

소형 보와 대형 댐에 의해 형성된 저수역이 저서성 대형무척추동물 군집에 미치는 영향

길혜경 · 김동건¹ · 정상우¹ · 진영현² · 황정미¹ · 배경석 · 배연재^{1,*}

(서울시 보건환경연구원, ¹고려대학교 생명과학대학, ²고려대학교 한국곤충연구소)

Impacts of Impoundments by Low-head and Large Dams on Benthic Macroinvertebrate Communities in Korean Streams and Rivers. *Kil, Hye Kyung, Dong Gun Kim¹, Sang Woo Jung¹, Young Hun Jin², Jeong Mi Hwang¹, Kyung Seok Bae and Yeon Jae Bae^{1,*}* (Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-734, Korea; ¹College of Life Sciences and Biotechnology, Korea University, Seoul 136-701, Korea; ²Korean Entomological Institute, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

This study was conducted to examine the effects of dams on benthic macroinvertebrate communities in Korean streams and rivers. Four low-head dams and three large dams were studied throughout South Korea. Sampling was taken at immediately upper (impoundment), lower (riffle area), and control (riffle area) sites from the dams during 2004-2007. The upper sites, of which substrate heterogeneity and velocity were relatively low, showed a lower degree of species richness, density, and diversity indices, which is very different from the lower and control sites. Heavily polluted streams showed a lesser degree of community differences between the upper and lower sites. In the large dams, the upper and lower sites showed very low values of species diversity indices and very high values of dominance indices compared to the control sites. In the low-head dams, however, the difference of degree of the values was relatively smaller. Compositions of the functional feeding groups and the habitat orientation groups were relatively simpler at the upper sites than at the lower sites and the degree of difference was greater in the large dams. Species richness and community indices of benthic macroinvertebrates were more significantly affected by habitat characteristics than water quality at the upper sites; however, those were more significantly related with water quality at the lower sites. In conclusion, large and low-head dams could simplify stream habitats particularly at the upper sites (impoundment), and they negatively affected on the benthic macroinvertebrate communities inhabited the habitats. The impact was larger in the large dams than in the low-head dams.

Key words : benthic macroinvertebrates, low-head dams, large dams, functional groups, taxa composition

서 론

하천에는 수위유지와 농업용수 공급을 위한 소규모의 보에서부터 홍수조절, 발전, 용수공급 등을 위한 대규모

의 다목적 댐에 이르기까지 다양한 규모의 댐이 축조되어 있다. 이러한 댐은 북반구의 온대지역에 집중적으로 분포하고 있으며, 하천생태계를 단편화하고 수로를 인위적으로 변경시키는 가장 큰 요인이 되어왔다(Benke, 1990; Dynesius and Nilsson, 1994). 우리나라에는 현재 15개의

* Corresponding author: Tel: 02) 3290-3408, Fax: 02) 3290-3623, E-mail: yjbae@korea.ac.kr

다목적 댐을 비롯하여 약 18,000여 개의 크고 작은 댐과 보가 축조되어 있다.

댐은 인류에게 다양한 이익을 제공하는 한편 하천생태계를 교란하는 가장 큰 인위적 요인이라 할 수 있다 (Ward and Stanford, 1979). 댐은 물, 퇴적물, 영양염류 및 생물의 종적 교환을 방해하여 하천의 연결성을 단절시키고, 저수역 (impoundment)의 증가로 인한 물의 흐름과 하상 구조의 변화를 가져오며, 하천내의 생물 종과 수변 식생의 변화를 가져오는 등 하천생태계의 구조와 기능을 근본적으로 변화시킨다 (Baxter, 1977; Ward and Stanford, 1979; Petts, 1984; Doeg and Koehn, 1994; Poff and Hart, 2002; Stanley *et al.*, 2002). 저수량이 적은 하천의 보는 대형 댐에서와 같이 하천의 환경을 근본적으로 변화시키지는 않지만 유속과 퇴적물의 조성에 영향을 미친다 (Maggilligan and Nislow, 2001; Stanley *et al.*, 2002). 댐에 의한 유속, 수온, 바닥물질 등의 서식 환경 변화는 하천생태계의 생물상을 근본적으로 변화시키며, 저서성 대형무척추동물 군집에 있어서도 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Doeg and Koehn, 1994; Tiemann *et al.*, 2004). 그러나 댐의 영향 연구는 대부분 수리수문학적 연구에 치우쳐 있을 뿐 그곳에 서식하는 주요 생물인 저서성 대형무척

추동물에 대한 연구는 많지 않다. 국내에서는 오와전 (1991)이 배내천의 보 상류와 하류에 출현하는 저서성 대형무척추동물의 군집과 환경을 비교한 연구가 있다.

본 연구에서는 국내의 주요 하천과 강에 축조된 대표적인 보와 댐을 선정하여 그 상류와 하류 지점에서 저서성 대형무척추동물상을 조사하여 보와 댐이 이들 군집구조에 미치는 영향을 알고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구는 경기도 파주시 문산천의 검전보(높이 2 m, 길이 60 m), 고양시 곡릉천의 곡릉2보(높이 1.5 m, 길이 76 m), 안양시 안양천의 안양대교보(높이 1.3 m, 길이 40 m)와 연현보(높이 0.5 m, 길이 50 m) 등 농업용수 공급을 위해 축조된 4개의 보와 낙동강 수계인 경상남도 합천군 황강의 합천댐(높이 96 m, 길이 472 m), 경상북도 안동시 반변천의 임하댐(높이 73 m, 길이 515 m), 대전광역시 대덕구 금강의 대청댐(높이 72 m, 길이 495 m) 등 용수공급과 발전, 홍수조절 등을 위해 축조된 3개의 다목적 댐을 대상으로 하였다 (Fig. 1).

