

수서곤충의 다양성과 생물평가

원 두 희

(주)생태조사단 부설 두희생태연구소

제1장 서론

수서곤충(aquatic insects)은 육상에서 번성하여 오던 곤충류가 이차적으로 수중생활, 특히 담수생태계에 적응하여 생활사의 전부 또는 일부를 물속에서 보내는 곤충류를 총칭하는 것으로, 바다에서 생활하는 몇 종을 제외하고는 대부분이 하천이나 호소 등과 같은 내륙의 담수에서 생활한다. 이들 수서곤충은 원래 다른 육상곤충과 같이 육상 생활을 하던 곤충 종류가 이차적으로 다시 수중생활을 하게 된 것으로 생화 방법이 변화된 환경에 알맞게 적응된 것들이 대부분이다.

비록 전체 곤충류의 3% 정도만이 생활사의 일부를 물속에서 보내지만(Daly, 1984), 수서곤충은 담수생태계에서 그 종류와 개체수가 가장 다양하고 풍부한 무리로 담수생태계에 존재하는 대형무척추동물의 95%에 이르는 것으로 알려져 있다(Ward, 1992). 생활사 중 일부를 물속 또는 물과 밀접히 관련되어 생활하고 있는 수서곤충은 곤충강 중 절반 정도의 목에서 나타나며(Daly, 1984), 일반적으로 무리의 대부분이 물에 적응한 일차적응군(primary invader)과 무리의 일부만이 물에 적응한 이차적응군(secondary invader)으로 나눌 수 있다(Hynes, 1984). 일차적응군으로는 하루살이목, 잠자리목, 강도래목, 뱀잠자리목, 날도래목 등을 들 수 있으며, 이차적응군으로는 노린재목, 딱정벌레목, 파리목, 벌목, 나비목 등이 속한다.

수서곤충 중에서 전 생활사를 물속에서 지내는 것은 노린재목과 딱정벌

레목뿐이며, 딱정벌레 목 중에서도 반딧불이과의 성충은 육상생활을 한다. 이들을 제외한 나머지 목에서는 유충 시기 또는 유충과 번데기시기를 물속에서 보내고 성충 시기는 육상에서 생활한다. 하루살이목, 강도래목 및 잠자리목 등은 유충시기를 물속에서 지내고 번데기를 거치지 않고 바로 성충이 되어 육상생활을 하는 불완전변태를 하는 곤충(hemimetabolous insects)이며, 벌목, 뱀잠자리목, 날도래목, 나비목 및 파리목 등에 속하는 무리는 완전변태를 하는 곤충(holometabolous insects)으로 유충과 번데기시기를 물속에서 지낸 후 성충으로 육상생활을 한다.

수서곤충은 담수생태계에 서식하고 있는 생물 중에서 가장 다양하고 풍부한 무리일 뿐만 아니라 생태계의 영양단계(trophic level)에서 저차 소비자로서의 기능을 담당하고 있기 때문에 그 구성원으로 중요하다(Hynes, 1970; Ward, 1992; Williams & Feltmate, 1992). 또한 수서곤충은 담수생태계의 다양한 환경요인과 서식지(habitat)에 따라 적응방식이 다양하고 수질환경에 대하여 민감하게 반응하는 종이 많으므로 순수생태학적 연구뿐만 아니라 지표생물로서 이용되는 등 응용적인 연구에도 좋은 재료가 된다(Boon, 1988; Minshall, 1988; 배, 1992, 1996; Reice & Wohlemberg, 1993; Rosenberg & Resh, 1993; Dudgeon, 1994, 1995).

또한 수서곤충은 담수생태계의 다양한 먹이자원을 이용하기 때문에 이러한 먹이자원의 이용양상에 따른 섭식기능군(functional feeding groups)의 분류가 제시되어 이용되고 있다(Cummins & Klug, 1979; Merritt & Cummins, 1984, 1996). “하천연속성 개념(river continuum concept)”에 따르면 하천의 흐름을 따라 상류에서 하류로 갈수록 섭식기능군의 조성도 달라지며, 하천의 오염 등 인위적인 물환경의 변화에 따라서도 그 조성이 달라져(Allan, 1995; Horne & Goldman, 1994; Palmer et al., 1993; Quinn & Hickey, 1990; Vannote et al., 1980) 이에 대한 관심이 증가되어 왔다. 또한 이들은 분포의 범위가 비교적 좁고 이동이 느리며 육안으로 식별이 가능하여 생태학의 연구에 훌륭한 재료로 이용되어 왔다. 특히 이들은 물환경의 변화에 민감하게 반응하여 물환경을 평가하는 지표생물로서 이미 오래 전부터 연구되어 왔다(Hyne, 1970)

제2장 수서곤충의 다양성

1. 주요 목별 특징

수서곤충은 전체 곤충강의 아주 작은 부분을 차지하고 있지만 담수생태계에서는 매우 다양하고 풍부하게 존재하는 무리로, 이들이 담수생태계에서 하는 역할은 매우 중요하게 다루어지고 있다. <표 1>에서는 전 세계, 북미, 유럽, 일본 및 우리나라에서 보고된 수서곤충 주요 목에 속하는 종수를 비교·기록하였다.

<표 1> 수서곤충의 다양성

구 분	세계	북미	유럽	일본	한국
하루살이목	2,000	650	217	97	80
잠자리목	5,500	650	127	163	100
강도래목	2,000	540	387	156	54
노린재목	3,300	400	130	100	66
뱀장자리목	250	43	6	7	3
풀잠자리목	?	?	?	2	?
딱정벌레목	6,000	1,073	1,072	372	111
벌목	?	51	74	2	1
파리목	?	?	?	?	?
날도래목	10,000	1,200	895	280	92
나비목	?	280	?	35	?

하루살이(Ephemeroptera)는 불완전변태를 하는 종류로 유충은 물속생활을 하고 성충 시기에 육상생활을 한다. 세계적으로 22과 310속에 약 2,000여종(Hubbard, 1990)이 기록되어있다. 또한 북미에서는 650여종, 유럽에서는 217종이 보고되어있으며, 일본에서는 97종이, 한국에는 80여종 정도가 출현하고 있다. 하루살이의 유충은 진화적 측면을 고려하여 생

활형에 따라 다음과 같은 4개의 범주로 나누기도 한다. 1) 헤엄치는무리 (swimming nymphs) : 옛하루살이과, 꼬마하루살이과 일부, 2) 기어오르는무리 (creeping and climbing nymphs) : 꼬마하루살이과 일부, 알락하루살이과, 등딱지하루살이과, 방패하루살이과, 3) 납작하고 유선형인 무리 (flattened, streamlined nymphs) : 납작하루살이과, 4) 굴파는무리 (burrowing nymphs) : 하루살이과, 흰하루살이과, 강하루살이과로 구분할 수 있다.

잠자리 (Odonata)는 불완전변태를 하는 종류로, 유충과 성충이 아주 다른 모습을 하고 있으며, 유충은 물속생활을 성충은 육상생활을 한다. 잠자리는 세계적으로 5,500여종이 기록되어있으며, 북미에서는 650여종이, 유럽에서는 127종이 보고되어있다. 강도래 (Plecoptera)는 불완전변태를 하는 종류로 유충은 물속생활을 성충은 육상생활을 한다. 대부분의 종은 양반구의 온대지역에 서식한다 (Illis, 1965; Zwick, 1980). 강도래는 세계적으로 15과에 2,000여종이 기록되어있으며, 북미에서는 540여종이, 유럽에서는 387종이 출현하고 있다.

노린재 (Hemiptera)는 불완전변태를 하는 종류로, 이 목에 속하는 대부분의 종들은 육상생활을 한다. 그러나 노린재아목 (Heteroptera)에 속하는 종류는 진수서군으로 세계적으로 16과에 3,300여종이 보고되어있으며, 북미와 유럽에서 각각 400여종과 130여종이 기록되어있다. 뱀잠자리 (Megalopectera)는 완전변태를 하는 종류로 생활사에서 유충만이 물속생활을 하고, 알, 번데기 및 성충은 육상생활을 한다. 뱀잠자리과는 온대와 열대 수역에 널리 분포하나 유럽에는 없으며, 쏘뱀잠자리과는 양반구의 온대 지역에 널리 분포하고 있다. 뱀잠자리 유충은 잘 발달된 큰 턱을 가지고 있는 왕성한 포식자이다. 풀잠자리 (Neuroptera)는 대부분이 육상생활을 하는 곤충으로 단지 해면풀잠자리과 유충만이 물속생활을 한다. 일본에서는 2종이 기록되어있다.

딱정벌레 (Coleoptera)는 완전변태를 하는 종류로 세계적으로 적어도 27과에 6,000여종의 수서 및 반수서 종이 보고되어있고, 북미에는 1,073종, 유럽에는 1,072종이 알려져 있다. 벌 (Hymenoptera) 중 물속생활을 하는 북미에서 4과 51종이, 유럽에서는 74종이 기록되어있다. 이 종류의 성충은 일반적으로 다른 곤충이 물속생활을 하는 단계에 기생 또는 포식을

위하여 물로 들어간다. 파리(Diptera)는 수서곤충으로 알려진 모든 종수의 반 이상을 차지하고 있는 무리이다(Ward, 1992). 특히 깔다구과는 담수생태계에 존재하는 매우 큰 무리 중의 하나이다.

날도래(Trichoptera)는 완전변태를 하는 종류로 유충과 번데기는 물속 생활을 하고 성충으로 육상생활을 한다. 현재 세계적으로 날도래목은 10,000여종 정도가 기록되어있으며, 북미에서 1,200여종이, 유럽에서 895종이 보고되어있다. 날도래 유충은 집짓는 습성, 즉 생활형에 따라 5군으로 나누어지며(Wiggins, 1996), 우리나라에 출현하는 과에 적용하면, 1) 자유생활을 하는 무리(free-living forms) : 물날도래과, 2) 사다리 또는 사각기둥 모양의 집을 짓는 무리(saddle-case makers) : 광택날도래과, 3) 지갑모양의 집을 짓는 무리(purse-case makers), 4) 그물을 치는 무리(net-spinners or retreat makers) : 각날도래과, 입술날도래과, 입술날도래과, 통날도래과, 갯날도래과, 별날도래과, 줄날도래과, 5) 튜브 모양의 집을 짓는 무리(tube-case makers) : 날도래과, 둥근날개날도래과, 둥근얼굴날도래과, 우묵날도래과, 네모집날도래과, 털날도래과, 바수염날도래과, 날개날도래과, 달팽이날도래과, 채다리날도래과, 나비날도래과로 구분할 수 있다.

나비(Lepidoptera)는 북미에서 수서 및 반수서 21속에 148종(Lang, 1996)이 기록되어있다. 수서 및 반수서인 명나방과는 북미에서 21속에 148종, 유럽에서는 4속에 5종이 기록되어있다.

2. 적응(Adaptation)

일반적으로 수서곤충은 깊은 호소에서 생활하는 종류는 많지 않으며, 물가의 얕은 곳이나 계류와 같은 곳에 많은 종류와 개체수가 살고 있고, 특히 물가의 수초가 무성한 곳에 많은 종류의 수서곤충이 서식한다. 또한 수서곤충은 물의 흐름에 대하여 여러 가지 적응을 하고 있으며, 우선 고인 물에서 생활하는 종류들보다 흐르는 물에서 생활하는 종류, 즉 계류성 수서곤충에서 몸의 형태나 생활방법 등이 다양하게 적응되어있다(표 2).

먼저 호흡법에 있어 공기 중의 산소를 이용하는 것과 물에 녹아있는 산소, 즉 용존산소를 이용하는 것 등이 구별된다. 전자에는 대부분의 생애를 물속에서 생활하는 노린재류와 딱정벌레류가 이에 속하는데 이들은 육상에서 하던 호흡법을 그대로 지니고 있으면서 물속에서 공기 호흡을 할 수 있도록 적응되어있다. 때때로 물 표면으로 떠올라 기문을 통하여 직접 공기를 몸 안으로 끌어들인다(물장군, 물방개 등). 이에 대하여 후자, 즉 용존산소를 이용하는 종류들은 폐쇄기관계를 가지고 있으며, 기관아가미를 통하여 호흡을 한다. 이러한 기관아가미는 곤충류에 따라 배마디에 가지고 있는 것(하루살이류), 가슴과 배마디에 가지고 있는 것(강도래류, 날도래류) 등이 있으며, 잠자리류는 직장의 안쪽 벽에 기관이 분포되어 이를 통하여 호흡을 하는 종류와 배마디 말단의 꼬리아가미로 호흡하는 종류가 있다.

한편 형태적 적응은 몸의 모양이 유속에 대하여 저항을 적게 받거나 또는 흡착장치와 같은 것을 가지고 유속에 직접적으로 대항하는 방법으로 적응된 것과 빠른 유속을 피할 수 있는 장소를 이용하는 간접적인 방법을 이용하도록 적응된 것 등으로 크게 구별된다.

<표 2> 수서곤충의 발생단계별 서식지

목	수서관련	각 단계의 서식지			
		알	유충	번데기	성충
하루살이목	1	A	A	-	T
잠자리목	1	A, T	A	-	T
강도래목	1	A	A	-	T
노린재목	2	A, T	A, S, T	-	A, S, T
뱀장자리목	1	T	A	T	T
풀잠자리목	2	T	A	T	T
딱정벌레목	2	A, T	A, T	T	A, S, T
벌목	2	P	P	P	A, T
파리목	2	A, T	A	A, T	T
날도래목	1	A, T	A	A	T
나비목	2	A	A	A	T

1 = 모든 종이 수서; 2 = 주로 육서, 일부는 수서; 3 = 주로 육서, 일부 반수서;
A = 수서; S = 반수서; T = 육서; P = 기생자

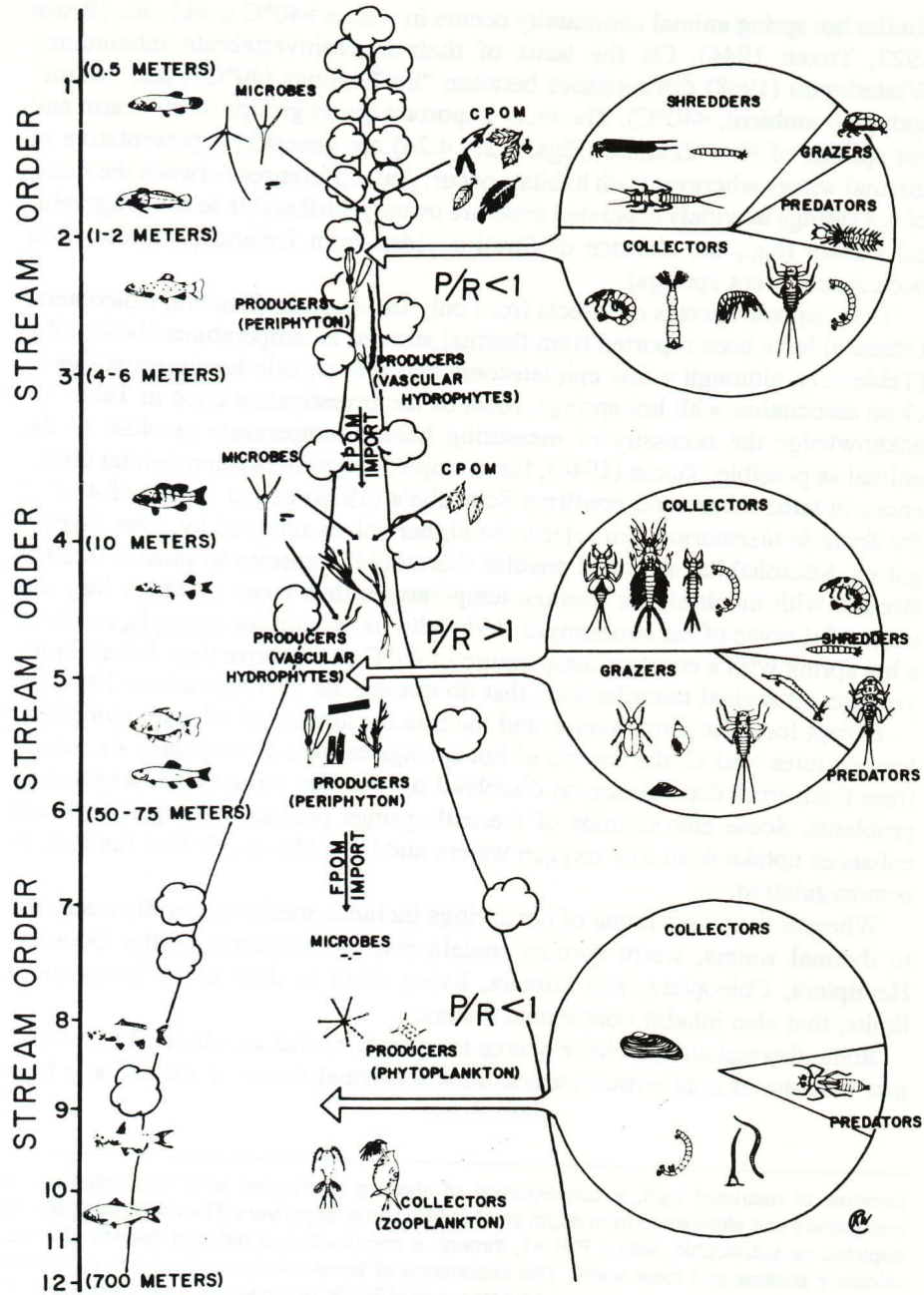
제3장 수서곤충의 생태

1. 서식지(Habitat)

담수생태계는 호소나 연못과 같은 정수생태계(lentic ecosystem)와 강, 하천과 같은 유수생태계(lotic ecosystem)로 크게 구분할 수 있으며, 발원지, 산간계류, 평지하천, 대규모 강 등 다양한 크기와 종류의 유수생태계를 통칭 하천생태계(stream ecosystem)라 부른다(표 3).

