

ORIGINAL ARTICLE

금강 수계 백제보에서 어류의 종 특성 평가 및 생태평가모델 적용

문성대 · 한정호¹⁾ · 안광국^{1)*}

네오엔비즈 환경안전연구소, ¹⁾충남대학교 생명시스템과학대학 생명과학과

Fish Species Compositions and the Application of Ecological Assessment Models to Bekjae Weir, Keum-River Watershed

Seong-Dae Moon, Jeong-Ho Han¹⁾, Kwang-Guk An^{1)*}

Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co., Bucheon 420-806, Korea

¹⁾*Department of Biological Science, College of Biological Sciences and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea*

Abstract

The objectives of study were to evaluate fish species compositions of trophic guilds and tolerance guilds and apply ecological fish assessment (EFA) models to Bekjae Weir, Keum-River Watershed. The EFA models were Stream Index of Biological Integrity (SIBI) used frequently for running water and Lentic Ecosystem Health Assessment (LEHA) used for assessments of stagnant water. The region of Bekjae Weir as a "four major river project" was originally a lotic ecosystem before the weir construction (2010, B_{WC}) but became more like lentic-lotic hybrid system after the construction (2011, A_{WC}). In the analysis of species composition and ecological bioindicator (fish), fish species with a preference of running water showed significant decreases ($p < 0.05$), whereas the species with a preference of stagnant water showed significant increases ($p < 0.05$). After the weir construction, relative abundances of tolerant species increased, and the proportion of insectivores decreased. This phenomenon indicated the changes of biotic compositions in the system by the weir construction. Applications of SIBI and LEHA models to the system showed that the two model values decreased at the same time after the weir construction (A_{WC}), and the region became more like lentic-lotic hybrid system, indicating the degradation of ecosystem health. The model values of SIBI were 19 and 16, respectively, in the BWC and AWC, and the health conditions were both "C-rank". In the mean time, the LEHA model analysis showed that the values was 28 in the BWC and 24 in the AWC, thus the health was turned to be "B-Rank" in the BWC and "C-Rank" in the AWC. indicating a degradation of ecological health after the weir construction.

Key words : Fish, Keum-river watershed, Weir construction, Bekjae weir, Health assessment model

1. 서론

우리나라 하천 및 강은 아시아 문순지역에 위치하여 연강우의 하절기 집중 분포로 인해 잦은 홍수, 하천의 범

람이 빈번하게 보고되면서, 수체의 수리 시설관리 및 제방 안전성 등에 대한 관심을 지속적으로 기울여온 것이 사실이다. 최근에는 특히 4 대강 유역을 중심으로 노후 제방 보강, 하천 생태계의 서식지 및 생물 복원, 중소규

Received 15 January, 2015; Revised 30 March, 2015;

Accepted 1 April, 2015

*Corresponding author : Kwang-Guk An, Department of Biological Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
Phone: +82-42-821-6408
E-mail: kgan@cnu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

모 댐 및 홍수 조절지 건설을 위해 많은 예산들이 국토부 및 환경부로부터 투입되어 왔으며, 2010 - 2011년에는 전국의 4 대강 수계에 총 16개의 인공보(artificial weir)를 건설하여, 4 대강의 구조적 특성 및 수리수문학적 특성에 영향을 주었다(Ko 등, 2012; Lee 등, 2014).

국내·외의 인공보 및 소규모 댐에 대한 연구에 따르면, 수체내의 인공구조물의 건설은 하천의 흐름을 차단시키는 효과 때문에 일차적으로는 수온, 탁도와 같은 물리적 특성(Crisp, 1993), 유량 유속과 같은 수리·수문학적 특성(Macan, 1974) 및 수체내의 물질순환에 중요한 역할을 하는 화학적인 수질변화를 야기하는 것으로 알려져 있다(Stanley 등, 2002). 이러한 하천의 환경변화는 수체에 서식하는 생물에게 영향을 주며 특히, 어류와 같은 상위 소비자는 장거리 회유 및 이동(산란 등)에 직접적으로 영향을 주어 총체적으로는 다양한 생물들의 군집 구조 및 생태계 기능에 영향을 미칠 수 있다(Naiman 등, 1986).

일반적으로 자연형 하천에 만들어지는 인공구조물은 유수생태계에서 정수생태계로 전환되면서 각종 유기물과 영양염류의 유입 및 체류를 증가시켜 고유종 감소 또는 특정 종의 이상증식 등이 발생될 수 있다(Dadzie, 1980). 심도 있는 하천 생태계 연구를 종합하여 얻어진 일련의 하천 불연속 개념 (Serial discontinuity concept, SD)에 따르면, 연속적인 댐 혹은 보의 건설은 하천 생태계에 물리적/서식지 특성 변화(Gehrke와 Harris, 2001), 화학적 수질 변화(Krenkel 등, 1979) 및 생물학적 군집 변화(Sweeney 등, 1986)가 예상되나 현재 우리나라에서 이에 대한 연구 및 관리대책 마련은 극히 미흡한 실정이다.

최근 금강 수계 중·하류역에는 세종보, 공주보, 백제보 3개가 2010년에 건설되었고, 이들 보의 건설 이전에 비해 수위 증가 및 수체류 시간의 증가를 가져왔다. 특히 금강 수계 하류부에 건설된 백제보의 경우 2012년 10월에 대규모 어류폐사가 발생하였고, 이후 어류 군집 및 개체수 감소가 보고되었다(Kwon 등, 2013). 우리나라 하천의 중·하류역에 건설된 댐 및 보에 대한 연구에 따르면, 주암댐에서는 어류의 군집구조에 대한 영향을 보고한 바 있고(Choi와 Hwang, 1991), 영주댐에서는 내성천 부근에서 어류의 종 조성 및 군집특성에 영향을 준 것으로 보고되었다(Kang 등, 2011b). 또한, 그 이외에도,

영천댐(Park 등, 2005) 및 용담댐(Yang 등, 2012) 등에서 인위적 구조물 건설은 어류상, 어류 개체군 및 어류군집에 영향을 주는 것으로 보고된 바 있다.

