

백마강의 화학적 수질특성 및 다변수 생태 건강도 모델 평가

한 정 호 · 김 현 맥¹ · 안 광 국*

충남대학교 생명과학과, ¹국립환경과학원 자연평가 연구팀

Chemical Water Quality and Multi-metric Eco-health Model Assessments in Baekma River

Jeong-Ho Han, Hyun-Mac Kim¹ and Kwang-Guk An*

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

¹Ecosystem Assessment Division National Institute of Environmental Research

Abstract - The objectives of this study were to analyze chemical the water quality related to the fish community and to evaluate the ecosystem health based on the faunal composition and guild structure in 2007 in Baekma River. Mean concentrations of biological oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) were 2.8 and 4.0 mg L⁻¹, respectively and total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were 5.0 mg L⁻¹ and 158 µg L⁻¹, which is indicating that the river is in an eutrophic state. Especially, organic pollution and eutrophication occurred in the downstream reach of Baekma River. A total of 19 fish species were collected during the study and the most dominant species was *Opsariichthys uncirostris amurensis* accounted 48% of the total abundances. The proportion of sensitive species was low (2.3%), compared with that of tolerant species (71.8%). These results suggest that tolerant species and the biotic quality of the fish community was severely degraded. According to the multi-metric model, the Index of Biological Integrity (IBI), the mean model value of the fish community in Baekma River was estimated as 14.8 indicating a “poor” condition. The minimum values of the IBI were observed in the downstreams, and this was mainly attributed to chemical pollutions of nutrients (N, P) and organic matters.

Key words : Baekma River, downstreams, IBI, Biological Health Assessments, Geum River

서 론

지난 20~30년간 고도성장 및 산업화와 더불어 하천 유역의 토지이용 증대 및 개발 등으로 인해 국내의 하천과 강은 물리·화학적 변화로 생태적 구조와 기능에 많

은 변화가 있었다(Joo *et al.* 1997). 특히 인(P), 질소(N)와 같은 영양염류, 독성물질 등의 유입은 수질오염을 더욱 가속화 시켰다(An 2003; Lee and An 2007). 인간의 인위적인 활동으로 인해 영향을 받는 하천생태계는 해양생태계보다 쉽게 교란 받으며, 이로 인한 생태계 변화는 이미 전 세계적으로 많이 진행되고 있다(Ricciardi and Rasmussen 1999). 최근 국내 하천에서도 물리적인 서식지의 변경(An *et al.* 2001a, b), 오염물 유입에 의한 수질 악화, 이에 따른 하천 생물상의 종다양도 감소 현상(Yeom

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

et al. 2000) 등 다양한 교란현상이 보고되어 왔으며, 이러한 현상은 현재까지도 지속적으로 진행되고 있다.

중·하류 생태계는 소하천 혹은 상류하천 생태계와는 다르게 중소도시 및 농촌지역으로부터 각종 오·폐수에 따른 유기물 및 영양염류가 응집되기 때문에 수질 오염으로 인한 많은 문제점들이 발생하는 생태계이다. 도심지에서 배출되는 생활하수와 상류역의 논경지에서 무제한적 사용되고 있는 농약 및 비료가 하천으로 유입되어 하류수계의 부영양화를 일으켜 각종 수생태계의 문제점을 동시에 유발하고 있다. 또한 강 하구에서는 해수의 유입을 막기 위해 배수갑문이 설치되어 연안으로 유출되지 못하고 추체의 체류시간이 길어져 수질오염은 가속화 되는 것으로 보고되고 있다. 결과적으로 하류 생태계의 수질 오염은 상류에 비하여 더 심각하게 나타나고 있지만, 이 지역에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다.

최근 북미 및 유럽에서는 수자원의 총체성을 반영하는 생태계 건강성 회복을 물관리의 최상 목표로 설정하고, 1990년대 초반부터 수질에 대한 생물학적 평가체계를 도입하여 활용하고 있다(Karr 1981). 이런 이유로 해서 최근 미국 환경부(US EPA)는 어류를 이용한 생물학적 모니터링 및 생태계 건강성 평가를 통해 환경영향평가 모델로 이용하고 있다(Barbour et al. 1999). 우리나라는 지난 3년간(2003~2006)까지의 ‘물환경 종합평가기법 개발 조사연구’를 통해 수생태계 건강성 평가의 기반이 되는 생물학적 수질평가 지침을 마련하였으며(MOE/NIER 2006), 2007년에는 전국 수계의 1,000여개 조사지점을 대상으로 수생태계 건강성 조사 및 평가를 실시하고 있다(MOE/NIER 2008). 이 중 어류군집을 이용하여 하천 생태계의 건강성 평가할 수 있는 모델은 An et al. (2006)에 의해 개발되어 현재까지 4대강 수계 전체에서 하천 생태계 건강성 조사 및 평가에 핵심적인 모델로 적용되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 백마강에서 총인(TP), 총질소(TN) 및 생물화학적 산소요구량(BOD, COD) 등에 대한 수질상태를 평가하고, 어류를 이용한 생태 건강도 평가를 실시하여 백마강의 종합적인 건강도 상태를 진단하고자 하였다. 이를 위하여 수질 오염에 따른 어종의 조성도 및 길드분석을 실시하여 어류의 섭식특성 및 내성도에 대한 영향을 평가하였다. 본 연구의 최종 목적은 4대강 사업 이후 생태계에 대한 변화를 비교, 평가하고자 할 때 백마강 과거 건강성 상태를 판단할 수 있는 핵심적인 기초자료를 제공하고자 한다.

