

Original article

온도 분포가 다른 두 산림 하천의 저서성대형무척추동물 군집 특성 비교

이다영 · 이대성 · 박찬우¹ · 윤순진¹ · 임종환¹ · 박영석*

경희대학교 생물학과, ¹국립산림과학원 산림생태연구과

Comparison of Benthic Macroinvertebrate Communities at Two Headwater Streams Located with Different Temperature Regions in South Korea. Da-Yeong Lee (0000-0002-2457-2041), Dae-Seong Lee (0000-0001-7288-0156), Chanwoo Park¹ (0000-0002-0049-2493), Soon Jin Yun¹ (0000-0001-5272-0796), Jong-Hwan Lim¹ (0000-0002-2174-9948) and Young-Seuk Park* (0000-0001-7025-8945) (Department of Biology, Kyung Hee University, Dongdaemun, Seoul 02447, Republic of Korea; ¹Division of Forest Ecology, National Institute of Forest Science, Dongdaemun, Seoul 02455, Republic of Korea)

Abstract Macroinvertebrates in forest streams affect the overall health of other streams in the same water system. In this study, we compared differences in the benthic macroinvertebrate community at two headwater streams located at different latitudes in the southern and northern parts of South Korea. We calculated the community temperature index (CTI), which represents the thermal preferences of the benthic communities. Hierarchical cluster analyses (HCA) were conducted to compare the similarities among sampling sites. In addition, we analyzed the relationship between community composition and environmental and community characteristics using non-metric multidimensional scaling (NMDS). Our results showed that CTI was significantly different between the two regions, indicating that these benthic macroinvertebrate communities have different thermal preferences. These two regions were clearly distinguished from each other in the HCA; furthermore, seasonal differences in benthic community composition were observed within each region. The functional feeding groups present in the benthic macroinvertebrate communities were different even though their habitat was similar.

Key words: headwater stream, forest stream, community temperate index (CTI), community analysis, effects of temperature

서 론

산림 하천은 대부분 상류에 위치하며 하천 차수가 낮고 하류와는 다른 환경 특성을 가지며, 이들 지역에서 서식하는 생물은 하류지역의 생물 군집에 영향을 미친다. 특히 산

림 하천의 주요 서식 생물인 저서성대형무척추동물은 하류의 동일 수계 전반의 생물다양성에 영향을 미치므로 담수생태계의 보전 및 관리에서 중요한 위치를 가지고 있다(Meyer *et al.*, 2007; Wipfli *et al.*, 2007). 저서성대형무척추동물은 1차 생산자, 유기물 등을 섭식하고 최상위 포식자의 주요한 먹이원으로 하천 내 에너지 흐름에 중요한 연결고리 역할을 한다(Malmqvist, 2002; Boulton, 2003). 산림 하천으로 대표되는 상류 하천에는 어류의 포식압이 적어 저서성대형무척추동물은 중간자로서의 역할뿐 아니라 최상위 포식자의

Manuscript received 4 June 2021, revised 16 June 2021, revision accepted 17 June 2021
* Corresponding author: Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244
E-mail: parkys@khu.ac.kr

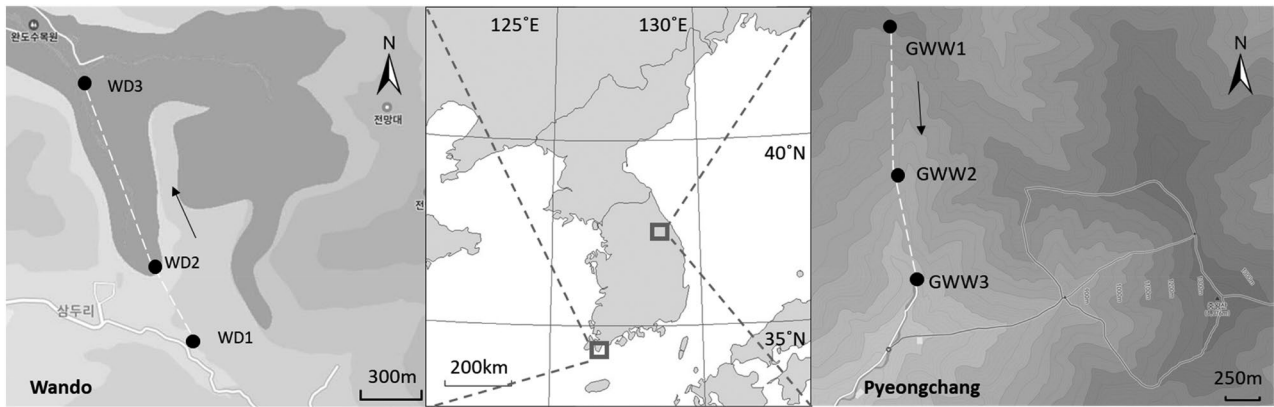


Fig. 1. The map of the study sites in South Korea.

역할도 하므로 중요성이 상대적으로 크다(Richardson and Danehy, 2007). 저서성대형무척추동물은 상대적으로 행동권이 좁아 경쟁적 배제 등의 상호작용이 상대적으로 적으므로 다양한 종이 공존할 수 있으며(Heino *et al.*, 2003b), 상류 하천에서의 저서성대형무척추동물 군집은 종류에 비해 지역 내 다양성은 상대적으로 낮으나 조사지역 간의 이질성이 크므로 각각의 상류 하천의 고유의 생물학적 과정을 연구하는 데 적합하다(Richardson and Danehy, 2007).

