Korean J. Ecol. 20(1): 69~78, 1997

〈종 설〉

하천 생태학의 발전과 우리 나라 하천 연구의 현황

주기재 · 김현우 · 하 경
부산대학교 자연과학대학 생물학과

The Development of Stream Ecology and Current Status in Korea

Joo, Gea-Jae, Hyun-Woo Kim and Kyong Ha
Department of Biology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

ABSTRACT

The development of stream ecology, especially the progress of that field in North America, has been briefly reviewed, and stream studies in Korea were analyzed through literature survey.

During the last two decades, theoretical advances in stream ecology and understanding of the structure and function of stream ecosystem were made from the studies mainly in North America. Early studies (1960~1970) focused on determination of the environmental factors controlling the distribution and abundance of organisms dwelling in streams. Introduction of conceptual development, such as the functional feeding concept, river continuum concept, and nutrient spiraling was notable in the late 70's and the 80's. For last 20 years, experimentation approaches to apply ecological principles were very fruitful in the understanding of community structure.

Even though studies on the stream ecosystem is Korea have a long history, most of works were concentrated on limited subjects: water quality, abundance and distribution of aquatic insects and fishes. Basic ecological attributes of stream organisms and test of ecological principles have rarely been a subject of research topics. We must concentrate our effort to enhance our understanding of stream and river ecosystem through qualitative, experimental and interdisciplinary approaches.

Key words: Stream ecology, River, Stream ecosystem, Concepts.

서 론

지난 20~30년간 고도의 경제 성장, 산업화와 더불어 하천 유역의 토지이용 증대 및 개발 등으로 인해 우리 나라의 자연적인 하천과 강은 물리 · 화학적 성질 등이 변화되어, 하천 생태계의 구조와 기능에 큰 변화를 가져왔다. 최근 10 여년간 하천 생태계에 대한 학술적 관심은 크게 증가했으며 특히, 수질 오염의 가속으로 하천을 대상으로 한 일반적인 오염 관련 연구 및 수질과 서식 생물과의 관계를 밝히는 연구는 꾸준히 이루어져 왔으나 하천 생태계의 역동적인 특성에 관한 기초 자료는 아직 미비한 실정이다.

하천 생태계가 갖는 기능적 · 구조적인 특성은 여러 연구 분야(지질학, 물리학, 화학, 생물학, 수문학 등)와 연관되어 있어 종합적인 시각에서 하천 생태계를 이해하고 평가한다는 일은 매우 어려운 일이다. 우리 나라에서는 하천 생태학의 연구 흐

이 논문은 1996년도 환경부 G-7과제 연구지원에 의해 이루어졌음.

름에 대한 체계적인 접근 및 자료의 정리 작업이 선행되지 않아 새로운 방향성 모색 및 체계 확립이 힘든 실정이다.

최근 3~4년간 우리 나라에서 생태학 전반에 관한 연구 흐름은 비교적 잘 정리되고 있으나 세부 영역별 연구결과의 정리는 미흡했었다(김 1995, 이 등 1994, 배 1996, 한국생물과학협회 1996). 한국생물과학협회 50년사(예: 한국육수학회, 한국생태학회 등), 한국 생태학 90년사, 생물 다양성 2000 등을 통한 포괄적인 연구의 흐름은 정리된 적이 있어 매우 고무적이라고 할 수 있다. 그러나, 하천 생태학과 같은 세부 연구 주제별 혹은 서식처의 유형성을 중심으로 한 연구의 흐름 파악은 심도 깊게 다루어지지 않았다.

본고에서는 북미의 하천 생태학의 발달사를 소개하고 우리 나라의 하천 생태계를 대상으로 발표된 학술 내용을 연구 주제별, 연구 분야별로 정리해 최근의 연구 동향 분석 및 방향성을 모색하고자 한다. 하천과 강을 대상으로 한 생태학을 하천 생태학(stream ecology)으로 칭했으며 하천 생태학에 있어 응용적 측면이 강한 분야(하천 복원, 모델 적용 및 개발 등)는 검토 대상에서 제외했다. 특정유역 내 여러 하천과 강들은 크기나 수심, 유역 면적 등이 매우 다르지만, 계류라는 점에서 서로 구분하기 힘든 연속성을 갖고 있어 하천 및 강의 생태학을 따로 구분하는 견해보다는 하천 생태학(stream ecology)이라는 통합적 용어를 사용하고 있는 추세이다.

전통적인 육수학(호수 생태학)이 유럽을 중심으로 지난 150여년 간 발전되어 세계적으로 확산되었다면, 하천 생태학은 북미를 중심으로 지난 30 여년간 급속히 발전한 학문이라고 할 수 있다. 최근 전통적인 육수학 강좌에서도 하천 생태를 중요한 주제로 인식하여 통합적인 접근을 시도하고 있다(예: Wetzel and Likens 1991, 육수학 실험서). 생물 서식의 유형 파악을 위주로 한 육수학 연구의 초기 단계에서 환경 요인과 생물간의 상호작용, 특정 분류군의 서식 유형에 생태적인 원리를 적용하는 데에는 상당한 시간이 걸렸다. 이미 이런 단계를 수십년 전에 거친 북미 하천 생태학의 발전 과정과 하천 생태에 관련된 학술지의 논문 발표 변화 추이를 파악하여 봄으로써 우리 나라 하천 생태학 연구의 현황을 파악하고 방향성을 모색해 보는 계기로 갖고자 했다.

본 론

하천 생태학의 발전

1. 하천 생태연구의 흐름

하천 생태학은 하천 및 강에서 시식하는 생물, 생물과 환경요인 간의 상호작용 현상을 연구하는 학문으로 북미를 중심으로 활발히 연구되었으며, 최근 30여 년 동안 급속히 발전하고 있는 분야이다. 유럽과 일본의 경우에도 공해의 영향에 따른 하천의 수질관리와 환경 평가를 위주로 한 하천 생태연구가 상당히 진행되었으나 본고에서는 북미를 중심으로 연구 흐름을 살펴보았다(Sladecek 1973, 水野와 御勢 1993). 하천 생태학은 수서 곤충학 및 어류학에서 그 기원을 찾을 수 있다. 초기 연구는 수서 곤충과 어류의 분류 및 생물 지리학적인 분포에 관한 것이 많았으며, 어류 군집을 지탱할 수 있는 곤충의 현존량에 관한 의문이 주요 관심사였다. 1952년에 Welch의 저서 "육수학"이 발표되었는데, 이 책에는 거의 대부분이 호수에 관한 내용이었으며 하천 관련 연구는 여러 분류군의 서식 실태에 관하여 조금 언급되었을 뿐이다. 1960년대에는 하천의 생물 군집 구조에 영향을 미치는 환경 인자에 대한 관심이 크게 고조되었으며, 특히 저서 무척추동물과 저층(기질)간의 관계에 대한 연구가 시작되었다. 이 기간 중에 쇄설물(detritus)이 수서 곤충의 분포에 미치는 영향, 소하천에서 유연종의 미세분포 등이 인식되기 시작했다. 북미에서는 1960년 중반부터 독립된 하천 생태학 강좌가 시작되었으며 수서 곤충과 어류 분야 외의 중요 분류군 및 영역에 관심을 갖게 되었다.

