

## 금호강 수계에서 생물학적 하천 건강도 및 이화학적 특성

권 영 수 · 안 광 국\*

(충남대학교 생명과학부)

Biological Stream Health and Physico-chemical Characteristics in the Keum-Ho River Watershed. Kwon, Young-Soo and Kwang-Guk An\* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objective of this study was to evaluate biological health conditions and physico-chemical status using multi-metric models at five sites of the Keum-Ho River during August 2004 and June 2005. The research approach was based on a qualitative habitat evaluation index (QHEI), index of biological integrity (IBI) using fish assemblage, and long-term chemical data (1995~2004), which was obtained from the Ministry of Environment, Korea. For the biological health assessments, regional model of the IBI in Korea (An, 2003), was applied for this study. Mean IBI in the river was 30 and varied from 23 to 48 depending on the sampling sites. The river health was judged to be "fair condition", according to the stream health criteria of US EPA (1993) and Barbour *et al.* (1999). According to the analysis of the chemical water quality data of the river, BOD, COD, conductivity, TP, TN, and TSS largely varied depending on the sampling sites, seasons and years. Variabilities of some parameters including BOD, COD, TP, TN, and conductivity were greater in the downstream than in the upstream reach. This phenomenon was evident in the dilution by the rain during the monsoon. This indicates that precipitation is a very important factor of the chemical variations of water quality. Community analyses showed that species diversity index was highest ( $H=0.78$ ) in the site 1, while community dominance index was highest in the site 3, where *Opsariichthys uncirostris* largely dominated. In contrast, the proportions of omnivore and tolerant species were greater in the downstream reach, than in the upstream reach. Overall, this study suggests that some sites in the downstream reach may need to restore the aquatic ecosystem for better biological health.

**Key words :** fish assemblage, biological integrity, chemical water quality, river

### 서 론

1970년대 이후 급속한 산업화의 물결에 따라 낙동강의 지류중의 하나인 금호강은 가정하수 및 공단에서 배출하는 오염물의 영향으로 수생태계의 수질오염 및 이에 따른 생물 감소 등 큰 영향을 받고 있다. 1991년 낙동강

폐놀오염, 1994년 낙동강 수질오염 등 각종 대형 오염사고가 발생하면서 정부도 낙동강 오염의 주요인으로 작용한 제1지류에 해당하는 금호강을 살리면 낙동강 수질이 개선된다는 취지 때문에 금호강에 대한 많은 오염원 저감 및 오폐수처리장 설치에 대한 노력을 통해 수질이 개선된 것이 사실이다. 1999년 말에 "낙동강 물관리 종합대책"을 세워 국가적으로 시행함으로써 2005년 이후에는

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

금호강의 수질을 상수도원 II급수 이하의 수 환경생태 복원을 위해 노력하고 있지만(남, 2003; 박 등, 2005), 현재에도 기본적인 수환경 특성평가 및 생태계 오염현황 파악이 시급하다.

수환경을 평가하는 기존의 전통적 기법으로 유기물오염측정을 위한 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 혹은 부영양화 현상 파악을 위한 영양염류 분석 등과 같은 대표 기준항목에 의거한 방법과, 특정 독성물질을 검출하는 방법(윤, 1990) 등이 널리 이용되어 왔다. 현재에도 전국 수계에서 이화학적 평가에 의한 지속적인 화학적 모니터링이 널리 이루어지고 있으며(환경부, 2000), 금호강에서도 여러 연구자들에 의해 화학적 평가가 선행된 바 있다. 금호강에서 수환경의 이화학적 선행 평가에 따르면, 금호강 수질의 장기 변동 및 연별 특성에 관한 연구(배 등, 1995), 금호강 수질환경의 계절적 변동과 수리 수문학적관리 방안(이 등, 1996), 금호강 유역의 오염부하량 및 오염총량제를 위한 관리 대책방안(정과 황, 2002), 금호강 오염의 종합적 조사(대구환경청, 2000; 배 등, 2002), 금호강유역의 환경 특이성이 하천 수질에 미치는 영향(박, 2003), 금호강 수질오염 현황 및 조사방법 개선연구(남, 2003) 등에 대한 다각적 연구가 수행된 바 있다. 이런 이화학적 접근방식은 즉각적이고, 가시적인 측정치를 제공해준다는 점에서 유리하지만, 측정 당시의 일시적인 수질 상태만을 대표할 뿐만 아니라 측정 시간과 장소, 기상상태, 측정자의 숙련도 등 주변 환경 여건에 따라 영향을 받는 단점을 내포하고 있다(공, 2002). 또한 이런 자료는 하천의 경우 강우일수 및 강우량에 역동적 변이를 보이며(이 등, 2002), 측정시간과 측정위치의 변화에 따른 변동폭이 크게 나타날 수 있다(이 등, 1996). 또한, 하천의 물리적인 특성변화(댐건설, 골재 채취, 하상구조의 변화)나 폭우나 가뭄이 유발하는 계절적 효과, 하천의 차수(Stream order), 일시적인 오염원 등을 효과적으로 반영 할 수 없다는 단점이 제시되고 있다. 이런 단점들 때문에 이화학적 수질자료는 획득한 값에 대한 불확실성이 높고(김 등, 2004), 하천의 본질적 특성에 대한 신뢰도 검증, 수질 대표성에 종종 문제로 거론된 바 있다(공, 2002). 즉, 하천의 평가 기법에 있어서 이화학적 수치만을 기본으로 한다면 총체적인 수환경 평가가 될 수 없기 때문에(환경청, 1987), 생물을 이용한 생물학적 수환경 평가를 위한 지표개발 및 평가방법 개발이 시급하다.

전통적인 생물학적 수환경 평가로는 지표생물을 이용한 하천평가로서, 금호강 유역에서 주로 이용된 분류군은 저서성 무척추동물(윤 등, 1992), 어류(양 등, 1994; 양

등, 2001) 및 수서곤충(김 등, 1995), 부착조류(정 등, 1996)를 들 수 있다. 이런 지표종을 이용한 평가방법은 이화학적 수질특성(유 등, 2004), 물리화학적 서식지교란 영향(양 등, 1994; 안 등, 2001, 안 등, 2004), 기후변화(An, 2000; 안 등, 2001) 등 다양한 요인으로 인한 생물의 변화를 반영하며, 평균수질을 대변할 수 있으므로 과거로부터 진행되어온 오염물질의 축적, 오염물질간의 상호 작용 등 종합적인 추적도 가능하다는 장점이 보고되고 있다.

최근, 북미에서는 지표생물을 이용한 총체적 생물학적 수질평가를 정책에 이미 반영하고 있는데(US EPA, 2002), 이런 기법은 전통적으로 1~2개의 변수(지표) 특성을 탈피하여 생물의 다변수 체제(Multi-metric system)를 확립하고 있다. 즉, 어류를 이용한 하천 생태계의 다변수 평가는 1980년대 초 Karr(1981)의 생물학적 건강도 지수(Index of Biological Integrity, IBI)모델 제시로부터 시작되었고, 1990년대 초부터 미환경부(US EPA)에서 사용되기 시작하였으며, 생태위해성 평가의 일환으로 신속한 RBP 생물평가개념(Barbour *et al.*, 1999)을 확립하였고, 평가기법으로 다변수 생태건강도 평가모델을 제시하고 있다(US EPA 1993; Barbour *et al.*, 1999). 이런 기법은 북미 외에도 유럽, 아프리카, 아시아 등 전 세계적으로 폭넓게 사용되어 수환경 관리 및 정책 제언에 반영하고 있다. 최근 우리나라에서는 제한적으로 평창강(안 등, 2001) 및 갑천(안 등, 2001)에서 상기 다변수 모델을 적용하여 생태계 건강성 평가를 실시한 바 있으나 향후 폭넓은 적용평가가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 첫째, 생물학적 건강도 지수(IBI)를 이용하여 금호강의 생물학적 하천 건강도를 평가하고, 둘째, 기존의 이화학적인 방법에 의거한 수질 모니터링 데이터를 수질오염 변이를 파악하고, 셋째, 이화학적 수질 특성 및 생물학적 수질특성을 비교, 검토하는데 목적이 있다. 본 연구에서 얻어진 자료는 향후 금호강의 생태복원 및 생물학적 복원에 핵심 역할을 할 것으로 사료된다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사시기 및 조사지점

