

보청천의 수질 및 어류를 이용한 생태학적 건강도 분석

류태호^{1,2} · 김유표¹ · 김진규² · 안광국^{1,*}

(¹충남대학교 생명시스템과학대학, ²한국원자력연구원 방사선과학연구소)

Analysis of Ecological Health Using a Water Quality and Fish in Bocheong Stream. Ryu, Tae Ho^{1,2}, Yu-Pyo Kim¹, Jin Kyu Kim² and Kwang-Guk An^{1,*} (¹College of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ²Korean Atomic Energy Research Institute, Advanced Radiation Technology Institute, Jeongseup 580-185, Korea)

This study was conducted at 5 sites of Bocheong Stream basin in May and September 2009 for the evaluate of fish assemblage and chemical water quality. For the study, the models of Index of Biological Integrity (IBI) and Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) were modified as 8 and 11 metric attributes, respectively. We also analyzed patterns of chemical water quality at the sampling site over the period of 2005~2009, using the water chemistry dataset, obtained from the Ministry of Environment, Korea. The survey showed that total sampled fishes were 34 species and the most dominant species was *Zacco platypus* (24.3%). In Bocheong Stream basin, values of IBI averaged 28 (n=5), which is judged as a "Good". IBI score at B1, B4 and B5 indicating a "Good" condition whereas, B2 and B3 were as 21 and 22, indicating "Fair" condition, respectively. QHEI was 152 (n=5), judged as "Fair" habitat condition. Values of BOD and COD averaged 1.0 mg L⁻¹ (scope: 0.3~4.0 mg L⁻¹) and 2.3 mg L⁻¹ (scope: 0.3~18.7 mg L⁻¹), respectively. Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and suspended solid (SS) were distinct spatial variation. Based on the IBI, QHEI and chemical water quality dataset, ecological health of Bocheong Stream basin was evaluated that generally good.

Key words : Bocheong Stream, fish, ecological health, water quality

서 론

현재 우리나라 하천의 수질을 평가하기 위해서는 주로 유기물(BOD, COD)과 영양염류(TN, TP)농도 등의 이화학적 특성을 고려해왔으나, 최근에는 복미와 유럽 등에서 '생물 통합 지수'(Index of Biological Integrity, IBI)를 이용한 평가방법을 이용하고 있다. 최근 우리나라는 수환경 내 수체 특성을 반영할 수 있는 수생생물의 특정 분류군의 다양한 생태 지표종 속성 분석(공, 2002) 및 지표종의

독성평가(박 등, 2004)를 통한 생태 위해성 평가 방법의 중요성이 강조되고 있다(조 등, 2004). 수계내에서 다양한 생물분류군을 이용한 모델로서 부착조류(황 등, 2006), 저서성 대형무척추동물(원 등, 2006)과 어류(안 등, 2006)를 이용한 방법이 소개되고 있다. 특히, 어류는 하천 생태계에서 최상위 층이기 때문에 하천 생태계를 가장 적절히 반영하는 생물군으로서 화학적 수질특성을 반영할 뿐만 아니라(Barbour *et al.*, 1999), 생물군집 간의 물질 순환 및 에너지 흐름을 직접적으로 반영하여(Karr, 1981; Karr *et al.*, 1986; Karr and Dionne, 1991), 생물학적 통합수질

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

평가법으로 널리 인정받고 있다. 어류의 다변수 건강성 평가 모델을 이용한 생태학적 건강성 평가에 대한 연구는 갑천(배와 안, 2006), 평창강(안 등, 2001b), 금호강(염 등, 2000) 등 다양하게 적용되고 있다.

금강은 한강과 낙동강에 이어 남한에서 3번째로 큰 강이며, 지천으로는 보청천, 미호천, 갑천 및 초강 등 크고 작은 20여개의 지류로 이루어져 있다(안과 양, 2007). 하지만 금강은 서부 지역의 주요 용수공급원으로 중요한 역할을 담당하고 있지만 중부권의 발전에 따른 용수의 수요 및 오염 부하량의 증가로 인해 수량 확보와 수질관리에 있어 많은 문제점이 지적되고 있다(김, 2002). 금강 수계 중 하나인 보청천은 대청댐 상류지역에 위치하고 있으며, 하천 경사는 상류가 급하고 하류가 완만한 일반적인 하천의 형태를 가지고 있다.

