[報 文]

KOR. J. ENVIRON. TOXICOL.
Vol. 11, No. 1~2, 31~39 (1996)

생물학적 방법에 의한 도시생활폐기물 매립지의 침출수 독성특성 평가

황 인 영 · 류 경 무

인제대학교 자연대학 환경학과

Biological Evaluation for Characteristics of Leachate Toxicity from Municipal Solid Waste Landfill

In Young Hwang and Kyong Moo Ryu

Department of Environmental Science, INJE University
Kimhae, Kyongna, Korea

ABSTRACT

Leachate from municipal solid waste (MSW) landfill, effluent from leachate treatment plant, and ground water sample from a monitoring well near landfill site were tested for an acute toxicity. Microtox toxicity test was used for testing the acute toxicity of leachate and other samples. EC_{50} values which a concentration of pollutant for reducing 50% light output from luminescent bacteria, Photobacterium phosphoreum were determined to assess the toxicity of pollutants as well as the relative toxicity. In addition, characteristics of leachate were studied and compared to those of phenol and pentachlorophenol (PCP) which are typical aquatic toxic pollutants.

For leachate, EC_{50} for 30 min incubation was 10.8%, while for phenol and PCP, 46 ppm and 1.2 ppm, respectively. the relative toxicity of treated leachate by in situ aeration with activated sludge was reduced to more than 75% of toxicity of the untreated leachate. Microtox toxicity test was failed to figure out EC_{50} values for groundwater from a monitoring well since the relative toxicity of the unconcentrated sample was too low to estimate EC_{50}. Addition of activated carbon to leachate was reduced the relative toxicity. The reduction Pattern of the relative toxicity of leachate by mechanical aeration was similar to that of PCP, but different from that of phenol.

These findings suggest that the toxicity of leachate may come from PCP-like toxic compounds rather than phenol-like one. In conclusion, the process of aeration with activated sludge might be very important to reduce the environmental toxicity of leachate. And Microtox test could be a reasonable bioassay for screening and monitoring the environmental toxicity of leachate from municipal solid waste landfill as well as for determining the reduction efficiency of the leachate toxicity by various treatment processes in leachate treatment plant.

Key words : Leachate, Toxicity, MSW, Landfill, Bioassay, Microtox

서 론

폐기물 매립지에서 발생하는 침출수가 그 속에 함유되어 있는 유독성 물질들로 매립지 인근 토양이나 지하수 뿐만 아니라, 주변 하천과 저수지 등을 오염시키기 때문에[1,2], 신규 폐기물 매립지는 반드시 침출수 차집장치 및 처리시설을 설치한 위생매립을 시행하도록 국내법으로 규정하고 있다[3]. 침출수는 일반적으로 독성이 매우 강하므로[4] 무독화 또는 독성의 극소화를 한 후 하수처리장으로 이송해서 최종 처리하거나, 하천 등으로 방류하여야 한다. 그러나 지형적 여건상 매립지에서 발생하는 침출수를 하수처리장으로 이송하는 것이 불가능할 때, 하천으로 방류하게 되는 침출수는 방류전 철저한 침출수의 처리가 필요하다[5]. 이때 방류하고자 하는 처리된 침출수가 환경관리 규정에 맞도록 수질을 향상시켜야 한다. 도시생활 폐기물의 위생매립지 침출수의 수질향상을 위해 사용하고 있는 일반적인 처리공정들로는 응집제 처리, 폭기조에서의 미생물에 의한 물질분해, 고형물 침전, 그리고 생물학적 여과막 투과 등이 있다. 무기물질 또는 부유물질은 응집 및 침전시키고, 유기물질들은 미생물에 의해 호기적, 혐기적으로 분해시킨 후 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD) 및 부유물질의 총량(TSS) 등의 항목들을 환경기준 이하로 유지하여 외부로 방류하게 된다.

침출수의 수질특성을 평가하는 것은 침출수의 처리와 방류기준을 결정하는 중요한 인자가 된다. 침출수의 수질은 BOD, COD, TSS, pH, 알칼리도, 경도, 총질소량, 암모니아성 질소량(NH_3-N), 총인량, 그리고 주요 중금속류 등의 무기물 함량을 측정함으로써 평가할 수 있다[6]. 한편, 시간이 경과함에 따라 매립지에서 발생되는 침출수의 성상은 연속적으로 변화하게 되므로 침출수의 위해성을 예측하기 위해서는 위와 같은 측정항목들은 지속적으로 관측하여야 한다. 그러나 기존의 방류수에 대한 환경기준은 단순히 몇몇 중요한 화학물질들의 농도 등을 측정하는 것으로 제한하고 있기 때문에, 매립폐기물의 성상에 따라 달라지는 침출수의 환경독성을 앞서 열거한 측정항목들만으로 정확히 표현할 수 없는 경우가 있다. 예를 들면, 난분해성 유기독성물질은 활성오니에 의해 잘 분해가 되지 않을 뿐더러, 미량의 농도로 존재해도 해당물질에 의한 환경피해가 심각할 수 있다. 그러나 침출수 속에 있는 미량의 고독성물질은 침출수 전체의 COD 값에 큰 영향을 미치지 못한다[7]. 즉, 침출수 또는 방류수의 값이 비록 환경관리기준 이하라 해도, 그 속에 고독성물질이 포함되어 있으면 환경피해가 일어날 가능성이 있다.

