

ORIGINAL ARTICLE

질소($\delta^{15}\text{N}$)와 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 안정동위원소를 이용한 안동댐 녹조 유발 유기오염물질의 기원 추정 및 기여도 평가

권희원 · 조혁진¹⁾ · 송병철²⁾ · 김영훈 · 김정진^{2)*}

국립경국대학교 환경공학과, ¹⁾한국수자원공사, ²⁾국립경국대학교 지구환경과학과

Assessment of the Origin and Contribution of Organic Pollutants Causing Algal Blooms in Andong Dam Using Nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) and Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) Stable Isotopes

Hee-Won Kwon, Hyuk Jin Cho¹⁾, Byeong Cheol Song²⁾, Young Hun Kim, Jeong Jin Kim^{2)*}

Department of Environmental Engineering, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea

¹⁾*Andong Office, Korea Water Resources Corporation, Andong 36611, Korea*

²⁾*Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea*

Abstract

In this study, nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) and carbon ($\delta^{13}\text{C}$) stable isotopes were applied to estimate the origin of organic pollutants that trigger algal blooms in Andong Dam and quantitatively evaluate their contribution. Water, algae, sediment, fertilizer, soil, and livestock manure samples were collected from the Dancheon Bridge, Togyestream, Donggyestream, Yeokgyestream, Dosan Seowon, Dongburi, Seoburi, Yean Bridge, and Jujin Bridge, and from the reservoir areas of the Yeongju and Imha dam. The isotopic ratios of livestock manure, fertilizer, and soil exhibited clear differences depending on the pollution source. The isotope signatures of the water samples were similar to those of the chemical fertilizers, whereas those of the algal and sediment samples showed strong similarities to cattle manure. Algal samples were mainly influenced by cattle manure at an average level of 60–65%, whereas the contribution of chemical fertilizers was 35–40%. In particular, in the Yeokgyestream watershed, the livestock manure contribution exceeded 70%, confirming that livestock-derived nonpoint source pollutants are the dominant driver of algal blooms in Andong Dam.

Key words : Green algae, Stable isotopes, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$, Organic pollutants, Andong Dam

1. 서 론

담수호와 하천에서의 부영양화와 녹조 대발생은 전 세계적으로 가장 심각한 수질관리 이슈 중 하나이며, 특히 음용수 공급을 담당하는 대형 다목적댐에서 그 중요성이 더욱 크다. 인과 질소와 같은 영양염류의 과다 유

입, 기후변화에 따른 수온 상승과 장기간 정체 수역의 확대는 남조류(Cyanobacteria)를 중심으로 한 유해 조류 대발생 빈도와 강도를 증가시키는 주요 요인으로 알려져 있다(Paerl et al., 2001; O'Neil et al., 2012). 이러한 조류 대발생은 단순한 수질 악화에 그치지 않고, 독소 생성, 냄새 문제, 용존산소 고갈에 따른 어류 폐사,

Received 7 January, 2026; Revised 3 February, 2026;

Accepted 4 February, 2026

*Corresponding author : Jeong Jin Kim, Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea

Phone : +82-54-820-5038

E-mail : jjkim@andong.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.

정수장 여과지 폐쇄 등 다양한 사회, 경제적 피해로 이어져 상수원 관리 측면에서 가장 우선적으로 해결해야 할 과제로 인식되고 있다(Watson, 2004; Heisler et al., 2008).

우리나라 낙동강 수계 상류에 위치한 안동댐은 대구와 부산권을 포함한 영남지역의 중요한 상수원으로, 유역 내 농업과 축산 활동과 도시와 농촌 혼재 토지이용의 영향을 동시에 받는 대표적인 다목적댐이다. 안동댐에서는 여름철 고수온기와 갈수기, 장마 이후와 같이 수체가 정체되거나 유량이 감소하는 시기에 유해 남조류가 우점하는 녹조현상이 반복적으로 보고되고 있으며, 이는 하류 취수장과 정수장의 운영 안정성에 직접적인 위협 요인으로 작용할 수 있다. 안동댐 및 유입 지천에 대한 장기간 모니터링 결과에 따르면, 수계로 유입되는 유기물과 영양염류의 상당 부분이 농경지, 축산분뇨 살포지, 산림, 농촌마을 등과 같은 비점오염원으로 알려져 있다. 그러나 기존 연구는 주로 수질 항목(TN, TP, TOC 등)의 농도 및 부하량 평가에 초점을 두고 있어, 녹조를 유발하는 비료, 가축분뇨, 생활하수, 토양 유기물 등의 유기오염물질의 세부 기원과 각 기원의 상대적 기여도를 정량적으로 구분하는 데에는 한계가 있다.

부영양화와 녹조 관리를 위해서는 영양염류의 총량 규제뿐만 아니라, 특정 수체에서 문제 발생을 주도하는 유기오염원의 유형과 기여도를 파악하여 우선순위를 설정하는 것이 중요하다. 전통적으로 토지이용도, 오염원 통계, 유량-농도 관계와 부하량 산정 모델을 이용하여 점오염 및 비점오염원 기여도를 추정해 왔으나, 서로 다른 오염원에서 유래한 유기물과 질소가 수계에서 혼합 및 변형되는 과정을 정량적으로 분해하는 데에는 많은 불확실성이 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위한 도구로 안정동위원소(Stable isotopes) 기법이 제안되었으며, 수생태와 수환경 분야에서 유기물 및 질소의 기원 규명, 먹이망 구조 분석, 질소 순환 과정 해석 등에 광범위하게 활용되고 있다(Fry, 1988; Meyers, 1997; Kim et al., 2013; Choi and Shin, 2018).

탄소와 질소는 각각 두 개의 주요 안정동위원소(^{12}C - ^{13}C , ^{14}N - ^{15}N)를 가지며, 이들의 동위원소비($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)는 광합성, 질소 고정, 무기화, 질산화, 탈질과 같은 생지화학적 과정에서 예측 가능한 방향의 분별 작용이 일어난다. 일반적으로 시료의 동위원소 조성은 국제 표준물질에 대한 상대적인 차이를 천분율(‰) 단위의 δ (델타) 값으로 나타내며, 탄소의 경우 Vienna pee

dee belemnite (VPDB), 질소의 경우 대기 중 N_2 (AIR)가 표준으로 사용된다(Deines, 1980; Meyers, 1997).

담수 및 해양 식물플랑크톤, 저서 조류, 육상-해양 기원 유기탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 범위 역시 서로 중첩되면서도 뚜렷한 경향성을 보여, 수체 내 유기물의 육상-수생, 담수-해양 기원을 판별하는 지시자로 널리 사용되고 있다(Meyers, 1997).

