한국지하수토양환경학회지 Vol. 8, No. 3, pp. 13~22, 2003 ≪原著≫

대수층 토양입자크기에 따른 공기분사 흐름 양상

이준호* · 박갑성
한국외국어대학교 자연과학대학 환경학과

Effect of Sediment Size On Air Injection and Flowing Aspect of Groundwater Saturated Zone

Jun-Ho Lee* · Kap-Song Park
Department Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

ABSTRACT

Laboratory scale study for an air injection and flowing aspect of groundwater saturated zone was conducted for three sediment grains (AMG 0.34, 1.38, 3.89 mm diameter). Air flow for AMG (Average Modal diameter Grains) 0.34 mm diameter grain size provides indication of patten of channelized air flow in saturated zone and expansion state in above saturated zone. Maximum area of influence is approximately 15.2%/m^2 for AMG of 0.34 mm diameter. For AMG of 1.38 mm and 3.89 mm modal diameter grains, air flow are pervasive air flow, forming a symmetrical cone of influence around the injection point. Maximum areas affected are 37%/m^2 for AMG 1.38 mm diameter and 30%/m^2 for AMG 3.89 mm diameter. AMG 1.38 mm and 3.89 mm diameter grains show onset of collapse and approach to steady state in above saturated zone, respectively. In this study, optimal sites for in situ air sparging, may be grain diameters between about AMG 1.5-2.5 mm diameter.

Keywords : Groundwater saturated zone, Average Modal diameter Grains (AMG), Air flow, Area of influence, In situ Air Sparging (IAS)

요 약 문

현장공기분사공정의 복원효율에 있어서 중요한 인자로 작용 할 수 있는 것은 공기가 지하 포화대수층을 통과하면서 생기는 공기분사에 따른 흐름 양상과 토양입자크기에 따른 공기의 영향반경이다. 토양입자크기별 AMG 0.34, 1.38, 3.89 mm diameter 3가지 입자크기로 실험한 결과 AMG 0.34 mm diameter의 포화 대수층에서는 공기가 처음 결정된 방향으로만 흐르는 채널링 현상(channelized air flow)과 포화 대수층 가장 윗면에서는 확장모양(expansion state)을 가졌으며, 공기영향반경은 단위 면적당 15.2%/m^{2}이었다. AMG 1.38, 3.89 mm diameter의 포화 대수층에서는 공기가 퍼지는 현상(pervasive air flow)과 포화 대수층 가장 윗면에서는 각각 붕괴의 조짐(onset of collapse), 안정한 상태로 퍼짐모양(approach to steady state)을 가졌으며, 단위면적당 각각 37.0%/m^2, 30.0%/m^{2}의 영향반경이 계산되었다. 이 실험을 통해서 현장공기분사공정에 있어서 토양입자 크기에 따른 최대 영향반경효율을 얻을 수 있는 토양입자의 크기는 AMG 1.5-2.5 mm diameter로 사료된다.

주제어 : 대수층, 토양입자크기, 공기흐름, 영향반경, 현장공기분사공정

*Corresponding author : 96hanul@hanmail.net
원고접수일 : 2003. 6. 9 게재승인일 : 2003. 7. 2
질의 및 토의 : 2003. 12 30 까지

1. 서 론

우리나라에서는 최근 들어 군부대, 주유소, 공단지역과 산업시설에서의 지하저장탱크로 인한 유류 및 유해화학물질의 누유(漏由)가능성에 대한 인식이 고조되고 있다[1].

지하저장탱크의 누유로 인한 토양 및 지하수 오염은 매우 심각하다. 가솔린과 디젤 등의 자동차 연료용으로 저장된 지하저장탱크 파손은 토양 및 지하수 오염을 가속화시킨다. 오염원들은 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs)을 다량 포함하고 있는데, 이러한 화합물은 약 95%가 석유(石油)에서 생산된 물질들이다.

정부는 막대한 양의 지하수자원을 효율적으로 개발·이용하고 보호하기 위해 1993년 12월에 지하수법을 제정하였다[2]. 이후 1999년 국립 환경연구원의 전국 석유·유동물질 제조 및 저장시설 8,637개소 주변 토양에 대한 BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene) 오염도 조사결과, 조사지역의 토양이 유독성 기름으로 심각하게 오염되어 있는 것으로 나타났으며, 결국 이는 지하수 오염 가능성을 제시해 주었다.

휘발성 유기화합물에 의해 오염된 지하수는 휘발성 유기화합물과 같은 오염물질이 상당하다. 이러한 오염물질의 정화기술이 현재 몇 가지 개발되고 있으나 대부분이 대규모 시설과 많은 에너지를 요구하며, 지하수 정화에 한계를 지니고 있다. 전통적인 방법 중에 채수처리공정(Pump and Treat: P&T 공정)이 많이 이용되어 왔지만 소수성 오염물질을 제거 하는 곳에는 한계를 나타내고 있다. 오염물질들을 지하수로 용해시켜 제거하는 채수주입공정의 특성상 소수성 오염물질들은 물에 잘 녹지 않기 때문에 처리 적용 시간이 길고, 결과적으로 비용이 많이 소요되는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완한 토양증기추출공정(Soil Vapor Extraction: SVE)이 개발되어 적용되고 있는데, 이 기술은 불포화층(vadose zone)에는 효과적이나 포화된 지반 또는 지하수층의 오염원을 정화할 수 없는 단점을 지니고 있다. 다른 정화기술 중 생물학적 정화기술(bioremediation technology)이 개발되고 있는데, 이 기술은 오염된 지반 또는 지하수층의 정화 효율을 높이기 위하여 다른 정화기술과 복합적으로 사용되고 있다. 그러나 이 기술은 미생물 등을 사용하는 과정 중에 토양 내 영양소의 부족과 토양 내 환경변화 그리고 많은 정화 시간을 요구하는 단점을 지니고 있다.

