

보령댐 도수가 저서성 대형무척추동물 군집구조 변화에 미치는 영향¹

안채희² · 한중수² · 최준길² · 이황구^{2*}

The Effect of Water Conveyance of Boryeong Dam on Structural Changes of Benthic Macroinvertebrates Community¹

Chae-Hui An², Jung-Soo Han², Jun-Kil Choi², Hwang-Goo Lee^{2*}

요 약

본 연구는 충청남도 보령시에 위치한 보령댐의 도수 전과 후의 저서성 대형무척추동물상을 비교·분석하여 인위적 교란에 대한 영향을 파악하고자 하였다. 조사시기는 2016년 4월부터 2017년 9월까지 총 8회에 걸쳐 조사하였으며, 조사지점은 방류되는 지점부터 총 4개의 지점을 선정하였다. 저서성 대형무척추동물은 총 4문 7강 19목 70과 125종 13,447개체가 출현하였다. 군집분석 결과 우점도 0.55(±0.07)에서 0.47(±0.08), 다양도 2.06(±0.26)에서 2.23(±0.28), 균등도 0.69(±0.05)에서 0.70(±0.04), 풍부도 3.43(±0.72)에서 4.03(±0.91)으로 나타났다. 도수 이후 우점도는 감소하고 다양도, 균등도, 풍부도는 증가하는 안정적인 군집구조로 나타났다. 기능군 분석 결과 도수 이후 섭식기능군은 굽어먹는 무리, 걸러먹는무리의 비율은 증가하고 썰어먹는무리, 주워먹는무리의 비율은 감소하였으며, 서식기능군은 기어오르는 무리와 붙는무리의 비율은 증가하고 굴파는무리와 기는무리의 비율은 감소하는 것으로 나타났다. 군집안정성 분석 결과 도수 이후 St. 1과 St. 2는 저항력과 회복력이 감소하여 Ⅲ특성군에 새로운 종이 출현하였으며, St. 3과 St. 4는 큰 차이를 나타내지 않았다. 다차원척도법 분석 결과 도수 이후 St. 1에서 유사도의 변화가 가장 높은 것으로 나타났으며, St. 4에서 유사도의 변화가 가장 낮은 것으로 나타났다.

주요어: 군집분석, 기능군, 군집안정성, 다차원척도법

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the influence of artificial disturbances occurring during water conveyance frequency on benthic macro-invertebrate by comparing and analyzing data before and after the construction of Boryeong dam in Boryeong-si, Chungcheongnam-do. We conducted the survey eight times in four points from April 2016 to September 2017. A total of 13,447 individuals from 125 species, 70 families, 19 orders, 7 classes, and 4 phyla were collected. The result of the community analysis showed that the dominant index was 0.55 (±0.07) to 0.47 (±0.08), diversity index was 2.06 (±0.26) to 2.23 (±0.28), evenness index was 0.69 (±0.05) to 0.70 (±0.04), and richness index was 3.43 (±0.72) to 4.03 (±0.91). After conveyance, the dominance decreased while the diversity, evenness, and richness increased. The result of the functional group analysis showed the portion of scrapers, filtering-collectors increased while that of shredders, gathering-collectors decreased in the functional feeding group and that the proportion of climbers and clingers increased

1 접수 2018년 3월 14, 수정 (1차: 2018년 5월 19일, 2차: 2018년 7월 23일), 게재확정 2018년 8월 14일

Received 14 March 2018; Revised (1st: 19 May 2018, 2nd: 23 July 2018); Accepted 14 August 2018

2 상지대학교 생명과학과 Department of Biological Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea

* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-33-730-0434, Fax: +82-33-811-1030, E-mail: morningdew@sangji.ac.kr

while that of burrowers and sprawlers decreased in the habitat orientation group. The result of analysis of community stability showed that St. 1 and St. 2 decreased resistance and resilience after conveyance and new species appeared in the III characteristics group while St. 3 and St. 4 did not show much difference. The result of multidimensional scaling analysis showed that the variation of similarity was the highest at St. 1 after conveyance, and the variation of similarity at St. 4 was the lowest.

KEY WORDS : COMMUNITY ANALYSIS, FUNCTIONAL GROUPS, COMMUNITY STABILITY, MULTIDIMENSIONAL SCALING

서 론

우리나라는 여름철 강수량이 70% 이상 집중되는 몬순기후 특성에 따라 수자원 관리에 어려움을 겪고 있으며, 강우 패턴의 변화는 장기간의 가뭄 발생 위험을 크게 증가시키고 있다(Choi, 1995; Choi, 2017). 이러한 우리나라의 기후특성에 따른 문제를 해결하기 위해 다목적 댐을 건설하여 수자원을 관리하고 있으나 다목적 댐은 갈수시 급격한 유량변화를 초래할 수 있으며, 최근에는 지구온난화 등으로 인하여 가뭄의 빈도 및 피해가 점차 증가하고 있는 추세이다(Park, 2008; Choi, 2017). 본 연구 대상지역인 보령댐은 1992년 6월부터 1996년 10월까지 충청남도 서북부지역의 생활용수와 공업용수 등을 공급하기 위하여 건설된 다목적 댐이다. 총 저수량은 1억 1,700만톤으로 현재까지도 댐의 주요 역할을 수행하고 있지만 최근 가뭄에 따른 강수량이 감소하고, 가뭄 빈도가 증가함에 따라 댐의 저수율이 감소하고 있다. 보령댐의 저수율은 2014년부터 2017년까지 감소하고 있는 실정이며, 2015년의 경우 저수율이 44.82%에서 24.36%까지 감소하여 이로 인한 용수공급의 문제가 제기되었다(Geum river water system management commission, 2017). 이에 저수율 감소 문제를 해결하기 위해 2015년 10월부터 2016년 2월까지 백제보 하류 6.7km 부터 보령댐 상류 지역인 반교천으로 댐 내 취수를 위한 취수관로인 도수로를 건설하였다. 보령댐 도수로 건설 이후 대표적인 가뭄 지역이었던 충청남도 서북부지역은 이례적인 가뭄에도 안정적으로 대처할 수 있는 구조적 대책이 마련되었으며(Lee, 2016), 2017년 3월부터 도수를 시작한 후 현재까지 보령댐의 저수율이 증가하고 있는 추세이다. 2016년 2월 도수로 건설이 완료된 이후 일시적으로 도수로를 가동하였으나 저수율이 44.83%로 올라 관심단계가 되면서 도수를 중단하였으며, 관심단계 이하인 15.35%로 내려가는 2017년 3월에 도수를 시작하여 현재까지 가동 중에 있다. 도수로가 가동된 후 농번기의 시작으로 도수 유입량이 8.23m³/sec로 높아졌으나 7월 경 농번기가 끝나면서 도수 유입량이 2.43m³/sec로 낮아졌다. 도수의 영향으로 생활용수와 농업

용수에 큰 도움을 주었으며, 보령댐의 저수율도 2017년 6월부터 9.25%에서 34.22%까지 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 국내 도수로의 사례는 보령도수로 건설 이후 충청남도 지역에 위치한 예당저수지에도 적용이 되어 공주보와 예당저수지를 잇는 도수로를 건설 중에 있다. 하지만 하천생태계는 외부의 영향에 대하여 물리적 특성이 상호 유기적으로 반응하고 변화하는 특성을 지니고 있어(Ko *et al.*, 2009) 인위적인 도수 시 해당수계에는 유량 및 수위 변동, 유속 변화 등의 교란이 불가피할 것으로 예상된다.

