

생태공학의 이해와 전망(1)

황 순 진

건국대학교 생명환경과학대학 조교수



“본 학술원고는 최근 환경개선과 복원의 기술적 대안으로 대두되고 있는 생태공학에 관한 이해와 전망을 고찰하기 위하여 시도하였다. 생태공학은 환경문제 뿐만 아니라 경관문제까지도 포괄하고 있어 농공학 분야에서 적용되고 있는 농업분야의 기반정비 및 생활환경정비에 중요한 이론 및 기술적 조합이 될 수 있을 것으로 전망된다. 본 원고는 총 6장으로 구성되어 있으며 전체원고를 세장씩 2회에 나누어 게재한다. 제1부는 서론, 생태공학의 정의 및 목적, 그리고 생태공학의 원리와 방법을 소개하고, 제2부에서는 생태공학의 분류 및 적용, 생태공학의 현황 및 향후과제, 그리고 결론을 포함한다.”

1. 서 론

인구증가, 산업화, 도시화와 더불어 우리는 환경오염이나 환경문제를 극단적으로 단순화시키는 방향으로 해결책을 마련해 왔으며, 생태계 전반적인 관점에서 문제를 다루어 오지 못했다. 에너지와 자원 집약적인 기술적 측면을 강조한 환경오염 해결 방안은 오염물질의 완전한 제거를 목표로 추구해 왔으나 이는 실제로 완전한 제거(무방출)가 아니라 또 다른 형태의 오염물질로 전환시키는 문제를 낳고 있다. 예를 들면, 질소와 인을 완전히 제거하지 못하는 오폐수처리기술은 처리과정에서 유기물을

무기물로 바꾸어 수역에 방류함으로써 부영양화에 의한 녹조현상을 조장시키고 있다. 하수처리장이 위치한 인근지역의 하천이나 호소수역의 수질악화 현상은 바로 그러한 원인으로 볼 수 있다(신 등, 2000).

환경문제의 근원이 거대화된 인간활동에 있다는 것은 의심할 여지가 없는 사실이지만 환경에 대한 인간의 영향이라고 하는 관점에서 보면 그 영향을 적게 하는 즉, 「환경에 부합하고 친화적인」 것으로서 해결을 도모하기에는 한계가 있다. 인류의 오늘날과 같은 번영의 기반이 된 자연의 시스템은 이미 상당부분 파괴되어, 인류에게 큰 악영향을 되돌

려주고 있는 상태가 되었으나 완전한 회복은 불가능하다. 이와 같이 생각하면 환경문제의 해결을 도모하는 방법은 자연의 시스템을 회복하면서 새로운 인간과 환경의 시스템을 만들어내는 것 즉, 인간과 자연의 공생이 가능하도록 균형을 취하는 시스템의 재구축인 것이다. 이를 위하여 자연의 복잡한 시스템을 파악하고 변화와 원인을 평가하여 때로는 원인을 배제하고 때로는 새로운 생태학적 시스템을 구축하는 방법으로 개선하여 전체적으로 균형을 취하는 시스템으로 이끌어 나갈 필요가 있다.

에너지와 자원 집약적, 그리고 대량의 처리를 추구하는 기술적 해결방안은 지구적 관점에서 물질의 재순환을 고려하지 못하여 환경오염에 의한 생태계의 교란이나 파괴에 대해서는 올바른 접근방법이나 대안이 제시되지 못하였다. 이에 생태계에 대한 근본적인 한계를 가지고 있는 공학적 방법을 극복하고 보완하여, 긴 시간을 통해 형성된 자연생태계와 그 속에 생존하는 생물들의 상호의존적(생태적) 가치를 동시에 추구함으로써 생태계의 지속가능성(sustainability)을 목표로 하는 학문과 그의 적용이 미래의 환경문제와 자연과 인간의 공생이라는 측면에서 극히 중요한 의미를 가진다.

본 논문은 이러한 목적을 가지는 생태공학을 이해하고 그 적용성과 전망을 고찰하고자 한다. 생태공학의 원리는 생태학적 기본 원칙들을 기본으로 하고 있으므로 환경복원적 측면에서 생태계의 구조와 기능에 대한 이해가 필요하며, 생태공학의 범위와 대상 그리고 적용사례들을 살펴봄으로써 생태공학의 전망과 그의 중요성을 제시하고자 한다.

2. 생태공학의 정의 및 목적

가. 생태공학의 정의

생태공학은 현대의 환경문제의 심각성과 그를 해

결하는 공학일변도 방법의 한계를 극복하고자 하는 사회적, 문화적, 경제적 요구로부터 나타난 새로운 분야이며, 그의 학문적 근간을 생태학에 두고 있다. 미국의 시스템 생태학자 Odum(1962, 1963)은 생태공학이라는 용어를 처음 정의한 사람의 하나였으며, 그는 생태공학을 '시스템을 제어하기 위한 부가적인 에너지가 자연자원으로부터 얻어지는 인간에 의한 환경적 조절'이라고 정의하였다. 그 이후 그는 생태공학의 개념을 좀 더 발전시켜, '자연의 관리'가 생태공학이며, 기존의 공학적인 측면에 대한 보완적인 노력으로 보았다. 이 과정에서 '자연과의 공조 또는 협력관계'를 강조하였다(Odum 1971). 그는 역저 Systems Ecology (1983)에서 새로운 생태계 설계에 대한 공학적 측면은 주로 스스로 조직화(self-organization) 또는 스스로 지탱(self-support)이 가능한 시스템을 이용하는 분야라고 설명하였다. 이후 생태공학은 다른 학자들(Ma 1985, Straskraba 1984)에 의해 그 정의가 보완, 확대되었으며 이들은 모두 생태학적 원리들을 적용하는 방향으로 공헌하였다. 예를 들면, 생태공학은 생태계 관리를 위한 기술적인 수단이며, 실행의 비용과 환경에 대한 피해를 최소화시키는 생태학적 이해에 기초를 둔다고 정의하고 있다. 비교적 최근에 Mitsch & Jorgensen (1989)은 생태공학을 '인간사회와 자연환경 양쪽의 이득을 추구하는 지속가능한 생태계의 디자인'으로 정의하였다.

이러한 여러 가지 의미의 정의를 고려할 때, 생태계의 기능을 강화하고 파괴된 생태계를 복원하여 생태계의 기능을 이용하는 것을 생태공학(Ecological Engineering, Ecotechnology)이라고 하며, 이것은 인간과 자연의 공생을 가능토록 하는 기술이다. 바꾸어 말하면 생태공학은 지구나 환경에 친화적이고 부드럽게 접근하는 기술로서 미래의

환경문제를 다루게될 가장 중요한 분야라 볼 수 있다. 따라서 생태공학의 목표는 1) 환경오염이나 경관의 교란과 같이 인간에 의해 파괴된 생태계의 복원, 2) 인간사회와 생태계의 가치를 동시에 추구하는 지속가능한 생태계의 보전이라고 볼 수 있다.

