

ORIGINAL ARTICLE

저서성 대형무척추동물을 이용한 도시지역의 토지이용 유형별 하천생태계 건강성 평가

박오집^{1,2)} · 배양섭^{2,3,4)*}

¹⁾㈜생태기술연구소, ²⁾인천대학교 생명과학과, ³⁾인천대학교 생물자원환경연구소, ⁴⁾인천대학교 매개체감염병연구소

Assessment of River Ecosystem Health in Urban Areas Based on Land - Use Types Using Benthic Macroinvertebrates

Oh-Jip Park^{1,2)}, Yang-Seop Bae^{2,3,4)*}

¹⁾Eco Technology Institute co., Ltd.

²⁾Division of Life Sciences, College of Life Sciences and Bioengineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

³⁾Bioresource and Environmental Center, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

⁴⁾Convergence Research Center for Insect Vectors, Division of Life Sciences, College of Life Sciences and Bioengineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

Abstract

This study evaluated the impact of various land - use types (industrial, residential, and green areas) on river ecosystem health and biodiversity using benthic macroinvertebrates. Physicochemical water quality assessments, community structure analyses, functional group and indicator species analyses, and aquatic environment evaluations were conducted for rivers in the Anseongcheon watershed. The industrial area exhibited high water temperature (°C), high conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$), and low dissolved oxygen (DO, mg/L). Community analysis revealed that industrial areas had relatively high dominance and low diversity, whereas residential and green areas exhibited lower dominance and higher diversity. Functional group analysis showed that Collector-gatherers (CG) and Burrowers (BU) dominated the industrial area, whereas Clingers (CL) were more prevalent in the residential and green areas. Indicator species analysis identified the species associated with more diverse habitats in residential and green areas compared with industrial areas. Aquatic environment evaluations indicated that residential and green areas were relatively more stable than industrial areas but were still affected by urbanization. This study highlights the relationship between land use and river ecosystem health, and emphasizes the need for region-specific management and conservation strategies.

Key words : Anseongcheon watershed, Aquatic environment evaluation, Green area, Industrial area, Residential area, Urban areas

1. 서론

하천생태계는 지구 생태계의 중요한 구성 요소로, 물

정화, 홍수 완화, 생물서식지 제공과 같은 필수적인 생태계 서비스를 제공한다(Meybeck, 2003). 특히 도시 지역의 하천은 인구밀집 지역의 주요 수자원 공급원으

Received 27 December, 2024; Revised 27 January, 2025;

Accepted 4 February, 2025

*Corresponding author : Yang-Seop Bae, Division of Life Sciences, College of Life Sciences and Bioengineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea
Phone : +82-32-835-0754
E-mail : baes@inu.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.

로 작용하며, 산업 및 농업활동 등 인간의 활동에 중요한 기반을 제공한다. 그러나 현재 도시화와 산업화로 인해 하천생태계는 점점 더 큰 압박을 받고 있다. 예를 들어, Paul and Meyer(2001)의 연구에 따르면, 도시화는 하천의 물리적 특성과 유량 패턴을 변화시켜 생물다양성 감소를 가속화하고, 물리·화학적 교란은 생태계 복원력을 감소시키며, 이는 간접적으로 지역 사회와 인간 건강에도 영향을 미칠 수 있다. 도시지역과 같은 인구밀집 지역에서는 각종 생활하수와 공장폐수 등이 다량 발생하며, 강우 시 도로와 건물 등에서 다양한 비점오염 물질이 하천으로 유입되어 하천의 수질을 악화시키는 것으로 보고되고 있다(Park et al., 1994; Collins and Jenkins, 1996).

하천생태계의 주요 구성원이자 어류의 주요 먹이원인 저서성 대형무척추동물은 퇴적물의 유기물 함량이 높아지거나 독성물질에 의한 퇴적물 오염 등과 같은 서식처의 교란에 매우 민감하게 반응하기 때문에 종수와 개체수의 분포 등 군집구조의 차이가 뚜렷하여 중요한 생물학적 지표로 이용된다(Hynes, 1963; Kehde and Wilhm, 1972). 따라서, 다양한 오염에 대한 물환경의 변화 분석에 있어서 저서성 대형무척추동물은 여러 가지 측면에서 그 유용성이 매우 높다(Metcalf, 1996).

안성천 유역은 북위 36° 50' ~ 37° 20', 동경 126° 50' ~ 127° 00'에 걸쳐 한반도 중서부에 위치하고 있으며, 유역 면적은 1,654.61 km², 유로 연장은 71.05 km로서 북동측으로 한강 유역, 남동측으로는 금강 유역, 남서측으로는 삽교천 유역과 접하고 있고, 국가하천 4개와 지방하천 99개로 총 103개의 법정하천으로 구성되어 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014). 공업지역, 주거지역, 녹지지역 등 다양한 토지이용 형태를 가진 복잡한 생태계를 대표하는 안성천 유역은 최근 도시화 및 산업화로 인한 환경변화를 겪고 있다. 생활하수, 산업용수, 비점오염 물질의 지속적 유입으로 인해 하천 수질이 악화되고, 생물다양성이 감소하는 문제가 보고되고 있다. 특히 하천 수질은 임야, 초지, 농경지, 도시 및 공업지역 등 다양한 유역 토지 이용도에 따라 두드러진 차이를 보이며, 각 토지 이용도에 따라 해당 수계의 수질이 결정된다(Haith, 1976). 이러한 수질 변화는 하천생태계의 구조 및 기능에 직·간접적인 영향을 미친다.

그러나, 현재 안성천 유역 도시지역의 다양한 토지이용 유형이 하천생태계 건강성에 미치는 영향을 종합적

으로 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이며, 이러한 배경은 안성천 유역의 도시화가 하천생태계에 미치는 영향을 연구하는 데 있어 이상적인 사례임을 보여준다. 따라서 본 연구는 안성천 유역 도시지역의 다양한 토지이용 유형(공업지역, 주거지역, 녹지지역)이 하천생태계에 미치는 영향을 종합적으로 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 이화학적 수질평가, 저서성 대형무척추동물을 이용한 군집분석 및 기능군·지표종 분석, 생물학적 지수를 활용한 수환경평가를 실시하였다.

본 연구는 공업지역, 주거지역, 녹지지역의 하천생태계 건강성 평가를 실시하여 비교·분석하고, 각 토지이용 유형에 따른 하천생태계에 미치는 영향의 차이를 규명하고자 한다. 특히, 토지이용 유형에 따라 저서성 대형무척추동물의 군집구조와 하천생태계 건강성이 지역별로 유의미한 차이를 보일 것으로 예상된다.

이러한 결과는 도시화와 산업화로 인한 환경적 압박이 하천생태계에 미치는 영향을 보다 심도 있게 이해하는데 기여할 것이다. 또한, 이를 바탕으로 각 지역별 맞춤형 보전 및 복원 전략 수립의 필요성을 강조하며, 도시화가 지속적으로 증가하는 현대 사회에서 하천생태계의 지속 가능성을 확보하기 위한 구체적인 관리 방안을 마련하는 데 중요한 기초자료가 될 것이다.

2. 연구 방법

2.1. 조사 범위 및 방법

2.1.1. 시·공간적 범위

2023년 10월(추계), 2024년 4월(춘계), 2024년 6월(하계, 우기 전), 2024년 8월(하계, 우기 후) 등 총 4회의 현장 조사를 실시하였다.

