

생물학적 복구법(Bioremediation)의 원리와 응용

정재춘 · 박창희* · 이성택**

연세대학교 환경과학과

*경기도 환경국

**한국과학기술원 생물과학과

The Principle and Application of Bioremediation

Jae-Chun Chung, Chang-Hee Bark*, Sung-Taik Lee**

Dept. of Env. Sci., Yonsei University

**Environmental Division, Kyonggi Provincial Office*

***Dept of Biol. Sci., KIST*

ABSTRACT

The efficiency of bioremediation can be measured by the enumeration of microorganism, respiration rate and decomposition rate. The side-effect can be measured by using Daphnia, oyster larvae and rainbow trout. Oxygen transfer could be a problem in the on-site treatment. For these, hydrogen peroxide can be used for solvents such as benzenes. Oleophilic nitrogen and phosphorus can be added for the treatment of oil pollution. Mixed microbial population or pure culture can be used for the inoculum. The pure culture used is Pseudomonas and Phanerochate. Sometimes enzymes are added and photodegradation is coupled to increase the efficiency. For the treatment of oil pollution residue on soil such as waste lubrication oil and machine oil sludges, top soil of 15cm~20cm depth is plowed and oil residue with approximately 5% concentration is applied. The optimum pH range is 7~8, the ratio of phosphorus to hydrocarbon is 1:800. Appropriate drainage is necessary. For the treatment of marine oil pollution residue, addition of oleophilic fertilizer is effective. Air pollutant such as odor can be treated by bioremediation. In this case, biofilters or bioscrubbers are used for the reactor.

Key word : Bioremediation, Inoculum, oil pollution, Air pollutant

요약문

생물학적 복구법의 효율은 미생물 균수의 계수, 호흡율, 분해율 등으로 측정할 수 있으며 부작용 시험은 *Daphnia*, 굴의 유충, 무지개 송어 를 사용하여 측정된다. On-Site 처리에 있어서는 산소 전달이 문제가 되는데 이에선 과산화 수소가 사용될수 있으며(벤젠계통의 용매), 유류오염 방제시에는 친유화 적 질소 및 인을 첨가할 수 있다. 접종균주는 혼합균주 또는 순수 균주가 사용되는데 후자에는 *Pseudomonas*와 *Phanerochaete* 등이 있다. 때로는 효율을 높이기 위해 효소를 첨가 하거나 광분해법과 병용되기도 한다. 토양의 유류오염물질, 예컨대 폐윤활유, 기계유, 오일 슬러지들을 처리할때는 토양 상부 15~20cm를 갈고 유류오염물질을 5%의 농도로 주입한다. 이 때 적정 pH는 7~8, 탄화수소 : 질소 = 100 : 1, 탄화수소 : 인 = 800 : 1 이며 적절한 배수가 필요하다. 지하 유류오염물질의 처리에 있어서는 특히 다량의 산소가 필요하며 해양유류오염물질의 처리에 있어서는 친유화성 비료를 첨가하면 효과가 있다. 생물학적 복구법에 의해 대기오염물질 특히, 악취 물질을 처리할 수 있는데 반응기로는 생물여과법과 생물세정기가 쓰인다.

주제어 : 생물학적 복구법, 접종균주, 지하유류 오염물질, 해양유류오염물질.

1. 서론

생물학적 복구법(bioremediation)은 오염물질을 제거하는데 있어서 미생물을 이용하는 것이다¹⁾. 생물학적 복구법에는 두가지 일반적인 접근법이 사용되는데, 그 하나는 영양물질을 첨가하거나 포기를 하는등 환경을 개조시키는 것이고 다른 하나는 난분해성 물질을 분해시키는 미생물을 종균으로 접종하는 방법이다. 생물학적 방법이 효율적일 경우 최종산물은 물이나 이산화탄소와 같이 무해한 물질로 변화되어 환경이나 생물에 아무런 해를 주지 않아야 한다. 오염물질을 제거하는데 있어서 생물학적 복구법을 사용하면 막대한 비용이 소요되는 다른 방법에 비하여 훨씬 비용이 적게 든다는 장점이 있다. 예를 들면 알라스카의 Prince William Sound 지역에서 석유로 오염된 자갈들을 정화하는데 매일 백만불 이상이 소요되고 있지만 그렇게 커다란 성공은 거두지 못하고 있는 것이 사실이다. 따라서 최근에는 생물학적 복구법에 대한 관심이 높아지고 있는데 이는 미국에서 생물학적 복구법이

