

여름철 집중 강우량 변동에 의한 저서성 대형무척추동물 군집구성의 변화

홍 철^{1,2} · 김원석² · 김진영³ · 노성유¹ · 박지형¹ · 이재관¹ · 곽인실^{2,*}

¹국립환경과학원 물환경연구부, ²전남대학교 해양기술학부 환경해양학전공, ³국립생태원 멸종위기종복원센터

Change of Benthic Macroinvertebrates Community Composition Following Summer Precipitation Variance. Hong Cheol^{1,2} (0000-0002-5444-7743), Won-Seok Kim² (0000-0003-3368-3891), Jin-Young Kim³ (0000-0002-7146-4510), Seong-Yu Noh¹ (0000-0001-6396-4497), Ji-Hyung Park¹ (0000-0001-8025-4833), Jae-Kwan Lee¹ (0000-0002-1399-8688) and In-Sil Kwak^{2,*} (0000-0002-1010-3965)(¹National Institute Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea; ²Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea; ³National Institute of Ecology, Research Center for Endangered Species, Republic of Korea)

Abstract To investigate the changes of dominant species of benthic macroinvertebrates following summer precipitation variance, we surveyed twenty five sites of the main Seomjin River in May and September in 2014 and 2015. The temperature, precipitation, water quality factors and substrate composition, water depth and flow velocity, which are important factors in benthos habitat environment, were collected and measured. There is not much difference of the cumulative precipitation (CP) between 2014 (2,322.1 mm) and 2015 (2,371.0 mm) in May. However CP in september was decreased by more than half in 2015 (3,726.1 mm) than 2014 (7,678.2 mm). Due to washing effect by summer precipitation, total number of species and individuals for benthic macroinvertebrates were higher in May than in September. Chironomidae spp. and *Choroterpes altiocularis* were dominated in May, *Ecdyonurus levis*, *Ecdyonurus kibunensis* were dominated in September. As a result of correlation analysis between community indices and environment factors, it was found that there is a significant correlation with flow velocity and substrate compositions. According to the results of cluster analysis and PCA based on environment factors and dominant species of benthic macroinvertebrates in Seomjin River, it was divided into four groups following CP and MT. *Ecdyonurus levis* and *Ecdyonurus kibunensis* reflect the effect of the decrease in summer precipitation.

Key words: summer precipitation variance, benthic macroinvertebrates, dominant species

서론

하천생태계의 자연적 교란 요인 중 강우(flooding)는 하

상구성의 변화나 수심과 유속 등 물리적 환경을 변화시킨다(Stanley and Fisher, 1992; Old *et al.*, 2003; Parasiewicz *et al.*, 2012). 최근 연구에서 평균기온의 증가와 함께 강우의 빈도가 줄어들고 이로 인해 가뭄의 기간과 증발량 증가를 발생시킨다고 보고되었으며(Leibowitz *et al.*, 2014; Praskiewicz and Bartlein, 2014; Prudhomme *et al.*, 2014), 특히 여름철 집중강우(Monsoon rainfall)는 물리적 환경

Manuscript received 18 October 2019, revised 27 November 2019, revision accepted 27 November 2019
* Corresponding author: Tel: +82-61-659-7148, Fax: +82-61-659-7149, E-mail: iskwak@chonnam.ac.kr

뿐만 아니라 수환경에 서식하는 생물군집 변화를 일으키는 요인으로 작용한다(Brewin *et al.*, 2000; Bouillon *et al.*, 2004; Kwak *et al.*, 2004; Mesa, 2012; Hong *et al.*, 2017). 따라서 하천생태계의 환경 변화를 파악하기 위해 생물군집의 분포 특성을 파악하는 것은 생물과 환경의 통합평가를 위한 주요 요소이다(Shi *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2016).

하천에 서식하는 저서성 대형무척추동물은 가장 풍부하고 다양한 군집 구성을 이루고 있으며(Rosenberg and Resh, 1993), 생태계 내 저차 소비자로서, 종에 따라 선호하는 서식환경의 뚜렷한 차이를 보인다(Shearer *et al.*, 2015). 또한 긴 생활사, 군집의 다양성, 낮은 이동성, 채집의 용이성, 종에 따른 오염도에 대한 내성 등의 특성으로 수환경평가의 지표생물로서 많은 연구가 이루어지고 있다(Reynoldson *et al.*, 1997; Arimoro and Muller, 2010; Gonzalo and Camargo, 2013; Piggott *et al.*, 2015; Graeber *et al.*, 2017).

본 연구의 조사 지역인 섬진강은 길이 212 km, 유역면적 4,896.5 km²로 전라북도 진안군 백운면과 장수군 장수읍의 경계인 팔공산에서 발원하여 전라도의 동쪽 지리산 기슭을 지나 임실, 순창, 곡성, 구례 등 전라남·북도를 거쳐 남해의 광양만으로 흘러간다. 섬진강 수계는 자연 그대로의 생태경관을 유지한 곳이 많으며, 지리적 위치와 계절에 따라 강우의 차이가 뚜렷하게 나타나 저서성 대형무척추동물 군집분포를 연구하기에 좋은 하천이다.

저서성 대형무척추동물의 지표적 특성을 이용하여 수질오염, 보 구간 생태계 등 인위적 교란에 대한 군집 특성에 대한 연구가 보고되고 있으나(Choi *et al.*, 2012; Shin *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014a, b; Baek *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2018), 자연적 교란 요인에 대한 연구는 부족한 실정이다(Kwak *et al.*, 2004; Hong *et al.*, 2017). 이에 본 연구에서는 섬진강 본류 25지점을 대상으로 여름철 집중 강우량의 감소를 살펴보고, 이로 인한 저서성 대형무척추동물의 군집 분포를 파악해 보고자 한다. 그리고 저서성 대형무척추동물의 자연적 서식처를 구성하는 하상구성과 수질, 수리학적 요인 사이의 관계를 분석하여 조사 시기별 차이를 살펴 보고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구 조사지 및 조사시기

조사지점은 섬진강 본류 25지점으로 상류인 진안 4지점(J1~4)에서부터 임실 6지점(I1~6), 순창 3지점(S1~3).