<표 3> 서식지 구분

구 분	설 명
유수성(lotic)	
유수-침식성 (lotic-erosional)	서식처가 유수생태계의 여울(riffle)지역에 있는 경우를 의미하며 호박돌, 자갈, 잔자갈 등이 혼합된 복잡한 하상구조로 이루어져 있으며 먹이자원이 다양하고 용존산소가 높기 때문에 생물다양성이 높다.
유수-퇴적성 (lotic-depositional)	하천의 소(pool) 및 수폭이 넓은 강과 같이 유속이 매우 느리거나 유속의 영향을 거의 받지 않는 유수생태계의 서식처를 의미하며 모래나 니(silt)처럼 일반적으로 작은 입자가 하상을 이룬다. 퇴적성 지역에서는 여울지역보다 비교적 적은 종의 저서성 대형 무척추동물이 출현하지만 일부 종은 높은 우점율을 보이기도 한다.
정수성(lentic)	
정수-수변성 (lentic-littoral)	정수생태계의 수변 지역을 의미하며 일반적으로 수생식물이 풍부하기 때문에 이를 섭식하거나 은신처로 삼는 생물이 다양하게 서식한다. 왕잠자리과, 장구애비과 등이 이러한 서식처를 갖는다.
정수-수중성 (lentic-limnetic)	정수생태계의 수면이나 수체(water column)에 위치하는 서식처를 의미하며, 노린재목 중 물벌레과와 송장해엄치게과의 수서곤충이 이러한 서식처를 갖는다.
정수-심수성 (lentic-profoundal)	정수생태계 중심부의 수심이 깊은 곳을 의미하며, 빛의 투과량이 미약하고 수생식물이 적기 때문에 수서곤충 중에서는 깔다구류와 같은 일부 분류군만이 서식한다.



<그림 1> 하천연속성의 개념(Ward, 1992)

실제로 하천이나 강과 같은 하천생태계는 지구 전체에 존재하는 물의 약 0.0001%를 차지하는 데 불과하지만 인간이 필요로 하는 담수자원의 대부분을 하천생태계에서 얻고 있다(Allan, 1995). 하천생태계는 물이라는 매체에 의하여 외부와 구별되는 독립적인 생태계일 뿐만 아니라, 고도차로 물이 한 방향으로 지속적으로 흐름에 따라 유역환경이 점진적으로 변하며, 또한 다양한 유역환경의 영향을 생태계 내에서 지속적으로 받는 매우 복잡한 생태계이다. 이런 특성을 고려하여 하천생태계를 하나의 연속성의 개념(river continuum concept)으로 보고 있다(Vannote et al., 1980). 이 개념은 하천생태계의 전반에 대하여 설명한 것으로 하천의 발원지로부터 하구까지 연속적으로 변화하는 물리적 환경, 즉 온도, 유속, 하상구조, 일조량 등에 따라 생물군집이 변동을 보인다는 것이다(Vannote et al., 1980; Horne & Goldman, 1994; Allan, 1995). 이러한 “하천 연속성의 개념”을 통하여 각각의 영양단계에 있는 생물군집의 변동에 대한 예측이 가능하며, 환경에 대한 인간의 영향을 예측할 수 있고 궁극적으로 하천생태계의 기능을 규명할 수 있다(Palmer et al., 1996)(그림 1).

2. 습성(Habit)

수서곤충은 서식습성에 따라 지치는무리(skater), 부유하는무리(planktonic), 잠수하는 무리(diver), 헤엄치는무리(swimmer), 붙는무리(clinger), 기는무리(sprawler), 기어오르는무리(climber), 굴파는무리(burrower) 등으로 구분할 수 있는데(Merritt & Cummins, 1984, 1996), 이는 수서곤충의 외부형태학적 적응과 하상구조, 유속 등의 환경 요인과의 상관성을 고려하여 구분한 것이다(표 4).

<표 4> 수서곤충 습성, 즉 생활양식의 구분

구 분	내 용
지치는무리 (skater)	수면 위에서 스케이트를 타는 것처럼 또는 얼음 위를 지치는 것처럼 미끄러지듯이 다니는 무리를 의미하며, 소금쟁이가 대표적이다
부유하는무리 (planktonic)	정수생태계의 수중에 서식하는 무리를 뜻하며, 모기유충(장구벌레)이 이에 속한다.
잠수하는무리 (diver)	뒷다리로 노를 젓듯이 헤엄치며 잠수하는 무리로 이들은 산소를 얻기 위하여 수면위로 올라왔다가 먹이포획과 적으로부터의 은신을 위해 다시 잠수하는 습성을 보인다. 대표적인 수서곤충으로는 노린재목 중 물벌레과, 딱정벌레목 중 물방개과 등이 있다.
헤엄치는무리 (swimmer)	유수 및 정수생태계에서 물고기처럼 헤엄칠 수 있는 무리로 짧은 시간동안 헤엄을 친 후 하상이나 수생식물에 붙어 있는 습성을 보인다. 옛하루살이과, 갈래하루살이과 등이 이 무리에 속한다.
붙는무리 (clinger)	주로 유속이 빠른 여울지역에서 서식하는 무리로 몸이 떠나려가지 않도록 하는 구조물을 만들거나 길고 구부러진 발톱, 납작한 체형, 흡반(suctorial disc)과 같은 형태적인 특징을 보인다. 납작하루살이과, 멧모기과, 줄날도래과, 물날도래과 등이 여기에 속한다.
기는무리 (sprawler)	하상의 표면을 기어다니며 먹이를 섭취하거나 은신하는 무리를 말하며, 등딱지하루살이과, 잠자리과, 우묵날도래과 등이 있다.
기어오르는무리 (climber)	관속 수생식물에서 서식하며 수직으로 이동할 수 있는 무리로 왕잠자리과가 여기에 속한다.
굴파는무리 (burrower)	모래 또는 점토성 니(silt)의 하상에서 굴을 파거나 몸을 숨길 수 있는 관을 만드는 무리를 의미한다. 하루살이과, 강하루살이과, 깔따구과 등이 여기에 속한다.

또한 위에서 설명된 하천 연속성의 개념에 영양단계를 설명할 수 있는 섭식기능군을 도입하는 것이 필요하며, 이는 어떻게 각각의 생물종들을 영양단계에 따른 기능적 집단으로 나눌 것인가의 문제이다. 일반적으로 섭식기능군을 구분하기 위하여 두 가지의 방법을 이용하는데, 하나는 어떤 형태의 먹이를 먹는가하는 것과 다른 하나는 어떻게 먹이를 얻는가하는 것이다. Cummins & Klug(1979)는 수서곤충의 일차적인 먹이자원이 다양한 자원으로부터 유도된 부식질이므로 단순히 부식자라는 것만으로는 어떻게 부식질을 얻는가에 대한 정보가 부족하기 때문에 후자, 즉 먹이 획득방법의 중요성을 강조하였다.

<표 5> 섭식기능군의 분류체계

구 분	내 용
썰어먹는무리 (shredder)	낙엽 등과 같은 굵은유기입자를 섭식하는 무리를 말한다. 일반적으로 이들은 굵은유기입자를 찢기 위한 입구조를 가지며 이들에 의해 분해되고 남은 절편과 배설물은 차후 가는유기입자로 변하여 주워먹는무리 또는 걸러먹는무리의 먹이원이 된다. 일부 강도래목(민강도래과, 흰배민강도래과, 꼬마강도래과 등)과 날도래목(우묵날도래과, 네모집날도래과 등)이 여기에 속하며 계곡과 같은 하천의 상류부에 풍부한 종구성을 보인다.
모아먹는무리(collector)	
주워먹는무리 (collector-gatherer)	물의 흐름을 따라 하류로 떠내려 온 가는유기입자를 섭식하는 무리로 이들은 주로 하상에 퇴적된 유기입자를 얻는다. 일부 하루살이목(꼬마하루살이, 하루살이과, 알락하루살이과 등)과 파리목(갈따구과 등) 등이 주요 구성원으로 하천의 중류에서 풍부하게 나타난다.
걸러먹는무리 (collector-filterer)	주워먹는무리와 함께 가는유기입자를 섭식하는 무리를 말하지만 물의 흐름을 따라 떠내려 오는 가는유기입자를 섭취하기 위하여 그물과 같은 장치를 이용한다는 점에서 다르다. 즉, 앞다리에 긴 강모열을 가지고 있는 빗자루하루살이와 머리에 부채모양의 구조물을 가지는 먹파리와 같이 몸의 형태적인 구조를 이용하는 경우와 일부 날도래목(임술날도래과, 깃날도래과, 줄날도래과 등)와 같이 하상에 깔때기 모양의 그물을 지어 유기입자를 거르는 두 가지 종류가 있다. 일반적으로 유기물의 양과 가는유기입자의 양이 많아질수록 이 무리들은 폭발적으로 우점하는 경향을 보인다.
긁어먹는무리 (scraper)	하상에 붙어있는 부착조류를 섭식하는 무리를 말한다. 이들은 호박돌이나 자갈과 같은 하상에서 먹이를 긁어 먹기 위하여 튼튼한 뼈기형의 큰턱과 기저부에 짧고 강한 강모들을 갖는 형태적인 특징을 보인다. 또한 부착조류는 여울지역의 하상 표면에 밀집하기 때문에 대부분의 종은 빠른 유속에 쓸려가지 않기 위하여 납작한 모양을 갖는다. 일부 하루살이목(피라미하루살이과, 납작하루살이과 등), 딱정벌레목(여울벌레과, 물삿갓벌레과 등) 및 날도래목(광택날도래과, 통날도래과 등)이 여기에 속한다.
수액빠는무리 (macrophyte-piercer)	수생식물 및 이끼류, 사상조류(filamentous algae) 등을 뽕족한 입으로 찢러 수액을 빨아먹는 무리를 뜻한다. 일부 노린재목(물벌레류 등)과 날도래목 중 애날도래류가 이에 해당한다.
잡아먹는무리(predator)	
삼키는무리 (predator-engulfer)	살아있는 동물의 먹이 전체를 삼키는 무리로 잠자리목, 뱀잠자리목, 대부분의 딱정벌레목 및 일부 강도래목(그물강도래과, 강도래과, 녹색강도래과 등)이 이러한 방법을 이용한다.
체액빠는무리 (predator-piercer)	살아있는 동물의 체액을 빨아먹는 무리로 일부 노린재목(물장군과, 장구애비과 등)은 뽕족한 입의 구조로 포획한 먹이의 조직을 뚫어 체액을 빨아 먹는다.

수서곤충에 대하여 담수생태계에 존재하는 다양한 먹이자원의 획득방법에 따른 섭식기능군의 분류가 제시되고 있다(표 5). 즉 먹이의 형태와 섭식습성 등을 토대로 섭식기능군을 다음과 같이 6개의 범주로 나누었다. 1) 찢어먹는무리(shredder)는 외부로부터 담수생태계로 유입된 나뭇잎이나 나뭇가지와 같이 큰 고형물질인 굵은유기물질(CPOM, coarse particulate organic matter, >1mm)을 찢어서 먹는 무리이다. 2) 모아먹는무리(collector)는 찢어먹는무리의 부산물을 포함한 가는유기물질(fine particulate organic matter, FPOM, 0.5 μ m~1mm) 이하의 것을 먹는 무리이며, 다시 가는유기물질의 퇴적물을 주워서 먹는 주워먹는무리(collector-gatherer)와 몸의 구조물이나 망(net)을 이용하여 물 속에 떠 있는 물질을 걸러서 먹는 걸러먹는무리(collector-filterer)로 구분되어진다. 3) 긁어먹는무리(scraper)는 하상의 돌표면에 부착되어있는 물질을 긁어서 먹는 무리로 이러한 물질은 가는유기물질도 포함되지만 대부분이 부착조류이다. 4) 수액빠는무리(macrophyte piercer)는 수생식물에 구멍을 내어 수액을 빨아먹거나 조류(algae)의 조직 자체를 먹는 무리이다. 5) 잡아먹는무리(predator)는 다른 동물을 잡아서 먹는 무리로 육식자(carnivore)이며, 이는 다시 수서곤충의 몸 전체를 먹는 삼키는무리(predator-engulfer)와 뾰족한 입을 먹이에 박고 체액을 빨아먹는 체액빠는무리(predator-piercers)로 구분되어진다. 마지막으로 6) 기생하는무리(parasite)는 다른 동물의 알, 유충, 번데기 등의 내외부에 기생하여 사는 무리로 살아있는 동물조직을 먹게 된다.

