

Study Note

안정동위원소비를 활용한 생태지위면적 분석의 수생태계 평가 가능성 분석: 영산강 승촌보의 저서성 대형무척추동물을 대상으로

서동환* · 오혜지* · Jin Mei-Yan* · Oda Yusuke* · 김현우** · 장민호*** ·
최보형**** · 신경훈**** · 이경락***** · 이수웅***** · 장광현*

경희대학교 환경학및환경공학과*, 순천대학교 환경교육학과**, 공주대학교 생물교육학과***,
한양대학교 해양융합공학과****, 국립환경과학원 유역생태연구팀*****

Application of Stable Isotopic Niche Space to Large River Monitoring: Analysis of Benthic Macroinvertebrates of the Seongchon Wier

Dong-Hwan Seo* · Hye-Ji Oh* · Mei-Yan Jin* · Yusuke Oda* · Hyun-Woo Kim** ·
Min-Ho Jang*** · Bohyung Choi**** · Kyung-Hoon Shin**** · Kyung-Lak Lee***** ·
Su-Woong Lee***** · Kwang-Hyeon Chang*

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University*

Department of Environmental Education, Suncheon National University**

Department of Biology Education, Kongju National University***

Departure of Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University****

Watershed Ecology Research Team, National Institute of Environmental Research*****

First Author: Dong-Hwan Seo, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea,
Tel: +82-31-201-3392, E-mail: sdh0202@naver.com

Corresponding Author: Kwang-Hyeon Chang, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin
1732, Korea, Tel: +82-31-201-3392, E-mail: chang38@khu.ac.kr

Co-Authors: Hye-Ji Oh, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea, E-mail:
ohg2090@naver.com

Mei-Yan Jin, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea, E-mail:
jinmeiyan870@163.com

Yusuke Oda, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea, E-mail:
odayusuke543@gmail.com

Hyun-Woo Kim, Department of Environmental Education, Suncheon National University, Suncheon 255, Korea, E-mail:
hwkim@suncheon.ac.kr

Min-Ho Jang, Department of Biology Education, Kongju National University, Kongju 56, Korea, E-mail: jangmino@kongju.ac.kr

Bohyung Choi, Departure of Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan 15588, Korea,
E-mail: chboh@hanyang.ac.kr

Kyung-Hoon Shin, Departure of Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan 15588,
Korea, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

Kyung-Lak Lee, Watershed Ecology Research Team, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, E-mail:
micow1022@korea.kr

Su-Woong Lee, Watershed Ecology Research Team, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, E-mail:
hoffman@korea.kr

Received: 7 November, 2018. Revised: 6 December, 2018. Accepted: 7 December, 2018.

요약: 본 연구에서는 저서성 대형무척추동물의 탄소와 질소 안정동위원소비를 이용하여 생태지위면적을 계산하고 수생태계 평가 활용 여부를 분석하였다. 평가를 위해 영산강 승촌보의 상류와 하류에 서식하고 있는 저서성 대형무척추동물의 생태지위면적을 6월과 8월 두차례에 걸쳐 비교하여 보로 인한 영향 유무를 집중호우 전후 시기로 구분하여 평가하였다. 또한, 수질과 군집지수 및 생물지수 (BMI)를 각각 측정하고 계산하여 계산된 생태지위면적과의 연관 관계를 알아보고자 하였다. 생태지위면적의 계산은 R 프로그램의 SIBER 패키지에서 제공하는 Bayesian Stable Isotope 기능을 이용하여 수행하였다. 승촌보 지역의 집중호우 이전 시기인 6월과 집중호우 이후 시기인 8월의 수질과 생물지수는 집중호우 전과 후 차이를 나타냈으나, 승촌보의 상류와 하류 지점에서 보로 인한 차이의 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 반면, 저서성 대형무척추동물의 생태지위면적은 6월과 8월 조사에서 모두 상류 지역과 비교하여 하류 지역에서 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 보로 인한 하천의 물리적 변화가 수질과 관계없이 저서성 대형무척추동물의 생태지위면적에 영향을 줄 수 있음을 의미하며, 종조성 변화와 같은 서식처 선호도에 따른 구성 생물의 변화와 같은 직접적인 영향 외에 서식처 환경 변화를 통한 종합적인 영향을 반영하는 것으로 판단된다. 따라서, 안정동위원소를 이용한 생태지위면적 값으로 먹이의 다양성, 선택성, 종의 생태적 지위, 경쟁 수준 등을 정량적으로 평가하여 기존의 지수를 이용한 평가방법을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 탄소·질소 안정동위원소비, 깔따구류, 보의 영향, 군집지수

Abstract: We measured ecological niche space (ENS) using carbon and nitrogen stable isotope ratios of benthic macroinvertebrates to estimate its applicability for large river assessment. In particular, we compared ENSs of selected macroinvertebrates between upper and lower area of Seungchon Weir in Yeongsan River to estimate the impact of weir on biological community. We also measured basic water quality and community indices including benthic macroinvertebrates index (BMI) to estimate their correlations with calculated ENS. ENS was calculated using the Bayesian Stable Isotope in R statistics (package "SIBER"). The results showed that seasonal variations in water quality and community indices were found, but there was no apparent tendency between upper and lower area of the Seungchon Weir in June (before rainy season) and August (after rainy season). However, ENS of benthic macroinvertebrates markedly decreased across the weir in both June and August regardless of changes in water quality. This means the physical change of the stream due to the weir cause decrease of ecological isotopic niche space of benthic macroinvertebrates regardless of water quality, suggesting physical modification by the weir can affect the interaction between habitat condition and macroinvertebrates. Therefore, the ecological isotopic niche space can be a useful supplementary indicator for the river ecosystem assessment.

