

도심하천 생태계에서의 수질 및 생태건강성 평가

김 현 맥 · 이 재 훈 · 안 광 국*

충남대학교 생명과학부

Water Quality and Ecosystem Health Assessments in Urban Stream Ecosystems

Hyun-Mac Kim, Jae Hoon Lee and Kwang-Guk An*

School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract – The objectives of the study were to analyze chemical water quality and physical habitat characteristics in the urban streams (Miho and Gap streams) along with evaluations of fish community structures and ecosystem health, throughout fish composition and guild analyses during 2006~2007. Concentrations of BOD and COD averaged 3.5 and 5.7 mg L⁻¹, in the urban streams, while TN and TP averaged 5.1 mg L⁻¹ and 274 µg L⁻¹, indicating an eutrophic state. Especially, organic pollution and eutrophication were most intense in the downstream reach of both streams. Total number of fish was 34 species in the both streams, and the most abundant species was *Zacco platypus* (32~42% of the total). In both streams, the relative abundance of sensitive species was low (23%) and tolerant and omnivores were high (45%, 52%), indicating an typical tolerance and trophic guilds of urban streams in Korea. According to multi-metric models of Stream Ecosystem Health Assessments (SEHA), model values were 19 and 24 in Miho Stream and Gap Stream, respectively. Habitat analysis showed that QHEI (Qualitative Habitat Evaluation Index) values were 123 and 135 in the two streams, respectively. The minimum values in the SEHA and QHEI were observed in the both downstreams, and this was mainly attributed to chemical pollutions, as shown in the water quality parameters. The model values of SEHA were strongly correlated with conductivity ($r = -0.530, p = 0.016$), BOD ($r = -0.578, p < 0.01$), COD ($r = -0.603, p < 0.01$), and nutrients (TN, TP: $r > 0.40, p < 0.05$). This model applied in this study seems to be a useful tool, which could reflect the chemical water quality in the urban streams. Overall, this study suggests that consistent ecological monitoring is required in the urban streams for the conservations along with ecological restorations in the degraded downstreams.

Key words : urban streams, Miho Streams, Gap Streams, SEHA, QHEI

서 론

최근 우리나라의 수질 및 수생태계 관리의 패러다임

은 과거의 이화학적으로만 깨끗한 물이 아닌 생명체가 살 수 있는 건강한 수환경의 개념으로 변화하고 있다. 2007년 환경부는 수질환경 보전법을 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률로 변경하여 수생태계 복원을 위한 건강성 평가, 수생태 모니터링, 측정망 등을 수립하였으며 전국을 대상으로 한 수생태 건강성 평가 사업을 본격적

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

으로 착수하였다(전 등 2007). 또한 양재천(신 1999; 김과 구 2002), 청계천(서울시 2004), 전주천(신 2002) 등 전국적인 하천복원사업이 시행되고 있으며 특히, 하천내의 소멸된 어종복원 및 생물서식지복원이 주류를 이루고 있다. 또한 환경부에서는 2006년부터 2020년까지 1조 1,237억원을 투자하여 900개의 하천을 대상으로 자연형하천 복원사업을 계획하고 있다(환경부 2004a; 최 2005). 이러한 동향은 수환경 복원 시 수체내의 생물 및 물리적 서식지 환경의 중요성을 더욱 부각시키고 있다. 특히 최근 도심하천은 산업화 및 인구집중현상으로 산업폐수, 생활하수 등의 점오염원과 그 밖의 다양한 비점오염원에 노출되어 하천생태계가 위협받고 있는 실정이다. 이를 위해 과거에는 하천관리를 위해 인공제방, 보의 축조, 하천 직강화, 하천 준설 등을 실시하였는데, 이는 최근에 또 다른 수생태계의 문제로 제기되고 있다. 이러한 하천의 인위적 변경은 이수나 치수의 이점을 가져왔으나 하천의 생태적 측면에 대한 고려는 미미하여 서식생물상의 변화 및 물리적 서식지 제한의 문제점을 가져왔다(손 1998; 손과 변 2005).

본 연구의 대상지인 미호천과 갑천은 전형적인 도심형 하천으로서 도시를 관통하여 금강 본류와 합류되는 수계로서 금강의 수질에 큰 영향을 주는 있는 하천들로 보고되고 있다(노와 이 2007). 서 등(2007)의 연구에 따르면 금강본류가 목표수질을 달성하기 위해서는 금강수계의 주요 오염원인 미호천과 갑천의 수질을 개선해야 한다고 제시하였다. 미호천에 대한 어류상 및 어류군집특성에 대한 조사는 최(1977), 손(1983 1991), 손과 변(2005)에 의해 수행되어 졌으나 어류상 및 군집의 변화만을 기록하고 있어 미호천의 생태 건강도를 파악하기에는 부족한 현실이다. TOC를 이용한 수질 모니터링(류와 이 2007), GIS를 이용한 미호천의 장래수질예측(노 등 2008) 등 이화학적 수질에 의해 수계를 평가하는 연구들이 대부분으로 하천의 생태 건강도에 대한 연구가 요구되는 하천이다. 갑천에서는 수질유지에 필요한 유량(정 등 2005), 물리적 서식지와 하천수위(우와 정 1998), 어류상 조사(홍 1994; 이 2001), 생물학적 건강도(안 등 2001) 등의 연구가 이루어진 바 있으며, 안 등(2006)은 갑천의 하류 수역으로 방류되고 있는 하수 처리수에 대해 어류의 해부학적 건강도 지수를 산정한 바 있다. 상기 연구들이 제시하는 바와 같이 연구의 주요 주제는 이화학적 수질 평가가 주류를 이루고 있어 생태계건강성 및 서식지 특성 파악에 대한 연구가 절실한 실정이다.

이런 방안으로서, 최근에는 지표생물을 이용한 하천생태 건강도 평가가 수생태계 관리기법으로 널리 이용되

고 있는데, 이는 Karr(1981)에 의한 생물통합지수(IBM)의 개념에 기초를 두고 있고, 가장 최근에는 US EPA에서 RBP모델(Barbour *et al.* 1999)을 개발하여 수환경 평가에 실효를 거두고 있다. IBM모델과 RBP의 개념은 과거 이화학적 수질만으로 하천을 평가하던 범주에서 벗어나 하천에 서식하는 고유 생물지표를 이용하는 다변수 모델 생태 평가기법으로서, 이러한 평가기법은 과거의 화학적 수질평가와는 달리 하천생태계의 생물종 특성 및 서식지 특성을 반영하는 통합 평가기법으로 수환경 관리에 각광을 받고 있다. 따라서 이화학적 수질평가가 주류를 이루어온 도심하천들에서 생물지표에 의한 통합적 생태건강성 평가가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 특히 최근 행정 복합도시의 건설로 심하게 변화가 예상되는 미호천과 같은 수계의 종합적 조사는 더욱 절실한 실정이다.

본 연구에서는 어류를 이용하여 도심하천에서 생태 건강도(SEHA)를 평가하고, 수질특성에 따른 종조성도 및 길드분석을 실시하였다. 또한 하천의 물리적 서식지 특성 및 어류의 군집구조특성을 분석하여 생태건강도와 연관성을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사시기 및 조사지점 선정

본 연구를 위한 어류 조사는 2006년 4월~2007년 9월 동안 실시하였으며, 미호천과 갑천의 5개 지점을 선정하여 각 2회 실시하였다. 미호천의 세부 지점으로는 충북 청원군의 여암교(M1), 팔결교(M2) 및 미호천교(M3)와 충남 연기군의 쌍용제지 앞(M4), 월산교(M5)를 선정하였다(Fig. 1). 미호천의 모든 지점은 5차 하천으로서 대부분 하상 퇴적물의 축적이 관찰되었다. 갑천의 세부 지점으로는 대전광역시외의 봉곡 2교(G1), 가수원교(G2), 만년교(G3), 대덕대교(G4), 갑천교(G5)를 선정하였다(Fig. 1). G1지점은 3차 하천, G2~G4는 4차 하천, G5는 5차 하천으로서 특히 G4지점은 대형 하상주차장이 형성되어 있고, G5는 공단 및 하수처리장의 영향이 클 것으로 예상되는 지점에서 조사되었다.

