

낙동강 본류 낙단보 설치 전후의 저서성 대형무척추동물 군집변동

이미진 · 서울원 · 유재정¹ · 이종은*

안동대학교 생명과학과, ¹국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Community Fluctuation of the Benthic Macroinvertebrates before and after the Construction of Nakdan Weir. Lee, Mi Jin, Eul Won Seo, Jae Jeong Yu¹ and Jong Eun Lee* (Department of Biological Science, Andong National University; ¹Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research)

Abstract Nakdan weir, which is located in the second weir among the 8 weirs of Nakdong River, had been constructed from Nov. 2009 to Nov. 2011. To analyze the effect of Nakdan weir construction on benthic macroinvertebrates, we studied 2 sites around Nakdan weir (upstream and downstream) from 2007 to 2014. The average numbers of species and individuals were decreased after the construction (in 2012~2014, 51 species 895 inds. m⁻²) than before construction (in 2007~2009, 25 species 84 inds. m⁻²), especially in upstream site of Nakdan weir. After the construction, especially in 2012, dominance indices (DI) were increased by the decline of some specific taxon population, such as Ephemeroptera and Trichoptera, etc. After construction, individual ratios of GC (Gathering Collectors) and P (Predator) of FFGs (Functional feeding groups) and BU (Burrowers) of HOGs (Habitat orientation groups) were higher than before construction. So the results of this study indicate that the changes by a weir construction, such as the decline of shallow depth area, reduced velocity of water flow and increased ratio of sand bed, etc., can affect the benthic macroinvertebrate communities variously.

Key words: Nakdan weir, benthic macroinvertebrate, weir construction, FFGs, HOGs

서 론

낙동강 본류의 8개 보 중 상류에서 두 번째에 위치한 낙단보는 2009년 11월 착공 후 2011년 11월에 준공되었다. 낙단보는 총 연장 286 m (고정보 144.4 m, 가동보 141.6 m), 높이 11.5 m, 저수 용량 3,430만 톤의 대형 다기능 보로, 연장 141.6 m의 공도교 및 자연형 수로와 아

이스 하버식이 복합적으로 적용된 어도가 설치되어 있다. 낙단보 설치 공사가 본격적으로 진행된 2010년부터 2011년에는 낙동강 본류 수계에 총 8개의 보가 설치되었으며, 이와 동시에 대대적인 준설 작업이 진행되었다.

하천의 보 설치에 상류의 유속을 저하시켜 반 정수성 환경을 조성하게 되는 것이 일반적이며 (Walther and Whiles, 2008), 이러한 인공구조물에 의한 유속 저하는 저서성 대형무척추동물, 어류 등 다양한 하천 생태계에 영향을 미치게 된다 (Schlosser and Ebel, 1989; Thoms and Sheldon, 1997; Norris and Thoms, 1999; Miranda *et al.*, 2005). 특히 저서성 대형무척추동물은 어류의 대표적인 먹이원으로 이용되고 있으며 (Wipfli and Baxter,

Manuscript received 8 December 2014, revised 23 December 2014,
revision accepted 24 December 2014

* Corresponding author: Tel: +82-54-820-5618, Fax: +82-54-820-7705,
E-mail: jelee@andong.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

2010) 분류군별 다양한 저항력과 회복력을 보이기 때문에 (Robinson, 2012), 이들 군집의 변화는 하천 생태계의 건강성을 판단하는 중요한 기준으로 작용하고 있다 (Resh and Jackson, 1993; Lawrence *et al.*, 2014). 보 설치 전후의 저서성 대형무척추동물 군집에 미치는 영향에 대한 국내 연구는 Kil *et al.* (2010), Kim *et al.* (2013) 등에 의해 진행된 바 있으나, 이는 모두 소규모 보에 대한 내용으로, 대규모 보 설치의 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 낙단보 설치로 인해 상류와 하류의 저서성 대형무척추동물 군집에 발생한 변화 양상을 파악하기 위하여, 보 설치 이전부터 보 설치 이후까지 8년간의 연구 자료를 비교 및 분석하였다. 본 연구 결과는 홍수예방, 수자원 확보 등을 목적으로 국내외적으로 설치되고 있는 수중보 구간의 수생태계 예측 및 관리에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 조사 시기 및 조사지점

낙단보의 상류와 하류 지점 (Fig. 1)에서 2007년부터 2014년까지 연 4회씩 (3, 5, 8, 11월) 저서성 대형무척추동물상 변화 양상을 조사하였다.

2. 저서성 대형무척추동물 현장 조사 및 분석

저서성 대형무척추동물의 채집은 보 설치 공사가 진행되기 이전인 2007년부터 2009년까지는 surber sampler

(30 cm × 30 cm, mesh size 1 mm), 착공 이후인 2010년부터 2014년까지는 dredge sampler (width 0.42 m, mesh size 1 mm)를 이용하여 정량채집을 수행하였으며, hand net과 편셋을 이용하여 정성채집을 병행하였다. 채집된 시료는 현장에서 94% Ethanol에 고정하여 실험실로 운반 후, 실체현미경 (LEICA M125, OLYMPUS SZ40, OLYMPUS SZX12)을 활용하여 동정하였다. 동정은 Yoon (1988, 1995), Won *et al.* (2005), Kwon *et al.* (2013), Kim *et al.* (2013) 등의 문헌 및 검색도설을 참고하였으며, ESK and KSAE (1994), KSSZ (1997) 등의 분류체계에 따라 정리하였다.

