

Original article

금강 상류 구간 내 샛강형 수로의 서식환경 특성이 저서성 대형무척추동물 군집 구조에 미치는 영향

손세환 · 최종윤^{1,*}

경기대학교 생명과학과, ¹국립생태원 생태평가연구실

Influence of Environmental Characteristics on the Community Structure of Benthic Macroinvertebrates in Stream-type Waterways Constructed at Upper Reaches of Geum River. Se-Hwan Son (0000-0002-6849-6394) and Jong-Yun Choi^{1,*} (0000-0001-6052-9473) (Department of Life Science, Kyonggi University, Suwon 16227, Republic of Korea; ¹National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam province 33657, Republic of Korea)

Abstract Microhabitat In the upper stream is created by various environment variables such as the bottom substrate and the physicochemical factors, and may influence the distribution of benthic macroinvertebrates. We investigated the bottom substrate and environmental variables influencing the distribution of benthic macroinvertebrate in 26 stream-type waterways established at upper reaches of Geum River. During study period, total 85 families, 160 species, 9305 individuals of benthic macroinvertebrates were recorded. The stream-type waterways, where the bottom substrates consist mainly of pebble (16~64 mm) and cobble (64~256 mm) or with rapid water velocity (more than 0.2 m/s) and high dissolved oxygen (more than 120%), were supported by high species diversity of benthic macroinvertebrate. Hierarchical cluster analysis and the nonparametric multi-dimensional scale (NMDS) divided 26 stream-type waterways into a total of three clusters. In Cluster 1, the invertebrate species, such as *Branchiura sowerbyi*, *Cloeon dipterum*, *Ischnura asiatica*, *Paracercion calamorum*, and *Radix auricularia*, closely related to aquatic macrophytes, and *Chironomidae* spp., *Limnodrilus gotoi*, and *Tanyptodinae* sp. were abundant in waterways, with high coverage of silt and clay as well as high turbidity and total nitrogen. The benthic macroinvertebrate species (*Cheumatopsyche brevilineata*, *Drunella ishiyamana*, *Dugesia japonica*, *Ephemera orientalis*, *Gumaga* KUa, *Macrostemum radiatum*, *Potamanthus formosus*, *Semisulcospira libertine*, *Stenelmis vulgaris*, and *Teloganopsis punctisetae*) included in Cluster 2 were dominated in sites with high cover rates of pebble and gravel. Cluster 3 was predominantly covered by the Cobbles, was supported by *Simulium* sp. Such a clear distinction in the study sites means that each stream-type waterways is governed by a clear habitat environment. In the case of some sites with low species diversity, improvement measures are required to restore nature, such as improving the function of inflows and outflows, creating meandering channel, and inducing the settlement of littoral vegetation.

Key words: river upstream, microhabitat, aquatic macrophytes, biodiversity, river refurbishment project

Manuscript received 3 March 2021, revised 15 March 2021,
revision accepted 16 March 2021

* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5473, Fax: +82-41-950-6157
E-mail: jyc311@nie.re.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

서론

서식처의 물리·화학적 특성은 다양한 담수생물들의 분포와 종다양성을 결정짓는 중요한 요인이다(Casatti, 2005; Choi *et al.*, 2014). 담수생태계는 육상 및 해양과 비교할 때 그 범위와 한계가 명확한 시스템이며, 이로 인해 생물군집 간에 접촉 빈도가 높아 경쟁과 포식 등의 생물학적 상호작용이 가속화되어 발생한다(Sih *et al.*, 1985; Menge and Sutherland, 1987). 미소서식처의 존재는 과도하거나 빈번한 상호작용을 낮출 수 있으며, 결과적으로 다양한 종들의 공존에 기여할 수 있다(Gjelland *et al.*, 2007). 저질이나 수생식물, 고사목, 기타 인공기질들은 담수생태계의 공간적 이질성을 야기하는 요소들이며, 이들의 풍부함이나 적절한 조합은 서식처 복잡성을 크게 증가시킨다(Schmidt *et al.*, 2020). 담수생태계 먹이망 내에서 상위포식자로서 위치하는 어류의 포식 활동은 복잡한 구조를 가진 공간에서 제한적이며, 이로 인해 다양한 피식자들은 생존가능성을 높이고 안정적인 개체군 성장을 유지할 수 있다(Brandl *et al.*, 2015). 또한, 식물 플랑크톤이나 박테리아 등이 미소서식처의 공간적 구조에 따라 풍부도 또는 종조성의 차이를 가지는 것은 서로 다른 먹이원을 활용하는 무척추동물들의 서식처 선호성과 공간적 분포를 유도하기에 충분하다(Sun *et al.*, 2020).

습지나 흐름이 거의 없는 하천의 하류 등에서 주로 발달되는 수생식물은 물리적인 서식처 복잡성을 증가시키고 미소서식처의 다양성을 야기하는 구조체이다(Christie *et al.*, 2009). 이들의 잎과 줄기, 그리고 뿌리의 표면은 다양한 무척추동물에게 효율적인 서식처를 제공할 뿐만 아니라 이들에 의해 피복되는 공간은 어류와 같은 포식자의 회피에 유리하다(Harrison *et al.*, 2005). 그러나 이들은 생물학적 구조체라는 한계 탓에 이들의 성장이나 종조성은 지역적인 환경 특성에 따라 변동되기 쉬우며, 이러한 특성은 지역적인 서식처 효율성의 분명한 차이를 야기한다. 대표적으로, 강이나 하천의 상류구간은 빠른 흐름과 비교적 크기가 큰 하상기질로 주로 피복되는 특성으로 인해 수생식물이 성장하기 어려운 서식환경이다(Eriksson, 2001). 그래서, 이 지역에서는 다양한 크기의 저질이 서로 겹치거나 맞닿으면서 조성되는 공간이 서식 생물들에게 중요한 서식처로서 활용된다(Nakano *et al.*, 2005). 이러한 하상기질의 다양성에 의해 조성된 미소서식처는 수생식물보다 상대적으로 변동이 적은 미소서식처를 제공하지만, 강이나 하천의 상류라는 지역적인 범위에 국한되어 적용된다. 굵은자갈(Pebble, 16~64 mm), 호박돌(Cobble, 64~256 mm) 및 전석(Boulder, >256 mm) 상류구간은 하상 내 전석(Boulder, >256 mm)이나 호박돌(Cobble, 64~256 mm), 굵은자갈(Pebble, 16~64 mm) 등의 비율이 높

고, 흐름이 빠르게 발생하기 때문에 하천의 중류나 하류와는 다른 서식환경이 조성되는 담수생태계이다(Rosenfeld *et al.*, 2007). 이 지역에서 서식하는 생물군집들은 하천의 빠른 흐름에 적응되어 있을 뿐만 아니라 높은 용존산소와 상대적으로 낮은 수온을 선호하기 때문에 같은 하천의 중류나 하류에서 관찰되는 생물군집과도 명확한 분포 차이를 가진다(Kuemmerlen *et al.*, 2014). 물 흐름이 감소되는 중류나 하류 지역은 연못이나 습지, 일부 저수지와 비슷한 서식환경과 생물군집을 가지지만, 상류지역은 대부분의 담수생태계 유형과 중복되지 않는 환경적 특성에 의해 조성된다. 상류지역에서 발생하는 빠른 흐름은 저질의 위치를 변경시키거나 침식 및 퇴적 등의 하상변화를 유도하며, 이로 인해 다양한 크기의 틈이 생성되고 유기물이 축적된다(Townsend *et al.*, 1997). 그래서, 이 지역에서 서식하는 저서성 대형무척추동물을 포함한 다양한 수서동물들은 저질의 크기나 조합 등에 상당히 의존적인 편이다(Loke *et al.*, 2010). 그러나, 대부분의 선행연구들은 저질특성에 대한 물리적인 서식처의 적용 대상으로 주로 어류를 선정하였으며(Torgersen *et al.*, 1997; Lee and Choi, 2014; Kong *et al.*, 2017), 저서성 대형무척추동물을 고려한 연구는 상대적으로 부족한 편이다. 저서성 대형무척추동물은 어류보다 이동 능력이 낮기 때문에 수문학적 특성이나 미소서식처의 효율성에 분명하게 영향받을 수 있다.

우리나라의 강이나 하천의 상류는 인위적인 교란이 강하게 작용하는 탓에 고유의 서식처 특성이 훼손되거나 변경된 경우가 대부분이다. 수자원의 용이한 확보를 위해 조성된 보나 댐과 같은 인공구조물은 물 흐름을 유의하게 감소시켜 모래나 점토 등의 미립성 토사를 증가시킬 뿐만 아니라 용존산소나 pH 등의 이화학적 요인의 변화에도 기여한다(Crosa *et al.*, 2010). 이러한 환경변화로 인한 서식처 변형은 상류지역에서 제한적으로 분포하는 저서성 대형무척추동물의 풍부도나 종다양성 감소를 야기하며, 결국에는 지역적인 절멸로 이어질 수 있다(Mueller *et al.*, 2011). 다양한 기준 문헌들은 강이나 하천에서 댐이나 보의 제거가 저서성 대형무척추동물의 종다양성 회복에 크게 기여하는 것으로 제안하였으며(Hansen and Hayes, 2012; Renöfält *et al.*, 2013), 이는 상류지역의 물리·화학적 요인의 복원이 주요 요인으로 작용하는 탓이다. 또한, 국내에서도 내성천 상류에 영주댐의 건설이 하상의 유의한 변화와 저서무척추동물의 종다양성 감소를 야기하는 것으로 보고하였으며(An *et al.*, 2019), 이 밖에도 중소규모의 인공구조물이 다양한 강이나 하천에서 저서성 대형무척추동물의 시·공간적 분포에 영향을 미친다고 제안하였다(Kang and Lee, 2015; Kang *et al.*, 2016).

금강은 낙동강, 한강에 이어 국내에서 3번째의 큰 규모를

가진 강으로(유역면적, 9,912.15 km²), 진안군, 무주군, 금산군 등에 위치한 상류구간은 그 특유의 고유성이 잘 유지되는 편이다. 그러나 다른 강 상류와 마찬가지로, 금강 상류는 2001년에 완공된 용담댐에 의해 흐름이 인위적으로 조절될 뿐만 아니라, 2012년에 완료된 4대강 사업으로 인해 둔치가 공원화되면서 수변부의 인위적인 형태적 변화가 발생되었다. 본 연구에서는 이러한 수변부 변화가 저서성 대형무척추동물의 분포나 종다양성에 미치는 영향을 평가하였다. 2012년 이후 금강 상류지역에서는 본류수의 분기에 의해 셋강형 수로가 여러 구간에서 인위적으로 조성되었으며, 미적 및 경관적 목적을 기반으로 상류지역에 적합하지 않은 하상재로 조성되거나 유입구와 유출구의 기능 부족으로 인한 정체 등으로 급격한 서식처 변화를 겪고 있다. 이러한 서식환경의 변화는 각 셋강형 수로에서 저서성 대형무척추동물의 분포나 종다양성 차이로 나타날 것으로 예상된다. 본 연구의 결과는 향후 저서성 대형무척추동물의 밀도와 다양성 유지를 위한 셋강형 수로들의 보전 방안과 서식처로서 기능 회복을 위한 관리 전략 마련을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있다.

