

생물지수와 수질을 이용한 양재천과 여의천의 생태건강성평가

이진호*, 한 현, 이준연, 차영섭, 조석주

서울특별시보건환경연구원 물환경연구부

Ecological health assessment of Yangjaecheon and Yeouicheon using biotic index and water quality

Jin Hyo Lee*, Hyeon Han, Jun Yeon Lee, Young Seop Cha and Seog Ju Cho

Water Environment Research Department, Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health, Gwacheon 13813, Republic of Korea

*Corresponding author

Jin Hyo Lee

Tel. 02-570-3296

E-mail. co90mp@seoul.go.kr

Received: 27 May 2022

First Revised: 14 June 2022

Second Revised: 15 June 2022

Third Revised: 16 June 2022

Revision accepted: 17 June 2022

Abstract: Benthic macroinvertebrates are important ecological and environmental indicators as primary or secondary consumers, and therefore are widely used in the evaluation of aquatic environments. However, there are no comprehensive river ecosystem monitoring surveys that link the major physicochemical water quality items with benthic macroinvertebrates in urban streams. Therefore, this study investigated the distribution characteristics of benthic macroinvertebrates and physicochemical water quality items (17 items) in Yangjaecheon and Yeouicheon from 2019 to 2020. At the same time, by applying Spearman's rank correlation analysis and nonmetric multidimensional scaling (nMDS) analysis in the water quality data and biotic index, we tried to provide basic data for diagnosing the current status of river ecosystems in major urban rivers in Seoul. Based on the study results, a total of 39 species and 3,787 individuals were identified in Yangjaecheon, the water quality (based on BOD, TOC, and TP) of Yangjaecheon was higher than Grade Ib (good), and the BMI using benthic macroinvertebrates appeared as Grade C (normal) at all the sites. In Yeouicheon, a total of 51 species and 4,199 individuals were identified, the water quality (based on BOD, TOC, TP) was higher than Grade Ib (good) similar to Yangjaecheon, and the BMI of both Upstream and Saewon bridge was Grade B (good), while Yeoui bridge was Grade C (normal). Overall, analysis results for the distribution of benthic macroinvertebrates by a nonmetric multidimensional scaling method showed no significant difference between the two streams ($p=0.1491$). Also, significant environmental variables related to benthic macroinvertebrates distribution were determined as water temperature and DO. On the other hand, the results of the correlation analysis between biotic index and major water quality items confirmed that R1 and BMI could be used for on-site urban river water quality evaluation.

Keywords: benthic macroinvertebrates biotic index, correlation analysis, nMDS, water quality grade

서 론

하천은 다양한 생물들이 살아가면서 생물 간, 무생물 간 상호작용이 일어나는 자연생태계의 중심이며, 동시에 인간의 오랜 역사를 통하여 고유한 문화, 전통을 창출하는 공간으로서 역할을 하고 있다. 또한 기능적 관점에서 하천의 역할을 살펴보면 갈수관리, 수리권, 수자원개발 등의 이수기능(irrigation function)과 홍수관리, 하천정비, 개수 등 치수기능(water control function), 그리고 하천 동·식물의 서식처, 하천수질 자정, 자연경관 및 도심하천(urban river)으로서의 여가공간 등 환경기능(environment function)의 역할까지 하고 있다. 하지만 급격하게 진행된 산업화와 도시화, 최근에는 홍수, 태풍, 가뭄 및 녹조·어류폐사 등 돌발적인 수질사고를 일으키는 이상 기후변화가 더해져 하천의 정상적인 생태적 안정이 깨지고, 환경적 기능이 저하되고 있으며(Yoon *et al.* 1992), 이는 곧 생물군집의 변화, 즉 하천 내 또는 주변 서식지의 다양성이 감소되는 커다란 문제가 발생하고 있다(Beldsoe *et al.* 2001). 따라서 하천수질을 체계적으로 관리하면서, 하천의 환경적 기능을 회복시키고, 특히 도심하천과 같이 시민들의 이용이 활성화되는 하천을 중심으로 한 종합적인 하천 생태계의 관리방안 마련이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 우선 전통적인 수질조사와 함께 하천 군집구조(community structure), 생물지수(biotic index) 도출 등 생태학적 건강성평가가 필요하다.

최근에는 하천 생태계의 건강성을 평가하기 위해서 생물학적 요소인 생물분류군 분포 및 서식처 특성이 수질 및 수문환경과 동시에 평가되고 있는 추세이다(You *et al.* 2016; Jo *et al.* 2019; Jang *et al.* 2020). 이는 과거에 주로 실시된 이화학적 수질항목만을 이용한 수질평가로는 측정 당시의 수질상태를 제한적으로만 보여주는 한계가 있고, 따라서 지표생물(indicator organisms)을 이용한 생물학적 방법을 통해서 하천수질을 관리하는 방법들이 도입되고 있다. 생태계 주요 구성원인 저서동물(저서성 대형 무척추동물, benthic macroinvertebrates)은 널리 활용되고 있는 지표생물 중 하나이다. 저서동물은 하천바닥에서 서식하는 수서곤충, 조개류, 갑각류 등 다양한 무척추동물을 말하며, 수환경 변화에 민감하고 이동성이 적고, 종이 다양하다. 특히 하천 생태계의 주요 구성원 중 1차 또는 2차 소비자로서 생태적 중요성과 환경지표성이 높아, 예전부터

수생태 환경평가에 폭넓게 활용되고 있으며(Hynes 1970; Rosenberg *et al.* 1993; Karr 1999; Smith *et al.* 1999; Nalepa *et al.* 2000; Morene and Callisto 2006; Baumgartner *et al.* 2008), 국내에서도 영산강, 낙동강 및 지류천 등 다양한 생태환경에서 저서동물을 활용하여 담수생태계의 수환경을 조사한 사례들이 많이 있다(Ra *et al.* 1986; Oh *et al.* 1991; Wui *et al.* 1991; Kong *et al.* 2020). 하지만 자연형 하천에 비해 도시화된 지역에 위치하여 친수공간으로서의 역할이 강화된 도심하천을 대상으로 저서동물을 활용한 생태조사와 함께 동시에 DO(용존산소, dissolved oxygen), pH(수소이온농도), TP(총인, total phosphorus), BOD(생물학적 산소요구량, biochemical oxygen demand), TOC(총유기탄소, total organic carbon) 등 하천에서의 주요 이화학적인 수질항목 등을 연계한 통계분석 기반의 도심하천 평가방법에 대한 연구 사례는 여전히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 서울지역 대표 도심하천으로 녹지와 경관, 특히 시민들을 위한 휴식 공간이 다수 설치되어 있어 시민들의 이용이 많은 양재천과 여의천을 대상으로 하천수질 및 저서동물 생물상을 조사하여 저서동물 생물지수와 수질과의 상관성 분석 및 생물지수의 현장 적용성을 파악하였다. 동시에 여의천의 경우, 주로 양재천을 유지용수로 사용하는 만큼 두 하천 간 환경조건에 따른 저서동물 분포상태가 차이가 있는지 확인하고, 환경요인과의 관계를 살펴보는 등 저서동물 기반의 하천 생태계의 건강성을 평가하고, 향후 도심하천 생태건강성평가를 위한 기초자료를 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 자료수집

본 연구는 서울지역 대표 도심하천인 양재천과 여의천을 대상으로 2019~2020년 2년 동안 총 8회(2019년 3월, 6월, 9월, 11월, 2020년 3월, 7월, 9월, 11월)에 걸쳐 분기별로 현장 시료채취 및 생태조사를 실시하였다. 조사지점 세부 내역은 Fig. 1에서 보듯이(QGIS 3.16.11, Google Earth Pro 7.3.4.8642), 양재천, 여의천의 서식처 특성과 지형학적 위치를 고려하여 하천별로 각각 상류·중류·하류 3지점을 선정하였다. 조사내용은 군집지수(community index), 저서동물지수(Benthic Macroinvertebrate Index, BMI) (NIER

