



독일 베를린의 도시하천 복원성공사례

연합모토

1 환경복원기술

‘인공 미생물’로 재난 지역 ‘자연화’

- 환경 복원 주관할 핵심 유전체 찾아 배양

글_상병인 KIST 수질환경및복원연구센터 biosang@kist.re.kr

1976년 미국의 러브운하 지역에서는 가로수와 정원의 꽃들이 원인을 알 수 없이 죽어갔으며 많은 사람들이 통증, 만성 천식과 신장 및 간 질환 등에 시달리는 사건이 일어났다. 러브운하 지역은 1892년에 윌리엄 러브(William T. Love)가 이곳에 10km에 달하는 운하를 건설하다 중단하여 공사중이던 곳을 매립하였던 지역이다. 이 운하 건설은 1910년 운하가 1.6 km 정도 만들어질 무렵 운하의 경제성이 없어지게 되면서 중단되었다.

그 후 30년 간 러브운하는 방치되어 있었는데 1940년대에 후크 화학회사가 이 지역을 사들여 공장에서 버리는 화학물질을 200ℓ 들이 철제 드럼통에 넣어 이 운하에 매립하였다. 매립

한 폐기물은 액체, 고체 및 각종 용매로서 염소 400톤, 클로로벤젠 200톤, 트라이클로로페놀 200톤, 헥사클로로사이클로산 6천900톤, 도데실 머캡탄 2천400톤 등이었다.

폐기물로 운하 매립, ‘죽음의 땅’ 만들어

후크 화학회사는 1942년에서 1950년 사이에 2만여 톤의 유독성 화학물질을 러브운하에 매립한 후 1953년 러브운하를 포함한 주변 땅을 나이에가라 시교육위원회에 기증하였다. 유독성 화학물질로 오염된 지역인 것을 알지 못한 교육위원회는 몇 년 후 그 곳에 초등학교를 세웠고 일부는 주택지로 사용하였다. 1970년대 초부터 건물 지하실에서 기암 이상한 물질이 스며

나오고, 하수구가 검은 액체에 부식하는 일이 있었으나 시에서는 대수롭지 않게 여겼다. 그러나 이 지역에 사는 주민들은 계속하여 피부병과 두통으로 고생하였으며 다른 지역에 비해 유산율이 높았다. 그런데 1976년 큰 홍수가 휩쓸고 간 뒤 가로수와 정원의 꽃이 죽어갔으며 사람들이 수영하던 연못에서 유해한 화학물질이 나오고 곳곳의 땅에서는 유독 물질이 스며 나왔다. 그리고 많은 사람들이 통증으로 시달리고, 만성 천식과 신장 및 간 질환 등에 시달리게 되었다.

뉴욕주 보건당국이 이 지역에 대한 역학조사를 실시한 결과 이 지역 주민들의 유산율이 다른 지역에 비해 4배나 높다는 것이 밝혀졌다. 또한 1973~78년 사이에 출생한 16명의 어린이 중 9명이 정신박약, 심장 및 신장 질환 등으로 고통받는 심한 선천적 기형아라는 것이었다. 이에 따라 미국 연방환경청은 1978년 8월 미국 역사상 처음으로 이 지역을 환경재난지역으로 선포하고, 거주하던 238가구는 이 지역을 즉시 떠날 것을 명령했다. 그리고 문제의 초등학교는 폐쇄되었다.

1980년 5월 카터 행정부는 주변 800가구를 환경재난지역에 추가하였다. 그 후 미국 정부는 이 지역을 정화하기 위해 1억 달러 이상을 소모하였으나 지금까지도 사람이 살지 못하는 유령도시로 남아 있다.

러브운하사건을 계기로 하여 미국전역에서는 토양오염에 의한 환경파괴와 인체에 미치는 위해성에 대해 경각심을 갖게 되었고, 한번 오염된 토양과 지하수를 복원하는데 오랜 시간과 비용이 필요함을 알게 되었다. 그래서 미국 정부는 대규모의 연구자금을 들여 토양 및 지하수 오염을 이전 상태로 정화하여 복원시키는데 필요한 복원기술과 오염도 평가기술을 개발하기 위해 '슈퍼펀드(superfund) 프로젝트'를 시작하게 되었다. 이러한 일련의 사건과 연구를 통하여 토양, 지하수 오염에 대한 많은 연구가 진행되었고, 오염에 대한 상당한 수준의 이해를 할 수 있게 되었다.

