

불포화 토양내에서 가스상 오존 측정을 위한 광섬유센서의 적용

정해룡, 최희철
광주과학기술원 환경공학과

e-mail: hrjung@kjist.ac.kr

요 약 문

A new monitoring system has been developed for *in-situ* and realtime measurement of ozone transport in unsaturated porous media using a fiber optic sensor. The calibration of the fiber optic transfection dip probe (FOTDP) system was successfully carried out at various ozone concentrations using a column with length of 30 cm and diameter of 5 cm packed with glass beads, which don't react with gaseous ozone. The breakthrough curves (BTCs) of ozone was obtained by converting the normalized intensity into ozone concentration. The FOTDP system reflected the ideal transport phenomena of gas phase ozone at various flow rates. The FOTDP system worked well for *in-situ* monitoring of gas phase ozone at various water saturations and in presence of SOM. However, the FOTDP system did not measure the ozone concentration at more than 70% water saturation.

key word : fiber optic sensor, transfection dip probe, unsaturated porous media, ozone.

1.서론

근래에 오염물질들에 대한 높은 제거효율 뿐만 아니라 독성효과 감소등과 같은 장점으로 인해 지중오존산화기술의 현장적용성 평가에 대한 연구가 국내외적으로 많이 실시되고 있다¹⁾. 지중 오존산화기술의 현장적용에 있어 오염부지내에서 오존농도를 측정하여 시스템 운전기간 및 시스템 성능을 평가할 수 있다. 즉, 오염부지내의 다양한 위치에서 주입된 오존의 파과곡선(Breakthrough curve)을 측정함으로써 시스템성능을 평가할 수 있으며, 오존농도가 최종파과되었을 때를 기준으로 시스템 종료시기를 간접평가할 수 있다. 하지만, 오염부지내에서 오존농도를 측정하기 위해서는 토양가스를 샘플링 한 후, 실험실로 이동하여 분석하여야 하기 때문에 많은 경비가 소요되고 분석에 있어 여러 가지 오차를 유발할 수 있다. 따라서 오존산화기술을 실용화하기 위해서는 현장 오염부지에서 저렴한 비용으로 쉽게 오존농도를 측정할 수 있는 방법의 개발이 필수적이라 하겠다. 시료채취가 필요없고, 크기가 작으며, 빠른 시간내에 실시간 측정이 가능하다는 장점으로 인해 광섬유 센서(Fiber optic sensor)가 지하수 혹은 토양환경에 많이 적용되고 있다^{11), 12), 13), 14), 15), 16)}. 본 연구에서는 실험실 규모의 토양칼럼실험을 통하여 불포화 토양매질내에서 가스상 오존을 실시간으로 측정 할 수 있는 광섬유 센서 시스템을 개발하고자 하였다.

2. 본론

2.1 실험 방법

광섬유 센서 시스템은 광원에서 일정한 강도의 빛을 광섬유를 통하여 조사하게 되고 센서부에서 측정하고자 하는 물질과 빛이 반응하여 빛의 강도가 감소하게 되고, 이 빛을 다시 광섬유를 통하여 검출부로 이동시켜 검출부에서 빛을 강도를 측정하게 된다. 그리고 빛과 반응한 물질의 농도는 광원에서 조사된 빛과 검출부에서 측정된 빛의 강도 차이를 이용하여 측정하게 된다. 오존은 자외선 영역에서 빛을 흡수하는 특성이 있기 때문에 본 연구에서는 자외선을 광원으로 하는 광섬유 센서 시스템을 개발하고자 하였다. 그리고 복잡하게 구성되어 있는 토양매질의 특성을 고려하여 토양내부로 직접 삽입되어 오존농도를 측정할 수 있는 센서 시스템을 설계하였다. 본 연구에서 개발한 Fiber optic transfection dip probe (FOTDP) 시스템의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. FOTDP 시스템은 deuterium 광원, transfection dip probe, miniature fiber optic spectrometer, A/D converter, 그리고 데이터 측정을 위한 컴퓨터로 구성되어 있다.

