WP 21-25

온실가스 저감을 위한 하천 및 수변공간 관리방안 연구

김준성 국토연구원 부연구위원 (kimjs@krihs.re.kr)

KRIHS 국토연구원

차례

01 연구배경 및 목적

■ 지속된 지구 온난화에 따른 기후재해 심각성 고조

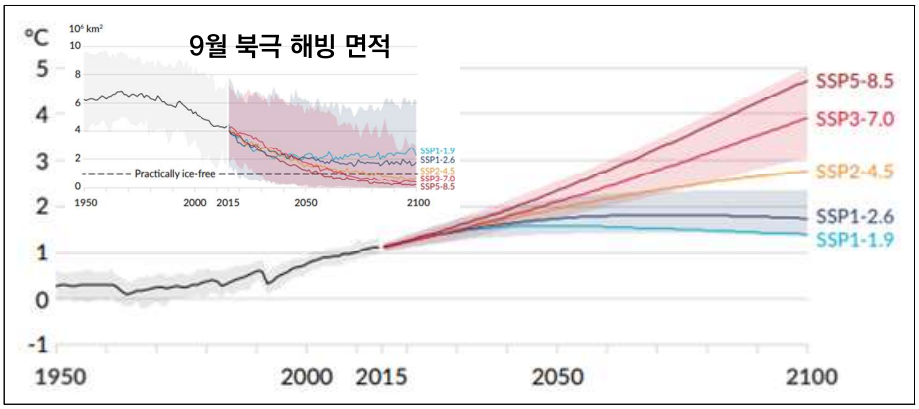
- 2021년 7월 중순 100년 만의 기록적인 폭우로 인해 독일, 벨기에를 포함한 서유럽 홍수로 200명 이상의 사망·실종자가 발생
- 우리나라는 2018년 역대 가장 긴 장마에 따른 전국적 홍수피해로 인해 총 3차례에 걸쳐 38개 시·군·구, 36개 읍·면·동이 집중호우 특별재난지역으로 선포됨(이승수 외 2020)
  - 2050년 홍수량은 현재보다 11.8% 증가하고, 100년 강우 빈도에 맞게 설계된 우리나라 댐과 제방이 미래에는 4년에 한 번 범람할 것으로 전망됨(환경부 2020a)
- 전 세계적으로 기존에 경험하지 못한 이상기후로 인해 사회가 기구축한 방어 수준을 넘어서는 재해의 발생빈도 증가

■ 2021년 8월 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 제6차 평가보고서 발행(IPCC 2021)

- 최저·저배출 시나리오(SSP1-1.9[1], SSP1-2.6), 최고배출 시나리오(SSP5-8.5) 등을 포함하는 5개 기후변화 시나리오에 대한 미래 기후변화를 전망
- 2021~2040년 중 1.5℃ 지구온난화를 넘어설 가능성은 온실가스를 가장 적게 배출하는 시나리오(SSP1)일 때도 50% 이상으로 나타남
- 모든 온실가스 배출 시나리오에서 2050년 이전 최소 한번은 9월 중 북극 해빙이 모두 녹을 가능성이 있는 것으로 전망됨
- 그럼에도 불구하고 가장 적게 배출하는 시나리오일 때 21세기 말 전 지구 지표면 온도가 1.5℃ 이하로 복구될 가능성이 상대적으로 높음(〈그림 1〉 참조)
- 따라서 온실가스 배출로 인한 전 지구 지표면 온도 상승의 억제와 기후위기 적응을 위해 전 지구 탄소중립 달성은 필요조건

1) SSP는 Shared Socioeconomic Pathyways의 약자로 'IPCC 6차 평가보고서' 작성을 위해 각국의 기후변화 예측모델로 온실가스 감축 수준 및 기후변화 적응대책 수행 여부 등에 따라 미래 상회경제 구조가 어떻게 달라질 것인지 고려한 시나리오.

그림 1 IPCC 온실가스 배출 시나리오에 따른 1850~1900년 대비 전 지구 지표면 온도 및 9월 북극 해빙 면적 변화 전망



출처: IPCC 2021, 29의 그림을 발췌하여 저자 재구성.

■ 탄소중립 이행을 위한 전 세계적 합의

- 미국 민주당 2019년 2월 넷제로(net zero) 목표를 위한 그린뉴딜 결의안을 제출했고, 바이든 대통령은 2050년 탄소배출 순 제로 달성 목표 및 4년간 2조 달러 규모 그린뉴딜 공약 발표
- 중국 시진핑 주석 역시 2020년 9월 유엔총회에서 2060년 이전까지 탄소중립 달성을 선언했고, 일본은 '2050년 탄소중립'을 실현하기 위한 녹색성장전략(2020.12.25) 수립
- 대한민국 정부도 2050 대한민국 탄소중립 선언(2020.10.28.) 후 관계부처 합동의 '2050 탄소중립 추진전략(2020.12.07)'을 발표하고, 2050 탄소중립을 위한 움직임 가속화
  - '2050 탄소중립 추진전략'에 따라 2021년 말까지 2030년 온실가스 감축 목표(안) 마련 계획으로 하천 및 수자원 분야 대응이 필요

■ 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(이하 탄소중립기본법) 제정

- 2021년 9월 탄소중립기본법 제정을 통해 한국은 세계에서 14번째로 '2050 탄소중립' 비전 이행을 위한 법적 기반을 마련
- 기존의 저탄소 녹색성장 기본법을 대체하는 법률로서 온실가스 감축을 위한 시책이 신법 제정의 배경이지만, '기후위기 적응'과 관련 내용이 반영되어 있음[2)]

2) 탄소중립기본법 제2조 제11호: '기후위기 적응'이란 기후위기에 대한 취약성을 줄이고 기후위기로 인한 건강피해와 자연재해에 대한 적응역량과 회복력을 높이는 등 현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 예상되는 기후위기의 파급효과와 영향을 최소화하거나 유익한 기회로 촉진하는 모든 활동.

- 온실가스 감축목표 달성을 위한 최상위법으로서 정부의 기후변화 대응을 위한 4가지 시책(△온실가스 감축, △기후위기 적응, △정의로운 전환, △녹색성장 등)을 망라하도록 입법화

■ 수자원·국토 분야 탄소중립 이행전략 마련 필요성 증대

- 탄소중립기본법 제6장에서 물관리와 국토 부문 적응에 대한 부문별 시책을 명시
  - 물관리 부문(제43조)에서 기후위기 대응을 위해 안정적인 수자원 확보, 수생태계 보전·관리와 수질개선, 물순환 체계 정비, 수해 예방, 하천 보전·복원 등을 고려하도록 하고 있음
  - 국토 부문(제44조)에서 국토종합계획, 도시·군기본계획 등의 계획을 수립·시행 시 기후위기 대응에 관한 사항을 반영하게 했으며, 온실가스 감축, 산림·녹지 확충, 생태축 보전과 생태계 복원, 인프라의 친환경적 건설·전환, 국토 회복력 등에 대한 고려를 강조
- 환경부 등 관계부처 물 분야 탄소중립 이행계획 수립
  - 2021년 3월에 수립된 2021 환경부 탄소중립 이행계획은 세부과제 주요내용으로 온실가스 흡수원 관리를 명시하고 있으며, 자연기반해법(Nature-based Solution: NBS)을 통한 수변지역 탄소흡수원 확대 및 하천 생태계 복원을 강조
  - 제1차 국가물관리기본계획 역시 물 분야 탄소중립 이행에 따른 기후위기 대응책으로 수변생태벨트, 생태마을 조성 등 온실가스 흡수원 확충방안을 포함하고, 하천과 주변 토지를 연계한 수변 완충녹지(Green buffer zone) 조성의 필요성을 명시
- 하천 및 수변공간 온실가스 흡·배출 현황 통계자료 부족
  - 폐기물 부문에 하·폐수처리(2018년 기준 174만tCO_2eq), 농업 분야의 벼재배(2018년 기준 629만tCO_2eq)로부터 발생되는 온실가스 배출량이 통계자료로 발표되고 있으나(환경부 2020b), 하천 및 수변공간의 온실가스 흡·배출량은 따로 산정되고 있지 않음

■ 기존 국내 학술연구는 수변공간 수목 식재에 따른 온실가스 흡수 효과에만 집중

- 주요 연구들은 4대강 유역에 조성된 수변녹지를 대상으로 향후 연간 탄소흡수량 변화, 탄소저장량 등을 추정하였고(조현길 외 2013; 조현길·박혜미 2015, 이종문 외 2019), 자연수변림 구조와 생장환경 분석을 바탕으로 수변녹지의 효율적 조성을 위한 생태식재 모델을 제안한 바 있음(송희용 외 2011)
- 일부 연구에서 수변공간의 탄소저장 및 수질개선 기능을 중점으로 적정 수변 폭 산정 등 완충녹지 설계방법을 제시한 바 있음(김보라·성기준 2010)
- 그러나 온실가스 흡수 및 수질개선 효과 외에 물순환, 홍수방어, 생태서식처 제공 등 하천의 본연적인 이·치수, 환경, 생태 기능에 미치는 영향에 대한 종합적인 검토가 미흡

- 또한, 하천의 온실가스 농도가 대기 중 농도의 약 4.5배 이상으로 보고된 바 있음에도 (Keegan 2021), 기존 국내 연구들은 하천공간의 온실가스 흡수 잠재량에만 역점을 두고 있어 배출 잠재량에 대한 고려가 부족한 실정

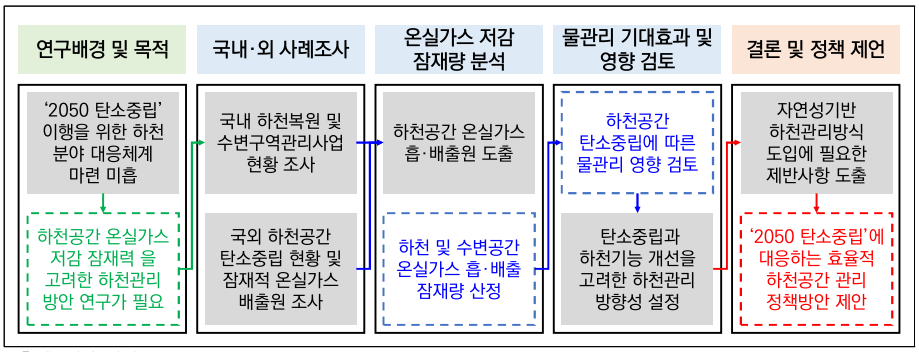
■ 하천의 이·치수, 환경, 생태 기능을 고려한 다면적 탄소중립 전략 마련 필요

- 수변녹지의 효율적 조성을 위해 비점오염원 저감 기능 강화, 하천 흐름 및 하상 구조의 안정화, 하천 서식지와 식생 회복 등에 대한 종합적 검토가 필요(최지용 2002)
- 상류 지역 완충녹지는 저류지로서의 역할을 제공하여 홍수 부담이 가중되는 하류 지역 홍수위를 저하하는 등의 홍수피해 저감 효과 기대 가능(이상은·김준성 2021)
- 탄소중립에 따른 생태계, 물·환경, 방재 등 물관리 영향 검토에 대한 법률적 근거 존재
  - 탄소중립기본법 제37조 2항은 기후위기 적응 시책으로 생태계, 생물다양성, 대기, 물환경, 보건, 농림·산림, 방재 등에 미치는 영향과 취약성, 위험 및 사회적·경제적 파급효과에 대한 정보관리체계 구축 및 운영에 대한 정부 의무를 명시

■ 연구 목적

- 이 페이퍼에서는 하천 및 수변공간의 온실가스 흡·배출 현황 및 전망을 분석하고, 아울러 온실가스 저감효과 외에 하천기능 유지 및 개선을 고려한 하천공간 관리 정책방안을 제시하고자 함
  - 첫째, 국내·외 현황조사를 통한 하천공간 탄소중립 시사점 도출
  - 둘째, 하천 및 수변공간의 온실가스 흡·배출 잠재량 추정
  - 셋째, 하천공간 탄소중립에 따른 물관리 기대효과 검토
  - 넷째, 온실가스 저감 및 물관리 기대효과 고려한 하천공간 탄소중립 정책 제언

그림 2 연구의 흐름도



출처: 저자 작성.

