

ORIGINAL ARTICLE

# 강릉 남대천 부유입자유기물의 탄소안정동위원소 비와 C/N 비의 시·공간 변동

곽정현<sup>1,2)</sup> · 박현재<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>강릉원주대학교 해양자원육성학과, <sup>2)</sup>광주과학기술원 국제환경연구소

## Spatial and Temporal Variations of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N in Suspended Particulate Organic Matter in the Gangneung Namdae Stream, Korea

Jung Hyun Kwak<sup>1,2)</sup>, Hyun Je Park<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Korea

<sup>2)</sup>International Environmental Research Institute, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

### Abstract

To understand the composition, quantity, and quality of Suspended Particulate Organic Matter (SPOM) in the Gangneung Namdae Stream, Korea, we examined spatiotemporal variations in water temperature, salinity, chlorophyll *a* (Chl *a*), Particulate Organic Carbon (POC) and nitrogen (PON), and carbon stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of SPOM at six stations in June (pre-monsoon), July (monsoon), and September (post-monsoon) 2017. With increasing precipitation, the average POC and C/N values increased significantly in July than in June. In September, the values decreased with decreasing precipitation. The  $\delta^{13}\text{C}$  values showed irregular spatiotemporal fluctuations among the stations and periods, thereby suggesting a greater contribution of autochthonous organic matter to the pool of SPOM than that of allochthonous organic matter derived from upstream. In addition, the large and irregular changes in POC, C/N ratio, C:Chl *a*, and  $\delta^{13}\text{C}$  compared to that of PON were observed for all periods among the stations, indicating a serial discontinuity of the stream. Our results suggest that the Gangneung Namdae Stream is significantly influenced by the increase in freshwater discharge caused by heavy rainfalls during the summer monsoon and post-monsoon periods.

**Key words** : Gangneung Namdae Stream, Particulate organic carbon, Particulate organic nitrogen, Carbon stable isotope, Carbon/Nitrogen ratio, Chlorophyll *a*, River continuum, Serial discontinuity

### 1. 서론

하천은 해양으로 이어지는 전지구적 탄소순환에서 중

요한 구성요소이며, 상류에서 하류로 이어지는 하천 내 탄소 유기물 분포의 특징은 수온, 유속, 유량, 유속, 수심 등의 물리·화학적 요인과 외부물질 유입의 영향을 받아

Received 27 March, 2020; Revised 27 April, 2020;

Accepted 29 April, 2020

\*Corresponding author: Hyun Je Park, Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Korea  
Phone: +82-33-640-1680  
E-mail: phj13579@gwnu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© 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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다양하게 나타난다(Vannote et al., 1980). 더욱이 도심 하천의 경우 산업화 및 도시화로 인해 하천 환경이 급격히 변하여 수역별 생태계 입자유기물질 구성과 생물상 그리고 그 구조와 기능 또한 크게 달라질 가능성이 높다. 강릉 남대천은 강원도 강릉시 왕산면 일대의 지류가 모여 강릉 시내 중심을 지나 남향진동에서 동해로 유출되는 하천으로 호소, 댐 등의 지형지물과 도시의 영향으로 생물상이 다양하게 나타나는 독특한 생태계를 형성하고 있다(Yoon and Kim, 1998). 강릉 남대천의 수환경 또는 생태계 관련 연구는 수질 및 미생물(Choi et al., 1993; Park et al., 1994; Yoon, 2003), 대형저서동물의 분포(Hong et al., 2004), 그리고 어류군집(Song et al., 2005; Byeon and Oh, 2015; Kim and Lee, 2018) 등이 수행되었으나, 강릉 남대천에서 탄소순환을 이해하기에는 내륙 하천에 비해 연구가 아직 미흡한 실정이며, 먹이망의 근간이 되는 식물플랑크톤이나 부유입자유기물질 거동에 대한 연구는 전무한 상태이다.

하천의 입자유기물질의 대부분은 토양, 육상식물 그리고 식물플랑크톤 및 저서조류에 기원하며, 이들의 화학적 특성은 생태계 내 에너지와 물질의 흐름에 대한 정보를 제공한다(Onstad et al., 2000; Kendall et al., 2001; Keckeis et al., 2003). 특히, 수서곤충과 같은 1차 또는 2차 소비자가 하천생태계 내에서 중 및 개체수의 대부분을 차지하고 있으며, 이러한 영양단계의 저차 소비자의 주요 먹이원인 입자유기물질의 거동은 하천생태계 구조와 기능 변동과 밀접한 관계를 가지고 있다(Williams and Feltmate, 1992). 입자유기물질은 유역 등 주로 육상에서 유입되는 것(타지성, allochthonous)과 식물플랑크톤이나 부착조류 등에 의해 내부에서 자체 생산되는 것(원지성, autochthonous)으로 나뉘며, 탄소 및 질소 조성비와 탄소 안정동위원소 분석을 통해 그 기원을 구분할 수 있다. 안정동위원소비 값은 동위원소의 질량 차이로 인하여 발생하는 생지화학적 반응에 따라서 물질 내 그 비율 달라지는 분별효과를 가진다(Lajtha and Marshall, 1994). 이러한 분별 효과로 인해 지구화학적 추적자 역할을 수행할 수 있는 탄소 안정동위원소비 값은 물질의 기원과 생성환경을 해석하는데 다양한 연구 분야에서 광범위하게 사용되고 있다(Kendall et al., 2001; Delong and Thorp, 2006).