보청천에 관한 최근의 연구로는 금강 수계 호소와 하천의 수질특성(윤 등, 2007), 금강유역의 어류상과 서식지 적합도(허 등, 2009) 등이 있으며, 보청천 유역의 물 수지 해석(예 등, 2007), 보청천 유역의 유지유량 산정(안 등, 2006)과 같은 지리 및 수리적 연구도 활발히 보고되고 있다. 그러나 상기 문헌에서 제시하는 바와 같이 보청천의 수질 특성과 어류상, 유지유량 산정 등은 연구되었으나 생물을 이용한 수환경 평가는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 보청천 수계의 어류상과 물리적 서식지 평가를 통해 그 특성을 조사하고, 이화학적 수질 데이터를 분석하여 생태학적 건강성을 평가하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사지 개요 및 조사지점

본 연구의 대상인 보청천은 충북 보은군 내북면 신궁리의 상공저수지 부근에서 발원하여, 유역 면적 423.27 km², 유로 연장 45.11 km의 지방 2급 하천으로 흐르다가, 보은군 마로면과 옥천군 청산면의 경계에서 유역 면적 553.38 km², 유로 연장 72.11 km의 지방 1급 하천이 되는 금강 제1지류의 하천이다. 행정구역은 충청북도 보은군과 옥천군, 영동군, 경상북도 상주시 일부지역을 포함하고 있으며, 주변은 대부분 농경지와 도시 및 산림으로 구성되어 있다(예 등, 2007).

조사지점은 환경부 수질측정망 지점인 금강 수계 중 보청천 유역의 5개 지점을 선정하였고, 하천차수는 Horton (1945)과 Strahler (1957)의 하천 규모(Stream order)에 따른 분류 기준에 의거하여, B1은 2차 하천, B2와 B3

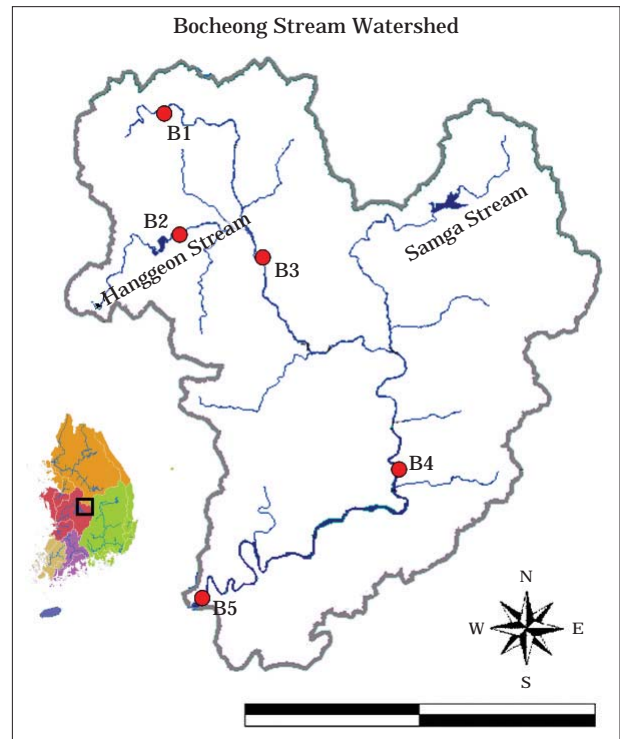


Fig. 1. Sampling sites in the Bocheong Stream.

는 3차 하천, B4과 B5는 4차 하천으로 세부지점은 Fig. 1과 같다. 또한 상·하류 간 각각 500 m, 하천으로부터 폭 200 m를 선정하였고, 인공위성 사진을 통하여 대략적으로 각 지점의 수변구역 토지이용도를 산정하였다.

조사시기는 몬순강우의 영향으로 수체가 불안정하면 어류의 교란 요인으로 작용할 수 있어 수체 안정기인 2009년 5월과 9월에 실시하였다.

- B1: 충청북도 보은군 내북면 이원리 (N: 36° 32'09", E: 127° 40'35")
- B2: 충청북도 보은군 수한면 교암리 (N: 36° 28'27", E: 127° 41'10")
- B3: 충청북도 보은군 보은읍 죽전리 (N: 36° 28'37", E: 127° 43'35")
- B4: 충청북도 옥천군 청산면 대성리 (N: 36° 21'34", E: 127° 48'55")
- B5: 충청북도 옥천군 청성면 고당리 (N: 36° 17'35", E: 127° 41'48")

2. 조사시기 및 조사방법

보청천 유역의 어류 생태 조사는 2009년 5월과 9월 두 차례에 걸쳐 보청천 유역의 5개 지점에서 수행하였으

며, Wading method (Ohio EPA, 1989)에 의거하여 우리나라 하천의 특성에 맞게 수정·보완한 안 등(2001a)의 방법을 적용하였다. 어류 채집은 투망(망목 5×5 mm)과 족대(망목 4×4 mm)를 이용하여, 여울(Riffle), 흐름이 있는 곳(Run), 소(Pool)에서 조사지점의 상·하류 200 m 구간을 선정하여 50분 동안 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류는 현장에서 김과 박(2002), 김 등(2005)에 의거해 동정한 뒤 바로 놓아주었으며, 현장에서 분류가 어려운 일부 종은 10%의 포르말린 용액에 고정하여 실험실로 운반 후 동정하였다.