기존의 수체 평가자들은 급속도로 악화되는 수중 생태계 오염을 파악하기 위한 일환으로 주로 화학적 모니터링을 빈번하게 이용해 왔다(U.S. EPA, 1991). 그러나 수질악화는 화학적 오염뿐만 아니라 인위적인 구조물 설치로 인한 하상구조 변경, 유로변경 및 유량변동 등에 의해서도 악화되기 때문에, 단순 화학적 평가만으로는 수계의 총체적인 건강 상태를 진단하기 어렵다(Karr, 1981; Karr 등, 1986). 따라서 미국 환경부(U.S. EPA)에서는 수생태계 건강성평가를 위한 도구로서 어류를 이용한 생물지표 기준 및 등급(biological criteria)시스템을 도입하여 수체의 생태 건강도를 평가하고 있다(Barbour 등, 1999). 우리나라에서는 An 등(2001; 2006)에 의해 개발된 하천 생태건강도 평가 모델(Index of Biological Integrity, IBI)과 정수 생태계 평가를 위한 LEHA 모델(An과 Han, 2007)을 이용하여 하천 및 호수 등의 다양한 수생태 건강성 평가에 이용되고 있다(An과 Shin, 2005; An과 Lee, 2006; Han과 An, 2008; 2010). 최근 금강에 건설된 백제보는 보 건설 이전에는 유수생태계의 전형적인 하천 생태계이었으나, 보 건설 이후에는 수체류 시간의 증가에 따라 정수 생태계 특성을 가진 수체로 전환됨에 따라 수체평가 모델의 적용이 모호하게 되었다. 따라서, 이런 유수 정수형 수체에서는 유수 생태 평가 모델 또는 정수 생태 평가 모델 적용성 검토가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 금강 백제보 수역의 어류 종 조성 및 군집구조 특성을 조사하였고, 보의 건설에 따른 횡단 구조물 설치가 어류 종 특성, 트로픽 길드 및 내성도 길드에 어떻게 영향을 주는지를 평가 하였다. 또한, 어류의 지표특성에 대한 매트릭을 이용하여, 유수형 수체의 건강도 평가 모델인 SIBI와 정수형 수체의 건강도 평가 모델인 LEHA를 동시에 적용하여 보 건설에 대한 건강도 영향을 분석하였다. 즉, 본 연구에서는 생태계 변화에 대해 많은 자료를 이용하여 변화 특성을 파악하는 관점 보다는 두 개 모델의 적용시의 유사점 및 차이점에 초점을 두어 실시하였다. 현재 국내·외 적으로 유수역에서 정수역으로 전환되는 하천/강의 경우 어떠한 모델을 적용하는 것이 타당한지에 대한 기준이 없고, 두 가지 모델을 동시에

적용한 사례가 없어 건강도 평가에 대한 적용 방법 전환이 필요한 실정이다. 본 연구에서 수행된 백제보 수역의 생태 건강도 분석법은 향후 변화된 수생태계 평가모형 연구의 기초자료로 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 현장 조사지역 및 어류채집

본 연구 대상 지역은 금강 수계의 중·하류역에 위치한 백제보로서, 하폭이 100~300 m에 달하며 하천차수는 6차 하천에 속한다. 어류조사는 Barbour 등(1999)에 의거하여 최대 일주기 대기온도(maximum daily temperature)가 19℃ 이상인 6월, 10월에 실시하였고, 2010~2011년도 까지 2년간 조사하였다. 조사시기로서 하절기 및 동절기 조사는 우리나라 생태 건강도 평가법에 의거하여 제외되었다. 이런 이유는 장마기인 7 - 8월은 유량증가 및 유속변화 등의 물리적 영향으로 인해 어류군이 상류 혹은 하류로 이동할 수 있으며, 반대로 동절기에는 낮은 수온과 유량감소 등으로 인해 어류가 수심이 깊은 하류로 이동할 수 있는 특성 때문이다. 또한 조사 구간은 본래 백제보의 상류역, 하류역 및 인근 지천들을 조사하였으나, 본 연구에서는 정수역 및 유수역 건강도 평가모델의 적용성 평가를 위해 보 상류 구간의 자료만을 분석하였다. 2010년 조사 시기를 보 건설 이전 기간

(before the weir construction, B_{wc}), 2011년 조사 시기는 보 건설 이후 기간(after the weir construction, A_{wc})으로 구분하여 어류 종 구성도 변화 및 모델 적용성을 평가하였다.

어류 채집은 Ohio EPA(1989) 방법에 기초하여 우리나라의 특성에 맞게 수정·보완된 An 등(2001)의 방법을 따랐다. 조사거리는 200 m로 제한하였고(Ohio EPA, 1989), 조사에 소요된 시간은 Karr(1981)와 Rankin과 Yoder(1999)에 의한 경험적 방법으로서 최대 종풍부도 곡선(maximum species richness line)을 통하여 60분으로 하였다. 어류 채집도구는 투망(망목: 7 × 7 mm) 및 족대(망목: 4 × 4 mm)를 동시에 이용하였다. 각 채집도구의 선정은 채집도구의 효율성을 바탕으로 수정·보완된 방법을 적용하였다(Han과 An, 2010). 수심이 얇은 수초 근처 지역에서 족대를 이용하였으며, 수심이 깊거나 개방된 구간에서는 투망을 이용하였다. 채집한 어류는 현장에서 Kim과 Kang(1993), Kim(1997), Kim과 Park(2002)에 의거하여 동정하였고, 동정이 확실치 않은 종의 경우 10% 포르말린 용액에 고정한 후 실험실로 운반하여 동정하였다. 채집된 어류의 개체수 산정은 어류체장의 길이가 20 mm 이하인 경우 제외하였고(Barbour

