

# 탐진강-강진만의 댐하류 열린하구 시스템에서 유기탄소의 조성 및 기원 변화 연구

박형근 · 강동원<sup>1</sup> · 신경훈<sup>2</sup> · 옥기영\*

국립생태원 생태기반연구실, <sup>1</sup>국립생태원 생태조사연구실, <sup>2</sup>한양대학교 해양융합과학과

**Tracing Source and Concentration of Riverine Organic Carbon Transporting from Tamjin River to Gangjin Bay, Korea.** Park, Hyung-Geun (0000-0002-0376-1089), Dong-Won Kang<sup>1</sup> (0000-0003-1799-8289), Kyung-Hoon Shin<sup>2</sup> (0000-0002-3169-4274) and Giyoung Ock\* (0000-0002-9078-3090) (Division of Basic Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea; <sup>1</sup>Division of Ecological Survey Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea; <sup>2</sup>Marine Sciences and Convergence Technology, Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea)

**Abstract** The biogeochemical information of riverine organic matter gives a detailed and integrated recording of natural and anthropogenic activity within a watershed. To investigate the changes in quality and quantity of organic carbon transporting from mountain to ocean via river channels, we estimated the concentrations of dissolved (DOC) and particulate organic carbon (POC), and then traced the source origin of POC using stable carbon isotopes ratio before and after summer rainfalls in the Tamjin River and Ganjin Bay, Korea. Along the small watershed, a total of 13 sites including headwaters, dam reservoir, river and estuary were established for the study. We found some interesting findings in the aspect of distribution of DOC/POC concentration changing their origin sources dynamically flowing downstream. In particular, the river channel transport downstream mainly DOC to river mouth, although upper dam reservoir increased POC concentration by phytoplankton production in summer. Whereas, in the river mouth and estuary, POC was dominated not only by local supply from nearby reed saltmarsh, but also by marine phytoplankton production, respectively. The findings can contribute to increasing the understanding of riverine organic carbon transport in upper large dam and lower open estuary system.

**Key words:** organic carbon transport, dam impact, estuary, ecosystem linkage, POC

## 서 론

강과 하천을 흐르는 유기물은 수생태계의 일차생산력을 결정하고 먹이사슬을 거쳐 상위 영양단계의 생물군집에 영향을 미친다(Wipfli *et al.*, 2007; Stumm and Morgan

2012). 특히 하천을 통해 바다로 유출되는 육상유기탄소의 이동량과 유출특성을 파악하는 것은, 기수역이나 연안 생태계의 생물다양성을 유지관리하는 연구뿐만 아니라(Schlünz and Schneider, 2000; Smittenberg *et al.*, 2006), 최근에는 지구규모의 탄소 물질순환을 해석하는 핵심 요소로서 중요성이 높아지고 있다(Schlesinger and Melack, 1981; Hedges *et al.*, 1997).

이러한 하천유기탄소는 성상에 따라 크게 용존성(DOC,

Manuscript received 9 November 2017, revised 14 December 2017, revision accepted 26 December 2017  
\* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5987, Fax: +82-41-950-5953, E-mail: ockgy@nie.re.kr

dissolved organic carbon)과 입자성(POC, particulate organic carbon)으로 구분된다. 그리고 발생기원에 따라서는 식물플랑크톤과 부착조류와 같은 내부생성물질(autochthonous organic matter)과, 낙엽이나 토양유기물과 같은 외부유입물질(allochthonous organic matter)로 나뉜다(Thorp and Delong, 1994; Allan and Castillo, 2007). 산림에서 유입된 입자성 유기탄소는 산지계류 생태계(headwater ecosystem)를 유지하는 주요 에너지원으로 작용한다(Nakano *et al.*, 1999; Finlay, 2001). 유역 상류에 다목적 댐과 농업용 저수지가 건설되어 있는 댐 하류 하천에서는 상류댐에서 방류되는 호수기원(lake-derived organic matter) 물질이 새로운 에너지원으로 공급되면서(Ock and Takemon, 2014), 상류댐에서 방류되는 식물플랑크톤의 비율이 높을수록, 이를 먹이원으로 하는 여과섭식자(filter feeders)의 우점도가 높아지는 등 저서무척추동물 군집의 종다양성을 변화시키고 있다(Richardson and Mackay, 1991). 강하구와 연안역에서의 유기탄소의 공급은 주로 하천을 통해 들어오는 육상기원(terrestrial-derived organic carbon)과 해양생물에 의해 생산되는 자생기원(marine-derived organic carbon)이 있으며(Hiederer and Köchy, 2011), 특히 강하구에 가까울수록 육상기원 유기탄소가 중요한 비중을 차지한다. Schlünz and Schneider (2000)에 따르면, 전 세계적으로 하천을 통해 약  $430 \times 10^{12}$  gC yr<sup>-1</sup>의 육상기원 유기탄소가 강하구로 유출되며, 이 가운데 약 10%에 해당하는 양이 연안에 퇴적된다. 이는 연안 퇴적물이 갖는 총유기탄소량( $98 \times 10^{12}$  gC yr<sup>-1</sup>)의 약 44%를 차지한다.

이와 같이, 강물에 포함되어 있는 유기탄소의 조성(성상, 기원)과 양(농도, 이동량)에 대한 생지화학적 정보는 유역을 구성하는 자연적, 인공적 환경특성을 집약적으로 보여주는 바이오마커로서(Hedges *et al.*, 1986), 유역의 환경변화를 추적하고 생태계 변화를 예측하는 데 유용하게 적용되고 있다. 미국에서는 탄소-질소 안정동위원소를 이용하여 미시시피강, 리오그란데강, 콜로라도강, 콜롬비아강 등 대하천 유역에서 입상유기물 조성 변화를 비교하여 유역간 환경특성을 분석하였으며(Kendall *et al.*, 2001), 중국에서는 삼협댐 건설 이후 양쯔강에서 황해로 유출되는 육상유기물의 변화를 체계적으로 모니터링 하고 있다(Wu *et al.*, 2015). 국내 연구로는 새만금 방조제 내측에 퇴적된 유기탄소를 분석하여 새만금 건설에 의해 만경강에서 유출된 육상유기물의 이동특성을 분석하였다(Park *et al.*, 2006, 2009). Oh (2016)에 따르면 국내 산림 순생태계생산량의 5%에 해당하는 약  $185 \times 10^9$  gC yr<sup>-1</sup>의 총유기탄소가 우리나라 주요 5대강을 통해 해양으로 유출되고 있다고 추정하였다.

