

〈Original article〉

과거 문헌 비교를 통한 원주천 수서곤충 군집구조 변화

한중수 · 최준길 · 원경호¹ · 이황구*

상지대학교 생명과학과

¹원주시청

Changes in Aquatic Insect Community Structure in Wonju Stream based on a Comparison of Previous Studies

Jung Soo Han, Jun Kil Choi, Kyung Ho Won¹ and Hwang Goo Lee*

Department of Biological Science, College of Science & Engineering, Sangji University,
Wonju 26339, Republic of Korea

¹Wonju City Hall, Wonju 26384, Republic of Korea

Abstract - This study was a survey of the Wonju stream in Wonju city from May 2015 to September 2016. A total of three sites were selected from the upstream area Gwanseol-dong to the downstream area Hojeo-myeon. Physicochemical analysis, aquatic insect changes, cluster analysis, functional group analysis, rarefaction curve, and statistical analysis were compared between 2004 and 2016. A total of 19 species (38.78%) in 2004 and 22 species (36.67%) in 2016 were analyzed, with the largest number belonging to ephemeroptera. The individual ratio ranged from 27,759.2 (ind. m⁻², 84.30%) in 2004 to 4,573.2 (ind. m⁻², 41.64%) in 2016, with the highest number involving diptera. As a result of the community analysis, significant differences were detected in the indices of dominance, diversity, evenness, and richness in 2004 and 2016 ($p < 0.05$). Burrowers of the habitat orientation groups showed the greatest variation with an average of -68.00% (± 2.15) and the collector-gatherers of the functional feeding groups showed the highest variation of -40.12% (± 1.77). The rarefaction curve analysis suggested that the species was the poorest in the midstream regions in 2004 and 2016. Physical factors and water quality showed a significant correlation with diversity index, evenness index, and the number of individuals. MDS analysis of the similarity of upstream and downstream regions was high in 2004, and low in 2016. The differences were attributed to physicochemical changes such as increase in flow velocity due to improvement of small dams and changes in bottom structure.

Keywords : ecologically restored stream, small dam improvement, physicochemical change, multidimensional scaling

서 론

하천생태계는 하천에 서식하는 다양한 생물들의 서식

공간 및 이동통로의 역할을 하고 있으며, 에너지의 고정과 순환, 오염물질 정화 등의 중요한 기능을 담당한다(Byeon 2013). 또한 육상생태계와 인접하고 있어 하천에 서식하고 있는 생물뿐만 아니라 육상에 서식하는 생물에게도 서식처를 제공하는 중요한 역할을 하고 있다(Vannote *et al.* 1980;

* Corresponding author: Hwang Goo Lee, Tel. 033-730-0434,
Fax. 033-811-1030, E-mail. morningdew@sangji.ac.kr

McCafferty 1981). 하지만 과거 산업화 및 도시화로 인한 도시발전의 영향으로 토지 이용의 고도화가 발생함에 따라 하천을 중심으로 활발한 개발이 이루어져 왔다(Hur *et al.* 2011). 도시가 발전함에 따라 인근 하천에서는 보, 제방축조, 교량건설, 하수관 매설, 골재채취 등으로 인위적인 환경변화가 발생하였으며, 생물 서식장소로서의 기능이 상실되는 문제점이 제기되었다(Yoon *et al.* 1992, 2010; Choi *et al.* 2005). 훼손된 대부분의 도시하천은 생태적인 개념을 고려하지 않고 이·치수 측면에 집중하여 관리하였으며, 하천 고유의 기능과 역할이 악화되어 생태적 건강성이 저하되었다(Lee and Rhee 2009).

원주천은 치악산과 백운계곡에서 발원하여 유로연장 24.8 km, 유역면적 154.15 km²로 원주시를 지나는 대표적인 도시하천으로서 영랑천, 홍양천, 단계천 등의 소하천과 합류되어 섬강으로 유입된다. 원주천은 과거 상류부터 하류까지 약 40여개의 보가 설치되어 있어 하상구조가 변화하고 유기물의 축적에 따라 수질오염이 발생하였다(Shin *et al.* 2006). 또한 하천 인근에서 유입되는 생활하수, 산업폐수 및 하수처리장 방류수 등에 의해 수질을 악화시켜 원주천 최하류 지역은 매우 오염된 하천으로 평가된 사례가 있었으며, 유량 부족으로 인한 건천화, 하천 공사 및 인근 공사장에서 유입되는 토사로 인한 교란, 폐식용유 기름 유출, 원인불명의 물고기 폐죽음 등의 문제가 발생하였다(Choi *et al.* 2005; Shin *et al.* 2006). 이에 원주천 및 기타 하천의 건강성을 회복시키고, 수질오염을 방지하고자 생태하천 복원사업, 하수처리장 건설, 하수관거 정비 등 다양한 방법으로 하천정비를 시도하고 있다(Shin *et al.* 2006). 최근 원주천에서는 유량증가로 제방의 유실을 방지하기 위한 제방쌓기, 하천 생물의 서식처 및 피난처 역할을 하는 수변부 조성, 보에 의해 유속이 낮은 정수의 환경에서 유수의 환경을 조성하기 위한 여울형 낙차보 설치 및 정비, 하상구조의 다양화를 위한 콘크리트 포장 철거 및 자연석 돌 붙임, 상·하류하천의 단절화를 방지하기 위한 어도 설치 등 많은 물리적인 변화를 시도하였다. 또한 하수관거 시설을 정비하여 지하수 오염방지 및 하수종말처리장의 효율을 증가시키기 위한 하수관거정비 BTL(Build Transfer Lease) 사업, 수질개선을 위한 공공하수처리장의 고도수처리 시설 가동 등으로 인해 긍정적인 물리·화학적 변화가 일어나고 있다.

수서곤충은 하천생태계의 물리, 화학, 생물학적 요인 등의 환경변화에 민감하게 반응하고 급격한 환경변화에 능동적으로 대처하는 능력이 낮으며, 비교적 뚜렷한 내성범위를 나타내어 환경교란에 대한 분석에 유용성이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Hynes 1960; Wiederholm 1983; Bae *et al.* 2003). 이와 같이 서식처와 밀접한 관계를 나타내는 수서곤

충은 하천 생태계에서 다양한 종수와 풍부한 개체수 현존량을 나타내고 정량채집이 용이하여, 생물모니터링 및 보존과 복원 등 환경 변화를 평가하는 지표생물로 많이 이용되고 있다(Bae *et al.* 2005; Morse *et al.* 2007).

