

이론적 Biodegradability를 토대로 한 토양 내 PAH의 Bioavailability 예측 방안

류혜림, 남경필

서울대학교 지구환경시스템공학부 (hyerim48@snu.ac.kr)

<요약문>

대부분의 유기물은 토양의 특성에 따라 그 흡착 및 탈착 양상이 다르며 이는 오염물질의 토양에서의 지속성 및 이동성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 대표적인 유기오염물인 PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)에 대하여 흡착 및 탈착과 오염물질의 미생물 분해 등을 통한 제거 기작과의 연관성을 연구하고자 한다. PAH의 이론적인 미생물분해반응식은 열역학적 이론을 바탕으로 하는 반쪽반응방법을 사용하여 예측할 수 있다. 오염물과 토양의 특성에 따른 흡착 및 탈착 양상을 파악하고, 앞에서 구한 미생물 분해반응식을 이용하여 이론적 분해량을 예측하면 오염물의 생물학적 이용성과 노출량을 결정할 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 토양의 여러 특성을 분석한 후, PAH의 미생물 분해량 및 분해율을 측정하고자 한다. 실험을 통하여 실제 토양에서 측정된 PAH 분해량과 위의 이론적 분해량 예측 결과 사이의 관계를 토양의 특성을 이용하여 설명할 수 있으며 나아가 오염물질의 생물학적 이용성에 관하여 개략적으로 일반화된 예측 모형을 얻을 수 있을 것이다. 본 연구를 통하여 토양과 유기오염물질, 미생물 간의 상호 작용에 대한 이해를 높이고 보다 실질적인 유기오염물의 생물학적 이용성을 예측할 수 있는 방안을 마련할 수 있을 것이다.

keyword : biodegradability(미생물분해가능성), bioavailability(생물학적 이용성), PAH

1. 서론

대부분의 유기물질은 토양의 특성에 따라 그 흡착 및 탈착 양상이 다르며 이는 오염물질의 토양에서의 지속성 및 이동성에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 유기오염물로서 PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)을 선택하여 토양의 특성에 따른 오염물질의 거동과 그에 따른 오염물질의 생물학적 이용성에 관한 개략적인 일반화를 시도할 계획이다. 특히 흡착 및 탈착과 오염물질의 미생물 분해 등을 통한 제거 기작과의 연관성을 연구하고자 한다.

2. 본론

2.1. 이론적 Biodegradability

PAH의 이론적인 미생물분해반응식은 열역학적 이론을 바탕으로 하는 반쪽반응방법을 사용하여 예측

할 수 있다[1]. 이 식은 최근에 도입된 이론들인 중간체 생성 반응, oxygenation 반응, 그룹 이론에 의한 표준 자유생성에너지 예측기법 등을 적용한 것으로 이를 이용하면 PAH에 대한 미생물 분해반응의 화학양론식과 산소요구량, 질소요구량, 무기화율, 미생물 수율 등의 정보를 얻을 수 있다. 여기에서는 대표적인 두 가지 PAH에 대한 미생물분해 총괄반응식을 구하였으며 그 결과는 표 1과 같다. 여기에서 Case PHE①은 phenanthrene가 중간체인 1-hydroxy-2-naphthoate로 분해 되는 과정을 나타낸 것이며, Case PHE②는 이것이 다시 완전무기물화 되는 과정을 나타낸 것이다. Case PHE는 phenanthrene이 중간체를 거치지 않고 한 번에 완전히 무기물화 되는 것을 나타낸 것으로 앞의 두 총괄반응식을 더하면 Case PHE의 총괄반응식과 같음을 알 수 있다. Pyrene의 경우, 3,4-dihydroxyphenanthrene과 1-hydroxy-2-naphthoate를 중간체로 설정하여 세 단계의 분해과정을 각각 총괄반응식으로 나타내었다. 여기에서도 마찬가지로 세 단계의 분해과정에 대한 총괄반응식(Case PYR①,②,③)을 합하면 중간체를 설정하지 않은 pyrene의 완전 무기물화 분해반응식(Case PYR)과 같아진다.