하천 내 입자유기물질은 유역의 물리·화학 특성 및 강

수의 영향에 의해 분포양상이 다르게 나타난다. 적은 강수량과 하구역에 형성되는 모래톱 등으로 인해 유속이 느려져 하천수가 정체되면 식물플랑크톤 등에 의한 원지성 부유입자유기물질의 기여가 높아질 수 있으며, 장마와 같이 강우량이 증가할 경우에는 유역으로부터 유입된 타지성 부유입자유기물질의 기여가 증가할 수 있다. 따라서 본 연구는 장마 전(pre-monsoon), 장마(monsoon), 그리고 장마 후(post-monsoon)에 강릉 남대천의 부유입자유기물질 내 입자유기탄소 및 질소의 함량과 탄소 안정동위원소를 분석하여, 부유입자유기물질 변동 및 기원을 파악하고 하천생태계의 구조와 기능 변화를 이해하기 위한 기초 자료를 제공하는데 목적을 두고 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상 개요

2017년 5월, 7월, 그리고 9월에 강릉 남대천에서 강릉 시 입구에서부터 시내 중심을 지나 동해와 연결되는 하구역까지 7개 정점에서 조사하였다(Fig. 1). 수심이 얇고 유폭이 좁은 N1 정점에서부터 N2 정점을 거쳐 제방이 설치되어 있는 N3 정점으로 갈수록 유폭이 넓어지고 수심 또한 깊어진다. 제방을 지나 N4 정점에서는 유폭과 수심이 급격히 줄어들며, N5 정점에서 하구역인 N6 정점으로 흐르면서 다시 유폭과 수심이 증가한다. N7 정점은 하천과 해수의 교환이 원활히 이루어지는 곳을 선정하였다.

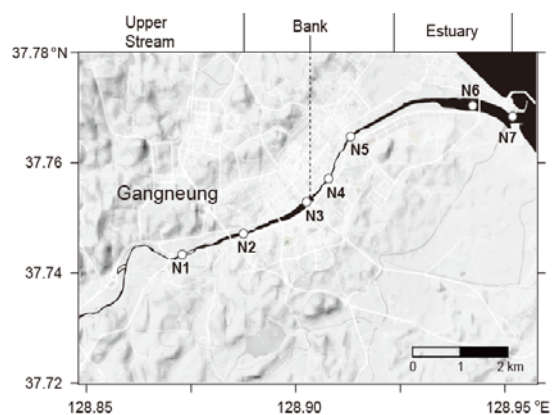


Fig. 1. Study sites in the Gangneung Namdae Stream.

2.2. 수온, 염분, 그리고 강수량

현장 조사는 N1 정점에서부터 N7 정점까지 순차적으로 이루어졌으며, TS meter로 수온 및 염분을 측정하고 무균 채수병에 채수하였다. 조사지역의 강수량은 국가 수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water Resources Management Information System)에서 수집하였으며, 해수온은 국립해양조사원 실시간해양관측정보시스템에서 제공하는 경포대해수욕장 해양관측부이 자료를 사용하였다.

2.3. 클로로필 a

채수 시료 200 ~ 500 ml은 chlorophyll a (Chl a) 측정을 위해서 각각 Whatman GF/F (pore size: 0.7 μm) 여과지로 거른 후 분석 전까지 냉동(-80℃) 보관하였다. 여과시료는 30일 이내에 90% 아세톤 5 ml로 12시간 동안 냉암소에서 추출한 후 초음파 분쇄기로 여과지를 분쇄하고 2,000 rpm에서 10분 동안 원심 분리하여 상등액을 분석용기에 담아 Turner Designs Trilogy 형광측정기(Turner Designs, Inc.)를 이용하여 측정하였다.

2.4. 입자유기탄소, 입자유기질소, 그리고 탄소 안정동위원소

입자유기탄소(Particulate Organic Carbon, POC)와 입자유기질소(Particulate Organic Nitrogen, PON) 분석을 위해 채수 시료 200 ~ 500 ml을 200 μm 망지로 거대 입자물질을 제거한 후 GF/F (직경 25 mm) 여과지에 여과하였다. 여과 시료는 1N HCl 혼중법으로 탄삼염을 제거한 후 항온 건조기(60℃)에 건조시켜 원소분석기(Vario MICRO Cube; Elementar Analysensysteme GmbH)를 이용하여 측정하였다.

부유입자유기물질(suspended particulated organic matter)의 탄소 안정동위원소 조성 분석을 위해 채수 시료 1000 ml 가량을 200 μm 망지로 거대 입자물질을 제거한 후 GF/F (직경 47 mm) 여과지에 입자물질을 포집하였다. 여과 시료는 건조 후 원소분석기와 연결된 안정동위원소 질량분석기(CF-IRMS; Isoprime 100; IsoPrime Ltd)를 이용하여 분석하였다.