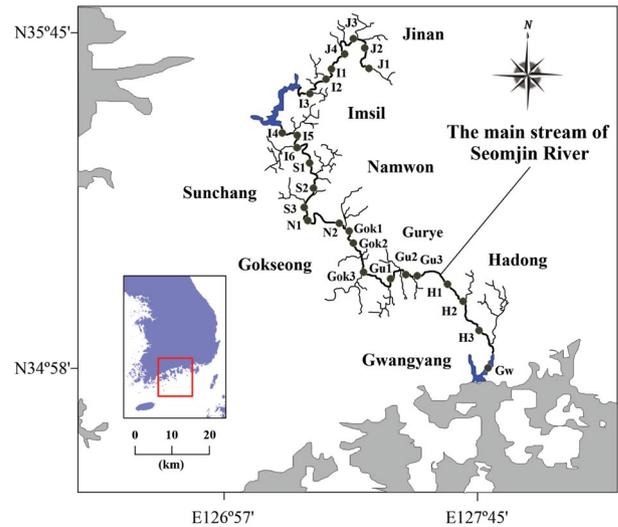


Fig. 1. Location of the survey area at Seomjin River (J: Jinan, I: Imsil, S: Sunchang, N: Namwon, Gok: Gokseong, Gu: Gurye, H: Hadong, Gw: Gwangyang).

남원 2지점(N1, 2), 곡성 3지점(Gok1~3), 구례 3지점(Gu1~3), 하동 3지점(H1~3), 하류인 광양(Gw)이다(Fig. 1). 조사시기는 2014년과 2015년 여름철 집중강우 전인 6월과 강우 후인 9월 년 2회씩 2년에 걸쳐 총 4회 조사하였다.

2. 자료 수집

현장 조사에서 저서성 대형무척추동물의 현장 조사는 수심 50 cm 이하의 여울(riffle) 지점에서 Surber net (30×30, 1 mm mesh size)을 사용하여 총 3회 정량 채집하였다. 채집된 생물은 검색도설(Yoon, 1995; Merritt and Cummins, 1996; Won *et al.*, 2008; Kwon *et al.*, 2013)을 참고하여 종 수준으로 동정하였으며, 출현 개체수는 개체밀도(individual m⁻²)로 환산하여 분석에 이용하였다.

하상구성은 현장조사와 병행하여 수행하였으며, 입자의 크기에 따라 진흙 이하(<0.063 mm), 모래(0.063~2 mm), 자갈(16~64 mm), 큰 자갈(64~256 mm), 큰 돌(>256 mm)로 구분하였다. 또한 조사지점의 유속, 수심을 측정하였다. 수질항목인 수온, 유속, 수심, pH, turbidity, conductivity, biochemical oxygen demand, dissolved oxygen, ammonium nitrogen, total nitrogen, chlorophyll-a는 환경부 물환경정보 시스템(<http://water.nier.go.kr>)의 수질측정망 자료를 이용하였다.

기온과 강우 자료는 기상청(www.kma.go.kr)의 진안, 임실, 순창, 남원, 곡성, 구례, 하동, 광양 측정소에 대한 일별

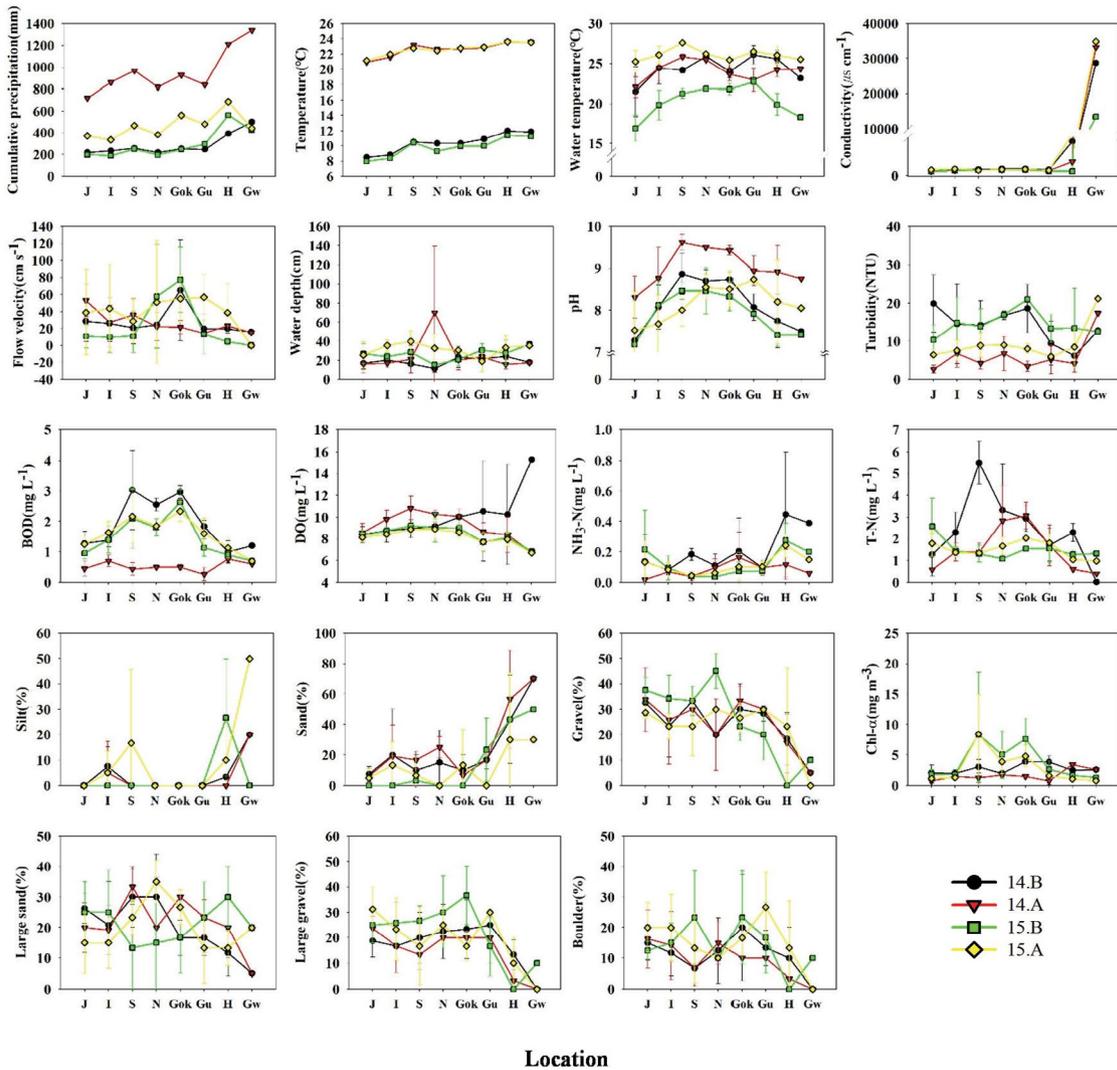


Fig. 2. Climatic factors, water quality factors, bed composition, and other environment factors in Seomjin River. The alphabet shown on the x-axis indicates a location (J: Jinan, I: Imsil, S: Sunchang, N: Namwon, Gok: Gokseong, H: Hadong, Gu: Guryu, Gw: Gwangyang). The alphabet shown in the legend indicates the period of investigation (14R: Pre-flooding in 2014, 14O: Post-flooding in 2014, 15R: Pre-flooding in 2015, 15O: Post-flooding in 2015).

