

유류로 오염된 철로지역의 지중정화를 위한 영향반경 산정과 공기주입법/토양증기추출법의 적용성 평가

조장환¹ · 박정구¹ · 김응덕¹ · 서창일¹ · 김해금² · 최상일^{2*}

¹한국환경공단 토양지하수처

²광운대학교 환경공학과

Calculation of Radius of Influence and Evaluation of Applicability of Air Sparging/Soil Vapor Extraction system for the Remediation of Petroleum Contaminated Rail Site

Chang-hwan Cho¹ · Jung-ku Park¹ · Yong-deok Kim¹ · Chang-il Seo¹ · Hai-jin Jin² · Sang-il Choi^{2*}

¹Department of Soil and Groundwater, Korea Environ. Corp.

²Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

The objectives of this study were to calculate the radius of influence (ROI) of well for an air-sparging (AS)/soil vapor extraction (SVE) system and to evaluate the applicability of the system applied for the remediation of the petroleum contaminated rail site. For air permeability test, three monitoring wells were installed at a location of 1.3 m, 2.3 m, 3.0 m from the extraction well. And the pressure of each monitoring well was measured by extracting air from the extraction well with the pressure and flow of (-)2,600 mmH₂O and 1.58 m³/min. The ROI for an extraction well was calculated as 4.31 m. Air was injected into the injection well with the pressure and flow of 3,500 mmH₂O and 0.6 m³/min to estimate the radius of influence for oxygen transfer. Oxygen concentrations of air from three monitoring wells were measured. The ROI of an injection well for oxygen transfer was calculated as 3.46 m. The 28 extraction wells and 19 injection wells were installed according to the ROI calculated. The AS/SVE system was operated eight hours a day for five months. The rail site was contaminated with the petroleum and concentrations of benzene, toluene, and xylene were over the 'Worrisome Standard' of the 'Soil Environment Conservation Act'. The contaminated area was estimated as 732 m² and contaminants were dispersed up to (-)3 m from the ground. During the operation period, soil samples were collected from 5 points and analyzed periodically. With the AS/SVE system operation, concentrations of benzene, toluene, and xylene were decreased from 7.5 mg/kg to 2.0 mg/kg, from 32.0 mg/kg to 23.0 mg/kg, from 35.5 mg/kg to 23.0 mg/kg, respectively. The combined AS/SVE system applied to the rail site contaminated with volatile organic compounds (VOCs) exhibited a high applicability. But the concentration of contaminants in soil were fluctuated due to the heterogeneous of soil condition. Also the effect of the remediation mechanisms was not clearly identified.

Key words : Radius of influence, Air-sparging, Soil vapor extraction, Rail site, Volatile organic compounds

1. 서 론

토양증기추출법은 지중토양에 압력구배를 형성하여 토양표면의 휘발성 오염물질을 휘발·추출하는 방법으로써 휘발성오염물질로 오염된 지역의 정화에 효과인 방법으로

알려져 있다(Johnston et al., 2002; Kaleris and Croise, 1997, 2002; Chu et al., 2004). 또한 공기주입법은 오염된 대수층에 공기 또는 산소를 함유한 기체를 주입하여 오염된 지하수로부터 용존 상태의 오염물질을 기체상으로 비껴어 불포화대 밖으로 배출하는 오염지하수 처리기술이

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

Received : 2014. 10. 31 Reviewed : 2015. 2. 25 Accepted : 2015. 2. 25

Discussion until : 2015. 4. 30

다. 이 과정에서 저휘발성 및 비휘발성 오염물질은 지중 미생물에 의한 생물학적 분해 효과를 기대할 수 있다 (McCray and Falta, 1995; Benner et al., 2002; Nobre and Nobre, 2004; Tsai, 2007).

