

2022년 시정과제 추진 보고서

저서동물을 이용한 도시복원하천의 생태학적 평가



2022. 12. 30.



인천광역시 보건환경연구원

물환경연구부 환경생태과

저서동물을 이용한 도시복원하천의 생태학적 평가

■ 요 약

인천의 대표적인 도시복원하천인 장수천, 승기천, 굴포천, 공촌천을 대상으로 생태학적 평가를 실시하였다. 평가를 위해 각 하천에서 분기별로 저서성 대형무척추동물을 채집하였고, 수질 및 하상퇴적물을 함께 채취하여 분석하였다.

하천 수질은 하천의 유지용수 및 비점오염원에 의해 영향을 받는 것으로 판단되었으며, 하상퇴적물의 중금속 함유량은 3개 하천에서 ‘약간 나쁨’ 한 개 하천에서 ‘나쁨’으로 파악되었다. 하천 공극수의 중금속은 환경기준 이내였으며, 생태독성은 나타나지 않았다.

조사기간 총 38종 15,835개체의 저서성 대형무척추동물을 채집하였으며 대부분 ‘실지렁이’로 대표되는 환형동물문과 ‘갈따구’로 대표되는 절지동물문의 저서동물이 우점하였다. 저서동물의 생활상 분류는 섭식기능군에서 주워 먹는 무리, 서식기능군에서 굴 파는 무리가 70 % 이상을 차지하여 조사 하천이 세립질의 하상과 느린 유속을 갖는 하천임을 간접적으로 알 수 있었다.

하천 생태건강성을 나타내는 저서동물지수(BMI)는 15.8 ~ 80.6까지 넓은 범위를 나타냈으며 하천별로는 공촌천 - 장수천 - 굴포천 - 승기천 순으로 생물다양성지수 역시 유사 경향을 보였다. 2022년은 가뭄이었던 상반기와 집중 강우로 시작한 하반기 이후의 저서성 대형무척추동물의 출현 경향이 매우 달라져 섭식기능군은 걸러 먹는 무리와 찢어 먹는 무리가, 서식기능군은 붙는 무리가 증가하는 경향을 보여 하천의 서식지 상태의 변화폭이 컸음을 알 수 있었다. 하천의 오염을 나타내는 대부분의 수질 항목은 서로 상관성이 있었으며, 하천생태의 건강성과 다양성을 보여주는 생물지표 역시 서로 상관관계를 보였다. 조사 시기별 지점 간 유사성을 통계적으로 살펴본 결과, 3그룹으로 나눌수 있었으며, 이에 따른 가장 큰 영향인자는 수질 오염도와 생물지수로 파악되었다. 따라서 이같은 영향인자들로 하천 수질평가에서 상호보완적인 적용이 가능 할 것으로 판단된다.

본 평가는 다양한 생물의 서식처이자 수생태계를 구성하는 기본공간으로서 하천의 역할을 확인하고, 앞으로의 생태하천 관리를 위해 현재의 하천 생태를 점검하고자 하였다. 생태하천의 유지관리를 위해서 하천 유지용수와 비점오염원의 관리, 하상퇴적물의 적정 준설 등 생물의 특성을 고려한 서식환경을 우선적으로 개선하고 향후 지속적인 조사를 기반으로 한 문제점 도출을 통해 하천별 환경과 특성에 맞는 단계적 생태하천 복원 과정이 필요할 것으로 판단된다.

저서동물을 이용한 도시복원하천의 생태학적 평가

서상원, 민성은, 길혜진, 이지영, 이주형, 성지홍, 권문주
인천보건환경연구원 환경생태과

Ecological Evaluation of Restored Urban Streams Using Benthic Macroinvertebrates

Sang-Won Seo, Sung-Eun Min, Hye-Jin Kil, Ji-Young Lee, Ju-Hyeong Lee, Ji-Hong Seong, Mun-Ju Kwon

Division of Environmental ecology, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

This study conducted an ecological evaluation on Jangsuecheon, Seunggicheon, Gulpocheon, and Gongchoncheon, which are representative restored urban streams in Inchoen. Benthic macroinvertebrates were collected every quarter from each stream, and benthic macroinvertebrate index(BMI) and biological indices were calculated to evaluate the ecological healthness. Also, environmental items such as water quality of stream and heavy metal contamination of riverbed sediments were analyzed. Benthic macroinvertebrates and environmental items were compared to investigate the habitat environment of benthic macroinvertebrates. As a result, 15,835 benthic macroinvertebrates of 38 species were collected. Biological indices were calculated as having high dominance, moderate diversity, and unstable evenness at most survey sites. The BMI values, which represents the ecological healthness of the stream, analyzed in four urban streams ranged from 15.8 to 80.6, in order of Gongchoncheon, Jangsuecheon, Gulpocheon, and Seunggicheon. And biodiversity index also showed a similar trend. Heavy metals in riverbed sediments, which indicate habitat contamination of benthic animals, showed 'slightly bad' in three rivers and 'bad' in the other. Statistical analysis was also conducted to determine the effect on benthic macroinvertebrates. Most of water quality items showed a positive correlation, and the BMI confirmed a significant correlation with a correlation coefficient of 0.5 or more in the biodiversity index such as the number of species, diversity and evenness. In addition, clustering analysis was conducted to compare the similarities among the survey subjects. As a result of clustering analysis, each survey subjects were classified by water pollution factors and biological indices. This study was intended to confirm the role of the river as a habitat for various organisms and as a basic space constituting the aquatic ecosystem, and to inspect the current ecological river for sustainable river management. For the maintenance and management of ecological rivers, management of river maintenance water and non-point pollution sources, dredging of riverbed sediments, restoration of rivers through selection and concentration, and creation of habitat environments considering the characteristics of organisms are required.

Key words : benthic macroinvertebrates, BMI, urban streams

I. 서론

그동안의 우리나라 물관리 정책은 오염물질 관리 위주의 정책이었으나, 2000년대에 들어 국민 건강과 수생태계라는 개념을 고려하는 정책으로 패러다임이 변화하였다. 따라서 도시하천의 복원 역시 유지용수를 확보하고, 수질을 개선하는 것뿐만 아니라 생태적으로도 생물이 함께 살아가야 할 공간을 만들어주는 것으로 인식되고 있다(국립환경과학원, 2017).

하천의 수생태계는 하천을 이루는 수역과 수변지역을 구성하는 식물, 동물 및 미생물 그리고 이들이 살아가는 환경이 기능적인 단위로 상호작용하는 유기적인 복합체로 하천에 대한 평가는 수질뿐만 아니라 생물학적인 면을 고려한 수생태계의 건강성을 평가해야 한다(곽승국, 2012).

저서성 대형무척추동물은 하천 생태계의 1차 또는 2차 소비자의 역할을 하기 때문에 생산자인 부착조류와 최종 소비자인 어류 사이의 먹이사슬에서 중요한 위치를 차지하고 있어 수생태계의 건강성을 평가하는데 많이 사용된다. 이들은 긴 생활사와 다양한 분류군을 가지며 이동성이 적어 하천 고유의 환경과 수질오염과 같은 환경변화를 반영하는 지표 생물군으로서의 역할에 매우 적합하다. 또한 종이 다양하고 정량적으로도 충분하기 때문에 채집을 통한 분석이 용이하고, 학문적으로도 종분류가 잘 되어있어 하천의 수생태 건강성 평가에 널리 이용된다(Yoon *et al.*, 1992).

우리나라에서도 1970년대부터 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 수질평가 기법을 도입하려는 노력이 꾸준히 이어져 내려오다, 1990년대 들어 저서성 대형무척추동물에 대한 수질 지표를 설정하여 이를 생물지수로 개발하려는 노력이 이어졌다(Yoon *et al.*, 1992). 이후 한국오수생물지수(Korean Saprobic Index, KSI)(Won *et al.*, 2006)와 한국저서생물지수(Korean Benthic Macroinvertebrate Index,

KBI)가 제안되었다(Kong *et al.* 2018). 2016년 환경부에서 운영 중인 ‘수질측정망’에 ‘생물측정망’을 신설하고 이에 국립환경과학원에서는 ‘수생태 현황조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침’을 제정하였다. 이 지침의 저서성 대형무척추동물에 의한 수생태 건강성 평가는 저서동물지수(Benthic Macroinvertebrates Index, BMI)라는 명칭으로 제시되어 사용 중이다.

인천광역시의 하천은 강화도와 옹진군을 제외한 내륙 지방에 16개의 지방하천과 2개의 국가하천이 흐르고 있으며, 대부분이 도시를 관류하는 전형적인 도시하천이다. 유로연장이 가장 긴 하천은 약 15 km인 굴포천이며, 인천의 대부분 하천은 10 km 이내의 짧은 유로를 갖는 작은 소하천이다(변성준, 2019). 2003년 이후 장수천, 승기천, 굴포천, 공촌천, 나진포천 등 5대 하천살리기사업을 진행하며 이들 하천은 인천의 대표적인 도시복원하천으로 관리되고 있으며, 현재 굴포천과 승기천은 상류의 복개된 부분을 걷어내고 새로운 도시생태하천으로의 복원을 계획 및 시행하고 있다.

본 연구에서는 인천광역시의 대표적인 도심 하천 4개소를 대상으로 저서성 대형무척추동물 및 하천환경의 현황조사 및 모니터링을 통해 도시복원하천의 생태학적 평가를 기초로 생태개선방향을 모색하여, 자연형 하천을 유지관리하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상지역

본 연구에서는 장수천, 승기천, 굴포천, 공촌천 등 인천에 위치한 생태복원 하천을 선정하여 생태학적 평가를 실시하였다.

장수천은 한강(팔당)에서 취수한 물을 원수로 하는 인천대공원 호수의 유출부 부터 서해안의 소래습지생태공원까지 이어지는 총 길이 7.6 km의 하천이다. 승기천의 시점은 도심 한가운데인

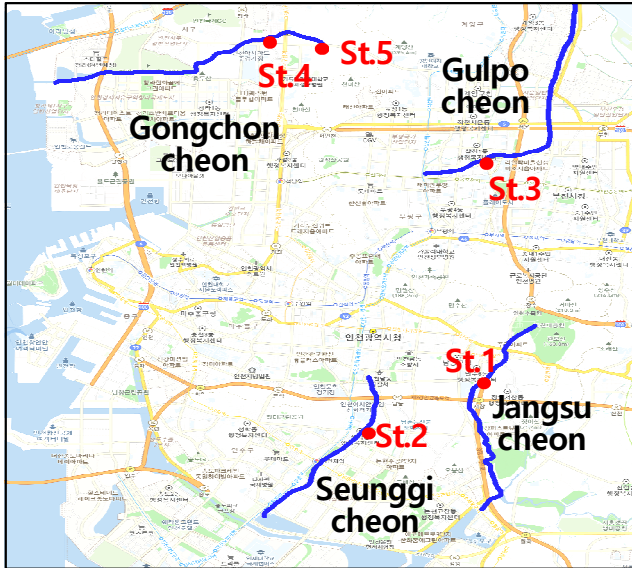


Fig. 1. Location of study sites.

