

공지천 수계에서 물리적인 요인에 따른 저서성 대형무척추동물 군집의 시·공간적인 변동^{1a}

이재용² · 이광열³ · 한상진³ · 이석종⁴ · 정유경⁵ · 천재룡² · 최재석⁶ · 김준철^{3*}

Spatial and Temporal Variation of Macroinvertebrates according to Physical Factors in Gongji Stream Area^{1a}

Jaeyong Lee², Kwang-yeol Lee³, Sang-Jin Han³, Seok-Jong Lee⁴, Yukyong Jung⁵,
Jaelyoung Cheon², Jaeseok Choi⁶, Joon Chul Kim^{3*}

요 약

본 연구는 2011년~2013년 사이에 춘천시에 위치하고 종적으로 분포하는 2개 하천(공지천, 신촌천)을 대상으로 각각 2개의 조사 지점에서 저서성 대형무척추동물 군집의 계절 및 공간별 조사를 시행하였다. 본 연구는 하천에서의 인위적인 교란이 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수의 감소에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구의 상류구간인 신촌천(St.1, St.2)과는 달리 공지천 구간(St.3, St.4)은 공지천생태하천조성사업의 진행에 따른 인위적인 교란에 빈번하게 노출된 구간이었다. 이 사업 이후 물 흐름의 정체시간이 장기화됨으로 인하여 2012년 하절기에 신촌천 상류(St.1)와 공지천 하류(St.4) 사이에 커다란 수온의 차이(최대 9°C까지) 및 30°C 이상 수온이 증가하는 현상을 보였다. 또한 매년 몬순강우는 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수 그리고 종 다양도지수의 감소를 초래하였다. 분류군에 따른 우점 양상을 보면, 신촌천 상류에서만 날도래류가 우점하였을 뿐, 그 외의 지점들에서는 파리류가 우세하게 출현하였다. 저서성 대형무척추동물의 시·공간적인 변동은 인위적인 하상의 교란(하상변화, 수온 증가) 및 몬순강우 등으로 인한 토사유입과 같은 물리적인 요인들의 영향을 반영하는 지표생물로서 중요하다.

주요어: 하천, 인위적인 교란, 몬순강우, 종 다양도, 수온

ABSTRACT

Our study is purposed to understand effect on spatio-temporal variability of macroinvertebrate community 11 sampling times at 4 sites between two streams (Shinchon stream and Gongji stream in Chuncheon City) from May 2011 to October 2013. In this study, the possible physical factors on spatio-temporal variability of macroinvertebrate community were discussed. After stream improvement project, the effects of anthropogenic disturbance in study sites appeared as increased water temperature more than 30°C and the difference of water temperature between Shinchon stream and Gongji stream was by maximum 9°C on 2012. The monsoon rainfall

1 접수 2014년 1월 17일, 수정(1차: 2014년 2월 12일, 2차: 2014년 2월 26일), 게재확정 2014년 2월 27일

Received 17 January 2014; Revised (1st: 12 February 2014, 2nd: 26 February 2014); Accepted 27 February 2014

2 (주) 자연과 사람 환경기술연구소 Nature and Human environmental Technology Institute, Wonju 200-844, Korea

3 강원대학교 생명과학과 Dept. of Biological Science, Kangwon national Univ., Chuncheon 200-701, Korea

4 강원도 보건환경연구원 Gangwon Institute of Public Health & Environ. Res., Chuncheon 200-090, Korea

5 강원대학교 환경과학과 Dept. Environ. Sci. Kangwon National Univ., Chuncheon 200-701, Korea

6 강원대학교 환경연구소 Environmental Research Institute at Kangwon National Univ., Chuncheon 200-701, Korea

a 이 논문은 2013년도 강원녹색환경지원센터와 2013년도 강원대학교 학술연구조성비(과제-120131214)에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: jckim@kangwon.ac.kr

decreased number of species, individuals and biodiversity index of macroinvertebrate community, particularly, in Shincheon stream compare to Gongji stream. Dominant species of macroinvertebrate taxa was caddisfly in Shincheon stream and Diptera in Gongji stream but on August 2013, it was dominated by Diptera, Chironomidae spp. in all study sites. The spatio-temporal variability of macroinvertebrate community in the streams may be useful as bio-indicator influencing anthropogenic factors such as soil erosion (landslide or cultivation) or monsoon rainfall.

KEY WORDS: STREAM, ANTHROPOGENIC DISTURBANCE, MONSOON RAINFALL, BIODIVERSITY, WATER TEMPERATURE

서론

저서성 대형무척추동물은 수중생활을 하는 유충시기에 서 육상으로 우화하여 짝짓기를 하는 성충시기에 이르기까지의 생활사를 통해서 육상생태계와 하천생태계를 연계하는 에너지흐름의 전달자로서 그 역할을 담당하고 있다(Davis *et al.*, 2003; Peitz, 2003; Bae *et al.*, 2005; Pond, 2010). 이들은 하천 내 다양한 수리수문학적, 지형학적인 특성과 수질환경의 조건에 적합한 서식처 선정 및 분포범위를 결정하기 때문에, 하천의 생물서식환경을 이해하고 평가하는데 유용한 생물지표로서 활용되고 있다. 저서성 대형무척추동물은 하천의 수질환경 악화에 반응하고, 서식지를 선택하기 위한 종적인 이동을 통해 분포의 범위를 확장한다(Connolly *et al.*, 2004, 2007; Savić *et al.*, 2013). 즉, 이들은 종적으로 유역 및 하도환경의 변화에 반응하여 상류에서 하류로 이행하면서 서식분포를 결정하며 또한 섭식군의 분포 및 조성을 달리한다(Jung *et al.*, 2008).