최근 들어 지중정화 효과를 극대화하기 위해 공기주입법(Air sparging: AS)과 토양증기추출법(Soil vapor extraction: SVE)의 조합(Kirtland and Aelion, 2000) 또는 공기분사법(Bioventing: BV)과 토양증기추출법(SVE)의 복합 공정(Amin et al., 2014)을 적용하여 오염된 토양 및 지하수를 정화한 사례가 다수 보고되고 있다. 공기주입법에 의해 대수층으로부터 분리된 휘발성 오염물질을 토양증기추출법으로 추출하여 제거함으로써 휘발성오염물질의 불필요한 외부확산을 방지하고 정화효율을 증가시킬 수 있다.

지중정화공법은 오염토양을 굴착할 수 없는 부지에 적용하여 건물이나 시설물의 철거 없이 효과적으로 오염지역을 정화할 수 있다. 지중정화 공법 선정에 있어 가장 먼저 고려해야 할 사항은 오염물질의 분포 위치 및 대상 부지의 통기성 등이다.

토양증기추출법의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 추출압력과 통기성이며, 생물학적 분해과정에서는 지중토착 미생물에 원활한 산소 전달 가능성이이다(US Army corps of Engineers, 2002). 부지통기성조사에서 영향반경(ROI; radius of influence)은 추출정의 추출압력이 영향을 미칠 수 있는 범위이며, 산소전달반경은 주입정의 공기주입에 의해 오염물질의 생물학적분해에 필요한 산소가 전달되는 최대 거리이다. 영향반경은 주입 및 추출정을 중심으로 하는 원으로 표현되며, 이 원의 반지름이 영향반경이다(EPA, 2004).

오염부지의 정화를 위해서는 오염분포 및 심도에 따라 다수의 주입정 및 추출정을 설치하게 된다. 최적의 정화설계를 위해서는 관정의 영향반경을 정확히 파악하여 오염지역 정화에 소요되는 관정의 수량과 위치를 정확하게 계산함으로써 정화에서 배제되는 지역이 없도록 하여야 하며, 중복설계에 의한 과도한 시설설치비의 투입을 방지하여야 한다(Chai and Miura, 2004; Fan et al., 2013).

본 연구의 목적은 장기간 유류로 오염된 철로부지 유류 오염토양 정화를 위해 지중정화공법의 적용을 위한 영향반경을 평가하고, AS/SVE 혼합공법의 적용성을 평가하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 부지현황

대상 부지에서는 지난 수 십 년간 유류저장탱크, 송유

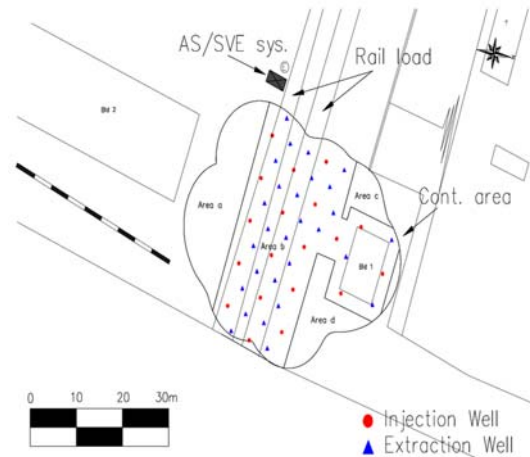


Fig. 1. Contaminant status and the location of wells for AS/SVE system at the study site.

관, 이송시설이 사용되어 왔다. 부지 내부로 연결된 철로를 통해 유조차가 이동하여 다량의 유류를 운반하고 있었다. 부지 내부에서는 지중 송유관을 통해 저장탱크로 유류를 이송하고 있었으며, 철로 하부를 지나고 있는 지중 송유관의 노후화에 따른 누유에 의해 토양이 오염되었다. 대상 부지는 서쪽에서 동쪽으로 차츰 고도가 낮아지는 지형이며, 지하수 흐름방향 또한 지형적 특성에 따라 서쪽에서 동쪽으로 흐르고 있었다.

