

낙동강 보 구간 저서성 대형무척추동물의 생물다양성 변화와 군집 특성^{1a}

정상우^{2*} · 김윤호³ · 이재하⁴ · 김동건⁵ · 김민경⁶ · 김현맥⁷

Biodiversity Changes and Community Characteristics of Benthic Macroinvertebrates in Weir Section of the Nakdong River, South Korea^{1a}

Sang Woo Jung^{2*}, Yoon-Ho Kim³, Jae-Ha Lee⁴, Dong-Gun Kim⁵, Min-Kyung Kim⁶, Hyun-Mac Kim⁷

요약

본 연구는 2020년 5월부터 10월까지 4대강 사업의 하나로 준공된 8개의 낙동강 보 구간에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 생물다양성 변화와 군집분석을 수행하였으며, 2010년부터 2020년까지 약 10년간의 저서성 대형무척추동물 주요 분류군에 대한 변화상을 분석하였다. 조사결과 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 18목 52과 83속 97종 128.1개 체/m²가 출현하였으며, 오염지표생물인 깔따구류(Chironomidae sp.)와 실지렁이류(Tubificidae spp.)가 전체적으로 우점하였다. 군집분석결과 우점도지수는 평균 0.62±0.20이고 다양도지수는 1.87±0.63로 낙동강 보 상류에서 가장 안정적으로 분석되었다. 낙동강 보 중앙부에서는 실지렁이가 우점하였으며, 칠곡보와 강정고령보에서 가장 불안한 군집구조가 나타났다. 군집안정성 분석결과 상대적 회복력과 저항력이 높은 특성군I이 높게 나타났으며, 저항력과 회복력이 낮은 특성군III이 소수 분포하는 것으로 나타나 현재 낙동강 보 구간의 군집은 매우 불안한 상태로 분석되었다. 섭식기능군에서는 잡아먹는무리가 비교적 높게 출현하였고, 썰어먹는무리, 모아먹는무리, 걸러먹는무리는 낮게 나타났다. 서식기능군에서는 굴파는무리와 기어오르는무리가 우세하게 출현하여 대부분 용존산소가 낮은 정수생태계에서 출현하는 기능군들이 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 주요 법적보호종으로는 상주보와 낙단보에서 멸종위기야생생물 II급인 노란잔산잠자리(*Macromia daimoji*)가 분포하고 있는 것으로 확인되었다. 과거부터 10년간의 분석결과 종수와 개체수는 댐 공사 직후에는 증가하였지만, 2016년 이후부터 급감하면서 다시 안정화되고 있는 것으로 나타났다. 우점종으로는 깔따구류가 모든 지점에서 우점하는 것으로 나타났으며, 현재 약 50% 수준의 비율로 유지되고 있는 것으로 나타났다. EPT 그룹은 2011년을 기점으로 대폭 감소하였으며, 이중 강도래목과 날도래목은 회복하지 못하는 것으로 분석되었다. 오염지표생물인 실지렁이류는 2012년 공사 완료 후 증가 추세를 보였으며, 2015년과 2020년에 개체수가 폭발적으로 증가하였다. 멸종위기야생생물 I급으로 지정된 귀이빨대칭이(*Cristaria plicata*)는 2011년 합천창녕보에서 출현 후 관찰되지 않았으며, 멸종위기야생생물 II급인 노란잔산잠자리는 2015년까지 7개의 구간에서 드물게 확인되었으나 현재 분포 서식처가 급격히 줄어들 것으로 확인되었다.

주요어: 수생태계, 무척추동물, 수서곤충, 4대강, 다양성

1 접수 2021년 12월 24일, 수정 (1차: 2022년 2월 28일), 게재확정 2022년 3월 7일

Received 24 December 2021; Revised (1st: 28 February 2022); Accepted 7 March 2022

2 다산이생물자원연구소 대표 DASARI Research Institute of BioResources, Daejeon 34116, Korea (elmidae79@gmail.com)

3 다산이생물자원연구소 대표 DASARI Research Institute of BioResources, Daejeon 34116, Korea (dosirak09@naver.com)

4 다산이생물자원연구소 선임연구원 DASARI Research Institute of BioResources, Daejeon 34116, Korea (ckoom@naver.com)

5 삼육대학교 스미스학부대학 조교수 Smith College of Liberal Arts, Sahmyook University, Seoul 01795, Korea (ecology@syu.ac.kr)

6 서울여자대학교 일반대학원 생명환경공학과 Department of Bio-environmental Technology, Graduate School of Seoul Women's University, Korea (min4190@naver.com)

7 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 환경연구사 Nakdong River Environment Research Center, Daegu 43008, Korea (khmc11@korea.kr)

a 이 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 NIER-2020-04-02-034)을 받아 수행되었음.

* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-07-7353-2547, Fax: +82-504-387-2411, E-mail: elmidae79@gmail.com

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the biodiversity changes and characteristics of the benthic macroinvertebrate community in the Nakdong River with eight weirs, which was constructed as one of the Four Major River Restoration Projects from May to October 2020. The study also includes the analysis of changes in the major groups of benthic macroinvertebrates for about ten years, from 2010 to 2020. The surveys collected 97 species of benthic macroinvertebrates belonging to 83 genera, 52 families, 18 orders, five classes, three phyla, and 128.1 individuals/m². Chironomidae sp. and Tubificidae spp., which are pollutant indicators, dominated throughout the sections. The community analysis result shows the average dominant index and the diversity index of 0.62±0.20 and 1.87±0.63, respectively, and indicated the most stability of the freshwater ecosystem in the upper stream of the Nakdong River. The survey showed dominance by Chironomidae sp. at the center of the Nakdong River weir and the most unstable community in Chilgok and Gangjeong Goryeong weirs. The results of the community stability analysis showed a high distribution of the characteristic group I with high resilience and resistance and small distribution of characteristic group III with low resistance and resilience, indicating a very unstable condition of communities in the Nakdong River weir section. Predators were relatively abundant among the functional feeding groups (FFGs), whereas shredders, gathering-collectors, and filtering-collectors were relatively lower. Among the habitat orientation groups (HOGs), burrowers and climbers were dominant, indicating a wide distribution of groups in ecosystems with low dissolved oxygen. An endangered species level II of *Macromia daimoji* was found in Sangju and Nakdan weirs. The analysis results for 10 years from 2010 showed that the number of species and populations increased immediately after the dam construction but plummeted in 2016 and are now stabilizing. Chironomidae spp. has been dominant in all sections over the past 10 years, and they are currently maintained at a rate of about 50%. The EPT groups have decreased significantly since 2011, and the Plecoptera and Trichoptera of the group have not yet been restored. The population of Tubificidae spp. showed an increase after construction was completed in 2012 and drastically increased in 2015 and 2020. The species of *Cristaria plicata*, designated as endangered species level I, has not been observed since 2011 in Hapcheon Changnyeong weir. Moreover, *Macromia daimoji* was rarely observed in seven weirs until 2015, and it has been confirmed that the current distribution habitat has decreased rapidly.

KEY WORDS: AQUATIC ECOSYSTEM, INVERTEBRATES, AQUATIC INSECTS, FOUR MAJOR RIVER, DIVERSITY

서론

낙동강은 유로연장 521km, 유역면적 23,817km로 국내에서는 가장 긴 강으로 알려져 있으며, 32개의 시와 군을 통과하여 농업 및 공업용수로 이용되고 있다. 2009년부터 본격적인 4대강(한강, 금강, 낙동강, 영산강) 살리기 사업이 시행되면서 낙동강수계에는 총 8개의 보가 설치되었으며, 2011까지 준설로 인한 낙동강수계의 서식처는 하상부터 주변 환경까지 인위적인 교란으로 패류 및 어류가 집단폐사

하는 현상이 나타나고 녹조로 인해 끊임없는 공방을 벌이고 있다. 4대강 사업에서 건축된 보의 길이는 184-953m이며, 높이는 평균 7.7m로 가장 높은 보는 11.8m이다. 보(weir)라고 평가하기보다는 댐(dam) 형식의 높이의 역할을 하고 있으며, 이런 인공구조물은 하천 바닥에 풍부하게 서식하고 있는 저서성 대형무척추동물의 다양한 분류군들의 이동과 교류에 극단적 선택을 강요하여 부분적으로 절멸을 강요하고 있다(Poulos *et al.*, 2019; Muller *et al.*, 2011). 또한, 댐으로 인한 호수화는 저서성 대형무척추동물들을 먹이원

으로 하는 담수어류의 행동과 성장 및 생리 등의 유전적 부분까지도 변화시킨다고 알려져(Carpenter-Bundhoo *et al.*, 2020) 담수어류와 공생 또는 기생하는 저서성 대형무척추동물에 큰 피해를 줄 수 있다. 이런 원인은 강의 댐 건설로 인한 물의 순환이 교란되고, 강변 생태계의 구조와 기능 변화에 따른 부정적인 영향으로 파악된다(Eng *et al.*, 2013). 댐에 의한 자연적 하천의 변화와 파편화는 하천생태학, 지질학, 수리학에 끊임없는 영향을 미치고 있다(Poff and Zimmerman, 2010). 댐에 의한 물 흐름의 정체와 계속되는 교란은 하천의 영향순환, 퇴적물, 수온뿐만 아니라 강에서 바다로 연결되어 살아가는 생명들에 대한 순환과 주기를 변화시켜 댐의 상류와 하류의 생태학적 종다양성에 심각한 영향을 주고 있다(Poff *et al.*, 2007; Carpenter-Bundhoo *et al.*, 2020).

