

# 자갈하천에서 서식처 교란이 어류 군집구조에 미치는 영향

## Effects of Habitat Disturbance on Fish Community Structure in a Gravel-Bed Stream, Korea

김석현<sup>1</sup> · 이완옥<sup>2</sup> · 조강현<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 생명과학과 석사과정

<sup>2</sup>국립수산과학원 중앙내수면연구소 연구관

<sup>3</sup>정회원, 인하대학교 생명과학과 교수

Kim, Seog Hyun<sup>1</sup>, Lee, Wan-Ok<sup>2</sup> and Cho, Kang-Hyun<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 402-751

<sup>2</sup>Inland Fisheries Research Institute, NFRDI, Gapyeong 477-815

<sup>3</sup>Member, Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 402-751

**ABSTRACT:** Fish assemblages play an integral role in stream ecosystem and are influenced by stream environmental conditions and habitat disturbances. Fish community structures and habitat parameters of U.S. EPA rapid bio-assessment protocol were surveyed to investigate the effect of stream environment and habitat disturbance on fish communities at 13 study sites in the Gapyeong Stream, a typical gravel-bed stream. Principal component analysis (PCA) based on data from habitat assessment at each study site indicated that the study sites were differentiated by habitat parameters such as embeddedness, velocity/depth regime and sediment deposition, which were related with bed slope. A total of 46 species belonging to 12 families were collected in the Gapyeong Stream. A dominant species was *Zacco koreanus*, subdominant species was *Z. platypus*. Hierarchical cluster analysis based on species abundance classified fish communities into the three main groups along the stream longitudinal change. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) portrayed that fish community structures were related to major habitat parameters, i.e., epifaunal substrate/available cover, embeddedness, velocity/depth regime, sediment deposition, channel alternation and frequency of riffles. These results suggested that fish community structures were primary affected by the longitudinal environmental changes, and those were modified by habitat disturbance in the Gapyeong Stream, a gravel-bed stream.

**KEYWORDS:** Bed slope, Bed structure, Disturbance, Fish community structure, Gravel-bed stream

**요 약:** 본 연구는 전형적인 자갈하천인 가평천에서 하천 환경과 서식처 교란이 어류 군집구조에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 13개 조사지점에서 미국 환경청의 간편 생물평가법을 적용하여 하천환경을 평가하고 어류 군집구조를 조사하였다. 하천환경 평가 자료를 이용하여 주요인분석을 실시한 결과, 하상 경사와 관계가 있는 하상 서식환경, 유속/수심 체제, 유사 퇴적이 주요한 평가항목으로 판별되었다. 가평천에서 출현한 어종은 12과 46종이었고, 우점종이 참갈겨니 (*Zacco koreanus*), 아우점종이 피라미 (*Z. platypus*)이었다. 종별 개체수 자료를 사용하여 계층적 군집분석의 결과, 조사지는 상류, 중류 및 하류의 세 개의 집단으로 구분되었다. 비모수다차원척도법 결과에 의하면, 어류는 하천환경 평가 항목 중 하상 서식환경, 하상 매물, 유속/수심 체제, 유사 퇴적, 하도 개수, 여울 빈도 항목과 유의한 상관관계가 있었다. 따라서 자갈하천인 가평천에서 어류 군집구조는 일차적으로 하상의 종적 환경 변화에 의하여 영향을 받고, 인위적 교란에 의하여 군집구조에 변화가 나타났다.

**키워드:** 교란, 어류 군집구조, 자갈 하천, 하상 경사, 하상 구조

\*Corresponding author: khcho@inha.ac.kr

## 서 론

하천 생태계에서 어류의 종다양성과 군집구조는 물리화학적 서식지 환경에 영향을 받기 때문에 (Poff et al., 1997; Taylor et al., 2006), 어류와 환경 사이의 관계를 규명하는 것이 하천 생태계의 보전과 관리에 필수적이다 (Wilhaber et al., 2000). 어류 군집구조에 영향을 미치는 물리 환경 요인으로서 유속, 수심, 하상 재질, 식생 등이 중요하다 (Gorman and Karr, 1978; Angermeier and Karr, 1983; Poff and Allan, 1995; Rowe et al., 2009), 이러한 물리적 서식지 환경은 고도와 하상 경사와 밀접한 관계를 가진다 (Maret et al., 1997). 수질로서 중요한 환경 요인은 수온, 용존산소, 부유물질, 영양소, 오염물질 등이 있다 (Lenat and Crawford, 1994; Meador and Goldstein, 2003). 이들 환경 요인은 개별적 또는 복합적으로 어류 군집구조에 영향을 미친다 (Jackson et al., 2001; Taylor et al., 2006).

하천에서 어류는 다양한 하천환경 요인에 반응하며 채집이 용이하기 때문에 하천 생태계의 건강성을 평가하는데 흔히 사용되고 있다 (Karr, 1981; Davis, 1995). 특히 하천환경의 주요 지표생물로서 활용이 가능한 어종을 대상으로 하천 생태계를 평가하는 시도가 이루어지고 있다 (FISRWG, 2001). 어류의 종다양성은 어류 서식처 다양성 및 복잡성에 의하여 결정되는데 (Gorman and Karr, 1978), 교란은 하천에서 서식지 변동을 유발하여 서식처의 단순화 및 수질 악화 등을 유발한다 (Karr, 1981). 이러한 결과 어류는 교란에 의해 변화된 하천의 서식처 다양성 및 하천환경의 안정성에 반응하여 종 다양성 감소, 종 수도 변화 등 어류 군집구조 변화를 보인다 (Shield et al., 1994; Diana et al., 2006).

본 연구의 조사지인 가평천은 경기도 가평읍과 북면에 위치한 지방하천이다. 가평천은 경기도 가평군 북면 적목리 도마치 고개에서 발원하며 해발 1,000m가 넘는 산에서 흘러드는 지류하천이 모여서 형성되는 하천이다. 또한 이 하천은 개곡천, 도마천, 백둔천, 승안천, 화악천 등이 합류하며 가평읍 읍내리에서 북한강 청평호로 흘러드는 다소 복잡한 하천구조를 보이고 있으나 대부분의 하천 구간의 하상이 돌로 이루어진 전형적인 자갈하천이었다 (K-

water, 2007).

가평천 어류상 및 어류 군집에 관한 연구로는 Hong (1991)이 25종, Nam (1997)이 47종의 채집을 기록하고 있으나 최근 가평천의 어류상 및 어류 군집에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 하천의 건강성을 평가할 때 어류뿐만 아니라 이들이 서식하는 환경을 동시에 평가함으로써 생태계의 건강성을 평가하는 시도 또한 이루어지고 있다. 특히, 미국 환경청이 개발한 간편 생물평가법 (RBP, rapid bio-assessment protocol) (Barbour et al., 1999)에 제공되는 서식지 평가법과 어류 조사를 병행하여 하천 환경과 교란에 따른 어류 군집 특성의 관계를 연구한 사례가 있다 (Pirhalla, 2004; Price and Birge, 2005).

따라서 본 연구에서는 자갈하천에서 하천의 물리적 환경과 교란에 따른 어류 군집구조의 변화를 밝히기 위하여, 가평천에서 (1) 어류를 채집하여 어류 군집구조의 특성을 밝히고 (2) 물리적 하천환경 평가법을 적용하여 서식지 환경을 평가하여 (3) 어류 군집구조와 서식지 환경 및 교란과의 관계를 밝히는데 그 목적이 있다.