원주천 본류의 하천생물상에 대한 선행 연구는 원주천의 어류군집 분석(Choi *et al.* 2005) 및 어류군집을 이용한 생태적 건강성 평가 연구(Park *et al.* 2017) 등이 있으며, 수서곤충의 경우, 치악산 계류의 수서곤충 군집(Bae *et al.* 1998), 수서곤충을 이용한 원주천 수서생태계 건강도 평가(Shin 2005), 원주천 수서곤충의 섭식기능군을 이용한 군집분석(Shin *et al.* 2006) 등의 연구가 진행되었다. 따라서 본 연구는 원주천에 서식하고 있는 수서곤충을 대상으로 군집구조 및 다양한 항목의 분석으로 과거 문헌자료와 비교를 통해 현재 원주천에 서식하고 있는 수서곤충의 군집구조를 파악하고자 하며, 향후 하천생태계 복원 및 보전에 대한 기초자료를 제공하고자 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점

원주천의 과거 문헌자료와의 비교를 위하여 Shin (2005)의 연구지점(St. A~St. C)과 가장 유사한 원주천 상류, 중류,

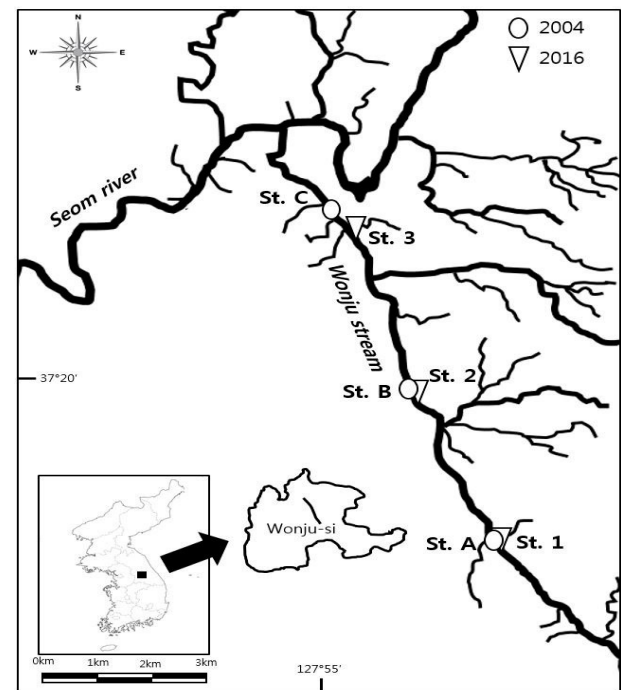


Fig. 1. Map of studied sites in Wonju stream region.

하류지역의 3개 지점(St. 1~St. 3)을 선정하였으며, 조사지점별 행정구역명은 다음과 같다.

St. A: 강원도 원주시 관설동

(E: 37°18' 31.54", N: 127°58' 40.96")

St. B: 강원도 원주시 봉산동 봉평교

(E: 37°20' 36.28", N: 127°57' 39.13")

St. C: 강원도 원주시 호저면 주산리

(E: 37°24' 30.56", N: 127°55' 32.58")

St. 1: 강원도 원주시 관설동 대평교

(E: 37°18' 43.18", N: 127°58' 34.94")

St. 2: 강원도 원주시 봉산동 원주교

(E: 37°20' 44.50", N: 127°57' 20.88")

St. 3: 강원도 원주시 호저면 주산리 주산교

(E: 37°23' 41.04", N: 127°56' 10.20")

2. 조사시기

본 연구는 수서곤충의 상대적인 출현율이 높은 2015년 5월부터 2016년 9월까지 봄과 가을에 총 4회 조사를 실시하였다. 과거 문헌자료인 Shin (2005)의 연구는 2004년 5월부터 11월까지 계절별 총 4회 조사를 수행하였다.

1차조사: 2015년 05월 26일

2차조사: 2015년 09월 02~03일

3차조사: 2016년 05월 20일

4차조사: 2016년 09월 23일

3. 조사방법

1) 물리·화학적 분석

하상구조의 물리적 분석은 Cummins (1962)의 방법을 적용하여 Boulder, Cobble, Pebble, Gravel, Silt/Sand의 5단계로 구분하여 상대적인 구성비율을 측정하여 Shin (2005)의 문헌과 비교하였다. 수질자료는 환경부에서 제공하는 물환경정보시스템의 연도별 평균 자료를 이용하여, 2004년과 2016년의 DO (Dissolved Oxygen), SS (Suspended Solid), BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorus)를 비교·분석하였다. 또한 원주천의 유량 변동을 추정하기 위해 2004년부터 2016년까지의 연평균 강수량은 기상청의 자료를 이용하여 분석하였다. 유속은 레이저 거리측정계(Nikon LASER 1200S)를 이용하였으며, 유속은 riffle, run/pool에서 Digital water velocity meter (FP111)을 이용하여 지점 당 5회씩 측정하였다. 2004년의 유속 및 유속은 Shin (2005)의 문헌을 이용하였으며, 2016년에 측정된 자료와 비교하였다.

2) 채집 및 분류

수서곤충의 정량채집은 물리적 환경 및 유량의 특성을 고려하여 계류형 정량채집망(Surber sampler 30 cm × 30 cm, mesh 0.2 mm)을 이용하였고, riffle, run/pool에서 지점별 총 3회 실시하였다. 다양한 미소서식처에 서식하는 수서곤충을 채집하고자 Bottom kick net, Hand net (diameter 18 mm, mesh 0.5 mm)을 이용하여 정성채집을 병행하였다. 채집된 수서곤충은 500 mL vial에 담아 현장에서 99% Ethanol로 고정하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서 유기물을 골라낸 수서곤충은 10~25 mL Vial에 옮겨 80% Ethanol로 보존하였다. 수서곤충의 동정은 현미경을 이용하여 McCafferty (1981), Yoon (1988, 1995), Won *et al.* (2005), Merritt *et al.* (2008) 등을 참고하여 동정하였다. 깔따구류(Chironomidae spp.)는 정확한 종과 속 수준의 동정이 제한되어 과 수준(Family level)으로 동정하였다.

3) 군집분석

군집분석은 정량적으로 채집된 수서곤충의 우점종, 우점도지수(McNaughton 1967), 다양도지수(Shannon-Weaver 1949), 균등도지수(Pielou 1975), 풍부도지수(Margalef 1958)를 산출하였으며, 수서곤충을 대상으로 Shin (2005)의 자료와 비교·분석하였다.

4) 기능군 분석

하천생태계에 서식하고 있는 생물들의 섭식 및 서식처 선택은 환경을 평가하는 지표가 되는 것으로 알려져 있으며(Barnes and Minshall 1983), Shin (2005)의 2004년 및 2016년의 먹이자원 섭식과 서식처 특성의 변화를 보기 위하여 섭식기능군(Functional Feeding Groups; FFGs) 및 서식기능군(Habitat Orientation Groups; HOGs)을 비교·분석하였다(Ro and Chun 2004; Merritt *et al.* 2008).

5) 통계분석

통계분석은 Biodiversity Pro (Version No. 2.0, UK)를 이용하여 Rarefaction curve 분석을 실시하였다. Rarefaction curve는 n개체수의 표본에서 종수를 예측하여 조사지역의 경향성과 종풍부도를 비교할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 실제 서식 종수에 대한 야외 관찰의 오차를 줄이고 실제 관찰치에서 개체군 크기에 따른 종수의 기대치를 나타낸다(James and Rathbun 1981; Lee *et al.* 2004). 본 연구에서는 2004년과 2016년에 원주천에서 출현한 수서곤충의 개체군 크기에 따른 종수의 기대값을 비교·분석하였다. 상관성 분석은 SPSS (Version No. 18.0, USA)를 이용하여 물리적 요인, 수질, 군집지수, 종수, 개체수, 저서동물지수(Benthic

Table 1. Habitat condition and general characteristics of Wonju stream 3 sampling site between 2004 and 2016

	Upstream		Midstream		Downstream	
	2004	2016	2004	2016	2004	2016
Stream width (m)	25-30	5.5-12	25-30	17-32	40-45	14-19
Water depth (cm)	40-80	2-40	30-60	2-20	50-160	2-30
Water current (m s^{-1})	0.1	0.127	0.09	0.201	0.05	0.560
Substrate *B:C:P:G:S	0:2:4:3:1	2:2:3:1:2	0:1:4:3:2	1:3:2:1:3	0:1:1:3:5	1:1:2:2:4

