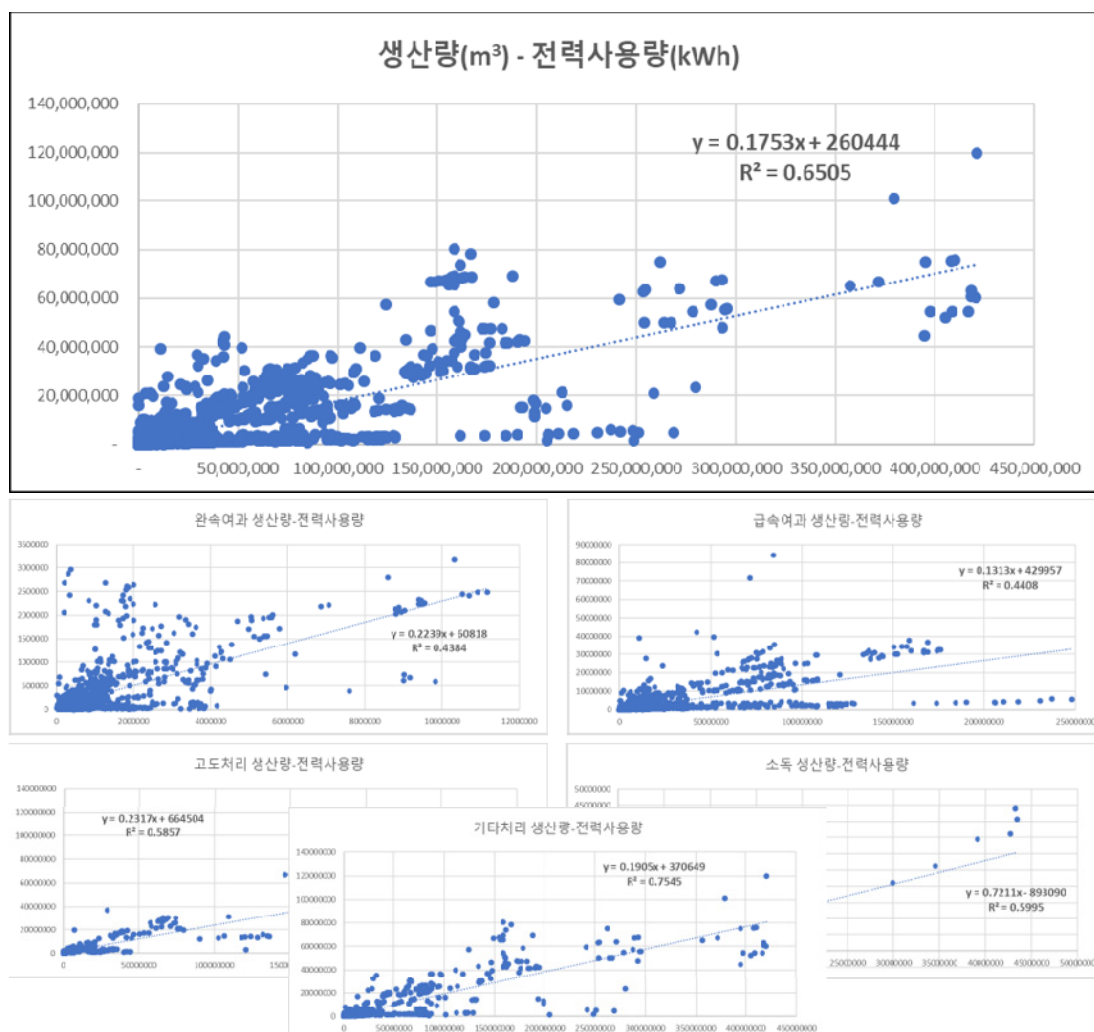
〈표 4-3〉 연도별 정수시설 전력사용량 및 온실가스 배출량

연도	연간 총생산량 (합계, 백만㎥/년)	연간 전력사용량 (합계, GWh)	연간 온실가스배출량 (합계, 천톤 CO ₂ eq.)
2011	5,926	1,178	583
2012	5,932	1,118	554
2013	5,992	1,116	553
2014	6,058	1,092	541
2015	6,155	1,156	573
2016	6,344	1,424	705
2017	6,448	1,332	660
2018	6,588	1,257	623
2019	6,588	1,243	616
2020	6,559	1,248	618
평균	6,259	1,216	603

자료: 저자 작성.

정수시설에서는 연평균 1,216GWh의 전력을 사용하고 있으며, 603천톤 CO₂eq.의 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 정수처리 방법을 다섯 가지로 구분하고는 있으나 실제 정수처리 방식의 조합에 따라 수백 가지의 경우의 수가 나올 수 있어 물 생산량과 전력사용량 간의 주목할 만한 관계를 찾아볼 수 없었다. 다만 방법을 구분하지 않고 생산량과 전력사용량 모두를 비교하는 경우 가장 높은 결정계수를 얻을 수 있었다. 따라서 정수처리 과정에서 생산량당 전력사용량을 추정하려면 전체 시계열보다 가장 최근 1년간의 총생산량 대비 전력사용량 간의 관계를 활용하는 것이 타당하다.

〈그림 4-11〉 처리방법별 생산량-전력사용량 관계



자료: 저자 작성.

〈그림 4-11〉의 가장 상단 그림은 최근 10년간의 7,220개 자료를 활용하여 정수시설의 생산량-전력사용량 관계를 도식한 것이다. 이 그래프에서 결정계수는 0.65로 높지 않은 편이다.

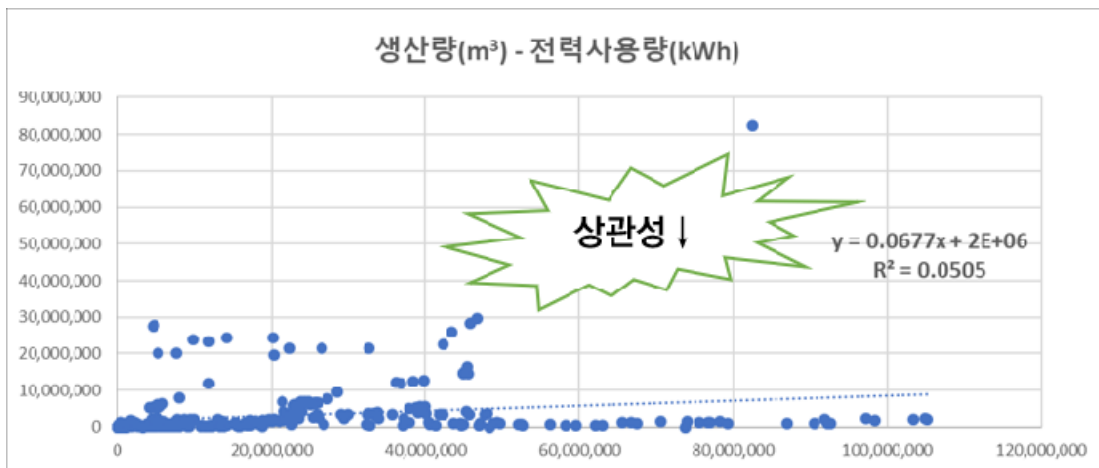
공업용 정수장은 2018년 상수도통계를 기준으로 33개의 시설현황자료가 제공되고 있다. 공업용 정수장의 생산량과 전력사용량의 관계도 정수장의 처리방법에 따라 다양한 조합이 가능하여 일정한 관계를 도출할 수 없었다. 생활용수 공급을 위한 정수장의 경우와 마찬가지로 필요시 가장 최근 1년의 총생산량 대비 전력사용량의 관계를 활용하는 것이 타당하다.

〈표 4-4〉 연도별 공업용 정수시설 전력사용량 및 온실가스 배출량

연도	연간 총생산량 (합계, 백만㎥/년)	연간 전력사용량 (합계, GWh)	연간 온실가스 배출량 (합계, 천톤 CO ₂ eq.)
2011	442	70	35
2012	533	32	16
2013	580	48	24
2014	589	40	20
2015	594	77	38
2016	605	147	73
2017	613	72	36
2018	612	78	39
2019	582	72	36
2020	533	66	33
평균	568	70	35

자료: 저자 작성.

〈그림 4-12〉 공업용 정수장 생산량-전력사용량 관계



자료: 저자 작성.

〈표 4-4〉, 〈그림 4-12〉에 공업용 정수장의 연간 생산량과 전력사용량의 평균치 및 관계가 나와 있다. 공업용 정수장에서는 연간 70GWh의 전력을 사용하여 568백만㎥의 물을 생산하며, 그 과정에서 35천톤 CO₂eq.의 온실가스를 배출하고 있다.

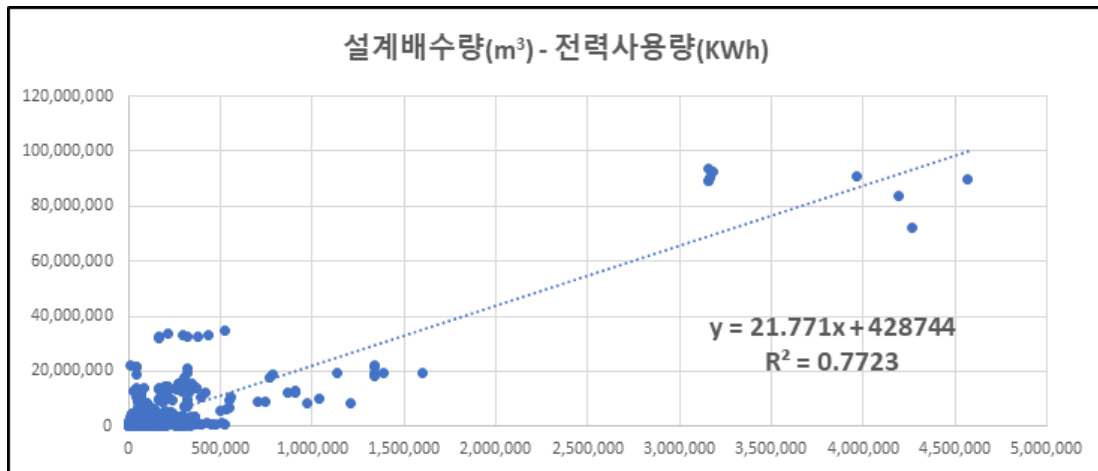
가압장 자료는 시군단위의 수도사업자가 운영하는 전체 가압장의 수와 연간 전력사용량, 총 설계 배수량 자료의 수집이 가능하다. 2018년 현재 총 5,170개의 가압장이 운영되고 있으며, 연평균 523GWh의 전력을 사용하고, 259천톤 CO₂eq.의 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 다만 설계배수량은 실제 송수량과는 다르므로 단위 송수량과 전력사용량 자료를 이 관계를 통해 추론하는 것은 신중해야 한다.

〈표 4-5〉 연도별 가압장 전력사용량 및 온실가스 배출량

연도	총 설계배수량 (합계, 천㎥/일)	연간 전력사용량 (합계, GWh)	연간 온실가스배출량 (합계, 천톤 CO ₂ eq.)
2011	17,441	435	215
2012	16,535	452	224
2013	15,933	468	232
2014	17,014	475	235
2015	16,394	596	295
2016	52,188	604	299
2017	16,199	547	271
2018	17,503	534	265
2019	17,353	554	275
2020	17,848	565	280
평균	20,441	523	259

자료: 저자 작성.

〈그림 4-13〉 가압장 설계배수량-전력사용량 관계



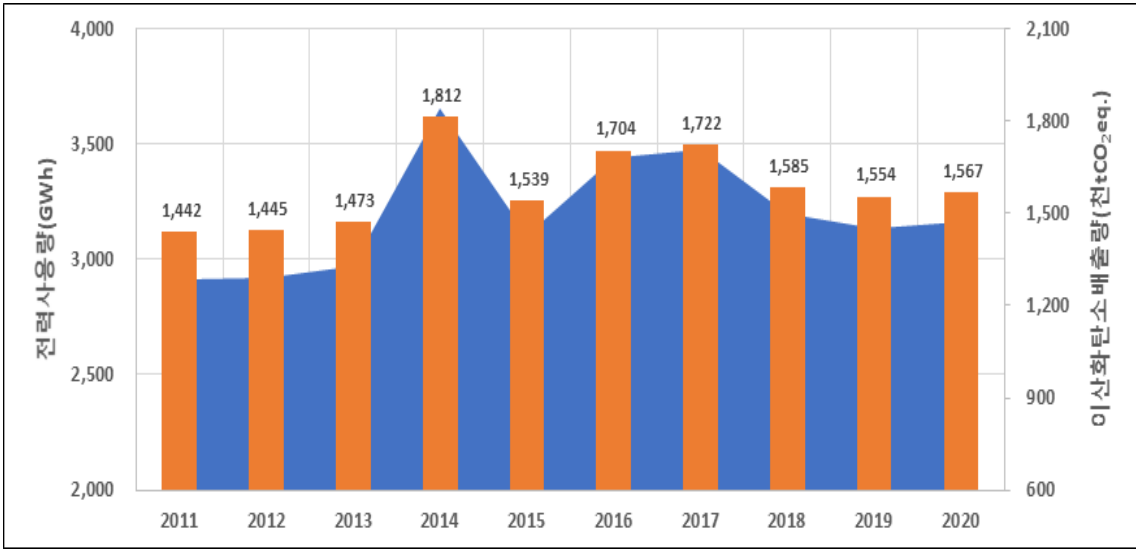
자료: 저자 작성.

다. 결과 종합 및 수도사업자별 온실가스 배출 비율

물공급 시설별 자료를 수도사업자별 자료로 집계하고 전력사용량, 온실가스 배출량 및 배출 비율을 분석하였다. 그 결과 상수도통계의 시설물별 전력사용량 자료를 기반으로 물공급 시설은 지난 10년간 연평균 1,585천톤 CO₂eq.의 온실가스를 배출하였다. 비교 기준연도인 2018년의 경우 1,585천톤 CO₂eq.으로 전력 판매량 기준 간접 배출량 2,501 천톤 CO₂eq.과는 다소 차이가 있다. 상수도통계 자료는 전체 시설을 대상으로

하지 않고 있으며, 분석 과정에서 오류인 것이 확실한 자료는 제외하였기 때문에 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

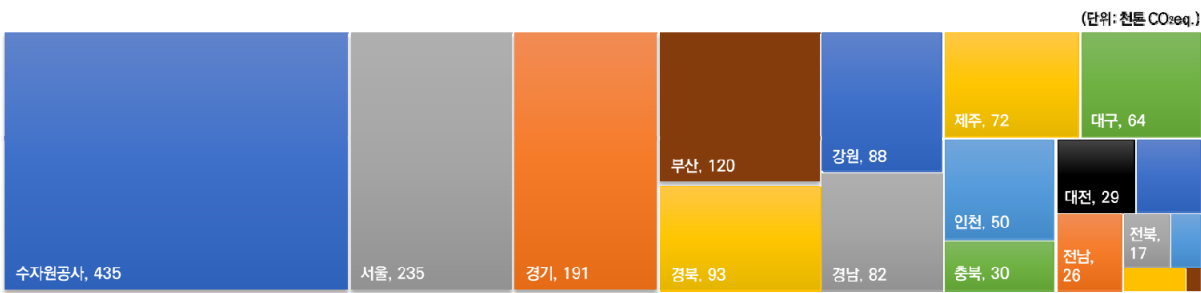
〈그림 4-14〉 연도별 물공급 시설 전력사용량 및 온실가스 배출량 추이



자료: 저자 작성.

연도별 전력사용량 및 온실가스 배출량은 〈그림 4-14〉에 도시된 바와 같이 2014년에 소폭 증가하였다가 2018년 이후로 큰 변화 없이 유지되고 있음을 알 수 있다.

〈그림 4-15〉 수도사업자별 온실가스 배출량



자료: 저자 작성.

〈표 4-6〉 수도사업자별 전력사용량 및 온실가스 배출량

수도사업자(시도)	연간 전력사용량 (평균, GWh)	연간 온실가스배출량 (평균, 천톤 CO ₂ eq.)	배출량 비율 (%)
강원도	178	88	6
경기도	386	191	12.1
경상남도	165	82	5.1
경상북도	187	93	5.8
광주광역시	21	11	0.7
대구광역시	130	64	4.0
대전광역시	59	29	1.9
부산광역시	241	120	7.5
서울특별시	474	235	14.8
세종특별자치시	3	1	0.1
울산광역시	54	27	1.7
인천광역시	101	50	3.1
전라남도	52	26	1.6
전라북도	35	17	1.1
제주도	146	72	4.6
충청남도	30	15	0.9
충청북도	60	30	1.9
한국수자원공사	878	435	27.4
계	3,200	1,585	100.0

자료: 저자 작성.

수도사업자별로 살펴보면 〈그림 4-15〉 및 〈표 4-6〉에서 확인할 수 있듯이 광역상수도를 운영 중인 한국수자원공사에서 배출하는 온실가스가 물공급 과정에서 발생하는 전체 온실가스 중 가장 많은 27.4%를 차지한다. 그다음으로 서울특별시와 경기도가 온실가스 배출량 비율이 높은 편이었다. 인구와 물 사용량을 고려하면 이러한 결과는 자연스러운 현상이라고 할 수 있다. 제주도는 상대적으로 인구는 적으나 섬이라는 특성상 소규모 시설이 많아 전력사용량과 온실가스 배출량이 많은 것으로 판단된다.

1.2 농업용수

농업용수 공급시설의 에너지 사용량으로 인한 온실가스 배출량은 2018년 541천톤 CO₂eq.으로, 2011년(333천톤 CO₂eq.) 이후로 증가하는 추세이다. 이는 농업생산 구조의 변화로 인해 시설재배와 축산업의 증가로 농업용수에 대한 수요가 증가하였기 때문이다.

〈표 4-7〉 농업용수 공급으로 인한 온실가스 배출량

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
농업용수	333	409	376	414	490	503	502	541

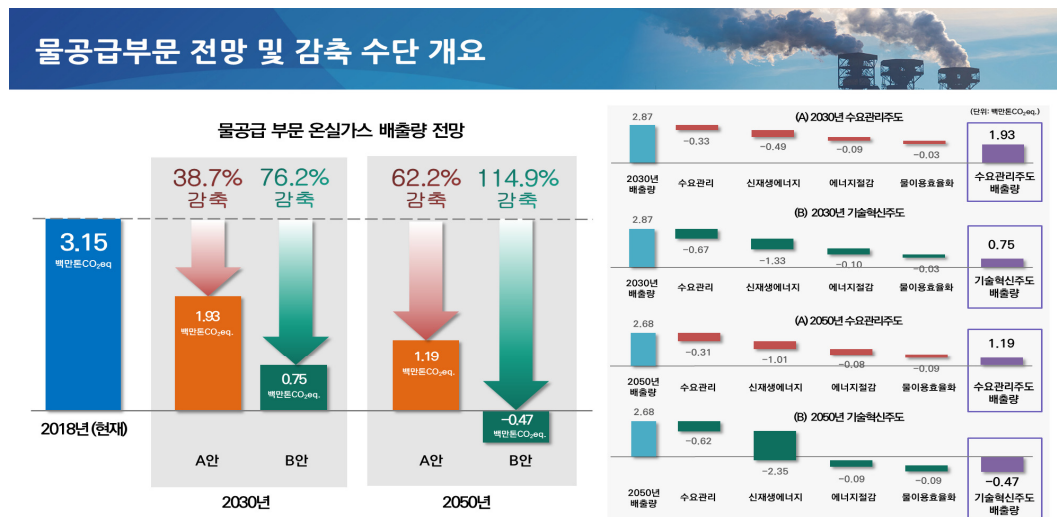
자료: 저자 작성.

2 전망(BAU 및 세 가지 시나리오)

물이용 관리 부문의 경우 시나리오 구성 특성상 기술혁신주도 B 시나리오와 하이브리드 시나리오(C안)의 전망 경로가 같기 때문에 수요관리주도 A 시나리오와 B 시나리오를 비교 분석하였다.

물이용 관리 부문(생활, 공업, 농업용수)의 주요 감축 방안은 물수요 관리(수요관리 측면 수요관리), 물이용 효율화(공급관리 측면 수요관리), 신재생에너지의 전환, 에너지효율 증가에 따른 에너지 절감 절약 네 가지로 요약할 수 있으며, 기술혁신주도 경로에 의해 2050년에 물이용 관리 부문의 탄소중립을 달성할 수 있으며 나아가서 네거티브를 달성하는 것을 보여 준다.

〈그림 4-16〉 2030년 및 2040년 시나리오별 배출량 전망 총괄



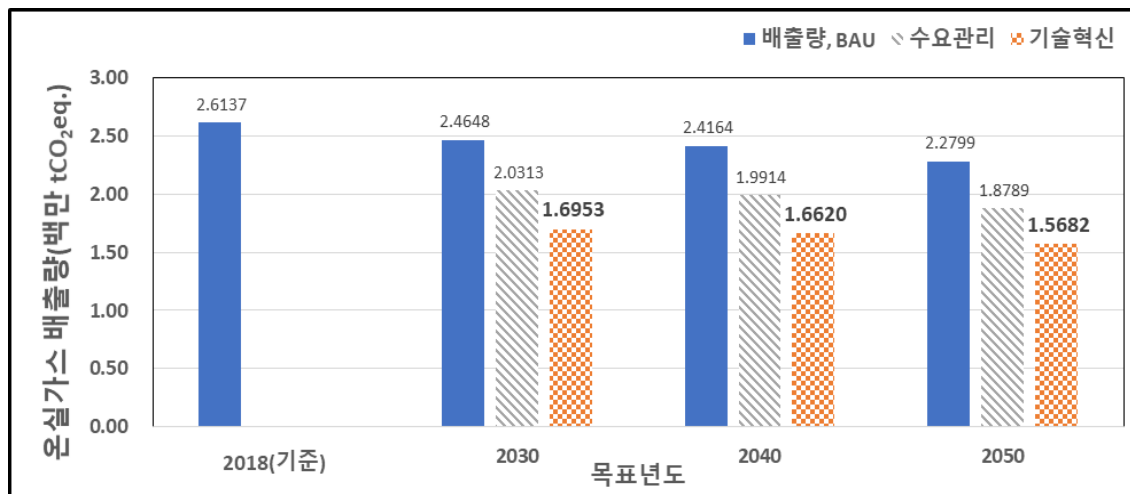
자료: 저자 작성.

2.1 생활·공업 용수관리

배출전망치(BAU: Business As Usual)란 추가적인 감축 노력을 하지 않고 현재 추세로 진행할 때 예측되는 미래의 온실가스 배출량을 말한다. 본 연구에서 각 시나리오의 목표연도별 BAU 중 중요한 사항은 유수율과 물 사용량이다. 국가물관리기본계획(환경부, 2021)에서는 2030년 유수율을 90.7%로 예측하고 있어 이를

BAU 추정에 적용하였다. 물 사용량은 2018년, 2019년, 2020년 연속으로 기록하고 있는 295 L(1인 1일 물 사용량)를 BAU 예측에 사용하였다.

〈그림 4-17〉 생공용수 공급 부문 목표연도 시나리오별 온실가스 배출량 전망



자료: 저자 작성.

〈그림 4-17〉은 목표연도의 시나리오별 온실가스 배출량 전망을 나타낸 것이며, 〈표 4-8〉에는 모든 시나리오의 온실가스 BAU를 나타내었다. 주요 BAU를 요약하면 다음과 같다.

2030년 물이용(생공용수) 부문 온실가스 BAU는 2.46백만톤 CO₂eq.이며, 수요관리주도 시나리오를 적용하면 2.04백만톤 CO₂eq.의 온실가스가 배출되고, 기술혁신주도 시나리오를 적용하면 1.70백만톤 CO₂eq.의 온실가스가 배출되는 것으로 나온다.

2050년 물이용(생공용수) 부문 온실가스 BAU는 2.28백만톤 CO₂eq.이며, 기술혁신주도 시나리오(B안)를 적용하면 0.71백만톤 CO₂eq.이 감소한 1.57백만톤 CO₂eq.이 배출되는 것으로 나온다.

2.2 농업용수 관리

앞서 언급한 것과 같이 본 연구에서는 농경지면적 감소에 따라 농업용수 온실가스 배출량 역시 감소한다고 가정하였다. 따라서 농업용수 공급 기준 시나리오에 따른 온실가스 배출량은 2018년에 541천톤 CO₂eq.에서 2050년에 399.6천톤 CO₂eq.까지 감소하는 것으로 나온다.

〈표 4-8〉 농업용수 온실가스 배출량

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2018	2030	2040	2050
기준 시나리오 배출량	541.0	413.1	402.3	399.6

자료: 저자 작성.

〈표 4-9〉 시나리오별 온실가스 배출량

(배출량 단위: 백만톤 CO₂eq.)

목표 연도	유수율 (%)	사용량 (ℓ pcd)	급수량 (ℓ pcd)	총급수량 (백만㎥/년)	전력사용량 (MWh/년)	온실가스 배출량 ①	에너지 3.8% 절감 ②	에너지 4.3% 절감 ③	직접배출 ④	계	비고
2030	90.7	295	325	6,042	4,941,956	2.3627	2.2730	2.2612	0.1020	2.4648	BAU(①+④)
		260	287	5,325	4,355,622	2.0824	2.0033	1.9929	0.0899	2.0828	③+④
		224	247	4,588	3,752,536	1.7941	1.7259	1.7169	0.0775	1.7944	③+④
	93.0	295	317	5,892	4,819,736	2.3043	2.2168	2.2052	0.0995	2.3047	③+④
		260	280	5,193	4,247,902	2.0309	1.9537	1.9436	0.0877	2.0414	A안(②+④)
		224	241	4,474	3,659,731	1.7497	1.6832	1.6745	0.0756	1.7500	③+④
	96.0	295	307	5,708	4,669,119	2.2323	2.1475	2.1363	0.0964	2.2327	③+④
		260	271	5,031	4,115,156	1.9675	1.8927	1.8829	0.0850	1.9678	③+④
		224	233	4,334	3,545,365	1.6950	1.6306	1.6222	0.0732	1.6953	B안(③+④)
2040	90.7	295	325	5,923	4,844,878	2.3163	2.2283	2.2167	0.1000	2.4164	BAU(①+④)
		260	287	5,220	4,270,062	2.0415	1.9639	1.9537	0.0882	2.0419	③+④
		224	247	4,497	3,678,822	1.7588	1.6920	1.6832	0.0759	1.7592	③+④
	93.0	295	317	5,776	4,725,058	2.2591	2.1732	2.1619	0.0975	2.2595	③+④
		260	280	5,091	4,164,458	1.9910	1.9154	1.9054	0.0860	2.0013	A안(②+④)
		224	241	4,386	3,587,841	1.7153	1.6502	1.6416	0.0741	1.7157	③+④
	96.0	295	307	5,596	4,577,400	2.1885	2.1053	2.0944	0.0945	2.1889	③+④
		260	271	4,932	4,034,319	1.9288	1.8555	1.8459	0.0833	1.9292	③+④
		224	233	4,249	3,475,721	1.6617	1.5986	1.5903	0.0718	1.6620	B안(③+④)
2050	90.7	295	325	5,588	4,571,255	2.1855	2.1025	2.0915	0.0944	2.2799	BAU(①+④)
		260	287	4,925	4,028,903	1.9262	1.8530	1.8434	0.0832	1.9266	③+④
		224	247	4,243	3,471,055	1.6595	1.5964	1.5882	0.0717	1.6598	③+④
	93.0	295	317	5,450	4,458,203	2.1315	2.0505	2.0398	0.0920	2.1319	③+④
		260	280	4,804	3,929,263	1.8786	1.8072	1.7978	0.0811	1.8883	A안(②+④)
		224	241	4,138	3,385,211	1.6185	1.5570	1.5489	0.0699	1.6188	③+④
	96.0	295	307	5,280	4,318,884	2.0649	1.9864	1.9761	0.0892	2.0652	③+④
		260	271	4,653	3,806,474	1.8199	1.7507	1.7416	0.0786	1.8202	③+④
		224	233	4,009	3,279,424	1.5679	1.5083	1.5005	0.0677	1.5682	B안(③+④)

자료: 저자 작성.

3 감축수단

3.1 생활·공업 용수관리

물이용 부문의 생·공용수 공급 과정에서 배출되는 온실가스 감축의 핵심 수단은 수요관리와 기술혁신 시나리오 모두 최종 사용자, 특히 가정에서의 물 수요량을 줄이는 것과 공급 측면에서 유수율을 향상하는 것이다. 운영 효율화를 통해 전기사용료를 3.8% 및 4.3% 절감할 수 있었던 서울시의 사례를 고려하여 이 절감 비용을 모두 에너지 효율화에 사용하는 시나리오는 BAU를 제외한 모든 시나리오에 적용하였다. 수요와 공급으로 최대한 온실가스 배출을 줄이고 난 이후 발생하는 온실가스는 환경부 정책⁴⁵⁾을 반영하여 수열에너지 및 수상태양광으로 얻을 수 있는 재생에너지를 활용하여 감축하는 방안을 제시하였다.

가. 수요관리주도 시나리오(A안)

수요관리주도 시나리오는 모든 목표연도에서 유수율을 93%로 향상하고, 1인 1일 물사용량을 260리터로 줄이는 것을 목표로 한다.

〈표 4-10〉 수요관리주도 시나리오 온실가스 배출량 예측치

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2030년	2040년	2050년
온실가스 배출량	2,041	2,001	1,888

자료: 저자 작성.

나. 기술혁신주도 시나리오(B안)

기술혁신주도 시나리오는 모든 목표연도에서 유수율을 96%로 향상하고, 1인 1일 물사용량을 224리터로 줄이는 것을 목표로 한다.

〈표 4-11〉 기술혁신주도 시나리오 온실가스 배출량 예측치

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2030년	2040년	2050년
온실가스 배출량	1,695	1,662	1,568

자료: 저자 작성.

45) 환경부(2021); 환경부 보도자료(2021.9.1).

기술혁신주도 시나리오를 적용한 후 배출되는 온실가스는 <표 4-11>에 제시된 바와 같이 수요관리주도 시나리오보다 적으므로 재생에너지 사용을 통해 전량 감축이 가능하다. 물공급 과정에서 흡수 시나리오는 구축 수단이 없으므로 하이브리드 시나리오(C안)는 물이용 부문에서는 제외하였다.

다. 재생에너지 사용을 통한 감축 가능량

2021년 탄소중립 이행계획(환경부, 2021a)에 따르면 환경부는 2030년까지 설비용량이 2,100MW인 수상태양광 설비를 확보할 예정이다. 또한 2050년까지 2,000MW 용량의 수열에너지를 통해 연간 2,138GWh의 전력을 생산하여 517천톤 CO₂eq.의 온실가스 감축효과를 예상하고 있다(환경부, 2021b). 수상태양광을 통한 온실가스 감축 가능량을 직접 제시하고 있지 않아 두 가지 방법을 통해 추정하고 시나리오를 구성하였다.

● A 시나리오: 수열에너지의 설비용량 대비 감축가능량 관계를 수상태양광 분야에 적용

<표 4-12> 에너지원별 감축가능량 예측치

구분	설비용량(MW)	감축가능량(천톤 CO ₂ eq.)	비고
수상태양광(목표: 2030)	2,100	492	예측
수열에너지(목표: 2050)	2,000	571	환경부 제시

자료: 저자 작성.

● B 시나리오: 발전량을 물 분야에서 전량 사용하여 온실가스를 감축

이 경우 발전량을 온실가스 배출량으로 환산하고 이 배출량을 감축가능량으로 사용한다는 가정하에 성립이 가능한 시나리오이다. 수상태양광의 경우 발전량을 예측하고 있지 않아 한국전력의 관련 통계자료를 활용하였다. 한국전력통계에서는 설비용량 대비 전력생산량 자료를 제공하고 있으며, 신재생에너지 분야로 태양광의 설비용량 및 전력생산량은 최근 5년간의 자료를 수집할 수 있다. 이를 토대로 설비용량-연간발전량 관계를 살펴보면 아래 수식과 같다.

$$\text{태양광 연간발전량} = 1.0982 \times \text{설비용량} + 475.73, \text{ 상관계수: } 0.9988$$

따라서 2,100MW의 용량을 가진 수상태양광의 경우 연간 2,782GWh의 전력을 생산하는 것을 유추할 수 있다.

〈표 4-13〉 에너지원별 설비용량 및 감축가능량 예측치

구분	설비용량(MW)	발전량(GWh)	감축가능량(천톤 CO ₂ eq.)
수상태양광(목표: 2030)	2,100	2,782	1,330.1
수열에너지(목표: 2050)	2,000	2,138	1,022.0

자료: 저자 작성.

따라서 2050년 목표를 기준으로 A 시나리오의 경우 물공급 부문에서 배출하는 온실가스를 전량 감축하기는 어려운 상황이나 B 시나리오는 전량 감축이 가능한 것으로 나타난다. 〈표 4-14〉는 각 목표연도의 시나리오별 배출량에 대한 종합 전망치이다.

〈표 4-14〉 각 목표연도의 시나리오별 배출 종합 전망

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분		직접배출	간접배출	재생에너지	계
2030	A시나리오	1,953.7	87.7	▽ 492.4	1,549.0
	B시나리오	1,622.2	73.2	▽ 1,330.1	365.3
2050	A시나리오	1,807.2	81.1	▽ 1,009.4	878.9
	B시나리오	1,500.5	67.7	▽ 2,352.2	▽ 784.0

자료: 저자 작성.

3.2 농업용수관리

가. 수요관리주도 시나리오(A안)

수요관리주도 시나리오는 2021년 농어촌용수이용합리화계획의 농업용수 공급효율화 계획에 명시된 2030년 효율화 목표(7%)를 적용하였다. 즉 수요관리주도 시나리오는 농업용수 공급효율화를 통해 용수 공급량을 7% 줄임으로써 농업용수 공급에 이용되는 전기를 7% 감축하는 것을 의미한다.

〈표 4-15〉 수요관리주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 농업용수

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2030	2040	2050
기준 시나리오 배출량(A)	413.1	402.3	399.6
감축량(B)	28.9	28.2	28.0
배출량(A-B)	384.2	374.1	371.6

자료: 저자 작성.

나. 기술혁신주도 시나리오(B안)

농업용수 관련 기술혁신주도 시나리오는 2030년 농업용수 공급효율화 목표 7%를 달성을 위해 매년 필요한 농업용수 공급효율 향상이 2050년까지 지속된다고 가정하였다. 즉 2050년까지 농업용수 공급효율이 매년 약 0.7%씩 향상된다고 가정하였다.

〈표 4-16〉 기술혁신주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 농업용수 (단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2030	2040	2050
기준 시나리오 배출량(A)	413.1	402.3	399.6
감축량(B)	28.9	58.3	88.9
배출량(A-B)	384.2	344.0	309.6

자료: 저자 작성.

다. 하이브리드 시나리오(C안)

농업용수 공급과 관련된 두 가지 시나리오, 즉 수요관리주도 시나리오와 기술혁신주도 시나리오는 정도의 차이를 둔 기술 개발 혹은 혁신 시나리오이다. 따라서 하이브리드 시나리오를 구성하기보다는 기술혁신주도 시나리오를 가장 급격한 감축을 달성하는 시나리오로 사용하는 것이 합리적이다.

4 정책 제언

4.1 생활·공업 용수관리

가. 물 사용자와 공급자가 모두 참여하는 물수요 관리 정책의 추진

노후 상수도관 교체와 ICT 기술을 접목한 누수진단 시스템의 구축 등 공급자 측면의 물수요 관리 정책은 지속적으로 추진되는 반면, 최근 10년간 1인 1일 물 사용량은 소폭 증가하거나 기존 상태를 유지하고 있어 물 사용자도 물 절약에 적극 참여하도록 유도해야 한다.

국가는 수도요금을 현실화하거나 특히 가정에서 물 사용을 줄일 수 있도록 절수기기를 보급하고 지속적인 물 절약 캠페인을 추진해야 한다. 또한 현재 시행하고 있는 물수요 관리 종합계획의 성과를 평가하고, 지자체의 적극적인 참여를 유도하기 위한 다양한 인센티브 정책도 함께 추진할 필요가 있다.

나. 기술혁신을 통한 고효율 설비 개발과 최적 물공급 기술 확보

고효율 펌프의 개발과 보급, 상수관망 모니터링 시스템 및 수원의 수량, 수질, 거리 및 고저차 등을 반영하는 물공급 계획의 수립, 시간대별 설비 운영 최적화 등이 가능하도록 지속적인 연구개발과 투자가 필요하다. 개발된 기술은 설비 교체 비용 지원 등을 통해 효과적으로 보급될 수 있어야 한다.

다. 물이용계획 수립 시 온실가스 관리 목표 설정 및 하위 계획 단계의 이행 계획 수립

국가물관리기본계획 및 유역물관리종합계획 등 국가 계획에 탄소배출 전망 검토 및 관리목표를 설정하고 하위 계획에서는 이행 계획을 수립하여 구체적인 온실가스 감축 계획이 추진될 수 있어야 한다.

4.2 농업용수관리

농업용수 공급 관련 시나리오는 농어촌용수이용합리화 계획에 명시되어 있는 2030년 농업용수 공급 및 이용 효율화 목표(7%)를 바탕으로 설정되었다. 하지만 농업용수 공급 및 이용 효율화를 통해 7%의 용수를 절약하려면 우선 용수로 관수로화와 ICT 모니터링 관개 시스템 도입이 필요하다. 하지만 이러한 시설 설치의 한계감축비용이 매우 높기 때문에 온실가스 감축 관점에서는 매우 비효율적일 수 있다. 따라서 비용효과적인 농업용수 공급 및 이용 효율화 시나리오를 달성하려면 농업 분야 물관리를 통한 공편익, 예를 들어 농업용수 공급 및 이용을 통한 용수 절약, 논물 관리를 통한 온실가스 감축, 단위 면적당 생산성 향상 등을 정책 수립과 이행에 충분히 고려할 필요가 있다.

또한 농업용수 공급 및 이용 효율화 목표를 달성하려면 농업인들을 대상으로 한 수요관리가 필수적이다. 하지만 수리권이 농업인들에게 있어 농업인들의 요구에 따라 농업용수를 공급받을 수 있는 상황이므로 홍보와 교육만으로는 수요관리가 제대로 이루어지기 어렵다. 따라서 농업인들이 자발적으로 참여하는 물관리 관련 거버넌스 모델의 개발이 필수적이다. 특히 지역마다 농업용수 관련 여건이 상이한 점을 고려할 때 물관리 관련 거버넌스는 기존의 상향식 거버넌스가 아닌 하향식 거버넌스가 더 적합할 것으로 생각된다.

제3절

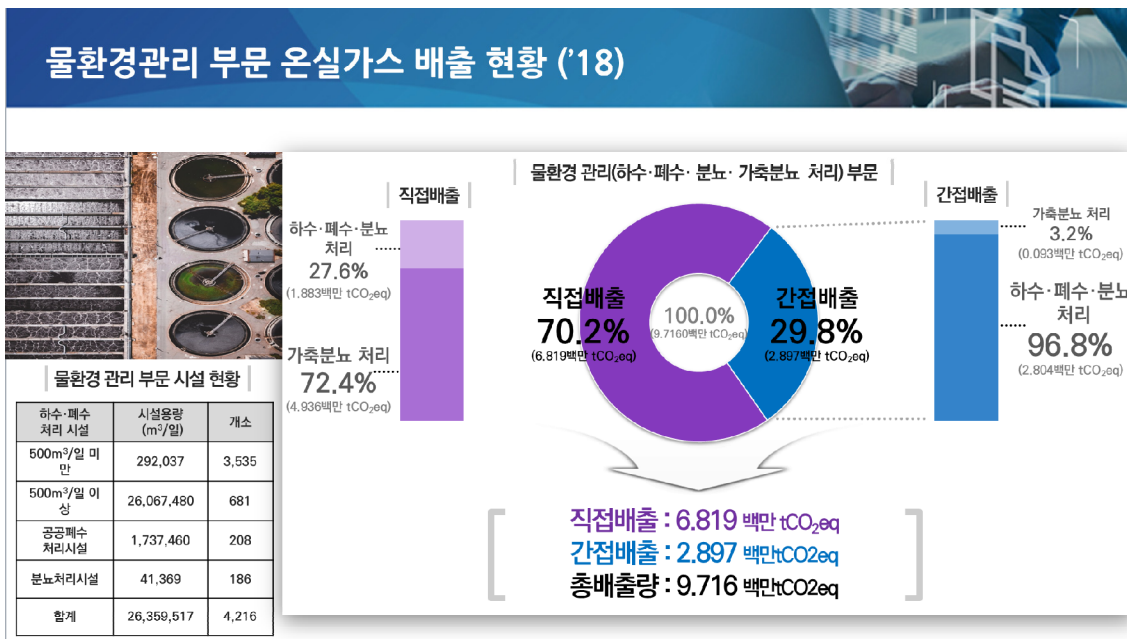
물환경 부문

1

현황(기준연도 2018년)

본 연구에서는 물환경 관리 부문을 크게 가축분뇨관리와 하·폐수·분뇨관리로 나누어 살펴본다. 물환경 관리 부문의 2018년 배출량은 9.72백만톤으로, 처리공정 등에 따른 직접 배출량 6.83백만톤(70.3%)과 전력사용에 따른 간접 배출량 2.89백만톤(29.7%)으로 구분된다. 이때 공정처리 등에서 온실가스 나오는 직접배출의 경우에는 가축분뇨처리(72.4%)가 하·폐수·분뇨처리(27.6%)보다 훨씬 크고, 전력사용을 통한 간접배출의 경우에는 시설 수가 훨씬 많은 하·폐수·분뇨처리(96.8%)가 가축분뇨처리(3.2%)보다 훨씬 높은 비율을 차지한다.

〈그림 4-18〉 2018년 물환경 관리 부문 온실가스 배출 현황



자료: 저자 작성.

1.1 가축분뇨처리

물이용 부문에는 하수, 폐수, 분뇨, 가축분뇨가 포함된다. 가축분뇨 관련 온실가스 배출량은 가축분뇨처리와 분뇨처리전력 사용으로 인한 배출량을 포함한다. 2018년 기준 가축분뇨처리 과정에서 배출되는 온실가스 배출량은 약 4.9백만톤 CO₂eq.이며, 분뇨처리전력 사용으로 인한 온실가스 배출량은 0.093백만톤

CO₂eq.으로 나타났다. 2018년 가축분뇨 관련 총배출량은 약 5.03백만톤 CO₂eq.으로 2011년 이후 증가하는 추세를 보인다.

〈표 4-17〉 가축분뇨 관련 온실가스 배출량

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
가축분뇨처리	4,522	4,676	4,739	4,707	4,592	4,504	4,662	4,936
분뇨처리전력	4.4	5.5	38.1	50.4	63.2	75.5	88.4	93.3
합계	4,529	4,681	4,777	4,757	4,655	4,579	4,751	5,029

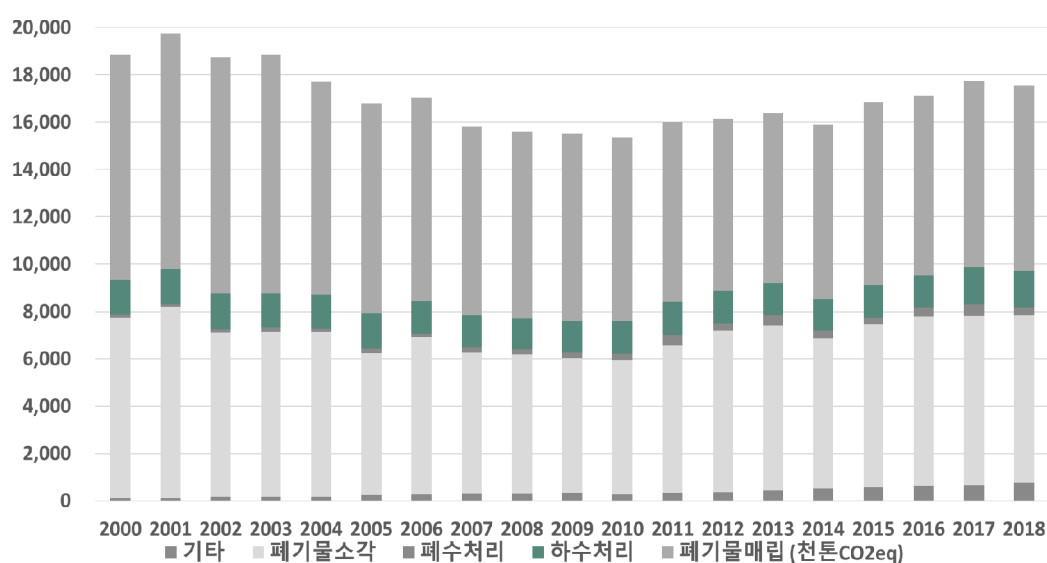
자료: 저자 작성.

1.2 하·폐수·분뇨처리

우리나라 하·폐수처리시설 온실가스 배출량 현황을 분석하기 위해 2000~2018년 국가 온실가스 인벤토리 보고서를 참고하였으며 하·폐수처리 탄소중립 시나리오 분석에는 2018년 배출량을 기반으로 하였다.

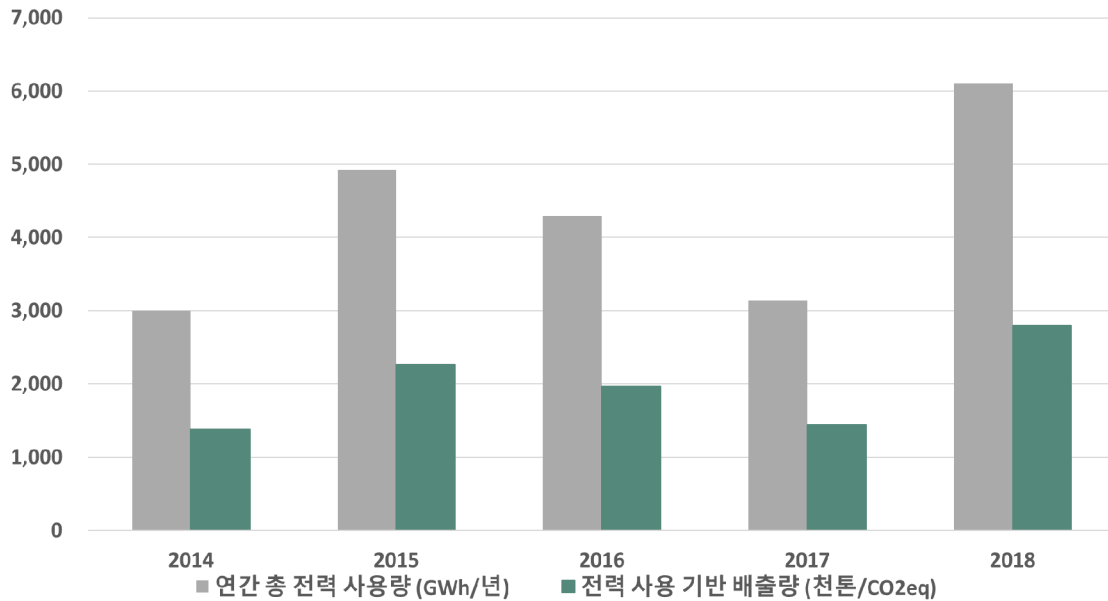
하·폐수처리 부문 온실가스 배출량은 2018년에 1,741천톤 CO₂eq.으로 폐기물 부문 배출량의 10.2%를 차지하며, 2011~2018년 평균 배출량은 2000~2010년 대비 165천톤 CO₂eq.이 증가하였다. 2018년 하수처리 시설의 총 전력사용량은 연간 6,104GWh로 온실가스 배출량이 2,804천톤 CO₂eq.인 것으로 산정되었다. 공공하수처리시설의 온실가스 배출량 및 감축량 산정을 위한 배출계수는 0.45941kgCO₂/kWh를 적용하였으며 이는 하수도 통계 작성 방법을 참고하였다.

〈그림 4-19〉 국가 하·폐수처리 온실가스 배출량



자료: 환경부(2019)를 참조하여 재구성.

〈그림 4-20〉 하수처리 에너지 사용에 따른 배출량

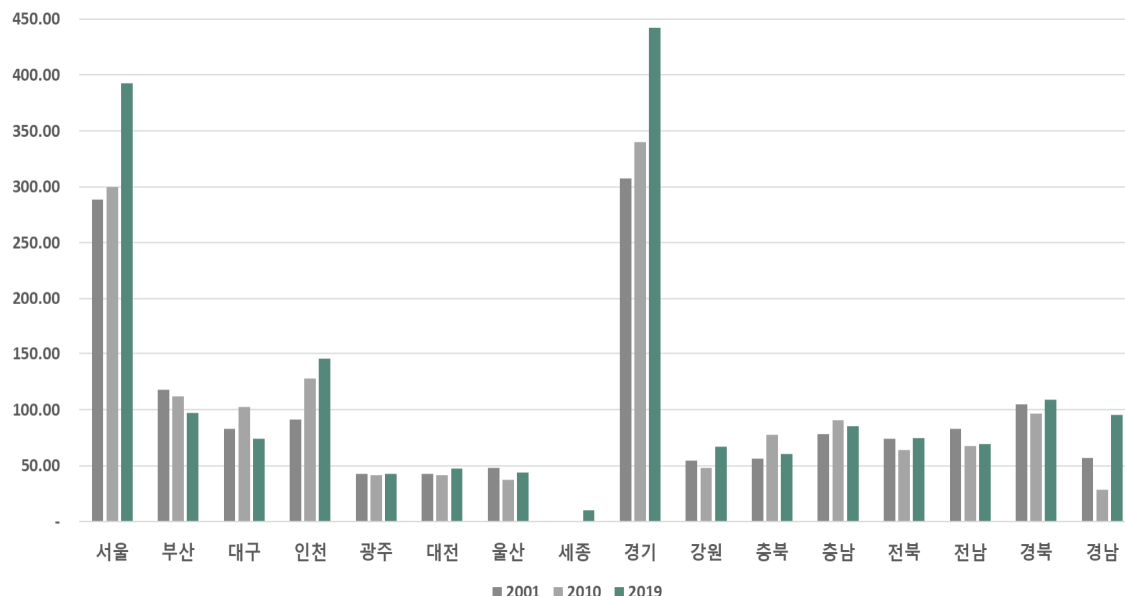


자료: 국가하수도정보시스템, “2019 하수도통계”, 검색일: 2022.09.12.

우리나라 지자체별 하·폐수처리시설 온실가스 배출 현황을 조사하기 위해 2000년대 초반부터 10년 단위로 구분하여 최근 연도까지의 배출량을 비교하였다. 2001년, 2010년, 2019년을 기준연도로 설정하여 분석한 결과 경기(2001, 2010, 2019년: 307, 340, 442천톤 CO₂eq.)와 서울(2001, 2010, 2019년: 289, 300, 392천톤 CO₂eq.)의 온실가스 배출량이 가장 많은 것으로 파악되었다.

2001년 대비 2019년 온실가스 배출량이 증가한 지자체는 서울, 인천, 대전, 세종, 경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 경북, 경남으로 나타났고, 감소한 지자체는 부산, 대구, 광주, 울산, 전남으로 나타났다. 온실가스 배출량이 많은 대표적인 지자체인 서울, 인천, 경기에서 하·폐수처리시설 온실가스 배출량을 감축하려는 노력이 더 적극적으로 이루어져야 할 것이다.

〈그림 4-21〉 지자체별 하·폐수처리 온실가스 배출량



자료: 환경부(2019)를 참조하여 재구성.

2010년 『에너지 자립화 기본계획』의 수립으로 하수처리시설 탄소중립을 위한 2030 하수처리시설 에너지 자립률 50% 달성 목표가 제안되었고, 소화가스·소수력·하수열·풍력·태양광 등의 에너지 활용 대책이 추진되었다.

- 『2030 하수슬러지 감량 및 바이오가스 생산 활용 계획(안)』 등과 같은 계획(안)을 통해 슬러지의 바이오가스화, 유기성 폐자원 병합, 고형 연료화, 통합바이오가스화 등의 에너지 사용을 위한 정책이 추진되고 있음
- 『제2차 국가하수도종합계획(2016~2025)』에서 하수도 에너지자립화 사업의 지속성과 에너지 통합관리 시스템 구축 기반의 실시간 하수처리 관리시스템 개발 계획을 수립하였으며, 『환경부 그린뉴딜(2020)』을 통해 지능형 하수처리장 시범사업 추진(15개소) 등 하수처리시설 안에서의 경제적 기회 창출과 하수관리 스마트화 지향으로 탄소중립을 위한 정책들을 계획하고 있음
- 지속적인 하수처리시설의 에너지 자립화 및 재생에너지 활용 정책이 추진되었음에도 에너지 자립률은 2008년 0.8%에서 2019년 13.2%로 소폭 향상하는 데 그쳐 『에너지 자립화 기본계획』의 2020년 목표인 30%를 달성하려면 효율적이고 체계적인 에너지 자립화 계획 수립과 실행이 필요함

하수처리시설의 용량별 에너지생산량 현황을 분석하기 위해 2019년 가용 통계자료를 활용하였다. 500m³/일 ~1만m³/일 미만인 시설은 태양광을 활용한 에너지 생산량이 100%를 차지하며, 1만m³/일 이상인 시설은 소화가스, 소수력, 풍력, 하수열, 태양광 등의 에너지를 사용하고 그중 소화가스의 바이오에너지가 에너지 생산량의 83.1%를 차지한다. 또한 규모가 커질수록 소화가스 활용이 증가하는 경향을 보여주며 5만m³/일

이상의 시설에서의 소화가스는 5만 4,762m³/일로 가장 에너지를 생산한다.