이러한 단점들을 극복하고, 지하수층에 오염된 물질을 복원하기 위해 사용되는 기술로 현장공기분사공정(In situ Air Sparging: IAS)이 있는데 이는 오염된 지하 포화대수층, 불포화층의 오염물질을 처리하는 방법이다. 지하 포화대수층에 있는 휘발성 유기화합물, 석유계 탄화수소류(Total Petroleum Hydrocarbon: TPH)와 NAPLs(Non-Aqueous Phase Liquids)층에 포함하고 있는 물질을 효과적으로 처리하며 이는 지하 포화대수층(토양층)으로 직접 압을 가해 강제적으로 공기 주입하는 방법이다. 공기펌프나 송풍기를 이용하여 대기 중의 공기를 중앙정(air injection well)으로 주입하고, 오염된 대수층 내로 다량 주입된 공기가 휘발성 유기화합물, 석유계 탄화수소류 등으로 오염된 지하 포화대수층을 따라 수평으로 이동하면서 생분해 및 휘발작용을 일으킨다. 이동된 공기는 진공펌프에 의해 압력이 낮은 배출정(extraction well)으로 이동 후 공기 중으로 배출된다. 즉, 공급된 산소는 액상으로 전이되어 지하수내 생 분해 효율을 증진시킨다. 또한 지하 포화대수층 내의 휘발성 유기화합물은 공기흐름에 의해 기상으로 전이되어 상부의 불포화층으로 운반되며, 지상으로 배출되면서 생분해가 이루어진다. 이는 토양 사이의 기체에 함유되어 있는 오염물질이 기체에 의해 먼저 제거되면 토양의 공극 내에 있는 오염물질과 기체의 흐름 사이의 농도구배에 의한 오염물질의 휘발과 확산기작을 이용한 것이다. 이 과정에서 휘발성이 큰 성분이 먼저 제거되며 시간이 지날수록 휘발성이 낮은 성분이 많이 남게 되어 오염물의 제거속도는 감소하게 된다[3]. 현재까지도 현장 경험적 지식에 의존하는 부분이 많으며 포화대내에서의 주입 공기의 채널링 현상(channel, channeling, channelized air flow), 주입공기의 압력, 주입 깊이 및 공극의 크기(porosity)에 따라 효율이 상당히 영향을 받는다[3].

외국의 경우 유류오염 지하수에 대한 정화공법으로서 현장공기분사공정은 1980년대 중반 이후부터 여러 성공적인 사례들과 함께 지금까지 현장에 적용되고 있으며, 1993년 실내 실험 연구[4]에서는 토양대신에 유리구슬을 사용하여 백라이트 또는 사진촬영 결과만을 가지고 공기흐름을 알았으나 유리구슬크기에 따른 상관관계를 시도하지 못하였고, 이를 참고하여 동일인이 1999년 연구에서는 자연적 토양입자의 크기와 공기주입에 의한 포화상태에서의 영향면적 관계에 관한 주제를 가지고 실험을 하였다. 그러나 실험에 사용된 물은 산소가 완전히 제거되지는 못하고 실험되었을 뿐만 아니라 지하 포화대수층의 깊이에 따른 공기의 영향반경 기작과 그림 모양을 제시하지는 못하였다. 2000년 실내 실험 연구[5]에서는 물로 포화된 토양에서 톨루엔의 감소 효율 측정 목적으로 실험되었는데, 채널링 현상(channelized air flow)이 일어나는 곳에서만 농도 감소 실험을 하여 결과 값을 도출 하였지만 지하수

오염 복원 적용 과정 중의 퍼지는 현상(bubble, pervasive, bubbly air flow)에 대한 언급이 없었다. 2001년 실내 실험 연구[6]에서는 빈공간 현상(chamber air flow)에 대한 자세한 실험결과와 토의를 하였으며, 그 실험 결과로 빈공간 현상은 첫 번째로 가시적인 수평적 결과이며, 두번째로 규칙적이지는 않지만 빈공간 현상의 뚜렷한 범위를 정해주며, 마지막 세번째는 공기 확산기(diffuser)로부터 공기 배출, 출구의 존재를 알려주는 역할을 한다고 정의 했으며, 입자의 직경 크기가 0.21 mm 이하에서만 발생한다고 하였다. 그러나 영향면적 계산시 분석전용소프트웨어 패키지사용으로 다른 사람이 실험 할 경우 프로그램 사용의 어려움과 모호성을 가지고 있다. 한편, 실내 연구와는 달리 1995년 현장 실험 연구[7]에서는 영향반경 길이에 관한 두 가지의 ROI SAT(Radius Of Influence in Saturated Zone), ROI VAD(Radius Of Influence in Vadose Zone) 결과를 얻었다.

최근 외국의 실내 실험 경향은 휘발성 유기화합물 등을 직접 주입하여 채널링 현상(channelized air flow)에서 AMZ (Air channel Mass transfer Zone)의 길이추정실험인 휘발성 유기화합물 제거효율 측정 실험[8]들이 주류를 이룬다. 현장 실험은 토양증기추출공정(Soil Vapor Extraction: SVE)과 함께 현장공기분사공정(In situ Air Sparging: IAS)을 이용하여 NAPLs층에 가솔린 등으로 오염된 토양의 제거 효율 측정 실험[9]등과 같이 직접적으로 휘발성 유기화합물, BTEX, 가솔린, 디젤 등의 오염물을 주입하여 오염물질의 제거 효율을 알아보는 실험을 많이 하고 있는 중이다.

국내의 경우 정화공법으로서의 현장공기분사공정은 2000년 실내 실험 연구[10]에서 토양성상이 sandy loam인 토양에 페놀의 초기농도가 약 700 mg/kg으로 약 30일간 운전했을 경우 공기를 공급하면 거의 분해되었으나, 공기공급을 하지 않은 경우에는 약 80%가 제거되었다. 이는 토양내 공기공급은 페놀의 제거반응을 촉진한다고 볼 수 있으며, 1차 반응 모델이 0차반응보다 더 적합하다고 하였다. 그러나 이 실험은 토양만 존재한다면 공기공급은 페놀의 제거반응을 촉진시켰다고 할 수 있으나, 지하 포화대수층일 경우 오염 제거효율에 대한 언급은 없었다. 한편, 2000년 현장 실험 연구[11]에서는 토양증기추출공정 장치가 설치된 곳에서 지하수가 존재하지 않는 사질토와 미사토로 이루어진 휘발유 오염부지에서 토양증기추출공정 장치를 설치하여 하루 8시간씩 100일간 운전한 결과 BTEX는 90%이상의 효율로 제거 되었으나 지하 포화대수층이 존재하는 토양층에서는 BTEX와 석유계 총탄화수소류의 제거효율은 대폭 낮아졌다. 또한 토양증기공정 장치에 의해 유도된 토양내 공기흐름은 토양깊이가 깊어질수록 공기 흐름양은 감소하여 복원효율이 떨어졌다. 이는 실제로 현장 실험시 오염복원 효율은 좋았지만, 공기흐름은 깊이에 따라 채널링 현상(channelized air flow)이 발생하여 깊이가 깊어질수록 공기 흐름량이 감소하여 복원효율이 떨어지는 기작과, 지하 포화대수층에서의 공기 흐름 현상에 대한 근거를 제시하지는 못했다. 최근 2003년 실내 실험 연구[12]에서는 STOMP이란 프로그램을 사용하여 사전 모델링 작업을 통해 실험에 필요한 적절한 공기주입위치와 공기주입량을 결정하고 특히 오염원 내의 DNAPLs (Dense Non-Aqueous Phase Liquids)상태로 존재하는 TCE(Trichloroethylene)의 저감 양상을 알아보는 실험은 TCE농도변화감소 관찰에는 좋은 실험이나 입자크기나 공기흐름에 대한 언급과 공기에 의한 오염물질의 휘발기작에 대한 설명을 하지 못하였다.

