

내린천 상류 유역 열목어(*Brachymystax lenok tsilingensis*) 서식지 자연성 평가

Evaluation on Watershed Natural Habitat Assessment for Conservation of *Brachymystax lenok tsinlingensis* in Naerin Upstream

김정은¹ · 이황구^{2*}

¹국립공원공단 국립공원연구원 연구원, ²상지대학교 생명과학과 연구교수

Jeong Eun Kim¹ and Hwang Goo Lee^{2*}

¹Researcher, Ecological Research Division, Korea National Park Research Institute, Korea National Park, Wonju-si 26441, Korea

²Research Professor, Department of Smart Life Science, College of Science & Engineering, Sangji University, Wonju-si 26339, Korea

Received 26 June 2023, revised 25 September 2023, accepted 25 September 2023, published online 30 September 2023

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate biodiversity and natural habitat environment of freshwater ecosystem. Our aim was therefore to produce a set of biodiversity and habitat indicators based on multi-parameters of water quality and biodiversity by analyzing the characteristics of the results by indicators. We selected four indicators a) anthropogenic disturbance, b) habitat diversity, c) biodiversity, d) ecosystem structure. The fishes cohabiting with *Brachymystax lenok tsinlingensis* were *Rhynchocypris kumgangensis* and *Zacco koreanus*. As a result of the anthropogenic disturbance evaluation, it was analyzed that vegetation embankment showed a more stable environment in the tributary than the main stream, and other disturbance was not confirmed. As a result of the habitat diversity evaluation, it was analyzed that habitat evaluation index showed a high score of 200 more on average, showing an optimal habitat condition. As a result of the biodiversity evaluation, it was analyzed as a clean habitat condition with a high proportion of sensitive species, abundant dissolved oxygen, and little pollutants. As a result of the ecosystem structure, the ecological health condition metrics and appearance of endangered species showed large score deviation, but it was analyzed that the stream ecosystem health was generally excellent. There was a slight correlation between the habitat environment and the results of the nature habitat evaluation according to the appearance of the *B. lenok tsinlingensis*.

KEYWORDS: Biodiversity, Freshwater ecosystem, Habitat assessment, Multimetric-indicators

요 약: 본 연구는 수생태계 생물다양성과 자연 서식지 환경을 유역 수준에서 평가하기 위해 수질과 수생태 분야를 중심으로 통합 지표를 개발하였으며, 지표별 결과 특성을 분석하여 적용성을 검토하였다. 자연성 평가체계는 인간 활동에 의한 교란, 서식지 다양성, 생물다양성, 생태계 구조의 4가지 평가분야와 7개 세부 평가지표로 구성하였다. 하천 생태계의 서식지 보전을 위해 평가 대상 생물군으로 어류를 활용하였으며, 멸종위기야생생물 II급 열목어와 최대 서식지인 계방천과 내린천을 평가대상으로 선정하였다. 조사 수역은 대부분 하천차수가 낮은 산간계류 형태로 열목어의 공서어종은 금강모치와 참갈겨니로 분석되었다.

*Corresponding author: morningdew@sangji.ac.kr, ORCID 0000-0001-7843-3795

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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.

자연성 평가 결과, 교란 현황 분야에서 분류보다 지류에서 제방 식생이 안정적인 환경을 보였으며, 외부 교란이 적은 것으로 분석되었다. 서식지 다양성 분야에서는 서식지 평가 지수가 평균 200 이상의 높은 점수를 나타내어 최적의 생물서식 환경을 보이는 것으로 분석되었다. 생물다양성 분야에서는 민감종의 비율이 높고, 용존산소가 많은 편이며 오염물질이 거의 없는 청정상태로 분석되었다. 생태계 구조 분야에서는 생태지표특성 메트릭과 멸종위기야생생물의 출현에 따른 점수 편차가 큰 특성을 보였으나, 대체로 하천생태계 건강성이 우수한 것으로 분석되었다. 열목어의 출현 유무에 따라 서식지 환경에 차이를 보이면서 자연성 평가 결과에 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 생태계 변화 관찰 목적에 따라 자연환경 변화를 신속하게 탐지하고 하천생태계 보전을 위한 평가체제로 활용하기 위해서는 다양한 유역을 대상으로 조사 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

핵심어: 생물다양성, 하천생태계, 서식지 평가, 다변수 메트릭

1. 서론

물관리 기본법의 시행으로 환경부에서는 개별적으로 관리되고 있는 수질과 수량 및 수생태를 통합하여 유역기반 통합물관리(IWRM, Integrated Water Resources Management) 정책을 수립하였다. 통합물관리는 물순환의 건전성 회복과 공공자원의 지속가능한 이용 등을 목표로 수자원, 물환경, 물이용 등 다양한 물 문제에 효과적으로 대응하고 있다. 이러한 정책 패러다임에 따라 유역 물순환 관리를 이행하기 위해서는 지속가능한 모니터링 체계를 갖춘 통합형 생물다양성 평가 지표가 필요하며, 물관리 현황과 상태, 정책적 요구사항을 포괄적으로 반영할 수 있는 유역 및 지역 경관 수준에서 분석 가능한 지표가 구성되어야 한다 (Noss 1990, KEI 2017). 하천생태계를 구성하는 주변 경관과 물리환경, 생물학적 환경의 상호작용을 고려하여 수생태계와 생물다양성을 통합 진단할 수 있는 다각적인 지표가 필요하다 (Grinstead Sam et al. 2022, Tracy et al. 2022). 종 다양성 현황, 수질오염 상태, 오염원 현황, 보전계획 등을 아울러 환경문제에 신속히 대응하기 위해서 유역 중심의 수생태계 통합연구가 이루어져야 할 것으로 보인다. 환경지표는 축적된 빅 데이터의 수집이 용이하고, 누구나 이해하기 쉽도록 선정되어야 하며, 환경 변화에 유동적으로 대응하기 위해 자료의 정확성과 높은 신뢰성이 요구된다. 또한, 현 환경 상태를 정의하고, 정책의 실효성을 구분함으로써 미래의 환경문제를 예측 가능해야 한다.

