

유류오염토양 복원을 위한 지중 오존산화기술의 현장규모 적용

정해룡, 손규동, 최희철, 김수곤*, 양지원**

광주과학기술원 환경공학과 · *한국환경기술(주) · **한국과학기술원 생명화학공학과
e-mail: hrjung@kjist.ac.kr

<요약문>

Field scale application of in-situ ozonation were carried out for remediation of variably saturated soils contaminated with diesel fuel with 3 dimensional test cell (3m×2m×2m). After 20 days of ozone injection, more than 90% of removal rate was observed through the 3-D test cell. This result might be caused by uniform distribution, relatively low oxidant demand, and low water content of soils, as well as high oxidation potential of ozone. However, less than 50 % of injected ozone was monitored through the 3-D test cell even after 20 days of injection.

key word : Unsaturated zone, In-situ chemical oxidation, Ozonation, Diesel fuel.

1. 서론

난분성 및 비휘발성 유기화합물로 오염된 불포화토양을 복원하는 기술로서 근래에 지중오존산화기술(In-situ ozonation technology)에 대한 연구가 국내외적으로 폭넓게 진행되고 있다¹⁾. 지중 오존산화기술에서는 오염된 부지내로 강산화제인 오존을 주입하여 오염물질과 직접반응시켜 빠른시간내에 오염물질을 물과 이산화탄소 혹은 비독성물질로 전환시키게 된다. 위와 같은 지중오존산화기술의 장점으로 인해 국외에서는 현장오염부지에 적용성 평가가 이루어지고 있으며, 이를 상용화하기 위한 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 국내에서는 실험실 규모의 1차원 칼럼실험과 2차원 soil box 실험을 통하여 오염물질 제거에 영향을 미치는 인자를 평가하고 있으며, 이들 인자들이 주입된 산화제의 이동특성에 미치는 영향을 평가하고 있다. 본 연구팀에서는 이전의 연구결과를 바탕으로 하여 지중오존산화기술의 현장규모 적용실험을 실시하였다.

2. 본론

2.1 실험 방법

당해연도 연구내용으로는 3차원 test cell 실험을 통한 오존-펜톤산화 공정의 시스템 운전인자를 확보하는데 있으며, 이를 위해 3차원 test cell (3m×2m×2m)을 설계/제작하였다. Test cell 내부에는 오존주입정과 추출정을 설치하였다. 그리고 오존주입 압력을 조절할 수 있는 오존주입 시스템을 새로이 개발하

여 설치하였다. 3-D test cell 내부에 총 15,331.1 kg의 sand를 충전하였다. 토양충진 중에 주기적으로 다짐 작업을 실시하여 3-D test cell 내에서 토양이 균일한 밀도 및 공극율을 가지도록 하였다. 토양을 충전한 후에는 오존산화공정을 적용하였을 때에 대기중의 공기가 반응기내의 압력변화에 영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 3차원 test cell 표면에 시멘트로 불투수층을 조성하였다. 그리고 각각 4개 씩의 오존주입정과 추출정을 설치하였다. 각 주입정 및 추출정의 직경은 6.0 cm 으로 하였다. 먼저, 각 추출정과 주입정에 가는 자갈을 충전하여 오존주입구가 막히는 현상을 방지하였다. 실제 오염현장부지에서 발생하는 오염현상을 모의하기 위해서 상업용으로 판매되는 디젤을 중력식으로 주입하였다. 지상 혹은 지하에 존재하는 화학약품 저장소에서 유출이 발생하는 현상을 나타내기 위해서 디젤 저장용기에 미세한 구멍을 뚫어 지속적으로 디젤이 유출되어 토양이 오염되도록 하였다. 평균농도는 300 mg/kg이 되도록 조절하였으며, 총 주입량은 4.6 kg (6.1 L)이었다. Fig. 1에는 본 실험에 사용한 3D test cell에 설치한 오존주입 및 추출정, 그리고 디젤 주입정 등의 위치를 나타내었다. 실험에서 오존의 주입 유량은 오존 주입 시스템의 주입압력에 따라 달라지지만, 현재 시스템 규모에서는 오존발생기의 용량을 고려하여 평균 11.8 L/min으로 설정하였다. 이 경우에 3D test cell에서 오존의 평균유속은 유속은 공극율을 고려할 때 0.357 cm/min 될 것으로 예상된다. 하지만, 하지만 일반적으로 유효 공극율 (effective porosity)은 실험으로 결정된 공극율에 비해 작기 때문에 실제 불포화 토양내에서의 오존의 평균유속은 이론적인 값에 비해 크게 나타날 것으로 판단된다.