## 본 론

### 재료 및 방법

#### 조사지 개황

어류 채집과 하천교란 평가를 위한 현장 조사는 경기도 가평군 가평천 수계에서 2010년 2월, 3월, 5월, 7월 및 8월에 총 5회 실시하였다. 가평천은 한강수계에 속하는 지방하천으로서 유로연장 39.3 km, 유역면적 305.4 km<sup>2</sup>이었다. 또한 이 하천의 평균고도는 해발 267 m이고 유역의 약 90%가 산림인 전형적인 산지 자갈하천이었다. 현장 조사지점로서 가평천의 본류와 지류에서 총 13개 조사지점 (St. 1 - St. 13)을 선정하였다 (Fig. 1). 가평천 본류에서 조사지점으로서 St. 2는 경기도 가평군 북면 적목리 (37°58'10.1" N, 127°25'38.8"E), St. 7은 도대리 (37°55'58.9" N, 127°29'18.2"E), St. 8은 제령리 (37°54'02.9" N, 127°31'03.7"E), St. 10은 목동리 (37°53'03.0" N, 127°32'46.3"E), St. 11은 이곡리 (37°52'14.4" N, 127°31'21.

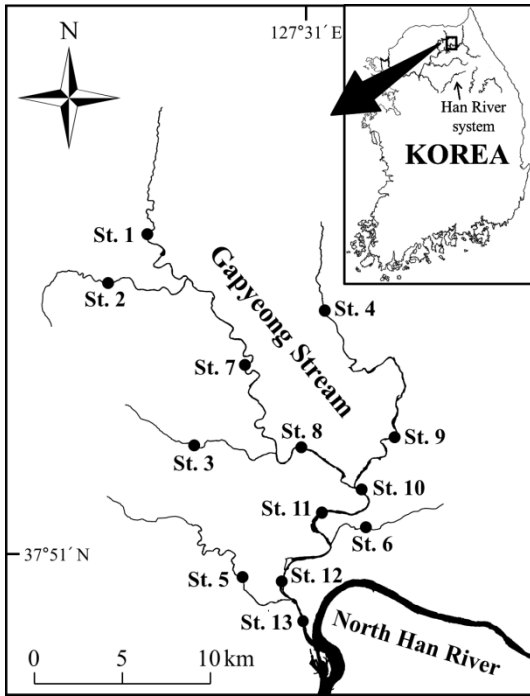


Fig. 1. Map showing the study area. The closed circles indicate the study sites of the Gapyeong Stream, Korea

1"E), St. 12는 가평읍 마장리 (37°50'46.2"N, 127°30'26.4"E), St. 13은 읍내리 (37°49'46.8"N, 127°31'04.7"E)에 위치하였다. 또한 지류에서는 조사지점 St. 1이 경기도 가평군 북면 적목리 도마천 (37°59'13.6"N, 127°26'14.3"E), St. 3이 백둔리 백둔천 (37°54'09.4"N, 127°27'37.2"E), St. 4가 화악리 화악천 (37°57'21.7"N, 127°31'42.0"E), St. 5가 가평읍 개곡리 개곡천 (37°52'06.3"N, 127°32'45.0"E), St. 6이 승안리 승안천 (37°50'49.7"N, 127°29'13.9"E), St. 9가 북면 목동리 화악천 (37°54'01.6"N, 127°33'35.2"E)에 위치하였다. 각 조사지점에서 수로를 따라서 100 m 또는 200 m의 하천 구간에서 어류를 채집하고 하천 환경을 평가하였다.

### 어류 채집

선정된 조사지점에서 어류를 정량 채집하기 위하여 1회 조사 시 투망 (망목 7×7 mm)을 15회 투척, 족대 (망목 5×5 mm) 30분 사용하여 채집하였다. 채집된 어류는 현장에서 동정하고 계수한 후에 방류하였다. 어류의 동정은 Kim and Park (2002)과 Kim

et al. (2005)을 사용하였고 분류체계는 Nelson (2006)을 참조하였다.

### 하천환경 평가

하천환경 평가는 어류를 채집한 조사지점에서 미국 환경청의 하천 표준 조사법 (Barbour et al., 1999)을 이용하여 실시하였다. 이 조사법에서 급경사 (high gradient) 하천의 평가기준을 사용하여 10개 평가 항목을 적용하였다. 각 조사지점의 하상경사는 어류 채집 지점을 중심으로 상하류 1 km에서 RIMGIS (2013)에서 제공하는 가평천 수계 하천기본계획을 참고하여 계산하였다.

### 자료 분석

하천 환경에 따른 조사지점 사이의 관계를 분석하기 위하여 R 환경 (ver. 2.14.0) (R Development Core Team, 2011)에서 Vegan package (Oksanen, 2011)의 'rda' 함수를 사용하여 주요인분석 (principal component analysis, PCA)을 실시하였다. 입력 자료는 조사지점별 하상경사와 하천환경 평가항목의 점수로 구성하였다. 환경 요인 중에서 하상경사는 'ordisurf' 함수를 사용하여 주요인분석 결과 그림에 등치선 (isocline)으로 나타내었다. 각 조사지점별 어류 군집의 종다양성을 분석하기 위하여, 종별 개체수를 사용하여 다양도 지수 (Shannon and Weaver, 1949), 균등도 지수 (Pielou, 1975) 및 풍부도 지수 (Margalef, 1958)를 산출하였다.

어류 군집구조에 따른 조사지점 사이의 관계를 분석하기 위하여 R 환경의 Vegan package 에서 'hclust' 함수를 사용하여 계층적 군집분석 (hierarchical cluster analysis)을 실시하였다. 전체 조사기간에서 채집된 어종별 총 개체수 (S)를  $\log(S+1)$ 로 전환하여 입력 자료로 사용하였으며, 거리의 산출은 Bray-Curtis (Bray and Curtis, 1957) 방식을 적용하였다. 군집분석에서 산출된 높이 수준 (height level)을 기준으로 각 조사지점간 유사거리를 Ward (Ward, 1963) 방식으로 분류하였다. 또한 조사지점별 관계를 서열법 (ordination)으로 분석하기 위하여 R 환경의 Vegan package에서 'metaMDS' 함수를 사용하여 비모수다차원척도법 (non-metric multidimensional scaling, NMDS) (Kru-

scal, 1964)을 적용하였다. 분석용 입력 자료는 한 조사지에서만 출현한 종은 제외하고 종별 개체수 (S)를  $\log(S+1)$ 로 전환하여 사용하였다. 조사지점 사이 거리는 Bray-Curits 방식으로 산출하였다. 비모수다차원적도법의 결과에서 상대수도가 0.5 %를 넘는 어종만 배열하였고, 조사지점의 계층적 군집분석 결과를 도식화하였다 (Field et al., 1982; Llopiz and Cowen, 2009). 어류 군집구조와 하천환경 사이의 관계는 Vegan package의 함수 ‘envfit’로 분석하여 유의한 관계에 있는 평가항목을 나타내었고, ‘ordisurf’ 함수를 사용하여 하상경사를 등치선으로 나타내었다.

## 결 과

### 하천환경 평가

가평천 수계에서 조사지점 St. 1 - St. 4는 상류 구간으로서 하천 폭이 좁고 유속이 빠른 여울과 수심이 깊지 않은 소 (pool)가 연속적으로 형성된 곳이었으며 하상은 전석과 호박돌로 구성된 곳이었다. 미국 환경청의 하천 표준 조사법 (Barbour et al., 1999)의 하천환경 평가항목 중 하상 서식환경 (ES), 하상 매물 (EB), 유사 퇴적 (SD)과 여울 빈도 (FR)는 이들 조사지점에서 높은 값을 가졌으나 유속/수심 체제

(VD)은 낮은 값을 보였다 (Table 1). 한편 조사지점 St. 1과 St. 3은 주변에 유원지가 위치하고 제방 경사가 급하여 식생 정착이 어렵기 때문에 식생 보호 (VP)과 하안림 폭 (RV)의 평가항목이 St. 2와 St. 4보다 낮았다. 조사지점 St. 5과 St. 6는 가평천의 지류 하천인 승안천과 개곡천으로서 주변이 제방 공사, 토지 개발 등으로 인하여 교란이 심한 곳이었다. 따라서 하도 개수에서 평가 점수가 낮았고 제방 공사에 의하여 식생이 파괴되어 식생 보호와 하안림 폭에서 점수가 낮았다. 특히 조사지점 St. 5는 지속적인 하천 공사로 인하여 흐름 상태에서 평가점수가 가장 낮았다.