좌초된 Exxon Valdez호의 유류오염 처리에 있어서 만족스러운 결과를 나타내었을 뿐만 아니라²⁾ 매립지의 조기안정화, 대기오염물질의 처리 등 다양한 분야에 적용 가능성이 있기 때문이다. 재래적인 처리기술은 독성폐기물로 오염된 다량의 토양을 소각로로 옮겨 연소분해처리 하는 방법이 주를 이루었으나 전형적인 생물학적 복구법은 현장에서 행해질수 있기 때문에 간단한 장비만 있으면 가능하다. 그러나 다른 처리기술과 마찬가지로 생물학적 복구법 역시 처리할수 있는 대상물질이 제한되어 있으며 처리장소의 조건 및 처리시간 등의 제약을 받고있는 것이다. 생물학적 복구법은 환경오염물질의 파괴에 있어 커다란 잠재력을 가지고 있는데, 특히 연료나 크레오소트(방부제)로 오염된 토양의 처리에 효과가 탁월하다^{3,4)}. 수 백 곳의 오염된 부지에 대하여 오염정화 기술로서의 생물학적 복구법의 잠재력이 시험되었다. 야외에서의 pilot 실험이나 실규모의 생물학적 시험에 있어서 가장 큰 관심사가 되는 오염물질은 석유와 크레오소트인데 60%의 부지가 이러한 시험에 사용되었다^{5,6)}. 생

물학적 복구법은 최근에 그 이용과 기술이 급속히 성장하고 있는 분야이다. 본 총설에서는 그 원리와 응용에 대한 최근 동향을 논술하기로 한다.

2. 생물학적 복구법의 효능시험

생물학적 복구기술이 잠재적으로 유용하다는 것을 증명하려면 제어된 조건하에서 오염물질의 생물학적 분해가 증진되었다는 것을 보여야 한다. 이것은 현장에서는 수행하기가 어려우므로 실험실내에서 실험을 행하여야 한다. 다시말해 실험실 내에서의 실험을 통하여 특정한 처리가 오염된 부지로부터 채취한 난분해성 물질을 제거하는데 효과가 있다는 것을 증명해야 한다⁷⁾. 그런데 실험실 내에서의 실험은 실제의 환경조건에 가장 가깝게 모호화 해야만 실용적인 결과를 얻을 수 있게 된다. 이것은 대개 현장의 고유한 미생물 개체군을 가지고 있는 시료를 채취, 이용함으로써 수행된다. 이러한 실험에 있어서는 오염물질의 비생물학적 풍화작용 효과를 실제의 생물분해 작용과 구분하기 위해서 살균처리와 같은 적절한 대조군을 함께 설치하는 것이 중요하다. 이러한 실험은 물론 야외에서의 현장 입증실험을 대체하는 것은 아니지만 특정한 생물학적 복구법에 대한 과학적인 신뢰성을 확립하는데 있어서 매우 중요하다. 이것은 또한 잠재적인 생물학적 복구처리법들을 선별하는데 있어서도 유용하다.

생물학적 복구법의 효능을 시험하는 실험실내 실험에 있어서 전형적으로 측정되는 파라미터로는 미생물 개체군의 계수⁴⁾, 미생물의 호흡율(산소 소비율과 이산화 탄소 발생량)과 분해율(개개 또는 총 오염물질의 소멸도)이다. 생물학적 복구법의 효능을 가장 직접적으로 측정하는 방법은 오염물질의 소멸도를 측정하는 것이다. 그런데 이 방법을 사용할 때는 적절한 대조군과 분석방

법을 선정하는 것이 매우 중요하다. 오염물질의 소멸도는 생물학적 분해에 의해서만이 아니라 증발과 광분해 및 용탈에 의해서도 일어난다.

생물학적 기술과 생물적 복구법을 촉진시키기 위하여 미국 환경처와 피츠버그 신탁사업단(Pittsburg Trust)은 다원적 협력계약을 맺어 국립환경기술 적용 공사(National Environmental Technology Applications Corporation, NETAC)를 설립하였다. 이 공사의 목적은 정부와 민간기업이 함께 국가의 가장 시급한 환경문제에 긍정적인 영향을 미치는 기술의 상업화를 촉진하는데 있다. 공사의 목적중에는 단순히 현존하는 기술과 공정들을 변경하고 개선하는 것은 물론 상업성이 유망한 새로운 기술을 장려하는 것도 포함되어 있다. 미 환경처와의 합의하에 공사는 생물학적 복구방법용으로 개발된 제품의 제안서를 검토할 전문가 위원회를 주재한다. 위원회에서 현장에서 가장 성공가능성이 있는 제품을 추천하게 되며 추천된 제품은 Ohio 주 Cincinnati에 있는 미환경처 실험실에서 검사하게 된다. 실험실에서의 검사목적은 상업적인 생물학적 복구 제품이 환경을 간단히 개조시킴으로써 성취할수 있는 것 보다는 그 제품이 상당한 정도로 오염물질의 생분해를 증진시키는가의 여부를 결정하는 것이다. 이실험은 전해 호흡량 측정기를 통하여 시간의 경과에 따른 산소흡수율을 측정하고 분해율과 미생물 성장율을 측정하게 된다⁸⁾.

현장에서 오염물 생분해율을 측정하기는 매우 어렵다. 현장실험을 실시하기 위해서는 단힌 실험계가 필요하고 호흡량 측정등은 현장에서 수행하기가 매우 어렵기 때문에 지속적인 수 많은 반복 실험을 통하여 통계적으로 처리하여야만 그 신뢰도를 인정받을 수 있게된다.

