

안정동위원소를 이용한 북한강 하천생태계 연구

강 정 임* / 김 재 구** / 이 상 돈***

Studies on Stream Ecosystem in the Bukhan River using Stable Isotopes

Jung In Kang* / JaeGu Kim** / Sang-Don Lee***

요약 : 본 연구는 부식물 및 유기물로부터 분리 배양한 부착조류의 안정동위원소비 결과를 중심으로 분리된 부착조류의 안정동위원소비가 수질 대표성을 알아보기 위한 연구를 수행하였다. 주변 농경지의 분포가 많으며, 부착조류 현존량이 높아질수록, 부착조류의 질소안정동위원소비는 증가하며, 탄소안정동위원소비는 감소하는 경향을 보였다. 농경지 중심지역인 내린천 상류, 인북천 상류지역에서 질소안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}$)가 임야 중심지역인 한계천 및 북천에서의 값보다 높았다. 탄소안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)는 농경지에 의한 오염으로 부착조류의 현존량이 많은 내린천 상류와 인북천 상류지역보다 임야 중심의 청정한 한계천 및 북천으로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. 이에 따라 부착조류의 안정동위원소비는 하천수질오염원 중요한 지표가 될 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 안정동위원소, 먹이망, 부착조류, 소양호, 고랭지, 부영양화, 하천, 토지이용

Abstract : This study examined the epiphytes using stable isotopes. Separated epiphytes should represent the water quality. In study areas, where agricultural paddies were prevailing, biomass of epiphytes can increase nitrogen isotopes($\delta^{15}\text{N}$) and as a result decrease in carbon isotopes($\delta^{13}\text{C}$). Naerin stream and Inbuk upper areas showed higher nitrogen isotopes($\delta^{15}\text{N}$) than in Hangye and Buk stream. Also, stable carbon isotopes($\delta^{13}\text{C}$) in Naerin stream and Inbuk streams tended to increase than in Hangye and Buk stream. This can indicate the epiphytes can be a good indicator for water quality pollution.

Keywords : stable isotopes, food-web, epiphytes, Soyang reservoir, eutrophication, stream, land use pattern

1. 서 론

본 연구는 부착조류의 균집분석과 안정동위원소 분석을 함께 하여 부착조류의 생지화학적 특성을 최대한 활용하였다. 이는 하천 주변 오염원의 근원을 파악하고 오염도를 평가할 수 있는 부착조류의 탄소 및 질소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)의 생지화학적 특성에 기인한다(Peterson, 1999). 생태계 내에서 탄소의 흐름은 먹이연쇄에 따라 전달되고, 질소는 단백질원으로 영양단계에 따라 생태적 지위를 결정한다(Griffiths, 1998).

지금까지 진행된 부착조류를 활용한 안정동위원소 연구는 생태계 먹이망과 생물의 먹이 기원이 중심이 되었다. 수생태계 먹이망의 영양 단계가 높아질수록 일정한 경향을 보이며 변하는 질소와 탄소 안정동위원소비의 값에 근거하여 수생태계 먹이망을 분석하였고(Couch, 1989), Minagawa and Wada(1984)는 생물의 먹이 기원을 추적하였다. 안정동위원소비를 연구하여 농경지 및 하·폐수의 영향을 판단하는 연구는 최근 지역성과 수계 특성을 분석하는 데 도입되었으며 세계적으로 다양한 지역과 생물종을 대상으로 진행되

+ Corresponding author : lsd@ewha.ac.kr

* 이화여자대학교 환경공학과(Dept of Environmental Sciences & Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University)

