한국지하수토양환경학회지 Vol. 11, No. 4, pp. 10~17, 2006 ≪原著≫

디젤오염 토양 및 지하수 복원을 위한 공기주입정화법 실험실 연구 : 공기주입량과 공기주입방식의 영향

장순웅[1]* · 이시진[1] · 조수형[2] · 윤준기[3]
[1]경기대학교 환경공학과, [2]한국시설관리공사, [3]삼성물산 기술연구소

Lab-Scale Air/Bio-Sparging Study to Remediate Diesel-Contaminated Soil and Groundwater : The Effect of Air Injection Rate and Pattern

Soon-Woong Chang[1]* · Si-Jin Lee[1] · Su-Hyung Cho[2] · Jun-Ki, Yoon[3]
[1]Dept. of Environmental Engineering, Kyonggi University
[2]Environmental Facilities Management Corporation
[3]Engineering & Construction Group, Samsung Corporation

ABSTRACT

Laboratory-scale two-dimensional aquifer physical model studies were conducted to assess the effect of air injection rate and air injection pattern on the removal of disel contaminated soil and groundwater by air/bio-sparging. The experimental results were represented that the optimal conditions in this experiment were as air injection rate of 1,000 ml/min and pulsed air injection pattern (15 min on/off). The results of the TPH reduction, DO consumption and CO_2 production indicate the effective biodegradation evidence of diesel. Based on our results, The minimal O_2 supply and pulsed air injection pattern could effectively enhance the diesel removal and the pulsing air injection had effect on oxygenation in this system. Thus, the cost of operating air/bio-sparging system will be reduced if optimal air injection rate and pulsed air injection pattern are applied to remediate contaminants.

Key words : Air/Bio-sparging, Diesel, Air injection rate, Air injection Pattern

요 약 문

본 연구에서는 실험실 규모의 2D air/bio-sparging 장치를 이용하여 공기주입량과 공기주입방식이 디젤오염 토양/지하수의 복원에 미치는 영향을 평가하고 최적 조건을 도출하였다. 최적의 공기주입량과 공기주입방식은 1,000 ml/min의 공기주입과 15 min 간격의 간헐적인 공기주입 패턴이 효율적으로 관찰되었고, 실험기간동안 TPH와 DO 감소, CO_2 생성은 오염원인 디젤이 효과적으로 생분해에 의해 제거가 이루어지고 있음 보여주었다. 즉, 최소한의 공기주입으로도 포화층에서의 디젤 분해를 효과적으로 증진시킬 수 있었으며, 간헐적인 공기주입방식은 대수층내에서의 공기 전달을 증진시킬 수 있었다. 또한 Air/bio-sparging공법의 대부분의 운전비가 blower와 off-gas 처리 시스템에 사용되는 전력비라는 것을 감안 할 때, 최적의 공기주입량과 간헐적인 공기주입방식은 운전비 절감의 효과를 가져다 줄 것으로 판단된다.

주제어 : 공기주입정화법, 디젤, 공기주입량, 공기주입 방식

1. 서 론

계속적인 경제발전과 소득수준이 향상되면서 에너지 소비량의 증가에 따른 환경오염이 심화될 것으로 예상되고 있다. 특히 산업활동과 자동차 보급대수의 증가와 함께 유류사용량이 증대되면서 주유소를 비롯한 유류 저장시설의

*Corresponding author : swchang@kyonggi.ac.kr
원고접수일 : 2005. 8. 3 게재승인일 : 2006. 1. 11
질의 및 토의 : 2006. 10. 31 까지

수는 1980년대 이후 크게 증가하였다. 이에 따라 주유소와 유해화학물질을 저장하고 있는 산업시설에서의 지하저장탱크(Underground Storage Tank; UST)에서 NAPLs (Non Aqueous Phase Liquids)로 분류되는 유류 및 유해화학물질의 유출로 인한 토양 및 지하수오염 문제가 부각되고 있다(이진용 등, 2002). 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. 그러므로, 오염된 토양 및 지하수의 정화는 단일 기술에 의해서는 충분한 복원이 어려우므로, 여러 가지 종합적인 처리기술을 요구하기도 한다(Reddy and Adams, 2001; Johnson et al., 1999).

최근 유류로 오염된 포화층의 정화를 위해서 air-sparging 공법이 선택적으로 사용되고 있다. Air-sparging 공법은 1985년부터 독일 등 유럽을 중심으로 널리 사용되어 왔으며 미국에서는 1990년 중반부터 사용되기 시작하였다 (Johnson et al., 1999). Air-sparging 공법은 포화층에 상향류의 공기 주입으로 air channel을 형성, 토양층의 투과성을 변화시켜 오염원의 휘발 및 생물학적 활성도를 증가시키는 방법으로 시공비와 운전비가 비교적 저렴하고 설치가 용이한 처리기술이다(Reddy et al., 1995; Lundegard et al., 2001; Heron et al., 2002, Rutherford and Johnson, 2000). 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 공정을 이해하는데 어려움이 있다. 이와 더불어 air-sparging 공법은 최소한도의 공기주입만으로 생물학적 반응을 주요 기작으로 대수층내의 오염원을 제거하는 bio-sparging 공법 개념으로 적용하기도 한다.