3. 부작용 실험

생물학적 복구법이 그 효능을 인정받기 위해

서는 생태적인 악영향이 없어야 한다⁹⁾. 생태학적 부작용 실험은 비료와 같은 화학적 첨가제가 토착생물에 독성을 미치는지의 여부를 밝히는 것으로서 직·간접적 또는 만성적인 독성피해를 알아내게 된다. 실험대상은 *Daphnia*와 같은 작은 갑각류나 굴의 유충 등의 조개류 그리고 무지개 송어 등의 어류 등이다. 그 밖에도 조류성장을 등의 실험을 병행하기도 한다. 이 실험의 근본적인 목적은 부영양화 등을 발생시키지 않으면서 생분해를 촉진시킬 수 있는 영양물질의 적용범위와 그 양을 파악하는 것이다. 예측하지 못했던 독성이나 잔류물질에 의한 돌연변이 현상 등의 위해성을 파악하기 위하여 생체군집을 이용한 잔류물 분석을 해야 할 필요가 있다. 유류오염의 토양처리 효능을 알아내기 위하여 *Microtox* 군집인 *Photobacterium phosphoreum*을 종종 이용하는데 이는 빛 발광의 감소율을 측정함으로써 가능하다¹⁰⁾. 생물학적 복구법을 시행하게 되면 일시적인 독성현상이 나타나지만 종국적으로는 독성이 사라지게 된다. *Microtox* 방법은 생분해 활동을 방해하는 독성물질이 고농도로 존재할 때 생물학적 복구법 시행 전에 토양을 희석시키는 등의 용도를 결정하는데 이용된다¹¹⁾.

방향족 탄화수소 등 돌연변이를 일으키는 잔류물 측정은 Ames 시험으로 시행한다¹²⁾. 디젤 기름으로 오염된 경우 생물학적 분해가 시작되면 어느정도의 돌연변이 현상이 발생하지만 생분해가 진행되면서 이러한 현상이 사라지게 된다. 또한 이같은 현상은 씨의 발아상태나 식물의 성장 생육 실험을 통하여도 입증되었다^{10,13)}. 종자나 식물을 이용한 실험은 미생물 실험보다 민감도가 훨씬 낮기 때문에 탄화수소의 농도가 건량무게기준 토양의 1.0% 이상인 경우에만 그 결과를 알 수 있다. 이 방법은 오일 침윤토양 지역에서 다시 색생이 살아나는 시기를 결정할 때 이용된다.

4. 생물학적 복구법의 접근방법

4.1 환경적 변형

유해 화학물질에 대한 생물학적 분해를 제한하는 요인들은 폐기물의 고농도, 산소결핍, pH, 영양염류의 부족, 수분부족, 온도 등이다. 이러한 제한요인들이 제거되면 미생물들은 급속히 성장하게 된다. 경쟁력이나 생존력이 약한 몇몇 경우를 제외하고는 특별히 미생물을 토양에 접종할 필요는 없다. 그러나 접종을 한다고 하더라도 미생물의 생존과 번식에 적합한 생태학적 조건들을 함께 만들어 주어야만 소기의 성과를 거둘 수 있다. 그러한 생태학적 조건들은 알맞은 온도, 적당한 수분함량, 영양염류, pH, 산소 등을 들 수 있다.

활발한 공동 물질대사를 하는 미생물들을 분리하여 접종하면 난 분해성 유기화합물 제거에 커다란 효과를 보기도 한다. 예를들면 PCB 나 3,4-dichloroaniline 같은 난 분해성 유기염화물질 분해시 공동 물질대사를 하는 미생물군을 투입하면 다양한 형태의 효소를 분비하여 생물학적 분해가 진행된다.

토양이나 퇴적물 그리고 대수층내의 산소가 생분해능의 중요한 제한요소가 되며 이는 토양의 종류와 함수율 등에 따라 달라진다¹⁴⁾. 지하수나 토양에 유류오염 발생시 생물학적 복구법을 적용할 경우 통기성이 크게 문제가 된다. 공기로 채워진 토양내의 공극은 산소의 확산 작용을 도와 미생물이 석유를 분해하는데 도움을 주지만 수분으로 채워져 있는 경우 공기의 확산을 방해하여 분해작용이 어렵게 된다. 분해되는 석유의 농도가 높은 경우 산소 소비량이 매우 높으며 확산속도가 낮아 분해율이 낮아진다. 필요할 경우 토양을 뒤섞어 공기의 확산율을 높이기도 한다. 많은 경우 지하의 토양이나 지하수를 오염시키는 것은 석유저장 탱크에서 새어나온 기름이 원인이다. 이러한 환경에서는 미생물에 의한 분

해율은 매우 낮으나 이를 획기적으로 높일 수 있는 방법이 개발되고 있다^{15,16}. 땅을 파서 지표면에 펼쳐 놓고 처리하기(on-site bioremediation)가 어려우면 지하에서 직접 생물학적 복구법을 적용할 수 있는데(in-situ bioremediation) 가장 문제가 되는 요인은 필요한 산소의 전달이다. 산소의 용해도가 낮기 때문에 펌프를 이용하여 과산화 수소를 주입하여 지하의 미생물에게 산소를 전달하는데¹⁷ 그 농도는 100 ppm 내외이다. 일례로 D. J. Berwanger 와 J. F. Barker (1988)는 혐기성 상태에서 메탄으로 포화된 지하수에 방향족 탄화수소로 오염된 상태에서 산소원으로 과산화 수소를 사용하여 in-situ bioremediation 방법을 이용하여 정화하였다. 그들은 실험대상으로 Canadian 매립지의 지하수와 원주 채취시료(Core Sample)를 이용하였으며 과산화수소를 비독성 수준에서 산소원으로 사용한 결과 benzene, toluene, ethyl benzene 과 o-, m-, p-xylene 에 대하여 만족할만한 결과를 도출하였다.