3. 자료 분석

동정된 모든 종별 개체수는 단위면적당 출현개체수 (inds. m⁻²)로 환산하여 분석하였다. 그리고 각 조사 시기별 우점도지수 (DI, Dominance index; McNaughton, 1967), 다양도지수 (H', Species diversity index; Shannon and Weaver, 1971), 종풍부도지수 (R1, Species richness index; Margalef, 1958), 종균등도지수 (J', Evenness index; Pielou, 1975)를 산출하여 군집분석을 실시하였다.

저서성 대형무척추동물의 먹이습성 및 먹이사슬을 확인하기 위해 구기의 형태와 섭식 기능을 파악하여 섭식 기능군 (FFGs: Functional Feeding Groups)으로 분석하는 조사 및 분석방법이 Merritt *et al.* (1996, 2009), Ro (2002), Ro and Chun (2004) 등에 의해 국내외적으로 심도 있게 연구되고 있다. 이에 본 연구에서는 Ro and Chun (2004)에서 제안한 분류 방법을 이용하여 섭식 기능군 분석을 실시하였다. 또한 하상 구조 및 수변 식생,

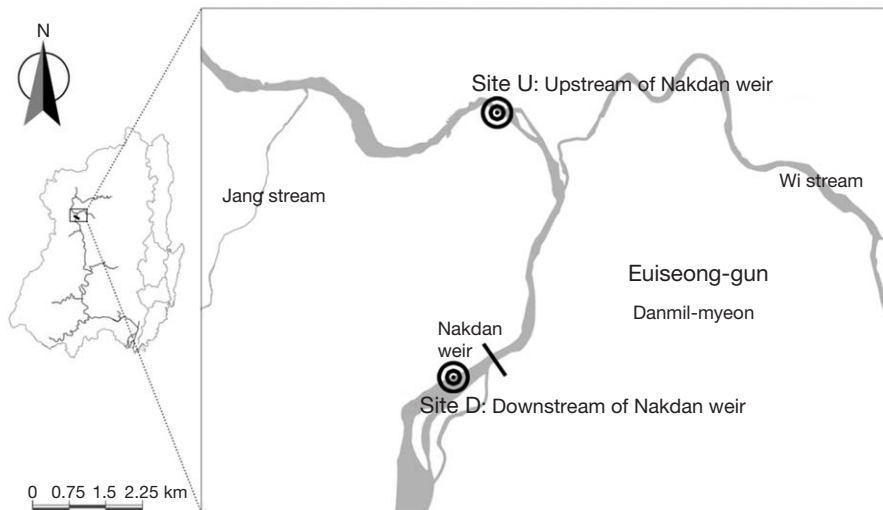


Fig. 1. Surveyed sites.

유속 등의 물리적 서식환경에 따라 달라지는 서식기능군(HOGs: Habitat orientation groups)을 Merritt *et al.* (1996)의 체계에 따라 구분하였다. 군집안정성은 Ro and Chun (2004)이 제안한 한국산 수서곤충 각 종이 갖는 상대적 저항력과 회복력 값에 의거하여 각 출현 종을 4개의 특성군으로 구분한 후 분석하였다.

공사 단계별 공통 출현종 분석을 위한 벤 다이어그램은 'Venn Diagram Plotter ver. 1.5.5228.29250' 프로그램을 이용하여 도식화하였다.

결과 및 고찰

1. 저서성 대형무척추동물 종수 및 개체수

2007년부터 2014년까지 총 5문 8강 20목 64과 134종의 저서성 대형무척추동물이 확인되었다. 하천의 수중보는 해당 보에 의해 조성되는 물리적 서식환경의 특성에 따라 각기 다른 생물 종 조성을 보인다(Dodd and Wahl, 2007). 낙단보의 저서성 대형무척추동물상을 공사 이전과 공사 중, 공사 이후로 구분하여 분석한 결과, 공사 이전인 2007년부터 2009년까지 매년 평균 51종 895 inds. m⁻², 공사 중이었던 2010년부터 2011년까지는 매년 평균 30종 130 inds. m⁻², 공사 이후인 2012년부터 2014년까지는 매년 평균 25종 84 inds. m⁻²가 출현한 것으로 조사되어, 공사의 진행에 따라 평균 종수 및 개체수가 감소한 것으로 확인되었다. 공사 이전과 공사 중, 공사 이후에 모두 공통적으로 출현한 종은 총 26종이며, 공사 중에 일시적으로 출현이 확인되지 않았으나 준공 이후 다시 출현한 종은 총 11종이다. 또한, 공사 이전에만 출현한 종은 *Acentrella gnom*, *Cheumatopsyche* KUa, *Simulium* sp. 등 총 40종, 착공 이후 새로이 출현한 종은 *Tipula* KUb, *Macromia amphigena* 등 6종, 준공 이후에 새로이 출현하게 된 종은 *Ephemera strigata*, *Sieboldius albardae* 등 10종으로, 낙단보 설치에 의해 비교적 다양한 종의 구성이 변화한 것으로 확인되었다(Fig. 2).