연구대상 하천은 안성천 유역의 도시지역에 분포하는 하천으로, 토지이용 유형에 따라 공업, 주거, 녹지지역으로 구분하여 각 지역에 포함되는 하천을 선정하였다. 해당 하천들은 경기도 평택시 및 안성시 일원에 소재한 서정리천, 장안천, 도일천, 통복천 등 4개의 지방하천이다. 각 하천별로 4~5개의 조사지점을 선정하여 총 18개의 지점이 선정하였다(Table 1, Fig. 1). 저서성 대형무척추동물 군집은 해발 고도, 하폭 등과 같은 환경요인에 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Vannote et al., 1980; Braccia and Voshell, 2006; Kwon et al., 2012). 따라서 이러한 요인들을 고려하여 조사지점

Table 1. Detailed locations of each survey point

Classification	Stream name	Address	GPS coordinates	
Industrial areas	IA-1	Seojeongri stream	Pyeongtaek-si, Godeok-myeon Haechang-ri 91-3	37°01'35"N, 127°10'45"E
	IA-2	Jangahn stream	Pyeongtaek-si, Mogok-dong 452	37°02'22"N, 127°04'33"E
	IA-3	Jangahn stream	Pyeongtaek-si, Mogok-dong 346-7	37°01'34"N, 127°04'06"E
	IA-4	Doil stream	Pyeongtaek-si, Chilgoe-dong 535-1	37°02'04"N, 127°05'08"E
	IA-5	Doil stream	Pyeongtaek-si, Doil-dong 1127-10	37°02'41"N, 127°05'57"E
	IA-6	Doil stream	Pyeongtaek-si, Mogok-dong 196	37°01'41"N, 127°04'46"E
Residential areas	RA-1	Seojeongri stream	Pyeongtaek-si, Godeok-dong 2745	37°02'07"N, 127°02'17"E
	RA-2	Seojeongri stream	Pyeongtaek-si, Godeok-dong 1968-3	37°02'39"N, 127°02'53"E
	RA-3	Seojeongri stream	Pyeongtaek-si, Godeok-dong 1832	37°03'33"N, 127°03'09"E
	RA-4	Tongbok stream	Pyeongtaek-si, Segyo-dong 165-1	36°59'55"N, 127°04'55"E
	RA-5	Tongbok stream	Anseong-si, Wongok-myeon Oegacheon-ri 343	37°02'26"N, 127°07'42"E
	RA-6	Tongbok stream	Pyeongtaek-si, Bijeon-dong 372-2	37°00'32"N, 127°06'01"E
Green areas	GA-1	Doil stream	Pyeongtaek-si, Mogok-dong 333	37°01'30"N, 127°04'13"E
	GA-2	Doil stream	Pyeongtaek-si, Doil-dong 1058-2	37°03'16"N, 127°06'51"E
	GA-3	Jangahn stream	Pyeongtaek-si, Jangahn-dong 571	37°03'12"N, 127°04'46"E
	GA-4	Jangahn stream	Pyeongtaek-si, Gajae-dong 367-24	37°03'07"N, 127°04'44"E
	GA-5	Tongbok stream	Anseong-si, Wongok-myeon Oegacheon-ri 343	37°01'42"N, 127°07'02"E
	GA-6	Tongbok stream	Anseong-si, Wongok-myeon Chilgok-ri 884-1	37°02'39"N, 127°09'03"E

을 선정하였으며, 선정된 조사지점들의 해발 고도는 5~37 m, 하폭은 12~69 m 범위에 포함되었다. 하상구조는 Wentworth(1922)의 기준에 따라 실트(Silt), 모래(Sand), 자갈(Gravel), 큰돌(Boulder)로 구분되었으며, 실트와 모래의 비율이 높았다.

2.1.2. 이화학적 수질평가 및 생물시료 채집

수온(°C), 용존산소(DO, mg/L), pH, 전기전도도(μ S/cm) 등의 기초 수질항목을 다항목수질측정기(YSI-Proplus, YSI, US)를 이용하여 측정하였다.

저서성 대형무척추동물의 채집은 제5차 전국자연환경조사 지침(National Institute of Ecology, 2019)을 참고하였으며, 본 하천 조사지점 내 다양한 미소서식처가 포함되도록 5곳의 정점에서 채집 장비를 이용한 정량적 조사를 실시하였다. Surber net (30×30 cm, mesh size: 500 μ m)으로 채집 시 손갈퀴를 이용하여 하상을 긁어, 해당 조사 장비 안으로 들어가도록 채집하였으며, Dredge sampler(30 cm, mesh size: 0.5 mm) 이용 시 물속에 망 부분을 담가, 입자가 작은 유기물이 제거될 수 있도록 채집하였다. 채집된 생물시료는 현장에

서 80% 에틸알코올로 고정된 후, 실험실로 운반하여 분석하였다. 생물시료의 분류는 Yoon(1995), Won et al.(2005)을 참고하여 실시하였으며, 분류체계는 National Institute of Biological Resources(2023)를 따랐다.

2.2. 분석 방법

2.2.1. 군집분석

1) 우점도 지수(Dominance index, DI) :

제 1 우점종과 제 2 우점종의 개체수 비율을 나타낸다 (McNaughton, 1967).

$$DI = \frac{N_1 + N_2}{N}$$

N_1 : Number of individuals of the first dominant species

N_2 : Number of individuals of the second dominant species

N : Total individual count of occurring species

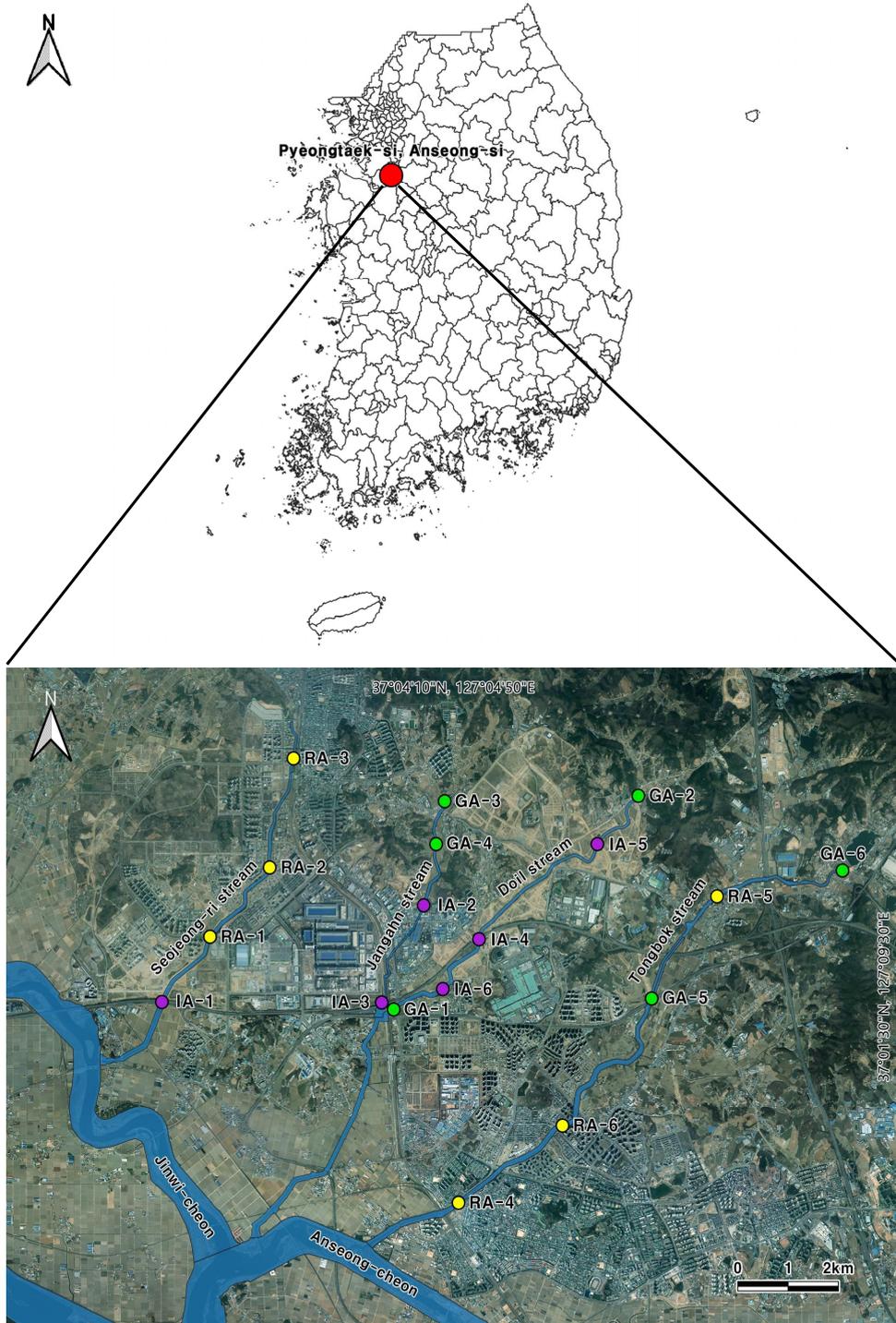


Fig. 1. Locations of study sites (Anseongcheon watershed). IA-1~6, Industrial areas survey sites 1~6; RA-1~6, Residential areas survey sites 1~6; GA-1~6, Green areas survey sites 1~6.