저서성대형무척추동물은 담수생태계에서는 수질 지표(Ab Hamid and Rawi, 2017), 수리수문학적 요소(Dunbar *et al.*, 2010; Herbst *et al.*, 2018), 하상 구조(Radwell and Brown, 2008)와 주변 토지이용(Moore and Palmer, 2005; Kim *et al.*, 2016) 등 다양한 자연적 변수에 따라 다양한 군집 구조를 보인다. 또한 미소서식지 환경과 더불어 고도와 위도는 기온 및 수온과 밀접한 관련이 있으며, 온도는 생물의 생리적 기능에 영향을 미쳐 서식 가능한 종을 제한하여 군집 구조를 결정한다(Jacobsen *et al.*, 1997; Heino *et al.*, 2003a; Pörtner and Farrell, 2008; Day *et al.*, 2018). 한편 우리나라에서는 전국 규모에서 조사된 주요 수서 곤충을 이용하여 다양한 환경 특성이 수서 곤충의 분포에 미치는 영향을 평가하였고(Li *et al.*, 2012), 온도 변화가 이들의 분포에 미치는 영향에 대해 평가하고 미래기후 변화 시나리오에 따른 변화를 예측하였다(Li *et al.*, 2014).

한편, 국내 산림 하천의 위도에 따른 저서성대형무척추동물 군집의 차이를 비교한 연구는 제한적이다. Lee *et al.* (2018)는 평창에서 산맥을 두고 나누어진 위도가 거의 같은 두 지역의 군집 구성의 차이를 비교하여 위도 외의 환경 조건에 따른 군집 변화를 연구하였으며, 두 하천 사이에는 명확한 군집 구조 차이가 있었으며 조사지역 내에서는 계절적 영향이 크다고 밝혔다. Bae *et al.* (2016)은 4년에 걸쳐 서로

다른 연도에 조사된 4개 지역 군집 구조의 시공간적 차이를 비교하였으며, 각 지역 간 공간적 차이가 가장 지대한 영향을 미쳤고 계절적인 영향에 따라라도 지역 내에서의 군집 구조가 달라짐을 밝혔다.

이 연구는 위도 차이에 따른 온도가 다른 두 산림 하천에서 저서성대형무척추동물 군집의 특성을 분석하고 이러한 결과에 미치는 환경 특성을 비교 분석하였다. 이러한 결과는 산림 하천의 저서성대형무척추동물 다양성 보전과 온전한 수생태계 관리에 기여할 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

야외 조사는 위도 및 연평균 기온이 다른 두 지역(강원도 평창군 중왕산 및 전라남도 완도군 완도수목원)에서 실시하였다(Fig. 1). 평창군 중왕산에서는 하안미천 상류에서, 완도군 완도수목원에서는 군외천 상류에서 각각 3개 지점을 선정하여 저서성대형무척추동물 및 환경 특성을 조사하였다. 평창 조사지점은 고도 700~1100 m에 위치하며 연평균 기온 7.27°C를 보이며, 유역에는 들메나무, 가래나무, 복장나무, 개벚지 나무 등으로 구성된 숲이 발달되어 있다(Lee *et al.*, 2004) (Table 1) 한편 완도 조사지점은 고도 100~200 m에 위치하며, 연평균 기온 13.00°C를 보이며, 식생은 온대성 식물부터 난대성 식물까지 다양한 식생 분포를 보이고(Oh *et al.*, 2013) 울창한 혼효림으로 둘러싸여 있다. 두 지역의 연간 강수량은 인근 기상 관측소 기준으로, 평창이 1731.4 mm, 완도가 1431.4 mm이다(Korea Meteorological Administration, 2018). 두 지역 모두 일반인들의 접근이 제한적이며 인위적 교란이 적은 곳이다.

Table 1. Environmental condition of two study areas.

Variable	Pyeongchang	Wando
Latitude,	37° 28' 9.24" N,	34° 20' 57.7" N,
Longitude	128° 29' 51.42" E	126° 40' 20.5" E
Elevation (m)	700~1100	100~200
Average annual temperature (°C)	7.27	13.00
Major vegetation	<i>Fraxinus mandshurica</i> <i>Juglans mandshurica</i> <i>Acer mandshuricum</i> <i>Prunus maackii</i>	<i>Quercus acuta</i> <i>Camellia japonica</i>

2. 저서성대형무척추동물 군집 조사

저서성대형무척추동물은 서버넷 (Surber-net) (30×30 cm², 망목 크기 100 μm)을 이용하여 각 조사지점에서 봄과 여름 2회 채집되었다. 봄과 여름의 군집 특성을 비교분석하기 위하여 계절에 따른 조사를 하였다. 여름 조사시기에는 강수 후 일주일 이상의 간격을 두어 하천이 안정된 시기에 조사를 진행하였다. 각 조사지점 내에서는 1~3 m 간격으로 여류지역에서 5개 지점을 선정하여 반복 채집하였다. 생물 시료는 채집 즉시 95% 에탄올에 고정되었으며 이후 실험실에서 70% 알코올로 교체하여 보관하였다(Bae *et al.*, 2016). 채집한 생물은 300 μm 이상인 개체를 대상으로 분류 동정하였다. 저서성대형무척추동물의 분류는 대부분 종 수준으로 이루어졌으나 깔따구류 등 일부 분류 동정이 어려운 분류군은 과 수준에서 분류하였다(Pennak, 1953; Brinkhurst and Jamieson, 1971; Quigley, 1977; Brigham *et al.*, 1982; Yoon, 1988; Merritt and Cummins, 1996).

저서성대형무척추동물 채집과 함께 각 조사지점에 대한 환경 특성을 조사하였다. 수리수문학적 요소, 이화학적 수질 및 하상 구조는 채집과 동시에 조사되었다. 수리수문학적 요소 중 수심과 하폭은 줄자를 이용하였으며, 유속은 유속계 (KENEK VE20)를 사용하여 측정하였다. 이화학적 수질인 자는 다항목수질측정기 (Orion® StarA223)를 이용하여 전기 전도도, 용존산소 (DO), pH 등을 측정하였다. 생물화학적 산소 요구량 (BOD₅)은 20°C의 암실에서 5일간 보관한 후 측정되었다. 하상 구조는 하상 구성 입자의 평균 지름에 따라 7개 단계로 나누어 조사하였다. 하상 입자는 작은 자갈 이하 (D < 8 mm), 중간 크기 자갈 (8 ≤ D < 16 mm), 거친 자갈 (16 ≤ D < 32 mm), 매우 거친 자갈 (32 ≤ D < 64 mm), 작은 호박돌 (64 ≤ D < 128 mm), 큰 호박돌 (128 ≤ D < 256 mm), 바위 (D ≥ 256 mm)로 분류하였다(Cummins and Lauff, 1969;

Lee *et al.*, 2018).