일반적으로 보 설치 지점의 상류 유역은 정수성 환경이 조성되면서 유수성 곤충류의 감소에 따라 낮은 생물 다양성을 보이게 되며(Baekken *et al.*, 1984), 특히 이러한 생물다양성의 변화는 보 설치 이전에는 비교적 빠른 유속을 나타내었던 지점에서 두드러지게 나타난다(Fjellheim *et al.*, 1993). 또한 Kil *et al.* (2010)은 소규모 보 설치 유역의 종 조성은 하류보다는 상류에서 더욱 단순해지는 경향을 보이는 것으로 보고하였다. 낙단보의

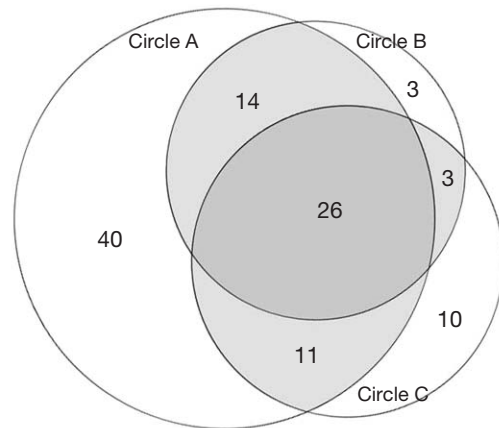


Fig. 2. The Venn diagram indicates that the number of species before (circle A), during (circle B) and after (circle C) the Nakdan weir construction.

상류와 하류 지점별 분석 결과, 상류와 하류 모두 공사 직후인 2012년에 각각 16종, 12종으로 가장 적은 종이 출현하였으며, 2007년에 각각 42종, 36종으로 가장 많은 종이 출현하였다. 낙단보 상류 지점에서의 출현 개체수는 2007년에 697 inds. m⁻²으로 최대, 2013년에 54 inds. m⁻²으로 최소값을 보였으며, 하류 지점에서는 2008년에 1,702 inds. m⁻²으로 최대, 2014년에 5 inds. m⁻²으로 최소값을 나타냈다. 낙단보의 상류와 하류 유역별 종 조성 변화 양상을 파악한 결과, 공사 이전에는 상류와 하류에서 공통적으로 출현한 종이 42종으로 총 91종 중 46.2%의 비율을 보였고, 공사 중에는 19종이 공통적으로 출현하여 총 46종 중 41.3%의 비율을 차지하였으며, 준공 이후에는 17종이 공통적으로 출현하여 총 50종 중 34.0%의 비율을 나타냈다. 또한 낙단보의 하류 지점에서만 출현한 종이 공사 이전에는 총 출현 종수의 25.3%를 차지하였으나, 준공 이후 38.0%의 비율로 증가한 것으로 확인되었다(Fig. 3).

2010년부터 2011년 낙단보 설치와 동반하여 4대강살리기 사업의 일환으로 낙동강 본류에서 일괄적인 준설 작업이 진행되었고, 이에 의한 영향으로 낙단보 설치 지점의 하류뿐만 아니라 상류에서도 보 설치와 동반하여 진행된 준설 등의 영향으로 일부 교란이 발생되었다. 아울러 준공 이후에는 보 설치로 인한 하천 담수화의 영향으로 기존에 서식하는 종의 일부가 영향을 받은 것으로 사료된다.

2. 분류군별 출현 현황

주로 유수성 환경에 서식하며 수환경 변화에 민감하

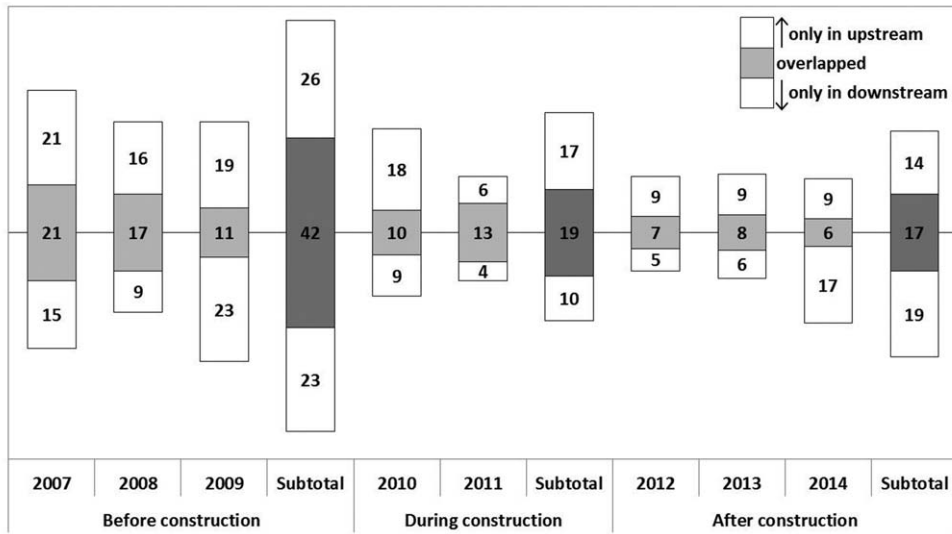


Fig. 3. The changes of species composition at upstream and downstream of Nakdan weir in each surveyed year.