저서성 대형무척추동물에 대한 연구는 국내 하천의 경우 대다수 수환경 평가 및 관리하는 차원에서 연구를 진행하고 있다(Kasangaki *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2012). 저서성 대형무척추동물을 생물지표로서 활용한 연구는 육상생태계(성충시기)와 수생태계(유충시기)에서 양서하는 생활사의 중요한 특성을 활용할 수 있다는 장점이 있는데, 이에 하천의 생물서식환경 및 유역환경까지도 접목하여 일괄적으로 관리·평가하는데 효과적이기 때문이다(Won *et al.*, 2006; Arimoro and Muller, 2010; Choi *et al.*, 2012). 저서성 대형무척추동물이 서식하기에 적합한 서식환경을 규명함에는 복잡한 환경인자들과 예측하기 어려운 다양한 수문학적인 특성이 관여하기 때문에 이를 단순화하여 이해하고자 하는 다양한 모델 적용(Gore *et al.*, 2001)이 시도되기도 한다. 이를 위해서는 저서성 대형무척추동물 군집에 대한 현장에서의 시·공간적인 모니터링 연구를 통한 충분한 기초

자료의 수집이 필연적일 수밖에 없다(Jung *et al.*, 2008). 몇몇 연구에서는 저서성 대형무척추동물 군집의 시·공간적인 변동의 원인을 규명함에 있어서 다양한 수문학적인 환경요인(수심, 유속, 탁도, 수온, 포식 등)과의 밀접한 관련성을 언급하기도 한다(Connolly and Pearson, 2007; Mesa, 2012; Savić *et al.*, 2013).

하천은 좁은 공간 내에 이질적인 수문학적 및 지형학적인 특성을 보이고, 수생생물과 육상생물 사이에 에너지 이동이 이루어지는 전이역이다. 국내 하천은 몬순기후의 영향을 받는데, 강수량의 60% 전후가 7월에서 8월 사이에 집중되어 일시적인 수위증가를 겪는다. 이 기간은 하천 유역으로부터 유입되는 유기물과 영양염류를 포함한 토사가 하천으로 집중되는 시기이기도 하다. 불규칙한 강우패턴은 하천의 물리적인 하상 조성뿐만 아니라 이곳에 서식하는 수생생물의 군집구조를 변화시키는 요인으로도 작용한다(Connolly and Pearson, 2007). 따라서 하천생태계에 대한 물리적인 요인들 중 몬순강우는 하천의 수질, 유황 및 하상의 변화 그리고 수생생물에 의한 종적인 이동과 분포를 유발시키는 요인 중 하나이다. 몬순강우로 인한 하천의 유황의 변화는 생물의 미소서식지에 대한 물리적인 변화, 일부 수생생물의 서식지의 확장을 유도할 뿐만 아니라 하천 하류의 생물군집의 에너지원을 운반하는 매개수단으로서 중요한 역할을 수행한다고 볼 수 있다(Mesa, 2012). 반면, 하천에 근접한 도로공사, 하천수변 및 하도에 대한 토목공사와 같은 인위적인 교란은 불투수면적의 증가, 물 흐름의 정체를 초래하여 하천 내 생물서식지의 훼손 및 수온 증가의 잠재적인 원인이 되고 있다. 더욱이 식생이 부재한 도심하천 내 수증보의 존재는 수체의 흐름을 정체시키게 하여 수온의 일주기 변동폭의 증가 및 고수온상태의 지속화의 원인이 된다. 수온변동은 저서성 대형무척추동물에게 있어서 생활사(우화 및 산란)를 결정하는 요인(Hur *et al.*, 2000)이 되고 있는데, 저서성 대형무척추동물의 개체군 사이의 수온에 대한 내성의 차이에 따라 저서성 대형무척추동물의 중간 출현 시기를

달리한다. 결과적으로 하천에서의 인위적인 교란은 하천의 종적, 횡적인 서식환경을 훼손시켜 저서성 대형무척추동물의 다양성을 감소시키고 장기적으로는 육상생태계와 하천생태계의 에너지의 상호이동을 제한하는 요인이 될 수 있다 (Urban *et al.*, 2006; Yoshimura, 2008).

본 연구의 목적은 공지천 수계에서 저서성 대형무척추동물의 시·공간적인 종수와 개체수의 변화를 파악하고자 하였다. 저서성 대형무척추동물의 시·공간적 변동에 영향을 미치는 물리적인 요인으로서 문순강우 시 유역으로부터의 토사의 하천유입, 유량의 급격한 증가로 인한 물리적인 하상 변화 그리고 하도 내 구조물로 인한 수온의 증가의 영향을 고찰하였다. 본 연구는 기후환경의 변화와 하천내 인위적인 교란이 하천생태계의 저차소비자에 미치는 영향에 대한 정보를 제공할 뿐만 아니라 지속적인 모니터링을 통한 도심하천의 관리방안을 제시하는데 중요한 기초자료로써 활용하고자 한다.

연구방법

1. 연구대상지

본 연구의 대상지인 공지천은 춘천시 동내면과 동산면의 경계지인 응봉(매봉 759m)에서 발원하는데, 공지천의 상류 조사 지점은 신춘천 및 학곡천의 유입수와 합수하고, 퇴계천과 후천은 공지천의 하류조사 지점에서 합류하는데, 이들은 춘천시 남부에 위치한 의암호로 연결된다. 또한 2013년 6월에 복원된 약사천은 소양호의 방류수를 도수관로를 통해 공지천 말단 하구에서 합수되나 본 조사 지점에서 하류에 위치하고 있다.

2. 조사 지점 및 조사 시기

조사 지점은 저서성 대형무척추동물의 시·공간적인 분포 패턴을 파악하기 위해 공지천의 상류에 위치한 신춘천내 (St.1, St.2) 2개 지점과 신춘천의 하류에 위치하는 공지천내 (St.3, St.4) 2개 지점을 대상으로 총 4개 지점을 선정하여 조사를 시행하였다. 신춘천(St.1, St.2)은 유역에 농경지가 위치하고, 신춘천 하류(St.2)는 공지천 상류(St.3)와 합수한 후 도심구간을 관통하여 공지천 하류(St.4)로 흐른다(Figure 1).

