KJEE 50(3): 275-285 (2017)
https://doi.org/10.11614/KSL.2017.50.3.275
ISSN: 2288-1115 (Print), 2288-1123 (Online)

Original article

자연적인 기온과 강수량 증가로 인한 저서성 대형무척추동물 군집 구성의 변화

홍 철 · 김원석 · 곽인실*

전남대학교 해양기술학부

Changes of Benthic Macroinvertebrate Community Composition Following Natural Temperature and Precipitation Increase. *Hong, Cheol* (0000-0002-5444-7743)*, Won-Seok Kim* (0000-0003-3368-3891) *and Ihn-Sil Kwak** (0000-0002-1010-3965) *(Department of Fisheries and Ocean Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea)*

Abstract To investigate the changes of dominant species of benthic macroinvertebrates according to the changes of temperature and precipitation, we surveyed twenty sites of the main Seomjin River in May and September in 2013 and 2014. The temperature, precipitation, water quality factors and substrate composition, which are important factors in benthos habitat environment, were collected and measured. The average temperature of the Seomjin River increased by 0.2°C in 2014 compared to 2013, and the temperature increased from upstream to downstream, showing a difference of more than 3°C. Also, the annual cumulative precipitation (ACP) was increased toward low latitude. The temperature of Seomjin River increased more than twice in September (21.7~24.5°C) after rainfall compared to May (7.6~11.3°C) before rainfall, and CP (cumulative precipitation) increased about 3 times before rainfall (263 mm~287.5 mm) and after rainfall (756.3 mm~882 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 sp. and *Choroterpes altioculus* were dominated in May, *Ecdyonurus levis*, *Macrostemum radiatum* and *Choroterpes altioculus* were dominated in September. As a result of correlation analysis between community indices and environment factors, it was found that there is a high correlation with boulder and sand among substrate compositions. According to the results of cluster analysis based on temperature, CP and the dominant species of benthic macroinvertebrates in Seomjin River, it was divided into two groups following temperature and CP, and the dominant species and geographical position were reflected and divided into detailed groups.

Key words: temperature, cumulative precipitaion, benthic macroinvertebrates, dominant species

서 론

하천생태계는 인위적인 교란뿐만 아니라 기온, 여름철 집중 강우와 같은 자연적 교란요인에 의해 수심, 유속, 하상 구성의 변화 등으로 다양한 물리환경적 특성이 달라지며 (Danehy *et al*., 2012; Parasiewicz *et al*., 2012; Alldredge and Moore, 2014), 이러한 특성은 생물군집에 영향을 미친다 (Boykin *et al*., 2013; Yan *et al*., 2014; Shen *et al*., 2015; Feebarani *et al*., 2016). 따라서 하천생태계 내 환경 변화를 파악하기 위하여 생물군집의 분포 특성을 파악하는 것

Manuscript received 30 May 2017, revised 21 June 2017,
revision accepted 5 July 2017
* Corresponding author: Tel: +82-61-659-7148, Fax: +82-61-659-7149,
E-mail: iskwak@chonnam.ac.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.

은 생물과 환경의 통합평가를 위한 주요 요소이다(Park *et al*., 2011; Shi *et al*., 2016; Song *et al*., 2016). 특히 저서성 대형무척추동물은 가장 다양하고 풍부한 군집 구성을 이루고 있으며(Rosenberg and Resh, 1993), 생태계 내 영양단계의 저차소비자로서, 종에 따라 선호하는 서식환경 조건이 뚜렷하게 차이를 보인다(Shearer *et al*., 2015; Shi *et al*., 2016). 또한 긴 생활사, 채집의 용이성, 군집 다양성, 낮은 이동성 등의 특성으로 수환경평가의 지표생물로서 많은 연구가 이루어지고 있다(Arimoro and Muller, 2010; Mcfarland *et al*., 2010; Lee *et al*., 2014a, b; Piggott *et al*., 2015).

기후변화에 관한 정부 간 협의체보고서(Intergovernmental Panel on Climate Change)에 의하면 20세기 지구의 평균기온이 0.72°C 상승하였고, 이러한 기온 증가는 생태계와 생물다양성에 위협적인 요인으로 보고되었다(IPCC, 2013). 우리나라도 최근 30년간 기온이 증가하여(0.85°C/10년) 지구온난화의 경향을 따라가고 있다(Jin and Park, 2015). 최근 연구에서 평균기온의 증가는 강수의 빈도를 줄이고, 가뭄의 기간과 증발량의 증가를 발생시킨다고 보고되었다(Leibowitz *et al*., 2014; Praskievicz and Bartlein, 2014; Prudhomme *et al*., 2014). 우리나라의 경우에도 최근 20년 동안 연 강수량과 유출량은 증가하고 있으며(Bae *et al*., 2008; Lee *et al*., 2011; Hong *et al*., 2012), 여름철 집중 강우는 하천의 하상 구성뿐만 아니라 수생물의 군집 구조를 변화시키는 요인으로 작용하는 것으로 알려졌다(Kwak *et al*., 2004; Xenopoulos *et al*., 2005; Connolly and Pearson, 2007; Mesa, 2012). 또한 기온 증가는 저서성 대형무척추동물 군집의 변화에 큰 영향을 주기 때문에(Kwak *et al*., 2004; Mantyka-Pringle *et al*., 2014; Piggott *et al*., 2015), 기온 증가와 강수로 인한 저서성 대형무척추동물 군집변화를 분석하는 것은 하천생태계의 지속성을 평가하는 데 매우 중요하다.

본 연구의 조사 지역인 섬진강은 길이 212 km, 유역면적 4,896.5 km^2로 전라북도 진안군 백운면과 장수군 장수읍의 경계인 팔공산에서 발원하여 전라도의 동쪽 지리산 기슭을 지나 남해의 광양만으로 흘러간다. 섬진강 유역은 생태경관이 뛰어나고 하구둑이 없는 강으로 지형지리적 위치와 계절에 따른 기온과 강수에 차이가 뚜렷하게 나타나 저서성 대형무척추동물의 군집분포를 연구하기에 좋은 하천이다.