인천종합버스터미널 부근으로 시점 상류부는 복개되어 있으며, 하류는 남동공단 유수지로 총길이는 6.2 km, 유지용수는 만수 하수처리장의 방류수를 사용하고 있다. 굴포천은 인천의 대표적인 국가하천으로 도심지역인 부평구청에서 시작하여 한강까지 약 15 km의 길이를 갖고 있다. 시점 상류부는 복개되어 있으며, 한강(풍납) 원수를 유지용수로 사용하였으나 최근에는 주로 굴포 하수처리장 처리수를 오존으로 재처리하여 유지용수로 사용하고 있다.

Table 1. GPS Information of study sites.

No.	River	Coordinate
St.1	Jangsucheon	N 37° 26' 22" E 126° 44' 23"
St.2	Seunggicheon	N 37° 25' 23" E 126° 42' 10"
St.3	Gulpocheon	N 37° 30' 47" E 126° 44' 21"
St.4	Gongchoncheon	N 37° 33' 17" E 126° 40' 24"
St.5	Gongchoncheon (upstream)	N 37° 33' 6" E 126° 41' 23"

공촌천은 계양산 아래쪽에서 시작하여 청라를 거쳐 서해까지 8.6 km의 길이를 갖고 있으며, 공촌 하수처리장 방류수와 한강(풍납) 원수를 유지용수로 사용하고 있다. 모든 하천이 2003년 이후 한차례 이상 하천 복원을 하였으며, 특히 굴포천의 경우 현재 시점 상류부의 복개 지점을 복원하는 공사를 진행 중에 있다(인천광역시, 2022).

조사지점은 도심하천의 영향을 살펴보기 위하여 각 하천의 유지용수 유출부로부터 1 km 이상 떨어져 있으며 도심을 지나는 지점을 선정하고, 대조군으로 하천유지용수와 도심지 영향을 받지 않는 공촌천 상류 지점을 선정하여 총 5지점을 조사하였다. 조사 시기는 2022년 분기별로 1회씩 4회, 대조군은 1분기를 제외하고 3회 실시하였다. 각 하천의 시료 채취지점에 대하여 (Fig. 1.)과 (Table 1.)에 나타내었다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 하천수질 및 하상퇴적물 조사

하천의 수질 환경을 조사하기 위해 물환경 측정망의 수질자료 15항목을 이용하였다. 수온, pH, DO, 전기전도도는 현장측정기(ProDSS, YSI)를 이용하여 측정하였고, BOD(model 5100, YSI), COD, TOC(Formacs TOC analyzer, Skalar), SS, Chl-a(UV/vis analyzer, SHIMAZU), T-N, T-P, NH₃-N, NO₃-N(SAN++, Skalar), 총대장균군, 분원성대장균군 등은 현장 채수 후 실험실에서 분석하였다.

또한 저서성 대형무척추동물에 대한 하상퇴적물의 영향을 살펴보기 위하여 소형 포나그랩을 이용하여 하상퇴적물을 채취하여 하상퇴적물의 중금속과 공극수의 생태독성 및 중금속을 분석하였다. 채취한 하상퇴적물을 풍건하여 분쇄한 뒤, 이를 질산 등의 산으로 전처리하여 Pb, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Hg 등의 중금속(5110 ICP-OES, Agilent ; MA-3000, NIC)을 측정하였다. 공극수는 퇴적물을 4,000 rpm에서

Table 2. Biological indices used in this study.

Indices	Equation	Component
Benthic Macroinvertebrate Index	$BMI = \left(4 - \frac{\sum_{i=1}^n s_i h_i g_i}{\sum_{i=1}^n h_i g_i} \right) \times 25$	i : Number assigned to the species n : Number of taxa s_i : Saprobic valency of i th taxon h_i : Frequency of i th taxon g_i : indicator weight value of i th taxon
Dominance index	$DI = \frac{N_1 + N_2}{N}$	N_1 : Number of individuals in 1st dominant species N_2 : Number of individuals in 2nd dominant species N : Total number of individuals
Species Diversity Index	$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i), (p_i = \frac{N_i}{N})$	N_i : Number of individuals in species i i : Number assigned to the species
Evenness Index	$E = \frac{H'}{H_{\max}} = \frac{H'}{\ln(S)}$	p_i : Proportional abundance of i species S : Total number of species
Richness Index	$R = \frac{(S-1)}{\ln(N)}$	

10분간 원심분리하여 1차 공극수를 추출한 후, 이를 5분간 2,500 rpm에서 재 원심분리한 상등액을 실험에 사용하였다(백용욱, 2010). 공극수는 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 급성 생태독성 시험을 실시하고 공극수 중의 중금속(7900 ICP-MS, Agilent)을 분석하였다. 분석과 관련된 제반 사항은 수질오염공정시험기준(국립환경과학원, 2021)에 따라 시행하였다.

2.2.2. 저서성 대형무척추동물 분포조사

수생태계 현황조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침(국립환경과학원, 2019)의 저서성 대형무척추동물 현장 조사 방법에 따라 저서성 대형무척추동물을 채집하였다. 조사지점의 여울 구간을 우선으로 일반적인 하상 구조를 가진 지점 3곳 이상을 선정 한 후, 손갈퀴와 서버넷(30 × 30 cm, 망목 1.0mm)을 이용하여 하상 10 cm 까지 긁어 채집하였다. 채집된 표

본은 실험실로 운반하여 분류한 후, 종 수준까지 동정하였으며 종 수준까지 분류가 어려운 종은 외부 형태가 확연히 구분되는 개체에 대하여 임의의 상위단계 분류군인 과 또는 속 등으로 정리하였다. 종의 동정은 수서곤충검색도설(윤일병, 1995), 한국의 수서곤충(원두희, 2008), 물속생물도감 저서성대형무척추동물(권순직, 2013), 한국산 저서성 대형무척추동물 생태도감(공동수, 2013) 등의 문헌을 참고하였다.

2.2.3. 자료분석

저서성 대형무척추동물 분포조사의 동정 결과를 정량화하여(개체수/m²) 생물지수를 산정하였다(Table 2.). 본 연구에서는 저서동물지수(BMI)와 다양성을 평가하기 위한 군집지수인 우점도 지수(DI, Dominance index)(McNaughton 1967), 다양도 지수(H', Species Diversity Index)(Shannon and Weaver. 1949), 균등도 지수(E,

Evenness Index)(Pielou, 1975), 풍부도 지수 (R, Species Richness Index)(Margalef 1958) 등을 산정하였다.

통계분석을 위해 R 프로그램(version 4.2.1)을 사용하여 각 하천의 생물지수와 주요 수질 항목에 대한 상관관계를 살펴보고(R package 'psych', 'corplot'), 군집분석(Clustering analysis)과 비계량적 다차원척도법(Nonmetric multidimensional scaling)을 이용하여 각각의 케이스간 유사성을 분석하였다.(R package 'cluster', 'NbClust', 'factoextra', 'MASS', 'vegan')

III. 결과 및 고찰

3.1. 하천환경

3.1.1. 하천수질

하천의 수질은 매월 정기적으로 분석하고 있는 물환경측정망의 결과를 참조하였으며, 2022년 1월~12월까지의 평균과 Boxplot을 (Table 3.)과 (Fig. 2.)에 나타내었다.

수온은 일반적으로 하천의 깊이, 넓이, 유량 등 물리적 요인에 의한 영향을 많이 받으나 이번 4개 하천 조사지점의 경우 물리적인 요인 보다는 하천유지용수의 차이 때문으로 판단된다. 일반적으로 하수처리장의 생물학적 처리공법으로 인하여 하수처리장 방류수의 수온은 높은 편으로 알려져 있다. 방류수를 하천유지용수로

사용하지 않는 St.1의 1분기 평균 수온 3.0 ℃와 비교 시 다른 지점의 수온은 8.9~12.1 ℃의 범위를 보여 수온 차이에 의한 영향도 있을 것으로 추측된다.

수소이온농도는 St.1과 St.4가 비교적 높은 편으로 St.1은 유지용수로 사용되는 호수의 조류 발생으로 인한 수소이온농도 상승 때문으로 보이며, St.4는 하수처리장 방류수의 영향으로 보인다.

용존산소는 St.2가 비교적 낮은 편으로 다른 하천에 비해 오염도가 높기 때문으로 판단되며, 전기전도도는 하수처리장 방류수를 유지용수로 사용하는 지점에서 전반적으로 높게 측정되었다.

생물화학적산소요구량과 총유기탄소량은 하천의 유기물질의 양을 알 수 있는 항목으로, 조사 하천의 생물화학적산소요구량은 평균 II(약간 좋음) ~ III 등급(보통), 총유기탄소량은 평균 Ib(좋음) ~ IV(약간 나쁨)로 하수처리장 방류수를 유지용수로 사용하는 하천의 수질이 약간 낮은 것으로 나타났다.

총질소 역시 자연 하천에 비하여 높은 편으로 그 중 질산성 질소의 비율이 높은 편이며, 암모니아성 질소는 농도변화가 심하여 수생생물에 다소 영향을 미칠 것으로 추정된다. 총인은 식물플랑크톤의 성장에 필수 영양염류로 총인의 농도가 늘어나면 식물플랑크톤의 번성으로 인한 용존산소 부족으로 어류 등의 수중생물에 영향을 미치기 때문에 중요한 항목이다.

Table 3. Water quality of the study sites.

Item	Temp. (℃)	pH	DO (mg/L)	EC (μS/m)	BOD (mg/L)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
St.1	15.4 ± 10.2	7.9 ± 0.2	11.1 ± 2	297.3 ± 39.1	2.2 ± 0.8	2.2 ± 0.5	7.8 ± 5.3	2.3 ± 0.6	0.102 ± 0.139	1.8 ± 0.6	0.044 ± 0.056	9.8 ± 6.9
St.2	18.3 ± 7.8	7.5 ± 0.4	8.0 ± 1.9	808.8 ± 68.2	3.3 ± 1.5	5.7 ± 1.1	10.6 ± 6.3	5.3 ± 2.1	0.681 ± 0.721	3.5 ± 1.8	0.179 ± 0.103	4.2 ± 4.5
St.3	19.0 ± 8.1	7.4 ± 0.4	9.7 ± 2.7	509.3 ± 92.7	4.8 ± 9.2	5.0 3.4	20.4 ± 21.5	9.7 ± 1.7	0.400 ± 0.888	7.9 ± 2.3	0.110 ± 0.046	3.3 ± 2.5
St.4	19.7 ± 7.4	8.1 ± 0.3	10.4 ± 1.3	721.8 ± 305.6	2.8 ± 1.8	3.5 ± 1.3	6.2 ± 3.8	5.6 ± 1.6	0.304 ± 0.371	4.6 ± 1.7	0.216 ± 0.184	6.3 ± 6.2