B: Boulder (>256 mm), C: Cobble (64-256 mm), P: Pebble (16-64 mm), G: Gravel (2-16 mm), S: Sand (0.1-2 mm)

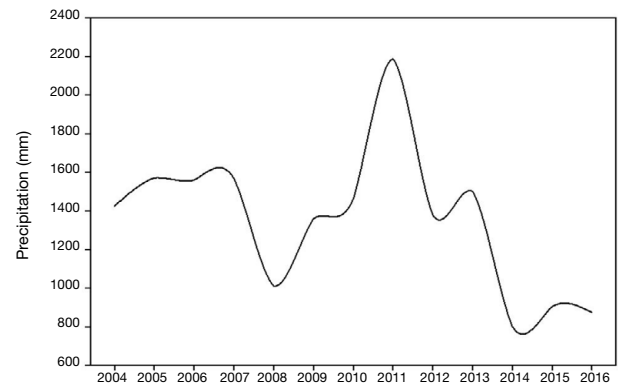
macroinvertebrate index; BMI)와의 상관성을 분석하였다. 다차원척도법(Multidimensional scaling; MDS)은 개체들 사이의 유사성과 비유사성을 측정하여 다차원 공간상에 표현하는 분석방법으로 생물학적 군집구조의 차이를 나타내는 효과적인 분석방법으로 알려져 있다(Jonna and Hannu 2002). 본 연구에서는 2004년과 2016년의 물리적 요인과 수질 변동에 따른 수서곤충의 종조성 및 개체수에 대한 영향을 분석하기 위해 MDS 분석을 실시하였다. 또한 t-test를 통해 연도별 수질분석, 군집지수 등의 유의성을 검증하였다.

결과 및 고찰

1. 물리·화학적 분석

2004년과 2016년 원주천 일대에서 측정한 물리적 특성 분석 결과, 2016년의 유속 및 수심이 2004년에 비해 감소한 것으로 나타났다(Table 1). 유속은 2004년과 2016년에 측정된 최저 유속을 비교한 결과 상류지역은 유사하였으나, 중류 지역에서는 2016년 0.201 m s^{-1} , 하류지역에서는 0.560 m s^{-1} 로 2004년에 비해 상대적으로 증가한 것으로 분석되었다. 일반적으로 보의 개량 및 철거는 유속이 증가함에 따라 하상에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Poff and Hart 2002; Stanley *et al.* 2002). 2004년 이후 원주천에서는 자연 친화형 하천 조성, 생태복원하천 사업 등이 진행되었으며, 이로 인해 수변부 조성, 하상 단순화 보강, 제방 쌓기, 약 40여개 보의 보수 및 개량 등의 변화가 발생하여 2004년과 2016의 물리적인 환경이 차이가 나타난 것으로 판단된다. 유속 및 수심은 2004년에 비해 2016년에 감소한 것으로 측정되었는데, 이는 하천정비로 인한 인위적인 영향뿐만 아니라 2011년 이후 원주시 연평균 강수량의 감소와 같은 자연적 교란에 의해 하폭 및 수심의 변화에 일부 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Fig. 2).

2004년부터 2016년까지 수질측정망을 이용한 연도별 원주천의 상류지역과 하류지역의 평균 수질분석 결과는 다음

**Fig. 2.** Average precipitation in Wonju from 2004 to 2016.

과 같다(Fig. 3). 상류지역에서는 DO, 하류지역에서는 DO, BOD, T-N, T-P가 연도별 유의한 차이를 나타내는 것으로 분석되었다($p < 0.05$). SS는 상·하류지역에서 연도별 유의한 차이를 나타내지 않았으나 제방공사, 수변부 조성, 하천 평탄화 및 교량 설치 등 하천공사의 영향으로 2004년에 비해 2016년에 증가하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다(Choi *et al.* 2005, 2008; Shin *et al.* 2006). 여울의 형성 및 유속의 증가는 용존산소량이 증가하는 것으로 알려져 있으며(Lee 2003), 본 연구에서도 원주천 일대에서 보 개량 및 여울공사를(Shin *et al.* 2006; Choi *et al.* 2008) 진행함에 따라 정수환경에서 우수환경으로 변화하여 DO가 증가한 것으로 판단된다. DO, BOD, COD는 유기물의 양을 간접적으로 나타내어 오염에 대한 지표로 알려져 있으며(Kim *et al.* 1998; Bae *et al.* 2001), T-N, T-P는 생활용수, 공업용수 등으로 이용된 물이 하천으로 유입될 경우 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Choi and Yu 1998; Jung *et al.* 1999). 본 연구에서는 BOD, COD, T-N, T-P가 주요 도심지에서 배출되는 생활용수 및 공업용수 등 비점오염원의 영향으로 2004년과 2016년의 하류지역이 상류지역에 비해 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

