

생물 군집의 회복력 및 저항력 : 하천생태계 건전성 평가를 위한 응용성

Resilience and Resistance of Biological Community :
Application for Stream Ecosystem Health Assessment

노 태 호

한국환경정책·평가연구원

Tae Ho Ro

Korea Environment Institute

Abstract

Ecosystem health assessment is an emerging concept regarded as a useful diagnostic tool for evaluating ecosystems. The stability of ecosystem is the main theme in the assessment. Generally, two components - resilience and resistance - are involved in the mechanism of ecosystem stability. In this study, relative degrees of the resistance and the resilience were quantified for most aquatic insects inhabiting running waters in Korea. A total of 34 groups were newly categorized based on previous studies, and a conceptual model has been produced. The model was applied for the aquatic insect communities inhabiting different streams and demonstrated that each stream ecosystem possessed different degrees of stability. This study also indicated that it was possible to compare stabilities of different ecosystems using relative degrees of resilience and resistance. Using the conceptual model, suitable conservation and management strategies could be recommended in ecological assessments. The model can be used as a stepping-stone for developing more comprehensive methodology that objectively diagnoses and evaluates the ecosystem stability.

Keywords : Resilience, Resistance, Ecosystem Health Assessment, Stability, Aquatic Insects, Conceptual Model

I. 서 론

1. 국내동향

3가지 주요한 기능적 구성요소는 생물군집, 에너지 그리고 물질이다. 이 3가지 기본적인 구성 요소의 상관관계로부터 생태계는 다양한 기능을 나타내고 항상성이 유지된다.¹⁾ 생물군집이 지닌 구조적인 복잡성과 생태계의 항상성에 대한 연구는 자연생태계의 건전성(ecosystem health)을 규명하는데 있어 그 중심에 있는 분야이다.²⁾ 즉 안정성 및 생물다양성(stability and biodiversity)을 객관적으로 평가할 수 있는 기법을 토대로 생태계의 항상성을 평가하려는 일련의 노력이 진행되고 있는 추세이다. 환경평가에 있어 무엇보다도 중요한 것은 평가최종점(assessment endpoint)의 설정이다.³⁾ 기존에 시행 되어온 각종 영향평가를 고려해 볼 때, 일반적으로 받아들여지는 5가지의 평가최종점 결정기준 가운데 생물학적 타당성(biological relevance)⁴⁾에 있어서는 전체적인 동·식물상의 현황과악에 치중해온 경향이 있다. 이는 균형적인 토착개체군(balanced indigenous population)보존이라는 측면이 잘못 해석된 것으로 판단된다. 넓지 않은 국토를 지닌 국가에 있어 국토의 효율적 이용은 국경의 확장에 대한 대안이 될 수 있으며, 이는 생물종을 포함한 모든 자연자원 활용의 극대화와도 일치한다. 이러한 상황에서 자연을 단지 보존의 대상으로 보는 것은 광대한 국토를 지닌 국가의 정책일 수는 있으나 우리 나라와 같은 경우에는 적합한 방안은 아닌 것으로 판단된다. 따라서 자연을 보존의 대상으로 파악하고 삶의 질을 향상시키기 위한 친환경적인 개발이 필요하다. 이러한 시점에서 보다 합리적이고 객관적인 평가를 위한 방법론의 개발이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 생태학적 접근이 필수적이며, 한국 생물자원의 고유성과 특성을 고려한 생태계 건전성 평가를 위한 기법의 개발이 요구되어진다.

현재 자연생태계의 훼손을 예방하고 저감방안을 도출하고자 하는 목적으로 환경영향평가 제도가 실시되고 있으나 생태분야에 있어서는 뚜렷한 평가 및 분석기법이 미비한 상황이다. 이에 본 연구는 우수생태계 내 생물군집의 안정성을 유지하는 2가지 기작인 회복력과 저항력의 계량화를 통해 생태계의 건전성을 객관적으로 평가할 수 있는 기법을 개발·제시하고자 한다. 즉 국내 우수생태계에 서식하고 있는 생물종의 특성을 고려한 그룹화와 이들 생물군의 상대적인 회복력 및 저항력의 등급화로 분석되는 개념적인 표준모형을 제시하고, 이를 특정

1) 노태호 등. 2001.

2) Clayton, A. M. H. and N. J. Radcliffe. 1996.

3) Barnthouse, L. W., 1993.

4) Suter, G. and L. Barnthouse. 1993.

지역의 유수생태계 생물군집에 이를 적용하므로써 그 응용성을 파악하고자 한다.

II. 관련 연구기술개발 현황

1. 국내동향

국내에 있어 각종 개발 및 건설사업에 따른 환경영향의 평가에 있어 자연생태계 분야의 경우 동식물 분포현황의 조사는 양호하게 이루어지고 있으나, 생태계의 종합적 평가와 대책의 수립에 관련된 분야는 객관성이 확보된 분석기법이 없어 외국의 수준에 비하여 크게 뒤떨어져 있는 실정이다. 이는 기존에 축적된 기초적인 생태자료가 적은 이유에도 기인하지만 생태계의 항상성 또는 건전성 평가에 대한 객관적인 방법론의 개발과 접근이 활발하게 전개되지 못한 결과이다.

생태계는 그 특성상 계측기구나 도구를 이용한 측정으로 고유한 건전성을 파악할 수 없기 때문에 이를 위해서는 생태계의 중요한 구성요소 중 하나인 생물군집에 대한 이해가 선행되어야 한다. 즉 군집이 지닌 환경변화 및 교란에 대한 대처능력 또는 오염에 대한 내성의 정도를 파악함으로써 생태계의 항상성에 대한 분석이 가능해 진다.⁵⁾⁶⁾ 이를 토대로 객관성 확보를 위해 생태계의 항상성을 수치화(계량화)할 수 있는 기법의 개발이 필요하다. 그러나 현재까지 국내에서 이러한 연구는 수행되지 않고 있다. 1990년대 수행된 생태계 영향평가 기법의 개발 등 일련의 연구들⁷⁾의 결과는 육상 및 수중의 지표 생물종의 개발 및 검증의 수준에 머무르고 있다. 현재 국가적으로 환경영향평가제도의 사후환경영향조사에 있어 생태계 분야를 강화하고자 하고 있고 일부 하천이나 인공호수의 수환경 오염에 따른 수질의 평가기법이 국내에서 개발, 시도되어 현재 초기 단계에 있는 상황이다. 그러나 무엇보다도 중요한 종합적인 생태계의 건전성 평가기법의 개발은 진전을 보고 있지 못하다. 또한 외국에서 개발된 환경친화적 기법의 도입 및 적용은 초기단계에 머물러 있으나 체계적인 검토 및 여과과정을 거치지 않았으며 지역 생태계의 특성에 대한 충분한 파악 없이 실행되고 있다. 이는 단기적으로 시각적인 효과를 거둘 수는 있으나 인위적으로 새롭게 조성된 생태계가 스스로 유지할 수 있는 건전성을 지니고 있는가에 대한 평가가 없어 장기적인 측면에서의 실효성을 장담할 수 없다.

5) Camargo, J. A., 1990.

6) Metcalfe-Smith, J. L., 1996.