Keywords: carbon and nitrogen stable isotope ratios, Chironomids, weir impacts, community index

I. 서론

수생태계는 다양한 물질과 생물이 종합적으로 상호작용하는 환경으로, 수생태계 건강성을 평가하기 위해선 이화학적 정보뿐만 아니라 생물학적 정보가 필요하다. 수생태계의 생물학적 평가에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으며, Kolkwitz & Marsson (1902, 1908, 1909) 이 지표생물을 기준으

로 하천생태계를 네 등급으로 나누는 오수생물계열 (saprobic system)을 창안한 이후 현재까지 다양한 생물학적 지수가 제안되어 수생태계 평가에 적용되어 왔다(Kong et al. 2018). 이와 같은 생물학적 지표 중 저서성 대형무척추동물은 다양한 오염에 대한 물 환경의 변화 분석에 있어 오염 정도 및 자원의 종류와 같은 측면에서 유용성이 매우 높다 (Metcalf-

Smith 1996).

저서성 대형무척추동물은 대부분의 생활사를 하천에서 보내고, 오염물질의 유입과 같은 서식환경의 변화에 민감하게 반응하는 생물학적 지표생물이다. 또한, 채집하기 쉽고 다양하며 낮은 이동성을 가지고 있기 때문에 환경교란을 평가하는 대표적인 지표생물종으로 활용되고 있다 (Cairns & Pratt 1993). 이들을 이용한 환경평가는 일반적으로 지표성이 높은 개체군, 즉 수질을 대변할 수 있는 지표종을 이용하는 방법과 생물군집 내의 개체군 밀도 및 조성과 같은 군집정보를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다 (Choi & Lee 2012). 하지만, 지표종의 경우 몇몇 종과 분류군에 한정되어 있으며 종 채집에 제한이 따르기 때문에 정확한 평가에 어려움이 따른다. 이러한 한계점 때문에 저서성 대형무척추동물을 이용한 평가는 군집 단위에서의 분석이 일반적으로 이루어지고 있다. 군집을 계량화하여 분석하는 방법은 수리적 접근 방법으로 군집의 구조를 파악하는 ‘군집지수 (Community Index)’와 생물 분류군별 생태적 특성을 고려한 ‘생물지수 (Biotic Index)’가 있다.

군집분석을 이용한 평가방법에는 군집의 다양성을 기초로 하는 수리군집지수 (Mathematical Community Index, MCI)를 이용한 방법, 지표종에 따른 가중치를 부여하여 지표성이 높은 개체군을 이용한 지표군집지수 (Indicate Community Index, ICI)인 Biotic score, Trent biotic index, Monitoring working party score 등의 방법이 존재한다. 또한, 간이수질평가지수 (Group Pollution Index, GPI), 한국생물지수 (Korean Biotic Index, KBI), 저서무척추동물 생태점수 (Ecological Score of Benthic macroinvertebrate community, ESB), 한국형 오수생물지수 (Korea Saprobic Index, KSI) 등 다양한 방법을 이용하여 수질을 평가하고 있다. 국내에서 개발된 생물지수 평가방법에는 저서성 대형무척추동물에 의한 수생태 건강성 평가지수로 저서동물지수 (Benthic Macroinvertebrates Index, BMI)가 주로 사용되고 있다 (Won et al, 2006; Choi & Lee 2012).

이처럼 저서성 대형무척추동물을 이용하여 수생태

계를 평가하는 방법은 다양하게 개발되어 있으나, 국내 하천의 다양한 환경과 특성, 다양성을 고려하여 종합적으로 평가하기에는 한계가 있다. 평가에 사용되는 다양도와 같은 군집지수 및 건강성 평가지수는 군집의 종 조성을 바탕으로 하여 계산되므로 구성 종의 특성에 따른 구조적 특징은 제시할 수 있으나 생물학적 상호작용 및 이를 통한 기능적 특성과 서식처의 먹이환경과 같은 정보를 나타내기엔 부족하다. 따라서 유기물오염 및 부영양화 영향 이외에 서식처의 생태적 특성을 종합적으로 평가할 수 있는 지표의 개발이 필요하다.

국내의 하천의 경우 보 건설과 같은 영향으로 다양한 물리적 변화가 발생하고 있으며, 4대강의 경우 본류의 보 건설에 따른 물리적 변화로 인한 수질, 생물상, 먹이망 등의 다양한 변화가 발생하였다. 이러한 변화를 평가하기 위해 저서성 대형무척추동물 군집과 함께 부착 돌말류 및 어류 군집을 포함한 다양한 생물상 조사가 이루어져 왔으나, 분류군 생물상을 중심으로 한 평가는 하천 생태계를 서식처의 개념으로 접근하여 서식처의 먹이단계, 생물의 생태적 지위, 먹이망 등의 구조와 기능을 평가하는 것에 한계가 있다.

