

디젤오염 지하수 정화를 위한 공기주입정화법 칼럼 실험

장 순 웅 · 이 시 진 · 송 정 훈* · 권 수 열**
경기대학교 환경공학과, *(주)그린기술산업, **한국방송통신대학교 환경보건학과
(2004년 7월 15일 접수; 2004년 12월 21일 채택)

Bio Sparging Column Experiment for Remediation of Diesel Contaminated Groundwater

Soon-Woong Chang, Si-Jin Lee, Jung-Hoon Song* and Soo-Youl Kwon**

Dept. of Environmental Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

*Green Engineering and Construction Co. Ltd., Seoul 138-160, Korea

**Dept. of Environmental Health, Korea Open National University, Seoul 110-791, Korea

(Manuscript received 15 July, 2004; accepted 21 December, 2004)

Bio sparging experiments were conducted in a laboratory column to investigate the potential removal of diesel contaminated groundwater. The objectives in this study were (a) to determine the extent of diesel degradation in laboratory columns under supplement of nutrient; (b) to determine the effect of variation of air flow in the removal of diesel and (c) to evaluate the potential enhancement of diesel degradation as a function of temperature. Our results showed that the nutrient supplement and higher air flow greatly enhanced diesel degradation. However, the variation of water temperature examined slightly increased degradation rate of diesel fuel.

Key Words : Bio sparging, Diesel, Nutrient, Air flow, Temperature

1. 서 론

최근 주유소와 유해화학물질을 저장하고 있는 산업시설의 지하저장탱크에서 유류 및 유해화학물질의 유출로 인한 토양 및 지하수오염 문제가 부각되고 있다. 지하저장탱크에서 유출된 유류오염물질은 대부분 소수성이고 토양과 강한 흡착을 이루거나 오랜 시간 잔류하고 지하수와 함께 이동하여 광범위한 지역에 오염원으로 작용하게 되므로 대상 오염물질과 현장 조건에 따른 적절한 처리가 요구된다. 특히 주유소, 공장 및 군부대 유류저장 시설 등의 유류오염물질로 인한 토양 및 지하수 오염은 생태계를 파괴하고 지속적인 오염원으로 작용할 가능성이 높아 매우 심각한 환경문제로 대두되고 있어 이에 따른 종합적인 현황 파악과 오염지역 정화기술 개발과 관련된 연구가 필요한 실정이다. 그러나 토양 및 지하수 오염의 처리에는 장기적이고 많은

경비가 소요되기 때문에, 오염지역의 처리가 필수적임에도 불구하고 국내에서는 기술개발을 위한 충분한 투자가 이루어지지 못하고 있다.

토양은 물이나 공기와 달리 불균일하고 운반성이 나쁘며 중량이 크기 때문에 처리시 공정상 제어가 쉽지 않다. 또한 처리지역의 현장조건에 따른 변수로 인해 단기간의 연구로는 적절한 복원기술의 확립이라는 기대효과를 얻기 힘들다. 대표적인 토양 및 지하수 오염원인 유류오염물질은 어떤 한계이하로 떨어지지 않는 잔존현상(tailing effect)으로 정화에 많은 시간이 소요된다. 오염된 토양 및 지하수의 정화는 단일 기술에 의해서는 충분한 복원이 어려우므로, 여러 가지 종합적인 처리기술을 필요로 한다¹⁾.

최근 유류로 오염된 포화층의 정화를 위한 방법 중의 하나로 air sparging 공법이 제시되고 있는데, air sparging은 1985년부터 독일 등 유럽을 중심으로 널리 사용되어 왔으며 미국에서는 1990년 중반부터 사용되기 시작하였다²⁾. Air sparging은 포화층에 상향류의 공기 주입으로 air channel을 형성, 토양층의 투과성을 변화시켜 오염원의 휘발 및 생물학

Corresponding Author : Soon-Woong Chang, Dept. of Environmental Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea
Phone : +82-31-249-9739
E-mail : swchang@kyonggi.ac.kr

적 활성도를 증가시키는 방법으로 시공비와 운전비가 비교적 저렴하고 설치가 용이한 처리기술이다²⁻⁴⁾. 그러나 air sparging 공정은 포화층에 공기주입시 토양흡착물질, 용존물질 및 증기상태의 물질 등 존재 형태가 다른 오염물질 사이에 복잡한 관계와 휘발, 탈기, 생분해등 복잡한 메커니즘에 의해 제거되므로 공정이해가 어렵다. 오늘날 이러한 공학적인 시스템의 설계는 경험적인 지식에 크게 의존하고 있다.