그렇기 때문에 침출수의 환경독성을 평가하는 것은 환경피해를 예측하고 나아가서 침출수를 처리하는 기준을 설정하는 과정에서 매우 중요한 항목이 된다. 침출수의 독성을 평가하기 위하여서는 분석화학적 또는 생물학적 방법을 사용하게 된다. 침출수의 독성물질의 존재 유무 및 그의 농도 등을 결정하고 그에 따른 독성을 양과 반응의 관계로부터 판정하는 것이 분석화학적 독성평가 방법이다. 그러나 매립폐기물의 침출수에 함유될 가능성이 있는 물질들은 수 없이 많기 때문에 독성물질들의 농도를 일일이 분석하며 확인할 수도 없을 뿐만 아니라, 이들이 혼재되어 있는 경우 혼합효과를 나타내기 때문에 복합적인 독성을 평가하기란 용이한 일이 아니다. 그러므로 이러한 혼합물질의 복합독성을 평가하기 위하여 생물학적인 방법을 사용하여야만 한다.

침출수의 독성을 생물학적인 방법으로 측정하기 위하여 사용되는 대표적 생물종류로 식물체, 무척추동물, 또는 발광성 미생물 등이 있다[8-12]. Microtox 독성 검사방법은 발광성 미생물(*Photobacterium phosphoreum*)을 이용하여 발광도 저해정도를 측정함으로써 해당물질의 독성을 판정하는 생물학적 기법이다[13]. *Photobacterium phosphoreum*은 자가 생성된 ATP의 일부를 NADH와 Flavo-protein을 필요로 하는 Luciferase의 조효소로 사용하여 가시광선(λ =490 nm)을 발생한다. 독성물질이 미생물 내부에서의 ATP나 NADH의 생산량 또는 에너지 전달체계에 영향을 미치게 되면, 그 효과로써 발광량이 달라지게 되는 원리를 이용하여 물질의 독성을 판정하게 된다. Microtox를 이용한 환경독성 평가는 신속하고, 간편하며, 측정값의 편차가 타 생물시험법에 비해 근소하기 때문에 산업폐수, 저질오염층, 그리고 폐기물 침출수 등을 대상으로 한 독성 예비검색 시험(screening toxicity test)에 많이 활용되고 있다[14].

경남 김해지역의 도시생활 폐기물 위생매립지에서 발생하는 침출수의 독성과 침출수 처리공정 간에 감소되는 독성의 정도를 Microtox를 이용한 생물학적 방법으로 측정하였다. 또한 침출수의 독성 형태를 파악하기 위하여 대표적 유기독성 수질오염물질인 phenol과 PCP을 선택하였으며, 이들 수용액을 활성탄처리

또는 폭기 (mechanical aeration) 처리한 후, Microtox독성을 측정하고 동일한 처리에 의한 침출수의 독성변화와 비교하였다. 이러한 연구결과는 침출수 독성의 특성을 생물학적으로 분석하는 단초를 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 침출수의 위해성 평가나 침출수에 의해 오염된 지하수의 수질 연구 등에 큰 도움이 되리라 생각한다.

재료 및 방법

시 약

Phenol, PCP 등은 Sigma Chemical Co.의 제품을 사용하였으며, Microtox용 diluent solution, osmotic solution 등은 Microbics사에서 구입하였다. 발광성 미생물인 *Photobacterium phosphoreum*은 Microbics사에서 냉동보관용을 주문하여 사용하였다. 흡착용 활성탄은 입자활성탄을 유자사발에 곱게 갈아 분발로 만들었다.

침출수 및 침출수의 현장처리

침출수 원수와 단계별로 처리된 침출수는 경남 김해시에 위치한 생활쓰레기 위생매립장의 침출수 처리공장에서 채수하였다[15]. 매립현장에서의 침출수 처리를 위한 공정 개념도와 시료채수 위치는 그림 1과 같았다. 매립지에서 차수되어 침출수 처리공장으로 들어오는 침출수를 침출 원수 (Leachate, L), 화학적 응집제를 처리하고 폭기조로 이송하기 직전의 시료를 1차 처리수 (T1), 폭기 후 제1, 2차 침전조를 거쳐 회전방식 생물여과막처리 전의 시료를 3차 처리수 (T3), 회전방식 생물여과막 처리 후의 시료를 4차 처리수 (T4)로 명명하였다. 이때, 제1차 침전조의 상등액인 2차 처리수 (T2)는 T3와 유사하므로 본 실험재료로는 채택하지 않았다. 한편, 여러공정을 거쳐 하천으로 최종 방류되는 방류수 (Effluent, E)와 매립지 하단에 위치한 지하수 관측공의 지하수 (GW)를 침출수 및 각 처리수들과 비교하기 위하여 채수하였다. 각 시료는 채수현장에서 1L 크기의 유리병에 넣고 밀봉하여 실험실의 냉장고 (4°C)에서 실험에 사용할 때까지 보관하였다. 시료의 총 보관기간은 4주를 넘지 않았다.