질소 안정동위원소($\delta^{15}\text{N}$)는 수원에서 질소 오염원의 기원을 구분하는 데 특히 민감한 지시자이다. 대기 중 질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 0‰로 정의되며, 질소고정 미생물이나 대기 중 N_2 를 직접 이용하는 식물의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 0‰에 근접한다. 반면, 화학비료, 토양 유기물, 생활하수 및 가축분뇨 등은 각기 다른 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 범위를 보인다. 합성 질소비료는 대체로 -4 ~ +4‰, 자연토양 유기물은 +4 ~ +8‰, 생활하수 기원 질소는 +6 ~ +10‰, 가축 및 인분 기원 질소는 +10 ~ +20‰ 수준의 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 나타내는 것으로 알려져 있다(Costanzo et al., 2001; Kim et al., 2019; Kang et al., 2022). 이러한 차이는 분뇨-하수의 처리 및 토양 내 질소 순환 과정에서 탈질 및 암모니아 휘산 등에 의해 ^{15}N 이 잔류상에 축적되기 때문이며, 하천과 호소에서 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)와 식물플랑크톤, 입자성 유기물의 $\delta^{15}\text{N}$ 을 측정함으로써 농업, 축산, 생활계 오염원의 상대적 기여도를 추정할 수 있다(Tesdal et al., 2013; Kim et al., 2017).

수원수에서 질산성질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 과 $\delta^{18}\text{O}$ 를 이용해 상류 지류, 농경지, 축산시설의 오염 기여도를 추적함으로써, 안정동위원소가 상수원 보호구역에서 오염원 관리 정책 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있다는 것을 보여주었다(Kim et al., 2019). 그러나 이러한 국내 연구는 수도권 상수원인 팔당호 및 일부 하천-지하수 유역에 편중되어 있으며, 낙동강 상류권 주요 댐, 특히 안동댐과 같은 다목적댐에서 녹조 유발 유기오염물질의 기원을 안정동위원소를 이용해 체계적으로 규명한 연구는 매우 제한적이다.

안동댐 유역은 상류 산지, 임야, 중류 농경지, 하류 농촌, 소도시가 복합적으로 분포하는 전형적인 다층 구조 유역으로, 논밭과 축사에서 기원하는 비점오염원, 마을하수 및 소규모 처리장에서 기원하는 점오염원, 상류 폐광산이 분포하는 지류에서 유입되는 자연기원 유기물과 금속류 오염이 혼재되어 있다. 따라서 안동댐 수체와 유입 지천, 유역 내 비료, 가축분뇨, 토양유기물,

퇴적물 및 녹조류 시료에 대한 질소($\delta^{15}\text{N}$)와 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 안정동위원소 특성 연구를 통하여, 유기오염물질의 기원과 녹조 발생 기여도를 정량적으로 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 질소($\delta^{15}\text{N}$)와 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 안정동위원소를 이용하여 안동댐 녹조 유발 유기오염물질의 기원을 추정하고 각 기원의 기여도를 평가하였다. 이를 위해 안동댐 및 유입 지천, 대조군인 임하댐과 영주댐의 수질, 퇴적물, 비료, 우분, 토양유기물 및 녹조류 시료에 대한 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 특성을 분석하였다. 또한, 오염원 유형이 안동댐 녹조 발생에 기여하는 상대적 비율을 추정하였다.

2. 연구 방법

2.1. 시료 채취

수질 시료 채취 지점은 안동댐 저수구역에서 녹조 발생 특성을 고려하여 선정하였다. 저수구역 상류인 낙동강 본류 단천교와 유입 지류인 토계천, 동계천, 여계천, 그리고 저수구역 내 도산서원, 동부리, 서부리, 예안교, 주진교 하부 등 총 9개 지점을 조사하였다(Fig. 1). 대조군으로는 영주댐 저수구역 2개 지점과 임하댐 1개 지점에서 추가로 시료를 채수하였다. Table 1은 수질 시료 명과 채취지점 및 시료의 특징을 나타낸 것이다. 단천교 하부는 낙동강 본류가 안동댐으로 유입되는 최상류 지점으로 가장 많은 수량이 유입되는 지역이며, 토계천과 동계천 및 여계천은 오염물질이 직접 저수구역으로 유입되는 주요 지류이다. 도산서원 앞, 동부리, 서부리, 예안교 하부는 매년 녹조가 집중적으로 발생해 온 지역이며, 주진교는 녹조가 상대적으로 발생하지 않는 저수구역 중간부 지점이다.

Fig. 2는 현장에서 수질, 퇴적물, 토양, 녹조 및 분뇨 시료를 채취하는 사진이다. 수질 시료 채취는 1차(2023년 5월 3일, 건기), 2차(7월 22일, 집중 강우 후), 3차(8월 29일, 녹조 발생기)에 수행하였다(Fig. 2A, B). 4차 수질 시료는 동일한 지점에서 녹조, 퇴적물을 동시에 채취하여 동위원소비를 비교하였다. 채수량은 각 지점당 2 L 채수병 2개를 확보하였으며, 현장에서 pH, EC, ORP, 온도 등을 측정한 후 전처리하여 중금속 분석을 수행하였다.

퇴적물 시료는 안동댐 유역의 동부리, 서부리, 예안교와 대조군 지역인 영주댐 1개 지점, 임하댐 1개 지점

에서 총 5개 시료를 채취하였다. 퇴적물 시료는 녹조가 다량 발생하는 저수구역 내에서 그래프샘플러를 이용하여 채취하였으며(Fig. 2C), 채취된 시료는 플라스틱 용기에 담아 냉장 보관 후 전처리하였다. 토양 시료는 동일 지역의 논토양 2개, 밭토양 2개, 산토양 2개 등 총 6개 시료를 채취하였다(Fig. 2D).

탄소 및 질소 안정동위원소 분석용 녹조 시료는 안동댐 저수구역의 도산서원, 동부리, 서부리, 예안교, 주진교 등 5개 지점과 영주댐 2개 지점, 임하댐 1개 지점 등 총 8개 지점에서 채취하였다. 녹조는 녹조 대발생 시기인 8월 말에 채취하였으며, 녹조가 포함된 수질 시료를 채수한 후 50 mesh (300 μm), 100 mesh (150 μm), 170 mesh (90 μm), 200 mesh (75 μm)의 4단 망체를 이용해 분리하였다(Fig. 2E). 녹조는 대부분 170 mesh 망체에서 농집되었으며, 분리된 녹조는 살레에 옮긴 후 전처리 시까지 냉동 보관하였다.

유기오염 기원 추정을 위한 분뇨 시료는 지류인 토계천 및 여계천 유역의 우사, 돈사, 계사에서 채취하였으며(Fig. 2F), 우분 3개, 계분 2개, 돈분 1개 등 총 6개를 확보하였다. 비료 시료는 농가에서 사용 중인 유기비료 2종 및 시중 판매 화학비료 4종을 선정하여 채취하였다. 분뇨 시료는 적지장에서 채취하여 지퍼백에 밀봉 후 건조 및 전처리까지 보관하였으며, 토양 시료는 낙엽 등 유기물을 포함한 상태로 채취한 뒤 지퍼백에 담아 실험실로 운반하여 건조 후 분석 전까지 보관하였다.

2.2. 시료 분석

호소수 및 하천수는 시료 채취 시 현장에서 온도, pH, 용존산소(DO), 전기전도도(EC) 등을 측정하였다. 수질분석은 T-N, T-P 및 TOC 3개 항목을 측정하였다.

