

ORIGINAL ARTICLE

집중호우에 의한 서식지변동이 저서성 대형무척추동물의 분포에 미치는 영향

김형곤¹⁾ · 윤춘식 · 정선우*

창원대학교 생물학·화학융합학부, ¹⁾국립수산과학원 내수면양식연구센터

Effects of Habitat Changes Caused by Localized Heavy Rain on the Distribution of Benthic Macroinvertebrates

Hyoung-Gon Kim¹⁾, Chun-Sik Yoon, Seon-Woo Cheong*

Department of Biology & Chemistry, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

¹⁾Inland Aquaculture Research Center, National Fisheries Research and Development Institute, Changwon 51688, Korea

Abstract

The changes on community structures of benthic macroinvertebrates, relevance to the environment and interrelationship between benthos were studied over two years in stream with large environmental disturbance, which caused by localized heavy rain during Typhoon Chaba in October 2016. As a result, the number of species and individuals were increased after localized heavy rain, especially numbers of individuals of Ephemeroptera and Plecoptera were greatly increased. On the contrary, those of *Semisulcospira libertina* and *Semisulcospira forticosta* of Mesogastropoda were greatly decreased. Dominant species was *Baetis fuscatus* of Ephemeroptera, numbers of species and individuals of Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera(EPT group) were dramatically increased from 26 species, 110 individuals to 32 species, 365 individuals respectively. This suggests that the change of river bed and flow velocity due to heavy rain provided a suitable environment for the EPT group that preferred the rift of a stream. In the functional feeding group, only gathering collectors and filtering collectors were identified in autumn of 2017 because some functional groups preferentially adapted to the changed environment. The interspecific competition and environmental condition were the worst in autumn after heavy rain due to the increase individuals of some species. The ecological score of benthic macroinvertebrate community(ESB) was higher after the heavy rain than before. Results of the Group Pollution Index(GPI), Korean Saprobic Index(KSI) and Benthic Macroinvertebrate Index(BMI) were similar to those before and after heavy rainfall. Therefore, ESB was the most discriminating method for estimating the biological water quality in this study. Some species that are sensitive to water quality changes still appear or increase individuals in the area under investigation after the heavy rain. On the other hand, the individuals of some pollutant species decreased. This is thought to be because the habitat fluctuation caused by heavy rainfall has improved the water environment.

Key words : Benthic macroinvertebrates, Community characteristics, Localized heavy rain, Biological analysis of water quality, Habitat change

Received 27 June, 2018; Revised 23 July, 2018;

Accepted 24 July, 2018

*Corresponding author: Seon-Woo Cheong, Department of Biology & Chemistry, Changwon National University, Changwon 51140, Korea
Phone: +82-55-213-3454
E-mail: swcheong@changwon.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

1. 서론

저서성 대형무척추동물은 수중 먹이망의 저차 소비자인 동시에 어류와 같은 척추동물의 먹이원으로 수중생태계 먹이망의 중요한 구성요소이다. 그들의 생존은 서식지의 상태에 크게 의존하기 때문에 군집 상태는 그 환경의 수질을 평가하는 도구로 광범위하게 이용된다(Pennak, 1989; Merrit et al., 2008).

저서성 대형무척추동물의 서식과 생존에 영향을 미치는 환경조건은 하상구조나 유속, 유량과 같은 물리적 요인과 산소포화도 등의 화학적 요인 그리고 주변의 생물적 요인으로 나뉘는데(Buss et al., 2004), 이중 물리적 요인에 크게 영향을 미치는 것은 기후의 변화라 할 수 있다. 여름철 홍수나 집중호우에 의하여 서식지 하상이 유실되거나 표면적이 증가하는 등 하상의 불안정성 증가와 빈번한 유속 및 수위의 변화는 저서성 대형무척추동물의 생존뿐만 아니라 다양성에 불리한 서식환경을 제공한다(Robertson et al., 1995; Kim et al., 2016). 서식지 변동 후 저서성 대형무척추동물의 군집은 회복을 하게 되며 그 속도는 서식처에 남아 있던 성충의 적응분산능력과 산란능력, 그리고 새로운 환경에 적응하여 이입하는 군집에 의해 결정된다(Brooks and Boulton, 1991).

집중호우란 한 지역에서 단시간에 내리는 많은 양의 비를 말하며 보통 연간수량의 10%에 상당하는 비가 하루에 내리는 정도를 말한다. 지구 기후변화에 의해 한반도의 이러한 집중호우 빈도는 점차 높아지고 있으며 호우로 급증한 하천의 유속과 유량으로 인하여 토사의 이동이 이루어지게 된다. 이렇듯 담수생태계의 물리적 구조가 변경되면 그 속에 서식하고 있던 저서성 대형무척추동물은 적응하지 못하고 유실되거나, 오히려 증가하는 것들도 있으며 외부에서 이입되어 적응, 분산하는 경우도 있다.

2016년 10월 한국에서는 태풍 차바의 영향을 받았으며 경상북도 경주지역에 일 200 mm 이상의 국지성 호우가 쏟아졌다. 단시간의 집중호우로 일 강우량은 토함산 277.5 mm, 경주 감포 223.5 mm, 경주 외동 221.0 mm를 각각 기록하였으며 이로 인하여 하천의 물리적 구조가 변경되는 곳이 발생하였다. 하천의 물리·화학적 환경에 의존하고 있는 저서성 대형무척추동물은

서식처의 교란에 의하여 군집구조에 변화가 있을 것이므로 이 연구에서는 집중호우 당시 유속과 유량 급변에 따른 토사운반에 의하여 대규모의 서식지 교란이 일어난 경상북도 경주시 암곡동의 평지하천 구역에 대하여 집중호우 이전과 이후의 저서성 대형무척추동물의 군집분포 변화를 비교하였다.