따라서 하천연속성의 개념으로부터 다음과 같이 섭식기능군의 분포를 예측할 수 있다. 찢어먹는무리와 걸러먹는무리는 수관(canopy)이 형성되어있어 외부로부터 낙엽의 유입이 많은 곳인 하천의 발원지와 상류수역에서 우점하고, 중류수역에서는 일조량의 증가로 인한 부착조류의 번성과 유입되는 낙엽의 감소로 긁어먹는무리가 우점하며, 하류수역에서는 작은 입자성 물질이 증가함에 따라 주워먹는무리가 우점하게 된다. 그러나 이러한 하천연속성의 개념을 도입하기 위해 가장 큰 문제는 생물군집 구성원에 대한 정확한 개생태학적 자료(autecological data)가 부족하다는 점이며, 특히 각 생물종을 어떠한 섭식기능군으로 분류할 것인가에 대한 정확한 연구가 결여되어있는 것이 현실이다. 그러므로 수서곤충의 섭식습성을 이해한

다는 것은 하천생태계의 생물군집의 기능을 이해하는데 매우 중요한 것이다. 이러한 중요성에도 불구하고 현재까지 몇몇 종에 대해서만 섭식과 관련된 연구가 이루어져왔고, 이러한 연구도 위내용물 분석(gut content analysis)의 방법에 의존하였기 때문에 어떻게 먹이를 찾고, 어떻게 환경으로부터 먹이를 얻으며, 먹이의 어떤 부분이 영양적으로 중요한가에 대한 것은 알기 어렵다. 따라서 수서곤충의 섭식생태에 대한 두 번째 의문인 “어떻게 환경으로부터 먹이를 얻는가?”에 대한 연구를 발달된 생태학적인 이론과 접목시키는 것이 중요하다. 이러한 연구를 통하여 축적된 자료는 차후 하천생태계의 기능을 밝히는 데에 필수적인 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

현재까지 수서곤충의 섭식기작, 특히 구기의 구조가 섭식전략이나 먹이자원에 따라 어떻게 적응되었는가를 기능형태학적 측면과 섭식행동, 특히 어떠한 방법으로 먹이를 획득하는가를 행동학적 측면에 대하여 복합적으로 연구된 경우는 드물다. 섭식과 관련되어 과거에 이루어진 연구의 대부분(Brown, 1960, 1961a, 1961b;)은 주로 광학현미경 등의 장비가 이용되어 정확한 섭식기작과 행동을 파악하는 데 한계가 있었다. 그러나 1980년 이후 구기의 보다 세밀한 부분의 구조까지도 파악할 수 있는 주사전자현미경(SEM)의 이용이 일반화되고, 실제의 행동을 기록할 수 있는 영상확대촬영시스템(videomacroscopic system)과 같은 보다 진보된 도구가 등장하게 되었다. 특히 영상확대촬영시스템의 이용으로 과거에는 매우 어려웠던 곤충 행동에 관한 개생태학적 연구에 획기적인 발전을 기대할 수 있게 되었고, 최근 들어 이 분야의 연구에 필수적인 도구로 자리매김하고 있다. 영상확대촬영법은 동물행동을 동영상으로 기록하여 실험크기 이상으로 확대하여 관찰하고 느린 동작, 정지 동작, 시간 분석 등의 기술로 행동을 분석하는 기법으로 곤충과 같은 미소동물의 행동연구에 많이 이용된다. 최근 디지털 카메라의 등장으로 더욱 선명한 영상을 촬영할 수 있게 되었다. 그러나 미소 수서동물은 크기가 작고(대개 5~20mm), 물속에 살기 때문에 관찰이 용이하지 않아 육상에 적용하던 방법과는 매우 다른 새로운 기법들이 도입되어야만 한다(McShaffrey & McCafferty, 1986, 1988, 1990, 1991;).

3. 개체군 생태학(population ecology)

최근 외국에서는 수서곤충 개체군에 대한 연구가 매우 활발히 이루어지고 있는데 이러한 개체군 생태학적 연구는 하천의 군집 및 생태계 연구에 기초가 되기 때문이다(Allen, 1995). 따라서 개체군에 대한 정보의 지속된 축적은 하천생태계의 구조와 기능을 밝히는 데에 중요한 밑거름이 될 것이다. 개체군 생태학은 현재 생활사(life history), 특히 생물기후학(phenology)적 연구, 개체군 동태(population dynamics)에 관한 연구 및 이차생산력(secondary production) 등에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 하천에 서식하는 생물군집 내에서 다양한 개체군 간의 상호관계, 특히 포식-피식관계(predator-prey interaction), 굵어먹는무리-조류관계(grazer-algae interaction) 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Resh & Rosenberg, 1984)

Tomas Park은 개체군의 특성에 대하여 적절한 표현을 하였는데, 개체군은 구성하고 있는 생물종의 공통적 특성, 즉 '생물적 특성(biological attribute)'과 그 집합체가 지니고 있는 '집단적 특성(unique attribute)'을 함께 가지고 있다고 기술하고 있다(Allee et al., 1949). 이는 곧 개체군이 생활사를 통해 마치 한 생물 개체처럼 성장과 분화를 하여 자기 유지를 하는 생물적 특성과 번식률, 사망률 및 연령구조 등과 같은 집단적 특성을 가지고 있다는 것을 직접으로 표현한 것이라 할 수 있다.

가. 생활사(life history)

개체군의 생활사에 대하여 Oliver(1979)는 번식력(fecundity), 발생(development), 수명(longevity) 및 행동(behavior)을 포함하는 중이나 개체군의 생식과 생존에 의존하는 사건으로 정의하였고, Water(1970)는 생활사에 포함되는 요소로 출생방법, 성장의 형태와 속도, 섭식, 위치이동과 사회적 행동, 수명, 서식지 선택, 환경요인에 대한 반응, 생식 및 사망의 형태를 기술하였다. 한편 생활환(life cycle)에 대하여 Calow(1978)는 생식을 통하여 스스로를 만들어가는 사건의 순환으로

정의하였고, Butler(1984)는 한 세대에서 다른 세대로 연결되는 형태적 단계와 생리적 과정의 연속으로 정의하여 생활사와 생활환을 구분하였다.

나. 생물기후학(phenology)

생물기후학은 주로 개체군에 대한 생물학적 사건의 타이밍과 이러한 타이밍의 원인이 될 수 있는 생물학적, 비생물학적 요인에 대하여 연구하는 학문으로(Leith, 1974), 다양한 계절적 요인, 즉 온도, 용존산소, 수위, 광주기 및 먹이자원 등은 수서곤충에게 영향을 미치는 중요한 요인으로 알려져 있다. 이중에서도 온도는 수서곤충의 생태와 진화에 중요한 역할을 담당하며, 또한 수서곤충의 시공간적 분포에 영향을 미치는 주요한 요인의 하나로 알려져 있다(Ward, 1992). 또한 온도는 수서곤충 성장률의 계절적 변화를 조절하는 중요한 역할을 하며, 영양물질이나 광주기와는 어느 정도 독립적으로 작용한다. 따라서 높은 성장률을 위한 적정온도는 성장효율, 우화의 성공이나 성충수명을 위해 덜 적절한 상태를 유지하게 될지도 모른다(Heiman & Knight, 1975). 일반적으로 유수역이나 정수역에 서식하는 종들은 0℃나 그 부근의 온도에서도 어느 정도 성장이 이루어지는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 적산온도모델(degree day model)로 표현되는 생물기후학적 모델은 곤충의 성장이 그들이 서식하고 있는 지역의 온도와 밀접한 관련이 있다는 사실을 기초로 언급되고 있다. 또한 적산온도의 산출을 위한 rectangle method, sine wave method 등 다양한 방법이 개발되고 있다.

4. 군집 생태학(community ecology)

군집구조의 분석은 정량적으로 채집된 자료로부터 출현한 분류군의 수를 비교하여 출현개체수, 우점종, 군집지수 - 우점도지수(DI), 다양도지수(H'), 종풍부도지수(R1) 및 균등도지수(J')를 산출한다. 총출현개체수를 N , i 종의 개체수를 N_i , 총출현종수를 S , 제1우점종의 개체수를 N_1 , 제2우

점종의 개체수를 N_2 라 할때 다음과 같이 표현할 수 있다(수식 1).

$$\begin{aligned}
 DI &= \frac{N_1 + N_2}{N} & \text{McNaughton(1967)} \\
 H &= - \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N} \cdot \log_2 \frac{N_i}{N} & \text{Shannon-Weaver(1949)} \\
 R1 &= \frac{S-1}{\ln N} & \text{Margalef(1958)} \\
 J &= \frac{H}{\log_2 S} & \text{Pielou(1975)}
 \end{aligned}
 \tag{수식 1}$$

우점도지수(DI)는 가장 근본적이고 고전적인 지수로서 군집 내에서 가장 높은 출현도를 보이는 두 종의 개체수에 대한 총개체수의 상대적 구성 비율을 의미하며, 지수값이 높을수록 특정종이 차지하는 비율이 높음을 나타낸다. 즉 지수값이 1에 가까울수록 생태계 내의 군집이 매우 단순함을 의미하며, 반대로 생물다양성과 안정성이 높은 생태계에서의 우점도지수는 낮게 나타난다.

다양도지수(H')는 출현한 각 종의 개체수와 전체 출현개체수의 상대적인 출현도를 나타내는 것으로 지수값이 높을수록 다양한 종이 안정적으로 서식하고 있음을 의미한다.

종풍부도지수(R1)는 출현한 생물의 총 종수와 총 개체수를 고려하여 존재하는 종의 구성이 어느 정도 높은가(또는 어느 정도 풍부한가)를 가늠하는 척도가 되는 지수로 다양도지수와 마찬가지로 값이 높을수록 하천에 서식하는 생물종에 의한 생태적 안정성이 높음을 의미한다. 다양도지수와 비교할 때 민감도가 뛰어나 공간적으로 여러 곳에 위치하는 군집의 생물다양성을 상호 비교하는 데에 매우 유용한 지수이다.

균등도지수(J')는 종 조성이 어느 정도 균일한가를 보여주는 것으로 안정적 생태계에서는 높은 값을 나타낸다. 즉 어느 장소에서 분포하는 종들이 완전히 균등하다면 그 값은 1이 되며, 이는 하천생태계에 서식하고 있는 생물종이 이루고 있는 군집구조가 안정화된 것으로부터 기인한다고 볼 수 있다.

제4장 생물학적 수질평가

1. 생물평가의 의의

가. 생물학적 평가와 생물학적 기준의 정의 및 중요성

수질의 악화에 대한 확인은 적절한 평가도구를 필요로 하며, 이들은 화학적, 물리적 및 생물학적 피해에 대한 원인과 기원을 찾아내고 특징화하는데 도움을 준다. 생물학적 평가는 해당 수체의 생물학적 상태를 평가하는 일차적인 도구로서, 수체에 서식하고 있는 생물체(수생식물, 조류, 어류, 수서곤충, 저서성 대형무척추동물 등)에 대한 생물학적 조사나 기타 직접적인 측정방법들로 구성된다. 생물학적 평가는 다른 물리·화학적 평가와 함께 수체의 건강성을 평가하는데 매우 중요하다.

■ 생물학적 평가(Biological Assessment, Bioassessment)

서식하고 있는 생물들에 대한 생물학적 조사나 기타 직접적인 측정법을 이용하여 수체의 생물학적 상태를 평가하는 작업

■ 생물학적 기준(Biological Criteria, Biocriteria)

수생생물의 생존과 번영을 유지할 수 있도록, 이수목표가 지정된 수계에 서식하는 생물들의 상태를 보호하기 위해 제정된 수치(numeric value) 또는 서술적 묘사(narrative description)

■ 생물학적 총체성(Biological Integrity, Biointegrity)

자연상태의 서식지와 비교가능한 종조성, 다양도 및 기능적 구조를 가지는 건강한 생물군집을 유지·관리 시킬 수 있는 능력

수계에 서식하는 생명체는 과다한 영양물질, 독성화합물질, 수온증가, 과다한 토사의 유입 등과 같은 여러 종류의 스트레스들에 대한 누적적인 효과를 종합하여 보여준다. 따라서 생물학적 평가는 스트레스들에 대한 집합적인 영향의 측정을 가능하게 한다. 생물군집들은 시간에 따라 스트레스에 반응하기 때문에 신속하게 변화하는 수질의 화학적 측정이나

독성시험이 파악하기 어려운 정보를 제공하는 장점이 있다. 이처럼, 생물학적 평가는 수체의 상태에 있어 장기적인 생물변화를 평가하는 신뢰성 있는 방법을 제공한다(표 6). 수서생물군집의 생물학적 상태를 평가하는 가장 중요한 목적은 해당 수체가 그 안에 서식하는 생명체들을 얼마나 잘 유지할 수 있는가를 결정하는 것이다.

생물학적 평가는 전반적인 생태학적 총체성의 상태를 반영한다. 즉, 생물학(생물 및 그들과 관련된 제반현상)이 건강할 때 전형적으로 수체의 물리·화학적 상태 또한 양호한 상태에 있다. 그러므로 생물학적 평가는 직접적으로 생태계의 건강성을 평가하는 것이며, 미국의 경우 청정수법(Clean Water Act)의 가장 기본적인 목표이다(표 7). 생물기준이란 수생생물 이용을 위해 지정된 수체에서 생명유지를 위해 희망하는 상태를 표현하는 수질기준의 형태로 국가나 지방정부가 채택할 수 있는 서술적 표현 또는 수치이다. 역으로 기준은 수자원을 보다 잘 관리하기 위해 이화화학적인 기준들과 같이 사용한다.

<표 6> 생물학적 정보의 이점

-
- 수체의 영향에 대한 기준이 존재하지 않을 때, 예를 들면 서식지를 교란시키는 영향, 생물군집은 평가에 대한 단하나의 실질적인 수단을 제공한다.
 - 생물학적 자료는 성공적인 수서생물을 이용한 분석과 지역적으로 특수한 기준을 만들기 위해 필수적이다.
 - 생물학적 자료는 수질변화경향과 총량관리의 효율성을 평가하는데 사용 가능하다.
 - 생물들은 수계에서 대부분 모든 종류의 다른 스트레스에 대한 영향에 노출되어 있기 때문에 스트레스의 조합된 영향을 파악하는 수단을 제공한다.
 - 생물들은 경시적으로 스트레스를 종합하며 따라서 변화하는 상태에 대한 측정을 제공한다.
 - 생물군집에 일상적인 모니터링은, 특히 개별적인 독성오염물질에 대한 모니터링 비용과 비교할 때 상대적으로 비용이 크게 소요되지 않는다.
 - 시민들은 오염이 없는 환경에 대한 측정치로서 생물의 상태를 인식한다.
-

<표 7> 미국 청정수법(CWA)의 요구조건에 대한 생물학적 평가의 이점

관련법조항	생물학적 평가의 이점
수서생물 이용에 대한 목표달성 (305b조)	생물평가는 수체가 건강한 수서생명체를 보유하고 있는가를 명확하게 결정
비점원(319조)	생물평가는 이화학적스트레스 모두를 포함하는 비점원으로 부터의 누적적 영향을 평가하는 가장 효과적인인 방법
TMDLs (303d조)	생물평가는 수체의 상태에 대한 생태학에 기초한 평가를 제공하며 생물학적 피해의 심각성에 기초한 오염허용총량을 위한 수체의 우선순위를 결정하는데 도움
NPDES(402조)	생물평가는 서식하는 수서생물에 대한 특정 또는 모든 스트레스의 조합된 영향을 직접적으로 측정하며, 허용 가능한 관리의 효율성을 결정하는데 사용가능

나. 건강한 수체(healthy water body)의 정의

건강한 수체는 생태학적 총체성(ecological integrity)을 표현하며, 자연 상태 혹은 교란되지 않은 상태를 나타낸다. 생태학적 총체성은 화학적, 물리적 및 생물학적 총체성이라는 세 가지 요인들의 조합이다. 이중에서 하나 또 그 이상이 교란이나 파괴되었을 때 수체의 건강성은 영향을 받으며 대부분의 경우에 있어 서식하는 수생생물이 그 영향을 반영한다.

다. 수질평가에 있어 생물학적 기준의 중요성

미국의 경우, 생태학적 총체성의 개념은 미국 청정수법의 법령 및 법규적 구조 안에 녹아들어 있다. 미국 청정수법 제정의 장기적인 목표중의 하나는 생태학적 총체성(물리·화학·생물학적 총체성의 조합)을 회복하고 유지함으로써 수생자원들을 보호하는데 있다. 생물학적 평가는 수체의 건강성과 수체의 이용목적을 유지하기 위해 필요한 수준을 달성하기 위한 주정부나 지방정부의 도구이다(표 8). 미국 청정수법에서는 주나 지방정부가 법의 목표를 달성하도록 그들의 수체들에 대해 수생생물의 이용(즉, 환경적 목표)을 지정하도록 요구하고 있다. 그 내용은 생물학적 총체성을 향상시키고 보호하는 것과 그에 필요한 기준을 채택하는 것을 포함한다.