** 강원대학교(Gangwon National University)

*** 이화여자대학교 환경공학과(Dept of Environmental Sciences & Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University)

고 있다. Hebert and Wassenaar(2001)는 수변에 서식하는 오리의 깃털의 질소 안정동위원소비가 토지 이용에 따라 무거워진다는 결과를 보였고, Brabandere 외(2007)은 대서양 아열대성 하천 유역의 오염원의 유입이 높은 농경지역에서 산림지역 까지 부착조류의 안정동위원소비가 질소 농도 구배에 따라 변하는 것을 확인하였다. 최근 국외 연구에서 토지 이용과 영양염류 농도의 상관관계를 밝히기 위해 질소 안정동위원소분석을 실시하는 연구가 주목되고 있는데, 많은 연구자들이 적용한 지역적 범위는 매우 넓었으며(Hebert and Wassenaar, 2001; Walter 외 2006), 이를 적용한 환경 분야에 연구도 활발히 진행 중이며, 주로 오염원의 종류와 오염물질의 기원을 규명하는 유용한 해석 방법으로 이용되고 있다(Riera 외 2009).

수생 생물의 질소 안정동위원소비 값은 다양한 유기물의 영향으로 인한 한계점을 지적하였으며, 부착조류의 안정동위원소비는 수체 내 생물 간의 먹이원 이동 연구의 기초자료가 될 수 있을 뿐 아니라, 외부 오염원의 근원 파악 및 영향력 판단에도 유용하게 활용될 수 있는 잠재성에 주목하였다(Cole 외, 2004), 하지만, 부착조류는 하천 바닥의 자갈에 오랫동안 부착하여 수체 내 오염 상태 및 환경을 상대적으로 잘 반영할 수 있다(Watanabe and Asai, 1999). 따라서 이러한 부착조류의 특성을 기반으로 외부 오염원, 부착조류의 군집, 안정동위원소의 물리화학생물학적 요소들을 통합적으로 분석할 수 있다.

본 연구는 토지 이용이 수질 환경에 미치는 영향을 파악하기 위해 부착조류를 이용한 질소 및 탄소 안정동위원소비의 변동의 폭 파악을 위한 연구를 수행하였으며, 오염원의 유입 정도의 차이가 수계별로 변동의 폭이 큰 북한강 상류 지역과 인북천 본류 지역에서 수행되었다.

2. 연구 지역 및 방법

연구의 수행을 위해 북한강 상류지역에서와 인북천 본류 지역 모두에서 순수 부착조류를 수집하

였으며, 부식질을 포함한 부착조류 시료에 대해 질소 안정동위원소비 값과 탄소 안정동위원소비 값은 얻었다. 부착조류의 수집과 분리배양은 아래의 방법에 의해 수행되었으며, 질소 및 탄소 안정동위원소비의 변동의 폭을 파악하였다. 소양강 상류 유역은 북한강 상류 지역과 인북천 본류 지역으로 나뉠 수 있으며 이에 따른 오염원의 유입 정도의 차이가 수계별로 변동의 폭이 차이에 영향을 미칠 수 있다.

부착조류를 기질(자갈)로부터 긁어낸 후 계수를 위한 시료는 Lugol 용액으로 고정하는 반면 안정동위원소 분석을 위한 시료는 중성 포르말린 용액으로 고정한다. 부착조류 시료들은 실험실에 도착하자마자 바로 450°C에서 4시간 동안 미리 태워서 준비한 GF/F 여과지(직경 25mm)를 이용하여 여과하여 무게를 재고 동결 건조하여 분석 시까지 데시케이터에 보관하였다.

본 연구에서는 안정동위원소분석을 시행하기 이전 동결 건조 하기 전에 분리 배양 과정을 도입하여 순수 부착조류를 기질에서 분리해내도록 하였다. 부착조류의 분리 배양을 위해 채집해온 돌을 천장 부분이 뚫린 플라스틱 용기에 담고, 부착조류가 올라올 수 있도록 mesh로 그 위를 덮어준다. 그리고 mesh위에 분말형태의 실리카겔을 뿌려주어 부착조류가 서로 엉겨 붙을 수 있도록 해준다. 24시간정도 빛을 쬐어주면 순수 부착조류들은 광합성을 하기 위해 미세 물질들만 통과할 수 있는 mesh를 통과하여 실리카겔에 흡착될 수 있도록 한다. 24시간 후, 부착조류가 흡착된 mesh는 450°C에서 4시간 동안 미리 태워서 준비한 GF/F 여과지(직경 25mm)를 이용하여 여과하여 무게를 재고, 동결 건조하여 데시케이터에 보관하기 전에, 현미경을 통해 시료의 90% 이상이 부착조류로 이루어져 있는지 3회 반복하여 검경하여 부식물의 잔존 여부를 확인하였다.

