

물환경 관리와 식물공학

이 덕 길

금오공과대학교 환경공학과

인류문명과 환경

지구촌의 환경문제 시작은 18세기 중반에 있었던 산업혁명에서 그 뿌리를 찾을 수 있지만 본격적 환경 이슈의 대두는 2차 세계 대전 후 정치·사회가 안정되면서 인구가 급속히 증가하고 경제와 산업이 크게 발달 하면서부터이다. 산업혁명 이전까지 인류는 지구촌 자연생태계의 한 구성원으로서 자연의 규범과 법칙에 순응하여 어렵게 살아오다가 지식의 증가와 과학기술의 발달로 자연의 제약을 극복하면서 오히려 자연환경을 관리하는 수준으로 발전하였다. 지구촌의 육지면적, 특히 사람이 생활하기에 적당한 지역은 제한적인데 그 속에 67억의 사람들이 생활을 영위해 나가고 있다. 20세기 후반에 들어와 인류는 급속한 경제성장과 산업생산을 이루었고 이에 힘입어 사람들의 생활수준이 향상되고 평균수명은 늘어났으며 이에 따라 더 많은 자연자원을 소비하고 더 많은 폐기물과 환경오염물질을 배출하게 되었다. 지구촌의 현재 경제규모는 65조 달러, 1인당 GDP는 평균 10,000달러이며 하루 8천만 배럴의 석유를 소비하면서 막대한 양의 대기·수질 오염물질과 폐기물을 쏟아내면서 곳곳에서 심각한 환경문제를 야기하고 있다.

지구온난화, 오존층 파괴, 생물종 절멸, 해양 오염, 담수자원의 고갈과 오염 등 많은 문제들은 인류의 생존기반(life support system)에 심각한 위협을 가하고 있다. 문제의 근원은 자연생태계의 한 구성원인 homo sapiens라는 생물종이 다른 어떤 생물종보다도 과도하게 번성하여 다른 생물종을 압도하고 생태계의 균형과 질서를 파괴하고 있다는 것이다. 이제 인간의 지혜와 과학기술은 지구촌의 환경을 보호하고 살리는 데에 집중되어야 한다.

인구의 증가와 도시집중, 산업생산의 대규모화가 진전되면서 수자원의 이용량이 늘어나고 오염배출이 증가하면서 특히 도시와 공업지역의 환경 오염문제가 환경관리의 핵심 과제로 등장하였다. 20세기의 환경관리정책은 환경오염물질의 배출규제와 대규모의 처리장에 의한 오염처리가 핵심이었다. 수질오염의 처리는 주로 물리화학적 방법에 의한 오염물질의 분리(screening), 침전, 여과 등의 방법에 의해 오염을 경감하거나, 화학적 작용에 의해 유해성이 적은 다른 물질로 변환시키는 방법이 사용되었고, 미생물에 의한 생물학적 처리가 이용되어 왔다. 환경과학 또는 환경공학이라는 학문영역은 1960년대에 와서야 등장하였고 그 전까지 수자원 관

1)Water Environment Protection and Phytotechnology

2)RHEE, Deok-Gil, Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology;

E-mail: rheedg@hanmail.net

리 또는 토목공학의 분야에서 하수처리를 중심으로 하는 오폐수처리가 이루어지다가 1970년대에 들어와 환경과학 또는 환경공학이 입지를 확보하고 학문적 자리매김을 하였다.