게 반응하는 EPT분류군 (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera)은 (Lenat, 1988) 공사 이전에는 41종, 공사 중 26종, 공사 이후에 20종이 출현하여 점차 종수가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 단위면적당 평균 개체수 또한 284 inds. m⁻², 48 inds. m⁻², 12 inds. m⁻²로 공사 이전에 비해 공사 중과 공사 이후에 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 특히 Ephemeroptera (하루살이목)과 Trichoptera (날도래목)에서 강하게 나타났는데, Ephemeroptera의 공사 전, 중, 후 시기별 종수는 각각 25종, 20종, 17종이 출현하였고, 개체수는 247 inds. m⁻², 40 inds. m⁻², 11 inds. m⁻²가 출현하였다. Ephemeroptera 중 하상의 기질 변화에 민감하게 반응하는 분류군인 Baetidae (꼬마하루살이과)는 하상 기질의 크기가 커짐에 따라 개체수 점유율이 높아진다는 보고가 있다 (Kaller, 2004). Baetidae의 연도별 출현현황을 분석한 결과, 전체 출현 Ephemeroptera에 대한 Baetidae의 개체수 비율인 B/E 값이 공사 이전에는 연 평균 0.35, 공사 중에는 0.33, 공사 이후에는 0.13으로 준공 이후 급격히 낮아지는 양상을 보였으며, 이는 낙단보 구간의 하상 변화를 일부 반영하는 결과로 사료된다. Trichoptera의 공사 전, 중, 후 시기별 종수는 15종, 5종, 2종이 출현하였고, 개체수는 27 inds. m⁻², 5 inds. m⁻², 0.3 inds. m⁻²가 출현하였다. 또한 Trichoptera 중 오염에 내성이 강해 다양한 수환경에 서식 가능한 분류군인 Hydropsychidae (줄날도래과) (Higler and Tolkamp, 1982)의 출현현황을 분석한 결과, 전체 출현 Trichoptera에 대한 Hydropsychidae의 비율인 H/T 값이 공사 이전에는 연 평균

0.81, 공사 중에는 0.95, 공사 이후에는 1.00으로, 공사가 진행됨에 따라 Trichoptera의 종 구성이 단순화되고 있는 것으로 나타났다 (Table 1).

주로 수변식생이 잘 발달된 정수성 환경을 선호하는 OCH분류군 (Odonata, Coleoptera, Hemiptera) (Lawrence *et al.*, 2014)은 공사 이전 29종에서 공사중 12종, 공사 이후 13종이 출현하였으며, Odonata (잠자리목)은 19종, 8종, 7종의 순으로, Coleoptera (딱정벌레목)은 4종, 1종, 1종, Hemiptera (노린재목)은 6종, 1종, 3종의 순으로 출현하였다. OCH분류군의 공사 전, 중, 후 진행 단계별 개체수는 각각 235 inds. m⁻², 46 inds. m⁻², 28 inds. m⁻²가 출현하여 점차 감소하는 경향을 보였으나, 주로 수변부의 수초 사이에 숨어서 서식하는 분류군적 특성상, 대부분의 개체가 정성채집법에 의해 포획되었기 때문에 출현 개체수의 결과 분석은 비교적 모호한 것으로 판단된다.

유기물이 풍부한 유수역 및 정수역에 대발생하는 경향이 있는 GOLD분류군 (Gastropoda, Oligochaeta, Diptera) (Lawrence *et al.*, 2014)은 공사 이전에는 15종, 공사 중 5종, 공사 이후에 9종이 출현하여 공사 중에 일시적으로 감소하였다가 점차 회복되고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 단위면적당 평균 개체수 또한 368 inds. m⁻², 34 inds. m⁻², 39 inds. m⁻²로 종수와 유사한 양상을 보였다. GOLD분류군의 Diptera (파리목) 중 오염에 내성이 강한 Chironomidae (갈따구과)의 출현 개체수 분석 결과, Diptera 전체 개체에 대한 Chironomidae의 비율인 C/D 값이 공사 이전에는 연 평균 0.94, 공사 중에는 0.99,

Table 1. Coefficients of variability of metric values from 2007 to 2014 (U: upstream of Nakdan weir; D: downstream of Nakdan weir).

Metric	2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014	
	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D
Abundance																
Total no. species	42	36	33	26	30	34	28	19	19	17	16	12	17	14	15	23
No. Ephemeroptera	13	11	15	12	14	10	12	5	12	12	7	8	5	7	3	7
No. Plecoptera	4	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
No. Trichoptera	17	12	23	17	24	12	18	8	12	13	8	8	6	8	3	8
No. EPT	2	4	3	1	3	4	3	2	2	1	2	2	1	1	2	2
No. Diptera	3	4	6	1	5	4	3	2	3	3	2	1	2	1	1	3
No. Baetidae	2	1	3	2	5	1	3	1	1	1	1	1	2	1	1	1
No. Hydropsychidae	11	8	1	2	8	8	2	3	3	1	1	3	3	4	4	3
No. Odonata	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	3	1	2	4	5	8
No. Coleoptera	7	7	4	4	1	6	2	3	4	2	3	1	6	1	5	4
No. non-insects	16	13	3	4	2	12	5	6	4	2	3	1	6	1	5	4
No. OCH	3	4	5	3	3	5	4	2	3	2	3	2	2	2	3	4
No. GOLD	189	160	176	460	188	280	110	163	53	73	112	86	41	50	53	46
Composition																
No. individuals	28.6	26.6	39.4	20.1	40.4	23.6	49.5	3.4	48.8	50.5	4.9	12.3	23.0	26.9	7.1	20.3
% Ephemeroptera	0.0	0.0	8.1	0.3	0.4	0.0	6.4	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.5	0.0	0.0
% Plecoptera	0.9	0.2	2.3	0.3	18.6	0.2	5.2	5.4	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2
% Trichoptera	29.6	26.7	49.8	20.7	59.4	23.8	61.1	11.2	48.8	50.9	5.4	12.3	24.2	28.4	7.1	22.5
% EPT	42.7	38.8	38.6	13.0	26.6	10.3	18.9	11.1	43.7	46.4	50.4	21.1	22.4	54.2	33.6	50.0
% Chironomidae	40.9	40.8	56.3	61.4	69.1	69.8	76.4	50.3	52.8	52.3	9.6	36.8	51.9	34.3	17.4	31.1
EPT/EPTC	43.0	40.6	38.9	13.0	35.1	10.9	19.5	11.2	44.1	46.4	50.7	21.3	22.4	54.2	38.4	50.5
% Diptera	99.4	95.4	99.3	100.0	75.8	94.3	96.5	98.6	98.9	100.0	99.6	98.6	100.0	100.0	87.7	98.9
Chironomidae/Diptera	37.5	43.5	18.7	3.5	76.6	41.7	53.2	36.4	22.1	8.8	0.0	2.4	36.8	5.6	20.0	18.9
Baetidae/Ephemeroptera	42.9	100.0	75.0	33.3	86.4	50.0	91.3	97.1	—	100.0	100.0	—	—	—	—	100.0
Hydropsychidae/Trichoptera	3.1	3.9	0.1	0.2	0.0	3.5	0.5	0.9	1.4	0.3	0.0	0.0	4.2	0.0	3.3	3.3
% Odonata	0.3	0.6	0.4	0.1	0.1	0.8	2.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	1.1
% Coleoptera	4.2	5.8	1.1	46.8	1.1	1.6	6.6	1.7	1.4	0.7	0.7	0.3	5.5	14.9	49.8	22.0
% non-insects	23.2	26.9	10.2	19.4	4.5	63.7	12.7	75.8	5.6	2.1	43.3	66.1	47.9	2.5	4.7	4.4
% OCH	45.0	40.6	39.3	59.6	35.1	11.0	25.9	11.2	45.5	47.1	50.9	21.3	23.0	57.2	62.6	54.4
% GOLD	Diversity															
DI	0.62	0.61	0.57	0.66	0.53	0.71	0.38	0.86	0.56	0.72	0.93	0.87	0.64	0.64	0.58	0.58
H'	2.88	3.02	3.12	2.31	3.24	2.20	3.69	1.53	2.89	2.43	1.48	1.49	2.74	2.52	2.73	2.92
R1	6.19	5.42	4.88	3.33	4.38	4.70	4.44	2.78	3.36	2.82	2.46	1.89	3.13	2.45	2.62	4.23
J'	0.53	0.58	0.62	0.49	0.66	0.43	0.77	0.36	0.68	0.59	0.37	0.41	0.67	0.66	0.70	0.64