이러한 조건들을 고려하여 서식처와 서식생물의 생태적 특성을 정량적으로 나타낼 수 있는 평가방법인 생태지위면적 (Ecological Niche Space)이 하천뿐만 아니라 다양한 생태계 환경에서 적용되고 있다 (Newsome et al, 2007). 생태지위면적은 생물의 환경요구조건을 나타내는 정서적인 개념으로 이해되어 왔으나, 안정동위원소 분석이 가능해지면서 안정동위원소비를 이용하여 생태지위면적을 정량적으로 계산하는 것이 가능해졌다 (Bolnick et al, 2003). 가로축을 탄소 동위원소비, 세로축을 질소 동위원소비로 대상 생물의 안정동위원소비 값을 2차원으로 작성하여 나타낼 수 있는 안정동위원소비 기반 생태지위면적은 먹이의 다양성, 선택성, 종의 생태적 지위, 경쟁수준 등 환경의 정량적인 평가에 사용될 수 있다. 특히, 탄소 값의 폭은 이용되는 먹이종류의 다양성을 대변하며 질소 값의 폭은 먹이사슬내의 영양단계를 나타낸다. 즉, 초식성, 육식성 및 잡식성의 먹이 선택성을 평가할 수 있다. 따라서 안정동위원소비를

이용하여 계산된 생태지위면적은 대상 서식처에서 생물의 이용가능 먹이원의 범위와 그 결과 생태계 내의 영양단계를 종합적으로 나타낸다고 할 수 있다.

본 연구에서는 4대강의 보로 인한 하천 생태계 영향을 평가하기 위해 저서성 대형무척추동물의 안정 동위원소비를 분석하여 생태지위면적을 측정, 보의 상·하 지점을 비교하였다. 또한, 저서생물의 경우 홍수기 동안 발생하는 토사유입 및 다양한 서식처의 영향으로 인해 저서생물군집 및 먹이환경이 변화할 수 있으므로 이와 같은 강우로 인한 변화가 보 상하구간에서 어떻게 작용하는지 평가하기 위해 홍수기 전후인 6월과 8월에 조사를 실시하였다. 이 결과를 통해 생태지위면적이 하천 생태계 평가 가능 여부를 검토하였으며, 기존의 생태계 평가 방법과 더불어 생태계 먹이망과 관련한 추가정보를 제공하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 조사 지점 및 기초 환경

조사는 2017년 6월과 8월, 홍수기 전·후에 걸쳐 두 차례에 걸쳐 낙동강 승촌보의 상류 지역과 하류 지역

에서 진행하였다 (Figure 1). 조사 지점 별 수심과 수질은 현장에서 다항목 수질측정기를 이용하여 측정하였으며, 수온, 수소이온농도지수 (pH), 전기전도도 (EC), 용존산소 (DO)를 측정하였다. 각 조사구간에 대해 횡단면을 따라 5개 지점 (좌우안, 좌중앙, 중앙, 우중앙)에서 수심을 측정하고, 수심 1 m 간격으로 수질항목을 측정하였다. 생물학적산소요구량 (BOD), 화학적산소요구량 (COD), 부유물질 (SS), 총인 (T-N), 총질소 (T-P), 총유기탄소 (TOC), 유량 자료는 물환경정보시스템의 자료를 활용하였다 (<http://water.nier.go.kr>).

2. 저서 무척추동물 채집 및 분석

조사는 생물측정망 조사 및 평가지침에 따라 실시하였다. 저서성 대형무척추동물의 현장 채집은 하도의 중앙 지점과 좌·우 중앙 지점에서 Ponar grab (15×15 cm)을 사용해 3회 정량 채집을 실시하여 단위면적당 개체밀도 (ind. m⁻²)로 환산하였다. 모든 채집물은 적정 크기의 플라스틱 통 (bottle, 500~1,000 ml)에 넣고 현장에서 100% 에탄올 (ethyl alcohol)에 고정하였다 (Ministry of Environment 2015).