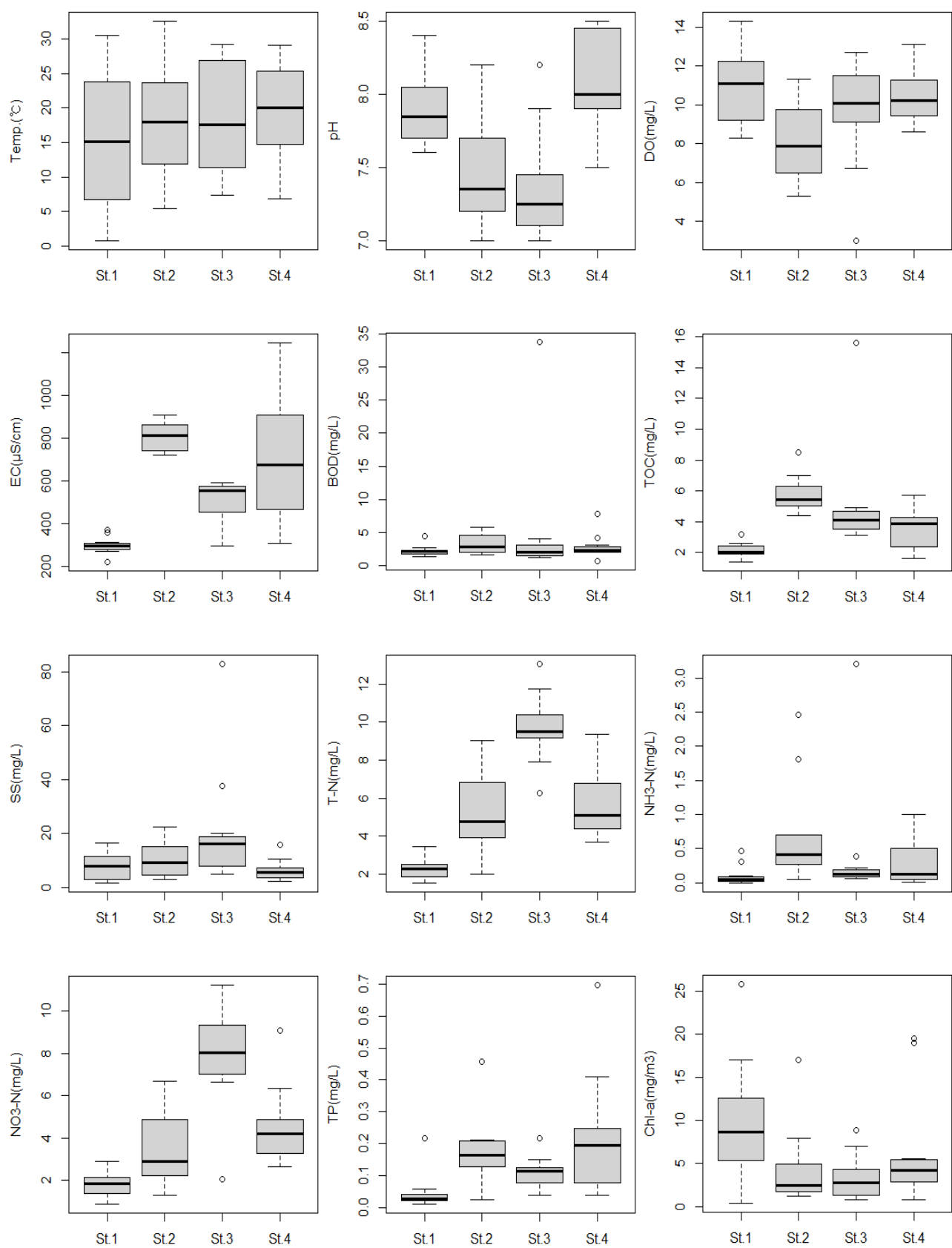


Fig. 2. Boxplot of water quality items.(circle : Outlier)

이번 연구의 조사 하천은 길이가 짧아 조류 발생량을 간접적으로 나타내는 클로로필-a가 평균 3.3 ~ 6.3 mg/m³ 정도로 일반적인 수준을 나타내고 있으나, St.1의 클로로필-a는 높은 편으로 이는 유지용수로 사용되는 호수의 조류 발생 때문으로 판단된다.

Boxplot의 많은 수질 항목에서 이상치(Outlier)가 보이는데, 이는 하천의 수질 변동이 심하다는 것을 의미한다. 따라서 하천의 수질에 큰 영향을 미치는 유지용수, 비점오염원 등의 관리가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.2. 하상퇴적물

저서성 대형무척추동물을 비롯한 많은 수의 수생생물이 하상(river bed)을 서식처로 삼아 살고 있다. 하지만 하천의 오염물질은 퇴적되어 하상에 쌓이게 되고 수생생물에 영향을 미치게 된다. 그중 중금속은 PBT(Persistence, Bio-accumulation, Toxicity)의 특성을 가져 지속해서 퇴적물로 축적되고, 생물농축 등으로 수서생물에 영향을 줄 수 있다(Baek and An, 2008).

따라서 본 연구에서는 수서생물이 실제 서식하는 환경인 하상퇴적물의 공극수에 직접 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용하여 독성 실험을 하였고, 공

극수 및 퇴적물의 중금속 함량을 살펴보았다.

그 결과, St.1 ~ St.5 지점까지 분기별 퇴적물의 공극수를 이용하여 24시간 동안 이루어진 물벼룩 급성독성 실험에서는 물벼룩의 유영저해(immobilization)나 치사(mortality)가 발견되지 않아 생태독성의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

공극수에 대한 중금속 분석 결과를 (Table 4.)에 나타내었다. 모든 항목이 환경정책기본법의 환경기준을 만족하여 생태독성 실험 결과와 마찬가지로 공극수에서의 중금속에 의한 독성이 영향을 야기할만한 수준은 아닌 것으로 판단된다.

퇴적물의 중금속 함량을 분석한 결과는 (Table 5.)와 같다. 하천의 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 제2015-687호)에 따라 각 중금속에 대하여 개별 평가(등급) 후, 중금속 결과를 토대로 하천에 대한 종합평가를 실시하였다. 종합평가 기준은 ‘보통’ (금속류 8항목 모두 I 등급), ‘약간 나쁨’ (금속류 8항목 중 II 등급 또는 III 등급 항목 한 개 이상), ‘나쁨’ (항목별 II 등급 기준에 대한 비례 값의 평균이 0.34 이상), ‘매우 나쁨’ (IV 등급 항목 1개 이상)으로 되어 있으며, 본 연구에서는 St.1, St.2, St.4, St.5에서 ‘약간 나쁨’, St.3에서 ‘나쁨’으로 나타났다. ‘약간 나

Table 4. Heavy metals in pore water on sediments.

(Unit : mg/L)

Item	Pb	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg
Environ. Guideline	0.05	0.05	0.005	0.05	-	-	-	0.01
St.1	0.004 ± 0.004	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000	0.002 ± 0.002	0.023 ± 0.013	0.015 ± 0.026	0.027 ± 0.028	0.000 ± 0.000
St.2	0.021 ± 0.021	0.005 ± 0.005	0.000 ± 0.000	0.009 ± 0.008	0.052 ± 0.027	0.008 ± 0.007	0.122 ± 0.105	0.000 ± 0.000
St.3	0.007 ± 0.008	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000	0.011 ± 0.01	0.042 ± 0.023	0.027 ± 0.039	0.047 ± 0.018	0.000 ± 0.000
St.4	0.004 ± 0.004	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000	0.008 ± 0.006	0.038 ± 0.035	0.011 ± 0.009	0.024 ± 0.014	0.000 ± 0.000
St.5	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.011 ± 0.016	0.000 ± 0.000	0.005 ± 0.005	0.000 ± 0.000

Table 5. Heavy metals in sediments.

(Unit : mg/kg)

Item		Pb	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg
St.1	Value	65.22	4.40	0.34	31.83	64.14	15.76	177.07	0.017
	Grade	II	I	I	I	II	I	I	I
	Site Grade	Slightly bad							
St.2	Value	28.76	2.60	0.26	56.48	86.94	25.82	266.90	0.064
	Grade	I	I	I	I	II	I	I	I
	Site Grade	Slightly bad							
St.3	Value	52.00	4.42	0.50	83.56	248.60	42.65	288.91	0.160
	Grade	I	I	II	I	III	II	I	II
	Site Grade	Bad							
St.4	Value	39.64	3.85	0.30	40.08	52.28	20.14	175.79	0.070
	Grade	I	I	I	I	II	I	I	I
	Site Grade	Slightly bad							
St.5	Value	53.43	4.11	0.26	40.38	54.08	19.17	177.13	0.021
	Grade	I	I	I	I	II	I	I	I
	Site Grade	Slightly bad							

뽕은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있으며, 독성시험을 통해 악영향을 확인해볼 필요성이 있는 단계이며, '나뽕'은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있어, 조사 범위를 상·하류로 확대하여 오염 규모에 대한 확인이 필요한 단계이다. 따라서 향후 해당 하천은 면밀한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 저서동물의 분포특징

3.2.1. 동물군에 의한 분류

조사기간 5지점에서 총 38종 15,835개체의 저서성 대형무척추동물을 채집, 동정하였다. 그 중 환형동물문이 8,974개체(56.7 %), 절지동물문이 6,459개체(40.8 %), 연체동물문이 260개체(1.6 %), 편형동물문이 142개체(0.9 %)로 나타났다. 시기별로는 2분기(6,509) > 4분기(5,301) > 3분기(2,517) > 1분기(1,508) 개체로 나타났다. 이는 2022년 기상의 영향이 큰 것으로 보이는데, 2022년 5월까지 강수량은 총 118.2 mm(인천 기상청 기준)으로 봄 가뭄에 가까운 강수량을

보였으나, 이후 6월에서 9월까지의 집중 강우, 장마, 태풍 등 총 1304.9 mm를 기록하는 등 극심한 기상변화에 기인한 것으로 보인다. 저서동물 출현 종수는 환형동물문이 5종(13.2 %), 절지동물문이 24종(63.2 %), 연체동물문이 8종(21.0 %), 편형동물문이 1종(2.6 %)으로 나타났다. 그중 환형동물문에 속하는 오염 내성종인 실지렁이(*Limnodrilus gota*)가 총 6,859개체에 달해 가장 큰 영향을 준 것으로 나타났다. 시기별로 나타난 종수를 살펴보면 1분기 11종, 2분기 21종, 3분기 25종, 4분기 24종으로 1분기 이후 기온이 상승함에 따라 서식 환경이 변화하면서 출현 종수가 늘어난 것으로 보인다(Hong *et al.*, 2017).

조사지점별 저서성 대형무척추동물 분포를 (Table 6.)에 나타내었다. St.1은 꼬마줄날도래(*Cheumatopsyche brevilineata*)와 갈따구류(Chironomidae sp.)가 우점하고 있으며 절지동물문이 73.6 %를 차지하였다. 환형동물문은 2분기에 실지렁이(*Limnodrilus gota*)가 많이

Table 6. Benthic macroinvertebrate community composition of the study sites.