Air sparging은 디젤과 같이 휘발이 잘 되지 않으며 생분해도가 높은 오염원에 대하여 bio sparging 개념으로 적용할 수 있다. In situ biosparging 공법은 포화된 토양내에 최소한의 공기를 공급해 줌으로써 토착미생물의 활성도를 증가시켜 오염원의 생분해를 촉진하는 원위치 복원기술로서 stripping과 volatilization보다 biodegradation에 의한 제거가 용이한 오염원에 적합한 처리기술이다^{3,4,7)}.

본 연구에서 대상 물질로 선정된 디젤은, 휘발성과 용해도가 낮아 오염원의 확산이 느리며 NAPLs 상태로 토양 불포화층을 통해 수직 이동하여 지하수면에 축적, 잔류포화 상태로서 지하수의 장기적인 오염원으로 작용한다. 디젤은 200여종의 유기화합물로 구성되어 있으며, 이중 약 70%이상이 파라핀계 물질로서 이들 물질들은 토양 미생물에 의해 분해가 용이한 성분들로 알려져 있다⁵⁾. 따라서 미생물의 활성도를 유지시킬 수 있는 조건(온도, 영양물질, pH, DO등)하에서 디젤의 생분해는 매우 효과적으로 알려져 있다⁶⁾.

이러한 측면에서 본 연구에서는 디젤로 오염된 지하수를 정화하기 위한 하나의 방법으로 bio sparging 공법의 적용 가능성을 검토하였다. 특히, nutrient 공급유무, 공기유속 변화 및 온도변화에 따른 디젤 제거 특성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치 및 운전조건

실험에 사용된 토양은 디젤에 오염된 적이 없는 학교 인근의 지표 20cm 이내의 토양을 채취하여 균일한 성상을 갖도록 하기 위하여 읍지에서 48시간 풍건 후 No.10 및 No.35 체를 이용하여 0.5~2mm 입경을 갖도록 하였으며, 증류수를 이용하여 수회 세척한 후 사용하였다.

토양 1kg당 약 5,000mg의 디젤로 오염된 토양을 Fig. 1에서 나타낸바와 같은 실험실 규모의 air sparging column에 채운 후 배양된 30ml의 디젤분해균주를 주입하였다.

본 실험을 위한 column은 Fig. 1과 같이 제작하였다. 높이 33cm, 내경 7.5cm이고 부피는 대략 1.5 l 정도 되는 column으로써 하부에는 nutrient solution

주입을 위한 유입부와 air를 주입하기 위한 유입부를 따로 설치하였다. 칼럼 상부에는 온도감지 센서를 두어 칼럼의 온도를 측정할 수 있도록 하였으며 칼럼 하부 공기 유입부에는 온도조절장치와 온도센서를 두었고 공기 유입관에 열선을 감아 유입 공기의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 칼럼에 유입되는 nutrient solution은 미량펌프(SMP-23(EYELA.Co))를 이용하여 칼럼 전체가 포화될 수 있도록 하였고, 이는 충분한 nutrient solution의 공급과 함께 칼럼내부의 오염물의 이동을 억제하기 위해 결정하였다. Air 유속은 100ml/min를 최소 유속으로 정하였는데 이는 오염물인 디젤의 특성이 휘발과 탈기로 인한 제거보다 미생물에 의한 생분해로 인한 제거가 지배적이므로 충분한 산소의 공급을 기준으로 결정하였다.

2.2. 디젤 추출 및 분석방법

토양시료의 분석은 칼럼에서 채취한 토양시료 4g을 일정량(약 15g)의 sodium sulfate를 섞어 수분을 제거한 다음 추출용매(Methylene chloride) 20ml에 첨가하여 24시간동안 shaking chamber를 이용하여 shaking하여 추출하였다⁸⁾. 추출효율은 평균 약 62%이었다. 추출시료내의 디젤농도의 분석은 NWTPH-Dx(Northwest Total Petroleum Hydrocarbon Analytical Method for Semi-Volatile Petroleum Products) 분석법⁹⁾을 근거로 하여 디젤범위유기물(diesel range organics, DRO)농도와 TPH 표준 용액으로 나누어 따로 준비하였다. DRO 농도의 경우 디젤 대표적 성분들인 n-alkane계 물질만을 대상으로 하며, 일반적으로 디젤 범위내의 탄소수(C8-C28)를 갖는 포화탄화수소 물질들의 농도 합으로 표시된다. 본 실험에서는 DRO농도 분석을 위한 표준물질로서 Supelco Co.에서 제조하여 판매하는 UST Modified DRO Mix를 사용하였다. 이 표준용액에는 decane(C10)과 octacosane(C28) 사이에서 짝수개의 탄소수를 갖는 10개 포화탄화수소가 각각 1,000µg/mL(총농도 10,000 µg/mL)가 hexane에 함유되어 있다. 이러한 표준물질을 methylene chloride를 이용하여 5가지 농도로 희석하여 working calibration standard로 사용하였다. 개별 DRO 성분별 농도 총합을 토양시료 건조중량으로 나누어 최종적으로 건조토양의 단위 중량당 DRO질량(mg-DRO/kg-dry soil)으로 농도를 결정하였다. TPH 표준 용액의 경우 실험에 사용된 No.2 디젤유를 이용하여 10,000mg/L의 모표준용액을 준비해놓고 농도별 5개의 표준용액을 제조하여 매 분석시마다 사용하였다.

