

관평천 개발에 따른 장기간 어류 생태적 특성 변화 및 해부학적 건강도 평가^{1a}

오자윤²·이상재³·안광국^{4*}

Long-term Changes of Fish Ecological Characteristics on the Gwanpyeong Stream Development and the Necropsy-based Health Assessments^{1a}

Ja Yun Oh², Sang-Jae Lee³, Kwang-Guk An^{4*}

요약

본 연구에서는 2009-2019년 기간 동안 대전시 외곽의 도심개발에 따른 인근 하천(관평천)의 상류, 중류, 하류의 구간에서 4회 조사(2009, 2010, 2016, 2019)를 통해 이화학적 수질, 어류 종 조성, 생태 건강성 특성에 대해 장기간 변화추이를 분석하였다. 본 하천지역에서 도심개발은 2008년에 이루어졌고, 2012년에는 하천복원사업이 수행되어 하천복원 전과 후의 특성변화 추이를 모니터링 하였다. 하천 생태건강도 평가를 위해 군집수준의 어류평가지수(Fish Assessment Index, FAI)를 이용하였고, 어류의 기관(Organ) 수준에서 해부학적 건강도(Necropsy-based Health Assessment Index, HAI) 분석을 실시 하였다. 이화학적 수질 분석에서는 중류(St. 2)에서 가장 낮은 탁도와 엽록소(Chl-a)가 측정되었다. 이는 빠른 유속에 의한 물리적 요인 때문으로 나타났다. 어류 조사에서는 총 18종이 채집되었고, 피라미(*Zacco platypus*)가 가장 우점 하는 종 (40.6%)으로 나타났다. 하천복원 직후(2016)에는 민감종(Sensitive species)과 충식종(Insectivore species)이 우점, 종 다양도 및 종 풍부도 지수 상승, 생태건강도 지수(FAI)가 상승하여 생태 건강도는 “최상상태(A: 87.5)”로 나타났으나 가장 최근 조사인 2019년에는 전 기간에 비해 악화되는 것으로 나타났다. 기관(Organ) 분석에 의거한 해부학적 건강도 지수(HAI) 분석에 따르면, 피부손상(Skin)은 상류에서, 신장 손상(Kidney)은 하류 역에서 나타났고, 간(Liver)과 아가미(Gill)의 손상은 모든 지점에서 나타나 해부학적 측면의 건강도에서도 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어: 하천복원, 어류 종 조성, 어류평가지수, 생태건강도 평가

ABSTRACT

This study investigated a long-term variation trend of water quality, fish compositions, and ecological health conditions in the Gwanpyeong stream located in the nearby Daejeon metropolitan city to understand the impact of urban development projects on the aquatic ecosystem. The sampling was made in four surveys (2009, 2010, 2016, 2019) before and after urbanization. The urban development was conducted in 2008, resulting in the stream's ecological disturbance, and the stream restoration was conducted in 2012. Thus, stream monitoring was

1 접수 2020년 4월 28일, 수정 (1차: 2020년 8월 7일), 게재확정 2020년 8월 20일

Received 28 April 2020; Revised (1st: 7 August 2020); Accepted 20 August 2020

2 충남대학교 환경생물시스템 연구소 전임연구원 Institute of Environment Biosystem, Chungnam National Univ., Daejeon 34134, Korea

3 전북지방환경청 환경연구사 Chemical Safety Division, Jeonbuk Regional Environmental Office, Jeonju 54872, Korea

4 충남대학교 생명시스템과학대학 생물과학과 교수 Dept. of Biological Science, College of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National Univ., Daejeon 34134, Korea

a 이 논문은 대전녹색환경지원센터의 2016년도 연구개발사업 지원에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: kgan@cnu.ac.kr

conducted to analyze the ecological trends before and after the restoration. The multi-metric models for Fish Assessment Index(FAI) and necropsy-based Health Assessment Index(HAI) were applied in the fish community and organ-level, respectively, to assess the ecological health of the stream. Minimum turbidity and chlorophyll-a(Chl-a) occurred in the mid-stream(St. 2), and this was probably due to rapid current velocity in the riffle zone. We collected 18 fish species, and the dominant species was *Zacco platypus* (40.6%). In 2016 immediately after the stream restoration, the relative proportions of sensitive species and insectivore species were the highest along with highest values in the species diversity and species richness index, resulting in the best condition in the ecological health, based on FAI model values. However, the ecological health, based on the FAI, became worse in the latest survey conducted in 2019. The analysis of the HAI model based on the organ-level approach showed skin erosion in the fish of upper stream, kidney defects in downstream, and the liver and gill defects observed in all sites, indicating that the anatomical health was also affected.

KEY WORDS: STREAM RESTORATION, FISH COMPOSITION, FAI, ECOLOGICAL HEALTH

서론

최근 우리나라에서는 도심 외곽에서 도시화에 따른 각종 건설사업(주거지역, 공단 등), 즉 하천의 근린시설 확장, 하천의 수로화, 하상의 준설사업 등으로 수체내의 수질악화 및 생물 서식지 교란 현상이 빈번히 발생하고 있다. 특히 대도시 하천정비 공사는 수로의 직강화에 의한 형태변화 및 이전 서식 생물종의 급감 현상이 일어나 도심 생태계의 종 다양성 감소에 악영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 이로 인해 인근 소하천으로는 공사로 인한 각종 토사 및 부유물의 유입으로 인해 하상구조, 유속, 유량과 같은 수체의 물리적 특성 교란(Elmore and Kaushal, 2008)과 부영양화(N, P 증가) 및 유기물의 유입으로 인한 이화학적 수질 변화(Pennino *et al.*, 2014)로 인한 수생태계의 어류 등에 치명적인 피해를 입히는 사례가 우리나라뿐만 아니라 외국에서도 빈번히 보고되고 있다(Walsh *et al.*, 2005; Kim and Han, 2008). 특히, 도시화 현상은 인구집중 현상이 가중화되면서 오염물(하수)의 급격한 증가 및 서식지 교란이 일어나며, 하천 물리적 서식지 면적 및 질의 감소를 가져오고 결국은 수생생물의 다양성 또한 감소하는 결과가 초래하며, 내성이 약한 생물들은 종 풍부도가 감소하여(Yoon *et al.*, 2007), 궁극적으로는 생태계 전반의 먹이사슬 관계 및 먹이망에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Eitzmann and Paukert, 2010).