Air-sparging 공정 적용에 있어 공기주입량과 공기주입방식은 중요한 운전조건으로 작용한다. 과도한 공기주입량은 직경이 큰 규모의 channel을 형성하고 한쪽 방향으로만 channeling 현상을 유도하기 때문에 산소전달 효율이 감소될 수 있다(Heron et al., 2002; Reddy and Adams, 2000; Johnson et al., 1997). 또한 연속적인 공기주입방식은 대수층의 수리전도도를 감소시키기 때문에 간헐 공기주입보다 효과가 떨어 질 수 있다. 반면에 간헐 공기주입에서 sparging 기간 동안 형성된 channel은 air pathway로 작용, 오염원의 이동과 용존산소 전달에 중요한 역할을 수행한다. 이후 형성된 channel은 sparging이 중지된 기간동안 서서히 붕괴·소멸하게 되는데 붕괴된 channel은 외부의 지하수 혹은 오염원으로 채워지게 된다 (Reddy et al., 1995; Rutherford and Johnson, 2000; Johnson et al., 1997). 이러한 간헐 공기주입에서 반복되는 channel의 형성과 붕괴는 수리전도도를 증가시키고 영향반경내로 외부오염원의 유입과 확산, 용존산소 농도의 증가라는 이점을 가진다. Air-sparging 공법에서 대부분의 운전비용이 전력비라는 것을 감안하면 최적의 공기주입량과 공기주입방식의 산정은 경제성면에서 유리하게 작용할 수 있다. 그러므로 최적의 공기주입량과 공기주입방식을 산정하기 위한 실험실 혹은 현장 연구는 매우 중요한 과정이다.

본 연구에서는 실험실 규모의 2D air/bio-sparging 장치를 이용하여 공기주입량과 공기주입방식이 디젤 제거에 미치는 영향을 조사하였으며 최적 운전 조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

디젤로 오염된 토양 및 지하수의 정화를 위한 air/bio-sparging 공법 적용시 공기주입량과 공기주입방식이 디젤 생분해에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 구성하였다.

높이 50 cm, 너비 80 cm, 폭 15 cm의 2D air sparging 반응조를 제작하여 실험에 사용하였고 토양을 바닥에서 45 cm 높이로 채운 후 용존산소를 제거한 증류수를 바닥에서 40 cm 높이까지 채워 포화층을 구성하였다. 2D air/

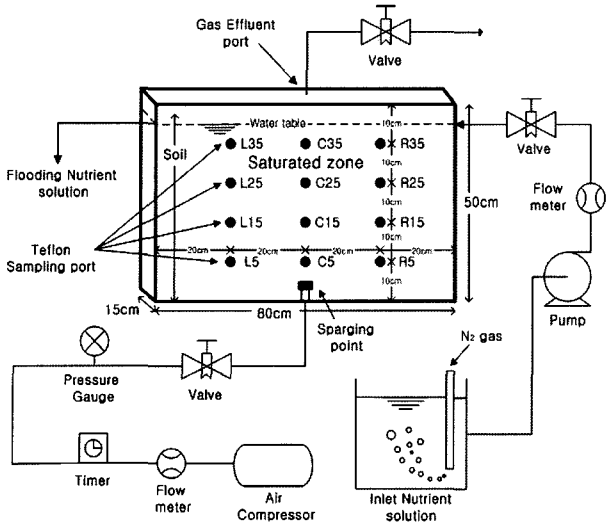


Fig. 1. Schematics of 2D air/bio-sparging experiment setup.

bio-sparging 반응조 하부 5 cm 지점에 sparging point를 구성, compressor를 이용하여 공기를 주입하였고 공기유량 및 폭기방식의 변화를 위하여 유량계와 타이머를 설치하였다.

공기주입으로 인한 배출가스는 2D air/bio-sparging 반응조 상단중앙부를 통하여 외부로 배출하였다. 외부산소의 유입을 막기 위해 2D air/bio-sparging 반응조를 밀봉하였고, 외부의 빛을 차단하였다. DO와 TPH분석을 위해 상하 10 cm, 좌우 20 cm 간격으로 총 12개의 teflon sampling port를 구성하였다. 디젤은 실험초기에 C15 port를 통하여 100 ml 주입, 포화층 내에 디젤에 의한 NAPL을 인위적으로 조성하였다. 주유소 부근 현장 오염토양에서 채취, BSM배지(1% Diesel)에 2주간 배양한 디젤 분해 미생물을 각각의 port에 주 1회 5 mL씩 2주간 주입하였다.