그렇지만, 최근 대형댐 건설에 따른 하류생태계의 변화, 하구둑 운영에 따른 기수역 수산자원의 변화 등에 대한 사회적 관심이 높아졌음에도 불구하고, 이러한 변화에 대한 원인을 규명하기 위한 연구로서, 유역규모에서 하천 유기탄소의 성상별, 기원별 변화과정을 종합적으로 파악한 국내 연구는 아직까지 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 산림에서 생산된 유기물질이 호수와 하천을 통해 기수역에 도달하는 과정까지 육상기원 유기탄소의 양적, 질적 변화과정과 그 정도를 파악하고자, 장흥다목적댐과 열린하구를 가진 탐진강 유역과 그 하구역인 강진만을 선정하여 용존성과 입자성 유기탄소 농도를 정량하고, 입상유기탄소의 탄소와 질소 안정동위원소를 분석하여 육상기원 탄소의 조성변화를 추적하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상지 개황

우리나라 서남해안 대부분의 하구역은 하구둑, 방조제, 항만시설에 의해 물순환이 차단된 상태로, 특히 금강과 영산강과 같은 닫힌 하구가 차지하는 비율이 각각 91%, 81%를 차지할 정도로 높다(Lee and Kang, 2007). 본 연구를 위한 조사지역은 산림과 댐, 하천, 기수역 등 다양한 유형의 생태계가 연속적으로 이어지는 열린하구의 소유역을 기준으로 하였다. 탐진강은 하천연장 56 km, 유역면적 193 km<sup>2</sup>의 소유역으로, 상류역은 산지하천인 탐진천(산림비율 87%)에서 시작해서 중류역에는 2000년 장흥다목적댐(높이 53 m, 저수량 191백만 m<sup>3</sup>)이 건설되었다. 댐 하류는 국가하천 탐진강 구간으로 도시와 농경지가 집약적으로 분포되어 있으며, 하류로 가면서 금강천이 합류되어 유량이 증가하고 강하구에서는 강진만과 연결되어 해수와의 물순환이 원활하게 이루어지고 있다.

조사지점은 탐진강 유역에서는 댐상류 지천으로 탐진천(T1)과 댐저수지인 탐진호(L1~L3), 그리고 댐하류는 국가하천 탐진강(R1~R5), 그리고 가장 큰 유입지천인 금강천(T2)을 포함하여 총 10개 지점을 선정하였다(Fig. 1). 강진만에서는 강하구로부터 약 20 km까지의 구간까지 3개의 정점(M1~M3)을 선정하였다.

### 2. 시료채집 및 분석

현장조사는 여름 몬순강우 전후와 계절성을 고려하여 2016년 8월과 9월, 그리고 겨울철인 12월에 수행하였다. Fig. 2A에서 보는 바와 같이, 8월에는 상대적으로 강우유

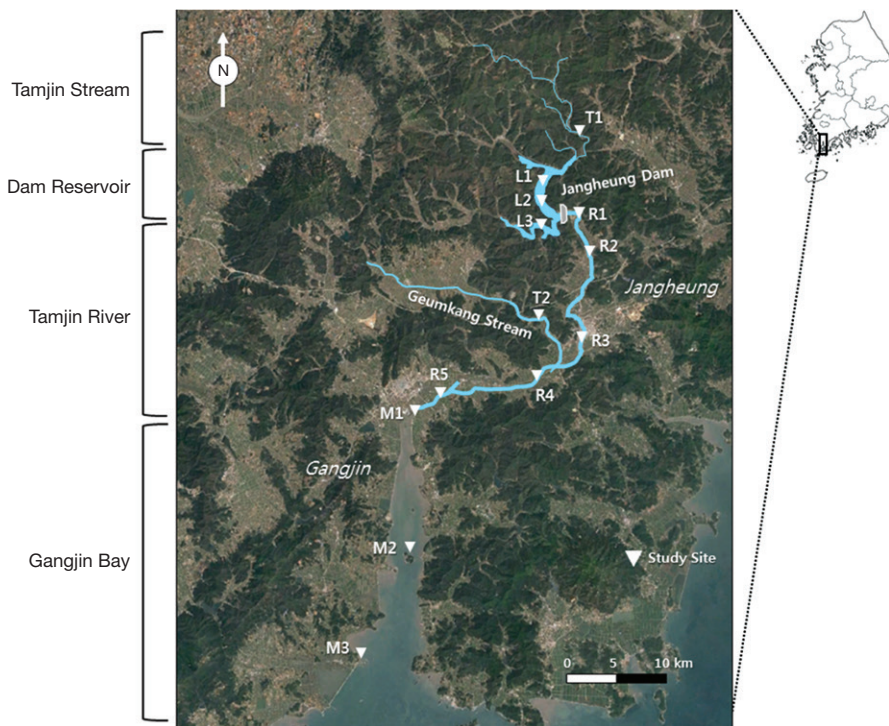


Fig. 1. Study site from Tamjin River to Gangjin Bay in southern Korea.