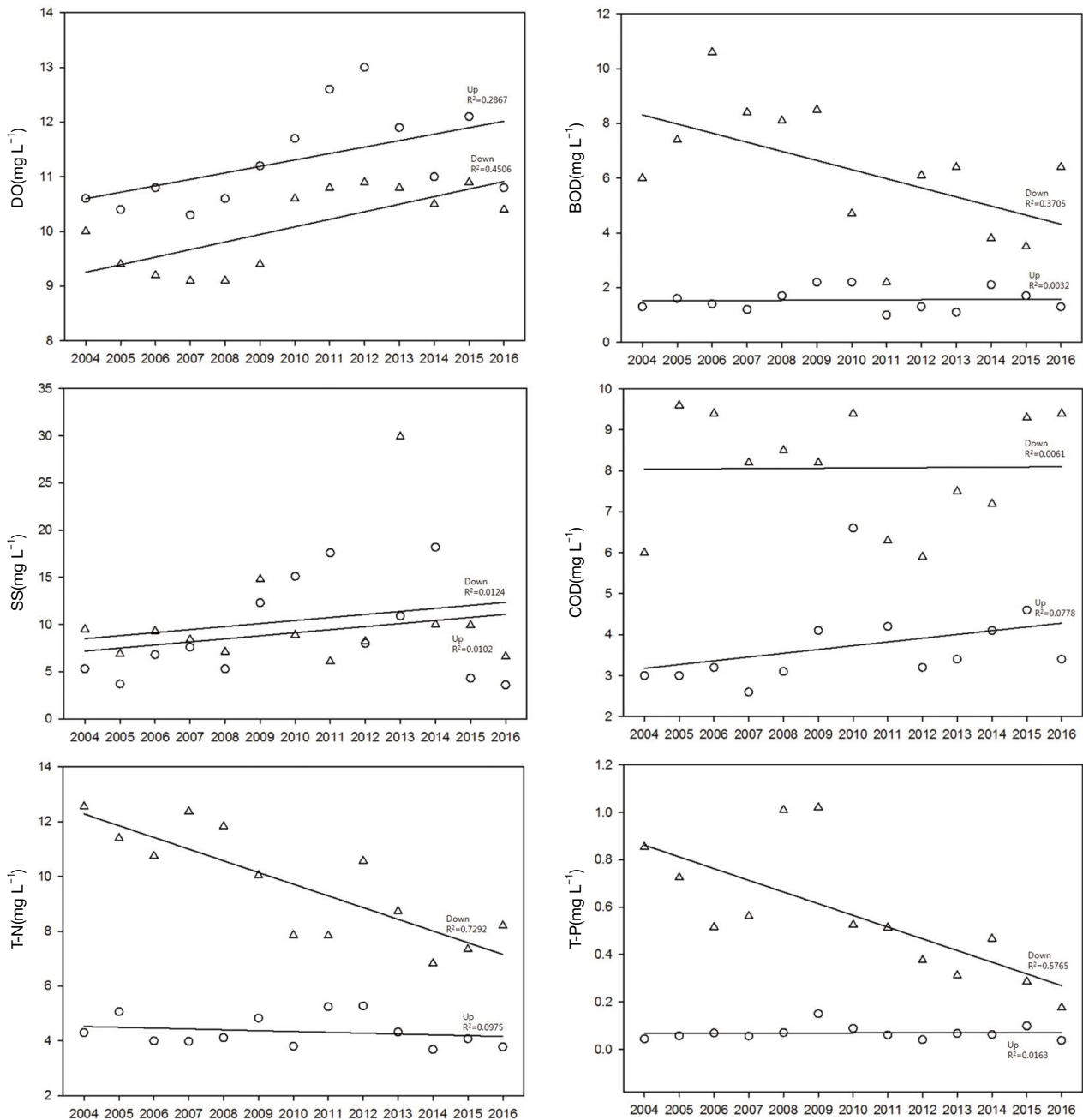


Fig. 3. Water quality variation at the study sites in Wonju stream in 2004 and 2016.

2. 수서곤충상 변화

2004년과 2016년에 출현한 수서곤충의 분류군별 종수 및 출현비율을 비교·분석한 결과는 다음과 같다(Fig. 4). 2016년에는 총 7목 29과 60종 10,989개체(ind. m⁻²)가 출현하였으며, 하루살이목이 22종(36.67%)으로 과거와 동일하게 가장 높은 것으로 나타났고, 잠자리목 14종(23.33%), 날도래목

12종(20.00%), 파리목 5종(8.33%), 딱정벌레목 4종(6.67%), 노린재목 2종(3.33%), 뱀잠자리목 1종(1.67%) 등의 순으로 나타나 2004년에 비해 하루살이목 3종, 잠자리목 4종, 딱정벌레목 3종, 날도래목 3종이 추가적으로 조사되었다. 수변식생은 유영능력이 낮은 생물들에게 서식처를 제공하는 것으로 알려져 있으며(Choi *et al.* 2015, 2016), 본 연구에서도 수변식생의 조성으로 인한 영향으로 이를 선호하는 잠자리

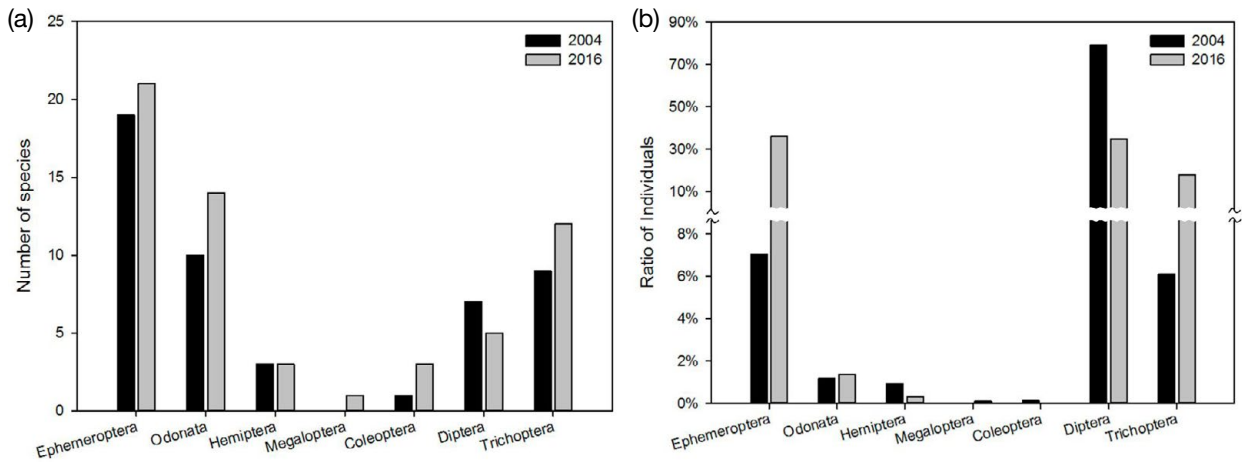


Fig. 4. Major benthic macroinvertebrate taxa of number of species (a) and ratio of individuals (b) at the study sites in Wonju stream from 2004 to 2016.

목의 종이 가장 높게 증가한 것으로 판단된다. 개체수 출현 비율 분석 결과, 파리목에서 2004년 27,759.2개체 (ind. m⁻², 84.30%), 2016년 4,573.2개체 (ind. m⁻², 41.64%)로 가장 높은 출현율을 나타내는 것으로 분석되었다. 파리목의 개체수 비율은 갈따구류(Chironomidae spp.)가 대량으로 출현한 결과이며, 하루살이목과 날도래목은 다른 분류군들에 비해 과거보다 개체수가 비교적 크게 증가한 것으로 분석되었다. 이는 정수환경에서 유수환경으로 조성하기 위해 수중보를 개량하여 유기물의 축적이 과거에 비해 감소하고, 하수처리장 방류수의 수질변화 등의 결과로 물리·화학적 환경이 변화한 결과로 판단된다(Shin *et al.* 2006; Choi *et al.* 2008). 따라서 2004년에 비해 2016년에 오염내성도가 강하고 정수환경을 선호하는 갈따구류의 개체수가 감소하고, 유수환경을 선호하는 하루살이목과 날도래목의 개체수 비율이 증가한 것으로 판단된다(Na 2005).

2004년과 2016년의 상류지역부터 하류지역까지 전체 출현종을 비교한 결과(Fig. 5), 2004년에만 출현한 종은 피라미하루살이(*Ameletus costalis*), 왕잠자리(*Anax parthenope*), 장구애비(*Laccotrephes japonensis*), 흑외줄물방개(*Potamonectes hostilis*) 등 총 23종, 2016년에만 출현한 종은 범꼬리하루살이(*Serratella setigera*), 흰등하루살이(*Ephemerella kozhovi*), 방울하루살이(*Baetis ursinus*), 가시우묵날도래(*Neophylax ussuriensis*) 등 총 34종으로 분석되었다. 2004년에는 정수환경을 선호하는 종들이 주로 분포하는 것으로 나타났으며, 피라미하루살이와 같이 유수환경을 선호하는 종들은 대부분 상류지역에 분포하는 것으로 분석되었다. 여울 및 유속의 증가는 수서곤충의 종조성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며(Ward 1992), 본 연구에서도 과거에 비해 여

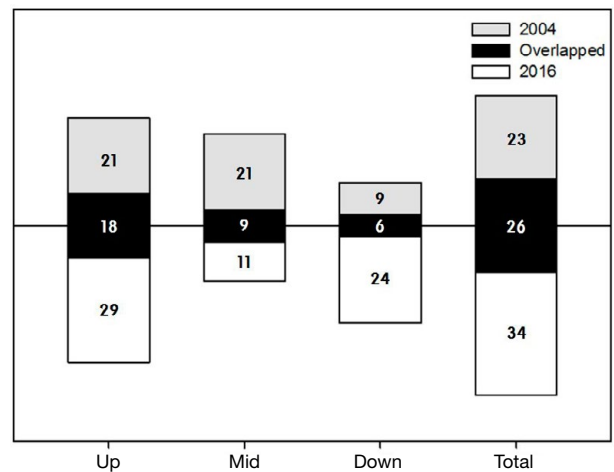


Fig. 5. Aquatic insect species in Wonju stream from 2004 to 2016.