조사지점 St. 7과 St. 8은 가평천의 중류에 위치한 곳으로서 여울 구간과 보에 의해 형성된 정수 구간이 반복적으로 나타나는 곳이었다. 두 조사지점의 주변에는 유원지가 많았고 콘크리트 호안이 축조되어 있어서 하도 개수, 식생 보호 및 하안림 폭에서 평가점수가 낮았다 (Table 1).

조사지점 St. 9 - St. 13은 가평천의 중-하류에 위치한 조사지점으로서 보에 의한 정수 구간과 규모가 큰 여울 구간이 연속적으로 형성된 곳이었다. 특히 보 상류의 정수 구간에서 유사퇴적이 진행되었고 하상재료가 세립사로 매몰된 곳이 많아서 하상 서식환

**Table 1.** Scores of habitat parameters evaluated by the rapid bio-assessment protocol and bed slope at each study site of the Gapyeong Stream

| Habitat parameter*<br>(abbreviation)            | Study site |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|   | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         | 11         | 12         | 13         |
| 1. Epifaunal substrate/<br>available cover (ES) | 19         | 20         | 17         | 18         | 13         | 12         | 13         | 14         | 12         | 14         | 13         | 12         | 14         |
| 2. Embeddedness (EB)                            | 20         | 20         | 20         | 20         | 16         | 14         | 13         | 15         | 10         | 9          | 13         | 8          | 11         |
| 3. Velocity/depth regime (VD)                   | 6          | 8          | 8          | 7          | 10         | 8          | 14         | 15         | 14         | 16         | 18         | 19         | 17         |
| 4. Sediment deposition (SD)                     | 20         | 20         | 20         | 20         | 16         | 17         | 18         | 17         | 13         | 10         | 14         | 9          | 14         |
| 5. Channel flow status (CF)                     | 13         | 11         | 12         | 13         | 13         | 7          | 14         | 16         | 13         | 14         | 13         | 12         | 13         |
| 6. Channel alternation (CA)                     | 17         | 20         | 16         | 18         | 4          | 5          | 10         | 10         | 9          | 11         | 18         | 12         | 17         |
| 7. Frequency of riffle (FR)                     | 19         | 20         | 17         | 20         | 14         | 12         | 16         | 15         | 11         | 16         | 14         | 13         | 15         |
| 8. Bank stability (BS)                          | 17         | 19         | 17         | 19         | 12         | 15         | 14         | 13         | 15         | 14         | 20         | 19         | 17         |
| 9. Vegetation protection (VP)                   | 11         | 12         | 9          | 15         | 3          | 11         | 6          | 10         | 11         | 9          | 9          | 17         | 9          |
| 10. Riparian vegetation zone<br>width (RV)      | 8          | 13         | 6          | 11         | 3          | 2          | 8          | 7          | 10         | 9          | 8          | 13         | 8          |
| <b>Total score</b>                              | <b>150</b> | <b>163</b> | <b>142</b> | <b>161</b> | <b>104</b> | <b>103</b> | <b>126</b> | <b>132</b> | <b>118</b> | <b>122</b> | <b>140</b> | <b>134</b> | <b>135</b> |
| Bed slope (SLP)                                 | 1/57       | 1/72       | 1/39       | 1/27       | 1/42       | 1/49       | 1/104      | 1/182      | 1/131      | 1/234      | 1/360      | 1/637      | 1/797      |

\* The score range of each parameter is 1 to 20.

경, 하상 매물, 유사 퇴적에서 낮은 평가를 받았다 (Table 1). 반면 정수 구간과 여울 구간이 잘 발달하여 유속/수심 상황은 높게 평가되었다. 이중 화악천 하류인 조사지점 St. 9과 화악천과 가평천이 합류하는 St. 10에서는 콘크리트 또는 돌망태 호안으로 식생이 발달하지 않았고 특히 보와 콘크리트 호안 주변에 침식이 진행되어 제방 안정 (BS)의 평가점수가 낮았다. 조사지점 St. 11 - St. 13은 가평천 하류로서 식생이 잘 발달되어서 식생 보호와 하안림 폭에서 높은 평가를 받았다.

### 하천환경과 조사지점의 관계

가평천의 조사지점별 하천환경 평가항목 값을 이용한 주요인분석에서 1축과 2축의 고유값은 각각 4.64 및 2.83으로서 두 축이 전체 변이의 74.7 %를 설명하였다 (Fig. 2). 평가항목에 따른 조사지점의 배열을 살펴보면, 조사지점 St. 1 - St. 4가 1 축을 중심으로 좌측에 배열되었는데, 2축을 중심으로 St. 1과 St. 3이 위쪽으로 배열된 반면 St. 2와 St. 4는 아래쪽으로 배열되었다. 또한 조사지점 St. 5 - St. 8은 우측 상단에 배열되었는데, 이중에서 St. 5와 St. 6은 St. 7과 St. 8보다 위쪽에 배열되었다. 조사지점 St. 9 -

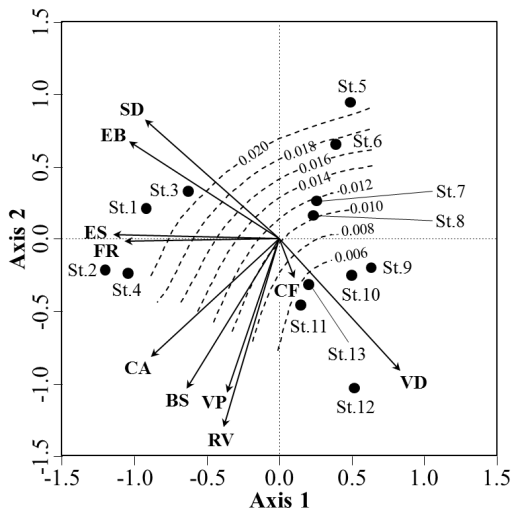
St. 13은 우측 하단에 배열되었으며 특히 St. 12는 가장 아래쪽에 배열되었다.

주요인분석 결과에서 하천환경 평가항목의 배열을 살펴보면, 하상 퇴적 (SD)과 하상 매물 (EB)가 왼쪽 상단에 위치하였고 이와 반대 방향에 유속/수심 체제 (VD)가 위치하였다 (Fig. 2). 또한 하상경사 (Fig. 2에서 등치선으로 표시)도 왼쪽 위로 갈수록 급하여 이곳이 하천의 상류 쪽임을 나타내었다. 하상 서식환경 (ES)과 여울 빈도 (FR)가 서로 가까이 왼쪽 중앙에 위치하였다. 한편 하도 개수 (CA), 제방 안정 (BS), 식생 보호 (VP) 및 하안림 폭 (RV)이 서로 가까이 중앙 왼쪽 하단에 위치하였다.

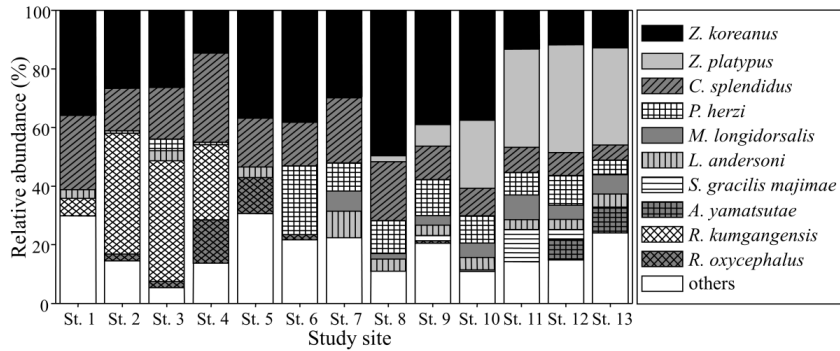
조사지점과 하천환경 평가항목의 관계를 살펴보면, 하상 경사가 급한 상류의 조사지점 St. 1 - St. 4에서 하상 서식환경, 여울 빈도, 하상 매물 및 유사 퇴적의 점수가 높았고 유속/수심 체제 (VD)의 평가가 나쁘게 나타났다 (Fig. 2). 하상 경사가 중간 이상으로 급한 중상류의 조사지점 St. 5 - St. 8에서 하도 개수, 제방 안정, 식생 보호 및 하안림 폭에서 낮은 평가를 받아 이들 장소에서 교란이 비교적 심한 것으로 판단되었다. 하상 경사가 낮은 하류의 조사지점 St. 9 - St. 13은 유속/수심 체제에서는 우수하나 하상 서식환경, 하상 매물, 유사 퇴적 및 여울 빈도 항목에서 낮은 평가를 받았다. 그러므로 가평천에서 조사지점의 하천 환경은 일차적으로 상하류의 종적 변화에 영향을 받고 이차적으로 인위적인 하천 교란에 영향을 받고 있었다.

