

Microbial removal of hazardous organic compounds on hazardous waste and contaminated soil (유해환경오염물질의 환경미생물을 이용한 제어연구)

김 무 훈

삼성엔지니어링 기술연구소 에너지환경연구실

요 약 문

환경에 관한 지식의 증가와 더불어 환경오염을 적극적으로 해결하기 위한 새로운 연구들은 국경을 초월하고 있다. 특히, 미국을 비롯한 여러 환경고도기술국가들속의 실험실의 주역들은 <환경 미생물>을 이용한 제어연구에 엄청난 자본과 심혈을 바치고 있다. 실제로 미국 EPA에 의해 이미 유해유기화합물로 규정된 수많은 물질들이 이른바 환경미생물을 이용한 생물학적인 처리를 통해서, 이산화탄소와 물 및 메탄가스등의 무해한 무기화합물로 변환시킬 수 있음이 이미 확증된 바 있다. 아무리 많은 환경미생물들이라 할지라도 그 미생물 군들의 적절한 선택과, 대사작용이 최상의 상태로 유지될 수만 있다면, 환경오염물질들의 생물학적 처리는 개선된 최선방법중의 하나가 될 것이다. 또 이와같은 미생물을 이용한 각종 처리방법 및 기작의 신개발은 21세기 환경오염문제 해결에 <마스터키> 역할을 감당해 나갈 것으로 기대된다.

1. 서론

환경오염에 있어서 인간에 의해 만들어진 유기 오염물질들은 환경오염은 물론 국민의 건강과 삶의 질에 심각한 문제를 야기시킨다. 미국 환경청(EPA: Environmental Protection Agency)에 의하면 이미 생성된 유기화합물 중에서 65종이 유해한 것으로 밝혀졌으며, 이 중 114개의 유기화합물이 EPA에 의해 priority pollutant로 지정되었다. 그리고 이러한 화합물들은 대체로 적절하지 못한 disposal 기술에 의해 처리되고 있는 것으로 나타나고 있고 이것들은 물과 토양의 주요 오염원이 되고 있다. 현재 미국에서 이러한 유기화합물의 유입을 조절하고 제어하는 법으로 이른바 Safe Drinking water Act(SDWA), The Clean Air Act(CAA), Toxic Substance Control Act(TSCA) 그리고 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act)들이 동원되고 있다. 수많은 경우, 미생물을 이용한 생물학적 처리방법은 유해한 물질들을 무해한(innocuous) 형태로 생전환(biotransforming) 시킴으로써 그들을 이산화탄소와 물의 형태로, 혹은 혐기성상태에서는 이산화탄소와 메탄의 형태로 제거할 수 있지만 자연적으로 생성되는 다른 화합물에 비해 합성유기화합물은 기존의 미생물이 가진 대사작용에 의해 기질을 분해(무기화)하는 효소를 생산하지 못하기 때문에 생분해가 어렵다. 그럼에도 불구하고 지금까지 많은 선험자들에 의해 화학구조와 생분해능력사이의 관계를 일반화하여 화학기질의 목록으로 이용하려는 시도가 무수히 이루어졌고 또 이 목록에는 amines, methoxy, sulfonates, nitro groups, chlorine, 벤젠의 메타치환체와 저분자보다 분해가 어려운 고분자화합물등으로 구성되어 있다는 것이 연구에 의해 입증되었다. 환경에 유해한 대부분의 인공화합물들은 할로겐화되어 있고 그 종류별로는 농약, 플라스틱 용매와 THM등이 있으며, 염소원소를 함유한 인공화합물에는 DDT와 같은 농약이나 산업용매등이 있고 이러한 난분해성인

화합물들의 특성은 halogen atom의 위치, 관계된 halides, 그리고 염소화된 정도(halogenides)에 의해 결정된다.