집중호우 등 강수량변화에 따른 저서성 대형무척추동물의 실제 군집구조변화에 대한 연구는 제한적으로 이루어지고 있으며 국내의 관련 연구는 Bae(2010)에 의해 서울·경기지역에서 홍수에 의한 하천교란과 그에 따른 저서성 대형무척추동물의 군집 피해 및 회복에 대하여 이루어진 것이 있으며, 도시하천에서 강우량과 수온의 변화에 따른 저서성 대형무척추동물의 분포변화에 대한 연구(Gwag et al., 2014)가 있다. 그중 Bae(2010)의 연구에서는 저서성 대형무척추동물의 군집에는 집중호우의 빈도보다는 강도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였으며 이와 관련하여 본 연구에서는 시간적 및 공간적 규모가 제한적이기는 하나, 실제 높은 강도의 강우에 의한 대규모 교란이 발생한 하천환경에서 저서성 대형무척추동물의 군집구조 변화 및 생물간 상호관련성을 관찰하였다. 아울러 생물지수(Biotic index)와 생물학적 수질지수변화를 토대로 현재 이용되고 있는 여러 환경 건강성 평가방법들을 비교하여 평지하천 서식환경에 더욱 적절한 평가방법을 탐색하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 조사기간

대상 연구에서는 일정한 조사지점에서 집중강우 이전과 이후의 저서성 대형무척추동물 분포변화를 파악하였다. 조사지점은 경상북도 경주시 암곡동에 소재하며 덕동호로 유입되는 소규모 평지하천으로 지리 좌표는 북위 35° 52' 19", 동경 129° 19' 60"로서 해발 고도는 200 m이다. 집중호우 이전의 준계를 중심으로 조사지역의 하폭은 15~25 m, 유폭은 1~5 m, 수심은 0.5 m 이하였다. 하상은 호박돌과 자갈이 반 이상을 차지하고 그 외 잔자갈과 모래로 구성 되어 있으며 유로가 복잡하고 유속은 빠르지 않았다. 2016년 10월 태풍 차바에 의한 집중호우로 하천환경이 변동된 후에는



Fig. 1. Study site showing before heavy rain (left, 2016) and after heavy rain (right, 2017).

유폍이 5~10 m로 확장되고 유속과 유량이 증가하였으며 상류로부터 사력이 운반되어 하상은 자갈과 호박돌의 비율이 증가하였다.

조사기간은 2016년과 2017년의 4월(춘계), 7월(하계), 9월(추계)로 구분하여 계절별로 조사를 행하였으며, 동계에는 서식지의 결빙과 저서성 대형무척추동물의 감소로 조사를 원활히 행할 수 없으므로 제외하였다. 조사는 2016년 태풍 차바에 의한 집중호우 이전과 이후인 2017년의 계절별 각 1회씩으로 하여 총 6회를 행하였다.

2.2. 조사방법 및 저서성 대형무척추동물의 분류

저서성 대형무척추동물의 채집은 정량조사 방법에 따랐으며, 서버넷(30×30 cm, 망목 0.5×0.5 mm)을 이용하여 4 m²의 면적에 대하여 하상을 긁는 방법으로 하였다. 현장에서 채집된 표본은 고정액(증류수 59%, 에틸 알콜 28%, 포르말린 11%, 초산 2%)에서 24시간 고정한 후 80% 에틸알콜 용액으로 옮겨 냉장 보관하였다(Williams and Feltnate, 1992; Merritt and Cummins, 2008).

저서성 대형무척추동물의 동정은 Jung(2010), Kawai and Tanida(2005), Kwon(1990), Won et al.(2005), Yoon(1995), Yoon and Song(1989)을 이용하여 실제 현미경하에서 하였고, 종단위의 동정이 어려운 종은 sp.로 기록하였다. 섭식기능군(Functional feeding group)의 분류는 Barbour et al.(1992), Merritt et al.(2008), Ro and Chun(2004)에 따랐으며 분류체계

와 학명은 한국곤충명집(The Korean Entomological Society of Korea and Korean Society of Applied Entomology, 1994) 및 한국동물명집(The Korean Society of Systematic Zoology, 1997)을 참고하였다.

2.3. 생물지수 및 생물학적 수질지수

생물지수로는 다양도(Diversity index, H')(Shannon and Weaver, 1949), 풍부도(Richness Index, RI)(Margalef, 1957), 우점도(Dominant Index, DI)(McNaughton, 1967), 그리고 균등도(Evenness index, J')(Pielou, 1975)를 산출하였으며 생물학적 수질지수로는 생태점수(Ecological score of benthic macroinvertebrate community, ESB)(Kong, 1997), 군오염지수(Group Pollution Index, GPI)(Yoon et al., 1992), 한국오수생물지수(Korean Saprobic Index, KSI)(Won et al., 2006), 그리고 저서생물지수(Benthic Macroinvertebrate Index, BMI)(National Institute of Environmental Research, 2013)의 네 가지 평가방법을 이용하였다. 환경의 건강도 평가는 우점도와 다양도지수를 반영한 환경부의 군집특성 및 환경상태 평가기법(National Institute of Environmental Research, 2013)을 따랐다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 저서성 대형무척추동물 구성의 변화

2016년 10월의 집중호우에 의하여 서식지가 크게 변동된 경주의 평지하천에서 집중호우를 기점으로 그 이전인 2016년과 이후인 2017년으로 구분하여 저서성

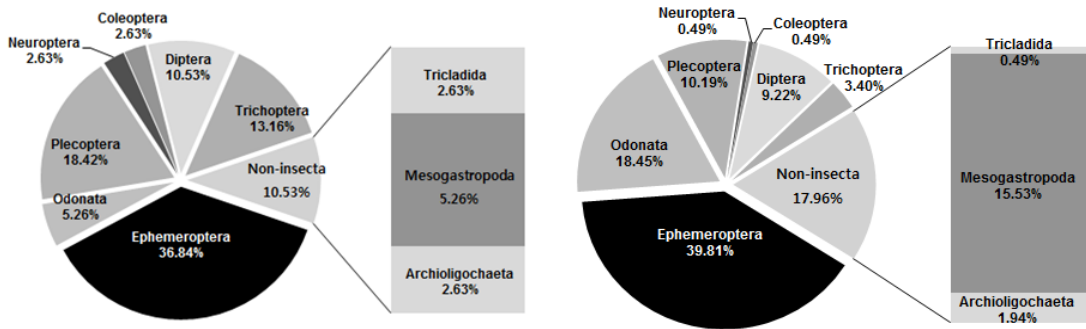


Fig. 2. Species composition (A) and individuals composition (B) by the order before the heavy rain in 2016.