1970년대 이후, 하천에서 영양 염류가 재순환되면서 하류로 이동된다는 개념(nutrient spiraling)이 도입되면서 물질의 이동 및 상호 교환에 관한 많은 학술 발표가 이루어졌다. 이 개념은 하천을 단순히 육지의 영양소를 전달하는 관으로만 생각하였던 이전의 사고를 전환시키는 큰 계기가 되었다. 1970년 이후 11권의 하천 생태를 포괄적으로 다룬 책(Table 1)이 발간되었으며, 현재 단행본 발간이 크게 증가하고 있는 추세이다. 특히 1980년 이후, 하천 생태학의 중요 세부 영역의 하나인 수서 곤충학은 생태 및 분류를 중심으로 가장 활발히 정리되어 단행본으로 발간되고 있다(Resh and Rosenberg 1984, Ward 1992).

1970년에는 Hynes의 "The Ecology of Running Waters"가 출판되었고 이 책에는 1966년까지 하천을 대상으로 한 많은 논문을 총망라했다. 문헌의 집대성으로 수생생태 및 일반 생태학자들은 쉽게 하천을 대상으로 한 논문을 접하게 되었으며, 이 책으로 말미암아 육수학이라는 학문 범주 내에서 하천 생태가 중요한 분야로 인식되었다. 또한 River Ecology and Man (Oglesby *et al.* 1972), River Ecology(Whitton 1975)가 출간되었으며 하천 및 강의 중요 분야별 연구 내용이 정리되었다. 그 외에도 1970년대초 미국에서는 환경 운동 전개와 수질 오염에 대한 우려로 오염과 관련된 많은 연구가 진행되었다. 이 분야의 연구는 1960년 Hynes가 초기에 발표한 문헌들을 정리하여 발표한 책 "The Biology of Polluted Waters"에 의해 크게 고무되었다.

Table 1. Major books on stream ecology. Monographs and books on the aquatic insects are not included. *: J. of the North American Benthological Society Vol. 7(4):261-529. (12 review papers)

발행년도	저자/편집자	서 명	출 판 사
1970	Hynes	The Ecology of Running Waters	University of Toronto Press
1972	Oglesby *et al.*	River Ecology and Man	Academic Press
1975	Whitton	River Ecology	Blackwell Scientific Publishers
1979	Ward and Stanford	The Ecology of Regulated Rivers	Plenum Press
1981	Krumholz	The Warm Water Streams Symposium	Allen Press
1981	Lock and Williams	Perspectives in Running Water Ecology	Plenum Press
1983	Barnes and Minshall	Stream Ecology	Plenum Press
1983	Fontaine and Bartell	Dynamics of Lotic Ecosystems	Arbor Science Publishers
1986	Davies and Walker	The Ecology of River Systems	Dr. W. Junk Publishers
1988	Stanford and Covich	Community Structure and Function in Temperate and Tropical Streams*	
1995	Allan	Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters	Chapman and Hall
1995	Cushing *et al.*	River and Stream Ecosystems	Elservier

1970년대 부터 1980년대 초반까지 하천 생태학 연구가 가장 활발하게 이루어졌던 분야는 다음과 같다.

1) 하천 생태계 내에서 에너지 흐름이 쇄설물 유입에 의해 시작되며, 자생 생성 유기물과 외부 생성 유기물의 상대적 중요성에 대한 이해가 크게 증가했다(Kaushik and Hynes 1971, Anderson and Cummins 1979).

2) 하천 생태계 내의 저서 무척추동물 guild 관계 규명에 있어서, 기능적 섭식 분류군 개념(functional feeding group)이 적용되었다(Cummins 1973, 1974).

3) 강을 이루는 크기가 다른 지천들이 연속적이고 통합된 생태적 단위로 이루어졌다는 하천 연속성 개념(River Continuum Concept: RCC)이 정립되었다(Vannote *et al.* 1980, Minshall *et al.* 1983). RCC는 북미의 교란 요인이 거의 없는 낙엽 산림대의 하천을 주된 연구 대상으로 하여 도출된 개념으로 하천 크기에 따라 변화하는 생태계의 기능과 무척추동물 기능군의 분포, 생산자의 기능과 분포 등을 종합적으로 다루고 있다(예: P:R ratio) (Fig. 1).

4) 하천에서 영양물질의 이용과 하류로의 이동이 마치 스프링 고리처럼 활용-이동-재활용 순환이 spiraling 형태로 이루어진다는 이론이 확립되었다(Wallace *et al.* 1977, Newbold *et al.* 1981).

1980년대 초부터 현재에 이르기까지 가장 두드러진 하천 생태 연구에 관한 진전은 생태학적 기본 원리를 실험적 접근을 통한 생태 현상 파악이었으며 경쟁, 포식, 행동과 같은 분야에 대한 관심 증대였다. 1980년대까지만 하더라도 많은 하천 생태학자들은 하천 생태계의 군집 구조를 결정짓는데 있어서 무생물적 요소가 생물적 요소보다 중요하다고 믿고 있었다. 그러나 최근에는 경쟁, 포식과 같은 생물적 요소가 하천의 군집 구조