주유소 주변의 깊이 50 cm에 위치한 토양을 실험에 사용하였으며, 채취된 토양은 균일한 성상을 갖도록 하기 위하여 음지에서 풍건 후 mash를 이용하여 입경을 일정하게 갖도록 한 후 사용하였다. 토양분석결과 medium sand 80.6%, fine sand 4.3%, silty clay 12.5%로 전형적인 사질토양으로 나타났다.

2.2. 분석방법

DO농도는 10 cm needle을 이용하여 sampling port에서 3 ml를 채취, YSI model 58 DO meter로 측정하였고, 기상부의 CO_2 농도는 GC-TCD로 분석하였다.

TPH는 크게 물시료와 토양시료로 나누어 분석하였다. 물시료 분석을 위해 각각의 sampling port에서 10 cm needle을 이용하여 시료 1 mL를 채취하였다. 그 다음 120 ml 갈색 bottle에 주입하고 water bath를 이용하여 bottle의 온도를 80°C로 올린 후 Supelco사의 PDMS (polydimethylsiloxane coating) fiber를 이용하여 SPME (solid phase microextraction) 방법으로 디젤을 기상에서 추출하여 GC-FID로 분석하였다. PDMS fiber는 bottle의 headspace에서 1분간 흡착하였고, GC-FID injecter에서 5분간 탈착하였다. 디젤은 용해도가 매우 낮아 수용액상에서 대부분 NAPL 상태로 존재하므로, 물시료의 TPH는 채취한 sample 1 mL 당 포함되어 있는 디젤의 양(mg/L mL)으로 표현하였다.

토양시료의 분석은 각각의 sampling port에서 채취한 토양시료(4 g)를 dichloromethane 20 ml로 추출, sodium sulfate를 넣어 수분을 제거한 후 GC-FID를 이용하여 분석하였고 토양 1 kg당 포함되어 있는 디젤의 양(mg/kg)으로 환산하였다.

디젤 분석은 GC-FID(HP 5890serise; Hewlett Packard Co.)를 이용하여 수행되었으며, HP-5 capillary column(길이 25 m, 내경 0.32 mm, film thickness가 0.52 μM인 methyl silicon 칼럼)을 사용하였다.

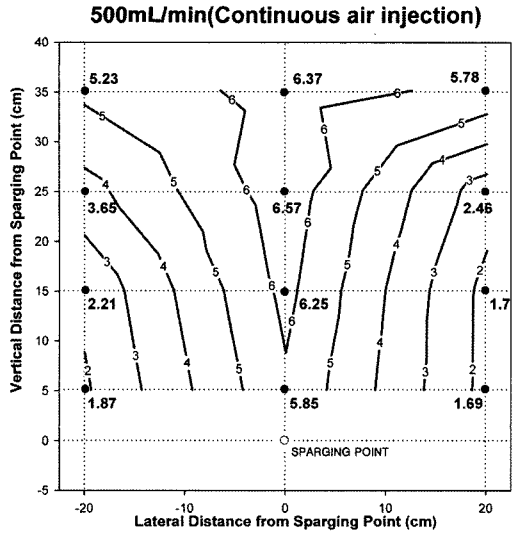
GC의 운전조건은 초기온도를 40°C에서 290°C까지 10°C/min로 승온시켰고, 최종온도는 290°C이고 시료 주입부와 검출부 온도는 각각 250°C와 290°C이었다. 칼럼유량은 1 mL/min, H_2와 air의 유량은 각각 30 mL/min, 300 mL/min를 유지하였다.

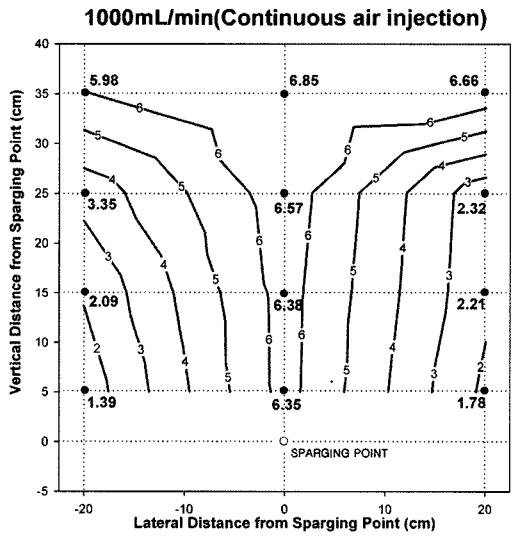
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 공기주입량과 공기주입방식에 따른 DO 농도

일반적으로 Air-sparging 공법 적용시 주입된 공기는 영향반경내의 용존산소를 6~10 mg/L까지 상승시켜 오염물질의 휘발을 유도하거나 호기적 조건하에서 미생물의 생분해도를 증가시키는 역할을 한다(Johnson et al., 1999). 반면에 Bio-sparging 공법은 상대적으로 최소한도의 공기주입에 따라 미생물의 생분해 기작을 극대화 하는데 목적이 있다. 그러므로 Bio-sparging 공법 적용시 적절한 공기주입량(Air injection rate)의 산정은 운전비 절감을 통한 경제성 측면에서 매우 유리하게 작용할 수 있다.

