

생태독성학적 기법을 이용한 토양오염평가 방안

안윤주^{1*} · 정승우²

¹건국대학교 환경과학과, ²군산대학교 토목환경공학부

Soil Pollution Assessment Based on Ecotoxicological Methods

Youn-Joo An^{1*} · Seung-Woo Jeong²

¹Department of Environmental Science, Konkuk University

²School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

Chemical analyses are generally used to assess contaminated soils and to monitor the efficiency of soil remediation. In this study, the ecotoxicological methods was suggested to evaluate soil pollution by using a battery of bioassay. Plant assay and earthworm assay were conducted to evaluate ecotoxicity of soils contaminated by heavy metals (cadmium and copper) and oil (BTEX compounds, toluene). Test plants were *Zea may*, *Triticum aestivum*, *Cucumis sativus*, and *Sorghum bicolor*. The presence of heavy metals decreased the seedling growth. *Cucumis sativus* and *Sorghum bicolor* seemed to be good indicator plants which are sensitive to heavy metal pollution as well as BTEX contamination. An earthworm bioassay was performed to predict the ecotoxicity in toluene-contaminated soils, based on a simple contact method. *Perionyx excavatus* was adopted as a test earthworm species, and the severity of response increased with increasing toluene concentrations. The present study demonstrated that ecotoxicological methods could be a quantitative approach to evaluate contaminated soils.

Key words : Soil pollution assessment, Heavy metal, Oil, Ecotoxicity, Bioassay

요 약 문

본 연구는 물리화학적인 평가방법에만 의존하고 있는 토양오염평가에 대해 생태독성학적 방법(ecotoxicological methods)을 도입하기 위한 방안을 제시하였다. 오염물질에 민감하게 반응하는 토양생물을 이용하여 단기간에 결과를 얻을 수 있도록 측정방법을 고안하고, 대상토양에서의 생존 및 성장률을 정량적인 방법으로 측정하여 토양의 안전성 및 오염정도를 평가하였다. 실험연구는 토양 동·식물 모두를 포함하기 위한 노력의 일환으로 식물독성 실험(발아 및 성장저해실험), 그리고 토양 무척추동물 독성실험(단순접촉법에 의한 생존률 실험)으로 구성되었다. 식물독성실험에서는 국내 주요농작물인 *Zea may*, *Triticum aestivum*, *Cucumis sativus*, 그리고 *Sorghum bicolor*를 대상 식물로 하여 중금속 토양의 오염정도와 식물의 성장률, 식물 내 중금속 축적량의 상관관계를 분석하고, 이들 실험식물 중에서 토양오염의 평가에 적합한 식물지표종으로 *Cucumis sativus*와 *Sorghum bicolor*를 제안하였다. 토양무척추동물 독성실험에서는 국내사육종인 *Perionyx excavatus*를 이용하여 톨루엔오염토양을 평가하였다. 본 연구에서 제시한 토양생물을 이용하는 생태독성학적 평가방법은 물리화학적 측정방법과 함께 토양오염을 평가하는 정량적인 방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 토양오염평가, 중금속, 유류, 생태독성, 바이오에세이

*Corresponding author : anyjoo@konkuk.ac.kr

원고접수일 : 2005. 7. 26 게재승인일 : 2005. 10. 25

질의 및 토의 : 2006. 2. 28 까지

1. 서 론

도시화 및 산업화의 가속화로 국토의 토지사용이 양적으로 늘어나고 있다. 또한 근래 사회·경제적 변화에 따라 공장, 유류저장시설(주유소 포함), 폐기물매립지역이 주거 및 레크리에이션 지역 등으로 토지사용 목적이 빈번히 변화하고 있는 실정이다. 최근 경기도의 조사 자료에 의하면 조사 대상 제조업 264개사 중 73%가 부지를 이미 매각하였거나 이전계획이 있었으며, 대부분의 매각부지위에 공동주택단지가 조성될 계획인 것으로 나타났다(경기도, 2003). 제조공장, 주유소, 비위생 매립 지역의 경우 토양 및 지하수오염의 개연성이 매우 높아 앞으로 토지용도 변경시 이에 따른 토양환경평가가 면밀히 시행될 되어야 할 것이다. 그 이유는 토양오염물질의 대부분은 인체에 직접적 영향을 미칠 뿐만 아니라 생태계에 독성을 나타내고, 생태독성(ecotoxicity)은 생태계의 먹이사슬 경로를 통해 궁극적으로 인간에게 돌아오기 때문이다. 근래 오염 토양 복원기술개발에 대한 노력과 관심은 증대되고 있지만 토양오염 지역을 선별하고 평가하는 방법 및 체계에 대한 연구는 비교적 적게 이루어지고 있다.