환경 이슈와 생태적 접근 (ecosystem approach)

점증하는 환경문제가 이제 지구촌 전체의 번영과 인류의 생존 자체까지도 위협할 수 있다는 인식 아래 국제사회는 1972년 UN 인간환경회의(UNCHE, Stockholm)를 시작으로 1992년 UN 환경개발회의(UNCED, Rio), 그리고 2002년 지속가능발전 세계정상회의(WSSD, Johannesburg)로 환경보호 논의를 이어갔으며 이제는 환경 이슈가 국제정치 무대의 앞자리를 차지하였고 지속가능한 발전(sustainable development) 이념이 정치·경제·사회의 바탕을 이루고 있다. 환경과 생태계 관리의 지속가능성(sustainability)이 강조되면서 UN은 생물다양성협약 등 220여개의 국제환경협약을 채택하고 세계 모든 나라들이 환경보호에 참여하도록 강제하고 있다. UN은 UNEP로 하여금 물환경정책(Water Policy and Strategy) 및 종합적 수계관리(Integrated Water Resources Management)라는 정책대안 및 건의를 통해 세계 각국이 생태적 접근(ecosystem approach) 방법을 채택할 것을 권고하고 있다. 이는 환경문제가 모든 다른 문제들과 연결되어 있고, 특히 환경문제의 해결에 있어서는 단순한 한 개의 사안을 독립적으로 다루기보다는 생태적 차원에서 연관된 모든 요소를 고려하여 종합적이고 체계적 대안을 선택하라는 것이다. 이에 따라 국제사회는 물환경을 보전함에 있어 재래의 오염물질 처리공학 위주에서 자연계의 정화능력을 제고하는 생태학적 접근(ecological approach)에 의한 수질개선으로

정책방향을 전환하고 있다. 이러한 정책전환의 배경은 다음과 같이 설명할 수 있다.

물환경은 인간환경과 생활을 지탱하는 중심이며 물 생태계를 구성하는 호수와 하천, 습지 등은 인간의 생존과 환경의 생태적 기능유지에 매우 중요하다. 자연생태계는 담수자원을 정화하여 공급하고 해양환경을 유지시키는 복잡하고도 정교한 기능을 수행한다. 비록 현대 과학기술이 공학적 설계를 통해 이러한 생태적 기능을 증진하고 재현하고 있지만, 자연수계의 보전은 물환경 본래의 생태적 기능을 무시하고는 존립할 수 없다. 따라서 하천과 호소의 물환경문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 국지적, 지역적 접근보다는 인근지역 전체의 여러 환경요소를 고려하고 생태계의 기능을 살려 그 안에서 수질오염문제도 다루는 새로운 접근방법의 도입이 필요하다. 인간이 추구하는 웰빙에 필요한 서비스의 필수적 요소는 생태계가 제공하므로 생태계의 기능 증진이 곧 환경질의 개선이고 인간의 웰빙을 향상하는 방안이 된다.

생태계와 환경관리

지구촌은 매우 복잡하고 상호의존적 요소로 구성되어 있으며 또한 취약하기 이를 데 없다. 지구촌 한 곳에서 일어난 환경 스트레스는 지구촌 다른 곳 또는 지구 전체에 어떤 형태로든지 영향을 미친다. 범지구적 변화는 동적인 과정이며 생태적 관점과 조망으로만 이해될 수 있다. 1994년 발간된 부룬트란드 보고서(Brundtland Report)는 '지구생태계의 각 요소간 상호작용이 복잡하고도 상호 연관되어 있으며 개발의 시스템적 영향을 고려하여야 한다.'고 하였다. 생태적 과정은 이러한 자연적, 사회적, 기술적 작용의 중심에 해당한다. 인간은 과학기술의 발달을 통해 삶의 질을 향상시키는 데 성공하였지

만, 다른 한편으로 과학기술 발전의 부산물로 예기치 못한 위협에 부딪쳐 있으며 그 결과 자연생태계의 핵심 기능인 복원성·항상성과 생물종 다양성이 심각하게 손상받고 있다. 동식물 종의 감소는 우리와 우리 후대의 번영과 발전 잠재력을 제약한다.

환경친화기술(Environmentally Sound Technologies; ESTs)

과학기술은 인류의 문화적 가치를 반영하는 것이며 역사적으로 인간의 인식을 바꾸어 왔다. 우리는 과학기술로 인해 만들어진 문제들을 다른 과학기술적 방법으로 해결하려 한다.