조사 시기는 문순강우 시기를 전후로 하였는데, 2011년은 공지천 구간에서 공지천생태하천조성사업(2009년 ~ 2012년)이 시행 중인 해였다. 본 연구에서 공지천내 2개의 조사지점(St.3, St.4)은 하천정비 및 하도내 구조물의 축조 그리고 토사준설과 같은 토목사업이 마무리되기까지 서식지의 교란을 빈번하게 겪었다. 2012년에는 하절기 공지천

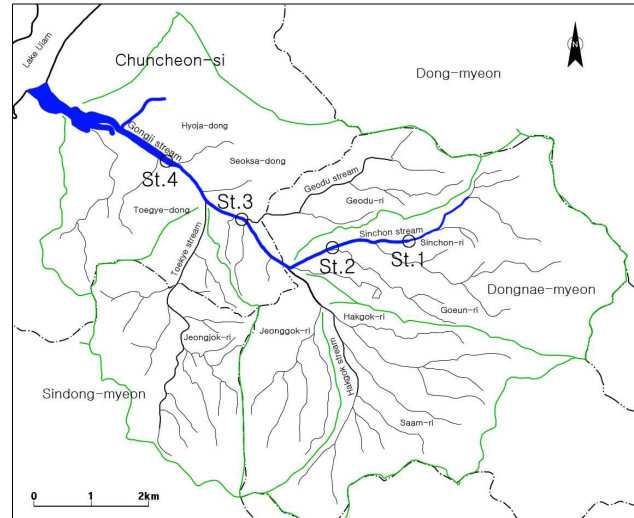


Figure 1. Map of sampling sites

의 수온이 30℃를 장기간 초과한 해로 기록되었고 이 기간에는 어류폐사가 지속적으로 발생하기도 하였다. 2013년에는 집중호우가 있었던 해로 하천유역에서 산사태가 발생하였고 하천으로 유입한 토사가 본 조사구간 전반에 영향을 미쳐 하상이 모래로 덮인 해였다.

3. 이화학적인 조사

Table 1에 제시한 수질자료는 본 연구의 조사 지점인 공지천 하류와 인접한 공지고 부근에서 측정한 결과로서 강원도보건환경연구원으로부터 제공받았다.

본 연구에서는 저서성 대형무척추동물의 수온변화에 따른 군집의 변화를 파악하기 위한 연구의 일환으로 수온측정기(Hobo Data logger Water Temp Pro v2)를 신춘천의 상류지점과 공지천의 하류지점에 각각 설치하여 모니터링을 하였다. 측정 기간 및 횟수는 5월부터 10월 사이에 2시간(2012년 5월~7월) 또는 1시간(2012년 8월~10월) 간격으로, 자동측정 된 자료는 측정기간 중 두 번 다운로드하였다. 수온 측정기의 편차는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이고 0~50℃의 측정범위를 가진다. 수온측정기를 설치한 장소는 직사광선을 회피할 수 있도록 차광막을 씌워 물의 흐름양상이 비슷한 장소에 각각 설치하였다.

4. 저서성 대형무척추동물의 군집조사

저서성 대형무척추동물의 조사도구는 Surber net(30cm × 30cm, 망목 0.5mm)를 사용하였으며 하천의 유폍이 좁은 지점에서는 중앙을, 유폍이 넓은 지점에서는 횡적으로 3개의 정점을 선정하였다. 채집 정점은 수심이 30cm 이내이고

유속이 0.1~0.6 m s⁻¹ 구간인 여울과 평여울에서 채집하였다(Jung *et al.*, 2008). 돌 기질은 직접 네트 안에서 씻었고 모래 또는 저니질은 손으로 10cm 이내의 깊이로 파헤쳐 저서성 대형무척추동물이 물의 흐름을 따라 네트 안으로 흘러들게 하는 방식으로 채집하였다.

채집된 시료는 현장에서 10% 중성 포르말린으로 고정 한 후 실험실로 운반하였으며 실험실 내에서 돋보기 하에서 저서성 대형무척추동물을 선별 분리했다. 선별한 저서성 대형무척추동물은 종 동정을 위해 해부현미경(OLYMPUS SZ-ST, Japan)하에서 검정하였다. 동정을 끝낸 저서성 대형무척추동물은 에틸알코올 80%에 고정시켜 실내 상온에서 보관하였다.

저서성 대형무척추동물의 각 분류군 중 수서곤충의 경우는 Yun(1995), Won *et al.*(2005) Kawai and Tanida(2005) 등을 참고로 하여 동정하였다. 또한 패류는 Choe *et al.*(1999)을 이용하여 동정하였다. 군집분석은 정량시료에 대해 종 다양도지수를 산정하여 저서성 대형무척추동물의 안정도를 검토하고자 하였다. 저서성 대형무척추동물의 종 다양도지수는 각 조사 지점의 종 구성상태의 다양도를 나타내는 척도로서, Shannon and Wiever(1949) 함수를 사용하여 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 이화학적 특성 결과

본 연구는 강원도보건환경연구원에서 제공받은 수질의 이화학적 특성을 제시하였는데, 2011년~2013년(매년 5월~9월)에 공지천의 하류(공지교)의 수온측정결과는 2012년에 최대 30.0℃(7월 26일)를 보였고, 2011년과 비교하여 다른 해에는 평균 1.6℃(2012년)~2.4℃(2013년)까지 증가한 것으로 나타났다(Table 1).

또한 고빈도 자동수온측정결과는 2012년에 저서성 대형무척추동물을 모니터링하는 조사구간내 상류(St.1)와 하류(St.4) 사이에서 수온의 차이를 비교하였는데, St.1과 St.4에

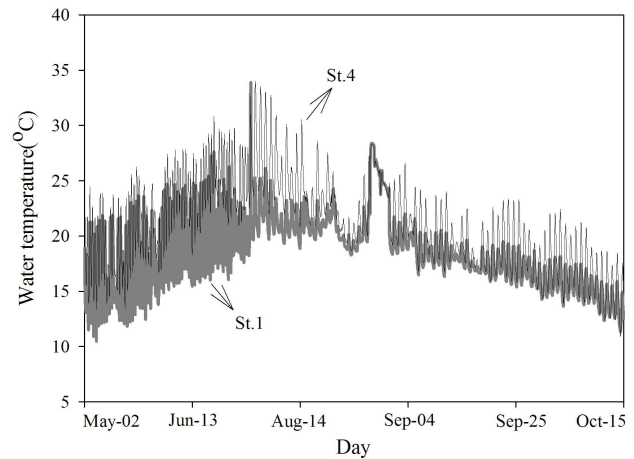


Figure 2. High frequency of water temperature in two streams (Shicheon stream; St.1 and Gongji stream; St.4) from May to October, 2012. Shicheon stream and Gongji stream is located to upper site and down site, respectively

서 각각 10.5~28.4℃(18.4±3.3℃), 10.7~34.0℃(21.0±4.0℃)의 범위를 보였다(Figure 2).

