Vol. 46(1):93-103
http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2024003

Ocean and Polar Research

March 2024

Review

하구 환경의 유기탄소 순환에 관한 국내 연구 동향

강수진*

한국해양과학기술원 해양환경연구부
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385

Research Trends on the Organic Carbon Cycle in Estuarine Environment in South Korea

Sujin Kang*

Marine Environment Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

Abstract : Estuaries are connecting pathways where terrestrial carbon is transported to the ocean and environments where various biogeochemical cycles occur. It is essential to estimate the carbon flux across the land-sea continuum to accurately determine the global carbon budget. Additionally, understanding the carbon characteristics of estuarine environments provides valuable information for watershed management and coastal ecosystem conservation. This paper introduces research results in Korea regarding the organic carbon cycle in estuarine environments. In particular, it focuses on research results concerning organic carbon characteristics using stable and radioisotopes, and, based on this, suggests directions for future study.

Key words : carbon cycle, organic carbon, carbon flux, carbon isotopes

1. 서 론

지구상에는 대기권, 생물권, 지권 및 수권에 일련의 탄소 저장소가 있다. 이들 저장소에서 일어나는 탄소의 생성, 소비 그리고 저장소 간의 탄소 이동 과정을 '탄소 순환'이라고 하며, '탄소 수지(carbon budget)'는 이러한 탄소 순환 과정에서 일어나는 탄소의 배출과 흡수 간의 균형과 차이를 의미한다(Ciais et al. 2013). 탄소 수지는 최근 몇 십 년 동안 기후 과학 및 관련 정책 분야에서 기후 변화의 핵심 개념으로 자리 잡았으며(Lahn 2020), 전 지구 기후 변화 연구의 주요 이슈 중 많은 부분이 육지-해양-대기 탄소 저장소 간의 탄소 순환과 탄소 수지를 이해하는 것과 관련되어 있다. 1950년대 대기 이산화탄소(CO_2) 모니터링이 시작된 이후, 대기 중 CO_2 농도는 100 ppm 이상 증가하였다(Crisp et al. 2022). 대기 중 CO_2 증가는 전 지구적 생지화학 순환 과정을 통해 일어나는 각 탄소 저장소 간의 흐름과 변환에 의해 제어된다(Friedlingstein et al. 2022). 2023년에 발표된 전 지구 탄소 수지 연구 결과에 따르면, 1850-2022년 사이에 화석 연료 및 토양 사용 등의 인간 활동으로 인해 방출된 CO_2의 누적 방출량 695 GtC이었다(Friedlingstein et al. 2023). 이 중 225 GtC이 육상에(land sink), 180 Gt이 해양에 흡수(ocean sink)되었고, 280 Gt이 대기에 증가분(atmospheric increase)으로 남게 되었다(Friedlingstein et al. 2023). 하지만 지역별 생지화학 순환의 차이와 복잡한 상호 작용은 탄소 이동의 정량적 추정에 대한 큰 불확실성을 야기했으며, 이는 총 배출량과 흡수량 사이의 불균형을 발생시켰다(Friedlingstein et al. 2023). IPCC의 제6차 평가 보고서에서 기후 변화는 약 50%의 확률로 예측되었는데, 육지와 관련된 탄소 순환

*Corresponding author. E-mail: sjkang@kiost.ac.kr

은 기후 변화 예측 불확실성을 증가시키는 주요 원인 중 하나로(Friedlingstein et al. 2014), 이와 관련하여 강을 통해 바다로 이동하는 탄소의 중요성이 전 지구 탄소 수지 평가에서 꾸준히 확대되고 있다(Battin et al. 2009; Butman and Raymond 2011; Drake et al. 2018). 하지만 강을 통해 바다로 이동하는 탄소에 관한 연구가 계속 증가하고 있음에도 불구하고, 소 하천에서의 연구 미비, 기후 변화, 인간 활동에 의한 환경 변화와 같은 이유로 여전히 많은 불확실성이 존재한다. 국내에서도 마찬가지로 강과 해양을 연결하는 지역에서 탄소순환 연구가 꾸준히 증가, 확대되고 있으며, 중요성 또한 대두되고 있다. 이 논문에서는 하구 환경의 유기탄소 순환에 대한 국내 연구 동향을 소개하고, 이를 바탕으로 앞으로 필요한 연구에 대해 제언하고자 한다.

2. 하구 환경에서 유기탄소 연구의 중요성과 국내 연구 현황

국내 하구의 특성과 하구 연구 현황

바다에 자연적으로 연결된 강 혹은 해수가 육지 유역으로부터 유입되는 담수와 희석이 이루어지는 수계 어귀의 모두 또는 일부분을 하구라고 한다(Lee et al. 2011). 강을 통해 하구로 운반되는 유기탄소는 연안 해역을 지나 먼바다로 이동한다. 하구는 육지에서 해양으로 유기 탄소를 비롯한 여러 유기물을 운반하는 통로 역할을 하며, 약 1 Pg의 탄소가 매년 강을 통해 바다로 이동한다(Drake et al. 2018). 하구 환경 내의 탄소는 성상과 입자 크기에 따라 유기탄소와 무기 탄소, 용존성 탄소와 입자성 탄소로 구분되는데, 강을 통해 하구로 유입되는 탄소의 조성과 특성은 유역의 토지 이용 그리고 유량과 강우량과 같은 수문학적 특성에 영향을 받는다(Canuel et al. 2012; Drake et al. 2018). 그 때문에 하구 유기탄소의 성질(조성, 기원)과 양(농도, 이동량)에 대한 정보는 유역의 환경 특성을 종합적으로 보여주는 지표로 활용될 수 있다(Lee et al. 2021a; Oh 2016). 육상과 해양의 연결 통로 역할 외에도 하구는 유기물의 생산, 분해, 변동이 일어나는 중요한 장소이다(Canuel et al. 2012). 하구에서는 담수와 해수가 혼합되며, 이에 따라 염분, 유기 및 무기 탄소와 같은 생지화학 인자들은 거동 특성에 따른 분포가 달라진다. 하구는 복잡한 생지화학 과정이 일어나는 역동적인 환경이다. 하구 환경으로 유입된 유기물은 미생물 분해로 인해 CO_2로 방출되거나, 난분해성 유기물과 같은 안정적인 형태로 전환되기도, 흡착되어 바닥으로 가라앉기도 하며, 인위적 요소에 영향을 받아 변동되기도 한다(Canuel et al. 2012; Regnier et al. 2013). 이처럼 하구로 이동한 유기물은 생분해, 광분해, 산화, 응집, 퇴적 등의 다양한 생물학적 및 비생물학적 과정에 의해 영향을 받는다(Canuel et al. 2012) (Fig. 1).