공기주입방식(Air injection mode)은 오염원의 이동과 확산, DO 농도 분포에 따른 영향반경의 면적에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Air sparging 공법에서 연속(Continuous) 공기주입은 수리전도도를 저하시켜 외부 오염원의 영향반경내로의 확산과 이동에 효과적이지





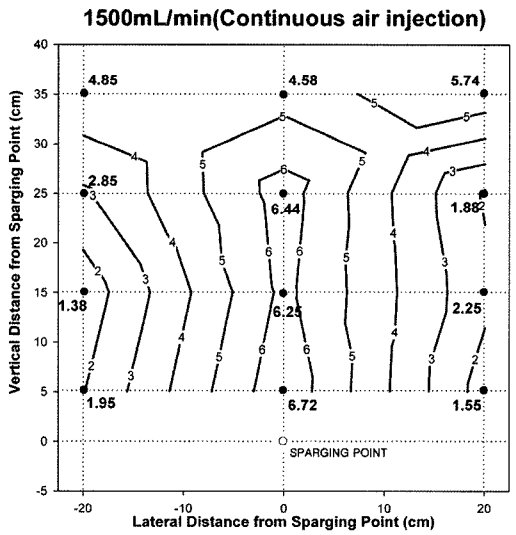
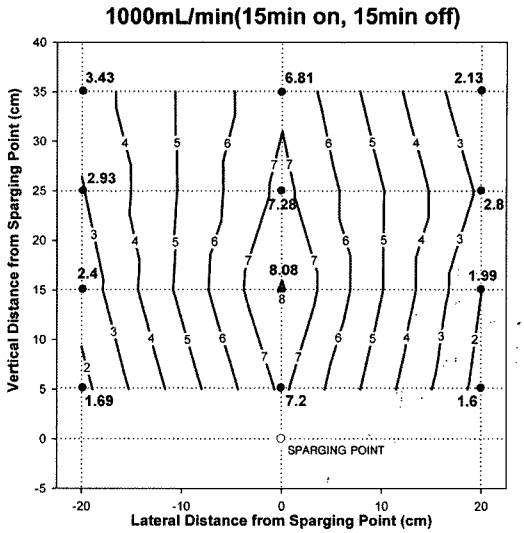
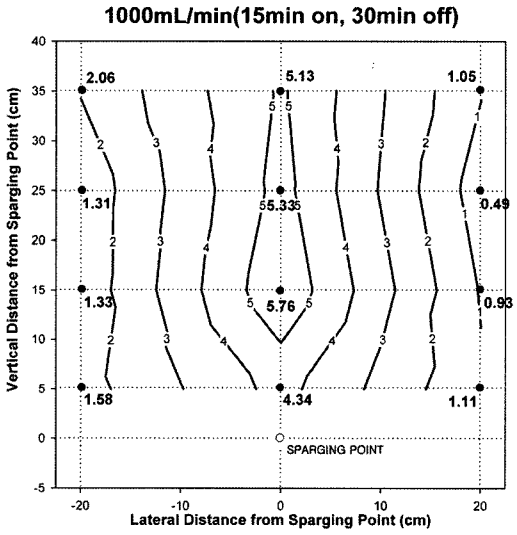


Fig. 2. DO concentration profile on the continuous air injection mode.





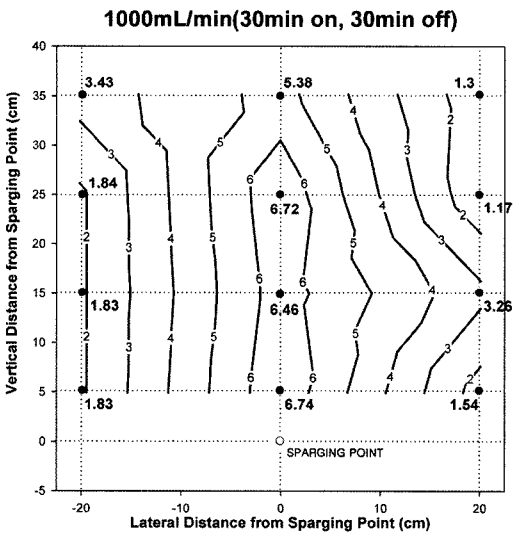


Fig. 3. DO concentration profile by air injection patterns (Q = 1000 mL/min).

