

생태공학과 환경친화적 공학기술의 미래



강 호 정

이화여자대학교 환경공학과 교수
hjkang@ewha.ac.kr

서울대 미생물학과 학사
서울대 환경대학원 석사
영국 웨일즈대학교 생물학부 박사
미국 위스콘신대학교 육수학 연구소 연구원
(현) 이화여자대학교 환경공학과 교수

1. 서론

생태학에 대한 일반인들의 생각은 개발이나 공학기술과 양립할 수 없는 것으로 받아들이는 경우가 많다. 즉, 생태학이란 인간의 영향이 미치지 않은 원시림이나 깨끗한 호수와 같은 곳에서 진행되는 학문이고, 대부분의 공학기술은 인구 밀도가 높은 대도시나 공단에서 적용되는 기술로 이해된다. 그러나 인간의 경제 활동의 영향에 직·간접적으로 노출되지 않은 지역은 지구상에서 더 이상 찾아보기 어렵다. 이에 따라 생태학자들도 인간의 간섭을 하나의 고려할 요소로 생각하고 있으며, 도시도 하나의 새로운 생태계로 간주하여 연구하는 경향이 나타나고 있다. 이와 같이 생태학자들이 인간의 간섭에 눈을 돌린다는 사실은 미국의 장기생태연구망(Long-Term Ecological Research Network)의 연구지 중 가장 최근에 새로 편입된 지역이 아리조나 주의 피닉스와 메릴랜드 주의 볼티모어와 같은 인구의 증가가 급격히 일어나고 있는 도시 생태계라는 사실이 잘 말해주고 있다. 더 나아가 파괴된 생태계를 원상태로 회복시키기 위한 ‘복원생태학(Restoration ecology)’이나 인간의 토지 이용도를 중요한 요소로 생각하는 ‘경관생태학(Landscape ecology)’과 같은 학문 분과가 크게 발전하고 있다.

이와 더불어 다른 한편에서는, 경제발전이나 산업활동의 부작용으로 나타나는 현상들을 완화하거나 저감하기 위한 노력이 토목이나 건축 공학과 같은 부분에서도 활발히 나타나고 있다. 즉 도로, 항만, 택지 등의 건설이나 개발에 있어서 생태계의 파괴, 생물종 다양성의 저감 등과 같은 생태적 피해를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 청계천 복원 등을 포함한 자연형 하천 복원이나 생태도로와 같이 생물체에 미치는 영향을 저감하기 위한 연구와 기술들이 속속 개발되고 있다. 이는 단순히 환경단체의 압력에 대한 해결책이라기 보다는, 삶의 질을 중시하는 현대의 대중적 요구와 사회적 수요에 대한 새로운 기술적 개발이라 할 수 있다.

이러한 배경 하에서 생태학적 원리를 공학적인 기술에 적용하여 자연과 인간 모두에게 이로움을 가져다주기 위해 탄생한 학문 분과가 바로 생태공학(Ecological engineering)이다. 이 글에서는 생태공학의 발전과정과 현재 다루고 있는 내용, 그리고 미래의 발전 전망에 대해 간략히 논의하고자 한다.

2. 생태공학의 정의와 발전 배경

생태공학은 영어로는 ‘Ecological engineering’ 혹은 ‘Ecotechnology’라 불리며, 미국 플로리다 대학의 교수

속성	생태공학	생물공학	환경공학
연구 단위	생태계	세포 혹은 분자	공정 단위
기초 관련 학문	생태학	유전학, 분자생물학	화학, 물리, 수학 등
학문의 뿌리	생태학	생물학	위생공학
조절 인자	강제함수, 생물체	유전적 구조	기계나 설비
디자인	약간의 인간도움으로 자기 스스로의 디자인	대부분 인간의 디자인	전적으로 인간의 디자인
생물학적 다양성	보호된다	변화된다	최소화 한다
비용	상당히 저렴	매우 높다	보통 혹은 높다
에너지원	태양 에너지	화석연료	화석연료
단기 효율	보통	보통에서 높음	높음
조절 가능성	낮다	보통	높다

▲ 표 1 생태공학, 생물공학, 환경공학의 비교표 (Mitsch와 Jorgensen, 1989에서 변형)