대상부지의 토양오염 조사결과 유류에 의해 지하 3 m 까지 오염이 발견되었으며, 오염된 토양의 양은 약 1,830 m³(면적; 732 m²)으로 조사되었다. 토성은 사질양토(Silt loam)이었으며, 유효공극율은 0.38이었다. 오염지역은 대상부지 상부의 지하수가 모이는 하부지역이고, 지하수위는 -1 m 이내에 분포하고 있으며 지하수에서는 자유상유류가 발견되었다. 지하수에 의한 토양오염의 확산이 의심되는 지역이다. 토양오염현황 및 지중정화를 위한 추출정과 주입정의 설치 위치를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2. 영향반경 조사

2.2.1. 부지통기성 조사

통기성 조사는 불포화대내 오염층을 대상으로 실시하였으며, 추출정 주변에 일정간격으로 모니터링관정을 배치하고 추출운전 중 추출정과 모니터링관정 헤드에서의 진공압을 측정하여 추출운전에 따른 영향반경(ROI; Radius of Influence)을 평가하였다. 동시에 주입 압력별 유량평가를 통해 적합한 추출장비의 사양도 결정하였다.

2.2.2. 산소전달반경 조사

산소전달반경 평가를 위해 주입정 주변에 일정간격으로

모니터링관정을 배치하였다. 포화대내 공기주입 후 모니터링관정에서 용존산소농도의 변화를 측정하여 산소전달반경을 평가하였다.

2.3. 지중정화 시설설치 및 운영

추출용 블로워는 2단 링블로워(8.0 m³/min × 5,000 mmAq × 7.5 kW)를 사용하였으며, 주입용은 Roots 블로워(6.0 m³/min × 4,000 mmAq × 7.5 kW)를 사용하였다. 기액분리기, 활성탄 흡착탑 및 제어반을 포함한 컨테이너 일체형(2 mW × 4 mL × 2.5 mH)으로 제작하여 사용하였다.

공기확산법(AS) 주입정 및 토양증기추출법(SVE) 추출정에 대한 영향반경을 산정하여 오염부지에 관정배치를 위한 계획을 수립하였다. 기본적으로 주입정을 중첩되게 영향반경에 따라 일정간격으로 배치하고, 가운데 지점에 추출정을 배치하여 주입 및 추출에 의한 공기 흐름이 균일하고 원활하게 진행되도록 설계하였다.

추출정과 주입정은 각각 직경 50 mm(2 inch)와 25 mm(1 inch)의 PVC 배관을 사용하였고, 설치심도는 토양오염 심도 및 공정운영 효율을 고려하여 지표하 4 m로 설치하였다.

오염물질의 분포심도를 고려하여 추출정은 지표하 0.75~4.0 m, 주입정은 지표하 3.5~4.0 m에 스크린을 설치하여 오염물질의 외부확산을 최대한 방지하고 추출효율을 극대화 하였다. 약 5개월 동안 하루 8시간씩 운전하면서 오염물질 저감 여부를 측정하였다.

추출블로워는 배가스 온도가 70°C를 넘으면 정지되도록 하고, 30분 동안 냉각시킨 후 재가동 되도록 설정하였다. 블로워의 추출진공압이 (-)3,000 mmAq 이상으로 감압될 경우 추출블로워가 정지되도록 설정하였다. 기액분리기 내 수위가 일정수위(고점) 이상으로 올라가면 블로워가 멈추고 이송펌프가 작동하여 기액분리기 내 추출지하수가 유수분리기로 이송되고, 다시 일정수위(저점) 이하로 낮아지면 블로워가 작동되도록 설정하여 블로워 내 지하수유입을 차단하였다. 타이머를 이용하여 일정간격으로 블로워가 자동으로 운전정지 및 재가동 되도록 설정하여 블로워의 과열을 방지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부지 통기성

최대 7.5 kW 용량의 2단 링블로워를 장착한 추출설비를 이용하여 추출진공압에 따른 추출유량을 평가하였다. 추출압력 980 mmH₂O에서 유량은 0.46 m³/min으로 나타

