

공기 주입량 및 주입모드가 바이오벤팅의 처리효율에 미치는 영향

박준석 · 안병구 · 류두현* · 신현균 · 최민주 · 김영석 · 박종은

(재)자연환경연구소, *전주대 환경과학과
e-mail: jspark3901@hotmail.com

요약문

This study was performed to evaluate the effects of air flow rate and aeration mode on the treatment of bioventing for diesel-contaminated soil. Initial concentrations of diesel-contaminated soils were about 2,500 and 9,000mg/kg. Air flow rates were 30, 60, and 100mL/min, and air was injected in the continuous and the intermittent modes. TPH removal efficiency of intermittent aeration mode was higher than that of continuous aeration mode. Greater air flow rate than the value of guidance book was needed for bioventing.

Key word : Bioventing, Air flow rate, Aeration mode

1. 서론

유류누출 사고에 의한 탄화수소계 오염물질의 대부분은 불포화층(vadose zone)과 capillary fringe로 흘러 들어간다. 지하수위는 계절에 변화하며, 지하수위가 높아졌을 때 토양층의 잔류물질이 지하수에 녹아 지하수를 오염시키게 된다. 바이오벤팅(bioventing)은 불포화층의 오염원을 정화하여 지하수오염을 줄이려는 목적으로 시도되는 방법이다. 바이오벤팅은 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction, SVE)과 생물학적 분해를 결합시킨 in-situ 생물학적 처리공정이다^{1,2)}. 토양증기추출법은 탄화수소 화합물을 구성하고 있는 휘발성 물질의 처리에 적합하며 생물학적 처리공정은 휘발성이 낮은 고분자 탄화수소류에 주로 적용된다. 그러므로 이들 두 가지 공정의 조합은 보다 넓은 범위의 오염물질을 처리하는데 유용하게 이용된다^{3,4)}. 바이오벤팅 공정은 토양증기추출(Soil Vapor Extraction, SVE)공정과 비슷하지만 그 목적이 다르다. 토양증기추출공정에서도 미생물에 의한 분해가 일부 일어나지만 주된 목적은 저분자화합물의 휘발을 극대화하여 휘발된 배가스를 처리하는 것이다. 바이오벤팅 공정에서도 휘발은 일어나지만 여기에서는 분자량의 크기에 상관없이 호기성조건에서 분해 가능한 화합물들의 분해를 증진시키는 것을 목적으로 한다. 그러므로 토양증기추출법은 가솔린 같은 휘발성물질에 적용되는 것임에 반하여 바이오벤팅은 주로 휘발성이 작은 물질, 즉 디젤 등의 오염물질로 오염된 토양에 적용된다²⁾.

토양증기추출과 바이오벤팅은 공기공급량의 차이에 따라서 달라진다. 토양증기추출에는 1-15 pore volume/day, 바이오벤팅에는 0.1-0.5 pore volume/day 정도의 공기를 공급하는 것이 일반적이다⁴⁾. 본 연구는 공기공급량 및 공기주입모드가 디젤류 오염토양의 처리에 미치는 영향을 검토하기 위하여 실시하였다. 공기는 배가스량을 최소화하기 위하여 토양증기추출보다는 바이오벤팅에 맞추어 공급하였다.

2. 실험재료 및 운전조건

본 실험에 사용된 토양은 점토함량이 많아 양이온치환능력이 33.7meq/100g으로 높게 나타남 사질양토(sandy loam)이었으며, 토양의 공극률은 약 35%이었다(Table 1 참조). Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치이다. 내경 5cm, 높이 25cm의 유리칼럼에 인공적으로 오염시킨 디젤오염토양을 300cm³ 충전한 후 실리콘마개로 막았다. 주입되는 공기는 오염토양층을 통과한 후 휘발성물질을 흡착시키기위한 활성탄을 통과시킨 후 배출시켰다. 이 때 침출 등에 의한 농도감소는 없었으므로 디젤은 휘발과 분해에 의하여 제거된다. 공기공급방법으로는 간헐식과 연속식 공기주입모드를 선택하였다. 토양시료는 칼럼을 해체한 후 각 부분에서 일정량씩 채취하여 20g의 분석시료를 준비하였다. 시료는 아세톤과 메틸렌클로라이드를 1:1(부피비)로 혼합한 추출용매로 추출한 후 회전식 농축기(rotary evaporator)로 농축하여 가스크로마토그래프(Varian CP-3800)로 분석하였다. 칼럼은 길이 30m, 내경 0.25mm이며 WCOT 실리카 필름이 0.25 μ m 코우팅되어 있는 capillary column이다. 또한 유리칼럼보다 좀 더 큰 규모(D=10cm, H=100cm)로 아크릴로 제작한 반응기도 이용하여 실험을 하였다. 반응기의 하부 40cm정도까지는 물이 채워져 있으며 그 위 상부 50cm는 오염토양을 충전하였다. 반응기 실험과 유리칼럼 실험의 경우 디젤의 초기오염농도는 각각 약 9,000mg/kg과 2,500mg/kg으로 하였다.