<표 8> 미국의 생물학적 수질평가 현황(자료: US EPA, 2002)

주정부	생물평가 기준형식	내 용
Idaho	서술적 생물기준	stream과 하천 모니터링; 3개의 생물학적 지역(bioregion) 평가; 생물 물 지수와 손상의 역치(threshold) 설정; 손상된 물의 목록화에 이 용; 최적관리 프로그램을 찾아내고 효율성을 평가하는데 이용
Oregon	서술적 생물기준	stream 모니터링; 저서성 대형무척추동물 이용; 지역적인 reference 상태 설정; 다변량분석 및 생물학적 metric 요소에 의해 평가; 손상 된 물을 목록화하기 위해 이용
Arizona	서술적 생물기준	stream 모니터링; 저서성 대형무척추동물 이용; 생물학적 및 물리적 자료의 종합; Montane & Plains 지수 이용
Vermont	(서술적 생물기준)	일련의 단계 수서생물의 이용; stream 모니터링, 강과 호수는 개발 중; 복수의 군집이용; 3개로 개천을 그룹화(고도/경사); 물상태의 목 록화에 이용
Maine	정량적 생물기준	단계별 수서생물의 이용; 개천과 강의 모니터링; 저서성 대형무척추 동물 이용; 다변량 예측모델; 수서생물을 이용한 reference 상태 설 정; 수준별 이용(tiered use)에 기초한 교란의 역치 설정
Maryland	서술적 생물기준	stream 모니터링; 복수의 군집이용; coastal 및 non-coastal 생물지 역; 생물지수 및 생물지역에 의한 손상역치 설정; 손상된 물에 대한 목록화 및 평가에 이용
Ohio	정량적 생물기준	단계별 수서생물의 이용; 생태지역적 reference 상태 설정; stream, 강, 습지 모니터링; 생물학적, 물리적, 화학적 및 독성자료의 종합; 단계별 이용을 위한 생물지수; 수질기준에 채택
Florida	정량적 생물기준	강 유역 모니터링; 개천, 강, 호수, 만, 습지 모니터링; 생물학적, 물 리적, 화학적 및 독성자료의 종합; 평가를 위한 4개 생물지역 설정; 생물지수 및 생물지역에 의한 손상역치 설정; 손상된 물에 대한 목 록화에 이용

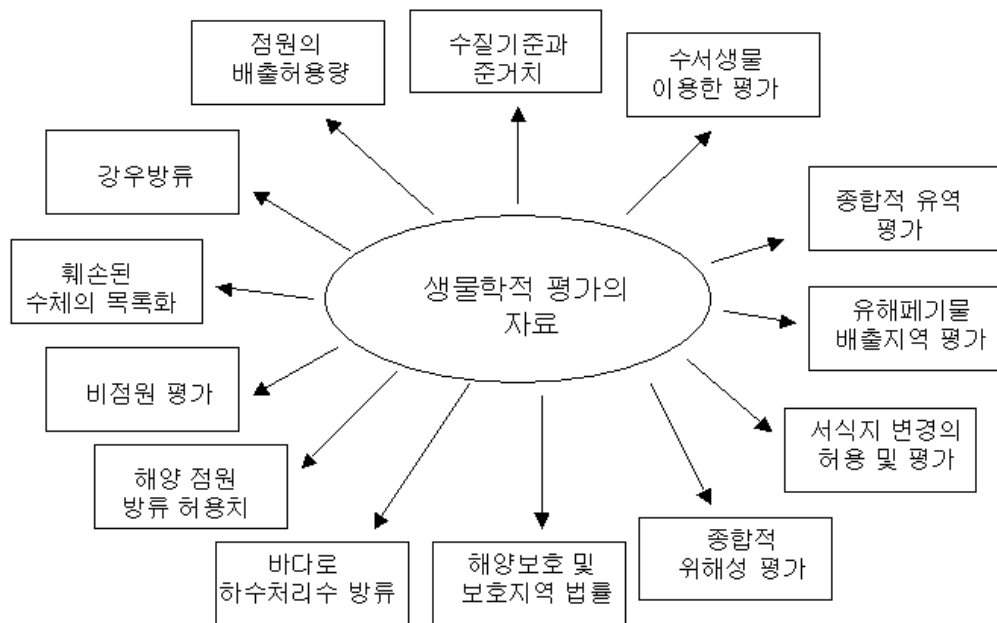
우리나라의 수질환경기준에 대해 명시하고 있는 환경정책기본법의 제정
목표에서는 “자연환경을 적절하게 관리·보존함을 목적”으로 하고 있으나
이 내용은 미국의 경우처럼 생태학적 총체성의 유지 및 확보라는 구체적인
의미로 정리하지는 않고 있다. 또한 수질환경기준에 있어서도 생태계의 건
강성 및 서식생물의 보호와 보존에 대한 내용은 존재하지 않는다. 선진국
의 사례 및 생태학적 원리에서도 명백히 증명되듯이 수체의 수질은 물리·
화학적환경의 총체성으로 대표되기는 어렵다. 수체의 존재는 궁극적으로
그 안에 서식하는 생명체를 유지하는 것에 연결되며 수자원의 총체성은 생

물학적 총체성이 포함될 때 비로소 완성될 수 있다. 또한 미래의 물환경문제의 관리와 개선에 있어서도 국내외적인 조류가 생태계의 보전과 회복에 초점을 맞추고 있음을 감안할 때 생물학적 기준에 의한 수질의 평가는 필수적인 의미를 갖는다.

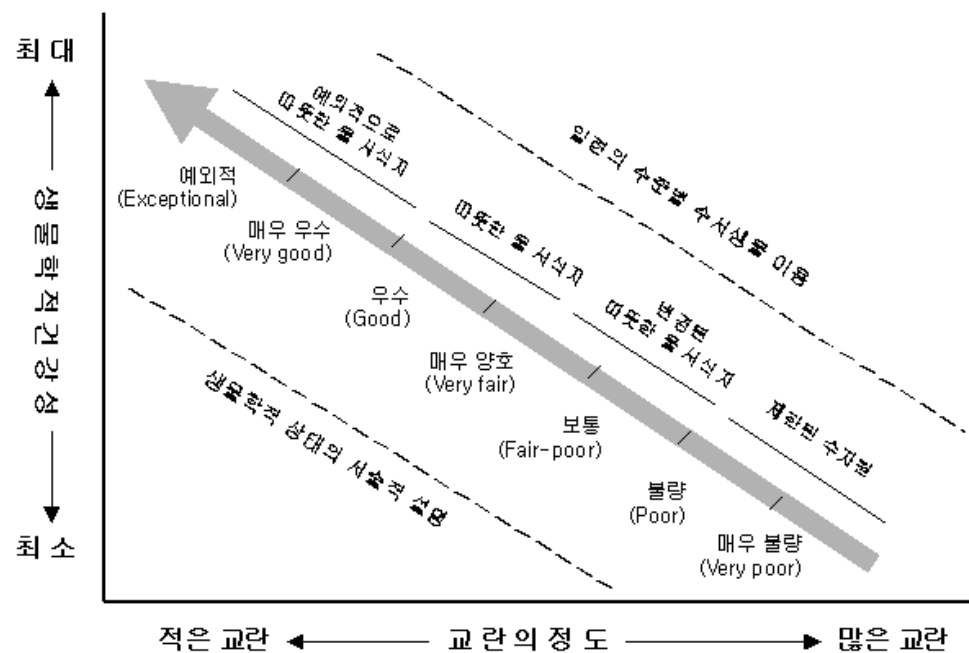
라. 수질프로그램에서 생물학적 평가와 생물기준의 이용

자연적, 물리·화학적 총체성을 구성하는 많은 인자들은 생물학적 총체성에 직접적으로 영향을 미친다. 그러므로 생물학적 총체성을 달성하는 것은 양호한 수체의 건강성을 회복하는 것이다. 인간의 활동이 물리·화학적 총체성을 교란할 때 생물학적 총체성도 영향을 받으며 결국 생태계의 건강성이 저하된다. 생물학적 평가는 생물학적 상태를 평가하기 위한 도구이며 1) 상태에 대한 초기평가 또는 스크리닝, 2) 손상과 진단에 대한 방법, 3) 개선 또는 질적 저하를 평가하는 모니터링을 포함하는 세 가지 기능을 부여한다. 따라서 생물학적 평가는 복잡한 수질문제를 관리하는데 중요한 수질정보를 제공한다.

생물학적 평가를 이용하는 목적중의 하나는 국가나 지방정부가 해당 수계에서 목표로 하는 생물학적 상태를 확보하기 위한 기대치를 발전시키는데 도움을 준다. 이것은 수서생물의 이용을 의미하며, 수서생물에 대한 목표를 확립하는 기술적인 과정을 통해 수행된다. 생물학적 평가는 다양한 종류의 수서생물을 이용할 수 있다. 따라서 한 기준은 수체내의 깨끗한 군집을 유지시키며 다른 것은 시골, 도시하천 또는 다른 변경된 생태계 복원을 위한 목표를 설정할 수 있게 한다. 수서생물의 몇 가지 형태나 이들의 조합은 국가나 지방정부가 생태계보전을 위한 요구와 비례하여 해당 수체에 대해 특정한 가치와 자원을 지정하도록 할 수 있다. <그림 2>와 <그림 3>은 이러한 접근방법을 보여준다.



<그림 2> 수질프로그램에서 생물학적 평가의 이용(미국 EPA, 2002)



<그림 3> 수서생물 이용을 결정하는 생물평가 및 기준을 위한 체계(미국 EPA, 2002)

2. 생물학적 수질평가(Biological water quality assessment)

교란(disturbance)은 생태계에서 생물군집의 구조와 기능을 결정하는 중요한 요인 중의 하나이다. 군집은 안정적인 것이 아니라 천이를 하는 동안에 구조적, 기능적으로 변화하게 되므로 교란의 효과는 군집의 발달 상태에 따라 다양한 모습을 나타내게 된다. 교란에 대한 생물군집의 반응은 시공간적으로 다양하게 나타나므로 생태계의 환경구배는 저항성을 강하게 도는 약하게 하거나 교란 후의 회복속도와 유형을 변형시키는 방법으로 군집의 구조와 기능에 영향을 미칠 수 있다. 한편 하천생태계에서 교란으로부터 회복하려는 저서성 대형무척추동물의 능력은 1) 각 생물의 생활사 특성, 2) 교란의 시기, 3) 교란지역 내의 생존개체 여부, 4) 재정착(recolonization)을 위한 원천 개체군의 거리, 5) 교란의 성질 등 많은 요인에 영향을 받게 된다.

일반적 하천생태계의 교란은 단기적 형태(pulse type)와 장기적 형태(press type)로 구분할 수 있다. 단기적 교란은 개체군 밀도나 군집구조에 일시적인 변화를 일으키는 것으로, 화학물질의 갑작스런 유입과 같이 생태계에 일시적인 변화를 일으킨다. 이러한 교란은 재빨리 제거되었을 때 생태계의 반응은 일시적인 것이 된다. 반대로 장기적인 교란은 지속적이고 만성적인 간섭을 통하여 생태계에 장기적인 영향을 주게 되는 것으로 댐 및 수중보의 건설, 수로의 변형 등은 유속 및 서식지의 물리적 특성을 변화시켜 하천생태계에 영향을 주게 된다. 하천생태계의 회복력은 생물체에 대한 교란의 효과와 서식지에 대한 물리적, 장기적 변화에 영향을 받기 때문에 저서성 대형무척추동물 군집의 회복 기작에 대한 이해를 촉진시킨다.

최근 수질오염의 양적, 질적 증가에 따라 물환경을 파괴시키는 오염물질의 잠재적 유출 가능성은 더욱 커지고 있다. 따라서 화학적인 방법으로 수체에 내재되어 있는 수 만종의 오염물질을 검색한다는 것은 인력과 경제적인 면에서 사실상 불가능하며 오염물질의 복합 상승작용에 의해 생태계에 미치는 유해도의 증폭효과를 평가한다는 것은 더욱 어려운 일이다. 반면 생물군집은 환경의 영향을 받고 환경변화에 따라 기능적으로 변동하므로 내재적 환경요인에 대한 모든 종합적 정보를 담고 있다. 따라서 생물학

적 수질평가는 이러한 면에서 이화학적 수질평가에 앞서서 혹은 동시에 실시되어야 한다.

가. 생물학적 물환경 평가기법 개발의 중요성

현재까지의 물환경 평가에 있어서는 화학적 수질항목의 분석에 의존함으로써 생태계의 기능을 분석하는 부분은 매우 취약한 것이 현실이다. 또한 환경영향평가제도가 1977년에 도입되어 1982년 각종 규정이 제정되면서 시행되어왔으나, 수질예측모델만이 주로 적용되고 생태분야에 대해서는 동식물상의 언급에만 국한되는 한계를 보이고 있다. 따라서 개발 및 교란에 따른 생태계의 변화를 예측하고 환경변화의 영향을 보완하기 위해서는 수환경 평가기법의 개발이 필요하며, 생태계평가 또는 환경평가에 있어서는 평가최종점의 설정이 중요하다. 기존에 시행 되어온 각종 평가를 고려해 볼 때, 일반적으로 받아들여지는 5가지의 평가중점 결정기준 가운데 생물학적 타당성에 있어서는 전체적인 동·식물상에 치중해온 경향이 있다. 이는 균형적인 토착개체군 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 극대화에도 일치한다. 이러한 상황에서 자연을 단지 보존의 대상으로 보는 것은 광대한 국토를 지닌 국가의 정책일 수는 있으나 우리나라와 같은 경우에는 적합한 방안은 아닌 것으로 판단된다. 따라서 자연을 보전의 대상으로 파악하고 개발과 함께 보호, 발전시킬 수 있는 방법론의 개발에 있어 생태학적 접근이 필수적이다(표 9).

<표 9> 수질평가 방법의 장·단점 비교

항 목	이화학적 방법	생물학적 방법
수질의 반영	제한적 ¹⁾	종합적
수질항목의 상승작용	반영불가능	반영가능
수질항목 평가치의 이질성	나타남 ²⁾	나타나지 않음
평가결과의 임의변동	나타남 ³⁾	나타나지 않음
과거 오염영향 추적	불가능 ⁴⁾	가 능
오염영향의 평가	간접적 ⁵⁾	직접적
평가의 신속성	항목에 따라 다름 ⁶⁾	신 속
소요 노력	많 음 ⁷⁾	적 음
소요 비용	많 음 ⁸⁾	적 음
오염물질의 정량	직접적 ⁹⁾	간접적

- 주 1) 이화학적 방법은 선택된 검사항목으로 제한됨
- 2) 일례로 토사유출이 심한 홍수시 부유물질(SS)은 유기물이나 영양염류 농도에 상관없이 높음. 조류발생이 심한 수역에는 오염도에 상관없이 용존산소의 농도가 높고, 가용 영양염류농도는 현저히 낮음.
- 3) 이화학적 방법의 경우 수온, 용존산소, BOD등은 하루에도 일주기적 변동을 보이며 일시적인 오염물질 유출 등에 의해서도 좌우되므로 장기적 수질의 대표치로 볼 수 없음.
- 4) 생물학적 방법의 경우 오염영향 후의 생물군집의 회복기가 비교적 길어 상류 오염원으로부터의 과거 임의적 유출에 대한 추정이 가능함.
- 5) 제한된 이화학적 오염물질의 농도만으로는 생태계의 영향도를 직접적으로 평가할 수 없음.
- 6) 수질항목에 따라 다르나 BOD등 배양시간이 필요한 경우나 방법상 장시간의 분석이 요하는 항목이 다수임.
- 7) 분석에 필요한 노력은 선택 수질항목에 따라 결정되나 일반적으로 상당한 노력을 요함.
- 8) 중금속이나 휘발성 유기화합물 등의 분석에는 고가품의 표준시약이 소요되며, 기타 항목에도 상당한 비용이 요구됨. 생물학적 방법의 경우는 생물 그 자체가 판정시료이므로 소요경비 적음.
- 9) 생물학적 방법은 수질에 대한 종합판정이므로 수질항목에 따른 오염물질의 직접정량은 가능하지 않음.