공사 이후에는 0.98로, 전반적으로 높은 값을 보였으며, 특히 공사 중과 준공 이후에 그 값이 더욱 높아진 것으로 확인되었다.

EPA에서 고안한 EPT/EPTC 분석법 (Plafkin *et al.*, 1989)은 지표 생물군의 상대풍부도를 기반으로 산출한다. 대부분의 EPT분류군은 환경변화에 민감하게 반응하는 반면, Chironomidae는 오염에 강한 내성을 갖는다. 때문에 해당 네 분류군 간의 상대 풍부성 관계는 양호한 생물 서식환경과 비정상적인 환경 스트레스의 균형성을 반영한다 (McGuire, 2007). 낙단보 구간의 EPT/EPTC값은 공사 이전 0.57에서 지속적인 교란이 있었던 공사 중에는 0.61로 소폭 증가한 후, 준공 이후에는 0.27로 그 값이 낮아진 것으로 나타났다 (Table 1). 이러한 결과는 낙단보 준공 이후에 우수성의 여울 환경을 선호하는 분류군의 개체수가 감소하였으며, 이러한 감소 경향에 비해 Chironomidae의 개체수 증가 폭이 상대적으로 크다는 점을 대변하는 것으로 사료된다.

3. 군집분석

우점도 (DI), 다양도 (H'), 풍부도 (R1), 균등도 (J') 등의 군집지수를 분석한 결과, 우점도는 0.55 (2010년 상류)~0.94 (2012년 상류), 다양도는 0.76 (2012년 상류)~2.75 (2010년 상류), 풍부도 0.88 (2013년 하류)~2.84 (2010년 상류), 균등도 0.30 (2012년 상류)~0.85 (2013년 하류)의 범위로 나타났다 (Table 1). 공사 진행 과정별 우점도는 공사 이전 0.74에서 준공 이후 0.80으로 증가하였고, 다양도는 공사 이전 2.04에서 준공 이후 1.46으로 감소, 풍부도는 공사 이전 2.24에서 준공 이후 1.30으로 감소하였으며, 균등도는 큰 차이를 보이지 않았다. 군집

지수의 변화 폭이 가장 컸던 해는 준공 직후인 2012년으로, 2012년에 일시적으로 우점도는 대폭 증가, 다양도와 풍부도, 균등도는 감소한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 낙단보를 비롯한 낙동강 8개 보의 일괄 준공 및 가동으로 2011년 말에 급격한 서식환경 변화가 일어났으며, 이에 의한 영향으로 저서성 대형무척추동물 군집이 새로운 수환경에 적응해가는 과정에서 일어난 일시적 변동 현상으로 사료된다.

4. 섭식기능군 및 서식기능군

섭식기능군은 대부분의 기능군이 공사 전에 비해 준공 후에 적은 종의 출현을 보였다. FC (Filtering Collectors, 걸러먹는 무리)가 공사 전 9종에서 공사 후 2종으로 감소하였으며, GC (Gathering Collectors, 모아먹는 무리)는 29종에서 17종으로 감소, P (Predators, 잡아먹는 무리)는 29종에서 15종으로 감소, SC (Scrappers, 긁어먹는 무리)는 7종에서 3종으로 감소, SH (Shredders, 씹어먹는 무리)는 2종에서 1종으로 감소하였고, PP (Plant Piercers, 찢러먹는 무리)는 공사 전과 공사 중, 공사 후에 각각 1종이 출현하였다. 공사 단계별 섭식기능군의 개체수 또한 FC는 공사 전 31 inds. m⁻²에서 공사 후 0.3 inds. m⁻², GC는 444 inds. m⁻²에서 42 inds. m⁻², P는 245 inds. m⁻²에서 28 inds. m⁻², SC는 27 inds. m⁻²에서 2 inds. m⁻² 등, 대부분의 기능군에서 감소하는 양상을 보였으나, 총 출현 개체수를 고려한 개체수 비율 분석 결과 GC와 P의 비율이 각각 49.5%에서 50.4%, 27.3%에서 33.9%로 소폭 증가하였다 (Fig. 4).