저서성 대형무척추동물은 비교적 다양하고 풍부한 무리이며, 절지동물문의 경우 150만종 이상이 알려져 있어 다른 생물군에 비해 종 다양성이 높다(Ward, 1992; Kim, 2014). 하천 바닥 환경에 기반을 두고 서식하는 저서성 대형무척추동물은 이동성이 적어 지역적 환경을 잘 대변하는 것으로 알려져 있어 군집의 정량적 연구가 용이하며(Won *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2012; Piggott *et al.*, 2015; Graeber *et al.*, 2017; Kwak *et al.*, 2018), 대부분 청정한 곳에 서식하여 생물지표종으로 활용되는 강도래목과 같이 저서성 대형무척추동물은 비교적 뚜렷한 내성범위를 가지고 있어 환경변화를 평가하는 지표생물로 널리 이용되고 있다(Hynes, 1960; Wiederholm, 1983; Bae *et al.*, 2003; Reice and Wohleberg, 1993). 또한 하천의 물리적 요인, 화학적 요인, 생물학적 요인 등 환경변화에 민감한 것으로 알려져 있으며(Kim, 2013), 급격한 환경의 변화에 능동적으로 대처하는 능력이 낮아(Im, 2015), 홍수나 가뭄 등과 같은 자연적 교란 및 보 설치, 물의 이용 등 인위적 교란에 특이적인 반응을 나타내는 것으로 알려져 있다(Power *et al.*, 1988; Resh *et al.*, 1988; Kwak *et al.*, 2004). 즉, 인위적인 하천 생태계 교란은 환경변화에 민감하게 반응하는 저서성 대형무척추동물의 개체군과 군집구조, 종조성, 생물상 등의 변화 및 하천 생태계의 변화를 유추하는데 유용하게 사용된다(Kwak *et al.*, 2018). 또한 저서성 대형무척추동물은 교란에 의한 유속 및 하상구조 등의 변화에 영향을 받아 미소서식처가 결정되는 것으로 알려져 있어 도수에 의한 저서성 대형무척추동물의 변화는 하천 생태계의 변화를 나타내는데

유용할 것으로 판단된다(Schollosser and Ebel, 1989; Thoms and Sheldon, 1997; Norris and Thoms, 1999; Miranda *et al.*, 2005; Kim, 2014).

도수에 관한 연구로는 지하수위 변동, 지하수 유입량, 흐름특성 분석 등 하천 수위나 유입량에 관한 연구가 이루어져 왔으나(Lee *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2001; Yoon *et al.*, 2011), 도수에 의한 생물군집의 변동에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 보령댐 도수 전과 도수 후의 연구 자료를 이용하여 군집분석, 기능군 분석, 군집안정성 분석 등을 비교·분석하여 일시적인 도수 시 하천환경 변화에 민감한 저서성 대형무척추동물을 대상으로 인위적인 교란에 대한 영향을 파악하고자 실시하였다.

연구방법

1. 조사시기

조사시기는 도수에 따른 변화를 파악하기 위하여 2016년 4월부터 2017년 9월까지 조사지점별 도수가 시작되기 전과 후를 각각 4회씩, 총 8회에 걸쳐 조사를 실시하였다. 연구기간 동안 조사시기별 우기를 피하여 조사를 수행하였으며, 도수의 경우 비가 내리는 기간에는 도수를 멈추어 유속 및 유량이 증가하는 것을 방지하였다.

- 도수 전(Before): 2016년 4월 26일 (1차)
- 2016년 6월 23일 (2차)
- 2016년 8월 19일 (3차)
- 2016년 9월 30일 (4차)
- 도수 후(After): 2017년 5월 03일 (5차)
- 2017년 6월 23일 (6차)
- 2017년 8월 30일 (7차)
- 2017년 9월 25일 (8차)

2. 조사지점

조사지역은 충청남도 보령시 미산면에 위치한 보령댐 일대를 대상으로 선정하였다(Figure 1). 조사지점은 도수 방류지점부터 보령댐으로 합류되기 전까지 총 4지점을 선정하여 조사를 실시하였다(Table 1). St. 1은 도수 방류지점으로 도수 이후 유속 및 유량의 변화가 가장 높은 지점이며, St. 2는 소형보가 설치되어 있는 지점이다. St. 3은 도수 전 하천공사가 장기간 진행되어 물리적인 교란이 매우 높은 지점이며, St. 4는 방류지점과 약 6km 정도 거리가 이격되어 물리적인 요인의 변화가 가장 적은 지점이다.

St. 1: 충청남도 부여군 외산면 반교리(N: 36°17' 04.17", E: 126°43' 10.83")

St. 2: 충청남도 부여군 외산면 길산리(N: 36°17' 49.40", E: 126°42' 31.60")

St. 3: 충청남도 부여군 외산면 만수리(N: 36°17' 36.65", E: 126°41' 42.29")

St. 4: 충청남도 보령시 미산면 풍계리(N: 36°17' 25.20", E: 126°40' 21.15")

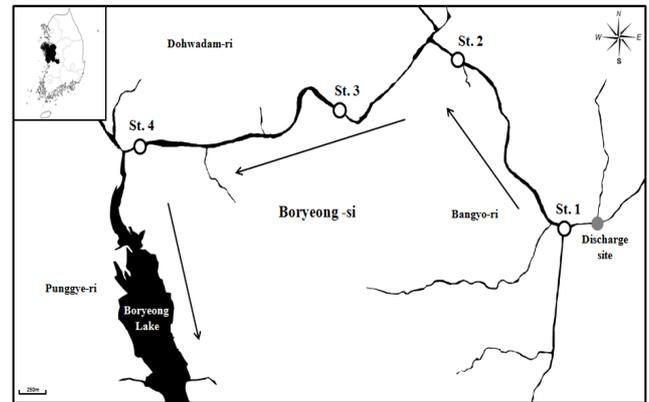


Figure 1. Map showing the study sites in Boryeong dam region.

Table 1. Physical factors of each site in first and fifth survey in Boryeong dam region

	St.1		St.2		St.3		St.4	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
Water velocity (m/s)	0.7	2.1	1.4	2.4	1.2	2.3	1.2	1.2
Bottom structure *B:C:P:G:S	1:2:2:2:3	1:3:3:2:1	1:3:3:2:1	1:3:2:2:2	3:3:2:1:1	1:1:2:3:3	4:3:2:1:0	3:4:2:1:0

*B: Boulder >256mm, C: Cobble 64~256mm, P: Pebble 16~64mm, G: Gravel 2~16mm, S: Silt/Sand <2mm

3. 조사방법

1) 서식처 내 물리적 수환경 분석

서식처 내 물리적 특성분석은 도수 전과 도수 후에 각각 조사를 실시하였으며, 1차조사 및 5차조사 시 측정된 값을 이용하여 분석하였다. Digital water velocity meter(DaeSung Sciences, FP111)를 이용하여 유속을 측정하였으며, 하상구조물의 계측 및 분류는 Cummins(1962)의 방법을 적용하여 Boulder, Cobble, Pebble, Gravel, Silt/Sand의 5단계로 구분하여 상대적인 구성 비율을 측정하였다.