02 탄소중립 관련 하천관리 현황 및 시사점

1) 국내 생태하천복원 및 수변구역관리사업 경과

■ 도시하천복원사업 추진을 통한 탄소흡수원 면적 확대 사례

- 서울시는 중랑천, 안양천, 양재천 등 도심 주요 하천변(18개소)에 10만 그루의 수목을 식재하는 등 지난 14년간(2006~2018년) 약 686억 원 규모의 하천생태복원 및 녹화사업을 통해 약 2.17㎢ 상당의 수변 녹지공간을 조성하여 탄소흡수원 면적 확대(서울특별시 홈페이지 2019)
  - 수변부는 초본 식재, 넓은 둔치는 숲으로 조성하고 제방사면에는 관목, 교목을 중심으로 식재하는 등 하천과 제방 본연의 치수 기능을 저해하지 않기 위해 노력
  - 미세먼지 흡착효과가 높은 수종을 도입하여 미세먼지 저감에 기여하고, 하천변 산책로나 자전거길 주변에는 그늘나무를 식재하여 주민들에게 쾌적한 친수공간을 조성
- 환경부는 댐 저수구역 37곳(다목적댐 20개, 용수댐 14개, 홍수조절댐 3개)을 대상으로 생물 서식처 및 탄소흡수원 확대를 위한 댐 저수구역 생태계 복원사업을 추진(환경부 2021)
  - 임하댐 저수구역(송강리 일원 약 0.14㎢) 시범사업을 시작으로 무단 경작, 서식지 훼손 등으로 교란된 댐 저수구역의 생태계를 복원 및 관리

■ 수변구역 지정 제도 운영 현황

- 수변구역이란 상수원 수질을 보전하기 위하여 상수원으로 이용되는 댐과 그 댐 상류 지역의 일정한 구역을 법정구역으로 지정하여 오염원의 신규 입지를 규제하는 제도
  - 수변구역은 녹지를 조성하여 강우유출을 통해 주거지역, 상업지역, 농경지, 지류 등에 축적된 오염물질이 직접 하천에 유입되기 전에 수변녹지가 완충(buffer) 작용을 하여 오염물질을 자연 정화하는 등 하천 유입수질 개선을 도모
  - 지정 대상 지역과 지정 범위는 4대강 「수계법」에 따라 상이하며(〈표 1〉 참조), 상수원 보호구역, 개발제한구역, 군사시설 보호구역, 하수처리구역, 국토계획법 제6조 제1호에 해당하는 도시지역 등은 수변구역 지정에서 제외

표 1 4대강 수계별 수변구역 지정 대상 및 범위

구분	지정 대상 및 범위	
	대상 호소 및 하천	지정 범위(너비 기준)
한강	팔당호, 남한강, 북한강, 경안천	특별 대책지역 내에는 당해 하천 및 호소 경계로부터 양안 1㎞, 특별대책지역 외에는 500m
낙동강	상수원댐 및 상수원댐 유입하천	하천 및 호소 경계로부터 양안 500m
금강	상수원댐, 금강본류, 금강본류 직접 유입하천	상수원댐과 특별대책지역 안은 금강 본류의 경계로부터 1km, 그 외 금강 본류는 500m, 금강 본류에 직접 유입되는 하천은 300m
영산강·섬진강	주암호, 동복호, 상사호, 수어호, 상수원댐, 상수원댐 유입하천	하천 및 호소 경계로부터 양안 500m

출처: 법제처(https://www.moleg.go.kr, 2021년 11월 13일 검색) 정보를 바탕으로 저자 작성.

- 관계 중앙행정기관 및 해당 지방자치단체의 공무원, 전문가, 주민 대표 등으로 조사반을 구성하여 실태조사 후 관할 광역시장 및 도지사의 협의를 거쳐 환경부 장관이 지정 고시
- 가장 최근 수립된 제3차 수변구역관리기본계획(2019~2023년)상 4대강 수계의 수변구역 총 면적은 약 1,194㎢이며, 금강(370㎢), 낙동강(338㎢), 영산강·섬진강(299㎢), 한강(187㎢) 순으로 크게 나타남

표 2 4대강 유역면적, 수변구역 면적, 유역면적 대 수변구역 면적 비 및 토지매수 면적(1999~2020년)

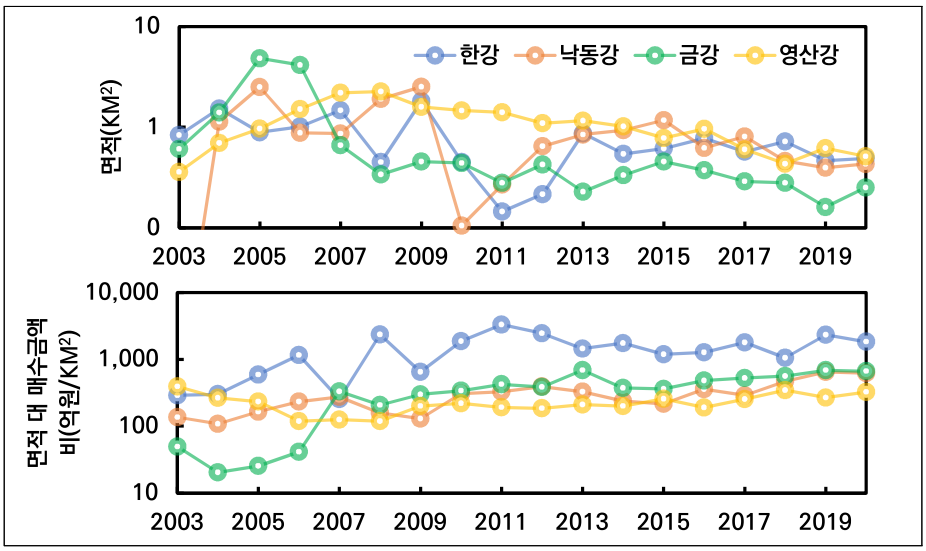
구분	한강	낙동강	금강	영산강·섬진강
유역면적(㎢)	35,770	23,384	9,900	7,695
수변구역 면적(㎢)	187	338	370	299
유역면적 대 수변구역 면적 비(%)	0.52	1.45	3.74	3.89
토지매수 면적(㎢)	15.3	16.5	15.9	19.6

출처: 환경부 2020c 자료를 바탕으로 저자 작성.

■ 4대강 수계관리기금 및 토지매수사업 운영을 통한 수변구역 확대 지정

- 수계관리기금은 최초로 1999년 8월 한강수계에 설치됐고, 2002년 7월 수계관리기금이 낙동강, 금강, 영산강·섬진강 수계에 추가 설치되어 2003년 이후 수질개선 및 주민지원사업이 4대강 수계 전체에 걸쳐 시행
  - 2003년까지는 4대강 수계기금은 주민지원사업, 토지매수, 환경기초시설 설치사업, 환경기초시설 운영 등에 활용됐고, 2004년부터 수질개선지원사업과 유역구성원의 적극적인 참여와 협력을 유도하기 위해 주민지원사업 등으로 확대 적용
- 수계관리기금 설치 이후 2020년까지 약 67.2㎢의 토지가 매수됐으며, 여기서 수변구역의 매수 면적은 약 42.3㎢로 전체 면적의 약 63%에 해당하고 하천 1㎞ 이내 매수토지가 전체 매수토지의 91%를 차지
  - 수계별 매수토지 면적의 크기는 영산강·섬진강(19.6㎢), 낙동강(16.5㎢), 금강(15.9㎢), 한강(15.3㎢) 순으로 집계됨(2020.12 기준)
  - 2000년대 중후반까지 4대강 수계 연 매수토지 총 면적이 5㎢ 이상을 유지하였으나, 2010년을 기점으로 50% 이상 급격히 감소하여 2018년 이후 해당 수치가 2㎢ 이하로 나타나는 등 꾸준한 하락세를 보이고 있음(<그림 3> 참조)

그림 3 2003~2020년 4대강 수계별 매수토지 면적(위) 및 토지면적 대 매수금액 비용(아래) 변화



출처: 환경부 2020c 자료를 이용하여 저자 작성.

■ 2021년 4대강 수계관리기금 수변구역관리사업 투자 현황

- 한강수계관리기금 예산은 6,589억 원으로 수질 오염원 제거 등 사전 예방적 수질관리 정책의 일환으로 토지매수 및 수변구역관리사업에 1,093억 원을 책정하고 있으며, 환경기초시설 설치·운영 사업에 예산의 39.4%를 계획하고 있음
- 낙동강 수계는 2,641억 원의 관리기금 중 483억 원을 토지매수 및 수변구역관리사업 및 완충저류시설 운영지원에 투자
  - 수질문제가 심각한 낙동강 특성상 상수원 상류지역 수질개선을 위한 환경기초시설 설치·운영 사업에 예산의 50% 이상인 1,551억 원을 반영한 것이 특징임
- 금강수계관리기금의 경우 1,566억 원 중 247억 원을 상수원관리지역의 토지매수 및 매수토지에 대한 수변녹지조성에 투자하고 있으며, 한강 및 낙동강과 유사하게 사업항목 중 가장 많은 30% 이상의 예산을 환경기초시설 설치·운영 사업에 편성하고 있음
- 영산강·섬진강 수계는 기금 총액인 1,176억 원의 약 30%에 해당하는 350억 원을 토지매수 및 녹지조성사업 계획에 반영했고, 이는 사업 부문별 예산 최대치에 해당함

표 3 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%)

출처: 기획재정부 2021 자료를 바탕으로 저자 작성.