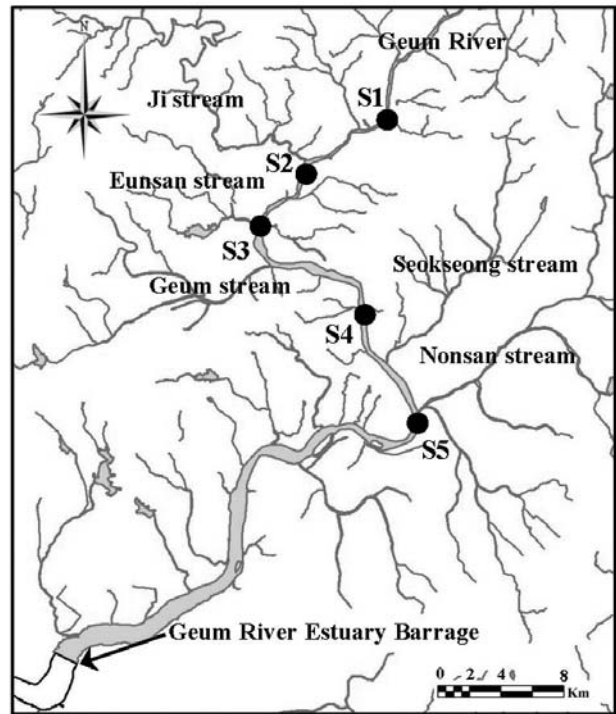


Fig. 1. The map showing the sampling sites in down stream (Baekma River) of Geum River watershed.

재료 및 방법

1. 조사시기 및 조사지점 특성

본 연구를 위한 어류 조사는 장마 후 수체 안정기인 2007년 10월에 실시되었으며, 백마강의 5개 조사지점을 선정하여 현장수질을 측정하였다(Fig. 1). 백마강은 전라북도 장수군에서 발원하여 금강의 상류인 진안, 금산, 옥천을 거쳐 중류의 대전, 공주를 지나 부여군의 동부지역을 S자 모양으로 굴곡하여 흐르고 있는 금강의 중·하류 수계이다. 백마강은 부여읍 저석리 창강나루에서 백마강이 시작되며, 그 지류는 상류부에 지천과 은산천, 하류부에 금천, 구룡천, 왕포천 및 석성천 등의 지천이 합류된다. 백마강은 금강분류로서 금강의 하류구간에 포함되며, 하천차수가 6차인 하천규모로서 하폭이 100~300m인 대형하천이다. 하상은 80% 이상이 모래로 이루어져 있으며, 유속은 완만하여 전형적인 하류하천의 특성을 보이고 있다.

2. 이·화학적 수질자료 분석

수질 조사는 현장조사와 실험실에서의 분석으로 나누

어 진행되었다. 현장에서는 어류 현장조사와 동일한 지점에서 YSI 6600 (다항목 측정기)을 이용하여 수온(Water temperature), 용존산소량(Dissolved oxygen, DO), 전기전도도(Electric conductivity, EC, at 25°C), 수소이온농도(pH), 탁도(Turbidity)를 측정하였고, 생물학적 산소요구량(Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus, TP) 등의 항목은 수질오염공정시험법에 준하여 분석하였다. 분석된 수질자료는 생물학적 건강도 지수값과 비교를 위한 보조 자료로 사용하였다.

3. 어류 현장조사 방법

어류의 현장조사는 MOE/NIER (2008)에 기술된 어류 조사 방법(Wading method)에 의거하여 수행하였고, 정량화된 채집 조사를 위하여 Catch Per Unit of Effort (CPUE)를 산출하였다. 어류 채집은 가슴장화를 착용한 채집자가 접근이 가능한 장소에서 이루어졌다. 각 지점의 조사 거리는 200 m, 조사시간은 50분으로 한정하였다. 하천차수(Stream order)는 1:120,000 축적의 지도를 이용하여 Strahler (1957) 방법에 따라 결정하였다. 조사도구는 주로 투망(망목: 7×7 mm)과 족대(망목: 4×4 mm)를 이용하였고, 조사인원은 어류채집에 대한 전문적 훈련을 받았거나 현장경험이 최소한 3년 이상인 전문가를 1인 이상 포함하였으며, 3인 1조로 구성하여 조사를 실시하였다. 채집한 어류는 현장에서 Kim and Park (2002) 및 Son and Song (2006)에 의거해 동정 및 계수 후 바로 방생하는 것을 원칙으로 하되 현장에서 동정이 모호한 종은 10% 포르말린 용액으로 고정하여 실험실로 옮긴 후 동정하였다. 채집된 어류의 개체 수 산정은 어류체장의 길이가 20 mm 이하의 동정이 불가능한 치어의 경우 제외하였으며, 비정상어종이 채집되었을 경우에는 감별 방식은 Barbour *et al.* (1999)의 방법에 따라 비정상성 유형을 감별하여 야장에 기록하였다.