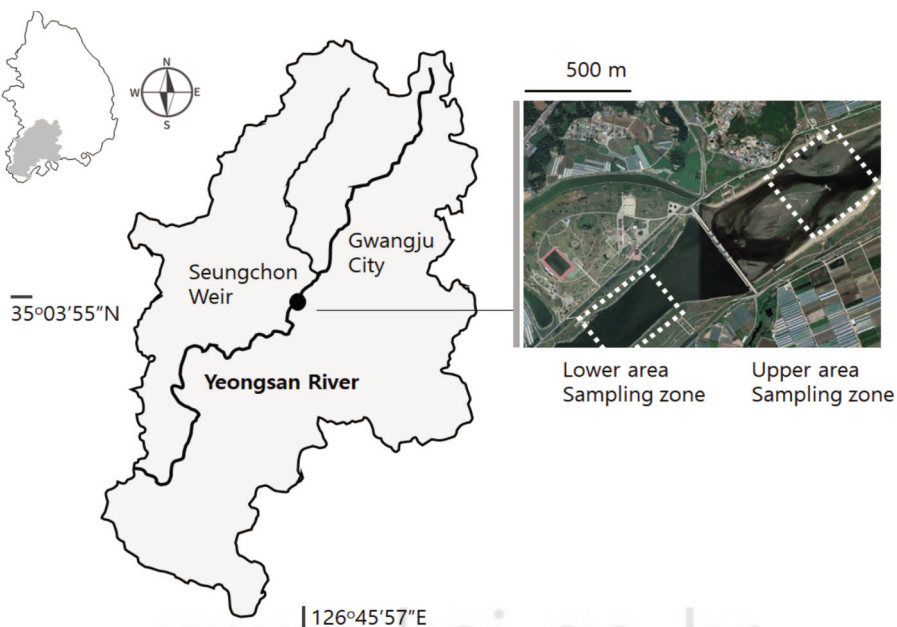


Figure 1. Survey site of water quality and benthic macroinvertebrates in Yeongsan River.

Table 1. Summary of benthic macroinvertebrates index.

Diversity index, H'	Diversity index (H') = $-\sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 p_i = \frac{N_i}{N}$					
Benthic Macroinvertebrates Index, BMI	(Formula 1.)	$I = \frac{Ind.}{T \times S} \times 100$ I : Individuals of 1m ² T : Number of times S : Size of survey(m ²)				
	(Formula 2.)	$I = \frac{N_i}{N} \times 100$ R _i : Individuals Rank(%) of Indicators species N : Number of species in study site N _i : Ranking individuals for species				
	Rank(%) (R _i)	≤20%	20% < R ≤ 40%	40% < R ≤ 60%	60% < R ≤ 80%	>80%
	Appearance Frequency Rate (h _i)	5	4	3	2	1
	(Formula 3.)	$BMI = \left(4 + \frac{\sum_{i=1}^n s_i h_i g_i}{\sum_{i=1}^n h_i g_i} \right) \times 25$ i : Serial number of Indicators species n : Individuals of i Indicators species s _i : Pollution index of i Indicators species h _i : Appearance frequency rate of i Indicators species g _i : Index weight of i Indicators species				

현장에서 채집한 저서성 대형무척추동물 샘플은 실험실로 운반하여 유기물로부터 저서성 대형무척추동물을 골라내고 플라스틱 병 (Vial, 10~25 ml)에 옮겨 80% Ethanol로 보존하고, 채집정보를 기록하였다. 골라내기한 저서성 대형무척추동물 표본은 분류목록 및 검색표를 참고하여 실체현미경 (LEICA S8APO)으로 동정하였다 (Ministry of Environment 2015).

다양도지수는 Margalef (1958)의 정보이론 (Information Theory)에 의하여 유도된 Shannon-Wiever Function (Pielou 1969)을 이용하여 계산하였다. BMI는 수생태계 건강성 평가 지침 (Ministry of Environment 2013)을 이용하여 계산하였다 (Table 1).

3. 안정동위원소 분석

채집, 동정된 저서성 대형무척추동물 중 지점별로 대표종 4종을 선정하여 각 종별 3개체의 안정동위원소비를 측정하였다. 시료는 동결건조 후 분말화를 통해 안정동위원소비 측정을 위한 시료를 준비하였으

며, 탄소 측정용 시료는 무기탄소 및 지질 제거 (2:1 Chloroform:Methanol (v/v)) 과정을 수행했다 (Kim et al. 2013). 전처리된 시료는 안정동위원소 측정용 질량분석계 (IRMS, Isotope Ratio Mass Spectrometers, Isoprime, UK)를 이용하여 탄소와 질소의 안정동위원소비를 측정하였다. 측정된 안정동위원소비는 각 원소별 정해진 표준물질 (탄소 : VPDB, Vienna Pee-Dee Belemnite; 질소 : Air)의 원소존재비를 비교하여 대상 시료에 대한 존재비가 어느 정도 차이가 나는지를 천분율로 계산하여 나타내었다.

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

$$\delta^{15}N \text{ 측정시료} = \left(\frac{[^{15}N/^{14}N]_{\text{측정시료}}}{[^{15}N/^{14}N]_{\text{표준시료}}} - 1 \right) \times 1000 (\text{‰})$$

탄소 안정동위원소비의 경우 섭식관계에 의한 동위원소 농축이 1‰ 이하인 반면, 섭식 관계에 의한 질소 안정동위원소의 농축 값은 3.4‰로 알려져 있으며, 이와 같은 농축특성을 이용하여 정량적으로 먹이

망 내 생물위치를 특정할 수 있다.