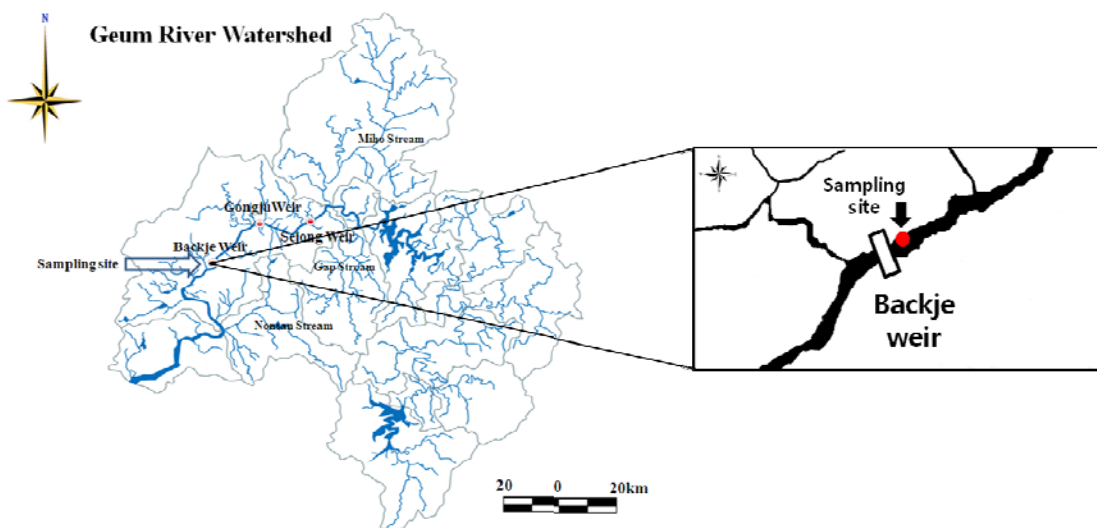


Fig. 1. The sampling location of Bakjae Weir in Geum-River watershed.

등, 1999), 비정상어종은 U.S. EPA(1993)의 외형적 비정상 평가 기준에 따라 분류하였다.

2.2. 어류의 생태 지표 특성 분류

어류 생태지표종 구분방식은 U.S. EPA(1993) 및 Barbour 등(1999)의 방식에 의거하여 분석하였다. 생태지표특성은 민감종(sensitive species, SS), 중간종(intermediate species, IS) 그리고 내성종(tolerant species, TS)으로 분류하였다. 어류의 섭식특성은 충식종(insectivore species, I), 잡식종(omnivore species, O), 육식종(carnivore species, C)으로 대별하였다. 섭식 특성의 구분은 다양한 먹이원이 동시에 존재할 때, 1차적으로 이용하는 먹이자원에 근거하여 분류하였다(Ohio EPA, 1989).

2.3. 생태건강도 다변수 생태모델 (Multimetric Eco-Model)

백제보 건설구간의 생태건강도를 평가하기 위해서 유수생태계의 건강도 평가 모형인 SIBI모델과 정수 생태계 모형인 LEHA 모델을 동시에 적용하여 평가하였다. SIBI 모델은 우리나라 하천의 특성에 맞게 수정·보완한 환경부의 수생태계 건강성 조사 및 평가(Ministry of Environment, 2009)방법에 따라 총 8개 메트릭을 이용하였다. 각 메트릭 항목은 M1: 국내종의 총 종수, M2: 여울성 저서종수, M3: 민감종수, M4: 내성종의 개체수 비율, M5: 잡식종의 개체수비율, M6: 국내종의 충식종 개체수 비율, M7: 채집된 국내종의 총 개체수 및 M8: 비정상종의 개체수 비율을 이용하였다. 평가 방법은 An 등(2006)이 제시한 바와 같이, 각 메트릭 별로 “5”, “3”, “1”의 점수를 부여하고, 8개 메트릭 항목의 총합으로 모델값을 구하여 최적상태(A; excellent, 36~40), 양호상태(B; good, 26~35), 보통상태(C; fair, 16~25), 불량상태(D; poor, < 15)로 평가등급을 산정하였다.

유수 생태계 평가를 위한 LEHA 모델은 정수역의 생태 특성을 바탕으로 수정·보완된 방법으로서 Han과 An(2010)에 의해 개발된 모델을 적용하였다. 모델의 각 메트릭 특성은 크게 세 가지로 구분되는데 첫째는 어류 종조성과 특성(species composition)을 반영하여 M1: 어류의 종다양도 지수, M2: 민감성 어종의 개체수, M3: 내성종의 상대빈도로 구성되었다. 둘째, 영양단계 특성(trophic composition)을 반영한 메트릭으로 M4: 잡식

종의 상대빈도, M5: 충식종의 상대빈도 메트릭을 이용하였다. 셋째, 종풍부도 및 개체건강도 특성(fish abundance and fish health)을 반영한 메트릭으로 M6: 군집 우점도 지수, M7: 배스의 상대빈도 및 M8: 비정상개체 출현빈도를 이용하였다. 본 LEHA 모델 평가 및 등급산정을 위해 US EPA(1994)의 정수생태계 평가 모델을 기본으로 우리나라 호소 생태 특성에 맞게 수정·보완된 등급을 이용하였다. LEHA 모델 등급의 구분은 각메트릭 별로 “5”, “3”, “1”의 점수를 부여하고 총 8개 메트릭 점수를 합산하여 건강도 평가등급을 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 어류의 종 성분 및 상대풍부도

본 연구에서 2년의 연구기간 동안 백제보에서 채집된 어류는 총 8과 22종으로서 높은 종 풍부도를 보였다(Table 1). 이런 결과는 최근 금강 본류에서 채집된 종 목록과 비교해 볼 때, 금강 수계 전체의 약 25% 수준으로 나타났다. 어류 조사에서는 모래무지아과(Gobioninae) 어류가 9종으로서 전체 중 41%를 차지하여, 다른 분류군에 비해 가장 높게 우점도를 보였다. 그 외의 전체 상대풍부도가 9%를 상회하는 어종은 납자루아과(Acheilognathinae) 3종으로서 상대풍부도는 15%로 나타나 일반적으로 정체되는 수역에서 서식하는 종이 우점하는 것으로 나타났다. 그 다음으로 피라미아과(Danioninae, 3종 15%), 강준치아과(Cultrinae, 2종 9%) 및 검정우럭과(Centrachidae 2종, 9%)가 높은 풍부도를 보였다.

백제보의 건설 이전/이후의 어류 종조성 분석에 따르면, 보 건설 이전에 상대풍부도가 가장 높은 종은 뿔꼬치(*Microphysogobio jeoni*, 22%) 및 피라미(*Zacco platypus*, 21%)가 20%이상을 상회하였고, 그 다음으로 꼬리(*Opsarichthys uncirostris amurensis*, 12%) 누치(*Hemibarbus labeo*, 7.1%), 긴몰개(*Squalidus gracilis majimae*, 6.7%)로 나타났다. 반면, 보 건설 후 어류의 상대풍부도는 꼬리가 26%로 최고치를 보였고, 강준치(*Erythroculter erythropterus*) 22%, 몰개(*Squalidus japonicus coreanus*) 14%, 뿔꼬치 9.4% 순으로 출현율이 감소하였으며, 유수 생태계의 우점종인 피라미는 우점종에서 누락되어 보 건설 후 수체는 정수형 선호 어종으로 변화된 것으로 나타났다.