침출수의 실험실내 처리

침출수에 함유되어 있는 유기독성물질을 활성탄으로 흡착시키기 위하여 다음과 같이 흡착을 실시하였다. 침출수를 20 ml크기 Borosilicate scintilation vials에 각각 나누어 넣고 분말 활성탄을 0.1, 1, 10, 20 g/L의 농도가 되도록 조절한 후 teflon liner가 들어있는 screw cap으로 밀봉하였다. 왕복진탕기 (KMC-8480SR Shaker, Korea Manhattan Co., 120

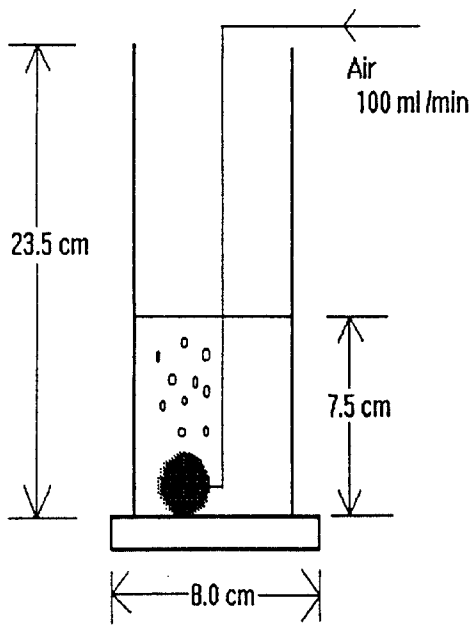

Fig. 2. Diagram for Mechanical Aeration of Leachate, Phenol, and Pentachlorophenol (PCP) Solutions.

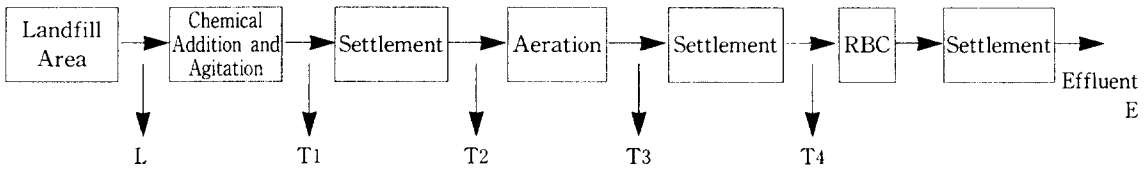

Fig. 1. Flow Chart for Leachate Treatment Plant. RBC means rotary biological contacts.

ppm)를 이용하여 24시간 동안 진탕하였다. 이와 더불어, 침출수의 휘발성 독성물질의 물리적 제거를 위하여 그림 2와 같은 장치를 만들고 상온에서 침출수를 폭기시켰다. 폭기 중 물의 증발로 인해 자연 감소되는 액량은 증류수로 보충하여 물질의 농축현상을 방지하였다. 폭기 시간(0, 3, 6, 9, 15, 24, 48 및 72시간)별로 시료(각 3.0 ml)를 채취하였다. 흡착시료 및 폭기시료는 각각 원심분리(Eppendorf Centrifuge, 1300 ppm×20 min)를 하고 상등액을 취하여 다음 실험에 사용하였다.

한편, 침출수의 독성특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 실험을 병행하였다. 대표적 수질오염물질이나 물리화학적 성질이 구분되는 물질들 가운데 phenol과 PCP를 모델물질로 선정하여 앞서 언급한 흡착과 폭기실험을 각각 행하였다. Phenol을 증류수에 용해시켜 100 ppm의 phenol용액을 만들었으며, PCP는 수용성이 낮으므로 dimethylsulfoxide (DMSO)으로 1000 ppm의 용액을 제조한 후 증류수로 5 ppm되게 희석하였다.