토양오염평가는 오염토양지역을 색출하는데 그 목적이 있을 뿐 아니라 복원 후 처리토양의 안전성을 검증하기 위해서도 반드시 필요한 과정이다. 토양오염평가 결과는 현재 또는 복원 후 토양의 오염정도를 평가하여 농경지, 주거지 등으로의 토지이용목적에 결정하는 데에도 큰 역할을 담당할 수 있으며 일정한 토양오염 기준을 설정하는데 있어서도 토양오염평가 결과가 유용하게 이용되기도 한다. 미국은 토양오염지역에 대하여 건강위해성평가(health risk assessment, HRA)와 생태위해성평가(Ecological risk assessment, eRA) 등을 수행하여 부지의 오염정도를 위해성 개념에서 평가하고 복원목표를 설정하고 있다. 특히 ERA에서는 오염물질이 수용체인 동식물에 미치는 영향을 평가하는 방법으로 복원방법 및 복원목표 설정에 주요한 평가체계로 이용되고 있다(USEPA, 1997).

현재의 토양오염 측정을 위한 화학적 방법은 현장에서의 측정이 어렵고 분석비용과 시간이 많이 소요되며, 각 개별 토양오염물질에 대해서만 분석이 이루어진다. 화학적 분석 방법에 의한 각 개별 토양오염물질 측정 결과는 토양오염기준과 비교하여 위해 가능성을 간접적으로 판단할 수 있을 뿐이며, 여러 종류의 토양오염물질이 공존하는 오염현장의 경우, 복합 토양오염물질에 의한 부가적인 위해도 및 독성효과에 대한 정보는 전혀 제공해 주지 못한다. 따라서 물리화학적 분석방법에 의한 토양오염평가

방법과 더불어 생물학적 평가방법의 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 생태독성학적 토양오염평가의 장점은 크게 두 가지로, 첫째, 토양오염물질의 총량 중 생물이 용기가능한 양을 측정할 수 있으며, 둘째, 여러 가지 오염물질이 공존할 경우 복합독성을 반영할 수 있다. 복합 토양오염물질에 의한 복합적인 위해도(hazard)와 생물이용성(bioavailability)에 대한 자료가 주어진다면 이는 토양오염도 판단에 그치지 않고 생물학적 복원 공법(자연저감법, 식물상 복원공법, 미생물학적 복원 등) 적용에 대한 기초 자료로서 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 우리나라에는 현재까지 생물독성을 측정하여 활용할 수 있는 일반화된 방법이 없기 때문에 생물학적 평가가 이루어지지 못하고 있다.

본 연구는 토양오염을 평가할 때 생태독성학적 접근방법(ecotoxicological approach)을 도입하기 위한 기초연구로, 토양환경에서 서식하는 생물종이 오염물질에 노출됨으로써 발생하는 생태독성을 실험연구를 통해 정량적으로 측정하였다. 본 연구는 다음과 같은 4가지 모델연구로 구성되어 있다. 첫째, 중금속(카드뮴, 구리)으로 오염된 토양을 평가하기 위한 식물독성실험(plant assay), 둘째, *C. sativus*를 이용한 복합오염(Cd+Cu) 토양평가, 셋째, 유류(BTEX 화합물) 오염토양에 대한 식물독성실험, 그리고 넷째, 유류(톨루엔) 오염토양 평가를 위한 토양무척추동물 실험(earthworm assay)이다. 본 연구에서는 오염물질에 민감하게 반응하는 토양생물종을 이용하여 단기간에 평가결과를 얻을 수 있도록 측정방법을 고안하고 대상토양에서의 생존 및 성장률을 정량적인 방법으로 측정하여 토양의 안전성 및 오염정도를 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 모델 토양오염물질