(Sp. : Species, indiv. : Individuals)

Community composition		Annelida	Arthropoda	Mollusca	Platyhelminthes
St.1	Sp.	3	13	2	1
	Indiv.	1112	3233	43	4
St.2	Sp.	4	6	2	0
	Indiv.	5138	491	46	0
St.3	Sp.	4	6	5	0
	Indiv.	1792	490	78	0
St.4	Sp.	4	12	6	0
	Indiv.	898	2031	74	0
St.5	Sp.	2	13	1	1
	Indiv.	34	214	19	138
Total	Sp.	5	24	8	1
	Indiv.	8974	6459	260	142

나타났는데 이는 봄 가뭄에 의한 수질 악화의 영향으로 추정된다. St.1의 출현 종수를 살펴보면 2분기 5종에서 3분기 15종으로 급격하게 늘어나고 있어, 2분기 이후 서식지의 변화가 많이 나타난 것으로 추정할 수 있다. St.2는 90 % 이상이 환형동물문으로 나타났으며, 실지렁이(*Limnodrilus gota*), 넓적거머리(*Glossiphoniidae* sp.), 돌거머리(*Erpobdella lineata*), 아가미지렁이(*Branchiura sowerbyi*) 등 오염내성종으로 이루어져 있어 다른 하천에 비해 오염이 심한 곳임을 예측할 수 있다. St.3은 환형동물문이 약 76 %이며 St.2와 비슷한 종으로 구성되어 있어 하천의 오염 특성도 비슷할 것으로 파악된다. St.4는 깔따구(*Chironomidae* sp.)중 일반적인 하천에서 폭넓게 발견되는 non-red type이 전체의 30 %, 오염된 하천에서 많이 발견되는 red type이 12 % 정도를 보이며, 출현 종수도 4분기에 15종이 채집되는 등 하천유지용수의 유입유형이 다양하여 여러 환경의 생물종이 서식하는 것으로 보인다.

대조군인 St.5에서는 무늬하루살이(*Ephemera strigata*), 동양줄날도래(*Hydropsyche orientalis*) 등이 포함된 절지동물문이 52.8 %, 플라나리아(*Dugesia japonica*)와 같은 편형동물문이 34.1 %가 나타나 청정한 지역에서 서식하는 종이 다수 채집되었다. 반면에 실지렁이(*Limnodrilus gota*), 붉은 깔따구(*Chironomidae* sp., red type) 등 오염내성종도 발견되었다. St.5의 채취지점은 하수처리장 방류수 투입지점보다 100 m, 한강 원수 투입지점보다 30 m 상류 지점이지만 수질이 다른 유지용수의 영향을 확인할 수 있었다.

3.2.2. 기능군에 의한 분류

섭식기능군(functional feeding groups, FFGs)는 걸러 먹는 무리(filtering collectors, CF), 주워 먹는 무리(gathering collectors, CG), 기생하는 무리(parasites, PA), 잡아먹는 무리(predators, Pe), 찢어 먹는 무리(piercers, Pi), 썰어 먹는 무리(shredders, Sh), 긁어 먹는 무리(scrapers, Sc)로 나뉘며, 본 연구에서는 기생

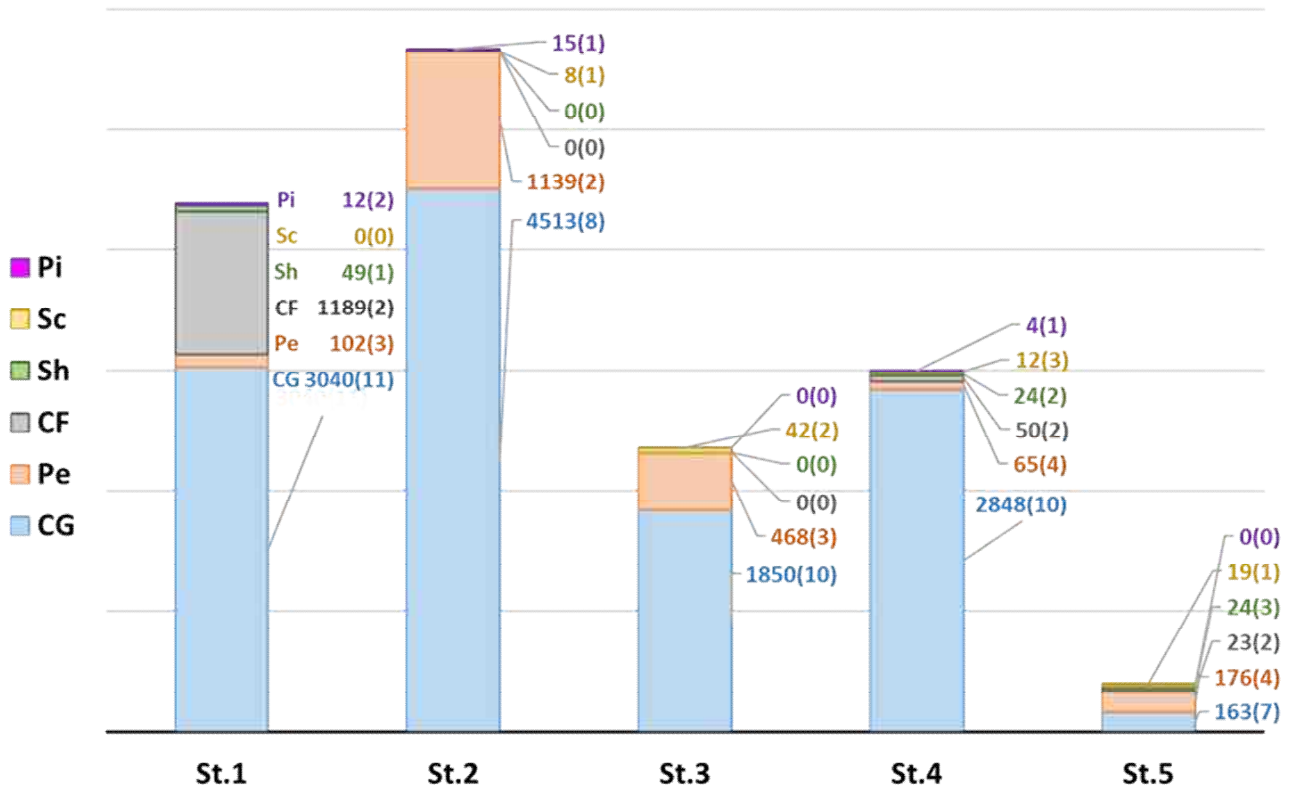


Fig. 3. Classification of functional feeding groups(FFGs) (label : Individuals(Species))

하는 무리를 제외한 6개의 섭식 기능 군이 확인되었다.

주워 먹는 무리는 실지렁이(*Limnodrilus gota*), 깔따구류(*Chironomidae* sp.), 하루살이류(*Ephemeroptera* sp.) 등이 속하며 전체개체수 중 78.4 %가 이 무리에 속한다. 이 무리는 주로 침전된 유기물을 모아 먹는 무리로 유속이 느려지고, 세립질의 하상과 부유물질이 증가하는 조건을 가진 하류부 또는 유속이 감소하고, 수변지역 침식, 유사 퇴적하는 상황인 홍수, 가뭄, 상류 저수, 하천 공사 등에서 많이 발견되는 경향이 있다(환경부, 2019).

잡아 먹는 무리는 넓적거머리(*Glossiphoniidae* sp.), 돌거머리(*Erpobdella lineata*), 플라나리아(*Dugesia japonica*) 등이 속하며 전체개체수 중 12.3 %가 여기에 속하였다. 이 무리는 다른 동물의 살아있는 조직을 먹는 포식성 무리로 주워먹는 무리와 같이 유기물이 많아지는 곳일수록 수가 늘어나는 경향이 있다. 이는 유기물을 섭취하며 살아가는

저차소비자가 많아져 이를 포식하는 잡아먹는 무리가 많아지기 때문이다(Bang, 2016).

걸러 먹는 무리는 꼬마줄날도래(*Cheumatopsyche brevilineata*)와 재첩속(*Corbicula*) 등이 있다. 본 연구에서는 8.0 %가 이 무리에 해당하며, 주로 떠다니는 유기물을 먹는다. 가는 유기 입자를 먹는다는 점에서는 주워 먹는 무리와 비슷하지만, 물의 흐름을 따라 떠내려오는 수중의 먹이원을 확보하기 위해 그물망을 만들거나 몸의 구조물을 이용하는 등의 차이가 있다. 주로 호박돌과 자갈로 이루어진 평지 하천의 여울 구간에서 줄날도래과를 중심으로 이 무리가 폭발적으로 증식해 우점하는 경향이 있다. 썰어 먹는 무리와 굵어먹는 무리, 찢어 먹는 무리는 전체의 1.3 %로 아주 적은 수를 차지하였다. 썰어 먹는 무리는 살아있거나 죽은 식물을 갈아 먹는 무리로 외부로부터 낙엽이나 작은 나뭇가지 같은 큰 고형물질인 소립 유기물이 공급되는 지류에 비율이 높다. 굵어먹는 무리는 부착조류를 굵어 먹는 무리로 호박돌과 자갈로 이루어진 하

상을 기어 다니며 먹이활동을 한다. 주로 유속이 빠른 표면에 부착조류가 있어 유속에 휩쓸리지 않기 위해 체형이 납작한 편이다. 찢러 먹는 무리는 다른 동물 또는 식물의 체액을 빨아먹는 섭식 기능을 갖는다(권순직, 2017).

(Fig. 3.)에 저서성 대형무척추동물을 섭식기능군에 따라 분류해 보았다. St.1은 전체적으로 주워 먹는 무리와 걸러 먹는 무리가 96.3 %이나, 초반 1, 2분기에는 주워 먹는 무리가 95 % 이상으로 우점하고 있었다. 3분기 이후 걸러 먹는 무리(꼬마줄날도래)가 급격히 증가하여 3, 4분기 평균 44 %를 차지하였다. St.2는 주워 먹는 무리와 찢러 먹는 무리가 대부분을 차지하고 있으나, 시기적으로 1, 2 분기에 주워 먹는 무리가 99 %를 차지하였고, 3분기 이후 찢러 먹는 무리가 증가하기 시작하여 4분기에는 55:44 정도까지 찢러 먹는 무리가 증가하였다. St.3도 비슷한 경향을 보이며 4분기에는 주워 먹는 무리와 찢러 먹는 무리의 비율이 67:33

정도를 보이고 있으며, St.4 역시 3분기부터 주워먹는 무리가 감소하고 잡아먹는 무리, 걸러 먹는 무리, 찢어 먹는 무리가 증가하였다. 모든 지점에서 3분기 이후부터 변화가 시작되는 경향을 보였는데, 이는 앞서 설명한 기상 변화의 영향으로 보여진다.

서식기능군(habitat orientation groups, HOCs)는 하천의 여울이나 물살이 있는 하상 표면에 부착 생활하는 붙는 무리(clinger; CL), 유영적응방식을 가지는 헤엄치는 무리(swimmer; SW), 하상의 미세퇴적물에서 기질의 윗 표면을 기는 무리(sprawler; SP), 관속 수생식물 줄기 표면을 기어오르는 무리(climber; CB), 세립질 퇴적층에 굴을 파고 사는 굴 파는 무리(burrower; BU)로 구분된다.