Table 1. Fish fauna and species compositions along with tolerant, trophic, and habitat guilds in the Bakjae Weir and the comparisons between before-the-weir construction (Bwc, 2010) and after-the-weir construction (Awc, 2011)

Species	Guild Types				Bwc (2010)				Awc (2011)			
	Tolerance guild	Trophic guild	Habitat guild		1st	2nd	TNI	RA (%)	1st	2nd	TNI	RA (%)
<i>Microphysogobio jeoni</i> *	IS	I	-		60	8	68	21.8	5	6	11	9.4
<i>Zacco platypus</i>	TS	O	-		55	9	64	20.5	2		2	1.7
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	TS	C	-		14	23	37	11.9	20	10	30	25.6
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I	-		1	21	22	7.1	3	5	8	6.8
<i>Squalidus gracilis majimae</i> *	SS	I	-		21		21	6.7	3		3	2.6
<i>Lepomis macrochirus</i> †	TS	I	-			18	18	5.8				
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	IS	O	-		1	16	17	5.4		3	3	2.6
<i>Hemibarbus longirostris</i>	IS	I	-		1	13	14	4.5				
<i>Micropterus salmoides</i> †	TS	C	-			11	11	3.5				
<i>Acanthorhodeus macropterus</i>	IS	O	-			8	8	2.6				
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	-			6	6	1.9	3		3	2.6
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	TS	I	-			6	6	1.9				
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O	-			5	5	1.6		1	1	0.9
<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i> *	IS	O	-			4	4	1.3	2	2	4	3.4
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i> *	IS	I	-			4	4	1.3				
<i>Odontobutis interrupta</i> *	IS	C	-			3	3	1.0				
<i>Squaliobarbus curriculus</i>	IS	O	-		2		2	0.6		1	1	0.9
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I	RB		1		1	0.3				
<i>Hemiculter eigenmanni</i> *	TS	O	-		1		1	0.3				
<i>Acanthorhodeus gracilis</i> *	IS	O	-						8		8	6.8
<i>Squalidus japonicus coreanus</i> *	TS	O	-						15	1	16	13.7
<i>Erythroculter erythropterus</i>	TS	C	-						26		26	22.2
Total Number of Species					10	15	19	19	10	9	14	14
Total Number of Individuals					157	155	312	312	87	30	117	117

*: Endemic species, †: Exotic species, Tolerance guild: (SS: Sensitive species, IS: Intermediate species, TS: Tolerance species), Trophic guild: (I: Insectivore, O: Omnivore, C: Carnivore), Habitat guild: (RB: Riffle Benthic), TNI: Total number of individuals, RA: Relative abundance

금강수계의 기종의 어류 종조성 보고(Hur 등, 2009a, 2009b)에 따르면, 피라미가 단연 우점종이고 참갈겨니(*Zacco koreanus*), 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*) 등이 우점하는 것으로 보고하였다. 그 후 2011년 Hur 등(2011) 및 Kang 등(2011a)은 피라미 및 참갈겨니를 우점종으로 보고하였고, 2012년 Kang(2012)은 피라미, 참갈겨니, 쉬리, 모래무지(*Pseudogobio esocinus*) 순서로 우점하는 종조성을 확인하였다. 각 문헌에서 보고된 우점종은 피라미이고 그 다음으로 참갈겨니가 아우점종으로 확인되었다. 본 연구의 경우 우점종에서 피라미의 뚜렷한 차이를 볼 수 있는데, 이는 조사지점의 차이(문헌: 금강 본류 및 지류를 포함/ 본 연구: 백제보 수역)에 따른 결과로 나타났다. 즉, 금강수계의 본류 및 지류를 포함하는 전체를 보면 건설 전, 후 큰 차이가 없어 보이나 본 백제보 수역처럼 보 건설 구간에서는 우수종의 상대풍부도 측면에서 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

채집종에 대한 보 건설 전, 후의 출현 여부 분석에 따르면 보 건설 이전에는 출현하였지만, 건설 후 채집되지 않은 종은 블루길, 참마자, 배스, 큰납자리, 동자개, 중고기, 얼룩동사리, 밀어로 나타났다. 이러한 종은 단기간에 완전히 사라진 것이 아니라 상대적으로 풍부도가 낮아져 채집이 되지 않은 것으로 추정되었다. 보 건설 이후에 새롭게 출현된 종은 정수역 선호종인 가시납자리, 물개, 강준치로 나타나 보 건설 후 정수역 선호종들의 출현빈도가 높은 것으로 나타났다.

본 연구 조사기간에 채집된 한국 고유종(Endemic species)은 전체 어종 중 36.4%였고, 조사시기별로 채집된 고유종은 보 건설 이전 및 건설 직후 시기 모두 27.3%였다. 보 건설 이전에 채집된 어류는 전체 19종 312개체였으나, 보 건설 이후에는 14종 117개체로 일부 고유종의 감소를 보였다(Table 1). 외래종 분석에 따르면, 보 건설 이전에는 배스, 블루길이 출현하였으나, 보 건설 후에는 채집되지 않았다. 또한, 모든 조사에서 우리나라 환경부 지정 천연기념물과 법적 보호종은 백제보 구간에서 전혀 채집되지 않았다.

3.2. 어류 생태지표종 특성

조사시기별로 채집된 어류의 내성도 길드(Tolerance guild) 분석에 따르면, 민감종(Sensitive sp.)은 보 건설 이전/이후 모두 1차 조사에서만 채집되었고, 보 건설 후

종수가 감소된 것을 확인하였다(Fig. 2). 수질 및 서식지 교란 측면에서 중간종(Intermediate sp.)은 보 건설 이전/이후 시기별로 구분하여 볼 때, 2차 조사에는 차이가 없었으나 1차 조사에서 종수 감소 현상을 보였다. 또한 수질 오염 및 서식지 교란에 대해 우점특성을 보이는 내성종(Tolerant sp.)은 1차 조사에서 보 건설 후 증가양상을 보였고, 2차 조사에서도 유사한 것으로 나타났다. 보 건설 이전에 채집된 어류의 내성도에 따른 대표어종은 민감종의 경우 긴몰개가 1종으로 100%였고, 중간종은 10종 중에서 53.5%가 됨경모치였다.