7) 공동수 등 1995; 염육철 등 1996; 오용남, 전태수. 1991; 위인선 등. 1991; 윤일병 등 1992a; 윤일병 등 1992b; 윤일병 등 1992c; 윤일병 등 1992d; 정준 등 1992.

2. 외국현황

외국의 경우 생태학적인 건전성의 평가는 자연 친화적인 측면을 강조하면서 자연자원의 활용성을 극대화하기 위한 적합한 결정 및 선택도구로서 이용되고 있고 현재도 많은 연구(8)9)10)를 집중적으로 실시하고 있다. 생태계의 항상성에 대한 이론적 연구를 바탕으로 1990년을 전후하여 이를 실질적으로 응용하는 단계에 들고 있다.11)

생태계의 건전성 평가는 항상성을 가늠하는 방법으로서 생태계의 회복력(resilience)과 저항력(resistance)을 함께 이용한다.12)13) 이는 인위적 영향에 따른 생태계의 변화를 예측할 수 있는 모델의 정립에 가장 기초적인 요소로서 중요한 의미를 지닌다. 이러한 예측모델을 토대로 각종 교란에 의해 생태계 내의 어떠한 생물군이 얼마만큼의 영향을 받으며 향후 서식의 가능성이 어느 정도인가를 판단할 수 있다. 그러므로 생태계의 변화에 따라 필요한 보완대책을 제시할 수 있는 체계가 이루어지고 있고 이를 기초로 하여 종합적인 평가의 기법을 개발하려는 일련의 노력이 배가되고 있는 상황이다. 그러나 이러한 방법론의 개발은 무엇보다도 생물군의 생태적 특성을 파악함으로써 가능하기 때문에 종 또는 개체군 수준에서의 지표생물의 개발이 함께 진행되고 있다. 이는 지역에 따라 출현하는 생물의 종류가 다르고 또한 같은 종일지라도 각 지역의 특성에 맞게 적응하여 환경의 변화에 대해 다른 반응성을 보이기 때문이다. 외국의 경우에 있어 가장 관심을 갖고 지속적으로 연구되고 있는 분야는 지표생물의 개발과 이들의 특성을 점수화(계량화)하는 연구이다.14)15) 육상 생태계에 있어 지표생물로서는 주로 식물종이 이용되고 있고 수중 생태계의 경우에 있어서는 무척추동물군이 이용되고 있다. 육상 생태계는 그 자체가 지닌 환경요인이 매우 복잡적이며 포괄적인 특성을 지니고 있어 그 건전성을 평가하는 것이 그리 쉽지 못하기 때문에, 수중 생태계의 평가에 대한 방법의 발전에 비해 연구성과가 미약하다. 수중 생태계의 환경 변화에 대한 건전성의 평가는 생물지수와 계량화 방법론의 개발로 이루어지고 있다.

8) Camargo, J. A., 1990.

9) Metcalfe-Smith, J. L., 1996.

10) Owen, O. S. and D. D. Chiras, 1995.

11) Petts, G. and P. Calow, 1996.

12) Peter, S. 1992.

13) National Research Council, 1992.

14) Metcalfe-Smith, J. L., 1996.

15) Persoone, G. and N. De Pauw, 1979.

Ⅲ. 군집의 회복력 및 저항력 분석

1. 생물군집의 선정 및 생태적 특성

본 연구에서는 하천 생태계의 건전성을 평가하기 위한 기법을 개발하기 위해 생물군집을 수서곤충류로 국한하여 접근하였다. 이는 저서성 대형무척추동물의 대부분(95%)이 수서곤충으로서 이들이 하천생물의 종다양성과 풍부성을 거의 결정하기 때문에 가능하다.¹⁶⁾¹⁷⁾ 하천생태계는 생산자, 소비자 및 분해자의 각 영양단계(trophic level)가 서로 유기적 관계로 연결되어 먹이사슬(food chain)을 이루고, 이들이 망처럼 얽혀서 먹이그물(food web)을 형성한다. 따라서 하천생태계의 다양성이나 단순성은 먹이사슬의 복잡성으로 측정될 수 있기 때문에 먹이사슬은 하천생태계의 기능을 규명하기 위한 주요 관심 사항일 뿐만 아니라 하천생태계의 환경을 평가하는 지표가 되기도 한다.¹⁸⁾

담수생태계의 이러한 먹이사슬을 구성하는 생물 중 수서곤충은 하천생물 중에서 가장 다양하고 풍부한 무리일 뿐만 아니라, 영양단계의 저차소비자(1차 또는 2차 소비자가 대부분)의 역할을 하기 때문에 하천생태계의 구성원으로서 중요하다. 이들은 또한 하천생태계의 다양한 환경요인과 서식처에 따라 적응방식이 다양하고, 수질환경에 대하여 민감하게 반응하는 종이 많으므로 순수 학문적 연구뿐만 아니라, 지표종으로 이용되는 등 응용연구에도 좋은 재료가 된다.¹⁹⁾ 또한 수서곤충은 담수생태계의 다양한 먹이자원(food resources)을 이용하기 때문에 이의 이용 양상에 따른 섭식기능군(functional feeding group)의 분류가 제시되어 이용되고 있다.²⁰⁾²¹⁾²²⁾ 하천연속성의 개념(River continuum concept)에 의하면 하천의 흐름에 따라 하류로 갈수록 환경구배의 변화에 따라 섭식기능군의 조성도 달라지게 되며, 또한 하천의 오염 등 인위적인 수환경의 변화에 따라서도 그 조성이 달라지므로 이에 대한 관심이 집중되어 왔다.²³⁾ 본 연구에서는 안정성(stability)측정을 위한 계량화/지수화(quantification/indexing)를 위해서 선별 될 지표 생물군에 대한 문헌 및 기본조사를 실시하였고, 이와 함께

16) 윤일병 등 1998.

17) Barnes, R. K. and K. H. Mann, 1980.

18) Barnes, J. R. and G. W. Minshall, 1983.

19) Barnes, J. R. and G. W. Minshall, 1983.

20) LeCren, E. D. and R. H. Lowe-McConnell, 1980.

21) Strand, M. and R. W. Merritt, 1999.

22) Wheeler, B. D. *et. al.* 1995.

23) Vannote, R. L, *et. al.* 1980.

선행 연구된 한국생물지수²⁴⁾²⁵⁾를 기본으로 하여 국내에서 출현하는 모든 수서곤충류 전체를 대상으로 하였다.

2. 연구대상지역

하천생태계 건전성 평가기법 개발을 위해 국내에서 출현하는 모든 수서곤충류에 대한 저항력과 회복력에 대한 등급화를 실시하여 전국적인 규모에서 나타날 수 있는 일반적인 모형을 분석하였다. 이를 다음 3지역의 우수생태계 평가에 적용하여 그 실질적인 응용성을 파악하고자 하였다.