4. 어류 군집분석 및 생태길드 분석

본 조사의 어류 군집분석을 위해, 각 조사지점에서 채집된 어종의 개체수를 기준으로 아래와 같이 종 풍부도 지수(Margalef 1958), 종 균등도 지수(Pielou 1975), 종 다양도 지수(Shannon and Weaver 1949) 및 군집 우점도 지수(Simpson 1949)를 산정하였다. 본 연구에서 내성도(Tolerance)와 영양단계(Trophic level)에 대한 범주는 US EPA (1993)의 기준에 의거하였다. 어류의 내성도는 수질 오염도에 따라 쉽게 사라지는 민감종(Sensitive species, SS)

과 수질오염도에 따라 상대적인 비율이 증가하는 내성종(Tolerant species, TS), 그리고 두 범주의 중간에 해당하는 중간종(Intermediate species, IS)으로 구분하였다. 영양단계 구조는 섭식 특성에 따른 잡식종(Omnivores, O), 충식종(Insectivores, I), 육식종(Carnivores, C), 초식종(Herbivores, H)으로 구분하였다(Barbour *et al.* 1999). 각 어종별 내성 특성 및 영양단계 구분에 대한 기준은 MOE/NIER (2008)의 분류기준에 의거하여 분석하였다.

5. 다변수 평가 모델 적용 및 생물학적 건강도 평가

본 연구에서는 어류를 이용한 생물보전지수(IBM)를 기반으로 개발된 다변수 메트릭 건강도 평가 모델을 적용하였다. 본 연구에 적용한 하천 생태 건강도 평가 모델은 An *et al.* (2001a)에 의해 국내 서식 환경에 맞게 수정되었고, 수생태계 건강성 조사 및 평가(MOE/NIER 2008)로 확립되었다. 본 연구에서 총 8개 메트릭을 이용하였고, 각 메트릭 마다 1, 3, 5의 수치값을 부여하여, 점수를 합산하였다. 건강도 평가 모델의 등급 산정은 초기에 개발된 Ohio EPA (1989) 및 US EPA (1993)의 등급 기준에 의거하였으며, 본 연구에서는 8개 메트릭 모델의 4등급 체계로 수정하여 40~36의 범위는 I등급(최적상태), 35~26은 II등급(양호상태), 25~16은 III등급(보통상태), 그리고 15 이하는 IV등급(악화상태)으로 대별하여 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 이·화학적 수질 특성

백마강의 조사지점별 수온, pH, DO, 탁도 등의 수질변수들은 상·하류간 종적구배 특성을 보이지 않는 것으로 나타났다(Fig. 2). 수온은 15.5~16.5°C로 일반적으로 11월 수온범위를 보이고 있었으며, pH도 6.3~6.9로 나타나 약산성에서 중성 상태를 보였고, 지점별 큰 차이를 보이지 않았다. 용존산소(DO) 농도범위는 전반적으로 8.0~8.5 mg L⁻¹로서 환경부에서 지정한 하천의 환경기준치인 5 mg L⁻¹ 보다는 모두 높은 것으로 나타났다. 대체로 상류지역이 높고 하류로 갈수록 낮아지는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 탁도(Turbidity)는 S3에서 증가하기 시작하여 S4에서 38.1 NTU로 가장 높은 값으로 나타났는데, 이는 S3 주변의 건설공사 및 S4 주변에 환경기초시설인 분뇨처리장 배출수의 영향으로 사료된다. 반면, 수질오염 지표인 BOD,

