KJEE 46(2) : 175~184 (2013)
http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2013.46.2.175
ISSN: 2288-1115 (Print), 2288-1123 (Online)

Original article

탄소 및 질소 안정동위원소 비를 이용한 영산강하구역 유기물 기원 추정 연구

이연정 · 정병관[1] · 신용식[1] · 김성환[2] · 신경훈

(한양대학교 해양융합과학과, [1]목포해양대학교 환경 · 생명공학과,
[2]경북대학교 화학과)

Determination of the Origin of Particulate Organic Matter at the Estuary of Youngsan River using Stable Isotope Ratios ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$). ***Lee, Yeon-Jung, Byung-Kwan Jeong[1], Yong-Sik Shin[1], Sung-Hwan Kim[2] and Kyung-Hoon Shin (Department of Marine Sciences and Convergence Technology, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea; [1]Department of Environmental Engineering & Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chonnam 530-729, Korea; [2]Department of Chemistry, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)***

Organic carbon and total nitrogen stable isotope ratios of suspended materials were determined at 3 stations (from Mongtan Bridge to Youngsan river estuary barrage) (n=6, each) from November 2008 to August 2009, in order to understand the origin of particulate organic matter at the Estuary of Youngsan River. Allochthonous organic matter, ammonia-N and silicate were increased after heavy rain (in August). Carbon isotope ratios were significantly different between stations in November and August, and it was possible to determine the origin of organic matter. The heavier nitrogen isotope ratios, as well as higher phosphate concentrations, were found in November than other sampling times. Livestock wastewater and farmland input was likely the main causes of these high values. In addition, YS3 station, the nearest site to estuary barrage, appears to be affected by a substantial amount of livestock wastewater and farmland input, considering that nitrogen isotope ratios were heavier than those at the upper sites. These results suggest that the analysis of stable isotope ratios is a simple but useful tool for the determination of organic matter origin in aquatic environments.

Key words : carbon stable isotope ratio, nitrogen stable isotope ratio, Youngsan River, origin of organic matter

* Corresponding author: Tel: +82-31-400-5536, Fax: +82-31-416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

ⓒ The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

서 론

안정동위원소를 이용한 다양한 생태 해석 연구는 수십 년 전부터 진행되고 있으며 (Peterson and Fry 1987; Radajewski *et al.*, 2000; Post, 2002; Di Lascio *et al.*, 2013), 그 중 유기물의 기원을 추적하는 연구에서도 유용한 방법으로 사용되고 있다 (Thornton and McManus, 1994; Middelburg and Nieuwenhuize, 1998; Guo *et al.*, 2013). 수층의 유기물은 식물플랑크톤으로부터 만들어지는 자생기원 유기물과 육상식물이나 토양 등 육지에서 유입되는 외부기원 유기물로 이루어져 있다. 식물플랑크톤이나 육상식물은 1차 생산자로서 이들이 사용한 무기탄소나 무기질소의 기록이 1차 생산자에 의해 생성된 유기물에 반영되기 때문에 그 기원을 해석하는 것이 가능하게 된다.

강을 통한 탄소의 유입 및 이동은 전지구적 탄소 순환 관점에서 매우 중요하며 (Ludwig *et al.*, 1996; Cole *et al.*, 2007), 특히 하구역은 해양과 연결되어 있으면서 담수에 의한 유입이 존재하기 때문에 육지기원 물질들이 해양으로 유입되는 통로로서 이 환경의 유입원에 대한 이해가 중요하다고 할 수 있다.

우리나라 4대강 중 하나인 영산강은 과거 자연적인 하구역이었으나 1981년 농업용수 공급 등의 목적으로 하구둑이 만들어지면서 해수와 담수 환경으로 분리되었다. 이 후 영산호에는 생활하수나 농·축산 폐수 등이 지속적으로 유입되어 오염이 가속화 되었으며 (Ryu and Lee, 2000), 하구 둑 수문 운영을 통해 높은 농도의 영양염류 및 유기물을 함유한 영산호 물이 목포 연안으로 방류되면서 식물플랑크톤 대량 발생을 야기시키는 등 다양한 환경 문제를 초래하였다 (Kim and Lee, 2003; Lee *et al.*, 2011). 특히 영산강유역의 하단에 위치하고 있는 영산호는 하구둑에 의해 상류에서 하류로의 물 흐름이 차단되어 타 구간에 비해 오염도가 심각하며, 농업용수 수질기준 (IV급수, COD 8.0 ppm 이하)으로 관리되었기 때문에 상류로부터 오염원이 그대로 유입되도록 방치되어 있었다 (NIER_Yeongsan river environment research center, 2007). 따라서 영산호로 유입되는 오염원의 기원을 지속적으로 파악하여 관리대책을 마련하는 것이 필요하며, 안정동위원소 비 분석은 이에 대한 정보를 제공할 수 있는 유용한 방법으로 사용될 수 있다. 질소 안정동위원소 비 분석은 질소 비점오염원 유입원 규명에 유용하게 사용될 수 있으며 (Hebert and Wassenaar, 2001; Sugimoto *et al.*, 2011), 영산강은 주변에 농업 및 축산 활동이 활발하게 진행되고 있는 지역으로 이와 같은 기법이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료되나 현재까지 영산강 수층 입자성 물질의 안정동위원소 비 자료는 전무한 실정이