대부분의 기술은 그 유래나 내용에 무관하게 비슷한 발전 과정을 밟는다. 첫 단계는 필요의 대두이고 이어서 대안의 선택, 그 다음은 입지와 기술의 선택, 디자인, 적정한 법적 허가 획득, 시공과 운영관리 등이 뒤따른다. 이어서 사후 모니터링과 평가, 필요시 보완과 수리작업이 이루어지며 마지막 단계는 대체, 재사용 또는 폐기이다. 합리적 환경관리란 자연계의 항상성과 재생능력의 손상 없이 인간의 욕구를 충족하도록 최적으로 자원을 이용하는 것이다. 이는 바람직한 개발전략과 대안의 선택, 그리고 관련 기술의 선택과 적용을 요구한다.

환경친화기술(ESTs)은 다른 기술에 비해 환경상 성과를 이룰 수 있는 기술을 의미한다. 우수한 환경친화기술은 환경을 보호하며, 덜 오염시키고, 자원을 지속가능한 방식으로 사용하며 폐기물을 자원화하여 순환시킨다. 환경친화기술은 개별 기술뿐만 아니라 환경지속성을 증진시키는 총체적 시스템으로서 방법, 절차, 상품과 서비스, 장비, 조직과 관리절차 등을 포괄하는 개념으로 이해되어야 한다.

환경친화적 기술은 특정 인구집단, 특정지

역의 생태계, 지역의 사회 인프라, 시간적·공간적 요소 등에 따라 그 정의와 개념이 달라질 수 있다. 한 나라에서 환경친화기술이 다른 나라에서는 지역 필요에 맞도록 재설계되지 않으면 환경친화기술이 아니될 수도 있다. 자연환경 부문에서의 환경친화기술이 바로 생태공학(ecological engineering)과 생태기술(echotechnology)이다.

생태공학(Ecological Engineering and Ecolotechnologies)

환경문제는 근본적으로 부적절한 결정과 이러한 결정이 환경에 미치는 영향에 대한 이해의 부족에서 발생한다. 경제사회적, 환경적 편익이 증진되기 위해서는 기술개발과 공학적 현실성이 종합적으로 구실하는 새로운 접근 방식이 필요하다.

생태공학은 공학과 생태학을 접목한 것이며 환경을 보전·개선하고 복원하는 역할을 한다. 생태적으로 건전한 공학기술은 자연계가 체계적이고 계속적, 집적적으로 반응하는 것을 수용하는 기술이며 자연계에 반하거나 충돌하지 않고 현장에서 이용될 수 있다. 이러한 점에서 생태계의 역동성과 취약성에 대한 이해와 충분한 노하우 획득이 중요하다.

생태공학과 생태기술은 자연과 생태계의 자기조절능력에 의존한다. 자연계는 변화가 발생하면 이에 적응하여 먹이연쇄망을 재구성하며, 개별 생물종이 선택적으로 역할하여 새로운 질서가 자리매김 한다. 이러한 생물종·생물군집·생태계의 이용은 생태공학/생태기술이 생태학적 고려가 없는 재래의 공학 기술적 방법과 어떻게 다른지를 극명하게 보여준다.

생태공학은 인간의 필요를 가장 잘 충족시키는 생태계 시스템을 찾아내어 그 기능을 이용하는 것이다. 그러므로 생태공학/생태기술의 이용은 부분적이 아닌 전체적 생

태계에 대한 이해가 바탕이 되어야 한다. 생태공학/생태기술 이용의 사례는 다음과 같다.

- 생태계를 이용한 오염문제 해결 : 습지의 폐수처리, 슬러지 처리 등
- 수자원 문제 해결을 위한 생태계 조성 : 인공생태계 설치 등
- 생태계의 복원 : 호소·하천 복원, 유해 폐기물처리장 오염제거
- 환경문제 해결을 위한 기존 생태계의 개조 : 부영양화의 생물학적 통제
- 주민 편익을 위한 생태계의 이용 : 지속 가능한 농경, 생물자원 수확 등

식물공학(Phytotechnology)

식물공학은 식물을 이용하여 환경분야 등의 문제를 해결하는 공학이다. 식물공학이라는 용어가 현재까지 널리 사용되고 있지는 않지만 자연계에서의 식물의 중요성과 유익한 이용에 대한 이해가 넓어져 가고 있다. 식물공학은 환경 문제를 다룸에 있어서 식물을 하나의 '살아있는 기술'로 이용한다.