어류를 이용한 하천의 건강성 평가는 생물통합지수인 IBI (Index of Biological Integrity) 모델에 기반을 두고 있으며, 우리나라 하천의 특성에 맞게 이를 수정·보완한 환경부의 수생태계 건강성 조사 및 평가(환경부, 2009) 방법에 따라 총 8개 메트릭 시스템으로 구성하였다. 메트릭 항목은 M₁ 국내종의 총 종수, M₂ 여울성 저서종수, M₃ 민감종수, M₄ 내성종의 개체수 비율, M₅ 잡식종의 개체수 비율, M₆ 국내종의 총식종 개체수 비율, M₇ 채집된 국내종의 총 개체수 및 M₈ 비정상종의 개체수 비율로 구성되어 있다. 평가 방법은 환경부에서 제시한 기준에 따라 각 메트릭 별로 “5”, “3”, “1”의 점수를 부여하고, 8개 메트릭 항목의 총합으로 모델값을 구하여 최적상태(A; Excellent, 40~36), 양호상태(B; Good, 35~26), 보통상태(C; Fair, 25~16), 불량상태(D; Poor, ≤15)로 최종 평가등급을 산출하였다.

물리적 서식지 평가 모델은 Plafkin *et al.* (1989)에 의해 도입된 정성적 서식지 평가 지수(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI)를 Barbour *et al.* (1999)이 보완한 것이며, 본 연구에서 보청천 유역의 서식지 평가는 국내 하천 환경에 맞게 수정한 11개의 다변수 메트릭 모델(안과 김, 2005)을 이용하여 수행되었다. 메트릭 모델은 M₁ 하상구조/서식지 피복도, M₂ 하상매몰도, M₃ 유속/수심 조합, M₄ 하상유실 및 토사축적도, M₅ 흐름 상태, M₆ 수로 변경도, M₇ 여울 빈도 및 하천굴곡도, M₈ 제방 안정도, M₉ 제방식생 보호도, M₁₀ 천변 식생대 폭 및 M₁₁ 소규모 댐의 존재유무로 총 11개 메트릭으로 구성되어 있다. 서식지 평가 등급은 U.S. EPA (1993)의 기준에 의거하여 각 항목의 총 합을 최종적으로 평가한 최적상태(Excellent, 220~182), 양호상태(Good, 168~124), 보통상태(Fair, 110~66), 불량상태(Poor, 52~8)로 분류하였다.

이화학적 수질은 2005년 1월부터 2009년 12월까지 10년간의 환경부 수질 측정망(환경부, <http://water.nier.go.kr/>) 자료를 이용하였고, 수소이온농도(pH), 용존 산소량(Dissolved oxygen, DO), 생화학적 산소요구량(Biochemi-

cal oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorous, TP), 부유물(Suspended solid, SS), 전기전도도(Electric conductivity, EC)의 8가지 수질 항목을 통해 분석했다. 본 연구에서 이용된 이화학적 수질 등급 기준은 환경정책기본법 시행령 별표1의 7등급 기준 체계에 의거하였다.

결과 및 고찰

1. 어류의 종 조성 및 트로픽 길드 분석

보청천 유역에서 채집된 어류는 총 34종 1,812개체로서, 전체 출현 어종 중 24.3%를 차지한 피라미(*Zacco platypus*)가 최대 우점종으로 나타났고, 그 다음으로는 밀어(*Rhinogobius brunneus*, 17.9%), 참갈겨니(*Zacco koreanus*, 17.6%) 순이었다(Table 1). 이는 허 등(2009)의 피라미가 금강수계, 특히 보청천 지점에서 우점하는 결과와 일치하였다. 내성도 길드를 분석해 보면 민감종(Sensitive species)은 약 25%, 중간종(Intermediate species)은 약 47%, 내성종(Tolerance species)은 약 28%로 나타났다. 채집된 어류 중 내성종의 수는 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보여 하류로 갈수록 수질이 악화되는 경향과 일치하였으며, 이는 보은 시내의 생활하수와 농경지 배출수로 인하여 민감종의 종수가 감소하고 내성종의 종수가 증가한 것으로 사료되었다(Fig. 2). 하류 지점인 B4와 B5에서는 민감종의 수와 개체수가 증가하였는데, 보청천의 하류가 산림으로 이루어져 서식지의 질이 상승하였으며 오염원의 유입이 줄어들어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료되었다(Fig. 5).

어류의 트로픽 길드를 살펴보면 총식종(Insectivore)이 약 56%, 잡식종(Omnivore)이 약 37%, 육식종(Carnivore)이 약 8%로 나타나 총식종의 우점 현상을 볼 수 있었다. 이번 조사에서 발견된 외래종은 한 종뿐이었으나, 채집된 배스(*Micropterus salmoides*)는 많은 포란수와 천적의 부재로 인해 군집생태지수에 있어 종 조성의 교란을 야기하고 수생태계 건강성을 악화시킨다는 연구 결과가 있는 어종이다(김 등, 1996; 이 등, 2009). B5 지점에서 나타난 어종은 25종으로 가장 많은 종이 채집되었으며, 특히 멸종위기야생동·식물 1급으로 지정되어 있는 감돌고기(*Pseudopungtungia nigra*)와 2급인 꾸구리(*Gobiobotia macrocephala*) 출현하여 보호종에 대한 서식지 생태 관리와 종 보전에 대한 관심이 필요하며, 향후 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Table 1. Fish fauna and the various guilds in Bocheong Stream.