저서성 대형무척추동물의 생물지표성을 이용하여 수질오염, 보 건설 등 인위적인 교란에 대한 생물의 변화 양상에 대한 연구가 보고되고 있으나(Choi *et al*., 2012; Shin *et al*., 2013; Lee *et al*., 2014b; Baek *et al*., 2015), 자연적 교란요인에 대한 연구는 부족한 실정이다(Kwak *et al*., 2004, 2008). 이에 본 연구에서는 섬진강 본류를 대상으로 지역적 위치에 따른 자연적인 물리환경인 기온과 강수의 차이를 살펴보고, 이로 인한 저서성 대형무척추동물의 군집 분포를 파악해 보고자 한다. 그리고 저서성 대형무척추동물의 자연적 서식처를 구성하는 주요 요인인 하상 구성 그리고 수질과의 관계를 분석하여 지형적인 위치에 따른 분포의 차이점을 살펴보고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구 조사지와 조사 시기

섬진강은 전북 진안군과 장수군의 경계인 팔공산에서 발원하여 전북 임실군, 순창군의 상류를 통과하여 중류인 곡성군과 하류인 하동군을 지나 남해의 광양만으로 유입되는 하천이다. 섬진강은 주변에 인구가 밀집되어 있지 않아, 수질 상태가 비교적 양호한 상태이다(Yang and Choi, 2003). 연구 대상 지점은 섬진강 본류 20지점으로, 상류인 진안(J1, J2, J3, J4), 임실(I1, I2, I3, I4, I5, I6), 순창(S1, S2, S3), 남원(N1, N2), 곡성(G1, G2, G3), 하류인 하동(H1, H2)까지 조사하였다(Fig. 1). 조사 시기는 2013년부터 2014년까지 여름철 집중 강우 전인 5월과 강우 후인 9월, 년 2회씩 2년에 걸쳐 총 4회 조사하였다.

2. 이화학적 자료

섬진강의 이화학적 수질 특성은 “수생태계 건강성 조사 및 평가(MOE/NIER, 2013, 2014)”의 측정 항목 중 생물학적 산소요구량(Biological oxygen demand, BOD), 총 질소(Total Nitrogen), 질산성질소(NO_3-N)를 사용하였다.

기온과 강수 자료는 기상청(www.kma.go.kr)의 일별 자료를 대상으로, 기온은 강우 전인 2월에서 5월까지의 평균값과 강우 후인 6월에서 9월까지의 평균값을 각각 5월의 평균기온과 9월의 평균기온으로 산정하였다. 강수량은 강우 전인 2월에서 5월까지의 일별 강수량을 합산하여 5월의 누적강수량(CP: cumulative precipitation)을 산출하였고, 같은 방법으로 강우 후인 6월에서 9월까지의 일별 강수량을 합산하여 9월의 CP를 산정하였다.

3. 현장 조사

현장 조사는 여울 지점(riffle)에서 Surber net (30 × 30, 1 mm mesh size)을 사용하여 총 3회 정량 채집하였다. 채집된 시료는 플라스틱 병에 담아 현장에서 포름알데하이드 용액으로 10%로 희석 고정한 후 실험실로 운반하여 생물

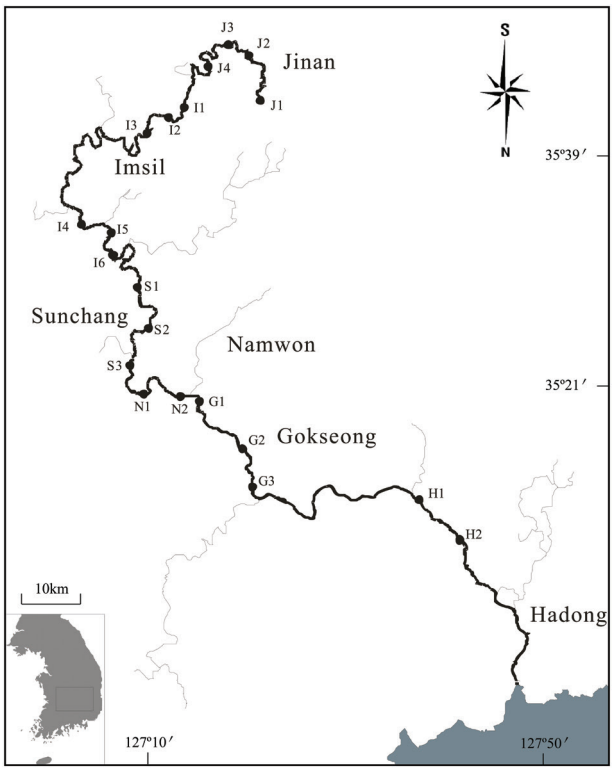

Fig. 1. Location of the survey area at Seomjin River.

시료를 골라낸 다음 70% Ethyl alcohol에 보관하였다. 동정과 분류는 국내에서 발표된 검색도설(Yoon, 1995; Merritt and Cummins, 1996; Won *et al*., 2008; Kwon *et al*., 2013)을 참고하였다. 지역마다 조사지점의 숫자가 다르기 때문에 지역별 비교를 위해 개체수는 지역별 평균값을 계산하였고, 종 수는 총 출현한 종 수를 사용하였다. 수질 항목인 BOD, T-N, NO_3-N은 지역별 평균값을 사용하였다. 하상 구성은 각 지점별로 현장 조사를 거쳐 점토(<0.004 mm)부터 니(0.004~0.06 mm), 모래(0.06~2 mm), 잔자갈(2~16 mm), 자갈(16~64 mm), 호박돌(64~256 mm), 암반(>256 mm)까지 7단계로 구분하여 측정하였다.

4. 생물지수의 산출

생물지수는 정량채집으로 조사된 저서성 대형무척추동물을 대상으로 우점도지수(Dominant index)는 McNaughton's dominant index (DI)를 이용하여 산출하였다. 다양도지수는 Margalef의 정보이론에서 유도된 Shannon-Weaner function (H′) (Shannon and Weaner, 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.

