

## Numerical Simulation and Laboratory Test Analysis of Air Sparging for TCE Remediation

김훈미, 이강근

서울대학교 지구환경과학부

tweetyhm@hanmail.net, kkleee@snu.ac.kr

### 요약문

Trichloroethylene, which is one of the representative DNAPL, has been found in underground water sources as a result of the manufactural use, and disposal of the chemical. In this research, in situ air sparging method was chosen to reduce the TCE concentration from the source zone. The concentration reduction in the source zone resulting from air sparging is simulated using the modified STOMP Water-Air operational mode in a two dimensional axisymmetric domain and bench scale test is conducted to analyze the performance of air sparging. The results of laboratory tests are compared with numerical simulations.

**key word** : trichloroethylene(TCE), DNAPL, air sparging, source zone

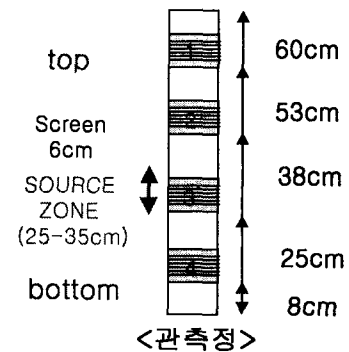
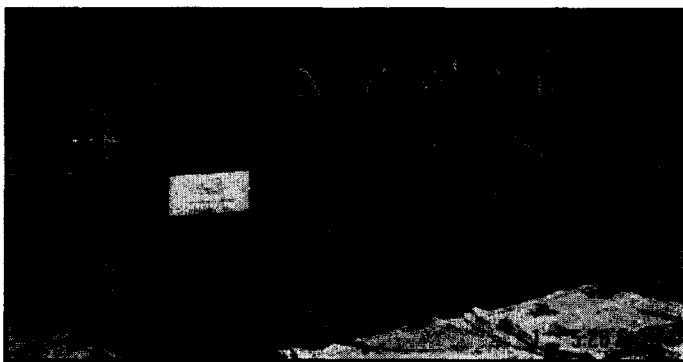
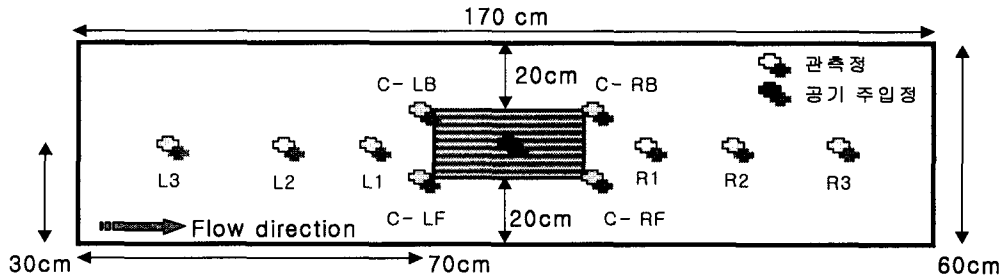
### 1. 서론

본 연구에서는 최근 환경부에서 실시한 전국 오염 우심 지역에서의 지하수 수질측정망 운영 결과 TCE의 초과지점이 전체 초과개소의 40% 이상을 차지해 가장 많은 것으로 나타난 것에 기초하여 TCE를 오염대상물질로 정하였다. 특히 이 물질은 기계의 세정제나 냉매제 그리고 드라이 클리닝 용매로 빈번히 사용되는 물질이기 때문에 인체에 노출되어 질 수 있는 가능성이 크며 장시간 노출시 호흡기, 피부, 간, 신장 등에 손상을 가져올 수 있고 미국과 유럽 뿐 아니라 현재 우리나라에서도 특정유해물질과 발암물질로 관리되어 질 정도로 유독한 물질이므로 적절한 사용과 처리방법이 요구되어진다. 이러한 TCE가 비교적 토양에 흡착력이 강하고 고 휘발성을 띠고 있다는 점을 고려하여 본 연구에서는 흡착 실험과 bench scale의 공기분무법(air sparging)을 실행하여 각 지점별로 TCE의 이동·저감양상을 관찰하였으며 또한 사전 모델링 작업을 통해 실험에 필요한 적절한 공기주입위치와 주입량을 결정하고 특히 오염원 내의 DNAPL상태로 존재하는 TCE의 저감 양상을 모의해보았다.

