

점봉산 산지 수계의 저서성 대형무척추동물 분포 특성 및 강우가 군집에 미치는 영향 연구

권혁영* · 권순직** · 손세환*** · 이영상**** · 주성배**** · 박정수**** · 김재훈***** · 전영철*****

*에코벅스

** (주)애일

***에스에이치 수생물 연구소

****국립생태원 기후생태관측팀

*****국립안동대학교 생명과학과

***** (주)생태자원연구소

A Study on the Habitat Characteristics of Benthic Macroinvertebrates and the rainfall effects on their communities in Mt. Jeombongsan

Hyeok Yeong Kwon* · Soon Jik Kwon** · Se-Hwan Son*** · Young san Lee**** · Sungbae Joo**** ·
Jeong-Soo Park**** · Jae Hun Kim***** · Hung Chul Jun*****

*Eco-bugs, Andong 36740, Korea

**Corporation Aeil, Bucheon 14676, Korea

***SH Aquatic Biome Research, Asan 31523, Korea

****Ecological Observation Team, National Institute of Ecology, Seoecheon 33657, Korea

*****Department of Biological Science, Andong National University, Andong 36729, Korea

*****+Institute of Ecological Resources Research, Seoul 02783, Korea

(Received : 01 November 2024, Revised : 18 November 2024, Accepted : 18 November 2024)

요약

우리나라는 여름철 강수량이 연 강수량의 50% 이상을 차지하는 기후적 특성이 있으며, 이는 저서성 대형무척추동물의 분포 및 군집에 직·간접적인 영향을 미친다. 따라서 저서성 대형무척추동물 연구에 대한 객관적이고 신뢰성 있는 분석을 위해서는 강수량과 이들 분류군의 분포 및 군집에 대한 관계와 영향을 이해하는 것이 중요하다. 현재까지 단순히 저서성 대형무척추동물과 강수량의 상관관계에 관한 연구는 일부 진행되었으나 강우빈도와 강수량이 산지 수계의 습지와 계곡 등 각 유형에 미치는 영향에 대한 연구는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 저서성 대형무척추동물 분포 현황에 대한 생태 연구를 함에 있어 객관적인 분석을 진행할 수 있도록 외부요인에 의한 환경변화가 적은 점봉산 장기생태연구 대상지에서의 결과를 기반으로 일별 누적 강수량과 저서성 대형무척추동물 군집 간의 상관성 분석을 진행하였다. 연구는 2016년부터 2023년까지 총 29회에 걸쳐 진행하였으며, 각 조사일을 기준으로 조사일, 조사일 이전 3일, 5일, 10일, 15일, 20일 25일, 30일간의 누적 강수 자료를 각각 정리하여 분석하였다. 연구 결과, 산간계류에서는 조사일 기준 약 20일 이전부터의 누적 강수량이 저서성 대형무척추동물 종수에 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 산지습지는 강수량과의 상관성을 보이지 않았다.

핵심용어 : 저서성 대형무척추동물, 점봉산, 장기생태연구, 강수량

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail : eco072@empal.com (Y.C. Jun)

- Hyeok Yeong Kwon Eco-bugs / President, Ph.D (blueblue509@hanmail.net)
- Soon Jik Kwon Corporation Aeil / Research Director, Ph.D (triopsidae@naver.com)
- Se-Hwan Son SH Aquatic Biome Research / President, Ph.D (son-s.h@hanmail.net)
- Young san Lee National Institute of Ecology / Researcher (lys890309@nie.re.kr)
- Sungbae Joo National Institute of Ecology / Researcher, Ph.D (doctorjoo@nie.re.kr)
- Jeong-Soo Park National Institute of Ecology / Researcher, Ph.D (jspark@nie.re.kr)
- Jae Hun Kim Department of Biological Science, Andong National University / Ph.D Candidate (988jae-hun@hanmail.net)

Abstract

Most temperate Asian regions experience monsoonal climates that play a critical driver in stream ecosystems, significantly affecting stream environments such as the hydrologic regime and geomorphology. Consequently, the distribution and abundance of benthic macroinvertebrates could be determined depending on the frequency and intensity of monsoonal rainfalls. This is the same case in Korea. However, there is little information on the effects of rainfalls on benthic macroinvertebrate communities in Korea. Therefore, this study was aimed i) to compare the distribution of benthic macroinvertebrates in highland wetlands and mountain streams, and ii) to understand the relationships between cumulative precipitation and their diversity in Mt. Jeombongsan. Biological data were quantitatively and qualitatively obtained by field surveys for 29 times from 2016 to 2023. Rainfall data were classified as 3 days, 5 days, 10 days, 15 days, 20 days, 25 days and 30 days prior to the survey date. Precipitation was concentrated in summer season (July and August) in every survey year, approximately 46.9% of the total annual precipitation. Highland wetlands showed the lowest taxa richness with the highest proportion of Odonata, whereas mountain streams displayed the highest taxa richness with the high number of Ephemeroptera and Trichoptera. Our results confirmed that the cumulative precipitation for 20 days prior to the survey date was significantly related with the benthic macroinvertebrate diversity in mountain stream sites. This study is expected to establish a long-term biological monitoring plan and to be used as basic information for selecting indicator species.

Key words : Benthic Macroinvertebrates, Mt. Jeombongsan, Long-Term Ecological Research, Precipitation

1. 서론

기후변화는 지난 세기부터 현재까지 지속되고 있으며 우리나라를 비롯한 전 세계에 극한호우의 증가, 강우의 시공간적 분포 변화 등 강우 양상에 큰 변화를 일으키고 있다(Sun et al., 2021; Kim et al., 2023). 즉 기온 상승에 따라서 점차 강우의 패턴이 급변하고 있는데, 강우의 강도가 증가하고 있으며 강우의 시공간적 분포는 보다 집중되는 경향을 보이고 있다(Wasko and Sharma, 2016; Kim et al., 2023).