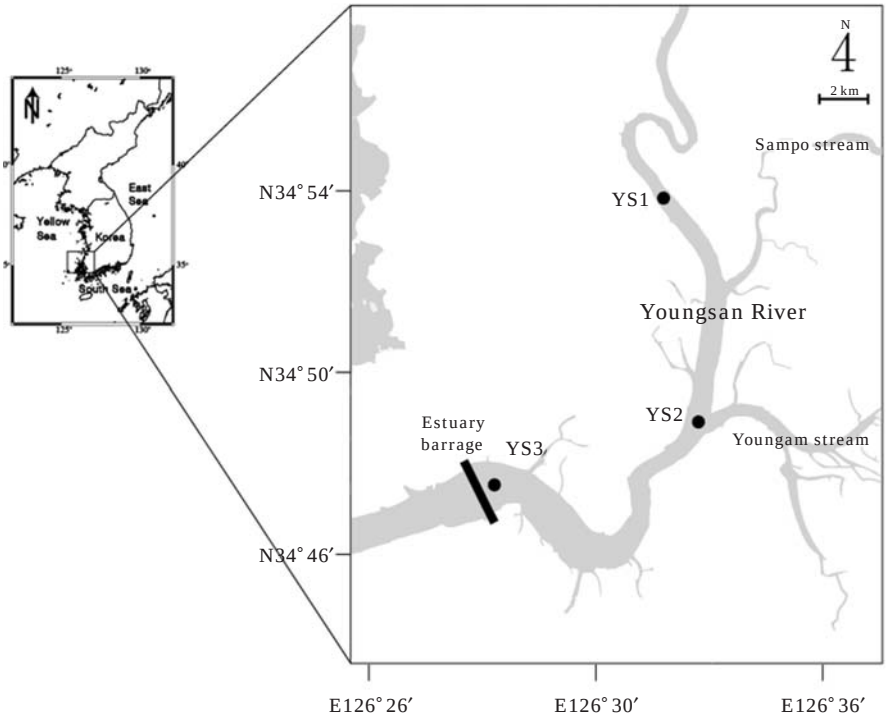

Fig. 1. Map showing the sampling stations in the Youngsan River estuary.

다. 따라서 본 연구는 이화학적 요인 및 입자성 물질의 탄소 및 질소 안정동위원소 비 측정을 통해 영산강하구역 입자물질 유입원의 시·공간적 변화를 추정해보고자 실시되었다.

재료 및 방법

본 연구는 영산강 하류역의 3개 정점(YS1, YS2, YS3)에서 2008년 11월, 2009년 1월, 2월, 3월, 6월, 8월 총 6회 실시되었으며, 조사지점은 Fig. 1에 나타내었다. 국가수자원관리종합정보시스템의 토지이용 자료에 의하면 2000년 기준 영산강 하류 및 영산강 하구언 유역의 토지피복별 면적 비율은 산림과 논이 각각 31%, 48%로 높은 비율을 차지하였으며, 수역 및 도시, 나지, 습지, 초지, 밭 등은 10% 미만의 비율을 보였다. 2006년 기준 생화학적 산소요구량 오염 부하량의 배출 비율은 축산이 60%로 가장 높게 나타났으며, 인간활동과 토지에 의한 배출 비율은 각각 24%와 14%로 나타났다(www.wamis.go.kr).

강우량 자료는 기상청 홈페이지(www.kma.go.kr) 자료를 사용하였으며, 염분 및 탁도는 수질 다항목 측정기(YSI-85, YSI inc., USA)를 이용하여 표층에서 측정하였다. 입자성 부유물질(SPM: Suspended particulate matter)의 농도는 여과 전·후 건조된 GF/F 여과지의 무게 차를 여

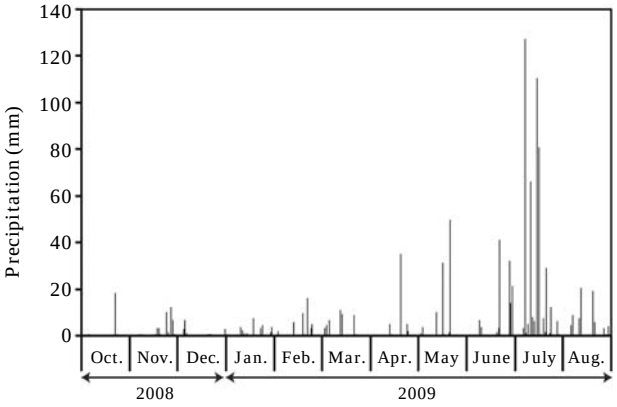

Fig. 2. Temporal variation of precipitation amounts from October 2008 to August 2009 in Mokpo City.