재료 및 방법

1. 조사지점 현황

금강은 전라북도 장수군에 위치한 신무산의 동쪽 계곡에서 발원하여 충청남도와 전라북도의 도계를 이루는 서천군과 군산시를 연결짓는 하구언으로 유입되는 강이다. 1980년과 2001년도에 각각 완공된 대청댐과 용담댐은 금강 상류구간에 위치하며, 이로 인해 금강은 물 흐름이 인위적으로 조절되는 특성을 가지게 되었다. 그러나 용담댐에 의해 영향받는 금강 상류지역(진안~옥천)은 하도구배가 높고, 유입 수량이 풍부하여 물 흐름이 빠를 뿐 아니라 다양한 거암, 자갈 등이 어우러져 비교적 강 상류의 고유한 특성이 잘 유지되고 있다. 금강 상류는 대부분 산림과 접하고 있어 생태계 연결성이 우수하며, 급격하게 사행하는 구간이 많아 물 흐름 다양성이 높으며, 여름과 소의 비율이 적절하여 다양한 서식처가 조성된다(Hur *et al.*, 2011). 그래서, 이 지역은 다양한 담수어와 저서성 대형무척추동물의 서식지로서 활용성이 우수하며, 생물다양성이 높다(Yang *et al.*, 2012; Kwak *et al.*, 2018).

금강 상류구간은 2009년부터 2012년까지 진행된 4대강 사업으로 인한 재정비 과정에서 하도 내 또는 둔치를 관류하는 소형 수로나 습지 등이 인공적으로 조성되었다. 이들의 형태는 본류수가 분기되어 둔치 방향으로 우회하거나 하중도의 준설 또는 재조성을 통해 본류수의 유입을 유도한 형

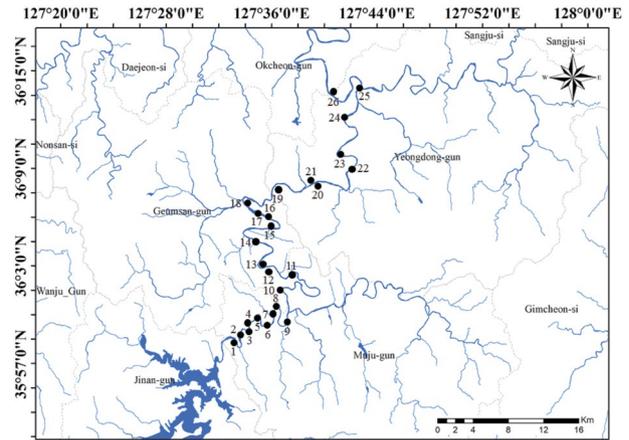


Fig. 1. Map of the study sites in south-eastern part of South Korea. The study sites are indicated as solid circles (●). The small map in the left side indicates the Korean Peninsula.

태들이다. 본 연구에서는 이러한 셋강형 수로를 위성지도와 현장조사를 통해 26개소를 선정하였다. 이 셋강형 수로들은 원활한 통수확보를 위해 유입구와 유출구를 조성하였으나, 오랜 시간 동안 관리가 미흡하여 본류수 유입이 원활하지 못한 경우 물 흐름이나 하상기질이 변화되었다(Choi *et al.*, 2020).

2. 환경요인의 측정 및 저서성 대형무척추동물의 채집

금강 상류에 위치한 26개의 셋강형 수로에서 2018년 봄(4월~5월)에 환경요인(수문학적 요인, 이화학적 요인, 하상기질 등)의 측정 및 저서성 대형무척추동물의 채집이 수행되었다. 하천의 길이와 폭은 위성지도(Daum Kakao Map)를 이용하여 측정되었으며, 수심, 유속, 유입·유출부의 기능은 현장에서 확인되었다. 유속은 유속계(Flo-Meter March-McBirney, Medel 2000)를 사용하여 도섭법(하천의 횡적 방향으로 조사하는 방법)으로 조사되었으며, 수심은 수심측정봉(길이 2.5 m)을 활용하여 측정하였다. 유입·유출부의 기능(inflow and outflow functions)은 금강 본류수의 유입·유출 정도를 육안으로 확인하였으며, 양호(Good), 보통(Medium), 나쁨(Poor)으로 평가하였다. 금강 본류수가 셋강형 수로 내로 유입되거나 금강 본류로 유출되는 등 통수가 원활하게 이루어지는 경우 ‘양호’로, 유입·유출부에 토사 퇴적 등으로 기능이 저하된 경우 ‘나쁨’으로 평가되었다. 유입·유출구 중 어느 하나만 기능이 낮은 경우는 ‘보통’으로 평가되었다.

하상기질은 Cummins (1962)의 방법을 참고하여 셋강형 습지별로 1×1 m 방형구를 5개 설치하고, 각 방형구 내의 하상기질을 비율(%)로서 산출하였다. 이를 바탕으로

본 연구에서는 사립질의 크기에 따라 진흙(Silt and clay, <0.06 mm), 모래(Sand, 0.06~2 mm), 가는자갈(Gravel, 2~16 mm), 굵은자갈(Pebble, 16~64 mm), 호박돌(Cobble, 64~256 mm) 및 전석(Boulder, >256 mm) 등 6단계로 분류하였다. 추가적으로, 저서성 대형무척추동물의 서식처 특성을 상세히 구분하기 위해 사립질의 크기에 따른 6단계의 분류 외 수생식물에 의해 피복된 공간(Macrophytes)도 함께 평가하였다.

이화학적 요인은 수온, 용존산소, pH, 전기전도도, 탁도, 엽록소 a, 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus, TP) 등 8개 항목으로, 각 조사지점에서 즉시 측정하거나 원수 채수 후 실험실로 운반되었다. 수온과 용존산소는 DO meter (YSI DO Meter; Model 58)를 이용하여 측정하였으며, pH와 전기전도도는 각각 pH 측정기(Orion pH Meter; Model 58)와 전기전도도 측정기(Fisher Conductivity meter; Model 152)를 이용하였다. 탁도와 엽록소 a, 총인, 총질소 등의 항목 측정을 위해 각 조사지점에서 채수한 원수는 실험실에서 별도로 분석되었다. 탁도는 탁도측정기(Model 100B)를 이용하여 측정되었으며, 엽록소 a, 총질소, 총인은 Wetzel and Likens (2000)의 방법에 준하여 분석되었다.

각 셋강형 수로에서 저서성 대형무척추동물은 제 5차 전국자연환경조사 지침(NIE, 2019)에 준하여 채집되었다. 저서성 대형무척추동물의 채집을 위해 각 셋강형 수로별로 3개의 방형구(2×2 m)를 설치하였으며, 각 방형구 내에서 2 m²에 해당하는 면적에 대한 저서성 대형무척추동물의 개체수를 정량 채집하였다. 유시수량의 부족 등의 사유로 2 m²에 해당하는 채집면적을 확보하기 어려운 경우 1×1 m 방형구를 이용하여 각 정점별로 두 번씩 채집되었다(1×1 m 방형구는 총 6번). 각 방형구 내에서 저서성 대형무척추동물은 등근뜰채(Hand net, mesh size=0.5 mm), 사각뜰채(aquatic kick net, mesh size=0.2 mm), D frame-net (mesh size=0.2 mm)을 이용하여 각 조사지점의 환경특성에 기반하여 채집되었다. 흐름을 가진 셋강형 수로는 주로 사각뜰채를 이용하였으며, 정체된 지점에서는 등근뜰채나 D frame-net을 이용하였다. 채집된 저서성 대형무척추동물의 표본은 현장에서 96% Ethanol로 고정하였으며, 실험실에서 해부현미경 및 광학현미경을 이용하여 동정되었다. 각 조사지점에서 채집된 저서성 대형무척추동물은 The Korean Entomological Society of Korea (1994)와 The Korean Society of Systematic Zoology (1997)의 분류체계를 따랐으며, Won *et al.* (2005), Park *et al.* (2008), Jung (2011), Kim *et al.* (2013), Kwon *et al.* (2013)에 따라 종(Species) 또는 속(Genus)으로 구별되었다. 각 지점에서 산출된 종별 저서성 대형무척추동물은 m² 당 개체수로 환산되었다.

셋강형 수로를 피복하는 하상기질별 저서성 대형무척추동물의 공간적 분포를 파악하기 위해 추가적인 조사가 수행되었다. 조사지점 선정을 위해 봄철 조사된 군집분석(Cluster analysis)과 비모수다차원척도법(Nonmetric Multidimensional Scaling, NMDS) 분석 결과를 활용하였으며, 이 분석을 통해 분명하게 구분된 3개의 클러스터를 대표하는 셋강형 수로를 3개소 선정하였다. 각 클러스터를 대표하는 지점 선정은 다음과 같다. 첫 번째로, 각 클러스터를 대표하는 환경 특징(유속, 용존산소, 탁도 등) 및 저서성 대형무척추동물종의 출현현황(종다양성 및 우점종 등)을 가지는 점을 고려하였으며, 두 번째로, 하상기질 유형이 다양하게 피복된 셋강형 수로를 선정하였다. 선정된 셋강형 수로에서 저서성 대형무척추동물의 채집을 위해 기질 유형별로 3개씩 방형구(1×1 m) 설치하였고, 각 방형구 내에서 등근뜰채, 사각뜰채, D frame-net을 이용하여 저서성 대형무척추 채집을 수행하였다. 본 추가적인 조사에서는 각 하상기질별 개체수 차이를 파악하기 위해 각 셋강형 수로를 우점하거나 아우점하는 종만을 선별적으로 채집 및 계수하였다. 각 지점에서 채집된 저서성 대형무척추동물의 우점 및 아우점종으로 구별되었다.