하천 생태계에서는 다양한 수질 및 생태계 교란의 문제가 심각해지고 여론에 대두되면서 1980년대 이후부터 정부의 주도하에 하천생태 복원사업이 진행되기 시작하였다. 하천복원(Stream restoration)은 하천의 기능이 상실되거나 인공적인 하천을 자연 하천 본래의 기능과 형태로 회복시켜주는 것으로서 정의되며(Kondolf and Micheli, 1995), 전 세계적으로 수많은 다양한 하천복원 사업이 수행됐다. 일반적으로 초기 하천

복원사업은 하천의 물리적 서식지에 주로 초점을 맞추어 수행되다가, 이후에는 수체 내의 이화학적 수질 향상(오·폐수 종말처리장 시설물 건설) 그리고 이후에는 수생태계 복원으로 이어지고 있다. 즉 초기의 사업은 주로 하천의 하상 구조변경 및 수질 향상을 위한 것들에 초점을 두었고, 최근에는 소실되거나 멸종된 종을 복원하는 생물학적 복원 기법이 적용되고 있다(Violin *et al.*, 2011). 우리나라에서는 전주천에서 서식지복원, 수질에 대한 이화학적 복원 및 소멸하였던 생물 지표종인 쉬리의 복원과 같은 생물학적 복원이 대표적인 하천복원 사례로 보고되고 있다. 즉 교란된 하천 생태계를 복원하기 위해서는 일차적으로는 오염물질의 유입을 감소시키고 제거해야 하며, 하천의 식생 및 물리적 하상 구조를 복원하여 다양한 서식지를 형성시켜야 한다. 현재 우리나라는 치수 위주로 정비된 하천의 자연성을 회복시키는 일에 집중하고 있고 지속적인 하천 생태계의 관리를 위해 생태계 건강성 평가와 같이 여러 기법을 도입하여 수 환경 관리 체계를 마련하고 있다(An and Han, 2007).

하천복원평가를 위해서는 수생태계의 현재 상태를 분석해야 하는데, 전 세계적으로 널리 이용되는 기법이 하천 생태계 건강성 평가 기법이다(Yadav *et al.*, 2014). 이런 기법에서는 수체 내의 지표생물을 이용한 방법이 가장 유용하게 쓰이고 있고 그 중 먹이사슬 최상위 분류군인 어류는 수생태 지표생물로 아주 빈번히 이용되고 있다(Oberdorff *et al.*, 2002). 어류는 다양한 수역에서 서식하기 때문에 특정 서식지에서 서식하는 어류는 그 지점의 화학적 오염물질, 병원균, 물리적 서식지 변경 등 다양한 스트레스 요인에 노출되어 수 생태 건강성 평가에 가장 널리 이용되는 담수 생물 종이다(An *et al.*, 2006). 생태계 건강성 평가를 하는 기법 중 다변수 생물 평가모델(Multi metric model)이 가장 널리 사용되고 있으며, 그 중 대표적인 모델로는 하천의 어류 군집 수준에서 어류를 이용한 하천건강

도 평가 모형(Index of Biological Integrity; IBI, Karr, 1981)이다.

다변수 모형은 미국 환경부(U.S. EPA)에 의해 1990년대부터 사용되기 시작하여, 현재는 미국 모든 주(State)에서 일부 모형을 변형하여 하천과 강의 수 환경 평가모델로 널리 적용되고 있다(U.S. EPA, 2002). 또한, 어류는 최상위 분류군이기 때문에 독성물질이 최종적으로 축적되며, 크기가 커서 어류의 외형 및 내부 장기(Intestine)를 해부학적으로 관찰하기 쉽다. 그러한 이유로 어류 표본의 조직과 장기를 관찰하여 어류 건강도를 측정하는 Field-Based Necropsy Method를 개발했다(Adams *et al.*, 1993). 이런 모형을 이용하여 어류의 각 기관에 대한 건강도를 14개의 매트릭으로 구분하고 모델값을 부여하여 해부학적 건강도 평가지수인 HAI 모델(Necropsy-based Health Assessment Index)을 개발하여 수체의 하천 건강도에 적용하고 있다. 현재 우리나라에서는 국가에서 군집수준의 생태 건강도 평가 기법을 이용하여 평가하고 있으나, 이런 해부학적 건강도 지수 평가 적용은 극히 미미한 실정이다.

본 연구의 대상인 관평천은 2007년 테크노 밸리 주거단지 개발이 시작되었고, 이 기간에 소하천에 많은 영향을 주었다. 상류에는 주로 농경지와 과수원이 있고, 중류는 대덕 테크노밸리 주거단지를 관통하여 흐르는 하천이다. 2009-2010년 이곳 하천 주변에서는 대규모 주거 및 산업 복합단지를 조성 하였고 이후 2012년에 하천생태 복원사업을 마친 상태이다. 본 연구의 목적은 도심개발과 생태복원사업 두 과정 모두를 거친 하천에서 현재, 과거의 복원사업 이전과 이후의 수질 및 수생태 현황 등의 비교를 통해 생태 건강도 변화를 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 이전의 조사된 자료를 포함한 문헌 자료(An *et al.*, 2012) 검토 및 2019년의 수질 측정, 어류 현장조사에 따른 종 분포 특성 및 어류 군집 분석하였다. 이를 통해 하천생태복원 전후(2016년 전/후)의 수질 및 어류 평가지수에 의한 하천 생태건강도 변화를 분석하였다. 또한, 수체의 목표종으로 피라미(*Zacco platypus*)를 이용하여 Adams *et al.*(1993)에 의해 제시된 매트릭을 기준으로 7개 매트릭을 선정하여 해부학적 건강도 평가(HAI)를 실시하였다.

연구방법

1. 조사지점 및 시기

본 연구대상 소하천은 대전광역시 유성구 우성이산 근처에서 발원하여 상류부에 덕진천이 합류되어 갑천으로 흘러나간다. 본 유역에는 일부 과수원, 논, 밭 등이 광범위하게 분포하고 또한 대규모 테크노밸리의 주거단지 영향을 받는 하천이다. 비교적 소규모의 하천으로서 유로 연장은 5.45km이며 유역면적

은 10.85km²이다. 본 연구를 위해 소유 역내의 상류에서 하류까지 총 3개 지점을 각각 선정하여 현장 수질을 측정하였고, 어류 현장조사, 군집모델에 기반을 둔 하천 생태 건강도 및 기관(Organ) 모델에 기반을 둔 해부학적 건강도 평가를 시행하였다. 조사지점의 세부 위치는 아래와 같다(Figure. 1).

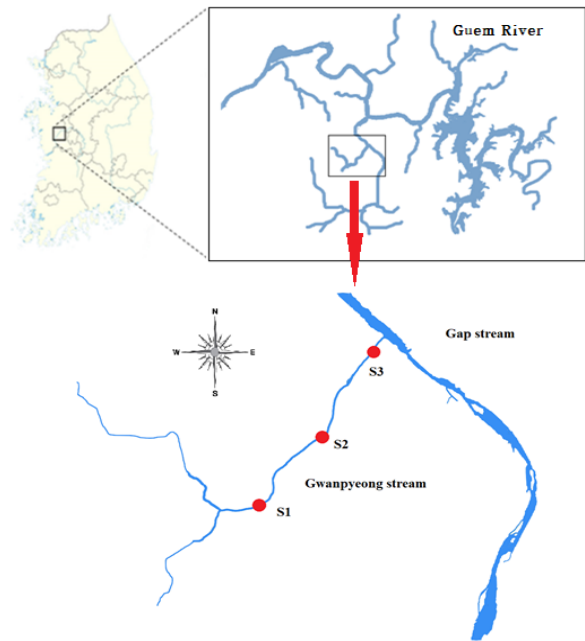


Figure 1. The map showing the sampling sites in the Gwanpyeong Stream, which is the tributary of Gap Stream.