이 실험은 현장공기분사공정을 이용하여 오염된 지하수·토양을 복원할 경우 지하 포화대수층의 토양입자 크기에 따른 공기분사 영향반경과 분사공기의 흐름 양상을 규명하는데 연구의 목적을 둔다.

2. 실험 방법

2.1. 토양시료의 채취

채취장소는 경기도 용인시 M사 건물을 중심으로 반경 10~80 m 거리에 15개의 지하수 모니터링 측정 well(지름 1 inch) 천공(穿孔)작업시 깊이 2~7 m의 지하 토양을 채취하였다. 채취 시기는 2002년 7월 10일이다.

2.2. Air flow indicator

실험시 토양과 산소가 접촉되는 면적을 구하기 위해 지시약(indicator)으로 Fe시약을 사용했다. Fe시약은 ACROS에서 생산된 −325 mesh(99%, MW = 55.84)를 사용했고 반응기작은 다음과 같다[4].

$$Fe + O_2 + H_2O \rightarrow FeO(OH) \cdot nH_2O$$

Gray color → Brown color

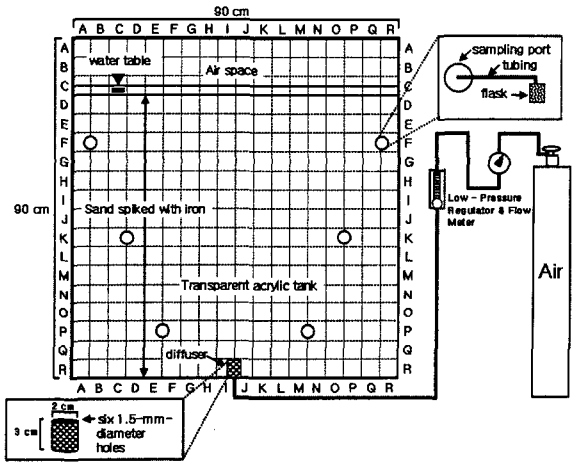
즉, Fe시약이 물과 함께 주입된 공기 속에 포함된 산소를 만나면 Fe시약의 색변화를 통해 실험 과정 중에 토양의 어느 부분에 공기가 이동 되는지 관찰 가능하다. 처음에는 Fe시약과 물이 포함된 토양이 산소를 만나기전에는 Fe시약의 색이 회색이지만 실험과정 중에 공기 속에 포함된 산소와 만나면 Fe시약이 산화되어 흑갈색(갈철석, 褐

鐵石, limonite, $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$)으로 변한다[13].

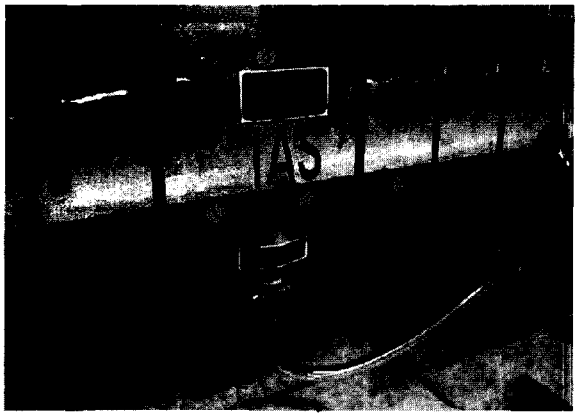
2.3. 투명 아크릴 실험탱크 실험조

Fig. 1(a)와 같이 투명 아크릴 탱크 실험조의 크기는 90 cm×90 cm×2 cm(아크릴 두께: 10 mm)이다. 실험도중과 실험 종료 후 공기와 접촉하는 면적을 계산하기 위해 영문자 알파벳 순서로 각각 가로방향과 세로방향으로 A부터 R까지 표시하여 총 324개의 grid를 테이프로 표시해 토양의 영향반경 계산이 쉽도록 하였다.

AIR-GAS로부터 주입된 공기가 물로 포화된 토양 아래쪽 방향(Fig. 1(b))에서 윗 방향(Air space)으로 빠지기 위한 공기 확산기(diffuser)는 가로, 세로 직경이 각각 2 cm, 3 cm이고, 총 6개의 공기 hole이 있는데 각각의 직경은 1.5 mm이며, 설치 위치는 [I, R] 1곳이다([I, R] = [가로 영문자명 I, 세로 영문자명 R 교차 지점]). 물로 포화된 토양시료



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Schematic illustrating experimental apparatus, and (b) Diffuser photograph.

를 통과한 공기가 투명 아크릴 탱크 밖으로 빠지기 위한 공기 배출구 설치 위치는 가로 A층 방향 아크릴 덮게 위에 일정한 간격으로 총 6개의 공기 hole이 있는데 각각의 hole 직경은 각각 10 mm이다. 산소가 제거된 물을 주입하기 위한 투입구 설치 위치는 [A, A] 1곳이고 물을 배출하기 위한 배출구 설치 위치는 [R, R] 1곳이다. 공기에 불포화되는 토양의 산소 농도(Dissolved Oxygen: DO)를 측정하기 위해 총 6개의 sampling port가 아크릴 뒷면에 고안되었는데, 설치 위치는 [A, F], [C, K], [E, P], [M, P], [O, K], [Q, F] sampling port로서 총 6곳이다. 공기에 포화되는 토양의 산소 농도를 측정[10]하기 위해 1개의 sampling port가 아크릴 뒷면에 고안되었는데 설치 위치는 [I, I] 1곳이다.