모델 토양오염물질로는 환경부에서 지정한 현행 16가지 항목의 토양오염물질 중 국내 여러 지역에서 문제가 되고 있는 유류와 중금속을 선정하였다. 대상유류로는 복합물인 BTEX 화합물(benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes)과 가솔린에 다량(약 8% v/v)으로 함유된 톨루엔을 선정하여, 각각 식물실험과 토양무척추동물 실험에 적용하였다. 모델 중금속의 경우, 토양측정 전국망 조사결과 자연함유량을 초과한다고 보고 된 바 있는 카드뮴(Cd)과 구리(Cu)를 선정하여 식물실험에 적용하였다. 실험에 사용된 시약들은 CdCl₂(Sigma, reagent grade, 99.5%), CuCl₂(Sigma, reagent grade, 99.5%), Benzene(Showa,

99.5%), Toluene(Showa, >99.5%), Ethylbenzene(Showa, 99.0%), Xylene(덕산, 94.8-95.8%) 등이다.

2.2. 실험토양

실험에 사용된 토양은 안산(서울 서대문구 소재)에서 채취한 후 체(1.4 mm)를 통과시킨 다음 105°C 오븐에서 24시간 건조시켜 사용하였다. 토양자체가 가지는 물리화학적 특성이 독성실험에 영향을 미치므로, 토양 pH, 토양 유기질함량(SOM, soil organic Matter) 등의 실험토양의 기본적 성질을 측정하였다. SOM은 Organic matter soil test kit(Model ST-OR 5020, LaMotte Company, MD, USA)를 사용하여 Walkey-Black 습식산화법에 의해 측정되었다. 실험토양은 Sandy Loam으로 SOM는 0.3%, 그리고 pH는 4.3(1:2 Slurry)으로 측정되었다. 오염토양은 실험실에서 일정한 농도구배의 중금속 또는 유류를 주입하여 조성하였다. 특히 BTEX의 경우, 기술린에 함유되어 있는 함량을 고려하여 개별 화합물의 주입량을 결정하였다.

2.3. 모델 토양생물종

모델 토양생물종은 국내 토양환경에서의 적용성과 실험종 확보 용이성을 고려하여 선정되었다. 식물종(plant species)으로는 국내에서 재배되는 주요 농작물 중 *Triticum aestivum*, *Zea mays*, *Cucumis sativus* 그리고 *Sorghum bicolor*를 선정하였다. 이들은 식량으로 재배되는 중요한 작물이며 해외 관련정부기관들에 의해 추천된 바 있는 실험종이다. 예를 들면 *T. aestivum*은 OECD 및 미국 식품의약품안전청(USFDA)에 의해, *Z. mays*는 미국 환경청(EUSEPA)과 USFDA에 의해 제안된 바 있다(Fletcher, 1991). 토양무척추동물로는 토양 내에서 물리적, 화학적으로 중요한 작용을 하는 Earthworm을 선정하였다. 국내에서 사육되고 있는 Earthworm은 분류동정을 통해 3가지 종으로 확인된 바, 본 실험에서는 획득하기가 쉽고 실험실내에서의 유지배양이 용이한 국내 사육종인 *Perionyx excavatus*를 사용되었다.

2.4. 생태독성실험 디자인

생태독성실험은 기존의 실험방법에 기초하되(An et al, 2002), 생물독성실험이 가지는 단점을 보완하기 위하여 단기간에 결과를 얻을 수 있도록 실험방법을 고안하고 독성 실험단위(toxicity test unit)를 최소화하였다. 식물독성실험은 광구병(wide-mouth glass jar)에서 수행되었으며 실험에 소요되는 시간을 최단기화하기 위하여 램프를 사용하여 식물성장을 촉진시켰다. 각 실험단위별 사용된 씨앗개

수는 10개이며 각 실험단위는 4반복으로 준비하여 인큐베이터에서 수행하였다. 본 실험에서의 배양기간은 5일로서, 이는 식물발아 및 성장(Shoot와 Root)을 측정하기에 충분한 기간으로 조사되었다. 실험기간중의 평균온도는 25°C이고, 조도는 5870 ± 1230 lux이었다.