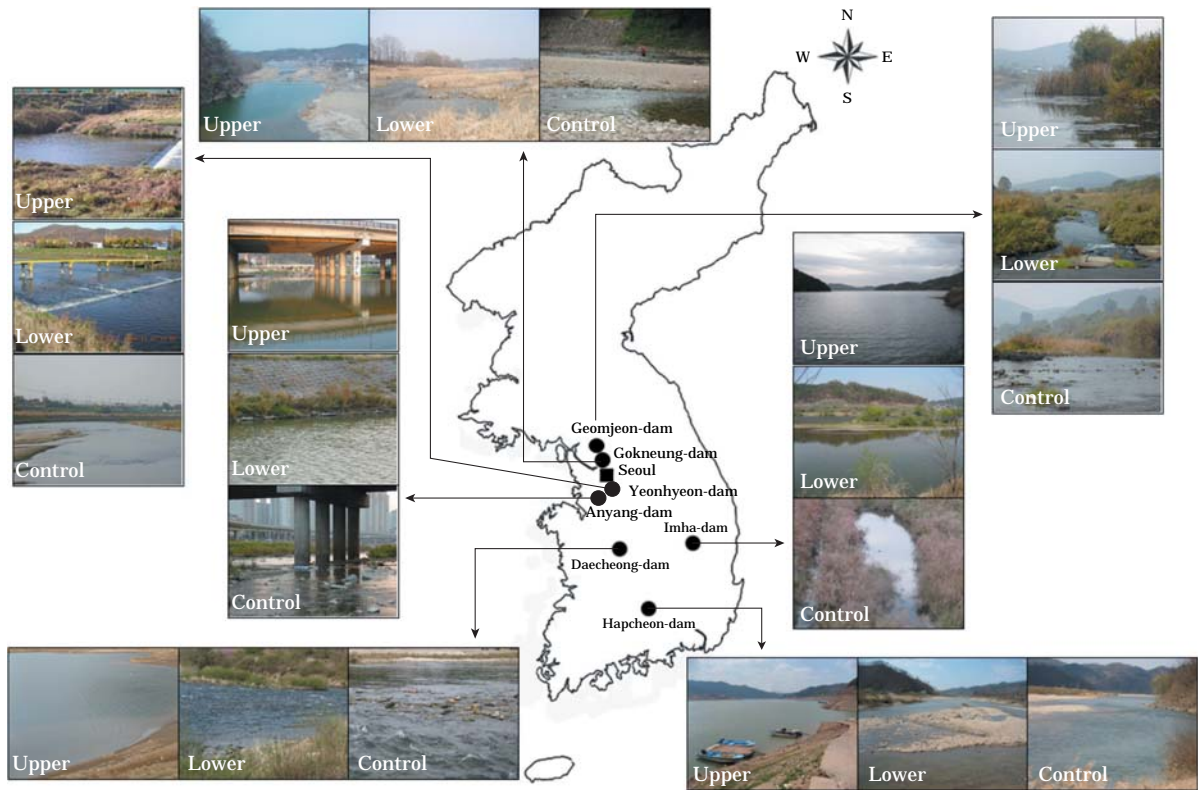


Fig. 1. Study sites.

Table 1. Habitat environment at the study sites.

Dams	Sites	Air temp. (°C)	Water temp. (°C)	Substrates (%)				Velocity (m · sec ⁻¹)
				Silt and sand	Gravel	Pebble	Cobble	
Geomjeon	Upper	22.1	14.0	71	15	12	2	0.10
	Lower	19.0	14.7	5	35	38	22	1.17
	Control	21.0	18.0	11	43	21	25	0.54
Gokneung	Upper	15.0	9.3	41	6	13	40	0.07
	Lower	15.0	8.5	0	3	12	85	0.83
	Control	14.5	14.0	0	1	9	90	0.62
Anyang	Upper	14.6	19.8	77	23	0	0	0.19
	Lower	14.3	19.0	42	29	18	11	0.25
	Control	17.0	20.0	45	30	15	10	0.70
Yeonhyeon	Upper	15.0	20.2	92	5	3	0	0.13
	Lower	15.0	19.5	17	50	30	3	0.98
	Control	20.0	21.0	20	40	40	0	0.85
Hapcheon	Upper	11.5	10.0	100	0	0	0	0.00
	Lower	11.0	9.0	0	0	70	30	0.77
	Control	12.5	10.6	0	45	35	20	0.83
Imha	Upper	14.0	9.1	40	10	50	0	0.00
	Lower	13.0	14.8	0	10	70	20	0.14
	Control	10.0	12.4	0	5	85	10	1.17
Daechong	Upper	15.0	17.0	100	0	0	0	0.00
	Lower	15.0	16.5	10	75	15	0	0.22
	Control	15.0	14.0	5	45	30	20	0.75

조사지점은 보와 댐에 의하여 형성된 저수역에 해당하는 보와 댐의 직상류 지점의 정수역 (pool) (상류)과 직하류 지점의 유수역 (riffle) (하류), 그리고 보와 댐의 영향을 받지 않는 저수역 상류 지점의 유수역 (riffle) (대조지점)을 선정하여 저서성 대형무척추동물과 서식처 환경을 조사하였다 (Fig. 1). 조사시기는 2004년부터 2007년 사이에 가급적 봄철에 1회 조사한 값을 사용하였다 (검전보, 안양대교보, 연현보는 3회 조사한 정량자료를 평균한 값을 사용).