국내 하천 유역의 환경지표를 활용한 수생태계 통합 연구는 하천 및 지하수위, 강우 등 공공데이터를 활용한 강원도 태백시 낙동강 유역 지하수위 취약성 평가 (Yang et al. 2017), 수질평가지수와 통계분석을 이용

한 남한강 하류 유역 중점 관리 우심 지역 평가(Cho et al. 2021), GIS 기반 모델과 수생태계 건강성 자료 연계를 통한 유역 건전성 확보의 서식지 질 평가(Lee et al. 2021) 등이 있다. 국내에서는 공공데이터를 활용하여 다양한 환경지표를 제작하고, 환경 모델을 이용하여 물 관리 모니터링을 위한 연구를 수행하고 있으나 활용 측면에 대해서 환경지표 각각에 대한 연구가 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 유역관리 차원에서 수질과 수생태 부문을 중심으로 생물다양성과 서식지 자연성을 평가하기 위한 통합 지표를 모색하였다. 지표 각각의 특성을 분석하여 적용성 검토를 위해 열목어 (*Brachymystax lenok tsinlingensis*) 서식지인 내린천 상류 유역을 대상으로 자연환경을 평가하고, 향후 하천생태계의 서식지 환경 관리 방안을 마련하기 위한 기초자료를 제공하고 자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지

열목어 서식지를 조사 및 평가하기 위해 장마 시기를 고려하여 2회(1차: 2018년 7월 25 - 26일, 2차: 2018년 9월 15 - 16일) 조사를 실시하였다. 홍천군 명개리 일대를 중심으로 지류를 포함하는 계방천 11개, 내린천 7개의 조사지점을 선정하였다. 총 18개 조사지점 모두 강원도 행정구역에 속하며, 한강 대권역의 소양강 중권역, 내린천상류 표준유역에 속하고 있다. 물환경정보시스템에서 제공하는 집수구역 자료인 KRF (Korean Reach File) 면형자료를 중첩할 경우, 조사지점의 2개 주요 하천인 계방천과 내린천을 중심으로 2개의 소유역으로 구분된다 (Fig. 1).

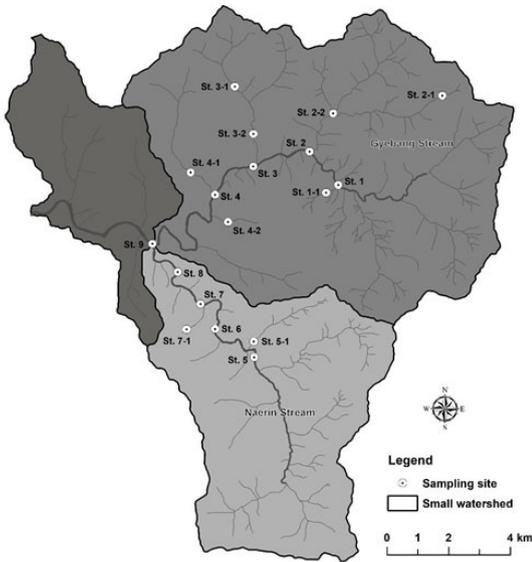


Fig. 1. The map showing the sampling sites in Gyebyang Stream and Naerin Stream.

2.2 어류 채집

홍천 명개리 일대 열목어 서식지의 공서어종을 파악하기 위해 어류상을 조사하였다. 하천조사는 각 조사지점의 상·하류 간 총 200 m 구간에 존재하는 미소서식지인 여울 (riffle), 소 (pool), 흐르는 곳 (run) 등을 대상으로 투망 (망목 7 mm × 7 mm) 12회와 족대 (망목 4 mm × 4 mm) 40분을 기준으로 어류를 채집하였다. 채집된 어류는 현장에서 동정하고, 계수하여 방류하였다. 어류의 동정은 Kim and Park (2002)과 Kim et al. (2005)을 참고하였으며, 분류체계는 Nelson (2006)을 참조하였다.

2.3 자연성 평가

하천 생태계는 강우 시 분수령을 따라 오염물질이 하천으로 유입되기 쉬운 특성을 보이기 때문에 (Bae et al. 2003), 유역 오염원 관리와 수생태계 유지·관리 목적에 초점을 맞추어 하천 수질에 영향을 미치는 토지이용 특성을 주된 분석 요인으로 고려하여 지표를 개발하였다 (Lee et al. 2012). 또한, 신속한 자연성 평가를 수행하기 위해 환경 변화에 민감하게 반응하고 국가 하천 생태계 평가 지표로 활용되는 담수어류를 평가 대상 생물군으로 선정하였다. 하천 자연성 평가를 위해 2개의 소유역으로 구분된 열목어 서식지인 계방천 유역과 내린천 유역을 대상으로 인간활동에 의한 교란과 서식지 다양

성, 생물다양성, 생태계 구조에 대한 평가지표를 선정하였다. 최종 평가는 각 분야의 지표별 점수를 합산하여 본 조사 수역을 대표하는 열목어 서식지 환경과 비교 평가하였다 (Table 1).

2.3.1 인간활동에 의한 교란 (Anthropogenic disturbance)

교란에 대한 평가지표로 수변 식생대 자연성 (Naturalness of the riparian area, Nr)과 농업 강도 (Agricultural intensity, Ai)를 선정하였다. 토지이용 분석에 필요한 자료는 환경부 환경공간정보서비스 (Environmental Geographic Information System, EGIS)의 중분류 체계 토지피복지도를 활용하였으며, 연구지역에 해당하는 도엽을 추출하여 조사지점 주변으로의 토지이용 분석을 실시하였다. 수변 식생대 자연성은 산림 지역의 자연 식생이 하천의 자정 효과를 야기하는 특성에 근거하여 하천 식생대로부터 자연 식생의 분포 면적을 산정하여 하천 주변의 자연환경을 대표하는 지표로 활용하였다 (Xiang 1996). 토지이용 유형에서 자연 서식지는 내륙습지와 자연나지, 자연초지, 침엽수림, 혼효림, 활엽수림의 자료를 활용하였으며, 수변 식생대는 토지이용 유형에서 내륙습지와 자연나지의 자료를 활용하여 분석을 실시하였다. 수변 식생대의 토지면적 분석 시, 하천 중심선을 기준으로 20 m 버퍼를 설정하여 분석을 수행하였다. 농업 강도는 농업 활동에 의한 비점오염원의 영향으로 유기물 및 영양염류의 유입을 통해 하천 수질을 악화시키는 특성을 대표하는 지표로 활용하였다 (UNEP 2001). 토지이용 유형에서 경작이 가능한 환경으로 논과 밭의 자료를 활용하였으며, 지점으로부터 200 m 버퍼를 설정하여 토지면적을 분석하였다.

2.3.2 서식지 다양성 (Habitat diversity)

서식지 다양성에 대한 평가지표로 정성적 서식지 평가 지수 (Qualitative habitat evaluation index, QHEI)를 활용하였다. 본 연구에서 적용한 서식지 평가 모델은 Kang and Hur (2012)와 Kim et al. (2010)을 참고하였다. 연구 대상 지역의 환경 특성을 고려하여 11개 메트릭을 적용한 최적 (182 - 220), 양호 (124 - 168), 보통 (66 - 110), 악화 (8 - 52) 상태로 구분하여 각 11개 점수를 합산하여 하천 서식지의 물리적 건강성을 평가하였다 Jung et al. (2001).

