

# 하천에서의 무생물적 환경인자와 생물과의 상관성<sup>1a</sup> -경기지방의 하천사례를 중심으로-

김혜주<sup>2\*</sup> · 김송이<sup>2</sup> · 김창완<sup>3</sup>

## Correlation between Biotic Factor and Abiotic Factor<sup>1a</sup> - Focus on the Case Streams in Kyonggi District-

Hyea-Ju Kim<sup>2\*</sup>, Song-Yee Kim<sup>2</sup>, Chang-Wan Kim<sup>3</sup>

### 요약

물리적 구조조사 항목 25개 중에서 하천유형 분류척도로 이용되는 9개의 항목과 출현한 저서생물 및 식물과의 상관성을 분석한 결과 하상재료의 다양성, 하도의 사형성, 횡단사주의 발달정도가 생물의 출현에 높은 상관성을 보였다. 그리고 수화학적 인자의 경우 총 12개 중 COD농도만이 저서생물의 분포에 유효한 상관성을 나타내었다. 본 연구의 무생물적 인자와 생물적 인자와의 상관성 분석에서는 특히 모래하천과 자갈하천이 서로 음과 양의 방향으로 상관관계를 나타내어 두개 유형의 하천의 물리적 구조 및 생태적 특성이 서로 뚜렷하게 다르다는 것을 지시하고 있었다. 따라서 이러한 분석결과는 생물서식처를 고려해야만 하는 하천복원이나 하천의 생태적 유형분류를 위한 하천평가에도 활용되어질 수 있다고 사료된다.

주요어 : 물리적 구조, 하천유형, 상관성분석, 하상재료의 다양성, 횡단사주

### ABSTRACT

The analysis of correlation between the 9 element (used as the classification standard of stream typology out of the 25 elements pertinent to the survey of hydromorphological structure) and both emerged benthic macroinvertebrate as well as vegetation indicated that the substrate diversity, curvature, and degree of development of the transverse bar had a high correlation with the species composition. Only COD concentration was found to have the statistically significant correlation with the distribution of benthos among the 12 aquatic and chemical elements. Specifically, the analysis of the biotic and abiotic factors in this study indicated that there was a statistically significant correlation between the sand river and cobble river in the positive(+) and negative(-) aspects, suggesting that there is a distinctive difference between the two types of rivers in terms of hydromorphological structure and ecological characteristics.

1 접수 9월 18일 Received on Sep. 18, 2006

2 김혜주자연환경계획연구소 Institute of Landscape Planning Hyea-Ju Kim (437-801) 276-8. Kochen-Dong, Uiwang-City, Kyonggi-Do, Korea

3 한국건설기술연구원 수석연구원 Korean Institute of construction technology(411-312) 2311 Daewha-Dong, Ilsan-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

a 본 연구는 2004, 2005년도 한국건설기술연구원의 '하천 생태구조 현장실험 및 특성 분석'의 일환으로 수행되었음

\* 교신저자, Corresponding author(hjkim@lapla.co.kr)

Therefore, the findings of this study imply that the consideration of a biotop is prerequisite for the evaluation of stream status regarding stream restoration or the ecological topology of streams.

**KEYWORD : HYDROMORPHOLOGICAL STRUCTURE, STREAM TYPOLOGY, CORRELATION ANALYSIS, SUBSTRATE DIVERSITY, TRANSVERSE BAR**

## 서론

지구상의 생물은 종류에 따라서는 환경을 지시하는 지시종들이 있다. 이들 대부분은 서식처(Biotop)의 한계성이 뚜렷한 것이 특징이다. 반면에 어떤 생물들은 서식처의 범위가 넓고 다양하여 특정한 환경을 지시하고 있지 않다. 따라서 환경을 평가하는데 이용되는 생물들은 주로 전자와 같이 서식처가 분명한 종들이 이용된다. 호소 및 하천의 경우 저서- 및 부착생물의 종과 어류의 특정 종들이 수질과의 상관성을 나타내어 지시종(지표종)으로 알려져 있다. 그에 반해 식물의 경우에는 일부의 종에 국한되어 있는 실정이다. 그러나 이러한 생물의 지시성만으로는 하천의 수환경을 총체적으로 평가하는 것은 불충분하기 때문에 일반적으로 하천수의 화학성도 하천평가에 포함하게 된다. 하지만 이와 같은 생물종이나 수화학적성만으로도 하천의 자연성, 특히 복잡한 하천의 생태성을 평가하는 데에는 완벽하지 않기 때문에 유럽에서는 하천의 물리적 구조를 하천 평가에 포함하고 있다(LAWA, 2000).

하천의 물리적 구조란 대상 하천이 속한 유역의 지질적 특성과 하천수의 변화에 따른 하천의 물리적 변동으로서, 예를 들면 사형성이나 사형에 따른 사형침식 또는 사주발달 그리고 횡단의 깊이나 횡단폭의 변화 특성 또는 하상재료와 이에 따른 여울과 소와 같은 하천의 구조특성들이다. 이러한 물리적 특성은 하천환경의 구성인자이며 또한 하천생물의 서식처이기 때문에 출현생물과 서로 밀접한 상관성을 가진다고 예측할 수 있다. 국내의 경우 하천의 물리적 구조와 같은 하천의 무생물적 환경인자와 그 곳에 서식하는 생물과의 상관성을 연구한 사례는 많지 않은데, 하천과 관련하여 안영희 등(2001)은 안성천수계의 버드나무과 식물 분포와 지형 및 토양환경에 대한 상관성분석을 통하여 버드나무과 식물이 미지형과 경사, 토양입자와 유기물 등의 환경요인과 관련성이 있다고 하였고, 김영식 등(2002)의 경우 만경강 하천식생과 토양환경(pH, 유기물, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, T-N, EC)의 상관성 분석에서 수생식물과 pH와 상관성이 높고 교란지 식생과 습생식물은 T-N과 인산과 상관성이 있는 것으로 보고하였다. 기타 산림

식생과 환경요인(주로 지형, 유기물함량, 토양습도 등)에 대한 상관성연구에는 Kim, et al. (1999)와 Kim & Kil(1997)의 연구가 있다. 이렇게 국내의 경우 상관성 분석은 주로 식물의 생장에 초점을 둔 토양환경에 많은 관심을 모으고 있으나, 다양한 무생물적 환경요인을 다양한 생물서식과 연계하여 하천별로 특성을 정리한 경우는 없었다. 반면에 외국의 경우는 하천의 유형 분류나 하천평가를 위해서 여러 무생물적 인자 간에 또는 무생물적 인자와 출현생물과의 상관관계를 연구하고 있다. 예를 들면 LfU(1998)의 Baden-Wuerttemberg의 하천유형에 대한 연구에서는 점토성과 편마암을 기저로 한 하천의 물리적 구조 인자와 유량, 하천수의 화학성과 지질성 그리고 생물(저서생물과 어류)과 하천의 물리적 구조에 대한 상관성을 분석하여 하천의 특성을 규정하여 하천을 규산염과 탄산염하천으로 분류하고 있다. 그리고 LfU(2000)의 경우에는 지질성과 수화학적 인자간의 상관성 분석을 통하여 하천타입을 정리하였다. 그리고 AQEM(2001)에서는 저서생물과 하천의 무생물적 요인(하천의 화학성, 물리적 구조)과의 상관성 분석을 통하여 하천유형별 대표적 저서생물을 규명하고 이를 하천의 생태적 평가에 이용하고자 하였다.

이에 본 연구에서도 여러 사례하천의 조사결과 중에서 하천의 무생물적 환경인자와 출현 생물간의 상관성을 찾아 하천의 특성을 판별하여 보고자 하였다. 그리고 나아가서는 이러한 자료를 축적하여 하천의 분류나 하천의 생태성 평가자료로 이용하고자 하는데 그 의의를 두었다.

## 재료 및 방법

### 1. 생물인자와 환경인자

경기도내의 북한강수계인 가평천, 조종천, 구운천과 남한강 수계의 청미천, 양화천, 복하천에 대하여 2004년과 2005년 4월에 LAWA(2000)에 의거한 하천의 물리적 구조 조사를 전 하천 연장에 대하여 실시하고, 그 결과에 따라서 각 하천에서 가장 자연성이 높은

구간 1 km씩 선발하여 중점조사구로 정하였다. 그리고 그 중점조사 구간에 대하여 식물 및 식생조사와 저서생물조사를 장마전과 후(6월 중순과 8월 말)에 실시하고, 관찰된 생물과 그들의 서식처인 하천의 물리적 구조와 하천수의 화학성과의 상관관계를 CANOCO 4.5 프로그램 (Ter Braak and Šmilauer(2002a)의 Ordination 기법을 이용하여 분석하였다.

출현생물과 하천의 물리적 특성과의 상관성 분석에는 중점조사구에서 출현한 총 62개의 저서생물종 및 개체수 그리고 각 하천의 중점조사구에서 5회 이상 출현한 식물 116종 및 그 출현빈도와 하천의 유형척도인 “하도사행”, “사행침식”, “횡단사주”, “파랑의 다양성”, “깊이의 다양성”, “횡단침식”, “횡단 폭의 변화”, “하상재료의 다양성”, “하상구조의 특이사항”의 9개 항목의 물리적 구조 평가치(표 10: 1-7등급의 index)를 대입하였다. 각 척도의 정의와 K(산지형 하천으로 V형 하천수로 형태), S(산지형 하천으로 깊은 웅덩이를 형성하는 하천수로 형태), A(전체적으로 완만한 하천수로 형태), F(평지하천) 등의 하천유형별 평가기준은 다음에서와 같다(LAWA, 2000):

1) 하도사행은 하도가 부정형적으로 굴곡을 나타내는 정도인데, “심한 사행”이란 사행도가 1.5 이상인 경우이며, “보통 사행”이란 사행도가 1.26-1.5, “약간 사행”의 범위는 1.06-1.25이다. 그리고 “미미한 사행”은 두 가지가 있는데, 그 하나는 물 흐르는 방향으로 20° 굽은 정도이며, 다른 하나는 조사구의 30% 정도의 구간에서 직선형을 보이는 경우이다. 아울러 “직선형”이란 조사구의 하도가 대부분 직선에 가까운 경우이며 “직강화”라는 것은 인공적인 하도에서 볼 수 있는 하도의 직선형을 의미한다. 사행성에 대한 평가는 하천유형(유형 A, F와 S)에 따라서 아래에서 보이는 것처럼 지수 값이 다르며 K유형의 경우 자연 상태에서 사행성이 나타나지 않음으로 (X)로 평가하지 않는다.