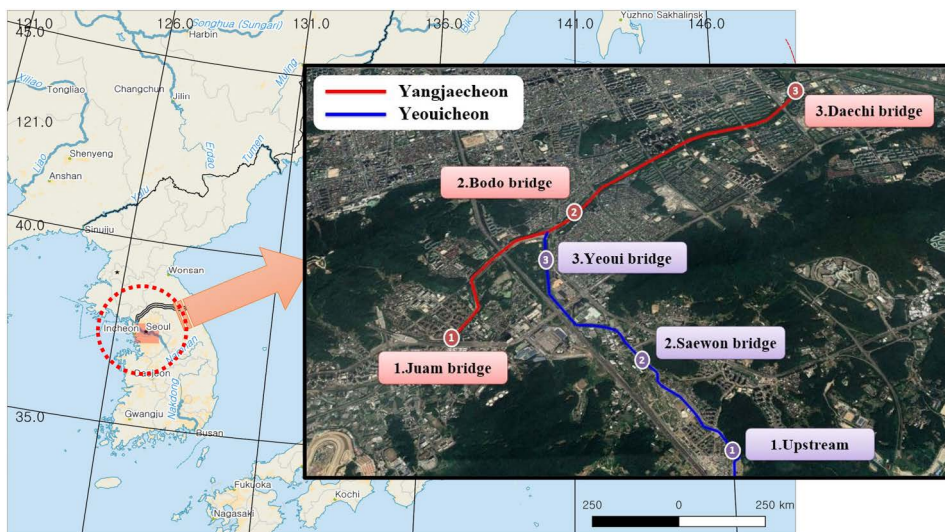


Fig. 1. Map of study sites in Yanjaecheon and Yeouicheon. The coordinates for study sites are as follows: Juam bridge (N 37°27'35.9", E 127°01'37.7"), Bodo bridge (N 37°28'35.4", E 127°02'29.1"), Daechi bridge (N 37°29'47.0", E 127°04'25.0"), Upstream (N 37°26'44.5", E 127°03'33.7"), Saewon bridge (N 37°27'30.2", E 127°02'57.2"), Yeoui bridge (N 37°28'10.4", E 127°02'17.2").

2017) 등 생물지수 도출을 위한 저서동물 분포조사와 함께 수심차를 이용한 유속측정, 휴대용 수질측정기 (YS-6820V2, YSI, USA)를 사용한 수온, pH, DO, 전기전도도, 탁도 등 현장 측정항목 5항목과 수질오염공정시험기준 (NIER 2019a)에 따른 BOD (PRECISION815, THERMO, USA), TOC (JP/TOC-LCPH, Shimadzu, Japan), SS, TN (QuAAtro, Seal Analytical, Germany), DTN (dissolved TN) (QuAAtro, Seal Analytical, Germany), NH₃-N (Quick chem 8500 series 2, LACHAT, USA), NO₃-N (940IC, Metrohm, Swiss), TP (QuAAtro, Seal Analytical, Germany), DTP (dissolved TP) (QuAAtro, Seal Analytical, Germany), PO₄-P (QuAAtro, Seal Analytical, Germany), 클로로필 a (JP/UV-2700, Shimadzu, Japan) 등 실험실 분석항목 11항목 등 총 17항목을 분석하였다. 저서동물 동정은 한국의 수서곤충 (Won *et al.* 2008), 한국산 저서성 대형무척추동물 생태도감 (NIER 2013), 하천생태계와 담수무척추동물 (Kim *et al.* 2013) 등을 활용하였다.

2. 조사방법

본 연구에서는 수생태계 현황조사 및 건강성평가 방법 등에 관한 지침 (하천편) (NIER 2019b)에 따라 저서동물 분포조사와 유속측정을 실시하였다. 저서동물 분포조사는 정량채집 결과 (개체수 m⁻²)를 이용하여 생물지수

를 산정한 것으로서, 본 연구에서는 Eq. 1~4와 같이 저서동물지수, 군집지수인 우점도지수 (DI, Dominance Index) (McNaughton 1967), 다양도지수 (H', Species Diversity Index) (Lloyd *et al.* 1964) 그리고 풍부도지수 (R1, Species Richness Index) (Margalef 1958)를 산출하였다.

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

s_i: unit pollution index of *i* species

h_i: appearance of *i* species

g_i: indicator weight of *i* species

저서동물지수는 환경 지표생물군을 활용한 생물학적 수질 판정 지수로서 개별 생물종마다 설정된 오탁지수와 가중치를 반영하여 수질을 A (매우 좋음, 80 ≤ BMI ≤ 100), B (좋음, 65 ≤ BMI < 80), C (보통, 50 ≤ BMI < 65), D (나쁨, 35 ≤ BMI < 50), E (매우 나쁨, 0 ≤ BMI < 35) 등 총 5단계로 구분하여 평가하는 지수이다.

$$DI = \frac{N_1 + N_2}{N} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \times \log_2 p_i), \quad (p_i = \frac{N_i}{N}) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$R1 = \frac{S-1}{\ln N} \quad (\text{Eq. 4})$$

N_1 : first dominant species population

N_2 : second dominant species population

N_i : population of i species

N : total appearing population

S : total number of species

또한, 장기적인 군집변동 양상을 파악하기 위한 군집지수로서 우점도지수는 특정 생물종 개체수의 총 개체수에 대한 비를 말하며, 다양도지수는 생물군집 내 종의 다양성, 생태적 안정성을 판정하는 지수이고, 풍부도지수는 생물군집 내 존재하는 종의 수에 따른 종의 밀도지표를 나타낸다. 여기서 다양도지수 및 풍부도지수는 값이 클수록, 우점도지수는 값이 작을수록 양호한 생태환경을 의미한다. 한편 하천수질 평가는 현재 국가수질기준으로서 하천에 적용되고 있는 환경정책기본법 시행령(ME 2020) 내 수질 및 수생태계 하천 생활환경기준으로 주요 항목별로 수질 상태를 평가하여 저서동물지수에 기반한 수질등급과 비교·분석하였다.

본 연구에서는 대표적 오픈소스 언어인 R 프로그램(R-4.0.3, New Zealand)을 사용하여 양재천, 여의천에서의 생물지수와 주요 수질항목에 대해 산점도(scatter plot)를 도시하고, 비정규분포에 따른 Spearman 상관관계를 파악하였다(R package 'nortest', 'psych'). 이를 통해 생물지수와 수질항목 간 연관 정도와 비선형적 관계를 확인하고, 최종적으로 하천수질 평가도구로서 실제로 기존 수질 기준과 함께 생물지수를 현장에 적용할 수 있을지 검토하였다. 또한, 비계량적 다차원척도법(nMDS, nonmetric multidimensional scaling, R package 'vegan')을 활용한 저서동물 생태조사와 하천수질(전기전도도를 제외한 현장 측정항목 5항목)을 연계한 통계분석을 실시하였다(Lee 2011). 모형의 적합도는 주로 근접 정도 측도인 stress 값을 활용하는데, 일반적으로 경험법칙(a rule of thumb)에 따르면 stress가 0~0.05이면 매우 좋은 모형(excellent), 0.05~0.10은 만족스러운 모형(great), 0.10~0.20은 양호한 수준의 모형(good), 0.30 이상일 경우 나쁨 수준의 모형(poor)으로 판단한다(<https://jonlefecheck.net/2012/10/24/nmds-tutorial-in-r/>).

결과 및 고찰

1. 수질환경 특성

양재천 3개 지점(주암교, 보도교, 대치교)에서의 주요 항목 평균 수질은 Fig. 2에서 보듯이, BOD 1.1 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TOC 2.3 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TP 0.072 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)로 나타났다. 지점별로 살펴보면, 상류 지역인 주암교 지점의 평균 수질은 BOD 1.2 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TOC 2.4 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TP 0.078 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)으로 유기물 및 영양염류에 의한 오염은 적은 것으로 조사되었다. 중간지역 보도교 지점의 평균 수질은 BOD 1.1 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TOC 2.3 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TP 0.073 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)로 나타났으며, 하류지역인 대치교 지점의 평균 수질은 BOD 1.0 mg L^{-1} (Ia등급, 매우 좋음), TOC 2.3 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TP 0.065 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)로 전반적으로 유기물과 영양염류에 의한 수질상태는 양호하였는데, 이는 양재천이 하류로 흘러가는 과정에서 유의한 오염물질 유입이 없고, 하천 자정작용에 의한 수질이 개선되었다고 판단된다.

여의천의 경우(상류지점, 새원교, 여의교), Fig. 3과 같이 주요 항목 평균 수질은 BOD 1.5 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TOC 2.0 mg L^{-1} (Ia등급, 매우 좋음), TP 0.077 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)로 전반적으로 양재천 수질환경과 유사한 결과를 보였다. 지점별로 살펴보면, 여의천 상류지점의 평균 수질은 BOD 1.5 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TOC 2.3 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TP 0.068 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)로 나타났으며, 중간지역 새원교 지점의 평균 수질은 BOD 1.6 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TOC 2.1 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TP 0.084 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)로 상류지점과 유사한 수질특성을 확인할 수 있었다. 또한, 하류지역인 여의교 지점의 평균 수질은 BOD 1.5 mg L^{-1} (Ib등급, 좋음), TOC 1.6 mg L^{-1} (Ia등급, 매우 좋음), TP 0.079 mg L^{-1} (II등급, 약간 좋음)로 유기물 및 영양염류에 의한 오염은 적은 것으로 조사되었다.