Microtox독성 측정

침출수 및 각 전처리된 시료들의 환경독성은 Microtox 독성 검사장치(Microtox Toxicity Test System, Model M500, Microbics Inc., Calsbad, CA, USA)를 이용하여 평가하였다. *Photobacterium phosphoreum*의 발광량 측정은 Microtox 표준시험법[16]에 따라서 또는 목적에 맞도록 변형하여 실시하였다. 즉, 미생물로부터 발생되는 광량(light intensity)이 독성물질에 의해 50% 감소되는 때의 물질의 농도를 EC_{50}로 하였으며, 이는 Microtox 표준시험법을 원용하였다. 상대적 독성의 평가방법은 Microtox표준시험법을 변형하여 사용하였으며 그 방법은 다음과 같았다. 500 $\mu\ell$ Diluent용액과 10 $\mu\ell$ 미생물 혼탁액을 혼합하여 15°C에서 15분간 예열하고 초기 발광도(Io)를 측정하였다. 한편, 15°C에서 예열한 액상시료 500 $\mu\ell$를 앞서 Io가 측정된 용액에 혼합하고 15°C에서 5 및 30분간 배양한 후 시간별 발광도(It)를 측정하였다. 각 시료의 독성(toxic unit, TU)은 TU=1-It-Io의 식을 이용하여 계산하였다. 시료간의 상대적인 독성(relative toxicity, RT)은 처리하기 전 시료의 TU를 100으로 하고, 해당시료의 TU값을 이와 비교하여 표현하였다. 위의 모든 Microtox 시험은 salinity를 유지하기 위한 Microtox표준시험법에 따라 osmotic solution을 첨가하여 실시하였다.

통계처리

MINITAB Computer program (Minitab Inc., State College, PA, USA)을 이용하여 Student t-test를 하였고, $p<0.05$ 수준에서 유의성을 검증하였다.

결 과

침출수의 환경독성, EC_{50}

침출수, 또한 비교독성 물질인 phenol과 PCP의 EC_{50}값은 표 1과 같았다. phenol에 비해 PCP의 독성은 약 40배 이상 강하게 나타났다. 이것은 PCP와 같은 독성물질이 시료속에 미량 존재하여도 그에 따른 환경독성이 강하게 나타날 수 있다는 것을 알려준다. 처리되지 않은 침출수(L)의 EC_{50}, 30 min는 10.8%로 침출원수의 환경독성은 12 ppm PCP용액, 또는 450 ppm phenol용액의 독성에 상응하는 값을 나타내었다. 한편, phenol이나 PCP의 EC_{50}값은 문헌상에 보고되어 있는 EC_{50}값들[17-19]과 유사하게 관측되었다. 이 결과는 Microtox를 사용한 침출수의 독성평가방법이 일반적인 생물학적 독성평가 방법의 단점인 계통오차발생을 극소화할 수 있다는 증거가 된다(토론에서 언급함).

Table 1. EC_{50} Values for 5 and 30 min Incubation of Luminescent bacteria, *Photobacerium phosphoreum*, with Phenol, Pentachlorophenol, or Leachate from Municipal Solid Waste Landfill.

Chemical	EC_{50}, 5 min	EC_{50}, 30 min
Phenol	43 ppm	46 ppm
Pentachlorophenol	2.3 ppm	1.2 ppm
Leachate	21.3%	10.8%

침출수 처리공정간의 독성변화

매립지에서 발생되는 침출수를 현장에서 처리하였을 때, 공정별 환경독성도의 감소정도는 그림 3과 같이 나타났다. 침출원수(L)의 독성과 비교하여 T1, T3 및 T4는 각각 4, 67, 그리고 75% 이상 감소됨을 보였다. 응집제를 처리하여 부유물질 등이 제거된 T1은

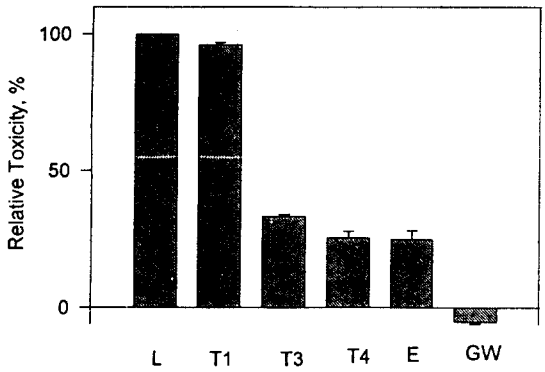

Fig. 3. Comparison of Relative Toxicities of Leachate (L), Treated Leachate (T1, T3, and T4), Effluent (E), and Groundwater (GW).

침출원수와 비교하여 볼 때, BOD, COD 및 TSS의 농도는 크게 감소하나(결과 미발표), 그의 독성이 거의 감소되지 않았다. 한편, 방류수(E)의 상대독성은 T4와 비교할 때, 별 차이가 없었다. 이 결과로 미루어 볼 때, *Photobacterium phosphoreum*의 발광도에 영향을 미치는 물질들의 대부분은 폭기과정에서 감소됨을 알 수 있다. 유기성 독성물질의 폭기조의 활성오니 미생물들에 의해 분해되거나, 폭기시 휘발성 독성물질들이 비산에 의한 농도 감소로 상대독성이 감소되었다고 추정된다. 매립지의 하단에 위치한 관측공의 지하수는 침출원수의 독성에 비해 그의 상대독성이 오히려 음수값으로 측정되었다. 이 현상은 지하수의 성분중 발광성 미생물의 성장을 촉진하는 물질이 존재할 수 있다는 가능성을 보여주고 있으나, 이에 대한 연구가 더욱 필요하다.