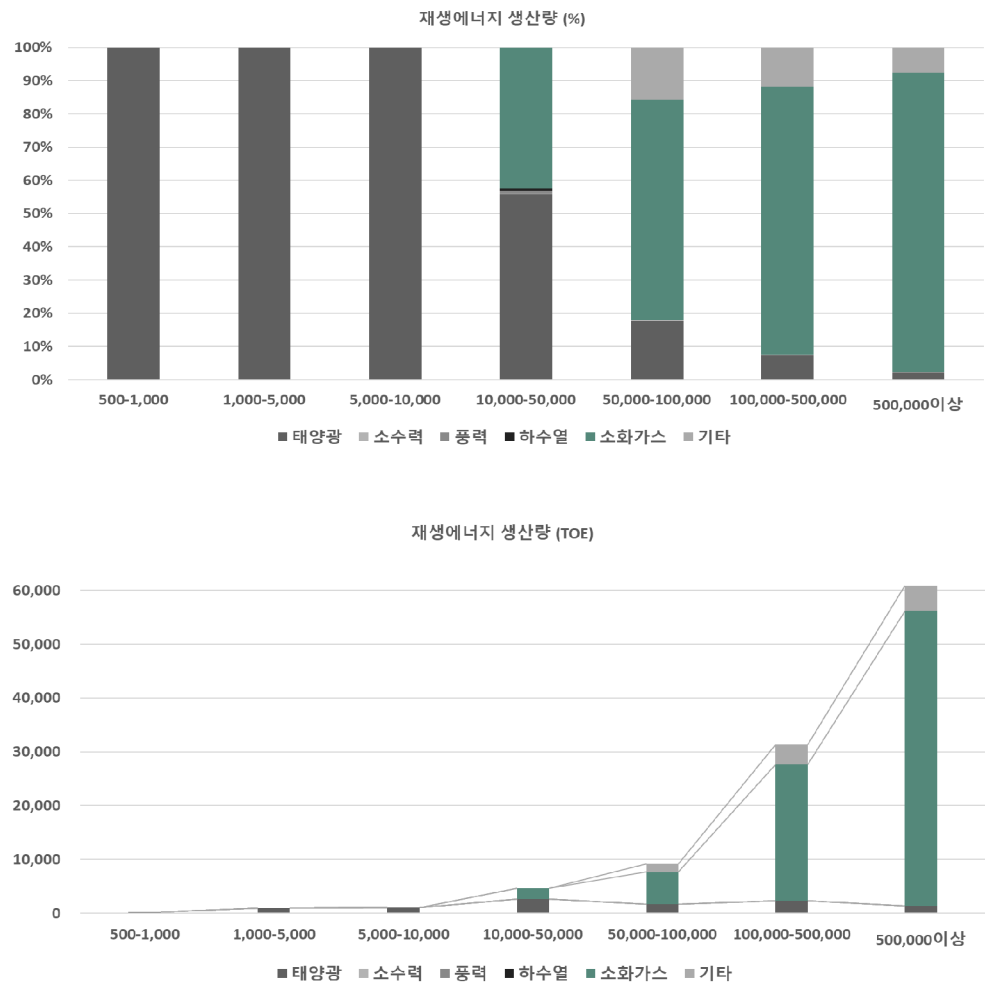
〈표 4-18〉 규모별 재생에너지원

(단위: m³/일)

구분	시설용량							총합계
	500~1,000	1,000~5,000	5,000~10,000	10,000~50,000	50,000~100,000	100,000~500,000	500,000 이상	
소화가스	0	0	0	1,967	6,090	25,259	54,762	88,078
소수력	0	0	0	2	23	60	52	136
풍력	0	0	0	43	0	0	0	43
하수열	0	0	0	33	0	0	0	33
태양광	81	907	1,030	2,591	1,625	2,285	1,311	9,831
기타	0	0	0	0	1,443	3,709	4,686	9,839

자료: 환경부(2020b); 국가하수도정보시스템, “2019 하수도통계”, 검색일: 2022.09.12. 참조.

〈그림 4-22〉 하수처리시설 용량별 재생에너지 생산량

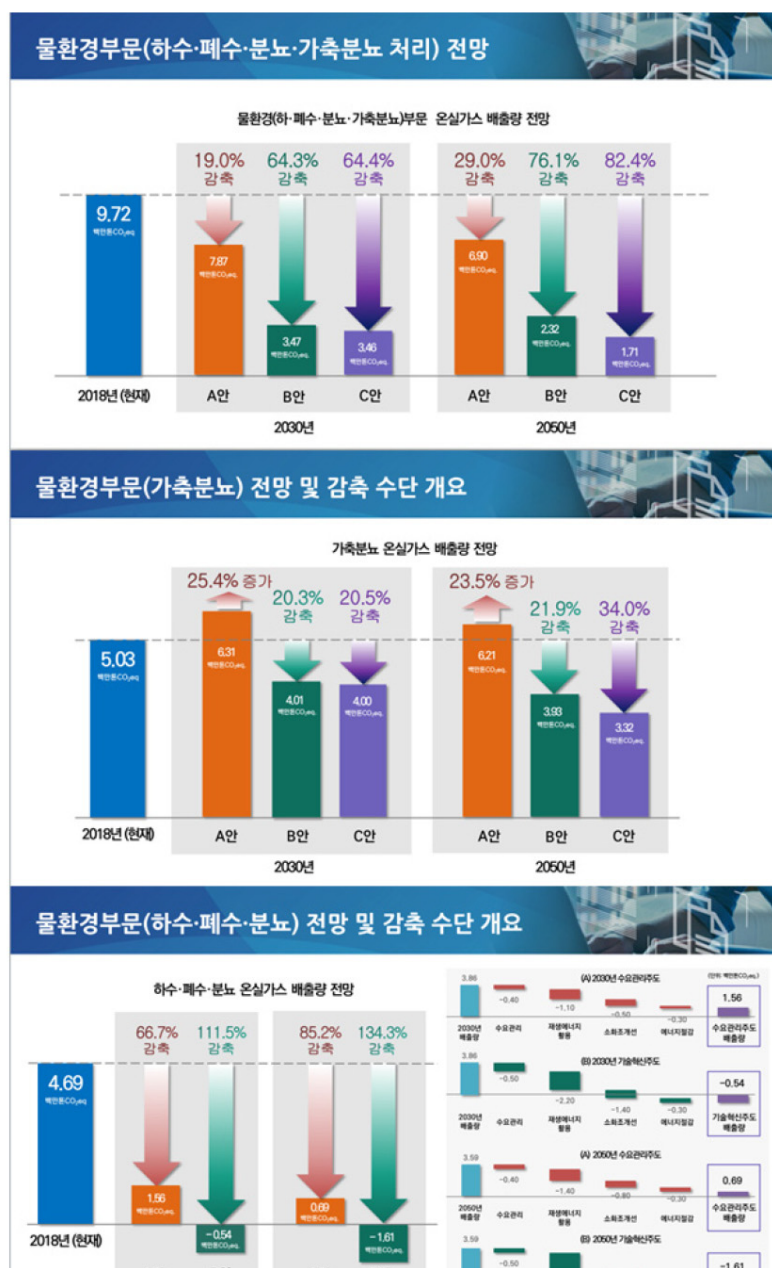


자료: 환경부(2020b)를 참조하여 작성.

2 전망(BAU, 세 가지 시나리오)

물환경 관리 부문은 물이용 관리 부문과 다르게 세 가지 시나리오 모두 탄소중립을 달성할 수 없다. 이는 가축분뇨관리 부문의 경로 때문인데, 하·폐수·분뇨처리 부문의 경우에는 기술혁신 B안에 의해 2030년부터 탄소중립을 달성하는 것을 볼 수 있다.

〈그림 4-23〉 2030년 및 2040년 시나리오별 배출량 전망 총괄



자료: 저자 작성

2.1 가축분뇨처리

가축분뇨처리로 인한 온실가스 배출량은 가축 사육두수의 변화에 비례한다. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 농업 여건 변화 전망을 바탕으로 가축분뇨처리로 인한 온실가스 배출량을 산정하였다. 다만 분뇨처리전력의 경우, 분뇨처리기술과 재생에너지 활용에 대한 자료가 부재하여 2018년과 동일하다고 가정하였다.

〈표 4-19〉 가축분뇨처리 및 분뇨처리 전력 온실가스 배출량

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2018	2030	2040	2050
기준 시나리오 배출량	5,029.5	6,329.5	6,600.3	6,822.3

자료: 저자 작성.

2.2 하·폐수·분뇨 처리

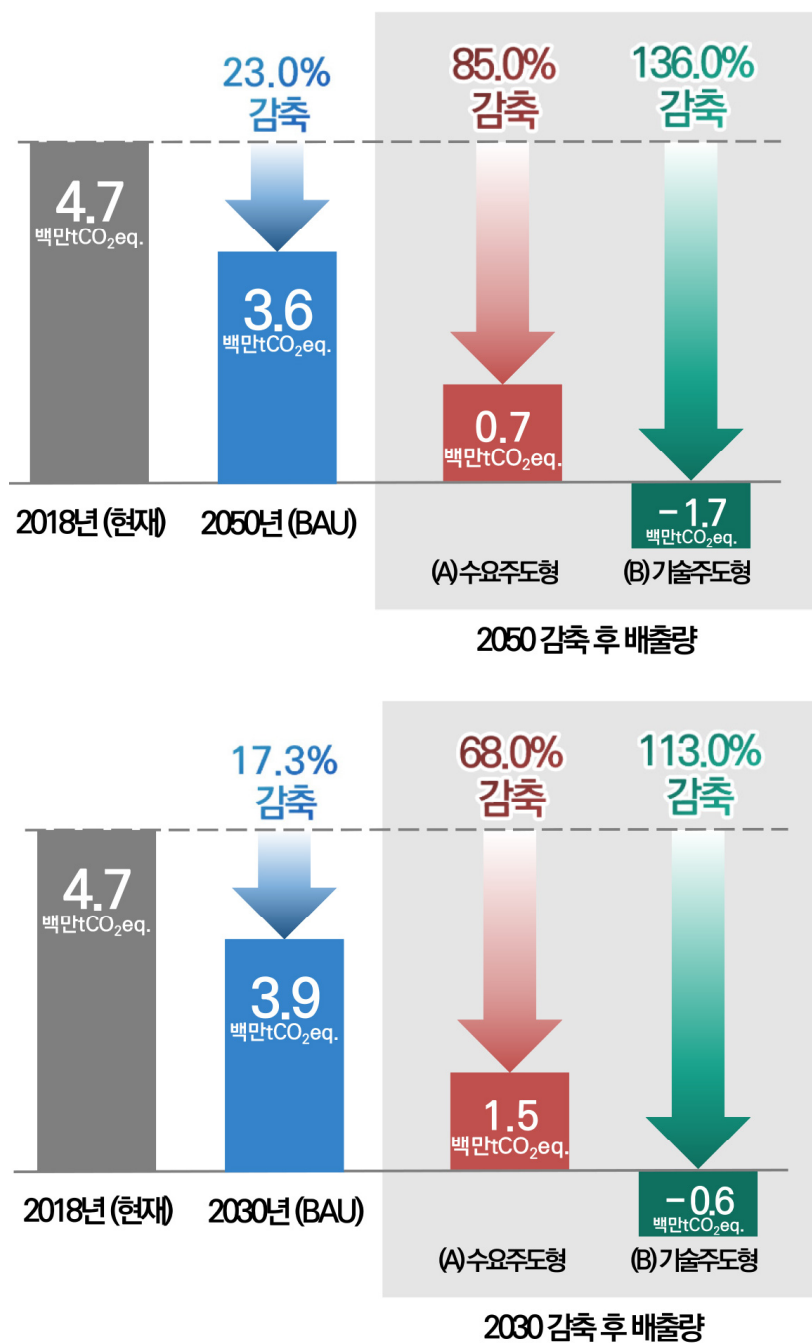
물환경 부문 온실가스 감축목표 시나리오를 설정하기 위해 우선 미래 온실가스 배출전망치인 ‘배출전망(BAU)’을 산정하였다. BAU 산정은 2018년 하·폐수처리시설 직접 배출량과 전력사용에 대한 간접 배출량을 기반으로 2030년 BAU와 2050년 BAU를 계산하였다.

각 연도의 예상 인구나 하수도 보급률을 바탕으로 하수 인구를 추정하였고, 수료관리(국가물관리기본계획 상수도 유수율 참고)와 함께 하수처리시설을 위한 전력사용량을 산정하였다. 2018년의 전력사용량과 2030년 및 2050년 전력사용량의 비율로 배출량 감축 비율을 계산하였고 계산된 배출량을 2030년 BAU와 2050년 BAU로 사용하였다.

2030년 BAU를 위한 주요 가정은 2018년 하수 인구 49,836천 명에서 2030년 49,151천 명으로 추정하였고, 하수도 보급률은 2018년 93.9%에서 2030년 96%(국가 하수도 종합계획 2016~2025년 참고)로 추정하였다. 하수 인구는 장래인구추계통계청의 자료를 참고하여 하수도 보급률과 함께 산정하였다. 2050년 BAU 역시 장래인구추계통계청 자료를 기반으로 2050년 하수 인구 45,464천 명을 추산하였고 하수 보급률 96%를 적용하여 배출량을 산정하였다.

2018년 4.67백만톤 CO₂eq. 배출량에서 2030년 BAU는 3.9백만톤 CO₂eq.으로 약 17.3%로의 감축을 보여 주었고, 2050년 BAU는 3.6백만톤 CO₂eq.으로 약 23.0%로의 감축을 보여 주었다. 이와 함께 물환경 부문 온실가스 감축을 위해 2030년과 2050년의 수요주도형 및 기술주도형 시나리오를 분석하였다. 2030년 수요주도형 시나리오 및 기술주도형 시나리오를 기반으로 한 온실가스 감축량은 2.4백만톤 CO₂eq., 4.5백만톤 CO₂eq.으로 각각 68%, 113% 감축이 가능한 것으로 추정되었다. 2050년 수요주도형 시나리오 및 기술주도형 시나리오를 기반으로 한 온실가스 감축량은 2.9백만톤 CO₂eq., 5.3백만톤 CO₂eq.으로 각각 85%, 136% 감축이 가능한 것으로 산정되었다.

〈그림 4-24〉 2030 및 2050 BAU와 온실가스 감축 후 배출량



자료: 저자 작성.

3 감축수단

3.1 가축분뇨처리

가축분뇨처리를 위한 수요관리주도 시나리오는 소비자들의 육류에 관한 소비성향의 변화를 의미한다. 구체적으로 본 연구에서는 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」에 제시되어 있는 대체가공식품과 식단 변화를 바탕으로 수요관리주도 시나리오를 구축하였다. 이러한 수요관리주도 시나리오는 소비자들의 육류소비 감소로 인한 가축 사육두수 감소를 가정한다. 수요관리주도 시나리오의 가정과 온실가스 감축량 분석 결과는 〈표 4-20〉에 제시된 바와 같다. 단 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 공급과잉이 시작된다고 예측되는 2042년 이후부터 식단변화 수단 적용을 가정하였으며, 이로 인해 2030년과 2040년 식단 변화로 인한 감축량은 없는 것으로 분석되었다.

〈표 4-20〉 수요관리주도 시나리오 주요 가정: 가축분뇨처리

(단위: %)

구분	2030	2040	2050
대체가공식품 시장점유율	4.4	9.7	15.0
식단 변화로 인한 가축 사육두수 변화	-	-	10.2

자료: 저자 작성.

〈표 4-21〉 수요관리주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 가축분뇨처리

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분	2030	2040	2050
기준 시나리오 배출량(A)	6329.47	6600.25	6822.35
감축량	대체가공식품	17.86	42.22
	식단 변화	0.00	0.00
	합계(B)	17.86	42.22
배출량(A-B)	6311.61	6558.03	6207.68

자료: 저자 작성

가. 기술혁신주도 시나리오(B안)

가축분뇨처리를 위한 기술혁신주도 시나리오는 ① 가축분뇨를 바이오차, 고체연료 등으로 전환하여 가축분뇨처리 물량을 직접적으로 감축하는 방법(퇴비 감축), ② 에너지화·정화처리를 통해 가축분뇨처리 물량을 감축하는 방법, ③ 스마트 축사를 통해 축산 부문의 생산성을 향상하고, 축산물 수요를 충족하기 위해

필요한 가축 사육두수를 감소시키는 방법으로 구성된다. 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」에서 활용한 세 부분에 대한 연도별 가정과 수단별 감축량은 <표 4-22>에 제시된 바와 같다.

<표 4-22> 수요관리주도 시나리오 주요 가정: 가축분뇨처리

(단위: %)

구분	2030	2040	2050
퇴비감축을 통한 가축분뇨처리 감소	8.0	8.0	8.0
정화처리 및 에너지화 통한 가축분뇨처리 감소	25.0	26.0	27.0
스마트 축사 보급	30.0	40.0	50.0

자료: 저자 작성.

<표 4-23> 기술혁신주도 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 가축분뇨처리

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분		2030	2040	2050
기준 시나리오 배출량(A)		6329.47	6600.25	6822.35
감축량	퇴비감축	498.89	520.56	538.32
	정화처리 및 에너지화	1559.05	1691.81	1816.85
	스마트 축사 보급	218.87	359.35	530.83
	합계(B)	2276.81	2571.72	2886.00
배출량(A-B)		4052.66	4028.53	3936.35

자료: 저자 작성.

나. 하이브리드 시나리오(C안)

가축분뇨처리와 관련된 하이브리드 시나리오는 앞서 제시한 수요관리주도 시나리오와 기술혁신주도 시나리오를 합친 것이다. 다만 이러한 시나리오 그리고 대안들과의 합은 각 대안이 온실가스 감축에 미치는 영향이 서로 독립적이라는 가정을 바탕으로 한다. 분석한 결과, 하이브리드 시나리오를 통해 가축분뇨처리 온실가스 발생량의 약 51.3%를 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

〈표 4-24〉 하이브리드 시나리오에 따른 온실가스 감축량: 가축분뇨처리

(단위: 천톤 CO₂eq.)

구분		2030	2040	2050
기준 시나리오 배출량(A)		6329.47	6600.25	6822.35
감축량	퇴비 감축	498.89	520.56	538.32
	정화처리 및 에너지화	1559.05	1691.81	1816.85
	스마트 축사 보급	218.87	359.35	530.83
	대체가공식품	17.86	42.22	69.56
	식단 변화	0.00	0.00	545.11
	합계(B)	2294.68	2613.94	3500.67
배출량(A-B)		4034.79	3986.31	3321.68

자료: 저자 작성.

3.2 하·폐수·분뇨 처리

가. 수요관리주도 시나리오(A안)

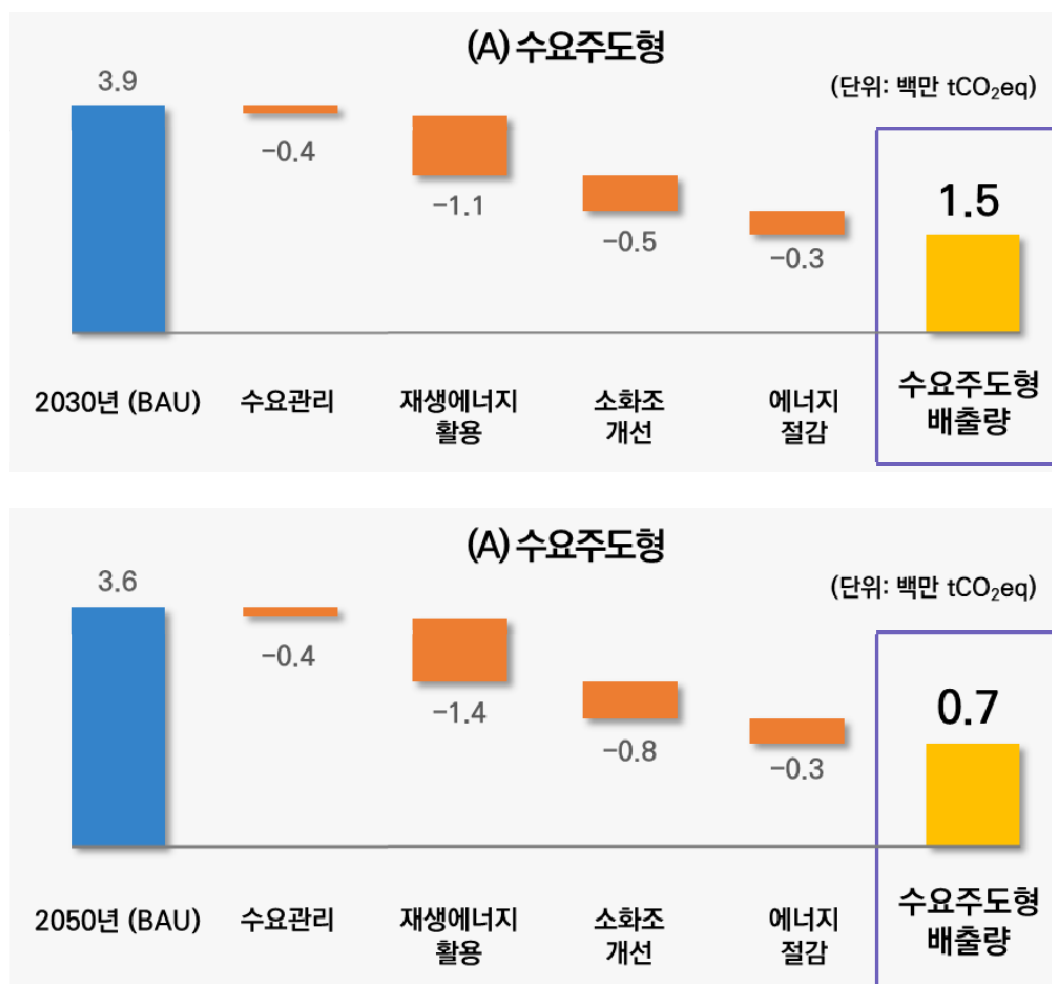
물환경 부문의 수요주도형 시나리오 분석과 함께 2030년 및 2050년의 온실가스 감축과 배출량을 산정하기 위하여 두 해의 BAU를 기반으로 수요관리, 재생에너지 활용, 소화조 향상, 에너지 절감을 고려하였다. 수요관리 분석을 위해 상수도의 유수율과 인구를 고려하였고 수요관리 기반으로 수요주도형 2030년 및 2050년의 수요관리에 의한 감축량은 0.4백만톤 CO₂eq., 0.5백만톤 CO₂eq.으로 추정되었다.

재생에너지와 소화조 개선의 목표율은 UK Water의 물환경 부문 수요주도형 탄소중립을 위한 제시 값을 기본으로 감축량을 추정하였다. 2030 UK Water의 수요주도형 재생에너지 활용은 40%를 목표로 하며 소화조 개선은 35%로 목표로 한다. 본 연구의 물환경 부문 수요주도형 분석에도 같은 목표율을 사용하였다.

2030년 재생에너지 활용으로 1.1백만톤 CO₂eq.의 감축과 소화조 개선으로 0.5백만톤 CO₂eq.의 감축을 보여 주었다. 에너지 절감에 대한 목표율은 현 지자체별 목표를 고려하여 약 10%의 절감을 목표로 하였고, 이로 인해 0.3백만톤 CO₂eq.의 배출량을 감축할 수 있을 것이다. 2050년 배출량 감축을 위해 2030 UK Water 목표를 기반으로 재생에너지 50%, 소화조 개선 50%로 설정하여 각각 1.4백만톤 CO₂eq., 0.7백만톤 CO₂eq.의 감축량을 추산하였다. 에너지 절감은 2030년 대비 2%로 향상으로 감축량 목표를 잡았다.

BAU 기반으로 수요주도형 2030년 총감축량은 2.4백만톤 CO₂eq., 배출량은 1.5백만톤 CO₂eq.이며 2050년 총감축량은 2.9백만톤 CO₂eq., 배출량은 0.7백만톤 CO₂eq.이다. 물환경 부문의 탄소중립을 위해서는 다른 시나리오를 고려해야 함을 확인할 수 있다.

〈그림 4-25〉 2030년 및 2050년 수요주도형 배출량 분석



자료: 저자 작성.

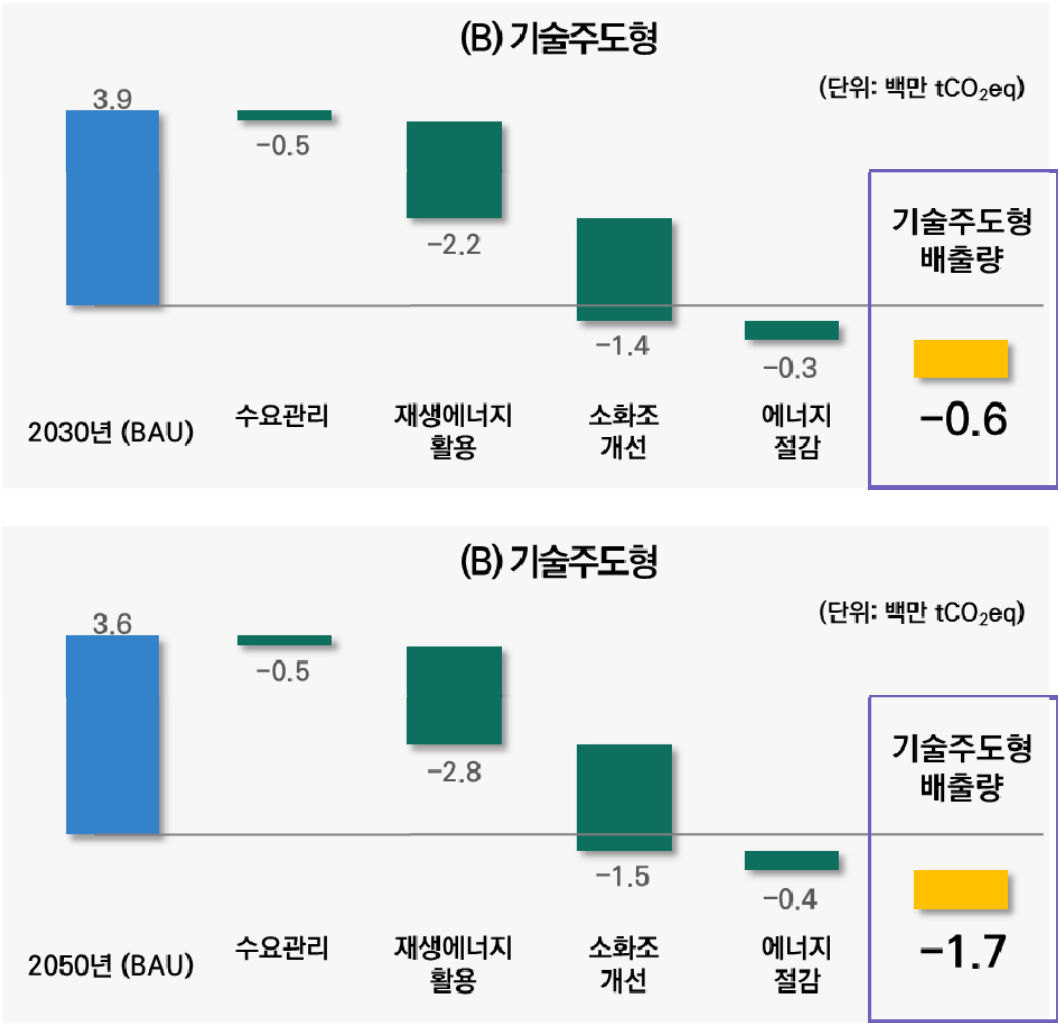
나. 기술혁신주도 시나리오(B안)

수요주도형과 같이 기술주도형 시나리오에서도 수요관리, 재생에너지 활용, 소화조 향상, 에너지 절감을 고려한 BAU를 사용하였다. 산정된 BAU를 기반으로 2030년 기술주도형 배출량 분석과 2050년 배출량 분석을 실시하였다.

2030 UK Water 분석에서 사용한 기술주도형 시나리오의 재생에너지 활용 80%, 소화조 향상 90%를 목표로 2030년 하·폐수 부문 탄소감축량을 산정하였고, 2050년은 목표값을 극대화하여 재생에너지, 소화조 향상 목표를 각각 100%로 하여 추정하였다. 2030년 재생에너지 활용, 소화조 향상, 에너지 절감으로 각각 2.2백만톤 CO₂eq., 1.4백만톤 CO₂eq., 0.3백만톤 CO₂eq.의 배출량이 감축되었다. 그리고 2050년 재생에너지 활용, 소화조 향상, 에너지 절감으로 각각 2.8백만톤 CO₂eq., 1.5백만톤 CO₂eq., 0.4백만톤 CO₂eq.의 배출량이 감축되었다.

기술주도형 2030년 총감축량은 4.5백만톤 CO₂eq., 배출량은 -0.6백만톤 CO₂eq.이고 2050년 총감축량은 5.3백만톤 CO₂eq., 배출량은 -1.7백만톤 CO₂eq.으로 탄소중립 목표 달성이 가능함을 나타내었다.

〈그림 4-26〉 2030년 및 2050년 기술주도형 배출량 분석



자료: 저자 작성.

4 정책 제언

4.1 가축분뇨처리

가축분뇨처리와 관련된 시나리오는 농식품부가 발표한 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」을 바탕으로 작성되었지만 대안별 감축량 산정에서 많은 가정을 하고 있다. 따라서 가축분뇨처리 관련 시나리오의 목표를 달성하려면 다음과 같은 세 가지 정책적 노력이 뒤따라야 한다.

첫째, 가축분뇨처리의 수요주도형 시나리오는 소비자들의 선호 변화를 바탕으로 한다. 하지만 선호가 바뀌려면 소비자의 인식 변화가 우선 이루어져야 하므로, 이를 위해서는 공공부문에서 육류소비 감소를 위한 저탄소 식단 제공, 저탄소 인증의 활성화, 교육 및 캠페인 등과 같은 정책적 노력을 추가적으로 기울일 필요가 있다.

둘째, 온실가스 인벤토리상의 정화처리는 기타시설에 포함되어 있으며, 기타시설의 아산화질소 배출계수는 액비화시설에 비해 5배 높다. 이는 현재 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」에 포함되어 있는 정화처리 관련 감축 대안은 자칫 온실가스 배출을 증가시킬 수 있음을 의미한다. 따라서 보다 효과적인 가축분뇨 적정 처리에 관한 정책을 수립하려면 가축분뇨 정화처리에 대한 배출계수 개발이 필요하다.

셋째, 스마트 팜을 통한 생산성 향상은 농가들의 한계비용을 감소시켜 자칫 과잉 생산의 원인이 될 수도 있으며, 이는 축산농가들의 경영에도 부정적인 영향을 크게 끼칠 수 있다. 따라서 가축분뇨 발생량을 줄이기 위한 스마트 팜 활용은 시장 여건과 소비자들의 선호 변화를 보다 적극적으로 고려한 뒤 진행할 필요가 있다.

4.2 하·폐수처리

기후변화로 인한 환경문제는 지속적으로 제기되어 왔으며, 전 세계적으로 기후위기를 극복하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 탄소중립과 함께 지속가능발전목표(SDGs)를 달성하고자 배출 감축량을 제시하고 재생에너지 생산정책을 제안하고 있다. 모든 부문에서 자원의 효율적 이용과 생산은 이러한 계획을 지지하는데 필수적이며, 하·폐수처리시스템에서의 에너지 생산 및 탄소중립은 실현되어야 할 중요한 어젠다이다.

물환경 부문의 탄소중립을 위해서 수요주도형 및 기술주도형의 시나리오를 분석하였다. 이러한 시나리오를 기반으로 탄소중립 목표를 달성하려면 시스템의 효율성 향상, 신재생에너지 생산을 포함한 에너지 자립화 및 에너지 자원 공급, 지자체와 민간기업의 협업을 통한 재정부담 완화 등의 정책이 마련되어야 한다.

또한 「하수도법」이나 「녹색건축물 조성 지원법」, 그리고 산업통상자원부의 「에너지이용 합리화법」에 근거하여 에너지효율성을 향상할 것이다. 이러한 에너지관리 제도를 개선함으로써 물환경 부문 탄소중립 계획과 목표 달성의 가능성을 높이고 탄소중립 정책의 실효성에 기여할 수 있을 것이다. 각 항목에 대한 자세한 설명은 제5장 물 분야 2050 탄소중립 이행 기반 마련에서 살펴본다.

제4절

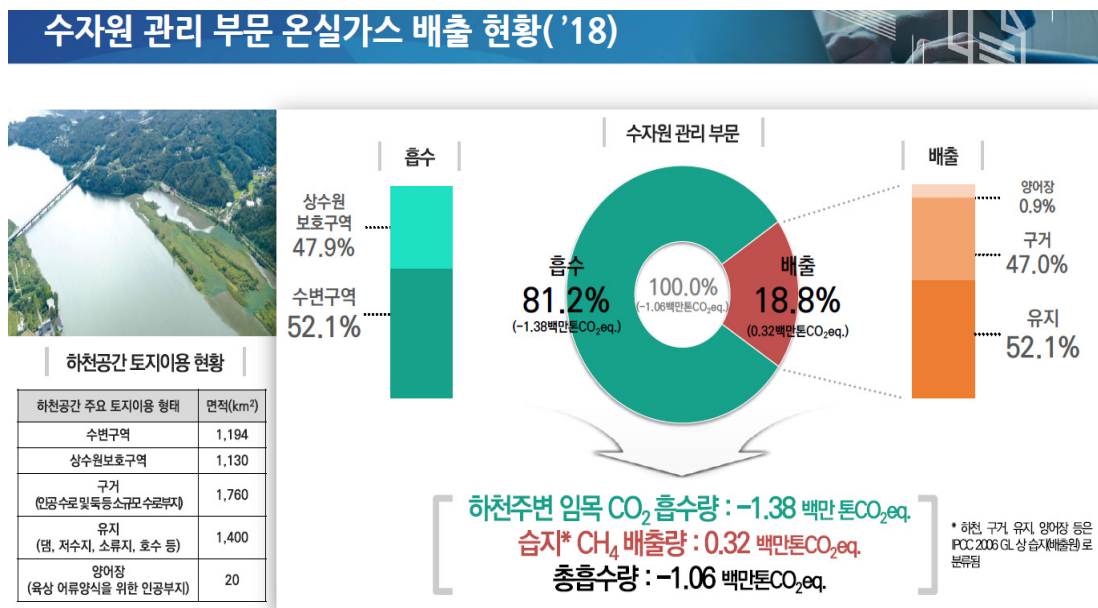
수자원 관리 부문

1 현황(2018년)

수자원 관리 부문에는 하천공간 토지이용 형태에 따른 흡수 및 배출이 포함된다. 흡수 부문의 수변구역·상수원보호구역 내 임목지에 의한 CO₂ 흡수와 배출 부문의 지적통계상 유지에 해당하는 구거, 유지, 양어장 등에 의한 CH₄ 배출에 기인한다.

수자원 관리 부문 2018년 온실가스 총흡수량은 1.28백만톤 CO₂eq.으로 우리나라 온실가스 총배출량의 약 35.7%로 나타났다. 수변구역·상수원보호구역의 수목에 의한 온실가스 총흡수량은 1.56백만톤 CO₂eq.이며, 인공침수지에 의한 온실가스 총흡수량은 0.28백만톤 CO₂eq.이다.

〈그림 4-27〉 2018년 수자원 관리 부문 온실가스 배출 및 흡수 현황

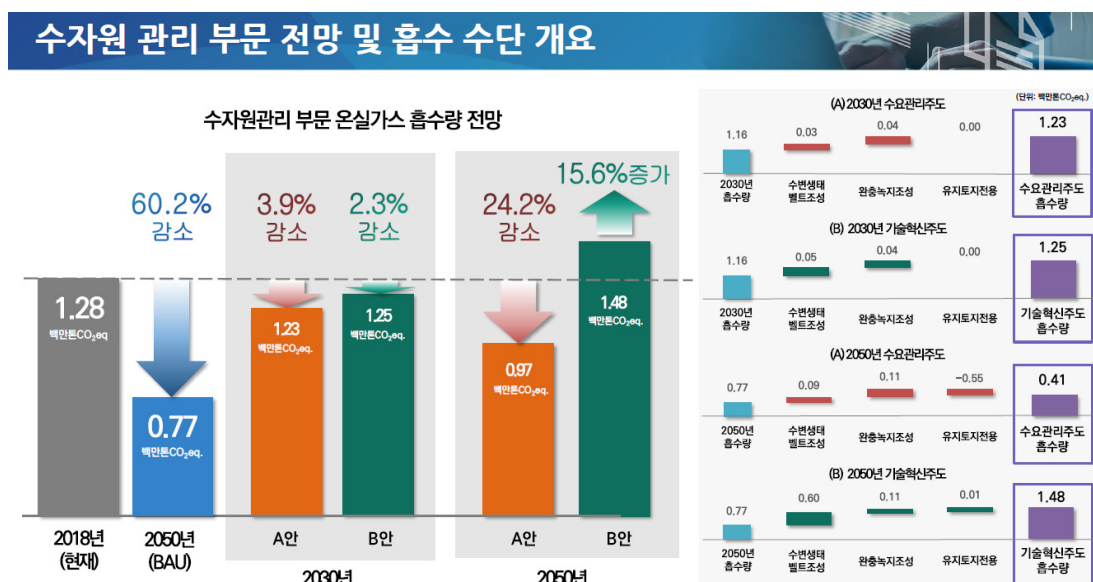


자료: 저자 작성.

2 전망(BAU, 시나리오 3)

BAU에서는 현재 조성된 수변구역·상수원보호구역 내 임목지 면적과 인공침수지 면적이 2018년과 동일하게 2050년까지 유지되는 것으로 가정하고, 여기에 수목의 노화에 따른 흡수량 증감 폭을 고려하였다. 수변구역·상수원보호구역 내 임목지에 의한 온실가스 흡수량은 2018년 1.56백만톤 CO₂eq.에서 2050년 1.05백만톤 CO₂eq.으로 감소하였고, 해당 수치에 인공침수지의 온실가스 배출량 0.28을 합산할 경우 수자원 관리 부문 BAU 흡수량은 0.77백만톤 CO₂eq.으로 전망된다.

〈그림 4-28〉 2030년 및 2040년 시나리오별 흡수 및 배출 전망 총괄



시나리오 A안에서는 제3차 한강 수계 수변관리기본계획에서 제시된 연 수변생태벨트 추가 면적을 2016~2018년 최근 3년 평균값을 유지하는 것으로 가정하였다. 이 같은 가정을 통해 2050년 수변구역 및 상수원보호구역 온실가스 흡수량을 산정할 경우, (1) 신규 수변생태벨트 조성에 따른 추가 온실가스 흡수량은 약 0.085백만톤 CO₂eq.으로 산정되었다.

해당 수치는 (2) 기초성 임목 녹화에 따른 흡수량 감소 수치(1.56 → 1.05백만톤 CO₂eq.)의 20% 미만에 해당하는 수치이다. (3) 댐 홍수터, 폐천부지, 이용률 저조 4대강 친수공원의 토지 전용을 통해 임목지를 조성할 경우, 2050년에 온실가스 흡수량 약 0.12백만톤 CO₂eq.이 추가로 확보 가능한 것으로 나타났다. 최종적으로 (1), (2), (3) 항목의 흡수량과 (4) 기존 인공침수지(2050년까지 구거, 유지, 양어장 면적이 동일함을 가정) 온실가스 배출량을 합산하면 A안의 수자원 관리 부문 2050년 온실가스 총 흡수량은 0.97백만톤 CO₂eq. (2018년 흡수량의 약 75.8%)으로 전망된다.

시나리오 B안과 C안에서는 제3차 낙동강 수계 수변관리기본계획에서 제시된 연 수변생태벨트 면적의 연 10% 증가를 가정하였다. 해당 가정 아래 2050년 수변구역 및 상수원보호구역 온실가스 흡수량을 산정하면, (1) 신규 수변생태벨트 조성에 따른 추가 온실가스 흡수량은 A안의 약 7배에 해당하는 약 0.599백만톤 CO₂eq.으로 산정되었다.

수변생태벨트 조성 이외에 흡·배출 시나리오는 A안의 (2)~(4) 항목과 동일함에 따라 최종적으로 B안과 C안의 수자원 관리 부문 2050년 온실가스 총흡수량은 -1.48 백만톤 CO₂eq.으로 전망되었으며, 해당 값은 2018년 흡수량 대비 약 1.15배 높은 수치이다.

3 감축수단

● 소극적 생태벨트조성 시나리오(A안)

- 매년 최근 3년 평균 면적으로 신규 수변생태벨트 조성
- 댐 홍수터 부지(61.6km²) 토지 전용에 따른 임목지 조성 및 유지 CH₄ 배출량 감축
- 폐천부지(27.4km²) 토지 전용에 따른 임목지 조성
- 이용률 저조 4대강 친수공원 부지(8.0km²) 토지 전용에 따른 임목지 조성

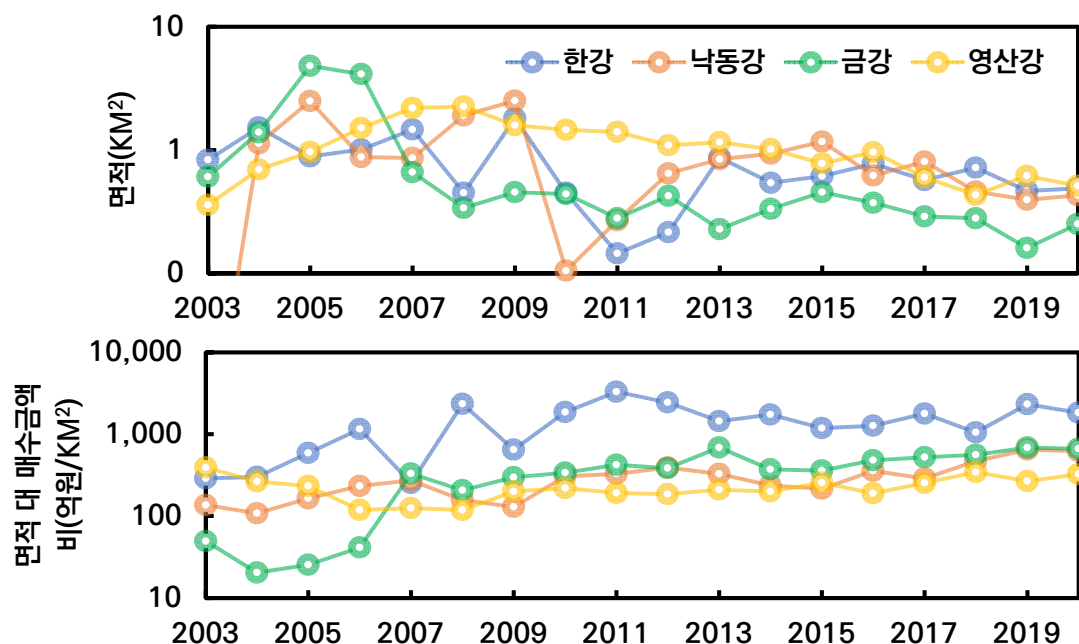
● 적극적 생태벨트조성 시나리오(B안, C안)

- 매년 전년도 대비 10% 증가 면적으로 신규 수변생태벨트 조성
- 댐 홍수터 부지(61.6km²) 토지 전용에 따른 임목지 조성 및 유지 CH₄ 배출량 감축
- 폐천부지(27.4km²) 토지 전용에 따른 임목지 조성
- 이용률 저조 4대강 친수공원 부지(8.0km²) 토지 전용에 따른 임목지 조성

4 정책 제언

현재 우리나라는 수자원 관리 부문의 주요 온실가스 흡수 수단으로 수계관리기금을 활용하여 토지매수 및 수변생태벨트 조성사업을 벌여 수변녹지를 확대하고 있다. 그러나 관련 예산이 소폭 상승 혹은 유지되고 있음에도 지속적 지가 상승에 따른 매수토지 면적의 감소가 발생하고 있어 보다 실효성 높은 수변구역 토지매수 전략 마련이 요청된다.

〈그림 4-29〉 2003~2020년 4대강 수계별 매수토지 면적 및 매수금액 변화



자료: 저자 작성.

수변생태벨트 조성 등 친환경 하천정비사업을 시행하였을 때, 기후변화 적응 차원에서 환경(수질), 생태 관련 평가 항목 외에 이·치수, 친수, 탄소흡수 부문에서 발생할 수 있는 사업 편익 평가 도구 마련이 필요하다. 일부 수변구역관리기본계획에서 수변녹지의 탄소흡수 효과를 언급하고 있으나, 이를 고려한 타당성 평가 방법이 정립되어 있지 않아 수변생태벨트 조성사업 평가 지침 마련과 관련 매뉴얼 개발이 필요하다.

현재 4대강 토지매수 우선지역은 하천경계로부터 거리, 비점오염부하량(토지 용도) 등에 따라 선정되는 등 상수원 수질개선에 중점을 두고 있어 향후 온실가스 저감 및 치수 기능 개선 효과를 종합적으로 고려할 수 있는 기후변화 완화와 적응을 동시에 고려할 수 있는 수변생태벨트 대상지역 선정 절차가 마련되어야 할 것으로 판단된다.

또한 홍수터 내 교목 식재는 하천의 통수 단면적 축소로 인해 치수적 측면에서 부정적 영향이 발생할 수 있다. 따라서 이에 대한 면밀한 기술적 검토가 요구되며, 특히 하천구역 내 식재 시 수종 및 배치에 따른 지체 구조 영향을 실증적으로 파악하여 적절한 설계 및 보강 기술을 마련하고 관련 치수영향평가 방법 개발이 수반되어야 한다.

제5절

물 분야 감축수단 공편익

물 분야의 탄소중립 물관리 전략 중 타 부문(농업, 에너지)의 온실가스 감축을 할 수 있는 공편익 전략들이 존재한다. 본 연구에서는 물수요 관리를 통한 타 부문의 감축량 중 ① 벼재배 물관리 온실가스 감축량, ② 온수 물수요 관리를 통한 에너지 부문 온실가스 감축량, 물환경 관리에서 가축분뇨 관리를 통한 감축량, ③ 농경지 토양의 수계 유출의 감축량, ④ 가축 사육두수 감축을 통한 온실가스 감축량을 대표적인 물 분야 감축수단의 공편익으로 설정하여 산정하였다.

1

벼재배 물관리 온실가스 감축량

1.1 배출량 산정

가. 산정방법

벼재배 과정에서 논밭에 물을 대어 놓는 관개농법에 의해 담수상태의 논에서 온실가스가 배출된다. 벼재배에서 배출되는 온실가스는 메탄(CH_4)이며, 논 의 물관리 방법에 따라 배출량 산정에 차이가 있다.

벼재배 부문 배출원은 물관리가 가능한 논, 즉 상시담수와 간단관개와 물관리가 되지 않는 천수답으로 구분하여 배출량을 산출한다. 물관리가 가능한 논은 수확 전 물을 빼는 시기를 제외하고 물이 항상 차 있는 상시담수(continuously flooded) 논과 벼재배 기간 중 3일 이상 물을 빼고 건조하는 간단관개(intermittently flooded) 논으로 구분한다. 간단관개는 물을 빼는 기간에 따라 1~2주 미만(간단관개 1회)과 2주 이상(간단관개 2회 이상)으로 구분한다. 물관리가 되지 않는 논인 천수답은 상습가뭄으로 분류하여 산정한다. 벼재배 부문 온실가스 배출량 산정은 아래 식을 따른다.

벼재배 부문 CH_4 배출량 산정식

$$CH_4 = A \times EF_1 \times t \times 10^{-6} (\text{천 톤 } CH_4/\text{yr})$$

A	: 벼재배 면적(ha/yr)
EF_1	: 벼재배 메탄 배출계수(kg CH_4 /ha/day)
t	: 벼재배 일수(day)

$$EF_1 = EF_C \times SF_W \times SF_O$$

EF_C	: 기본 배출계수(kg CH_4 /ha/day)
SF_W	: 벼재배 기간 중 물관리 보정계수
SF_O	: 유기물 사용 보정계수

벼재배 부문 메탄 배출량은 벼재배 면적에 배출계수와 벼재배 일수를 곱하여 산정한다. 배출계수는 기본 배출계수에 벼재배 기간 중 물관리 보정계수와 유기물 시용 보정계수를 적용하여 계산한다. 벼재배 일수는 2011~2017년은 138일, 2018년 이후는 137일을 적용하였다.⁴⁶⁾

나. 활동자료

벼재배 부문의 온실가스 배출량 산정을 위한 활동자료는 벼와 맥류의 재배면적이다.⁴⁷⁾ 재배면적은 농림축산식품부의 「농림축산식품통계연보」(농림축산식품부, 각 연도)를 활용하여 해당 연도와 직전 2개년 자료를 평균한 값을 활용한다.

〈표 4-25〉 벼, 맥류 재배면적 3년 평균자료

(단위: 천ha)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
벼	885	861	843	831	815	797	777	757	740
맥류	49	41	35	34	38	43	43	46	47
합계	934	903	878	865	853	840	820	803	787

자료: 농림축산식품부(각 연도), 농림축산식품통계연보.

물관리 방법별 재배면적을 구분하기 위해 유기물 환원 비율과 유기물 시용·무시용 비율, 물관리 방법별 벼재배 비율을 산출해야 한다.

벼재배에서 사용하는 유기비료인 볏짚·보릿짚 유기물 환원에 대한 면적 비율은 「2017~2019년 농림어업조사」(통계청, 2018~2020)의 마이크로데이터를 활용하여 계산한다. 2011년부터 2016년은 조사자료가 없으므로 2017년 값을 일괄적으로 적용하였고, 2018년과 2019년은 각 연도의 농림어업조사 자료를 활용하여 계산한다.

〈표 4-26〉 볏짚·보릿짚 유기물 환원 면적 비율

(단위: %)

구분	2011~2017	2018	2019
볶짚·보릿짚 유기물 환원 면적 비율	47.19	46.03	55.93

자료: 통계청(2018~2020), 2017~2019년 농림어업조사.

46) 재배일수는 기후변화로 인한 온도 상승으로 과거에 비해 모내기 이앙 적기가 늦어지는 추세를 반영하여 변경하였다. 벼 재배기간으로 구분되는 각각의 품종(조생, 중생, 중만생) 면적 비율을 산정한 후 품종별 재배 일수에 면적 비율을 가중하여 산출하였다(환경부, 2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서)

47) 우리나라는 벼, 보리 이모작을 하기 때문에 맥류 재배면적을 고려하여 벼재배 논 면적에서 맥류 재배 시 환원되는 유기물 시용에 대한 배출량을 산정한다.

유기물 사용·무사용 면적 비율은 통계청 농림어업조사의 마이크로데이터를 활용하였다.⁴⁸⁾ 유기물 사용 비율은 벼에 대한 수확 후 잔사처리 방법 문항의 ‘경지비료로 활용’ 항목에 대한 응답을 이용하여 계산하였다. 2017~2019년 자료는 각 연도의 조사 항목으로 계산하여 적용하였다. 2011~2016년까지 유기물 사용면적 비율은 환경부 온실가스 인벤토리 보고서에 따라 1990년 유기물 사용면적을 50%로 정하고, 선형내삽을 하여 산정하였다.

〈표 4-27〉 유기물 사용·무사용 면적 비율

(단위: %)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
사용	54.69	54.91	55.14	55.36	55.58	55.81	56.03	55.62	50.38
무사용	45.31	45.09	44.86	44.64	44.42	44.19	43.97	44.38	49.62

자료: 통계청(2018~2020) 2017~2019년 농림어업조사.

벼재배 논외 물관리 방법별 재배면적은 통계청 「2011~2019년 농림어업조사」(통계청, 2012~2020)의 마이크로데이터를 활용한다. 물관리 방법별 비율은 논벼 물관리 항목 문항으로 계산하였으며, 2015년은 조사자료가 없으므로 2014년과 2016년 비율을 내삽하여 준용하였다.

〈표 4-28〉 벼재배 논외 물관리 방법별 면적 비율

(단위: %)

구분	상시답수	간단관개			천수답
		중간낙수 1주	중간낙수 1~2주	중간낙수 2주 이상	
2011	12.09	16.41	44.43	26.10	0.96
2014	9.60	14.54	49.84	25.32	0.70
2017	12.70	12.38	40.90	33.26	0.76
2018	12.66	9.50	38.70	38.41	0.73
2019	12.95	7.79	38.35	40.33	0.59

자료: 통계청(2018~2020), 2017~2019년 농림어업조사.

논물관리 배출량 산정에 사용되는 최종 면적 자료를 도출하려면, 먼저 맥류 재배면적에 벼짚·보릿짚 유기물 환원 면적 비율을 적용하여 보리·밀 유기물 환원 면적을 산출한다. 다음으로 전체 논벼 면적에서 보리·밀 유기물 환원 면적을 제한 후 유기물 사용 비율을 곱하여 벼짚 유기물 환원 면적을 계산한다. 앞서 언급한 과정을 통해 도출한 최종 면적 자료는 〈표 4-29〉와 같다.

48) 2010년 이전에 벼재배 논외 유기물 사용에 대한 통계가 존재하지 않다가, 이후 「2010년 농림어업 총조사」(통계청, 2011)에 논벼 유기비료 항목이 신규로 조사되었다. 하지만 경지비료 사용에 대한 정의가 인벤토리 상의 정의와 달라서 사용하지 못하였으나, 2017년부터 정의를 인벤토리와 동일하게 조정하여 활용할 수 있게 되었다(환경부, 2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서).

앞서 구한 볏짚 유기물 환원 면적과 보리·밀 유기물 환원 면적에 물관리 방법별 비율을 적용하여 각각 상시답수, 간단관개, 천수답으로 구분한 후 방법별로 합산하여 유기물 시용에 따른 배출량을 산정한다. 보리·밀 유기물 환원은 농법의 특성을 고려하여 상시답수를 제외하고 중간낙수와 천수답으로만 면적 비율을 재계산하여 적용하였다. 마지막으로 유기물 무시용 면적은 전체 논벼 면적에서 유기물 시용 면적을 제한 후 물관리 방법 비율을 적용하여 산정하였다.

〈표 4-29〉 유기물 시용 및 물관리 방법별 벼재배 면적(3개년 평균)

(단위: 천ha)

구분		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
유기물 시용	상시답수	61.8	57.9	51.5	47.3	47.4	54.5	57.9	56.4	49.5
	중간낙수(1주)	92.8	82.5	71.8	68.1	66.8	66.7	62.2	53.4	41.3
	중간낙수(1~2주)	216.9	211.4	211.9	217.8	217.3	204.7	187.3	173.8	163.0
	중간낙수(2주 이상)	116.6	123.3	130.5	127.9	123.9	122.3	131.4	144.9	154.1
	천수답	4.4	4.8	4.7	4.2	3.5	3.6	3.6	3.4	2.9
유기물 무시용	상시답수	51.7	48.0	42.3	38.5	38.2	43.5	45.9	44.6	42.1
	중간낙수(1주)	73.5	65.2	56.6	53.3	51.5	50.6	46.7	39.8	32.4
	중간낙수(1~2주)	171.6	167.0	167.1	170.4	167.6	155.4	140.5	129.6	129.5
	중간낙수(2주 이상)	92.3	97.4	102.9	100.1	95.6	92.6	98.5	108.1	123.3
	천수답	3.5	3.8	3.7	3.3	2.7	2.7	2.7	2.6	2.3
합계		885.0	861.3	843.0	830.8	814.5	796.7	776.7	756.5	740.5

자료: 〈표 4-25〉~〈표 4-28〉를 이용하여 산정함.

다. 배출계수

벼재배 논에서 CH_4 배출량 산정을 위한 기본 배출계수(EF_0)는 2014년 국가고유 배출계수로 승인받은 2.32 $\text{kg CH}_4/\text{ha}/\text{day}$ 를 적용한다.

벼재배 기간 중 물관리 보정계수는(SF_w)와 유기물 시용 보정계수(SF_o)는 2014년 국가고유 배출계수로 승인받은 값을 적용한다. 물관리 방법 중 천수답(상습가뭄)은 IPCC GPG 2000의 기본계수를 적용하였다.

논의 유기물 시용 보정계수는 국립농업과학원의 「작물별 비료사용처방 기준」(농촌진흥청 국립농업과학원, 2017)에 따른 단위당 표준 볏짚 사용량인 6톤/ha를 준용하였다.