2. 조사 방법

본 연구에서는 어류현장조사를 실시하였으며, 어류의 채집정량화(Catch Per Unit of Effort, CPUE)를 위해 채집 거리는 200 m, 조사 소요시간 50분으로 가능한 한 여울(Riffle), 소(Pool), 흐르는 곳(Run)을 포함하였다. 하천차

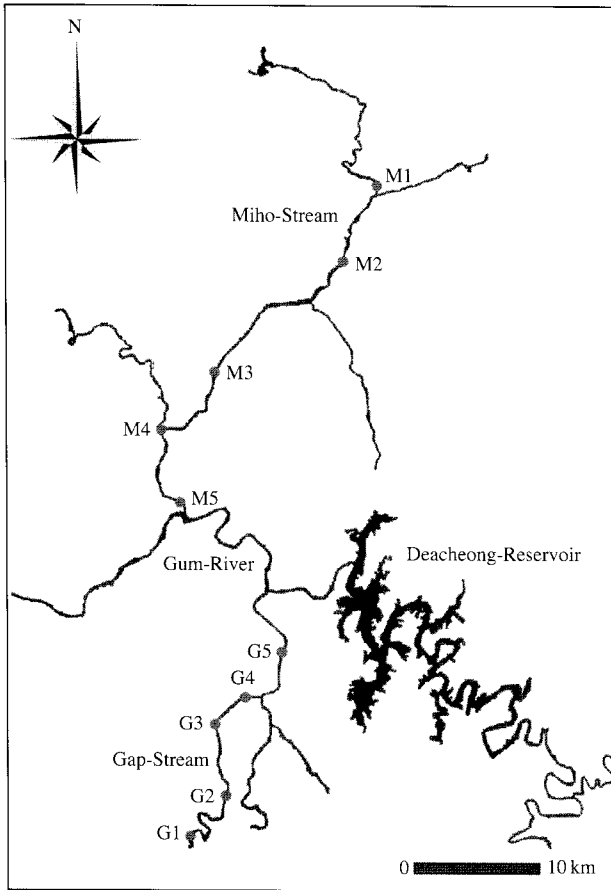


Fig. 1. The map showing the sampling sites in Miho Stream and Gap Stream

수(Stream order)는 1 : 120,000 축적의 지도를 이용하여 Strahler(1957)의 방법을 따랐다. 조사 도구는 투망(5×5 mm)과 족대(4×4 mm)를 이용하였다. 채집한 어류는 현장에서 동정 및 계수 후 바로 풀어주는 것을 원칙으로 하되 동정이 모호한 종은 10% 포르말린 용액으로 고정하여 실험실로 옮긴 후 김과 박(2002)에 의해 동정하였다. 채집된 어류의 개체수 산정은 건강성 평가를 위한 문헌에 의거하여 어류체장의 길이가 20 mm 이하는 제외하였고(Barbour *et al.* 1999), 비정상어종의 채집시에는 US EPA (1993)의 외형적 비정상성 평가 기준에 따라 기형(Deformity), 종양(Tumors), 부식(Erosion), 조직병리(Lesion)로 대별하여 분석하였다.

3. 어류의 생태 특성 분류

본 연구에서는 하천 생태 건강도 평가 모델의 적용을 위한 영양단계(Trophic level)와 내성도(Tolerance)에 대한 범주는 US EPA (1993)의 기준에 의거하였다. 영양단계 구조는 섭식 특성에 따른 생태계 내 위치를 나타내

는 항목으로 잡식종(Omnivore species, O), 충식종(Insectivore or invertevore species, I), 육식종(Carnivore or pishvore species, C), 초식종(Herbivore species, H), 여과섭식종(Filterfeeder, F)으로 구분하였으나 여과섭식종은 본 조사에서 나타나지 않았다. Ohio EPA (1987)에 따라 식성의 분류는 어류가 1차적으로 이용하는 자원(Primary source of food)을 기본으로 섭식특성을 분석하였다. 내성의 정도는 수질 오염도에 따라 쉽게 사라지는 민감종(Sensitive species, SS)과 수질오염도에 따라 상대적 비율이 증가하는 내성종(Tolerant species, TS), 그리고 두 범주의 중간에 해당하는 중간종(Intermediate species, IS)으로 구분하였다. 민감종(SS)은 주로 오염도에 따라 쉽게 사라지는 어종(US EPA 1993)으로서, Ohio EPA (1987)와 US EPA (1993)에서 제시한 전체어종의 5~10%로 제한하였고, 내성종(TS)은 수질오염에도 불구하고, 종수 및 분포범위가 증가하는 어종, 중간종(IS)은 두 범주 사이에 포함되지 않는 종으로 정의하였다.

4. 다변수 평가 모델 적용 및 하천 생태 건강도 평가

본 연구에서는 어류를 이용한 생물통합지수(Index of Biological Integrity, IBI)를 기반으로 개발된 다변수 매트릭 건강도 평가 모델(SEHA)을 적용하였다. 이러한 모델은 하천차수 부제에 의한 오차를 최소화하여 보다 정확한 생태 건강도 평가가 가능한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 적용한 하천 생태 건강도 평가 모델은 우리나라에서 안 등(2001)에 의해 국내 서식 환경에 맞게 수정되었고, 수생태계 건강성 조사계획 수립 및 지침(환경부 2007)으로 확립되었다. 본 연구에서 이용된 매트릭은 총 8개 매트릭으로 구성되어 있으며 건강도 평가 모델의 등급 산정은 초기에 개발된 Ohio EPA (1989) 및 US EPA (1993)의 등급 기준에 의거하였으며, 본 연구에서는 8메트릭 모델의 4등급 체계로 수정하여 40~36의 범위는 A등급, 35~26은 B등급, 25~16은 C등급, 그리고 15이하는 D등급으로 대별하여 평가하였다.

5. 물리적 서식지 평가

도심하천의 서식지 평가를 위해 적용한 평가 모델은 Plafkin *et al.* (1989)에 의해 개발된 서식지평가 정성지수(QHEI)와 이를 체계화한 RBP모델(Barbour *et al.* 1999)을 바탕으로 수정 보완한 모델을 이용하였다. 본 연구에서 이용된 물리적 서식지 평가 모델은 11개 매트릭 모델로서, 우리나라의 경우 특히 댐과 같은 인공구조물의 특정영향의 반영을 위해 기존 매트릭에 소규모 댐의 존재유무(Dam construction impact)에 대한 매트릭을 추가

하여 개발하였다. 각 메트릭은 하천차수를 고려하여 1~20점을 부여하였고, 최종적으로 US EPA (1993)의 기준을 적용하여 다음과 같이 최적상태 (220~182), 양호상태 (168~124), 보통상태 (110~66), 악화상태 (52~8)의 4개 등급으로 대별하여 평가하였다. 세부 메트릭 속성은 안과 김 (2005)의 이전문헌에 상세하게 기술되어 있다.