3. 자료 분석

금강 상류에 위치한 셋강형 수로의 저서성 대형무척추동물 군집 구조의 특성을 파악하기 위해 NMDS를 이용하여 지점별 군집 유사성과 하상기질 및 환경요인에 대한 영향을 분석하였다. NMDS 분석은 각 지점 간 측정 항목 간에 유사도 값을 이용하여 최적의 관계를 나타낼 수 있는 two-dimensional ordination을 이용하였다(Field *et al.*, 1982). 또한, 군집 구조 간 거리는 Bray-Curits 방법(Bray and Curtis, 1957)으로 산출되었다. 군집분석(Cluster analysis)은 저서성 대형무척추동물 군집을 기반으로 조사지점들 간에 유사성을 분석하기 위해 추가적으로 실행되었다. 저서성 대형무척추동물의 출현종 및 분포를 근거로 한 유사도 분석은 Jaccard (1908)의 유사도지수를 활용하였으며, 산출된 유사도를 기준으로 각 지점별 유사거리를 UPEMA (비가중치 평균연결법)으로 Clustering하였다. NMDS와 유사도 분석에서는 R 통계에서 제공하고 있는 vegan package를 사용하였다(Oksanen *et al.*, 2014).

각 셋강형 수로별로 채집된 저서성 대형무척추동물은 군집 구조 해석을 위해 종수, 개체수, 우점종, 아우점종, 우점도지수(Dominance Index, DI; McNaughton, 1967), 종다양도(Diversity index, H'; Shannon and Weaver, 1949), 균등도(Evenness, E, Pielou, 1975), 종풍부도(Richness index, RI; Margalef, 1958)를 분석하였다.

하상기질별 저서성 대형무척추동물의 밀도 차이는 일원 배치분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 유의성을 검증하였다. 각 하상기질에서 분포하는 저서성 대형무척추동물의 유의한 차이는 Duncan 검정법(Duncan's multiple-range test)으로 사후검정(Post-Hoc Test)을 수행하여 얻어졌다. 각 하상기질별 저서성 대형무척추동물의 밀도는 평균(Mean)과 표준편차(Standard deviation, SD)로 표현되었으며, 각 하상기질에 따른 차이를 알파벳(a, b, c, d)로 표시하였다. 상기 분석은 SPSS v.20을 사용하여 분석되었다.

결과 및 고찰

1. 셋강형 수로의 서식환경 특성

조사기간 동안, 수문학적 특징과 하상기질은 각 셋강형 수

로에 따라 상이한 것으로 나타났다(Table 1). 셋강형 수로의 평균 유로길리와 폭은 각각 547.5 m와 14.6 m로 국내 하천과 비교할 때 소규모로 나타났다. 2, 6, 25번 셋강형 수로의 유로길리는 1000 m 이상으로 가장 길었으며, 그 외 지점은 700 m 이하였다. 수로폭과 유로길리 간에 관련성이 낮았으며, 5, 14, 18, 19, 24번 등 유로길리가 짧은 수로(평균 472.4 m)에서 상대적으로 넓은 수로폭이 측정되었다(평균 30.4 m). 가장 넓은 수로폭은 18번 셋강형 수로에서 40.6 m로 나타났으며, 그 다음으로는 5번과 19번에서 32.5 m와 29.7 m의 순이었다. 셋강형 수로의 수심(Depth)은 평균 0.6 m로 상대적으로 낮았다. 가장 깊은 수심은 20번 셋강형 수로에서 2.2 m로 가장 낮은 수심이 측정된 4번 지점과 비교할 때 약 2.1 m의 차이를 보였다. 유속은 셋강형 수로별로 큰 차이가 목격되었다. 1, 3, 7, 10, 11, 13, 21, 22번 셋강형 수로에서는 0.2 m s^{-1} 이상의 유속이 측정된 반면, 나머지 셋강형 수로에

Table 1. Limnological characteristics and bottom substrate (%) of 26 study sites located in the upper parts of the Geum River.

Sites	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Vel. ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	In/out	B	C	P	G	S	SC	M
1	480	6.2	0.3	0.35	Good	44	28	28	—	—	—	—
2	1393	5.3	0.3	0.03	Medium	—	—	2	15	60	10	13
3	559	3.5	0.4	0.38	Good	5	27	47	15	6	—	—
4	181	0.2	0.1	0.042	Poor	—	—	—	—	16	64	20
5	610	32.5	0.5	0.1	Medium	—	7	4	20	20	36	13
6	1372	21	0.3	0.05	Medium	—	4	5	10	18	20	43
7	482	5.8	0.2	0.21	Good	—	20	45	16	6	4	9
8	141	6.1	0.8	—	Medium	—	—	—	10	10	16	64
9	192	5.1	0.8	0.05	Poor	—	—	6	12	28	38	16
10	576	3.4	0.2	0.37	Good	12	32	52	4	—	—	—
11	602	1.2	0.4	0.21	Good	10	13	32	20	10	3	12
12	430	15.4	0.3	—	Poor	—	—	—	9	12	53	26
13	330	15.2	1.0	0.48	Good	10	41	38	11	—	—	—
14	320	24.9	0.6	—	Poor	—	—	6	13	13	48	20
15	530	10.2	0.2	0.04	Medium	—	—	7	15	16	21	41
16	270	10.7	0.4	0.01	Medium	—	—	—	13	41	25	21
17	480	10.2	0.8	—	Medium	—	—	—	—	58	31	11
18	340	40.6	0.6	0.04	Medium	—	2	5	18	13	38	24
19	380	29.7	0.4	—	Poor	—	—	—	—	18	34	48
20	680	20.5	2.2	—	Medium	—	—	—	—	6	24	70
21	380	6.2	0.8	0.38	Good	15	21	64	—	—	—	—
22	460	5.2	0.4	0.32	Good	13	32	48	7	—	—	—
23	645	20.4	0.9	—	Poor	—	—	—	—	48	34	18
24	700	24.3	1.1	—	Poor	—	—	—	7	52	28	13
25	1270	25.4	1.4	—	Medium	—	—	—	15	42	18	25
26	420	23.1	0.6	—	Medium	—	—	—	12	47	28	13

Width, mean width; Depth, mean depth; Vel., velocity; In/out, inflow and out flow functions; B, boulder (>256 mm); C, cobble (256~64 mm); P, pebble (64~16 mm); G, gravel (16~2 mm); S, sand (2~0.06 mm); SC, silt and clay (0.06 mm or less); M, macrophytes.

Table 2. Environmental variables in 26 study sites located in the upper parts of the Geum River.

Sites	WT (°C)	DO (%)	pH	Cond. (µS cm ⁻¹)	Tur. (NTU)	Chl.a (µg L ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)
1	13.7	136.4	6.4	133.0	0.9	0.2	1.25	0.01
2	20.2	85.2	6.8	189.6	4.2	10.8	1.81	0.08
3	14.7	139.5	6.6	132.5	0.5	1.5	1.11	0.01
4	22.6	46.1	6.6	311.4	29.6	37.8	3.81	0.58
5	22.9	66.1	8.0	240.2	14.7	10.9	2.56	0.25
6	26.7	70.8	7.5	229.5	2.5	13.4	2.36	0.029
7	14.4	113.6	7.8	125.6	0.3	1.6	1.15	0.01
8	24.5	87.7	7.5	257.5	5.0	11.0	2.15	0.04
9	26.0	41.8	6.9	442.1	15.8	23.2	3.07	0.20
10	15.4	121.5	6.5	128.4	1.7	1.8	1.26	0.03
11	16.2	148.1	6.3	146.2	1.3	19.1	1.02	0.07
12	27.7	45.9	7.7	370.5	23.5	24.3	3.76	0.41
13	15.5	128.7	7.1	295.2	1.7	2.4	1.19	0.01
14	24.7	46.3	7.4	349.5	18.8	25.1	2.89	0.32
15	19.5	75.3	7.3	268.5	3.2	13.3	2.11	0.03
16	20.7	97.7	7.4	258.8	3.7	10.3	2.25	0.13
17	24.3	69.8	6.8	203.5	7.4	13.8	2.18	0.16
18	27.3	55.5	7.0	398.4	12.7	12.6	2.24	0.28
19	26.2	38.05	6.7	400.5	18.8	22.5	3.39	0.21
20	25.9	91.6	7.2	313.2	6.6	14.6	2.15	0.09
21	14.2	138.3	6.2	141.8	1.3	2.8	1.15	0.04
22	16.2	126.4	7.2	128.4	0.9	1.9	0.84	0.02
23	23.2	43.2	6.2	364.3	12.4	20.1	3.08	0.23
24	24.5	32.1	7.2	321.8	11.6	18.2	3.08	0.27
25	25.8	83.1	6.5	240.5	5.2	10.7	2.41	0.08
26	26.5	61.4	7.3	305.9	8.3	15.4	1.86	0.08
Mean	21.5	84.2	7.0	257.6	8.2	13.1	2.16	0.14
SD	4.9	36.8	0.5	97.5	8.0	9.2	0.87	0.14
CV	22.6	43.7	7.2	37.8	97.5	70.6	40.49	102.33

WT, water temperature; DO, dissolved oxygen; Cond., conductivity; Tur., turbidity; Chl a, chlorophyll a; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; SD, standard deviation; CV, coefficient of variation (%).

서는 유속이 0.1 m s⁻¹ 이하이거나, 흐름 발생 없이 정체된 것으로 나타났다. 유속이 0.2 m s⁻¹ 이상으로 측정된 셋강형 수로들은 유입·유출부의 기능이 우수(Good)한 것으로 평가되었지만, 유속이 낮거나 정체된 지점들에서는 보통(Medium) 및 나쁨(Poor)으로 나타났다.

하상기질 또한 셋강형 수로에 따라 큰 차이가 목격되었다(Table 1). 유속이 빠른 조사지점(1, 3, 7, 10, 11, 13, 21, 22번)에서의 하상기질은 대부분 가는자갈(Gravel), 굵은자갈(Pebble), 호박돌(Cobble)의 비율이 높은 반면, 낮은 흐름이 관찰되거나 정체된 셋강형 수로에서는 이보다 작은 크기인 모래(Sand)나 진흙(Silt and clay)의 비율이 높게 피복되었다. 모래나 진흙으로 구성된 일부 셋강형 수로(6, 8, 17, 20

번)에서는 수생식물(Macrophytes)의 비율이 높았다. 그러나 전석(Boulder)의 비율은 조사된 셋강형 수로에서 낮은 것으로 파악되었다.