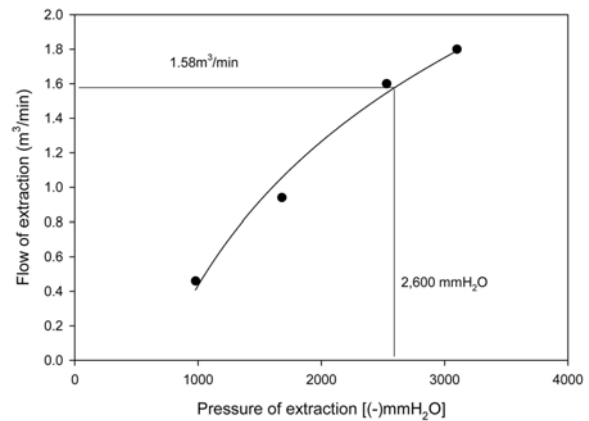


Fig. 2. The change of extraction flow with vacuum pressure.

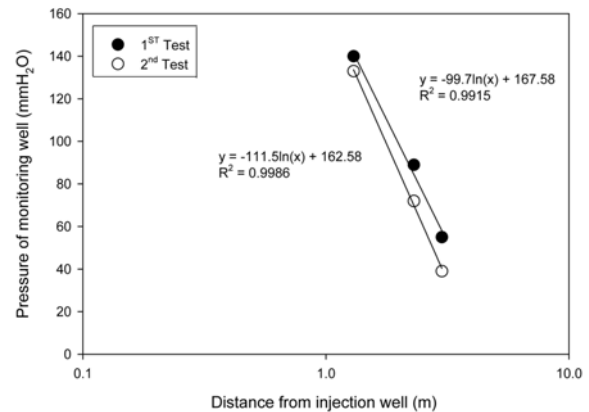


Fig. 3. The changes of vacuum pressure with distance.

났으며, 순차적으로 증가시킨 결과 3,100 mmH₂O에서는 1.8 m³/min으로 조사되었다. 추출설비의 용량을 고려한 적정 추출압력과 유량은 각각 (-)2,600 mmH₂O와 1.58 m³/min으로 평가되었다. 진공압에 따른 추출유량의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

추출정으로 부터 일정간격으로 3개의 관측정을 설치한 후 앞에서 구한 추출유량으로 일정하게 공기를 추출하면서 관측정의 압력을 2회 측정하였다. 주입정에서 각각 1.3 m, 2.3 m, 3.0 m 이격거리의 관측정에서 압력은 133 mmH₂O 및 140 mmH₂O, 72 mmH₂O 및 89 mmH₂O, 39 mmH₂O 및 55 mmH₂O로 조사되었다. 관측정의 공기압이 1 mmH₂O인 거리를 영향반경으로 가정하면 대상부지의 영향반경은 각각 5.32 m과 4.27 m로 산출된다. 각 2회 측정한 후 평균값을 사용하였다. 산출된 영향반경은 4.79 m이었으며, 안전율 0.9를 적용하여 설계 영향반경은 4.31 m로 설정하였다. 거리에 따른 관측정의 압력 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2. 산소전달반경

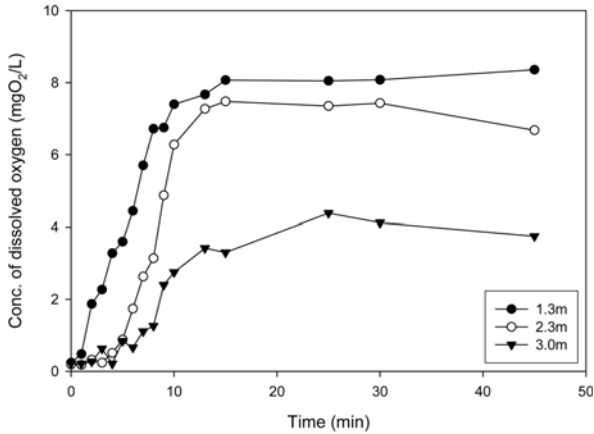


Fig. 4. The changes of oxygen concentration at monitoring wells.