2.2 실험 결과 및 고찰

Fig.2와 Fig. 3에는 각각 3D test cell 내부의 초기 오염물질 분포특성과 20일간 오존 주입후의 최종 오염물질 농도분포를 나타내고 있다. 20일간 주입한 가스상 오존의 양은 3D test cell의 공극율에 대해 약 157 pore volume에 해당한다. 초기 오염물질 분포는 오존주입정 인근에서 상대적으로 높은 농도를 나타내고 있으며, 오존 추출정 인근에서는 상대적으로 낮은 오염물질농도를 나타내고 있다. 그리고, 3D test cell 상부에서 하부에 비해 오염물질 농도가 높게 나타나고 있다. 20일간 오존주입후 전체적으로 약 90% 이상의 높은 오염물질 제거율을 나타내고 있다. 이와 같은 높은 제거율은 실험에 사용된 토양의 균일한 입경분포, 토양매질이 가지는 낮은 토양유기물 함량, 그리고 상대적으로 낮은 함수율 등에 기인하는 것으로 판단된다. 특히, 실험에 사용된 토양매질의 균일한 입경분포는 3D test cell 내부에 주입된 가스상 오존이 균일한 흐름을 이루도록 하여 오염물질과 오존이 직접 반응할 수 있는 기회를 증가시키기 때문에 이와 같은 높은 제거율을 나타내게 한 결정적인 원인이 되는 것으로 판단된다. 하지만, 현장 오염부지에서는 토양입자가 균일한 입경분포를 나타내지 않기 때문에 본 실험에서와 같이 높은 제거율을 나타내기 위해서는 현장부지에서의 실제적용 연구가 필요한 것으로 판단된다.

오염물질 농도가 높은 주입정 부근의 표면에서 평균 95%의 높은 제거율을 보이고 있고, 추출정 부근에서는 약 80%의 낮은 제거율을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 3D test cell 내부에 충전된 토양이 가지는 soil oxidant demand로 인해 주입된 오존이 흘러 가면서 소모되기 때문으로 판단된다. 따라서 전체적으로 균일한 오염물질 제거율을 나타내기 위해서는 본 실험에 적용된 유량보다 높은 유량을 적용할 필요가 있는 것으로 판단된다. FOTDP 시스템을 이용하여 측정된 3D test cell 내부에서의 가스상 오존의 파괴곡선을 측정하였다. 가스상 오존농도 측정은 지표면에서 약 50 cm 깊이에서 실시하였으며, 오존농도는 A-4, B-2, B-4, B-5 지점에서 측정하였다. 시스템 운전기간 동안 3D test cell 내부에 주입되는 가스상 오존의 농도를 100 mg/L로 유지하였다. 하지만, 20일 동안 가스상 오존을 주입하였을 때 B-2, B-4, B-5, A-4 지점에서 측정된 가스상 오존 농도는 각각 약 48, 36, 26, 38 mg/L로 주입농도의 50% 이하로 나타났다.