셋강형 수로에서 환경요인은 항목별로 상이한 특징을 나타냈다(Table 2). 수온과 용존산소, pH, 전기전도도, 총인 등의 환경요인은 변동계수(CV, Coefficient of variation)가 50% 미만으로 조사지점들 간에 차이가 매우 미미한 반면, 탁도, 엽록소 a, 총인은 상대적으로 큰 변동계수를 가졌다. 수온과 전기전도도, 탁도, 엽록소 a, 총인, 총질소는 흐름이 거의 없거나 정체된 셋강형 수로(4, 9, 12, 14, 18, 19, 23, 24, 25, 26번)에서 높았으며, 반대로 용존산소는 이 수로들에서 낮게 측정되었다. 각 셋강형 수로에서 환경요인과 유속 간에

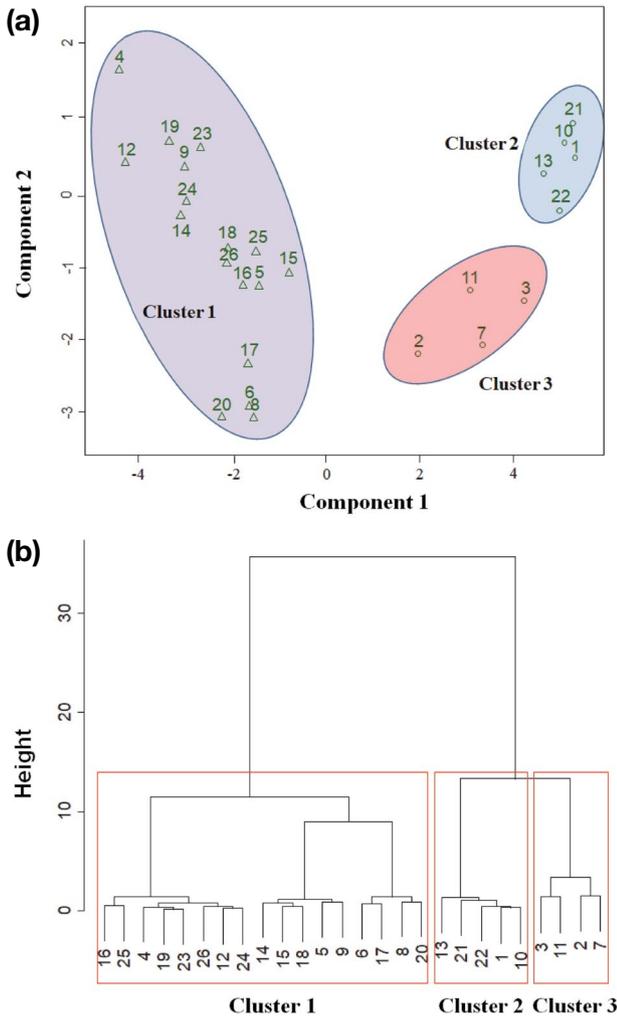


Fig. 2. Clusplot (a) and dendrogram (b) for the hierarchical cluster analysis based on the bottom substrate and environmental variables investigated at 26 study sites located in the upper parts of the Geum River. The red lined rectangle indicated differentiated three groups by height level of 14.03.

밀접한 관련성은 유입·유출부의 기능에 의해 결정되었다. 유입·유출부가 분류와 연결성이 우수한 경우 원활한 물 흐름이 유지되었으나, 기능이 저하된 수로의 경우, 낮은 흐름과 이로 인한 영양염(총인, 총질소)의 고농축과 수질 악화가 발생되었다. 수질을 측정하는 요인인 탁도와 엽록소 a, 총인 등의 항목은 셋강형 수로 간에 매우 큰 편차를 가졌으며, 이는 각 셋강형 수로의 수문학적 특징이 매우 분명하게 구분된다는 것을 의미한다.

하상기질과 환경요인을 기반으로 분석된 군집분석 결과 (Fig. 2)는 조사지점을 크게 세 집단으로 구분하였다. 클러스터 1에 속한 조사지점들(4, 5, 6, 8, 9, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 26번)은 하상기질이 주로 모래 (Sand), 진

흙(Silt and clay) 및 수생식물(Macrophytes)로 피복되었으며, 물 흐름의 거의 발생하지 않고 탁도와 영양염류(총인, 총질소)의 농도가 높은 지점들이었다. 클러스터 2(1, 10, 13, 21, 22번)와 3(2, 3, 7, 11)은 높은 유속과 용존산소, 그리고 낮은 탁도와 영양염류를 가진다는 점은 비슷했지만, 하상기질의 분명한 차이에 의해 구분되었다. 클러스터 2에 속한 조사지점은 가는자갈(Gravel) 및 굵은자갈(Pebble)의 비율이 높은 반면, 클러스터 3은 호박돌(Cobble)이 42~52%를 차지하였다. 이와 같은 집단 구분은 각 셋강형 수로가 명확한 차이를 가진 환경 특성에 의해 지배되고 있다는 것을 시사한다.

2. 저서성 대형무척추동물의 군집 구조

조사기간 동안, 금강 상류에 위치한 셋강형 수로에서 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 85과 160종 9305개체 m^{-2} 로 확인되었다. 분류군별 출현비율은 하루살이목(Ephemeroptera)이 9과 29종(18.2%)로 가장 높았으며, 그 다음으로는 잠자리목(Odonata)이 10과 26종(16.4%), 날도래목(Trichoptera)이 16과 26종(16.4%), 파리목(Diptera)이 16과 15종(9.4%), 딱정벌레목(Coleoptera)이 11과 13종(8.2%)의 순으로 나타났다. 비곤충류(Non-Insects)는 20과 36종으로 곤충류(Insects)와 비교할 때 상대적으로 종다양성이 낮았다. 이와 같은 저서성 대형무척추동물의 분류군별 출현양상은 국내에 위치하는 다양한 하천에서의 분포 특성과 일치한다(Kang and Lee, 2015; Kim and Choi, 2017; An *et al.*, 2019; Hong and Cheong, 2020). 하루살이목에 속한 종들은 주로 물 흐름이 잘 유지되고 용존산소가 높은 차가운 수역을 선호하지만, 유속이 느린 수변지역에서도 빈번하게 관찰되는 특성 탓에 비교적 넓은 출현 범위를 가질 수 있다(Ocon and Capítulo, 2004). 본 연구에서도 하루살이목에 속한 저서성 대형무척추동물들은 거의 모든 셋강형 수로에서 관찰되었다.

비교적 가장 다양한 저서성 대형무척추동물이 채집된 셋강형 수로는 2번으로 총 38과 59종이 출현하였으며, 그 다음으로 1번(36과 52종), 6번(35과 50종), 3번(33과 48종), 7번(30과 45종), 5번(30과 42종)의 지점 순으로 나타났다 (Fig. 3). 이를 제외한 대부분의 셋강형 수로들은 30종 이하의 저서성 대형무척추동물의 종수가 확인되었다. 저서성 대형무척추동물의 높은 종다양성이 목격되는 셋강형 수로들은 하상기질이 주로 굵은자갈(Pebble)과 호박돌(Cobble)로 구성되거나, 비교적 빠른 물 흐름($0.2 m s^{-1}$ 이상)과 높은 용존산소(120% 이상)를 가졌다. 상류 하천에서 발생하는 빠른 유속과 큰 낙차폭은 대기중의 산소를 물 안으로 유입시키는

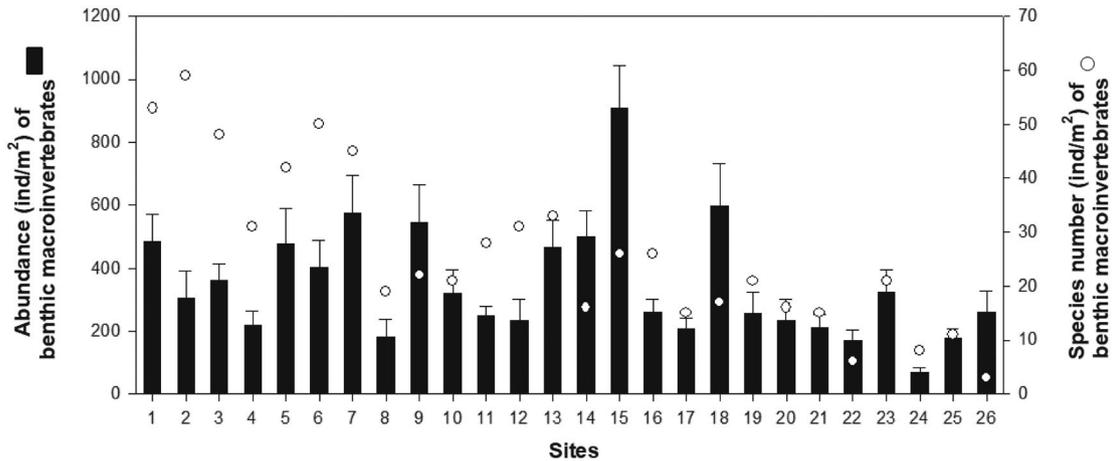


Fig. 3. Abundance and species number of benthic macroinvertebrate at 26 study sites located in the upper parts of the Geum River.

중요한 요인이므로, 흐름이 잘 유지되는 하천은 일반적으로 용존산소 농도가 높다(Hill *et al.*, 2000). 이 지점들은 높은 종다양성과 함께, 알통하루살이(*Drunella ishiyamana*), 작은 강하루살이(*Potamanthus formosus*), 다슬기(*Semisulcospira libertina*), 떡파리(*Simulium sp.*) 등의 빈도가 높았다. 적절한 흐름 발생이나 다양한 하상기질의 피복은 미소서식체의 복잡성을 증가시키며, 이는 포식자 회피뿐만 아니라 비슷한 생태학적 위치를 가지는 군집 또는 종 간에 접촉을 감소시킬 수 있기 때문에 다양한 종의 분포에 기여할 수 있다(Holomuzki and Short, 1988).