3. 자료 분석

채집한 저서성대형무척추동물 군집에 대하여 조사지 및 조사시기에 따라 군집지수를 산출하였다. 군집지수는 종풍부도 (richness), 개체수 (abundance), EPT 분류군 (하루살이목, 강도래목, 날도래목)의 개체수 비율, Shannon 다양도 지수 (Shannon and Weaver, 1949), 균등도, 우점도를 계산하였다. 우점종 산출에는 깔따구류는 제외하였다.

각 조사시기와 조사지점에 따른 군집의 공간간적 특성을 분석하기 위하여 집괴분석 (Cluster analysis, CA)을 수행하였다. 집괴분석은 군집 구성의 이질성에 따라 Bray-Curtis 거리를 산출한 후 Ward 연결 방법을 이용하여 수행하였다. 개체수의 변이를 줄이기 위하여 로그변환을 한 후 분석하였다. 이때, 로그 0의 불능을 피하고자 개체수에 1을 더하여 로그 변환하였다.

공간간적인 군집 구성의 차이를 대표하는 종을 선정하기 위해 지표종 분석을 하였다. 지표종 선정은 Dufrene and Legendre (1997)의 방법에 따라 각 종의 상대적인 개체수와 상대 빈도를 곱한 지표값 (IndVal)을 이용하였다(Lee *et al.*, 2018). 지표종 분석에서는 2개 지점 또는 2개의 조사시기 이상에서 나타난 종만 대상으로 하였으며, 로그 변환하여 사용하였다.

이 연구에서는 채집된 분류군의 섭식기능군 (functional feeding groups, FFGs)을 조사하여 조사지역 간의 기능적 군집의 차이를 비교하고자 하였다. 기능적 군집은 분류학적인 군집 구성이 포착하기 어려운 군집의 특성을 파악할 수 있도록 한다 (Filippi-Codaccioni *et al.*, 2010). 섭식기능군은 썰어먹는 무리 (Shredder), 긁어먹는 무리 (Scraper), 주워먹는 무리 (Gatherer-collector), 걸러먹는 무리 (Filterer-collector), 포식자 (Predator)로, 총 5가지로 분류하였다. 분류는 Barbour *et al.* (1999)을 따랐다.

또한 군집 구성원들의 온도 선호를 축약해서 보여줄 수 있는 군집 온도 지수 (Community temperature index, CTI)를 계산하였다 (Devictor *et al.*, 2008; Bowler and Böhning-Gaese, 2017). CTI는 기후 변화에 따른 군집 변화를 추적하는 등 온도의 변화에 대한 연구에 주로 이용되고 있다. 이를 이용하면 낮은 기온에 적응한 종으로부터 높은 기온에 적응한 종으로 군집 구성이 변화하는 흐름을 기온으로서 수치화하여 추적할 수 있어 기존의 군집지수가 포착하지 못한 군집의 변화를 포착할 수 있다 (Filippi-Codaccioni *et al.*, 2010).

CTI는 군집에 속하는 각각의 종이 선호하는 온도를 상대적 개체수로 가중하거나 채집 여부 (0 또는 1)에 따라 산출할

수 있다. 각각의 종의 선호 온도는 Species temperature index (STI)로 표현된다. STI는 2008~2020년까지 이용된 하천 수생태계건강성평가(Minister of Environment and National Institute of Environmental Research, 2015)와 평년 연평균 기온 자료를 이용하여 상대적 개체수를 가중하여 계산하였다. 여기서 구한 각 종의 STI를 이용하여 CTI를 구하는 식은 다음과 같다(Devictor *et al.*, 2008; Bowler and Böhning-Gaese, 2017).

$$CTI = \sum_{s=1}^n Optimal\ Temperature_s \times Relative\ abundance_s$$

여기서 s 는 각각의 종을 나타내며 n 은 군집 내 종풍부도를 의미한다. 최적 온도는 STI를 의미하고, 상대 개체수(relative abundance)는 군집 내에서 종 s 의 개체수를 전체 개체수로 나눈 값이다. 이 중 과 단위로 분류되어 STI를 계산할 수 없었던 깔따구류를 제외하고 CTI를 산출하였다. Mann-Whitney U test를 이용하여 조사지역 간의 차이를 평가하였다.

마지막으로, 생물 군집의 시공간적 변이와 군집지수 및 서식지 환경과의 관계를 분석하기 위하여 Non-metric multi-dimensional scaling (NMDS)를 수행하였다(McCune *et al.*, 2002). NMDS는 집괴분석에 사용한 자료와 동일한 자료를 적용하였으며, 변이를 줄이기 위하여 모든 지점 및 계절을 통틀어 한 번만 출현한 10개 분류군은 제외하고 분석하였다. 또한 시공간 단위로 분류된 NMDS 좌표값과 군집지수, 섭식 기능군, CTI, 환경인자들 사이의 상관관계를 조사하였다. 상관관계는 환경변수를 종속변수로 두고 NMDS 축에 대한 다중 선형 회귀식을 세운 후 이를 기반으로 통계적 유의성을 검증하였다(Zelený and Schaffers, 2012).

모든 분석은 R (<https://www.r-project.org/>) (R Core Team, 2019)에서 관련 package를 이용하여 수행되었다. 지표종 분석은 indicpecies package (De Cáceres and Jansen, 2016)를 이용하였고, 집괴분석과 NMDS는 vegan package (Oksanen *et al.*, 2019)를 이용하였다. Mann-Whitney U test는 stats package (R Core Team, 2019)를 이용하였다.