Table 1. Curvature

Standard for estimation	Index by stream typology		
	A, F	S	K
<b>Curvature</b>			
Strong meander	1	1	
Moderate meander	2	1	×
Weak meander	3	2	
<b>Non curvature</b>			
~30 % very weak meander	4	3	
~10 % very weak meander	5	4	
Straight	6	5	×
Constrained	7	7	

2) 사행침식은 하천이 충분히 사행을 하지 못한 경우에 발생하는데, 하안이 급경사로 불안정하고 흔히 식생이 빈약하거나 전혀 없는 경우도 있으며 언제나 한 쪽 하안에서 발생한다. 침식의 정도에 따라서 “자주 크게”의 경우는 수층부에 매우 가파른 비탈이 불안정하게 자주 형성되어 있는 경우다. “드물게 크게”에서는 수층부에 약 1/3정도가 강한 침식이 있으며 1/3 정도는 약한 침식이 있고 나머지 하안에는 침식이 없는 경우이다. “자주 약하게”의 기준은 수층부의 약 1/3정도가 높은 비탈이 형성되어 있으며, 불안정하고 식생이 거의 없는 경우이다. 이 경우는 심한 하안침식의 진행은 찾기 어려운 형태로써 나머지의 수층부 구간에서도 가파른 경사는 있지만 침식의 흔적은 없다. “드물게 약하게”는 수층부 구간의 1/3 미만에서 약한 침식을 나타내며, 나머지의 수층부 하안은 가파르나 심한 침식의 흔적은 없을 때이다. 그리고 “없음”은 수층부의 하안이 없거나 있어도 침식이 없는 경우를 의미한다.

Table 2. Erosion due to curvature

Standard for estimation	Index by stream typology		K
	S, A, F		
	Curvature	Non curvature	
Frequently strongly	2	2	
Rarely strongly	2	3	
Frequently weakly	1	4	×
Rarely weakly	1	5	
None	1	7	

3) 횡단사주는 수표면의 파랑에 의해 발생한 하상상승을 의미하며, 평수위 위로 분명히 드러난 유사와 집합이다. 평가는 조사구간 내에서 관찰되는 횡단사주의 개수에 의거하며 그 개수가 4개 이상이면 “많음”(지수값: 1)으로, 3개일 때는 “여러 개”(지수값: 2)로 한다. 그 외 “2개”(지수값: 2), “1개”(지수값: 4), “1/2”(지수값: 5), “없음”(지수값: 7)으로 평가한다.

4) 파랑의 다양성은 하천수표면의 구조를 평가하는 것으로, “매우 크다”는 수표면에 흰 거품이 형성되고, 전 구간에서 다양하고 강한 유속의 변화가 있으며 조사구의 3개소 이상에서 물의 유동이 있는 경우이다. “크다”는 전구간의 수표면에 커다란 빗 모양으로 뾰족하며 부분적으로 부서지는 물결을 보이고, 조사구의 20% 이상에서 다양한 유속의 변화가 있을 때이다. “보통”은 조사구 전구간의 수표면에 크고 둥근 파랑이 있는 물결이 형성되며 여러 번 유속의 변화가 있을 때이다. 또한 “작다”는 조사구에 흐름을 저지하는 돌, 나뭇

가지, 또는 식물들로 인하여 부분적으로 크거나 작은 물결이 형성된 경우이다. 그리고 “없음”은 조사구의 수표면에 물결이 없는 고요한 상태를 가리킨다.

Table 3. Diversity of currents

Standard for estimation	Index by stream typology	
	S, A, K	F
Very high	1	1
High	2	1
Moderate	4	3
Low	5	5
None	7	7

5) 깊이의 다양성은 종단으로 본 평균수심의 변화와 규모로서 “매우 크다”는 조사구에 다양하고 큰 규모의 수심의 변화가 많을 때로, 평수위를 기준으로 그 보다 낮은 곳(평수위의 1/3 또는 그 이하)과 깊은 곳(평수위의 2배, 3배)이 3개소 이상 관찰될 경우이다. 또한 “크다”는 평수위를 기준으로 낮은 곳과 깊은 곳이 2개소 관찰될 때, “보통”은 낮은 곳과 깊은 곳이 2개소 미만 이 있을 때이다. 그리고 “작다”는 조사구내에 부분적으로 작은 깊이의 차이는 있으나 그 정도가 미미한 경우이며, “없음”은 전 조사구간의 수심이 균일한 것을 의미한다.

Table 4. Variation of depths

Standard for estimation	Index by stream typology	
	S, A, K	F
Very high	1	1
High	2	1
Moderate	4	3
Low	5	5
None	7	7

6) 횡단침식은 좌우 양안에 같은 규모로 나타나는 저수로의 확대를 의미하는 것으로, 저수로가 깊어졌을 때 폭과 깊이의 관계를 유지하고자 하안 침식이 발생할 수 있다. “강”은 저수로가 대부분(조사구의 50% 이상) 강한 침식을 나타내며, 양안이 하안의 끝까지 가파르게 깎여지고 대개는 식생이 없으며, 매우 불안정한 하안 상태를 보일 때이다. 그리고 “약”은 조사구의 50% 이상이 약한 침식을 나타내며, 양안이 대부분 가파르거나 매우 가파를 때로 하안의 위 부분은 넓고 아래는 좁은 형태로 불안정하다. 그러나 이때에 평수 위 위의 하안부는 비스듬한 경사를 나타내며 안정화되어 침식의 흔적을 찾을 수 없다. 한편, “없음”은 저수로

의 50% 이상이 하안침식을 보이지 않는 경우이다. 횡단침식의 평가치(지수값)는 횡단 깊이에 따라 다르다.

Table 5. Width erosion

Standard for estimation	Index by stream typology		
	S, A, F		
Depth of cross section	Very deep~ Deep	Moderate~Very shallow	K
Strong	3	3	
Weak	5	1	×
None	7	1	

7) 횡단폭의 변화는 저수로 폭의 변화정도를 의미한다. 횡단폭의 변화가 “매우 크다”는 것은 저수로의 폭이 조사구의 평균 저수로 폭 보다 3배 또는 2배 이상 넓어질 경우나 1/2배로 축소하는 경우 등의 변화가 3번 이상 있으며, 그 중 3개는 규모가 클 때로 조사구의 약 20%이상을 차지할 때이다. 그리고 “크다”는 저수로 폭의 변화가 3번 이상 있으며, 그 중 2개는 그 규모가 클 때로 조사구의 약 20%를 차지할 경우이다. “보통”은 조사구의 저수로 폭이 평균적으로 지점에 따라서 폭의 변화가 분명하며, 작은 규모의 저수로 폭의 변화가 2개 정도 관찰될 경우이다. 또한 “작다”는 조사구의 저수로 폭이 크게 변하는 곳이 없고, 지점에 따라 매우 미미한 정도의 폭의 변화가 1회 정도 있을 때이다. “없다”는 조사구의 저수폭이 일정하며 변화가 없는 경우이다.

Table 6. Width variations

Standard for estimation	Index by stream typology	
	S, A, K	F
Very high	1	1
High	2	1
Moderate	4	2
Low	6	4
None	7	7

8) 하상재료의 다양성은 조합된 하상 재료의 빈도와 규모를 조사하는 것이다. “매우 크다”는 조사구의 하상재료가 매우 많이 변하는 경우로, 자연적 하상재료가 3종류 이상, 그 규모는 소하천은 2m<sup>2</sup>, 중규모하천은 4m<sup>2</sup> 이상이며, 그 중 3개의 하상재는 규모가 큰 경우이다. “크다”는 조사구내에서 여러 번 하상재료가 변하며 그 중 3종류는 소하천: 2m<sup>2</sup>, 중규모 하천: 4m<sup>2</sup>이 될 때로서, 이 중에서 2개의 하상재는 규모가 크다. 그리고 “보통”은 조사구의 하상재료가 여러 번 변하나

하상재료의 차이는 크지 않을 경우이다. 이 때 자연적 하상재료 중 3종류가 최소한  $2\text{m}^2 / 4\text{m}^2$  (소하천/중규모하천) 있으나, 이 중 2개는 드문드문 작은 규모로 나타난다. “작다”는 조사구에 부분적인 하상재료의 변화가 관찰되어지나, 전반적으로 지역별 차이가 미미하며, 자연적 하상재료 중 2종류가 소하천에는  $2\text{m}^2$ , 중규모하천에는  $4\text{m}^2$  있지만, 그 중 1개만 드문드문 작은 규모로 나타날 경우이다. “없다”는 조사구의 하상재료가 일률적으로 모두 같은 경우로 자연적 하상재료 중 1종류만 나타난다.

Table 7. Substrate diversity

Standard for estimation	Index by stream typology	
	S, A, K	F
Very high	1	1
High	2	1
Moderate	4	2
Low	6	4
None	7	7

9) 하상구조의 특이사항은 하상재료의 정적 침식 또는 퇴적에 의해서 자연적으로 하상을 형성하는 요인들로서, 그 예로는 물소리가 나는 곳, 여울, 소, 나무뿌리 등이 있다. 이러한 요소가 조사구에 4개소 이상일 때는 “매우 많다”로, 3개 일 때는 “여러 개”로 평가한다. 그 외 “2개”, “1개”, “1/2개”, “없음”으로 평가한다.