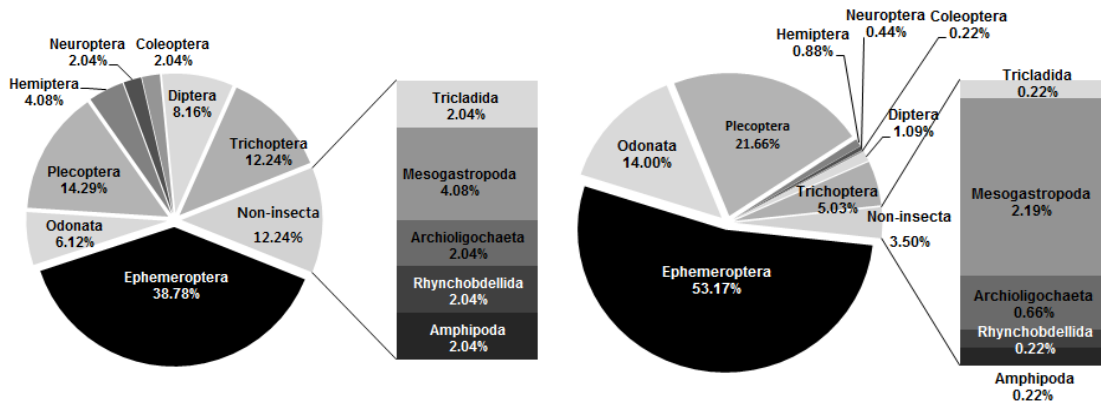


Fig. 3. Species composition (A) and individuals composition (B) by order after the heavy rain in 2017.

대형무척추동물 분포를 조사하였으며 2년의 조사기간 동안 4문 6강 13목 31과 63종 663개체가 확인되었다.

집중호우 이전인 2016년에 채집된 표본은 3문 4강 10목 20과 38종 206개체로 중수에 의한 목별 점유율에서 곤충강(Insecta)의 하루살이목(Ephemeroptera)이 36.84%로 가장 높은 점유율을 나타내었고 그 다음은 강도래목(Plecoptera)이 18.42%, 날도래목(Trichoptera)이 13.16%, 파리목(Diptera)이 10.53%의 순이었으며 비곤충류가 10.53%를 차지하였다. 개체수에 의한 목별 점유율도 곤충강의 하루살이목이 39.81%로 가장 높았으나 날도래목의 개체수 점유율은 3.40%로 낮았다. 비곤충류의 개체수 점유율은 17.96%로 중수 점유율보다 높았는데 이는 중복족목(Mesogasteropoda)에 속하는 다슬기(*Semisulcospira libertina*)와 주름다슬기(*Semisulcospira forticosta*)의 개체수가 많았기 때

문이다(Fig. 2). 집중호우 이후인 2017년에 채집된 표본은 4문 6강 13목 28과 49종 457개체로 중수에 의한 목별 점유율에서 곤충강의 하루살이목이 38.78%로 가장 높은 점유율을 나타내면서 2016년에 비해 약 2% 증가하였고 그 다음은 강도래목(14.29%), 날도래목(12.24%) 등의 순이었으며 강도래목은 전년도에 비해 4% 정도 감소하였다. 비곤충류에서는 2016년에는 채집되지 않은 부리거머리목(Rhynchobdellida)과 단각목(Amphipoda)이 2017년도에 채집되면서 3목에서 5목으로 증가하는 목 구성의 변화가 나타났다. 곤충강에서는 포식성의 노린재목(Hemiptera)이 추가되었다. 개체수에 의한 목별 점유율은 곤충강의 하루살이목이 53.17%로 2016년의 39.81%에 비해 높았으며 이는 꼬마하루살이과(Baetidae)의 개똥하루살이(*Baetis fuscatu*) 개체수가 급격히 증가하여 이곳의 저서성 대형무척추동물 군집구조에 주된 영향을 미쳤기 때문

Table 1. Changes in dominant species and EPT group in study site

Study Period		Dominant species	Subdominant species	TS	TI	ES	EI
2016 (Before Heavy Rain)	Spring	<i>Epeorus nipponicus</i>	<i>Paraleptophlebia japonica</i>	30	112	22	90
	Summer	<i>Semisulcospira libertina</i> <i>Sieboldius albardae</i>	<i>Davidius lunatus</i>	10	68	2	2
	Autumn	<i>Baetis fuscatus</i>	<i>Semisulcospira libertina</i>	9	26	6	18
	Total	<i>Semisulcospira libertina</i>	<i>Davidius lunatus</i> <i>Sieboldius albardae</i>	38	206	26	110
2017 (After Heavy Rain)	Spring	<i>Archynopteryx</i> KUa	<i>Sweltsa nikkoensis</i>	27	200	21	192
	Summer	<i>Davidius lunatus</i>	<i>Sieboldius albardae</i>	17	90	6	9
	Autumn	<i>Baetis fuscatus</i>	<i>Procloeon pennulatum</i>	15	167	13	164
	Total	<i>Baetis fuscatus</i>	<i>Davidius lunatus</i>	49	457	32	365

TS: Total Species, TI: Total Individuals, ES: EPT Species, EI: EPT Individuals.

으로 생각된다. 또한 강도래목의 개체수도 21.66%로 높은 점유율을 나타내었는데 이는 전년도에는 나타나지 않았던 녹색강도래과(Chloroperlidae)의 녹색강도래(*Sweltsa nikkoensis*)와 그물강도래과(Perlodidae)의 큰등그물강도래 KUa(*Archynopteryx* KUa)가 다수 개체 출현하여 나타난 결과이다. 한편, 비곤충류의 목별 점유율은 약 14% 감소하였는데 이는 다슬기 등 중북족목의 개체수가 2016년에 비해 13.34% 감소한 것이 그 원인이라 할 수 있다(Fig. 3).