생물학적 복구법을 이용하여 유류오염 방제시 문제가 되는 또다른 요인은 질소와 인 같은 영양염류의 첨가이다. 질소나 인 성분은 미생물의 필수 요소로서 이들이 부족하게 되면 생분해율이 급격히 낮아진다. 따라서 이들 영양물질의 적절한 사용이 필요하다. R. M. Atlas 와 R. Bartha (1973)¹⁸은 친유화적인(oleophilic) 질소와 인을 포함하는 비료를 개발하였는데 이 비료는 생분해가 활발하게 일어나는 기름과 수표면사이에서 회석되지 않고 남아 생분해를 돕는다. 1978년 프랑스 Amoco Cadiz 기름유출 사고시 상업적인 친유화적 비료를 이용한 바 있다^{19,20}. 이 제품은 Inipol EAP 22 로서 질소원으로 요소를, 인산원으로 lauryl phosphate, 탄소원으로 oleic 산을 함유하고 있다.

4.2 미생물 접종과 생물공학적인 접근

미생물 오염방지제의 연간 매출규모는 연 700 - 1000 만불에 이르며 잠재적인 시장은 2 억불에 달한다. 기름을 제거하는 미생물제제를 접종하게 되면 석유화학 공장의 폐기물 처리효율을 크게 높일 수 있다. 예를들면 처리과정중에 발생하는 3차 butyl alcohol 의 제거나 formaldehyde 의 대량유출시 매우 큰 효과를 발휘할 수 있다. 그러나 정확한 조절방법이나 정량적인 효능이 아직까지는 잘 알려져 있지않다.

생물학적 복구법은 오염물과 접촉하고 있는 미생물들의 생분해 능력이 관건이므로 일부 학자들은 오염물을 분해하는 미생물들을 직접 접종하는 노력을 경주해왔다. 접종이란(seeding) 오염물의 생분해도를 높이기 위하여 미생물을 자연환경에 주입하는 것으로서 토착 미생물의 분해능력이 미약하거나 또는 다양한 종류의 오염물이 혼재되어 있을 경우 사용된다. 상업적인 다양한 형태의 오염정화 미생물군이 시중에서 시판되고 있다²¹.

다양한 종류의 오염정화 미생물군은 물론 순수한 배양미생물도 생물학적 복구법에 사용된다. Pseudomonas 종은 다양한 오염물질 정화 능력을 가지고 있으므로 많이 사용되고 있으며 흰색의 부패균주인 Phanerochaete 역시 복잡한 오염물질 정화에 많이 이용된다²². Phanerochaete chrysosporium은 리그닌 분해시 이용되는 laccases 와 peroxidases 의 효소를 배출한다. 특히 Phanerochaete는 DDT와 같은 살충제²³나 TNT²⁴, 그리고 benzpyrene 같은 고분자 중핵 방향성 화합물, polyethylene 류인 플라스틱 등의 분해²⁵에 효과가 있다. 난 분해성 화학 물질에 대한 분해경로가 밝혀지지 않았다는 사실이 문제이긴 하지만 절대적인 문제는 아니다. 생화학적 분해경로는 지속적으로 진화하고 있으며 이러한 진화는 선택적인 압력에 의하여 자연스럽게 이루어진다. 최근에는 생명공학의 발달로 독

성물질의 분해도 진행되고 있다²⁶⁾. 또한 다양한 성분을 가지는 오염물질을 분해시킬 수 있는 미생물의 개발이 급격히 이루어지고 있다. A. M. Chakrabarty가 개발한 탄화수소를 분해하는 단세포 생물이 미국 대법원에서 인정받아 특허를 취득하였다. 그러나 유전자를 조작하여 만들어진 미생물을 적용하기 위해서는 안전성과 생태적인 위해성 등에 대하여 종합적으로 입증된 후 사용되어야 하며 이들은 자체의 위험성을 내포하고 있으므로 과학적인 예측과 정부의 승인을 받아야만 한다²⁶⁾. 또한 자연적으로 이루어져야 할 진화가 인위적인 방법으로 급속하게 진행된다는 사실에 문제가 있다. 미생물학적 외래효소는 토양이나 살충제, 그리고 생산공정에서 발생하는 폐기물 처리에 큰효능을 가지고 있다. 담자균류(basidiomycete)인 *Phanerochaete chrysosporium*이 내는 lignin 분해 효소는 DDT나 TCDD와 같은 난분해성 탄화수소 물질의 분해에 매우 효과적이다²⁷⁾. 한편 생물학적 처리법은 다른처리법과 상호 보완성을 가지고 있다. 일례로 광분해법은 할로젠족 화합물 처리에 매우 효율적이거나 이 방법만을 가지고 완벽하게 처리하기가 매우 힘들며 비용이 많이 든다. 그러나 생물학적 처리법과 병행하게 되면 비교적 간단히 처리할 수 있다. UV를 적당량 주사한 후 생물학적 처리를 하게 되면 2, 4-dichlorophenol, 2, 4, 5-trichlorophenol, benzopyrene 등 난 분해성 할로젠 화합물의 분해가 용이하게 이루어진다²⁷⁾.