의왕시 H화학 부지도 토양오염 심각

국내의 경우, 1997년 정부 용역의 일환으로 (사)한국토양환경학회 (현, 지하수토양학회)가 실시한 오염현황조사에서 경기도 의왕시 소재 H화학 공장지역이 오염시설로 지적되었다. 1998년 정확한 오염상태를 파악하기 위해 정밀조사를 실시한 결과 H화학 공장 부지내의 유류저장탱크에서 새어 나온 기름



서울 난지도 평화의 공원 전경

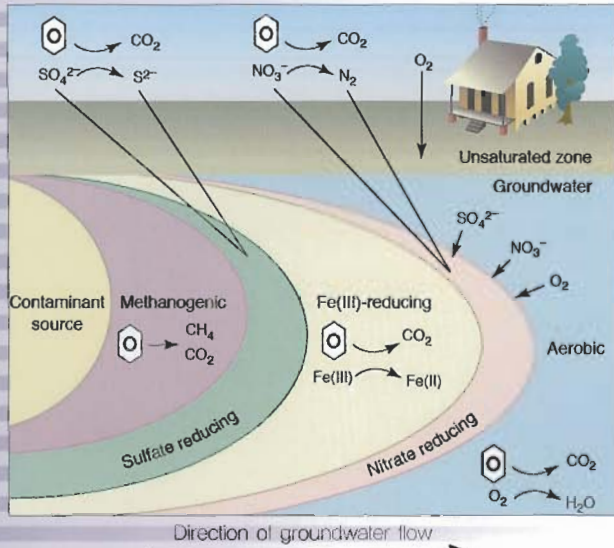
이 지하로 500m 이상 번져나가 주변 1만3천여 평의 토양이 오염된 것으로 조사되었다.

오염의 주성분은 고농도의 톨루엔과 등유로 유류성분이고, 특히 저장탱크에서 200여m나 떨어진 인근 C보직의 주차장 지하 4.5m 지점에서 채취한 토양시료에서는 환경부가 정한 오염기준치(80ppm)의 약 22.5배에 달하는 1천809ppm의 용제계통(BTX) 유류 성분들이 검출됐다. 확히는 보고서 결론에서 정확한 실태조사에만 10억 원이 소요되고 오염된 부지를 완전 복원하는데는 1천300억 원의 비용이 들 것이라고 보고했다.

국내에는 1만여 주유소를 포함해 총 1만8천여 곳의 기름저장시설이 운영되고 있으며, 토양환경학회는 이송 한 군데를 임의로 선정해 조사한 것이어서 전국의 기름저장시설 주변 토양에 대한 보다 정밀하고 정확한 조사가 시급한 것으로 지적되었다. 이러한 사항은 국회에서까지 논의되는 사회분쟁화해 이후 토양환경보전법의 보다 강력한 제도적 보완 장치를 갖추는 계기가 되었다.

위에서 살펴 본바와 같이 토양, 지하수오염에 의한 환경파괴는 국내·외적으로 시급히 예방되고 해결해야 할 문제이다. 이러한 토양, 지하수오염을 해결하는데 미생물을 이용한 복원기술이 가장 경제적이고 효과적인 것으로 인식되어 있다. 미생물은 오염물질을 산화, 흡착, 고정화, 휘발화, 또는 무해물질로의 전환 등을 통해서 환경복원에 기여를 한다.

그러나, 미생물을 이용한 환경복원기술이 실제 오염부지를



오염물질로 오염된 지하수내에서의 미생물 분해과정

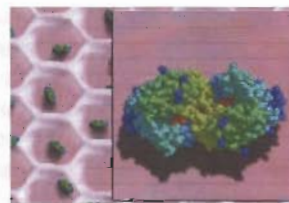
복원하는데 많이 사용되어 오고 있음에도 많은 연구자들은 토양과 지하수에서 미생물이 하는 역할과 기능에 대해 많은 부분을 정확하게 이해하고 있지 못한 실정이다.