식물공학은 생태공학의 원리를 이용하는 것이며 생태기술(ecotechnology)이라고도 한다. 생명공학(biotechnology)은 생명과학과 공학을 접목하여 특정한 능력을 가진 생물체를 만들기 위해 유전자 조작을 행하는 등 생태공학과는 차이가 있다.

식물공학의 응용사례는 의학, 농업, 임학 등에서 이미 잘 알려져 있으며 환경분야에도 적지 않다. 식물공학의 환경분야 이용은 인간활동의 영향을 저감하기 위한 자연생태계의 능력 증진, 환경훼손 최소화를 위한 오염배출 억제 및 환경작용 통제, 훼손된 생태계의 회복과 치유, 생태계의 건강성 지표 등이 있다.

자연생태계가 외부로부터의 영향을 흡수하여 무력화하는 능력을 증진하는데 식물공학

을 이용한다. 생태공학을 이용하여 환경적으로 유해한 물질의 생산과 환경배출을 방지 또는 저지한다. 생태계의 회복과 치유는 인위적 또는 자연적으로 발생한 환경영향을 생태 공학적 방법으로 완화하고 생태적 기능을 회복시키는 것이다.

식물공학의 환경분야 이용

식물공학의 환경보전에의 응용에는 생태계가 외부 영향을 흡수하는 능력을 증진하는 것, 오염의 치유·감소·예방, 그리고 생태계의 건전성 평가 측정 등이 있다. 이러한 응용은 생태계의 기능을 증진시키고 나아가 경제적 의미로는 자연적 자산가치를 높이는 바, 예를 들면 식물공학을 현장 적용하여 오염물질을 분해하거나 무해화하며, 식물공학의 유용성을 증대시키는 것이다. 이러한 생태공학의 물환경 보호에의 응용에는 다음과 같은 것들이 있다.

생태적 전이대(Ecotone)

생태적 전이대(ecotone)는 두개의 인접한 생태적 군집 간에 존재하는 천이 지대이며 예를 들면 수생생태계와 육상생태계의 중간 지역이 이에 해당된다. 전이대는 생태계를 인위적 영향으로부터 보호하는데 매우 중요하다. 기본적으로 전이대는 호소 또는 하천에 바람직하지 않은 오염물질이 유입되는 것을 저지하는 역할을 한다. 비점오염원으로부터 오염물질이 하천으로 흘러들어오는 경우 전이지대는 대부분의 오염물질을 흡수하거나 무해화한다. 전이대는 오염물질에 대한 완충지대 역할을 할 뿐만 아니라 인접 생태계에 존재하는 생물종의 서식처 역할도 한다.

지난 수십 년간 여러 나라에서 하천 연변에 콘크리트 제방을 쌓아 하천과 육지 사이의 전이대를 파괴하였으며 이에 따라 하천

의 자정능력이 저하되었다. 식물공학을 이용하여 생태적 전이대를 복원함으로써 자연식생이 조성되고 수질개선을 달성할 수 있다.

자연습지(Natural Wetlands)

자연습지는 수생생태계의 생물다양성 유지에서 매우 중요한 역할을 담당한다. 자연습지에는 외변습지(하구 기수지역 등), 강변습지, 저지습지, 습지대(습원) 등 위치하는 지역과 생태학적, 수문학적 특성에 따라 여러 가지 습지로 분류된다.

습지는 주거지역 또는 농경지로부터 나오는 오염물질을 순환시키고 흡수하여 수질을 개선한다. 습지의 탈질화 능력은 매우 커서 연간 1ha의 습지에서 2~3톤의 질산-질소 탈질화가 가능하다고 평가되고 있다.

