

배출가스의 후처리 공정을 포함한 토양증기추출법을 이용한 가솔린 오염 토양 복원

이민희^{1*} · 강현민¹ · 이병헌² · 빈정인²

¹부산광역시 남구 대연3동 599-1 부경대학교 환경해양대학 환경지질학과

²부산광역시 남구 대연3동 599-1 부경대학교 환경해양대학 환경공학과

Remediation for Gasoline Contaminated Soils with SVE (soil vapor extraction) Including a Post-treatment System of Extraction Gases

Minhee Lee^{1*} · Hyunmin Kang¹ · Byunhun Lee² · Jungin Bin²

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University,
599-1 Daeyon 3 Dong, Namgu, Pusan, 608-737, Republic of Korea

²Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, 599-1 Daeyon 3 Dong,
Namgu, Pusan, 608-737, Republic of Korea

ABSTRACT

Box experiments were performed to evaluate the removal efficiency of SVE (soil vapor extraction) for gasoline in soil. An activated carbon sorption tower and a biofilter were operated as post-treatment processes to remove VOCs extracted from extraction wells of SVE. An acrylic resin box (65 cm×20 cm×30 cm) was used to make artificial soil layers and two injection wells and one extraction well were built for SVE process in the box. Gases from extraction wells flew into the activated carbon sorption tower or the biofilter. Gasoline concentrations of VOCs emitted from the extraction well were compared with those after post treatments. More than 92% of initial gasoline mass in soil were removed by SVE within few days, suggesting that SVE is very available to remove VOCs from contaminated soils. To treat VOCs from extraction wells of SVE, an activated carbon sorption tower and a biofilter were attached to SVE process and their gasoline removal efficiencies were measured. These post treatment systems lowered gasoline concentrations to below 1.0 ppm within few days. Average remediation efficiency was 98% of gasoline for the activated carbon sorption tower and 84.1% for the biofilter. The maximum removal capacity of a biofilter was 10.7 g/L/hr, which was ten times higher than general biofilter removal capacity. Results from the study suggest that the activated carbon sorption tower and the biofilter would be available for the post treatment process to remove VOCs generated from SVE process.

Key words : VOCs, SVE, biofilter, sorption tower, gasoline contamination

요 약 문

토양증기추출(Soil Vapor Extraction)법을 이용하여 대표적 휘발성 오염물질(VOCs)인 가솔린을 토양으로부터 제거하는 박스실험을 실시하였다. 아크릴수지로 제작된 65 cm×20 cm×30 cm 규모의 박스를 제작하여, 인공적인 토양 환경을 설정한 후, 직경 1 cm인 스테인레스 재질의 관에 0.2 cm 간격으로 하부에서 15 cm까지 스크린 된 스테인레스 재질의 주입정(2개)과 추출정(1개)을 설치하여 SVE를 실시하였으며, 추출정으로부터 배출되는 가스를 제거하는 후처리 공정을 연결하여 SVE로부터 배출되는 가스의 가솔린 농도와 후처리 공정 후 배출되는 가솔린 농도를 비교 분석하였다. 가솔린 100g을 토양 내 주입한 경우 0.03 L/min 조건의 박스실험에서는 SVE에 의해 약 560 L (13일 경과) 가스 추출 후 주입된 가솔린의 95%가 제거되었으며, 주입 가솔린양이 250 g이고 추출 가스량이 0.2 L/min 조건에서는

*Corresponding author : heelee@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2003.12. 13 게재승인일 : 2004. 4. 30

질의 및 토의 : 2004. 9. 30 까지

약 1440 L(5일 경과) 가스 추출 후 주입 가솔린의 92% 이상이 제거되어, SVE가 토양 내 휘발성 오염물질을 제거하는데 매우 효과적인 방법임을 입증하였다. 가솔린으로 오염된 토양에서 SVE 공정으로부터 배출되는 가스를 과립상 활성탄 흡착탑과 바이오필터를 이용하여 제거하는 실험을 실시하였다. SVE로부터 배출된 가스의 후처리 공정으로 활성탄의 흡착탑을 이용한 제거 공정과 바이오필터를 이용한 제거 공정의 효율을, 후처리 공정으로 주입되는 가스내 가솔린량에 대한 운전 시간별 제거 효율로 나타내었다. 제거 효율은 후처리 공정에 주입되는 가솔린의 농도와 관계 없이 평균 94%의 높고 안정적인 효율을 나타내었고, 후처리 후 배출되는 가스의 농도 자체도 매우 낮게 나타남으로서, 실제 오염지역에서 토양증기추출법과 결합된 하나의 VOCs 제거공정으로서 효과적으로 사용될 수 있음을 입증하였다. 활성탄 흡착탑과 바이오필터에 유입되는 가솔린의 부하량에 대한 제거 용량은, 주입되는 가솔린의 농도가 상당히 높음에도 불구하고 주입되는 가솔린의 농도가 높을수록 선형적으로 증가하였다. 이러한 결과들은 후처리 공정들이 SVE에서 배출되는 가스의 VOCs 농도가 다양한 환경에서도 광범위하게 적용할 수 있으며, 특히 고농도의 가스상을 처리하는 데에도 매우 효과적으로 사용될 수 있음을 입증한다.