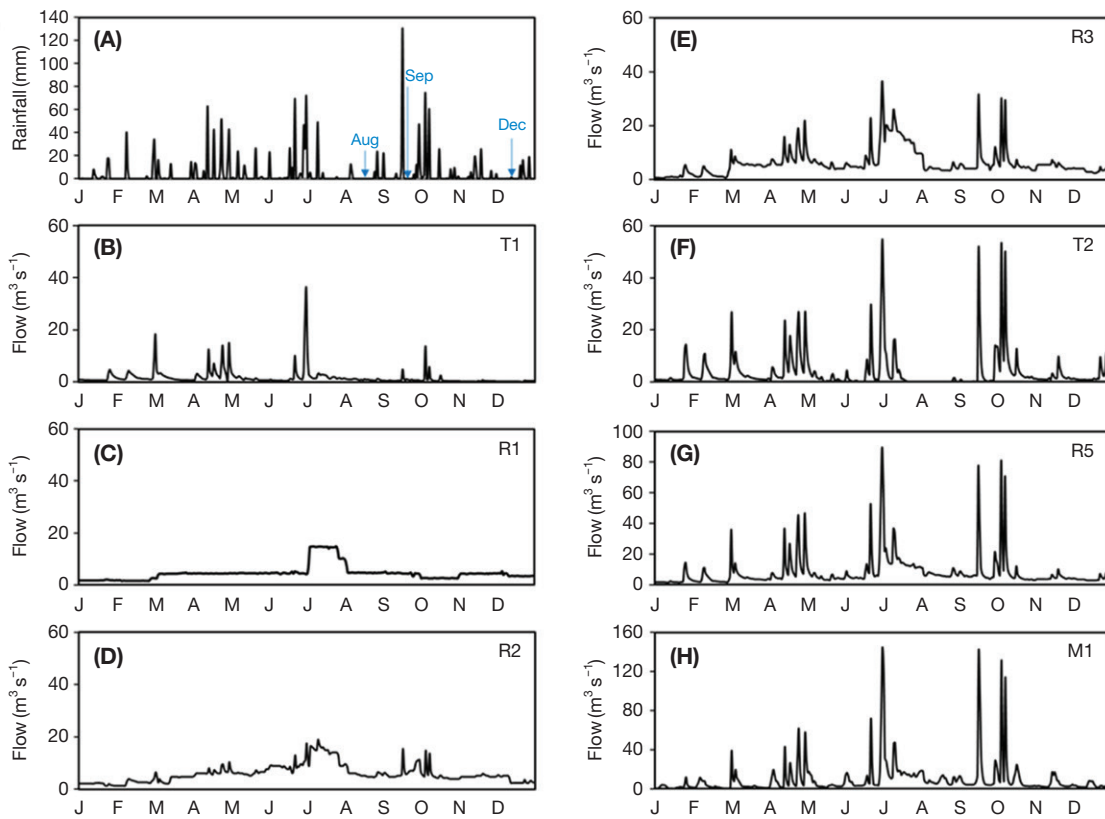
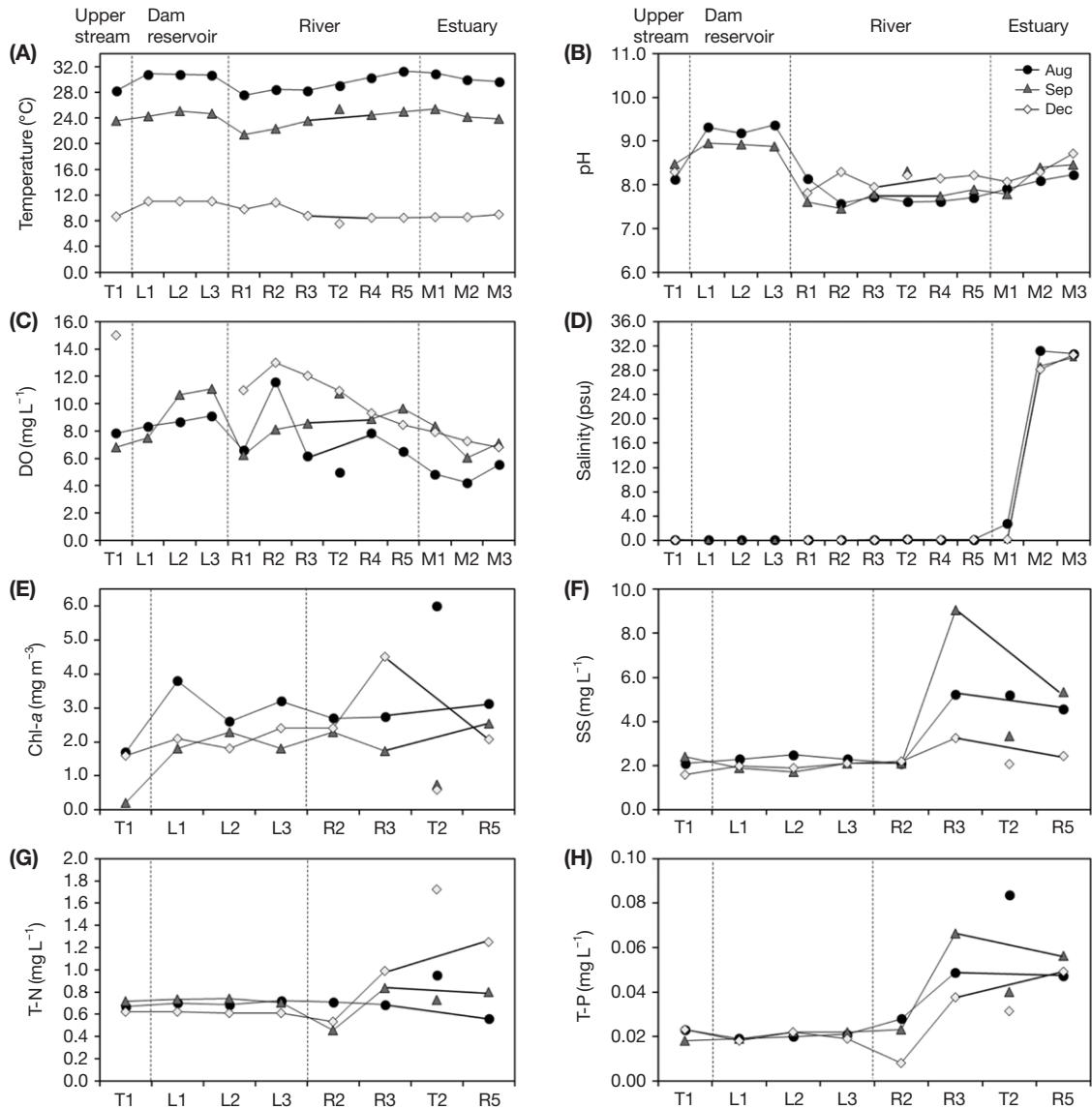


Fig. 2. Monthly rainfall and flows in 2016 at the study sites (A, rainfall of Jangheung station; B~H, river flows in the Tamjin River).



**Fig. 3.** Spatial variation of water quality factors in pre- (August), post- (September) summer rainfalls and winter (December) (A. water temperature; B. pH; C. Dissolved oxygen; D. Salinity; E. Chlorophyll *a*; F. Suspended solids; G. Total nitrogen; H. Total phosphorus).

출이 발생할 정도의 큰 비가 내리지 않아 장기간 건조하였으 며, 9월 중순에서야 일최대 강우량 130 mm 이상의 집중호우가 발생하였다. 물시료 채집은 탐진천과 탐진강, 강진만 구간의 정점에서 3회, 그리고 탐진호에서는 홍수기 전·후로 2회 수행되었다. 채수방식은 수심이 얕은 유수역 구간에서는 조사점점의 중심부에서 도섭법으로 (T1, R1, R2, R3, R4, R5, T2), 탐진호와 강진만(L1, L2, L3, M1, M2, M3)에서는 선박을 이용하여 표층수를 채수하였다. 채수한 시료는 현장에서 1 mm 이상의 입자를 제거하고 무균 채수병에 담아 냉장보관상태로 실험실로 이용하였다.

현장에서 수질측정장치(YSI 556, xylem Inc., US)를 사

용하여 수온, pH, 전기전도도, 염분농도 등을 측정하였으며, 클로로필-*a* 농도(Chl-*a*), 총질소(TN), 총인(TP) 농도 등의 자료는 환경부 물환경정보시스템의 월별측정자료를 이용하였다(Fig. 3). 유역의 강우량과 조사지점의 유량자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water Resources Management Information System)에서 수집하였다.