2. 저서동물 분포특징

양재천 3개 지점인 주암교, 보도교, 대치교에서 저서동물상은 총 5문 8강 8목 39종 3,787개체가 출현하였고, 지점별로는 주암교 23종 1,721개체, 보도교 23종 1,241개체, 대

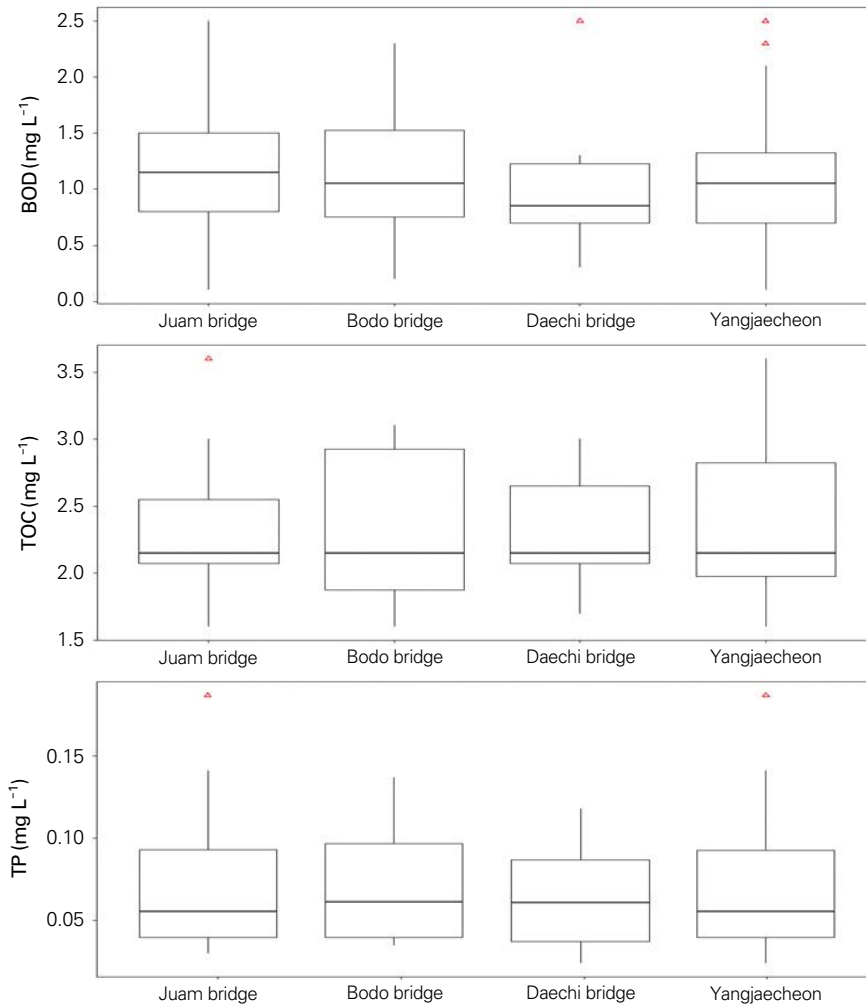


Fig. 2. Box plot comparing the average biological oxygen demand (BOD), total organic carbon (TOC), and total phosphorus (TP) water quality by study site in Yangjaecheon. Red triangles indicate outliers.

치교 25종 825개체가 출현하였다. Table 1과 같이, 분류군별로는 절지동물문(곤충강)이 전체 개체수의 77.5%로 가장 높은 빈도로 출현하였고, 종수도 27종으로 가장 많이 나타났다. 절지동물문(곤충강) 중에서는 하루살이목 1,360개체(46.3%), 파리목 897개체(30.6%), 날도래목 671개체(22.9%)가 전체 곤충강의 99.8%로 대부분이었고, 기타 잠자리목, 딱정벌레목이 일부 출현하였다. 한편 여의천 상류지점, 새원교, 여의교 3개 지점에서 저서동물상은 총 5문 8강 9목 51종 4,199개체가 출현하였고, 지점별로는 여의천 상류지점 35종 1,606개체, 새원교 35종 1,708개체, 여의교 22종 885개체가 출현하였다. 특히, 여의천 상류지점은 비교적 빠른 유속과 돌이 많은 서식처 특성 등 우수성 환경과 입자가 큰 하상구조를 갖고 있어 다양한 종이 출현

한 것으로 판단된다. 분류군별로는 절지동물문(곤충강, 갑각강)이 전체 개체수의 87.8%로 가장 높은 빈도로 출현하였고, 종수도 39종으로 가장 많았다. 절지동물문(곤충강)은 날도래목 1,066개체(45.1%), 파리목 673개체(28.5%), 하루살이목 597개체(25.3%)가 전체 곤충강의 98.9%로 대부분이었고, 기타 잠자리목 등은 개체수가 1.1%이지만 상대적으로 다양한 출현종(9종)을 보였다(Table 1). 우수생태계(flowing water ecosystem)의 주요 그룹으로서 하루살이목(Ephemeroptera), 강도래목(Plecoptera), 날도래목(Trichoptera)을 이용한 양재천, 여의천의 EPT 분류군을 살펴보면, 양재천은 15종(38.5%), 2,031개체(53.6%), 여의천의 경우 19종(37.3%), 1,663개체(39.6%)로 나타났다. 보통 EPT 분류군은 자연형 하천을 대상으로 분석이 이루어

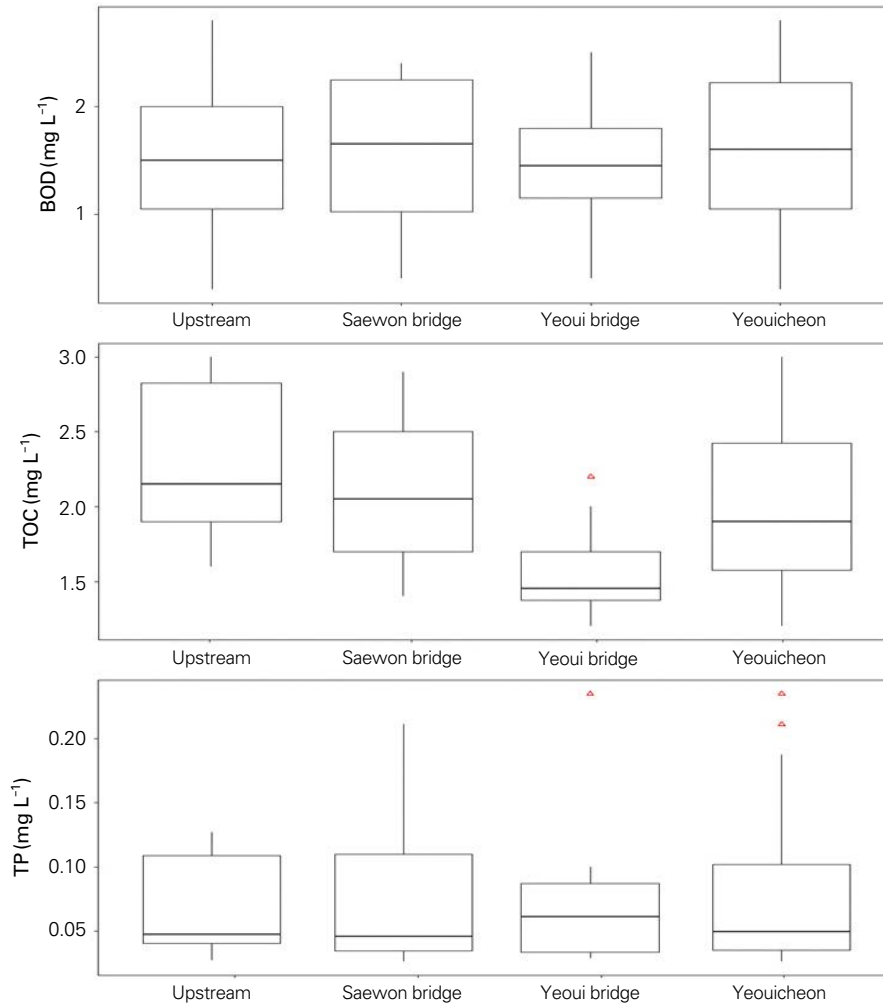


Fig. 3. Box plot comparing the average biological oxygen demand (BOD), total organic carbon (TOC), and total phosphorus (TP) water quality by study site in Yeouicheon. Red triangles indicate outliers.