5. 다양한 생태계에서의 생물학적 복구법

5.1 오염된 토양과 대수층의 생물학적 복구

생물학적 복구법은 현장이나 또는 지상의 생물반응기를 설치하여 오염된 토양을 처리한다. 처리시 배양된 미생물들을 추가하거나 영양염류와 산소 등을 주입하기도 한다. 석유화학 공장 등에서는 침전슬러지나 탈수 케익 등 폐수처리

과정중에서 많은 량의 기름성분을 함유한 슬러지를 배출하고 있으며 폐윤활유나 폐기계유 등 기름성분의 폐기물들이 발생된다²⁸⁾. 이들을 처분하는 여러 가지 방법중에 토양 미생물 처리법이 가장 경제적이라고 할 수 있다. 이 방법을 토양 처리 또는 토양경작이라고 부르는데 적용장소나 시간 처리율 등을 조절할 수 있다. 선정된 부지는 여러 가지 조건들을 만족해야 하는데 홍수, 유출, 침출현상 등에 대한 고려가 충분히 이루어져야 한다²⁹⁾. 오일 슬러지를 토양에 적용할 경우 토양 상부 15~20 cm 깊이에 약 5%정도의 농도가 적당하며 10%가 넘게 되면 생물학적 분해에 문제가 야기된다. 이 수치는 ha 당 기름 100,000 L에 해당된다. pH 조절은 석회를 가지고 조절하는데 pH 7~8 정도가 바람직 하며 질소와 인산질은 탄화수소 : 질소 = 200 : 1이며 탄화수소 : 인 = 800 : 1이 적당하다. 적절한 배수가 이루어져야 하며 살수는 건조하고 기온이 높을 경우에만 필요하다.

분해되지않은 기름은 토양처리장에서 쉽게 지하로 흘러들어가지 않으며³⁰⁾ 적정관리를 하면 환경적인 피해도 최소화 할 수 있다. 현재 미국이나 유럽, 브라질 등지에서 토양처리법을 활용하고 있다. 일부 휘발성물질들은 불가피하게 대기중으로 휘발되어 사라지는데 이를 막기 위하여 임시 프라스틱 포장을 하기도 한다. 유기성 폐기물의 일부분은 처리중에 결정화하여 광물질로 변하며 일부는 토양 부엽토 물질로 바뀌게 되어 독성을 잃어버리고 고정화 된다.

본질적으로 토양처리와 동일한 공정으로 원유나 정제유 등 기름으로 오염된 표토층에 생물학적 복구법을 이용하게 된다. 기름유출 사고는 예측할 수 없이 발생하기 때문에 조절하는 것이 불가능하다. 그러나 사고 발생시 생물학적 분해가 가능한지를 빨리 파악하는 것이 중요하며 가능할 경우 적정처리 방법을 선택하여야 한다. 생물학적 복구가 가능하다는 판단이 서면 'on-site' 처

리가 가장 경제적이고 환경적으로 안전하다. 즉 오염된 토양을 파서 15~20 cm 두께로 펼친 후에 생물학적 복구법을 적용하게 된다. 생분해율이 느리고 제한요인이 많을 때에는 다른방법을 고려할 수 있으나 비용이 많이 들고 비환경적이다³¹⁾.

유류의 종류에 따른 생물학적복구법의 적용도와 효율성을 살펴보면 이 공법은 제트 연료나 디젤유, No. 2 연료유에 가장 적합한 것으로 밝혀졌다³²⁾. 가솔린에 적용할 경우에는 생분해율보다 증발율이 높아 적당하지 않다. 한편 Song 등은 실험실 실험을 통하여 No. 6 (잔류 연료 오일)에 대하여 부분적인 성공을 거두었으나 M. Jones 과 J. H. Greenfield (1995) 는 Florida에서 시행한 'on-site' 시험결과 만족할만한 결과를 나타내었다. 그들은 No. 6 기름의 농도가 10,000 ppm인 오염된 토양에서 비료와 상업적인 미생물을 인위적으로 주입한 결과 300 일이 지난 후 90%의 제거율을 나타내었으며 비료를 주입하지 않은 경우에는 낮은 제거율을 보였다.