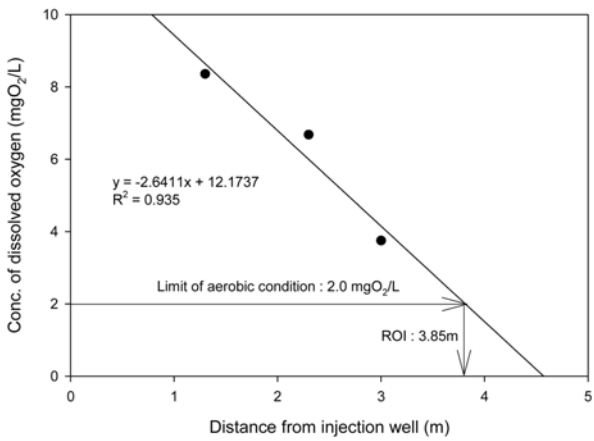


Fig. 5. The linear regression of equilibrium oxygen concentration with distance.

주입정에서 주입압력과 주입유량을 각각 3,500 mmH₂O, 0.6 m³/min로 주입하면서 거리에 따른 용존산소농도를 측정하였다. 주입정으로부터 1.3 m, 2.3 m, 3.0 m 지점에 관측정을 설치하고 공기를 추출하여 용존산소농도를 측정하였다. 포화대의 용존산소농도는 시간이 지남에 따라 증가하다가 약 15분 경과 후 평형상태를 유지하는 것으로 조사되었다. 최종 산소농도는 각각 8.36, 6.68, 3.75 mgO₂/L를 나타내었다. Fig. 4에 각 관측정에서 측정한 용존산소농도의 변화를 나타내었으며, 거리에 따른 평형상태의 용존산소농도를 Fig. 5에 나타내었다. 용존산소농도가 2 mg/L를 유지하는 거리를 산소전달반경으로 평가할 때, 해당부지의 전달반경은 3.85 m로 조사되었으며, 안전율을 고려한 산소전달반경은 3.46 m로 설정하였다.

정화시스템을 위한 부지통기성 영향반경은 4.31 m이고, 산소전달반경은 3.46 m로 조사되었으며, 산소전달반경을 기준으로 추출관정 28개와 주입관정 19개를 교차하여 배

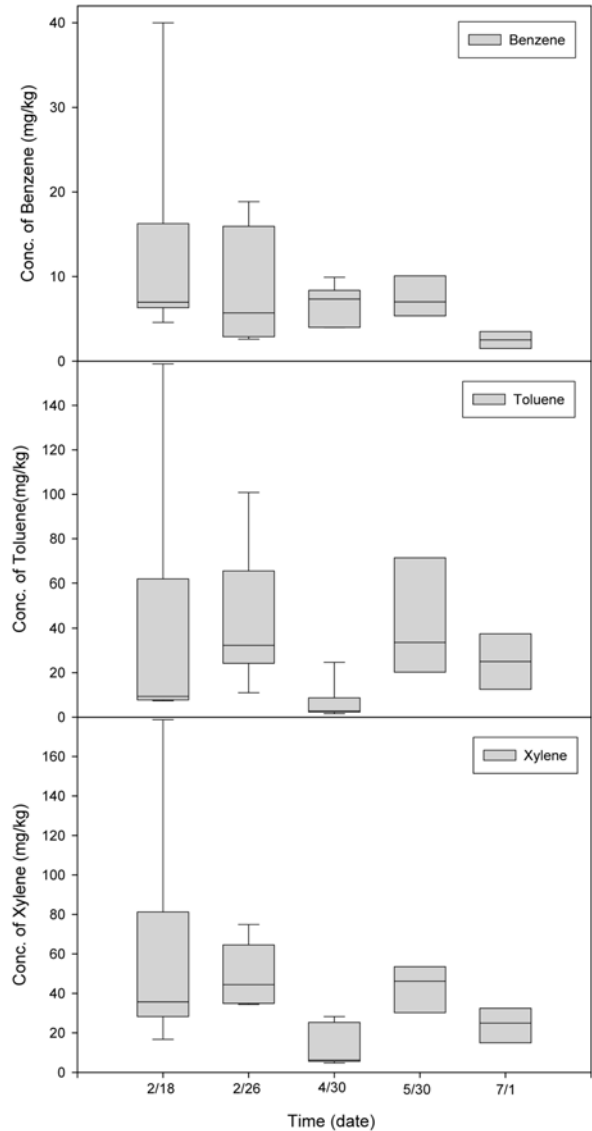


Fig. 6. The changes of contaminants concentration at the study site with time.