자료를 대상으로 기온은 일 평균기온, 강우는 일 누적강우량을 이용하였다. 자료 분석을 위해 기온은 강우 전인 2월에서 5월까지의 평균값을, 강우 후인 6월에서 9월까지의 평균값을 각각 5월의 평균기온과 9월의 평균기온으로 산정하였다. 강우량은 강우 전인 2월에서 5월까지의 일별 강우량을 합산하여 5월의 누적강우량(CP: cumulative precipitation)을 산출하였고, 같은 방법으로 강우 후인 6월에서 9월까지의 일별 강우량을 합산하여 9월의 CP를 산정하였다.

3. 생물지수의 산출

생물지수는 현장조사에서 정량 채집된 저서성 대형무척

추동물에 대해서 우점도지수(Dominant index)는 McNaughton's dominant index (DI)를 이용하여 산출하였다. 다양도지수는 Margalef의 정보이론에서 유도된 Shannon-Weaver function (H') (Shannon and Weaver, 1949)을 Lloyd & Gheraldi가 변형한 공식을 이용하였다. 종풍부도지수(Species richness Index: RI)는 Margalef (1958)의 지수를, 균등도지수(Evenness Index: J)는 Pielou (1975)의 지수를 적용하였다. 수환경의 건강성을 평가하기 위하여 생물학적 수질평가 방법으로 알려진 저서생물지수(BMI, Benthic Macroinvertebrate Index)를 이용하였다. 생물학적 건강성 평가는 환경부/국립환경과학원의 '생물측정망 조사 및 평

Table 1. Summary of the community indices of benthic macroinvertebrates in Seomjin River.

Indices	Jinan		Imsil		Sunchang		Namwon		Gokseong		Gurye		Hadong		Gwayang		Average	
	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.
2014																		
Dominance (DI)	0.612	0.457	0.605	0.592	0.715	0.515	0.601	0.569	0.470	0.617	0.635	0.583	0.588	0.441	0.550	0.903	0.597	0.585
Diversity (H')	2.493	3.376	2.637	2.554	2.114	3.040	2.829	2.772	3.498	2.821	2.559	2.302	2.696	3.122	2.446	1.224	2.659	2.651
Richness (RI)	2.724	3.557	2.752	2.282	2.562	2.425	3.108	2.647	3.549	2.753	2.581	1.704	2.513	2.434	1.394	0.843	2.648	2.331
Evenness (J)	0.561	0.753	0.673	0.642	0.481	0.788	0.609	0.658	0.717	0.652	0.590	0.913	0.803	0.869	0.871	0.527	0.663	0.725
BMI	75	76	63	65	70	70	75	78	80	81	67	65	66	68	40	52	67.1	69.3
	B	B	C	C	B	B	B	B	A	A	B	B	B	B	D	C		
2015																		
Dominance (DI)	0.399	0.368	0.521	0.364	0.517	0.508	0.538	0.475	0.577	0.359	0.452	0.428	0.862	0.680	1.000	1.000	0.608	0.523
Diversity (H')	3.424	3.771	3.051	3.387	2.944	2.717	3.210	3.382	3.220	3.678	3.266	3.454	1.522	1.957	0.918	0.811	2.694	2.895
Richness (RI)	3.135	3.823	2.988	2.979	3.335	1.960	3.655	3.497	3.903	3.610	2.990	3.265	0.749	1.851	0.415	0.371	2.646	2.669
Evenness (J)	0.833	0.835	0.737	0.873	0.643	0.819	0.675	0.762	0.675	0.869	0.752	0.792	0.640	0.543	0.918	0.811	0.734	0.788
BMI	75	85	69	78	77	80	79	83	84	84	72	86	50	82	78	10	73.0	73.6
	B	A	B	B	B	B	B	A	A	A	B	A	C	A	B	E		

가 지침'에 따라 계산하였다(MOE/NIER, 2013).

4. 통계분석

섬진강 본류의 저서성 대형무척추동물 군집과 환경요인과의 상관성을 파악하기 위하여 IMB SPSS Statistic (ver. 21.0) 프로그램을 이용하여 Pearson's 상관분석(Correlation analysis)을 실시하였고, 유의수준(p-value)은 $p < 0.01$ 로 하였다. 지역별 특성을 분석하기 위하여 집괴분석(Cluster analysis)을 실시하였으며, Ward linkage method과 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 적용하였다. 군집분석에 따른 그룹별 가장 영향을 준 환경요인을 분석하기 위해 주성분분석(PCA, Principal Component Analysis)을 이용하였다. 분석 전, 각 조사지점의 모든 데이터는 아래 식에 따라 Min-Max range normalization을 이용하여 전처리 하였다.

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

x_{ij} = 제i행, 제j열의 데이터 값

Min(x) = 데이터들의 최소값

Max(x) = 데이터들의 최대값

결 과

1. 지리적 위치에 따른 지역별 환경요인

2014년과 2015년 환경요인의 변화를 연도별로 살펴 보았다(Fig. 2). 누적강우량(CP: cumulative precipitation)

은 2014년 집중 강우전인 5월에 총 2,322.1 mm, 집중 강우 후인 9월에 총 7,678.2 mm(지역별 CP의 최소~최대값, 717.5~1,339.5 mm)로 5,000 mm 이상 증가하였으나, 2015년에는 5월 2,371.0 mm, 9월 3,726.1 mm (190.4~563.0 mm)로 1,355.1 mm가 증가하였다. 평균기온(MT: mean temperature)은 5월(8.0~12.0°C)이 9월(20.9~23.6°C)보다 12°C가 높았으며, 각 연도별로 비슷하였다. MT, CP는 상류인 진안부터 하류인 광양까지 점차 증가하는 경향을 보였다. 수온은 2014년 5월(24.3°C±1.5)과 9월(24.1°C±1.2)에 큰 차이를 보이지 않았으나, 2015년 5월(20.3°C±2.0)에서 9월(26.1°C±0.8)로 5.8°C 증가하였다. 수심은 2014년 9월 남원에서 평균 69.9 cm로 가장 높게 나타났다. 수질요인 중 DO는 2014년 5월을 제외하고 7.7~10.3 mg L⁻¹의 범위를 보였으며, 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. BOD는 2014년 5월(1.9±0.8 mg L⁻¹)과 9월(0.5±0.2 mg L⁻¹)에 1.4 mg L⁻¹ 감소하였으나, 2015년 5월(1.5±0.7 mg L⁻¹)에서 9월(1.6±0.5 mg L⁻¹)로 큰 차이를 보이지 않았다. pH는 2014년 5월 8.1±0.6에서 9월 9.0±0.5로 증가하였으나, 2015년은 큰 차이를 보이지 않았다. BOD와 pH는 상류와 하류보다 중류 지점에서 수치가 높아지는 경향을 보였다. 하상구성 중 진흙 이하와 모래는 하류로 갈수록 증가하였으나, 큰 자갈, 큰 돌은 감소하는 경향을 보였다.