Table 8. Special bottom structures

Standard for estimation	Index by stream typology	
	S, A, K	F
Numerous	1	1
Several	2	1
2	3	2
1	4	3
1/2	5	5
None	7	7

저서생물의 출현성과 수질과의 상관성 분석에는 수질요소 중 pH, COD, BOD, DO, SS, T-N, T-P,  $\text{NH}_3\text{N}$ ,  $\text{PO}_4\text{P}$ , 수온, 전기전도도, 총대장균군을 이용하였다. 대입된 수치는 환경부(2006) 물 환경 정보 시스템에서 제공되는 수질측정치로서, 중점조사구와 인접한 측정에서의 6월, 8월의 측정치를 이용하였다. 수질항목은 항목에 따라 단위가 다르기 때문에 SPSS 13.0 프로그램(SPSS Inc, 2004)의 기술통계분석을 이용하여 표준점수(Z-score)로 변환한 후 분석에 대입하였다.

## 2. 상관성 분석기법

생물과 환경요인과의 상관성 분석에는 주로 서열기법이 이용된다. 서열기법(Ordination)이란 생물종 구성에 의거한 Site들의 유사도를 두 개의 척도(Axis)로 구현되는 공간상에 거리로서 보여주기 위한 다변량 기법들을 총칭하는데 이를 적용하는 주 목적 중의 하나는 모든 생물종의 출현이 소수의 알려지지 않은 환경변수의 변화에 기인한다는 가정하에 데이터의 구조를 찾아내기 위한 것이다(Prentice, 1977). 이와 같은 서열기법은 대입되는 환경변수가 알려져 있는가, 아닌가에 따라 직접서열기법과 간접서열기법으로 분류된다. 대표적인 간접서열기법에는 Principal components analysis(PCA)와 Correspondence analysis(CA) 및 Detrended correspondence analysis(DCA) 등이 있다. 이 중 PCA는 Two-way weighted averaging algorithm을, CA는 Two-way weighted summation algorithm을 사용한다. 그리고 DCA는 CA의 변형된 형태로서 Axis의 끝부분에서 일어날 수 있는 밀집현상을 제거하고, Arch effect를 방지하려는 목적으로 개발된 기법이다. 한편, 직접서열기법에는 Redundancy analysis(RDA), Canonical correspondence analysis(CCA), Detrended canonical correspondence analysis(DCCA) 등이 있다. RDA는 PCA의 Algorithm을 응용하여 최적 환경변수, 즉 최소의 Total residual sum of squares를 가지는 환경변수들의 선형결합을 찾아내는 방법이다. 그리고 CCA는 CA의 제한된 Algorithm을 사용하여 Species scores의 분산을 최적화 할 수 있는 환경 변수들의 선형 결함을 찾아내는 기법이며, DCCA는 CCA에서 발생할 수 있는 Arch effect를 방지하려는 목적 등으로 사용될 수 있다.

위에서 서술한 여러 종류의 서열기법은 생물종 데이터가 환경 인자에 대응하는 형태에 따라 PCA, RDA와 같은 선형응답모델(Linear response model)과 CA나 CCA 등의 단봉응답모델(Unimodal response model)로 분류된다. 따라서 주어진 데이터의 형태를 알아보고 이에 따라 선형과 단봉응답모델 중 적합한 분석기법을 선택해야 한다. Lepš 와 Šmilauer(2003)에 의하면 이는 DCA를 이용하여 Ordination axis의  $\beta$ -diversity를 구함으로써 가능하다. 여기에서  $\beta$ -diversity란 연속되는 환경변화에 따른 생물종 구성의 변이정도를 측정하는 척도로서 DCA결과에서 Ordination axis의 Gradient 길이로 나타난다. 이때 Ter Braak 와 Šmilauer(2002b)의 기준에 따라 구해진 Gradient 중 가장 긴 Gradient의 길이가 4.0 이상이라

면 단봉응답모델을 사용해야 하고, 그 길이가 3.0 이하라면 선형응답모델이 적합하며, 3.0-4.0 사이라면 두 모델 모두 사용 가능하다. 본 연구에서는 위와 같은 선택기준에 의거하여 분석하려는 저서생물 데이터에 Segment와 Hill's scaling을 이용한 DCA를 적용하였다. 그 결과 저서생물의 경우 가장 긴 Gradient의 길이가 2.795로 직접적 선형응답모델인 RDA가 적합하였고, 식물은 3.641로 나타나 직접적 단봉응답모델인 CCA를 분석모델로 결정하였다.

본 연구에서 채택한 RDA나 CCA와 같은 직접적 서열분석에서는 주어진 환경변수의 개수가 증가할수록 환경변수에 의한 한정(Restriction)의 엄격성이 떨어지게 되고 대입된 환경인자의 개수가 Sites의 수 - 1의 개수를 초과하게 되면 더 이상 직접서열분석으로서의 의미가 없어지게 된다. 또한 서로 강한 상관관계를 보이는 여러 환경변수가 동시에 대입되었다면 Arch effect가 발생할 수 있다. 이와 같은 문제는 Stepwise selection을 통해 종분산에 유효한 환경인자 그룹을 채택함으로써 해결할 수 있으며, 이때 가장 많이 사용되는 형식이 Forward selection이다(Lepš and Šmilauer, 2003). 따라서 본 연구에서도 CANOCO 4.5의 Forward selection 옵션을 이용하여 유효한 환경인자 그룹을 선정하였다. 이때 통계적인 유의성은 Ter Braak 와 Šmilauer(1998)가 제시한 것 같이 Monte Carlo permutation test(Unrestricted permutation=999)를 통하여 검증하였고 유의수준은 0.05 이하로 하였다. 수질 항목의 경우 SPSS를 이용한 Pearson 상관분석과 PCA를 선행하여 상호간의 상관성이 성립하는 항목 중 PCA 결과에서 변화량이 작은 항목을 제외한 후 Forward selection을 실행하였다.

위와 같은 과정을 통해 선정된 환경인자와 분석하려는 생물데이터와의 RDA, CCA 상관성 분석결과는 Axis에 나타나는데, 각각의 Axis에서의 생물종의 분산은 Eigenvalue( $\lambda$ )이다. 이 때에 Eigenvalue가 클수록 대상 Axis가 나타내는 생물종 데이터에 대한 설명력과 생물종과 대입된 환경인자들과의 관계에 대한 설명력 및 생물종과 환경변수들 간의 상관관계(R)에 대한 신뢰성은 증가한다. 또한 한 Axis에서 개개의 환경변수가 설명하는 생물종 데이터의 변이는 Canonical coefficients(c)로 나타나며, 이 값이 클수록 Axis에서 대상 환경인자가 생물종 분산에 가지는 영향력은 크다. 그리고 각 환경인자가 한 Axis와 가지는 상관관계는 Intra-set correlations( $r$ )이며 그 절대값이 클 때 대상 환경인자는 해당 Axis와 높은 상관성을 보인다. 이러한 RDA와 CCA의 결과 값은 Ordination 그래프에

종합적으로 나타난다. 즉 환경인자의 방향성은 RDA와 CCA에서 공통적으로 화살표로 나타나며, 화살표의 길이가 길수록 대상 환경인자는 대입된 생물종과 강한 상관관계를 가리키는 것이다. 생물종의 분산은 CCA의 경우 점으로 표시되는데, 이 때에 점이 화살표와의 수직으로 만나는 접점이 화살표의 머리에 가까울수록 해당하는 생물종은 그 환경 인자에 의해서 강하게 영향을 받는 종이다. 그리고 RDA에서는 생물종의 분산도 화살표로 표시되며 그 길이가 긴 종일수록 풍부도가 높은 종으로 그래프에서의 표현력이 크다. 또한 그래프의 중심점에서 뺀어 나가는 각도는 각 화살표(환경인자×환경인자, 생물종×생물종, 환경인자×생물종)간의 상관관계를 보여준다. 이때 화살표와 화살표 사이의 각도가 작을수록 서로간의 상관관계는 양의 방향으로 증가하며 반면에 두 화살표의 방향이 서로 정 반대의 각도를 나타낸다면 음의 방향으로 강한 상관관계가 있음을 의미한다.

## 결 과

### 1. 조사하천의 위치 및 일반적 특성

조사하천의 위치는 그림 1에서 보이는 바와 같이 경기 북부와 서부에 위치하며, 일반적인 특징은 표 9에서와

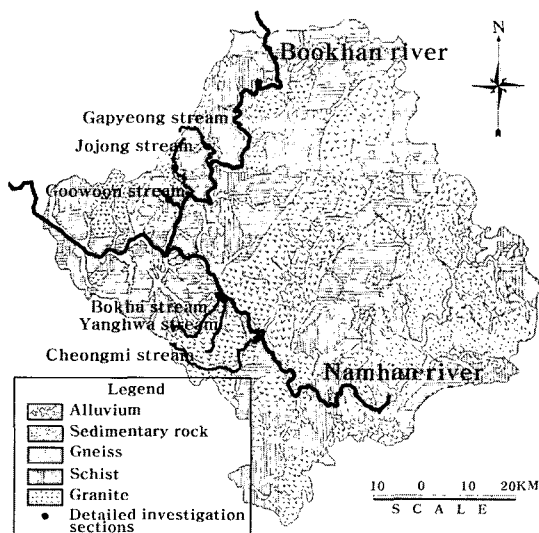


Figure 1. The location of the study sites and the geology of the Han River Basin

Table 9. General description of the study basins(Gyeonggi District, 1993, 1995, 2003a,b,c,d): N(National stream length(km)), L(Local stream length(km))

Variable	Cobble stream (Bukhan River Watershed)			Sand stream (Namhan River Watershed)		
	Gapyeong Stream	Jojong Stream	Guun Stream	Cheongmi Stream	Yanghwa Stream	Bokha Stream
Stream length(km)	41.82(L34.82)	39.30(L39.00)	18.43(L15.00)	60.80(N25.0+L35.27)	33.20(L29.81)	38.50(N19.8+L17.30)
Catchment area(km <sup>2</sup> )	306.60	260.59	87.76	595.00	183.82	308.50
Riverbed slope	1/26 ~ 1/320	1/21 ~ 1/298	1/74 ~ 1/206	1/300 ~ 1/1,000	1/55 ~ 1/3,500	1/151 ~ 1/658
Average basin slope(%)	46.40	36.90	28.00	16.00	5.46	34.81
Average basin elevation(m)	479.7	326.0	271.0	147.0	102.8	134.5
Sinuosity	2.07	1.68	1.31	1.70	1.27	1.54
Dominant bed material	Cobble (5~30cm)	Cobble (5~30cm)	Cobble (5~30cm)	Sand	Sand	Sand
Land use(%)	Forest: 83.23	Forest: 83	Forest: 81.3	Agriculture:33.92 Forest:52.86	Agriculture:42.74 Forest:36.7	Agriculture:41 Forest:52.6
Geology	Gneiss,Schist	Gneiss,Schist	Gneiss,Schist	Granite	Granite	Granite
pH	7.1	7.5	7.2	7.96	7.7	7.77
Chemical water conductivity quality ( $\mu$ shos)	85	127	68.9	340	236	658
BOD(mg/ℓ)	1.0: I Class	1.1: II Class	0.7: I Class	2.8: II Class	2.1: II Class	5.4: III Class

