

## 대전천 수계의 장기 모니터링 (2004~2007)에 의한 물리적, 화학적, 생물학적 평가 변수 분석

이민정 · 최지웅 · 김현맥 · 안광국\*

(충남대학교 생명시스템과학대학)

Analysis of Physical, Chemical and Biological Parameters, Based on Long-Term Monitoring (2004~2007), in Daejeon Stream. Lee, Min-Jung, Ji-Woong Choi, Hyun-Mac Kim and Kwang-Guk An\* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

We evaluated stream health, based on integrative approaches of qualitative habitat evaluation index (QHEI), chemical water quality and the index of biological integrity (IBI) using fish assemblages in Daejeon Stream during August 2004 - October 2007. The QHEI values in this study averaged 78.2 (n=28, range: 47~124), indicating "fair" condition based on the criteria of US EPA (1993). The highest value was in the headwater site (S1) that was 112 (good), whereas the value in S3, mid and downstream was 55 (fair-poor) that was the lowest owing to a disturbance on the bed and an artificial bank. Concentrations of chemical parameters such as BOD, TP and conductivity increased from the upstream to the downstream, due to higher inputs of organic matters and nutrients from the urban area. Conductivity and TP showed a dilution of stream water by rainwater during summer monsoon. Analysis of fish compositions showed that total number of species was 24 and *Zacco platypus* was predominated (82%). The mean IBI was 17 (range: 12~30) during four years and the IBI values also decreased from S1 to S4. These results indicated that ecological health was degraded distinctly as the stream goes down through the city-center. We concluded that Daejeon Stream running through the city are influenced by chemical impact such as an influx of domestic sewage as well as the quality of habitat.

Key words : Urban stream, Index of biological integrity, fish, pollution

### 서 론

우리나라는 경제성장에 초점을 맞춘 정부정책에 따라 유래 없는 초고속 경제성장을 지속해 오면서 도시의 인구 집중현상, 각종 산업화에 따른 오염물 배출에 의해 도심하천 생태계 교란 및 오염이 환경문제로 대두되고 있다(An *et al.*, 2002; 안과 김, 2005). 도심하천은 오수 및

하수처리장의 영향으로 인한 화학적 수질오염, 도로건설에 따른 불투수층 증가로 하천 유지유량 감소 및 건천화 현상(Paul and Meyer, 2001), 하폭의 인위적 확장 및 하도 직강화, 인공구조물 설치에 따른 서식지 교란을 통해 궁극적으로 하천 생태계의 건강성을 악화시키는 것으로 나타나고 있다(안과 김, 2005). 도심하천의 이런 문제점을 해결하기 위해 양재천(김 등, 2004), 청계천(신과 이, 2004), 전주천(신, 2002) 등의 도심하천에서 생태복원사업

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

이 실시된바 있다. 그러나 최근까지도 복원 전후의 환경 변화에 관련한 연구는 미미한 실정이며, 하천복원기법에 대한 검증 또한 부족하여 복원기법 검증의 필요성이 대두되고 있다.

최근 대전시에서도 시내를 관통하는 대전천, 갑천, 유등천의 3대 도심하천 복원사업이 시행 중에 있으며, 이에 따른 다양한 생태계 모니터링 및 평가가 수행되고 있다. 그러나 이들 복원 하천은 주로 조경 및 인간 편익을 위한 친수공간 건설위주로 시행되고 있어(김 등, 2004; 신과 이, 2004) 생물 및 생태계 복원 여부에 대한 타당성 문제들이 제기된 바 도심하천의 심도있는 수생태 조사 및 해결 방안 모색이 시급히 요구되고 있다(환경부, 2005). 대전 중심부에 위치한 대전천은 유등천의 제1지류로서 대전의 도시를 관통하는 전형적 도심형 하천으로서 유역면적이 작고 하상계수가 커서 하절기 몬순시기에만 유량이 풍부하고 그 밖의 시기에는 하천유량이 크게 줄어드는 특성을 가지고 있다(박 등, 2003). 최근 대전천에서는 하천 생태계 복원의 일환으로 홍명상가 및 하상주차장 철거가 진행되고 있으며, 이런 가운데 수생태계에 직·간접적 물리화학적 영향을 미치고 있어 이에 대한 생태계 보전방안 및 복원기법 마련이 절실하다(대전광역시, 2006). 기존의 대전천에 대한 연구로는 하천 하상퇴적물의 중금속 함량 분석(김과 이, 1996), 하천수질의 동위원소 특성 분석(문 등, 2002) 및 하천유지용수 공급에 대한 수리수문학적 단기적, 중·장기적 방안(박 등, 2003) 등에 대한 다양한 이화학적 분석이 실시되었다. 그러나 대전천에 관련한 생태계의 생물학적, 생태학적 평가에 대한 연구는 극히 미미한 실정이며 일부 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도(안과 김, 2005)를 평가한 바 있다. 그 외에 안 등(2001a)은 도심 생태계의 모니터링 및 평가를 위해 수정·보완된 다변수모델 평가기법을 갑천(배와 안, 2006) 및 유등천(이 등, 2005)의 도심하천(안 등, 2005; 안과 김, 2005) 건강성 평가에 다양하게 적용 평가한 바 있다. 최근 대규모의 하천정비 사업이 진행된 대전천은 생태교란이 예상되고 있으며, 하천정비 전후의 생태학적 건강도에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 대전시의 3대 하천 생태복원 사업 중에 하나인 대전천을 대상으로 화학적 수질특성분석 및 물리적 서식지 평가를 실시하였다. 또한, 어류를 이용한 다변수 평가모델(Multi-metric Fish Assessment Model)을 이용하여 생물학적 생태 건강도를 진단하였다. 이런 변수들에 대해 상류 및 하류사이의 조사지점에 따른 변이 양상 및 교란에 영향을 주는 주요요인을 분석하였고, 변수들 간의 상관분석 및 회귀분석을 통하여 수환경 특성을 통