Table 1. Characteristics of soil used in this study

Item	Value
Soil Texture	sandy loam
Sand (%)	69.90
Silt (%)	15.51
Clay (%)	14.59
Moisture Content (%)	20
Field capacity (%)	33.3
TKN(%)	0.02
pH	6.6
CEC (meq/100g)	33.7
Porosity (%)	35.6

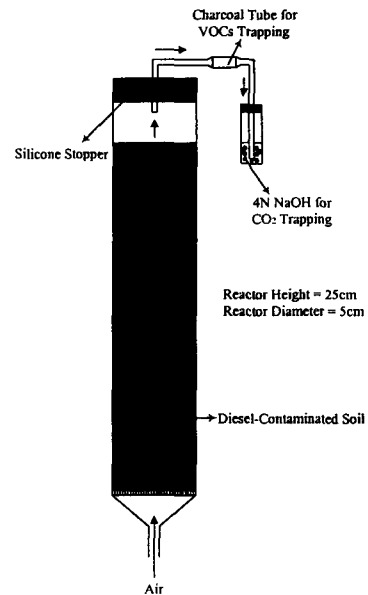


Fig. 1. Apparatus used in this experiment

3. 실험결과

3.1 압력손실

공기주입시 압력손실은 중요한 모니터링 인자가 된다. 압력손실은 토성과 밀접한 관계가 있다. 점토질 토양의 경우에는 동일한 공기를 주입하기 위하여 사토보다는 높은 압력손실이 발생한다. 토양증기추출 및 바이오벤팅을 현장에 적용할 경우에는 넓은 오염부지에 여러 개의 공기 주입정 또는 추출정을 설치하여야 한다. 이러한 경우 어느 정도간격으로 정(well)을 설치할 것인지를 결정하는 데에 압력손실 측정값을 이용할 수 있다. 현장에서 많이 적용되는 압력손실값은 2.5 mmH₂O이다. 압력은 가스유출부에 차압계를 설치하여 측정

하거나 지하수모니터링정을 설치한 후 수두차로 직접 측정할 수 있다. 일반적으로 공기를 주입할 경우 거리별로 압력손실을 측정하였을 때 2.5 mmH₂O의 압력손실을 나타내는 지점 까지를 공기주입영향반경으로 판단한다⁵⁾. 본 실험에서 반응기 실험에 대하여 공기유량에 따른 압력손실을 측정하여 보았다. 약 4L의 토양에 0.1L/min으로 공기를 주입할 경우 이는 25L/m³(토양)/min이 된다. 이 때의 압력손실은 약 35 mmH₂O이었다(Fig. 2). 유량을 조금씩 증가시키에 따라 압력손실은 급격히 증가하였으나 약 150L/m³(토양)/min이상으로 공기를 주입하자 압력손실증가는 크게 둔화되었다.

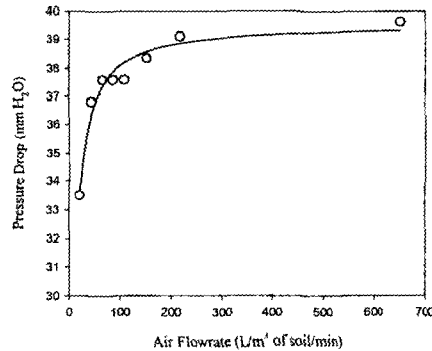


Fig. 2. Relationship between air flow rate and pressure drop

3.2 공기 주입량 및 주입모드의 영향

공기를 간헐주입(1시간 가동 후 3시간 중지)하는 경우와 연속주입하는 경우의 TPH 분해특성을 Fig. 3에 나타내었다. 4L의 토양층에 공급되는 공기는 간헐주입과 연속주입의 경우 0.5L/min과 0.125L/min으로 하루기간 동안 공급되는 총 공기량은 동일하였다. 이 때의 공기공급량은 문헌에서 제시하는 공기공급량보다 다소 높았다⁵⁾. 초기 4일차까지는 차이가 거의 없었으나 7일 이후부터는 간헐주입의 경우가 연속주입하는 경우보다 TPH농도감소율이 더 컸다(Fig. 3(a)). 그러나 간헐주입식과 연속주입식의 경우 모두 공기주입구로부터 가까운 곳(0cm 높이)에 있는 토양에서의 농도감소율이 상부의 농도감소율보다 큰 것으로 볼 때 공기공급량이 다소 부족하였던 것으로 판단된다. 각 시료채취구(0, 30, 60cm 높이)에서 측정된 농도를 평균하여 자연로그를 취한 후 1차반응속도상수를 비교하여 보았다. 공기를 간헐주입하는 경우의 k값이 0.07/day로 연속주입의 0.04/day보다 높았다(Fig. 3(b)).