5. 통계분석

생물지수와 환경 요인들 간의 상관성을 파악하기 위하여 IMB SPSS Statistic (ver. 21.0) 프로그램을 이용하여 Pearson's 상관분석(Correlation analysis)을 실시하였고, 유의수준(p-value)은 $p<0.05$로 하였다. 섬진강 지역별 기온과 강수량 그리고 우점종 간의 유사성을 평가하기 위해 Paleontological Statistics (ver. 3.10) 프로그램을 이용하여 유클리디안 제곱거리(squared euclidean distance)로 측정하였고, Ward's method를 이용하여 집괴분석(Cluster Analysis)을 하였다. 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

결과 및 고찰

1. 지리적인 위치에 따른 지역별 기온과 강수량의 분포

2013년과 2014년 평균기온(AMT: annual mean temperature)과 연중 누적강수량(ACP: annual cumulative precipitation)의 변화를 연도별로 살펴보았다(Fig. 2). 섬진강의 평균기온은 2013년에 비해 2014년 전 지역에서 평균 0.2°C 증가하는 양상을 보였다. 상류에 위치한 진안은 가장 낮은 AMT 10.84°C를 보였으나 하류인 하동에서는 14.43°C로 가장 높게 나타나 3.59°C 차이를 보여 지리적 위치에 따라 상류에서 하류로 갈수록 기온이 증가하는 경향이 뚜렷하였다(Fig. 2A, B). 이는 지리적 위치에 따라 고위도로 갈수록 기온이 낮아진다고 보고한 Park *et al*. (2009)의 결과와 같았다. 섬진강의 기온은 1975년 이후 2000년대 초반에 걸쳐 1.2°C 상승하고 있다고 알려졌는데(Yang, 2003), 본 연구에서도 증가하고 있음을 확인하였다. 강수량은 2014년 전 지역 평균이 1,421 mm로 2013년(전 지역 평균 1,345 mm)보다 대략 76 mm 많았다. 상류인 진안의 ACP는 1,231 mm로 가장 낮았으며 하류인 하동은 1,710 mm로 가장 높아 479 mm의 차이를 보였다. Lee *et al*. (2011)은 저위도의 강수량이 고위도보다 더 많이 관측된다고 보고하였는데 섬진강의 강수량도 이 경향을 따르고 있었다.

강우 전인 5월의 기온과 강수량이 강우 후인 9월보다

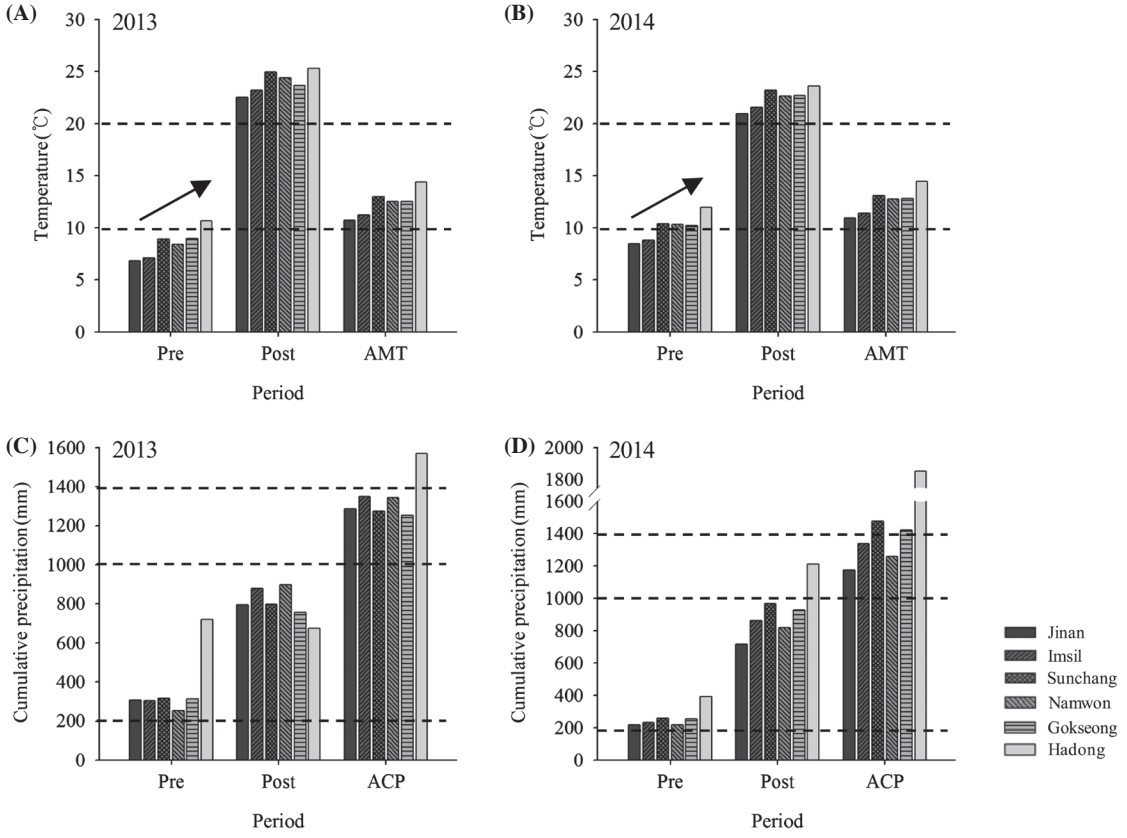

Fig. 2. Yearly variations of temperature and precipitation in May and September at Seomjin River. A and C are variations of 2013, B and D are variations of 2014. Pre: pre-flooding, Post: post-flooding, AMT: annual mean temperature, ACP: annual cumulative precipitation.

모두 낮았다(Fig. 2). 계절적인 영향으로 기온은 강우 전(7.6~11.3°C)보다 강우 후(21.7~24.5°C)가 2배 이상 높았다. 연도별 기온은 강우 전 2013년 8.5°C로 2014년 10.0°C에 비해 1.5°C 증가하였으며, 강우 후에는 2013년 24.0°C로 2014년 22.4°C로 1.6°C 감소하였다. 지리적으로 상류인 진안의 강우 전 기온이 가장 낮아 7.7°C였으나 하류인 하동은 가장 높아 11.3°C를 보였으며, 강우 후에도 진안은 21.7°C, 하동은 가장 높아 24.4°C였다.

여름 집중 강우가 있는 기후적인 특성이 반영되어 강수량은 강우 전에 비해 강우 후에 대략 3배가 증가하는 것으로 나타났다. 강우 전 CP는 263 mm~287.5 mm의 분포(하동 제외)를 보여 강우 후인 756.3 mm~882 mm보다 약 3배 적었다. 하류부인 하동의 경우, 강우 전(393.5~719 mm)과 강우 후(675~1212 mm)의 CP가 연도에 따라 차이가 크게 나타났으나 다른 지역에서는 연도별 CP 차이는 크지 않았다. 연도별로 강우 전 CP는 2013년 369 mm, 2014년 262.7 mm로 감소하였으나, 강우 후 CP는 2013년 800.6 mm, 2014년 917 mm로 증가하였다.