Table 1. Metrics employed for stream ecological health and diversity

Indicator	Formula	Score range	Score
Anthropogenic disturbance			
Naturalness of the riparian area (Nr)	$Nr=100 \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{a_r}$ n = the number of near natural land use types within the riparian area ai = the area of near natural land use type i ar = the total riparian area (20 m buffer along the watercourse)	75≤	4
		50≤ - <75	3
		25≤ - <50	2
		<25	1
Agricultural intensity (Ai)	$Ai=100 \frac{af_i}{af}$ afi = the area of agricultural land use type i af = the total land area (200 m buffer around the study site)	<25	4
		25≤ - <50	3
		50≤ - <75	2
		75≤	1
Habitat diversity			
Qualitative habitat evaluation index (QHEI)	M1 = Substrate/Instream cover M2 = Embeddedness M3 = Flow velocity/depth combination M4 = Bottom scouring and sediment deposition M5 = Channel flow status M6 = Channel alteration M7 = Frequency of riffles or bends M8 = Bank stability M9 = Bank vegetation protection M10 = Riparian vegetative zone width M11 = Dam construction impact	182≤ - <220	4
		124≤ - <168	3
		66≤ - <110	2
		8≤ - <52	1
Biodiversity			
Shannon index (H', diversity index)	$H' = - \sum_{i=1}^R p_i \ln p_i$ pi = the proportion of fish species belonging to the i-th type	3.0≤	4
		2.0≤ - <3.0	3
		1.0≤ - <2.0	2
		<1.0	1
Water quality (Wq)	Dissolved Oxygen concentration	7.5≤	4
		5.0≤ - <7.5	3
		2.0≤ - <5.0	2
		<2.0	1
Ecosystem structure			
Ecological health condition (Fish Assessment Index, FAI)	M1 = Total number of native fish species M2 = Number of riffle benthic species M3 = Number of sensitive species M4 = Proportion of individuals as tolerant species M5 = Proportion of individuals as omnivores M6 = Proportion of individuals as native insectivores M7 = Total number of individuals M8 = Proportion of individuals with disease, tumors, fin damage and other anomalies	80≤	5
		60≤ - <80	4
		40≤ - <60	3
		20≤ - <40	2
		0≤ - <20	1
Species diversity (Sd)	Rareness (20)	Endangered species	Each 5
	Excellent environment (45)	Migrating fish and River salmon, others	Each 5
	Disturbed by alien species (-20)	Bluegill, Bass	Each 5
Total			90

2.3.3 생물다양성 (Biodiversity)

생물다양성에 대한 평가지표로 ‘자연 친화적 하천 정비기법 개발’ 사업 (MCT 2004)에서 개발한 하천 생태평가를 한국적 현실에 적합하게 수정하여 적용한 Lee and Yang (2010)을 참고하였으며 (종 다양도 지수, 종 다양성 지표), 본 연구목적인 열목어 서식지 자연환

경 평가를 위해 일부 지표를 변형하여 적합하게 활용하였다. 종 다양도 지수와 수질 평가 지수를 활용하였으며, 종 다양도 지수를 분석하기 위해 Shannon diversity index (H')를 활용하였고, 수질 평가 지수는 환경부 하천 생활환경 기준에 의거하여 용존산소농도 (DO)를 이용하여 평가를 수행하였다.

2.3.4 생태계 구조 (Ecosystem structure)

생태계 구조에 대한 평가지표로 어류생물지수 (Fish Assessment Index, FAI)와 종 다양성 지표를 활용하였다. 어류생물지수는 국가 생물측정망 지침에 의거하여 건강성 평가 매트릭의 합산을 통해 5개의 등급으로 구별하여 활용하였다 (NIER 2016). 종 다양성 지표는 어류생물군집의 특성에 따라 희귀성 (Rareness), 환경의 우수성 (Excellent environment), 외래종에 의한 교란 (Disturbed by alien species)의 3가지 매트릭으로 구분하여 각 매트릭에 대한 점수의 합산을 통해 지표를 활용하였다. 희귀성 매트릭은 환경부 지정 멸종위기야생생물을 대상으로 연구지역 내 출현 유·무에 따른 평가점수를 산정하였으며, 환경의 우수성 매트릭은 회유성 어류의 출현에 따라 평가점수를 산정하는 것을 원칙으로 하였다. 회유성 어류는 주로 산란과 먹이 섭취 등을 위한 어류의 이동을 의미하며, 생활사에 따라 바다에서만 이동하는 해양회유성어류 (Oceandromy), 담수와 해수를 이동하는 양측회유성어류 (Diadromy), 담수 내에서만 이동하는 하천회유성어류 (Potadromy)로 구분된다 (Yoon and Jang 2009). 본 연구에서는 담수에서만 상·하류로 회유하며, 산란 활동을 위한 이동보다는 서식지를 중심으로 하는 이동 특성에 주안을 두어 하천환경 우수성 평가를 위한 차별성을 제시하였다. 따라서, 환경의 우수성 매트릭 평가 시 산란을 위해 바다와 하천을 왕래하는 소하성 및 강하성 어류를 회유성 어류로 구분하였으며, 국지회유성 어류는 평가에 포함하지 않았다. 외래종에 의한 교란 매트릭은 환경부 지정 생태계 교란야생생물을 대상으로 연구지역 내 출현 유·무에 따른 평가점수를 산정하였다. 종 다양성 지표의 매트릭 값 산출을 위한 환경부 지정 생물종 구분은 NIBR (2022)을 참고하여 분석에 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 어류상

3.1.1 어류 분포 특성

채집된 어류는 총 7과 17종 1,964개체로 나타났다. 계방천에서 6과 13종 1,425개체, 내린천에서 7과 15종 539개체가 채집되었다 (Table 2). 법정보호종으로는 멸종위기야생생물 II급인 열목어 (*Brachymystax lenok tsinlingensis*)와 가는돌고기 (*Pseudopungtungia tenu-*