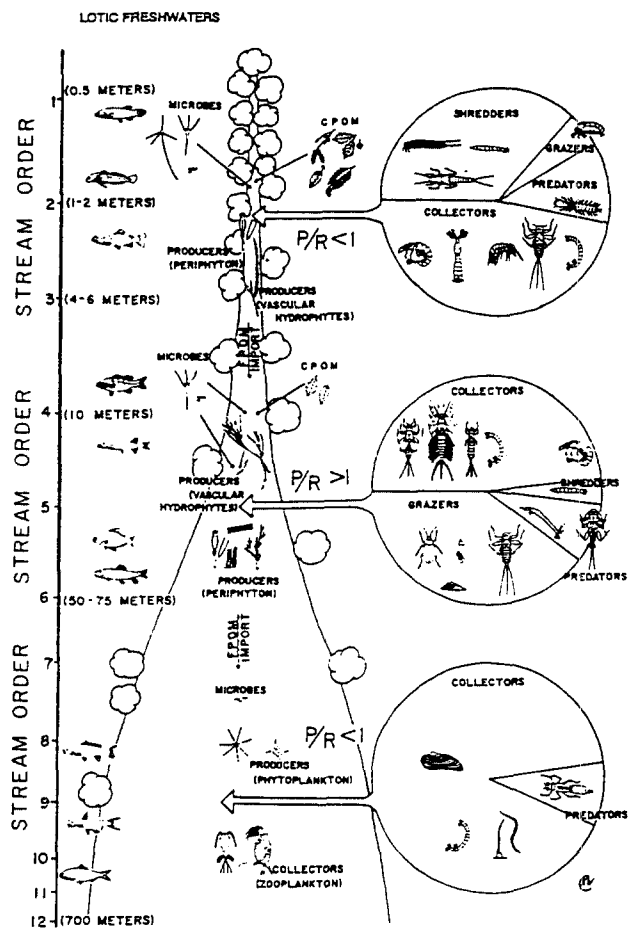

Fig. 1. Diagrammatic representation of the river continuum shown as a single stem of increasing order (adopted from Ward (1992), originally from Vannote *et al.* (1980) and Cummins (1979)).

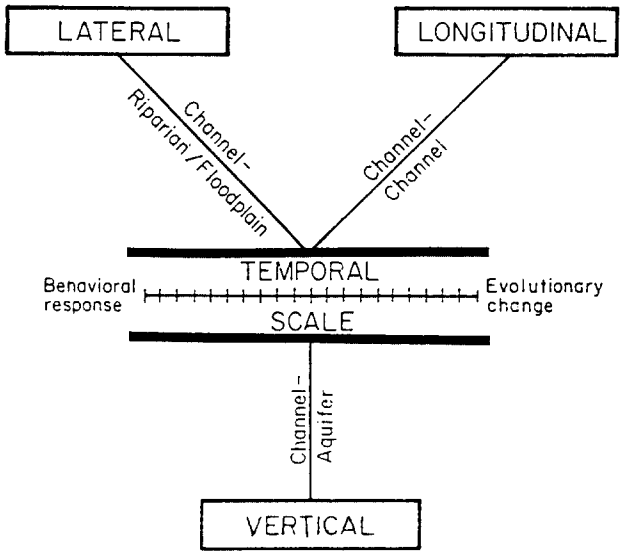

Fig. 2. A conceptualization of four-dimensional nature of lotic ecosystems (Ward 1989).

를 결정하는데 매우 중요한 요인이 된다는 증거들이 제시되고 있다(Power *et al.* 1988).

하천 생태학에 있어 최근까지의 연구 흐름 및 새로운 개념적 접근 방법을 J. V. Ward(1989, 1994)는 "하천 생태계의 4차원적 성격의 개념화" 에서 함축적으로 잘 표현하고 있다(Fig. 2). 이 4차원 개념은 1980년대 이전까지 하천을 대상으로 다루어 온 일반적인 연구 내용과 1980년대 초반의 RCC, 후반의 하천 하상 아래 부분에 대한 생물 및 물질 순환을 종적, 시간적, 횡적, 수직적 차원으로 구분하여 하천 생태학 연구의 다면적 특성과 연구의 방향성을 제시하고 있다.

첫째로, 종적 차원(longitudinal direction)은 이미 앞에서 언급했던 RCC에서 제시된 것처럼 상류에서 하류 하천으로 물질 순환 등이 하천의 크기에 따라 어떻게 달라지는가를 규명하는 것이다. 이 분야는 하천 크기에 따른 생태 현상의 유형성 및 서식 생물의 생태 등에 관한 연구로 1960년대 이후 꾸준히 관심을 가져오던 분야이기도 하다.

두번째는 시간적 차원(temporal scale)으로 하천 내에서의 개체군, 군집 등의 생물적 요소가 환경 요인의 변화에 의해 행동, 적응, 천이, 진화에 이르는 시간적 개념이 충분히 반영된 하천 생태 규명이다. 일반적으로 하천에 서식하는 생물을 대상으로 한 연구의 대부분이 이 범주에 속하며 연구기간에 따라 짧게는 수일에서 길게는 수년에 걸쳐 생물상에 관한 연구들이 시간적으로 다루어지고 있다.

세번째는 횡적 차원(lateral direction)으로 하천과 하천 주변 식생대 및 홍수 지대와의 횡적인 물질 교환 및 순환에 관한 내용이다. 독일의 Max Planks 육수학 연구소가 주축이 된 아마존강 연구는 강의 횡적인 물질 교환의 중요성을 밝히는 계기를 제공해 주었다. 연중 강폭의 변화가 수십 km에 이르며, 정기적으로 침수되는 강 주변 홍수 지대가 강 생태계의 중요한 일부분임은 물론 강의 본류에 직접적인 영향을 주는 중요한 서식처임을 밝혔다. 그러나 아직도 홍수 지대 내의 습지, 호수 등이 본류에 미치는 역할에 관한 학술적인 평가가 이루어져 있지 않아 많은 연구가 요구되는 분야이다(Joo 1990).

네번째는 하천수, 하천 하상, 지하수 사이의 상호작용을 포함하는 수직적 방향성(vertical direction)이다. 유럽의 하천에서는 이미 오래 전에 하상과 불투수층(모암) 사이의 hyporheic zone에 많은 무척추동물(hyporheos)이 서식하는 것으로 알려지고 있었다(Danielopol 1989). 하상으로부터 수직으로 수십 cm~수백 cm에까지 패충류(Ostracoda), 요각류(Copepoda), 등각류(Isopoda: 연갑류의 한목) 등이 서식하고 있음이 확인되었고, 심지어는 하천으로부터 횡적으로 수 km 떨어진 지역의 hyphoreic zone에서 발견되기도 했다. 북미에서는 하천 공극과 공극수에 관한 연구는 많이 이루어졌으나, 대부분이 지질, 수문 및 화학적 연구로 서식 생물에 대한 관심은 적었다. 1980년대 후반 이후 이 분야에 대한 유럽과 북미 학자간의 학술 교류 증진으로 최근에는 서식 생물은 물론 hyporheic zone과 하천수와의 상호작용에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구는 최근의 하상과 지하수, 하천수와 하천 주변 식생대에 관한 이해와 더불어 크게 주목받는 연구 분야 중의 하나이다. 앞에서 살펴본 하천 생태의 횡적, 수직적 성격은 그 연구 방법론에 있어 상당 부분 학제간 연구를 요하는 것으로 앞으로 크게 발전될 분야이다.