토양과 물 시료중 디젤성분의 분석은 토양시료에서 추출한 추출액을 GC-FID(HP 6890II series; Hewlett

디젤오염 지하수 정화를 위한 공기주입정화법 칼럼 실험

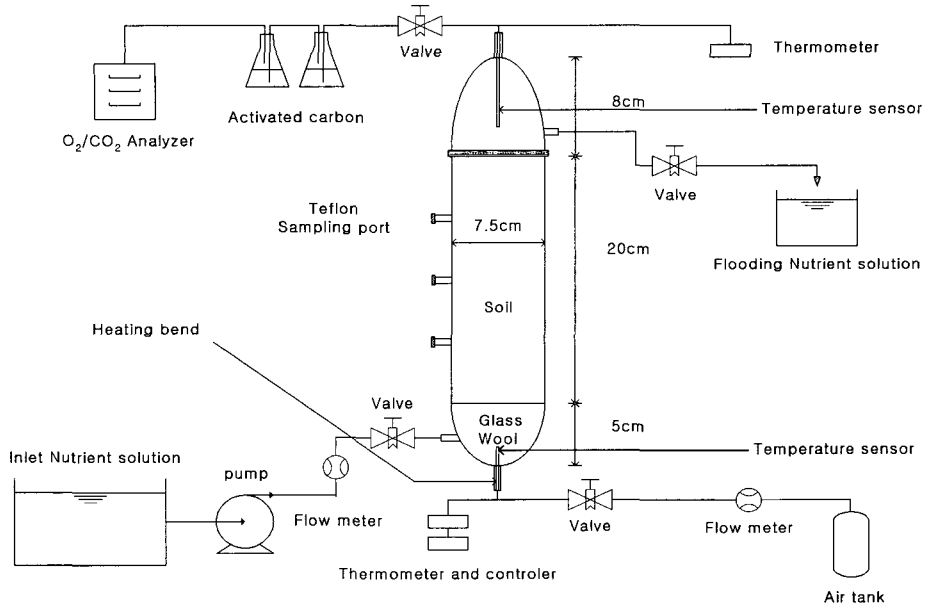


Fig. 1. Schematic of air sparging column.

Packard Co.)를 이용하여 수행되었으며, HP-1 capillary column(길이 25m, 내경 0.32mm, film thickness가 0.52 μ m인 methyl silicon 칼럼)을 사용하였으며 GC 운전조건은 다음과 같다. 오븐온도는 분석 대상물질의 피크가 중첩됨이 없도록 선정하였다. 초기온도는 40°C, 최종온도는 290°C이었으며 승온율은 290°C까지 10°C/min으로 증가시켰다. 시료 주입부와 검출부 온도는 각각 270°C와 290°C이었다. 칼럼 유량은 1ml/min이었으며 수소, 공기와 질소의 유량은 각각 30ml/min, 300ml/min과 250ml/min이었다. 석유계 총 탄화수소 농도는 GC 피크면적을 합산하여 검량선에 따라 계산하였다.

2.3. 미생물 분석

대부분의 토양에는 석유계탄화수소를 분해할 수 있는 토양 미생물(박테리아, 진균류 등)이 풍부하게 존재하며 약 200여종의 미생물이 석유계탄화수소의 생물학적 분해에 관여하는 것으로 알려져 있다¹⁰. Cookson 등¹¹은 토양미생물중 약 20% 정도가 석유계탄화수소를 분해할 수 있는 능력을 가지고 있다고 보고하고 있으며 이들 토양미생물을 이용한 생물학적 복원기술은 석유계탄화수소로 오염된 토양을 정화하는데 있어서 가장 비용경제적인 기술로 인정되고 있다.

Microorganism colony counting은 6주간의 칼럼 운전 후에 칼럼의 상부 5cm 부분의 토양을 채취하여 채취된 시료 10g와 멸균된 증류수 90ml를 reciprocating shaker에 약 30분간 둔 후 연속적인 10

배 희석을 실시하였다. 희석된 시료를 tryptic soy agar plate를 이용한 Standard total plate count methods를 이용하여 plate에 올린 후 35°C의 온도로 24시간 배양한 후 colony를 측정하여 colony/kg soil로 환산하였다¹².