화학공학(Chemical Engineering)은 화학에, 생물공학(Biotechnology)은 분자생물학이나 유전학에 기초가 있듯이 생태공학의 기초는 생태학이다. 생태공학은 생물공학과는 근본적으로 다르며 생태계의 기능을 제어하여 생태계를 보전·복원하는 기술을 다룬다. 생태계는 원래 자기설계(self-design) 능력을 가지고 있기 때문에 인간은 이를 발휘할 수 있도록 실마리를 제공하거나 혹은 촉진자로서 도움을 주게된다. 시스템을 유지하는 에너지

의 기본은 태양에너지이다(표 1).

생태공학적 기술은 공학적인 방법과는 달리 생물과 환경이 포함된 자연 생태계 또는 생태계 내의 생물적 구성요소들을 이용하며, 생태계의 가장 중요한 기능중의 하나인 물질의 순환과 이에 관련된 자연의 정화작용(self-purification)을 이용하는 방법이다. 세부적인 의미에서는 미생물이나 어패류와 같은 생물 그 자체를 이용하는 생물학적인 방법도 이 범주에 포함된다. 하수처리장의 배수구 부분이나 하천의 유입부에 인공적으로 습지를 건설하여 오폐수를 통과시킴으로써 오염물질의 농도를 저감시키는 방법이 가장 일반화된 생태공학적 방법의 하나이다. 이 방법은 생태계 및 생물의 구조와 기능을 이용하기 때문에 수질개선 뿐만 아니라 생물

표 1 환경공학기술과 생태공학기술의 비교

구 분	환 경 공 학 (Environmental engineering)	생 태 공 학 (Ecological engineering)
단 위	처리 및 부대시설 (폐하수, 분뇨처리장, 하수관거 등)	생물, 생태계, 지역
학문적 원리	환경공학	생 태 학
가동 에너지원	화석연료	자연, 태양에너지
처리대상 물질	유기물, 부유성 고형물질(SS), 영양염	유기물, 부유성 고형물질, 영양염류, 중금속, 병원균
정화효과에 대한 수질기준	BOD, COD, DO, SS	BOD, COD, DO, SS, TN, TP, 중금속, 대장균
운전조건	어 려 움	쉬 움
처리효율	높 음	낮음~높음
기술상의 장점	<ul style="list-style-type: none"> · 보편화된 방법 · 대규모 처리 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 유기물 이외에 부영양화 원인물질인 인산과 질소 처리 가능 · 유지 관리비가 적게 들 · 설치비가 상대적으로 적음
기술상의 단점	<ul style="list-style-type: none"> · 설치비가 매우 많이 들 · 유지비가 많음 · 관리를 위한 전문지식 필요 · 운전조건 조작 필요 · 영양염류 제거 곤란, 효율적인 유기물질의 처리 후에도 부영양화 가능성 큼 	<ul style="list-style-type: none"> · 기존 처리시설에 비해 넓은 부지 필요 · 아무 곳이나 설치하기 어려움 · 개발과 적용사례의 부족

의 서식공간의 확보, 심미적 기능, 휴식처, 교육장소의 제공 등 다양한 목적으로 이용되어 그 파급효과가 매우 크다. 이미 미국, 독일, 일본 등 외국에서는 보편적으로 생태공원이나 인공습지를 자연환경 학습장으로 이용하고 있다. 또한 이 방법은 생태계의 자연성을 이용하기 때문에 유지 및 관리비가 공학적인 방법에 비해 비교적 안될 정도로 적다. 다만 아무 곳이나 설치할 수 없다는 단점이 있다(표 1).

나. 생태공학을 활용한 환경복원

기본적으로 생태계는 다양한 생물이 풍부하게 서식할 수 있는 환경이어야 한다. 생태계로서 각종의 기능이 건전하고 확실히 발휘되도록 하는 것이 자연에 친화적인 것이며, 이로 인한 환경은 인간과 자연의 공생을 가능하게 할 것이다. 대부분 생태계의 건전함은 종의 다양성에 의해 인식할 수 있다. 생태공학의 기본은 식물연쇄를 통한 물질순환이기 때문에 생태계의 건전화를 위하여 대상이 되는 공간에 다양한 생물이 생활하고 있어야만 한다. 이를 위하여 생물의 서식장소를 제공하는 것이 필요하며, 바이오톱(biotope)이라 하는 생물의 서식장소를 시스템으로서 즉, 서로 다른 Biotope을 일체화하고 나아가 이를 연결시켜 네트워크로 정비하는 것이 중요하다.

삼림, 초지, 습지, 호소, 하천, 연안 등 생태계의 창출·재생·복원, 지속성이 있는 농업생태계의 개발에 대하여 생태계의 기능을 근간으로 기술개발을 해나가는 것이 생태공학의 중심이다. 지금까지의 환경기술은 생태계를 무시하고 개발하였으며 따라서 생태계가 자연과는 단절되어 있었으나 생태공학에서는 인간의 사회와 자연생태계가 공생할 수 있는 틀을 모색하고 있다. 생태공학은 수권이나 토양권의 환경보전 뿐만 아니라 수산, 임업, 농업에도

도입될 수 있는 방법으로서 이미 경험적으로 생태공학이 도입되어 있는 경우도 있으나 환경분야에서는 도입단계로서 앞으로의 기초를 확립해야 할 것이다.

3. 생태공학의 원리와 방법

가. 생태계의 구조와 기능

1) 생태계의 개념

자연계에서의 생물학적 상호작용을 생물과 환경이 일체가 된 시스템으로서 인식할 필요성을 설파한 영국의 Tansley는 생태계(ecosystem)라고 하는 용어를 제창하였다. 즉, 생태계란 자연을 '생물군집(biotic community)으로 보고 이를 둘러싼 무생물적 환경(abiotic environment)이 만드는 하나의 기능적인 시스템'으로 보는 개념이다. 여기서 생물군집은 생태계로서 대상이 되는 공간에 존재하는 식물, 동물, 미생물 등 생물의 집합 전체를 가리키고, 생태학적으로는 동종의 개체의 집합인 개체군을 구성요소로 하는 집합이다. 지구상의 여러 가지 경관을 대상으로 하여 생태계를 인식할 수 있는데 명확하게 구분할 수 있는 것이 있는 반면 도시나 농지생태계와 같이 토지이용이라는 관점에서 하나로 묶을 수 있는 것도 생태계로 볼 수 있다. 지구도 하나의 생태계이며 그 내부에는 수많은 생태계의 subsystem을 갖고 있으며 이들이 상호 연결되면서 전체로서 하나의 시스템을 만들게 된다.

생태계를 시스템화시키는 것은 구성요소들 간의 밀접한 관계인데 호소생태계를 예로 들면, 호소의 수중에는 조류(algae)가 생육하고 있고 조류는 에너지원으로서 태양 빛과 영양원으로서 수중의 탄소, 그리고 질소나 인 등을 흡수하여 생활하고 증식을 한다. 또한 온도나 pH, 염분농도 등의 물리화학적 인자들도 생장을 지배한다. 수중에는 수많

은 조류종이 있으며 빛이나 영양염을 둘러싼 경쟁이 일어나고 있다. 또한 초식동물(예를 들면 동물성플랑크톤)의 먹이가 되고 조류의 대사산물이 되는 유기물이 세균의 영양원이 되는 등 생물간에 상호작용이 일어나는데, 실제로는 더욱 복잡한 작용, 반작용, 상호작용이 일어나서 생태계 내의 에너지 흐름과 물질순환을 형성한다.