2. 연구 논문 발표의 변화

지난 30년간 하천 및 강을 대상으로 연구 발표된 논문은 양적·질적 수준이 크게 향상되었다. 1960년 이후 생태학 전 분야를 통하여 가장 권위 있는 학술지의 하나인 "미국생태학회지(Ecology)" 에서 하천을 대상으로 발표된 논문 편수 변화의 일부를 분석해 보면 변화 추세를 잘 알 수 있다. 1960년부터 1963년까지 발표된 논문은 총 510편이며, 이중 하천을 대상으로 발표된 논문은 6편으로 전체의 1.2%에 불과했으나, 1989년부터 3년 동안은 총 발표 403편수 중 22편으로 전체 논문 수의 5.1%로 크게 증가했다(Fig. 3). 이는 하천과 강이 생태학적 기본 원리를 적용할 수 있는 좋은 서식처임을 보여주는 동시에 하천 연구가 단순히 현황을 기술하는 수준을 벗어나 실험을 통해 원리를 파악하고 있음을 간접적으로 시사하고 있다. 미국 생태학회지 외의 생태학 전반을 다루고 있는 학술지(예: Oi-

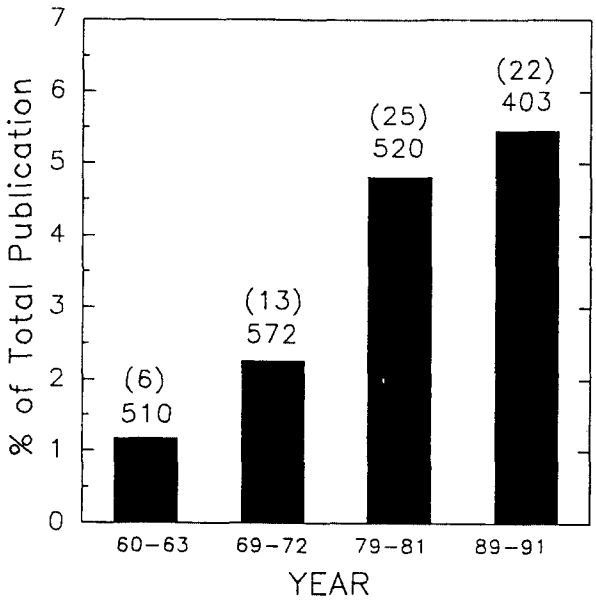

Fig. 3. Total papers and papers addressing stream ecology in "Ecology" published by the Ecological Society of America. Note: six of 510 total papers published from 1960 to 1963 were ecological studies of stream ecosystems.

Table 2. Subject areas and numbers of papers published in the proceedings of the International Association of Theoretical and Applied Limnology (1980~1992, 1980 : Japan, 1983 : France, 1987 : New Zealand, 1989 : W. Germany, 1992 : Spain). Papers in the minor categories are not included

Years	1980	1983	1987	1989	1992
Volume	21	22	23	24	25
Physical Limnology	16	14	8	11	13
Chemical Limnology	16	26	15	42	24
Lakes					
North America	16	48	28	52	44
Europe	21	96	26	115	88
Asia	36	8	4	8	13
Africa	1	10	1	8	10
Australia, New Zealand	5	5	20	5	2
South America	3	24	3	12	14
Paleolimnology	3	14	3	15	17
Man-made lakes	23	32	13	44	37
Running water	20	70	68	137	103

kos)등에서도 유사한 흐름을 읽을 수 있다.

호수를 주요 연구 대상으로 한 전통적인 육수학 학술지에서도 하천 및 강 등의 유수 환경을 대상으로 발표되고 있는 논문의 수가 크게 증가하고 있다. 2~3년마다 열리는 국제 이론 및 응용 육수학회의 논문집을 살펴보면 1980년 20편에 불과하던 유수(running water) 생태에 관한 논문 수가 꾸준히 증가하여 1992년에는 103편이 발표될 정도로 증가했음을 알 수 있다(Table 2). 조사 대상 분야 중 하천 및 강 생태에 관한 논문이 차지하는 비율을 보면 1980년 12.5%에서 1989년 30.5%로 크게 증가했다. 이 학회는 1922년 독일에서 출발한 국제 학회로 매 2~3년마다 주로 유럽에서 학회가 열려 왔으며 1980년 이전까지는 전통적인 육수학 연구가 주류를 이루었다. 그러나 1980년 이후에는 북미 하천 생물학의 발전, 저수지와 댐에 관한 관심이 충분히 반영되어 연구 발표 논문의 주제도 다양화되고 있다. 이러한 유수 환경에 대한 관심의 증가는 다른 전통적인 육수학 학술지(Hydrobiologia, Archiv für Hydrobiologie, Freshwater Biology, Limnology and Oceanography 등)에서도 쉽게 파악할 수 있다. 현재 학술지 Regulated River (1986년 창간호 발행)나 Archiv für Hydrobiology(supplement)는 주로 계류를 주된 연구 대상으로 한 논문을 싣고 있다.