본 연구를 위해 아래와 같이 금호강의 5개 조사지점(S1-S5)을 선정하였고(Fig. 1), 현장에서 어류 채집 및 물리적 서식지평가 조사를 총 3회 실시하였다. 조사시기는 우리나라의 몬순 강우에 따른 생태건강도의 계절별 변이 평가를 위해 1차 조사는 장마기(2004년 8월), 2차 조사는 장마 후기(2004년 10월), 3차 조사는 장마 전기(2005

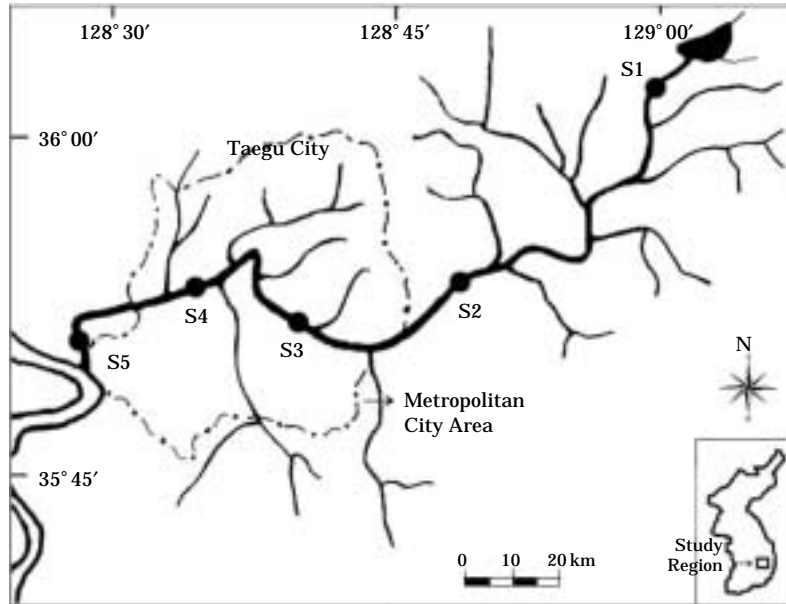


Fig. 1. The sampling locations in Keum-Ho River

년 6월)에 실시하였다.

- S1: 경북 영천군 자양면 삼매동 평천교
- S2: 경북 경산군 하양읍 청천리 청천교
- S3: 대구광역시 동구 효목동 2가 아양교
- S4: 대구광역시 북구 산격동 무태교
- S5: 대구광역시 달서구 파호동 강창교

2. 조사방법

본 조사의 어류 채집은 생태계 건강성 평가를 위해 Wading method (Ohio EPA, 1989)를 기반으로 하였으며, 조사지점내의 정량화된 Catch Per Unit of Effort (CPUE)를 위해 조사지점을 중심으로 상류 100 m, 하류 100 m 구간을 조사하였고, 소요된 채집시간은 60분으로 하였다. 어류채집은 주로 투망(망목: 5×5 mm)을 사용하였고, 60분당 20~30회를 실시하였고, 지역의 특징상 수초가 밀집되어 있거나, 바위 우점지역의 경우에는 족대(4×4 mm)를 사용하여 여울(Riffle), 소(Pool), 흐름이 느린 곳(Run) 등을 모두 포함하여 하류로부터 상류로 채집하였다. 각 지점에서 채집한 어류는 김(1997), 김과 강(1993), 김과 박(2002)을 참고하여 연구에 필요한 분류학적 주요형질을 조사한 후 방류하였고, 일부 동정이 불확실하거나 정밀 분석이 필요한 종은 10% 포르말린 용액에 고정한 후 실험실에서 동정 및 분류하였다.

3. 군집분석

본 수계의 어류 군집 특성 분석을 위해 우점도지수 (Simpson's Dominance Index, λ), 종 풍부도 지수 (Margalef's species richness index, d), 종 다양도 지수 (Shannon-Weaver diversity index, H') 및 종 균등도 지수 (Pielou's Pielou's evenness index, J')를 산정하였다.

i) 군집우점도지수 (λ)

$$\lambda = \sum \frac{N_i^2 - N}{N(N-1)}$$

[N=총 출현 개체수, N<sub>i</sub>=i종의 개체수,

S=총 출현 종수]

ii) 종풍부도지수 (d)

$$d = \frac{(S-1)}{\ln(N)}$$

iii) 종다양도지수 (H')

$$H' = -\sum P_i \log_{10} P_i$$

[P<sub>i</sub>=N<sub>i</sub>/N]

iv) 종균등도지수 (J')

$$J' = \frac{H'}{\log_e S}$$

4. 생물학적 건강도 지수 평가 모델 및 메트릭 분석

본 조사에서는 IBI (Index of Biological Integrity)값을

산정하기 위해 한국의 지역적 특성을 위해 개발한 안 등 (2001)의 11개 메트릭 중, 하천 중층 서식종수(Number of water column species) 1개 항목을 제외한 10개의 메트릭을 사용하였다. 모델 분석에 이용된 메트릭은 M<sub>1</sub>; 총 본토종수(Total species), M<sub>2</sub>; 여울성 저서종수(Riffle-benthic species), M<sub>3</sub>; 민감성 지표종수(Sensitive species), M<sub>4</sub>; 내성 지표종수(Tolerant species), M<sub>5</sub>; 잡식성종의 개체빈도(Omnivores), M<sub>6</sub>; 육식성종의 개체빈도(Carnivores), M<sub>7</sub>; 충식성종의 개체빈도(Insectivores), M<sub>8</sub>; 총 개체수(Total number of individuals), M<sub>9</sub>; 외래종 빈도(Exotics), M<sub>10</sub>; 개체건강도(anomalies)의 10개 메트릭을 설정하였다. 모델 값 산정은 각 메트릭에 “5”, “3”, “1”의 점수를 부여하여 등급을 분류하였다.

### 5. 모델 메트릭 등급

모델 메트릭 등급은 Karr (1981)에 의해 제시된 등급을 변형하여 생태건강도를 산정하였으며 등급 기준은 다음과 같다. I등급(48~50, 최적상태, Excellent; Ex), II등급(38~42, 양호상태, Good; G), III등급(30~34, 보통상태, Fair; F), IV등급(18~24, 악화상태, Poor; P), V등급(12~10, 최약상태, Very poor; VP)으로 분류하여 생물학적 건강도 지수(IBM Score)를 선정하였다. 또한 점수분류(Scoring category), 기준선정은 하천차수(Stream order) 및 지리적 특성에 따라 군집 구조가 변하기 때문에 국내에 맞게 변형 후 적용하였다. 각 어류에 대한 트로픽길드 및 서식지 길드 특성은 김과 박(2002), 김과 강(1993)에 의거하여 분류하였다.

