

염주알다슬기(*Koreoleptoxis nodifila* (Martens, 1886)) 서식지에 대한 저서성 대형무척추동물 종 다양성 및 섭식기능군에 관한 연구 - 동강유역 생태·경관보전 지역을 중심으로 -

권순직* · 한승필* · 황인철* · 김홍근** · 박영준*** · 전영철****†

*(주)에일, **고려대학교 4단계 BK21 환경생태공학교육연구단

국립생태원, *(주)생태자원연구소

Study on the species diversity and functional feeding groups of benthic macroinvertebrates in the habitat of *Koreoleptoxis nodifila* (Martens, 1886) - Focused on the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin -

Soon Jik Kwon* · Seung Pil Han* · In Chul Hwang* · Hong Geun Kim** · Youngjun Park*** · Yungchul Jun****†

*Corporation Aeil, Bucheon 14676, Republic of Korea

**BK21 FOUR R&E Center for Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

***National Institute of Ecology, Seoecheon 33657, Republic of Korea

****Institute of Ecological Resources Research, Seoul 02783, Republic of Korea

(Received : 14 July 2025 Revised : 27 August 2025, Accepted : 27 August 2025)

요약

동강유역 생태경관보전지역에 서식하는 염주알다슬기(*K. nodifila*)의 서식지와 생태학적 특성을 알아보기 위하여 염주알다슬기 서식지 6지점과 비서식지 3지점에 대하여 2023년 2회에 걸쳐 저서성 대형무척추동물에 대한 조사를 수행하였다. 동강유역 생태경관보전지역 전체에서 총 89종이 조사되었고, 염주알다슬기 서식지에서는 69종, 비서식지에서는 66종의 저서성 대형무척추동물이 확인되었다. 염주알다슬기 서식지에서 저서성 대형무척추동물 평균 출현종수는 $25.3(\pm 5.3)$ 종이었으며 비서식지에서는 평균 $29.0(\pm 4.5)$ 종이었다. 염주알다슬기는 주로 본류 구간에 서식하는데, 서식지에서의 평균 LCBD(local contributions to beta diversity)는 $0.099(\pm 0.016)$ 이었고, 비서식지에서의 평균 LCBD 값은 $0.136(\pm 0.025)$ 으로 비교적 높게 나타나 저서성 대형무척추동물 종 조성에 다소 차이가 있음을 의미한다. 염주알다슬기가 주로 서식하는 본류 구간보다 지류 구간에서 LCBD 값이 상대적으로 높았으며, 날도래목에 속하는 종들의 염주알다슬기의 서식지와 비서식지 간에 서식하는 종조성에 다소 차이가 있었다. 생태적 지위 폭(ecological niche breadth)이 좁은 종은 대체로 제한된 환경 조건에 서식하고, 특정 지역에서 개체밀도가 높은 보통연새우(*Gammarus sobaegensis*)는 전체 SCBD(species contributions to beta diversity)에 영향을 주는 것으로 나타났다. 염주알다슬기는 그들의 서식지 특성에 따라 중간 경쟁이나 다른 생물과의 상호작용을 통해 β -다양성에 기여하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 염주알다슬기가 서식하는 지역의 하천 차수는 7이었고, 동강으로 유입하는 지류의 하천 차수는 2와 5이었다. 일반적으로 하천규모는 염주알다슬기의 서식에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나로 판단된다. 염주알다슬기 서식지에서 걸러먹는 무리(collector-filterers)의 더 많은 출현 종수를 보였고, 썰어먹는 무리(shredders)의 종수와 개체수는 적었다.

핵심용어 : 염주알다슬기, LCBD(각 지점이 전체 β -다양성에 미치는 영향), SCBD(각 종이 전체 β -다양성에 미치는 영향), 종 다양성, 섭식기능군

†To whom correspondence should be addressed.

Institute of Ecological Resources Research

E-mail : eco072@empal.com

• Soon Jik Kwon Corporation Aeil/ Research Director, Ph.D (triopsidae@naver.com)

• Seung Pil Han Corporation Aeil/ Research Scientist Ph.D(E-mail : hsp9085@naver.com)

• In Chul Hwang Corporation Aeil/ Research Scientist, Ph. D (inchurs@naver.com)

• Hong Geun KIM BK21 FOUR R&E Center for Environmental Science and Ecological Engineering/ Research Scientist, Ph. D (: hgkimkr@korea.ac.kr)

• Youngjun Park National Institute of Ecology/ Research Scientist Ph.D(aquatic@nie.re.kr)

• Yung Chul Jun Institute of Ecological Resources Research / Senior Researcher, Ph.D (eco072@empal.com)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

To investigate the habitat and ecological characteristics of *Koreoleptoxis nodifila* inhabiting in the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin, surveys of benthic macroinvertebrates were conducted twice in 2023 at 6 sites where *K. nodifila* was present and 3 sites where it was absent. A total of 89 species were recorded throughout the conservation area, with 69 species found in *K. nodifila* habitats and 66 species in non-habitat areas. The average number of species at the sites where *K. nodifila* was present was $25.3 (\pm 5.3)$, while the average at the control sites without the species was $29.0 (\pm 4.5)$. *K. nodifila* primarily inhabits the main stream sections. The average local contributions to beta diversity (LCBD) of habitat sites was $0.099 (\pm 0.016)$, while the LCBD value of non-habitat sites was relatively high at $0.136 (\pm 0.025)$, indicating some differences in the species composition of benthic macroinvertebrates. In particular, tributaries exhibited a greater distinction in species composition between *K. nodifila* habitats and non-habitats, notably for species belonging to the order Trichoptera. Species with narrow ecological niches are likely to occur under restricted environmental conditions. For instance, *Gammarus sobaegensis*, a type of Order Amphipoda, maintained high population densities in specific locations and appeared to significantly influence overall species contributions to beta diversity (SCBD). *K. nodifila* seems to contribute to β -diversity (beta diversity) through interspecific competition and interactions with other organisms depending on habitat characteristics. The stream order of *K. nodifila* habitats was 7, while the tributaries flowing into the Donggang River had stream orders of 2 and 5, indicating that stream size is likely a major factor on the species distribution. The habitat of *K. nodifila* showed a higher species richness of collector-filterers, whereas both species richness and abundance of shredders were reduced. It is considered that biological communities inhabiting the same region should be included as considerations in the establishment of conservation plans for the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin.