인공습지(Constructed Wetlands)

습지가 부유물질 또는 용존물질을 걸러 내거나 흡수하고 물질대사를 하여 수질을 개선하는 효과가 알려지면서 많은 나라에서 인공습지를 설치하여 파괴된 습지를 복원하고 있다. 오폐수나 농업배수를 처리하는데 우수한 인공습지 조성기술이 개발되고 있다.

인공습지 조성은 다양한 오폐수의 처리와 비점오염원으로부터의 오염처리에 효과적이다. 인공습지는 오폐수가 1차적으로 퇴적층과 식생지대를 통과하여 흐르게 하여 오염물질이 식물의 뿌리에 흡착되거나 투과도가 낮은 토양층에서 걸러지게 하는 것이다. 대형 수생식물과 퇴적층의 미생물 활동으로 상당량의 오염물을 처리하게 된다.

인공습지에 이용되는 대형 수생식물에는 부들, 애기부들, 갈대, 골풀, 파피루스, 사초 등이 있고 수심이 깊은 곳에서는 붕어마름, 셀러리, 톱풀 등이 효과적이다. 인공습지가 식물이 자라고 기능을 발휘하려면 2~4년이 소요되는 점도 고려해야 한다.

수초재배섬(Floating Macrophytes)

대형 수생식물을 수면에 부유하게 하여 수질을 개선하는 것 또한 식물공학 응용한 예이다. 부들, 갈대, 창포, 개구리밥과 히야신스 등 수생식물을 이용하여 소량의 하수를 처리할 수 있으며 하수처리장과 멀리 떨어져 하수관거 연결이 어려운 지역에서 수초재배섬을 이용하여 유기물 분해와 탈질(denitrification)을 하는 것이 물환경 보전에 효과적이다.

폐수 안정조와 습지의 결합

인공습지와 오폐수 안정조를 연결하여 가동하면 매우 효과적인 오폐수처리 방법으로 이용될 수 있다. 습지가 부유물질을 상당한 정도 걸러내고 pH 완충작용을 하여 오폐수 안정조의 가동에 도움을 준다.

식물을 이용한 오염 치유(Phytoremediation)

식물치유는 토양, 지하수 또는 지표수의 오염을 식물을 이용하여 정화하는 것을 말한다. 식물치유 방법을 이용하여 오염도가 낮은 유해화학물질의 하천 배출을 경감하고 수질오염을 개선할 수 있다. 식물치유에는 식물농축(phytoconcentration) 또는 식물추출(phytoextraction) 방법으로 오염물질이 식물의 줄기, 뿌리 또는 잎에 농축되게 하는 것, 식물의 효소가 오염물질 분자의 분해에서 촉매 역할을 하는 식물분해, 식물뿌리의 생분해(rhizosphere biodegradation) 등이 있다.

식물공학적 수질관리의 실제

외국의 사례

식물공학적 수질관리의 사례는 선진국과 개발도상국의 구분없이 대단히 많다. 인공습지, 인공수초섬 등 시설은 중국, 태국, 필리핀 등 저개발국에서 많이 사용하는 수질

보호 방법이며 일본에서도 카스미가우라호, 비와호(琵琶湖) 등에서 호소수질개선에 식물공학적 기술을 광범위하게 사용하고 있다. 미국에서는 같은 규모의 대체 습지를 조성하지 않으면 자연습지의 훼손을 법으로 금지하고 있다.

우리나라의 식물공학적 수질관리

우리나라의 1990년대 상반기까지는 주로 대형 수질오염사고의 후속조치 중심의 수질보전대책이 수립되어 추진되었다. 유역관리 개념에 입각하여 과학적 분석에 의한 수질관리대책을 수립한 것은 1998년부터 시작된 한강을 필두로 한 4대강 물관리 종합대책이었다. 이 대책에서 생태적 개념이 도입되어 수변구역의 지정과 토지매수, 수초대와 인공식물섬의 조성, 인공습지 조성 등과 자연형 하천정비사업이 본격 시작되었다.