4. 생태지위면적 계산

저서성 대형무척추동물의 생태지위면적은 프로그램 R v.3.0.2 (R Core Development Team 2017)의 패키지 SIAR (Stable Isotope Analyses in R) 중 Stable Isotope Bayesian Ellipses in R (SIBER)을 이용하여 계산하였다. SIBER은 타원기반의 다변량 접근법을 사용하여 다양한 표본크기를 비교할 수 있다. 이를 이용하여 생태지위면적의 총 면적인 TA (Total Area) 와 표준 타원 영역인 SEA(Standard Ellipse Areas) 중 본 조사의 표본수를 고려하기 위해 적은 수의 표본 수를 고려해서 보정된 모델결과를 제공하여 SEAc를 도출하였다 (Jackson et al. 2011).

III. 결과 및 고찰

영산강 승촌보의 2017년 6월 조사와 2017년 8월 조사 시기의 수질을 비교해본 결과 6월 조사에 비하여 8월 조사의 수질이 비교적 좋은 경향을 나타내고 있다. BOD와 COD의 경우 6월 조사에서 각각 6.9 mgL⁻¹, 14.1 mgL⁻¹, 8월 조사에서 각각 3.8 mgL⁻¹, 8.8 mgL⁻¹의 값을 나타내어 약 절반가량 감소한 수치를 나타내었다. TOC의 경우도 6월 조사에서 10.3 mgL⁻¹, 8월 조사에서 6.3 mgL⁻¹의 수치를 나타내었다. 탁성의 지표인 EC의 수치 역시 6월 조사에서 420 μScm⁻¹, 8월 조사에서 294 μScm⁻¹로 낮아진 수치를 나타내었다. 이를 통해 6월 조사와 비교하여 8월 조사에서 승촌보의 수질이 희석효과로 인해 수질이 완화되는 것으로 판단된다. 6월 조사에서 유량이 23.25 m³s⁻¹, 8월 조사에서 94.80 m³s⁻¹로 6월 조사와 8월 조사 사이의 집중호우로 인한 영향이 존재한 것으로 판단되며, 이를 통해 집중호우 이전과 비교하여 이후에 희석효과로 인하여 수질이 완화되는 것으로 판단된다 (Table 2).

승촌보 지역의 6월 조사에서 채집된 저서성 대형 무척추동물의 종은 승촌보 상 지점에서 깔다구류 (*Chironomidae* sp.), 아시아실잠자리 (*Ischnura*

Table 2. Water quality of the survey site at June and August

	June	August
pH	7.7	8.5
EC (μS/cm)	420	294
DO (mg/L)	6.0	4.6
BOD (mg/L)	6.9	3.8
COD (mg/L)	14.1	8.8
SS (mg/L)	13.7	13.7
T-N (mg/L)	4.55	4.24
T-P (mg/L)	0.106	0.181
TOC (mg/L)	10.3	6.3
Water temp. (°C)	24.1	27.5
Discharge (m ³ /s)	23.25	94.80

Table 3. Species of benthic macroinvertebrates analyzed for ecological niche space

	upper area	lower area
June	<i>Chironomidae</i> sp.	<i>Chironomidae</i> sp.
	<i>Ischnura asiatica</i>	<i>Ischnura asiatica</i>
	<i>Corixidae</i> sp.	<i>Glossiphonia</i> sp.
	<i>Physa acuta</i>	<i>Muljarus japonicas</i>
August	<i>Muljarus japonica</i>	<i>Chironomidae</i> sp.
	<i>Ischnura asiatica</i>	<i>Ischnura asiatica</i>
	<i>Radix auricularia</i>	<i>Glossiphonia</i> sp.
	<i>Hippeutis cantori</i>	<i>Oligochaeta</i> sp.

asiatica), 물벌레 (*Corixidae* sp.), 원돌이물달팽이 (*Physa acuta*)가 채집되었으며, 승촌보 하 지점에서 깔다구류 (*Chironomidae* sp.), 아시아실잠자리 (*Ischnura asiatica*), 넓적거머리류 (*Glossiphonia* sp.), 물자라 (*Muljarus japonicas*)가 채집되었다 (Table 3). 8월 조사에서 채집된 저서성 대형무척추동물의 주요 종은 승촌보 상 지점에서 물자라 (*Muljarus japonicas*), 아시아실잠자리 (*Ischnura asiatica*), 물달팽이 (*Radix auricularia*), 수정또아리물달팽이 (*Hippeutis cantori*)가 채집되었으며, 승촌보 하 지점에서 깔다구류 (*Chironomidae* sp.), 아시아실잠자리 (*Ischnura asiatica*), 넓적거머리류 (*Glossiphonia* sp.), 빈모류 (*Oligochaeta* sp.)가 채집되었다 (Table 3).

승촌보의 상류와 하류 지점에서 생태지위면적을 계산한 결과 6월 조사에서 승촌보 상 지점의 TA값은

Table 4. Ecological isotopic niche space of benthic macroinvertebrates in seongchon weir (Yeongsan River)

		upper area	lower area
June	TA	19.96	10.00
	SEAc	8.89	4.40
October	TA	25.32	6.57
	SEAc	17.23	3.25

19.96 이고, 승촌보 하 지점의 TA값은 10.00 으로 나타났다. 승촌보 상 지점의 SEAc값은 8.89 이고, 승촌보 하 지점의 SEAc값은 4.02 으로 나타났다. 8월 조사에서 승촌보 상 지점의 TA값은 25.32이고, 승촌보 하 지점의 TA값은 17.23으로 나타났다. 승촌보 상 지점의 SEAc값은 17.23 이고, 승촌보 하 지점의

SEAc값은 3.25 으로 나타났다 (Table 4) (Figure 2).