2) 채집 및 분류

저서성 대형무척추동물의 채집은 유량 및 환경 특성을 고려하여 Surber sampler(30cm × 30cm, 망목 0.2mm)를 이용하여 조사지점별 riffle 1회, run과 pool에서 각 1회씩 3회 정량채집을 실시하였다. 채집된 저서성 대형무척추동물은 현장에서 500ml 바이알에 담아 99% Ethanol로 고정하여 실험실로 운반하였다. 운반된 채집물은 유기물로부터 저서성 대형무척추동물을 골라내어 바이알(10~25ml)에 옮긴 후 80% Ethanol로 보존하였다. 수서곤충의 동정은 McCafferty (1981), Yoon(1988, 1995), Merritt *et al.*(2008), Won *et al.*(2005) 등을 참고하여 동정하였으며, 연체동물과 거머리류는 각각 Kwon(1990), Song(1995)을 참고하였다. 깔따구류(Chironomidae spp.)는 정확한 종과 속 수준의 동정이 제한되어 과 수준(Family level)으로 동정하였다.

3) 군집특성 분석

군집분석은 정량적으로 채집된 저서성 대형무척추동물을 대상으로 출현한 분류군의 수를 비교하여 출현종수, 출현개체수, 우점종, 우점도지수(McNaughton, 1967), 다양도지수(Shannon and Weaver, 1949), 균등도지수(Pielou, 1975), 풍부도지수(Margalef, 1958)를 회귀분석 방법으로 산출하였다. 하천생태계에 서식하고 있는 생물군들의 섭식 및 서식기능군은 수환경을 평가하는 지표로 알려져 있으며 (Barnes and Minshall, 1983), 조사지점별 도수가 수서곤충에 미치는 영향을 분석하기 위해 채집된 수서곤충을 섭식기능군(Functional Feeding Groups, FFGs)과 서식기능군(Habitat Orientation Groups, HOGs)에 따라 구분하였다 (Ro and Chun, 2004; Merritt *et al.*, 2008). 도수의 영향에 대한 군집 변화를 파악하기 위해 분류군들 간의 상대적인 저항력(Resistance)과 회복력(Resilience)을 이용하여 군집 안정성을 분석하였다(Ro and Chun, 2004). 저항력과 회복력은 수환경의 오염에 대한 생물군의 반응을 의미하며, 상대적 저항력과 회복력을 각각 5.5를 기준점으로 하여 4분면

(I, II, III, IV 특성군) 위에 도식화하였다. I 특성군은 저항력과 회복력이 높은 종들이 분포하며, II 특성군은 저항력은 낮고 회복력이 높은 종, III 특성군은 저항력과 회복력이 낮은 종, IV 특성군은 저항력은 높고 회복력이 낮은 종들이 분포하게 된다. 군집안정성은 특성군별 교란에 따른 생물군집의 회복에 있어 빠르게 유입되거나 교란에 민감하게 반응하는 종들에 의해 결정되며(Jung *et al.*, 2017), 대상하천의 4개 조사지점에서 출현한 수서곤충을 대상으로 상대적인 저항력과 회복력은 각각의 점수(10등급)를 부여하여 특정 생태계의 안정성을 평가하였다(Ro, 2002).

4) 유사도분석

도수 전과 후의 조사지점별 저서성 대형무척추동물 군집의 변화를 파악하기 위해 SPSS(Version No. 18.0 for windows)를 이용하여 다차원척도법(Multidimensional scaling, MDS) 분석을 실시하였다. 다차원척도법은 여러 대상 간의 관계에 대한 수치적 자료를 이용하여 유사도 값을 상대적 거리로 나타내는 방법으로 지점 사이의 유사성을 거리로 나타내 보다 명확하게 지점 간의 차이를 나타낼 수 있다.

결과 및 고찰

1. 물리적 수환경

조사지역의 물리적 수환경을 분석한 결과는 다음과 같다 (Table 1). 최고유속은 St. 4를 제외하고 도수 이후에 증가하였는데, St. 4의 경우 도수 방류지점과의 거리가 크게 이격되어 유속에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 방류지점인 St. 1은 도수 이후 0.7m/s에서 2.1m/s로 유속의 변화가 가장 큰 것으로 측정되었다. 조사지점별 하상구조는 유속의 변화에 비해 상대적으로 큰 변화를 나타내지 않았으며, St. 1과 St. 2에서 모래(Silt/Sand)의 비율에 있어 다소 차이를 나타내었다. St. 3의 경우 큰돌(Boulder)과 작은돌(Cobble)의 비율은 감소하고, 자갈(Gravel)과 모래(Silt/Sand)의 비율은 일부 증가한 것으로 나타났는데 이는 4차조사 시부터 진행된 하천정비 공사에 따른 영향으로 물리적인 하상구조가 변화한 결과이다. 물리적 수환경은 도수의 영향이 높을 것으로 예상되는 St. 1에서 유속의 증가에도 불구하고 하상재질의 씻김현상이 적어 전체적으로 하상구조의 변화는 낮은 것으로 조사되었다.

2. 저서성 대형무척추동물상

조사기간 동안 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 4문

7강 19목 70과 125종 13,447개체였으며, 도수 전 4문 7강 17목 48과 84종 5,262개체, 도수 후 3문 6강 15목 48과 83종 8,182개체로 출현 종수는 유사하였으나 개체수는 증가한 것으로 조사되었다. 도수 전 분류군별 출현비율은 비곤충류(Non-Insects)에서 18과 25종(29.76%)으로 가장 높게 나타났으며, 하루살이목(Ephemeroptera)이 8과 20종(23.81%)으로 다음을 차지하였다. 도수 후 역시 비곤충류가 15과 20종(24.10%)으로 가장 높게 나타났으며, 날도래목이 12과 19종(22.89%)을 차지하였다. 대부분 하루살이목의 헤엄치는무리(Swimmers)에서 도수 이후 종수와 개체수가 감소하고 우수환경을 선호하는 날도래목의 종수와 개체수가 증가한 결과로 판단된다. 조사지점별 도수 전·후의 출현종을 비교한 결과, St. 1은 38종에서 41종, St. 2는 35종에

서 46종, St. 3은 50종에서 48종, St. 4는 53종에서 59종으로 대부분의 지점에서 종수가 증가하는 경향을 보였다(Figure 2). St. 1은 도수의 유출부와 가장 인접하여 유속의 저항력이 높은 일부 종들이 증가한 것으로 생각되며, St. 2는 평상시 유량이 부족하였으나 도수 후 유량 및 유속의 증가로 서식환경의 다양화와 함께 서식공간이 확대되어 가장 영향이 높은 것으로 판단된다. St. 3은 도수 중 하천 공사에 의해 하상 및 수변환경이 교란되어 상대적으로 종수가 감소하였으며, St. 4는 도수지점과 가장 이격된 지점으로 도수에 의한 영향 보다는 계절적인 이유로 생각된다. 도수에 의한 유속 및 유량의 증가는 종조성과 종수의 변화를 나타내었는데, 이는 도수 전에만 출현한 종들은 도수 후 변화된 수환경으로 인해 정착하지 못하고, 환경의 교란 후 나타나는 기회종(*Psephenoides* KUa, *Hydroptila* KUa 등)들이 정착하였기 때문으로 판단된다. 도수 전·후의 종조성을 비교한 결과 공통적으로 출현한 종은 65종이었으며, 도수 전에만 출현한 종은 19종, 도수 후 추가된 종은 18종으로 도수 이후 유속 및 수환경의 변화에 따라 종조성의 차이가 나타난 것으로 판단된다. 도수 후에만 출현한 종의 경우 유속이 증가함에 따라 대부분 돌 등의 기질에 붙어서 서식하는 종들이 높게 출현하였으며(Son *et al.*, 2012), 유기물을 선호하는 날도래목(Trichoptera)이 새롭게 정착한 것으로 판단된다(Figure 3). 조사지점별 목별 개체수 구성비에서는 우수환경을 선호하는 먹파리류(*Simulium* sp.)의 증가로 대부분의 지점에서 파리목이 증가하였으며(Han *et al.*, 2017), 상대적으로 비곤충류에서 감소 경향을 나타내었다.