첫 번째 대상지역으로 서울 북부지역에 위치한 북한산 국립공원 내의 남서사면에 형성된 수계를 선택하였다. 이곳은 수량의 변화가 매우 극심하며 행락인파의 영향을 받는 곳으로 물리적 교란과 인위적 교란이 지속적으로 반복되는 특성을 지니고 있다. 두 번째 대상지역은 환경부가 고시한 경기도 내 유일의 청정구역인 명지산 생태보전지역 내의 수계인 가평천이다. 본 지역은 매우 다양한 생물군이 분포하며 홍수를 제외한 다른 물리적 교란의 가능성이 매우 낮은 지역이지만 수변역의 인위적 교란이 지속적으로 증가하고 있는 지역이다. 세 번째 대상지역으로 경상북도 울진군 서면 및 북면일대의 하천을 선택하였다. 이 지역은 불영계곡을 위시하여 자연경관과 생물상의 보전상태가 뛰어난 곳이며, 기복이 심한 지표면 때문에 우리나라에서 가장 험준한 지역의 하나로 꼽히는 곳이다. 본 지역은 해안에서 가까운 지리적 특성으로 비교적 겨울이 따뜻하고 여름은 시원한 편으로 많은 행락인파의 영향을 받을 가능성이 있는 지역이다. 상기한 지역들은 도로의 확충 및 건설을 통해 교통환경이 개선될 경우, 관광명소로 부상될 수 있는 지역으로 판단된다. 이에 따른 인위적인 자연자원의 손실을 막고 생태적인 보전방법을 강구·적용하기에 적합한 지역으로 사료된다. 본 연구에서는 한국에서 나타나는 수서곤충 군집의 일반적인 경향을 분석하여 개념적인 모델을 제시하고 이를 위의 특정 3지역에 대한 비교분석을 통해 각 지역의 생태계 건전성을 검토하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 항상성 표준화

지수화의 주된 사항은 인위적인 활동에 의한 환경변화의 영향에 대한 선별(지표) 생물군의

24) 윤일병. 1995.

25) 윤일병 등. 1992c.

상대적 저항력(resistance) 및 회복력(resilience)의 등급화이다. 앞에서 기술한 바와 같이 저항력과 회복력은 생태계 항상성 또는 건전성을 유지하는 가장 주된 두 가지 요소로서, 주요 생물군에 대해 등급을 부여한 후 종합적으로 계량화(평균 또는 가중평균치)하는 것은 특정 생태계의 안정성을 객관적으로 평가할 수 있는 가장 적합한 방안의 하나이다. 예를 들어, 수서곤충 및 담수 무척추동물을 이용하여 이들에 대해 오염에 대한 내성치를 부여하고 수환경 교란(오염)에 따른 생태계의 변화를 모니터링하는 기법은 최근 서구 여러 나라에서 경쟁적으로 개발되고 있다.

〈표 1〉 저서성 대형무척추동물의 수질등급에 따른 출현특성(KBI 산출기준표)

번호	지표생물군	<V*	IV	III	II	I
1	플라나리아류				1**	3
2	선충류			2	3	
3	실지렁이류	3	2	1		
4	거머리류		2	3	1	
5	복족류		2	3	1	
6	부족류		1	2	2	
7	옆새우류, 가재류				1	3
8	등각류, 새뱅이류		2	3	1	
9	톡톡이류				2	3
10	개똥하루살이, 연못하루살이, 등딱지하루살이류		2	3	2	1
11	강하루살이류, 동양하루살이, 납작하루살이, 등줄하루살이, 세갈래하루살이			1	3	1
12	하루살이류(기타)			1	2	3
13	고려측범잠자리, 쇠측범잠자리			1	2	2
14	잠자리류(기타)		2	3	1	1
15	강도래류				1	3
16	뱀잠자리류			1	2	2
17	물날도래류, 광택날도래류, 입술날도래류				1	3
18	날도래류(기타)			1	3	2
19	여울벌레류, 물삿갓벌레류			1	3	2
20	딱정벌레류(기타)		1	2	1	1
21	각다귀류			1	2	2
22	등에류			1	3	1
23	나방파리류	3	2	1		
24	먹파리류			1	2	2
25	깔따구류(붉은색)	3	2			
26	깔따구류(흰색)		1	1	3	2
27	멧모기류					3
28	개울등에류				2	3
29	꽃등에류	3	2			

* I : 고도의 청정수, II : 청정수, III : 다소의 오염수, IV : 오염수, <V : 고도의 오염수

** 1 : 출현도 낮음, 2 : 출현도 보통, 3 : 출현도 높음

출처 : "윤일병, 1995. 수서곤충검색도설, 정행사. p.262"의 자료를 변형

국내에 보고되어 서식하는 수서곤충류는 8목(하루살이, 잠자리, 강도래, 노린재, 뱀잠자리, 딱정벌레, 파리 및 날도래목)에 총 723종이 정리, 보고되어 있다. 이들과 기타 수서 무척추동물 29개 군(group)으로 나누어 이용한 수질관정기법인 한국생물지수(Korean Biotic Index ; KBI)가 현재 개발되어 있다.²⁶⁾²⁷⁾

이는 대부분 과(family) 수준 (일부는 속 및 종 수준)에서 담수 무척추동물군의 내성치(tolerance value)와 출현 풍부도를 차등적으로 부여한 후, 이들로부터 오수생물지수를 산정하였고 이 값을 다양도지수를 이용하여 변환시킨 단위지수로 환산한 후 종합적인 분석을 위한 생물지수를 산출하는 일련의 과정을 거치는 방식이다. 이후 이를 응용하여 보다 쉽고 간단하게 현지에서 수질을 측정할 수 있는 속성수질판정법(Korean Rapid Water Quality Assessment ; KRWQA)을 1995년에 개발하였다. 이는 수질을 5단계(고도의 청정수, 청정수, 다소의 오염수, 오염수 및 고도의 오염수)로 평가하는 방법으로 다양한 생물군이 각 수질의 단계에서 출현하는 정도를 3단계(높음, 보통, 낮음)로 구분하여 평가되어진 기본 자료를 활용하는 유용한 방법으로 일반적인 분류학적 지식을 통해 수질을 평가할 수 있는 방법이다.²⁸⁾

이러한 등급화는 수환경의 오염에 대한 생물군의 반응을 의미하므로 이를 기준으로 변형된 상대적 저항력을 산출하는 것은 매우 합리적인 접근이다. 그러나 이는 수계의 화학적 교란(오염)의 정도만을 지표(계량화)하는 한계점을 지니고 있고 특정 군에 포함되어 있는 일부 곤충류의 물리적 교란에 대한 상대적 저항력이 서로 상이한 특성을 지니고 있다. 따라서 곤충류 이외의 분류군들은 제외시키고 새로이 몇몇개 군을 세분화하여 총 34개 군으로 세분한 후 이들의 상대적 저항력을 부여하였다(표 2). 상대적 회복력은 34개 군에 대한 생태적 자료들²⁹⁾을 토대로 물리적 교란 후 서식지에 재출현하는 시간, 이동력, 분포 영역의 상대적 크기, 연간 세대수 등을 고려하여 부여하였다. 이에 대한 광범위한 고찰은 보다 심도 있는 검증을 요하나 일반적인 면에서는 무리가 없을 것으로 판단된다. 상대적인 저항력과 회복력 모두 10 등급으로 구분하였으나 이들의 상대적인 값이 단순한 등차 급수적인지에 대해서는 다시 한번 재분석이 되어야 할 것으로 판단된다. 즉 등급에 대한 상호관계는 다변량 분석을 통하여 가중치를 산정한 후 이에 대한 검증을 통해 수행될 수 있다.