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Nutrient/Air 주입에 따른 디젤 제거 특성

Air sparging 공정은 오염지하수에 공기를 주입해 줌으로써 미생물에 의한 생분해 및 오염원의 휘발을 증대시켜 오염된 지하수로부터 오염원을 제거하는 방법이다. 본 연구에서는 일반적으로 적용되는 유류오염원중 적용이 쉬운 BTEX를 배제하고 상대적으로 생분해성이 낮고 공기주입에 따른 휘발이 적은 디젤을 대상으로 공기주입에 의한 처리가능성을 검토하였다.

Fig. 2는 4개의 column내에서의 용존산소농도 변화를 보여주고 있다. 공기가 주입되지 않은 자연정화에 의한 디젤의 처리효과를 보기 위한 column C에서는 초기 DO농도가 1.9mg/l이었으나 시간이 경과하면서 15일까지는 0.7~1.0mg/l, 25일 이후에는 DO농도가 0.5mg/l 이하의 범위를 보여주고 있다. 반면에 지속적으로 공기가 주입되는 column A, B, D에서는 7.0~8.5mg/l의 범위를 보여주고 있다. 즉, 공기주입이 효과적으로 이루어짐을 볼 수 있다. 또한 Column A와 B/D를 비교할 때, column내의 디젤분해균주의 활성화로 인해 소요되는 DO 분포의 차이를 보이는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 nutrient solution 및 air 주입에 따른 토양내의 TPH의 분해 경향을 나타낸 것이다. 오염물로 적용한 디젤유의 초기오염농도는 TPH로 환산하여 약 5,000mg/kg로 인위적으로 오염시켰다. Column A는 air만을 100ml/day로 주입하였으며, Column B는 air 100ml/day 주입과 동시에 nutrient solution을 주입하였다. Column C는 air 공급없이 nutrient solution만 주입하였으며, Column D는 Column B와 동일한 조건에 air 주입량을 200ml/day로 높여주었다. Fig. 3(A) 및 Fig. 3(B)를 비교하면 nutrient solution 공급 여부에 따른 디젤 분해 특성을 비교할 수 있다. Column A는 30일 후에 TPH의 농도가 4,214mg/kg의 농도로 나타났고 Column B는 2,004 mg/kg의 농도로 관찰되어, nutrient의 공급여부에 따라 디젤유의 제거율은 약 44.3% 증가하는 것으로 나타났다. 위의 결과는 디젤유의 분해에 토양의 유류분해 미생물에 의한 분해가 지배적으로 나타난 것을 알 수 있었으며 air 공급만을 시켜준 조건은 디젤유의 분해율이 상당히 낮은 것을 알 수 있었다. 디젤유는 다른 유류오염물과 비교하여 휘발성이 상당히 낮으므로 디젤유의 제거에 생물학적인 분해가 지배적으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 생물학적인 반응이외에 디젤유의 제거는 air에 의한 휘발과 토양 내에 흡착으로서 나타나는 것을 짐작할 수 있는데 이렇게 제거되는 양은 전체 오염농도의 10% 이내로 추정할 수 있다. 오 등¹³⁾의 연구에 의하면 bioventing 공정을 이용한 디젤유에 오염된 토양정화 실험에서 휘발에 의해 감소된 디젤유의 양은 1% 미만으로 나타났으며 황 등⁶⁾의 연구에 의하면 휘발에 의해 손실된 디젤유의 양은 초기농도의 1.7~2.1%로서 매우 작은 양이었다. 이에 따라 디젤유의 분해에는 생물학적 작용이 큰 비중을 차지하게 되므로 nutrient의 공급이 중요한 제어 인자가 될 수 있다.

또한 Fig. 4는 5일 간격으로 유출수의 디젤농도를 측정하였다. 실험 초기에는 공기 주입에 의한 sparging의 효과로 오염토양에 흡착된 디젤의 탈착 등의 영향에 의해 디젤의 용해도보다 높은 농도로 검출되었다. 반면에 시간이 경과함에 따라 유출수에 포함된 디젤의 농도는 급격하게 낮아짐을 보여준다.

Air/bio sparging 칼럼실험에서 작용하는 주요인자중 하나는 공급되는 air의 유속이다. air의 공급은 디젤오염물의 이동과 생물학적인 활성도에 영향을 미친다. 토양미생물에 의한 석유계 탄화수소의 초기 분해 단계는 oxygenase에 의한 산화공정이므로 분자상태의 산소가 필요하게 되며 호기성 조건이 필수적이다^{11,14)}. 물론 혐기성 조건에서도 생물학적인

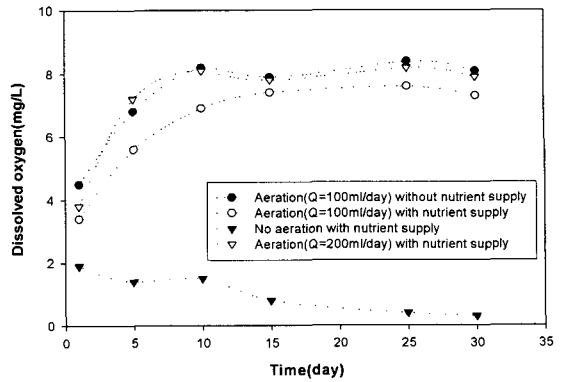


Fig. 2. Dissolved oxygen during air sparging.