결 과

평창과 완도 조사지역에서 총 4목 6강 13목 49과 79분류군에서 21,929개체가 채집되었다. 이 중 평창에서는 3문 5강 12목 44과 69분류군 13,042개체, 완도에서는 4문 5강 12목 37과 52분류군 8,887개체가 채집되었다. 종수와 개체수는 평창이 완도보다 많았고, 봄철보다는 여름철에 감소하였다(Table 2). EPT 비율도 평창이 완도보다 높게 나타났으나,

두 조사지역은 계절에 따라 다른 경향성을 보였다. 평창의 경우 여름철 조사에서 깔따구류의 감소로 EPT 비율이 증가한 반면, 완도는 봄철 51.6%에서 여름철 조사에는 31.4%로 감소하였다. Shannon 다양도 지수와 균등도는 평창이 더 높고 우점도는 완도가 더 높게 나타나 완도보다는 평창이 다양성이 높고 균등한 군집 구조를 가진 것으로 나타났다.

각 조사지점 및 조사시기에서 깔따구류를 제외하면 우점종은 평창에서는 두점하루살이(*Ecdyonurus kibunensis*), 완도에서는 길쭉하루살이(*Alanites muticus*)로 나타났다(Table 2). 평창의 경우 봄과 여름 조사 모두 두점하루살이가 우점종이었으며, 제2우점종은 봄과 여름 조사에서 각각 두갈래하루살이와 감조하루살이였다. 조사시기에 무관하게 최우점종이 같았던 평창과는 달리 완도에서는 봄 조사시기에서는 길쭉하루살이가 최우점종이었으나 여름 조사시기에는 옆새우류(*Gammarus* sp.)가 가장 우점하고 길쭉하루살이는 제2우점종으로 나타났다.

집괴 분석 결과 평창과 완도 지역으로 크게 두 부분으로 나눌 수 있었다(Fig. 2). 평창 내에서는 가장 상류에 위치한 지점인 GWW1은 계절적 영향보다 공간적인 유사성이 더 두드러진 반면, GWW2과 GWW3은 계절에 따른 차이가 우세하였다. 완도 지역 또한 계절에 따른 차이가 두드러졌으며 지점 간의 유사성은 계절마다 달라지는 것으로 나타났다. 평창 지역은 여름 표본인 GWW2_SU 및 GWW3_SU을 하나의 그룹으로 묶을 수 있었고(그룹 A), 봄 및 일부 여름 표본(GWW_SP 및 GWW1_SU)을 하나의 그룹으로 묶을 수 있었다(그룹 B). 완도 조사지점은 봄 조사(그룹 C)와 여름 조사(그룹 D)로 나눌 수 있었다.

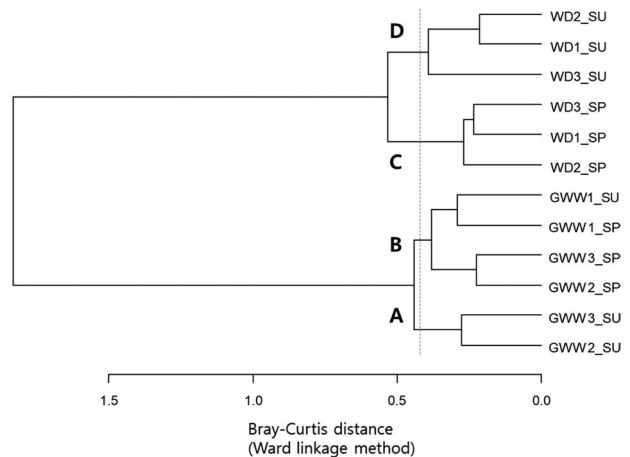


Fig. 2. Classification of samples collected at two different regions in spring and summer. The dendrogram of hierarchical cluster analysis was built with Ward linkage methods using Bray-Curtis distance. GWW: Pyeongchang, WD: Wando, SP: Spring, SU: Summer.

Table 2. Community indices and dominant species at each study region.

Region and season	Pyeongchang			Wando		
	Spring	Summer	Total	Spring	Summer	Total
Richness	59	53	69	44	35	52
Abundance	8175	4867	13042	4852	4035	8887
%EPT*	58.9	64.5	61	51.6	31.4	42.5
H**	2.54	2.56	2.66	1.93	2	2.05
Evenness	0.62	0.64	0.63	0.51	0.56	0.52
Dominance	47.2	47.4	47.3	68	59.3	61.2
1 st dominant species (%)	<i>Ecdyonurus kibunensis</i>	<i>Ecdyonurus kibunensis</i>	<i>Ecdyonurus kibunensis</i>	<i>Alanites muticus</i>	<i>Gammarus sp.</i>	<i>Alanites muticus</i>
	10.96	20.25	14.43	2.69	20.02	20.81
2 nd dominant species (%)	<i>Paraleptophlebia chocolata</i>	<i>Baetis silvaticus</i>	<i>Paraleptophlebia chocolata</i>	<i>Ecdyonurus kibunensis</i>	<i>Alanites muticus</i>	<i>Gammarus sp.</i>
	7.98	7.54	5.92	6.86	13.73	10.78

*Percentage of Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera. **Shannon diversity index

Table 3. Indicator species in each group defined in the hierarchical cluster analysis.

Group	Order	Species	[IndVal]	p value
B	Ephemeroptera	<i>Cinygmula sp. 1</i>	1.000	0.003
B	Plecoptera	<i>Yoraperla sp. 1</i>	0.866	0.045
C	Ephemeroptera	<i>Caenis nishinoae</i>	0.923	0.010
D	Ephemeroptera	<i>Heptagenia kyotoensis</i>	1.000	0.012

Table 4. Species richness (%) of functional feeding groups at two different study regions.