Species	Type of fish guild			Sampling sites					TNI	RA (%)
	Tolerance guild	Trophic guild	Habitat guild	B1	B2	B3	B4	B5		
<i>Pseudopungtungia nigra</i> * [†]	SS	I	–					28	28	1.5
<i>Coreoleuciscus splendidus</i> *	SS	I	RB				4	6	10	0.6
<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i> *	SS	I	–					16	16	0.9
<i>Squalidus gracilis majimae</i> *	SS	I	–		5				5	0.3
<i>Gobiobotia macrocephala</i> * [†]	SS	I	RB					1	1	0.1
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	SS	I	–	5	18				23	1.3
<i>Zacco koreanus</i>	SS	I	–	212	3		88	15	318	17.5
<i>Pseudobagrus koreanus</i> *	SS	I	RB				5	1	6	0.3
<i>Coreoperca herzi</i> *	SS	C	–					3	3	0.2
<i>Odontobutis platycephala</i> *	SS	C	–	15	3	8	1	15	42	2.3
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	IS	O	–	1		11	44	8	64	3.5
<i>Acheilognathus koreensis</i> *	IS	O	–			7	63	14	84	4.6
<i>Acheilognathus yamatsutae</i> *	IS	O	–					17	17	0.9
<i>Pungtungia herzi</i>	IS	I	–			12	48	10	70	3.9
<i>Gnathopogon strigatus</i>	IS	I	–			3			3	0.2
<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i> *	IS	O	–				2	2	4	0.2
<i>Hemibarbus longirostris</i>	IS	I	–		4	6	4		14	0.8
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	–			55	51	12	118	6.5
<i>Microphysogobio yaluensis</i> *	IS	O	RB			4	23	3	30	1.7
<i>Iksookimia koreensis</i> *	IS	I	RB	2	1		11	8	22	1.2
<i>Cobitis lutheri</i>	IS	I	–			25			25	1.4
<i>Odontobutis interrupta</i> *	IS	C	–	4	31	19	4	2	60	3.3
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I	RB	1	11		211	101	324	17.9
<i>Tridentiger brevispinis</i>	IS	I	RB		13			8	21	1.2
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	–				2		2	0.1
<i>Carassius auratus</i>	TS	O	–			4			4	0.2
<i>Squalidus japonicus coreanus</i> *	TS	O	–	4			1	6	11	0.6
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I	–					2	2	0.1
<i>Abbottina rivularis</i>	TS	O	–					1	1	0.1
<i>Zacco platypus</i>	TS	O	–	4	104	148	59	125	440	24.3
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	TS	C	–			6	6		12	0.7
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	O	–	1	1	5	3		10	0.6
<i>Silurus asotus</i>	TS	C	–					1	1	0.1
<i>Micropterus salmoides</i> * [†]	TS	C	–		1	13	6	1	21	1.2
Total Number of Species				10	12	15	20	25	34	
Total Number of Individual				249	195	326	636	406	1812	

SS=Sensitive species, IS=Intermediate species, TS=Tolerant species, O=Omnivore, I=Insectivore, C=Carnivore, RB=Riffle-benthic species, *: Endemic species, †: Endangered species, †: Exotic species, TNI=Total number of individuals, RA=Relative abundance

2. IBI 모델을 이용한 생태 건강도 평가

채집된 어류를 통해 생물보전지수 (IBI) 값을 산정해 보면 보청천 유역 5개 지점의 1, 2차 조사 결과 평균값은 28로 B등급의 양호상태 (Good)로 나타났으며, B1이 35로 나타나 그 중 생태 건강성이 가장 좋은 것으로 판단되었다 (Fig. 2). 다른 지점들의 IBI 값을 보면 B2와 B3가 각각 21과 22로 나타나 C등급의 보통상태 (Fair)를 보였으며, B4와 B5는 31과 29로 B등급인 양호상태로 나타났

다. 지점별로 건강도 값을 살펴보면, B2는 농경지 배출수와 B3은 보은읍 시내를 관통하면서 생활하수의 영향으로 하천 건강도가 악화된 것으로 사료되었다. 보청천 하류로 가면서 IBI값이 증가하여 건강도가 양호상태로 나타났다. 결과적으로 보청천 수계의 하천의 건강도가 보은 시내를 지나면서 건강도가 악화되었지만 하류에서 증가하였다. 따라서 보은 시내의 생활하수 및 농지의 배출수에 대한 대책이 필요할 것으로 사료되었다.