모든 실험은 Fe시약 성분을 포함하는 토양입자가 공기에 의해 산화된 토양면적을 일정한 시간 간격으로 사진을 찍어 photoshop(ver. 7.0) software program으로 공기에 접촉하는 토양 면적 비율을 계산하였다.

2.4. 실험방법

토양은 현장에서 채취[14] 후 원래토양에 대한 기초적 물리 · 화학 특성 조사 후 원래토양을 증류수(토양:증류수 = 1:10 비율)로 5번씩 깨끗이 씻는 과정인 전처리를 하였다. 모래를 씻는 이유는 본래의 토양에 불순물, clay 등이 있으면 정확한 실험을 할 수 없고 실험토양에 불순물이 많다면 지시약인 Fe시약의 변화를 관찰 할 수가 없기 때문이다[13]. 전처리 과정 후 110°C의 온도로 약 2일간 건조한 후 체(sieve)를 사용하여 입자크기에 따라 사용할 모래를 분류 하였다. U.S. standard mesh sieves를 사용하여 American Society of Testing Materials(ASTM specification E-11)의 분류법[6]에 따라 각각 직경 <0.71 mm(AMG 0.34 mm diameter), 1.18-2.00 mm(AMG 1.38 mm diameter), 2.36-5.6 mm(AMG 3.89 mm diameter)의 3가지로 형태로 분류(Fig. 2) 한 후에 시료를 채취하여 전처리하기 전의 원래토양에 대한 것과 마찬가지로 기초적인 물리 · 화학 특성 조사를 시행하였다. 토성측정 방법은 미국농무성의 USDA(U.S. Department of Agriculture)의 토양삼각도(Calgon test)를 이용하여 분별[15]하였다. 각각의 체로 분류한 토양에 대한 AMG(Average Modal diameter Grains)[4]를 계산하였다. 사용 토양에 대한 기초적 물리 · 화학특성 실험결과는 Table 1과 같다.

토양과 Fe시약은 토양입자의 세로 높이 50 mm당 Fe시약을 1-2 mm의 높이(토양:Fe = 10:1의 비율)로 넣어주었다[4,5]. 각각 토양 샘플당 Fe시약은 600 g이 사용되었다.

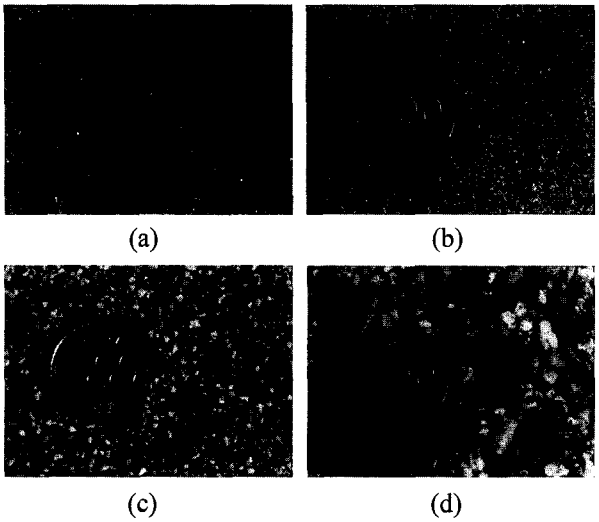


Fig. 2. Sand photograph. : (a) Original soil sample (AMG 1.76 mm diameter) and (b) First soil sample (AMG 0.34 mm diameter) and (c) Second soil sample (AMG 1.38 mm diameter), and (d) Third soil sample (AMG 3.89 mm diameter). Coin for scale 26.5 mm diameter, respectively.

각각의 토양 맨 위 가로 C층의 물만의 높이는 모든 시료에 대해서 25 mm를 유지하도록 하였다. 그리고 물의 정확한 수면을 매번 12시간마다 1번씩 검토하여 모자라는 물에 대해서는 N_2-GAS로 폭기(증류수 10 L당 12시간 폭기, DO농도=2.1 mg/L)한 포화된 물을 보충 투입하였다. 3가지의 토양입자에 대해서 120시간동안 공기를 주입한 후 120시간동안 일정한 간격을 두고 산소에 접촉하는 면적을 구하였다.

실험시의 평균 실험대기 온도는 21°C, 습도 82%, 물에 포화된 토양 온도는 20°C로 측정되었다. 주입된 공기에 불포화 되는 포화대수층의 DO농도를 측정하기 위한 [A, F], [C, K], [E, P], [M, P], [O, K], [Q, F] 6개 sampling port의 DO농도는 평균 3.2 mg/L로 측정되었다. 또한 주입된 공기에 포화되는 포화대수층의 DO농도를 측정하기위한 [I, I] 1개 sampling port의 DO농도는 평균 6.7 mg/L로 측정되었다. 공기 압력은 3.5-5.5 kPa, 공기유량은 0.81-1.0 L/min이었다. 실험 샘플당 실험이 종료되기 까지 공기 투여 시간은 각각 총 120시간이다. 또한 Diffuser에 공급되는 AIR-GAS는 20.5%의 Oxygen으로 이루어진 한국산업가스업체 것으로 사용했다.

3. 결과 및 고찰

현장공기분사공정법(IAS)을 이용하여 3가지 토양 입자크기에 따른 영향반경에 관한 실험 종료 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

3.1. AMG 0.34 mm diameter sediments

Fig. 3(a)와 같이 공기가 흐르는 확산 모양은 공기 확산

Table 1. Characteristics of soil

Classification \ Soil samples		Original sample	First sample <0.71 mm	Second sample 1.18-2.00 mm	Third sample 2.36-5.6 mm
Particle size distribution	Sand (%) (0.05-2 mm)	41.4	40.8	76.6	-
	Silt (%) (0.002-0.05 mm)	15.2	59.2	23.3	-
	Clay (%) (<0.002 mm)	43.4	0.0	0.0	-
Soil texture (USDA)		Clay	Silt Loam	Sandy Loam	Fine gravel (2.00-12.7 mm)
Cation Exchange Capacity (meq/100g dry soil)		27.0	24.5	16.5	10.5
Density (g/m^3)		1.22	1.17	1.16	1.17
pH (1:5)		7.4	7.0	7.4	6.9
Moisture retention (%)		16.8	33.1	12.5	24.5
Total Organic Carbon (%)		0.09	0.08	0.08	0.06
Conductivity (μS/cm)		50.2	32.9	12.6	39.6
Porosity		0.48	0.49	0.48	0.47
d_{50} (mm)		1.45	0.31	1.63	3.06
Uniformity coefficient		1.58[a]	2.92[a]	3.29a	2.18[a]
Grain size (mm)		1.76[b]	0.34[b]	1.38b	3.89[b]