수온의 일주기변동 폭은 8월 5일에 신춘천과 하류인 공지천 사이에 가장 큰 차이를 보였는데, 최소 4℃에서 최대 9℃가량의 차이를 보였다(Figure 2). 반면, 두 하천 사이의 수온 차이가 좁혀지는 시기는 몬순강우가 내리는 8월 중순 이후부터이다. 수온의 일주기변동 폭은 8월 중순 이전과는 달리 이후부터는 신춘천에 비해 공지천에서 상대적으로 그 변동폭이 크게 나타나는 양상을 보였다. 이는 공지천에는 없는 하천수변의 식생이 신춘천에서는 밀집하고 있어서 하천으로의 직접적인 빛의 유입을 차단하는 효과가 있다는 것과 물의 정체 시간이 공지천에 비해 신춘천이 짧기 때문으로 사료된다.

공지천에서 BOD(생물학적산소요구량)농도는 2011년~2013년 사이에 거의 변동이 없었으나 영양염류(총인과 총질소)의 농도는 2011년 이후 다소 낮아진 결과를 보였다(Table 1). 이는 지속적인 유역관리에 따른 성과로, 유역으

Table 1. Environmental parameters in Gongji stream from May 2011 to September 2013. WT, BOD, TN and TP abbreviates water temperature, biological oxygen demand, total phosphorous and total nitrogen, respectively (The data was supported by Gangwon Institute of Public Health and Environmental Research)

	2011			2012			2013		
	Min	Max	Mean±SD	Min	Max	Mean±SD	Min	Max	Mean±SD
WT (°C)	10.0	25.0	19.4±3.5	16.0	30.0	21.8±3.3	12.0	29.0	21.0±3.3
pH	6.5	8.1	7.5±0.4	7.2	9.0	7.7±0.4	6.8	8.7	7.5±0.3
BOD (mg L ⁻¹)	0.6	3.6	1.4±0.9	0.5	3.6	1.5±0.7	0.6	4.3	1.9±1.0
TP (mg L ⁻¹)	0.034	1.010	0.146±0.243	0.021	0.217	0.076±0.057	0.027	0.192	0.080±0.087
TN (mg L ⁻¹)	2.527	5.549	4.124±0.663	2.563	7.163	3.852±1.093	2.599	4.445	3.569±0.541

로부터 유입하는 인위적인 오염원이 본 조사기간 중 감소하였을 것으로 사료되며, 이는 공지천의 수질이 점차 개선되고 있음을 시사한다.

2. 저서성 대형무척추동물의 시·공간적인 변동 결과

본 연구에서 2012년과 2013년 계절에 따른 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수의 종적인 분포는 서로 다른 양상을 보였다(Figure 3). 즉, 2012년에는 6월과 8월의 종수 및 개체수가 낮고 4월과 10월에 높은 양상을 보인 반면, 2013년에는 몬순강우 이전(4월과 6월)에 비해 몬순강우 시기 및 이후(8월과 10월)에 현저한 감소를 보였다(Figure 3).

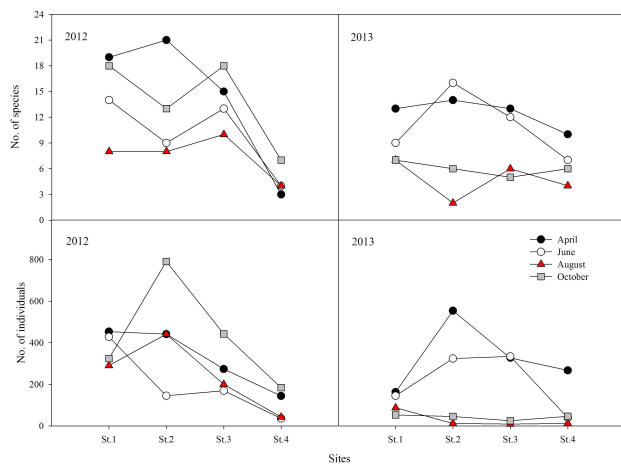


Figure 3. Seasonal variation of number of species and individuals of macroinvertebrate taxa in study sites on 2012~2013

본 조사지역에서는 2012년과는 달리 2013년 7월에 강우

가 집중되면서 유역에서 발생한 산사태로 인해 신촌천 상류(St.1)의 경우에는 수변식생 및 하상이 물리적으로 씻겨나간 상태였고, 공지천 구간(St.3, St.4)의 하상은 전반적으로 모래로 덮였다. 비록 몬순강우의 영향을 받는 지역에서 하상의 물리적인 교란이 서식환경을 개선하여 저서성 대형무척추동물의 시·공간적인 분포에 큰 영향을 줄 수는 있으나(Mesa, 2012), 본 연구에서는 강우 시 토사유입으로 인한 하상 공극의 소멸이 저서성 대형무척추동물의 군집변화에 악영향으로 작용한 것으로 보인다(Miserendino and Pizzolon, 2003). 몬순강우로 인한 물리적인 영향을 받는 하천에서 하상조성의 변화는 저서성 대형무척추동물 군집의 변화를 야기시키는 중요한 요인으로, 강우 이후 저서성 대형무척추동물은 짧은 생활사, 소형의 체형을 가진 종 그리고 지속적으로 생식이 가능한 종이 선점한다(Mesa, 2012).

이와 같은 양상은 본 연구에서 우점종의 출현양상을 통해서도 알 수 있었다(Table 2). 우점종은 몬순강우 시기 및 조사 지점이 하류에 가까워지면서 저서성 대형무척추동물의 군집내 파리류의 점유하는 비중이 커지는 것으로 나타났다(Table 2). 2013년에는 몬순강우 이후 전 조사 지점들에서 저서성 대형무척추동물의 우점종을 파리류(특히, 깔다구류)가 점유하였다. 매년 날도래류의 출현은 공지천 구간(St.3과 St.4)에 비해 신촌천 구간(St.1과 St.2)에서 빈번하였다. 특히, 다른 조사 지점들에 비해 다양한 하상조성을 갖춘 신촌천 상류(St.1)에서는 강우의 영향을 받지 않은 시기에 계절별 다양한 날도래류가 우점하여 서식하였다(Table 2). 그러나 8월에는 토사의 하천유입에 의한 영향으로 깔다구류가 우점하게 되었다. 이는 Harper *et al.*(1997)의 연구결과로 설명되는데, 이들은 현장과 mesocosm실험을 통해 꼬마하루살이류(Baetidae)와 더불어 깔다구류(Chironomidae)가 토사유입에 대한 내성을 가지고 있음을 보인 바가 있다. 본 연구에서는 구체적인 언급은 하지 않았으나 전 조사기간에 종수에 따른 섭식기능군의 점유율은