이와 대조적으로, 감소된 유속으로 인한 낮은 물 흐름 다양성을 가지거나 진흙과 같은 하상기질로 구성된 지역은 미소서식체의 효율성이 낮고 다양성이 부족하며, 포식과 경쟁과 같은 상호작용이 가속화되므로 종다양성이 상대적으로 낮다. 본 연구에서 또한 전술한 환경 특성을 가진 셋강형 수로들(17, 20, 23, 24, 25, 26번)에서 종다양성이 낮은 것을 확인하였다. 상류구간을 지배하는 하루살이류(Ephemeroptera)나 날도래류(Trichoptera), 강도래류(Plecoptera) 떡파리류(Simuliidae) 등은 일반적으로 빠른 유속과 높은 용존산소를 선호하며, 이들의 분포 양상은 강 상류지역의 저서성 대형무척추동물의 종다양성을 크게 지배하는 편이다. 그래서, 상류 지역에서 전술한 분류군들의 부재나 낮은 종수는 이 지역에서 저서성 대형무척추동물의 종다양성이 감소되는 원인으로 작용하였다. 그러나, 흐름이 거의 발생하지 않거나 저질 다양성이 낮은 지역이더라도 수생식물이 높게 피복되었다면, 미소서식체의 다양성이 유지될 수 있다. 수생식물은 하천의 하류나 습지에서 서식체 구조적인 복잡성을 야기하는 중요한 요인이며(Choi and Kim, 2020), 다양한 수생식물종에 의해 피복된 지역은 상대적으로 높은 종다양성이 유지될

수 있다(Chambers *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2016). 본 연구에서 또한 정체되었으나 수생식물의 생물량이 높은 4, 6, 16번 셋강형 수로에서 저서성 대형무척추동물의 높은 종다양성을 목격했다.

저서성 대형무척추동물의 군집분석 또한 셋강형 수로의 환경 특성에 의존되었다. 하상기질이 주로 굵은자갈(Pebble)과 호박돌(Cobble)로 구성되거나, 비교적 빠른 물 흐름(0.2 m s^{-1} 이상)과 높은 용존산소(120% 이상)를 가진 셋강형 하천들(1, 2, 3, 7, 10, 11, 13, 21, 22번; Fig. 2에서 Cluster 2 및 3)은 높은 종다양도(H'), 균등도(E), 종풍부도(RI)를 가지는 반면, 우점도지수(DI)는 낮았다(Table 3). 유속이 낮거나, 정체된 셋강형 수로에서 우점도지수가 상대적으로 높은 것은 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*)와 깔따구류(*Chironomidae spp.*)의 개체수가 풍부하기 때문인 것으로 해석된다. 또한, 상류지역에서 일반적으로 출현하는 하루살이류, 날도래류, 강도래류 등의 출현빈도가 낮은 것도 종다양도나 균등도, 종풍부도가 낮게 평가된 것에 크게 기여한 것으로 사료된다.

금강 상류에 위치한 셋강형 수로에서 출현한 저서성 대형무척추동물의 종다양성(160종)은 국내 선행 연구와 비교할 때 높은 수준으로 파악되었다. 비록 본 연구에서 채집된 저서성 대형무척추동물의 과(family)는 85과로 '하천 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 조사' 사업을 기반으로 한 금강수계의 저서성 대형무척추동물(115과)과 비교할 때 낮은 수준이지만(Kwak *et al.*, 2018), 금강 유역 전체를 조사 대상으로 삼은 점과 비교적 오랜 기간 동안 축적한 자료(2009~2016년)임을 감안할 때 본 연구에서 조사된 저서성 대형무척추동물의 종다양도는 낮은 수준이 아닌 것을 알 수 있다. 일부 산지습지나 주요 지천에서 조사된 저서성 대형무척추동물은 대부분 100종 이하의 종이 출현하는 것으로 파

Table 3. Dominant species and Community index at 26 study sites located in the upper parts of the Geum River.

Sites	Dominant species	Subdominant species	DI	H'	E	RI
1	<i>Drunella ishiyamana</i>	<i>Potamanthus formosus</i>	0.18	3.19	8.25	0.81
2	<i>Simulium</i> sp.	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	0.46	2.81	10.15	0.69
3	<i>Simulium</i> sp.	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	0.41	2.77	7.98	0.72
4	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.65	2.08	5.55	0.61
5	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.79	1.73	6.66	0.46
6	<i>Chironomidae</i> spp.	<i>Limnodrilus gotoi</i>	0.26	2.98	8.09	0.76
7	<i>Simulium</i> sp.	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	0.52	2.56	6.93	0.67
8	<i>Chironomidae</i> spp.	<i>Limnodrilus gotoi</i>	0.50	2.02	3.38	0.69
9	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.84	1.37	3.34	0.44
10	<i>Drunella ishiyamana</i>	<i>Dugesia japonica</i>	0.31	2.48	3.47	0.81
11	<i>Simulium</i> sp.	<i>Drunella ishiyamana</i>	0.61	1.95	4.93	0.59
12	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.75	1.83	5.47	0.53
13	<i>Potamanthus formosus</i>	<i>Drunella ishiyamana</i>	0.27	2.76	5.21	0.79
14	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.91	1.14	2.41	0.41
15	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.69	1.59	3.67	0.49
16	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.73	1.87	4.49	0.57
17	<i>Chironomidae</i> spp.	<i>Limnodrilus gotoi</i>	0.52	2.00	2.56	0.74
18	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.90	1.10	2.50	0.39
19	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.73	1.78	3.59	0.59
20	<i>Chironomidae</i> spp.	<i>Limnodrilus gotoi</i>	0.49	2.05	2.86	0.72
21	<i>Drunella ishiyamana</i>	<i>Dugesia japonica</i>	0.31	2.36	2.43	0.87
22	<i>Dugesia japonica</i>	<i>Drunella ishiyamana</i>	0.32	2.43	3.31	0.81
23	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.91	1.06	1.91	0.44
24	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.88	1.14	1.53	0.52
25	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.80	1.49	2.60	0.55
26	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Chironomidae</i> spp.	0.91	0.98	0.97	0.55

약되고 있다(Kim *et al.*, 2013; Jeon *et al.*, 2019; Hong and Cheong, 2020). 본 연구에서, 저서성 대형무척추동물종이 다양하게 채집되는 것은 셋강형 하천들이 다양한 미소서식처 유형을 가진다는 점에서 찾을 수 있다.

조사지점별 저서성 대형무척추동물의 종별 개체수를 이용하여 NMDS 분석을 시행한 결과, 전술한 하상기질 및 환경요인을 기반으로 한 유사도 분석과 비슷한 집단으로 구분되는 것을 확인하였다(Stress value, 0.34; Kruskal, 1964; Fig. 5). 2번 축을 기준으로 오른쪽에는 클러스터 1, 왼쪽에는 클러스터 2와 3이 위치하였으며, 1번 축을 기준으로 클러스터 2와 3이 각각 위와 아래로 구분되었다. 클러스터 1에 속한 저서성 대형무척추동물은 4가지의 하상기질과 환경요인에 의해 영향받았다. 아가미지렁이(Bs, *Branchiura sowerbyi*), 연못하루살이(Cd, *Cloeon dipterum*), 아시아실잠자리(Ia, *Ischnura asiatica*), 등검은실잠자리(Pc, *Paracercion calamorum*), 물달팽이(Ra, *Radix auricularia*) 등의 저서성 대형무척추동물종은 수생식물(Macrophytes)과 밀접하게 관련되

었으며, 깔따구류(C, *Chironomidae* spp.), 실지렁이(Lg, *L. gotoi*), 늪깔따구류(T, *Tanypodinae* sp.) 등은 하상기질이 진흙(silt and clay)으로 피복되며, 탁도(turbidity)와 총인(TN)이 높은 셋강형 수로에서 주로 우점하였다. 클러스터 2에 포함된 저서성 대형무척추동물(꼬마줄날도래, 알통하루살이, 동양하루살이, 털날도래 KUa, 큰줄날도래, 플라나리아, 작은강하루살이, 다슬기, 긴다리여울벌레, 등줄하루살이)들은 가는자갈(Gravle)과 굵은자갈(Pebble)의 비율이 높고, 유속이 빠른 지역에서 주로 풍부하였다. 클러스터 3은 주로 호박돌(Cobble)로 주로 피복된 지점들로 구성되었으며, 떡파리류(S, *Simulium* sp.)의 빈도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 저서성 대형무척추동물과 하상기질 및 환경요인 간에 관계는 전술된 두 가지의 유사도 분석 결과와 매우 유사하며, 이는 각 셋강형 수로들의 서식환경 특성이 분명하게 구분된다는 것을 의미한다.

금강 상류에 위치한 셋강형 수로 중 모래, 진흙 및 수생식물이 높은 비율로 피복된 지점들은 분명 상류지역에서 목격

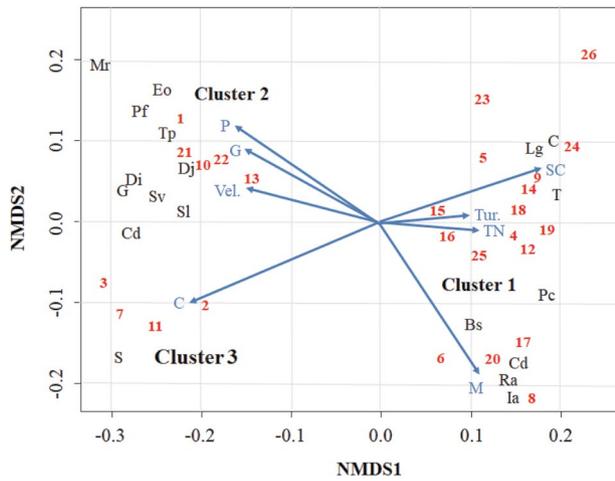


Fig. 4. None-metric multidimensional scaling (NMS2) of 19 dominant benthic macroinvertebrate species (letters) and 26 sampling time (Numbers). The blue arrows represent the associations with bottom substrate (%) and environmental variables. C, cobble; P, pebble; G, gravel; SC, silt and clay; M, macrophytes; Vel., velocity; Tur., turbidity; TN, total nitrogen; Bs, *Branchiura sowerbyi*; Cb, *Cheumatopsyche brevilineata*; C, *Chironomidae* spp.; Cd, *Cloeon dipterum*; Di, *Drunella ishiyamana*; Dj, *Dugesia japonica*; Eo, *Ephemera orientalis*; G, *Gumaga* KUa; Ia, *Ischnura asiatica*; Lg, *Limnodrilus gotoi*; Mr, *Macrostemum radiatum*; Pc, *Paracercion calamorum*; *Potamanthus formosus*; Ra, *Radix auricularia*; Sl, *Semisulcospira libertine*; S, *Simulium* sp.; Sv, *Stenelmis vulgaris*; T, *Tanypodinae* sp.; Tp, *Teloganopsis punctisetata*.