- 2000년대 중반 이후 매수토지 면적이 감소하는 동안 4대강 평균 토지면적 대 매수금액 비는 지속적으로 상승하여 2003~2010년 평균치와 비교했을 때 2019, 2020년 해당 수치가 2배 이상 높은 것으로 나타남(〈그림 3〉 참조)
  - 특히, 낙동강과 금강 수계의 경우 최근 5년 가파른 상승폭과 함께 3~4배 이상 높은 수치에 도달

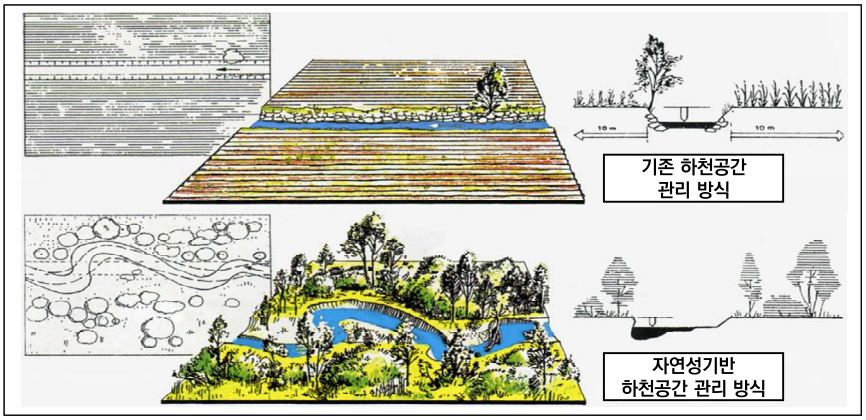
2) 국외 하천공간 관리 정책 현황 및 사례

■ 하천공간 자연성 회복에 기초한 하천관리방안의 도입

- 유럽·미국·일본 등 물관리 선진국에서는 기후변화, 도시화 등의 외부 여건 변화에 따른 기후재해 대응 및 하천생태 복원 차원으로 자연성 기반 하천복원 및 관리 기술을 적극 활용하도록 법령, 지침, 국가계획 등에 명문화(박진원 2017)
  - (유럽) 독일의 경우 1996년 개정된 '연방수자원법'에 따라 하천을 보존 대상으로 간주하고 있고 영국은 1995년 제정된 '환경법'에 의해 하안 및 범람원 복원하는 자연형 하천계획 개념을 도입했으며, 2000년 EU 물관리 기본지침(EU Water Framework Directive)[3] 이후 유럽 전체 하천유역에서 생태 및 하천유역 복원, 수질개선 등을 위한 프로그램을 적극 추진
  - (일본) 1980년대 이후 '다자연형하천공법'을 홍수터 복원사업에 활용하여 치수능력 유지 및 증진과 동시에 자연환경의 보전·재생·창출 효과를 도모하고 있으며, 아울러 친환경에 대한 사회적 요구와 하천환경의 정비 및 보전에 대한 필요성을 인식하여 1997년에 '하천법'을 개정했고 이에 근거하여 하천환경관리와 관련된 정책 및 제도를 수립 및 시행
  - (미국) 1990년 '수자원개발법' 제정과 1990년대 '하천복원공법'의 정립 등을 바탕으로 하천유역의 보전 및 복원 정책을 강화하고 있으며, 미시시피강 사례를 중심으로 홍수터 복원사업의 법·제도화, 기술 지침과 연계한 기후변화 대응 및 하천생태 복원사업을 추진
- 댐, 제방, 하도정비 등 기존 구조물적 홍수방어 방식은 발생빈도가 낮은 극한 홍수사상 대응에 있어 한계점을 노출하고 있어, 자연성 기반 하천공간 관리 및 계획 등 비구조물적 대책에 기반한 기후변화 대응력 강화를 강조(김규호 2019)
  - 자연성 기반 하천관리는 과도한 하도정비로 인해 직강화되고 제방으로 구분된 하천공간의 횡적 연결성을 개선하고, 홍수 위험감소와 더불어 생태 및 수질 건강성 회복, 온실가스 흡수효과 등 다기능성이 기존 관리방식과 구분되는 큰 장점(〈그림 4〉 참조)을 가짐
  - 네덜란드 'Room for the River'는 대표적 자연성 기반 하천관리 정책으로서 구조물과 하도정비 중심의 홍수방어 의존도를 낮추고, 제방을 후퇴시켜 친환경 홍수터를 조성하는 등 하천의 횡적공간 확보를 통해 생태연결성 강화와 동시에 홍수 취약성을 줄여 사회가 홍수와 공존할 수 있도록 하는 기후변화 대응 전략

3) EU 물관리 기본지침(EU Water Framework Directive) 도입은 수자원의 효과적이고 지속가능한 활용을 위해 물환경의 모든 측면을 이해 및 통합하는 것에 역점을 두어 유럽 물 관리의 새 시대를 가져오는 것을 목표로 함(Teodosiu et al. 2003).

그림 4 기존 하도정비 중심 하천관리와 자연성 기반 하천공간 관리의 비교 개념도

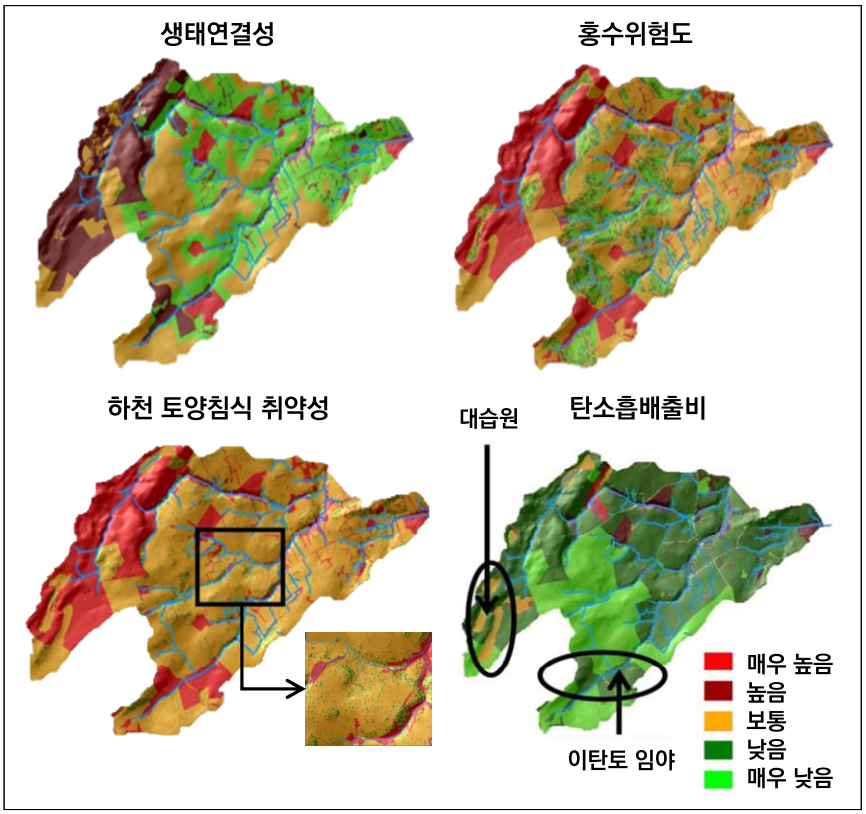


출처: Binder et al. 2015, 5 그림 일부를 발췌.

■ 자연성 기반 하천공간 관리계획을 위한 국외기술 동향

- **(일본)** 신현제(信玄堤), 대규격제방, 수방림(水防林) 조성 등 토지이용의 유연성 및 하천공간 생태 연결성을 고려한 자연친화적 하천공법을 현장에 적극 활용하여 지역 하천 고유의 취약 조건을 감안한 수방 대책을 마련
  - 하천변 수림대 회복으로 탄소흡수원을 확대하고, 제방 월류 시 제내지 홍수피해를 저감시킬 수 있는 다목적 홍수터 및 수방림 조성기술을 지역 여건에 따라 다양하게 개발
  - 치수대책의 일환으로 홍수터 활용 및 완충 방법론을 실무에서 적용할 수 있도록 제시하고 있으며, 홍수터를 다목적으로 활용하고자 평상시에 농경지, 홍수발생 시 저류지로 이용 가능한 수전(水田) 등 다양한 수변완충지 조성기술이 개발 및 실용화되고 있음
- **(미국·유럽)** 토양유실에 따른 농업생산성 감소 및 하천 통수단면적 축소 등에 대응하기 위해 토양침식 제어기술 개발에 초점을 두고 있는데, 예방 차원에서 완충녹지 조성 등 자연형 공법을 포함한 다양한 BMPs(Best Management Practices)를 제안
- **(유럽)** NBS 기반 하천공간 설계 및 실무지침의 경우, 영국·스코틀랜드 환경청이 선도적으로 관련 수단 발굴 및 효과 검증에 집중하고 있으며, 토지이용계획과의 조화를 위해 입지에 대한 실무적 연구를 활발히 수행
  - 자연성 기반 홍수관리 평가를 위해 GIS 기반 진단도구(Polyscape, 폴리스케이프)가 개발되어 토지이용 변화에 따른 홍수위험도, 생태연결성, 토양침식, 탄소흡수량 분석에 활용(〈그림 5〉 참조)
  - 영국 환경청에서는 자연성 기반 홍수관리 기법 적용을 위한 지도(Natural Flood Management: NFM)를 작성하여 하천공간 계획 및 설계에 활용

그림 5 폴리스케이프(Polyscape) 분석 결과 예시: 웨일즈 퐁브렌(Pontbren) 지역 생태연결성, 홍수위험도, 하천 토양침식 취약성 및 탄소 흡·배출 비 분포



출처: Jackson et al. 2013, 82-84의 그림 일부를 발췌하여 저자 재구성 및 번역.