못할 수 있다. 반면에, 간헐(Pulsed) 공기주입은 연속 공기주입보다 수리전도도를 증가시켜 영향반경내의 확산과 이동에 효과적이고 영향반경을 크게 하여 고려해 볼만한 운전조건이다(Reddy et al., 1995; Lundegard et al., 2001; Rutherford and Johnson, 2000).

본 실험에서는 air/bio-sparging 실험에 이용된 2D 실험실 규모 반응조에서 포화층의 DO 농도와 영향반경을 최대로 할 수 있는 적절한 공기주입량과 공기주입방식을 산출하는 실험을 수행하였다. 이를 위해 공기주입량(500 ~3000 mL/min)과 공기주입방식(연속 혹은 간헐 공기주입)에 따른 유효영향반경과 용존산소의 농도를 결정하는 실험을 수행하였으며, 산출된 최적 조건은 디젤 생분해 실험의 기본 운전조건으로 사용하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 공기주입량과 공기주입방식에 따른 DO 농도를 contour map으로 표현한 것이다. 유효영향반경을 1 mg/L 이상으로 보았을 때(이진용 등, 2002) 각각의 조건에서 sparging point 좌·우측 port에서의 DO 농도는 1~2 mg/L로 측정되어 각각의 sampling port는 모두 영향반경 안에 포함되는 것으로 나타났으며, air/bio-sparging에 의한 DO 농도의 증가는 sparging point에서 수직으로 5, 15, 25, 35 cm에 위치한 C5, C,15, C25, C35 port에서 주로 나타났다.

1,000 mL/min의 공기량으로 연속 주입하였을 때 center port(C5, C15, C25, C35)의 DO 농도는 6.3~6.8 mg/l로 가장 높게 측정되었고, 1,500 mL/min 이상으로 공기주입량을 증가시켰을 때는 오히려 1,000 mL/min 공기 주입시보다 DO 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 과도한 공기주입으로 인해 반응기내 직경이 큰 규모의 channel이 형성되어 산소전달 효율이 감소되어 나타난 현상으로 보여진다(Reddy et al., 1995; Rutherford and Johnson, 2000).

연속 공기주입방식에서 가장 큰 DO 농도의 증가를 나타낸 1,000 mL/min의 공기주입량에서 공기주입방식을 간헐 공기주입 조건으로 변화시켜 실험한 결과, 1,000 mL/min (15 min on/off) 조건에서 center port의 DO농도가 6.8 ~ 8 mg/L로 1,000 mL/min의 공기량으로 연속 주입하였을 때보다 높게 측정되어 간헐 공기주입이 연속 공기주입보다 포화층의 DO 농도를 증가시키는데 더 효과적으로 나타났다. 이는 간헐공기주입 조건에서 sparging이 중지된 기간동안, channel이 붕괴될 때 channel의 영향이 덜 미치는 지역에서의 오염원과 지하수가 channel로 이동하는 효과와 channel을 통과하는 공기입자가 기액 평형을 이루기에 충분한 체류시간으로 channel 내에 정체하여 산소전