분해가 일어나기는 하지만 호기성조건에 비하여 분해속도는 매우 미미하므로 석유계탄화수소의 생물학적 분해에 있어서 산소의 이용가능성이 가장 중요한 제한인자가 될 수 있다. 디젤유의 분해 미생물이 호기적 조건에서 디젤유를 분해하므로 충분한 산소를 공급해주어 미생물에 의한 디젤유를 제거함과 동시에 상향류의 air sparging에 의한 포화토양 내에서의 오염물의 이동과 air channel의 형성으로 산소의 공급이 충분히 이루어 질 수 있도록 air의 유속에 따른 디젤유의 분해정도를 알아보기 위함이다. 칼럼의 운전조건은 동일하게 nutrient를 공급해주면서 air의 flow rate를 변화해주어 비교를 하였는데 column B는 air 100ml/day 주입과 동시에 nutrient solution을 주입하였다. column D는 column B와 동일한 조건에 air 주입량을 200ml/day로 높여주었다. Fig. 3(B) 및 Fig. 3(D)를 비교할 때, 공기주입량의 증가에 따라 디젤 생분해율도 다소 증가되는 것으로 관찰되었다. 즉, 석유계탄화수소의 생물학적 분해에 air 공급이 중요한 역할을 하고 있음을 의미하는 것이다. 김 등¹⁵⁾은 미생물의 활성도는 air 공급에 의해 증진 될 수 있으나 통기조건인 경우는 aeration 효과와 더불어 토양시료의 수분감소로 인한 영향이 미생물 분포와 활성도에 더 큰 영향을 미치고 있다고 보고하였다. Denis 등¹⁶⁾ 실험실규모의 칼럼 연구에서는 air sparging의 공기 주입량의 변화에 따라 BTEX 제거율이 최대 3배 가량 차이가 났으며, mineral oil과 grease의 제거율은 포화층에서 대략 1.78배, 불포화층에서 대략 1.6배 가량의 차이를 보였다. 이것은 휘발성이 높은 물질보다 휘발성이 낮은 물질이 공급되는 유속에 비해 제거율이 낮으며 생물학적 분해에 의존율이 높다는 것을 설명해 준다.

3.2. 고온공기 주입에 따른 디젤 제거 특성

위의 실험 결과를 볼 때, 디젤오염지하수에 공기 주입법을 적용하는 효과는 용존산소 농도를 증대함

디젤오염 지하수 정화를 위한 공기주입정화법 칼럼 실험

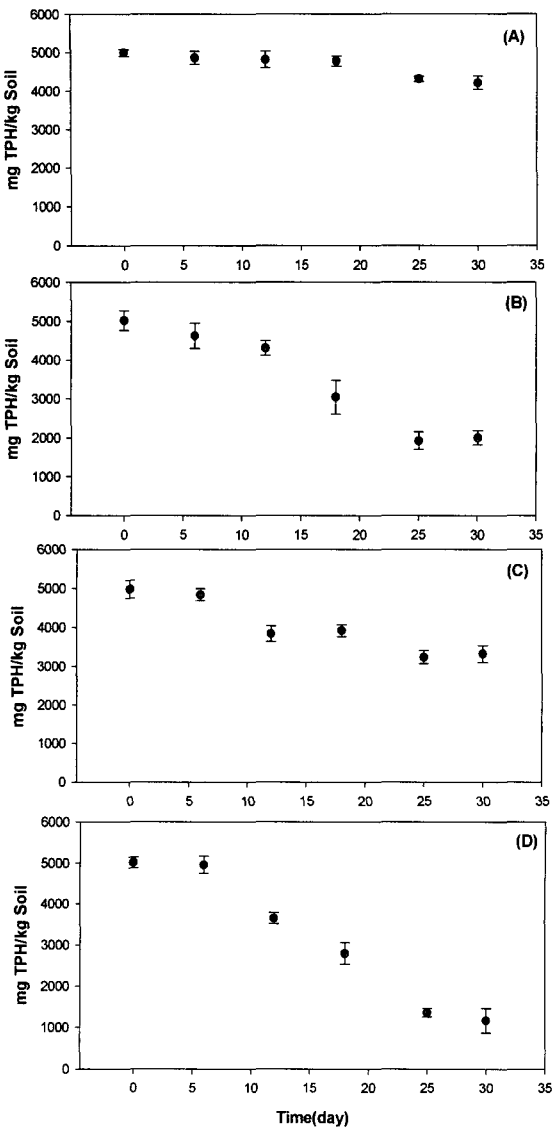


Fig. 3. TPH concentrations in the soil of the column A-D during 30 days experiment : (A) aeration (Q=100ml/day) without nutrient supply; (B) aeration(Q=100ml/day) with nutrient supply; (C) no aeration with nutrient supply; (D) aeration (Q=200ml/day) with nutrient supply.