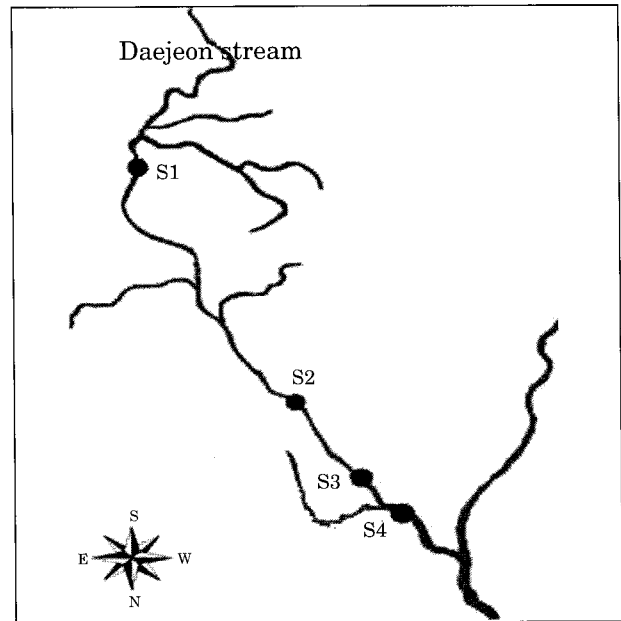


Fig. 1. The sampling locations in Daejeon Stream.

합적으로 고찰하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사시기 및 조사지점 선정

본 연구는 2004년에서 2007년까지 대전천의 4개 지점(Fig. 1)을 선정하여 어류채집을 실시하였고, 이에 다른 생물학적 건강도 평가, 수질자료 분석 및 물리적 서식지 평가를 실시하였다. 대전천의 최상류인 지점 1(S1)은 Strahler(1957)의 하천차수(Stream order) 기준에 의거할 때 2차 하천으로서 비교적 도심 외곽 지역에 속해있고, 토지이용도 측면에서 산림이 우점하고, 특이할 만한 오염원이 없다. 지점 2(S2)와 지점 3(S3)은 3차 하천으로 넓은 도심 주택가 및 아파트 단지가 형성되어 있고, 인공조형물을 이용한 하천정비사업이 수행되어 수질 및 하상구조 교란이 예상되는 지점이다. 지점 4(S4)는 학교, 주택, 소규모 공장들이 위치해 있는 3차 하천으로서 대전천의 지천중의 하나인 대동천의 대규모 오염물 영향을 받는 지점이다. 세부 조사지점은 다음과 같다.

- S1: 대전광역시 중구 옥계동 옥계교
- S2: 대전광역시 중구 문창동 문창교
- S3: 대전광역시 중구 선화동 선화교
- S4: 대전광역시 중구 산성동 현암교

## 2. 조사방법

### 1) 어류 현장조사 방법

어류채집은 Ohio EPA (1989)의 방법을 우리나라의 특성에 맞게 수정·적용한 안 등(2001b)의 방법에 의거하였고, 정량화된 Catch per unit effort (CPUE)를 위하여 채집거리는 200m로 제한하였고, 조사구간 내 다양한 서식지 유형을 모두 포함하였다. 채집 소요시간은 최대 종 풍부도곡선(Maximum Species Richness Line)을 산정하여 50분으로 한정하였고, 채집도구는 투망(망목: 5×5 mm 이하), 족대(망목: 4×4 mm)를 이용하였다.

### 2) 어종 분류 및 군집분석

채집된 어류는 현장에서 동정, 분류 및 개체수 산정을 한 후 바로 놓아주는 것을 원칙으로 하였다. 동정이 모호한 종의 경우 10% 포르말린 용액에 고정된 후 실험실로 운반하여 김과 강(1993), 김(1997), 김과 박(2002)에 의거하여 동정하였고 과(family)의 분류 체계는 Nelson (1994)에 따라 분류하였다. 비정상어종의 외형적 감별은 U.S. EPA (1993)에 의거하여 기형(Deformity), 지느러미 깎임(Erosion), 조직손상(Lesion) 및 종양(Tumors) 등으로 구분하여 분석하였다.

### 3) 생태지표종 분석법

생태지표종 구분방식은 U.S. EPA (1993) 및 Barbour *et al.* (1999)의 방식에 의거하여 분석하였고, 본 분석을 위하여 국내의 문헌 조사 및 현지 어류조사에서 얻은 시료 분석을 동시에 실시하였다. 생태지표특성은 크게 민감종(Sensitive species, S), 중간종(Intermediate species, I) 및 내성종(Tolerant species, T)으로 분류하였고 각 생태지표에 대한 세부특성은 다음과 같다. 민감종은 주로 오염도에 따라 쉽게 사라지는 어종으로 환경의 질적 변화에 민감하게 반응하는 어종들이다. 내성종은 수질오염에도 불구하고, 종수 및 분포범위가 증가하는 어종이고, 중간종은 민감종과 내성종의 두 범주 사이에 포함되지 않는 종으로 구분하였다.

### 4) 섭식특성 분석법

수체 내 에너지 흐름을 반영하는 영양단계는 잡식종(Omnivore species, O), 충식종(Insectivore species, I), 육식종(Carnivore species, C), 초식종(Herbivore species, H)으로 대별하여 분석하였다. Ohio EPA (1989)에 따르면 잡식종은 동·식물질의 상당비율을 지속적으로 먹는 종, 충식종은 주로 수서 무척추 곤충을 먹는 종, 육식종은 주로 어류 및 다른 무척추동물물을 먹는 종으로 정의하고 있으며 식성의 분류는 다양한 먹이원이 동시에 존재할 때 1

차적으로 이용하는 자원(primary source of food)에 근거하여 분류하였다. 분류 시 1차적으로 기존의 도감 및 문헌을 이용하였고, 채집한 종들의 일부에 대해서는 1종당 10개체의 해부를 실시하여, 전체 위 내용물에 대한 상대적 우점 정도를 파악하여 분류하였다.