서식기능군은 BU (Burrowers, 굴 파는 무리)가 공사

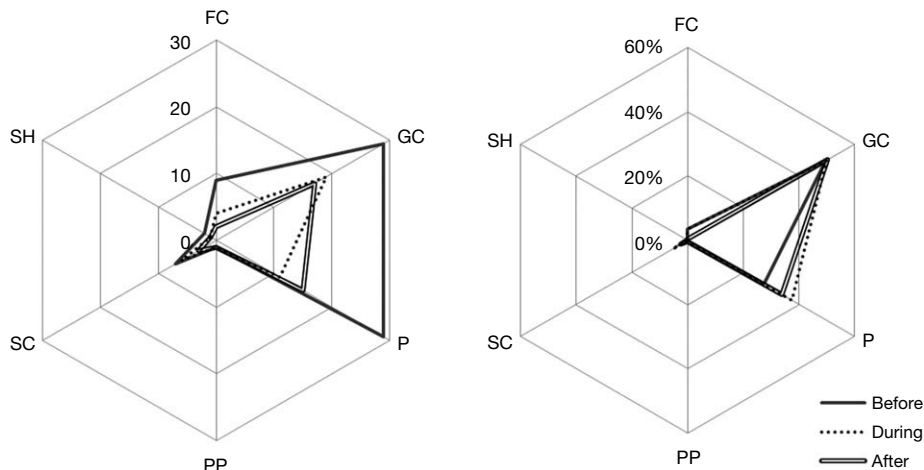


Fig. 4. Species number (left) and individual ratio (right) of FFGs (Functional feeding groups; FC, Filtering Collectors; GC, Gathering Collectors; P, Predators; PP, Plant Piercers; SC, Scrappers; SH, Shredders).

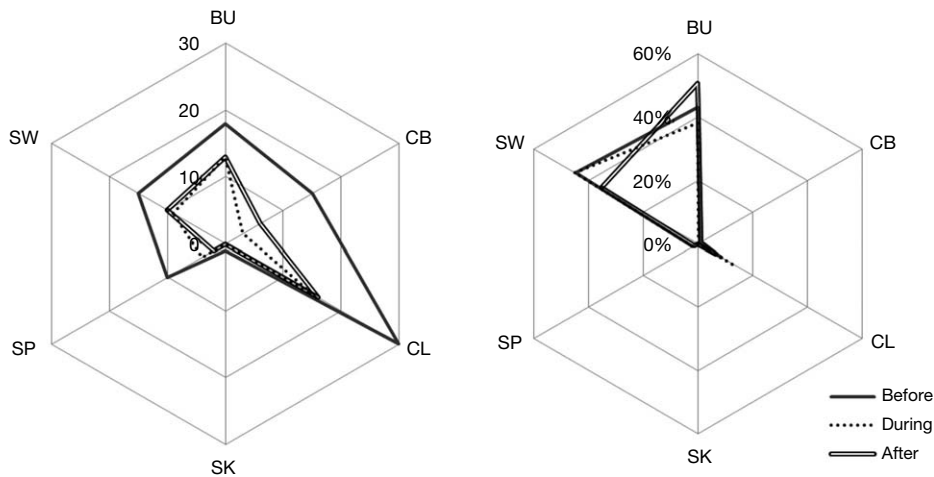


Fig. 5. Species number (left) and individual ratio (right) of HOGs (Habitat orientation groups; BU, Burrowers; CB, Climbers; CL, Clingers; SK, Skaters; SP, Sprawlers; SW, Swimmers).