본 연구에서는 glass beads와 주문진사에 대하여 실험을 실시하였다. 토양매질로 충전된 유리칼럼은 실험시스템내에 설치되었다. 실험시스템은 오존발생기 (GL-1, PCI-100; NJ, USA), 유량조절기, 가스세척병, UV/VIS spectrophotometer 등으로 구성되어 있으며, 오존발생기에서 생성된 오존이 칼럼내로 주입되기 전에 UV/VIS spectrophotometer로 오존의 농도를 측정하였다.

3.2 결과 및 고찰

FOTDP 시스템을 이용하여 측정한 데이터를 오존농도로 전환하기 위해서는 오존농도변화에 따른 FOTDP 시스템의 데이터 intensity에 대한 calibration이 필수적이라 할 수 있다. Fig. 2에 나타내어진 바와 같이 다양한 오존농도 (103.6, 101.9, 83.6, 63.4, 42.8, 26.1, 12.3, 5.0 mg/L)에서 시스템 데이터의 intensity를 측정하였다. 그리고 오존농도와 데이터 intensity 사이의 상관관계를 도출하였으며 이 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 데이터 intensity와 오존농도사이에 선형관계를 나타내지는 않았지만, 거의 완전한 polynomial fit 형태를 나타내었다.

토양수분은 불포화 토양내에서 오존의 이동 및 반응특성에 영향을 미치는 중요인자중의 하나이다. 따라서 본 연구에서는 토양수분의 포화도를 각기 달리한 상태에서 FOTDP 시스템을 이용하여 오존이동특성을 측정하여 FOTDP 시스템의 안정성을 평가하였다. Fig. 4에는 glass beads로 충전된 토양칼럼을 이용하여 다양한 토양수분조건에서 측정한 오존의 파과곡선을 나타내었다. 고정된 가스유량에서 토양수분양이 증가하게 되면 토양공극이 감소하여 주입된 오존 가스의 선형유속 (average linear velocity)은 증가하게 된다. 따라서 일반적으로 토양수분양이 증가할수록 가스상 오존의 이동속도도 함께 증가하게 된다. 하지만 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 토양수분양이 증가할수록 오존이동속도는 지체되었다. 이와 같은 결과는 오존의 용해도가 높기 때문에 오존과 반응성이 없는 glass beads로 충전된 토양칼럼내에서 토양수분이 증가하게 되면 주입된 가스상 오존중에서 토양수분내로 용해되어 분해되는 성분이 증가하기 때문으로 판단된다. 그리고 토양수분양의 포화도가 70%를 초과하였을 때는 dip probe 끝에 부착된 transfection mirror가 과도한 토양수분에 의해 젖기 때문에 FOTDP 시스템은 오존의 농도를 정확히 측정하지 못하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 불포화 토양내에서 오존농도를 측정할 수 있는 FOTDP 시스템을 개발하였으며, 실험실 규모의 실험을 통해 FOTDP 시스템의 성능을 평가하였다. 하지만, 실제현장 토양은 복잡하게 구성되어 있기 때문에 본 연구에서 개발된 FOTDP 시스템을 오염부지에 적용하기에 앞서 현장 적용성 평가를 거쳐야 할 것으로 판단된다.

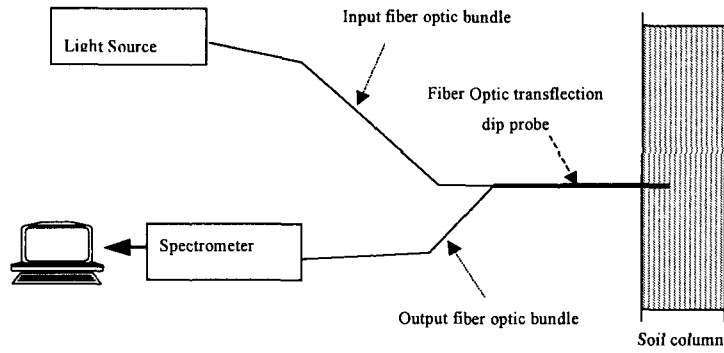


Fig. 1. Schematic of the fiber optic transfection dip probe (FOTDP) system.