같이 북한강 수계의 가평천, 조종천, 구운천은 주로 큰 자갈하천이고, 남한강 수계의 청미천, 양화천, 북한천은 주로 모래하상의 하천이다. 그리고 북한천과 청미천의 일부 구간을 제외하고 모두 지방 2급 하천이다. 조사하천들의 공통적 환경요소는 하천변 토지이용성이 주로 농경지와 산림으로 구성되어 있는 것이다. 반면에 서로 다른 유역의 환경요소는 표 9에서처럼 북한강 수계 조사하천이 남한강 수계 사례하천에 비하여 유역의 고도가 높은 편이다. 하천의 특성은 남한강 수계 모래하천의 유로연장이 33-60 km이며 하도의 사행성은 1.3-1.7, 하상경사는 0.2-0.3%로 매우 완만하다. 한편 북한강 수계 자갈하천의 경우 유로연장이 18-42 km로 짧은 편이며, 사행성은 1.3-2.1로 남한강 수계 모래하천보다 약간 크고, 하상경사는 28-47%로 급하다. 지질과 수화학성에서 북한강 수계 사례하천은 그림 1에서와 같이 주로 편마암으로 구성되어있으며 전기전도도가 낮으나 남한강 유역의 사례하천은 화강암이며 전기전도도가 높게 나타났다. 아울러 수질은 북한강 수계의 사례하천은 BOD 기준 0.1-1.1 mg/l 이고, 남한강 수계는 2.1-5.4 mg/l로서 북한강 수계하천의 수질이 더 양호하다.

## 2. 조사하천의 물리적 구조와 출현생물의 특성

하천의 물리적 구조 평가를 위한 항목 25개 중에서 하천유형평가와 관련이 있는 9개의 평가척도만을 선별하여 중점조사구에 대한 자갈하천(북한강 수계)과 모래하천(남한강 수계)의 특성을 비교하였다. 그 결과 그림 2에서 보이는 바와 같이 북한강 수계는 남한강 수계에 비하여 하도사행이 심하고, 하상재료의 다양성과 깊이 및 파랑의 다양성, 횡단폭의 변화와 특히 하상구조가 많은 것으로 나타났다. 반면에 횡단사주는 남한강 수계의 모래하천에서 보다 북한강수계의 자갈하천에서 미약하게 형성되는 것으로 조사되었다. 아울러 두 유형의 하천에서 서로 큰 차별성이 없이 조사된 물리적 구조는 “사행침식” 및 “횡단침식” 항목이었다. 물리적 구조에 따른 생태성 정도는 남한강 수계 하천의 지수값은 1.3-4.7로 표 10에 의거 “매우 양호” ~ “결여”의 범위이고, 북한강 수계의 하천은 1.0-3.3으로 “매우 양호” ~ “양호”로 평가되어 물리적 구조 인자 9개 항목으로 본 하천의 물리적 구조의 생태성은 북한강 수계의 하천이 더 양호한 것으로 평가되었다.

저서생물은 총 62종이 출현하였는데, 표 11에서처럼 북한강 수계인 자갈하천에서만 공통적으로 출현한 종은 15종이다. 이들의 Qi(개별분류군 환경질 점수)에 따른 구성비를 보면 Qi가 1인 종은 없었으며 Qi가 2인 종은 2종(13.3%), Qi가 3인 종은 8종(53.3%), Qi가 4

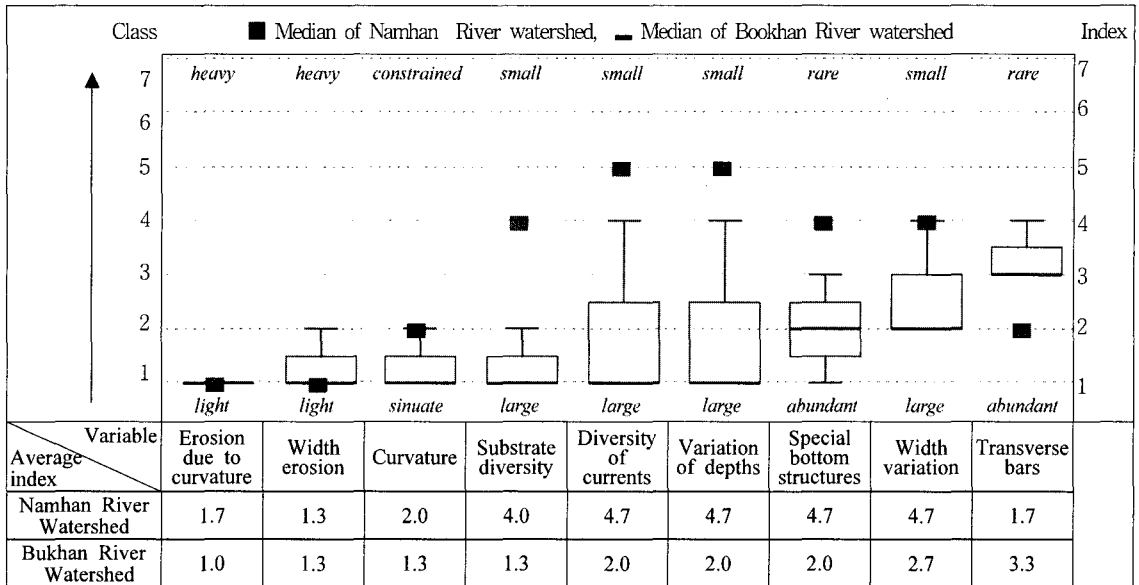


Figure 2. A comparison of the hydromorphological structure quality classes for the stream typology among the study sites

Table 10. Structure quality classes(LAWA, 2000): \*EU Water Framework Guideline

Class	State	Index	Ecological condition by EU-WFG*
1	Unchanged	1.0~1.7	
2	Slightly changed	1.8~2.6	Very good
3	Moderately changed	2.7~3.5	Good
4	Distinctly changed	3.6~4.4	Fair
5	Obviously changed	4.5~5.3	Poor
6	Strongly changed	5.4~6.2	
7	Completely changed	6.3~7.0	Very poor

인 종은 5개(33.3%) 종으로 Qi가 3이상인 종이 대부분이었다. 반면에 남한강수계의 모래하천에서만 공통적으로 출현한 종에는 31:물자라(Qi:2), 33:밀잠자리(Qi:2)등의 7개종이었으며 Qi가 1인 종이 2개종(28.6%), Qi가 2인 종이 4개종(57.1%), Qi가 4인종이 1개종(14.3%)으로 Qi 2이하인 종이 대부분이었다. 그리고 두 유형의 하천에서 공통적으로 출현한 종은 모두 5개종으로 나타났으며, 이 중 Qi=1과 Qi=2인 종이 각각 2개종이었고 Qi=3인종이 1개종이었다(표 11).

식물 및 식생은 표 12에서처럼 북한강수계의 자갈하천이 남한강수계의 모래하천에 비하여 식물의 총 출현종과 1m<sup>2</sup>당의 출현종수가 더 많았다. 귀화종의 출현 정도는 자갈하천에서나 모래하천에서나 별로 차이가 없었으며 1, 2년초의 출현정도는 모래하천에서 약

10% 가량 더 많았다. 그리고 북한강 수계 자갈하천에서의 주요균락은 갯버들, 버드나무, 달뿌리풀 균락이 우점하는 반면에 남한강 수계 모래하천에서는 달뿌리풀균락도 출현하나 그 분포도는 자갈하천에서 보다는 작고, 갈대균락, 또는 환삼덩굴-갈풀균락 등이 출현하였다. 아울러 자갈하천에서는 목본류가 모래하천에서는 초본류가 우세하는 특성을 나타내었다. 조사하천의 공통종은 표 13에서처럼 자갈하천의 경우 갯버들을 비롯한 29종이었으나, 모래하천에서만 출현한 공통종은 7종으로 모래하천의 경우 공통종이 더 작았다. 한편 두 유형의 하천에서 높은 빈도로 출현한 종은 썩, 달뿌리풀, 환삼덩굴이며 총 9종의 공통종이 조사되었다.