주요어 : VOCs, SVE, biofilter, 활성탄 흡착탑, 가솔린오염

1. 서 론

현재 국내 토양과 지하수 오염을 일으키는 오염물질 중에서 대표적인 휘발성유기오염물(VOCs: volatile organic compounds)들은 가솔린(BTEX류), 디젤류(TPH), 염화용제인 TCE(trichloroethylene), PCE(tetrachloroethylene) 등이다(이민호, 2003). In-Situ SVE(soil vapor extraction)는 토양 내 존재하는 휘발성 유기오염 물질(VOCs)을 토양 공극내 공기 흐름에 의하여 가스 상으로 제거하는 방법으로, 공기 주입정과 추출정을 오염된 불포화대 토양내에 설치하여 토양 내에 공기압의 차이를 발생시킴으로써 공기의 이동과 함께 휘발성(준휘발성) 오염물질을 가스 상으로 토양으로부터 분리시킨 후, 지상에서 추출정의 배출가스 처리과정을 거쳐 대기 중으로 배출하는 공정으로 이루어져 있다. In-Situ SVE는 다른 정화 방법에 비하여 비용이 저렴하며, 설치가 용이하고, 토양 특성상 발생하는 제한 요인들이 적기 때문에 주유소를 포함한 지하 저장 탱크(UST: underground storage tank) 주변 VOCs 누출에 의한 오염 토양 복원에 널리 사용되고 있는 방법이다(Johnson, *et al.*, 1990; EPA, 1995; EPA, 1999; Kaleris and Croise, 1997; Kirtland and Aelion, 2000).

국외에서는 90년대에 이미 SVE의 현장 적용성 시험을 마치고, 실제 오염지역에 적용할 수 있는 프로토콜과 공정과정들이 널리 사용되고 있으나, 국내에서는 오염물질이나 토양 특성별 정화 효율에 관한 실험적인 결과 없이, 대부분 단순한 공기 블로우어장치를 이용하여 주로 주유소 오염 토양 복원에 사용되고 있다. 이러한 경험적인 방법에만 의존하는 복원은 미세토양분포나 토양내 수분함량 차이, 오염물질의 특성에 따른 정화 효율의 차이를 무시

하기 때문에, 처리비용이나 소요시간이 부적절하게 계획되는 경우가 많다. 따라서 SVE 공정에 대한 체계적인 연구가 이루어져야 하며, 오염 현장의 적용성 평가 실험들이 수행되어, 실제적인 오염 복원 사업에서 가장 효율적이고 저렴한 복원 공정이 설계될 수 있도록 하여야 한다(이민희외, 2002).

SVE는 휘발성 오염물질을 토양으로부터 제거하는데 효율적인 방법으로 제시되고 있지만, 추출정으로부터 배출되는 가스 내 존재하는 VOCs 물질을 그대로 대기 중에 방출하는 경우, 대기 오염을 유발하게 된다. 환경오염이 심각해짐에 따라, 대기로 방출되는 VOCs 물질의 규제는 점점 엄격해지고 있으므로, 기존에 가능하였던 SVE 공정 후 배출가스의 대기로의 무단 방출은 더 이상 허용되지 않으며, 반드시 배출 규제 농도이하로 낮춘 후 대기로 방출하는 것이 의무화 되었다(환경부, 2002). 따라서 토양으로부터 VOCs 물질의 분리뿐만 아니라 대기로 방출되기 전 배출가스의 VOCs를 처리해야 하는 후처리 공정이 SVE 정화 공정의 중요한 부분으로 포함되어야 한다. 고농도의 과립상 활성탄을 이용한 흡착탑과 생물반응막에 의한 바이오필터는 활발히 연구되고 있는 대기오염제어(Air pollution control, APC)기술로써, 최근에는 악취 및 VOCs 제거공정뿐만 아니라 산업에서 발생하는 특정 화합물을 제거하는 고성능 제거 공정으로 확장되고 있다(LaGrega *et al.*, 2000; 박상진, 2001; 남궁완외, 2000).

본 연구는 토양내 가솔린 제거를 위해 기존의 SVE 방법에 이러한 후처리 공정들을 추가하여, 통합된 SVE 토양 오염 복원 공정의 개발 가능성을 확인하고자 하였으며, 실내 박스 실험을 통하여 SVE를 이용한 오염토양 내 가솔린 제거 효율과, 추출정으로부터 배출되는 VOCs를 효과적으로 제거하기 위한 활성탄 흡착탑과 바이오필터를 이용

한 배출가스 제거공정의 정화 효율을 측정하였다. 본 연구의 목적은 토양오염의 주 오염원인 VOCs 중에서 휘발성이 강한 기술린을 제거하기위해 SVE 공정에 활성탄 흡착탑과 바이오필터를 추가한 하나의 통합된 복원공정시스템 개발에 기술적, 학문적 자료를 제공하는데 있다.

2. 실험 방법

기술린 오염 토양의 SVE 정화 효율을 규명하기 위하여, 아크릴수지로 제작된 65 cm×20 cm×30 cm 규모의 박스를 제작하여, 인공적인 토양 환경을 설정한 후, 토양 복원 실험을 실시하였다. 직경 1 cm인 스테인레스 재질의 관에 0.2 cm 간격으로 하부에서 15 cm까지 스크린 된 주입정(2개)과 추출정(1개)을 설치하여 SVE를 실시하였으며, 추출정으로부터 배출되는 가스를 제거하는 후처리 공정을 연결하여 SVE로부터 배출되는 가스의 농도와 후처리 공정 후 배출되는 가스의 VOCs 농도를 비교 분석하였다.

오염물질인 기술린은 부산의 OO 주유소에서 구입하여 Sudan IV로 붉게 염색하여 사용하였다. 박스실험에 사용된 매질은 Ottawa sand와 조립질과 중립질의 국내 표준사 모래, 실제 토양을 이용하였으며, 사용된 Ottawa sand는 US Silica Company 제품으로써 F-35는 평균입경이 0.5 mm의 조립질 모래이며, F-110은 평균입경이 0.1 mm의 세립질 모래이다. F-35 Ottawa sand는 체가름을 하여 입자의 직경이 0.85 mm 미만 0.425 mm 이상인 모래만을 사용하였고, 국내 표준사(주)주문진구사 제품)는 평균입경이 0.425 mm 미만 0.25 mm 이상인 중립질 모래와, 평균입경이 0.85 mm 미만 0.425 mm 이상인 조립질 모래를 사용하였다. 모의 토양 매질 박스 내 평균 공극률은 39%였다. 실제 토양은 부산 대연동 지역 오염되지 않은 표토를 건조하여 2 mm 체를 통과한 입자를 사용하였으며 토양의 입도 분포는 Table 1에 나타나있다.