2) 다양도 지수(Diversity index, H') : 군집의 개체수와 종수 사이의 상대적인 균형을 나타낸다(Shannon and Weaver, 1964).

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

N_i : Number of individuals of species i

N : Total individual count of occurring species

3) 풍부도 지수(Richness index, R) : 군집의 상태를 표현하는 지수이며, 총 종수 및 개체수를 이용하여 산출하고, 종이 풍부하거나 환경의 상태가 양호할수록 높은 값을 나타낸다(Margalef, 1958).

$$RI = \frac{S-1}{\ln N}$$

S : Total number of species

N : Total number of individuals

4) 균등도 지수(Evenness index, J') : 군집 내 종 조성의 균등한 정도를 나타내며, 1에 가까울수록 안정적인 군집을 의미한다(Pielou, 1975).

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

S : Total number of species

H' : Diversity index

2.2.2. 기능군 분석

1) 섭식기능군(Functional feeding groups, FFGs) : 먹이에 대한 선호도와 이에 따른 섭식행동방법을 기반으로 섭식기능군을 구분할 수 있다(Merritt and Cummins, 1996; Smith, 2001; Ro and Chun, 2004). 섭식방법에 따라, 찢어먹는 무리(Shredder : SH), 긁어먹는 무리(Scraper : SC), 걸러먹는 무리(Collector-filterer : CF), 주워먹는 무리(Collector-gatherer : CG), 찢러먹는 무리(Predator-piercer : PI), 잡아먹는 무리(Predator-engulfers : PE), 기타(Unknown : UN)로 구분하였다.

2) 서식기능군(Habitat orientation groups, HOGs) : 살아가는 서식처에서의 행동에 따라 서식기능군을 구분할 수 있다(Merritt and Cummins, 1996; Ro, 2002).

행동에 따라, 굴파는무리(Burrower : BU), 붙어다니는 무리(Clinger : CL), 기어오르는 무리(Climber : CB), 미끄러타는 무리(Skater : SK), 기는 무리(Sprawler : SP), 헤엄치는 무리(Swimmer : SW), 기타(Unknown : UN)로 구분하였다.

2.2.3. 지표종 분석

지표종은 특정 서식지나 환경에서 개체수의 상대적 풍부도가 높은 종을 지표 종으로 정의하며, Dufrene and Legendre(1997)의 지표종 분석 방법을 적용하여, 각 지역별 상위 5개 지표종을 선정하였다.

2.2.4. 수환경평가

1) ESB (TESB, AESB)

Kong et al.(2018a)이 제안한 환경질 평가 기법인 TESB (Total ecological score of benthic macroinvertebrate community) 및 AESB (Average ecological score of benthic macroinvertebrate community)를 이용하였다.

$$\textcircled{1} \quad TESB = \sum_{i=1}^S Qi \quad \textcircled{2} \quad AESB = \frac{\sum_{i=1}^S Qi}{S}$$

$TESB$: Total ecological score of benthic macroinvertebrate community

$AESB$: Average ecological score of benthic macroinvertebrate community

Qi : Environmental quality score of species i

S : Total number of species

2) 저서성 대형무척추동물 평가지수(BMI)

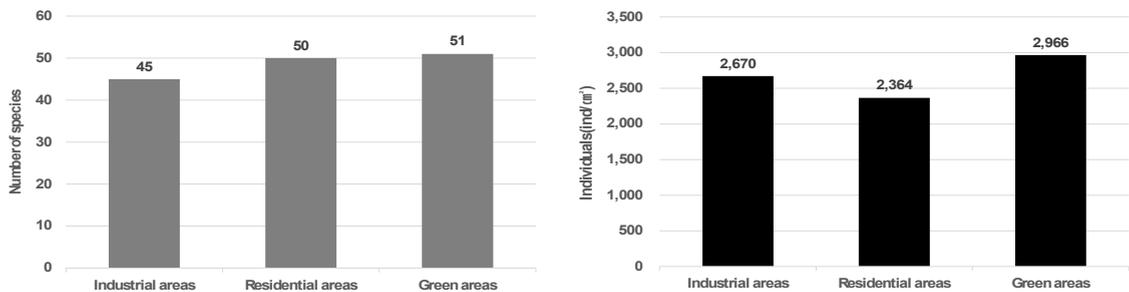
저서성 대형무척추동물 평가지수(Benthic macroinvertebrate index ; BMI) : 국립환경과학원에서 시행 중인 “수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침(하천편)”중 BMI 지수를 적용하였다(Kong et al., 2018b).

출현한 생물 지표종의 출현도, 오탁치 및 지표가중치를 적용하여 산정하며, 평가 지수에 따라 5단계인 Excellent “A”, Good “B”, Fair “C”, Poor “D”, Very bad “E” 등급으로 평가한다.

Table 2. Analysis of water quality parameters by land use type

Classification		Water temperature (°C)	DO (mg/L)	pH	Electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Industrial areas	IA-1	30.1~34.2 (32.4)	5.0~5.8 (5.4)	7.4~7.8 (7.6)	747.5~896.1 (822.3)
	IA-2	13.6~28.5 (21.1)	8.4~11.6 (9.6)	7.2~8.9 (8.4)	600.2~687.2 (642.5)
	IA-3	14.4~25.0 (19.6)	6.9~10.6 (8.5)	7.5~8.3 (7.8)	555.4~608.2 (581.2)
	IA-4	11.4~28.0 (20.2)	7.3~8.9 (8.2)	7.2~7.8 (7.6)	651.6~721.8 (686.9)
	IA-5	12.2~27.5 (21.0)	7.7~10.6 (9.1)	7.5~8.8 (8.1)	597.1~652.2 (625.0)
	IA-6	11.9~27.7 (20.1)	7.1~8.5 (7.6)	7.5~8.1 (7.8)	588.3~651.2 (620.4)
Residential areas	RA-1	11.5~26.5 (18.5)	7.1~9.8 (8.3)	7.1~8.1 (7.8)	570.2~624.8 (597.4)
	RA-2	12.1~26.0 (18.5)	6.7~9.5 (7.6)	7.5~8.0 (7.7)	555.8~607.0 (583.2)
	RA-3	13.5~25.5 (19.3)	6.3~8.1 (7.1)	7.4~8.0 (7.8)	552.6~587.7 (564.8)
	RA-4	11.4~25.3 (18.4)	6.6~7.6 (7.0)	7.5~7.8 (7.6)	528.8~579.3 (554.6)
	RA-5	10.3~24.5 (16.9)	7.7~11.9 (9.3)	7.8~8.1 (7.9)	543.6~605.3 (579.7)
	RA-6	10.3~26.5 (18.4)	6.3~8.4 (7.1)	7.5~8.1 (7.8)	591.5~643.0 (614.1)
Green areas	GA-1	13.7~27.5 (20.8)	6.9~8.8 (7.9)	7.8~8.2 (8.0)	605.2~659.2 (637.2)
	GA-2	12.4~25.0 (18.8)	6.3~8.8 (7.5)	7.7~8.5 (8.0)	582.0~617.7 (607.6)
	GA-3	14.2~26.0 (19.8)	6.0~6.8 (6.4)	7.7~8.1 (7.9)	581.6~626.5 (607.3)
	GA-4	11.1~26.5 (18.9)	6.1~9.2 (7.7)	7.8~8.2 (8.0)	581.8~621.2 (602.0)
	GA-5	10.7~25.5 (17.8)	5.2~7.7 (6.6)	7.5~8.2 (7.9)	546.6~589.3 (569.6)
	GA-6	12.4~25.8 (18.6)	6.3~9.0 (7.5)	7.7~8.1 (7.9)	575.5~621.4 (604.1)

Note : The values in parentheses represent the average values from four investigations at each survey point

**Fig. 2.** Comparison of number of species and individual density across industrial, residential, and green areas.

$$BMI = \left(4 - \frac{\sum_{i=1}^n s_i h_i g_i}{\sum_{i=1}^n h_i g_i} \right) \times 25$$