Table 2. Changes of dominant species of macroinvertebrates in study sites in 2011~2013

Sites		St.1	St.2	St.3	St.4
Study date					
2011	May	-	<i>Antocha</i> KUa	-	-
	July	-	<i>Baetis fuscatus</i>	-	-
	September	-	<i>Antocha</i> KUa	-	-
2012	April	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	<i>Antocha</i> KUa	Chironomidae spp.	Chironomidae spp.
	June	Chironomidae spp.	<i>Epeorus pellucidus</i>	<i>Antocha</i> KUa	Chironomidae spp.
	August	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	Chironomidae spp.	Chironomidae spp.
	October	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	<i>Baetis fuscatus</i>	Chironomidae spp.
2013	April	<i>Goera japonica</i>	<i>Antocha</i> KUa	Chironomidae spp.	Chironomidae spp.
	June	<i>Neophylax ussuriensis</i>	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	<i>Antocha</i> KUa	Chironomidae spp.
	August	Chironomidae spp.	Chironomidae spp.	Chironomidae spp.	Chironomidae spp.
	October	<i>Goera japonica</i>	<i>Antocha</i> KUa	Chironomidae spp.	Chironomidae spp.

주워먹는 무리(collector-gatherers)가 33.3%, 잡아먹는 무리(predators)가 25.9%로 다른 섭식기능군(15% 내외)에 비해 높게 나타났다. 또한 서식기능군 역시 붙는 무리(Clingers)가 50%, 굴파는 무리(Burrowers)가 30%를 점유하는 것으로 나타났다. 결과적으로, 신천촌에서와는 달리 공지천 구간에서 파리류(깔다구류)와 하루살이류(개똥하루살이)가 우점하는 양상(Table 2)을 보이고 있는데, 이는 하상조성이 모래와 clay 기질과 같은 공극이 작은 환경을 선호하는 종으로 변화하고 있음과 유기물의 증가(Table 1)로 인한 영향이 있음을 시사한다(Connolly and Pearson, 2007; Shin *et al.*, 2013).

3. 몬순강우와 저서성 대형무척추동물의 계절변동 결과

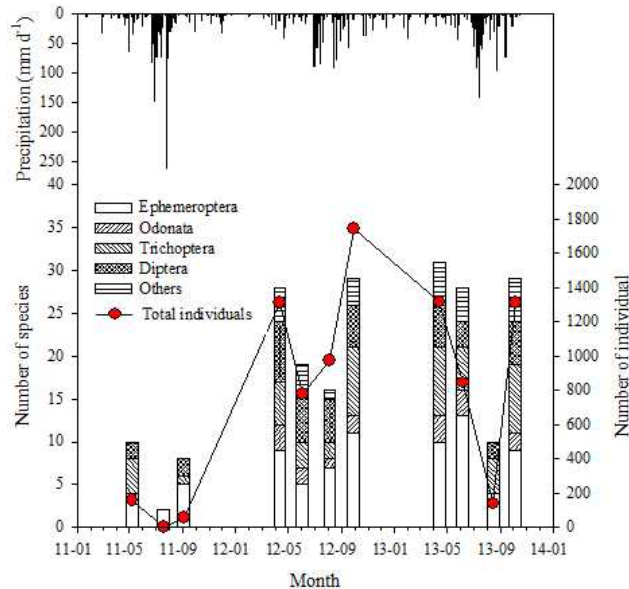


Figure 4. Seasonal variation of daily precipitation (cited from Chuncheon City Weather Research Center; <http://www.kma.go.kr>) and seasonal variation of cumulative number of species and individual among macroinvertebrate taxa in study streams from 2011 to 2013

저서성 대형무척추동물의 출현한 총 종수는 2011년(15과 22종)에 비해 2012년(29과 47종)과 2013년(27과 42종)에 현저하게 증가한 양상을 보였다(Figure 4). 비록 조사 횟수에 있어서 차이가 있으나 2011년에는 공지천에서 하도내 생태하천조성사업과 관련하여 인위적인 하상교란이 진행 중이었고, 조사 시기 중 가장 많은 강우량을 기록한 시기였다. 반면, 공지천생태하천조성사업이 마무리된 2012년

그리고 그 이듬해인 2013년에는 하상의 안정화와 더불어 종수 및 개체수의 현저한 증가를 보였다. 이는 인위적인 하상교란이 저서성 대형무척추동물 군집의 계절변동과정을 유지함에 있어서 악영향으로 작용함을 시사한다.

저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수의 감소는 집중강우에 의한 물리적인 씻김현상(Harper *et al.*, 1997; Miserendino and Pizzolon, 2003) 이외에 또 다른 메커니즘의 기여가 알려져 있다.