나. 하천생태계의 오염 형태

유수생태계는 다양한 점오염원 또는 비점오염원에서 유발되는 각종 오염물질 및 인위적 교란요인에 의해 수환경이 악화되어지며 이러한 오염은 여러 가지로 형태로 나타난다. 첫째로, 영양염류에 의한 오염은 특정 물질의 과잉공급에 의한 것으로, 농업용수 및 축산폐수에서 기인하는 질소 및 인의 유입으로 유발될 수 있는 부영양화가 대표적이라 할 수 있다. 둘째, 독성유기물질에 의한 오염은 생물체의 집단폐사 원인으로 작용하며, 최근 들어서는 환경호르몬 등에 의한 문제가 새로이 대두되고 있는 오염의 형태이다. 이와 함께 독성무기물질(수은, 납, 카드뮴 등)의 유입은 수중 내 생물에 있어 생물농축(biological concentration) 현상을 야기하여 생태계의

교란이 전 영양단계에 걸쳐 나타나게 된다. 넷째로 수중생물에 생리학적 영향 및 병원성 미생물의 대발생을 일으키는 오염의 형태로 폐열을 들 수 있는데, 이는 발전소에서 유출되는 냉각수에 의해 기인된다. 마지막으로 분류될 수 있는 오염의 형태로는 물리적 오염을 들 수 있다. 이는 수변정리, 교량건설, 골재채취 등으로 인한 하상구조의 교란 및 수중생물 미소서식처의 훼손 등으로서 주로 인위적 간섭에 의하여 나타나는 오염의 형태이다.

최근 들어 이화학적 방법에 의한 수환경의 분석이 단기적 또는 일시적 상태의 반영이라는 단점을 극복할 보완적인 방법으로 생물학적 수질관정에 대한 연구가 세계적으로 매우 활발하며 실질적 응용단계로 접어들고 있다. 이는 수중생물이 하천생태계 내에서 일생의 전부 또는 대부분을 생활하므로 장기적인 물환경을 대변할 수 있는 요소이기 때문이다. 다시 말해 장기간에 걸친 물환경 변화는 종 구성 및 조성의 변화로, 단기간의 변화는 개체수 또는 생체량의 변화라는 반응으로 분석되어질 수 있기 때문이다.

다. 물환경 분석에서 생물지표의 중요성

이와 같은 각종 오염의 형태에 따른 수환경의 변화분석에 있어서 저서서 대형무척추동물, 특히 수서곤충류는 여러 가지 측면에서 그 유용성 높다(표 10). 이는 다음과 같은 4가지로 정리되어 질 수 있다. 첫째, 다양한 오염원에 대한 분별적인 민감성이 높다는 점이다. 즉 종 또는 특정 분류군에 따라 민감한 오염원이 다르며 특히 오염원 유입에 따른 빠른 반응성(drift 등)을 보인다. 둘째, 대부분의 자연적인 담수생태계(특히 유수생태계)에 다양한 종들이 풍부하게 분포하기 때문에 채집이 용이하고 보편성이 높다는 장점을 지닌다. 셋째, 대부분의 종이 제한적인 미소서식처를 지니거나 이동성이 적어 지역적 환경을 잘 대변하므로 장시간에 걸친 환경 변화를 판단하기에 충분한 지표로서 역할이 가능하다는 점이다. 마지막으로 다양한 수서곤충은 군집 내에서 다른 기능을 보인다는 점이다. 즉, 수서곤충들이 다양한 영양단계를 구성하고 있으므로 이는 특정 수계에서 나타나는 환경을 타 수계의 환경과 객관적으로 비교할 수 있게 한다는 점이다.

<표 10> 생물평가 이용의 장단점

장 점	단 점
1) 수질, 서식처 교란에 영향	1) 정량채집은 많은 표본량 요구, 따라서 많은 비용 소요
2) 교란에 대한 다양한 반응	2) 수질 뿐만 아니라 다양한 요인들이 분포와 풍부도에 영향
3) 고착성 : 교란에 대한 공간적인 분석 가능	3) 계절적 변동 : 해석과 비교를 어렵게 함
4) 긴 생활사 : 규칙적 또는 간헐적인 교란, 다양한 수질농도에 대한 효과 반영	4) 일부 종의 표류성(drift), 대부분 종이 고착성이라는 장점을 상쇄
5) 채집 및 분석법은 발달 : 단순하고 저렴한 장비로 수행	5) 너무 많은 분석법 존재
6) 분류 확립 : 동정 용이	6) 분류학적으로 불확실한 분류군 존재(예, 깔다구류)
7) 많은 군집 분석법	7) 일부 교란(예, 인간 병원균, 미량의 오염물질 등)에는 반응이 미약
8) 오염형태에 따른 반응 체계 수립	
9) 교란에 대한 실험 연구에 적합	
10) 교란에 따른 개체 반응에 대한 생화학적, 물리적 측정법 발달	

라. 생물학적 수질평가기법의 발달

한편 생물지표로 사용되는 생물은 미생물로부터 고등척추동물에 이르기까지 거의 모든 생물이 광범위하게 이용되어 왔는데, 원생동물(Mohr, 1952; Cairns and Dickson, 1974), 조류(algae) (Fjordingstad, 1964), 저서성 대형무척추동물(Richardson, 1928; Liebmann, 1962; Mackenthun, 1969; Lenat, 1988; Metcalfe, 1989; Metcalfe and Reynoldson, 1989), 저서성 대형무척추동물 중에서 특히 빈모류(Brinkhurst and Cook, 1974; Howmiller and Scott, 1977), 거머리류(Sawyer, 1974; Metcalfe et al., 1984; Metcalfe and Reynaldson, 1989), 갑각류(Hobbs and Hall, 1974), 수서곤충류(Roback, 1974, Hilsenhoff, 1977, 1982, 1988; Saether, 1979; Wiederholm, 1980), 연체동물(Fuller, 1974; Harman, 1974) 등이 주로 이용되어왔다. 그러나 최근에는 수질의 판정 및 수환경의 변화에 높은 지표성을 나타내는 저서성 대형무척추동물 군집의 변화를 보다 정확한 방법으로 계량화하여 접근하고자 하는 일련의 연구가 진행되어왔다(윤과 노, 1999).

이러한 연구는 1964년 영국의 Trent강을 대상으로 최초로 시도되었으며, 서구의 여러 선진국들은 이를 기초로 하여 자국 담수 환경의 특성에

맞게 변형·발전시켜 왔다. 여러 생물지수의 모태가 된 Trent Biotic Index(TBI)는 오염에 민감한 일부의 분류군만을 선정하여 지수화 하였으나, 정성적 분석으로 다양도나 풍부도 등은 고려되지 않았다. 그 후 1970년에 개발된 Chandler's Score System은 TBI에 개체수를 포함하고 가능한 모든 분류군을 이용하여 오염에 대해 Sensitive Group과 Tolerant Group을 구분하였다. BMWP(Biological Monitoring Working Party) Score 방법은 Chandler's Score System을 단순화한 지수로서 Chandler's Score System처럼 모든 종을 고려하되 이들을 과(family) 수준에서 그룹화 하였다. 각과에 대한 내성치를 부여하고 ASPT(Average Score Per Taxon) system을 도입하여 출현도에 따른 가중치를 부여하였는데 이를 BMWP-ASPT방법이라고도 일컫는다. 이 방법은 오염상태의 변화에 대해 매우 민감한 반응을 보이는 계량화 방법으로 군집 지수인 몇몇 다양도 지수와 유사한 수치를 도출하는 객관적인 면도 지니고 있는 것이 특징이다. Belgian Biotic Index(BBI)는 정수역과 유수역에 대해 차별적인 채집 및 조사를 통해 이들 각각의 결과로부터 수질을 판정하고자 하였다. 8개의 Faunistic Group과 이들 각 Group 내에 분류학적 단위(systematic unit)를 두어 생물지수를 부여하였다. Chutter's 생물지수는 TBI를 변형한 지수로서 TBI와 마찬가지로 특정 종의 출현 여부를 중요시한다. 특정 종의 부재를 생물지리학적 차이에 의한 것으로 간주하고 종에 따라 다른 tolerance value를 부여한다. Hilsenhoff's (Improved) Biotic Index는 Chutter's BI와 유사하게 tolerance value를 각 종에 부여하나 과 수준에서도 내성치를 부여함으로써 간편하고 빠른 분석 방법으로 수질을 평가할 수 있도록 개발되었다. 보다 정확한 평가를 위하여 내성치의 등급 범위를 확장하였다.

<표 11> 저서성 대형무척추동물을 이용한 주요 수질 평가지표

구분	지수	국가	비고
Saprobic Indices	Biologically Effective Organic Loading (BEOL)	독일	Knöpp (1954)
	Saprobic Index	독일	Pantle & Buck (1955)
	Saprobic Valency	독일	Zelinka & Marvan (1961)
	Coupling Analysis	독일	Buck (1974)
	Saprobic Valency	일본	Gose (1978)
	DIN system	독일	Friedrich (1990)
	Saprobic Index	한국	윤등 (1992)
	Integrated Saprobic System	오스트리아	ÖNORM M 6232 (1995)
Simplified Indices	Korea Saprobic Index	한국	원등(1996)
	Family Biotic Index	미국	Hilsenhoff (1988)
	Group Pollution Index	한국	윤등 (1992)
Biotic Indices (formula based)	Higher Taxa Biotic Index	한국	공등 (1995)
	Biotic Index	미국	Beck (1954, 1955)
	Biotic Index	일본	Tsuda (1964)
	Biotic Index	남아프리카	Chutter (1972)
	Biotic Index	미국	Hilsenhoff (1977)
	Quality Index	네덜란드	Tolkamp & Gardeniers (1977)
	Improved Biotic Index	미국	Hilsenhoff (1987)
	RIVAUD	스위스	Lang et al. (1989)
Biotic Indices (based on standard tables)	Improved RIVAUD	스위스	Lang & Reymond (1995)
	Trent Biotic Index (TBI)	영국	Woodwiss(1964)
Biotic Scores	Extended Trent Biotic Index (EBI)	영국	Woodwiss(1967)
	Biotic Score	영국	Chandler(1970)
	Biological Monitoring Working Party Score (BMWP)	영국	Hellawell(1978)
	BMWP/Average Score Per Taxon (ASPT)	영국	Armitage et al.(1983)
	Total Biotic Score	한국	윤등 (1992)
	Macroinvertebrates Community Index (MCI)	뉴질랜드	Stark (1993)

<표 12> 저서성 대형무척추동물을 이용한 주요 생태질 평가지표

구분	지수	국가	비고
empirical model	River InVertebrate Prediction And Classification Scheme (RIVPAS)	영국	Wright et al. (1993)
	AUStralian RIVer Assessment System (AUSRIVAS)	호주	Norris (1995)
Integrated Assessment System	The Development and Testing of an Integrated Assessment System for the Ecological Quality of Streams and Rivers throughout Europe using Benthic Macroinvertebrates (AQEM)	유럽 연합	http://www.aqem.de
Multiple Metric Index	Rapid Bioassessment Protocols (RBPs)	미국	Shackleford (1988), Barbour et al. (1992, 1995, 1996b), Hayslip (1993), Smith & Voshell (1997)
	Invertebrate Community Index (ICI)	미국	DeShon (1995)
	Benthic Index of Biological Integrity (BIBI)	한국	원등(2006)

3. 생물모니터링 (biomonitoring)

생물모니터링이란 물환경의 질을 결정하기 위하여 생물 또는 그들의 반응을 이용하는 것으로 다음과 같이 두 가지 주요 유형으로 구분할 수 있다. 1) 영향의 전후를 조사하는 것, 2) 수질의 표준을 법률적으로 정하기 위하여 정기적인 채집이나 독성시험을 수행하는 것이다. 최근 미정부에 의하여 추진되는 계획은 대규모의 지리적 영역에 있는 담수에 적용할 수 있는 대조상태를 결정하기 위한 조사를 하는 다른 형태의 생물모니터링을 시도하고 있다(Hughes et al., 1986). 위의 접근방법 중 영향전후의 조사는 수서곤충을 포함하여 생물모니터링에서 가장 일반적으로 이용하는 방법이다. 어류, 부착조류 등이 수질을 평가하는 데 이용되기도 하지만 수서곤충을 포함하는 저서성 대형무척추동물(benthic macroinvertebrates)은 가장 널리 이용되고 있는 그룹이다(Hellawell, 1986).

생물학적 물환경평가는 대상생태계에 대한 정기적인 생물조사를 통해 이루어진다. 생물조사가 정기적으로 수행되기 위해서 현재 국내에서

시행되고 있는 이화학적 수질측정망과 같이 국가 생물모니터링 측정망이 도입되어야 하며, 생물조사와 분석 및 이를 이용한 평가지수의 계산 및 적용은 국가적으로 표준화된 가이드라인을 통해서 수행되어야 한다.

가. 유럽환경청의 지표수 수질모니터링 프로그램

대부분의 수서 동·식물 군집은 그들이 서식하고 있는 수환경에 대한 정보를 제공한다. 하천의 수질조사에 가장 일반적으로 이용되는 생물군은 하상에 붙어있어 육안으로 확인이 가능한 저서성 대형무척추동물 군집으로, 유충시기를 물속에서 보내는 수서곤충이 주가 된다. 저서성 대형무척추동물은 종마다 오염원에 대한 민감도와 내성도가 다르게 나타나게 되고, 수질오염은 군집의 다양성을 감소시키고 내성종의 밀도를 증가시킨다. 따라서 어느 하천 조사지점에서의 저서성 대형무척추동물 군집의 구성은 평균 수질을 반영하게 된다.

대부분의 유럽 국가들은 전통적으로 저서성대형무척추동물을 이용하여 하천의 생물학적 수질평가를 수행하여 왔다. 이러한 평가들은 일차적으로 해당 하천에 대한 관리와 모니터링을 책임지고 있는 지역의 해당기관에 의해서 이루어졌으나, 몇몇 다른 나라에서는 이러한 업무를 주요하천에 대한 생물학적 상태를 평가하는 국가수준의 조사로 발전시켜왔다. 이러한 국가 조사사업은 일반적으로 표준화된 방법(예를 들면 채집방법, 조사지점 선택 기준, 종의 분류체계 등)을 이용하는 유역(지방)환경청(혹은 해당기관)에 의해 수집된 결과들을 기초로 하였다. 대부분의 나라에서는 이화학적 수질 평가 지점에서 저서성대형무척추동물을 이용한 생물학적 수질평가를 병행하고 있다(표 13).

<표 13> 하천 수질의 생물학적 평가

국가적 저서생물 평가프로그램(또는 정보) 부재	국가 화학적 하천모니터링 프로그램에 포함된 조사지점에서의 저서생물 평가	하천의 생물학적 상태를 평가하는 특별한 국가적 프로그램
핀란드 그리스 이이스랜드	오스트리아 AU-R1 덴마크 DK-R1 프랑스 FR-R1 아일랜드 IE-R2 네덜란드 NL-R1 노르웨이 NO-R2 스웨덴 SE-R2/SE-R3	오스트리아 벨기에 BE-R2/R8 독일 DE-R2 룩셈부르크 LU-R2 포르투갈 스페인 ES-R2 영국 UK-R3

(자료) EEA. 1996. Surface Water Quality Monitoring. European Environment Agency, Copenhagen. 82pp.

1) 하천의 생물학적 질을 평가하는 국가조사사업

특별한 생물모니터링 조사들은 보통 하천 상태에 대한 국가적 분류와 관련하여 수행되는데, 오스트리아, 룩셈부르크, 아일랜드, 영국 등은 1970년대 이후 2~5년 주기로 하천 상태를 평가하고 있으며, 벨기에와 스페인은 1980년대 이후 비슷한 주기로 평가를 수행하고 있다. 1992년 네덜란드는 생물학적 프로그램을 담수모니터링 프로그램에 추가하였고, 1989년 이래로 덴마크는 1년 주기로 생물학적 분류등급을 수정하였다. 포르투갈에서는 생물학적 평가-오수생물체계가 몇몇 조사를 통하여 시행되었다.

수립된 생물모니터링망은 일반적으로 많은 조사지점을 포함하는데, 예로 영국은 10,000개 정도, 아일랜드는 3,000개 정도의 지점을 선정하고 있다. 일반적으로 지점들은 주요한 모든 하천에 위치하며, 각 하천에서 나타나는 수환경의 전체 범위를 반영할 수 있도록 선정하고 있다. 생물모니터링에 이용되는 조사방법과 빈도는 국가마다 어느 정도 다르다(표 14).