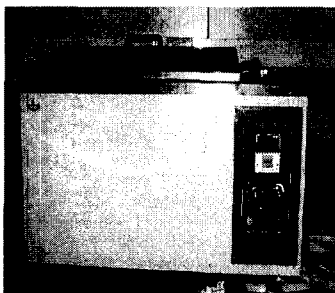
### 2. 본론

본 실험에서는 STOMP를 이용한 공기 주입량과 위치에 대한 민감도 분석 결과에 따라 공기 주입위치는 오염원이 존재하는 구간(하부로부터 25-35cm)보다 5cm 하부, 공기 주입량은 2l/min으로 정하였으며 그리고 정화방법으로 사s용된 IAS의 전형적인 단점이 공기를 주입하였을 때 주입된 공기가 한번 형성된 preference flow를 형성하여 그 방향으로만 움직이려는 경향으로 인해 공기와 직접 접촉되는 부분이 한정되어진다는 점이라는 것을 고려하여 이를 보완하기 위해서 간헐식 공기주입(pulsed air sparging) 방법을 이용하여 가능한 한 오염지역과 공기의 접촉 범위를 최대화하려고 노력하였다. 아래의 <그림 1>는 본 연구에 사용된 실내 실험 장치의 상부

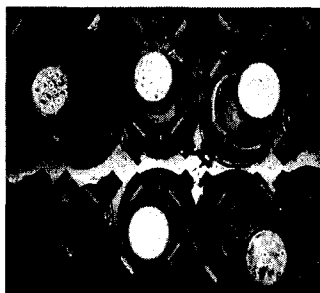
배열도와 측면모습이다. 지하수 흐름 방향은 왼쪽(51.5cm)에서 오른쪽(49cm)이며 수두 구배는 0.015이다. 상부배열도의 중앙에 보이는 빨간 직사각형 영역은 오염원인 TCE가 NAPL상태로 존재하고 있는 구간을 상부에서 본 모습을 표현한 것이며 깊이에 따라 4구간으로 나누어져 있는 관측정에서는 3구간에 해당한다. 실제 수위가 1구간과 2구간 사이에 존재함으로 1구간은 가스상으로 존재하는 TCE의 분석에, 2,3,4구간은 액상으로 존재하는 TCE의 분석에 사용되어졌다.



<그림1. 실내 실험장치 상부 배열도와 측면 모습 / 관측정>



a. 향온기 외부



b. 향온기 내부



c. 향온기에 설치된 플라스틱

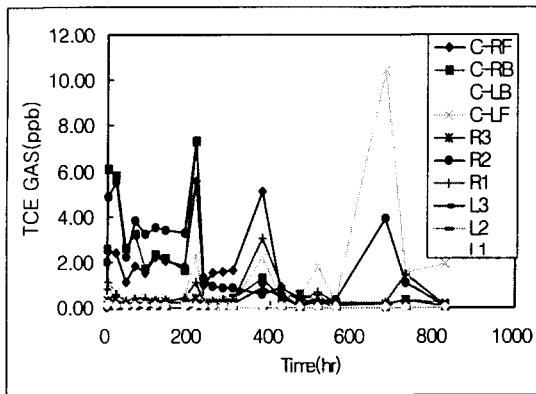
<그림2. 흡착시험에 사용된 향온기와 내부 SETTING>

위의 <그림2>는 흡착에 의한 지하수 내 TCE의 농도 변화 정도를 알아보기 위해 실험에 사용된 향온기와 그 내부 실험 SETTING 모습이다. 향온기를 온도 조건은 27~28℃이고 각각의 플라스틱에 토양과 주입 TCE의 농도조건을 <표1>과 같이 변화시켜 줌으로써 흡착정도에 이들이 미치는 영향정도를 알아보려고 하였다.