첫 번째로 저서성 대형무척추동물의 생활사에 따른 영향이 있을 수 있다. 불행하게도, 국내에서 저서성 대형무척추동물의 분류군에 따른 생활사에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 다만 국내 하천에서 많은 개체수의 출현과 서식 범위가 광범위한 종으로 알려진 줄날도래(*Hydropsyche kozhantschikovi*)의 경우에는 4월 중순에서 5월 말 사이에 우화를 하는 종으로 보고되고 있다(Hur *et al.*, 2000). 하천에서 수온의 스트레스는 우화 시기와 밀접하게 관련을 가지며 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수의 변화에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Quinn *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2012). 또한 하천에서 수변식생의 유무는 수온의 증감 및 생물다양성의 감소에 영향을 미치는 요인 중 하나로 작용한다(Dripps *et al.*, 2012; Urban *et al.*, 2006). 수온의 변동 및 차이는 하천의 수변환경 및 지형적인 특성에 따라 차이를 보였다. 신천천 상류(St.1)는 수변식생(달뿌리풀 군락)이 잘 발달해 있고, 식물군락의 형성은 하천 바닥으로 유입하는 직사광선을 차단하는 역할을 갖는다. 반면, 공지천 하류(St.4)는 하천으로 유입하는 직사광선을 차단할 수 있는 식생이 없는 개방하천이다. 더욱이 2011년에 건설된 수중보와 같은 구조물은 공지천에서 물의 체류시간을 길어지게 하였다. 수중보가 건설되기 이전에 공지천에서 볼 수 없었던 높은 수온(최대 34°C)이 2012년 7월~8월에 확인이 되었고 이 기간 동안에는 이례적인 현상으로 어류폐사가 발생하기도 하였다(Figure 2). Choi(2011)의 보고서에 따르면 2011년에는 신천천과 공지천에서 출현한 어종은 각각 3과 9종, 7과 25종이 보고된 반면, 2012년에는 신천천과 공지천에서 각각 4과 9종, 6과 17종이 출현함을 보였는데, 신천천에 비해 수온이 상대적으로 높아진 공지천에서는 어류의 종수가 감소함을 보였다. 공지천생태하천조성사업의 진행으로 인해 2011년에는 어종의 감소가 있었을 것으로 예상하였으나, 예상과는 달리 본 사업이 마무리된 2012년에 오히려 출현한 어종의 수가 감소하는 결과를 보였다. 이는 인위적인 하상교란으로 인한 스트레스와 추가적인 수온에 의한 스트레스가 어류의 종수 변화 또는 생존에 악영향으로 작용하였음을 시사한다(Durham *et al.*, 2006). 저서성 대형무척추동물 또한 수온의 영향을 받으나(Hur *et al.*, 2000), 2012년에 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수

의 감소가 2013년에 비해 현저하지 않은 이유는, 어류와는 달리 30℃ 이상의 수온에 노출되기 이전에 우화 시기를 앞당김으로서 높아진 수온환경을 회피하려는 어떤 생리적인 기작이 작용하였을 것으로 사료된다(Quinn *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 1999). 따라서, 우화 시기에 의한 영향만으로는 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수의 감소를 설명하기에는 어렵다.

두 번째 가능한 설명으로서 하천유역으로부터 몬순강우 시기에 유입하는 토사에 의한 악영향을 들 수 있다. 춘천시 기상자료에 따르면 강우량은 2011년(2,036mm)에는 2012년(1,324mm)과 2013년(1,645mm)에 비해 상대적으로 많은 강우량이 내렸다(Figure 4). 그러나 매년 7월~8월 사이에 내린 강우량 변동은 2011년, 2012년 그리고 2013년에 그 해 강우량의 각각 53.7%, 48.2% 그리고 66.0%를 점유하는 것으로 나타났다. 2013년 7월에 내린 집중강우의 영향은 산사태로 인한 토사의 유입과 하상의 서식처 훼손을 야기하였을 뿐만 아니라 저서성 대형무척추동물의 종수 및 개체수의 감소에도 물리적인 영향으로 작용한 것으로 보인다.

공지천은 몬순강우 시기에 하천유역의 수변식생이 잘 발달한 하천과는 달리 상류 및 수변유역에 인접하고 있는 경작지로부터 유입하는 토사(clay, 모래)에 의한 영향에 노출되기 쉬운 유역환경 조건을 가지고 있다. 일반적으로, 식생이 발달하지 못하였거나 수변에 경작지가 분포하는 하천에서 유역으로부터 유입된 토사는 하상내 저서성 대형무척추동물의 서식공간을 잠식시킬 수 있다. 더욱이 돌기질 사이에 서식하거나 아가미가 몸 밖으로 노출되어 있는 저서성 대형무척추동물의 경우에는 토사유입이 밀도를 감소시키는 원인이 된다(Larsen and Ormerod, 2010). 본 조사 지점

들에서 섭식기능군에서 상당한 우위를 보이는 저서성 대형 무척추동물(특히, collector-gatherers)은 몬순강우기에 먹이원의 질적인 상태가 악화되거나 먹이공급원이 부족한 환경에 놓여 개체수의 감소 또는 이후 개체수의 회복이 늦춰질 수가 있다(Grimm and Fisher, 1989).

마지막으로 저서성 대형무척추동물에 대한 어류의 포식이 개체수의 감소에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 것이다(Chakona *et al.*, 2007). 공지천에서 어류폐사가 발생한 해인 2012년에 폐사한 어종으로 피라미(*Zacco platypus*; 잡식성)가 있으며 우점종이면서 폐사한 개체수가 가장 많았다. 이외에도 잡식성에 속하는 납자루(*Acheilognathus intermedia*), 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 물개(*Squalidus japonicus coreanus*), 참붕어(*Pseudorasbora parva*)가 있었으며, 충식성인 누치(*Hemibarbus labeo*) 그리고 육식성인 끄리(*Opsariichthys bidens*), 배스(*Micropterus salmoides*)의 폐사가 보고되었다(Choi, 2012). 본 연구결과에서 어류에 의한 포식이 저서성 대형무척추동물의 개체수의 감소에 직접적인 영향이 있는지에 대해서는 추가적인 연구결과가 있어야 하겠지만, 2012년 7월~8월 사이에 발생한 어류폐사의 영향은 2012년 저서성 대형무척추동물의 종수와 개체수의 감소를 다소 둔화시킨 결과를 낳았다(Figure 4).

4. 종 다양도지수의 계절변동 결과

종 다양도지수는 저서성 대형무척추동물의 서식환경에 대한 안정도를 이해하는데 있어서 효과적인 평가지표가 될 수 있다(Bae *et al.*, 2005). 본 조사에서 종 다양도 지수값과 우점도지수값은 각각 0.05~2.24, 0.33~1.00의 범위를 보