26) 윤일병. 1995.

27) 윤일병 등. 1992c

28) 노태호 등. 2001

29) Allan, J. D. 1995; Chun, S. P. 1998; Cummins, K. W. and G. H. Lauff. 1969; Hur, J. M. 2000; Jin, Y. H. 2000; Kim, M. C. 2000; Lamberti, G. A. and V. H. Resh. 1979; Lee, S. J. 2000; Merritt, R. W. and K. W. Cummins. 1984; Resh, V. H. and D. M. Rosenberg 1984; Ward, J. V. 1992; Won, D. H. 2000

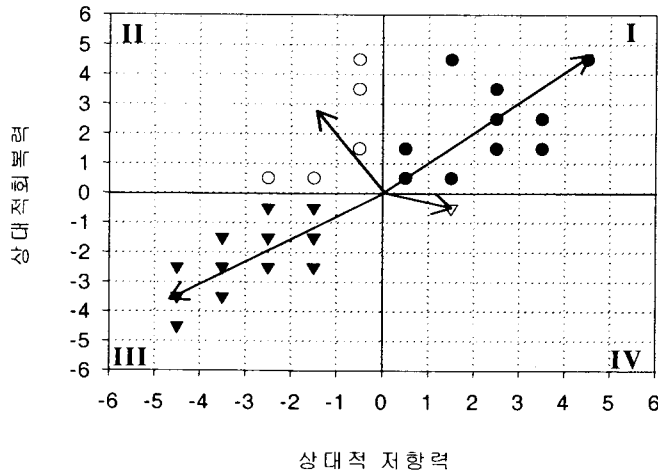
〈표 2〉 수환경교란에 대한 수서곤충의 상대적인 저항력과 회복력에 대한 등급화

군	지표생물군	상대적 저항력*										상대적 회복력**									
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	개똥하루살이						▲								▲						
2	등딱지하루살이					▲									▲						
3	등줄하루살이					▲									▲						
4	연못하루살이				▲									▲							
5	납작하루살이류			▲										▲							
6	강하루살이류								▲									▲			
7	동양하루살이							▲								▲					
8	세갈레하루살이							▲							▲						
9	기타하루살이						▲								▲						
10	줄날도래류			▲										▲							
11	입술날도래류									▲									▲		
12	물날도래류								▲										▲		
13	광택날도래류								▲									▲			
14	기타 날도래류					▲									▲						
15	강도래류									▲										▲	
16	고려측범잠자리								▲										▲		
17	쇠측범잠자리								▲										▲		
18	기타 잠자리				▲										▲						
19	뱀잠자리류								▲										▲		
20	여울벌레류								▲						▲						
21	물삿갓벌레류									▲										▲	
22	기타 딱정벌레류			▲											▲						
23	물장군류									▲											▲
24	장구애비류							▲											▲		
25	기타 노린재류				▲												▲				
26	먹파리류								▲							▲					
27	등애류							▲							▲						
28	각다귀류					▲									▲						
29	꽃등애류			▲											▲						
30	나방파리류			▲										▲							
31	멧모기류									▲									▲		
32	개울등애류								▲										▲		
33	갈따구류-붉은색	▲												▲							
34	갈따구류-흰색					▲								▲							

*, **: 1은 가장 낮은 상대적 저항력과 회복력을, 10은 가장 높은 상대적 저항력과 회복력을 의미.

각각 생물군의 안정성에 대한 특성을 상대적 회복력과 저항력으로 나타내면 이들을 4개의 특성군으로 구분하여 볼 수 있다. 즉 상대적 회복력과 저항력을 각각 5.5를 기준점으로 하여 4분면 위에 도식화하면 가중치의 산정 없이 산출된 이들의 특성이 도식화된다. 특성군은 상대적 저항력과 회복력이 모두 높은 특성군 I, 높은 상대적 회복력과 낮은 상대적 저항력을

보이는 특성군Ⅱ, 상대적 회복력과 상대적 저항력이 모두 낮은 특성군Ⅲ, 그리고 낮은 상대적 회복력과 높은 상대적 저항력을 보이는 특성군Ⅵ로 구분하여 볼 수 있다(그림 1).

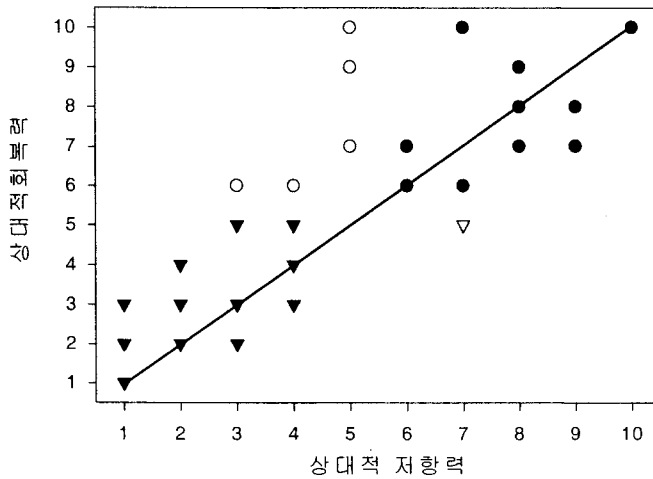


〈그림 1〉 상대적 저항력과 회복력의 상관성에 의한 4개 특성군의 분포
(특성군 I에는 2개, II에는 1개, III에는 3개의 생물군이 각각 중첩되어 있음)

총 34개 군 중 상대적으로 저항력과 회복력이 높아 인위적 간섭이나 교란에 대해 항상성을 유지하는 정도가 뛰어난 분류군들, 즉 특성군 I에 위치하는 분류군은 12개로 35.3%가 이에 해당하였으며 특성군 II는 6개 분류군으로 17.7%를 차지하고 있다. 이들은 특성군 I과 특성군 III의 생태계 내의 기능을 연결하여 주는 매우 중요한 역할을 수행하는 종류들로 판단된다. 상대적 회복력과 상대적 저항력이 모두 낮아 인위적 간섭이나 교란에 매우 민감한 특성군 III은 15개 분류군으로 전체의 44.1%로 가장 높은 결과를 나타냈다. 특성군 IV에는 1개 분류군만이 나타나는 것으로 분석되었으며 이는 전체의 2.9%를 차지했다. 이러한 상대적인 분포는 상대적 저항력과 회복력이 각기 다른 종들이 생태계의 기능적인 측면에서 어떠한 기능을 보이고 있는가를 잘 보여 주고 있다. 한국에서 출현하고 있는 모든 수서곤충류에 대한 일반화된 모형을 통해 특정지역의 생태적 건전성을 비교 분석할 수 있으며, 이로부터 건설에 따른 환경의 변화 및 교란의 정도를 조절하거나 또는 대안을 제시할 수 있는 근거를 마련할 수 있을 것이다.