굴 파는 무리는 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*), 깔따구류(Chironomidae sp.)가 속하여 전체 72.4 %를 차지한다. 모래 또는 점토성 실트 등 입자가 고운 하상에 굴을 파고 몸을 숨길

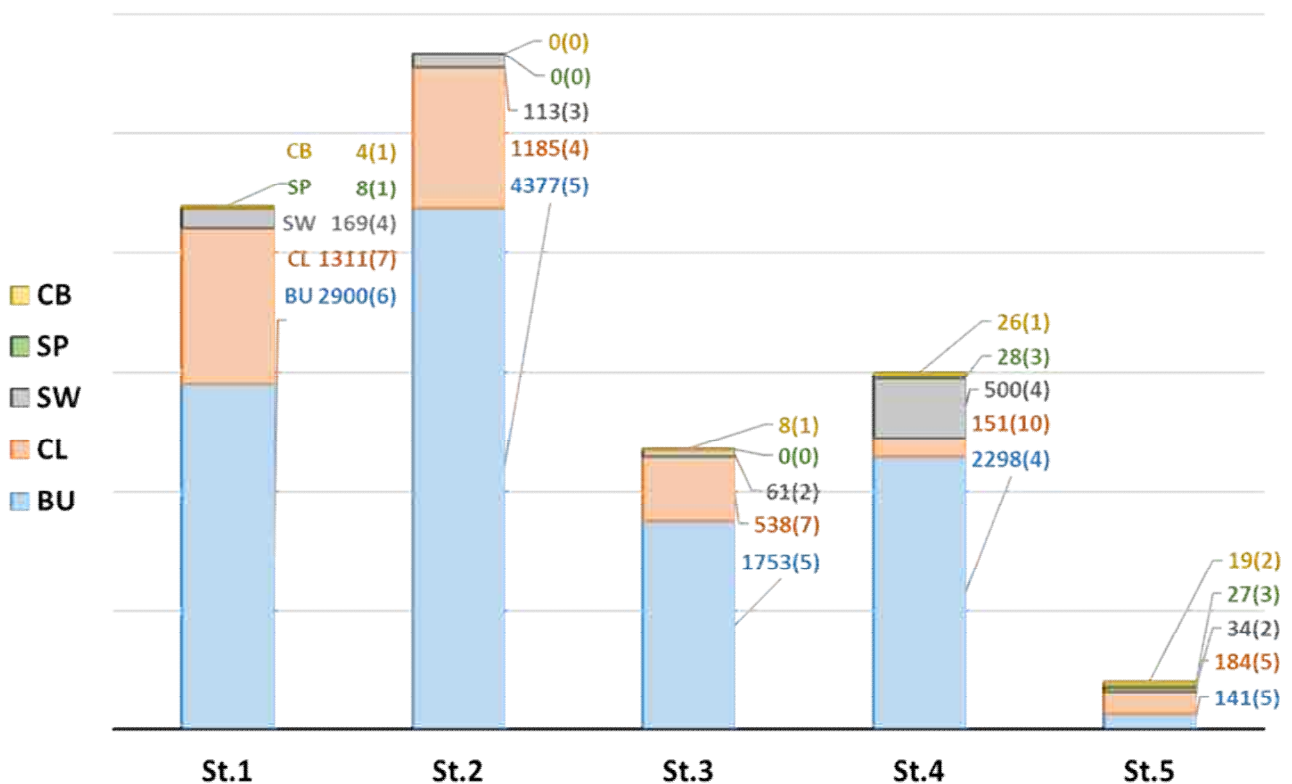


Fig. 4. Classification of habitat orientation groups(HOGs) (label : Individuals(Species))

수 있는 관을 만드는 습성을 가진다. 붙는 무리는 꼬마줄날도래(*Cheumatopsyche brevilineata*)와 넓적거머리(*Glossiphoniidae* sp.), 돌거머리(*Erbodella lineata*)가 여기에 속하며, 전체 중 21.4 %에 해당한다. 유속이 빠른 여울 서식처를 선호하며, 빠른 유속에 떠내려가지 않도록 그물망과 같은 구조물을 만들거나, 날카로운 발톱, 납작한 체형, 흡반 등의 형태적인 특징이 있다(Kim *et al.*, 2017).

헤엄치는 무리는 연못하루살이(*Claen dipterum*), 개뿔하루살이(*Baetis fuscatus*) 등이 여기에 속하며, 총 5.5 %를 차지한다. 유수역이나 정수역에서 물고기처럼 헤엄치는 것이 가능한 무리로 짧은 시간 동안 유영 후 바닥이나 수생 식물 표면에 붙는 습성이 있다. 기는 무리와 기어오르는 무리는 약 0.8 %를 차지하며 서식 기능군 중 가장 적은 수를 보였다. 기는 무리는 하상 표면을 기어 다니며 먹이 섭취, 은신 등을 하는 무리로 대부분의 하루살이, 참잠자리, 날도래 중 집을 짓는 종이 여기에 속한다. 기어오르는 무리는 수생식물이나 위로 곧게 뻗은 물체에서 수직으로 이동할 수 있는 무리를 의미하는데, 먹이 섭취를 위해 이동하는 우묵날도래, 먹이 포획을 위해 은신하는 왕잠자리 등이 포함된다(권순직, 2013).

지점별로 서식기능군에 따라 분류하여 (Fig. 4.)에 나타내었다. St.1은 굴 파는 무리와 붙는 무리가 96.9 %를 차지하고 있다. 1, 2분기에는 굴 파는 무리가 대부분이었으나, 3분기 이후 붙는 무리가 증가하여 최종 4분기에는 55.3 %에 이르렀다. St.2 역시 St.1과 비슷한 경향을 보이는데, 1, 2분기에는 굴 파는 무리가 대부분이지만 3분기 이후 붙는 무리가 증가하여 4분기에는 54.45%의 비율까지 보인다. St.3의 경우 봄 가뭄이 지속되던 2분기에는 굴 파는 무리가 91.7 %에 이르렀으나 3분기 이후 붙는 무리가 증가하는 경향을 보이고 있다. St.4는 다른 지점과 조금 다른 양상을 보이는데, 초기에는 굴 파는 무리가 84.2 %, 헤엄치

는 무리가 13.1 %로 다수를 차지하고, 2분기에는 헤엄치는 무리의 비율이 18.9 %로 증가하고, 3분기에는 붙는 무리가 증가하여, 최종 4분기에는 굴 파는 무리 45.1 %, 붙는 무리 26.6 %, 헤엄치는 무리 9.4 %, 기는 무리 8.2 %, 기어오르는 무리 10.7 %로 다양한 습성을 보인다. 이는 크게 보면 세립질의 하상, 낮은 유속, 얕은 수심에서 주로 서식하는 굴 파는 무리에서 조립질의 하상, 높은 유속, 깊은 수심에서 발견되는 붙는 무리로의 변화로, 지속적인 강우에 의한 하천의 유량, 유속 등의 증가가 불러온 변화로 판단된다.

3.3. 생태요인

3.3.1. 저서동물지수(BMI)

저서동물지수(BMI)는 출현한 지표생물종의 개체수에 따른 출현도, 유기물질에 대한 저서성 대형무척추동물의 내성을 의미하는 오탁치 및 오탁치를 보조하기 위한 지표가중치를 적용하여 산정하는 지표로서 값의 범위에 따라 건강성을 평가하고 있다(Kong *et al.*, 2018).

저서동물지수가 $80 \leq \sim \leq 100$ 인 경우, 건강성 등급은 A이며, 이때의 환경 상태는 '매우 좋음'으로 평가한다. 마찬가지로 $65 \leq \sim < 80$ 은 B(좋음), $50 \leq \sim < 65$ 는 C(보통), $35 \leq \sim < 50$ 은 D(나쁨), $0 \leq \sim < 35$ 는 E(매우 나쁨)으로 저서동물지수에 따라 수생태계의 건강성을 평가할 수 있다(국립환경과학원, 2019).

본 연구에서 지점별 저서동물지수를 이용한 건강성 평가 결과를 (Fig. 5.)에 나타내었다. St.1의 BMI는 평균 34.7로 건강성 등급은 E등급(매우 나쁨)으로 산출되었다. 시기별로 살펴보면 상반기의 BMI는 낮은 편으로 2분기의 경우 전체를 통틀어 가장 낮은 15.8을 기록하였다. 하지만 3분기 이후 BMI는 개선되어 4분기에는 최고 49.5 (D, 나쁨)을 나타내었다. 채집된 저서성 대형무척추동물을 오탁치를 기준으로 분류하면 상반기에는 오탁치가 2 이상

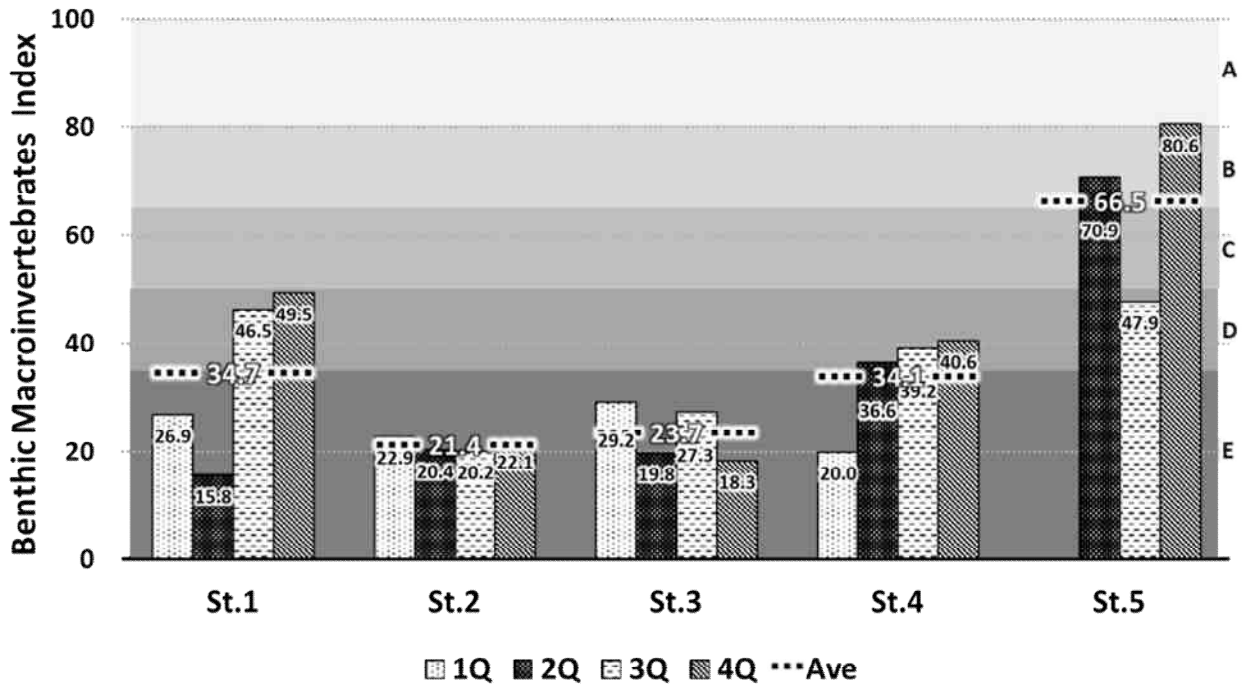


Fig. 5. Benthic Macroinvertebrates Index in this study.