- St. 1 : 대전시 유성구 관평동 동화교(1차 하천)
- St. 2 : 대전시 유성구 용산동 동화울교(1차 하천)
- St. 3 : 대전시 유성구 용산동 한들교(1차 하천)

본 연구에서 선정된 3개 지점은 모두 1차 하천으로서 하폭이 2~3m인 소하천이다. St. 1 지점은 좌측으로 산지와 인근에 과수원이 존재하며 하류 주변으로 농경지(논, 밭)가 형성되어 있다. 또한, 하천 주변으로는 인공 산책로가 조성되어 있다. 하상이 주로 모래와 진흙으로 구성되어 있으며 유속은 보통인 편이다. St. 2 지점은 주변에 대규모 테크노밸리 주거단지가 존재하며 하천 주변으로는 시민들이 산책할 수 있는 인공 산책로가 조성되어 있다. 하상의 대부분 모래로 이루어져 있으며 유속은 빠른 편이다. 이런 물리적 특성은 2016년 하천복원 공사를 통해 형성되었다. St. 3 지점은 갑천과 합류되기 직전 지점으로서 주변은 인공 산책로가 조성되어 있으며 하상 구조는 모래와 진흙으로 구성되어 있고 유속은 거의 정체된 편이다. 본 연구에서는 2009-2019년 기간 동안 본 유역의 상류, 중류,

하류의 구간에서 연 2회 현장조사(2009, 2010, 2016, 2019)를 실시하였다.

2. 이화학적 수질 측정

수질 자료는 현장에서 어류 조사와 동시에 다목적 수질 측정기(YSI 650 Mds + 6600Sonde, Pro Plus)를 이용하여 수온, 용존 산소량(Dissolved Oxygen, DO), 전기전도도(Electric Conductivity, EC), 수소이온농도(pH), 탁도(Turbidity) 5개 항목을 측정하였다. 또한, 각 지점에서 취수를 하여 실험실 내에서 클로로필 농도(Chlorophyll-a)를 분석하였다. 이는 어류를 이용한 하천 생태 건강도 지수와 비교를 위한 기초자료로 활용하였다.

3. 어류 현장조사

어류 현장조사는 환경부 생물측정망 조사 및 평가지침을 따랐다. 채집 도구로는 투망(망목 7×7mm), 족대(망목 4×4mm)를 이용하여 조사하였다. 채집한 어류는 현장에서 동정 후 바로 풀어주는 것을 원칙으로 하였고 해부를 위한 어류들은 부패를 막기 위해 얼음이 있는 아이스박스에 넣어 냉동상태로 보관 후 실험실에서 해부하였다. 채집된 어류의 개체수 산정은 어류 체장의 길이가 20mm 이하의 동정이 불가능한 치어의 경우는 제외하였다.

4. 어류 군집 분석

본 조사의 어류 군집 분석을 위해 각 조사지점에서 채집된 어종의 개체 수를 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.

5. 다변수 어류 평가지수 모델(FA)에 기반을 둔 하천 건강도 평가

어류를 이용한 하천 건강도 평가를 위해 다변수 평가모델인 어류 건강성 평가지수(Fish Assessment Index, FAI)를 이용하였고, 어류의 종 특성을 분석하였다. 어류의 내성등급은 오염도에 따라 민감종, 중간종, 그리고 내성종으로 구분하였다(U.S. EPA, 1993). 한편 영양단계는 잡식종(Omnivore species, O), 충식종(Insectivore species, I), 육식종(Carnivore species, C) 및 초식종(Herbivore species, H)으로 구분하였다. 본 연구에서는 Karr(1981)의 어류를 이용한 생물통합지수(Index of Biological Integrity, IBI)를 기반으로 개발되었으며 현재 환

경부에서 실시하고 있는 수생태계 건강성 조사의 어류 평가 매트릭에 의거하였다. 총 8개의 매트릭으로 구성되어 있으며, 종의 수, 개체수, 민감종의 수, 충식종의 비율, 잡식종의 비율, 내성종의 비율, 여울성 어종의 수, 비정상 개체의 비율이다. 본 조사에서 사용된 어류를 이용한 하천 생태 건강도 모델은 매트릭이 8개이며 계급 구간을 “12.5”, “6.25”, “0”으로 구분하여 이에 대한 최대 모델값은 $8 \times 12.5 = 100$ 점으로서 산정된다. 어류의 모델 평가 값은 최상상태(87.5-100), 양호상태(56.2-87.5), 보통상태(25.0-56.2), 불량상태(25.0 미만)로 구분하여 A, B, C, D의 4등급을 평가한다. 또한 과거 자료(2009, 2010, 2016년)를 분석하여 연도별 어류 평가지수에 의한 생태적 건강도를 비교 평가 하였다.

6. 해부학적 건강도 지수산정(Necropsy-based Health Assessment Index, HAI)

해부학적 건강도 HAI값 분석을 위해 목표종으로 피라미를 이용하였고, 채집 후 아이스박스에 냉동된 상태로 보관하여 실험실에서 해부학적 분석을 하였다. 비교 평가를 위하여 손상이 발견되지 않은 개체를 대조군(Control)으로 지정하고 지점별로 6개체씩 비교 분석하였다. 해부 과정 및 이상 유무 판별은 육안관찰에 의한 분석 및 디지털카메라에 의한 사진 촬영을 통해 수행되었다.

HAI 값 산정은 Adams *et al.*(1993)에 의하여 제시된 14개 매트릭 중 피부(Skin), 지느러미(Fin), 후장(Hindgut), 신장(Kidney), 간(Liver), 눈(Eye), 아가미(Gill)의 총 7개 매트릭을 채택하여 분석하였다. 모델값은 손상 정도의 차이를 두어 0은 정상상태를 의미하며 손상 정도에 따라 순차적으로 3, 9, 15점을 부여하였다. 최종 합산된 모델 값으로 각 지점의 해부학적 건강도를 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 이화학적 수질 특성

연구기간 동안 본 조사대상 하천의 6월에 측정된 평균 수온은 21.3 - 25.2℃로 어류 서식에 적정 수온이었으며, 용존산소(Dissolved oxygen, DO)의 경우 일반적으로 5mg L^{-1} 이하에서 어류의 건강성에 악영향을 미치는 수준으로 알려져 있으나(Dean and Richardson, 1999), 본 조사 기간에는 $7 - 8\text{mg L}^{-1}$ 수준으로 나타나 어류 서식에는 큰 제한요인으로 작용하지 않았다. 또한 전기전도도는 수체 내 이온 농도의 지표로서 $389 - 410\ \mu\text{S cm}^{-1}$ 범위로 나타나, 일반적인 상류의 맑은 하천($100-200\ \mu\text{S cm}^{-1}$ 내외)에 비해 비교적 높게 나타나, 하천

인근 주변의 논, 밭 등의 농경지 및 주거지 등의 영향을 받는 것으로 나타났다. 수소이온농도(pH)는 모든 지점에서 각각 7.45 - 7.58로 유사하게 나타났으며, 산성화는 일어나지 않은 것으로 평가되었다(Figure 2). 한편 관평천의 중류 지점(St. 2)에서는 용존산소(DO) 농도가 8.22mg L^{-1} 로 가장 높게 측정됐지만, 클로로필 농도(Chl-a)와 탁도(Turbidity)는 각각 1.9mg L^{-1} , 7.2 NTU로 다른 지점에 비해 가장 낮게 측정되었다. 이는 관평천 중류 지점의 하상 구조가 돌과 자갈로 구성되

어 있으며, 반복적으로 형성된 여울과 빠른 유속으로 인해 식물성 플랑크톤이 씻겨나가 클로로필과 탁도의 농도가 낮게 나타났다. 반면 상류 지점(St. 1)에서 클로로필 농도와 탁도가 높게 측정된 이유로는 유속이 아주 느리고, 적은 유량에 비해 주변 농경지 및 과수원 등에서 인(P), 질소(N)의 과다 공급에 의한 것으로 사료되었다.