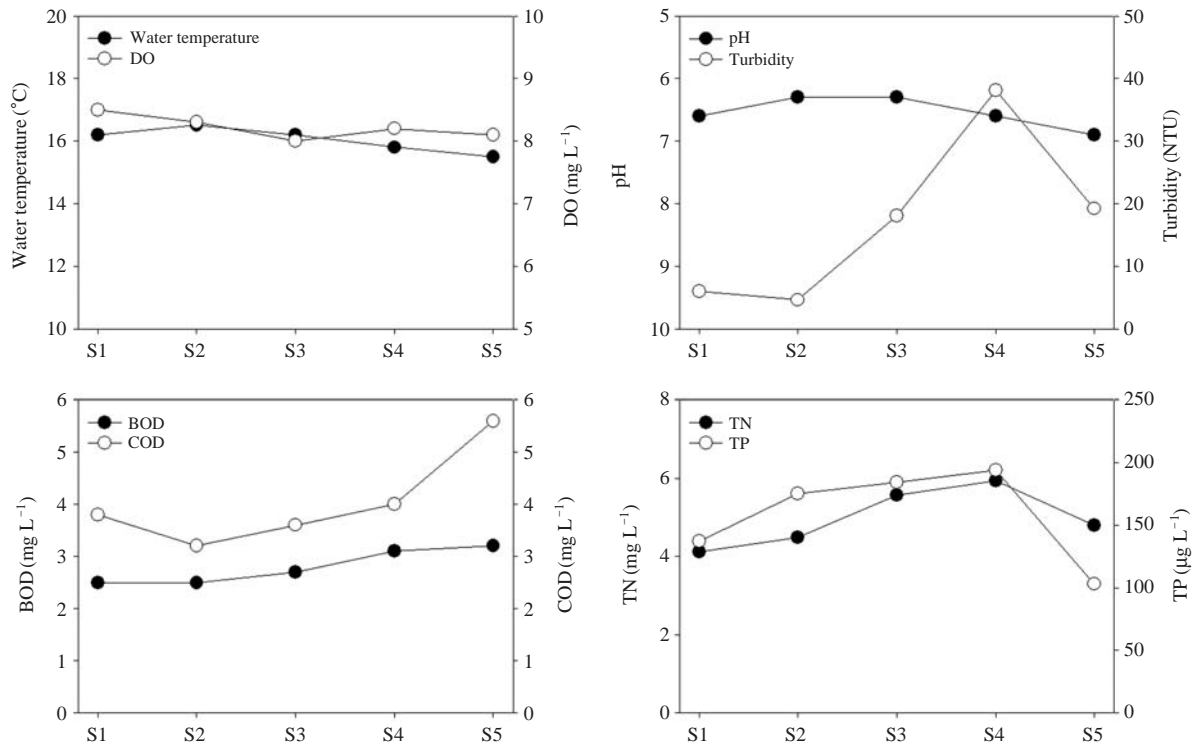


Fig. 2. Water chemistry in the sampling sites. The abbreviations of chemical parameters are shown in method section.

COD, TN, TP는 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 2). BOD의 농도는 평균 2.4 mg L^{-1} 로서 환경부 하천 생활환경기준 II 등급에 해당하는 것으로 나타났으며, 상류에서 하류로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다. S3 지점부터 BOD가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 부여군에서 발생된 오수 유입 때문에 나타난 결과로 사료된다. COD의 농도는 평균 4.0 mg L^{-1} 로서 환경부 호수 생활환경기준 III 등급에 해당하는 것으로 나타났으며, BOD와 마찬가지로 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보였다. TN과 TP는 각각 평균 5.0 mg L^{-1} , $158.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 호수생활환경기준 VI 등급에 해당되는 것으로 나타났으며, BOD, COD의 변동특성과 유사하였다. 상기 수질 변수를 종합해 보면, 지점별 4가지 수질변수(BOD, COD, TN, TP)는 유사하였으며, S4에서 급격하게 수질악화 현상을 보여 이에 대한 대책 마련이 시급한 것으로 나타났다.

2. 어류 종조성 및 분포특성

백마강 상류에서 하류에 이르기까지 총 5개 지점에서 출현한 어류는 총 9과 19종으로 조사되었다(Table 1). 이

중 총 개체수의 5% 이상을 차지하는 주요 우점종으로는 끄리 (*Opsariichthys uncirostris amurensis*, 우점율: 48.0%), 피라미 (*Zacco platypus*, 11.4%), 모래무지 (*Pseudogobio esocinus*, 9.3%), 참마자 (*Hamibarbus longirostris*, 6.3%), 누치 (*Hamibarbus labeo*, 5.0%) 등의 순으로 출현하였으며, 이는 금강 하구둑이 건설되기 20년 전에 백마강 유역에서 조사한 Choi (1987)의 52종의 어류와 비교해 볼 때, 종수가 2배 이상으로 감소한 것으로 확인되었다. 지점별로 살펴보면 S1에서 14종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, S5에서 6종으로 가장 적은 종이 출현하였다. 5개 지점 중 S3에서 190개체로 가장 많은 개체수가 확인되었으며, S4에서 45개체로 가장 적은 개체수가 출현하였다 (Table 1). 과거 백마강의 어류상 (Choi 1987)과 비교하였을 때, 채집된 한국고유종은 13종 311개체 (14.8%)에서 3종 14개체 (3.3%)로 종과 개체수 측면에서 크게 감소한 것으로 나타났다. 반면, 이전 문헌에서는 보고된 바 없던 외래도입종인 배스 (*Micropterus salmoides*)가 본 연구에서 새롭게 출현하였다. 배스는 육식성이면서 탐식성어류로 잘 알려져 있으며, 이들 종의 상대 풍부도는 0.9%로 낮게 나타났으나, 정수역을 선호하는 어종으로서 금강 하구둑의 건설 이후 백마강의 정수역이 증가하는

Table 1. Species composition and various guilds of the fish community in the Baekma River. The species lists were rearranged by the abundance in order

Species	T _o	T _r	H _a	Sampling sites					Total (#)	RA (%)
				S1	S2	S3	S4	S5		
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	TS	C	—	6	20	145	17	18	206	48.02%
<i>Zacco platypus</i>	TS	O	—	34	5	7	3		49	11.42%
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	—	10	14	16			40	9.32%
<i>Hemibarbus longirostris</i>	IS	I	—	14	3	10			27	6.29%
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I	—	13		2	1	5	21	4.90%
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	O	—	4	4	1	10		19	4.43%
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	IS	O	—	7		6	1		14	3.26%
<i>Squaliobarbus curriculus</i>	IS	O	—		1		1	6	8	1.86%
<i>Leiocassis ussuriensis</i>	IS	I	—					8	8	1.86%
† <i>Squalidus japonicus coreanus</i>	TS	O	—					8	8	1.86%
<i>Oryzias sinensis</i>	TS	O	—				5		5	1.17%
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I	RB			1	3		4	0.93%
† <i>Micropterus salmoides</i>	TS	C	—	1			1	2	4	0.93%
† <i>Odontobutis interrupta</i>	IS	C	—	1	2		1		4	0.93%
<i>Gnathopogon strigatus</i>	IS	I	—	2			1		3	0.70%
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O	—	2			1		3	0.70%
<i>Acanthorhodeus macropterus</i>	IS	O	—	1		1			2	0.47%
† <i>Squalidus gracilis majimae</i>	SS	I	—	1		1			2	0.47%
<i>Rhodeus notatus</i>	IS	O	—	1					1	0.23%
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	—		1				1	0.23%
Total Number of Species				14	8	10	12	6	19	
Total Number of Individuals				97	50	190	45	47	429	