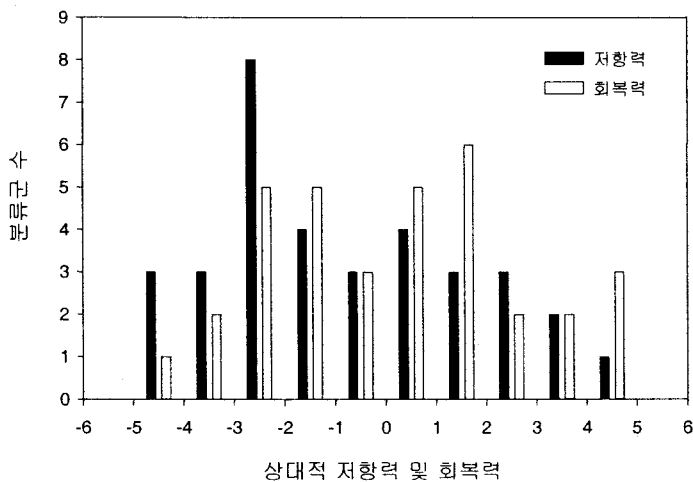
그림 2는 각 분류군들의 분포성향을 상대적 저항력과 회복력이 1:1 대응선에 기준으로 하여 분포하는 정도를 보여 준다. 상대적 회복력/상대적 저항력의 값이 1인(1:1 대응선에 위치한) 분류군들은 전체 34개 군 가운데 총 8개(23.5%) 군이었다. 상대적 회복력/상대적 저항력의 값이 1보다 큰 분류군은 총 20개(58.8%)로 이 값이 1보다 작은 6개(17.7%) 분류군보다 월등히 많았다. 이는 곧 대부분의 분류군들이 한국의 계절적인 수환경의 극심한 변화에 적응하여 회복력이 저항력보다 뛰어난 생존전략을 지니는 진화의 결과로 볼 수 있으며, 또한 지

속적인 환경적 교란에 의해 영향을 받고 있음을 의미한다. 따라서 환경의 변화에 있어 이들 분류군에 대한 세밀한 조치나 생태적 보호장치가 고려되어야 함을 의미한다.



〈그림 2〉 상대적 저항력과 회복력의 1 : 1 대응선과 이에 따른 생물군의 단순분포 (1 : 1 대응선상에 1개의 생물군이 중첩되어 있음)

한국 전역에 걸쳐 출현하는 수서곤충의 분석으로부터 도출된 본 모형에서 우리가 주목해야 할 사항은 상대적 저항력이 낮은 분류군(21개 군)이 높은 분류군(13개 군)보다 월등히 많으며, 상대적 회복력의 경우 이와는 반대로 상대적 회복력이 높은 분류군(18개 군)이 낮은 분류군(16개 군)보다 많은 양상을 보인다는 점이다(그림 3). 이 또한 한국의 전체적인 수환경이 매우 열악한 상태에 놓여 있음을 잘 증명하고 있다.



〈그림 3〉 상대적 저항력 및 회복력의 등급별 분류군 분포비도

2. 일반적 모형의 응용

상대적인 회복력과 저항력의 일반화된 등급을 경기도 가평천, 북한산 남서사면 수계 및 불영계곡에서의 수서곤충류의 서식환경 평가를 위해 적용한 결과는 그림 4에 보여진다.

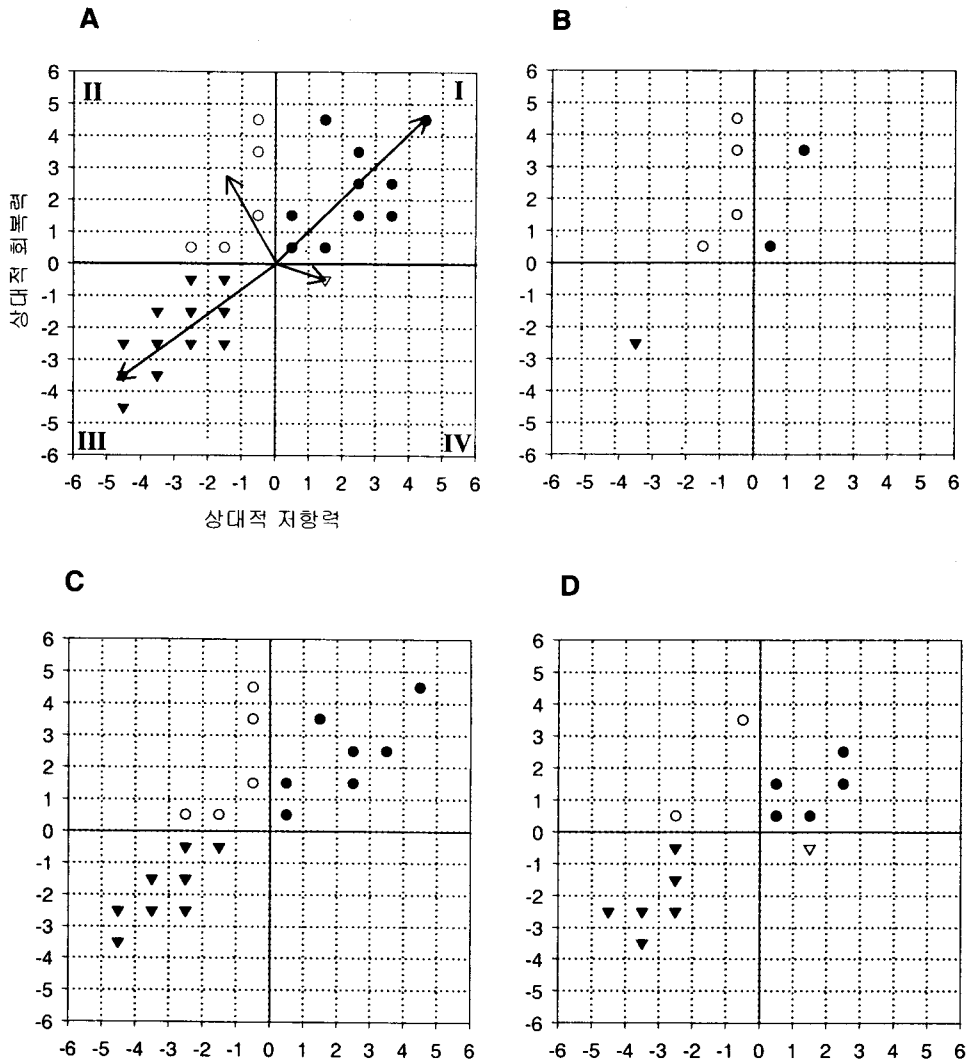
서울에 인접한 북한산의 경우(그림 4B), 4가지 특성군의 비율은 일반화된 모형과는 매우 다르게 나타나고 있다. 특성군 I 이 차지하는 비율은 약 28.6%로 특성군 II(57.1%)보다 낮게 나타났으며, 표준화 모형에서 가장 높은 비율을 차지하는 특성군 III은 북한산의 경우 14.3%에 불과한 수치를 나타냈다. 또한 특성군 IV는 출현하지 않았다. 또한 전체적으로 출현한 분류군의 수도 매우 낮아 총 7개 지표생물군이 낮은 출현빈도를 나타내고 있다(그림 5B). 이러한 북한산의 결과는 이곳의 수중 생태계의 건전성이 매우 열악함을 증명하고 있다. 이는 이곳의 수중생태계는 매우 작은 교란에 대해 항상성을 유지할 수 있는 기능이 매우 낮음을 의미한다. 특히 저항력보다는 회복력이 높은 지표생물군들이 대부분(85.7%)을 차지하고 있고 전 출현 생물군 모두 저항력이 중간(4-7등급)이거나 낮은(2등급) 지표생물군들로 구성되어 있는 것은 이곳의 수환경 보전 및 생태계 건전성을 향상시키기 위한 정책과 수행이 시급하다고 볼 수 있다. 이를 위한 다목적 건설공사가 필요하다면 생태 친화적인 측면을 충분히 고려한 공사가 시행될 수 있는 생태계라 판단된다. 물리적으로 하상이 단순한 구조를 지니고 수량 부족의 문제를 지니고 있어 다양한 서식처를 제공하여 주지 못하는 자연상태를 고려한다면, 이를 보상하거나 인위적으로 강화시킬 수 있는 투자가 필요한 생태계라 할 수 있다.