영국과 독일에서는 지방환경청에서 실질적인 조사와 분석을 수행하며, 기획위원회에서 국가전체의 평가와 보고를 위해 지방조직으로부터 결과를 수집한다. 반대로 아일랜드에서는 생물학적 평가모니터링 프로그램이 환경보호청 단일 기관에 의해 수행한다. 모니터링의 결과는 보고서의 형태로 출판되며, 여기에는 하천의 길이를 따라 다양한 등급이 표현되는 하천 수질평가도 등을 포함하고 있다.

<표 14> 생물학적 수질평가에 기초한 유럽국가의 하천모니터링 프로그램

코드	프로그램	평가대상	주기	조사 빈도	조사범위	보고
AU-R1	오스트리아	오수생물체계 저서성 대형무척추동물	1968년부터 2년 주기		국가전체	2년마다 보고서와 지도 작성
BE-R2	벨기에 플란더스 지역 하천질의 생물학적 평가	저서성 대형무척추동물 Belgium Biotic Index	1989년부터 매년은 아님	1회/년	플란더스 지역에서 900지점	DB & 매년 보고서
BE-R8	벨기에 왈론 지역 하천질의 생물학적 평가	저서성 대형무척추동물 Belgium Biotic Index, 식물플랑크톤, 수생식물	1980년부터 3년 주기	1회/년	왈론 지역에서 350지점	3년마다 보고서와 지도 작성
DK-R4	덴마크 하천질의 생물학적 평가 Inventory	저서성 대형무척추동물 조사방법과 분류체계가 완전히 비교가능하지는 않음	1989년부터 매년 하천의 생물분류결과 수집	1~2 회/년	표준화된 네트워크는 없음. 연간 총 10,000 지점 조사	매년 보고서
DE-R2	독일 하천질의 수질지도	오수생물체계 저서성 대형무척추동물, 미소식물, 미소동물	1976년부터 5년 주기 1976, 1980, 1985 & 1990		국가의 모든 주요 하천	지도
IE-R2	아일랜드 하천질의 생물학적 평가	저서성 대형무척추동물, 수생식물, Filamentous algae, Siltation	1971 ~ 1993년까지는 4년 주기 1994년부터는 3년 주기	1회/년 6~9 월 사이	1971년 2000km, 1981년 7,000km, 및 1990년 12,700km로 확장 1,200하천에서 약 3,000지점 조사	3년마다 표와 지도 작성
LU-R2	룩셈부르크 하천질의 생물학적 평가	저서성 대형무척추동물을 이용한 Belgium Biotic Index, 경우에 따라 플랑크톤, 수생식물 이용	1972년부터 3~5년 주기 오염이 심한 하천은 매년		주요하천에 대한 국가적 조사 특히 원칙적으로 양어와 관련된 하천 조사	
NO-R7	노르웨이 유역에서 부착조류 연구	부착조류	1986년부터	2~3 회/년	7개 지점	DB & 매년보고서
NO-R13	노르웨이 저서성 대형무척추동물 모니터링	저서성 대형무척추동물, 종목록, acidification index	1981년부터	2회/년	8개 하천에서 15~20지점	DB & 매년보고서
ES-R2	스페인 하천질의 생물학적 평가	저서성 대형무척추동물 BMWP 수정된 생물지수	1980년부터 3~5년 주기	4회/년	국가 전체에서 847지점 조사, 160지점/년	보고서와 지도 작성
UK-R3	영국 하천과 수로의 생물학적 분류	저서성 대형무척추동물	1970년 초부터 5년 주기	2~3 회/년	영국과 웨일즈는 40,000km에서 7,000여 지점 스코틀랜드는 11,000km에서 976지점 북아일랜드 2,500 km에서 290지점	DB & 보고서

(자료) EEA. 1996. Surface Water Quality Monitoring. European Environment Agency, Copenhagen. 82pp.

2) 일반적 국가 하천모니터링 프로그램과 연계된 생물학적 평가

일반 하천 모니터링 프로그램과 연계된 생물학적 수질평가는 정해진 조사지점에서 년 1~2회 기본적으로 저서성 대형무척추동물 군집에 대한 조사를 포함하고 있으며(표 15), 일부 생물모니터링 프로그램에서는 부착조류, 수생식물 및 어류 등을 포함하기도 한다.

<표 15> 일반적 국가 하천모니터링 프로그램과 연계된 생물학적 수질평가

코드	프로그램	평가대상	주기	조사빈도	조사범위	보고
AU-R1	오스트리아 하천수질모니터링에 대한 조례	오수생물지수 저서성 대형무척추동물, 저서식물	1991년부터	6회/년	국가 전체; 244 지점	DB & 보고서
DK-R1	덴마크 국가모니터링 프로그램하천 모니터링	저서성 대형무척추동물, 저서식물	1989년부터	2회/년	국가 전체; 261 지점	DB & 보고서
FR-R1	프랑스 국가유역 네트워크	저서성 대형무척추동물, 어류			국가 전체; 1082 지점	
NL-R1	네덜란드 국가지표수 모니터링(MWTL), 생물 분야	저서성 대형무척추동물, 어류, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 수생식물	1992년부터 매년 또는 4년 주기	1~13회/년	국가 전체; 15 고정지점	DB & 매년도 보고서
SE-R1	스웨덴 국가하천조사	저서성 대형무척추동물	1972년부터 5년주기		국가 전체; 300개 하천	DB & 보고서
SE-R2	스웨덴 국가 시계열 reference 하천	저서성 대형무척추동물, 부착조류	1993년부터	1회/년	35개 하천	DB & 보고서
SE-R3	스웨덴 국가중점 시계열 reference 하천	저서성 대형무척추동물, 부착조류, 어류, 수생식물	1994년부터, 수생식물은 3년 주기	1회/년	15개 하천	DB & 보고서

(자료) EEA. 1996. Surface Water Quality Monitoring. European Environment Agency, Copenhagen. 82pp.

나. 미국환경청의 생물모니터링 프로그램

미국에서는 지표생물을 이용한 생태계건강도평가법(Ecosystem Health Assessment, EHA)을 이미 1981년에 Karr (1981)가 다변수 모델

(Index of Biological Integrity)을 개발하여 수생태계 보전 및 관리에 체계적으로 활용하고 있다. 어류에 의거한 EHA평가 모델은 1986년까지 각 지역의 생태적 특성을 고려한 모델 보정 및 수정작업이 12개 주 정부에서 실행되었고(Karr et al., 1986), 그 후 4년 뒤인 1991년에는 이미 35개 이상의 주 정부(Karr & Dionne, 1991)에서 수환경 평가지침서로 채택되어 하천 위해성평가 및 건강성평가에 실효를 거두고 있다. 가장 최근에 U.S. EPA(2006)의 저서성 대형무척추동물에 의거한 생물학적 수질지표를 대부분의 주에서 실시하고 있다. 이러한 생물지표종을 이용한 물환경 건강성 평가는 생태네트워크 구축 및 지역적 물환경 종합평가에 크게 기여하고 있다.

어류, 저서성 대형무척추동물 및 부착조류와 같은 생물지표변수를 이용한 생물학적 수질평가 혹은 생태계 건강도평가가 각광을 받는 이유는 지표종 혹은 군집은 물리적, 화학적 변화에 민감할 뿐만 아니라, 생물군집간의 물질순환 및 에너지 흐름을 직접적으로 반영하고(Karr, 1981; Karr and Dionne, 1991; Karr et al., 1986), 조사 시 비용 절감 효과, 수질 진단 및 오염된 물환경 복원 시 핵심기술로 이용된다는 점에서 생물학적 건강도 평가방법으로 널리 인정 받아오고 있다. 그러나 현재 우리나라에서는 이런 평가방법이 이제 도입되고 있는 시점에 있다.

현재 미국 환경부에서는 생물학적 건강도 평가를 위해 조사권역은 10개 권역으로 대별하고 있고, 각각의 권역에서는 생물조사를 실시하여 생태계 오염도 및 건강도 현황을 파악하고 있다. 각각의 미국 내 권역에는 유사한 생태지역으로 묶이는 생태권에 몇몇 개의 주가 포함되어있고, 이들 각각의 주에서는 지역특색에 맞는 생물학적 평가 프로그램 및 생물 기준안을 개발하여 생물모니터링에 대한 세부내용 및 지침을 제시하고 있다.

미국 환경청의 경우 전 권역의 생물 모니터링을 위해 권역별로 코드, 프로그램, 생물평가지표, 조사빈도, 조사주기, 조사지점, 대조지점 등의 세부사항을 제시하고 있다. 아래에 기술되는 미국 환경청의 국가적 차원의 생물학적 모니터링 사례에 대한 세부 문헌조사 내용은 US EPA에서 발간된 원문에 의거하였다(US EPA, 2002).

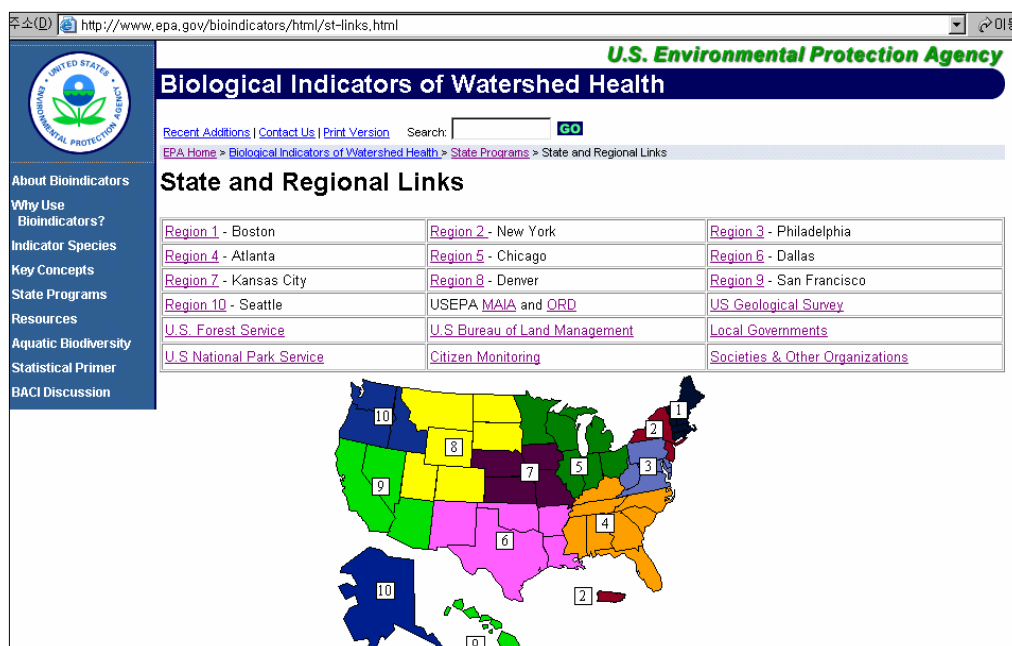
미국에서 초기 생물학적 물환경 평가는 해당 지역기관에 의하여 이루어지던 개별적 형태에서 현재는 국가 수준의 통합적 모니터링 시스템으로 발

전되어왔다. 미국의 경우 생물학적 물환경 평가를 국가조사사업으로 채택하여 펼쳐왔으며, 생물학적 건강도 모니터링을 위해 전국적으로 푸에르토리코와 사모아 등을 제외한 약 23,500여 지점에서 다변수 생물평가모델을 이용하여 생태건강도 평가를 실시해오고 있다. 미국 전역의 조사를 효과적으로 실시하기 위해, 미국 본토 및 기타 자치주를 10개 권역으로 구분하여 조사해 왔으며, 10개 권역에서 수생태계의 생물 모니터링을 위한 대표적인 지표생물종은 저서성 대형무척추동물, 어류 및 부착조류가 주류를 이루고 있다. 조사빈도는 일부 주를 제외하면 평균 1년에 1회를 실시하고 있으며 각주의 지역적 특성에 따라 조사지점과 조사방법은 특색 있게 채택하여 실시하고 있다(그림 4).

- 제1권역 : 미국 북동부의 코네티컷주, 메인주, 메사추세츠주, 뉴햄프셔주, 로드아일랜드주, 버몬트주의 6개 주로 구성되어 있다. 모든 주에서 저서성 무척추동물을 기본적으로 사용하고 있으며 로드아일랜드주는 저서성 무척추동물만을 사용하며 메인주에서는 부착조류를 선택하여 사용하고 있다. 6개 주 모두 1년에 1회 조사를 실시하며 코네티컷주와 로드아일랜드주에서는 각각 5년과 2년에 한 번씩 주기적으로 생물학적 건강성평가를 실시하고 있다. 조사지점은 각주의 특성에 맞추어 40~311개 지점을 선정하였으며 조사지점과의 비교·평가를 위한 대조지점은 역시 각 주의 상황에 따라 2~370개 지점이 조사되었다. 일반적으로 조사지점이 레퍼런스 지점보다 많은 수를 보이지만 버몬트주의 경우는 레퍼런스의 숫자가 조사지점의 숫자를 추월하였다.
- 제2권역 : 뉴저지주와 뉴욕주로 이루어진 권역이며, 미국령인 푸에르토리코, 버진아일랜드가 포함되어 있으나 이들에서는 생물학적 건강성평가가 이루어지고 있지 않다. 뉴저지주와 뉴욕주 각각 139개, 800개의 지점에서 1년에 한 번씩 조사를 실시하며 뉴저지주는 저서성 무척추동물과 어류를 이용하여 5년마다 조사를 하고 있다. 뉴욕주는 저서성 무척추동물과 어류 외에도 부착조류를 이용하여 생물학적 건강성평가를 실시하고 있다.
- 제3권역 : 미국 중동부 델라웨어주, 메릴랜드주, 펜실베이니아주, 버지니아주, 웨스트버지니아주, 콜롬비아주의 6개주가 포함되어 있으며 모든 주

에서 저서성무척추동물을 기본으로 하고 콜롬비아주, 웨스트버지니아주, 델라웨어주, 메릴랜드주, 버지니아주, 펜실베이니아주에서 어류를 선택적으로 활용하고 있다. 조사주기는 3~10년 주기로 실시하고 있으며 레퍼런스 지점은 현지사정에 따라 152개 지점까지 선정하고 있다. 펜실베이니아주의 경우는 조사지점이 7,435개에 달하는데 이를 10년 주기로 조사한다.

- 제4권역 : 미국 남동부 8개주 앨라배마주, 플로리다주, 조지아주, 켄터키주, 미시시피주, 노스캐롤라이나주, 사우스캐롤라이나주, 테네시주 가 포함된 권역으로 테네시주의 2,200개 지점, 켄터키주의 1,750개 지점을 비롯하여 활발한 생물학적 건강성평가가 이루어지고 있는 권역이다. 저서성 무척추동물을 기본으로 사용하며 알라바마주, 플로리다주, 조지아주, 켄터키주, 노스캐롤라이나주에서는 어류와 부착조류를 선택적으로 사용하고 있다. 플로리다주와 노스캐롤라이나주에서는 1년에 2회 조사를 실시하고 있으며 조사주기는 3~5년이 일반적이다.