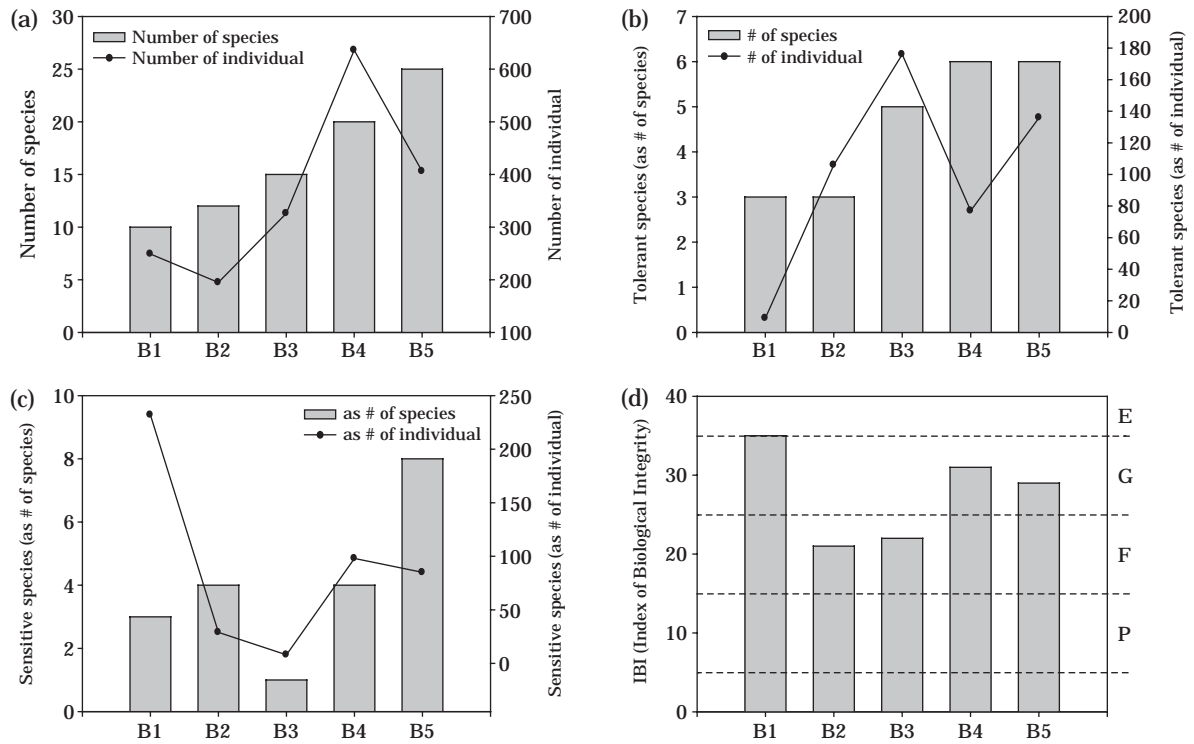


Fig. 2. Fish metric characteristics (a~c), Index of Biological Integrity (d). The abbreviations are as follows: E=excellent, G=good, F=fair, P=poor.

3. 생태 서식지 건강도 평가

보청천 유역의 물리적 서식지 평가는 하천의 차수별로 다르게 적용되는 11 메트릭 모델에 의해 수행되었으며, 정성적 서식지 평가지수(Qualitative Habitat Evaluation Index)의 총 값은 5개 지점에서 모두 양호상태(Good)로 나타났다(Fig. 3). 각 지점간의 메트릭 값을 비교해보면, B1은 M_1 (하천 서식지 구성)과 M_4 (침전물)의 점수가 매우 낮았고, 총점에서도 가장 낮은 값을 나타냈다. 이것은 조사 시점에 시행되고 있었던 누동교 다리공사로 인하여 서식지 환경이 급격히 악화되었기 때문이다. B2 지점은 유량이 매우 적고 흐름이 거의 없어 M_5 (수량)에서 가장 낮은 점수를 받았다. B3 지점은 주변에 조성되어 있는 아파트 단지로 인해 M_{10} (제방부터 인위적인 구간까지의 공간)에서 점수가 낮았다. B4는 11가지 모든 항목에서 대체로 높은 값을 나타내 보청천 유역의 5개 지점 중 최적의 조건을 갖춘 물리적 서식지라고 평가되었으며, 이는 동일한 지점에서 채집된 어류의 개체수가 가장 많은 것과 일치한다. B5는 제방공사 중이었기 때문에 M_6 (하천 변경)와 M_7 (여울 빈도) 항목에서 최저값을 받았다. 물리적 서식지 건강도는 생물학적 건강도를 직접 반영한다고 밝