지는데, 청정한 하천에서 출현도가 높고(Lenat 1988), 해당 비율이 높을수록 건강한 하천생태계, 양호한 수계환경으로 알려져 있다(Davis *et al.* 2003; Peitz 2003). 따라서 도심 하천 및 복원하천인 양재천, 여의천의 경우, 자연형 하천의 주요 그룹인 EPT를 직접 분석하기보다는 자연형 하천의 EPT와 비교하는 수준으로 참고하는 것이 타당하다고 판단되며, Bae *et al.* (2003), Shin *et al.* (2008), Park *et al.* (2013) 연구 등에 따르면 자연형 하천인 가평천 EPT 74.4%, 무심천 EPT 50.7%, 왕피천 EPT 62.9%로 모두 EPT가 50%를 넘는 것으로 나타났다. 따라서 양재천, 여의천의 경우, EPT 분류군 기준에 의하면 상대적으로 낮은 EPT 값을 보이기 때문에 하천 환경상태가 대체로 불량한 것으로 판단할 수 있는데, 이는 강도래목이 출현하지 않았다는 점, 그리고 유기

물 유입, 오염부하 증가에 따른 깔따구과 증가 등으로 인하여 불안정한 수환경 상태가 나타났기 때문이라고 판단된다. 하지만 비교적 청정한 환경상태에서 출현하는 옆새우, 민하루살이, 동양하루살이 등 또한 종종 출현하였고, EPT 값은 하상의 조건이나 다른 물리적 요건에도 큰 영향을 받기 때문에(Choi *et al.* 2012) EPT 분류군만으로 하천 환경상태를 직접적으로 판단하는 것은 무리가 있다. 이처럼 하천의 수질상태를 평가할 때 이화학적 수질항목 또는 저서동물 분포특징 등 하나의 지표로만 수질상태를 평가하는 것이 아니라 수질데이터와 함께 다양한 EPT 분류군, 군집지수, 저서동물지수 등을 연계하여 종합적으로 하천 환경상태를 평가하는 것이 중요하다(Park *et al.* 2013).

전반적으로 양재천, 여의천 모두 절지동물문(곤충강)

Table 1. Number of individuals and number of species in Yangjaecheon and Yeouicheon

Taxa (Yangjaecheon)	Number of individuals (%)	Number of species	Taxa (Yeouicheon)	Number of individuals (%)	Number of species
Platyhelminthes	452 (11.9%)	1	Platyhelminthes	230 (5.5%)	1
Mollusca	22 (0.6%)	4	Mollusca	98 (2.3%)	6
Nematomorpha	2 (0.1%)	1	Annelida	183 (4.4%)	5
Annelida	205 (5.5%)	4	Arthropoda (Crustacea)	1,327 (31.6%)	3
Arthropoda (Crustacea)	172 (4.5%)	2	Arthropoda (Insecta)		
Arthropoda (Insecta)			Diptera	673 (16.0%)	8
Diptera	897 (23.7%)	7	Odonata	10 (0.5%)	7
Odonata	4 (0.1%)	3	Trichoptera	1,066 (25.4%)	9
Trichoptera	671 (17.7%)	9	Coleoptera	1 (0.1%)	1
Coleoptera	2 (0.1%)	2	Megaloptera	4 (0.1%)	1
Ephemeroptera	1,360 (35.9%)	6	Ephemeroptera	597 (14.2%)	10
Total	3,787 (100%)	39	Total	4,199 (100%)	51

Table 2. Results of the first dominant species and dominance index by study site in Yangjaecheon

Site	1 st quarter		2 nd quarter		3 rd quarter		4 th quarter	
	1 st dominant species (pollution index)	DI*	1 st dominant species (pollution index)	DI*	1 st dominant species (pollution index)	DI*	1 st dominant species (pollution index)	DI*
Juam bridge	Chironomidae (3.4)	0.67	Turbellaria (0.7)	0.70	Baetis fuscatus (1.8)	0.89	Chironomidae (3.4)	0.59
Bodo bridge	Chironomidae (3.4)	0.81	Baetis fuscatus (1.8)	0.57	Baetis fuscatus (1.8)	0.88	Hydropsyche orientalis (0.4)	0.50
Daechi bridge	Chironomidae (3.4)	0.77	Hydropsyche orientalis (0.4)	0.62	Hydropsyche orientalis (0.4)	0.61	Hydropsyche orientalis (0.4)	0.74

*DI: dominance index

이, 그리고 이 중에서도 하루살이목, 파리목, 날도래목이 많은 비중을 차지하였으며, 지점별로 살펴보면 이전의 선행 연구에서 보듯이 (Hynes 1970; Allan 1995) 단순한 미소서식처보다는 물 흐름 개선과 다양한 미소서식처가 형성되어 있는 상류지역에서 (양재천 주암교, 여의천 상류지점) 비교적 다양한 종이 출현함을 확인할 수 있었다.

3. 군집지수

양재천 군집지수 산출 결과를 살펴보면, 우점도지수는 Table 2에서 보듯이, 0.50~0.89로 나타났으며, 특히 일부 시기에서는 0.8 이상의 높은 우점도지수를 보여 전반적으

로 불량한 생태환경을 나타냈다.

양재천 우점종으로는 오염 내성 범위가 넓고, 오락지수가 비교적 높은 출현종인 깔따구과, 개똥하루살이와 돌이 많고 유속이 빠른 환경적 특성을 갖는 여울 등에서 서식하는 오락지수 1 이하인 동양줄날도래가 조사시기 및 지점에 상관없이 주요 우점종으로 나타났다.

양재천 3개 지점인 주암교, 보도교, 대치교에서의 다양도지수 평균값은 Table 3에서 보듯이 각각 주암교 2.13±0.59, 보도교 2.09±0.61, 대치교 2.42±0.38로 모두 2.0 이상의 값을 보였으며, 특히 대치교에서 안정한 군집구조를 보였다. 반면, 3사분기 주암교, 1사분기 및 3사분기 보도

Table 3. Results of species diversity and richness indices by study site in Yangjaecheon

Site	H [*]					R1 ^{**}				
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	Mean ± sd	1st	2 nd	3 rd	4 th	Mean ± sd
Juam bridge	2.27	2.23	1.18	2.82	2.13 ± 0.59	1.80	2.08	1.93	2.82	2.16 ± 0.40
Bodo bridge	1.60	2.64	1.37	2.76	2.09 ± 0.61	1.91	2.34	1.96	2.23	2.11 ± 0.18
Daechi bridge	1.94	2.78	2.79	2.16	2.42 ± 0.38	2.07	2.41	2.43	2.70	2.40 ± 0.22

H^{}: species diversity index, **R1: species richness index

교에서는 각각 1.18, 1.60, 1.37로 상대적으로 다양도지수가 2.0 이하로, 동시에 우점도지수는 각각 0.89, 0.81, 0.88로 모두 0.8 이상의 높은 우점도지수를 보여 다소 불안정한 상태로, 이는 외부오염 유입 등에 따른 수생태계 교란이 있었을 것으로 추정된다. 풍부도지수는 주암교 2.16 ± 0.40, 보도교 2.11 ± 0.18, 대치교 2.40 ± 0.22로 대치교 지점이 군집의 종구성이 풍부하였으며, 전반적으로 1사분기에 낮게 시작된 풍부도지수는 점차 높아지는(또는 낮아지다가 회복되는) 경향을 보였는데 이는 BOD가 1사분기에 1.7 mg L⁻¹에서 4사분기 1.2 mg L⁻¹로, 탁도는 1사분기 8.4 mg L⁻¹에서 4사분기 4.2 mg L⁻¹로 낮아지는 등 수질개선과 서식처 교란의 영향이 감소되었기 때문이라고 판단된다.

여의천의 경우, 우점도지수는 Table 4와 같이 0.39~0.79로 1 이하의 값을 보였으며, 전반적으로 양재천과 유사한 우점도지수 분포를 보였다(Wilcoxon Matt Whitney test 검정 결과 ($n=12, p=0.3706$)).

여의천 우점종으로는 조사시기 및 지점에 상관없이 III~IV급수에서 주로 서식하는 오락지수가 비교적 높은 물벌레(등각류) 등이 주요 우점종으로서 다수 출현하였다.