였던 하워드 오덤(H.T. Odum)에 의해 처음 명명되었다. 그는 자연에서 유래한 에너지를 근본으로 하여 인간이 약간의 보조 에너지를 가하여 환경을 변화시키는 기술을 생태공학이라 정의했으며, 이 원리는 아직도 생태공학의 근본 원칙 중 하나로 자리매김하고 있다. 또한 미국 National Research Council의 정의에 의하면 생태공학이란 생태학적 원리를 이용하여 인간 환경과 자연 모두의 이익을 통합하기 위해 지속가능한 시스템을 디자인하는 기술을 의미한다. 더 나아가 국제 생태공학회(International Ecological Society)에서는 고전적인 생태학, 농업생태학, 복원생태학과 같은 학문 분야를 통합하여 환경 영향의 피해가 적은 수처리, 식량과 에너지 생산, 생태계 복원 등과 같은 분야에 적용할 수 있는 학문이라고 설명하고 있다. 구체적으로는 습지를 이용한 수처리 시스템, 폐기물을 이용한 전기·천연가스·에너지의 생산, 자연생태계의 경제적 가치를 평가하는 기술, 파괴된 폐광이나 하천·호수 등을 자연 상태로 되돌리는 복원 기술, 물리화학적 기술대신 생물학적인 원리를 이용한 오염토양의 정화와 같은 기술들이 널리 연구되고 적용되고 있다. 이러한 측면에서 보면 생태공학은 기존의 생물공학이나 환경공학과 상당히 겹치는 부분들도 있으나 이들 사이에는 몇 가지 큰 차이점이 존재한다. 이를 표로 나타내면 다음과 같다.

앞의 표 1에서와 같이 생태공학은 생태계를 대상으로 진행되는 공학으로 기본적으로는 자연의 에너지 즉 태양에서 유래하는 에너지를 사용하는 생물체를 이용하여 약간의 인간의 활동으로 자연이 스스로 디자인하는

기능을 이용하는 기술이다. 화석연료의 투입이 최소화되므로 비용이 낮은 장점이 있는 반면 기존의 환경공학 기술과는 달리 단기 효율이나 조절성의 측면에서 단점을 가질 수도 있다.

그럼에도 불구하고 생태공학은 환경문제 해결에 새로운 기술로 널리 각광받고 있다. 이렇게 된 배경에는 몇 가지 이유를 들 수 있다. 첫째로 기존의 고비용 고효율 기술의 적용이 어려운 지역에서는 생태공학이 유일한 대안인 경우도 많이 있다. 예를 들어, 제3세계나 인구 밀도가 낮은 농촌이나 화석연료의 공급이 어려운 지역의 경우에는 저비용 태양 에너지에 근거한 생태공학적 기술이 널리 사용된다. 둘째, 비용의 측면보다는 기존의 환경공학이 처리하기 어려운 환경문제들이 새로이 나타나고 있다. 예를 들어, 비점 오염물질의 관리에 있어서는 기존의 처리장 중심의 기술로는 문제 해결이 어렵다. 즉, 저농도로 광범위한 지역에 나타나는 환경문제의 경우에는 자연 생태계의 작동원리를 이용하는 생태공학 기술이 유일한 대안인 경우가 많이 있다.

3. 생태공학의 기본 원리

생태공학의 기저를 이루는 학문은 생태학지만, 기존의 생태학에서 다루어지지 않는 새로운 개념들도 많이 도입되었다. 즉 공학적인 측면에서 시스템을 구성하는 요소들과 그들의 작동원리에 대한 고려에 필요하다. 또 다른 측면에서는 기존의 환경공학과 달리 생태학적 원리들을 차용하여 사용하고 있다. 이러한 생태공학의 기본 원리나 기존의 학문과의 차별성을 정리하여 설명하

면 다음과 같다.

