

## 대수층에서의 자연표류 실험을 통한 염화지방족 탄화수소화합물 오염 지하수의 생물학적 복원 타당성 연구

김진옥, 하철윤, 김남희, 홍광표, 권수열\*, 안영호\*\*, 하준수\*\*\*, 박후원\*\*\*, 김 영

환경시스템공학과, 고려대학교

\*환경보건학과, 한국방송통신대학교

\*\*건설환경공학부, 영남대학교

\*\*\*(주)그린텍환경건설링

e-mail: [kimyo@korea.ac.kr](mailto:kimyo@korea.ac.kr)

### 요 약 문

The feasibility of stimulating in situ aerobic cometabolic activity of indigenous microorganisms was investigated in a trichloroethene(TCE)-contaminated aquifer. A series of single-well natural drift tests (SWNDT) was conducted by injecting site groundwater amended with a bromide tracer and combinations of toluene, oxygen, nitrate, ethylene and TCE into an existing monitoring well and by sampling the same well over time. Transformation of ethylene, a surrogate of overall TCE transformation activity, was also observed, and its transformation results in the production of ethylene oxide, suggesting that some toluene-oxidizing microorganisms stimulated may express a monooxygenase enzymes. Also in situ transformation of TCE was confirmed by dilution-adjusted data analysis developed in this study. These results indicate that, in this environment, toluene and oxygen additions stimulated the growth and aerobic cometabolic activity of indigenous microorganisms expressing monooxygenase enzymes and that these are responsible for observed toluene utilization and cometabolism of ethylene and TCE. The simple, low-cost field test method provides an effective method for conducting rapid field assessments and pilot testing of aerobic cometabolism of TCE, which has previously hindered application of this technology to groundwater remediation.

**key word** : TCE, aerobic cometabolism, single-well natural drift test(SWNDT)

### 1.서론

사염화에틸렌(perchloroethylene, PCE), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE), 염화비닐(vinyl chloride) 등과 같은 염화 지방족 탄화수소 (Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons; CAHs)은 대표적인 지하수 오염물질이다. 그 중 트리클로로에틸렌(TCE)은 빈번한 검출 및 위해성으로 가장 관심을 갖는 물질 중의 하나이며, 트리클로로에틸렌은 페놀과 톨루엔 산화 미생물들에 의해 효과적으로 분해되는 것으로 보고되었다 (Chang 등, 1995; Hopkins and McCarty, 1995; Wackett and Gibson, 1988). 또한, 트리클로로에틸렌 분해에 가장 효과적인 효소는 *Burkholderia cepacia* G4에 의해서 발

현되는 toluene orthomonooxygenase (TOM)이며 (Arp, 1995), 이는 트리클로로에틸렌 에폭시드 (trichloroethylene epoxide)를 생성하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이 부산물은 화학적으로 불안정하여 반감기가 수 초 이다 (van Hylckama Vlieg 등, 1996). 따라서 트리클로로에틸렌 에폭시드를 현장 시료로부터 분석하는 것은 불가능하다. 트리클로로에틸렌을 분해하는 톨루엔 2-monooxygenase는 같은 메케니즘으로 에틸렌을 분해하여 산화에틸렌을 생성한다(Yeager 등, 1999). 산화에틸렌은 트리클로로에틸렌 에폭시드 보다 안정된 화합물로 지하수에서 약 23일 의 반감기를 갖고 있다(Kim 등, 2004).

본 연구의 목적은 Single-Well Natural Drift Test(SWNDT)를 이용한 트리클로로에틸렌으로 오염된 지하수의 생물학적 복원 타당성 평가법 개발에 있다. 현장 SWNDT 실험은 미생물 기질과 추적자의 상대적 거동을 평가하기 위한 Push-pull Transport Test (PPTT), 토착 미생물의 양과 활성도를 증가시키기 위한 Drift Biostimulation Test (DBT), 트리클로로에틸렌과 유사한 미생물 반응이 예상되는 기질을 실험하기 위한 Drift Surrogate Activity Test (DSAT) 순으로 진행되었다.