땅속 미생물의 역할·기능 연구 활발

어떤 한 오염부지에서 성공적으로 작용을 하였던 미생물 복원기술이 다른 장소에서는 전혀 기능을 하지 못하거나, 실험실 차원의 실험에서는 획기적인 복원성능을 보였던 기술도 실제 현장에서는 실험실에서 보였던 수준에 크게 미달하는 성능을 보이는 등의 이유로 조절가능한 복원기술이라고 단정하기에는 우리가 알고 있는 미생물에 대한 이해가 많이 부족한 실정이다. 미생물을 이용한 환경복원기술은 오염환경에 미생물이 존재한다는 것과 이러한 미생물 중에 오염물질을 분해할 수 있는 미생물이 존재한다는 것, 그리고 이들 미생물이 환경조건이 변함에 따라 적절히 순응하면서 오염물질을 지속적으로 분해한다는 가정하에서 출발한 기술이다. 그 동안 자연환경 중의 미생물 기동이나 기능에 대한 지식이 충분하지 않았고 이를 분석할 수 있는 적절한 방법이 없었다.

그러나 최근 미생물의 유전자 정보를 이용하는 기술이 환경 분야에도 도입이 되어 오염환경에서 미생물이 존재하는지 또는 존재하는 미생물이 오염물질을 분해할 수 있는 대사능력을 보유하고 있는지를 조금이나마 알 수 있게 되었다.

모든 미생물에 존재하면서 유전학적 정보를 담고 있는 미생물의 16S rRNA 유전체가 미생물 생태학(microbial ecology) 분야에서 폭넓게 연구되면서 환경내에 존재하는 미생물군의 분포 현황과 미생물의 분해능력을 비교적 정확하게 알 수 있게 되었다. 실제로 환경복원이 진행되면서 어떠한 미생물이 오염물질을 분해하는지를 알 수 있게 되었고, 그러한 미생물이 어떠한 환경조건에 영향을 받는지도 알 수 있게 되었다. 또한 전체 지구상에 존재하는 미생물 중 실제로 우리가 실험실에서 인공적으로 배양할 수 있는 미생물의 종류가 1% 미만이어서 환경복원에 중요한 역할을 하지만 실험실에서 배양할 수가 없어 그 미생물의 특성을 알아 낼 수가 없었던 것을 16S rRNA 유전체를 이용하여 실험실에서 하는 별도의 배양없이도 환경복원에 관여하는 주요 미생물의 물리화학적 특성 및 유전학적 특성을 알 수 있게 되었다.



오염물질 분해 미생물 효소의 활성을 유지시켜 주기 위한 나노크기의 격자에 고정시킨 효소

미생물의 유전정보 분석기술 개발에 성공

환경복원에 관여하는 핵심적인 유전체(key genes)가 오염부지에 존재하는 미생물내에서 발현이나 존재하는가에 대한 이해는 16S rRNA 서열의 분석보다 미생물의 복원에 기여하는 역할에 대해 더 많은 정보를 우리에게 준다. 그러나 그러한 핵심적인 유전체는 발현이 될 때도 있고 그렇지 않을 경우도 있어 핵심 유전체의 mRNA 정도를 정량화하는 기술이 필요하다.

하나의 세포내에서 핵심 복원 유전체(key bioremediation genes)에 대한 mRNA를 분석하는 기술이 현재 개발되어 있다. 이러한 기술이 미생물의 유전체 정보를 알려주는 16S rRNA 분석기술과 연계된다면 우리가 관심을 두고 있는 오염물질을 해당 오염부지내에 존재하는 어떠한 종류의 미생물이 어떠한 효소를 분비하여 분해할 것인지를 알 수 있게 된다. 그러므로 특정 유전체에 대한 mRNA 분석을 통해 환경복원의 정도와 속도를 예측할 수 있을 것으로 기대가 된다.