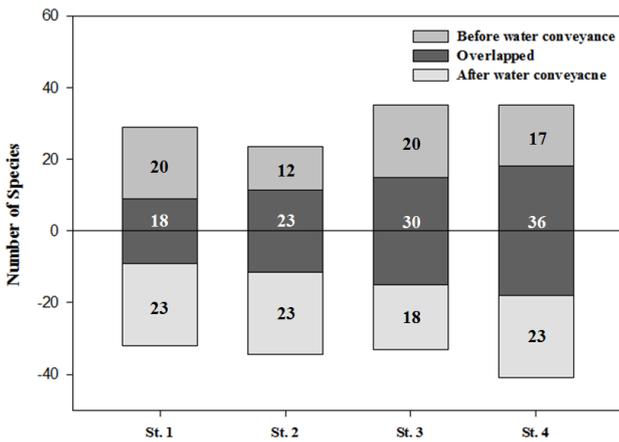


Figure 2. Change of number of species at the study sites before and after water conveyance in Boryeong dam region.

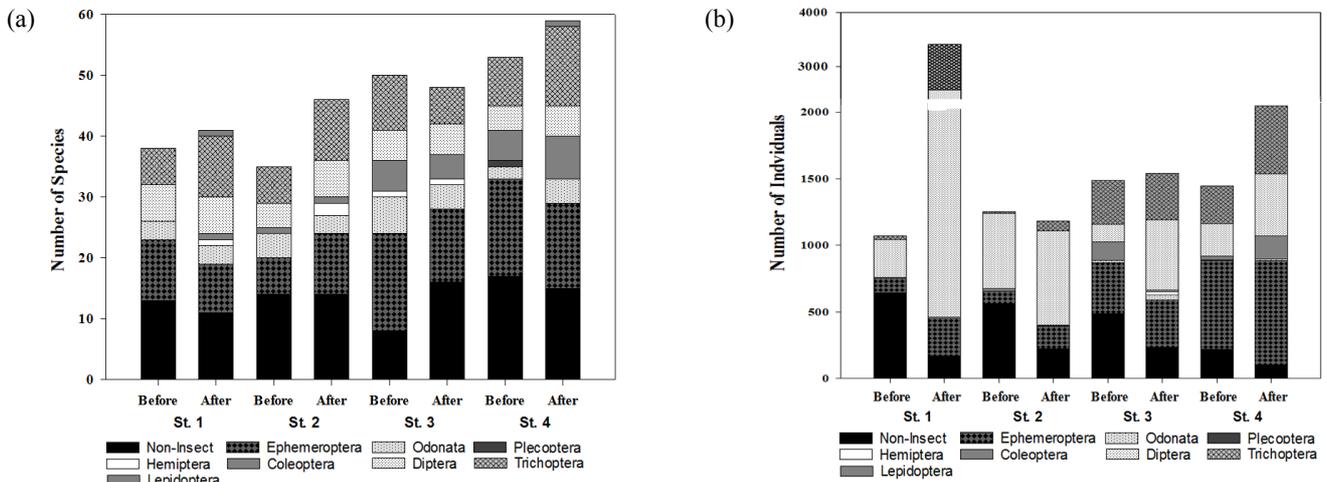


Figure 3. Composition of major benthic macroinvertebrates species and individuals at the study sites in Boryeong dam region. (a): Each order species composition ratio (b): Each order species composition ratio

3. 군집분석

도수 전과 도수 후의 조사지점별 우점종 분석 결과(Table 2), St. 1은 도수 전 다슬기(*Semisulcospira libertina*)가 우점하였으나, 도수 후에는 먹파리류가 우점한 것으로 나타났다. 먹파리류의 경우 유수환경을 선호하는 것으로 알려져 있어 도수에 따른 유속 증가로 먹파리류의 서식처가 제공되었기 때문으로 판단된다. St. 2는 도수 전·후 모두 깔따구류

(Chironomidae spp.)가 우점하였는데, 이는 St. 2에 위치한 보로 인하여 하상이 Silt/Sand로 이루어져 깔따구류가 선호하는 서식처가 제공되었기 때문으로 판단된다. St. 3은 도수 전 꼬마줄날도래(*Cheumatopsyche brevilineata*)가 우점하고, 다슬기가 아우점하였으나 도수 이후 깔따구류가 우점하고, 꼬마줄날도래가 아우점하였다. St. 3의 경우 대규모 하상 공사로 인해 일시적으로 꼬마줄날도래가 감소하고, 깔따

Table 2. Dominance and subdominance species of the each site in Boryeong dam region

		Before	After			Before	After
St.1	Do	<i>Semisulcospira libertina</i>	<i>Simulium</i> sp.	St.2	Do	Chironomidae sp. 2	Chironomidae sp. 1
	Sub	Chironomidae sp. 2	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>		Sub	<i>Limnodrilus gotoi</i>	Chironomidae sp. 2
St.3	Do	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	Chironomidae sp. 1	St.4	Do	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>
	Sub	<i>Semisulcospira libertina</i>	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>		Sub	<i>Ecdyonurus levis</i>	Chironomidae sp. 1