〈표 4-30〉 벼재배 물관리 방법 및 유기물 사용 보정계수

구분				보정계수
물관리 방법별 보정계수(SF _w)	상시답수			1.00
	간단관개	1회 간단관개	중간낙수(1주 미만)	0.83
			중간낙수(1주 이상~2주 미만)	0.66
		2회 이상 간단관개	중간낙수(2주 이상)	0.49
	천수답			상습가뭄 0.40
유기물 사용 보정계수(SF _o)	유기물 사용량(건중량)			5~7톤/ha 2.5

자료: 국가고유 배출계수(2014년 승인), IPCC GPG 2000.

1.2 감축량 산정

농림축산식품부의 2050 농식품 탄소중립 추진전략에서 논물관리를 통한 온실가스 감축 방안을 제시하였다. 통계청 조사결과에 따르면 2018년에 중간낙수를 이행하는 농가는 전체의 86.6%로 대부분의 농가에서 간단관개를 하고 있으나, 중간낙수 2주 이상 이행하는 농가는 전체 38.7% 수준에 불과하여 온실가스 감축역량은 높은 것으로 나타났다.⁴⁹⁾

따라서 온실가스 배출 저감을 위해 2030년까지 2주 이상 간단관개 비율을 61.1%로 확대한다는 목표를 발표하였다. 간단관개 기간 연장과 더불어 고품질 생산단지를 중점으로 논물 얇게 대기를 확대하는 등 추가적인 감축 방안도 제시하였다. 논물 얇게 대기는 2030년까지 간단관개 면적의 10% 수준으로 확대하기로 계획하였다.

〈표 4-31〉 벼재배 부문 온실가스 배출량 및 목표 감축량

(단위: %, 천톤 CO₂)

구분	2018년 배출량	2030년		2040년		2050년	
		목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량
간단관개 2주 이상 (중간 물떼기)	6,251	61.1	474	61.1	474	61.1	474
논물 얇게 대기		10	66	10	66	10	66

자료: 농림축산식품부(2021a).

49) 물관리 방법별 농가 비율(2018): 상시답수 12.7%, 중간낙수 1주 이하 9.5%, 중간낙수 1~2주 38.7%, 중간낙수 2주 이상 38.4%, 천수답(상습가뭄) 0.73%(통계청, 「(2011~2019)농림어업조사」 마이크로데이터).

2 농경지 토양의 비점오염원 관리를 통한 온실가스 감축량

2.1 배출량 산정

가. 산정방법

농경지토양 부문은 농경지에 투입되는 질소로 인해 아산화질소(N_2O)가 배출되고 있다. 온실가스 배출은 농경지토양 투입원이 동일 장소에서 배출되는 직접배출과 대기휘산, 수계유출로 인한 간접배출로 구분된다.

농경지토양의 세부 배출원은 화학비료, 가축분뇨 및 작물 잔사환원이 있으며, 2050 농식품 탄소중립 전략에 따른 농경지 토양의 물관리 부문 감축 방안으로 가축분뇨 투입으로 인한 온실가스 직접배출량을 산정하였다.

농경지토양의 N_2O 배출량은 2006 IPCC GL Tier 2를 따르며 아래 식으로 산정된다.

농경지토양 부문 가축분뇨 N_2O 직접 배출량 산정식

$$N_2O_{Direct} = (N_2O - N_{Inputs} + N_2O - N_{OS} + N_2O - N_{PRP}) \times \frac{44}{28}$$

$$N_2O - N_{Inputs} = \sum_i (F_{SNi} \times EF_{1i}) + (F_{ON} + F_{SOM} + F_{CR}) \times EF_1 + (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}_{FR}) \times EF_{1FR}$$

$$N_2O - N_{PRP} = [(F_{PRP,CPP} \times EF_{3PRP,CPP}) + (F_{PRP,SO} \times EF_{3PRP,SO})]$$

N_2O_{Direct}	: 농경지토양 N_2O 직접배출량[kg N_2O /yr]
$N_2O - N_{Inputs}$	: 연간 관리되는 농경지토양의 질소 투입에 따른 직접 배출량[kg N_2O -N/yr]
$N_2O - N_{OS}$	: 연간 관리되는 유기토양의 N_2O -N 직접 배출량[kg N_2O -N/yr]
$N_2O - N_{PRP}$	: 연간 방목지에 가축분뇨로 투입되는 N_2O -N 직접 배출량[kg N_2O -N/yr]
44/28	: N 배출량(kg N_2O -N/yr)의 N_2O 환산계수
F_{SN}	: 연간 화학비료로 투입되는 질소량(NH_3 , NO_x 대기 휘산량 제외)[kg N/yr]
F_{ON}	: 연간 유기질소로 투입되는 질소량[kg N/yr]
F_{CR}	: 연간 작물 잔사로서 농경지에 재투입되는 질소량[kg N/yr]
F_{SOM}	: 연간 농경지토양 토지이용 및 관리 변화에 따른 토양탄소 손실로 인해 광물화된 질소량[kg N/yr]
F_{PRP}	: 연간 방목 가축의 분뇨로 목초지, 방목지, 들판에 투입되는 질소량[kg N/yr]
EF_{1i}	: 작물별 N_2O 직접 배출계수[kg N_2O -N/kg N 투입량]
EF_{1FR}	: 논벼 재배지 질소 투입에 따른 N_2O 배출계수[kg N_2O -N/kg N 투입량]
EF_{3PRP}	: 방목 가축의 분뇨로 목초지, 방목지, 들판의 질소 투입에 따른 N_2O 배출계수[kg N_2O -N/kg N 투입량]
*CPP는 소, 가금류, 돼지, SO는 양 및 기타 가축을 의미함	

$F_{ON} = F_{AM} + F_{SEW} + F_{COMP} + F_{OOA}$ $F_{AM} = \Sigma(N_T \times Nex_{(T)}) \times (1 - Frac_{GASM}) [1 - (Frac_{FUEL-AM} + Frac_{PRP})]$	
F _{ON}	: 연간 방목 가축에 의해 투입되는 질소를 제외한, 농경지 토양에 투입되는 유기질 비료량[kg N/yr]
F _{AM}	: 연간 가축분뇨 질소의 농경지 투입량[kg N/yr]
F _{SEW}	: 연간 하수 질소의 농경지 투입량[kg N/yr](폐기물 부문의 하수 질소량과 중복 산정되지 않도록 주의)
F _{COMP}	: 연간 녹비 질소의 농경지 투입량[kg N/yr] (퇴비화한 분뇨의 질소량과 중복 산정되지 않도록 주의)
F _{OOA}	: 연간 기타 유기질 비료(축산처리 폐기물, 해조분, 양조장 폐기물 등)의 농경지 투입량[kg N/yr]
N _T	: 국내 가축종 T의 수
Nex _(T)	: 국내 가축종 T의 분뇨 N 총배출량[kg N/yr]
Frac _{GASM}	: 가축분뇨 중 대기로 휘산되는 NH ₃ , NO _x 비율
Frac _{FUEL}	: 가축분뇨 중 연료로 소각되는 비율
Frac _{PRP}	: 방목 가축에 의해 농경지 토양에 투입되는 분뇨 비율
T	: 가축종

나. 활동자료

가축분뇨의 질소 발생량은 축종별 사육두수에 축종별 분뇨 질소 배출량을 곱하여 산정하며, 가축분뇨처리 부문의 활동자료와 동일한 자료를 활용하여 산정한다.

농경지토양에서 가축분뇨 투입으로 인한 온실가스 배출량은 연간 발생하는 가축분뇨의 질소 발생량 중에서 대기휘산 비율(0.2)을 제외하고 남은 전량이 농경지에 투입되는 것으로 간주한다. 축종별 농경지에 투입되는 가축분뇨 질소량은 <표 4-32>에 제시된 바와 같다.

<표 4-32> 축종별 가축분뇨 질소 투입량

(단위: 천톤)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
젖소	32.1	33.0	33.7	35.2	34.6	33.7	33.0	32.5	32.4
한·육우	167.0	171.5	167.9	173.1	165.0	164.7	168.8	172.8	179.3
양(면양)	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
염소(산양)	7.9	8.0	8.0	8.0	8.3	9.4	10.9	13.7	16.1
말	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
돼지	121.3	152.5	161.6	157.7	162.0	166.8	179.8	181.7	182.0
닭	73.4	71.9	71.5	76.3	81.9	80.9	77.4	84.5	86.8
오리	6.5	5.9	5.7	3.4	4.6	4.5	3.2	4.2	4.3
사슴	2.0	1.8	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9
합계	411.3	445.6	450.8	456.0	458.4	461.9	475.0	491.3	502.7

자료: 통계청(2009~2020), 「가축동향조사」; 농림수산식품부(2009~2013), 「농림수산식품통계연보」; 농림축산식품부(2014~2020), 「농림축산식품통계연보」.

다. 배출계수

가축분뇨로 인해 농경지에 투입되는 질소량에 2006 IPCC GL 기본 배출계수인 0.01 kg N₂O-N/kg N을 적용하여 N₂O 배출량을 산출하였다.

〈표 4-33〉 가축분뇨 투입 N₂O 직접 배출계수

구분	배출계수 (kg N ₂ O-N/kg N)
기본 배출계수(EF ₁)	0.01

자료: IPCC(2006).

2.2 감축량 산정

농경지 토양에 투입되는 가축분뇨의 감축을 위해 가축분뇨처리와 연계한 목표 감축량을 제시하였다. 가축분뇨처리 방법 중 퇴·액비화 비율을 줄이고, 정화처리 및 신재생에너지화 처리 확대를 통해 농경지에 살포되는 양분을 감축할 수 있다.

2050 농식품 탄소중립 추진전략의 로드맵에 따르면 농경지토양에 투입되는 가축분뇨의 저감에 따른 목표치는 가축분뇨의 정화처리·에너지화 비율과 동일한 수준으로 발표되었다.

농경지 투입 분뇨량 저감을 통한 온실가스 감축은 2030년 33%에서 단계적으로 확대하여 2050년까지 35%를 감축할 계획이다.

〈표 4-34〉 농경지토양 부문 가축분뇨 투입의 온실가스 배출량 및 목표 감축량

(단위: %, 천톤 CO₂)

구분	2018년 배출량	2030년		2040년		2050년	
		목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량
농경지 투입 분뇨량 저감	2,393	33	1,683	34	1,814	35	1,936

자료: 농림축산식품부(2021a), p.9.

3 가축 사육두수 감소를 통한 온실가스 감축량

3.1 배출량 산정

가. 산정방법

가축분뇨 감소를 위한 생산성 향상과 수료관리수단(대체식품 및 식생활 개선)은 가축 사육두수를 감소시키고 이로 인해 가축 장내발효로부터 발생하는 CH₄ 배출량이 감축된다.

가축의 소화 과정에서 섭취한 사료가 장내 미생물에 의해 발효되며 대사산물로 메탄(CH₄)이 발생된다. 우리나라에서는 장내발효의 배출원으로 소(젖소, 한·육우), 염소(산양), 양(면양), 말, 사슴, 돼지의 배출량을 산정하고 있다. 장내발효의 CH₄ 배출량 산정식은 가축분뇨처리 부문의 CH₄ 배출량 산정식과 동일한 1996년 IPCC GL Tier 1 방법을 따른다. 장내발효 부문의 메탄 배출량은 축종별 사육두수에 축종별 CH₄ 배출계수를 곱하여 산정한다.

장내발효의 CH₄ 배출량 산정식

$$E_i = EF_i \times population_i \times (Gg/10^{-6}kg)$$

E_i : 가축종 i 의 CH₄ 배출량(천톤 CH₄/year)
 EF_i : 가축종 i 의 배출계수(kg CH₄/head/year)
 $population_i$: 가축종 i 의 사육두수(head)

나. 활동자료

장내발효 부문의 CH₄ 배출량 산정을 위한 활동자료는 가축 사육두수가 활용되며 해당 자료는 가축분뇨처리 부문의 축종별 사육두수 활동자료와 동일하다. 활동자료는 축종별 통계조사 주기에 따라 분기별 자료를 연평균하거나 또는 연간 자료를 해당 연도와 직전 2개년 자료를 3년 평균하여 구축하였다.

〈표 4-35〉 축종별 가축 사육두수 활동자료(Population)

(단위: 천 마리)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
젖소	402	413	421	440	433	421	412	407	405
한·육우	2,982	3,063	2,998	3,091	2,946	2,942	3,015	3,086	3,202
양(면양)	4	4	3	3	3	2	2	2	2
염소(산양)	247	250	249	250	259	295	342	428	503
말	30	30	30	28	24	23	24	28	28
돼지	7,580	9,534	10,097	9,858	10,127	10,426	11,239	11,358	11,377
닭	152,895	149,750	148,883	158,987	170,543	168,642	161,208	175,962	180,907
오리	13,628	12,367	11,910	7,101	9,679	9,274	6,637	8,760	8,947
사슴	64	55	47	43	38	34	32	29	27

주: 가축분뇨처리 부문 온실가스 배출량 산정의 활동자료와 동일함.

자료: 통계청(2009~2020), 「가축동향조사」; 농림수산식품부(2009~2013), 「농림수산식품통계연보」; 농림축산식품부(2014~2020), 「농림축산식품통계연보」.

다. 배출계수

장내발효 부문의 CH₄ 배출계수는 1996 IPCC GL 기본값을 적용하였으며, 우리나라의 축종별 상황에 맞는 배출계수를 활용하였다⁵⁰⁾. 젖소와 한·육우는 복미의 기본값을 적용하였으며, 돼지의 경우는 선진국의 기본 배출계수를 적용한다. 염소(산양)·사슴·양(면양)과 말의 경우 개발도상국의 기본 배출계수를 적용하였다.

〈표 4-36〉 장내발효 부문 축종별 CH₄ 배출계수(EFi)

축종	배출계수 (kg CH ₄ /두수/년)	배출계수 자료	배출계수 계산법
젖소	118	IPCC 기본값(복미)	IPCC, Tier 1
한·육우	47	IPCC 기본값(복미)	IPCC, Tier 1
돼지	1.5	IPCC 기본값(선진국)	IPCC, Tier 1
염소(산양)·사슴·양(면양)	5	IPCC 기본값(개발도상국)	IPCC, Tier 1
말	18	IPCC 기본값(개발도상국)	IPCC, Tier 1

자료: IPCC(1996).

3.2 감축량 산정

2050 농식품 탄소중립 추진전략의 로드맵에는 식단 변화, 대체가공식품, 스마트 축사 보급에 관한 정책 목표가 명시되어 있다. 따라서 본 연구에서는 수단별로 정책 목표 달성 시 감소하는 가축 사육두수를 바탕으로

50) 환경부(2021).

가축 사육두수 감소로 인한 장내발효 부문의 온실가스 감축량을 시산하였다.

〈표 4-37〉 가축 사육두수 감소로 인한 장내발효 부문의 온실가스 감축량

(단위: %, 천톤 CO₂)

구분	2018년 배출량	2030년		2040년		2050년	
		목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량
식단 변화	4,471 ¹⁾	-	-	-	-	10.2	348.3
대체가공식품		4.4	2.2	9.7	5.3	15	8.9
스마트 축사 보급		30	209.4	40	329.5	50	469.0

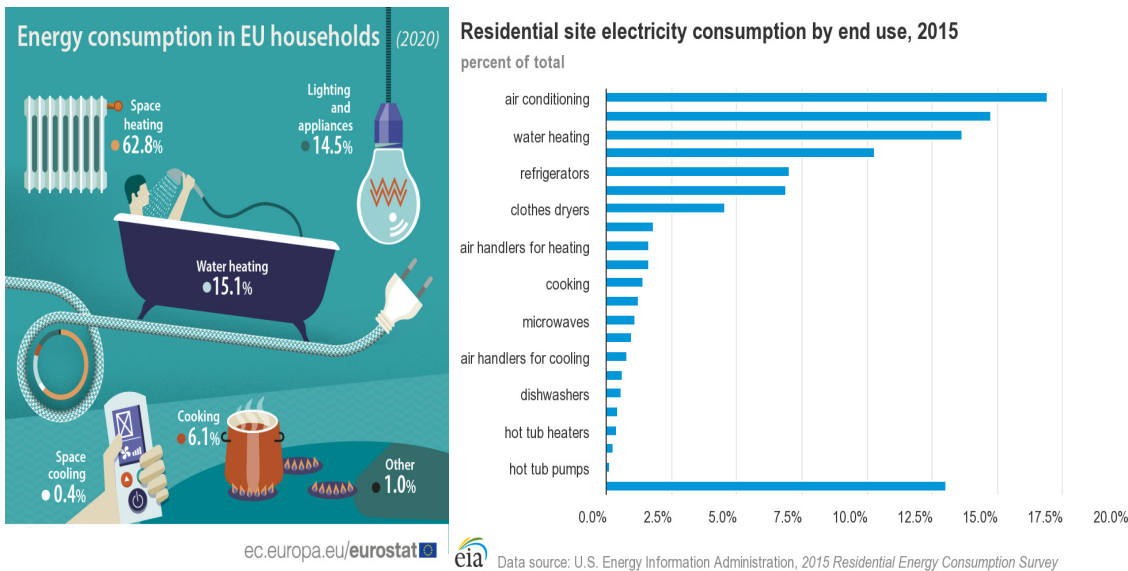
주: 1) 장내발효 부문 총배출량을 의미함.
2) 감축량은 각 수단으로 인한 가축 사육두수를 바탕으로 저자가 산정함.
자료: 저자 작성.

4 온수 물수요 관리를 통한 가정 내 에너지 온실가스 감축량

4.1 가정 내 온실가스 배출량 조사 및 온수 사용으로 인한 온실가스 배출량 추정

물 산업은 영국에서 발생하는 연간 온실가스 배출량의 0.8%에 해당하는 온실가스를 배출하나, 가정의 난방용수를 고려하면 이 비율은 5.5%에 이른다(Environment Agency, 2008).

〈그림 4-30〉 유럽연합(좌) 및 미국(우) 가정 내 용도별 에너지 사용 비율



유럽연합의 주요 통계를 다루는 Eurostat⁵¹⁾에서는 <그림 4-32>와 같이 2019년 가정 내 에너지의 15.8%가 물을 데우는 용도로 사용되고 있다. 미국 에너지관리청(EIA: The U.S. Energy Information Administration)에 따르면 2015년 미국 가정에서 사용하는 전력량의 13.7%가 물을 가열하기 위해 사용되었다.⁵²⁾ 따라서 온수의 사용량을 줄이고 이 줄어든 양을 계측할 수 있다면 온수 사용으로 인해 배출되는 온실가스의 양과 감축 가능한 양을 추정할 수 있다.

겨울철 난방은 물 분야와 관계가 없다고 하더라도 온수 사용량의 관리는 물관리의 영역이므로 향후 물 분야를 국가 인벤토리에서 별도로 집계, 관리한다면 온수가 포함되어야 한다. 다만 현재 우리나라는 난방과 온수 사용을 구분하여 자료를 수집할 수 있는 체계는 갖춰져 있지 않다.

에너지경제연구원(2010)은 계측 자료를 온수 사용 비율 추정 방법, 가구 실태조사, 기계실 시험 조사 등 다양한 방법으로 분석하고 2008년을 기준으로 가정용 에너지 소비의 23.8%가 온수에 사용된다고 발표하였다. 본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 가정에서 온수 사용에 따른 온실가스 배출량을 추정하였다.

먼저 에너지수급통계⁵³⁾를 통해 최근 10년간 가정에서 사용한 에너지를 조사하였다. 다양한 에너지원별 자료를 종합하여 석유환산톤으로 가정·상업 부문에 대한 자료를 획득할 수 있었다. 연간 자료를 전력량 및 온실가스 배출량으로 환산하고 앞서 언급한 23.8%의 비율을 고려하면 가정에서 온수 사용으로 인한 온실가스 배출량을 산출할 수 있다.

〈표 4-38〉 연도별 가정 내 에너지 사용 및 온실가스 배출량 추정

연도	에너지사용량 (천 TOE)	전력사용량 (환산자료, GWh)	가정 온실가스 배출 (천톤 CO ₂ eq.)	온수사용 배출 (천톤 CO ₂ eq.)
2011	21,873	95,515	43,880	10,443
2012	21,649	94,537	43,430	10,336
2013	21,293	92,983	42,716	10,166
2014	19,812	86,515	39,745	9,459
2015	20,539	89,690	41,204	9,806
2016	21,665	94,607	43,462	10,344
2017	22,480	98,166	45,097	10,733
2018	23,461	102,450	47,065	11,202
2019	22,567	98,546	45,272	10,775
2020	23,202	101,319	46,546	11,078
평균	21,854	95,433	43,842	10,434

자료: 저자 작성.

51) Eurostat, "Energy Consumption in Households", 검색일: 2022.3.2.

52) U.S. Energy Information Administration, "Use of Energy Explained Energy Use in Homes", 검색일: 2022.3.2.

53) 국가통계포털KOSIS, "에너지수급통계", 검색일: 2022.09.12.

〈표 4-38〉을 살펴보면 2018년에 가정에서의 온수 사용으로 인한 온실가스 배출량은 11.20백만톤 CO₂eq.에 이른다. 한편 국가온실가스 인벤토리에서는 2018년 가정 내 온실가스 배출량을 총 33.83백만톤 CO₂eq.으로 집계하고 있고 여기에 동일한 비율을 곱하면 8.05백만톤 CO₂eq.의 온실가스가 가정 내 온수 사용을 통해 배출되고 있다. 단 환경부(2019)의 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 국가 온실가스 인벤토리 연료 연소 항목 중 기타의 가정 항목에서 다루는 에너지는 목재와 숯을 포함하는 화석연료 사용에 따른 에너지 사용량으로 전력은 제외되어 있다. 따라서 가정 내 에너지 사용량 전체를 확인하려면 에너지수급통계의 자료를 인용하는 것이 타당하다. 결론적으로 가정에서 온수 사용에 따라 배출하는 온실가스는 2018년에 11.20 백만톤 CO₂eq.으로 추정할 수 있다.

4.2 시나리오별 급수량 변화로 인한 가정 내 온실가스 배출량 추정

목표연도별, 시나리오별 가정 내 온수 사용으로 인한 온실가스 배출량 추정을 위해 다음과 같은 과정을 거쳤다.

- 상수도통계의 전체 물 사용량에서 가정용수가 차지하는 양을 조사하고, 그 비율을 산정하여 미래 물 사용량에 곱하여 가정용수가 차지하는 양을 산정: 2018년, 유수수량 기준 총 5,652백만m³ 중 가정용수 3,529백만m³로 62.4%을 차지한다.
- 2018년 가정에서 사용한 물량과 온수 사용에 따른 온실가스 배출량 추정치(11.20 백만톤 CO₂eq.)를 활용하여 단위사용량 대비 온실가스 배출량을 산정하고 앞서 언급한 방식으로 계산한 미래 가정용수 사용량에 곱하여 온실가스 배출량을 예측: 2018년 기준 가정용수 1m³당 온실가스 3.2kg을 배출한다.
- 미래 시나리오별 가정에서 사용하는 온수에 의한 온실가스 배출량은 최소 7.94백만톤 CO₂eq.에서 최대 11.08백만톤 CO₂eq.으로 추정된다.
- 가정에서의 온수 사용에 의한 온실가스 배출량 추정에 2018년(2018년 예측)과 2021년(미래 시나리오 예측)의 다른 전력배출계수가 고려된 결과이다.

결과적으로 가정 내 온수 부문에서 2018년 11.20백만톤 CO₂eq.의 배출량은 2050년 7.94백만톤 CO₂eq.으로 3.26백만톤 CO₂eq.의 온실가스 감축이 가능하다.

〈표 4-39〉 시나리오별 온실가스 배출량

목표 연도	유수율 (%)	사용량 (ℓ pcd)	급수량 (ℓ pcd)	총급수량 (백만㎥/년)	가정용수량 (백만㎥/년)	온실가스배출량 (백만톤 CO ₂ eq.) ①
2030	90.7	295	325	6,042	3,421	11.3023
		260	287	5,325	3,016	9.9614
		224	247	4,588	2,598	8.5821
	93.0	295	317	5,892	3,421	11.3023
		260	280	5,193	3,016	9.9614
		224	241	4,474	2,598	8.5821
	96.0	295	307	5,708	3,421	11.3023
		260	271	5,031	3,016	9.9614
		224	233	4,334	2,598	8.5821
2040	90.7	295	325	5,923	3,354	11.0803
		260	287	5,220	2,956	9.7657
		224	247	4,497	2,547	8.4135
	93.0	295	317	5,776	3,354	11.0803
		260	280	5,091	2,956	9.7657
		224	241	4,386	2,547	8.4135
	96.0	295	307	5,596	3,354	11.0803
		260	271	4,932	2,956	9.7657
		224	233	4,249	2,547	8.4135
2050	90.7	295	325	5,588	3,165	10.4545
		260	287	4,925	2,789	9.2142
		224	247	4,243	2,403	7.9383
	93.0	295	317	5,450	3,165	10.4545
		260	280	4,804	2,789	9.2142
		224	241	4,138	2,403	7.9383
	96.0	295	307	5,280	3,165	10.4545
		260	271	4,653	2,789	9.2142
		224	233	4,009	2,403	7.9383

자료: 저자 작성.

참고로 〈표 4-39〉의 총급수량은 유수율과 사용량을 바탕으로 예측된 결과이므로 가정에서의 사용량 시나리오는 유수율과는 관계없이 1인 1일 물 사용량에 따라 결정된다. 따라서 가정용 온수 사용으로 인한 온실가스 배출량 추정은 아홉 가지 시나리오로 구성된다.

〈표 4-39〉의 시나리오별 가정 내 온수 사용으로 인한 온실가스 배출량은 여러 한계가 있는 현재 상황에서 그 방법의 합리성을 확보하기 위해 노력한 결과물이나 전국 단위로 적용할 수 있는 정확한 온수 및 에너지 사용량 계측이 선행되어야 공식적인 자료로 인정될 수 있을 것이다. 다만 온실가스 배출의 양적인 측면에서 상당한 양을 차지할 것이므로 향후 가정뿐만 아니라 상업, 공공 분야의 온수 사용에 대한 온실가스 배출량 산정과 관리계획도 필히 이루어져야 할 것이다.

물 분야 2050

탄소중립 이행을 위한
로드맵 구축 연구



05

SECTION

물 분야 2050 탄소중립 이행기반 마련

제1절 공편익 기반의 물부문 탄소중립 전략 마련

제2절 탄소중립 사업수행에 따른 재난영향평가 마련

제3절 물 분야 탄소중립 이행을 위한 제도 기반

제4절 정책 제언

제1절

공편익 기반의 물 분야 탄소중립 전략 마련

1

공편익 기반 탄소중립 전략의 개념

물 분야 탄소중립 실현을 위한 정책 설계 및 수행 과정에서 공편익(co-benefit) 개념을 반드시 고려해야 한다. 물 분야 온실가스 배출량은 국가 총배출량의 1.77%로 수송, 에너지, 제조 등 타 부문에 비해 높지 않아 물 분야의 온실가스 대책 수립 시 기존 물관리 전략과 공동효과 내지 상충효과를 필히 고려해야 한다. 탄소중립 시대에 물관리는 두 가지 이상의 목표(예: 온실가스 저감 및 물관리 기능 증진)를 동시에 고려하여 정책을 실행하고, 상호작용에 따라 시너지 효과가 발생하도록 방향을 설정할 필요가 있다.

공편익은 특정 정책 혹은 수단을 실행할 때 본래의 목적과는 별개로 부가적으로 발생하는 편익이라고 정의하였다. IPCC(2014) 등 기후변화에 관한 정부 간 패널 보고서에서는 공편익을 중심적인 개념으로 다루고 있으며, 공편익이 환경 측면을 고려하며 경제성장을 저해하지 않기 때문에 다수의 국가에서 유망한 개념으로 보고 있다.⁵⁴⁾

기후변화와 관련된 공편익은 정책의 우선순위 및 기대효과에 따라 기후 공편익, 발전 공편익, 상보적 공편익으로 구분할 수 있다.

〈표 5-1〉 정책의 우선순위 및 기대효과에 따른 공편익 분류

구분	내용
기후 공편익 (climate co-benefit)	개발, 보건 등 기후변화 대응과는 직접적인 관련이 없는 별개의 정책을 시행함에 따라 추가적으로 발생하는 관련 효과로 경제 사회적 발전을 목적으로 하는 정책 또는 수단 실행 과정에서 부수적으로 발생하는 온실가스 감축 효과에 해당함
발전 공편익 (development co-benefit)	온실가스 감축 정책의 일환으로 재생가능한 에너지원을 개발하고 보급하는 과정에서 경제 전반의 고용과 생산이 증가하는 경우에 해당함
상보적 공편익 (coimpact co-benefit)	기후변화 대응과 기후변화와는 다른 별개의 목표를 동시에 고려하여 정책을 수립하고, 시행하는 과정에서 발생하는 효과로 두 가지 이상의 목표를 동시에 고려하여 정책을 실행하고 상호작용에 따라 발생하는 시너지 효과를 추구함

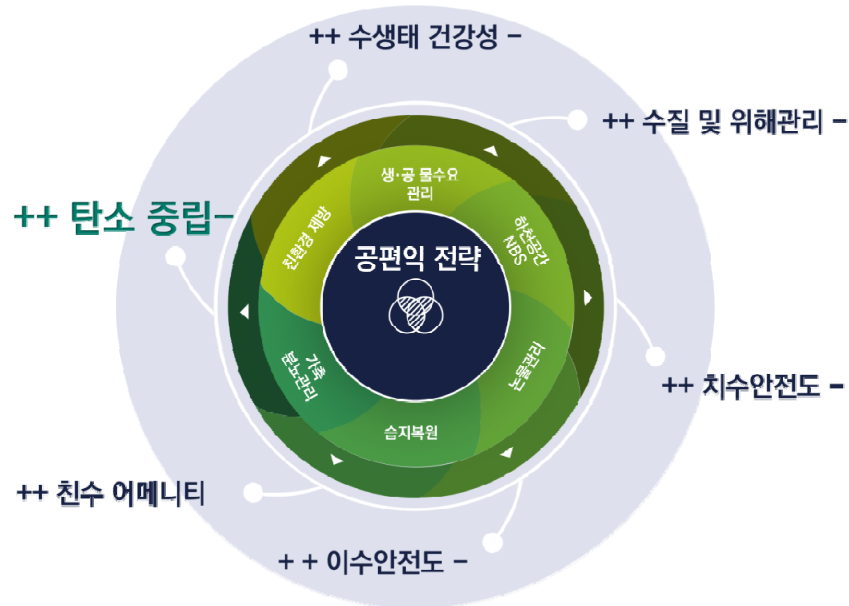
자료: 한혜진·정아영(2021).

54) IPCC(2014).

물관리 기능을 저해하지 않으면서 온실가스 감축 효과가 있는 공편의 물관리 정책에 관한 포트폴리오를 구성할 필요가 있다.

기후변화 적응 및 감축 공편의 수단은 물 분야 탄소배출 저감, 재생에너지 생산, 탄소 흡수원 보전 및 확충을 중심으로 발굴하며, 공편의 수단 전략은 관련 법령(「물관리기본법」 및 「수도법」, 「하천법」, 「습지보전법」 등) 검토, 제도적 여건 검토 및 기반 구축을 위한 제도상 개선을 통해 발굴되었다.

〈그림 5-1〉 탄소중립-물관리 공편의 전략 개념도



자료: 한해진·정아영(2021).

2 물수요 관리 중심 탄소중립 방안

2.1 생·공용수 수요관리에 따른 공편의

수요관리를 통해 얻을 수 있는 대표적인 효과 혹은 수요관리의 핵심 목표는 물 부족의 해소라고 할 수 있다. 물론 물수요 관리를 통해 확보할 수 있는 수량 혹은 절약되는 수량은 물이 부족한 지역과 물이 남는 지역, 물이 부족한 시기와 남는 시기의 불일치 탓에 정확하게 알 수 없다. 물론 정교한 물수지 분석을 시간과 공간을 고려하여 수행한다면 현재의 기술로도 충분히 가능하다. 이는 물이용 관련 국가계획에서 고려할 만한 사항으로 본 연구에서는 온실가스 배출의 측면에서 수요관리에 따른 개념적 수준의 공편의를 논하고자 한다.

『제1차 국가물관리기본계획』(환경부, 2021)의 물수급 전망 결과 과거 최대가뭄과 같은 기상상황 발생 시 2030년에는 연간 생·공용수 및 농업용수 부족량을 합산하여 2.57억㎥의 물이 부족할 것으로 예측한다. 2030년

BAU 시나리오에서 필요한 총 급수필요량 60.42억㎥는 물수요 및 우수율 관리를 통해 43.34억㎥로 줄어드는 효과가 있다. 앞서 언급한 바와 같이 줄어드는 물수요는 물 부족을 일대일로 해소할 수 있는 것은 아니나 다음과 같은 부수적인 효과를 낼 수 있다.

- 이수안전도 향상: 물공급 요구량 감소로 수원 확보 가능
- 농업 생산량 증대: 생·공용수 용도전환을 통한 농업용수 공급
- 가뭄기 하천생태계 건강성 증진 및 수질 개선: 하천 취수량 감소 및 가뭄 시 하천유지유량 공급 가능량 증대
- 물분쟁 해소: 필요수량 감소로 상하류 간, 유역 간 발생하는 물분쟁의 해소
- 국가 및 지자체 재정 건전성 향상: 물 생산 및 처리에 드는 비용 절감 효과

2.2 농업용수

농업용수 공급 및 이용 효율화는 공급량과 이용량 간의 차이를 줄이는 수요관리가 필수적이다. 논물관리는 논물관리 자체만으로 온실가스 배출량을 줄일 수 있는 수단일 뿐만 아니라 지하수를 제외한 농업용수 수요를 관리하는 데 중요한 수단이다.

「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 논물관리 및 용수관리 체계화에 대한 목표 및 세부 추진계획을 제시한다. 구체적으로 동 전략에서 설정한 논물관리 및 용수관리 체계화의 정책 목표는 ① 2주 이상 간단관개 비율을 2019년 40.3%에서 2030년 61.1%로 확대, ② 논물 얇게 대기를 2030년 간단관개 면적의 10%로 확대하는 것이다. 이를 위한 구체적인 세부 추진계획은 농가보급, 기반구축, 통계기반으로 나뉘며 그 구체적인 내용과 로드맵은 <표 5-2>에 제시된 바와 같다.

<표 5-2> 논물관리 체계화 관련 장단기 로드맵

구분	내용	세부추진계획
농가 보급	<ul style="list-style-type: none"> - 논물관리기술 모델 개발 - 논물관리 관련 농기자재 지원 - 저탄소 교육 가속화 	<ul style="list-style-type: none"> - 지역별 특성에 맞는 논물 관리 기술 모델 개발 - 농기자재 지원 및 탄소 인증 비용 지원 - 고품질 쌀 재배, GAP 버 인증 및 종자원 채종포 등 벼재배 관련 사업 중심의 메탄 감축 연계 추진
기반 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 물관리 기술 고도화 - 물이용 효율화 R&D - 공급시스템 개편 등 	<ul style="list-style-type: none"> - 용수로 계통도 디지털화(‘21~’23)를 바탕으로 한 물수급 분석 및 이를 바탕으로 한 물관리 - 공급량 계측기 설치 및 원격계측·제어장치 구축을 바탕으로 한 물 절약 - 관수로 설치 가이드라인 마련(‘21~’23), 최적 물관리 운영기준 수립(‘21~’30), 관수로화(‘21~’40) 등
통계기반	<ul style="list-style-type: none"> - 물관리 고도화 등 기술 수준에 맞는 배출량 계수 등 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 간단관개 횟수 증가 및 기간 연장에 대한 계수 - 지역별 특성에 맞는 얇게 대기 계수 개발

자료: 농림축산식품부(2021a), pp.20~21.

〈표 5-3〉 논물관리 체계화 관련 장단기 로드맵

과제별	단기('21~'30)	중기('~'40)	장기('~'50)
논물관리 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> - 지역별 논물관리 모델 개발 및 현장 보급 - 간단관개 기간 및 횟수 증가 계수개발('25~'30) 및 보급 - 알개 대기 계수 개발 및 등록('22~'26) 	신규 배출계수 ('31~'35)	신규 배출계수 ('41~'45)

자료: 농림축산식품부(2021a), p.21.

3 가축분뇨 탄소중립 방안

가축분뇨는 농경지토양에서 발생하는 직간접적인 온실가스 배출에 큰 영향을 미친다. 따라서 물관리를 위한 가축분뇨 적정 처리는 가축분뇨처리에서 발생하는 온실가스뿐만 아니라 농경지 토양에서 발생하는 온실가스도 감축하는 효과를 낸다.

〈표 5-4〉 가축분뇨처리 개선 세부 추진계획

구분	내용	세부 추진계획
정화처리	농가 및 위탁처리 시설에서의 정화처리 확대	<ul style="list-style-type: none"> - 대규모(5천 두 수준) 양돈농장의 정화시설 설치 의무화 - 공동자원화시설의 시설지원 및 제도 개선
퇴비감축	퇴비의 비농업계 이용 확대 추진	<ul style="list-style-type: none"> - 가축분뇨 산업 소재(바이오차, 바이오 플라스틱 등) 활용 활성화를 위한 법적 근거 마련 - 고체연료, 바이오차 활용 확대를 위한 수요처와의 협업체계 구축 및 시범사업 추진
에너지화	가축분뇨 에너지화 확대	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 퇴액비화 시설의 바이오 가스 연계 및 공공형 에너지화 시설 확대 추진 - 에너지화 시설과 지역 주민 및 농업시설과의 상생모델 확산 - 에너지 효율 제도, 폐기물 처리 수익 등을 위해 에너지화 시설의 반입원료 확대 추진
위탁처리	기존 시설을 활용한 위탁처리 시설 용량 확충	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 시설의 증개축 지원 확대

자료: 농림축산식품부(2021a), pp.27-28.

농식품부는 축산 분야의 가축분뇨 적정 처리를 농업 분야 탄소중립 달성을 위한 핵심과제로 설정하고 이에 대한 구체적인 세부 추진계획과 로드맵을 제시한다. 구체적으로 가축분뇨의 비농업 분야로의 이동을 통한 온실가스 감축량(2,355천톤 CO₂eq.)은 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」에서 2050년 농업 분야 전체 감축목표(8,243천톤 CO₂eq.)의 28.6%에 해당한다. 또한 농경지투입 가축분뇨 저감을 통한 온실가스 감축량은 1,963천톤 CO₂eq.에 이른다. 이에 따라 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 축산분뇨를 비농업 분야에서 사용하는 비율을 35%까지 증가시키겠다는 목표를 설정하고 다양한 세부 추진계획(표 5-4 참조)과 로드맵(표 5-5 참조)을 제시하였다.

〈표 5-5〉 가축분뇨처리 개선 장단기 로드맵

과제별	단기('21~'30)	중기(~'40)	장기(~'50)
정화처리 확대	양돈농가 중심으로 정화처리 확대(18%)	양돈농가 중심으로 정화처리 확대(24%)	양돈농가 중심으로 정화처리 확대(28%)
가축분뇨 에너지화 시설 확충	사업참여 대상 확대 반입원료 다양화	시설농업 단지 인근 에너지화 시설 유치 폐열 등 공급체계 확립	가축분뇨 발생량의 10% 에너지화
가축분뇨를 이용한 바이오차 생산	바이오차 생산시설 조성사업 추진(~'25)	바이오차 생산시설 5개소 확대	바이오차 생산시설 10개소 조성

자료: 농림축산식품부(2021a), p.28.

또한 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 가축 사육두수를 감소시켜 가축분뇨를 줄이는 방안으로 농식품 수요관리(식단변화 및 육류 대체식품)와 스마트 축사 보급을 제시하였다. 구체적으로 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 스마트 축사 보급과 농식품 수요관리(식단변화 및 육류 대체식품)를 통해 2050년까지 각각 579천톤 CO₂eq., 1,195천톤 CO₂eq.를 감축하기로 하였으며, 이를 위한 세부 추진전략(표 5-6 참조)과 로드맵(표 5-7 참조)을 제시하였다.

〈표 5-6〉 스마트 축사 보급, 농식품 수요관리 세부 추진계획

구분		내용	세부 추진계획
축산 생산성 향상	사양 관리	사육 과정의 과학화·자동화를 통해 적정 투입 사육구조로 개선	- ICT 장비 지원을 통한 과학적 관리를 통해 사육 과정에서 낭비되는 사료량을 절감하고, '적정량을 투입해 적정량을 생산'하는 축산업 구조 확립
	기간 단축	소 사육기간 단축 추진을 위한 연구개발 추진	- 다양한 조건에서 실증시험을 실시하여 단기사육 방식을 확립하고 농가에 보급함으로써 생산비도 경감
농식품 수요관리	교육 강화	국민의 건강과 사회·환경의 지속가능성을 달성하기 위한 식생활 교육 강화	- 취약계층(저소득층·고령자 등), 영유아, 초·중·고 학생, 군 장병, 직장인 등 다양한 계층의 삶을 고려한 맞춤형 식생활 교육 실시 - 농업·농촌과 연계한 바름 식생활 교육·체험을 위해 우수 식생활 체험공간과 식생활 교육기관 지정·운영
	대체 식품	저탄소의 미래형 식자재 공급기반 확충	- 식물 기반 식품, 배양육 등 대체식품 제품개발 및 산업화 지원 - 우유·계란 등 대체식품의 다양성 확보와 곤충·식품 부산물 등 단백질원을 안정적으로 확보하기 위한 투자 추진
	낭비 저감	유통 및 소비 단계에서 폐기 등 최소화 추진	- 식품 유통 단계에서 불필요한 식품 폐기를 줄이기 위해 실제 소비 가능한 기간을 표시하는 '소비기한 표시제' 도입(식약처 협업) - 도매시장 파렛트 출하 확대 및 농산물 폐기물 자원화에 대한 책임 강화 - 식품소재 및 반가공품 제조업체 지원을 확대하고, 탄소 저감효과가 큰 신선편의 및 전처리 업체 비율 향상

자료: 농림축산식품부(2021a), pp.27-28.

〈표 5-7〉 가축분뇨처리 개선 장단기 로드맵

구분	과제별	단기('21~'30)	중기(~'40)	장기(~'50)
축산 생산성 향상	스마트 축사 보급	스마트축사 보급 확대 (전업농의 30%)	스마트축사 보급 확대 (전업농의 40%)	스마트축사 보급 확대 (전업농의 50%)
	소 사육방식 개선	실증시험실시 단기사육 방식 확립	단기사육 방식 농가 보급·확산	소 사육방식 등 개선 지속 추진
농식품 수요관리	식생활 교육	대상별 맞춤형 교육 및 전문인력양성 교육기관 지정	우수체험공간 지정·교육 확대	우수체험공간 지정·교육 확대
	저탄소 미래형 식자재 공급기반 확충	대체식품·소재 발굴 및 기술 개발	대체식품·소재 상품화 및 시장 형성	대체식품·소재 시장 고도화
	도매시장 폐기물 자원화	자원화 위탁처리 확대	자원화시설 현대화 지원	자체 자원화시설 구축

자료: 농림축산식품부(2021a), p.26, p.32.

마지막으로 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」은 저탄소 농업구조 전환을 위한 핵심과제로 토양에 투입되는 양분관리를 통해 농경지에서 배출되는 온실가스를 줄이는 토양관리 방안을 제시한다(표 5-8, 표 5-9 참조).

〈표 5-8〉 토양관리 세부 추진계획

구분	내용	세부 추진계획
기반구축	양분수지 산정방법 확립 및 통계 등 관리 기반 구축	- 농가·토양의 양분수지 자료 등을 바탕으로 국내에 적용 가능한 양분 수지 산정방법을 개발하여 지자체에 보급 - 흙토람을 중심으로 토양의 N, P, K 수치 등 토양양분 관련 정보를 DB화
양분관리	토양 양분 관리 및 비료·농약 적정 사용 환경 구축	- 지역별 농경지의 살포 용량을 고려하여 비료 성분(질소·인 등)의 투입 등을 관리 - 농약안전정보 시스템의 고도화로 지역별·작목별 농약 사용 패턴을 분석하여 동일계통 농약의 중복 판매 방지 제한
제도개선	가축분 퇴비 등 비료 성분의 투입관리 지원	- 시판 퇴비의 비료 성분 분석·원재료 자료 수집, 해외 사례 및 업계 의견을 수렴하여 비료 공정규격 개정 - 지역단위 양분관리 시범사업(~'22, 환경부) 결과 등을 고려하여 토양 양분관리제 도입 여부 검토

자료: 농림축산식품부(2021a), pp.27-28.

〈표 5-9〉 농업자원(토양) 관리 강화 관련 장단기 로드맵

과제별	단기('21~'30)	중기(~'40)	장기(~'50)
토양양분 관련 정보 DB화	정보 축적·DB화 ('21~'30)	정보 DB화 ('31~'40)	정보 DB화 ('41~'50)
지역단위 양분관리 기반 구축	시범사업 실시	전면 확대	사업 안정화

자료: 농림축산식품부(2021a), p.16.

4 NbS 기반 탄소중립 방안

4.1 NbS(Nature-based Solution) 개념

국제자연보전연맹(IUCN)은 NbS를 “인류의 복지와 생물다양성 편익을 제공하는 동시에, 효과적이고 순응적으로 사회문제를 다루는 자연 본연 또는 변형된 생태계를 보호하고, 지속가능한 관리와 복원을 하는 행동들”이라고 정의한다.

(배경) NbS는 유럽 그린딜과 생물다양성 전략 등에 포함되어 각종 환경·사회문제 해결에 적용되기 시작하였고 기후변화 해법의 수단 중 하나로 유엔기후변화협약에 제안된 바 있다.

(접근법) NbS는 인간의 개입(intervention) 정도와 개입 방식에 따라 ‘자연생태계’, ‘복원된 생태계’, ‘새롭게 창출된 생태계’ 등 세 가지 유형과 ‘복원’, ‘관리’, ‘보호’, ‘창출’ 등 네 가지 유형으로 구분된다.

(유형) ‘복원에 기반한 접근’, ‘이슈 특화 접근’, ‘기반시설에 기반한 접근’, ‘관리에 기반한 접근’, ‘보호에 기반한 접근’ 등 크게 다섯 가지 유형으로 분류되며, 생태계 기반 기후변화 적응, 통합 수자원 관리, 보호지역 관리 등의 내용을 포함하고 있다.

4.2 NbS 기반 수변공간 관리의 공편익

기후위기 완화 및 적응, 수자원·수생태계 관리 차원의 NbS 수단으로 하천변 녹지(수변 완충녹지)의 조성을 강조하고 있으며, 이와 관련된 다양한 공편익 효과를 언급하고 있다.

〈표 5-10〉 환경위기별 NbS를 통한 접근법

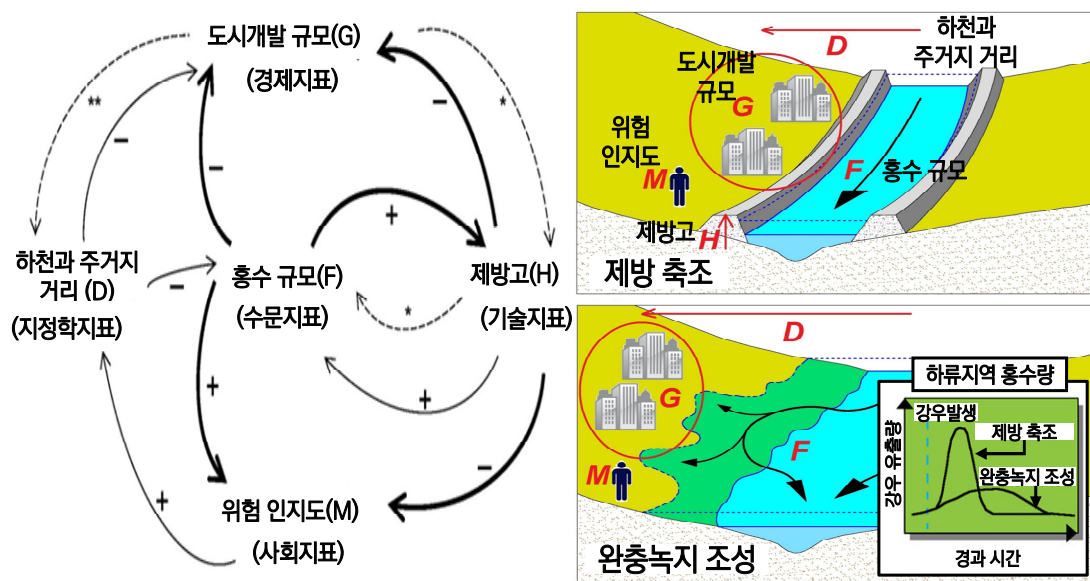
구분	수단
기후변화 완화	- 자연 기반 흡수원(산림지) 조성 - 습지, 이탄지 증진
기후변화 적응	- 습지와 하천변 녹지 등 재해완충 공간 조성 - 도시녹화를 통한 열섬현상 완화
지하수 고갈	- 습지 등 자연공간 조성 - 투수성 보도블록 설치
수질오염(부영양화)	- 하천변 녹지 조성 - 수생태계 먹이사슬 조절을 통한 수질개선
생물다양성 파괴	- 생물서식처 조성 및 생태복원 - 자연보호지역 확대

자료: 명수정, 오일찬(2021).

(이수) 강우 시 수변공간의 축적대수층은 지표면 유출수를 저장할 수 있고 하천으로 직접 유출되는 양을 줄일 수 있다. 또한 수변 녹지로 인해 횡적 연결성이 복원된 하천은 지표수와 지하수 간의 물순환이 이루어져 기저유출량이 증대되고 하천의 정상적인 기능을 위한 최소 유량인 하천유지유량의 확보가 가능해진다. 기저유출량의 증가는 불투수면적이 감소해야 가능하므로 수변공간의 확보가 필요하다.

(치수) 상류 지역에 수변 녹지를 확충하는 경우, 저류 및 완충공간이 확보되고 하류 지역의 홍수위가 낮아져 홍수피해 감소를 기대할 수 있다. 네덜란드는 ‘Room for the River’ 프로젝트를 통해 제방고 하강과 제방 후퇴를 해서 완충녹지를 조성하였고, 그로 인해 하천의 강우유출량 및 하류지역의 최대유출량 저감 효과가 발생하였다. 그래서 홍수 도달시간이 증대되어 주거지와 하천 사이에 이격거리가 확보되고 주민들의 재해 피해 불안감도 해소되었다. 다시 말해 자연성을 기반으로 수변공간을 관리하는 비구조적 대책으로 홍수취약성을 개선하고 기후변화에 대한 대응전략을 마련할 수 있다.

〈그림 5-2〉 제방 중심의 하천관리 방식과 NbS 기반 하천관리 방식의 비교



자료: Baldassarre 외(2013) 자료를 바탕으로 저자 재구성.

(환경) 수변 완충녹지는 제내지에서 생겨 수계로 유입되는 과도한 영양물질, 각종 오염물질을 차단·정화하는 생태 여과지로, 조류번식의 원인인 영양염류(질소, 인 등) 농도를 감소시켜 수질 오염을 방지하는 기능을 한다. 특히 하천 인근 농경지는 비료를 사용하기 때문에 토지에 축적된 질소 부하량이 높아 강우 시에 비점오염원으로 하천에 유입된다. 이후에 탈질산화 과정을 통해 N_2O 가 발생할 수 있기 때문에 수변 완충녹지 조성에 따른 하천의 질소 유입 저감은 하천 수질개선 효과 외에 하천 내 온실가스 배출량 감축에도 기여할 수 있다.

〈그림 5-3〉 수변완충 녹지 조성에 의한 하천 내 질소 유입 저감 개념도



자료: Passeport 외(2013) 자료를 바탕으로 저자 재구성.

(생태) 수변공간은 수생태계 보호를 위해 다양한 역할을 한다. 첫째, 수림대를 통해 그늘이 생기면 수온이 낮아져 용존 산소 공급에 도움이 되며 물속 생물에게는 서식 가능한 환경이 조성된다. 둘째, 수변식생은 하천에 유입되는 퇴적물을 감소시켜 산란처가 보호된다. 셋째, 수변녹지는 홍수 시 물속 생물의 은신처가 되어 유해물질을 차단·정화하는 역할을 한다. 넷째, 홍수터의 자연적 범람을 유도하여 생물의 서식처를 유지하고 수생태계 다양성을 가능하게 한다.

(친수) 최근 물을 활용한 휴식 공간 조성에 대한 요구가 증가하여 수변구역 내 친수공간이 다양하게 활용되고 있다. 과거에는 4대강 살리기 사업을 통해 수변생태공원의 수를 늘렸고 총 357개소의 친수공간과 234개의 수변공원을 조성하였다(국회입법조사처, 2017). 조성된 친수공간을 지역주민들은 운동, 놀이 등을 하는 생활체육시설로 이용하거나 조망, 관광 등의 레저·문화시설로 활용한다. 따라서 주민들의 삶의 질이 향상되고 지역경제 활성화 기회가 생길 수 있다.

4.3 NbS 기반 수변공간 관리 사례

(생태공원형 저류지) 동천변 저류지는 순천만 만조시간과 집중호우가 함께 발생할 경우 하천수를 저장하여 도시 침수를 방지하는 역할을 하는 약 245천㎡ 규모의 재해예방시설이다. 평상시 저류지는 공원으로 활용되며, 이는 순천만국가정원과 택지를 연결하는 녹지축을 형성해 시민들에게 휴식공간을 제공한다. 또한 저류지 제방 약 2km 이내에 수양버들, 벚꽃나무, 편백나무 등 수생식물과 초화류를 식재하여 저류지 내부에는 숲을, 수변부에는 연꽃단지를 조성하였다. 저류지의 특성을 이용해 방재 기능을 유지하면서 시민들의 휴식공간 제공, 일자리 창출, 관광객 유도 등 지역경제 활성화에 기여한다.

〈그림 5-4〉 순천시 동천변 저류지 생활 숲 조감도



자료:이뉴스투데이. “순천시, 동천변 저류지에 시민 휴식 ‘생활 숲’ 조성”, 검색일: 2022.09.23.

(댐 홍수터-수변구역 연계) 댐 홍수터는 수위 상승 시 상류 지역에 물을 저장하기 위한 토지인데, 개발, 무단 경작, 폐기물 투기 등으로 인해 최근 이곳에서 수질 오염 및 수생태계 위협 문제가 발생하고 있다. K-water는 금강댐 홍수터-수변구역 복원 사업의 일환이고, 대청댐 상류 서화천 유역의 충북 옥천군 이백리와 지오리 등 홍수터를 자연형 수변완충지대로 복원하여 수질, 수생태계 개선뿐 아니라 사회적 가치의 상승까지 가능하게 만들었다. 수변정화림, 소택형 생태습지, 생태학습시설 등을 조성하여 그간 활용이 미비했던 댐 홍수터를 주민참여형 생태문화 공간으로 전환하고, 홍수기에는 본연의 홍수조절 기능을, 비홍수기에는 탄소 흡수를 통한 자연성 회복(수질개선, 생물서식처 보전) 및 사회적 가치 창출(생태관광·교육, 지역소득창출) 기능을 하도록 만들었다.