BMI : Benthic macroinvertebrate index

i : The serial number assigned to indicator species

n : Total number of indicator species

s_i : Pollution value of indicator species

h_i : Occurrence rate of indicator species

g_i : Indicator weight of indicator species

2.2.5. 통계 분석

군집지수, 수환경평가지수 등 생물학적 요인의 관계를 비교·분석하기 위해 One-way analysis of variance (ANOVA)를 실시하였으며, 통계적 유의수준(*p*-value)은 0.05로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이화학적 수질평가

공업지역에서 수온은 계절 변화에 따른 변동을 보였으며, 여름철(3, 4차 조사)에는 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 조사지점별 평균 수온은 19.6~32.4℃로, 10℃ 이상의 차이가 관찰되었다. 특히, 일부 지점(IA-1)에서는 계절과 관계없이 평균 수온이 30℃ 이상으로 측정되었다. 용존산소 또한, 계절적 차이를 보였으며 5.4~9.6 mg/L로 나타났다. IA-1에서 5.4 mg/L로, 다른 지점에 비해 상대적으로 낮은 값을 기록했다. pH는 평균 7.6~8.4로 비교적 안정적이었으며, 전기전도도는 581.2~822.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위로 나타났고, 이 중 IA-1에서 최대값, IA-3에서 최소값이 확인되었다. 주거지역에서 수온은 16.9~19.3℃로 나타났으며, 용존산소는 7.0~9.3 mg/L, pH는 7.6~7.9, 전기전도도는 554.6~614.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 측정되었다. 녹지지역에서는 수온이 17.8~20.8℃, 용존산소는 6.4~7.9 mg/L, pH는 7.9~8.0, 전기전도도는 569.6~637.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났다(Table 2).

3.2. 출현종 현황

도시지역(공업, 주거, 녹지지역)에서 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 42과 73종 8,000개체(ind/m²)였다. 이 중 공업지역에서 30과 45종 2,670개체(ind/m²)가 출현하였다. 주거지역에서는 29과 51종 2,966개체(ind/m²)가 확인되었으며, 녹지지역에서 33과 50종 2,364개체(ind/m²)로 확인되었다(Fig. 2).

3.3. 분석 결과

3.3.1. 군집분석

공업지역에서 조사지점별 4회 조사 시 우점도 지수는 0.38~0.75, 다양도 지수는 1.97~3.56, 풍부도 지수는 0.94~4.02, 균등도 지수는 0.61~0.91의 값을 보였다. 주거지역에서 조사지점별 4회 조사 시 우점도 지수는 0.36~0.64, 다양도 지수는 2.28~3.55, 풍부도 지수는 1.35~3.46, 균등도 지수는 0.70~0.89의 값을 보였다. 녹지지역에서 조사지점별 4회 조사 시 우점도 지수는 0.35~0.71, 다양도 지수는 2.18~3.54, 풍부도 지수는 1.43~3.67, 균등도 지수는 0.68~0.92의 값을 보였다.

군집분석 결과, 세 지역 모두에서 우점도 지수가 증가하면 균등도 지수가 감소하는 경향이 확인되었으며, 다양도 지수와 풍부도 지수의 경우, 양의 상관관계를 나타냈다(Fig. 3).

3.3.2. 기능군 및 지표종 분석

공업지역에서는 섭식기능군 분석 결과, UN을 제외하고, CG가 86개체(34.0%)로 가장 높은 비율을 차지하였다. PE는 37개체(14.6%)로 두 번째로 높은 비율을 보였으며, CF는 14개체(5.5%) 등의 순으로 확인되었다. 서식기능군 분석 결과, BU가 82개체(32.4%)로 가장 높은 비율을 보였다. CL은 69개체(27.3%)로 두 번째로 높은 비율을 보였으며, CB는 11개체(4.3%)로 나타났다. 주거지역에서는 섭식기능군 분석 결과, CG가 76개체(28.7%)로 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. CF는 34개체(12.8%)로 두 번째로 높은 비율을 보였으며, PE는 23개체(8.7%) 등의 순으로 나타났다. 서식기능군 분석 결과, CL은 94개체(35.5%)로 가장 높은 비율을 보였다. BU는 79개체(29.8%)로 두 번째로 높은 비율을 보였으며, SP는 10개체(3.8%)로 나타났다. 녹지지역에서는 섭식기능군 분석 결과, CG가 85개체(29.3%)로 가장 높은 비율을 차지하였으며, PE는 42개체(14.5%)로 두 번째로 높은 비율을 보였고, CF는 19개체(6.6%)로 나타났다. 서식기능군 분석 결과, CL은 106개체(36.6%)로 가장 높은 비율을 보였으며, BU는 71개체(24.5%)로 두 번째로 높은 비율을 보였고, CB는 20개체(6.9%)로 나타났다(Fig. 4).

지표종 분석을 통해 각 지역의 생태적 특성과 환경 상태를 나타내는 주요 종들을 확인하였으며 분석 결과, 공업지역에서는 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*), 깔따구류 붉은색(*Chironomidae* sp. (red-type)), 깔따구류(*Chironomidae* spp. (Non red-type)), 모기류(*Culicidae* spp.), 개뿔하루살이(*Baetis fuscatus*)가 주요 지표종으로 확인되었다. 주거지역에서는 실지렁이, 깔따구류, 개뿔하루살이, 물달팽이(*Radix auricularia*), 원돌이물달팽이(*Physa acuta*)가 주요 지표종으로 나타났으며, 녹지지역에서는 깔따구류, 깔따구류 붉은색, 실지렁이, 원돌이물달팽이, 개뿔하루살이가 주요 지표종으로 확인되었다.