시료(sample)가 가지는 탄소 안정동위원소비 값은 아래 식과 같이 표준물질에 대한 시료의 그 비값 변위를 천분율(‰)로 나타내어 δ 기호로 표현하게 되는데, 여기서 사용한 탄소 표준물질(standard)은 PDB(Pee Dee

Belmnite) 국제표준 기준을 사용하였다.

$$\delta^{13}C (\text{‰}) = \left[ \frac{\left(\frac{^{13}C}{^{12}C}\right)_{sample}}{\left(\frac{^{13}C}{^{12}C}\right)_{standard}} - 1 \right] \times 1000$$

본 연구에서 탄소 안정동위원소 분석을 위한 carrier gas로는 헬륨 (He) gas를 이용하였고, 원소분석기의 온도를 1150℃로 조절하여 모든 유기물을 완전 연소시킨 후 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub> 가스를 헬륨으로 안정동위원소 질량분석기로 주입하여 각 원소를 측정하고 위의 식에 따라 국제 표준에 맞는 동위원소 비값을 계산하였다. 분석값은 안정동위원소비 값을 알고 있는 표준물질[8542 ANU, δ<sup>13</sup>C = -10.47 ± 0.13‰, National Institute of Standards and Technology (NIST)]을 이용하여 정밀도와 재현성을 확인하였다.

2.5. 분석자료의 처리

입자유기탄소(POC) 농도의 강수 전과 후의 비교를 위하여 t-검증(student's t-test)을 수행하였다. 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)은 입자유기질소(PON) 농도의 계절간의 비교에 사용하였으며, POC와 Chl a의 무계비(C:Chl a)의 계절 비교를 위해 로그 변환으로 정규분포화하여 분석한 후 Tukey's HSD (Honestly Significant Differences)으로 사후 검증하였다(SPSS, package, Chicago, IL).

3. 결과

3.1. 물리화학적 환경 요인

2017년 강릉지역의 강수와 기온의 연 변동 양상은 뚜렷한 몬순기후의 특징을 나타내었다(Fig. 2). 2017년 평균기온은 7월에 26.8℃로 가장 높았으며, 경포대 해수욕장 수온은 8월과 9월에 각각 24.1℃와 23.6℃로 높게 관측되었다. 강수량은 장마 전인 1월과 6월 사이에는 월평균 50 mm 이하였으며 장마인 7월과 8월에 강수량은 각각 238 mm와 444 mm로 크게 증가하였다가 장마 후인 9월에 46 mm로 다시 크게 감소하였다.

강릉 남대천에서 수온은 6월 17.4 ~ 22.9℃, 7월 19.6 ~ 27.0℃, 그리고 9월 22.0 ~ 25.0℃ 범위로 관측되었다

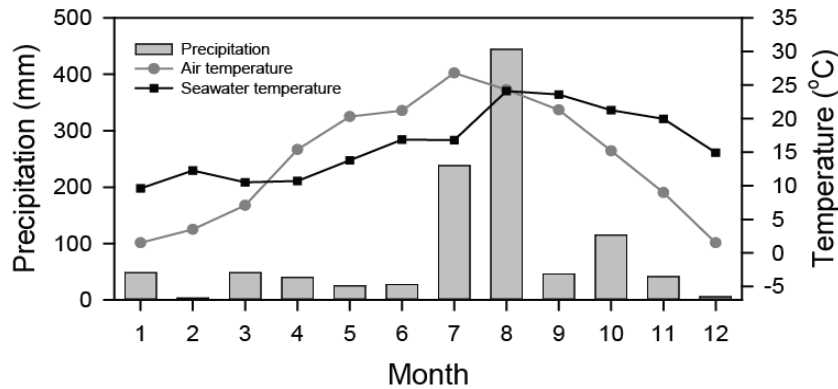


Fig. 2. Monthly variations in precipitation, air temperature, and sea water temperature of Gyeongpo beach in 2017.

(Fig. 3A). 동해안과 접해있는 N7정점을 제외하면 기온이 가장 높고 강수량이 증가하기 시작한 7월에 강릉 남대천 평균 수온(평균  $\pm$  표준편차,  $25.8 \pm 1.06^\circ\text{C}$ )이 가장 높았다. 조사 정점 중 N7정점에서 6월과 7월에 낮은 수온이 관측되었으나, 해수온이 높았던 9월에는  $23.7^\circ\text{C}$ 로 비교적 높게 기록되었다. 독을 지나 수심과 유평이 좁아지는 N4 정점은 조사기간 중 주변 정점과 비교하여 수온이 낮았다.

염분은 조사기간 중 도심에 위치한 N1 ~ N5 정점에서는 0.2 이하로 관측되었으며, N6 ~ N7 정점에서는 하구역의 특징인 염분 경사가 뚜렷하게 관측되었다(Fig. 3B). N7 정점에서 염분은 강수량이 적었던 6월에 29.8로 관측되었으며, 강수량이 증가했던 7월에 21.2로 감소하였다가 9월에는 27.2로 다시 증가하였다.