2. 집중 강우에 따른 저서성 대형무척추동물 군집의 변화

조사시기별로 출현한 종의 개체밀도를 서열에 따라 정리하였다(Fig. 3). 강우 전인 5월이 강우 후인 9월보다 평균

개체밀도와 평균종수가 더 많았다. 개체밀도는 2014년 5월 (1,650.3 ± 1087 ind. m⁻²)에서 9월 (504.9 ± 346.5)로 1,145.3 ind. m⁻²가 감소하였으며, 2015년 5월 (663.9 ± 432.3 ind. m⁻²)에서 9월 (319.4 ± 243.7)로 344.5 ind. m⁻²가 감소하였다. 종 수는 2014년 5월 (19.9 ± 6.5)에서 9월 (15.2 ± 5.9)로 평균 5종이 감소하였으며, 2015년 5월 (18.2 ± 9.6)에서 9월 (16.2 ± 7.8)로 평균 2종이 감소하였다. 강우량이 많았던 2014년에 비해 강우량이 적었던 2015년에 종수와 개체밀

도의 감소율이 낮았다. 지역별로 중류부인 순창, 남원, 곡성, 구례가 상류부인 진안과 임실, 하류부인 하동과 광양보다 개체밀도의 감소가 더 크게 나타났다.

섬진강에서 출현한 우점종을 대상으로 강우 전인 5월과 강우 후인 9월의 변화를 살펴보았다(Fig. 4). 먼저 강우량 차이가 많았던 2014년의 경우, 5월은 깔따구류(Chironomidae spp.)가 53.3%를 차지하여 가장 우점하였고, 세갈래하루살이(*Choroterpes altioculus*)가 25.2%로 우점하였다. 9월은 유수성 종(Merritt and Cummins, 2008)인 네점하루살이(*Ecdyonurus levis*)와 두점하루살이(*Ecdyonurus kibunensis*)가 각각 34.6%, 20.8%로 높은 비율을 차지하였으며, 중류인 남원, 곡성에서 높은 출현비율을 보였다. 강우량 차이가 적었던 2015년의 경우, 5월은 깔따구류가 38.4%로 가장 우점하였고, 세갈래하루살이가 29.3%로 우점하였다. 9월은 세갈래하루살이가 30.9%로 가장 우점하였고, 네점하루살이가 29.7%로 우점하였다. 특히 네점하루살이는 강우 후에 중류부인 순창, 남원, 곡성에서 집중강우 이후 가장 우점하는 것으로 나타났다.

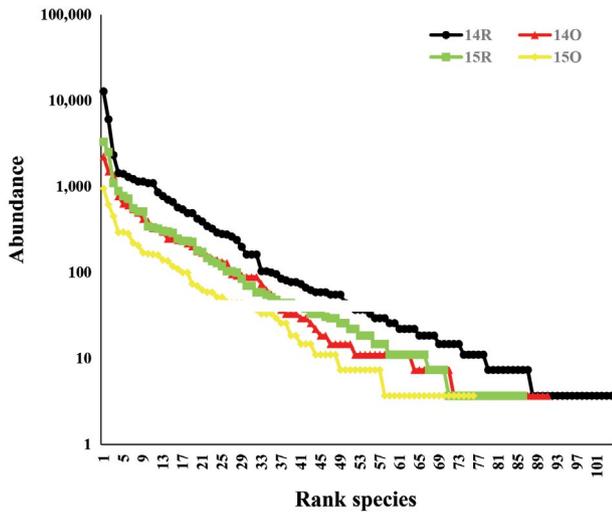


Fig. 3. The species rank abundance of benthic macroinvertebrates before and after flooding in Seomjin River. The alphabet shown in the legend indicates the time of investigation (14R: Pre-flooding in 2014, 14O: Post-flooding in 2014, 15R: Pre-flooding in 2015, 15O: Post-flooding in 2015).

3. 생물지수의 변화

우점도지수 (DI)와 다양도지수 (H'), 종풍부도지수 (RI)는 2014년에 5월 (DI: 0.597, H': 2.659, RI: 2.648)이 9월 (DI: 0.585, H': 2.651, RI: 2.331)보다 근소하게 높았으나, 균등도지수 (J), 저서생물지수 (BMI)는 5월 (J: 0.663, BMI: 67.1)보다 9월 (J: 0.725, BMI: 69.3)에 더 높았다. 2015년에 우점도지수는 5월 (DI: 0.608)이 9월 (DI: 0.523)보다 더 높았으

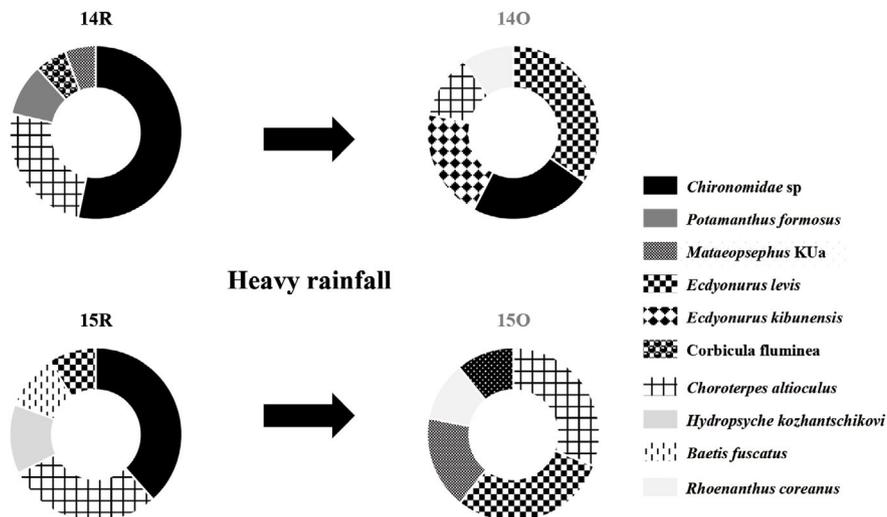


Fig. 4. Changes of dominant species of benthic macroinvertebrates in Seomjin River (14R: Pre-flooding in 2014, 14O: Post-flooding in 2014, 15R: Pre-flooding in 2015, 15O: Post-flooding in 2015).

Table 2. The result of correlation analysis between average community indices and environment factors.