부식물과 동화해 있는 부착조류 시료와 분리배양을 통해 분리된 부착조류 시료 각각에서 전처리를 통해 데시케이터에 보관된 건조된 여과지 시료는 자동원소분석기(Automated elemental analyzer,

Eurovector 3000 Series)에 주입되어 고온(1,030°C)에서 연소되고, 동위원소 분석을 위한 유도기체로는 헬륨(He)을 이용하였다. 연소 후 발생하는 CO₂ 가스에 대하여 안정동위원소 질량분석기를 장착한 continuous flow-through inlet system(Isotope Ratio Mass Spectrometer, Isoprime CF-IRMS, Micromass, UK)을 이용하여 질소와 탄소안정동위원소 비를 분석하였다. 안정동위원소비는 질량분석기를 이용하여 분석된 표준시료와 분석시료간의 동위원소값의 차이를 dX(‰)로 표현하였고, 표준물질은 탄소에 대해 Vienna PeeDee Belemnite (VPDB), 질소는 대기 N₂를 표준물질로 정의하였다.

$$dX(‰) = [R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1] \times 10^3$$

X는¹³C과 ¹⁵N을 나타내고 R_{sample}과 R_{standard}는 분석시료와 표준시료의 동위원소비 (¹³C/¹²C과 ¹⁵N/¹⁴N)이다. 분석에 대한 정밀도는 0.3‰ 이하이다.

3. 연구 결과

3.1. 부착조류 안정동위원소비의 수질환경대 표성 검토

본 연구의 안정동위원소 분석은 크게 부착조류와 부식물의 분리 배양 실험을 통한 안정동위원소비의 결과 비교와 하천에서 부착조류의 오염원에 따른 안정동위원소비의 변동으로 구분하여 볼 수 있다(Table 1).

부착조류 고유의 생지화학적 특성에 근거하는 안정동위원소 분석에 있어 기질의 부식물질을 포함한 박테리아나 미생물, 곰팡이, 원생동물 등의 영향을 최소화하기위해 부착조류를 기질로부터 분리 배양하는 실험을 하였고 그 결과, 부착조류만 분리해낸 샘플과 부식물을 포함한 부착조류 샘플의 안정동위원소비의 결과는 Table 1에서 차이를 보였다.

Table 1. 조사지점 별로 채집된 부착조류에 대한 질소 및 탄소 안정동위원소비 결과로 (a) 분리배양을 통한 부착조류 시료에 대한 결과값 (b) 부식질을 포함한 부착조류 시료에 대한 결과값 (unit, ‰)

site	(a) Only epilithic algal		(b) Epilithic algal with Substrates	
	δ ¹⁵ N	δ ¹³ C	δ ¹⁵ N	δ ¹³ C
HGC	4.92	-17.18	-2.13	-14.91
BUK	4.04	-15.71	1.97	-14.79
SYR	3.72	-21.17	4.38	-17.03
NER	7.84	-14.66	3.80	-16.90
IBC-1	3.61	-15.76	4.78	-13.96
IBC-2	5.41	-18.72	3.66	-15.06
IBC-3	5.46	-17.35	4.79	-13.64
IBC-4	5.84	-18.13	5.18	-16.07
IBC-5	5.73	-17.42	7.07	-12.07

(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 본류, NER-내린천, SYR-소양강)

분석 대상 원소에 따른 변동을 살펴보면, 북한강 상류지역에서와 인북천 본류 지역 모두에서 순수 부착조류를 분리 배양했을 경우는 부식질을 포함한 부착조류 시료에 비해 질소 안정동위원소비 값은 커졌으며, 탄소 안정동위원소비 값은 작아지는 경향을 보였다.