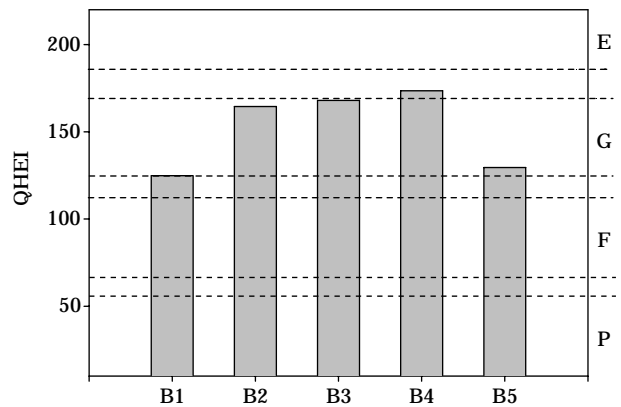


Fig. 3. Qualitative Habitat Evaluation Index. The abbreviations are as follows: E=excellent, G=good, F=fair, P=poor.

혀진 바 있다(안과 김, 2005). 따라서 물리적 서식지의 특성 및 이화학적 수질이 어류의 종조성과 개체수에 영향을 주는 것으로 판단되었으며, 꾸준한 연구를 통해 수질과 어류상 사이의 더 정확한 상관관계를 파악해 볼 필요가 있다.

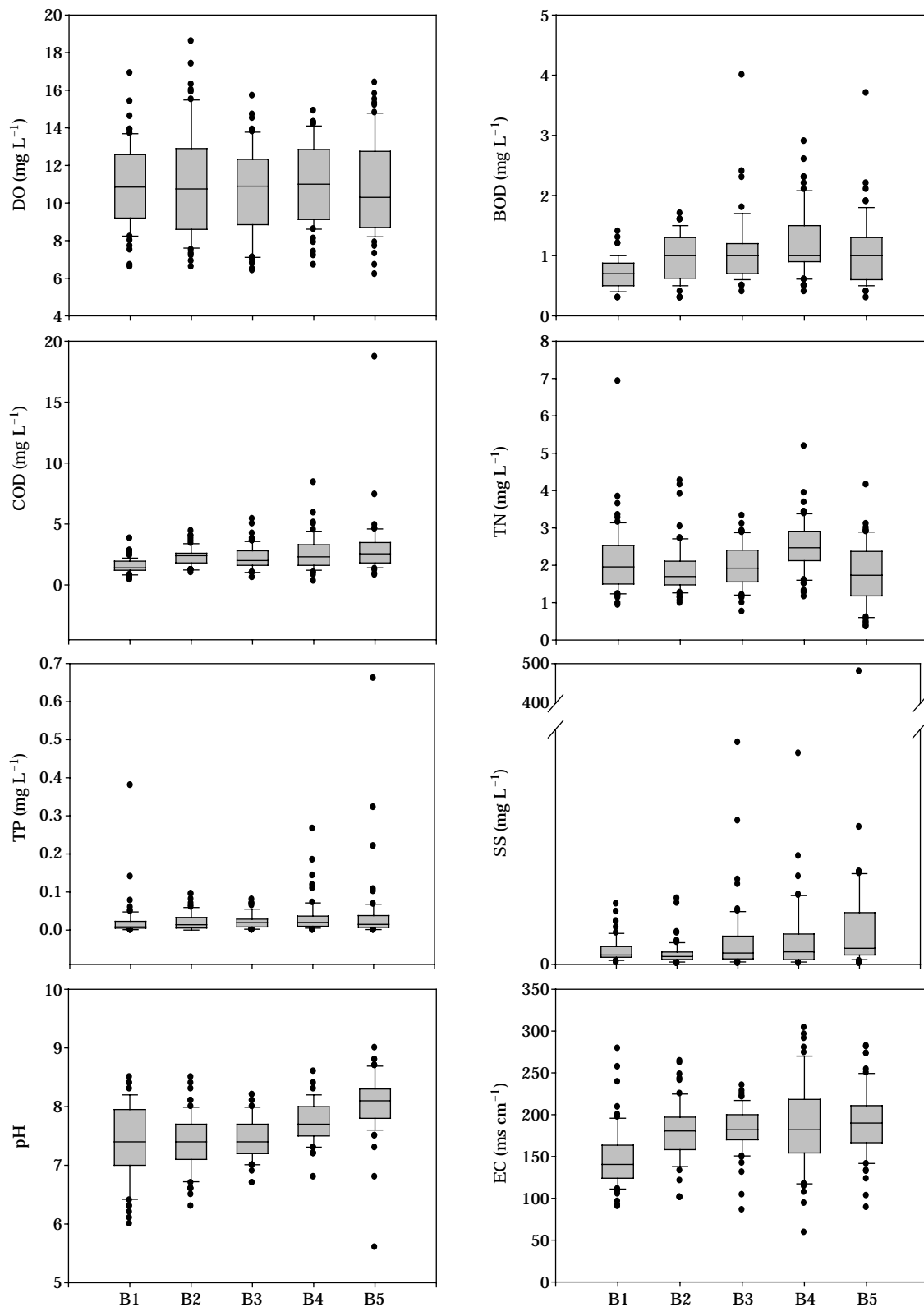


Fig. 4. Chemical parameter such as dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), suspended solids (SS), potential of hydrogen (pH) and electric conductivity (EC) in the Bocheong Stream.