- 1) 생태계의 구조와 기능은 ‘Forcing Function (강제 함수)’에 의해 결정되며 이 강제함수를 적절히 조절함으로써 생태계의 구조와 기능을 우리가 원하는 방향으로 변화시킬 수 있다. 예를 들어, 습지의 경우에는 수위가 핵심적인 강제함수에 해당한다. 즉, 수위를 조절함으로써 습지 내에 존재하는 식물상을 변화시켜 생태계의 구조를 바꿀 수 있으며, 동시에 다양한 물질 순환과 일차생산성을 변화시켜 습지의 기능도 바꿀 수 있게 된다.
- 2) 생태계는 자기 디자인(Self-designing)하는 시스템이다. 인간들은 초기 생물종, 환경에 적절한 종의 도입, 강제 함수의 변형 등을 통해 생태계의 자기 디자인에 참여할 수 있다. 예를 들면, 초기 식재 종을 변화시켜 천이의 경로를 바꿀 수 있으며, 광도나 영양분의 공급을 변화시켜 생태계의 경로를 바꿀 수도 있다.
- 3) 생태계 내에서 물질 순환이 일어나며, 이를 적절히 이용하면 환경오염을 저감시킬 수 있다.
- 4) 생태계의 항상성을 유지하기 위해서는 생물학적 기능과 화학 구성이 적절하게 유지되어야 하며 그렇지 못할 경우 생태계의 균형이 깨질 수 있다. 예를 들어 지나친 무기염류의 유입은 회복 불능상태의 부영양화를 일으킬 수 있다.
- 5) 생태계에서 일어나는 반응은 매우 다양한 시간적 규모를 가지고 있으며 그 범위는 수백배 씩 차이가 날 수도 있다. 예를 들어, 생태계에서 계절적으로 변화하는 특성이 있는 반면, 천이 과정은 수십 년에 걸쳐 일어나는 변화다. 따라서 생태계에 특정한 변화를 일으키려면 대상 변화의 시간적 규모를 정확히 이해하고 있어야 한다.
- 6) 생태계의 구성요소들은 특징적인 공간적 규모를 가지고 있다. 따라서 원하는 결과를 얻기 위해서는 적정 규모에 대한 이해가 필요하다. 예를 들어, 특정 생태계를 복원하기 위해서는 대상 식물종의 최소 규모 이상으로 식재를 해야 원하는 성과를 얻을 수 있다.
- 7) 화학적 생물학적 다양성은 생태계의 완충능력을 증대시킨다. 따라서 생태계를 디자인할 때 가능한

높은 다양성을 갖도록 하는 것이 중요하다.

- 8) 지리적 분포에서 경계 부분에 존재하는 생태계가 가장 취약하다. 따라서 생태관리자는 최적 지리적 위치에서 생태계와 생물군을 다루어야 한다.
- 9) 서로 다른 생태계의 경계의 변이지대를 추이대(Ecotone)라 부르며, 인간 정주지와 자연 사이에는 점차적인 변이지대를 구성하여야 하며, 급격한 경계를 갖는 것은 좋지 못하다.
- 10) 하나의 생태계는 다른 생태계들과 연결되어 있다. 예를 들면 호수 생태계 내의 생물학적 화학적 반응은 주위 유역내의 산림생태계나 농업생태계와 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 하나의 생태계를 다른 것들과 격리되지 않도록 하는 것이 중요하다.
- 11) 맥동성(Pulsing pattern)을 가진 생태계는 종종 높은 생산성을 갖는다. 따라서 어떤 생태계의 맥동성을 이해하고 이용하는 것은 생태계의 생산성 유지에 중요하다.
- 12) 생태계 내에서 모든 것은 다른 모든 것과 연관되어 있다. 다른 요소에 영향을 미치지 않고 생태계의 한 요소만 관리한다는 것은 불가능하다.
- 13) 생태계는 진화의 과정을 통해 되먹임 기작, 복원성, 완충 능력을 갖게 되었다. 따라서 현존하는 생태계가 인간이 만들어낸 새로운 합성물질에 잘 반응하지 않을 가능성이 많다.

4. 생태공학의 적용 예

앞에서는 생태공학의 개념과 예를 들어보았는데, 이번에는 구체적으로 생태공학이 적용되는 예를 들어 보도록 하겠다. 예를 들어, 생태학에서 영양소 순환을 이용한 접근으로는 슬러지나 음식폐기물을 이용한 농업 비료 개발이나 습지에서의 폐기물 처리 기술 등을 들 수 있다. 또 생태계 복원을 위해 폐광의 산성을 처리하거나 파괴된 호수와 하천을 복원하는 기술 등도 연구 개발되고 있다. 또한 생태적 다양성을 증대시키기 위한 기술로 열대우림관리 방안이나 호수의 생물조작(Biomanipulation) 등이 있다. 또 지속가능한 자연자원 관리를 위해 산림실행규칙(Good forest practice), 윤작기술, 다품종 수산 기술 등도 개발 적용되고 있다.