부착조류의 분리 배양에 따른 질소 및 탄소 안정동위원소비의 변동의 폭은 북한강 상류 지역(HGC, BUK, SYR, NER)에서보다 인북천 본류 지역(IBC_{1,2,3,4,5})에서 더 크게 나타났다. 소양강 상류 유역은 농경지의 분포의 뚜렷한 차이에 따라 북한강 상류 지역과 인북천 본류 지역으로 나뉠 수 있으며 이에 따른 오염원의 유입 정도의 차이가 수계별로 변동의 폭이 차이에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보인다 (그림 1,2).

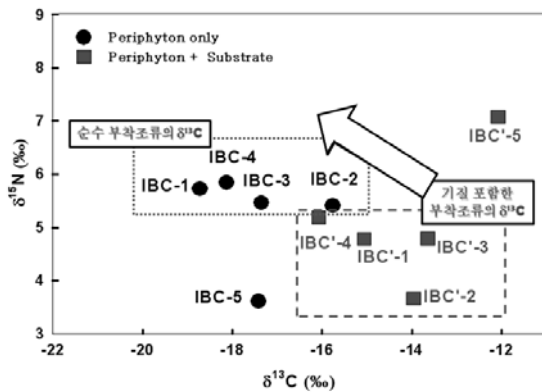


Fig. 1. 소양강 상류 하천 가운데 인북천 하류에서 부착조류의 분리 배양을 통한 질소와 탄소 안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$)의 변동. (\square CODE): 분리 배양을 통한 부착조류, \square CODE: 기존의 기질의 부식물을 포함한 부착조류.

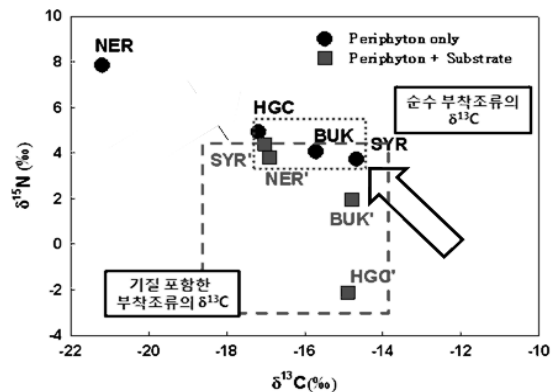
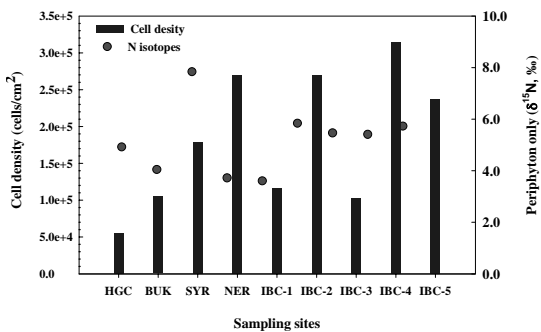


Fig. 2. 소양강 상류 하천 가운데 인북천 상류에서 부착조류의 분리 배양을 통한 질소와 탄소 안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$)의 변동. (\square CODE): 분리 배양을 통한 부착조류, \square CODE: 기존의 기질의 부식물을 포함한 부착조류.



(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 분류, NER-내린천, SYR-소양강)

Fig. 3. 조사 지점에 따른 부착조류 세포수(●)과 분리 배양을 통한 부착조류의 질소 안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}$).

상관도 분석 결과에 따라 소양호 상류하천환경 평가에 분리 배양을 통한 부착조류 시료의 안정동위원소비 결과를 활용하기로 하였고, 분리배양을 통한 부착조류의 질소안정동위원소비와 현존량의 관계에 대해 자세히 분석하였다. 하천에서 질소 안정동위원소비는 다양한 범위 안의 값을 나타내었지만, 결과적으로 부착조류의 현존량과 양의 상관관계를 보이며 변동하였다. 부착조류의 현존량이 약 50,000~100,000cells/cm² 범위를 보이는 한계천

(HGC)과 북천(BUK)의 질소 안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}$) 값은 약 4‰로서 상당히 낮은 반면, 부착조류의 총 현존량이 약 180,000~270,000cells/cm² 로 북천 수계에 비해 약 2배를 보이는 내린천과 소양강의 부착조류의 질소안정동위원소비 값은 약 4~7‰로 약 두 배 정도 높게 나타났다(Fig. 3).