Table 1. Grain size distribution of real soil in experiment

Sieve no.	Mesh size (mm)	Remained soil in mesh (g)	Percent finer by weight (%)
# 10	2.000	-	100
# 20	0.850	1.74	97.20
# 40	0.425	27.46	52.99
# 60	0.250	14.86	29.07
# 100	0.150	7.40	17.16
# 200	0.075	4.21	10.38
fan	-	6.45	0.00
Total	-	62.12	-

2.1. 입상 활성탄 흡착탑을 이용한 SVE 박스 실험

SVE 박스 실험은 국내 표준사를 이용한 모의 토양 박스 실험과 실제 토양을 이용한 박스 실험을 실시하였다. 모의 토양 박스 실험을 위하여, 국내 표준사를 건조하여, 미사질토층(2 cm 두께), 조립질사질토층(1.5 cm 두께), 세립질사질토층(1.5 cm 두께), 중립질사질토층(20 cm 두께: 오염 토양층), 점토층 (2 cm 두께) 순으로 다짐과 함께 충전하여, 박스 내 총 토양 두께는 27 cm가 되게 하였다.

배출된 공기의 후처리 공정으로 활성탄 흡착탑을 사용하였다. VOCs 흡착을 위해 고정상으로 이용된 흡착탑의 매질은 큰 비표면적과 낮은 밀도를 가지고 있어서 수처리 분야에서 널리 이용되고 있으며, 흡착에 의한 악취 제거 등에 많이 사용되고 있는 과립상 활성탄(activated carbon)을 사용하였다. 활성탄은 먼저 체분리하여 직경이 5-7 mm인 것들만 선별한 후에 물로 수회 세척하여 미세입자들을 제거하였다. 흡착탑은 내경이 6 cm이고 길이가 100 cm인 원형 아크릴 관을 사용하였다. 흡착탑에 충전된 활성탄의 중량은 0.64 kg이었으며, 충전에 사용한 것과 동일한 활성탄 일부를 채취하여 밀도, 공극율, 함수율 등의 특성 분석 실험을 수행하여 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

순도 99.99% 에어가 저장된 공기탱크로부터 가스유량계를 부착하여 주입정에 공기를 일정한 속도로 주입하였으며, 블로우어와 가스유량계를 추출정에 연결하여 배출된 가스가 활성탄 흡착탑을 통과하게 하여 오염된 공기의 후처리 제거 실험을 하였다. 활성탄은 원형 아크릴관의 55 cm 높이만큼 충전되었으며, 충전 부피는 1.1 L였다. 박스내 채수정으로부터 유입된 가스는 아크릴관 하부로 유입되어 상부로 유출되는 상향식을 채택하였다. 먼저 박스 상부로부터 소형 튜브 3개를 이용하여 증류수를 주입하여, 박스 내 토양을 상부로부터 포화시켰으며, 증류수 주입을 정지한 후, 박스 하부 양쪽 벽면에 설치된 배출구에 의하여 중력에 의해 증류수를 배출하여, 매질인 표준사질토양의 포화도를 평균 15.4%로 유지하였다. 염색된 기술린 100 g을 박스 내 불포화대인 표준사질토양 상부에 강철바늘이 부착된 진공 유리주사기를 이용하여, 박스 중심으로부터

Table 2. Physical characteristics of activated carbon for packing material

Physical characteristic	Activated carbon
Apparent density	1.38 g/cm ³
Packing density	0.58 g/cm ³
Void volume ratio	0.42
Water holding capacity	46.30% (w/w)
Mesh size	5-7 mm

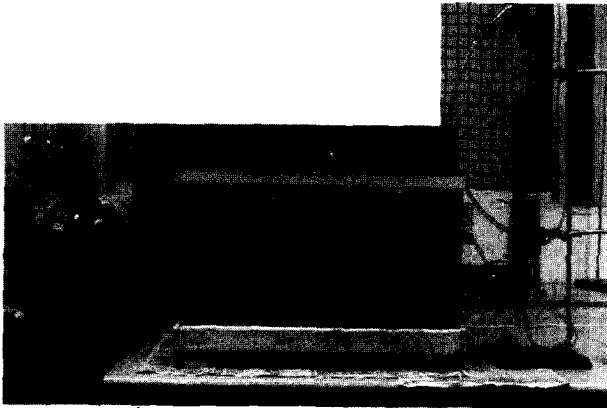


Fig. 1. Photograph of SVE box experiment system with an active carbon sorption tower.

약 10 cm 떨어진 4개 지점에서 균등하게 주입하였다. 가솔린 주입 후 약 24시간이 지난 다음, 공기탱크로부터 가스유량계를 이용하여 0.03 L/min. 의 속도로 두 개의 주입정에 공기를 주입하였다(각각 0.015 L/min. 주입). 추출정과 흡착탑 사이에 실리콘 튜브와 시료 채취용 밸브를 설치하였으며, 흡착탑과 블로워 사이에 시료 채취가 가능한 T형 밸브를 설치하였다. 블로워에 유량계를 부착하여 추출정으로부터 추출되는 가스의 양을 0.03 L/min.으로 유지하였다. Fig. 1은 과립상 활성탄 흡착탑을 이용한 VOCs 제거 후처리공정이 포함된 SVE 박스 실험을 보여주는 사진이다. SVE 실험 후 박스 내 매질을 매탄올로 세정하여 토양 내 잔존하는 가솔린의 양을 측정하였다.