수생물 군집은 수생태계의 구조적 및 기능적 특성을 통합하여 생태계의 건강성을 대변하므로 생태학 연구에서 수생생물을 사용하는 것은 환경 변수보다 더욱 효과적인 것이 여러 연구를 통해 입증되었다(Rosenberg and Resh, 1993; Bonada et al., 2006; Weigel and Robertson, 2007; Resende et al., 2010). 저서성 대형무척추동물은 담수생태계에서 종과 개체 수가 풍부할 뿐만 아니라 먹이사슬의 중간자적 위치에서 생태계의 원활한 유지에 중요한 역할을 한다(Rosenberg and Resh, 1993). 또한, 저서성 대형무척추동물은 교란에 의한 분류군별 반응이 다양하므로 서식환경의 변화 관찰을 위한 모니터링 수행에 유용한 지표생물로서 전 세계적으로 인정받고 있다(Chadd and Extence, 2004; Jun et al., 2012).

일반적으로 저서성 대형무척추동물은 강우 후 유속 및 유량 등 서식지의 수리수문학적 특성이 변화하면서 군집의 상태나 종의 분포 양상에 영향을 받는다(Theodoropoulos et al., 2017; Kim et al., 2018a). 특히 산지하천에서는 강우의 강도가 높을수록 저서성 대형무척추동물 다양성과 풍부성이 감소하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다(Kim et al., 2018b). 또한, 강우는 하천수의 유입량을 증가시키고 수위와 유속을 높이면서 하상의 미생물 활동을 촉진하는 동시에(Di Cesare et al., 2017), 용해된 유기물질의 안정성에도 영향을 미친다(Liu et al., 2024). 이와 같은 변화는 저서성 대형무척추동물의 서식지와 활동에 영향을 미치기 때문에 강우는 하천 생태계에 많은 영향을 미치는 주요 요인 중 하나이다

(Allan, 1995). 이러한 국내외 연구 결과는 산지 수계의 생태계에서 강우 강도가 높을수록 저서성 대형무척추동물 군집에 많은 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다.

저서성 대형무척추동물의 섭식기능군(functional feeding groups; FFGs)은 유충 또는 약충 단계에서의 수서곤충에 대한 분류학적 한계를 극복하고 수생태계에서의 기능성을 고려하여 분류하는 생태적 접근방법이다(Ro and Chun, 2004). 이에 따라 섭식기능군은 먹이 자원을 획득하는 방법에 따라 썰어먹는무리(shredders, Sh)와 주워먹는무리(collector-gatherers, CG), 걸러먹는무리(collector-filterers, CF), 긁어먹는무리(scrapers, SC), 잡아먹는무리(predators, Pe), 찔러먹는무리(piercers, Pi)로 유형화할 수 있다(Cummins and Klug, 1979; Merritt and Cummins, 1996). 하천생태계의 다양성은 먹이사슬(food chain)의 복잡성으로 설명할 수 있으므로 수생태계의 전반적인 환경 상태를 평가하기 위한 지표로 섭식기능군 개념을 유용하게 적용할 수 있다(Ro and Chun, 2004). 예를 들어 Vannote et al. (1980)은 하천의 종적 구배(longitudinal gradient)에 따라서 여러 환경조건과 함께 먹이자원의 유형이 변화하며, 이는 결과적으로 저서성 대형무척추동물의 섭식기능군 조성의 차이로 나타난다는 하천연속성(river continuum concept) 개념을 제시한 바 있다. 이와 같은 개념에 더하여 섭식기능군은 수생태계 건강성을 평가하기 위한 생물모니터링에 대하여 유용하고 효과적인 지표로서의 가치가 많은 연구를 통하여 입증되고 있다(Kerans and Karr, 1994; Rawer-Jost et al., 2000; Jun et al., 2012).

현재까지 국내외 강우에 따른 저서성 대형무척추동물 생태 연구는 일부 연구자에 의해 진행되어 왔으나(Bae and Park, 2009; Mesa, 2012; Lee et al., 2014; Cinéas and Dolédec, 2024), 장기간에 걸친 강우의 강도나 빈도 변화에 따른 산지 수계의 장기생태연구는 아직까지 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 산지 수계의 계류와 정수역의 습지를 구분하여 저서성 대형무척추동물의 전반적인 분포 특성을 비교하였으며 강우가 미치는 군집의 영향을 종다양성과 섭식기능군 측면에서

분석하였다. 본 연구는 향후 산지 수계에 대한 깊이 있는 생물모니터링 계획을 수립하고 생태계 변화 관찰의 측면에서 지표 선정을 위한 기초자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 조사시기

국립생태원은 장기생태연구를 위한 강원권 중점지소로 강원도 인제군 소재의 점봉산 일대를 선정하였으며 환경-생물 간 상호작용을 파악하기 위하여 2015년부터 물질순환과 식물, 조류, 수생생물 등 다양한 분야에서 관련 연구를 진행하고 있다(NIE, 2023). 해당 지역은 설악산국립공원과 인접하며 1982년 우리나라 최초로 지정된 UNESCO 생물권 보전지역(Biosphere Reserve)에 위치하고 있다. 뿐만 아니라 온대 낙엽수림이 잘 발달하여 있으며 자연경관이 수려하고 인위적 외부 교란요인이 없어 보전가치가 높다(Lee and Cho, 2000). 장기생태연구의 일환으로 저서성 대형무척추동물에 대한 현장조사는 점봉산의 단목령 남사면에 위치하는 산지습지 제3구역 일대를 중심으로 계류와 습지의 주요 지점을 대상으로 수행하였다.

조사지점은 생물서식환경이 다른 유수생태계 및 정수생태계에서의 저서성 대형무척추동물 출현양상과 강우가 저서성 대형무척추동물 군집에 미치는 영향을 비교 분석하기 위하여 계류 2개소(산지습지 유입 전, St.1; 산지습지 유출 후 타 지류와 합류 후, St.3) 및 습지 1개소(산지습지 내부, St.2)를 선정하였다(Fig. 1). 본 연구는 2016년부터 2023년까지 7개년(2022년에는 사업 미실시로 자료 부재) 동안 축적한 조사 결과를 활용하여 분석하였는데, 조사연도별 최소 2회(2021년)

에서 최대 6회(2016년)로 총 29회에 걸쳐 현장조사를 수행하였다(Table 1).