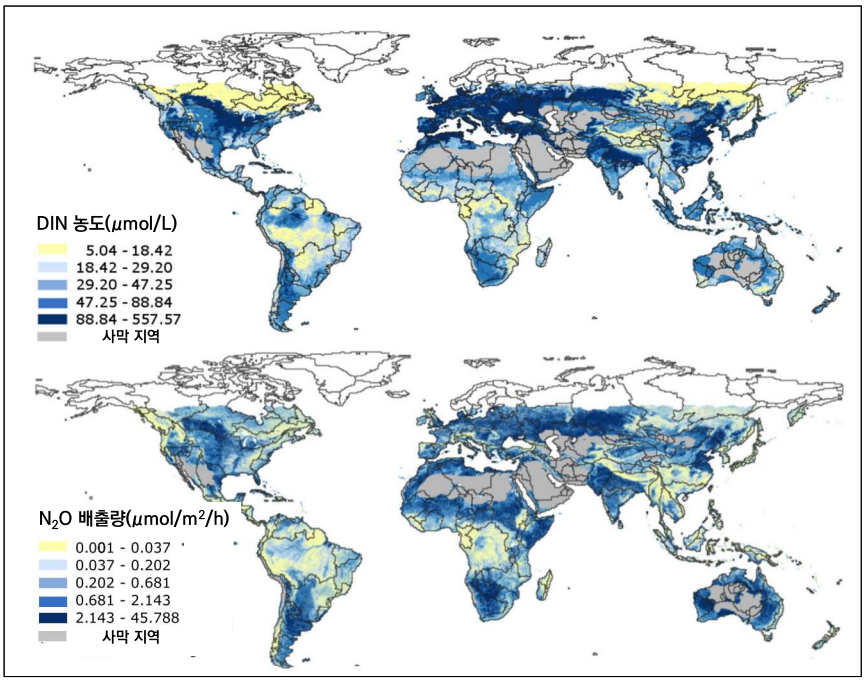
■ 하천 온실가스 배출 잠재력 평가 관련 주요 국외학술연구 결과

- 최근 하천을 주요 온실가스 배출원 중 하나로 인지하고 발생 경로와 배출량 분석과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있으며, 공통적으로 하천이 면적 대비 높은 온실가스 발생 잠재량을 지니고 있음을 강조(Borges et al. 2015)
- 하천의 온실가스 배출량은 주변 여건에 따라 다르게 나타나고 인간활동과 불투수면적층에 의해 수질의 부영양화가 심각한 도심하천이 주요 배출원으로 보고된 바 있으며(Wang et al. 2020), 비도심하천 대비 약 14배 이상 높은 N_2O 배출량을 지니는 것으로 나타남(Zhang et al. 2021)
  - 하천 N_2O 발생은 하천과 지하수의 흐름 교환이 일어나는 하상 및 홍수터 내 혼합대 흐름(hyporheic flow)에 의한 것으로, 하·폐수 및 비점오염원 유출에 의해 하천에서 생성된 용존성 무기 질소(Dissolved inorganic nitrogen: DIN)가 혼합대로 유입될 경우 탈질작용

(denitrification)에 의해 N_2O가 발생(Hill et al. 1998)

- N_2O는 이산화탄소(CO_2) 대비 지구온난화지수(Global Warming Potential: GWP) 가 약 296배 높아 온실가스 배출원으로써 상당한 잠재력을 지니고 있으며(Wang et al. 2018), 하천의 N_2O 최대 발생 잠재량은 전 세계 N_2O 발생량의 약 10%에 달할 것으로 추정(Beaulieu et al. 2011)
- 전 세계 하천의 N_2O 발생 잠재량이 호수, 저수지와 비교했을 때 2배 이상 높게 나타나는 것으로 보고됨(Beaulieu et al. 2011)

그림 6 전 세계 하천망 DIN 농도(위) 및 N_2O 배출량(아래) 분포도



주: N_2O 배출량이 DIN 농도와 강한 양의 상관관계를 지님을 확인할 수 있음.
출처: Marzadri et al. 2021, 4와 7의 그림을 발췌하여 저자 번역.

3) 소결

■ 국내 수변구역 녹지조성 관련 정책의 시사점

- 도시녹화사업을 통해 도시하천 내 수변녹지를 적극 조성하고 있으며, 이는 탄소흡수원으로써의 역할뿐만 아니라 치수, 환경, 생태, 친수 기능, 그리고 미세먼지 및 열섬효과 저감 등 다기능적 기대효과를 고려하여 추진되고 있음

- 수변구역 지정 및 토지매수사업 등을 통해 수변녹지의 횡적공간을 확충하고 있으나, 물가 상승으로 인해 예산 대비 매수토지 면적의 지속적인 감소가 불가피하여 효용성 높은 수변구역 토지매수 전략 마련이 필요
  - 현재 토지매수사업은 하천과의 거리, 수질 개선효과를 우선 매수지역 선정기준으로 활용하고 있으나, 해외 물관리 선진국에서는 온실가스 저감, 홍수피해 완화, 생태 다양성 및 서식처 제공 등 하천의 다차원적 기능을 고려하여 하천공간을 관리 및 계획하고 있음
- 4대강의 수계관리기금은 근거 법령인 「수계법」 시행 목적에 준거하여 상수원 상류지역 수질개선을 위해 주로 환경기초시설 관련 사업에 가장 많은 예산을 편성하고 있음
  - 영산강·섬진강 수계의 경우, 토지매수 및 녹지조성사업에 가장 많은 수계관리기금 예산을 편성하고 있으며, 수변구역관리기본계획에도 수변구역의 지구 온난화 저감효과를 명시하고 탄소흡수 현황 및 전망 분석을 포함하는 등 타 수계와 차별성을 보임

■ 국외 하천공간 관리 정책 및 연구동향의 시사점

- 미국·일본·유럽에서는 하천 및 수자원 관련 법령 개정 및 시행을 바탕으로 자연친화적 하천관리정책을 마련하고, NBS에 기초한 수변 완충녹지 및 다기능 홍수터 조성 등 비구조물적 하천관리 기술을 적극 개발하여 현장에 적용 및 검증하고 있음
  - 수변 생태복원을 통해 탄소흡수원 면적을 확대할 뿐만 아니라 홍수방어, 수질개선, 생태 연결성 강화 등 하천 본연의 기능을 강화하는 것이 자연성 기반 하천관리 정책의 기조임
  - 탄소흡수 효과를 포함한 수변 완충녹지의 다기능성을 고려하여 하천공간을 효율적으로 설계 및 계획하기 위해 GIS 기반 분석시스템을 개발하고 실무에 적극 활용하고 있음
- 하천 및 수변구역의 온실가스 배출 잠재력에 대해 주목하고 있으며, 특히 하천공간 내 N_2O 배출경로와 배출량 파악을 위한 학술적 논의가 매우 활발히 이루어지고 있음
  - 하천의 N_2O 발생은 하천변 토지이용과 밀접한 관계를 지닌 비점오염원 유입 등 인간 활동에 의한 하천 부영양화(DIN 농도)와 큰 연관성을 지니는 것으로 밝혀짐
  - N_2O는 메탄(CH_4), CO_2 등 주요 온실가스에 대비 높은 GWP로 인해 총배출량[4]이 상대적으로 낮음에도 배출량 대비 지구온난화 기여도가 크기 때문에 배출량 파악의 중요성을 강조하고 있음

4) 우리나라 2017년 국가 온실가스 배출 현황에 따르면 총 709백만tCO_2eq 중 CO_2 91.7%, CH_4 3.8%, N_2O 2.0%를 차지하는 것으로 나타났고, 해당 값은 GWP에 따라 직접 온실가스 배출량을 CO_2eq로 환산한 집계 결과임(환경부 2019).

03 하천 및 수변공간 온실가스 저감 잠재성

1) 국내 수변공간 온실가스 흡수 잠재량

■ 수변녹지 CO_2 흡수 잠재량 추정 방법

- 수변녹지는 국가 온실가스 인벤토리 중 LULUCF(Land Use, Land Use Changes and Forestry) 부문으로 분류 가능하며, '2006 IPCC 가이드라인'에서는 임목생장량에 수목 고유의 배출계수를 곱하여 연간 온실가스 흡수량을 산정하는 방법론을 제시
  - 현재 우리나라 LULUCF 부문의 온실가스 배출량은 Tier 2[5] 방법으로 산정하고 있음에 따라, 수변녹지 CO_2 흡수량 산정에 산림청 주요 산림수종의 탄소흡수량(ver. 1.2) 국가표준 자료(이선정 외 2019)를 활용

■ 산정 과정에서의 주요 가정

- 분석대상 공간적 범위는 4대강 「수계법」에 고시된 수변구역(특별관리구역 제외) 지정 범위와 유사하게 하천양안 경계 500m로 설정했으며 국가하천을 대상으로 함
  - 하천연장을 기준으로 산정한 분석대상 수변공간 면적은 한강(1,403km²), 낙동강(990km²), 금강(709km²), 영산강·섬진강(415km²) 순으로 크게 나타남

표 4 4대강 수변공간 온실가스 흡수 잠재량 산정 조건

구분	한강	낙동강	금강	영산강·섬진강
분석 공간범위	하천 경계로부터 양안 500m			
분석대상 수변공간 면적(㎢)	1,403	990	709	415
국가표준 자료 주요 수종	강원지방 소나무, 중부지방 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 편백, 상수리나무, 신갈나무			
연간 CO_2 흡수량(tCO2/ha/yr)	국가표준 자료 주요 수종 35년생 평균값 = 9.61			

출처: 이선정 외 2019를 바탕으로 저자 작성.

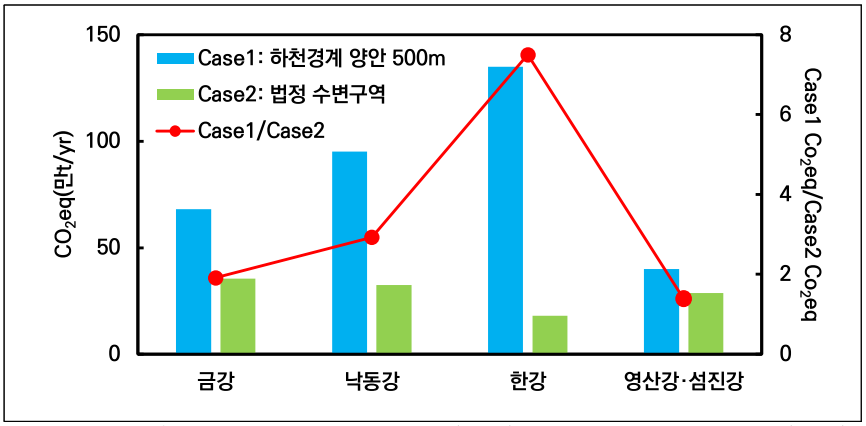
5) Tier 1은 국제적으로 통용되는 IPCC에서 제시한 기본계수값, Tier는 국가단위로 구축한 고유 계수값, Tier 3는 모델링을 통해 개발된 계수값을 의미함.