2. 서식처 환경요인의 변화

1) 하상 구성

하상 구성을 이루는 입자 중 연도별로 차이가 많았던 모래, 자갈, 호박돌을 대상으로 지역별 분포 차이를 살펴보았다(Table 1). 섬진강의 하상 구성 중 호박돌의 비율은 5월이 9월보다 높게 나타났다. 전체적으로 모래비율(5월 14.9%, 9월 15.3%)은 자갈(5월 26.5%, 9월 26.3%)과 호박돌(5월 23.4%, 9월 21.6%)에 비하여 낮았다. 2013년에 비해 2014년 모래비율(5월: 13.5%→16.3%, 9월: 10.8%→19.8%)은 증가하였으나, 호박돌(5월: 27.5%→19.4%, 9월: 26.7%→16.5%)은 감소하였다. 지역별로 모래는 하동(5월 35.0%, 9월 27.5%)에서 가장 높았고, 자갈은 진안(5월 31.3%, 9월 30.6%)과 곡성(5월 31.7%, 9월 30%)에서 높았으며, 호박돌 비율은 곡성(5월 28.3%, 9월 25%)에서 가장 높았다.

2) 수질 요인의 분포

수질 항목인 BOD, T-N과 NO_3-N은 하류인 하동을 제외한 지역에서 강우 전인 5월이 강우 후인 9월보다 전체적으로 높았다(Table 2). 여름철 집중 강우의 영향으로 인해 토

Table 1. Summary of the substrate composition (%) in Seomjin River.

Substrate composition	Jinan		Imsil		Sunchang		Namwon		Gokseong		Hadong		Average	
	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.
2013														
Sand	7.5	10.0	18.3	15.0	6.7	16.7	10.0	10.0	3.3	3.3	35.0	10.0	13.5	10.8
Gravel	30.0	27.5	21.7	21.7	26.7	26.7	30.0	30.0	33.3	26.7	15.0	20.0	26.1	25.4
Boulder	30.0	30.0	21.7	21.7	30.0	23.3	35.0	30.0	33.3	30.0	15.0	25.0	27.5	26.7
2014														
Sand	7.5	6.3	20.0	19.2	10.0	16.7	15.0	25.0	10.0	6.7	35.0	45.0	16.3	19.8
Gravel	32.5	33.8	23.3	25.8	33.3	30.0	20.0	20.0	30.0	33.3	22.5	20.0	26.9	27.2
Boulder	18.8	23.8	16.7	16.7	20.0	13.3	22.5	20.0	23.3	20.0	15.0	5.0	19.4	16.5

Table 2. Summary of the water quality in Seomjin River.

Water quality	Jinan		Imsil		Sunchang		Namwon		Gokseong		Hadong		Average	
	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.
2013														
BOD ($mg\,L^{-1}$)	0.8	0.7	1.2	1.3	2.2	1.1	2.3	1.1	3.6	3.0	1.3	1.4	1.9	1.4
T-N ($mg\,L^{-1}$)	0.8	0.7	1.5	1.4	5.4	1.5	5.2	3.7	5.3	5.0	0.9	1.0	3.2	2.2
NO_3-N ($mg\,L^{-1}$)	0.5	0.5	0.9	0.9	2.6	0.8	2.9	2.5	2.7	2.5	0.5	0.5	1.7	1.3
2014														
BOD ($mg\,L^{-1}$)	1.3	0.5	1.4	0.7	3.0	0.4	2.6	0.5	3.0	0.5	0.8	0.8	2.0	0.6
T-N ($mg\,L^{-1}$)	1.9	0.6	1.7	1.4	5.2	1.4	3.2	2.8	3.7	3.1	2.5	0.6	3.0	1.6
NO_3-N ($mg\,L^{-1}$)	1.4	0.4	1.2	0.8	3.5	0.9	2.3	2.0	2.9	2.4	1.3	0.3	2.1	1.1

사가 유입되어 수질이 악화된다고 보고되었으며(Ogawa *et al*., 2006; Park *et al*., 2006), 섬진강의 경우도 강우 후인 9월의 BOD, T-N과 NO_3-N가 5월보다 높게 나타났으며 특히, 곡성에서 BOD, T-N 그리고 NO_3-N가 가장 높게 나타났다. BOD는 5월 1.9~2.0 $mg\,L^{-1}$와 9월 0.6~1.4 $mg\,L^{-1}$, T-N은 5월 3~3.2 $mg\,L^{-1}$와 9월 1.6~2.2 $mg\,L^{-1}$ 그리고 NO_3-N은 5월 1.7~2.1 $mg\,L^{-1}$와 9월 1.1~1.3 $mg\,L^{-1}$의 분포를 보였다.

3. 군집 구성과 생물지수의 분포

1) 지리적 위치에 따른 군집 구성

여름철 집중 강우는 하천의 저서성 대형무척추동물 개체수에 크게 영향을 끼치는 것으로 보고되었다(Kwak *et al*., 2004; Death, 2008; Mesa, 2012; Theodoropoulos *et al*., 2017). 섬진강도 집중 강우의 효과가 반영되어 강우 전인 5월이 강우 후인 9월보다 개체수와 종 수가 많았다(Fig. 3).

5월의 개체수는 2013년 1756.5 ind. m^{-2}보다 2014년 1880.5 ind. m^{-2}로 증가하였으며, 종 수도 2013년 43종보다 2014년 45종으로 소수 증가하였다. 9월의 개체수는 2013년 640.9 ind. m^{-2}로 2014년 632.8 ind. m^{-2}로 연도별 차이는 크지 않았으며 종 수도 2013년 37종으로 2014년 38종과 연도별 차이가 없었다(Fig. 3).

위도가 반영된 지리적인 위치에 따른 상류와 하류지역의 군집 구성의 차이를 살펴보면, 5월의 기온이 하류로 갈수록 꾸준히 증가(Fig. 2A, B)하는 것과 유사하게 개체수도 하류로 갈수록 증가되는 양상을 보였다(Fig. 3A, B). 반면에 기온이 20°C 이상을 유지한 9월은 강우로 인한 유실효과와 겹쳐 하류로 갈수록 개체수와 종 수의 감소가 매우 뚜렷하였다. 5월 개체수와 종 수의 급격한 증가는 저서성 대형무척추동물의 많은 종이 수서곤충에 속하며 온도에 매우 민감하게 반응하고 빠르게 성장함을 보여주었다. 또한 수서곤충의 성장에 중요한 기온이 9월에는 20°C 이상 유지되어 성장에 대한 제한요인으로 작용하지 않았으나, 5월에 비해 3배 이상 늘어난 물리적인 강수량의 증가로 개체수와 종 수의 감소가 매우 크게 나타났다(Fig. 3C, D).