물 안쪽의 다양한 생태계를 구성하고 있는 저서성 대형무척추동물은 하천생태계에 먹이원뿐만 아니라 물질순환 및 동일 수계내의 생물다양성에 중요한 역할을 수행하고 있다(Malmqvist, 2002; Merritt *et al.*, 2008). 또한, 이동성이 낮고 한정된 공간내에 하상구조, 수온, 수변식생, 토지이용의 변화에 따라 서식하는 분류군의 군집구조가 나타나기 때문에 국내에서는 다양한 수환경 모니터링 소재와 평가지표종으로 활용되고 있다(Rosenberg and Resh, 1993; Kim *et al.*, 2016; Kong and Kim, 2016). 인위적인 환경변화와 댐 준공 이후 인공구조물 및 주변 친수시설들은 하천의 공간적 서식처 변화를 일으키며, 전형적인 유속의 감소뿐만 아니라 저질의 퇴적화, DO, pH 등의 이화학적 요인들까지 변화시켜 하천 생물군집에 다양한 교란을 일으키고 있다. 과거 많은 문헌에서 국내의 건설된 보 또는 댐에 의한 저서성 대형무척추동물의 영향은 대부분 부정적이며, 깔따구류 등과 같은 혐기성 생물들의 개체수들이 증가하여 종조성이 변하고 다양성이 급격히 감소한다고 보고되고 있다(Kil *et al.*, 2007; Kil *et al.*, 2010; Kil and Bae, 2012; Kim *et al.*, 2013a; Lee *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2018; An *et al.*, 2019; Kwon *et al.*, 2020).

낙동강 보 건설 후 수행된 연구는 낙동강 보 구간의 환경요인에 의한 플랑크톤 군집조성 분석(Seo *et al.*, 2013), 낙단보 설치 전후에 따른 저서성 대형무척추동물 군집변동(Lee *et al.*, 2014), 수문운영에 따른 낙단보 상류하도의 흐름 특성(Moon *et al.*, 2016), 보 건설에 따른 낙동강 녹조 발생에 따른 수환경 평가(Park *et al.*, 2018)의 연구가 진행되었으며, 공식적으로 2016년 이후부터 현재까지 조사결과에 따른 낙동강 보 건설에 따른 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구는 낙동강 보 설치 이후에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 종다양성 및 군집 특성과 2010년부터 약 10년간 보 구간의 저서성 대형무척추동물의 변화상을 파악하

여, 현재의 낙동강 저서성 대형무척추동물의 추세와 앞으로의 낙동강 보 구간의 수생태계 관리방안 및 다양성 증진에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

연구방법

1. 조사지점 및 시기

낙동강 보구간 일대의 저서성 대형무척추동물 조사는 낙동강 보 상류와 하류를 포함하여 8개의 보(상주보, 낙단보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 달성보, 합천창녕보, 창녕합안보)에서 수변부 26개 지점, 중앙부 25개 지점을 선정하여 계절별 조사(수변부: 3회, 중앙부: 2회)를 실시하였다. 조사 시기는 2020년 5월 4일~5월 8일(1차), 8월 3일~8월 7일(2차), 10월 12일~10월 16일(3차)에 실시하였으며, 각 조사지점(Figure 1)과 GPS는 다음과 같다.

- N1(낙동강 보 상류): 경상북도 예천군 풍양면 상감리(N 36° 33' 53", E 128° 17' 49")
- N2(상주보1): 경상북도 상주시 사벌면 퇴강리 764(N 36° 31' 19", E 128° 16' 00")
- N3(상주보2): 경상북도 예천군 풍양면 효갈리 1083-1(N 36° 29' 09", E 128° 16' 13")
- N4(상주보3): 경상북도 상주시 중동면 오상리 968-1(N 36° 26' 04", E 128° 15' 13")
- N5(낙단보1): 경상북도 상주시 중동면 오상리(N 36° 25' 41", E 128° 14' 10")
- N6(낙단보2): 경상북도 상주시 중동면 신암리 1128-1(N 36° 24' 12", E 128° 18' 18")
- N7(낙단보3): 경상북도 의성군 단밀면 생송리 1668-1(N 36° 21' 40", E 128° 18' 48")
- N8(구미보1): 경상북도 상주시 낙동면 낙동리 1105(N 36° 21' 16", E 128° 17' 40")
- N9(구미보2): 경상북도 구미시 도개면 월림리 1024(N 36° 18' 19", E 128° 18' 26")
- N10(구미보3): 경상북도 구미시 선산읍 독동리 783-1(N 36° 14' 19", E 128° 20' 38")
- N11(칠곡보1): 경상북도 구미시 해평면 월곡리 795(N 36° 13' 47", E 128° 20' 59")
- N12(칠곡보2): 경상북도 구미시 비산동 584(N 36° 07' 28", E 128° 23' 14")
- N13(칠곡보3): 경상북도 칠곡면 석적읍 중지리 627-1(N 36° 01' 06", E 128° 23' 52")
- N14(강정고령보1): 경상북도 칠곡면 왜관읍 석전리

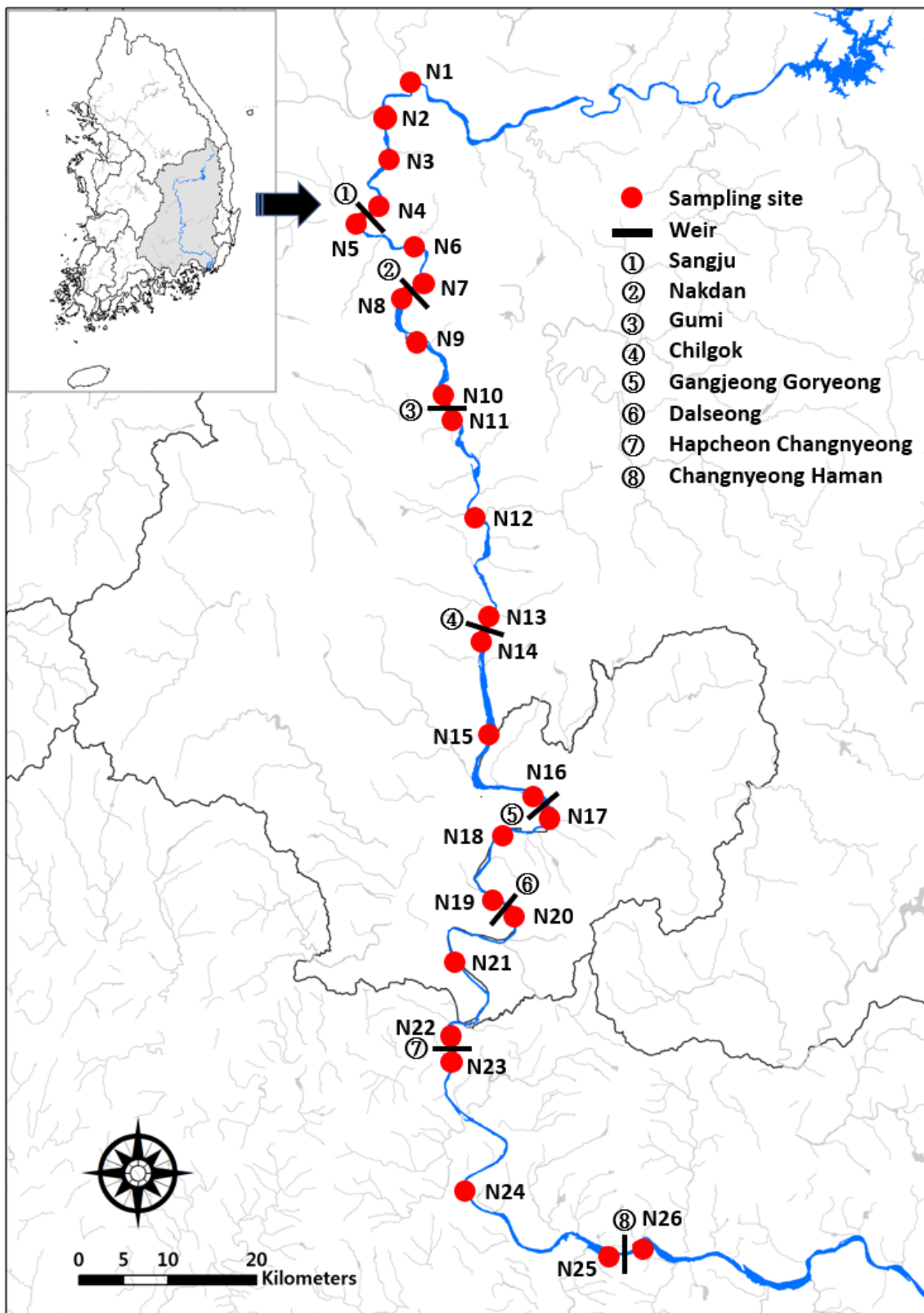


Figure 1. A map of sampling sites and eight weirs in Nakdong river.