Key words : *Koreoleptoxis nodifila*, local contributions to beta diversity (LCBD), species contributions to beta diversity (SCBD), species diversity, FFGs (functional feeding groups)

1. 서론

염주알다슬기(*Koreoleptoxis nodifila*)는 연체동물문(Mollusca) 복족강(Gastropoda)에 속하는 종으로 한강 수계 중 동강과 서강, 평창강, 임진강, 한탄강 등에 분포하는 한국 고유종(NIBR, 2025; Lee and Ko, 2017; Lee et al., 2001)이다. 이들은 서식범위가 제한적이며 생태적 특성이 독특한 종으로 알려져 있다. 본 종은 서식처 교란에 의한 개체수 감소로 인하여 2012년부터 멸종위기야생생물 II급으로 지정하여 보호하고 있다(NBC, 2025; Kim et al., 2022). Kim et al. (2022)는 서식지 적합도 지수(Habitat Suitability Index, HSI)를 이용하여 염주알다슬기의 적정 수심(optimal depth)이 0.53~17.17 cm 범위에 있으며, 특히 수심 10 cm 이하의 얕은 구간에서 출현 빈도가 가장 높음을 보고하였다. 또한, 본 종은 큰돌(boulder)을 중심으로 한 조립질 하상(substrate)으로 이루어진 여울(riffle) 구간에서 주로 서식하는 것으로 보고하였다. 동강 유역 생태경관보전지역은 강원특별자치도 영월군, 평창군, 정선군에 걸쳐 있고, 자연경관이 우수하며 다양한 생물이 서식하고, 염주알다슬기와 같은 멸종위기야생생물이 다수 서식하여 생태적 가치가 높다. 이에 환경부는 2002년 8월 9일 해당 지역을 생태경관보전지역으로 지정하였고, 이후 추가 확대 지정하여 현재 80.426 km²의 면적을 관리하고 있다(NBC, 2025).

공간 변화에 따라서 생물종의 다양성이 어떠한 방식으로 달라지는지에 대한 연구는 생태학의 관심 분야이다. 공간에 따른 다양성의 유형은 일반적으로 Whittaker(1960, 1972)가 제시한 α -다양성(alpha diversity, α -diversity), β -다양성(beta diversity, β -diversity), γ -다양성(gamma diversity, γ -diversity)으로 구분된다. α -다양성은 제한적이거나 좁은

공간의 다양성(local diversity)으로 종수나 종 풍부도, 다양성 지수 등으로 표현할 수 있다. γ -다양성은 넓은 생물 공간 전체의 종 다양성을 의미하며, α -다양성과 같은 방법으로 계산할 수 있다. β -다양성은 동물지리구, 강 유역 등과 같이 특징적으로 구분된 넓은 공간(region of interest)에 속한 지점 간의 종 구성이나 다양성의 차이를 의미한다(Whittaker, 1960; 1972). Whittaker(1960)가 제시한 β -다양성 지수 계산은 γ -다양성 값을 α -다양성의 평균값으로 나누는 것이었다($\beta = \gamma/\alpha$). 그러나 β -다양성은 특정 지역에 대한 정량적 제시가 어렵기 때문에 γ -다양성이나 α -다양성 값에 의존하지 않는 계산 방법이 제시되었다(Legendre and Cáceres, 2013; Heino and Grönroos, 2017).

군집의 지점-종 테이블을 이용한 β -다양성 분석법은 출현-비출현(presence-absence) 정보뿐만 아니라 밀도나 생체량의 기초가 되는 정보를 이용하여 각 지점이 전체 β -다양성에 미치는 영향(Local Contribution to Beta Diversity, LCBD)이나 각 종이 전체 β -다양성에 미치는 영향(Species Contributions to Beta Diversity, SCBD)의 계산도 가능하다(Legendre and Cáceres, 2013). β -다양성에 대한 지역적 기여(LCBD)는 특정 지역이나 서식지 내에서 종 조성의 차이를 설명하는 중요한 지표로서 서식지 간의 β -다양성을 이해하는 데 중요하다. 예를 들어, 하천규모 또는 수질, 하상재료의 차이에 따라 저서성 대형무척추동물의 종조성이나 군집이 달라진다. 따라서, 염주알다슬기의 지역적 기여를 분석함으로써 다양한 서식지에서 β -다양성을 설명하는 중요한 자료를 제공할 수 있다(Heino and Grönroos, 2017). SCBD는 점유 정도(degree of occupancy), 풍부도(abundance), 생태적 지위의 위치와 폭(ecological niche position and breadth) 및 종 특성(species traits)과 같은 일반적인 종의 특성과 연관성이 있다. 이러한 종 특성은 어느

정도 상호 상관관계가 있다(Tales et al. 2004; Siqueira et al. 2009; Heino and Grönroos 2017). 즉, 생태적 지위 폭이 넓은 일반 종(generalist species)은 다양한 서식지에 광범위하게 분포하여 SCBD에 대한 기여도가 상대적으로 낮게 나타나는 경향이 있다. 이와는 반대로 폭이 좁은 종은 SCBD에 대한 기여도가 상대적으로 높고, 제한된 환경조건에서 출현할 수 있기 때문이다(Slatyer et al., 2013). 또한, 섭식 형태 또는 개체 크기, 분산 능력과 같은 종의 생물학적 특성(biological traits)은 β -다양성에 대한 종의 기여도에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 종의 근본적인 생물학적 특성은 종의 점유율 및 풍부도(occupancy and abundance rate)에 영향을 미치며, 해당 종이 β -다양성에 더욱 크게 기여하게 된다(Verberk et al., 2010; Heino and Grönroos 2017).

하천 시스템의 물리적 변수들은 발원지에서부터 하구에 이르기까지 연속적인 구배(gradient)를 이룬다. 하천구배는 상류 지역이 고도가 높고, 하류 지역으로 내려갈수록 낮아진다. 이러한 구배는 유기물의 유입이나 수송, 이용, 저장 등에서 일정한 패턴을 만들어내며, 그 결과 하천 내 생물 군집은 일련의 반응을 보인다. 하천에 서식하는 생물 군집의 구조적 및 기능적 특성은 물리적인 서식환경 조건에 따라 결정되며, 수로의 역동적인 물리적 조건과 상호작용하며 변화한다. 이를 ‘하천 연속성 개념(River Continuum Concept)’이라 하고, 이 개념은 하천구배에 따라 저서성 대형무척추동물의 섭식기능군(functional feeding groups, FFGs)의 구조, 기능 및 안정성에 영향을 준다(Vanote et al., 1980).