2) 지리적인 위치에 따른 생물지수

전체적으로 우점도지수(DI) (2013년 0.46, 2014년 0.43)와 종풍부도지수(RI) (2013년 3.24, 2014년 3.03)는 5월이 높았지만, 다양도지수(H′) (2013년 3.39, 2014년 2.97)와 균

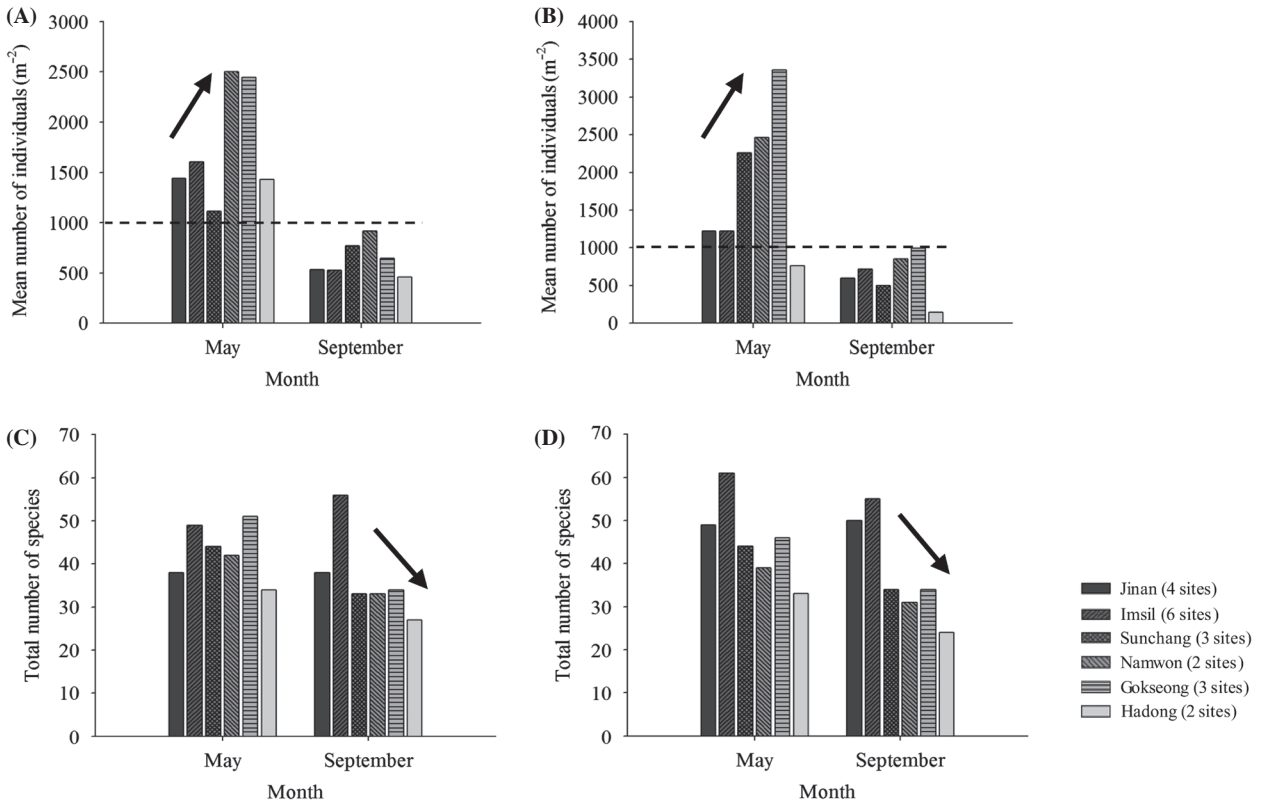

Fig. 3. Yearly variation of total number of species and mean number of individuals of benthic macroinvertebrates in May and September. A and C are variations of 2013, B and D are variations of 2014.

Table 3. Summary of the community indices of benthic macroinvertebrates in Seomjin River.

Indices	Jinan		Imsil		Sunchang		Namwon		Gokseong		Hadong		Average	
	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.	May	Sep.
2013														
Dominance (DI)	0.43	0.47	0.63	0.39	0.47	0.56	0.33	0.44	0.41	0.37	0.50	0.37	0.46	0.43
Diversity (H′)	3.45	3.15	2.52	3.48	3.30	2.95	3.93	3.54	3.78	3.63	3.12	3.57	3.35	3.39
Richness (RI)	3.19	2.87	2.29	3.03	3.42	3.04	3.77	3.17	3.54	0.75	3.23	0.69	3.24	2.26
Evenness (J)	0.77	0.75	0.68	0.87	0.72	0.68	0.80	0.79	0.75	0.80	0.69	0.87	0.74	0.79
2014														
Dominance (DI)	0.61	0.46	0.60	0.59	0.72	0.51	0.60	0.57	0.47	0.62	0.51	0.44	0.58	0.53
Diversity (H′)	2.49	3.38	2.64	2.55	2.11	3.04	2.83	2.77	3.50	2.82	3.26	3.28	2.81	2.97
Richness (RI)	2.72	3.56	2.75	2.28	2.56	2.43	3.11	2.65	3.55	2.75	3.47	2.80	3.03	2.74
Evenness (J)	0.56	0.75	0.67	0.64	0.48	0.79	0.61	0.66	0.72	0.65	0.71	0.86	0.63	0.73

등도지수(J) (2013년 0.79, 2014년 0.73)는 9월이 근소하게 높았다(Table 3). 우점도지수는 2013년보다 2014년이 높았으나, 다양도지수, 종풍부도지수 그리고 균등도지수는 2013년이 높았다. 우점도지수는 순창, 다양도지수는 곡성, 종풍부도지수는 남원 그리고 균등도지수는 하동에서 가장 높게 나타났다(Table 3).