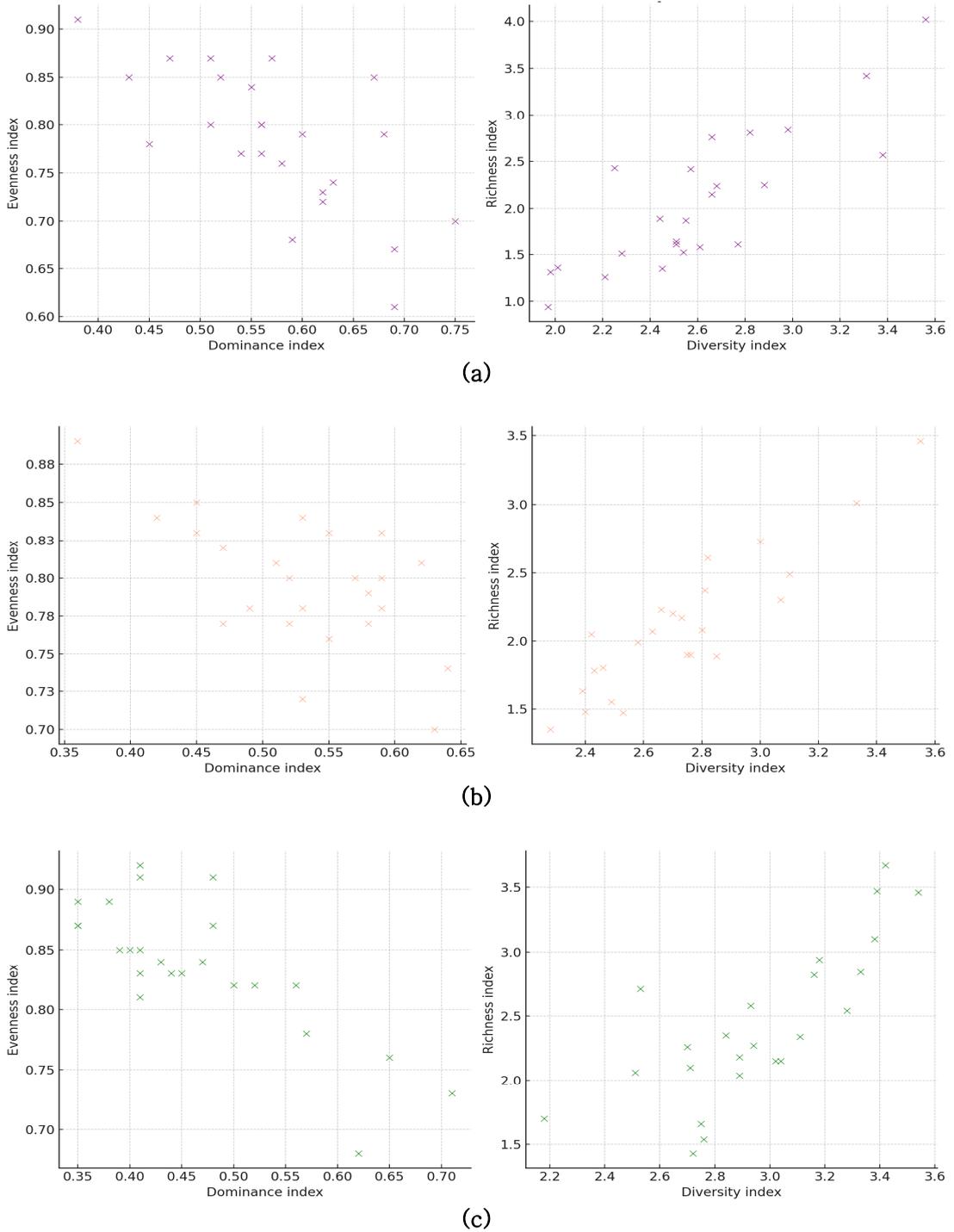


Fig. 3. Comparison of community analysis in industrial areas (a), residential areas (b), green areas (c). The dominance index and evenness index indices showed a negative correlation, while the diversity index and richness index indices exhibited a positive correlation.

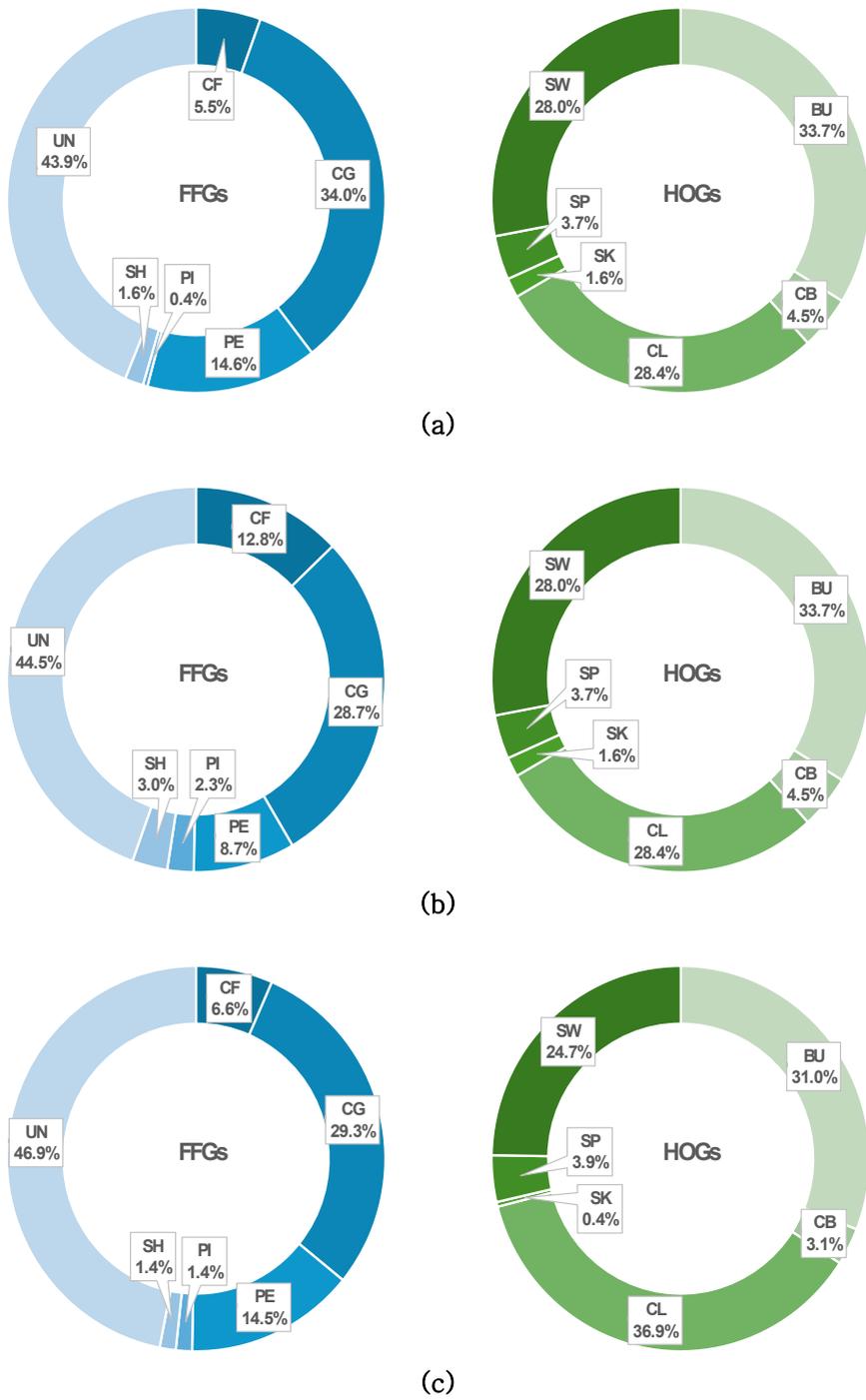


Fig. 4. Analysis of habitat and feeding functional groups in industrial areas (a), residential areas (b), green areas (c).

3.3.3. 수환경평가

공업지역에서 조사지점별 TESB 지수는 8~43의 값을 보였으며, 환경상태(Environmental status)는 "Very bad"~"Moderate", "E"~"C" 등급(Class)으로 나타났다. 지역관리(Area control) "Priority restoration"~"Monitoring", 수질등급(Water quality) "IV-VI"~"II", 종풍부도(Species richness) "Very low"~"Moderate" 였다. 평균 TESB 값(21)에 따른 환경상태는 "Bad", "D" 등급으로 나타났다. AESB 지수는 1.6~2.5의 값을 보였으며, 환경상태는 "Very bad"~"Bad", "E"~"D" 등급으로 분류되었다. 지역관리 "Priority restoration"~"Restoration", 수질등급 "IV-VI"~"III", 종풍부도 "Very low"~"Low" 였다. 평균 AESB 값(2.0)에 따른 환경상태는 "Very bad", "E" 등급으로 나타났다. BMI 지수는 19~42의 수치로 평가되었으며, 환경상태는 "Very bad"~"Poor", "E"~"D" 등급으로 나타났다. 평균 BMI 값(26)에 따른 환경상태는 "Very bad", "E" 등급의 수준으로 분석되었다. 주거지역에서 조사지점별 TESB 지수는 14~38의 값을 보였으며, 환경상태는 "Bad"~"Moderate", "D"~"C" 등급으로 나타났다. 지역관리 "Restoration"~"Monitoring", 수질등급 "III"~"II", 종풍부도 "Low"~"Moderate" 로 분석되었다. 평균 TESB 값(25)에 따른 환경상태는 "Bad", "D" 등급으로 나타났다. AESB 지수는 2.0~2.6의 값을 보였으며, 환경상태는 "Very bad"~"Moderate", "E"~"C" 등급으로 분석되었다. 지역관리 "Priority restoration"~"Monitoring", 수질등급 "IV-VI"~"II", 종풍부도 "Very low"~"Moderate" 였다. 평균 AESB 값(2.3)에 따른 환경상태는 "Bad", "D" 등급으로 나타났다. BMI 지수는 27~45의 수치로 평가되었으며, 환경상태는 "Very bad"~"Poor", "E"~"D" 등급으로 나타났다. 평균 BMI 값(34)에 따른 환경상태는 "Very bad", "E" 등급의 수준으로 분석되었다. 녹지지역에서 조사지점별 TESB 지수는 13~43의 값을 보였으며, 환경 상태는 "Bad"~"Moderate", "D"~"C" 등급으로 나타났다. 지역관리 "Restoration"~"Monitoring", 수질등급 "III"~"II", 종풍부도 "Low"~"Moderate" 로 분석되었다. 평균 TESB 값(26)에 따른 환경 상태는 "Bad", "D" 등급으로 나타났다. AESB 지수는 1.6~2.6의 값을 보였으며, 환경 상태는 "Very bad"~"Moderate", "E"~"C" 등급으로 분석되었다. 지역관리 "Priority restoration"~"Monitoring", 수질등급 "IV-VI"~"II", 종풍부도

"Very low"~"Moderate" 였다. 평균 AESB 값(2.2)에 따른 환경 상태는 "Bad", "D" 등급으로 나타났다. BMI 지수는 27~51의 수치로 평가되었으며, 환경 상태는 "Very bad"~"Fair", "E"~"C" 등급으로 나타났다. 평균 BMI 값(35)에 따른 환경 상태는 "Poor", "D" 등급의 수준으로 분석되었다(Table 3).