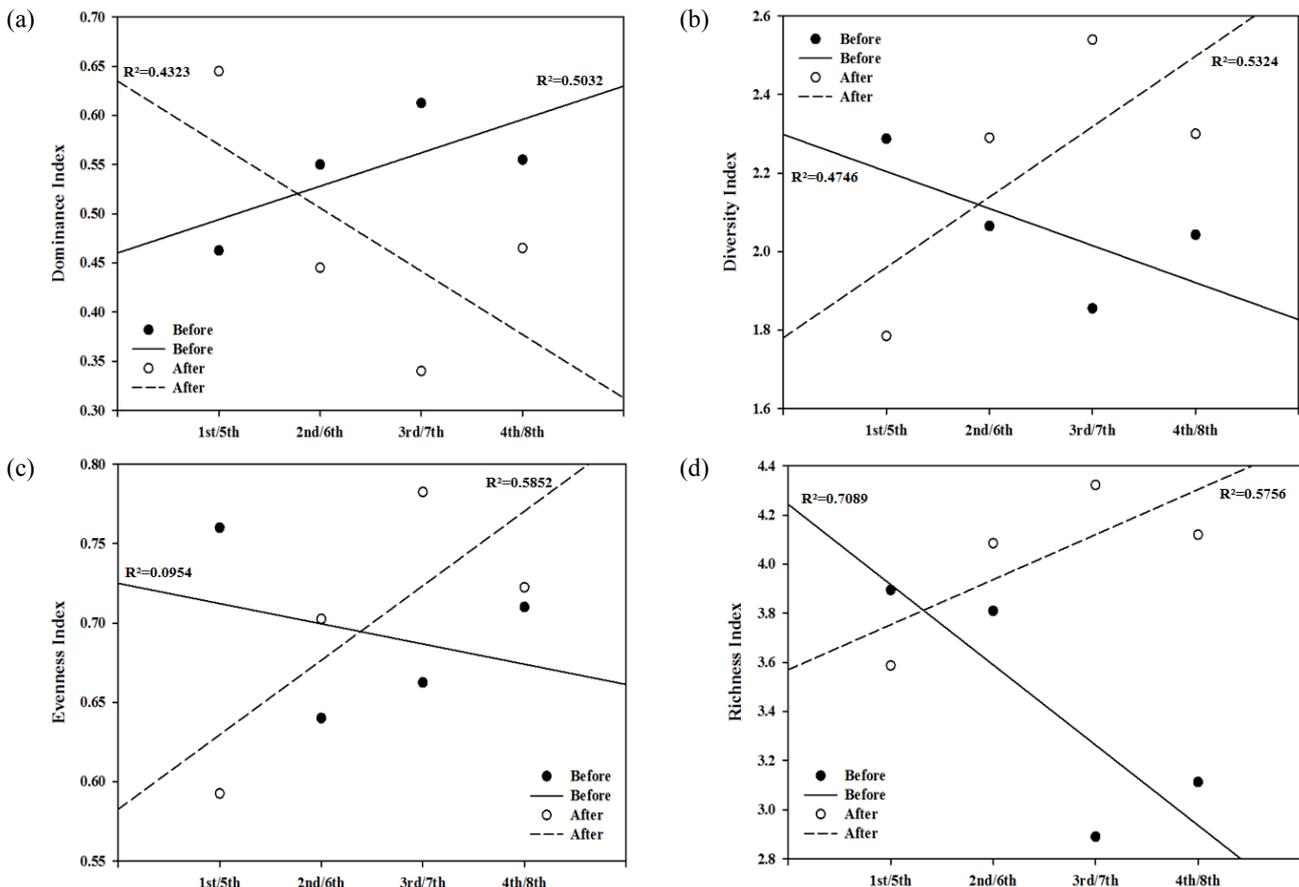


Figure 4. Community indices according to the study season at the study sites in Boryeong dam region. (a): Dominance index (b): Diversity index (c): Evenness index (d): Richness index

구류가 증가한 것으로 판단된다. St. 4는 도수 전·후 모두 꼬마줄날도래가 우점하였으며, 도수 방류지점과 거리가 이격되어 상대적으로 도수의 영향이 적었기 때문에 우점종의 변화가 없는 것으로 판단된다. 꼬마줄날도래는 유속이 있는 하천에서 유기물을 걸러먹는무리(Filtering-Collectors)로 알려져 있으며(Rabeni *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2016; Han *et al.*, 2017), 깔따구류는 오염 및 물리적인 교란에 내성이 강하고 굴파는무리(Burrowers)로 알려져 있는데, 이러한 특성으로 인하여 도수 여부와 관계없이 수환경 내에서 높은 밀도를 유지하는 것으로 판단된다(Rabeni *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2015).

군집분석 결과 우점도지수는 평균 0.55(±0.07)에서 0.47(±0.08)로 도수 이후 감소하였으며, 다양도지수는 평균 2.06(±0.26)에서 2.23(±0.28), 균등도지수는 평균 0.69(±0.05)에서 0.70(±0.04), 풍부도지수는 평균 3.43(±0.72)에서 4.03(±0.91)으로 도수 이후 증가하였으나(Figure 4), 회귀분석 결과 도수 전·후의 유의한 차이를 나타내지는 않았다. 우점도지수는 특정종이 군집에서 차지하는 비율을 나타내며, 생물군집의 구조와 기능을 판단하는 척도로 알려져 있으며(Lee *et al.*, 2009), 모래와 같은 가는 입자로 구성된 단순한 하상구조로 인한 미소서식처의 감소는 저서성 대형무척추동물의 종다양성을 감소시키는 원인으로 작용한다(Allan, 1995; Shao *et al.*, 2006). 본 연구에서는 도수 전·후 군집구조에 있어 유의한 차이를 나타내지는 않았으나 회귀분석에서 우점도지수는 감소하고, 다양도지수, 균등도지수, 풍부도지수는 상대적으로 증가하는 경향을 나타내어 도수에 의한 영향으로 새로운 종들이 정착함에 따라 종조성의 변화 및 군집구조의 안정성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 기능군 분석

섭식기능군(FFGs)과 서식기능군(HOGs)의 구성은 먹이 자원의 특성과 서식처의 환경 특성을 반영하는 것으로 알려져 있다(Cummins, 1973; Ward, 1992; Williams and Feltnate, 1992; Kil *et al.*, 2010). 본 연구에서는 도수 전·후에 출현한 수서곤충을 대상으로 분석하였다. 섭식기능군 분석 결과 Scrapers는 20종에서 22종, Filtering-Collectors는 9종에서 10종으로 증가하고, Shredders는 5종에서 4종, Gathering-Collectors는 29종에서 26종으로 감소하였으며, Predators는 17종으로 유지하였다(Figure 5). 미세입상유기물질(Fine Particulate Organic Matter, FPOM: 0.5 μ m~0.1mm)을 증가시키는 요인으로는 점오염원과 비점오염원이 있으며(Charles and William, 1992; Lee *et al.*, 1994; Jung *et al.*, 1997; Han *et al.*, 2017), 본 연구에서는 도수로 인한 유기물질의 유입으로 미세입상유기물질 및 유속이 증가하여 동양줄날도래(*Hydropsyche orientalis*) 등의 Filtering-Collectors가 증가한 것으로 판단된다. Gathering-Collectors의 종수는 감소하였으나 도수 전에 서식하던 정수환경을 선호하는 연못하루살이(*Cloeon dipterum*), 알락하루살이(*Ephemerella dentata*) 등 8종이 도수 후에 사라지고, 우수환경을 선호하는 콩알하루살이(*Acentrella sibirica*), 갈고리하루살이(*Proclonen pennulatum*) 등 5종이 새로 출현하여 도수 이후 종조성의 변화가 가장 높은 것으로 나타났다. 우리나라 하천의 경우 대부분 연중 햇빛에 노출되어 있거나 1차생산력이 높아 Scrapers의 비율은 비교적 일정하게 나타나는 것으로 알려져 있으며(Shin *et al.*, 2006), 본 연구에서 역시 도수 이후 Scrapers는 2종이 증가하였으나 큰 변동은 나타나지 않은

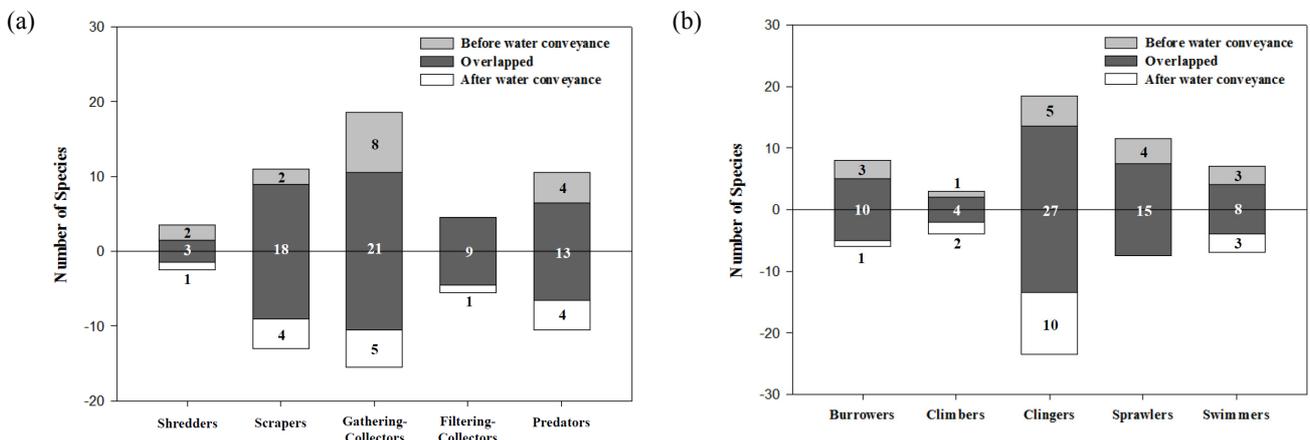


Figure 5. Species number of FFGs(Functional feeding groups) and HOGs(Habitat orientation groups) before and after water conveyance in Boryeong dam region. (a): FFGs species composition of before and after water conveyance in Boryeong dam region. (b): HOGs species composition of before and after water conveyance in Boryeong dam region.