Earthworm 독성실험은 OECD Guideline for testing of chemicals No. 207(OECD, 1984)을 수정하여 휘발성 유기오염물질 실험에 적합하도록 고안된 방법에 의해 수행되었다(An, 2005). 실험단위로는 평판유리병(Flat Bottomed Glass Vial)이 사용되었으며 농도별로 10반복으로 준비되어 단순접촉법(Simple Contact Method)에 의한 실험이 수행되었다. 실험단위는 25°C의 압조건에서 배양되어 시간대(24, 48, 72시간)별로 치사율, 이상현상(운동성, 빛에 대한 반응성) 등이 관찰되었다.

2.5. 데이터 분석

생태독성실험을 통해 수집된 자료는 생물종별로 정리한 후, USEPA의 통계프로그램인 Spearman을 이용하여 반치사농도(LC50, Median Lethal Concentration) 또는 반영향농도(EC50, Median Effective Concentration)을 산정하였다. 이 통계프로그램은 Trimmed Spearman-Kärber Method에 의해 95%의 신뢰도를 가지고 LC50 또는 EC50 값을 계산할 수 있다(Hamilton et al., 1977). 독성 자료의 Normality와 Homogeneity는 각각 Shapiro-Wilk's Test와 Bartlett's Test를 적용하여 검토되었고, 무영향농도(NOEC, No-Observed-Effect-Concentration)와 또는 최소영향농도(LOEC, Lowest-Observed-Effect-Concentration)는 다중비교법인 Dunnett's Procedure에 의해 결정되었다(Dunnett, 1955). 복합독성자료는 독성단위모형(toxic unit model)에 의해 분석되었다(van der Geest et al., 2000).

3. 결과 및 고찰

3.1. 식물독성실험(Plant Toxicity Assay)에 의한 토양오염평가

3.1.1. 중금속(카드뮴, 구리) 오염토양

Fig. 1은 카드뮴(A)과 구리농도(B)에 따른 모델 식물종의 Shoot 및 Root의 성장을 대조군과 비교하여 보여준다. 네 가지 식물 모두 중금속 농도 증가에 따른 Shoot와 Root의 성장률의 감소가 매우 뚜렷하게 나타났다. 각 식물별, 그리고 Root와 Shoot별로 EC50값을 산정한 결과, 카드뮴의 경우 *S. bicolor*, *C. sativus*, *T. aestivum*, 그리