- 872(N 36° 00' 38", E 128° 23' 38")
 N15(강정고령보2): 경상북도 칠곡면 왜관읍 금남리 861(N 35° 54' 13", E 128° 24' 15")
 N16(강정고령보3): 대구광역시 달성군 다사읍 죽곡리 806(N 35° 50' 33", E 128° 27' 24")
 N17(달성보1): 경상북도 고령군 다사면 호촌리 1102(N 35° 49' 36", E 128° 28' 27")
 N18(달성보2): 경상북도 고령군 다사면 월성리 1316(N 35° 48' 10", E 128° 24' 51")
 N19(달성보3): 대구광역시 달성군 논공읍 하리 899(N 35° 44' 08", E 128° 24' 50")
 N20(합천창녕보1): 경상북도 고령군 개진면 인안리 456(N 35° 43' 38", E 128° 25' 38")
 N21(합천창녕보2): 경상북도 고령군 우곡면 예곡리 597(N 35° 40' 35", E 128° 21' 34")
 N22(합천창녕보3): 경상남도 합천군 덕곡면 읍지리 1(N 35° 35' 36", E 128° 21' 19")
 N23(창녕합안보1): 경상남도 창녕군 이방면 등림리 754(N 35° 35' 05", E 128° 21' 28")
 N24(창녕합안보2): 경상남도 창녕군 남지읍 대곡리 839(N 35° 26' 23", E 128° 22' 37")
 N25(창녕합안보3): 경상남도 창녕군 기륙면 증산리 1311(N 35° 22' 50", E 128° 32' 55")
 N26(낙동강 보 하류): 경상남도 창녕군 길곡면 마천리 1415(N 35° 23' 09", E 128° 35' 17")

2. 조사방법

낙동강 보 구간 일대에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 현장조사는 수변부와 중앙부를 나누어 조사를 수행하였다. 수변부는 드렛지(dredge net, 40×20cm, mesh size=1.0mm)를 이용하여 하상 0.5m를 2회씩 긁어서 정량채집을 수행하였으며, 중앙부는 포나그랩(ponar grab, h33×w42×d16cm, sampling area=225cm²)을 이용하여 정점에서 3회씩 채집하였다. 정성조사는 저서성 대형무척추동물의 다양성을 파악하기 위해 둥근틀채(hand net, mesh size=0.5mm)를 이용하여 채집을 병행하였다. 정량채집된 샘플은 현장에서 96% Ethanol로 고정된 후 80% Ethanol로 치환하여 보관하였으며, 정성채집된 샘플은 현장에서 80% Ethanol로 바로 고정하였다.

3. 분류 및 동정(identification)

채집된 샘플은 실험실로 운반 후, 해부현미경 및 광학현미경을 이용하여 골라내기(sorting)와 동정(identification)하였

다. Yoon(1988, 1995), Kwon(1990), Won *et al.*(2005), Park *et al.*(2008), Jung(2011), Kim *et al.*(2013b), Kwon *et al.*(2013)을 참조하여 동정하였으며, 형태 동정이 어려운 일부 분류군은 과(family) 또는 속(genus) 수준에서 sp.로 처리하여 분석에 이용하였다. 특히 보 구간에서 중요시되는 깔따구과(Family Chironomidae)는 형태적 특징으로 6개의 유형으로 구분하여 “Chironomidae sp., Chironomidae sp.A, B, C, D, Tanypodinae sp.”로 제시하였으며, 이 중 7-8배마디에 혈세관(blood tubule)을 가지고 있는 Chironomidae sp.A만 붉은색깔따구(Red type chironomids)로 명시하였다.

4. 군집분석

수변부에서 정량 조사된 저서성 대형무척추동물 분류군별 개체수를 단위면적(m²) 당 밀도로 환산한 후 비교하였고, 우점종과 더불어 우점도지수(McNaughton, 1967), 종다양도지수(Shannon and Weaver, 1963), 균등도지수(Pielou, 1966) 및 풍부도지수(Margalef, 1958)를 분석하였다. 저서성 대형무척추동물 중에서 가장 다양하고 풍부하게 나타나는 수서곤충류의 분포를 확인하여 상대적 저항력과 회복력을 분석한 군집 안정성(Ro and Chun, 2004)을 평가하였다. 또한, 조사지점의 경향성 분석을 위해 섭식기능군(Functional Feeding Groups: FFGs)과 서식기능군(Habitat Orientation Groups: HOGs)을 분석하였다(Ro, 2002; Merritt *et al.*, 2008). 중앙부에서 채집된 저서성 대형무척추동물들은 종구성이 단순하게 분석되어 결과와 고찰 부분에서 일부만 해석하였다.

낙동강 보 구간의 저서성 대형무척추동물의 조사는 과거 2010년부터 현재(2020년)까지 조사가 수행되었다. 과거 10년간 동일 지점에서 채집된 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수 변화상을 종합하여 분석하였으며, 주요 법적보호종 분포 및 혐기성 분류군의 대표적인 깔따구류 및 실지렁이류의 변화, 청정한 수환경을 대표하는 하루살이목-강도래목-날도래목(Ephemeroptera-Plecoptera-Trichoptera; EPT groups)의 변화 등을 종합적으로 분석하였다.

결 과

1. 저서성 대형무척추동물의 다양성 및 법적보호종

낙동강 보 구간 조사지역 일대에서 관찰된 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 18목 52과 83속 97종 128.1개체/m²가 조사되었다(Table 1). 봄과 여름에 각각 66종으로 가장 많이 출현하였고 가을에 56종으로 다양성이 낮게 조사되었다. 개

Table 1. Individual number of benthic macroinvertebrates in Nakdong river, 2020

Phylum	Class	Order	Family	Genus	Species
Mollusca	Gastropoda	Architaenioglossa	2	3	3
		Littorinimorpha	1	1	1
		Mesogastropoda	1	1	1
		Systellommatophora	4	5	5
	Bivalvia	Mytiloidea	1	1	1
		Veneroidea	1	1	2
Annelida	Clitellata	Tubificida	1	1	1
		Haplotaxida	1	1	1
		Rhynchobdellida	1	3	3
		Arhynchobdellida	1	1	1
Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	1	1	1
		Decapoda	2	3	3
	Insecta	Ephemeroptera	6	11	13
		Odonata	8	15	17
		Hemiptera	5	9	11
		Coleoptera	5	11	12
		Diptera	6	6	12
		Trichoptera	5	9	9
Total			52	83	97

체수는 봄과 가을보다 여름에 약 2배 정도 높은 220.4개체/m²가 조사되었으며, 이는 여름에 수온의 증가로 인한 실지렁이류(Tubificidae spp.) 및 깔따구류(Chironomidae spp.)의 개체수가 급속히 증가한 것으로 파악된다. 전체 출현종 중에서

연체동물문은 13종(13.40%), 환형동물문 6종(6.19%), 연갑강 16종(16.49%), 곤충강 62종(63.92%)로 수서곤충류가 가장 다양성이 높았으며, 비곤충류(Non-Insecta)는 전체 32종(36.08%)로 조사되었다. 일반적인 하천보다 비곤충류의 비

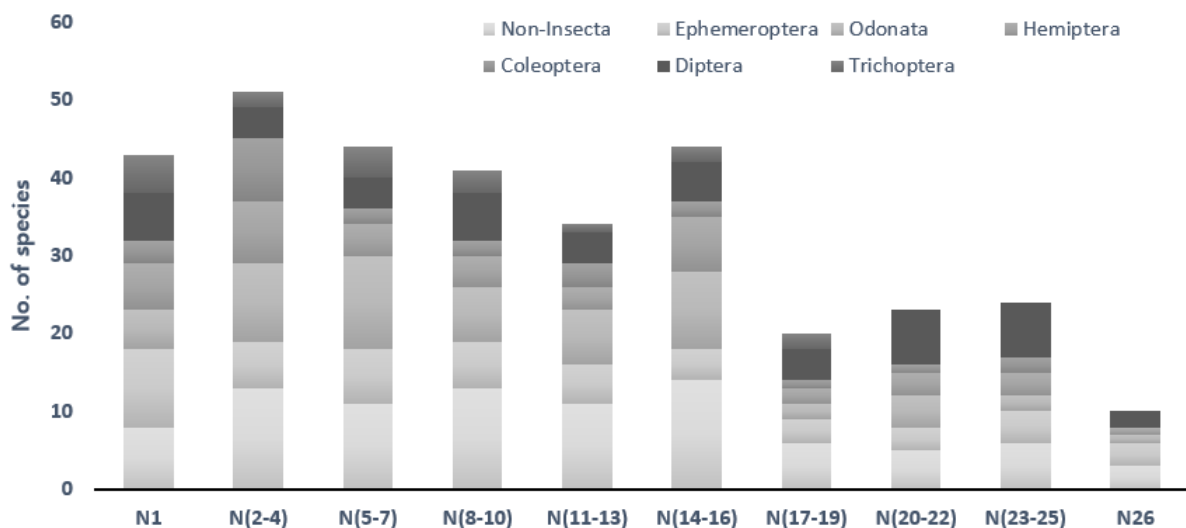


Figure 2. Species number of benthic macroinvertebrates at each sampling sites in Nakdong river.