본 연구는 동강유역 생태경관보전지역 내에서 확인된 저서성 대형무척추동물의 종 및 개체수를 기반으로 α -다양성의 지표인 출현 종수와 다양도 지수를 사용하고, β -다양성 지표인 LCBD와 SCBD를 적용하여 염주알다슬기 서식지의 생태적

특성을 규명하고자 하였다. 특히, 동강유역 생태경관보전 지역을 중심으로 서식지별 저서성 대형무척추동물의 종 다양성을 분석하였으며, 염주알다슬기 서식지와 비서식지로 구분하여 섭식기능군별 종구성과 개체수 변화를 비교하였다. 이를 통해 염주알다슬기의 생태적 역할을 밝히고, β -다양성의 중요한 기여 요소로서 이들의 분포 및 생태적 상호작용을 분석하고자 하였다. 본 연구 결과는 염주알다슬기 서식인 동강유역의 생태계 건강성 확보와 보전 전략을 수립하는데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 자료 수집 및 현장조사

동강유역 생태경관보전지역 일대에서 염주알다슬기가 서식하는 6개 지점과 서식하지 않는 지류 3개 지점을 선정하였다(Table 1, Fig. 1). 저서성 대형무척추동물의 조사는 1차로 2023년 4월 04~06일과 27~29일에 조사하였고, 2차로 10월 14~18일에 수행하였다. 각 조사 지점의 여울(riffle) 구간에서 계류형 정량채집망인 Surber sampler(30 × 30 cm, mesh size=0.5 mm)를 이용하여 지점당 3회씩 채집하였다. 또한, 종 다양성을 파악하기 위해 뜰채(Scoop net, mesh size=0.5 mm)를 이용하여 채집하였다. 채집된 시료는 현장에서 고정된 뒤 실험실에서 골라내기(sorting) 작업 후 실험현미경(Olympus, SZX-TR30)을 이용하여 동정하였다. 동정이 완료된 종 목록은 환경부 국립생물자원관에서 발표한 “2024 국가생물종목록(2025. 2. 4)” 기준에 따라 정리하였다(NIBR, 2025). 종(species) 수준으로 동정이 어려운 분류군은 과(Family)나 속(Genus) 수준으로 정리하였다. 한편, 하천 차수(stream order)는 수치지도의 고도자료(Digital Elevation

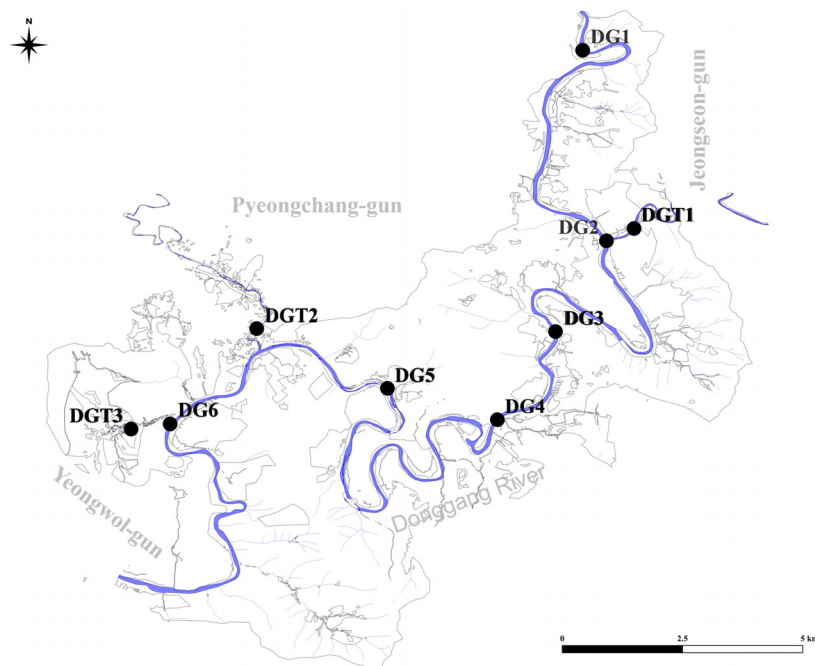


Fig. 1. The geographic location of survey sites in the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin.

Model)를 바탕으로 구축한 하천망을 이용하여 Strahler (1952)에 근거하여 기록하였으며, 하폭과 유폭의 거리는 현장에서 거리측정기(FineCaddie, UPL 300)를 이용하여 측정하였다.

2.2. α -다양성 분석

α -다양성은 하나의 서식지나 조사구 내에 존재하는 생물 종의 다양성을 의미하며 제한적이거나 좁은 공간의 다양성(local diversity)으로서 종수나 종 풍부도, 다양도 지수 등으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 동강유역 생태경관보전지역의 α -다양성을 분석하기 위해 각 조사 지점에서 정량과 정성 조사로 확인된 종수와 생물 군집의 현존량(abundance) 데이터를 사용하여 다양도 지수(Shannon's diversity index, H')를 산출하였다. 현존량 기반의 H' 값은 출현 종수뿐만 아니라 종별 개체수를 고려한 다양성 비교를 가능하게 한다. 다양도 지수는 총 출현개체수를 N , i 종의 개체수를 N_i , 총 출현종수를 S 라 할 때 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2 p_i \quad p_i = \frac{N_i}{N}$$

Shannon-Weaver (1949)

2.3 β -다양성 분석

β -다양성은 공간적으로 지점 간의 종 구성 차이로 생태계의 구조적 차이, 교란 영향, 보전 가치를 탐색할 수 있는 핵심 지표이다. 본 연구에서는 각 지점에서 수집한 저서성 대형무척추동물 종 조성 데이터를 기반으로 β -diversity를 분석하고, 각 지점이 전체 다양성에 기여하는 정도(LCBD)를 평가하였다. 또한, 각 종이 전체 β -다양성에 미치는 영향(SCBD)을 산출하였다(Legendre and Cáceres, 2013; Heino and Grönroos 2017; Xia et al., 2022). 이 척도는 결과적으로

전체 β -다양성에 대한 해당 지역 또는 종의 기여도로 나눌 수 있다(Legendre and Cáceres, 2013).

염주알다슬기 서식지(habitat sites)와 비서식지(non-habitat sites) 간의 저서성 대형무척추동물 집단의 차이를 비교하기 위해 Welch(1947)의 t -test를 수행하였다. 이 검정은 표본 크기의 불균형과 분산의 이질성으로 인해 선택되었다. LCBD 및 SCBD의 산출을 위하여 R 프로그램(version 4.3.2.)의 'adespatial' 패키지 내 LCBD.comp와 beta.div 함수를 통해 산출하였다(Dray et al., 2024; R Core Team, 2024). 산출된 LCBD 및 SCBD 결과는 QGIS 소프트웨어(version 3.28.15-Firenze)를 이용하여 지도화하였다.