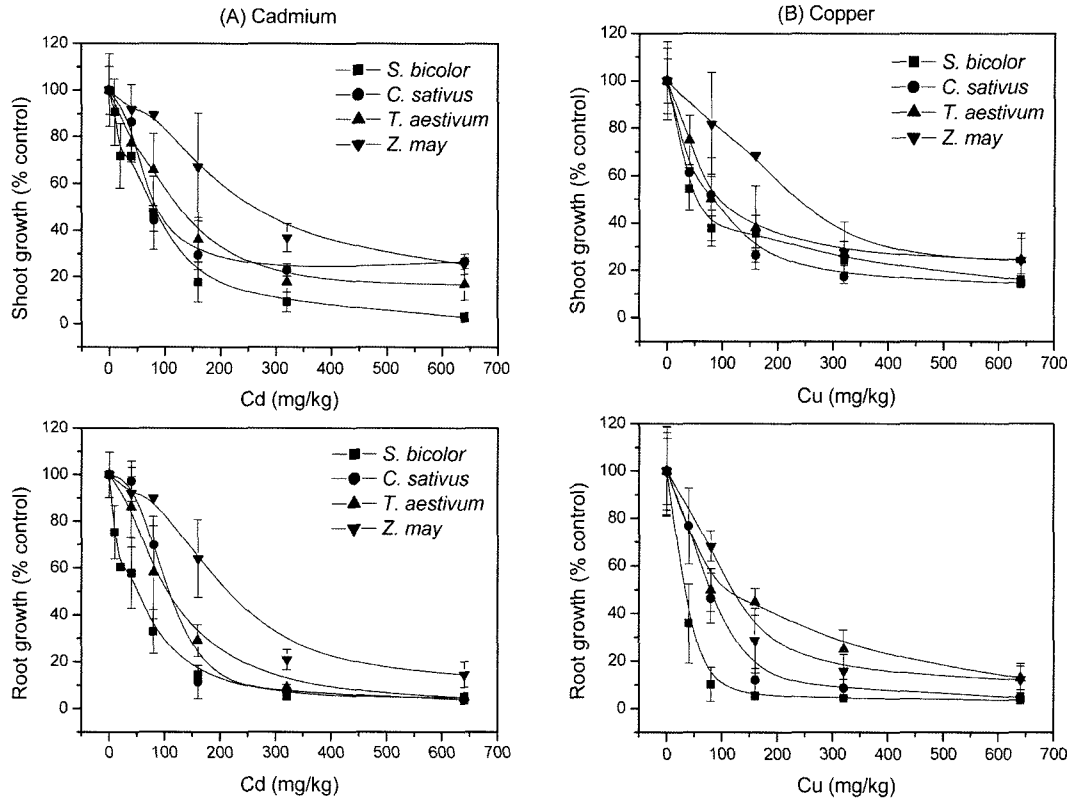


Fig. 1. Cadmium(A) and copper(B) concentration-response curves for the root growth and shoot growth for a period of 5 days. Bars represent one standard deviation of the mean of four replicates.

고 *Z. may*의 EC50-Shoot는 61, 88, 113, 그리고 268 mg/kg soil-dw(dry weight)로 산정되었으며, EC50-Root는 39, 102, 98, 그리고 208 mg/kg soil-dw로 계산되었다. *C. sativus*를 제외한 나머지 식물에서의 EC50-Root는 EC50-Shoot보다 작게 나타났는데 이는 일반적으로 Root가 Shoot보다 중금속오염에 더 취약하기 때문으로 여겨진다. 실험대상 식물 중에는 *S. bicolor*가 카드뮴에 가장 민감하게 반응하였으며 *Z. may*가 가장 저항력이 있는 것으로 나타났다. 구리의 농도에 따른 민감도는 Shoot와 Root 모두 *S. bicolor* > *C. sativus* > *T. aestivum* > *Z. may* 순으로 나타났다. *S. bicolor*, *C. sativus*, *T. aestivum*, 그리고 *Z. may*의 EC50-Shoot는 48, 77, 94, 그리고 232 mg/kg soil-dw로 산정되었으며, EC50-Root는 EC50-Shoot보다 작게 나타났는데 이는 카드뮴과 마찬가지로 Root가 Shoot보다 구리에 더 민감하게 반응하기 때문으로 여겨진다.

Fig. 2는 구리의 농도에 따른 각 식물체 Root내의 구리의 축적정도를 보여준다. 네 가지 식물 모두 중금속 농도 증가에 따라 식물체내 구리의 축적량이 뚜렷하게 증가했

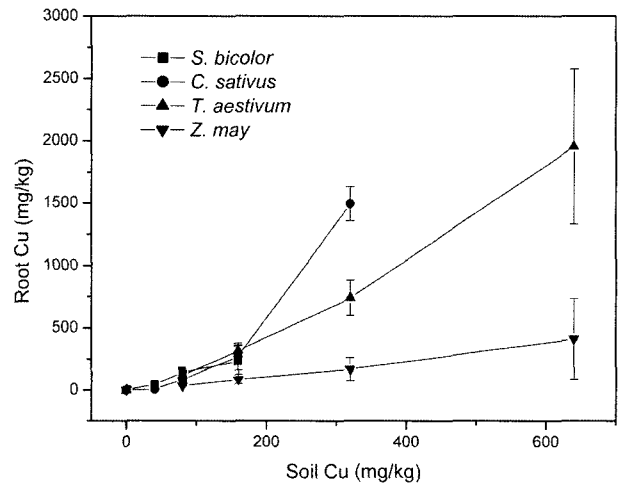


Fig. 2. Copper accumulation in roots for test plant species after 5 days of incubation in soils containing different concentration of copper. Bars represent one standard deviation of the mean of three replicates.