채집된 물시료는 고온(450°C)에서 사전에 불순물 제거한 GF/F 필터로 감압여과하여 용존성유기탄소(DOC)와 입자성유기탄소(POC) 시료를 각각 준비하였다. DOC 농도는 GF/F 필터를 통과한 시료를 총유기탄소분석기(TOC-L, Shimadzu, Japan)를 이용하여 비정확성 유기탄소분석법을



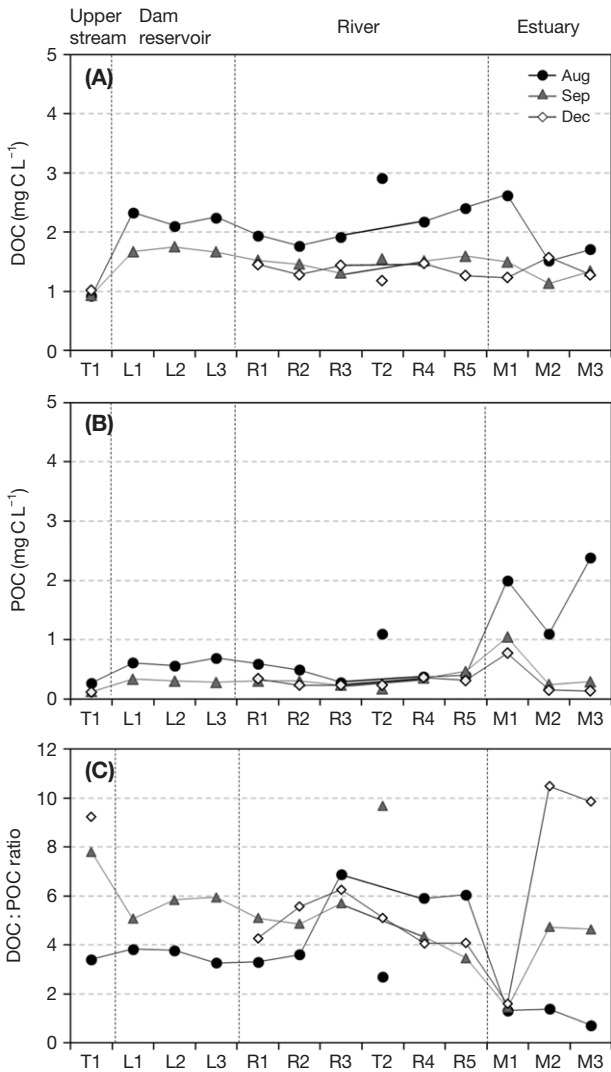


Fig. 4. Spatial distribution of DOC concentration (A), POC concentration (B) and DOC : POC ratio (C) in Pre-(August), Post-(September) summer rainfalls and winter (December).

로 분석하였다(Bisutti *et al.*, 2004). POC 농도와 안정동위원소비 분석을 위해 GF/F 필터시료를 1 N HCl 혼중법으로 무기탄소를 제거하고 동결 건조하였다(Kim *et al.*, 2013). 기기분석은 한양대학교 공동기기원의 원소-동위원소질량 분석기(Euro EA-IsoPrime IRMS, GV instruments, UK)로 수행하였으며, 분석오차는 0.2% 이하이다.

## 결 과

### 1. 유량 및 수질 변화

탐진천(T1)은 강우패턴에 따라 홍수기 유량변화가 뚜렷

하게 나타났다(Fig. 2B). 그러나 댐 직하류(R1)에서는 상류댐의 영향으로 하천유량이 감소하고 유량곡선은 단순화되었으며, 그 영향은 금강천이 합류되기 전까지(R2~R3) 이어졌다(Fig. 2C~E). 금강천 합류 이후에는 유량이 크게 증가하였고, 자연적인 유량곡선 패턴을 회복하였다(Fig. 2F, G). 따라서, 탐진강에서 장흥댐의 영향이 미치는 구간은 댐직하류에서 금강천 합류전까지인 R1~R3라고 할 수 있다. 탐진강 하류 R5 지점은 염분 농도가 기록되지 않는 하천구간이지만, 조석의 영향으로 하천의 수위가 변화하는 감소역에 해당한다. 그리고 강하구(M1)에서는 유의한 지천유입이 없음에도 불구하고 R5 정점보다 유량이 크게 증가하는 것으로 보아(Fig. 2H) 강진만 조위의 영향을 알 수 있다.

염도를 기준으로 보면, 탐진천과 탐진호, 탐진강 모두 담수로서 염도가 기록되지 않았다. 그렇지만 강진만에서는 M1 < 3.0 psu, M2 15~30 psu, M3 > 30 psu를 기록하였다(Fig. 3D). 이는 M1에서는 탐진강의 강물에 해수가 섞이지만 아직까지 담수의 특성을 강하게 보이는 기수역의 시점에 해당하며, M3 정점은 항상 30 psu 이상을 유지하는 연안역에 해당한다고 할 수 있다. 그리고 강하구에서 약 12 km 떨어진 M2 정점은 간조시에는 담수의 영향이 높아지고, 만조시에는 해수가 증가하는 등 조석의 주기에 따라 담수와 해수가 혼합비가 달라지는 기수역에 해당하였다.

현장에서 측정한 탐진강 유역의 평균 수온은 8월 28~31°C였으며, 9월은 22~25°C로 약 3~6°C 낮아졌으며, 12월에는 모든 지역에서 약 8~11°C를 기록하였다(Fig. 3A). pH는 장흥댐 호수(L1~L3)와 강진만(M1~M3)에서 여름철에 높은 pH값을 보였다(Fig. 3B). 클로로필-*a*는 8월에는 저수지(L1~L3)가 하천보다 높게 나타났지만, 12월에는 반대로 저수지에서 낮고 탐진강 중류에서 높게 나타나는 등 차이를 보였다. 지천인 탐진천과 금강천에서는 계절적인 변이가 상대적으로 더 크게 나타났다(Fig. 3E).

### 2. DOC 및 POC 농도 변화

여름철 강우 전후 DOC 농도의 변화는 탐진천(T1)을 제외하고 댐저수지, 본류, 하류, 하구, 기수, 연안 등 대부분의 정점에서 8월이 9월보다 높았다(Fig. 4A). 12월은 대부분의 지점에서 9월과 차이를 보이지 않았다. 공간분포는 8월 T1에서 최소값을 나타냈으며(0.9 mg CL<sup>-1</sup>), 저수지(L1~L3)로 유입된 이후에는 두 배 이상 급증하였다(2.2 ± 0.1 mg CL<sup>-1</sup>). 댐 하류(L1~L3)에서는 저수지에 비해 줄어들었지만(1.8~2.0 mg CL<sup>-1</sup>), 금강천이 합류하면서 점차적으로 증가하다가, 강하구(M1)에서 최대값(2.6 mg CL<sup>-1</sup>)을 기록하였다. 강진만에서 하구에서 바다로 갈수록 크게 감

소하였다. 9월에는 8월에 비해 전체적으로 감소하였지만 저수지에서 높고 댐하류에서 감소하는 공간적인 분포특성은 일치하였다.

POC 농도는 탐진강 대부분의 정점에서 세 번의 전체조사 모두  $<1.0 \text{ mg C L}^{-1}$ 로서 DOC와 비교해서 매우 낮은 농도값이 조사되었다. 그렇지만 강하구 M1에서는 갑자기 높아져서 홍수기 이후 두 번의 조사에서 모두 최대값을 기록하였다. 그렇지만, 강진만에서는 8월 M1에서는 R5에 비해 5배 이상 큰 폭으로 증가하였으며, M2에서 감소하다가 M3에서 다시 증가하여 최대값을 기록하는 등 뚜렷한 시공간적인 차이를 보였다(Fig. 4B).