여의천에서의 다양도지수 평균값은 Table 5와 같이 상류지점 2.39 ± 0.46, 새원교 2.06 ± 0.12, 여의교 1.90 ± 0.28로 하류로 내려갈수록 값이 작아지는 특징을 보였으며, 여의교를 제외하면 전반적으로 우수성 환경과 수변수초대 형성이 잘 되어있는 여의천이 양재천보다 다양도지수가 다소 높게 나타났다. 풍부도지수 또한 상류지점 3.38 ± 0.54, 새원교 2.82 ± 0.56, 여의교 2.00 ± 0.51로 나타나 양재천보다 비교적 높게 나타났으며, 다양도지수와 마찬가지로 하류로 갈수록 풍부도지수가 감소하였다. 특히 여의천 하류지역인 여의교에서는 봄철에 갈수기, 건천화, 하천정비공사 등의 영향으로 생태유지유량 및 서식처 확보가 어려워 풍부도지수가 1.32까지 떨어지는 등 풍부도가 빈약한 것으로 조사되었다.

4. 하천 환경상태 평가

저서동물지수(BMI)와 하천 생활환경기준에 따른 수질등급 비교 결과는 Fig. 4, Tables 6, 7과 같다. 우선 양재천의 경우, 평균 BMI는 C등급(보통, 59.6)으로, Fig. 4와 같이 주암교 1사분기를 제외하면, 조사시기 및 지점에 상관없이

Table 4. Results of first dominant species and dominance index by study site in Yeouicheon

Site	1 st quarter		2 nd quarter		3 rd quarter		4 th quarter	
	1 st dominant species (pollution index)	DI*	1 st dominant species (pollution index)	DI*	1 st dominant species (pollution index)	DI*	1 st dominant species (pollution index)	DI*
Upstream	<i>Asellus</i> (2.3)	0.65	<i>Asellus</i> (2.3)	0.46	<i>Asellus</i> (2.3)	0.69	<i>Asellus</i> (2.3)	0.39
Saewon bridge	Chironomidae (3.4)	0.67	<i>Asellus</i> (2.3)	0.73	<i>Hydropsyche orientalis</i> (0.4)	0.49	<i>Hydropsyche orientalis</i> (0.4)	0.72
Yeoui bridge	Chironomidae (3.4)	0.77	<i>Asellus</i> (2.3)	0.56	<i>Baetis fuscatus</i> (1.8)	0.79	<i>Asellus</i> (2.3)	0.71

*DI: dominance index

Table 5. Results of species diversity and richness indices by study site in Yeouicheon

Site	H'					R1**				
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	Mean ±sd	1 st	2 nd	3 rd	4 th	Mean ±sd
Upstream	2.25	2.57	1.75	3.00	2.39±0.46	2.54	3.51	3.43	4.03	3.38±0.54
Saewon bridge	2.22	2.02	2.11	1.88	2.06±0.12	2.59	2.03	3.52	3.13	2.82±0.56
Yeoui bridge	1.96	2.18	1.44	2.02	1.90±0.28	1.32	2.75	1.98	1.93	2.00±0.51

*H': species diversity index, **R1: species richness index

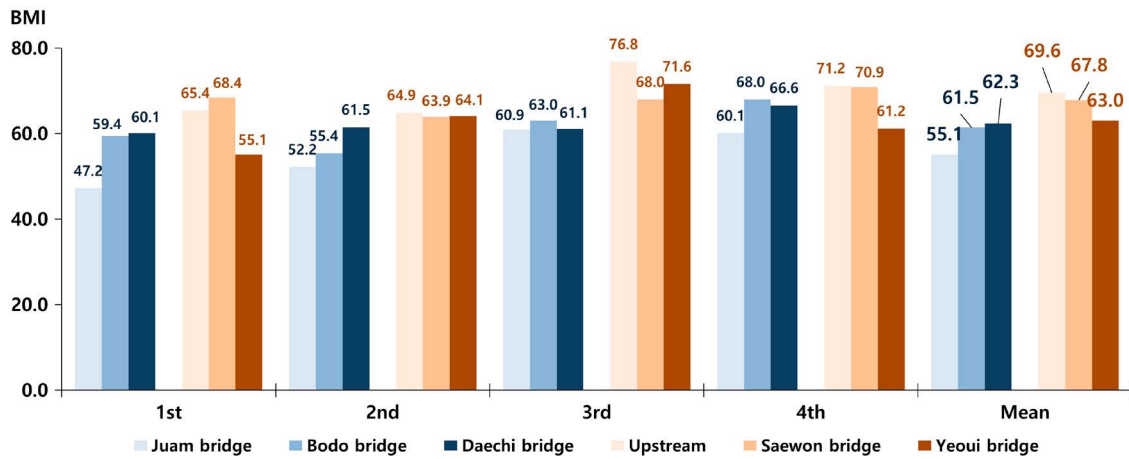


Fig. 4. Results of quarterly benthic macroinvertebrate index by study site in Yangjaecheon and Yeouicheon.

BMI는 C등급(보통) 이상으로 나타났으며, 출현종도 모든 지점에서 20종 이상 나타나 전반적으로 양호한 담수생태를 보였다. 또한 모든 지점에서 공통적으로 3사분기, 4사분기에 비해 1사분기, 2사분기에서 BMI가 낮게 나타났는데, 이는 저서동물 각각의 고유 생활사(life cycle)와 함께 봄철에는 오염원에 의한 수질악화, 하천정비공사로 인한 인위적인 생태계 교란, 하천 건천화 등에 의해 생태계 건강성이 다소 떨어지기 때문에 전체적으로 BMI가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

한편 여의천의 경우, 평균 BMI는 B등급(좋음, 66.8)으로, 여의천 상류지점과 새원교 지점은 2사분기(C등급, 보통)를 제외하면 모든 시기에서 B등급(좋음, 최대 76.8)으로, 출현종도 각각 35종으로 다양한 종들이 분포하였으며, 특히 봄철인 1사분기에서도 BMI가 각각 65.4(B등급, 좋음), 68.4(B등급, 좋음)로 나타났다. 심지어 하류지역인 여의교에서도(출현종 22종) 1사분기에는 수질악화, 하천 건천화 등에 따라 C등급(보통)이었으나 3사분기에는 BMI에 의한 환경상태가 B등급(좋음)까지 나타나는 등 전반적

으로 여의천 생태환경은 양호한 것을 확인할 수 있었다.

여의천의 경우, 양재천 수질환경과 유사한 것으로 나타났으며, BMI에 따른 하천 환경상태 또한 여의천 B등급(좋음), 양재천 C등급(보통)으로 전반적으로 유사한 환경상태를 보였다. 하지만 여의천에서 여의교를 제외한 상류지점, 새원교의 경우 양재천에 비해서 하천 환경상태가 좀더 양호한 것으로 조사되었으며, 이는 Fig. 5를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 5는 생물지수(DI, H', R1, BMI)와 주요 수질항목(BOD, TOC, TP) 등 7개 변수의 축으로 공통된 스케일로 표시된 변수값의 크기를 단순한 도형의 형태로 나타내어 상대적인 비교를 가능하게 한다. 따라서 도형 축의 길이는 각 변수에 해당되는 값의 크기를 의미하기 때문에 전체적으로 여의천 상류지점과 새원교 지점에서 생물지수가 높게 나오고, 반면 수질항목 농도는 낮게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 생물서식처 특성에 기인한 것으로 판단되는데, 즉, 여의천의 경우, 상류지점은 우수성 환경을 갖는 빠른 유속과 돌이 많은 서식처 특성을, 새원교는 서식처 교란이 적고, 다양한 하상구조 및 수변수초

Table 6. Results of grade comparison of benthic macroinvertebrate index and water quality by study site in Yangjaecheon

Site	Benthic macroinvertebrates		Water quality					
	BMI		BOD*		TOC*		TP*	
	Value	Grade	Con. (mg L ⁻¹)	Grade	Con. (mg L ⁻¹)	Grade	Con. (mg L ⁻¹)	Grade
Juam bridge	55.1	C (usually)	1.2	lb (good)	2.4	lb (good)	0.078	II (slightly good)
Bodo bridge	61.4	C (usually)	1.1	lb (good)	2.3	lb (good)	0.073	II (slightly good)
Daechi bridge	62.3	C (usually)	1.0	Ia (very good)	2.3	lb (good)	0.065	II (slightly good)

*BOD, TOC and TP applied water quality and aquatic ecosystem standards

Table 7. Results of grade comparison of benthic macroinvertebrate index and water quality by study site in Yeouicheon

Site	Benthic macroinvertebrates		Water quality					
	BMI		BOD*		TOC*		TP*	
	Value	Grade	Con. (mg L ⁻¹)	Grade	Con. (mg L ⁻¹)	Grade	Con. (mg L ⁻¹)	Grade
Upstream	69.6	B (good)	1.5	lb (good)	2.3	lb (good)	0.068	II (slightly good)
Seawon bridge	67.8	B (good)	1.6	lb (good)	2.1	lb (good)	0.084	II (slightly good)
Yeoui bridge	63.0	C (usually)	1.5	lb (good)	1.6	Ia (very good)	0.079	II (slightly good)

*BOD, TOC and TP applied water quality and aquatic ecosystem standards

대 형성 등 비교적 자연형 하천 상태를 잘 유지하고 있는 반면에, 양재천은 상대적으로 하도, 저수로의 인공 직강화 (일정폭), 인공식생이 포함된 경우가 존재하기 때문이라고 판단된다.