울 및 유속이 증가한 2016년에 유수환경을 선호하는 종들의 분포범위가 넓어지면서 새로운 기회종들이 유입되어 정착한 것으로 판단된다. 2014년과 2016년의 공통종은 갈따구류, 줄날도래(*Hydropsyche kozhantschikovi*), 꼬마줄날도래(*Cheumatopsyche brevilineata*) 등 총 26종으로 분석되었으며, 대부분 유기물을 선호하는 종들로 나타났다. 이는 보의 개량으로 과거에 비해 유속이 증가함에 따라 오염물의 축적은 감소하였으나 중류지역 인근의 도심지 및 하수처리장에서 지속적으로 유입되는 유기물(Park *et al.* 2017)의 영향인 것으로 판단된다.

3. 군집분석

2004년과 2016년, 원주천 일대에서 서식하는 수서곤충을

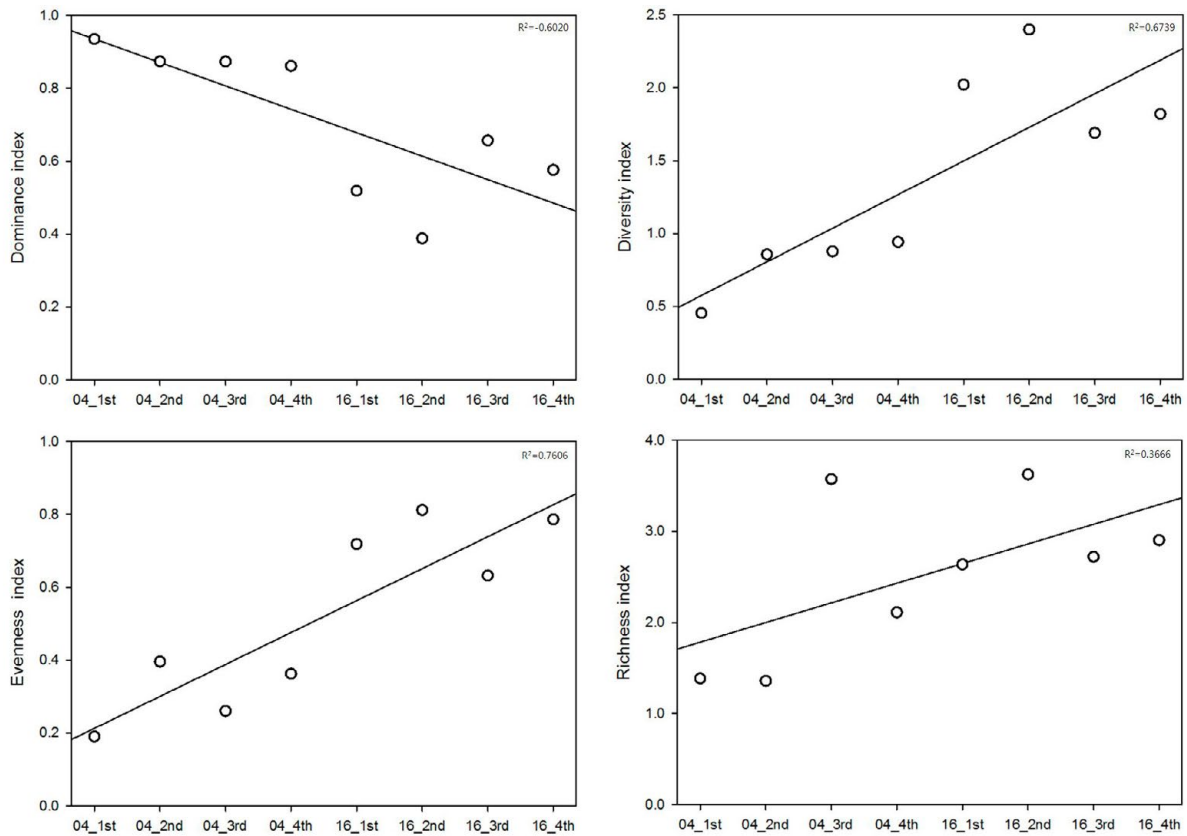


Fig. 6. Variation in community indices according to the years of study sites in Wonju stream between 2004 and 2016.

Table 2. Dominant and subdominant species according to years of the study sites in Wonju stream between 2004 and 2016

	Up		Mid		Down	
	2004	2016	2004	2016	2004	2016
Do	Chironomidae sp.	Chironomidae sp.	Chironomidae sp.	Chironomidae sp.	Chironomidae sp.	<i>Baetis fuscatus</i>
Sub	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	<i>Antocha</i> KUa	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	<i>Antocha</i> KUa	<i>Baitis thermicus</i>	Chironomidae sp.

Do: Dominant species, Sub: Subdominant species

대상으로 군집분석을 실시한 결과는 다음과 같다(Fig. 6). 조사시기별 우점도지수, 다양도지수, 균등도지수, 풍부도지수는 2004년과 2016년에 유의한 차이를 나타내는 것으로 분석되었다($p < 0.05$). 우점도지수는 2004년에 비해 2016년에 감소하는 경향을 나타내었고, 다양도지수, 균등도지수, 풍부도지수는 2016년에 증가하는 경향으로 나타나 과거에 비해 원주천 수서곤충 군집이 안정적으로 유지되고 있는 것으로 분석되었다. 이는 과거 인위적 유기물 축적 등의 수질오염이 대두되었던 원주천에서 깔따구류의 출현이 높았으나 생태하천복원사업 등의 친환경 하천정비 사업을 진행함에 따라 다

양한 물리·화학적 변화로 인해 새로운 종들이 출현한 결과로 판단된다. Kil *et al.* (2007)에 의하면 보 철거 이후, 서식환경이 우수환경으로 변화하면서 수서곤충의 종수가 증가하고 먹이섭식 형태가 변화한 것으로 나타났으며, 본 연구에서도 서식처의 환경이 변화함에 따라 먹이를 섭식하는 방법 및 서식하는 수서곤충의 종조성에 차이가 발생한 결과로 판단된다.

2004년과 2016년에 출현한 수서곤충을 대상으로 조사지점별 우점종 및 아우점종을 분석한 결과(Table 2), 2016년 개뿔하루살이(*Baetis fuscatus*)가 우점한 하류지역을 제