6. 이화학적 수질자료 분석

본 연구에서는 YSI 85(다항목 측정기)를 이용하여 수온, 용존산소량(Dissolved oxygen), 전기전도도(Conductivity), pH, 탁도(Turbidity)를 현장 측정하였으며, 그 외의 생화학적 산소 요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 총인(Total phosphorous, TP), 총질소(Total nitrogen, TN)는 외부적으로 환경부의 물환경정보시스템 자료를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 이화학적 수질 특성

미호천과 갑천의 이화학적 수질 상태는 악화된 것으로 나타났으며, 특히 하류 지점에서 오염도가 높게 나타나는 전형적인 도심형 하천의 특성을 보였다. 하천의 부영양도 지표(Trophic state)로서 널리 이용되는 영양염류(TN, TP)의 5년간 자료분석에 따르면 (Fig. 2), 미호천(TN=5.110 mg L⁻¹, TP=270 µg L⁻¹) 및 갑천(TN=5.050 mg L⁻¹, TP=277 µg L⁻¹)은 이미 부영양~과영양상태(Eutrophy Hypertrophy)로 나타났다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 지점별 TN 및 TP는 하류로 갈수록 증가하는 경향이 뚜렷하였으며, 미호천의 경우 1차 함수적으로 반응(R²>0.90)을 보였다. 또한, 갑천 5지점에서 총질소와 총인은 각각 10 mg L⁻¹, 800 µg L⁻¹을 상회하여 (Fig. 2) 대전 1, 2공단과 9×10⁵ m³ day⁻¹ 처리규모의 하수종말처리장에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 이런 연구 결과는 이전의 도심형 하천의 특성에 대해 보고한 박 등 (2003)의 결과와 일치한다.

화학적 산소요구량(COD)은 총유기물 유입의 지표가 되는 수질 항목으로서 미호천에서는 모든 지점에서 5 mg L⁻¹을 상회하였으나, 갑천에서는 하수종말처리장의 영향을 받는 5지점을 제외하고 4 mg L⁻¹ 이하로 나타나 (Fig. 2), 미호천의 유기물 농도가 갑천보다 높은 것으로 나타났다. 수질 항목의 비모수 검정(Non-parametric statistical test)에 따르면, 유기물 오염도 항목(BOD, COD) 및 영양염류(TP, TN) 항목은 두 하천 모두 유의한 통계적 차이

($p < 0.001$)를 보여 두 하천의 각 지점들 간에는 극명한 오염도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. BOD는 COD와 유사한 지점별 변이특성을 보였고, 이런 특성은 미호천 및 갑천에서 동일하게 나타났다. 상기 수질 변수를 종합해 보면, 지점별 4가지 수질변수의 변이 특성은 유사했으며 미호천은 4~5지점, 갑천은 5지점에서 급격하게 수질악화 현상을 보여 이에 대한 대책 마련이 시급한 것으로 나타났다.

2. 어류 종조성 및 분포특성

본 연구기간 동안 CPUE의 채집 효율성에 기반을 둔 어류상 분석에 따르면, 미호천 수계에는 총 34종 1,492개체, 갑천 수계에서는 총 34종 2,116개체가 채집되어 종수가 동일한 것으로 나타났다 (Table 1). 두 하천 모두 상대풍부도(Relative abundance)가 가장 높은 종은 피라미(*Zacco platypus*)였고 미호천은 23%, 갑천은 42%로서 피라미 우점도에서 갑천은 미호천에 비해 2배 정도까지 높은 우점도를 보였다 (Table 1). 이처럼 두 하천에서 가장 높은 상대 풍부도를 나타낸 피라미는 하천 오염에 대한 내성이 강한 잡식성 어종으로서 (안 등 2005), 우리나라 전역에 분포하는 우점종이 지만, 특히 오염도가 높은 도심형 하천에서 상대 풍부도가 높게 나타나는 것으로 사료되었다. 그 외에 미호천에서 10% 이상의 상대 풍부도를 보인 종은 모래무지(*Pseudogobio esocinus* 19%), 참마자(*Hamibarbus longirostris* 11%), 밀어(*Rhinogobius brunneus* 10%)로 나타났고 (Table 1), 갑천에서 5% 이상을 보인 우점종은 피라미 외에 납자루(*Acheilognathus lanceolatus* 11%), 모래무지(9%), 돌고기(*Pungtungia herzi* 6%)로 나타났다 (Table 1). 특히, 미호천에서 모래무지의 개체수는 갑천에 비해 두배 이상의 상대 풍부도를 보여 모래가 많은 미호천의 물리적 서식지 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

한편, 최근 하천의 생물 교란에 중요한 외래종인 배스와 떡붕어는 두 하천 모두 출현하였으며, 블루길은 미호천에서만 출현하였다. 특히 배스의 개체군은 크기가 작은 치어로부터 성체까지 채집되어 개체군의 증가에 의한 타 어류의 종수 및 개체수에 영향을 끼칠 것으로 사료되었다. 한편, 이전 문헌기록(손 1994; 홍 2004)에도 불구하고, 천연기념물로 지정된 미호종개는 채집되지 않았다.

3. 어류의 길드분석 및 시공간적 변이 특성

내성도 길드(Tolerance guild) 분석에 따르면, 두 하천은 모두 내성종의 비율이 전체 어종 중 40% 이상을 상

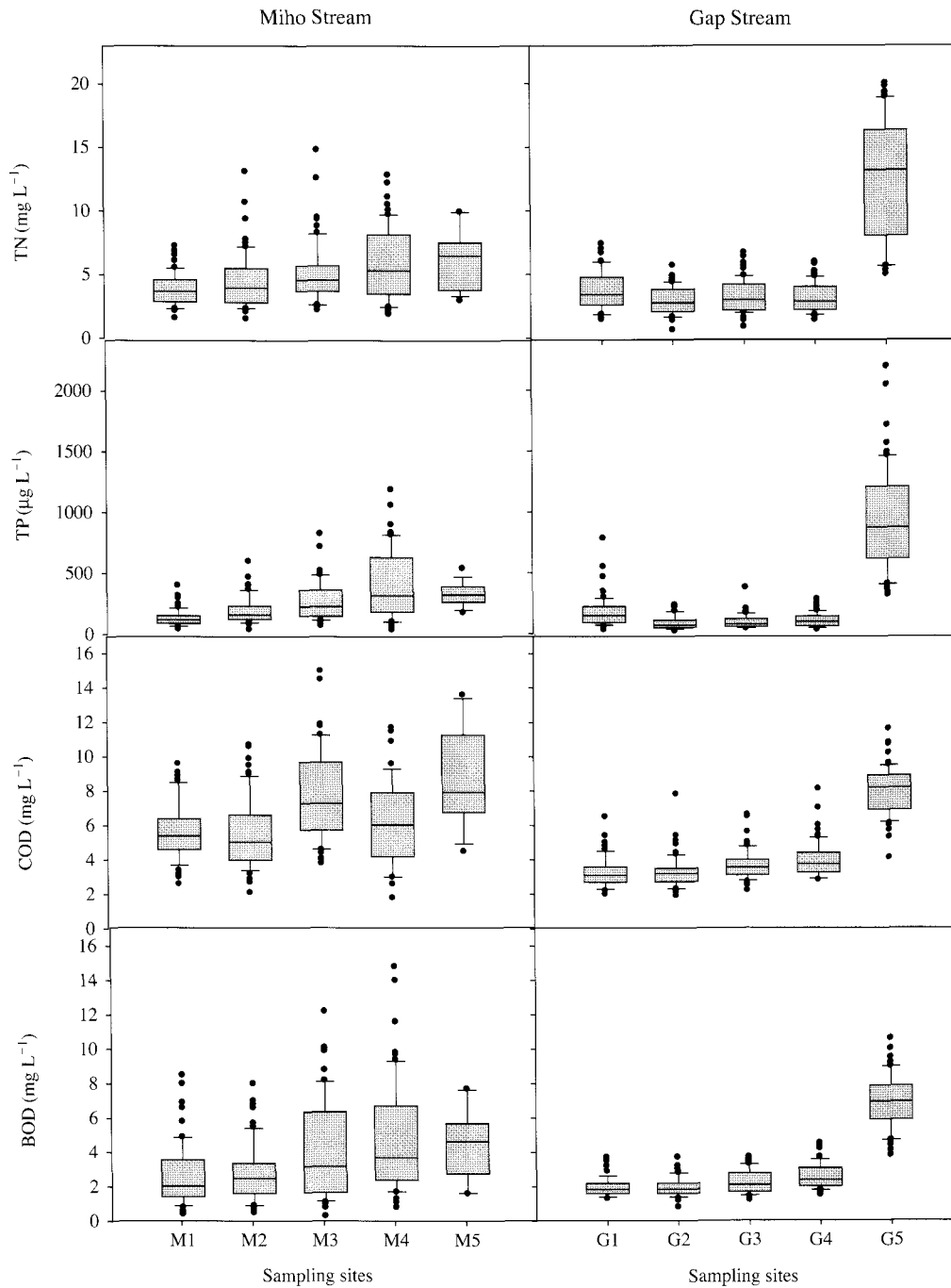


Fig. 2. Water quality patterns, based on nutrients (TN and TP) and organic matter (COD and BOD), in the sampling sites of Miho and Gap Streams.

