

대기압의 변화에 따른 휘발성 오염물질의 토양에서 대기로의 기동

최지원, James A. Smith*, 황경엽
한국과학기술연구원 수질환경 및 복원 연구센터
*University of Virginia
jc5z@hotmail.com

Natural attenuation has been actively studied and often selected as final clean-up process in remediation of contaminated ground-water and soil for the last decade. Accordingly, understanding of natural processes affecting the fate and transport of contaminants in the subsurface becomes important for a success of implementation of the natural remediation strategy. Contaminant advection and diffusion processes in the unsaturated zone are naturally related to environmental changes in the atmosphere. The atmospheric pressure changes affecting the transport of contaminants in the subsurface are investigated in this study. Moisture content, trichloroethylene (TCE) concentration, temperature, and pressure variations in the subsurface were measured for the July, August, November, and December 2001 at Picatinny Arsenal, New Jersey. These data were used for a one-phase flow and one-component transport model in simulating the soil-gas flow and accordingly the TCE transport in the subsurface in accordance with the atmosphere pressure variations at the surface. The soil-gas velocities during the sampling periods varied with a magnitude of 10^{-6} to 10^{-7} m s⁻¹ at land surface. The TCE advection fluxes at land surface were several orders of magnitude smaller than the TCE diffusion fluxes. A sensitivity analysis indicated that advection fluxes were more sensitive to changes in geo-environmental conditions compared to diffusion fluxes. Of all the parameters investigated in this study, moisture content has the most significant effect on TCE advection and diffusion fluxes.

key word : volatile organic compounds (VOC), barometric pumping, diffusion, advection, natural attenuation

1.서론

휘발성 유기 오염 물질 (VOCs) 의 토양 불포화지대에서의 거동에 영향을 미치는 물리화학적 과정들은 지하수 거동에서와 비슷하다. 하지만 지하수 거동과는 달리 불포화지대 기체상에서의 확산 계수 (diffusion coefficient) 가 매우 높아 확산의 중요도가 매우 높다. 따라서 지금까지 많은 연구들이 확산 중심으로 이루어졌으며, 토양에서 대기로의 VOC 거동량을 측정하거나 분석하는 데에도 이러한 관점이 적용되었다 (Baehr and Baker, 1995; Batterman et al., 1992). 오염물질의 이류 (advection)에 대한 연구도 많이 이루어 졌으나 이는 대부분 soil-venting systems에서였으며, 많은 연구들을 통해 자연 조건에서 토양 불포화지대 이류량의 중요성도 꾸준히 제기 되었다 (Chen et al.,

1995; Elberling et al., 1998). 본 연구는 지표상에서의 자연변화 특히 대기압의 변화에 따른 휘발성 유기 오염 물질의 토양에서 지표상으로의 이류량을 (advection fluxes)을 자연 확산량 (diffusion fluxes)과 비교하여 그 중요성을 알아보았다.

2.본론

자연 조건에서 토양내 공기의 흐름과 기체상 TCE의 거동에 대한 연구가 이루어진 곳은 미국의 Picatinny Arsenal, New Jersey 이다. 이 곳은 1960년부터 1981년 까지 금속관련 공정과정에서 흘러나온 폐수가 지하로 스며들어 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 오염된 지하수의 표면적이 $1.26 \times 10^5 \text{ m}^2$ 가 된다. 여러 연구를 통해 토양 불포화지대 기체상에서 오염물질이 발견되었으며 주로 TCE였다. 본 연구를 위해 2001년 4차례에 걸쳐 이 지역에서 여러 가지 데이터들이 수집되었으며, 그 중에는 토양 내 또는 지표상의 기압 변화 (pressure transducer), 온도 (thermocouple), 수분 함량 (time-domain reflectometry), TCE 농도 (CMS activated carbon adsorbent traps), TCE 거동량 (vertical flux chamber) 등이 있다. 토양 내 공기의 흐름을 예측하고 이에 따른 오염물질 이류량과 확산량을 계산하기 위하여, 토양내 공기의 흐름은 linearized flow equation 과 Darcy's law 에 기반한 공식을 이용하였고, 오염물질의 거동은 single-component advection-diffusion equation 을 이용하였다 (Choi et al., 2002).