### 6. 물리적 서식지 평가

금호강의 서식지 평가 모델은 Plafkin *et al.* (1989)에 의해 도입된 물리적 서식지평가지수(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI) 및 이를 수정한 Barbour *et al.* (1999)의 서식지 평가지수를 바탕으로 모델보정을 거친 후 평가에 적용하였다. 현장 적용평가는 수리 수문학적으로 가장 안정된 시기인 2005년 6월의 장마전의 시기에 수행하였다. 물리적 서식지 건강도 평가를 위한 메트릭 모델은 M<sub>1</sub> 하상구조/서식처 피복도(Substrate/ Instream cover), M<sub>2</sub> 하상매몰도(Embeddedness), M<sub>3</sub> 유속/수심 조합(Flow velocity/depth combination), M<sub>4</sub> 하상유실 및 토사축적도(Bottom scouring & sediment deposition), M<sub>5</sub> 수로흐름 상태(Channel flow status), M<sub>6</sub> 수로 변경도(Channel alteration), M<sub>7</sub> 여울 빈도 및 하천굴곡도(Frequency of riffles or bends), M<sub>8</sub> 제방 안정도(Bank stabil-

ty), M<sub>9</sub> 제방식생 보호도(Bank vegetative protection), M<sub>10</sub> 천변 식생대의 폭(Riparian vegetative zone width) 및 M<sub>11</sub> 소규모 댐의 존재유무(Dam construction impact)의 11개 메트릭으로 구성되었다. 각 변수값의 등급구분은 US EPA (1993)의 기준에 의거하였다.

### 7. 수질자료 분석

금호강의 이화학적 수질특성은 1995~2004년까지 10년간 환경부에서 측정된 수질자료를 이용하였다. 여러 일반수질 항목 중 전기전도도(Specific conductivity at 25 °C), 총부유물(Total suspended solids, TSS), 생물학적 산소요구량(Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 용존산소량(Dissolved oxygen, DO), 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus, TP)의 총 7개 항목을 선정하여 각 조사지점별, 연별로 시간의 흐름에 따른 변화양상을 분석하였다. 또한 한국 수리 수문학적 특성을 감안하여 장마 전기(5~6월), 장마 중기(7~8월), 장마 후기(9~10월)로 구분하여 시공간적 수질변이분석을 실시하였다. 금호강 유역의 강수량은 1995~2004년까지 기상청에서 기록된 통계자료를 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/index.jsp>)에서 획득하여 이화학적 수질값 및 생물학적 건강도지수와 비교평가 하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 생물학적 하천 건강도

본 조사기간 동안 금호강에서 Karr (1981)의 생물보존 지수(IBM)평가에 의거한 생물학적 하천건강도(Biological stream health) 지수값은, 연평균 30(변이 폭: 23~48, n=5)으로서 미국 환경부(US EPA)의 분류기준에 의거할 때 생물학적 건강도는 “보통상태”(Fair)로 나타났다(Table 1). 이전의 염 등(2000)의 금호강 수계의 생물학적 건강도 지수에서는 평균값이 23으로 “악화-매우악화 상태”로 보고된 바 있어 상대적으로 향상된 것으로 사료되었다. 한편, 전형적인 도심하천인 갑천수계의 경우 생물학적 건강도 지수(안 등, 2001)에서는 평균 36으로 보통상태(Fair)로서 본 금호강 수계와 유사한 양상을 보였고, 산간 계류형 하천인 평창강 수계의 건강도는 최적상태(Excellent)로 나타나(안 등, 2001), 지역적 특성에 의해 크게 차이가 있는 것으로 나타났다.

상·하류 간의 공간적 특성분석에 따르면, 최상류지점

**Table 1.** Biological stream health assessments, based on the 10 metric model of the IBI, using fish assemblages during monsoon, post-monsoon, pre-monsoon. The criteria for the IBI values were categorized as five ranks of excellent (Ex), good (G), fair (F), poor (P), and very poor conditions (VP). In the table, R-B species indicates a riffle benthic species as habitate guilds.

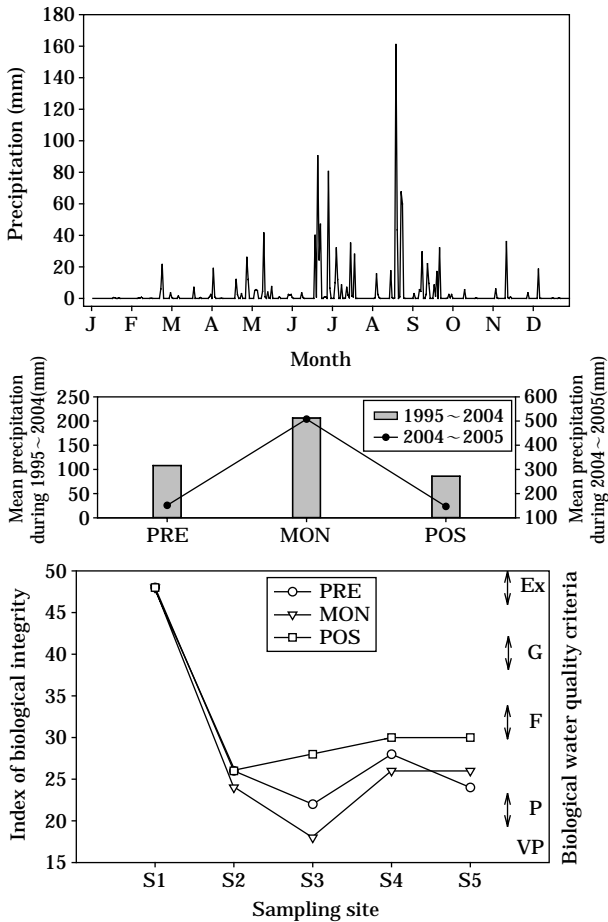
Sampling site/metric	Characteristics of ecological indicators				Trophic structure			Species richness & Individual health			IBI score	Stream health criteria	
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	M <sub>8</sub>	M <sub>9</sub>	M <sub>10</sub>			
	Total species	R-B species	Sensitive species	Tolerant species	Omnivore	Insectivores	Carnivores	Total number of individuals	Exotics	Anomalies			
1st survey	S1	12 (5)	8 (5)	7 (5)	1 (5)	21 (3)	64 (5)	13 (5)	67 (5)	0 (5)	0 (5)	48	Ex
	S2	6 (3)	3 (3)	1 (1)	27 (1)	51 (1)	9 (1)	40 (5)	53 (1)	0 (5)	0 (5)	26	F-P
	S3	5 (1)	0 (1)	0 (1)	80 (1)	80 (1)	0 (1)	20 (5)	5 (1)	0 (5)	0 (5)	22	P
	S4	5 (1)	1 (1)	1 (1)	6 (3)	6 (5)	12 (1)	8 (5)	16 (1)	0 (5)	0 (5)	28	F-P
	S5	3 (1)	0 (1)	0 (1)	15 (3)	8 (5)	8 (1)	77 (5)	13 (1)	2 (1)	0 (5)	24	P
2nd survey	S1	8 (5)	5 (5)	3 (5)	3 (5)	5 (5)	57 (5)	24 (5)	37 (3)	0 (5)	0 (5)	48	Ex
	S2	10 (3)	3 (3)	3 (1)	33 (1)	46 (1)	20 (3)	33 (5)	54 (1)	1 (1)	0 (5)	24	P
	S3	3 (1)	0 (1)	0 (1)	100 (1)	100 (1)	0 (1)	0 (1)	3 (1)	0 (5)	0 (5)	18	P
	S4	2 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (5)	0 (5)	0 (1)	100 (5)	23 (1)	1 (1)	0 (5)	26	F-P
	S5	3 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (5)	1 (5)	0 (1)	99 (5)	77 (1)	1 (1)	0 (5)	26	F-P
3rd survey	S1	10 (5)	6 (5)	5 (5)	0 (5)	8 (5)	69 (5)	23 (5)	36 (3)	0 (5)	0 (5)	48	Ex
	S2	8 (3)	3 (3)	2 (1)	30 (1)	40 (3)	20 (3)	40 (5)	27 (1)	1 (1)	0 (5)	26	F-P
	S3	5 (1)	0 (1)	0 (1)	5 (3)	5 (5)	1 (1)	94 (5)	235 (5)	1 (1)	0 (5)	28	F-P
	S4	6 (3)	1 (1)	1 (1)	12 (3)	12 (5)	4 (1)	84 (5)	95 (1)	0 (5)	0 (5)	30	F
	S5	2 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (5)	0 (5)	12 (1)	88 (5)	17 (1)	0 (5)	0 (5)	30	F