이상과 같은, 탐진강 유역과 강진만의 유기탄소의 두드러진 차이를 DOC : POC 농도비를 이용하여 분석한 결과(Fig. 4C), 강우 전 8월 탐진강 유역에서는 3.3~6.9로서 DOC 비율이 높았지만, 강진만에서는 0.7~1.4로서 상대적으로 POC 비율이 높았다. 9월에도 탐진강 유역에서 유사한 값을 보였으며(3.5~7.8), 강진만에서는 1.4~4.7로서 다소 증가하였지만 탐진강의 육상유기탄소값과 비교해서는 낮은 값을 보였다. 12월 탐진강에서는 9월 결과와 거의 유사한 값을 보였지만, 강진만에서는 M2정점부터는 POC 농도가 겨울철에 감소함에 따라 상대적으로 DOC의 비율이 매우 높아졌다.

**3. POM의 탄소안정동위원소비 변화**

$\delta^{13}\text{C-POM}$  은 댐으로 유입되기 전인 탐진천(T1)에서는 8월과 9월, 12월 모두 조사시기에 상관없이 일정한 값을 보였다( $-26.8 \sim -26.0\%$ ). 조사시기별로 탄소안정동위원소비의 공간분포를 보면, 여름철 홍수기 전 8월에는 댐저수지(L1~L3)에서의 탄소안정동위원소비는 탐진천에 비해 무거워졌다( $-22.0 \sim -21.4\%$ ). 그러나 댐직하류(R1)에서는 저수지와 하류하천(R2~R5)의 중간값을 보였다( $-25.2\%$ ). 이는 R1에서는 저수지에서 유래한 물질이 탐진강으로 유입되지만, R2정점부터는 그 양이 점점 줄어들어 탐진강 하류까지 이어지고 있음을 나타내고 있다. 하구 M1에서는 탐진강 본류와 유사한 값이 이어졌지만, M2부터는 탄소동위원소비가 점차적으로 무거워져서 M3에서는 최대값( $-19.8\%$ )을 기록하였다(Fig. 5).

한편, 홍수기가 지난 9월의  $\delta^{13}\text{C-POM}$ 은 8월과는 다른 공간분포를 보이고 있다. 가장 두드러진 차이는 저수지에서의 안정동위원소비가 8월에 비해 4% 정도 가벼워졌다는 것이다. 이 결과 저수지와 상류 탐진천은 탄소안정동위원소비의 차이를 보이지 않았다. 이 결과는 홍수기 전과 비교해서 홍수기 후에는 산지하천과 저수지의 유기탄

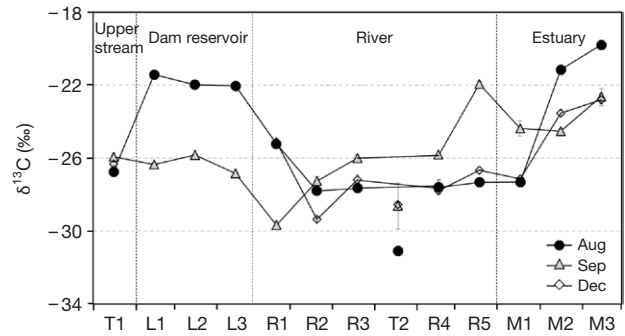


Fig. 5. Spatial changes in  $\delta^{13}\text{C-POM}$  in pre- (August), post- (September) summer rainfalls and winter (December).

소 조성이 유사해졌다는 것을 의미한다. 댐직하류(R1)에서 일시적으로 가벼워진 탄소안정동위원소비는 하류로 가면서 점차적으로 다시 무거워졌다. 특히 탐진강 하류인 R5에서는  $\delta^{13}\text{C}$ 가 크게 증가했다. 강진만에서는 8월과 마찬가지로 강하구에서 해양으로 갈수록 무거워지는 경향성을 보였다.

겨울철 12월의 탐진강  $\delta^{13}\text{C-POM}$ 은 8월과 유사하게 나타났다. 댐직하류의 R1에서 하류 R2까지는 감소하였고, 이후 강하구까지는 뚜렷한 차이 없이 유사한 값을 나타냈다. 그렇지만 강진만의 M2부터는 다시 높아져서 M3에서 최고값을 기록하였다(Fig. 5).

**고 찰**

**1. 댐하류 하천과 기수역에서 유기탄소의 조성과 기원 변화**

**1) 상류지천과 댐저수지: 탐진천-탐진호의 연결성**

탐진강에서 여름 강우 이전 유기탄소의 공간적 변화를 살펴보면, 댐저수지(L1~L3)가 상류의 산지하천(T1)에 비해 DOC와 POC 농도 모두 높았으며, 총유기탄소(DOC + POC) 농도에서는 저수지가 산지하천보다 2배 이상 높았다(Fig. 4A). 이와 같은 저수지에서 유기탄소 증가의 원인은 아래와 같이 여름철 호수에서 광합성에 의한 식물플랑크톤의 증가에서 기인한다고 설명할 수 있다.

탐진댐으로 유입되기 전 산지하천(T1)에서 측정된  $\delta^{13}\text{C-POM}$ 은 인근 산림에서 채집된 낙엽( $-26.8 \pm 0.3\%$ )과 거의 일치하였다. 일반적으로 온대지역 C3 낙엽활엽수림의  $\delta^{13}\text{C}$ 는 상대적으로 안정된 값을 보이는 대기 중의  $\text{CO}_2$ 를 광합성에 이용하기 때문에  $-28 \sim -26\%$  범위의 안정된 값을 나타내고 있으며(Balesdent *et al.*, 1993; Dawson *et al.*, 2002), 국내와 일본의 C3 산림식생도 이 범위의 값을

보이고 있다(Ock and Takemon, 2014; Derrien *et al.*, 2018). 이는 장흥댐의 영향을 받지 않는 탐진천의 입상유기물은 대부분 산림기원 유기물(leaf litter)로 이루어져 있다는 것을 의미한다(Jones and Smock, 1991; Gomi *et al.*, 2002). 그렇지만 탐진천의 물이 장흥댐으로 들어오면 탄소안정동위원소비는 크게 무거워져서( $-21.8 \pm 0.3\%$ ) 유기탄소 기원의 차이를 보였다. 팔당호에서도 여름 강우전  $\delta^{13}\text{C-POM}$ 이  $-22.3 \sim -20.8\%$ 였으며(Gal *et al.*, 2016), 소양호에서도 본 연구의 탐진호에 유사한 값을 보였다(Kim *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2013). 이러한 국내 몬순기후대의 호수에서 여름 강우전의 입상유기물의 탄소안정동위원소비가 변화하는 것은 식물플랑크톤의 일차생산에서 기인하고 있었다. 호수의 식물플랑크톤이 상대적으로 무거운  $^{13}\text{C-POM}$ 을 가지는 원인은 넓은 표면적을 가진 정체된 수역에서 대기와의 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ) 교환으로 대기에서 유래한 상대적으로 무거운 탄산염( $\text{HCO}_3^-$ )이 광합성 기작에 이용되기 때문이다(Dawson *et al.*, 2002; De Kluijver *et al.*, 2014). 이러한 탄소안정동위원소비 변화뿐만 아니라, Fig. 3B, C, E에서 보이는 클로로필-*a* 농도가 증가, >9의 높은 pH, 용존산소 농도 증가와 같은 생화학적 수질지표는, 여름철 저수지에서 POC의 증가가 수중에 존재하는 식물플랑크톤 증가에서 기인한다는 것을 뒷받침하고 있다(Dubinsky and Rotem, 1974; Wetzel, 2001). 또한 저수지의 높은 DOC 농도(Fig. 4A) 또한 식물플랑크톤의 용출과 분해에서 발생한 것으로 추정된다(Jansson *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2000).