Functional feeding group	Pyeongchang	Wando	Total
Filterer-collector	6 (8.7)	6 (11.5)	7 (8.9)
Gatherer-collector	14 (20.3)	13 (25.0)	17 (21.5)
Predator	21 (30.4)	18 (34.6)	24 (30.4)
Scraper	17 (24.6)	11 (21.2)	20 (25.3)
Shredder	11 (15.9)	4 (7.7)	11 (13.9)

각 조사지역 및 조사시기의 지표종을 분석한 결과 총 4종이 선정되었다 (Table 3). 평창의 GWW1 지점에서 조사된 봄 및 여름의 표본으로 구성된 그룹 B에서는 봄치너하루살이 (*Cinygmula sp. 1*)와 넓은가슴강도래 (*Yoraperla sp. 1*)로 두 종이 지표종으로 나타났다. 완도 지역 봄 조사를 나타내는 그룹 C에서는 등딱지하루살이 (*Caenis nishinoae*)가, 여름 조사를 나타내는 그룹 D에서는 총채하루살이 (*Heptagenia kyotoensis*)가 지표종으로 나타났다. 그룹 A에서는 지표종이 나타나지 않았다.

섭식기능군 중에는 씹어먹는 무리 11 분류군, 굵어먹는 무리 20 분류군, 주워먹는 무리 17 분류군, 걸러먹는 무리 7 분류군, 포식자 24 분류군으로 나타났다 (Table 4). 개체수의 비율로는 평창과 완도 모두 주워먹는 무리가 가장 많았는데 이는 깔따구류 때문으로 보였다. 굵어먹는 무리의 비율은 대체로 평창이 완도 지역보다 높았다 (Fig. 3a). 평창에서는 굵어먹는 무리가 주워먹는 무리 다음으로 높은 비율을 차지하였다. 반면 완도에서는 굵어먹는 무리와 씹어먹는 무리의 비율이 유사하게 나타났다. 깔따구류를 제외한 경우, 평창에서는 굵어먹는 무리가 가장 높은 비율을 차지한 데 반해 완도에서는 여전히 주워먹는 무리의 비율이 가장 높았다 (Fig. 3b). 두 조사지역 모두에서 걸러먹는 무리의 비율이 가장 낮았으나 완도 조사지역이 평창 조사지역보다는 높은 비율을 보였다.

군집 온도 지수는 평창 조사지점이 완도 조사지점보다 높았다. 평창 조사지점의 평균 CTI는 9.8 (±0.45)°C, 완도 조사지점은 11.0 (±0.24)°C로 나타났다 (Fig. 4). Mann-

Whitney U test의 결과 평창과 완도의 CTI 값은 유의미한 차이가 있었다($p=0.002$).

NMDS 분석에서는 NMDS 축에 따라 각각 조사지점 및 조사시기에 따라 나누어졌다(Fig. 5). 상관관계 분석은 환경, 군집지수, 섭식기능군 중 시공간적인 군집 변화와 유의미하게 상관관계가 있는 변수만을 나타냈다. 지표종으로 선정된 분류군들의 경향성은 지표종 분석 결과를 잘 반영해주었다(Fig. 5a). 그룹 B에서는 봄처녀하루살이가 평창 봄 조사에서 두드러지는 것으로 나타났고, 그룹 C에서는 등딱지하루살이, 그룹 D에서 총채하루살이의 경향성이 유의미하게 나타났다($p<0.05$). 그룹 B의 지표종 중 넓은가슴강도래는 해당 지역 및 공간에서 주로 분포하는 경향성은 나타났으나 통계적으로 유의하지 않았다.

고도는 완도보다 평창이 높은 경향성이 나타났으며, 수은의 경우 완도 여름 조사에서 높은 경향성을 보였다(Fig. 5b). 전기전도도는 고도와 반대 경향성을 보였으며, 탁도는 봄철보다 여름철에 더 높은 경향성을 보였다. 수심은 완도 봄 조사가 높은 경향성을 보였다. 조사항목 중 하상 구조는 지점 간 큰 차이가 없었다.

군집지수는 종수와 개체수는 평창 지역 봄 조사, 다양도와 균등도는 평창 지역 여름 조사에서 높은 경향성을 보였다(Fig. 5c). 고도와 위도를 고려하였을 때 CTI는 고도와 위도가 모두 낮은 완도에서 더 높은 값을 보였다. 섭식기능군에서도 앞선 분석을 지지해 주었다. 평창에서 굵어먹는 무리의 비율이 높으며, 완도 WD3 지점 여름(WD3_SU) 조사에서는 걸러먹는 무리가 높은 경향성을 보였는데 이는 먹파리류의

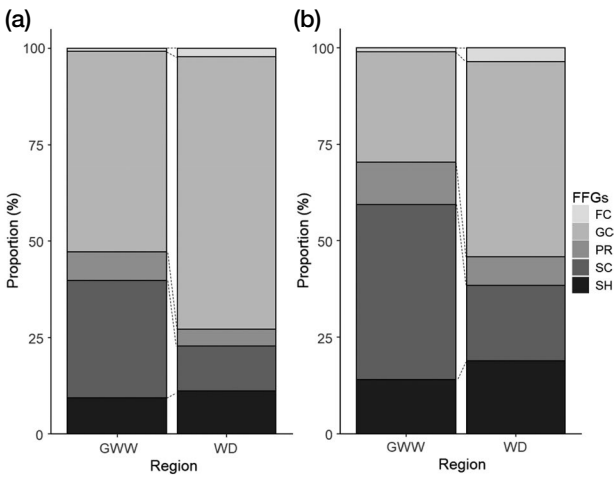


Fig. 3. Proportion of functional feeding groups at two different study regions (GWW: Pyeongchang, and WD: Wando). (a) With all taxa, (b) without Chironomidae. FC: filterer-collector, GC: gatherer-collector, PR: predator, SC: scraper, SH: shredder.