승촌보 지역의 저서성 대형무척추동물 생태지위면적은 6월과 8월 조사 모두 상류 지역과 비교하여 하류 지역에서 감소하는 경향을 나타냈다. 이를 통해 저서성 대형무척추동물은 승촌보로 인한 환경의 물리적 변화로 인해 보의 상류와 비교하여 하류의 지역에서 먹이 다양성, 선택성, 그리고 생태적 지위가 감소한 것으로 판단된다.

집중호우 이전 시기인 6월 조사와 비교하여 집중호우 이후 시기인 8월 조사에서 수질이 개선되는 경향이 나타났으며, 8월 조사의 넓은 생태지위면적은 이를 반영하는 것으로 나타난다. 하지만, 보의 상류와 비교하여 하류에서 감소하는 경향은 8월 조사에

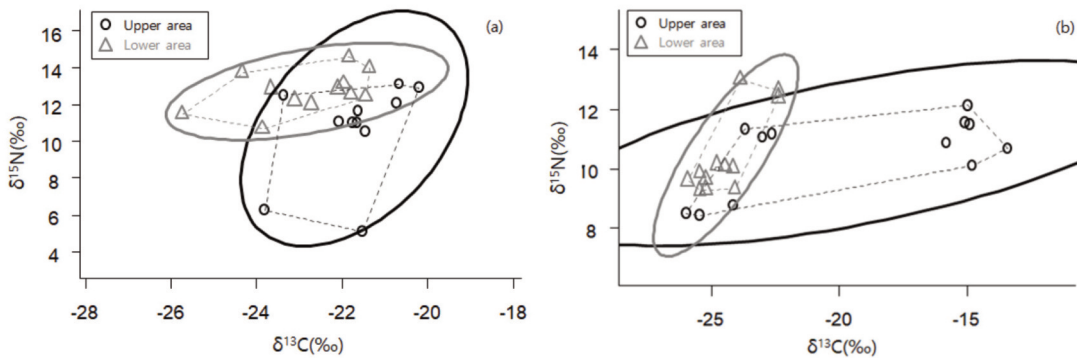


Figure 2. Ecological isotopic niche space of benthic macroinvertebrates in June (a) and August (b) at the upper and lower area of Seongchon Weir.

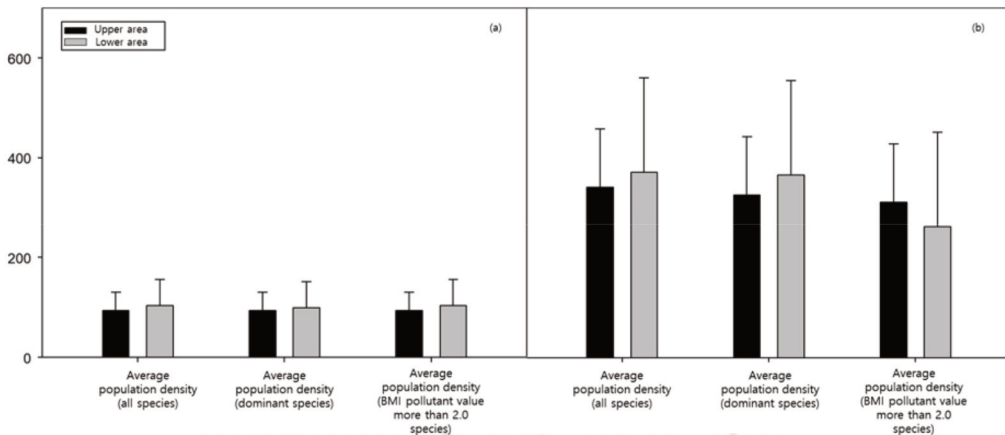


Figure 3. Average population density of benthic macroinvertebrates in June (a) and August (b) at the upper and lower area of Seongchon Weir.

Table 5. Average diversity index (H') and average Benthic Macroinvertebrates Index (BMI) of benthic 5 macroinvertebrates at the upper and lower area of Seongchon Weir.

		upper area	lower area
June	Average diversity index (H')	0.21	0.55
	Average benthic Macroinvertebrates Index (BMI)	12.50	12.40
August	Average diversity index (H')	0.70	16.70
	Average benthic Macroinvertebrates Index (BMI)	0.67	20.50

서도 동일한 것으로 나타났다. 이는 집중호우 이전 시기인 6월 조사와 이후 시기인 8월 조사가 보이는 경향이 수질의 변화와 관계없이 일치하는 것으로, 하천의 수질과 유량의 변화는 저서성 대형무척추동물의 생태지위면적에 영향을 미치나, 보로 인해 발생하는 서식처의 특성변화는 이와 같은 계절변화와 상관없이 저서성 대형무척추동물에게 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 판단된다.