가평천의 경우, 매우 다양한 지표생물군이 서식하고 있는 것으로 나타났으며, 특히 특성군의 분포 양상은 표준화된 모형과 거의 비슷하게 나타나 이 지역의 수중 생태계는 국내 전체적으로 나타나는 일반성을 보이고 있는 것으로 판단된다. 높은 상대적 회복력과 저항력을 보이는 특성군 I 과 이와 정반대의 특징을 보이는 특성군 III이 각각 34.6%와 38.5%를 보이고 있으며, 특성군 II에 해당되는 지표생물군은 26.9%를 차지하나 특성군 IV는 출현하지 않았다(그림 4C). 또한 출현한 지표생물군이 전 등급에 걸쳐 분포하며 이들의 출현빈도도 표준화의 경우와 매우 유사하게 나타났다(그림 5C). 이는 이곳의 수중생태계는 매우 높은 다양성을 유지함을 의미하며 소규모의 물리적이거나 일시적인 교란에 대하여서 생태계 스스로가 원래의 상태로 돌아가려는 회복력이 저항력보다는 상대적으로 매우 뛰어난 의미를 가진다. 또한 그림 4C에서 특성군 I 에 포함된 지표생물군의 분포형태(벡터의 길이)가 특성군 III의 분포형태보다 다소 신장되어 있는 것은 환경의 악화에 대해 내성이 강한 일부 생물군이 지속적으로 출현할 수 있음을 시사하고 있다. 그러므로 본 지역의 수중생태계는 교란 후 안정성을 유지하려는 전환과정 중에 있는 것으로 판단된다. 본 조사가 최상류 지역에서부터 하류역까지 광범위한 유역에서 실시되었음을 고려할 때, 전체적인 생태계는 안정화과정에 있다고 볼 수 있다.

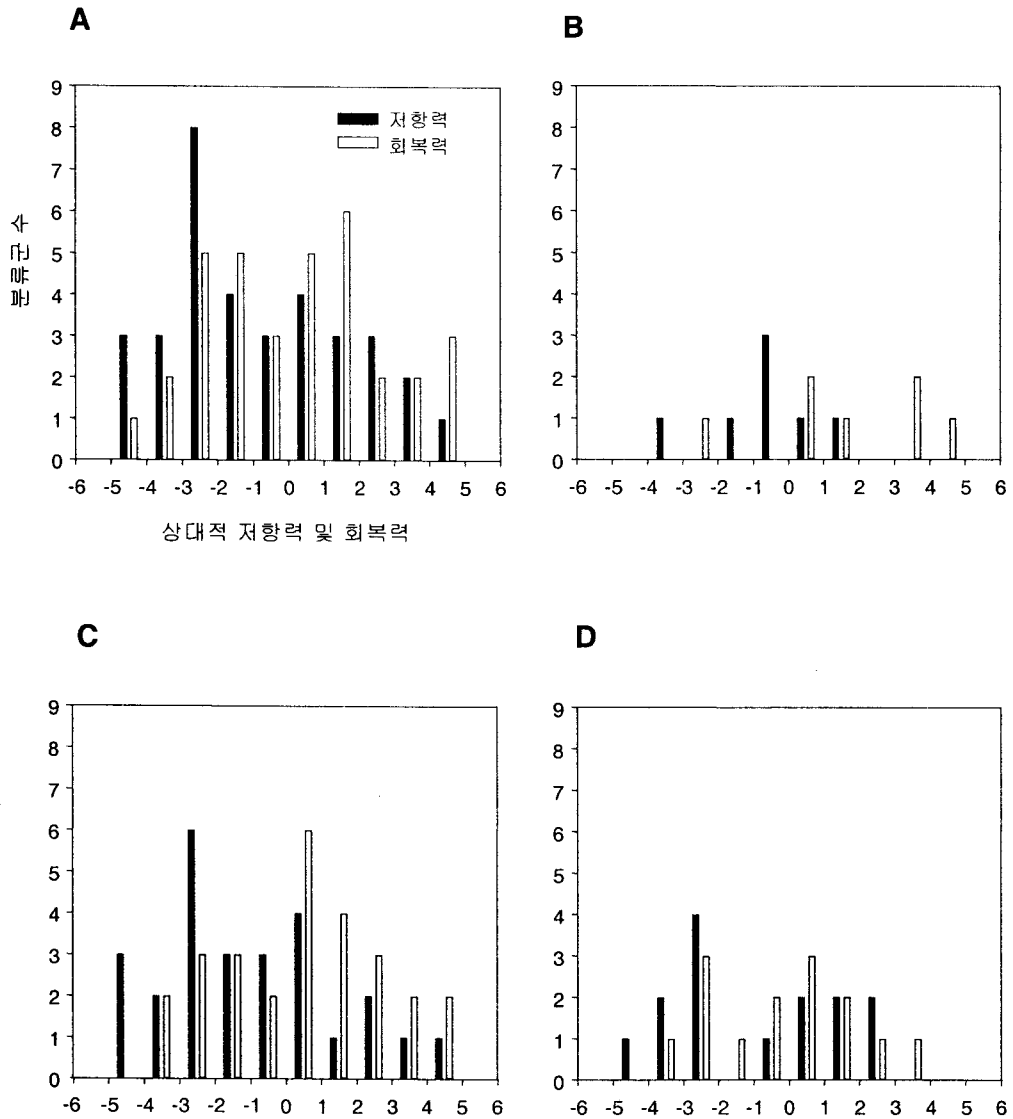
그러나 현재의 상태가 어떠한 방향으로 진행될 것인가에 대한 연구가 반드시 수반되어야 하며, 생태계 역동성을 반영하기 위한 장기 모니터링이 필요하다고 판단된다. 즉 안정화 과정이 지속적으로 이루어 질 경우, 보다 높은 생물다양성의 보전으로 그림 5A의 형태로 발전할 수도 있지만 교란의 규모가 클 경우 이에 역행할 수 있는 가능성도 있기 때문에 이에 대한 평가를 위한 연구가 지속적으로 요구되어진다.