Table 11. Common benthic macroinvertebrate species of cobble stream and sand stream

Variable	Scientific name of the benthic macroinvertebrates	Cobble stream (Bukhan River Watershed)			Sand stream (Namhan River Watershed)			Sum of population	Qi
		Gapyeong Stream	Jojong Stream	Guun Stream	Cheongmi Stream	Yanghwa Stream	Bokha Stream		
Species of cobble stream	21: <i>Paraleptophlebia chocolata</i>	14	37	58				109	4
	3: <i>Nothopsyche</i> KUb	48	28	29				105	4
	45: <i>Stenopsyche bergeri</i>	43	39	22				104	4
	58: <i>Semisulcospira coreana</i>	55	38	11				104	3
	51: <i>Rhoenanthus coreanus</i>	12	20	69				101	3
	32: <i>Cincticostella levanidovae</i>	31	40	20				91	4
	15: <i>Ecdyonurus levis</i>	39	15	36				90	3
	23: <i>Ecdyonurus kibunensis</i>	29	49	12				90	4
	1: <i>Tipulide</i> sp.1	32	39	13				84	3
	44: <i>Sieboldius albardae</i>	20	17	37				74	3
	8: <i>Glossosoma</i> KUa	19	18	27				64	4
	38: <i>Davidius lunatus</i>	16	28	18				62	3
	20: <i>Ephemera orientalis</i>	19	11	7				37	3
2: <i>Tipulide</i> sp.2	7	7	2				16	3	
25: <i>Whitmania pigra</i>	4	3	7				14	2	
Species of sand stream	40: <i>Limnodrilus gotoi</i>				89.5	89	82.5	261	1
	48: <i>Physa acuta</i>				71.5	66.5	48	186	1
	13: <i>Baitis thermicus</i>				34	58.5	48.5	141	2
	11: <i>Micronecta sedula</i>				33	40.5	39.5	113	2
	28: <i>Ephemera strigata</i>				8.5	10	16.5	35	4
	31: <i>Muljarus japonicus</i>				14	9.5	7.5	31	2
33: <i>Orthetrum albistylum speciosum</i>				12	5.5	13.5	31	2	
Common species of cobble and sand stream	9: <i>Chironomidae</i> sp. 1	23	27	40	83.5	101.5	93	368	1
	37: <i>Aquaris paludum</i>	30	28	28	41	44.5	40.5	212	2
	30: <i>Lymnaea auricularia</i>	20	28	66	23	8	9	154	1
	6: <i>Calopteryx atrata</i>	7	19	15	27	17.5	23.5	109	3
	60: <i>Potamonectes hostilis</i>	6	20	3	30	20	11	90	2

Table 12. Comparison of the vegetation between cobble streams and sand streams

Variable	Cobble stream (Bukhan River Watershed)				Sand stream (Namhan River Watershed)			
	Gapyeong Stream	Jojong Stream	Guun Stream	Average	Cheongmi Stream	Yanghwa Stream	Bokha Stream	Average
Total number of species	195	198	128	173	138	111	99	107
Number of species per 1m <sup>2</sup> of belt	11.4	13.3	14.7	13.1	8.6	8.9	9.4	8.9
Percentage of annual or biennial plants	17.4 %	28.8 %	41.4 %	29.2 %	31.9 %	44.2 %	41.4 %	39.1 %
Percentage of immigrated plants	6.2 %	13.6 %	14.1 %	11.3 %	8.7 %	12.6 %	14.1 %	11.8 %
Principal dominance plant communities	<i>Salix gracilistyla</i> , <i>Salix koreensis</i> community	<i>Phragmites japonica</i> community	<i>Phragmites japonica</i> community	<i>Phragmites japonica</i> community	<i>Phragmites japonica</i> , <i>Humulus japonicus</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> community	<i>Phragmites japonica</i> , <i>Phragmites communis</i> community	<i>Phragmites japonica</i> , <i>Phragmites communis</i> , <i>Humulus japonicus</i> community	
Common species	29 species				7 species			

Table 13. Common plant species of cobble streams and sand streams from the belt-transect investigation

Variable	Plants from low-flow channel to the levee	Cobble stream (Bukhan River Watershed)			Sand stream (Namhan River Watershed)			Appearance frequency
		Gapyeong Stream	Jojong Stream	Guun Stream	Cheongmi Stream	Yanghwa Stream	Bokha Stream	
		1: <i>Salix gracilistyla</i>	50	17	40			
2: <i>Equisetum arvense</i>	18	49	14				81	
3: <i>Carex dispalata</i>	13	44	14				71	
4: <i>Clematis apiifolia</i>	29	25	10				64	
5: <i>Chelidonium majus</i> V. <i>asiaticum</i>	1	17	27				45	
6: <i>Stephanandra incisa</i>	23	7	12				42	
7: <i>Amphicarpaea edgeworthii</i> V. <i>trisperma</i>	9	8	23				40	
8: <i>Rosa multiflora</i>	18	2	20				40	
9: <i>Oenothera odorata</i>	2	6	28				36	
10: <i>Youngia sonchifolia</i>	5	18	11				34	
11: <i>Commelina communis</i>	4	12	16				32	
12: <i>Persicaria hydropiper</i>	1	16	12				29	
13: <i>Aster yomena</i>	9	9	7				25	
Species of cobble stream	14: <i>Lactuca indica</i> V. <i>laciniata</i>	4	9	12				25
	15: <i>Setaria viridis</i>	3	6	15				24
	16: <i>Securinega suffruticosa</i>	16	4	2				22
	17: <i>Viola mandshurica</i>	5	16	1				22
	18: <i>Hosta longipes</i>	15	4	2				21
	19: <i>Viola acuminata</i>	7	9	4				20
	20: <i>Lysimachia vulgaris</i> V. <i>daurica</i>	16	3	1				20
	21: <i>Festuca ovina</i>	10	3	4				17
	22: <i>Miscanthus sinensis</i> V. <i>purpurascens</i>	9	2	6				17
	23: <i>Morus alba</i>	10	2	4				16
	24: <i>Viola verecunda</i>	7	2	5				14
	25: <i>Rubia akane</i>	2	3	7				12
	26: <i>Chenopodium album</i> V. <i>centrorubrum</i>	2	2	4				8
	27: <i>Rhus chinensis</i>	4	2	2				8
	28: <i>Fimbristylis dichotoma</i>	4	2	2				8
	29: <i>Glycine soja</i>	2	1	1				4
Species of sand stream	30: <i>Phragmites communis</i>				17	7.5	38	62.5
	31: <i>Artemisia selengensis</i>				3	33	23	59
	32: <i>Salix koreensis</i>				3	28.5	2	33.5
	33: <i>Bromus japonicus</i>				4	16.5	13	33.5
	34: <i>Rubia cordifolia</i> var. <i>pratensis</i>				5	3	7	15
	35: <i>Agropyron tsukushiense</i> V. <i>transiens</i>				3	4.5	7	14.5
	36: <i>Agropyron ciliare</i>				2	3	3	8
Common species of cobble and sand stream	37: <i>Artemisia princeps</i> V. <i>orientalis</i>	70	91	115	13	7.5	16	312.5
	38: <i>Phragmites japonica</i>	62	129	84	12	9	10	306
	39: <i>Humulus japonicus</i>	8	43	48	30	30	56	215
	40: <i>Phalaris arundinacea</i>	3	28	50	33	52.5	23	189.5
	41: <i>Erigeron annuus</i>	21	25	23	13	34.5	8	124.5
	42: <i>Stellaria aquatica</i>	2	23	15	14	15	32	101
	43: <i>Erigeron canadensis</i>	4	35	27	13	4.5	4	87.5
	44: <i>Rumex crispus</i>	2	15	23	3	12	4	59
	45: <i>Persicaria perfoliata</i>	1	5	6	7	10.5	17	46.5

### 3. 무생물적 환경인자와 생물과의 상관성

#### 1) 하천의 물리적 구조와 저서성 대형무척추동물

Forward selection 결과 9개의 물리적 구조항목 중에서 “하상재료의 다양성”(EN6), “하도사행”(EN4), “횡단침식”(EN2)의 3개 항목이 저서생물 종분산에 유효한 환경인자 그룹으로 선정되었다(Sig.  $\leq 0.05$ ). 이에 따라 출현한 전체 저서생물 62종과 위의 3개 물리 구조항목에 대하여 RDA를 실행하였다. 그 결과 표 14에서 보이는 것처럼 전체 저서생물종 분산의 82.1%( $\lambda$ : 0.821)의 설명율을 보였고, Ordination 그래프 상에서 구현되는 Axis 1, 2에서의 설명율은 75.7%( $\lambda_{1,2}$ : 0.757)로 나타났다. 이 중 Axis 1은 저서생물종 분산의 58.9%( $\lambda_1$ : 0.589)를 설명하고 있으며, 저서생물종과 환경인자와의 관계에 대하여 71.7%를 설명하고 있었다. 이때 저서생물종과 환경인자와의 상관계수(R)는 0.989로 매우 높은 상관관계를 보이고 있었다. 그리고 대입된 환경인자 중 “하상재료의 다양성”(EN6)( $c$ : -1.3867,  $r$ : -0.968) 항목이 Axis 1에 미치는 영향성이 가장 컸으며, 대상 Axis와의 상관성 또한 매우 높은 것으로 나타났다. 한편, Axis 2의 경우 종 분산에 대한 설명율과 저서생물종과 환경인자의 관계에 관한 설명율이 각각 16.8%( $\lambda_2$ : 0.168)과 20.5%로 Axis 1에 비해 매우 낮았다. 그러나 R 값은 0.977로 나타나 Axis 2에서의 저서생물종과 환경인자와의 상관성은 매우 높은 것으로 분석되었다. 또한 Axis 2에 가장 큰 영향성을 미치는 환경인자는 “하도사행”(EN4)( $c$ :

1.7271,  $r$ : 0.6294) 항목인 것으로 나타났으며, 이 항목과 Axis 2는 보통( $\pm 0.5 \sim 0.6$ ) 이상의 상관성을 보였다.

위의 내용을 종합하면, 그림 3의 화살표의 길이에서 제시된 것과 같이 “하상재료의 다양성(EN6)과 “하도사행”(EN4) 항목이 저서생물종 분산에 강한 영향성을 나타내는 것으로 나타났고, 이에 비하여 “횡단침식”(EN2)의 경우 그 영향성이 상대적으로 작은 것으로 평가되었다. 또한, “하상재료의 다양성”(EN6)과 “하도사행”(EN4)은 서로 양의 방향으로 깊은 상관성을 보인 반면에 “횡단침식”(EN2)의 경우 나머지 두 개 환경인자와의 상관관계가 미미하였다.

아울러 그림 3의 A그룹(그래프의 좌측 상단)은 EN6 및 EN4와 양의 방향으로 상관성이 있는 저서생물종으로 “하상재료의 다양성”(EN6)과 “하도사행”(EN4)이 작은 환경을 가리키는데 종 25, 52, 54 등은 “하도사행”(EN4)이 작은 것과, 종 9, 11, 28, 37, 56 등은 “하상재료의 다양성”(EN6)이 작은 것과 밀접한 상관관계를 나타내고 있다. 반면에 D그룹(그래프의 우측 하단)은 위의 A그룹과 반대의 물리적 구조를 지시하고 있다. 즉 D그룹의 종 중 4, 5, 14, 29, 35, 36, 43, 49 등은 “하도사행”(EN4)이 큰 경우와, 종 3, 20, 32, 45, 55 등은 “하상재료의 다양성”(EN6)이 풍부한 경우와 강한 상관성을 지시하고 있다.