저서성 대형무척추동물의 정량채집은 Surber sampler (50 × 50 cm, 망목 0.2 mm)를 이용하여 각 지점 (상류, 하류 및 대조지점)에서 2회씩 채집하였다. 합천댐, 임하댐, 대청댐의 정수역인 상류지점은 Dredge sampler (30 × 50 cm, 망목 0.2 mm)를 이용하여 Surber sampler의 면적에 맞춰 채집하였다. 일반적인 야외조사 및 서식처의 환경조사 방법은 기존의 방법 (Ward, 1992; Williams and Feltmate, 1992; Allan, 1995; Merritt and Cummins, 2008)을 사용하였다. 유속은 Craig (1987)가 고안한 방법으로 측정하였고, 바닥물질은 채집지점에서 silt/sand, gravel, pebble, cobble의 4단계로 구분하여 육안으로 상대적인 구성비율을 측정하였다. 수질오염물질 농도는 각 하천의 조사지점과 가

장 가까운 환경부 수질측정망 지점의 자료를 이용하였다.

저서성 대형무척추동물의 동정과 분류는 기존의 분류 문헌을 참고하였다 (McCafferty, 1981; Wiederholm, 1983; Pennak, 1989; 윤, 1995; Throp and Covich, 2001; Kawai and Tanida, 2005; Merritt and Cummins, 2008). 군집구조를 비교하기 위하여 정량 채집된 자료를 이용하여 우점종과 아우점종을 구하였고, McNaughton의 우점도지수 (DI)와 Shannon의 종다양도지수 (H')를 구하였으며, 기능군의 분석은 기존의 문헌을 이용하여 섭식기능군 (functional feeding group)과 서식기능군 (habitat orientation group)을 분석하였다 (노와 전, 2004; Merritt and Cummins, 2008). 서식처의 생물학적 환경평가는 수환경평가지수 (ESB)를 적용하였다 (환경부, 2000). 서식처의 이화학적 환경요인과 저서성 대형무척추동물 군집지수 간의 상관관계는 SAS를 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 환경요인

바닥물질의 조성에 있어서 상류지점은 전반적으로 silt

와 sand가 높은 비율을 차지하고 있었고, 하류지점은 silt/sand, gravel, pebble, cobble 등으로 다양하게 구성되어 있었다. 특히 합천댐, 임하댐, 대청댐 하류지점은 silt와 sand 등 미세입자의 비율이 극히 낮았고, pebble과 cobble의 비율은 상대적으로 높았다. 수두가 높은 댐의 상류는 수두가 낮은 보의 상류에 비해 바닥물질 평균입자의 크기가 작았고, 하류는 평균입자의 크기가 컸으며, 상류와 하류 간의 바닥물질 구성에 큰 차이를 나타냈다 (Table 1). 이는 하천이 깊고 유속이 감소하면 퇴적물의 수송능력이 감소하므로 (Kondorf, 1997) 정수역인 상류지점에는 미세입자가 퇴적되는 반면, 댐의 저수역에서 높은 유속으로 배수될 때 댐의 하류에는 침식이 일어나기 때문인 것으로 추정된다. 또한 저수용량이 적은 보의 상류는 하천의 특성을 지니고 있지만 대형 댐의 경우는 저수역의 바닥이 임야의 토지가 물에 잠겨 형성되었고, 체류시간이 길고 유속이 낮으므로 보의 상류에 비해 바닥물질의 입자가 더욱 미세하고 단순하게 나타났기 때문으로 생각된다.

유속은 상류지점과 하류지점의 차이가 매우 컸으며, 대조지점이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 대형 댐의 상류지점은 보의 상류지점에 비해 유속이 훨씬 낮아서 거의 정체상태였고, 대청댐과 임하댐은 하류지점의 유속도 매우 낮았다. 댐의 상류지점은 잦은 수위변동으로 연안대의 교란이 심하였고, 하류지점은 riffle, run, pool이 비교적 다양하게 형성되어 있었다.

2. 저서성 대형무척추동물

1) 종조성

저서성 대형무척추동물의 출현종 수는 대부분 상류지점이 하류지점보다 빈약한 것으로 나타났다 (Fig. 2). 보의 경우 문산천 검전보와 곡릉천 곡릉2보에서는 하류지점이 상류지점보다 2배 이상 많았고, 대조지점과 비슷하였다. 상류지점의 종조성은 정수성의 비곤충류(주로 실지렁이류)와 잠자리목 및 서식범위가 넓은 파리목의 비율이 높았고, 하류지점은 상대적으로 하루살이목과 날도래목의 비율이 높았다 (Fig. 3). 반면, 유기물 오염도가 높은 안양천 안양대교보와 연현보에서는 상, 하류 모두 출현종 수가 빈약하였다. 종조성은 오염에 내성이 강한 실지렁이류 (Tubificidae sp.), 거머리 (*Erpobdella lineata*), 붉은색 갈따구류 (*Chironomidae* sp.) 등이 우점하였고, 그 외에 꼬마하루살이 (*Baetis fuscatus*), 납작하루살이 (*Ecdyonurus levii*) 등이 일부 서식하고 있었으며, 상류와 하류지점 간의 차이가 적었다 (Table 2).

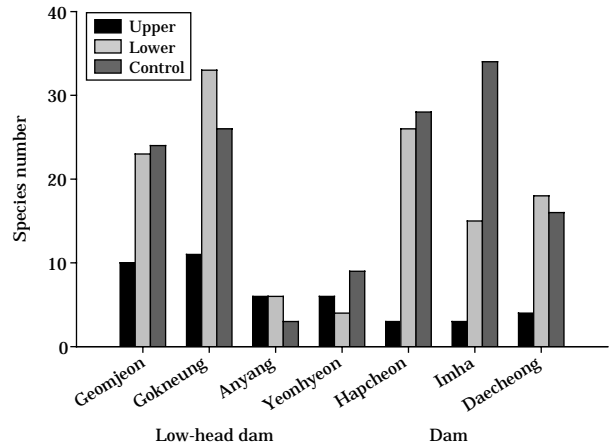


Fig. 2. Species number of benthic macroinvertebrates at the sampling sites.