실제 토양에서의 가솔린 제거 효율을 측정하기 위하여 실제 토양을 이용한 SVE 박스 실험을 실시하였다. 아크릴수지 박스를 미사질토층(2 m 두께), 조립질 사질토층(1.5 cm 두께), 세립질 사질토층(1.5 cm 두께), 실제 토양층(20 cm 두께), 점토층(2 m 두께) 순으로 다짐과 함께 충전하였다. 실제 토양층은 오픈 건조 후, 매질 내 평균 수분 포화도가 45.6%가 되도록 증류수와 혼합한 후 충전하였다. 염색된 가솔린 100 g을 실제 토양층 상부에 주입하였으며, SVE 운전 조건, 활성탄 흡착탑의 운전 조건은 모의 토양 SVE 실험과 같게 하였고, 실험 결과를 모의 토양 박스 실험 결과와 비교하였다.

2.2. 바이오필터(Biofilter)를 이용한 SVE 박스 실험

SVE에 의해 배출되어진 가스를 바이오필터를 이용하여 가스내 VOCs를 흡착분해함으로써, 최종적인 배출 가스의 VOCs 농도를 낮추는 박스 실험을 실시하였다. 바이오필터의 지배원리는 일반적인 생물막 공정과 유사하며 기본적으로 3단계 과정을 포함한다(Swanson and Loehr, 1997).

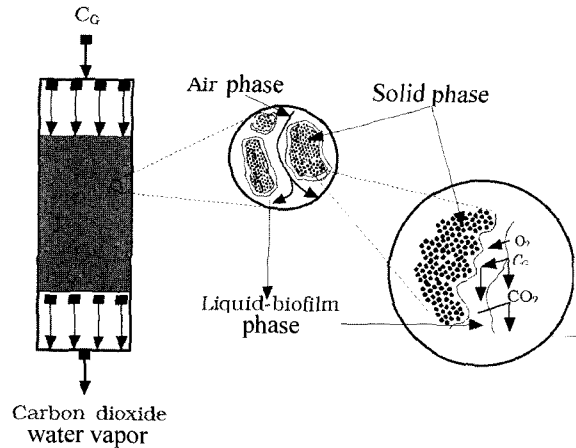


Fig. 2. Schematic of downflow co-current biofilter (Webster and Deviny, 1998).

먼저 가스 상의 VOCs 가 공극에서 기체흐름과 담체 표면의 생물막 사이의 계면을 통과하고 화학물질은 생물막을 통해 순응된 미생물에게로 확산되며, 최종적으로 미생물들은 1차 물질로써 화학물질의 산화로부터 에너지를 얻거나, 일반적인 효소들에 의해 화학물질은 상호 대사된다. 송풍기를 거친 VOCs 는 담체층전층을 통과하게 되고 이때 유기성물질은 필터층에 있는 미생물의 작용으로 호기성으로 분해된다. 생물학적 분해공정은 두개의 연속공정으로 나뉘어지는데 배출가스에 포함된 수용성물질의 흡수(absorption) 현상이 필터에 형성된 생물막(biofilm)에서 일어나고 이것이 필터물에 흡착(adsorption)되는 과정이다. 이러한 과정은 연속적으로 겹쳐서 일어나므로 배출가스에 포함된 물질의 농도가 변해도 이를 잘 완충하여 연속적으로 정화된 공기가 방출될 수 있게 한다. 이러한 흡수 및 흡착과정을 거친 물질은 생물막 중의 호기성 미생물에 의하여 최종적으로 이산화탄소와 물로 분해된다(이혜경과 백승훈, 1999; 유영석, 1998). Fig. 2는 대표적인 하향류(down flow co-current) 방식의 바이오필터 공정을 나타내고 있다.

바이오필터 반응기 내에 고정되어 있으면서 미생물을 부착/성장시켜 미생물에 의해 VOC성분의 제거가 가능하도록 하는 충전 담체의 적절한 선택은 상당히 중요하다. 활성탄은 큰 비표면적과 낮은 밀도 그리고 일정 이상의 물리적 강도를 이유로 생물탈취탑의 충전담체로써도 그 기능을 충분히 발휘하므로, 본 실험에서는 활성탄 흡착탑 실험에 사용되었던 과립상 활성탄(Activated carbon)을 담체로 채택하였다. 실험에 사용된 미생물의 균주는 하수처리장의 반송슬러지로부터 집중한 Bacillus sp. 이용하였는데, Bacillus sp.는 원핵생물 중에 비광합성 세균에 속하

며, Gram(+) 세균으로서 독립적 또는 시슬형태로 존재하고 형태상으로 간균 또는 원형으로 $0.5 \times 1.2 \sim 2.5 \times 10 \mu\text{m}$ 크기에 속하며, 다른 분류상의 큰 특징은 불리한 환경이 되면 내생포자를 형성한다. 유기폐수 성분의 분해성 및 자화성이 있으며, 육편, 단백질을 분해하고 전분을 포도당으로 분해하며, 또한 지방과 취기성분을 분해하는 특성이 있으며, 유기폐수 중의 암모니아, 황화수소, 이민류를 직접 섭취 또는 분해·자화하고(염해경, 2001), 토양 내 유류 성분을 분해하는 대표적인 미생물로도 알려져 있다(Roberts, 1998).