전국 하구 유역 면적은 총 32,483 km^2로 463개의 하구가 존재한다(Lee et al. 2011). 하구 유역의 토지 피복 구성 비율을 보면 전체 면적의 39.1%를 산림이, 28.8%를 농경지가 차지하고 있으며, 이어서 수역(16.4%), 시가지(5.8%), 초지(4.7%), 습지(2.9%), 나지(2.3%)의 순서로 나타났다(노와 이 2014). 하구는 인공 구조물의 유무에 따라 자연적인 하구 순환이 유지되는 열린 하구와 하굿둑, 배수 갑문과 같은 인공 구조물 등에 의해 하구 순환이 의해 단절된 닫힌 하구로 나눌 수 있다(노와 이 2014). 국내 하구 중 열린 하구는 235개(50.7%), 닫힌 하구는 228개로 조사되었다(Lee et al. 2011). 한강 서해 권역, 금강 권역, 영산강 권역에서 닫힌 하구의 비율이 높게 나타났고, 동해안에는 열린 하구의 비율이 높게 나타났다(노와 이 2014). 특히 우리나라 5대강인 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강의 경우 한강과 낙동강을 제외한 세 개 강 모두 하굿둑으로 닫혀있다. 한강의 경우 하굿둑은 없지만 하류에 신곡수

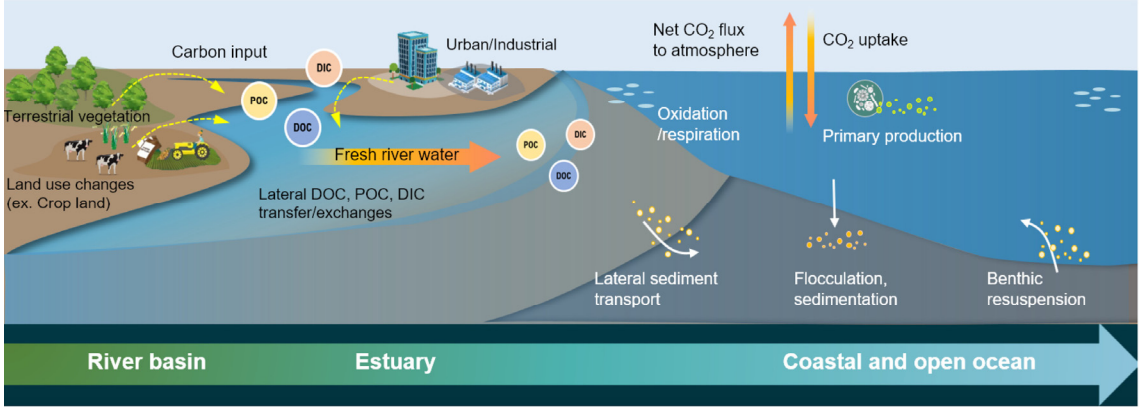

Fig. 1. Schematic of the river-estuary-ocean continuum. The sources of the carbon and diverse biogeochemical processes occur in the river-estuary-ocean continuum

중보가 건설되어 있어 완전한 자연 하구의 형태를 가지고 있진 않다. 낙동강 하굿둑(1983년 착공, 1987년 완공), 금강 하굿둑(1983년 착공, 1990년 완공), 영산강 하굿둑(1987년 착공, 1981년 완공)은 상류로 바닷물의 유입을 막고, 홍수를 조절하며, 주변 지역에 용수 공급을 원활하게 하는 등의 다목적 이유로 건설되었다. 하지만 하굿둑 건설 이후 수질오염이 가속화되거나, 식물플랑크톤의 대증식이 일어나는 등 다양한 환경 문제가 초래되고 있어 수문 개방을 통한 해수 유통, 하굿둑 철거 등 자연 하구의 모습으로 다시 되돌리려는 논의가 지속해서 이루어지고 있다.

이와 같은 이유로 최근 들어 하구 환경, 하구 생태에 관한 연구가 증가하는 추세다. 국가 과학기술 지식정보 서비스(NTIS 2023)에서 '하구', '탄소'를 검색어로 검색된 국가 연구개발 과제는 총 41건이었다(2002-2023년) (Fig. 2). 연도별 과제 건수 추이를 보면 2019년 이후 연구과제가 급격히 증가하였으며, 최근 들어 국내에서 관련 연구가 활발하게 수행되고 있음을 알 수 있었다(Fig. 2). 대표적으로 환경부에서는 2008년부터 하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 사업(환경부)을 통해 하천 및 하구의 수생태계의 수질, 생물 서식 현황을 조사해 왔다. 2014년에는 금강 하구를 대상으로 환경개선, 생태계 기능 증진 및 보전, 복원, 환경 관리를 위한 '하구역 종합관리시스템 개발연구(해양수산부)'가 5년간 수행되어 금강 하구에서 환경 연구가 복합적으로 진행되었다. 2021년에는 한반도 해양, 육상, 대기에서 탄소 거동을 진단, 이해하고 분석하며 이를 통해 국가 기후변화 대응 능력을 향상하기 위해 '해양-육상-대기 탄소순환 시스템 연구 사업(과학기술정보통신부)'이 시작되었다. 이를 통해 주요 강 하구, 연안, 해양과 같은 한반도의 다양한 환경을 대상으로 종합적 탄소 순환 연구가 수행되고 있다. 이 외에도 과학기술분야 기초연구사업(예를 들어, '강-해양 연결지역에서 유기탄소 이동 연구(과학기술정보통신부)') 등과 같이 개별 연구자들의 연구를 통해 하구 환경에서 초창기 탄소 순환 연구가 수행되어 왔다. 이처럼 국내 하구에서의 유기탄소 순환 연구는 국제 연구들에 비해 시작은 늦었지만, 국내 연구자들에 의해 국제적 수준으로 발전하고 있다.

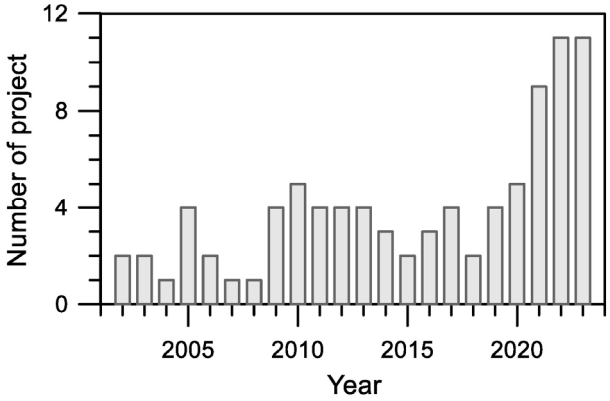

Fig. 2. The trends in the number of national research and development projects were examined by searching for the terms 'estuary' and 'carbon' in the National Science and Technology Knowledge Information Service (NTIS 2023) database for the years of 2002 to 2023

유기 탄소 유출량(carbon flux) 연구

전 지구적인 하천 탄소의 유출량은 1980년대에 보고되었다(Meybeck 1982). 국내에서도 강을 통해 이동하는 물질의 양과 특성, 그리고 하구와 연안에서 일어나는 다양한 생물 화학적 과정들은 국내 해양 연구가 시작되던 초창기 시기부터 국내 연구자들의 관심 분야였다(Kang 1967; 최 등 1968). 1972년 한국해양학회지에 낙동강 하구에서 측정된 입자성 유기탄소의 농도와 C/N비가 발표되었다(최와 정 1972). 그러나 강에서 해양으로 유출되는 유기탄소의 유출량을 보고한 연구논문은 2000년대에 들어와서야 발표되기 시작하였다.