두 해에 걸쳐 공통으로 출현한 종은 22종으로 전체 출현종 63종 가운데 34.92%만이 공통적으로 나타났다. 전체 개체수는 많지 않지만 집중호우의 영향을 받지 않고 개체수의 큰 변동이 없는 이 지점의 대표종은 흰부채하루살이(*Epeorus nipponicus*)와 어리장수잠자리(*Sieboldius albardae*)로 확인되었다.

반면, 집중호우 이전 해에는 소수이거나 출현하지 않다가 집중호우 이후인 2017년에 개체수가 증가한 종은 하루살이목의 개똥하루살이와 쌍혹하루살이(*Drunella lepnevae*), 잠자리목의 쇠측범잠자리(*Davidius lunatus*), 강도래목의 녹색강도래와 큰등그물강도래 KUa 등이었다. 한편, 집중호우 이후 1년간은 그 전 해에 비해 개체수가 2배 이상 증가하였지만 이러한 추세와는 반대로 오히려 개체수가 감소한 종들이 있는데, 연체동물문(Mollusca)의 다슬기와 주름다슬기의 개체수의 감소를 들 수 있다. 이들의 개체수는 각각 전년도에 비해 65.38%와 83.33%나 급감하였다. 이는

서식지의 기질에 몸을 부착하여 치설로 부착조류나 퇴적물을 긁어먹고 사는 복족류(Gastropoda)가 기상 변화에 의한 서식지 기질의 급변으로 생존에 불리한 조건에 처하였기 때문으로 생각된다.

조사대상 지역의 집중호우에 의한 서식지 변동 이전과 비교했을 때 나타난 저서성 대형무척추동물의 생물종구성 변화를 종합하면 38종에서 49종으로의 출현종의 증가와 더불어 부리거머리목과 단각목의 출현으로 비곤충류의 목 수 증가와 점유율 증가가 관찰되었다. 개체수는 206개체에서 457개체로 크게 증가하였는데 특히 하루살이목과 강도래목의 개체수가 크게 증가하였다. 반대로 다슬기와 주름다슬기 등 중북족목의 개체수는 크게 감소하였다.

3.2. 우점종과 EPT군의 구성변화

하루살이목(Ephemeroptera), 강도래목(Plecoptera), 날도래목(Trichoptera)을 EPT군이라 통칭하며 이들은 저서성 대형무척추동물 중 청정수계를 대표하는 지표생물군이다(Barbour et al., 1992). 그러므로 전체 출현 분류군에서 이들 특정 목(order)단위의 분류군이 차지하는 비율을 따져 환경상태를 판정하는 간편한 기준으로 이용하는데(Kim et al., 2014), 이번 조사에서는 집중호우에 의해 서식지의 변동이 일어나기 전과 변동이 일어난 후의 EPT군의 비율을 비교하였다 (Table 1).

조사기간을 통하여 확인된 전체 우점종은 개똥하루살이(우점도 17.34%)였으며 아우점종은 쇠측범잠

자리(우점도 6.79%)였다. 전체 EPT군의 종수는 40종으로 전체 출현종 63종의 63.49%를 차지하여 지리산 등지의 전형적인 산지계류에서 나타나는 높은 EPT점유율(80% 이상)에 비해 크게 낮았으나(Bang et al., 2016) 이는 조사지점이 평지하천이므로 유속과 기질의 구성 차이에 의해 나타난 결과로 생각된다.

집중호우 이전과 이후의 우점종 및 아우점종을 동일 계절에 대하여 비교하였다. 춘계에는 집중호우 이전에 흰부채하루살이(*Epeorus nipponicus*)와 두갈래하루살이(*Paraleptophlebia japonica*)가 우점하다가 집중호우 이후에 큰등그물강도래KUa와 녹색강도래가 우점하게 되었다. 이 하루살이류는 환경이 우수한 평지하천의 빠른 유속에서 납작한 체형을 이용하여 기질에 붙거나 바닥을 기면서 부착조류나 퇴적유기물을 먹으며 오염내성도가 약한 것들로 서식지 변동 전 춘계의 조사지점이 청정하며 안정된 환경이었다는 것을 알 수 있다. 한편 서식지 변동 후의 춘계에 우점한 큰등그물강도래KUa와 녹색강도래는 비교적 유속이 완만한 여울을 선호하며 중류하천의 수변부에서 작은 수생동물을 포식하는 무리로서 이러한 우점종 변화는 조사지역의 서식지 변동이 강도래류의 서식과 번식에 적합한 기질구성과 먹이를 제공하였기 때문일 것이다. 즉, 집중호우에 의해 조사지점은 하폭이 더 넓어지고 하도내 식생이 희박해 졌으며 유수에 의해 상류부로부터 이동된 호박돌과 자갈이 기질을 구성하였는데 이러한 기질조건은 EPT군이 선호하는 서식지의 상태이지만 특히 하루살이류와 같은 수중의 소형 먹이동물의 개체수가 증가하면서 잡아먹는 무리인 강도래류의 개체수가 증가한 것으로 보인다. 하계의 우점종 변화에서는 집중호우 이전의 안정된 서식지 상태에서는 다슬기가 우점하였으나 서식지 변동 후에는 수변부와 정체수역에서 소형 수생동물을 포식하는 쇠측범잠자리(*Davidius lunatus*)와 가시측범잠자리(*Trigomphus citimus*)가 우점하였다. 이는 하계에 조사지점의 유속이 빠르지 않음을 뜻하며 모래, 자갈위주의 하상에서 우점하던 다슬기가 호박돌과 자갈로 변동된 기질에 서식하기 불리한 반면 이러한 조건이 잠자리류의 서식에는 유리했기 때문이라 판단된다. 추계에는 서식지 변동 이전과 이후 모두 개똥하루살이가 우점하였는데 서식지 변동 이전에는 12개체가 확인된 데 비해

서식지 변동 이후에는 115개체로 급증하였다.