## 2.본론

본 연구는 PCE는 검출되지 않고, 트리클로로에틸렌이 0.93~1.20 mg/L로 오염된 대수층에서 수행되었다. 1000 L 통에 현장 지하수를 양수한 후, 순 산소가스로 지하수를 포기하여 용존산소농도가 약 30~35 mg/L가 되게 하여 SWNDT 실험용액을 준비하였다. 또한 추적자인 KBr과 미생물 영양소인 NaNO<sub>3</sub> 일정량을 실험용액에 주입 하였고, 25L 통에 톨루엔과 에틸렌이 용해된 실험용액을 준비하였다. 현장실험에서의 실험용액 주입부피, 양수부피 및 기질들의 주입농도를 Table 1과 같다.

Table 1. Injected and extracted volume, and concentrations of injected solutes

| Test | Injected vol. (L) | Extracted vol. (L) | Toluene (mg/L) | Ethylen e (mg/L) | DO (mg/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/L) | Br <sup>-</sup> (mg/L) |
|------|-------------------|--------------------|----------------|------------------|-----------|---------------------------------------|------------------------|
| PPTT | 280               | 570                | 4.4            | 0.54             | 31        | 12                                    | 77                     |
| DBT  | 4830              | 84                 | 7.8            | 0                | 37        | 13                                    | 85                     |
| DSA  | 890               | 36                 | 8.2            | 6.1              | 37        | 7.4                                   | 98                     |

Fig. 1은 PPTT 양수 시 각 기질들의 표준 농도(Normalized Concentration, C\*)를 나타내고 있으며, 이 실험결과로 브롬이온이 추적자로 추후 실험에서도 사용될 수 있으며, DBT 이전에는 톨루엔, 에틸렌, 용존산소의 생분해가 발생하지 않았다는 것을 확인하였다.

PPTT 후, 수행된 DBT에서는 에틸렌을 제외한 모든 기질이 용해된 실험용액을 주입한 후, 자연적인 지하수 흐름에 의해서 흘러가도록 하였다. Fig. 2에서, 실험용액 주입 2일 후 톨루엔과 용존산소의 농도는 급격히 감소되어 검출되지 않았다. 동시에 미생물 분해 최종 산물인 이산화탄소의 농도는 급격히 증가하였다. 톨루엔과 용존산소 농도 감소 속도가 브롬이온 농도 감소 속도보다 빠르고, 이산화탄소 농도가 증가한 것은 톨루엔 산화 미생물이 현장에서 증식되었다는 증거이다.

마지막 단계인 DSAT 역시 DBT와 동일방법으로 수행되었다. 두 실험 간의 차이점은 DSAT 실험 용액에 트리클로로에틸렌 미생물반응 유사기질인 에틸렌이 첨가된 것이다. DSAT 동안 에틸렌의 분

해와 동시에 부산물로 산화에틸렌가 생성되었다 (Fig. 3). 그리고 에틸렌의 완전 분해 후 지하수 흐름 혹은 가수분해에 의한 산화에틸렌 농도 감소가 일어났다. 이 결과로 현장 대수층에 성장한 톨루엔 산화 미생물들 중 monooxygenase를 합성하고 동일 효소가 트리클로로에틸렌 분해에 관여하였음을 알 수 있다.

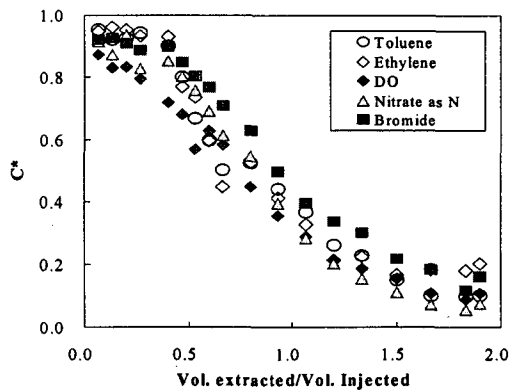


Fig. 1. Normalized concentrations ( $C^*$ ) of the solutes during the extraction phase of PPTT

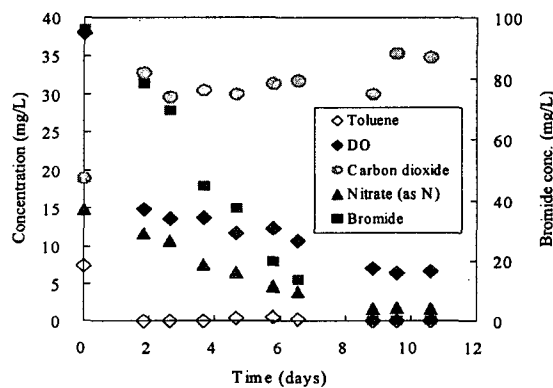


Fig. 2. Concentrations of toluene, DO, carbon dioxide, nitrate, and bromide during the DBT