2003년, 풍수기와 갈수기를 기준으로 만경강 하구역에서 유기탄소 유출량 연구가 수행되었다(박 등 2006). 용존 유기탄소는 갈수기와 풍수기에 각각 0.010 Gg yr^{-1}, 0.069 Gg yr^{-1}였으며, 입자성 유기탄소의 유출량은 갈수기와 풍수기에 각각 0.011 Gg yr^{-1}, 0.38 Gg yr^{-1}로 나타났다(Table 1). 2012-2013년에는 우리나라 5대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강)에서 동시에 유기탄소의 이동량 연구가 수행되었다(Lee et al. 2021b). Lee et al. (2021b) 등은 2012년 2월부터 2013년 11월까지 10-12회에 걸쳐 사계절을 아우르는 시료 채집을 수행하였고 유량과 유기탄소 농도를 이용해 유기탄소 유출량을 산정하였다. 용존 유기탄소는 5대강에서 4.3 Gg yr^{-1}에서 34.6 Gg yr^{-1}의 범위를 나타냈고 섬진강에서 가장 낮은 값을, 한강에서 가장 높은 값을 보였다(Table 1). 2016-2019년에는 금강과 섬진강에서 유기탄소 이동량 연구가 수행되었다(Kang et al. 2019). 마찬가지로 2016년 5월에서 2018년 3월까지 10-11회에 걸쳐 계절별 시료 채집을 실시하였고, 유량과 분석된 유기탄소 농도를 이용해 유기탄소 유출량을 산정하였다. 금강에서는 2016-2018년간 연평균 38.3±31.8의 용존 유기탄소, 35.4± 31.8 Gg yr^{-1}의 입자성 유기탄소가 유출되었으며, 같은 기간동안 섬진강에서는 용존 유기탄소와 입자성 유기탄소가 각각 2.5±3.9 Gg yr^{-1}, 0.9±1.3 Gg yr^{-1} 만큼 유출되었다(Table 1). 2012-2013년과 2016-2018년의 연구 결과를 비교해 보면 섬진강에서는 유기탄소 유출량이 두 연구 기간동안 비슷한 범위에서 나타난 반면, 금강에서는 큰 차이를 보였다. 2016-2018년 연구 기간 중 금강 하구에서는 하구호와 강 상류에서 일어난 식물플랑크톤 대번

Table 1. Total organic carbon, dissolved organic carbon, and particulate organic carbon fluxes measured from Korean rivers

Study area	Year	TOC flux (Gg yr^{-1})	DOC flux (Gg yr^{-1})	POC flux (Gg yr^{-1})	Reference
Han River	2012		28.7	9.4	Lee et al. 2021b
	2013		34.6	9.9	Lee et al. 2021b
	2016	17.9			Park and Ock 2017
Nakdong River	2012		34.5	16.7	Lee et al. 2021b
	2013		22.8	8.8	Lee et al. 2021b
Geum River	2012		14.5	7.5	Lee et al. 2021b
	2013		10.7	5.4	Lee et al. 2021b
	2016	2.9			Park and Ock 2017
	2016-2018		38.3±31.8	35.4±31.8	Kang et al. 2019
Yeongsan River	2012		7.5	4.1	Lee et al. 2021b
	2013		6.2	3.6	Lee et al. 2021b
	2016	2.6			Park and Ock 2017
Seomjin River	2012		5.6	1.8	Lee et al. 2021b
	2013		4.3	0.4	Lee et al. 2021b
	2016	2			Park and Ock 2017
	2016-2018		2.5±3.9	0.9±1.3	Kang et al. 2019
Mankeong River	2003 (Dry season)		0.010	0.011	Park et al. 2006
	2003 (Wet season)		0.069	0.38	Park et al. 2006
Tamjin River	2016	0.20			Park and Ock 2017

식으로 인해 유기탄소 농도가 증가하였으며, 그 영향으로 높은 유기탄소 유출량이 나타난 것으로 여겨진다(Kang et al. 2019).

연구자가 직접 측정한 데이터를 기반으로 수행된 연구 외에도 국가 수질 측정망 자료나 위성, 수문 모델 결과를 활용해 육상에서 해양으로 이동하는 탄소의 유출량을 산정한 연구가 지속해서 수행되고 있다. 국내에서는 2008년 이후로 정부 차원에서 국가 주요 하천과 호소에 수질 유량 측정망을 구축하여 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC) 농도를 모니터링 하고 있다. 박과 옥 (2017)은 2016년에 수질 유량 측정망에서 모니터링 된 총유기탄소 농도와 유량을 활용해 국내 대 하천 하구를 통해 방출되는 총 유기탄소의 유출량을 제시하였다. 2016년 TOC 유출량은 한강에서 17.9 Gg yr^{-1}으로 가장 높게 나타났고, 금강, 영산강, 섬진강에서 2 Gg yr^{-1}에서 2.9 Gg yr^{-1}의 범위를 보였다. 한편 실측 자료를 이용하는 탄소 유출량 연구 외에도 여러 가지 수문 모델과 탄소 유출모델을 활용한 연구 또한 시도되고 있는데, '위성 기반 한반도 주변 해역 해양 탄소 추정 모델 개발' 연구 사업에서는 SWAT 수문유출 모형을 이용하여 강에서 해양으로의 총 탄소 유출량을 추정하였다(해양수산부 2018). 2012-2015년의 기간 동안 국내 4대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강)에서 방출되는 총 탄소의 합은 158 Gg yr^{-1}였으며, 각 유역 별로는 한강 50 Gg yr^{-1}, 낙동강 33 Gg yr^{-1}, 금강 64 Gg yr^{-1}, 영산강 11 Gg yr^{-1}로 모의되었다.

이와 같이 같은 강에서 추정된 결과임에도 상이한 유출량을 보이는 이유는, 연구 시기의 차이, 연구 대상으로 한 탄소의 차이(총 유기탄소, 총 탄소), 활용 데이터의 차이(현장 분석, 수질 유량 측정망 자료 활용 등) 때문으로 사료된다. 최근 들어 우리나라는 연간 강우 변동성이 심화되고 있다. 2000년부터 2021년까지 지난 10년간 5대강의 유역 면적당 연 강우량을 살펴보면 2015년에 711-1,105 mm로 가장 낮은 연 강우량이 측정되었고, 2003년에 1,679-1,915 mm로 가장 높은 연 강우량이 측정되어 평균 1,000 mm에 가까운 차이가 관측되었다(WAMIS 2023, Fig. 3). 이러한 강우량 급격한 연간 변동은 중장기 연구를 기반으로 한 유기탄소 유출량 연구의 필요성을 시사한다. 더불어 댐, 보 건설과 같은 지속적인 유역환경의 변화와 유역에서의 인간활동도 유량 및 유기탄소 특성에 강한 영향을 미치고 있다(Butman et al. 2015; Wang et al. 2016). 따라서