안동댐 저수구역 호소수 및 유입 하천수, 우분, 계분, 돈분, 논토양, 밭토양, 산토양 등에 대한 탄소 및 질소 동위원소비를 분석하였다. 질소($\delta^{15}\text{N}$) 및 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 안정동위원소 조성은 원소분석기(Elemental Analyzer, EA)와 연결된 안정동위원소 질량분석기(IRMS; Delta V Advantage, Thermo Fisher Scientific)를 이용하여 분석하였다. 분뇨 및 토양 시료는 건조 후 분말화하여 분석하였으며, 수질 시료는 여과 후 동결건조하여 잔류물을 분석하였다. 또한 분뇨 및 토양의 침출수 분석을 위해 시료 일정량을 증류수 800 mL에 넣고 초음파 분해 10분 및 1시간 교반을 통해 용출한 뒤, 용출액을 여과하고 동결건조한 잔류물을 분석하였다. 반복 분석을

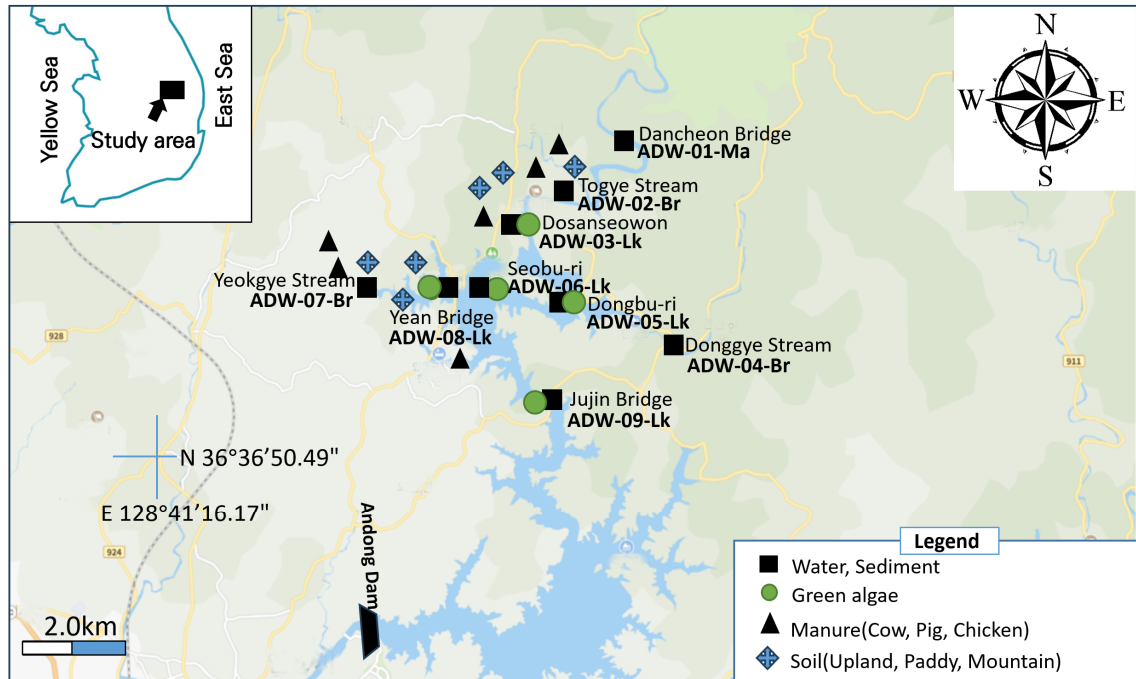


Fig. 1. Locations of water, sediment, soil, manure, and green algae sampling sites in the Andong Lake watershed.

Table 1. Sampling locations and abbreviations for water, soil, manure, algae, and sediment samples collected from the Andong Lake watershed

Sample no.	Sampling site	Description
ADW-01-Ma	Dancheon Bridge	Nakdong River Main Stream
ADW-02-Br	Togye Stream	Hagae Bridge
ADW-03-Lk	Dosanseowon	Andong Lake Reservoir Area
ADW-04-Br	Donggye Stream	Taegok Bridge
ADW-05-Lk	Dongbu-ri	Andong Lake Reservoir Area
ADW-06-Lk	Seobu-ri	Andong Lake Reservoir Area
ADW-07-Br	Yeokgye Stream	Sasin 2 Bridge
ADW-08-Lk	Yean Bridge	Andong Lake Reservoir Area
ADW-09-Lk	Jujin Bridge	Andong Lake Reservoir Area
YJW	Yeongju Dam	Yeongju Lake Water
IHW	Imhwa Dam	Imhwa Lake Water

*Ma: Main stream, Br: Branch, Lk: Lake



Fig. 2. Field sampling of water, sediment, soil, algal bloom, and cattle manure. (A) Surface water sampling at a reservoir site, (B) Water sampling at a tributary bridge, (C) Sediment sampling using a grab sampler, (D) Soil sampling in an adjacent agricultural field, (E) Collection of algal bloom, (F) Cattle manure sampling.

Table 2. Field measurement results of water of temperature, pH, DO, and EC for the 1st, 2nd, and 3rd sampling

Sample no.	Temp. (°C)			pH			DO (mg/L)			EC (uS/cm)		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
ADW-01-Ma	19.80	24.00	23.84	8.44	7.10	8.25	10.98	11.53	9.64	222	142	161
ADW-02-Br	20.89	26.86	26.29	8.75	7.07	8.85	10.74	9.75	8.58	235	182	236
ADW-03-Lk	21.44	30.03	29.08	8.35	8.57	10.19	10.87	9.66	12.18	225	121	228
ADW-04-Br	17.02	24.78	25.38	7.47	6.77	8.78	8.34	10.73	8.48	247	151	191
ADW-05-Lk	21.20	28.36	27.81	7.74	9.16	10.02	11.67	11.39	10.78	233	123	190
ADW-06-Lk	21.29	30.61	28.82	7.45	9.95	10.18	11.81	12.64	9.95	214	190	192
ADW-07-Br	17.97	25.46	25.25	7.57	7.26	8.19	10.22	11.67	8.12	339	236	275
ADW-08-Lk	21.70	29.69	28.41	9.05	9.74	10.01	12.73	12.61	8.54	237	175	269
ADW-09-Lk	19.44	29.14	29.10	8.30	9.86	10.09	8.58	10.26	10.14	251	351	166
YJW-01-Lk	-	-	28.40	-	-	10.27	-	-	11.77	-	-	186
YJW-02-Lk	-	-	28.12	-	-	10.12	-	-	11.97	-	-	174
IMW-01-Lk	-	-	28.01	-	-	8.94	-	-	8.78	-	-	165

통한 정밀도는 $\delta^{15}\text{N} \pm 0.2\%$ 이내, $\delta^{13}\text{C} \pm 0.1\%$ 이내였다.

안동댐 호소수 및 유입 하천수에 대한 동위원소 분석용 시료는 0.45 μm membrane filter로 여과한 후 500 mL를 600 mL 비커에 담아 -50°C 에서 10일간 동결건조하였다. 분뇨, 토양, 비료 침출수 시료 또한 수질 시료와 동일한 방법으로 여과 및 동결건조 후 안정동위원소 분석용 시료로 준비하였다. 망체로 분리된 녹조 시료는 고체 상태로 동결건조 후 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 안동댐 유역 조류 발생 특성

2023년 안동댐 예안교 지점에서 발생한 유해 남조류는 최대 약 94,000 cells/mL로, 기존 관측 기록 중 가장 높은 수준을 나타내었다. 안동댐의 유해 남조류는 대체로 7월 초부터 증가하기 시작하여 8월 중후반에 최대에 도달한 뒤 10~11월까지 장기간 지속되는 경향을 보인다. 본댐 전면부에서는 예안교보다 약간 늦은 7월 말부터 녹조가 발생하여 8월 말 약 24,162 cells/mL까지 증가한 후 10월 말까지 유지되었다.