현재 생태공학이 가장 많이 적용되고 있는 분야로 인공습지를 이용하여 비점오염원, 질소나 인의 제거, 다양한 합성물질의 분해 등에 이용하는 기술을 들 수 있다. 즉, 습지 내에 존재하는 식물, 조류, 미생물에 의해 오염물이 흡수되거나 분해되도록 하여 물을 깨끗하게 만드는 기술이다. 특히 습지는 다양한 산화환원 전위가 존재하고 식물에서 유래한 유기탄소의 양이 많아 다양한 미생물이 서식하며 작용할 수 있다. 이와 더불어 유속이 느려지고 식물과 토양의 작용으로 침전이나 흡착이 쉽게 일어날 수 있다. 질소를 예로 들면, 유기질소는 무기화의 과정을 거쳐 호기성 조건에서 암모니아화와 질산화의 반응이 일어날 수 있고, 이 과정으로 생성된 질산염은 탈질(Denitrification) 과정을 통해 대기로 제거됨으로써 수질이 개선될 수 있다. 또 우리나라의 자연형 하천 복원과 같이 파괴된 습지, 연안, 하천 등의 생태계의 구조와 기능을 회복하기 위한 기술에 생태공학이 널리 이용되고 있다. 예를 들면 하변(Riparian)에 식재할 적절한 식물종의 선정, 하안의 토양 침식을 막기 위한 자연재료를 이용한 구조물의 개발, 물고기의 이동을 가능하게 만드는 어도의 개발 등과 같은 기술들이 개발되어 적용되고 있다.

5. 생태공학의 미래

생태공학의 기저를 이루고 있는 생태학은 기존의 공학 기술과 상충되는 성격을 많이 가지고 있다. 즉, 인공 구조물에 근거하는 공학과 달리 다양성, 가변성, 완충성 등을 특징으로 하는 생태계는 단기 효율이 높지 않을 수 있고, 조작성도 떨어질 수 있다. 그럼에도 불구하고 생태친화적인 공학기술의 개발은 거스를 수 없는 사회적 요구이며, 발전 가능성이 많은 학문 분야이다. 또한 자연친화적인 환경기술은 자연 생태계의 복잡성을 이해해야 하기 때문에 새로운 학문 분야로의 발전 가능성을 가지고 있다.

그러나 기존의 생태공학은 인공습지 기술이나 일부 복원 기술 이외에는 대부분 낮은 수준의 기술로 구성되어 있고, 다양한 환경문제 해결에 제한적일 수 있다. 필자는 향후 다음과 같은 분야들이 생태공학에서 다루어야 할 분야라고 생각한다.

첫째, 전지구적 기후변화와 이의 저감 대책의 경우 생태계의 구조와 기능을 이용한 기술의 개발이 필요한 부분이다. 예를 들어, 기존의 온난화 저감 기술은 대부분 고농도로 산업공정에서 발생하는 것을 제거하는데 초점이 맞추어져 있다. 이에 비해 저농도로 광범위한 지역에서 발생하는 온난화 기체의 경우에는 자연생태계를 이용한 기술이 최적의 방법이 될 수 있을 것이다.

둘째, 기존의 환경복원 기술의 경우에는 아직도 조정 중심의 생태계 구조 복원에 집중되어 있다. 그러나 생태계의 완전한 복원을 위해서는 생태계의 기능에 대한 이해와 조절 기술이 절대적으로 필요하며 구조와 기능을 모두 복원해야 생태계가 장기적으로 안정화 될 수 있다. 여기서 생태계의 기능이라 하면 주로 에너지 흐름과 물질 순환을 의미하며 특히 이에 관여하는 미생물에 대한 연구가 매우 낙후되어 있는 상황이다.

셋째, 생태계의 기능을 평가하고 이의 경제적 가치를 정량화하는 기법이 필요하다. 생태경제학이라는 학문 분야가 이미 존재하기는 하지만, 대부분 기존의 환경 경제학의 방법론을 차용한 내용으로 구성되어 있고, 생태계의 고유한 특성을 반영한 경제지표나 기능 지표는 아직도 많은 발전이 필요한 부분이라 생각된다.

결론적으로 환경공학은 발전가능성과 필요성이 매우 높은 학문 분야로 기존의 생태학자나 환경공학자 뿐 아니라 토목학자나 경제학자와 같은 관련 제 분야 연구자들의 많은 관심과 참여가 필요할 것으로 생각된다.

기획 : 박재우 편집위원 jaewoopark@hanyang.ac.kr