하천 생태학 발전에 있어 가장 기여도가 높은 학술지의 하나로 북미 저서 생물학회지(J. of the North American Benthological Society)를 들 수 있다. 1985년 북미 저서 생물 학회가 "Freshwater Invertebrate Biology" 라는 학술지를 인수한 후 학술지 명칭을 고치고 논문 게재 범위를 크게 확대하였다. 이 학회는 원래 수서 무척추동물을 연구하는 회원들이 주축을 이루었다. 그러나 1980년 이후 하천 연구 범위가 다양해지면서 조류(algae), 박테리아, 물곰팡이, 이·화학적 특성 등을 다루는 다양한 분야의 전문가들이 이 학회에 참가하면서 관련 논문 발표의 장이 되었다. 또한 이 시기는 학제간 연구의 필요성 및 두 분류군 이상에 걸친 생태 현상(예: 부착 조류-초식자간의 상호작용, 물질 순환, 교란, 쇄설물 분해 등) 에 대한 연구의 필요를 크게 인식한 시기였다. 1986년부터 1996년까지 이 학술지에 발표된 논문의 구성을 분석해 보면 1986년에서 1989년까지는 여전히 수서 무척추동물(대부분 수서 곤충의 생활사 및 생태)에 관한 논문이 많이 게재되었으나 1990년 이후에는 무척추동물에 관한 논문 발표 편수의 비중은 다소 줄고 생산, 분해 등 생태계의 기능적 측면에서 연구가 증가하고 있음을 알 수 있다(Fig. 4). 이제 하천 생태에 있어서 학제간 연구나 여러 분류군의 동태를 동시에 실험적으로 파악하여 발표된 논문들은 더 이상 생소하지 않다.

이상에서 살펴본 바와 같이 하천 생태의 양적, 질적인 발전에도 불구하고 북미 중심의 하천 연구는 아직 소하천(1~4차) 중심이며 많은 과제를 남겨 놓고 있다. 특히 북미 중심으로 발전된 하천 생태학의 이론이나 원리가 타 대륙, 다른 기후대 및 식생대에서 어떻게 적용될지에 대해서는 많은 의문이 제기되고 있다. 하천과 주변 식생대 및 홍수 지대 간의 상호작용과 인위

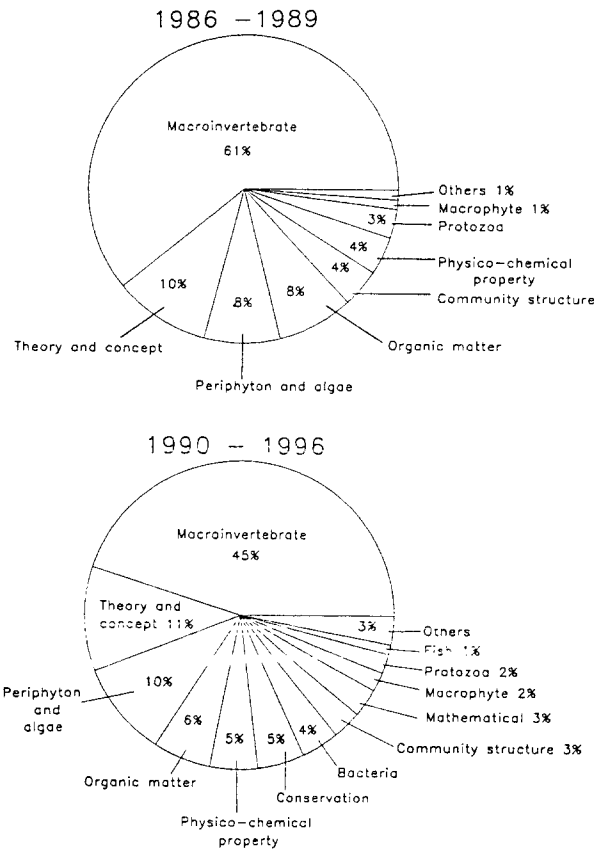

Fig. 4. Subject areas of the papers published in the J. of the North American Benthological Society in the last 7 years (1990~1996) compared with the previous 4 years (1986~1989) (Macroinvertebrates: life history, secondary production, general ecology, aquatic insects, hyphoreos etc., Periphyton: primary production, limiting nutrient, grazing, etc., Physico-chemical properties: nutrients etc., Organic matter: litter processing, CPOM, FPOM, DOC).

적으로 강의 흐름이 조절되고 있는 많은 선진국의 조절 하천 (regulated river, tamed river)에서의 생태 현상 등은 앞으로 연구되어야 할 과제이다.

우리 나라 하천 연구의 현황

1. 하천 현황

우리 나라의 하천은 유로 연장이 짧고 하천의 최상부 부터 교란 요인들이 많아 원형 그대로를 유지하고 있는 하천들은 아주 적은 실정이다(Table 3). 유역의 토지이용 및 형태에 따라 산지 하천, 농경지 하천, 준 도시 하천, 공단 하천, 도심 하천 등으로 구분할 수 있으며, 큰 강의 경우 거의 대부분이 인위적으로 강의 흐름이 조절되고 있는 조절 하천에 포함될 수 있다. 그러나 토지이용, 지질대, 하천의 크기, 생물 군집 구조 등을 포괄적으로 고려하여 하천의 유형을 파악한 예는 거의 없어 체계적인 연구가 시급히 요구된다.

우리 나라 하천 생태계는 지난 40년간 댐, 보 건설 등으로 물리적 환경이 변하고, 산업화와 인구 증가에 따른 오염 물질 유입의 증가와 부영양화로 인하여 수질오염이 가속화되었을 뿐 아니라 생물상이 변하고 있다. 그러나 현재까지 이에 대한 정량적인 평가가 이루어진 적이 없어 하천 생태계의 변화 요인들에 대한 상대적 중요성과 안정성 유지를 위한 방안의 도출이 매우 어려운 실정이다.

우리 나라 하천 생태계의 주요 변화 요인은 물리적 변형, 화학적·생물학적 변화 등으로 크게 나눌 수 있다(이 등 1994). 물리적 변형으로는 댐 건설, 직강화, 준설, 골재 채취, 제방 건설, 고수 부지 개발, 용수 공급을 위한 과도한 하천수의 이용, 유역의 교란(산림 벌채, 산불, 농경지 개간, 습지 매립), 수중보 등을 들 수 있으며, 이러한 물리적 변화요인은 화학적·생물학적 변화에도 큰 영향을 미쳐 왔다. 현재 대부분의 상류 및 중

Table 3. Major stream types in Korea and possible factors causing physical and chemical alteration

Major stream type*	Stream order	Disturbances
Mountain stream	1~3	Clear cut, road, fire, mining, small dam
Agricultural stream	2~3	Fertilizer, pesticide, livestock wastes, small dam, land use (agriculture)
Semiurban stream	2~4	Domestic wastes, small dam, channelization, artificial bank, harvest of construction material, watershed land use (residence)
Industrial stream	2~5	Industrial wastes, small dam, channelization, artificial bank, land use (industrial complex)
Urban stream	2~5	Domestic wastes, covering, channclization, artificial bank, land usc (residence)
Regulated stream (river)	4~7	All of above disturbances, estuary dam, regulated discharge, dam construction, distruction of riparian zonc

* Note: stream types are classified qualitatively.