corpa)가 출현하였으며, 천연기념물 제259호인 어름치 (*Hemibarbus mylodon*) 1종이 확인되었다. 한국 고유종은 11종이 출현하여 전체 어류 중 대비 고유화 빈도는 64.7%로 매우 높은 상태를 보이는 것으로 나타났으며, 한반도 평균 고유종 빈도가 22.5% (Nam 1996)인 것을 고려할 때, 고유성이 비교적 높게 나타난 것으로 분석되었다. 이는 본 조사 수역이 대부분 하천 차수가 낮은 계류 형태를 보이며, 외부로부터 유입되는 교란이 적고 양호한 수환경 상태를 나타내기 때문에 높은 고유화 비율을 보이는 것으로 판단된다. 전체 출현한 17종을 대상으로 개체수 구성비를 분석한 결과, 금강모치 (*Rhynchocypris kumgangensis*, 55.2%), 참갈겨니 (*Zacco koreanus*, 23.3%), 열목어 (6.1%), 꺾지 (*Coreoperca herzi*, 5.7%) 순으로 높게 출현하였으며, 계방천과 내린천 모두 유사한 출현 양상을 보이는 것으로 나타났다. 1% 미만의 출현율을 보이는 희소종에는 돌고기 (*Pungtungia herzi*), 새미 (*Ladislavia taczanowskii*), 참마자 (*Hemibarbus longirostris*), 어름치, 배가사리 (*Microphysogobio longidorsalis*), 새코미꾸리 (*Koreocobitis rotundicaudata*), 참종개 (*Iksookimia koreensis*), 메기 (*Silurus asotus*), 독종개 (*Cottus koreanus*)로 나타났다. 특히, 멸종위기야생생물에 속하는 가는돌고기는 계방천과 내린천 모두 일부 지역에서 출현하여 1.2%의 상대풍부도를 보이는 것으로 나타났으나 열목어는 계방천의 대부분 지점에서 출현하여 3번째로 높은 비율을 보였으며, 내린천에서는 4번째로 높은 비율을 보여 전체 어류상 대비 6.1%의 우세한 개체수 구성비를 나타내는 것으로 조사되었다. 계방천과 내린천 모두 출현한 어종이 하천 중·상류역과 산간 계류에 서식하는 어종으로 구성되어 있었으며, 유사한 종조성을 보이는 것으로 나타났다. 연구지역의 서식지 환경이 암반과 큰돌의 비율이 높고, 작은돌과 자갈, 모래가 균등하게 혼합된 비율의 하상구조와 식생이 넓게 활착하여 수관 형성 비율이 높은 산간 계류형 서식지 형태를 보였으며, 수심이 깊고 유속이 빠른 여울부가 조성되어 있어 열목어가 서식하기에 적합한 환경을 유지하고 있었다. 내린천에서 출현하였으나 계방천에서 출현하지 않은 어류는 참마자, 참종개, 메기, 독종개 4종이 확인되었는데 이는 내린천 유역의 수환경이 계방천에 비해 잔자갈과 모래 등 작은 입자로 구성된 하상구조를 보이면서 유속이 비교적 느리고, 하상바닥 가까이 서식하는 것을 선호하는 종들에 의해 일부 차이를 나타낸 것으로 판단된다.

Table 2. Individual number of fish species collected at each site in the Gyeongang stream and Naerin Stream

Species	Gyeongang Stream												Naerin Stream								Total	R.A. (%)
	St. 1	St. 1-1	St. 2	St. 2-1	St. 2-2	St. 3	St. 3-1	St. 3-2	St. 4	St. 4-1	St. 4-2	St. 5	St. 5-1	St. 6	St. 7	St. 7-1	St. 8	St. 9				
Family Cyprinidae																						
			1																1	0.1		
▲★						1		3	2								3	15	24	1.2		
★			2			18		14	12	8		1		6	4			13	78	4.0		
	12									1				1					14	0.7		
																		6	6	0.3		
◆★									1										1	0.1		
★										2								3	5	0.3		
★	51	27	33		48	98	138	48	30	156	142	130	42	74	30	5	29	3	1,084	55.2		
★	36		48			87	26	51	94	17	19					1	6	72	457	23.3		
Family Cobitidae																						
★			1			1		2	5									4	13	0.7		
★												1				1		1	3	0.2		
Family Siluridae																						
															1				1	0.1		
★	1					4	3		8	1		1		1					19	1.0		
Family Amblycipitidae																						
★			4			5	2	1	3					1	1		2		19	1.0		
Family Salmonidae																						
▲	8	4			12	4	2		3	7	47	1			1		1	30	120	6.1		
Family Cottidae																						
												5				2			7	0.4		
Family Centropomidae																						
★	8		10			23		14	16					2	9		8	22	112	5.7		
Total number of species																						
Total number of individuals																						
	116	31	99	0	60	241	171	133	176	190	208	139	42	85	46	9	49	169	1,964	100.0		

★: Korean endemic species, ◆: Natural monument, ▲: Endangered species

3.1.2 공서어종

내린천 상류 유역에서 서식하는 열목어의 공서어종은 5종 1,750개체로 조사되었다. 계방천과 내린천 모두 금강모치가 우점종으로, 참갈겨니가 아우점종으로 출현하였다. 낙동강 상류 봉화군 일대의 열목어 서식지에서는 참갈겨니와 버들치 (*Rhynchocypris oxycephalus*)가 대부분 우점종으로 출현하였으며, 열목어 보호 수역이 위치한 지점에서는 열목어가 우점종으로 출현하는 것으로 보고되어 있다(Byeon 2011). 본 연구지역과 동일한 지점인 계방천에서 열목어 서식지를 확인한 선행 연구에서는 금강모치와 높은 공서율을 보였으며 (Yoon

et al. 2013), 오대산국립공원 일대 남한강과 북한강 수계의 열목어 서식지에서는 금강모치와 갈겨니 (*Zacco temminckii*), 독중개가 높은 공서율을 보이는 것으로 보고되어 있다(Choi and Choi 2005). 본 조사수역에서 금강모치와 참갈겨니가 높은 공서율을 보이는 것은 대부분의 선행연구와 일치하는 결과를 보였다. 이는 열목어 서식지가 연중 수온이 낮고, 산간 계류의 특성을 보이는 환경에서 주로 서식하기 때문인 것으로 판단된다. 낙동강 수계 열목어 서식지에서는 금강모치가 아닌 참갈겨니와 버들치가 공서어종으로 출현하여 수계에 따라 다른 종 조성을 나타내었다. 이는 금강모치 서식지

가 남방한계 분포선인 금강수계 무주남대천을 포함한 한강수계의 상류 지역에 국한되며, 낙동강수계에서는 거의 출현하지 않기 때문이다 (Yun and Park 2021).

3.2 자연성 평가

3.2.1 교란 현황 (Anthropogenic disturbance)

인간 활동에 의한 교란 지표인 수변 식생대 자연성과 농업 강도의 분석 결과는 다음과 같다 (Table 3). 하천별 분석 결과, 계방천의 수변 식생대 자연성 지수는 평균 84.6 (범위: 61.5 - 100)을 나타내었으며, 농업 강도 지수는 평균 10.8 (범위: 0 - 27.6)로 분석되었다. 내린천의 수변 식생대 자연성 지수는 평균 79.5 (범위: 52.5 - 100)를 나타내었으며, 농업 강도 지수는 평균 19.8 (범위: 0 - 42.7)로 분석되었다. 지점별 분석 결과, 계방천의 St. 2-1, St. 2-2, St. 4-1과 내린천의 St. 7-1에서 식생 자연성이 매우 우수하며, 농업에 의한 교란은 없는 것으로 분석되었다. 대부분 본류보다 지류에 해당하는 지

점에서 제방 식생이 안정적인 환경을 보였으며, 물리적 또는 외부 교란이 확인되지 않아 하천 자연환경이 매우 우수한 것으로 분석되었다. 계방천의 St. 1-1, St. 2와 내린천의 St. 5에서는 동일하게 낮은 평가점수를 보이는 것으로 나타났으며, 내린천의 St. 9에서 가장 낮은 자연성 지수와 높은 농업 강도 지수를 보이는 것으로 분석되었다. St. 9 지점은 칠소폭포가 위치하고 있는 곳으로 인근에 민박을 비롯한 숙박업소가 운영되고 있어 야영객 또는 휴양객의 접근이 빈번히 이루어지고 있는 것으로 확인되었다. 휴가철 물놀이와 계곡 내 취사 행위, 쓰레기 투기 등 하천 내 직접적인 교란에 의한 오염이 우려되는 지역으로 각 지수별 값이 가장 낮게 산출되었다. 하천은 하천차수에 의해 하천규모가 변화하면서 수계 내 생물 분포 구배와 하천의 물리적 및 기능적 구조가 변화하여 하천 구간별로 독특한 수환경과 생물상을 보인다 (Lee et al. 2014). 하류로 갈수록 하폭과 유폭이 넓어지고, 도심부에 가까워지면서 제방부 식생 활착도의 감소와 수리구조물로 인한 하도 단절 현상이 발생하고,