대조군으로 조사된 영주댐에서는 안동댐보다 이른 6월 중순경부터 유해 남조류가 출현하였으며, 8월 중순에 최대 198,400 cells/mL까지 증가한 뒤 10월 중순까지 지속되었다.

3.2. 수질 특성

3.2.1. 현장 수질(수온, pH, DO, EC)

Table 2는 수질 현장측정 결과이다. 수온은 1차 17.02~21.70°C, 2차 24.00~30.61°C, 3차 23.84~29.10°C로 지천인 본류로부터 안동댐으로 유입되는 단천교 지점과 지류인 토계천, 동계천, 역계천이 저수 구역보다 약간 낮은 수온을 나타낸다. pH는 대체로 7.1~10.3 범위에서 변동했으며, 유입 지천인 단천교, 토계천, 동계천, 역계천에 비해 저수구역 내 지점인 도산서원, 동부리, 서부리, 예안교, 주진교에서 상대적으로 높은 값을 보였다. 특히 2, 3차 조사에서 서부리, 도산서원, 예안교, 영주댐 지점에서 pH 9.5~10.3 수준의 강한 알칼리성 조건이 형성되었는데, 이는 광합성에 따른 CO_2 소비 및 탄산-중탄산 평형 변화로 수층 pH가 상승하는 녹조 대량 발생 시 일반적인 특징과 잘 부합한다. DO 농도는 3차 조사에서 특히 도산서원(12.18 mg/L), 영주댐(11.8~12.0 mg/L) 등 녹조 발생이 활발한 지점에서 높은 값을 보였다. 이러한 수체 내 수온, pH, DO가 동시에 증가하는 것은 남조류 대발생 시 관측되는 전형적 패턴으로, 국내 팔당호, 영산강 하구 등에서도 유사한 경향이 보고된 바 있다(Lee et al., 2013; Kim et al., 2017). EC는 지류인 역계천(최대 339~275 $\mu\text{S}/\text{cm}$)에서 가장 높고, 상류 본류인 단천교 및 저수구역 내 지점에서 상대적으로 낮게 나타났다.

Table 3. Concentrations of T-N, T-P, and TOC for the 1st, 2nd, and 3rd sampling at sampling site

Sample no.	1st			2nd			3rd		
	T-N	T-P	TOC	T-N	T-P	TOC	T-N	T-P	TOC
ADW-01-Ma	1.391	0.007	0.1	1.417	0.058	0.2	1.521	0.105	0.1
ADW-02-Br	1.240	0.039	0.2	2.158	0.108	0.4	3.128	0.070	0.3
ADW-03-Lk	1.350	0.009	0.1	4.976	0.076	0.4	0.481	0.027	0.4
ADW-04-Br	1.417	0.017	0.2	1.481	0.078	0.4	1.412	0.015	0.2
ADW-05-Lk	1.713	0.005	0.1	1.958	0.041	0.4	0.427	0.021	0.3
ADW-06-Lk	1.653	0.018	0.2	1.234	0.037	0.4	0.349	0.022	0.4
ADW-07-Br	4.192	0.010	0.3	6.954	0.239	0.5	5.747	0.132	0.4
ADW-08-Lk	2.070	0.042	0.2	1.244	0.036	0.4	0.358	0.021	0.4
ADW-09-Lk	1.878	0.016	0.2	1.184	0.025	0.4	0.306	0.017	0.4
YJW-01-Lk	-	-	-	-	-	-	1.247	0.034	0.4
YJW-02-Lk	-	-	-	-	-	-	1.240	0.024	0.4

Table 4. Stable isotope compositions $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of soils, manures and fertilizers

Sample no.	Sample description	Leachate (freeze-dried)		Solid (powder)		Standard deviation (leachate vs. solid)	
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Ps-01	Yeokgyecheon	-29.457	4.234	-27.937	6.367	1.07	1.51
Ps-02	Togyecheon	-28.036	7.465	-27.464	9.223	0.40	1.24
Us-03	Yeokgyecheon	-26.891	12.340	-25.472	11.666	1.00	0.48
Us-04	Togyecheon	-23.898	10.505	-26.189	10.073	1.62	0.31
Ms-05	Yeokgyecheon	-29.820	6.843	-27.421	3.840	1.70	2.12
Ms-06	Togyecheon	-26.724	5.351	-24.133	4.242	1.83	0.78
Cw-01	Gusong-ri	-24.044	12.434	-25.604	12.309	1.10	0.09
Cw-02	Yeokgyecheon	-23.748	5.612	-25.108	6.668	0.96	0.75
Cw-03	Togyecheon	-27.041	8.719	-26.665	9.832	0.27	0.79
Ck-01	Seoburi	-23.901	6.684	-23.496	7.897	0.29	0.86
Ck-02	Yeokgyecheon	-20.831	7.760	-21.524	5.326	0.49	1.72
Pg-01	Ocheon	-18.523	19.194	-17.844	11.486	0.48	5.45
Of-01	Poongsan	-20.498	11.710	-23.989	14.356	2.47	1.87
Of-02	Hwangto	-22.910	10.761	-25.655	12.795	1.94	1.44
Cf-01-Br	brown color	-	-	-26.540	4.898	-	-
Cf-02-R	red color	-	-	-26.608	0.931	-	-
Cf-03-G	green color	-	-	-27.072	3.871	-	-
Cf-03-BI	black color	-	-	-25.557	3.991	-	-

Ps : Paddy soil, Up: Upland soil, Ms: Mountain soil, Cw: Cow manure, Ck: Chicken manure, Pg: Pig manure, Of: Organic fertilizer, Cf: Chemical fertilizer

Table 5. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ stable isotope compositions of water samples from the Andong and Yeongju dam watersheds

Sample no.	Water sample (1st)		Water sample (2nd)		Water sample (3rd)	
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
ADW-01-Ma	-9.400	-0.314	-11.821	8.007	-9.030	9.094
ADW-02-Br	-10.978	3.863	-15.267	12.449	-12.175	9.553
ADW-03-Lk	-4.861	8.593	-21.146	7.131	-21.751	9.553
ADW-04-Br	-11.272	-0.197	-20.146	12.961	-17.889	10.459
ADW-05-Lk	-9.757	-2.803	-15.098	7.428	-12.054	12.597
ADW-06-Lk	-3.271	6.268	-22.770	6.536	-21.126	18.945
ADW-07-Br	-7.541	20.364	-17.482	12.579	-12.427	14.696
ADW-08-Lk	-4.389	12.825	-18.738	8.523	-19.561	5.033
ADW-09-Lk	-3.214	8.330	-16.579	6.373	-23.368	6.603
YJD-W 1	-	-	-	-	-20.278	11.460
YJD-W 2	-	-	-	-	-19.997	12.703

3.2.2. 영양염류(TN, TP, TOC)

TN, TP, TOC 분석 결과 모두 역계천이 다른 지점에 비해 가장 높은 TN 농도를 보였다. 역계천 하류에 위치한 예안교 지점에서도 상대적으로 높은 TN 농도 값을 나타내어 역계천 상류에서 유입되는 질소원이 안동댐 상류 저수구역의 부영양화 및 녹조 형성에 많은 기여를 하고 있음을 시사한다(Table 3).