다. 같은 농도 범위에서 비교해보면 *C. sativus*와 *T. aestivum*에 구리의 축적이 더 많이 일어났음을 보여준다. 또한, Shoot와 Root내 축적량을 비교해보면 Root가

Shoot에 비해 구리의 축적량이 많은 것을 알 수 있다. 충분히 흡수된 구리는 지상부로는 거의 이동하지 않고 뿌리에 축적되기 때문에 독성효과는 뿌리에서 더 크게 나타난다. 또한 구리농도에 따라 생장률(%)은 급격히 감소하는데 반해 축적량은 증가했고, Root가 Shoot보다 생장률이 급격하게 감소하는 반면에 축적은 더 많이 일어났음을 알 수 있다. 이는 중금속의 축적이 먼저 이루어지는 Root가 오염물질에 보다 취약하기 때문으로 해석된다. 전반적으로 Shoot와 Root의 생장률은 뿌리에 축적된 구리농도와 반비례적 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 또한, 같은 농도 범위에서 비교했을 때 생장률 감소폭과 구리의 축적량이 반대의 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 식물이 고농도에 노출될수록 식물체가 가지고 있는 방어기작(chelation, 유입과 유출의 조절, 세포 내 특정 지역에 중금속의 저장 등)의 범위를 넘어서게 되고 이것이 생장에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 상대적으로 내성이 강한 식물은 민감한 종에 비해 중금속의 방어기작이 활발하게 이루어져 식물체내 축적을 줄이고 생장률 감소가 적게 일어나는 것으로 보인다. 결론적으로 식물은 중금속으로 오염된 토양의 생태독성을 측정하는 지표생물종(bioindicator)으로 이용될 수 있으며, 특히 중금속 독성에 민감한 *S. bicolor*나 *C. sativus*는 이용가능성이 높은 식물종으로 사료된다.

3.1.2. 복합중금속 (Cd+Cu) 오염토양

카드뮴과 구리의 복합중금속으로 오염된 토양의 생태독성을 측정하기 위해 앞 절에서 추천된 *C. sativus*를 이용하여 독성실험을 수행하였다. 독성단위모형에 의해 복합중금속에 대한 EC50 값인 EC50_{mix}를 산정한 결과 Root와 Shoot에 대해 각각 1.58과 1.06으로 산정됨으로써 모두 1보다 큰 값으로 나타났다. 이러한 결과는 카드뮴과 구리가 공존할 경우, 생태독성은 상승하는 효과가 있는 것을 의미한다(van der Geest et al., 2000). 따라서 두 물질의 복합오염은 위해도가 더 증가하는 것으로 나타났다. 복합오염에 대한 영향이 상승작용(synergistic effect)인지, 타감작용(antagonistic effect)인지 규명하기 위해서는 화학적인 분석방법으로는 불가능하며, 반드시 생태독성학적 접근방법이 사용되어 한다.

3.1.3. 유류(BTEX화합물) 오염토양

중금속오염 토양뿐 아니라 유류오염 토양에서도 Plant assay는 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. Fig. 3은 복합오염물질인 유류 중 BTEX를 대상으로 앞 절에서 중금

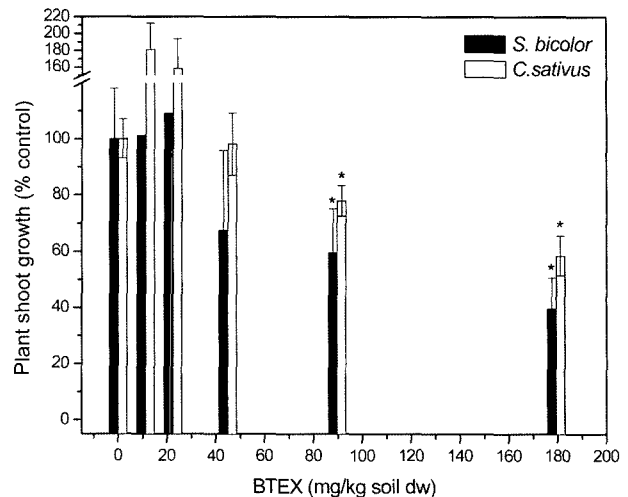


Fig. 3. Seedling growth of *Sorghum bicolor*(A) and *Cucumis sativus*(B) as a percent control after 5 days in soils containing different concentrations of BTEX. Bars represent one standard deviation of the mean of four replicates. Significant differences from controls ($p < 0.05$) are marked with an asterisk.