본 연구에 사용된 바이오필터는 원형 아크릴관으로 구성되어있으며, 담체인 입상 활성탄의 충전 부피는 1.1 L 이고, 아크릴관 내에 설치된 다공관위에 충전하였다. 박스 내 채수정으로부터 유입된 가스는 바이오필터 상부로 유입되어 하부로 유출되는 하향식을 채택하였으며, 상부 유입부에는 영양물질과 세척수 공급을 위한 분무기가 설치되어 있으며, 하부에는 드레인수의 저장 및 배출이 가능한 구조로 되어있다(빈정인, 2002). Fig. 3은 본 실험에 이용된 바이오필터 사진이다.

SVE 실험을 위한 박스는 국내 표준사 모래를 이용하여, 점토층(1.5 cm 두께), 세립질사질토층(8.5 cm 두께), 조립질사질토층(11 cm 두께: 오염 토양층), 미사질토층(4 cm 두

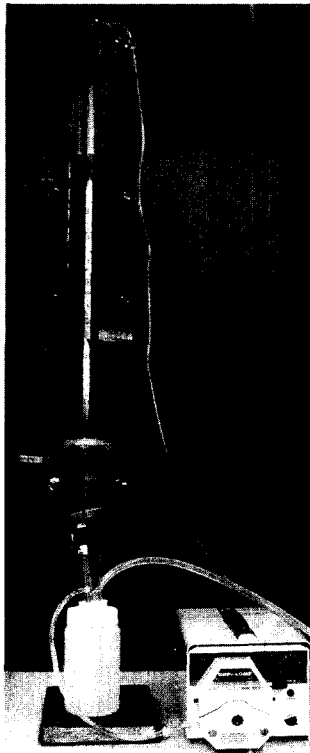


Fig. 3. Photograph of biofilter.

께), 세립질사질토층(2 cm 두께) 순으로 다짐과 함께 충전하였으며, 박스 내 총 토양 두께는 27 cm였다. 순도 99.99% 공기탱크로부터 가스유량계를 부착하여 주입정에 공기를 주입하였으며, 블로우어와 가스유량계를 추출정에 연결하여 오염된 가스를 바이오필터를 통과하게 하였다. 분해 균주인 *Bacillus sp.*를 영양물질 공급과 함께 반응기의 상부로부터 3일 동안 순환시킴으로서 활성탄 담체 표면에 접종하였다. 본 SVE 실험 과정동안 영양물질은 하루 1회, 세척수는 약 2-5 ml/min.의 속도로 연속적으로 순환되었다.

박스 상부로부터 소형 튜브 3개를 이용하여 증류수를 주입하여, 토양을 상부로부터 포화시켰으며, 증류수 주입을 정지한 후, 박스 하부 양쪽 벽면에 설치된 배출구에 의하여 중력에 의해 증류수를 배출하여, 포화대와 불포화대의 경계면이 하부 점토층상부에 유지하도록 하였다. 염색된 가솔린 250 g을 박스 내 조립질 사질토양 상부에 강철바늘이 부착된 진공 유리주사기를 이용하여, 박스 중심으로부터 약 7 cm 떨어진 8개 지점에서 균등하게 주입하였다. 가솔린 주입 후 약 12시간이 지난 다음, 공기탱크로부터 가스유량계를 이용하여 0.2 L/min.의 속도로 두 개의 주입정에 공기가 주입되었으며(각각 0.1 L/min. 주입), 채수정과 바이오필터 사이에 실리콘 튜브와 시료 채취용 밸브를 설치하였으며, 바이오필터와 블로우어 사이에 시료 채취가 가능한 T형 밸브를 설치하였다. 블로우어는 유량계를 부착하여 채수되는 가스의 양을 0.2 L/min으로 유지하였다. Fig. 4는 바이오필터를 이용한 박스 실험을 보여주는 사진이다.

2.3. 가솔린 분석과 QA/QC

추출정으로부터 배출되는 가스와 후처리 장치를 통과한



Fig. 4. Photograph of box experiment with biofilter.

Table 3. GC conditions for gasoline analysis

Item	Condition
Detector	FID, Detection limit (S/N ratio=3), greater than 1 ng/L
Column	Supelco capillary VOC-column (0.53 mm ID, 30 m in length, 3 μm Film thickness)
Oven temperature	50°C (4 min. holding, 4°C/min. increase) - 130°C (10°C/min. increase) - 200°C (total 32 min.)
Carrier gas	N ₂ (99.99%, flow pressure : 5 psi.)
Inlet	150°C, Splitless taper glass inlet
Injection	5 ml gas
Purge and desorption time	11 min. and 2 min.

가스에 대하여, SVE 가동 후 최초 1일 동안은 약 한 시간 간격으로, 이후에는 3시간 간격으로 가솔린의 농도를 측정하였다. 오염물질로 사용된 가솔린 분석을 위해, GC/FID(Agilent 6890)를 사용하였으며, 가스상 분석을 위해, 퍼지-트랩장치(Tekmar Dohmann 3100)를 사용하였다.

Sigma-Aldrich 회사의 탄화수소 표준 시료를 이용하여 탄소수 3개에서 10개 사이의 기상의 가솔린 성분들의 GC 반응 피크 면적을 총 적분하여, 표준 시료의 농도와 검출기 면적 값의 상관 관계선을 작성하였으며, 검량선의 신뢰도가 $r^2 = 0.990$ 이상(대부분 0.995 이상)이 되는 검량선을 사용하였으며, 매 5개의 가스 시료 분석 후 표준 가스 시료를 분석하여 새로운 검량선을 작성하여, 새로운 검량선과 이전 검량선과의 편차가 3% 이내로 일치할 경우에만

검량선을 사용하고, 그 이외의 경우는 표준시료를 다시 조제하여 신뢰도 이상의 경우에만 시료를 사용하였다. GC/FID 분석 조건은 Table 3에 나타나있으며, Fig. 5는 분석 검량선의 한 예를, Fig. 6은 GC/FID에서 검출되는 가솔린 피크를 나타낸다.