류 하천에는 농경지의 확대와 보의 건설로 인한 유량과 유속의 변화가 가속화되어 하천의 자연스러운 흐름이 제약을 받고 있다. 수심이 깊어지고 유속이 느려지는 곳은 생물상이 크게 변화되어 일차 생산력을 담당하는 부착 식물이 감소하고 플랑크톤이 크게 증가하여 무척추동물의 섭식 형태(기능군) 변화까지 초래되었다. 이러한 변화는 어류의 종조성을 크게 변화시켰으며 보의 설치는 회귀성 어종(예; 연어, 은어 등)의 이동을 막아 그 수를 감소시켰다. 보나 복개천 등에 의한 물리적 변형은 다른 나라에 비해 독특함에도 불구하고 이에 대한 생태학적 평가가 거의 없었다(오와 전 1991).

화학적 변화 요인은 점 오염원과 비점 오염원에 의한 유기·무기 오염물의 유입(공장 폐수, 생활 폐수, 유해 독극물이나 기름 유출), 토사 유입 등을 들 수 있다. 특히, 현재 겪고 있는 중·하류 하천의 수질 오염은 위에서 언급한 댐 건설에 의한 수량 감소와 오염 물질 유입의 가속 등의 복합 요인에 의해 초래된 것이다. 중·하류 하천의 경우 수질오염의 가속이 서식지 환경 변화의 주요 요인이며, 식물 플랑크톤의 군집 구조 변화에 관한 축적된 자료만 보아도 변화를 실감할 수 있다. 낙동강 하류의 경우 지난 20~30년간 부영양화의 가속으로 1990년대 이후 여름철 남조 군집의 번성이 빈번해졌고, 일차 생산자의 군집 변화로 인해 연쇄적으로 영양 단계 변화를 초래하고 있다(주 1995).

생물학적 변화의 요인으로는 외래유입종(예: 파랑볼우럭, 큰입우럭, 떡붕어, 황소개구리 등)에 의한 하천 고유 생태계의 교란과 특정 종의 남획에 따른 하천 생태계 군집 구조 및 영양구조의 변화 등을 들 수 있다. 특히, 수질오염이 가속화되고 있는 상황에서 외래 유입종들이 무분별하게 하천 수계에 유입되고 있어, 이로 인한 고유 담수어종 군집 구조에 큰 변화가 있을 것으로 예상된다. 현재, 체계적인 자료 축적의 미비로 특정 수계 서식지의 물리, 화학, 생물학적 요인들을 정량적으로 비교하기가 어려울 뿐만 아니라 파괴의 실상과 변화 정도를 예측하기도 어려운 실정이다. 또한 하천 생태 유형성과 현황이 파악되지 않은 채 하천 생태 연구가 진행된다면 기존의 연구는 우리 나라 수계 전체의 관점에서 조감되어지기 힘들고 연구간의 상호 적용성 및 보편성을 유지하기가 어렵다.

2. 연구 현황 및 방향성

현재 국내 하천 생태계의 군집 구조에 관한 연구는 부분적으로는 누적되고 있으나, 생태계의 기능, 즉 생태학적 기본 원리를 적용한 학술 연구는 매우 부진한 실정이다(Table 4). 하천 관련 논문이 가장 많이 게재되었던 육수학회지의 경우 총 558편 중 238편이 하천 관련 논문으로 전체의 45%를 차지하였다. 이중 수질 및 특정 분류군에 관한 내용이 가장 많았다. 한국생태학회지의 경우 조사 대상 논문 총 326편 중 하천 관련 논문은 15편으로 전체의 4.6%로 매우 적었다. 특히, 생태학적 기본 원리에 관한 접근은 매우 적었으며, 유수 환경을 대상으로 한 연구의 대부분은 특정 분류군의 분류학적 접근에 한정되어 있다. 중·소 하천의 경우 수서 곤충과 어류의 분포 및 서식환경이 상대적으로 많이 연구되었으며, 큰 강의 경우에는 식물플랑크톤에 관한 연구가 가장 많았다. 양적으로 볼 때, 하류 하천과 강을 대상으로 연구 발표된 논문이 상류 하천을 대상으로 한 연구보다 많아 한 수계 내에서도 조사 지점의 불균형을 보여주고 있다(주 1995).

Table 4. Subject areas and percent of papers addressing the stream ecology in The Korean Journal of Limnology (1968~1996, total 522 papers) and The Korean Journal of Ecology (1984~1987, 1991~1996, total 326 papers) *1: nutrients, sediment pollution, and water quality modeling are included. *2: histological and embryonic studies of fish are not included. *3: all invertebrates excluding aquatic insects are included. *4: all aspects of zooplankton study are included

Subject area	The Korean Journal of Limnology		The Korean Journal of Ecology	
	No.	%	No.	%
Water quality*1	53	10.2	2	0.6
Aquatic insects	51	9.8	6	1.8
Fish*2	47	9.0	1	0.3
Phytoplankton	22	4.2		
Bacteria	21	4.0	1	0.3
Macro invertebrates*3	10	1.9		
Periphyton	10	1.9	1	0.3
General stream study	9	1.7		
Zooplankton*4	5	1.0		
Bivalves	4	0.8		
Modelling	4	0.8	1	0.3
Aquatic macrophytes	2	0.4	3	0.9
Total	238	45.6	15	4.6

하천의 부착 식물, 일차 생산, 생·지화학적 순환에 관한 연구는 최근 시작되어 증가 추세에 있으나 하천 생물 군집의 동태에 영향을 미치는 생물학적 요소(경쟁, 포식, 행동, 피식, 초식 등)를 하천에 적용한 논문은 거의 없었다. 구미의 경우 이미 1960년대 인공 하천을 이용하거나 하천 주변에 인공 수로를 설치하여 현장 및 실험실에서 초식 및 유기물 분해, 행동 등을 연구한 바 있다(McIntire and Phinney 1965). 초식자(예: 다슬기)의 수를 조절하여 초식의 정도에 의한 일차 생산력 변화를 파악하거나 빛, 유속 등의 물리적 환경을 조절하여 생물의 반응을 연구한 것과 비교해 볼 때, 기본 원리 파악에 많은 노력을 경주할 필요가 있다.