속오염토양의 지표종으로 제안한 *S. bicolor*와 *C. sativus*를 이용하여 생태독성실험을 수행한 결과를 보여준다. 실험자료를 가지고 *S. bicolor*와 *C. sativus*의 성장률에 대한 최소영향농도(LOAEC)값을 산정한 결과는 90 mg BTEX/kg soil-dw 나타났다. 이 값은 BTEX화합물에 대한 국내 토양오염우려기준 (나지역)에 해당하는 80 mg BTEX/kg soil-dw과도 상당히 일치하는 값으로 식물독성을 이용한 평가방법은 물리화학적 방법 못지않게 정량적인 분석방법으로 나타났다. 결론적으로 성장저해실험에 의한 식물독성측정은 토양에 존재하는 독성물질의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 타당한 방법으로 판단된다.

3.2. Earthworm Assay에 의한 토양오염평가

Earthworm에 대한 중금속의 영향을 측정한 기존 연구들은 다소 있으나(Lock and Janssen, 2002; Maboeta et al., 1999), 유류성분에 대한 연구는 매우 부족하므로 본 연구에서는 가솔린에 다량(약 8%, v/v)으로 함유된 톨루엔을 본 실험의 모델 토양오염물질로 선정하여 단순접촉법에 의한 기본실험을 수행하였다. Fig. 4는 *P. excavatus*에 대한 단순접촉법 실험 결과를 24, 48, 72시간별 생존율로 보여준다. 24시간 생존율은 높게 나타났는데 48시간 결과를 보면 톨루엔 농도 0.03 mg/cm² 부터 생존율이 서서히 감소하였다. 72시간 결과에서는 톨루엔 농도 0.03 mg/cm² 이후의 생존율이 급격히 감소하였다. Fig. 4의 48시간 결과에 대한 LC50값을 산출한 결과, *P. excavatus*

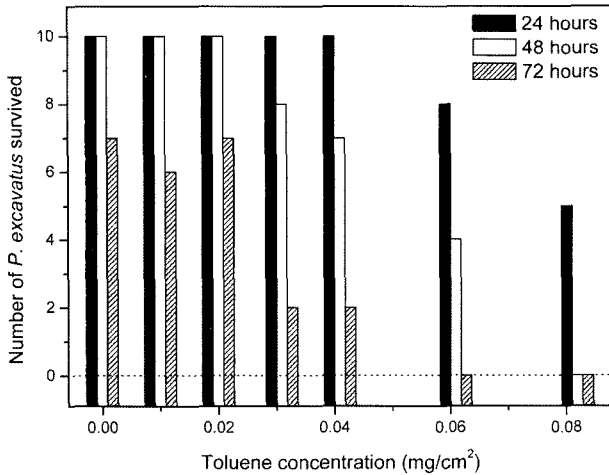


Fig. 4. Response of *Perionyx excavatus* exposed to toluene for 24, 48, and 72 hours by a simple contact method.

의 LC50값은 0.042 mg/cm²(95% 신뢰범위 0.035-0.049)로 나타났다. 형태학적인 이상현상으로는 Swelling, Coiling, Mucous Secretion, Bleeding 등이 관찰되었다. 그러나 이러한 현상은 톨루엔에 의한 직접적 영향뿐 아니라 간접적으로 생체 내 물질대사와 연결되어야 하므로 추가연구가 더 필요한 부분이다. 결론적으로 *P. excavatus* assay는 톨루엔으로 오염된 토양을 평가하는데 사용가능하며, 본 연구에서 시도된 Modified OECD 방법은 톨루엔과 같은 휘발성물질의 토양독성을 Earthworm assay로 성공적으로 평가할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구는 일련의 토양생물종을 이용한 바이오에세이에 의해 중금속과 유류로 오염된 토양을 생태독성학적 방법으로 평가하는 방안을 모델연구를 통해 제시하였다. 생태독성학적 방법은 독성물질에 대한 생물의 반응 및 변화를 통해 오염도를 나타내는 것으로 화학적 방법에 비해 측정 및 분석의 편리성, 시간 단축 및 비용의 저렴성, 무엇보다도 생물이용성을 측정한다는 장점을 가진다. 본 연구에서는 식물독성 실험(발아 및 성장저해실험)과 토양 무척추동물 독성실험(단순접촉법에 의한 생존률 실험)을 중금속 또는 유류오염토양에서 수행하여 토양오염도와 실험생물의 생존률 또는 성장률간의 상관관계를 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 식물(농작물)은 중금속으로 오염된 토양의 생태독성을 측정하는 지표생물종(Bioindicator)으로 이용될 수 있으며, 특히 중금속 독성에 민감한 *S. bicolor*나 *C. sativus*

는 이용 가능성이 높은 식물종으로 사료된다.