〈그림 5-5〉 충북 옥천군 이백리 복원 계획



자료: 데일리안. “한국수자원공사, 대청댐 홍수터 수변생태벨트 시범사업 완공”, 검색일: 2022.09.23.

제2절

탄소중립 사업 수행에 따른 재난영향평가 마련

1 국내외 재난영향평가 관련 법 및 제도

본 절에서는 재해영향평가, 지역안전도 진단, 재난관리평가 등 국내 재난 관련 평가제도를 조사하였으며, 이들 제도와 재난영향평가와의 상관성 및 중복 여부를 분석하였다.

〈표 5-11〉 국내 재난영향평가 관련 제도

구분	주요 내용
재해영향평가	<ul style="list-style-type: none"> • 근거: 「자연재해대책법」 제4조 • 주요 평가내용 <ul style="list-style-type: none"> - 지형조건 및 주변환경에 따른 재해위험요인 - 주변지역이나 시설에 미치는 재해영향 및 예방에 관한 사항 - 자연재해위험지구 현황조사 및 대상지역과의 관련성 - 침수재해 발생 가능성 - 주변지역의 토지이용, 개발계획 현황조사 및 대상지역과의 관련성 - 과도한 지형 변형으로 인한 재해 발생 - 대상지역 내 하천, 소하천의 존재 여부와 정비계획 수립의 관련성 - 대상지역 내 우수유출저감대책(저류시설, 침투시설)에 관한 사항
지역안전도 진단	<ul style="list-style-type: none"> • 근거: 「자연재해대책법」 제75조의2(지역안전도 진단), 2007년부터 시행 • 대상: 시·도, 시·군·구: 226개 시·군·구(자치구) • 주요 내용: 자연재해에 대한 지자체의 안전도 진단 <ul style="list-style-type: none"> - 재해위험요인(14개 항목) - 예방대책추진(28개 항목) - 예방시설정비(18개 항목)
재난관리평가	<ul style="list-style-type: none"> • 근거: 「재난 및 안전관리 기본법」 제33조의2 ※ 2005년부터 시행 • 시기: 2019년 실적을 대상으로 2020년 1~3월 실시 • 대상: 재난관리책임기관 325개소(중앙부처 28개소, 공공기관 54개소, 지자체 243개소) • 주요 내용: 재난관리책임기관의 재난관리 단계별 관리실태 <ul style="list-style-type: none"> ※ 재난 예방·대응 및 복구 과정, 재난 대응조직 구성·정비 실태, 안전관리체계, 교육·홍보, 재난관리 물자 및 상황관리 실태 등(재난안전법 및 동법 시행령) • 평가방법: 중앙재난관리평가단(민간전문가 60명)의 직접·확인평가

자료: 국립재난안전연구원, 2022, 재난관리 분야 탄소중립사업 지원을 위한 그린재난관리 Tool-kit 개발

〈표 5-12〉 우리나라 방재 관련 위험구역 관련 규정

구분	법적근거	범위
하천구역	하천법 (제10조)	<ul style="list-style-type: none"> 하천의 적정관리를 위하여 지정 <ul style="list-style-type: none"> - 완성제방 또는 계획제방의 부지 및 완성제방 하심 측 토지 - 계획하폭에 해당하는 토지 - 댐·하구둑·홍수조절차저류지의 계획 홍수위 아래 토지 - 철도·도로 등 선형 공작물의 하천 측 비탈머리의 하심 측에 해당하는 토지 - 하천기본계획 미수립 시: 매년 1회 이상 흐를 것으로 판단되는 수면 아래 토지
홍수관리구역 (연안구역)	하천법 (제12조)	<ul style="list-style-type: none"> 하천보전 및 홍수피해 방지를 위하여 지정 <ul style="list-style-type: none"> - 계획 홍수위 아래의 토지로 하천구역을 제외한 지역 - 하천기본계획 미수립 시: 하천구역 경계선부터 일정한 범위
친수구역	친수구역 활용에 관한특별법 (제2조)	<ul style="list-style-type: none"> 국가하천 주변의 체계적 이용 및 난개발 방지를 위해 지정 <ul style="list-style-type: none"> - 국가하천의 주변지역을 체계적이고 계획적으로 조성·이용하여 난개발을 방지하고 지속가능한 발전을 도모 - 국가하천의 하천구역 경계에서 양안 2km 범위 내의 지역을 100분의 50 이상 포함한 구역
홍수위험구역	지구단위 홍수방어 기준 (제15조)	<ul style="list-style-type: none"> 상습침수구역의 개발입지 우선순위 결정을 위해 지정 <ul style="list-style-type: none"> - 홍수주위보경계홍수위 및 계획홍수위 기준으로 홍수위험도, 취약도, 홍수방어 기준의 중요도를 고려한 3단계(높음, 보통, 낮음) 위험구역 구분 - 구역 구분에 따른 지구단위홍수방어 기준의 차등 적용
자연재해 위험지구	자연재해 대책법 (제12조)	<ul style="list-style-type: none"> 자연재해 발생우려 지역 관리를 위하여 지정 <ul style="list-style-type: none"> - 침수위험, 유실위험, 고립위험, 취약방재시설, 붕괴위험, 해일위험 지구 - 재해발생 가능성과 빈도에 따라 가~다 등급으로 구분 - 지정권자: 시장, 군수, 구청장
방재지구	국토의계획 및 이용에 관한 법률 (제37조)	<ul style="list-style-type: none"> 재해의 예방 및 개선을 위하여 지정 <ul style="list-style-type: none"> - 풍수해, 산사태, 지반붕괴 등 재해예방을 위해 지정하는 용도지구의 하나 - 지정권자: 국토해양부 장관 또는 시도지사

자료: 국립재난안전연구원, 2022, 재난관리 분야 탄소중립사업 지원을 위한 그린재난관리 Tool-kit 개발

〈표 5-13〉 해외 방재 관련 위험구역 관련 규정

구분	법적 근거	범위
미국 홍수터 관리	국가홍수보험 프로그램 (NFIP)	<ul style="list-style-type: none"> 홍수터의 설정 및 홍수터 지역을 등급화 <ul style="list-style-type: none"> - 홍수다발지역의 개발을 제한하는 토지이용계획과 규제, 범람원의 천연자원과 기능 유지 및 보수를 위한 홍수터 설정 및 관리 정책 - 범람원 내 특별홍수재해구역(SFHA)의 모든 개발에 대해 NFIP 요건 및 주/지방정부 관련 법령/조례의 허가기준을 적용 - SFHA 지역 내에서 개발 시 엄격한 인/허가 및 시설물 침수피해방어능력 증명 필요
영국 홍수구역 구분	PPS (Planning Policy Statements) (#25:Development and Flood Risk)	<ul style="list-style-type: none"> 홍수위험지역의 부적합한 개발규제를 위해 지정 <ul style="list-style-type: none"> - 계획 및 개발 과정에서의 홍수방어를 위한 최상위 계획지침 - 위험도 기반 접근방법의 구체적인 제도적 장치로 여러 단계의 홍수위험평가와 연간 침수확률(4단계) 및 취약도(5단계)에 의해 홍수구역을 구분하고 순차 및 예외검증 제도를 통하여 홍수위험이 최소가 되는 지역에 우선적으로 개발사업을 허용

구분	법적 근거	범위
호주 홍수터 구분	-	<ul style="list-style-type: none"> 홍수위험도에 따른 하천공간 분류를 위해 지정 <ul style="list-style-type: none"> 각각의 빈도별(20~100년) 홍수발생 가능성이 있는 지역을 대상으로 함 유속, 수위, 빈도를 고려한 홍수위험지수(HRI) 값에 따른 홍수위험구역 구분
일본 침수상정 구역	수방법 (제14조 제1항)	<ul style="list-style-type: none"> 홍수 시 원활하고 신속한 피난을 위해 지정 <ul style="list-style-type: none"> 홍수예보지정하천을 대상으로 계획강우로 인한 외수침수 예상구역에 대한 대응 및 대피문제를 중심으로 한 대책 수립 국토교통성 또는 도도부현이 지정구역 및 예상수심 등을 공표하고 해당 지자체에 통지
일본 도시홍수 상정구역 및 도시침수 상정구역	특정도시하천 침수피해대책법	<ul style="list-style-type: none"> 도시홍수 발생 시 원활하고 신속한 피난을 위해 지정 <ul style="list-style-type: none"> 도시홍수상정구역: 외수침수 예상구역 도시침수상정구역: 내수침수 예상구역 시정촌 방재회의는 각 침수예상구역에 대해 침수정보의 전달방법, 대피 장소, 대응 및 대피에 대한 대책을 시행

자료: 국립재난안전연구원, 2022, 재난관리 분야 탄소중립사업 지원을 위한 그린재난관리 Tool-kit 개발

2 재난영향평가 운영 방안

2.1 재난영향평가 제도 수립 및 운영 방안

재난영향평가는 각 부처가 탄소제로 2050을 달성하기 위하여 수행하는 사업들을 대상으로 재난영향을 평가하고, 사전에 대응 방안을 수립하기 위한 제도이다. 따라서 기존의 지역안전도 진단 제도처럼 지방자치단체를 대상으로 제도를 만들고 운영하기는 곤란하다. 지방자치단체를 비롯해 정부부처, 공공기관을 모두 대상으로 하는 재난관리평가 제도도 있으나, 재난관리평가는 각 기관의 전반적인 재난관리 능력에 대해 평가하기 위한 제도이며, 특정 사업에 대한 재해영향은 평가하지 않는다. 재난영향평가 제도와 목적이 가장 유사한 제도는 재해영향평가이다. 재해영향평가는 일정한 규모 이상의 개별 사업이 수행되며 발생하는 재해영향에 대해 사전에 평가하고 대응 방안을 수립하는 역할을 한다.

재난영향평가 제도는 1단계로 각 부처의 탄소저감계획에 대해 사전에 평가하고, 2단계로 개별 사업의 수행에 따른 위험성을 평가하는 이중 구조로 진행되어야 한다. 다만 현재 탄소배출 저감을 위해 수행되는 태양광 발전, 풍력발전 등의 사업들도 재해영향평가 수립 대상이므로, 재난영향평가 2단계의 경우는 재해영향평가 제도와의 중복을 피하는 방안이 마련되어야 한다.

가. 현장조사 및 재난영향 분석 방안

재난영향평가는 조사단이 각 부처의 탄소저감 사업에 대하여 서면 검토를 통하여 재난 발생 및 피해 가중 여부를 조사하고, 필요한 경우 현장조사를 수행하여 이루어진다. 기초 현황 조사는 문헌조사, 일반 현황, 관련

계획, 지구·지역 지정 등을 활용하여 수행되고, 위험성 분석을 통해 위험구역 및 위험요인별 위험수준(정량적 및 정성적)을 종합적으로 분석하여 이루어진다.

나. 예방계획 수립

탄소저감 사업에 따른 재난발생예상지역에 대해 위험요인별 예방대책 및 시행계획 등의 예방계획을 수립하고, 위험성이 높은 경우 위험지구로 따로 지정하기도 한다. 재난 위험지구로 지정될 경우 위험요인에 대한 예방대책을 수립하고, 관련 부처 및 관련 기관을 통해 타 계획과 연계 및 조정, 공청회 및 지방의회를 통해 이해관계자 의견 수렴 등을 하여 탄소저감 사업 계획을 수정하도록 한다. 재난관리 시 지자체 역할이 상대적으로 많거나 피해가 크게 발생할 것으로 예상되는 유형의 탄소저감 사업은 중점 분석대상으로 지정한다.

다. 법제도 개선을 위한 전문가 의견수렴 방안

재난영향평가 제도의 근거가 될 법을 만들기 위하여 사전에 관련 전문가 의견의 수렴 과정이 반드시 필요하며, 의견수렴의 주요 내용은 다음과 같다.

- 탄소저감사업 시 재난 예방 및 관리를 위해 필요한 기능과 역할
- 탄소저감사업으로 인한 재난 예방관리를 위한 중앙정부, 사업수행 부처 및 지방정부 지원 사항
- 탄소저감사업의 재해 영향평가를 위한 법적 근거의 필요성
- 탄소저감사업 재난 예방 및 지원에 필요한 법제도
- 기타(용어의 적절성 등)

라. 법제도 개선을 위한 법률제정 방법 검토

탄소저감사업의 안전하고 안정적인 추진을 위해서 재난영향에 대한 평가는 반드시 필요하다. 그리고 재난영향평가 제도의 효율적 추진과 이와 관련된 행정적·재정적 지원을 확보하려면 법령 정비를 해야 한다. 법령을 정비하는 방안으로 기존 자연재해 법률의 개정과 신규 법률의 제정 등 두 가지가 있다.

신규로 법률을 제정하는 방안에서는 법률 제명이 중요하며 법률이 추구하고자 하는 목적이 명확히 제시될 필요가 있다. 신규 법률 제정의 장점은 재난영향평가에 대한 체계적·종합적인 정책 추진이 가능한 것이고 단점은 입법화하는 과정이 복잡하고 시간이 많이 소요된다는 것이다.

기존 관련 법률을 개정하는 방안에서 가장 적합한 기존 법령은 기본법이고, 개별법의 속성을 지닌 재난 및 안전관리 기본법의 개정, 재해영향평가 제도의 근간이 되는 자연재해대책법의 개정 등을 할 수 있다. 기존 법 개정의 장점은 입법화하는 과정이 비교적 단순하며 시간 소요가 적어 제도의 조기 시행에 유리하다는 것이다.

따라서 탄소저감사업의 재해 위험을 체계적으로 관리하고 재난관리평가 제도를 조기에 정착시키려면 기존 법률 개정을 통해 사업을 추진하는 것이 바람직하다.

제3절

물 분야 탄소중립 이행을 위한 제도 기반

1

법률 재·개정 기반

1.1 총괄 법률

물관리 탄소중립 이행을 위한 「탄소중립기본법」, 「물산업진흥법」, 「물관리기본법」, 「공공기관운영법」 등 개정 또는 신규 법률 제정의 필요성을 검토하였다.

(탄소중립기본법) 물관리 부문에 대한 정확한 탄소중립 이행 기반을 제시하고 있지 않다. 예를 들어, 제33조(탄소흡수원 확충) 조항의 경우도 하천공간을 온실가스 흡수저장 대상으로 지정하고 있지 않으며 제43조(기후위기 대응을 위한 물관리)의 경우 기후위기 적응 시책으로 분류되어 있어 감축적 효과에 대한 고려가 부재하였다.

(물관리기본법) 제18조(기후변화 대응)에서 기후변화 적응, 즉 물관리 취약성 최소화에 대해서는 명시적으로 언급하고 있으나 탄소중립 관련 방향은 제시되어 있지 않다.

(물산업진흥법) 물산업 및 물기업에 탄소중립 관련 녹색기술 등은 포함되지 않으며, 특히 물수요 관리 기술 등 탄소절감 관련 기술 역시 진흥 대상에 포함되지 않았다.

「물관리기본법」 제27조에 따라 수립하는 ‘국가물관리기본계획’의 경우 기후변화 적응을 위한 탄소중립 관련 사항을 포함하는 것에 대해 법적인 명시를 검토해야 한다.

「물관리기본법」에서 규정하는 물이용의 권리와 의무, 물관리의 기본원칙을 검토하고 물이용(공급)에 탄소중립을 고려한 계획의 수립과 실행을 반영해야 한다.

〈표 5-14〉 탄소중립 관련 법률 현황

법률조항		감축
탄소중립 기본법	제33조 (탄소흡수원 등의 확충)	① 정부는 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지 및 「수산자원관리법」 제2조제6호에 따른 바다숲 등에서 온실가스를 흡수하고 저장(흡수된 온실가스를 대기로부터 영구 또는 반영구적으로 격리하는 것을 말한다)하는 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」 제2조제10호에 따른 탄소흡수원 및 그 밖의 바이오매스 등(이하 “탄소흡수원등”이라 한다)을 조성·확충하거나 온실가스 흡수 능력을 개선하기 위한 시책을 수립·시행하여야 한다.
	제43조 (기후위기 대응을 위한 물 관리)	정부는 기후위기로 인한 가뭄, 홍수, 폭염 등 자연재해와 물 부족 및 수질악화와 수생태계 변화에 효과적으로 대응하고 모든 국민이 물의 혜택을 고루 누릴 수 있도록 하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 시책을 수립·시행하여야 한다. 1. 깨끗하고 안전한 먹는 물 공급과 가뭄 등에 대비한 안정적인 수자원의 확보 2. 수생태계의 보전·관리와 수질 개선 3. 물 절약 등 수요관리, 적극적인 빗물관리 및 하수 재이용 등 물 순환 체계의 정비 및 수해의 예방 4. 자연친화적인 하천의 보전·복원 5. 수질오염 예방·관리를 위한 기술 개발 및 관련 서비스 제공 등

법률조항	감축
물관리기본법 제18조(기후변화 대응)	국가와 지방자치단체는 기후변화로 인한 물관리 취약성을 최소화하여야 하며, 물순환 회복 등을 통하여 적극적으로 기후변화에 대응할 수 있는 물관리 방안을 마련하여야 한다.
물산업진흥법 제2조(정의)	<p>이 법에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. “물관리기술”이란 수량·수질 및 수생태계를 균형적으로 관리하는 데 필요한 기술을 말한다. 2. “물산업”이란 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 사업을 말한다. <ul style="list-style-type: none"> 가. 「수도법」 제3조제17호에 따른 수도시설과 관련된 기술사업 나. 「하수도법」 제2조제3호에 따른 하수도를 설치·관리하는 사업 다. 「먹는물관리법」 제3조제9호에 따른 먹는물관련영업 라. 「수도법」 제3조제33호에 따른 해수담수화시설과 관련된 사업 마. 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」 제2조제1호에 따른 물의 재이용과 관련된 사업 바. 「물환경보전법」 제2조제4호에 따른 폐수를 처리 또는 이용하는 사업 사. 「지하수법」 제2조제1호에 따른 지하수의 개발·이용·정화 등과 관련된 사업 아. 「농어촌정비법」 제2조제3호에 따른 농어촌용수의 개발·이용 등과 관련된 사업 자. 「하천법」 제2조제5호에 따른 하천공사 차. 「소하천정비법」 제2조제4호에 따른 소하천등 정비 카. 「댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」 제2조제1호에 따른 댐의 건설·이용·관리 등과 관련된 사업 타. 그 밖에 관계 법률에 따라 물을 이용 또는 관리하는 사업 중 대통령령으로 정하는 사업 파. 가목부터 타목까지의 사업과 관련된 설계, 건설, 운영, 부품·소재·장치·기기·약품의 시험·검사·인증, 제조·판매·유통 및 컨설팅 등에 관한 사업

자료: 국가법령정보센터, “탄소중립기본법”; “물관리기본법”; “물산업진흥법”.

1.2 부문별 법률

「하수도법」, 「지하수법」, 「댐건설관리법」, 「수도법」, 「하천법」, 「수계법」, 「농어촌정비법」, 「공공기관 운영에 관한 법률」, 「수자원공사법」, 「농어촌공사법」 등의 조항을 검토하여 탄소 저감 이행을 위한 개정 사항을 검토하였다.

가. 물이용 관리 부문 탄소중립 관련 법률 현황 및 과제

● 하천법

「하천법」은 하천의 지정·관리·사용 및 보전 등에 관한 사항을 규정하는 법률로 에너지 절감 및 온실가스 감축에 대한 항목은 없다. 이에 하천에서의 다양한 행위에 대하여 온실가스 배출 저감을 위해 가능할 것으로 판단되는 사항은 다음과 같다.

- 제33조에 의한 하천의 점용허가 시 허가받은 사항의 이행에서 온실가스 배출을 최소화해야 함을 제시하고 온실가스의 흡수 혹은 감축과 관련이 있는 행위에 대해서는 점용료를 감면해 주는 제도를 시행한다.
- 제50조에 의한 하천수의 사용허가에 따른 시설물 설치 시 해당 시설물의 온실가스 배출량을 예측하고 사용량 보고 시 보고 항목에 포함한다.

● 댐건설·관리 및 주변지역지원 등에 관한 법률(댐건설관리법)

「댐건설관리법」은 댐의 건설·관리, 댐건설 비용의 회전활용, 댐건설에 따른 환경대책, 지역주민에 대한 지원 등을 규정하고 있다. 포괄적 의미의 친환경공간 조성에 관한 사항을 규정하고 있으나 에너지, 온실가스 배출 및 저감에 대한 사항을 규정하고 있지는 않다. 「댐건설관리법」에서는 온실가스 감축을 위해 다음의 항목을 고려할 수 있다.

- 제4조에 의한 댐관리기본계획 수립 시 댐의 운영 과정에서 사용 혹은 생산하는 에너지와 온실가스 배출과의 관계를 제시하고 시행령 등에 감축, 관리 방안을 포함하도록 명시하고 온실가스 관리 규정을 마련한다.
- 제9조의2에 의한 댐의 평가 시 온실가스 관련 사항을 고려한다.
- 제41조에 의한 댐 주변지역 정비 시 온실가스 흡수, 저감을 감안한 시설 및 공간 설치를 고려한다.

● 수도법

「수도법」은 수도의 설치와 관리에 관한 사항을 규정하고 있으며, 에너지 절감에 대한 사항으로 다음과 같은 내용을 담고 있다.

- 제16조(물 사용기기의 물 사용량 표시 등)에서는 물 사용기기를 국내에 판매하려면 에너지소비효율등급 표시에 물 사용량을 함께 표시해야 한다고 명시하고 있다.
- 제21조(수도시설의 관리)에서는 수도사업자가 수도시설의 운영·관리에 소요되는 에너지를 절감하고 수도시설을 효율적으로 운영·관리하기 위해 이행해야 할 사항(재생에너지 사용, 에너지 절약형 정수처리공법의 활용, 에너지 절약형 자재 및 제품의 사용)을 명시하고 있다.
- 「수도법」과 관련된 사항으로는 에너지 절감에 따른 온실가스 감축 실적을 평가하고 사용 가능한 범위 내에서 보조금을 지원하는 등 지원책을 마련하는 것이 필요하다.

● 지하수법

「지하수법」은 지하수의 적절한 개발·이용과 효율적인 보전·관리에 관한 사항을 정하기 위한 법률로 에너지 관련 사항으로는 지열냉난방시설과 관련된 항목이 있으나 온실가스배출과 밀접한 영향은 없는 것으로 판단된다. 「하천법」과 비슷하게 지하수를 수원으로 하는 시설의 설치와 운영 측면에서 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 조사하고 보고할 수 있는 체계의 마련이 필요하다.

나. 농업 분야 탄소중립 관련 법률 현황 및 과제

직접적으로 농업 분야의 기후변화 및 탄소중립에 관해 언급하고 있는 법률로는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(이하 「탄소중립기본법」)과 「농업·농촌 및 식품산업 기본법」(이하 「농업식품기본법」)이 있다. 또한 농업용수 부문 탄소중립과 간접적으로 관련이 있는 법률로는 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」(이하 「가축분뇨법」)과 「농어촌정비법」이 있다.

「농업식품기본법」 제39조와 제47조에는 기후변화 완화를 위한 온실가스 감축 지원 및 정책수립의 필요성이 나와 있으나, 온실가스 감축 범위 및 방안에 대해서는 제시되어 있지 않다.

「탄소중립기본법」 제43조는 기후변화에 대응하여물관리 전반의 안정적인 체계를 구축하기 위한 방향을 제시하였지만, 탄소중립과 관련된 내용은 포함하고 있지 않다. 동법 제45조에서는 기후변화에 대응하여 농림수산 부문의 탄소중립 이행을 위해 신·재생에너지 및 신품종 개량 등 구조 전환에 대해 제시하고 있다. 하지만 기후변화에 대응하여 안정적인 농림수산 체계 구축을 위해 지속적인 에너지 보급, 품종개량 등 생산기반 전환에 관한 내용이 제시되어 있을 뿐, 물관리와 관련된 내용은 언급되어 있지 않다.

탄소중립을 명시적으로 언급하지 않지만, 기후변화에 대응하기 위한 농업 분야 물관리와 관련된 법령으로는 「가축분뇨법」과 「농어촌정비법」이 있다.

2006년에 제정된 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」(이하 「가축분뇨법」)은 가축분뇨를 자원화하거나 적정하게 처리하여 환경오염을 방지함으로써 환경과 조화를 이루는 지속가능한 축산업의 발전과 국민건강 향상에 이바지함을 목적으로 하고 있다. 「가축분뇨법」에서는 가축분뇨의 관리, 가축분뇨의 배출 및 처리시설의 관리, 퇴·액비 살포, 가축분뇨의 이용촉진, 가축분뇨의 공공처리, 가축분뇨 관련 영업에 관한 내용을 다루고 있으며, 이를 근거로 가축분뇨처리와 관련해 농림축산식품부, 환경부 등 각 부처의 고시와 국가 및 지방자치단체별 조례가 제정되었다.

「가축분뇨법」 제9조에서 환경친화축산농장 지정에 관해 언급하고 있으나, 부가 조건 중 제2호(가축분뇨를 자원화하여 전량 농지에 환원할 것)는 농식품부의 탄소중립 추진전략 방향과 부합하지 않는 것으로 생각된다. 온실가스 감축을 위해 가축분뇨 정화처리 및 에너지화 등 비농업 분야에서도 이용할 수 있는 조건을 수정 또는 추가할 필요가 있다.

마지막으로 「농어촌정비법」 제15조에 따라 농어촌용수이용합리화계획이 수립되어 농어촌용수의 효율적인 개발·이용·보전을 위한 통합물관리 계획이 이루어지고 있지만, 농업용수 관리 부문의 탄소중립 방향에 대해서는 충분히 고려하지 못하고 있다.

〈표 5-15〉 농업 부문 탄소중립 관련 법률 현황

법률조항		감축
농업·농촌 및 식품산업 기본법 (약칭: 농업식품 기본법)	제39조 (농업경영체의 경영안정 및 구조개선 등의 지원)	① 국가와 지방자치단체는 농업경영체가 지속적인 경영 혁신을 통하여 소득을 높일 수 있도록 농업 경영의 상담, 교육훈련 및 정보 제공 등에 필요한 정책을 세우고 시행하여야 한다. ② 국가와 지방자치단체는 농업경영체의 소득·경영안정 및 농업의 경영구조 개선 등을 위하여 필요하다고 인정되면 다음 각 호의 지원을 한다. 토양 등 환경의 보전과 지구온실가스 감축을 위한 지원 (이하생략)
	제47조 (지구온난화 방지 등)	① 국가와 지방자치단체는 농업·농촌이 지구온난화 방지 및 기후변화 완화 등의 공익기능을 수행할 수 있도록 지구온실가스 감축 등에 필요한 정책을 세우고 시행하여야 한다. ② 국가와 지방자치단체는 바이오에너지에 이용되는 농작물 및 산림자원을 생산·공급하기 위하여 필요한 정책을 세우고 시행하여야 한다.
기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 (약칭: 탄소중립 기본법)	제43조 (기후변화대응을 위한 물 관리)	정부는 기후변화로 인한 가뭄 등 자연재해와 물 부족 및 수질악화와 수생태계 변화에 효과적으로 대응하고 모든 국민이 물의 혜택을 고루 누릴 수 있도록 하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 시책을 수립·시행하여야 한다. 1. 깨끗하고 안전한 먹는 물 공급과 가뭄 등에 대비한 안정적인 수자원의 확보 2. 수생태계의 보전·관리와 수질개선 3. 물 절약 등 수요관리, 빗물 이용·하수 재이용 등 순환 체계의 정비 및 수해의 예방 4. 자연친화적인 하천의 보전·복원 5. 수질오염 예방·처리를 위한 기술 개발 및 관련 서비스 제공 등
	제45조 (농림수산의 전환 촉진 등)	① 정부는 농작물의 생산 및 가축 생산 등의 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 줄이고 기후위기에 대응하여 식량안보를 확보함으로써 탄소중립 사회로의 이행에 기여하기 위하여 농림수산의 전환 시책을 수립·시행하여야 한다. ② 제1항에 따른 농림수산의 전환 시책에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다. 1. 정밀농업, 유기농업 등 농림수산구조의 전환에 관한 사항 2. 농림수산 분야 온실가스 감축 기술·기자재·시설의 개발 및 보급에 관한 사항 3. 농림수산 분야의 화석연료 사용량 감축, 신·재생에너지 보급과 에너지 순환 및 자립 체계 구축에 관한 사항 4. 기후위기로 인한 농림수산업 여건 변화 예측과 신품종 개량 등을 통한 식량자급률 제고에 관한 사항 ③ 정부는 「농업·농촌 및 식품산업 기본법」 제14조에 따른 농업·농촌 및 식품산업 발전계획을 수립·시행할 경우 온실가스 감축과 기후 회복력을 높일 수 있는 시책을 반영하여야 한다.
가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 (약칭: 가축분뇨법)	제1조 (목적)	이 법은 가축분뇨를 자원화하거나 적절하게 처리하여 환경오염을 방지함으로써 환경과 조화되는 지속가능한 축산업의 발전 및 국민건강의 향상에 이바지함을 목적으로 한다.
	제9조 (환경친화축산농장의 지정)	① 농림축산식품부장관은 축사를 친환경적으로 관리하고 가축분뇨의 적절한 관리 및 이용에 기여하는 축산농가를 환경친화축산농장으로 지정할 수 있다. ② 농림축산식품부장관은 환경친화축산농장을 지정하려는 때에는 다음 각 호의 조건을 붙일 수 있다. 1. 가축사육의 밀도를 「축산법」 제26조의 준수사항에 따라 유지하고 생활환경을 개선할 것 2. 가축분뇨를 자원화하여 전량 농지에 환원할 것 3. 조경수를 심는 등 자연친화형 축사를 조성할 것 4. 악취저감시설을 설치·가동하여 주변의 생활환경을 저해하지 아니할 것 5. 그 밖에 농림축산식품부령으로 정하는 기준을 지킬 것 (이하 생략)
농어촌정비법	제1조 (목적)	이 법은 농업생산기반, 농어촌 생활환경, 농어촌 관광휴양자원 및 한계농지 등을 종합적·체계적으로 정비·개발하여 농수산업의 경쟁력을 높이고 농어촌 생활환경 개선을 촉진함으로써 환경친화적이고 현대적인 농어촌 건설과 국가의 균형발전에 이바지하는 것을 목적으로 한다.

법률조항	감축
제15조 (농어촌용수 이용 합리화계획 등)	① 농림축산식품부장관은 농어촌용수의 효율적인 개발·이용 및 보전 등을 위하여 농어촌용수 이용 합리화계획을 세우고 추진하여야 한다. ② 농림축산식품부장관은 농어촌용수를 체계적으로 개발하고, 합리적으로 이용하며, 수질을 관리·보전하기 위하여 농어촌용수구역을 설정하여 운용할 수 있다. ③ 농림축산식품부장관은 제2항에 따라 농어촌용수구역을 설정하면 그 사실을 시·도지사에게 통보하여 고시하도록 하여야 한다. 다만, 2개 이상의 시·도 관할 구역이 포함되는 농어촌용수구역은 농림축산식품부장관이 고시한다. ④ 제1항에 따른 농어촌용수 이용 합리화계획의 수립·추진과 제2항에 따른 농어촌용수구역의 설정·운용 등에 필요한 사항은 대통령령으로 정한다. ⑤ 농림축산식품부장관은 농어촌용수 이용 합리화계획을 변경하려는 경우에는 제3항을 준용한다.

자료: 국가법령정보센터, “농업식품기본법”; “탄소중립기본법”; “가축분뇨법”; “농어촌정비법”.

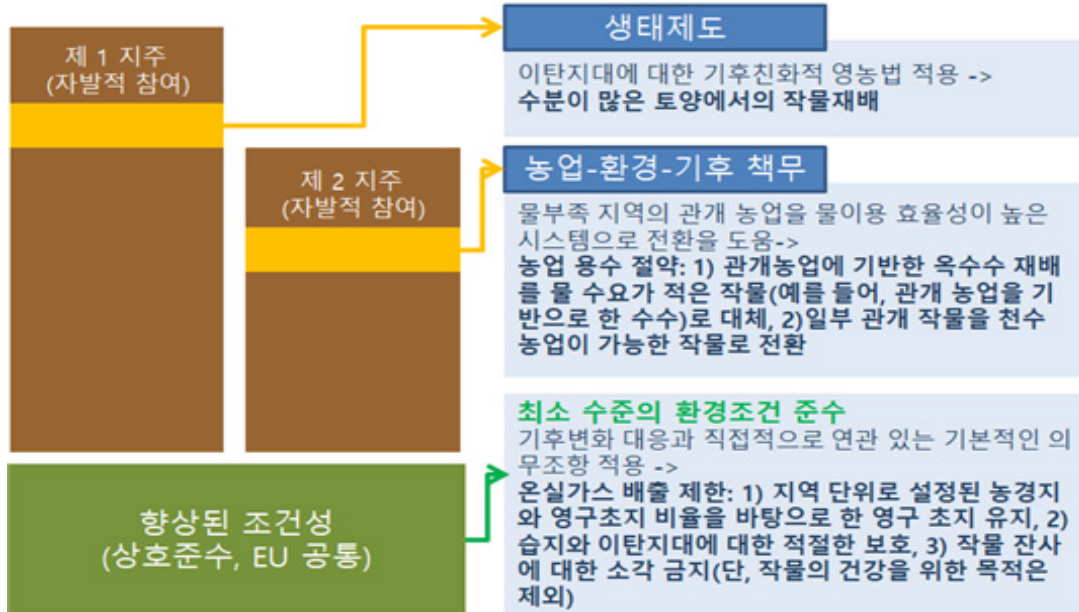
● 농업용수 가축분뇨처리 탄소중립을 위한 법·제도적 기반 확보 방안

앞서 언급한 것과 같이 농업용수 및 가축분뇨처리 부문의 탄소중립을 직접적으로 언급한 법제도는 많지 않다. 구체적으로 국가물관리기본계획에 따라 농어촌용수이용합리화 계획은 농업용수 부문의 탄소중립 내용을 언급하고 있을 뿐이며, 농업 분야의 기본계획이라고 할 수 있는 2018~2022 농업·농촌 및 식품산업 발전계획(농림축산식품부, 2018)에는 기후변화 적응에 대한 내용만 포함되어 있다.

우선, 농업용수 및 가축분뇨처리 탄소중립을 더 효과적으로 추진하려면 「농어촌정비법」에 탄소중립과 기후변화 대응을 명시적으로 나타낼 필요가 있다. 예를 들어 「농어촌정비법」 목적에 탄소중립 관련 내용을 추가하여 「농어촌정비법」 제1조(목적)를 “이 법은 농업생산기반, 농어촌 생활환경, 농어촌 관광휴양자원 및 한계농지 등을 종합적·체계적으로 정비·개발하여 농수산업의 경쟁력을 높이고 농어촌 생활환경 개선을 촉진하며, 국가 탄소중립에 기여함으로써 환경친화적이고 현대적인 농어촌 건설과 국가의 균형발전에 이바지하는 것을 목적으로 한다”라고 개정할 수 있을 것이다. 또한 「농어촌정비법」 제15조(농어촌 이용 합리화계획 등)제1항 역시 온실가스 감축과 관련해 “농림축산식품부장관은 농어촌용수의 효율적인 개발·이용 및 보전, 기후변화 적응과 완화 등을 위하여 농어촌용수 이용 합리화계획을 세우고 추진하여야 한다.”라고 수정할 수 있다.

추가적으로 현재 논의되는 선택형 직불금과 같은 농업환경지불금 프로그램에 농업용수 수요관리 수단(예: 논물관리 등)과 가축분뇨처리에 대한 활동을 포함시킬 필요가 있다. 예를 들어 2023년부터 시행되는 EU의 새로운 농업환경지불금 정책은 논물관리, 정밀농업, 분뇨 관리 등에 대한 경제적 인센티브를 제공할 수 있도록 하였다.

〈그림 5-6〉 EU의 농업환경지불정책 예시: 온실가스 감축 중심으로



자료: 정학균 외(2021), p.88, 〈그림 6-2〉를 인용함.

마지막으로 가축분뇨처리지원, 즉 공동자원화시설지원사업에 대한 접근성 향상이 필요하다. 공동자원화 시설지원사업의 예산 규모는 지속적으로 증가하여 2018~2019년에 약 100억 원 수준에서 2020년 215억 원까지 늘어났다. 하지만 2020~2021년에 공동자원화시설지원의 예산 집행률은 7%로 매우 저조하다.

더욱이 가축분뇨처리의 주요 수단인 가축분뇨 에너지화 관련 정책인 에너지화시설지원사업 예산은 예산 집행률이 낮을 뿐만 아니라 관련 예산 역시 2020년에 146.0억 원이었다가 이후 감소하여 2022년에는 92.5억 원까지 떨어졌다. 또한 2010년에 시작된 사업인데도 2022년 현재 공동자원화시설 중 에너지화 시설은 6개뿐이다.

공동자원화시설지원의 낮은 예산 집행률과 에너지화시설의 예산 감소는 사업대상자 선정의 어려움 때문이며,⁵⁵⁾ 사업자 선정이 어려운 이유는 에너지화시설의 낮은 수익성 때문이다. 따라서 이러한 한계를 극복하려면 ① 가축분뇨 활용 신재생에너지 공급인증서 가중치 상향 및 가축분뇨 활용 에너지에 대한 발전차액지원제도 도입,⁵⁶⁾ ② 공동자원화시설지원 사업의 예산 집행률 제고에 대한 검토가 필요하다.

다. 하·폐수처리시설 관련 탄소중립 관련 법률 현황 및 과제

하·폐수처리시설의 기능과 목적은 시대적 여건에 따라 변화해 왔으며 기후변화를 고려한 탄소배출 감소를 위해 하·폐수처리시설의 패러다임 전환과 배출량 관리에 필요한 법 제도가 개선되어야 한다. 하수처리시설에서의 탄소중립을 위해 먼저 「하수도법」을 살펴볼 수 있으며 「하수도법」 제1조(목적)에 유효자원 회수 및

55) 예를 들어, 2014년부터 2016년까지 가축분뇨 에너지화 지원사업 대상 사업자를 선정하지 못해 예산이 이월되었다(농림축산식품부, 2018, 2019).

56) 자세한 내용은 정민국, 이용건, 최진용(2021)를 참조하길 바란다.

하수 재활용의 추가와 탄소배출량 감축에 대한 목적을 추가할 수 있을 것이다. 이것으로 하·폐수처리시설의 효율적인 에너지 사용 증진과 탄소중립 정책의 실효성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 5-16〉 하수도법 제1조 개선안

하수도법 제1조(목적) 개선안	이 법은 하수도의 계획, 설치, 운영 및 관리 등에 관한 사항을 정함으로써 하수와 분뇨를 적정하게 처리하고 <u>유효자원 회수 및 하수 재활용</u> 으로, 하수의 범람으로 인한 침수 피해를 예방하고 지역사회의 지속가능한 발전과 공중위생의 향상에 기여하며 공공수역의 물환경 보전과 탄소배출량 감축을 목적으로 한다.
---------------------	---

자료: 국가법령정보센터, “하수도법”.

탄소중립을 위해 온실가스·에너지 목표관리제, 에너지 효율성 평가, 에너지 진단 등의 관리제도 강화가 필요하며, 에너지절감 관리정책의 방향도 제시되어야 한다. 환경부는 하수처리시설의 관리·운영 실태점검을 통해 에너지 관리 평가를 매년 하고 있으며, 평가 항목 중 에너지 효율화율이 2019년 1.8%에서 2020년 5.0% 그리고 2022년 7.5%로 높아지고 있음에도 탄소중립을 위한 에너지 효율화율 증가를 위한 정책 개선이 필요하다. 에너지 관리에 관한 주요 제도로는 환경부의 「하수도법」 및 「녹색건축물 조성 지원법」이 있으며 산업통상자원부의 「에너지이용 합리화법」에 근거하여 에너지효율을 위한 정책이 시행되는 가운데 에너지효율을 위한 진단 의무화 확대가 필요하다.

〈표 5-17〉 에너지관리 관련 제도

관련법	분야	주요 내용
하수도법 제69조의 2	공공하수처리 시설의 에너지 평가	하수처리시설의 효율적 운영 관리를 위한 실태점검을 매년 실시
저탄소녹색성장기본법 제42조	온실가스·에너지목표 관리제	온실가스 배출량 및 에너지 소비량사업장을 대상으로 5년 단위의 연차별 목표 보고와 매년 이행계획 및 이행실적 제출
에너지이용 합리화법 제 32조	에너지 진단	연간 에너지 사용량 2천 TOE 이상 사업자 또는 건축 연면적 3,000㎡ 이상 공공기관 업무시설은 5년 주기 에너지 진단 수행

자료: 국가법령정보센터, “하수도법”; “저탄소녹색성장기본법”; “에너지이용 합리화법”.

라. 수자원관리 탄소중립 관련 법률 현황 및 과제

(하천법) 제2조제5호에서 ‘하천공사’를 “하천의 기능을 높이기 위하여 하천의 신설·증설·개량 및 보수 등을 하는 공사”로 규정하고 있다. 따라서 하천 형상의 변경을 수반하는 하천생태계 복원은 「하천법」상 ‘하천공사’에 해당하고, 「하천법」에 따라 관련 사업이 시행될 수 있다.

동법 제25조제1항에서 하천사용의 이익을 증진하고 하천관리청으로 하여금 하천의 이용 및 자연친화적 관리에 필요한 기본적인 사항 등을 포함하는 10년 단위의 하천기본계획을 수립해야 함을 명시하고 있다.

동법 제43조(자연친화적인 공법의 사용 등)에서는 하천기본계획에 따라 하천공사를 시행하는 때에는

자연친화적인 공법을 사용하도록 의무화하고 있으며, 「하천법」이 하천 이·치수 기능 외에 환경 보전과 관련된 사항을 일부 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

동법 제44조(자연친화적 하천조성을 위한 보전지구 등의 지정) 하천관리청은 하천기본계획 수립 시 하천구역 안에서 하천환경 등의 보전 또는 복원이나 하천공간 활용에 필요한 경우에 보전지구·복원지구 및 친수지구를 지정할 수 있다. 그러나 「하천법 시행령」 제49조(보전지구 등의 지정기준)에서 기후변화 적응(홍수방어) 및 완화(온실가스 흡·배출)와 관련된 기준은 부재하여 관련 기준 신설이 필요하다.

〈표 5-18〉 하천법 시행령 제49조(보전지구 등의 지정기준)

하천법 시행령
<p>제49조(보전지구 등의 지정기준)</p> <p>① 하천관리청은 법 제44조제1항에 따른 보전지구를 다음 각 호의 하천구역 내에 지정할 수 있다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 하천의 자연생태계 유지를 위하여 보전가치가 큰 하천구역 2. 수량이 풍부하고 수질이 양호하여 용수공급, 주민의 건강에 미치는 영향이 큰 하천구역 3. 특이한 경관·지형 또는 지질을 가진 하천구역 4. 다양한 하천생태계를 대표할 수 있거나 표본이 될 수 있는 하천구역 5. 중요하고 고유한 역사적·문화적 가치가 있는 하천구역

자료: 국가법령정보센터, “하천법 시행령”.

(4대강수계법) 4대강 유역의 특성에 맞게 수자원을 보호하기 위해 제정된 법률로서, 주요 내용으로는 상수원보호지역 인근에서의 수변구역의 지정, 강수계의 지방자치단체별 오염총량제의 실시, 강수계별 수자원 최종소비자에 대한 물이용부담금의 징수, 환경기초시설의 설치 운영비 및 주민지원사업비 지원 제도 등을 포함하고 있다.

「한강수계법」 제4조(수변구역의 지정·해제 등)에 따라 수변구역이 지정·고시된다. 동법 제4조의2(수변구역 관리기본계획의 수립·시행)에 따라 5년마다 수변구역 관리기본계획을 수립·시행해야 하며, 수변녹지 등 수변생태벨트 조성계획과 수변구역의 토지매수 현황 및 계획 등을 포함해야 한다.

동법 제4조의3(수변생태벨트 시행계획의 수립·시행 등)에 따라 수변생태벨트 조성사업을 시행하려는 경우에 시행계획을 수립해야 하며, 동법 시행령 제3조의2에 따라 대상지역 이용 현황, 대상지역 매수 방법, 조성 후 관리 방안 및 사업 효과분석, 소요재원 및 투자계획 등을 포함해야 한다. 수변녹지 조성이 탄소중립 이행계획상 주요 온실가스 흡수 수단으로 명시되어 있음에도 수변구역 관리기본계획의 사업 효과분석이 수계법의 특성상 수질개선에 초점을 두고 있어 기후변화 완화에 대한 고려가 미흡하여 제도적 개선이 필요하다.

2 자원 확보 방안

2.1 물관리 탄소중립 관련 자원 확보 방안

「탄소중립기본법」에 따라 기후대응기금 등이 설치될 예정이며, 물관리 탄소중립 역시 기금 활용처가 될 가능성이 있다.

기후대응기금은 탄소중립 및 기후위기 대응의 재정적 뒷받침을 위해 새롭게 설치되는 기금으로, 이 역시 2022년부터 본격적으로 운용될 계획이다. 구체적으로는 온실가스 감축, 산업구조 전환, 기후위기 취약지역 및 계층 지원, 연구개발 및 인재양성 등을 위한 사업에 쓰일 예정이다. 향후 재원을 충분히 마련하고 탄소중립에 효과적으로 기여할 수 있는 사업을 선별 및 구성하는 것이 중요할 것이다.

〈표 5-19〉 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제69조 및 제70조

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법	
제69조(기후대응기금의 설치)	
①	정부는 기후위기에 효과적으로 대응하고 탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장을 촉진하는 데 필요한 재원을 확보하기 위하여 기후대응기금(이하 “기금”이라 한다)을 설치한다. (후략)
제70조(기금의 용도) 기금은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 용도에 사용한다.	
1.	정부의 온실가스 감축 기반 조성·운영
2.	탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장의 추진을 위한 산업·노동·지역경제 전환 및 기업의 온실가스 감축 활동 지원 (중략)
11.	그 밖에 기후위기 대응을 위하여 대통령령으로 정하는 용도

자료: 국가법령정보센터, “기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법”.

「탄소중립기본법」 제43조(기후위기 대응을 위한 물관리) 조항과 연계하였을 때, 물관리 전반을 포함하여 물관리 탄소중립 노력 역시 기금의 활용처가 될 수 있다.

〈표 5-20〉 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제43조

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법	
제43조(기후위기 대응을 위한 물 관리)	
정부는 기후위기로 인한 가뭄, 홍수, 폭염 등 자연재해와 물 부족 및 수질악화와 수생태계 변화에 효과적으로 대응하고 모든 국민이 물의 혜택을 고루 누릴 수 있도록 하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 시책을 수립·시행하여야 한다.	
1.	깨끗하고 안전한 먹는 물 공급과 가뭄 등에 대비한 안정적인 수자원의 확보
2.	수생태계의 보전·관리와 수질 개선
3.	물 절약 등 수요관리, 적극적인 빗물관리 및 하수 재이용 등 물 순환 체계의 정비 및 수해의 예방
4.	자연친화적인 하천의 보전·복원
5.	수질오염 예방·관리를 위한 기술 개발 및 관련 서비스 제공 등

자료: 국가법령정보센터, “기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법”.

본 연구에서는 물관리 영역에서 기후대응기금 활용가능성 및 활용처, 활용전략 등을 검토하고 나아가서 탄소세 등 추가법제화 가능성을 고려하여 재원 조달 방안 등을 검토하였다.

2.2 물이용 부문

가. 하천수입금 활용

「하천법」에는 하천 수입금 사용기준이 제시되어 있으며, 우선 사용해야 할 항목이 <표 5-21>과 같이 규정되어 있다.

<표 5-21> 하천법 시행령 제77조

하천법 시행령 제77조(수입금사용의 기준 등) ① 법 제66조에 따라 지방자치단체는 수입금을 다음 각 호의 비용으로 사용하되, 제1호 및 제2호에 우선적으로 사용하여야 한다.
1. 하천의 유지·보수비
2. 하천구역 안의 편입토지에 대한 보상금
3. 지방하천의 하천기본계획 수립과 하천시설 관리대장을 작성·관리하는 데에 드는 비용
4. 하천수입 또는 폐천부지등의 관리대장을 작성·관리하는 데에 드는 비용
5. 폐천부지등의 관리 및 처분에 소요되는 비용
6. 하천공사비
7. 그 밖에 하천관리에 드는 비용

자료: 국가법령정보센터, “하천법 시행령”.

<표 5-22> 연도별 하천수입금 현황

(단위: 백만 원)

연도	계	국가하천	지방하천
2010	37,354	19,489	17,865
2011	28,152	14,822	13,330
2012	30,550	3,892	26,658
2013	92,934	58,928	34,006
2014	64,593	44,985	19,608
2015	53,090	24,662	28,428
2016	53,090	24,662	28,428
2017	37,372	7,083	30,288
2018	48,167	6,861	41,305
2019	27,255	5,586	21,669
평균	47,256	21,097	26,195

자료: 국가통계포털(KOSIS), “하천수입금”, 검색일: 2022.08.03.

국가통계포털(KOSIS)에는 하천수입금 징수 현황 자료가 2019년까지 나오는데, 연도별로 그 편차가 큰 편이나 최근 10년간 평균 473억 원의 하천수입금이 발생한 것으로 나타난다. 이 비용의 일부를 물 공급 시설 효율화 혹은 물 관련 온실가스 흡수 공간 조성 등 온실가스 감축을 위한 사업에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

나. 물이용 관리 탄소중립 관련 자원

농업용수 및 가축분뇨처리 탄소중립 이행을 위한 자원은 ① 농업용수 관리, ② 가축분뇨처리, ③ 축산생산성 향상과 관련된 예산으로 활용될 수 있다.

다. 농업용수 관리 탄소중립 관련 자원

「농어촌정비법」 제15조(농어촌용수 이용 합리화계획 등)에 따라 농어촌용수의 효율적 이용과 개발 및 보전을 목적으로 농업용수이용합리화계획이 수립되고 있다. 농업용수 이용합리화계획에 따른 자원은 농업생산기반 정비 예산으로 조달되고 있으며, 농업용수 관리 탄소중립을 위해 본예산이 활용될 수 있을 것이다.

2022년 농업생산기반정비 예산은 약 1조 6,700억 원으로 편성되었으며, 2012년 최고액(약 2조 8,000억 원) 이후로 다소 감소하는 추세이다. 농업생산기반정비 예산은 침수피해 및 가뭄피해를 예방하기 위한 사업, 저수지 및 방조제 등 노후화된 수리시설물 유지관리에 관한 사업, 농업용수 공급개발 및 이용체계 재편, 그리고 수질조사 및 개선 등 안정적인 농업용수 확보를 위한 사업에 사용되고 있다.

농촌용수개발(농특회계)은 저탄소 사회로 이행을 위한 한국형뉴딜 사업과도 연계된 예산으로, 농업용수의 전력사용 절감을 위한 사업에 활용될 수 있다. 농어촌용수이용합리화계획에 따르면 용수로 관수로화, 관리자동화, ICT 모니터링 관개 시스템 도입 등 농업용수 공급체계 개편을 통한 탄소 감축을 제시하였으며, 해당 기술들은 본예산의 세부지원사업과 부합하여 활용될 수 있다.

〈표 5-23〉 2022년 농업생산기반정비 예산 변화

(단위: 백만 원, %)

연도	당해예산	전년 대비		연도	당해예산	전년 대비	
		증감액	증감률			증감액	증감률
2005	1,453,629	-	-	2014	1,654,573	△125,661	△7.1
2006	1,633,392	176,763	12.4	2015	1,807,040	152,467	9.2
2007	1,689,265	55,873	3.4	2016	1,866,362	59,322	3.3
2008	1,653,380	△35,885	△2.1	2017	1,717,468	△148,894	△8.0
2009	1,675,789	22,409	1.4	2018	1,698,481	△18,987	△1.1
2010	2,091,867	416,078	24.8	2019	1,755,761	57,280	3.4
2011	2,436,100	344,233	16.5	2020	1,545,199	△210,562	△12.0

연도	당해예산	전년 대비		연도	당해예산	전년 대비	
		증감액	증감률			증감액	증감률
2012	2,845,941	409,841	16.8	2021	1,624,827	79,628	5.2
2013	1,780,234	△1,065,707	△37.4	2022	1,671,663	46,836	2.9

주: 각 연도 농업생산기반정비 예산에 농지관리기금은 미포함됨.

자료: 농어촌연구원(2021a); 농림축산식품부(2021d, 2022c); 각 연도 농식품부 예산 및 기금운용계획 개요.

〈표 5-24〉 농업생산기반정비 세부 사업별 예산액

(단위: 백만 원, %)

구분	2022(A)	2021(B)	증감	비고
			A-B(%)	
농업생산기반정비	1,671,663	1,624,827	46,836 (2.9)	
배수개선 (농특회계)	375,590	324,510	51,080 (15.7)	• 침수피해를 겪는 농경지를 대상으로 배수시설을 설치하여 재해예방
가뭄대비용수개발 (농특회계)	11,210	11,800	△590 (△5.0)	• 국지적 강수 부족 등으로 인한 가뭄피해(우려) 지역에 용수개발 사업을 통해 가뭄으로 인한 농업피해 예방 및 최소화 도모 • 국고 80%, 지방비 20%
국가지방관리 방조제개보수 (농특회계)	43,980	46,114	△2,134 (△4.6)	• 노후화된 방조제를 사전 보수·보강함으로써 시설물의 붕괴 및 해수침수에 의한 농경지 염해 피해 방지 등 재해예방 • 국가관리방조제(국고 100%) • 지방관리방조제(국고 50%)
대규모농업기반 시설치수능력확대 (농특회계)	18,605	39,875	△21,270 (△53.3)	• 시설치 저수지 및 방조제의 시설물 보강을 통해 홍수배제능력 향상 및 재해예방 • 대규모농업기반시설 치수능력 확대
수리시설유지관리 (일반회계)	151,800	151,800	- (0)	• 한국농어촌공사 관리구역 내 수리시설물에 대한 운영·관리를 통해 안정적인 농업용수 공급 및 재해예방을 위한 사업비 부족분 151,800백만 원 국고지원
농촌용수관리 (농특회계)	83,329	94,799	△11,470 (△12.1)	• 농업용수 수질조사 및 개선, 관리 자동화, 통합물관리 등을 통한 농업용수의 효율적 이용·관리 도모 • 농업용수 관리 자동화, 농업용수 수질조사 및 개선, 수질자동 측정망, 지하수 자원관리, 농업가뭄 모니터링 및 평가·분석, 농촌용수 통합물관리 구축, 용·배수 계통도 디지털화
수리시설개보수 (농특회계)	682,249	636,463	45,786 (7.2)	• 농어촌공사에서 관리하는 저수지, 용·배수로 등 노후 수리시설 보수·보강을 지원하여 재해예방 및 영농편의 증진 • 수원 공개 보수, 용배수로 개보수, 안전진단, 양수장시설 개선, 재해예방 계측, 저수지 준설
농촌용수개발 (농특회계)	304,900	319,466	△14,566 (△4.6)	• 저수지, 양수장, 용수로 등 수리시설을 설치하여 농어촌에 농업·생활·환경용수확보·공급 등 가뭄 대비 안전영농기반 구축 • 다목적 농촌용수 개발, 농촌용수 이용체계 재편, 임진강수계 농촌용수 공급, 제주농업용수 통합광역화

자료: 농림축산식품부(2022c), pp.70-74.