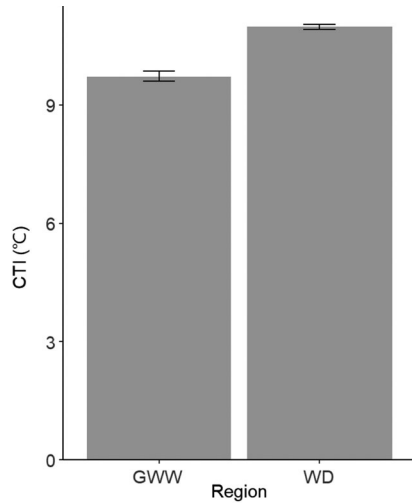


Fig. 4. Differences in community temperature index (CTI) at two different study regions (GWW: Pyeongchang and WD: Wando). Error bar indicate the standard error of CTI value.

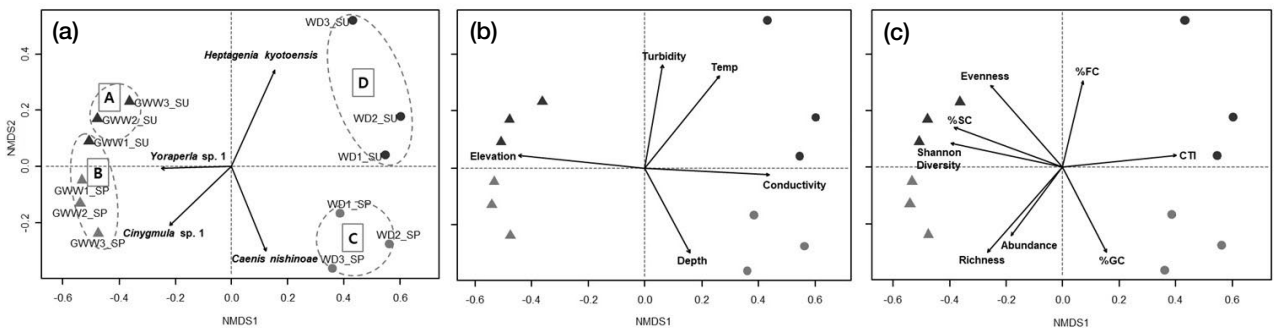


Fig. 5. (a) NMDS ordination of samples collected at two different regions (stress value for the first two axes: 0.049), (b) biplot of environmental variables on the NMDS, and (c) biplot of community indices on the NMDS. Indicator species were visualized in the plot a. Groups defined in the hierarchical cluster analysis were visualized as A-D. Sample names are presented in Figure 2. Temp: Mean average temperature; CTI: community temperature index; %SC: proportion of scraper; %GC: proportion of gatherer-collector; %FC: proportion of filterer-collector.

증가 때문이다. 또한 완도 봄 조사시기에서 굽어먹는 무리의 비율이 높은 경향성을 보였다.

고 찰

이 연구에서는 2019년 평창과 완도 조사지역에서 이루어진 저서성대형무척추동물 군집 조사를 바탕으로 시공간적 군집의 변화를 분석하였다. 지표종 분석, 군집 분석을 수행하였으며 섭식기능군에 따른 기능적 군집 구조와 CTI를 구하였다. 마지막으로 NMDS 분석을 통해 시공간적 군집 변동과 군집지수, 환경의 변이 등의 관계를 분석하고자 하였다. 평창과 완도 조사지역의 산림 하천은 유사한 미소서식지 환경에도 불구하고 상이한 군집 구조를 보였다. 또한 위도와 고도가 더 높은 평창 조사지점의 군집 온도 지수가 완도 조사지점보다 유의미하게 낮았다.

평창과 완도의 개체수와 종풍부도, 다양도, 균등도와 같은 군집지수의 비교와 집괴 분석을 통해서 저서성대형무척추동물의 군집 구조는 대체로 시간적 차이보다 고도 및 위도의 영향이 군집 구성에 더 지대한 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 상류 하천에서의 군집 구성은 지역에 따라 변동이 크다는 Clarke *et al.* (2008)의 연구 결과를 지지했다. 같은 조사지역 내에서 변이가 적은 이유는 조사지점 간 거리가 상대적으로 가깝기 때문으로 보인다. 단, 평창 지역의 최상류 조사지점인 GWW1는 계절적인 차이보다는 공간적인 영향이 더 큰 것으로 나타나 조사지점에 따른 차이가 있었다.

평창과 완도 두 조사지역 모두 인위적 교란이 최소화된 환경이라는 점에서 두 지역 간의 군집 구조의 차이는 온도 (Heino *et al.*, 2003a), 식생구성 (Townsend *et al.*, 2003) 등 서식지 환경의 자연적 차이 때문으로 보인다. 각 지역의 군집 구성을 바탕으로 산출한 CTI는 평창이 완도보다 더 낮았다. 이는 평창은 완도보다 위도와 고도가 더 높은 점을 고려하였을 때, 위도와 고도의 특성을 반영한 온도가 중요하게 작용한 것으로 볼 수 있었다 (Jacobsen *et al.*, 1997).

NMDS 분석에서도 평창과 완도의 수온, 탁도, 전기전도도, 수심의 차이가 반영되었다. 그러나 수질 및 수리수문화적인 요소는 산림에 위치한 상류 하천이라는 특성을 고려했을 때 절대적인 차이는 크지 않았다. 이는 이 연구에서는 고려하지 않았던 경쟁 등과 같은 생물 간의 상호작용 (Lounibos *et al.*, 1997) 등이 영향을 미쳤을 것으로 예상된다.

이 연구에서 분석된 지표종 중 봄치녀하루살이가 속한 납작하루살이과 (Heptageniidae)와 넓은가슴강도래과 속한 넓은가슴강도래과 (Peltoperlidae)는 기온이 낮은 지역에 적응한 종으로, 세계적으로 봄철 상류 하천에서 자주 관찰되

는 종으로 알려져 있다 (Sun *et al.*, 2019). 한편, 완도지역 여름 조사의 지표종으로 나타난 총채하루살이 또한 납작하루살이과에 속한다. 봄치녀하루살이와 총채하루살이의 차이는 STI 값으로 비교할 수 있었다. 봄치녀하루살이는 7°C에서 8°C 범위에서 적응하였으나 총채하루살이는 약 9.4°C로 STI 값의 차이가 2°C가량 낮다. NMDS상에서도 총채하루살이는 수온의 경향성과 유사했으나 봄치녀하루살이는 총채하루살이와 반대 경향을 나타냄을 볼 수 있었다. 같은 납작하루살이과에 속하더라도 지표종의 STI의 차이로 평창 조사지점과 완도 조사지점의 기온 차이를 다시 한번 확인할 수 있었다.