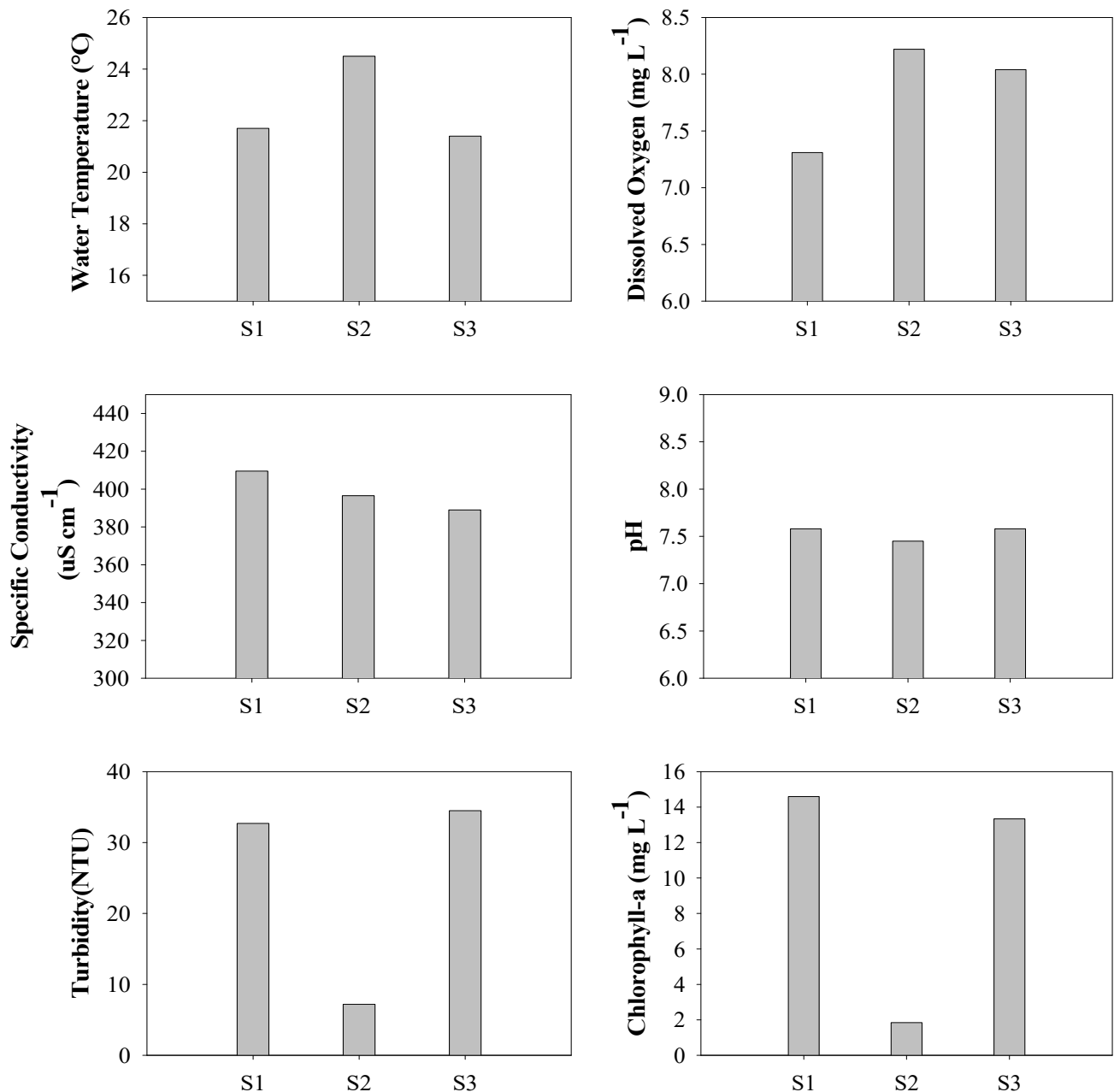


Figure 2. Physicochemical water quality in the stream.

2. 장기간 어류 종 조성 및 길드 특성 변동

본 연구가 수행된 10년 동안 모든 지점에서 채집된 어종은 18종 1,099개체로서 소하천 입에도 불구하고 다양한 어종이 출현한 것으로 나타났다(Table 1). 본 조사에서 우점종은 피라미 (40.6%), 아우점종은 붕어(*Carassius auratus*, 16.8%)로 나타났으며, 그 외에도 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*, 12.3%), 모래무지(*Pseudogobio esocinus*, 11.5%), 돌고기(*Pungtungia herzi*, 5.2%) 순으로 나타났다. 우점종인 피라미와 아우점종인 붕어의 내성, 섭식 길드는 각각 내성종(Tolerance sp.), 잡식종(Omnivore sp.)이다. 내성종과 잡식종의 우점은 대덕 테크노밸리 도심지역 개발에 따른 토사 및 퇴적물 그리고 이에 따른 하상 유기물이 많은 것으로 사료되었다. 다만 어류 종 분포 검토에 따르면, 하천복원사업을 한 2012년 후 조사된 2016년에는 우점종이 버들치, 아우점종이 돌고기로 우점종의 변화가 있었던 것으로 보인다. 또한, 붕어의 개체 수는 확연히 감소한 것을 알 수 있다. 버들치와 돌고기는 내성길드는 각각 민감종, 중간종이며 섭식특성은 충식종이다. 한편 여울성 저서종인 밀어(*Rhinogobius brunneus*)가 채집되는데, 이는 하천복원사업에 따라 관평천의 서식지와 수질이 회복된 것으로 보인다. 반면

2019년 조사한 결과 우점종은 다시 피라미로 아우점종은 버들치로 변화하였다. 내성종 및 잡식종인 피라미의 개체 수가 증가한 것으로 보아 관평천의 수질이 다시금 악화한 것으로 보인다.

일반적으로 하천 생태 건강성 및 어류 서식환경 좋지 않은 곳에서 주로 우점하는 내성종과 잡식종 비율의 연별 변화 분석은 하천의 부영양화 및 유기물 오염특성 파악에 중요한 지표로 활용된다. 본 연구기간 동안 연별 어류의 내성, 섭식 길드 분석 결과에 따르면, 내성종과 잡식종의 비율은 2009, 2010, 2019년에는 70~80%의 높은 비율이 나타났으나 2016년에는 약 20%로 4개 연도 중 가장 낮은 비율이 나타났다(Figure 3). 이와 반대로 민감종과 충식종의 비율은 2016년에 가장 높은 비율이 나타났으며 나머지 3개 연도에서는 낮은 비율이 나타났다. 이는 2009~2010년 도심개발에 따른 수질 악화의 이유로 내성종과 잡식종이 비율이 높았는데 2016년 하천복원사업 이후 수질이 개선됨으로써 내성종과 잡식종의 비율이 감소하고 민감종과 충식종의 비율이 증가한 것으로 보인다. 하지만 2019년 민감종과 충식종의 비율이 감소하고 내성종과 잡식종의 비율이 증가한 것으로 보아 수질이 다시 악화한 것으로 사료된다.