3.4. 고찰

본 연구에서는 도시지역(공업, 주거, 녹지지역)의 하천에서 이화학적 수질평가, 저서성 대형무척추동물을 이용한 군집분석 기능군·지표종 분석, 생물학적 지수를 활용한 수환경평가를 통해 하천생태계 건강성 평가를 실시하여 토지이용 유형에 따른 하천생태계에 미치는 영향의 차이를 규명하였다.

연구대상 하천은 주변지역 대부분이 산업단지외 주거 밀집지가 넓게 분포하는 등 전형적인 도심형 하천의 특성을 보였으며, 일부 농경지도 분포하는 것으로 조사되었다. 하천 내에는 산업용수와 하수 처리수 배출구가 위치하고, 생활쓰레기 유입 등 인위적인 교란이 지속적으로 발생하고 있었다. 특히 일부 하천 구간에서는 유기물 퇴적으로 인해 하상오염이 진행되고 있었다.

공업지역의 일부 지점(IA-1)은 평균 수온이 30℃를 초과하는 것으로 나타났는데, 이는 인근 공업 단지에서 방류되는 냉각수에 의한 영향을 받는 것으로 추정된다. 높은 수온은 용존산소의 농도를 감소시키는 주요 요인으로 작용하며, 해당 지점에서 용존산소 농도가 낮게 (5.4 mg/L) 나타난 것도 이와 관련이 깊다. 이는 Dodds and Whiles(2010)의 연구에서 보고된 바와 같이, 수온 상승이 용존산소 농도 감소와 생물다양성 저하로 이어질 수 있는 가능성을 시사한다. 또한, 공업지역의 전기전도도는 581.2~822.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 다른 두 지역에 비해 상대적으로 높은 값을 기록하였으며, 이 또한 공업 배출수로 인한 이온 농도의 증가를 반영한다. 주거 및 녹지지역의 수온, 용존산소, 전기전도도는 공업지역에 비해 상대적으로 안정적인 수준을 보였으며, 이는 생활하수나 비점오염원 유입 등 도시화로 인해 미세한 교란이 발생하면서도 비교적 균형이 유지되고 있음을 의미한다.

각 지역별 저서성 대형무척추동물의 출현종 및 개체수 현황을 비교해 보면, 공업지역 45종 2,670개체(ind/m²), 주거지역 51종 2,966개체(ind/m²), 녹지지역 50종 2,364개체(ind/m²)로 나타나 지역 간 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 저서성 대형무척추동

Table 3. Environmental status based on aquatic environment evaluation (TESB, AESB, BMI) in industrial, residential and green areas

Classification	ESB		BMI	
	TESB	AESB		
Industrial areas	Range	8~43 (21)	1.6~2.5 (2.0)	19~42 (26)
	Class	E~C (D)	E~D (E)	E~D (E)
	Environmental status	Very bad~Moderate (Bad)	Very bad~Bad (Very bad)	Very bad~Poor (Very bad)
	Species richness	Very low~Moderate (Low)	Very low~Low (Very low)	N/A
	Water quality	IV-VI~II (III)	IV-VI~III (IV-VI)	N/A
Area control	Priority restoration~Monitoring (Restoration)	Priority restoration~Restoration (Priority restoration)	N/A	
Residential areas	Range	14~38 (25)	2.0~2.6 (2.3)	27~45 (34)
	Class	Bad~Moderate (Bad)	Very bad~Moderate (Bad)	Very bad~Poor (Very bad)
	Environmental status	D~C (D)	E~C (D)	E~D (E)
	Species richness	Restoration~Monitoring (Restoration)	Priority restoration~Monitoring (Restoration)	N/A
	Water quality	III~II (III)	IV-VI~II (III)	N/A
Area control	Low~Moderate (Low)	Very low~Moderate (Low)	N/A	
Green areas	Range	13~43 (26)	1.6~2.6 (2.2)	27~51 (35)
	Class	Bad~Moderate (Bad)	Very bad~Moderate (Bad)	Very bad~Fair (Poor)
	Environmental status	D~C (D)	E~C (D)	E~C (D)
	Species richness	Restoration~Monitoring (Restoration)	Priority restoration~Monitoring (Restoration)	N/A
	Water quality	III~II (III)	IV-VI~II (III)	N/A
Area control	Low~Moderate (Low)	Very low~Moderate (Low)	N/A	

Note : The values in parentheses indicate the mean value and its corresponding environmental status, class, area control, water quality grade, and species richness

물 군집 지수에 대한 통계적 분석 결과, 일부 군집 지수에서 유의미한 차이를 보였다($p < 0.05$). 먼저, 우점도 지수는 지역 간 유의미한 차이를 보였으며, 특히 공업지역에서 가장 높은 값을 나타냈다. 이는 공업지역 하천의 환경이 특정 종이 군집을 지배하게 만드는 조건을 제공했음을 보여준다(Hilsenhoff, 1987; Rosenberg and Resh, 1993). 반면 녹지지역은 우점도 지수가 가장 낮아 상대적으로 군집이 고르게 분포하며, 보다 안정적인 환경을 유지하고 있음을 시사한다. 주거지역은 중간값을 나타내며, 교란된 환경과 일부 안정된 환경 사이의 특성을 보였다. 다양도 지수 역시 지역 간 유의미한 차이를 나타냈으며, 녹지지역에서 가장 높은 값을 보인 반면, 공업지역에서는 가장 낮은 값을 기록했다. 이는 공업지역의 하천 환경 조건이 군집 내 종 다양성을 제한하

는 것을 의미한다(Poff et al., 1997). 반면, 녹지지역에서 비교적 높은 다양도 지수는 다소 안정된 환경이 생물 종의 서식과 군집 내 균형을 유지하는 데 기여했음을 보여준다. 주거지역은 다양도 지수에서 중간값을 기록하였으며, 이는 도시화의 영향을 어느 정도 받고 있으나 완전히 교란되지는 않은 특성을 나타낸다(Wang et al., 2001). 풍부도 지수는 지역 간 유의미한 차이가 나타나지 않았는데($p > 0.05$), 이는 출현 종수와 유사하게 세 지역 모두 비슷한 수준의 개체수를 보였음을 시사한다. 하지만 개체수는 비슷하더라도 군집 구조의 질적인 측면에서 지역별 차이가 존재했다. 공업지역에서는 특정 우점 종의 비율이 높아 군집 구조가 단순화된 반면, 녹지지역에서는 상대적으로 다양한 종이 고르게 분포하여 군집의 안정성이 강조되었다(Hilsenhoff, 1987;

Wang et al., 2001). 균등도 지수는 녹지지역에서 가장 높게 나타났으며, 이는 녹지지역이 안정적인 서식 환경을 제공하고 상대적으로 군집이 특정 종에 치우치지 않고 고르게 분포하고 있음을 보여준다(Allan and Castillo, 2007). 반대로 공업지역에서는 가장 낮은 균등도를 나타냈으며, 이는 특정 종의 지배를 초래했음을 시사한다. 주거지역은 두 지역의 중간값을 보였으며, 군집 구조가 공업지역보다는 안정적이지만 여전히 균형을 이루기에는 부족함을 의미한다. 또한, 군집 지수에 대한 상관도분석 결과, 세 지역 모두에서 우점도 지수가 증가하면 균등도 지수가 감소하는 음의 상관관계를 보였다. 이는 특정 종이 지배적인 환경에서는 군집구조의 균형이 고르지 못해 생물다양성이 저하될 가능성을 시사한다. 다양도 지수 및 풍부도 지수 간에는 강한 양의 상관관계를 나타냈으며, 이는 군집의 풍부도가 증가할수록 다양성도 함께 증가한다는 것을 의미한다.