### 3.2. 부유입자유기물질의 생지화학적 특성

POC 농도는 6월, 7월, 그리고 9월에 각각 133 ~ 367, 292 ~ 543, 그리고  $167 \sim 531 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 범위로 측정되었다(Fig. 3C). N1 ~ N5 정점에서 6월 POC 농도는  $332 \mu\text{g l}^{-1}$ ( $210 \pm 90 \mu\text{g l}^{-1}$ ) 이하로 측정되었으며, 강수량이 증가했던 7월의 POC 농도는  $388 \mu\text{g l}^{-1}$ ( $455 \pm 61 \mu\text{g l}^{-1}$ ) 이상으로 유의하게 증가하였다(t-test,  $P < 0.05$ ). 반면, 하구역에 위치한 정점 N6 ~ N7에서는 조사 시기에 따른 POC 농도의 변동이 비교적 적었다. 강수량이 다시 줄어든 9월 N1과 N2 정점에서  $500 \mu\text{g l}^{-1}$  이상으로 POC 농도가 높았으나, 정점 3에서  $200 \mu\text{g l}^{-1}$  이하로 급격히 감소한 후 하구역 정점으로 갈수록 증가하는 경향

을 보였다.

PON 농도는 6월, 7월, 그리고 9월에 각각 16 ~ 65, 25 ~ 55, 그리고  $13 \sim 68 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 범위로 분포하였으며, POC 농도의 시공간 변동과 유사한 경향을 보였다(Fig. 3D). 하지만 조사 시기에 따른 평균 POC 농도의 변동과는 달리 PON 농도는 강수에 의한 유의한 변동이 관측되지 않았다(one-way ANOVA,  $P > 0.05$ ).

Chl *a* 농도는 6월과 9월에 각각 1.0 ~ 13.8 그리고  $0.5 \sim 12.6 \mu\text{g l}^{-1}$  범위에 분포하여 공간적 변동이 크게 나타난 반면 7월에 Chl *a* 농도는  $0.9 \sim 5.8 \mu\text{g l}^{-1}$  범위로 측정되어 공간적 변동이 가장 적었다(Fig. 3E). 동해와 인접한 N7 정점에서는 조사 시기에 따른 Chl *a* 농도 변화가 크진 않았지만, 염분경사를 보인 N6 정점에서는 6월과 9월에  $12 \mu\text{g l}^{-1}$  이상의 높은 농도가 관측되어 생물생산이 높은 하구역의 특징을 보였다.

C/N ratio 값은 6월 4.9 ~ 9.9, 7월 9.1 ~ 17.4, 그리고 9월 6.2 ~ 14.9 범위로 분석되었다(Fig. 3F). N1과 N2 정점에서 조사시기 별 C/N ratio 값의 변동 폭( $8.9 \sim 10.8$ )이 가장 좁았다. C/N ratio 평균값은 강수량이 적었던 6월 7.0 ( $\pm 2.1$ )에서 강수량이 증가했던 7월 그 값이 12.4 ( $\pm 2.9$ )로 증가하였다가 9월에 다시 10.7 ( $\pm 3.1$ )로 감소하였다.

C:Chl *a* 값은 7월과 9월에 각각 65 ~ 458과 29 ~ 742 범위에 분포하여 큰 공간적 변동이 관측되었으며, 6월에는 이 비값이 24 ~ 191 범위에 분포하여 유의한 변동이 관측되었다(one-way ANOVA,  $P < 0.05$ , Tukey's