3) 지리적인 위치에 따른 우점종의 변화

섬진강에서 출현한 우점종을 대상으로 강우 전인 5월과 강우 후인 9월의 변화를 살펴보았다(Fig. 4). 9월에 비하여 기온이 낮고, 강수량이 적었던 5월은 깔따구류(Chironomidae sp.)가 가장 우점하여 40.2%~53.8%를, 제2우점종은 세갈래하루살이(*Choroterpes altioculus*)가 28.7%~30.2%

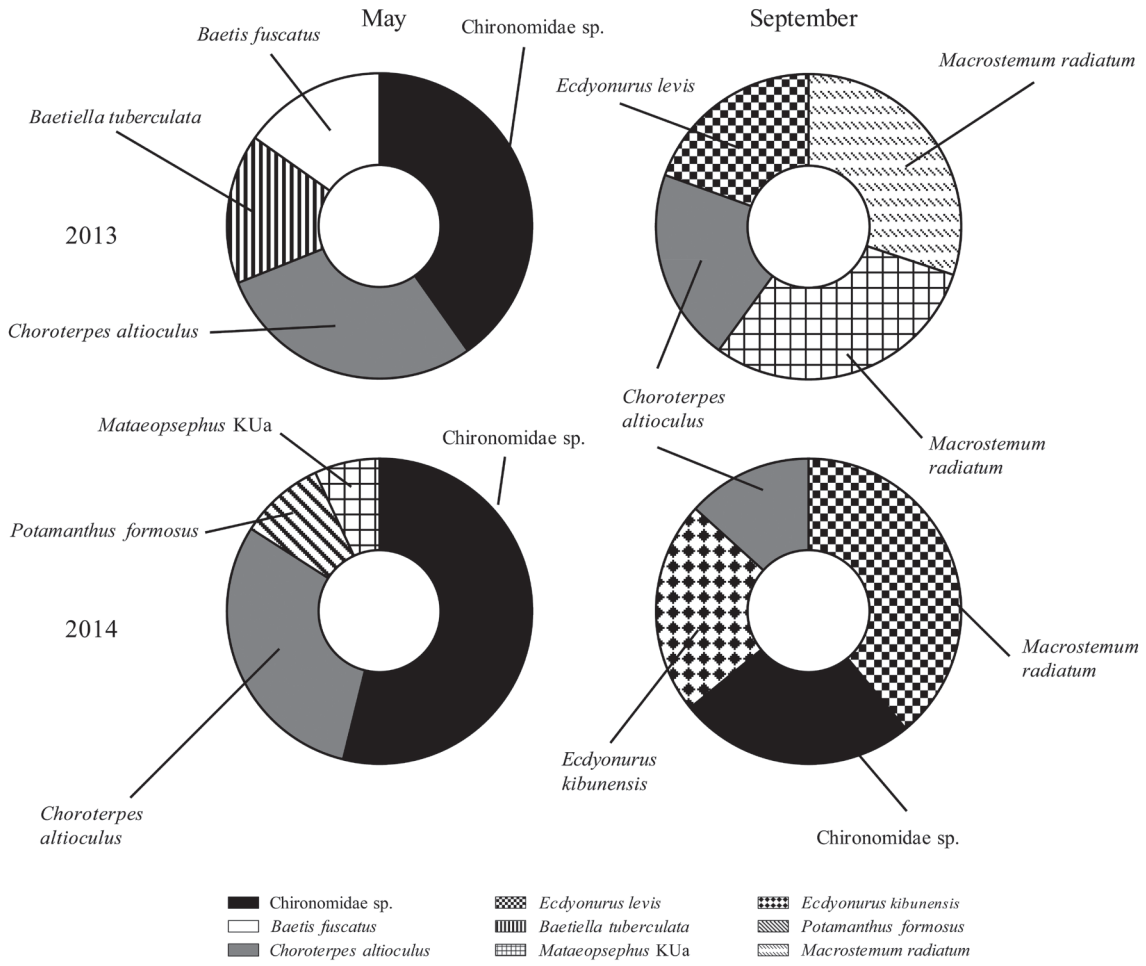

Fig. 4. Changes of dominant species of benthic macroinvertebrates in Seomjin River.

를 차지하였다. 그리고 제3우점종은 2013년 애호랑하루살이(*Baetiella tuberculata*)가 15.9%, 2014년 작은강하루살이(*Potamanthus formosus*)가 9.0%를, 제4우점종은 2013년 개똥하루살이(*Baetis fuscatus*)가 15.2%, 2014년 넓은물삿갓벌레 KUa (*Mataeopsephus* KUa)가 6.9%로 나타났다.

집중 강우 후인 9월은 2013년 큰줄날도래(*Macrostemum radiatum*)가 30.1%, 2014년 네점하루살이(*Ecdyonurus levis*)가 39.0%로 제1우점을 차지하였다. 2013년과 2014년 5월에 제2우점종이었던 세갈래하루살이(*Choroterpes altioculus*)는 강우 후인 2013년 9월에 제3우점종으로, 2014년 9월에는 제4우점종으로 조사되어 계절적인 온도 영향을 크게 받지 않고 다수 출현하는 섬진강의 대표적인 지표생물종으로 나타났다(Fig. 4). 지리적인 위치에 따른 우점종의 분포를 살펴보면, 5월은 상류인 진안에서 하류인 하동으로 갈수록 깔따구류(Chironomidae sp.)와 세갈래하루살이(*Choroterpes altioculus*)가 증가하며, 강우 후인 9월은 상류지역에는 네점하루살이(*Ecdyonurus levis*), 중류지역에는 줄날도래(*Hydropsyche kozhantschikovi*), 하류지역에는 개똥하루살이가(*Baetis fuscatus*) 우점하였다.

4. 생물지수와 환경요인과의 상관성 분석

환경요인과 생물지수와의 상관성을 파악하기 위해, 수질 항목(BOD, T-N, NO_3-N)과 하상 구성(모래, 자갈, 호박돌)을 환경요인으로 사용하였고, 생물지수로는 우점도지수(DI), 다양도지수(H′), 종풍부도지수(RI), 균등도지수(J)를 사용하여 상관분석을 실시하였다(Table 4). 전체적으로 저서 무척추동물을 대상으로 한 생물지수는 하상을 구성하는 모래와 자갈의 함량과 유의적인 상관성이 있는 것으로 나타났다.

2013년 5월은 하상 구성과 가장 높은 상관성을 보였는데, 특히 생물지수 모두 호박돌(DI ($r=-0.709$, $p<0.01$),

Table 4. Pearson's correlation coefficient between average community indices and measured parameters.