3. 결과 및 토의

3.1. 입상 활성탄 흡착탑을 이용한 SVE 박스 실험 결과

총 15일 동안 SVE를 이용한 박스 실험을 실시하였다. 0.03 L/min의 속도로 공기를 주입하였으며 추출된 가스는 모두 활성탄 흡착탑을 통과한 후 배출하였다. Fig. 7은 SVE에 의하여 추출정으로부터 배출되는 가스상의 가솔린 농도와 활성탄 흡착탑을 통과한 후 배출되는 가스상의 가솔린 농도를 공기 주입량에 따라 나타낸 것이다. 약 6시간 가스 추출 후(8.9L) 추출정으로부터 배출되는 가솔린 농도가 최고인 790 ppm을 나타내었으며, 7.5일 후에는 배출가스의 가솔린 농도가 대기환경보전법의 벤젠화합물 배출기준치인 50 ppm 이하를 유지하였고, 13일 후에는 초기 주입 가솔린 양(100g)의 95% 이상을 제거하였으며, 추출정의 배출농도는 4.8 ppm(흡착탑 통과한 농도는 0.39 ppm)을 나타내었다. 활성탄 흡착탑을 통과한 배출 가스의 가솔린

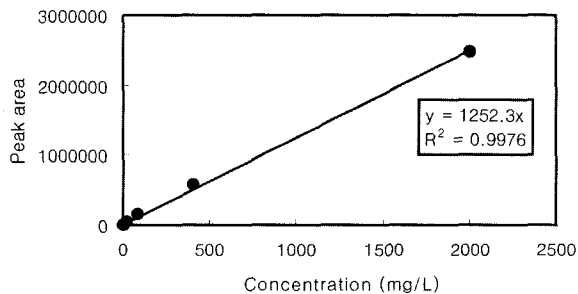


Fig. 5. Calibration curve for gasoline on GC analysis.

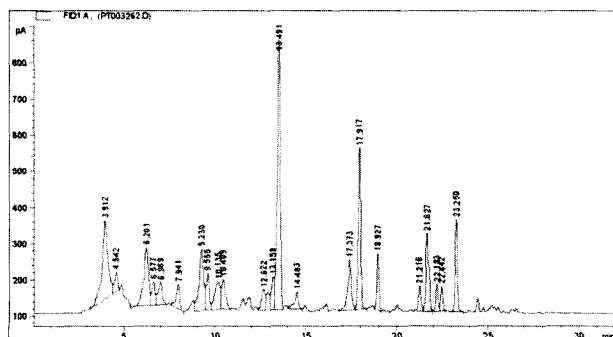


Fig. 6. Gasoline chromatogram on GC (capillary voc-column, length : 30 m, diameter : 530 μm, film thickness : 3 μm).

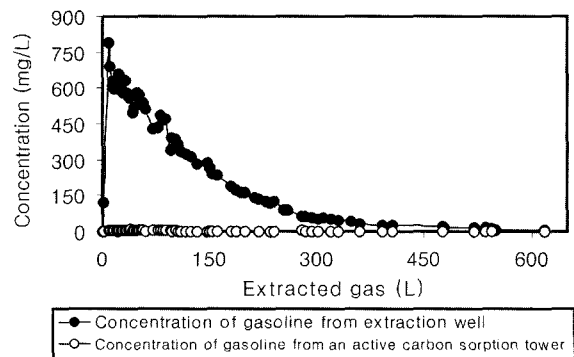


Fig. 7. Result of the artificial soil SVE box test with an active carbon sorption tower.

최종 농도는 SVE 가동 후 2.5일 이후에는 2.0 ppm 이하로, 9일 이후에는 1.0 ppm 이하로 안정되게 유지되어, 대부분의 가솔린이 흡착탑에 의해 제거됨을 알 수 있었다. 실험이 끝난 후 박스 내 9개 지점에서 토양을 채취하여 남아있는 가솔린의 양을 측정하였으며, 이들로부터 약 4.8 g의 가솔린이 SVE 실험 후 토양 내 잔존하는 것으로 나타났다.

SVE에 의해 추출정으로부터 배출된 가스가 활성탄 흡착탑을 통과한 후, 함유하고 있는 가솔린의 양과 활성탄 흡착탑의 처리 효율을 Table 4에 나타내었다. Fig. 8은 활성탄 흡착탑에 주입되는 가스내 가솔린의 양에 대한 운

전 시간별 제거 효율을 보여주는데, 추출정 배출가스의 농도와 관계없이 평균 98%이상의 높고 안정적인 정화 효율을 보여준다. Fig. 9는 활성탄 흡착탑에 유입되는 가솔린의 부하량에 대한 제거 용량을 낸 것으로, 제거용량은 주입되는 가솔린의 농도가 높을수록 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과들은 SVE 가동의 경우, 다양한 배출가스의 농도에서도 후처리 공정으로서 흡착탑을 사용할 수 있으며, 단시간 내에 다량의 VOCs 자유상들이 가스상으로 전환되어 제거되기 때문에 추출된 배출가스의 VOCs 농도를 낮추기 위해 요구되어지는 후처리 과정 시간이 매우 줄어들 수 있음을 나타내고, 결과적으

Table 4. Removal efficiency and capacity of active carbon sorption tower for artificial soil SVE experiment