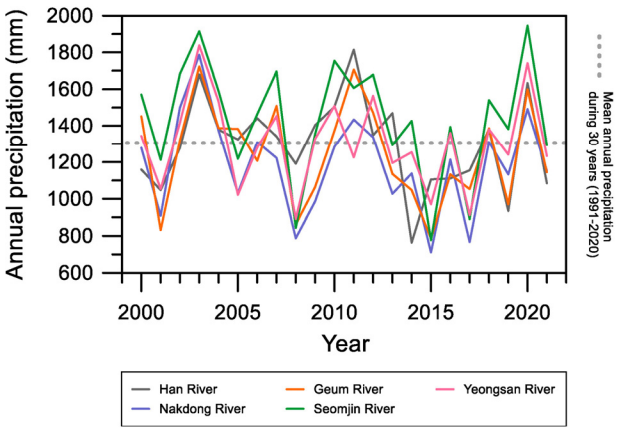

Fig. 3. Annual precipitation variability observed from 2000 to 2021 in Korea's five major river basins. Note that data from WAMIS (2023)

정확한 유기탄소 유출량 산정을 위해선 더 많은 유기탄소 관측 데이터를 기반으로 한 장기간의 연구가 필요할 것이다. 연구 방법의 차이(농도x유량의 단순 계산, 모델 활용 등)도 모의된 유출량에 영향을 미칠 것으로 여겨진다. 탄소 유출량 연구는 주로 관측 데이터를 기반으로 연구되고 있지만, 관측 기반 연구는 시간과 재원이 많이 소요되므로 적은 수의 데이터를 이용해 월간, 혹은 연간 유출량을 추정해야 한다는 단점이 있다. 때문에 실측 연구와 더불어 자동 측정망, 위성 자료, 수문 모델을 함께 활용해 각 연구법의 단점을 보완하는 지속적인 시도가 필요할 것이다.

유기 탄소 특성 연구: 탄소 동위원소 활용 연구를 중심으로

국내에선 하구 유기탄소의 기원과 반응성을 파악하기 위해, 화학적, 광학적 특성 분석 등 다양한 방면의 연구가 진행되고 있다. 유기탄소의 기원과 반응성을 파악하는 데 가장 많이 활용되고 있는 연구기법 중 하나가 바로 탄소 동위원소를 활용한 연구기법이다. 본 논문에서는 동위원소 활용 연구를 중점적으로 다루고자 한다. 동위원소란 같은 수의 양성자를 가지고 있지만 중성자의 수가 다른, 즉, 원자번호가 같지만, 질량수가 다른 원소를 의미하며, 탄소는 ^{12}C, ^{13}C, ^{14}C의 세 가지 동위원소가 존재한다. 동위원소 중 방사능 붕괴를 하지 않는 원소를 안정동위원소(stable isotope)라고 하고, 방사능 붕괴를 하는 원소를 방사성 동위원소(radio isotope)라고 한다.

하구 환경에 존재하는 유기탄소는 크게 식물플랑크톤과 같은 내부 생산으로부터 만들어지는 해양 생물 기원의 유기탄소(autochthonous organic carbon)와 육상식물이나 토양 등 육지에서 유입되는 외부 기원 유기탄소(allochthonous organic carbon)로 구분할 수 있다. 육상식물이나 식물플랑크톤에 포함된 탄소에는 이들이 일차생산에서 사용한 무기 탄소의 기록이 반영되기 때문에, 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$)를 활용해 그 기원을 해석할 수 있다(Peterson and Fry 1987). 예를 들어 육상식물의 경우에는 대기 중 이산화탄소를 이용해 광합성 하는데, 이때 식물의 광합성 기작에 따라서 식물의 탄소 안정동위원소비가 달라진다. C_3 식물의 경우 보통 -32‰ 에서 -24‰의 탄소 안정동위원소비를 가지고, C_4 식물은 -18‰ 에서 -7‰ 의 더 높은 값을 가진다(Kang et al. 2020a; Marwick et al. 2015; Meyers 1997; Peterson and Fry 1987). 담수 식물플랑크톤은 -32‰ 에서 -23‰의 범위를 보이는데, 일차생산에 활용하는 무기탄소의 존재 형태와 값에 따라서 −39‰에서 -6‰ 까지의 더 넓은 범위의 값을 가지기도 한다(Lamb et al. 2006; Vuorio et al. 2006). 해양 식물플랑크톤은 -16‰ 에서 -23‰의 값을 가진다고 알려져 있다(Lamb et al. 2006). 하지만 식물플랑크톤 대증식과 같이 수층의 무기탄소 존재비에 영향을 주는 현상이 발생할 경우엔 식물플랑크톤의 탄소 안정동위원소비가 변동할 수 있으므로 해석에 유의해야 한다. 영산강 하구(Lee et al. 2013)와 금강, 섬진강 하구(Kang et al. 2019)에서 수행된 입자성 유기탄소 연구, 마산만에서 수행된 용존 유기탄소 연구(Lee and Kim 2018)는 유기탄소의 농도와 안정동위원소비 분석 기법이 유기물의 기원을 추정하는데 유용하게 활용될 수 있음을 제안하였다. 섬진강 하구에서 Kim et al. (2019)도 입자성 유기탄소의 안정동위원소비를 보고하였는데, 그 결과를 섬진강 하구 생태계 먹이망 파악에 활용하였다. 이와 같이 유기탄소 특성 연구에서는 유기탄소의 농도와 이들의 안정동위원소비를 측정하여 그 기원과 특성을 파악하는 연구가 주로 수행되었으나, 이후 방사성 탄소와 함께 분석하는 연구가 확대되었다.

방사성 탄소동위원소는 시간에 따라 방사능 붕괴를 하므로 방사성 탄소동위원소비($\Delta^{14}C$)를 통해 탄소가 만들어진 시간 정보를 획득할 수 있다. 탄소의 방사성 동위원소비는 탄소의 체류시간, 반응성을 반영하기 때문에 탄소 순환 추적자로 활용될 수 있다(McNichol and Aluwihare 2007). 일반적으로 환경에서 측정되는 $\Delta^{14}C$의 범위는 대기 중 이산화탄소가 20‰에서 200‰, 이를 고정하는 육상식물의 경우 이와 유사한 20‰에서 200‰의 높은 값을 가지고, 토양은 그보다 더 낮은 값을 가진다(Marwick et al. 2015). 식물플랑크톤은 -200‰에서 80‰의 범위로 보고되고 있으며, 화석연료나 기반암 기원의 케로젠, 화석 탄소는 −1,000‰의 값을 가진다(Marwick et al. 2015). 2016년 여름철 금강과 섬진강 하구에서 분석된 입자성 유기탄소의 $\delta^{13}C$와 $\Delta^{14}C$ 결과는 열린하구와 닫힌하구에서 여름철 유기탄소 기원의 차이를 보여주었다(Kang et al. 2020b) (Table 2). 이어 발표된 연구에서는 여름철과 겨울철에 계절에 따라 서로 다른 특성을 가진 두 하구 시스템에서 입