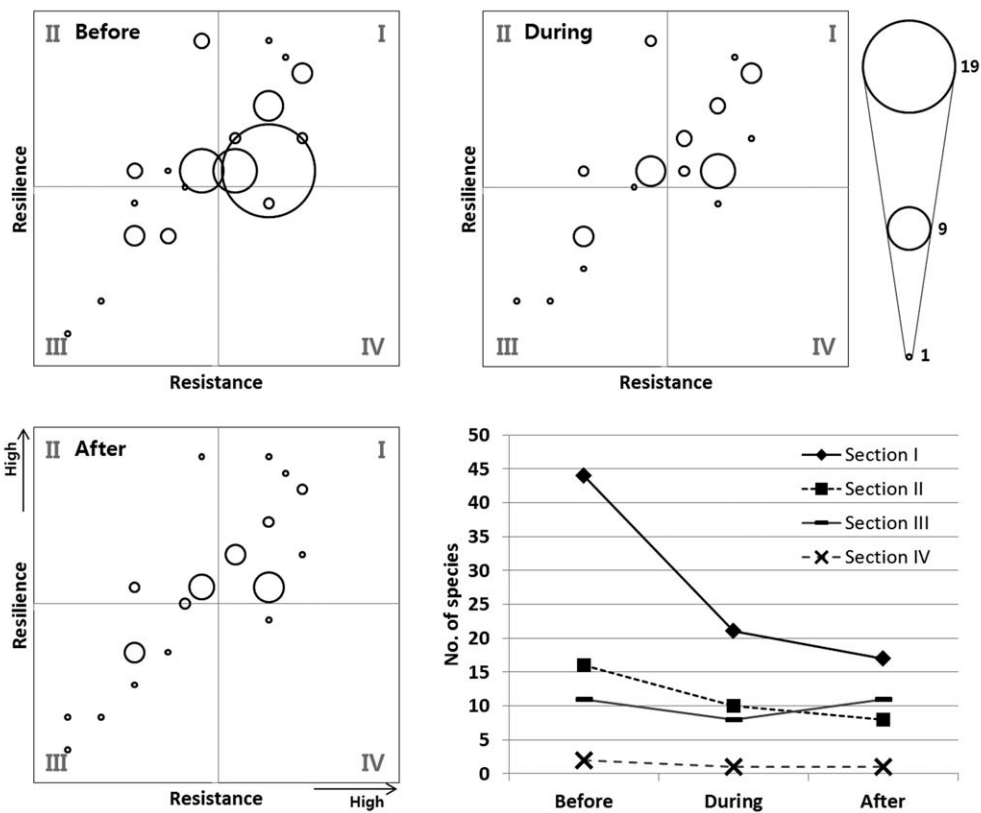


Fig. 6. Analysis of stability factors by relative resistance and resilience before, during and after the Nakdan weir construction (each diameter of circle means the number of species).

전 18종 387 inds. m^{-2} 에서 공사 후 13종 43 inds. m^{-2} , CB (Climbers, 기어 오르는 무리)는 15종 8 inds. m^{-2} 에서 6종 1 inds. m^{-2} , SW (Swimmers, 헤엄치는 무리)는

15종 400 inds. m^{-2} 에서 10종 30 inds. m^{-2} 등으로 변화되는 양상을 보였다. 공사 이전에 비해 준공 이후에 전체 출현 종 및 개체가 감소되어 전반적으로 대부분의

기능군이 감소하는 경향을 보였으나, 출현 개체수 분석 결과 BU의 개체수 비율이 43.0%에서 50.8%로 공사 이전에 비해 증가한 것으로 나타났다(Fig. 5).

보 준공 이후 GC와 BU의 개체수 비율이 증가한 현상은 수심 증가와 유속 감소, 하상 구조의 단편화 등의 영향으로 모래에 굴을 파고 서식하며, 하상에 떨어진 FPOM (fine particulate organic matter)을 주워먹는 Chironomidae와 *Ephemera* spp. 등의 종이 지속적으로 출현함에 의한 결과이며, P의 증가는 지속적으로 공급되는 먹이원인 플랑크톤 또는 GC나 FC를 섭식하는 종 (*Sieboldius albardae*, *Cercion calamorum*, *Micronecta* sp. 등)에 의한 결과이다.

5. 군집안정성

서식 종의 저항력과 회복력을 반영하는 군집안정성 분석 결과, 저항력과 회복력이 모두 높은 section I의 종수는 공사 전 44종에서 공사 이후 17종으로 61.4% 감소하였고, 저항력은 낮고 회복력은 높은 section II의 종수는 16종에서 8종으로 50% 감소하였다. 저항력과 회복력이 모두 낮은 section III의 종수는 공사 중 8종으로 일시적 감소가 있었으나, 공사 전과 준공 이후에는 11종이 출현하였으며, 저항력은 높으나 회복력이 낮은 section IV의 종수는 2종에서 1종으로 50% 감소하였다(Fig. 6). Section I의 종수가 현저하게 감소한 것은 해당 수계의 대대적 서식처 변동 이력을 반영하는 결과이며, 준공 이후 section III의 종수가 회복된 결과는 환경 변화에 따른 일부 새로운 종 (*Mataeopsephus* KUa, *Davidius lunatus*, *Parachauliodes continentalis* 등)의 이입에 의한 결과로, 향후 지속적인 모니터링을 통해 해당 종의 정착 여부를 확인해야 할 필요성이 있다.

적 요

2009년 11월 착공되어 2011년 11월 준공된 낙동강 낙단보 구간의 상류와 하류 지점을 대상으로 2007년부터 2014년까지 8년간 연 4회 조사된 저서성 대형무척추동물의 변화 양상을 파악하였다. 8년간의 자료를 보 설치 이전인 2007년부터 2009년, 공사 기간이었던 2010년부터 2011년, 준공 이후인 2012년부터 2014년의 3개 시기로 구분하여 분석한 결과, 공사 이전에 비해 공사 이후에 전반적인 종수 및 개체수가 평균 51종 895 inds. m⁻²에서 25종 84 inds. m⁻²로 감소하는 경향을 보

였다. 특히 이러한 감소 경향은 낙단보의 하류에 비해 상류에서 두드러지게 나타났으며, 분류군별로는 Trichoptera의 감소 폭이 큰 것으로 나타났다. 낙단보 준공 이후 우점도는 증가, 다양도 및 풍부도는 감소하였으며, 준공 직후인 2012년에 일시적으로 큰 변화를 보였다. 섭식기능군은 준공 이후 GC와 P의 개체수 비율이 증가하였으며, 서식기능군은 BU의 개체수 비율이 증가하였다. 이러한 현상은 준설에 의해 수변부의 경사도가 비교적 높아짐에 따른 저수심지대 면적 감소, 보 설치에 의한 유속 감소, 하상 구조 중 모래 비율의 증가 등의 영향으로, 유속이 느린 수계에서 모래에 굴을 파고 서식하거나, 하상의 CPOM과 FPOM을 주워먹는 종의 비율이 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 또한 보 준공 이후 신규 이입된 종과 교란에 의해 영향을 받은 종들에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

사 사

본 연구의 일부는 환경부 국립환경과학원 낙동강물환경연구소에서 시행한 낙동강 수계 환경기초조사사업(연구과제명: 낙동강 보구간 수생태계 모니터링)의 지원으로 수행된 자료를 활용하였습니다.