(지점 1)의 평균 건강도 지수는 48로서 최적상태(Excellent)인 반면, 지점 2, 4, 5의 평균값은 25~28 범위로서 보통-악화상태로 나타났으며, 지점 3의 평균 지수값은 최소치(23)를 보여 악화상태로 나타났다. 즉, 지점 3의 건강도 지수값은 최상류에 비해 2배의 급격한 감소를 보여 어류에 의거한 생물학적 건강도가 급격히 악화되는 것으로 나타났다. 지점 3에서 이렇게 낮은 값을 보인것은 주변 도심에서 가정 오·폐수가 직접적으로 유입되고 있고, 500 m 하부의 유원지가 점오염원으로 작용하여 건강도 악화에 영향을 준 것으로 사료된다. 이런 특성은 지점 3의 조사시 오수에서 흔히 발견되는 검정색 침전물이 하상의 70% 이상을 덮어 물리적 서식지 악화현상을 보여 생물학적 건강도 지수에도 악영향을 주었을 것으로 사료된다. 한편, 하절기의 장마영향(장마 전기, 중기, 후기)에 따라 시간적 변이 특성 분석에 따르면, 모든 지점을 평균한 생물학적 건강도 지수값은 장마 전기, 중기, 후기에 각각 30, 28, 32로서 계절별로 큰 차이를 보이지 않았으나 (Table 1), 각 지점별 특성은 변이를 보였다. 산간 계류형 하천의 특성을 보이는 지점 1은 계절적 변이를 전혀 보이지 않은 반면, 도심에 3~5 지점들은 일부 차이를 보였다 (Fig. 2). Fig. 2에서 보는 바와 같이, 지점 3~4에서 하절기의 생물보전 지수값은 장마 전기 및 후기에 비해 악

화되는 것으로 나타났다.

## 2. 물리적 서식지 건강도

금호강에서 Barbour *et al.* (1999)의 서식지 평가지수 (Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI) 분석에 따르면, 상하류 간에 물리적 서식지 건강도는 뚜렷한 차이를 보였다. 토지 이용도 면에서 주로 산림지역 및 농경지 일부의 영향을 받는 지역에 위치한 지점 1과 지점 2에서는 QHEI값은 각각 143, 146으로서 물리적 서식지 건강도 등급은 양호상태 (Good)로 평가되었다. 한편, 지점 3~5에서는 QHEI 값이 각각 104, 108, 92로서 보통상태 (Fair)로 판명되었다 (Table 2). 물리적 서식지 변수 11개 평가 메트릭의 각 항목들에 대해 상·하류간의 비교분석에 따르면, 수로 변경도 (Channel alteration), 제방 안정도 (Bank stability)는 “보통상태”로 차이가 거의 없었다. 한편, 어류의 서식지 공간을 나타내는 하상 및 천내피식도 구조는 양호-보통상태였고, 하천 구성물의 매몰도 (Embeddedness) 및 하상의 침전물 축적도 (Sediment deposition)는 각각 최적-보통상태 및 양호-보통상태로 하류로 내려올수록 감소하는 경향을 보였다. 하천 서식지의 다양성을 나타내는 유속/수심상태 (Velocity/depth



**Fig. 2.** The mean monthly precipitation during 1995 ~ 2004, mean precipitation during 2004 ~ 2005 (pre-monsoon: May and June; monsoon: July and August; postmonsoon: September and October), and the index of biological integrity during pre-monsoon (PRE), monsoon (MON), and postmonsoon (POS). The biological criteria of "Ex", "G", "F", "P", and "VP" indicate the excellent, good, fair, poor, and very poor conditions, respectively.

combination)의 메트릭은 도심하천의 하상구조 직선화와 단순화로 인해 지수값은 하류로 갈수록 낮게 나타났다. 그 밖에 제방식생보호도(Bank vegetative protection) 및 천변 식생대의 폭(Riparian vegetative zone width)는 상류에서 하류로 갈수록 전반적으로 낮은 점수를 나타내었는데 이는 도심 하천의 제방과 식생은 인위적으로 조성하여 서식지가 교란되었기 때문인 것으로 판단되었다. 특히, 지점 3~4의 서식지 상태의 질적 감소는 생물학적 건강도 악화, 종 풍부도 감소에 영향을 주는 것으로 사료되었다(Plafkin *et al.*, 1989).

**3. 생태지표종 및 트로픽길드 특성**

어류의 생태지표종 특성 분석에 따르면, 민감종(Sensitive species)은 지점 1에서 8종 95개체(13%)인 반면, 그 외 지점에서는 3% 이하로 뚜렷한 감소를 보였다(Table 3). 특히 지점 3, 지점 5에서는 민감종이 전혀 출현하지 않았다. 내성종(Tolerant species)의 상대 개체수 빈도는 지점 1에서는 1% 이하인 반면 지점 2, 지점 3에서는 3% 이상으로 증가하였다. 지점 1에서는 산간 계류의 하천의 특성을 보이고 있어 민감종이 우세하고, 내성종은 채집되지 않았지만, 중·하류로 올수록 도심지에서 유입되는 가정폐수, 공장폐수 등의 유입으로 수질이 악화되어 민감종은 출현하지 않고, 내성종의 수가 증가하는 것으로 보아 수질오탁 및 서식지 악화 현상이 뚜렷하게 나타났다. 즉, 하류 및 오염지점에 대한 지점별 내성종 우세현상은 이전의 연구 문헌으로 도심하천인 금호강 수계(염 등, 2000) 및 갑천 수계(안 등, 2001)에서 잘 나타나 있다. 즉, 이런 도심하천의 오염지점에서는 내성종 빈도 우점 및 민감종 빈도 감소가 극명하게 나타난 반면, 점오염원이 극히 적은 산간계류형 하천인 평창강 수계(안 등, 2001)에서는 민감종이 75%, 내성종이 4.8%로서 극명한 대조현상을 보여 하천의 특성별로 지표종 특성이 극명하게 분리되는 것으로 나타났다. 어류의 트로픽길드 분석에 따르면, 육식어종(Carnivore)의 상대 풍부도는 68%로서 식충어류(Insectivore, 16%) 및 잡식어류(Omnivore, 15%)에 비해 뚜렷하게 높게 나타났다(Table 3). 우점하는 육식성종의 90% 이상은 끄리(*Opsariichthys uncirostris*)였으며, 지점별로 본종을 제외할 경우 상대 풍부도는 지점 1~2에서 3.4%, 지점 3~5는 1% 이하로 감소하여 서식지의 질적 하강에 따라 육식어종의 상대 풍부도는 감소한다는 Ohio EPA (1987)의 결과와 일치하였다. 낙동강 수계에서 끄리의 출현은 양(1973)에 의해 처음 보고된 바 있고, 강과 금(2001)은 낙동강 중류, 지류에서 끄리의 급격한 증가를 보고하였고, 장 등(2001)은 낙동강의 일부 지류에서 끄리가 우점하고 있음을 보고한 바 있다. 본 수계에서도 중하류 지역에서는 끄리가 우점하고 있는 것이 확인되었다.