Table 2. Concentration, stable carbon isotope, and radiocarbon isotopes of the dissolved and particulate organic carbon of Korean rivers

Study area	Date (YYYY. MM)	Salinity (psu)	DOC concentration (mg L^{-1})	DOC-$\delta^{13}C$ (‰ VPDB)	DOC-$\Delta^{14}C$ (‰)	POC concentration (mg L^{-1})	POC-$\delta^{13}C$ (‰ VPDB)	POC-$\Delta^{14}C$ (‰)	Reference
Han River	2012.02–2013.11		1.1–1.7	-27.4–-26.6	-36.3–0.8	0.2–1	-30	-125.5	Lee et al. 2021b
Nakdong River	2012.02–2013.11		1.9–3.3	-27.1–-21.9	-124.3–-16	0.3–4.2	-29.9–-29.5	-73.9–-75.4	Lee et al. 2021b
Yeongsan River	2012.02–2013.11		1.9–5.5	-27.2–-24.3	-118.2–-24.3	0.6–4.3	-28.7–-25.6	-44.1–35.1	Lee et al. 2021b
Seomjin River	2012.02–2013.11		1.1–2.4	-27.4–-22	-1–-1	0.1–1.9	-26.4–-21.2	-22.6–-2.4	Lee et al. 2021b
	2015.02–2015.11	0					-26.7–-24.9		Kim et al. 2019
	2016.05–2018.05	0	1.20–3.22	-29.2–-16.8		0.12–1.70	-29.1–-24.6		Kang et al. 2019
Geum River	2012.02–2013.11		1.9–4	-27.7–-26.3	-123.6–-69	0.6–1.9	-28.6–-28.5	-64.9–-43.8	Lee et al. 2021b
	2016.05–2018.05	0	2.83–5.25	-28.4–-25.9		0.64–12.7	-32.6–19.4		Kang et al. 2019
Tamjin River	2016.08–2016.12	0					-27.3–-21.9		Park et al. 2017
Lake Shiwha tributary	2012.11–2013.10	0.29–5.2	2.4–13			0.74–6.3	-30.6–-24.5		Lee et al. 2017
	2015.06						-28.0–-23.7		Hong et al. 2019
Geum River Estuary	2016.08	0.1–34.0				0.19–12.7	-23.5–-19.4	-98.2–-48.1	Kang et al. 2020a
	2016.12	0.3–34.9				0.26–2.65	-32.5–25.3	-351–-87.03	Kang et al. 2020b
Yeongsan River Estuary	2008.11–2009.08	0–1.2				1.2–13.7	-31.1–-13.3		Lee et al. 2013
Seomjin River Estuary	2015.02–2015.11	0-33					-23.5–-18.9		Kim et al. 2019
	2016.08	0–35.2				0.76–1.04	-29.1–-21.1	-188.3–-51.4	Kang et al. 2020a
	2016.12	0.1–35.2				0.32–0.49	-29.0–-26.6	-302.2–-187.3	Kang et al. 2020b
Tamjin River Estuary	2016.08–2016.12	3–32					-27.3–-19.8		Park et al. 2017
Lake Shiwha	2012.11–2013.10	1.3–31	1.7–4.6			0.36–1.9	-27.3–-19.5		Lee et al. 2017
Masan bay	2011.08	10.2–20.8	1.3–2.2	-25.4–-20.6					Lee et al. 2020
	2016.08	25.5–32.0	1.5–2.3	-26.2–-21.1					Lee et al. 2020

자성 유기탄소의 기원을 살펴보았는데, 여름철과 겨울철에 채집된 POC의 서로 다른 $\Delta^{14}C$ 차이를 통해 재부유된 퇴적물이 하구 수층 입자성 유기탄소에 큰 기여를 미침을 밝힐 수 있었다(Kang et al. 2020a) (Table 2). 수환경 내 주로 존재하는 탄소의 세가지 형태인 용존 유기탄소(Dissolved Organic Carbon, DOC), 입자성 유기탄소(Particulate Organic Carbon, POC), 용존 무기탄소(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)의 $\delta^{13}C$와 $\Delta^{14}C$비율을 처음으로 동시에 비교 분석한 연구 결과는 2021년 처음 발표 되었다(Lee et al. 2021b) (Table 2). Lee et al. (2021b)은 우리나라 5대 강의 가장 끝단(해수의 영향이 미치지 않는 담수의 끝) 정점에서 DOC, POC, DIC의 탄소 안정동위원소와 방사성 동위원소를 모두 측정하였다. 그 결과 대부분 모든 강에서 여름철엔 어린(young) 탄소가 강을 통해 방출됨을 확인할 수 있었다. 또한 DIC는 토양이나 암석의 자연적인 풍화작용에서 주로 기원하지만, DOC나 POC는 댐의 건설, 하수처리장 방류와 같은 인간 활동의 영향을 받을 수 있음을 시사하였다.

이처럼 강 하류를 통해 하구로 유입되는 유기탄소는 자연적 영향뿐만 아니라 인간 활동에 의해서도 많은 영향을 받을 수 있음이 지속해서 제시되었다. 이에 도시, 공단 건설 등 인간 활동의 영향이 강 하류와 하구, 연안 환경에 미치는 영향을 파악하려는 연구가 다양하게 수행되었다. 이를 위해 탄소 동위원소비와 함께 다양한 화학 추적 인자를 함께 분석하는 멀티 프록시 연구가 수행되고 있다(i.e. Lee et al. 2017; Jin et al. 2018; Hong et al. 2019). 유역에 대규모 공업단지가 위치하는 시화호에서는 오염물질과 관련한 연구가 다양하게 연구가 수행되었는데, POC와 DOC의 탄소 동위원소와 함께 용존 유기물의 형광 특성, 입자 물질의 질소, 황 동위원소 분석을 활용한 연구는 주변 유역에서 시화호로 유입되는 유기물의 기원과 특성을 보여주었다(Lee et al. 2017). 이를 통해 각 연구 시기별로 농촌, 도시, 산업지역에서 유래한 유기물이 얼마나 유입되는지를 계산할 수 있었다(Lee et al. 2017) (Table 2). 또한 탄소, 질소의 안정동위원소비와 잔류성 독성 물질(알킬페놀, PAH 등)의 농도 분석은 폭우 때 우수관을 통해 유기오염물질이 주로 유입됨을 보여주었다(Hong et al. 2019). 한편 대도시를 지나는 강의 하류도 하수처리장 방류수 유입 등 도심에서 유입되는 물질의 영향을 많이 받는다. 한강에서는 중류부터 하류까지 채취된 DOC의 $\delta^{13}C$와 $\Delta^{14}C$ 그리고 수층에서 채집된 CO_2 와 CH_4의 $\delta^{13}C$ 결과가 발표되었다. 연구 결과, 도심에서 유입된, 오래된 유기탄소가 강 하류지역의 용존유기탄소와 온실가스 배출에 영향을 미침을 시사했다(Jin et al. 2018).