되기 어려운 서식환경이다. 그러나, 이들 셋강형 수로는 준설을 통해 인위적으로 조성되면서, 미적 및 경관적인 여건을 충족하기 위해 수생식물을 식재한 것으로 보인다. 더욱이, 수문학적 특성으로 인해 물 흐름이 원활하게 유지되지 못하면서 진흙과 같은 미립자들이 하상 내 퇴적되었으며, 이는 수생식물의 성장과 발달을 촉진시켰다. 그래서, 이 셋강형 수로들은 지역 고유의 서식처 특성(빠른 흐름, 큰 크기의 자갈, 높은 용존산소 등)과는 다른 서식환경에 의해 지배되게 되었다. 비록, 이러한 서식환경은 하루살이류나 날도래류, 강도래류 등의 저서성 대형무척추동물이 선호하지 않지만, 잠자리목(Odonata)이나 복족강(Gastropoda)에 속한 종들의 높은 빈도를 찾을 수 있다. 금강 상류지역에 위치한 셋강형 수로들은 새로운 서식처 환경과 기존 상류지역의 고유 특성이 각 지역을 독자적으로 지배하기 때문에 다양한 종의 출현이 가능한 것으로 사료된다. Choi and Kim (2020)은 이 지역에서 수생식물의 인위적인 식재가 멸종위기종II급 종인 꺾저기의 도입과 안정적인 서식처 제공에 크게 기여했다고 제안하였다.

3. 저서성 대형무척추동물의 미소서식처 활용

각 셋강형 수로에서 하상기질별 저서성 대형무척추동물의 우점 및 아우점종의 분포 특성(Fig. 5)은 유사도 분석 및

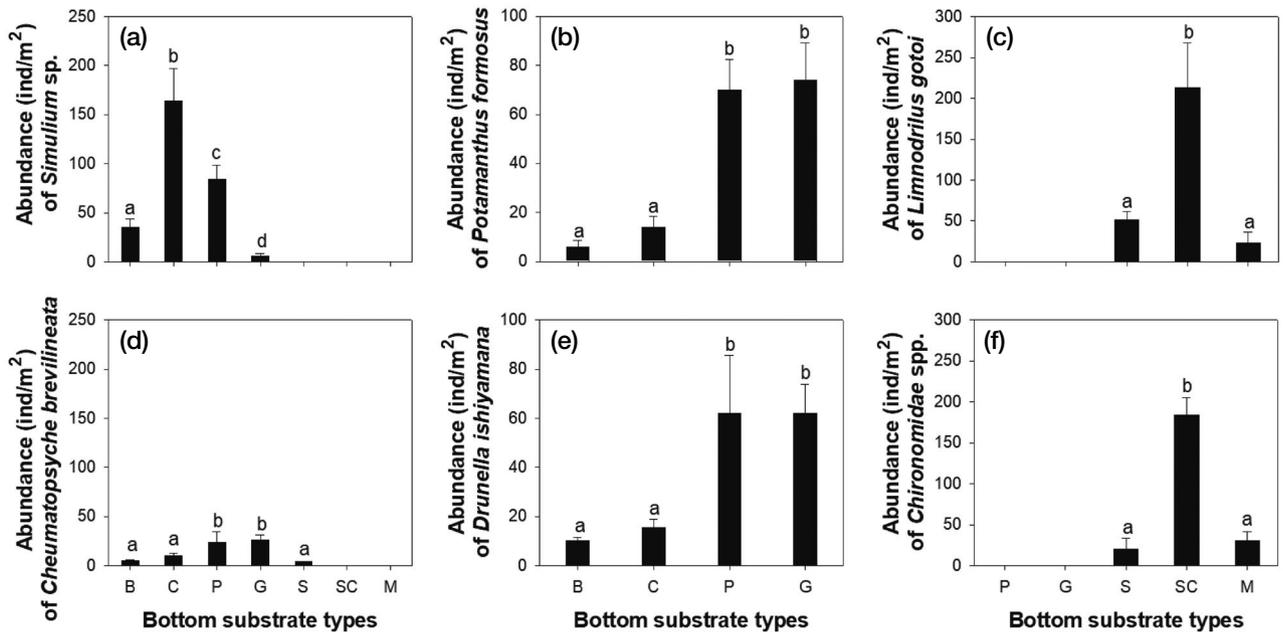


Fig. 5. Abundance of dominant species of benthic macroinvertebrate according to bottoms substrates types. B, boulder; C, cobble; P, pebble; G, Gravel; S, sand; SC, silt and clay; M, macrophytes. The four graphs (a, b, c and d) are different three study sites (From the left, site 11, 13, and 15). Means labelled with a different letter indicate statistical subgroups defined by the post hoc test (Tukey HSD, $p = 0.05$).

NMDS 분석 결과를 뒷받침하였다. 11번 셋강형 수로는 클러스터 3을 대표하며, 멧파리류와 꼬마줄날도래가 각각 우점 또는 아우점하였다. 비록 이 두 우점종은 개체수에 따라 우점 및 아우점이 결정되었으나, 11번 지점을 포함하여 클러스터 3에 속한 셋강형 수로들은 다른 저서성 대형무척추동물보다 멧파리류의 우점도가 높은 지점들이었다. 이 조사 지점들은 주로 호박돌(Cobble)의 비율이 높으며, 멧파리류 또한 다른 하상기질 유형(전석, 굵은자갈, 가는자갈 등)보다 호박돌에 의해 피복된 지역에서 풍부하였다. 호박돌에 의해 주로 피복된 공간에서 멧파리류의 밀도는 다른 하상기질과 뚜렷한 차이를 보였다(One-way ANOVA, $df=3$, $F=3.214$, $p<0.05$). 멧파리류들은 주로 물 흐름이 원활한 지역에서 비교적 큰 돌에 부착하여 유기물을 걸러먹는 특징을 가진다(De Moor *et al.*, 1986). 그러나 아우점종인 꼬마줄날도래는 굵은자갈(Pebble)이나 가는자갈(Gravel)이 피복된 공간에서 높은 밀도를 가짐으로서 멧파리류와 분명한 차이를 보였다. 비록 멧파리류와 꼬마줄날도래는 11번 조사지점에서 우점종과 아우점으로 나타났지만, 두 종 간에 분명한 서식처 선호성 차이로 인해 멧파리류는 호박돌이 풍부하게 피복된 11번 셋강형 수로에서 절대적인 우점 양상을 가지는 것으로 사료된다. 클러스터 2를 대표하는 13번 셋강형 수로의 하상기질은 굵은자갈(Pebble)과 가는자갈(Gravel)에 의해 지배되었고, 우점종인 작은강하루살이와 아우점종인 알통하루살이 또한 이 하상기질에 의존하였다. 굵은자갈(Pebble)과 가는자갈(Gravel)에 의해 피복된 지역은 전석(Boulder)이나 호박돌(Cobble)보다 더 많은 작은강하루살이와 알통하루살이가 서식처로서 활용하였다(One-way ANOVA, $df=3$, $F=3.316$, $p<0.05$). 이 지점들은 여울(Riffle)과 소(Pool)가 다양하게 분포하기 때문에 작은강하루살이와 알통하루살이가 서식하기에 적합하다(Abdelsalam, 2013). 국내에서도 이들 저서성 대형무척추동물종들은 흐름이 원활한 하천의 상류나 중류에서 주로 목격된다(Hong *et al.*, 2019). 마지막으로 클러스터 1에 속한 15번 셋강형 수로는 실지렁이와 깔따구류가 각각 우점 및 아우점종으로 나타난 지점이다. 이 지역은 하상기질이 주로 진흙(Silt and clay)으로 피복되어 실지렁이나 깔따구류가 서식하기 적합하다. 선행연구 또한 실지렁이나 깔따구류는 하상이 진흙이나 그 이하의 세립질(무기물 또는 유기물)로 구성된 정체된 수역에서 풍부하다고 제안하였다(Chutter, 1969; Lee *et al.*, 2017). 그래서 이들은 주로 하천의 하류나 논 등에서 주로 찾을 수 있다(Han *et al.*, 2007). 그러나 실지렁이의 경우, 하천의 상류에서도 물 흐름이 일시적으로 감소된 지역을 중심으로 높은 개체수가 관찰되기도 한다(Kil *et al.*, 2010).

4. 저서성 대형무척추동물 종다양성 확보를 위한 셋강형 수로의 관리방안

셋강형 수로의 물리적인 형태와 수리수문학적 특징은 각 조사지점별로 서식환경의 차이와 저서성 대형무척추동물의 종다양성을 유도했다. 셋강형 수로의 형태는 금강 본류가 둔치를 관류하거나 하중도의 준설 또는 정비로 통해 본류수가 하도 내에서 분기된 경우 등 2가지로 크게 세분되었다. 이 두 가지의 구조적인 형태는 셋강형 수로들의 수리수문학적 특징과 서식환경의 차이를 야기하였다. 하중도에 의해 분기된 대부분의 셋강형 수로는 금강 상류의 서식환경을 잘 반영하는 것으로 파악되었다. 이 수로들의 유입·유출부는 대부분 본류와 비슷한 단차를 가지며 유입 및 유출에 유리하기 때문에 원활한 통수가 이루어졌다. 하상기질은 호박돌(Cobble) 또는 굵은자갈(Pebble), 가는자갈(Gravel)이었으며, 모래(Sand)나 진흙(Silt and clay)의 비율은 상대적으로 적었다. 이 셋강형 수로들은 대부분은 빠른 흐름을 유지하고 있기 때문에 하상에 모래나 진흙과 같은 미립자들이 유지되기에는 어려운 환경이었다. 이와 대조적으로, 둔치를 관류하는 셋강형 수로는 유입·유출부의 기능이 대부분 낮은 것으로 파악되었다. 비록 이 수로들은 조성 당시 본류수 유입이 가능하도록 설계되었으나 조성 이후 오랜 기간 동안 관리가 미흡하여 기능이 점차적으로 저하된 것으로 추정된다. 이들 셋강형 수로들의 유입·유출부 기능의 저하는 두 가지의 원인으로 해석된다. 첫 번째로 토사나 식물잔해물이 퇴적되어 막힘 현상이 발생하거나, 두 번째로 침식이나 퇴적 등의 이유로 본류수면과의 높은 단차가 발생하여 유입이나 유출이 어려운 경우 등이 주요 원인으로 작용하였다. 이 수로들은 대부분 정체수역이 형성하기 때문에 하상기질이 대부분 모래(Sand)나 진흙(Silt and clay)으로 구성되었고, 내부생성 유기물에 의한 오염이 빈번하였다. 비록, 일부 셋강형 수로들은 유입·유출부의 기능이 저하되었더라도, 수생식물의 높은 피복으로 인해 높은 종다양성을 유지하고 있었으나, 물 흐름이 오랜 시간 동안 정체된 지점들은 높은 탁도 발생으로 수생식물이 부족하고, 저서성 대형무척추동물의 종다양성 또한 낮았다. 이 셋강형 수로들에서 저서성 대형무척추동물은 실지렁이나 깔따구 등 다소 오염된 환경에 내성을 가진 종들이 주로 분포하였다. 따라서 이러한 수로들에서는 저서성 대형무척추동물의 종다양성을 높이기 위한 유입·유출부의 개선이 필요하다고 사료된다. 본류수의 원활한 유입을 위한 유입·유출각의 낮춤이나 막힘현상을 유발하는 토사나 식물잔해물의 지속적인 제거 등은 통수 확보를 위한 효율적인 관리방안이다. 특히, 수생식물이 성장이 제한되고, 탁도가 높은 23~26번 지점들의 개선이 시급하다. 비록 수생식물의 높

은 우점은 금강 상류지역에 적합하지 않은 서식환경을 제공하지만, 이들은 저서성 대형무척추동물의 종다양성 증가에 기여하는 요인이므로 지속적인 관리를 통해 기존의 서식처를 유지하는 방안을 추천한다.