한편, 서식지를 점유하는 EPT군의 변화를 살펴보면 종수와 개체수가 서식지 변동이전에는 26종 110개체였으나 이후에는 32종 365개체로 증가하였다. EPT군은 수질오염에 민감하게 반응하는 분류군들로서(Kim et al., 2014), 이들의 점유율이 상승하였다는 것은 집중호우에 의한 서식지변동이 EPT군의 서식에 유리한 하천환경을 제공하였다는 것을 의미한다. 이는 또한 집중호우에 의해 서식지의 기질구조가 변동되고 하폭이 확대되었으며 통수량 증가와 여울 증가 등의 서식지 변동이 이들 EPT 군의 서식에 더욱 유리하게 작용하였음을 시사한다. EPT군의 개체수는 춘계에 가장 많고 2배 이상 증가하였으며, 하계에는 가장 적고 4배가량 증가하였다. 추계에는 춘계보다 개체수가 적으나 전해에 비해 9배가량 증가하였다.

이 지점의 EPT 비율의 변화와 잡아먹는 무리인 측범잠자리류와 강도래류가 우점 한 것은 개똥하루살이의 개체수 급증과 관련이 있을 것으로 사료된다.

3.3. 섭식기능군의 분포변화

조사지점의 섭식기능군은 지금까지 알려진 7개의 무리 가운데 찢어먹는 무리(Piercers)와 기생하는 무리(Parasite)를 제외한 5개 군이 확인되었다. 종 수를 중심으로 살펴보면 섭식기능군은 주위먹는 무리(Gathering collectors)의 점유율이 가장 높고 그 다음으로 잡아먹는 무리(Predators), 찢어먹는 무리(Shredders), 긁어먹는 무리(Scrapers), 걸러먹는 무리(Filtering collectors)의 순으로 나타났다. 집중호우 이후인 2017년은 전년도에 비해 종 수에 있어서는 잡아먹는 무리의 점유율이 6.79% 증가한 것이 특이하였고 주위먹는 무리, 긁어먹는 무리, 걸러먹는 무리의 종 수는 소폭 감소하였다. 잡아먹는 무리의 종 점유율 증가는 이 무리에 속하는 강도래목의 출현 종수에는 뚜렷한 등락이 없으나 노린재목의 장구애비(*Laccotrefes japonensis*)와 송장헤엄치개(*Notonecta (Paranecta) triguttata*), 딱정벌레목(Coleoptera)의 점물뽕팽이(*Laccobius (Laccobius) bedeli*), 잠자리목(Odonata)의 검은물잠자리(*Calopteryx atrata*) 등의 종들이 추가되어 얻어진 결과이다.

개체수를 중심으로 한 점유율은 역시 주위먹는

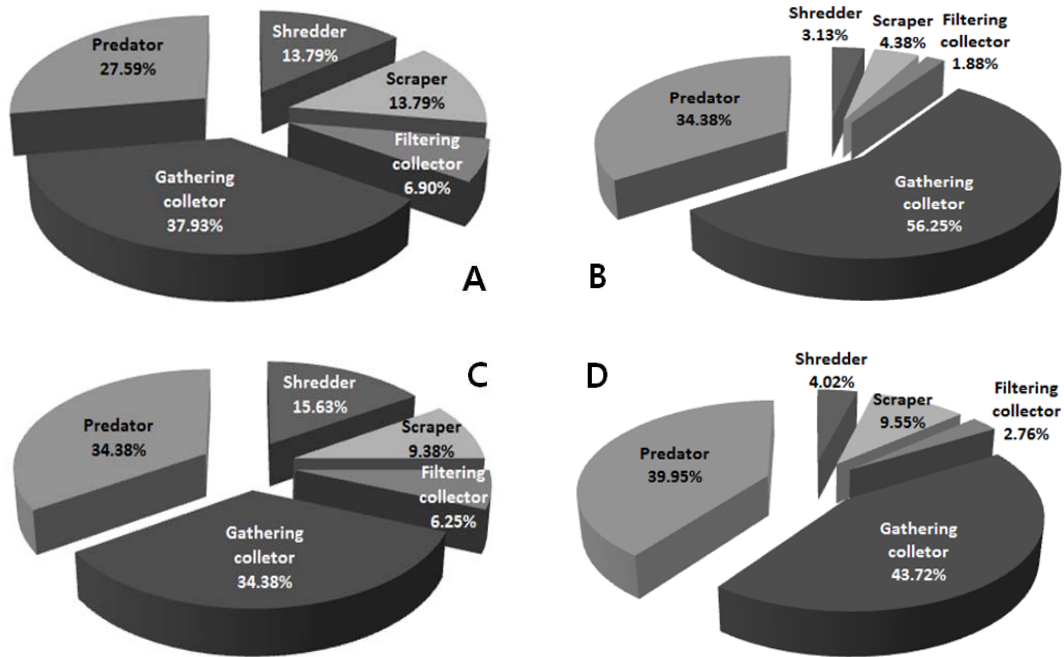


Fig. 4. Comparison the composition of functional feeding groups before and after heavy rain. A: Composition by species number before heavy rain, B: Composition by individuals before heavy rain, C: Composition by species number after heavy rain, D: Composition by individuals after heavy rain.

무리가 40% 이상으로 가장 높고 그 다음으로 잡아먹는 무리가 30% 이상으로 높았으며 긁어먹는 무리, 썰어먹는 무리, 걸러먹는 무리가 각각 10% 미만을 차지하였다. 집중호우 이후에 잡아먹는 무리의 개체수 점유율은 5.57% 증가하였으나 주위먹는 무리는 12.53% 감소하였다. 잡아먹는 무리의 개체수 점유율 증가는 집중호우 이후에 쇠뺨범잠자리, 녹색강도래, 큰등고물강도래의 개체수가 급증한 것이 요인이며 주위먹는 무리의 개체수 점유율 감소는 이 무리에 속하는 개똥하루살이의 개체수 급증에도 불구하고 집중호우에 의한 유속증가에 의해 다슬기류, 갈따구류, 각다귀류의 개체수가 현저히 감소하였기 때문이다(Fig. 4).