3. 향후 연구 방향에 대한 제언

고해상도 관측 연구의 필요성

염분의 영향이 미치지 않는 강의 가장 끝단 지점과, 염분의 영향이 있는 기수역에서 분석된 용존 유기탄소와 입자성 유기탄소의 탄소동위원소비 값이 Table 2와 Fig. 4에 정리되어 있다. 탄소 안정동위원소비는 DOC와 POC 모두 대체로 강의 끝단에서 기수역보다 낮게 나타났는데, 이는 낮은 탄소 안정동위원소비를 보이는 육상기원 유기탄소의 영향이 강에서 더 컸기 때문으로 여겨진다. 분석된 값을 보면, 계절별 조사가 이루어진 강(금강, 섬진강)의 탄소 안정동위원소비 값이 특정 계절에 조사된 강보다 더 넓은 범위의 값을 가지고 있는 것을 볼 수 있었다. 안정동위원소비의 범위는 각 강에서 5‰ 내외의 안정동위원소비의 범위를 보였지만 섬진강 끝단에서 분석된 용존 유기탄소 값과 금강 끝단에서 분석된 입자성 유기탄소의 안정 동위원소비 값은 다른 강들보다도 훨씬 더 넓은 범위의 값을 보이고 있었다(Fig. 4). 우리나라 강과 하구 환경에 존재하는 유기탄소는 육상기원과 식물플랑크톤 기원 유기탄소의 상대적 기여도뿐만 아니라 식물플랑크톤의 증식 정도에 따라서도 탄소 안정동위원소비가 달라지는 등 계절에 따라 그 기원과 특성이 달라진다(Kang et al. 2020a). 기후변화로 인한 폭우, 가뭄과 같은 극한 기상 현상 또한 탄소 방출량과 특성에도 영향을 미칠 수 있다(Qu et al. 2023; Shin et al. 2016). 예를 들어 2012~2013년 사이 낙동강에서 일 강우량이 3.16 mm 이상인 날은 46일(6.3%) 밖에 되지 않았지만 이 기간동안 연 강우량의 37%에 가까운 비가 내린 것으로 조사되었으며(Shin et al. 2016) 용존 유기탄소 농도 또한 증가했다. 따라서 정확한 탄소 유출량 산정과 특성 파악을 위해선 계절 변동성과 극한 기상 현상을 아우를 수 있는 고해상도의 중장기적 관측 조사 결과가 필요할 것이다.

분자수준 탄소 분석 연구의 필요성

지금까지는 전체 탄소 유출량과 크기에 따른(입자상, 용존상) 탄소 유출량 연구가 많이 이루어졌으나, 최근에는 기원별로 유래한 탄소의 유출량을 산정하는 연구 결과가 보고되고 있다(Kim et al. 2023; Lee et al. 2021a). 지질생체지표(lipid biomarker)는 특정 생물에서 유래한 분자물질로 이를 활용해 유기물의 기원을 추적할 수 있다. Lee et al. (2021a)은 금호강 하천수에서 채취한 입자성 물질에서 육상 고등식생, 조류, 박테리아, 분변기원 유기물의 마커로 활용되는 alkane, fatty acid, alcohol, sterol을 분석하였다. 이를 통해 각 정점에 존재하는 기원별 유기물의 농도를 제시하였으며, 계산 결과를 수리 수문 모델(Hydrological Simulation Program FORTRAN, HSPF)과 결합해 기원별

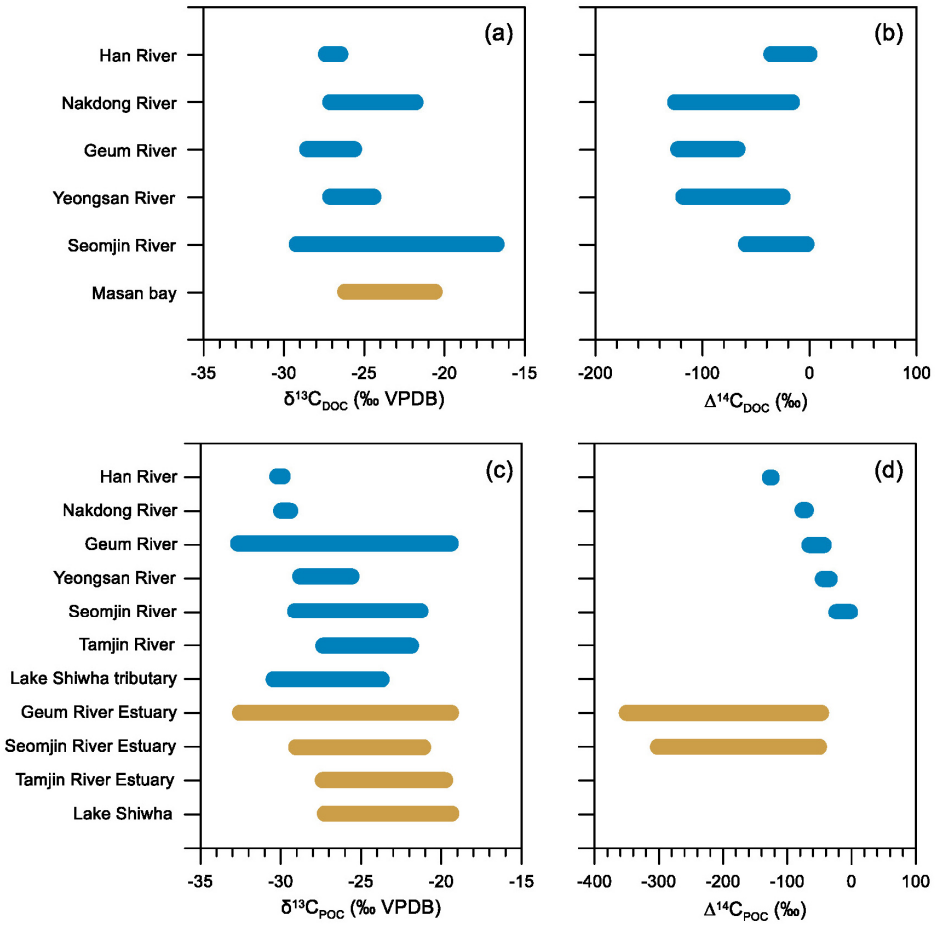

Fig. 4. (a) Stable carbon isotope ratio and (b) radiocarbon isotope of the dissolved organic carbon, as well as (c) stable carbon isotope ratio and (d) radiocarbon isotope of the particulate organic carbon measured in the Korean estuary systems. Blue bars describe values from the end of each river system, and brown bars represent the results from the brackish water zone. Note that data from Lee et al. (2013), Park et al. (2017), Kim et al. (2019), Kang et al. (2019, 2020a, 2020b), Lee et al. (2020) and Lee et al. (2021b)

유기탄소 유출량(flux)을 산정하였다. 기원별 질산염 방출량도 이와 유사하게 HSPF 모델을 활용하여 보고된 바 있다(Kim et al. 2023). 이와 같이 현장 관측 자료를 수리모델과 결합하면 더 정확한 유기탄소 유출량을 산정할 수 있을 것이며, 시간과 인력을 많이 요구하는 현장 관측의 단점 또한 보완할 수 있을 것이다. 나아가 기원별 유기물, 유기탄소 유출량 추정은 유역환경 관리에도 정확한 정보를 제공할 수 있을 것이라 여겨진다.