2) 카드뮴과 구리로 복합오염된 토양의 *C. sativus*에 대한 생태독성은 상승작용이 있는 것으로 나타났는데, 이와 같은 복합오염에 대한 영향을 규명하기 위해서는 반드시 생태독성학적 접근방법이 사용되어 한다.

3) 중금속오염 토양뿐 아니라 유류오염 토양에서도 Plant Assay는 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. *S. bicolor*와 *C. sativus*의 성장에 영향을 미치기 시작하는 BTEX오염의 최소무영향농도(LOEC)는 국내 토양오염우려기준(나지역)에 해당하는 기준치와도 상당히 일치하는 것으로 나타나, 성장저해실험에 의한 식물독성측정은 토양에 존재하는 독성물질의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 타당한 방법으로 판단된다.

4) 토양무척추동물 중 국내사육종인 *P. excavatus*는 톨루엔과 같은 휘발성물질의 토양독성을 Earthworm Assay로 성공적으로 평가할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 토양오염을 평가할 때 생태독성학적 접근방법을 도입하기 위한 기초연구로 이 방법도 화학적인 방법처럼 정량적임을 규명하였다. 생태독성학적 평가방법은 오염토양을 색출하고 복원을 위한 기초 자료로서 제시될 수 있으며, 적용된 환경복원기술의 효과 및 복원 후 처리토양의 안전성을 검증하여 재활용 여부를 판단할 수 있는 도구로서 활용될 수 있으리라 사료된다. 그러나 성공적인 현장적용을 위해서는 심층연구가 필요하며, 토양성질에 따른 생태독성 차이에 대한 논란의 여지가 남아 있어, 후속연구가 더 이루어져야 한다고 사료된다.

사 사

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(R08-2004-000-10200-0).

참 고 문 헌

경기도, 2003, 수도권정책 T/F 주간동향분석 보고.
 An, Y.-J., Kampbell, D. H., and McGill, M. E., 2002, Toxicity of methyl *tert*-butyl ether (MTBE) on plants (*Avena sativa*, *Zea mays*, *Triticum aestivum*, and *Lactuca sativa*), *Environ. Toxicol. Chem.*, **21**, 1679-1682.
 An, Y.-J., 2005., Assessing soil ecotoxicity of methyl *tert*-butyl ether using earthworm bioassay; closed soil microcosm test for volatile organic compounds, *Environ. Pollut.*, **134**, 181-186.

- Dunnett, C.W., 1995, Multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control. *J. Am. Stat. Assoc.* **50**, 1096-1121.
- Fletcher, J., 1991. Keynote speech: A brief overview of plant toxicity testing. In: J. W. Gorsuch, W. R. Lower, W. Wang and M. A. Lewis(ed), *Plants for Toxicity Assessment*. Second Volume, American Society for Testing and Materials STP 1115, Philadelphia, p. 5-11.
- Hamilton, M.A., Russo, R.C., and Thurston, R.V., 1977. Trimmed Spearman-Kärber method for estimating median lethal concentrations in toxicity bioassays. *Environ. Sci. Technol.*, **11**, 714-719; Correction **12**, 417 (1978).
- Lock, K., and Janssen, C.R., 2002, Ecotoxicity of chromium to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus*, and *Folsomia candida*. *Ecotoxicol. Environ. Safety*, **51**, 203-205.
- Maboeta, M.S., Reinecke, A.J., and Reinecke, S.A., 1999, Effects of low levels of lead on growth and reproduction of the Asian earthworm *Perionyx excavatus*. *Ecotoxicol. Environ. Safety*, **44**, 236-240.
- OECD. 1984. Earthworm, Acute Toxicity Tests. OECD Guideline for Testing of Chemicals, No 207, Paris.
- USEPA, 1997, Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments, EPA 540/R97R/006, Washington D. C.
- van der Geest, H.G., Greve, G.D., Blivin, M-E., Kraak, M.H.S., and van Gestel, C.A.M., 2000, Mixture toxicity of copper and diazinon to larvae of the mayfly judging additivity at different effect levels. *Environ. Toxicol. Chem.*, **19**, 2900-2905.