한편, C그룹은 “횡단침식”(EN2)과 양의 상관관계를 나타내고, 횡단침식이 큰 지역을 선호하는 것으로 평가할 수 있다. 특히, 7, 18, 26, 34, 42, 57, 60, 61, 62 종 등은 C그룹의 성격을 강하게 나타내고 있다. 한편 B그룹은 EN2와 음의 상관성을 보여 “횡단침

Table 14. Result of the RDA for benthic macroinvertebrates and stream hydromorphological structures.

Result	Axis		Axis 1	Axis 2	Total variable	
Sum of all eigenvalues					1	
Sum of all canonical eigenvalues					0.821	
Eigen values( $\lambda$ )			0.589	0.168	1	
Cumulative percentage variance						
of species data			58.9	75.7		
of species-environment relation			71.7	92.2		
Species-environment correlations(R)			0.989	0.977		
Canonical coefficients(c) and intra-set correlations(r)			<i>c</i>	<i>r</i>		
of environmental variable EN2			-0.0575	-0.4265	-0.4708	-0.3829
of environmental variable EN4			0.5015	-0.7316	<b>1.7271</b>	<b>0.6294</b>
of environmental variable EN6			<b>-1.3867</b>	<b>-0.968</b>	-1.0978	0.2435

\*Range of correlation: Generally, if the correlation coefficient between two variables is  $\pm 1.0$ , it represents perfect correlation,  $\geq \pm 0.9$  means extreme correlation,  $\pm 0.7$  to  $\pm 0.8$  reflects high correlation,  $\pm 0.5$  to  $\pm 0.6$  means ordinary correlation, 0.3 to  $\pm 0.4$  expresses weak correlation and  $\pm 0.2 \leq$  represents no correlation(정충영과 최이규, 2002).

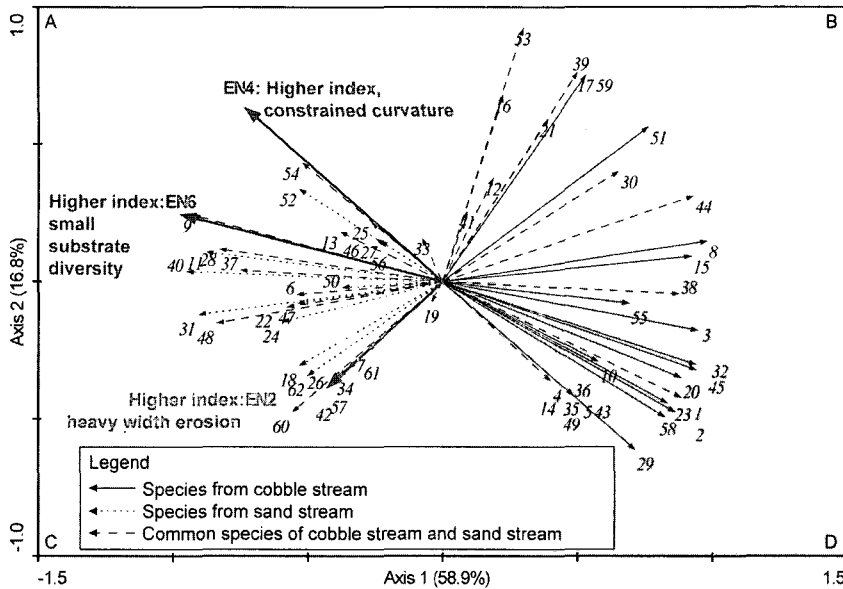


Figure 3. RDA ordination graph for 62 benthic macroinvertebrates and 3 stream hydromorphological structures: Focus scaling on inter-species correlation, Species scores divide by standard deviation, Species scaling factor and explanatory scaling factor are 1.

Species number and their scientific name:

- 1: *Tipulide* sp.1(Qi:3), 2:*Tipulide* sp.2(Qi:3), 3:*Nothopsyche* KUa(Qi:4), 4:*Kamimuria* KUa(Qi:4), 5:*Baetis fuscatus*(Qi:2), 6:*Calopteryx atrata*(Qi:3), 8:*Glossosoma* KUa(Qi:4), 7:*Ranatra chinensis*(Qi:2), 9:*Chironomidae* sp. 1(Qi:1), 10:*Laccophilus difficilis*(Qi:2), 11: *Micronecta sedula*(Qi:2), 12:*Hydaticus grammicus*(Qi:2), 13:*Baitis thermicus*(Qi:2), 14:*Goerodes* KUa(Qi:3), 15:*Ecdyonurus levis*(Qi:3), 16:*Macromia daimoji*(Qi:2), 17:*Whitmania edentula*(Qi:2), 18:*Semisulcospira libertina*(Qi:4), 19:*Erpobdella lineata*(Qi:1), 20:*Ephemera orientalis*(Qi:3), 21:*Paraleptophlebia chocolata*(Qi:4), 22:*Sympetrum eroticum*(Qi:2), 23:*Ecdyonurus kibunensis*(Qi:4), 24:*Cercion calamarum*(Qi:2), 25:*Whitmania pigra*(Qi:2), 26:*Unio douglasiae*(Qi:2), 27:*Anax nigrofasciatus*(Qi:2), 28:*Ephemera strigata*(Qi:4), 29:*Rhyacophila* KUa(Qi:4), 30:*Lymnaea auricularia*(Qi:1), 31:*Muljarus japonicus*(Qi:2), 32:*Cincticostella levanidovae*(Qi:4), 33:*Orthetrum albistylum speciosum*(Qi:2), 34:*Platycnemis phillopoda*(Qi:3), 35:*Epeorus pellucidus*(Qi:4), 36:*Drunella aculea*(Qi:4), 37:*Aquaris paludum*(Qi:2), 38:*Davidius lunatus*(Qi:3), 39:*Hippeutis cantori*(Qi:2), 40:*Limnodrilus gotoi*(Qi:1), 41:*Ischnura asiatica*(Qi:2), 42:*Rhantus pulverosus*(Qi:2), 43:*Baetiella tuberculata*(Qi:4), 44:*Sieboldius albardae*(Qi:3), 45:*Stenopsyche bergeri*(Qi:4), 46:*Gabbia misella*(Qi:2), 47:*Hesperocorixa kolthoffi*(Qi:2), 48:*Physa acuta*(Qi:1), 49:*Wormaldia* KUa(Qi:4), 50:*Laccotrephes japonensis*(Qi:2), 51:*Rhoenanthus coreanus*(Qi:3), 52:*Corbicula fluminea*(Qi:3), 53:*Semisulcospira tegulata*(Qi:3), 54:*Hydropsyche* KUa(Qi:4), 55:*Iron aesculus*(Qi:3), 56:*Macrobrachium nipponense*(Qi:3), 57:*Anodonta woodiana*(Qi:2), 58:*Semisulcospira coreana*(Qi:3), 59:*Stylurus annulata*(Qi:2), 60:*Potamonectes hostilis*(Qi:2), 61:*Dytiscidae* sp. 1(Qi:2), 62:*Dytiscidae* sp. 2(Qi:2)

식”(EN2)이 작은 것을 지시하며, 이에 속한 종은 종 30, 51 등이다.

대입된 종의 출현지역을 살펴보면 하상재료의 다양성이 적고, 하도사행성이 미약하나 횡단침식이 큰 환경(EN4, 6, 2)에서는 모래하천 종들이 대부분으로 그 래프의 A와 C에 속한 종들이다. 반대로 하상재료의

다양성과 하도사행이 크고 횡단침식이 약한 환경을 가 리키는 B와 D그룹에는 자갈하천 종이 대부분이었다. 이러한 분석결과로 미루어 볼 때 하천의 사행성, 하상 재료 그리고 횡단침식과 같은 물리적 구조는 저서생물 종의 출현성은 물론 서식처의 특성을 구분하는 데에도 큰 무리가 없는 것 같다.

2) 하천수의 화학성과 저서성 대형 무척추 동물

Pearson 상관분석과 Forward selection 결과 수질의 pH를 비롯한 12개 항목 중 COD 만이 유의수준( $\text{sig.} \leq 0.05$ )을 만족하였다. 따라서 총 62개의 저서생물종과 COD를 대입하여 RDA를 실행하였다. 그 결과 Axis의 개수는 대입된 환경인자의 수와 동일하기 때문에 여기에서는 첫 번째 Axis 만이 COD에 따른 저서생

물종의 분산을 보여주고 있는데 Axis 1에서의 종 분산에 대한 설명율은 44.7%( $\lambda_1=0.447$ )이다. 그리고 저서생물과 환경인자와의 상관관계( $R: 0.868$ )는 높은 것으로 나타났으며,  $c$  와  $r$  값은 모두 -1이었다. 한편, 환경인자에 의해서 종분산이 한정되지 않지만 그래프에서 세로축을 담당하는 Axis 2의 설명율은 22.4 %( $\lambda_2=0.224$ )이었고 여기에서의  $R$ ,  $c$ ,  $r$ 값은 0이다(표 15).