Table 3. Ecological health and diversity assessment based on the 7 metrics in Gyebang Stream and Naerin Stream

Stream	Sites	Anthropogenic disturbance				Habitat diversity		Biodiversity				Ecosystem structure				Total Score
		Nr		Ai		QHEI		H'		Wq		FAI		Sd		
		v*	s**	v	s	v	s	v	s	v	s	v	s	v	s	
Gyebang	St. 1	69.8	3	14.1	4	204	4	1.4	2	6.3	3	93.8	5	5	5	26
	St. 1-1	73.0	3	27.0	3	210	4	0.4	1	9.1	4	62.5	4	5	5	24
	St. 2	61.5	3	27.6	3	212	4	1.3	2	7.2	3	81.3	5	0	0	20
	St. 2-1	100	4	0.0	4	215	4	-	1	7.1	3	-	-	0	0	16
	St. 2-2	100	4	0.0	4	205	4	0.5	1	7.2	3	62.5	4	5	5	25
	St. 3	66.7	3	16.5	4	203	4	1.4	2	7.7	4	93.8	5	10	10	32
	St. 3-1	95.5	4	4.5	4	191	4	0.6	1	6.1	3	87.5	5	5	5	26
	St. 3-2	97.3	4	2.7	4	210	4	1.4	2	6.4	3	93.8	5	5	5	27
	St. 4	76.7	4	16.7	4	205	4	1.5	2	7.2	3	100	5	10	10	32
	St. 4-1	100	4	0.0	4	188	4	0.7	1	7.7	4	100	5	5	5	27
St. 4-2	89.9	4	10.1	4	201	4	0.8	1	8.2	4	87.5	5	5	5	27	
Naerin	St. 5	72.3	3	27.7	3	204	4	0.3	1	5.8	3	93.8	5	5	5	24
	St. 5-1	89.6	4	10.4	4	208	4	0.0	1	6.8	3	50.0	3	0	0	19
	St. 6	81.6	4	18.4	4	193	4	0.6	1	8.0	4	87.5	5	0	0	22
	St. 7	81.9	4	18.1	4	198	4	1.1	2	8.2	4	75.0	4	5	5	27
	St. 7-1	100	4	0.0	4	178	4	1.1	2	8.0	4	81.3	5	0	0	23
	St. 8	78.8	4	21.2	4	175	4	1.2	2	8.0	4	75.0	4	10	10	32
	St. 9	52.5	3	42.7	3	206	4	1.7	2	7.5	4	93.8	5	10	10	31

Nr: Naturalness of the riparian area, Ai: Agricultural intensity, QHEI: Qualitative habitat evaluation index, H': diversity index, Wq: Water quality, FAI: Fish Assessment Index, Sd: Species diversity, *: value, **: score

일부 구간에 하천 자연성 훼손이 나타나는 것이 일반적이다. 계방천의 경우 St. 2 지점에서 유량 감소로 인해 좌안부의 하상이 드러나 수변 식생대 면적이 축소된 것으로 나타났으며, St. 4 지점에서는 골재 채취로 인해 하상이 단조로워지고, 양수로 인해 유량이 감소하면서 자연성이 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

3.2.2 서식지 다양성 (Habitat diversity)

서식지 다양성에 대한 지표인 정성적 서식지 평가 지수(QHEI)의 분석 결과는 다음과 같다(Table 3). 유역별 분석 결과, 계방천의 서식지 평가 지수는 평균 204 (범위: 188 - 215)로 생물서식이 최적 상태를 보이는 것으로 나타났으며, 내린천은 평균 194.6 (범위: 175 - 208)로 계방천보다 다소 낮은 값으로 분석되었으나, 동일하게 최적 상태의 서식지 환경을 보이는 것으로 나타났다. 지점별 분석 결과, 계방천의 St. 3-1, St. 4-1 지점을 제외하고 전체 지점에서 200 이상의 서식지 지수를 나타내어 하천 내 물리적 교란 또는 오염이 거의 없는 맑은 계류의 서식 환경을 보이는 것으로 판단된다. 내린천은 St. 5, St. 5-1, St. 9 지점에서 200 이상의 높은 서식지 지수를 나타내었으며, St. 5 지점에서 가장 낮은 지수를 보여 전체 지점 대비 서식지 질적 환경이 가장 낮은 수준을 보이는 지점으로 나타났다. 그러나 계방천과 내린천을 포함한 대부분의 지점들이 하천 차수가 낮고 점오염원 및 비점오염원 등 외부 교란에 의한 영향이 적은 상류 하천의 환경을 보이기 때문에 조사지역 내 서식지 평가 지수가 평균 200의 높은 수치를 보이는 것으로 판단된다(An et al. 2001). 서식지 평가 지수의 변수에서 조사지점 특성에 따르면 하상구조 및 서식지 피복도와 수로 특성에서 대부분 최적 상태의 범위를 보였다. 이는 오대산을 경계로 하여 유량이 풍부하고 여울 및 소가 다양한 하상구조를 나타내는 것으로 판단되지만, St. 3-1, St. 6, St. 8 지점에서는 제방 한쪽 부분에 콘크리트 구조물에 의해 하도가 일부 직선화 형태를 나타내는 것으로 확인되어 제방 안정성 측면에서 낮은 수치의 결과를 보였다. 제방의 특성 및 구조에서는 하천 제방의 가장자리 식생 분포와 안정성에 대해 내린천에서 비교적 낮은 수치를 보였는데, 이는 콘크리트 구조물에 의해 변형된 제방으로 식생이 제거되고, 인근에 캠핑장 및 민박 시설이 위치하여 치수와 여가활동 등의 영향으로 식생 분포가 비교적 불량한 것으로 판단된다.