섭식기능군의 출현패턴은 계절에 따라서도 다른데 춘계에는 가장 다양한 무리의 섭식기능군이 확인되었으며 서식지 변동 후에 주위먹는 무리의 점유율이 상대적으로 감소하였다. 하계에는 다섯 가지 섭식기능군 중 잡아먹는 무리, 주위먹는 무리, 썰어먹는 무리의 세 개 군만 채집되었으며 잡아먹는 무리의 종 수는 집

중호우 후의 하계에 증가하였다. 그러나 같은 때에 주위먹는 무리의 종 수는 오히려 감소하였다. 집중호우 이후의 추계에는 주위먹는 무리와 걸러먹는 무리만 확인되었으며 주위먹는 무리의 점유율이 가장 높았다. 계절별 결과를 종합해보면 집중호우 이전에 비해 이후, 특히 추계에 긁어먹는 무리와 썰어먹는 무리가 사라지면서 섭식기능군의 구조가 더 단순해지는데 이는 변화된 환경에 특정 기능군들이 먼저 적응하여 나타난 현상으로 보인다(Fig. 5).

3.4. 생물지수와 생물학적 수질지수의 변화

생물지수는 정량조사 된 저서성 대형무척추동물에 대하여 우점도(DI), 다양도(H'), 풍부도(RI), 균등도(J')를 산출하여 집중호우 이전과 이후의 계절별 비교를 하였으며 우점도와 다양도 수치를 바탕으로 종간 경쟁(interspecific competition) 정도와 군집안정도(community stability) 및 환경상태(environmental condition)를 평가하였다.

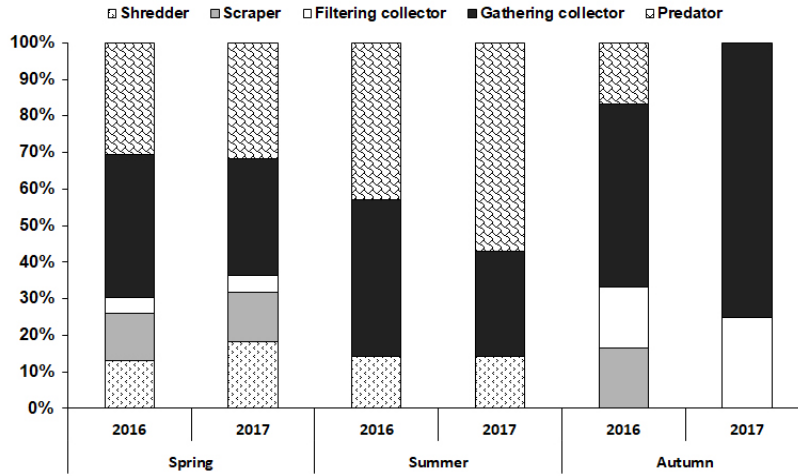


Fig. 5. Seasonal changes of functional feeding groups before(2016) and after(2017) heavy rain.

그 결과 풍부도와 균등도는 춘계에 가장 높았으며 집중호우 이후에는 춘계의 풍부도가 6.15에서 4.91로 감소하였다. 우점도지수는 균등도나 다양도지수와는 반대되는 개념으로 특정 종들의 점유율이 높아지면 상승하는데 춘계에는 가장 낮고 추계에 가장 높았다. 집중호우 이후의 2017년도의 추계에 우점도 지수는 전체 조사기간 중 가장 높은 0.75를 기록하였는데 이는 조사당시 개똥하루살이의 개체수가 급증하여 나타난 결과이다. 반대로 다양도는 춘계에 가장 높고 추계에 가장 낮은 것으로 나타났는데 이는 춘계에 비해 추계에 우점도가 높고 저서성 대형무척추동물의 종수에 비해 개체수가 많으며 종별 개체수 균등도가 춘계에 비해 낮기 때문이다. 이 또한 2017년 추계에 나타난

개똥하루살이 개체수 급증이 그 원인으로 보인다. 우점도지수와 다양도지수의 값으로 평가한 중간 경쟁상태는 집중호우 이후의 추계에 가장 낮은 것으로 나타났으며 환경상태도 이 시기에 가장 좋지 않은 것으로 나타났다. 군집안정도는 두 해의 춘계를 제외하면 모든 조사기간에서 군집이 불안정한 것으로 나타났다. 이러한 세 가지 평가는 모두 우점도와 다양도에 의존하기 때문에 2017년 추계에 불량한 결과를 산출하였으며, 특히 그 시기에 개똥하루살이 등 몇 종의 개체수 급증으로 인하여 평가기준이 되는 지수에 불리하게 작용하였을 것으로 보인다. 그러므로 이러한 지수만으로 서식지의 환경 건전성을 판정하는 것은 적합하지 않으며 생물학적 수질지수를 반영한 판정기준을

Table 2. Comparison of interspecific competition, community stability and environmental condition with biotic indices of benthic macroinvertebrates before and after heavy rain in survey site

		DI	H'	Interspecific competition	Community stability	Environmental Condition	RI	J'
Before Heavy Rain	2016 Spring	0.24	4.41	very high	very stable	very good	6.15	0.90
	Summer	0.53	2.56	somewhat high	unstable	somewhat good	2.13	0.77
	Autumn	0.65	2.45	somewhat high	unstable	somewhat good	2.46	0.77
After Heavy Rain	2017 Spring	0.34	3.77	high	stable	good	4.91	0.79
	Summer	0.70	2.50	somewhat high	unstable	somewhat good	3.56	0.61
	Autumn	0.75	1.95	low	unstable	bad	2.74	0.50

H': species diversity, RI: species richness, DI: dominance index, J': Evenness index.

Table 3. Biological water quality indices with biotic indices of benthic macroinvertebrates before and after heavy rain in survey site

		ESB	WQ	GPI	WQ	KSI	WQ	BMI	WQ
2016 Before Heavy Rain	Spring	101	1	0.88	1	0.31	1	94.06	highest
	Summer	29	2	1.17	2	0.69	1	84.34	highest
	Autumn	32	2	1.21	2	0.66	1	87.23	highest
2017 After Heavy Rain	Spring	95	1	0.80	1	0.06	1	95.66	highest
	Summer	51	1	1.29	2	0.26	1	85.28	highest
	Autumn	43	2	1.56	2	0.78	1	84.63	highest

WQ: Water Quality, ESB: Ecological Score of Benthic macroinvertebrate community, GPI: Group Pollution Index, KSI: Korean Saprobic Index, BMI: Benthic Macroinvertebrate Index.