Table 1. Annual variations of fish fauna and compositions based on tolerance guild(ToL), trophic level(Tro) in the Gwanpyeong Stream 2009 – 2019

Species	ToL	Tro	2009				2010				2016				2019				Total	RA (%)	
			St.1	St.2	St.3	total	St.1	St.2	St.3	total	St.1	St.2	St.3	total	St.1	St.2	St.3	total			
<i>Zacco platypus</i>	TS	O	8	116	99	223	1	50	33	84	26	14	9	49	44	38	8	90	446	40.6	
<i>Carassius auratus</i>	TS	O	95	27	14	136	22	9	6	37	1		7	8	1		3	4	185	16.8	
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I		11	58	69		8	12	20	11	1	13	25	6	1	5	12	126	11.5	
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	O	18	2		20	7	2	4	13	2	3		5					38	3.5	
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	SS	I	11			11	11			11	33	54	9	96	1	16		17	135	12.3	
<i>Misgurnus mizolepis</i>	TS	O					10	1	4	15			1	1					16	1.5	
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O		1	4	5		2	8	10									15	1.4	
<i>Gnathopogon strigatus</i>	IS	I			3	3		1	4	5	9	6	2	17					25	2.3	
<i>Oryzias sinensis</i>	TS	O	2		5	7	2			2	1			1					10	0.9	
<i>Odontobutis interrupta</i>	IS	C						2	4	6	11	5	9	25	3	1		4	35	3.2	
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	IS	O							2	2	1			1					3	0.3	
<i>Rhodeus uyekii</i>	IS	O							1	1									1	0.1	
<i>Micropterus salmoides</i>	TS	C			1	1													1	0.1	
<i>Pungtungia herzi</i>	IS	I		1		1					15	6	29	50	6			6	57	5.2	
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I									2			2					2	0.2	
<i>Acanthorhodeus gracilis</i>	IS	O										1	1	2					2	0.2	
<i>Acheilognathus rhombeus</i>	IS	O											1	1					1	0.1	
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I															1	1	1	0.1	
Total Number of Species			5	6	7	10	6	8	10	12	11	9	9	14	6	4	4	7	18		
Total Number of Individuals			134	158	184	476	53	75	78	206	112	91	80	283	61	56	17	134	1099		

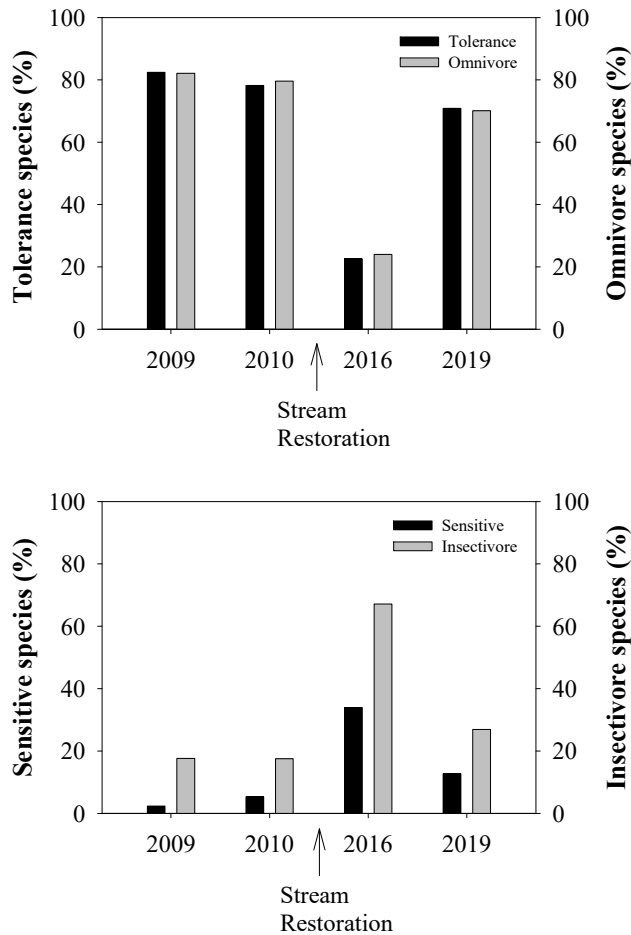


Figure 3. Annual variations of the relative proportions in tolerance and trophic guilds analysis of Gwanpyeong Stream.

3. 장기간 어류 군집 분석 변동성

지난 10년 동안 연별 어류군집 분석결과에 따르면, 종다양도 지수는 0.49-0.82, 종풍부도 지수는 1.23-2.3, 종균등도 지수는 0.25-0.33, 우점도 지수는 0.15-0.43으로 나타났다(Figure 4). 2019년의 경우 군집 우점도지수가 높아 상대적으로 종 균등도, 다양도 지수는 낮게 나타났다. 2019년 조사에서 채집된 어종은 총 7종 134개체로 다른 해에 비해 종수 및 개체 수가 현저히 줄었다. 또한, 우점종인 피라미가 90개체로 전체어종의 약 67%를 차지하고 있어 특정 종에 의한 매우 높은 우점현상을 보여 군집우점지수가 높고 종 다양도와 종균등도는 낮게 나타났다. 연도별로 군집 분석 특성은 2009년과 2019년, 2010년과 2016년이 서로 비슷한 양상이 나타나는 것으로 보인다. 2009년과 2019년은 종 다양도, 종 풍부도와 종 균등도가 낮고 2010년과 2016년은 높은 값이 나왔다. 반면 군집우점 지수는 2009년과 2019년에는 2010년과 2016년보다 높은 수치를 보였다.

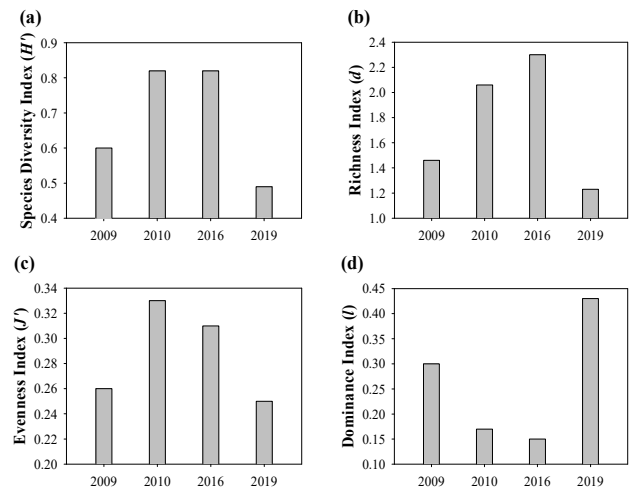


Figure 4. Annual variations of community analysis based on the species diversity index(H'), richness index(d), evenness index(J') and dominance index(I) in the sampling sites.