저서성 대형무척추동물의 섭식 및 서식기능군, 지표종 분석 결과, 공업지역에서는 섭식기능군 중 CG와 서식기능군 중 BU가 각각 86개체(섭식기능군 내 34.0%)와 82개체(서식기능군 내 32.4%)로 가장 높은 비율을 보였다. 이는 하천 바닥에 퇴적된 유기물이 주요 에너지원으로 작용하며, 환경 교란이 심각한 상태임을 나타낸다(Wallace and Webster, 1996). 지표종 분석 결과, 실지렁이, 깔따구류 붉은색, 깔따구류와 같은 오염 내성 종이 주요 지표종으로 확인되었으며, 이는 유기물 퇴적과 오염의 정도가 높은 환경 상태임을 반영한다(Hilsenhoff, 1987). 이러한 결과는 공업지역 하천이 오염 내성 종의 지배를 받는 군집 구조를 형성하고 있음을 시사하며, 생태적 건강성이 저하된 상태임을 보여준다. 주거지역에서는 섭식기능군 중 CG가 76개체(섭식기능군 내 28.7%)로 가장 높은 비율을 보였으며, 이는 하천 내 유기물 부하가 여전히 존재함을 나타낸다. 반면, 서식기능군 중 CL이 94개체(서식기능군 내 35.5%)로 가장 높은 비율을 차지하며, 비교적 안정적인 하천 기질이 일부 유지되고 있음을 시사한다(Allan and Castillo, 2007). 이는 도시화로 인한 교란이 발생하고 있으나 일부 안정적인 환경을 유지하는 상태임을 반영한다. 지표종 분석 결과, 실지렁이, 깔따구류, 개똥하루살이, 물달팽이, 원돌이물달팽이가 주요 지표종으로 나타났다. 공업지역과 비교하여 일부 유사하게 나타난 것은 주거지역이 여전히 유기물 퇴적 등 도시화의 영향을 받고 있음을 보여준다. 그러나 개똥하루살이, 물달팽

이, 원돌이물달팽이는 보다 다양한 환경에서 서식할 수 있는 특성을 가지며, 이는 주거지역이 공업지역보다 상대적으로 교란 강도가 낮고 일부 안정된 환경을 유지하고 있음을 시사한다(Rosenberg and Resh, 1993). 결론적으로, 주거지역은 도시화의 영향을 받고 있지만 하천 환경이 부분적으로 안정성을 유지하고 있어 군집 구조가 공업지역보다 복잡하고 다양성이 어느 정도 보존되고 있음을 의미한다. 녹지지역에서는 섭식기능군 중 CG가 85개체(섭식기능군 내 29.3%)로 가장 높은 비율을 보였다. 서식기능군 중 CL이 106개체(서식기능군 내 36.6%)로 나타났다. 이는 녹지지역이 주거지역과 유사하게 일부 하천 환경이 다소 안정적인 하천 기질이 유지되고 있음을 보여준다. 지표종 분석 결과, 깔따구류, 깔따구류 붉은색, 실지렁이, 원돌이물달팽이, 개똥하루살이가 주요 지표종으로 확인되었다. 주거지역과 녹지지역은 일부 동일한 지표종을 공유하며, 이는 두 지역이 생태적 안정성과 군집 구조에서 유사한 경향을 나타냄을 시사한다. 기능군 및 지표종 분석 결과를 종합하면, 주거지역과 녹지지역은 모두 공업지역보다 상대적으로 안정적인 하천 환경을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 다만, 주거지역과 녹지지역 간 일부 유사한 경향을 보였는데, 이는 주거지역이 정기적인 관리나 시설 개선 등의 인프라가 구축되어 있어, 환경적으로 안정적인 상태를 유지할 수 있었을 가능성을 제기할 수 있으며, 도시 계획 및 관리가 하천생태계 건강성에 중요한 요소로 작용할 수 있음을 시사한다.

공업지역에서 평균 TESB 지수에 따른 환경 상태는 "Bad", "D" 등급으로 나타났으나, 평균 AESB와 BMI 지수에 따른 환경 상태는 "Very bad" "E" 등급으로 평가되었는데, 이는 오염 내성 종이 우점하는 군집 구조와 유기물 부하가 높은 환경적 특성을 반영하며, 이러한 결과는 공업지역 하천의 오염 정도가 다소 높은 상태에 있음을 시사한다. 주거지역 및 녹지지역에서 평균 TESB 지수에 따른 환경 상태는 "Bad", "D" 등급으로 평가되어 공업지역과 유사하게 나타났으며, 통계적 분석으로도 유의미한 차이를 보이지 않았다. 다만, 평균 AESB 지수에 따른 환경 상태는 두 지역 모두 "Bad", "D" 등급으로 평가되어 상대적으로 공업지역에 비해 보다 나은 환경 상태를 나타냈고, 통계적 분석을 통해서도 유의미한 차이를 보이는 것으로 확인되었다. BMI 지수의 경우, 주거지역에서 "Very bad" "E" 등급의 환경 상태를 나타내어 공업지역과 유사하게 확인되었으나, 녹지지역은

"Poor" "D" 등급으로, 보다 나은 환경 상태를 보였으며, 통계적 분석을 통해서도 각 지역별 AESB, BMI 지수는 유의미한 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 결과적으로 주거 및 녹지지역이 공업지역에 비해 상대적으로 안정적인 환경 상태를 보였으나, 도시화에 의한 영향을 받는 것으로 확인되었다. 다만, 교란 강도 및 오염 정도가 공업지역에 비해 상대적으로 낮고, 저서성 대형무척추동물의 군집 구조가 비교적 안정적으로 유지되고 있는 것으로 해석된다.

본 연구에서는 TESB, AESB, BMI 지수를 활용하여 수환경평가를 실시하였으며, 각 지역별 결과에서 일부 지수에 따른 환경 상태가 유사하게 평가된 경향도 있으나, 각 지수에 따라 환경 상태가 차이를 보이는 경우도 확인되었다. 예를 들어 공업지역의 경우, TESB ("Bad") 및 AESB ("Very bad")에 따른 환경 상태가 차이를 보이는 것으로 나타났다. TESB, AESB 모두 환경 상태를 평가하는 데 사용되지만, 두 지수는 평가 요소와 가중치가 다르기 때문에 일부 차이를 보일 수 있다. TESB는 종 다양성 및 풍부도를 종합적으로 평가하여 하천 생태 건강성을 나타내는 지수로, 환경 교란이 비교적 심하지 않은 지역에서 더 민감하게 작용할 가능성이 있다(Bonada et al., 2006). 즉, 표본의 크기에 따라 민감하게 작용하는 반면, AESB는 오염 내성 종과 감수성 종의 비율을 강조하여 오염 상태에 더 민감하게 반응하는 경향이 있으며 즉, 물리적인 요인보다는 수질에 보다 밀접한 관계를 가진다(Kong et al., 2018a). 따라서, 공업지역과 같은 오염의 정도가 높은 지역에서는 AESB가 TESB 보다 더 낮은 값을 나타낼 가능성이 높다. 이러한 차이는 TESB가 다양한 환경 요인을 종합적으로 평가하는 반면, AESB는 특정 군집의 오염 내성 정도에 중점을 두기 때문에 발생한다. 또한, AESB(TESB, AESB)에 따른 환경 상태와 BMI에 의한 환경 상태가 차이를 보이는 이유는 평가 초점이 다르기 때문이다. BMI는 하천 환경의 건강성을 평가할 때 주로 특정 지표종의 출현 빈도와 오염 내성도를 강조한다. 이는 AESB와 비슷한 성격을 가지고 있지만, BMI는 하천 환경의 전반적인 다양성보다는 군집 내 특정 종의 비율에 더 집중한다. 반면, TESB는 하천생태계를 종풍부도와 다양성 관점에서 평가하기 때문에, 종의 분포가 상대적으로 고르게 나타나는 주거 및 녹지지역에서는 BMI보다 더 긍정적인 평가를 받을 수 있다. 결과적으로, 공업지역과 같이 특정 종이 군집을 지배하는