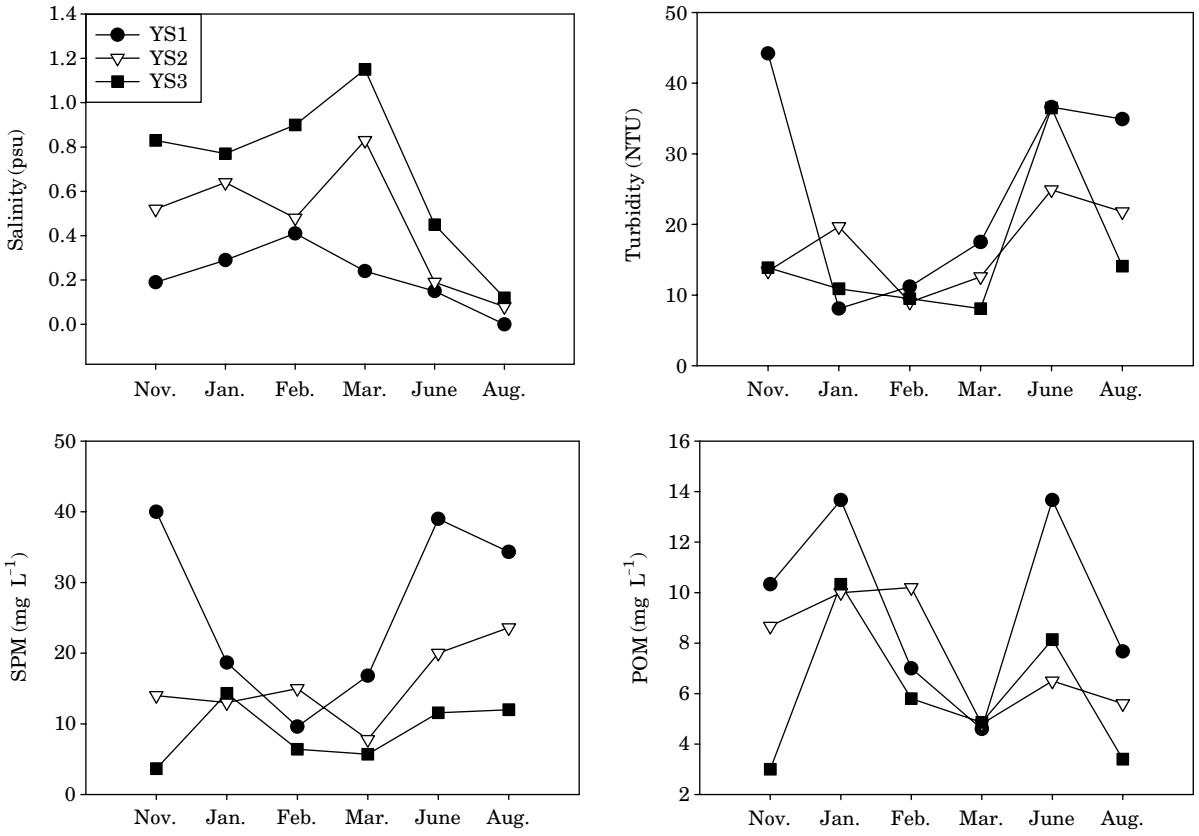

Fig. 3. Temporal variations of salinity, turbidity, SPM, and POM at three stations from November 2008 to August 2009.

과량으로 나누어 계산하였으며, 입자성 유기물질 (POM: Particulate organic matter)의 농도는 강열감량 방법을 이용하여 계산하였다. 영양염류 농도는 Parsons *et al.* (1984)의 방법에 따라 자동영양염분석기 (AACS5, BLTEC®, Japan)를 이용하여 분석하였고, Chl.*a*의 농도는 현장수를 여과한 GF/F 여과지를 90% 아세톤으로 추출한 후 형광광도계 (10-AU, Turner Designs, USA)를 이용하여 분석하였다. 입자성 유기탄소의 농도 및 안정동위원소 비 측정을 위한 시료는 현장에서 채집한 원수를 전처리한 GF/F 여과지 (450°C, 4시간)로 여과 (50～200 mL)한 후 12N 농도의 진한 염산 증기를 이용하여 무기탄소를 제거하고 원소-질량 분석기 (EuroEA-Isoprime irms, GV instruments, UK)로 분석하였다. 입자성 질소의 농도 및 안정동위원소 비 측정을 위한 시료는 염산 증기 처리를 제외하고 입자성 유기탄소와 동일하게 진행하였다. 기기오차를 검정하기 위한 표준물질은 Urea (Reference material for NC, Eurovector, UK)를 사용하였다 (S.D.=0.1). 일반적으로 시료의 안정동위원소 비를 표현할 때에는 국제적으로 공인된 표준물질과의 차이를 천분율로 표시하며 그 식은 다음과 같다.

$$\delta(‰) = \left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1\right) \times 1000$$

여기서 R은 무거운 동위원소와 가벼운 동위원소(탄소의 경우 $^{13}C/^{12}C$, 질소의 경우 $^{15}N/^{14}N$)의 비를 의미하며, R_{sample}은 시료의 값, $R_{standard}$는 표준물질의 값으로 탄소는 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite), 질소는 대기 중 질소를 표준물질로 사용하였다. 통계분석은 PASW Statistics 18.0 프로그램을 사용하였으며, 분석 항목들 간의 피어슨 상관계수 (r)는 상관분석을 통하여 계산하였으며, 결정계수 (R^2)는 단순회귀분석을 통해 구하였다. 모든 분석의 유의확률은 0.05를 기준으로 하였다.

결 과

1. 환경요인의 변화

2008년 10월부터 2009년 8월까지 목포시 일 강우량 분포는 Fig. 2에 나타내었다. 강우량은 집중 호우 시기인 7월에 가장 높은 값을 보였으며, 7월을 제외하고 5월과 6