인 개체수는 평균 88 %였으나 3분기에는 53.9 %, 4분기에는 11.1 %로 떨어지는 것을 볼 수 있다. St.2는 4분기 평균 21.4(E등급)로 조사지점 중 가장 낮은 BMI를 보였다. 또한 대부분 지점에서 3분기에 저서성 대형무척추동물의 특징이 변하면서 BMI가 오르는 경향을 보이는 데 반해 St.2는 큰 변화 없이 계속 낮은 수치를 보였다. 이는 오타치가 높은 종이 너무나 우점하고 있어 환경이 바뀌더라도 시기별로 개체수의 차이만 있을 뿐, 종의 변화가 적기 때문으로 판단된다. St.3 역시 평균 BMI가 23.7로 4분기 내내 낮은 BMI를 보인다. 이는 St.2와 같은 경향으로 보이는데, 채집된 저서동물의 오타치가 대부분 2 이상으로 나타났다. 하지만 채집된 저서성 대형무척추동물의 전체종수가 St.2의 12종보다 높은 15종을 보여 St.2보다 높은 건강성을 보인 것으로 판단된다. St.4의 평균 BMI는 34.1로 높지 않지만 1분기부터 4분기까지 꾸준히 상승하여 4분기에는 40.6(D, 나쁨)을 보여주었다. 오타치를 기준으로 개체의 구성이 다양하고, 채집된 종이

7종에서 시작하여 15종까지 늘어나고 있어 수생태계의 건강성 측면에선 가장 개선의 여지가 있는 지점으로 보인다. 대조군인 St.5는 최종 BMI 80.6으로 A등급(매우 좋음)으로 판정되었다. 이때 채집된 종수는 7종으로 많지 않았지만 6종이 오타치 2 미만으로 나타났고, 개체수 역시 95.8 %가 청정종으로 이루어져 있어 최종적으로 가장 좋은 수생태계 건강성을 가진 지점으로 판정되었다.

3.3.2. 생물다양성

우점도 지수(Dominance index, DI) 우점종의 상대비를 계산하는 것으로 생태환경이 악화할 때 특정종의 우세가 나타나는 경우가 많으므로 이를 환경변화의 지표로 사용이 가능할 것으로 판단되어 사용하는 지표이다. 값이 커질수록 우점도가 편중되어 있다는 의미이며 75를 넘는 경우 높은 우점도를 의미한다. 본 연구에서는 St.1 ~ St.3까지 높은 우점도를 갖고 있으며 같은 하천인 St.4와 St.5는 보통의 우점도를 가진것으로 판단된다.

다양도 지수(Species diversity index, H')는

종풍부도와 개체 수의 상대적 균형성을 의미하는 것으로 군집의 복잡성을 나타낸다. 군집의 종풍부도와 균등도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며 값이 증가할수록 다양성이 높은 생태계를 의미한다. 일반적으로 3 이상의 값을 가지면 높은 다양도를 갖는다는 의미나 이번 조사에서는 높은 다양도를 갖는 지점은 나타나지 않았다. St.2는 1 이하의 다양도지수를 보여 다른 조사지점에 비해 상대적으로 낮은 다양도를 갖는 것으로 조사되었다.

균등도(Evenness index, E)는 생태계에서 종의 구성이 얼마나 균일한가를 나타내는 정도 즉, 각종의 개체수가 얼마나 고르게 출현하는지를 의미한다. 균등도의 값이 작을수록 한 종이 우점하는 경향을 보이므로, 0.5 이하의 값에서는 침체한 생태계, 0.5 초과는 불안정한 생태계, 0.75가 넘어가면 안정한 생태계로 분류한다. 조사 결과 St.2가 0.49로 침체한 생태계로 분류되며, 대조군인 St.5가 안정한 생태계로 나타났다.

종풍부도 지수(Richness index, R)은 생물 다양성을 표현하는 가장 간단한 지수로 단순히 주어진 지역에서 관찰되는 총개체수 및 총 종수를 이용한 지수이다. 본 조사에는 St.4 > St.5 > St.1 > St.3 > St.2의 순으로 종 풍부도가 높게 나타났다.

3.4. 통계분석

3.4.1. 수질환경과 생물지수의 상관성 분석

데이터에 관련된 변수들 간의 상호관련성을 갖게 되는 경우, 두 변수 간의 선형관계가 존재하는지 또는 존재하지 않는지를 분석하는 기법을 상관계수(correlation coefficient)라고 하며 변수 간의 선형성의 강도에 대한 통계적 분석 방법이다. 일반적으로 Pearson의 상관분석을 많이 사용하며 0.4 ~ 0.6일때 보통 관계, 0.6 ~ 0.8 에서 높은 상관관계를 갖는다고 보며, 0.8 이상은 매우 높은 상관관계를 갖는다는 의미이다. 하지만 상관계수는 수학적인 관계일뿐이므로 이를 속성의 관계로 확대해석

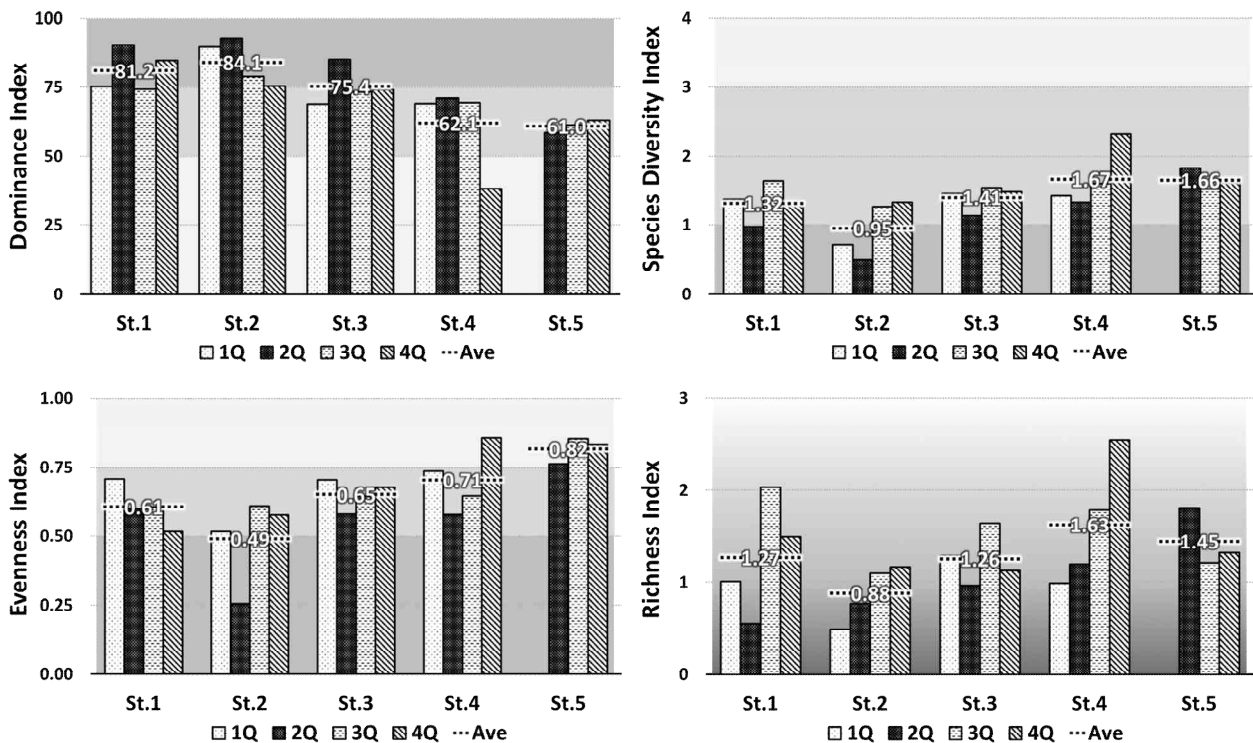


Fig. 6. Biological indices in this study.

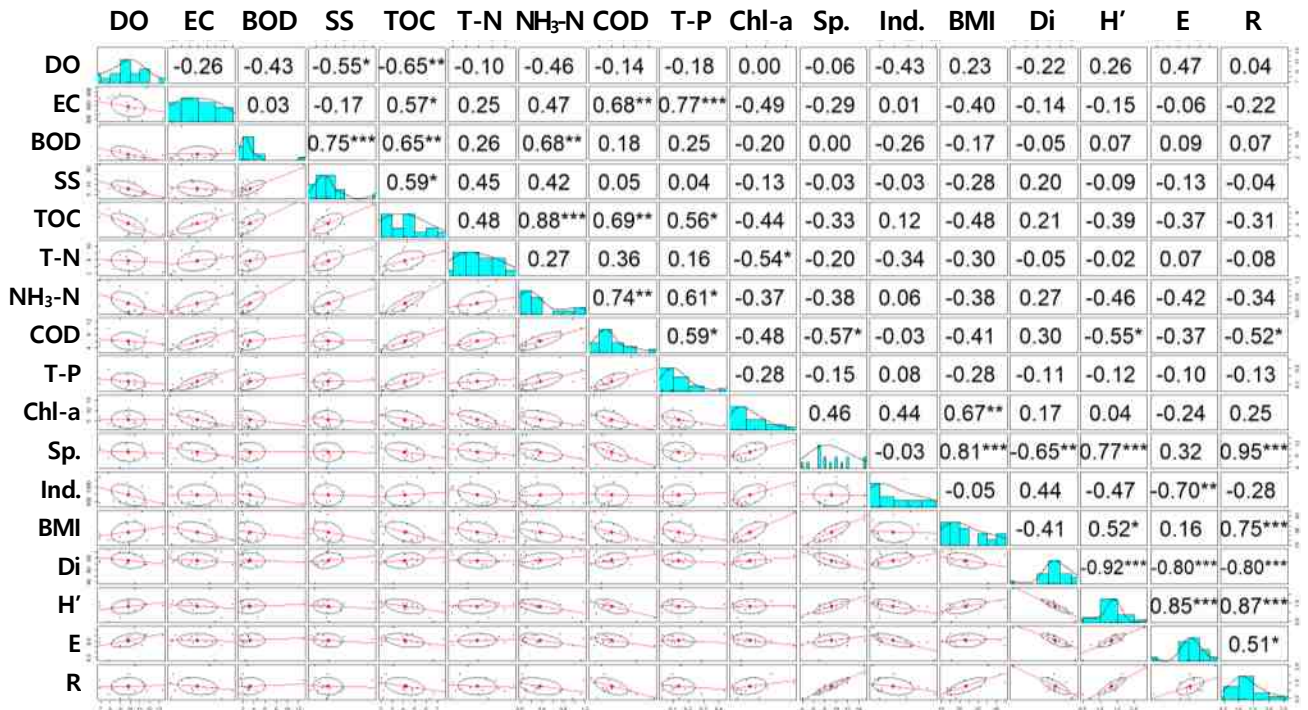


Fig. 7. Results of correlation coefficient with water quality and biological indices.
(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

하는 오류는 주의하여야 한다.