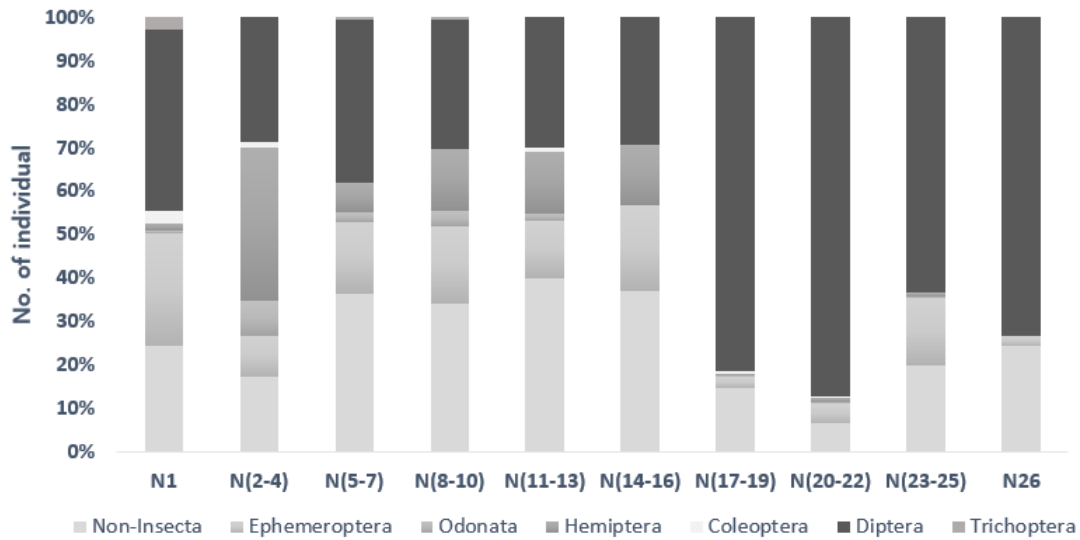


Figure 3. Percentage composition of benthic macroinvertebrates taxa at each sampling sites in Nakdong river.



Cristaria plicata (Leach, 1815)



Macromia daimoji Okumura, 1949

Figure 4. Korean endangered species of sampling sites in Nakdong river: *Cristaria plicata* (endangered species I), *Macromia daimoji* (endangered species II).

울과 수서곤충 중에 잠자리목(17종, 17.53%), 노린재목(11종, 11.34%), 딱정벌레목(12종, 12.37%)이 높게 나타나는 이유는 보 영향으로 인한 정수생태계가 우수생태계보다 상대적으로 많은 부분을 차지하고 있기 때문으로 판단된다.

지점별 출현 양상은 상주보에서 51종(110.1개체/m²)으로 가장 다양하였으며, 낙단보와 강정고령보에서 각각 44종(181.2개체/m², 68.6개체/m²), 보 상류에서 43종(215.8개체/m²), 구미보 41종(97.8개체/m²), 칠곡보 34종(90.5개체/m²), 창녕함안보 24종(105.2개체/m²), 합천창녕보 23종(222.7개체/m²), 달성보 20종(88.4개체/m²), 보 하류에서 10종(101.1개체/m²) 순으로 나타나, 보 하류로 갈수록 종수는 적어지고 파리목의 개체수는 증가하는 것으로 나타났다 (Figures 2, 3).

낙동강 보 구간에서 출현한 저서성 대형무척추동물 중 환경부에서 지정한 법적보호종으로는 멸종위기야생생물 II 급으로 지정된 “노란잔산잠자리(*Macromia daimoji*)”가 상주보와 낙단보에서 출현하였으며(Figure 4), 적색목룩기준위협(NT, Near Threatened)으로 판별된 “주름다슬기(*Semisulcospira forticosta*)와 일본재첩(*Corbicula japonica*)”이 2종, 국외반출승인대상종인 “강우렁이(*Sinotaia quadrata*), 주름다슬기, 일본재첩, 줄새우(*Palaemon paucidens*), 강하루살이(*Rhoenanthus coreanus*), 가람하루살이(*Potamanthus luteus oriens*), 자실잠자리(*Coper a annulata*), 어리장수잠자리(*Sieboldius albardae*), 검정측범잠자리(*Trigomphus nigripes*), 언저리잠자리(*Epitheca marginata*), 청나비날도래 KUa(*Mystacides KUa*)”으로 11종, 한반도고유종인 “주름다슬기

와 강하루살이” 2종으로 확인되었다. 추후 멸종위기야생생물 및 자연생태계에서 멸종될 우려가 되는 준위협(NT) 종들은 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단되며, 서식처에 따른 개체군 크기와 밀도변화를 주의 깊게 관측해야 할 것으로 사료된다.

낙동강 보 중앙부에서 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 16종 35.0개체/m²였으며, 깔따구류와 실지렁이류를 제외하고는 대부분 수문이 개방되거나 장마로 인해 상류의 서식종들이 중앙부에 유입되어 일시적으로 나타난 종으로 판단된다.

Table 2. Dominant species and biological indices on benthic macroinvertebrates in the weirs of Nakdong river

Site	Dominant species	Subdominant species	DI	H'	E	RI
Up stream	Chironomidae sp.	Tubificidae spp.	0.39	2.62	0.81	4.47
Sangju	<i>Micronecta sahlbergii</i>	Chironomidae sp.	0.50	2.41	0.72	5.74
Nakdan	Chironomidae sp.	Tubificidae spp.	0.63	2.09	0.64	4.81
Gumi	Tubificidae spp.	<i>Micronecta sedula</i>	0.42	2.32	0.75	4.58
Chilgok	Tubificidae spp.	Chironomidae sp.	0.50	2.19	0.73	4.22
Gangjeong Goryeong	Chironomidae sp.	Tubificidae spp.	0.47	2.24	0.79	3.78
Dalseong	Chironomidae sp.	Tubificidae spp.	0.87	0.96	0.39	2.45
Hapcheon Changnyeong	Chironomidae sp.	Ephydriidae sp.	0.81	1.38	0.47	3.33
ChangnyeongHamman	Chironomidae sp.	Tubificidae spp.	0.68	1.61	0.55	3.89
Down stream	Chironomidae sp.	<i>Neocaridina denticulata</i>	0.93	0.85	0.48	1.08
Mean ± SD			0.62 ± 0.20	1.87 ± 0.63	0.63 ± 0.15	3.83 ± 1.31

*DI: Dominance index, H': Diversity index, E: Evenness index, RI: Richness index

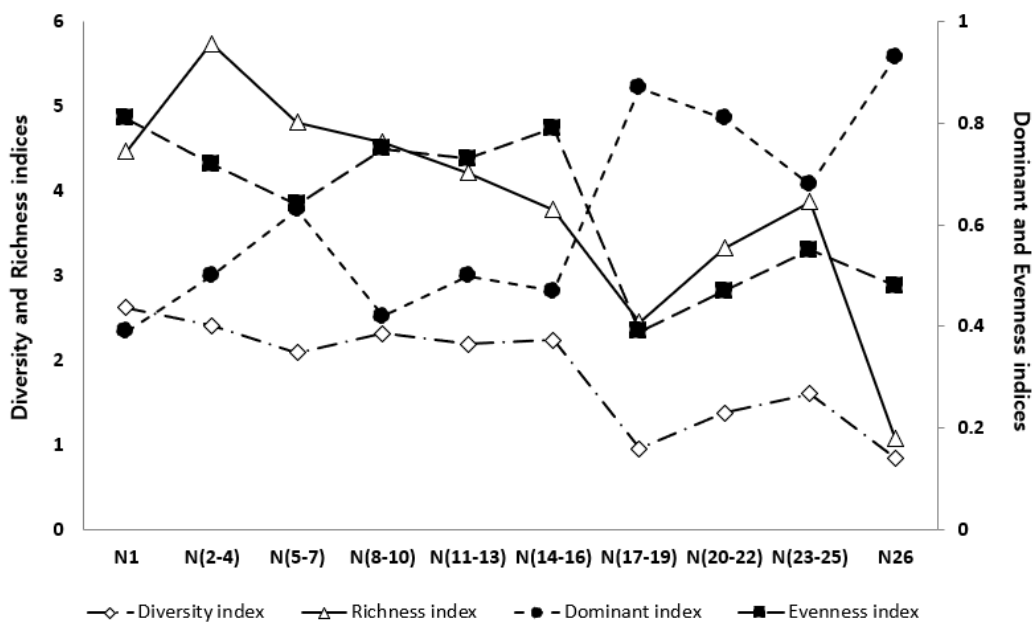


Figure 5. Community index of benthic macroinvertebrates at each sampling sites in Nakdong river.