2.2. 현장조사 및 동정

모든 조사지점에서의 저서성 대형무척추동물은 정량 및 정성적인 방법을 병행하여 채집하였다. 즉 계류에서는 Surber sampler(30cm×30cm, 망목 1mm), 정수역의 산지습지에서는 D-frame net(폭 30cm, 망목 1mm)을 이용하여 정량적으로 조사지점별 3회 반복 채집하였다. 또한, 정성조사는 지점 내 전체적인 생물다양성을 파악하고자 여러 형태의 미소서식처(예: 침수된 나뭇가지와 낙엽층, 소, 수변부의 돌 등)를 대상으로 저서성 대형무척추동물의 서식 특성을 고려하여 뜰채(hand net, mesh size 1mm)로 채집하였다. 채집한 시료는 현장에서 95% 에틸알코올에 고정하였으며 실험실에서 sorting 작업 후 70% 에틸알코올에 고정 보관하였다.

저서성 대형무척추동물 표본은 최근 발표된 국내외 문헌을 참고하여 동정하였다. 수서곤충 중 파리목 깔따구과(Chironomidae)는 국내 문헌의 분류학적 한계로 인하여 과(Family) 수준에서 분류하였다(NIER, 2019). 출현종의 학명과 국명은 국립생물자원관에서 제공하는 국가생물종목록(2023)을 따랐다. 특히 종목록은 과거 조사 결과와의 비교를 위하여 동종이명(synonym)을 관련 문헌에 근거하여 재정리하였으며 형태적 특징에 따라 임의로 분류되었던 깔따구과는 “하천 수생태계 현황조사 및 건강성 평가 지침(NIER, 2019)”에 근거하여 모두 과 수준에서 재정리하였다.

2.3. 강우경향 분석

강우에 따른 저서성 대형무척추동물 변화양상을 파악하기

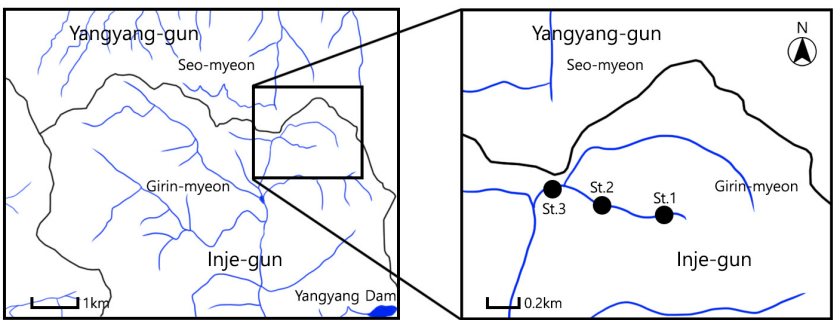


Fig. 1. The survey sites in Mt. Jeombongsan.

Table 1. survey months from 2016 to 2023 in Mt. Jeombongsan.

Year	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2016						●	●	●	●	●		
2017			●	●	●			●		●		
2018			●		●			●		●		
2019				●	●			●		●		
2020				●		●			●	●		
2021				●						●		
2023			●			●		●		●		

위하여 연구대상지가 위치하는 인제군(강원특별자치도 인제군 인제읍 남북리; 기상대 지점번호 211)의 일별 강수량 자료를 기상청(www.weather.go.kr)에서 다운받아 활용하였다. 일반적으로 저서성 대형무척추동물 군집은 유량과 유속 등 수문학적 요소와 밀접한 관계가 있다(Jun et al., 2016; Kim et al., 2018b). 이에 따라 본 연구는 각 조사일을 기준으로 조사일 이전 3일(D3)과 5일(D5), 10일(D10), 15일(D15), 20일(D20), 25일(D25), 30일(D30) 동안의 누적 강수량과 강우일수를 산출하여 분석하였다.

2.4. 공통출현종 및 상관관계 분석

각 조사지점 간의 공통출현종은 Ro and Chun (2004)에서 제시한 방법에 근거하여 수생태계 건강성을 평가하기 위한 생물모니터링에 대하여 유용하고 효과적인 지표로서 많이 활용되는 섭식기능군을 분석하였으며(Kerans and Karr, 1994; Rawer-Jost et al., 2000; Jun et al., 2012), Larsson (2021)의 기법을 활용하여 벤 다이어그램으로 표현하였다.

강수량 및 강우일수와 채집된 저서성 대형무척추동물의 출현양상 및 섭식기능군 등의 상관관계를 파악하기 위해 IBM

SPSS statistics (ver. 27)를 활용하여, Pearson의 이변량 상관계수를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 점봉산 일대 강우 현황

점봉산이 위치한 강원도 인제군 일원의 전체 조사 기간에 대한 일평균 강수량은 9.7mm이었으며, 조사일 이전 누적 강수량은 D3이 0~103.8mm, D5가 0~126.3mm, D10이 0~155.6mm, D15가 0~211.9mm, D20이 0~228.1mm, D25가 0~404.5mm, D30이 1.8~540.2mm이었다. 특히 2020년 9월은 약 10일 간격으로 연이어 발생한 태풍 ‘바비’와 ‘마이사’ 등의 영향으로 전체 조사 기간 중에서 가장 많은 누적 강수량을 기록하였는데(Fig. 2), 두 태풍은 대기 중에 많은 수증기를 함유하여 고기압이 발달하였으며 느린 이동속도로 인하여 심한 강풍과 집중호우가 지속적으로 발생한 특징이 있었다(Kim et al., 2021). 모든 조사연도는 공통적으로 총 강수량의 약 46.9%가 7월부터 8월에 집중되어 전형적인 온대 몬순기후의 강우 특성을 보였다.