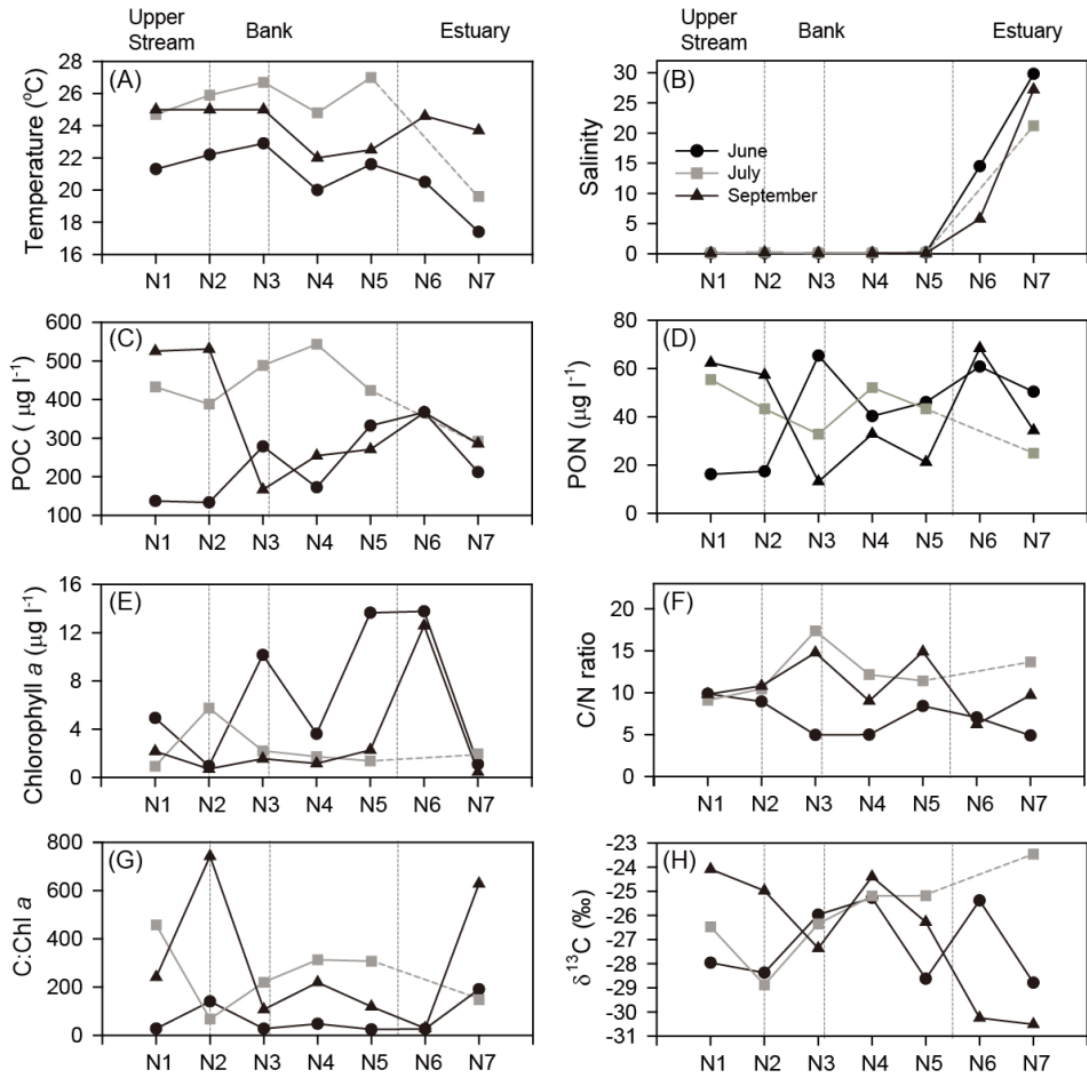


Fig. 3. Spatiotemporal variations in temperature (A), salinity (B), POC (C), PON (D), Chl a (E), C/N ratio (F), C:Chl a, and  $\delta^{13}\text{C}$  (H) at the study sites.

HSD, 6월<7월=9월).

부유입자유기물질(SPOM) 내 탄소 안정동위원소비 값( $\delta^{13}\text{C}$ )은 불규칙한 시공간적 변동을 보이며 6월, 7월, 그리고 9월에 각각  $-28.8 \sim -25.3$ ,  $-28.9 \sim -23.5$ , 그리고  $-30.5 \sim -24.1 \%$  사이에 분포하였다(Fig. 3H). 강수 등 계절에 의한  $\delta^{13}\text{C}$ 의 변동이 N7번 정점에서 가장 크게 나타났지만, 11월에 N6 ~ N7에서 관측된  $\delta^{13}\text{C}$  을 제외하면, 국내 하천에서 보고된 SPOM의  $\delta^{13}\text{C}$  범위

와 일치하였다(Table 1).

#### 4. 고찰

##### 4.1. 강수에 의한 강릉 남대천 물리환경 및 부유입자유기물질 특성 변동

본 조사를 통하여 강수에 의해 강릉 남대천의 물리환경과 부유입자유기물질의 생지화학적 특성이 크게 변하고

**Table 1.** Carbon stable isotope values ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of organic matter from river and watershed

Source of organic matter	Region	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Reference
C3 Plant	Temperate zone	-28 ~ -26	Balesdent et al. (1993); Dawson et al. (2002)
	Tamjin River basin	-26.8 ± 0.3	Park et al. (2017)
C4 Plant	-	-15 ~ -6	O'Leary (1988)
Epiphytes	Han River system	-21.2 ~ -14.7	Kang et al. (2011)
Freshwater Phytoplankton	-	-40 ~ -30	Rau (1982) Meyers (1994)
SPOM	East coast of Korea	-22.1 ± 1.3	Kang et al. (2008)
	Han River system	-25.3 ~ -23.2	Kim et al. (2007)
	Tamjin Stream	-26.8 ~ -26.0	Park et al. (2017)
	Gangneung Namdae Stream	-30.5 ~ -23.5	Present study
		June: -27.2 ± 1.6 July: -25.9 ± 1.8	
	September: -26.8 ± 2.7		

있음을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 강수량이 적은 6월과 9월에 동해와 가장 가까이 위치한 N7 정점에서의 수온과 동해의 수온은 0.5°C 이내의 차이를 보인 반면 장마가 시작되어 강수량이 증가한 7월에는 약 2°C 정도의 차이를 보였다(Fig. 2, Fig. 3A). 또한, N7 정점에서 염분은 6월에 비하여 7월에 크게 감소하였다. 이는 강수량의 증가로 인해 동해로 유출되는 유량이 증가하고 하천 내 부유입자 유기물질의 거동에도 유의미한 영향을 끼친다는 것을 암시한다. POC와 PON 농도 그리고 C/N ratio의 시공간 변동을 비교해보면, POC 농도와 C/N ratio의 경우 6월에 비하여 7월에 그 값들이 크게 증가하였으나 PON 농도의 분포 범위는 6월과 7월이 유사하였다. 이러한 결과들은 강수에 의한 하천 생태계의 물리환경 변화가 연쇄적으로 부유입자 유기물질 내 생지화학적 특성의 변화를 초래한 것을 의미한다. 식물플랑크톤의 C/N ratio 값은 일반적으로 3 ~ 9 범위에 분포하며, 육상기원의 부유입자 유기물질의 이 비값은 토양과 육상식물의 영향으로 12 이상의 높은 값을 나타낸다(Parsons et al., 1961; Pocklington and Leonard, 1979; Cauwet, 1981). 또한, 유기물질이 증가하게 되면 부유입자 유기물질의 C/N ratio는 증가하는 것으로 알려져 있다(Cauwet, 1981; Kwon et al., 2002). C:Chl *a* 값의 계절 변동에서도