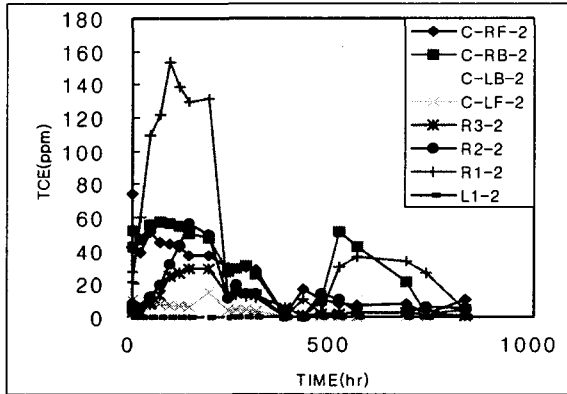
	T C E ( p p m )	s o i l / 용 액 ( g / m l )
a 1	5 0	3 0 0 / 3 0 0
a 2	1 0 0	3 0 0 / 3 0 0
a 3	1 5 0	3 0 0 / 3 0 0
a 4	2 0 0	3 0 0 / 3 0 0
a 5	3 0 0	3 0 0 / 3 0 0
b 2	1 0 0	6 0 0 / 3 0 0
b 4	2 0 0	6 0 0 / 3 0 0