2.3 물환경 부문

가. 가축분뇨처리 관련 자원

가축분뇨처리지원과 관련된 자원은 농식품부와 환경부의 각 사업에 따라 축산발전기금과 가축분뇨공공처리시설설치예산으로 활용될 수 있다.

농식품부의 가축분뇨처리지원사업은 축산발전기금으로 운영되고 있으며 국비를 기준으로 2019년에 약 833억 원에서 매년 증가하여 2021년에 약 1,100억 원 수준까지 올라갔다. 사업의 지원 비율은 국고 20~100%, 지방비 20~50%, 용자 20~70%, 자부담 0~30%로 세부 사업에 따라 지원 비율 및 용자조건에 차이가 있다.

가축분뇨처리지원사업은 농림축산식품부와 축산환경관리원, 농협경제지주 등이 담당하여 추진하고 있다. 이 사업은 가축분뇨처리 시설 및 장비 등을 지원하여 가축분뇨를 퇴·액비 또는 에너지 등으로 자원화하고 있으며, 자연순환 농업 활성화 및 환경오염 방지를 목적으로 삼고 있다. 세부 사업으로는 축산악취개선을 위한 퇴·액비화시설, 정화개보수, 액비저장조 등 지원과 악취측정 ICT기계, 기상장비 등의 지원이 있다. 또한 공동자원화시설지원을 통해 퇴·액비화, 바이오가스 연계 및 에너지화, 마을형 공동퇴비장 지원, 퇴·액비 살포 비용을 지원하고 있다.

〈표 5-25〉 연도별 가축분뇨처리지원사업 재정투입 현황

(단위: 백만 원, 국비 기준)

구분	2018년	2019년	2020년	2021년
국고	36,908	35,050	45,049	49,401
용자	55,710	48,295	55,523	60,917
합계	92,618	83,345	100,572	110,318

자료: 농림축산식품부(2021b), p.2155.

〈표 5-26〉 가축분뇨처리지원사업 지원 비율

(단위: %)

사업명	국비보조	지방비	국비용자	자부담	용자조건
축산악취개선	20	20	50	10	10년(3년 거치 7년 균분상환), 연 2.0%(민간기업 등 3%)
악취측정 ICT 기계·장비	50	50	-	-	
공동자원화시설					
- 퇴액비화,	40	30	30	-	
바이오가스 연계,	40	30	30	-	
마을형 퇴비자원화	40	30	30	-	
- 에너지화	50	20	20	10	
퇴비·액비 살포비	50	50	-	-	
축산환경개선	100	-	-	-	
자연순환농업활성화	-	-	70	30	연 2%, 3년 거치 후 일시상환

자료: 농림축산식품부(2021b), p.2163.

환경부는 가축분뇨의 정화처리와 에너지화 비율을 높이기 위해 1991년부터 ‘가축분뇨 공공처리시설 설치 국고보조사업’을 추진하고 있다. 환경부 가축분뇨공공처리시설 설치사업은 국고보조금 형태로 지원되며, 사업 시행주체에 따라 국고 보조율이 60~80% 정도로 차등 지원된다. 가축분뇨공공처리시설의 2022년 예산액은 567억 원 수준으로 전년에 비해 증가하였다.

가축분뇨 공공처리시설 설치사업은 가축분뇨 공공처리시설의 확충과 시설 개선을 통하여 축산농가에서 발생하는 가축분뇨를 정화 및 자원화하여 상수원 등 수질 보전에 기여함을 목표로 한다. 따라서 이와 관련된 시설 설치비 및 개선 사업비를 지원받고 있다. 공공처리시설 설치사업은 환경부의 지원으로 지방자치단체 및 농협조합이 설치하는데, 정화방류와 바이오가스 에너지화를 위주로 지원하고 있어 퇴·액비 등 자원화 중심의 공동자원화시설과 차이가 있다.

농식품부와 환경부는 가축분뇨처리를 위한 지원사업을 추진 중이며, 사업의 세부 내용에 따라 지원에 차이가 있다. 따라서 탄소중립을 위한 가축분뇨 정화처리 및 에너지화 확대를 통한 감축 방안에 재정적 지원이 가능할 것으로 보인다.

〈표 5-27〉 가축분뇨공공처리시설 설치사업 지원 비율

(단위: %)

구분	시·군·구	광역시(군지역)	광역시	농협조합
지원 비율	80	80	60	70

자료: 환경부(2022a), p.3.

〈표 5-28〉 연도별 가축분뇨공공처리시설 설치사업 재정투입 현황

(단위: 백만 원)

구분	2018	2019	2020	2021	2022
국고	54,190	55,268	51,448	48,474	56,723

자료: 환경부(2018~2022), 각 연도 환경부 소관 예산 및 기금운용계획 개요.

나. 축산생산성 관련 자원

가축분뇨처리의 탄소중립을 위한 로드맵 방안 중 하나로 스마트 축사 보급이 제시되었다. ICT 도입 등 스마트 축사보급의 재원은 자유무역협정이행지원기금(FTA기금)으로 마련되고 있다. FTA기금의 2022년 예산액은 2,183억 원으로 전년(약 2,542억 원)에 비해 다소 감소하였다. 지원 형태는 축사의 규모에 따라 다르며, 용자 80%, 자부담 20%으로 되어 있다.⁵⁷⁾

57) 중·소규모(FTA기금)와 대규모(이차보전)에 다르게 지원되며 이차보전이 남는 경우 중·소규모 농가에게 지원이 가능하다.

한·미, 한·EU, 영연방 FTA 체결 등에 따른 시장개방에 대응하여 축사 및 축사시설 현대화를 하면서 생산성 향상과 환경 개선을 추진하므로 FTA기금은 축산업 경쟁력 확보를 위한 사업에 쓰이고 있다. 관련 사업으로 축사시설 현대화사업이 있으며, 축사시설 개선, 방역인프라 시설 및 ICT 융복합 시설 설치, 스마트축산 ICT 시범단지 조성 등을 지원하고 있다.

〈표 5-29〉 연도별 축사시설현대화사업 재정투입 현황

(단위: 백만 원)

구분	2018	2019	2020	2021	2022
국고	9,744	-	-	-	-
용자	113,680	113,680	96,628	89,298	52,154
이차보전	65,000	65,000	122,500	122,500	122,500
자부담	47,106	44,670	54,872	42,360	43,664
합계	235,530	223,350	273,910	254,158	218,318

자료: 농림축산식품부(2022a).

스마트축사 보급은 ‘축산분야 ICT 융복합 확산사업’으로 이루어지고 있다. 이 사업은 축산업 경쟁력 확보를 위해 생산비 절감과 최적의 사양 관리에 필요한 ICT 장비를 지원한다. 또한 축사 환경관리를 위한 내·외부의 환경 모니터링 및 조절 장비, 원격 또는 자동제어 장비 등 생산경영관리를 위한 장비를 지원하고 있어, 탄소중립을 위한 로드맵 감축방안에 기금이 활용될 수 있을 것으로 보인다.

다. 하·폐수 관리

에너지 관련 시설을 포함한 도시기반시설의 건설과 운영에는 많은 예산이 필요하며 하·폐수처리시설과 에너지 활용 시설 계획도 예외는 아닐 것이다. 이러한 공공예산투자에 대한 부담을 줄이려면 지자체에서 민간사업자, 지역에너지사업가의 공동 투자 및 건설·운영 등 다자간 협력모델을 도입해야 한다. 이러한 사업모델은 PPP(Public-Private Partnership)모델이라고 할 수 있으며 하수열을 활용한 지역난방 공급 사업은 민관과 공공이 협력하는 PPP 사업모델의 성공적인 사례라고 볼 수 있다. 마찬가지로 방류수의 낙차를 이용한 소수력 발전시설의 건설·운영 사업에도 PPP 사업모델이 적용되고 있으며 두 사업의 성공은 정책적으로 의미가 크다고 할 수 있다.

〈그림 5-7〉 Public-Private Partnership의 특징

BENEFITS OF PPP

More accessibility to vocational education



Better system level governance in Vocational Education



Innovative forms of collaboration, efficiency and technology



자료: ETF, <https://www.etf.europa.eu/>, 검색일: 2022.07.16.

사업을 위해 지자체는 필요한 부지를 제공하고 사업과 관련된 행정절차를 지원하도록 한다. 민간부문은 시설의 설계·시공·운영·관리를 포함한 계획에 필요한 사업비를 투자하고 시설을 설치하며 사업 완료 후 시설에서 생산되는 에너지 판매로 수익을 내도록 한다. 결국 하·폐수처리시설의 에너지 자립률 제고라는 목표를 넘어 전 세계가 동참하고 있는 탄소중립 경제로의 이행 목표를 달성할 수 있는 기술적, 정책적 기반을 마련할 수 있을 것이다.

2.4 수자원 관리 부문

가. 수자원 관리

4대강수계법에는 수계관리기금이 설치되어 있으며, 그 예로 「한강수계법」의 경우 제20조(한강수계관리기금의 설치)에 따라 한강수계관리위원회에 한강수계관리기금을 설치한다. 동법 제21조(기금의 재원)에 따라 수계관리기금은 물이용부담금, 매수한 토지 등에서 발생한 수익 및 토지 등의 매도금액, 기금운용수익금 따위로 조성된다.

동법 제22조(기금의 용도)상 각 호의 어느 하나에 해당하는 용도로 기금이 운용될 수 있으며, 동법 시행령 제28조(기금의 용도)에는 수변녹지 조성사업, 매수한 토지 등의 관리, 수질개선을 위한 생태하천 복원사업, 비점오염저감사업, 수원함양 기능을 증진하기 위한 산림사업 등 수변구역 토지매수 및 수변생태벨트 조성에 수계관리기금을 활용할 수 있는 법·제도적 근거가 마련되어 있다.

〈표 5-30〉 한강수계법 시행령 제28조(기금의 용도)

한강수계 상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률 시행령

제28조(기금의 용도)

법 제22조제10호에서 “그 밖에 상수원의 수질개선을 위하여 대통령령으로 정하는 사업”이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 사업을 말한다.

1. 팔당호 및 잠실수중보 등의 퇴적물 준설사업
 2. 수변녹지 조성사업
 3. 매수한 토지등의 관리
 4. 민간단체의 수질감시 및 보전활동의 지원
 5. 환경기초조사사업
 6. 수질개선을 위한 교육 및 홍보
 7. 상수원관리지역 및 법 제6조에 따라 상수원보호구역에서의 행위제한이 준용되는 하천구간의 관리
 8. 수질개선을 위한 생태하천 복원사업
 9. 수질자동측정감시 장치의 설치와 운영
 10. 소유자 또는 관리자가 없는 지하수 개발·이용시설에 대한 수질오염방지사업
 11. 비점오염저감사업(非點汚染低減事業)
- (중략)

자료: 국가법령정보센터, “한강수계법 시행령”.

3 탄소중립 이행 및 성과체계

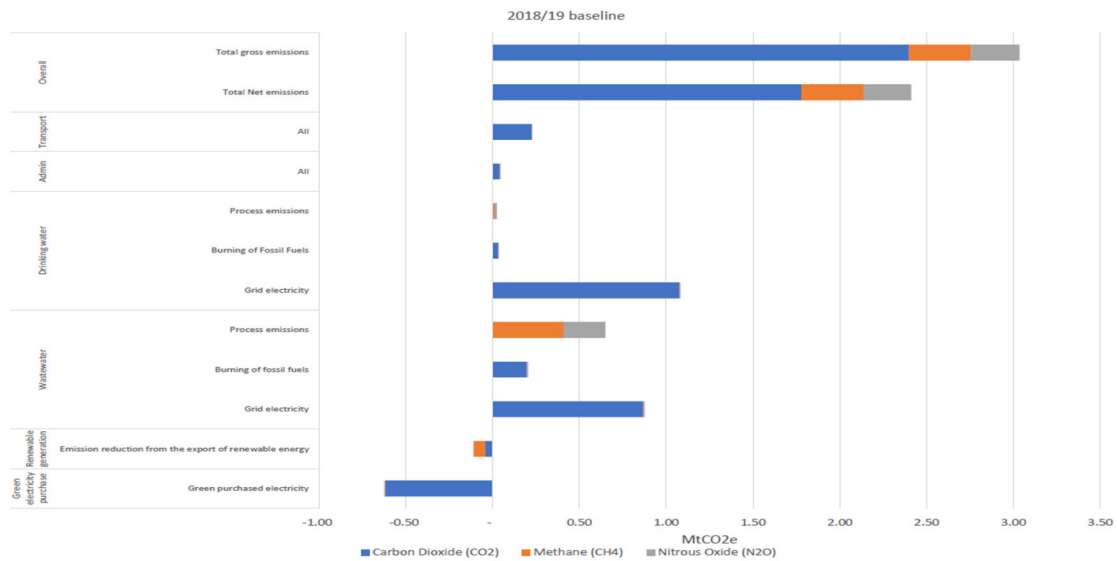
3.1 탄소중립 이행 및 성과체계 구축

물관리 부문 탄소중립 주류화 및 이행기반 구축을 위해 용수 공급의 안정성(reliability), 일인당 물 사용량, 물 분야 에너지 사용량, 물사용 에너지(혹은 탄소) 집약도(energy intensity of water), 물 분야 온실가스 배출량 등 물 분야 탄소중립 이행 성과지표를 식별하고 관련 자료를 수집하였다.

Water UK(영국), Water for Victoria(호주), Urban Water Management Plan(캘리포니아), System of Environmental-Economic Accounting for Water(UN) 등 국내외 여건과 해외 사례분석을 통한 모니터링 및 평가체계를 구축하였다.

물 분야 통합(aggregated) 모니터링 및 평가체계와 더불어 물관리 기관들을 위한 모니터링 및 평가체계를 구축하였다.

〈그림 5-8〉 Water UK의 온실가스 배출량 산정



자료: Water UK(2000).

3.2 농업용수 및 가축분뇨처리 탄소중립 관련 성과평가 현황

농림축산식품부는 4개의 전략목표를 설정하고 각각의 특성에 맞는 52개의 주요 정책 및 사업과 그 성과목표를 제시하였다. 또한 각 정책 및 사업의 성과관리를 위해 관리과제별로 세부 성과지표를 설정하여 성과달성 여부를 확인하고 있다. 다만 농업용수 부문의 탄소중립 이행에 대한 직접적인 성과지표는 아직 고려되지 않고 있다.

〈표 5-31〉 농업기반시설 안전관리 및 안정적 농업용수 공급 성과지표 및 달성도

(단위: %)

성과지표	측정방법	실적			목표
		2018	2019	2020	
① 수리답률	(수리답면적/전체논면적)×100	81.8	82.5	82.8	83.4
② 가뭄발생피해방지율	{1-(가뭄피해면적/가뭄발생 전체면적)}×100	-	92.0	93.0	94.0
③ 농어촌공사 수리시설 수혜면적 대비 가뭄면적 비율	(가뭄 빈도 3년 관개면적/농어촌공사 관리면적)×100	-	-	-	1.26
④ 수리시설 개보수율	(완료지구수/대상지구)×100 *대상: 8,769지구	81.3	82.5	83.6	84.8
⑤ 수질개선 사업추진율	(완료지구/ 대상지구)×100 *대상: 87지구	36.8	41.4	46.0	50.6
⑥ 농촌용수 급수율	(다목적 농촌용수개발사업 급수면적(누계)/ 사업 대상 면적)×100 *대상: 136.4천ha	74.9	76.8	80.3	83.4

자료: 농림축산식품부(2021c), p.142.

농업용수와 관련된 전략목표는 ‘II. 농업인 소득안정’이며, 이에 따른 성과목표는 ‘II-2. 재해대응력을 강화하여 안정적인 농업경영 여건을 조성한다’이다. 성과목표 달성을 위한 관리과제로는 ‘II-2-②. 농업기반시설 안전관리 및 안정적 농업용수 공급’이 제시되었다. 해당 과제의 성과지표는 <표 5-31>과 같으며, 매년 목표치를 상향 조정하며 달성하고 있다. 하지만 ‘농업기반시설 안전관리 및 안정적 농업용수 공급’ 관리과제가 제시될 때 온실가스 감축이 정책목표로 고려되지 않았으며, 이에 대응하는 성과지표 역시 제시되지 않았다.

가축분뇨처리와 관련된 탄소중립 이행 및 성과 역시 농식품부와 환경부 각 사업의 성과지표를 통해 간접적으로 평가되고 있다.

우선, 농식품부는 가축분뇨처리 지원사업의 이행을 위해 2022년까지 깨끗한 축산농장⁵⁸⁾ 5천 호 지정을 성과목표로 수립하였다.⁵⁹⁾ 해당 성과지표는 대표 국정과제로 축산농가의 자발적인 가축분뇨 적정 처리 및 환경개선 유도를 위하여 설정되었다. 2021년의 당초 성과달성 목표치는 최근 3년간의 깨끗한 축산농장 지정실적 평균의 약 111% 수준인 965호의 축산농가를 신규 지정하는 것으로 설정되었다.

축사시설 현대화사업의 ICT 도입을 통한 스마트축사 보급의 성과지표는 스마트축사 보급 농가수(호)로 평가된다. 2021년에 해당 사업을 통해 4,780호의 스마트축사 농가를 기록하여 당초 목표였던 4,350호 대비 109.9%의 달성을 이룬 것으로 나타났다.

<표 5-32> 가축분뇨처리 관련 성과지표 및 달성도

성과지표	측정방법	목표대비 달성률	2018	2019	2020	2021
깨끗한 축산농장 조성 (누적, 호)	깨끗한 축산농장 지정 개소수	목표	1,750	2,529	3,410	4,375
		실적	1,815	2,610	3,629	5,242
		달성률(%)	103.7	103.2	106.4	119.8
스마트축사 보급 농가수 (누적, 호)	스마트축사 보급 농가수의 합	목표	-	-	-	4,350
		실적	-	-	-	4,780
		달성률(%)	-	-	-	109.9

주: 깨끗한 축산농장은 가축사육 환경개선, 악취 발생 저감 등을 실천하는 농가를 의미하며, 가축분뇨 관리 상태 및 악취 관리 등의 기준을 바탕으로 선정함. 축산농가의 자발적 환경개선과 지속가능한 축산환경 보전을 통한 탄소중립 달성을 위한 지표로 활용되고 있음.

자료: 농림축산식품부(2022b).

환경부는 국정철학과 환경부 가치 및 미래상이 반영된 7개 전략목표를 설정하였으며, 세부적으로 국정기조 및 당해 연도 주요 정책사업 등을 담은 성과목표와 관리과제들을 제시하여 성과관리 시행계획을 추진하고 있다.

성과목표는 전략목표별로 3~4개이며 당해 연도 중점 추진정책을 포괄하는 정책목표로 제시되며, 관리과제에는 성과목표와 관련된 당해 연도 정책 및 사업 2~4개가 포함된다. 또한 성과달성평가를 위해

58) 깨끗한 축산농장은 가축사육 환경개선, 악취 발생 저감 등을 실천하는 농가를 의미하며, 가축분뇨 관리 상태 및 악취 관리 등의 기준을 바탕으로 선정된다. 현재는 축산농가의 자발적 환경개선과 지속가능한 축산환경 보전을 통한 탄소중립 달성을 위한 지표로 활용되고 있다.

59) 깨끗한 축산농장 조성계획(누계): (2019) 2,610호 → (2021) 4,375호 → (2022) 5,000호

목표별로 사업내용 및 일정, 정책성과 달성 여부를 위한 성과지표가 1~6개가 포함된다.

가축분뇨처리와 관련된 전략목표는 'Ⅲ. 통합적 물관리로 인간과 자연이 함께 누리는 건강한 물환경 조성'이며, 이에 따른 성과목표로는 'Ⅲ-2 체계적 수질관리와 유역협력체계 구축을 통해 생태적으로 건강한 하천을 만든다'가 제시되었다. 성과목표 평가를 위한 성과지표 가운데 가축분뇨처리와 관련된 성과지표는 '가축분뇨 공공처리 기반 조성'이며, 2022년 목표치는 지난 3년간의 추진 실적을 고려하여 설정되었다.

성과목표 달성을 위한 가축분뇨처리 관련 관리과제로는 'Ⅲ-2-④. 가축분뇨, 하·폐수의 자원화 및 재이용 확대'가 제시되었다. 해당 과제는 수질오염 저감과 안정적인 수자원 확보를 위해 가축분뇨와 하·폐수의 자원화 및 재이용을 확대하는 내용을 포함한다. 2022년 관리과제의 성과지표로 제시된 '지역단위 양분관리 시범사업 추진(개소)'의 목표치는 전년도(2021년) 시범사업 추진 현황 등을 고려하여 설정되었다.

〈표 5-33〉 환경부 농업용수 관련 성과지표 실적 및 목표치

성과목표/관리과제	성과지표	실적			목표
		2019	2020	2021	2022
Ⅲ-2. 체계적 수질관리와 유역협력 체계 구축을 통해 생태적으로 건강한 하천을 만든다.	① 하천 수질 목표 달성률(%)	75.7	80.0	78.3	75.2
	② 가축분뇨 공공처리 기반 조성(개소)	99	105	106	109
	③ 공공폐수처리시설 수질오염물질 삭감량 (T-P, 톤/년)	3,283	3,327	3,350	3,381
Ⅲ-2-④. 가축분뇨, 하·폐수의 자원화 및 재이용 확대	① 지역단위 양분관리 시범사업 추진(개소)	-	-	4	4
	② 하수처리장 에너지 자립화율(%)	10.9	12.9	13.6	13.8
	③ 하수처리수 수자원 활용률(%)	7.5	7.9	8.0	8.1

자료: 환경부(2022b).

현재 가축분뇨처리와 관련된 농식품부와 환경부의 정책과 사업은 가축분뇨의 적절한 처리를 통한 축산 분야의 환경오염 저감을 목표로 한다. 따라서 온실가스 감축이라는 탄소중립 이행 관련 성과지표는 포함되어 있지 않으며, 이를 바탕으로 한 성과평가 역시 이루어지고 있지 않다.

마지막으로 현재 농업 부문의 탄소중립 이행 및 성과체계는 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」에 유일하게 들어가 있다. 하지만 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」에 가축분뇨처리는 포함되어 있지만, 농업용수 공급과 가축분뇨처리에서 발생하는 간접배출은 들어가 있지 않다. 따라서 본 연구에서 농업용수 및 가축분뇨처리 탄소중립 이행과 성과체계로 활용하기에는 한계가 있다.

3.3 농업용수 및 가축분뇨처리 탄소중립 이행 모니터링과 평가 체계 구축 방향

앞서 언급하였듯이 농업용수 및 가축분뇨처리 탄소중립 이행 및 성과체계를 구축하려면 온실가스 인벤토리에서 관리되고 있는 가축분뇨처리와 더불어 농업용수 관리와 가축분뇨처리에서 배출되는 직간접 배출량을 추가적으로 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이를 위해 한국전력통계의 농사용(갑) 자료와 한국전력의 산업분류코드 판매실적을 활용하였다.

농업용수 이용 효율화를 통한 농업용수 및 가축분뇨처리 탄소중립 이행을 뒷받침하기 위해서는 더 세분화된 자료를 바탕으로 한 이행 및 성과체계가 필요하다. 구체적으로 농업 생산구조의 변화로 인해 농업용수의 이용자가 벼 재배농가에서 시설 혹은 축산 농가로 점점 바뀌고 있다. 또한 앞서 언급한 농업의 생산구조 변화뿐만 아니라 농촌의 정주 여건 변화로 인해 농업 분야뿐만 아니라 비농업 분야의 농업용수에 대한 수요는 증가하였다. 따라서 농업용수 이용 관련 온실가스 배출량뿐만 아니라 농업용수 사용량도 동시에 고려할 필요가 있다. 나아가서 농업용수 이용 관련 온실가스 배출량과 농업용수, 사용농업용수 관리를 위한 농민 참여량 모니터링 및 평가, 그리고 이를 바탕으로 한 제도의 개선을 위해서는 품목별·지역별 농업용수 사용량과 온실가스 배출량 산정이 필요할 것으로 생각된다.

〈그림 5-9〉 캘리포니아주의 물관리 기관의 에너지 사용량 집계표

Table O-1C: Recommended Energy Intensity - Multiple Water Delivery Products								
Enter Start Date for Reporting Period 10/1/2014 End Date 9/30/2015		Urban Water Supplier Operational Control						
Total Volume of Water Entering Process (AF)	Water Management Process					Total Utility	Non-Consequential Hydropower (if applicable)	
	Extract and Divert	Place into Storage	Conveyance	Treatment	Distribution		Hydropower	Net Utility
	0	0	0	0	0	N/A	0	N/A
Retail Potable Deliveries (%)	0%	0%	0%	0%	0%		0%	
Retail Non-Potable Deliveries (%)	0%	0%	0%	0%	0%		0%	
Wholesale Potable Deliveries (%)	0%	0%	0%	0%	0%		0%	
Wholesale Non-Potable Deliveries (%)	0%	0%	0%	0%	0%		0%	
Agricultural Deliveries (%)	0%	0%	0%	0%	0%		0%	
Environmental Deliveries (%)	0%	0%	0%	0%	0%		0%	
Other (%)	0%	0%	0%	0%	0%		0%	
Total Percentage (must equal 100%)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	0%	N/A
Energy Consumed (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0
Energy Intensity (kWh/AF)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	N/A	0.0	N/A

Water Delivery Type	Production Volume (AF)	Total Utility (kWh/AF)	Net Utility (kWh/AF)
Retail Potable Deliveries	0	0.0	0.0
Retail Non-Potable Deliveries	0	0.0	0.0
Wholesale Potable Deliveries	0	0.0	0.0
Wholesale Non-Potable Deliveries	0	0.0	0.0
Agricultural Deliveries	0	0.0	0.0
Environmental Deliveries	0	0.0	0.0
Other	0	0.0	0.0
All Water Delivery Types	0	0.0	0.0

자료: DWR(2020), Appendix O를 인용함.

더 나아가서 농업용수 수요관리를 위해서는 지구 단위의 물 사용량과 에너지 사용량을 모니터링 및 평가할 수 있는 체계가 필요하다. 예를 들어 2020년에 개정된 미국 캘리포니아주의 도시지역 물관리 계획(Urban Water Management Plan) 수립 가이드라인(DWR, 2020)에 따라 도시지역 물관리 기관들의 물 사용량뿐만 아니라 에너지 사용량의 집계표까지 작성하였다.

3.4 물환경 부문

세계 여러 선진국에서 하수처리시설은 탄소중립에서 하수처리 및 하수자원회수 시설의 역할뿐 아니라 탄소감축시설의 역할을 하고 있으며, 설계와 운영의 단계에서 탄소감축을 위한 역할도 수행하고 있다. 이에 우리나라도 하수처리시설을 온실가스·에너지 목표관리제의 기준을 기반으로 제한적으로 선정하는 일이 중요한 것이 아니라 지자체별 하수처리시설의 온실가스·에너지 목표관리제를 설정하고 이행 및 성과체계를 구축하는 것이 필요하다.

하수처리시설의 탄소중립 이행 및 성과체계를 위해 「하수도법」 제4조의2인 ‘유역하수도정비계획 수립’과 「하수도법」 제5조 ‘하수도정비기본계획의 수립권자 등’에 하수처리시설의 탄소중립 계획과 이행 및 성과체계에 관하여 관한 내용을 추가할 필요가 있다.

〈표 5-34〉 하수도법 제4조의2 및 제5조 개선안

제4조2(유역하수도정비계획 수립)

- ③ 유역하수도정비계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
1. 「물관리기본법」 제28조제1항에 따른 유역물관리종합계획의 이행을 위한 해당 유역 하수도의 관리 목표 및 전략에 관한 사항
 2. 제7조제1항 단서에 따른 방류수수질기준의 설정에 관한 사항
 3. 유역 내 하수도의 설치, 운영 및 관리의 통합에 관한 사항
 4. 유역의 하수 발생, 처리 및 하수처리수(공공하수처리시설에서 처리된 물을 말한다. 이하 같다)의 재이용 계획에 관한 사항
 5. 유역의 물순환, 도시 침수 가능성 등을 고려한 하수도 설치 및 운영에 관한 사항
 6. 하수도 관련 사업 시행에 드는 비용의 산정 및 재원 조달에 관한 사항
 7. 하수처리시설의 탄소중립계획과 이행 및 성과체계에 관한 사항

제5조(하수도정비기본계획의 수립권자 등)

- ③ 하수도정비기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
1. 하수도의 정비에 관한 기본방침
 2. 유역하수도정비계획에 따른 세부시행방안에 관한 사항
 3. 하수도에 따라 하수를 유출 또는 처리하는 구역에 관한 사항
 4. 하수도의 기본적 시설의 배치·구조 및 능력에 관한 사항
 5. 합류식하수관로와 분류식하수관로의 배치에 관한 사항
 - 5의2. 하수의 원활한 유출을 통한 관할 구역의 침수예방에 관한 사항
 - 5의3. 강우 시 하수 측정 및 처리에 관한 사항
 6. 하수도정비사업의 실시순위에 관한 사항
 7. 배수구역에서 방류되는 오염물질의 저감계획 및 하수저류시설의 설치에 관한 사항
 8. 하수를 공공하수처리시설에서 처리하는 과정에서 발생한 찌꺼기의 처리계획 및 처리시설의 설치에 관한 사항
 - 8의2. 하수처리수의 재이용에 관한 사항
 - 8의3. 하수처리시설의 탄소중립계획과 이행 및 성과체계에 관한 사항

자료: 국가법령정보센터, “하수도법”.

또한 「에너지이용 합리화법」 제32조를 기반으로 하는 5년 주기(부분진단은 3년) 에너지진단에 대상이 아닌 공공하수처리시설(2천TOE 미만)을 포함시켜서 에너지진단 의무화를 확대하는 등 에너지 이용 효율성 제고가 필요하다. 「하수도법」 제14조 기술진단에 진단 내용 등 에너지진단 의무 대상 확대를 추가하면 〈표 5-35〉와 같다.

〈표 5-35〉 하수도법 시행규칙 제14조(기술진단의 대상 및 내용 등) 개선안

제14조(기술진단의 대상 및 내용 등)

- ② 법 제20조제3항에 따른 기술진단의 내용은 다음 각 호와 같다. <개정 2012. 5. 15., 2014. 7. 17.>
1. 공공하수처리시설·간이공공하수처리시설 및 분뇨처리시설: 유입 오염물질의 특성조사, 시설 및 운영에 대한 현상진단, 공정별 처리효율, 시설의 문제점 및 개선방안, 시설의 유지·관리 방안
 - 1의2. 하수처리용량이 10천m³/일 이상 및 2천TOE 미만 하수처리시설은 5년마다 에너지진단을 받아야 한다.
 2. 하수관로: 유량 및 수질조사, 시설 및 운영에 대한 현상진단, 하수관로의 연결 상태 진단, 시설의 문제점 및 개선방안, 시설의 유지·관리 방안
 3. 하수저류시설: 하수의 유입·유출 시기 및 방법의 적정성, 시설 및 운영에 대한 현상진단, 하수저류시설에 유입된 하수의 처리 방법의 적정성, 시설의 문제점 및 개선방안, 시설의 유지·관리 방안
 4. 그 밖에 공공하수도관리청이 필요하다고 인정하는 사항
 - ③ 공공하수도관리청은 기술진단을 한 후 필요하면 정밀진단을 할 수 있다.

자료: 국가법령정보센터, “하수도법 시행규칙”.

「하수도법」 목적의 개정을 통해 하수처리 기능 확장에 대한 실효성 제고와 에너지 효율성 증대를 위한 유효자원 회수 명시로 탄소중립 정책 목적에 맞는 정책 방향을 제시하며 하수처리시설의 에너지 자립 제고에 이바지할 수 있어야 할 것이다.

3.5 수자원 관리 부문 이행 및 성과체계 구축

- (관리과제) 수변구역 녹지 신규 조성, 댐 홍수터·폐천부지·이용률 저조 친수공원 부지 내 수변녹지 신규 조성, 인공침수지 토지 전용
- (성과지표) 수변녹지 신규 조성에 따른 온실가스 흡수량(톤 CO₂eq.), 인공침수지 토지 전용을 통한 온실가스 감축량(톤 CO₂eq.)

4 공정 및 지속가능 거버넌스 체계 방안

4.1 공정전환 이슈 분석 및 부정적 영향 검토

물관리 부문 탄소중립 이행을 통한 공정전환(just transition) 이슈를 분석하고 그에 따른 부정적 영향을 검토하였다.

〈표 5-36〉 공정전환 이슈 분석에 따른 한계점과 부정적 영향

구분	근로자 및 지역 영향	가정 및 소비자 영향
긍정적 영향이 수반하는 한계점 (positive impacts with limitations)	<ul style="list-style-type: none"> 일자리 기회: 다른 사회인구/사회경제적 지역별 차이 때문에 탄소중립에 따른 신규 일자리의 기회는 균등하지 않을 수 있음 일자리(질): 탄소중립에 의해 발생된 새로운 일자리의 질 저하가 있을 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 새로운 기술 투자가 저소득층에게 적용되지 않을 수 있음 탄소중립 중심의 새로운 시설 설치가 환경의 질을 저하할 수 있음
잠재적 부정적 영향	<ul style="list-style-type: none"> 전환 과정에서 고탄소 산업, 고탄소 산업 집약 지역의 중소기업들의 좌초에 따라 일자리 및 지역경제가 나빠질 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 세제, 부담금, 가격 상승 등은 취약계층의 재무적 피해 가중 가능 자원집약적 상품에 대한 규제는 사회적 포용을 어렵게 할 수 있음(여행, 상징소비)

자료: 저자 작성.

4.2 농업용수 이용 효율화⁶⁰⁾

현재 농업용수 이용 효율화를 위한 국내 거버넌스는 매우 드물다.⁶¹⁾ 이는 농촌사회가 거버넌스 구축에 매우 불리한 여건이기 때문이다. 구체적으로 조원주 외(2020)는 농촌지역 거버넌스 구축 장애요인으로 ① 농업인들의 거버넌스 참여 경험과 의지의 퇴보, ② 공동체가 같이 공유할 수 있는 공동의 이익 또는 상부상조의 필요성 감소, ③ 농촌 농업환경의 이질성을 제시하였다.

농업용수 이용 효율화를 위한 농업용수 수요관리는 농업인 개인의 활동으로 달성될 수 없다. 즉 농업용수 수요관리는 농업용수 관리 주체인 농어촌공사 혹은 지자체가 농업인들과 협력하는 것이 필수적이다. 또한 농업용수 이용 효율화를 달성하려면 농업인 각각의 개별활동이 아닌 일정 수 이상의 지역 농업인들이 참여하는 집합행위(collective action)가 필요하다. 따라서 농업용수 이용 효율화 달성을 위해서는 농업인과 농업용수 관리 주체 간의 거버넌스 구축이 필요하다.

〈표 5-37〉 물질약 거버넌스 주체별 역할(안)

구분	농공학회	농업인(현장운영)	농어촌공사	지자체	타 분야 전문가
공통	• 거버넌스, 물관리토론회 및 참여형 물관리 거버넌스 운영 참여				
기관별	• 거버넌스 운영 • 물관리토론회 운영 • 참여형 물관리 효과 분석	• 참여형 물관리 거버넌스 운영	• 참여형 물관리, 농업용수 공급관리	• 행정 지원	• 타용수 분야의 관심 사항(물순환 등) 의견 제시

자료: 농어촌연구원(2021a), p.157, 〈그림 4-24〉를 인용함.

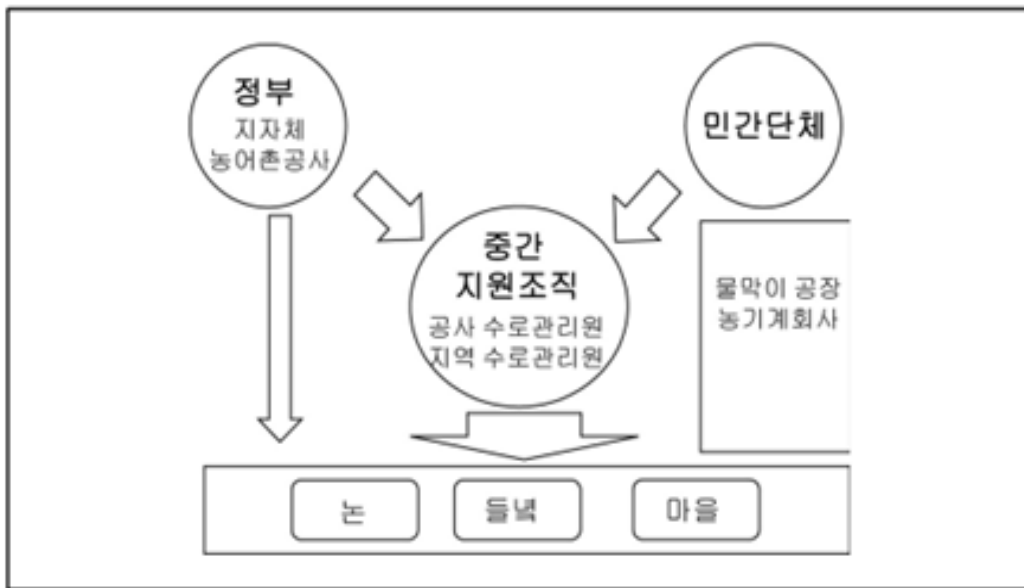
2021년 농어촌이용합리화 계획은 계획의 기본 방향 중의 하나인 지속가능한 농어촌용수 개발을 위한 기본원칙과 추진전략으로 참여형 유역 거버넌스 운영을 명시하였다. 구체적으로 2021년 농어촌이용합리화

60) 농업용수 이용 효율화를 위한 거버넌스로는 조원주 외(2020)의 내용을 바탕으로 하였다.

61) 국내 농업용수 관리 관련 거버넌스로는 농어촌물포럼, 새만금 비점오염관리 거버넌스 등이 있다.

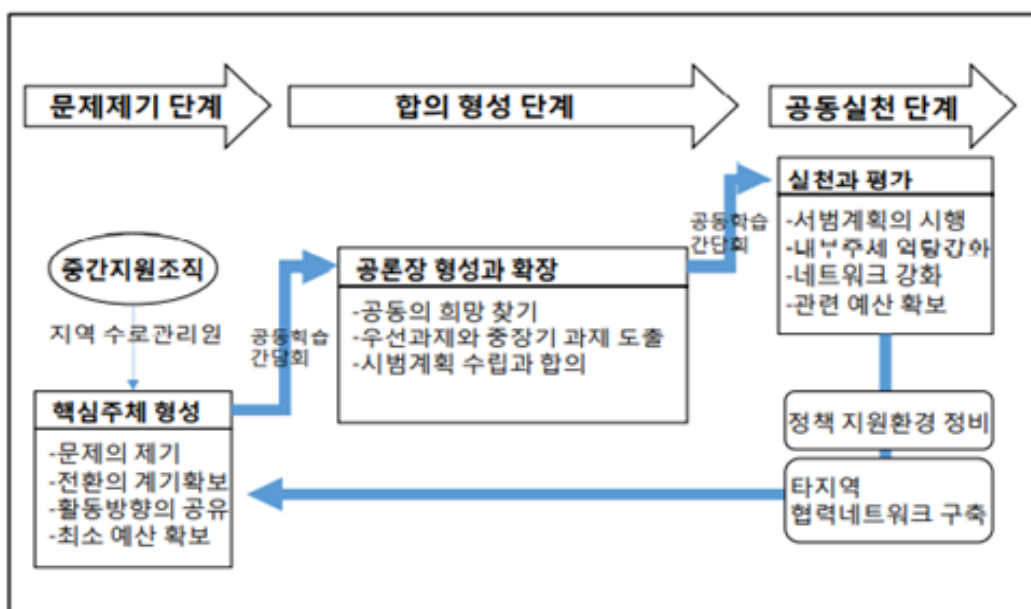
계획은 용수구역 물관리 취약성 대응 방안으로 2021~ 2025년 지구 단위 물절약 거버넌스 운영 확대를 제시하였으며, 동 계획에서 제시하는 주체별 역할은 <그림 5-24>와 같다. 다만 2021년 농어촌이용합리화 계획은 거버넌스 구축 방향과 과제, 역할 등을 구체적으로 제시하지 않아서 동 계획을 바탕으로 한 실질적인 농업용수 관리 거버넌스 체계 구축에는 한계가 있다.

〈그림 5-10〉 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 모델



자료: 구자인 외(2020), p.40; 조원주 외(2020), p.90, 재인용.

〈그림 5-11〉 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 구축 단계



자료: 구자인 외(2020), p.141; 조원주 외(2020), p.90, 재인용.

조원주 외(2020)는 농업용수의 효율적 관리를 위한 거버넌스 구축 방향으로 ① 지역의 대다수 농업인들의 참여, ② 지역 농업의 맥락적 특이성 고려, ③ 작은 것부터 점진적이면서 지속적인 거버넌스 구축, ④ 자발적인 실천주체로 중간지원 조직 활용을 제시하고, 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 모델을 제시하였다(그림 5-25 참조).

조원주 외(2020)에서 제시한 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 모델은 <그림 5-25>와 같이 점진적이며 지속적인 거버넌스 구축 모형이다. 즉 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 구축은 ① 핵심주체 형성(서로에게 이익이 되는 목표를 도출하는 단계), ② 공론장 형성과 확장(협의를 통해 시범계획을 수립하는 단계), ③ 실천과 평가(협력 네트워크 형성 단계)로 구성되며, 평가 결과는 다시 핵심주체 형성으로 돌아가 거버넌스의 점진적인 발전에 기여하게 된다.

조원주 외(2020)에서 제시한 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 모델은 2021년 농어촌용수합리화 계획에 제시되어 있는 물절약 거버넌스 구축 방안 중의 하나로 적용이 가능할 것으로 생각된다. 이는 물관리와 관련된 지역 주민의 의식과 물관리 여건 등은 지역에 따라 다르므로 지역의 맥락적 특이성을 고려하는 데 한계가 있는 하향식 물관리 거버넌스를 농업용수 관리로 지속적으로 사용할 수 없기 때문이다. 또한 처음에 완성된 거버넌스가 아닌 점진적이며 지속적으로 발전 및 확장해 가는 거버넌스가 앞서 제시한 농촌 거버넌스의 장애요인을 더 효과적으로 극복할 수 있기 때문이다.

〈그림 5-12〉 새만금 농업 비점오염관리 거버넌스 구조 개념도



자료: 장정렬(2017), p.13; 조원주 외(2020), p.84, 재인용.

마지막으로 농업용수 관리를 위한 농민참여 거버넌스 모델은 현재 새만금 농업비점오염관리 거버넌스와 같이 유역 단위 거버넌스와의 결합이 필요할 것으로 생각된다. 새만금 농업비점오염관리 거버넌스는 참여-소유역-대구역 거버넌스로 구성되며, 각 단계의 거버넌스는 상위 단계 거버넌스의 구성요소가 된다. 이는 농업비점오염이 농업인 개개인의 영농활동의 결과로 생긴 것인 데다 유역 단위 활동을 통한 관리가 더 효과적이기 때문이다. 그리고 이러한 농업비점오염의 특징은 농업용수 관리와 일맥상통한다. 따라서 농업용수

관리를 위한 농민참여 거버넌스 모델 역시 유역 단위 농업용수 관리 거버넌스와의 결합을 통해 농업용수 관리의 효율성을 높일 필요가 있다.

4.3 물환경 부문

정부와 기업, 시민사회의 다양한 주체들이 참여와 협력, 소통의 과정을 통해 공동의 문제인 하수처리시설 탄소중립을 달성하려면 공정 및 지속가능한 시스템을 만들어야 할 것이다. 지속가능한 발전정책에 대한 추진체제로 탄소중립 시범사업 프로그램 지원 및 하·폐수처리시설 에너지 통계자료 체계 강화를 통한 하·폐수처리시설 탄소중립 제시를 고려할 수 있다.

- 하·폐수처리시설에 대한 탄소중립 시범사업 지원으로 처리시설의 온실가스·수질·에너지 등의 모니터링과 분석, 재생에너지에 대하여 적극적인 활용, 에너지의 효율적 관리, 하수재이용 등 통합적이고 효율적인 관리 계획 추진
- 하·폐수처리시설이 프로그램 지원 대상으로 선정된다면 에너지 사용 제로 달성에 필요한 사업지 50%를 달성 결과에 따라 지원하는 방안을 고려하여 탄소중립에 필요한 프로그램을 활성화하며 추가적인 지원 등을 고려하여 시범사업을 실시
- 하·폐수처리시설의 에너지 관련 자료와 품질 고도화 및 데이터 세분화 작업을 통해 처리시설의 신뢰할 만한 통계자료 구축과 검증이 필요하며 이를 토대로 에너지 자립화의 구체화와 탄소중립 실현화를 위한 통계자료 체계 강화 및 관리 역량 강화 지원

하·폐수처리시설의 탄소중립을 위한 시범사업으로 통합적이고 효율적인 관리 계획을 수립하고 탄소중립에 필요한 프로그램 활성화, 정책의 핵심 주체인 관료제의 역량강화 및 통계자료 체계 강화로 하·폐수처리 부분의 탄소중립을 제고할 수 있을 것이다.

또한 환경기초시설 재생에너지 생산시설 설치와 유기성 폐자원을 활용한 바이오가스 생산 확대 등 친환경 에너지를 재활용할 수 있는 에너지 자립화 방안 검토의 기반이 되는 『에너지 자립화 기본계획』 수립 추진과 탄소중립을 위한 처리시설 최적화 및 에너지 목표관리제 도입 등의 방향 제시로 물환경 부문의 탄소중립 정책 집행에 대한 효과를 보여 줄 수 있을 것이다.

- 2050 물 분야 탄소중립 중 하·폐수처리 부문에 대한 시나리오 분석(수요주도형, 기술주도형)을 기반으로 배출량 감축을 위한 적정 기술 활용에 대한 내용을 『에너지 자립화 기본계획』의 탄소중립 방안으로 추가 제시
- 『에너지 자립화 기본계획』 중 하수처리시설의 에너지 잠재력 부분에서 하수슬러지(소화가스), 하수처리수(하수열, 소수력), 시설 공간 활용(태양광, 풍력 등)을 통한 에너지 전환 목표 도입
- 하수처리 배출량 전망을 기반으로 재생에너지를 활용하여 2050년까지 기술주도형 기술을 통해 재생에너지

활용 2.8백만톤 CO₂eq., 소화조 개선 1.5백만톤 CO₂eq., 에너지 절감 0.4백만톤 CO₂eq. 감소 등 2050년 BAU 3.6백만톤 CO₂eq.을 기반으로 -1.7백만톤 CO₂eq.의 배출량 감축목표 제시와 폐수·분뇨 부분의 배출량 상쇄 목표 제시

이는 물환경 부문의 탄소중립은 생활 속 하수 처리 기능만을 강조하는 것이 아닌 하·폐수 내에 존재하는 자원을 활용하여 수자원 생산 및 재생에너지를 생산하는 에너지 생산기지로서의 기능을 의미하는 것이다. 물환경 부문의 탄소중립에서 기술적 어려움 극복과 신기술 확대에는 많은 인적자원이 필요하며, 기술의 효과 검증되고 보급 단계에서 성공적으로 운영될 경우, 새로운 성장 동력사업으로 기술 개발보급 확대에 따른 관련 일자리 창출에도 이바지함으로써 탄소중립 과정에서의 공정 체계 이점을 확인할 수 있을 것이다.

4.4 자연성 기반 수변공간 관리를 위한 주체별 역할 검토

자연성 기반 수변공간 관리는 수변공간 내 온실가스 흡수원 확대와 배출원 감축을 위한 주요 수단이다. 이에 따라 자연성 기반 수변공간 관리의 주체인 정부부처(국토교통부, 환경부, 행정안전부), 지자체, 시민의 역할 현황을 조사 및 검토하였다.

〈표 5-38〉 NbS 기반 수변공간 관리 관련 중앙부처·지자체·시민의 역할

구분	역할
국토교통부	<ul style="list-style-type: none"> 「국토계획법」 제3조에는 자연환경에 대한 보전 및 복원이 이루어져 환경적으로 건전하고 지속가능하게 발전을 해야 한다고 명시 수변구역의 경우, 동법 제8조제4항에서 국토교통부 소관이 아님을 명시
환경부	<ul style="list-style-type: none"> 수변공간과 관련해서는 「수질수생태계법」 제19조3에서 수질 및 수생태계 보전을 위해 수변생태구역을 조성·관리할 수 있음을 명시 「하천법」 제44조에서도 하천구역 안에서 하천 환경을 보전/복원하는 경우에 보전·복원지구 및 친수지구를 지정할 수 있다고 명시
행정안전부	<ul style="list-style-type: none"> 행정안전부는 물 관련 주요 법령 중 「소하천정비법」을 관리하고 있음 소하천 설계기준 내 환경계획에서 소하천이 본래 지닌 자연성을 보전·복원하면서 지역사회와 연계한 친수기능을 확대하는 방향을 제시 소하천 생태보전시설은 소하천 생태계의 다양성과 건강성 회복을 위해 자연상태의 하천 식생 형성과 유사하게 계획해야 함
지자체	<ul style="list-style-type: none"> 「하천법」상 지방하천은 지방의 공공이해와 관련된 하천으로 해당 관할 구역의 시·도지사가 관리를 하도록 명시 최근 지자체는 도심하천 정비·복원과 자연 친화적 친수공간 조성을 통해 시민 휴식 공간과 생태 보전 공간을 창출하는 방식으로 계획 2020년부터 10년 단위로 수립되던 지방하천 정비계획이 국토교통부에서 지자체로 이양되면서 계획 수립, 예산 편성, 사업 시행, 예산 지원 등 모든 과정의 지방하천정비사업을 수립하게 됨
시민	<ul style="list-style-type: none"> 제1차 국가물관리기본계획(2021~2030)의 기본원칙 중 물관리 정책의 결정은 국가와 지자체 공무원, 물 이용자, 지역 주민, 전문가 등 이해관계자의 참여와 다양한 의견 수렴을 통해 이루어져야 한다고 제시 시민은 정책결정권을 가지고 있는 주체로서 새로운 물관리 거버넌스에 대한 요구와 책임이 부여됨

자료: 저자 작성.

하천 유형별로 관리주체가 다양하고 소관 법령 역시 상이하여 관리의 효율성이 떨어진다. 따라서 물 관련 주요 부처는 하천 관리주체를 명확하게 지정하고, 타 계획과의 중복 및 혼선을 최소화하는 통합물관리 체계를 수립해야 한다.

지방하천정비사업은 비국고보조 사업으로 예산 확보가 쉽지 않다. 그러나 최근 지방하천정비사업이 자자체로 이양되면서 각 지방의 특색을 살리고, 지역 주민의 의견도 적극 반영할 기회가 마련되었다. 따라서 기존 하향식 하천정비사업 형태에서 벗어나 지자체가 독립적이고 자율적인 주체로서 사업을 추진할 필요가 있다.

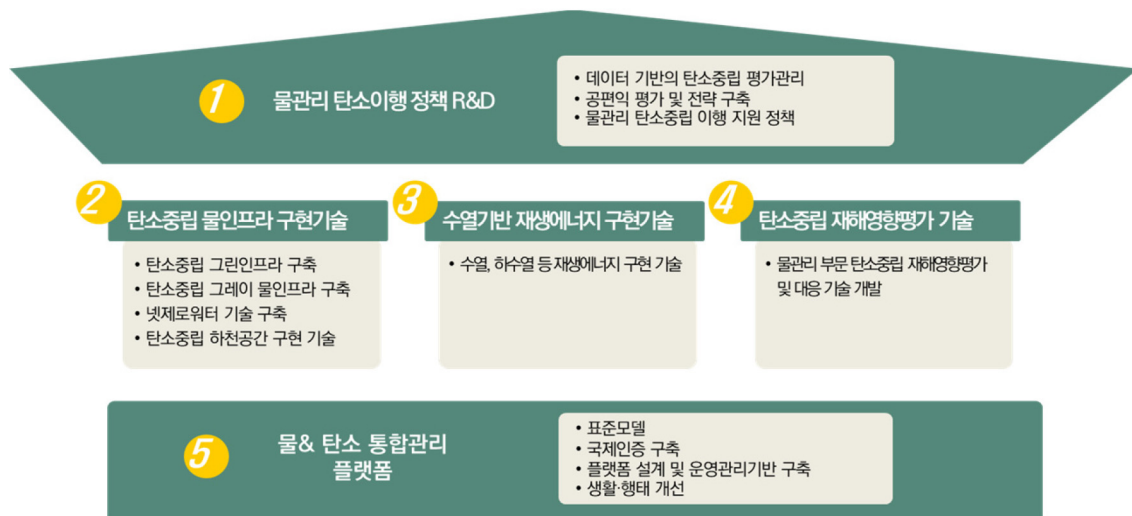
통합적인 물관리 체계도 중요하지만 향후 물 관련 거버넌스는 중앙정부, 지자체, 시민 등 다양한 주체의 협력이 필요하다. 생태계 회복을 위한 하천 관리뿐 아니라 친수, 즉 물과 친화적인 하천의 수변공간을 조성하려면 지자체와 시민의 적극적인 참여는 필수이다.

5 기술 및 개발 전략

5.1 물 분야 실증기술 및 연구개발 전략

본 연구에서는 국내외 탄소중립적인 물관리 및 실증기술 연구개발 현황(연구개발 사업, 논문, 특허 등)을 조사하고 관련 전문가와 협업하여 요소 및 공백 기술을 파악하고 연구개발 항목을 제시한다. 본 연구를 시작으로 하천의 이수, 치수, 환경 기능을 다차원적 관점으로 바라보는 통합물관리정책과 환경 보호와 인간의 편익을 함께 추구하는 탄소중립 하천공간 활용 및 개발 전략의 적극적인 실행이 요구된다.

〈그림 5-13〉 물관리 탄소중립 기술 및 연구개발 예시(안)



자료: 저자 작성.