Benzene, alkylbenzene, toluene, xylene 등 방향족 용매들은 매립장이나 공장, 폐기물 저장소 등에서 새어나와 대수층을 오염시킨다¹⁷⁾. 이들 오염원들이 지하에 침투되면 특성상 파낼 수가 없기 때문에 방해물이 없는 한 오염이 지속적으로 발생한다. 지하 유류오염에 대한 'in-situ' 방법은 여러 학자들에 의하여 연구되었다²⁵⁾. 지하 대수층에 대한 생물학적 복구법은 지질학적, 지하수학적 요인과 밀접한 관련이 있다. 이 방법의 기본적인 요체는 오염된 층과 오염되지 않은 층을 분리하는 것이다. 그렇게 하기 위하여 cement, bentonite 또는 grouting 등의 물리적 방법을 사용하여 더 이상의 오염이 진행되는 것을 방지하거나 pumping 하여 기름이나 용해되어있는 지하수를 빨아들인다. 또한 물리적 수세법도 이용되는데 오염된 토양을 물로 세척하게 되면 엄청난 양의 물이 필요하며 기름이 물보다는 토양과의 친화도가 높기 때문에 완전한 복구가 어

렵고 비용도 많이 든다. 따라서 수세법 적용시 오염된 토양주변에 주입공을 통하여 분산액이나 현탁액을 섞어 사용한다. 이 방법은 생분해와 에멀전화를 동시에 이용하여 경제적으로나 효율성 면에서 많이 이용된다³³⁾.

할로젠 방향족 화합물, haloethane, halomethane 등에 오염된 지하 대수층을 생물학적 복구법으로 처리할 때에는 많은 문제점을 가지고 있다¹⁷⁾. 이들중 일부는 혐기성 상태하에서 할로젠 원소와 분리되지만 어떤것들은 혐기성, 호기성 어느 상태에서도 분리되지 않고 methane 이나 toluene이 존재하는 산화 상태하에서만 분리가 된다. P. L. McCarty 등은 (1991)³⁴⁾ 'in-situ bioremediation' 실험에서 1,617 kg 의 할로젠 화합물을 포함하고 있는 480,000 m³ 의 대수층으로부터 1,375 kg의 염화 탄화수소를 전환시키기 위해서는 5,200kg의 methane과 19,200 kg 의 산소가 필요하다는 것을 알아내었다.

5.2 해양유류 오염의 생물학적 복구

Exxon Valdez 호 기름유출 사건으로 생물학적 복구법과 적용법에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 사고 직후의 초기 대응책은 물리적인 방법으로서 고압 분사기를 가지고 해안을 세척하는 것이었다. 그러나 이 방법은 비용이 많이 소요되었으며 분쇄된 기름은 다시 합쳐지는 등 비효율적이었다. 따라서 미국 환경청 (USEPA) 과 Exxon 사는 생물학적 복구법을 적용하는데 합의하였다. 이 방법의 초점은 영양물질을 첨가시키는 것이 토착미생물들이 보다 활발하게 생분해도를 높일 수 있는가에 대한 것이었다.

친유화성 비료의 적용은 놀랄만큼 성공적이었으며 그 결과 기름에 시커멓게 뒤덮혀 있던 해안가의 돌들은 10일만에 다시 원래 상태로 변하였고 기름이 말끔히 제거되었다³⁵⁾. 이 결과로 인하여 생물학적 복구법을 적용할 경우 영양물질이 포함된 비료를 투입하는 것이 매우 바람직하다

는 결론을 얻게 되었다. 이러한 결과로 생물학적 복구법이 기름으로 오염된 지역을 정화하는 중요한 처리방법으로 주목받게 되었다.

5.3 대기오염의 생물학적 복구법

산업체나 폐기물처리 공진중에 발생하는 대기 오염물질은 smog를 형성하거나 오존층을 파괴시킨다. 대기오염은 세정기(scrubber)나 수세, 응집, 여과 흡수, 흡착, 소각등 여러 가지 물리화학적 방법으로 제어하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 비용이 많이들게 된다. 대부분의 휘발성 유기물질들은 미생물의 좋은 먹이가 되며 미생물적인 방법으로 처리하면 비용이 적게 든다는 장점이 있다. 대기오염 방지에 사용되는 미생물학적인 방법에는 세가지 형태가 있는데 생물여과법, 살수여상 여과법 그리고 생물 세정기(scrubber)를 들 수 있다^{36,37)}.

생물 여과법은 오염된 대기의 악취나 휘발성 유기물 제거에 사용된다³⁶⁾. 토양층과 충전층을 통과시켜 황화수소, mercaptans, terpenes 등의 악취를 제거한다. 악취발생물질은 biofilm에 흡수되고 미생물에 의하여 전환된다. 전통적인 방법의 filter 충전물은 peat, compost, 나무껍질 또는 토양을 사용하고 초기에 영양물질과 완충제를 주입하고 운영중에 증발되는 수분을 보충해 준다. 표 1에 생물여과법의 효율을 나타내었다.