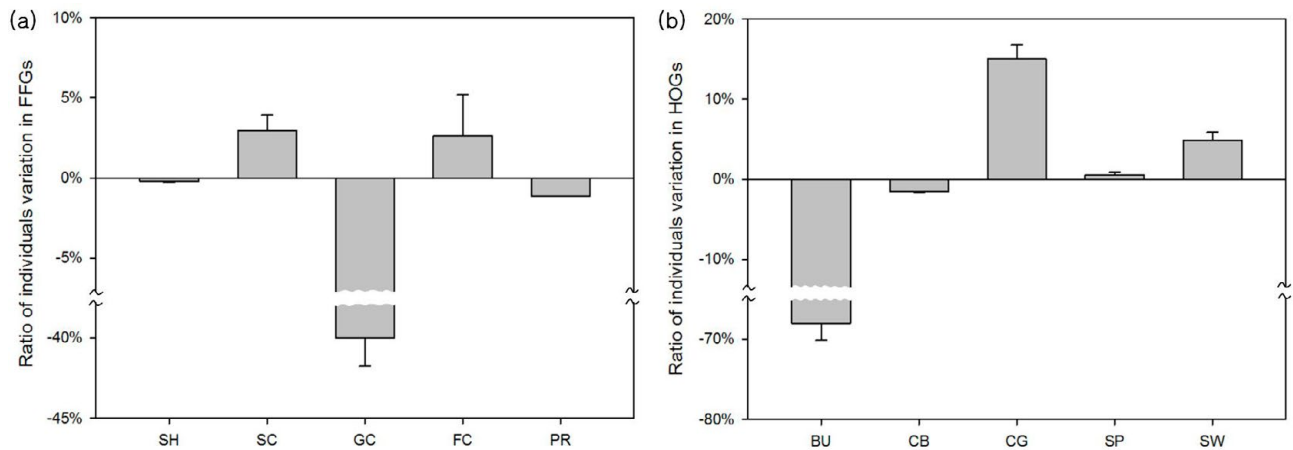


Fig. 7. The rate of variation from 2004 to 2016 in functional feeding groups (a) and habitat orientation groups (b) in Wonju stream (BU: Burrowers, CB: Climbers, CG: Clingers, SP: Sprawlers, SW: Swimmers, SH: Shredders, SC: Scrapers, GC: Collector-gatherers, FC: Collector-filterers, PR: Predators).

외하고 모두 깔따구류가 우점종으로 분석되었다. 아우점종은 2004년에 줄날도래와 개똥하루살이로 나타났으며, 2016년에 명주각다귀 KUa (*Antocha* KUa)와 깔따구류로 분석되었다. 2016년에 아우점종으로 나타난 명주각다귀 KUa는 유기물이 많은 지역을 선호하는 종이지만 줄날도래 보다 비교적 오염에 대한 내성도가 낮은 것으로 알려져 있다 (Yoon *et al.* 1992). 따라서 과거에 비해 상대적으로 오염내성도가 낮은 종이 출현하여 원주천 일대의 환경변화가 서식 종에 대한 영향을 미친 것으로 생각되나 중류지역에서 유입되는 유기물의 유입 등으로 인해 일반적인 도시하천에서 서식하는 수서곤충의 양상 (Shin *et al.* 2006)과 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

4. 기능군 분석

섭식기능군 (FFGs)과 서식기능군 (HOGs)은 서식처의 환경적 요인과 먹이자원의 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다 (Ward 1992). 원주천 일대에서 2004년과 2016년에 출현한 수서곤충의 기능군 변화율 분석을 실시한 결과는 다음과 같다 (Fig. 7). 섭식기능군은 Scrapers, Collector-filterers가 증가한 것으로 분석되었으며, 이 중 Scrapers가 평균 2.95% (± 0.98)로 가장 큰 증가율을 나타내었다. 우리나라는 발원지역을 제외하고 하천이 연중 햇빛에 노출되어 있는 상태로 Scrapers의 비율은 비교적 일정한 것으로 알려져 있는데 (Shin *et al.* 2006), 본 연구에서는 2004년에 비해 2016년 하류지역에서 Scrapers의 비율이 증가한 것으로 분석되었다. 이는 1차 생산자의 영향보다는 하류지역에서 유속이 증가한 이유로 가시우묵날도래 등의 종

들이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 한편, Shredders, Collector-gatherers, Predators는 감소한 것으로 분석되었으며, Collector-gatherers가 평균 -40.12% (± 1.77)로 가장 큰 감소율을 나타내었다. 미세입상유기물질 (Fine Particulate Organic Matter; FPOM: $>0.5 \mu\text{m} \sim 1.0 \text{mm}$)은 자연적 요인 및 공장폐수 등과 같은 인위적인 요인으로 유기물의 증가에 따라 Collector-filterers와 Collector-gatherers의 비율이 높아지고, 환경의 변화에 따라 먹이섭식 방법에 차이가 나타나는 것으로 알려져 있다 (Charles and Williams 1992; Ward 1992; Lee *et al.* 1994; Han *et al.* 2017). 2016년 Collector-gatherers의 감소는 깔따구류의 개체수 감소가 원인인 것으로 분석되었으며, 이는 하수관거정비 사업, 하수처리장의 고도수처리시설 가동 등으로 인해 인위적인 유기물의 유입이 2004년에 비해 감소한 결과로 판단된다. 서식기능군 분석결과, Clingers, Sprawlers, Swimmers가 2016년에 증가한 것으로 분석되었으며, 이 중 Clingers는 평균 15.00% (± 1.79)로 가장 큰 증가율을 나타내었다. Clingers는 비교적 유속이 빠른 지역에서 출현이 높은 기능군으로 알려져 있으며 (Yoon *et al.* 1992), 이는 원주천 일대에서 우수환경의 조성으로 인한 여울형성 등 물리적인 환경의 변화로 2016년에 명주각다귀 KUa, 줄날도래, 가시우묵날도래 등 비교적 여울을 선호하는 종들의 출현이 증가한 영향으로 판단된다. 반대로 Burrowers, Climbers는 2004년에 비해 감소한 것으로 분석되었으며, Burrowers가 평균 -68.00% (± 2.15)로 가장 큰 감소율을 나타내었다. Burrowers는 2004년 상류지역부터 하류지역까지 높은 출현비율을 나타낸 깔따구류의 영향인 것으로 분석되었다.

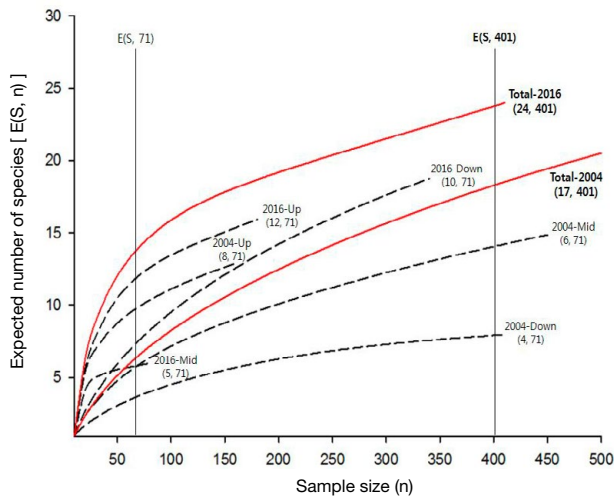


Fig. 8. Rarefaction curves of variation in Wonju stream between 2004 and 2016.

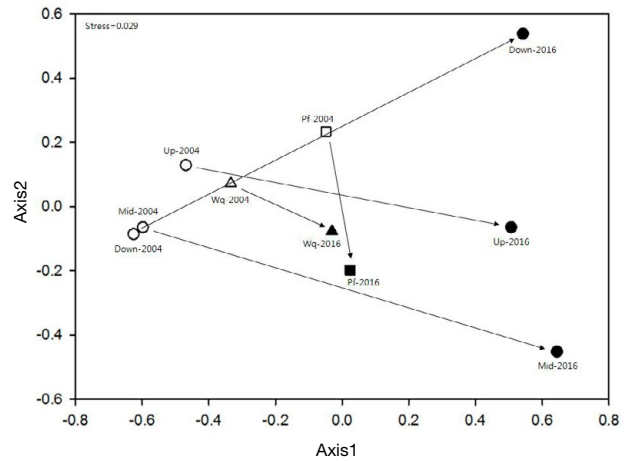


Fig. 9. Multidimensional scaling analysis of aquatic insects between 2004 and 2016 sampling studies (Pf: Physical factor, Wq: Water quality).