(Fig.7.)은 하천 수질 항목과 저서동물 지수, 생물다양성 지수 등과 상관분석을 실시한 결과이다. 용존산소는 일반적으로 오염된 하천에서 낮게 나타나고 있는데, 본 조사에서도 부유물질(-0.55), 총유기탄소(-0.65)와 상관관계가 보였다. 또한 유기물질을 대표하는 항목인 생물화학적산소요구량, 화학적산소요구량, 총유기탄소량, 부유물질 등은 서로 비교적 높은 상관관계를 보였으나 생물화학적산소요구량과 화학적산소요구량의 상관관계는 낮은 것(0.18)으로 나타나 이미 생물학적으로 처리된 하수처리장 방류수의 특징을 보여주고 있다. 또한 암모니아성 질소는 유기물질 대표항목과 생물화학적산소요구량과 상관관계를 보여 방류수 처리효율과 관련한 지표로 사용할 수 있다.

출현 종수는 화학적산소요구량과 비교적 높은 음의 상관관계(-0.57)를 갖고 있었으며, 또한 저서동물 지수(0.81), 우점도 지수(-0.65), 다양도 지수(0.77), 종풍부도 지수(0.95)와 같은 주요 생물지수와도 높은 상관관계를 갖고 있

었다.

3.4.2. 시기 및 지점에 따른 유사성 파악

조사 시기별 조사지점 간의 유사성을 살펴 보기 위하여 군집분석과 비계량적 다차원척도 분석을 실시하였다.

군집분석(clustering analysis)은 각 개체의 유사성을 측정하여, 높은 대상 집단을 분류하고 군집에 속한 개체들이 유사성과 서로 다른 군집에 속한 개체 간의 상이성을 규명하는 통계분석 방법으로, 비슷한 특성을 가진 개체를 합쳐가면서 최종적으로 유사 특성의 그룹을 발굴하는 기법이다. 본 연구에서는 계층적 군집분석법(hierarchical clustering)을 이용하여 분석을 실시하였는데, 이는 일정 단계를 반복하면서 계층화시키면서 군집분석 하는 것으로, 모든 관찰 치들의 거리를 순차적으로 계산하면서 가까운 거리의 관찰치를 묶어가는 과정을 거치면서 군집화하는 것을 말한다. 다차원 척도분석(multi-dimensional analysis)은 객체간 근접성(Proximity)를 시각화하는 통계기

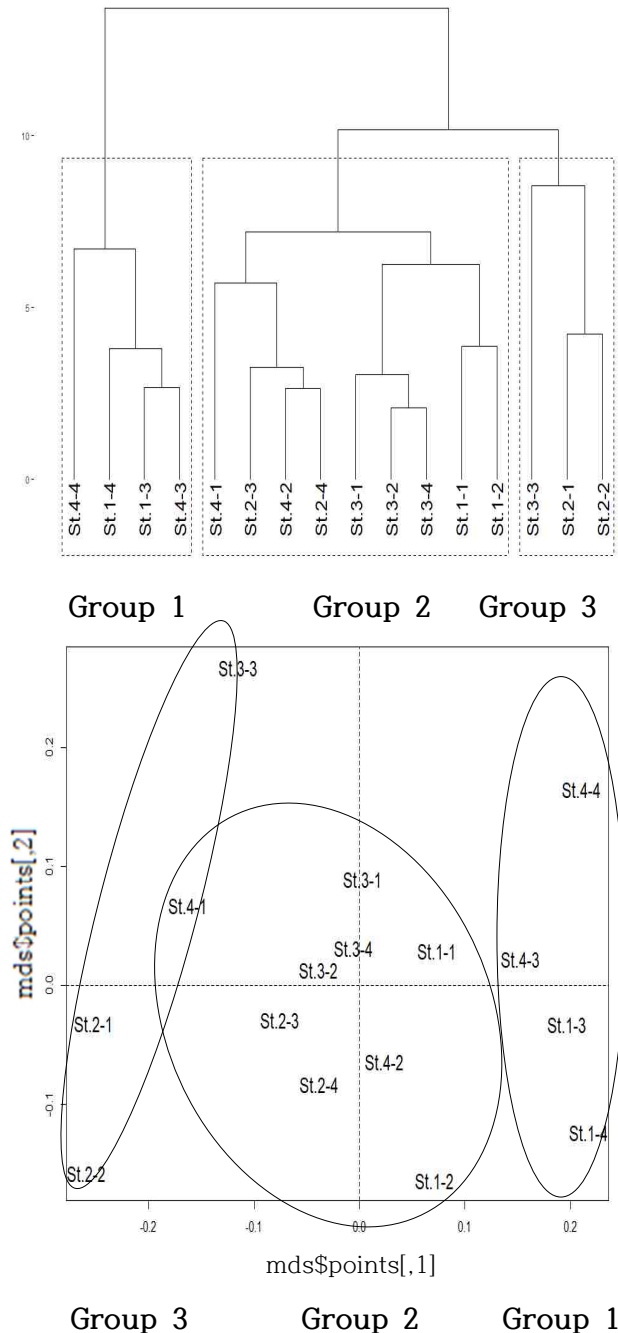


Fig. 8. Results of clustering analysis(Dendrogram) and nMDS.

법으로 군집분석과 같이 개체들을 대상으로 변수들을 측정 한 후에 개체들 사이의 유사성/비 유사성을 측정하여 개체들을 2차원 공간상에 점으로 표현하여 개체들 사이의 집단화를 시각적으로 표현하는 방법이다. 그중 비계량적 다차원 척도분석은 자료가 순서 척도인 경우 활용된다(Yoon *et al.*, 2018).

본 연구에서는 하천의 오염도를 나타내는 수질 항목과 출현 종수, 출현 개체수, 저서동물 지수, 생물다양성 지수 등의 생물학적 조사 결과를 대상으로 Euclidean 거리를 측정하고, Ward 결합방식을 적용한 계층적 방식(hierarchical methods)군집 분석과 비계량적 다차원척도법 분석을 시행하였고 그 결과를 (Fig. 8.)에 나타내었다.

결과는 군집 분석과 비계량적 다차원척도에 의하여 크게 3그룹으로 나누어지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 수질오염도와 생물지수에 의해 분류된 것으로 보인다. Group 1은 하천 수질 항목 값이 비교적 낮아 수질오염도가 낮고, 우점도 지수를 제외한 저서동물 지수 등 생물지수가 높은 경향을 나타내고 있는 수생태계 건강성이 높은 지점들이 분류되었고, Group 3은 반대로 수질 항목 값이 높고, 생물지수가 낮아 수생태계 건강성이 낮은 지점들이 분류되었으며, Group 2는 그 중간에 위치하였다.

본 연구에서 개별적인 수질 항목은 환경기준을 만족하는 것으로 보이나 저서동물 지수 및 생물다양성 지수와 같은 생물지수는 낮게 나오고 있는데, 이는 생물지수들이 수질 환경을 종합적으로 반영하기 때문이다. 이것은 수질 항목과 주요 생물지수가 상관관계를 갖고 유사성 측정을 통하여 군집을 분석할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 주요 생물지수는 이 화학적 수질항목과 연계하여 현장 수질 평가에 상호보완적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

장수천, 승기천, 굴포천, 공촌천 등 인천의 대표적인 도시복원하천을 생태학적으로 평가하기 위하여 저서성 대형무척추동물과 하천수질, 하상퇴적물을 조사하였다.

인천의 하천은 대부분 유지용수를 사용하고, 도심 통과로 인하여 비점오염원의 영향을 많

이 받으며, 길이가 짧아 자연적 자정작용을 기대하기 힘든 하천으로 유지용수와 비점오염원의 관리가 중요하다. 따라서 분류식 하수관거로의 전환으로 우천 시 하수시설의 부하를 줄여 유지용수로 사용하는 방류 수질의 변화를 줄이고, 각종 개발 시 불투수면 감소 등 비점오염원의 관리가 필요하다. 또한 하천 정비 시 지나친 공원화를 지양하고 녹지와 습지 등 자연형 정비를 통해 둔치부 식생복원, 하도 흐름의 다양성 복원 등의 관리가 필요할 것으로 판단된다.

하상에 서식하는 저서동물에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 하상퇴적물을 조사한 결과, 공극수의 생태독성은 나타나지 않았으며, 중금속은 모두 환경기준 이내로 나타났다. 하상퇴적물의 중금속 함유량은 하천의 퇴적물 오염평가 기준에 따라 대부분 약간 나쁨 ~ 나쁨으로 나타나 하천 준설 등 하상퇴적물에 대한 지속적인 관리가 필요한 것으로 나타났다.

조사기간 총 38종 15,835개체의 저서성 대형무척추동물을 채집, 동정하였으며, 환형동물문과 절지동물문이 대부분(97.5 %)을 차지하였다. 많은 수가 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*), 깔따구류(*Chironomidae* sp.) 등의 오염내성종이었으며, 대조군인 St.5에서 발견된 무늬하루살이(*Ephemera strigata*), 동양줄날도래(*Hydropsyche orientalis*), 플라나리아(*Dugesia japonica*) 등 청정지역 서식종과는 차이가 있었다.

저서성 대형무척추동물을 기능군에 따라 분류한 결과, 섭식 기능군에서는 침전된 유기물을 모아 먹는 무리인 주워 먹는 무리가 약 78 %, 서식 기능군에서는 모래 또는 점토성 실트 등 입자가 고운 하상에 굴을 파고 서식하는 굴파는 무리가 약 72 %로 대부분을 차지하였다. 이는 조사 하천의 하상이 세립질이고, 하천의 유속이 느리다는 것을 나타낸다. 따라서 하천의 생태다양성 회복을 위해서는 생물의 서식, 섭식 등의 기능적 특성을 이용한 자연형 서식지 조성이 필요할 것으로 보인다.

하천 생태건강성을 나타내는 저서동물 지수(BMI)는 15.8 ~ 80.6까지 넓은 범위에 걸쳐 나타났다. 하천별로는 St.4 - St.1 - St.3 - St.2의 순서였으며, 생물다양성 지수는 St.1과 St.3이 비슷한 값을 보이며 저서동물 지수와 동일한 경향을 보였다. 또한 강우와 같은 기상변화에 St.2와 St.3은 큰 변화가 없었고, St.1과 St.4는 개선되는 변화가 있었다. 이것은 환경변화에 따른 생태건강성의 회복이 모든 곳에서 이루어지지 않는다는 것을 보여준다. 따라서 한 하천의 생태 회복을 위해서는 전체 하천을 대상으로 하기보다는 조사를 통해 우선 회복 가능성이 높은 구간을 선정하여 환경조성을 시작하는 것이 효율적으로 판단된다.