- 분석대상 수변공간(제내지 포함)의 논, 밭, 유휴부지, 나대지 등은 생태하천복원 및 수변구역관리 사업을 통해 임야로 전환되었다는 가정 아래 CO_2 흡수 잠재량을 산정
- 배출계수 선정을 위해 임령은 우리나라 숲 평균 나이가 30~40년생인 것(이선정 외 2019)을 감안하여 35년생으로 설정하고, 35년생 수종의 평균값을 사용(〈표 4〉 참조)

■ 4대강 수계별 수변공간 CO_2 흡수 잠재량 산정 결과

- 국가하천 수변공간 면적이 가장 넓은 한강 수계가 가장 높은 온실가스 흡수 잠재량(135만 tCO_2eq/yr)을 지닌 것으로 도출됐고, 4대강에 걸친 분석대상 수변공간의 온실가스 흡수 총 잠재량은 338만tCO_2eq/yr로 산정됨
  - 우리나라 LULUCF 흡수량 41.6백만tCO_2eq/yr(2017년 기준)의 약 8.1%에 해당하는 수치
  - 2020년 자동차 온실가스 배출기준인 97g/㎞를 연평균 주행거리 1만 5천㎞로 가정할 경우, 약 232만 대의 CO_2 배출량 상쇄 가능
  - 법정 수변구역만을 이용하여 계산할 경우(115만tCO_2eq/yr), 한강 수계에서 가장 낮은 CO_2 흡수량이 도출됐고, 수변구역 지정이 가장 활발한 영산강·섬진강 수계와 비교했을 때 잠재적 탄소 흡수원 면적이 약 5.4배 큰 것으로 나타남(〈그림 7〉 참조)

그림 7 4대강 수계별 분석대상 수변공간(하천양안 경계 500m)과 법정 수변구역(제3차 수변구리관리기본계획[2019~2023년] 기준) CO_2 흡수 잠재량 산정 결과 및 비교



주: Case1 CO_2eq/Case2 CO_2eq은 법정 수변구역 흡수량(Case2) 대비 하천경계 양안 500m 수변공간(Case2) 흡수량을 나타내며, 해당 수치가 높을수록 법정 수변구역 지정 및 수변생태벨트조성사업 등을 통해 추가 확보 가능한 잠재적 탄소흡수량이 큼을 의미함.

출처: 저자 작성.

2) 국내 하천 온실가스 배출 잠재량

■ 하천 N_2O 배출 잠재량 추정 방법

- 수질 측정자료와 과거 연구에서 제안된 경험식을 활용하여 온실가스 배출 잠재량을 산정
  - 환경부 물환경정보시스템(http://water.nier.go.kr)의 수계별 2020년 총량측정망 자료(337개 측정소)를 이용하여 4대강 연 평균 총 질소(Total nitrogen, T-N) 농도를 아래와 같이 계산하고, T-N 중 DIN의 비율을 70%로 가정하여 DIN 농도를 추정

$$C_{DIN} = \sum_{i=1}^{n} C_{DIN,i} \times Q_i / \sum_{i=1}^{n} Q_i$$
$$C_{DIN,i} = \text{측정지점 농도},\ Q = \text{측정지점 유출량},\ n = \text{측정지점 수}$$

  - 위에서 계산된 DIN 농도를 각 수계의 대표값으로 가정하고, 여기에 4대강 수계의 연 강우 유출량을 곱하여 4대강 수계별 DIN 연 부하량(Load)을 계산
  - 이후 Well et al.(2005)이 제안한 다음의 식을 이용하여 DIN 연 부하량으로부터 N_2O 연 배출량을 계산

$$ER = EF \times L_{DIN}$$
$$ER = N_2O\ \text{연 배출량},\ EF = N_2O\ \text{배출계수},\ L_{DIN} = DIN\ \text{연부하량}$$

  - 하천 N_2O 배출은 강우유출 시 토지로부터 비점오염원 형태(Leaching/Runoff)로 유입된 DIN이 주요 발생원임에 따라 국가 온실가스 인벤토리 중 AFOLU(Agriculture, Forestry and Other Land)의 간접 배출(Indirect emission)로 분류 가능
  - 하천에 대한 배출계수 IPCC 기본값(EF = 0.0025)을 DIN 연 부하량에 곱하여 N_2O 연 배출량을 계산하였고, 여기에 N_2O의 GWP = 296을 곱하여 온실가스 배출량(CO_2eq)을 최종적으로 산출

■ 4대강 수계별 온실가스 잠재량 산정 결과

- N_2O에 의한 온실가스 연 배출량은 4대강 수계에 걸쳐 총 71,500 tCO_2eq/yr로 나타났고, 높은 DIN 농도와 강우 유출량으로 인해 한강 수계에서 전체의 약 39%에 해당하는 가장 큰 온실가스 배출량이 도출됨
  - 상대적으로 낮은 DIN 농도에도 불구하고 높은 강우 유출량에 의해 낙동강 수계에서 전체 약 28% 수준의 온실가스 배출량이 산정됐고, 금강과 영산강·섬진강 수계의 경우 비슷한 DIN 농도와 강우 유출량을 지니고 있어 유사한 수준(전체 약 16%)으로 나타남
  - 온실가스 연 배출량 상쇄에 필요한 수변녹지 총면적은 74.4㎢로 도출됐고(〈표 5〉 참조), 이는

2020년까지 수계관리기금에 의해 매수된 토지 면적(67.2㎢) 대비 7.2㎢ 높은 수치로서 이를 매수금액(2020년 기준)으로 환산할 경우 6,420억 원에 해당하는 수치임

- 반면, 유역면적당 온실가스 연 배출량의 경우 영산강·섬진강 수계가 가장 높은 수치가 나타났고, 해당 값은 한강 수계 대비 약 1.9배 높은 수준이었으며 이는 유역면적 대비 상대적으로 높은 강우 유출량에 기인한 것으로 판단됨

표 5 4대강 수계별 DIN 농도, 연평균 DIN 부하량, 온실가스 배출 잠재량 등 추정 결과

구분	한강	낙동강	금강	영산강·섬진강
평균 DIN 농도(mg/l)	1.97	1.56	1.86	1.89
강우 유출량(억m^3/yr)	174	158	78	74
DIN 연 부하량(t/yr)	37,870	27,332	15,969	15,150
N_2O 연 배출량 (tN_2O/yr)	94.7	68.3	39.9	38.6
온실가스 연 배출량 (tCO_2eq/yr)	**28,024**	**20,226**	**11,817**	**11,433**
유연 면적당 온실가스 연 배출량(tCO_2eq/yr/㎢)	0.78	0.87	1.19	1.49
상쇄에 필요한 수변녹지 면적(㎢)	29.2	21.0	12.3	11.9

주: 강우 유출량은 30년(1978~2007) 연 강수량에 상응하는 값이며, 하천 온실가스 배출량 상쇄에 필요한 수변녹지 면적은 이선정 외(2019)에 나타난 주요 수종 35년생의 연간 평균 CO_2 흡수량 9.61tCO2/ha/yr를 기준으로 산정한 결과임.
출처: 저자 작성.

■ 시·도별 온실가스 배출 잠재량 분포

- 행정구역 단위 기상·수문·수질·토지피복 정보를 이용하여 하천 DIN 농도, 강우 유출량을 산출하고, 최종적으로 시·도별 유역면적당 N_2O 배출량 분포를 추정
  - 환경부 물환경정보시스템의 행정구역별 2020년 총량측정망 자료를 이용하여 앞서 설명한 4대강 적용 방법과 동일하게 시·도별 유역면적당 온실가스 배출 잠재량을 추정(측정소가 5개 미만인 시·도는 분석에서 제외)
  - 먼저, 환경부·환경공단(2013)에서 산출된 시·도별 불투수 및 투수 면적률과 하천설계기준해설에 제시된 불투수층 및 투수층의 유출계수 평균값(각각 0.8, 0.3, 수계의 경우 유출계수 = 1을 적용)을 다음의 식에 대입하여 시·도별 총괄유출계수를 산정

$$C = \sum_{i=1}^{m} C_i A_i / \sum_{i=1}^{m} A_i$$

C = 총괄유출계수, C_i, A_i = 토지유형별 유출계수 및 면적비

$i = 1$(불투수층), $i = 2$(투수층), $i = 3$(수계)

- 위에서 계산된 총괄유출계수를 행정구역 단위 유역면적과 2020년 연 강수량의 곱에 곱하여 시·도별 강우 유출량을 추정

표 6 시·도별 강우 유출 관련 주요 결과 및 온실가스 연 배출 잠재량 추정 결과(2020년 기준)

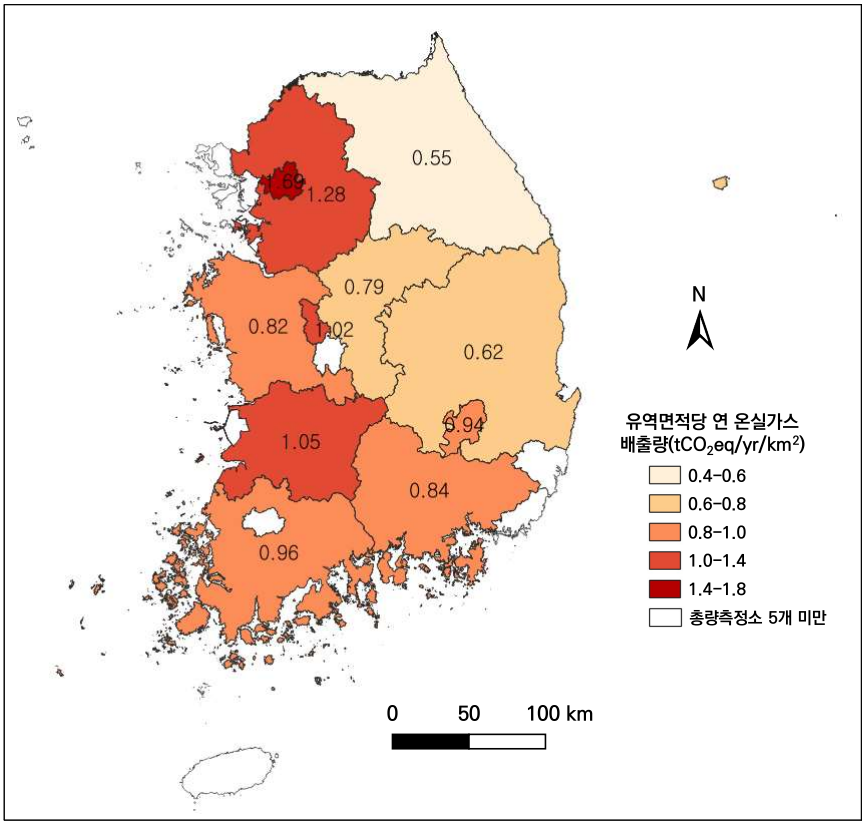
구분	불투수(%)	투수(%)	총괄 유출계수	강우 유출량 (억m^3/yr)	DIN 농도 (mg/l)	온실가스 연 배출량(tCO_2eq/yr)
서울	54.4	37.7	0.623	6.2	2.01	1,025
경기	22.7	73.2	0.433	69.7	2.28	12,967
강원	4.3	92.7	0.331	88.0	1.30	9,335
세종	12.4	81.5	0.394	3.1	1.88	474
충북	8.9	86.7	0.364	41.4	1.73	5,847
충남	8.4	86.9	0.360	45.4	1.81	6,704
대구	23.2	70.8	0.449	4.9	2.06	828
경북	5.3	90.8	0.342	89.0	1.62	11,762
경남	8.2	87.5	0.360	71.5	1.51	8,802
전북	8.8	85.8	0.371	56.6	1.90	8,775
전남	8.6	86.9	0.363	71.8	2.00	11,721

출처: 저자 작성.