2) 생태계의 구조

가) 생물적 요인

생태계의 생물적 구성요소는 주어진 역할에 따라 생산자(producer), 소비자(consumer), 분해자(decomposer)로 나뉜다. 이들 용어는 생물군집에서 에너지의 흐름이나 물질의 순환을 설명하는데 편리하게 이용되어 왔다.

생산자는 독립영양을 하는 광합성식물(녹색식물·조류)이며 탄소원으로서 무기물인 이산화탄소를 사용하고 에너지원으로서 빛을 이용하여 유기물을 생산한다(1차생산).

소비자는 종속영양을 하는 생물인데 탄소원으로서 생산자가 만들어 낸 유기물에 의존하고 있다. 소비자 가운데 포식자는 1차 소비자, 이를 먹는 육식자는 2차소비자, 그리고 3차, 4차의 고차소비자가 존재한다.

분해자는 동식물의 사체나 그 파편, 혹은 동물의 배설물 및 분해배설물(detritus)에서 유기물을 섭취·분해하고 그 과정에서 생기는 에너지를 이용하여 생활하는 생물이다. 생태계 내에서는 소비자가 이용하기 어려운 유기물을 무기물로 분해하여 이를 무생물적 환경으로 되돌려서 생산자가 이용할 수 있도록 하는 역할을 담당하고 있다(물질순환). 생활자원으로서 생산자나 소비자가 섭식으로 혹은 분해물의 섭취·분해에서 유기물을 획득하는 점, 생산자가 이용할 수 있는 형태까지 유기물 분해여부

라는 점에서 소비자와 분해자의 차이를 인정할 수 있으나 이들은 모두 종속영양생물이며, 유기물을 무기화하는 점에서는 본질적인 차이는 없다(Odum, 1971).

생산자는 태양의 광에너지를 광합성에 의해 고정해서 유기물을 생산하고, 소비자, 분해자는 그 유기물을 섭식해서 생활하는데 이와 같은 생물 섭식에 의한 연결을 식물연쇄(food chain)라 한다. 식물연쇄는 생식연쇄(grazing food chain)와 부식연쇄(detritus food chain)로 나뉜다. 생식연쇄는 살아있는 식물체를, 부식연쇄는 detritus를 섭식하는 것에 따라 연쇄 시작이 다르다. 그러나 실제 생태계에서 생식연쇄와 부식연쇄는 도중에서 복잡하게 연결된다.

나) 무생물적 환경

생물이 성장해서 증식하는 과정은 그 환경에 서식하고 있는 다른 생물뿐만 아니라 물리적 및 화학적 조건도 커다란 영향을 미치는데 이를 환경요인이라 하며 생물에게 현저한 영향을 미치는 것으로서 온도, 빛, 물, 토양 등이 있다. 일반적으로 하나의 생물에게 영향을 미치는 환경요인은 다수인데 어느 한 개 요인의 과소 과다가 그 생물의 존재나 증식에 결정적인 작용을 미치거나 혹은 다른 요인의 과소 과다가 어느 정도 영향을 미치지 않는 경우, 그 요인을 특별히 제한요인(limiting factor)라고 한다. 어느 환경요인이 과소인 경우 제한요인이 되는 것은 당연하지만 과다인 경우에도 제한요인이 된다. 제한요인으로서 온도, 빛, 물, 토양, 영양염류 등이 중요하다.

3) 생태계의 기능

가) 기능인자

① 생산량

생태계의 기능은 생물군집 내의 에너지 흐름, 물

질순환을 근거로 하고 있는데 중요한 것은 생물체량과 생산량이다. 생산자가 광합성에 의해 광에너지를 고정하는 총량을 총생산량(gross production)이라 하며 이 가운데 생산자의 호흡에 의해 소비되는 에너지량(호흡량: respiration)을 뺀 것을 순생산량(net production)이라 한다.

② 에너지의 흐름

태양표면은 약 6000 °K의 온도에서 에너지를 우주공간으로 방출하는데 그 일부가 지구에 입사되고 있다. 지구의 대기권외의 태양방사에 의한 에너지는 약 $2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ (태양정수)이다. 이 에너지는 기후환경(온도, 물의 증발, 공기나 물의 움직임 등)을 형성하고 광합성에 의해 생태계의 에너지의 흐름을 낳게되며, 또한 적외방사로서 우주로 흐르고 있다. 태양방사 빛의 30%는 지구에 작용하는 것이 아니고 우주로 반사되며 대기중의 공기분자와 구름이 19%를 흡수하기 때문에 지표에 도달하여 생물권에 도달하는 것은 나머지 51%가 된다. 즉, 생물권에 유입하는 방사에너지는 그 지역의 위도, 계절, 구름의 양 등에 커다란 영향을 받는데 $1.1 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{년}$ 으로 추정된다.

생물권의 1차 총생산량은 Odum(1971)에 의해 산출되었는데, 해양 및 육상의 각 생태계를 평균해서 $2 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{년}$ 이다. 즉, 생물권에 입사하는 태양에너지의 0.13~0.18% 정도가 생산자에 의해 이용되고 있을 뿐이다. 영양단계의 상위의 생물이 하위의 생물을 섭식할 때의 에너지 이용효율은 일반적으로 10% 정도이며, 이는 영양단계가 한 단계씩 오를 때마다 이용가능한 에너지는 1/10로 감소하게 됨을 의미한다.

③ 물질순환

대기, 물, 토양은 생물이 존재하는 세 가지 중요한 매체로서 각각 대기권, 수권, 토양권에 존재하며, 이들 권내에서도 서로 다른 권역간에 물질의

순환이 일어나는데 여기에는 생물이 크게 관여하고 있다.

탄소의 순환과정에서 지배적인 것은 광합성이다. 식물은 탄산동화작용에 의해 이산화탄소를 흡수하면서 동시에 호흡으로 이산화탄소를 배출하고 있다. 여기서 생산되는 유기물의 일부는 동물들의 먹이가 되고 호흡에 의해 이산화탄소로서 배출된다. 분해채설물은 세균 등에 의해 분해되며 호흡에 의해 이산화탄소로서 배출된다.

질소는 대기중에 가장 많이 포함되어 있는 성분인데 산소에 비하여 불활성이며 동물이나 식물 등이 이용할 수 없다. 그러나 일부 세균이나 Cyanobacteria(남조류)는 대기중의 질소를 고정하는 능력을 갖고 있으며 이를 통해 아미노산을 합성한다. 또한 자연계에서 질소의 순환은 암모니아 산화세균, 아질산 산화세균, 탈질세균 등이 중요한 역할을 하고 있다. 암모니아는 동식물의 사체에 함유된 단백질이나 배설물의 부패에서 생기는데 암모니아 산화세균, 아질산 산화세균에 의해 아질산을 거쳐 초산까지 산화된다. 초산은 녹색식물에 흡수되거나 탈질세균에 의해 질소로 환원된다.