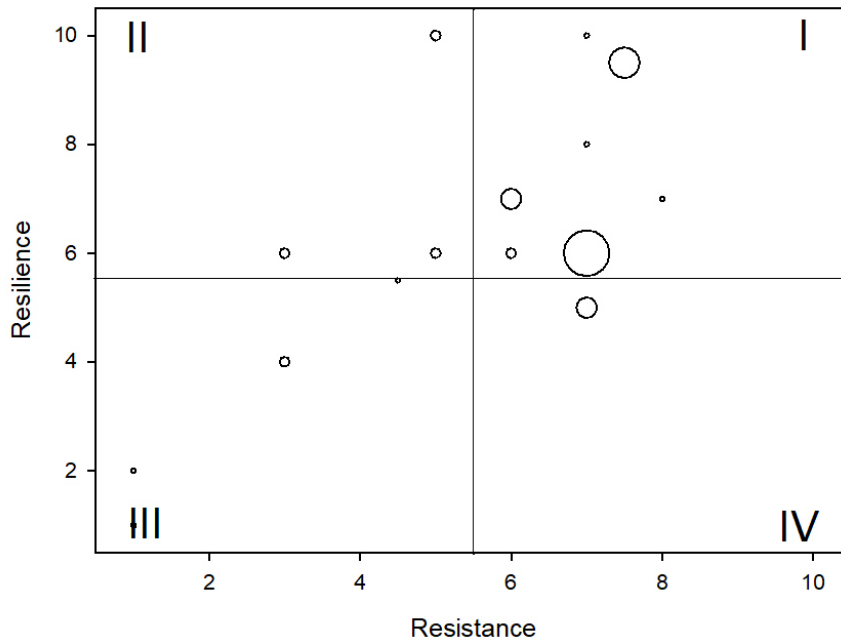


Figure 6. Analysis of stability factors with resistance and resilience in Nakdong river, 2020.

2. 우점종 및 군집 구조

조사 지점별 우점종 및 군집분석 결과 낙동강 상류부터 하류까지 전 지점에서 깔따구류(Chironomidae sp.)가 우점하는 것으로 나타났으며, 상주보에서는 이동성이 강하고 집단생활을 하는 동쪽꼬마물벌레(*Micronecta sahlbergii*), 구미보와 칠곡보에서는 오염생물 지표종인 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*)가 우점하였다. 우점도지수는 평균 0.62 ± 0.20 (0.39~0.93), 다양도지수는 평균 1.87 ± 0.63 (0.85~2.62), 균등도지수는 평균 0.63 ± 0.15 (0.39~0.81)로 나타났으며, 하천의 흐름(run, riffle)이 있는 낙동강 보 상류에서 가장 안정적이며 균등한 것으로 분석되었다. 풍부도지수는 평균 2.83 ± 1.31 (1.08~5.74)로 나타났으며, 상주보에서 종풍부성이 가장 높은 것으로 분석되었다(Table 2, Figure 5). 이는 보 영향으로 인단 담수의 영향으로 해석되며, 하류로 내려갈수록 특정 분류군의 우점율이 점차 증가하여 상류지점에 비해 상대적으로 불안정한 것으로 판단된다.

낙동강 보 중앙부에서는 대부분 구간에서 실지렁이와 깔따구류가 우점 및 아우점하였으며, 우점도지수는 평균 0.76 ± 0.14 , 다양도지수는 평균 1.23 ± 0.37 , 균등도지수는 평균 0.78 ± 0.16 , 풍부도지수는 평균 1.27 ± 6.33 로 8개의 보 중에 칠곡보와 강정고령보에서 가장 불안한 군집구조가 나타났다.

3. 군집 안정성 및 기능군 분석

낙동강 보구간 생태계의 건전성을 평가하기 위해 저서성 대형무척추동물의 95%를 구성하고 있는 수서곤충류의 군집 안정성 분석을 4개의 특성군으로 분석한 결과, 하천생태계의 상대적 회복력과 저항력이 모두 높은 특성군 I이 대부분을 차지하고 있었으며, 저항력이 낮으며 회복력이 높은 특성군 II와 저항력과 회복력이 낮은 특성군 III에 매우 소수의 분류군이 분포하고 있는 것으로 나타났다(Figure 6). 하지만, 특성군 I에 분포도 범위가 매우 크지 않고, 기준점에 인접하여 분포하고 있어 낙동강 하천생태계의 안정화에는 미치는 영향은 적을 거라 판단된다. 또한, 기본적으로 수환경 변화에 내성이 높은 깔따구류와 이동 범위가 넓은 딱정벌레류, 노린재류, 잠자리류가 낙동강 하천생태계에 상대적으로 다양하게 분포하고 있어 건전성은 양호한 편으로 보이지만, 하천생태계의 회복력이 일정하게 유지되고 있지 않은 것으로 나타났다. 특성군 III의 분포 비율은 인위적인 간섭이나 주변의 작은 교란에도 다양성이 큰 폭으로 떨어질 수 있다는 걸 의미하여 현재 낙동강 수서곤충류의 군집은 매우 불안정한 상태로 교란에 민감한 분류군들이 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다.

출현한 저서성 대형무척추동물을 이용한 섭식기능군과 서식기능군 분석 결과(Figure 7), 잡아먹는무리(Predators, PR)가 12종(52.17%)으로 매우 높게 나타나 습지와 같은 정수생태계의 형태를 나타내고 있었으며, 상대적으로 찢어먹는무리(Shredders, SH), 모아먹는무리(Gathering-collectors,

GC), 걸러먹는무리(Filtering-collectors, FC)와 같은 유수성 형태의 종들은 낮게 나타났다. 이러한 특징은 낙동강 보의 영향에 따른 하천의 유속 감소와 수심이 깊어짐에 따른 먹이원의 단순화에 의한 원인으로 파악된다(Choe *et al.*,

2016). HOGs 분석 결과, 출현종은 모래하천의 전형적인 특징을 나타내는 굴파는무리(Burrowers, BU)가 종수와 개체수에서 우점하였으며, 다음으로는 기어오르는무리(Climbers, CB)와 헤엄치는무리(Swimmers, SW)가 아우점하는 것으로

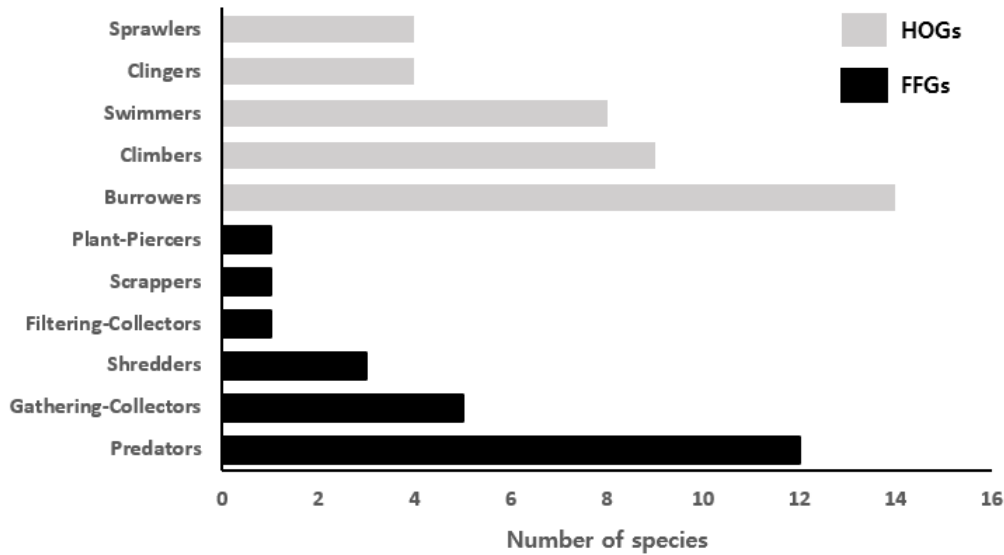


Figure 7. Composition of habitat orientation groups (HOGs) and functional feeding groups (FFGs) of benthic macroinvertebrates at each sampling sites in Nakdong river.