Table 1. Removal Efficiency of the Biofilter

Chemical	Removal Efficiency(%)
Hydrogen sulfide	99
Dimethyl sulfide	91
Terpene	98
Organo-sulfur gases	95
Ethyl benzene	92
Tetrachloroethylene	86
Chlorobenzene	69

현재 사용하고있는 생물여과법에는 몇가지 문제점을 가지고 있다. 가장 큰 단점은 사멸한 생물체가 filter 담체내에 존재한다는 점이며 염화합 유기물과 황화합물의 생물학적 분해로 생성된 산이 완충능력을 잃게한다는 것이다. 따라서 공기중에 과도한 유기물질 부하가 존재하게되면 담체의 압력손실이 증가 하게되고 pH가 낮아져 처리 효율이 낮아지게 된다. 결국 오염된공기내의 오염부하에 따라 담체교환 시기가 달라지는데 저부하인 경우에는 일 년이상 사용이 가능하다. 살수여상 여과법은 다공질의 고체에 오염된 공기를 이동하게 함과 동시에 액체도 공기와 같은 또는 반대방향으로 이동시킨다. 이 공정에서는 염이 쌓이게 되면 중화시키거나 회석될 수 있도록 액체의 흐름을 주기적으로 조절하여야 하며 필요시 영양물질도 첨가해 주어야 한다. 휘발성 유기화합물이 분해되면서 산이나 알칼리 또는 염등이 발생되는데 이 화합물은 미생물군이 활동하는데 필요하다. 미국 환경처 위험물 저감 공학실 (EPA's Risk Reduction Engineering Laboratory)에서는 고농도 유기화합물 (200 ppm 이상)을 함유하고 있는 오염된 배기가스를 살수여상 탑을 통과하여 정화하고 있다. 이 생물여과탑의 체류시간은 2분으로 모든 유기오염물질을 제거하고 있다.

생물 세정기 (scrubber) 법에서는 오염된 공기가 생물 스프레이 분무에 흡착하여 낙하한 후 교반 반응조에서 오염물질의 분해가 이루어진다. 이 방법은 용해도가 높은 휘발성 화합물의 제거에 사용된다. 미생물을 이용하여 대기오염을 정화하는 방법은 새로운 것이긴 하지만 유럽등지에서는 시간당 75,000 m³ 용량의 대규모 운전이 성공적으로 이루어지고 있다. 이 방법은 향후 지속적인 개발이 진행되고 있다³⁸⁾.

6. 맺는말

난분해성 물질에 의한 오염문제를 해결하기 위해서는 새로운 화학 물질에 대한 환경적 안전성 검증이 필요하다. 일반적인 독성실험 외에도 생분해성 평가나 생체축적의 가능성 여부 실험 등이 시행되어야 적용할 수 있다. 난 분해성 오염물질에 대한 환경 모니터링을 수행시 정교한 분석기구나 미생물학적 검증을 거치게 된다. 생물학적 복구법을 시행할 경우 대상물질에 대한 생분해도나 최적 분해조건, 생태계에 대한 위해성 등을 종합적으로 판단한 후 시행되어야 한다. 성층권의 오존층 파괴, 산성비, 중금속 오염, 방사선 핵오염 등은 직간접적으로 미생물 작용에 의하여 감소되거나 또는 더욱 악화될 수 있으므로 미생물의 역할과 기능을 이해하고 잘 이용한다면 훌륭한 오염저감 방안이 개발될 수 있다. 이러한 맥락에서 오염물질 저감에 관한 새로운 생물공학적인 기술인 생물학적 복구법이 탄생되게 되었다.

참 고 문 헌

1. Atlas, R.M., and D. Pramer. Focus on bioremediation. *ASM News* 56(7), pp.(1995).
2. Beardsley, T. No slick fixpp.Oil spill research is suddenly back in favor. *Scientific American* 261(3), pp.43, (1989).
3. Mueller, J.G. et al., Biodegradation of cresote and pentachlorophenol in contaminated groundwater : Chemical and biological assessment. *Applied and Environmental Microbiology* 57, pp.1277~1285, (1991).
4. Song, H.G., and R. Bartha. Effect of jet fuel spills on the microbial community of soil. *Applied and Environmental Microbiology* 56, pp.641~651, (1990).
5. Hinchee, R.E. and R.F. Olfenbuttel(eds.). a. *In situ Bioremediation: Applications and Investigations for Hydrocarbon and Contaminated Site Remediation*. Butterworth - Heinemann, Boston, (1991).
6. Hinchee, R.E. and R.F. Olfenbuttel(eds.). b. *On-site Bioremediation : Processes for Xenobioticand Hydrocarbon Treatment*. Butterworth-Heinemann, Boston, (1991).
7. Bailey, N.J.L. et al., Bacterial degradation of crude oil : Comparison of field and experimental data. *Chemical Geology* 11, pp. 203~221, (1973).
8. Venosa, A.D. et al. Screening of commercial inocula for efficiency in enhancing oil biodegradation in closed laboratory system. *Journal of Hazardous Materials* 28, pp.131~144, (1991).
9. Doe, K.G., and P.G. Wells. Acute toxicity and dispersing effectiveness of oil spill dispersants : Results of a Canadian oil dispersant testing program(1973 to 1977). In L.T. McCarthy, Jr., G.P. Lindblom, and H.F. Walter(eds.). *Chemical Dispersants for the Control of Oil Spills*. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp.50~65, (1978).
10. Wang, X., and Bartha. Effects of bioremediation on residues: Activity and toxicity in soil contaminated by fuel spills. *Soil Biology and Biochemistry* 22, pp.501~506, (1990).
11. Matthews, E., and L. Hastings. Evaluation of toxicity test procedure for screening treatability potential of waste in soil. *Toxicity Assessment* 2, pp.265~281, (1987).
12. Maron, D.M., and B.N. Ames. Revised