또한 이 셋강형 수로들은 유입·유출부 구간을 제외한 대부분이 직강화되어 흐름다양성을 유도하는 요인이 적고, 단조로운 호안부 형태를 가졌다. 흐름다양성은 대기로부터 유입되는 용존산소량을 결정할 뿐만 아니라, 미소서식처의 조성과 효율성에도 영향을 미치는 중요한 요인이다. 높은 흐름다양성을 유도하기 위해서는 높고 낮은 낙차폭을 유도하는 하도구배를 조정하거나 굴곡진 사형을 유지하는 방안이 적절하다. 또한 일부 직강화된 호안부는 사석 등의 재료를 활용하여 인위적으로 조성되었거나 높은 경사로 인해 식물 활착이 부족한 특징을 가졌다. 이러한 호안부의 구조는 물과 접하는 구간의 침식을 지속적으로 증가시키며, 높은 탁도를 유발한다. 따라서, 이 지역들에서 사면 경사의 완만한 조정과 식생매트릭스 등의 친환경 소재를 가진 호안공법을 활용하여 자연성을 증가시켜 줄 필요가 있다.

인위적인 교란 또한 이 셋강형 수로에서 저서성 대형무척추동물의 종다양성을 감소시키는 중요한 요인으로 작용하고 있다. 금강 상류는 상수원보호지역으로 지정된 지역이나, 제외지를 관류하는 일부 셋강형 수로들은 접근이 용이하거나 공원 내에 조성되어 인위적인 교란에 취약한 것으로 나타났다. 인위적인 교란의 형태는 낚시 등의 수산물 채집, 캠핑, 배수시설 설치 등으로 세분되며, 이와 같은 요인들은 저서성 대형무척추동물의 종다양성에 부정적인 영향을 미친다. 뿐만 아니라, 이러한 인위적인 교란에 의해 수질오염을 유도하는 부유쓰레기 및 생활하수의 유입 등이 빈번하게 발생하고 있다. 특히, 다슬기나 꺾지 등의 채집은 이 지역에서 매우 광범위하게 발생하는 주요한 교란 요인이며, 지역적인 생물다양성 확보를 위해 시급하게 관리해야 할 필요가 있다. 이들 인위적인 요인들은 셋강형 수로 내로 접근을 위해 주변 초지나 관목 등을 훼손하면서 발생하기 때문에 큰 문제로서 대두되고 있다. 셋강형 수로들은 금강 상류로부터 분기된 형태로 이 지역에서의 교란은 상류지역 전체로 확산될 가능성이 높으므로, 이 지역에 대한 관리정책 수립(보전지역 설명 및 상수원보호지역 확대 등)과 적극적인 보전을 위한 노력이 시급하게 요구된다. 비록 이 셋강형 수로들은 인위적으로 조성되었지만, 자연성이 높고, 다양한 저서성 대형무척추동물종이 서식하는 지역들이기 때문에 저서성 대형무척추동물 외에 다른 수서생물(어류 등)의 서식처로서 활용될 가능성이 높다. 따라서 이 셋강형 수로들의 수리수문학적 현황이나 서식환경을 적극적으로 관리하여 현재의 상태를 유지하는 효율적인 보전 방안이 마련되어야 할 것으로 사료된

다. 추후 이 셋강형 수로에서 저서성 대형무척추동물을 포함한 수서생물의 생물다양성 확보를 위해, 어류나 플랑크톤 등의 추가적인 조사가 필요할 것으로 보인다.

적 요

금강 상류지역에 조성된 26개의 셋강형 수로에서 서식처로서 효율성과 보전방안 마련을 위해 하상기질, 환경요인, 저서성 대형무척추동물을 조사하였다. 조사기간 동안, 총 85과 160종 9305개체 m^{-2} 의 저서성 대형무척추동물이 출현하였으며, 하상기질이 주로 굵은자갈(Pebble)과 호박돌(Cobble)로 구성되거나 빠른 물 흐름($0.2 m s^{-1}$ 이상)과 높은 용존산소(120% 이상)를 가진 셋강형 수로에서 높은 종다양성이 목격되었다. 유사도 분석(Hierarchical cluster analysis)과 비모수다차원척도법(NMDS)의 결과, 26개의 셋강형 수로는 총 3개의 클러스터로 구분되었다. 클러스터 1에서 아가미지렁이, 연못하루살이, 아시아실잠자리, 등검은실잠자리, 물달팽이 등의 저서성 대형무척추동물종은 수생식물과 관련되었으며, 깔따구류, 실지렁이, 늪깔따구류 등은 하상기질이 진흙(Silt and clay)이며, 탁도와 총인이 높은 셋강형 수로에서 주로 우점하였다. 클러스터 2에 포함된 저서성 대형무척추동물종(꼬마줄날도래, 알통하루살이, 동양하루살이, 털날도래 KUa, 큰줄날도래, 플라나리아, 작은강하루살이, 다슬기, 긴다리여울벌레, 등줄하루살이)들은 굵은자갈(Pebble) 및 가는자갈(Gravel)의 비율이 높고, 유속이 빠른 지역에서 주로 풍부하였다. 클러스터 3은 주로 호박돌(Cobble)로 주로 피복된 지점들이었으며, 떡파리류의 빈도가 높았다. 이와 같이 조사지역의 분명한 구분은 각 셋강형 수로가 명확한 서식환경에 의해 지배된다는 것을 의미한다. 일부 종다양성이 낮은 지점의 경우, 유입·유출부의 기능 개선, 사형조성, 호안부 식생 정착 유도 등의 자연성 회복을 위한 개선 방안이 요구된다.

저자정보 손세환(경기대학교 생명과학과 박사과정), 최종윤(국립생태원 생태평가연구실 전임연구원)

저자기여도 개념설정: 최종윤, 방법론: 손세환, 최종윤, 자료수집: 손세환, 최종윤, 분석: 최종윤, 자료관리: 최종윤, 초안작성: 손세환, 최종윤, 원고교정: 손세환, 원고편집: 최종윤, 연구비수주: 최종윤

이해관계 본 연구 논문의 모든 저자는 이해관계에 충돌이 없음을 밝혀드립니다.

연구비 본 연구는 국립생태원에서 수행한 환경부 수탁과

제 『2018년 금강지역 생태공간 조사 및 평가(NIE-수탁연구-2018-11)』의 지원으로 작성되었습니다.

REFERENCES

- Abdelsalam, K. 2013. Distributional patterns of benthic invertebrates at some meso-habitats of sandy riverbed of a mountain stream in Japan. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries* **17**: 13-35.
- An, C.H., J.S. Han, J.K. Choi and H.G. Lee. 2019. Benthic Macroinvertebrate Community Changes after Impoundment of Yeongju dam in Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **33**: 515-524 (in Korean).
- Brandl, S.J., W.D. Robbins and D.R. Bellwood. 2015. Exploring the nature of ecological specialization in a coral reef fish community: morphology, diet and foraging microhabitat use. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **282**: 20151147.
- Bray, J.R. and J.T. Curtis. 1957. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs* **27**: 325-349.
- Casatti, L. 2005. Fish assemblage structure in a first order stream, southeastern Brazil: longitudinal distribution, seasonality, and microhabitat diversity. *Biota Neotropica* **5**: 75-83.
- Chambers, P.A., P. Lacoul, K.J. Murphy and S.M. Thomaz. 2007. Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. In *Freshwater animal diversity assessment*. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 9-26.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, S.K. Kim, G.H. La, K.H. Chang and G.J. Joo. 2014. Role of macrophytes as microhabitats for zooplankton community in lentic freshwater ecosystems of South Korea. *Ecological Informatics* **24**: 177-185.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, S.K. Kim and G.J. Joo. 2016. Impact of habitat heterogeneity on the biodiversity and density of the zooplankton community in shallow wetlands (Upo wetlands, South Korea). *Oceanological and Hydrobiological Studies* **45**: 485.
- Choi, J.Y. and S.K. Kim. 2020. Responses of rotifer community to microhabitat changes caused by summer-concentrated rainfall in a shallow reservoir, South Korea. *Diversity* **12**: 113.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, J.C. Kim and J.H. Yun. 2020. Effect of Microhabitat Structure on the Distribution of an Endangered Fish, *Coreoperca kawamebari* (Temminck & Schlegel, 1843) in the Geum River, South Korea. *Water* **12**: 1690.
- Christie, H., K.M. Norderhaug and S. Fredriksen. 2009. Macrophytes as habitat for fauna. *Marine Ecology Progress Series* **396**: 221-233.
- Chutter, F.M. 1969. The effects of silt and sand on the invertebrate fauna of streams and rivers. *Hydrobiologia* **34**: 57-76.
- Crosa, G., E. Castelli, G. Gentili and P. Espa. 2010. Effects of suspended sediments from reservoir flushing on fish and macroinvertebrates in an alpine stream. *Aquatic Sciences* **72**: 85.
- Cummins, K.W. 1962. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *The American Midland Naturalist* **67**: 477-504.
- De Moor, F.C., F.M. Chutter and I.J. De Moor. 1986. Drift behaviour and microhabitat selection in the preimaginal stages of *Simulium chutteri* (Diptera Simuliidae). *Hydrobiologia* **133**: 143-154.
- Eriksson, P.G. 2001. Interaction effects of flow velocity and oxygen metabolism on nitrification and denitrification in biofilms on submersed macrophytes. *Biogeochemistry* **55**: 29-44.
- Field, J.G., K.R. Clarke and R.M. Warwick. 1982. A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Marine Ecology Progress Series* **8**: 37-52.
- Gjelland, K.Ø., T. Bøhn and P.A. Amundsen. 2007. Is coexistence mediated by microhabitat segregation? An in-depth exploration of a fish invasion. *Journal of Fish Biology* **71**: 196-209.
- Han, M.S., H.S. Bang, M.H. Kim, M.K. Kim, K.A. Roh, J.T. Lee and Y.E. Na. 2007. The fauna of aquatic invertebrates in paddy field. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **26**: 267-273 (in Korean).
- Hansen, J.F. and D.B. Hayes. 2012. Long-term implications of dam removal for macroinvertebrate communities in Michigan and Wisconsin rivers, United States. *River Research and Applications* **28**: 1540-1550.
- Harrison, S.S., D.C. Bradley and I.T. Harris. 2005. Uncoupling strong predator-prey interactions in streams: the role of marginal macrophytes. *Oikos* **108**: 433-448.
- Hill, P.S., T.G. Milligan and W.R. Geyer. 2000. Controls on effective settling velocity of suspended sediment in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research* **20**: 2095-2111.
- Holomuzki, J.R. and T.M. Short. 1988. Habitat use and fish avoidance behaviors by the stream-dwelling isopod *Lirceus fontinalis*. *Oikos* **52**: 79-86.
- Hong, C., W.S. Kim, J.Y. Kim, S.Y. Noh, J.H. Park, J.K. Lee and I.S. Kwak. 2019. Change of benthic macroinvertebrates community composition following summer precipitation variance. *Korean Journal of Ecology and Environment*, **52**: 348-357 (in Korean).
- Hong, S.J. and S.W. Cheong. 2020. A Study on the Community Characteristics and Changes of Benthic Macroinvertebrates in the Conservation Area of the Shinbulsan Wetland. *Journal of Environmental Science International* **29**: 1079-1088.
- Hur, J.W., D.S. In, M.H. Jang, H. Kang and K.H. Kang. 2011. Assessment of Inhabitation and Species Diversity of Fish to Substrate Size in the Geum River Basin. *Journal of Environmental Impact Assessment* **20**: 845-856.