### 어류 군집구조

가평천 전체 조사지점에서 채집된 어류는 총 12과 46종이었다 (Appendix). 가평천에서 우점종은 참갈겨니 (*Zacco koreanus*)로서 상류부터 하류까지 모든 조사지점에서 발견되었고, 아우점종은 피라미 (*Z. platypus*)로서 주로 중 하류에 집중적으로 출현하였다 (Fig. 3). 이 다음으로는 쉬리 (*Coreoleuciscus splendidus*), 돌고기 (*Pungtungia herzi*), 배가사리 (*Microphysogobio longidorsalis*), 통가리 (*Liobagrus andersoni*)의 순으로 많이 출현하였다. 가평천의 상류에 속하는 조사지점 St. 1 - St. 4에서는 다른 조사지점보다 적은 7 ~ 8종의 어류가 출현하였고 주로 참갈겨니, 금강모치 (*Rhynchocypris kumgangensis*), 쉬리가 우세하였다 (Fig. 3). 지류하천인 조사지점 St. 5와



**Fig. 2.** Ordination biplot derived from the first two axes of principal component analysis (PCA) of the parameters of habitat assessment at each study site. Eigen values of both axes are 4.643 and 2.828, explained 74.71 % of total variation. The dotted line indicates the isocline of bed slope. Abbreviations of habitat parameters are provided in Table 1



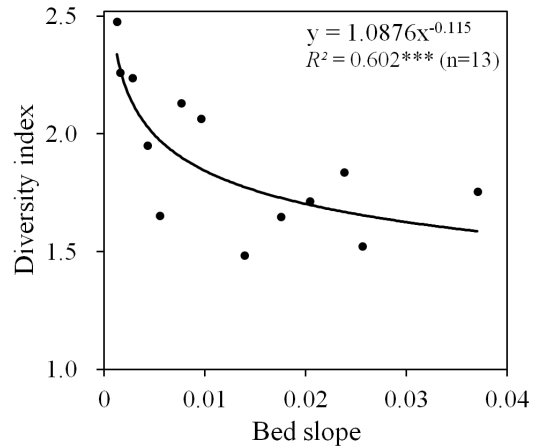
**Fig. 3.** Relative abundance of major collected fishes at each study site in the Gapyeong Stream from February to August 2010

**Table 2.** Indices of diversity, richness and evenness of fish species at each study site of the Gapyeong Stream, Korea

| Indices   | Study site |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|           | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
| Diversity | 1.65       | 1.48 | 1.52 | 1.76 | 1.84 | 1.71 | 2.07 | 1.65 | 2.13 | 1.95 | 2.24 | 2.26 | 2.48 |
| Richness  | 1.67       | 1.25 | 1.40 | 1.92 | 1.34 | 1.69 | 2.25 | 2.22 | 2.92 | 2.96 | 3.16 | 3.22 | 4.91 |
| Evenness  | 0.79       | 0.76 | 0.73 | 0.76 | 0.84 | 0.80 | 0.78 | 0.61 | 0.74 | 0.64 | 0.71 | 0.73 | 0.67 |

St. 6에서는 출현종수가 9종이었고 우점종이 참갈겨니였고, St. 5에서는 쉬리와 버들치 (*R. oxycephalus*), St. 6에서는 돌고기와 쉬리가 많았다. 가평천의 중·상류에 위치한 조사지점 St. 7과 St. 8에서 14 ~ 15종이 출현하였고 참갈겨니가 우점종이었으며, 쉬리, 돌고기, 배가사리, 통가리 등이 많았다. 지류하천인 화악천에 위치한 조사지점 St. 9에서는 18종이 채집되었고, 참갈겨니가 우점하였으며 돌고기, 쉬리 순으로 우세하였다. 중·하류에 위치한 조사지점 St. 10 - St. 12에서는 21 ~ 23종이 출현하였고, St. 10에서는 참갈겨니가 우점종이고 피라미가 아우점종이었으나 St. 11과 St. 12에서는 피라미가 우점종이었고 참갈겨니가 아우점종이었다. 가평천의 최하류 조사지점인 St. 13에서는 36종이 출현하여 어류상이 가장 다양하였다. 이곳에서는 피라미가 우점종이었고 참갈겨니가 아우점종이었으며 줄납자루 (*Acheilognathus yamatsutae*), 배가사리, 쉬리, 돌고기 순으로 우세하였다.

가평천에서 어류의 종다양도 지수는 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 경향을 보였는데, 조사지점 St. 2에서 1.48로서 가장 낮았으며 St. 13에서 2.48로서 가장 높았다 (Table 2). 이러한 경향은 하천의 종적 변화를 나타내는 하상 경사와 종다양성 관계에서 두



**Fig. 4.** Relationship between bed slope and species diversity index of fishes in the Gapyeong Stream (\*\*\*)  $P < 0.001$

변수 사이에 역의 관계에서도 확인할 수 있었다 (Fig. 4). 한편 종다양도의 구성요소인 종풍부도와 종균등도 중에서 종풍부도는 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 경향을 보였으며 종균등도는 큰 변화가 없었다. 그러므로 가평천에서 어류의 종다양성은 대체로 하상경사에 의하여 결정되는 것으로 판단되었다.

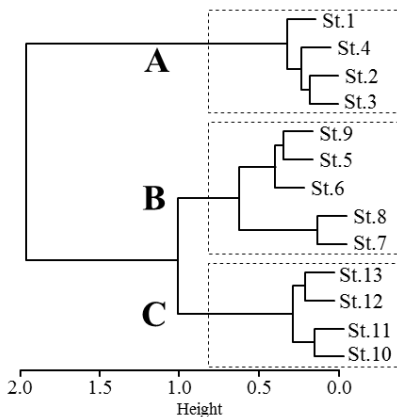
가평천에서 어류의 종별 수도를 사용한 계층적 군집분석에서 높이 수준 (height level) 0.83을 기준으

로 A 집단 (St. 1 - St. 4), B 집단 (St. 5 - St. 9) 및 C 집단 (St. 10 - St. 13)의 3개 집단으로 구분되었다 (Fig. 5). 이중에서 B 집단과 C 집단이 A 집단보다 더 가까웠다.