치하였다.

3.3. 지중정화 효율평가

대상부지의 주 오염물질은 유류이며, 이 중 토양환경보전법의 3지역 우려기준을 초과하는 토양오염물질은 벤젠(우려기준 : 3 mg/kg), 톨루엔(우려기준 : 60 mg/kg), 크실렌(우려기준 : 45 mg/kg)으로 조사되었다. 지중정화장치를 약 5개월간 운영하면서 정밀조사 시 오염농도가 가장 높았던 5지점에서 토양시료를 5회 채취하여 오염물질의 농도변화 특성을 조사하였다. 시간에 따른 농도변화를 상자그림(box plot)으로 Fig. 6에 나타내었다.

벤젠은 지중정화장치 운전 초기에 약 7.5 mg/kg의 중간

값을 나타내었으며, 최대값과 최소값은 각각 40.0 mg/kg 및 4.6 mg/kg이었다. 8일, 72일, 102일 운전 후 오염물질의 중간값은 6.0 mg/kg, 7.0 mg/kg, 6.5 mg/kg로 변화되었다. 132일 후 2.0 mg/kg을 나타내었으며, 최대값과 최소값은 각각 3.0 mg/kg과 1.0 mg/kg이었다. 중간값 기준으로 4회 까지 농도의 변화가 뚜렷하지 않았으나 5회 분석결과 저감율이 높은 것으로 조사되었다.

톨루엔의 초기 중간값은 약 32.0 mg/kg이었으며, 최대값과 최소값은 각각 158.7 mg/kg 및 7.3 mg/kg이었다. 8일, 72일, 102일 운전 후 오염물질의 중간값이 35.0 mg/kg, 8.0 mg/kg, 24.5 mg/kg로 변화되었다. 132일 후 23.0 mg/kg을 나타내었으며, 최대값과 최소값은 각각 45.0 mg/kg과 5.0 mg/kg이었다.

크실렌은 운전초기 약 35.5 mg/kg을 나타내었으며, 8일, 72일, 102일, 132일 운전 후 43.0 mg/kg, 8.0 mg/kg, 44.5 mg/kg, 23.0 mg/kg을 나타내었다. 톨루엔과 크실렌은 3회 분석결과 보다 4회 결과가 높게 나타났다. 이는 인위적인 지중환경의 변화 및 토양의 불균질성에 의한 것으로 판단된다.

대상부지의 유류오염물질 중 3지역 우려기준을 초과한 오염물질은 벤젠, 톨루엔, 및 크실렌으로 조사되었다. 약 5개월간 지중정화에 의해 모든 오염물질이 기준이하로 정화되었으나, 벤젠의 경우 최대값 기준으로 우려기준을 약간 상회하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 장기간 유류로 오염된 철로부지의 유류 오염토양 정화를 위해 대상부지의 지중정화공법을 위한 영향반경을 평가하고, AS/SVE 혼합공법 적용에 따른 휘발성 오염물질의 농도변화 특성을 파악하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

대상지역의 오염토양은 약 1,830 m³(면적; 732 m²)이며, 사용중인 시설로 굴착정화가 불가능한 지역이다. 현장에서 통기성시험 및 산소전달반경 시험을 통해 영향반경을 각각 4.31 m(추출정), 3.46 m(주입정)으로 산정하였다. 위 결과를 토대로 대상부지 오염토양을 효과적으로 정화하기 위해 추출정 28개와 주입정 19개를 설치하였다. 약 5개월간 지중정화 시설을 운영하면서 오염물질의 저감현황을 파악하였다.

대상부지의 오염물질은 유류오염물질 중 휘발성이 강한 휘발유 계열의 오염 특성을 나타내었으며, 토양환경보전법의 3지역 우려기준을 초과하는 오염물질은 벤젠, 톨루

엔, 크실렌 이었다.