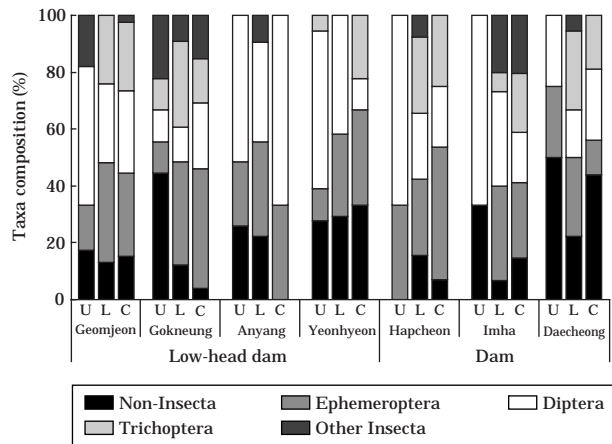


Fig. 3. Relative composition of major benthic macroinvertebrate taxa at the sampling sites.

댐의 상류지점은 보의 상류지점에 비해 출현종 수가 더욱 빈약하였고, 상류와 하류 간의 차이를 비교할 때 댐이 보에 비하여 출현종 수의 차이가 더욱 큰 것으로 나타났다 (Fig. 4). 합천댐, 임하댐, 대청댐의 상류지점에서는 갈따구류 (*Chironomidae* spp.)와 일부 정수성 하루살이류 (*Cloeon dipterum*, *Uracantella rufa*) 등 3~4종만이 출현하여 다양한 종 조성을 이루고 있는 하류지점이나 대조지점과는 큰 차이를 보였다. 합천댐, 임하댐의 하류지점은 대조지점에 비해 하루살이목과 날도래목의 종풍부도가 낮았으나, 보의 하류지점은 대조지점과 큰 차이를 보이지 않았다.

저서성 대형무척추동물의 종풍부도는 바닥물질의 구성과 밀접한 연관성이 있으며 (Waters, 1995), 댐에 의한 인

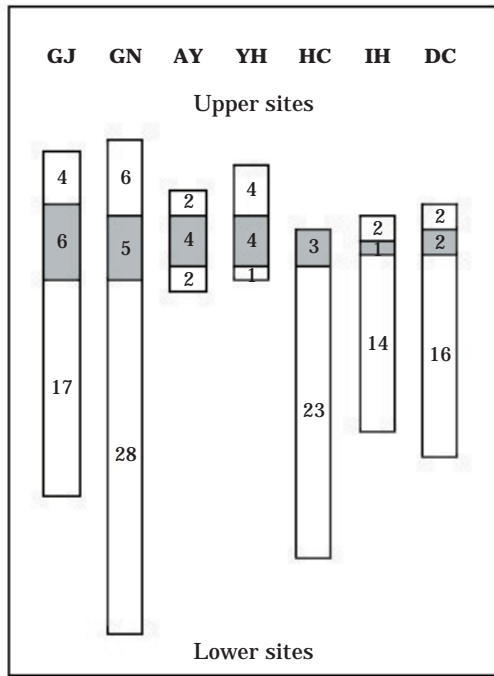


Fig. 4. Species number of benthic macroinvertebrates at the upper and lower sites: ■, common species; □, species occurred only at the upper or lower sites. GJ (Geomjeon), GN (Gokneung), AY (Anyang), YH (Yeonhyeon), HC (Hapcheon), IH (Imha), and DC (Daecheon).

위적이고 불규칙한 배수는 댐 하류지점의 바닥물질 조성과 크기에 영향을 미쳐서 하천 생물상을 빈약하게 만드는 것으로 알려져 있다 (Kondolf, 1997; Camargo and Voelz, 1998). 본 연구에서도 댐의 상류지점은 수심이 깊고 바닥물질의 이질성이 낮아 보의 상류지점에 비해 저서성 대형무척추동물이 훨씬 빈약하게 출현한 것으로 사료된다. 하류지점의 경우에도 소형 보에서 보다 댐에서 상대적으로 낮은 종풍부도를 나타낸 것은 댐에 의한 교란 영향이 상대적으로 크기 때문인 것으로 사료된다. 댐에 의한 지속적인 방류로 하류지점의 실트나 모래와 같은 바닥물질이 소실되어 바닥물질의 이질성이 감소되었고, 이는 결국 저서성 대형무척추동물의 종풍부도에 악영향을 미친 것으로 사료된다 (Allen, 1995). 한편, 규모가 비슷한 보의 경우라 할지라도 수질오염도가 높은 도시하천에서는 보의 상하류 모두 종풍부도가 극히 낮기 때문에 보의 형성에 따른 서식처의 영향을 판단하기는 어렵다.