Sample No.	Inflow					Outflow				
	Injection time (hr)	Injected gasoline mass (g)	accumulated mass (g)	Inflow gasoline concentration (mg/L)	Inflow gasoline loading (g/L/hr)	Extraction time (hr)	Outflow gasoline concentration (mg/L)	Outflow gasoline loading (g/L/hr)	Removal efficiency (%)	Removal capacity (g/L/hr)
1	1	0.13	0.13	122.8	0.20	1	2.07	0.00	98.3	0.20
2	5	3.11	3.23	789.8	1.29	5	5.21	0.01	99.3	1.28
3	6	1.65	4.88	692.9	1.13	6	5.36	0.01	99.2	1.13
4	7	1.50	6.38	626.3	1.02	7	4.04	0.01	99.4	1.02
5	9	1.49	7.87	597.5	0.98	9	2.73	0.00	99.5	0.97
6	10	1.70	9.57	618.4	1.01	10	4.34	0.01	99.3	1.00
7	11	1.15	10.72	598.5	0.98	11	2.54	0.00	99.6	0.98
8	13	1.38	12.10	660.9	1.08	13	4.46	0.01	99.3	1.07
9	15	1.92	14.02	631.4	1.03	15	3.70	0.01	99.4	1.03
10	16	2.00	16.01	579.7	0.95	16	3.39	0.01	99.4	0.94
11	17	1.16	17.18	633.4	0.92	17	3.31	0.01	99.5	1.03
12	18	1.33	18.51	581.4	0.93	18	3.80	0.01	99.4	0.95
13	20	1.92	20.43	560.9	0.91	20	6.31	0.01	98.9	0.91
14	22	1.42	21.85	566.2	0.95	22	8.21	0.01	98.6	0.91
15	23	1.71	23.55	497.4	0.95	23	6.61	0.01	98.7	0.80
16	25	1.11	24.67	517.0	0.94	25	6.82	0.01	98.7	0.83
17	27	1.87	26.54	578.8	0.94	27	5.97	0.01	99.0	0.94
18	28	1.06	27.59	574.3	0.88	28	4.05	0.01	99.3	0.93
19	29	1.26	28.85	572.2	0.88	29	4.05	0.01	99.3	0.93
20	30	1.30	30.15	540.3	0.84	30	3.96	0.01	99.3	0.88
21	32	1.63	31.78	537.3	0.70	32	3.73	0.01	99.3	0.87
22	34	1.85	33.63	515.1	0.71	34	2.31	0.00	99.6	0.84
23	40	4.94	38.58	429.5	0.80	40	2.81	0.00	99.4	0.70
24	43	2.53	41.10	434.5	0.76	43	2.90	0.00	99.3	0.71
25	45	1.63	42.74	488.7	0.77	45	3.21	0.01	99.3	0.79
26	47	2.06	44.80	464.8	0.55	47	5.57	0.01	98.8	0.75
27	49	1.34	46.13	472.6	0.64	49	4.61	0.01	99.0	0.77
28	53	2.92	49.05	338.7	0.63	53	4.13	0.01	98.8	0.55
29	54	0.89	49.94	391.3	0.60	54	2.47	0.00	99.4	0.64
30	56	1.57	51.51	385.1	0.55	56	3.66	0.01	99.1	0.62

Table 4. Continued

Sample No.	Inflow					Outflow				
	Injection time (hr)	Injected gasoline mass (g)	accumulated mass (g)	Inflow gasoline concentration (mg/L)	Inflow gasoline loading (g/L/hr)	Extraction time (hr)	Outflow gasoline concentration (mg/L)	Outflow gasoline loading (g/L/hr)	Removal efficiency (%)	Removal capacity (g/L/hr)
31	59	1.77	53.29	367.9	0.53	59	2.15	0.00	99.4	0.60
32	61	1.39	54.68	335.8	0.51	61	1.01	0.00	99.7	0.55
33	65	2.13	56.81	322.7	0.46	65	1.76	0.00	99.5	0.53
34	69	2.19	59.01	313.0	0.47	69	2.18	0.00	99.3	0.51
35	74	2.73	61.74	282.5	0.44	74	2.27	0.00	99.2	0.46
36	82	4.07	65.81	289.1	0.40	82	1.70	0.00	99.4	0.47
37	83	0.93	66.75	266.9	0.38	83	1.58	0.00	99.4	0.43
38	86	0.98	67.72	241.1	0.31	86	2.22	0.00	99.1	0.39
39	89	1.62	69.34	234.9	0.29	89	1.69	0.00	99.3	0.38
40	99	3.84	73.18	190.9	0.27	99	1.56	0.00	99.1	0.31
41	104	1.41	74.59	174.2	0.26	104	1.22	0.00	99.3	0.28
42	108	1.30	75.89	162.3	0.23	108	1.30	0.00	99.2	0.26
43	110	0.70	76.59	160.3	0.22	110	1.36	0.00	99.1	0.26
44	118	2.20	78.79	142.0	0.21	118	1.20	0.00	99.2	0.23
45	122	0.82	79.62	136.1	0.20	122	1.00	0.00	99.3	0.22
46	127	1.30	80.92	126.3	0.20	127	1.40	0.00	98.9	0.20
47	130	0.60	81.51	122.1	0.15	130	1.83	0.00	98.5	0.20
48	133	0.01	82.28	123.5	0.14	133	1.83	0.00	98.5	0.20
49	141	0.01	83.82	91.2	0.10	141	1.50	0.00	98.4	0.15
50	144	0.00	84.22	88.3	0.10	144	1.30	0.00	98.5	0.14
51	155	0.02	85.69	63.8	0.09	155	3.76	0.01	94.1	0.10
52	158	0.01	86.06	60.6	0.09	158	1.67	0.00	97.3	0.10
53	163	0.01	86.55	57.2	0.09	163	1.75	0.00	97.0	0.09
54	168	0.01	87.05	54.6	0.08	168	1.70	0.00	96.9	0.09
55	171	0.01	87.43	56.2	0.07	171	1.50	0.00	97.3	0.09
56	178	0.01	88.04	51.5	0.07	178	1.24	0.00	97.6	0.08
57	183	0.01	89.27	45.7	0.06	183	1.39	0.00	97.0	0.07
58	193	0.02	89.70	40.3	0.05	193	1.20	0.00	97.0	0.06
59	199	0.01	90.70	33.9	0.04	199	1.12	0.00	96.7	0.05
60	217	0.03	91.05	27.7	0.03	217	0.94	0.00	96.6	0.04
61	225	0.01	92.65	26.2	0.02	225	0.87	0.00	96.7	0.04
62	264	0.07	93.34	18.4	0.02	264	0.77	0.00	95.8	0.03
63	288	0.04	93.55	13.3	0.02	288	0.80	0.00	94.0	0.02
64	297	0.02	93.66	13.3	0.01	297	0.80	0.00	95.2	0.02
65	302	0.01	93.66	11.4	0.01	302	0.64	0.00	94.1	0.02
66	303	0.00	93.70	8.7	0.01	303	0.68	0.00	93.1	0.01
67	304	0.00	94.07	6.0	0.01	304	0.60	0.00	93.6	0.01
68	311	0.07	95.65	4.8	0.01	311	0.39	0.00	92.0	0.01