불영계곡의 하류역은 뛰어난 환경적 조건을 지니고 있음에도 불구하고 예상보다 단순한 지표생물군이 서식하는 것으로 평가된다. 총 34개의 지표생물군 가운데 14개만이 출현하고 있으며, 전체적인 특성군의 분포도 5.5 기준점을 크게 벗어나지 않는 형태를 보이고 있다(그림 4D). 이는 본 지역의 다양성이 가평천의 경우보다 낮으나 저항력과 회복력이 크게 뒤떨어지지 않는다는 것을 의미한다. 이들 지표생물군의 등급분포는 표준화된 경우와는 비슷하나 각 등급에 해당하는 생물군의 수는 비교적 낮은 상태를 보이고 있다(그림 5D). 본 지역의 수중생태계는 건전성에 있어서는 양호한 반면, 회복력이나 저항력이 뛰어나다고 평가하기에는 부적절하다고 판단된다. 즉 구조적인 다양성이 풍부하지 못한 원인으로 인해 기능적인 면에서 중요한 자기조절능력의 기작인 회복력이나 저항력이 다소 뒤떨어지는 생태계라 할 수 있다.

이상에서 살펴본 바를 기초로 3지역의 수중생태계를 비교하여 보면, 가평천과 불영계곡 하류역의 생태계 건전성은 양호한 반면 북한산의 경우는 열악하다고 진단할 수 있다. 항상성을 이루는 회복력과 저항력의 측면에서는 가평천 > 불영계곡 하류역 > 북한산 남서 수계의 순으로 그 기능을 평가할 수 있다. 그러나 이 부분에서 한가지 인식해야 할 중요한 점은 이렇게 서열화된 분석이 어느 특정 수계의 생태계가 보다 중요하고 덜 중요함을 구분짓는 기준이 될 수 없다는 점이다. 모든 생태계는 고유의 기능과 가치를 지니고 있으므로 이를 상대적으로 비교·분석할 수 없는 것이다. 이러한 분석이 제공하는 가장 중요한 것은 ①특정 생태계가 자신의 구조로부터 유래되는 고유한 기능을 유지하는 조절능력이 어느 정도인가를 분석하고, ②교란에 대해 반응할 수 있는 능력과 이에 준하는 보전장치가 얼마만큼 필요할 것인가를 가늠하는 객관적인 척도를 제공한다는 점이다.



〈그림 4〉 상대적 저항력과 회복력의 기준점(5.5)에 의한 4분할 특성군의 분포양상
 A : 표준화 모형, B : 북한산 계류, C : 가평천, D : 불영계곡 하류역



<그림 5> 지표생물군의 상대적 저항력과 회복력 등급별에 따른 출현 분포빈도
 A : 표준화 모형, B : 북한산 계류, C : 가평천, D : 불영계곡 하류역

V. 결 언

본 연구는 하천생태계의 군집을 구성하는 생물종 가운데 가장 중추적인 기능을 수행하는 특정 생물집단, 즉 수서곤충류에 국한하여 실시된 연구이다. 상대적인 저항력과 회복력 모두 10등급으로 구분하였으나, 이들의 상대적인 값은 가중치를 두지 않고 단순 등차급수적으로 구분하였으므로 이에 대한 심도 있는 분석이 요구되어진다. 이러한 등급에 대한 상호관계의 분석은 다변량 분석을 통하여 가중치를 산정한 후 이에 대한 검증을 통해 수행될 수 있다.

군집은 다양한 생물종을 포함하고 있는 기능적 단위이므로, 생태계 항상성 측정을 위한 계량화/지수화는 포괄적 생물군에 대한 각 전문가의 전문적 지식을 기초로 삼고 오랜 동안 축적된 야외조사 경험을 접목시킨 후, 이를 토대로 종합적·체계적으로 검토해야 할 사항이다. 즉 생태계 내에 서식하는 다양한 생물종들 가운데 지표생물군을 재분류하고 교란에 대한 저항력과 회복력에 따른 종합적인 등급화 연구가 필요하다고 판단된다. 즉 동식물군 중 주요한 생물군의 항상성 기작에 작용하는 저항력과 회복력에 대한 등급화의 확대연구가 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이와 함께 생물종에 대한 등급화는 보완 작업(가중치 부여의 차등화 또는 기능적 생물군의 재선별 등)을 통해 여과될 필요가 있을 것으로 판단된다. 최종적으로는 등급화에 따른 일관성을 검토할 것이며, 후속 연구에 있어서는 종합적 계량화 기법(평균 또는 가중평균치)을 도출하고 이를 검증하는 단계가 필요하다. 본 연구의 결과로 도출된 기법은 제한적이거나 자연의 개발과 보전에 필요한 사항들을 최적화하는 데 응용될 수 있을 것으로 판단된다. 즉 하천생태계의 종합적인 진단으로 어떤 생물종이 위험한지를 알 수 있고, 이와 함께 위험한 정도를 예측할 수 있으므로 불필요한 환경시설물을 줄일 수 있어 경제적인 측면에서도 큰 효과를 거둘 수 있다. 이렇게 절감된 비용의 일부를 필수적인 시설물에 재투자함으로써 더욱 생태친화적인 개발을 이끌어 낼 수 있다. 계량화된 객관적인 진단과 이에 따른 보전대책을 제시함으로써 각종 단체들 간의 이견을 조정하는데 매우 긴요한 자료를 제시할 수 있다. 한국 실정에 맞는 기법의 개발은 외국의 최상의 기법보다도 더욱 실용적일 수 있으며 또한 이와 관련된 수입기술을 대체할 수도 있을 것으로 판단된다.

지수화 또는 등급화를 통하여 생태계의 건전성을 평가하려는 연구가 미국과 유럽을 중심으로 진행되고 있는데, 이는 생태계가 지닌 고유한 물리적·지역적 특성 그리고 인위적 간섭의 정도를 포함시키는 총체적인 계량화에 그 목표를 두고 있다.³⁰⁾³¹⁾ 그러나 국내의 경우 기초적인 자료의 부재로 종합적인 연구가 불가능한 상태이므로 현재 개발된 주요 지표생물군

30) Clayton, A. M. H. and N. J. Radcliffe. 1996.

31) 윤일병, 노태호. 1999.

을 중심으로 이를 지수화하는 연구가 시급하다. 이와 함께 국내 생태계에서 가능한 접근방법으로는 식물 및 곤충류에 대한 군집비교지수(community comparison index ; CCI)³²⁾ 및 먹이그물 연관성분석(foodweb connectance analysis)³³⁾의 개발이다. 이는 군집들 간의 비교를 통해 환경적 변화가 특정 지역 내의 다양한 지점들이 얼마나 유사한가를 보여주고 군집의 안정성을 나타내는 지수들로서 생태계의 특성을 고려한 평가 방법이 될 수 있다. 서구에 있어 가장 최근에 개발된 실질적인 방법들 가운데 영국의 다변량적 접근(multivariate approaches) 방법은 확률변수 모델을 이용한 통계적 접근이다³⁴⁾. 이와 같은 기법의 개발은 국내 생태계평가의 기법을 전환시키는 효과를 나타낼 수 있고 정성적인 측면(특정 생물종의 서식지훼손 및 멸종위기 등)만을 고려함으로써 나타난 많은 문제점을 해결할 수 있기 때문에 앞으로 생태계 건전성 평가의 기법 개발은 지수화, 객관화의 방향으로 변화를 모색하여야 할 것으로 판단된다.