이러한 생태지위면적의 경향을 저서성 대형무척추동물의 다른 지수 값과 비교하기 위하여 평균 개체밀도, 평균 종다양성지수, 평균 BMI 값을 계산하였다. 평균 개체밀도의 경우 6월 조사의 승촌보 상 지점에서 93.8의 값을 나타내었고, 승촌보 하 지점에서 103.7의 값을 나타내었다. 8월 조사의 경우 승촌보 상 지점에서 340.7의 값을 나타내었고, 승촌보 하 지점에서 370.4의 값을 나타내었다. 이는 두 시기 모두 보의 상류 지점보다 하류 지점에 높은 평균 개체밀도를 가진다는 경향을 나타낸다 (Figure 3). 평균 종다양성지수의 경우 6월 조사에서 승촌보 상, 하 지점 각각 0.21, 0.55의 값을 나타내었으며 8월 조사에서 승촌보 상, 하 지점 각각 0.70, 0.67의 값을 나타내었다. 평균 BMI의 경우 6월 조사에서 승촌보 상, 하 지점 각각 12.50, 12.40의 값을 나타내었으며 8월 조사에서 승촌보 상, 하 지점 각각 16.70, 20.50의 값을 나타내었다. 평균 종다양성지수와 평균 BMI의 경우 6월, 8월 조사에서 승촌보 상, 하 지점에서 일정한 경향을 나타내지 않았다 (Table 5).

평균 개체밀도의 경우 6월과 8월 조사에서 일정한 경향을 나타내었으나, 평가의 주요 항목으로 사용되는 저서성 대형무척추동물의 평균 종다양성지수와 BMI의 경우 일정한 경향을 나타내지 않아 평가에 사용하기 어려운 것으로 나타났다. 이와 같은 군집지수

는 그 계산이 조사에서 채집되는 종별 개체수에 의존하므로 조사 시기나 지점에 따라 채집결과가 달라진다면 평가 결과에 문제가 발생할 수 있다. 또한, 강우나 오염과 같은 하천의 환경의 일시적인 변화로 인해 조사 결과 값이 변할 수 있기 때문에 대상 지점의 전반적인 환경을 종합적으로 평가하기에는 한계점을 가질 수 있다 (Everall et al, 2017). 따라서 먹이 다양성, 영양단계변화, 하천의 오염 등을 평가할 수 있는 안정동위원소비를 이용한 생태지위면적을 이용하여 이러한 한계점을 보완하고 특히 평가결과의 신뢰성을 확보하고 추가 정보를 제공하는 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

기존의 하천 환경 평가에 이용되는 이화학적 평가 방법과 생물을 이용한 평가방법은 하천의 부영양화와 같은 제한된 범위의 평가가 가능하였다. 안정동위원소비를 이용한 생태지위면적의 경우, 생태계 먹이망 구조, 대상 생물의 영양단계 변화와 같은 하천 환경의 서식처 개념으로써의 종합적인 평가를 통해 기존의 평가항목에 대한 보완적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 생태계 장기변화의 지표 생물인 저서성 대형무척추동물을 이용한 생태지위면적 분석으로 하천의 유기물 기원과 먹이망 내 에너지 흐름 및 물질순환을 평가하고 기능적 섭식군의 구성과 유기물 조성 변화의 관계를 파악 할 수 있다 (Doi et al, 2008).

본 조사의 경우 생태적 지위 면적의 적용 여부를 검토하기 위해 제한된 지점에서의 특정 분류군의 조사결과를 사용하였다. 본 분석에 사용한 생태지위면적 계산을 위한 'SIBER' 모델은 지점별 최소 5개체 이상의 안정동위원소 분석결과를 필요하지만, 저서성 대형무척추동물의 경우 지점에 따라 통일된 종들을 채집하기 어렵고, 소형 개체의 경우 분석을 위한

시료 확보가 어려운 경우도 발생할 수 있다. 따라서 안정동위원소비 분석 시 저서성 대형무척추동물 중 지표 종을 선택하여 분석하거나 기능적 섭식군을 고려한 종 선택을 통한 조사 및 분석의 보완이 고려되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 본 조사는 생태지위면적 개념을 시범적으로 적용하기 위해 대형 하천의 제한된 구간을 대상으로 실시하였으므로, 향후 보다 객관적인 검증과 영향평가 지표로서의 활용을 위해서는 다양한 하천을 대상으로 한 횡적 구조물의 영향 및 서식처 특성과 관련한 종 특이적 생태지위면적의 차이에 대한 추가 연구가 필요하다.

IV. 결론

본 연구에서는 승촌보에 서식하고 있는 저서성 대형무척추동물의 안정동위원소비 분석을 통한 생태지위면적의 정량적 분석을 통해 생태지위면적이 하천 생태계의 지표로 이용 가능한지 판단하고자 하였다. 승촌보에 서식하고 있는 저서성 대형무척추동물의 생태지위면적은 6월과 8월 조사 모두 상류 지역과 비교하여 하류 지역에서 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 집중호우 이전 시기인 6월 조사와 비교하여 집중호우 이후 시기인 8월 조사에서 수질이 개선되어 8월 조사에서 넓은 생태지위면적을 나타냈다. 반면 수질 변화에도 불구하고 승촌보 상류와 하류에서 나타난 생태지위면적의 감소는 두 조사에서 모두 일치하는 경향을 나타냈다.