<표1. 흡착 실험 조건>

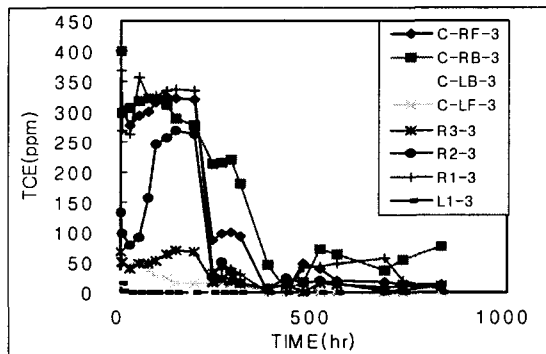
### 3. 결론



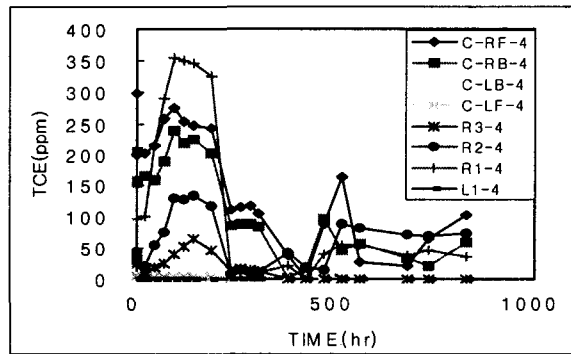
a. 기체상 TCE 농도 분석



b. 오염원 상부의 액체상 TCE 농도 분석



c. 오염원 내의 액체상 TCE 농도 분석

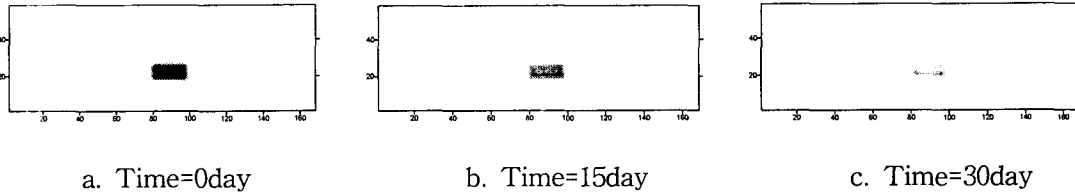


d. 오염원 하부의 액체상 TCE 농도 분석

<그림3. 액상과 기체상 오염원의 농도변화 분석>

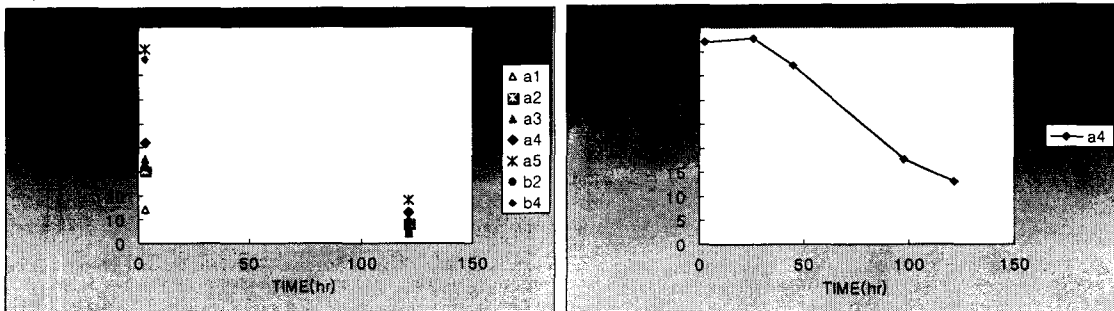
기체상의 TCE분석에는 Gas Chromatography를, 액체상 TCE분석에는 Liquid Chromatography사용하였으며 각각 사용된 기기명은 DS 6200 GC와 waters HPLC이다. 관측정 1구간에서 기체상 TCE의 농도 변화를 분석한 <그림 3.a>에서 여러 번의 peak가 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이는 pulsed air sparging을 실시함으로 공기를 주입하는 동안에 NAPL상태로 존재하던 TCE와 주입 공기와의 직접적 접촉에 의한 휘발의 가능성이 높아져 농도가 급격히 증가하였다가 공기 주입이 중단되면서 휘발가능성이 낮아짐에 따라 기체상으로 존재하는 TCE의 양과 농도가 줄어들기 때문이다. 이와 반대로 공기 주입 기간동안에는 오염원내의 TCE의 상당량이 휘발되어 없어지게 되어 액상으로 존재하는 TCE 농도 변화는 <그림 3.b,c,d>에 나타나있듯이 서서히 감소하게 되며 공기 주입이 중단되는 시점부터는 오염원지역의 TCE농도가 증가하

게 되므로 액상의 농도도 다시 서서히 증가하는 추세를 나타내게 된다. 오염원이 초기에 <그림 3.c>에 존재함에도 불구하고 오염원 상부와 하부지점에서의 TCE농도 변화를 보여주는<그림 3.b,d>에서 상당량의 TCE가 관측되는 원인은 공기가 분사되는 영역에서는 공기의 이동에 따른 순환현상을 주원인으로 생각할 수 있으며 하류 지역에서는 NAPL상태의 TCE가 시간이 흐름에 따라 서서히 용해되면서 흐름방향으로 이동되기 때문으로 생각되어진다.



<그림4. 시간에 따른 Source Zone에서 NAPL상태로 존재하는 TCE의 변화 양상>

오염원의 이동과 저감 양상을 예측하고 제어하기 위해서는 무엇보다도 NAPL상태로 존재하는 오염원의 변화 양상을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 STOMP를 이용하여 NAPL상태 TCE의 시간에 따른 mass량 변화를 <그림4>와 같이 모의해 보았고 그 결과 mass량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었고 그 저감양상이 <그림 3.c>와의 저감속도 비교를 통해 어느 정도 일치한다는 결과를 얻을 수 있었다.



<그림5. 다공질 매질내의 시간에 따른 TCE흡착 정도>

흡착실험 결과를 보여주고 있는 위의 <그림5> 그래프를 통해서 주입한 토양의 양과 TCE농도에 비례하여 흡착된 양도 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 농도 저감이 비교적 짧은 시간에 상당히 빠른 속도로 일어나고 있으며 그 양도 상당하다는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.참고문헌

- 2000년 지하수 수질측정망 운영결과 보고서, 2001.4, 상하수도국
- EPA, 2002, National Primary Drinking Water Regulations
- Suthan S. Suthersan, 1997, Remediation Engineering, Lewis Publishers

#### Acknowledgment

This research was supported by a grant(code : 3-5-1) from Sustainable Water Resources Research Center of 21st Century Frontier Research Program.