Table 15. Result of the RDA for benthic macroinvertebrates and COD: See "Range of correlation\*" in table 15

Result	Axis	Axis 1	Axis 2	Total variable
Sum of all eigenvalues				1
Sum of all canonical eigenvalues				0.447
Eigen values( $\lambda$ )		0.447	0.224	1
Cumulative percentage variance of species data		44.7	67	
of species-environment relation		100	0	
Species-environment correlations( $R$ )		0.868	0	
Canonical coefficients( $c$ ) and intra-set correlations( $r$ ) of environmental variable COD		$c$ $r$	$c$ $r$	
		-1    -1	0    0	

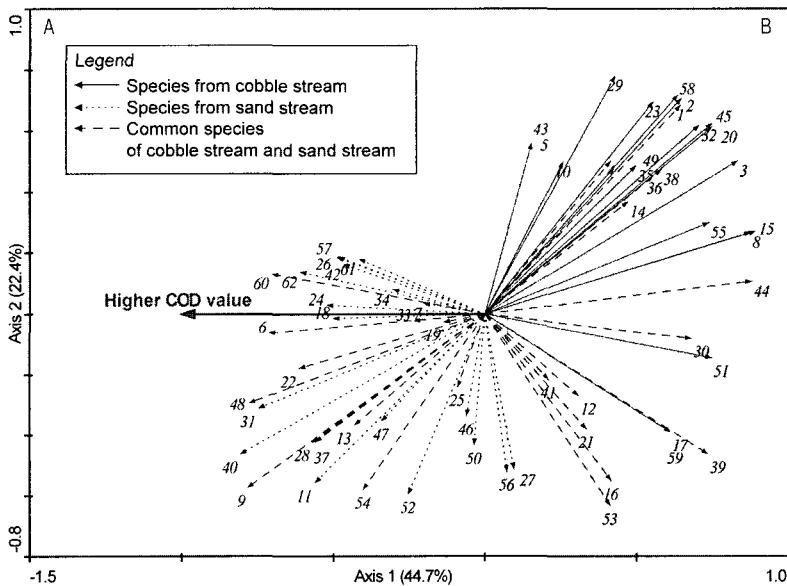


Figure 4. RDA ordination graph for 62 benthic macroinvertebrates and COD: Focus scaling on inter-species correlation, Species scores divide by standard deviation, Species scaling factor and explanatory scaling factor are 1, See "Species number and their scientific name" in figure 3.

RDA 서열분석결과 그림 4에서와 같이 COD에 따른 저서생물 군집은 크게 A(그래프의 좌측)와 B그룹(그래프의 우측)으로 구분되었다. 이 중 A그룹의 종은 COD 농도의 증가와 양의 상관관계를 나타내고 있으며, B그룹은 음의 상관관계를 보이고 있었다. 특히 A그룹의 종 중 6, 18, 19, 24, 33 등은 높은 농도의 COD를 강하게 지시하고 있으며 반면에 B그룹의 44, 30번 등은 낮은 농도의 COD와 밀접한 상관관계를 나타냈다. 아울러 그룹별 출현 종을 보면 A그룹에는 실제로 수질이 불량한 대부분 모래하천에서 출현한 종이 속하였으며 B그룹에는 수질이 양호한 자갈하천에서 우점하는 종들이었다. 이것으로 하천수의 COD 농도와 저서생물의 출현성 그리고 하천의 유형이 서로 높은 연관성을 지시하고 있다고 볼 수 있다.

3) 하천의 물리적 구조와 식물출현

Forward selection 결과 9개의 물리적 구조항목 중 “횡단침식”(EN2), “횡단사주”(EN3), “하상재료의 다양성”(EN6), “파랑의 다양성”(EN7) 항목이 식물분산에 유효한 환경인자로 선정되었다(sig. ≤0.05). 이에 선발된 116종의 식물을 대입하여 CCA를 적용하였다. 그 결과 대입된 환경인자로 설명되는 식물종 분산은 전체의 59.3%(λ: 1.495)로 나타났다. 각 Axis 별로 보면, Ordination 그래프의 가로축에 해당하는 Axis 1은 식물종 분산에 대하여 24.7%(λ<sub>1</sub>:0.624)를 보여주며, 종과 환경인자의 관계에 대하여 41.7%를 설명하고 있었다. 이때의 식물종과 환경인자의 상관관계(R:0.997)는 매우 높았다. 그리고 Axis 1에 가장 강한 영향성을 나타낸 환경인자는 “횡단사주”(EN3) (c:-1.6684) 항목

으로서, 이 항목과 Axis 1과의 상관성(r:-0.9007)은 매우 컸다. 한편, 그래프의 세로축인 Axis 2는 λ<sub>2</sub> 값이 0.398로서 식물종 분산에 대한 설명율(15.9%)과 식물종과 환경인자와의 관계에 대한 설명율(26.7%)이 Axis 1에서에 비해서 낮았다. 그러나 종과 환경인자와의 상관계수(R)는 0.979로 상관성이 매우 높았다. 또한, 대입된 항목 중 “하상재료의 다양성”(EN6) (c:2.1906)이 Axis 2에 가장 강한 영향성을 나타내었으며, 이때의 r은 0.573으로 이 항목과 Axis 2 사이에는 보통 정도의 상관관계가 성립하였다(표 16).

이러한 결과를 종합하면, 그림 5의 화살표에서와 같이 4개 물리적 구조항목 중 “횡단사주”(EN3)와 “하상재료의 다양성”(EN6) 항목이 식물출현에 가장 강한 영향성을 나타내었으며, “횡단침식”(EN2), “파랑의 다양성”(EN7)은 그에 비하여 영향성이 작았다. 그리고 “횡단침식”(EN2), “하상재료의 다양성”(EN6), “파랑의 다양성”(EN7)은 서로 양의 방향의 상관성을 보였고, “횡단사주”(EN3)의 경우 위의 3개 항목과 음의 방향의 상관관계를 나타내었다.

CCA 결과 대입된 식물종은 그림 5에서와 같이 A, B, C의 3개 그룹으로 나뉘어졌다. 이 중 A그룹은 “횡단사주”(EN3)와는 양의 방향으로, “횡단침식”(EN2), “하상재료의 다양성”(EN6), “파랑의 다양성”(EN7)과는 음의 방향의 상관성을 보여 물리적 구조의 특성은 횡단사주가 많지 않고, 횡단침식은 약하며, 하상재료의 다양성과 파랑의 다양성이 많은 하천환경을 가리킨다. 이러한 특성을 강하게 가리키는 종은 특히 A그룹에서 a의 종들로서 북한강 수계의 자갈하천인 가평천에서 출현한 종들이었다.

Table 16. Result of the CCA for plants and Substrate stream hydromorphological structures: See "Range of correlation\*" in table 15.

Result	Axis		Total variable	
	Axis 1	Axis 2		
Sum of all eigenvalues				2.519
Sum of all canonical eigenvalues				1.495
Eigen values(λ)	0.624	0.398		1
Cumulative percentage variance				
of species data	24.7	40.6		
of species-environment relation	41.7	68.4		
Species-environment correlations(R)	0.997	0.979		
Canonical coefficients(c) and intra-set correlations(r)				
of environmental variable EN2	-0.5251	0.3741	0.7858	0.6571
of environmental variable EN3	<b>-1.6684</b>	<b>-0.9007</b>	1.2269	-0.4117
of environmental variable EN6	-0.7324	0.7517	<b>2.1906</b>	<b>0.573</b>
of environmental variable EN7	0.3125	0.7816	-1.069	0.2493

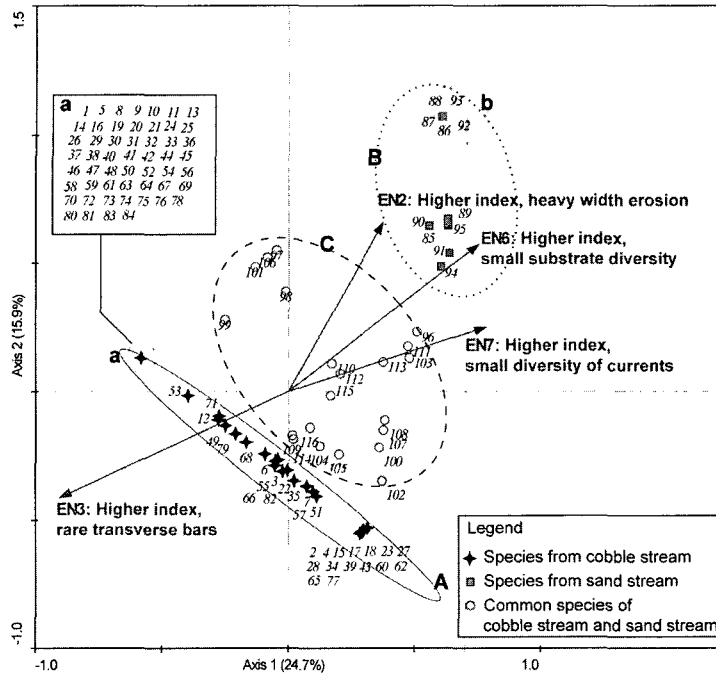


Figure 5. CCA ordination graph for 116 plant species and 4 stream hydromorphological structures: Focus scaling on inter-species correlation, Biplot scaling(LΛa), type, Species scaling factor = 0.5, Explanatory scaling factor = 1

Species number and their scientific name:

- 1: *Ailanthus altissima*, 2: *Galium spurium*, 3: *Setaria vidis*, 4: *Rorippa indica*, 5: *Ampelopsis brevipedunculata* V. *heterophylla*, 6: *Salix gracilistyla*, 7: *Youngia sonchifolia*, 8: *Pteridium aquilinum* V. *latiusculum*, 9: *Staphylea bumalda*, 10: *Securinega suffruticosa*, 11: *Oxalis corniculata*, 12: *Stephanandra incisa*, 13: *Carex lanceolata*, 14: *Festuca ovina*, 15: *Trigonotis peduncularis*, 16: *Vicia unijuga*, 17: *Impatiens noli-langere*, 18: *Corydalis ochotensis*, 19: *Actinidia arguta*, 20: *Maackia amurensis*, 21: *Acer palmatum*, 22: *Commelina communis*, 23: *Bilderdykia dumetora*, 24: *Parthenocissus tricuspidata*, 25: *Carex siderosticta*, 26: *Aceriphyllum ossii*, 27: *Ambrosia artemisiifolia* V. *elatiior*, 28: *Alopecurus aequalis* V. *amurensis*, 29: *Woodsia manchuriensis*, 30: *Kummerowia striata*, 31: *Berberis koreana*, 32: *Hypericum ascyron*, 33: *Impatiens textori*, 34: *Bidens frondosa*, 35: *Aster pilosus*, 36: *Cardamine leucantha*, 37: *Angelica decursiva*, 38: *Duchesnea chrysantha*, 39: *Stellaria alsine* V. *undulata*, 40: *Weigela subsessilis*, 41: *Rhus chinensis*, 42: *Hosta longipes*, 43: *Torilis japonica*, 44: *Rubus crataegifolius*, 45: *Morus bombycis*, 46: *Crataegus pinnatifida*, 47: *Rhododendron yedoense* V. *poukhanense*, 48: *Vicia angustifolia* V. *segetilis*, 49: *arex dispalata*, 50: *Menispermum dauricum*, 51: *Amphicarpaea edgeworthii* V. *trisperma*, 52: *Lycopus ramosissimus* V. *japonicus*, 53: *Acer ginnala*, 54: *Lespedeza bicolor*, 55: *Aster yomena*, 56: *Malus sieboldii*, 57: *Chelidonium majus* V. *asiaticum*, 58: *Onoclea sensibilis* V. *interrupta*, 59: *Potentilla fragarioides* var. *major*, 60: *Persicaria hydropiper*, 61: *Hemerocallis fulva*, 62: *Lactuca indica* var. *laciniata*, 63: *Youngia denticulata*, 64: *Callicarpa japonica*, 65: *Trisetum bifidum*, 66: *Viola mandshurica*, 67: *Artemisia japonica*, 68: *Arthraxon hispidus*, 69: *Lespedeza maximowiczii*, 70: *Spiraea prunifolia* var. *simpliciflora*, 71: *Viola acuminata*, 72: *Quercus serrata*, 73: *Boehmeria spicata*, 74: *Lysimachia vulgaris* V. *davurica*, 75: *Gleditsia japonica* V. *koraiensis*, 76: *Aristolochia contorta*, 77: *Hemistepta lyrata*, 78: *Plantago asiatica*, 79: *Rosa multiflora*, 80: *Lilium tigrinum*, 81: *Aster scaber*, 82: *Pueraria thunbergiana*, 83: *Viola verecunda*, 84: *Euonymus alatus* for. *ciliato-dentatus*, 85: *Oenanthe javanica*, 86: *Metaplexis japonica*, 87: *Pinus densiflora*, 88: *Quercus mongolica*, 89: *Rubia cordifolia* V. *pratensis*, 90: *Salix koreensis*, 91: *Persicaria perfoliata*, 92: *Robinia pseudo-acacia*, 93: *Rosa multiflora*, 94: *Artemisia selengensis*, 95: *Phragmites communis*, 96: *Bromus japonicus*, 97: *Quercus aliena*, 98: *Morus alba*, 99: *Miscanthus sinensis* V. *purpurascens*, 100: *Beckmannia syzigachne*, 101: *Dioscorea batatas*, 102: *Agropyron tsukushiense* V. *transiens*, 103: *Stellaria aquatica*, 104: *Oenothera odorata*, 105: *Rumex crispus*, 106: *Fraxinus rhynchophylla*, 107: *Persicaria thunbergii*, 108: *Erigeron canadensis*, 109: *Clematis apiifolia*, 110: *Carex dispalata*, 111: *Phalaris arundinacea*, 112: *Erigeron annuus*, 113: *Humulus japonicus*, 114: *Equisetum arvense*, 115: *Artemisia princeps* V. *orientalis*, 116: *Phragmites japonica*

B그룹은 A그룹과 반대의 물리적 구조와 상관성을 나타내어 “횡단사주(EN3)가 상대적으로 많고, “횡단침식(EN2) 강하며 “하상재료의 다양성(EN6), “파랑의 다양성(EN7)이 작은 하천환경에서 출현하는 종의 그룹으로 남한강 수계의 모래하천에서 출현한 종들이다. 특히 B그룹의 종 중 음영으로 표시된 b의 종들은 이러한 지시성이 강한 것들이다. 한편, C그룹은 자갈과 모래하천에서 동시에 출현한 종들로서 대입된 물리적 구조와 뚜렷한 상관성을 보이고 있지 않다.

이와 같은 분석결과를 대입된 식물종의 실제 출현 지역과 비교하면 A그룹은 자갈하천에서만 출현한 종으로 구성되어 있고, B그룹은 모래하천에서만 출현한 종들의 그룹이었다. 이러한 결과는 식물 종 또한 저서생물과 마찬가지로 물리적 구조가 하천식물서식처와 출현에 밀접한 연관성이 있음을 지시하는 것이라 사료된다.

## 결론 및 고찰

하천유형성 분류적으로 이용되는 9개의 물리적 구조조사 항목 중에서 저서생물과 식물과의 상관성을 보인 항목은 하상재료의 다양성, 하도의 사행성, 횡단사주의 발달도이었으며, 이들은 모래하천과 자갈하천에서 서로 음과 양으로 상관관계를 나타내어 두 유형의 하천의 물리적 구조가 뚜렷하게 다르다는 것을 지시하고 있었다. 즉 저서생물종들은 하상재료의 다양성과 하도사행의 정도에 따라서 하상재료의 다양성이 많고 사행성이 큰 경우는 자갈하천으로 이와 반대의 경우는 모래하천으로 분류되었고, 식물의 경우는 횡단사주의 발달도와 하상재료의 다양성으로 상관관계를 나타내어 횡단사주의 발달이 크고, 하상재료의 다양성이 약한 경우가 모래하천을 서식처로 하는 식물종들로 그 반대의 경우가 자갈하천종으로 분류되었다. 특히 하상재료의 다양성 정도는 저서생물은 물론 식물출현 및 서식에도 공통적으로 강한 상관성을 나타낸 항목으로 나타났다. 아울러 저서생물과 수질의 환경인자와의 상관관계에서는 대입된 12개의 수질인자 중에 단지 COD농도의 높낮이에 의하여 저서생물의 서식처를 자갈과 모래하천으로 분류해 주었다. 따라서 현재 본 연구결과로서는 수질의 환경요인보다는 하천의 물리적 구조가 더 생물서식에 강한 상관성을 보이고 있다고 할 수 있다.

하천환경을 구성하는 요소 중 무생물적 인자는 하천의 물리적 구조나 수화학적 이외에도 여러 가지 다른 인자들이 있다. 예를 들면 유량, 유속, 지질 및 기후

대 또는 인위적이나 자연적 교란 등이다. 그러나 본 고에서는 여러 사정으로 인하여 이러한 무생물적 환경인자들을 모두 고려하지 못하였다. 따라서 본 연구는 사례 하천과 일부의 환경 인자만을 분석하였기 때문에 타 하천의 경우에 객관성이 다소 떨어질 것이라 생각한다. 하지만 본 연구의 결과로 볼 때에 하천의 물리적 구조와 생물종과의 사이에는 매우 명확한 상관관계가 성립하였고, 이는 앞으로 자연형 하천 설계나 관리상에서 하천의 물리적 구조가 중요하게 고려되어야만 한다는 근거도 될 수 있을 것이다. 아울러 본 분석결과를 보면 출현생물이 하천의 하상재료유형이나 수질환경에 따라서도 뚜렷하게 구별되어지는 것으로 나타나서 앞으로 생물서식처를 척도로 하는 생태적 하천분류도 시도해 볼 수 있을 것으로 사료된다.

## 인용문헌

- 경기도(1993) 구운천 수계 하천정비기본계획.  
 경기도(1995) 가평천 수계 하천정비기본계획.  
 경기도(2003a) 북하천 수계 하천정비기본계획.  
 경기도(2003b) 양화천 수계 하천정비기본계획.  
 경기도(2003c) 조종천 수계 하천정비기본계획.  
 경기도(2003d) 청미천 수계 하천정비기본계획.  
 김영식, 김창환, 이경보(2002) 서열법에 의한 만경강 하천식생의 분석. 한국환경과학회지 11(10): 1031-1037.  
 안영희, 양영철, 전승훈(2001) 안성천 수계의 버드나무과 식물의 분포특성에 관한연구-월동천, 옥정천, 조명천, 기술천을 중심으로-. 한국환경생태학회지 15(3): 213-223.  
 정충영, 최이규(2002) 한글용 SPSS 10.0 SPSSWIN을 이용한 통계분석, 4판, 무역경영사.  
 환경부(2006) 수질측정망자료. 물환경 정보시스템.  
 AQEM(2001) Experiences with different stream assessment methods and outlines of an integrated method for assessing streams using benthic macroinvertebrates.  
 Kim, C.H. and B.S. Kil(1997) Canonical Correspondence Analysis(CCA) on the Forest Vegetation of Mt. Tōgyu National Park, Korea. Korea J. Ecol. 20(2): 125-132.  
 Kim, Y.S., C.H. Kim, and B.S. Kil(1999) Classification and Ordination Analysis on the Quercus mongolica Communities in Mt. Changan, Chōnbuk. Kor. J. Env. Eco. 13(2): 143-152.  
 LAWA(Laenderarbeitsgemeinschaft Wasser)(2000) Gewaesserstrukturguetekartierung in der BRD. 1. Auf. Schwerin.  
 Lepš, J. and P. Šmilauer(2003) Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge university press.



- LfU(Landesanstalt f. Umweltschutz Baden-Wuerttemberg)  
(1998) Handbuch Wasserbau 2, 41. Regionale Bachtypen  
in Baden-Wuerttemberg.
- LfU(Landesanstalt f. Umweltschutz Baden-Wuerttemberg)  
(2000) *Hydrochemische und biologische Merkmale re-*  
*gionaler Bachtypen in Baden-Wuerttemberg.* Karlsruhe.
- Prentice, I.C.(1977) Non-metric ordination methods in  
ecology. *Journal of Ecology* 65: 85-94.
- SPSS Inc.(2004) SPSS 13.0 for Window. Ter Braak, C.J.F.  
and P. Šmilauer.(1998) CANOCO reference manual and  
user's guide to canoco for windows: Software for canon-  
ical community ordination (Version 4.). Ithaca, NY,  
Microcomputer power.
- Ter Braak, C.J.F. and P. Šmilauer(2002a) CANOCO for  
Windows Version 4.5.
- Ter Braak, C.J.F. and P. Šmilauer(2002b) CANOCO refer-  
ence manual and CanoDraw for windows user's guide:  
Software for canonical community ordination(version  
4.5). Ithaca, NY, Microcomputer Power.