## 3. 화학적 자료 분석

대전천의 화학적 수질상태 분석을 위하여 2004년에서 2007년까지 측정된 환경부의 수질자료를 환경부 홈페이지(www.me.go.kr, 물환경 정보시스템)에서 획득하였고, 현재 환경부에서 측정되고 있는 여러 일반 수질 항목 중 하천의 수질특성을 가장 잘 반영할 수 있는 4개 항목을 선정하였다. 4개 수질항목은 생물화학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 총인(Total phosphorus, TP), 총부유물(Total suspended solids, TSS), 전기전도도(Electric conductivity at 25°C, EC)이며, 각각 수질값의 지점별, 시기별 변화양상을 분석하였다.

## 4. 생태건강도 다변수 모델 및 메트릭 속성 분석

본 조사에서는 어류에 의거한 생물통합지수를 기반으로 하천 건강도 평가모델을 적용하였다. 하천 건강도 평가모델은 북미에서 최초 개발된 어류의 다변수 IBI 모델에 기반을 두고 있으며(Karr, 1981) 최근에는 Barbour *et al.* (1999)에 의해 수정·보완된 모델을 기초로 하였다. 또한, 현재 우리나라에서 안 등(2001a, b)은 북미의 메트릭 속성, 트로픽 길드 및 서식지길드를 우리나라 생태특성에 맞게 수정, 개발된 모델을 제시한 바 있어 이를 기반으로 하였다. 본 연구에서 이용된 메트릭 속성 및 모델의 세부적 특성은 안 등(2001a)의 연구에서 자세히 기술되었다. 모델 분석에 이용된 메트릭은 M1 총 본토종수(Number of native species), M2 여울성 저서종수(Riffle-benthic species), M3 민감성 생태 지표종수(Number of sensitive species), M4 내성 지표종의 개체수빈도(Proportion of tolerant species), M5 잡식성종의 상대빈도(Proportion as a number of omnivore species), M6 본토 충식성 종의 상대빈도(Proportion as a number of insectivore species), M7 총개체수(Total number of individual), M8 개체의 비정상도 빈도(Proportion as a number of abnormal individual)의 총 8개 메트릭 시스템이다. 생물학적 건강도 평가 값은 10개 메트릭에 대해 Barbour *et al.* (1999)에 의해 제시된 바와 같이 각각 “5”, “3”, “1”의 모델값을 부여한 뒤 최종값을 산정하여 최적상태(A, 40~36), 양호상태(B, 35~26), 보통상태(C, 25~16), 불량상태

(D, ≤16)의 4개 등급으로 대별하여 평가하였다.

(110~66), Poor (52~8)의 5개 등급으로 구분하였다.

5. 물리적 서식지 평가

본 연구에 적용된 서식지 평가 모델은 Plafkin *et al.* (1989)에 의해 도입된 서식지평가 정성지수 및 이를 수정한 Barbour *et al.* (1999)의 서식지평가지수를 바탕으로 국내실정에 맞추어 모델보정을 거친 후 적용하였다. 물리적 서식지 평가를 위한 메트릭 모델은 M1 하상구조/서식처 피복도(Substrate/Instream cover), M2 하상매몰도(Embeddedness), M3 유속/수심 조합(Flow velocity/depth combination), M4 하상유실 및 토사축적도(Bottom scouring & sediment deposition), M5 유량 상태(Channel flow status), M6 수로 변경도(Channel alteration), M7 여울빈도 및 하천굴곡도(Frequency of riffles or bends), M8 제방 안정도(Bank stability), M9 제방식생 보호도(Bank vegetative protection), M10 친변 식생대의 폭(Riparian vegetative zone width) 및 M11 소규모 댐의 존재유무(Dam construction impact)의 11개 메트릭으로 구성되었다. 각 변수값의 등급구분은 U.S. EPA(1993)의 기준에 의거하여 Excellent (220~182), Good (168~124), Fair

결과 및 고찰

1. 이화학적 수질 특성

대전천에서 2004~2007년 동안 분석된 수질자료에 따르면, 연평균 생물학적 산소요구량(BOD)의 농도는 2.08 mg L<sup>-1</sup>(범위: 1.4~2.8)로 환경부 하천 생활환경 기준 II (약간 좋음)등급으로 나타났다. 총인(TP)의 평균농도는 76.7 μg L<sup>-1</sup>(범위: 44~155)로서, 부영양화된 하천특성을 보였고, 전기전도도는 305.6 μS cm<sup>-1</sup>(범위: 244~359)로서 인근 타 도심하천(유동천, 갑천)들과 유사한 값을 보였다. 하천수내의 TSS는 3.6 mg L<sup>-1</sup>(범위: 2.4~6.0)로 환경부 기준(2006) 28 mg L<sup>-1</sup> 이하로 Ia(매우 좋음) 등급으로서 일부 강우 집중기인 하절기에 높은 값을 보이나 부유물에 의한 생물의 영향은 크지 않을 것으로 사료되었다. 수질 변수의 연별 변이분석에 따르면 뚜렷한 차이를 보이지 않아, 본 연구기간 동안 수질 특성은 크게 변하지 않은 것으로 나타났다.