개체수 밀도 역시 하천에 따라 상류와 하류지점이 다른 것으로 나타났으며, 전반적으로 상류지점은 개체수 밀도가 매우 낮았다. 특히 오염이 심한 안양천의 안양대교

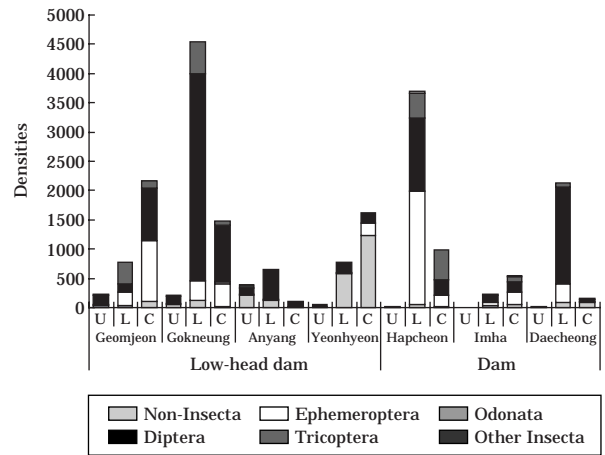


Fig. 5. Relative density composition (inds./0.5 m²) of major benthic macroinvertebrate taxa at the sampling sites. U (Upper), L (Lower), and C (Control).

보와 연현보에서는 상류뿐만 아니라 하류지점에서도 개체수 밀도가 매우 낮았으며, 붉은색 깔따구류와 실지렁이류가 주를 이루고 있었다. 합천댐, 대청댐의 하류지점은 대조지점에 비해 개체수 밀도가 높았으나 깔따구류와 하루살이류가 차지하는 비율이 높았다 (Fig. 5).

저서성 대형무척추동물은 서식처의 특성에 따라 출현하는 종이 다르다 (Allen, 1995; Merritt and Cummins, 2008). 조사한 대부분 댐의 상류와 하류지점에서 깔따구류 (Chironomidae spp.)와 실지렁이류 (Tubificidae sp.)가 공통으로 출현하였고, 일부 보의 경우 동양하루살이 (*E. orientalis*)와 꼬마하루살이, 거머리, 원돌이물달팽이 (*Physa acuta*) 등이 상류와 하류지점에서 공통으로 출현하였다. 6개 조사대상 댐지역의 하류지점에서 공통으로 출현하였던 하천의 대표적인 유수성 수서곤충인 줄날도래과 (Hydropsychidae)는 연현보의 상류에서 꼬마줄날도래 (*Cheumatopsyche brevilineata*)가 1개체 출현한 것을 제외하고는 상류지점에서는 전혀 출현하지 않았다.

2) 군집지수

보와 댐의 상류지점은 전반적으로 깔따구류와 실지렁이류가 우점종과 아우점종으로 나타났으며, 합천댐은 등줄하루살이 (*Uracantella rufa*)가 아우점하였다 (Table 2). 곡릉2보, 안양대교보, 연현보, 임하댐은 하류지점의 우점종이 대조지점과 같았으며, 검전보와 합천댐은 줄날도래 (*H. kozhanstchikovi*), 등줄하루살이 (*Uracantella rufa*) 등이 각각 우점종으로 나타났다. 우점도지수는 검전보와 합천댐, 임하댐의 경우 상류가 높았으며, 특히 상류와 하류지점

Table 2. Dominant species and dominant indices of benthic macroinvertebrates at the study sites.

Dams	Sites	Dominant species	2nd dominant species	DI
Geomjeon	Upper	Chironomidae sp.	Tubificidae sp.	0.55
	Lower	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	<i>Uracantella rufa</i>	0.47
	Control	Chironomidae sp.	<i>Baetis fuscatus</i>	0.45
Gokneung	Upper	Tubificidae sp.	Chironomidae sp.	0.77
	Lower	Chironomidae sp.	Tubificidae sp.	0.76
	Control	Chironomidae sp.	<i>Baetis fuscatus</i>	0.63
Anyang	Upper	Tubificidae sp.	Chironomidae sp.	0.81
	Lower	Chironomidae sp.	Tubificidae sp.	0.94
	Control	Chironomidae sp.	<i>Baetis fuscatus</i>	0.97
Yeonhyeon	Upper	Chironomidae sp.	Tubificidae sp.	0.85
	Lower	Tubificidae sp.	Chironomidae sp.	0.98
	Control	Tubificidae sp.	<i>Baetis fuscatus</i>	0.85
Hapcheon	Upper	Chironomidae sp.	<i>Uracantella rufa</i>	0.94
	Lower	<i>Uracantella rufa</i>	Chironomidae sp.	0.51
	Control	<i>H. kozhanstchikovi</i>	Chironomidae sp.	0.43
Imha	Upper	Chironomidae sp.	<i>Paleaemon serrifer</i>	0.67
	Lower	Chironomidae sp.	Tubificidae sp.	0.52
	Control	Chironomidae sp.	<i>Ecdyonurus kibunensis</i>	0.49
Daechong	Upper	Chironomidae sp.	Tubificidae sp.	0.70
	Lower	Chironomidae sp.	Tanypodinae sp.	0.73
	Control	<i>Semisulcospira forticosta</i>	Chironomidae sp.	0.54

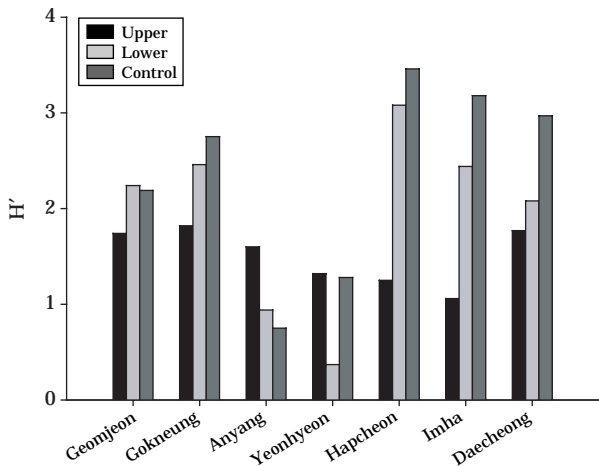


Fig. 6. Shannon species diversity indices (H') of benthic macroinvertebrates at the study sites.