2. 본론

생분해의 첫단계는 생분해 기작에 의한 할로젠 원소를 제거하는 일이다. 최근, 산화기작은 할로겐화 화합물의 대표적인 분해수단으로 알려져 있고, 현재, 할로젠 원소의 탈리작용이 요구되는 화합물들로는 염소로 치환된 농약과 벤젠, 그리고 PCBs등과 같은 화합물이다. 할로젠 원소의 탈리(dehalogenation)는 산화-제거에 의한 할로젠 원소의 제거이며(fig.1), 이러한 기작은 저분자 유기물 기질에서 생물적(NAD(P), flavin, flavoproteins, chlorophyll, cytochromes, glutathione 등) 또는 무생물매체(Fe^{3+})에 의한 환원된 유기물 기질의 전자전달에 의한 것이다. 그리고 이 모든 반응은 전자의 주개(donor), 받개(acceptor) 및 매체(mediator)들과 자유전자(free electron)와의 접촉에 의한 것이다. 환경에서 중요한 무생물매체는 blue-green algae로 부터 flavoproteins를 유도한 Matsumura와, 플랑크톤의 농도와 reductive dechlorination의 관계를 밝힌 Miskus에 의해서 밝혀졌다. (예; flavoproteins는 살아있는 세포에서 생성되어, 세포가 죽어감에 따라 유용하게 된다. 즉, chlorinated pesticides가 수중에서 세포에 흡수되어 세포가 감소함에 따라, 유기물질로 부터의 자유전자와 매체 및 염화유기화합물은 reductive dechlorination이 일어날 수 있는 이상적인 조건을 만들게 된다.) 또한 algae에서 일어나는 reductive dechlorination은 비효소적인 광화학적 전이이며, 빛에 민감한 화합물에 의한 빛의 흡수를 통하여 일어나고, 살충분자로 전자가 전이된다.

대부분의 생분해 연구 중 가장 많이 사용되고 있는 부분은 산소를 필요로 하는 <호기성 연구>이다. 왜냐하면 공기를 필요로 하지 않는 혐기성 연구보다는 그것이 더 쉽고, 잘 알려져 있기 때문이다. 또한 환경미생물의 생분해과정이 많이 연구되는 이유는 가장 잘 알려진 방법이며, 가장 효과적이고, 일반적인 적용이 쉽기 때문이다. 그러나 호기성처리와 혐기성처리를 비교해 보면 호기성 처리는 에너지-집중적이고 비용이 비싼 반면에, 혐기성처리는 에너지-효율적이므로 어떤 특정한 반응(즉, reductive dehalogenation, nitroreduction, reduction of sulfoxides)에는 즉시 특성화시켜 여러가지 방법으로 사용할 수 있다. 순수 미생물 균집을 이용한 단순연구들이 그렇게 중요함에도 불구하고 바로 그런 연구가 항상 자연상태에서 생분해도나 transformation에 사용할 수 있는 것은 결코 아니다. 이러한 상관관계는 다음과 같은 환경요인들(용존 산소량, 산화-환원 potential, 온도, pH, 염도, PM(particulate matter) 그리고 오염물 농도와 유기체들의 종류)에 의해 생분해도의 용이성이 좌우된다. 화합물의 물리·화학적 특성(용해도, 휘발성, 수소반발성, 친수성 등)은 생분해에 큰 영향을 끼친다(예, 유기화합물이 수용성일때, 수생미생물은 수용성인 유기화합물과 접촉할 기회가 많이 생겨 분해특성이 좋아진다.) 생분해 연구에서의 또 한 가지 제약점은 생분해를 방해하는 미생물들간의 상반되는 상호작용이다. 예를 들면 bacteria는 fungi에 상반되는 역할을 한다. 그리고 또 다른 ^② 제약점은 생분해가 유기물기질의 농도가 고농도일때 일어나므로 저농도인 유출수에서는 문제가 제기될 수 있다. 기질의 농도가 낮을때 생기는 문제점은 저농도의 기질에서 미생물의 유지에 매우 적은 양의 에너지가 투입되고, 그로 인해 기질의 이용이 느려지는 것과, 필수효소의 생성이 어렵다는 점이다. 실험단계에서의 단일 culture에서 기질의 운명은 실제환경에서는 상호작용에 의해 매우 복잡해진다. 또한 미생물에 의해 분해된 기질은 또다른 미생물에 의해 분해되기도 한다.

1) 특정화합물의 분해에 적합한 미생물(Specific groups of organisms)

(1) Actinomycetes.