인은 세포막을 구성하는 인지질, 에너지물질인 ATP, 유전정보를 담당하고 있는 DNA 등에 포함되며 생물에게는 매우 중요한 원소이다. 인의 공급원은 인광석이며 이것이 침식된 인산염이 생물에게 이용된다. 또한 동식물중의 사체를 포함한 유기물도 세균의 작용을 받아 인산으로 변하며, 이것이 다시 생물에게 이용되는 순환과정을 거친다.

나) 환경과 관련한 생태계의 기능

① 자연정화

자연정화란 인위적인 방법이 아닌 생태계의 작용으로 오염물질이 감소하는 작용을 말하며, 자정작용(self-purification)이라 한다. 자연의 정화기능을 기대할 수 있는 오염물질로 유기물을 들 수 있

는데, 정화는 분해자인 호기성 미생물이 담당한다. 유입되는 유기물이 자연정화기능의 용량을 넘지 않는 정도라면 호기성 미생물에 의한 분해에 의해 유기물은 무기화된다. 그러나 생활배수나 공장배수에 의해 다량의 유기물이 흘러 들어오면 호기성 미생물에 의한 유기물의 분해과정에서 소비되는 산소의 양이 많게 되고 물속은 빈산소 혹은 무산소 상태가 된다. 이와같은 상태가 되면 호기성 미생물이나 물고기 등 산소를 필요로 하는 생물은 사멸하고 정화기능은 극단적으로 저하된다. 유기물과 관련한 자연정화기능은 산소가 관여하기 때문에 하천생태계와 같이 재폭기에 의한 산소의 공급이 큰 경우가 호소생태계에 비해서 자연정화 기능이 높다.

질소와 관련한 자연정화 기능으로서의 탈질을 들 수 있다. 질화세균에 의한 암모니아의 산화와 탈질세균에 의한 질산의 환원에 의해 질소가스는 물에서 대기로 방출되면서 제거된다. 때문에 질산화에 적절한 산화상태인 경우와 탈질에 적절한 환원상태의 경우가 근접해 있는 경우가 바람직한데, 이와같은 생태계로서는 습지를 들 수 있다.

호안지대나 해안가의 식생, 혹은 조류 등에 의한 영양염류의 흡수도 부영양화를 억제하는 자연정화기능으로 볼 수가 있다. 또한 식물플랑크톤에는 유독물질이나 이취미의 원인물질을 생산하는 것이 있으나 유해물질의 일부는 원생동물을 포함하는 동물성플랑크톤의 포식으로 무해화되는 것도 있는 등 식물연쇄의 기능도 자연정화로 생각할 수 있다. 그러나 생태계의 자연정화 기능에는 아직 불투명한 부분이 많고 또한 이 정화기능을 정량화하기 위하여 생태계의 물질수지를 기초로 한 평가가 필요하다.

② 생물농축

생물농축(biological concentration)은 생물이 분해나 배출할 수 없는 물질을 받아들여 그대로 체내에 축적하고 농축해 가는 상태를 말하는데, 외계

의 극히 희박한 양의 물질을 농축하는 작용은 매우 놀라울 정도이다. 생물은 이와같은 농축능력을 가짐으로써 오히려 생명을 유지할 수 있다. 또한 생물에 의한 농축이 유해물질인 경우, 매우 심각한 환경피해를 유발하게 되는데 카드뮴, 수은 등의 금속, 다이옥신류, DDT, PCB 등 인간이 만들어 낸 난분해물질은 외계의 1~10만 배 때로는 100만 배로 농축되기도 한다.

나. 생태공학의 원리

생태공학은 환경문제를 접근함에 있어 생태계의 특성을 이용한다는 점에서 기존의 환경공학 개념들과 원칙과는 다른 점을 보여준다. 생태공학은 자연의 구조와 기능을 다루는 생태학과 오염물질을 제거하는 기술적 측면을 다루는 공학(환경공학, 토목공학)이 합쳐진 학문이다. 따라서 생태공학은 기존의 기술적 측면만으로 다루는 공학과는 기본 원칙과 개념이 다르다. 생태공학의 기본 개념들은 다음과 같은 원리를 포함한다(Jorgensen and Mitsch, 1989)

① 생태계는 자기 계획적인 시스템(self-designing system)이다. 자연의 자기 계획적 능력을 더 많이 이용할수록 그 시스템을 유지하는 에너지 비용은 적어진다.

생태공학은 자연과 생태계의 자기계획적 능력에 의존한다. 생태계의 규칙과 피드백 기작들은 환경에 대한 적응과 자기계획적 능력을 부여하며, 생태계 기능에 있어서의 변화를 최소화한다. 교란에 의한 변화가 발생할 때 생태계 내의 생물종들은 그에 적응하고 또한 대체되며 최종적으로 먹이사슬의 구조와 기능이 변하게 된다. 각각의 종들이 분류될 때 새로운 환경에 적응하는 일부는 선택되지만 그렇지 못한 일부는 도태된다. 생태공학적 입장에서 인간은 환경과 잘 조화되고 적응할 수 있는 초기

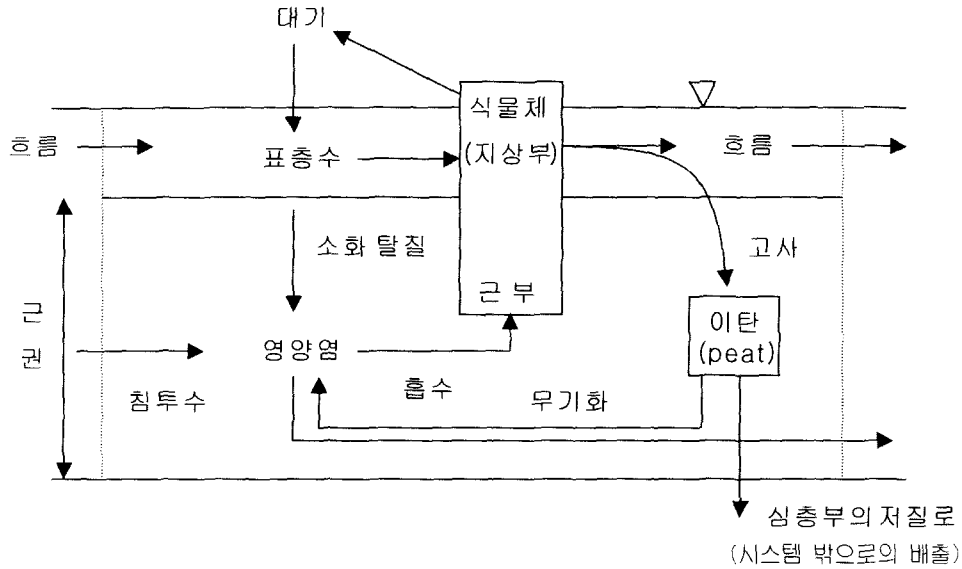


그림 1 습지생태계에서의 물질순환

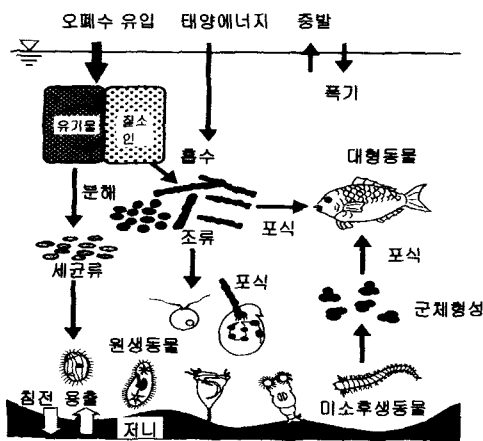


그림 2 수중생태계에서의 물질순환
(자료: 須藤隆一, 2000)

종들을 선택하지만, 나머지는 자연 스스로의 진행 해 간다. Odum(1989)은 이 능력을 '자기조직화 (self-organization)' 라고 하였으며, Ma and Yan(1989)은 '자정능력(self-purification)'으로 표현하였다.