3.2. 소양호 상류하천에서 기질로부터 분리 배양된 부착조류의 질소안정 동위원소비 변동

소양호 상류 하천에서 부착조류의 질소안정동위원소비는 3.61~7.84‰ 분포를 보였으며, 인북천 수계는 서화천이 유입되는 최상류 지역부터 북천과 합류되기 전까지 총 다섯 지점으로 이루어져 있어 인북천 최상류 지역인 IBC_{4,5} 지점에서 하류 지역인 IBC_{1,2,3} 지점으로 내려오면서 거리에 따른 값의 변동을 보였다(Fig. 4). 질소안정동위원소비가 커 상대적으로 무거운 질소안정동위원소의 함량이 큰 순서는 조사지점에서 다음과 같다.

NER >> IBC₄ > IBC₅ > IBC₃ > IBC₂ > HGC > BUK > SYR > IBC₁ 의 순서로 질소 안정동위원소비가 무거운 값을 보였다. 수계별로는,

내린천($\delta^{15}\text{N}$ =7.84‰) > 인북천 분류(평균 $\delta^{15}\text{N}$ =5.21‰)

> 북천수계(평균¹⁵N=4.23‰)의 순서로 무거운 질소 안정동위원소 값을 띠었다. 인북천 분류에서는 인북천 하류인 북천 및 한계천과 소양강에 비해 질소 안정동위원소비가 평균 0.98‰ 정도 높았으며, 이는 오염원 및 부착조류 군집에 따른 유의미한 영향에 의한 것으로 예측한다.

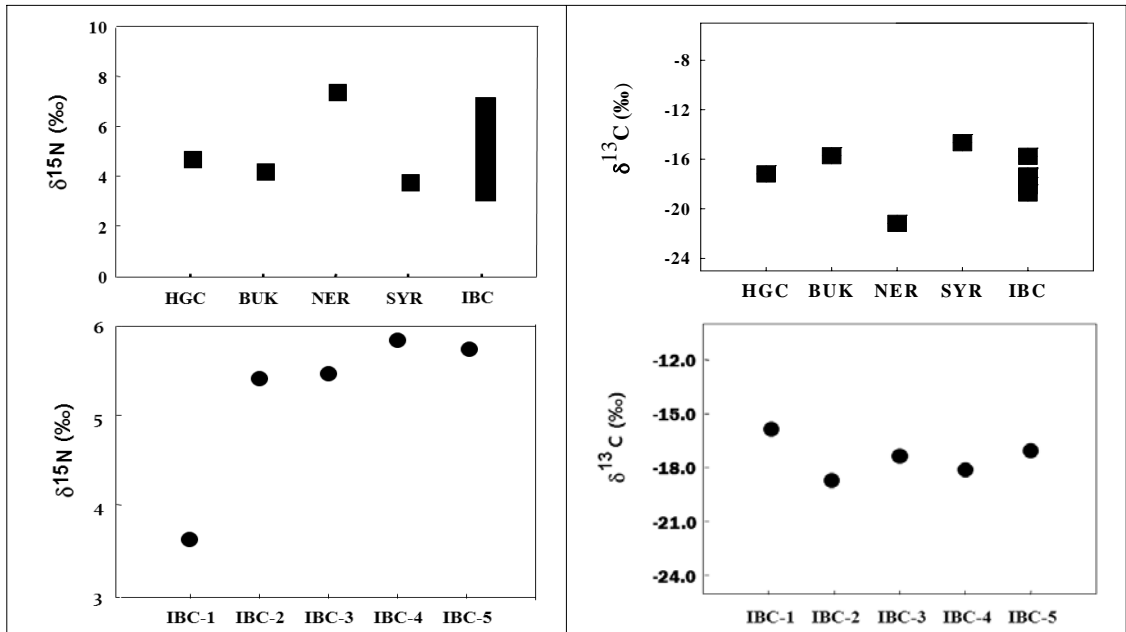
서화천이 유입되는 최상류 지역부터 북천과 합류되기 전까지 총 다섯 지점으로 이루어져 있는 인북천 상류에서 질소동위원소비의 종적인 분포(IBC_{1,2,3,4,5})를 보면, 인북천 최상류인 IBC₅지점에서 IBC₃까지 질소 안정동위원소비 값은 비슷한 경향을 보이고 북천과 합류되는 하류(IBC-1)지점에서 낮은 값을 보였다. 조사 지점들 간에 2‰가 넘는 유의미한 값의 차이를 보이면서, 배수지역은 같을지라도 다양한 오염원의 복합적인 영향 및 부착조류 군집 특성과 같은 다양한 요소들이 이러한 안정동위원소비 결과의 약간의 차이들을 설명할 수 있을 것으로 예상된다.