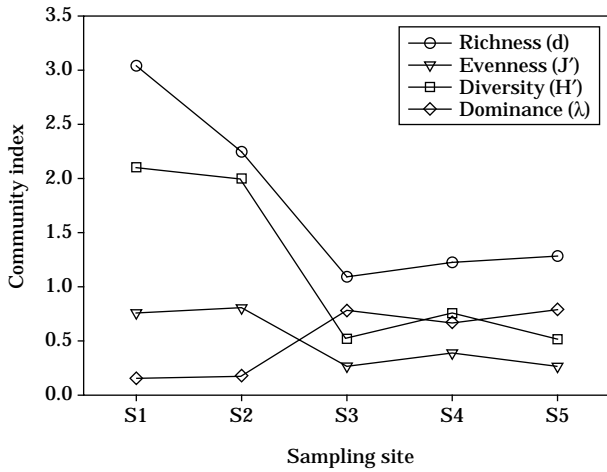
지점별 식충어종 분석에 따르면, 최상류지점(지점 1)에서는 12.3%(7종 93개체)로 단연 우점하는 반면, 하류지점(지점 3~5)으로 갈수록 1% 이하로 감소하였다. 최상류에서의 식충종의 높은 상대 풍부도는 뚜렷한 대비는 서식지 하상구조의 차이를 반영하는 것으로 사료된다. 상류역(지점 1~2)의 경우 하상구조의 90% 이상이 자갈 및 바위로 구성되어, 수서 무척추동물의 서식 호조건을 가진

**Table 2.** Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) at five sampling locations in Keum-Ho River.

Habitat parameters	Sampling locations				
	S1	S2	S3	S4	S5
M <sub>1</sub> Substrate/Instream cover	15	18	15	12	10
M <sub>2</sub> Embeddedness	16	18	8	8	6
M <sub>3</sub> Flow velocity/Depth combination	15	13	10	10	8
M <sub>4</sub> Bottom scouring & sediment deposition	15	13	10	10	6
M <sub>5</sub> Channel flow status	11	15	13	13	13
M <sub>6</sub> Channel alteration	10	10	6	8	8
M <sub>7</sub> Frequency of riffles or bends	13	13	10	6	3
M <sub>8</sub> Bank stability	10	10	8	8	8
M <sub>9</sub> Bank vegetative protection	14	14	12	12	10
M <sub>10</sub> Riparian vegetative zone width	14	12	6	10	9
M <sub>11</sub> Dam construction impact	10	10	6	11	11
Total score	143 (Good)	146 (Good)	104 (Fair)	108 (Fair)	92 (Fair)

**Table 3.** Ecological indicator species in the stream sites. The species list was arranged by a sequence of the tolerant (T), intermediate (I), and sensitive species (S). The symbol of “\*” and “RB” indicates an exotic species and the riffle benthic species, respectively. The values before and within the parenthesis indicate the number of individual sampled and the relative abundance, respectively.

Species	Tolerance guild	Feed guild	Habitat guild	S1	S2	S3	S4	S5
<i>Zacco platypus</i>	T	O		1 (0.7)	45 (33.6)	14 (5.8)	12 (9.0)	
<i>Silurus asotus</i>	T	C		1 (0.7)				
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	T	H						1 (0.9)
<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	T	O			1 (0.7)			1 (0.9)
<i>Carassius auratus</i>	T	O			7 (5.2)	1 (0.4)		1 (0.9)
<i>Cyprinus carpio</i>	T	O			1 (0.7)	3 (1.2)		
<i>Opsariichthysuncirostris amurensis</i>	I	C			24 (17.9)	214 (88.1)	109 (81.3)	95 (88.8)
<i>Leiocassis ussuriensis</i>	I	C					1 (0.7)	
<i>Odontobutis platycephala</i>	I	C	RB	22 (15.8)	13 (9.7)		2 (1.5)	
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	I	C		1 (0.7)				
<i>Pseudogobio esocinus</i>	I	I			1 (0.7)	1 (0.4)	2 (1.5)	
<i>Cobitis cf. sinensis</i>	I	I	RB	7 (5.0)	14 (10.4)			
<i>Tridentiger obscurus</i>	I	O	RB	1 (0.7)				
<i>Microphysogobio yaluensis</i>	I	O	RB	9 (6.5)				
<i>Coreoperca herzi</i>	S	C	RB	2 (1.4)	3 (2.2)			
<i>Niwaella multifasciata</i>	S	H	RB	1 (0.7)				
<i>Zacco temmincki</i>	S	I		34 (24.5)				
<i>Hamibarbus labeo</i>	S	I					4 (3.0)	
<i>Pungtungia herzi</i>	S	I	RB	26 (18.7)	6 (4.5)			
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	S	I	RB	22 (15.8)				
<i>Gnathopogon strigatus</i>	S	I		1 (0.7)				
<i>Liobagrus mediadiposalis</i>	S	I	RB	1 (0.7)				
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	S	O			9 (6.7)			
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	S	O		8 (5.8)				
<i>Micropterus salmoides</i>	C				10 (7.5)	9 (3.7)	4 (3.0)	6 (5.6)
<i>Squalidus gracilis majimae*</i>	I			2 (1.4)		1 (0.4)		2 (1.9)
<i>Lepomis macrochirus*</i>	I							1 (0.9)
Total Number of Individual				139	134	243	134	107
Total Number of Species				16	12	7	7	7



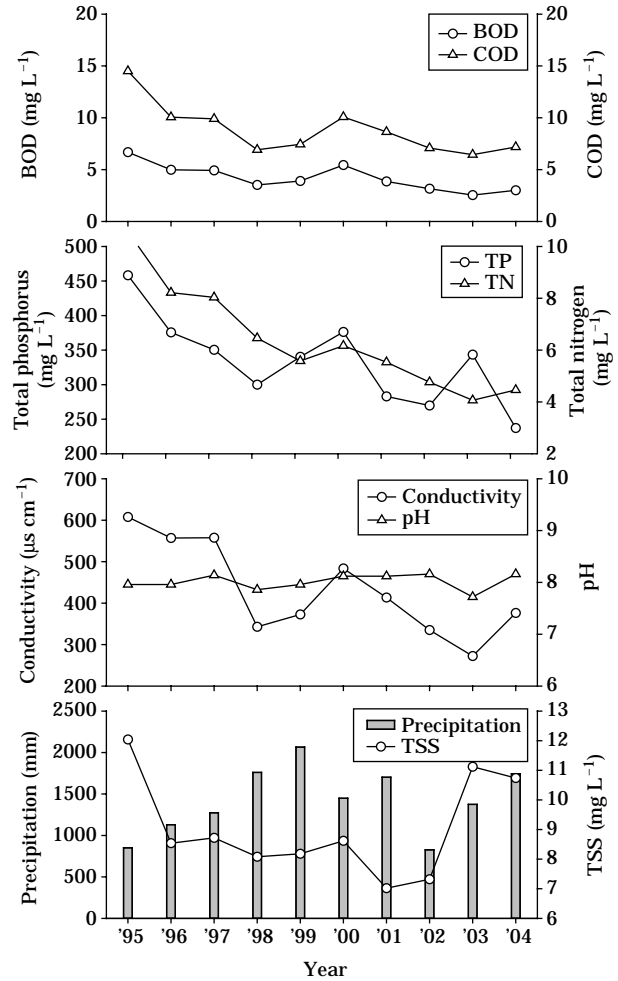
**Fig. 3.** Community analyses, based on the species richness index (d), community evenness index ( $J'$ ), species diversity index ( $H'$ ), and dominance Index ( $\lambda$ ) in the sampling sites.

반면, 중·하류(지점 3, 지점 4, 지점 5)에서 하상구조는 유기물이 퇴적되어있고(Table 2), 지점 5에서는 빨 흙으로 구성되어 있었다. 이런 뚜렷한 하상구조의 차이는 어류의 트로픽 구조를 변경 시키는 주된 요인 중의 하나라고 사료된다.

**4. 군집구조의 특성**

종 풍부도 지수(Margalef's index)에 따르면, 지점 1~2의 풍부도 지수는 2.0 이상으로 나타났고, 지점 1에서는 최대치(3.04)를 보였으며, 지점 3에서는 최소치(0.109)를 보였다(Fig. 3).