- methods for the Salmonella mutagenicity test. *Mutation Research* 113, pp.173~215, (1983).
13. Bossert, I., and R. Bartha. Plant growth in soils with a history of oily sludge disposal. *Soil Science* 140, pp.75~77, (1985).
 14. Lee, K. and E.M. Levy. Bioremediation: Waxy crude oils stranded on low-energy shorelines. In Proceedings of the 1991 International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 541~547, (1991).
 15. Aelion, C.M., and P.M. Bradley. Aerobic biodegradation potential of subsurface microorganisms from a jet fuel-contaminated aquifer. *Applied and Environmental Microbiology* 57, pp.57~63, (1991).
 16. Fredrickson, J.K. et al., Isolation and characterization of a subsurface bacterium capable of growth on toluene, naphthalene, and other aromatic compounds. *Applied and Environmental Microbiology* 61, pp.796~803, (1995).
 17. Berwanger, D.J., and J.F. Barker. Aerobic biodegradation of aromatic and chlorinated hydrocarbons commonly detected in landfill leachate. *Water Pollution Research Journal of Canada* 23(30), pp.460~475, (1988).
 18. Atlas, R.M., and R. Bartha. Stimulated biodegradation of oil slicks using oleophilic fertilizers. *Environmental Science and Technology* 7, pp.538~541, (1973).
 19. Tramier, B., and A. Sirvins. Enhanced oil biodegradation: A new operational tool to control oil spills. In Proceedings of the 1983 Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, Washington, D.C, (1983).
 20. LaDousse, A., and B. Tramier. Results of 12 years of research in spilled oil bioremediation: Inpol EAP 22. In Proceedings of the 1991 International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 577~581, (1994).
 21. Applied Biotreatment Association. The role of Biotreatment of Oil Spills. Applied Biotreatment Association, Washington, D.C, (1993).
 22. Bumpus, J.A., et al., Oxidation of persistent environmental pollutants by a white rot fungus. *Science* 228, pp.1434~1436, (1985).
 23. Bumpus, J.A., and S.D. Aust. Biodegradation of DDT (1,1,1-trichloro-2, 2-bis(4-chlorophenol) ethane) by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied and Environmental Microbiology* 53, pp. 2001~2028, (1987).
 24. Fernando, T., et al., Biodegradation of TNT (2,4,6-trinitrotoluene) by *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied and Environmental Microbiology* 56, pp.1666~1671, (1990).
 25. Lee, M.D. et al., In-situ restoration techniques for aquifers contaminated with hazardous wastes. *Journal of Hazardous Material* 14, pp.71~82, (1994).
 26. Kilbane, J.J. Genetic aspects of toxic chemical degradation. *Microbial Ecology* 12 pp.135~146. Miller, R. et al., 1988b. Sequential degradation of chlorophenols by photolytic and microbial treatment. *Environmental Science and Technology* 22, pp.1215~1219, (1986).
 28. CONCAWE. Sludge Farming: A technique for the Disposal of Oily Refinery Wastes. Rep. 3/80. CONCAWE, the Hague, the Netherlands, (1980).

29. Bartha, R., and Bossert. The treatment and disposal of petroleum wastes. In R.M. Atlas (ed.) *Petroleum Microbiology*. Macmillan, New York, pp.553~577, (1984).
30. Dibble, J.T., and R. Bartha. Leaching aspects of oil sludge biodegradation in soil. *Soil Science* 127, pp.365~370, (1979)
31. Jones, M., and J.H. Greenfield. In-situ comparison of bioremediation methods for a Number 6 residual fuel oil spill in Lee County, Florida. In *Proceeding of the International Oil Spill Conference*. American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 533~540 (1991).
32. Song, H.G. et al., Bioremediation potential of terrestrial fuel spills. *Applied and Environmental Microbiology* 56, pp.652~656, (1995).
33. Beraud, J.F., et al., Use of Soil-aquifer treatment in oil pollution control of underground waters. In *proceedings of the 1989 Oil Spill Conference*. American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp.53~59, (1989).
34. McCarty, P.L. et al., In situ methanotrophic bioremediation for contaminated groundwater at St. Joseph, Michigan. In R.E. Hinchee and R.F. Olfenbuttel(eds.). *On-situ Bioremediation: Processes for Xenobiotic and Hydrocarbon Treatment*. Butterworth-Heinemann, Boston, pp.16~40, (1991).
35. Pritchard, P.H., and C.F.Costa. EPA's Alaska oil spill bioremediation project. *Environmental Science and Technology* 25, pp.372-379, (1991).
36. Ottengraf, S.P.P. Exhaust gas purification In W. Schonborn(ed.). *Biotechnology*. Vol. 8. VHC Verlags-gellschaft, Weinheim, Germany, pp.425~452, (1986).
37. Ottengraf, S.P.P., and A.H.C. Van den Oever. Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter. *Biotechnology and Bioengineering* 25, pp. 3089~3102, (1983).
38. Leson, G. and A.M. Winer. Biofiltration: An innovative air pollution control technology for VOC emissions. *Journal of Air and Waste Management Association* 41, pp.1045~1054., (1991).