홍수기 이후 저수지에서 유기탄소 농도가 감소한 원인 또한 식물플랑크톤의 감소에서 찾을 수 있다.  $\delta^{13}\text{C-POM}$ 이 줄어들고 더불어 용존산소 농도 감소, pH 감소, 클로로필-*a* 농도 감소와 같은 일련의 수질지표의 변화들은(Fig. 3B, C, E), 강우 이후 저수지 내부의 일차생산이 줄어들면서 식물플랑크톤의 영향이 감소하게 되고, 상대적으로 강우기에 호수로 유입된 산림기원 유기물의 영향이 증가했다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 연구결과들을 종합해 보면 여름철 몬순강우가 댐저수지에서 유기탄소의 성상변화를 가져온다는 것을 보여주고 있다.

## 2) 댐하류 하천: 다목적댐과 탐진강의 연결성

장흥댐 하류에서 강하구까지의 구간에서는 상류댐과 지류 유입에 의한 영향이 DOC와 POC에서 차별된 이동특성을 보였다. DOC 농도는 8월 장흥댐 직하류에서 금강천 합류점까지는(R1~R3) 댐의 방류구 지점(L1)과 비교했을 때 약 17% 정도 감소했지만, 하류로 갈수록 그 정도는 크지 않았다. 그러나, POC 농도의 경우에는 댐직하류 R1과 상류댐 L1의 농도 변화에 차이가 없었으나, 이후 점차 하

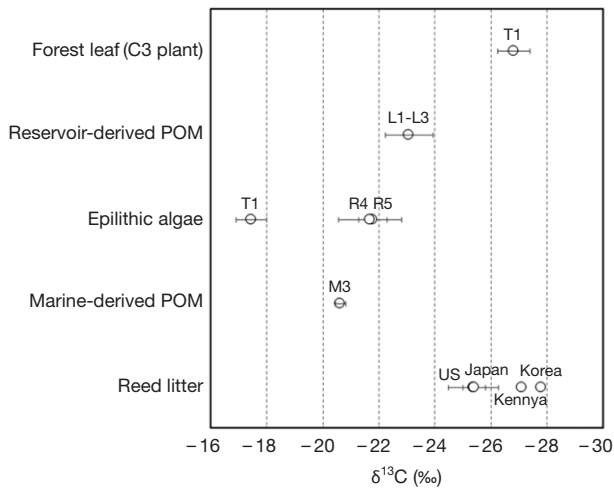
류로 이동하면서 R3 지점에서는 약 50% 감소하였다. 안정동위원소비 분석결과에 따르면, 8월과 9월 모두 저수지에 비해 댐하류에서 가벼운 탄소안정동위원소값을 보이고 있으며, 8월에 더 큰 변화를 보였다. 이는 강우량이 제한적인 여름철에 남조류와 같은 부유성 식물플랑크톤의 과다 번성이 발생하였지만, 댐의 방류가 억제되어 댐 내 유기물의 성상특성 및 안정동위원소비가 종적인 연속성에 반영되지 못하고 있는 것으로 사료된다. 특히, 댐직하류인 R1에서  $\delta^{13}\text{C-POM}$ 은 저수지와 하류하천의 중간값을 보였다. 이는 댐직하류에서는 상류댐에서 공급되는 저수지 유래 물질의 비중이 매우 높지만, 하류로 갈수록 점차적으로 감소하고 있다는 것을 가리키고 있다. Ock and Takemon (2014)에서도 일본 교토에 위치한 댐직하류를 흐르는 입상유기물에는 상류댐에서 유출된 식물플랑크톤이 무려 70% 포함되어 있었지만, 이 비율은 하류로 갈수록 점차 감소하는 등 본 연구와 일치하는 경향을 보였다. 이러한 댐하류 입상유기물 기원 조성에서 식물플랑크톤의 감소 경향은 댐하류하천의 공통적인 현상으로 많은 연구에서 보고하였다(Richardson and Mackay, 1991; Angradi, 1993; Vadeboncoeur, 1994; Ock and Takemon, 2010). 그렇지만 강우후 9월에는 저수지에서 일차생산이 감소하면서 상류댐에서 유출되는 식물플랑크톤의 영향이 크게 나타나지 않았다.

금강천(T2)은 농경지 비율이 34%를 차지할 정도의 집약적 농업을 하고 있으며, 이로 인해 사용되는 퇴비와 비료로 인하여 총질소(TN)와 총인(TP) 농도가 탐진강에 비해 매우 높게 조사되었으며(Fig. 3G, H), DOC 농도 또한 탐진강에 비해 높은 값을 보였다(Fig. 4A, B). 따라서, 탐진강 하류 구간(R4~R5)에서 나타난 DOC 농도의 증가 양상은 금강천 합류가 주요 원인으로 판단된다. 특히, 금강천에서 유입된 높은 영양염 농도로 인하여 합류점 이후 탐진강 하류에서 부착조류의 성장이 국지적으로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 9월 높은  $\delta^{13}\text{C-POM}$ ( $-21.9\%$ )은 현장에서 채집한 부착조류의 탄소안정동위원소비( $-21.8\%$ )와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이는 탐진강 하류를 흐르는 입상유기물은 부착조류가 많이 포함되어 있다는 것을 의미한다. Gal *et al.* (2012)이 동일지역에서 수행한 연구에서도 POM에 대한 부착조류의 기여도가 가장 높게 조사되어 본 연구와 일치하는 결과를 보여주고 있다.

## 3) 열린하구 기수역: 탐진강과 강진만의 연결성

본 연구에서 가장 주목할 부분은 탐진강의 열린하구 강진만(M1~M3)에서 나타나는 유기탄소의 변화라고 할 수 있다. 강진만은 탐진강에서 유출되는 육상기원 유기물





**Fig. 6.** Carbon stable isotope ratios of potential source origins of POM such as terrestrial leaf, freshwater plankton, epilithic algae, marine plankton and reed litter. The data of reed litter data from Wozniak *et al.*, 2006 (US), Kurata *et al.*, 2001 (Japan), Gichuki *et al.*, 2001 (Kenya) and Kang *et al.*, 2009 (Korea).

과 남해에서 유입되는 해양기원 유기물의 영향이 동시에 나타나는 곳으로 하구에서 연안으로 멀어질수록 DOC와 POC의 농도와 조성에 서로 다른 특성을 보였다.