- 시·도별 유역면적당 하천 온실가스(N_2O) 배출량 산정 결과, 서울시와 경기도가 상대적으로 높은 배출 잠재량을 지니고 있었고, 강원도에서 가장 낮은 면적당 배출량이 도출됨(〈그림 8〉 참조)
  - 서울시와 경기도는 높은 불투수면적률로 인해 유역면적 대비 큰 유출량이 나타남과 동시에 이로 인해 비점오염원 유입을 증진시켜 높은 DIN 부하량을 발생(표 6〉 참조), 결과적으로 면적당 높은 N_2O 배출량을 지니게 됨
  - 강원도와 경상북도에서 가장 낮은 면적당 배출량이 도출됐는데, 이는 90% 이상의 높은 투수면적

률(유역면적 대비 낮은 강우 유출량)과 이와 동반된 낮은 DIN 부하량에 의한 것으로 판단되며 이러한 영향이 한강과 낙동강의 낮은 면적당 온실가스 배출량에 기여한 것으로 사료됨

그림 8 시·도별 유역면적당 온실가스(N_2O) 배출 잠재량 분포(2020년 기준)



출처: 저자 작성.

3) 소결

■ 수변녹지 온실가스 흡수 잠재량 산정 결과의 시사점

- 4대강 수계 수변공간(하천경계 양안 500m)의 온실가스 흡수 잠재량은 총 338만tCO_2eq/yr로 도출됐고, 한강 수계가 가장 높은 흡수 잠재량(전체 약 40%)을 지님
  - 그러나 한강 수계는 높은 면적당 토지 매수금액(2020년 기준 영산강·섬진강 대비 약 5.6배)으로 인해 분석대상 수변공간 면적 대비 현재 법정 수변구역 및 매수토지 면적이 매우 작아 흡수원 추가 확보를 위해 수계관리기금 외 추가적인 재원 조달방안이 필요할 것으로 판단됨

- 현재 산림청 국가표준 자료는 주요 8개 수종에 한정되어 있어 수변공간 수목 특성을 고려한 흡수량 산정에 한계가 존재
  - 국내 수변공간에서는 주로 침수 가능 식생인 버드나무가 우점종으로 나타나고 있으나 (박미옥 2017), 현재 해당 수종에 대한 국가 고유 배출계수가 부재함
  - 버드나무 군락을 하천변에 조성할 경우 육상식물과 비교했을 때 CO_2 저장효과가 2배 이상 높은 것으로 알려짐에 따라(박은진·좌승희 2009), 보다 정확한 수변녹지 탄소흡수량 잠재량 파악을 위해 수변 우점식생에 대한 국가표준 자료 구축이 필요
- 또한, 이 페이퍼에서는 분석대상 하천공간을 하천 경계 양안 500m로 가정함에 따라 제내지 구간의 도시용지를 다수 포함하고 있어, 향후 보다 정확한 하천 및 수변공간 온실가스 흡수 잠재량 산정을 위해 토지피복도 자료의 활용이 필요할 것으로 사료됨

■ 하천 온실가스(N_2O) 배출량 산정 결과의 시사점

- 4대강 수계에서 N_2O와 연관된 온실가스 연 배출량 총 71,500tCO_2eq/yr로 나타났고, 한강 수계에서 가장 큰 온실가스 배출 잠재량(전체 약 39%)이 도출됨
  - 서울시와 경기도에서 가장 높은 유역면적당 배출량이 나타났는데, 이는 해당 행정구역의 높은 불투수면적률이 야기한 면적 대비 큰 강우 유출량과 높은 DIN 농도에 기인함
  - 투수면적률이 90% 이상인 강원도와 경상북도의 경우, 면적당 배출량이 서울시와 경기도의 절반 이하로 나타남
- 하천의 N_2O 배출은 지역의 토지피복 특성에 큰 영향을 받음에 따라 수변공간 등 하천인접 지역 토지이용 및 관리에 기반한 하천 온실가스 배출 저감 전략이 필요
  - 강우 유출량과 하천 DIN 부하량을 저감하기 위해 하천 주변 투수면적층의 추가확보가 필요할 것으로 판단되며, 이에 효과적인 수변 완충녹지 조성 등 자연성 기반 하천공간 관리방식은 온실가스 배출량 저감과 동시에 온실가스 흡수원 확대에도 활용 가능

04 수변녹지 확충에 따른 물관리 기대효과

■ 자연성 기반 하천공간 관리방식 적용에 따른 하천기능 유지 및 개선효과

- 하천 및 수변공간 온실가스 흡·배출 잠재량 산정 결과, 수변녹지 조성은 온실가스 흡수 효과뿐만 아니라 투수면적 증가를 통해 농경지 및 시가지 등 토지로부터 하천에 유입되는 오염부하량을 저감시켜 온실가스 배출 저감 효과도 기대 가능한 것으로 나타남
- 온실가스 흡수원 면적 확대와 배출량 저감을 위해 수변 완충녹지 및 다기능 홍수터 확충·조성 등 NBS 기반의 하천공간 관리방안을 실제 하천 및 수변공간에 적용하였을 때 도출 가능한 이·치수, 환경, 생태 기능 유지 및 개선 효과를 아래와 같이 검토

1) 이·치수적 측면

■ 지하수 함량 및 물순환 증진에 따른 하천유지유량[6] 확보효과

- 수변공간의 충적 대수층(Alluvial aquifer)은 큰 깊이를 지니고 있어 강우발생 시 많은 양의 유출수 저장이 가능하며, 하천으로 직접 유출량을 저감하고 지하수 함량을 높일 수 있음
- 수변녹지에 의해 횡적 연결성이 강화된 자연형 하천의 경우, 하천(지표수)과 수변공간(지하수)의 활발한 물순환 과정을 통해 기저유출량(Baseflow discharge)[7] 증대효과 기대 가능
  - 기저유출은 지하수 흐름으로 체류시간이 길기 때문에 평상시(강우 미발생) 하천유량의 대부분을 차지하고 있어 기저유출량 관리는 하천유지유량 확보에 매우 중요
  - 특히, 불투수면적의 증가가 기저유출량 감소를 야기하는 것으로 나타남에 따라(강형식 등 2019), 평상시 하천유량 확보를 위해 수변녹지 확충이 동반돼야 할 것으로 판단됨

■ 완충·이격 공간 확보를 통한 홍수량 저류 및 홍수파 저감 효과

- 기존 구조물적 하천관리 방식의 경우, 정비구간은 제방고 증가, 하천 준설 및 직강화 등에 의해

6) 생활·공업·농업·환경개선·발전·주운 등의 하천수 사용을 고려하여 하천의 정상적인 기능 및 상태를 유지하기 위하여 필요한 최소한의 유량을 의미함(「하천법」 제 51조).
7) 강우발생 시 지표면에서 하천으로 직접 유출되지 않고, 지하수를 거쳐 하천으로 간접 유출되는 흐름을 의미함

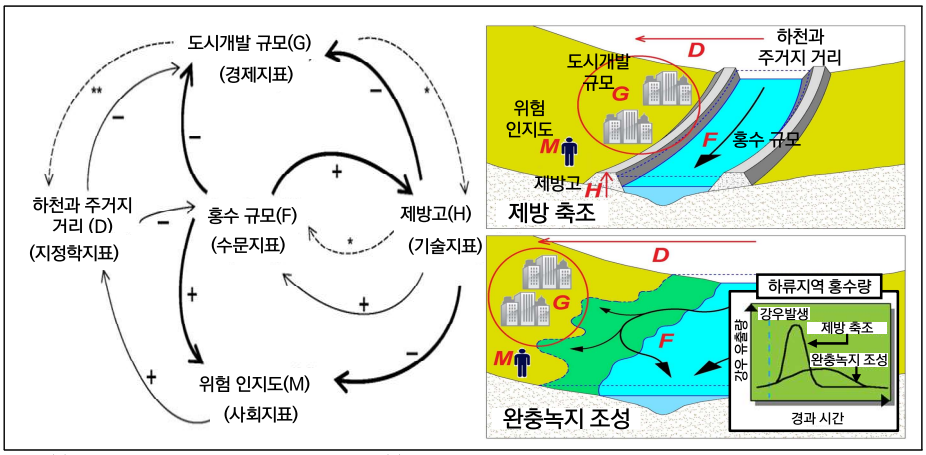
홍수방어 능력이 즉각 증가하나, 계획홍수량 이상의 강우가 발생할 경우 피해가 가중될 수 있음

- 기존 제방 및 하도정비 중심의 하천관리방식은 유역 하류의 첨두 홍수량을 증가시키고, 제방고 상승은 제내지의 도시개발사업을 촉진시켜 이상강우에 제방범람이 발생할 경우 재산 및 인명 피해 규모가 더욱 커질 수 있음(〈그림 9〉 참조)

- 미국의 경우, 상류 지역의 과도한 제방 축조로 인해 하류에서 제방 정비가 취약한 지역의 홍수피해를 가중시킨 사례가 여러차례 보고됨
  - 미주리 주 메라믹(Meramec)강 밸리파크(Valley Park) 일대는 100년 빈도 계획홍수위 보다 약 3ft 높게 제방을 축조했데, 2017년 홍수발생 당시 펜톤(Fenton)시 일대 하류 지역의 도로, 주택, 학교 등이 침수 및 파손되어 연방재난관리청이 주민들에게 6,200만 달러의 홍수보험금을 지불한 사례가 있음(Cusick 2018)
  - 상류 지역의 높은 제방고는 하천구역 내 충분한 저류공간를 제공하지 않아 하류 지역 첨두 홍수위가 상승했고, 홍수파 완충효과 역시 부족하여 주민들이 대피시간을 충분히 확보하기 전 첨두홍수량이 해당 지역에 도달하여 큰 홍수피해를 야기한 것으로 파악됨

- 반면, 네덜란드 'Room for the River' 사례와 같이 제방고를 낮추고 후퇴시켜 수변녹지를 넓게 확보할 경우, 수변녹지가 자연형 완충저류지 역할을 제공하여 하천의 강우 유출량을 저감시킬 뿐만 아니라 하류지역의 첨두홍수량 저감 및 도달시간 지체 효과 기대 가능
  - 아울러, 수변녹지 조성을 통해 주거지와 하천 간의 이격 거리 확보가 가능하고, 하천의 자연적 범람은 주민들의 위험의식 결여를 완화해 사회·지정학적으로 홍수 대응력을 강화할 수 있음(Baldassarre et al. 2013)