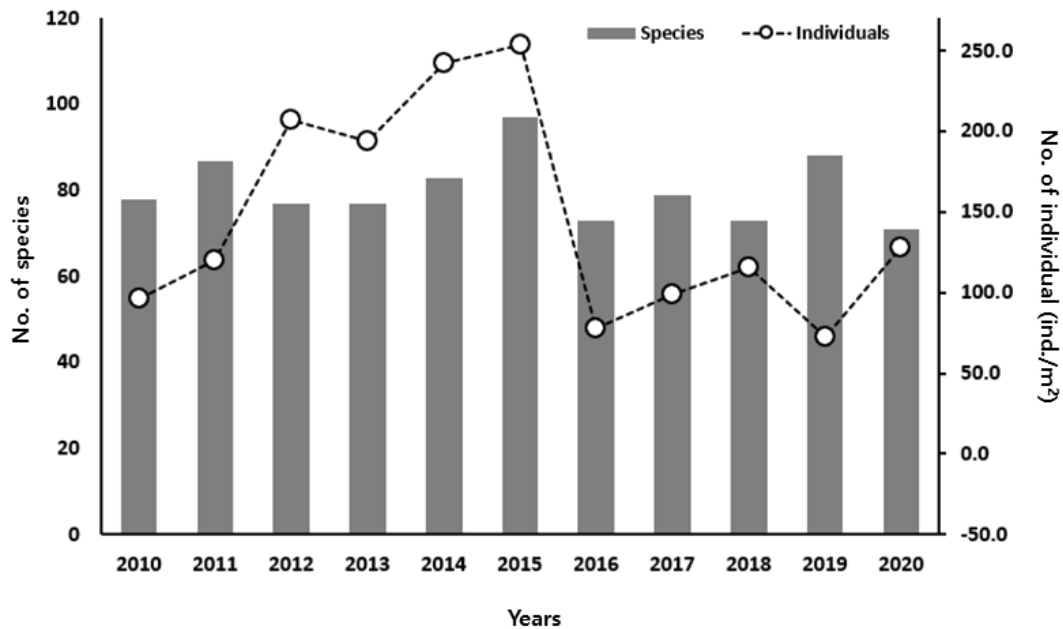
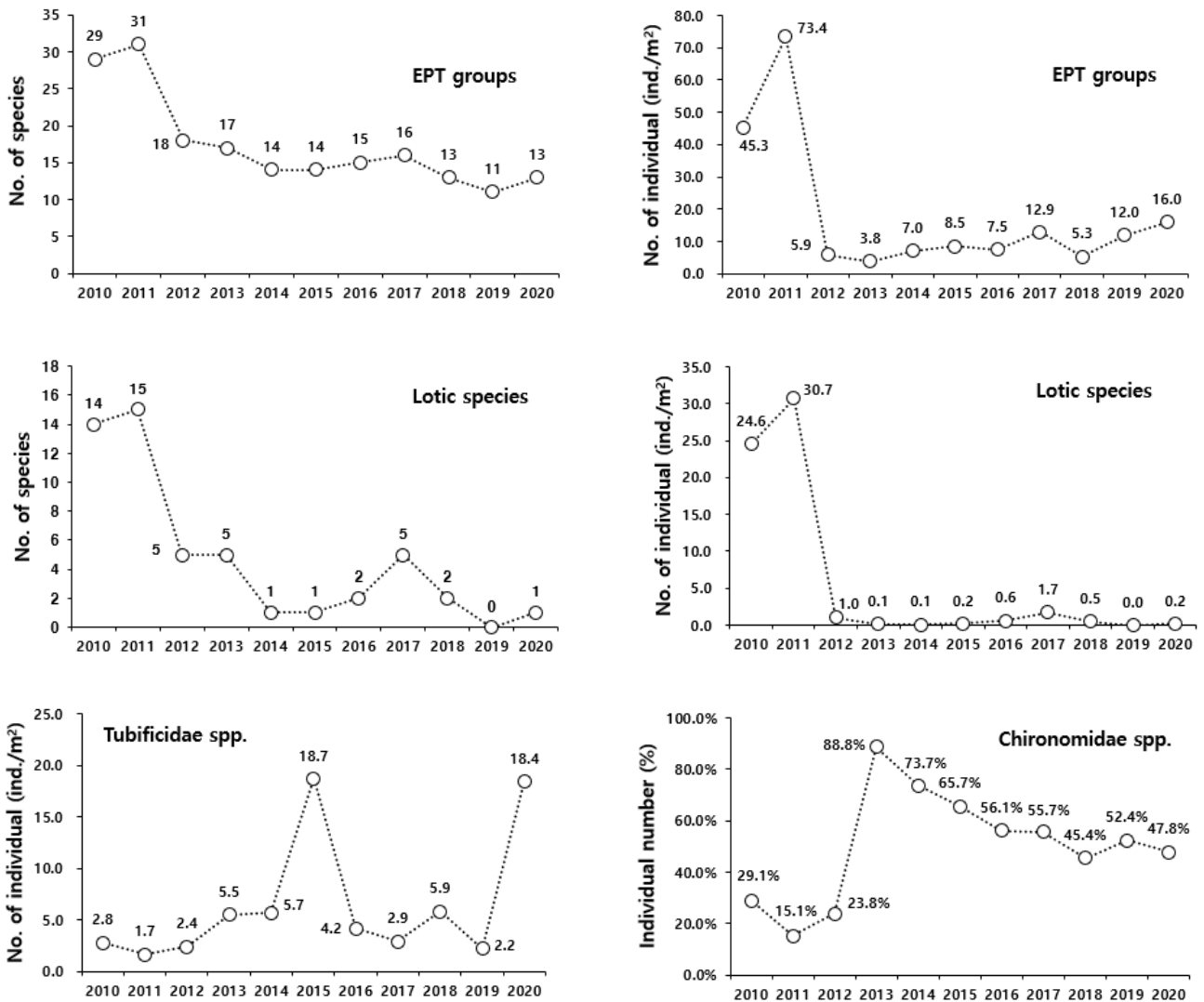


Figure 8. Change in number of species and individuals of benthic macroinvertebrates from 2010 to 2020 in Nakdong river.

나타났다. 강하루살이류, 동양하루살이(*Ephemera orientalis*), 갈따구류(*Chironomidae* spp.)의 출현빈도로 인해 굴파는무리(BU)가 높게 분석되었으며, 육식성인 잠자리류가 상대적으로 높은 비율로 출현하여 기어오르는무리(CB)가 높게 분석되었다. 대부분 용존산소가 낮은 소(Pool)에서 출현하는 분류군으로 수질의 영향을 적게 받는 대기호흡과 직장호흡을 하는 종들로 서식처가 대변되었다. 이와 같은 결과는 낙동강 하천생태계의 서식처는 생물다양성이 풍부한 유수생태계 보다는 보 영향으로 인한 하상의 단순함과 용존산소의 감소로 인한 혐기성 분류군들이 점점 증가하고 서서히 안정화 되고 있다고 판단된다.

4. 2010년부터 2020년까지 주요 분류군의 변화

낙동강 보 구간의 수생태계 모니터링은 공사가 완료된 2012년도 이전에는 2010년을 기점으로 3년에 걸쳐 수행되었으며, 2012년 공사가 완료된 후에는 6차(2013년~2018년)를 거쳐 현재(2021년)까지 수행되고 있다. 10년에 걸쳐 동일한 지점에서의 저서성 대형무척추동물의 변화를 분석하기 위해 과거 조사지점과 같은 지점에서 수행된 지점을 선별하여 분석하였다. 2010년부터 2020년까지의 종수와 개체수는 보 공사 이후(2013년~2015년)에는 증가하는 경향을 나타냈으며, 2016년 이후부터는 종 구성과 분류군별



Years

Figure 9. Change in number of species and composition of major groups and taxa (Tubificidae spp., Chironomidae spp.) from 2010 to 2020 in Nakdong river.

개체수가 급감하면서 다시 안정화된 경향을 나타냈다 (Figure 8). 우점종으로는 2011년과 2012년을 제외하고는 깔따구류(Chironomidae spp.)가 모두 우점하는 것으로 나타났으며, 우점율은 보 공사가 끝난 2013년에 52%로 가장 높았으며, 현재(2020년)까지는 약 40% 수준으로 우점하는 것으로 분석되었다. 수환경 변화에 민감하게 반응하는 하루살이-강도래-날도래(EPT) 그룹은 2011년을 기점으로 종수와 개체수가 대폭 감소하는 경향을 나타냈으며, 굴파는 하루살이(동양하루살이(*Ephemera orientalis*))를 제외한 강도래목과 날도래목은 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 공사의 영향으로 용존산소의 감소와 수위가 높아지고 담수화되면서 서식처와 먹이원이 감소하는 원인으로 나타난다(Mueller *et al.*, 2011). 담수화의 영향은 공사 후 유수역을 선호하는 분류군(하루살이류, 날도래류)이 공사가 완료되는 2012년부터 급감하여 현재까지 회복되지 않고 대부분 전멸한 것으로 나타났으며, 오염물의 지표생물인 실지렁이는 2012년 공사 완료 후 증가 추세를 보였으며, 2015년과 2020년에는 개체수가 폭발적으로 증가하였다(Figure 9). 깔따구류(Chironomidae spp.) 역시 2012년 공사 완료 후에 그 비율이 약 90%까지 폭발적으로 증가하였으며, 현재는 약 50% 수준으로 비율이 유지되고 있는 것으로 분석되었다. 멸종위기야생생물 I급인 귀이빨대칭이(*Cristaria plicata*)(Figure 4)는 2011년 합천창녕보에서 출현한 후 관찰되지 않았으며, 멸종위기야생생물 II급인 노란잔산잠자리는 상주보, 낙단보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 달성보, 창녕합안보에서 2015년까지는 드물게 확인되었으나 그 이후에는 2020년 상주보와 낙단보에서만 확인되었다. 귀이빨대칭이는 국내 담수에서 서식하는 가장 큰 조개로, 수정된 알(egg)이 물고기 몸에 기생하는 특징이 있다(Wu. *et al.*, 2018). 보 구간이 완성되면서 어류의 군집구조가 바뀌고 서식처가 인위적으로 교란되어 지속적으로 번식하고 보존되지 못하였을거라 판단된다. 또한, 모래형 하천에 서식처를 둔 노란잔산잠자리(II급)는 2016년 이후부터 분포 서식처가 급격히 줄었으며, 최근 2020년에 확인된 2개체 역시 매우 협소한 서식처에서 발견되어 추후 정밀한 서식처 보존과 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다.