보 건설 이후에 채집된 어류 내성도 분석에 따르면, 민감종은 3%, 중간종은 21%, 내성종은 76%로서 극명한 내성종 우점현상을 보였다. 풍부도가 높은 어류에 대한 내성도 분석에 따르면 민감종의 경우 긴몰개 1종이었고, 중간종은 6종 중에서 됨경모치가 37%, 내성종은 7종 중에서 끄리가 36%를 차지하였다. 전체적으로 보 건설 후 민감종과 중간종은 전반적으로 감소되었고, 내성종은 건설 후 증가되는 경향을 보였다. 이는 공사로 인한 탁수발생과 유역의 흐름이 완화되면서 민감종은 감소하고, 중간종 혹은 내성종은 증가한 것으로 사료되었다.

어류의 트로픽 길드 분석에 따르면, 보 건설 이전에 채집된 충식종(Insectivore)은 보 건설 후 감소하는 것으로 나타났고, 육식종(Carnivore)은 반대로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2). 이는 Yang 등(2012) 연구에서 용담댐 건설 직후 그 곳에 서식하는 어류가 충식성 어류 군집구조에서 잡식성으로 변화되는 것과 유사한 경향성을 보였다. 잡식종(Omnivore)의 상대빈도는 1차 조사에서 보 건설 후에 감소한 반면, 2차 조사에서는 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로 문헌에 따르면(Karr, 1981; U.S. EPA, 1993), 잡식종은 유기물 오염도가 증가할수록 상대풍부도가 증가하는 특성을 보인다는 점을 감안한다면, 백제보는 하천 유기물오염이 이전에 비해 증가할 가능성이 있는 것으로 사료되었다.

3.3. 생태 서식지 변화에 따른 어류상 특성

보 건설과정에서 우수역이던 하천이 정수역으로 전환되면서 하천에 서식하는 어류의 종조성 변화를 우수역 선호종과 정수역 선호종으로 구분하여 분석한 결과에 따르면, 우수역을 선호하는 어종의 상대풍부도는 감소한 반면 정수역을 선호하는 어종은 증가하는 경향을 보였다

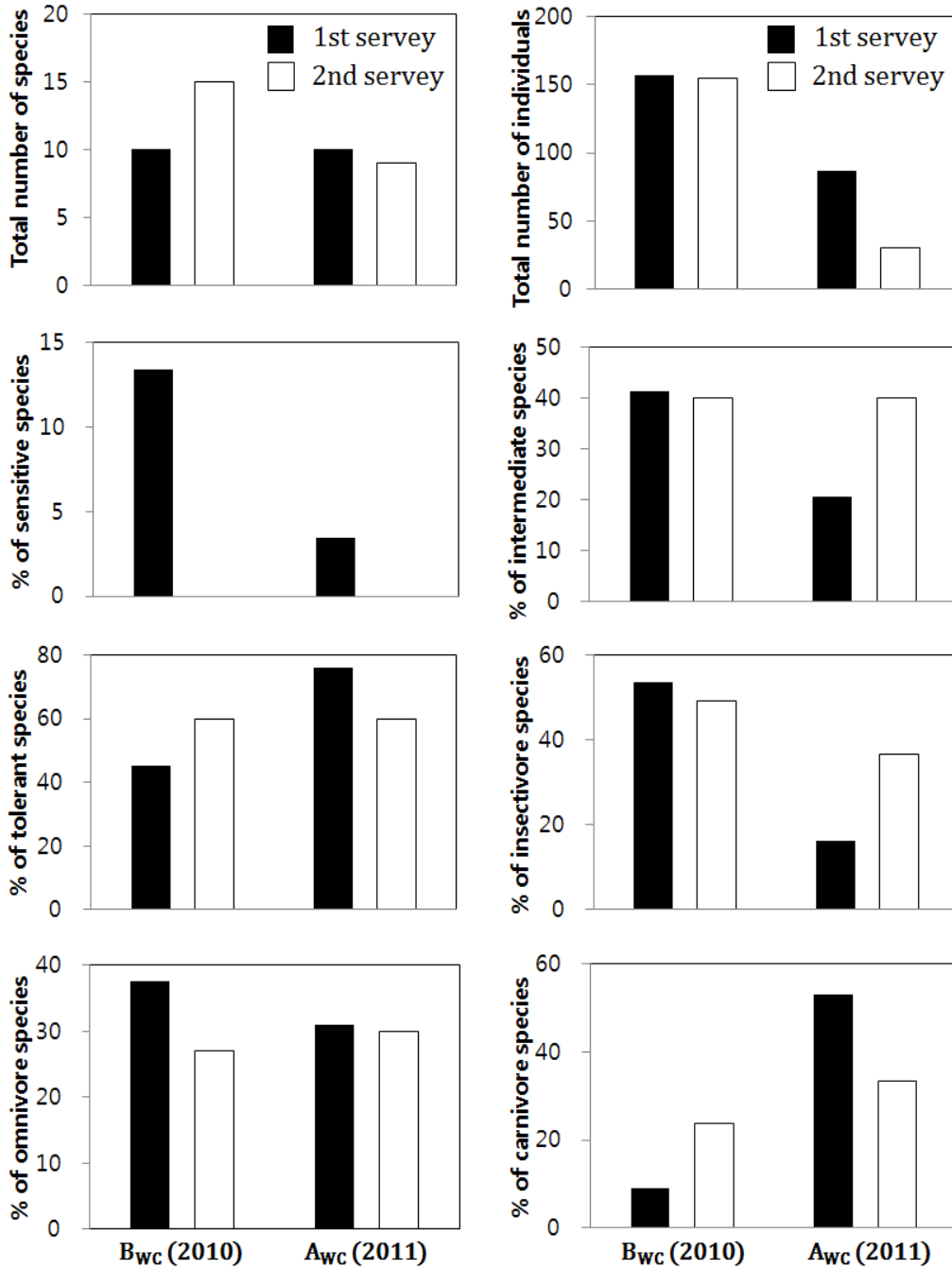


Fig. 2. Comparisons of species compositions and tolerance / trophic guilds between before-the-weir construction (Bwc) and after-the-weir construction (Awc).