3.2.3 생물다양성 (Biodiversity)

생물다양성에 대한 지표인 종 다양성지수(Shannon indices)와 수질 평가지수의 분석 결과는 다음과 같다(Table 3). 하천별 분석 결과, 계방천의 종 다양성지수는 평균 1.0 (범위: 0 - 1.5)을 나타내었으며, 수질 평가지수는 평균 7.3 (범위: 6.1 - 9.1)으로 나타났다. 내린천의 종 다양성지수는 평균 0.9 (범위: 0 - 1.7)를 나타내었으며, 수질 평가지수는 평균 7.5 (범위: 5.8 - 8.2)로 나타났다. 지점별 분석 결과, 종 다양성지수는 계방천과 내린천의 모든 지점에서 대체로 낮은 수치 및 점수 범위를 보이는 것으로 나타났다. 계방천의 경우, St. 3-2 지점과 종이 출현하지 않은 St. 2-1 지점을 제외하고 모든 지류 지점에서는 1.0 미만의 낮은 수치를 보이면서 최하 점수를 나타내었으며, 상대적으로 본류 지점에서는 1.0 이상의 수치를 보이면서 최고 점수를 나타낸 것으로 분석되었다. 내린천은 하류로 갈수록 종 다양성지수가 점차 증가하면서 St. 6 지점을 기준으로 1.0 이상의 수치를 보이면서 최고 점수를 나타낸 것으로 분석되었다. 본 연구지역의 서식지 환경은 대부분 상류 하천에 해당하여 하천 폭이 좁고, 유속이 빠른 여울과 수심의 깊이가 다양하여 소(pool)가 연속적으로 형성되었으며, 하상구조가 다양한 특성을 보이고 있다. 일반적으로 상류 하천은 유기물이나 오염원의 유입이 적기 때문에 어류 군집에 있어 내성종의 비율은 적고, 금강모치와 쉬리 등의 민감종이 차지하는 비율이 매우 높은 경향을 나타낸다(Kim et al. 2014). 계방천과 내린천 역시 금강모치, 참갈겨니, 쉬리 등 민감종의 출현비율이 높고, 평균 6종의 낮은 종수로 출현하는 경향으로 보아 전형적인 상류 하천의 어류 군집과 종 다양성 특성을 나타내는 것으로 판단된다. 어류의 종 다양도지수는 주로 하천 경사구배에 따라 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 경향을 나타내는데, 하류로 갈수록 하천 크기가 커지고, 정수 구간이 증가하며, 어류의 산란장과 서식지의 기능이 발달하면서 상류보다 종풍부도와 다양도가 증가하는 경향을 보이게 된다(Jackson et al. 2001, Taylor et al. 2006, Murray and Innes 2009, AI-Chokhachy et al. 2010). 계방천과 내린천은 지류를 제외하고 본류에서 상류부터 하류까지 출현종수가 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 계방천은 최상류 St. 1 지점부터 St. 4 지점까지 6종에서 11종으로 증가하였으며, 내린천은 St. 5 지점부터 St. 9 지점까지 6종에서 10종으로

증가함으로써 앞서 제시한 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보이는 것과 일치하는 결과를 나타내었다.

수질 평가지수는 계방천과 내린천에서 용존산소 농도의 큰 차이는 없는 것으로 분석되었으며, 환경부 하천 생활환경기준에 따라 계방천은 평균 7.3으로 Ib 등급의 ‘ 좋음 ’ 상태, 내린천은 평균 7.5로 Ia 등급의 ‘ 매우 좋음 ’ 상태를 보이는 것으로 나타났다. 전체 유역에서 평균 ‘ 좋음 ’ 상태로서 조사지역의 수질 및 수생태계 상태는 용존산소가 높고, 오염물질이 거의 없는 청정상태에 근접한 것으로 해석될 수 있다. 계방천에서는 St. 3-1 지점에서 6.1의 낮은 농도를 보였으며, 내린천에서는 St. 5 지점에서 5.8의 가장 낮은 농도를 보이는 것으로 나타났으나 실제 수질 등급으로는 Ib 등급에 속하는 ‘ 좋음 ’ 상태를 보이는 것으로 나타나 하천 내 오염원이 적고, 해당 수환경이 서식지에 큰 변화를 주지 않는 것으로 판단된다. 그러나 St. 3-1 지점에 바로 인접하여 좌안으로는 콘크리트 제방과 함께 소규모의 농경지가 조성되어 있으며, 우안으로는 민가가 위치하고 있어 다른 지점에 비해 접근성이 높은 것으로 확인되었다. 농경지가 인접하여 농업용수로 활용되며, 하천이 직강화되면서 하천 유량이 다른 지점에 비해 월등히 적은 것으로 판단된다. 해당 지점은 멸종위기야생생물 II급인 열목어 2개체가 출현한 지점으로 농업 활동에 의해 유입 가능한 비점오염원에 대비한 하천환경 모니터링이 필요할 것으로 판단된다. St. 5 지점의 경우, 교각 하단의 콘크리트 제방에 배수로가 존재하고 있었으며, 다량의 불명수가 하천에 직접적으로 유입되고 있는 것으로 확인되었다. 수질 측정지점이 불명수가 유입되는 하류 부근으로 DO에 영향을 미친 것으로 판단된다. 해당 지점에서 열목어 1개체의 출현이 확인되었기 때문에 개체군 보전을 위한 수환경 관리가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.4 생태계 구조 (Ecosystem structure)

생태계 구조에 대한 지표인 어류생물지수 (FAD)와 종 다양성 지표 (Species diversity)의 분석 결과는 다음과 같다 (Table 3). 하천별 분석 결과, 계방천의 어류생물지수는 평균 86.3 (범위: 0 - 100)을 나타내었으며, 종 다양성 지표는 평균 5.0 (범위: 0 - 10)으로 나타났다. 내린천의 어류생물지수는 평균 79.5 (범위: 50 - 93.8)를 나타내었으며, 종 다양성 지표는 평균 4.3 (범위: 0 - 10)으로 나타났다. 지점별 분석 결과, 어류생물지수는 계방천과 내린천 유역 모두 하천 건강도에 있어서 큰 차이