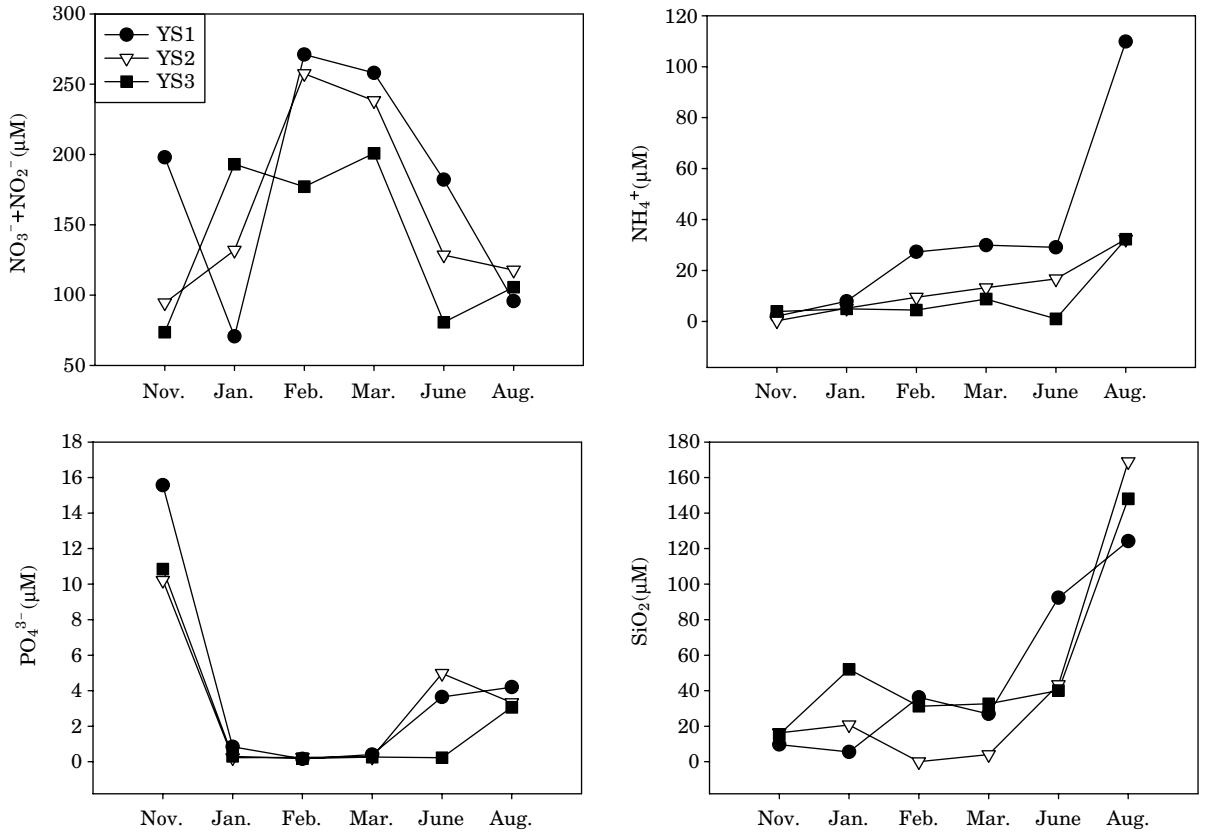

Fig. 4. Changes of nutrients ($NO_3^- + NO_2^-$, NH_4^+, PO_4^{3-}, SiO_2) at three stations from November 2008 to August 2009.

월, 8월에 총 월 강우량이 50 mm 이상으로 다른 시기에 비해 높게 나타났다. 조사기간 동안 염분 및 탁도, SPM, POM의 농도 변화는 Fig. 3에 나타내었다.

영산강 세 정점에서 염분은 0.0～1.2 psu의 범위로 하구둑 앞 정점(YS3)에서 상대적으로 높은 값을 보였으며, 강우량이 높았던 6월과 8월에 염분 감소가 나타났다. 탁도는 0.5～44.2 NTU의 범위를 보였으며, 11월 YS1을 제외하고 모든 정점에서 다른 시기에 비해 6월과 8월에 비교적 높은 값을 보였다. SPM은 1.3～40.0 mg L^{-1}의 범위로 YS1과 YS2에서 SPM과 탁도가 높은 상관을 보였으며 ($r=0.94$, 0.65), POM은 1.2～13.7 mg L^{-1}의 범위로 강우에 의한 영향이 두드러지게 나타나지 않았다. 11월 YS1에서 탁도와 SPM의 값은 높게 나타난 반면 강우량 및 염분, POM의 농도는 큰 변화가 없었다. 모든 정점에서 염분은 탁도 및 SPM과 통계적으로 유의하게 음의 상관관계를 보였으며 ($p<0.05$), POM은 YS3 정점을 제외하고 다른 환경 요인과 통계적으로 유의한 상관을 보이지 않았다. YS3 정점에서는 다른 정점과 달리 SPM과 POM이 높은 상관을 보였다 ($r=0.775$, $p<0.05$).

2. 영양염류의 농도 변화

조사기간 동안 세 정점 표층에서 질산성 질소 및 아질산성 질소($NO_3^-+NO_2^-$), 암모니아성 질소(NH_4^+), 인산염 인(PO_4^{3-}), 규산염(SiO_2)의 농도 변화는 Fig. 4에 나타내었다.

질산성 질소 및 아질산성 질소는 70.6～271.1 μM, 암모니아성 질소는 0.3～109.9 μM, 인산염 인은 0.2～15.6 μM, 규산염은 8.9～169.0 μM의 농도 범위를 보였다. 질산성 질소 및 아질산성 질소는 2월과 3월에 높은 농도를 보인 후 강우량이 높았던 6월이나 8월에 감소하는 경향을 보였다. 반면 암모니아성 질소는 강우량이 높았던 8월에 높게 나타났으며, 이는 규산염의 농도 변화와 유사하였다. 한편 인산염은 11월에 가장 높은 농도를 보였고, 6월과 8월에 소폭 상승하는 경향을 보였다.

3. 영산강 유역 표층수 입자성 유기탄소 농도 및 안정동위원소 비의 시 · 공간적 변화

조사 기간 동안 세 정점 표층에서의 입자성 유기탄소(POC; Particulate organic carbon) 및 Chl.*a*의 농도, POC의 탄소 안정동위원소 비는 Fig. 5에 나타내었다.

YS1부터 YS3까지의 POC 농도 범위는 각각 1,418～3,666 μgC L^{-1}, 1,003～4,528 μgC L^{-1}, 745～2,267 μgC L^{-1}

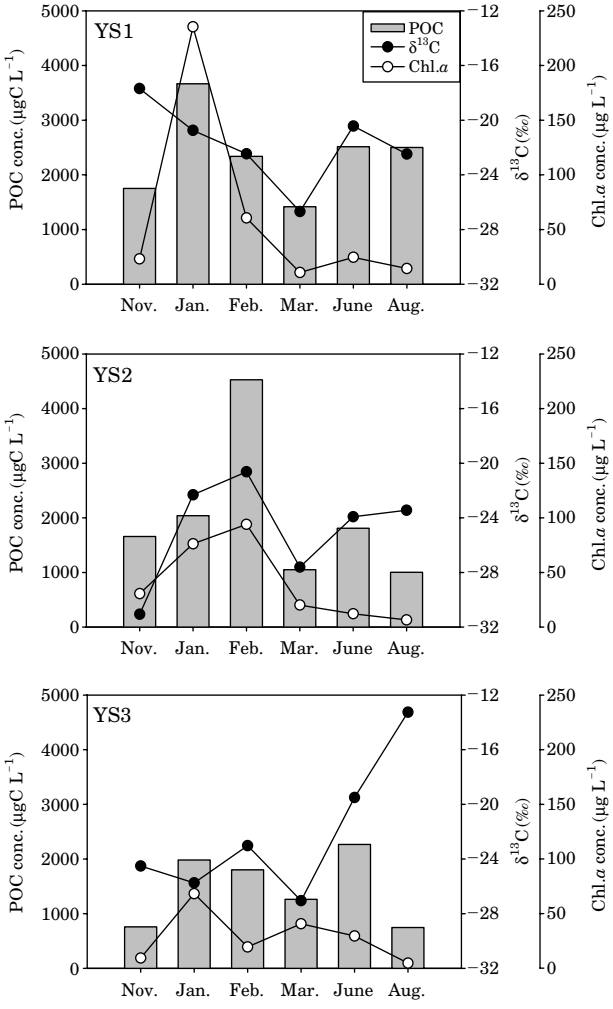

Fig. 5. Temporal changes in POC concentration, $\delta^{13}C$, and Chl.*a* at three stations from November 2008 to August 2009.