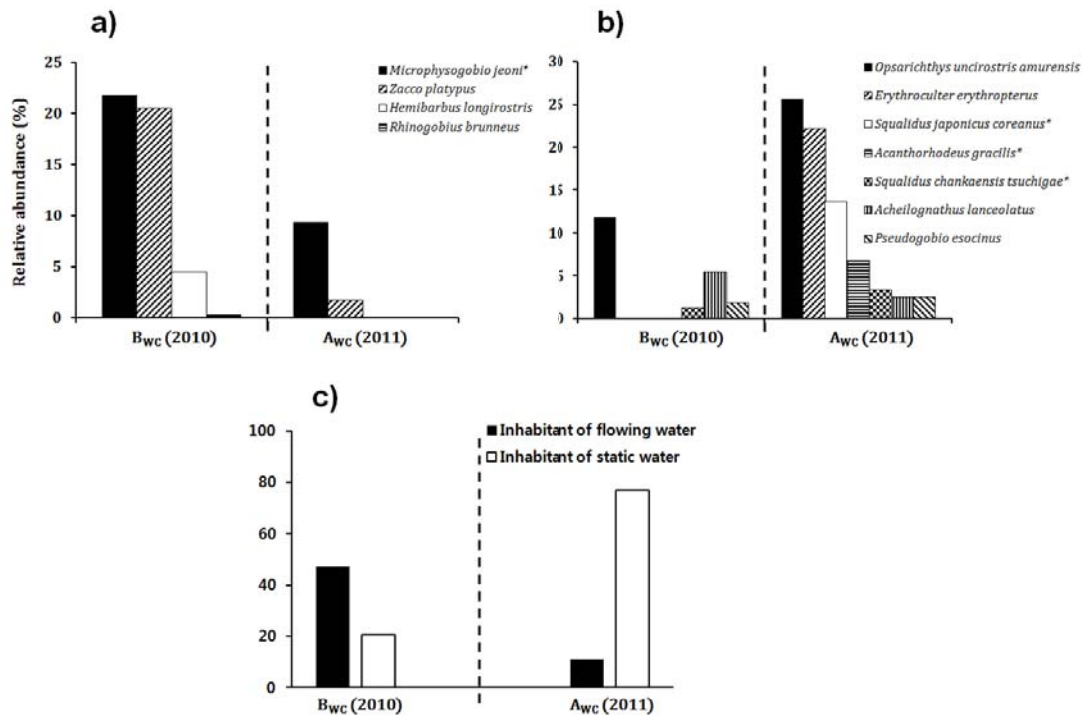


Fig. 3. Comparisons of temporal relative abundance of fish species before-the-weir construction (Bwc, 2010) and after-the-weir construction (Awc, 2011). a) the lotic-type species (running water) species, b) lentic-type species (stagnant water), and c) the summation of relative abundance (*: endemic species).

(Fig. 3). 어류 생태 서식처에 대한 특성은 Kim(1997), Ministry of Environment(2009)에 의거하여 유수역 서식종과 정수역 서식종을 구분하였다. 1차적으로 유수역을 선호하는 어종 중에서 뽕명모치, 피라미, 참마자, 밀어에 대해 시기별 채집현황에 따르면, 보 건설 후 채집된 개체수의 상대빈도는 적게는 약 2 배에서 크게는 12배까지 감소한 것으로 나타났다(Fig. 3a). 특히 참마자, 밀어의 경우 보 건설 이전에는 각각 14개체, 1개체가 채집되었으나, 보 건설 후에는 채집되지 않아 상대적으로 출현 빈도가 감소한 것으로 나타났다.

한편, 정수역 선호종은 *꼬리*, *강준치*, *몰개*, *가시납지리*, *참몰개*, *납자루*, *모래무지*로 나타났고, 이들 중 *납자루*를 제외한 모든 종은 보 건설 후 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 3b). 특히, *참몰개*는 약 2.7배 증가하였고, *꼬리*는 2.2배, *모래무지*는 1.3배 증가하여 정수역 선호도가 뚜렷하게 나타났다. *강준치*, *몰개*, *가시납지리*

의 어류들은 보 건설 전에는 채집되지 않았으나, 보 건설 후 새롭게 출현한 어종으로 나타나 원래 없던 종이 출현했다기 보다는 상대 출현빈도가 증가한 것으로 보여진다. 유수역 선호어종과 정수역 선호어종의 전체적인 상대빈도를 비교하면 보 건설 이전 시기의 유수역 어종의 상대빈도는 47.1%였고, 보 건설 직후의 상대빈도는 11.1%로 감소하였다(Fig. 3c). 반면, 정수역 어종의 상대빈도는 보 건설 이전에 20.5%였으나, 보 건설 후 76.9%로서 높은 증가 양상을 보였다.

정수역 선호종 및 유수역 선호종의 빈도를 종합한 결과에 따르면, 보 건설 후 유수역을 선호하는 어류상이 정수역 선호종으로 뚜렷하게 변한 것을 알 수 있다. Yang 등(2012)의 보고에 따르면, 댐 건설로 인해 유수역이던 하천이 정수역으로 전환되면서 어류의 종조성에 미치는 영향은 유수성 어종인 *돌고기*, *참중고기*, *돌마자*, *참갈겨니*의 상대풍부도가 감소하였고, 정수성 선호 어종인 *누*

치, 꼬리 등은 증가하였다. 본 연구에서는 돌고기, 참중고기, 돌마자, 참갈겨니가 채집되지 않아 직접적인 비교는 될 수 없지만, 꼬리가 증가한 것은 유사하게 유수성 어류가 증가한 것으로 해석되었다.

3.4. 보 건설 전/후의 SIBI 및 LEHA 다변수 어류 모델 평가

보 건설에 따른 백제보 수역의 생태 건강도를 평가하기 위해서 SIBI의 유수성 수체 평가 모델과 정수성 수체 평가 모델인 LEHA 모델을 동시에 적용 분석한 결과는 Table 2와 같다. 보 건설 후 SIBI와 LEHA 모델 값은 감소되어 전체적인 생태 건강도가 악화된 것으로 나타났다. 보 건설 전에 SIBI 모델 값은 평균 19로서 생태 건강도는 C 등급이었고, 보 건설 후 모델 값은 16으로 일부 수치는 감소한 것으로 나타났다. 한편, 정수형 수체의 평가 모델인 LEHA 모델의 경우에는 보 건설 이전에 모델 값은 28, B등급이었으나, 보 건설 후 모델 값은 24, C등급으로 악화된 것으로 나타났다. 이는 보 건설 직후에 채집된 어류 중 꼬리, 물개, 강준치 등 내성종(Tolerant sp.)의 상대빈도가 높아졌기 때문에 결과적으로 등급이 낮아진 것으로 사료되었다. 충식종의 상대빈도의 경우 보 건설 직후에 현저히 낮아졌기 때문에 이 또한 등급하락에 기여한 것으로 나타났다. 충식성 어류는 주로 자연 상태의

상류 서식지에 서식하는 것이 일반적이며 담호나 저수지의 경우는 잡식성 어류가 주로 서식한다. Yang 등(2012)에서도 댐 건설은 충식성 어류(Insectivore sp.)의 감소를 가져온 것으로 보고되어, 본 연구결과와 유사하게 나타났다.