T_o: Tolerance guilds, T_r: Trophic guilds, H_a: Habitat guilds, RA: Relative abundance, SS: Sensitive species, IS: Intermediate species, TS: Tolerant species, O: Omnivore, I: Insectivore, C: Carnivore, H: Herbivore, RB: Riffle-benthic species, †: Endemic species, ‡: Exotic species

추세로 인하여 수심이 깊은 곳에는 더욱 높은 풍부도를 보일 것으로 사료된다. 또한 백마강 구간에 건설된 백제보 역시 배스 개체수 증가를 가속화 시킬 것으로 판단되며, 이에 따른 국내종의 분포 역시 변화를 가져올 것으로 판단된다. 한편, 천연기념물 및 멸종위기종과 같은 법정 보호종은 본 조사에서 채집되지 않았으며, 회유성 어종인 뱀장어 (*Anguilla japonica*), 웅어 (*Coilia nasus*) 등은 본 조사에서 출현하지 않았다. 이는 금강 하구둑의 건설로 회유성 어류의 이동 단절과 더불어 정체수역의 증가로 인한 수질악화 및 하상구조의 단순화가 이와 같은 결과를 초래한 것으로 판단된다.

3. 어류 군집분석

백마강의 어류 군집분석 결과에 따르면, 종 풍부도 지수는 다른 지점에 비해 많은 종이 출현한 S4 (2.89) 및 S1 (2.84)에서 높게 나타났으며, 종 다양도 지수는 S1에서 0.89으로 가장 높게 나타났고, 지점 3에서 0.42로 가장 낮게 나타났다. 군집 우점도 지수는 끄리가 단연 우점하는 S3 (0.59)을 제외하고는 0.18~0.26의 범위로 나타나 S1, S2, S4, S5에서는 특정 한 종에 의한 우점현상

Table 2. Fish community parameters in the Baekma River. The abbreviation in the table are as follows : d =Margalef's species richness index, J' =Pielou's evenness index, H' =Shannon-Weaver diversity index, λ =Simpson's dominance index.

Sites	Community index			
	d	J'	H'	λ
S1	2.842	0.7729	0.8858	0.176
S2	1.542	0.7925	0.6697	0.256
S3	1.715	0.4164	0.4164	0.593
S4	2.89	0.7644	0.8249	0.199
S5	1.299	0.8962	0.6974	0.217

이 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 종 균등도 지수도 S3을 제외한 전 지점에서 높은 종 균등도를 보이고 있으며, S1에서 어종별 서식밀도가 비교적 일정한 것으로 분석되었다 (Table 2). 5개의 조사 지점 중 S1은 가장 많은 종 (14종)이 출현하였고, 비교적 많은 개체가 채집되어 종 풍부도가 높게 나타났을 뿐만 아니라 종 다양도가 가장 높게 나타나 비교적 안정된 군집구조를 유지하고 있는 반면, S3은 가장 많은 개체수 (190개체)가 채집되었으나 끄리 (145개체)가 단연 우점하고 있어 군집 우점도