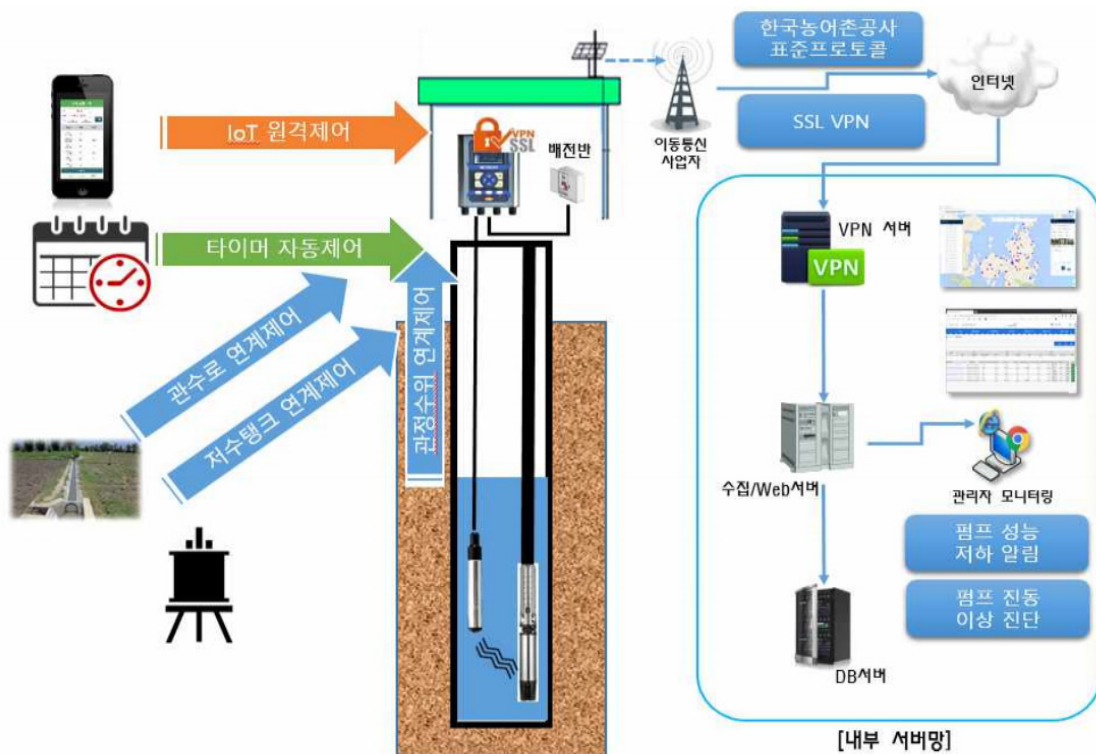
5.2 물 분야 부문별 실증기술 및 연구개발 전략

가. 물이용 부문

● 농업용수 공급 관련 기술 및 개발 전략

2021년 농어촌용수 이용 합리화계획은 디지털 기반의 용수공급시스템 고도화를 통한 탄소중립 방안을 제시하였다. 효율적인 농업용수 공급 및 이용을 통한 방안은 기존 시설의 기능을 개선하거나 전환하는 방식으로, ICT 기술 도입, 개수로의 관수로 전환, 인버터 펌프 설치 등이 있다.⁶²⁾

〈그림 5-14〉 지하수 스마트 관리 시스템 모식도



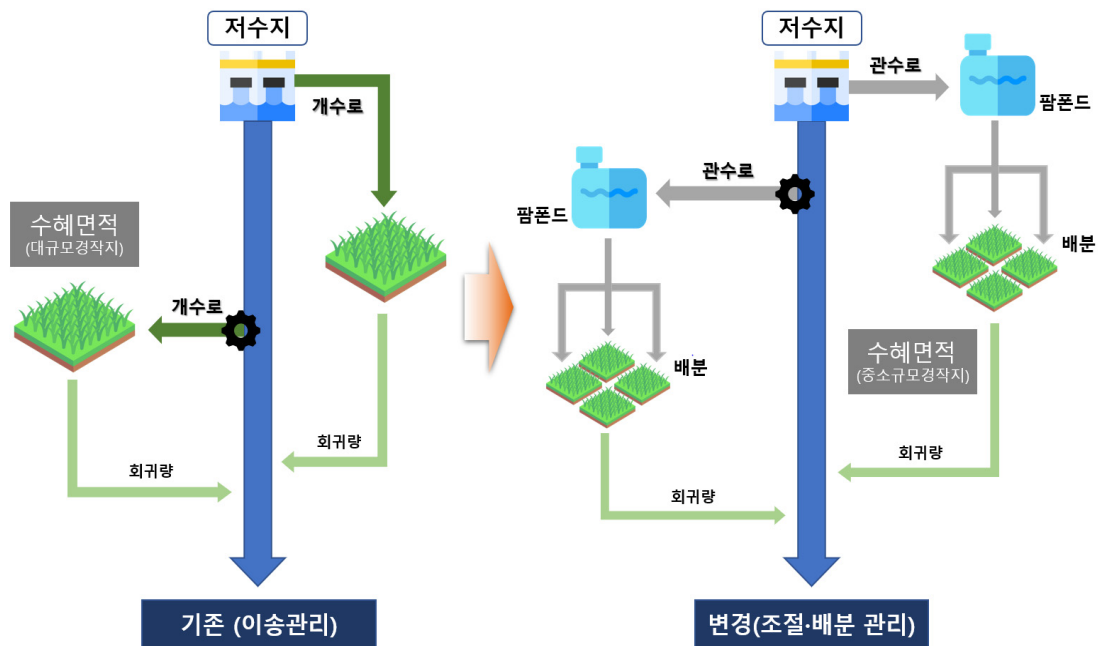
자료: 농어촌연구원(2021a).

구체적으로 살펴보면, ICT 기술로 지하수 관리의 고도화가 가능하다. 관수로 라인, 취수·여과시설, 계량기, 계측센서 등 용수공급 제반 시설에 ICT 기술을 도입하면 원격가동과 시설점검 등 실시간 모니터링을 통해 과학적으로 용수관리가 가능한 스마트관리 시스템으로 전환할 수 있다.

또한 효율적인 농업용수 공급관리를 통한 용수 절감 및 탄소중립 달성을 위해서는 ICT 기반의 물관리 시스템으로 기존의 농업용수 공급방식을 이송 중심에서 조절 및 배분 중심으로 전환할 필요가 있다.

62) 본 절의 내용은 2021년 농어촌용수이용합리화계획을 바탕으로 작성되었다.

〈그림 5-15〉 농업용수 공급체계 개편



자료: 농어촌연구원(2021b).

마지막으로 ICT 기반 물관리 시스템이 실현되려면 수로 운영 및 물 공급이 자동화되도록 ① 인버터 방식 펌프 설치, ② 개수로의 관수로 전환 등이 필요하다. 인버터 펌프는 모터 속도 제어 장치이며, 교류 주파수에 따라 필요한 만큼 회전에너지를 공급하여 에너지를 절약한다. 우리나라의 일반적인 용수공급 통로인 개수로는 일정량 이상의 유량을 흘려내리는 중력급수방식으로 설계되어 농업용수의 공급 효율성이 떨어진다. 따라서 용수 공급체계를 개수로에서 관수로로 전환하면 농업용수를 효율적으로 공급할 수 있다.

나. 물환경 부문

● 가축분뇨 정화처리 및 에너지화

우선, 가축분뇨 정화처리에 관한 배출계수 개발이 필요하다. 앞서 언급하였듯이 온실가스 인벤토리상의 정화처리는 기타시설에 속하며 기타시설의 아산화질소 배출계수는 액비화시설에 비해 5배 높다. 또한 2023년 이후로 IPCC 2006년 가이드라인을 활용하더라도 액비화시설과 정화처리가 속한 기타시설과의 배출계수는 동일하다. 이는 가축분뇨처리 정화처리의 온실가스 감축효과가 전혀 없음을 의미한다. 따라서 배출계수를 개발하여 가축분뇨 정화처리를 통한 온실가스 감축 정도를 정확하게 계측할 필요가 있다. 마지막으로 정화처리를 통한 공편익을 극대화하려면 정화처리 과정에서 발생하는 질소와 인 제거기술을 개발해야 한다.

〈표 5-39〉 가축분뇨처리부문의 축종별 N₂O 배출계수

(단위: kg N₂O/kg N)

축종	1996년 IPCC 지침	2006년 IPCC 지침	2019년 IPCC 지침	
액비화시설	0.001	0.005	젖소, 한·육우, 돼지	0.005
			닭, 오리	0.001
퇴비화시설	0.02	0.005	젖소, 한·육우, 돼지	0.01
			닭, 오리	0.001
기타 시설	0.005	0.005	젖소, 한·육우, 돼지	0.005
			닭, 오리	0.001

자료: IPCC(2019): 정민국, 이용건, 최진용(2021)에서 재인용.

● 하·폐수처리

탄소중립형 하·폐수처리 2050 탄소중립에 도달할 수 있는 기술·관리 개발(수질·에너지·탄소배출량 평가 기술, 공정 자동제어 시스템, 저탄소 고도 하수처리 기술, 재생에너지 활용 극대화 모델 등) R&D 지원 확대가 필요하다.

하·폐수처리시설에서의 재생에너지 추진 사업으로는 소화가스 연료화 사업, 태양광 발전사업, 바이오가스 연료 열병합 발전 사업, 하수열 활용의 지역난방 공급 사업 등이 있다. 특히 하수열 활용은 현실적으로 수익성이 기대되는 사업으로서 민간투자사업으로 진행되는 하수열 활용 지역난방 공급 사업의 확대를 볼 수 있다. 하수열은 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」의 수열에너지에 포함된다고 볼 수 있으며, 관련 법에 근거한 하수열 활용의 제도적 재정지원 방안이 마련되어야 한다. 또한 하수관거에서 취수한 미처리수 전량에 대한 하수열의 활용 방안도 추진될 필요가 있다.

〈표 5-40〉 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령 제2조 [별표 1] 개선안

[별표 1] 바이오에너지 등의 기준 및 범위

5. 수열에너지

가. 기준: 물의 열을 히트펌프(heat pump)를 사용하여 변환시켜 얻어지는 에너지

나. 범위: 해수의 표층, 하천수, 하수의 열을 변환시켜 얻어지는 에너지

자료: 국가법령정보센터, “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령”.

이러한 사업지원 확대를 통해 기술적·경제적·환경적 차원의 기후변화 대응 체계 구축으로 이해관계자 간의 기술정보협력 및 공유 활성화 등의 활동으로 하·폐수처리시설의 탄소중립을 도모해야 할 것이다.

아울러 『제5차 신재생에너지 기술·개발 및 이용보급 기본·계획』 발표와 같이 신재생 열에너지 공급자 또는 수요자 대상 공급 의무화로 신재생 기반의 열에너지 보급 활성화 방안을 모색하고, 신재생에너지 활성화를 위한 공급 의무화 기반 구축 및 보조금 지원 등의 정책적 지원 방안이 마련되어야 한다.

다. 재난안전관리

● 친환경제방 기술

한국건설기술연구원은 바이오폴리머 기반의 보강재와 골재 혼합물로 친환경 제방 보강공법 기술을 개발하였다. 기존에는 제외지 제방 구역만 유수의 보강기술이 적용되었고, 제내지 부근의 제방사면 붕괴를 대비하는 기술 연구는 미흡하였다. 이를 보완하고자 친환경 재료로 구성된 바이오폴리머를 골재와 혼합하여 제방 표면에 부착할 수 있도록 하였다. 혼합된 바이오폴리머 재료는 물 흐름에 대한 저항강도를 높여 고유속 및 고수압 상태에서도 표면토의 침식 없이 제방을 보호할 수 있다. 아울러 친환경 재료이기 때문에 생산 시 탄소발생량이 적고, 제방에 식생 활착이 가능함에 따라 기후변화 적응 및 완화에 모두 대응할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 바이오폴리머를 활용한 친환경제방 기술의 고도화 및 지원 방안을 마련할 필요가 있다.

〈그림 5-16〉 한국건설기술연구원 안동하천실험센터 바이오폴리머 제방 실험 전경

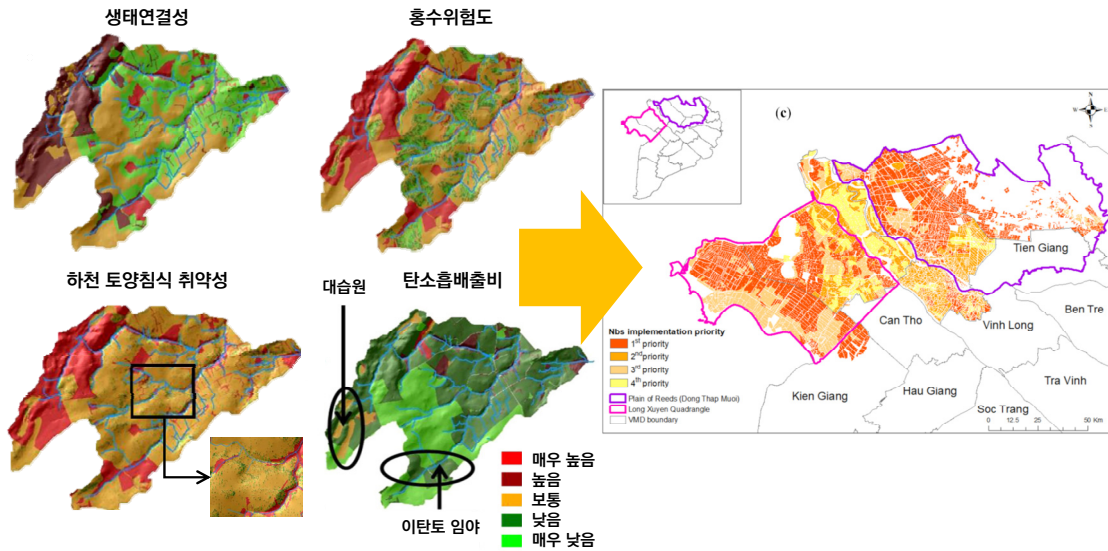


자료: Ko, Kang(2020).

● 자연성 기반 토지활용성 평가기술

영국과 같은물관리 선진국에서는 온실가스 흡·배출량, 홍수취약성, 제방 정비율, 비점오염원 부하량, 하안 침식 취약성, 생태 연결성 등 다양한 공간 정보에 기초하여 토지의 잔존가치와 활용성을 평가할 수 있는 기술 및 지침을 개발하고 있다. 수변생태벨트 조성 부지 선정을 더 합리적으로 하려면 향후 토지매입 및 수변녹지 조성 우선순위 분석 기법을 개발하고 제도 방안을 마련해야 할 것이다. 아울러 이를 실무적으로 지원할 수 있는 GIS 기반 분석도구와 하천기본계획, 도시공원·녹지 세부기준, 도시·군계획 등과 연계된 분석시스템의 실용화 방안이 필요하다.

〈그림 5-17〉 토지이용의 다목적성을 고려한 수변완충녹지 적용 우선지역 선정 예시



자료: Jackson 외(2013) 자료를 바탕으로 저자 재구성.

● 유수지 수질개선 기술

유수지의 수질개선을 위해 많은 정비 사업이 추진되어 왔고, 이에 저류조 설치, 유용미생물 살포 등 다양한 대안이 나왔지만, 아직까지 뚜렷한 해결 방안이 없는 실정이다. 환경과 토지이용 측면에서 최적의 유수지 수질개선 방안은 자연성 기반의 LID 기술을 통해 유수지, 저류지 등의 공극을 높여 물의 저류 능력을 향상하고 유수지 내 생태공간을 조성하여 질소농도를 저감하고 N_2O 배출을 억제하는 것이다. LID 기술은 개발 이전 상태를 최대한 복원하는 기법으로 친환경 시설 구축 및 식생 공간 확보에 중점을 둔다. 환경부에서는 물환경정책 대응기술의 일환으로 국내 기상 및 토양 특성이 반영된 한국형 LID 기술 개발을 마련하고 있으며, 김해시는 도시물순환 체계와 관련해 LID 기반의 유수지 스마트 생태 복원 사업을 추진 중이다.

물 분야 2050

탄소중립 이행을 위한
로드맵 구축 연구



SECTION 06

물 분야 2050 탄소중립 로드맵 구축

제1절 공편익 기반의 물부문 탄소중립 전략 마련

제2절 탄소중립 사업수행에 따른 재난영향평가 마련

제3절 물 분야 탄소중립 이행을 위한 제도 기반

제4절 정책 제언

물 분야 2050 탄소중립 이행기반 마련

제1절

물 분야 2050 탄소중립 로드맵 구축

1

물 분야 2050 탄소중립 비전 및 중점 추진과제

본 연구에서는 <그림 6-1>과 같이 물 분야 2050 탄소중립 로드맵 비전, 목표, 추진방향 및 추진과제, 이행기반을 제시하였다.

물 분야 2050 탄소중립 로드맵 비전은 2050 물 분야 탄소 네거티브 달성으로, 이를 위해 물 분야 3대 부문(물공급, 물환경, 수자원 관리) 중심의 온실가스 배출량과 흡수량을 목표로 제시하였다. 2050년 물공급 부문 목표배출량은 -0.47백만톤으로 탄소 네거티브를 달성하였으며 물환경 부문 목표배출량은 1.71백만톤이다. 수자원관리 부문 목표배출량은 -1.48백만톤으로 잉여분을 흡수로 상쇄하였다. 2018년 물 분야 총배출량 12.87백만톤 대비 전량 감축 및 흡수를 통해 2050년 물 분야 순배출량은 -0.24백만톤으로 2050년 물 분야 탄소 네거티브를 달성하였다.

물 분야 2050 탄소중립 로드맵은 세 가지 추진방향으로 ① 기후위기로부터 안전하고 지속가능한 물 분야 탄소중립 달성, ② 저탄소 물관리시설 운영 등 공공부문 주도 온실가스 감축, ③ 탄소중립 지향 물관리를 통한 공편익 온실가스 감축을 제시하였다. 추진과제는 물이용, 물환경, 수자원, 재난관리 부문별로 나누어 제시하였다. 특히 기후변화 적응 및 감축 그리고 공편익 효과를 동시에 기대할 수 있는, 즉 물수요 관리, 자연형 기반 물관리시설 확충, 물-에너지 넥서스 사업(그린수소 및 유기물 바이오가스), 수변식생대 조성 확대 방안을 반영한 로드맵을 구축하였다.

국가 온실가스 인벤토리에 물 분야는 빠져 있지만 현행 탄소중립 추진정책을 기초로 물 분야를 고려하여 물 분야의 온실가스 산정 및 관리체계 이행 기반을 마련하였다.

〈그림 6-1〉 물 분야 2050 탄소중립 로드맵

비 전		2050 물분야 탄소네거티브 달성		
목 표		● 2050 물분야 탄소네거티브 달성		
		<table><tr><td>(물이용) -0.47 백만톤 (18년 배출량 대비 114.9 % 감축)</td><td>(물환경) 1.71 백만톤 (18년 배출량 대비 82.4% 감축)</td></tr><tr><td>(수자원) -1.48 백만톤 (18년 흡수량 대비 15.6% 증가)</td><td></td></tr></table>	(물이용) -0.47 백만톤 (18년 배출량 대비 114.9 % 감축)	(물환경) 1.71 백만톤 (18년 배출량 대비 82.4% 감축)
(물이용) -0.47 백만톤 (18년 배출량 대비 114.9 % 감축)	(물환경) 1.71 백만톤 (18년 배출량 대비 82.4% 감축)			
(수자원) -1.48 백만톤 (18년 흡수량 대비 15.6% 증가)				
		● 2018년 총배출량 12.87 백만톤 전량 감축 및 흡수하고 '50년 순배출량 -0.24 백만톤 탄소네거티브 달성		
추진 방향		● 기후위기로부터 안전하고 지속가능한 물분야 탄소중립 달성 ● 저탄소 물관리시설 운영 등 공공부문 주도 온실가스감축 ● 탄소중립 지향 물관리를 통한 공편익 온실가스감축 지향		
추진 과제	물이용	→	① 물수요 저감을 통한 에너지 소비 절감 ② 유수율 제고로 저에너지 고효율 물공급 실현 ③ 공급 효율화를 통한 에너지 소비 절감	
	물환경	→	① 수요관리 및 에너지 절감 ② 재생에너지 활용 및 소화조 개선 ③ 가축분뇨 처리 개선을 통한 가축분뇨 처리량 감소 ④ 생산성 향상 및 수요관리를 통한 가축 사육두수 관리	
	수자원	→	① 하천·수변공간 내 수변생태벨트 조성 ② 인공침수지 토지 전용 및 완충녹지 조성	
	재난관리	→	① 저탄소 재난안전관리사업 시행 ② 탄소중립사업의 수재해 영향 평가 및 저감	
이행 기반		● (법·제도) 국가 내 물분야 탄소중립 체계 마련 및 주류화 필요 ● (기술 등) R&D 투자 확대, 물관련 계획 탄소중립 요소 강화, 국외 감축사업 적극 발굴		

2050

물분야탄소중립 로드맵

물이용 부문

생·공용수

'18년 배출량 261만 톤
'50년 배출량 -78만 톤



농업용수

'18년 배출량 54만 톤
'50년 배출량 31만 톤



물환경 부문

하·폐수·분뇨

'18년 배출량 469만 톤
'50년 배출량 -161만 톤



가축분뇨

'18년 배출량 503만 톤
'50년 배출량 332만 톤



수자원관리 부문

흡수원

'18년 배출량 128만 톤
'50년 배출량 148만 톤



에너지 전환

재생에너지

'50년 재생에너지 감축량 368만 톤
수상태양광&수열에너지 133만 톤
하폐수&가축분뇨 에너지화 235만 톤



재난안전관리 부문

하천 정비



" 50년 순배출량
-0.24 백만톤 네거티브 달성 "



자료: 저자 작성.

2 추진 과제별 세부 이행 방안

2.1 (물이용) 물공급 관리 물공급 시설 탄소중립 성능 개선

물공급 시설은 전 과정에서 많은 에너지를 사용하므로 고효율 기기 및 에너지 절감형 운영 방안 도입 등으로 온실가스 감축을 추진한다. 물 사용량 자체를 줄이면 용수 생산에 소비되는 에너지를 절약할 수 있으며, 댐 수면 수상태양광, 수열에너지 등 물 분야 재생에너지를 생산한다면 탄소중립 목표를 달성하는 데 더 크게 기여할 수 있다.

〈표 6-1〉 물공급 관리 시나리오

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

구분	2018년 배출량	2030년 배출량	2050년 배출량
물공급 관리	3.15	0.74('18 比 76.2%)	-0.47('18 比 114.9%)
생공업수	2.61	0.36('18 比 85.8%)	-0.78('18 比 129.9%)
농업용수	0.54	0.38('18 比 29.6%)	0.31('18 比 42.6%)

자료: 저자 작성.

● 생활 및 공업용수

사용자 중심의 물 수요관리 및 공급관리를 통해 2018년 대비 1인 1일 물 사용량을 71리터 절감하였다. 유수율 향상(84.9% → 96%)을 통한 2050년 물공급 부문(생·공업수) 목표배출량은 -78만톤이다. 2050년 예측 급수인구 적용 시 물사용 절약으로 연간 온실가스 50만톤 감축이 가능하며, 2020년 서울특별시 수준의 유수율이 전국 단위로 달성된다.

정책수단으로서 수요 및 공급 측면의 물수요 관리를 병행하고 고효율 설비 개발, 보급 및 시설물 효율 운영 기술 개발 노력이 필요하다. 수요 측면 전략으로는 수도요금 현실화, 가정용 절수기기 보급 및 맞춤형 물절약사업을 추진하고, 공급 측면 전략으로는 노후 상수도관 정비 및 ICT 기반의 누수진단 시스템을 통한 물 생산 에너지 절감, 고효율 펌프 개발 및 보급을 비롯한 시설 개선과 스마트한 운영 방안 도입으로 에너지 효율을 향상해야 한다. 이 외에 수상태양광 사업, 수열에너지 기술 개발 및 보급지원 확대, 클러스터 조성을 비롯한 물 분야 재생에너지 생산 노력도 요구된다.

※ 수요관리 (2030) 66.8만톤 감축 → (2050) 61.8만톤 감축

※ 기술개발 (2030) 10.2만톤 감축 → (2050) 9.41만톤 감축

※ 재생에너지 활용 (2030) 133.1만톤 감축 → (2050) 235.2만톤 감축(2030년 재생에너지 포함)

〈그림 6-2〉 수상태양광과 국가상수도 스마트 관리체계



자료: (좌) 연합뉴스(2022.01.03.), 검색일: 2022.08.22. (우) 환경부 보도자료(2020), 검색일: 2022.09.13.

● 농업용수

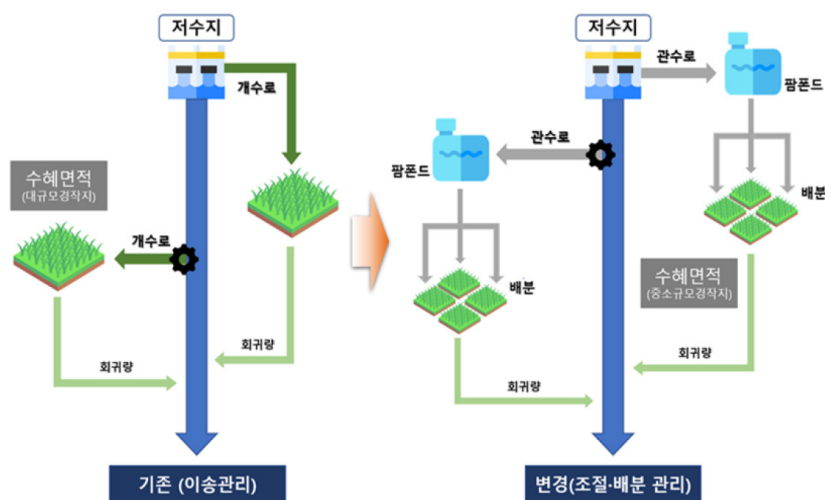
농업용수의 공급관리 효율화 및 수요관리 효율화를 통해 농업용수의 공급량, 이용량, 사용량 간의 차이를 줄여 농업용수와 관련 에너지의 사용량을 절감하였으며, 2050년 농업용수 공급 부문의 목표배출량은 0.31백만톤 CO₂eq.이다.

정책수단으로서 공급관리 효율화를 위한 기술 개발 및 혁신, 수요관리 효율화를 위한 물관리 거버넌스를 구축한다. 주로 물이용 효율화를 위해 용수로 관수로화 및 ICT 모니터링 관개 시스템을 도입하며 효과적인 농업용수 수요관리를 위한 농민참여 물절약 거버넌스를 구축한다. 또한 논물관리 등 공편익을 발생시키는 농업용수 물관리 활동에 대해 선택형 직불금 등을 통한 인센티브를 지급한다.

※ 물이용 효율화를 통한 감축 (2030) 28.9만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 89.9만톤 CO₂eq. 감축

※ 물관리를 통한 타 부문의 공편익 감축: 논물관리를 통한 감축(2030) 54.0만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 54.0만톤 CO₂eq. 감축

〈그림 6-3〉 논물관리를 통한 감축



자료: 농어촌연구원(2021b).

2.2 (물환경) 물환경 시스템의 에너지 절감과 생산

하·폐수 및 가축분뇨처리시설에 대한 고효율 기기 보급 확대와 고효율 공정 개선으로 에너지를 절감하였다. 또한 지역별로 발생하는 음식물, 음폐수, 하수 찌꺼기 및 가축분뇨를 에너지 자원화(폐기물 → 유기성 폐자원)하여 탄소중립에 기여하였다.

〈표 6-2〉 물환경 관리 시나리오

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

구분	2018년 배출량	2030년 배출량	2050년 배출량
물환경 관리	9.72	3.46('18 비 64%)	1.71('18 비 22%)
생공용수	4.69	-0.54('18 비 112%)	-1.61('18 비 134%)
농업용수	5.03	4.00('18 비 20%)	3.32('18 비 34%)

자료: 저자 작성.

● 하·폐수 처리시설

하·폐수 기초시설 에너지 효율화, 공정 효율화를 통한 공정배출 감축, 하수슬러지 등 에너지 자원화를 통해 탄소중립에 기여하고자 하며, 2050년 하·폐수 목표배출량은 -1.71백만톤이다. 정책수단으로서 하수 처리시설 내 고효율 기기 보급 확대, 디지털화 및 고효율 공정 도입으로 효율 향상, 통합 바이오가스화 사업 추진으로 에너지를 전환하며 물수요 관리를 통한 하수처리량 저감으로 하수처리 직간접 배출량을 저감한다.

※ 수요관리 (2030) 0.5백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 0.5백만톤 CO₂eq. 감축

시설 및 운영 개선을 위해 하수 처리시설 내 에너지 절감 설비 교체(인버터 설비, 고효율 송풍기, 유입펌프 등), 효율적인 제어로 에너지 사용량 절감(빅데이터 및 AI기술 활용) 등을 통해 에너지를 절감한다.

※ 에너지 절감 (2030) 0.3백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 0.4백만톤 CO₂eq. 감축

고효율 공정을 위해 단축질소제거(Anammox)⁶³⁾ 공정 도입 등 반류수 처리와 소화조 개선으로 저에너지 고소화 효율을 달성하고 바이오가스 생산량 증가를 위한 바이오가스화 플랜트를 도입한다.

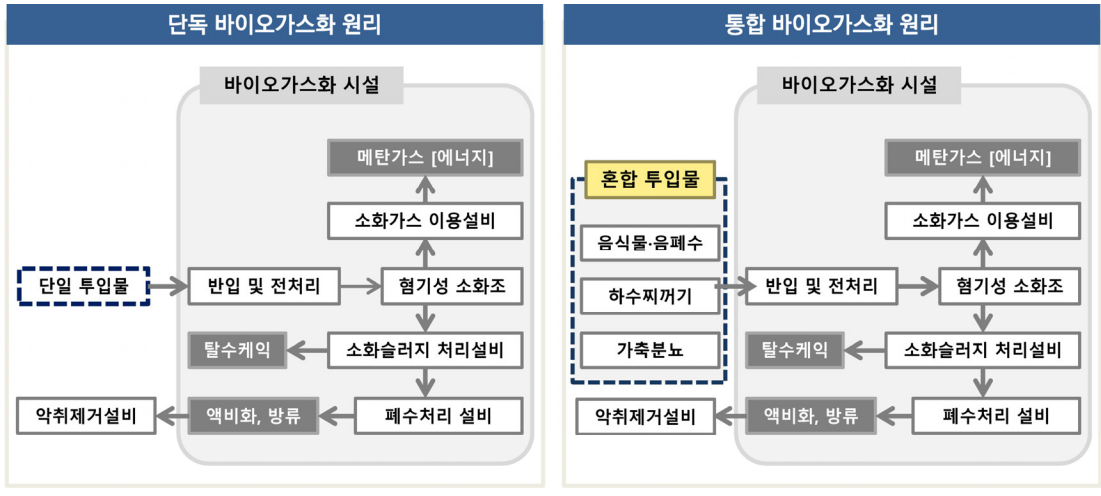
※ 소화조 개선 (2030) 1.4백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 1.5백만톤 CO₂eq. 감축

63) 하수 내 질소 제거와 암모늄 산화 미생물 활용으로 기존 질산화/탈질 공정 대비 에너지 절감, 소량의 약품 사용, 외부탄소원 절감 등 에너지 절감형 공정을 활용한다.

재생에너지 생산 및 활용을 위해 유기성 폐자원의 혐기성 소화에 의한 바이오가스(메탄감축가스) 생산과 하수처리장 유틸리티 활용으로 태양광, 풍력 등 발전설비 설치에 의한 에너지원 활용으로 2050년에 100% 자립화를 추진한다.

※ 재생에너지 활용 (2030) 2.2백만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 2.8백만톤 CO₂eq. 감축

〈그림 6-4〉 [참고] 단독·통합 바이오가스화 공정 원리



자료: 저자 작성

에너지관리 제도 개선을 위해 유효자원 회수 및 하수 재활용 적극 추진을 위한 「하수도법」 개선과 에너지 효율성을 높이기 위한 「녹색건축물 조성 지원법」 및 「에너지이용 합리화법」에 근거한 에너지효율진단 의무화를 확대한다.

이행 및 성과체계 구축 기반 마련을 위해 「하수도법」 제4조의2와 제5조에 하수처리시설의 탄소중립 계획과 이행 및 성과체계에 관한 내용을 추가하고 기반을 마련한다.

● 가축분뇨

가축분뇨처리량 감소와 가축 사육두수 관리를 통한 온실가스 감축을 추진하며 2050년 가축분뇨처리 부문 목표배출량은 332.2만톤이다.

정책수단으로서 가축분뇨처리량 감소를 위한 가축분뇨처리 개선, 가축 사육두수 관리를 위한 생산성 향상 및 수요관리를 추진한다. 가축분뇨처리 개선에는 정화처리 및 에너지화 확대, 바이오차 등 가축분뇨의 산업 소재를 활용한 퇴비 감축이 포함되며 퇴비 감축, 정화 처리 및 에너지화 등의 분뇨처리 개선을 통한 감축량은 아래와 같다.

(2030) 205.8만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 235.5만톤 CO₂eq. 감축

생산성 향상 및 수요관리에는 대체식품 및 식단 변화를 통한 육류 소비 감소, 스마트 축사를 통한 축산 부문 생산성 향상 및 수요 대비 가축 사육두수 감소가 포함되며 감축량은 아래와 같다.

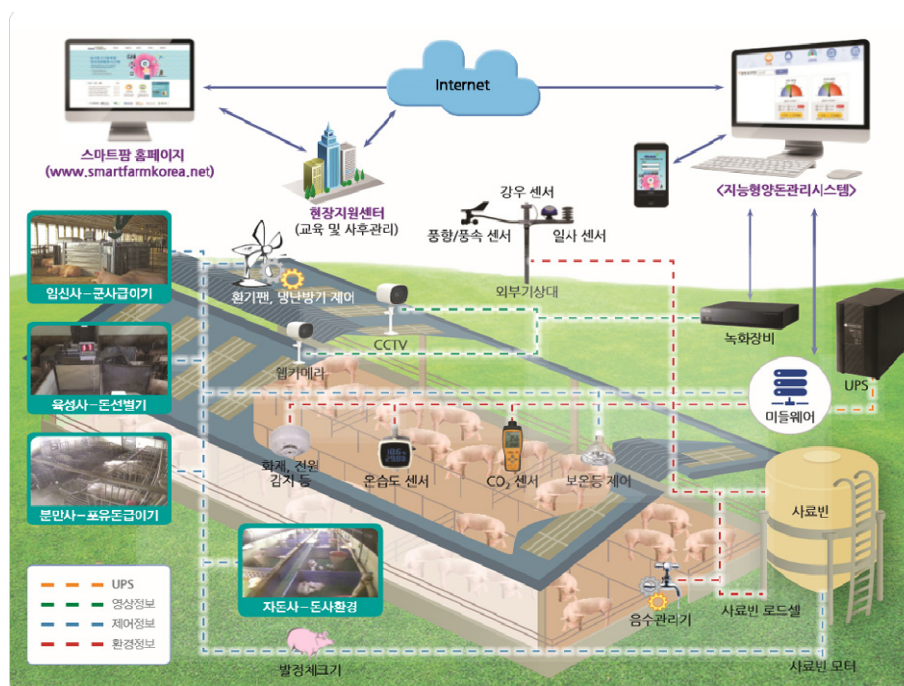
※ 스마트 축사 보급을 통한 가축 사육두수 관리

(2030) 21.9만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 53.1만톤 CO₂eq. 감축

※ 수요관리를 통한 가축 사육두수 관리

(2030) 1.8만톤 CO₂eq. 감축 → (2050) 61.4만톤 CO₂eq. 감축

〈그림 6-5〉 [참고] 스마트 축사 구성: 양돈 농가



자료: 저자 작성.

2.3. (수자원 관리) 완충녹지 조성

수자원 관리 관련 부지에 수변식생대를 적극 조성하여 탄소흡수 기능을 부여함으로써 탄소중립에 기여하였다. 댐홍수터, 폐천부지 등 하천공간 토지이용 제고와 완충녹지 조성을 통해 온실가스 배출량 감축과 흡수원을 동시에 확보할 수 있으며, 주요 수단으로 수변생태벨트 조성, 인공침수지(댐홍수터) 토지 전용 등이 있다.

〈표 6-3〉 수자원 관리 시나리오

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

구분	2018년 흡수량	2030년 흡수량	2050년 흡수량
수자원 관리	1.28	1.25('18 비 -2%)	1.48('18 비 16%)

자료: 저자 작성.

● 수변녹지

2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)⁶⁴상 수변녹지는 주요 탄소흡수원으로, 수변생태벨트 조성을 주요 수단으로 추진하였으며 2050년 수변녹지 목표흡수량은 175.7만톤이다.

수변구역을 중심으로 하천 인접 녹지의 탄소흡수능력 증진과 함께 하천공간 내 토지이용 제고를 통해 신규 흡수원 발굴을 정책 수단으로 제안하였으며, 수변구역·상수원보호구역 토지 매수 및 수변생태벨트 조성을 통해 수변공간의 흡수능력 및 생태 건전성을 확보하고자 하였다. 또한 수변녹지 조성을 통해 탄소흡수원을 확보하고, 이를 다목적으로 활용할 수 있는 자연성 기반(NbS)⁶⁵* 수변공간 관리 방안을 모색하였다.

※ 수변생태벨트 (2030) 1,655km², 1,49.3만톤 흡수 → (2050) 2,138km², 164.9만톤 흡수

댐홍수터·폐천부지·4대강 친수공원(연평균 이용객 2,000명 미만) 등 토지활용 제고가 필요한 하천부지의 탄소흡수 능력을 극대화하기 위해 흡수원을 발굴하였으며, 하천공간 내 토지 전용 및 수변녹지 조성을 통해 탄소흡수원을 창출하였다.

※ 완충녹지 (2030) 36.3km², 3.8만톤 흡수 → (2050) 97km², 10.7만톤 흡수

〈그림 6-6〉 하천공간 내 잠재적 탄소흡수원



자료: 저자 작성.

하천기본계획을 수립할 때는 하천구역 내 보전지구 지정 기준에 기후변화 적응(홍수방어) 및 완화(온실가스 흡·배출) 관련 기준을 반영하였다.

64) 홍수터 및 하천 수변구역 녹지조성 등을 통해 2030년까지 10만톤의 탄소흡수량 추가 확보가 가능한 것으로 평가된다.

65) NbS(Nature-based Solution)는 수변공간 관리에서 홍수방어, 수질개선, 생태 연결성 및 다양성, 탄소흡수원 확대 등 공편익 효과를 도모하는 방식이다.

● 인공침수지

유지⁶⁶⁾의 토지이용 제고 및 수변녹지 조성을 통해 메탄 발생량 감축과 동시에 흡수원 확대를 추진하였으며, 2050년 인공침수지 목표배출량은 27.2만톤이다.

댐홍수터-수변구역 연계형 수변생태벨트 추진을 통해 자연형 수변완충지대 확충을 정책 수단으로 제안하였으며, 댐홍수터 부지를 유수지에서 수변완충지대로 전환하여 메탄 발생 감축 및 탄소 흡수 기능을 부여하였다. 댐홍수터는 홍수기에는 홍수조절지, 평상시에는 자연성 회복(수질개선, 생물서식처 보전) 및 사회적 가치 창출(생태관광·교육, 지역소득 창출) 기능을 제공한다.

※ 유지 토지 전용 (2030) 23.1km², 0.27만톤 감축 → (2050) 61.6km², 0.8만톤 감축

댐-하천 디지털 트윈 구축 등 선제적 홍수방어 체계를 마련하여 홍수피해 복구 시 발생하는 탄소배출량을 최소화하였으며, 댐홍수터 내 무단 경작지 등 훼손구역 관리에 주민을 비롯해 다양한 주체가 참여할 수 있는 지역 협치 체계를 구축하였다.

2.4 (재난관리) 기후위기에 재난안전 보장을 위한 탄소중립

가. 재난안전관리사업 탄소중립 방안

재난안전관리사업 탄소중립 방안의 정책수단으로서 국내 재난안전관리사업을 저탄소 사업으로 단계적으로 전환하기 위한 기술개발, 보급 및 기반을 확충한다.

물재해를 저감함으로써 기반시설피해 복구·개선을 위한 직접사업 수행과 재료 생산에 소요되는 에너지를 절감하는 재난관리를 수행하며, 온실가스 저감을 위한 친자연기반 인프라 구축 기술 개발 및 실증을 수행한다. 특히 탄소발생·흡수량 산정 지원 Tool-kit 개발로 친자연 기술(Natural Based Solution, Low Impact Development, Green Infrastructure 등)별 재난안전 및 탄소중립 효과를 검증할 수 있다.

나. 탄소중립 사업의 수재해 영향 평가 및 저감

탄소중립 사업 수행을 통해 재난영향을 저감하고 지속가능한 발전을 지원하며 재난탄력성을 강화하는 평가체계를 구축한다.

탄소중립 사업의 재난영향평가를 위해 국내외 환경 여건 조사를 통한 법·제도·조직 마련 등 실용적 추진체계를 구축하고, 물 분야 특성을 고려한 기후변화영향평가⁶⁷⁾를 위해 기후변화 현황·전망, 수재해 영향 분석, 취약성·위험성 평가 등 다양한 방법론을 마련한다.

66) 2006 IPCC GL상 유지는 홍수조절지 등과 같은 습지로 구분되며, 우리나라 국가 온실가스 인벤토리에서 메탄 발생량을 산정하고 있다.

67) 「탄소중립기본법」에 의거한 국가계획·사업 추진 시 기후변화 영향(감축 및 적응) 등을 사전 분석 및 평가하는 제도로 물 분야에서는 「환경영향평가법」에 따라 하천의 이용 및 개발 사업 대상(하천정비사업)으로 포함된다.

3 물 분야 탄소중립 이행 기반

3.1 기초조사

물 분야 특성에 맞는 온실가스 배출 및 흡수 현황을 관측하고 분석함으로써 탄소 데이터 수집을 위한 기초조사를 실시한다. 이 조사는 물공급 관리, 물환경 관리, 수자원 관리, 재난관리 등 네 가지 분야로 구분된다. 첫째, 물공급 관리는 물공급 시설의 전력·에너지 사용량 보고 대상 및 항목 확대와 집계방식의 표준화가 요구되며, 농업용수 및 에너지 사용량 통계가 구축되어야 한다. 둘째, 물환경 관리는 하·폐수 처리시설 에너지 통계자료의 신뢰성이 제고되어야 한다. 셋째, 수자원 관리는 수변녹지 내 정확한 탄소흡수량 산정을 위해 수변 우점식생의 국가 고유 흡수계수 조사가 확대되어야 한다. 넷째, 재난관리는 재난안전관리 사업에서 탄소 발생·흡수량 원단위 도출 항목을 확대해야 한다.

3.2 통계

물 분야 탄소배출 실태조사 및 방법론 개발을 통해 수집된 물 분야 탄소 데이터는 국가 온실가스 통계에 반영하고 탄소저감 실적을 확보해야 한다. 물공급 관리는 상업·공공시설 및 가정 내 온수사용 계측 방법을 개발 및 물 분야 온실가스 배출에 포함하여 관리한다. 물환경 관리는 가축분뇨 정화처리 배출계수를 개발하고, 수자원 관리는 수변생태벨트 등 산림지 내 토양탄소 축적량 관련 활동자료 구축 및 산정방법 개발을 통해 국가 온실가스 통계에 반영한다. 재난관리는 재난안전관리 탄소배출 국가 온실가스 통계에 반영한다.

3.3 재정

온실가스감축인지 예산제도 및 기후대응기금 등 「탄소중립기본법」 체계에서 신설되는 재정운용제도를 적극적으로 활용한다.

물공급 관리에서는 농업용수 공급 효율화를 위해 기존 예산항목에 농촌용수개발(특별회계)을 추가하여 재원을 확보한다. 물환경 관리에서는 민간사업자 및 지역에너지사업가를 비롯한 다자간 협력모델의 도입이 필요하다. 특히 PPP(Public-Private Partnership) 모델을 적용하여 지자체는 부지와 행정절차를 지원하고 민간 부문은 설계·시공·운영·관리에 필요한 사업비 투자 후 생산되는 에너지 판매로 수익을 창출한다. 이러한 협력 모델을 활용한다면 물환경 관리에 투입되는 공공예산의 부담을 줄일 수 있다. 또한 관리기금을 수변구역 토지매수 및 수변생태벨트 조성에 적극 활용하고, 관련 기술 개발을 위한 신규사업 재원을 확보한다. 하천수입금(2010~2019년 연평균 473억 원 발생)을 물공급 시설 현대화 및 관리체계 개선에 활용할 수 있도록 근거를 마련하고, 가축분뇨처리지원사업을 위해 사용되는 축산발전기금, 스마트 축사 보급의 재원인 FTA 기금 등을 가축분뇨처리 개선을 위한 재원으로 확보한다.

3.4 국내외 협력

국내에서는물관리 기초시설 관할 지자체, 관련 물산업 업계와 협력하며 국외에서는 UN, OECD 등 국제기구, 물 분야 전략적 탄소감축수단 관심 국가와 협력한다.

국내적으로는 물 분야 탄소중립 달성을 위해 정부와 기업, 시민사회가 소통·협력하여 공정하고 지속가능한 시스템을 개발하고 효율적인 거버넌스 체계를 확립한다. 시민참여 탄소중립 시범사업 프로그램의 지원, 시민체감형 수변공간 창출을 위한 시민과 지자체의 적극적 참여를 독려하는 민관 협의체 구성 등의 다양한 방안을 마련해야 하며, 물 분야 탄소중립을 위한 새로운 기술 개발 및 보급을 추진한다면 탄소중립뿐 아니라 관련 일자리 창출이라는 경제적 이익도 발생할 수 있다.

국외적으로는 물 분야 탄소중립 달성을 위해 글로벌 거버넌스에 적극 동참하고, 탄소중립 미래 성장 분야(저탄소 물관리 SOC 구축사업, 하천습지 등 수생태계 기반 블루카본 탄소흡수력 사업, 수열에너지 전환사업 등)에 대한 적극적인 기술교류와 공동사업을 추진한다. 하천습지 등 수생태계 기반 블루카본의 탄소흡수력 국제 공인(IPCC)을 확대하기 위한 주요국 중심 의제에 공동으로 대응하는 한편 기술교류를 늘리고, 그린뉴딜 공적개발원조 사업 확대를 통해 수상태양광 및 수열에너지 기술을 해외에 보급한다.

3.5 기술개발

2050 탄소중립 목표 달성을 위해 물이용 부문은 ICT 기술 도입을 통한 기존 시설의 기능 개선과 공급 효율 제고를 위한 기술 개발 및 보급이 필요하다. 물환경 부문은 수질, 에너지, 탄소배출량을 정확히 측정할 수 있는 기술과 공정 자동제어 시스템, 저탄소 배출 고도 하수처리 기술, 재생에너지 활용 분야의 기술 개발 노력이 요구된다. 수자원 관리 부문은 GIS 기반의 토지 활용 및 잔존가치 평가기법 개발을 통해 수변공간의 다목적성을 고려한 수변생태벨트 조성 부지의 합리적 선정 절차를 마련하려는 노력이 필요하다.

4 물 분야 3대 부문 탄소중립 추진목표

〈표 6-4〉 물 분야 3대 부문 탄소중립 추진목표

(단위: 백만톤 CO₂eq.)

부문	2018년 배출량		감축·흡수 수단	2030년 배출량	2050년 배출량
물이용 관리	생·공용수	2.61	(생공) 물수요 절감 및 유수율 개선	0.37	-0.78
			에너지 효율 기술 적용 및 효율 개선		
			수상태양광 및 수열에너지 등 보급 확산		
	농업용수	0.54	농업용수 물공급 및 이용효율화	0.38	0.31
	소계	3.15		0.75	-0.47
물환경 관리	하·폐수·분뇨	4.69	하·폐수 처리시설 수요관리	-0.54	-1.61
			바이오가스 등의 재생에너지 활용		
			고효율 공정을 위한 소화조 개선		
			시설 및 운영 개선을 통한 에너지 절감		
	가축분뇨	5.03	가축분뇨처리 개선	4.00	3.32
			생산성 향상 및 수요관리		
	소계	9.72		3.46	1.71
수자원 관리	-1.28		수변구역 녹지 확충	-1.25	-1.48
			하천부지 토지이용 제고 및 수변녹지 조성		
			인공침수지(유지 등) 토지 전용		
합계	11.59			2.96	-0.24

SECTION 07

참고문헌

국내 문헌

- 관계부처합동(2021), “2050 탄소중립 시나리오.”, 탄소중립위원회.
- 관계부처합동(2021). “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안”.
- 구자인, 이윤정, 황바람, 정민철, 신소희(2020), 「농산어촌 유토피아 구현을 위한 지방자치단체 시범계획 수립」, 충남연구원.
- 국립산림과학원(2019). “주요 산림수종의 표준 탄소흡수량(ver.1.2)”.
- 국립재난안전연구원(2022), 재난관리 분야 탄소중립사업 지원을 위한 그린재난관리 Tool-kit 개발
- 국토해양부(2009), 『하천설계기준해설』
- 국토해양부(2012), “시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인”.
- 국회입법조사처(2017). “수변공원의 관리현황과 개선 과제”.
- 기획재정부(2021). “2021년 기금현황”.
- 김준성(2021). 온실가스 저감을 위한 하천 및 수변공간 관리방안 연구. 국토연구원 워킹페이퍼 21-25. 세종: 국토연구원.
- 농림수산식품부(2009~2013), 농림수산식품통계연보.
- 농림축산식품부(2014~2020), 「농림축산식품통계연보」.
- 농림축산식품부(2018), “2018년도 예산 및 기금운용계획 사업설명자료.”
- 농림축산식품부(2019), “2019년도 예산 및 기금운용계획 사업설명자료.”
- 농림축산식품부(2021e), 「축산환경 개선대책(안)」, 내부자료.
- 농림축산식품부(2021a), 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」.
- 농림축산식품부(2021b), 「2021년 농림축산식품사업 시행지침서」.
- 농림축산식품부(2021c), 「2021년도 성과관리 시행계획」.
- 농림축산식품부(2021d), 「2021년도 예산 및 기금운용계획 개요」.
- 농어촌연구원(2021a), 「21년 농어촌용수 이용합리화계획」.
- 농어촌연구원(2021b), 「농업용수 효율화 관수로 설치 가이드라인 마련」.
- 대한민국정부(2019), 「제3차 대한민국 격년갱신보고서」.
- 명수정, 오일찬(2021). 환경위기 대응을 위한 자연기반해법(NbS) 연구. KEI 정책보고서, 2021-10. 세종: 한국환경연구원
- 산업통상자원부(2019), “2019 전 부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계”.
- 서울특별시 정수시설과(2018), “2018년 전력요금 및 에너지 절감 계획”.
- 손민숙(2021), “유럽의회, 탄소 중립을 위한 유럽기후법 승인”. 보험연구원.

- 신동석, 정득중, 김형석, 황재운, 박지희, 신유경, 빈은미, 최진호, 김재란, 이미나(2017), 「지자체 온실가스 배출량 산정지침(Ver.4.1)」, 한국환경공단.
- 이창훈(2022), 「2050 탄소중립 5년의 성과와 과제」, 한국환경연구원, 대통령 보고자료.
- 이재근(2009), 「수생태계가 온실가스의 발생 및 배출량에 미치는 기초연구」, 대전발전연구원.
- 장정렬(2017), “비점오염관리 거버넌스로 새로운 플랫폼을 만들어본다,” RRI 포커스 제66호.
- 정민국, 이용건, 최진용(2021), 「축산업 환경영향 분석과 정책과제」, 한국농촌경제연구원.
- 정학균, 성재훈, 임영아, 김현정(2021), 「저탄소농업 활성화 방안 연구」, 한국농촌경제연구원.
- 조을생 외(2021a), “2050년 탄소중립 실현을 위한 최근의 동향과 하수도 부분의 대응”.
- 조을생 외(2021b), “하수도의 자원·에너지이용”.
- 조현길, 박혜미(2015), “수변구역 조성녹지의 탄소저감 효과 및 증진방안”, 「한국조경학회지」, 43(6), pp.16-24.
- 조원주, 손학기, 최진용, 남원호, 김익재, 손학기, 황길식(2020), 「참여형 농업용수 관리체계 구축 방향과 과제」, 한국농촌경제연구원.
- 최현진(2022), “국내외 탄소중립 관련 정책 및 기술 동향”, 「공업화학전망」, 25(2), pp.1-7.
- 축산물품질평가원(2021), 「2020년 축산물 유통조사보고서」.
- 통계청(2009~2020), 「가축동향조사」.
- 통계청(2012~2020), 「농림어업조사」.
- 통계청(2021), “장래인구추계”.
- 한국수자원공사(2022), 「광역상수도 탄소중립 추진방안」.
- 한국에너지공단(2019), “2019 전 부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계”.
- 한국전력(2022), “산업부분별 전력사용량”, 내부자료.
- 한혜진 외(2021), 「물관리의 전환적 혁신을 위한 그린뉴딜 정책 및 사업 기획 연구」, 한국환경연구원.
- 한혜진, 정아영(2021), 「물 부문 온실가스 배출 현황 및 탄소중립 정책 방향」, 한국환경연구원.
- 환경부(2016), “옛 물길(터) 복원 기본계획”.
- 환경부(2018~2022), 「환경부 소관 예산 및 기금운용계획 개요」.
- 환경부(2019), “제3차(2019~2023) 금강수계 수변구역관리기본계획”.
- 환경부(2019), 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」.
- 환경부(2021), 「2021년 환경부 탄소중립 이행계획」.
- 환경부(2021), “2050 탄소중립 실현을 위한 자연기반해법 포럼”.
- 환경부(2022a), 「지방상수도 탄소중립 기본계획 수립」.
- 환경부(2022b), 「2022년 가축분뇨공공처리시설 예산 편성·집행 지침」.
- 환경부(2022c), 「2022년도 성과관리 시행계획」.
- 환경부 온실가스종합정보센터(2020), 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」.

환경부 온실가스종합정보센터(2021), 「2020 국가 온실가스 인벤토리 보고서」.

환경부 온실가스종합정보센터(2022), 「2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서」.

해외 문헌

California Orange County Sanitation District(2021), 내부자료.

Colorado Energy Office(2021), The Colorado Greenhouse Pollution Reduction Roadmap

Di Baldassarre 외(2013). Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3295-3303.

DWR(2020), 2020 Urban Water Management Plan Guidebook Appendix O, Department of Water Resource, California, USA

Environment Agency(2008). Greenhouse Gas Emissions of Water Supply and Demand Management Options.

IPCC(1995), Second Assessment Report: Climate Change 1995.

IPCC(1996), Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, Japan.

IPCC(2000), IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, Montreal, Canada.

IPCC(2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Japan.

IPCC(2014), Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri, and L. A. Meyer (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, p.151.

Jackson(2013). Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 112, 74-88.

Ko, Kang(2020). Biopolymer-reinforced levee for breach development retardation and enhanced erosion control. *Water*, 12(4), 1070.

Nakamura(2022). Green Infrastructure and Climate Change Adaptation: Function, Implementation and Governance (p. 506). Springer Nature.

NEXT 10(2021), The Future of California's Water-Energy-Climate Nexus.

Ofwat(2022), "Net Zero Principles Position Paper".