2.4 섭식기능군(Functional feeding groups, FFGs) 분석

동강 유역에서 염주알다슬기 서식지 6개 지점과 비서식지 3개 지점에서 확인된 저서성 대형무척추동물의 기능적 다양성(Functional Diversity, FD)을 통해 섭식기능군의 기능군별 종수와 개체수 및 구성 비율을 분석하였다(Fig. 2). 섭식기능군은 저서성 대형무척추동물이 먹이를 획득하는 방식(behavioral mechanism) 및 먹이 자원의 종류와 크기를 기준으로 분류한 기능적 그룹으로 하천생태계의 에너지 흐름과 기능적 구조를 파악하는데 유용한 지표이다(Ro and Chun, 2004; Merritt et al., 2008).

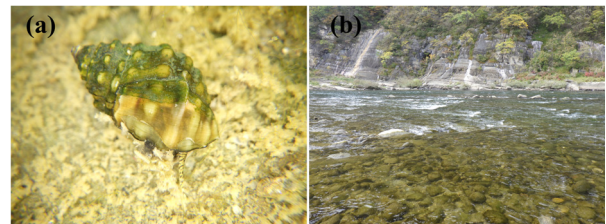


Fig. 2. Selected photographs of (a) *Koreoleptoxis nodifila* and (b) habitat observed in field survey

Table 1. Survey site location information in the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin

ID	Latitude	Longitude	Locality	Stream name	Stream order	Stream width (m)	Water width (m)
DG1	37.358	128.621	Jeongseon-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do	Joyanggang	7	164	50
DG2	37.313	128.626	Jeongseon-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do	Donggang	7	166	76
DG3	37.292	128.614	Sindong-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do	Donggang	7	162	80
DG4	37.271	128.601	Sindong-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do	Donggang	7	175	61
DG5	37.278	128.575	Mitan-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do	Donggang	7	135	119
DG6	37.270	128.524	Yeongwol-eup, Yeongwol-gun, Gangwon-do	Donggang	7	152	83
DGT1	37.316	128.633	Jeongseon-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do	Jijangcheon	5	62	30
DGT2	37.292	128.544	Mitan-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do	Gihwacheon	5	60	21
DGT3	37.269	128.515	Yeongwol-eup, Yeongwol-gun, Gangwon-do	-	2	7	6

3. 결과 및 고찰

3.1 염주알다슬기 서식지와 비서식지의 α -다양성(alpha diversity, α -diversity)

동강유역 생태경관보전지역에서 확인된 저서성 대형무척추동물은 총 89종이었고, 염주알다슬기 서식지와 비서식지에서 각각 69종과 66종이 관찰되었다(Fig. 3). α -다양성 중 출현 종수와 다양도 지수는 가장 직관적으로 비교할 수 있는 지표

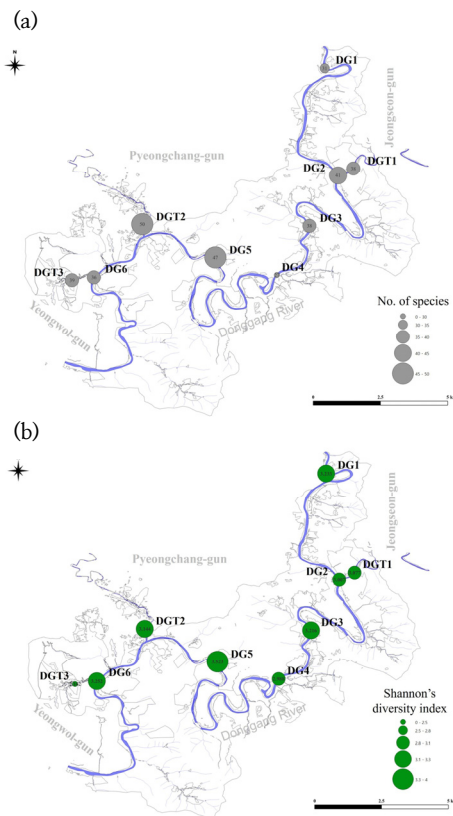


Fig. 3. Number of species (a), Shannon diversity index (H') (b) at each survey site in the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin.

중 하나이다. 염주알다슬기 서식지의 지점 평균 출현종수는 $25.3(\pm 5.3)$ 종이었으며, 비서식지에서는 $29.0(\pm 4.5)$ 종이었다. 평균 출현종수는 동강 본류보다 지류에서 다소 높았다(Table 2). 이 중에 정량 조사만으로 확인된 각 지점의 자료를 이용하여 다양도 지수를 산출한 결과, 염주알다슬기 서식지에서는 2.660 ~ 3.707의 범위로서 평균 $3.203(\pm 0.281)$ 으로 산출되었고, 비서식지에서는 1.799 ~ 3.403의 범위로 평균 $2.791(\pm 0.571)$ 로 산출되어 비서식지에서 변화폭이 크게 산출되었다(Table 2, Fig. 3). 특히, DGT3 지점은 보통옆새우(*Gammarus sobaegensis*)와 같은 특정 종에 의한 우점율이 높아 다양도 지수가 낮았다. 동강유역 생태경관보전지역의 저서성 대형무척추동물 출현 종수는 염주알다슬기 서식지와 비서식지 간의 두 집단 간 평균 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($p > 0.05$). 이와 같은 결과는 염주알다슬기의 서식 여부보다는 조사 지점별 하폭, 유폭, 하상재료, 수변식생 등 환경 요인 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

3.2 LCBD를 이용한 저서성 대형무척추동물 서식 특성 분석

각 지점의 β -다양성 기여도(LCBD)는 특정 지역의 생태학적 고유성을 나타내어 지역 내에 서식하는 생물군집에 대한 생태학적 특성을 파악하는데 유용한 지표이다(Legendre and Cáceres, 2013). 이는 단순한 β -다양성 측정을 넘어 개별 조사 지점의 생물학적 가치를 평가하고, 지점 간에 생물 군집의 특성을 파악하는 유용한 자료이다(Heino and Grönroos, 2017). 동강유역 각 조사 지점의 LCBD 값은 0.080에서 0.156의 범위에 있었으며, 3개 지점(DG5, DGT2, DGT3)이 평균보다 높았다(Table 2). 염주알다슬기 서식지의 평균 LCBD는 $0.099(\pm 0.016)$ 로서 비서식지의 $0.136(\pm 0.025)$ 과 비교하여 낮게 산출되었으나, 저서성 대형무척추동물 종 구성에서 큰 차이는 없는 것으로 판단된다(Fig. 4).