표 41. Overall stoichiometry for phenanthrene biodegradation.

Case	Overall Stoichiometry
PHE①	$C_{14}H_{10} + 0.459NH_4^+ + 2.707O_2 + 0.624H_2O = 0.459C_5H_7O_2N + 0.707H_2CO_3 + 1.459H^+ + C_{11}H_7O_3^-$
PHE②	$C_{11}H_7O_3^- + 1.134NH_4^+ + 5.829O_2 + 3.597H_2O = 1.134C_5H_7O_2N + 5.329H_2CO_3 + 0.134H^+$
PHE	$C_{14}H_{10} + 1.593NH_4^+ + 8.536O_2 + 4.222H_2O = 1.593C_5H_7O_2N + 6.036H_2CO_3 + 1.593H^+$
PYR①	$C_{16}H_{10} + 0.169NH_4^+ + 2.154O_2 + 1.493H_2O = C_{14}H_{10}O_2 + 0.169C_5H_7O_2N + 1.154H_2CO_3 + 0.169H^+$
PYR②	$C_{14}H_{10}O_2 + 0.288NH_4^+ + 2.558O_2 + 1.135H_2O = C_{11}H_7O_3^- + 0.288C_5H_7O_2N + 1.558H_2CO_3 + 1.288H^+$
PYR③	$C_{11}H_7O_3^- + 1.134NH_4^+ + 5.829O_2 + 3.597H_2O = 1.134C_5H_7O_2N + 5.329H_2CO_3 + 0.134H^+$
PYR	$C_{16}H_{10} + 1.633NH_4^+ + 10.333O_2 + 6.100H_2O = 1.633C_5H_7O_2N + 5.833H_2CO_3 + 1.633H^+$

그러나 이는 phenanthrene과 pyrene이 단일종 미생물에 의하여 완전히 무기물화 되는 것을 가정한 것이며 이는 토양의 특성이 전혀 반응되지 않은 수용액상에서의 분해반응을 예측한 것이라 할 수 있다. 실제 토양은 불균질하고 미생물의 활동과 오염물의 거동에 영향을 미치는 여러 가지 특성들을 가지고 있기 때문에 이것만으로 토양 내 오염물의 분해량을 예측하는 것은 어렵다. 따라서 토양의 특성에 따른 오염물의 거동과 미생물 분해의 관계를 파악할 필요가 있다.

2.2. Bioavailability 예측 방안

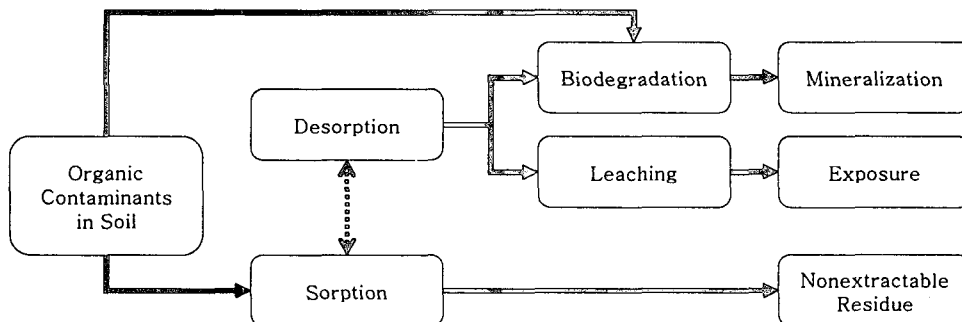


그림 95. Fate of organic contaminants in subsurface soil.

자연 상태에서 토양 내 유기오염물의 거동은 그림 1과 같이 단순화하여 나타낼 수 있다. 전체 오염량 중 흡착되지 않은 부분과 흡착되었다가 다시 탈착되는 부분 중 일부는 화학적으로 또는 미생물에 의하

여 분해되며 나머지는 분해되지 않고 지하수 흐름을 따라 유출된다. 흡착 후 탈착되지 않고 남아있는 오염물은 토양유기물화 되거나 nonextractable residue로 남게 된다. 특히 PAH의 경우, 여러 개의 벤젠고리가 연결된 형태로 쉽게 분해되지 않으나 미생물에 의하여 천천히 분해되는 것으로 알려져 있다. 따라서 오염물과 토양의 특성에 따른 흡착 및 탈착 양상을 파악하고, 앞에서 구한 미생물 분해반응식을 이용하여 이론적 분해량을 예측하면 오염물의 생물학적 이용성과 노출량을 결정할 수 있다.