고 찰

낙동강 보 구간에서 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 97종으로 일반적으로 하천에서 80% 이상 우점하는 수서곤충류는 약 64%(62종)로 낮게 나타났으며, 상대적으로 비곤충류는 약 36%로 높게 나타났다. 우리나라 하천 전역에서 나타나는 저서성 대형무척추동물의 기록은 약 650종으로

보고된 것에 비해(Kwak *et al.*, 2000; Chon *et al.*, 2000) 낙동강 보 구간에서는 약 15%의 분류군이 출현하였다. 분류학적으로 세분화해보면, 국내 수서곤충류는 현재 1,500종 이상이 기록되어 있는데(Jung *et al.*, 2020), 낙동강 보 구간에서 출현한 분류군은 기록된 수서곤충의 약 4% 정도의 수준으로 매우 낮게 분석되었다. 이와 같은 결과는 낙동강 보 준설로 인한 인위적 담수 및 교란(하상 및 온도변화)이 하천생태계에 종 다양성 감소 및 군집구조를 변화시키는 원인이 되었다고 판단된다(Poff and Hart, 2002; Lee *et al.*, 2014; Min and Kong, 2020). 또한, 환경 오염 지표종으로 다양한 서식처를 가지고 먹이 영양 단계에서 중요한 역할을 하는 수서곤충류의 낮은 다양성은 낙동강 보 구간의 현재 상황이 어떻게 유지되고 있는지 설명해 주고 있다(Resh and Jackson, 1993; Baskar and Gawade 2021).

낙동강 보 준설 이후, 유수역에 풍부하게 나타나는 EPT 그룹의 급감과 폭발적으로 증가한 실지렁이와 깔따구류는 낙동강 보 구간 대부분 지역에서 심각한 수질 오염물질이 증가하고 있음을 시사한다(Kerans and Karr, 1994; Barbour *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2005). 파리목의 깔따구류는 유해물질에 따른 노출이 유전자 수준까지 그 영향을 주는 환경 지표종으로 알려져 있다(Mantilla *et al.*, 2018). 수환경에서 생활사가 짧아 독성평가 연구에도 활용되고 있지만, 오염된 지역의 유기물 섭취를 하는 분류군으로 준설 지역이나 교란되어 산소포화도가 낮은 지역에서 대발생할 수 있는 종으로 앞으로 낙동강 보구간의 깔따구류에 대한 세밀한 모니터링과 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

국내 멸종위기야생생물 I급으로 지정된 대형 민물조개 귀이빨대칭이는 2011년 출현 후 관찰되지 않았다. 환경부 적색자료집(National Institute of Biological Resources, 2012)에 따르면 귀이빨대칭이는 낙동강 중·하류에 집중적으로 분포하고 퍼져나가고 있는 것으로 알려져 있는데, 단순한 모니터링에 더하여 멸종위기종의 서식이 확인된 지점에 대해서는 정밀조사가 수행되어 보존 및 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다. 멸종위기야생생물 II급인 노란잔산잠자리는 하천의 퇴적 모래가 쌓인 곳에서 약 2년간 생활하는 것으로 보고되고 있으며(Jung, 2011), 모래 하천의 지표종으로 알려져 있다. 최근 연구결과에 따르면(Lee *et al.*, 2019), 낙동강의 최상류부터 총 15개의 중권역에 분포하고 있는 것으로 나타났지만, 하상공사 골재 채취 등의 인위적 요인으로 그 서식처가 감소하고 있는 것으로 파악되었다. 낙동강 보구간 모니터링에서도 2015년 이후 관찰이 되지 않고 2020년 상주시(상주보, 낙단보) 지점에서만 매우 소수의 개체가 관찰되어 과거 서식 지점(경북 안동시, 상주시, 의성군, 성주군; 경남 창녕군, 합천군, 의령군)보다는 매우 축소되어 특별한 대책을 마련하지 않으면, 이른 시일 내에

서식지 전멸할 가능성이 있다고 판단된다.

낙동강 보구간에서 분석된 군집안정성은 총 31개의 분류군이 적용되었으며, 회복력과 저항력이 모두 높은 특성군이 총 21개의 분류군으로 67.7%를 차지하고 있어 이동성이 높고 빠른 생식으로 회복력의 전략을 선택하고 있는 분류군이 주로 출현하는 것으로 나타났다. 이는 자연형보다는 도시화 비율이 높은 공간적인 다양성이 낮은 서식지에서 나타나는 특성으로 분석되었다(Mondy *et al.*, 2016; Moon *et al.*, 2020). 기능군 역시 하천연속성 개념과는 상반된 잡아먹는무리(PR)가 높고 걸러먹는무리(FC)는 낮게 나타났으며, 굴파는무리(BU)는 높게 붙는무리(Clingers, CG)는 낮게 나타났다. 이러한 결과는 조사지점의 특성을 반영하여 서식처가 매우 단순하며, 섭식할 수 있는 부식질 먹이 자원(CPOM: Coarse Particulate Organic Matter, FPOM: Fine Particulate Organic Matter)의 순환이 정적으로 나타난 결과뿐만 아니라, 물리적 교란에 따른 내성도가 높은 분류군으로 안정화되고 있는 것으로 판단된다(Rabeni *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2016).

전체적으로 낙동강 보구간의 저서성 대형무척추동물은 현재 준설 이후 서식처와 출현하는 분류군이 안정되었다고 판단된다. 앞으로 일부 분류군은 서식처 전멸과 특정종의 대발생으로 다양성과 그에 따라 분석되는 건강성 역시 매우 낮게 유지될 것으로 파악된다. 따라서 다양한 먹이 자원과 현재까지 진행된 평가를 바탕으로 하천 생물들이 서식할 수 있는 공간을 분석하고 위협되는 요인을 개선할 구체적 방안이 제시되어야 할 것으로 판단된다. 현재 낙동강 보 구간에서는 유기물과 영양물질 등이 과도하게 증가하여 유지되고 있다. Kim *et al.*(2016)에 따르면, 저서성 대형무척추동물의 군집의 다양성과 건강성이 증진되기 위해서는 유기물, 부유물질, 영양물질 등의 모든 농도가 감소하여야 한다고 분석하였다. 하지만 이런 관련 농도가 감소되는데 있어 하천변의 친수활동 및 하천복원 공사가 계속해서 행해지면 단순한 군집으로 회복되지 못할 것으로 판단된다. 아직 낙동강 보 개방에 대한 찬반 논란이 뜨겁고 현재 낙동강의 보는 개방되지 않고 있다. 보 개방 또는 철거에 대한 사전 자료와 사례에 더하여 현재 낙동강의 10년간 생물과 환경 변화상을 비교하여 낙동강 보 구간의 환경을 개선하고 수생태계 조사와 평가에 올바른 방향성을 제시할 필요성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을

받아 수행하였습니다(NIER-2020-04-02-034)

REFERENCES

- 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 Environmental Ecology* 33(5): 515-524. (in Korean with English abstract)
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling(1999) Rapid bioassessment protocols for use in wadeable streams and rivers. *Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish* (2nd ed.). US Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC. EPA 841-B-99-002.
- Baskar, K. and S. Gawade(2021) Aquatic insects and their importance in assessing ecosystem health. *MOJ Ecology and Environmental Sciences* 6(4): 136-137.
- Carpenter-Bundhoo, L., G.L. Butler, N.R. Bond, S.E. Bunn, I.V. Reinfelds and M.J. Kennard(2020) Effects of a low-head weir on multiscaled movement and behavior of three riverine fish species. *Scientific Reports* 10: 6817.
- Choe L.J., K.J. Cho, M.S. Han, M.K. Kim, S.K. Choi, H.S. Bang, J. Eo, Y.E. Na and M.H. Kim(2016) Benthic macroinvertebrate biodiversity improved with irrigation ponds linked to a rice paddy field. *Entomological Research* 46(1): 70-79.
- Chon, T.S., I.S. Kwak and Y.S. Park(2000) Pattern recognition of long-term ecological data in community changes by using artificial neural networks: Benthic macroinvertebrates and chironomids in a polluted stream. *Korean Journal of Limnological Society* 23(2): 89-100.
- Eng, K., D.M. Wolock and D.M. Carlisle(2013) River flow changes related to land and water management practices across the conterminous united states. *Science of the Total Environment* 463: 414-422.
- Jung, K.S.(2011) *Odonata Larvae of Korea*. Nature and Ecology, Seoul, 399pp. (in Korean)
- Jung, S.W., S.H. Kwang and J.C. Jeong(2020) Preliminary Checklist and Current Status of Aquatic Insects in Korea National Park. *Entomological Research Bulletin* 36(1): 27-43. (in Korean with English abstract)
- Kerans, B.L. and J.R. Karr(1994) A Benthic Index of Biotic Integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications* 4: 768-785.
- Kil, H.K. and Y.J. Bae(2012) Effects of low-head dam removal on benthic macroinvertebrate communities in a Korean stream. *Animal Cells and Systems* 16(1): 69-76.
- Kil, H.K., D.G. Kim, S.W. Jung, I.K. Shin, K.H. Cho, H.S. Woo and Y.J. Bae(2007) Changes of Benthic Macroinvertebrate