② 원소(element)들은 생태계 내에서 순환한다. 순환경로에서 인간과 생태계의 조화는 궁극적으로 오염의 영향을 저하시킨다.

원소는 모든 생태계에서 순환한다. 그림 1과 2는 습지생태계와 수중생태계에서 영양염류를 포함한 물질순환을 나타낸 예이다. 생태계 내에서 각 원소의 순환과 그의 속도를 이해하는 것이 생태공학에 적용에 있어 매우 중요한 사항이다. 더욱 중요하게 재순환(recycling)을 이용하는 생태공학적 접근은 오염영향을 저감시키고 자원을 절약한다는 것이다. 예를 들면, 영양물질 재순환을 위한 육상 생태계의 이용은 최소의 비용으로 연약한 생태계를 보호하는 효과적인 수단이 될 수 있으며, 수생태계로 방류될 수 있는 자원의 복구를 유도한다.

모든 생태계는 태양에너지에 의존하기 때문에, 그들은 스스로의 유지가 가능하다. 그리고 자연적이든 인위적이든 일단 만들어진 생태계는 자기계획 능력을 통해 어느 정도의 외부교란에도 지속가능하

다. 태양에너지에 의해 운영되는 생태계는 전통적인 기술에 의한 해결책에 비해 많은 화석연료가 필요하지 않다. 만일 시스템 자체가 지속성이 없다면 이는 생태공학이 자연과 환경을 적절하게 조화시키지 못했다는 의미가 된다. 현대의 환경기술은 대부분 분야에서 재생불가능한 에너지에 의해 지탱되는 원리에 근거를 두고 있다. 그러나 생태공학은 초기에는 화석연료에 얼마간 의존하지만 최종적으로 태양에너지와 자원의 재순환의 원칙으로 전환하게 된다.

③ 생태계의 항상성(homeostasis)은 생물학적 기능과 화학적 조성의 조화를 요구한다.

생물체 내에서 화학적 조성은 반드시 고정된 농도에서 일어나는 것이 아니라 어떤 범위를 가지게 된다고 할지라도, 살아 있는 생물의 생화학적 기능은 원소들의 화학적 조성을 결정한다. Shelford의 내성의 법칙에 의하면, 생물들은 반드시 어떠한 범위 내에서만 환경내성을 조절할 수 있으며, 이러한 원칙이 생태공학의 이용에 있어 반드시 고려되어야 한다. 생태공학적 방법들의 성공은 이러한 원칙을 이해하여야 가능하다. 예를 들면, 화석연료의 사용결과 나타나는 이산화황(SO₂)의 방출로 야기되는 호수산성화의 결과는 이러한 원칙을 위배한 것으로 설명 가능하다. 구미 각국의 호소에서 관찰되는 낮은 pH 값은 호수 내에서 광합성을 위한 무기탄소의 부족을 야기한다. 따라서 이 경우 호수는 극빈영양 상태로 변하게 되며, 전체 먹이사슬이 영향을 받고, 호수 생물상이 매우 빈약하게 된다.

④ 생태계의 과정들은 큰 정도로 변하는 특징적인 시간적 규모(time scale)를 보유한다. 생태계의 조절은 생태계 규모의 동태학에 적용되어야 한다.

시간적 스케일에 대한 고려의 부족으로 인한 잘못된 환경관리의 예들이 피식-포식관계의 인식부족에서 발견된다. 인간들은 포식자를 자주 해로운 동물로 생각하며, 따라서 초식동물들을 보호하기 위

해 육식동물들을 제거해 왔다. 그러나 단기이익이 장기적 패턴을 희생하였기 때문에 이러한 전략은 실패로 나타났다. 즉, 서로 다른 시간스케일이 고려되지 못했다. 포식자의 수가 감소될 때, 피식자의 수는 빠르게 증가한다. 그러나 초식동물들은 그들의 먹이원을 이용하는데 있어 다른 시간적 스케일을 가지고 있으며, 포식자의 부족시 그들의 수용능력 이상으로 증가하게 된다. 결과적으로 과도한 섭식과 많은 수가 굶게 되는 결과를 초래한다. Hutchinson(1961)에 의해 제기되었던 "플랑크톤의 모순적 역설(paradox of plankton)" 즉, 수생태계에 있어 수많은 플랑크톤이 제한된 한 공간에 존재하는 현상 역시 시간적 스케일의 중요성을 보여주는 것이다.

⑤ 생태계 구성인자들은 특징적인 공간적 스케일을 보유한다. 생태계의 조절을 이용하여 원하는 결과를 성취하기 위해서는 해당 목적에 필요한 적절한 크기를 고려해야 한다.

빠른 인구증가는 농사를 짓기 위한 땅의 요구를 증가시키는 결과를 가져왔으며, 습지의 배수와 산림벌채는 이러한 요구에 부응하기 위해 광범위하게 이용되었다. 벌채로 인한 사막화현상이나 습지 제거의 결과로 인해 오염물질이 수계로 직접 전달되는 것과 같은 문제들은 생태학적으로 건전한 관리를 방해하며, 이러한 문제들은 자원의 공간적인 유형이 고려되어야만 극복할 수 있다. 또한 생태공학은 환경보전에 대한 윤리를 강조한다. 예를 들어, 습지가 홍수조절과 수질개선 등의 환경적 가치를 지니고 있음을 인식한다면, 습지를 관리하고 복원시키려는 노력은 많은 호응을 이끌어 낼 수 있다. 즉, 생태공학을 통한 생태계의 보전에 대한 인식은 생태계 보전에 정당성을 부여해줄 수 있다.

⑥ 화학적, 생물학적 다양성은 생태계의 수용능력에 공헌한다. 생태계를 디자인 할 때, 생태계의

자기 설계능력을 향상시킬 수 있는 부분들에 대해 광범위한 다양성을 도입해야만 한다.