간에 바닥물질의 조성에 큰 차이를 보인 합천댐은 상, 하류지점 간의 우점도지수 차이가 다른 댐이나 보에 비해 더욱 큰 것으로 나타났다(Table 2). 도시하천인 안양천의 안양대교보나 연현보는 도시 근교에 위치한 문산천의 점전보나 곡릉천의 곡릉2보에 비해 우점도지수가 높아 오염에 내성이 강한 특정 종의 밀도가 높은 특성을 보여주

었다.

도시하천을 제외한 모든 보와 댐에서 다양도지수는 상류지점보다 하류지점이 높았고, 특히 합천댐과 임하댐의 경우 상류에 비해 하류의 다양도지수가 2배 이상 높았다(Fig. 6). 이는 오와 전(1991)이 배내천에서 봄과 가을에 조사한 결과와 비슷하였다. 그러나 보와 댐의 상, 하류지점은 대조지점에 비해서 다양도지수가 낮았으며, 도시하천인 안양천의 보는 모든 지점에서 다양도지수가 낮아 지점간 차이가 적었다. 댐의 상류지점이 하류지점에 비해서 다양도지수가 낮게 나타난 것은 미세한 바닥물질로 된 정수역이 유수역에 비하여 상대적으로 단순한 미소서식처를 지니고 있으므로 저서성 대형무척추동물의 다양성이 낮게 나타나는 일반적인 경향으로 설명할 수 있을 것이다(Hynes, 1970; Allen, 1995).

3) 기능군 조성

하천에서의 섭식기능군과 서식기능군의 분포 특성은 저서성 대형무척추동물의 먹이자원과 서식처 환경의 특성을 반영한다. 섭식기능군의 경우 보나 댐, 혹은 상류, 하류지점과 관계없이 전반적으로 종풍부도와 개체수 밀도에 있어서 gatherers의 비율이 가장 높았다(Fig. 7). 보의 상류지점은 predators 등이 출현하여 댐의 상류지점보다 기

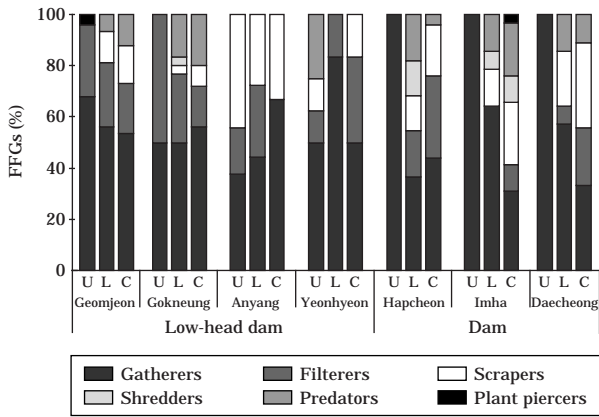


Fig. 7. Percentage composition of functional feeding groups (FFGs) of benthic macroinvertebrates at the study sites. U (Upper), L (Lower), and C (Control).

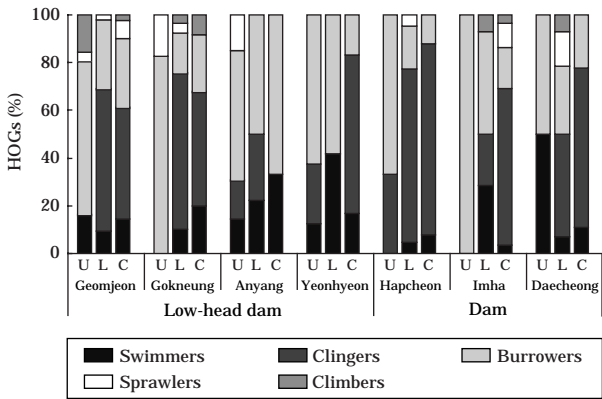


Fig. 8. Percentage composition of habitat orientation groups (HOGs) of benthic macroinvertebrates at the study sites.

능군이 다소 다양하였으나 하류지점에 비해서는 빈약하였다. 그러나 도시하천인 안양천의 보들에서는 모든 지점에서 기능군의 조성이 단순한 편이었다. 댐의 상류지점은 gatherers만이 출현하였으나 하류지점은 filterers, scrapers, predators 등 다양한 기능군이 출현하였다. 댐의 대조지점은 하류지점에 비해 filterers와 scrapers의 비율이 높았으며, gatherers의 비율은 낮았다.

섭식기능군과 마찬가지로 보와 댐의 상류지점의 서식 기능군은 하류지점에 비해 단순하였다. 댐의 상류지점은 보의 상류지점에 비해 서식기능군의 다양성이 낮았다. 유속이 느리고 오염물질이 퇴적되거나 바닥물질이 모래나 실트 이하로 단순해지면 clingers는 사라지고 burrowers나 수초 표면을 기어다니는 소수의 sprawlers 또는 climbers가 증가한다(윤 등, 1992). 본 연구에서 보와 댐의 상

Table 3. Pearson correlation coefficients between community indices and habitat factors at the study sites.