회하여 높게 나타났으며, 갑천이 미호천에 비해 내성종의 비율이 약간 높게 나타났다(Fig. 3). 미호천에서 내성종은 41%, 민감종은 15%로 나타났고(Fig. 3), 갑천은 내성종 48%, 민감종 29%로 나타나 도심하천에서의 내성종 우점 및 민감종 감소현상이 두드러지게 나타났다.

어류의 트로픽 길드(Trophic guild)에 의한 군집특성

분석에서는 두 하천 모두 잡식성 어종의 비율이 비교적 높게 나타났으며 미호천보다 갑천에서 더 높은 것으로 나타났다(Fig. 3). 미호천에서는 잡식종 44%, 총식종 51% 갑천에서는 잡식종 58%, 총식성 35%로 분석되었다(Fig. 3). 갑천에서 높게 나타난 잡식종의 비율은 채집된 개체 중 53%를 차지한 피라미와 납자루의 영향이 크게

Table 1. Fish composition and various guilds in the two streams. The value indicate an average of two samplings (1st and 2nd survey). The species lists were rearranged by the abundance in order

Species	To	Tr	Ha	MS					GS					RA (%)	CI (%)
				M1	M2	M3	M4	M5	G1	G2	G3	G4	G5		
<i>Zacco platypus</i>	TS	O	-	89	27	32	17	5	71	101	152	69	53	33.98	100
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	-	30	23	33	20	34	4	3	17	48	22	12.92	100
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	SS	O	-	8	7	9	3		4	74	18	24	1	8.07	90
<i>Hemibarbus longirostris</i>	SS	I	-	23	8	6	28	15	9	1	30	6	1	6.93	100
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I	RB	30	21	21	2	4	21	5	4	4	6	6.46	100
<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	IS	C	-	7	6	4	3	1	1	3	16	11	13	3.44	100
<i>Pungtungia herzi</i>	SS	I	RB	1					29	19	7	5	1	3.33	60
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I	-	1	2	6	9	5		1	5	8	23	3.19	90
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O	-	2			27	25	1	1		3		3.16	60
<i>Gnathopogon strigatus</i>	IS	I	-	2	2	8	24	4			3	2	9	2.94	80
<i>Carassius auratus</i>	TS	O	-	1	5	7	2	28			2	4	2	2.72	80
<i>Iksookimia koreensis</i> ¹	SS	I	RB							27	8	7		2.33	30
<i>Microphysogobio yaluensis</i> ¹	IS	O	RB	3				1	2	13	7	1		1.41	60
<i>Coreoleuciscus splendidus</i> ¹	SS	I	RB						5	2	10	2	1	1.05	50
<i>Micropterus salmoides</i> ²	TS	C	-	1	5	1			3	6	2	2		0.97	70
<i>Tridentiger brevispinis</i>	IS	I	RB	8			3	1	3		1		1	0.80	60
<i>Squalidus japonicus coreanus</i> ¹	IS	O	-		5	3	3		1				2	0.72	50
<i>Abbottina rivularis</i>	IS	O	-	6	3			4						0.69	30
<i>Misgurnus mizolepis</i>	TS	H	-		2		1	3	5		1			0.61	50
<i>Pseudobagrus koreanus</i> ¹	SS	I	RB	2	3				2	3	3			0.61	50
<i>Odontobutis interrupta</i> ¹	IS	C	RB	1		2	3				5			0.53	40
<i>Acheilognathus rhombeus</i>	IS	O	-	1	4						1	3		0.44	40
<i>Odontobutis platycephala</i> ¹	SS	C	RB						5	2			1	0.39	30
<i>Acheilognathus macropeterus</i>	IS	O	-							2	4	1		0.36	30
<i>Zacco temminckii</i>	SS	I	-						4			1		0.25	20
<i>Silurus asotus</i>	TS	C	-		1		2						2	0.22	30
<i>Microphysogobio jeoni</i> ¹	IS	I	-					4						0.22	10
<i>Carassius cuvieri</i> ²	TS	O	-	1			1					2		0.19	30
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	IS	C	-			1					3			0.19	20
<i>Acheilognathus koreensis</i> ¹	IS	O	-						3					0.17	10
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	-		1	1	1							0.11	30
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i> ¹	IS	I	-			1						1		0.08	20
<i>Leiocassis ussuriensis</i>	IS	C	-			1	1							0.08	20
<i>Cobitis lutheri</i>	IS	I	RB						1		1			0.08	20
<i>Acheilognathus yamatsuate</i> ¹	SS	O	-	1							1			0.06	20
<i>Erythroculter wrythropterus</i>	IS	C	-			1							1	0.06	20
<i>Lepomis macrochirus</i> ²	TS	I	-	1				1						0.06	20
<i>Rhodeus uyekii</i> ¹	IS	O	-						1					0.06	10
<i>Anguilla japonica</i>	IS	C	-			1								0.03	10
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	H	-					1						0.03	10
<i>siniperca scherzeri</i>	SS	C	-			1								0.03	10
<i>Squaliobarbus curriculus</i>	IS	O	-				1							0.03	10
<i>Squalidus gracilis majimae</i> ¹	IS	I	-							1				0.03	10
Total number of apieces				19	18	19	19	17	22	16	23	19	16		
Total number of individual				215	125	140	149	138	202	243	299	197	137		

MS=Miho Stream, GS=Gap Stream, To=Tolerance guild, Tr=Trophic guild, Ha=Habitat guild, RA=Relative abundance, CI=Constancy index, SS=Sensitive species, IS=Intermediate species, TS=Tolerant species, O=Omnivore, I=Insectivore, C=Carnivore, H=Herbivore, RB=Riffle-benthic species, ¹=Endemic species, ²=Exotic species

나타났으며 (Fig. 3), 육식종의 경우 미호천보다 갑천에서 높은 비율로 나타났다 (Fig. 3). 이와 같이 도심하천에서 우점하는 종은 내성종 이면서 잡식성인 종이 우점하는 반면, 산간 계류형 하천 조사(안 등 2005)에서는 민감종 및 충식종의 상대빈도가 높아 하천의 유형에 따라 종 조성이 극명하게 차이를 보이는 것으로 나타났다.