분해대상물질 : phenols, pyridines, glycerides, steroids, chlorinated & nonchlorinated aromatic compounds, paraffins, long-chain carbon compounds, lignocellulose (다양한 유기화합물을 분해한다)

종류 : *Nocardia*, *N. aramae* (비옥한 활성슬러지와 영양소가 부족한 중류수에서 발견된다.)

장점 : 폐수처리에 슬러지의 발생량이 bacteria나 fungi에 비하여 훨씬 적다.
광범위한 온도와 pH범위에서 서식하고, 건조에 강하다

적용 : 미생물의 생존에 적합한 오염된 토양의 처리에 유용하다.

(2) Fungi.

분해대상물질 : 복잡한 구조나 긴-사슬의 탄화수소, PCBs 등 long-chain의 Alkanes의 분해등의 적용가능

종류 : *Cunninghamella*, *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium oxysporum*

특징 : 방향족화합물을 분해시키기 위한 특성의 효소체계를 가지고 있지 않아 다른 미생물의 도움이 필요하다.

적용 : PCBs의 분해능력은 bacteria보다 뛰어나다.

*Fusarium oxysporum*의 DDT 분해

(3) Bacteria

분해대상물질 : heterocyclic compounds, 탄화수소,

종류 : *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Vibrio*, *Acinetobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*,

적용 : *Pseudomonas*는 chlorobenzenes를 다른 형태의 물질로 합성하는데 사용한다.

(4) Phototrophic microorganisms

종류 : algae, cyanobacteria(blue-green algae), photosynthetic bacteria

특징 : 햇빛에서 에너지를 얻고 CO₂를 고정시켜 탄소를 얻으므로, 저농도의 영양 상태에서도 생존할 수 있다.(저농도의 영양이 제한인자가 될 수 없다.)

다양한 기질을 대사작용에 이용할 수 있다.(예; sugars, alcohols, volatile fatty acids, benzoates 1,3,5-trihydroxybenzene)

폐수처리에서도 광범위하게 쓰인다.

오염물질에 대한 저항성도 크다.

완전한 분해를 추구하지 않고 유해물질을 전이시키는 데 목적이 있음

Green algae - 오염물에 저항성이 강하고 낮은 D.O.에 존재.

적용 : 나프탈렌(by *Oscillatoria*), DDT(by *Dunaliella*: 다양한 염도에 저항성이 있음)의 분해, Chromatiaceae(purple sulfur), Rhodospirillaceae(purple nonsulfur bacteria: Nitrosamine을 무해한 물질로 전이)(Table 1)

(5) Anaerobic bacteria

- 종류: 1. Hydrolytic bacteria-생체량의 주요성분을 catabolize 시킴(saccharides, proteins, lipids)
 2. H₂-producing, acetogenic bacteria- 위 1.로부터 catalyze시키는 products.
 3. Homoacetogenic bacteria (multicarbon compounds -- acetic acid)
 4. Methanogenic bacteria - anaerobic sediments, digesting sewage sludge, rumen samples로부터 획득 가능)