활성탄 흡착에 의한 침출수의 독성 변화

활성탄에 의한 물질의 흡착이 독성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각 용액에 활성탄을 넣고 흡착시켰다. 활성탄 혼탁액을 원심분리하고 그의 상등액을 취하여 독성을 측정한 결과는 그림 4와 같다. 활성탄의 양이 증가함에 따라 침출수의 독성이 감소되는 것은 *Photobacterium phosphoreum*의 발광을 저해하는 물질들이 활성탄과 흡착이 일어나는 물질류임을 시사한다. 그러나 phenol이나 PCP와는 달리 침출수에 다량의 활성탄을 처리해도 독성이 완전히 제거되지 않는 현상은 활성탄에 흡착이 일어나지 않는 성분들도 함께 존재하고 있음을 보여준다. 즉, 침출수에는 흡착

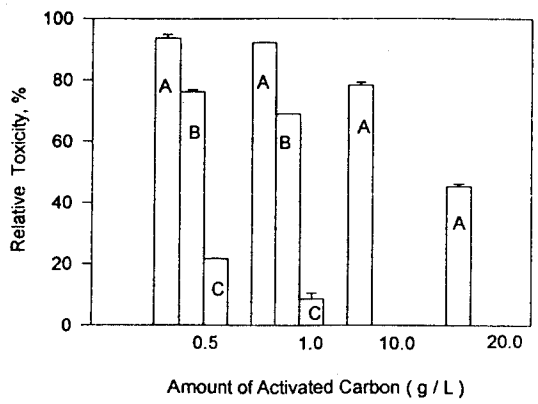

Fig. 4. Change of Relative Toxicities of Leachate (column A), Phenol (column B), and Pentachlorophenol (PCP, column C) as the Addition of Various Amount of Activated Carbon.

이 원활히 일어나는 유기독성물질류와 비흡착성 무기독성물질, 예를 들면 중금속류들이 혼재하고 있다는 보고들과 유사성을 보이고 있다[2)20)]. 한편, phenol과 PCP간의 활성탄에 의한 흡착효과의 차이는 나타나지 않았다.

폭기에 의한 침출수의 독성변화

폭기가 침출수의 독성감소에 미치는 영향 정도를 파악하기 위하여 앞서 언급한 폭기장치로 침출수를 처리하고 시간별로 변하는 독성을 침출원수의 독성과 비교하였다. 이와 병행하여 독성변화의 형태를 파악하기

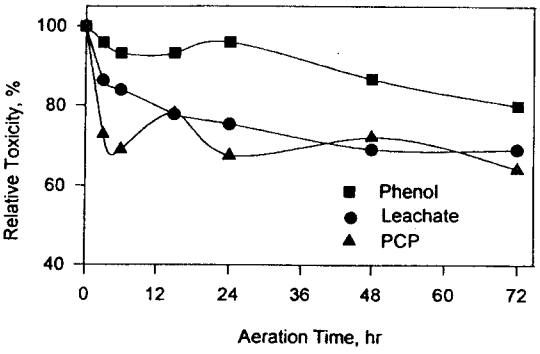

Fig. 5. Change of Relative Toxicities of Leachate, Phenol, and Pentachlorophenol (PCP) with Mechanical Aeration.

위하여 침출수 폭기와 동일한 상태에서의 phenol용액과 PCP용액의 폭기처리에 따른 독성변화를 측정하였으며, 그 결과는 그림 5와 같았다. 실험기간중에 발생하는 침출수 농축현상은 시간별 시료를 채취하기전 증류수로 보정하였으므로 그에 따른 독성의 변화는 무시할 수 있었다. 폭기에 의한 침출수의 독성변화는 그 형태가 PCP의 경우와는 유사한 phenol의 경우와는 현저히 다르게 나타났다. 그러므로 폭기에 의한 독성감소 효과는 수용성이 큰 물질(phenol)보다 작은 물질(PCP)에게 더욱 큰 것을 알 수 있다. 이 결과는 물질의 수용성과 액체상태에서 기체상태로의 이동성을 판단할 수 있는 중요한 물리화학적 인자들은 각각 옥타놀-물 분배계수(octanol-water parition coefficient, Kow)와 헨리상수(Henry's constant, Hc)이며, PCP의 Kow 및 Hc값이 phenol의 것들 보다 월등히 큰 결과들과 일치하고 있다[21]. 이러한 현상은 침출수에 포함되어 있는 물질들 가운데 독성들 가운데 독성을 유발하는 물지로서 phenol의 물리화학적 특성보다는 PCP의 특성과 비슷한 독성물질들이 존재할 수 있음을 말해준다.