특정 지역의 생태학적 고유성을 나타내는 LCBD는 단일 지역의 가치를 개별적으로 평가하는 수단을 제공할 수 있으나, 간혹 종이 적은 지역에서 높은 LCBD 값을 갖는 지역이 나타나는 경우도 있다(Legendre and Cáceres, 2013). DGT2와 DGT3의 두 조사 지점은 LCBD 값이 각각 0.144와 0.156으로 다른 지역과 비교하여 높았는데, 이는 해당 지점들의 하천

Table 2. Number of species, Shannon's diversity index (H'), and local contributions to beta diversity (LCBD) at each survey site.

ID	No. of species	H'		LCBD (local contributions to beta diversity)		
		1st	2nd	Donggang River basin	Order Ephemeroptera	Order Trichoptera
DG1	31	3.438	3.027	0.104	0.151	0.117
DG2	41	3.222	2.793	0.106	0.107	0.117
DG3	38	3.199	3.233	0.096	0.096	0.063
DG4	27	3.316	2.660	0.082	0.076	0.099
DG5	47	3.707	3.339	0.124	0.134	0.052
DG6	36	3.367	3.136	0.080	0.086	0.056
DGT1	38	2.957	3.197	0.108	0.073	0.143
DGT2	50	3.403	2.885	0.144	0.103	0.208
DGT3	39	1.799	2.524	0.156	0.175	0.146

차수가 낮아 다른 지점보다 하천규모가 상대적으로 작고, 하천의 상류에 서식하는 종의 출현빈도가 높았다. 인위적 교란(anthropogenic disturbances)은 가장 흔한 분류군의 지역적 우세(regional prevalence)를 감소시키고, 하천에서 저서성 대형무척추동물 군집에서 덜 흔한 분류군의 우세를 증가시키기도 한다(Hawkins et al., 2015). DG6 지점의 LCBD 값은 0.080으로 가장 낮았는데, 이는 이 지역이 관광지로서 이용되어 수변을 중심으로 인위적 교란에 의한 미소서식처의 단편화가 주요 원인으로 판단된다.

각 지점의 β -다양성 기여도(LCBD)를 출현 종수가 풍부한 하루살이목과 날도래목으로 구분하여 산출하였다. 하루살이목에 대한 각 조사지점의 LCBD 값은 0.073에서 0.175의 범위로 나타났고, 3개 지점(DG1, DG5, DGT3)에서 평균보다 높았다(Table 2). 염주알다슬기가 주로 서식하는 본류 구간과 지류 구간으로 구분하면 유의미한 차이가 없었다($p > 0.05$). 날도래목에 대한 각 조사지점의 LCBD 값은 0.052에서 0.208의 범위였고, 5개 지점(DG1, DG2, DGT1, DGT2, DGT3)에서 평균보다 높았다. 염주알다슬기가 주로 서식하는 본류 구간보다 지류 구간에서 LCBD 값이 비교적 높았는데, 날도래목은 염주알다슬기의 서식지와 비서식지 간에 유의미한 차이가 있었다($p < 0.05$)(Fig. 5). 하천에서 곤충류의 LCBD 변화는 종수 또는 개체수에 의하여 좌우되는데, 일반적으로 하폭(stream width), 수폭(water width), 하상재료, 수질, 캐노피(canopy) 등 유역마다 다양하다(Heino and Grönroos, 2017). 본 연구에서 하루살이목과 날도래목에 대해 각각 LCBD를 산출한 결과, 하루살이목보다 날도래목에서 종 조성의 차이가 크게 나타났다. 동강유역 생태경관보전지역은 하천 주변에 개발 압력이 존재하는데, 생태경관보호지역의

확대나 염주알다슬기 개체군 보전에 있어서 동서하는 생물 군집과 하천규모도 고려해야 할 요인이다.

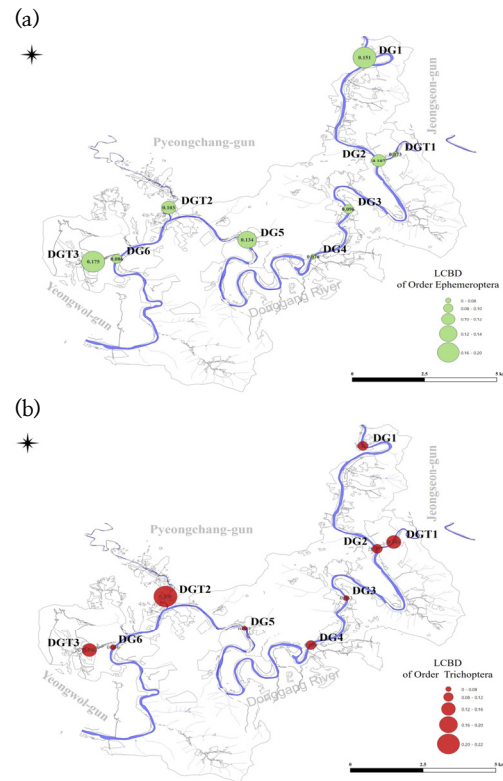


Fig. 5. Local contributions to beta diversity (LCBD) of Order Ephemeroptera (a) and Trichoptera (b) at each survey site in the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin.

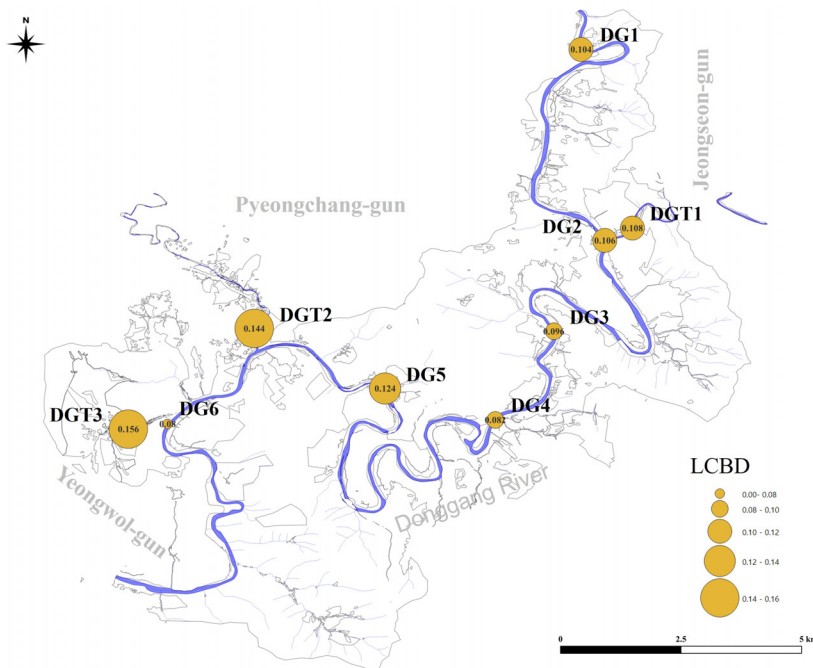


Fig. 4. Local contributions to beta diversity (LCBD) at each survey site in the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin.