3.3. 소양호 상류하천에서 부착조류의 탄소안

정동위원소비 변동

소양호 상류 하천에서 부착조류의 탄소안정동위원소비는 -21.17~-14.66‰ 분포를 보였으며, 최저값을 보이는 내린천을 제외한 조사지점의 탄소 안정동위원소비는 -18.72~-14.66‰의 범위를 보여 큰 차이가 없이 비슷한 경향을 보였다(Fig. 4). 평균적으로 인북천 수계에 비해 다소 무거운 경향을 보였지만, 약 2‰ 내의 차이를 보이면서 오염원에 따른 지역적인 차이를 보이지는 않았다. 내린천이 특히 가벼운 결과 값은 분리 배양 과정에 있어 부착조류 주변 유기물에 의한 생물화학적 기작들로부터 기인한 것으로 보이며, 오염원과 부착조류 군집의 복합적인 영향들이 이러한 결과에 대해 설명할 수 있을 것으로 예상된다.

북한강 상류 하천의 지점들에 비해서는 다소 가벼운 값을 보였지만, 기존 연구들에 의해 밝혀진 환경 탄소 안정동위원소비의 값과 비교 분석한 결과 조사 지점 전 지역의 부착조류는 대기로부터 공급되는 CO₂의 안정동위원소비와 비슷한 값을 보였다.



(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 분류, NER-내린천, SYR-소양강)

Fig. 4. 소양강 상류 하천의 분리 배양 실험을 통한 부착조류의 탄소 안정동위원소비(¹⁵N)와 질소안정동위원소비(¹³C). IBC는 IBC_{1,2,3,4,5} 다섯 지점의 값을 막대를 이용하여 범위로 표현.

4. 고 찰

전 세계적으로 동위원소분석을 이용한 비점오염원 평가가 시도되고 있다(Elliott and Brush, 2006). 그 예로 Hebert and Wassenaar(2001)은 캐나다 전 지역의 대규모 하천 유역을 대상으로 질소안정동위원소비가 농경지의 증가로 인한 오염원의 증가와 밀접한 상관관계를 보인다는 연구 결과를 보였다. 그러나 아직까지 우리나라 하천 유역을 대상으로 부착조류의 안정동위원소분석을 활용하여 다양한 환경 기준을 적용하여 포괄적인 수질 환경을 평가하려는 시도는 거의 없었으며, 따라서 문헌 자료 및 연구 결과 자료가 미흡한 실정이다. 더욱이 부착조류의 안정동위원소분석을 시도한 기존의 연구들조차도 부식물의 영향에 따른 불확실한 결과 때문에 폭넓은 활용이 제한되고 있다(Cole 외 2004). Peterson(1999)에 의해 주목된 부식물과 같은 기질의 부착조류 외의 유기물의 방해요소를 최소화한다면, 추후 안정동위원소분석은 간편성과 정성 분석의 신뢰성으로 인해 수질 분야에서 활용 가능성이 매우 높을 것으로 보인다.