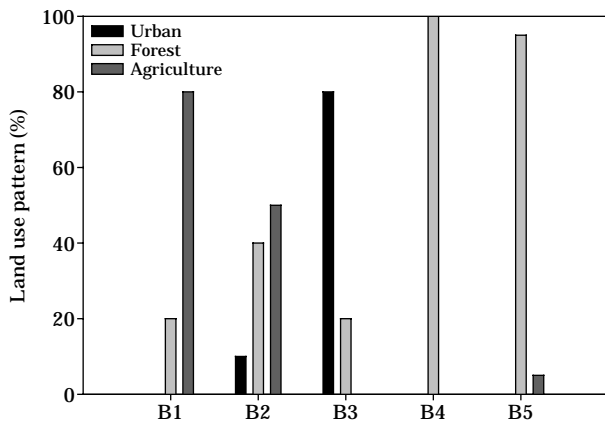


Fig. 5. Land use pattern in the Bocheong Stream.

4. 이화학적 수질평가

5년 동안의 수질 자료 분석에 따르면, 보청천 유역의 생화학적 산소요구량 (BOD), 화학적 산소요구량 (COD), 부유물질 (SS), 총인 (TP), 전기전도도 (EC)는 B1에서 최소치를 나타냈으며 하류로 갈수록 값이 증가하는 경향으로 나타났다 (Fig. 4). 용존산소량 (DO)은 B3에서 가장 낮게 나타났으나 각 지점 간에 큰 차이가 없이 모두 10.0 mg L^{-1} 이상으로 나타났다. 지난 5년간의 지점별 평균 BOD를 보면 B1이 약 0.7 mg L^{-1} , B5가 약 0.9 mg L^{-1} , 나머지 B2, B3, B4 지점은 약 1.0 mg L^{-1} 로 환경정책기본법 시행령의 하천생활환경 기준 7등급에 의거할 때 모든 지점에서 Ia 등급 (매우 좋음)으로 나타났다. 하천의 부영양화 정도를 평가할 수 있는 TN 값은 B1에서 2.1 mg L^{-1} 로 비교적 높은 값으로 나타났으며, B4로 갈수록 증가하다가 B5 지점에서 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 상류 주변에 존재하는 보은시내의 영향으로 사료되었으며, B4과 B5의 주변은 95% 이상 산림으로 이루어져 있어 비점오염원에 대한 영향이 감소한 것으로 사료되었다 (Fig. 5).

적 요

본 연구는 2009년 5월과 9월 두 차례에 걸쳐 보청천 유역의 5개 지점에서 어류상의 분포와 물리적 서식지를 조사함으로써 수행되었다. 생물통합지수인 IBI (Index of Biological Integrity) 모델은 우리나라 하천의 특성에 맞게 수정·보완하여 총 8개 매트릭 시스템으로 구성하였으며, 물리적 서식지 평가는 11개의 다변수 매트릭 모델을 이용하였다. 이화학적 수질 분석은 2005년부터 2009

년까지의 환경부 수질 측정망 자료를 통해 8가지 수질 항목을 평가하는 것으로 이루어졌다. 어류의 종 조성을 분석해보면 내성종이면서 잡식종인 피라미가 약 24.3%로 가장 우점하였으며, 조사지점 중 총 4곳에서 외래종인 배스 (약 1.2%)가 발견되었고, B5에서는 보호종인 감돌고기와 꾸구리가 채집되었다. 보청천 유역의 1, 2차 조사 결과 생물통합지수는 평균 28로 B등급의 양호상태 (Good)로 나타났으며, B1, B4, B5가 양호상태 (Good), B2와 B3는 보통상태 (Fair)로 나타났다. 물리적서식지평가 (QHEI)는 평균 152로 양호상태임이 확인되었으며, 공사중인 B5를 제외하고 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 이화학적 수질 자료의 분석 결과, 평균 BOD는 지난 5년간의 보청천 유역 5개 지점에서 하천수질환경 기준 (환경정책기본법)에 의거할 때 모두 Ia (매우 좋음) 등급으로 나타났다. 영양염류 (TN, TP)와 부유물질 (SS)의 값은 하천 주변의 토지이용도에 따라 비점오염원의 영향이 달라져 지점별로 약간의 변이 폭을 보였다.