생태공학은 기본적으로 생태계 전체에 대한 관심을 강조한다. Odum(1989)은 생태공학은 소규모의 개별적인 또는 분석적 실험으로 목적을 성취하기 어렵다고 주장하였다. 생태계의 설계와 그 진행이 각 부분들의 합한 기능으로서 예측하기 매우 어렵기 때문에 모델링이나 편익분석과 같은 기법들이 이용된다. 따라서 개별적인 종 수준의 조절과 관리라 할지라도 생태공학은 최종적으로 시스템 전체를 다루어야 하며, 이를 위해 생태계를 디자인하는 많은 연구와 조사가 병행되어야 한다. Jordan et al. (1987)은 어떤 시스템을 이해하는 최선의 방법은 그 시스템을 모방하거나 수정, 적용하여 그것이 제대로 운영되도록 하는 것이며, 따라서 생태공학은 기본적인 생태학적 연구에 부가하여 시스템적 접근을 통해 적용하는 것으로 보았다.

⑦ 생태계는 지형학적으로 그들의 가장자리 부분에서 가장 취약하다. 생태학적 관리는 생태계와 그의 지형학적으로 최적의 범위에 존재하는 생물상을 이용하여야 한다.

생태적 추이대(ecotone)는 생태계들간의 전이지대에 형성된다. 인간의 거주지와 자연간에 공간적으로 존재하는 접촉영역은 연속적이고 점진적인 지역으로 계획되어야 하며, 급격한 변화가 있는 경계로 되어서는 안된다. 생태계들은 또한 다른 생태계와 연결되어 있다. 이러한 연결은 가능한 언제나 유지되어야 하며, 주변의 다른 생태계들과 격리되어서는 안된다. 또한 생태계 내의 각 구성요인들은 모두 밀접하게 연결되어 있다. 따라서 다른 부분에 영향을 주지 않고는 생태계 내의 한 구성요인을 관리하기가 불가능하다.

다. 경관생태학적 개념의 중요성

1) Biotope 의의와 개념

다양한 생물이 서식할 수 있는 환경을 다음 세대까지 계승하기 위하여 환경에 미치는 부하가 적도록 하는 지속적 발전이 가능한 사회구축이 필수 불가결하다. 지금까지 인간을 중심으로 한 사회 발전은 환경부하의 증대를 초래하여 자연의 정화기능이나 자원순환 등의 환경용량을 초과함으로써 지구규모의 문제로 대두됐다. 이 가운데 biotope 창출이라는 생물의 서식환경을 고려하는 것은 대량소비·대량생산·대량폐기형 사회를 개선하고 건전한 생태계를 구축하는데 중요하며, 그 기술적 요소인 생태공학기술은 지구나 환경에 친화적인 것으로서 앞으로 발전되어야 할 방법이다.

Biotope란 「특정의 생물군집이 생존할 수 있는 특정 환경조건을 갖춘 균질한 일정지역」으로 규정되며, 생물군집과 생존을 보장하는 환경조건, 최소의 지리적 공간단위가 동시에 갖춰진 장소를 가리킨다. 원래 Biotope은 경관관리, 자연보호적 측면을 강조하는 경관생태학적 개념에서 발생한 것인데, 지역규모에서 지구규모에 이르기까지 여러 가지 공간에서 도시, 농촌, 자연이 갖는 경관과 생태계와의 관계를 지리학적으로 제어하는 데에 그 근거를 두고 있다. 즉, Biotope은 주로 동물보호를 목적으로 하는 최소공간 단위를 표시하는 것인데 이를 위하여 숲·물·토양의 입장에서 각각의 생물종이 대대에 걸쳐 생활사를 전할 수 있는 서식장소의 형성이 전제가 되며, 삼림, 초지, 습지, 하천, 늪 등의 여러 공간에 적용할 수 있는 생물종사이의 상호작용에 의해 생태계가 구축되고 있다(표 2).

더욱이 일체적, 연속적 창출을 도모하는 생태학적 회랑(eco-corridor)으로의 서식공간을 상호 이동할 수 있도록 하는 연구가 자연환경 뿐만 아니라

표 2 서식장소의 단계 (주로 하천의 경우)

초미서식장소 (Super-micro habitat)	원생동물이나 소형갑각류 등이 서식하는 하상의 돌표면이나 수중의 식물체 표면의 생물막 등. 유기물, 영양염류의 정화·분해에 공헌
미서식장소 (Microhabitat)	하상의 바위표면, 빈 공간, 수중의 식물체 표면, 하상의 모래속 등 수생곤충, 패류 등, 소형동물이 생활사의 일부시기에 서식장소로 하는 경우가 많다.
서식장소 (Habitat)	연못, 침수식물 군락, 갈대군락 등, 어류, 양서류, 대형 갑각류, 조류, 곤충류등의 생활장소, 혹은 생활사의 일시적시기를 지내는 생활장소가 된다.
바이오톱 (Biotope)	하천 중류부의 소(pool) 구조를 포함한 일정구간, 다양한 식생을 가진 호반림, 호소연안대 등, 크고 정리된 경관으로서 유형화할 수 있다. 어류, 양서류, 대형 갑각류, 조류, 곤충류 등의 일생을 사는 생활장소, 혹은 생활사의 일부 시기를 사는 생활장소가 된다.
바이오톱 시스템 (Biotope system)	해역을 포함한 수계전체, 혹은 하천과 그 주변의 경작지나 삼림 등을 포함한 넓은 지역 등, 생물의 생활을 통해서 일정한 관계를 갖고 있는 대부분의 서로 다른 biotope으로 되는 것들을 총체적으로 포함, 대부분의 소형생물의 일생의 생활장소가 되는 것이외에도 생활사 중에서 여러 가지 biotope을 이용하는 생물이나 또는 행동범위가 넓고 항상 대부분의 biotope의 사이를 이동하는 대형육식동물 등의 생활장소가 된다.
Biotope 네트워크	철새나 넓은 수역을 회유하는 어류 등의 경우, 개별적인 서식장소의 보전으로는 부족하고 각각의 생물이 계절적 혹은 생활사의 모든 단계에서 이용되는 서식장소와 연계한 환경, 이를 연결하는 안전한 이동경로가 되는 biotope의 네트워크가 없어서는 아니 된다. 또한 보다 행동범위가 작은 생물에게도 장기적인 생물종의 유지를 위한 서식장소는 소수의 독립적인 것이 아니고 생물의 행동권내에서 서로 연관지며 존재하는 것이 중요하다.

(자료, 須藤隆一, 2000)

도시 환경에서도 공통적으로 필요하다. 이러한 생물이나 생태계의 서식환경을 표시하는 용어가운데 Biotope이 일반적으로 사용되게 된 것은 그 지역 고유의 특정종에 착안하여 서식환경을 확보하는 것이 건전한 생태계 창출의 원점이 되는 것에서 유래하기 때문이다.

Biotope 공간에서는 대상생물을 둘러싼 먹이연쇄나 서식공간과 관련된 환경인자 등의 생태학적 기술론과 계획론이 상호 연대하는 생물계(Biosystem) 내지 생태계(Ecosystem)의 제어가 부수적으로 이루어지는데 이러한 것이 격리되는 것이 아니라 지역생태계로서 종합적으로 창출되는 Ecotope로 발전한다. 이 경우 대상이 되는 야생생물 및 이

를 포함한 생태계가 각각의 환경특성에 따라 정착할 수 있도록 기술적으로 접근하는 것이 생태공학이다. 즉, 생태공학은 태양에너지를 기원으로 하여 생태계의 식물연쇄 하위단계인 플랑크톤에서 고차에 위치하는 육식동물에 이르기 까지 적절하게 제어하는 자연생태계에 공학적 기술을 도입한 창출 및 회복방법이다.