2005년 정부는 물환경관리 장기기본계획을 수립하고 수질관리라는 좁은 의미에서 벗어나 물과 물길, 그리고 수생태계를 포괄하는 물환경이라는 보다 포괄적이고 종합적인 개념으로 확대하여 새로운 물환경정책을 추진하게 되었다. 즉, 오염물질 처리 위주의 수질관리에서 생태적으로 건강한 물환경을 조성하기 위해 수용체 중심의 수질관리 패러다임으로 전환하였고, 수생태계의 건강성을 복원한다는 목표 아래 하천과 호소의 수변생태벨트(riverine eco-belt) 조성, 위해성 평가에서 생물학적 지표 도입, 하천의 생태 특성별 관리모델 개발·시행 등이 추진되었다.

2005년 '수질환경보전법'을 '수질 및 수생태계 보전에 관한 법률'로 개정하고 수질오염물질 총량관리, 공공수역의 수질 및 수생태계 보전, 수변생태구역 조성, 수계영향권별 수질 및 수생태계 보전 등 생태적 개념에 입각한 물환경관리를 제도화하였다. 또한 환경정책기본법을 개정하여 '수질환경기준'

을 '수질 및 수생태 환경기준'으로 바꾸어 생태적 건전성을 환경기준의 척도로 삼입하고 물 등급별 생물지표종을 도입하였다.

현재 4대강에 수변구역 1,130 km²를 지정되었고 수생태벨트 조성, 완충저류 시설 설치 등 사업이 추진되고 있으며 생태하천 복원사업에 5,390억원이 투자된 바 있다. 장기적으로 수생태 복원에 2015년까지 4조5천억원을 투자 하는 계획을 추진하고 있다.

향후 과제 및 전망

식물공학의 환경보전, 특히 수질보전에의 적용은 그 효율성, 경제성, 용이성 등의 장점 때문에 그 이용 범위를 넓혀가고 있는 것이 추세이다. 그러나 식물공학의 현장 적용에 따른 제약과 고려해야 할 사항 또한 적지 않다.

인공습지, 수초섬 등 시설은 그 시설입지가 적당한 곳이 많지 않으며 지역 생태계, 수리·수문, 설치공간 등 여러 가지 특수 요건에 합당해야 설치가 가능하다. 또한 식물의 선정, 유지관리 등에는 전문 인력과 경험을 필요로 한다. 이러한 시설의 설치는 오폐수처리장에 비해 비용이 덜 들기는 하지만 그 처리효율이 하수처리장에 훨씬 못 미친다. 그럼에도 이러한 식물공학 시설의 설치와 가동을 권장하는 것은 물환경의 보전에서 자연계의 생태적 기능을 살려 수질을 개선한다는 점과 하수처리장의 설치가 어려운 농어촌지역 등지에 쉽게 설치하여 가동할 수 있다는 점 등 여러 가지 이점이 있기 때문이다.

물환경관리에서 생태적 접근방법의 채택은 당연한 귀결이며 환경보전 정책의 효율성과 합리성을 제고하기 위해 앞으로 계속 발전시켜 나가야 할 과제이다.

참고문헌

- 물환경관리 기본계획(2006~2015), 2006. 환경부
환경백서, 2005/2007. 환경부.
환경생태공학, 2002. 유재근 등, 그루.
국가환경종합계획(2006~2015), 2005. 환경부.
Millennium Ecosystem Assessment, 2005. World
Resources Institute.
- Global Environment Outlook, 2007. UNEP.
UNEP Annual Report, 2007. UNEP.
Water Policy and Strategy of UNEP, 2002. UNEP.
Phytotechnologies, 2005. UNEP/IETC.
Dams and Development, 2007. UNEP.
Water Quality for Ecosystem and Human Health,
2006. UNEP.