※USDA; United States Department of Agriculture, d_{60}; sixty drawdown, d_{50}; fifty drawdown, d_{10}; ten drawdown, 1:5; a mass soil:a volume of distilled water, [a]; d_{60}/d_{10}, [b]; AMG (Average Modal diameter Grains)[4)]

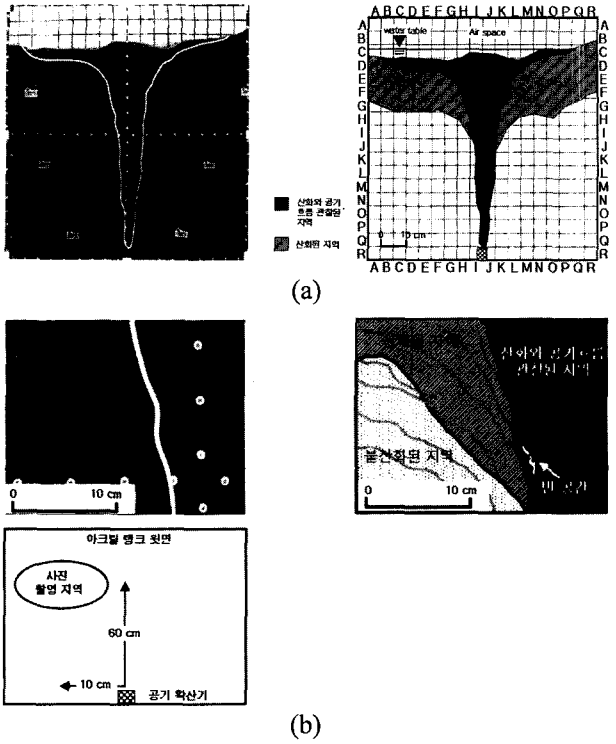


Fig. 3. Sketch of region illustrated photographically. : (a) Air flow in Silt Loam (AMG 0.34 mm diameter) experiment after 120 hour of air sparging, and (b) Silt loam (AMG 0.34 mm diameter) experiment after 50 hour of air sparging.

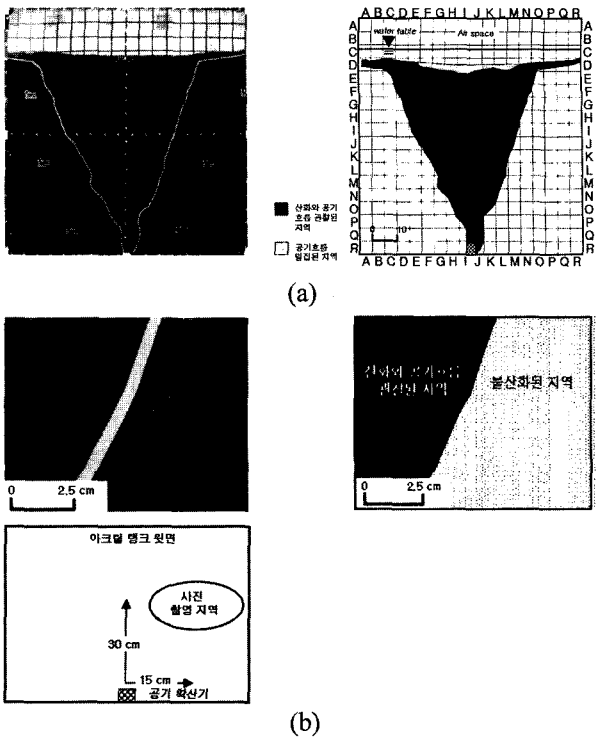


Fig. 4. Sketch of region illustrated photographically. : (a) Air flow in Sandy Loam (AMG 1.38 mm diameter) experiment after 120 hour of air sparging, and (b) Sandy loam (AMG 1.38 mm diameter) experiment after 60 hour of air sparging.

기로 투입된 공기가 air space방향으로 상승할수록 가로 E층까지는 수평방향으로 조금씩 확산되어가는 형태이며, 가로 C, D층에서는 수평방향으로 비교적 넓게 확산되었다. 공기흐름의 형태는 한번 결정된 공기방향으로만 계속 흐르려고 하는 채널링 현상(channelized air flow)을 보였다. 즉, 공기 확산기로 투입된 공기가 지하수면으로 배출될 때 공기흐름은 한꺼번에 2개 이상 관찰되는 현상은 거의 없었으며, 공기흐름이 순차적으로 1개씩 지하수면으로 빠지는 현상이 관찰 되었다.

토양과 함께 투입된 Fe시약은 공기 확산기로 투입된 공기에 의해 산화되어 흑갈색을 가짐과 동시에 공기흐름이 함께 관찰되는 지역도 있었고, 공기흐름이 이동되는 것이 관찰되지는 않고 산화만 되는 지역에서는 Fe시약이 산화되어 약한 흑갈색를 띄었다(Fig 3(b)).

실험 전에 [C, A]부터 [C, R]까지 25 mm 깊이의 지하수면과 평행한 모양으로 설치한 지하 포화대수층의 sediment(토양입자)는 실험종료 후에 Fig. 3(a)와 같이 [C, A]부터 [C, G]까지 sediment 높이는 거의 변화가 없었으나 [C, H]부터 [C, L]까지는 sediment가 위로 약간 볼록한 모양을 가졌으며, [C, M]부터 [C, R]까지는 sediment가 점점 위로 상승하여 지하수면을 벗어나는 형태를 보였다.

Fig. 3(a)와 같이 실험을 시작한 후 실험 종료 시점인 약 120시간이 지난 후 가로 C층 방향의 지하 포화대수층 sediment모양과 실험 종료 시점보다 30시간을 더 분사하여 총 150시간이 지난후의 가로 C층 방향의 sediment모양을 서로 비교해 보았을 때 비슷한 형태를 유지했으며, 공기 확산기로 투입된 공기는 계속해서 세로 I, J 방향으로만 공기가 배출되려고 하는 확장 모양(expansion state)을 가졌다.