3.3 SCBD를 이용한 저서성 대형무척추동물 서식 특성 분석

각 종이 전체 β -다양성에 미치는 영향(SCBD)을 알아보기 위하여 동강유역 생태경관보전지역 9개 지점에서 2회 조사를 통하여 총 18m²에서 확인된 69종 8,838개체를 이용하여 SCBD를 산출하였다. 그 결과 SCBD 값은 0.0002에서 0.2719 범위로 나타났으며, SCBD의 평균값(0.0145) 이상인 종은 14종(*G. sobaegensis*, *Stenopsyche marmorata*, *Ecdyonurus kibunensis*, *Hydropsyche kozhantschikovi*, *Cheumatopsyche brevilineata*, *Teloganopsis punctisetae*, *Epeorus pellucidus*, *Choroterpes (Euthraulus) altiocularis*, *Ephemerella kozhovi*, *Koreoleptoxis globus ovalis*, *E. levis*, *Baetiella tuberculata*, *Simulium* sp., *Nigrobaetis bacillus*)으로 이들이 차지하는 SCBD의 합계 점유율은 80.2%이었다(Fig. 6).

한편, 동강유역 생태경관보전지역 내에 염주알다슬기가 서식하는 지역과 서식하지 않는 지역으로 구분하여 SCBD를 산출하였다. 염주알다슬기 서식지에서 각 종이 전체 β -다양성에 미치는 영향(SCBD)을 알아보기 위하여 6개 지점에서 2회 조사를 통하여 총 12m²에서 확인된 54종 3,447개체를 이용하여 산출하였다. 그 결과 SCBD 값은 0.0009에서 0.1138 범위로 나타났으며, SCBD의 평균값(0.0185) 이상인 종은

14종(*T. punctisetae*, *C. (E.) altiocularis*, *C. brevilineata*, *E. kibunensis*, *E. kozhovi*, *H. kozhantschikovi*, *Simulium* sp., *E. levis*, *Baetiella tuberculata*, *Nigrobaetis bacillus*, *Macrostemum radiatum*, *K. g. ovalis*, *Elmidae* sp.)으로 이들이 차지하는 SCBD의 합계 점유율은 73.1%이었다(Fig. 6). 또한, 염주알다슬기 비서식지역에서 각 종이 전체 β -다양성에 미치는 영향(SCBD)을 알아보기 위하여 3개 지점에서 2회 조사를 통하여 총 6m²에서 확인된 51종 5,391개체를 이용하여 산출하였다. 그 결과 SCBD 값은 0.0001에서 0.4748 범위로 나타났으며, SCBD의 평균값(0.0196) 이상인 종은 6종(*G. sobaegensis*, *E. kibunensis*, *H. kozhantschikovi*, *E. pellucidus*, *S. marmorata*, *C. brevilineata*)으로 이들이 차지하는 SCBD의 합계 점유율은 79.7%이었다(Fig. 6).

염주알다슬기가 β -다양성에 대한 종의 기여도는 동강유역 생태경관보전지역 전체에서 0.0031이었고, 동강 본류 구간에서 0.0061로 산출되었다. 염주알다슬기는 서식지 특성에 따라 중간 경쟁이나 다른 생물과의 상호작용을 통해 β -다양성에 기여하는 것으로 판단된다. 산간 계류에 주로 서식하는 보통옆새우(*G. sobaegensis*)는 특정 지역(DGT3)에서 높은 개체밀도를 유지하였는데, 이는 전체적인 SCBD에

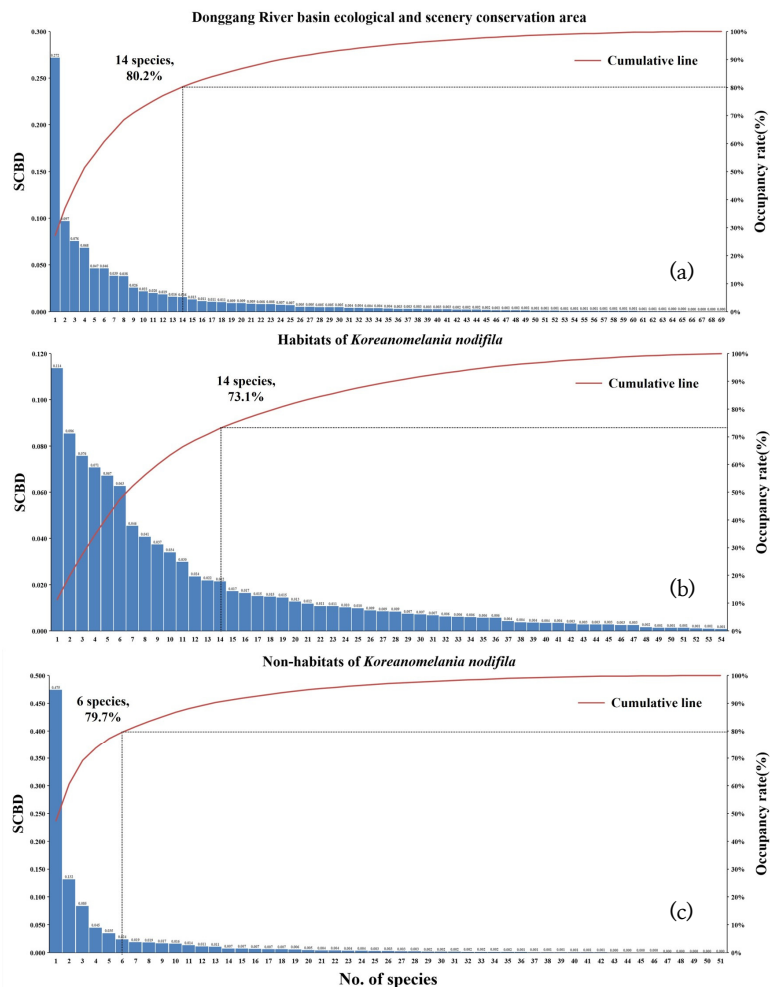


Fig. 6. Species contributions to beta diversity (SCBD) of the ecological and scenery conservation area of the Donggang river basin (a), habitats (b) and Non-habitats (c) of *K. nodifila*.