지점별 이런 변화 경향은 종 다양도지수(Species diversity index)에서 그대로 반영되어 지점 1~2에서 2.0 이상으로서 높게 나타났고, 지점 3~5에서 종다양도 지수는 1.0 이하로서 낮게 나타나 상류역과 하류역 사이에 뚜렷한 차이를 보였다. 일반적으로 종 다양도 지수가 낮을 경우 종종 화학적 오염 및 서식지 교란과 요인이 작용한다는 점을 고려할 때, 생물학적 건강도 지수가 낮은 지점 3~5 지점은 수생태계의 교란이 있었음을 시사하였다. 우점도 지수(Species dominance index)는 *Opsariichthys uncirostris*에 의해 지점 3, 지점 5에서 가장 높게 나타났으며, 본종이 우점하지 않으며, 종 다양도가 최대값을 보였던 최상류 지점에서는 우점도가 낮게 나타났다. 이런 이유로 해서 종 균등도는 지점 3에서 최저치를 보였다.



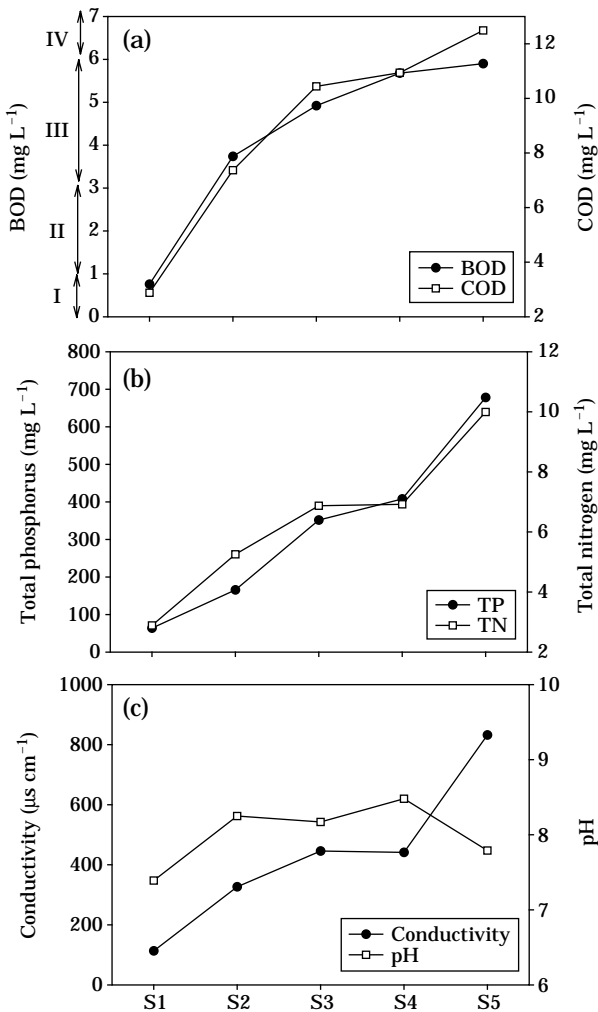
**Fig. 4.** Long-term annual trends of chemical parameters and precipitation during 1995~2004. The chemical data was obtained from the Ministry of Environment, Korea.

**5. 이화학적 수질특성**

금호강에서 10여년 간의 이화학적 수질자료 분석에 따르면, 생물학적 산소요구량(BOD)의 평균값은 4.2 mg L<sup>-1</sup> (범위 : 2.5~6.7 mg L<sup>-1</sup>, n=10)로서(Fig. 4), 우리나라 현행 환경부의 하천수질기준에 의하면 3등급으로 나타났다. 연별 변화로 보면 2000~2001년에 일시적 증가를 제외한다면 지속적으로 산소요구량이 감소하는 경향을 보였다.

이런 경향은 영양염류에 의한 부영양도 지표인 총인(TP), 총질소(TN), 그리고 이온변화 양의 지표인 전기전도도에서도 분명하게 반영되었다(Fig. 4). 한편, 수소이온농도(pH)는 7.5~8.5에서 변화하였으며, 연별 큰 변화를





**Fig. 5.** Spatial variation of water quality based on site average of BOD, COD, total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), conductivity, and pH.

보이지 않았고, 총부유물농도(TSS)는 95년에 11 mg L<sup>-1</sup> 이상의 최고치로부터 2001~02년까지 감소하는 경향을 보였으나, 2003~04년에 증가하는 양상을 보였다.

조사지점별 이화학적 수질자료 분석에 따르면, 상류에서 하류로 내려 갈수록 거리에 따른 수질 악화 현상은 뚜렷해졌다. 유기오염의 지표인 평균 BOD는 지점 1에서 0.76 mg L<sup>-1</sup>, 지점 5에서 4.2 mg L<sup>-1</sup>으로 약 5.5배의 차이를 보였으며, COD는 두 지점(지점 1=2.9 mg L<sup>-1</sup>, 지점 5=8.8 mg L<sup>-1</sup>) 사이에 3배까지 증가하였다(Fig. 5a).

또한 하천 부영양화의 핵심지표인 총인(TP)도 지점 1(0.06 mg L<sup>-1</sup>)과 지점 5(0.3 mg L<sup>-1</sup>)사이에 5배의 차이를 보였고, 총질소(TN)는 두 지점간에 2.2배까지 증가하였으며(Fig. 5b), 이런 양상은 전기전도도도 및 수소이온농

도에서 유사하였다(Fig. 5c). 이런 특성은 상류에서 하류로 갈수록 도심지역의 산업화, 인구밀집 현상에 의한 생활하수, 공장폐수 등 점오염원의 증가로 사료된다.

계절별 수질 특성분석에 따르면, 화학적 오염 정도는 강우에 의해 영향을 받는 것으로 사료되었다(Fig. 6). 강우의 전기, 중기, 후기의 각각 지점별 이화학적 수치의 변화를 보면 유기물 오염지수인 평균 BOD는 상류인 지점 1에서는 장마 전기, 장마 중기, 장마 후기에 각각 0.8 mg L<sup>-1</sup>, 0.7 mg L<sup>-1</sup>, 0.7 mg L<sup>-1</sup>로서 뚜렷한 특징을 보이지 않지만, 지점 3의 경우 장마 전기, 장마 중기, 장마 후기에 각각 6.6 mg L<sup>-1</sup>, 4.3 mg L<sup>-1</sup>, 3.5 mg L<sup>-1</sup>로 강우에 의해 오염원이 충분히 희석되어 BOD값이 2배까지 희석되는 것으로 나타났다(Fig. 6a). COD의 경우도 같은 양상을 보였다(Fig. 6b).

장마 전기에 유량의 감소로 오염물질이 농축되어 있다가 장마 중기에 강우에 의한 많은 유량으로 인하여 오염물질이 희석되고, 수치가 감소하여, 장마 후기가 되면 이화학적 수치가 최소로 나타났다. 이런 특성은 화학적 오염도가 높은 지점 3~5구간의 생물학적 건강도지수(Index of biological integrity)에서 잘 나타났다. 하천 부영양화의 기준이 되는 총인(TP)은 상류지점들(지점 1~2)에서는 강우에 따른 변이를 보이지 않지만, 지점 3~5의 도심구간에서는 장마 중기에 강우에 의해 오염수치가 가장 낮아지고, 장마 후기가 되면 약간 상승하는 양상을 보였다(Fig. 6c).