는 보이지 않는 것으로 분석되었으나, A 등급 (FAI: $80 \leq < 100$)의 ‘ 매우 좋음 ’ 상태를 나타내는 지점 비율이 계방천 72.7%, 내린천 57.1%로 분석되어 내린천에 비해 계방천의 하천 생태계 건강성이 더 우수한 것으로 나타났다. 계방천의 경우, 종이 출현하지 않은 St. 2-1 지점을 제외하고, St. 1-1과 St. 2-2의 2개 지점에서 B 등급 (FAI: $60 \leq < 80$)의 ‘ 좋음 ’ 상태를 나타내었으며, 나머지 8개 지점은 모두 A 등급의 ‘ 매우 좋음 ’ 상태로 분석되었다. 내린천은 St. 5-1 지점에서 C 등급 (FAI: $40 \leq < 60$)의 ‘ 나쁨 ’ 상태, St. 7과 St. 8 지점에서 B 등급의 ‘ 좋음 ’ 상태를 보였으며, 그 외 4개 지점에서는 모두 A 등급의 ‘ 매우 좋음 ’ 상태로 분석되었다. FAI 점수는 메트릭 항목별 점수 합산으로 산출된 결과이며, 유사한 수환경을 보이는 상류 하천에서도 지점별 점수와 등급에 차이를 보이게 되는데, 이는 생태지표특성의 메트릭 항목이 많은 부분을 차지하고 있기 때문인 것으로 판단되며, 특히 총 국내종수 (M1) 메트릭에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 본 조사지역은 평균 종수가 5종으로 지점별 출현종수가 높지 않은 특성을 보이는데, 하천 종적구배에 따라 나타나는 어류 군집의 특성을 고려했을 때, 수생태계 건강성에 큰 영향은 주지 않을 것으로 판단된다. 상류 하천의 특성을 보이는 만큼 환경 스트레스에 민감하고, 교란에 취약한 민감종이 매우 풍부하였으며, 내린천의 St. 7 지점에서 메기 1종의 출현이 확인되었으나 어류 군집구조에는 큰 영향은 주지 않은 것으로 판단된다. 가장 낮은 수생태계 건강성 등급을 나타낸 내린천의 St. 5-1 지점의 경우, 출현종수가 충식성의 민감종 1종으로 나타나 출현종수에 따른 낮은 건강성 등급의 결과를 보인 것으로 판단된다. 종 다양성 지표는 멸종위기야생생물과 회유성 어종, 생태계교란종의 출현에 따라 메트릭 항목별 점수 합산으로 산출된 결과이며, 계방천과 내린천 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 본 조사지역에서는 회유성 어종과 외래종 또는 생태계교란종 등 위해 및 교란종은 출현하지 않은 것으로 확인되었다. 따라서 멸종위기야생생물의 출현유무에 따라 점수에 차이를 보였으며, 멸종위기야생생물이 출현하지 않은 계방천의 St. 2, St. 2-1 지점과 내린천의 St. 5-1, St. 6, St. 7-1 지점에서 가장 낮은 점수를 보였다. 조사 기간 동안 멸종위기야생생물 II급에 해당하는 가늘고기와 열목어가 모두 출현한 지점은 계방천의 St. 3, St. 4 지점과 내린천의 St. 8, St. 9 지점으로 가장 높은 점수의 결과를 보였다. 한강수계의 내린천 상류 유역에 속하여 차가운 수온을 유지하는 조사지점의 특성을 고

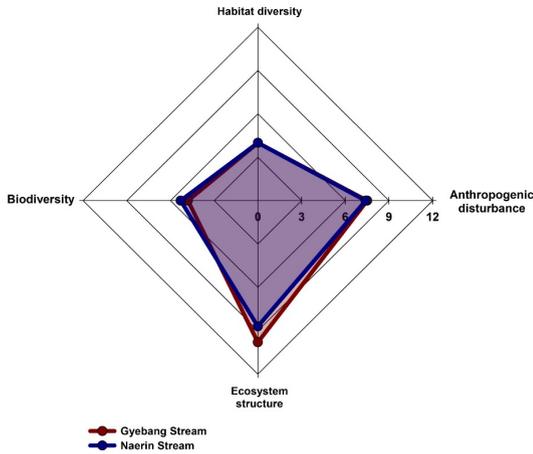


Fig. 2. Comparison with scoring for evaluation category.

려했을 때, 회유를 하기 위한 바다와 인접하지 않고, 외래종의 서식과 정착이 어려운 환경이 조성되어 이러한 결과가 도출된 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

자연성 평가 결과를 평가분야와 지표에 따라 하천별 종합 분석한 결과는 다음과 같다 (Fig. 2). 계방천의 자연성 평가점수는 평균 25.6으로 분석되었으며, 내린천은 평균 25.4로 하천별 평가점수에 큰 차이는 없게 나타났다. 자연성 평가체계의 총점은 90점으로 산정되어 있는데, 본 조사지역의 평균 점수가 26점으로 총점 대비 매우 낮은 수치를 나타내는 것으로 분석되었다. 자연성 평가점수의 감소 원인은 생태계 구조 평가분야의 희귀성 지표 메트릭의 합산이 상대적으로 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 상류 하천의 경우, 유속이 빠른 환경으로 주로 여울이 분포하고 있는 환경에서 제한적으로 나타나는 어류 군집구조 특성에 따라 생물다양성과 생태계 구조 평가분야의 점수가 감소하는 주요 요인으로 판단된다. 열목어는 대체로 물이 맑고 여름철 수온이 20°C 이하의 용존산소가 높고, 자연환경이 수려한 곳에서 서식하는 특성을 보이기 때문에 열목어 출현 유무에 따른 자연성 평가결과의 차이를 분석하였다 (Fig. 3). 열목어 출현지역에서는 자연성 평가지수가 평균 27.8점 (범위: 24점 - 32점)으로 분석되었으며, 비출현지역에서는 평균 21.2점 (범위: 16점 - 27점)으로 분석되었다. 계방천과 내린천이 인접하여 유사한 환경특성을 보임에도 불구하고 자연성 평가점수에 따른 차이

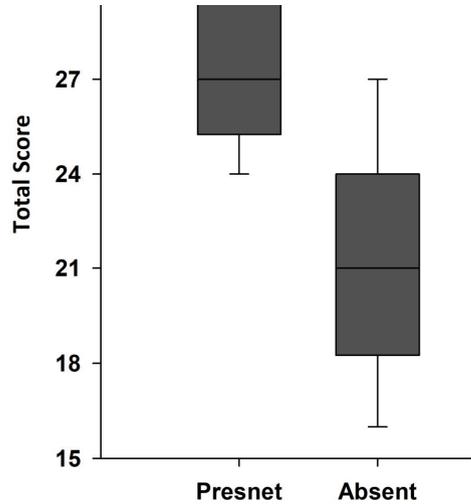


Fig. 3. Total score of evaluation as appearance of *Brachymystax lenok tslingensis*.

를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 2개의 인접한 소유역을 대상으로 하천생태계 상류 구간의 자연성 평가를 위한 통합지표를 구성하여 평가체계를 개발 및 시범 적용하였다. 하천의 종적 구배 특성에 따라 비교적 깨끗한 수환경을 나타내는 하천 상류의 자연성을 모니터링하기 위한 지표로 사용 가능할 것으로 판단된다. 하지만, 유역 및 수계별로 나타내는 환경적 특성이 상이하기 때문에 전체 유역을 대상으로 평가체계를 적용하기에는 한계가 있을 것으로 보인다. 일반적으로 하천의 서식지 질과 생물군집의 상태 등은 하천 지형에 의해 결정되는 특성을 보이기 때문에 하천 자연환경을 면밀하게 진단하기 위해선 하천 연속성 개념을 참고하여 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다 (Jung and Kim 2018). 현재 평가체계는 대표적인 열목어 서식지인 연구대상지 특성을 고려하여 지표를 구성하였기 때문에, 변화 관찰 목적에 따른 평가가 적합할 것으로 보이며, 향후에는 전체 유역을 대상으로 동일하게 평가할 수 있는 지표를 모색하고 보완이 필요할 것으로 보인다.