8월과 9월 DOC 농도는 강하구(M1)가 M2와 M3에 비해 높은 경향을 보였다. 이는 강하구에서는 탐진강에서 공급되는 육상기원 DOC가 해양기원 물질보다 우세하다는 것을 의미한다. 이에 반해, POC 이동은 국지적인 영향이 크게 나타났다. M1의 δ<sup>13</sup>C-POM은 8월(-27.3‰)과 9월(-24.4‰)이 큰 차이를 보였는데, 이는 간조기에 조사된 8월에는 육상기원물질이, 만조기에 조사된 9월에는 해양기원물질을 반영하고 있는 것으로 판단된다. 특히 간조시에 M1은 R5와 비교해서, POC 농도는 5배 이상 급증하였고, 또한 DOC : POC비가 최소값을 보이는 등 POC가 상대적으로 많았음에도 불구하고 δ<sup>13</sup>C-POM의 값에는 큰 차이가 없었다. 이는 탐진강 하류에서 강하구까지의 짧은 구간에서 탄소동위원소비가 유사한 특별한 입자성 육상기원 물질이 공급되었다는 것을 의미한다. 탐진강의 강하구는 제외지 면적의 30%를 차지할 정도의 갈대군락지가 넓게 분포하고 있다. 본 연구에서 분석된 탐진강 하구에서 채집된 갈대의 δ<sup>13</sup>C는 -26.3±0.1‰로서, 국내외에서 제시되는 갈대군락지의 탄소안정동위원소비의 범위와 유사하며(δ<sup>13</sup>C-Reed litter -24~-28‰) (Gichuki *et al.*, 2001; Kurata *et al.*, 2001; Wozniak *et al.*, 2006; Kang *et al.*, 2009), M1에서의 δ<sup>13</sup>C-POM은 이러한 갈대군락지의 값을 반영하고 있는 것으로 보인다(Fig. 6). 이러한 결과는 탐진

강 하구의 입상유기물은 국지적으로 갈대로부터 공급되는 입자성 유기탄소의 기여도가 상대적으로 높다는 것을 보여주고 있다.

강진만 해양정점(M3)에서 8월 POC 농도는 탐진강 하류(R5)의 약 6배를 기록했고 강하구(M1) 보다도 높아 전체에서 최대값을 보였다. 또한 M3의 δ<sup>13</sup>C-POM는 탐진강에 비해 매우 무거운 탄소안정동위원소비를 보이고 있었다. 국내연구에 따르면, 시화호에서도 해수가 유입되는 조력발전소 인근에서 평균 -22.2‰의 값을 보여 유입하천보다 무거운 탄소안정동위원소비를 보였으며(Lee *et al.*, 2017), 국내 서해안의 해양식물플랑크톤 또한 -18‰ 이상의 무거운 탄소안정동위원소비를 나타냈다(Kang *et al.*, 2009). 이와 같은 강진만 M3정점에서 보이는 무거운 탄소안정동위원소비는 해양식물플랑크톤의 공급이 POC 농도 증가의 주된 원인이라는 것을 의미한다. 이는 강하구와 기수역과는 구별되는 특성이라고 할 수 있다. 그리고 M2정점의 δ<sup>13</sup>C-POM가 R5와 M3의 중간값을 보인 것은 탐진강에서 유출되는 육상기원 유기탄소가 바다로 갈수록 해양기원 유기탄소로 바뀌어 가고 있음을 의미한다.

이상과 같은 연구결과를 종합하면, 탐진강에서는 대부분 DOC 형태로 강하구로 유출되는 반면, 강진만에서는 해양으로부터 입자성 식물플랑크톤이 공급되면서 POC이 공급이 우세하다는 것을 의미한다. 특히 기수역에서는 하구에서 멀어질수록 육상기원 물질이 줄어들고 해양성 물질이 증가하는 등 유기탄소의 성상별, 발생기원별 전이가 뚜렷하게 발생하고 있다는 것을 보여준다.

## 적 요

본 연구에서는 상류댐과 열린하구를 가진 소유역에서 하천을 통해 기수역에 유출되는 육상기원 유기탄소의 농도와 발생기원의 시공간적인 분포를 파악하였다. 탐진강과 강진만의 연구결과, 탐진강 상류에 건설된 댐저수지와 강진만 해양에서는 여름 경우 이전에는 일차생산에 의해 저수지 기원, 그리고 해양기원 식물플랑크톤이 유기탄소의 성상과 조성에 영향을 미쳤다. 댐하류 하천에서는 상류댐에서 유래한 물질이, 그리고 금강천이 합류되면서 지류의 영향이 나타났다. 탐진강 하구역은 조석간만에 따라 탐진강에서 공급되는 물질과 바다에서 유입되는 물질, 그리고 국지적인 갈대습지의 영향이 복잡하게 작용하여 DOC와 POC의 농도변화에 영향을 주고 있었다. 특히, 탐진강에서는 대부분의 유기탄소가 DOC 형태로 강하구로 유출되는 반면, 강진만에서는 해양으로부터 들어오는 식물플랑크