POC에 대한 유기물질 기여가 다른 두 조사 시기와 달리 6월에 낮다는 것을 확인할 수 있었다. C:Chl *a* 값은 100 이하일 때 부유입자 유기물질은 주로 식물플랑크톤 기원임을 나타내며, 200 이상 값이 증가할수록 유기물질의 비율이 증가하는 경향을 보인다(Hunter and Laws, 1981). 따라서 강릉 남대천에서 장마 기간 강수량이 증가함에 따라 탄소 함량이 높은 토양 혹은 육상 식물 기원의 타지성 유기물질이 하천으로 보다 많이 유입되고 하류로 전달되는 것으로 사료된다.

#### 4.2. 강릉 남대천 하구역에서 부유입자 유기물질 거동

하천에 존재하는 유기물은 먹이망을 통해 상위영양단계로 전달되거나 하구역으로 흘러가 해양으로 유출된다(Stumm and Morgan, 2012). 하구역은 담수와 해수의 특성이 혼재되어 나타나고 생물생산도 높아, 이 수역에서 유기물질의 거동을 파악하는 것은 하천생태계뿐만 아니라 전지구적 물질순환을 이해하기 위한 필수 요건이다(Hedges et al., 1997; Smittenberg et al., 2006). 탄소 안정동위원소비 값( $\delta^{13}\text{C}$ )은 유기물 생성 기작이 다른 식물과 종(예: C3 식물, C4 식물, 조류 등)에 따라 유의한 차이가 발생하며, 먹이연쇄에 의해서도 1‰ 내외의 비교적 작은 분별효과 값을 갖기 때문에 생태계 내에서 유기물질의

기원을 파악하기 위한 추적자로 사용되고 있다(Post 2002).

강릉 남대천 하구역(N6, N7)과 인접한 상류정점(N5)에서 부유입자유기물질 내  $\delta^{13}\text{C}$ 의 공간적 변동 양상은 조사 시기마다 다르게 나타났다(Fig. 3H). 6월의 이 값은 세 정점에서 각각 3% 이상의 차이가 나타났는데, 이 결과는 하천을 따라 상류로부터 유입되는 유기물보다 하천 내에서 자체 생산된 원지성 입자유기물의 기여가 높다는 것을 의미한다. 강수가 증가한 7월에는 2% 이내의 변동을 보여, 6월에 비하여 하천으로부터 많은 양의 유기물이 하구로 유입된 것으로 여겨진다. 9월에는 부유입자유기물질의  $\delta^{13}\text{C}$ 이 N5 정점에서 -26.3‰로 국내 하천에서 관측된 POM의  $\delta^{13}\text{C}$  범위 내에 분포하였으나(Table 1), N6과 N7 정점에서  $\delta^{13}\text{C}$ 은 각각 -30.2‰과 -30.5‰로 측정되었다. 이 결과는 N5 정점으로부터 유입되는 유기물보다 N6 정점에서 자체 생산된 유기물의 기여가 크다는 것과 N7 정점의 부유입자유기물질의 대부분은 N6 정점에서 생성된 부유입자유기물질 기원임을 의미한다. 9월 N6 정점에서의 급격한 Chl *a* 농도의 증가와 N7 정점에서 급격한 감소가 이러한 설명을 뒷받침한다.

#### 4.3. 강릉 남대천 하천의 연속성과 불연속성

자연적인 하천은 물이 상류에서 하류로 흐름에 따라 물리적 특성 변화와 함께 화학적 수질 구배가 생기며, 다양한 생물학적인 반응이 복합적으로 일어나는 연속성을 가지는데 이를 하천의 연속성 개념(river continuum concept)이라고 한다(Vannote et al., 1980). 반면 급격한 산업화와 도시화에 따른 국토개발 사업이 진행되면서 하천 유역의 토지이용이 증가하고 댐과 둑과 같은 인위적 개발로 하천 생태계 환경이 변하는 등 하천의 연속성이 교란되어 자연적인 하천에서 나타나지 않는 특성이 나타나는 것을 하천의 불연속 개념(serial discontinuity concept)이라고 한다(Ward and Stanford, 1995). 강릉 남대천의 염분 분포는 전형적인 하천과 해양을 연결하는 연속성을 보인다(Fig. 3B). 하지만 강릉 남대천은 물리적으로 제방이 설치된 N3 정점 상류와 하류 그리고 하구역(N6, N7)으로 구분되어지며, 1 ~ 2 km 이내의 짧은 조사 정점 사이에서도 수온 및 부유입자유기물질의 생지화학적 특성이 불규칙하게 변동하여 하천의 불연속적 특성을 잘 반영하였다(Fig. 3). 더욱이 인위적인 제방 설치