	Sand	Gravel	Boulder	BOD	T-N	NO_3-N
May 2013						
Dominance (DI)	−0.567**	−0.636**	−0.709**	−0.225	−0.433	−0.420
Diversity (H′)	−0.636**	0.684**	0.765**	0.283	0.464*	0.460*
Richness (RI)	−0.579**	0.593**	0.703**	0.338	0.490*	0.505*
Evenness (J)	−0.429	0.528*	0.577**	0.100	0.309	0.284
May 2014						
Dominance (DI)	0.377	−0.292	−0.298	0.042	0.302	0.244
Diversity (H′)	−0.332	0.260	0.233	0.012	−0.217	−0.149
Richness (RI)	−0.476*	0.522*	0.348	0.023	−0.146	−0.117
Evenness (J)	0.122	−0.188	−0.111	−0.101	−0.335	−0.263
September 2013						
Dominance (DI)	0.484*	−0.398	−0.407	−0.223	−0.212	−0.120
Diversity (H′)	−0.574**	0.486*	0.520*	0.186	0.281	0.213
Richness (RI)	−0.624**	0.528*	0.610**	0.138	0.279	0.208
Evenness (J)	−0.160	0.090	0.010	0.217	0.131	0.042
September 2014						
Dominance (DI)	0.333	−0.168	−0.352	−0.354	0.018	−0.036
Diversity (H′)	−0.43	0.293	0.446*	0.273	0.033	0.101
Richness (RI)	−0.354	0.316	0.397	0.338	0.074	0.125
Evenness (J)	−0.496*	0.353	0.458*	0.112	−0.088	−0.018

**p < 0.01, *p < 0.05, N = 20

H′ (r = 0.765, p < 0.01), RI (r = 0.703, p < 0.01), J (r = 0.528, p < 0.05))과 강한 상관성을 보였다. 9월은 다양도지수(H′)와 종풍부도지수(RI)가 모래(H′ (r = −0.574, p < 0.01), RI (r = −0.624, p < 0.01))와 음의 상관관계를, 자갈(H′ (r = 0.486, p < 0.05), RI (r = 0.528, p < 0.05))과 호박돌(H′ (r = 0.520, p < 0.05), RI (r = 0.610, p < 0.01))에 대하여 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 2014년 5월은 종풍부도지수(RI)가 모래(r = −0.476, p < 0.05)와 자갈(r = 0.522, p < 0.05)에 대하여 상관성을 보였으며, 9월은 다양도지수(H′)와 종풍부도지수(RI)가 호박돌(H′ (r = 0.466, p < 0.05), RI (r = 0.458, p < 0.05))과 양의 상관관계를 나타내었다.

5. 지리적인 위치에 따른 유사성 파악

기온과 CP 그리고 저서성 대형무척추동물의 우점종을 대상으로 각 조사지점 간의 유사성을 파악하고자 집괴분석을 하였다(Fig. 5). Ward' method를 이용하여 집괴분석(Cluster analysis)을 실시한 결과 기온과 강수량에 차이가 많았던 강우 전인 5월(I)과 강우 후인 9월(II)로 크게 두 그룹으로 나뉘어졌다. 그리고 5월이 묶여져 있는 그룹 I은 우점종과 지리적인 위치가 반영되어 나뉘어졌다: 그룹 A는 세갈래하루살이(*Choroterpes altioculus*)가 다수 출현한

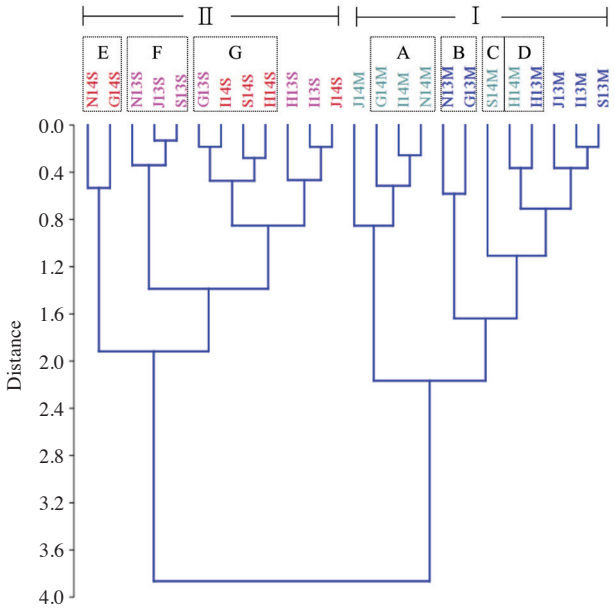

Fig. 5. A dendrogram of cluster analysis based on annual mean temperatures and annual cumulative precipitation and dominant species of benthic macroinvertebrates by ward's method. Front words mean regions (J: Jinan, I: Imsil, S: Sunchang, N: Namwon, G: Gokseong, H: Hadong) and last words mean months (M: May, S: September) and middle numbers mean years (13: 2013, 14: 2014).

중상류지역, 그룹 B는 개똥하루살이(*Baetis fuscatus*)가 출현한 남원과 곡성, 그룹 C는 깔따구류(Chironomidae sp.)가 다수 출현한 순창, 그리고 그룹 D는 다른 지역보다 기온이 높고 강수가 많았던 하동이 묶여져 구분되었다. 강수량과 기온이 높았던 9월의 그룹 II는 우점종의 출현에 영향을 받아 3그룹으로 나누어졌다: E는 네점하루살이(*Ecdyonurus levis*)와 두점하루살이(*Ecdyonurus kibunensis*)가 다수 출현한 2014년 남원과 곡성, 그룹 F는 넓은물삿갓벌레 KUa (*Mataeopsephus* KUa)가 다수 출현한 2013년 남원, 진안과 순창이, 그룹 G는 넓은물삿갓벌레 KUa가 적게 출현하였던 곡성, 임실, 순창, 하동이 묶여져 나타났다.