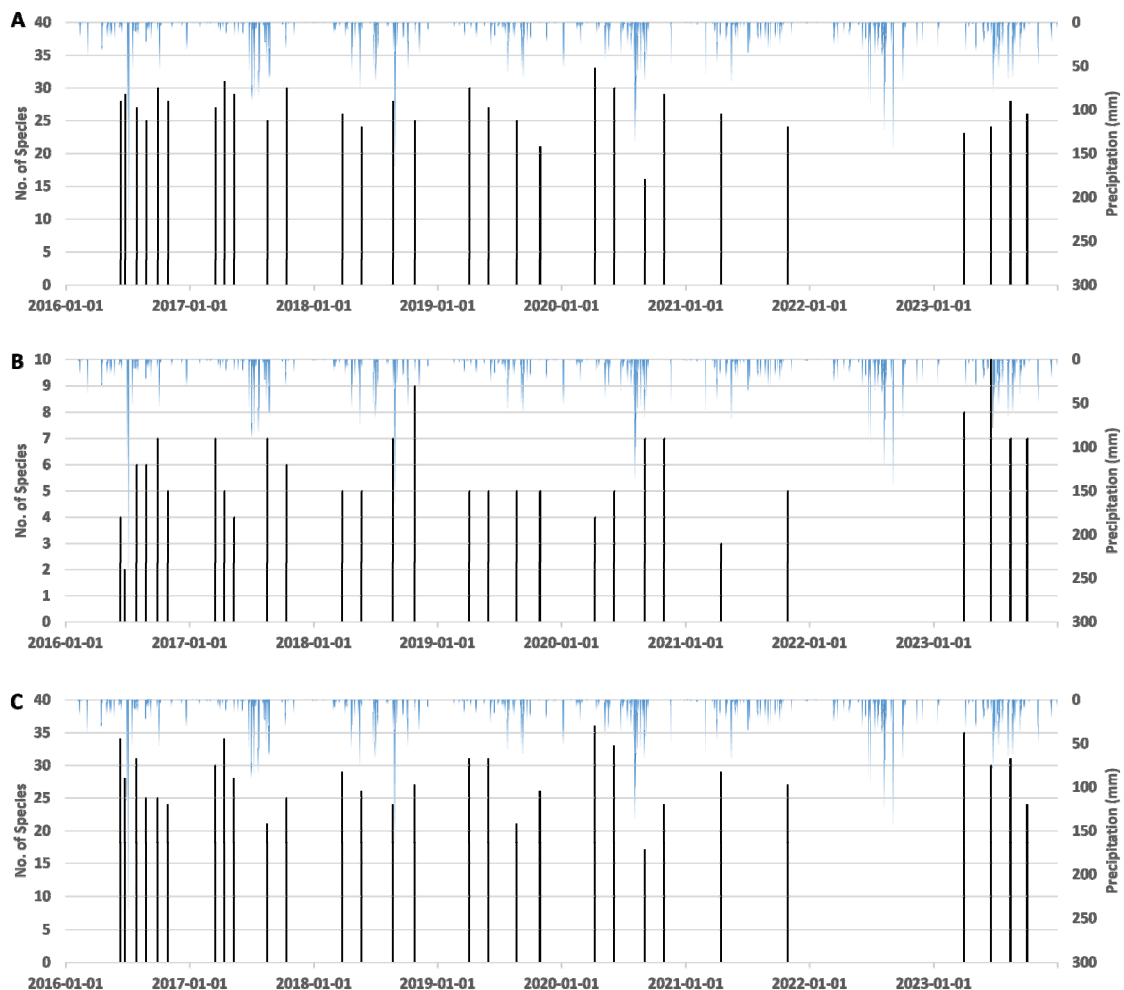


Fig. 2. Precipitation in Inje-gun and number of species at each survey site (A, St.1; B, St.2; C, St.3).

3.2. 저서성 대형무척추동물 분포 특성

전체 조사시기에서 확인된 저서성 대형무척추동물은 St.3에서 총 87종으로 가장 다양한 종이 출현하였으며 그 다음으로 St.1에서 78종이었고 산지습지 내부에 위치하는 St.2에서는 28종으로 출현종수가 가장 적었다. 군집 구성은 St.1과 St.3에서 청정한 계류의 지표생물군인 EPT분류군(Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera)의 출현빈도와 개체밀도가 현저히 높았으며, 이 중에서 날도래목의 종수가 각각 25.6%와 25.3%로 가장 높은 구성비를 차지하였다. 반면, St.2는 별박이왕잠자리(*Aeshna juncea*)와 백두산북방잠자리(*Somatochlora clavata*) 등을 포함하는 잠자리목이 25.0%로 출현종 구성비가 가장 높아 전형적인 정수환경의 출현양상을 보였다(Fig. 3). 특히 St.2에서는 모든 조사시기에 대한 우점종이 산골조개(*Pisidium coreanum*)로서 타 출현종에 비하여 개체밀도가 현저히 높았는데, 본 종은 고산습지를 비롯하여 용천수나 발원지와 같이 서식지 특성이 비교적 명확한 종이다(Jun and Kwon, 2024).

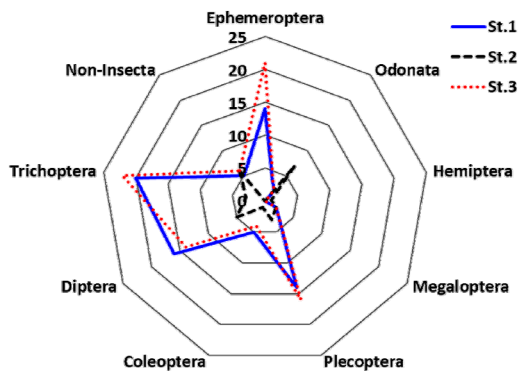


Fig. 3. Species composition of major taxa by survey site.

이처럼 저서성 대형무척추동물은 계류와 산지습지에서 종 구성과 분포 특성에 뚜렷한 차이를 보였다. 한편, 조사지점별 출현종수는 St.1에서 16종~33종의 범위로 평균 $26.7(\pm 3.4)$ 종이었으며, St.2에서 2종~10종의 범위로 평균 $5.8(\pm 1.8)$ 종이었고, St.3에서 17종~36종의 범위로 평균 $27.8(\pm 4.5)$ 종이 출현하였다(Fig. 2).