으로 하류인 YS3에서 가장 낮은 농도 범위를 보였다. Chl.*a*의 농도 범위는 각각 10.7～235.4 μg L^{-1}, 6.5～94.0 μg L^{-1}, 4.7～68.2 μg L^{-1}으로 POC와 동일하게 YS3에서 가장 낮게 나타났다. 모든 정점에서 Chl.*a*의 농도는 동절기인 1월 또는 2월에 최대 값을 보였으며, POC는 YS1과 YS2에서만 동절기에 가장 높은 농도를 보였다. YS1부터 YS3까지의 탄소 안정동위원소 비는 각각 −17.69～−26.69‰, −20.63～−31.06‰, −13.25～−27.05‰의 범위를 보였으며, 11월과 8월을 제외한 연구 기간에는 모든 정점에서 같은 시기에 유사한 값을 보였다. 11월 탄소 안정동위원소 비는 YS1에서 −17.69‰, YS2에서 −31.06‰, YS3에서 −24.51‰의 값으로 정점에 따라 큰 차이를 보였으며, 8월은 각각 −22.48, −23.45, −13.25‰의 값으로

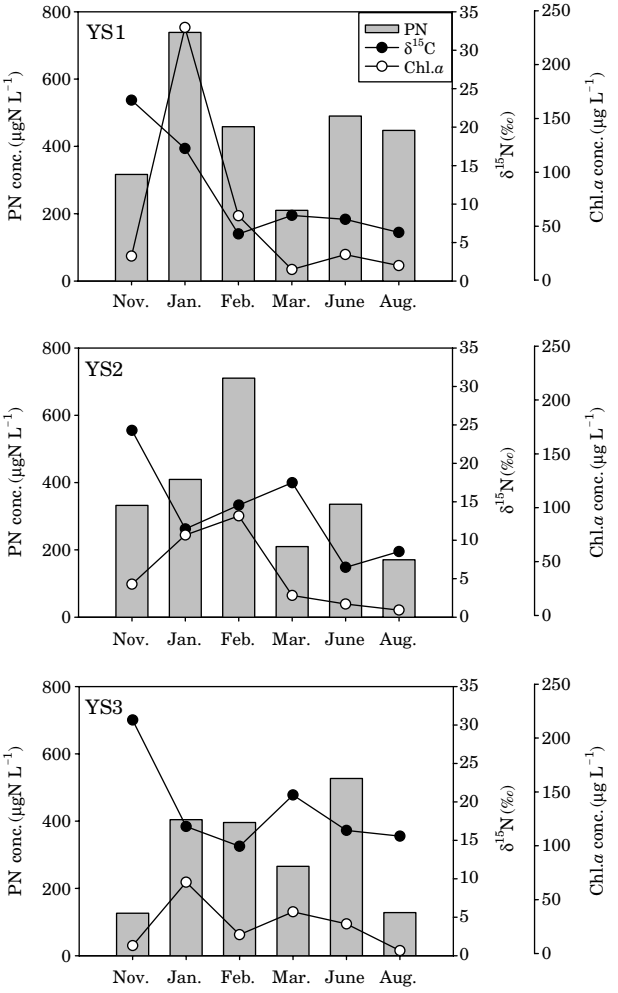

Fig. 6. Temporal changes in PN concentration, $\delta^{15}N$, and Chl.*a* at three stations from November 2008 to August 2009.

YS3에서 매우 무거운 값을 보였다.

4. 영산강 유역 표층수 입자성 질소 농도 및 안정동위원소 비의 시 · 공간적 변화

조사 기간 동안 세 정점 표층수에서의 입자성 질소(PN: Particulate nitrogen) 및 Chl.*a*의 농도, PN의 질소 안정동위원소의 비는 Fig. 6에 나타내었다.

입자성 질소의 농도 범위는 YS1부터 YS3까지 각각 210～739 μgN L^{-1}, 171～710 μgN L^{-1}, 126～527 μgN L^{-1}의 범위를 보였으며, POC 농도와 유의한 상관관계를 보였다 ($r > 0.99$). 입자성 질소의 안정동위원소 비 범위는 YS1부터 YS3까지 각각 6.12～23.51‰, 6.48～24.29‰, 14.23～30.65‰로 나타났으며 하구둑 앞 정점인 YS3에

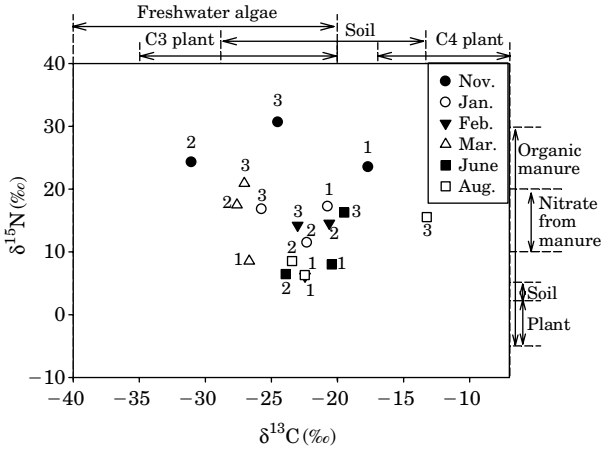

Fig. 7. Carbon and nitrogen isotope ratios of particulate matter at three stations (numbers: study site names).

서 다른 정점에 비해 비교적 무거운 값을 보였다. 모든 정점에서 11월에 매우 무거운 질소 안정동위원소 비를 보였다.