**6. 화학적, 물리적 특성 및 생물학적 건강도의 비교**

생물학적 건강도 지수값과 이화학적인 하천 수질 등급 기준을 비교해 보면, 최상류인 1지점의 생물학적 건강도 지수 값(IBM=48)은 I등급, 이화학적 수질 값(BOD기준: 0.76 mg L<sup>-1</sup>)은 1급수를 보였으며, 물리적 서식지 건강도 지수(QHEI)에서도 양호상태로 나타났다. 또한, 지점 3에서 지점 5로 내려갈수록 생물학적 건강도 지수 값(IBM=23~28)은 III~IV등급으로 감소하였고, 이화학적 BOD 수질값(3.7 mg L<sup>-1</sup>~5.9 mg L<sup>-1</sup>)은 3급수로 하강하였다(Fig. 7). 3~5지점 구간에서 생물학적 IBM 건강도 지수는 27 이하로서 최상류에 비해 급격히 낮아졌는데, 이는 물리적 서식지 건강도 및 화학적 건강도의 동시 악화현상에 의한 것으로 사료되었다(Fig. 7). 즉, 지점 1에서의 최적상태의 생물학적 건강도는 양호한 물리적 서식지 특성 및 양호한 수질 특성(낮은 유기물 오염도)에 의한 복합적인 반영으로 사료되었으며, 하류에서의 생물학적 건강도 악화는 서식지 교란 및 화학적 오염의 결과로 사료되

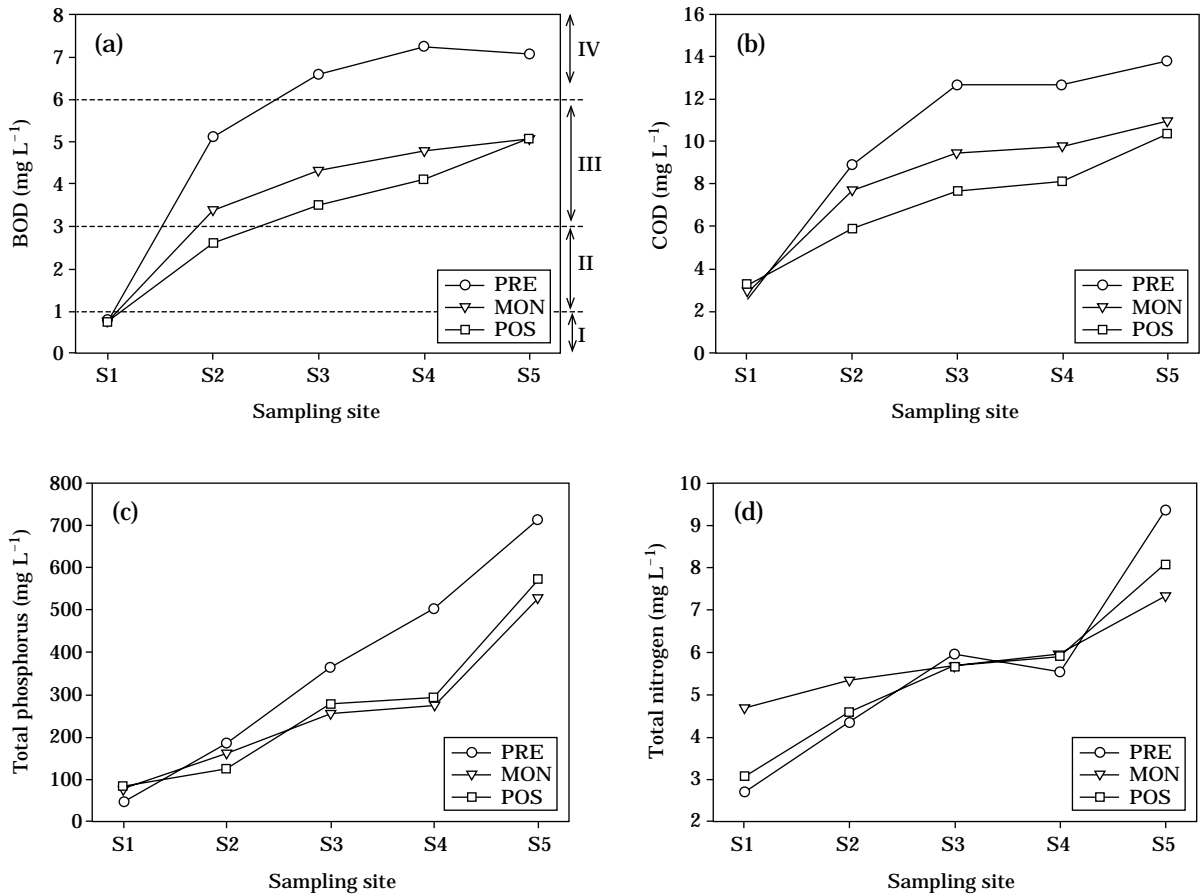


Fig. 6. Seasonal changes of BOD, COD, total phosphorus (TP), and total nitrogen (TN) at each site [PRE=Premonsoon, MON=During Monsoon, POS=Postmonsoon].

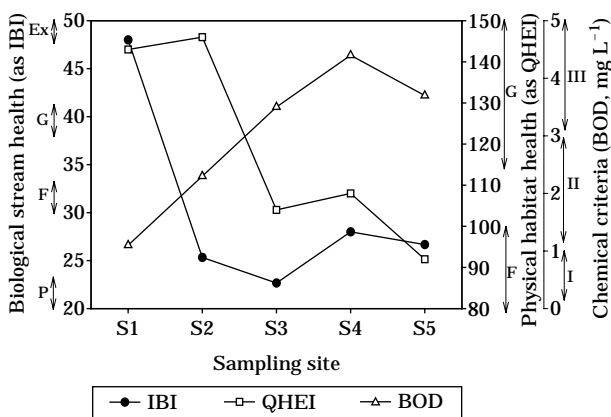


Fig. 7. Spatial comparisons of biological stream health, based on the index of biological integrity with physical habitat health as Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) and the chemical criteria as BOD values. The abbreviations of “Ex”, “G”, “F”, and “P” indicate Excellent, good, fair, and poor conditions, respectively.

었다. 즉, 건강도 지수가 낮은 3~5지점구간에서는 서식지평가지수인 QHEI 값이 110 이하로서 상류역에 비해 크게 감소하였으며, 동시에 이런 구간에서 BOD는 연평균  $3 \text{ mg L}^{-1}$  이상을 보여 상류에 비해 유기물 오염이 급격히 증가하여, 생물학적 건강도에 영향을 준 것으로 사료되었다 (Fig. 7).

이런 결과를 종합해 볼 때, 현재 금호강에서는 최상류역인 지점 1을 제외하고는 생물학적 생태건강도 측면에서 악화 혹은 악화-보통상태로 나타나 차후 연속적인 수환경 모니터링 및 지점 3의 경우 특히 생태적 복원이 필요한 것으로 사료되었다. 이런 지점의 경우 특히 점오염원의 차단 혹은 오염부하의 감소에 의한 화학적 복원뿐만 아니라 하상 매몰도 (Embeddedness) 향상, 수로변경도 (Channel alteration)의 향상, 수변식생대폭 확대 및 소규모 댐의 제거에 의한 물리적 서식지 복원이 특히 요구되는 것으로 나타났다. 반면에, 최 상류역은 생물학적 IBI 건강도에서 최적상태 (Excellent)를 보였고, 화학적 수

질(BOD 기준)이 1등급, 또한 물리적 서식지 건강도가 양호상태로 나타나 생태계의 지속적 보전이 요구되었다. 본 평가기법은 기존의 단일변수를 이용한 기법과는 달리 다변수 연구 접근방식으로서 수환경의 상태를 정량적으로 평가할 수 있고, 장기간 변화 추이를 모니터링 하여 수환경의 상태를 파악할 수 있다는 점에서 큰 의의가 있다. 현재 본 금호강 수계에서도 국가적인 사업으로 수환경의 상태를 생물학적 산소요구량(BOD)을 기준으로 2급수 상태로 만들기 위해 노력하고 있다. 본 연구에서 제시한 바와 같이 이화학적 수질오염 및 물리적인 서식지 파괴에 따른 하천의 다각적인 복원작업을 수행할 때 생물학적 건강도 평가기법을 이용하면 생태복원 후 실제 하천 생태계 복원성 여부를 판단하는 핵심자료로서 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 여러 변수분석에서 제시하는 바와 같이, 하천의 총체적인 건강도를 평가하기 위해서는 수 환경에 직접적인 영향을 주는 하천의 물리적인 특성변수 분석(하상구조의 변화, 댐건설 유무등), 폭우나 가뭄이 유발하는 계절적 효과, 강우량에 의한 하천 유량변화, 이화학적 유기물 오염도 분석 및 좀 더 나아가서는 독성물질 및 생태독성평가와 같은 다양하고 폭넓은 복합적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 적 요