부영양화의 가속과 수질오염의 심각성으로 유수 환경에서의 수질에 관한 자료는 비교적 많이 축적되고 있으나, 대부분 수질 평가를 위한 접근에 그치고 있다. 서식생물상에 관한 연구도 계절적 분포 위주로 개체수의 변화에 치중하고 있어 군집의 역동성 및 군집에 미치는 환경 요인을 파악하는데는 한계가 있다. 예를 들어, 무척추동물(특히, 수서 곤충)의 경우 분포에 관한 많은 연구가 진행되었음에도 이차 생산을 다룬 예는 없었으며, 섭식 방법에 따른 기능군별 군집 구성을 파악한 경우도 매우 적었다. 최근 배(1996)에 의해 수서 곤충 연구의 현황과 연구 방향성은 상세히 정리되었으며, 이러한 시도가 타 분류군에도 적용되어 종합적인 평가가 이루어진다면 하천 생태계 내의 생물학적 접근이 보다 효율적으로 이루어질 것이다.

특정 분야의 연구가 하루 아침에 괄목할 만하게 달라질 수는 없다. 연구 인력의 배출, 소연구 주제별 선진 이론의 이해, 연구 지원 체제의 확립 등 많은 선결 과제가 해결되어야만 극복될 수 있기 때문이다. 하천 생태의 경우도 우리 나라 생태 학계가 겪고 있는 일반적인 문제처럼 적은 연구진으로 효율적인 구를 수행하지 않으면 안될 어려운 시기에 직면해 있다고 할 수 있다. 현재 하천 생태학의 학술적 중요성에 대한 인식은 해를 거듭 할수록 높아지고 있으며, 생물 다양성 위기, 훼손된 생태계의 복원 등 많은 시대적 과제가 산적해 있다(홍 1995). 따라서 우리 나라 하천 생태학의 발전을 위해서는 다음과 같은 시도나 접근을 통하여 효율성을 극대화해야 한다.

첫째, 하천 생물을 대상으로 한 연구에 있어 정량적인 자료의 축적이 필요하다. 연구 대상 분류군의 개체수는 물론 개체군의 실질적인 생체량 혹은 체적 등이 연구되어 먹이사슬, 생산력의 연구와 연계되어야 한다. 하천에서의 에너지 흐름을 파악하기 위해서는 생태계의 계층 구조별 역동성이 생산력, 생체량 등으로 표준화 되어야 하며 장기적인 생태계 구조 변화 파악 및 비교를 위해서는 정량적인 접근이 필요하다.

둘째, 생태 현상 규명을 위해서는 필요에 따라 실험적 접근을 시도하여야 한다. 현재 호수의 경우 소규모로 특정 환경 요인을 변화시켜 조사 대상 생물군의 반응을 추적하는 일이 시도되고 있다. 그러나 하천의 경우, 다양한 저층 종류에 따른 부착 식물의 부착 정도 파악을 위한 시도를 제외하고는 실험적 접근이 이루어지지 않고 있다(조 1994). 하천 내 혹은 하천 근처에 인공 하천과 같은 인위적인 구조물을 이용하면 환경 인자 조절이 용이하여 연구 효율을 증대시킬 수 있다. 특히, 하천에서 포식, 경쟁, 초식, 행동 등의 기초 생태와 오염 물질의 독성 파악을 위해서는 실험적 접근이 필요하다.

셋째, 하천과 강에 서식하는 주요 분류군과 기능군에 대한 포괄적인 연구가 필요하다. 단순한 하천 연구 단계를 벗어나 생태학적 역동성이 고려된 연구 단계로 전환되어야 한다. 현재 수서 곤충, 어류, 식물 플랑크톤에 관한 연구는 비교적 활발한 편이나 기타 분류군에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다. 낙동강 수계의 경우 지난 40년간 약 300여편의 학술 논문, 학위 논문, 보고서가 하류를 대상으로 발표되었다. 이중, 식물 플랑크톤과 무척추동물은 각각 30여편 이상의 논문이 발표된 반면, 일차 생산력은 불과 두·세편 만이 발표되어 있는 실정이고 동물 플랑크톤의 경우 거의 조사 자체가 이루어져 있지 않을 정도로 특정 연구 분야에 편중되어 있다(주 1995). 상류 하천의 경우에도 아직 생태적 특성이 한번도 조사되지 않은 분류군이 많은 편이다. 분해자로 매우 중요한 물곰팡이, 일차 생산자인 선태류가 그러한 예에 속한다. 우리 나라의 상류 하천은 여름철의 집중 강우시를 제외하고는 흐름이 없거나 건천화되는 경향이 많아(intermittent stream) 앞으로 우리 나라 하천 생태 연구시 고려되어야 할 중요한 특성 중의 하나이다.

넷째, 우리 나라 하천 생태가 획기적으로 발전되기 위해서는 학제간 연구가 활성화되어야 한다. 하천 생태의 구조적 차원의 연구에서는 지질, 수문 학적 요소가 포함되어 있고, 관리 차원에서는 인문 지리, 수질, 공학 등의 인접 학문과 연계되어 있어 학제간 연구가 효율적으로 진행되었을 경우 연구의 경쟁성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

하천 생태학은 최근 30년간 급속히 발전한 학문 분야로 1960년대의 생물 군집 구조에 미치는 환경 인자, 70년대와 80년대의 물질 순환과 에너지 흐름, 기능적 섭식 분류군, 강을 이루는 여러 지천을 하나의 연속적이고 통합적 생태적 단위로 보는 개념 등 많은 발전이 있었다. 특히, 최근 20년간은 실험을 통한 생태 원리의 적용으로 다른 생태계 유형에 비해 소홀했던 군집 및 개체군 생태학의 발전이 있었다. 우리 나라의 하천 연구 역사는 짧지 않으나, 대부분 수질, 수서 곤충, 어류의 분포와 군집 구조에 편중되어 왔으며 생태적 원리 적용이나 에너지

흐름과 같은 하천의 기능적 측면에 관한 연구는 미진했다. 이미 하천 생태학이 비교적으로 오랜 기간에 걸쳐 정착된 북미나 유럽의 학문 수준을 단시일 내에 극복하기란 현실적으로 어려운 일이기는 하지만 하천 생태 자료의 정량화, 실험적 접근, 학제간 연구 등을 촉진하여 연구의 효율성을 높인다면 이 분야의 급속한 발전과 더불어 다른 학문과 연계성을 가져 경쟁성을 확보할 수 있을 것으로 여겨진다

사 사

본고는 한국생태학회·어류학회 공동 심포지움에서 발표한 내용을 토대로 작성되었으며 심포지움 조직 위원회에 감사드린다. 아울러 자료취합시 도움을 준 박성배, 김진수, 장혜숙, 주윤희, 조은아, 장광현, 장진우, 조가익, 하진용에게 감사드린다.