조사지점별 섭식기능군의 출현 양상을 살펴보았을 때 걸러먹는무리(CF)는 St.1에서 6종, St.2에서 2종, St.3에서 5종이 출현하였으며 모든 지점에서 공통적으로 출현한 종은 산골조개(*P. coreanum*)로 1종이었다(Fig. 4A). 잡아먹는무리(Pe)는 St.1에서 27종, St.2에서 14종, St.3에서 26종이 출현하였으며, 산골플라나리아(*Phagocata vivida*), 장수잠자리(*Anotogaster sieboldii*) 등 6종이 3개 지점에서 공통적으로 출현하였다(Fig. 4B). 주워먹는무리(CG)는 St.1에서 14종, St.2에서 3종, St.3에서 16종이 출현하였으며, 깔따구류(Chironomidae sp.), 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*) 2종이 3개 지점에서 공통적으로 출현하였다(Fig. 4C). 썰어먹는무리(Sh)는 St.1에서 17종, St.2에서 6종, St.3에서 19종이 출현하였으며, 굴뚝날도래(*Semblis phalaenoides*), 토우민강도래(*Nemoura tau*) 등 5종이 3개 지점에서 공통적으로 출현하였다(Fig. 4D). 굵어먹는무리(SC)는 유수역인 St.1과 St.3에서만 각각 13종, 20종이 출현하였으며, 봄치녀하루살이(*Cinygmula grandifolia*), 바수염날도래(*Psilotreta kisoensis*) 등 12종이 2개 지점에서 공통적으로 출현하였다(Fig. 4E).

3.3. 강우에 따른 저서성 대형무척추동물 출현 양상

유량이나 유속 등의 수문학적 환경조건은 저서성 대형무척추동물 군집구조와 종의 출현 양상에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다(Sandin, 2003; Jun et al., 2016). 아울러

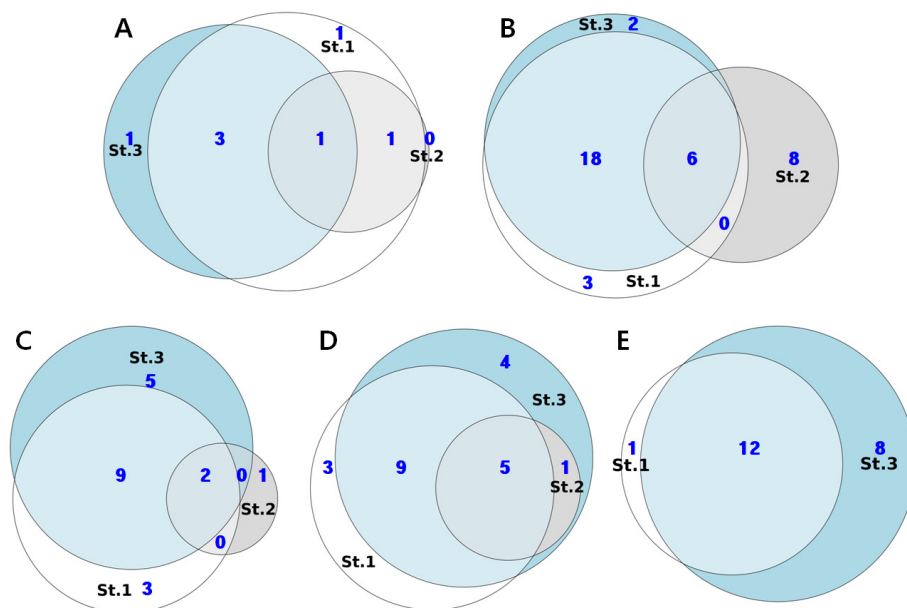


Fig. 4. Comparison of species number among surveyed sites according to functional feeding group (A, CF; B, Pe; C, CG; D, Sh; E, SC; Blue letters, the numbers of species).

강우(rainfall)는 수체의 수문학적 상태에 영향을 미칠 수 있는데, 강우량이 증가할 경우 유량과 유속이 증가함으로써 저서성 대형무척추동물의 서식공간인 하상 구성의 변화를 일으킬 수 있으며 출현종수와 개체수 감소를 유발한다는 많은 연구가 보고되었다(Brewin et al, 2000; Mesa, 2010; Chattopadhyay et al., 2021). 이와 같은 연구 결과에 근거하여 본 연구는 조사일 이전의 강우일수와 강수량이 저서성 대형무척추동물의 출현종수 변화에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

산지습지에 해당하는 St.2 지점은 모든 기간별 누적 강수량과 상관관계를 보이지 않았다(Table 2). 이는 해당 지점이 산지습지 내부에 위치하는 정수환경으로서 흐름이 없고 낙엽층이 풍부하여 강우량이 증가할수록 유량이 일시적으로 증가할 수는 있으나, 근본적인 서식환경의 변화를 유발하지는 않는 것으로 판단되었다. 이와는 반대로 계류의 St.1과 St.3의 두 조사지점은 거의 모든 강수량 조건에서 출현종수와 비교적 강한 음의 상관관계를 보였다(Table 2). 즉 St.1은 조사당일 이전 3일(D3)에서부터 30일(D30)까지의 모든 누적 강수량 조건에서 음의 상관관계를 보였으며($p<0.05$), St.3은 25일 이전(D25)의 누적 강수량을 제외한 모든 강수량 조건에서 음의 상관관계를 보였다($p<0.05$). 분석 결과 산간계류는 조사일 기준 약 20일 이전부터의 누적 강수량이 저서성 대형무척추동물 종수에 영향을 미쳤으나, 산지습지에서는 누적 강수량의 영향을 크게 받지 않았다(Table 2).

한편, 누적 강우일수와 출현종수와의 상관관계는 St.3에서만 조사일 이전 3일간의 강우일수와 음의 상관관계를 보였으며($p<0.05$), 그 외 지점 및 누적 일수에 대해서는 유의미한 관계를 보이지 않았다($p<0.05$) (Table 2).