양재천, 여의천 환경상태 평가 결과, BMI에 따른 수질 등급평가는 C등급(보통)~B등급(좋음)으로 나타났으며, 하천 생활환경기준에 따른 수질등급 또한 Tables 6, 7에서 보듯이 이와 유사하게 평가된 II등급(약간 좋음)~Ia등급(매우 좋음)으로 나타났다. 이처럼 매우 복잡한 하천 환경 상태를 하나의 방법으로만 평가하여 일반화하기보다는 앞서 제시된 이화학적 수질항목에 따른 수질오염도, 저서 동물 군집지수와 함께 저서동물지수 등 다양한 평가방법

을 통한 교차평가 실시 및 연관성을 도출함으로써 상호 보완적으로 적용할 필요가 있으며, 향후에는 통합적인 평가 방법과 기준을 구축하는 것이 중요하다고 생각된다(Kil *et al.* 2010; Park *et al.* 2013).

5. 통계적 분석 결과

본 연구에서는 양재천과 여의천에서의 저서동물 생태 조사 결과를 이용하여 Fig. 6과 같이 상관분석을 실시하고, 생물지수 현장 적용성을 검토하였다. 상관분석 결과, 생물지수 중 풍부도지수(R1)는 대표적 영양염류 항목인 TP 항목과 음의 선형관계($r = -0.55, p < 0.001$)를 나타냈다. 또한 저서동물지수(BMI)는 유기물 지표항목인

TOC 항목과 음의 선형관계 ($r = -0.32, p < 0.05$)를, 부유 물질 함유 등 물의 탁함과 교란 정도를 나타내는 SS와 탁도와는 모두 음의 선형관계 (각각 $r = -0.48, p < 0.001, r = -0.42, p < 0.01$)를, TP 항목과도 음의 선형관계 ($r = -0.30, p < 0.05$)를 나타내는 등 주요 수질항목과 유의한 상관관

계가 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 통해서 다양한 오염원으로부터 영향을 받은 이화학적 수질요인은 극단적으로 악화된 수질상태가 아니라면 하천의 물리적 구조, 서식처 특성 등과 함께 저서동물의 생물학적 요인에 영향을 줄 수 있는 것으로 판단할 수 있으며 (Kim et al. 2008; Jo et al. 2019), 동시에 이전의 선행 연구에서도 볼 수 있듯이 (Kil et al. 2010; Choi et al. 2012; Jang et al. 2020), 풍부도지수와 저서동물지수 등 주요 생물지수는 이화학적 수질항목과 연계하여 현장 수질평가에 상호 보완적으로 적용할 수 있는 지표로 판단된다.

nMDS 분석, 분산분석을 통해 두 하천 간의 저서동물 분포상태가 차이가 있는지 시각적, 통계적으로 차이 유무를 분석하였다. 그 결과 Fig. 7과 같이 시각적으로 두 하천 간 교차지점이 발생하는 등 양채천, 여의천에서의 저서동물 분포상태를 구분하기 어려웠으며, 분산분석 결과, 두 하천 간 유의미한 차이가 없음을 통계적으로도 확인할 수 있었다 ($n = 24, F = 2.2356, p = 0.1491$). 또한, Fig. 8과 같이 Shepard plot을 통해 Fig. 7에서 도출된 nMDS 모형의 적합도를 판단하였으며 (Jari 2015), 그 결과 적합도 통계량 (statistics of goodness of fit) 2개의 상관계수 Non-metric fit R^2 , Linear fit R^2 은 각각 0.995, 0.95로 나타났고, stress값은 0.0711로 0.05~0.10 범위의 값을 보여 전체적으로 nMDS

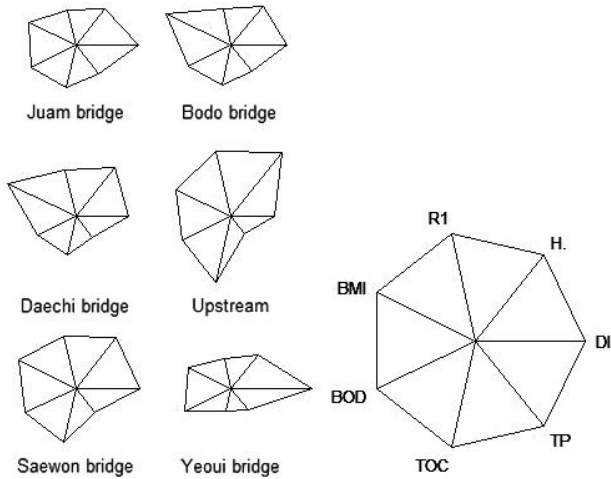


Fig. 5. Star plot comparing the use of biotic index (BMI, R1, H', and DI) and major water quality items (BOD, TOC, and TP) by study site in Yangjaecheon and Yeouicheon. The longer the axis is toward the biotic index and the shorter the axis toward water quality items, the better the ecological environment.

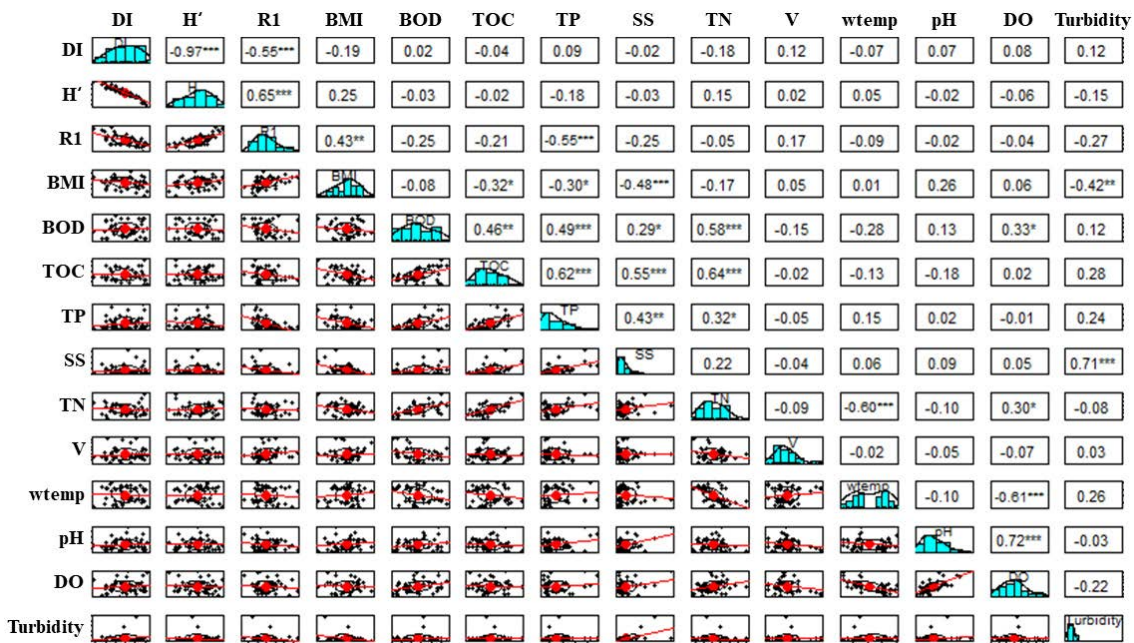


Fig. 6. Scatter plot matrix between the biotic index and major water quality items according to Spearman's rank correlation analysis. 'wtemp', 'V' is abbreviations for water temperature, velocity of river. (***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$ in the correlation analysis).