Passeport 외(2013). Ecological engineering practices for the reduction of excess nitrogen in human-influenced landscapes: A guide for watershed managers. Environmental management, 51, 392-413.

The White House(2001), Plan to Conserve Global Forests: Critical Carbon Sinks.

UKWIR(2020), Workbook for Operating Operational GHG Emissions - Version 14.

U.S. Department of State(2021), The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050.

US EPA(2021), Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks (1990-2019).

Water UK(2020), Net Zero 2030 Routemap.

Xylem Inc.(2015), Global Greenhouse Gas Abatement Opportunities from Energy Efficiency in Wastewater Treatment, Report Prepared by Vivid Economics.

Zhongming, Z., Linong, L., Xiaona, Y., Wangqiang, Z., & Wei, L.(2021), Water-Related Hazards Dominate Disasters in the Past 50 Years.

온라인 자료

국가법령정보센터, "수계법". <https://www.law.go.kr/법령/수도법>. 검색일: 2022.08.02.

국가법령정보센터, "기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법", <https://www.law.go.kr/법령/기후위기대응을위한탄소중립·녹색성장기본법>, 검색일: 2022.06.19.

국가법령정보센터, "하천법 시행령", <https://www.law.go.kr/법령/하천법시행령>, 검색일: 2022.08.03.

국가법령정보센터, "하수도법 시행규칙", <https://www.law.go.kr/법령/하수도법시행규칙>, 검색일: 2022.07.18.

국가법령정보센터, "신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령", <https://www.law.go.kr/법령/신에너지및재생에너지개발·이용·보급촉진법시행령>, 검색일: 2022.09.06.

국가법령정보센터, "하수도법", <https://www.law.go.kr/법령/하수도법>, 검색일: 2022.07.18.

국가법령정보센터, "저탄소 녹색성장 기본법", <https://www.law.go.kr/법령/저탄소녹색성장기본법> (14839,20170726), 검색일: 2022.06.15.

국가법령정보센터, "에너지이용 합리화법", <https://www.law.go.kr/법령/에너지이용합리화법>, 검색일: 2022.06.15.

국가법령정보센터, "물관리기본법", <https://www.law.go.kr/법령/물관리기본법>, 검색일: 2022.06.11.

국가법령정보센터, "물관리기술 발전 및 물산업 진흥에 관한 법률", <https://www.law.go.kr/법령/물관리>

기술발전및물산업진흥에관한법률, 검색일: 2022.06.11.

국가법령정보센터, “농업·농촌 및 식품산업 기본법”, <https://www.law.go.kr/법령/농업·농촌및식품산업기본법>, 검색일: 2022.06.11.

국가법령정보센터, “가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률”, <https://www.law.go.kr/법령/가축분뇨의관리및이용에관한법률>, 검색일: 2022.06.08.

국가법령정보센터, “농어촌정비법”, <https://www.law.go.kr/법령/농어촌정비법>, 검색일: 2022.06.07.

국가법령정보센터, “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법 시행령”, <https://www.law.go.kr/법령/신에너지및재생에너지개발·이용·보급촉진법시행령>, 검색일: 2022.06.07.

국가법령정보센터, “한강수계 상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률 시행령”, <https://www.law.go.kr/법령/한강수계상수원수질개선및주민지원등에관한법률시행령>, 검색일: 2022.06.07.

국가법령정보센터, <https://www.law.go.kr/LSW/main.html>, 검색일: 2022.9.28.

국가온실가스 종합관리시스템, “공공부분 배출량 통계”, <https://ngms.gir.go.kr/link.do?menuNo=30130105&link=/websquare/websquare.html%3Fw2xPath%3D/cm/bbs/OGCMBBS026V.xml%26menu%3D30130105>, 검색일: 2022.07.14.

국가지표체계, “1인당 물 사용량”, <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4287>, 검색일: 2022.9.26.

국가통계포털(KOSIS), “하천수입금”, 검색일: 2022.08.03.

국가통계포털(KOSIS), “주요 인구지표(성비, 인구성장률, 인구구조, 부양비 등)”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1BPA002&conn_path=I3, 검색일: 2022.3.15.

국가하수도정보시스템, “2019 하수도통계”, <https://www.hasudoinfo.or.kr/>, 검색일: 2022.09.12.

기후위기 적응 정보 포털(2022), “기후위기의 정의”, <https://www.ccaipath.kaccc.kei.re.kr/understanding>, 검색일: 2022.9.19.

농림축산식품부(2022.2.6), “2030년까지 축산분야 온실가스 30% 감축: 지속가능한 축산업 실현을 위한 「축산환경개선 대책」 발표”, <https://www.lifein.news/news/articleView.html?idxno=13676>, 검색일: 2022.3.20.

뉴스트리(2022.8.25), “바닥드러난 中 양쯔강과 호수... 물과 전기 부족한데 식량까지 걱정?”. <https://www.newstree.kr/newsView/ntr202208250006>, 검색일: 2022.09.23.

데일리안. “한국수자원공사, 대청댐 홍수터 수변생태벨트 시범사업 완공”. 검색일: 2022.9.23.

아주경제(2022.9.7), “‘국토 3분의 1 잠겼다’ 파키스탄...세계 면화 가격 상승세 지속 전망”, <https://www.ajunews.com/view/20220907074802823>, 검색일: 2022.09.23.

연합뉴스(2021.10.18), “[그래픽] 2050 탄소중립 시나리오 최종안”, <https://www.yna.co.kr/view/GYH20211018001900044>, 검색일: 2022.07.22.

연합뉴스(2022.01.03), “[그래픽] 합천댐수상태양광”, <https://www.yna.co.kr/view/AKR202201031>

07900063, 검색일: 2022.08.22.

이기원(2012), “온실가스 가스 감축을 위한 온실가스 인벤토리”, <https://gscaltexmediahub.com/energy/greenhouse-gas-inventories/>, I am your Energy, 검색일: 2022.06.08.

이뉴스투데이. “순천시, 동천변 저류지에 시민 휴식 '생활 숲' 조성”. 검색일: 2022.9.23.

환경부 보도자료(2021.9.1), “2022년도 환경부 예산안…탄소중립 실현의지 확실히 담았다”, <https://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=230&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=&orgCd=&boardId=1473300&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>, 검색일: 2022.08.08.

환경부 보도자료(2021.10.27), “2050년 탄소중립 이정표 마련”, 대한민국 정책브리핑, <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156477275>, 검색일: 2022.6.9.

환경부 보도자료(2021.9.1), “2022년도 환경부 예산안 탄소중립 실현의지 확실히 담았다”, 대한민국 정책브리핑, <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156468906>, 2022.10.06.

환경부(2011), “정수처리기준 등에 관한 규정”, 환경부 고시 제2011-85호, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2000000016601>, 검색일: 2022.08.06.

환경부(2017), “공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침”, 환경부 고시 제2017-197호, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000196544>, 검색일: 2022.09.16.

환경부 보도자료(2021.10.27), “2050 탄소중립을 위한 이정표 마련”, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=&boardId=1483250&boardMasterId=1>, 검색일: 2022.06.03.

환경부 보도자료(2020.06.12), “그린뉴딜 밑그림 그린다 광역상수도 스마트관리 본격 구축”, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1377620>, 검색일: 2022.09.13.

환경부. “상수원보호구역 지정현황” 자료를 바탕으로 저자 작성. 검색일: 2022.08.02.

Condalab, <https://www.conditional.com/>, 검색일: 2022.08.11.

Decker, P.(2022), “How the Water Sector Can Lead the Way to Net-Zero”. World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2022/03/water-sector-net-zero-decarbonization/>, 검색일: 2022.6.9.

ETF, <https://www.etf.europa.eu/>, 검색일: 2022.07.16.

Eurostat, “Energy Consumption in Households”, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households, 검색일: 2022.3.2.

Minnesota BWSR, “Carbon Sequestration in Wetlands”. <https://bwsr.state.mn.us/carbon-sequestration-wetlands>. 검색일: 2022.08.17.

NIST, “BEES”, <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees>, 검색일: 2022.09.15.

UN Sustainable development Goals, “UN Report Finds 90 Per Cent of Disasters Are Weather-Related”, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2015/11/un-report-finds-90-per-cent-of-disasters-are-weather-related/>, 검색일: 2022.08.05.

U.S. Energy Information Administration, “Use of Energy Explained Energy Use in Homes”, <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/electricity-use-in-homes.php/>, 검색일: 2022.3.2.

Water UK. “Race to Zero”, <https://www.water.org.uk/netzerowater/racetozero/>, 검색일: 2022.06.06.

WWF EU. “WWF works to bring over 12 million m³ water back to nature in the Danube basin”. <https://www.wwf.eu/?242496/WWF-works-to-bring-over-12-million-m-water-back-to-nature-in-the-Danube-basin>. 검색일 2022.08.17.

環境省(2019.6.11), “「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」の閣議決定について”, <https://www.env.go.jp/press/106869.html>, 검색일: 2022.08.05.

SECTION 08

부 록

제1절 재난관리에서 탄소중립 방안 마련

제1절

재난관리에서 탄소중립 방안 마련

본 연구에서 물관리 부문의 조직경계를 정할 때 재난관리 부문의 탄소배출은 포함하지 않았다. 이는 재난관리 부문에서 일어나는 여러 가지 건설 행위에서 발생하는 온실가스가 Scope 3의 영역이 많으며, IPCC 가이드라인에 의한 공식적인 탄소배출량 평가보다는 연구 차원에서 시범적으로 산정한 방법이 많기 때문이다. 하지만 기후변화에 의해 물과 관련한 재난이 자주 발생하고, 이에 대응하기 위한 예방, 대응, 복구 과정에서 저탄소의 접근법은 매우 중요한 탄소중립 전략 중 하나이다. 이에 본 연구에서는 많은 재난복구 중 물 분야와 연관성이 높은 ① 소하천 정비 사업, ② 자연재해위험개선지구사업과 관련된 탄소흡수량 평가 및 저감 방안에 대해서 연구를 수행하였다.

1 소하천 정비사업에 따른 탄소배출량 평가

소하천 정비사업의 공정은 축제공과 구조물공(시설물 공사)으로 구분하였으며, 축제공 위주의 공사는 절성토 및 유용성토, 법면녹화, 면고르기, 호안공으로 구분하여 탄소배출량 산정방법 및 공정별 원단위를 제시하였으며, 구조물공(시설물 공사)은 낙차공 및 보를 대상으로 원단위를 제시하였다.

가. 축제공에 따른 탄소배출량 산정

1) 절성토 및 유용성토

절토 및 성토 공정은 별도의 재료 투입 없이 장비(굴삭기)만 사용하여 공정이 이루어진다. 2021 건설공사 표준품셈(국토교통부)에서는 절성토에 사용되는 굴삭기 사용량을 다음과 같이 제시한다.

$$Q = \frac{3,600 \times q \times k \times f \times E}{\text{cm}}$$

여기에서 Q: 시간당 작업량(m³/hr), q: 버킷용량(m³), f: 체적환산계수, E: 작업효율, K: 버킷계수, cm: 1회 사이클 시간(초)이며, 버킷계수는 〈부록 표 1〉과 같이 적용할 것으로 제안된다.

〈부록 표 1〉 버킷계수(K) 산정 기준

현장 조건	K
용이하게 굴착할 수 있는 연한 토질로서 버킷에 산적으로 가득 찰 때가 많은 조건이 좋은 모래, 보통토인 경우	1.10
위의 토질보다 약간 단단한 토질로서 버킷에 거의 가득 채울 수 있는 모래, 보통토 및 조건이 좋은 점토인 경우	0.90
버킷에 가득 채우기가 어렵거나 가벼운 발파를 필요로 하는 것으로서 단단한 점토질, 점토, 역토질인 경우	0.70
버킷에 넣기 어렵고 불규칙한 공극이 생기는 것으로서 발파 또는 리퍼 작업 등으로 얻은 암과 파쇄암, 호박돌, 역 등인 경우	0.55

주: 1) 굴삭기는 위치한 지면보다 낮은 데 있는 토량의 굴착에 사용되는 것이 일반적이다.
 2) 버킷계수는 굴착하는 토질과 굴착 작업의 높이 또는 깊이에 따라 다르나 작업현장 조건을 고려하여 기종이 선택되므로 특수한 경우를 제외하고는 굴착작업의 깊이는 버킷계수에 영향을 주지 않는 것으로 한다.
 3) 굴삭기는 굴착된 토량을 운반하는 기계와의 상태가 작업상 균형이 유지되고 굴삭기에 대한 운반기계의 적재높이가 적합하게 이루어져야 한다.

소하천 제방공사의 경우 약간 단단한 토질로서 버킷에 거의 가득 채울 수 있는 모래, 보통토 및 조건이 좋은 점토인 경우로 가정하여 버킷계수 K=0.9로 가정한다.

작업효율(E)은 〈부록 표 2〉와 같이 적용할 것으로 제안된다.

〈부록 표 2〉 작업효율(E) 산정 기준

현장조건 토질명	자연상태			흐트러진 상태		
	양호	보통	불량	양호	보통	불량
모래, 사질토	0.75	0.70	0.55	0.90	0.75	0.60
자갈 섞인 흙, 점성토	0.75	0.60	0.45	0.80	0.62	0.50
파쇄암	-	-	-	-	0.45	0.35

소하천 제방공사 현장조건은 토질의 조건이 보통인 흐트러진 상태와 모래 및 사질토로 가정하여 작업효율 E=0.75로 가정한다. 1회 사이클 시간(cm)은 〈부록 표 3〉과 같이 적용할 것으로 제안된다.

〈부록 표 3〉 사이클 시간(cm) 산정 기준

규격(㎡) \ 각도(°)	사이클 시간(cm)			
	45	90	135	180
0.12~0.4	13	15	18	20
0.6~0.8	16	18	20	22
1.0~1.2	17	19	21	23
2.0~	22	25	27	30

소하천 제방공사 현장조건은 1회 사이클 시간은 135도 회전, 버킷용량 0.8m³로 가정하여 cm=20초로 가정한다.

체적환산계수는 지반의 다짐 정도에 따라 달라지며, 절토인지 성토인지에 따라서도 변경된다. 본 과업에서는 절성토에 따른 흙의 체적 변화는 별도로 고려하지 않고 체적환산계수를 1로 가정한다. 따라서 굴삭기 버킷 1m³의 시간당 작업량은 다음의 식으로 계산된다.

$$Q(\text{m}^3/\text{hr}) = \frac{3,600 \times q \times k \times f \times E}{\text{cm}} = \frac{3,600 \times q \times 0.9 \times 1 \times 0.75}{20} = 121.5 \times q \quad (2.13)$$

따라서 0.6m³ 굴삭기의 경우 시간당 72.9m³를 작업할 수 있는 것으로 산정되었다. 즉 절성토 10m³당 0.6m³ 굴삭기가 0.137시간 필요하다.

2) 법면녹화

소하천 법면은 콘크리트 블록이나 사면보호공, 사면녹화 등의 시공이 가능하며, 대부분의 경우 법면녹화로 시공되고 있다. 법면녹화는 2021 건설공사 표준품셈(국토교통부)의 비탈면보호공 설치에 필요한 품셈을 적용하였다. 비탈면보호공은 프리캐스트 콘크리트 블록 설치, 지압판 블록 설치, 천연섬유 사면보호공 설치, 절토사면 녹화, 비탈면 보강공으로 구분되는데, 소하천 법면녹화로는 절토사면 녹화가 적절한 것으로 판단된다.

법면녹화는 부착망 설치와 식생기반제 뿔어 붙이기 공정이 포함되며, 식생기반제 뿔어 붙이기 공정은 다시 기계기구 설치 및 해체와 뿔어 붙이기로 구성된다.

부착망 설치에는 10m²당 50kW 발전기 0.2시간과 5ton 크레인 0.05시간이 필요한 것으로 나타났다. 기계기구 설치 및 해체에는 회당 5ton 크레인 4시간이 필요하며, 뿔어 붙이기에는 공기압축기, 발전기, 트럭탑재형크레인, 물탱크, 덤프트럭 등이 <부록 표 4>에 제시된 바와 같이 필요한 것으로 나타났다.

<부록 표 4> 뿔어 붙이기 공정에 필요한 장비(10m²당 필요수량)

구분	규격	단위	수량(뿔어 붙이기 두께)			
			5cm	7cm	10cm	15cm
취부기(녹생토)	18.65kW	hr	0.28	0.36	0.51	0.75
공기압축기	21m³/min	hr	0.28	0.36	0.51	0.75
발전기	50kW	hr	0.28	0.36	0.51	0.75
트럭탑재형크레인	5ton	hr	0.28	0.36	0.51	0.75
물탱크	5,500 ℓ	hr	0.28	0.36	0.51	0.75
덤프트럭	6ton	hr	0.28	0.36	0.51	0.75

주: * 본 품은 식생기반제와 종자를 혼합하여 비탈면에 뿔어 붙이는 기준이며, 비탈면 녹화를 위한 유사공법에 적용할 수 있음.

기계기구 설치는 회당 100㎡를 작업할 수 있는 것으로 가정하였으며, 따라서 10㎡당 5ton 크레인이 0.4시간 필요한 것으로 계산하였다. 뿔어 붙이기 두께는 10cm로 각 장비는 0.51시간이 필요한 것으로 산정하였다.

3) 면고르기

면고르기는 2021 건설공사 표준품셈(국토교통부), 성토부대공의 '성토면 고르기' 품셈을 사용하였다. 면고르기는 절토 및 성토 공정과 마찬가지로 별도의 재료가 투입되지는 않으며, 장비(굴삭기)만 사용하여 공정이 이루어진다. 2021 건설공사 표준품셈(국토교통부)에서는 면고르기 10㎡당 0.6㎡ 굴삭기가 0.09시간 필요한 것으로 제시된다.

4) 호안공

호안공은 호안의 형태 및 종류에 따라 다양한 공법으로 시공이 가능하다. 본 과업에서는 2021 건설공사 표준품셈(국토교통부) 중 비탈면보호공의 '프리캐스트 콘크리트 블록 설치', 돌공사의 '돌붙임', 하천호안공의 '식생매트' 품셈을 사용하는 것으로 검토하였다.

프리캐스트 콘크리트 블록 설치 공법을 선택하면 10㎡당 크레인(타이어)이 0.9시간이 필요하다. 콘크리트 사용량은 블록의 종류, 규모에 따라 다양하게 선택이 가능하지만, 두께 15cm를 가정하면 10㎡당 약 1.5㎡의 콘크리트가 필요하다. 콘크리트의 단위중량을 2.5ton/㎡로 가정하면, 10㎡당 약 3.75ton의 콘크리트가 필요하다.

돌공사는 돌쌓기, 돌붙임, 전석쌓기 및 깔기, 석재판 붙임 등의 공법이 있는데, 호안에는 돌붙임 공법을 선택하였다. 돌붙임 공법에는 메붙임과 찰붙임 공법이 있으며, 장비는 굴삭기만 필요하다. 수량(뒷길이)에 따라 1㎡당 0.6㎡ 굴삭기가 0.20시간~0.25시간 필요하다. 돌붙임의 경우 인력소요가 많아 작업시간 동안 장비가 계속 작동되지는 않는 것으로 판단하여, 본 과업에서는 분석에서 제외하였다.

하천호안공의 식생매트는 1㎡당 0.6㎡ 굴삭기가 0.031시간 필요한 것으로 나타났다.

〈부록 표 5〉 호안공 공법에 따른 필요한 재료 및 장비(1㎡당 필요수량)

공법	재료	장비
프리캐스트 콘크리트 블록 설치	콘크리트 3.75ton	5ton 크레인(타이어) 0.09시간
돌붙임	-	0.6㎡ 굴삭기 0.25시간
식생매트	-	0.6㎡ 굴삭기 0.031시간

5) 축제공 및 호안공에 따른 탄소배출량 산정

축제공 및 호안공의 세부 공정별 재료 및 장비 투입량 원단위를 정리하면 <부록 표 6>과 같다.

<부록 표 6> 축제공 및 호안공 공정별 재료 및 장비 투입량 원단위

공종		단위	재료투입량	장비	투입량
1) 축제공					
	성 토	m³	·	0.6m³ 굴삭기	0.0137시간
	유용성토	m³	·	0.6m³ 굴삭기	0.0137시간
	사 토	m³	·	0.6m³ 굴삭기	0.0137시간
법면 녹화	부착망 설치	m²	·	50kW 발전기 5ton 크레인	0.02시간 0.005시간
	기계기구 설치 및 해체		·	5ton 크레인	0.04시간
	뽕어 붙이기		·	50kW 발전기 5ton 트럭탑재형크레인 6ton 덤프트럭	0.051시간 0.051시간 0.051시간
	면고르기	m²	·	0.6m³ 굴삭기	0.009시간
2) 호안공					
	프리캐스트 콘크리트 블록설치	m²	콘크리트 0.375ton (0.15m³)	5ton 크레인	0.09시간
	돌붙임	m²	·	0.6m³ 굴삭기	0.25시간
	식생매트	m²	·	0.6m³ 굴삭기	0.031시간

국토해양부(2021)의 가이드라인에 맞추어 각 중장비 및 재료의 사용에 따른 탄소배출량 원단위를 산정한 결과는 <부록 표 7>과 같다.

<부록 표 7> 재료 및 장비 탄소배출량 원단위

장비 및 재료	단위	탄소배출량(kgCO ₂ /hr)
0.6m³ 굴삭기(무한궤도)	hr	26.56
50kW 발전기	hr	22.66
5ton 크레인(트럭탑재형)	hr	13.28
6ton 덤프트럭	hr	20.83
콘크리트	m³	346.00

축제공 및 호안공의 세부 공정별 재료 및 장비 투입량에 따른 탄소배출량 원단위는 <부록 표 8>과 같다.

<부록 표 8> 재료 및 장비 투입에 따른 탄소배출량 원단위

공종		투입 단위	장비	시간당 탄소배출량 (kgCO ₂ /hr) (A)	공정별 투입량 (hr/투입단위) (B)	공정별 탄소배출량 (kgCO ₂ /투입단위) (C=A×B)
1) 축제공						
성토		m³	0.6m³ 굴삭기	26.56	0.0137	0.363872
유용성토		m³	0.6m³ 굴삭기	26.56	0.0137	0.363872
사토		m³	0.6m³ 굴삭기	26.56	0.0137	0.363872
법면 녹화	부착망 설치	m²	50kW 발전기	22.66	0.02	0.4532
	기계기구 설치 및 해체		5ton 크레인	13.28	0.005	0.0664
			5ton 크레인	13.28	0.04	0.5312
			50kW 발전기	22.66	0.051	1.15566
			뽀여 붙이기	5ton 트럭탑재형크레인	13.28	0.051	0.67728
	6ton 덤프트럭			20.83	0.051	1.06233
면고르기		m²	0.6m³ 굴삭기	26.56	0.009	0.23904
2) 호안공						
프리캐스트 콘크리트 블록설치		m²	5ton 크레인	13.28	0.09	1.1952
		m³	콘크리트	0.15	346	51.9
돌붙임		m²	0.6m³ 굴삭기	26.56	0.25	6.64
식생매트		m²	0.6m³ 굴삭기	26.56	0.031	0.82336

나. 시설물 공사(구조물공)에 따른 탄소배출량 산정

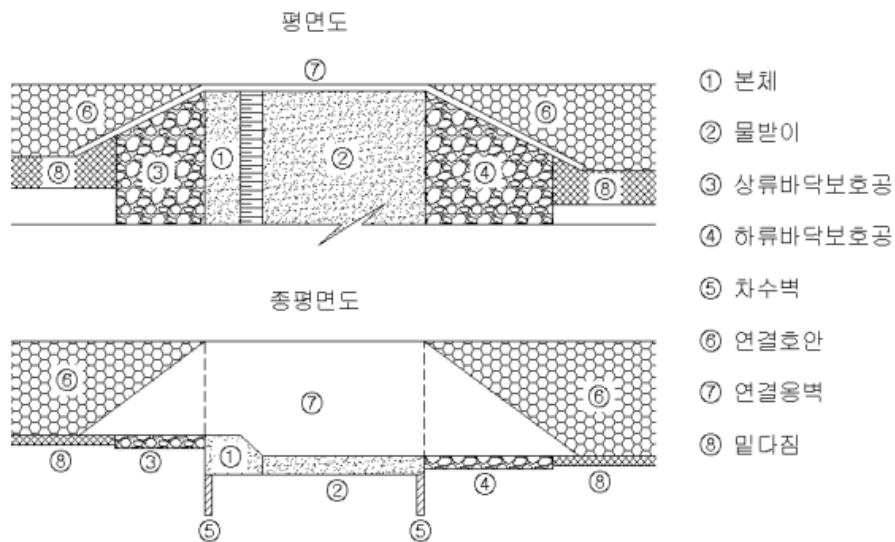
소하천 정비사업 중 구조물공 공사로는 배수암거, 배수통관, 교량, 낙차공 및 보가 있다. 축제공 공사와 마찬가지로 구조물공 사업을 통한 탄소배출량을 산정하려면 사업수행에 필요한 재료 및 장비 투입량에 각 재료 및 장비 사용에 따른 탄소발생 원단위를 곱해서 산정해야 한다. 그러나 소하천정비종합계획에는 개략적인 수량 및 예산만 산출되어 있다. 특히 구조물의 경우 배수암거, 배수통관 등은 개소수만 산출되어 있으며, 교량은 상판넓이, 낙차공과 보는 길이만 나타나 있어 재료 및 장비 투입량을 산정할 수 없다.

본 연구에서는 낙차공과 보는 개략적인 표준단면을 설정하여 재료 및 장비 투입량을 산정하였다. 전체 소하천공사에서 발생하는 탄소배출량 중 배수통관에 의한 배출량 비율은 매우 낮은 것으로 예상되어 분석에서 제외하였으며, 배수암거와 교량은 편차가 매우 커 원단위 적용이 불가능할 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다.

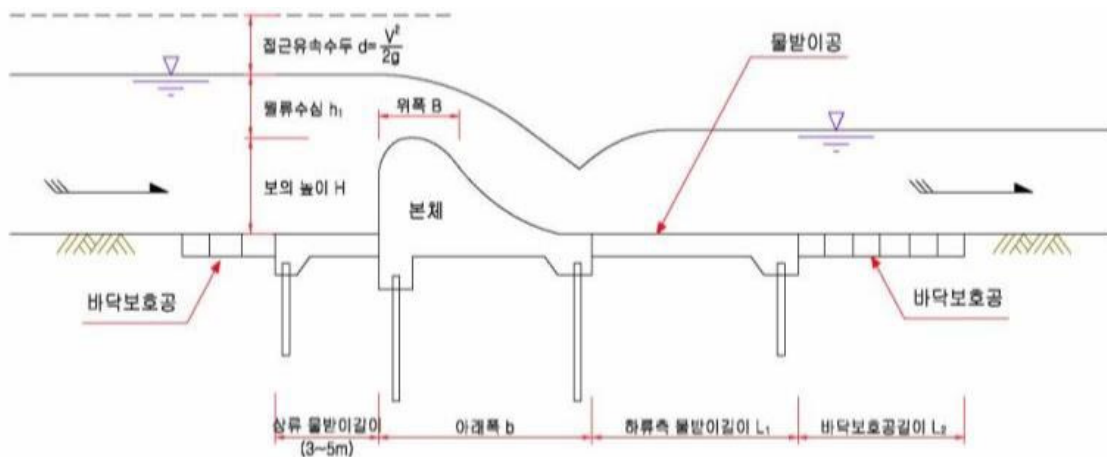
1) 낙차공 및 보의 표준단면 결정

소하천정비종합계획에서 낙차공과 보의 경우 설치 예정인 개소수 또는 길이로만 나타나 있어, 시공에 필요한 구체적인 물량을 산정할 수 없다. 이에 본 연구에서는 표준단면을 결정하여 투입물량을 산정하였다. 낙차공과 보의 유사한 형태의 구조물이어서 동일한 단면으로 가정하였다. <부록 그림 1>과 <부록 그림 2>는 낙차공과 보의 일반적인 형태를 나타낸다. 주요 단면은 보의 본체와 상류측 바닥보호공 및 물받이, 하류측 바닥보호공 및 물받이로 이루어져 있다. 이 중 바닥보호공과 물받이를 합치고, 전체적인 구조를 단순화하여 표준단면을 <부록 그림 3>과 같이 설정하였다.

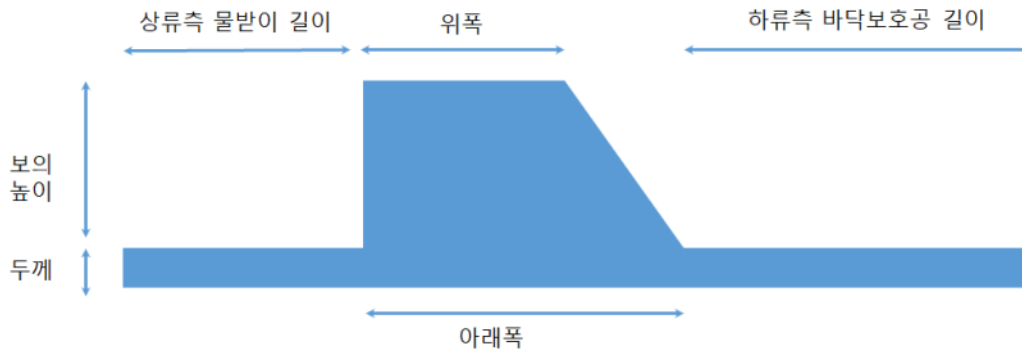
<부록 그림 1> 낙차공의 형태



<부록 그림 2> 보의 형태



〈부록 그림 3〉 낙차공과 보의 표준단면 형태



하류측 물받이의 길이는 블라이(Bligh) 공식을 사용하여 산정하였다.

$$\text{하류측 물받이 길이 } (L_1) = 0.6 \cdot C \cdot \sqrt{H_a}$$

여기에서 L_1 은 하류측 물받이 길이(m), H_a 는 하류측 물받이 상판에서 보마루까지의 높이(m), 배사구나 가동보의 경우는 수문 마루까지의 높이(m)이고, C 는 블라이(Bligh)계수이다. 소하천설계기준에서 낙차공의 높이를 1m 이내로 권장하고 있어, H_a 를 1m로 가정하였으며, 하상토의 상태를 굵은 모래로 가정하여 블라이 계수는 12로 가정하였다. 블라이공식으로 산정한 하류측 물받이 길이는 7.2m이며, 본 과업에서는 8m로 가정하였다.

〈부록 표 9〉 블라이(Bligh) 계수

하상토의 상태	블라이(Bligh) 계수
극미립사 또는 이토(0.1~0.005mm)	18
가는 모래(0.25~0.1mm)	15
굵은 모래(1.00~0.5mm)	12
자갈과 모래의 혼합	9
호박돌, 자갈	4~6

자료: 국토해양부(2019).

바닥보호공의 길이는 블라이(Bligh) 공식을 사용하여 산정하였다.

$$\text{바닥보호공 길이 } (L_2) = 0.66C \cdot f \cdot (H_a \cdot q)^{1/2} - L_1$$

여기에서 f 는 안전율(가동보=1.5, 고정보=1.0), q 는 단위폭당 유량($m^3/sec/m$), L_1 은 물받이 길이이다. 단위폭당 유량은 $2(m^3/sec/m)$ 로 가정했으며, 고정보로 $f=1$, 블라이계수는 물받이와 동일하게 12, 물받이 길이는 8m를 적용하였다. 바닥보호공의 길이는 3.2m로 계산되었으며, 본 과업에서는 3m로 가정하였다. 하류 측에는 바닥보호공과 물받이의 합으로 8m, 상류측에는 물받이로 3m를 적용하였다.

물받이의 두께는 하천시설기준 해설에서 추천하는 식을 사용하였다.

$$T = \frac{4(\Delta h - h_f)}{3(r - 1)}$$

여기에서 T 는 물받이의 두께(m), r 은 물받이 재료의 비율, Δh 는 상하류의 수위차(m), h_f 는 손실수두이다. r 은 콘크리트로 2.5를 적용하고, 상하류 수위차는 2m, 손실수두는 0.5m를 가정하여 물받이의 두께는 1.33m로 계산되었으며, 본 과업에서는 물받이의 두께를 1.5m로 적용하였다. 위 폭과 아래 폭 모두 하천설계기준에서 권장하는 블라이 공식을 사용하였으며, 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{위 폭 (B)} &= \frac{h_1}{\sqrt{\gamma}} \\ \text{아래 폭 (b)} &= \frac{(H + h_1 + d)}{\sqrt{\gamma}} \end{aligned}$$

여기에서 γ 은 콘크리트의 비율, H 는 보의 높이(m), h_1 은 보 정상의 최대월류수심(m), d 는 접근유속 수두(m)를 각각 나타낸다.

최대월류수심은 3m, 콘크리트 비율은 2.5, 보의 높이는 1m, 접근유속 수두는 1m로 가정하였으며, 이때의 위 폭은 1.89m, 아래 폭은 3.16m로 계산되었다. 본 과업에서는 위 폭은 2m, 아래 폭은 4m를 적용하였다.

따라서 소하천 단위폭당 낙차공 및 보 표준단면의 체적은 상류측 물받이 $4.5m^3/m$, 하류측 물받이 $12m^3/m$, 본체 $10.5m^3/m$ 로 총 $27m^3/m$ 로 결정하였다. 산정된 표준단면 단위 길이당 체적값에 소하천정비종합계획의 낙차공 및 보 계획 길이를 곱하여 총 투입재료량을 산정할 수 있다. 다만 철근배근에 의한 철근 사용량은 본 과업에서는 생략하였다.

124개 시군의 소하천정비종합계획 1만 1,948개의 소하천 제원을 분석한 결과 최대 하폭의 평균은 17.7m로 나타났으며, 최대 하폭의 분포는 <부록 표 10>과 같이 나타났다. 낙차공 및 보의 설치 길이를 모르거나 전국의 소하천에 표준단면을 적용할 경우에는 최대 하폭의 평균값인 14m를 곱하여 투입 재료의 양을 가정할 것을 추천한다.

<부록 표 10> 소하천 최대 하폭 분포

백분위	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
최대 하폭(m)	7	9	10	12	14	16	19	24	32

2) 낙차공 및 보 표준단면 시공에 따른 재료 및 장비 투입 원단위

낙차공 및 보 시공에는 해당 체적만큼의 콘크리트가 사용되며, 현장 콘크리트 타설을 위한 장비가 투입된다. 2021 건설공사 표준품셈(국토교통부)에서는 현장 콘크리트 타설(레디믹스트콘크리트 타설)을 위한 장비 투입량을 <부록 표 11>과 같이 제시한다. 본 과업에서는 0.6㎥ 굴삭기, 철근구조물 설치를 가정하였다. 이에 낙차공 및 보 시공에는 1㎡당 0.6㎥ 굴삭기가 0.10시간 필요한 것으로 나타났다.

〈부록 표 11〉 낙차공 및 보 표준단면 시공에 필요한 장비(1㎡당 필요수량)

구분	규격	단위	수량		
			무근구조물	철근구조물	소형구조물
굴삭기	0.6~0.8㎥	hr	0.09	0.10	0.31
비고	<p>본 품의 타설 유형은 다음의 경우에 적용한다. 믹서트럭에서 콘크리트를 굴삭기로 공급받아 근접된 타설 위치에 직접 시공하는 기준이다. [주] ① 본 품은 현장 내 콘크리트 운반, 타설, 다짐 및 양생준비를 포함한다. ② 소형구조물은 개소별 소량(6㎥이하)의 타설 위치가 산재되어 있는 경우에 적용한다. ③ 미장공에 의한 표면 마무리가 필요한 경우 '공통부문' 6-1-3 표면 마무리'를 따른다. ④ 양생은 양생방법 및 시간을 고려하여 별도로 계산한다.</p>				

3) 낙차공 및 보 시공에 따른 탄소배출량 산정

낙차공 및 보 공정에 따른 재료 및 장비 투입량 원단위를 정리하면 <부록 표 12>와 같다. 낙차공 및 보 단위 폭당 콘크리트가 27㎥ 필요하며, 0.6㎥ 굴삭기가 2.7시간 필요한 것으로 나타났다.

〈부록 표 12〉 낙차공 및 보 시공 시 재료 및 장비 투입량 원단위(1m당 필요수량)

공종	단위	재료투입량	장비	투입량
낙차공 및 보	m	콘크리트 27㎥	0.6㎥ 굴삭기	2.7시간

국토해양부(2021)의 가이드라인에 맞추어 각 중장비 및 재료의 사용에 따른 탄소배출량 원단위를 산정한 결과는 <부록 표 13>과 같다.

〈부록 표 13〉 재료 및 장비 탄소배출량 원단위

장비 및 재료	단위	탄소배출량(kgCO ₂ /hr)
0.6㎥ 굴삭기(무한궤도)	hr	26.56
콘크리트	㎥	346.00

낙차공 및 보 공정의 재료 및 장비 투입량에 따른 탄소배출량 원단위는 <부록 표 14>와 같다.

<부록 표 14> 재료 및 장비 투입에 따른 탄소배출량 원단위

공종	투입 단위	장비	시간당 탄소배출량 (kgCO ₂ /hr) (A)	공정별 투입량 (hr/투입단위) (B)	공정별 탄소배출량 (kgCO ₂ /투입단위) (C=A×B)
낙차공 및 보	m	0.6m³ 굴삭기	26.56	2.7	71.712
	m³	콘크리트	346.00	27	9,342

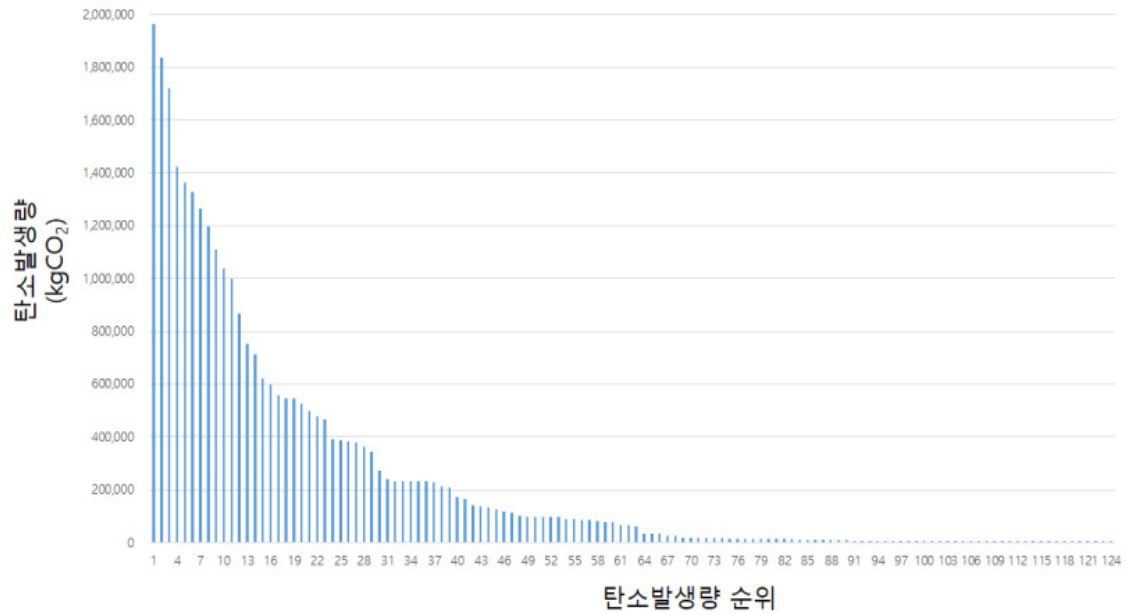
다. 전국 소하천 정비사업 완료 시 탄소배출량 평가

소하천정비사업 수행에 따라 발생하는 탄소량을 산정하기 위해 앞 절에서 제안된 방법을 용인시 소하천정비종합계획(2018)에 적용하여 총 126개 소하천에서의 탄소배출량을 산정하였다. 용인시 소하천 중에서는 전체 하천 평균 242.1톤 CO₂이 발생하였으며, 수역천 1,965톤 CO₂로 최대, 대치고개천에서 0.415톤 CO₂로 가장 적게 발생하였다. 용인시의 소하천 사업이 모두 완료되면, 총 3만 14톤 CO₂가 발생하는 것으로 산정되었다.

용인시 전체 소하천 중 61.3%인 76개 소하천은 100톤 CO₂ 이하로 발생시켰으며, 이 하천들에서 발생하는 CO₂의 양은 전체 배출량의 6.1%에 불과하였다. 즉 전체 소하천의 38.7%에 해당하는 48개 소하천에서 CO₂ 총배출량의 93.9%를 배출하였으며, 상위 11개 소하천에서 총배출량의 50.8%를 배출하는 것으로 나타났다.

공정별로는 낙차공 및 보가 2만 8,035.0톤 CO₂로 전체 배출량의 93.4%를 차지하였으며, 식생매트로 산정한 호안공에서 904.2톤 CO₂(3.0%)가 발생하였다. 사토처리에 659.7톤 CO₂(1.2%), 표토제거에 147.6톤 CO₂(0.5%) 성토와 유용성토에 각각 40.0톤 CO₂(0.13%), 56.8톤 CO₂(0.19%)가 발생하는 것으로 나타났다. 결과에서 보듯이, 콘크리트 사용에서 대부분의 탄소가 발생하였으며, 성토에서는 많은 탄소가 발생하지 않은 것으로 나타났다.

〈부록 그림 4〉 소하천별 탄소배출량 분포



〈부록 표 15〉 소하천 정비사업 공정별 탄소배출량

공정명	총배출량 (톤 CO ₂)	소하천별평균 배출량 (톤 CO ₂ /소하천)	비율 (%)
표토제거	147,592	1,180.7	0.49
유용성토	56,773	454.2	0.19
순성토	40,026	320.2	0.13
사토처리	359,714	2,877.7	1.20
호안공 (식생매트)	904,239	7,233.9	3.01
낙차공 및 보	28,034,976	224,279.8	93.41

〈부록 표 16〉 용인시 소하천 정비사업에 따른 탄소배출량

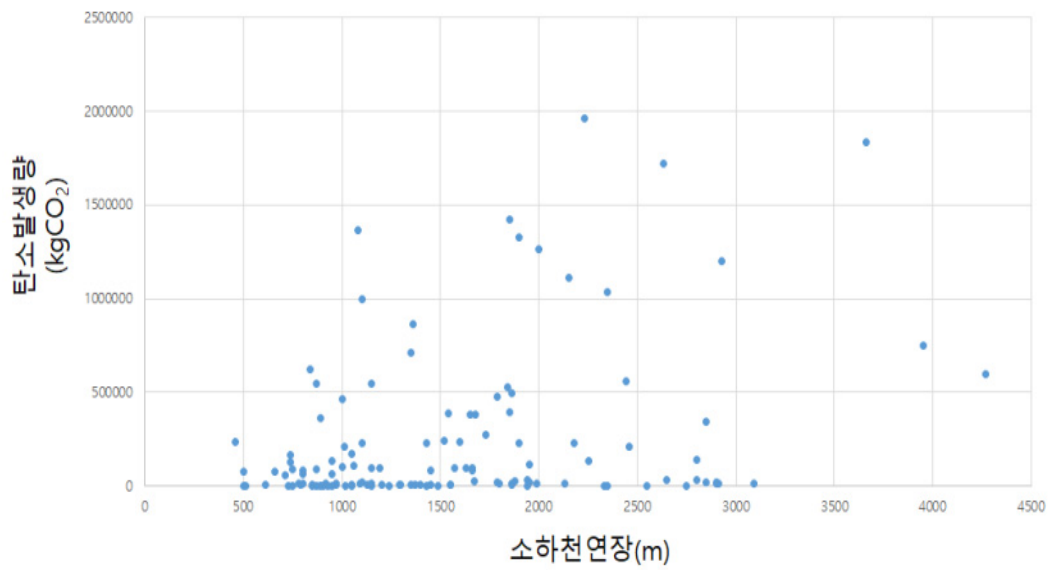
배출 순위	하천명	탄소배출량 (톤 CO ₂)	배출량누계 (톤 CO ₂)	누적배출 비율(%)	배출 순위	하천명	탄소배출량 (톤 CO ₂)	배출량누계 (톤 CO ₂)	누적배출 비율(%)
1	수역천	1,965.0	1,965.0	6.5	63	관곡천	59.5	29,453.2	98.1
2	황석천	1,837.8	3,802.9	12.7	64	지내천	33.4	29,486.6	98.2
3	신기천	1,719.6	5,522.5	18.4	65	양가천	32.4	29,518.9	98.3
4	식송천	1,424.8	6,947.3	23.1	66	아곡천	32.2	29,551.1	98.5
5	별미천	1,365.1	8,312.4	27.7	67	안악골천	26.7	29,577.9	98.5
6	아곡천	1,328.4	9,640.7	32.1	68	소실천	25.4	29,603.3	98.6
7	공세울천	1,265.0	10,905.7	36.3	69	신평천	19.0	29,622.2	98.7
8	상하천	1,198.7	12,104.4	40.3	70	영곡천	18.6	29,640.8	98.8
9	동진천	1,110.8	13,215.2	44.0	71	상동천	17.7	29,658.5	98.8
10	음달안천	1,038.2	14,253.4	47.5	72	맹리천	17.4	29,675.9	98.9
11	장울천	998.0	15,251.4	50.8	73	젯말천	16.9	29,692.8	98.9
12	정지천	866.2	16,117.6	53.7	74	상반천	15.8	29,708.6	99.0
13	평촌천	752.3	16,869.9	56.2	75	박석천	15.3	29,723.9	99.0
14	중리천	713.7	17,583.6	58.6	76	강촌천	14.7	29,738.6	99.1
15	예직천	622.3	18,205.9	60.7	77	고초천	13.5	29,752.1	99.1
16	화곡천	596.5	18,802.4	62.6	78	맹골천	13.5	29,765.6	99.2
17	당하천	559.2	19,361.6	64.5	79	창동천	13.5	29,779.1	99.2
18	울천	547.2	19,908.7	66.3	80	내천	13.5	29,792.6	99.3
19	목동천	544.8	20,453.5	68.1	81	삼박천	12.3	29,804.9	99.3
20	공세울1천	527.7	20,981.2	69.9	82	고당1천	12.3	29,817.1	99.3
21	가두천	497.6	21,478.8	71.6	83	염티천	11.9	29,829.1	99.4
22	산매동천	480.1	21,958.9	73.2	84	석실천	11.2	29,840.2	99.4
23	단사골천	466.0	22,424.9	74.7	85	옥산2천	10.9	29,851.2	99.5
24	상동천	391.5	22,816.4	76.0	86	광곡천	10.6	29,861.8	99.5
25	용해곡천	386.3	23,202.7	77.3	87	말골천	10.2	29,871.9	99.5
26	읍내웃골천	381.5	23,584.1	78.6	88	분안골천	10.2	29,882.1	99.6
27	아송천	379.2	23,963.3	79.8	89	모산천	10.1	29,892.2	99.6
28	호동천	363.9	24,327.3	81.1	90	갈마재천	8.6	29,900.8	99.6
29	은이천	342.9	24,670.2	82.2	91	학일천	7.5	29,908.3	99.6
30	고사리천	273.2	24,943.4	83.1	92	왕곡천	7.2	29,915.5	99.7
31	운학천	240.3	25,183.7	83.9	93	구례논골천	7.0	29,922.5	99.7

〈부록 표 16〉의 계속

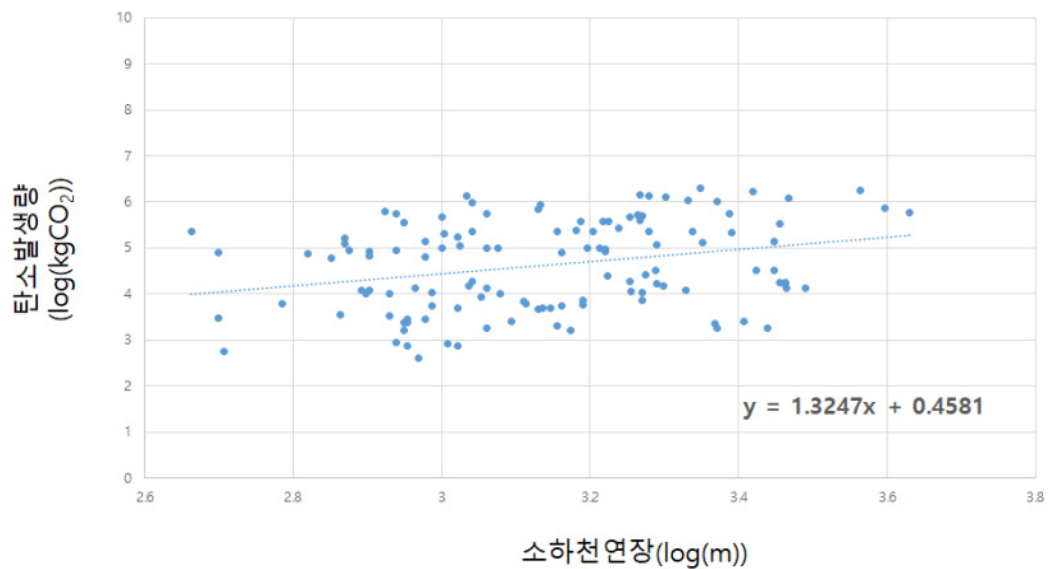
배출 순위	하천명	탄소배출량 (톤 CO ₂)	배출량누계 (톤 CO ₂)	누적배출 비율(%)	배출 순위	하천명	탄소배출량 (톤 CO ₂)	배출량누계 (톤 CO ₂)	누적배출 비율(%)
32	산소골천	233.5	25,417.2	84.7	94	사전천	6.4	29,928.9	99.7
33	해곡천	232.9	25,650.1	85.5	95	안산천	6.2	29,935.1	99.7
34	능막천	232.5	25,882.7	86.2	96	후평천	6.0	29,941.1	99.8
35	요덕천	231.6	26,114.3	87.0	97	후동천	5.5	29,946.6	99.8
36	초현천	230.3	26,344.7	87.8	98	냉수물천	5.4	29,952.0	99.8
37	교쟁이골천	226.9	26,571.6	88.5	99	용암천	5.1	29,957.1	99.8
38	장투리천	211.5	26,783.1	89.2	100	학고개골천	5.0	29,962.1	99.8
39	좌전천	207.7	26,990.8	89.9	101	먹조현천	4.9	29,967.0	99.8
40	불당골천	171.0	27,161.8	90.5	102	시미곡천	4.6	29,971.6	99.9
41	도창천	165.0	27,326.8	91.0	103	요산천	3.5	29,975.1	99.9
42	완기천	139.0	27,465.8	91.5	104	심부고개천	3.4	29,978.5	99.9
43	민제궁천	137.2	27,602.9	92.0	105	죽말천	3.0	29,981.4	99.9
44	삼파천	134.2	27,737.2	92.4	106	위골천	2.9	29,984.3	99.9
45	갈현천	126.8	27,864.0	92.8	107	해시리천	2.8	29,987.1	99.9
46	금현천	116.4	27,980.4	93.2	108	좌향천	2.6	29,989.8	99.9
47	중리천	111.3	28,091.7	93.6	109	송골천	2.5	29,992.3	99.9
48	독재미골천	102.1	28,193.8	93.9	110	탐골천	2.5	29,994.7	99.9
49	동산천	98.4	28,292.2	94.3	111	내수곡천	2.4	29,997.1	99.9
50	궁촌천	97.6	28,389.8	94.6	112	거문정천	2.3	29,999.5	99.9
51	초부천	97.4	28,487.2	94.9	113	남생이천	2.1	30,001.5	100.0
52	통곡천	97.3	28,584.5	95.2	114	삼가천	1.8	30,003.4	100.0
53	상덕천	95.6	28,680.1	95.6	115	갈담천	1.8	30,005.2	100.0
54	구백암천	89.5	28,769.6	95.9	116	아리실천	1.8	30,007.0	100.0
55	광교산천	87.6	28,857.2	96.1	117	삼전천	1.7	30,008.6	100.0
56	학촌천	86.3	28,943.5	96.4	118	장익천	1.6	30,010.3	100.0
57	바란골천	85.3	29,028.8	96.7	119	내창천	0.9	30,011.2	100.0
58	내추계천	80.5	29,109.3	97.0	120	언동천	0.8	30,012.0	100.0
59	한덕천	77.6	29,186.9	97.2	121	복사고개골천	0.8	30,012.8	100.0
60	이현천	75.7	29,262.7	97.5	122	샘말천	0.7	30,013.5	100.0
61	도사천	66.6	29,329.2	97.7	123	사암천	0.6	30,014.1	100.0
62	동막천	64.4	29,393.6	97.9	124	대치고개천	0.4	30,014.5	100.0

소하천정비사업으로 각 소하천에서의 탄소배출량과 소하천 길이의 상관관계를 분석하였다. 소하천 길이가 길수록 정비사업에 따른 탄소배출량이 많아지는 경향이 있었으나, 소하천별로 탄소배출량의 편차가 커 적절한 회귀식을 찾기가 곤란하다. 이에 탄소배출량과 소하천 연장을 전대수지에 <부록 그림 5>와 같이 나타냈다.

〈부록 그림 5〉 소하천 연장과 정비사업에 따른 탄소배출량 상관관계



〈부록 그림 6〉 소하천 연장과 정비사업에 따른 탄소배출량 상관관계(전대수지)



회귀식을 사용하여 전국의 2만 2,093개 모든 소하천에 대하여 탄소배출량을 산정하였다. 전국의 모든 소하천은 길이, 폭, 경사, 유역면적, 유역의 토지이용 등 여건이 다르며, 모든 소하천별로 필요한 재료와 장비의 양은 상이할 수밖에 없다. 다만 전체 자료의 취득이 불가능한 상황에서 용인시 124개 소하천에서의

탄소배출량을 기준으로 유도한 소하천 길이에 따른 탄소배출량 회귀식을 사용하여 우리나라 전체 소하천 정비사업에 따른 탄소배출량을 산정하였다. 분석한 결과 전체 소하천정비사업 수행 시 총 115만 8,840.7톤 CO₂가 발생할 것으로 산정되었다. 2021년 현재 전체 소하천 중 약 40%의 소하천정비사업이 완료된 것으로 나타나, 향후 소하천정비사업 완료 시 69만 5,304.4톤 CO₂가 추가로 발생할 것으로 예상된다.

2 자연재해위험개선지구사업에 따른 탄소배출량 평가

가. 자연재해저감종합계획에 따른 재해위험지구 개선사업 분석

자연재해저감 종합계획은 「자연재해대책법」 제16조에 따라 자연재해로부터 지방자치단체의 안전을 확보하기 위하여 광역 및 기초지방자치단체의 장이 수립하고 있다. 이를 위하여 자연재해저감 종합계획에서는 자연재해로 인한 과거 피해, 인문·지형적 여건 및 관련 계획을 종합적으로 검토하여 피해 예방 및 저감을 위한 각종 구조적 대책과 비구조적 대책을 종합적으로 제시하는 자연재해 저감 분야 최상위 종합계획이다. 대상으로 하는 재해의 종류는 태풍, 홍수, 호우, 강풍, 풍랑, 해일(지진해일 포함), 조수, 대설, 가뭄 및 그 밖에 이에 준하는 자연현상으로 인하여 발생하는 재해이며, 하천재해, 내수재해, 사면재해, 토사재해, 바람재해, 해안재해, 가뭄재해, 대설재해, 기타재해로 구분하고 있다. 재해 유형별 위험요인은 <부록 표 17>과 같이 구분된다.