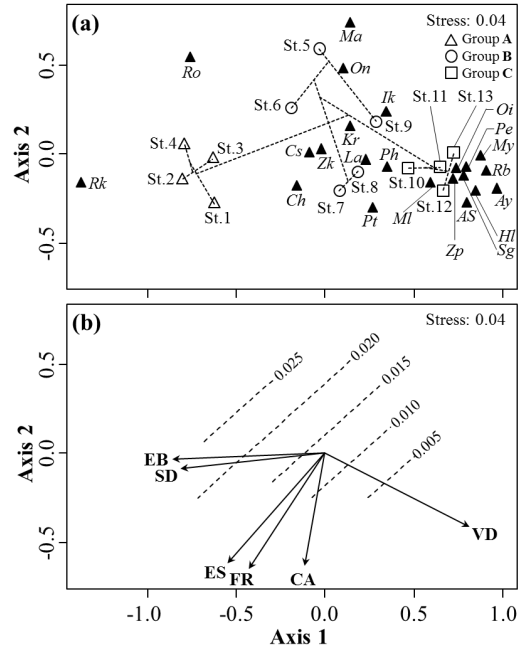
가평천에서 조사지점별 어류 군집구조를 비모수 다차원척도법 (NMDS)으로 2차원으로 분석했을 때 왜곡도를 나타내는 스트레스 (stress) 함수 값이 0.04로서 분석 결과의 설명력이 높았다 (Kruskal, 1964) (Fig. 6). 조사지점의 배열에서 계층적 군집분석에서 구분된 A 집단이 좌측에, B 집단이 중앙에 배열되는데, 조사지점 St. 5와 St. 6은 B 집단의 다른 조사지점과 달리 상단에 배열되었다. 또한 C 집단은 우측에 배열되었으며 B 집단의 St. 7 - St. 9와 가깝게 배열되었다.

비모수다차원척도법 (NMDS)에서 종의 배열은 최상류에 서식하는 금강모치 (Rk)가 오른쪽에 동떨어져 가평천의 상류인 A 집단에 가까이 배열되어 있었고, 버들치 (Ro)는 A 집단과 B 집단의 St. 5와 St. 6와 가까이 위치하였다 (Fig. 6). B 집단 중 St. 5 주변에 배열된 어류는 대륙종개 (*Orthrias nudus*, On)와 미꾸리 (*Misgurnus anguillicaudatus*, Ma)이었다. 조사지점 St. 6 - 9 주변에 위치한 어류는 쉬리 (Cs), 참갈겨니 (Zk), 참중개 (*Iksookimia koreensis*, Ik), 새코미꾸리 (*Koreocobitis rotundicaudata*, kr), 통가리 (La), 꺾지 (*Coreoperca herzi*, Ch) 등 이었는데, 이들 어종은 대부분의 조사지점에 출현하는 흔한 어류

이었다. B 집단과 C 집단 중간에 배열된 어류는 돌고기 (Ph)와 가는돌고기 (*Pseudopungtungia tenuicarpa*, Pt)로서 가평천의 중·하류에 주로 출현하는 어종이었다. 묵납자루 (*Acheilognathus signifier*, As), 줄납자루 (Ay), 긴물개 (*Squalidus gracilis majimae*, Sg), 참마자 (*Hemibarbus longirostris*, Hl), 모래무지 (*Pseudogobio esocinus*, Pe), 돌마자 (*Microphysogobio yaluensis*, My), 배가사리 (Ml), 얼룩동사리 (*Odon-*



**Fig. 5.** Dendrogram for the hierarchical cluster analysis based on the fish communities collected at the study sites of the Gapyeong Stream. The dotted rectangle indicates differentiated three groups by height level of 0.83



**Fig. 6.** Ordination biplot of non-metric multidimensional scaling (NMDS) based on the fish communities collected at the study sites of the Gapyeong Stream. The stress value of NMDS explains goodness of fit. (a) Different symbols of study sites indicate three groups of study sites and dotted line indicates cluster dendrogram resulted from hierarchical cluster analysis in Fig. 5. (b) The angles and lengths of the radiating arrows indicate the direction and strength of relationships of habitat parameters with the ordination scores and the dotted line indicates the isocline of bed slope. Habitat parameter abbreviations are provided in Table 1. (As, *Acheilognathus signifier*; Ay, *A. yamatsutae*; Ch, *Coreoperca herzi*; Cs, *Coreoleuciscus splendidus*; Hl, *Hemibarbus longirostris*; Ik, *Iksookimia koreensis*; Kr, *Koreocobitis rotundicaudata*; La, *Liobagrus andersoni*; Ma, *Misgurnus anguillicaudatus*; Ml, *Microphysogobio longidorsalis*; My, *M. yaluensis*; Oi, *Odontobutis interrupta*; On, *Orthrias nudus*; Pe, *Pseudogobio esocinus*; Ph, *Pungtungia herzi*; Pt, *Pseudopungtungia tenuicarpa*; Rb, *Rhinogobius brunneus*; Rk, *Rhynchocypris kumgangensis*; Ro, *R. oxycephalus*; Sg, *Squalidus gracilis majimae*; Zk, *Zacco koreanus*; Zp, *Z. platypus*)

*tobutis interrupta*, *Oi*), 밀어 (*Rhinogobius brunneus*, *Rb*) 등은 C 집단인 St. 10 - St. 13 주변으로 배열되었는데, 이들은 주로 하천의 본류 정수 구간이나 여울 구간에 서식하는 어종이었다.

### 어류 군집과 하천환경의 관계

가평천에서 비모수다차원척도법 결과와 유의한 상관관계를 가지는 하천환경 평가항목은 하상 서식환경 (ES) ( $r^2=0.790$ ,  $P=0.0006$ , 1,000번 치환에 기초), 하상 매물 (EB) ( $r^2=0.843$ ,  $P=0.0002$ ), 유속/수심 체제 (VD) ( $r^2=0.933$ ,  $P=0.0002$ ), 유사 퇴적 (SD) ( $r^2=0.763$ ,  $P=0.0009$ ), 하도 개수 (CA) ( $r^2=0.497$ ,  $P=0.0317$ )와 여울 빈도 (RF) ( $r^2=0.697$ ,  $P=0.0026$ )이었다 (Table 3). 이들 중에서 하상 매물과 유사 퇴적 항목은 비모수다차원척도법의 2차원 배열에서 좌측으로 양의 상관관계를 보였고 A 집단 조사지점과 금강모치 (*Rk*)와 버들치 (*Ro*)와 가까이 위치하였다 (Fig. 6). 이와는 반대로 유속/수심 체제는 우측으로 위치하여 C 집단 조사지점과 이곳에서 주로 서식하는 묵납자루 (*As*), 줄납자루 (*Ay*), 긴물개 (*Sg*), 참마자 (*Hl*), 모래무지 (*Pe*), 돌마자 (*My*), 배가사리 (*Ml*), 피라미 (*Zp*), 밀어 (*Rb*) 등과 가까이 위치하였다. 하상 서식환경 (ES), 하도 개수 (CA)와 여울 빈도 (FR)는 하단으로 배열되었으며, 이들과 음의 상관관계를 갖는 어종은 대륙종개 (*On*), 미꾸리 (*Ma*) 등 이었다. 이상의 결과를 종합하면, 하상 경사가 급한 가평천 상

류에서 하상 매물도가 낮고 유사 퇴적이 적으나 흐름의 다양성이 떨어지는 하천 환경에서 금강모치, 버들치 등이 출현하였으며, 이와는 반대로 하상이 매물되고 유사 퇴적이 심하나 흐름의 다양성이 큰 하류에서는 다양한 어종이 출현하였다. 가평천의 중류에서는 상류와 하류의 물리적 하천환경의 중간적인 특성을 보이고 있었으며 특히 이곳에서는 하천의 개수에 따라서 조사지점이 배열되었다. 이 중 하도 개수가 심하지 않은 곳에 쉬리 (*Cs*), 참갈겨니 (*Zk*), 새코미꾸리 (*kr*), 통가리 (*La*), 꺾지 (*Ch*) 등이 출현하였고, 하도 개수가 심하게 되어 있고 하상 서식환경이 좋지 않고 여울 빈도가 낮은 곳에 미꾸리, 대륙종개 등이 서식하였다.