지표면에서의 TCE 거동량을 모델링으로 예측한 값과 실험 측정값을 비교해 보면 7월과 12월 중 측정기간에는 비슷하였으나 8월과 10월 중 측정기간에는 두 배 정도의 차이가 났다. 그러나 이러한 차이는 모델링에 이용된 parameter 값의 부정확도를 고려한 sensitivity analysis를 보면 중요하지 않은 것으로 생각된다. 지표면에서 TCE의 거동량은 연중 계절에 따라 100배가량의 차이를 보였으며 여름 시즌에는(7월, 8월) $3.5 \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 에 이르렀고 겨울 시즌에는(10월, 12월) $0.02 \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 에 이르렀다. 각각의 기간 내 시간에 따른 거동량 변화는 측정기기의 정확도를 고려했을 때 의미가 없는 것으로 고려된다. TCE 이류량과 확산량을 비교하여 보면 이류량의 평균 절대값은 실험기간에 따라 $0.34 \times 10^{-2} \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 에서 $1.43 \times 10^{-2} \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 의 범위를 갖으며 확산량의 평균값은 $0.06 \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 에서 $2.37 \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 의 변화범위를 나타내었다. 토양 내 공기흐름 속도는 $10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ 에서 10^{-6} m s^{-1} 으로 지표면 가까이에서 비교적 더 큰 공기의 흐름이 나타났다. Sensitivity analysis를 통해 토양 불포화지대의 깊이, gas permeability, 수분함량, 온도, 지하수면 높이의 변화와 TCE 농도가 모델링 결과에 미치는 영향을 알아보았다. 여기에 고려된 조건들은 대부분 조사 범위 내에서 TCE 확산량에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 토양 수분함량은 확산 계수에 직접적인 영향을 미침으로 토양 내 기체상의 TCE 확산 움직임을 조정하는 영향이 있는 것으로 나타났다. 반면 TCE 이류량은 확산과 비교하여 이러한 여러 가지 조건들에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

3. 결론

본 연구는 대기압의 변화가 토양 내 공기의 흐름에 미치는 영향과 아울러 휘발성 유기 오염물질의 거동에 미치는 영향을 조사하였으며 특히 토양에서 지표상으로의 오염물질의 이동 중 확산량과 이류량의 중요성을 비교하였다. TCE 기체가 지하수에서 대기로 이동하는 것을 고려하는 것은 오염지역의 자연저감능력이나 가능성을 정확히 파악하는 데에 있어 중요하다. 생물학적인 자연분해는 오염물질의 종류와 자연조건에 영향을 많이 받지만 확산에 의한 거동은 항상 일어나기 때문이다. 또한 대기압에 의한 오염물질의 이류도 항상 일어나고 있으며 지역조건에 따라 그 중요도가 변할 수 있기 때문이다. 또한 이러한 오염물질의 거동은 인간의 건강에 미칠 수 있는 영향을 고려할 때 그 중요성이 명백히 드러난다.

4. 참고문헌

- (1) Baehr, A.L., and Baker, R.J. (1995). Use of a reactive gas transport model to determine rates of hydrocarbon biodegradation in unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*
- (2) Batterman, S.A., McQuo주, B.C., Murthy, P.N., and McFarland, A.R. (1992). Design and evaluation of a long-term soil gas flux sampler. *Environ. Sci. Technol.*,
- (3) Chen, C., Green, R.E., Thomas, D.M., and Knuteson, J.A. (1995). Modeling 1,3-dichloropropene fumigant volatilization with vapor-phase advection in the soil profile. *Environ. Sci. Technol.*
- (4) Elberling B., Larsen, F., Christenssen, S., and Postma, D. (1998). Gas transport in a confined unsaturated zone during atmospheric pressure cycle. *Water Resour. Res.*
- (5) Choi, J.-W., Fred Tillman, J., and Smith, J.A. (2002). Relative importance of gas-phase diffusive and advective trichloroethene (TCE) fluxes in the unsaturated zone under natural conditions. *Environ. Sci. Technol.*