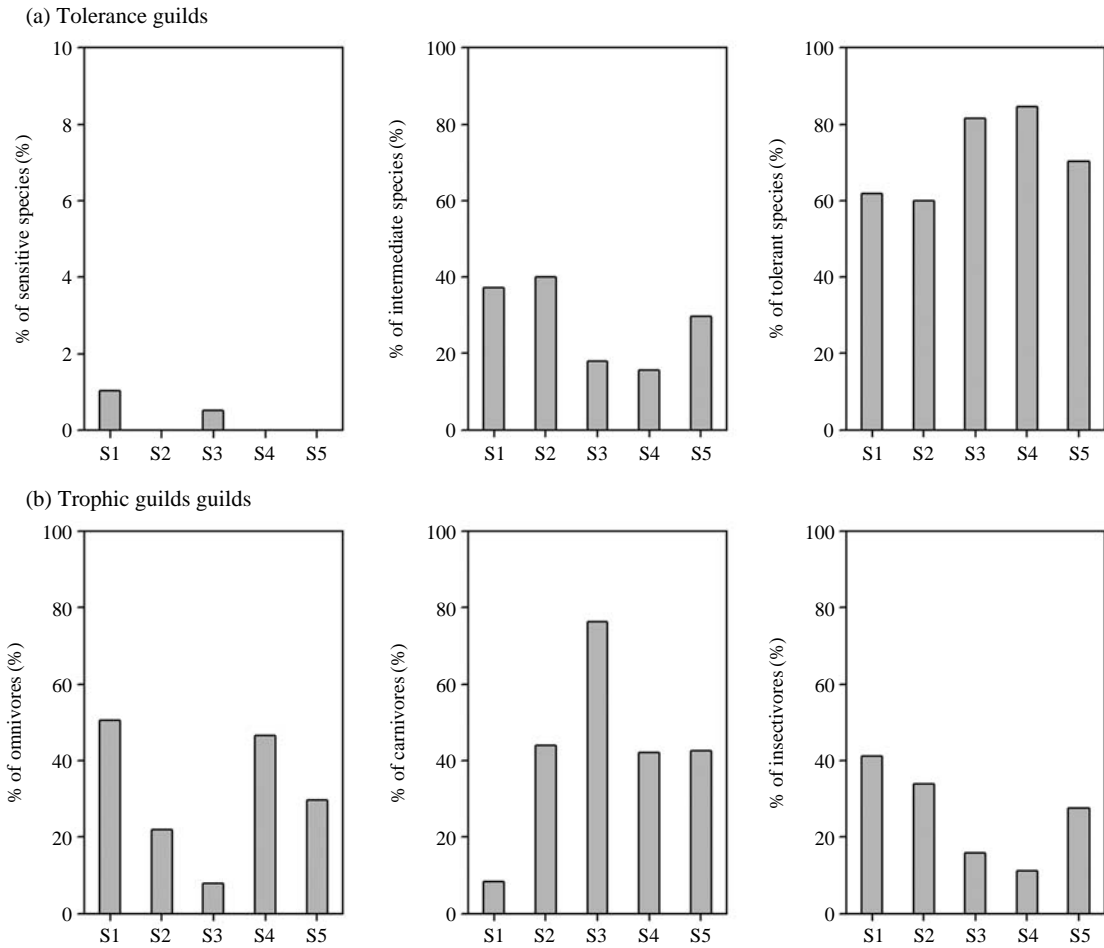


Fig. 3. Tolerance and trophic guilds in the five sampling sites of Baekma River.

가 가장 높게 나타났다. 한편, 종 균등도 및 종 다양도는 다른 지점에 비하여 낮은 값을 보여 불안정한 군집구조를 갖고 있는 것으로 분석되었다. S4는 S1 다음으로 많은 종이 출현하여 종 풍부도와 종 다양도가 비교적 높게 나타났으며, S5는 가장 적은 종과 개체가 채집되어 종 풍부도와 종 다양도 측면에서 악화된 상태를 보였으나 종 균등도는 다르게 나타났다(Table 2). 본 조사지점 내에서는 끄리가 우점하여 종다양도 지수가 0.42를 나타낸 S3을 제외하고 대부분 6.67~0.89으로 비교적 높게 나타나고 있어 비교적 군집구조적으로는 안정되어 있다고 할 수 있으나, 어류상 분석에서 고유종의 비율이 과거의 조사에 비해 현저히 낮아지고 외래도입종 배스의 유입 등은 생물 다양성 측면에서 단순화가 진행되고 있음을 의미하기 때문에 이에 대한 대책도 필요하다고 사료된다. 또한 천연기념물이나 멸종위기종 같은 보호어종 및 회유성 어종 또는 주연성 담수어종이 채집되지 않았기에 이들 어종의 복원에 대한 특별한 관심과 보호가 필요

하다.

4. 어류의 길드분석 및 공간적 변이 특성

내성도(Tolerance guilds) 분석에 따르면, 민감종은 2개체 (0.5%), 중간종은 111개체 (25.9%), 내성종은 316개체 (73.7%)로 나타나 내성종이 우세한 것으로 나타났다(Fig. 3a). 내성종 중 65.2%가 끄리였으며, 중간종 중 36%의 비율을 보이는 어종은 모래무지이며, 민감종은 1종으로서 긴물개 (*Squalidus gracilis majimae*)가 각 길드별 대표 어종으로 나타났다(Table 1). 민감종은 전 지점에서 동일한 경향을 보인 것으로 나타났는데, 이는 백마강이 금강의 하류구간으로서 금강하구연에 의한 정체수역 증가로 미소서식지의 단순화 및 고농도의 오염원이 이와 같은 결과의 주된 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 반면, 수질오염 정도에 따라 상대적인 비율이 증가하는 내성종의 비율이 전 지점에서 60% 이상의 비율을 보이고 있었

Table 3. The metric values and criteria grades based on the Index of Biological Integrity (IBI) in Baekma River. The values of parenthesis indicate the scores of each metric with the value of 1, 3, and 5, respectively

Sampling location	Model metrics								IBI (Criteria)
	TNS	RB _S	S _S	% T _S	% O _S	% I _S	TNI	% A _I	
S1	13 (3)	0 (1)	1 (1)	61.9 (1)	50.5 (1)	41.2 (3)	96 (1)	0 (5)	16 (III)
S2	8 (1)	0 (1)	0 (1)	60.0 (1)	22.0 (3)	34.0 (3)	50 (1)	0 (5)	16 (III)
S3	10 (3)	1 (1)	1 (1)	81.6 (1)	7.9 (5)	15.8 (1)	190 (1)	2.6 (1)	14 (IV)
S4	11 (3)	1 (1)	0 (1)	84.4 (1)	46.7 (1)	11.1 (1)	44 (1)	3.5 (5)	14 (IV)
S5	5 (1)	0 (1)	0 (1)	70.2 (1)	29.8 (3)	26.7 (3)	45 (1)	4.3 (1)	12 (IV)

TNS: Total number of native species, RB_S: Total number of riffle benthic species, S_S: Total number of sensitive species, % T_S: % individuals as tolerant species, % O_S: % individuals as omnivores, % I_S: % individuals as native insectivores, TNI: Total number of individual, % A_I: % individuals with anomalies, I: Excellent, II: Good, III: Fair, IV: Poor

으며, S4에서 84.4%로 가장 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 전반적으로 상류구간에 비하여 하류구간에서 높은 값을 보였는데, 이는 BOD, COD, TN, TP들과도 유사한 경향을 보이는 것으로 나타나 어류의 내성도 특성이 수질오염에 잘 반영하고 있는 것으로 판단되었다(Fig. 3a).