TP는 대부분 지점에서 0.01-0.11 mg/L 범위로, 역계천과 토계천에서 저수구역 지점보다 약간 높은 농도를 나타냈다. TOC는 지점 간 상대적으로 변동폭이 크지 않으나, 단천교가 가장 낮고 역계천 및 일부 저수구역 지점에서 약간 높은 값을 보였다.

영양염류 중 질소 부하는 역계천 유역에서 집중되는 양상을 보이며, 상류 유역의 가축 분뇨, 비료 등 유기오염원이 존재할 가능성이 매우 높다. 안정동위원소와 수질 자료를 이용한 연구 결과에 의하면 질소의 부하는 주로 가축분뇨, 시비에 의한 농지 유출에 의해 이루어지며 조류 발생에 크게 기여할 수 있다(Lee et al., 2013; Kim et al., 2017).

3.3. 안정동위원소($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$) 특성

본 연구에서는 안동댐 및 대조군인 영주댐, 임하댐 유역에서 수질, 토양, 퇴적물, 분뇨, 비료, 녹조 시료에 대한 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 을 분석하여 유기오염물질의 기원과 녹조 발생 기여도를 평가하였다. $\delta^{13}\text{C}$ 는 식생 및 유기물 기원 차이를, $\delta^{15}\text{N}$ 은 비료, 분뇨, 생활하수 등 질소원

특성을 반영한다는 점에서 유기오염원의 기원 추정에 널리 활용된다(Fry, 1988; Meyers, 1997; Costanzo et al., 2001).

3.3.1. 토양, 분뇨, 비료 시료의 동위원소 조성

Table 4는 토양, 분뇨, 비료에 대한 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ 분석 결과이다. 토양의 $\delta^{13}\text{C}$ 은 대체로 -29.820 ~ -23.898‰ 범위로 밭토양이 논이나 산토양에 비해 약간 무거운 값을 나타냈다. 분뇨의 경우 우분과 계분은 -27.041 ~ -20.831‰ 수준, 돈분은 -18.523 ~ -17.844‰로 더 무거우며, 유기비료는 -25.655 ~ -20.498‰, 화학비료는 -27.072 ~ -25.557‰ 수준이다. $\delta^{15}\text{N}$ 의 경우, 토양은 대체로 3.840 ~ 12.340‰ 범위로, 산림이나 농경지에서 흔히 보고되는 범위에 해당하며(Peters et al., 1978), 분뇨는 5.326 ~ 19.194‰로 기존에 알려진 가축분뇨의 $\delta^{15}\text{N}$ 범위(10 ~ 20‰)와 유사하며, 화학비료는 0.931 ~ 4.898‰ 범위로, 알려진 범위(-5 ~ 5‰)와 잘 일치하였다(Costanzo et al., 2001). 유기비료는 약 10.761~14.356‰로 화학비료보다 뚜렷이 무거운 질소동위원소 조성을 보여, 분뇨 기반 유기비료의 가능성을 시사한다.

우분 시료의 경우 침출액 동결건조 잔류물과 고체 분말 시료의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 은 각각 -27.041 ~ -23.748‰, 5.612 ~ 12.434‰ 범위로 유사하게 나타났으며, 두 시료형 간 상관관계(R^2)가 각각 0.689, 0.527 수준으로 비교적 양호한 상관성을 나타냈다. 이는 강우 시 고체상

유기물에서 용존상 유기물로 전이되어도 원재료의 동위원소 특성이 유지된다는 것을 의미하며, 강우 유출 시 수질의 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용하여 토양, 분뇨, 비료의 기여도를 추정할 수 있다는 것을 시사한다(Lee et al., 2013; Kim et al., 2017).

3.3.2. 수질 시료의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$

1~3차 수질 시료에 대한 $\delta^{13}\text{C}$ 은 대체로 $-23.368 \sim -3.214\%$ 범위로 나타났으며, 토계천과 동계천, 저수구역인 도산서원, 예안교, 서부리, 주진교 사이에서 뚜렷한 차이를 보였다. 영주댐의 경우, 3차 시료에서 영주댐 1과 영주댐 2의 $\delta^{13}\text{C}$ 은 각각 -20.278% , -19.997% 로 유사한 값을 보였으며, 안동댐 저수구역보다는 높지만 유입 하천수보다 낮은 값을 나타낸다(Table 5).

$\delta^{15}\text{N}$ 은 1차 시료에서 역계천이 20.364% 로 가장 높고, 도산서원, 예안교도 $8.593\% \sim 12.825\%$ 수준의 비교적 무거운 값을 보였다. 2차에서는 동계천 12.961% , 토계천 12.449% , 역계천이 12.579% 로 높았고, 3차에서는 서부리 18.945% , 역계천 14.696% , 동부리 12.597% 등에서 상대적으로 높게 나타났다. 영주댐에서는 영주댐 1과 2가 각각 11.460% 과 12.703% 를 나타내 안동댐 유역과 유사한 경향을 나타내었다. 전반적으로 역계천과 일부 저수구역 지점 및 영주댐 유역은 가축분뇨 및 유기비료에 해당하는 $\delta^{15}\text{N}$ 범위($10 \sim 20\%$)에 근접하거나 초과하여, 이들이 수질 중 질소원의 주요 기여원으로 판단된다.

3.3.3. 동일 지점의 수질, 녹조, 퇴적물 시료의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$

Table 6은 동일 지점의 수질, 녹조, 퇴적물 시료의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 분석 결과이다. $\delta^{13}\text{C}$ 동위원소 특성은 수체 내에서 무기탄소원과 광합성 조건에 따라 그 값이 변화하기 때문에 시료 채취 지점에 따라 다양한 값을 나타낸다(Meyers, 1997; O'Neil et al., 2012). 수질 시료의 $\delta^{13}\text{C}$ 은 임하댐이 -15.413% 로 가장 높고 안동댐과 영주댐 수질 시료는 $-23.215 \sim -19.743\%$ 범위에 분포하였다. 안동댐과 영주댐의 녹조 시료는 대부분 $-24.524 \sim -22.186\%$ 범위로 주로 우분이나 계분과 유사한 분포를 보이지만, 임하댐 녹조 시료는 -32.235% 로 다른 지점에 비해 현저히 낮은 값을 나타냈다. 임하댐에서 수질 시료와 녹조 시료 간 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 현저한 차이는 용존 무기탄소와 생물기원 유기탄소의 기원 및 동위원소 분

별 특성 차이에 기인할 수 있으며, 이러한 분별 효과는 영양염 농도가 높고 1차 생산이 활발한 수역에서 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 보고되고 있다(O'Neil et al., 2012). 퇴적물 시료는 안동댐, 영주댐, 임하댐 모두에서 $-26.983 \sim -25.980\%$ 로 비교적 좁은 범위에 집중되어 지점 간 차이가 크지 않았다.