와 하천유역의 토지 개발, 그리고 조차가 적은 동해의 특성으로 인해 염분구배가 발생하는 하구역이 2 km 내외로 짧게 형성되어, 이 수역에서 수온, 염분, 그리고 Chl *a* 농도의 급격한 변동이 나타나는 것으로 사료된다. 특히, 9월 N6과 N7 정점 사이에서 관측된 Chl *a* 농도의 급격한 감소와 C:Chl *a* 값의 급격한 증가는 N6 정점에서 담수성 식물플랑크톤의 대번성(bloom)이 발생한 후 이들이 하천의 흐름에 따라 수송되는 동안 급격한 염분 증가로 인하여 식물플랑크톤이 사멸하여 유기쇄설물 형태로 N7 정점으로 유입된 것으로 설명할 수 있다. 앞서 언급했듯이, 동 시기에 두 정점에서  $\delta^{13}\text{C}$ 가 유사하게 나타나 유기물 기원이 동일하다는 것이 이 설명을 뒷받침한다(Fig. 3H). 이 결과는 하천의 불연속적 특성을 보이는 강릉 남대천에서 급격한 수환경 및 먹이원 변화로 인해 종조성과 생물군집이 달라지고 나아가 생물학적 단절로 생태계 구조와 기능이 크게 변할 수 있음을 시사한다(Houghton and Wasson, 2013).

## 5. 결론

본 연구에서는 강수에 의한 물리환경의 변화가 큰 하천의 특성을 고려하여 6월(pre-monsoon), 7월(monsoon), 그리고 9월(post-monsoon)에 강릉 남대천 상류에서부터 하구역까지 7개의 정점(Upper Stream: N1 ~ N2, Bank: N3 ~ N4, Estuary: N5 ~ N7)을 선정하여 생태계 내 주요 먹이원인 부유입자유기물질의 입자유기탄소(POC) 및 질소(PON) 함량, 그리고 탄소 안정동위원소 비 값( $\delta^{13}\text{C}$ )을 관측하고, 그 거동을 분석하였다. 강수량이 증가한 7월의 POC 농도( $428 \pm 86 \mu\text{g l}^{-1}$ )와 C/N ratio ( $12.4 \pm 2.9$ )는 6월(각각,  $233 \pm 94 \mu\text{g l}^{-1}$ ,  $7.0 \pm 2.1$ )에 비하여 유의하게 증가하였다가 9월(각각,  $343 \pm 139 \mu\text{g l}^{-1}$ ,  $10.7 \pm 3.1$ )에 강수량이 줄어들면서 감소하였다. 반면, PON 농도는 조사 시기별 유의한 변동이 관측되지 않았다. 이는 강수에 의해 탄소함량이 높은 타지성 유기물의 유입이 증가하였음을 의미한다. 하지만 유기물의 기원을 나타내는 지시자인  $\delta^{13}\text{C}$  값은 불규칙한 시공간적 변동을 보여, 부유입자유기물질에 대한 기여는 상류로부터 유입된 타지성 유기물보다 해당 수역에서 자체 생산된 원지성 유기물이 우세함을 암시하였다. 또한, 제방이 설치된 수역과 급격한 염분의 구배가 나타나는

하구역에서는 좁은 수역 내에서도 부유입자유기물질의 생지화학적 특성이 크게 변동하여 하천의 불연속적인 특성을 보였다. 따라서 강릉 남대천은 강수량과 해수 유입 등 자연적인 요인과 인공적인 구조물(제방)에 의해 물리 환경과 부유입자유기물질의 특성이 급격히 변하여 생태계 구조와 기능이 크게 달라질 수 있기 때문에 물질 순환과 에너지 흐름을 이해하고 하천을 관리 보전하기 위해서는 지속적인 관측과 통합적인 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년도 강릉원주대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었음