3.2. AMG 1.38 mm diameter sediments

Fig. 4(a)와 같이 공기가 흐르는 확산 모양은 공기 확산기로 투입된 공기가 air space 방향으로 상승할수록 가로 E층까지 수평방향으로 일정하게 완만한 확산 형태를 가졌으며, 가로 D층에서 수평방향으로 가장 많이 확산되었다. 공기흐름의 형태는 일정한 규칙을 가지지 못하고 불규칙하게 흐르는 퍼지는 현상(pervasive air flow)을 보였다. 즉, 공기 확산기로 투입된 공기가 water table로 배출될

때 공기흐름은 평균 3~4개가 한꺼번에 지하수면으로 빠지는 현상이 관찰 되었다.

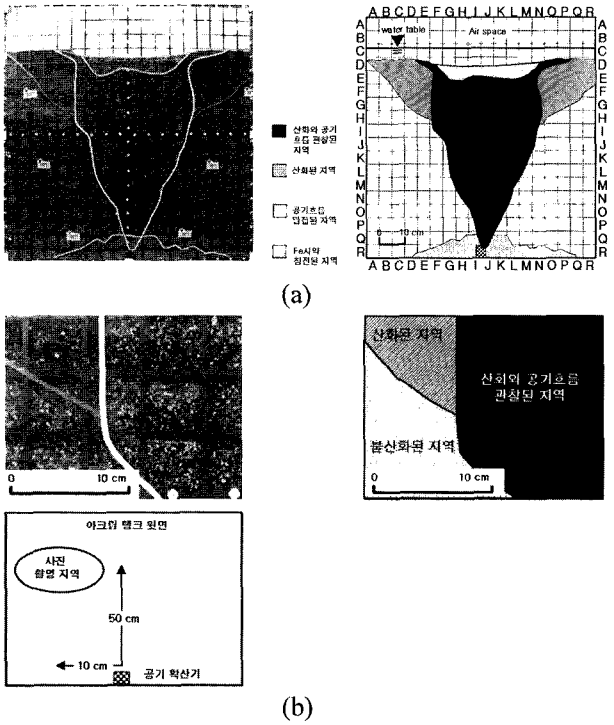
가로 D층에서의 sediment들은 지하수면 층에서 불규칙하게 흔들리는 현상이 관찰되었으며 이로 인해 공기흐름이 밀집된 지역이 형성(Fig. 4(a))되었다.

실험 전에 지하수면과 평행한 모양으로 설치한 sediment는 실험종료 후에 Fig. 4(a)의 가로 D층과 같이 거의 평행한 모양을 가졌지만, [D, E]부터 [D, O]까지는 아래방향으로 들어간 약간 볼록한 모양을 가졌다.

실험을 시작한 후 실험 종료 시점인 약 120시간이 지난 후 가로 D층의 sediment모양과 30시간을 더 분사하여 총 150시간이 지난 후의 sediment모양을 서로 비교해 보았을 때 비슷한 형태를 유지했고, 공기 확산기로 투입된 공기는 계속해서 세로 I와 J를 중심으로 수직 방향으로 대칭인 붕괴의 조짐 모양(onset of collapse)을 가졌다.

3.3. AMG 3.89 mm diameter sediments

Fig. 5(a)와 같이 공기가 흐르는 확산 모양은 공기 확산기로 투입된 공기가 air space 방향으로 상승할수록 가로 I층까지는 수평방향으로 일정하게 확산되어 가고, 가로 I



(a)

(b)

Fig. 5. Sketch of region illustrated photographically. : (a) Air flow in Fine gravel (AMG 3.89 mm diameter) experiment after 120 hour of air sparging, and (b) Fine gravel (AMG 3.89 mm diameter) experiment after 80 hour of air sparging.

층부터 가로 E층까지는 공기확산의 정도가 일정한 종의 모양을 보이며, 가로 D층에서 수평방향으로 비교적 넓게 확산되었다. 공기흐름의 형태는 일정한 규칙을 가지지 못하고 불규칙하게 흐르는 퍼지는 현상(pervasive air flow)을 보였다. 즉, 공기 확산기로 투입된 공기가 water table로 배출될 때 공기흐름은 평균 5~6개가 한꺼번에 water table로 빠지는 현상이 관찰되었다.

토양과 함께 투입된 Fe시약은 공기 확산기로 투입된 공기에 의해 산화되어 흑갈색을 가짐과 동시에 공기흐름이 함께 관찰되는 지역도 있었고, 공기흐름이 이동되는 것이 관찰되지는 않고 산화만 되는 지역에서는 Fe시약이 산화되어 약한 흑갈색를 띄었다(Fig. 5(b)).

토양 입자가 AMG 0.34, 1.38 mm diameter에 비해 상대적으로 커서 토양 사이에 존재하는 철시약이 공기 확산으로 인해 확산기 아래쪽으로 약간 침전되는 현상이 관찰되었지만 공기가 흐르는 형태에는 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

공기확산기로 공기분사 실험을 시작한 후 실험 종료 시점인 약 120시간이 지난 후 가로 D층의 sediment모양과 30시간을 더 분사하여 총 150시간이 지난후의 sediment모양을 서로 비교해 보았을 때 비슷한 형태를 그대로 유지했고, 공기 확산기로 투입된 공기는 계속해서 세로방향 I와 J층를 중심으로 수직 대칭인 정도가 Fig. 4에 비해 크기 때문에 안정한 상태로 퍼짐 모양(approach to steady state)을 가졌다.

3.4. 고찰

Fig. 6과 같이 채널링 현상(channelized air flow)형태를 보인 AMG 0.34 mm diameter로 실험한 결과 실험을 시작 하기 전에 지하 포화대수층의 2차원적 넓이는 6750 cm^2 (가로 90 cm×세로 75 cm)이었다. 실험시작 후 총 120시간이 지난 후 공기확산에 의한 지하 포화대수층 sediment의 영향반경에 대한 면적 계산은 1026 cm^2이고 이를 이용하여 환산하면 공기분사에 의한 영향반경이 1 m^2 단위 면적당 15.2%로 환산가능하다. 퍼지는 현상(pervasive air flow) 형태를 보인 AMG 1.38, 3.89 mm diameter의 2가지 입자크기로 실험한 결과 공기분사실험 시작 후 120시간이 지난 후에 공기확산에 의한 토양·지하수의 영향반경은 1 m^2 당 각각 37.0, 30.0%로 계산되었다.