	CP	MT	WT	DO	pH	Conductivity	Turbidity	BOD	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-N	Chl-a	WD	FV	Silt	Sand	Large sand	Gravel	Large gravel	Boulder
CP	1.000	0.688	0.154	0.086	0.516	0.089	-0.488	-0.569	-0.235	-0.240	-0.176	-0.033	-0.032	0.050	0.347	0.049	-0.165	-0.370	-0.244	
Dominance (DI)	0.084	-0.076	-0.137	0.047	0.008	0.302	0.105	-0.091	0.158	0.001	0.029	0.103	-0.342	-0.342	0.404	-0.063	-0.340	-0.339	-0.382	
Diversity (H')	-0.122	-0.001	0.118	-0.049	0.069	-0.314	-0.035	0.143	-0.185	0.046	0.005	-0.079	-0.114	0.407	-0.387	0.085	0.417	0.428	0.402	
Richness (RI)	-0.237	-0.140	0.064	-0.040	0.123	-0.329	0.111	0.247	-0.201	0.096	0.062	0.052	-0.178	0.445	-0.454	0.076	0.557	0.524	0.360	
Evenness (J)	0.076	0.201	0.083	-0.034	-0.042	0.016	-0.190	-0.109	-0.064	-0.144	-0.170	-0.181	0.050	0.169	-0.017	-0.113	0.039	0.012	0.025	0.179
BMI	-0.115	0.078	0.135	-0.164	0.086	-0.431	-0.012	0.188	-0.153	0.087	0.062	0.090	0.024	0.432	-0.561	-0.462	0.069	0.439	0.464	0.472

The boldface type indicates $p < 0.01$. CP: Cumulative precipitation, MT: mean temperature, WT: water temperature, WD: water depth, FV: Flow velocity.

나, 다양도지수, 종풍부도지수, 균등도지수, BMI는 5월(H': 2.694, RI: 2.646, J: 0.734, BMI: 73.0)보다 9월(H': 2.895, RI: 2.669, J: 0.788, BMI: 73.6)에 더 높았다.

4. 환경요인과 저서성 대형무척추동물의 상관 분석

1) 우점종과 환경요인과의 상관성 분석

생물지수와 환경요인 사이의 상관성을 파악하기 위해 환경요인으로는 수질항목(수온, 유속, 수심, pH, turbidity, conductivity, BOD, DO, NH₃-N, T-N, Chl-a)과 하상 구성(silt, sand, large sand, gravel, large gravel, boulder), 수리학적요인(수심, 유속), 기상자료(CP, MT)을 사용하였고, 생물지수로는 우점도지수(DI), 다양도지수(H'), 종풍부도지수(RI), 균등도지수(J), 저서생물지수(BMI)를 사용하여 상관 분석을 실시하였다(Table 2). 상관성 분석 결과 생물지수는 유속과 하상구성에 대하여 유의한 상관성을 나타냈으며, Conductivity (DI ($r=0.302, p<0.01$), H' ($r=-0.314, p<0.01$), RI ($r=-0.329, p<0.01$) BMI ($r=-0.431, p<0.01$))를 제외한 수질요인과는 큰 상관성을 보이지 않았다. 특히 종풍부도지수는 모래 ($r=-0.563, p<0.01$)와 음의 상관성을 보였으며, graver ($r=0.557, p<0.01$)과 large gravel ($r=0.524, p<0.01$)에 대하여 양의 상관성을 나타냈다.

2) 군집분석

저서성 대형무척추동물 우점종과 환경요인을 대상으로 각 조사지점 간의 유사성을 파악하고자 집괴분석을 하였다(Fig. 5). Ward's linkage method를 이용하여 군집분석(Cluster analysis)을 실시한 결과 조사시기에 따라 네 그룹으로 나뉘었다. 그룹 1은 2015년 5월의 조사지점이 다수 포함되어 MT, CP, pH가 낮고, 작은강하루살이, 강하루살이의 개체수가 적었다. 그룹 2는 2014, 2015년의 5월 조사지점들로 이루어져있고, MT, CP, 수심이 낮으며, 세갈래하루살이, 강하루살이, 작은강하루살이의 개체수가 높았다. 그룹 3은 강우량이 가장 많았던 2014년 9월의 조사지점으로 이루어졌으며, DO, 두점하루살이, 네점하루살이의 개체수가 가장 높았다. 그룹 4는 집중 강우량이 적었던 2015년 9월의 조사지점으로 이루어져있으며, 강우량은 적으나 MT와 수온이 높고, 수심이 깊으며 큰돌의 비율이 높았다.

3) 주성분 분석

군집분석 결과 얻어진 4개 그룹은 주성분 분석 결과에 잘 반영되었다. 고유값이 가장 높은 제1주성분(Axis1: 21.8%, eigenvalue: 3.57)과 제2주성분(Axis2: 16.4%, eigenvalue: 2.53)을 살펴보면, 제1주성분에서는 BOD ($r=0.371$)가 가장

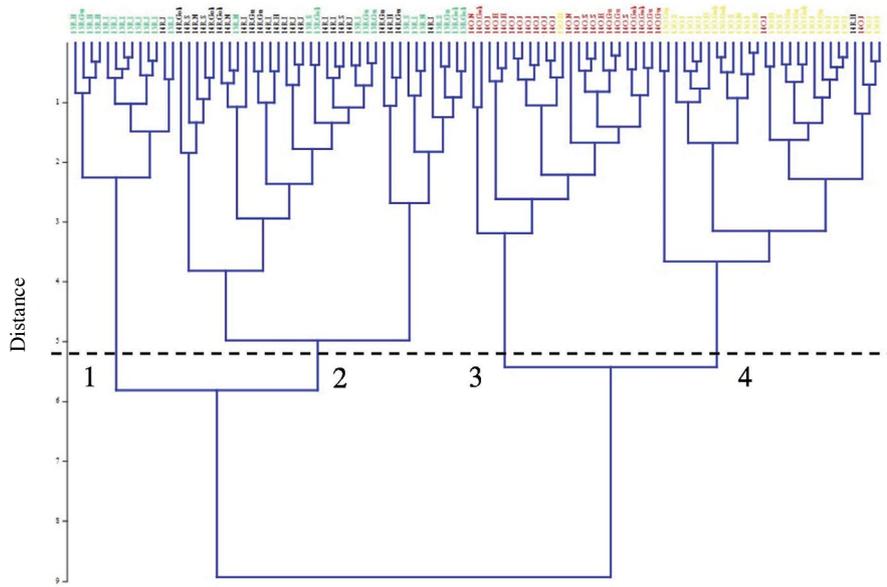


Fig. 5. A dendrogram of cluster analysis based on benthic macroinvertebrates abundance and environment factors by Ward's linkage method. The alphabet '14R' which is black color indicates pre-flooding in 2014, '14O' which is red color indicates post-flooding in 2014, '15R' which is green color indicates pre-flooding in 2015 and '15O' which is yellow color post-flooding in 2015). The last alphabet 'J' indicates Jinan, 'I' indicates Imsil, 'S' indicates Sunchang, 'N' indicates Namwon, 'Gok' indicates Gokseong, 'Gu' indicates Gurye, 'H' indicates Hadong, 'Gw' indicates Gwangyang.