저서동물 지수와 생물다양성 지수는 현장의 생물을 직접 조사하여 산출하는 지표로, 이화학적인 수질 항목과는 달리 수질 환경에 대하여 장기적이고 종합적인 판단을 할 수 있다. 또한 본 연구에서의 통계분석에서도 두 지수가 서로 상관관계가 있으며, 이를 이용하여 유사한 지점을 분류할 수 있었다. 따라서 수질 항목과 생물지표는 수질 환경평가에 있어서 상호보완적으로 적용할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구에서는 저서동물을 이용한 도시복원 하천의 생태학적 평가를 기초로 하천의 생태 개선방안을 모색하고자 하였다. 이를 위해 하천 수질 자료와 생물지표를 이용하여 통계 조사를 통해 조사지역의 경향과 특성을 파악하였다. 본 자료를 기초자료로 활용함과 동시에 꾸준한 모니터링이 지속된다면 해당 지역의 생태환경 개선을 통한 생태복원 하천관리에 더욱 나은 기여를 할 수 있을 것으로 판단한다.

V. 참고문헌

1. 공동수, 원두희, 박재홍, 김명철, 함순아, 권순직, 손세환, 한승철, 황인철, 이준국, 류덕희, 이수형,

- 박상정, 유경아, 공학양, (2013). 한국산 저서성 대형무척추동물 생태도감, 국립환경과학원.
2. 박승국, (2012). 국내 중소형 도시하천의 생태적 복원, 하천과 문화, 8(1), 84-92.
3. 국립환경과학원, (2017). 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 제도 해설서
4. 국립환경과학원, (2019) 수생태계 현황조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침.
5. 국립환경과학원, (2021) 수질오염공정시험기준.
6. 권순직, 전영철, 김명철, (2017). 화살표 물속생물도감, 자연과 생태.
7. 권순직, 전영철, 박재홍, (2013). 물속생물도감 저서성 대형무척추동물. 자연과 생태.
8. 농촌진흥청, (2019). 논 생태계 수서갑각류 및 패류 도감, 21세기사.
9. 농촌진흥청, (2019). 논 생태계 수서무척추동물 도감. 21세기사.
10. 백용욱, 이용한, 김학규, 정다운, 안운주, (2010). 탄천 상·하류의 하천수 및 퇴적물 오염도 연구, 한국육수학회지, 43(1), 11-18.
11. 변성준, 김원규, (2019). 인천광역시 도시하천의 현실과 개선방안, 물과 미래, 52(3), 23-29.
12. 부산광역시 보건환경연구원, (2019), 온천천 · 수영강 생태도감.
13. 부산광역시 보건환경연구원, (2022). 하천 생태 가이드북 부산 온천천의 생물.
14. 원두희, 권순직, 전영철, (2008). 한국의 수서곤충, (주) 생태조사단.
15. 윤일병, (1988). 한국동식물도감 제30권 동물편(수서곤충류), 문교부.
16. 윤일병, (1995). 수서곤충검색도설, 고려대학교 생물학과 생태학연구실.
17. 이대현, 안기정, (2018). 대한민국 생물지 한국의 곤충 제12권 22호 수서딱정벌레 I, 국립생물자원관.
18. 이대현, 안기정, (2019). 대한민국 생물지 한국의 곤충 제12권 26호 수서딱정벌레 II, 국립생물자원관.
19. 인천광역시, (2022). 2021 환경백서, 163-171.
20. 정광수, (2011). 한국잠자리유충, 자연과 생태.
21. Baek, Y. W., An, Y. J., (2008). Examining the interrelation of total, soluble and bioavailable metals in the sediments of urban artificial lakes. Korean Society of Limnology, 41(1), 66-72.
22. Bang, G. J., Kim, Y. G., Yoon, C. S., Cheong, S. W., (2016). Distribution Characteristics of Functional Feeding Groups of Benthic Macroinvertebrates and Biological Evaluation of Water Quality in Jirisan National Park. Journal of Environmental Science International, 25(5), 655-671.
23. Barbara L. Peckarsky, Pierre R. Fraissinet, Marjory A. Penton, Don J. Conklin Jr, (1990). Freshwater Macroinvertebrates of Northeastern North America, Cornell University Press
24. Hong, C., Kim, W. S., Kwak, I. S. (2017). Changes of Benthic Macroinvertebrate Community Composition Following Natural Temperature and Precipitation Increase. Korean Society of Limnology, 50(3), 275-285
25. Kim, J. W., Kim, A. R., Kong, D. S., (2017). Classification of Microhabitats based on Habitat Orientation Groups of Benthic Macroinvertebrate Communities. Journal of Korean Society on Water Environment, 33(6), 728-735.
26. Kong, D. S., Son, S. H., Hwang, S. J., Hwang, Won, D. H., Kim, M. C., Park, J. H., Jeon, T. S., Lee, J. E., Kim, J. H., Kim, J. S., Park, J. H., 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. J., Kim,

- P. J., Kim, A. R., (2018). Development of Benthic Macroinvertebrates Index (BMI) for Biological Assessment on Stream Environment, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(2), 183-201.
27. Kong, D. S., Son, S. H., Kim, J. Y., Won, D. H., Kim, M. C., Park, J. H., Chon, T. S., Lee, J. E., Park, J. H., Kwak, I. S., Kim, J. S., and Ham, S. A.. (2012). Development and Application of Korean Benthic Macroinvertebrates Index for Biological Assessment on Stream Environment, *Proceedings of the 2012 Spring Conference and water environmental forum of Yeongsan River*, Korean Society of Limnology, 33-36.
 28. Lee, J. H., Han, H., Lee, J. Y., Cha, Y. S., Cho, S. J., (2022). Ecological health assessment of Yangjaecheon and Yeouicheon using biotic index and water quality. *Korean Journal of Environmental Biology*, 40(2), 172-186.
 29. Won, D. H., Jun, Y. C., Kwon, S. J., Hwang, S. J., Ahn. K. G., and Lee, J. K., (2006). Development of Korean Saprobic Index using Benthic Macroinvertebrates and Its Application to Biological Stream Environment Assessment, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(5), 768-783.
 30. Yoon, I. B., Kong, D. S. and Ryu, J. K., (1992a). Studies on the Biological Evaluation of Water Quality by Benthic Macroinvertebrates (1) Saprobic Valency and Indicative Value, *Korean Society of Environmental Biology*, 10(1), 24-49.
 31. Yoon, I. B., Kong, D. S., and Ryu, J. K., (1992b). Studies on the Biological Evaluation of Water Quality by Benthic Macroinvertebrates (2) Effects of Environmental Factors to Community, *Korean Society of Environmental Biology*, 10(1), 40-55.
 32. Yoon, I. B., Kong, D. S. and Ryu, J. K., (1992c). Studies on the Biological Evaluation of Water Quality by Benthic Macroinvertebrates (3) Macroscopic Simple Water Quality Evaluation, *Korean Society of Environmental Biology*, 10(2), 77-84.
 33. Yoon, S. H., Yang, Y. C., Seo, G. Y., Cho, Y. G., (2018), Statistical Relations between Benthic Macroinvertebrate Distribution and Water Quality at Pungyeongjeong Stream in the Urban Region. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(2), 164-172.

VI. 부록

1.

저서동물지수(BMI) 산정 및 건강성평가 (5단계)

◎ 저서성 대형무척추동물 평가지수 (BMI)

하천에 서식하는 저서동물상 정보를 바탕으로 수생태계 건강성을 평가한 지수로, 오염에 내성이 강한 생물종의 출현도, 오탁지수, 지표가중치 등을 고려해 숫자로 나타낸 값

◎ BMI (Benthic Macroinvertebrates Index)

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

i : 지표생물종
 n : 총 수
 s_i : 오탁치
 h_i : 출현도
 g_i : 지표가중치

일련번호

<표 1> 저서동물을 이용한 건강성 등급 (5단계)

등급	표시색	환경상태	BMI
A	파랑	매우 좋음	$80 \leq \sim \leq 100$
B	초록	좋음	$65 \leq \sim < 80$
C	노랑	보통	$50 \leq \sim < 65$
D	주황	나쁨	$35 \leq \sim < 50$
E	빨강	매우 나쁨	$0 \leq \sim < 35$

<표 2> 저서동물 개체밀도에 따른 출현도 산정 예시

분류군(Taxa)	국명	개체밀도 (개체/m ²)	개체수 순위 (S_i)	순위 백분율 (R_i , %)	출현도 (h_i)
1 <i>Semisulcospira libertina</i>	다슬기	12	10	40	4
2 <i>Limnodrilus gotoi</i>	실지렁이	8	16	64	2
3 <i>Gammarus</i> sp.1	옆새우류 sp.1	12	10	40	4
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
23 <i>Kamimuria coreana</i>	한국강도래	12	10	40	4
24 <i>Simulium</i> sp.1	먹파리류 sp.1	34	5	20	5
25 <i>Hydropsyche orientalis</i>	동양줄날도래	23	8	32	4
총 종수 (S)		25			
총 개체수		566			

<표 3> 저서동물평가지수 산정표 예시

출현종	분류군(Taxa)	오탁치 s	지표가중치 g	출현도 h	세지수의 곱 $s \cdot h \cdot g$	두지수의 곱 $h \cdot g$
1 <i>Semisulcospira libertina</i>	14 <i>Semisulcospira</i>	0.4	4	4	6.4	16
2 <i>Limnodrilus gotoi</i>	34 <i>Limnodrilus gotoi</i>	3.5	4	2	28.0	8
3 <i>Gammarus</i> sp.	42 <i>Gammarus</i>	0.6	4	4	9.6	16
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
6 <i>Epeorus nipponicus</i>	70 <i>Epeorus nipponicus</i>	0	5	5	0.0	25
14 <i>Kamimuria coreana</i>	118 Other Plecoptera	0	5	4	0.0	20
19 <i>Simulium</i> sp.	140 <i>Simulium</i>	0.2	4	5	4.0	20
23 <i>Hydropsyche orientalis</i>	172 <i>Hydropsyche orientalis</i>	0.4	4	4	6.4	16
총합					77.5	368

※ 오탁치, 지표가중치 : 수생태계 현황조사 및 건강성평가방법 등에 관한 지침 (별표 2) 에 따름

【산정예시】 $BMI = \left(4 - \frac{77.5}{368} \right) \times 25 = 94.7$ BMI가 94.7이므로 건강성 등급은 A등급 (매우 좋음)

2.

우리 하천에 서식하는 주요 저서성 대형무척추동물



플라나리아
(*Dugesia japonica*)



등에모기
(*Ceratopogonidae* sp.)



꼬마줄날도래
(*Cheumatopsyche brevilineata*)



동양줄날도래
(*Hydropsyche orientalis*)



개똥하루살이
(*Baetis fuscatus*)



다슬기
(*Semisulcospira libertina*)



청나비날도래 KUa
(*Leptoceridae Mystacides* KUa)



갈따구

(Chironomidae, non-red type)



붉은 갈따구

(Chironomidae, red type)



실지렁이

(*Limnodrilus gotoi*)



재첩

(*Corbicula*)



각다귀

(*Tipula*)



연못하루살이

(*Cloeon dipterum*)



돌거머리

(*Erpobdella lineata*)

※ 위 사진은 2022년 조사 대상 하천에서 채집된 저서동물입니다.