3. 결론

본 연구에서는 지중오존산화기술의 현장부지적용을 위한 현장규모 실험을 실시하였다. 20일간 오존을 주입하였을 경우에 전체적으로 약 90% 이상의 높은 오염물질 제거율을 나타내고 있다. 이와 같은 높은 제거율은 실험에 사용된 토양의 균일한 입경분포, 토양매질이 가지는 낮은 토양유기물 함량, 그리고 상대적으로 낮은 함수율 등에 기인하는 것으로 판단된다. 특히, 실험에 사용된 토양매질의 균일한 입경분포는 3D test cell 내부에 주입된 가스상 오존이 균일한 흐름을 이루도록 하여 오염물질과 오존이 직접 반응할 수 있는 기회를 증가시키기 때문에 이와 같은 높은 제거율을 나타내게 한 결정적인 원인이 되는 것으로 판단된다. 그리고 20일 동안 가스상 오존을 주입하였을 때 test cell내에서의 가스상 오존 농도는 주입농도의 50% 이하로 나타났다. 그리고 1차원 칼럼실험에서 관찰되는 오존주입 초기의 급격한 가스상 오존농도의 급격한 파과는 관찰되지 않고 있으며 오존주입시간과 비례하여 오존농도가 증가하였다.

4. 참고문헌

1. 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).

5. 사 사

본 연구는 '2003년도 차세대 핵심환경기술개발사업'의 연구과제로 수행되었으며, 연구비를 지원해주신 환경부에 감사 드립니다.

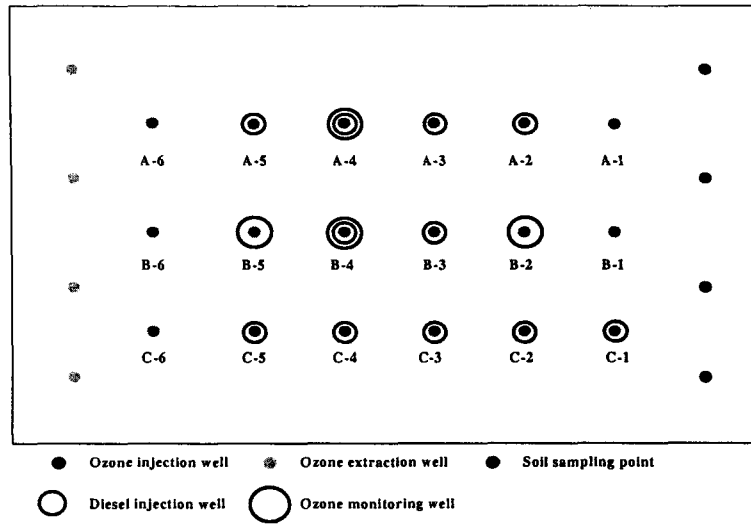


Fig. 1. Test cell layout.

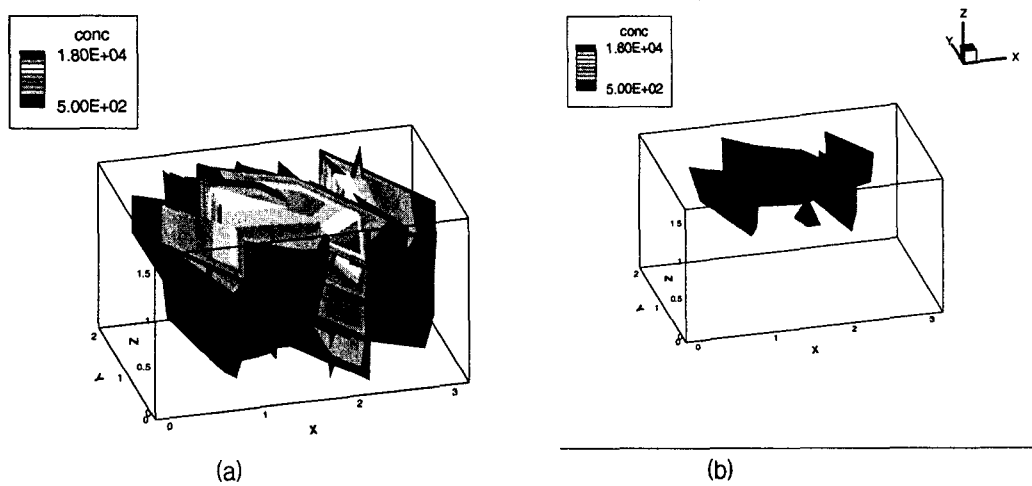


Fig. 2. Contour map of residual LNAPL: (a) before treatment, (b) after treatment