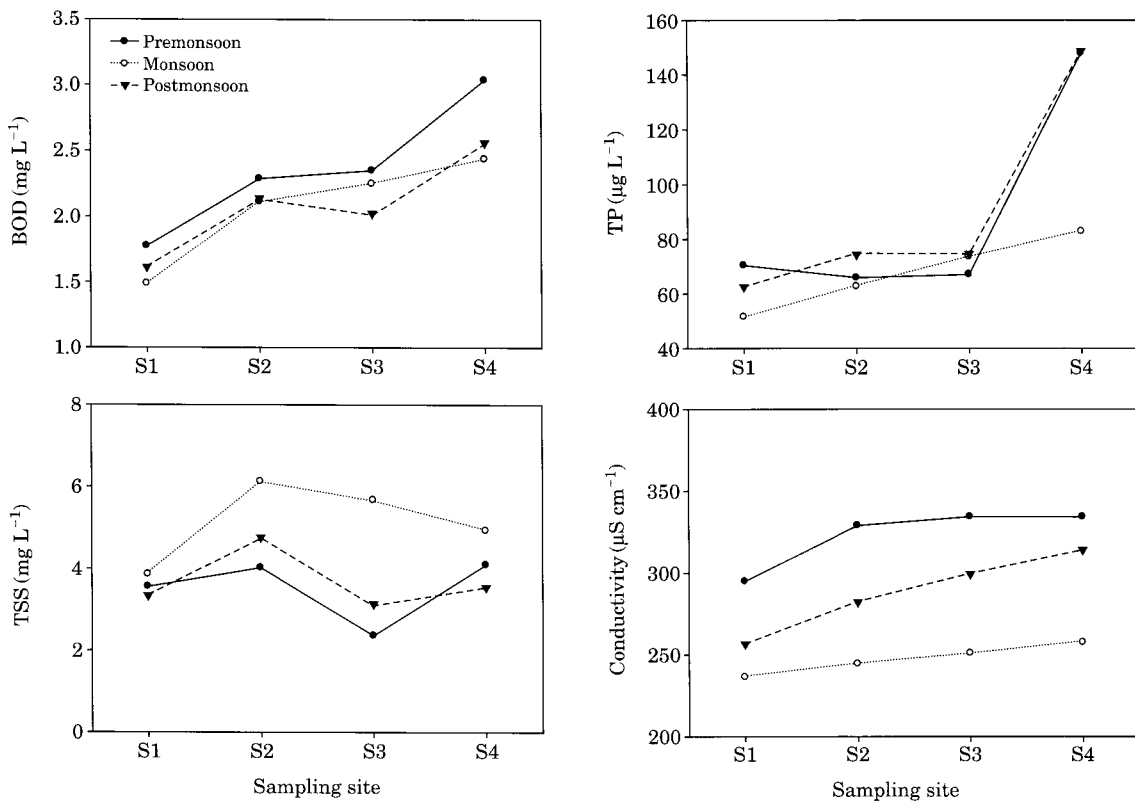


Fig. 2. Spatial and seasonal variation of water parameters in the sampling sites. Biological oxygen demand(BOD), total phosphorus (TP), total suspended solids (TSS) and electric conductivity.

대전천의 계절적 수질변이 특성을 파악하기 위해 장마 전(Premonsoon, 5~6월), 장마 기간(Monsoon, 7~8월)과 장마 후(Postmonsoon, 9~10월)로 대별하여 분석하였다(Fig. 2). 유기물 오염도를 나타내는 BOD는 장마 전(평균  $2.4 \text{ mg L}^{-1}$ ), 장마 기간(평균  $2.1 \text{ mg L}^{-1}$ ), 장마 후(평균  $2.1 \text{ mg L}^{-1}$ )의 계절적 변이를 보이지 않았고, S1( $1.6 \text{ mg L}^{-1}$ )은 국내 하천의 생활환경 수질 기준(환경부, 2007), Ib(중음)등급으로 나타났으나, S4( $2.6 \text{ mg L}^{-1}$ )는 II(약간 좋음)등급으로 나타나 하류지점으로 갈수록 유기물에 의한 오염이 진행되고 있는 것으로 나타났다. 부영양화 지표인 TP는 장마 전(평균  $87.8 \mu\text{g L}^{-1}$ ) 및 장마 후(평균  $90 \mu\text{g L}^{-1}$ )에 비해 장마 기간에 평균  $67.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타나 집중강우에 의한 일시적인 희석효과를 보였다. 또한 장마 전·후 S4의 TP 농도는 S3에 비해 약 2.1배 증가하는 것으로 나타나, S4에 유입되는 대동천(생활하수 및 공장폐수 등의 오염원)에 의한 수질악화현상으로 사료되었다(노 등, 1994). 전기전도도는 TP와 마찬가지로 장마 기간(평균  $247.3 \mu\text{S cm}^{-1}$ )에 일부 강우에 의한 희석효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 계절에 관계없이 하류부로 갈수록 전기전도도가 증가하는 양상을 보였으며, 이는 하류로 갈수록 이온성 부유물질이 증가하여 수질 저하가 일어난 것으로 사료된다. 이는 위의 BOD와 동일한 경향을 보여 도심을 관통하면서 유기물질의 증가가 발생했을 것으로 판단되었다. 수체 내 부유물의 농도를 나타내는 TSS는 장마 전·후에 비해 장마 기간에 약 1.4배 높은 농도를 나타내어 TP, 전기전도도와 상반된 결과를 나타냈다. 이는 강우에 의한 주변 오염원으로부터의 난분해성 부유물 유입에 의한 것으로 사료되었다. 지점에 따른 TSS는 S1에서 가장 낮은  $2.63 \text{ mg L}^{-1}$ 을 보였고, S2에서  $4.08 \text{ mg L}^{-1}$ 로 증가 후, S4에서  $4.11 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높게 측정되었다. 이는 2007년부터 시행된 하천복원사업을 통하여 S2의 인공구조물을 비롯한 수변환경을 개선하였고 이로 인한 일시적인 TSS의 증가로 사료되었다. TSS의 증가는 유역의 토지 이용도에 의하여 큰 영향을 받으나, 최근 유역의 토지 개발, 하천 정비 사업 및 준설 등의 복원사업에 따른 탁수유입에 의하여 큰 영향을 받고 있는 것으로 나타났고 점차적으로 그 영향이 증대되고 있는 것으로 사료되었다.

## 2. 물리적 서식지 평가지수 분석

각 지점의 정성적 서식지 평가 지수(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI)에 의한 평가 결과에 따르면, QHEI 값은 평균 78.2(범위: 47~124)로 보통상태

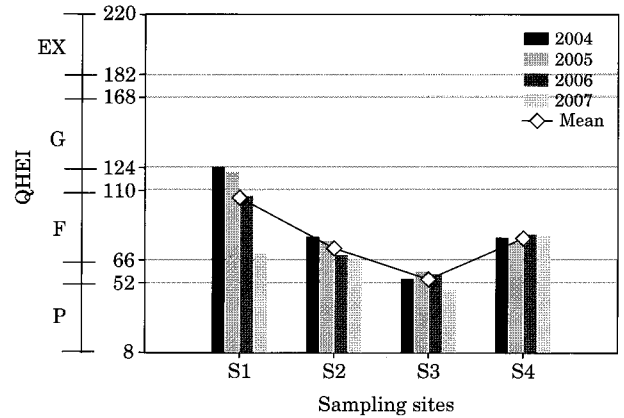


Fig. 3. Temporal and spatial variation of Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) in Daejeon Stream.