결과적으로 산지 수계에서의 저서성 대형무척추동물은 누적 강수일수보다는 누적 강수량에 직접적인 영향을 받았으며, 강수량에 의한 영향은 정수환경의 산지습지보다는 유수환경의 계류에서 뚜렷하였다.

3.4. 강수량과 섭식기능군별 상관관계 분석

앞선 결과에서 저서성 대형무척추동물 출현종수는 현장조사 이전의 누적 강수량과 유의미한 상관관계를 보임에 따라 서 누적 강수량 및 섭식기능군 종수와의 상관관계를 파악하고자 하였다. 전체 조사지점 중에서 계류 두 지점(St.1, St.3)

에서만 잡아먹는무리(Pe)와 썰어먹는무리(Sh) 등 일부 섭식 기능군에 대해 강수량과의 상관관계가 유의미하였다. 즉 St.1은 잡아먹는무리의 종수가 조사일 이전 3일, 5일, 10일, 20일에 대한 누적 강수량과 음의 상관관계를 보였으며($p<0.05$), St.3은 3일, 5일, 10일, 15일, 20일의 누적 강수량과 음의 상관관계를 보였으며($p<0.05$). 보전상태가 양호한 우리나라 산간 계류에서의 잡아먹는무리는 대체로 강도래과(Perlidae)와 물날도래과(Rhyacophilidae) 등으로 이루어지는데(Jun and Kwon, 2024), 이들 분류군은 여울을 주요 서식처로 하기 때문에 유속과 유량이 급격히 증가할 경우 쉽게 유실될 수 있다(Benedict, 2020). 점봉산 일대 수계에서의 잡아먹는무리는 쇠족범잡자리(*Davidius lunatus*) 및 장수잡자리(*Anotogaster sieboldii*)의 잠자리목(Odonata)과 한국강도래(*Kamimuria coreana*) 및 그물강도래(*Megarcys ochracea*)의 강도래목(Plecoptera) 등과 같이 개체 크기가 큰 분류군이 다수 포함되었으며 이러한 종은 다른 종과 비교하여 유속 증가에 더욱 쉽게 영향을 받을 수 있다(Ro, 2002).

또한, St.1에서는 썰어먹는무리(Sh) 종수가 조사일로부터 30일까지 모든 누적 강수량과 음의 상관관계를 보였으며($p<0.05$). St.1에서 출현한 썰어먹는무리 17종 중 10종(58.8%) 이 강도래목(Plecoptera)에 속하는 종으로, 출현한 4개 과(꼬마강도래과, Leuctridae; 민강도래과, Nemouridae; 민날개강도래과, Scopuridae; 흰배민강도래과, Capniidae) 모두 Ro and Chun (2004)의 기준에 따른 상대적 저항력과 회복력이 각각 2로 매우 낮은 점수를 보이는 분류군이다. 이들 분류군은 하천 바닥에 떨어진 나뭇잎 등 대형 유기물질을 썰어먹는 습성을 가지고 있으며, 강한 강수에 의해 하천의 유기물질이 쓸려 내려감에 따라 이를 섭식하는 분류군도 함께 유실되었거나 일정 기간 서식지 이동을 하게 되어 나타난 결과로 판단된다(Krno et al., 2015; Theodoropoulos et al., 2017).

한편, 주워먹는무리(CG)는 누적 강수량과 출현종수와의 상관관계가 대부분의 조건에서 유의미하지 않았다(Table 3). 이는 꼬마하루살이과(Baetidae)와 깔따구과(Chironomidae) 등이 포함되는 주워먹는 무리(CG)는 저항력과 회복력이 높아 불안정한 환경에 특히 잘 적응할 수 있는 특성에 의해 (Jacobsen and Encalada, 1998) 누적 강수량과 유의미한 상관관계를 보이지 않은 것으로 판단된다.

Table 2. Pearson correlation coefficients between taxa richness and the cumulative precipitation patterns prior to field survey dates at each site

Precipitation	Site	D3	D5	D10	D15	D20	D25	D30
(A) Cumulative precipitation	St.1	-0.525**	-0.544**	-0.490**	-0.513**	-0.502**	-0.404*	-0.490**
	St.2	0.075	0.023	0.066	0.001	0.035	0.110	0.099
	St.3	-0.582**	-0.578**	-0.512**	-0.511**	-0.459*	-0.303	-0.409*
(B) Number of cumulative precipitation days	St.1	-0.329	-0.221	-0.292	-0.181	-0.090	-0.132	-0.157
	St.2	-0.177	-0.274	-0.103	-0.125	-0.229	-0.137	-0.141
	St.3	-0.440*	-0.276	-0.355	-0.273	-0.161	-0.190	-0.266

1) D3~D30: Cumulative precipitation (A) and a number of cumulative precipitation days (B) for 3 to 30 days prior to field survey dates.

2) ** $p<0.01$, * $p<0.05$

Table 3. Pearson correlation coefficients between taxa richness of functional feeding groups and cumulative precipitation at each site

Functional feeding groups		D3	D5	D10	D15	D20	D25	D30
St.1	CF	-0.173	-0.164	-0.024	-0.026	0.040	0.154	0.085
	CG	-0.084	-0.115	-0.136	-0.205	-0.204	-0.397*	-0.401*
	Pe	-0.440*	-0.427*	-0.385*	-0.353	-0.370*	-0.252	-0.298
	SC	-0.197	-0.146	0.186	-0.124	-0.156	0.038	0.032
	Sh	-0.385*	-0.474**	-0.426*	-0.517**	-0.481**	-0.454*	-0.498**
St.2	CF	0.175	0.099	0.149	0.184	0.108	0.068	0.105
	CG	0.194	0.189	-0.128	-0.126	-0.061	0.061	0.112
	Pe	0.164	0.127	0.295	0.187	0.216	0.150	0.104
	Sh	-0.167	-0.302	-0.356	-0.345	-0.219	-0.259	-0.301
St.3	CF	-0.195	-0.189	-0.066	0.029	0.062	0.276	0.173
	CG	-0.322	-0.323	-0.207	-0.235	-0.173	-0.300	-0.318
	Pe	-0.453*	-0.424*	-0.478**	-0.460*	-0.495**	-0.196	-0.288
	SC	-0.271	-0.285	-0.298	-0.398*	-0.336	-0.434*	-0.438*
	Sh	-0.286	-0.267	-0.264	-0.222	-0.167	-0.025	-0.082

1) CF, Collector-Filterers; CG, Collector-Gatherers; Pe, Predators; SC, Scrapers; Sh, Shredders.

2) ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

4. 결 론

점봉산 산간계류 및 산지습지의 저서성 대형무척추동물 분포현황을 누적 강수량과 강우일수와 관련하여 분석하였다. 누적 강수량과 저서성 대형무척추동물 출현양상 간의 상관성 분석 결과, 산간계류에서는 조사일 기준 약 20일 이전부터의 누적 강수량이 저서성 대형무척추동물 종수에 영향을 미치는 것으로 확인되었으나, 산지습지는 강수량과의 상관성을 보이지 않았다. 또한, 산간계류는 누적 강수일수보다는 강수량에 더욱 큰 영향을 받았다. 본 연구를 통해 밝혀진 저서성 대형무척추동물 분포양상과 강수량의 상관관계 분석 결과는 향후 저서성 대형무척추동물 분포현황 조사 시 조사시기 선정 및 변화양상 분석에 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

점봉산 일원의 수계는 인위적 요인에 의한 오염 우려가 적어 장기생태연구에 매우 적합한 환경을 가지고 있으며, 이에 따라 오로지 자연적 요소에 의한 생태계 변화양상을 파악하기에 유리하다. 향후 강우 강도에 의한 저서성 대형무척추동물 분포 양상 변화 연구를 추가로 진행한다면 더욱 면밀한 수계 관리 및 기후변화에 대한 저서성 대형무척추동물 군집의 반응을 이해하는데 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 국립생태원에서 수행한 “국가장기생태연구(NIE-고유연구-2023-02, NIE-고유연구-2024-02)”에 의해 이루어진 자료를 포함한 것으로 이에 감사드립니다.

References

Allan J. D. 1995. Stream ecology: structure and function of running waters. Chapman and Hall, New York.

xii+388 p.

Bae M. J. and Y. S. Park. (2009). Changes in Benthic Macroinvertebrate Communities in Response to Natural Disturbances in a Stream. *Journal of Ecology and Field Biology*. 32(3): pp. 197–206.

<<https://doi.org/10.5141/JEFB.2009.32.3.197>>.

Benedict T. M. (2020). Benthic Macro-Invertebrate Biomonitoring Study. *Bighill Creek Preservation Society*. pp. vi+51.

Bonada N., Prat N., Resh V. H. and Statzner B. (2006). Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches. *Annual Review of Entomology*. 51: pp. 495–523.

<<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151124>>.

Brewin P. A., Buckton S. T. and Ormerod S. J. (2000). The seasonal dynamics and persistence of stream macroinvertebrates in Nepal: do monsoon floods represent disturbance? *Freshwater Biology*. 44(4): pp. 581–594.

<<https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2000.00608.x>>.

Chadd R. and Extence C. (2004). The conservation of freshwater macroinvertebrate populations: a community-based classification scheme. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 14(6): pp. 597–624.

<<https://doi.org/10.1002/aqc.630>>.

Chattopadhyay S., Oglecki P., Keller A., Kardel I., Mirosław-Świątek D. and Piniewski M. (2021). Effect of summer flood on benthic macroinvertebrates in a medium-sized, temperate, lowland river. *Water*. 13: 885. <<https://doi.org/10.3390/w13070885>>.

Cinéas C. and Dolédec S. (2024). Influence of climate, physical and chemical variables on the taxonomic and