고 찰

1. 환경 요인 및 영양염류 농도의 시 · 공간적 변화

조사 기간 중 6월과 8월은 다른 시기에 비해 강우량이 높았으며, 탁도 역시 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과를 통해 이 시기에는 강우 유입에 의한 영향이 크게 나타날 것으로 사료된다. 암모니아성 질소는 토양 내 박테리아 활동이나 강우, 대기 중의 먼지, 축사를 통해 유입되며, 강우량이 많은 시기에는 육지식물의 이용이나 미생물의 질산화 작용이 약화되어 더 많은 양의 암모니아성 질소가 수계로 유입될 수 있다(Horne and Goldman, 2001). 한편 호수에서의 주요한 규산염 유입경로는 육지로부터의 유입과 퇴적물로부터의 용출로 구분되는데(Horne and Goldman, 2001), 본 연구에서는 표층 규산염의 농도를 제시하고 있으며, 강우량이 높은 8월에 가장 높은 농도를 보이고 있다. 이러한 결과들을 통해서 하계 높은 강우량은 영산강하구역의 탁도 증가를 야기시키며, 이와 더불어 암모니아성 질소 및 규산염의 유입 역시 증가시키는 것으로 추측된다.

인산염은 자연적으로는 육지에서 암석의 풍화작용이나 토양을 통해 강으로 유입되지만, 최근 하수나 농경지에서 사용하는 비료에 의한 인위적인 영향이 증가하고 있다

(Horne and Goldman, 2001; Kaiser *et al.*, 2013). 모든 연구 정점에서 인산염의 농도가 강우량이 높은 8월보다 11월에 높게 나타나는 것으로 보아 비료 사용 등의 인간활동에 의한 유입이 인산염의 주요한 경로로 사료된다. 11월 YS1에서는 강우량이 높지 않았음에도 불구하고 탁도 및 SPM의 높은 농도가 관찰되었고, SPM 내 POM의 비율은 약 26%로 육지 기원 물질 유입이 높았던 8월과 유사하게 매우 낮게 나타났다. 이는 토사 유입에 의한 결과로 추정되며, 그로 인해 11월 YS1에서는 다른 정점에 비해 비교적 높은 인산염 농도를 보이는 것으로 사료된다. 전세계적으로 점 오염원에 의한 수층으로의 인(phosphorus) 유입은 감소하는 추세지만, 농업지역을 통한 인의 유입은 여전히 수층의 부영양화를 야기시키는 원인이 되고 있다(Hahn *et al.*, 2012). 연구 정점 주변의 토지가 대부분 논으로 이용되고 있음을 고려할 때(www.wamis.go.kr), 영산강 역시 농업지역을 통한 인산염 유입에 대한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

Shin (2010)은 섬진강과 영산강의 질산염 농도 분석을 통해 인간 활동이 활발하지 않은 섬진강에 비해 영산강은 주변의 농경지나 도심지의 영향이 크기 때문에 더 높은 농도의 질산염 농도가 관찰된다고 보고하였다. 본 연구 정점 역시 이와 동일한 이유로 비교적 높은 질산성 질소 및 아질산성 질소의 농도를 보이는 것으로 사료되며, 강우량이 높았던 6월이나 8월은 강우에 의한 희석효과로 인해 농도가 감소한 것으로 판단된다.

2. 입자성 물질의 유기탄소 및 질소 농도와 안정동위원소 비의 변화

조사 기간 동안 모든 정점에서 POC와 PN의 상관계수는 모두 약 0.99로 매우 높은 상관관계를 보였으며, YS1과 YS2에서 POC와 Chl.*a*, PN와 Chl.*a*의 결정계수(R^2)는 모두 0.7 이상으로 POC의 농도 변화가 식물플랑크톤에 의해 크게 영향을 받는 반면 YS3은 모두 0.3으로 다른 유입원에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 정점 별 POC와 PN 비의 평균 값은 YS1부터 YS3까지 각각 5.5, 5.4, 5.1로 YS3에서 가장 낮은 값을 보였다. 이는 상대적으로 YS3의 입자성 물질 내 질소 함유량이 높음을 의미하며, Chl.*a*와 POC, PN의 결정계수가 낮았던 것으로 미루어보아 자생기원 유기물보다 비교적 질소의 함유량이 높은 유기물의 유입이 나타나고 있는 것으로 판단된다. Eppley *et al.* (1977)은 POC와 Chl.*a*의 비가 100 이상이면 입자성 유기물의 기원이 육지기원임을 제시한 바 있으며, 본 연구에서는 YS1에서는 3, 6, 8월, YS2에서는 6, 8월, YS3에서는 8월에 이 비가 100 이상으로 나타났다. 이 시기의 입자성 유기물질 내에는 육지기원 유기물의 비율이 비교적 높을 것으로 사료된다.

탄소 안정동위원소 비($\delta^{13}C$)는 유기물의 기원을 추적할 수 있는 유용한 지표로 육상 식물 중 밀이나 벼와 같은 C3 식물은 약 −20～−35‰의 값을 보이는 반면 옥수수, 사탕수수, 잡초, 수생식물과 같은 C4식물은 −7～−17‰로 C3식물에 비해 무거운 값을 보인다(Deines, 1980; Ehleringer, 1989). 토양의 유기물은 식생과 휴믹화 정도에 따라 다르게 나타나며 −13.3～−28.8‰의 범위를 보인다(Schwartz *et al.*, 1986). 담수 식물플랑크톤의 경우 서식하는 수환경의 무기탄소 $\delta^{13}C$값에 의해 크게 변하기 때문에 −20～−40‰의 넓은 범위를 보인다(France, 1995). 질소 안정동위원소 비 역시 탄소와 마찬가지로 기원을 찾는데 유용한 방법으로 사용될 수 있는데, 대부분 식물(plant)의 경우 −5～+2‰, 토양은 +2～5‰, 대기 중 질소를 이용하여 만든 인공비료의 경우 −4～+4‰, 식물사체나 동물들의 배설물로 만들어진 유기질 비료는 +2～+30‰, 동물의 배설물에서 기인한 질산염의 경우 +10～+20‰의 범위를 보인다(Fry, 1991; Kendall, 1998).

조사 기간 동안 모든 정점에서의 입자성 유기탄소 및 입자성 질소의 안정동위원소 비의 bi-plot은 Fig. 7에 나타내었다.

