

## 토양증기추출공정 중 오염물의 기동평가기법에 관한 연구

조현정, 권태순, 양중석, 양지원

한국과학기술원 화학공학과 (e-mail : jwyang@kaist.ac.kr)

### <요약문>

In this study, a risk-based cleanup approach using the leaching potential was suggested for the soil vapor extraction (SVE) process. A multi-component model was adopted with local equilibrium assumption (LEA), and Raoult's law was applied to estimate the leaching potential for BTEX. Finally, a risk analysis was conducted based on the leaching potential calculated. To complete the feasibility of this approach, more investigations and discussions will be required in future.

**key word** : soil vapor extraction (SVE), process evaluation, leaching potential, groundwater contamination, risk assessment, Raoult's law

### 1. 서론

최근들어 주유소 등의 누유로 인한 유류 오염부지에 대하여 위해도 평가를 기반으로 경제적인 복원 목표를 설정하고자 하는 시도가 미국 등의 선진국에서 활발하게 이루어지고 있다. 국내에서는 아직까지 토양오염우려기준 및 토양오염대책기준 등의 단일 기준을 이용하여 토양 오염도를 규제하므로 이에 따른 복원 목표를 설정하고 있으나, 향후 위해도 평가 개념을 도입하여 부지별 특성을 감안한 규제기준을 마련하기 위한 논의가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 기존의 위해도 평가 절차에 따르면 매우 많은 양의 부지고유특성에 관한 자료가 요구되며, 오염물의 노출경로 또한 매우 높은 불확실성을 안고 있다.

본 연구에서는 침출 잠재성을 기반으로 위해도 평가를 도입하여 최소한의 현장 정보를 바탕으로 효율적인 공정관리를 도모하기 위하여 실험적으로 몇 가지 간단한 모델을 도입하고 그 결과를 논의하였다.

### 2. 본론

먼저 대상 오염물로 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene)를 선정하고, 토양증기추출공정 중 오염물의 휘발 및 잔류 거동을 예측하기 위하여 복합 오염물의 1차원 평형 휘발 모델[1]을 선택하였다.

모델링 결과에 따르면 공정의 진행에 따라 잔류 오염물의 조성이 변화하게 되는데, BTEX를 포함한 대부분의 가솔린 성분의 용출 거동은 라울의 법칙을 이용하여 예측 가능하므로[2], 이러한 조성 정보를 기초로 한 침출 잠재성 예측이 가능할 것으로 기대된다.

오염물의 침출 잠재성은 지하수에서의 오염물의 농도를 좌우하게 되므로, 이러한 과정을 통하여 얻은 결과를 토대로 지하수에서 각 오염물의 예상 가능농도를 예측할 수 있으며, 그에 따른 위해도를 평가할 수 있다. 이때 지하수에서 각 오염물의 예상 가능농도를 평가하기 위해 대표적으로 2가지 방법을 사용할 수 있다. 먼저, 오염에 의한 환경적 영향이 매우 민감하여 보수적인 가정의 적용이 요구되는 부지의 경우 오염물의 최대 침출농도를 오염부지에 인접한 지하수원에서의 지하수 농도로 선정한다[3]. 또한, 일반적인 경우 부지의 상황을 감안한 DAF (dilution/attenuation factor)를 도입할 수 있는데, 개념적인 모델에서 수용 가능한 값으로 미국 EPA에서 제안한 DAF는 100이다[4].

또한, 지하수로부터 대표적인 오염물의 흡입 경로는 음용수로의 섭취, 휘발에 의한 호흡 등을 들 수 있는데, 본 연구에서는 음용수로의 섭취에 의한 위해도를 가정하여 평가하였다. BTEX 중 benzene은 발암 위해도, toluene, ethylbenzene, xylene 등은 비발암 위해도로 구분하여 각각의 위해도를 산출한다.

### 3. 결론

모델링 수행 결과, 보수적인 가정에 의해 최대 침출농도(침출 잠재성으로 평가되는 농도)를 지하수의 오염농도로 이용할 경우 오염물이 완전히 제거되기까지 toluene, ethylbenzene, xylene의 비발암 위해도 (hazard index)가 언제나 1.0을 훨씬 상회하는 것으로 나타났다. 반면에 DAF값으로 100을 선택해 지하수원에서의 오염농도가 최대 침출농도보다 100배 희석되었다고 가정할 경우 toluene, ethylbenzene, xylene에 의한 비발암 위해도가 항상 1.0 이하를 만족하게 됨으로써 매우 높은 BTEX 농도에서 benzene의 발암 위해도가  $10^{-6}$  이하의 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 기존에 제시된 몇 가지 개념적인 접근을 이용하여 침출 잠재성 및 위해도 평가를 근간으로 오염물의 거동을 평가할 수 있는 기법을 살펴보았다. 그러나, 아직까지 이와 같은 접근에 관해 보다 효과적이고 만족할만한 평가기법이 체계적으로 수립되어 있지 못하므로 향후 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

특히 본 모델에서 채용한 라울의 법칙은 오염물의 조성만으로 쉽게 침출 잠재성을 예측할 수 있도록 도와주지만, 오염물의 농도를 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 실제로 토양증기추출공정 중 대부분의 높은 오염농도 범위에서 라울의 법칙을 이용한 침출 거동예측이 가능하나, 오염물의 농도가 낮아짐에 따라 그 타당성이 감소하게 된다. 또한, 부지별 토양의 고유특성이 침출 잠재성에 미치는 영향을 좀더 파악할 필요가 있으므로, 이를 확립하기 위해서는 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 환경모니터링 신기술 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

### 4. 참고문헌

- 1) Ho, C. K., Liu, S-W, and Udell, K. S., *J. Contam. Hydrol.*, 16, 381-401 (1994)
- 2) Cline, P. V., Delfino, J. J., and Rao, P. S. C., *Environ. Sci. Technol.*, 25, 914-920 (1991)
- 3) Odermatt, J. R. and Menatti, J. A., *J. Soil Contam.*, 5, 157-169 (1996)
- 4) Simmons, M. S., "Hazardous Waste Measurements", Lewis Publishers, 1991