4. 어류 평가지수에 의한 생태적 건강도 평가

다변수 모델에 의한 어류생태 건강도 비교 평가에 따르면 총 종수와 개체 수 메트릭은 모든 해에 모델값이 12.5로 가장 높은 값이 부여되었다(Figure 5a, b). 이는 소하천인 관평천에 서식하는 어종이 다양하고 개체 수가 풍부한 것으로 평가되었다. 한편 민감종의 수 메트릭 모델값은 모든 해에 6.25가 부여되었다(Figure 5c). 본 연구 기간 동안 출현한 민감종은 버들치 1종이 유일하였으며, 특히 상류 지점에서 매해 출현하는 것으로 확인되었다. 한편 잡식종과 내성종 비율 메트릭 값에 따르면 2016년 조사결과만 유일하게 12.5점으로 만점으로 보이고, 다른 해에는 모두 0점으로 가장 낮은 값이 부여되었다(Figure 5e, f). 2016년 조사에 따르면 총 14종 283개체가 출현하여 다른 해에 비해 다양한 종이 나타났다. 우점종은 버들치, 아우점종은 돌고기로 내성도가 각각 민감종 중간종이며, 섭식도는 두 종 모두 충식성으로 내성, 섭식도 길드 측면에서 모두 건강한 종 구성을 보였다. 또한 밀어, 가시납자리 등 다른 해에 출현하지 않았던 종들이 채집되어 종다양성에도 긍정적인 영향을 미친 것으로 사료된다. 특히 상류 지점(St. 1)에서 확인한 밀어 2개체는 본 연구기간 중 출현한 유일한 어류성저서종으로 확인되었다(Figure 5g). 한편 비정상 개체 비율 메트릭은 관평천 복원사업 이전보다 복원사업 이후에 더 악화한 수치를 확인할 수 있었다(Figure 5h).

모든 항목의 모델 값을 종합한 결과 2009년과 2010년은 각각 31.25, 37.5으로 생태적 건강도는 “보통상태(C)”로 나타났다. 이후 2016년은 87.5로 생태적 건강도가 “최상상태(A)”로 나타났지만, 2019년의 모델 값이 50으로 대폭 감소하여

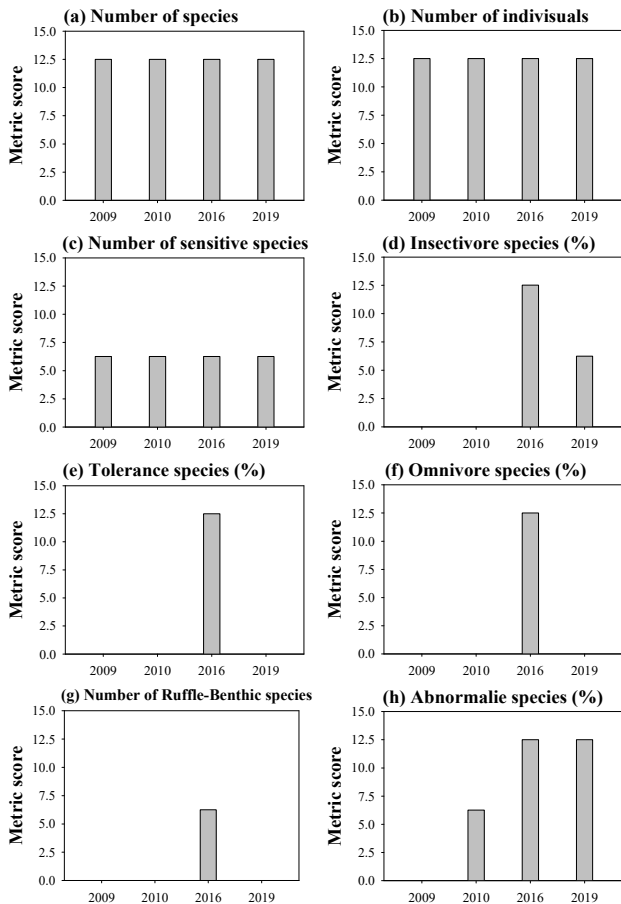


Figure 5. Annual variations of metric scores for fish assessment index(FAI)

생태 건강도가 “보통상태(C)”로 나타났다(Figure 6). 지점별 생태 건강도 비교 분석에 따르면 여울과 미소서식처가 발달한 중류 지점(St. 2)은 62.5로 “양호상태(B)”로 가장 높은 평가 지수를 보였다. 상류 지점(St. 1)은 50으로 “보통상태(C)”, 하류 지점(St. 3)은 43.8로 “보통상태(C)”의 생태 건강도로 진단되었다(Figure 6). 본 연구결과 도심지역 하천의 생태복원사업 결과 생태 건강도가 일시적으로 회복하지만, 이후 다양한 요인으로 인해 다시 복원사업 이전으로 돌아 간 것으로 나타났다. 따라서 하천복원 사업이후 지속적인 관리가 필요한 것으로 나타났다.

5. 해부학적 HAI(Health Assessment Index) 건강도 평가

본 연구에서는 기관에 기반을 둔 해부학적 건강도, HAI 분석을 위해 Adams *et al.*(1993)에 의하여 제시된 14개 매트릭 중 피부, 지느러미, 후장, 신장, 간, 눈, 아가미 총 7개 매트릭 모델 분석을 하였다(Figure 7). 외형적 손상이 없으며, 기관의

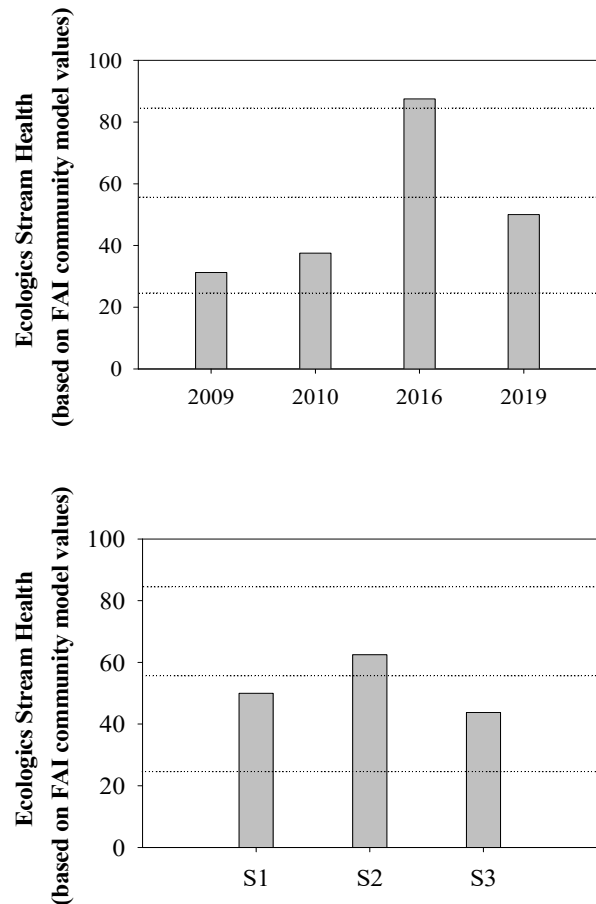


Figure 6. Temporal(year) and spatial(site) variations in the ecological stream health, based on fish assessment index(FAI) during the sampling periods(2009 - 2019).