인 용 문 헌

- 공동수. 2002. 생물학적 수질기준 설정 필요성 및 접근방안. 환경생물 20(Special Issue): 38-49.
- 김도한, 황수옥, 양홍준, 전상린, 최신석, 김익수, 최충길. 1996. 댐저수지의 외래어종 분포 및 영향에 관한 연구. 한국수자원공사 연구보고서.
- 김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기. 교학사.
- 김익수, 최 윤, 이충렬, 이용주, 김병직, 김지현. 2005. 원색 한국어류대도감. 교학사.
- 김종구. 2002. 통계분석 기법을 이용한 금강수계의 수질평가. 한국환경과학회지 11(12): 1281-1289.
- 박종호, 이상일, 조영옥. 2004. *Ceriodaphnia dubia*의 먹이섭생 기작과 온도조절에 근거한 급성독성조사법의 비교. 한국물환경학회지 20(1): 48-54.
- 배대열, 안광국. 2006. 생물학적 다변수 모델 적용 및 수화학 분석에 의거한 감천생태계 평가. 한국육수학회지 39(2): 198-208.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. 한국육수학회지 38(3): 361-371.
- 안광국, 양우미. 2007. 금강 수계의 수질 특성. 한국육수학회지 40(1): 110-120.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001a. 생물보전지수의 신속한 생물평가 기법을 이용한 감천 수계의 평가. 환경생물 19(4): 261-269.
- 안광국, 이재연, 배대열, 김자현, 황순진, 원두희, 이재관, 김창수.

2006. 우리나라 주요하천 수계에서 다변수모델을 이용한 생태학적 수환경 평가. 한국물환경학회지 **22**(5): 796-804.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001b. 생물보전지수 (Index of Biological Integrity) 및 서식지평가지수 (Qualitative Habitat Evaluation Index)를 이용한 평창강의 수환경 평가. 한국육수학회지 **34**(3): 153-165.
- 안상진, 김진규, 윤석환. 2006. 보청천 유역의 유지유량 산정. 한국수자원학회 학술발표회 논문집 p. 1052-1056.
- 염동혁, 안광국, 홍영표, 이성구. 2000. 어류군집을 이용한 금호강의 생물보전지수 (Index of Biological Integrity, IBI) 평가. 환경생물 **18**(2): 215-226.
- 예령, 이홍수, 정용락, 정세웅. 2007. 보청천 유역의 물 수지 해석을 위한 SWAT 모델 매개변수 민감도 분석. 대한상하수도학회, 한국물환경학회 공동추계 학술발표회 논문집 p. 657-667.
- 원두희, 전영철 권순직, 황순진, 안광국, 이재관. 2006. 저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용. 한국물환경학회지 **22**(5): 768-783.
- 윤정희, 유영복, 이재운. 2007. 금강수계 호소와 하천의 수질특성에 관한 통계분석. 대한상하수도학회, 한국물환경학회 공동추계 학술발표회 논문집 p. 673-681.
- 이완옥, 양현, 윤승운, 박종영. 2009. 옥정호와 용담호에 서식하는 배스 *Micropterus salmoides*의 먹이생물 차이에 관한 연구. 한국어류학회지 **21**(3): 200-207.
- 조규석, 박종호, 강주찬. 2004. 수은, 납 및 구리에 대한 붕어와 돌고기 자어의 급성독성. 한국물환경학회지 **20**(3): 265-268.
- 허준욱, 박진우, 강신욱, 김정곤. 2009. 금강유역의 어류상과 서식지 적합도 지수 산정. 한국환경생태학회지 **23**(6): 516-527.
- 황순진, 김난영, 원두희, 안광국, 이재관, 김창수. 2006. 돌말 (*Epilithic Diatom*) 지수를 이용한 국내 주요 하천 (금강, 영산강, 섬진강)의 생물학적 수질평가. 한국물환경학회지 **22**(5): 784-795.
- 환경부. 2009. 수생태계 건강성 조사 및 평가 최종보고서. 국립환경과학원.
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, 2nd Ed, EPA 841-B-99-002. US EPA Office of Water, Washington, D.C., USA.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin* **56**: 275-370.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- Karr, J.R., K.D. Fausch, P.L. Angermeier, P.R. Yant and I.J. Schlosser. 1986. Assessing biological integrity in running water: A method and its rationale. pp. 28, Illinois National History Survey, Special Publication 5, Campaign, IL.
- Karr, J.R. and M. Dionne. 1991. Designing surveys to assess biological integrity in lakes and reservoirs, in biological criteria; Research and Regulation-Proceedings of a symposium. p. 62-72. U.S.EPA, Office of Waters, Washington, D.C., EPA-440/5-91-005, USA.
- 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.
- 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 macroinvertebrate and fish. EPA/444/4-89-001. Office of water regulations and standards. US EPA. Washington. DC, USA.
- U.S. EPA. 1993. Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters. EPA 600-R-92-111. Environmental Monitoring systems Laboratory - Cincinnati office of Modeling, Monitoring systems, and quality assurance Office of Research Development, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268, USA.

(Manuscript received 15 May 2010,
Revision accepted 20 June 2010)