AMG 0.34, 1.38, 3.89 mm diameter의 경우 공기흐름에 의해 Fe시약이 산화되는 시작시간은 실험 시작 후 각각 약 54, 74, 81 hour이며, 이러한 Fe시약이 산화되는 시작시간 경과 후에는 거의 전체적인 영향반경이 결정되는

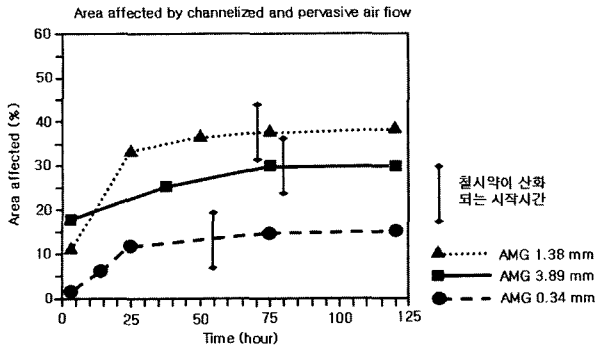


Fig. 6. Area affected by AMG 0.34 mm diameter and AMG 1.38 mm diameter, and AMG 3.89 mm diameter.

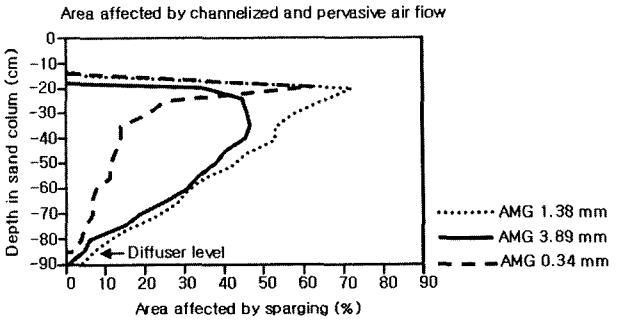


Fig. 7. Relation between area affected by sparging and depth in sand column. Fig. 2. for reference.

결과를 얻을 수 있었다. 이는 AMG 0.34 mm diameter와 비교해 볼 때 입자의 크기가 커짐에 따라 시간에 따른 효율성이 낮아지는 것인데, 이러한 이유는 공기압력과 입자 사이에 존재하는 적정한 air flow가 형성되어야 하는데, 입자크기가 상대적으로 크면 투입된 공기가 토양과 접촉하지 못하고 그냥 air space로 빠져 버리는 결과로 사료된다. 또한 Fe시약이 산화되는 시작시간 전에는 투명하게 보이는 공기흐름의 모양을 추적하여 공기흐름에 따른 영향 반경 예측 가능함을 알 수 있다.

AMG 0.34 mm diameter의 경우 공기가 토양 속에서 정체하여 있는 빈공간 현상(chamber air flow)현상이 관찰되었으며 AMG 0.34 mm diameter 범위 또는 이하에서는 공기주입법이 적절하지 못함을 도출 가능하며, 이는 공기 안의 산소와 토양입자가 얼마나 잘 접촉하여 산화시킬 수 있는가 하는 문제로 평가 가능하다. 입자 크기가 가장 작은 AMG 0.34 mm diameter와 비교해 볼 때 공기 안에 산소와 토양이 가장 빠르게 접촉 된다는 결론을 얻을 수 있지만, 그만큼 토양 면적에 대한 전체적인 효율에 있어서는 낮다는 것으로 사료되며, 이는 실험 과정에 각각 3가지 입자크기에 따라서 공기흐름과 동시에 Fe시약이 산화되는 지역의 DO농도 측정 결과 입자별로 큰 차이가 없었다는 사실이 이를 증명해 줄 수 있다고 사료된다.

Fig. 7과 같이 공기 확산기로부터 지하수면까지 높이별 영향면적을 보면 상대적으로 AMG 1.38 mm, 3.89 mm diameter는 그 형태가 비슷하며, AMG 0.34 mm diameter에서는 그 형태가 다름을 알 수 있었다. AMG 0.34 mm diameter에서 공기 확산기 설치 위치인 [I, R]부터 윗방향 60 cm에 해당되는 [I, G]까지는 서서히 확산되었지만 [I, G]부터 지하수면 까지는 상대적으로 공기흐름의 1 m^2의 단위면적당 영향면적 값이 증가하였는데, 이는 실제로 오염된 현장토양에서 적용시 공기 확산기의 well 위치를 지면으로부터 깊게 위치 시켜 공기확산 효율를 증가시킬 필요성이 있음으로 사료된다.

AGM 3.89 mm diameter에서는 AMG 1.38 mm diameter 보다는 1 m^2의 단위면적당 영향면적이 작았지만 상당부분에 있어서 복원시 복원 효율이 좋음을 알 수 있다.

토양입자크기에 따라 최대의 영향면적은 깊이에 따라 다른 결과가 도출될 수 있으므로 실제로 오염된 토양에서 현장 적용시 laboratory 규모의 예비실험이 필요하며, 이에 따라 공기 확산기의 깊이 도출 가능성을 제시해 줄 수 있다.

이번 실험의 최대영향면적 효율을 얻을 수 있는 토양입자의 크기는 1.5-2.5 mm 예상이 가능하다는 것으로 판단된다.

이번 실험을 바탕으로 현장오염에 대한 복원 효율의 정확한 유추는 직접적인 현장실험의 자료와 간적접인 토양성상, 오염물과 토양, 물의 특성의 실내실험과 더불어 컴퓨터 모델링과의 이상적인 조합이 중요하다. 이번에 실험한 2차원 면적에 대한 물리, 화학적 평가 결과자료는 지하수 모델링 소프트웨어로 계산한 실제적인 3차원 면적 자료보다 옳은가 옳지 않은가는 아직 불확실 하다고 판단되며 더욱 세밀하고 자세한 실험이 필요로 할 것으로 생각된다.

이번 실험 이외에 공기의 영향범위를 예측하기 위한 방법으로 산소측정, 지하수면의 높이 측정, 지반내의 공기압력 증가 측정과 함께 공기흐름의 패턴을 결정하는 것으로 공기밀도와 주입공기의 표면적 등의 추가적인 실험을 한다면 더욱 정확한 결과 값을 얻을 수 있으리라 사료된다.