REFERENCES

Baekken, T., A. Fjellheim and R. Larsen. 1984. Benthic animal production in a weir basin area in western Norway. *Regulated rivers* 223-232.

Dodd, H.R. and D.H. Wahl. 2007. Evaluation of Newberry weirs (rock riffles) for improving habitat quality and biotic diversity in Illinois streams. *Illinois Natural History Survey* 1-17.

ESK (The Entomological Society of Korea) and KSAE (Korean Society of Applied Entomology). 1994. Check list of insects from Korea. Kon-Kuk University Press, Seoul.

Fjellheim, A., J. Havardstun, G.G. Raddum and O.A. Schnell. 1993. Effects of increased discharge on benthic invertebrates in a regulated river. *Research and Management* 8: 179-187.

Higler, L.W. and H.H. Tolkamp. 1982. Hydropsychidae as bio-indicators. *Environmental Monitoring and Assessment* 3: 331-341.

Kaller, M.D. and K.J. Hartman. 2004. Evidence of a threshold level of fine sediment accumulation for altering benthic macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia* 518: 95-

- 104.
- 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.
- Kim, B.S., K.S. Sim, S.H. Kim, O.C. Kwon, E.W. Seo and J.E. Lee. 2013. The influence of artificial structures on benthic macroinvertebrate communities in streams. *Journal of Environmental Science International* **22**(3): 309-318.
- Kim, M.C., S.P. Cheon and J.K. Lee. 2013. Invertebrates in Korean freshwater ecosystems. Geobook, Seoul.
- KSSZ (The Korean Society of Systematic Zoology). 1997. List of animals in Korea (excluding insects). Academy books, Seoul.
- Kwon, S.J., Y.C. Jeon and J.H. Park. 2013. Checklist of organisms in Korea 7. Benthic macroinvertebrates. Eco and Nature, Seoul.
- Lawrence, J.E., M.R. Cover, C.L. May and V.H. Resh. 2014. Replacement of culvert styles has minimal impact on benthic macroinvertebrates in forested, mountainous streams of Northern California. *Limnologica* **47**: 7-20.
- Lenat, D.R. 1988. Water quality assessment of streams using a qualitative collection method for benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* **7**(3): 222-233.
- Margalef, R. 1958. Temporal succession and spatial heterogeneity in natural phytoplankton. p. 323-349. *In: Perspectives in marine biology* (Buzzati, A.A., ed.). University of California press.
- McGuire, D.L. 2007. Clark Fork river biomonitoring, macroinvertebrate community assessments. United States Environmental Protection Agency.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationship among functional properties of California Grassland. *Nature* **216**: 168-169.
- Merritt, R.W., J.R. Wallace, M.J. Higgins, M.K. Alexander, M.B. Berg, W.T. Morgan, K.W. Cummins and B. Bandeneeden. 1996. Procedures for the functional analysis of invertebrate communities of the Kissimmee River - floodplain ecosystem. *Florida Scientist* **59**(4): 216-274.
- Merritt, R.W., M.B. Berg and K.W. Cummins. 2009. An introduction to the aquatic insects of North America. 4th edition. Kendall/Hunt.
- 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? *Freshwater Biology* **41**: 197-209.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. John Wiley and Sons.
- Plafkin, J.L., M.T. Barbour, K.D. Porter, S.K. Gross and R.M. Hughes. 1989. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrates and fish. U.S.EPA.
- Resh, V.H. and J.K. Jackson. 1993. Rapid assessment approaches to biomonitoring using benthic macroinvertebrates. *In: Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates* (Rosenberg, D.M. and V.H. Resh eds.). Chapman and Hall, New York, NY, USA.
- Ro, T.H. 2002. Resilience and resistance of biological community: application for stream ecosystem health assessment. *Environmental Policy Studies* **1**(1): 93-112.
- Ro, T.H. and D.J. Chun. 2004. Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis. *Korean Journal of Limnology* **37**(2): 137-148.
- Robinson, C.T. 2012. Long-term changes in community assembly, resistance, and resilience following experimental floods. *Ecological Applications* **22**: 1949-1961.
- 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.
- Thomes, M.C. and F. Sheldon. 1997. River channel complexity and ecosystem processes: the Barwon Darling River, Australia. *Frontiers in Ecology* 193-206.
- Walther, D.A. and M.R. Whiles. 2008. Macroinvertebrate responses to constructed riffles in the Cache River, Illinois, USA. *Environmental management* **41**(4): 516-527.
- Wipfli, M.S. and C.V. Baxter. 2010. Linking ecosystems, food webs, and fish production: subsidies in salmonid watersheds. *Fisheries* **35**: 373-387.
- Won, D.H., S.J. Kwon and Y.C. Jeon. 2005. Aquatic insect of Korea. Korea ecosystem service press, Seoul.
- Yoon, I.B. 1988. Illustrated encyclopedia of Fauna & Flora of Korea. Vol. 30. Aquatic Insects. Ministry of Education.
- Yoon, I.B. 1995. Explanatory diagrams of aquatic insects. Jeongheangsa press, Seoul.