톤의 영향으로 POC 형태의 공급이 우세하게 나타나는 등 유기탄소의 성상별, 발생기원별 전이가 뚜렷하게 발생하였다. 이와 같은 강과 해양으로 연결하는 하천 유기탄소의 시공간적인 변화연구는 유역의 환경변화에 따른 생태계 물질이동 변화를 평가하고 예측하는 데 활용될 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 국립생태원 기초연구과제 ‘유역규모 생태계 물질순환 기능연구’에 의해 수행되었습니다. 현장조사에 도움을 주신 Kwater 서남권사업단 및 강진군 사초리 어촌계, 그리고 건설적인 조언을 해주신 익명의 심사위원께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Allan, J.D. and M.M. Castillo. 2007. Stream ecology: structure and function of running waters. Springer, Dordrecht.
- Angradi, T.R. 1993. Stable carbon and nitrogen isotope analysis of seston in a regulated Rocky Mountain river, USA. *Regulated Rivers: Research & Management* **8**: 251-270.
- Balesdent, J., C. Girardin and A. Mariotti. 1993. Site-related  $\delta^{13}C$  of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. *Ecology* **74**: 1713-1721.
- Bisutti, I., I. Hilke and M. Raessler. 2004. Determination of total organic carbon-an overview of current methods. *Trends in Analytical Chemistry* **23**: 716-726.
- Dawson, T.E., S. Mambelli, A.H. Plamboeck, P.H. Templer and K.P. Tu. 2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics* **33**: 507-559.
- De Kluijver, A., P.L. Schoon, J.A. Downing, S. Schouten and J.J. Middelburg. 2014. Stable carbon isotope biogeochemistry of lakes along a trophic gradient. *Biogeosciences* **11**: 6265.
- Derrien, M., M. Kim, G. Ock, S. Hong, J. Cho, K. Shin and J. Hur. 2018. Estimation of different source contributions to sediment organic matter in an agricultural-forested watershed using end member mixing analyses based on stable isotope ratios and fluorescence spectroscopy. *Science of The Total Environment* **618**: 569-578.
- Dubinsky, Z. and J. Rotem. 1974. Relations between algal populations and the pH of their media. *Oecologia* **16**: 53-60.
- Finlay, J.C. 2001. Stable-carbon-isotope ratios of river biota: implications for energy flow in lotic food webs. *Ecology* **82**: 1052-1064.
- Gal, J., G. Ock, H. Park and K. Shin. 2016. The effect of summer monsoon on pelagic and littoral food webs in a large regulated reservoir (Lake Paldang, Korea): A stable isotope approach. *Journal of Freshwater Ecology* **31**: 327-340.
- Gal, J., M. Kim, Y. Lee, J. Seo and K. Shin. 2012. Foodweb of Aquatic Ecosystem within the Tamjin River through the Determination of Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratios. *Korean Journal of Limnology* **45**: 242-251.
- Gichuki, J., L. Triest and F. Dehairs. 2001. The use of stable carbon isotopes as tracers of ecosystem functioning in contrasting wetland ecosystems of Lake Victoria, Kenya. *Hydrobiologia* **458**: 91-97.
- Gomi, T., R.C. Sidle and J.S. Richardson. 2002. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. *BioScience* **52**: 905-916.
- Hedges, J., R. Keil and R. Benner. 1997. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Organic Geochemistry* **27**: 195-212.
- Hedges, J.I., W.A. Clack, P.D. Quay, J.E. Richey, A.H. Devol and U.D.M. Santos. 1986. Composition and fluxes of organic matter in the Amazon River. *Limnology and Oceanography* **31**: 717-738.
- Hiederer, R. and M. Köchy. 2011. Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. European Commission Joint Research Centre, EUR25225.
- Jansson, M., A.-K. Bergström, P. Blomqvist and S. Drakare. 2000. Allochthonous organic carbon and phytoplankton/bacterioplankton production relationships in lakes. *Ecology* **81**: 3250-3255.
- Jones, Jr, J.B. and L.A. Smock. 1991. Transport and retention of particulate organic matter in two low-gradient headwater streams. *Journal of the North American Benthological Society* **10**: 115-126.
- Kang, C., E. Choy, Y. Kim and H. Park. 2009.  $\delta^{13}C$  Evidence for the importance of local benthic producers to fish nutrition in the inner bay systems in the southern coast of Korea. *The Sea* **14**: 56-62.
- Kendall, C., S.R. Silva and V.J. Kelly. 2001. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrological Processes* **15**: 1301-1346.
- Kim, B., K. Choi, C. Kim, U.H. Lee and Y.H. Kim. 2000. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Research* **34**: 3495-3504.
- Kim, M., J. Hwang, O. Kwon and W. Lee. 2013. Analytical Methodology of Stable Isotopes Ratios: Sample Pretreatment, Analysis and Application. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 471-487.
- Kurata, K., H. Minami and E. Kikuchi. 2001. Stable isotope analysis of food sources for salt marsh snails. *Marine Ecology Progress Series* **223**: 167-177.
- Lee, C. and D. Kang. 2007. Management System Improvement

- Strategies for Supporting an Integrated Estuary Environmental Management. *Ocean Policy Research* **22**: 89-122.
- Lee, J., J. Kim, J. Owen, Y. Choi, K. Shin, S. Jung and B. Kim. 2013. Variation in carbon and nitrogen stable isotopes in POM and zooplankton in a deep reservoir and relationship to hydrological characteristics. *Journal of Freshwater Ecology* **28**: 47-62.
- Lee, Y., S. Hong, M. Kim, D. Lim, B. Choi, J. Hur, J. Khim and K. Shin. 2017. Identification of sources and seasonal variability of organic matter in Lake Sihwa and surrounding inland creeks, South Korea. *Chemosphere* **177**: 109-119.
- Nakano, S., H. Miyasaka and N. Kuhara. 1999. Terrestrial-aquatic linkages: riparian arthropod inputs alter trophic cascades in a stream food web. *Ecology* **80**: 2435-2441.
- Ock, G. and Y. Takemon. 2010. Estimation of transport distance of fine particulate organic matter in relation to channel morphology in tailwaters of the Lake Biwa and reservoir dams. *Landscape and Ecological Engineering* **6**: 161-169.
- Ock, G. and Y. Takemon. 2014. Effect of reservoir-derived plankton released from dams on particulate organic matter composition in a tailwater river (Uji River, Japan): source partitioning using stable isotopes of carbon and nitrogen. *Ecohydrology* **7**: 1172-1186.
- Oh, N. 2016. The loads and biogeochemical properties of riverine carbon. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 245-257.
- Park, J., E. Kim, K. Kim, S. Cho, J. Yoo, S. Kim, Y. Park and T. Song. 2009. Characteristics in organic carbon distribution in the Seamangeum area during the construction of artificial sea dike, Korea. *Journal of Korean Society for Marine Environment and Energy* **12**: 75-83.
- Park, J., E. Kim, K. Kim, Y. Park and S. Cho. 2006. Organic carbon behavior and distribution in the Mankyung River Estuary. *Journal of Korean Society for Marine Environment and Energy* **9**: 131-140.
- Richardson, J.S. and R.J. Mackay. 1991. Lake outlets and the distribution of filter feeders: an assessment of hypotheses. *Oikos* **62**: 370-380.
- Schlesinger, W.H. and J.M. Melack. 1981. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus* **33**: 172-187.
- Schlünz, B. and R. Schneider. 2000. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux- and burial rates. *International Journal of Earth Sciences* **88**: 599-606.
- Smittenberg, R., T. Eglinton, S. Schouten and J.S. Damsté. 2006. Ongoing buildup of refractory organic carbon in boreal soils during the Holocene. *Science* **314**: 1283-1286.
- Stumm, W. and J.J. Morgan. 2012. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. John Wiley & Sons, New York.
- Thorp, J.H. and M.D. Delong. 1994. The riverine productivity model: an heuristic view of carbon sources and organic processing in large river ecosystems. *Oikos* **70**: 305-308.
- Vadeboncoeur, Y. 1994. Longitudinal dynamics of seston concentration and composition in a lake outlet stream. *Journal of the North American Benthological Society* **13**: 181-189.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: lake and river ecosystem. Gulf Professional Publishing.
- Wipfli, M.S., J.S. Richardson and R.J. Naiman. 2007. Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems: transport of organic matter, invertebrates and wood down headwater channels. *Journal of the American Water Resources Association* **43**: 72-85.
- Wozniak, A.S., C.T. Roman, S.C. Wainright, R.A. McKinney and M.-J. James-Pirri. 2006. Monitoring food web changes in tide-restored salt marshes: a carbon stable isotope approach. *Estuaries and Coasts* **29**: 568-578.
- Wu, Y., H. Bao, H. Yu, J. Zhang and G. Kattner. 2015. Temporal variability of particulate organic carbon in the lower Changjiang (Yangtze River) in the post-Three Gorges Dam period: Links to anthropogenic and climate impacts. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **120**: 2194-2211.