현장공기분사공정(IAS) 실험 결과 정확한 복원 효율을 도출해 내기 위해서는 실내 실험, 공기확산기의 모양변화에 따른 실험, 컴퓨터 모델링 그리고 현지 자료 사이에서 분석뿐만 아니라 토양 깊이에 따른 복원 효율이 다르므로 정확한 토양평가가 이루어 질수 있을 때, 오염된 지하수·

토양에 대한 가장 현명한 복원 방법 디자인 설계를 할 수 있음은 자명한 사실이다.

4. 결 론

본 연구는 유류로 오염된 지하수의 정화방안의 하나로 현장공기분사공정(In situ Air Sparging: IAS)기술의 현장 적용가능성을 평가하는 실험이다. 토양 입자 크기가 서로 다른 3가지 토양에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AMG 0.34, 1.38, 3.89 mm diameter의 3가지 입자 크기로 실험한 결과 주입된 공기에 의해 영향 받는 포화 대수층의 영향반경은 단위 면적당 각각 15.2%/m^2, 37.0%/m^2, 30.0%/m^2이었다.

2. AMG 0.34, 1.38, 3.89 mm diameter의 3가지 입자별로 주입된 공기에 의해 최대로 영향 받는 반경의 범위가 다르면서도 실험 시작 후 각각 25, 50, 75시간 정도 경과 후에는 거의 전체적인 영향반경이 결정되었다.

3. 주입된 공기 속에 포함된 산소에 의해 철시약이 산화되는 시간순서는 AMG 0.34 mm diameter(54 Hour), 1.38 mm diameter(74 Hour), 3.89 mm diameter(81 Hour) diameter순서 이었다. 입자 크기가 가장 작었던 AMG 0.34 mm diameter에서 가장 빨리 Fe시약이 산화 되었지만 전체적인 영향반경에서는 15.2%/m^2로 가장 작었고, AMG 0.34 mm diameter에서는 빈공간 현상(chamber air flow)으로 현장공기주입공정법이 적절치 못함을 유추할 수 있다. 공기흐름의 형태는 일정한 규칙을 가지지 못하고 불규칙하게 흐르며 퍼지는 모양(pervasive air flow)을 보였다

4. 실험 종료 후 전체적인 공기흐름의 형태는 AMG 0.34 mm diameter의 경우 한번 결정된 공기방향으로만 계속 흐르려고 하는 채널링 현상(channelized air flow)을 보였고, AMG 1.38, 3.89 mm diameter의 경우에는 공기흐름이 일정한 규칙을 가지지 못하고 공기 확산기로 투입된 공기가 지하수면 쪽으로 불규칙하게 흘러나가는 퍼지는 현상(pervasive air flow)을 보였다.

5. 실험 종료 후 water table 바로 아래의 토양 입자 AMG 0.34 mm diameter에서는 확장 모양(expansion state), AMG 1.38 mm diameter에서는 붕괴의 조짐(onset of collapse), 그리고 AMG 3.89 mm diameter에서는 안정한 상태로 퍼짐모양(approach to steady state)을 보여 주었다. 이를 바탕으로 포화 대수층의 ROI SAT(Radius Of Influence in Saturated Zone)와 불포화층의 ROI VAD(Radius Of Influence in Vadose Zone)길이 계산 추정이 가능할 것이라 사료된다.

6. 실험 결과 최대효율을 얻을 수 있는 모래 입자의 크기는 AMG 1.5-2.5 mm diameter로 사료 된다. 그러나 실제 현장에서는 깊이에 따라 토양 입자 크기가 다를 수 있으므로 정확한 토양평가가 함께 이루어 져야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2003년도 한국외국어대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 공성호, 이승희, 조욱상, 곽무영, "고속도로 주변과 주유소의 토양오염에 관한 연구", 한양대학교 에너지·환경 기술연구소 (1998).
2. 한정상, 지하수환경과 오염, 박영사, 서 울, pp.1-6 (2000).
3. US EPA, A Technology Assessment of Soil Vapor Extraction and Air Sparging, EPA/600/R-92/173, 214p. (1992).
4. Peterson, J.W., Lepczyk, P.A., and Lake, K.L., "Effect of sediment size on area of influence during groundwater remediation by air sparging : a laboratory approach", *Environmental Geology*, **38**(1), pp. 1-6 (1999).
5. Peterson, J.W., DeBoer, M.J., and Lake, K.L., "A laboratory simulation of toluene cleanup by air sparging of water-saturated sands", *Journal of Hazardous Materials*, **72**, pp. 167-178 (2000).
6. Peterson, J.W., Murray, K.S., Tulu, Y.I., and Peuler, B.D., "Air-flow geometry in air sparging of fine-grained sands", *Hydrogeology Journal*, **9**, pp. 168-176 (2001).
7. Lundegard, P.D., amd LaBrecque, D.J., "Air spaging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, U.S.A.) : Actual and apparent radius of influence", *Journal of Contaminant Hydrology*, **19**, pp.1-27 (1995).
8. Braida, W.J., and Ong, S.K., "Air sparging effectiveness : laboratory characterization of air-channel mass transfer zone for VOC volatilization", *Journal of Hazardous Materials*, **B87**, pp. 241-258 (2001).
9. Johnston, C.D., Rayner, J.L., and Briegel, D., "Effectiveness of in situ air sparging for removing NAPL gasoline from a sandy aquifer near Perth, Western Australia", *Journal of Contaminant Hydrology*, **59**, pp. 87-111 (2002).
10. 박준석, 남궁완, 황의영, "공기공급이 토양내 페놀화합물 제거에 미치는 영향", 한국토양환경학회지, **5**(2), pp. 3-12 (2000).
11. 김재덕, 김영래, 황경엽, 이성철, "토양증기추 출법에 의한 휘발유 오염토양의 현장복원 연 구", 한국토양환경학회지, **5**(1), pp. 13-23 (2000).
12. 김훈미, 이강근, "Numerical Simulation and Laboratory Test

Analysis of Air Sparging for TCE Remediation", 2003년 한국지하수 토양환경학회 총회 및 춘계학술발표회, pp. 348-351 (2003).
13. US EPA, Assessing UST Corrective Action Technologies : Diagnostic Evaluation of In Situ SVE-Based System Performance, EPA/600/R-96/041, (1996).
14. 환경부, 토양오염공정시험방법 , pp. 26-32 (1999).
15. Carter, M. R., Soil sampling and methods of methods of analysis, Lewis, (1993).