	Velocity	Substrate mean size	Silt & sand
Species richness	0.3947**	0.3466*	-0.4417**
Density	0.1243	0.1139	-0.2744
EPT richness	0.3612*	0.3296*	-0.3984**
EPT density	0.3774**	0.3507*	-0.247
DI	0.2955*	0.5090**	0.6592**
H'	0.7439**	0.8735**	0.0896
RI	0.7626**	0.8993**	-0.0106

*p<0.05, **p<0.01

DI, Dominant index; H', Shannon diversity index; RI, Richness index; EPT, Ephemeroptera, Plecoptera, and Tricoptera

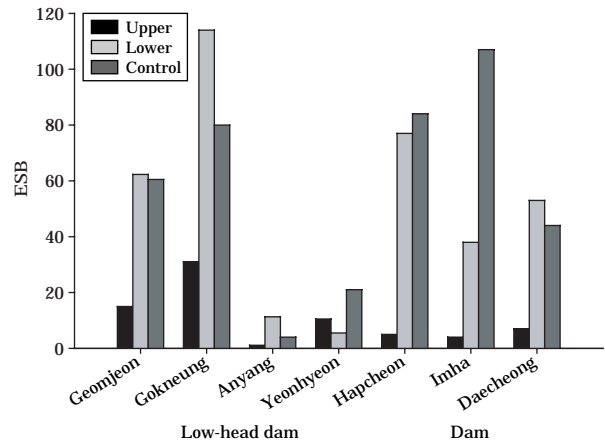


Fig. 9. Ecological score of benthic macroinvertebrates (ESB) at the study sites.

류지점은 전반적으로 burrowers가 가장 우세하였으며, 하류지점에서 우세한 clingers는 상류지점에서는 출현하지 않았거나 아주 낮은 비율로 출현하였다. 그러나 하상에 미세퇴적물이 덮여 있는 안양천의 경우 상류 및 하류 모두 burrowers가 높은 비율을 차지하였으며, 상류와 하류지점의 기능군 조성이 유사하였다(Fig. 8).

4) 수환경평가지수

대상 지역에 출현한 저서성 대형무척추동물의 모든 종의 상대적인 오염 내성치를 반영한 수환경평가지수(ESB)에서는 보나 댐의 상류지점이 하류에 비해 수환경등급이 매우 낮았고, 안양천의 안양대교보나 연현보는 상류와 하류지점 및 대조지점 모두 매우 낮게 나타났다. 안양대교보와 연현보는 상류와 하류지점 모두 매우 불량한 수역으로 평가되었고, 검전보는 상류는 불량한 수역으로, 하류와 대조지점은 모두 양호한 수역으로 평가되었으며,

Table 4. Correlation coefficients between water quality factors and community indices at the lower dam sites.

	Species richness	Density	DI	H'	RI
DO	0.7179	0.3028	-0.4327	0.5615	0.7820*
BOD	-0.7738*	-0.4563	0.7396	-0.9053**	-0.8454*
T-N	-0.7792*	-0.4215	0.8066*	-0.9252**	-0.8688*
T-P	-0.7614*	-0.4493	0.7387	-0.9126**	-0.8409*
Chlorophyll- <i>a</i>	-0.5350	-0.2383	0.7836	-0.6581	-0.6049
Conductivity	-0.6813	-0.4575	0.7808*	-0.8977**	-0.7367

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

DI, Dominant index; H', Shannon diversity index; RI, Richness index

곡릉천은 상류지점은 다소 불량한 수역, 하류지점은 매우 양호한 수역으로 평가되었다. 모든 댐의 상류지점은 모두 13 이하로 매우 불량한 수역으로 나타났고, 임하댐은 하류지점이 상류지점보다는 양호하나 대조지점보다는 불량한 것으로 나타났다(Fig. 9). 댐의 상류지점은 보의 상류지점에 비해 수환경 등급이 더욱 낮은 것으로 평가되었으며, 하류지점은 하천에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 보의 경우 수질오염도가 높은 하천에서는 수질오염도가 낮은 하천에 비해 상류, 하류 및 대조지점 모두 수환경 등급이 매우 낮게 나타나 보의 영향보다는 수질오염이 저서성 대형무척추동물의 분포에 더 큰 영향을 미치고 있음을 시사하였다.

3. 환경요인과의 상관관계

조사지점에서의 종풍부도, 개체수 밀도, EPT-group의 종풍부도, EPT-group의 개체수 밀도 및 우점도지수, 다양도지수, 풍부도지수 등의 생물지표와 서식처 환경요인과의 상관분석 결과 유속과 바닥물질의 평균 크기는 종풍부도 및 EPT-group의 풍부도와 유의한 상관성이 있으며, 군집지수와도 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다(Table 3). 바닥물질의 크기에서 silt/sand 등 미세입자의 비율은 종풍부도 및 EPT-group의 풍부도와 높은 음의 상관성을 나타냈고, 우점도지수와는 높은 양의 상관성을 나타냈다.

조사지역의 보와 댐의 하류지점에서 측정된 연평균 수질오염도와 우점도지수, 다양도지수, 풍부도지수 등의 군집지수 및 종풍부도, 밀도 등과의 상관분석 결과, BOD, 총질소, 총인은 종풍부도, 다양도지수, 풍부도지수와 유의한 음의 상관성을 나타냈다(Table 4). 개체수 밀도는 수질오염물질과 유의한 상관성을 보이지 않았다. 한편, 보와 댐의 상류지점은 수질오염도와 군집지수, 종풍부도, 밀도 등과 유의한 상관성을 보이지 않았다. 따라서 저서성 대형무척추동물 군집은 댐의 상류지점에서 수질오염도 보다는 유속, 바닥물질 등 댐에 의한 서식처 단순화가 더 큰

영향을 미치고 있음을 시사하였다.