여울성 저서종(Riffle-benthic species)은 미호천에서 6종 202개체가 채집 되었으며 (Fig. 4) 갑천은 10종 411개체가 채집되어 일부 차이를 보였다 (Fig. 4). 두 하천 모두 상류 지점에서 하류 지점으로 갈수록 개체수가 감소 하였으며, 이러한 경향은 여울성 저서종의 비율이 더 높은 갑천에서 크게 나타났다 (Fig. 4). 미호천은 갑천에 비

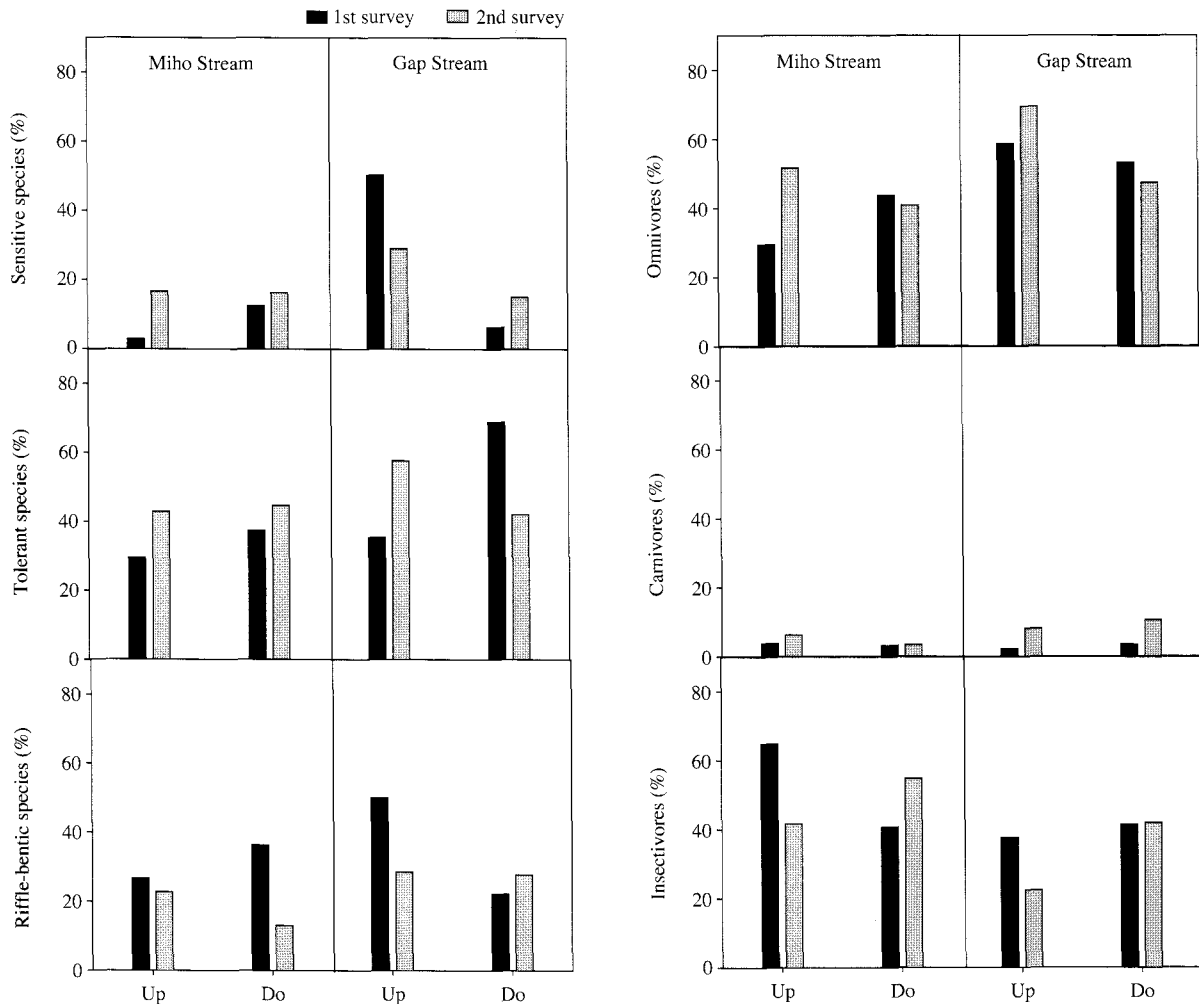


Fig. 3. Tolerance guilds and trophic guilds in the upstream (Up, Site 1 and 2) and downstream (Do, site 4 and 5).

해 여울성 저서종의 비율이 낮게 나타났으며, 이는 미호천이 갑천에 비하여 여울 형성이 부족하거나 혹은 저서어종이 서식하기 어려운 하상기질로 하천이 이루어져 있음을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

어류 내성도에 대한 시공간적 변화 분석에 따르면, 하천의 계절적 문순 강우에 의한 유량 변동(Flow fluctuation)은 어류 길드의 구조적 특성에 크게 영향을 주는 요인으로 사료되었다. 미호천과 갑천 수계에서 상류 지점은 강우의 크기에 따라 유량의 변화가 크게 나타났으며, 특히, 하절기 장마시기(Monsoon)에 미호천 상류지점은 민감종(Sensitive species)의 비율이 증가하는 반면, 갑천 수계에서는 줄어드는 상이한 결과를 보였다(Fig. 3). 갑천 수계의 상류 지점에서는 장마전기(갈수기)에 민감종의 비율이 50%였으나, 풍수기에는 큰 폭으로 낮아(29%)졌으며, 미호천의 상류 지점에서 민감종 비율은 갈수기에 3%에서 17%로 증가하였다(Fig. 3). 갑천 상류

지점의 이러한 민감종 비율 변화는 장마기 동안 빠른 물살에 대한 어류의 피난처 이동 및 하류로부터의 어류 이동성 증가 등에 의한 것으로 사료된다. 한편, 미호천의 M1지점은 갑천의 G5지점과 같이 5차 하천으로서 갑천의 하류지점과 동일한 경향을 보인 것으로 사료되며, 이러한 변화는 하천의 하류에서 강우에 의한 고농도의 오염원 희석 및 어류의 이동성 증가에 의해 발생된다고 보고된 바 있다. 내성종 비율의 변이 측면에서는 갑천의 상류지점은 크게 증가하는 반면 하류지점은 크게 낮아져 상하류의 뚜렷한 변화를 보였으며(Fig. 3), 이는 민감종 비율의 변화 원인과 동일한 것으로 사료된다. 또한, 섭식 변화에 대한 시공간적 분석에 따르면, 두 하천 모두 상류의 경우 갈수기에는 풍수기에 비해 잡식종(Omnivore species)의 비율이 낮게 나타났으며, 하류에서는 갈수기에 비해 풍수기의 잡식종 비율이 낮은 것으로 나타났다(Fig. 3). 총식종(Insectivore species)의 비율은 갑

Table 2. Fish community analysis in the two streams. The abbreviation in the table are as follows : MS=Miho Stream, GS=Gap Stream, d=Margalef's species richness index, J'=Pielou's evenness index, H'=Shannon-Weaver diversity index, K'=Simpson's dominance index

Sites	Community index				
	d	J'	H'	K'	
MS	M1	2.980	0.639	1.881	0.235
	M2	3.093	0.813	2.351	0.131
	M3	3.219	0.738	2.174	0.158
	M4	3.177	0.768	2.260	0.135
	M5	2.856	0.762	2.160	0.156
GS	G1	3.512	0.703	2.172	0.184
	G2	2.432	0.600	1.663	0.284
	G3	3.450	0.619	1.942	0.290
	G4	3.020	0.681	2.005	0.210
	G5	2.683	0.669	1.855	0.223

식종의 비율과 상반된 패턴을 보였으며 두 하천의 상류 지점에서 풍수기시 총식종의 비율이 감소했고 하류 지점에서는 풍수기시 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3). 내성도 길드와 트로픽 길드 분석에 따르면, 이들 모두는 풍수기에 지점별 어류의 종 구성에 대한 변이 차이가 감소하는 경향을 보였으며, 이런 경향은 강우에 의한 물리적 수환경의 교란 때문으로 사료되었다.