$\delta^{15}\text{N}$ 의 경우 수질 시료 $6.354 \sim 10.508\%$, 녹조 시료 $6.369 \sim 9.852\%$ 범위로 유사한 분포도를 보이지만, 퇴적물 시료는 $4.325 \sim 8.426\%$ 로 넓은 범위의 값을 갖는다(Fig. 3). 수질 시료에서는 영주댐 1 지점이 10.508% 로 가장 높은 값을 나타냈으며, 녹조 시료는 안동댐과 영주댐에서 $6.302 \sim 6.991\%$ 수준으로 유사한 값을 보이지만, 임하댐에서는 약 9.852% 로 상대적으로 높다. 이는 안동댐과 영주댐에서는 화학비료, 토양 등 다양한 질소원이 혼합된 결과로 중간 수준의 $\delta^{15}\text{N}$ 이 나타나고, 임하댐에서는 가축분뇨뿐만 아니라 유기비료의 영향이 영주댐이나 안동댐보다 상대적으로 더 많이 기여했다는 것을 의미한다. 팔당호 및 영산강 하구역에서 식물플랑크톤 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용해 외부 질소원 기원을 추적한 연구에서도, 축산폐수와 시비에 의한 농경지 유출이 높은 유역에서 플랑크톤 $\delta^{15}\text{N}$ 이 무거워지는 경향이 보고된 바 있다(Lee et al., 2013; Kim et al., 2017).

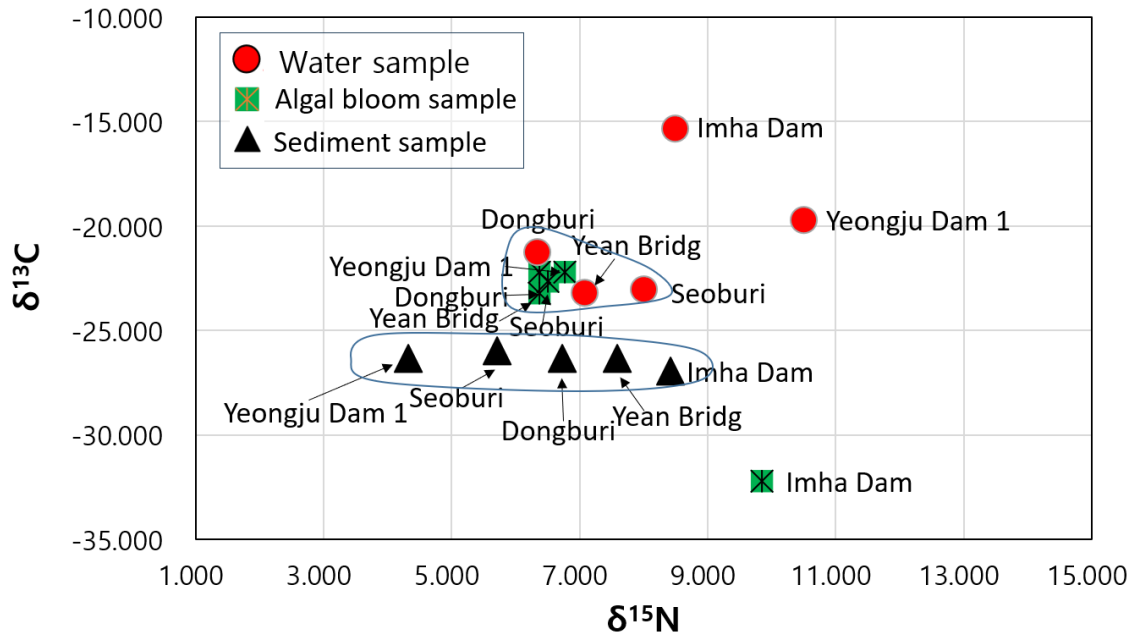
퇴적물 시료의 $\delta^{15}\text{N}$ 은 $4.325 \sim 8.426\%$ 로 수질 및 녹조 시료에 비해 다소 낮고 넓은 범위의 값을 나타냈다. 임하댐에서의 8.426% 로 다른 지점에 비해 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 은 상류 유역에서 가축분뇨나 시비와 관련된 농경지 유출이 퇴적물에 축적된 것으로 볼 수 있으며, 영산강 하구역에서 퇴적물 $\delta^{15}\text{N}$ 이 높을수록 축산폐수와 농경지 유입 가능성이 높다는 결과와 유사하다(Lee et al., 2013).

3.4. 안정동위원소를 이용한 유기오염원 기여도 평가

질소 안정동위원소($\delta^{15}\text{N}$)는 질소 오염원의 기원에 따라 서로 다른 범위를 나타내며, 이를 이용한 오염원 구분 및 기여도 평가는 기존 연구에서 널리 활용되어 왔다(Heaton, 1986). 질소는 생지구화학적 순환 과정에서 분별작용을 겪으며, 오염원별로 서로 다른 $\delta^{15}\text{N}$ 범위를 나타내는 특징을 갖고 있다. 두 개의 주요 질소 기원이 존재할 때, 혼합 시료의 $\delta^{15}\text{N}$ 조성은 질소 전환 과정에서 동위원소 분별을 무시할 수 있으며, 각 기원의 유입이 정상상태를 유지한다는 조건 하에서 선형 혼합

Table 6. Carbon and nitrogen stable isotope compositions of water, algal bloom, and sediment samples

Sample no.	Sampling site	Water sample		Algal bloom sample		Sediment sample	
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
AD-05-Lk	Dongburi	-21.290	6.354	-22.186	6.369	-26.375	6.739
AD-06-Lk	Seoburi	-23.111	8.011	-22.674	6.506	-25.980	5.718
AD-08-Lk	Yean Bridg	-23.215	7.091	-23.214	6.369	-26.365	7.588
YJ-01-Lk	Yeongju Dam 1	-19.743	10.508	-22.215	6.764	-26.375	4.325
IH-01-Lk	Imha Dam	-15.413	8.499	-32.235	9.852	-26.983	8.426

**Fig. 3.** $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ stable isotope compositions of water, algal bloom, and sediment samples at the same sites.

모델에 의해 설명될 수 있으며, 이를 통해 각 오염원의 상대적 기여도를 산정할 수 있다(Kendall and McDonnell, 1998; Phillips and Gregg, 2001). 특히 생활하수 및 축산분뇨 기원 질소는 탈질 및 암모니아 휘산 과정으로 인해 상대적으로 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 보이는 반면, 화학비료 기원 질소는 낮은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 나타내는 것으로 알려져 있다(Heaton, 1986).

질소 오염원이 두 개의 주요 기원(End-member A와 B)으로 구성된 경우, 혼합 시료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각 오염원의 선형 혼합으로 표현될 수 있으며, 이 모델은 생활하수-농업계 또는 축산분뇨-자연토양 유기물 등 두 가지 주요 질소원이 지배적인 경우에 적용 가능하다

(Phillips and Gregg, 2001).

$$\delta^{15}N_{mix} = f_A \delta^{15}N_A + f_B \delta^{15}N_B$$

$\delta^{15}N_{mix}$ 혼합 시료의 질소 동위원소 값,
 $\delta^{15}N_A$ 와 $\delta^{15}N_B$ 각 오염원의 질소 동위원소 값,
 f_A 와 f_B 각 오염원의 기여도를 의미한다.