마련하여야 할 것으로 판단된다(Table 2).

생물학적 수질지수로서 저서성 대형무척추동물 생태점수(ESB), 군오염지수(GPI), 한국오수생물지수(KSI), 저서생물지수(BMI)를 산출하였다. ESB와 BMI는 높을수록, KSI와 GPI는 낮을수록 환경의 건강성이 양호한 것으로 판정한다.

먼저, ESB는 청정한 환경에 주로 서식하여 오염내성이 약한 종들에 높은 점수를 부여하는 방식으로 두 해의 수질을 계절별로 각각 비교해보면 집중호우 이후의 하계에 ESB점수가 전 해에 비해 훨씬 높아져 수질이 개선된 것을 알 수 있다. 추계에는 두 해 모두 2급수이지만 2017년도의 추계에 ESB가 더 높았다. GPI는 저서성 대형무척추동물의 수질등급에 따른 출현특성을 바탕으로 지표생물에 따라 점수를 차등 부여하는 방식인데 이 방법에 의해서는 두 해의 수질이 거의 비슷하게 판정되었다. KSI는 지표생물군의 오락계급치와 출현개체수를 바탕으로 점수를 산출하며 조사대상지역이 1차 하천에 해당하는 비교적 청정한 서식지이므로 출현종의 오락계급치가 낮은 까닭에 수질은 2년간의 전체계절을 통하여 1급수로 나타났다. BMI지수는 지표생물종의 단위오탁지수와 생물출현도를 바탕으로 산출되며 이도 역시 KSI와 유사한 이유로 전 계절을 통하여 수질이 최상으로 나타났다(Table 3).

조사지역은 산간계류에서 평지하천으로 가는 중간단계의 하천으로서 오염내성도가 낮거나 중 정도의 종들이 다수 서식하는 곳이다. 이 때문에 오락지수가 높은 종들이 많지 않아 KSI나 BMI값이 모두 최상으

로 나타나며 결과에 변별력을 갖지 못하게 된다. 그러므로 오염내성이 강한 종들이 서식하는 하천의 종류 부나 하류부, 또는 오락수의 평가에 더 적합한 KSI나 BMI지수보다는 이러한 하천 상류부나 청정하천에 대한 평가에는 ESB나 GPI의 적용이 더 적합하다고 생각된다.

조사지역의 환경건강성 변화를 지표생물을 바탕으로 알아보았다. 오염에 대한 내성이 약하여 청정하천 대표 종으로 알려진 것들 중 검은머리물날도래(*Rhyacophila nigrocephala*)와 뿔하루살이(*Drumella aculea*)가 집중호우에 의한 서식지변동 이후인 2017년에도 서식지에서 여전히 발견되며 민하루살이(*Cincticostella levanidovae*)의 개체수는 오히려 크게 증가한 것으로 보아 서식지 환경의 건강성은 변함없는 것으로 보인다(National Institute of Environmental Research, 2013). 이러한 결과는 집중호우와 같은 물리적 교란에 의한 서식지 변동에 대해서는 자연의 회복력이 강하다는 것을 시사한다. 한편, 물 흐름이 좋아지면서 오염하천 지표종인 깔따구류의 개체수는 감소하였는데 이러한 결과는 Gwag et al.(2014)의 연구결과와 유사하였으며 집중호우에 의해 수변의 바이오필름이 제거되고 수환경이 개선되는 효과를 주었기 때문으로 생각된다. 하천의 자연교란에 대한 생물분류군의 반응은 하천에 따라 다르게 나타나 일반화 할 수는 없겠으나 이러한 연구결과가 축적되면 더 합리적인 생물학적 수환경 건강성 평가도구가 개발될 것이며 수해에 대한 인공적 환경복구의 타당성을 판단할 수 있는 근거가 마련될 수 있을 것이다.

4. 결론

실제 집중호우에 의해 대규모 교란이 발생한 하천 환경에서 저서성 대형무척추동물의 군집구조 변화, 환경과의 관련성, 저서생물간 상호관련성을 연구하였다. 또한 현재 통용되고 있는 환경 건강성 평가방법들을 비교하여 하천 서식환경에 더욱 적절한 평가방법을 탐색하였다. 연구 대상지는 경상북도 경주시에 소재한 평지하천의 한 구간으로 2016년 10월 태풍 차바 때 집중호우에 의해 하상구조와 유속의 변화가 크게 일어난 곳이다. 이 연구에서는 2016년과 2017년의 2년간 6회의 조사를 통하여 집중호우 이전과 이후의 저서성 대형무척추동물의 군집구조를 비교하였다. 특히 하루살이목(Ephemeroptera)과 강도래목(Plecoptera)의 개체수가 크게 증가하였으나 다슬기(*Semisulcospira libertina*)와 주름다슬기(*Semisulcospira forticosta*) 등 중복족목(Mesogastropoda)의 개체수는 크게 감소하였다. 우점종은 개똥하루살이(*Baetis fuscatus*)였으며 하루살이목, 강도래목, 날도래목(EPT군)의 종수와 개체수가 26종 110개체에서 32종 365개체로 크게 증가하였는데, 이는 집중호우에 의한 하천의 하상과 유속변화가 여울부를 선호하는 EPT군의 서식에 적합한 환경을 제공하였기 때문으로 생각된다. 섭식기능군은 집중호우 이후에 굵어먹는 무리와 썰어먹는 무리가 사라지면서 그 구조가 더 단순해졌으며 이는 변화된 환경에 우선적으로 적응한 일부 기능군들이 먼저 나타났기 때문으로 생각된다. 풍부도는 집중호우 이후에는 춘계의 풍부도가 6.15에서 4.91로 감소하였고, 우점도는 집중호우 이후의 추계에 가장 높은 0.75로 나타났는데 이는 당시 개똥하루살이의 개체수 급증이 원인이다. 우점도와 다양도 지수를 바탕으로 한 중간 경쟁 정도와 환경상태는 특정 종의 개체수 증가로 인해 집중호우 이후의 추계에 가장 불량하게 나타났는데 이러한 환경 판정기준은 더 다양한 생물지수를 반영하지 않아 다소 편향된 결과를 나타낸다. 몇 가지 생물학적 수질지수를 산정한 결과 계절별 생태점수(ESB)는 집중호우 이후가 이전보다 더 높았다. 군오염지수(GPI)와 한국오수생물지수(KSI) 그리고 저서생물지수(BMI)의 산정결과는 집중호우 이전과 이후가 비슷하게 나타나 본 연구 결과로 하천환경의 생물학적