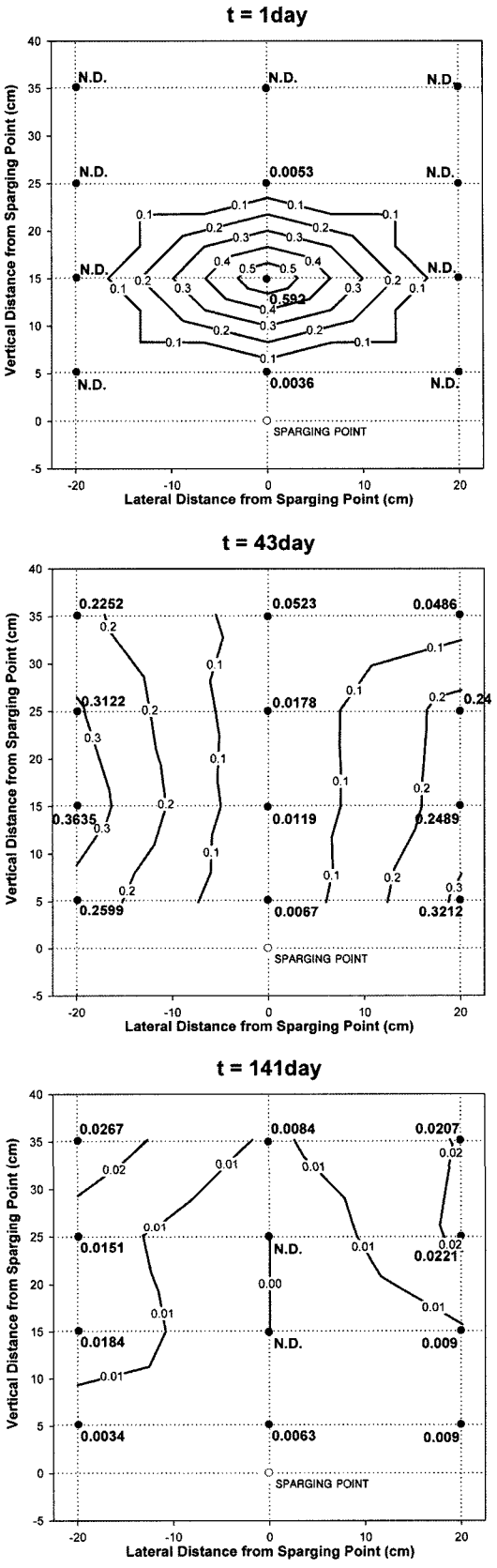


Fig. 4. TPH mass distribution during 143 day operation.

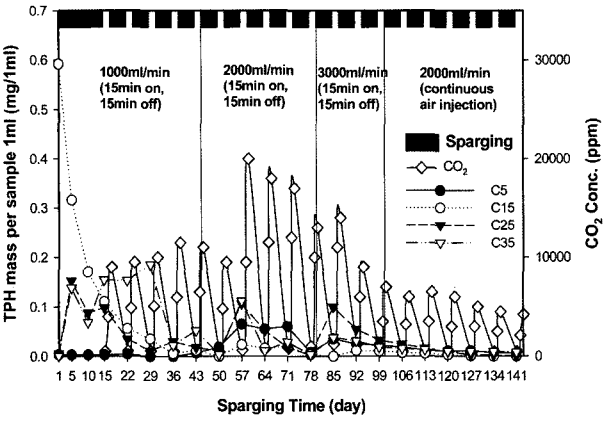


Fig. 5. TPH mass at center port and CO_2 concentration during 143 day operation.

달원으로 작용하고 때문으로 사료된다. 이러한 간헐 공기주입의 효과는 air/bio-sparging 공정의 현장 적용시 전력비 절감의 효과를 가져다 줄 것이다(Adams and Reddy, 2003).

3.2. 공기주입량과 공기주입방식에 따른 디젤 생분해 실험

실험실 규모의 sparging 장치에서 최적 공기주입량 및 공기주입방식을 산정 후 디젤 주입 후 제거 특성을 관찰하였다. Fig. 2에서 보듯이 sparging point에서 수직으로 15 cm에 위치한 C15 port에 디젤 100 mL를 주입하고 각각의 port에 디젤분해 미생물을 주입한 후 143일간 운전조건에 따른 air/bio-sparging 실험을 실시하였다. 디젤 생분해도는 TPH mass 변화, DO 변화 및 CO_2 발생량을 근거로 평가하였으며 실험은 7일을 기준으로 5일 sparging, 2일은 휴지기를 유지하였다. TPH 분석은 1주에 1회, DO 및 CO_2 분석은 휴지기 기간인 2일동안 3회(0 hr, 24 hr, 48 hr) 실시하였다.

또한 143일 운전기간 동안 공기 주입량 변화를 주면서 TPH 제거량과 CO_2 발생량을 살펴보았다.

Fig. 4는 143일 운전기간동안 각각의 sampling port에서 채취한 sample 1 mL에 포함된 TPH 분포(mg)를 contour map으로 나타낸 것이다. 143일 운전 후 반응조 내 TPH 분포는 상당히 감소하였을 볼 수 있는데, C15 port의 초기 TPH mass 0.592 mg는 시간이 지남에 따라 감소하여 43일 후 0.012 mg으로 나타났다. 43일에서의 contour map은 공기주입이 계속됨에 따라 디젤이 좌·우측 port로 상당부분 이동한 것으로 보여주고 있는데, 이 시기 C15 port에서 TPH mass의 급격한 감소는 air-sparging시 상향류 공기이동에 의한 디젤의 확산과 토양내 흡착 효과로 볼 수 있다. 디젤의 생분해가 계속됨에