분해대상 : saccharides, protein, lipids, fatty acids, multicarbon compounds

특징 : 혐기성의 조건에서 특화

(6) Oligotrophic bacteria

종류 : *Clostridium*, *Actinomyces*(*Nocardia*), *Coryneforms*, *Mycobacteria*

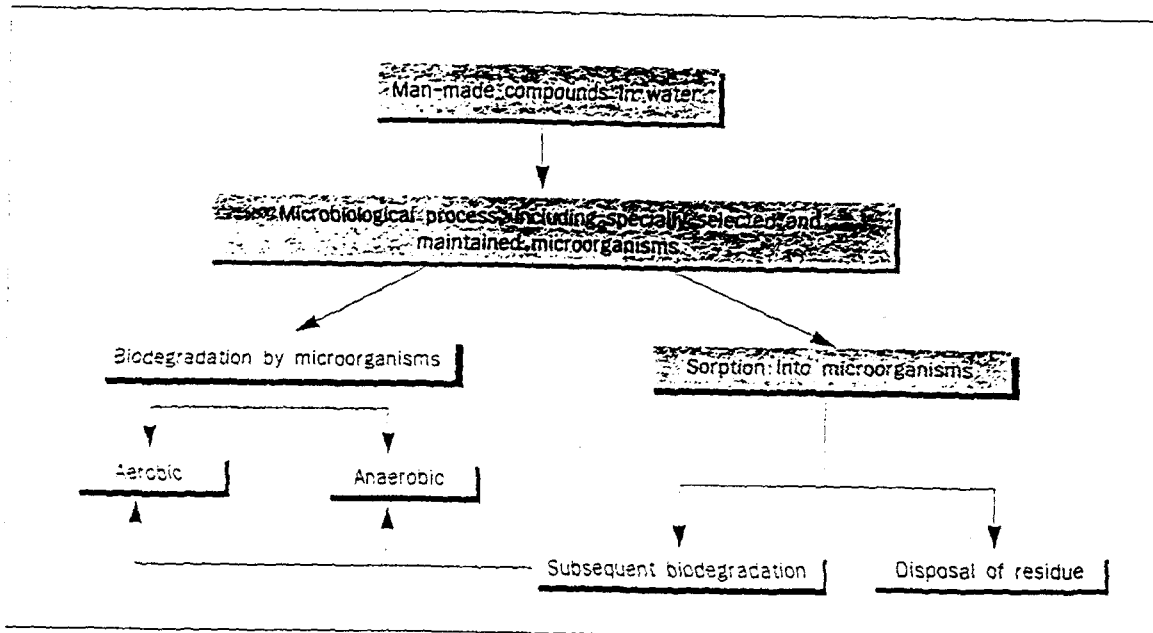
특징 : 저농도의 탄소(1 mg/l/d)로도 생존 가능, 빈영양상태에서 장시간 생존(최고 30일)
 다종의 유도효소를 가지며, 혼합된 기질을 이용할 수 있다.

적용 : 유기물에 오염된 물, 폐수처리시의 유출수에 이용

2) 미생물의 선택적 사용

선택적인 미생물을 사용하여 생물학적 처리방법을 개선하는 데 있어서 가장 중요한 점들은 미생물들의 선택, 발전 그리고 retention이다. 그리고 상대적인 화합물들의 저항성 역시 고려되어야 한다. 비록 미생물의 선택이 미생물들의 가장 바람직한 종류들을 개발하기 위한 다양한 유전공학 기술에 기초를 둔다 할지라도, 선택된 미생물들의 변성과 maintenance에 접근하기 위한 실질적 방법들은 원하는 미생물의 종들만을 encourage시키기 위한 환경요인들에 의해 좌우된다.