것으로 분석되었다.

서식기능군 분석 결과 Climbers는 5종에서 6종, Clingers는 32종에서 37종으로 증가하고, Burrowers는 13종에서 11종, Sprawlers는 19종에서 15종으로 감소하였으며, Swimmers는 11종을 유지하였다(Figure 5). 미소서식처의 다양성이 상대적으로 높은 유수역의 경우 Climbers나 Clingers 등의 기능군이 다양하게 분포하고(Ward, 1992; Williams and Feltmate, 1992), 유속의 증가에 따라 Clingers는 증가하고, Burrowers와 Sprawlers는 감소하는 것으로 알려져 있다(Yoon *et al.*, 1992; Son *et al.*, 2012; You *et al.*, 2016). 본 연구에서도 도수에 따른 유속의 증가로 정수환경을 선호하는 나비날도래류(*Ceraclea* sp.) 등 5종이 도수 이후 사라지고, 동양줄날도래, 입술날도래 KUa(*Wormaldia* KUa) 등 10종이 새로 출현하여 종조성의 변화가 가장 높은 것으로

나타났으며, 이는 빠른 유속에도 돌 등의 기질에 붙어 씻김 현상에 저항하도록 발달된 Clingers에서 종수가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

5. 군집안정성 분석

조사지점별 도수 전·후의 군집안정성을 분석한 결과는 다음과 같다(Figure 6). St. 1과 St. 2는 도수 전 저항력과 회복력이 높은 I 특성군에 대부분의 종이 분포하고 있었으나 도수 이후 저항력과 회복력이 낮은 III 특성군에서 종수가 증가한 것으로 분석되었으며, 이는 물삿갓벌레 KUa(*Psephenoides* KUa), 입술날도래 KUa, 물날도래 KUa(*Rhyacophila* KUa), 떡파리류 등의 새로운 종이 유입된 결과이다. III 특성군은 상대적으로 저항력과 회복력이 낮은 집단으로 인위적인 교란

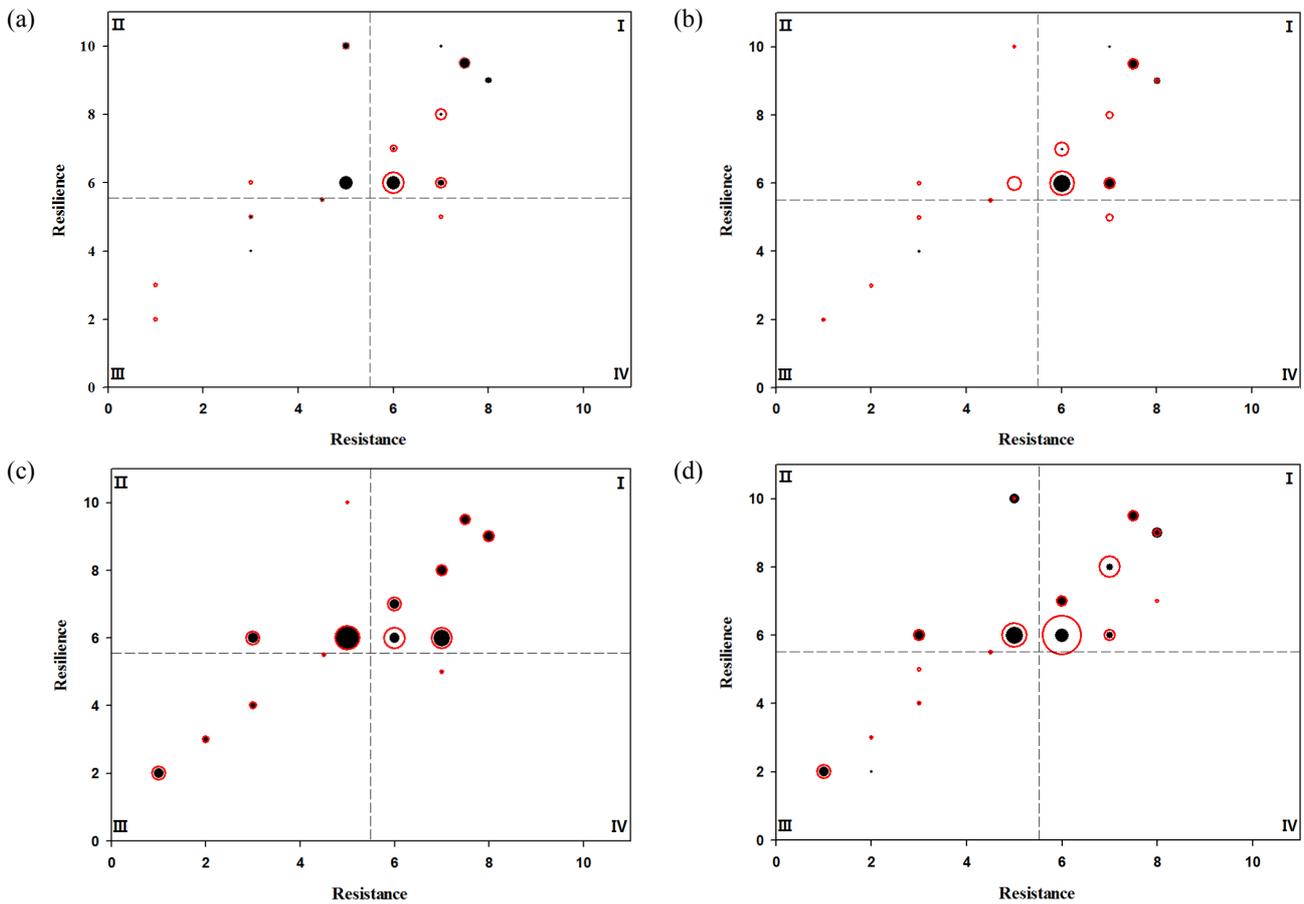


Figure 6. Analysis of community stability with resistance and resilience before and after water conveyance in Boryeong dam region. The size of the circle indicates the number of species. The I characteristic group has a high resistance and resilience, the II characteristic group has a low resistance and a high resilience, the III characteristic group has a low resistance and resilience, the IV characteristic group has a high resistance and a low resilience. (a): Analysis of community stability of St. 1 (b): Analysis of community stability of St. 2 (c): Analysis of community stability of St. 3 (d): Analysis of community stability of St. 4

및 환경변화에 민감하게 반응하여 감소하는 것이 일반적이 나(Ro and Chun, 2004) 본 연구결과 도수시 유속 및 유량의 증가에 따른 물리적인 환경변화에도 불구하고 Ⅲ특성군의 민감종들이 증가하였으며, 도수 전에 비하여 양호한 군집안정성을 유지하는 것으로 분석되었다. 이는 유속의 영향으로 물리·화학적 변화가 일어남에 따라 주변의 기회종들이 유입되어 일시적으로 정착한 결과로 판단된다. 이러한 민감종의 증가는 도수에 따른 저서성 대형무척추동물의 분포에 있어 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있으나 이는 도수시 발생하는 일시적인 영향으로 생각되며, 추후 지속적인 모니터링에 의한 정밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다. St. 3은 도수 전과 후 모두 유사한 분포 특성을 나타내고 있었다. 대규모 하천 공사로 인하여 도수 후 I 특성군의 종들이 증가할 것으로 예상되었으나 수환경의 안정화에 따라 빠르게 기존의 민감종들이 정착된 것으로 생각된다. St. 4는 물리적인 환경변화가 가장 적은 지점으로 도수 후 I 특성군과 Ⅲ특성군에서 모두 증가하였으며, 다른 지점에 비해 상대적으로 변화가 적은 것으로 나타났다.