생태공학과는 대조적으로 어느 한정된 환경에서 인위적으로 개개 생물의 기능을 제어·강화하는 것이 생물공학, 소위 Biological engineering, 혹은 Bio-technology라 불리며 농업생산에서는 품종개발이나 식품생산공정 등이 있으며, 그 외에 환경복원 분야에서도 배수처리나 오니처리, 퇴비화 기술

로서 이용되고 있다. 이와 같이 생태공학과 생물공학에서는 그 목적이나 효과가 조금은 다르다 할지라도 환경복원을 위해 각기 효과를 발휘하도록 적절한 역할분담을 할 필요가 있다. <그림 3>에서는 양자를 포함한 환경복원 기술의 개념도를 표시한 것이다.

2) Biotope의 창출

Biotope의 창출은 자연환경에 대하여 인위적인 영향이 미치는 장소 외에 인위적이 손질이 미치지 않는 다양한 환경의 유지가 곤란한 장소도 대상으로 하고 있다. 농촌환경에서는 야생생물의 다양성이 확보될 수 있으며, 잡목림, 전답, 농업용수로, 초지 등의 장소에서 인간의 삶과 밀착한 biotope이 다양하게 창출될 수 있다. 다양한 생태계의 창

출은 자연환경과 인간과의 관계와 만남에 커다란 역할을 하게된다. 한편, 도시의 발달이나 편리함, 재해로부터 안전성의 확보 등은 토목기술의 발달에 의한 공적이 매우 크다. 그러나 자연을 무분별하게 개혁한다면 야생동물의 서식지, 결과적으로 인간이 자연환경이 갖는 혜택을 빼앗는 것이 되며, 따라서 지속적인 사회구축에 기여하는 지구환경보전을 고려한 토목공학의 발전이 요구된다.

예를 들면, 대규모적인 지형변화가 필요한 경우, 절토를 하지 않고 터널로 하거나 성토가 동반되는 경우에는 고목까지 포함된 지역식생이 번성할 수 있도록 구배를 비스듬하게 하는 등 가능한 한 현재의 환경특성이 유지될 수 있도록 도로계획 등을 하여야 한다. 또한 야생생물의 이동통로의 분단요소에 대하여도 동물 이동통로를 설치하는 배려도 필

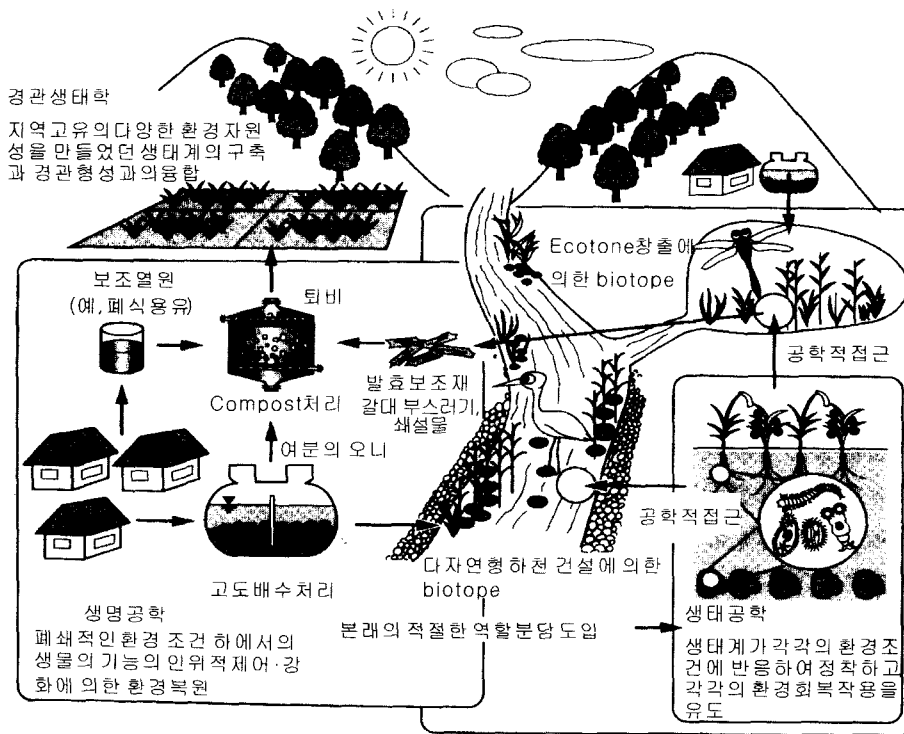


그림 3 환경복원 방법의 개념도(자료, 須藤隆一, 2000)

요하다. 하천이나 수로에서도 마찬가지로 낙차공 등 유로를 횡단하는 구조물이 설치된 경우에는 어도를 확보하고, 호안 축조에 따라 육상동물의 이동이 곤란하지 않도록 진입로를 설계하는 등의 배려가 필요하다.

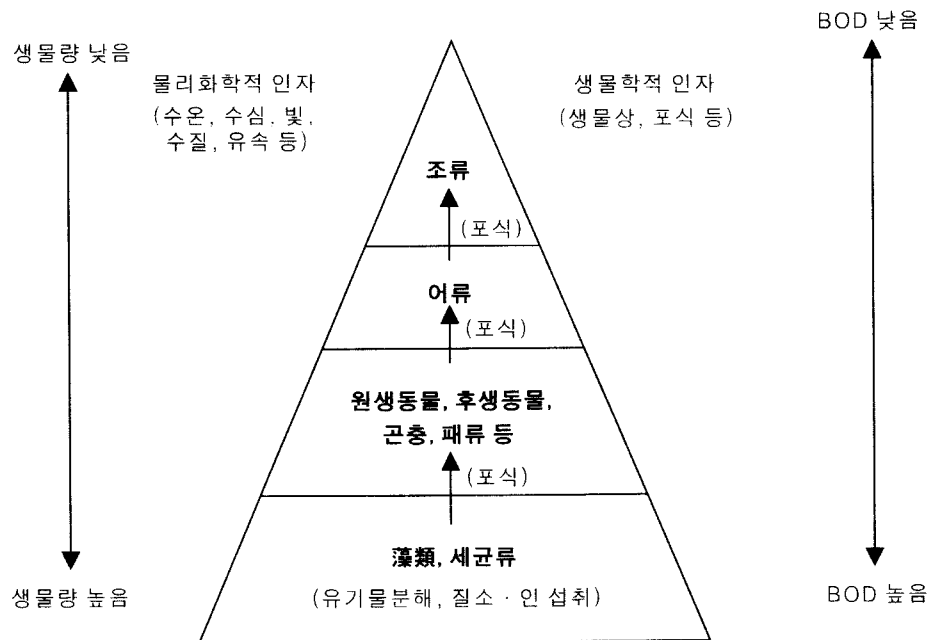
자연환경을 변화시키지 않을 수 없는 경우의 자연정화, 야생동물의 서식공간 등을 가능한 한 대체지로 보상하려고 하는 즉, mitigation에 대하여도 biotope의 개념을 도입하는 것이 중요하다. 즉, 생물의 생태공간의 배려가 토목기술의 도입에 실제 필요하며, 토목적인 지형의 변형이나 구조물의 설치에 의해 환경의 질적인 저하를 피할 수 있는 경우에는 mitigation 및 biotope의 개념을 재점검할 필요가 있다.