Fig 1. Biochemical removal of man-made organic compounds from water



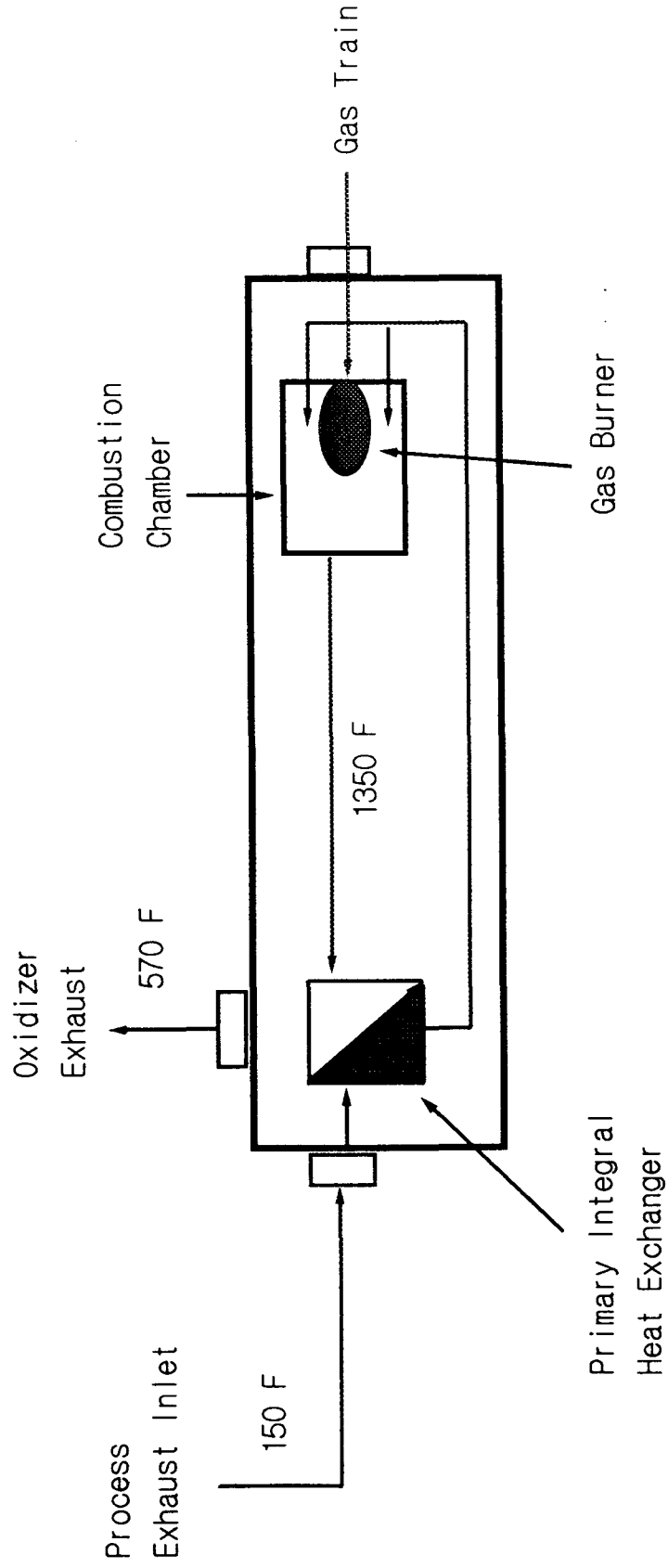
3. 결론 및 고찰

인간에 의해 생성된 화합물들의 생물학적인 처리를 위한 novel 미생물들의 사용은 전에 없었던 새로운 개념이다. 앞서가는 많은 연구개발결과들이 실제 large-scale로 적용이 가능하겠지만, 무엇보다도 가장 중요한 문제는 다른 종류의 미생물들에 의한 특정화합물들의 생분해를 위한 metabolic pathway의 개선이다. 많은 미생물의 metabolic 능력은, 특히 algae나 oligotrophic bacteria에서 아주 빈약하게 이해되고 있다. 특히 더 많은 novel cultures들을 위한 “실제 세계”처리 system에서 필요로 하는 적합한 종류의 미생물들의 선택에 더 많은 연구를 필요로 한다. 그리고 유전적으로 조작된 특정 목적의 유기체를 개발하기 위해서는 서로 다른 종류들의 미생물 유기체들의 유전적 구조의 이해에 주된 역점을 두어야 한다.

참고문헌

1. Atlas, R.M., and D. Pramer. Focus on Bioremediation, ASM news, 56:7-8, 1990.
2. Atlas, R.M., Bej, A.K., DiCesare, J.L., and McCarty, S.: 204th American Chemical Society National Meeting, Washington D.C., 1992.
3. Bakken, L.R.: Separation and purification of bacteria from soil. Appl. Environ. Bacteriol, 49:1482-1487, 1995.
4. Bluestone, M.: Microbes to the issue. Chemical Week, 139(17):34-35, 1986.
5. Kim, M.H., and L.S. Clesceri.: Factors affecting the recovery of microbial DNA from contaminated soil and validation of hybridization quality. Proceedings of the 49th Industrial Waste Conference, Lewis Publisher, Chelsea, Michigan, 1994
6. Kim, M.H.: Bioremediation and Biotechnology, J. of Technology Innovation, 8(2):64-71 1995.
7. Kim, M.H.: Microbial characterization for the assessment of the bioremediation potential on MGP soils. J. of Korean Solid Waste Engineering Society, 12(2):223-230, 1995 .:

<그림 1> Recuperative Thermal Oxidizer의 개략도



<그림 2> Regenerative Thermal Oxidizer의 개략도