적 요

본 연구는 우리나라의 하천과 강에 설치된 댐(보)이 저서성 대형무척추동물 군집에 미치는 영향을 알아보고자 전국의 대표적인 하천과 강에 설치된 4개의 소형 보와 3개의 대형 댐을 대상으로 댐의 상류(저수역: impoundment), 하류(유수역) 및 대조지점(유수역)에서 2004~2007년에 걸쳐 저서성 대형무척추동물의 군집을 조사하였다. 바닥물질이 단순하고 유속이 상대적으로 낮은 상류지점은 종풍부도, 개체수밀도 및 다양도지수가 상대적으로 낮았으며, 하류지점과는 큰 차이를 보였다. 수질오염이 심한 도시하천에서는 보의 상류와 하류지점 간의 군집의 차이가 거의 없었다. 대형 댐의 상류와 하류지점은 대조지점에 비해 다양도지수가 훨씬 낮았고, 우점도지수는 훨씬 높았다. 반면, 소형 보의 하류지점은 대조지점과 유사하였다. 서식 및 섭식 기능군은 상류지점이 하류지점에 비해 더욱 단순하였으며, 대형 댐의 상류지점은 소형 보의 상류지점에 비해 더욱 단순하였다. 저서성 대형무척추동물의 종풍부도와 군집지수는 상류지점에서는 수질오염보다는 서식처 특성에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 하류지점에서는 수질오염과 더 높은 상관성을 보였다. 결론적으로, 하천과 강에 설치된 보와 댐은 상류지점(저수역)의 서식처를 단순화시켜 저서성 대형무척추동물 군집에 부정적인 영향을 미치며, 규모가 큰 댐이 소형 보에 비해 더 큰 악영향을 미칠 수 있음을 시사하였다.

사 사

본 연구는 한국건설기술연구원의 연구과제 "ECORIVER 21"의 지원으로 이루어졌습니다.

인 용 문 헌

- 노태호, 전동준. 2004. 한국산 수서곤충류 섭식기능군 유형 및 군집 안정성 분석. *한국육수학회지* **37**: 137-148.
- 오용남, 전태수. 1991. 배내천 중류의 저서성 대형무척추동물에 대한 연구 II. 붓독상하에서의 군집 및 환경비교. *한국생태학회지* **14**: 399-413.
- 윤일병. 1995. 수서곤충검색도설. 정행사, 서울.
- 윤일병, 공동수, 유재근. 1992. 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구; 오락제급치 및 지표가중치 산정을 중심으로. *환경생물* **10**: 24-39.
- 환경부. 2000. 제2차 전국자연환경 조사 지침. 저서성 대형무척추동물 p. 85-143.
- Allan, D.J. 1995. *Stream Ecology; Structure and Function of Running Waters*. Chapman & Hall, London.
- Baxter, R.M. 1977. Environmental effects of dams and impoundments. *Annual Review of Ecology and Systematics* **8**: 255-283.
- Benke, A.C. 1990. A perspective on America's vanishing streams. *Journal of the North American Benthological Society* **9**: 77-88.
- Camargo, J.A. and N.J. Voelz. 1998. Biotic and abiotic changes along the recovery gradient of two impounded rivers with different impoundment use. *Environmental Monitoring and Assessment* **50**: 143-158.
- Craig, D.A. 1987. Some of what you should know about water: or K.I.S.S. for hydrodynamics. *Bulletin of North American Benthological Society* **4**: 178-182.
- Doeg, T.J. and J.D. Koehn. 1994. Effects of draining and desilting a small weir on downstream fish and macroinvertebrates. *Regulated Rivers: Research and Management* **9**: 263-277.
- Dynesius, M. and C. Nilsson. 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science* **266**: 753-762.
- Hynes, H.B.N. 1970. *The Ecology of Running Waters*. Liverpool University Press, Liverpool.
- Kawai, T. and K. Tanida. 2005. *Aquatic Insects of Japan: Manual with Keys and Illustrations*. Tokai University Press, Kanagawa.
- Kondorf, G.M. 1997. Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management* **21**: 533-551.
- Magilligan, F.J. and K. Nislow. 2001. Long-term changes in the regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *Journal of the American Water Resources Association* **37**: 1551-1570.
- McCafferty, W.P. 1981. *Aquatic Entomology*, John & Bartlett, Boston.
- Merritt, R.W. and K.W. Cummins. 2008. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. 4th ed. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.
- Pennak, R.W. 1989. *Fresh-water Invertebrates of the United States*. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Petts, G.E. 1984. *Impounded Rivers. Perspectives for Ecological Management*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Poff, N.L. and D.D. Hart. 2002. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bio-science* **52**: 659-668.
- Stanley, E.H. and A.L. Michelle, M.W. Doyle and D.W. Marshall. 2002. Short-term changes in channel form and macroinvertebrate communities following low-head dam removal. *Journal of North American Benthological Society* **21**: 172-187.
- Throp, J.H. and A.P. Covich. 2001. *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. Academic Press, San Diego.
- Tiemann, J.S., D.P. Gillette, M.L. Wildhaber and D.R. Edds. 2004. Effects of lowhead dams on riffle-dwelling fishes and macroinvertebrates in a midwestern river. *Transactions of the American Fisheries Society* **133**: 705-717.
- Ward, J.V. 1992. *Aquatic Insect Ecology*. John Wiley & Sons, New York.
- Ward, J.V. and J.A. Stanford. 1979. *The Ecology of Regulated Streams*. Plenum Press, New York.
- Waters, T.F. 1995. *Sediment in Streams: Sources, Biological Effects, and Control*. American Fisheries Society, Monograph 7, Bethesda, Maryland.
- Wiederholm, T. 1983. *Chironomidae of the Holarctic Region. Part 1. Larvae*. Entomologica Scandinavica Supplements. No. 19.
- Williams, D.D. and B.W. Feltmate. 1992. *Aquatic Insects*. CBA International, Oxon.

(Manuscript received 6 March 2010,
Revision accepted 17 April 2010)