- functional responses of macroinvertebrate communities in tropical island rivers. *Hydrobiologia*. 851: pp. 3735–3754.
 <https://doi.org/10.1007/s10750-024-05532-3>.
- Cummins K. W. and Klug M. J. (1979). Feeding ecology of stream invertebrates. *Annual Review of Ecological Systematics*. 10: pp. 147–172.
- Di Cesare A., Eckert E. M., Rogora M. and Corno G. (2017). Rainfall increases the abundance of antibiotic resistance genes within a riverine microbial community. *Environmental Pollution*. 226: pp. 473–478.
 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.036>.
- Jacobsen D. and Encalada A. (1998). The macroinvertebrate fauna of Ecuadorian highland streams and the influence of wet and dry seasons. *Archiv für Hydrobiologie*. 142(1): pp. 53–70.
 <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/142/1998/53>.
- Jun Y. C., Won D. H., Lee S. H., Kong D. S. and Hwang S. J. (2012). A multimetric benthic macroinvertebrate index for the assessment of stream biotic integrity in Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 9(10): pp. 3599–3628.
 <https://doi.org/10.3390/ijerph9103599>.
- Jun Y. C., Kim N. Y., Kim S. H., Park Y. S., Kong D. S. and Hwang S. J. (2016). Spatial distribution of benthic macroinvertebrate assemblages in relation to environmental variables in Korean nationwide streams. *Water*. 8(1): pp. 1–27.
 <https://doi.org/10.3390/w8010027>.
- Jun Y. C. and Kwon S. J. (2024). Spatial distribution of benthic macroinvertebrate assemblages in Odaesan National Park, South Korea. *Journal of National Park Research*. 15(1): pp. 105–119.
- Kerans B. L. and Karr J. R. (1994). A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications*. 4(4): pp. 768–785.
 <https://doi.org/10.2307/1942007>.
- Kim D. G., Yoon T. J., Baek M. J. and Bae Y. J. (2018b). Impact of rainfall intensity on benthic macroinvertebrate communities in a mountain stream under the East Asian monsoon climate. *Journal of Freshwater Ecology*. 33(1): pp. 489–501.
 <https://doi.org/10.1080/02705060.2018.1476271>.
- Kim H. G., Yoon C. S. and Cheong S. W. (2018a). Effects of Habitat Changes Caused by Localized Heavy Rain on the Distribution of Benthic Macroinvertebrates. *Journal of Environmental Science International*. 27(8): pp. 689–699.
 <https://doi.org/10.5322/JESI.2018.27.8.689>.
- Kim H. J., Kim D. B., Jeong O. J. and Moon Y. S. (2021). The Moving Speed of Typhoons of Recent Years (2018–2020) and Changes in Total Precipitable Water Vapor Around the Korean Peninsula. *Journal of Korean Earth Science Society*. 42(3): pp. 264–277.
 <https://doi.org/10.5467/JKESS.4.42.3.264>.
- Kim S., Wasko C., Sharma A., Visser J. B. and Nathan R. (2023). Effects of Climate Change on Quantity and Spatiotemporal Distribution of Rainfall. *Water for Future*. 56(1): pp. 50–58.
- Krno I., Lánčzos T. and Šporka F. (2015). Windstorm disturbance effects on mountain stream ecosystems and the Plecoptera assemblages. *Biologia*. 70: pp. 1215–1227.
 <https://doi.org/10.1515/biolog-2015-0138>.
- Larsson J. (2021). eulerr: Area-Proportional Euler and Venn Diagrams with Ellipses. R package version 6.1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=eulerr>.
- Lee K. S. and Cho D. S. (2000). Relationships between the spatial distribution of vegetation and microenvironment in a temperate hardwood forest in Mt. Jeombong Biosphere Reserve Area, Korea. *The Korean Journal of Ecology*. 23(3): pp. 241–253.
- Lee J. Y., Lee K. Y., Han S. J., Lee S. J., Jung Y. K., Cheon J. Y., Choi J. S. and Kim J. C. (2014). Spatial and Temporal Variation of Macroinvertebrates according to Physical Factors in Gongji Stream Area. *Korean Journal of Environmental Ecology*. 28(1): pp. 24–32.
 <https://doi.org/10.13047/KJEE.2014.28.1.24>.
- Liu Y., Guo W., Wei C., Huang H., Nan F., Liu X., Liu Q., Lv J., Feng. J. and Xie S. (2024). Rainfall-induced changes in aquatic microbial communities and stability of dissolved organic matter: Insight from a Fen river analysis. *Environmental Research*. 246: 118107.
 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118107>.
- Merritt R. W. and Cummins K. W. (1996). An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd ed. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, USA. 862 pp.
- Mesa L. M. (2010). Effect of spates and land use on macroinvertebrate community in Neotropical Andean streams. *Hydrobiologia*. 641(1): pp. 85–95.
 <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-009-0059-4>.
- Mesa L. M. (2012). Interannual and seasonal variability of macroinvertebrates in monsoonal climate streams. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 55(3): pp. 403–410.
 <https://doi.org/10.1590/S1516-89132012000300011>.
- National Institute of Biological Resources. (2023). Biodiversity of the Korean Peninsula.
 <https://species.nibr.go.kr>.

- NIE. (2023). Project of Long Term Ecological Research. National Institute of Ecology, Seoecheon. 456 pp.
- NIER. (2019). Guidelines for Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment-Stream-. National Institute of Environmental Research, Incheon. 127 pp.
- Resende P. C., Resende P., Pardal M., Almeida S. and Azeiteiro U. (2010). Use of biological indicators to assess water quality of the Ul River (Portugal). *Environmental Monitoring and Assessment*. 170(1-4): pp. 535-544.
[〈https://doi.org/10.1007/s10661-009-1255-4〉](https://doi.org/10.1007/s10661-009-1255-4).
- Ro T. H. (2002). Resilience and Resistance of Biological Community: Application for Stream Ecosystem Health Assessment. *Journal of Environmental Policy*. 1(1): pp. 93-112.
- Ro T. H. and Chun D. J. (2004). Functional Feeding Group Categorization of Korean Immature Aquatic Insects and Community Stability Analysis. *Korean Journal of Limnology*. 37(2): pp. 137-148.
- Rawer-Jost C., Böhmer J., Blank J. and Rahmann H. (2000). Macroinvertebrate functional feeding group methods in ecological assessment. *Hydrobiologia*. 422/423: pp. 225-232.
[〈https://doi.org/10.1023/A:1017078401734〉](https://doi.org/10.1023/A:1017078401734).
- Rosenberg D. M. and Resh V. H. (1993). Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. Chapman and Hall, New York, USA.
- Sandin L. (2003). Benthic macroinvertebrates in Swedish streams: community structure, taxon richness, and environmental relations. *Ecography*. 26: pp. 269-282.
- Sun Q., Zhang X., Zwiers F., Westra S. and Alexander L. V. (2021). A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *Journal of Climate*. 34(1): pp. 243-258.
[〈https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1〉](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1).
- Theodoropoulos C., Vourka A., Stamou A., Rutschmann P. and Skoulikidis N. (2017). Response of freshwater macroinvertebrates to rainfall-induced high flows: A hydroecological approach. *Ecological indicators*. 73: pp. 432-442.
[〈https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.011〉](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.011).
- Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R. and Cushing C. E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 37: pp. 130-137.
[〈https://doi.org/10.1139/f80-017〉](https://doi.org/10.1139/f80-017).
- Wasko C. and Sharma A. (2016). Reduced spatial extent of extreme storms at higher temperatures. *Geophysical Research Letters*. 43(8): pp. 4026-4032.
[〈https://doi.org/10.1002/2016GL068509〉](https://doi.org/10.1002/2016GL068509).
- Weigel B. M. and Robertson D. M. (2007). Identifying biotic integrity and water chemistry relations in nonwadeable rivers of Wisconsin: toward the development of nutrient criteria. *Environmental Management*. 40(4): pp. 691-708.
[〈https://doi.org/10.1007/s00267-006-0452-y〉](https://doi.org/10.1007/s00267-006-0452-y).