References

AI-Chokhachy, R., Roper, B.B., and Archer, E.K. 2010. Evaluating the status and trends of physical stream habitat in headwater streams within the interior Columbia River and upper Missouri River basins using an index approach. Transactions of the American Fisheries Society

- 139: 1041-1059.
- An, K.G., Jung, S.H., and Choi, S.S. 2001. An evaluation on health conditions of Pyong-Chang River using the Index of Biological Integrity (IBI) and Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI). *Korea Journal of Limnology* 34: 153-165. (in Korean)
- Bae, Y.J., Lee, W.J., and Seung, H.W. 2003. Development of environmental technique and biodiversity management system and their application to stream ecosystems in Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* 21: 223-233. (in Korean)
- Byeon, H.G. 2011. The characteristics of fish fauna and *Brachimystax lenok tsinlingensis* individuals in the Bonghwa-gun, Korea. *Korean Journal of Environmental Ecology* 25: 878-886. (in Korean)
- Cho, Y.C., Choi, H.M., Ryu I.G., Kim, S.H., Shin, D.S., and Yu, S.J. 2021. Assessment of water quality in lower reaches Namhan River by using statistical analysis water quality index (WQI). *Journal of Korean Society on Water Environment* 37: 114-127. (in Korean)
- Choi, J.S. and Choi, J.K. 2005. Fish fauna and disturbance in Odaesan National Park, Korea. *Korean Journal of Environmental Ecology* 19: 177-187. (in Korean)
- Grinstead, S., Kelly, B., Siepker, M., and Weber, M.J. 2022. Evaluation of two fish-based indices of biotic integrity for assessing coldwater stream health and habitat condition in Iowa's Driftless Area, USA. *Aquatic Ecology* 56: 983-1000.
- Jackson, D.A., Pere-Neto, P.R., and Olden, J.D. 2001. What controls who is where in freshwater fish communities the roles of biotic, abiotic, and spatial factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58: 157-170.
- Jung, H.R. and Kim, K.H. 2018. A development of an assessment system for stream physical environments in Korea. *Korea Water Resources Association* 51: 713-727. (in Korean)
- Jung, S.H., Choi, S.S., and An, K.G. 2001. An evaluation on health conditions of Pyeong-Chang River using the Index of biological Integrity (IBI) and qualitative habitat evaluation index (QHEI). *Korean Journal of Limnology* 34: 153-165. (in Korean)
- Kang, H.S. and Hur, J.W. 2012. Aquatic ecosystem assessment and habitat improvement alternative in Hongcheon River using fish community. *Korean Society of Civil Engineering* 32: 331-343. (in Korean)
- Kim, H.J., Lee, S.H. and An, K.G. 2010. Comparative analysis of ecological health conditions before and after ecological restoration in Changwon Stream and Nam Stream. *Korean Journal of Limnology* 43: 307-318. (in Korean)
- Kim, I.S. and Park, J.Y. 2002. *Freshwater fish of Korea*. Kyohak Publishing Co., Ltd. Seoul, Korea. (in Korean)
- Kim, I.S., Choi, Y., Lee, C.L., Lee, Y.J., Kim, B.J. and Kim, J.H. 2005. *Illustrated book of Korean fishes*. Kyohak Publishing Co., Ltd. Seoul, Korea. (in Korean)
- Kim, J.I., Choi, J.W., and An, K.G. 2014. Spatial and temporal variations of water quality in an urban Miho Stream and some influences of the tributaries on the water quality. *Journal of Environmental Science International* 23: 433-445. (in Korean)
- Korea Environment Institute (KEI). 2017. *A study on the basic principles and policy roadmap of integrated water management*. pp. 1-116. (in Korean)
- Lee, J.E., Choi, J.W., and An, K.H. 2012. Influence of land use pattern and seasonal precipitation on the long-term physico-chemical water quality in Namhan River watershed. *Journal of Environmental Sciences* 21: 1115-1129. (in Korean)
- Lee, J.W., Woo, S.Y., Kim, Y.W., Park, J.W., and Kim, S.J. 2021. Evaluation of InVEST habitat quality model using aquatic ecosystem health data. *Journal of Korea Water Resources Association* 54: 657-666. (in Korean)
- Lee, S.H. and Yang, D.C. 2010. A study on the disturbance and the rehabilitation of stream by using evaluation of ichthyofauna to disturbed ecosystem. *Korean Journal of Limnology* 43: 242-254. (in Korean)
- Lee, S.H., Lee, H.G., Park, S.J., Lee, S.H. and Choi, J.K. 2014. Distribution characteristics of fish community to stream order in Namhan River watershed. *Korean Journal of Ecology and Environment* 47: 100-115. (in Korean)
- Ministry of Construction and Traffics (MCT). 2004. *Development to close-to nature river improvement techniques*. pp. 1-1460. (in Korean)
- Murray, S. and Innes, J.L. 2009. Effects of environment on fish species distributions in the Mackenzie River drainage basin of northeastern British Columbia, Canada. *Ecology of Freshwater Fish* 18: 183-196.
- Nam, M.M. 1996. Present status of Korean freshwater fish. In 1996 Symposium of Korean Journal of Limnology. Proc. pp. 31-45. (in Korean)
- National Institute of Biological Resources (NIBR). 2022. *National list of Korea*. <https://kbr.go.kr/>. Accessed 13 Sep 2022. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2016. *Biomonitoring survey and assessment manual*. pp. 1-313. (in Korean)
- Nelson, J.S. 2006. *Fishes of the world* (3rd ed.). John Wiley & Sons. New York. U.S.A. p. 550
- Noss, R.F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology* 4: 355-364.
- Taylor, C.M., Holder, T.L., Fiorillo, R.A., Williams, L.R., Thomas, R.B., and Warren, Jr. M.L. 2006. Distribution, abundance, and diversity of stream fishes under variable environmental conditions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63: 43-54.

- Tracy, E.E., Infante, D.M., Cooper, A.R., and Taylor, W.W. 2022. An ecological resilience index to improve conservation action for stream fish habitat. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 32: 951-996.
- UNEP (United Nations Environment Programme) 2001. Indicators and environmental impact assessment: designing national-level monitoring and indicator programs. UNEP/CBD/SBSTTA/7/12. Montreal. Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice.
- Xiang, W.N. 1996. GIS-based riparian buffer analysis: injecting geographic information into landscape planning. *Landscape and Urban Planning* 34: 1-10.
- Yang, H.E., Lee, J.B., and Kim, I.H. 2017. Assessment of the vulnerability of groundwater level management in Nakdong river basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 50: 815-825. (in Korean)
- Yoon, H.N., Kim, K.D., Jeon, Y.L., Lee, J.H., and Park, Y.J. 2013. Stomach contents of the Manchurian Trout (*Brachymystax lenok tsinlingensis*) and River Salmon (*Oncorhynchus masou masou*) in the Odae mountain, Gangwondo. *Korean Journal of Ichthyology* 25: 90-105. (in Korean)
- Yoon, J.D. and Jang, M.H. 2009. Migration patterns of *Brachymystax lenok tsinlingensis* using radio tags in the upper part of the Nakdong river. *Korean Journal of Ecology and Environment* 42: 58-66. (in Korean)
- Yun, S.W. and Park, J.Y. 2021. Fish fauna and community structure in the Deogyusan National Park, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* 33: 126-141. (in Korean)