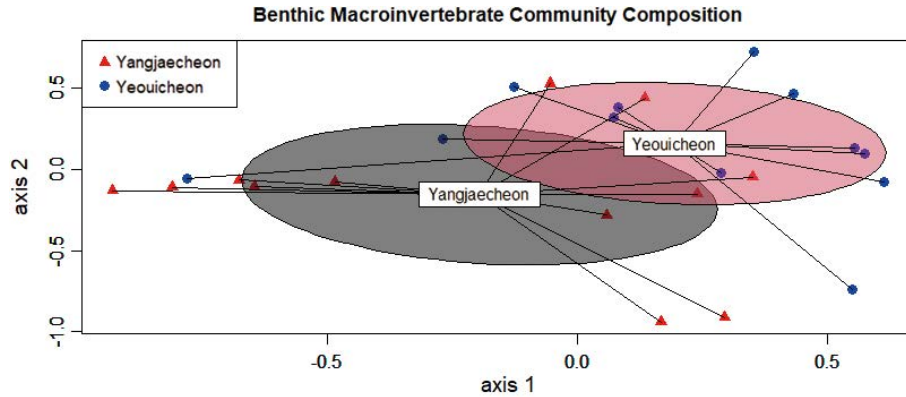


Fig. 7. Ordination diagrams of benthic macroinvertebrates in Yangjaecheon and Yeouicheon according to nonmetric multidimensional scaling analysis. The distances between points (red triangle, blue circle) approximate compositional dissimilarity among samples. Axis 1 and axis 2 are dimensions 1 and 2, and are arrays of distances between Yangjaecheon and Yeouicheon.

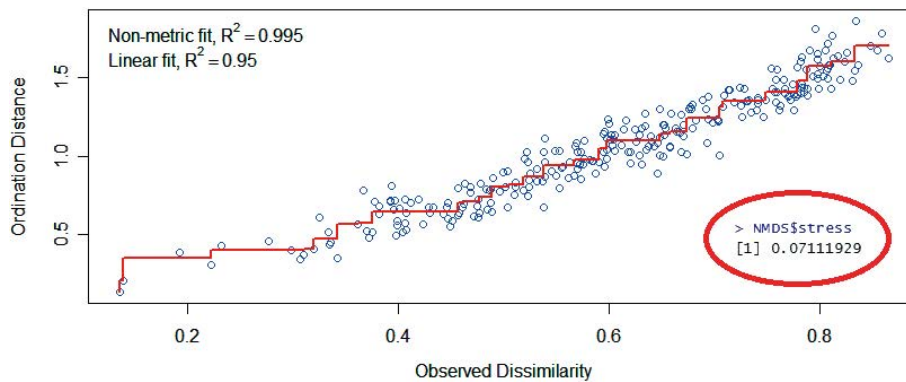


Fig. 8. Shepard plot where ordination distances are plotted against observed dissimilarities according to nonmetric multidimensional scaling analysis. The fit between observed dissimilarity and ordination distances is indicated by the monotonic step line (red). The non-metric fit is the modified Kruskal's stress value and the linear fit is R^2 value of the correlation between the ordination values and the ordination values predicted from the monotonic regression line.

모형은 만족스러운 모형(great)으로 판단하였다.

한편, Fig. 9에서 보듯이, 저서동물 분포와 현장 측정 5 항목과의 상관관계 중, 수온($R^2=0.51$, $p<0.001$)과 DO($R^2=0.26$, $p<0.05$) 항목이 두 하천에서의 저서동물 분포와 관련 있는 유의한 환경인자로 조사되었으며 특히 이전의 선행 연구와 같이(Han *et al.* 2017; Lee *et al.* 2021) 수온과 밀접하게 관련이 있는 것으로 나타났다.

결론

도심하천은 주요 본류에 비해 환경변화에 민감하고, 최근에는 생태복원 및 시민들의 이용이 활성화되고 있는 하

천이기 때문에 하천수질뿐만 아니라 서식처 특성, 생물분류군 분포 등 생물학적 요소를 포함한 종합적인 도심하천 생태건강성이 평가되고 있는 추세이다. 본 연구에서는 하천생태계 생물구성원 중 다양하고 풍부한 저서동물을 이용하여 서울지역 대표 도심하천인 양재천과 여의천을 대상으로 생물지수 및 수질특성 등을 평가함으로써 저서동물 생물지수와 수질과의 상관성 분석 및 현장 적용성을 살펴보고, 두 하천의 저서동물 분포 차이와 환경인과의 관계를 통계적 방법으로 분석하는 등 하천수질관리를 위한 기초자료 확보 및 도심하천 생태건강성 조사를 위한 기틀을 마련하고자 하였다. 본 연구를 통해서 양재천, 여의천은 수변환경 조건이 다르지만 전반적으로 수질 및 저서동물 분포 차이는 크지 않음을 볼 수 있었으며, 특히 하천의

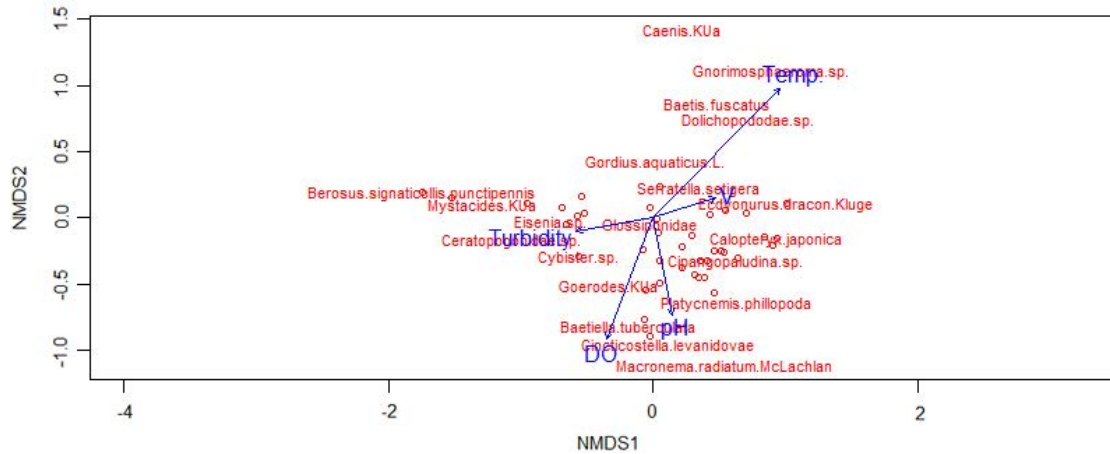


Fig. 9. Ordination plot (type: triplot) representing the relationship between benthic macroinvertebrates and major environmental variables according to nonmetric multidimensional scaling analysis. Arrows indicate the direction in which the value of the environment increases and the arrow length is proportional to the degree of the correlation between the environmental variable and the ordination.

수질상태를 평가하기 위해서는 수질데이터와 함께 군집지수, 저서동물지수 등 다양한 평가기법을 상호보완적으로 적용하는 것이 필요하다는 것을 확인하였다. 또한, 수질 및 저서동물 데이터를 이용한 상관분석 결과, 풍부도지수 및 저서동물지수가 TP, TOC, SS 등 주요 수질항목과 음의 상관관계가 있음을 확인하였다. 따라서 점오염원 및 비점오염원 등 다양한 오염원이 저서동물 군집에 영향을 끼칠 수 있는 것으로 나타나 도심하천 생태건강성을 유지하기 위하여 오염원 유입 차단, 유역관리, 하천정비사업 등 지속적인 하천수질관리와 모니터링이 중요하며, 이를 위한 하나의 방법으로서 기존 이화학적 수질항목 모니터링과 함께 생물지수를 함께 활용하는 것이다. 향후에는 좀 더 축적된 다양한 유형의 데이터를 활용하여 빅데이터 기반의 상관분석, nMDS 분석 등을 통해 보다 정확한 군집구조, 유사도 평가 및 다양한 환경인자와의 유의성을 도출하고, 이를 통해 고도화된 하천 수질평가 기법에 대한 조사 및 관련 연구가 이루어져야 할 것이다.