### REFERENCES

- Balesdent, J., Girardin, C., Mariotti, A., 1993, Site-related  $\delta^{13}\text{C}$  of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. *Ecology*, 74(6), 1713-1721.
- Byeon, H. K., Oh, J. K., 2015, Fluctuation of fish community and inhabiting status of introduced fish in Gangneungnamdae Stream, Korea, *Korean J. Environ. Ecol.*, 29(5), 718-728.
- Cauwet, G., 1981, Non-living particulate matter, in: Duursma, E.K., Dawson, R. (eds.), *Marine organic chemistry*, Elsevier, Amsterdam, 79-85.
- Choi, C. G., Sim, H. S., Kim, H. S., Kim, K. J., Jun, B. O., 1993, The changes of water quality and some bacterial populations of Namdaechon stream by water discharged from Kangnung hydropower plant, *J. East Coastal Res.*, 4(1), 16-21.
- Dawson, T. E., Mambelli, S., Plamboeck, A. H., Templer, P. H., Tu, K. P., 2002, Stable isotopes in plant ecology, *Annu. Rev. Ecol. S.*, 33(1), 507-559.
- Delong, M. D., Thorp, J. H., 2006, Significance of instream autotrophs in trophic dynamics of the Upper Mississippi River, *Oecologia*, 147(1), 76-85.
- Hedges, J. I., Keil, R. G., Benner, R., 1997, What happens to terrestrial organic matter in the ocean?, *Organic geochemistry*, 27(5-6), 195-212.
- Houghton, D. C., Wasson, J. L., 2013, Abrupt biological discontinuity in a small Michigan (USA) stream due to historical riparian canopy loss, *J. Freshw. Ecol.*, 28(3), 293-306.
- Hunter, B. L., Laws, E. A., 1981, ATP and chlorophyll *a* as estimators of phytoplankton carbon biomass 1, *Limnol. Oceanogr.*, 26(5), 944-956.
- Kang, C. K., Choy, E. J., Son, Y., Lee, J. Y., Kim, J. K., Kim, Y., Lee, K. S., 2008 Food web structure of a restored macroalgal bed in the eastern Korean peninsula determined by C and N stable isotope analyses, *Mar. Biol.*, 153(6), 1181-1198.
- Kang, J. I., Kim, J. G., Lee, S. D., 2011, Studies on stream ecosystem in the Bukhan River using stable isotopes, *Korean J. Wet.*, 13(3), 515-522.
- Keckeis, S., Baranyi, C., Hein, T., Holarek, C., Riedler, P., Schiemer, F., 2003, The significance of zooplankton grazing in a floodplain system of the River Danube, *J. Plankton Res.*, 25(3), 243-253.
- Kendall, C., Silva, S. R., Kelly, V. J., 2001, Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States, *Hydrol. Process.* 15, 1301-1346.
- Kim, J. E., Lee, H. G., 2018, The evaluation of potential invasive species in the Gangneungnamdae Stream in Korea using a fish invasiveness screening kit, *Korean J. Environ. Biol.*, 36(1), 73-81.
- Kim, J. K., Kim, B. C., Jung, S. M., Jang, C. W., Shin, M. S., Lee, Y. K., 2007, The Distribution of DOM and POM and the composition of stable carbon isotopes in streams of agricultural and forest watershed located in the Han River System, Korea, *Korean J. Limno.*, 40(1), 93-102.
- Kwon, K. Y., Moon, C. H., Kang, C. K., Kim, Y. N., 2002, distribution of particulate organic matters along the salinity gradients in the Seomjin river Estuary, *J. Korean fish. soc.*, 25(1), 86-96.
- Lajtha, K., Marshall, J. D., 1994, Sources of variation in isotopic composition in plants, in: Lajtha, L., Marshall, J. D. (eds.), *Stable isotopes in ecological and environmental sciences*, Oxford University Press, London, UK., 1-21.
- Meyers, P. A., 1994, Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter, *Chem. Geol.*, 144, 289-302.
- O'Leary, M. H., 1988, Carbon isotopes in photosynthesis, *Bioscience*, 38(5), 328-336.
- Onstad, G. D., Canfield, D. E., Quay, P. D., Hedges, J. I., 2000, Sources of particulate organic matter in rivers from the continental USA: lignin phenol and stable carbon



- isotope compositions, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64(20), 3539-3546.
- 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. Environ. Ecol.*, 50(4), 422-431.
- Park, K. H., Jun, B. O., Min, S. H., Choi, B. J., 1994, Survey and management of water quality of three main streams of Youngdong area, *J. East Coastal Res.*, 5(1), 1-89.
- Parsons, T. R., Stephens, K., Strickland, J. D. H., 1961, On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters, *J. Fish. Res. Board Can.*, 18(6), 1001-1016.
- Pocklington, R., Leonard, J. D., 1979, Terrigenous organic matter in sediments of the St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord, *J. Fish. Res. Board Can.*, 36(10), 1250-1255.
- Post, D. M., 2002, Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions, *Ecology*, 83, 703-718.
- Rau, G. H., Sweeney, R. E., Kaplan, I. R., 1982, Plankton  $^{13}\text{C}$ :  $^{12}\text{C}$  ratio changes with latitude: differences between northern and southern oceans. *Deep-Sea Res. Pt A.*, 29(8), 1035-1039.
- Smittenberg, R. H., Eglinton, T. I., Schouten, S., Damsté, J. S., 2006, Ongoing buildup of refractory organic carbon in boreal soils during the Holocene, *Science*, 314(5803), 1283-1286.
- Song, H. B., Baek, H. M., Lee, C. W., 2005, Water environmental assessment by the species biotic index of freshwater fish in the Namdaecheon, Gangneung city, *J. Environ. Impact Assess.*, 14(4), 237-245.
- Stumm, W., Morgan, J. J., 2012, *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*, John Wiley & Sons, New York.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., Cushing, C. E., 1980, The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37(1), 130-137.
- Ward, J. V., Stanford, J. A., 1995, The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers, *Regul. Rivers: Res. Manage.*, 10(2-4), 159-168.
- Williams, D. D., Feltmate, B. W., 1992, *Aquatic Insects*, C.A.B. International, Wallingford, Oxon, UK.
- Yoon, Y. Y., 2003, Comparison of water qualities and pollutants discharged to the East sea of Korea from Namdae and Yeongok stream in the Gangneung city, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 6(1), 68-77.
- Yoon, Y. Y., Kim, K. T., 1998, Level and Fate of Trace Metals in the Namdae Stream, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 20(8), 1039-1049.

- 
- Ph.D. Jung-Hyun Kwak  
International Environmental Research Institute, Gwangju  
Institute of Science and Technology  
kjght@gist.ac.kr
  - Professor. Hyun-Je Park  
Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National  
University  
phj13579@gwnu.ac.kr