<부록 표 17> 재해 유형별 위험요인(하천재해, 내수재해)

재해 유형	구분	위험 요인
하천재해	하천범람	<ul style="list-style-type: none"> - 하폭, 제방고 및 제방여유고 부족 - 본류하천의 높은 외수위에 의한 지류하천 홍수소통 불량 - 토석류, 유송잡물 등에 의한 하천 통수단면적 감소 - 교량 공간장 및 형하여유고 부족으로 막힘 현상 발생 - 교량 부분이 인근 제방보다 낮음으로 인한 월류 및 범람 - 하천구역의 다른 용도 사용 - 인접 저지대의 높은 토지이용도 - 상류댐 홍수조절능력 부족 - 계획홍수량 과소 책정
	제방 유실·변형·붕괴	<ul style="list-style-type: none"> - 파이핑 및 하상세굴, 세굴 등에 의한 제방 기초 유실 - 만곡부의 유수나 유송잡물 충격 - 소류력에 의한 제방 유실 - 제방과 연결된 구조물 주변 세굴 - 하천시설물과의 접속 부실 및 누수 - 하천횡단구조물 파괴에 따른 연속 파괴 - 제방폭 협소, 법면 급경사에 의한 침윤선 발달 - 제체의 재질 불량, 다짐 불량 - 하천범람에 의한 제방 붕괴

〈부록 표 17〉의 계속

재해 유형	구분	위험 요인
하천재해	호안유실	<ul style="list-style-type: none"> - 호안 강도 미흡 또는 연결 불량 - 소류력, 유송잡물에 의한 호안 유실, 이음매 결손, 흡출 등 - 호안내 공동 발생 - 호안 저부 손상
	하상안정시설 파괴	<ul style="list-style-type: none"> - 소류력에 의한 세굴 - 근입깊이 불충분
	하천 횡단구조물 파괴	<ul style="list-style-type: none"> - 교량 경간장 및 형하여유고 부족 - 기초세굴 대책 미흡으로 인한 교각 침하 및 유실 - 만곡 수충부에서의 교대부 유실 - 교각부 콘크리트 유실 - 날개벽 미설치 또는 길이 부족 등에 의한 사면토사 유실 - 교대 기초세굴에 의한 교대 침하, 교대 뒷채움부 유실·파손 - 유사 퇴적으로 인한 하상 바닥고 상승 - 도로 노면 배수능력 부족
	제방도로 파괴	<ul style="list-style-type: none"> - 제방 유실·변형, 붕괴 - 집중호우로 인한 인접사면의 활동 - 지표수, 지하수, 용출수 등에 의한 도로 절토사면 붕괴 - 시공다짐 불량 - 하천 협착부 수위 상승
	댐·저수지 붕괴	<ul style="list-style-type: none"> - 계획홍수량을 초과하는 이상호우에 대한 방류 시설 미비 - 균열 및 누수구간 발생, 여수로 및 방수로 시설 파손 - 안전관리 소홀
내수재해	우수유입시설 문제로 인한 피해	<ul style="list-style-type: none"> - 빗물받이 시설 부족 및 청소 불량 - 지하공간 출입구 빗물유입 방지시설 미흡
	우수관거시설 문제로 인한 피해	<ul style="list-style-type: none"> - 우수관거 및 배수통관의 통수단면적 부족 - 역류 방지시설 미비 - 계획홍수량 과소 책정
	배수펌프장 시설 문제로 인한 피해	<ul style="list-style-type: none"> - 배수펌프장 용량 부족 - 배수로 미설치 및 정비 불량 - 펌프장 운영 규정 미비 - 설계기준 과소 적용(재현기간, 임계지속기간 적용 등)
	외수위로 인한 피해	<ul style="list-style-type: none"> - 외수위로 인한 내수배제 불량 - 하천단면적 부족 또는 교량설치 부분의 낮은 제방으로 인한 범람
	노면 및 위치적 문제에 의한 피해	<ul style="list-style-type: none"> - 인접지역 공사나 정비 등으로 인한 지반고의 상대적인 저하 - 철도나 도로 등의 하부 관통도로의 통수단면적 부족
	이차적 침수피해 증대 및 기타관련 피해	<ul style="list-style-type: none"> - 토석류에 의한 홍수소통 저하 - 지하수 침입에 의한 지하 침수 - 지하공간 침수 시 배수계통 전원 차단 - 선로 배수설비 및 전력시설 방수 미흡 - 지중 연결부 방수처리 불량 - 침수에 의한 전기시설 노출로 감전 피해 - 다양한 침수 상황에 대한 발생유량 예측 및 대피체계 미흡

각 재해로 인한 피해를 저감하기 위한 대책은 공간적으로는 전지역단위 저감대책과 수계단위 저감대책으로 구분되며, 방법적으로는 구조적 저감대책과 비구조적 저감대책으로 구분되어 수립된다. 구조적 저감대책은 타 계획을 우선적으로 검토하여 반영하도록 하고 있어 본 과업에서는 분석대상에서 제외하였다. 비구조적 저감대책은 자연재해 저감을 위한 제도적 차원에서 관련 지침이나 기준 또는 법령 변경 등 탄소 발생 및 저감과는 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 이에 본 과업에서는 수계단위 저감대책 중 재해위험지구 유형별로 수립되는 구조적 저감대책을 분석대상으로 삼았다. 재해 유형별 구조적 저감대책은 〈부록 표 18〉에 제시된 바와 같다.

〈부록 표 18〉 재해 유형별 구조적 저감대책

재해 유형	구조적 저감대책
하천재해	하천 축제, 보축(홍수방어벽 포함), 교량, 낙차공 및 보 등 횡단시설물 신설 또는 재설치 등
내수재해	유역분할을 위한 우수관거(배수로) 설치, 배수펌프장 설치 또는 증설, 우수저류시설 설치, 우수관거(배수로) 설치 또는 증설 등
사면재해	낙석방지책, 낙석방지망 등 설치, 옹벽 설치, 사면 녹화 등
토사재해	송수로, 배수로 등의 수로공사의 경우 토사유출 방지를 위하여 식생공법이 계획, 산지 계곡부 등 토석류와 유송잡물의 차단시설 등
바람재해	설계기본풍속 조례 제정, 주민이주대책 수립 등 비구조적 저감대책
해안재해	TTP 보강, 잠제, 해안선 정비, 호안 보수, 방조제 보수, 방파옹벽 설치, 양빈, 이안제 설치 등
가뭄재해	양수장 설치, 용수로 설치, 저수지 증고, 도수터널 설치 등
대설재해	염수분사장치 설치 등
기타재해	저수지 제당 증고, 여수로 정비, 차수시설 보강, 제당 그라우팅 등

각 유형의 재해 발생 시 피해를 저감하기 위하여 다양한 구조적 대책이 제시되고 있으며, 서로 다른 재해에도 유사한 구조적 대책이 제시되기도 하고, 동일한 재해에도 상이한 대책이 수립되기도 한다. 탄소 발생의 측면에서는 서로 다른 대책이 유사하게 평가될 수도 있다. 예를 들어, 홍수피해를 저감하기 위한 저수지 설치 또는 하천 제방 축제와 가뭄피해를 저감하기 위한 저수지 증고 등은 세부 공정이 토공의 절토 및 성토로 탄소배출량 산정 과정은 굴삭기 사용 시간만으로 유사하게 진행된다. 따라서 자연재해저감종합계획 수행에 따른 공정별 탄소배출량은 재해 유형이 아닌 구조적 저감대책별로 평가되어야 한다.

바람재해와 대설재해 관련 대책 등에 포함된 비구조적인 대책과 해안재해 등 특정 지역에만 해당하는 재해는 평가에서 제외하였다. 하천재해의 대책인 하천 축제, 보축(홍수방어벽 포함), 교량, 낙차공 및 보 설치 등은 앞 절의 소하천정비종합계획 이행에 따른 탄소배출량에서 평가하였고, 동일한 방식으로 적용이 가능하여 본 절에서는 평가에서 제외하였다. 본 과업에서는 내수재해 및 사면재해를 대상으로 평가를 수행하였으며, 이 중 배수펌프장 설치와 급경사지 붕괴위험지역 정비사업에 따른 탄소배출량을 평가하였다.

나. 배수펌프장 건설에 따른 탄소배출량 산정

실제 시공을 위한 실시설계를 사용하여 배수펌프장 건설 공정을 분석하였으며, 공정별 탄소배출량을 산정하였다. 배수펌프장 건설 공정은 토목, 건축, 기계 및 전기로 구분된다. 이 중 기계 및 전기는 배수펌프장 운영 중 탄소배출량이 많은 설비이나, 건설 단계에서는 토목, 건축 분야에 비하여 그 양이 미미하거나, 원단위 산정이 곤란하여 본 과업에서는 토목 및 건축 분야에서의 탄소배출량 위주로 평가하였다.

자연재해저감종합계획은 재해종류별 위험지구를 선정하고, 해당 위험지구의 재해피해를 방지 및 저감하기 위한 대책을 수립한다. 배수펌프장 위치, 펌프 및 유수지용량 등에 대한 개략적인 계획만 수립할 뿐, 구체적인 물량과 관련된 계획은 수립하지 않는다. 이에 본 과업에서는 경기도 고양시 신평 제2배수펌프장 건설공사 실시설계(2014)를 바탕으로 배수펌프장 건설에 따른 탄소배출량을 산정하였다.

배수펌프장 건설을 위한 토목 분야 공정은 펌프장 본동, 옹벽, 토출관로, 토출수조, 유출구, 유수지 건설 등으로 구분된다. 이상의 공정 수행을 위한 실제 공정은 터파기, 되메우기, 잔토처리, 유수지 준설로 요약할 수 있으며, 이는 다시 절토 및 성토 과정으로 일반화할 수 있다. 그리고 절성토 등 토공에 의한 탄소배출량은 앞 절의 소하천 사업에서 산정한 방법 및 원단위를 사용하였다.

〈부록 표 19〉 배수펌프장 토공에 의한 탄소배출량

공종	터파기 (㎡)		되메우기 (㎡)	잔토처리 (㎡)	양질토 치환 (㎡)	잡석부설 (㎡)	유수지 준설 (㎡)	계
	4m 이내	4m 이상						
본동	5,604.2	8,510.88	60.31	14,054.7	·	297.0	0	·
옹벽	7,267.6	·	3,006.72	4,260.9	3,971.4	81.0	0	·
토출관로	5,021.2	·	3,190.31	1,830.9	·	·	·	·
토출수조	3,041.8	·	1,035.94	2,005.9	·	86.3	0	·
유출구	1,276.5	·	367.26	909.3	·	100.3	0	·
유수지	·	·	·	·	·		19577.4	·
계	22,211.3	8,510.88	7,660.54	23,061.7	3971.44	564.5	19577.4	·
탄소배출량 원단위 (kgCO ₂ /㎡)	0.3638	0.3638	0.3638	0.3638	0.3638	0.3638	0.3638	·
탄소배출량 (kgCO ₂)	8082.1	3096.9	2787.5	8391.9	1445.1	205.4	7123.7	31,132.1

배수펌프장 건설을 위한 공정별 주요 자재는 레미콘과 철근이며, 〈부록 표 20〉과 같이 산정된다. 토공은 별도 재료 사용이 없었으며, 가시설공은 시공 후 재활용이 가능하여 탄소배출량 산정에서는 제외하였다.

〈부록 표 20〉 배수펌프장 주요 자재 사용량

공종	규격	단위	공종별 재료 사용량				계
			진입도로공	구조물공	추진공	부대시설공	
레미콘	고유동(24MPa)	m ³	.	.	1,528	.	1,528
	25-30-15		.	5,022	.	.	5,022
	25-24-15		.	383	1,018	.	1,401
	25-21-12		.	1,149	.	61.26	1,211
	25-21-8		469	.	.	16.21	485
	25-18-8		.	287	601	11.53	900
철근 (SD30)	D13	ton	0.207	34.021	15.753	3.710	53.691
	D16-32		.	0.505	2.523	.	3.028
	계		0.207	34.526	18.276	3.710	56.719
철근 (SD40)	H13	ton	.	41.428	30.862	.	72.290
	H16~32		.	726.856	82.057	.	808.913
	계		-	68.283	112.919	-	881.202
시멘트	40kg	대	.	19,940	4,027	.	23,967
H-350*350*12*19 H-형강	1년 미만 손료 50%	ton	.	.	49.427	.	49.427
	손료 100%, 매몰		.	.	0.917	.	0.917
H-300*300*10*15 H-형강	1년 미만 손료 50%	ton	.	.	117.431	.	17.431
	손료 100%, 매몰		.	.	47.110	.	47.110
H-200*200*8*12 H-형강	1년 미만 손료 50%	ton	.	.	17.440	.	17.440
C-380x100x 10.5x16 C-형강	1년 미만 손료 50%	ton	.	.	17.222	.	17.222

레미콘 사용에 따른 탄소배출량은 소하천 공사와 동일하게 346kgCO₂/m³을 적용하였으며, 철근 및 H-형강 등은 국토해양부(2012)의 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인에서 제시하는 값을 사용하였다. 다만 〈부록 표 21〉과 같이 철강제품 중에서도 종류에 따라 온실가스 배출량이 0.35~0.76kgCO₂/kg로 다소간 차이가 있다. 본 연구에서는 철강제품에 따른 차이를 반영하지 않고, 0.40kgCO₂/kg을 일괄적으로 사용하였다. 시멘트는 포틀랜드 시멘트 0.944kgCO₂/kg를 적용하였다.

〈부록 표 21〉 철근 생산에 따른 온실가스 배출량

재료명	기능단위	온실가스배출계수 (kgCO ₂ /단위)
전기로 제강_철근	kg	0.35
전기로 제강_형강	kg	0.43
전기로 제강_봉강	kg	0.76
전기로 제강_레일	kg	0.41
H형강	kg	0.40
I형강	kg	0.40
ㄱ형강	kg	0.41
ㄷ형강	kg	0.41
고장력이형철근	kg	0.41
일반이형철근	kg	0.40

자료: 국토해양부(2012)

경기도 고양시 신평 제2배수펌프장을 대상으로 사업 수행에 따른 탄소배출량을 산정하였다. 신평 제2배수펌프장 사업 수행 시 5,060.4톤 CO₂가 발생하였으며, 이 중 토공을 위한 장비 사용에는 31.1톤 CO₂, 재료 사용에는 5,029.3톤 CO₂가 발생하였다. 이 중 콘크리트(시멘트, 레미콘 등) 타설을 위해서는 4,554.3톤 CO₂, 강재에서는 475.0톤 CO₂가 발생하였다. 탄소배출량의 90.0%가 시멘트 및 레미콘 등 콘크리트 타설에서 발생하였으며, 강재 사용이 9.4%, 장비 사용이 0.6%를 차지하였다.

〈부록 표 22〉 배수펌프장 재료 분야 탄소배출량 산출의 예(고양시 신평 제2배수펌프장)

공종	규격	단위	재료 사용량	배출원단위 (kgCO ₂ /unit)	배출량 (kgCO ₂ /unit)
레미콘	고유동(24MPA)	m ³	1,528	346	528,723.0
	25-30-15	m ³	5,022	346	1,737,653.5
	25-24-15	m ³	1,401	346	484,758.7
	25-21-12	m ³	1,211	346	418,909.4
	25-21-8	m ³	485	346	167,882.7
	25-18-8	m ³	900	346	311,367.4
철근 (SD30)	D13	ton	53.691	400	21,476.4
	D16-32	ton	3.028	400	1,211.1
철근 (SD40)	H13	ton	72.290	400	28,915.9
	H16-32	ton	808.913	400	323,565.0
시멘트	40KG	대	23,967	37.76	904,978.8

공종	규격	단위	재료 사용량	배출원단위 (kgCO ₂ /unit)	배출량 (kgCO ₂ /unit)
H-350*350*12*19 H-형강	1년 미만 손료 50%	ton	49.427	400	19,770.8
	손료 100%, 매몰	ton	0.917	400	366.8
H-300*300*10*15 H-형강	1년 미만 손료 50%	ton	117.431	400	46,972.4
	손료 100%, 매몰	ton	47.110	400	18,844.0
H-200*200*8*12 H-형강	1년 미만 손료 50%	ton	17.440	400	6,976.0
C-380x100x10.5 x16-형강	1년 미만 손료 50%	ton	17.222	400	6,888.8
계					5,029,260.7

본 연구에서 대상으로 활용한 신평 제2배수펌프장은 펌프 용량이 3,000m³/min이고 용지보상비를 제외한 순수 시공비가 408.2억 원이다. 추후 실시설계가 수립되지 않아 총 투입 물량이 산정되어 있지 않은 다른 지역에서 자연재해저감종합계획의 빗물펌프장 건설로 인한 탄소배출량을 산정하려면 펌프 용량 또는 시공비를 기준으로 탄소배출량을 산정할 것을 추천한다.

다. 급경사지 정비사업에 따른 탄소배출량 산정

실제 시공을 위한 실시설계를 사용하여 급경사지 정비사업 공정을 분석하였으며, 공정별 탄소배출량을 산정하였다. 급경사지 정비사업 공정은 토공, 배수공, 포장공, 교통안전시설공, 부대공으로 구분된다. 이 중 교통안전시설공, 부대공은 토공 및 배수공에 비하여 그 양이 미미하여 본 과업에서는 토공, 배수공 및 포장공에서의 탄소배출량 위주로 평가하였다.

토공에서의 탄소배출량은 흙깎기, 면고르기 등 토공을 위한 장비사용량으로 산정되며, 배수공과 포장공은 토공, 측구, 집수정 건설을 위한 재료사용량으로 산정한다. 각 건설재료와 장비의 단위 사용량당 탄소배출량은 국토해양부(2012)의 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인에서 제시하는 값을 사용하였다.

자연재해저감종합계획은 재해종류별 위험지구를 선정하고, 해당 위험지구의 재해피해를 방지 및 저감하기 위한 대책을 수립한다. 급경사지 정비사업 수행 위치 등에 대한 개략적인 계획만 수립할 뿐, 구체적인 물량과 관련된 계획은 수립하지 않는다. 이에 본 과업에서는 경상남도 고성군 동산3지구 급경사지 붕괴위험지역 정비사업 종합보고서(2017)를 바탕으로 급경사지 붕괴위험지역 정비사업에 따른 탄소배출량을 산정하였다.

급경사지 정비사업 토공 분야 공정은 흙깎기, 뜯돌제거, 되메우기, 면고르기 등으로 구성된다. 이상의 공정 수행을 위한 실제 공정은 절토 및 성토 과정으로 일반화할 수 있다. 발파 작업에 의한 탄소배출량은 본 과업에서는 산정하지 않았으며, 모든 흙깎기 과정을 절토 과정에 포함하여 산정하였다. 그리고 절성토 등 토공에 의한 탄소배출량은 앞 절의 소하천 사업에서 산정한 방법 및 원단위를 사용하였다.

〈부록 표 23〉 급경사지 정비사업 장비 사용에 의한 탄소배출량

공종	규격	단위	수량	원단위 (kgCO ₂ /unit)	탄소배출량 (kgCO ₂)
흙깎기	토사	m ³	688.3	0.36	250.5
	리핑암	m ³	280.7	0.36	102.1
	발파암	m ³	1,000.2	0.36	363.9
		m ³	1,000.2	0.36	363.9
		m ³	2,709.6	0.36	985.9
		m ³	456.3	0.36	166.0
뚝돌제거		m ³	732.7	0.36	266.6
되메우기		m ³	136	0.36	49.5
면고르기		m ²	2,798.8	0.24	669.0
계					3,217.6

급경사지 정비사업 공정별 주요 자재는 레미콘, 철근 및 아스콘이다. 토공은 별도 재료 사용이 없었으며, 배수공은 레미콘과 철근, 포장공은 아스콘을 주로 사용하였다. 레미콘은 346kgCO₂/m³, 철근은 400kgCO₂/ton, 아스콘은 10kgCO₂/ton이 발생하는 것으로 적용하였다. 〈부록 표 24〉는 급경사지 정비사업 중 재료에 의한 탄소배출량 산정결과이다.

〈부록 표 24〉 급경사지 정비사업 재료 사용에 의한 탄소배출량

공종	규격	단위	수량			수량 계	원단위 (kgCO ₂ /unit)	탄소배출량 (kgCO ₂)
			배수공	포장공	교통안전 시설공			
레미콘	25-21-12	m ³	203.9	.	.	203.9	346	70,544.21
	40-18-8	m ³	32.1	.	0.3	32.4	346	11,219.74
철근	D13	ton	10.180	.	.	10.180	400	4,071.80
	D29	ton	0.014	.	.	0.014	400	5.60
	소계	ton	.	.	.	.		-
	고재대	ton	.	.	.	.		-
아스콘	WC-2	ton	.	197.2	.	197.2	10	1,972.00
	BB-2	ton	.	43.7	.	43.7	10	437.00
계								88,250.35

경상남도 고성군 동산3지구 급경사지 붕괴위험지역 정비사업을 대상으로 사업 수행에 따른 탄소배출량을 산정하였다. 경상남도 고성군 동산3지구 급경사지 붕괴위험지역 정비사업 수행 시 91.5톤 CO₂가 발생하였으며, 이 중 토공을 위한 장비 사용에는 3.2톤 CO₂, 재료 사용에는 88.3톤 CO₂가 발생하였다. 이 중 레미콘 타설을 위해서는 81.8톤 CO₂, 철근에서는 4.1톤 CO₂이 발생하였다. 탄소배출량의 89.4%가 시멘트 및 레미콘 등 콘크리트 타설에서 발생하였으며, 강재 사용이 4.5%, 장비 사용이 3.5%를 차지하였다.

본 연구에서 대상으로 활용한 경상남도 고성군 동산3지구 급경사지 붕괴위험지역 정비사업은 용지보상비를 제외한 순수 시공비가 15억 8,900만 원이다. 추후 실시설계가 수립되지 않아 총투입 물량이 산정되어 있지 않은 다른 지역에서 자연재해저감종합계획의 급경사지 붕괴위험지역 정비사업으로 인한 탄소배출량을 산정하려면 시공비를 기준으로 탄소배출량을 산정할 것을 추천한다.

3 재난관리 부문 사업에 따른 탄소배출량 저감 방안

3.1 소하천 사업에 의한 탄소배출량 저감 방안

● 탄소흡수량 원단위 산정





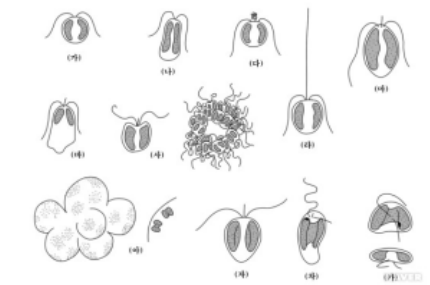
홍수기에 우수의 통수능이 저하될 수 있어 소하천 부지 내에 수목을 식재하는 것은 곤란하며, 이미 부지 내에 수목이 자라고 있다면 홍수기 전에 유수의 이동에 방해가 되지 않도록 제거해야 한다. 소하천 제방 마루 및 제내지측 사면에는 하천수가 흐르지 않는 공간이 있으나, 제방에 대형 수목을 식재할 경우 뿌리가 제방을 상하게 할 수 있기 때문에 제방안전의 측면에서 권장되지 않는다. 뿌리가 길게 자라지 않는 소형 수목은 식재할 수 있지만, 수목을 이용해 탄소흡수량을 평가하기에는 기존 연구에서 제시되는 수목들이 모두 대형 수목들이어서 적절하지 않다.

이에 본 과업에서는 이재근(2009)의 연구에서 제시된 수변식물에 의한 탄소흡수량과 수중 조류에 의한 탄소흡수량을 이용하여 소하천에서의 탄소흡수량 원단위를 제시하였다.

〈부록 표 25〉에 제시된 수중 해조류는 하천에서 살 수 없지만, 이재근(2009)의 연구에서는 유사한 수생식물이 살 것으로 가정하고, 해조류별로 대전광역시 내 하천에서의 CO₂ 흡수량을 제시한 바 있다. 본 과업에서는 식물성 플랑크톤을 포함한 각 해조류의 평균 CO₂ 흡수율을 사용하였으며, 4,640gCO₂/m²·yr로 산정하였다.

갈대, 매자기, 애기부들, 노랑꽃창포, 골풀, 달뿌리풀, 미국가막사리, 개구리밥, 검정말, 봉어마름, 좁개구리밥, 마름 등 수변식물 12종의 단위면적당 건중량을 산정하였으나, 서식면적당 탄소 함량은 갈대, 애기부들, 달뿌리풀, 마름 등 수변식물 4종에 대해서만 산정되었다. 본 과업에서는 이 중 우리나라 소하천에서 가장 흔히 볼 수 있는 갈대를 사용하여 CO₂ 흡수율을 465gCO₂/m²·yr로 산정하였다. 대기 중 CO₂ 흡수량은 1,705gCO₂/m²·yr를 사용하였다.

〈부록 표 25〉 수중 해조류의 종류

구분	정의	사진
개도박	지누아릿과의 해조(海藻). 몸이 납작하며 선 모양의 짧은 줄기가 있다. 빛깔은 어두운 백색인데 녹색, 누런 녹색을 띠기도 한다. 연한 혁질(革質)이며 점질(粘質)이 많아 호료(糊料)로 이용된다. 한국의 남해안과 일본 등지에 분포한다.	
다시마	갈조류 다시맛과의 해조(海藻). 길이가 2~4m이고 몸이 누르스름한 갈색 또는 검은 갈색이며, 바탕이 두껍고 미끄럽다. 식용하고 아이오딘의 원료가 된다. 한해성 식물로 태평양 연안에 20여 종이 있다. 뿌리로 바위에 붙어서 사는데 제주, 거제도, 흑산도 등지에 분포한다.	
모자반	갈조류 모자반과의 해조(海藻). 몸은 뿌리, 줄기, 잎의 구분이 뚜렷하고, 1~3m 이상 자라는데 줄기 밑동의 헛뿌리로 바위에 붙어서 산다. 잎은 타원형으로 짙은 갈색이나 말리면 파래진다.	
대황	갈조류 다시맛과의 해조(海藻). 한 개의 원기둥 모양의 줄기 끝에 길쭉한 잎이 있고, 가을에서 겨울에 걸쳐 훌쭉주머니가 생긴다. 몸은 짙은 갈색이나 마르면 흑색으로 변한다. 다시마 대용으로 식용한다. 한국의 동해안과 일본 등지에 분포한다.	
식물 플랑크톤	물속에서 부유 생활을 하는 단세포 조류(藻類) 또는 다세포성 조류(藻類). 플랑크톤으로 되어 있으며 표층 가까이에 분포하여 광합성으로 영양 생성층을 형성한다.	

● 소하천 정비사업으로 인한 탄소배출 저감 시나리오

소하천정비종합계획에는 수목 및 수변식물 식재 계획이 없으며, 소하천 내 유지유량 등에 관한 계획도 수립된 것이 없다. 이에 소하천 정비사업으로 인한 수목 및 수변식물의 식재량 확인이 불가능하여 소하천 정비사업으로 인한 탄소배출 저감 및 흡수량은 시나리오를 수립하여 해당 시나리오별로 탄소흡수량을 산정하였다. 시작연도는 2022년으로 하였으며, 목표연도는 2030년과 2050년으로 설정하여 장기간(9년 및 29년)에 걸친 탄소흡수량을 산정하였다.

앞 절에서 소하천 내 조류 및 수변 식물에 의한 탄소흡수량 원단위를 산정하였다. 시나리오 1은 전체 하천부지 면적 대비 조류서식 및 수변식물 식재 면적 비율에 따른 탄소흡수량을 산정하였다.

소하천 2만 2,093개의 총 하천길이에 하폭을 곱해 전체 소하천 부지 면적을 산정하였다. 이때 하폭은 1만 1,947개의 샘플 소하천에서 측정한 분위별 평균 하폭을 기준으로 하였다. 평균 하폭 중 약 20%에는 조류가 서식하고, 또 1년 중 6개월만 서식하는 것으로 가정하였다. 평균 하폭 중 80%에는 수변식물이 서식하는 공간으로 가정하였다. 다만 전체 소하천의 70%에는 제방이 양쪽에 각각 4m씩 있는 것으로 가정하여 식생서식 하폭을 산정하였다.

〈부록 표 26〉 소하천 평균 하폭

(단위: %, m)

백분율	평균 하폭	조류서식 하폭	식생서식 하폭
10	49.4	9.9	45.1
20	27.4	5.5	27.5
30	21.2	4.2	22.5
40	17.4	3.5	19.5
50	14.8	3.0	17.5
60	12.7	2.5	15.8
70	10.9	2.2	14.3
80	9.5	1.9	13.2
90	7.8	1.6	11.8
100	5.4	1.1	9.9

총 하천길이 3,411만 8,274m를 곱해 산정한 결과 조류서식 면적은 총 120.45km²이고 식생서식 면적은 총 672.88km²인 것으로 나타났다. 조류서식 면적에는 모두 식물플랑크톤이 살고, 또 식생서식 면적에는 10~90%까지 갈대가 서식하는 것으로 가정하여 시나리오를 설정하였다.

전체 소하천 면적에 대해서 조류와 수변식물에 따른 CO₂ 흡수량을 알아보기 위하여 수변식물이 소하천의 면적 중 10~90%만큼 서식한다고 가정했을 때, 각각의 수생식물에 따른 CO₂ 흡수량을 산정하여 〈부록 표 27〉에 나타났다.

〈부록 표 27〉 식생 면적 비율 시나리오에 따른 탄소흡수량

(단위: %, 톤 CO₂)

식생면적 비율	2030년까지 탄소흡수량	2050년까지 탄소흡수량
10	3,547,593.6	11,431,134.9
20	4,580,121.4	14,758,168.8
30	5,612,649.1	18,085,202.7
40	6,645,176.9	21,412,236.7
50	7,677,704.7	24,739,270.6
60	8,710,232.4	28,066,304.6
70	9,742,760.2	31,393,338.5
80	10,775,288.0	34,720,372.4
90	11,807,815.8	38,047,406.4

분석한 결과 전체 소하천 정비사업 수행으로 발생하는 총 탄소배출량 115만 8,840.7톤 CO₂ 대비 2030년까지 탄소흡수량이 3배에서 10.2배까지 많은 것으로 나타났으며, 2050년까지는 사업 수행에 따른 탄소배출량을 최대 약 32배까지 식생을 통해 흡수할 수 있는 것으로 나타났다.

〈부록 표 28〉 소하천 정비사업 수행에 의한 배출량 대비 탄소흡수량 비율

(단위: %)

식생면적 비율	저감량 비율 (2030년까지)	저감량 비율 (2050년까지)
10	306.1	986.4
20	395.2	1,273.5
30	484.3	1,560.6
40	573.4	1,847.7
50	662.5	2,134.8
60	751.6	2,421.9
70	840.7	2,709.0
80	929.8	2,996.1
90	1,018.9	3,283.2

3.2. 그린 재난관리 Tool-kit의 개발 및 보급

● 국내외 재난관리 사업별 탄소저감량 산정 프로그램 현황

1) 시설물별 탄소배출량 산정 프로그램(국토해양부 등)

시설물별 탄소배출량 산정 프로그램은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 기준에 맞추어 제작된 국토해양부의 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인의 자재 및 에너지 사용량에 따라 온실가스 배출량을 추정하는 방법론을 준용하고있다. 건축물, 도로 시설물, 철도 시설물에 대해 생애주기(life cycle)를 계획 및 설계, 시공, 운용, 해체 및 재활용으로 나누어 전체 또는 일부에 대해 CO₂, CH₄, N₂O 등 다섯 가지의 온실가스를 IPCC 2006의 지구온난화잠재력(GWP)값을 적용하여 CO₂-e (CO₂ 당량)로 나타낸다. 시공 단계의 탄소배출량 산정은 공종별로 투입 자재량과 장비 사용에 따른 에너지 소비량을 기준으로 온실가스 배출량을 산정하며, 운용 단계의 탄소배출량 산정은 전력, 도시가스, 상수도, 기타 난방 에너지원의 사용량에 따른 각각의 탄소배출계수를 적용하였다. 해체 및 재활용 단계의 탄소배출량 산정은 폐기물의 재활용 및 최종처리에 사용되는 운송장비만을 분석범위로 하여 시공 단계에 준하여 산정한다. 세부 공종별 규격, 단위, 수량, 자재 등의 입력값이 다양하여 계산 폭이 넓어서 활용 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.

〈부록 그림 7〉 시설물별 탄소배출량 평가 프로그램



한국환경연구원에서는 도로수송, 상업, 공공, 가정, 폐기물과 흡수원 항목에서 사업대상지의 물량을 기입할 때 해당 에너지열량 환산계수, 국가고유 배출계수와 함께 탄소배출량(kgCO₂)을 계산할 수 있는 시스템을 개발하였다. 그러나 이 시스템은 적용 분야에 대한 다양성이 부족하여, 공종별 에너지 소비량과 CO₂ 배출량 산정이 불가능하다는 단점이 있다.

주요 부문별 온실가스 배출량 산정보조 엑셀 활용방법(첨부 3 관련)

본 Tool-kit은 에너지, 외부공급, 매립, 생물학적 처리, 소각, 하수, 폐수에 따른 온실가스 배출량을 산정할 수 있고, 사업장 유형과 산정 등급에 따른 배출량을 정확하게 계산할 수 있다. 다만 사업장에 적용하기 위해 개발된 Tool로 공종별, 건설재료 등 시공에 따른 배출량을 확인하는 것은 불가능하다.

〈부록 그림 9〉 폐기물 부문 온실가스 배출량 및 에너지 소비량 계산 Tool

Ver. 1.42 (2011.05.24)

온실가스·에너지 목표관리제 수행을 위한

폐기물 부문 온실가스 배출량 및 에너지 소비량 계산 Tool

1. 알람

- 가. 본 배출량 계산 파일은 저탄소 녹색성장 기본법 제42조 및 같은 법 시행령 제26조에 따른 폐기물 분야 관리업체의 명세서 작성 시 배출량 계산 참조용으로 작성되었습니다.
 나. 본 배출량 계산 파일은 환경부고시 제2011-29호(2011.3.16) "온실가스-에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침"의 배출량 산정방법론에 근거하고 있습니다.
 다. 본 파일은 원본 상태로의 배포, 사용만 가능하며, **상업적 목적의 배포는 금지합니다.**
 라. 본 파일을 사용하는 도중에 오류를 발견하거나, 파일을 수정/재가공 하고자 할 경우 온실가스목표팀(032-590-3454)로 연락 주시기 바랍니다.
 마. 본 파일의 수정에 따른 신규 버전 파일은 한국환경공단 홈페이지의 기후변화대응 자료실에서 내려 받으시기 바랍니다. **자료실바로가기**

2. 각 시트의 내용 (시트 이름을 클릭하면 해당 시트로 이동)

총괄·에너지및온실가스	: 각 시트의 내용을 총괄하여 전체 배출량 확인
가·에너지	: 에너지(연료) 사용에 의한 온실가스배출량 및 에너지 소비량 계산
나·외부공급	: 외부에서 공급받은 전력, 스팀의 사용에 의한 온실가스 배출량 및 에너지 소비량 계산
다·매립	: 고형폐기물 매립시설에서의 온실가스 배출량 계산
라·상물학적처리	: 고형폐기물의 상물학적처리(음식물폐기물 등)에서의 온실가스 배출량 계산
마·소각	: 폐기물의 소각처리에서의 온실가스배출량 계산
바·하수	: 하수처리시설에서의 온실가스배출량 계산
사·폐수	: 폐수처리시설에서의 온실가스배출량 계산
Parameter	: 배출량계산에 관여되는 배출계수, 발열량 등의 매개변수가 입력된 시트

3. 각 셀의 종류에 따른 작성요령

작 성	(선택 박스)	: 선택박스는 배출계수의 선택 등을 위하여 처리유형, 폐기물의 종류 등 선택을 하는 부분
입 력	직접입력 (활동자료 입력)	: 노란색 셀 은 사업장에서 확보한 활동자료(예. 폐기물처리량, 매립회수량 등)를 직접 입력하는 부분
	선택 (활동자료 선택)	: 사업장 고유 배출계수가 있는 경우 직접 입력할 수 있도록 배출계수 입력부분이 노란색 셀 로 된 부분도 있음
		: 주황색 셀 은 직접 입력하지 않고 목록에서 선택을 해야 하는 부분
자 동	배출계수 (배출계수)	: 하늘색 셀 은 해당 배출시설별 배출계수 또는 활동자료에 의한 계산값이 자동으로 입력되는 부분
입 력	배출량 (배출량및소비량)	: 연한 녹색 셀 은 입력된 활동자료와 배출계수를 이용하여 각각의 온실가스 배출량과 에너지 소비량이 산정된 부분
적	입력방법 (설명)	: 보라색 셀 은 각 시트별로 배출량 산정을 위해 입력/선택해야 하는 순서를 설명한 부분

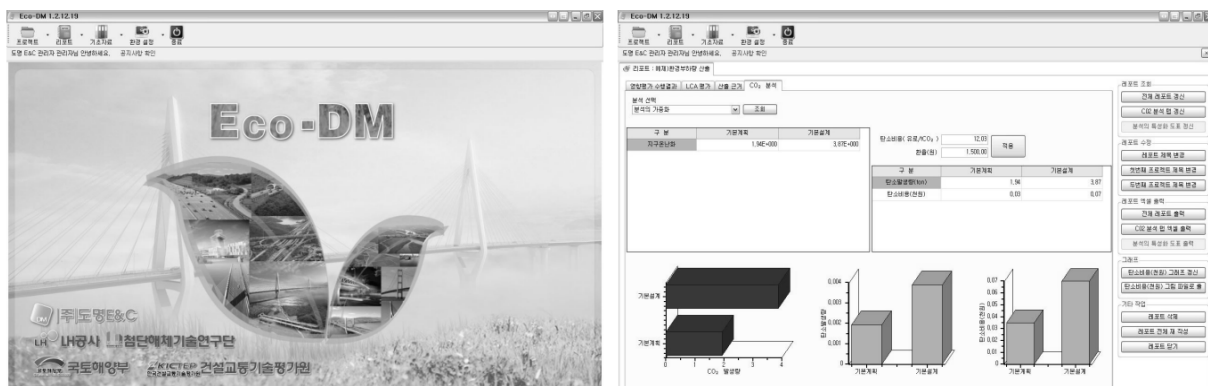


한국환경공단 기후대기본부 기후변화대응처 온실가스목표팀

4) Eco-DM 프로그램(Lee, 2012)

개별적산방식과 산업연관방식을 조합하여 LCA(Life-Cycle Analysis, 전과정평가) 방법으로 환경평가를 수행하기 위해 개발된 프로그램이다. 공사명칭, 기간, 위치, 규모, 개요 등 기본 자료를 입력하면 프로젝트가 시작되고 그다음으로 소요되는 공종, 장비, 자재를 선택하고 각 사용량을 입력하면 프로젝트가 완료된다. 각 DB를 선택할 때에는 초기 건설 단계, 유지-운영 단계, 해체·폐지 단계 등 사용자의 옵션에 따라 추가할 수 있도록 설계되어 있으며, 각 결과를 그래프로 시각화할 수 있다.

〈부록 그림 10〉 Eco-DM 인터페이스

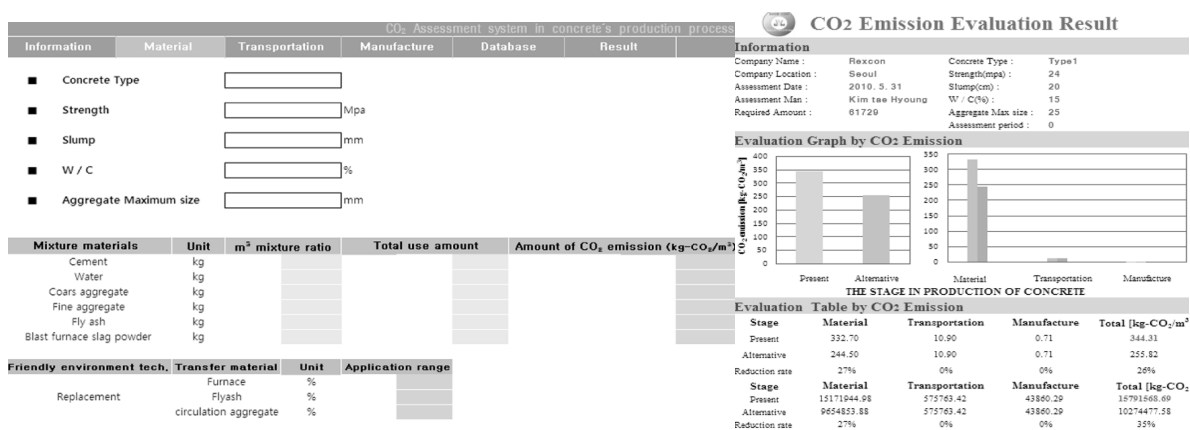


자료: Lee(2012).

5) 콘크리트 CO₂ 배출량 평가 프로그램(Kim, 2010)

Excel 기반 프로그램으로 레미콘 생산업체의 기본 정보, 평가일시, 연간 생산량 등을 분석하여 단위 체적당 제조 시 투입되는 각각의 에너지 사용량을 산출할 수 있다. 콘크리트 종류, 호칭 강도, 필요량, 슬럼프, W/C 등 단위 체적의 재료 배합을 입력할 수 있으며, 탄소발생량 계산의 분야가 한정적이라는 단점이 있다.

〈부록 그림 11〉 콘크리트 CO₂ 배출량 평가 프로그램 인터페이스



6) 골조 공사 탄소배출량 산정모델(Lee, 2019)

건축물 시공 단계에서 발생하는 탄소배출량을 변수들과 작업 간의 연관성을 바탕으로 산정하는 모델이다. 탄소배출량 산정을 위해 공장에서의 철근 생산, 트럭을 이용한 운송 및 레미콘을 이용한 콘크리트의 운송, 크레인의 운송, 건설현장에서의 철근, 거푸집 설치, 콘크리트 타설, 거푸집 해체로 세분화하고 있으며, 표준품셈에 맞춘 입력값에 따라 작성하게 되어 활용도가 높다.

7) Road Construction Emission Model(RCEM)

Sacramento Metropolitan Air Quality Management District에서 개발된 Road Construction Emission Model(RCEM)은 장비의 사용량에 따라 온실가스 배출량을 추정하는 방법론을 준용하고 있다. 도로공사의 시공 단계를 '지반개량 → 터파기/되메우기 → 배수/기타작업 → 포장'의 4단계로 구분하여 사용된 장비의 대수에 따라 CO₂, CO, NO_x 등 온실가스 6종을 단계별로 산정할 수 있다. 단계별 온실가스 배출량 산정은 프로젝트 종류, 건설 시작연도, 도로연장, 면적 등 필수 입력요소 열두 가지를 기준으로 단계별 공사기간, 규모에 따른 장비의 종류와 사용 대수를 경험에 의해 추정하여 대략적인 온실가스 배출량을 자동으로 계산해 준다.

〈부록 그림 12〉 Road Construction Emission Model(2007)

Welcome to the Road Construction Emissions Model, Version 8.1.0 User Instructions

This spreadsheet system contains the following individual worksheets:

- 1 This worksheet of User Instructions
- 2 Updates
- 3 Emission Estimates
- 4 Data Entry
- 5 Non-default Off-road Equipment
- 6 EMFAC2014
- 7 On-road Mitigation EF
- 8 OFFROAD Convert
- 9 Off-road Tier 4 EF
- 10 OFFROAD HP & LF
- 11 OFFROAD EF
- 12 x-ref



The Emission Estimates worksheet calculates a project's emissions in pounds per day (and tons) by project phase and tons over the entire construction period. The worksheet can be used to estimate emissions for both vehicle exhaust and fugitive dust. The methodology used to estimate fugitive dust emissions is a simplified methodology involving estimates of the maximum area (acreage) of land disturbed daily. Detailed fugitive dust emission estimates associated with individual materials handling operations and/or activity/vehicle types cannot be conducted with this version of the model.

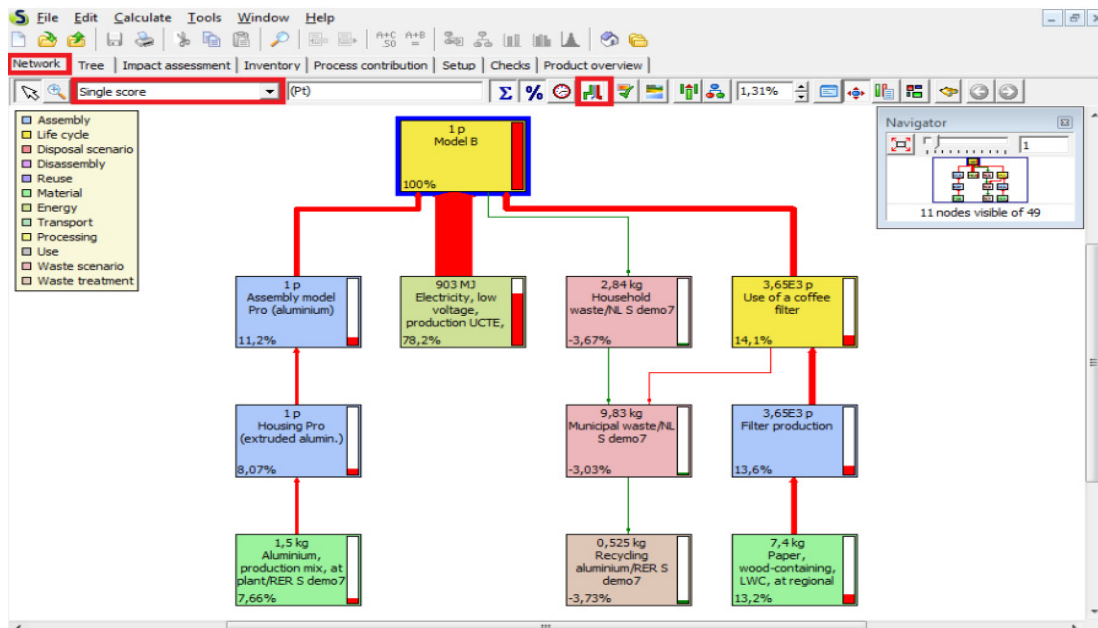
Light Duty Truck																
Worker Commute Truck Emissions (Emfac2014 - web 1.0.7, weighted LDT1 and LDT2 emission factor based on VMT and trips)																
Year	ROG	Weighted - Grubbing	Weighted - Grading	Weighted - Drainage	Weighted - Paving	CO	Weighted - Grubbing	Weighted - Grading	Weighted - Drainage	Weighted - Paving	NOx	Weighted - Grubbing	Weighted - Grading	Weighted - Drainage	Weighted - Paving	PM10
2014	0.0642	-	-	-	-	2.2203	-	-	-	-	0.2535	-	-	-	-	0.0026
2015	0.0542	-	-	-	-	1.9680	-	-	-	-	0.2228	-	-	-	-	0.0024
2016	0.0451	-	-	-	-	1.7328	-	-	-	-	0.1945	-	-	-	-	0.0022
2017	0.0362	-	-	-	-	1.5134	-	-	-	-	0.1685	-	-	-	-	0.0021
2018	0.0290	-	-	-	-	1.3289	-	-	-	-	0.1463	-	-	-	-	0.0020
2019	0.0242	-	-	-	-	1.1506	-	-	-	-	0.1280	-	-	-	-	0.0020
2020	0.0210	-	-	-	-	1.0764	-	-	-	-	0.1134	-	-	-	-	0.0020
2021	0.0190	-	-	-	-	0.9903	-	-	-	-	0.1016	-	-	-	-	0.0019
2022	0.0172	-	-	-	-	0.9178	-	-	-	-	0.0915	-	-	-	-	0.0019
2023	0.0156	-	-	-	-	0.8529	-	-	-	-	0.0825	-	-	-	-	0.0019
2024	0.0142	-	-	-	-	0.8010	-	-	-	-	0.0748	-	-	-	-	0.0018
2025	0.0130	-	-	-	-	0.7506	-	-	-	-	0.0681	-	-	-	-	0.0018
Total		-	-	-	-		-	-	-	-		-	-	-	-	

자료: 저자 작성.

8) SimaPro(Europe)(PRé Sustainability BV)

다양하고 많은 LCI DB를 제공하며 꾸준히 업데이트되고 있다. 설계 단계에서 고려되는 의사결정 톨로서 LCA에서 발생하는 탄소배출량을 산정하며, 건축물과 관련하여 17개 모듈을 포함하고 있다.

〈부록 그림 13〉 SimaPro 인터페이스

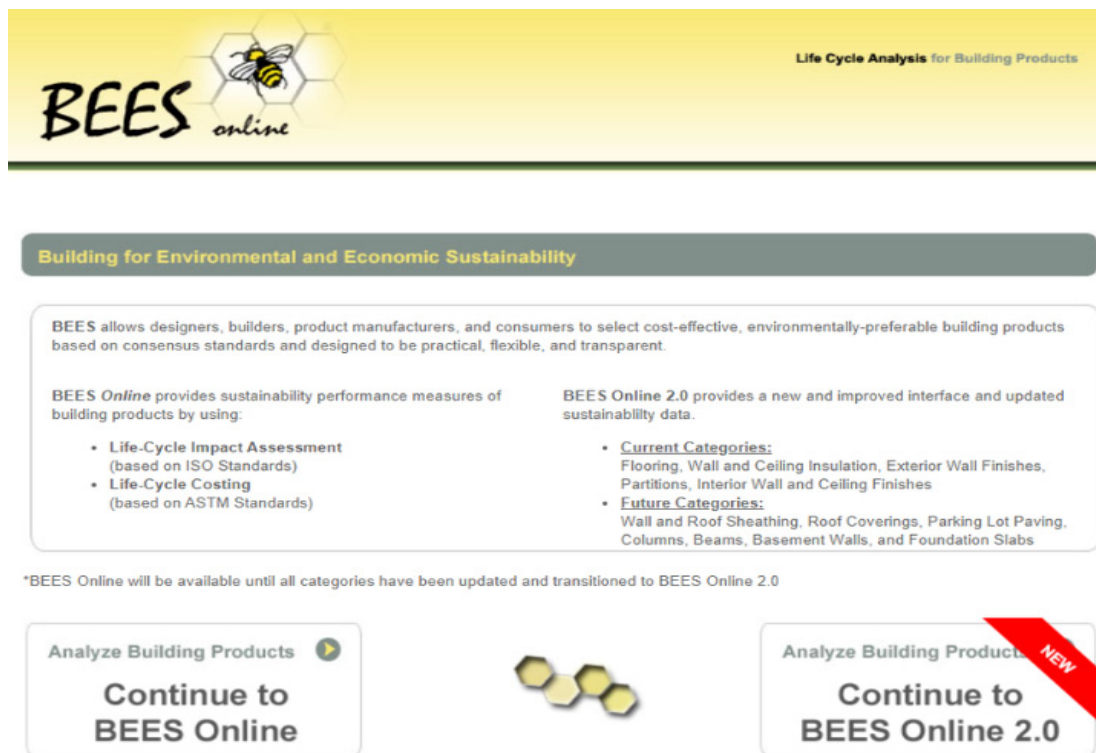


자료: <https://simapro.com>

9) BEES(U.S)(NIST)

BEES(Building for Environmental and Economic Sustainability)는 비용효율적이며 친환경적인 건축 제품을 선택하기 위해 제공되는 프로그램이다. 재료, 제조, 운송, 설치, 사용 등 다양한 분야에서 발생하는 탄소배출량 등의 환경성능 측정이 가능하며, 국내 고유 배출계수가 부재하여 국내에 적용하는 것은 곤란하다.

〈부록 그림 14〉 BEES



자료: NIST, "BEES", 검색일: 2022.09.15.

10) 탄소배출량 산정 프로그램별 비교

국내외에서 연구된 탄소배출량 산정 프로그램 및 Tool-kit를 조사한 결과 시설물별 탄소발생량, 공중 및 건설재료별 탄소발생량을 계산하는 프로그램은 다수이지만 국내에서 개발된 프로그램의 경우는 계산된 탄소배출량에 따른 시각화 자료가 부족하고, 국외 프로그램의 경우는 국내에 필요한 국가고유계수, 시공 등급 등이 적용되지 않아 국내에서 사용하기에 적절하지 못한 것으로 나타났다.

그러나 각 탄소배출량 산정 프로그램의 특징을 분석한 결과, '1) 시설물별 탄소배출량 평가 프로그램'과 '7) RCEM 프로그램'이 평가항목 다양성과 Microsoft Excel VBM 기반 프로그래밍 언어를 사용하여 개발되고, 건설장비와 건설자재 및 에너지 사용에 따른 탄소배출량을 사용하여 건설산업의 온실가스 배출량이 추정되며, 탄소발생 원단위에 대한 국가고유계수 등의 반영이 가능하여 높은 호환성을 보일 것으로 판단된다.

그 외 프로그램은 프로그래밍 언어와 적용 분야 측면에서는 우수하나, 분야가 특정분야로 한정되어 있어 확장성이 낮은 것으로 분석되었다.

〈부록 표 29〉 탄소배출량 산정 프로그램 비교

항목	접근성	호환성	프로그래밍 언어	시각화	분야	개발 연도
시설물별 탄소배출량 평가 프로그램	○	○	Excel VBA	△	건설 분야 LC (재료 및 생애주기)	2006
주요 부문별 온실가스 배출량 산정 보조	○	○	Excel VBA	△	도로수송, 상업, 폐기물	2022
폐기물 부문 온실가스 배출량 및 에너지 소비량 계산 Tool	○	△	Excel VBA	△	에너지, 매립, 소각 등	2011
Eco-DM	△	○	Excel VBA	○	공중, 장비, 자재 등	2012
콘크리트 CO ₂ 배출량 평가 프로그램	△	△	Excel VBA	○	콘크리트	2010
골조 공사 탄소배출량 산정모델	△	△	Vensim (System Dynamics model)	△	골조 공사	2019
RCEM	○	○	Excel VBA	△	도로공사 (장비 중심)	2007
SimaPro	△	△	개별 Software	○	건축물	2021
BEES	○	○	개별 Software	○	재료, 제조 등	2020

물 분야 2050 탄소중립 이행을 위한 로드맵 구축 연구

발 행 일 2023년 4월

발 행 인 국가물관리위원회 위원장 배덕효

발 행 처 국가물관리위원회

주 소 세종특별자치시 도움3로 19

홈 페이지 <http://www.watercommission.go.kr>

디자인·인쇄 한결엠 02-6952-0551

 중증장애인생산물생산시설

 사회적협동조합

 사회적기업