전체 기여율의 합은 1이므로 다음의 관계가 성립한다.

$$f_{mix} = f_A + f_B = 1$$

이를 정리하면 특정 오염원(A)의 기여도는 다음과 같이 산정된다.

$$f_A(\%) = \frac{R_{mix} - R_B}{R_A - R_B} \times 100$$

$$f_B(\%) = 1 - F_A$$

본 연구에서 기여도 평가는 토양(논, 밭, 산토양), 분뇨(우분, 돈분, 계분), 비료(유기, 화학비료)를 잠재 오염원(End-members)으로 설정하고, 유사 값을 갖는 질소동위원소를 기준으로 화학비료(Chemical fertilizer: 화학비료+산토양: 평균 4.246%), 분뇨(Manure: 우분+계분+논토양: 7.895%), 유기비료(Organic fertilizer: 유기비료+밭토양: 12.217%) 3개 군으로 구분하여 4.246% 미만은 화학비료, 12.217% 초과는 유기비료, 그 중간 범위는 주로 분뇨의 기여도가 높은 것으로 간주하였다. 탄소동위원소의 경우 -25%을 경계로 그보다 가벼우면 화학비료와, 무거우면 분뇨와 유기비료의 기여도가 큰 것으로 해석하였으며, 본 연구에서는 질소동위원소를 이용하여 화학비료-분뇨, 분뇨-유기비료의 두 개의 구간으로 구분하여 기여도를 평가하였다. 계산식은 다음과 같다.

화학비료-분뇨 구간

$$4.246 \leq \delta^{15}N \leq 7.895$$

$$F_{chem}(\%) = \frac{7.895 - \delta^{15}N}{7.895 - 4.246} \times 100$$

$$F_{chem} = 1 - F_{chem}$$

분뇨-유기비료 구간

$$7.895 \leq \delta^{15}N \leq 12.217$$

$$F_{organic}(\%) = \frac{\delta^{15}N - 7.895}{12.217 - 7.895}$$

$$F_{manure} = 1 - F_{organic}$$

3.4.1. 수질 시료에 대한 기여율 평가

1차 수질에서는 단천교·토계천·동계천·동부리가 화학비료 기여율 100%로 평가되었고, 도산서원은 분뇨

83.9%, 유기비료 16.1%, 서부리는 화학비료 44.6%, 분뇨 55.4%로 나타났다. 2차 시료에서는 단천교가 화학비료 97.4%, 분뇨 2.6%, 도산서원 분뇨 79.1%, 유기비료 20.9%, 동부리 화학비료 12.8%, 분뇨 87.2%, 서부리 화학비료 37.2%, 분뇨 62.8%, 예안교 분뇨 85.5%, 유기비료 14.5%, 주진교 화학비료 41.7%, 분뇨 58.3% 등으로 다양하였다. 반면 지류인 토계천, 동계천, 역계천은 대부분 시기에서 화학비료 기여율 100%로 평가되어, 지류 수질 중 무기질소는 주로 화학비료 및 산림토양에서 기인하는 것으로 나타났다.

3차 수질에서는 동부리, 서부리, 역계천, 영주댐2 등이 분뇨 기여율 100%로 평가되었고, 단천교는 분뇨 72.3%, 유기비료 27.7%, 토계천과 도산서원은 분뇨와 유기비료 혼합 비율>유기비료의 결과를 보였다. 녹조 채취 시기 동시 채수한 시료에서도 도산서원, 동부리, 예안교, 주진교 등 저수구역 지점은 화학비료와 분뇨의 혼합 기여가 지배적이었고, 영주댐과 임하댐은 분뇨와 유기비료의 기여율이 높았다.

따라서 안동댐으로 유입되는 지류 수질의 질소원은 주로 화학비료, 산림토양에 의해 지배되고, 저수구역 내 수질은 시기와 지점에 따라 화학비료와 분뇨, 유기비료의 혼합 기여가 나타난다. 특히 역계천, 예안교, 서부리 등은 분뇨, 유기비료 기여율이 높다. 이는 한강, 영산강 수계에서 안정동위원소를 활용하여 유기오염원 기여도를 평가한 선행 연구에서 가축분뇨와 농경지 유출이 주요 질소원으로 밝혀진 결과와도 일치한다(Lee et al., 2013; Kim et al., 2017).

3.4.2. 녹조 시료에 대한 기여율 평가

녹조 시료에 대한 기여도 평가 결과, 안동댐 도산서원, 동부리, 서부리, 예안교, 주진교, 영주댐1, 2 등 대부분 지점에서 화학비료와 분뇨의 기여율이 높지만, 임하댐은 분뇨 54.7%, 유기비료 45.3%로 유기비료 기여도가 상대적으로 높다.

3.4.3. 퇴적물 시료에 대한 기여율 평가

퇴적물 시료의 기여도 평가에서는 동부리 화학비료 31.7%, 분뇨 68.3%, 서부리 화학비료 59.7%, 분뇨 40.3%, 예안교 화학비료 8.4%, 분뇨 91.6%로 나타났다. 안동댐의 3개 퇴적물 시료는 화학비료 8.4~59.7%, 분뇨 40.3~91.6% 평가되었으며, 영주댐1은 화학비료

Table 7. Contribution rates (%) of potential nitrogen sources of chemical fertilizer, manure, and organic fertilizer to water, algal bloom, and sediment samples

Sample No.	Sampling site	Water (1st)			Water (2nd)			Water (3rd)			Algal bloom			Sediment		
		Cf	Ma	Of	Cf	Ma	Of	Cf	Ma	Of	Cf	Ma	Of	Cf	Ma	Of
ADW-01-Ma	Dancheon Bridge	100	-	-	-	97.4	2.6	-	72.3	27.7	-	-	-	-	-	-
ADW-02-Br	Togye Stream	100	-	-	-	-	100	-	61.6	38.4	-	-	-	-	-	-
ADW-03-Lk	Dosan-seowon		83.9	16.1	20.9	79.1	-	-	61.6	38.4	35.2	64.8	-	-	-	-
ADW-04-Br	Donggye Stream	100	-	-	-	-	100	-	40.7	59.3	-	-	-	-	-	-
ADW-05-Lk	Dongbu-ri	100	-	-	12.8	87.2	87.2	-	-	100	41.8	58.2	-	31.7	68.3	-
ADW-06-Lk	Seobu-ri	44.6	55.4	-	37.2	62.8	-	-	-	100	38.1	61.9	-	59.7	40.3	-
ADW-07-Br	Yeokgye Stream	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	-	-	-	-
ADW-08-Lk	Yean Bridge	-	-	100	-	85.5	14.5	78.4	21.6	-	41.8	58.2	-	8.4	91.6	-
ADW-09-Lk	Jujin Bridge	-	89.9	10.1	41.7	58.3	-	35.4	64.6	-	43.7	56.3	-	-	-	-
YJW 1	Yeongju Dam 1	-	-	-	-	-	-	-	17.5	82.5	31.0	69.0	-	97.8	2.2	-
YJW 2	Yeongju Dam 2	-	-	-	-	-	-	-	-	100	24.8	75.2	-	-	-	-
IHW	Imhwa Dam	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54.7	45.3	-	87.7	12.3

Cf: Chemical fertilizer, Ma: Manure, Of: Organic fertilizer

97.8%, 분뇨 2.2%로 분뇨 영향이 상대적으로 낮고 화학비료와 토양 기여도가 높다. 임하댐 퇴적물은 분뇨 87.7%, 유기비료 12.3%로, 유역 내 축산 및 유기비료의 영향이 큰 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 팔당 호와 영산강 하구역에서 입자성 유기물과 퇴적물의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용하여 축산폐수 및 농경지 유출의 기여도를 정량 평가한 연구와 유사한 경향을 나타낸다(Lee et al., 2013; Kim et al., 2017). 따라서, 수체 내 조류 및 퇴적물의 안정동위원소 특성은 하천으로 유입되는 유기오염물질의 기여도 평가에 매우 유효한 도구임을 확인해 준다.