### 결론

하천에서 어류 군집은 다양한 환경 중에서 물리적 환경에 큰 영향을 받는다 (Wang et al., 2003; Rowe et al., 2009). 특히 하상 재료, 정수와 여울 구간의 발달, 유량의 안정성 등은 어류 다양성과 깊은 관계를 가진다 (Gorman and Karr, 1978; Milner et al., 1985). 한편 하천에서 인간에 의한 교란은 제방 공사, 하도 개수, 경작, 수질오염 등의 다양한 형태로 발생한다 (Paller et al., 2000; Allan, 2004; Diana et al., 2006). 이러한 교란은 하천 환경을 변화시키고, 서식

**Table 3.** The direction of biplot-fitted vectors of habitat parameters in non-metric multidimensional scaling (NMDS), squared correlation coefficients ( $r^2$ ) and significant levels ( $P$ ) by permutation tests

| Habitat parameter (abbreviation)         | Vectors |        | $r^2$ | $P$       |
|--|---------|--------|-------|-----------|
|  | Axis 1  | Axis 2 |       |           |
| Epifaunal substrate/available cover (ES) | -0.647  | -0.763 | 0.790 | 0.0006*** |
| Embeddedness (EB)                        | -0.996  | -0.084 | 0.843 | 0.0002*** |
| Velocity/depth regime (VD)               | 0.914   | -0.404 | 0.933 | 0.0002*** |
| Sediment deposition (SD)                 | -0.983  | -0.186 | 0.763 | 0.0009*** |
| Channel flow status (CF)                 | 0.415   | -0.909 | 0.139 | 0.4619    |
| Channel alternation (CA)                 | -0.169  | -0.985 | 0.497 | 0.0317*   |
| Frequency of riffle (FR)                 | -0.542  | -0.840 | 0.697 | 0.0026**  |
| Bank stability (BS)                      | -0.112  | -0.993 | 0.248 | 0.2353    |
| Vegetation protection (VP)               | -0.101  | -0.994 | 0.218 | 0.2951    |
| Riparian vegetation zone width (RV)      | 0.016   | -0.999 | 0.356 | 0.1134    |

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$



처의 공간과 안정성을 훼손하여 어류 다양성을 감소시킨다 (Shields et al., 1994; Diana et al., 2006). 어류는 하천환경의 변화에 즉각적으로 반응하기 때문에 어류를 사용한 하천생태계 평가가 이루어지고 있다 (FISRWG, 2001). 또한 어류뿐만 아니라 이들의 서식 환경을 동시에 조사함으로써 생태계 건강성을 평가하려는 시도가 이루어지고 있다. 특히, 미국 환경청의 하천 표준 조사법 (Barbour et al., 1999)에 의한 하천환경 평가와 어류조사를 병행하여 하천교란을 연구한 사례로는, 미국 켄터키 소하천에서 고속도로 공사에 의한 하천 교란을 평가한 사례 (Price and Wesley, 2005)와 미국 메릴랜드에서 어류의 건강성과 하천의 환경을 광범위하게 평가한 사례 (Pirhalla, 2004)가 있다. 또한 다양한 환경 요인과 더불어 하천 표준 조사법 중 일부 항목을 적용하여 어류의 기능적 특성 (functional trait)과 서식환경의 관계를 연구한 사례가 있다 (Pease et al., 2012).

본 연구에서는 전형적인 자갈하천인 가평천에서 상류부터 하류까지 총 13개 조사지점을 선정하여 하천환경과 인위적 교란이 어류 군집에 미치는 영향을 조사하였는데, 다양한 하천환경 평가항목이 어류 군집구조의 특성과 관계가 있었다. 전석과 호박돌 등의 하상 입자 크기가 큰 상류인 조사지점 St. 1 - St. 4는 평가항목 중 하상 서식환경, 하상 매물, 유사 퇴적과 여울 빈도에서 우수한 평가를 받아서 유속이 빠른 여울과 수심이 얇은 소가 연속적으로 이루어진 전형적인 자갈 하천 상류구간의 특징이 나타났다 (Table 1). 그러나 유속의 다양성이 낮아서 유속/수심 체제가 낮게 평가되었다. 반면 가평천 하류에 위치한 St. 10 - St. 13은 대형 보에 의한 정수 구간과 규모가 큰 여울이 발달하여서 하상 서식환경, 하상 매물, 유사 퇴적과 여울 빈도에서 낮게 평가된 반면 유속/수심 체제가 높게 평가되었다. 이러한 하천 종적 환경 변화에 따라서 가평천의 상류에서는 어류 종다양성은 낮았고 금강모치, 쉬리, 참갈겨니 등이 출현하였다 (Fig. 6). 반면 하류 수역은 어류의 종다양도가 높았으며 정수 구간에서는 묵납자루, 긴물개, 모래무지 등이, 규모가 큰 여울 구간에서는 돌고기, 참마자, 돌마자, 배가사리, 피라미 등이 본 조사구간에서 우세하였다.

앞서 살펴본 바와 같이, 가평천에서는 하류로 갈수록 하상 경사가 낮아지고 하천환경이 좋지 않게 평가

되었으나 어류의 종다양성이 높아졌다 (Fig. 4). 하상 경사는 어류 서식처에서 중요한 요인 중 하나인 정수 구간의 발달과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다 (Roni, 2003). 일반적으로 하천에서 정수 구간은 어류의 산란장과 서식처의 기능으로 중요하는데, 하상 경사가 급한 상류에서는 소가 발달하기 어렵기 때문에 종 풍부도와 종 다양성이 떨어지는 경향을 가진다 (Al-Chokhachy et al., 2010). 그러므로 하천이 상류로 갈수록 하폭이 좁아지고 하천 경사가 높아지면서 종 풍부도와 다양도가 감소하는 경향을 가진다 (Jackson et al., 2001; Taylor et al., 2006; Murray and Innes, 2009).

가평천에서 인위적 교란이 많이 일어난 곳은 주로 중-상류에 위치한 조사지점이었으며, 그 중에서도 지류하천인 승안천 St. 5과 개곡천 St. 6이었다 (Table 1). 이 두 조사지점에서는 제방 공사와 택지 개발 등의 교란에 의하여 하도가 불안정한 상황이었다. 따라서 하천환경 평가 항목 중에서 하도 개수, 제방 안정 및 하안립 폭 항목에서 가장 낮은 점수를 받았다. 이 세 가지 평가항목의 교란은 주로 인간의 영향으로 인하여 발생하기 때문에 다른 조사지점과는 차이가 있는 어류 군집구조를 나타내었다 (Fig. 6). 특히, 하상 경사가 급하고 하폭이 좁아서 상류의 환경을 보이고 있었으나 교란에 의해 A 집단 조사지점에 주로 출현하는 금강모치가 출현하지 않았다. 어류 군집은 주로 가평천에서 흔하게 출현한 쉬리, 참갈겨니 등이 우세하였고 상류에 서식하지만 환경에 대한 내성이 어느 정도 있는 버들치가 출현함을 알 수 있었다.

이상의 결과를 종합하면, 전형적인 자갈하천인 가평천에서 어류 군집구조는 일차적으로 하천의 종적 환경변화에 의하여 영향을 받았다. 특히 하류로 갈수록 유사 퇴적이 심해지고 하상의 매물도가 증가하였다. 이에 따라서 유속이 빠른 상류를 선호하는 어류 종에서 정수역과 큰 규모의 여울역을 선호하는 어종으로 군집구조가 바뀌었다. 또한 이러한 종적 환경변화와 함께 하천 개수 등의 인위적 교란이 어류의 군집구조를 결정하는 중요한 환경 요인이었다. 특히 가평천에서는 휴양시설의 건설과 위락 행위가 심한 중류에서 하천 개수에 의하여 하상의 부착생물 서식환경이 나빠지고 여울의 출현빈도가 낮아졌다. 그러므로 자갈하천에서는 하천의 종적 환경변화에 따라서