Table 3. Correlation analysis of each item according to the study sites in Wonju stream

	Pf	Wq	DI	H'	E	RI	Species	Individuals
Pf	1.000	0.693	-0.546	0.927**	0.904*	-0.237	0.066	-0.579
Wq	0.693	1.000	-0.260	0.821*	0.881*	-0.785	0.413	-0.835*

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Pf: Physical factor, Wq: Water quality, DI: Dominance index, H': Diversity index, E: Evenness index, RI: Richness index

5. 통계분석

Rarefaction curve는 n개체수의 표본에서 예상되는 종수를 나타내며, 표본 크기의 경향 및 차이점을 나타내어 조사지역의 종풍부도를 비교할 수 있는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.* 2004). 본 연구에서는 2004년과 2016년에 출현한 수서곤충을 대상으로 Rarefaction curve를 분석하였다(Fig. 8). 연도별 관찰된 개체수를 71개체(ind. m⁻²)로 동일하다고 가정하였을 때, 2004년과 2016년 모두 상류지역에서 각각 8종, 12종으로 가장 높은 종수를 나타내는 것으로 분석되었다. 상류지역은 중·하류지역에 비해 비교적 인위적인 교란의 영향이 적어 2004년과 2016년에 가장 높은 종수를 나타낸 것으로 판단된다. 중류지역은 2004년에 6종, 2016년에 5종으로 유사하게 분석되었는데, 이는 중류지역이 도시 중심지에 위치하여 관리되지 않은 다양한 생활하수 등의 비점오염원의 교란을 지속적으로 받고 있는 것으로 판단된다. 과거 하류지역은 오염된 하천으로 평가되었으나(Shin *et al.* 2006; Park *et al.* 2017), 2009년 하류지역에 위치한 고도수처리시설의 영향으로 날도래목의 종들이 새롭게 출현하여 2004년의 4종에 비해 2016년에 10종으로 증가한 것으로 판단된다(Choi

et al. 2005; Park *et al.* 2017). 종합적으로 관찰된 개체수가 401개체(ind. m⁻²)로 동일하다고 가정하였을 때, 2004년에 17종, 2016년에 24종으로 종수가 증가하는 것으로 분석되어 물리·화학적 환경의 변화가 원주천 일대에 서식하는 수서곤충의 종다양성에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

2004년과 2016년의 원주천 일대 물리적 요인, 수질, 군집지수, 종수, 개체수 등 다양한 항목들과 상관성 분석(Pearson correlation analysis)을 실시한 결과는 다음과 같다(Table 3). 물리적 요인은 다양도지수와 균등도지수에서 양의 상관성을 나타내었으며, 수질은 다양도지수, 균등도지수와는 양의 상관성, 개체수는 음의 상관성을 나타내는 것으로 분석되었다. 유속의 증가는 수서곤충의 먹이원 및 서식처 차이에 의한 종조성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Ward 1992). 본 연구에서도 우점도지수, 풍부도지수, 종수는 물리적으로인 및 수질과 유의한 상관관계를 나타내지는 않았으나 2004년에 비해 2016년에 유속이 증가함에 따라 날도래목의 종이 새롭게 출현하고, 오염내성도가 강한 깔따구류의 개체수가 감소한 영향으로 우점도지수 및 풍부도지수는 음의 상관성, 종수는 양의 상관성을 나타낸 것으로 판단된다.

2004년과 2016년의 조사지역 및 물리적 요인과 수질을

대상으로 수서곤충 군집의 종조성 및 개체수에 대한 영향을 Multidimensional scaling 방법으로 분석한 결과는 다음과 같다 (Fig. 9). 2004년에는 상류지역부터 하류지역까지 지점별 유사도가 비교적 높은 것으로 분석되었으나 2016년에는 상류지역에서 하류지역까지 유사도가 상대적으로 낮게 분석되었다. Shin *et al.* (2005)의 연구에서는 2004년 수중보로 인한 정수환경, 유기물의 축적, 수질오염 및 하상의 단순화 등의 영향으로 상류지역부터 하류지역까지 비교적 유사한 환경상태를 나타내어 지점별 종조성이 유사한 것으로 분석되었으며, 2016년에는 수중보 개량에 따른 유수환경의 조성, 수질 개선 등 상류지역에서 하류지역까지 물리·화학적 환경변화에 따라 지점별 출현한 수서곤충의 종조성에 차이가 나타난 결과로 판단된다.

적 요

본 연구는 2015년 5월부터 2016년 9월까지 원주시의 주요 하천인 원주천을 대상으로 조사를 실시하였다. 조사지점은 상류지역인 관설동에서 하류지역인 호저면까지 총 3 지점을 선정하였으며, 물리·화학적 분석, 수서곤충상 변화, 군집분석, 기능군 분석, Rarefaction curve, 통계분석 등을 실시하여 2004년의 연구와 비교·분석하였다. 2004년과 2016년의 종비율과 개체수 비율을 비교한 결과, 종비율은 2004년에 19종 (38.78%), 2016년에 22종 (36.67%)으로 하루살이목에서 가장 많은 것으로 분석되었으며, 개체수 비율은 2004년에 27,759.2개체 (ind. m⁻², 84.30%), 2016년에 4,573.2개체 (ind. m⁻², 41.64%)로 파리목에서 가장 높은 것으로 분석되었다. 전체 출현종 변화를 분석한 결과 공통종은 총 26종, 2004년에만 출현한 종은 총 23종, 2016년에만 출현한 종은 총 34종으로 분석되었다. 군집분석 결과, 2004년, 2016년의 우점도지수, 다양도지수, 균등도지수, 풍부도지수는 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다 ($p < 0.05$). 전체 우점종은 2004년, 2016년 모두 깔따구류 (Cronomidae sp.)로 분석되었으며, 아우점종은 2004년에는 줄날도래 (*Hydropsyche kozhantschikovi*), 2016년에는 명주각다귀 KUa (*Antocha* KUa)로 나타났다. 기능군 분석 결과, 서식기능군은 Burrowers가 평균 -68.00% (± 2.15)로 가장 큰 변동율을 나타내었으며, 섭식기능군은 Collector-gathers가 평균 -40.12% (± 1.77)로 가장 큰 변동율을 나타내었다. Rarefaction curve 분석 결과, 연도별 관찰된 개체수를 71개체 (ind. m⁻²)로 가정할 때 2004년에 6종, 2016년에 8종으로 중류지역에서 종이 가장 빈약한 것으로 분석되었다. 물리적 요인, 수질, 군집지수, 종수, 개체수의 상관성을 분석한 결과,