비정상성이 관찰되지 않은 개체를 대조군(Reference)으로 지정하였고, 처리군(상류, 중류, 하류)은 각 지점의 채취 시료를 기반으로 하여 6개체씩 비교 분석하였다. 해부학적 건강도 모델(HAI) 값은 손상 정도의 차이를 두어 0은 정상상태를 의미하며 손상 정도에 따라 순차적으로 3, 9, 15 모델값을 부여하였다. 피부 매트릭에서 중류 지점과 하류 지점에서는 외형적으로 손상된 개체가 발견되지 않았다(Figure 7a). 반면, 상류 지점의 처리군 6(T6)에서는 여기저기 산재한 비늘의 벗겨짐 등의 손상이 발견되었다(Figure 8). 지느러미 매트릭, 후장 매트릭과 눈 매트릭에서는 상류, 중류, 하류 지점 모두 손상된 개체가 발견되지 않았다(Figure 7b, c, f). 이처럼 피부, 지느러미, 눈 매트릭에서 손상된 개체가 없거나 1개체만이 손상된 채로 발견된 것으로 보아 어류의 외형적인 부분의 손상을 일으킬 만한 물리적 화학적 요인은 거의 없을 것으로 평가되었다.

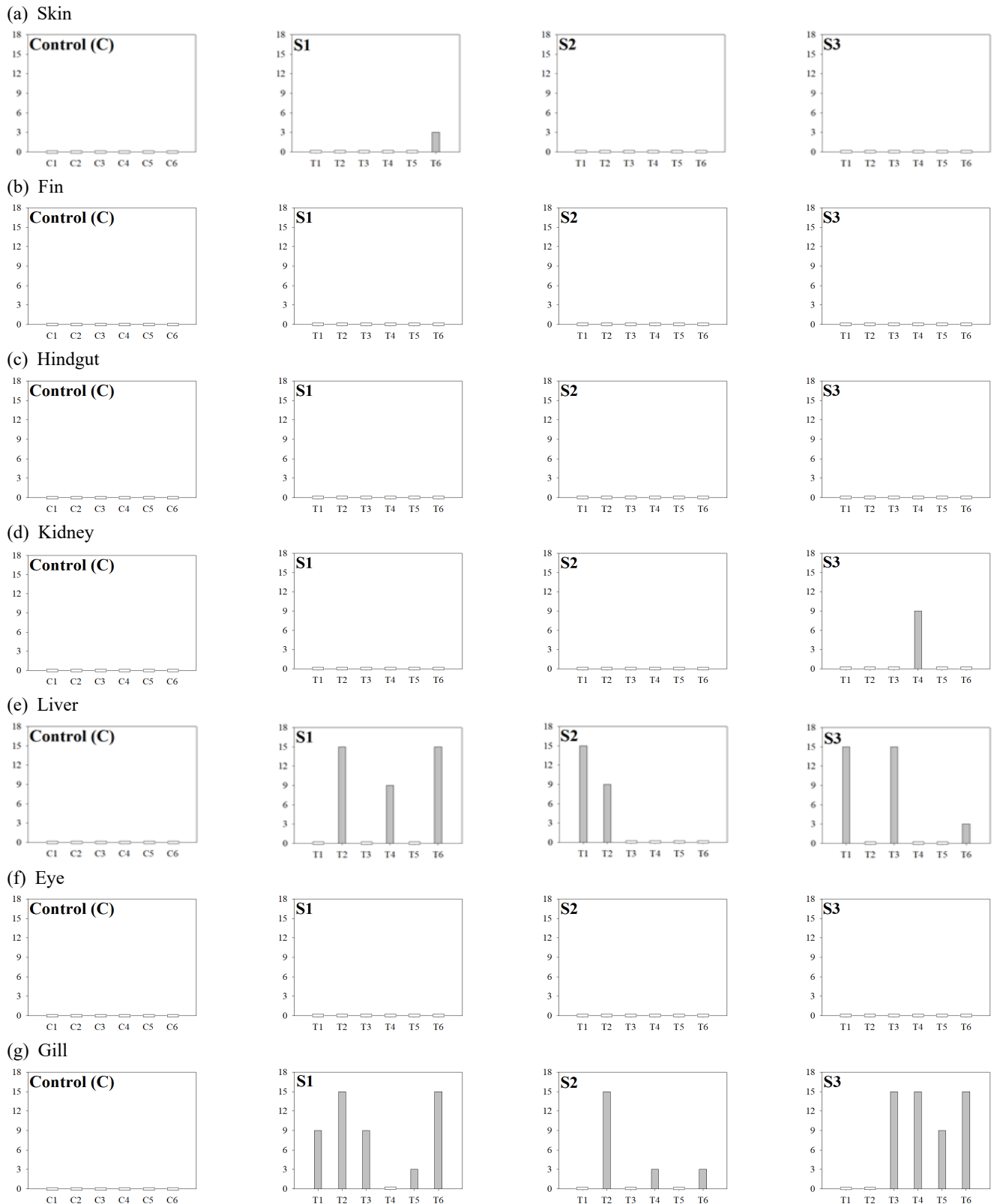


Figure 7. Metric evaluations for Necropsy-based health assessment index(HAI).

신장 매트릭에서 상류와 중류 지점에서는 비정상적인 신장을 가진 개체가 발견되지 않았으나, 하류 지점의 처리군 4(T4)에서는 비정상적인 개체가 관찰되었다(Figure 7d). 정상적인 개체의 신장은 진한 빨간색의 신장과 주위의 혈관이 선홍빛을 나타내는데, 하류 지점의 처리군 4(T4)에서는 신장과 주위의 혈관이 검은 자주 색(Pale dark purple)을 띠고 있다(Figure 8). 간(Liver)매트릭에서는 상류 지점에서 처리군 2, 4, 6(T2,

T4, T6), 중류 지점에서는 처리군 1, 2(T1, T2), 하류 지점에서는 처리군 1, 3, 6(T1, T3, T6)에서 비정상적인 간이 관찰되었다(Figure 7e). 정상적인 개체의 간은 선홍색을 띠지만 비정상적이라고 생각되는 개체들의 간은 색 바란 노란색(Pale yellow)을 띠거나, 짓무름 등이 보여 정상적인 간과는 다른 것으로 나타났다(Figure 8).

또한, 아가미(Gill) 매트릭에서도 St. 1 지점에서는 처리군




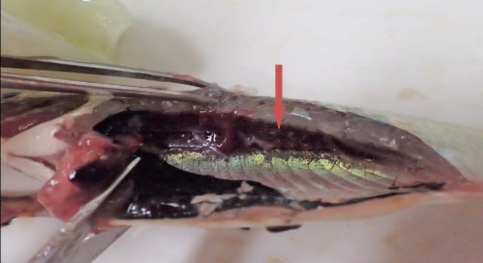
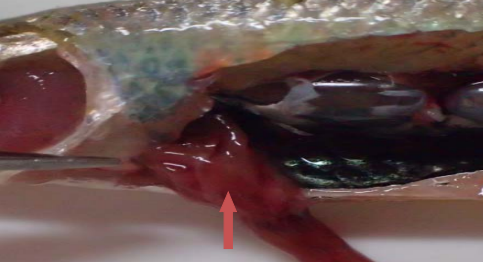

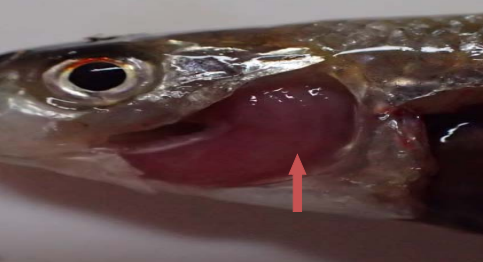

Fish organs Examined	Control(Reference site)	Sampling sites(S1-S3)
M1: Skin (aberrations)	 <p data-bbox="587 880 732 905">No abrasions</p>	 <p data-bbox="1123 880 1305 905">scatted abrasions</p>
M2: Kidney (color)	 <p data-bbox="611 1191 708 1216">Dark red</p>	 <p data-bbox="1153 1191 1283 1216">Dark violet</p>
M3: Liver (color)	 <p data-bbox="611 1502 708 1526">Light red</p>	 <p data-bbox="1145 1502 1291 1526">Paled yellow</p>
M4: Gill (color and structure)	 <p data-bbox="496 1813 828 1837">Dark red and normal structure</p>	 <p data-bbox="1031 1813 1406 1837">White red and abnormal structure</p>

Figure 8. The analysis of necropsy-based metrics using a target species of *Zacco platypus* : the controls(reference site) and treatments(sampling sites), based on the organs of skin, kidney, liver and gills.