환경에서는 BMI와 AESB가 낮은 값을 보이며, TESB는 상대적으로 완화된 결과를 나타낼 수 있다. 따라서, 본 연구에서 활용된 TESB, AESB, BMI와 같은 다양한 생물학적 평가 지수를 병행하여 사용하는 것이 중요함을 보여준다. 각 지수는 평가의 초점이 다르므로 특정 지역의 하천 건강성을 종합적으로 이해하고 신뢰성 있는 평가를 수행하기 위해서는 다양한 지표의 결합 분석이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 안성천 유역 도시지역(공업, 주거, 녹지지역)의 생태계 건강성 평가를 실시하여 토지이용 유형에 따른 하천생태계에 미치는 영향의 차이를 규명하였으며, 주요 결과는 다음과 같다. (1)공업지역 하천은 높은 수온, 낮은 용존산소, 높은 전기전도도와 같은 이화학적 특성을 나타내며, 특정 종이 우점하는 비교적 단순화된 군집 구조를 보였다. (2)주거 및 녹지지역은 공업지역에 비해 비교적 안정적인 이화학적 수질과 상대적으로 다양한 군집 구조를 유지하였으나, 도시화로 인한 영향을 완전히 배제할 수 없는 것으로 나타났다. (3)수환경평가(TESB, AESB, BMI) 결과, 공업지역은 비교적 오염의 정도가 심한 상태를, 주거 및 녹지지역은 상대적으로 나은 환경 상태를 보였으나, 여전히 도시화의 영향을 받고 있음이 확인되었다. 결론적으로, 산업화 등의 도시화는 하천생태계의 건강성과 생물다양성에 부정적인 영향을 미치며, 특히 공업지역에서 그 영향이 두드러졌다. 그러나 주거 및 녹지지역에서 상대적으로 양호한 환경 상태가 관찰된 점은 적절한 관리와 계획이 수반될 경우 하천생태계의 건강성과 기능을 일정 수준 유지할 수 있음을 보여준다. 결과적으로 도시화의 영향을 이해하고 이를 바탕으로 지역 맞춤형 관리 전략을 수립하는 것은 하천생태계의 지속 가능성을 확보하는데 필수적이다. 향후 연구는 장기 모니터링과 보전 전략의 효과성을 평가하여 도시화가 하천생태계에 미치는 영향을 완화할 방안을 제시해야 할 것이다.

REFERENCES

- Allan, J. D., Castillo, M. M., 2007, Stream ecology: Structure and function of running waters, 2nd ed., Springer Science and Business Media, Dordrecht, Netherlands, 1-400.

- Bonada, N., Prat, N., Resh, V. H., Statzner, B., 2006, Developments in aquatic insect biomonitoring: A Comparative analysis of recent approaches, *Annu. Rev. Entomol.*, 51, 495-523.
- Braccia, A., Voshell, J. R., 2006, Environmental factors accounting for benthic macroinvertebrate assemblage structure at the sample scale in streams subjected to a gradient of cattle grazing, *Hydrobiologia*, 573, 55-73.
- Collins, R., Jenkins, A., 1996, The impact of agricultural land use on stream chemistry in the middle hills of the Himalayas, *J. Hydrol.*, 185, 71-86.
- Dodds, W. K., Whiles, M. R., 2010, *Freshwater ecology: Concepts and environmental applications of limnology*, 2nd ed., Academic Press, London, UK, 330-333.
- Dufrêne, M., Legendre, P., 1997, Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach, *Ecol. Monogr.*, 67, 345-366.
- Haith, D. A., 1976, Land use and water quality in New York rivers, *J. Environ. Eng-ASCE.*, 102, 1-15.
- Hilsenhoff, W. L., 1987, An Improved biotic index of organic stream pollution, *Great Lakes Entomol.*, 20, 7.
- Hynes, H. B. N., 1963, Imported organic matter and secondary productivity in streams, *Proceedings of 16th International Congress of Zoology*, Washington, D.C., USA, 324-329.
- Kehde, P. M., Wilhm, J. L., 1972, The effects of grazing by snails on community structure of periphyton in laboratory streams, *Am. Midl. Nat.*, 87, 8-24.
- Kong, D. S., Park, Y. J., Jeon, Y. R., 2018a, Revision of ecological score of benthic macroinvertebrates community in Korea, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 34, 251-269.
- Kong, D. S., Son, S. H., Hwang, S. J., Won, D. H., Kim, M. C., Park, J. H., Jeon, T. S., Lee, J. E., Kim, J. H., Kim, J. S., Park, J., Kwak, I. S., Jun, Y. C., Park, Y. S., Ham, S. A., Lee, J. K., Lee, S. W., Park, C. H., Moon, J. S., Kim, J. Y., Park, H. K., Park, S. J., Kwon, Y., Kim, P., Kim, A. R., 2018b, Development of benthic macroinvertebrates index (BMI) for biological assessment on stream environment, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 34, 183-201.
- Kwon, S. J., Jun, Y. C., Jeong, J. C., Han, S. C., Lee, J. E., 2012, Distribution of benthic macroinvertebrates according to altitude at Jirisan National Park, *J. Natl. Park Res.*, 3, 33-43.
- Margalef, R., 1958, Information theory in ecology, *General Systems.*, 3, 36-71.
- McNaughton, S. J., 1967, Relationship among unctional properties of California grassland, *Nature*, 216, 168-169.
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., 1996, *An introduction to the aquatic insects of North America*, 3rd ed., Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, IA, USA. 1-862
- Metcalf, J. L., 1996, Biological water quality assessment of rivers: Use of macroinvertebrate communities, In: Petts, G., Calow, P. (eds.), *River restoration*, Blackwell Science, Oxford, UK, 17-43.
- Meybeck, M., 2003, Global analysis of river systems: From Earth system controls to Anthropocene syndromes, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 358, 1935-1955.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014, Basic river plan for the midstream and downstream of the Anseongcheon watershed [Anseongcheon (National River)], Report No. 11-1613168-000016-01, ISAN Co., Ltd., Dongbu Engineering Co., Ltd., Pyeonghwa Engineering Co., Ltd., Seoul and Sejong, Korea, 13-48.
- National Institute of Biological Resources, 2023, National list of species of Korea, <https://species.nibr.go.kr/index.do>.
- National Institute of Ecology, 2019, Guidelines for the 5th national natural environment survey, The Ministry of Environment, Korea, 1-135.
- Park, S. S., Park, B. K., Lee, S. H., 1994, Comparison of tributary water qualities relating to land use types in the Han River watershed, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 10, 10-16.
- Paul, M. J., Meyer, J. L., 2001, Streams in the urban landscape, *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 32, 333-365.
- Pielou, E. C., 1975, Species diversity and pattern diversity in the study of ecological succession, *J. Theor. Biol.*, 10, 370-383.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., Stromberg, J. C., 1997, The natural flow regime, *BioScience*, 47, 769-784.
- Ro, T. H., 2002, Categorization and ecological importance of functional feeding group as essential units in lotic ecosystems, *Bull. Korean Assoc. Conserv. Nat.*, 21, 67-93.
- Ro, T. H., Chun, D. J., 2004, Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis, *Korean J. Ecol. Environ.*, 37, 137-148.
- Rosenberg, D. M., Resh, V. H., 1993, *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*, Springer, New York, USA, 1-488.

- Shannon, C. E., Weaver, W., 1964, The mathematical theory of communication, 10th ed., Univ. Illinois Press, Urbana, USA, 14-16.
- Smith, D. G., 2001, Pennak's freshwater invertebrates of the United States: Porifera to Crustacea, 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 1-664.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., Cushing, C. E., 1980, The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37 130-137.
- Wallace, J. B., Webster, J. R., 1996, The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function, *Annu. Rev. Entomol.*, 41, 115-139.
- Wang, L., Lyons, J., Kanehl, P., Bannerman, R., 2001, Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales, *Environ. Manage.*, 28, 255-266.
- Wentworth, C. K., 1922, A Scale of grade and class terms for clastic sediments, *J. Geol.*, 30, 377-392.
- Won, D. H., Kwon, S. J., Jun, Y. C., 2005, Aquatic insects of Korea, 1st ed., Korea Ecosystem Service, Seoul, Korea, 1-363.
- Yoon, I. B., 1995, Aquatic insects of Korea, 1st ed., Junghaengsa, Seoul, Korea, 5-237.
-
- Researcher. Oh-Jip Park
Eco Technology Institute co., Division of Life Sciences,
College of Life Sciences and Bioengineering, Incheon
National University
dhwlqcft@gmail.com
 - Professor. Yang-Seop Bae
Division of Life Sciences, College of Life Sciences and
Bioengineering, Incheon National University
baeys@inu.ac.kr