물리적 요인 및 수질은 다양도지수, 균등도지수, 개체수와 유의한 상관관계를 나타내는 것으로 분석되었다. MDS 분석 결과, 2004년에는 상·하류지역의 유사도가 높은 것으로 분석되었고 2016년에는 상·하류지역의 유사도가 낮은 것으로 분석되어 물리·화학적 환경변화가 원주천 일대 수서곤충의 종조성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원주시 (과제번호: 20141121941-03, 원주천 생태하천 복원사업 공사중 모니터링 연구 용역)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bae YJ, DH Won, DH Hwang YH Jin and JM Hwang. 2003. Community composition and functional feeding groups of aquatic insects according to stream order from the Gapyeong creek in Gyeonggi-do, Korea. Korean J. Limnol. 36:21-28.
- Bae YJ, HK Kil and KS Bae. 2005. Benthic macroinvertebrates for uses in stream biomonitoring and restoration. KSCE J. Civ. Eng. 9:55-63.
- Bae YJ, SY Park, SJ Park, JM Hwang and JM Hur. 1998. Aquatic insect community in a mountain stream of Chiaksan. Korean J. Nat. Sci. 10:7-20.
- Bae ZU, SH Lee and SH Lee. 2001. Study on the long-term change of water quality of the Kumho river (II). J. Korean Chem. Soc. 45:14-24.
- Barnes JR and GW Minshall. 1983. Stream ecology: Application and testing of general ecological theory. Plenum Press. London.
- Byeon HK. 2013. The characteristics of fish fauna and population of *Zacco koreanus* in the Bongseonsa stream, Korea. J. Korean Nat. 4:255-262.
- Charles MC and ML Williams. 1992. Water quality and agriculture Mississippi experiences. J. Soil Water Conserv. 47:220-223.
- Choi HS and CM Yu. 1998. A study on the epilithic algae in a stream drained from hot springs. Korean J. Environ. Health Sci. 24:131-136.
- Choi JK, HS Shin and JS Choi. 2005. Fish community analysis in the Wonju stream. Korean J. Environ. Ecol. 19:46-54.
- Choi JK, HS Shin, O Mitamura and SJ Kim. 2008. Health assessment of aquatic ecosystem for Wonju stream using the

- composition of aquatic insects. *Korean J. Environ. Ecol.* 22:544–550.
- Choi JY, KS Jeong and GJ Joo. 2015. Rainfall as dominant driver of rotifer dynamics in shallow wetlands: evidence from a long-term data record (Upo wetlands, South Korea). *Int. Rev. Hydrobiol.* 100:21–33.
- Choi JY, SK Kim, DH Kim and GJ Joo. 2016. Role of aquatic macrophytes as refuge of zooplankton on physical distribution (summer rainfall) in shallow wetlands. *Korean J. Limnol.* 49:308–319.
- Cummins KW. 1962. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic water. *Am. Midl. Nat.* 67:477–504.
- Han JS, JH Wang, JE Kim, JH Jung, YJ Bae, JK Choi and HG Lee. 2017. The effects of thermal discharge on benthic macroinvertebrate communities structure in Buso stream. *Korean J. Environ. Biol.* 35:83–94.
- Hur JW, HS Kang and MH Jang. 2011. Investigation on physical habitat condition and fish fauna in Dal stream of Han river basin. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 33:564–571.
- Hynes HBN. 1960. *The biology of polluted water.* University of Liverpool Press. England.
- James FC and S Rathbun. 1981. Rarefaction, relative abundance and diversity of avian communities. *The Auk* 98:785–800.
- Jonna P and F Hannu. 2002. Short and long-term effects of wood ash on the boreal forest humus microbial community. *Soil Biol. Biochem.* 34:1343–1353.
- Jung YT, DB Lee, KB Lee, MY Kim, BH Kim, MK Choi and ST Park. 1999. Influence of spa sewage on the water and soil pollution and restoration: I. Influence of spa sewage on the pollution of stream water and agricultural land. *Korean J. Environ. Biol.* 17:337–344.
- Kil HK, DG Kim, SW Jung, IK Shin, KH Cho, HS Woo and YJ Bae. 2007. Changes of benthic macroinvertebrate communities after a small dam removal from the Gyeongan stream in Gyeonggi-do, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 25:385–393.
- Kim JK, SJ Kang, SH Seo and WC Park. 1998. The survey of regional and seasonal characteristics of water quality in Nakdong river. *Korean J. Res. Agric. Sci.* 16:75–83.
- Lee CS and JW Rhee. 2009. Research on river landscape design by analyses of urban river design: Focus on landscape designing of Yoe Chon river. *Korean J. Digital Design* 9:475–486.
- Lee JS, BY Kim and KD Woo. 1994. Chemical composition of precipitation in Suwon area and its effect on crop development. *Korean J. Limnol.* 45:72–81.
- Lee SS. 2003. A study on the oxygen transfer efficiency for the Ecological habitat in the river riffles. University of Chung-ang Press.
- Lee WH, JD Jang, BI Choi, SR Kang and KC Kwon. 2004. Bird diversity on area around the Ulsan mosaic landscape. *Korean J. Ecol.* 27:325–333.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *General Systems* 3:36–71.
- McCafferty WP. 1981. *Aquatic entomology: The fisherman's and ecologist's illustrated guide to insects and their relatives.* Science Book International. Boston.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California grassland. *Nature* 216:168–169.
- Merritt RW, KW Cummins and MB Berg. 2008. *An introduction to the aquatic insects of North America (4th ed).* Kendall/Hunt Publisher, Dubuque.
- Morse JC, YJ Bae, G. Munkhjargal, N Sangpradub, K Tanida, TS Shivkova, BX Wang, LF Yang and CM Yules. 2007. Freshwater biomonitoring with macroinvertebrates in east Asia. *Front. Ecol. Environ.* 5:33–42.
- Na KB. 2005. *Taxonomy of the Chironomidae (diptera, insecta) in Seoul-Gyeonggi area, Korea.* University of Seoul Women's Press.
- Park HK, JK Choi, KH Won and HG Lee. 2017. Study on the evaluation of ecological health by using fish communities in the Wonju stream, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 35:684–693.
- Pielou EC. 1975. *Ecological Diversity.* John Wiley & Sons Press. New York.
- Poff NL and DD Hart. 2002. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience* 52:659–668.
- Ro TH and DJ Chun. 2004. Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis. *Korean J. Limnol.* 37:137–148.
- Shannon CE and W Weaver. 1949. *The mathematical theory of communication.* University of Illinois Press. Urbana.
- Shin HS. 2005. *Health assessment of ecosystem based on the composition of aquatic insects in Wonju stream.* University of Sangji Press.
- Shin HS, SC Park, JK Kim, SJ Kim, JH Park, JS Choi and JK Choi. 2006. Community analysis based on functional feeding groups of aquatic insects in Wonju stream. *Korean J. Environ. Ecol.* 20:259–266.
- Stanley EH, AL Michelle, MW Doyle and DW Marshall. 2002. Short-term changes in channel form and macroinvertebrate communities following low-head dam removal. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 21:172–187.
- Vannote RL, GW Minshall, KW Cummins, JR Sedell and CE Cushing. 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37:130–137.

- Ward JV. 1992. Aquatic insects ecology (1. Ecology and habitat). John Wiley & Sons. Inc. p. 438.
- Wiederholm I. 1983. Chironomidae of the Holarctic region, keys and diagnoses: Part I, larvae. Entomol. Scand. Suppl. 19:1-457.
- Won DH, SJ Kwon and YC Jun. 2005. Aquatic insects of Korea. Korea Ecosystem Service press. Seoul.
- Yoon IB. 1988. Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea (aquatic insects). Ministry of Education press. Seoul.
- Yoon IB. 1995. Aquatic insects of Korea. Junghaengsa press.
- Yoon IB, DS Kong and JK Ryu. 1992. Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates: (1) Saprobic valency and indicative value. Korean J. Environ. Biol. 10:24-39.
- Yoon SA, NY Kim, BH Kim and SJ Hwang. 2010. Effects of an inflowing urban stream (Wonju stream) on epilithic diatom assemblages in the lower Seom river. Korean J. Limnol. 43:232-241.

Received: 14 March 2018

Revised: 20 June 2018

Revision accepted: 13 July 2018