지표종 분석에서 나온 종들은 대부분 각 그룹에 속하는 지점에서만 나온 종으로, 다소 단순한 결과로 나타났다. 이는 일부 종은 계절과 공간에 따른 분포가 명확함을 나타낸다. 그러나 이 연구는 단일 연도를 대상으로 하였으므로 해당 연도의 특수성에 의한 왜곡의 가능성이 있다. 해당 조사지역에 대한 장기적인 연구를 통해 시공간적 차이를 더 명확히 판단할 수 있을 것으로 보인다. 또한 이 연구에서는 단일 연도의 CTI만을 구하였으나 장기적으로 모니터링하면 기후 변화 등 환경 변화에 따른 군집 변화를 추적하여 하천관리에 도움이 될 것으로 보인다. 수계 내 생물다양성에 영향을 미치는 산림 하천의 장기적인 연구는 수계 전반의 건강성과도 관련이 있으므로 하천 생물다양성 유지 및 관리를 위해서는 꾸준한 모니터링이 필요할 것이다.

적 요

유사한 시기에 조사된 다른 위도의 저서성대형무척추동물 군집 구조의 시공간적 차이를 비교한 결과, 평창 조사지역에서는 3문 5강 12목 44과 69분류군 13,042개체, 완도 조사지역에서는 4문 5강 12목 37과 52분류군 8,887개체가 채집되었다. 평창이 완도보다 다양도와 균등도 또한 높게 나타났다. 우점종은 평창에서는 두점하루살이로 나타났고, 완도에서는 길쭉하루살이로 서로 달랐다. 집괴 분석 결과 평창과 완도 조사지역의 군집 특성이 명확하게 나누어졌으며 지역 내에서는 대체로 계절성의 영향이 컸다. 지표종 분석에서는 총 4종의 지표종이 선정되었으며 대체로 해당 조사시기 및 지점에만 나타난 종이 선정되었다. 기능적 군집으로는 주위먹는 무리인 깔따구류를 제외하였을 때 평창 조사지점에서는 굽어먹는 무리가 가장 많았다. 완도 조사지점에서는 주위먹는 무리가 가장 많았으며 평창 조사지역에 비해 걸러먹는 무리의 비율이 더 높았다. 군집 온도지수 산출 결과 평창이 9.8°C, 완도가 11.0°C으로 평창의 군집이 더 낮은 온도를 선

호하는 것으로 나타났다. 이는 서식지 온도 특성이 저서성대형무척추동물 군집 구성에 크게 영향을 미치고 있음을 반영해 주었다.

저자정보 이다영 (경희대학교 대학원 박사과정), 이대성 (경희대학교 대학원 박사과정), 박찬우 (국립산림과학원 주무관), 윤순진 (국립산림과학원 연구원), 임종환 (국립산림과학원 과장), 박영석 (경희대학교 교수)

저자기여도 연구설계: 박영석, 박찬우, 임종환, 자료 수집 및 관리: 박영석, 이다영, 이대성, 윤순진, 자료분석: 이다영, 이대성, 박영석, 과제관리: 박찬우, 윤순진, 임종환, 원고작성: 이다영, 박영석, 원고 수정 및 검토: 이다영, 이대성, 박찬우, 윤순진, 임종환, 최종 원고 검토: 모든 저자 참여

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 연구는 국립산림과학원 연구과제와 한국연구재단 연구과제 (NRF-2019R1A2C1087099)의 지원을 받아 수행되었습니다.

사사 연구를 충실하게 수행할 수 있도록 지원해 주신 국립산림과학원 연구자분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ab Hamid, S. and C.S.M. Rawi. 2017. Application of aquatic insects (Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera) in water quality assessment of Malaysian headwater. *Tropical Life Sciences Research* **28**: 143-162.
- Bae, M.-J., J.H. Chun, T.-S. Chon and Y.-S. Park. 2016. Spatio-temporal variability in benthic macroinvertebrate communities in headwater streams in South Korea. *Water* **8**: 99.
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish - second edition. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Water, Washington, D.C.
- Boulton, A.J. 2003. Parallels and contrasts in the effects of drought on stream macroinvertebrate assemblages. *Freshwater Biology* **48**: 1173-1185.
- Bowler, D. and K. Böhning-Gaese. 2017. Improving the community-temperature index as a climate change indicator. *PLOS ONE* **12**: e0184275.
- Brigham, A.R., W.U. Brigham and A. Gnilka. 1982. Aquatic insects and oligochaetes of North and South Carolina. Midwest Aquatic Enterprises.
- Brinkhurst, R.O. and B.G.M. Jamieson. 1971. Aquatic Oligochaeta of the world. University of Toronto Press, Toronto.
- Clarke, A., R. Mac Nally, N. Bond and P.S. Lake. 2008. Macroinvertebrate diversity in headwater streams: a review. *Freshwater Biology* **53**: 1707-1721.
- Cummins, K.W. and G.H. Lauff. 1969. The influence of substrate particle size on the microdistribution of stream macrobenthos. *Hydrobiologia* **34**: 145-181.
- Day, P.B., R.D. Stuart-Smith, G.J. Edgar and A.E. Bates. 2018. Species' thermal ranges predict changes in reef fish community structure during 8 years of extreme temperature variation. *Diversity and Distributions* **24**: 1036-1046.
- De Caceres, M. and F. Jansen. 2016. indicspecies: Relationship Between Species and Groups of Sites. <https://cran.r-project.org/web/packages/indicspecies/index.html>.
- Devictor, V., R. Julliard, D. Couvet and F. Jiguet. 2008. Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **275**: 2743-2748.
- Dufrêne, M. and P. Legendre. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* **67**: 345-366.
- Dunbar, M.J., M. Warren, C. Extence, L. Baker, D. Cadman, D.J. Mould, J. Hall and R. Chadd. 2010. Interaction between macroinvertebrates, discharge and physical habitat in upland rivers. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **20**: S31-S44.
- Filippi-Codaccioni, O., V. Devictor, Y. Bas and R. Julliard. 2010. Toward more concern for specialisation and less for species diversity in conserving farmland biodiversity. *Biological Conservation* **143**: 1493-1500.
- Heino, J., T. Muotka, H. Mykrä, R. Paavola, H. Hämäläinen and E. Koskenniemi. 2003a. Defining macroinvertebrate assemblage types of headwater streams: implications for bioassessment and conservation. *Ecological Applications* **13**: 842-852.
- Heino, J., T. Muotka and R. Paavola. 2003b. Determinants of macroinvertebrate diversity in headwater streams: regional and local influences. *Journal of Animal Ecology* **72**: 425-434.
- Herbst, D.B., S.D. Cooper, R.B. Medhurst, S.W. Wiseman and C.T. Hunsaker. 2018. A comparison of the taxonomic and trait structure of macroinvertebrate communities between the riffles and pools of montane headwater streams. *Hydrobiologia* **820**: 115-133.
- Jacobsen, D., R. Schultz and A. Encalada. 1997. Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biology* **38**: 247-261.
- 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.
- Korea Meteorological Administration. 2018. Annual Climatological Report. Korea meteorological administration Press, Seoul
- Lee, D.-G., T.W. Umh, J.H. Chun and M.H. Jung. 2004. Plant community classification and characteristics in natural deci-