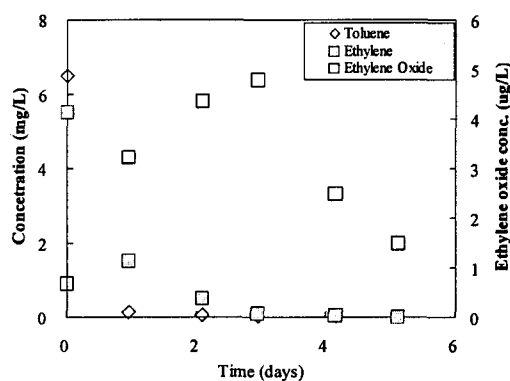


Fig. 3. Concentrations of toluene, ethylene, and ethylene oxide during the DSAT

### 3. 결론

본 연구는 현장 관측정 자연표류 실험 (single-well natural drift test, SWNDT)를 이용하여 호기성 동시대사에 의한 트리클로로에틸렌 오염 지하수 생물학적 복원 타당성 평가 방법을 제시 하였다.

현장 실험 결과 현장 토착 미생물의 성장기질(톨루엔과 용존산소), 트리클로로에틸렌 유사기질(에틸렌), 트리클로로에틸렌의 분해능을 평가 할 수 있었다. 본 연구에서 트리클로로에틸렌이 미생물 반응에 의한 분해된다는 확증 얻기 위하여 트리클로로에틸렌과 화학 구조적으로 유사하고, 초기분해경로가 동일한 무해기질 (surrogate) 에틸렌의 적용, 대수층에서의 트리클로로에틸렌 이송속도가 미생물 분해 시 추적자의 이송 속도에 보다 지연 되는 현상을 이용한 결과 해석 방법은 트리클로로에틸렌 분해를 입증하는 효과적인 방법이라 판단된다. 따라서 SWNDT는 염화 지방족 탄수화합물로 오염된 지하수의 생물학적 복원 타당성 평가 방법으로 용이하고 경제적인 방법이라 사료된다. 트리클로로에틸렌 오염 현장의 복원 설계를 위하여 SWNDT를 통한 톨루엔, 트리클로로에틸렌 유사기질, 트리클로로에틸렌, 용존산소의 분해속도 도출에 대한 장래 연구가 이루어져야 한다고 사료된다.

#### 4. 참고문헌

- Chang, H. L., Alvarez-Cohen, L. "Transformation capacities of chlorinated organics by mixed cultures enriched on methane, propane, toluene or phenol." *Biotech. Bioeng.* **45**, 440-449 (1995).
- Hopkins, G. D. and McCarty, P. L. Field observation of in situ aerobic cometabolism of trichloroethylene and three dichloroethylene isomers using phenol and toluene as primary substrates. *Environ. Sci. Technol.* **29**, 1628-1637 (1995).
- Wackett, L. P. and Gibson, D. T. "Degradation of trichloroethylene by toluene dioxygenase in whole-cell studies with *Pseudomonas putida* F1." *Appl. Environ. Microbiol.* **54**, 1703-1708 (1988).
- Arp, D. J. "Understanding the diversity of trichloroethene co-oxidations." *Current Opinion in Biotechnology.* **6**, 352-358 (1995).
- van Hylckama Vlieg, J. E. T., de Koning, W., and Jassen, D. B. "Transformation kinetic of chlorinated ethenes by *Methylosinus trichosporium* OB3b and detection of unstable epoxides by on-line gas chromatography." *Appl. Environ. Microbiol.* **62**, 3304-3312 (1996).
- Yeager, C. M., Bottomley, P. J., Arp, D. J. and Hyman, M. R. "Inactivation of toluene 2-monooxygenase in *Burkholderia cepacia* G4 by Alkynes." *Appl. Environ. Microbiol.* **65**, 632-639 (1999).
- Kim, Y., Istok, J. D., and Semprini, L. "Push-pull tests for assessing in-situ aerobic cometabolism." *Ground Water.* **42**, 329-337 (2004).