4. 어류의 군집지수 분석

어류의 군집구조 분석을 위해 종풍부도 지수, 균등도 지수, 종 다양도 지수 및 군집 우점도 지수 분석에 대한 결과는 Table 2와 같다. 어류군집의 생태적 안정성 지표로 종종 이용되는 종 풍부도 지수는 갑천의 최상류 지점인 G1이 3.512로 가장 높게 나타났으며, 갑천의 최하류 지점인 G5에서 가장 낮게 나타났다(Table 2). 이는 Fig. 2에서 제시하는 바와 같이, 상류에 비해 하류 지점에서 질소와 인(TN, TP)과 같은 영양염류 증가에 의한 급격한 수체 부영양화 및 유기물 오염(BOD, COD)에 의한 수질악화 현상을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 군집내 종구성의 균일한 정도를 나타내는 종 균등도 지수(Evenness index)는 갑천에 비하여 미호천에서 높게 나타나는 경향을 보였다(Table 2). 미호천의 M2 지점에서 균등도 지수는 0.813으로 최고치를 보였으며(Table 2), 갑천의 G1지점에서는 6.00으로서 최저치를 보였다(Table 2). 군집의 종풍부 정도와 개체 수의 상대적 균형성을 의미하며 군집의 복잡성을 나타내는 것으로 알려진(최 등 2005) 종 다양도 지수(Species diversity index) 분석에 따르면, 미호천은 갑천에 비해 높게 나타나는 경향을 보였으며 미호천의 M2지점이 2.351로 최고치를 보인 반면 갑천의 G2에서 1.663으로 최저치를 보였다

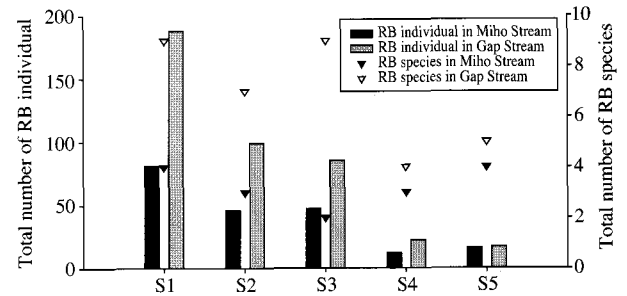


Fig. 4. Total numbers of RB individuals (bar) and species (triangle) in the sampling sites of Miho Stream and Gap Stream (RB=Riffle-Benthic fish).

(Table 2). 군집 우점도 지수(Dominance index)는 전체 지점에서 0.131~0.290으로 나타났다(Table 2). 미호천에서는 M1 지점에서 0.131로 가장 낮게 나타났고 갑천에서는 G1 지점이 0.290으로 가장 높게 나타났다(Table 2). 즉, 군집지수에 의한 평가를 종합해 보면, 미호천은 갑천에 비해 군집구조가 더 안정적 특성을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 어류 군집분석의 결과는 본 연구의 후반부에서 기술되는 어류 다변수 모델에 의한 생태 건강성평가의 결과에서 갑천이 미호천에 비해 양호하게 평가된 것을 감안해 본다면 상이한 결과로서, 군집 평가시 하천의 크기(하천 차수, stream order)를 고려하는 것이 하천 비교 평가시 중요한 요소로서 사료되었다.

5. 하천생태 건강도 평가와 서식지 평가지수

도심하천(미호천, 갑천)에서 다변수 평가 모델(Multi-metric model)에 의한 하천 생태건강도(Stream Ecosystem Health Assessment, SEHA)의 평균값은 21.6(n=8)로서 전형적인 도심하천의 특성을 보여 산간 계류형 하천과는 큰 차이를 보였다(Fig. 5). 미호천과 갑천에서 SEHA 모델값은 각각 19, 24로서 어류에 의거한 환경부의 생물학적 수질기준에 비추어 볼때 C등급을 나타내 하천의 건강도가 양호하지 못한 것으로 나타났다. SEHA의 시공간적 변이 분석에 따르면, 미호천에서는 모델값의 변이가 크게 나타났고, 전 조사지점에서 풍수기에 SHEA 모델값이 증가한 것으로 나타났다(Fig. 5). 미호천의 각 지점별 SHEA는 전 지점이 17~21로 평가되어 수계 전반에 걸쳐 물리적 서식지의 교란현상이나 오염원 유입이 수생태계 건강성에 영향을 미친 것으로 나타났으며 갑천은 최상류 지점인 G1이 29로 가장 양호한 SHEA를 보였고 가장 하류인 G5가 20으로 평가되어 상류보다 하류 쪽에서 생태 건강성이 악화된 것으로 나타났다(Fig. 5). 특히 점오염원의 유입으로 급격한 오

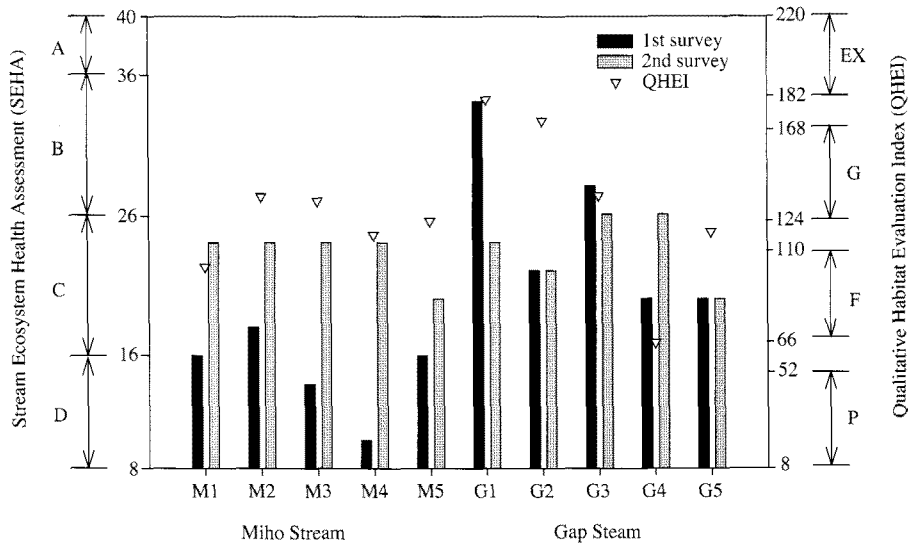


Fig. 5. Stream Ecosystem Health Assessment (SEHA), based on 8-metric fish model, and Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) in the two streams. In the figure, A ~ D indicates the criteria of the health conditions in the SEHA and the abbreviations of EX, G, F and P indicate “excellent”, “good”, “fair”, and poor in the habitat criteria.

염을 보인 갑천의 G5지점은(Fig. 2) SHEA에서도 낮게 평가 되었다. 하지만 갑천 G5지점의 SHEA는 이화학적 수질항목처럼 큰 변화를 보이지는 않았으며, 미호천지점들의 이화학적 조건에 따른 SHEA에 비하여 양호한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 물리적 서식지에 의한 차이일 수 있으나 본 연구에서는 QHEI의 서식지 평가지수 값에 차이가 크지 않았다. 이는 어류의 이동성, 오염도가 낮은 인접 지점의 영향 및 점오염원의 충격에 대한 생태계의 완충효과 등으로 사료되며, 이러한 변수는 기존의 이화학적 수질측정에 대한 생물학적 생태 평가 기법의 필요성에 대한 근거에 추가 되어 질 수 있을 것으로 사료된다.

조사지점에 대한 서식지 건강성 평가를 위해 이용된 정성적 서식지 평가 지수(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI)의 평가 결과에 따르면, 미호천은 122.6로 “양호~보통상태”(Good~Fair), 갑천은 134.8로 “양호상태”(Good)로 나타나 갑천의 물리적 서식지가 미호천에 비해 양호한 것으로 나타났다(Fig. 5). 두 하천의 지점별 QHEI 값의 비교에 따르면, 미호천은 전체적으로 낮게 나타났으며, 각 지점 별 차이가 작은 것으로 나타났다(Fig. 5). 갑천은 상류에서 하류로 갈수록 낮게 나타났으며 G4지점에서 가장 낮게 나타났다(Fig. 5). G4지점은 인공보가 형성되어 있으며 콘크리트 재방 및 하상도로가 형성되어 물리적 서식지의 교란이 크게 일어나고 있는 것으로 평가되었다. 미호천의 QHEI는 M4 메트릭인 하상유실 및 토사축적도(Bottom scouring & sediment

deposition) 및 M5 메트릭인 하천 흐름 상태(Channel flow status)에서 비교적 낮게 나타났으며, 이는 하상 성분 중 모래의 비율이 큰 미호천의 하상구조의 영향으로 사료되었다. 이러한 미호천의 물리적 하상 특성은 어류의 종 조성분석에서 제시한 바와 같이 여울성 저서종(Riffle-benthic species)의 낮은 비율에서 잘 반영되는 것으로 나타났다. 어류평가 모델에 의한 SHEA와 서식지 건강성에 대한 QHEI는 두 하천에서 아주 유사한 경향을 보였으나, 통계적 상관성을 나타내지는 않았다. 이는 타 지점에 비해 비정상적으로 낮은 값을 보인 G4의 QHEI가 크게 영향을 미친 것으로 사료되었다.