섭식특성(Trophic guilds) 분석에 따르면, 잡식종이 110개체(25.6%), 충식종이 105개체(24.5%), 육식종이 214개체(49.9%)의 구성비를 보여 육식종의 우점현상을 나타냈다(Fig. 3b). 섭식특성별 각 대표종으로는 잡식종에서 피라미가 44.5%, 충식종에서 모래무지가 38.1%, 육식종에서는 끄리가 96.3%를 차지하여 각각의 대표종으로 나타났다(Table 1). 지점별 섭식구조의 특성을 살펴보면, 잡식종 비율은 S3까지 점차 감소하는 경향을 보이다가, S4에서 46.7%로 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 S3과 S4사이에 부어음에서 유입되는 폐수의 영향이 반영된 것으로 판단된다. 충식종의 비율도 상류에서 하류로 갈수록 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 반면 육식종의 경우 S3에서 76.3%의 높은 비율을 보였는데, 이는 이 지점에서 우점하고 있는 끄리가 다량 채집되어 이와 같은 결과가 나타났다(Fig. 3b). 결과적으로 금강 수계의 중·하류부에 위치한 백마강에서 우점하는 종은 내성종 이면서 잡식성인 종이 우점하는 반면, 상류부의 하천 조사에서는 민감종 및 충식종의 상대빈도가 높아 하천 구간에 따라 종 조성이 극명하게 차이를 보이는 것으로 나타났다(An *et al.* 2005).

한편, 여울성 저서종(Riffle-benthic species)은 전 지점에서 밀어(*Rhinogobius brunneus*) 1종만이 확인되었는데, 그 풍부도(0.9%)는 매우 미미한 것으로 나타났다. 이는 백마강이 상류 하천에 비하여 여울 형성이 조건이 부족하고, 증가한 수 체류 시간으로 인해 침적된 퇴적물들이 저서어종이 서식하기 어려운 하상기질이 형성되기 때문에 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

5. 생물학적 건강도 평가

백마강에서 어류를 이용한 생물학적 건강도 평가 결과, 생물보전지수(IBM) 값은 평균 14.4로서 “악화상태(IV 등급)”로 나타났다. 지점별로 상류부에 위치한 S1과 S2는 생물보전지수 값이 16으로서 “보통상태(III등급)”로 가장 높은 값을 보였으며, S5에서 모델 값 12로 “악화상태(IV등급)”로 가장 낮은 값을 보였으며(Table 3), 하류부로 갈수록 생태 건강성은 점차적으로 악화되는 것으로 나타났다. 특히 생활하수 등의 점오염원이 유입되는 S3 이후부터 생물보전지수 값이 낮아지는데, 이는 Hungueny *et al.* (1996)의 연구와 마찬가지로 강의 하류로 갈수록 이·화학적 오염원 증가로 인해 IBM 값이 낮아진다는 연구결과와 일치하였다. 각 지점별 생물학적 건강도 평가를 종합한 결과, 민감종수, 여울성 저서종수, 내성종의 상대비율 및 총 국내종 개체수 등 4개 메트릭 값이 평균 “1”로서 모든 지점에서 최하 점수를 기록하였다. 백마강은 현재 대부분의 하상 기질이 모래와 빨리 이루어져 하류부의 특징을 잘 보여주고 있다. 특히 S1~S2의 경우, 인근 농경지 및 과수원등으로 부터의 유기물 유입이 일어나고 있으며, S3~S5의 경우는 하천주변의 인가 및 식당으로부터의 생활하수 및 분뇨처리장으로부터의 유출수(S4) 등의 유입으로 인해 하천수의 영양물의 유입으로 인한 교란이 진행 중인 것으로 사료된다. 즉, 하구둑 건설로 인해 정체수역의 증가가 하류부의 높은 오염 부하량을 야기하고, 증가된 수 체류 시간은 퇴적물을 증가시켜 저서어종이 서식하기 불가능한 하상기질을 형성하였기 때문에 내성종과 잡식종의 우점화 현상을 초래시켰으며, 이에 따라 민감종은 급격히 감소된 것으로 판단된다. 결론적으로 현재 백마강은 금강하구둑으로 인해 하류로 갈수록 유속이 줄고 물의 정체현상이 나타나고 있으며, 이와 더불어 중류역에서 유입되는 생활오수나

산업폐수들로 인해 부영양화가 가속화되고 있기 때문에 오염원인 수계에 대한 규제 강화가 반드시 필요하며, 이와 같은 규제를 통하여 건강한 하천으로 복원시키는 계획이 중요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 대전녹색환경지원센터의 2009년도 연구개발 사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