(Fair)를 나타냈고, 하류로 갈수록 점점 악화되는 것으로 나타났다(Fig. 3). 가장 양호한 물리적 서식지 상태를 보인 지점은 S1(105, 보통상태)로 하상기질이 주로 자갈로 되어 있고 수변식생대가 잘 발달되어 있어 어류가 서식하기에 적합한 환경으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 그러나 대전천의 경우, 2007년부터 시작된 수생태계 복원사업으로 인하여 대부분의 수역에서 공사가 진행 중이고, 이로 인한 물리적 서식지의 교란현상이 뚜렷한 것으로 나타났다. 특히, S1은 수변 식생대와 하상이 교란되면서 QHEI 값이 크게 감소하였고, S2와 S3에서도 점차 낮아지는 양상을 보였다. 또한, S3과 S4의 경우, 하천 주변이 모두 인공제방으로 형성되어 있고, 하상도로 및 인위적인 활동에 의한 영향이 큰 것으로 나타나 이로 인한 수생태계의 오염이 심각한 것으로 사료되었다. 현재, 본 연구지역은 복원공사가 진행되고 있으며, 복원공사에 따른 영향을 파악하고 추후 변화양상을 파악하기 위한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료되었다.

## 3. 어류분포 특성 및 생태길드 분석

본 연구 결과에 따르면, 5과 24종 6909개체의 어류가 채집되었고, 채집된 어류 중 과별 다양도는 잉어과 어류가 15종(62.5%)으로 가장 높게 나타났고, 그 외에 미꾸라리와 4종, 동사리와 2종, 망둑어과 1종, 동자개과 1종 순으로 나타났다(Table 1). 어류의 상대풍부도(Relative abundance) 분석에 따르면, 채집된 어종 중 피라미(*Zacco platypus*) 81.6%, 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*) 5.8%, 미꾸라지(*Misgurnus mizolepis*) 4.4%의 상대풍부도를 보여 대전천에서 피라미가 우점하는 것으로 나타났다. 피라미는 수질오염에 대한 내성이 강하고 여울과 소의 구

**Table 1.** Fish fauna and various guild analysis in the sampling sites. Tolerance guild (SS: Sensitive species, IS: Intermediate species, TS: Tolerant species), Trophic guild (O: Omnivore, I: Carnivores, H: Herbivores), TNI: Total number of Individuals and RA: Relative abundance.

Species	Tolerance guild	Trophic guild	Habitat guild	S1	S2	S3	S4
<b>Cyprinidae</b>							
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	-			1	1
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	-	1			
<i>Carassius auratus</i>	TS	O	-	9	33	95	50
<i>Rhodeus uyekii</i>	IS	O	-			3	
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O	-	1	8	14	
<i>Pungtungia herzi</i>	IS	I	-	3			
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>	IS	I	-			7	
<i>Gnathopogon strigatus</i>	IS	I	-			23	21
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	IS	I	-		5	1	
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I	-				1
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	-	14	99	41	5
<i>Microphysogobio yaluensis</i>	IS	O	RB	6	22	1	
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	SS	I	-	306	58	37	
<i>Zacco platypus</i>	TS	O	-	2081	1293	1948	317
<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	TS	C	-			5	4
<b>Cobitidae</b>							
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	O	-	2	4	3	1
<i>Misgurnus mizolepis</i>	TS	O	-	88	65	51	100
<i>Iksookimia koreensis</i>	IS	I	RB	33			
<i>Cobitis lutheri</i>	IS	I	-	5		2	
<b>Bagridae</b>							
<i>Pseudobagrus koreanus</i>	SS	I	RB	1			1
<b>Siluridae</b>							
<i>Silurus asotus</i>	TS	C	-				2
<b>Odontobutidae</b>							
<i>Odontobutis platycephala</i>	SS	C	-	21	2	2	
<i>Odontobutis interrupta</i>	IS	C	-	5	3		
<b>Gobiidae</b>							
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I	RB	1	2	1	
Total number of species				16	12	17	11
Total number of individuals				2549	1449	2050	425

분 없이 대부분의 서식지에 잘 적응하여 대전천의 전지점에 분포(항존도(Constasy): 100)하고 있는 것으로 나타났다. 모래무지의 항존도 값은 62.5로 일부 지점을 제외하고 대전천 수계 전역에 고르게 분포하는 것으로 나타났다. 이외에도 항존도가 높은 어종은 붕어, 모래무지, 미꾸라지, 미꾸리 등으로 나타났다.

각 지점별 어류상 분석에 따르면, 서식환경에 따라 어류 종조성에 차이를 보였고, 특히 대동천이 합류되는 4지점에서 가장 적은 종과 개체수가 채집되었다. 또한, 채집된 개체수는 하류로 갈수록 현저히 감소하여 수체가 커짐에 따라 어류 개체수가 증가하는 대조하천과는 전혀 다른 양상을 보였다(안 등, 2001a). 이는 생활하수 유입에 따른 수질악화와 서식지 교란에 의한 것으로 사료되었다.

내성도(Tolerance guild) 분석에 의하면, 민감종(Sensitive species)은 6.2%(428개체), 내성종(Tolerance species)은 89.4%(6178개체), 중간종(Intermediate species)은 4.4%(303개체)로 나타났다. 수질오염과 생태계 교란에 민감하게 반응하는 민감종은 지점 1에서 대부분 채집되었고 하류로 갈수록 민감종의 상대풍부도는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 내성종의 상대풍부도는 평균 85%로 높게 나타나 이화학적 수질악화와 서식지 파괴에 의한 것으로 사료되었다(Fig. 4).