6. 생태건강도 평가 모델값에 대한 타 변수와의 상관성 분석

본 연구에서 어류의 다변수 평가 모델에 의거한 SHEA 값에 대한 여러 수질항목 및 서식지 평가지수와 상관성 분석 결과는 Fig. 6과 같다. 도심 하천에서 어류에 의거한 생태건강도 평가모델 값은 전기전도도($r = -0.530, p = 0.016$), BOD ($r = -0.578, p < 0.01$), COD ($r = -0.603, p < 0.01$), 영양염류(TN, TP: $r > 0.40, p < 0.05$)와 높은 역상관 관계를 보였다(Fig. 6). 이는 어류의 생태학적 특성을 기반으로 한 SHEA는 이화학적 수질 악화에 의해 어류 평가 모델값이 낮아지는 것을 의미하여, 수질 특성을 잘 반영하는 객관성 있는 평가기법으로 잘 활용될 수 있음을 제시하였다.

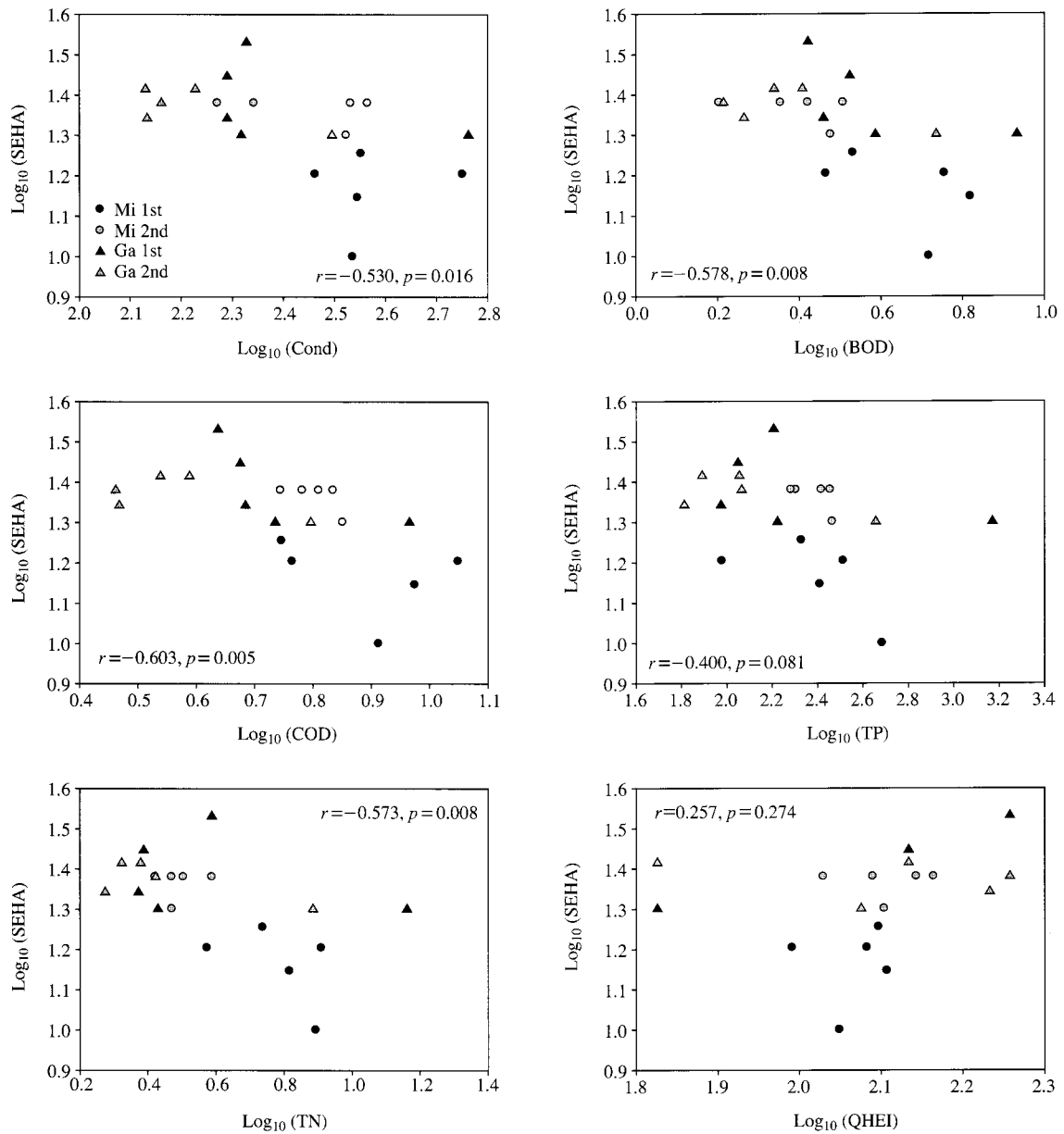


Fig. 6. Correlation analysis of Stream Ecosystem Health Assessment (SEHA) on the water Quality variables and habitat variable of Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI).

한편, SHEA에 대한 어류 서식지에 대한 영향 평가에 따르면 도심하천의 물리적 서식지 변화는 이화학적 수질에 비해 적은 영향을 끼치는 것으로 나타났다($r = 0.257, p = 0.274$; Fig. 6). 즉, 도심하천에서 물리적 서식지 변화는 불가피하나 우선적으로 화학적 영향을 더 많이 받는 것을 의미한다. 본 연구의 도심형 하천은 유기물 및 영양염류가 고농도로 유지되고 있는 상태로서 QHEI 보다 수질 항목의 수치 변화가 SHEA에 크게 영향을 준 것으로 사료되며, 이는 안 등(2001)의 평창강 연구에서 SHEA와 QHEI가 양의 상관관계를 보인 사례와 확연히

구분된다. 서식지 평가 모델값인 QHEI의 영향은 풍수기에 비해 갈수기에 크게 나타나는 경향을 보였으며(Fig. 6), 풍수기의 SHEA와 이화학적 수질항목은 지점별 차이가 줄어드는 경향을 보였다(Fig. 6). 풍수기의 지점별 SHEA와 수질항목들의 차이 감소는 늘어난 유량에 의한 유기물 희석과 어류 이동성 증가에 인한 것으로 사료되며 SHEA 평가시 강우량에 대한 평가시기 결정에 반영되어 질 수 있을 것으로 보인다. Karr(1981)와 Karr *et al.*(1986)에 의하면 생태 건강도 평가는 수체의 교란이 없는 시기에 평가되어야 한다고 보고된 바 있으며,