환경복원에 유전체학(genomics)이 적용된다면 혁신적인 발전이 있을 것으로 기대가 된다. 현재 환경복원에 관여하는 대표적인 미생물의 지놈 서열(genome sequence)이 완전히 또는 약간 불완전하지만 분석이 완료되어 있고, 지속적으로 다양한 미생물에 대한 지놈 서열분석이 진행되고 있다. 특히, '총

지놈서열(whole-genome sequencing)은 이전에 전혀 알려지지 않았던 새로운 미생물이 환경복원의 속도를 획기적으로 개선하는데 많은 정보를 줄 수 있을 것으로 기대가 된다.

환경복원에 관여하는 효소의 생산을 크게 향상시킬 수 있도록 단백질체학(proteomics)에 이용가능한 수준의 지놈 정보를 얻게 된다면 다양한 미생물로부터 지금까지는 분해할 수 없는 물질로 알려졌던 다양한 화학물질을 다양한 미생물을 이용하여 분해할 수 있는 효소를 생산할 수 있도록 조절이 가능하고 이를 통해 환경복원기술의 수준이 현재와 다르게 조절가능한 기술이 될 수 있을 것으로 기대가 된다.

이러한 지놈 수준의 정보는 미생물의 유전학적 기능에 대한 우리의 이해를 증대시켜 단일 미생물 세포내에서 동시에 일어나는 수천개의 대사과정을 미리 예측할 수 있는 수학적 모델식을 만들 수 있게 해줄 것이다. 실제로 이러한 시도가 현재 진행 중이며 세포의 대사과정을 컴퓨터상에서 모의로 구성하고 예측하려는 '인 실리코 모델(in silico models)'이 발표되고 있다.

미생물 대사과정 시뮬레이션, 선택적 복원 가능

현재까지는 대장균이나 몇 개의 병원성 균에 한하여 이러한 '인 실리코 모델'이 개발되었지만, 환경복원에 관여하는 미생물의 대사과정을 모의할 수 있는 모델 개발이 가능할 것으로 예상된다. 이러한 모델식은 환경복원에 속도를 결정하는 요소가 무엇인지에 대한 해답을 줄 수 있을 것이며 미생물을 이용한 환경복원기술을 조절이 가능하고 경제적이며 더욱 효과적인 기술로 만들 것이다.

미생물을 이용한 환경복원의 미래기술 중의 하나는 오염물질을 분해하는 전혀 새로운 기능의 미생물을 설계하여 인공적으로 미생물을 만들어 내는 인공세포 기술이다. 환경시료 중에서 미생물균의 지놈 DNA를 추출하여 임의로 일정한 크기로 절단한 후에 배양가능한 세포에 융합시켜 기존 미생물이 보유하고 있지 않았던 새로운 기능을 나타나게 하는 미지의 미생물이 보유하고 있는 지놈서열(genomic sequence)을 찾아내는 기술이다. 이러한 미지의 미생물 지놈 정보는 앞서 언급한 유전체학(genomics), 단백질학, 인 실리코 바이올로지(in silico biology)와 융합이 되어 환경복원에 필요한 기능만을 지닌 인공세포를 설계할 수 있으며, 실제로 그러한 인공세포를 만들어 오염부지를 복원하는데 사용할 수 있을 것으로 기대가 된다.



난지도 발생가스 포집·재활용 시설 난지도매립지에서 발생하는 가스를 모아 상암동월드컵 경기장과 인근 아파트 단지에서 에너지원으로 활용할 수 있는 포집·재활용 시설 테이프커팅

환경복원에 대한 미생물 지놈을 이용하려는 연구는 현재 초기단계에 있다. 그러나 환경복원을 위해 미생물의 거동과 역할에 대한 정확하고 자세한 이해는 미생물을 이용한 복원기술의 개발 진전을 위해서는 매우 필요하다. 순수 미생물 연구분야에서 진행되고 있는 유전체학, 단백질학, 그리고 '인 실리코 바이올로지'에 대한 연구가 지속적으로 환경분야 연구와 융합되어 새로운 연구영역을 만들어 나가려는 노력이 경주되어야 할 것으로 생각된다. ㉔



글쓴이는 한양대학교 화공과를 졸업 후, 서울대학교 화공과에서 석사 학위를, 도쿄대에서 생물공학 박사 학위를 받았고, 한화에너지(주) 기술연구소를 거쳤다.