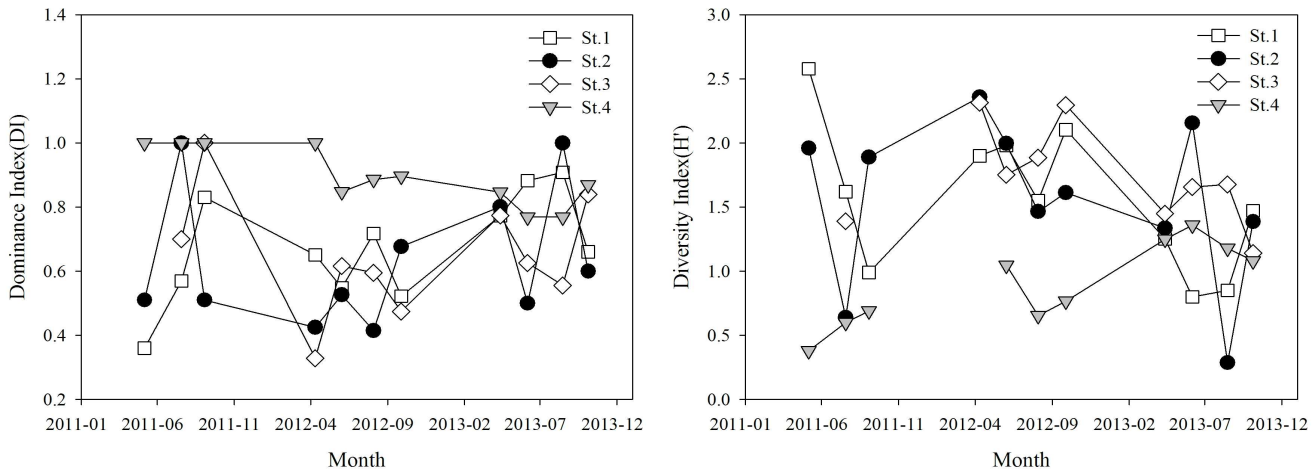


Figure 5. Dominance index (DI) and difference of diversity index (H') between Shincheon stream (upper site; St.1, St.2) and Gongji stream (down site; St.3, St.4) of macroinvertebrate taxa from 2011 to 2013. Arrow indicates first rainfall and 2011, 2012, 2013 was 83mm, 43.7mm, 94.3mm, respectively

였고, 첫 강우를 전후로 하여 급격한 변동을 보였다(Figure 5). 본 연구에서는 종 다양도지수값의 계절변동 통해 상류에서 하류로의 뚜렷한 공간적인 변화의 경향성을 발견하지 못하였으나 몬순강우로 인한 하상 교란의 영향은 신촌천 하류(St.2)에서 가장 분명하게 나타났다(Figure 5). 즉 매해 첫 강우(40mm 이상)로 인한 영향에 노출된 직후 저서성 대형무척추동물의 종 다양도지수값이 감소하였고 우점도지수값은 낮아졌다(Figure 5).

본 연구에서는 조사 시기에 따라 저서성 대형무척추동물의 종 다양도지수값에 대한 시·공간적인 변동은 공지천 상류(St.3)에서 가장 안정적인 상태를 보인 반면, 신촌천 하류(St.2)에서 가장 불안정한 상태를 보였다. 특히, 공지천 하류(St.4)는 다른 조사 지점들에 비해 현저하게 낮은 종 다양도지수값을 보였으나, 2013년에는 다소 증가하였다. 이는 2011년에 있던 공지천생태하천조성사업 이후 다른 상류에 위치한 조사 지점들에 비해 상대적인 수온 증가, 토사유입으로 인한 하상내의 서식지 소멸 등의 영향 때문인 것으로 사료된다(Kwak *et al.*, 2008; Arimoro and Muller, 2010).

저서성 대형무척추동물의 상류에서 하류로의 종적인 종 다양성의 차이는 식생 및 수질환경 그리고 하천의 지리·지형적인 환경에 따라 다양하다(Harper *et al.*, 1997; Jung *et al.*, 2008). Banks *et al.*(2007)는 종 다양도가 수관에 의해 덮여 있는 높은 고도에 위치한 하천이 낮은 고도에 위치하고 개방된 하천에 비해 낮다는 연구결과를 보였다. Savić *et al.*(2013)의 연구에 의하면, 저서성 대형무척추동물의 종 다양성은 용존산소농도가 높고 영양염의 농도가 낮은 구간에서 높다고 하였다. 기존의 몇몇 연구에 의하면, 저서성 대형무척추동물 군집의 종 다양도지수값은 도심하천에서는 하류에 비해 상류에서 높게 나타나는 반면, 그 외의 대부분의 하천에서는 하류에서 높게 나타나는 양상이 보고되고 있다(Kil *et al.*, 2010; Savić *et al.*, 2013). Kil *et al.*(2010)은 이와 같은 원인을 하천 내 보나 댐과 같은 인공구조물로 인한 영향으로, 상류구간에 발달한 정수구간이 하류구간에 형성된 유수구간에 비해 하상조성의 다양성이 결여된 서식공간을 갖고 있기 때문이라고 하였다.

본 연구에서는 당시의 수환경의 변화에 따라서 발생하는 물리적인 요인들이 복합적으로 저서성 대형무척추동물의 시·공간적인 변동에 영향을 미칠 가능성에 대해 직·간접적인 측정자료 및 문헌을 통해 고찰을 하였다. 저서성 대형무척추동물의 시·공간적인 모니터링과 관련한 연구는 유역관리, 하천의 정비 및 복원과 관련한 사업을 시행함에 있어서 발생할 수 있는 물리적인 악영향에 대한 대응방안을 마련하는데 중요한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

LITERATURE CITED

- 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: 581-594.
- Bae, Y.J., H.K. Kil and K.S. Bae(2005) Benthic macroinvertebrates for uses in stream biomonitoring and restoration. *Journal of Civil Engineering* 9: 56-63.
- Banks, J.L., J. Li and A.T. Herlihy(2007) Influence of clearcut logging, flow duration, and season on emergent aquatic insects in headwater streams of the Central Oregon Coast Range. *Journal of the North American Benthological Society* 26: 620-632.
- Chakona, A., B. Marshall and L. Brendonck(2007) The effect of fish predation on benthic macroinvertebrates in a seasonal stream in north-western Zimbabwe. *African Journal of Aquatic Science* 32: 251-257.
- Choe, B.L., M.S. Park, L.G. Jeon, S.R. Park and H.T. Kim(1999) Commercial molluscs from the freshwater and continental shelf in Korea. National Fisheries Research & Development Institute Press, 197pp. (in Korean)
- Choi, A.R., S.J. Park, J.Y. Kim, M.Y. Song and D. Kong(2012) The correlation between water quality and benthic macroinvertebrate community indices in the Jinwi stream. *Korean Journal of Limnology* 45(1): 1-10. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.S.(2011) Study for Longitudinal Continuity and Restoration of Aquatic Ecosystem in Gongji Stream. Kangwon Green Environment Center, pp. 34-35.
- Choi, J.S.(2012) Study for Longitudinal Continuity and Restoration of Aquatic Ecosystem in Gongji Stream. Kangwon Green Environment Center, 37pp.
- 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.
- Connolly, N.M., M.R. Crossland and R.G. Pearson(2004) Effect of low dissolved oxygen on survival, emergence, and drift of tropical stream macroinvertebrates. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 592: 423-438.
- Davis, S., S.W. Golladay, G. Vellidis and C.M. Pringle(2003) Macroinvertebrate biomonitoring in intermittent coastal plain stream impacted by animal agriculture, *Journal of Environmental Quality* 32: 1036-1043.
- Dripps, W., K. Ashman, M. Saunders and S. Drake(2012) The impact of golf courses on stream water temperature. *The Open Environmental and Biological Monitoring Journal* 5: 14-21.
- Durham, B.W., G.R. Wilde and K.L. Pope(2006) Temperature-caused fish kill in a flowing great plains river. *The Southwestern*