섭식특성(Trophic guild) 분석에 의하면, 잡식성(Omnivore) 어종은 6,198개체로 89.7%, 육식성(Carnivore) 어종은 44개체로 0.6%, 충식성(Insectivore) 어종은 667개체로 9.7%를 차지하였다. 지점별 상대빈도 분석에 따르

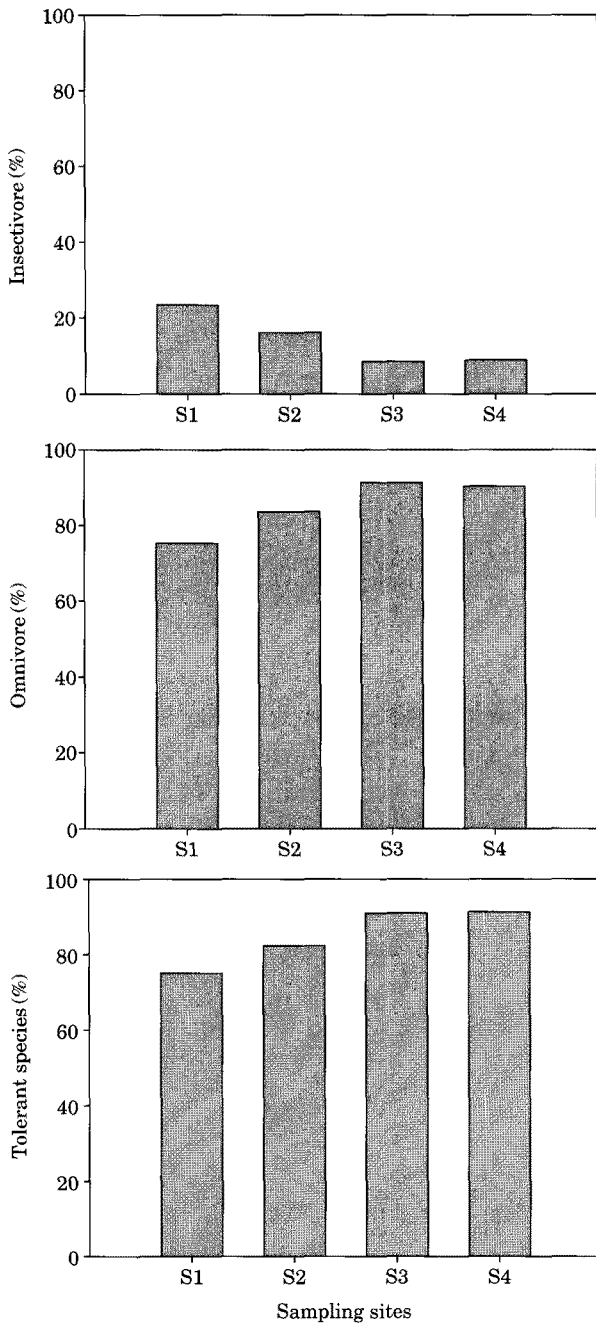


Fig. 4. Relative abundance of insectivores, omnivores and tolerant species at the sampling sites.

면, 거의 모든 지점에서 잡식성 어종의 상대빈도가 높게 나타나 육식종 및 증식종에 비해 우점하는 것으로 나타났다.

Karr(1981)와 US EPA(1993)의 보고에 따르면, 내성종과 잡식종의 풍부도는 유기물 오염, 서식지 파괴 등 수환경의 이·화학적 질적 하강에 따라 어종의 풍부도가

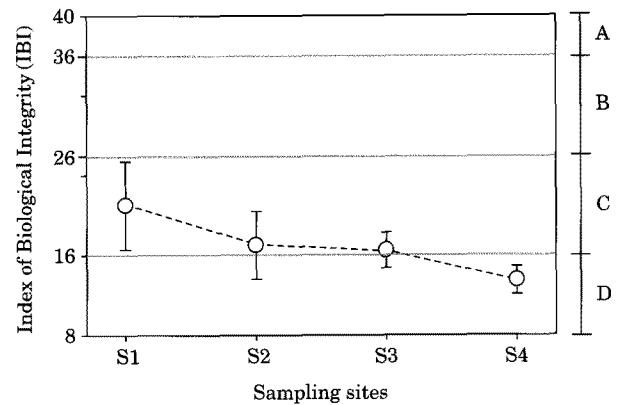


Fig. 5. Spatial variation of Index of Biological Integrity (IBI) with the standard deviation (S1=4.4, S2=3.4, S3=1.8, S4=1.4) and the grade of health conditions in Daejeon Stream. The grade of "A", "B", "C" and "D" indicates excellent, good, fair and poor conditions, respectively.

증가하는 경향을 보인다. 대전천의 경우, 내성종과 잡식종의 상대풍부도가 각각 89.4%, 89.7%로 나타나 화학적 수질악화나 물리적 서식지 교란현상이 심각한 것으로 사료되었다.

환경의 질적 저하에 따라 증가하는 양상을 보이는 외래어종(Exotics species)은 이스라엘 잉어(*Cyprinus carpio*) 한 종만이 채집되었고, 피부손상 및 기형 등 외형적 비정상 상태를 보인 어종이 일부 채집되어 수환경의 질적저하를 시사하였다(US EPA, 1993).