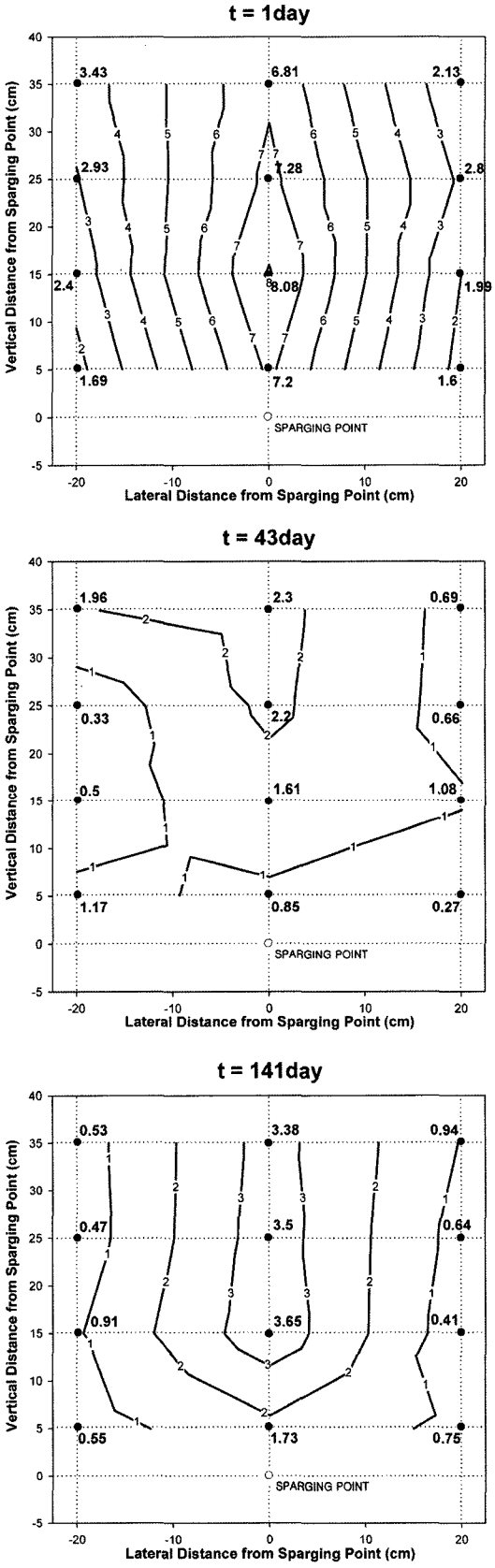


Fig. 6. DO concentration distribution during 143 day operation.

따라 141일에서의 전체 sampling port의 TPH mass 분포는 0~0.026 mg으로 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 143일의 운전기간동안의 center port(C15)에서의 TPH mass와 CO_2 발생량 변화를 나타낸 그림이다. 1,000 ml/min 속도의 공기주입과 간헐 공기주입방식(15 min on/off)을 유지하였을때, 초기에 확산등으로 인한 급격한 TPH 감소가 일어났으며, CO_2 발생량 역시 생물학적 반응이 시작되면서 점진적으로 증가하기 시작하였다. 공기주입량을 증가시킨 43일 이후부터는 점진적인 TPH 감소와 더불어 강제적인 공기주입에 따른 생물학적 활성도가 증가됨을 볼 수 있다. 실험초기 본 반응조 규모에서 최적 공기주입량(1,000 mL/min)과 공기주입방식(15 min on/off)보다 활발한 생물학적 반응 결과가 도출되었다. 최적 공기주입량 산출은 반응조내에서의 최소의 공기주입으로 효과적인 DO 분포를 근거로 한 결과였다. 즉, 1,000 mL/min의 공기주입량의 조건에서도 생물학적 TPH 분해가 효과적으로 이루어졌으며, 그 이상의 조건에서는 TPH 분해만을 놓고 볼 때 효과는 더욱 증대되었다. 그러나, 78일 이후 공기주입량을 3,000 mL/min로 증가시킨 후에는 CO_2 발생량이 오히려 감소하기 시작했는데, TPH mass의 감소에 따른 생물학적 분해도의 감소로 설명할 수 있다. 또한 85일 경과 후에 center port의 TPH mass가 0.035 ~ 0.099 mg으로 증가한 후 점차 감소되는 것으로 나타나는 것으로 관찰되었는데, 이때 관찰된 TPH mass의 증가는 공기주입량 증가에 의한 channeling 현상과 본 실험의 특성상 2D air/bio-sparging 반응조 좌 · 우측 port로 확산되었던 디젤이 center port로 이동하기 때문으로 사료된다. 또한 이 시기에 형성된 channel을 바탕으로 영향반경을 추정하였을 때 공기주입량 증가에 의한 반응기 안의 영향반경의 증가를 관찰 할 수 있었다.

101일부터 143일까지 2,000 mL/min의 연속적인 공기주입으로 운전하였을 때, 2,000 mL/min(15 min on/15 min off)와 3,000 mL/min(15 min on/off) 운전조건으로 변화시켰을 때 관찰할 수 있었던 center port의 TPH mass의 일시적인 증가는 관찰할 수 없었는데, 이는 공기주입량의 감소와 연속적인 공기주입 방식은 channeling 현상과 영향반경내의 수리학적 안정도를 변화시키지 못하는 것을 알 수 있었다. 이 시기 center port의 TPH mass는 계속해서 감소하여 141일에 0~0.008 mg으로 나타났다. TPH mass가 감소함에 따라 CO_2 발생량은 지속적으로 감소하는 추세로 143일에서 CO_2 발생량(휴지기 48hr 기준)은 0.42%로 나타났다.