으로써 미생물의 활성화로 인한 디젤 처리효과 증대이다. 물론 공기주입 압력에 의해 휘발에 의해 디젤제거가 유도되기도 하지만 생분해에 비해 상대적으로 적은 양이다. 이러한 결과를 바탕으로 디젤의 제거에는 생분해의 효율을 높여주는 것이 중요하다. 위의 실험은 일반 실험실 조건인 20°C~24°C에서 진행되었지만, 고온공기에 의한 디젤 제거 효과를 조사하기 위해 위의 실험과 유사한 조건에서 hot

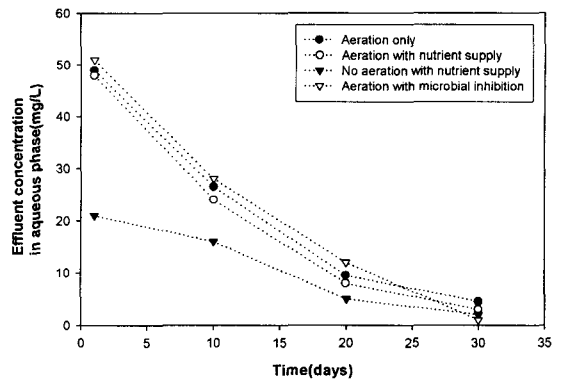


Fig. 4. Profile of aqueous diesel concentration in column effluents.

air를 주입시킴으로써 bio sparging column내의 온도를 약 26°C~29°C로 유지할 수 있도록 조절하였다.

Fig. 5는 Fig. 3의 조건에서 온도의 변화를 주어 디젤의 제거 특성을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(A)는 nutrient solution 100ml/day, air 100ml/min으로 주입한 조건의 column내의 토양 상부에서 5cm 지점에서 채취한 토양의 TPH를 약 5일 간격으로 분석한 결과이다. 이 결과는 공기 주입 시작 10일 후부터 토양내의 디젤이 활발하게 저감되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 실험초기에 접촉한 디젤 분해균주가 공기 주입과 더불어 활성화됨으로써 디젤을 효율적으로 저감시키고 있다. 초기 TPH 농도가 5,011mg/kg soil에서 30일후에는 2,435mg/kg soil으로 51.4%가 감소되었다. Fig. 5(B)의 결과는 Fig. 5(A)와 동일한 조건에서 고온공기를 지속적으로 sparging 시켰을 때의 칼럼내의 토양의 농도 변화를 보여준다. 고온공기 주입 시작 후 칼럼 전체의 온도가 일정한 상태로 상승하는데는 3일 정도가 소요되었고, 칼럼내의 온도를 26°C~29°C로 유지하였다. 디젤 저감속도는 Fig. 5(A)와 비교하여 상대적으로 접촉한 미생물의 적응에 필요한 지연기가 다소 짧아 실험 시작 후 5일부터는 TPH 농도가 지속적으로 저감됨을 알 수 있다. 실험 초기 TPH 농도는 4,957mg/kg soil에서 30일 경과후에는 1,927mg/kg soil으로 61.1% TPH 저감효과가 있었다. 본 실험은 고온공기 주입에 따른 디젤로 오염된 토양 및 지하수를 정화하는데 효율성을 증대할 수 있는지에 대한 사전 실험 연구이다. 즉, 고온공기 주입은 일반 공기 주입보다는 효율성이 향상되었음을 확인할 수 있다.

특히 현장에서의 지하수의 온도가 지역에 따라 다르지만 일반적으로 15°C~20°C 범위이므로 본 공정에서 제안한 것처럼 지하수의 온도를 올려줄 수