이를 예측하기 위하여 본 연구에서는 토양의 종류, 유기물 함량, 함수비, 흡·탈착 특성 등을 분석한 후, 자연계에서 분리, 동정한 PAH를 분해하는 토착 미생물(군)을 이용하여 PAH의 미생물 분해량 및 분해율을 측정하고자 한다. 이와 같이 실험을 통하여 실제 토양에서 측정된 PAH 분해량과 위의 이론적 분해량 예측 결과 사이의 관계를 토양의 특성을 이용하여 설명할 수 있으며 나아가 오염물질의 생물학적 이용성에 관하여 개략적으로 일반화된 예측 모형을 얻을 수 있을 것이다. 특히 최근에는 오염된 기간의 중요성이 강조되는 연구결과들이 보고 되고 있으므로[8], 실험에서는 오염되지 않은 토양과 기존에 오염되어 있던 지역의 토양을 각각 사용함으로써 이에 관한 연구도 함께 수행할 계획이다.

3. 결론

앞에서 유기오염물의 이론적 미생물 분해반응의 예측을 기반으로 하는 토양 내 PAH의 생물학적 이용성 예측 방안을 제시하였다. 오염물의 생물학적 이용성은 실제 토양 내에서 미생물이 오염물을 분해할 수 있는 가능성을 가리키는 것으로 토양과 유기오염물, 미생물(군) 각각의 특성 뿐 아니라 상호 간의 작용에 의하여 영향을 받는다. 본 연구를 통하여 이러한 상호 작용에 대한 이해를 높이고 보다 실질적인 유기오염물의 생물학적 이용성을 예측할 수 있는 방안을 마련할 수 있을 것이다. 또한 이를 이용하여 실제 오염물의 노출량을 예측하고 그 위해성을 평가함으로써, 오염이 과대평가되는 경향이 있는 현 오염평가 기준에 비하여 실질적이고 효율적인 토양오염 평가 기준을 수립할 수 있을 것이다.

4. 참고문헌

1. 우승한, 박종문, "유해유기물질에 대한 미생물 분해 반응식의 이론적 예측", *한국지하수토양환경학회지*, **8(2)**, pp. 70-77 (2003)
2. M. L. Mavrovouniotis, "Group contributions for estimating standard Gibbs energies of formation of biochemical compounds in aqueous solution", *Biotechnol. Bioeng.*, **36**, pp. 1070-1082 (1990)
3. M. L. Mavrovouniotis, "Estimation of standard Gibbs energy changes of biotransformations", *J. Biol. Chem.*, **266(22)**, pp. 14440-14445 (1991)
4. M. L. Mavrovouniotis, "Group contributions for estimating standard gibbs energies of formation of biochemical compounds in aqueous solution", *Biotechnology and Bioengineering*, **38**, pp. 803-804 (1991)
5. Gibson DT and Subramanian V, "Microbial degradation of aromatic hydrocarbons" In DT Gibson (ed) *Microbial Degradation of Organic Compounds*, pp 361-369, Marcel Dekker (1984)
6. D. Dean-Ross and C. E. Cerniglia, "Degradation of pyrene by *Mycobacterium flavescens*" *Appl. Microbiol Biotechnol.* **46**, pp. 307-312 (1996)
7. K. Rehmann, H. P. Noll, C. E. W. Steinberg and A. A. Kettrup, "Pyrene degradation by *Mycobacterium* sp. strain KR2" *Chemosphere*, **36(14)**, pp. 2977-2992 (1998)
8. M. Alexander, "Aging, Bioavailability, and Overestimation of Risk from Environmental Pollutants", *Environ. Sci. & Technol.* **34(20)**, pp. 4259-4265 (2000)