4. 결론

본 연구는 안동댐에서 장기간 반복적으로 발생하는 녹조의 유기오염 기원을 규명하기 위해 탄소($\delta^{13}\text{C}$)와 질소($\delta^{15}\text{N}$)의 안정동위원소를 활용하여 수질, 퇴적물, 녹조, 토양, 분뇨 및 비료 시료를 종합적으로 분석하고 오염 기여도를 평가하였다.

2023년 안동댐에서 관측된 유해남조류는 최대 약 94,000 cells/mL로 최근 관측 중 가장 심각한 수준이었으며, 녹조는 7월 초에 발생이 시작되어 8월 중순에 최대에 도달한 후 11월까지 장기적으로 지속되는 전형적인 부영양화 패턴을 보였다.

세 차례에 걸친 수질 분석 결과에서 역계천이 모든 시기에서 높은 총질소(T-N) 농도를 나타내어 안동댐으로 유입되는 유기오염물질의 주요 공급 수계라는 것을 알 수 있다.

안동댐으로 유입되는 지류 수질의 질소원은 시료 채취 시기와 지점에 따라 다양하게 나타난다. 1차 시료는 화학비료, 2차와 3차 시료는 유기비료가 지배적이며, 영주댐은 유기비료가 질소의 주 공급원인 것으로 판단된다.

퇴적물 시료의 기여도는 안동댐의 경우 시료 채취지점에 따라 약간의 차이가 있지만 주로 화학비료와 분뇨가 지배적이며, 영주댐은 화학비료가 우세하지만 임하댐의 경우 분뇨와 유기비료가 주 질소원으로 평가되었다. 녹조 시료의 기여도는 안동댐과 영주댐 유역은 화학비료와 분뇨의 기여율이 높지만, 임하댐은 유기비료 기여도가 상대적으로 높다.

기여도 평가에서 수질 시료는 상대적으로 화학비료의 영향을 크게 받았으며, 녹조와 퇴적물은 축산계에서 기원한 분뇨의 영향을 받는 것으로 나타났다. 안동댐 유역에서 녹조 발생에 대한 기여율은 토지계 화학비료나 유기비료보다 축산계에서 유래한 분뇨 기원이 가장 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 결론은 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 안정동위원소 비값은 녹조 유발 오염원의 기원 추정 및 정량적 기여도 평가 도구로 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 경북녹색환경지원센터 연구개발사업의 지원으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, B. H., Shin, K. H., 2018, Applications and perspectives of stable isotopes in aquatic ecological studies, *J. Ecol. Environ.*, 51, 96-104.
- Costanzo, S. D., O'Donohue, M. J., Dennison, W. C., Loneragan, N. R., Thomas, M., 2001, A New approach for detecting and mapping sewage impacts, *Mar. Pollut. Bull.*, 42, 149-156.
- Deines, P., 1980, The isotopic composition of reduced organic carbon, in: Fritz, P., Fontes, J. C. (eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol. 1, Elsevier, Amsterdam, 329-406.
- Fry, B., 1988, Food web structure on Georges Bank from stable C, N, and S isotopic compositions, *Limnol. Oceanogr.*, 33, 1182-1190.
- Heaton, T. H. E., 1986, Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: A Review, *Chemical Geology*, 59, 87-102.
- Heisler, J., Glibert, P. M., Burkholder, J. M., Anderson, D. M., Cochlan, W., Dennison, W. C., Suddleson, M., 2008, Eutrophication and harmful algal blooms: A Scientific consensus, *Harmful Algae*, 8, 3-13.
- Kang, H., Song, H. W., Kim, Y. H., Kim, J. J., 2022, Characteristics of nitrogen and carbon isotopes on organic matter and river sediments of Toil Stream in Yeongju Dam Basin, *Econ. Environ. Geol.*, 55, 439-445.
- Kendall, C., McDonnell, J. J., 1998, *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Elsevier, Amsterdam, 839.
- Kim, H. S., Kim, J. I., Lee, S. H., Choi, J. W., Kim, Y. S., 2019, Identification of pollutant sources of water supply using nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) and oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) stable isotope ratios in nitrate, *J. Environ. Anal. Toxicol. Public Health*, 22, 145-153.
- Kim, M. S., Hwang, J. Y., Kwon, O. S., Lee, W. S., 2013, Analytical methodology of stable isotope ratios: sample pretreatment, analysis and application, *Korean J. Ecol. Environ.*, 46, 471-487.
- Kim, M. S., Lee, E. J., Yoon, S. H., Lim, B. L., Park, J. S., Park, H. W., Jeong, H. M., Choi, J. W., 2017, Determination of the origin of dissolved inorganic nitrogen and phytoplankton using stable isotope ratios, *Korean J. Ecol. Environ.*, 50, 452-458.
- Lee, Y. J., Jeong, B. K., Shin, Y. S., Kim, S. H., Shin, K. H., 2013, Determination of the origin of particulate organic matter at the estuary of Youngsan River using stable isotope ratios, *Korean J. Ecol. Environ.*, 46, 175-184.
- Meyers, P. A., 1997, Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes, *Org. Geochem.*, 27, 213-250.
- O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., Gobler, C. J., 2012, The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change, *Harmful Algae*, 14, 313-334.
- Paerl, H. W., Fulton, R. S., Moisander, P. H., Dyble, J., 2001, Harmful freshwater algal blooms with an emphasis on cyanobacteria, *Sci. World J.*, 1, 76-113.
- Peters, K. E., Sweeney, R. E., Kaplan, I. R., 1978, Correlation of carbon and nitrogen stable isotopes in sedimentary organic matter, *Limnol. Oceanogr.*, 23, 598-604.
- Phillips, D. L., Gregg, J. W., 2001, Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources, *Oecologia*, 127, 171-179.
- Tesdal, J. E., Galbraith, E. D., Kienast, M., 2013, Nitrogen isotopes in bulk marine sediment: linking seafloor observations with subseafloor records, *Biogeosciences*, 10, 101-118.
- Watson, S. B., 2004, Aquatic taste and odour: a primary signal of drinking-water integrity, *J. Toxicol. Environ. Health A*, 67, 1779-1795.

-
- Postdoctoral Research Associate and Lecturer. Hee-Won Kwon
Department of Environmental Engineering, Gyeongkuk National University
heewon0424@gmail.com
 - General Director. Hyuk Jin Cho
Andong Office, Korea Water Resources Corporation
hyukjincho@kwater.or.kr
 - Graduated student. Byeong Cheol Song
Department of Earth and Environmental Sciences,
Gyeongkuk National University
r4tang97@naver.com
-
- Professor. Young Hun Kim
Department of EEnvironmental Engineering,
Gyeongkuk National University
youngkim@andong.ac.kr
 - Professor. Jeong Jin Kim
Department of Earth and Environmental Sciences,
Gyeongkuk National University
jjkim@andong.ac.kr