그에 따라 본 연구는 부착조류를 부식물과 분리한 시료와 부식물에 동화되어 있는 부착조류 시료의 동위원소비의 차이를 비교 분석 하여 실험이 부식물의 영향을 최소화하는지 검토하였다. 그 결과 소양강 상류하천에서 부착조류는 분리배양 후 탄소 및 질소 안정동위원소 값이 무거워졌고, 이는 부식물이 반영할 수 있는 다양한 오염원의 복합적인 영향에서 기인한다고 판단하였다. 기질에 있는 박테리아와 같은 미생물은 수체 내의 탄소 및 질소의 이용에 있어 부착조류와 경쟁한다. 따라서 그들은 가벼운 질소안정동위원소 값을 갖는 대기, 질산화와 같은 질소 공급원을 우선적으로 흡수하기 때문에 오염된 수질과 상관없이 가벼운 안정동위원소 값을 결과에 포함시킨다(Dodds, 2006). 본 연구에서 하천 주변 높은 농경지 점유로 인해 오염원의 유입이 발생하며, 무거운 질소가 축적되어 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 나타내야 하는 내린천의 경우, 부식물을 포함한 부착조류의 $\delta^{15}\text{N}$

값은 매우 낮다(내린천 $\delta^{15}\text{N}=3.80$, 조사지역 평균 $\delta^{15}\text{N}=5.17$). 반대로 임야 중심 지역인 한계천 부착조류에는 가벼운 질소가 축적되어 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 낮지만, 일반적인 부착조류의 질소 안정동위원소 비 범위에서 벗어난 음의 값을 띄고 있었다. 이는 부식물에 축적된 질소의 값이 결과의 분석에 영향을 주어 오류가 발생한 것으로 볼 수 있다. 추후 반복 실험에 의해 부식물을 포함한 부착조류 시료와 분리 배양 후 분리 시료의 안정동위원소 결과가 충분히 구축된다면, 부식물의 영향을 줄이기 위한 실험의 효과를 확실하게 확인할 수 있을 것이며, 실험의 폭넓은 활용을 가능하게 할 것으로 판단된다.

인구가 증가하고 농경지의 분포가 증가할수록 수체 내로 비료와 같이 질소안정동위원소값이 3~15%인 무거운 질소안정동위원소비를 갖는 오염원이 유입되며(Hebert and Wassenaar, 2001), 오염에 따른 인위적인 원인을 제외한 대부분 부착조류가 질소를 얻을 수 있는 공급원인 대기 deposition에 의한 질소안정동위원소비는 -2.0~4.0%(Kendall and Mcdonnel, 1998)로 가벼운 값을 갖는다. 그리고 Peterson(1999)은 비료에 의한 질소 유입이 있는 수계와 상대적으로 청정하여 외부 오염에 의한 질소 유입이 거의 없는 수계의 부착조류의 질소 흡수율을 측정하였고, 부착조류의 분별 작용이 오염된 수계에서 10% 가량 크게 일어나 무거운 오염원의 질소의 흡수가 상승하는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과에 비추어 볼 때, 소양강 상류하천에서 질소 안정동위원소의 변동을 통해 농경지의 분포를 예측할 수 있을 것으로 판단하였다. 결과적으로 농경지 중심지역인 내린천 상류, 인북천 상류지역에서 $\delta^{15}\text{N}$ 가 임야 중심지역인 한계천 및 북천에서의 값보다 높았다. 탄소 안정동위원소는 농경지에 의한 오염으로 부착조류의 현존량이 많은 내린천 상류와 인북천 상류지역보다 임야 중심의 청정한 한계천 및 북천으로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. 이는 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 부착조류 현존량이 증가할수록 정비례하여 증가하는 경향을 보인다는 Walter 외(2006)의 연구 결과와

함께 부착조류의 생지화학적 특성에 따른 탄소안정동위원소비의 생물지수로서의 활용을 위한 기초자료가 될 수 있다.