하상 특성이 어류 군집을 결정하는 중요한 요인이었으며 인위적인 교란에 의하여 군집구조가 변형됨을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Al-Chokhachy, R., Roper, B. B., and Archer, E. K. (2010). "Evaluating the status and trends of physical stream habitat in headwater streams within the interior Columbia River and upper Missouri River basins using an index approach." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 139, pp. 1041-1059.
- Allan, J. D. (2004). "Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems." *Annual Reviews of Ecology, Evolution and Systematics*, Vol. 35, pp. 257-284.
- Angermeier, P. L., and Karr, J. R. (1983). "Fish communities along environmental gradients in a system of tropical streams." *Environmental Biology of Fishes*, Vol. 9, No. 11, pp. 117-135.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D., and Stribling, J. B. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*, 2nd ed. EPA 841-B-99-002, Washington, D.C.
- Bray, J. R. and Curtis, J. T. (1957). "An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin." *Ecological Monographs*, Vol. 27, pp. 325-349.
- Davis, W. S. (1995). "Biological assessment and criteria: building on the past." *Biological assessment and criteria: tools for water resource planning and decision making*, W. S. Davis and T. P. Simon, ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 15-29.
- Diana, M., Allan, J. D., and Infante, D. (2006). "The influence of physical habitat and land use on stream fish assemblages in southeastern Michigan." *American Fisheries Society Symposium*, Vol. 48, pp. 359-374.
- Field, J. G., Clarke, K. R., and Warwick, R. M. (1982). "A practical strategy for analyzing multispecies distribution patterns." *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 8, pp. 37-52.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). (2001). *Stream Corridor Restoration: Principal Processes, and Practices*, US Department of Commerce, NTIS, Springfield, VA, USA.
- Gorman, O. T., and Karr, J. R. (1978). "Habitat structure and stream fish communities." *Ecology*, Vol. 59, NO. 3, pp. 507-515.
- Hong, Y. P. (1991). Studies on the distribution and community dynamics of *Zacco platypus* and *Z. temmincki* (Cyprinidae) in the Han River, Korea. Ph.D. Dissertation, Chungnam National University, Daejeon. (in Korean)
- Jackson, D. A., Peres-Neto, P. R., and Olden, J. D. (2001). "What controls who is where in freshwater fish communities the roles of biotic, abiotic, and spatial factors." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 58, NO. 1, pp. 157-170.
- Karr, J. R. (1981). "Assessment of biotic integrity using fish communities." *Fisheries*, Vol. 6, pp. 21-27.
- Kim, I. S., and Park, J. Y. (2002). *Freshwater Fishes of Korea*. Kyo-Hak Publishing Co., Ltd., Seoul. (in Korean)
- Kim, I. S., Choi, Y., Lee, C. L., Lee, Y. J., Kim, B. J., and Kim, J. H. (2005). *Illustrated Book of Korean Fishes*. Kyo-Hak Publishing Co., Ltd., Seoul. (in Korean)
- Kruskal, J. B. (1964). "Non-metric multidimensional scaling: a numerical method." *Psychometria*, Vol. 29, pp. 115-129.
- K-water. (2007). *A guide book of Rivers in South Korea*. K-water, Daegu. (in Korean)
- Lenat, D. R. and Crawford, J. K. (1994). "Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont streams." *Hydrobiologia*, Vol. 294, NO. 3, pp. 185-199.
- Llopiz, J. K. and Cowen, R. K. (2009). "Variability in the trophic role of coral reef fish larvae in the oceanic plankton." *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 381, pp. 259-272.
- Maret, T. R., Robinson, C. T., and Minshall, G. W. (1997). "Fish assemblages and environmental correlates in least-disturbed streams of the upper Snake River basin." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 126, pp. 200-216.
- Margalef, R. (1958). "Information theory in ecology." *General Systematics*, Vol. 3, pp. 36-71.
- Meador, M. R., and Goldstein, R. M. (2003). "Assessing water quality at large geographic scales: relations among land use, water physicochemistry, riparian condition, and fish community structure." *Environmental Management*, Vol. 31, No. 4, pp. 504-517.
- Milner, N. J., Hemsworth, R. J., and Jones, B. E. (1985). "Habitat evaluation as a fisheries management tool." *Journal of Fish Biology*, Vol. 27, pp. 85-108.
- Murray, S., and Innes, J. L. (2009). "Effects of environment on fish species distribution in the Mackenzie River drainage basin of northeastern British Columbia,

- Canada." *Ecology of Freshwater Fish*, Vol. 18, pp. 183-196.
- Nam, M. M. (1997). "The fish fauna and community structure in the Kapyong Stream." *Korean Journal of Limnological Society*. Vol. 30, No. 4, 357-366. (in Korean)
- Nelson, J. S. (2006). *Fishes of the World*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Oksanen, J. (2011). *Multivariate analysis of ecological communities in R: Vegan Tutorial*. <http://cc.oulu.fi/~jarioksa/>.
- Pease, A. A., Gonzalez-Diaz, A. A., Rodiles-Hernandez, R., and Winemiller, K. O. (2012), Functional diversity and trait-environment relationships of stream fish assemblages in a large tropical catchment, *Freshwater Biology*, Vol. 57, pp. 1060-1075.
- Paller, M. H., Reichert, M. J. M., Dean, J. M., and Seigle, J. C. (2000). "Use of fish community data to evaluate restoration success of a riparian stream." *Ecological Engineering*, Vol. 15, pp. 171-187.
- Pilou, E. C. (1975). *Ecological Diversity*. Wiley, New York, pp. 1-165.
- Pirhalla, D. E. (2004). "Evaluating fish-habitat relationships for refining regional indexes of biotic integrity: development of a tolerance index of habitat degradation for Maryland stream fishes." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 133, pp. 144-159.
- Poff, N. L., and Allan, J. D. (1995). "Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability." *Ecology*, Vol. 76, No. 2, pp. 606-627.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. C. (1997). "The natural flow regime." *Bioscience*, Vol. 47, No. 11, 769-784.
- Price, D. J., and Brige, W. J. (2005). "Effectiveness of stream restoration following highway reconstruction projects on two freshwater streams in Kentucky." *Ecological Engineering*, Vol. 25, pp. 73-84.
- R Development Core Team. (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Available: [www.R-project.org](http://www.R-project.org).
- RIMGIS. (2013). <http://www.river.go.kr>. River Management Geographic Information System, Seoul, Korea. (in Korean)
- Roni, P. (2002). "Habitat use by fishes and Pacific giant salamanders in small western Oregon and Washington streams." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 131, pp. 743-761.
- Rowe, D. C., Pierce, C. L., and Wilton, T. F. (2009). "Fish assemblage relationships with physical habitat in wadeable Iowa streams." *North American Journal of Fisheries Management*, Vol. 29, No. 5, 1314-1332.
- Shields, F. D., Knight, S. S., and Cooper, C. M. (1994). "Effects of channel incision on base flow stream habitats and fishes." *Environmental Management*, Vol. 18, 43-57.
- Shannon, C. E., and Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Taylor, C. M., Holder, T. L., Fiorillo, R. A., Williams, L. R., Thomas, R. B., and Warren, M. L., Jr. (2006). "Distribution, abundance, and diversity of stream fishes under variable environmental condition." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 63, No. 1, pp. 43-54.
- Wang, L., Lyons, J., Rasmussen, P., Seelbach, P., Simon, T., Wiley, M., Kanehl, P., Baker, E., Niemela, S., and Stewart, P.M. (2003). "Watershed, reach, and riparian influences on stream fish assemblages in the Northern Lakes and Forest Ecoregion, U.S.A." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 60, pp. 491-505.
- Ward, J. H. (1963). "Hierarchical grouping to optimize an objective function." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 58, pp. 236-244.
- Wildhaber, M. L., Allert, A. L., Schmitt, C. J., Tabor, V. M., Mulhern, D., Powell, K. L., and Sowa, S. P. (2000). "Natural and anthropogenic influences on the distribution of the threatened *Neosho madtom* in a midwestern warmwater stream." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 129, pp. 243-261.