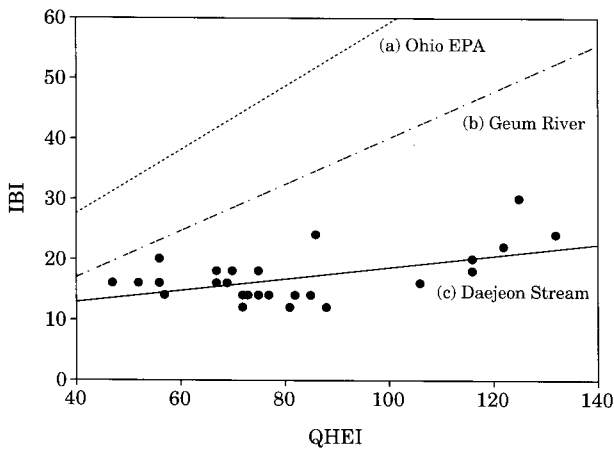
#### 4. 생물통합지수 평가

다변수 평가 모델을 이용한 수생태 건강성 평가에 따르면, 생물통합지수 (Index of Biological Integrity, IBI)는 평균 17(범위: 12~30, n=32)로 "보통상태(C)"인 것으로 나타났다(Fig. 5). 최근 4년간 IBI 값은 17.8(2004), 17.2(2005), 15(2006), 17(2007)로 명확한 차이를 보이지 않았다. 반면, 지점에 따른 IBI 값을 비교한 결과 S4로 갈수록 생태건강성이 악화되는 양상을 보였고, 이는 하류로 갈수록 오염원의 증가로 인한 생물학적 건강도 악화 현상이 뚜렷한 도심하천의 특성을 잘 반영한 것으로 사료되었다(US EPA, 1993; 안과 김, 2005; 안 등, 2005; 배와 안, 2006). 또한, 본 연구지점 중 최상류 지점인 S1은 산림지역을 지나 주거지를 통과하는 지점으로 IBI 값이 평균 21(범위: 16~30, n=8)로 "보통상태(C)"를 보여 하류의 각종 오염원의 영향을 받는 도심지에 비해 상대적으로 양호한 건강성을 보였으나, 타수계의 산간계류형 하천(안

**Table 2.** Pearson's correlation coefficients (*r*) and its probability (*p*, n=120) of water quality parameters to QHEI, IBI, tolerant and trophic guild. SS=Sensitive Species, TS=Tolerant Species, O=Omnivore, and I=Insectivore.

		QHEI	IBI	SS	TS	O	I
BOD	<i>r</i>	-0.43*	-0.40*	-0.47**	0.31	0.31	-0.32
	<i>p</i>	0.024	0.049	0.006	0.080	0.086	0.077
TP	<i>r</i>	0.01	-0.13	-0.27	0.09	0.04	-0.11
	<i>p</i>	0.961	0.468	0.134	0.642	0.844	0.540
TSS	<i>r</i>	-0.27	-0.02	-0.10	-0.10	-0.14	0.23
	<i>p</i>	0.164	0.934	0.603	0.603	0.452	0.216
Conductivity	<i>r</i>	-0.30	-0.17	0.07	0.31	0.19	-0.32
	<i>p</i>	0.125	0.359	0.690	0.080	0.312	0.074

\*: significant at the 0.05 level, \*\*: significant at the 0.01 level



**Fig. 6.** Relations of IBI to the QHEI values in Daejeon Stream with the Ohio EPA model and Geum River study. (a) Ohio EPA model [IBI=0.50\*(QHEI)+7.5, *r*=0.79, *R*<sup>2</sup>=0.063, *p*<0.05] (b) Geum River [IBI=0.29\*\* (QHEI)+14.6, *r*=0.95, *R*<sup>2</sup>=0.89, *p*<0.001] (c) Daejeon Stream [IBI=0.098\*\* (QHEI)+9.0, *r*=0.55, *R*<sup>2</sup>=0.31, *p*<0.002]

과 신, 2005; 안과 최, 2007)에 비해 하천 건강도가 악화 된 것으로 나타났다. 대전광역시 도심의 상가밀집지역 및 주거지역을 통과하는 S2 및 S3은 평균 17(보통상태, C)로 하상도로 및 각종 오염원에 의해 수생태 생물이 악영향을 받은 것으로 사료되었다. 최하류 지점인 S4는 평균 14(범위: 16~12, n=8) “불량상태(D)”로 나타나 4지점 중 하천 건강도 악화현상이 심각한 것으로 나타났으며, 이는 S4의 상류에서 유입되는 대동천에 의한 수질악화(노 등, 1994) 및 유기물 축적에 의한 하상 단순화 등 서식지 파괴가 수생태 건강성 악화에 기인한 것으로 사료되었다.

**5. 물리적, 화학적, 생물학적 평가 지수의 비교분석**

화학적 수질변수를 물리적 서식지 평가 지수, 생물 통

합 지수 및 내성·섭식길드와 Pearson 상관도 분석을 실시한 결과, BOD는 QHEI, IBI 및 민감종과 통계적으로 유의한 역상관관계를 나타냈다(Table 2). 이는 BOD 증가 즉, 유기물에 의한 수질오염이 물리적 서식지 및 생물 건강도에 악영향을 미친 것으로 사료되었다.

미국 오하이오 환경청(Ohio EPA)에서 제시한 IBI와 QHEI간의 경험적 회귀식과 An and Choi(2003)에 의해 도출된 금강의 경험적 회귀식을 이용하여 대전천의 회귀식과 비교한 결과 확연한 차이를 보였다(Fig. 6). 금강은 기울기 0.29로 Ohio EPA 모델(기울기: 0.50)에 비해 상대적으로 서식지에 따른 생물 통합 지수 변화도가 낮게 나타났다. 이는 금강이 타 수계에 비해 오염원 적으며, 수량과 수질이 안정적이나 갑천과 같은 도심하천을 비롯한 50개의 지천 및 공단으로부터의 폐수 유입과 대청댐에 의한 수질저하현상이 일어나(임, 1999) Ohio 모델에 비해 서식지에 의한 교란보다 수질악화에 의한 영향이 큰 것으로 사료되었다. 금강의 지류인 대전천의 기울기는 0.098로 Ohio 모델의 약 5배, 금강 연구의 약 3배 낮게 나타났다. 이는 대전천이 대전 중심 시가지를 관통하면서 생활하수 유입 및 쓰레기 투기 등으로 인한 수질 저하현상에 의한 것으로 판단되었다. 따라서 대전천의 경우, Ohio 모델과 금강에 비해 서식지 이외 다른 요인들에 의하여 영향을 받는 전형적인 도심하천인 것으로 사료되었고 도심하천에 적합한 다변수 경험모델의 개발이 요구된다.