사사

고려대학교 한국곤충연구소와 한국건설기술연구원에서 일부 지원하여 수행된 본 연구의 논문을 면밀히 검토하고 조언을 해주신 익명의 심사위원 3분께 감사의 말씀을 드립니다.

32) Petts, G. and P. Calow, 1996.

33) Peter S. 1992.

34) Petts, G. and P. Calow, 1996.

참고문헌

- 공동수, 류홍일, 류재근, 윤일병. 1995. “저서성 대형무척추동물 상위분류군 생물지수의 고안 및 적용”. 「한국환경독성학회 추계학술대회 요약집」 p. 11
- 노태호, 송미영, 김동욱, 윤일병. 2001. 「지구환경생태학」. 한국방송대학교출판부. p. 294
- 염육철 등. 1996. 「훼손된 생태계의 Biodiversity 평가 및 복원기법 개발」. 환경부. p. 359
- 오용남, 전태수. 1991. “배내천 중류의 저서성 대형무척추동물에 관한 연구. I. 군집분석 및 생물학적 수질 판정”. 「한국생태학회지」 14 : 345-360.
- 위인선, 나철호, 이종빈, 백순기. 1991. “수환경오염에 대한 수서곤충 지표종에 관한 연구”. 「한국환경생물학회지」 9 : 42-54.
- 윤일병. 1995. 「수서곤충검색도설」. 정행사. p. 262
- 윤일병, 노태호. 1999. “수계의 오염에 따른 수서곤충의 계량적 변화. pp. 52-63”. 「환경변화와 곤충자원 심포지엄」. 고려대학교 p. 92
- 윤일병, 공동수, 유재근 1992a. “저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구(I) -오탁계급치 및 생물가중치 산정을 중심으로-”. 「한국환경생물학회지」 10 : 24-39.
- 윤일병, 공동수, 유재근 1992b. “저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구(II) -생물군집에 대한 환경요인 영향을 중심으로-”. 「한국환경생물학회지」 10 : 40-55.
- 윤일병, 공동수, 유재근, 1992c. “저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구(III)”. 「한국육수학회지」 10 : 77-84
- 윤일병, 공동수, 이상협 1992d. “저서성 대형무척추동물에 의한 금호강 수계의 생물학적 수질 판정”. 「한국육수학회지」 25 : 177-183.
- 윤일병, 배연재, 노태호, 이성진, 박재홍, 1998. “수서곤충군집분석에 있어서 최적표본크기의 결정 - 방대천 모형”. 「한국생태학회지」 21 : 409-418
- 정 준, 최재신, 이정호, 1992. “부착조류에 의한 양산천의 수질평가”. 「환경생물학회지」 10 : 9-23.
- Allan, J. D. 1995. *Stream Ecology. structure and function of running waters*. Chapman & Hall, London.
- Barnes, J. R. and G. W. Minshall. 1983. *Stream ecology, Application and Testing of general ecological theory*. Plenum Press, p. 399
- Barnes, R. K. and K. H. Mann. 1980. *Fundamentals of Aquatic Ecosystems*. Blackwell Sci. Publ., p. 229
- Barnhouse, L. W. 1993. Population-Level Effects. pp. 247-274. *Ecological Risk Assessment* (G. W. Suter III, ed.). Lewis Publ., p. 538

- Camargo, J. A. 1990. "Performance of a new ecotoxicological index to assess environmental impacts on freshwater communities". *Bull. Environ. Contamination and Toxicology* 44 : 529-534
- Clayton, A. M. H. and N. J. Radcliffe. 1996. *Sustainability. A systems approach*. Earthscan Publ. Ltd., p. 258
- Cummins, K. W. and G. H. Lauff. 1969. "The influence of substrate particle size on the microdistribution of stream macrobenthos". *Hydrobiologia* 34 : 145-181.
- Hur, J. M. 2000. *Systematics and Ecology of the Genus Hydropsyche (Insecta : Trichoptera : Hydropsychidae) in Korea*. M.S. Dissertation. Seoul Women's Univ, p. 56
- Jin, Y. H. 2000. *Systematics and Ecology of the Scopuridae (Plecoptera: Insecta) in Korea*. M.S. Dissertation. Seoul Women's Univ, p. 57
- Kim, M. C. 2000. *Life Cycles and Population Fluctuations of Chironomus flaviplumus and Crictopus bicinctus in Wangsuk Creek*. M.S. Dissertation. Korea Univ, p. 55
- Lamberti, G. A. and V. H. Resh. 1979. "Substrate relationships, spatial distribution patterns, and sampling variability in a stream caddisfly population". *Environ. Entom.* 8 : 561-567.
- LeCren, E. D. and R. H. Lowe-McConnell, 1980. *The functioning of freshwater ecosystems*. Cambridge Univ. Press, p. 588
- Lee, S. J. 2000. *Phenological Adaptation of Two Montane Mayflies, Ephemera strigata and E. separigata (Ephemeroidea : Ephmeroptera)*. Ph.D. Dissertation. Korea Univ, p. 112.
- Merritt, R. W. and K. W. Cummins. 1984. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Kendall / Hunt Publishing Co., Iowa.
- Metcalf-Smith, J. L. 1996. Biological Water-quality Assessment of Rivers : Use of Macroinvertebrate Communities. p. 17-43. *River Restoration* (G. Petts and P. Calow, eds.). Blackwell Sci. p. 231
- National Research Council, 1992. *Restoration of Aquatic Ecosystems. Science, Technology, and Public Policy*. National Academy Press, p. 552
- Owen, O. S. and D. D. Chiras : 1995. *Natural resource conservation*. 6th ed. Prentice Hall, p. 586
- Persoone, G. and N. De Pauw. 1979. Systems of biological indicators for water quality assessment. pp. 39-75. *Biological Aspects of Freshwater Pollution* (O. Ravera, ed.). Pergamon Press, p. 214
- Peter S. 1992. *Introductory Ecology*. Prentice Hall Intl. Inc. p. 597
- Petts, G. and P. Calow. 1996. *River Restoration*. Blackwell Sci., p. 231
- Resh, V. H. and D. M. Rosenberg. 1984. *The ecology of aquatic insects*. Praeger, O.V.Y. Publ.

- Strand, M. and R. W. Merritt. 1999. "Impacts of livestock grazing activities on stream insect communities and the riverine environment". *Am. Entomol.* 45 : 13-29
- Suter, G. and L. Barnhouse. 1993. Assessment concepts. pp. 21-47. *Ecological Risk Assessment* (G. W. Suter III, ed.). Lewis Publ., p. 538
- Vannote, R. L, G. W. Minshall, K. W. Cummins, J. R. Sedell, and C. E. Chshing. 1980. "The river continuum concept". *Can. J. Fish. And Aquatic Sci.* 37 : 130-137
- Ward, J. V. 1992. *Aquatic Insect Ecology. I. Biology and habitat*. John Wiley & Sons, Inc., N. Y., N. Y. pp. 438
- Wheeler, B. D., S. C. Shaw, J. F. Wanda and R. A. Robertson, 1995. *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley, p. 562
- Won, D. H. 2000. *Life History and Productivity of Stenopsyche bergeri (Stenopsychidae : Trichoptera)*. Ph.D. Dissertation. Korea Univ, p. 126