- Naturalist 51: 397-401.
- Gore, J.A., J.B. Layzer and J. Mead(2001) Macroinvertebrate in-stream flow studies after 20 years: a role in stream management and restoration. *Regulated Rivers: Research and Management* 17: 527-542.
- Grimm, N.B. and S.G. Fisher(1989) Stability of periphyton and macroinvertebrates to disturbance by flash floods in a desert stream. *The North American Benthological Society* 8:293-307.
- Harper, D., J. Mekotova, S. Hulme, J. White and J. Hall(1997) Habitat Heterogeneity and Aquatic Invertebrate Diversity in Floodplain Forests. *Global Ecology and Biogeography Letters* 6: 275-285.
- Hur, J.M., Y.H. Jin, S.J. Park, D.H. Won and Y.J. Bae(2000) Emergence patterns of *Hydropsyche kozhantschikovi* (Trichoptera: Hydropsychidae). *Korean Journal of Limnology* 33(3): 267-273. (in Korean with English abstract)
- Jung, S.W., V.V. Nguyen, Q.H. Nguyen and Y.J. Bae(2008) Aquatic insect faunas and communities of a mountain stream in Sapa Highland, northern Vietnam. *Limnology* 9: 219-229.
- Kasangaki, A., D. Babaasa, J. Efitre, A. McNeilage and R. Bitariho(2006) Links between anthropogenic perturbations and benthic macroinvertebrate assemblages in Afromontane forest streams in Uganda. *Hydrobiologia* 563: 231-245.
- Kawai, T. and K. Tanida(2005) *Aquatic Insects of Japan: Manual with Keys and Illustrations*. Tokai University Press, 1342pp.
- Kil, H.K., D.G. Kim, S.W. Jung, Y.H. Jin, J.M. Hwang, K.S. Bae and Y.J. Bae(2010) Impacts of impoundments by low-head and large dams on benthic macroinvertebrate communities in Korean streams and rivers. *Korean Journal of Limnology* 43(2): 190-198. (in Korean with English abstract)
- 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: 47-55. (in Korean with English abstract)
- Larsen, S. and S.J. Ormerod(2010) Low-level effects of inert sediments on temperate stream invertebrates. *Freshwater Biology* 55: 476-486.
- Lee, C.Y., D.G. Kim, L.J. Choe, M.J. Baek, Y.J. Yoon and Y.J. Bae(2012) Estimation of accumulated degree days required for the development of *Cloeon dipterum* (Ephemeroptera: Baetidae) in an experimental tub under field conditions. *Korean Journal of Limnology* 45: 123-128. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.J., Y.J. Bae, I.B. Yoon and N.C. Watanabe(1999) Comparisons of temperature-related life histories in two ephemeropterid mayflies (*Ephemera separigata* and *E. strigata*: Ephemeroptera, Insecta) from a mountain stream in Korea. *Korean Journal of Limnology* 32: 253-260. (in Korean with English abstract)
- Mesa, L.M.(2012) Interannual and seasonal variability of macroinvertebrates in monsoonal climate streams. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 55: 403-410.
- Miserendino, M.L. and L.A. Pizzolon(2003) Distribution of macroinvertebrate assemblages in the Azul-Quemquemtreu river basin, Patagonia, Argentina. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 37: 525-539.
- Peitz, D.G.(2003) Macroinvertebrate monitoring as an indicator of water quality. Status Report for Pipestone Creek, Pipestone National Monument, 1989~2002. National Park Service Republic, pp. 1-13.
- Pond, G.J.(2010) Patterns of Ephemeroptera taxa loss in Appalachian headwater streams (Kentucky, USA). *Hydrobiologia* 641: 185-201.
- Quinn, J.M., G.L. Steele, C.W. Hickey and M.L. Vickers(1994) Upper thermal tolerance of twelve New Zealand stream invertebrate species. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 28: 391-397.
- Savić, A., V. Randelović, M. Đorđević, B. Karadžić, M. Đokić, and J. Krpo-Četković(2013) The influence of environmental factors on the structure of caddisfly (Trichoptera) assemblage in the Nišava River (Central Balkan Peninsula). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* DOI: 10.1051/kmae/2013051.
- Shannon, C.E. and W. Weaver(1949) *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana, 233pp.
- Shin, S.M., I.K. Choi, E.W. Seo, J.E. Lee(2013) Community structure of benthic macroinvertebrate in the urban and nature stream. *Journal of Environmental Science International* 22(12): 1551-1559.
- Urban, M.C., K. David, S.D. Burchsted, W. Price and S. Lowry(2006) Stream communities across a rural-urban landscape gradient. *Diversity and Distributions* 12: 337-350.
- Won, D.H., S.J. Kwon and Y.C. Jun(2005) *Aquatic Insect of Korea*. Korea Ecosystem Service, 415pp.
- Won, D.H., Y.C. Jun, S.J. Kwon, S.J. H., K.G. Ahn and J.K. Lee(2006) Development of Korean saprobic index using benthic macroinvertebrates and its application to biological stream environment assessment. *Journal of Korean Society on Water Quality* 22: 768-783. (in Korean with English abstract)
- Yoshimura, M.(2008) Longitudinal patterns of benthic invertebrates along a stream in the temperate forest in Japan: in relation to humans and tributaries. *Insect Conservation and Diversity* 1: 95-107.
- Yun, I.B.(1995) *Aquatic insects I of Korea*. Junghaengsa press, 262pp.