- duous forest of Mt. Joongwang, Gangwon province. Proceedings of Korean Society of Forest Science 2.
- Lee, D.-Y., M.-J. Bae, Y.-S. Kwon, C.W. Park, H.M. Yang, Y. Shin, T.-S. Kwon and Y.-S. Park. 2018. Characteristics of spatiotemporal patterns in benthic macroinvertebrate communities in two adjacent headwater streams. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 192-203.
- Li, F., N. Chung, M.-J. Bae, Y.-S. Kwon and Y.-S. Park. 2012. Relationships between stream macroinvertebrates and environmental variables at multiple spatial scales: Stream systems and multispatial scales. *Freshwater Biology* **57**: 2107-2124.
- Li, F., Y.S. Kwon, M.J. Bae, N. Chung, T.S. Kwon and Y.S. Park. 2014. Potential impacts of global warming on the diversity and distribution of stream insects in South Korea. *Conservation Biology* **28**: 498-508.
- Lounibos, L., R. Escher, N. Nishimura and S. Juliano. 1997. Long-term dynamics of a predator used for biological control and decoupling from mosquito prey in a subtropical treehole ecosystem. *Oecologia* **111**: 189-200.
- Malmqvist, B. 2002. Aquatic invertebrates in riverine landscapes. *Freshwater Biology* **47**: 679-694.
- McCune, B., J. Grace and D.L. Urban. 2002. Analysis of Ecological Communities. MjM software design. Gleneden Beach.
- Merritt, R.W. and K.W. Cummins. 1996. An introduction to the aquatic insects of North America. Kendall/Hunt Pub. Co.
- Meyer, J.L., D.L. Strayer, J.B. Wallace, S.L. Eggert, G.S. Helfman and N.E. Leonard. 2007. The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks 1. *Journal of the American Water Resources Association* **43**: 86-103.
- Minister of Environment and National Institute of Environmental Research. 2015. Survey and Evaluation Method for River and Stream Ecosystem Health Assessment. MOE, Incheon, Korea.
- Moore, A.A. and M.A. Palmer. 2005. Invertebrate biodiversity in agricultural and urban headwater streams: implications for conservation and management. *Ecological Applications* **15**: 1169-1177.
- Oh, C.J., H.C. You, J.S. Park, S.B. Ryu, B.S. Yoon, H.H. Park and S. Lee. 2013. Vascular plants and plant resources in Wan-do arboretum. *Proceedings of Korean Institute of Forest Recreation and Welfare* **2013**: 72-74.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlinn, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens, E. Szoecs and H. Wagner. 2019. vegan: Community Ecology Package. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html>.
- Pennak, R.W. 1953. Freshwater invertebrates of the United States. The Ronald Press Company, New York.
- Pörtner, H.O. and A.P. Farrell. 2008. Physiology and climate change. *Science* **322**: 690-692.
- Quigley, M. 1977. Invertebrates of streams and rivers. Edward Arnold.
- R Core Team. 2019. R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria.
- Radwell, A.J. and A.V. Brown. 2008. Benthic meiofauna assemblage structure of headwater streams: density and distribution of taxa relative to substrate size. *Aquatic Ecology* **42**: 405-414.
- Richardson, J.S. and R.J. Danehy. 2007. A synthesis of the ecology of headwater streams and their riparian zones in temperate forests. *Forest Science* **53**: 131-147.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. A mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Sun, Y., Y. Takemon and Y. Yamashiki. 2020. Freshwater spring indicator taxa of benthic invertebrates. *Ecohydrology & Hydrobiology* **20**: 622-631.
- Townsend, C.R., S. Dolédec, R. Norris, K. Peacock and C. Arbutckle. 2003. The influence of scale and geography on relationships between stream community composition and landscape variables: description and prediction. *Freshwater Biology* **48**: 768-785.
- Wipfli, M.S., J.S. Richardson and R.J. Naiman. 2007. Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems: Transport of organic matter, invertebrates, and wood down headwater channels 1. *Journal of the American Water Resources Association* **43**: 72-85.
- Yoon, I. 1988. Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea. Ministry Education, Korea.
- Zelený, D. and A.P. Schaffers. 2012. Too good to be true: pitfalls of using mean Ellenberg indicator values in vegetation analyses. *Journal of Vegetation Science* **23**: 419-431.