북미의 경우 봄과 가을이 이에 해당된다. 하지만 본 연구에서 제시하는 바와 같이 하절기의 몬순강우의 영향을 받는 우리나라는 7, 8월이 수체 교란기에 해당하며 이 시기의 생태 건강도 평가는 지양해야 할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구에서는 2006~2007년 동안 도심하천인 미호천과 갑천의 이화학적 수질 및 서식지 특성을 분석하였고, 또한 어종 분포 및 길드분석을 통해 군집구조 및 생태건강도 특성을 비교 평가하였다. 전형적인 두 도심하천의 BOD, COD농도는 각각 평균 3.5 mg L^{-1} , 5.7 mg L^{-1} 였고, 총질소(TN) 및 총인(TP)의 농도는 각각 5.1 mg L^{-1} , $274 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 이미 부영양 상태로 판정되었으며, 특히 갑천하류 지점에서는 유기물 오염 및 부영양화 현상이 뚜렷했다. 두 도심하천에서 총 종수는 34종으로서 동일하게 나타났고, 내성종 및 잡식종인 피라미(*Zacco platypus*)는 가장 높은 상대 풍부도(32~42%)를 보였다. 두 하천에서 민감종의 비율(23%)은 낮은 반면 내성종과 잡식종의 비율(45%, 52%)은 높게 나타나 도심하천에서의 전형적인 길드 변화 현상이 확연히 나타났다. 하천 생태건강도 평가(SEHA)에 따르면, 두 하천에서 다변수 모델값은 각각 19, 24로서 양호하지 못한 것으로 나타났고, 서식지 평가 분석(QHEI)에서는 미호천 123, 갑천 135로서 보통~양호 상태를 보였으며, 수질에서 보여준 바와 같이 최하류(특히, 갑천)에서는 극명하게 악화된 것으로 나타났다. 특히 갑천 하류의 낮은 건강도 평가 모델값(20)은 하수종말처리장으로부터 나온 배출수의 화학적 영향이 큰 것으로 사료되었다. 이런 다변수 모델값은 전기전도도($r = -0.530$, $p = 0.016$), BOD($r = -0.578$, $p < 0.01$), COD($r = -0.603$, $p < 0.01$), 영양염류(TN, TP: $r > 0.40$, $p < 0.05$)와 같은 수질변수들과 높은 역상관 관계를 보였다. 이는 생태건강도 모델값이 수질 특성을 잘 반영하는 객관성 있는 평가기법으로 활용 될 수 있음을 제시하였다. 따라서 이런 도심하천의 하류부에서는 생태계 보존을 위해 향후 하천복원 및 지속적인 생태모니터링이 필요할 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 환경부의 2008 차세대 핵심환경기술개발사업(세부 과제명: 수중생태계에서 어류개체 및 군집수

준의 생물학적, 화학적, 물리적 서식지 스트레스 평가모델 개발 및 최적 스트레스 분석)에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- 김익수, 박종영, 2002. 한국의 민물고기. 교학사.
- 김정수, 구태희. 2002. 양재천에서 생태적 복원구간과 비복원구간에 서식하는 조류군집의 비교. 한국환경복원녹화기술학회지. 8:1-11.
- 노준우, 이상옥. 2007. 오염총량제를 고려한 미호천의 장래 수질예측. 대한상하수도학회, 한국물환경학회 2007 공동추계학술발표회 논문집. 70.
- 노준우, 이상진, 이상옥. 2008. GIS를 이용한 미호천의 장래 수질예측. 한국지형공간정보학회지. 16:13-21.
- 류재홍, 이두곤. 2007. 미호천의 물환경 탐구-TOC-를 중심으로 한 수질 모니터링. 한국물환경학회지. 23:731-739.
- 박재로, 이효범, 김은주. 2003. 대전천 유지유량 확보를 위한 방안 검토. 한국물환경학회, 대한상수도학회 공동추계학술발표회 논문집. C-11.
- 서미진, 서동일, 이용성, 윤진호. 2007. 행정중심 복합도시(세종시)가 금강의 수질에 미치는 영향. 대한상수도학회, 한국물환경학회 2007추계학술발표회 논문집. P-106.
- 서울특별시. 2004. 청계천 복원사업. 환경백서.
- 손명원. 1998. 도시하천의 생태학적 역할과 개선방안. 한국지역지리학회지. 4:15-25.
- 손영목. 1983. 미호천의 담수어류상에 관한 연구. 한국육수학회지. 16:13-20.
- 손영목. 1991. 충청북도 담수어류. 기초과학연구소, 기초과학연구논총. 5:1-38.
- 손영목, 변화근. 2005. 미호천의 어류상과 어류군집 동태. 한국어류학회지. 17:271-278.
- 신정아. 1999. 자연형 하천 공법 적용후의 식생변화분석 -서울시 양재천의 학여울 구간을 중심으로-. 한국환경복원녹화기술학회지. 2:10-17.
- 신진철. 2002. 전주천, 1950년대로 역류하다 -전주천 자연형 하천 조성사업. 국토연구원-국토. 253:98-103.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. 한국육수학회지. 38:361-371.
- 안광국, 김자현, 배대열, 이재연. 2006. 생태 지표종을 이용한 해부학적 건강성 평가지수(HAI)적용을 위한 예비실험. 한국육수학회지. 39:62-72.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001. 생물보전지수(Index of Biological Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천 수계의 평가. 한국육수학회지. 19:261-269.
- 안광국, 이재연, 장하나. 2005. 유등천에서의 생태학적 건강도 평가 및 수질양상. 한국육수학회지. 38:341-351.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001. 생물보전지수(Index of Biological Integrity) 및 서식지 평가지수(Qualitative Habitat

- Evaluation Index)를 이용한 평창강의 수환경 평가. 한국 육수학회지. 34:153-165.
- 안광국, 최지웅. 2006. 초강의 통합적 생태건강성 평가. 한국 육수학회지. 39:320-330.
- 우원재, 정동양. 1998. 수변식재에 따른 갑천의 수위분석. 한국환경복원녹화기술학회지. 1:3-17.
- 이충렬. 2001. 갑천수계의 어류상과 어류군집. 환경생물. 19:292-301.
- 전용호, 김재구, 김철구. 2007. 수생태 복원사업의 현황과 향후전망. 환경연구논문집. 4:23-29.
- 정영훈, 이충성, 김형수, 심명필. 2005. 갑천 유역의 빈도별 갈수유량에 따른 필요유량 산정. 대한토목학회지. 25:97-105.
- 최미희. 2005. 하천복원사업 평가기준의 과제. 한국영양평가학회지. 1:13-22.
- 최병문. 1977. 충북산 담수어에 관한 연구. 충주교육대학 과학교육연구논문. 2:41-59.
- 최재석, 이광열, 장영수, 최의용, 서진원. 2005. 평화의 댐 어류군집 분석. 한국육수학회지. 38:297-303.
- 홍영표. 1994. 자연환경기본계획; 담수어류. 대전직할시.
- 홍영표. 2004. 멸종위기종 미호종개의 현황 및 보존. 한국어류학회 2004년 추계학술발표대회 심포지움 발표요약집. pp. 59-75.
- 환경부. 2004. 2005예산안 주요사업 설명자료. 2004, 9.
- 환경부. 2007. 수생태 건강성 회복을 위한 하천복원 모델과 기준, 조사계획 수립 연구 최종보고서 (III): 수생태 건강성 조사계획 수립 및 지침.
- 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, Second Edition. EPA 841-B-99-002. US Environmental Protection Agency; Office of Water; Washington, D.C.
- Karr JR. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries. 6:21-27.
- Karr JR, KD Fausch, PL Angermeier, PR Yant and IJ Schlosser. 1986. Assessing biological integrity in running water: A method and its rationale. pp. 28, Illinois National History Survey, Special Publication 5, Champaign, IL.
- Ohio EPA. 1987. Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol.II, Users manual for biological field assessment of Ohio surface waters. Columbus, Ohio, 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.
- Plafkin JL, MT Barbour, KD Porter, Gross SK and RM 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.
- Strahler AN. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. American Geophysical Union Transactions. 38:913-920
- 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, US. EPA, Cincinnati, Ohio 45268, USA.

Manuscript Received: August 12, 2008
 Revision Accepted: November 17, 2008
 Responsible Editor: Yongsik Sin