본 연구의 목적은 2004년 8월부터 2005년 6월까지 금호강의 5개 조사지점에서 다변수 메트릭 모델을 이용하여 물리적 서식지건강도 평가(QHEI) 및 생물학적 건강도 평가를 실시하고자 하였다. 본 연구의 접근방식은 본 연구에서 직접측정한 정성적 식지평가지수(QHEI), 어류를 이용한 생물학적 건강도 지수(IBM) 및 환경부에 획득한 지난 10년간(1995~2004)의 수질 모니터링 자료와 비교 평가에 기반을 두었다. 본 연구를 위해 이미 한국의 지역적 생태 특성에 맞게 개발된 An(2003)의 모델이 생물학적 건강도 평가에 적용되었다. 총체적인 건강성평가 EPA(1993) 및 Barbour *et al.*(1999)의 기준에 따르면, 금호강의 생물학적 건강도 지수는 평균 30이었고, 지점에 따라 23~48까지의 변이를 보이며, 건강도는 보통상태(Fair)로 나타났다. 금호강의 이화학적 수질자료 석에 따르면, 1995년부터 2004년 까지 10년 동안 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 소오구량(COD), 전기전도도(Conductivity), 총인(TP), 총질소(TN), 총부유물(TSS)은 조사지점별, 계절별, 연별로 오염농도 변화 폭이 크게 나타났다. 계절에 따른 강우량에 BOD, COD, TP, TSS, Conduc-

tivity은 상류지점 1에서는 영향이 적었지만 하류로 갈수록 많은 영향을 받아 유량에 의한 희석현상으로 장마후에 수질이 향상되는 양상으로 보아 강우가 수질의 이화학적 변이에 중요한 요소임이 확인되었다. 군집분석에 따르면 종다양도 지수는 지점 1에서 최대치를 보였고(H'=0.781), 지점 3에서는 크리의 확실한 우점도를 보였다. 대조적으로 잡식성, 내성종 비율이 상류보다 하류로 갈수록 높았다. 전체적으로 본 연구에서는 하류의 지점들은 수환경상태의 생물학적 건강도 향상을 위하여 복원이 필요함을 제시하는 바이다.

## 사 사

본 연구는 한국학술진흥재단 목적기초연구(과제번호: R08-2003-000-10535-0; 과거-한국과학재단)의 지원으로 수행되었음.

## 인 용 문 헌

- 강영훈, 금지돈. 2001. 비슬산 생태조사 보고서. 영남자연 생태 보존회. 대구. 156-179.
- 공동수. 2002. 생물학적 수질기준 설정 필요성 및 접근방안. 환경생물 20: 28-49.
- 김익수, 강종연. 1993. 원색 한국 어류도감. 아카데미서적.
- 김익수, 박종영. 2002. 원색도감 한국의 민물고기. 교학사.
- 김익수. 1997. 한국동식물도감 제3권 동물편(담수어류). 교육부.
- 김중선, 함순아, 나철호. 1995. 수서곤충을 이용한 탐진강 수계의 수질평가. 환경생물 13(2): 225-231.
- 김호섭, 황순진. 2004. 얇은 부영양 저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화. 육수지 37(2): 180-192.
- 남광현. 2003. 금호강 수질오염 현황 및 조사방법 개선연구. 대구경북개발 연구원.
- 대구환경청. 금호강의 어제와 오늘 그리고 미래. 2000.
- 박경훈. 2003. 금호강 유역의 환경 특이성이 하천수질에 미치는 영향. 한국지리정보학회지 6(4): 85-98.
- 박재홍, 최의소, 공동수. 2005. 수질환경척도. 한국물환경학회 109-117.
- 배준웅, 장혜영, 송희봉, 서무룡, 하광수, 박태명. 1995. 금호강 수질의 장기 변동에 관한 연구. 한국환경과학회지 4(3): 207-220.
- 배준웅, 이상학, 이성호. 2002. 금호강 오염의 종합적 조사. Analytical & Technology 15(1): 54-56.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001. 생물보전지수(Index of Biological Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천수계

- 의 평가. 환경생물 **19**: 261-269.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001. 생물보전지수 및 서식지 평가지수를 이용한 평창강의 수환경평가. 육수지 **34**(3): 153-165.
- 안광국. 2003. 어류군의 다변수 접근 방식에 의거한 생물보전지수 산정에 의한 생태학적 하천 건강성 평가, 대한환경공학회 논문집 pp. 548-552.
- 안홍규, 우효섭. 2004. 중규모 하천 생물 서식처의 특성 분석-북하천을 중심으로, 한국조경학회지 **32**(2): 102-119.
- 양홍준, 채병수, 강영훈. 2001. 담수어를 이용한 금호강 수계의 수질관정. 한국환경과학회지 **10**(3): 225-231.
- 양홍준, 채병수. 1994. 대도시 주변 하천수계의 수질환경과 육수생물학적 연구, 금호강 수계의 어류상과 어류군집 구조(II). 육수지 **27**: 177-188.
- 양홍준. 1973. 낙동강산 어류조사. 목록과 분포에 대하여. 육수지 **6**: 125-141.
- 염동혁, 안광국, 홍영표, 이성규. 2000. 어류군집을 이용한 금호강의 생물보전지수(Index of Biological Integrity; IBI) 평가. 환경생물 **18**(2): 215-225.
- 유경아, 신재기, 공동수, 황순진. 2004. 낙동강 유역의 호수수와 하천수에 대한 조류생장 잠재력 측정, 한국물환경학회-대한상하수도학회 공동논문집 35p.
- 윤일병, 공동수, 류재근. 1992. 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구(II). 환경생물 **10**(1): 40-55.
- 윤일병. 1990. 생물에 의한 환경평가, 생물과학 심포지움 **11**: 21-32.
- 이상균, 박성배, 장광현, 정광석, 주기재. 2002. 장마기 강우가 낙동강 하류(물금) 수질에 미치는 영향. 육수지 **35**(3): 160-171.
- 이태관, 박태규. 1996. 금호강 수질환경의 계절적 변동과 관리. 환경과학논문집 **1**(1): 155-170.
- 장민호, 조가익, 주기재. 2001. 낙동강 본류의 어류상. 육수지 **34**(3): 223-238.
- 정연태, 최민규, 김백호, 위인선, 이종빈. 1996. 수질오염 판정을 위한 기법 개발(I) 부차조류 군체화에 미치는 기질특이성 연구. 환경생물 **14**(1): 95-111.
- 정효준, 황병기. 2002. 금호강 유역의 오염총량 관리 대책 수립. 한국환경과학지 **11**(10): 1125-1131.
- 환경부. 2000. 환경통계연감(제13호) 2000. 450p.
- 환경청. 1987. 자연생태계 전국조사 1987-제2차년도-(I): 담수 어류/수서곤충. 450p.
- An, K-G. 2000. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. *Korean J. Limnol.* **33**(4): 342-349.
- An, K-G. 2001. Seasonal patterns of reservoir thermal structure and water column mixis and their modifications by interflow current. *Korean J. Limnol.* **34**(1): 9-19.
- 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.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- Ohio EPA. 1987. Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol. II, User manual for biological field assessment of Ohio surface waters, 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, Gross, S.K. 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.
- US 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.
- US EPA. 2002. Summary of biological assessment programs and biocriteria development for states, tribes, territories, and interstate commissions: streams and wadable rivers. EPA-822-R-02-048. U.S. EPA, USA.

(Manuscript received 10 October 2005,  
Revision accepted 28 April 2006)