**Appendix.** Individual number of fish species collected at each study site in the Gapyeong Stream from February to August 2010 (abbreviations of species are provided in parenthesis)

| Family / Species (abbreviabiton)            | Study site |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       | Total | R.A.* (%) |  |    |       |       |
|---|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-------|-------|-----------|--|----|-------|-------|
|   | 1          | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11    | 12  | 13    |       |           |  |    |       |       |
| <b>Cyprinidae</b>                           |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Cyprinus carpio</i>                      |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  | 1  | 1     | 0.02  |
| <i>Carassius auratus</i>                    |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1     | 11  | 5     |       |           |  |    | 17    | 0.28  |
| <i>Carassius cuvieri</i>                    |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  | 1  | 1     | 0.02  |
| <i>Rhodeus ocellatus</i>                    |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     | 1     |       |           |  |    | 1     | 0.02  |
| <i>Rhodeus uyekii</i>                       |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       | 4   | 8     | 5     |           |  |    | 17    | 0.28  |
| <i>Rhodeus notatus</i>                      |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  | 5  | 5     | 0.08  |
| <i>Acheilognathus lanceolatus</i>           |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  | 42 | 42    | 0.70  |
| <i>Acheilognathus signifer (As)</i>         |            |     |     |     |     |     |     |     |     | 10  | 17    | 10  |       |       |           |  |    | 37    | 0.62  |
| <i>Acheilognathus yamatsutae (Ay)</i>       |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     | 46    | 107   |           |  |    | 153   | 2.55  |
| <i>Pseudorasbora parva</i>                  |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  | 4  | 4     | 0.07  |
| <i>Pungtungia herzi (Ph)</i>                |            |     |     | 6   |     |     | 27  | 31  | 63  | 42  | 79    | 81  | 69    | 62    |           |  |    | 460   | 7.66  |
| <i>Pseudopungtungia tenuicarpa (Pt)</i>     | 1          | 4   |     |     |     |     |     | 25  | 4   |     | 6     | 6   | 13    | 10    |           |  |    | 69    | 1.15  |
| <i>Coreoleuciscus splendidus (Cs)</i>       | 17         | 18  | 26  | 33  | 65  | 17  | 71  | 111 | 39  | 81  | 89    | 54  | 63    | 684   |           |  |    | 684   | 11.39 |
| <i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i> |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     | 2     | 5     |           |  |    | 7     | 0.12  |
| <i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>  |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    | 1     | 0.02  |
| <i>Squalidus gracilis majimae (Sg)</i>      |            |     |     |     |     |     |     |     |     | 6   | 5     | 116 | 25    | 3     |           |  |    | 155   | 2.58  |
| <i>Squalidus japonicus coreanus</i>         |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       | 2     |           |  |    | 2     | 0.03  |
| <i>Hemibarbus labeo</i>                     |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    | 3     | 0.05  |
| <i>Hemibarbus longirostris (Hl)</i>         |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 14    | 21  | 15    | 8     |           |  |    | 58    | 0.97  |
| <i>Hemibarbus mylodon</i>                   |            |     |     |     |     |     |     | 10  | 16  |     |       |     | 1     |       |           |  |    | 27    | 0.45  |
| <i>Pseudogobio esocinus (Pe)</i>            |            |     |     |     |     |     |     |     |     | 3   | 8     | 15  | 3     | 12    |           |  |    | 41    | 0.68  |
| <i>Gobiobotia brevibarba</i>                |            |     |     |     |     |     |     | 1   | 1   |     | 1     |     |       |       |           |  |    | 3     | 0.05  |
| <i>Microphysogobio yaluensis (My)</i>       |            |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |       | 16  |       | 16    |           |  |    | 33    | 0.55  |
| <i>Microphysogobio longidorsalis (Ml)</i>   |            |     |     |     |     |     |     |     | 22  | 10  | 11    | 43  | 88    | 33    | 82        |  |    | 289   | 4.81  |
| <i>Rhynchocypris oxycephalus (Ro)</i>       |            |     | 3   | 3   | 16  | 48  | 2   |     |     | 3   |       |     |       |       |           |  |    | 75    | 1.25  |
| <i>Rhynchocypris kumgangensis (Rk)</i>      | 4          | 51  | 61  | 28  |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    | 144   | 2.40  |
| <i>Zacco koreanus (Zk)</i>                  | 24         | 33  | 39  | 16  | 144 | 44  | 95  | 275 | 133 | 323 | 139   | 81  | 160   | 1,506 |           |  |    | 1,506 | 25.07 |
| <i>Zacco platypus (Zp)</i>                  |            |     |     |     |     |     | 1   | 11  | 25  | 200 | 352   | 252 | 410   | 1,251 |           |  |    | 2,083 | 20.83 |
| <i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>   |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     | 2     | 1     |           |  |    | 3     | 0.05  |
| <b>Balliforidae</b>                         |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Orthrias nudus (On)</i>                  |            |     |     | 2   | 21  | 5   |     |     |     | 10  | 2     | 4   |       | 5     |           |  |    | 49    | 0.82  |
| <b>Cobitidae</b>                            |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Misgurnus anguillicaudatus (Ma)</i>      |            |     |     |     |     | 26  |     |     |     | 4   | 2     | 1   |       |       |           |  |    | 33    | 0.55  |
| <i>Iksookimia koreensis (Ik)</i>            |            |     |     |     |     | 44  | 4   | 2   | 12  | 17  | 23    | 10  | 8     | 7     |           |  |    | 127   | 2.11  |
| <i>Koreocobitis rotundicaudata (Kr)</i>     | 3          |     |     | 1   | 27  | 10  | 10  | 10  | 10  | 18  | 6     | 4   | 4     | 18    |           |  |    | 111   | 1.85  |
| <b>Siluridae</b>                            |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Silurus asotus</i>                       |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       | 3     |           |  |    | 3     | 0.05  |
| <i>Silurus microdorsalis</i>                | 3          |     | 1   | 1   |     |     |     | 4   | 3   |     |       |     |       |       |           |  |    | 12    | 0.20  |
| <b>Bagridae</b>                             |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Pseudobagrus koreanus</i>                |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1     | 4   |       | 11    |           |  |    | 16    | 0.27  |
| <i>Leiocassis ussuriensis</i>               |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       | 1     |           |  |    | 1     | 0.02  |
| <b>Amblycipitidae</b>                       |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Liobagrus andersoni (La)</i>             | 2          | 1   | 5   | 1   | 14  |     |     | 29  | 23  | 12  | 36    | 35  | 24    | 55    |           |  |    | 237   | 3.95  |
| <b>Osmeridae</b>                            |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Hypomesus nipponensis</i>                |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       | 1     |           |  |    | 1     | 0.02  |
| <b>Cottidae</b>                             |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Cottus koreanus</i>                      |            |     |     |     | 2   |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    | 2     | 0.03  |
| <b>Centropomidae</b>                        |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Coreoperca herzi (Ch)</i>                | 13         | 14  | 7   | 9   |     | 2   | 15  | 10  |     | 2   | 12    | 13  | 6     | 27    |           |  |    | 130   | 2.16  |
| <b>Ondontobutidae</b>                       |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Odontobutis platycephala</i>             |            |     |     |     |     | 2   | 4   | 5   | 4   | 6   | 3     | 3   |       | 1     |           |  |    | 28    | 0.47  |
| <i>Odontobutis interrupta (Oi)</i>          |            |     |     |     |     |     |     |     | 1   | 8   | 5     | 19  | 13    | 7     |           |  |    | 53    | 0.88  |
| <b>Centrarchidae</b>                        |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Micropterus salmoides</i>                |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       | 2     |           |  |    | 2     | 0.03  |
| <b>Gobiidae</b>                             |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  |    |       |       |
| <i>Chaenogobius urotaenia</i>               |            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |       |       |           |  | 1  | 1     | 0.02  |
| <i>Rhinogobius brunneus (Rb)</i>            |            |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |       |     | 12    | 98    |           |  |    | 111   | 1.85  |
| Total number of specimens                   | 67         | 124 | 148 | 109 | 391 | 115 | 321 | 554 | 341 | 861 | 1,049 | 686 | 1,240 | 6,006 |           |  |    |       |       |
| Number of species                           | 8          | 7   | 8   | 10  | 9   | 9   | 14  | 15  | 18  | 21  | 23    | 22  | 36    | 46    |           |  |    |       |       |

R.A.\*: Relative abundance (%)