Fig. 6은 air/bio-sparging 실험 기간동안의 DO분포를 contour map으로 나타낸 것이다. 실험초기에는 공기주입으로 인해 전체적으로 높은 DO농도 분포를 보여주고 있다. 43일 경과 후에는 생물학적 분해가 활성화되면서 DO 분포가 0.27~2.3 mg/L의 범위내에 있으나, 141일 경과 후에는 0.41~3.65 mg/L로 오히려 증가하는 현상을 보여주었다. 이 결과는 토양내에 잔존하는 TPH 감소에 따른 미생물의 분해가 감소하면서 잔류 DO가 증가하기 때문으로 설명 할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 디젤로 오염된 토양/지하수의 정화방안으로 생물학적 복원 공법인 air/bio-sparging 공법의 적용가능성을 실험 규모의 실험을 통하여 검토하였다. 디젤은 물리화학적 특성상 휘발보다 생분해에 의한 반응이 중요기작이므로 공기주입량을 최소화하면서 지속적인 디젤 제거 반응을 유지하기 위한 방안으로 bio-sparging 개념으로 본 실험을 진행하였으며, 주요변수인 공기주입량 및 공기주입방식에 따른 디젤제거특성을 조사하였다. 실험실 규모의 2D air/bio-sparging 장치를 이용하여 공기주입량과 공기주입방식을 선정하기 위한 실험 결과 본 연구에서는 1,000 mL/min의 공기주입량, 공기주입방식은 연속적인 공기주입보다는 간헐적인 공기주입(15 min on/off) 방식이 효과적인 것으로 나타났다. 2D air/bio-sparging 실험에서의 디젤 제거는 143일 실험기간동안의 TPH, DO, CO_2의 변화를 가지고 평가하였다. 실험초기에는 공기주입으로 인한 center port에서의 디젤의 확산이 관찰되었으며, 시간경과에 따라 TPH 감소, DO 감소 및 CO_2 증가 현상이 관찰되면서 디젤이 생분해에 의해 지속적으로 제거가 일어남을 관찰하였다. 본 실험결과, 오염원 특성에 따라 air/bio-sparging 공법을 선택적으로 운전할 필요가 있으며, 특히 air-sparging공법의 대부분의 운전비가 blower와 off-gas 처리 시스템에 사용되는 전력비라는 것을 감안 할 때, 최적의 공기주입량과 간헐적 공기주입 방식은 운전비 절감의 효과를 가져다 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

이진용, 이철효, 이강근, 2002, 유류오염 지하수에 대한 공기주입 정화법의 적용성 평가, 지질학회지, **38**, 125-130.

Adams, J. and Reddy, K., 2003, Extent of benzene biodegradation in saturated soil column during air sparging, *Ground Water*

Monitoring & Remediation, **23**, 85-94.

Heron, G., Gierke, J.S., Faulkner, B., Mravik, S. Wood, L., and Enfield, C.G., 2002, Pulsed air sparging in aquifers contaminated with dense nonaqueous phase liquids, *Ground Water Monitoring & Remediation*, **22**, 73-82.

Johnson, P., Das, A., and Bruce, C., 1999, Effect of flow rate changes and pulsing on the treatment of source zones by in situ air sparging, *Environmental Science and Technology*, **33**, 1726-1731.

Johnson, P., Johnson, R., Neaville, C., Neaville, C., Hanssen, E., Sterns, S., and Dortch, I., 1997, An assessment of conventional in situ air sparging pilot tests, *Ground Water*, **35**, 765-774.

Lundegard, P., Chaffee, B., and LaBrecque, D., 2001, Effective air delivery from a horizontal sparging well, *Ground Water Monitoring & Remediation*, **21**, 117-123.

Reddy, K. and Adams, J., 2001, Effects of soil heterogeneity on airflow patterns and hydrocarbon removal during in situ air sparging, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**, 234-247.

Reddy, K. and Adams, J., 2000, System effects on benzene removal from saturated soils and ground water using air sparging, *J. of Environmental Engineering*, **124**, 288-299.

Reddy, K., Kosgi, S., and Zhou J., 1995, A review of in-situ air sparging for the remediation of VOC contaminated soils and groundwater, *Hazardous Waste* and *Hazardous Materials*, **12**, 97-118.

Rutherford, K. and Johnson, P., 2000, Effects of process control changes on aquifer oxygenation rates during in situ air sparging in homogeneous aquifers, *Ground Water Monitoring & Remediation*, **16**, 132-141.