토 론

phenol과 PCP의 $LD_{50(Rat)}$는 각각 530 mg/kg, 146 mg/kg로 인체가 이들 물질들에게 낮은 농도로 장기간 노출되는 경우 신장과 간장 등이 손상을 입는다고 알려져 있다[22]. EC_{50}가 10.8%인 침출수(표 1)에 의해 야기될 수 있는 환경피해를 단순히 phenol이나 PCP의 환경독성에 해당하는 피해로 환산하는 경우, 450 ppm phenol이나 12 ppm PCP용액이 방류되는 효과가 나타날 수 있다. 더우기 소규모 MSW매립지의 침출수의 발생량이 최소 50~100톤/일 임을 고려할 때, 침출수가 미처리되는 상태로 하천이나 토양속으로 방출되는 경우 예상되는 환경독성 피해는 더욱 심각하게 된다. 연구대상으로 선정된 김해의 MSW매립지에서는 발생하는 침출수의 독성을 현장에서 환경독성을 기준으로 할 때, 1/5 이하로 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다(그림 3). 이러한 연구결과들로부터, 환경오염을 방지하고 주민의 보건을 지키기 위해서는 폐기물 매립지의 침출수의 무독성화를 위한 적절한 처리가 반드시 필요함을 알 수 있었다.

폐기물 매립지의 침출수에서 환경독성학적으로 특히 문제가 되는 것은 중금속류와 독성 유기화학물질류[4,23~25]이다. 이러한 물질들에 의해 인근 토양이나 지하수 또는 하천 등이 오염되면, 생태계 뿐만 아니라 주변 주민들의 건강이 치명적으로 피해를 입게 된다. MSW매립지 주변의 지하수를 음용수로 사용하는 주민들이 집단으로 중금속에 의한 피해 증세를 보이는가 하면[23,26], 독성유기화학물질 노출에 각종 질병들이 발생하기도 한다[27]. 더우기, 급성독성 또는 유전독성을 유발하는 염소계 유기화학물, 유기용제, 유기산류 등이 MSW에서 발생되는 침출수 속에 다량 함유되어 있다고 알려져 있다[28]. 그러나 BOD나 및 COD 등만으로는 이러한 물질들의 독성을 표현하기가 부족하다. 그러므로 매립지의 침출수 뿐만 아니라, 독성물질들을 함유할 가능성이 높은 공장의 폐수 등은 처리 후 그의 BOD나 COD가 현재의 환경기준에 미치지 못한다 해도, 이와 아울러 철저한 독성검사를 행하여야 할 필요성이 있다.

침출수의 위해성 평가는 침출수 처리효율의 결정 및 처리후 최종 방류기준을 설정하는 과정에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 일반적으로 독성물질의 위해성을 평가하고자 할 때는 우선 해당물질의 위험성을 확인하고, 양-반응의 관계 등을 규명한다[29]. 이 때 양-반응의 관계를 설정하는 것은 물질의 농도가 높을수록 반응 즉 독성이 증대한다는 가정을 포함한다. 이러한 가정은 해당물질이 단일성분으로 이루어져 있는 경우에 비교적 잘 적용되나 복합성분의 물질인 경우에는 결과예측에 혼란을 야기시킨다. 여러가지의 물질이 혼재하여 한 생물체에게 독성을 일으킬때, 단순한 가산적용(additive effect)이 아닌, 상승 또는 길항작용을 하는 경우가 많기 때문이다. 예를 들면, atrazine의 독성보다 copper가 혼재된 atrazine의 독성이 더욱 강해지며[30], kepone의 독성은 사염화탄소가 함께 존재할 때 70배 이상 상승한다[31]. 반면에 Cu, Zn, Pb, As 등이 혼합되면, 각 중금속 성분이 보이는 독성의 합보다 적은 값의 독성이 나타난다[32]. 그렇기 때문에 매립지 침출수, 산업공장 하폐수, 폐기물 등 수 많은 독성물질들이 혼재되어 있는 복합불질들은 물질의 양을 측정하고 그 결과로부터 반응 또는 환경피해 등을 예상하는 분석화학적 기법만을 사용하여 그들의 환경독성을 정확히 평가할 수 없다. 이러한 복합물질의 독성을 평가하기 위해서는 생물학적 독성 검정법을 활용하게 된다.

침출수의 생물학적 독성 평가는 물벼룩, 물고기, 식물 등을 이용하는 방법이 알려져 있다. 물벼룩(Da-

phnia magna)를 이용하는 생물학적 기법은 MSW나 산업폐기물의 매립지에서 발생하는 침출수의 독성을 검색할 수 있는 방법으로 잘 확립되어 있다[11]. Duckweed (*Lemna minor*)[9]를 사용하여 도시생활쓰레기 (MSW)매립지의 침출수 독성을 평가하는 경우, 엽록소 파괴로 인한 탈색, 식물체의 성장저해 등이 독성평가를 위한 측정인자(endpoint)가 될 수 있다. 지표수 어종인 *Sarotherodon mossanbicus*의 LC_{50}, 96 hr를 endpoint로 침출수의 독성을 평가[33]할 수도 있으나, 연속적인 독성변화의 관찰이나 여러 조건하에서 발생되는 침출수의 독성을 검색하는 방법으로는 적다하지가 못하다. 더우기 어류를 대상으로 한 급성독성평가 자료인 LC_{50}의 유용성에 대하여 논란이 많다. 이 때문에 만성 또는 아급성 독성시험을 요구하게 되나 이것은 경제성이 제한요소가 된다.