4. 맺음말

하구는 육상에서 생성되는 탄소가 해양으로 이동하는 연결 통로이자 그 자체로도 다양한 생지화학 순환이 일어나는 환경이다. 전 지구적 탄소 수지를 정확하게 추정하기 위해선 하구를 통해 해양으로 이동하는 탄소량 산정이 필수적이다. 더불어 하구 환경의 탄소 특성 파악은 유역 환경 관리와 연안 생태계 보전에도 유용한 정보를 제공할 수 있기 때문에 중요성이 더 대두되는 연구 분야라 할 수 있다. 탄소 농도 및 동위원소 분석을 통해 유출량 산정과 특성 파악 연구가 이루어지고 있지만, 계절 변동성과 경년 변동, 이상 기후 현상에 따른 변동성 파악을 위해 중장기적인 연구가 꾸준히 이루어져야 할 것이다. 또한 하구 환경 내에서 일어나는 유기탄소의 생지화학 순환 과정에 대한 연구도 수행되어야 할 부분이다. 비용과 시간, 노력이 많이 드는 어려움에도 불구하고 다양한 연구들이 시도되고 있으며, 이 논문에서는 국내 하구 환경과 유기탄소 연구 사례에 대해 소개하였다. 이 논문을 통해 국내 하구 탄소 순환 연구에 대한 관심을 불러일으키고, 이해를 높일 수 있길 기대한다.

사 사

논문 작성에 도움을 주신 김동우 박사, 김도균 박사에게 감사드립니다. 건설적인 의견을 주신 두 분의 심사위원에게 감사드립니다. 이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2023-00256005, 고품질 준실시간 해양그리드 데이터서비스 체계 개발).

참고문헌

노백호, 이창희 (2014) 하구유형에 따른 권역별 하구습지의 분포특성과 시계열 변동추이 분석. 대한지리학회지 **49**: 321-338

박준건, 김은수, 김경태, 조성록, 박용철 (2006) 만경강 하구역의 유기탄소 거동 및 분포. 한국해양환경공학회지 **9**(3): 131-140

박형근, 옥기영 (2017) 수질측정망을 이용한 국내 대하천 하구를 통한 총유기탄소 유출량 산정과 비교. 환경생물학회지 **35**(4):549-556. doi:10.11626/KJEB.2017.35.4.549

최상, 정태화, 곽희상 (1968) 한강의 영양염류 및 주요이온류의 년변화와 그 수질적고찰. 한국해양학회지 **3**:26-38

최상, 정태화 (1972) 낙동강 하구수역의 영양염류와 유기현탁물질. 한국해양학회지 **7**:1-14

해양수산부 (2018) 위성기반 한반도 주변해양 탄소 추정모델 개발 보고서. 해양수산부 해양수산과학기술진흥원, BSPM 59760-11426-1, 846 p

Battin TJ, Luyssaert S, Kaplan LA, Aufdenkampe AK, Richter A, Tranvik LJ (2009) The boundless carbon cycle. Nat. Geosci. **2**:598-600. doi:10.1038/ngeo618

Butman D, Raymond PA (2011) Significant efflux of carbon dioxide from streams and rivers in the United States. Nat Geosci **4**:839-842. doi:10.1038/ngeo1294

Butman DE, Wilson HF, Barnes RT, Xenopoulos MA, Raymond PA (2015) Increased mobilization of aged carbon to rivers by human disturbance. Nat Geosci **8**:112-116. doi:10.1038/ngeo2322

Canuel EA, Cammer SS, McIntosh HA, Pondell CR (2012) Climate change impacts on the organic carbon cycle at the land-ocean interface. Annu Rev Earth Planet Sci **40**:685-711. doi:10.1146/annurev-earth-042711-105511

Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M (2013) The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Chang. IPCC Clim. Cambridge University Press, Cambridge, pp 465-570

Crisp D, Dolman H, Tanhua T, McKinley GA, Hauck J, Bastos A, Sitch S, Eggleston S, Aich V (2022) How well do we understand the land-ocean-atmosphere carbon cycle? Rev Geophys **60**:1-64. doi:10.1029/2021RG000736

Drake TW, Raymond PA, Spencer RGM (2018) Terrestrial carbon inputs to inland waters: a current synthesis of estimates and uncertainty. Limnol Oceanogr Lett **3**:132-142. doi:10.1002/lol2.10055

Friedlingstein P, Meinshausen M, Arora VK, Jones CD, Anav A, Liddicoat SK, Knutti R (2014) Uncertainties in CMIP5 climate projections due to carbon cycle feedbacks. J Clim **27**:511-526. doi:10.1175/JCLI-D-12-00579.1

Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Bakker DCE, Hauck J, Landschützer P, Le Quéré C, Luijkx IT, Peters GP (2023) Global carbon budget 2023. Earth Syst Sci Data **15**:5301-5369. doi:10.5194/essd-15-5301-2023

Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Gregor L, Hauck J, Le Quéré C, Luijkx IT, Olsen A, Peters GP (2022) Global carbon budget 2022. Earth Syst Sci Data **14**:4811-4900. doi:10.5194/essd-14-4811-2022

Hong S, Lee Y, Yoon SJ, Lee J, Kang S, Won EJ, Hur J, Khim JS, Shin KH (2019) Carbon and nitrogen stable isotope signatures linked to anthropogenic toxic substances pollution in a highly industrialized area of South Korea. Mar Pollut Bull **144**:152-159. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.05.006

Jin H, Kyung Yoon T, Begum MS, Lee EJ, Oh NH, Kang N, Park JH (2018) Longitudinal discontinuities in riverine greenhouse gas dynamics generated by dams and urban wastewater. Biogeosciences **15**:6349-6369. doi:10.5194/bg-15-6349-2018

Kang S, Kim JH, Hwang JH, Bong YS, Ryu JS, Shin KH (2020a) Seasonal contrast of particulate organic carbon (POC) characteristics in the Geum and Seomjin estuary systems (South Korea) revealed by carbon isotope (δ^{13}C and Δ^{14}C) analyses. Water Res **187**:116442. doi:10.1016/j.watres.2020.116442

Kang S, Kim JH, Kim D, Song H, Ryu JS, Ock G, Shin KH (2019) Temporal variation in riverine organic carbon concentrations and fluxes in two contrasting estuary systems: Geum and Seomjin, South Korea. Environ Int **133**: 105126. doi:10.1016/j.envint.2019.105126

Kang S, Kim JH, Ryu JS, Shin KH (2020b) Dual carbon isotope (δ^{13}C and Δ^{14}C) characterization of particulate organic carbon in the Geum and Seomjin estuaries, South Korea. Mar Pollut Bull **150**:110719. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110719

Kang YJ (1967) Studies on the primary production in Suyong Bay. J Oceanol Soc Korea **2**:13-23