영향을 주는 것으로 판단된다. 이 종은 염주알다슬기 서식지에서는 관찰되지 않았다. 염주알다슬기가 서식하는 지역의 하천 차수는 7이었고, 동강으로 합류하는 지류의 하천 차수는 2(DGT3)와 5(DGT1, DGT2)이었다. 염주알다슬기가 최근 까지 관찰되고 있는 서식지인 서강과 조양강의 하천 차수는 7이었고, 평창강과 주천강의 하천 차수는 6이었다(Kim et al., 2022; Lee and Ko, 2017; Lee et al., 2001). 염주알다슬기는 하천 차수가 6~7 내외의 하천에 주로 분포하는 것으로 예상되는데, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

3.4 염주알다슬기 서식지와 비서식지의 섭식기능군

동강유역 생태경관보전지역 내에 서식하는 염주알다슬기 서식지와 비서식지로 구분하였을 때, 저서성 대형무척추동물 출현종수는 서식지와 비서식지에서 각각 68종과 66종으로 유사하였다. 그러나 섭식기능군 측면에서는 찢어먹는 무리(shredders)는 서식지에서 1종(1.5%), 비서식지에서 9종(13.6%) 이었고, 걸러먹는 무리(collector-filterers)는 서식지에서

13종(19.1%), 비서식지에서 7종(10.6%)이 조사되었다(Fig. 3). 찢어먹는 무리와 걸러먹는 무리는 서식지와 비서식지 간에 출현 종수에서 큰 차이를 보였으나, 그 외의 섭식기능군은 차이가 적었다. 한편, 서식지에서 찢어먹는 무리(Sh)는 정성 조사에서만 조사되었고, 정량조사에서는 조사되지 않았다. 비서식지에서 찢어먹는 무리(Sh)는 1,646개체(30.5%)가 조사되어 개체수가 풍부하였다. 그러나 찢어먹는 무리를 제외한 다른 섭식기능군의 개체수는 큰 차이가 없었다(Table 3, Fig. 7).

하천 차수에 따른 섭식기능군 구성을 살펴보면 걸러먹는 무리(CF)는 하류 지점으로 갈수록 증가하였고, 굵어먹는 무리(SC)는 유역에 고르게 분포하였으며, 잡아먹는 무리(PE)는 하천의 상류 유역에서 종수와 개체수가 많았다(Bae et al., 2003). 하천의 상류 지역에서는 찢어먹는 무리(Sh)가 높았고, 중류 지역에서는 굵어먹는 무리(SC)와 주워먹는 무리(CG)의 비중이 높았다(Park et al., 2010). 찢어먹는 무리(Sh)는 하천 차수가 증가하여 하천의 규모가 커지면 감소하는 경향을

Table 3. Species richness, abundance, and occupancy by functional feeding groups (FFGs) between *K. nodifila* habitats and non-habitats

FFGs	No. of species		No. of individual/m ²	
	Habitat	Non-Habitat	Habitat	Non-Habitat
Collector-Filterer (CF)	13(19.1%)	7(10.6%)	1,333(38.7%)	1,683(31.2%)
Collector-Gatherer (CG)	21(30.9%)	18(27.3%)	851(24.7%)	618(11.5%)
Predator-Engulfer (PE)	16(23.5%)	14(21.2%)	155(4.5%)	119(2.2%)
Scraper (Sc)	17(25.0%)	18(27.3%)	1,108(32.1%)	1,325(24.6%)
Shredder (Sh)	1(1.5%)	9(13.6%)	0(0.0%)	1,646(30.5%)
Total	68	66	3,447	5,391

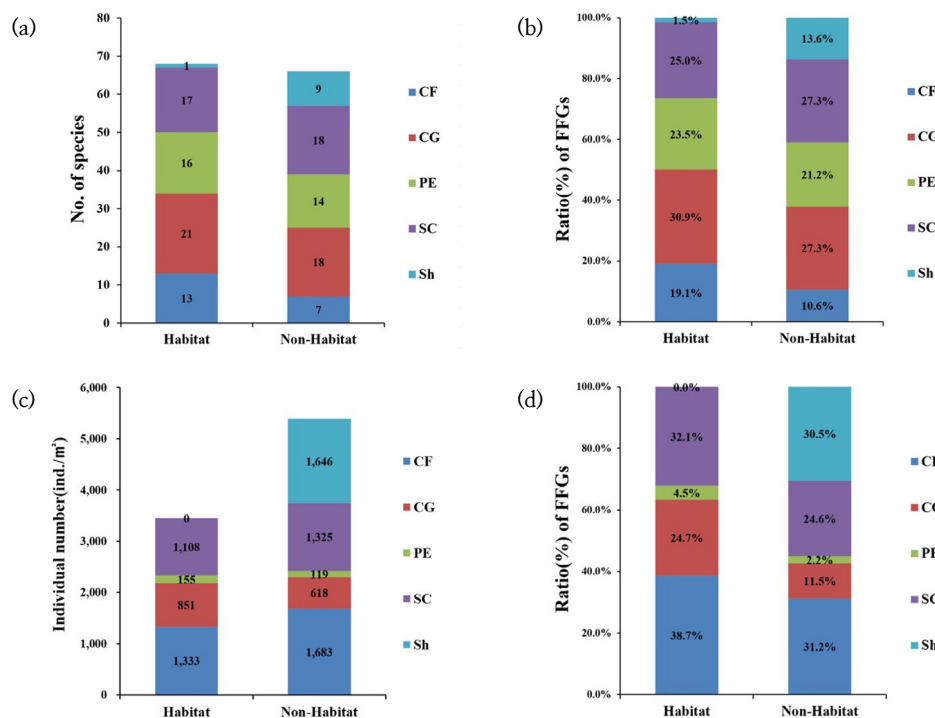


Fig. 7. Comparison of functional feeding group (FFG) composition between habitats and non-habitats of *K. nodifila*. (a) Number of FFGs species, (b) ratio of FFGs species number, (c) number of FFGs individuals (/m²) and (d) ratio of FFGs individuals (/m²).

보였고, 걸러먹는 무리(CF)는 하천의 규모가 커지면 증가하는 경향을 보였다(Hwang et al., 2022). 본 연구에서도 하천 차수가 높은 염주알다슬기 서식지에서는 썰어먹는 무리(Sh)의 종수와 개체수가 적었고, 걸러먹는 무리(CF)는 출현 종수가 다소 풍부하였다.