3) Biotope에 의한 생태계 제어

가) 대상 생물군집

Biotope 생태계를 구성하는 생물군은 미세조류, 원생동물, 갑각류, 곤충류, 어류, 양서류, 파충류, 조류, 포유류, 수초 및 육상의 초목 등이다. 특히 생태공학의 도입으로 수질개선 효과를 목적으로 하는 경우, 식물연쇄 저차수준인 세균, 균류에서 식물연쇄 고차수준인 원생동물 및 후생동물 등의 혼합 미생물군이 크게 공헌하고 있으며 이들의 관계는 피라미드형으로 표시된다(그림 4).

모든 생물 군집을 지탱하고 있는 것은 1차 생산자인 조류이며 이들을 포식하면서 생활하고 있는 미소동물이 1차 소비자, 나아가 이들을 포식하는 어류가 2차 소비자가 된다. 또한 이들의 분해물질



먹이환의 다양화·먹이사슬의 고차화외에 의한 호흡 에너지 등으로의 전환과 포식에 의한 오염물질의 분해가 높아져 정화능이 향상

그림 4 식물연쇄(먹이사슬)를 통한 수질정화 모식도

과 분해자인 세균을 기원으로 하는 부식연쇄(detritus food chain)를 동반하다. Biotope 생태계를 구성하는 대표적인 생물군의 생활형태 및 역할은 다음과 같다.

① 부유생물(plankton)

식물연쇄의 근간을 이루고 있는 플랑크톤은 수체에 용존하는 질소·인을 흡수하여 증식하고 용존태의 무기영양염류를 고형화하는 역할을 담당하고 있다. 이들은 식물성과 동물성으로 대별할 수 있는데 식물성으로는 남조류·규조류·녹조류·외편모조류 등이 있으며 동물성으로는 원생동물이나 유충류, 절지동물 갑각류(물벼룩)등이 중심이 된다. 특히 유충 등의 여과섭식성 동물플랑크톤은 세균이나 미세조류 등을 포식하여 1차 소비자로서 호소의 투명도 향상에 기여한다.

② 부착생물(periphyton)

Periphyton은 저질이나 연못 구조물, 수초의 심층부 등 다른 생물 혹은 무생물에 부착해서 생활하는 것을 말하며, 세균류·균류·조류·원생동물 등이 중심이 된다. 이들의 서식환경은 물이 접하는 부분인 하상, 바닥, 호안, 식생 등이며 특히, 돌로 구성된 호안의 바위틈 등 빈 공간의 표면에는 고밀도의 부착생물이 존재하고 있다. 플랑크톤과 같이 여과성의 것도 많이 있으며 이들은 입자상 물질의 포식을 통해 투명도향상에 기여하고 있다. 또한 조류 등의 식물성의 것은 수중에 용존하는 질소·인을 섭취하여 증식하기 때문에 용존형태의 무기영양염류를 고형화하는 역할을 담당하고 있으며(Hwang et al. 1999; Havens et al. 2001) 식물연쇄의 근간을 책임지고 중요한 역할을 맡고 있는 것은 플랑크톤과 같다.

③ 저서생물(benthos)

Benthos는 연못 바닥에서 퇴적물 분해에 기여하는 생물을 말하며, 지렁이, 수서곤충류 등이 중

심이다. 하상과 저수지에 쌓이는 낙엽 등을 분해해서 토양으로 되돌아가게 하는 등 부식연쇄의 중요한 위치를 차지하고 있다. 한편 잠자리 유충과 각다구 유충 등의 수서곤충은 적극적으로 포식한 저질을 소화해서 성장함으로써 수괴중의 유기물과 영양염의 흡수하여 이를 시스템 밖으로 배제하는데 크게 공헌하고 있다.

④ 어 류

어류는 초식, 육식, 잡식성 등 식성에 따라 수생태계에서 차지하는 위치는 다르다. 조류와 인간에게 포식 당하지만 연못에서는 먹이사슬의 고차원에 위치한다. 이들의 생물적 포식효과는 먹이사슬을 통해 하위단계로 전달되며 동물플랑크톤에 의한 조류섭식작용을 강화시켜 생물학적 조류제어 및 수질 개선에 공헌할 수 있다(Benndorf, 1990).

그러나 최근 큰입우럭(largemouth bass)나 파랑블우럭(bluegill) 등의 육식어류의 도입에 의해 평소 볼 수 있었던 송사리를 비롯한 작은 물고기의 현존량이 급감해서 생태피라미드가 불안정해지거나, 초어 등의 초식성 어류의 방류에 의해 호소의 수생식물상이 막대한 타격을 입는 예가 있어 어종의 선정에는 신중한 판단이 요구된다.

⑤ 수생식물(macrophytes)

수생식물은 바이오톱의 초기단계로서 이식하는 경우가 많은데 이러한 것은 생식장소에 의해 정수성, 부엽성, 침수성, 추수성의 네 가지로 크게 나눌 수 있다. 추수성, 정수성, 부엽성의 수초는 부영양화가 진행되어도 생식가능하며 그 중에서도 갈대와 애기부들 등의 추수식물은 침수식물 등과 비교해서 이식에 의한 뿌리의 활착성이 우수하다. 그 반면 수면의 대부분을 피복 해버리는 것에 주의할 필요가 있다. 또 침수식물은 투명도 향상에 기여하는 동물성플랑크톤의 생식공간으로서 중요한 역할을 하지만 부엽식물인 마름 등이 개방수면을 점거

해 버리거나 물 투명도가 확보되어 있지 않은 곳에서는 빛이 수중 잎에 도달하지 못해 광합성 활성이 저해 받아 정착할 수 없다. 이러한 점에서도 수생 식물의 식재를 실시할 경우 수심의 변화와 하상, 호안구조물의 배치에 대해 고려가 필요하다.

나) 제어의 기본원칙

바이오톱의 창출에 있어서는 생물학적 관점에서 생물도입의 원산종 도입, 장소의 잠재력에 맞는 생물종 선택, 공학적 관점에서 다양한 서식지(niche)를 창출하기 위한 구조, 종합적 관점에서 유지관리

방침의 명확화 등의 원칙이 중요하다. 즉 이러한 요소가 환경을 개선하는데 있어서 기능적으로 도입되어 각각의 환경회복을 목적으로 하는 장소에 적용해 나가는 것이 생태공학에 요구되어 이러한 관점에 선 기술개발이 중요해지고 있다.

본 연구는 농림기술개발과제, '부착조류시스템을 이용한 농촌유역 수질개선기법개발(#200083-3)'에 의해 지원되었음.