1, 2, 3, 5, 6(T1, T2, T3, T5, T6), St. 2 지점에서는 처리군 2, 4, 6(T2, T4, T6), St. 3 지점에서는 처리군 3, 4, 5, 6(T3-T6)에서 비정상적인 모습이 관찰되어 간 매트릭과 동일하게 모든 지점에서 비정상적인 개체가 관찰되었다(Figure 7g). 정상적인 개체의 아가미는 짙은 붉은색을 띠며 매끄러운 표면을 가진 구조를 나타내는 데 반해 비정상적으로 관찰된 아가미들은 옅은 분홍색을 띠거나 아가미의 구조 변화가 관찰되었다(Figure 8). 모든 결과를 관찰한 결과, 어류의 외적인 부분의 손상 정도와 달리 내적인 부분의 손상이 훨씬 많이 관찰된 것으로 보아 관평천 내부에 어류의 내적인 손상을 일으키는 오염물질이 많이 포함된 것으로 나타나 보다 추가적인 실험과 분석이 필요한 것으로 사료된다.

상기 분석을 기반으로 상류, 중류, 하류의 HAI 매트릭 모델 값을 최종적으로 합산한 결과에 따르면, 상류에서 모델값은 93, St. 2 지점은 45점, St. 3 지점은 96점으로 St. 2 지점의 해부학적 건강도가 상대적으로 좋은 것으로 나타났다(Figure 9). 하지만 간과 아가미가 비정상적인 개체는 모든 지점에서 관찰되었으므로(Figure 7) 이에 따른 대책 마련과 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

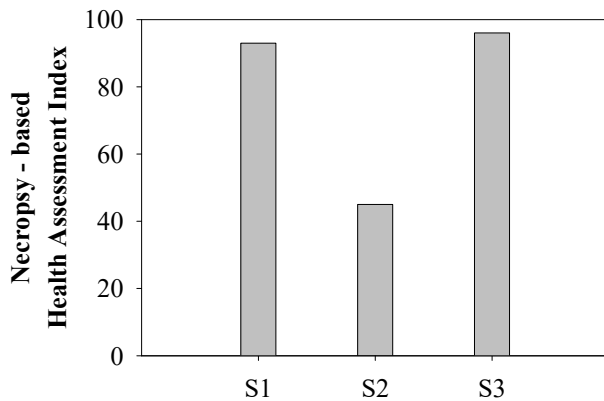


Figure 9. Ecological health using the necropsy-based health assessment index(HAI) in the stream.

REFERENCES

- Adams, S.M., A.M. Brown and R.W. Goede(1993) A quantitative health assessment index for rapid evaluation of fish condition in the field. *Transactions of the American Fisheries Society* 122: 63-73.
- An, G.K. and J.H. Han(2007) A development of multi-metric approach for ecological health assessments in lentic ecosystems. *Korean Journal of Limnology*. 40(1): 72-81.
- An, G.K., J.H. Han and J.H. Lee(2012) Environmental impact assessments along with construction of residential and commercial complex. *Journal of Environmental Impact Assessment* 21(5): 631-648.
- An, G.K., J.H. Kim, D.Y. Bae and J.Y. Lee(2006) Preliminary studies on the necropsy-based health assessment index (hai) using a ecological indicator species. *Journal of Limnology*. 39(1): 62-72.
- Dean, T.L. and J. Richardson(1999). Responses of seven species of native freshwater fish and a shrimp to low levels of dissolved oxygen. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 33(1): 99-106.
- Eitzmann, J.L. and C.P. Paukert(2010) Urbanization in a Great Plains river: Effects on fishes and food webs. *River Research and Applications* 26(8): 948-959.
- Elmore, A.J. and S.S. Kaushal(2008) Disappearing headwaters: Patterns of stream burial due to urbanization. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(6): 308-312.
- Karr, J.R.(1981). Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* 6(6): 21-27.
- Kim, I.J. and D.H. Han(2008) A small stream management plan to protect the aquatic ecosystem. *Korea Environment Institute Research Report*. Korea Environment Institute 2008: 1-149.
- Kondolf, G.M. and E.R. Micheli(1995) Evaluating stream restoration projects. *Environmental Management* 19(1): 1-15.
- Margalef, R.(1958) Information theory in ecology. *Generation System* 3: 36-71.
- Oberdorff, T., D. Pont, B. Hugueny and J.P. Porcher(2002) Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France. *Freshwater Biology* 47(9): 1720-1734.
- Pennino, M.J., S.S. Kaushal, J.J. Beaulieu, P.M. Mayer and C.P. Arango(2014). Effects of urban stream burial on nitrogen uptake and ecosystem metabolism: Implications for watershed nitrogen and carbon fluxes. *Biogeochemistry* 121(1): 247-269.
- Pielou, E.C.(1975) *Ecological diversity*. Wiley. New York. 165pp.
- Shannon, C.E. and W. Weaver(1949) *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Simpson, E.H.(1949) Measurement of diversity. *Nature* 163: 688.
- U.S. EPA.(1993) Environmental monitoring systems laboratory-cincinnati office of modeling, monitoring systems and quality assurance office of research development. U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268. EPA 600-R-92-111.
- U.S. EPA.(2002). Summary of biological assessment programs and biocriteria development for states, tribes, territories, and interstate commissions: Streams and wadeable rivers. EPA-822-R-02-048.
- Violin, C.R., P. Cada, E.B. Sudduth, B.A. Hassett, D.L. Penrose and E.S. Bernhardt(2011) Effects of urbanization and urban stream

- restoration on the physical and biological structure of stream ecosystems. *Ecological Applications* 21(6): 1932-1949.
- Walsh, C.J., A.H. Roy, J.W. Feminella, P.D. Cottingham, P.M. Groffman and R.P. Morgan(2005) The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society* 24(3): 706-723.
- Yadav, N.S., A. Kumar and M.P. Sharma(2014) Ecological health assessment of Chambal River using water quality parameters. *Journal of Integrated Science and Technology* 2(2): 52-56.
- Yoon, J.D., M.H. Jang, D.H. Oh and G.J. Joo(2007). The characterization of fish communities in urban streams of the Busan metropolitan city and suggestions of stream restoration. *Korean Journal of Ecology and Environment* 40(2): 303-317.