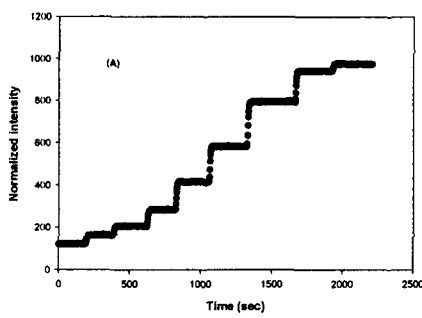


Fig. 2. Calibration fronts of the FOTDP in the glass-bead packed column.

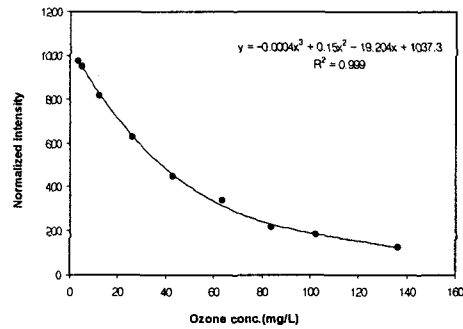


Fig. 3. Calibration curve between ozone conc. and normalized intensity.

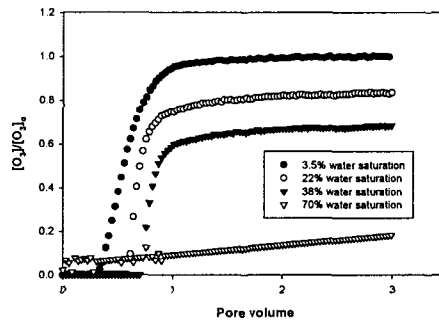


Fig. 4. Effect of water saturation on the measurement of the ozone BTCs in the glass-bead packed column using the FOTDP system.

3. 결론

불포화 토양매질내에서 가스상 오존을 실시간 측정하기 위해 광섬유 센서를 이용하여 Fiber optic transfection dip probe (FOTDP) 시스템을 개발하였다. 103.6 - 5.0 mg/L의 오존농도 범위에서 오존과 반응성이 없는 것으로 알려진 glass beads로 충전된 유리칼럼을 통하여 FOTDP 시스템 측정 데이터에 대해 calibration을 성공적으로 실시하였으며, 이를 통하여 FOTDP 시스템을 이용하여 오존의 파과곡선을 측정하였다. 토양수분의 포화도와 유량을 달리한 조건에서도 FOTDP 시스템은 높은 안정성을 나타내었으며, 불포화 토양매질내에서의 이상적인 오존이동 특성을 나타낼 수 있었다. 그러나 토양수분의 포화도가 70%를 넘었을 때에는 오존농도를 측정하지

못하였다.

본 연구에서 개발한 FOTDP 시스템은 불포화 토양매질의 다양한 조건내에서 오존이동현장을 정확히 나타내었다. 하지만, 현장 토양은 복잡하게 구성되어 있기 때문에 FOTDP 시스템을 현장오염부지에 적용하기에 앞서 현장적용에 대한 연구가 요구된다.

4. 사 사

본 연구는 한국환경기술진흥원의 차세대 핵심환경기술개발사업의 일환으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. Miller, C. M., Valentine, R. L., Roehl, M. E., and Alvarez, P. J. J. "Chemical and microbiological assessment of pendimethalin-contaminated soil after treatment with Fenton's reagent", *Water Research*, **30**, pp. 2579-2586(1996).
2. Hsu, I. and Masten, S. J. "The kinetics of the reaction of ozone with phenanthrene in unsaturated soils", *Environmental Engineering Science*, **14**(4), pp. 207-217(1997).