적 요

본 연구에서는 2007년의 금강 중·하류부의 백마강의 상류에서 하류에 이르는 5개 지점에서 이·화학적 수질 특성을 분석하였고, 그 곳에 서식하는 어류군집의 어종 분포 및 길드분석을 통해 군집구조 및 생태건강도 특성을 평가하였다. 전형적인 하류하천인 백마강의 BOD, COD농도는 각각 평균 2.8 mg L^{-1} , 4.0 mg L^{-1} 였고, TN, TP의 농도는 각각 5.0 mg L^{-1} , $158 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 이미 부영양 상태로 판정되었으며, 특히 하류 지점에서는 유기물 오염 및 부영양화 현상이 뚜렷했다. 5개 지점에서 출현한 어종은 총 19종으로 나타났고, 내성종인 끄리는 가장 높은 상대 풍부도(48%)를 보였다. 백마강에서 민감종의 비율(2.3%)은 낮은 반면 내성종 비율(71.8%)은 높게 나타나 중·하류 하천에서의 전형적인 길드 변화 현상이 확연히 나타났다. 하천 생태건강도 평가(IBM)에 따르면, 백마강에서 생물보전지수는 14.8로서 악화상태인 것으로 나타났고, 수질에서 보여준 바와 같이 하류부에서는 극명하게 악화된 것으로 나타났다. 특히 하류구간(S3~S5)의 낮은 건강도 지수값은 하수종말처리장으로부터 나온 배출수의 화학적 영향이 큰 것으로 사료되었다. 이는 생태건강도 모델값이 수질 특성을 잘 반영하는 객관성 있는 평가기법으로 활용 될 수 있음을 제시하였다. 따라서 백마강의 생태계 보존을 위해서는 향후 이 구간에 대한 하천복원 및 지속적인 생태모니터링이 중요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

An KG. 2003. Spatial and temporal variabilities of nutrient limitation based on in situ experiments of nutrient enrichment

- bioassay. *J. Environ. Sci. Heal. A.* 38:687-882.
- An KG, DH Yeom and SK Lee. 2001b. Rapid bioassessments of Kap stream using the index of biological integrity. *Korean J. Environ. Biol.* 19:261-269.
- An KG, SH Jung and SS Choi. 2001a. 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 KG and JH Kim. 2005. A diagnosis of ecological health using a physical habitat assessment and multimetric fish model in Daejeon stream. *Korean J. Limnol.* 38:361-371.
- An KG, JY Lee, DY Bae, JH Kim, SJ Hwang, DH Won, JK Lee and CS Kim. 2006. Ecological assessments of aquatic environment using multi-metric model in major nationwide stream watersheds. *J. Kor. Water Qual.* 22:796-804.
- An KG, JY Lee and HN Jang. 2005. Ecological health assessments and water quality patterns in Youdeung stream. *Korean J. Limnol.* 38:341-351.
- Barbour MT, J Gerritsen, BD Snyder and JB Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2nd Ed. EPA 841-B-99-002.
- Choi KC. 1987. Nature of Chungnam. Jeong-mun Publishing Co., Ltd. pp. 206-213.
- Hugueny B, S Camara, B Samoura and M Magassouba. 1996. Applying an index of biotic integrity based on communities in a west african river. *Hydrobiologia* 331:71-78.
- Joo GJ, HW Kim and K Ha. 1997. The development of stream ecology and current status in Korea. *Korean J. Ecol.* 20: 69-78.
- Karr JR. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries.* 6:21-27.
- Kim IS and JY Park. 2002. Freshwater fishes of Korea. Kyo-hak Publishing Co., Ltd. pp.30-428.
- Lee JH and KG An. 2007. Seasonal dynamics of fish fauna and compositions in the Gap stream along with conventional water quality. *Kor. J. Limnol.* 40:503-510.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *Gen. Syst.* 3: 36-71.
- MOE/NIER. 2006. Researches for integrative assessment methodology of aquatic environments (III): development of aquatic ecosystem health assessment and evaluation system, The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Korea. pp. 39-41.
- MOE/NIER. 2008. The survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea, The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. pp. 73-100.
- Ohio EPA. 1989. Biological criteria for the protection of aquat-

- ic life. Vol.III, Standardized biological field sampling and laboratory method for assessing fish and macroinvertebrate communities.
- Pielou EC. 1975. Ecological diversity. Wiley. New York. 165pp.
- Ricciardi A and JB Rasmussen. 1999. Extinction rates of North American freshwater fauna. *Conserv. Biol.* 13:1220-1222.
- Shannon CE and W Weaver. 1949. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana. 117pp.
- Simpson EH. 1949. Measurement of diversity. *Nature* 163: 688pp.
- Son YM and HB Song. 2006. Freshwater fish of Geum River. Ji-Sung Publishing Co., Ltd., Seoul, Korea. pp. 30-200.
- US EPA. 1993. Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters. EPA 600-R-92-111. Cincinnati, Ohio 45268.
- Yeom DH, KG An, YP Hong and SK Lee. 2000. Assessment of an index of biological integrity (IBI) using fish assemblages in Keum-Ho River, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 18:215-226.

Received: 16 April 2013

Revised: 28 May 2013

Revision accepted: 29 May 2013