<그림 4> 미국환경청의 생물모니터링을 위한 권역도

- 제5권역 : 5대호를 접하고 있는 중북부 일리노이주, 인디애나주, 미시간주, 미네소타주, 오하이오주, 위스콘신주의 6개 주를 포함하고 있는 권역이다. 저서성무척추동물과 어류를 기본적으로 활용하고 있으며 위스콘신주에서는 부착조류를 추가적으로 활용하고 있다. 조사주기는 5년, 조사빈도는 년1회가 일반적이며 조사지점은 100~3,500개(미시간주) 지점으로 각 주의 여건에 따라 변이를 보인다. 레퍼런스 지점 역시 35~2,000개 지점으로 다양하다.
- 제6권역 : 미국 중남부 알칸사스주, 루이지애나주, 뉴멕시코주, 오클라호마주, 텍사스주의 5개주를 포함하고 있으며 저서성무척추동물과 어류가 지표생물로 이용되고 있으며 뉴멕시코주 만이 부착조류를 추가적으로 활용한다. 조사주기는 뉴멕시코주 만이 5년으로 명시되어 있으면 조사빈도는 일반적으로 년1회를 선정하고 있다.
- 제7권역 : 미국 중앙의 대평원 지역 아이오와주, 캔사스주, 미주리주, 네브라스카주의 4개주를 포함한 권역이다. 저서성무척추동물과 어류가 지표생물로 이용되고 있으며, 캔사스주에서는 부착조류가 추가적으로 사용된다. 조사빈도는 년1회 조사가 일반적이다. 조사지점은 40~200개 지점을 선정하여 건강성을 평가하고 레퍼런스 지점은 38~96개 지점을 선정하였다.
- 제8권역 : 미국 중북부 콜로라도주, 몬태나주, 노스다코타주, 사우스다코타주, 유타주, 와이오밍주의 6개주를 포함하는 권역으로 몬태나주, 노스다코타주, 콜로라도주는 저서성 대형무척추동물, 어류 및 부착조류의 세 분류군을 모두 사용하고 유타주는 저서성 무척추동물만을 활용하여 건강성평가를 한다. 일반적으로 년1회 평가하며 40~700개 지점을 선정하여 조사하였다.
- 제9권역 : 애리조나주, 캘리포니아주, 하와이주, 네브라스카주의 5개 주와 괌, 사모아, 노스마리아나의 미국령 자치주들을 포함하고 있는 권역이다. 본토와 하와이에서만 생물학적 건강성평가가 이루어지고 있으며 하와이에서는 어류, 캘리포니아주에서는 저서성 대형무척추동물만을 이용하여 평가가 이루어지고 있다. 네바다주는 저서성 대형무척추동물과 부착조류를 이용하여 4~5년 주기로 조사를 하며 조사지점은 17~324개 지점을 선정하였다. 캘리포니아주는 200~300개의 대조지점만을 선정하

고 평가는 이루어진 바 없다.

- 제10권역 : 알래스카주를 포함한 북서부 3개주, 아이다호, 오레곤주, 워싱턴주로 구성된 권역이다. 오레곤주에서는 미국에서 유일하게 저서성 대형무척추동물, 어류 및 부착조류를 비롯하여 양서류를 생물지표종으로 활용한다. 알래스카주에서는 저서성 대형무척추동물만을 사용하며 나머지 주에서는 세분류군을 모두 활용한다. 조사빈도는 오레곤주와 워싱턴주가 년1회를 실시하며 조사지점은 아이다호주가 4,500개 지점으로 가장 많은 지점을 선택하였다. 대조지점은 알래스카주의 43개 지점을 제외하고 세지점이 187~200지점으로 나타났다.

4. 한국오수생물지수(KSI)

저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 수질평가방법인 한국오수생물지수(KSI, 원 등(2006))를 이용하여 각 조사지점의 수생태 건강성을 평가한다. 즉 생물학적인 수질평가에 이용하고 있는 저서성 대형무척추동물 중에서 지표성을 갖는 총 100개 생물군을 이용하여 각 조사구간의 수생태를 평가하고 생물등급을 산정한다(표 16).

$$KSI = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \cdot A_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot G_i}$$

KSI	한국오수생물지수(korean saprobic index)
i	지정된 지표생물군의 일련번호(number assigned to the taxon)
n	출현한 지표생물군의 총수(number of taxa)
s_i	지표생물군의 오락계급치(saprobic value of the ith taxon)
A_i	지표생물군의 출현개체수(abundance index of the ith taxon)
G_i	지표생물군의 지표가중치(welghting factor of the ith taxon)

<표 16> 각 지표생물군의 단위오탁계급치, 평균오탁계급치(s) 및 지표가중치(G)

번호	지표생물군	출현빈도						오탁계급 치(S)	지표가중 치(G)
		I (0)	II (1)	III (2)	IV (3)	V (4)	- (5)		
편형동물문 (Turbellaria)									
1	<i>Dugesia</i>	6.9	3.1					0.31	4
복족강 (Gastropoda)									
2	<i>Parafossarulus manchouricus</i>		3.3	4.3	2.4			1.91	1
3	<i>Semisulcospira</i>	3.1	5.3	1.6				0.85	2
4	<i>Austropeplea ollula</i>		6.1	3.9				1.39	4
5	<i>Radix auricularia</i>		3.1	5.5	1.4			1.83	2
6	<i>Physa acuta</i>					4.3	5.7	4.57	3
부족강 (Lamellibranchiata)									
7	<i>Limnoperna fortunei</i>	1.2	6.3	2.5				1.13	3
8	<i>Anodonta arcuiformis</i>		6.5	2.4	1.1			1.46	2
9	<i>Unio douglasiae</i>	1.6	4.1	2.7	1.6			1.43	1
10	<i>Corbicula</i>	2.1	6.8	1.1				0.90	3
빈모강 (Oligochaeta)									
11	<i>Branchiura sowerbyi</i>				0.9	4.2	4.9	4.40	2
12	<i>Limnodrilus gotoi</i>					4.4	5.6	4.56	2
거머리강 (Hirudinea)									
13	Glossiphoniidae		4.3	4.5	1.2			1.69	2
14	Arhynchobdellidae		1.1	4.7	4.2			2.31	2
갑각강 (Crustacea)									
15	<i>Asellus</i>		1.5	4.7	3.8			2.23	2
16	<i>Gammarus</i>	10.0						0.00	5
17	<i>Cardinia</i>		6.0	3.1	0.9			1.49	2
하루살이목 (Ephemeroptera)									
18	<i>Siphonurus chankae</i>	10.0						0.00	5
19	<i>Ameletus</i>	10.0						0.00	5
20	<i>Acentrella</i>	5.3	4.7					0.47	3
21	<i>Alanites muticus</i>	7.6	1.5	0.9				0.33	2
22	<i>Baetiella tuberculata</i>	6.3	3.7					0.37	4
23	<i>Baetis</i>	1.8	4.7	2.7	0.8			1.25	2
24	<i>Nigrobaetis</i>	2.1	6.1	1.8				0.97	2
25	<i>Isonychia</i>	9.7	0.3					0.03	5

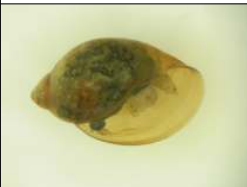
번호	지표생물군	출현빈도						오탁계급 치(S)	지표가중 치(G)
		I (0)	II (1)	III (2)	IV (3)	V (4)	- (5)		
26	<i>Bleptus fasciatus</i>	10.0						0.00	5
27	<i>Cinygmula</i>	8.7	1.3					0.13	5
28	<i>Ecdyonurus</i>	6.2	2.8	1.0				0.48	2
29	<i>Ecdyonurus levis</i>	1.8	5.1	3.1				1.13	2
30	<i>Epeorus curvatulus</i>	8.7	1.3					0.13	5
31	<i>Epeorus pellucidus</i>	6.4	3.6					0.36	4
32	<i>Heptagenia</i>	10.0						0.00	5
33	<i>Ison</i>	10.0						0.00	5
34	<i>Rhithrogena</i>	8.7	1.3					0.13	5
35	<i>Choroterpes altioculus</i>	6.3	3.7					0.37	4
36	<i>Paraleptophlebia chocoata</i>	9.3	0.7					0.07	5
37	<i>Potamanthus</i>	2.7	6.4	0.9				0.82	3
38	<i>Rhoenanthus coreanus</i>	3.7	6.3					0.63	4
39	<i>Ephemera orientalis</i>	1.9	6.4	1.7				0.98	3
40	<i>Ephemera separigata</i>	10.0						0.00	5
41	<i>Ephemera strigata</i>	7.5	2.5					0.25	4
42	<i>Cincticostella</i>	9.6	0.4					0.04	5
43	<i>Drunella</i>	8.7	1.3					0.13	5
44	<i>Ephemerella</i>	7.1	2.9					0.29	4
45	<i>Serratella</i>	6.8	3.2					0.32	4
46	<i>Uracanthella</i>	1.3	5.2	3.5				1.22	2
47	<i>Caenis</i>	2.7	5.1	2.2				0.95	1
잠자리목 (Odonata)									
48	<i>Cercion</i>		6.7	2.1	1.2			1.44	1
49	<i>Ischnura asiatica</i>		6.5	3.5				1.35	4
50	<i>Davidius lunatus</i>	8.5	1.5					0.15	4
51	<i>Nihonogomphus</i>	4.1	4.0	1.9				0.78	1
52	<i>Onychogomphus ringens</i>	2.3	4.7	1.7	1.3			1.20	1
53	<i>Ophiogomphus obscura</i>	6.9	3.1					0.31	4
54	<i>Sieboldius albardae</i>	4.8	5.2					0.52	3
55	<i>Stylurus annulata</i>		5.3	3.7	1.0			1.57	2
56	<i>Macromia</i>		6.3	3.7				1.37	4
57	<i>Orthetrum</i>		4.1	5.3	0.6			1.65	3
58	<i>Tramea virginia</i>		3.6	6.4				1.64	4

번호	지표생물군	출현빈도						오탁계급 치(S)	지표가중 치(G)
		I (0)	II (1)	III (2)	IV (3)	V (4)	- (5)		
강도래목 (Plecoptera)									
59	Plecoptera	10.0						0.00	5
뱀잠자리목 (Megaloptera)									
60	<i>Parachauliodes continentalis</i>	4.2	5.8					0.58	3
61	<i>Protohermes grandis</i>	6.7	3.3					0.33	4
딱정벌레목 (Coleoptera)									
62	<i>Neonectes natrix</i>	10.0						0.00	5
63	Elmidae	4.5	5.5					0.55	3
64	Psephenidae	4.1	5.9					0.59	4
파리목 (Diptera)									
65	<i>Antocha</i>	5.8	4.2					0.42	3
66	<i>Dicranota</i>	6.1	3.9					0.39	4
67	<i>Hexatoma</i>	10.0						0.00	5
68	<i>Tipula</i>	4.7	3.5	1.8				0.71	1
69	<i>Psychoda</i>					3.3	6.7	4.67	4
70	<i>Simulium</i>	6.1	3.9					0.39	3
71	Ceratopogonidae	3.8	6.2					0.62	4
72	Chironomidae (red-type)				1.3	4.6	4.1	4.28	2
73	<i>Atherix</i>	7.8	2.2					0.22	4
74	<i>Suragina</i>	9.2	0.8					0.08	5
75	<i>Tabanus</i>	5.3	3.1	1.6				0.63	1
76	<i>Eristalis</i>					1.6	8.4	4.84	4
날도래목 (Trichoptera)									
77	<i>Stenopsyche</i>	9.6	0.4					0.04	5
78	Philopotamidae	10.0						0.00	5
79	<i>Psychomyia</i>	6.4	3.6					0.36	4
80	<i>Plectrocnemia</i>	9.4	0.6					0.06	5
81	<i>Ecnomus tenellus</i>		2.4	7.6				1.76	4
82	<i>Arctopsyche ladogensis</i>	10.0						0.00	5
83	<i>Cheumatopsyche</i>	5.7	4.3					0.43	3
84	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	1.1	4.8	4.1				1.30	2
85	<i>Hydropsyche orientalis</i>	6.7	3.3					0.33	4
86	<i>Hydropsyche valvata</i>		4.6	3.6	1.8			1.72	1
87	<i>Macrostemum radiatum</i>	3.2	6.1	0.7				0.75	3

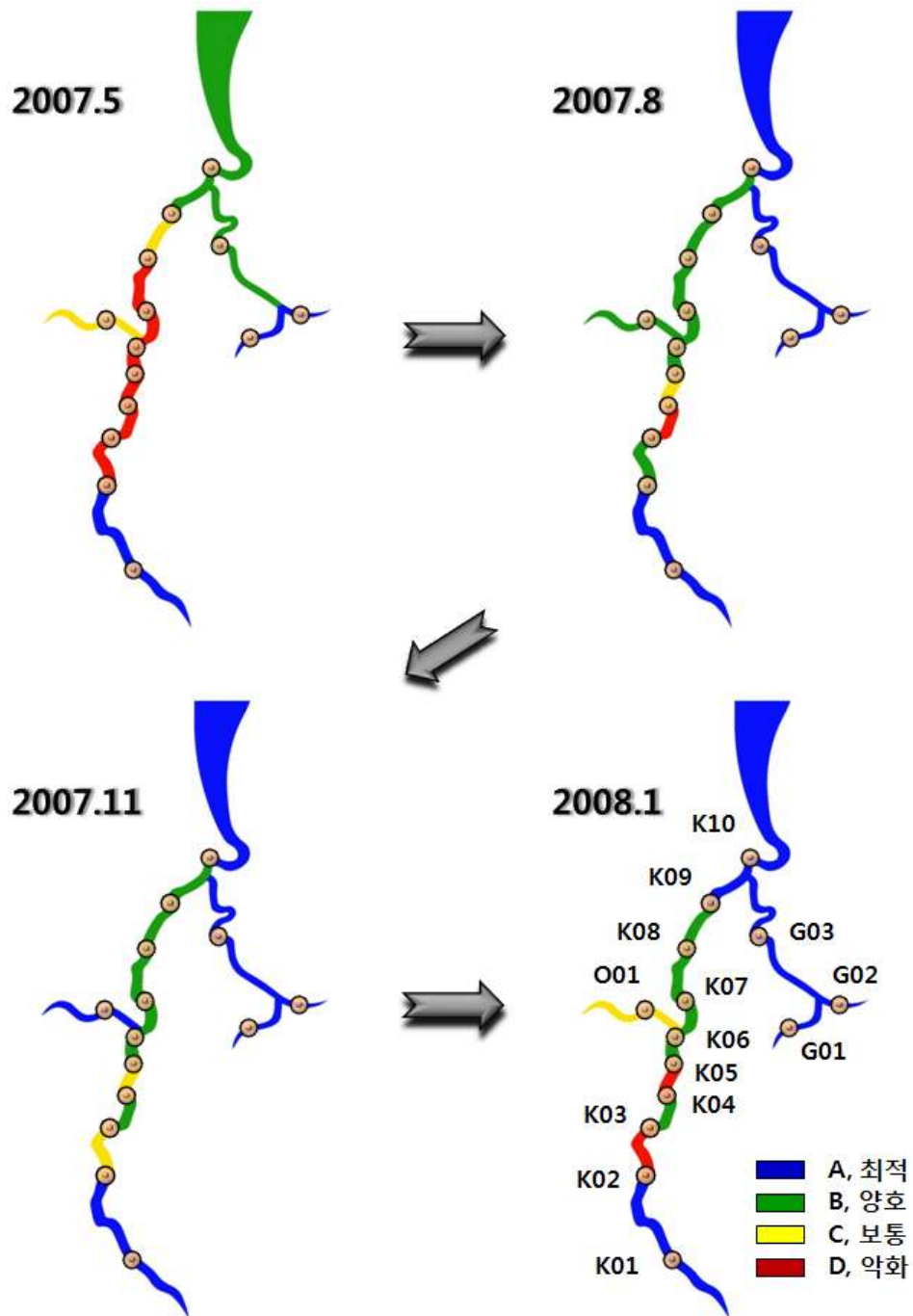
번호	지표생물군	출현빈도						오탁계급 치(S)	지표가중 치(G)
		I (0)	II (1)	III (2)	IV (3)	V (4)	- (5)		
88	<i>Apsilochorema</i>	9.4	0.6					0.06	5
89	<i>Rhyacophila</i>	8.7	1.3					0.13	5
90	Glossosomatidae	8.6	1.4					0.14	5
91	<i>Hydroptila</i>	2.3	6.7	1.0				0.87	3
92	<i>Apatania</i>	5.3	4.7					0.47	3
93	<i>Goera</i>	4.8	5.2					0.52	3
94	<i>Hydatophylax nigrovittatus</i>	10.0						0.00	5
95	<i>Neophylax ussuriensis</i>	7.9	2.1					0.21	4
96	<i>Notopsyche</i>	1.8	8.2					0.82	4
97	<i>Goerodes</i>	10.0						0.00	5
98	<i>Psilotreta kisoensis</i>	10.0						0.00	5
99	<i>Ceraclea</i>	5.7	4.3					0.43	3
100	<i>Mystacides</i>	7.9	2.1					0.21	4