또한, 저서성 대형무척추동물의 주요 지수로 사용되는 종다양성지수, BMI 값과 생태지위면적값을 비교한 결과, 종다양성지수와 평균 BMI의 경우는 보의 유무에 따른 일정한 경향이 나타나지 않아 일시적 조사 시 채집되는 개체들의 종조성 정보에 의존하는 지수들의 경우 조사 시기 및 방법 등에 따른 한계점이 존재하는 것으로 판단된다. 따라서 안정동위원소비를 이용한 생태지위면적 값으로 먹이의 다양성, 선택성, 종의 생태적 지위, 경쟁 수준 등을 정량적으로 평가하여 기존의 지수를 이용한 평가방법을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원 대하천 구간 수생태계 특성조사 연구사업의 연구비 지원 (과제번호 NIER-SP2017-359)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bolnick DI, Svanback R, Fordyce JA, Yang LH, Davis JM, Hulsey CD, Forister ML. 2003. The Ecology of Individuals: Incidence and Implications of Individual Specialization. *American Naturalist*. 161: 1-28.
- Choi JK, Lee HG. 2012. Introduction of Aquatic Ecosystem Assessment by Benthic Macroinvertebrates. *Water and Future*. 45(12): 29-35. [Korean Literature]
- Cairns JJ, Pratt JR. 1993. A History of Biological Monitoring Using Benthic Macroinvertebrates. *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. 10-27.
- Craig AL, John PQ, Caroline MP, Jacob EA. 2007. Niche Width Collapse in a Resilient Top Predator Following Ecosystem Fragmentation. *Ecology Letters*. 10: 937-944.
- Doi H, Chang KH, Ando T, Imai H, Nakano SI, Kajimoto A, Katano I. 2008. Drifting Plankton from a Reservoir Subsidize Downstream Food Webs and Alter Community Structure. *Community Ecology*. 156: 363-371. [Korean Literature]
- Everall NC, Johnson MF, Wood P, Farmer A, Wilby RL, Measham N. 2017. Comparability of Macroinvertebrate Biomonitoring Indices of River Health Derived from Semi-quantitative and Quantitative Methodologies. *Ecological Indicators*. 78: 437-448.
- Jackson AL, Richard I, Andrew CP, Stuart B.

2011. Comparing Isotopic Niche Widths Among and within Communities: SIBER ? Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*. 80(3): 595-602.
- James AM, Sarah ML, Timothy BJ, Thomas JS, John DF, Brian CW, Maureen GW, Jana RL, Michael JY, Aaron TF. 2018. Diet and Trophic Niche Space and Overlap of Lake Ontario Salmonid Species Using Stable Isotopes and Stomach Contents. *Journal of Great Lakes Research*. *Journal of Great Lakes Research*. In press (<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.08.009>)
- Jeon SK, Lee DJ. 2014. A Health Assessment of Freshwater Ecosystem by Benthic Macroinvertebrate in Mudueng-san National Park. *Journal of National Park Research*. 5(4): 187-195. [Korean Literature]
- Kim MS, Hwang JY, Kwon OS, Lee WS. 2013. Analytical Methodology of Stable Isotopes Ratios: Sample Pretreatment, Analysis and Application. *Korean Journal of Ecology and Environment*. 46(4): 471-487. [Korean Literature]
- Kong DS, Park YG, Jeon YR. 2018. Revision of Ecological Score of Benthic Macroinvertebrates Community in Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 34(3): 251-269. [Korean Literature]
- Margalef R. 1958. Information Theory in Ecology. *Gen. Syst.* 3: 36-71.
- Metcalf-Smith JL. 1994. Biological Water-quality Assessment of Rivers: Use of Macroinvertebrate Communities. *The rivers handbook: hydrological and ecological principles*. 8: 17-43.
- Ministry of Environment. 2013. Nationwide Aquatic Ecological Monitoring Program (VI). Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research.
- Ministry of Environment. 2015. Survey and Evaluation Method for River and Stream Ecosystem Health Assessment. p. 117
- Newsome SD, Martinez del RC, Bearhop S, Phillips DL. 2007. A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 5: 429-436.
- Pielou EC. 1966. The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections. *Journal of Theoretical Biology*. 13: 131-144.
- Vander Zander JM, Rasmussen JB. 2001. Variation in $\Delta^{15}\text{N}$ and $\Delta^{13}\text{C}$ Trophic Fractionation: Implication for Aquatic Food Web Studies. *Limnology and Oceanography*. 46: 2061-2066.
- Vander Zander JM, Fetzer WW. 2007. Global Patterns of Aquatic Food Chain Length. *OIKOS*. 116: 1378-1388.
- Won DH, Jun YC, Kwon SJ, Hwang SJ, Ahn KG, Lee JK. 2006. Development of Konan Saprobic Index Using Benthic Macroinvertebrates and Its Application to Biological Stream Environment Assessment. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 22(5): 768-783. [Korean Literature]