유수성 수체의 생태평가 모형인 SIBI 모델값의 평균은 19에서 16으로 감소하였는데, 이러한 이유는 국내종의 충식종의 감소와 충식종 개체수 비율이 낮았기 때문이며, 이로 인해 M1, M6 메트릭 점수가 감소하였다. LEHA 모델값은 보 건설 후 내성종의 상대빈도가 높아졌고, 충식종의 상대빈도가 낮았기 때문에 M3, M5 메트릭 모델 값이 낮았다. 하지만 외래종 이면서 최상위 포식자인 배스의 상대빈도는 보 건설 후 채집이 되지 않아 M7 메트릭 점수는 오히려 증가하는 결과를 보였다. 전체적으로 정수형 수체 평가모형인 LEHA 모델값과 등급 하락에 미치는 영향은 내성종의 상대빈도 증가와 충식종의 상대빈도 감소가 주된 영향으로 나타나 생태건강도에 악 영향을 주었다.

4. 결론

유수역에서 정수역으로 전환될 것으로 예상되는 지역

Table 2. Ecological health assessments of before-the-weir construction (Bwc) and after-the-weir construction (Awc) using multimetric eco-models of Stream Index of Biological Integrity (SIBI) and Lentic Ecosystem Health Assessment (LEHA). In the SIBI model, M1~M4 = species composition, M5~M6 = trophic composition, and M7~M8 = fish abundance & individual health. In the LEHA model, M1~M3 = species composition, M4~M5 = trophic composition, M6~M8 = fish abundance & individual health

Model metrics	BWC (SIBI Model)		AWC (SIBI Model)		LEHA Model	
	1st survey	2nd survey	1st survey	2nd survey	BWC	AWC
M1	10 (3)	13 (3)	10 (3)	9 (1)	2.4 (5)	2.1 (5)
M2	1 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	1 (1)	1 (1)
M3	1 (1)	0 (1)	1 (1)	0 (1)	53 (5)	72 (1)
M4	45 (1)	60 (1)	76 (1)	60 (1)	32 (3)	31 (3)
M5	38 (3)	27 (3)	31 (3)	30 (3)	51 (5)	21 (3)
M6	54 (5)	37 (3)	16 (1)	37 (3)	12 (1)	15 (1)
M7	157 (1)	126 (1)	87 (1)	30 (1)	4 (3)	0 (5)
M8	0 (5)	0 (5)	0 (5)	0 (5)	0 (5)	0 (5)
Sum of Scores	20	18	16	16	28	24
Mean	19		16		28	24
Health criteria	C		C		B	C

에 대해 두 가지 생태건강도 평가 모델을 적용한 결과에 따르면, SIBI 모델의 경우 모델 값의 일부 감소가 있었지만 등급에는 변화가 없었고, LEHA 모델은 모델값 감소 및 생태 건강도 등급의 뚜렷한 악화를 보였다. 현재의 연구 결과를 종합해 보면, 백제보는 이미 수체류 시간이 적게는 3배에서 5배 이상 증가하였고, 수위도 이미 최대 6m 이상의 높은 수위를 보이며, 최근 호수 및 정수형 수체에서 빈번히 발생하는 수화현상(Algal bloom)이 보고되고 있어 현재 백제보는 좀 더 정수형 수체에 가까운 것으로 평가되었다. 이런 상황은 기존의 백제보 지역 흐름이 분명히 존재하는 유수역에서 흐름이 극히 완화된 정수역으로 전환된 것으로 예상되는 바 이런 경우 정수 생태건강도 평가 모델인 LEHA 모델을 적용하는 것이 합당할 것으로 사료되었다.

상기의 종합적 연구에서 백제보와 같이 강의 중/하류역에 건설된 인공구조물은 수체류 시간을 증가시켜 유수역 환경은 정수역 환경으로 서식지 및 수리수문학적으로 특성이 변화되고, 이에 따라 어류의 종 조성 및 트로픽 길드에 영향을 주어 수생태계의 전반적인 구조와 기능에 영향을 줄 수 있는 것으로 추측되었다. 그러나 본 연구는 단기적인 연구이기 때문에 향후 장기적인 연구 및 자료 축적을 통해 어류의 종 조성 및 생태 건강도의 추이를 지속적으로 지켜봐야 할 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 연구는 “충남대학교 자체연구비 과제”에 의해 수행되었습니다.