<표 17>. 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물등급의 판정

생물 등급	한국오수생물지수 (KSI)	환경 상태	표현색	지표생물군(예시)
A	0.00~≤1.00	최적	파랑	옆새우류/ 가재/ 뿔하루살이류/ 민하루살이류/ 강도래류/ 물날도래류/ 광택날도래류
B	1.00~≤2.40	양호	초록	다슬기류/ 넓적거머리류/ 강하루살이류/ 동양하루살이/ 등줄하루살이/ 등딱지하루살이
C	2.40~≤3.60	보통	노랑	물달팽이/ 턱거머리류/ 물벌레/ 밀잠자리류
D	3.60~≤5.00	불량	빨강	원돌이물달팽이/ 실지렁이류/ 붉은깔다구류/ 나방파리류/ 꽃등에류

A 〈천전〉					
	강도래류	물날도래류	가재	우묵날도래류	옆새우류
B 〈유어〉					
	물삿갓벌레류	등줄하루살이	넓적거머리류	다슬기류	강하루살이
C 〈파충류〉					
	물벌레류	밀잠자리류	물달팽이	턱거머리류	
C 〈하위〉					
	붉은갈다구류	실지렁이	나방파리류	꽃등에류	원돌이물달팽이

<그림 5> 저서성 대형무척추동물 지표생물군



<그림 6> 한국오수생물지수(KSI)에 의한 경안천 수계의 평가 결과

참고문헌

- Allan, J.D. 1995. Stream Ecology. Structure and function of running waters. Chapman and Hall, London.
- Allee, W. C., A. E. Emerson, O. Park, T. Park., and K. P. Karl. 1949. Principle of Animal Ecology. W. B. Saunders Company, Philadelphia.
- Armitage, P. D., D. Moss, J. F. Wright and M. T. Furse. 1983. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. Water Res., 17 (3), 333-347.
- Beck, W. M., Jr. 1955. Suggested method for reporting biotic data. Sewage Industr. Wastes, 27: 1193.
- Boon, P. J. 1988. The impact of river regulation on invertebrate communities in the U.K. Regulated Rivers: Research and Management. 2: 389-409.
- Brinkhurst, R. O. and D. G. Cook, 1974. Aquatic Earthworms(Annelida: Oligochaeta). p. 143-156. In: Harst, C. W. Jr. and S. L. H. Fuller (Eds.). Pollution Ecology of Freshwater Invertebrates. Academic Press, Inc.
- Brown, D. S. 1960. The ingestion and digestion of algae by Cloeon dipterum L. (Ephemeroptera). Hydrobiol. 16: 81-96.
- Brown, D. S. 1961a. The food of the larvae of Cloeon dipterum L. and Baetis rhodani (Pictet) (Ephemeroptera). J. Anim. Ecol. 30: 55-75.
- Brown, D. S. 1961b. The morphology and function of the mouthparts of Cloeon dipterum L. and Baetis rhodani (Pictet) (Insecta: Ephemeroptera). Proc. Zool. Soc. Lond. 136: 147-176.
- Buck, H. 1974. Die Kopplungsanalyse, ein rationelles Ökologisches Verfahren zur Gütebewertung von Fließgewässern. Interner Kurzbericht Landesstelle für Gewässerkunde und Wasserwirtschaftliche Planung Baden-Württemberg, 1-10.
- Cairns, J. Jr. and K. L. Dickson (Eds.) 1974. Biological methods for the assessment of water quality. Spec. Tech. Publ. Am. Soc. for Testing and Materials. No. 528. Philadelphia. vii 256pp.
- Chandler, J. R. 1970. A biological approach to water quality management. Water Poll. Control., 69: 415-422.
- Chutter, F. M. 1972. An empirical biotic index of the quality of water in South African streams and rivers. Water Resour. 6:19-30.
- Cummins, K. W. and M. J. Klug. 1979. Feeding ecology of stream invertebrates. Ann. Rev. Syst. 10:147-172.
- Dudgeon, D., 1994, Functional assessment of the effects of increased sediments loads resulting from riparian-zone modification of a Hong Kong stream, Verh. Internat. Verein. Limnol., 25: 1790-1792.
- Dudgeon, D., 1995, Environmental impacts of increased sediment loads caused by channelization: A case study of biomonitoring in a small river in Hong Kong, Asian J. Environmental Management, 3(1): 69-77.
- Fjerdingstad, E. 1964. Pollution of stream estimated by benthal phytomicro - organisms. I. A saprobic system based on communities of organisms and ecological factors. Internat. Rev.

- Hydrobiol. 49:63–131.
- Friedrich, G. 1990. Eine Revision des Saprobien-systems. Z. Wasser–Abwasser–Forsch. 23, 141–152.
- Fuller, S. L. H. 1974. Clams and Mussels (Mollusca: Bivalvia). p. 215–274. In: Harst, C. W. Jr. and S. L. H. Fuller (Eds.). Pollution Ecology of Freshwater Invertebrates. Academic Press, Inc.
- Gose, K. 1978. Trial to application of saprobic value and indicator value on macroscopic animals by Zelinka–Marvan. Jap. J. Water Treat. Biol. 14:9–17.
- Harman, W. N. 1974. Snails (Mollusca: Gastropoda). p. 275–313. In: Harst, C. W. Jr. and S. L. H. Fuller (Eds.). Pollution Ecology of Freshwater Invertebrates. Academic Press, Inc.
- Hellawell, J. M. 1978. Biological Surveillance of Rivers. Water Research Center, Stevenage, England, 322 pp.
- Hellawell, J. M. 1986. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management. Elsevier Applied Science Publishers, London, England 546pp.
- Hilsenhoff, W. L. 1977. Use of arthropods to evaluate water quality of streams. Technical Bulletin No. 100, Department of National Resource, Madison Wisconsin. 15pp.
- Hilsenhoff, W. L. 1987. An improved biotic index of organic stream pollution. Great Lakes Entomologist, 20: 31–39.
- Hilsenhoff, W. L. 1988. Rapid field assessment of organic pollution with a family–level biotic index. J. NABS. 7(1): 65–68.
- Hilsenhoff, W. L. 1998. A modification of the biotic index of organic stream pollution to remedy problems and to permit its use throughout the year. Great Lakes Entomologist, 31: 12pp.
- Hobbs, H. H. Jr. and E. T. Halls, Jr. 1974. Crayfishs (Decapoda: Astacidae). p. 195–214. In: Harst, C. W. Jr. and S. L. H. Fuller (Eds.). Pollution Ecology of Freshwater Invertebrates. Academic Press, Inc.
- Horne, A. J. and C. R. Goldman, 1994, Limnology, McGraw–Hill, Inc., 576pp.
- Howmiller, R. P. and M. A. Scott. 1977. An environmental index based on relative abundance of oligochaete species. J. Water Poll. Cont. Fed. 49:809–815.
- Hynes, H. B. N. 1970b. The Ecology of Running Waters. Univ. Toronto Press, Toronto.
- Knapp, H. 1954. Ein neuer Weg zur Darstellung biologischer Vorfluteruntersuchungen, erläutert an einem Querschnitt des Maines. Die Wasserwirtschaft. 45:9–15.
- Lang, C. and Reymond, O. 1995. An improved index of environmental quality for Swiss rivers based on benthic invertebrates. Aquatic Sciences, 57(2): 172–180.
- Lang, C., G. L' Eplattenier, and O. Reymond. 1989. Water quality in rivers of western Switzerland: Application of an adaptable index based on benthic invertebrates. Aquatic Sciences, 51 (3), 224–234.
- Lenat, D. R. 1988. Water quality assessment of streams using a qualitative collections method for benthic macroinvertebrates. J. NABS. 7:222–233.
- Liebmann, H. 1962. Handbuch der Frischwasser und Abwasserbiologie,

- Vol. I, 2nd edit., R. Oldenbourg, Munchen, 588pp.
- Mackenthun, R. M. 1969. The practice of water pollution biology. FWPCA, Washington. 281 pp.
- Margalef, R., 1958, Information theory in ecology, General Systematics, 3: 36–71.
- McNaughton, S. J., 1967, Relationship among functional properties of California Grassland, Nature, 216: 168–169.
- McShaffrey, D. and W. P. McCafferty. 1986. Feeding behavior of *Stenacron interpunctatum* (Ephemeroptera: Heptageniidae). J. N. Am. Benthol. Soc. 5: 200–210.
- McShaffrey, D. and W. P. McCafferty. 1988. Feeding behavior of *Rhithrogena pellucida* (Ephemeroptera: Heptageniidae). J. N. Am. Benthol. Soc. 7: 87–99.
- McShaffrey, D. and W. P. McCafferty. 1990. Feeding behavior and related functional morphology of the mayfly *Ephemerella needhami* (Ephemeroptera: Ephemerellidae). J. Insect Behav. 3: 673–688.
- McShaffrey, D. and W. P. McCafferty. 1991. Ecological association of the mayfly *Ephemerella needhami* (Ephemeroptera: Ephemerellidae) with the green algae *Cladopora* (Chlorophyta: Cladophoraceae). J. Freshwat. Ecol. 6: 383–394.
- Merritt, R. W. and K. W. Cummins. 1984. An introduction to the Aquatic Insects of North America. 2nd ed. Kendall/Hunt Publ. Co., Dubuque, Iowa.
- Merritt, R. W. and K. W. Cummins. 1996. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd ed. Kendall/Hunt Publ. Co.
- Metcalfe, J. L. 1989. Biological water quality assessment of running water based on macroinvertebrate communities: History and present status in Europe. Environ. Pollut. 60: 101–139.
- Metcalfe, J. L. and T. B. Reynoldson. 1989. Special Section on the use of benthic macroinvertebrates in environmental assessment. J. Great Lakes Res. 15:537.
- Metcalfe, J. L. and T. B. Reynoldson. 1989. Special Section on the use of benthic macroinvertebrates in environmental assessment. J. Great Lakes Res. 15:537.
- Metcalfe, J. L., M. E. Fox and J. H. Carey. 1984. Aquatic leeches (Hirudinea) as bio- indicators of organic chemical contaminants in freshwater ecosystems. Chemosphere. 13:143–150.
- Minshall, G. W., 1988, Stream ecosystem theory: a global perspective, J. N. Benthol. Soc., 7(4): 263–288.
- Norris, R.H. 1995. Biological monitoring: The dilemma of data analysis. Journal of North American Benthological Society 14: 440–450.
- ONORM M 6232. 1995. Richtlinien für die ökologische Untersuchung und Bewertung von Fließgewässern. Österr. Normungsinstitut, Wien
- Palmer, C. G., B. Maart, A. R. Palmer, and J. H. O'Keeffe. 1996. An assessment of macroinvertebrate functional feeding groups as water quality indicators in the Buffalo River, eastern Cape Province, South Africa. Hydrobiologia 318: 153–164.
- Palmer, C., J. O. O'Keeffe, A. R. Palmer, T. Dunne, and S. Radloff. 1993. Macroinvertebrate functional feeding groups in the middle and lower reaches of the Buffalo River, eastern Cape, South Africa. I. Dietary variability. Freshwater Ecology. 29: 441–453. 1.3.

- Pantle, R. and H. Buck. 1955. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Bes. Mitt. Dtsch. Gewässerkundl.* 12, 135–143.
- Pantle, R. and H. Buck. 1955. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas and Wasserfach.* 96:604.
- Pielou, E. C., 1975, *Ecological Diversity*, 165pp.
- Quinn, J. M., and C. W. Hickey. 1990. Characterisation and classification of benthic invertebrate communities in 88 New Zealand rivers in relation to environmental factors. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research.* 24: 387–409.
- Reice, S. R. and M. Wohleberg, 1993, Monitoring freshwater benthic macroinvertebrates and benthic processes: measures for assessment of ecosystem health, p. 287–305, In: D. M. Rosenberg and V. H. Resh (Eds.), *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*, Chapman & Hall, New York
- Resh, V. H. and D. M. Rosenberg 1984. *The ecology of aquatic insects.* Praeger, O.V.Y. Publ.
- Richardson, R. E. 1928. The bottom fauna of the middle Illinois River 1913–1925: its distribution, abundance, valuation and value in the study of stream pollution. *Bull. Illinois State Nat. Hist. Survey.* 17:387–475.
- Roback, S. S. 1974. Chapter 10, Insects (Arthropoda: Insecta). pp. 313–376 in C. W. Hart, Jr. and L. M. Fuller. Eds. 1974. *Pollution ecology of freshwater invertebrates.* Acad. Press, N. Y., San Francisco, London. 389 pp.
- Rosenberg, D. M., and V. H. Resh, 1993, *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*, Chapman and Hall, New York, 488pp.
- Saether, O. A. 1979. Chironomid communities as water quality indicators. *Holarctic Ecology* 2:65–74.
- Sawyer, R. T. 1974. Leeches (Annelida: Hirudinea). p. 82–142. In: Harst, C. W. Jr. and S. L. H. Fuller (Eds.). *Pollution Ecology of Freshwater Invertebrates.* Academic Press, Inc.
- Shannon, C. E. and W. Weaver, 1949. *The Mathematical Theory of Communication.* University of Illinois Press, Urbana.
- Stark, J. D. 1993. Performance of the macroinvertebrate community index: Effects of sampling method, sample replication, water depth, current velocity, and substratum on index values. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 27, 463–478.
- Tolkamp, H. and J. Gardeniers. 1977. Hydrobiological survey of lowland streams in the Achterhoek (The Netherlands) by means of a system for the assessment of water quality and stream character based on macro-invertebrates. *Mit. Inst.f. Wasserwirt. d. TH Hannover* 41, 215–237.
- U.S. EPA, 2002. Summary of biological assessment programs and biocriteria development for states, tribes, territories, and interstate commissions: Streams and wadeable rivers. The Office of Water and the Office of Environmental Information. EPA-822-R-02-048. USA
- 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.
- Ward, J. V. 1992. *Aquatic insect ecology. 1. Biology and habitat.* John Wiley & Sons, Inc., New York..

- Wiederholm, T. 1980. Chironomids as indicators of water quality in Swedish lakes. *Acta Universitatis Carolinae-Biologica* 1978:275-283.
- Williams, D. D. and B. W. Feltmate, 1992, *Aquatic Insects*, C·A·B International. Wallingford, UK.
- Woodiwiss, F. S. 1964. The biological system of stream classification used by the Trent River Board. *Chemistry Industry* 14:443-447.
- Zelinka, M. and P. Marvan. 1961. Zur Pr zisierung der biologischen klassifikation der Reinheit fliessender Gewässer. *Arch. Hydrobiolog.* 57:389-407.
- 경기도보건환경연구원. 2008. 경안천 생태조사. 71-6410578-000023-01.
- 공동수, 류홍일, 류재근, 윤일병. 1995. 저서성 대형무척추동물 상위분류군 생물지수의 고안 및 적용. *한국환경독성학회 추계학술대회 요약집* 11pp.
- 원두희, 권순직, 전영철. 2005. 한국의 수서곤충. 생태조사단. 415pp.
- 원두희, 전영철, 권순직, 황순진, 안광국, 이재관. 2006. 저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용. *한국물환경학회지* 22(5):768-783.
- 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) -육안적 간략수질 평가방법을 중심으로-. *한국환경생물학회지* 10: 77-84.
- 환경부. 2006. 물환경관리 기본계획.
- 환경부·국립환경과학원. 2006. 물환경종합평가방법 개발 조사연구(III) 최종보고서 - 수생태 건강성 조사 및 평가체계 연구 -