그림 9 하천범람의 사회수문학적 구조와 수변녹지 확충에 따른 첨두홍수량 저감 개념도



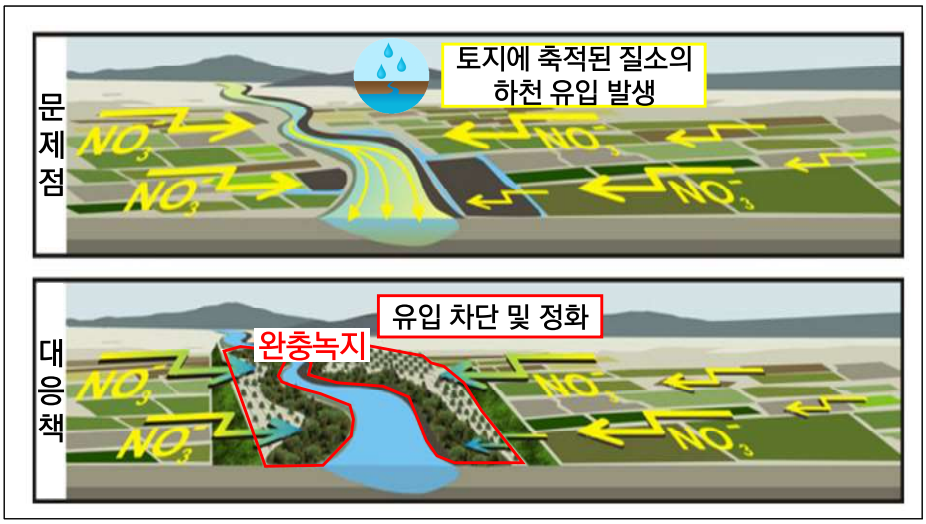
주: (+)는 지표 간에 양의 상관관계를 의미하고, (-)는 음의 상관관계를 의미함.
출처: Baldassarre et al. 2013, 3296와 3298의 그림을 발췌하여 저자 재구성 및 번역.

2) 환경·생태적 측면

■ 수변녹지 완충에 의한 비점오염원 유입 저감효과

- 수변녹지는 인접한 개발지로부터 유출될 수 있는 과도한 영양분, 토사 및 기타 오염물질들을 차단 및 흡수하는 생태 여과지로 작용하고, 아울러 인, 질소 등 조류번식을 야기하는 영양염류 농도 저감이 가능하는 등 수질오염 예방 기능을 제공
  - 수변공간의 식재는 수처리시설과 달리 추가적인 운영 및 보수 비용이 크게 요구되지 않아 장기적인 관점에서 보다 효율적이고 저렴하게 상수원 수질 보호가 가능하고(최지용 2002), 동시에 온실가스 저감 및 생태계 보존 효과도 기대할 수 있음
  - 하천 인접 농경지는 비료 사용으로 인해 토양의 질소 부하량이 매우 높으며, 이는 강우발생 시 비점오염원 형태로 하천에 유입되어 온실가스(N_2O) 발생을 야기하고 있어 수변 완충녹지의 오염원 정화 및 유입 저감 효과는 하천 온실가스 배출 저감에 기여 가능(〈그림 10〉 참조)
- 제2차 한강수계 수변구역관리기본계획(2014~2018년)에서 수변생태벨트 조성 시 기대 가능한 오염물질 저감효과(매수토지 면적 10.2 km^2, BOD 기준)를 신규 하수처리장 설치 비용으로 환산했을 때 약 530억 원의 편익이 발생할 것으로 예측한 바 있음
  - 아울러, 약 6t/yr의 T-N, 0.6t/yr의 총 인(Total phosphrous: T-P) 발생 부하량 저감이 가능하고, 약 7억m^3/yr의 강우유출 저감효과도 발생할 것으로 추정함

그림 10 수변 완충녹지를 활용한 강우유출 시 질소의 하천 유입 저감 개념도



출처: Passeport et al. 2013, 403의 그림을 발췌하여 저자 재구성 및 번역.

■ 생태 연결성 강화에 따른 생태 서식처 확대 및 다양성 증진 효과

- 수변녹지는 야생동물 개체수 보존을 위해 필요한 이동 통로를 제공함에 따라, 제방 및 수로 절개 등에 의해 하천과 수문학적으로 단절된 수변공간은 생태통로 기능을 상실할 수 있음
- 식생이 조성된 수변공간은 수서생태계 보호에 있어 다양한 기능을 제공하며, 그 기능은 다음과 같이 분류할 수 있음(최지용 2002)
  - 하천변 수림대의 그늘막은 수온을 낮게 유지시켜 재폭기 증진과 함께 용존 산소량 공급을 원활하게 하여 송어 등 고급 어류가 서식할 수 있는 환경을 제공
  - 수변식생은 하천변 침식 완화 기능을 수행하여 하천에 퇴적물 유입을 저감시켜 여울 등 산란장소의 퇴적을 방지
  - 토양에서 유입되는 과도한 퇴적물은 하천의 탁도를 높여 광합성 효율을 저하시켜 수생식물 생장에 악영향을 끼치고, 이를 먹이로 하는 수서생물 개체 수의 감소를 유도함
  - 수변공간은 홍수발생 시 수서생물의 피난처 역할을 하며, 유해 독성물질의 유입을 차단하거나 정화해 생태계 개체 수 및 건강성 유지에 기여 가능
- 자연 상태에서 홍수터 내부 수목, 습지, 고유종의 건강성은 주기적인 하천 범람에크게 의존하므로 하천 범람을 차단하는 만큼 홍수터 생태·환경의 희생이 요구됨(Poiani et al. 2000)
  - 제방, 댐 등 기존 구조물 중심 하천정비와 달리 수변공간 확충을 포함한 자연성 기반 하천 관리방식은 하천의 자연스러운 범람을 유도하여 생물들의 서식처가 되는 홍수터 면적을 지속적으로 유지할 수 있음

05 결론 및 정책 제언

1) 연구 요약

■ 국내·외 하천공간 탄소중립 관련 정책 및 기술 현황 검토

- 우리나라는 수계관리기금에 기반한 토지매수사업을 통해 수변녹지 면적 확대를 위해 노력하고 있으나, 관련 예산은 상승 혹은 유지되고 있음에도 지속적인 물가상승으로 인해 매수토지 면적의 감소가 발생하고 있어 효용성 높은 하천인접지역 토지매수 전략 마련이 필요
- 해외 물관리 선진국에서는 하천 및 수자원 관련 법령 제·개정을 통해 자연친화적 하천관리정책 시행 여건을 마련한 바 있으며, 수변 완충녹지 조성 등 토지이용 및 계획에 기초한 비구조물적 하천관리 기술 개발 및 현장 적용에 많은 노력과 투자를 하고 있음

■ 하천 및 수변공간 온실가스 흡·배출량 추정

- 4대강 수변공간에 NBS 기반 하천관리정책의 일환으로 완충녹지를 조성했을 때 온실가스 흡수 잠재량은 하·폐수처리의 배출량(2018년 기준)을 상쇄할 수 있는 수준으로 예측됐고, 가장 큰 잠재량을 지닌 한강 수계의 경우 타 수계 대비 최대 약 3~6배 높은 면적당 토지 매수금액으로 인해 잠재적 수변녹지 면적 대 매수토지 면적 비가 가장 적게 나타남
  - 이 페이퍼에서는 토지이용 특성이 다양한 제내지 구간을 포함하여 온실가스 흡수 잠재량을 산정함에 따라 후속 연구에서는 제내지 토지피복 분포를 고려하여 보다 정확한 수변공간의 온실가스 저감효과를 도출할 계획
- 온실가스 배출(N_2O) 잠재량 역시 한강 수계에서 가장 크게 예측됐고, 이는 서울시와 경기도의 넓은 불투수면적층이 야기한 높은 질소 부하량에 기인한 것으로 투수면적층 증대와 함께 비점오염원 유출량을 저감할 수 있는 수변 완충녹지 조성방안이 필요

■ 하천공간 탄소중립(수변 완충녹지 확충)에 따른 하천 기능 유지 및 개선 효과 검토

- 수변녹지 조성에 따른 하천의 횡적 연결성 강화는 활발한 지표수와 지표수 간의 활발한 물순환을 유도하여 기저유출량 증대 등 하천유지유량 확보효과 기대 가능
- 하천구역의 수변녹지(자연형 홍수터) 확충은 상류 지역의 충분한 완충 및 저류 공간 확보를 통해

하류 지역의 홍수 부하량 저감효과 기대 가능

- 수변 완충녹지는 강우 유출 시 발생하는 질소의 하천 유입량을 감소시켜 하천 부영양화 개선과 동시에 하천의 온실가스(N_2O) 배출경로 차단효과 기대 가능
- 적정 폭의 수변공간은 하천 내 용존산소량 증가 및 토사 유입 억제를 통해 생물의 서식처 및 산란처를 제공하여 수생태계 건강성 및 다양성 회복효과 기대 가능
- 하천 및 수변공간 온실가스 저감 외에 위와 같은 이·치수, 환경, 생태 기능 개선 효과는 수변 완충녹지 조성에 근간한 자연성 기반 하천공간 관리방식의 도입 필요성을 시사

2) 탄소중립을 고려한 하천 및 수변공간 관리 방향

■ 수변공간 온실가스 흡·배출량 산정 및 평가 체계 구축

- 현재 산림청 국가표준 자료는 주요 8개 수종에 한정되어 수변 식생분포를 고려한 흡수량 산정에 한계가 존재, 버드나무 등 수변 우점식생은 높은 탄소저장 효과를 지닌 만큼 정확한 LULUCF 부문 흡수량 파악을 위해 수변식생에 대한 국가표준 자료 구축 필요
- 하천 및 수자원계획에서 탄소중립 이행방안 마련 시 수변공간의 탄소흡수 기능 외에 하천의 환경(수질)·수문학적(유출량) 특성을 고려할 수 있는 온실가스 배출영향평가 방법 개발

■ 하천공간 탄소중립 이행에 따른 공편익(Co-benefit)[8] 및 영향 분석 체계 구축

- 완충녹지 면적 확대를 위한 수변생태벨트 조성 등 자연성 기반 하천관리사업을 시행하였을 때, 이·치수, 환경, 생태, 친수 부문에서 발생할 수 있는 사업 경제성 평가 도구 마련
  - 수변구역관리기본계획에서 일부 다루어지고 있으나, 타당성 평가 방법이 정립되어 있지 않아 결과의 불확도가 크고 일관성이 부족함에 따라 토지매수 및 수변생태벨트 조성사업 평가 지침 마련 혹은 매뉴얼 개발이 필요
- 수변녹지 조성 과정 중 홍수터 교목 식재는 하천의 통수단면적 축소 등 홍수관리에 있어 부정적 영향을 미칠 수 있어 이에 대해 면밀한 기술적 검토가 요구됨
  - 하천구역 내 수목 식재 시 수종 및 배치에 따른 지체 구조 영향을 실증적으로 파악하여 적절한 설계 및 보강기술을 마련하고 관련 치수영향평가 방법을 개발(이상은 2019)

8) 어느 한쪽의 대책이 다른 쪽에도 긍정적인 영향을 미치는 것을 의미하며, 하나의 정책 수단으로 복수의 목표를 이루고자 할 때 수립하는 전략.