6. 유사도 분석

조사지점별 도수 전과 후의 군집변화에 대한 다차원적도법(MDS) 분석 결과 도수 전에는 방류지점과 가까운 St. 1과 St. 2의 유사도가 높은 것으로 분석되었으나, 도수 후에는 조사지점별 유사도의 변화가 있는 것으로 분석되었다(Figure 7). 도수 후 조사지점별 분석 결과 St. 1에서 도수 전에 비하여 상대적으로 유사도의 변화가 크게 나타났으며, St. 4의 종조성 변화는 적은 것으로 분석되었다. 도수 후 유사도의 변화는 방류지점과의 거리에 따라 결정되었으며, 거리가 가까울수록 유사도의 변화가 높은 것으로 분석되었

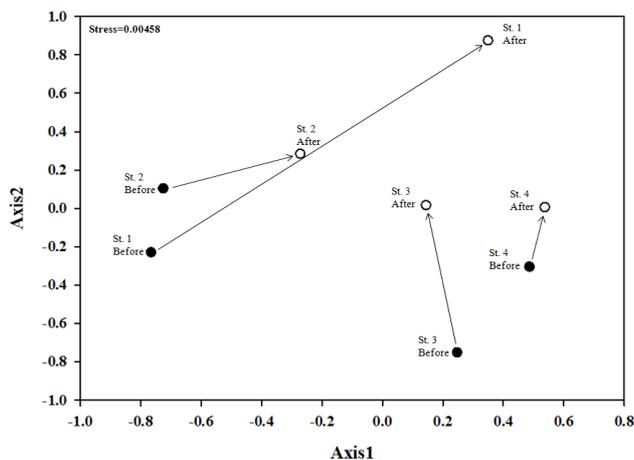


Figure 7. Multidimensional scaling(MDS) analysis on benthic macroinvertebrates for study sites.

다. 즉, 도수는 방류지점 인근의 수생태계 내 저서성 대형무척추동물 군집을 교란시킬 가능성이 높은 것으로 판단되며, 향후 장기적인 모니터링을 통해 군집의 변화를 추적할 필요가 있다. 한편, St. 3과 St. 4는 Axis2에 따라 유사도의 변화가 큰 것으로 나타났는데, 이는 도수에 의한 영향보다는 하천 공사로 인한 하상 및 수환경의 변화에 따른 결과로 판단된다.

REFERENCES

- Allan, J.D.(1995) Stream Ecology, Structure and Function of Running Waters. Chapman & Hall, London, 388pp.
- Bae, Y.J., D.H. Won, D.H. Howang, Y.H. Jin and J.M. Hwang (2003) Community composition and functional feeding groups of aquatic insects according to stream order from the Gapyeong creek in Gyeonggi-do, Korea. Korean Journal of Limnology 36(1): 21-28. (in Korean with English abstract)
- Barnes, J.R. and G.W. Minshall(1983) Stream ecology, Application and Testing of general ecological theory. Plenum Press, London, 399pp. (in Korean with English abstract)
- Charles, M.C. and M.L. William(1992) Water quality and agriculture Mississippi experiences. Journal of Soil and Water Conservation 47: 220-223.
- Choi, A.R., S.J. Park, J.Y. Kim, M.Y. Song and D.S. 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, Y.J.(1995) Cause and prediction of drought. Korean Journal of Water Resources Association 28(1): 16-20. (in Korean with English abstract)
- Choi, Y.J.(2017) Analysis of Boryeong Dam diversion tunnel operation effects. Master's thesis, Univ. of Ajou. (in Korean)
- Chun, D.J. and T.H. Ro(2004) Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis. Korean Journal of Limnology 37(2): 137-148. (in Korean with English abstract)
- Cummins, K.W.(1962) An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic water. The American Midland Naturalist 67(2): 477-504.
- Cummins, K.W.(1973) Trophic relation of aquatic insects. Annual Review of Entomology 18: 183-206.
- Geum river water system management commission(2017) Monitoring of water quality and aquatic ecosystem according to construction of waterway from Geum river to Boryeong reservoir.
- Graeber, D., T.M. Jensen, J. Rasmussen, T. Riis, P. Wiberg-Larsen and A. Baattrup-pedersen(2017) Multiple stress response of lowland stream benthic macroinvertebrates is dependent on