적 요

기온과 강수량의 변화에 따른 저서성 대형무척추동물 우점종의 변화를 알아보기 위하여, 섬진강 본류 20지점을 대상으로 2013년과 2014년 5월과 9월 년 2회씩 총 4회에 걸쳐 조사하였다. 서식환경에 중요한 요인으로 작용하는 기온, 강수량, 수질요인과 하상 구성을 수집하고 측정하였다. 섬진강의 평균기온은 2013년에 비해 2014년 0.2°C 증가하였고, 상류에서 하류로 갈수록 기온이 증가하는 양상이 뚜렷하여 3°C 이상의 차이를 보였다. 또한 연 누적강수량(ACP)도 저위도로 갈수록 증가되었다. 섬진강은 강우 전 5월(7.6~11.3°C)에 비하여 강우 후 9월(21.7~24.5°C)에 기온이 2배 이상 높아지며, CP는 강우 전(263 mm~287.5 mm)과 강우 후(756.3 mm~882 mm)에 약 3배 증가하는 것으로 나타났다. 여름철 집중 강우로 인한 유실효과로, 개체수와 종 수는 5월이 9월보다 높았다. 5월은 깔따구류와 세갈래하루살이, 9월은 네점하루살이, 큰줄날도래, 세갈래하루살이가 우점을 차지하였다. 생물지수와 환경요인 간의 상관성 분석 결과, 하상 구성 중 호박돌 및 모래와 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 섬진강의 기온과 CP, 우점종 출현과의 집괴분석한 결과 강수량과 기온에 따라 2그룹으로 크게 나뉘었으며, 우점종과 지리적인 위치가 반영되어 세부적인 그룹으로 나뉘어짐을 파악하였다.

사 사

본 연구는 환경부 "수생태건강성 조사 및 평가"와 한국연구재단 NRF-2016-R1D1A3B-03934515 지원을 받아 이루어졌습니다.

REFERENCES

Alldredge, 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.

Bae, D.H., I.W. Jung and H.J. Chang. 2008. Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins. *Hydrological Processes* **22**(14): 2644-2656.

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.

Boykin, K.G., W.G. Kepner, D.F. Bradford, R.K. Guy, D.A. Kopp, A.K. Leimer, A.K. Leimer, E.A. Samson, N.F. East, A.C. Neale and K.J. Gergely. 2013. A national approach for mapping and quantifying habitat-based biodiversity metrics across multiple spatial scales. *Ecological Indicators* **33**: 139-147.

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.

Connolly, N.M. and R.G. Pearson. 2007. The effect of fine sedimentation on tropical stream macroinvertebrate assemblages: a comparison using flow-through artificial stream channels and recirculating mesocosms. *Hydrobiologia* **592**: 423-438.

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.

Death, R.G. 2008. The effect of floods on aquatic invertebrate communities. CAB International, Wallingford.

Feebarani, J., T.V. Joydas, R. Damodaran and A. Borja. 2016. Benthic quality assessment in a naturally- and human-stressed tropical estuary. *Ecological Indicators* **67**: 380-390.

Hong, S.H., Y.G. Kim, W.H. Lee and E.S. Chung. 2012. Rainfall variations of temporal characteristics of Korea using rainfall indicators. *Journal of Korea Water Resources Association* **45**(4): 393-407.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United

Kingdom/New York, NY, USA.

Jin, M.J. and S.Y. Park. 2015. Temperature Changes of Climatic Solar Terms and Their Spatiotemporal Characteristics in South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* **50**(1): 23-36.

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., S.A. Jeong and G.S. Jeong. 2008. Community Composition on Stream Benthic Macroinvertebrate in Daegu. *Korean Journal of Environmental Biology* **26**(1): 47-55.

Kwon, S.J., Y.C. Jeon and J.H. Park. 2013. Checklist of organisms in Korea 7. Benthic macroinvertebrates. Eco and Nature, Seoul.

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 streamflow vulnerability to climate change in Oregon, USA. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**(9): 3367.

Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *General Systems* **3**: 36-71.

Mantyka-Pringle, C.S., T.G. Martin, D.B. Moffatt, S. Linke and J.R. Rhodes. 2014. Understanding and predicting the combined effects of climate change and land-use change on freshwater macroinvertebrates and fish. *Journal of Applied Ecology* **51**(3): 572-581.

McFarland, B., F. Carse and L. Sandin. 2010. Littoral macroinvertebrates as indicators of lake acidification within the UK. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **20**(S1): S105-S116.

Mesa, L.M. 2012. Interannual and seasonal variability of macroinvertebrates in monsoonal climate streams. *Brazilian Archives of Biology and Technology* **55**: 403-410.

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.

MOE/NIER. 2013. The survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea.

MOE/NIER. 2014. The survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea.

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.

Parasiewicz, P.E. Castelli, J.N. Rogers and E. Plunkett. 2012. Multiplex modeling of physicalhabitat 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.

Park, Y.J., K.D. Kim, Y.H. Cho, Y.G. Han, Y.J. Kim and S.H. Nam. 2011. Habitat Classification and Distribution Characteristic of Aquatic Insect Functional Feeding Groups in the Geum River, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **25**(5): 691-709.

Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. Wiley and Sons, New York, 165pp.

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.

Praskievicz, 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.

Rosenberg, D.M. and V.H. Resh. 1993. Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. Chapman & Hall, New York, 488pp.

Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, 233pp.

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.

Shen, X.M., T. Sun, F.F. Liu, J. Xu and A. Pang. 2015. Aquatic metabolism response to thehydrologic alteration in the Yellow River estuary, China. *Journal of Hydrology* **525**:

42-54.

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.

Theodoropoulos, C., A. Vourka, A. Stamou, P. Rutschmann and N. Skoulikidis. 2017. Response of freshwater macroinvertebrates to rainfall-induced high flows: A hydroecological approach. *Ecological Indicators* **73**: 432-442.

Won, D.H., S.J. Kwon and Y.C. JUN. 2008. Aquatic insects of korea. Korea Ecosystem Service, Seoul.

Xenopoulos, M.A., D.M. Lodge, J. Alcamo, M. Märker, K. Schulze and D.P. Van Vuuren. 2005. Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal. *Global Change Biology* **11**(10): 1557-1564.

Yan, J.X., J.L. Liu and M.Y. Ma. 2014. In situ variations and relationships of waterquality index with periphyton function and diversity metrics in BaiyangdianLake of China. *Ecotoxicology* **23**: 495-505.

Yang, H.K. and H.C. Choi. 2003. Estimation of Water Quality Environment in Youngsan and Seumjin River Basins. *Journal of the Korean Geographical Society* **38**: 16-32.

Yoon, I.B. 1995. Aquatic Insects of Korea. Junghaengsa, 262pp.