그러므로 경제적이고도 신속하며, 어류 등의 시험종을 대체할 수 있는 생물학적 독성평가법의 개발이 요구되고 있다. 현재까지 알려져 있는 방법중 발광성 미생물인 *Photobacterium phosphoreum*을 사용하는 Microtox독성평가법이 매우 유용하다고 알려져 있다[14]. 특히, Microtox방법은 타생물종의 실험결과와의 호환성이 높고, 독성물질의 종류에 따라서는 낮은 농도에서도 독성평가가 가능하며, 30분내에 독성평가가 이루어지는 장점이 있다. 그러므로 Microtox를 이용한 독성평가기법은 수 많은 독성물질들이 혼합되어 있는 매립지 침출수의 환경독성을 검색 및 평가할 수 있는 이상적인 방법이 될 수 있다. 이와 더불어 본 실험에서 획득한 Phenol과 PCP의 EC_{50}값 (표 1)이 문헌상의 값들과 매우 유사하게 관측되었다는 사실은 생물학적 독성평가 기법으로 Microtox를 사용할 수 있는 중요한 이유가 된다. 일반적으로 생물학적 방법으로 물질의 독성을 평가하게 되는 경우, 시험생물체의 strain, 시험생물체의 유지 및 배양법, 시험관측자의 숙련도, 시험당시의 외부조건 등에 영향을 받게 되며 이는 곧 계통오차 (systemic errors)의 원인들이 된다. 그러나, Microtox 시험방법은 앞서 언급한 인자들이 물질독성평가에 미치는 영향들을 최소화하여 생물시험시 발생되는 계통오차를 극소화 할 수 있음이 확인되었다. 이러한 이유때문에 캐나다 환경청에서는 *Photobacterium phosphoreum*을 이용하여 화학물질, 방류수, 침출수, 저질토, 합천합류지점, 폐수 방류지점의 하천수 등의 환경독성을 검색하는 생물학적 방법으로 공인하고자 심의중에 있다[34].

결 론

Microtox를 사용하여 MSW매립지의 침출수 독성을 측정하고 그 특성을 연구하였다. 침출수의 환경독성은 대표적 수질오염물질의 환경독성과 단순 비교시, 450 nm phenol용액이나 12 ppm PCP용액의 독성에 해당하였다. 침출수를 방류수 기준에 이루도록 매립지 현장에서 각종 처리를 행하고 방류시킬 때, 독성은 약 80% 가량 감소하였다. 침출수에 활성탄 흡착이나 폭기처리를 하였을 때, 독성이 감소되는 형태는 톡성 비교물질중에 phenol보다는 PCP의 성질과 비슷하였다. 이와 같은 결과들로부터 MSW 침출수속에 PCP의 성질과 유사한 유독성 물질들이 존재함을 알 수 있었다. 또한 Microtox독성 검사방법으로 침출수의 환경독성을 검색할 수 있음을 확인하였다.

아울러, 수질 환경기준에 맞는 방류수라 하더라도 환경독성이 관측되는 연구결과는 환경부의 규제 규정인 하천수의 환경기준 항목을 변경해야 하는 필요성을 시사한다. 즉, 현재의 하천수질 평가항목으로 중요시되는 것은은 COD, BOD, pH, 부유물질량 등이나, 유독성분을 포함하고 있을 가능성이 큰 공장의 폐수나 폐기물 매립지의 침출수 및 처리된 방류수 등에 대한 환경기준 설정시 환경독성평가 항목을 반드시 설정해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 한국학술진흥재단의 1995년도 지방대 육성 지원 연구비 (과제번호 : 02D 683)로 수행하였으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Saint-Fort, R : Ground water contamination by anthropogenic organic compounds from waste disposal sites: Transformations and behabiour. *J. Environ. Sci. Health-Environ Sci. Eng.* A26, 13-62(1991).
2. Rule, JH : Municipal landfill leachate in the ground and surface water, Chesapeake, Virginia: heavy metals. *J. Environ Health*, **42**, 60-63(1979).
3. 환경부 : 수질환경보전법(1992).
4. clark, CS, Meyer, CR, Gartside, PS, Majeti,

VA, Specker, B, Balistreri, WF and VJ Elia : An environmental health survey of drinking water contamination by leachate from a pesticide waste dump in Hardeman County, Tennessee. *Arch. Environ. Health*, **37**, 9-18(1982).