- habitat type. *Science of the Total Environment* 59: 1517-1523.
- Han, J.S., J.H. Wang, J.E. Kim, J.H. Jung, Y.J. Bae, J.K. Choi and H.G. Lee(2017) The effects of thermal discharge on benthic macroinvertebrate communities structure in Buso Stream. *Korean Journal of Environmental Biology* 35(1): 89-94. (in Korean with English abstract)
- Hynes, H.B.N.(1960) *The biology of polluted waters*. Univ. of Liverpool. England.
- Im, S.H.(2015) *The Analysis of benthic macroinvertebrates community structure in the Saemangeum water*. Master's thesis, Univ. of Hanseo. (in Korean)
- Jung, S.W., Y.C. Cho and H.G. Lee(2017) Community Characteristics and Biological Quality Assessment on Benthic Macroinvertebrates of Bongseonsa Stream in Gwangneung Forest, South Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* 31(6): 508-519. (in Korean with English abstract)
- Jung, Y.S., J.E. Yang, Y.K. Joo, J.Y. Lee, Y.S. Park, M.H. Choi and S.C. Choi(1997) Water quality of streams and agricultural wells related to different agricultural practices in small catchments of the Han river basin. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 16(2): 199-205. (in Korean with English abstract)
- 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)
- Kim, J.H.(2014) Hydraulic habitat analysis of benthic macroinvertebrates at Gapyeong Stream. *Korean Journal of Water Resources Association* 47(1): 63-70. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y.(2013) Development of Korean thermal index using benthic macroinvertebrates. Master's thesis, Univ. of Kyonggi. (in Korean)
- Kim, P.J., J.Y. Kim, S.H. Son, D.H. Won and D.S. Kong(2016) Comparative analysis of benthic macroinvertebrate communities before and after the restoration project in the Kyoungan Stream. *Korean Journal of society on Water Environment* 32(1): 15-22. (in Korean with English abstract)
- Ko, I.H., J.K. Kim and S.Y. Park(2009) Evaluation of eco-hydrological changes in the Geum River considering dam operations: 1. Flow regime change analysis. *Korean Journal Water Resources Association* 42(1): 1-8. (in Korean with English abstract)
- Kwak, I.S., D.S. Lee, C. Hong and Y.S. Park(2018) Distribution patterns of benthic macroinvertebrates in streams of Korea. *Korean Journal of Limnology* 51(1): 60-70. (in Korean with English abstract)
- Kwak, I.S., M.Y. Song and T.S. Chon(2004) The effects of natural disturbances on benthic macroinvertebrate. *Korean Journal of Limnology* 37(1): 87-95. (in Korean with English abstract)
- Kwon, O.K.(1990) *Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea. Mollusca(I)*. Ministry of Education Press. Seoul. (in Korean)
- Lee, B.D., I.H. Sung, S.Y. Hamm, B.W. Cho, J.S. Kim and J.H. Park(2000) Analysis of groundwater level declines associated with fracture systems in the vicinity of tunnel in chungsong, Korea. *Korean Journal of Geological Society* 10(2): 143-162. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.S., B.Y. Kim and K.D. Woo(1994) Chemical composition of precipitation in Suwon area and its effect on crop development. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 13(1): 31-38. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.J., J.Y. Park, J.K. Seo, H.J. Lee, E.W. Seo and J.E. Lee(2009) Community structure and cluster analysis of the benthic macroinvertebrates in inflow and outflow area of ten reservoirs of the Nakdong river system. *Korean Journal of Life Science* 19(12): 1758-1763. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.C.(2016) Overcome drought in Chungcheongnam-do through Boryeong dam construction project. *Korean Journal of Hazard Mitigation* 16(2): 33-37. (in Korean with English abstract)
- Margalef, R.(1958) Information theory in ecology. *Generation Systems* 3: 36-71.
- McCafferty, W.P.(1981) *Aquatic entomology: the fisherman's and ecologist's illustrated guide to insects and their relatives*. Science Book International. Boston. 448pp.
- McNaughton, S.J.(1967) Relationship among functional properties of California grassland. *Nature* 216: 168-169.
- Merritt, R.W., K.W. Cummins and M.B. Berg(2008) *An introduction to the aquatic insects of north america*. 4th Ed. Kendall/Hunt Publish. Co. Dubuque, Iowa, 1158pp.
- Miranda, R., J. Oscoz, P.M. Leunda, C. Garcia-Fresca and M.C. Escala(2005) Effects of weir construction on fish population structure in the River Erro(North of Spain). *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 41(1): 7-13.
- Norris, R.H. and M.C. Thoms(1999) What is river health? *Fresh water Biology* 41: 197-209.
- Park, B.J., K.H. Kang and K.S. Jung(2008) Hydrologic regime alteration analysis of the multi-purpose dam by indicators of hydrologic alterations. *Korean Journal Water Resources Association* 41(7): 711-723. (in Korean with English abstract)
- Park, J.H., S.Y. Hamm, I.H. Sung, B.D. Lee and J.Y. Cheong(2001) Relation between groundwater inflow into the waterway tunnel and hydrogeological characteristics in Hyeonseong-myeon, Cheongsong-gun, Korea. *Korean Journal of engineering geology* 11(2): 141-152. (in Korean with English abstract)
- Pielou, E.C.(1975) *Ecological diversity*-john wiley & sons. New York. 165pp.

- Piggott, J.J., C.R. Townsend and C.D. Matthaiei(2015) Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics. *Global Change Biology* 21(5): 1887-1906.
- Power, M.E., R.J. Stout, C.E. Cushing, P.P. Harper, F.R. Hauer, W.J. Matthews, P.B. Moyle, B. Statzner, I.R. Wais and D.E. Badgen(1988) Biotic and abiotic controls in river and stream communities. *North American Journal of Benthol.* 7: 456-479.
- Rabeni, C.F., K.E. Doisy and L.D. Zweig(2005) Stream invertebrate community functional responses to deposited sediment. *Aquatic Sciences* 67: 395-402.
- Reice, S.R. and M. Wohleberg(1993) Monitoring freshwater benthic invertebrate communities in New Zealand Rivers. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 24: 387-409.
- Resh, V.H., A.V. Brown, A.P. Covich, M.E. Gurtz, H.W. Li, G.W. Minshall, S.R. Reice, A.L. Sheldon, J.B. Wallace and R.C. Wissmar(1988) The role of disturbance in stream ecology. *North American Journal of Benthol.* 7: 433-455.
- Ro, T.H.(2002) Resilience and Resistance of Biological Community: Application for Stream Ecosystem Health Assessment. *Korean Journal of Environmental Policy* 1(1): 91-112. (in Korean with English abstract)
- Schlosser, I.J. and K.K. Ebel(1989) Effects of flow regime and cyprinid predation on a headwater stream. *Ecological Monographs* 59: 41-57.
- Shannon, C.E. and W. Weaver(1949) The mathematical theory of communication. University of Illinois Press. Urbana. 233pp.
- Shao, M., Z. Xie, L. Ye and Q. Cai(2006) Changes in the Benthic Macroinvertebrates in Xiangxi Following Dam Closure to form the Three Gorges Reservoir. *Journal of Freshwater of Biology* 21(4): 717-719.
- Shin, H.S., S.C. Park, J.K. Kim, S.J. Kim, J.H. Park, J.S. Choi and J.K. Choi(2006) Community analysis based on functional feeding group of aquatic insect in Wonju stream. *Korean Journal Environment Ecology* 20: 259-266. (in Korean with English abstract)
- Son, S.H., M.C. Kim, J.H. Park, D.H. Won, H.Y. Kong and D.S. Kong(2012) Analysis on habitat orientation group of benthic macroinvertebrates in main stream of Han River. *Korean Journal of Water Quality* 272-273pp. (in Korean with English abstract)
- Song, G.R.(1995) Systematics of the Hirudinea (Annelida) in Korea. Master's thesis, Univ. of Korea. (in Korean)
- Thomes, M.C. and F. Sheldon(1997) River channel complexity and ecosystem processes: the Barwon Darling River, Australia. *Frontiers in Ecology* 193-206.
- Ward, J.V.(1992) Aquatic insects ecology. 1. Biology and Habitat. John Wily & Sons, Inc., New York, 438pp
- Wiederholm, I.(1983) Chironomidae of the Holarctic region, keys and diagnosis: Part I. larvae. *Entomologica Scandinavica Supplement* 19: 1-457.
- Williams, D.D. and B.W. Feltmate(1992) Aquatic insects. CBA International, Oxon, UK.
- Won, D.H., S.J. Kown and Y.C. Jun(2005) Aquatic insects of Korea. Korea Ecosystem Service, Seoul, 415pp. (in Korean)
- Yoon, I.B.(1988) Illustrated encyclopedia of fauna and flora of Korea Vol. 30 Aquatic insects, Ministry of Education Republic of Korea, 840pp. (in Korean)
- Yoon, I.B.(1995) Aquatic insects of Korea. Jeonghaengsa, Seoul, 262pp. (in Korean)
- Yoon, I.B., D.S. Kong and J.K. Ryu(1992) Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates(2)- Effects of environmental factors to community. *Korean Journal of Environment Biology* 10(1): 40-55. (in Korean with English abstract)
- Yoon, S.E., G.H. Lim, C.S. Rim and J.H. Kim(2011) Analysis of stream characteristic at chute berm. *Korean Journal of Hazard Mitigation* 10: 227-227. (in Korean with English abstract)
- You, H., M.J. Lee, E.W. Seo and J.E. Lee(2016) Analysis of benthic macroinvertebrate community structure and stability in major inflow streams of lake Andong and lake Imha. *Korean Journal of Environment Biology* 34(4): 320-328. (in Korean with English abstract)