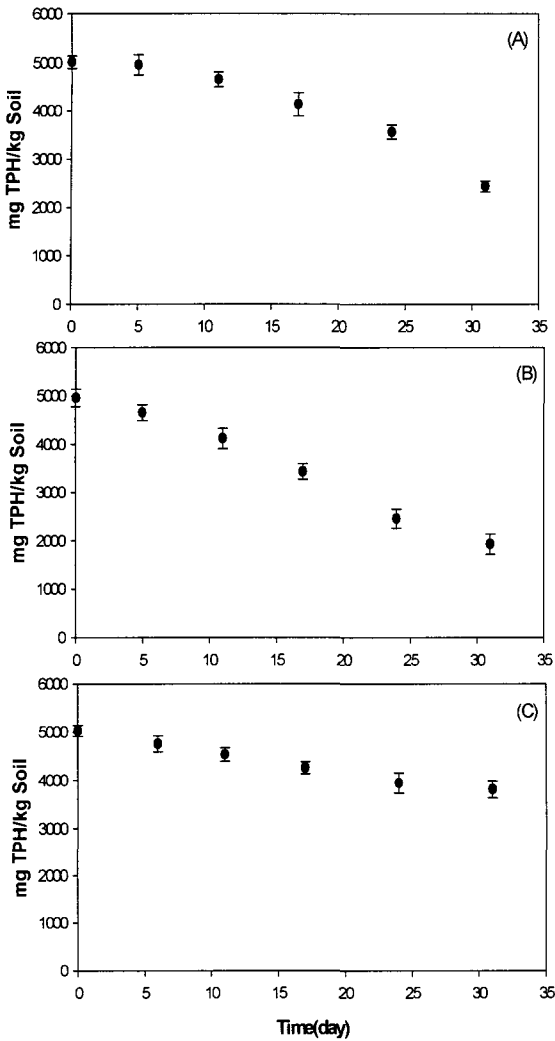


Fig. 5. TPH concentrations in the soil of the column A-C as a function of temperature : (a) aeration with nutrient; (b) aeration with nutrients and increased temperature; (c) aeration with nutrient and increased temperature but microbial activity was inhibited.

있다면 효율적으로 디젤을 제거할 수 있을 것이다. Fig. 5(C)에서는 Fig. 5(B)와 동일하게 고온공기를 주입하되 nutrient solution에 1% sodium azide를 포함하여 주입함으로써 미생물에 의한 디젤의 분해를 방해하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 유출수에서의 TPH 액상 농도를 분석한 결과이다. 즉, 실험초기에는 100ml/min 유속의 공기 주입에 따라 column 밖으로의 유출농도가 디젤 용해도를 상당히 초과한 농도로 검출되나 시간이 경과하면서 유출 농도가 격감하는 것을 볼 수 있다. 특히 이전 실험에서 sparging한 경우와 하지 않은

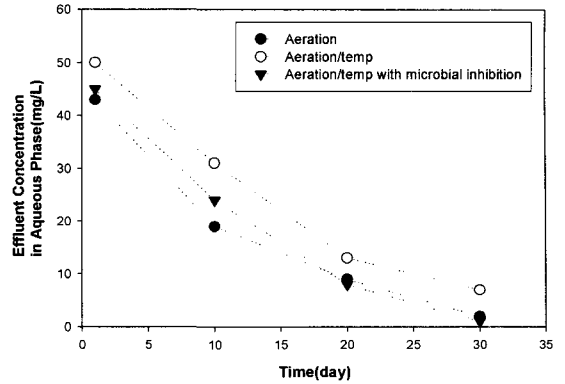


Fig. 6. Profile of aqueous diesel concentration in column effluents.

Table 1. Bacterial plate counts(colony-forming units/g soil)

| Column | Day 0 | Day 30 |
|--------|-------------------|-------------------|
| 1 | 3.4×10^3 | 16×10^6 |
| 2 | 6.8×10^3 | 225×10^6 |
| 3 | 6.4×10^3 | 45×10^3 |

경우 유출수에서의 디젤 농도는 확연하게 차이가 있었으나 고온공기 주입에 따른 유출수의 변화는 별 차이가 없음을 볼 수 있다. 그러나 차후 연구로서 본 실험에서 진행된 온도보다 높은 고온공기 주입에 따른 휘발의 증가에 따른 저감, 액상에서의 용해도 증가로 인한 유출수에서의 검출농도에 대해서도 검토가 이루어져야 할 부분이다.

Table 1은 실험 시작할 때와 30일 경과 후 칼럼 토양내의 상부에서 채취한 시료에서 균주양을 분석한 결과이다. column C의 경우는 sodium azide가 주입된 경우인데, 토양내의 균주수의 변화가 거의 없음을 보여주고 있다. 즉, sodium azide 공급에 따라 효과적으로 미생물의 작용을 방지했음을 확인할 수 있다. 그러나 column A, column B인 경우 실험 종료 후 토양내 균주수가 확연하게 증가했음을 볼 수 있다. 특히 고온공기를 주입 column B의 경우는 column A보다 균주수가 많았다. 즉, 공기 주입에 따라 column내 DO 농도 증가에 의한 미생물의 수 증가, 활동도 증가를 유도할 수 있으나, 고온공기 주입에 따라 column내의 온도를 미생물의 성장에 적합한 온도를 유지해 줌으로써 같은 실험 기간이지만 많은 양의 균주수가 검출되었다.