수질판정에는 ESB가 가장 변별력 있는 방법으로 판단되었다. 검은머리물날도래(*Rhyacophila nigrocephala*)나 빨하루살이(*Drunella aculea*)와 같이 수질변화에 민감한 몇몇 저서성 대형무척추동물 종들이 집중호우 이후에도 조사대상 지역에 여전히 출현하거나 오히려 개체수가 증가한 반면, 갈따구류와 같은 일부 오염지표종의 개체수는 감소하였는데 이것은 집중호우에 의한 서식지 변동이 수환경의 개선효과를 주었기 때문으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구 과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

- Bae, Y. J., 2010, Damage and recovery of benthic macroinvertebrate communities following localized torrential rainfalls in Korean streams, Korea Science and Engineering Foundation, 1-69.
- Bang, G. J., Kim, H. G., Yoon, C. S., Cheong, S. W., 2016, Distribution characteristics of functional feeding groups of benthic macroinvertebrates and biological evaluation of water quality in Jirisan National Park, J. Environ. Sci., 25(5), 655-671.
- Barbour, M. T., Plafkin, J. L., Bradley, B. P., Graves, C. G., Wiseman, R. W., 1992, Evaluation of EPA's rapid bioassessment benthic metrics: Metric redundancy and variability among reference stream sites, Environ. Toxicol. & Chem., 11, 437-449.
- Brooks, S. S., Boulton, A. J., 1991, Recolonization dynamics of benthic macroinvertebrates after artificial and natural disturbances in an Australian temporary stream, Aus. J. Mar. Freshw. Res. 42, 295-308.
- Buss, D. F., Baptista, D. F., Nessimian, J. L., Egler, M., 2004, Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams. Hydrobiol., 518, 179-188.
- Gwag, I. S., Song, M. Y., Jeon, T. S., 2014, The effects of natural disturbances on benthic macro-invertebrate, Kor. Soc. Lim., 37(1), 87-95.
- Jung, K. Y., 2010, Aquatic invertebrate in paddy

- ecosystem of Korea, Nat. Acad. Agric. Sci. Rur. Dev. Admin. 1-530.
- Kawai, T., Tanida, K., 2005, Aquatic insects of Japan, Tokai University Press Japan, 27-1275.
- Kim, H. G., Lee, D. J., Yoon, C. S., Cheong, S. W., 2016, Assessing biodiversity of benthic macroinvertebrates and influences of several environmental factors on the community structures in Upo Wetland by long-term ecological monitoring, J. Environ. Sci., 25(3), 417-424.
- Kim, H. G., Yoon, C. S., Hwang, J. W., Park, E. H., Cheong, S. W., 2014, A Characteristic of community distribution on benthic macroinvertebrates in major streams of Jirisan mountain, J. Environ. Sci., 23(2), 291-302.
- Kong, D. S., 1997, Benthic macroinvertebrates in Hongseong and Yesan County, Ministry of Environment, Natural Environment in Yesan, Seosan-si and Hongseong-gun, 155-204.
- Kwon, O. G., 1990, Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea, Min. Edu. Korea, Vol. 32, 2-446.
- Margalef, R., 1957, La teoria de la informacion en ecologia, Mem. Real Acad. Cienc. Artes Barcelona, Vol. 32, 373-449.
- McNaughton, S. J., 1967, Relationship among functional properties of California grassland, Nature, 216, 1268-144.
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., Berg, M. B., 2008, An Introduction to the aquatic insects of North America, Cambridge University Press, 1-267.
- National Institute of Environmental Research, 2013, National aquatic ecological monitoring program, Korea, Min. Environ. Korea, 1-535.
- Pennak, R. W., 1989, Fresh-water invertebrates of the United States, Wiley Interscience, 1-628.
- Pielou, E. C., 1975, Species-diversity and pattern diversity in the study of ecological succession, J. theor. Biol., 10, 370-383.
- Ro, T. H., Chun, D. J., 2004, Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis, Korean J. Limnol., 37(2), 137-148.
- Robertson, A. L., Lancaster, J., Hildrew, A. G., 1995, Stream hydraulics and the distribution of macrocrustacea: A Role for refugia, Freshw. Biol., 33, 469-484.
- Shannon, C. E., Weaver, W., 1949, The mathematical theory of communication, Univ. Illinois Press, 1-117.
- The Korean Entomological Society of Korea and Korean Society of Applied Entomology, 1994, Check list of insects from Korea, Kon-Kuk University Press, 5-744.
- The Korean Society of Systematic Zoology, 1997, List of Animals in Korea, The Korean Society of Systematic Zoology, 3-489.
- Williams, D. D., Feltmate, B. W., 1992, Aquatic insects, CBA International, Oxon, 1-358.
- Won, D. H., Jun, Y. C., Kwon, S. J., Hwang, S. J., Ahn, K. G., Lee, J. K., 2006, Development of Korean saprobic index using benthic macroinvertebrates and its application to biological stream environment assessment, J. Korean Soc. Water Qual., 22(5), 768-781.
- Won, D. H., Kwon, S. J., Jun, Y. C., 2005, Aquatic insects of Korea, Korea Ecosys. Ser., 1-415.
- Yoon, I. B., 1995, Aquatic insects of Korea, Junghaengsa, 5-262.
- Yoon, I. B., Kong, D. S., Ryu, J. K., 1992, Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (3) Macroscopic simple water quality evaluation, Korean Soc. Environ. Biol., 10(2), 77-84.
- Yoon, I. B., Song, M. Y., 1989, A Revision of the taxonomy of Korean black-flies (Simuliidae : Diptera) I, The larval and pupal stages of subgenus *Simulium*, Entomol. Res. Bul., 15, 35-64.