인 용 문 헌

김준호. 1995. 한국생태학 90년사. 생태학의 징검돌. 여천 김준호 교수 정년 기념 논총. pp. 1-283.

배연재. 1996. 한국 수서곤충 연구의 현황과 과제. '96 한국육수학회 심포지움 proceedings, pp. 63-71.

이경준, 김범철, 김은식, 주기재, 오정수, 유신재, 이준호, 이창석. 1994. 서식지 및 생태계의 보전과 복구. pp. 289-313. 이인규, 김계중, 조재명, 이도원, 조도순, 유종수. 엮음내, 한국의 생물 다양성 2000. 민음사, 서울. 405p.

조경제. 1994. 인공 基質을 이용한 附着藻類 調査. 한국육수학회지 27: 47-57.

주기재. 1995. 낙동강 생태연구 1957-1994. 도서출판 금정, 부산. 177p.

오용남·전태수. 1991. 배내천 중류의 저서성 대형무척추동물에 대한 연구. Ⅱ. 봇둑 상하에서의 군집 및 환경비교. 한국생태학회지 14: 399-413.

한국생물과학협회. 1996. 한국생물과학협회 50년사. 도서출판 한림원, 서울. 387p.

홍욱희. 1995. 하천시스템복원의 생태학적 관점. '95 한국생태학회, 한국어류학회 공동 심포지움 proceedings. pp. 85-97.

水野信彦·御勢久右衛門. 1993. 河川の生態學. Nobuhiko Mizuno and Kyuemon Gose. 247pp.

Allan, J.D. 1995. Stream ecology: structure and function of running waters. Chapman and Hall, London.

Anderson, N.H., and K.W. Cummins. 1979. Influences of diet on the life histories of aquatic insects. Can, J. Fish. Aquat. Sci. 36: 335-342.

Barnes, J.R., and G.W. Minshall (eds.) 1983. Stream ecology: application and testing of general ecological theory. Plenum Press, New York.

Cummins, K.W. 1973. Trophic relations of aquatic insects. Annual Review of Entomology 18: 183-206.

Cummins, K.W. 1974. Structure and function of stream ecosystems. BioScience 24: 631-641.

Cummins, K.W. 1979. "The natural stream ecosystem". *In* Ward, J.V. and J.A. Stanford (eds.), The ecology of regulated streams. Plenum, New York.

Cushing, C.E., K.W. Cummins and G.W. Minshall. 1995. River and stream ecosystem. Elservier, Amsterdam, 382p.

Danielopol, D.L. 1989. Groundwater fauna associated with riverine aquifers. J. N. Am. Benthol. Soc. 8: 18-35.

Davies, B.R. and K.F. Walker (eds.). 1986. The ecology of river systems. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Fontaine, T.D. and S.M. Bartell (eds.). 1983. Dynamics of lotic ecosystems. Ann. Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan.

Hynes, H.B.N. 1970. The ecology of running waters. University of Toronto Press, Toronto.

Joo, G.J. 1990. Limnological studies of oxbow lakes in the Southeastern United States: morphometry, physico-chemical characteristics and patterns of primary productivity. Ph. D Dissertation, Univ. of Alabama.

Kaushik, N.K. and H.B.N. Hynes. 1971. The fate of dead leaves that fall into streams. Archiv für Hydrobiologie 68: 465-515.

Krumholz, L.A. (ed.). 1981. The warm water streams symposium: a national symposium on fisheries aspects of warm water streams. Southern Division, American Fisheries Society. Allen Press, Lawrence, Kansas.

Lock, M.A. and D.D. Williams (eds.). 1981. Perspectives in running water ecology. Plenum Press, New York.

McIntire, C.D. and H.K. Phinney. 1965. Laboratory studies of periphyton production and community metabolism in lotic environments. Ecological Monographs. 35: 237-258.

Minshall, G.W., R.C. Petersen, K.W. Cummins, T.L. Bott, J.R. Sedell, C.E. Cushing and R.L. Vannote. 1983. Interbiome comparison of stream ecosystem dynamics. Ecological Monographs 53: 1-25.

Newbold, J.D., J.W. Elwood, R.V. O'Niell and W. Van Winkle. 1981. Measuring nutrient spiralling in streams. Can. J. of Fish. Aquat. Sci. 38: 860-863.

Oglesby, R.T., C.A. Carlson and J.A. McCann. 1972. River ecology and man. Academic Press, New York.

Power, M.E., R.J. Stout, C.E. Cushing, P.P. Harper, F.R. Hauer, W.J. Matthews, P.B. Moyle, B. Statzner and I.R. Wais. 1988. Biotic and abiotic controls in river and stream communities. J. N. Am. Benthol. Soc. 7: 456-479.

Resh, V.H. and D.M. Rosenberg (eds.). 1984. The ecology of aquatic insects. Praeger Publ., New York.

Sladecek, V. 1973. System of water quality from the biological point of view. Arch. Hydrobiol. (Ergebn Limnol.) 7: 1-218

Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37: 130-137.

Wallace, J.B., J.R. Webster and W.R. Woodall. 1977. The role of filter feeders in flowing waters. Archiv für Hydrobiologie 79: 506-532.

Ward, J.V. 1989. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. J. N. Am. Benthol. Soc. 8: 2-8.

Ward, J.V. 1992. Aquatic insect ecology: 1. Biology and habitat. John Wiley and Sons, New York.

Ward, J.V. 1994. The structure and dynamics of lotic ecosystems. *In* Margalef, R. (ed.). Limnology Now: A Paradigm of Planetary Problems. Elsevier Science B.V., Amsterdam.

Ward, J.V. and J.A. Stanford (eds.). 1979. The Ecology of Regulated Streams. Plenum Press, New York.

Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. Limnological Analyses. Springer-Verlag, New York.

Whitton, B.A. (ed.). 1975. River ecology. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

(1997년 1월 23일 접수)