5. Loisidou, M, Vithoulkas, GN, and E. Kapetanois : Physical chemical treatment of leachate from landfill. *J. Environ. Sci. Health-Environ. Sci. Eng.* A27, 1059-1073(1992).
6. Shams-Khorzani, R., Knox, TD and RC, Brockway : Sanitary landfill leachate treatment and disposal. *Public Works*, June, 46-49(1994).
7. Brown, MA, Kim, IS, Roehl, R, Sasinos, FI and Stephens, RD : Analysis of target and nontarget pollutants in aqueous leachates from the hazardous waste site Stringfellow, California, via ion chromatography-particle beam and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chemophere*, **19**, 1921-1926(1989).
8. Devare, M and M, Bahadir : Biological monitroring of landfill leachate using plants and luminescent bacteria. *Chemophere*, **28**, 261-270(1994).
9. Clement, B and G, Merlin : The contribution of ammonia and alkalinity to landfill leachate toxicity to duckweed. *Sci. Total Environ.* **170**, 71-8(1995).
10. Clement, B and Y, Bouvet : Assessment of landfill leachate toxicity using the duckweed *Lemna minor*. *Sci. Total Environ.*, May, 1179-1190(1993).
11. Assmuth, T and S, Penttila : Characteristics, determinants and interpretations of acute lethality in daphnids exposed to complex waste leachates. *Aquatic Toxicology*, **31**, 125-141(1995).
12. Gupta, G and P, Kelly : Poultry litter toxicity comparison from various bioassays. *J. Environ. Sci. Health-Environ. Sci. Eng.* A27, 183-1093(1992).
13. Richardson, M : Ecological monitoring. Ed. by M. Richardson, VHC Publisher, pp.384(1994).
14. 황인영 : Microtox를 이용한 펜타클로로벤젠과 펜타클로로페놀의 환경독성 평가. 인제논총, 11권 2호, 인쇄중(1996).
15. 조영하 : 김해지역 생활쓰레기 매립지 침출수 처리공장의 운용에 대한 보고서, 인제대학교 환경연구소(1996).
16. Microtox testing mannual : Microbics Inc., version 4, Calsbad, CA, USA(1994).
17. Samak, QM and R Noiseuk : *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* **990**, 288-308(1981).
18. Curtis, C, Lima, A, Lozano, SJ and GD Veith : In "*Aquatic toxicology and hazard assessment: fifth conference, ASTM 766*" ASTM, Philadelphia, pp.170-178(1982).
19. Mallak, FP and RL, Brunker : In "*Toxicity screening procedures using bacterial systems*" Marcel Dekker, New York, pp.65-76(1984).
20. Sullivan, PJ and WL, Morgan : Dilution of a municipal landfill leachate: Franklin County, Indiana. *J. Environ. Health*, **44**, 253-257(1982).
21. Schwarzenbach, R : In "*Environmental Organic Chemistry*", chapters, John Wiley & Sons, Inc., New York, p.1993.
22. Clayton, GD and FE, Clayton : Patty's industrial hygiene and toxicology, 4th Edition, V.II, Part B, pp.1605-1616(1994).
23. Meyer, CR : Liver dysfunction in residents exposed to leachate from a toxic waste dump. *Environ. Health Perspec.* **48**, 9-13(1983).
24. Webster, IA : Municipal solid waste landfills : the role of industrial wastes in those landfills. EPA *Mid-Atlantil Ind Waste 20th Conf*, Washington, DC, June 19-21, pp.377-382(1988).
25. Kerndroff, H, Schleyer, R, Milde, G and RH Plumb : Geochemistry of groundwater pollutants at German waste sites. In: *Groundwater Contam & Anal at Hazard Waste Sites*, Marcel Dekker, pp.245-271(1992).
26. James, SC : Metals in municipal landfill leachate and their health effects. *Am. J. Public Health*, **67**, 429-432(1979).
27. Glaubinger, Rs, Kohn, PM and Remirez, R : Love Canal aftermath: Learning from a tragedy. *Chem. Eng.* **86**, 86-92(1979).
28. Schrab. GE, Brown, KW and KC Donnely : Acute and genetic toxicity of municipal landfill leachate. *Water Air Soil Pollut.* **69**, 99-112(1993).
29. Paustenbach, DJ : *The risk assessment of environmental and human health hazards: a textbook of case studies*. Ed. by Dennis J. Paustenbach, John Wiley & Sons, New York, USA(1989).

30. Roberts, S, Vasseur, P and D, Dive : Combined effects between atrazine, copper, and pH on target and nontarget species. *Water Res.* **24**, 485-491(1990).
31. Kodavanti, PR, Joshi, UM and HM Mehendale : Chlordecone (Kepone)-potentiated carbon tetrachloride hepatotoxicity in partially hepatectomized rats-a histomorphometric study. *J. Appl. Toxicol.* **9**, 367-375(1989).
32. Wong, MH : Toxicity test of landfill leachate using *Sarotherodon mossambicus* (Freshwater fish). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **17**, 149-156 (1989).
33. Environmental Canada : Biological test method : Toxicity test using luminescent bacteria (*Photobacterium phosphoreum*). *Environ Can Report EPS 1/RM/24*, Nov.(1992).