초기 오염물질 농도는 중간값 기준으로 벤젠, 톨루엔, 크실렌이 각각 약 7.5 mg/kg, 32.0 mg/kg, 35.5 mg/kg을 나타내었다. 약 5개월 후 벤젠의 최대값이 우려기준을 약간 상회하였지만, 평균값은 2.0 mg/kg, 23.0 mg/kg, 23.0 mg/kg으로 우려기준을 만족하였다. 대상부지에 적용한 지중정화방법(AS/SVE)은 휘발성 유기오염물질의 정화에 효과적인 것으로 판단되었다.

지중정화를 위해 적용한 정화메커니즘은 SVE를 통한 물리적인 추출과 오염물질의 생물학적 분해과정이다. 물리적인 추출에 의한 오염물질의 저감효과가 생물학적 분해에 의한 효과보다 우세하였을 것으로 판단되지만, 두 제거 기작의 영향을 정확히 구분하는 것은 용이하지 않았다. 또한 토양의 이질성으로 인해 시간에 따라 일정한 저감도를 나타내지는 않은 것으로 조사되었다.

향후 오염물질의 저감속도 및 정확한 지하환경의 예측을 위해 보다 혁신적인 지하환경평가 기술이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구의 일부분은 2014년도 광운대학교 학술연구비의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

References

- Amin, M.M., Hatamipour, M.S., Momenbeik, F., Nourmoradi, H., Farhadkhani, M., and Mohammadi-Moghadam, F., 2014, Toluene removal from sandy soils via in situ technologies with an emphasis on factors influencing soil vapor extraction, *ScientificWorld Journal*, **23**, 416752.
- Benner, M.L., Mohtar, R.H., and Lee, L.S., 2002, Factors affecting air sparging remediation systems using field data and numerical simulations, *J. Hazard. Mater.*, **95**(3), 305-329.
- Chai, J.C. and Miura, N., 2004, Field vapor extraction test and long-term monitoring at a PCE contaminated site, *J. Hazard. Mater.*, **110**(1-3), 85-92.
- Chu, Y., Werth, C.J., Valocchi, A.J., and Yoon, H.K., 2004, Andrew G. Webb, Magnetic resonance imaging of nonaqueous phase liquid during soil vapor extraction in heterogeneous porous media, *J. Contam. Hydrol.*, **73**(1-4), 15-37.
- EPA, 2004, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites; A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA/510-R-04-002.
- Fan, W., Yang, Y.S., Lu, Y., Du, X.Q. and Zhang, G.X., 2013,

Hydrogeo-chemical impacts of air sparging remediation on a semi-confined aquifer: Evidences from field monitoring and modeling, *Chemosphere*, **90**(4) 1419-1426.

Johnston, C.D., Rayner, J.L. and Briegel, D., 2002, Effectiveness of in situ air sparging for removing NAPL gasoline from a sandy aquifer near Perth, Western Australia, *J. Contam. Hydrol.*, **59**(1-2), 87-111.

Kaleris, V. and Croisé, J., 1997, Estimation of cleanup time for continuous and pulsed soil vapor extraction, *Journal of Hydrology*, **194**(1-4), 330-356.

Kirtland, B.C. and C. Aelion M., 2000, Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/soil vapor extraction: impact of continuous or pulsed operation, *J. Con-*

tam. Hydrol., **41**(3-4), 367-383.

McCray, J.E. and Falta, R.W., 1996, Defining the air sparging radius of influence for groundwater remediation, *J. Contam. Hydrol.*, **24**(1), 25-52.

Nobre Manoel, M.M. and Nobre Rosane, C.M., 2004, Soil vapor extraction of chlorinated solvents at an industrial site in Brazil, *J. Hazard. Mater.*, **110**(1-3), 119-127.

Tsai, Y.J., 2007, Air flow paths and porosity/permeability change in a saturated zone during in situ air sparging, *J. Hazard. Mater.*, **142**(1-2), 315-323.

US Army Corps of Engineers, Engineering and design; Soil vapor extraction and bioventing, EM 1001-1-4001, June 2002.