공기주입량을 변화시켜 주입한 경우의 분해특성을 살펴보면 다음과 같다(Fig. 4 참조). 공기를 30mL/min(100L/m³(토양)/min), 60mL/min 그리고 100mL/min으로 주입하였을 때 공기주입량을 증가시킬수록 제거효율이 증가하였다. 이것으로 살펴볼 때 적정공기량을 결정하기 위해서는 공기공급량을 더 증가시켜야 할 것으로 사료되며, 이는 향후 연구에서 계속 진행할 예정이다.

4. 결론

공기주입량과 공기주입모드가 바이오벤틱의 처리효율에 미치는 영향을 검토한 결과 공기는 문헌에 제시되는 0.1-0.5 pore volume/day보다 많이 주입하는 것이 효율적이었으며, 간헐식 공기주입이 연속식 공기주입보다는 제거효율이 다소 우수하였다.

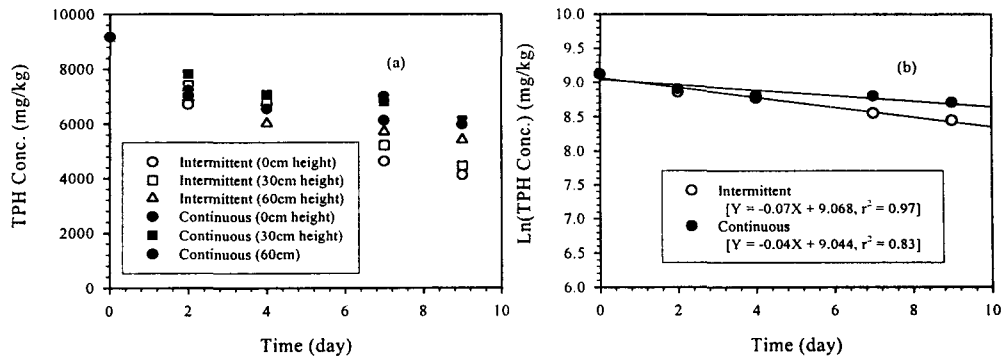


Fig. 3. Effect of air injection mode on bioventing

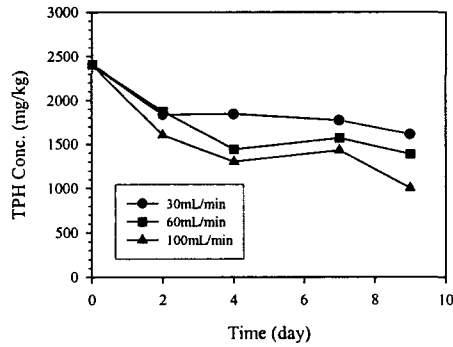


Fig. 4 Effect of air flow rate on bioventing

감사의 글

본 연구는 '2001년도 차세대 핵심환경기술개발사업'의 연구과제로 수행되었으며, 연구비를 지원해주신 환경부에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Eweis, J.B., Ergas, S.J., Chang, D.P.Y., and Schroeder, E.D., Bioremediation Principles, Mc-Graw-Hill, pp.150-162(1998)
- 2) Long, G., Bioventing and Vapor Extraction: Innovative Technologies for Contaminated Site Remediation, Air & Waste Manage. Assoc., 42(3), pp.345-348(1992).
- 3) Reisinger H.J., Johnstone E.F. and Hubbard P., "Cost Effectiveness and Feasibility Comparison of Bioventing vs. Conventional Soil Venting" in Hydrocarbon Bioremediation edited by Hinchee R.E., Alleman B.C., Hoepfel R.E., Miller R.N., Lewis Publishers, pp40-57(1994)
- 4) 윤석표, 차명철, 류범수, 윤범한, Soil Vapor Extraction과 Bioventing 기술의 원리와 적용에 관한 고찰, 13(1), pp.161-171(1996).
- 5) Leeson, A. and Hinchee, R.E., Soil Bioventing: Principles and Practice, Lewis Publishers(1997).