- Jaccard, P. 1908. Nouvelles recherches sur la distribution florale. *Bulletin Society Sciences Naturelle* **44**: 223-270.
- Jeon, H.J., C. Hong, M.Y. Song, K.H. Kim, W.O. Lee and I.S. Kwak. 2019. Characteristics of Benthic Macroinvertebrates in Gihwa Stream, Tributary of Dong River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**: 105-117 (in Korean).
- Jung, K.S. 2011. Odonata Larvae of Korea. Nature and Ecology, Seoul, 399pp (in Korean).
- Kang, K.H., C.L. Jang, G.H. Lee and K.S. Jung. 2016. Numerical analysis of the morphological changes by sediment supply at the downstream channel of Youngju dam. *Journal of Korea Water Resources Association* **49**: 693-705 (in Korean).
- Kang, G.H. and W.S. Lee. 2015. Introduction of Yeongju Multipurpose Dam construction project. *Water for Future* **48**: 63-70 (in Korean).
- Kil, H.K., D.G. Kim, S.W. Jung, Y.H. Jin, J.M. Hwang, K.S. Bae and Y.J. Bae. 2010. Impacts of impoundments by low-head and large dams on benthic macroinvertebrate communities in Korean streams and rivers. *Korean Journal of Ecology and Environment* **43**: 190-198 (in Korean).
- Kim, H.G., C.S. Yoon and S.W. Cheong. 2018. A Community Characteristic on Benthic Macroinvertebrates and Correlation of Physicochemical Water Quality Factors in Stream of Gaya Mountain. *Journal of Wetlands Research* **20**: 322-329 (in Korean).
- Kim, M.C., S.P. Chun and J.K. Lee. 2013. Invertebrates in Korean Freshwater Ecosystems. Geobook, Seoul, 483pp (in Korean).
- Kim, S.K. and S.U. Choi. 2017. Computation of composite suitability index for fish and macroinvertebrate species in the Gongneung River. *Ecology and Resilient Infrastructure* **4**: 105-114 (in Korean).
- Kong, D., S.H. Son, J.Y. Kim, P. Kim, Y. Kwon, J. Kim, Y.J. Kim, J.K. Min and A.R. Kim. 2017. Estimation of habitat suitability index of fish species in the Gapyeong stream. *Journal of Korean Society on Water Environment* **33**: 626-639 (in Korean).
- Kruskal, J.B. 1964. Non-metric multidimensional scaling: a numerical method. *Psychometria* **29**: 115-129.
- Kwak, I.S., D.S. Lee, C. Hong and Y.S. Park. 2018. Distribution patterns of benthic macroinvertebrates in streams of Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 60-70.
- Kwon, S.J., Y.C. Jun and J.H. Park. 2013. Benthic Macroinvertebrates. Nature and Ecology, Seoul, 791pp (in Korean).
- Kuemmerlen, M., B. Schmalz, B. Guse, Q. Cai, N. Fohrer and S.C. Jähnig. 2014. Integrating catchment properties in small scale species distribution models of stream macroinvertebrates. *Ecological Modelling* **277**: 77-86.
- Lee, H.G. and J.K. Choi. 2014. The Distribution Characteristics of Fish Community by Habitat Type in the Nonsan Stream. *Journal of Wetlands Research* **16**: 303-313 (in Korean).
- Lee, S.H., M.J. Lee, E.W. Seo and J.E. Lee. 2017. Analysis of functional habitat groups of benthic macroinvertebrates according to changes in the riverbed. *Journal of Environmental Science International* **26**: 373-380.
- Loke, L.H., E. Clews, E.W. Low, C.C. Belle, P.A. Todd, H.S. Eikaas and P.K. Ng. 2010. Methods for sampling benthic macroinvertebrates in tropical lentic systems. *Aquatic Biology* **10**: 119-130.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. General Systems bull, University of Louisville, Systems Sic, Ins. **3**: 36-71.
- McCafferty, W.P. 1981. Aquatic entomology: the fisherman's and ecologist's illustrated guide to insects and their relatives. Science Book International, Boston, USA, 448pp.
- Menge, B.A. and J.P. Sutherland. 1987. Community regulation: variation in disturbance, competition, and predation in relation to environmental stress and recruitment. *The American Naturalist* **130**: 730-757.
- Mueller, M., J. Pander and J. Geist. 2011. The effects of weirs on structural stream habitat and biological communities. *Journal of Applied Ecology* **48**: 1450-1461.
- Nakano, D., M. Yamamoto and T. Okino. 2005. Ecosystem engineering by larvae of net-spinning stream caddisflies creates a habitat on the upper surface of stones for mayfly nymphs with a low resistance to flows. *Freshwater Biology* **50**: 1492-1498.
- National Institute of Ecology (NIE). 2019. Guideline for the 5th national ecosystem survey. NIE, Seochon, Korea.
- Ocon, C.S. and A.R. Capitulo. 2004. Presence and abundance of Ephemeroptera and other sensitive macroinvertebrates in relation with habitat conditions in pampean streams (Buenos Aires, Argentina). *Archiv Fur Hydrobiologie* **159**: 473-487.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, R. Kindt, P. Legendre, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens and H. Wagner. 2015. Package 'Vegan'. Community Ecology Package, Vers. 2.2-1. Available online: <http://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html> (accessed on 2-March 2021).
- Park, H.C., H.S. Sim, J.H. Jeong, T.H. Kang, H.A. Lee, Y.B. Lee, M.A. Kim, J.G. Kim, S.J. Hong, K.Y. Seol, N.J. Kim, S.H. Kim, N.H. Ahn and C.G. Oh. 2008. A Field Guide to Aquatic Insects of Rural Environments in Korea. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, 349pp (in Korean).
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. John Wiley & Sons, New York, 165pp.
- Renöfält, B.M., A.G. Lejon, M. Jonsson and C. Nilsson. 2013. Long-term taxon-specific responses of macroinvertebrates to dam removal in a mid-sized Swedish stream. *River Research and Applications* **29**: 1082-1089.
- Rosenfeld, J.S., J. Post, G. Robins and T. Hatfield. 2007. Hydraulic geometry as a physical template for the River Continuum: application to optimal flows and longitudinal trends in sal-

- monid habitat. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **64**: 755-767.
- Schmidt, M.L., B.A. Biddanda, A.D. Weinke, E. Chiang, F. Januska, R. Props and V.J. Deneff. 2020. Microhabitats are associated with diversity-productivity relationships in freshwater bacterial communities. *FEMS Microbiology Ecology* **96**: fiae029.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The mathematical theory of communication. Ph. D. Univ. of Illinois, Urbana, 233pp.
- Sih, A., P. Crowley, M. McPeck, J. Petranka and K. Strohmeier. 1985. Predation, competition, and prey communities: a review of field experiments. *Annual Review of Ecology and Systematics* **16**: 269-311.
- Sun, J., J.F. Hamel, B. Stuckless, T.J. Small and A. Mercier. 2020. Effect of light, phytoplankton, substrate types and colour on locomotion, feeding behaviour and microhabitat selection in the sea cucumber *Cucumaria frondosa*. *Aquaculture* **526**: 735369.
- The Entomological Society of Korea & Korean Society of Applied Entomology. 1994. Check list of insects from Korea, KonKuk University Press, Korea, pp. 5-744 (in Korean).
- The Korean Society of Systematic Zoology. 1997. List of animals in Korea (excluding insects), The Korean Society of Systematic Zoology, Korea, pp. 3-489 (in Korean).
- Torgersen, C.E., C.V. Baxter, H.W. Li and B.A. McIntosh. 2006. Landscape influences on longitudinal patterns of river fishes: spatially continuous analysis of fish habitat relationships, pp. 473-492. *In: Influences of Landscapes on Stream Habitats and Biological Assemblages* (Hughes, R.M., L. Wang and P.W. Seelbach, eds.). American Fisheries Society, Bethesda, MD. *American Fisheries Society Symposium* **48**: 473-492.
- Townsend, C., S. Doledec and M. Scarsbrook. 1997. Species traits in relation to temporal and spatial heterogeneity in streams: a test of habitat templet theory. *Freshwater Biology* **37**: 367-387.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 2000. Limnological analyses. Springer, New York, 429pp.
- Won, D.H., S.J. Kwon and Y.C. Jun. 2005. Aquatic Insects of Korea. Korea Ecosystem Service, Seoul, 415pp (in Korean).
- Yang, S.G., Y.C. Cho, H. Yang and E.J. Kang. 2012. Characteristics of fish fauna and community structure in Yongdam reservoir by inhabiting environment changes. *Korean Journal of Environmental Biology* **30**: 15-25 (in Korean).