REFERENCE

- An, K. G., Jung, S. J., Choi, S. S., 2001, An Evaluation on Health Conditions of Pyong-Chang River using the Index of Biological Integrity (IBI) and Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI), Korean J. Limnol., 34, 153-165.
- An, K. G., Shin, I. C., 2005, Influence of the Asian Monsoon on Seasonal Fluctuations of Water Quality in a Mountainous Stream, Korean J. Limnol., 38, 54-62.
- An, K. G., Lee, J. Y., Bae, D. Y., Kim, J. H., Hwang, S. J., Won, D. H., Lee, J. K., Kim, C. S., 2006, Ecological Assessments of Aquatic Environment using Multi-metric Model in Major Nationwide Stream Watersheds. Korean Society on Water Environment, 22, 796-804.
- An, K. G., Lee, E. H., 2006, Ecological Health Assessments of Yoogu Stream Using a Fish Community Metric Model, Korean J. Limnol., 39, 310-319.
- An, K. G., Han, J. H., 2007, A Development of Multi-metric Approach for Ecological Health Assessments in Lentic Ecosystems, Korean J. Limnol., 40, 72-81.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D., Stribling, J. B., 1999, Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers, USEPA, Washington.
- Choi, C. G., Hwang, Y. J., 1991, On the Fish Communities of the Posong River, Korean J. Limnol., 24, 199-206.
- Crisp, D. T., 1993, The environmental requirements of salmon and trout in fresh water, Freshwater Forum, 3, 176 - 202.
- Dadzie, S., 1980, Recent changes in the fishery of a new tropical man-made lake Lake Kamburu (Kenya), Journal of Fish Biology, 16, 361-367.
- Gehrke, P. C., Harris, J. H., 2001, Regional-scale effects of flow regulation on lowland riverine fish communities in New South Wales, Australia, Regulated Rivers: Resource Management, 17: 369-391.
- Han, J. H., An, K. G., 2008, Applications and Assessments of a Multimetric Model to Namyang Reservoir, Korean J. Limnol., 41, 228-236.
- Han, J. H., An, K. G., 2010, Analysis of Fish Fauna by Sampling Gear as a Preliminary Survey for Ecosystem Health Assessments in Jinyang Reservoir, Korean J. Limnol., 43, 103-116.
- Hur, J. W., Park, S. Y., Kang, S. U., Kim, J. K., 2009a, Physical Habitat Assessment of Pale Chub (*Zacco platypus*) to Stream Orders in the Geum River Basin, Korean J. Environ., Biol., 27, 397-405.
- Hur, J. W., Park, J. W., Kang, S. U., Kim, J. K., 2009b, Estimation of Fish Fauna and Habitat Suitability Index in the Geum River Basin, Kor. J. Env. Eco., 23, 516-527.
- Hur, J. W., In, D. S., Jang, M. H., Kang, H. S., Kang, K. H., 2011, Assessment of Inhabitation and Species Diversity of Fish to Substrate Size in the Geum River Basin, Journal of Environmental Impact Assessment, 20, 845-856.
- Kang, H. S., Im, D. K., Hur, J. W., Kim, K. H., 2011a,

- Estimation of Habitat Suitability Index of Fish Species in the Geum River Watershed, KSCE J. Civil Engineering., 31, 193-203.
- Kang, Y. H., Kim, S. K., Hong, G. B., Kim, H. S., 2011b, Change of Fish Fauna and Community Structure in the Naeseong Stream around the Planned Yeongju Dam, Korean J. Limnol., 44, 226-238.
- Kang, H. S., 2012, Comparison of Physical Habitat Suitability Index for Fishes in the Rivers of Han and Geum River Watersheds, KSCE J. Civil Engineering., 32, 71-78.
- Karr, J. R., 1981, Assessment of biotic integrity using fish communities, Fisheries, 6, 21-27.
- Karr, J. R., Fausch, K. D., Angermeier, P. L., Yant, P. R., Schlosser, I. J., 1986, Assessing biological integrity in running waters A method and its rationale, pp. 28, Illinois national History Survey, Special Publication 5. Champaign, IL.
- Kim, I. S., Kang, C. E., 1993, Coloured fishes of Korea, Academy Books, pp. 477.
- Kim, I. S., 1997, Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea: Freshwater Fishes, Ministry of Education., pp. 629.
- Kim, I. S., Park, J. Y., 2002, Coloured illustrations of the freshwater fishes of Korea, Kyohaksa, pp. 465.
- Ko, D. G., Choi, J. W., Lim, B. J., Park, J. H., An, K. G., 2012, Fish Distribution, Compositions and Community Structure Characteristics during Juksan-Weir Construction in Yeongsan River Watershed, Kor. J. Env. Eco., 26, 892-901.
- Kwon, H. H., Han, J. H., Yoon, J. H., An, K. G., 2013, Influence of Fish Compositions and Trophic/Tolerance Guilds on the Fishkills in Geum-River Watershed (Backje Weir), Korean J. Environ. Biol., 31, 393-401.
- Krenkel, P. A., Lee, G. F., Jones, R. A., 1979, Effects of TVA impoundments on downstream water quality and biota, In: The Ecology of Regulated Streams (Ward, J.V. and J.A. Stanford, J.A.), Plenum Press, NY, 289-306.
- Lee, S. H., Kim, B. R., Lee, H. W., 2014, A Study on Water Quality after Construction of the Weirs in the Middle Area in Nakdong River, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 36, 258-264.
- Macan, T. T., 1974, Freshwater Ecology, John Wiley, NY.
- Ministry of Environment, 2009, Nationwide Aquatic Ecological Monitoring Program, Final report, pp. 439.
- Naiman, R. J., Melillo, J. M., Hobbie, J. E., 1986, Ecosystem alternation of boreal forest streams by beaver (*Castor canadensis*), Ecology, 67, 1254-1269.
- Ohio EPA, 1989, Biological criteria for the protection of aquatic life, Vol. III. Standardized biological field sampling and laboratory method for assessing fish and macroinvertebrate communities, USA.
- Park, B. J., Sung Y. D., Jung, K. S., 2005, An Evaluation of Fish Habitat Conditions due to the Construction of Youngchun Dam in the Gumbo River, Journal of Korea Water Resources Association, 38, 771-778.
- Rankin, E. T., Yoder, C. O., 1999, Methods for deriving maximum species richness lines and other threshold relationships in biological field data, CRC Press. USA, 611-621.
- Stanley E. H., Michelle, A. L., Doyle, M. W., Marshall, D. W., 2002, Short-term changes in channel form and macroinvertebrate communities following low-head dam removal, Journal of North American Benthological Society, 21, 172-187.
- Sweeney, B. W., Vannote, R. L., Dodds, P. J., 1986, The relative importance of temperature and diet to larval development and adult size of the winter stonefly, *Soyedina carolinensis* (Plecoptera: Nemouridae), Freshwater Biology, 16, 39-48.
- U.S. EPA, 1991, Technical support document for water quality-based toxic control, EPA 505-2-90-001, U.S. EPA, Office of Water, Washington D.C., USA.
- U.S. EPA, 1993, Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters, EPA 600-R-92-111, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268, USA.
- U.S. EPA, 1994, Environmental monitoring and assessment program: Integrated quality assurance project plan for the Surface Waters Resource Group, EPA 600/X-91/080.
- Yang, S. G., Cho, Y. C., Yang, H., Kang, E. J., 2012, Characteristics of Fish Fauna and Community Structure in Yongdam Reservoir by Inhabiting Environment Changes, Korean J. Environ. Biol., 30, 15-25.