Kim C, Kang HY, Lee YJ, Yun SG, Kang CK (2019) Isotopic variation of macroinvertebrates and their sources of organic matter along an estuarine gradient. Estuaries Coasts **43**:496–511. doi:10.1007/s12237-019-00543-z

Kim SH, Lee DH, Kim MS, Rhee HP, Hur J, Shin KH (2023) Systematic tracing of nitrate sources in a complex river catchment: An integrated approach using stable isotopes and hydrological models. Water Res **235**:119755. doi:10.1016/j.watres.2023.119755

Lahn B (2020) A history of the global carbon budget. Wiley Interdiscip Rev Clim Chang **11**:1–9. doi:10.1002/wcc.636

Lamb AL, Wilson GP, Leng MJ (2006) A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using δ^{13}C and C/N ratios in organic material. Earth-Science Rev **75**:29–57. doi:10.1016/j.earscirev.2005.10.003

Lee DH, Kim SH, Won EJ, Kim MS, Hur J, Shin KH (2021a) Integrated approach for quantitative estimation of particulate organic carbon sources in a complex river system. Water Res **199**:117194. doi:10.1016/j.watres.2021.117194

Lee EJ, Shin Y, Yoo GY, Ko EB, Butman D, Raymond PA, Oh NH (2021b) Loads and ages of carbon from the five largest rivers in South Korea under Asian monsoon climates. J Hydrol **599**:126363. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126363

Lee K-H, Rho B-H, Cho H-J, Lee C-H (2011) Estuary classification based on the characteristics of geomorphological features, natural habitat distributions and land uses. J Korean Soc Oceanogr **16**:53–69

Lee SA, Kim G (2018) Sources, fluxes, and behaviors of fluorescent dissolved organic matter (FDOM) in the Nakdong River Estuary, Korea. Biogeosciences **15**:1115–1122. doi:10.5194/bg-15-1115-2018

Lee SA, Kim TH, Kim G (2020) Tracing terrestrial versus marine sources of dissolved organic carbon in a coastal bay using stable carbon isotopes. Biogeosciences **17**:135–144. doi:10.5194/bg-17-135-2020

Lee Y, Hong S, Kim MS, Kim D, Choi BH, Hur J, Khim JS, Shin KH (2017) Identification of sources and seasonal variability of organic matter in Lake Sihwa and surrounding inland creeks, South Korea. Chemosphere **177**:109–119. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.02.148

Lee Y, Jeong B, Shin Y-S, Kim S, Shin KH (2013) Determination of the origin of particulate organic matter at the estuary of Youngsan River using stable isotope ratios (δ^{13}C, δ^{15}N). Korean J Ecol Environ **46**:175–184. doi:10.11614/KSL.2013.46.2.175

Marwick TR, Tamooh F, Teodoru CR, Borges AV, Darchambeau F, Boillon S (2015) The age of river-transported carbon: a global perspective. Global Biogeochem Cy **29**:122–137. doi:10.1002/2014GB004911

McNichol AP, Aluwihare LI (2007) The power of radiocarbon in biogeochemical studies of the marine carbon cycle: insights from studies of dissolved and particulate organic carbon (DOC and POC). Chem Rev **107**:443–466. doi:10.1021/cr050374g

Meybeck M (1982) Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. Am J Sci **282**:401–450. doi:10.2475/ajs.282.4.401

Meyers PA (1997) Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. Org Geochem **27**:213–250. doi:10.1016/S0146-6380(97)00049-1

NTIS (2023) Ministry of Science and ICT. National Science and Technology Information Service. https://www.ntis.go.kr/ Accessed 13 Oct 2023

Oh N-H (2016) The loads and biogeochemical properties of riverine carbon. Korean J Ecol Environ **49**:245–257. doi:10.11614/KSL.2016.49.4.245

Park, H-G, Kang, D-W, Shin, K-H, Ock, G. (2017) Tracing source and concentration of riverine organic carbon transporting from Tamjin River to Gangjin Bay, Korea. Korean J Ecol Environ **50**(4):422–431 doi:10.11614/KSL.2017.50.4.422

Peterson BJ, Fry B (1987) Stable isotopes in ecosystem studies. Annu Rev Ecol Syst **18**:293–320. doi:10.1146/annurev.es.18.110187.001453

Qu Q, Xu H, Ai Z, Wang M, Wang G, Liu G, Geissen V, Ritsema CJ, Xue S (2023) Impacts of extreme weather events on terrestrial carbon and nitrogen cycling: a global meta-analysis. Environ Pollut **319**:120996. doi:10.1016/j.envpol.2022.120996

Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, Mackenzie FT, Gruber N, Janssens IA, Laruelle GG, Lauerwald R, Luyssaert S, Andersson AJ (2013) Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. Nat Geosci **6**:597–607. doi:10.1038/ngeo1830

Shin Y, Lee EJ, Jeon YJ, Hur J, Oh NH (2016) Hydrological changes of DOM composition and biodegradability of rivers in temperate monsoon climates. J Hydrol **540**:538–548. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.06.004

Vuorio K, Meili M, Sarvala J (2006) Taxon-specific variation in the stable isotopic signatures (δ^{13}C and δ^{15}N) of lake phytoplankton. Freshwater Biol **51**(5):807–822. doi:10.1111/j.1365-2427.2006.01529.x

WAMIS (2023) Water Resources Management Information System. http://www.wamis.go.kr/ Accessed 13 Oct 2023

Wang S, Fu B, Piao S, Lü Y, Ciais P, Feng X, Wang Y (2016) Reduced sediment transport in the Yellow River due to

anthropogenic changes. Nat Geosci **9**:38–41. doi:10.1038/ngeo2602

국문 참고자료의 영문표기

English translation / Romanization of references originally written in Korean

Rho P, Lee C-H (2014) Spatial distribution and temporal variation of estuarine wetlands by estuary type. J Korean Geographical Soc **49**(3):321–338

Park JK, Kim ES, Kim KT, Cho SR, Park YC (2006) Organic carbon behavior and distribution in the Mankyoung River Estuary. J Korean Soc for Marine Environ Engineering **9**(3):131–140

Park H-G, Ock G (2017) Estimation of the total terrestrial organic carbon flux of large rivers in Korea using the national water quality monitoring system. Korean J Environ Bio **35**(4):549–556. doi:10.11626/KJEB.2017.35.4.549

Choe S, Chung TW, Kwak H-S (1968) Seasonal variations in nutrients and principal ions contents of the Han River water, and its water characteristics. J Oceanol Soc Korea **3**(1):26–38

Choe S, Chung TW (1972) Nutrient and suspended organic particulates in the estuary of Nak-dong River. J Oceanol Soc Korea **7**(1):1–14

MOF (2018) Satellite based techniques for estimates of carbon cycle around Korean peninsular. Ministry of Oceans and Fisheries, Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion, BSPM 59760-11426-1, 846 p

Author's Information

Sujin Kang
Senior Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science and Technology,

Received Dec. 1, 2023
Revised Jan. 12, 2024
Accepted Jan. 17, 2024

Copyright © 2024 Ocean and Polar Research
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.