적 요

본 연구에서는 2019년~2020년 2년 동안 양재천과 여의천을 대상으로, 이화학적 수질항목(17항목)과 함께 저서동물지수와 우점도지수 및 다양도지수 등의 군집지수와 연계하여 두 하천의 생태건강성을 평가하였다. 또한 저서동물 생물지수의 현장 적용성 평가 및 두 하천

간 저서동물 분포특성을 통계적으로 비교하기 위하여 각각 상관분석(correlation analysis)과 비계량적 다차원척도법(nMDS, nonmetric multidimensional scaling)을 활용하였고, 이를 통해 도심하천의 하천생태계 현황을 진단하는 기초자료를 제공하고자 하였다. 조사 결과, 양재천(주암교, 보도교, 대치교)은 총 39종, 3,787개체가 출현하였으며, 양재천 수질(BOD, TOC, TP 기준)은 II등급(약간 좋음) 이상이며, 저서동물을 이용한 BMI는 모든 지점에서 C등급(보통)으로 나타났다. 여의천(상류, 새원교, 여의교)은 총 51종, 4,199개체가 출현하였으며, 여의천 수질(BOD, TOC, TP 기준)은 양재천과 유사하게 II등급(약간 좋음) 이상으로, BMI는 상류 및 새원교 모두 B등급(좋음), 여의교는 C등급(보통)으로 나타나는 등 전반적으로 양재천과 여의천 모두 수질 및 하천 환경상태는 유사한 것으로 확인되었다. 특히 저서동물 분포상태를 비계량적 다차원척도법으로 분석한 결과에서도 두 하천 간의 유의미한 차이를 볼 수 없었으며($p=0.1491$), 이때 수온과 DO 환경인자가 두 하천에서의 저서동물 분포와 상관성이 높은 것으로 나타났다. 저서동물 생물지수와 주요 수질항목과의 상관분석 결과, 풍부도지수와 저서동물지수가 현장 수질평가에 활용될 수 있을 것으로 확인되었다.

REFERENCES

Allan DJ. 1995. Stream Ecology; Structure and Function of Run-

- ning Waters. Chapman and Hall, London, UK.
- Bae YJ, DH Won, DH Hoang, YH Jin and JM Hwang. 2003. Community composition and functional feeding groups of aquatic insects according to stream order from the Gapyeong Creek in Gyeonggi-do, Korea. *Korean J. Limnol.* 36:21–28.
- Baumgärtner DM, K Mörtl and O Rothhaupt. 2008. Effects of water-depth and water-level fluctuations on the macroinvertebrate community structure in the littoral zone of Lake Constance. *Hydrobiologia* 613:97–107.
- Bledsoe BP and CC Watson. 2001. Effects of urbanization on channel instability. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37:255–270.
- Choi AR, SJ Park, JY Kim, MY Song and DS Kong. 2012. The correlation between water quality and benthic macroinvertebrate community indices in the Jinwi Stream. *Korean J. Limnol.* 45:1–10.
- Davis SD, SW Golladay, G Vellidis and CM Pringle. 2003. Macroinvertebrate biomonitoring in intermittent coastal plain stream impacted by animal agriculture. *J. Environ. Qual.* 32:1036–1043.
- Han JS, JH Wang, JE Kim, JH Jung, YJ Bae, JK Choi and HG Lee. 2017. The effects of thermal discharge on benthic macroinvertebrate communities structure in Buso stream. *Korean J. Environ. Biol.* 35:83–94.
- Hynes HBN. 1970. *The Ecology of Running Waters*. Liverpool Univ. Press. Liverpool, UK.
- Jang MH, EW Seo and JE Lee. 2020. Analysis of benthic macroinvertebrates community stability and similarity in the Giran stream. *Korean J. Environ. Biol.* 38:714–723.
- Jari O. 2015. *Multivariate Analysis of Ecological Communities in R: vegan Tutorial*. University of Helsinki. Helsinki, Finland.
- Jo MH, MJ Lee, EW Seo and JE Lee. 2019. Analysis of functional habitat groups and community stability of benthic macroinvertebrates before and after Yeongju Dam completion in Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 37:664–671.
- Karr JR. 1999. Defining and Measuring River Health. *Freshw. Biol.* 41:221–234.
- Kil HK, DG Kim, SW Jung, YH Jin, JM Hwang, KS Bae and YJ Bae. 2010. Impacts of impoundments by low-head and large dams on benthic macroinvertebrate communities in Korean streams and rivers. *Korean J. Limnol.* 43:190–198.
- Kim MC, SP Cheon and JG Lee. 2013. *Invertebrates in Korean Freshwater Ecosystems*. GeoBook Publisher, Seoul.
- Kim HM, JH Lee and KG An. 2008. Water quality and ecosystem health assessments in urban stream ecosystems. *Korean J. Environ. Biol.* 26:311–322.
- Kong DS and SY Kim. 2020. Benthic macroinvertebrates fauna of Mt. Cheonggye. *Korean J. Nat. Conserv.* 19:15–28.
- Lee CY. 2011. A non-metric multidimensional scaling algorithm using continuous simulated annealing based on Gaussian distribution. *J. KISS-Softw. Appl.* 38:287–295.
- Lee DY, DS Lee, CW Park, SJ Yun, JH Lim and YS Park. 2021. Comparison of benthic macroinvertebrate communities at two headwater streams located with different temperature regions in South Korea. *Korean J. Ecol. Environ.* 54:87–95.
- Lenat DR. 1988. Water quality assessment of streams using a qualitative collection method for benthic macroinvertebrates. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 7:222–233.
- Lloyd M and RJ Ghelardi. 1964. A table for calculation of the “equitability” component of species diversity. *J. Anim. Ecol.* 33:217–226.
- Margalef R. 1958. Information Theory in Ecology. *Int. J. General Syst.* 3:36–71.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California Grassland. *Nature* 216:168–169.
- MOE. 2020. Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Moreno P and M Callisto. 2006. Benthic macroinvertebrates in the water-shed of an urban reservoir in southeastern Brazil. *Hydrobiologia* 560:311–321.
- Nalepa TF, GA Lang and DL Fanslow. 2000. Trends in benthic macroinvertebrate populations in southern Lake Michigan. *Verein. Limnol.* 27:2540–2545.
- NIER. 2013. *Ecological Encyclopedia of Benthic Macroinvertebrates from Korea*. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- NIER. 2017. *Biomonitoring Survey and Assessment Manual*. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- NIER. 2019a. *Water Pollution Standard Method*. Korea, National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- NIER. 2019b. *Guidelines on How to Survey the Current Status of Aquatic Ecosystems and Evaluate Health (Stream Edition)*. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- NMDS TUTORIAL IN R. Available from: <https://jonlefcheck.net/2012/10/24/nmcs-tutorial-in-r/> (accessed on September 2021).
- Oh YN and TS Chon. 1991. A study on the benthic macroinvertebrates in the middle reaches of the Paenae Stream, a tributary of the Nakdong River, Korea. I: Community analysis and biological assessment of water quality. *Korean J. Ecol. Environ.* 14:345–360.
- Park YJ, YL Jeon, KD Kim, HN Yoon and SH Nam. 2013. Community analysis and biological water quality evaluation on benthic macroinvertebrate in Wangpi-cheon Watershed. *Korean J. Environ. Ecol.* 27:327–343.
- Petiz DG. 2003. Macroinvertebrate biomonitoring as an indicator

- of water quality: Status report for pipestone Creek. Pip. Nat. Mon. 13:1989-2002.
- Ra CH, CG Choi and SK Baik. 1986. Studies on the tolerance and sensitivity of Korean aquatic insects to the environmental pollutants. Korean J. Ecol. Environ. 19:109-125.
- Rosenberg DM and VH Resh. 1993. Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. Chapman and Hall, New York. p. 488.
- Shin HS, O Mitamura, SJ Kim and JK Choi. 2008. Characteristics of Musim stream by surveyed sites based on EPT-group of aquatic insects. Korean J. Environ. Ecol. 22:420-426.
- Smith MJ, WR Kay, DHD Edward, PJ Papas, KSJ Richardson, JC Simpson, AM Pinder, D Cale, PHJ Horwitz, JA Davis, FH Yung, RH Norris and SA Halse. 1999. Using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia. Freshw. Biol. 41:269-282.
- Won DH, SJ Kwon and YC Jeon. 2005. Aquatic Insects of Korea. Korea Ecosystem Service Press. Seoul.
- Wui IS, CH Ra, JB Lee and SK Baik. 1991. Studies on the bioindicator of aquatic insects to the environmental pollution. Korean J. Environ. Biol. 9:42-54.
- Yoon IB, DS Kong and JK Ryu. 1992. Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (I) -Saprobic valency and indicative value-. Korean J. Environ. Biol. 10:24-39.
- You H, MJ Lee, EW Seo and JE Lee. 2016. Analysis of benthic macroinvertebrate community structure and stability in major inflow streams of Lake Andong and Lake Imha. Korean J. Environ. Biol. 34:320-328.