**적 요**

본 연구에서는 대전광역시를 관통하는 도심하천인 대전천의 4개 지점을 선정하여, 2004년 8월에서 2007년 10월까지 총 8차례에 걸쳐 생물학적 건강도 평가 및 물리



적 서식지 평가를 실시하였고, 환경부 수질측정망 지점 자료를 이용하여 화학적 수질특성을 분석하였다. 물리적 서식지 평가 지수(QHEI)는 평균 78.2(범위: 47~124)로 “보통상태”(Fair)로 나타났다. QHEI 값은 최상류지점(S1)에서 최대치(112, “양호상태”)를 보인 반면, S3에서 55(보통~악화상태)로 가장 불량한 서식지 상태를 보였는데, 이는 심각한 하상구조의 교란, 하상도로 및 인위적 활동에 의한 것으로 사료되었다. 화학적 수질변수들은 하류로 갈수록 점차 악화되는 것으로 나타나 하천주변 도심으로부터 유입되는 유기물 오염에 의한 것으로 사료되었다. 또한 TP 및 전기전도도(Conductivity)는 집중강우로 인한 희석효과가 뚜렷이 나타난 계절적 변이가 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서는 총 5과 24종 6909개체의 어류가 채집되었고, 피라미(*Zacco platypus*)가 81.6%로 우점하는 것으로 나타났다. 다변수 어류 평가모델인 생물통합지수(IBM)는 평균 17(범위: 12~30) “보통상태”(C)로 나타났으며, 하류지점으로 갈수록 생태건강성이 악화되는 양상(S4: 14, “불량상태”)을 보였다. 따라서 대전광역시 도심의 상가밀집지역 및 주거지역을 관통하면서 생활하수 유입 및 각종 오염원에 의한 심각한 수질저하 현상에 의한 것으로 사료되었다.

## 사 사

본 연구는 환경부의 2009' 차세대 핵심환경기술개발사업(세부 과제명: 수중생태계에서 어류개체 및 군집수준의 생물학적, 화학적, 물리적 서식지 스트레스 평가모델 개발 및 최적 스트레스 분석)에 의해 수행되었음.

## 인 용 문 헌

- 김경웅, 이현구. 1996. 대전지역 하천수 및 하상퇴적물에서의 중금속오염, 한국자원 공학회지 **33**: 266-273.
- 김선근, 김고은, 이지은, 신동훈, 이규석. 2004. 도시 자연형하천 공사 후의 경관개선방안, 한국환경복원녹화기술학회 **7**(5): 66-74.
- 김익수. 1997. 한국동식물도감. 제37권 동물편(담수어류).
- 김익수, 강연중. 1993. 원색 한국어류도감. 아카데미서적, 서울.
- 김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기, 교학사.
- 노재경, 안병기, 김태철. 1994. 대전직할시 대동천의 유풍용수 공급방안, 충남대학교 공공문제연구소 **6**: 51-78.
- 대전광역시. 2006. 대전천, 유등천 생태복원 기본설계 보고서 3. 문병진, 정찬호, 이광식, 신형선. 2002. 대전광역시 도심하천의 수리화학적 및 동위원소 특성, 대한지질공학회 학술발표회 논문집 129-136.
- 박재로, 이효범, 김은주. 2003. 대전천 유지유량 확보를 위한 방안 검토, 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동총계 학술발표회 논문집 185-188.
- 배대열, 안광국. 2006. 생물학적 다변수 모델 적용 및 수화학 분석에 의거한 갑천생태계 평가, 한국육수학회지 **39**(2): 198-208.
- 신동훈, 이규석. 2004. 도시하천경관복원 접근방법에 관한 고찰, 한국조경학회 **32**(4): 39-48.
- 신진철. 2002. 전주천, 1950년대로 역류하다 - 전주천 자연형 하천 조성사업, 국토연구원-국토 **253**: 98-103.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지 평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단, 한국육수학회지 **38**: 361-371.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순 강우의 영향, 한국육수학회지 **38**: 54-62.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001a. 생물보전지수 (Index of Biological Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천수계의 평가, 환경생물 **19**: 261-269.
- 안광국, 이재연, 장하나. 2005. 유등천에서의 생태학적 건강도 평가 및 수질양상, 한국육수학회지 **38**(3): 341-351.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001b. 생물보전지수 및 서식지 평가 지수를 이용한 평창강의 수환경평가, 한국육수학회지 **34**: 153-165.
- 안광국, 최지웅. 2007. 초강의 통합적 생태건강성 평가, 한국하천호수학회지 **39**(3): 320-330.
- 이재연, 장하나, 안광국. 2005. 유등천에서의 생태학적 건강도 평가 및 수질양상, 한국육수학회지 **38**(3): 341-351.
- 임창수. 1999. 금강유역 14개 관측점의 수질자료를 이용한 수질의 다변량 분석, 한국환경화학학회지 **8**(3): 331-336.
- 환경부. 2005. 물환경종합평가방법 개발 조사연구(II) 보고서.
- 환경부. 2006. 물환경종합평가방법 개발 조사연구(III) 보고서.
- An, K.G. and S.S. Choi. 2003. An assessment of aquatic ecosystem health in a temperate watershed using the index of biological integrity. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* **38**: 1115-1130.
- An, K.-G., S.S. Park and J.Y. Shin. 2002. An evaluation of a river health using the index of biological integrity along with relations to chemicals and habitat conditions. *Environment International* **28**: 411-420.
- 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-B99-002. US EPA Office of Water, Washington, D.C., USA.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities, *Fisheries* **6**: 21-27.
- Nelson, J.S. 1994. *Fishes of the world* (3rd ed.). John Wiley

- & Sons, New York.
- 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.
- Paul, M.J. and J.L. Meyer. 2001. Stream in the urban landscape. *Annual Review of Ecological System* **32**: 333-365.
- Plafkin, J.L., M.T. Barbour, K.D. Porter, S.K. Gross and R.M. Hughes. 1989. Rapid bioassessment protocols for use in stream and rivers: benthic macroinvertebrate and fish. EPA/444/4-89-001. Office of water regulations and standards. US EPA. Washington. DC, USA.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions* **38**: 913-320.
- 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 1 August 2009,  
Revision accepted 9 September 2009)