- Communities after a Small Dam Removal from the Gyeongan Stream in Gyeonggi-do, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* 35(4): 385-393. (in Korean with English abstract)
- 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 Limnology* 43(2): 190-198. (In Korean with English abstract)
- Kim, D.H., T.S. Chon, G.S. Kwak, S.B. Lee and Y.S. Park(2016) Effects of land use types on community structure patterns of benthic macroinvertebrates in streams of urban areas in the South of the Korea Peninsula. *Water* 8: 187.
- Kim, J.S., H.G. Lee and J.K. Choi(2013) An Ecological Comparison of Benthic Macroinvertebrate Community in Downstream Region of Large Dams. *Korean Journal of Environmental Ecology* 27(1): 52-63. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y., S.H. Lee, K.L. Lee, S.Y. Noh, Y.N. Shin, S.W. Lee, J.K. Lee and D.H. Won(2018) Spatio-temporal Distribution Patterns of Lotic Benthic Macroinvertebrate Communities in NamhanRiver Weir Section. *Korean Journal of Ecology and Environment* 51(4): 331-344. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.C., S.P. Chun and J.K. Lee(2013) Invertebrates in Korean Freshwater Ecosystems. Geobook, Seoul, 483pp. (in Korean)
- Kim, P.J., J.Y. Kim, S.H. Son, D.H. Won and D.S. Kon(2016) Comparative Analysis of Benthic Macroinvertebrate Communities Before and After the Restoration Project in the Kyoungan Stream. *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(1): 15-22. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.K., Y.J. Bae, G.S. Ryu, D.H. Yeon, S.K. Lee, S.H. Lee, J.H. Lee and K.J. Jo(2005) Invertebrate Bioindicator and Environment Risk Assessment. Jeonghaengsa, Seoul, 211pp. (in Korean with English abstract)
- Kong, D.S. and J.Y. Kim(2016) Development of benthic macroinvertebrates streambed index (BMSI) for bioassessment of stream physical habitat. *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(1): 1-14. (in Korean with English abstract)
- Kwon, Y.J., J.Y. Kim, P.J. Kim, J.W. Kim, J.K. Lim and D.S. Kong(2020) Spatial Distribution of Benthic Macroinvertebrates at Three River Weirs in The Namhan River. *Journal of Korean Society on Water Environment* 36(1): 36-47. (in Korean with English abstract)
- Kwak, I.S., G. Liu, Y.S. Park and T.S. Chon(2000) Community Patterning of Benthic Macroinvertebrates in Streams of South Korea by Utilizing an Artificial Neural Network. *Korean Journal of Ecology and Environment* 33: 230-243. (in Korean with English abstract)
- Kwon, O.K.(1990) Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea vol.32 Mollusca(I). Ministry of Education Republic of Korea, 446pp. (in Korean)
- Kwon, S.J., Y.C. Jun and J.H. Park(2013) Benthic Macroinvertebrates. *Nature and Ecology*, Seoul, 791pp. (in Korean)
- Lee, M.J., E.W. Seo, J.J. Yu and J.E. Lee(2014) Community Fluctuation of the Benthic Macroinvertebrates before and after the Construction of Nakdan Weir. *Korean Journal of Environment and Ecology* 47(4): 328-336. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., K.I. Suh, S.K. Kim, J.H. Song, J.Y. Kim, H.S. Shin and H.W. Cho(2019) Distribution Status and Analysis of Environmental Factors about *Macromia daimoji* (Odonata: Macromiidae) in the Nakdonggang River. *Entomological Research Bulletin* 35(1): 32-38. (in Korean with English abstract)
- Malmqvist, B.(2002) Aquatic invertebrates in riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47: 679-694.
- Mantilla, J.G., L. Gomes and M.A. Cristancho(2018) The differential expression of Chironomus spp genes as useful tools in the search for pollution biomarkers in freshwater ecosystems. *Briefings in Functional Genomics* 17: 151-156.
- Margalef, R.(1958) Information theory in ecology. *Generation System* 3: 36-71.
- McNaughton, S.J.(1967) Relationship Among Functional Properties of California Glassland. *Nature* 216: 168-169.
- Merritt, R.W., K.W. Cummins and M.B. Berg(2008) An Introduction to the Aquatic Insects of North America (4th ed.). Kendall/Hunt Publish. Co. Dubuque, Iowa, 1158pp.
- Min, J.K. and D.S. Kong(2020) Distribution patterns of benthic macroinvertebrate communities based on multispatial-scale environmental variables in the river systems of Republic of Korea. *Journal of Freshwater Ecology* 35(1): 323-347.
- Mondy, C.P., I. Muñoz and S. Dolédec(2016) Life-history strategies constrain invertebrate community tolerance to multiple stressors: A case study in the Ebro basin. *Science of the Total Environment* 572:196-206.
- Moon, M.Y., C.W. Ji, D.S. Lee, D.Y. Lee, S.J. Hwang, S.Y. Noh, I.S. Kwak and Y.S. Park(2020) Characterizing Responses of Biological Trait and Functional Diversity of Benthic Macroinvertebrates to Environmental Variables to Develop Aquatic Ecosystem Health Assessment Index. *Korean Journal of Ecology and Environment* 53(1): 31-45. (in Korean with English abstract)
- Moon, S.C., K.B. Park and S.S. Ahn(2016) Analysis of Flow Characteristics in Upstream Channel depending on Water Gate Operation of Nakdan Multi Functional Weir. *Journal of Environmental Science International* 25(4): 491-504. (in Korean with English abstract)
- 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.
- National Institute of Biological Resources(2012) Red data book of endangered Mollusks in Korea. National Institute of Biological Resources, Incheon, 205pp. (in Korean)
- 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)
- 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)
- Park, J.S., D. Wang and W.H. Lee(2018) Evaluation of weir construction on water quality related to algal blooms in the Nakdong River. *Environmental Earth Sciences* 77: 408.
- Pielou, E.C.(1975) *Ecological diversity*. Wiley and Sons, New York, 165pp.
- Poff, N.L. and D.D. Hart(2002) How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience* 52(8): 659-668.
- Poff, N.L. and J.K.H. Zimmerman(2010) Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology* 55: 194-205.
- Poff, N.L., J.D. Olden, D.M. Merritt and D.N. Pepin(2007) Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 5732-5737.
- Poulos, H.M., K.E. Miller, R. Heinemann, M.L. Krackowski, A.W. Whelchel and B. Chernoff(2019) Dam Removal Effects on Benthic Macroinvertebrate Dynamics: A New England Stream Case Study (Connecticut, USA). *Sustainability* 11(10): 2875.
- Rabeni, C.F., K.E. Doisy and L.D. Zweig(2005). Stream Invertebrate Community Functional Responses to Deposited Sediment. *Aquatic Sciences* 67: 395-402.
- Resh, V.H. and J.K. Jackson(1993) Rapid assessment approaches to biomonitoring using benthic macroinvertebrates. In: D.M. Rosenberg and V.H. Resh(eds.), *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. Chapman and Hall, New York, pp.195-233.
- Ro, T.H. and D.J. Chun(2004) Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis. *The Korean Journal of Limnology* 37(2): 137-148. (in Korean with English abstract)
- Ro, T.H.(2002) Categorization and Ecological Importance of Functional Feeding Groups as Essential Units in Lotic Ecosystems. *Bulletin of the KACN* 21: 67-93. (in Korean)
- Rosenberg, D.M. and V.H. Resh(1993) *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Chapman and Hall, New York, 488pp.
- Seo, D.I., G.S. Nam, S.H. Lee, E.H. Lee, M. Kim, J.Y. Choi, J.H. Kim and K.H. Chang(2013) Plankton Community in Weir Section of the Nakdong River and Its Relation with Selected Environmental Factors. *Korean Journal of Environment and Biology* 31(4): 362-369. (in Korean with English abstract)
- Shannon, C.E. and W. Weaver(1963) *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana, pp.1-177.
- Won, D.H., S.J. Kwon and Y.C. Jun(2005) *Aquatic Insects of Korea*. Korea Ecosystem Service, Seoul, 415pp. (in Korean)
- Wu, R.W., T.H. Chen, D.T. Zanatta, S. Ouyang and X.P. Wu(2018) Reproductive traits of nine freshwater mussel species (Mollusca: Unionidae) from Poyang Lake, China. *Journal of Molluscan Studies* 84: 324-332.
- Yoon, I.B.(1988) *Illustrated Encyclopedia of Fauna & Flora of Korea Vol. 30 Aquatic Insects*. Ministry of Education Republic of Korea, 840pp. (in Korean)
- Yoon, I.B.(1995) *Aquatic Insects of Korea*. Junghaengsa, Seoul, 262pp. (in Korean)