■ 수변구역 토지매수 재원조달 방안 마련 및 우선지역 선정 기법 개발

- 4대강 수계관리기금의 토지매수 사업을 통해 현재 수변녹지 면적을 확대하고 있으나, 해당 법령이 상수원 수질보호에 역점을 두고 있어 예산 활용에 한계가 존재함에 따라 탄소중립기본법 기후대응기금[9] 등의 활용 가능성 검토 필요
  - 기후대응기금의 용도 중 정부의 온실가스 감축 기반 조성·운영(제70조 1항) 및 기후위기 대응을 위한 녹색기술 연구개발 및 인력양성(제70조 4항)을 근거로 기금 활용 가능
- 현재 4대강 토지매수 우선지역은 하천경계로부터 거리 및 비점오염부하량에 따라 선정되고 있으며, 기존 연구들 역시 수질개선에 중점을 두고 있어(심윤진 외 2014) 온실가스 저감 및 하천 기능 개선효과을 종합적으로 고려할 수 있는 우선지역 선정 방법 개발이 필요
  - 온실가스 흡·배출량, 홍수량, 제방 정비율, 수질, 하천변 침식(퇴적물 유입), 생태 연결성 등 다양한 공간 정보에 기초한 토지매입 및 수변녹지 조성 우선순위 분석 기법을 개발 및 제도화하고, 이를 실무적으로 지원할 수 있는 GIS 기반 분석도구를 개발
  - 하천기본계획수립 지침, 도시공원·녹지 세부기준 지침, 도시·군계획수립 지침, 도시 재해 취약성분석·활용 지침 등과의 연계를 통해 개발된 분석시스템의 실용화 방안 마련

9) 정부가 기후위기에 효과적으로 대응하고 탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장 촉진에 수반되는 재원 확보를 위해 설치된 기금(탄소중립기본법 제69조).

참고문헌

강형식·현윤정·전상묵. 2019. 국내 하천 기저유출지표 산정 및 도시화에 따른 기저유출 영향 분석. 한국수자원학회논문집 52권, 2호: 97-105.

기획재정부. 2021. 2021년 기금현황. 세종: 기획재정부.

김규호. 2019. 하천공간 복원 기본계획 수립 기술보고서, 자연과 인간이 공존하는 생태하천 조성기술 개발연구단 기술보고서, 1호.

김보라·성기준, 2010. 비점오염저감 및 탄소축적을 고려한 적정 수변지역 설계방법. 대한환경공학회지 32권, 11호: 1030-1037.

박미옥. 2017. 수문 및 토양환경을 고려한 수변식생군락 조성 모델-대청호 저수지를 사례로. 한국습지학회지 19권, 1호: 144-154.

박은진·최승희. 2009. 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안. 수원: 경기연구원.

박진원. 2017. 생태하천조성사업의 미래 기술개발 방향. 물과 미래: 한국수자원학회지 50권, 8호: 21-25.

법제처. https://www.moleg.go.kr/ (2021년 11월 13일 검색).

서울특별시 홈페이지. 2020. https://news.seoul.go.kr/env/archives/500772 (2021년 10월 29일 검색).

심윤진·차진열·박용수·이동진·서윤희·홍진표·조동길. 2014. 영산강· 섬진강수계 수변구역 토지매수 우선순위 산정에 관한 연구-주암호 수변구역을 사례로. 환경복원녹화 17권, 1호: 173-184.

송희용·안태권·허권·조현길. 2011. 수변녹지 조성을 위한 생태식재 모델 연구 -금강유역권을 대상으로-. 한국환경생태학회:학술대회논문집 21권, 1호: 54-56.

이상은. 2019. 국토 여건변화에 따른 하천관리 주요 현안과 정책과제. 국토정책Brief 708호. 세종: 국토연구원.

이상은·김준성. 2021. 기후위기시대, 홍수관리대책 전환과 정책 추진방안. 국토정책Brief 824호. 세종: 국토연구원.

이선정·임종수·강진택. 2019. 주요 산림수종의 표준 탄소흡수량 (ver. 1.2). NIFoS 산림정책이슈, 129호. 서울: 국립산림과학원.

이종문·조용현·김윤호·박성우. 2019. 한강 수변구역 복원지의 표토 특성 및 유기탄소 저장량 추정. 한국조경학회지 47권, 4호: 12-23.

이승수·이문환·강형식. 2020. 2020년 홍수 현황과 향구적 대책 방향. KEI 포커스 8권, 14호. 세종: 한국환경연구원.

조현길·박혜미. 2015. 수변구역 조성녹지의 탄소저감 효과 및 증진방안. 한국조경학회지 43권, 6호: 26-48.

조현길·박혜미·김진영. 2013. 생태식재를 통한 수변녹지 조성방안. 한국환경생태학회:학술대회논문집 23권, 2호: 55.

최지용. 2002. 물환경 생태복원을 위한 수질관리 (수변완충녹지 (Buffer Zone) 관리를 중심으로). 환경생물학회지 20권: 20-29.

환경부. 2019. 2019년 국가 온실가스 인벤토리 보고서. 세종: 환경부.

_____. 2020a. 2050년 일부 유역의 홍수규모 최대 50% 증가 예상, 9월 21일. 보도자료.

_____. 2020b. 온실가스 배출량 2018년 2.5% 증가, 2019년 3.4% 감소, 9월 29일. 보도자료.

_____. 2020c. 4대강 수계 토지매수실적('99~'20년).

_____. 2021. 댐 저수구역 생태가치 향상을 위한 복원사업 추진, 5월 4일. 보도자료.

환경부·한국환경공단. 2013. 전국 불투수면적률 조사 및 개선방안 연구 최종보고서. 세종: 환경부.

Baldassarre, G.D., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J.L. and Bloschl, G., 2013. Socio-hydrology:

conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, no.8: 3295-3303.

Beaulieu, J.J., Tank, J.L., Hamilton, S.K., Wollheim, W.M., Hall, R.O., Mulholland, P.J., Peterson, B.J., Ashkenas, L.R., Cooper, L.W., Dahm, C.N. and Dodds, W.K. 2011. Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, no.1: 214-219.

Binder, W., Gottle, A. and Shuhuai, D. 2015. Ecological restoration of small water courses, experiences from Germany and from projects in Beijing. *International Soil and Water Conservation Research* 3, no.2: 141-153.

Borges, A.V., Darchambeau, F., Teodoru, C.R., Marwick, T.R., Tamooh, F., Geeraert, N., Omengo, F.O., Guerin, F., Lambert, T., Morana, C. and Okuku, E. 2015. Globally significant greenhouse-gas emissions from African inland waters. *Nature Geoscience* 8, no.8: 637-642.

Cusick, D. 2018. A Levee That Saves One Town Could Imperil Another. Scientific American, Aug 8, https://www.scientificamerican.com/article/a-levee-that-saves-one-town-could-imperil-another/ (2021년 12월 1일 검색).

Hill, A.R., Labadia, C.F. and Sanmugadas, K. 1998. Hyporheic zone hydrology and nitrogen dynamics in relation to the streambed topography of a N-rich stream. *Biogeochemistry* 42, no.3: 285-310.

IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jackson, B., Pagella, T., Sinclair, F., Orellana, B., Henshaw, A., Reynolds, B., Mcintyre, N., Wheater, H. and Eycott, A. 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.

Keegan, M. 2021. Rivers are a surprisingly large source of greenhouse gases, and water pollution makes their emissions many times worse, Mar 24, https://www.bbc.com/future/article/20210323-climate-change-the-rivers-that-breathe-greenhouse-gases(2021년 11월 7일 검색).

Marzadri, A., Amatulli, G., Tonina, D., Bellin, A., Shen, L.Q., Allen, G.H. and Raymond, P.A. 2021. Global riverine nitrous oxide emissions: The role of small streams and large rivers. *Science of The Total Environment* 776: 145148.

Passeport, E., Vidon, P., Forshay, K.J., Harris, L., Kaushal, S.S., Kellogg, D.Q., Lazar, J., Mayer, P. and Stander, E.K. 2013. Ecological engineering practices for the reduction of excess nitrogen in human-influenced landscapes: A guide for watershed managers. *Environmental Management* 51, no.2: 392-413.

Poiani, K.A., Richter, B.D., Anderson, M.G. and Richter, H.E. 2000. Biodiversity conservation at multiple scales: functional sites, landscapes, and networks. *BioScience* 50, no.2: 133-146.

Teodosiu, C., Barjoveanu, G. and Teleman, D. 2003. SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT 1. RIVER BASIN MANAGEMENT AND THE EC WATER FRAMEWORK DIRECTIVE. *Environmental Engineering & Management Journal* 2, no.4: 377-394.

Wang, R., Zhang, H., Zhang, W., Zheng, X., Butterbach-Bahl, K., Li, S. and Han, S. 2020. An urban polluted river as a significant hotspot for water?atmosphere exchange of CH4 and N2O. E*nvironmental Pollution* 264: 114770.

Well, R., Weymann, D. and Flessa, H. 2005. Recent research progress on the significance of aquatic systems for indirect agricultural N2O emissions. *Environmental Sciences* 2, no.2-3: 143-151.

Zhang, W., Li, H., Xiao, Q. and Li, X. 2021. Urban rivers are hotspots of riverine greenhouse gas (N2O, CH4, CO2) emissions in the mixed-landscape chaohu lake basin. *Water Research* 189: 116624.

국토연구원 Working Paper는 다양한 국토 현안에 대하여 시의성 있고 활용도 높은 대안을 제시할 목적으로 실험정신을 가지고 작성한 짧은 연구물입니다. 투고된 원고는 정해진 절차를 거쳐 발간되며, 외부 연구자의 투고도 가능합니다. 공유하고 싶은 새로운 이론이나 연구방법론, 국토 현안이나 정책에 대한 찬반 논의, 국내외 사례 연구나 비교연구 등 국토분야 이론이나 정책에 도움이 될 어떠한 연구도 환영합니다.
투고를 원하시는 분은 국토연구원 연구기획·평가팀(044-960-0582, jhkim@krihs.re.kr)으로 연락주십시오. 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 드립니다.

WP 21-25

온실가스 저감을 위한 하천 및 수변공간 관리방안 연구

연 구 진 김준성
발 행 일 2021년 12월 28일
발 행 인 강현수
발 행 처 국토연구원
홈페이지 http://www.krihs.re.kr

KRIHS 국토연구원