4. 결 론

동강유역 생태경관보전지역에서 확인된 저서성 대형무척추동물 출현 종수는 염주알다슬기 서식지와 비서식지 간의 차이가 크지 않았으며, 이러한 차이는 염주알다슬기의 서식 유무보다는 조사 지점 간의 서식환경 상태에 기인하는 것으로 판단된다. LCBD는 비서식지인 지류에서 비교적 높게 산출되었는데, 이는 분류에 위치한 염주알다슬기 서식지와 비교할 때 저서성 대형무척추동물의 종 구성에 차이가 있음을 시사한다. 특히, 날도래목은 염주알다슬기의 서식지와 비서식지 간의 종 조성 차이가 있었다. 하천규모는 염주알다슬기의 서식에 있어서 종간 경쟁이나 다른 생물들과의 상호작용을 통해 SCBD 값에 영향을 미치는 주요 인자이다. 염주알다슬기 서식지에서는 썰어먹는 무리(Sh)의 종수와 개체수가 적었고, 걸러먹는 무리(CF)는 출현 종수는 다소 풍부하였다. 본 연구는 동강유역 일대에 서식하는 염주알다슬기를 보호하고, 서식지 보전 측면에서 수생태계 건강성 확보를 위한 전략 수립에 중요한 기초자료가 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 국립생태원에서 수행한 “2025 특정지역(생태-경관보전지역, 특정도서 등) 정밀조사(NIE-C-2025-01)”에 의해 이루어진 자료를 포함한 것으로 이에 감사드립니다.

References

- Bae, Y.J., Won, D. H., Hoang, D. H., Jin, Y. H. and Hwang, J.M. (2003). Community Composition and Functional Feeding Groups of Aquatic Insects According to Stream Order from the Gapyeong Creek in Gyeonggi-do, *Korean J. Limnol.* 36(1): pp. 21–28.
- Dray, S., Bauman, D., Blanchet, G., Borcard, D., Clappe, S., Guénard, G., Jombart, T., Larocque, G., Legendre, P., Madi, N. and Wagner, H. H. (2024). *adespatial: Multivariate Multiscale Spatial Analysis*. R package version 0.3–28. <<https://CRAN.R-project.org/package=adespatial>>
- Hawkins, C. P., Mykrä, H., Oksanen, J. and Vander Laan, J.J. (2015). Environmental disturbance can increase beta diversity of stream macroinvertebrate assemblages. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 24: pp. 483–494. <<https://doi.org/10.1111/geb.12254>>
- Hwang, I. C., Kwon, S.J., Park, Y. J. and Park, J. Y. (2022). Ecological characteristics of benthic macroinvertebrates according to stream order and habitat – focused on the ecological landscape conservation area -. *Journal of Wetlands Research*. 24: pp. 185–195. <<https://doi.org/10.17663/JWR.2022.24.3.185>>
- Heino, J. and Grönroos, M. (2017). Exploring species and site contributions to beta diversity in stream insect assemblages. *Oecologia*. 183: pp. 151–160. <<https://doi.org/10.1007/s00442-016-3754-7>>
- Kim, J. Y., Kim, Y. J., Kim, A. R., Yoo, I. S., Kim, H. and Kong, D. S. (2022). Physical Habitat Characteristics of the Endangered Macroinvertebrate *Koreoleptoxis nodifila* (Martens, 1886) (Mollusca, Gastropoda) in South Korea. *KJEE*. 55(2): pp. 145–155. <<https://doi.org/10.11614/KSL.2022.55.2.145>>
- Lee, J. S. and Ko, J. H. (2017). The study of external morphological characters of the family Pleuroceridae in Korea. *Journal of the Environment*. 12(1): pp. 27–39
- Lee, J. S., Ko, J. H. and Kwon, O. K. (2001). Isozyme variations in two species of freshwater Pleurocerid snails in Korea: *Koreanomelania nodifila* and *Koreoleptoxis globus ovalis*. *The Korean Journal of Malacology*. 17(2): pp. 117–123.
- Legendre, P. and Cáceres, M. De. (2013). Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecological Letters*. 16: pp. 951–963. <<https://doi.org/10.1111/ele.12141>>
- Merritt, R. W., Cummins, K. W. and Berg, M. B. (2008). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America* (4th Edition). Kendall Hunt Pub. Co. USA. 1158 pp.
- National Biodiversity Center (NBC). (2025). List of Ecosystem Landscape Conservation Area. <<https://kbr.go.kr>>.
- National Institute of Biological Resources (NIBR). (2025). Biodiversity of the Korean Peninsula. <<https://species.nibr.go.kr>>.
- Park, Y. J., Lim, H. M., Kim, K. D., Cho, Y. H., Nam, S. H. and Kwon, O. S. (2010). Community analysis based on functional feeding group of benthic macroinvertebrate in Wangpi-cheon. *Korean J. Environ. ecol.* 24(5): pp. 556–565.
- R Core Team. (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Ro, T. H. and Chun, D. J. (2004). Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis. *Korean J. Limnol.* 37(2):

- pp. 137–148.
- Shannon, C. E. and Weaver, W. (1949). The Mathematical Theory of Communication. Urbana, IL: The University of Illinois Press. Urbana. pp. 1–117.
- Siqueira, T., Bini, L. M., Cianciaruso, M. V., Roque, F. O. and Trivinho-Strixino, S. (2009). The role of niche measures in explaining the abundance–distribution relationship in tropical lotic chironomids. *Hydrobiologia*. 636: pp. 163–172. <<https://doi.org/10.1007/s10750-009-9945-z>>
- Slatyer, R. A., Hirst, M., Sexton, J. P. (2013). Niche breadth predicts geographical range size: a general ecological pattern. *Ecol. Lett.* 16: pp. 1104–1114. <<https://doi.org/10.1111/ele.12140>>
- Strahler, A. N. (1952). Dynamic Basis of Geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*. 63(9): pp. 923–938. <[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)>
- Tales, E., Keith, P. and Oberdorff, T. (2004). Density–range size relationships in French riverine fishes. *Oecologia*. 138: pp. 360–370. <<https://doi.org/10.1007/s00442-003-1430-1>>
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R. and Cushing, C.E. (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 37: pp. 130–137.
- Verberk, W. C. E. P., van der Velde, G. and Esselink, H. (2010). Explaining abundance–occupancy relationships in specialists and generalists: a case study on aquatic macroinvertebrates in standing waters. *J. Anim. Ecol.* 79: pp. 589–601. <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2010.01660.x>>
- Welch, B. L. (1947). The generalization of ‘Student’s’ problem when several different population variances are involved. *Biometrika*. 34(1/2): pp. 28–35. <<https://doi.org/10.2307/2332510>>
- Whittaker, R. H. (1960). Vegetation of the Siskiyou mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*. 30: pp. 279–338. <<https://doi.org/10.2307/1943563>>
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*. 21: pp. 213–251. <<https://doi.org/10.2307/1218190>>
- Xia, Z., Heino, J., Yu, F., He, Y., Liu, F. and Wang, J. (2022). Spatial patterns of site and species contributions to β diversity in riverine fish assemblages. *Ecological Indicators*. 145: 109728. <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109728>>