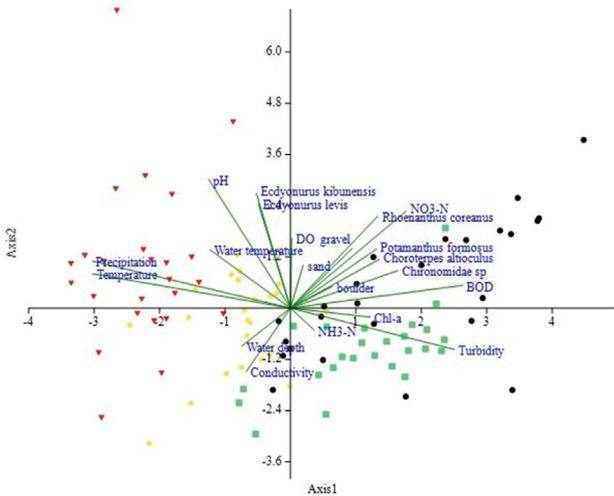


Fig. 6. Principal component analysis (PCA) for dominant species of benthic macroinvertebrates and environment factors in Seomjin River (Axis1: 21.8%, eigenvalue: 3.57 and Axis2: 16.4%, eigenvalue: 2.53). The black circle indicates before flooding in 2014, the red inverted triangle indicates after flooding in 2014, the green square indicates before flooding in 2015, the yellow diamond indicates after flooding in 2015.

높은 양의 상관관계를 나타냈으며, CP ($r = -0.429$)과 MT ($r = -0.427$)이 가장 높은 음의 상관관계를 나타냈다. 제2주

성분에서는 수온 (Water temperature, $r = 0.425$)이 가장 높은 양의 상관관계를 나타냈으며, conductivity ($r = -0.210$)가 가장 높은 음의 상관관계를 나타냈다. 결과적으로 제1주 성분은 BOD가 깔따구류, 세갈래하루살이와 양의 상관성을 보였으며, 강우량과 기온은 강한 음의 상관성을 보여 집중 강우 전인 5월과 9월의 특징을 보여주고 있다. 제2주 성분은 DO, pH, 네점하루살이, 두점하루살이가 강한 양의 상관성을, 수심과 conductivity가 음의 상관성을 나타내어 연도별로 차이를 보였다.

고 찰

여름철 집중 강우량의 감소에 따른 저서성 대형무척추동물의 군집 구성 변화를 분석하였다. 자연적 교란 요인인 여름철 집중 강우는 하천생태계 내 하상구성, 수심과 유속 등 서식처 환경의 변화를 일으킨다 (Danehy *et al.*, 2012; Parasiewicz *et al.*, 2012; Alldredge and Moore, 2014). 이러한 변화는 저서성 대형무척추동물 군집에 영향을 주어 (Lock *et al.*, 2011; Shearer *et al.*, 2015), 수환경평가에 대한 지표생물로서 많은 연구가 이루어지고 있다 (Gonzalo and Camargo, 2013; Piggott *et al.*, 2015; Graeber *et al.*, 2017; Kwak *et al.*, 2018; Vaughan and Gotelli, 2019). 저서성 대

형무척추동물에 대한 국내 연구는 주로 수질오염과 댐 건설에 따른 군집구성의 변화에 대한 연구가 보고 되었으며 (Kil *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2014b), 집중강우에 의한 군집 구성 변화를 파악한 연구는 부족하다 (Hong *et al.*, 2017).

본 연구는 여름철 집중강우량 감소에 따른 섬진강 수계의 저서성 대형무척추동물 군집 변화를 분석하였다. CP는 5월과 9월 차이를 보였는데, 이는 연 강우량의 반 이상이 6~9월에 집중되어 내린다는 Jo *et al.* (1997)과 일치하였다. 특히 2014년에 5월(2,322.1 mm)과 9월(7,678.2 mm)은 5,356.1 mm의 큰 차이를 보였으나, 2015년에 5월(2,371.0 mm)과 9월(3,726.1 mm)은 1,355.1 mm의 차이를 보여 여름철 집중 강우량의 감소를 확인하였다. 또한 강수량은 지리적 위치에 따라 상류에서 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 저위도의 강수량이 고위도보다 더 많이 관측된다고 보고한 Lee *et al.* (2011)의 연구 결과와 비슷한 경향을 보였다. 섬진강의 MT는 5월(2014년 10.4°C, 2015년 9.8°C)과 9월(2014년 22.6°C, 2015년 22.7°C)이 뚜렷한 차이를 보였으며, 지리적 위치에 따라 상류에서 하류로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다 (Park *et al.*, 2009).

집중 강우 이후 주변 토사물로 인해 수질이 악화 된다고 보고되었으나 (Ogawa *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2006), 섬진강의 경우 BOD, Turbidity는 집중강우 이후 더 낮아지는 경향을 보였다. 특히 강우량이 많았던 2014년 5월(0.5 mg L⁻¹)에 다른 조사시기보다 1 mg L⁻¹의 차이를 보였다. 하상 구성은 상류에서 하류로 갈수록 진흙 이하, 모래의 비율은 증가하고, 큰 자갈과 큰 돌은 감소하는 경향을 보였다.

집중 강우에 따른 유실효과로 저서성 대형무척추동물 개체밀도와 종 수는 감소하였고, 우점종은 강우 전 깔따구류에서 강우 후 네점하루살이로 바뀌었다. 또한 우점종인 세갈래하루살이는 매 조사시기마다 1~4 우점종으로 출현하여 강우에 영향을 크게 받지 않고 다수 출현하는 섬진강의 대표적인 지표생물로 나타났다.