탄소 안정동위원소 비 결과는 11월 YS1, YS2, 8월 YS3을 제외하고 비교적 좁은 범위를 보였으며, 특정 기원 유기물의 값을 보이지 않는 것으로 보아 다양한 기원의 유기물이 혼합되어 있는 것으로 사료된다. 반면 11월 YS2는 C3식물 기원 유기물, 8월 YS3은 C4식물 기원 유기물에 가까운 값을 보여 이들의 기여도가 높았던 것으로 추정된다. 탐진강 유역에서 암석을 기질로 사용하는 부착조류의 탄소 안정동위원소 비는 −20.02～−15.20‰, 갈대 부착조류는 −24.04～−21.96‰의 범위를 보였으며(Gal *et al.*, 2012), 본 연구 지역의 부착조류 역시 유사한 값을 보인다고 가정하면 8월 YS3의 무거운 탄소 안정동위원소 비 값에 대한 부착조류의 영향은 미비하였을 것으로 판단된다. 11월 YS1은 C4식물과 토양기원의 값과 유사하게 나타났다. 이 시기에는 강우량이 높지 않았음에도 불구하고 탁도가 매우 높고 무기물의 비율이 높은 입자성 물질의 유입이 있었으며(Figs. 2, 3), 이는 위에서 언급한 바와 같이 토사의 유입에 의한 결과로 사료된다.

질소 안정동위원소 비 결과는 6월과 8월 YS1, YS2, 3월 YS1, 11월 모든 정점을 제외하고 모두 동물의 배설물에서 기인한 질산염의 값과 유사한 범위를 보였다. 이는 식물플랑크톤이나 주변 육지식물이 사용하는 무기질소원

이 동물 배설물에서 기인하였음을 간접적으로 나타내지만 이를 확인하기 위해서는 추가적인 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 6월과 8월 YS1, YS2에서는 비교적 가벼운 질소 안정동위원소를 보였으며, 이는 강우를 통해 다른 기원의 무기질소 및 입자성 질소의 유입에 의한 결과로 사료된다. 반면 11월은 다른 시기에 비해 가장 무거운 값을 보였으며, 이는 식물사체나 동물들의 배설물로 만들어진 유기질 비료의 값과 유사하였다. 또한 연구 정점 중에서는 YS3이 모든 시기에 다른 정점에 비해 무거운 질소 안정동위원소 비의 값을 보였다. Yang (2001)은 영산강을 12개 유역으로 구분하여 생활하수 및 산업폐수, 축산폐수, 양식장, 분뇨처리장 및 쓰레기 침출수, 자연계 (비점원) 오염 부하량을 비교하였으며 본 연구 지역인 영산호가 속해있는 유역이 다른 유역에 비해 축산폐수 및 농경지에서 기인한 오염 부하량이 높게 나타났다고 보고하였다. 또한 Shin (2010)은 영산강의 질산염 질소 안정동위원소 비 분석을 통해 영산강의 질산염은 분뇨나 오수에 의해 많은 영향을 받는다고 보고하였다. Hebert and Wassenaar (2001)는 농경지로 사용되는 토지의 비율이 높을수록 질소 안정동위원소 비가 무거운 값을 보인다고 보고한 바 있으며, 또한 축산폐수는 무거운 질소 안정동위원소 비를 갖는 동물의 배설물이 상당량 포함되어 있기 때문에 무거운 값을 보일 수 있다. 따라서 11월에는 다른 시기에 비해 축산폐수 및 농경지를 통한 유입이 영산강에 뚜렷하게 나타나 모든 정점에서 무거운 $\delta^{15}N$의 값을 보였을 것으로 사료된다. 또한 다른 정점에 비해 무거운 질소 안정동위원소 비를 보이는 YS3은 축산폐수 및 농경지를 통한 유기물 유입이 보다 많이 일어나고 있을 것으로 판단되며, 이는 Chl.*a*와 POC 및 PN의 결정계수가 낮은 값을 보이는 원인으로 사료된다.

지리적으로 강을 통해 연결되어 있는 유수역 정점들에서 입자성유기물의 탄소 및 질소 안정동위원소 비가 시 · 공간적으로 상이하게 나타난 것은 조사 시기에 따라 상류를 통해 유입되는 유기물뿐만 아니라 지천을 통해 주변 유역에서 지속적으로 다양한 기원의 유기물들이 유입되고 있음을 의미한다. 본 연구 결과를 통해 탄소 및 질소 안정동위원소 비는 유입원을 추적하는데 유용한 방법으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 그러나 유입된 유기물의 안정동위원소 비는 미생물 분해활동 등에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 (Karlsson *et al.*, 2011), 차후 농경지 및 축산폐수, 토양 등 유입원 별 초기 및 분해 후 안정동위원소 비를 측정하면 더욱 정확한 영산강 유기물 기원 추적 및 기여도 계산이 가능할 것으로 사료된다. 이와 더불어 분자 생체지표의 농도 및 안정동위원소 비 분석 등이 추가된다면 유기물 기원 추정 뿐만 아니라 이동에 대한 정보까지 얻을 수 있을 것이다.

적 요

본 연구는 영산강하구역 입자물질 유입원의 시 · 공간적인 변화를 추정해 보고자 몽탄대교에서 영산강 하구둑에 이르는 영산강하구역 세 정점에서 연 6회에 걸쳐 수층 부유 물질의 탄소 및 질소 안정동위원소 비를 비교하였다. 모든 정점에서 8월에 강우를 통한 외부기원 유기물의 유입이 증가하였으며, 이 때 암모니아성 질소 및 규산염의 유입 역시 함께 증가하였다. 탄소 안정동위원소 비 측정 결과 11월과 8월에 정점 별 유기물의 기원이 크게 차이 났으며, 안정동위원소 비 값을 이용하여 주요 유입원 추정이 가능하였다. 11월에 모든 정점에서 질소 안정동위원소 비가 무거운 값을 보였고, 인산염의 농도가 가장 높게 나타났는데 이는 축산폐수 및 농경지를 통한 유입이 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 다른 정점에 비해 영산강 하구둑에서 모든 조사 기간 동안 비교적 높은 질소 안정동위원소 비를 보였으며, 이를 통해 축산폐수 및 농경지를 통한 유기물 유입이 다른 정점에 비해 높을 것으로 추정된다. 본 연구 결과를 통해 안정동위원소 비 분석은 입자성유기물의 기원을 추정하는데 유용한 방법임을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2008-0060923)을 받았으며, 또한 2013년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구 (한국 관할해역 지질구조 및 해양지질조사) 입니다.