최근 농경지 이외에도 Elliott 과 Brush(2006)은 도시의 영향에 의한 생활하수에 의해 질소안정동위원소비가 최고 5% 상승한다는 결과를 얻었다. 본 연구는 농경지에 의한 집중적인 오염원의 영향이 특징적인 소양호 상류 유역이라는 소규모 하천 유역을 대상으로 하였지만, 추후 다양한 오염원의 분포에 따른 안정동위원소분석 결과가 추가된다면, 대 하천 유역에 대한 광범위한 적용을 기대할 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 대 하천을 대상으로 하는 기존의 수질환경평가지수를 이용한 지류 하천의 소규모 유역 분석은 한계가 있음을 알 수 있었다. 부영양화의 가능성이 큰 농경지 주변 소규모 하천의 수질 평가에 있어 외국에서 사용되는 부영양화 기준은 매우 단순하여 우리나라 하천 생태에 불일치하는 결과를 보였다. 결과적으로 부착조류의 생지화학적 특성을 효과적으로 반영하는 안정동위원소 분석의 추가적인 적용은 하천 수질평가의 정확성과 신뢰성을 높일 수 있을 것을 기대할 수 있다.

5. 사 사

본 연구는 SEST(2011) 및 Eco-Star 연구사업(EW53-10-10) 지원에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사를 표합니다.

6. 참고문헌

김규한. 2010. 동위원소 지구화학. 시그마프레스.
정준, 최재신, 이정호. 1992. 부착규조군집의 유기오탁지수(DAIpo)에 의한 금호강의 수질평가. 한국하천호수학회. 25(4):304-304.
Adams, S. M.. 2002. Biological indicators of aquatic ecosystem stress. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
Brabandere, L. Frazer T. K. Montoya, J. P.

2007. Stable isotope ratios of macrophytes and associated *periphyton* along a nitrate gradient in two subtropical. Spring-fed streams. *Freshwater Biology*. 52:1564-1575
Dodds, W. K. 2006. Eutrophication and trophic state in rivers and streams. *Limnology and Oceanography*. 51: 671-680.
Elliott, E. M. Brush, G.S. 2006. Sedimented organic nitrogen isotopes in freshwater wetlands record long-term changes in watershed nitrogen source and land use. *Environmental Science and Technology*. 40(9):2910-2916.
Godwin, C.M. Arthur, M.A., Carrick, H.J. 2009. Periphyton nutrient status in a temperate stream with mixed land-uses: implications for watershed nitrogen storage. *Hydrobiologia*. 623: 141-152.
Griffiths H. 1998. Stable isotopes: Integration of biological, ecological and geochemical process. *Oecologia* 144:337-352
Hebert, C. E. Wassenaar, L. I. 2001. Stable Nitrogen Isotopes in Waterfowl Feathers Reflect Agricultural Land Use in Western Canada. *Environmental Science and Technology*. 35: 3482-3487.
Leland, H. V. Porter, S. D. 2000. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology*. 44:279-301.
Minagawa, M., Wada, E. 1984. Stepwise enrichment of ¹⁵N along food chain : further evidence and the relation between ¹⁵N and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 48: 1135-1140.
Peterson. B. J. 1999. Stable isotopes as tracers of organic matter input and transfer in benthic food webs: A review.

Acta Oecologica 20(4): 479-487.
Riera, P. Escaravage, C. Leroux, C. 2009.
Trophic ecology of the rocky shore
community associated with the *Ascophyllum*
nodosum zone (Roscoff, France): $\delta^{13}\text{C}$ vs
 $\delta^{15}\text{N}$ investigation. Estuarine, Coastal and
Shelf Science. 24:390-451.
Watanabe, T. Asai, K. 1999. Statistic

classification of epilithic diatom species
into three ecological groups relating to
organic water Pollution (2) Saprophilous
and saproxenous taxa. Diatom. 10:35-47.

- 논문접수일 : 2011년 08월 26일
- 심사의뢰일 : 2011년 08월 29일
- 심사완료일 : 2011년 11월 17일