섬진강의 환경요인과 저서성 대형무척추동물 군집을 이용하여 상관분석을 실시한 결과, 생물지수는 유속, 하상구성과 유의한 연관성을 보였으며, 수질항목 중 conductivity를 제외하고 유의한 상관성을 보이지 않았다. 또한 CP는 생물지수보다 환경요인인 MT, 수질(pH, Turbidity, BOD), 하상구성(sand, large gravel)에 대하여 유의한 상관성을 보였다. 전체 조사지점을 군집분석한 결과, 4그룹으로 구분되었다. 각 그룹은 강우량의 차이에 따라 크게 5월과 9월로 나뉘었고, 연도별로 세분화되었다. 각 그룹의 특성은 주 성분분석에 잘 반영되어 제1요인을 기준으로 왼쪽은 기온과 강우, 강우 후에 우점종으로 나타난 네점하루살이와 두

점하루살이가 위치하였고, 오른쪽은 강우 전 우점종인 깔따구류, 강하루살이, 작은강하루살이와 수질항목 중 BOD가 위치하여 5월과 9월의 특성을 잘 반영하였다. 집중 강우 후 우점종으로 나타난 네점하루살이와 두점하루살이는 대표적인 우수성종 (Merritt and Cummins, 2008; Kwon *et al.*, 2013)으로 2015년 9월보다 누적강우량이 많았던 2014년 9월에 높은 비율로 출현하여 왼쪽 상단에 위치하였으며, 강우량 변동에 따른 변화를 잘 반영하는 것으로 판단된다.

적 요

여름철 집중 강우량 감소에 따른 저서성 대형무척추동물 군집 변화를 알아보기 위하여 섬진강 본류 25지점을 대상으로 2014년과 2015년 각각 5월과 9월 총 4회 조사를 실시하였다. 서식환경에 중요하게 작용하는 요인인 강우량, 기온, 수질, 수심, 유속, 하상구성을 수집하고 측정하였다. 섬진강의 5월 누적강우량(CP)은 2014년 2,322.1 mm, 2015년 2,371.0 mm로 큰 차이를 보이지 않았으나, 9월 CP는 2014년 7,678.2 mm, 2015년 3,726.1 mm로 반절 이상 감소하였다. 여름철 집중강우로 인한 유실효과로, 개체밀도와 종 수는 5월이 9월보다 높았다. 5월은 깔따구류와 세갈래하루살이, 9월은 네점하루살이, 두점하루살이, 세갈래하루살이가 우점을 차지하였다. 생물지수와 환경요인과의 상관성 분석 결과, 하상구성 및 유속과 상관성이 있는 것으로 나타났다. 저서성 대형무척추동물 우점종과 환경요인과의 집괴분석한 결과 5월과 9월의 CP와 MT에 따라 4 그룹으로 나뉘었다. 주 성분 분석 결과 집괴분석으로 나뉘어진 그룹의 특성을 잘 반영하였으며, 특히 네점하루살이와 두점하루살이는 강우량의 변동을 잘 반영하였다.

저자정보 홍철 (국립환경과학원 물환경연구부 전문위원), 김원석 (전남대학교 해양기술학부 환경해양학전공 박사과정), 김진영 (국립생태원 멸종위기종복원센터 전임연구원), 노성유 (국립환경과학원 물환경연구부 환경연구사), 박지형 (국립환경과학원 물환경연구부 과장), 이재관 (국립환경과학원 물환경연구부 부장), 광인실 (전남대학교 해양기술학부 환경해양학전공 교수)

저자기어도 개념설정: 광인실, 방법론: 광인실, 홍철, 분석: 홍철, 김원석, 자료제공: 김진영, 노성유, 자료관리: 홍철, 김진영, 노성유, 박지형, 원고 초안작성: 홍철, 원고 교정: 홍철, 김원석, 광인실, 원고 편집 및 검토: 홍철, 광인실, 노성

유, 박지형 과제관리: 곽인실, 노성유, 박지형, 이재관, 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 본 연구는 환경부/국립환경과학원의 “하천 수생태계 현황조사 및 건강성 평가(XI)” [NIER-2019-04-02-050]와 교육부 한국연구재단 대학중점연구사업 [NRF-2018-R1A6A1A-03024314]의 지원을 받아 이루어졌습니다.

REFERENCE

- Allredge, B. and G. Moore. 2014. Assessment of riparian vegetation sensitivity to river hydrology downstream of a major Texas dam. *River Research and Applications* **30**(2): 230-244.
- Arimoro, F.O. and W.J. Muller. 2010. Mayfly (Insecta: Ephemeroptera) community structure as an indicator of the ecological status of a stream in the Niger Delta area of Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment* **166**(1): 581-594.
- Baek, S.H., J.Y. Seo and J.W. Choi. 2015. Growth characteristics and distribution pattern of a brackish water clam, *Corbicula japonica* along an estuarine salinity gradient in Seomjin River. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* **16**(10): 6852-6859.
- Bouillon, S., N. Koedam, W. Baeyens, B. Satyanarayana and F. Dehairs. 2004. Selectivity of subtidal benthic invertebrate communities for local microalgal production in an estuarine mangrove ecosystem during the post-monsoon period. *Journal of Sea Research* **51**(2): 133-144.
- Brewin, P.A., S.T. Buckton and S.J. Ormerod. 2000. The seasonal dynamics and persistence of stream macroinvertebrates in Nepal: monsoon floods represent disturbance?. *Freshwater Biology* **44**(4): 581-594.
- Choi, A.R., S.J. Park, J.Y. Kim, M.Y. Song and D.S. Kong. 2012. The Correlation between water quality and benthic macroinvertebrate community indices in the Jinwi stream. *Korean Journal of Limnology* **45**(1): 1-10.
- Danehy, R.J., R.E. Bilby, R.B. Langshaw, D.M. Evans, T.R. Turner, W.C. Floyd, S.H. Schoenholtz and S.D. Duke. 2012. Biological and water quality responses to hydrologic disturbances in third-order forested streams. *Ecohydrology* **5**: 90-98.
- Gonzalo, C. and J.A. Camargo. 2013. The impact of an industrial effluent on the water quality, submersed macrophytes and benthic macroinvertebrates in a dammed river of Central Spain. *Chemosphere* **93**(6): 1117-1124.
- Graeber, D., T.M. Jensen, J.J. Rasmussen, T. Riis, P. Wiberg-Larsen and A. Baatrup-Pedersen. 2017. Multiple stress response of lowland stream benthic macroinvertebrates depends on habitat type. *Science of The Total Environment* **599**: 1517-1523.
- Hong, C., W.S. Kim and I.S. Kwak. 2017. Changes of Benthic Macroinvertebrate community composition following natural temperature and precipitation increase. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**(3): 275-285.
- Jo, H.M., Y.J. Choi and H.J. Kwon. 1997. Climatological features of summer precipitation in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* **30**(3): 247-256.
- 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**(2): 190-198.
- Kim, J.Y., S.H. Lee, K.L. Lee, S.Y. Noh, Y.N. Shin, S.W. Lee, J.K. Lee, D.H. Won, S.H. Lim, Y.J. Kwon and D.S. Kong. 2018. Spatio-temporal distribution patterns of lotic benthic macroinvertebrate communities in Namhan-River Weir Section. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**(4): 331-334.
- Kwak, I.S., M.Y. Song and T.S. Chon. 2004. The Effects of natural disturbances on benthic macro-invertebrate. *Korean Journal of Limnology* **37**(1): 87-95.
- 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**(1): 60-70.
- Kwon, S.J., Y.C. Jeon and J.H. Park. 2013. Checklist of organisms in Korea 7. Benthic macroinvertebrates. Eco and Nature, Seoul.
- Kwon, S.J., Y.C. Jun and J.H. Park. 2013. An illustrated guide to aquatic organism-Benthic macroinvertebrate. Econature.
- Lee, J.Y., K.Y. Lee, S.J. Han, S.J. Lee, Y.K. Jung, J.L. Cheon, J.S. Choi and J.C. Kim. 2014a. Spatial and Temporal Variation of Macroinvertebrates according to Physical Factors in Gongji Stream Area. *Korean Journal of Environment and Ecology* **28**(1): 24-32.
- Lee, M.J., E.W. Seo, J.J. Yu and J.E. Lee. 2014b. Community Fluctuation of the Benthic Macroinvertebrates before and after the Construction of Nakdan Weir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**(4): 328-336.
- Lee, W.H., S.H. Hong, Y.G. Kim and E.S. Chung. 2011. Temporal and spatial variability of precipitation and daily average temperature in the south Korea. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* **11**(4): 73-86.
- Leibowitz, S.G., R.L. Comeleo, P.J. Wigington Jr, C.P. Weaver, P.E. Morefield, E.A. Sproles and J.L. Ebersole. 2014. Hydrologic landscape classification evaluates stream flow vulner ability to climate change in Oregon, USA. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**(9): 3367-3392.
- Lock, K., M. Asenova and P.L. Goethals. 2011. Benthic macroinvertebrates as indicators of the water quality in Bulgaria:

- A case-study in the Iskar river basin. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters* **41**(4): 334-338.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *General Systems* **3**: 36-71.
- Merritt, R.W. and K.W. Cummins. 1996. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd ed. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.
- Merritt, R.W. and K.W. Cummins. 2008. An Introduction to the Aquatic Insects of North America (fourth edition). Kendall/Hunt Publishing Company.
- Mesa, L.M. 2012. Interannual and seasonal variability of macroinvertebrates in monsoonal climate streams. *Brazilian Archives of Biology and Technology* **55**: 403-410.
- MOE/NIER. 2013. Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment.
- Ogawa, A., H. Shibata, K. Suzuki, M.J. Mitchell and Y. Ikegami. 2006. Relationship of topography to surface water chemistry with particular focus on nitrogen and organic carbon solutes within a forested watershed in Hokkaido, Japan. *Hydrological Processes* **20**: 251-265.
- Old, G.H., G.J. Leeks, J.C. Packman, B.P. Smith, S. Lewis, E.J. Hewitt, M. Holmes and A. Young. 2003. The impact of a convective summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanised catchment: Bradford, West Yorkshire. *Science of the Total Environment* **314**: 495-512.
- Parasiewicz, P., E. Castelli, J.N. Rogers and E. Plunkett. 2012. Multiplex modeling of physical habitat for endangered freshwater mussels. *Ecological Modelling* **228**: 66-75.
- Park, C.Y., Y.E. Choi, J.Y. Moon and W.T. Yun. 2009. Classification of climate zones in South Korea considering both air temperature and rainfall. *Journal of the Korean Geographical Society* **44**: 1-16.
- Park, J.H., J.H. Lee, S.Y. Kang and S.Y. Kim. 2006. Hydroclimatic controls on dissolved organic matter (DOM) characteristics and implications for trace metal transport in Hwangryong River Watershed, Korea, during a summer monsoon period. *Hydrological Processes* **21**: 3025-3034.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. Wiley and Sons, New York, 165 pp.
- Piggott, J.J., C.R. Townsend and C.D. Matthaei. 2015. Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics. *Global Change Biology* **21**(5): 1887-1906.
- Praskiewicz, S. and P. Bartlein. 2014. Hydrologic modeling using elevationally adjusted NARR and NARCCAP regional climate-model simulations: Tucannon River, Washington. *Journal of Hydrology* **517**: 803-814.
- Prudhomme, C., I. Giuntoli, E.L. Robinson, D.B. Clark, N.W. Arnell, R. Dankers, B.M. Fekete, W. Franssen, D. Gerten, S.N. Gosling, S. Hangemann, D.M. Hannah, H.J. Kim, Y. Masaki, Y. Satoh, T. Stacke, Y. Wada and D. Wisser. 2014. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**(9): 3262-3267.
- Reynoldson, T.B., R.H. Norris, V.H. Resh, K.E. Day and D.M. Rosenberg. 1997. The reference condition: a comparison of multimetric and multivariate approaches to assess water-quality impairment using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* **16**(4): 833-852.
- Rosenberg, D.M. and V.H. Resh. 1993. Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. Chapman & Hall, New York, 488 pp.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, 233 pp.
- Shearer, K.A., J.W. Hayes, I.G. Jowett and D.A. Olsen. 2015. Habitat suitability curves for benthic macroinvertebrates from a small New Zealand river. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **49**(2): 178-191.
- Shi, X., J. Liu, X. You, K. Bao, B. Meng and B. Chen. 2016. Evaluation of river habitat integrity based on benthic macroinvertebrate-based multi-metric model. *Ecological Modelling* **353**: 67-76.
- Shin, S.M., I.K. Choi, E.W. Seo and J.E. Lee. 2013. Community structure of benthic macroinvertebrate in the urban and nature stream. *Journal of Environmental Science International* **22**(12): 1551-1559.
- Song, Y.J., Y.D. Ju, B.S. Park, J.M. Kim, E.H. Kwon, D.Y. Chae, H.J. Lee and Y.S. Bae. 2016. Study on the community structure of benthic macro-invertebrates in Jangsu-cheon, an urban restoration stream of Incheon city. *Journal of Wetlands Research* **18**(1): 32-38.
- Stanley, E.H. and S.G. Fisher. 1992. Intermittency, disturbance, and stability in stream ecosystems. In Aquatic ecosystems in semi-arid regions: implications for resource management. *National Hydrology Research Institute Symposium Series* **7**: 271-280.
- Vaughan, I.P. and N.J. Gotelli. 2019. Water quality improvements offset the climatic debt for stream macroinvertebrates over twenty years. *Nature Communications* **10**(1): 1956.
- Won, D.H., S.J. Kwon and Y.C. Jun. 2008. Aquatic insects of Korea. Korea Ecosystem Service, Seoul, 415 pp.
- Yoon, I.B. 1995. Aquatic Insects of Korea. Junghaengsa, 262 pp.