4. 결론

본 연구 목적은 실험실 규모의 bio sparging column

실험을 통하여 디젤로 오염된 토양/지하수 정화 가능성을 검토하고, 그 중 bio sparging 공정에 영향을 주는 인자들을 찾아내는데 있다. 생물학적 분해에 영향을 미치는 nutrient와 air의 공급유속에 따라 변화하는 디젤의 제거 특성을 살펴보았으며 column 내의 온도를 증가시켜 온도변화에 따른 디젤 제거 특성을 조사하였다. Nutrient 주입여부에 따른 미생물의 활성에 대한 차이는 두드러지게 나타났다. Air/bio sparging의 주요인자중 하나인 air의 공급은 100ml/day, 200ml/day의 유속에 따라 디젤유의 제거 정도에 약간의 차이를 보였다. 휘발에 의한 디젤의 제거가 다소 증가한 것으로 추정되며, 이미 충분한 산소의 공급이 이루어지고 있으므로 디젤의 생분해율의 증대에는 미미한 영향을 미치는 것으로 사료된다.

또한 hot air를 지속적으로 column내에 주입한 column내의 온도가 약 4°C~5°C 정도 증가하였으며, 디젤 분해 효율이 약 10% 향상됨을 관찰하였다. 본 연구의 결과는 디젤오염지하수 정화를 위한 현장 생물학적 복원방법중 Air/bio sparging 공정 역시 적절한 대안이 될 수 있으며, 현장 특성에 따라 지하수의 온도를 높여줄 수 있다면, 생물학적 처리 효율을 극대화 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Reddy, K. R., S. Kosgi and J. Zhou, 1995, A review of in-situ air sparging for the remediation of VOC-contaminated saturated soils and groundwater, *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, 12(2), 97-118.
- 2) Jeffrey, A. A. and R. R. Krishna, 1999, Laboratory study of air sparging of TCE-contaminated saturated soils and groundwater, *Ground Water Monitor. Remed.*, 19, 182-190.
- 3) Colin, D. J., L. R. John, M. P. Bradley and B. D. Greg, 1998, Volatilization and biodegradation during air sparging of petroleum hydrocarbon-contaminated sand aquifer, *Groundwater Remediation and Protection*, IAHS Pub., 250, 125-131.
- 4) Elder, C. R. and C. H. Benson, 1999, Air channel formation, size, spacing, and tortuosity during air sparging, *Ground Water Monitor. Remed.*, 19, 171-181.
- 5) 엄익태, 이상현, 안규홍, 1999, 오염토양중 디젤 성분의 생분해 처리성 평가, *대한환경공학회지*, 21(8), 1519-1529.
- 6) 황의영, 남궁원, 박준석, 2000, 환경인자가 토양 내 석유탄화수소의 분해에 미치는 영향, *한국토양환경학회지*, 5(1), 85-96.
- 7) Johnson, P. C., R. L. Johnson, C. L. Bruce and A. Leeson, 2001, *Bioremediation Journal*, 5(4), 251-266.
- 8) U.S. Environmental Protection Agency, 1983, Method 418.1: Petroleum Hydrocarbons, Total Recoverable, In: *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*, EPA-600/4-79-020.
- 9) Widrig, D. L. and J. F. Manning, 1995, Biodegradation of No. 2 diesel fuel in the vadose zone a soil column study, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(11), 1813-1822.
- 10) Yerushalmi, L., S. Rocheleau, R. Cimpoia, M. Sarrazin, G. Sunahara, A. Peisajovich, G. Leclair and S. R. Guiot, 2003, Enhanced biodegradation of petroleum hydrocarbons in contaminate soil, *Bioremediation Journal*, 7(1), 37-51.
- 11) Suthersan, S. S., 1996, *Remediation engineering design concepts*, Lewis Publishers.
- 12) Brock, K. H. and M. T. Madigan, 1991, *Biology of microorganisms*, Prentice-Hall.
- 13) 오영진, 왕성환, 박태주, 2001, 디젤 오염토양의 효과적인 Bioventing, *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집(II)*, 235-236pp.
- 14) Autry, A. R. and G. M. Ellis, 1993, *Bioremediation of petroleum fuel contaminated soils*, Federal Environmental Restoration Conference Proceedings, 93-100pp.
- 15) 김무훈, 강순기, 정우성, 박덕신, 1999, 유류오염 지역의 미생물 분포 및 활성도에 관한 연구, *대한환경공학회지*, 21(11), 2041-2047.
- 16) Denis, L., L. Jiyu, M. C. Chapdelaine, J. L. Sansregret and C. Benoit, 1994, In situ air sparging for bioremediation of groundwater and soils. In *situ aeration : air sparging, bioventing and related remediation processes*, 3(2), 121-126.