인 용 문 헌

Cole, J.J., Y.T. Prairie, N.F. Caraco, W.H. McDowell, L.J. Tranvik, R.G. Striegl, C.M. Duarte, P. Kortelainen, J.A. Downing, J.J. Middelburg and J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* **10**: 171-184.

Deines, P. 1980. The isotope composition of reduced organic

carbon, p. 329-406. *In*: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, The Terrestrial Environment, A (Fritz, P. and Fontes, J. Ch., eds.). Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York.

Di Lascio, A., L. Rossi, P. Carlino, E. Calizza, D. Rossi and M.L. Costantini. 2013. Stable isotope variation in macroinvertebrates indicates anthropogenic disturbance along an urban stretch of the river Tiber (Rome, Italy). *Ecological Indicators* **28**: 107-114.

Ehleringer, J.R. 1989. Carbon isotope ratios and physiological processes in aridland plants. Stable isotopes in ecological research. Ecological studies series. Springer-Verlag, New York. pp. 41-54.

Eppley, R.W., W.G. Harrison, S.W. Chisholm and E. Stuart. 1977. Particulate organic matter in surface waters off California and its relation to photosynthesis. *Journal of Marine Research* **35**: 671-696.

France, R.L. 1995. Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications. *Marine Ecology Progress series* **124**: 307-321.

Fry, B. 1991. Stable isotope diagrams of freshwater foodwebs. *Ecology* **72**: 2293-2297.

Gal, J.K., M.S. Kim, Y.J. Lee, J. Seo and K.H. Shin. 2012. Foodweb of aquatic ecosystem within the Tamjin River through the determination of carbon and nitrogen isotope ratios. *Korean Journal of Limnological Society* **45**(2): 242-251.

Guo, Q., H. Strauss, T.B. Chen, G. Zhu, J. Yang, J. Yang, M. Lei, X. Zhou, M. Peters, Y. Xie, H. Zhang, R. Wei and C. Wang. 2013. Tracing the source of Beijing soil organic carbon: A carbon isotope approach. *Environmental Pollution* **176**: 208-214.

Hahn, C., V. Prasuhn, C. Stamm and R. Schulin. 2012. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **153**: 65-74.

Hebert, C.E. and L.I. Wassenaar. 2001. Stable nitrogen isotopes in waterfowl feathers reflect agricultural land use in weastern Canada. *Environmental Science and Technology* **35**: 3482-3487.

Horne, A.J. and C.R. Goldman. 2001. Limnology, 2nd Edition, McFraw-Hill, New York, NY. pp. 113-171.

Kaiser, D., D. Unger, G. Qiu, H. Zhou and H. Gan. 2013. Natural and human influences on nutrient transport through a small subtropical Chinese estuary. *Science of the Total Environment* **450-451**: 92-107.

Karlsson, E.S., A. Charkin, O. Dudarev, I. Semiletov, J.E. Vonk, L. Sanchez-Garcia, A. Andersson and O. Gustafsson. 2011. Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea. *Biogeosciences* **8**: 1865-1879.

Kendall, C. 1998. In Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier: New York, NY. pp. 519-576.

Kim, K.S. and N.I. Lee. 2003. Estimation of pollution loads flowing into Mokpo harbor -centering on pollution loads from land in dry case-. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **6**(1): 11-20.

Lee, Y.J., J.O. Min, Y.S. Shin, S.H. Kim and K.H. Shin. 2011. Temporal and spatial variations of primary productivity in estuary of Youngsan River and Mokpo coastal areas. *Korean Journal of Limnological Society* **44**(4): 327-336.

Ludwig, W., J.L. Probst and S. Kempe. 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* **10**: 23-41.

Middelburg, J.J. and J. Nieuwenhuize. 1998. Carbon and nitrogen stable isotopes in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary. *Marine Chemistry* **60**: 217-225.

National institute of environmental research, Yeongsan river environment research center. 2007. A feasibility study of water quality improvement in the Yeonsan Reservoir.

Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, pp. 22-25.

Peterson, B.J. and B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics* **18**: 293-320.

Post, D.M. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology* **83**(3): 703-718.

Radajewski, S., P. Ineson, N.R. Parekh and J.C. Murrell. 2000. Stable-isotope probing as a tool in microbial ecology. *Nature* **403**(6770): 646-649.

Ryu, I.K. and C.Y. Lee. 2000. A study on phosphorus loading model for eutrophication response in the Yongsan Lake. *Korean Journal of Environmental Health Society* **26**(4): 97-104.

Schwartz, D., A. Mariotti, R. Lanfranchi and B. Guillet. 1986. $^{13}C/^{12}C$ ratios of soil organic matter as indicators of vegetation changes in the Congo. *Geoderma* **39**: 97-103.

Shin, W.J. 2010. Hydrogeochemical processes and isotope characteristics of the major rivers in South Korea. Thesis (doctoral).

Sugimoto, R., A. Kasai, K. Fujita, K. Sakauchi and T. Mizuno. 2011. Assessment of nitrogen loading from the Koso-

Sansen Rivers into Ise Bay using stable isotopes. *Journal of Oceanography* **67**(2): 231-240.

Thornton, S.F. and J. McManus. 1994. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay estuary, Scotland. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **38**: 219-233.

Yang, H.M. 2001. Database and user interface for pollutant source and load management of Yeungsan estuarine lake watershed using GIS. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* **28**(6): 114-126.

(Manuscript received 28 January 2013,
Revised 25 March 2013
Revision accepted 15 April 2013)