로 많은 후처리 비용의 절감을 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

실제 토양을 대상으로 실시된 SVE 박스 실험에서는 약 13시간 가스 추출 후(150 L) 추출정으로부터 가솔린의 농

도가 최고인 838 ppm을 나타내었으며, 3.3일 후에는 배출 가스의 농도가 50 ppm 이하를 유지하였고, 7일 이후에는 10 ppm 이하를 유지하였다(Fig. 10). Table 5와 Fig. 10은 실제 토양 박스 실험에서 활성탄 흡착탑에 주입되는 가스

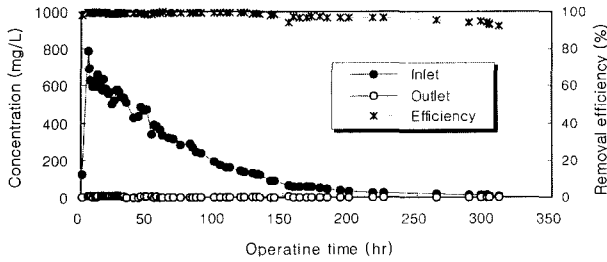


Fig. 8. Removal efficiency of gasoline under inlet concentration in the active carbon sorption tower for the artificial soil SVE experiment.

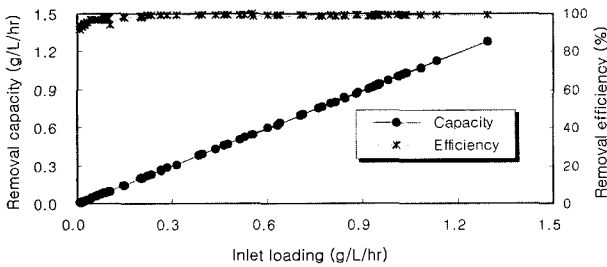


Fig. 9. Removal capacity of gasoline under inlet concentration in the active carbon sorption tower for the artificial soil SVE experiment.

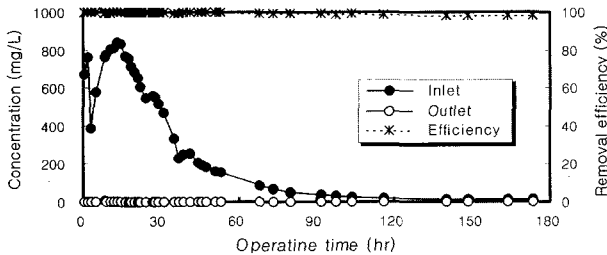


Fig. 10. Removal efficiency of gasoline under inlet concentration in the active carbon sorption tower for the real soil SVE experiment.

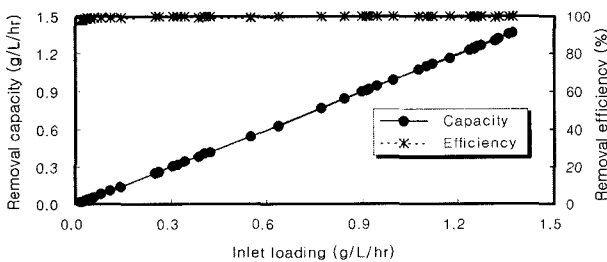


Fig. 11. Removal capacity of gasoline under inlet concentration in the active carbon sorption tower for the real soil SVE experiment.

내 가솔린의 양에 대한 운전 시간별 제거 효율을 보여주는데, 평균 99.5%이상의 높은 정화 효율을 보여준다. Fig. 11은 활성탄 흡착탑에 유입되는 가솔린의 부하량에 대한 제거 용량을 낸 것으로, 제거용량은 주입되는 가솔린

의 농도가 높을수록 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있었으며, 이것은 모의 토양 박스 실험 결과와 유사하다. 대기환경보전법의 VOCs 배출가스 허용기준의 경우 벤젠 화합물의 농도가 50 ppm임을 감안할 때, 본 실험 결과들은 SVE에 의하여 토양 내 가솔린을 효과적으로 제거할 수 있으며, 추출정으로부터 발생하는 가스내 VOCs 를 단순한 활성탄의 흡착 공정만으로도 충분히 제거할 수 있다는 것을 의미한다.

3.2. 바이오필터(Bio-filter)를 이용한 SVE 박스 실험 결과

총 5일 동안 SVE를 이용한 박스 실험을 실시하였으며, 활성탄 흡착탑의 SVE 공정에서 VOCs 제거 효율이 높았던 것을 감안하여, 본 실험에서는 주입 가솔린의 양을 250 g으로 증가시키고, 주입 공기의 속도를 0.2 L/min로 증가하여 박스 실험을 실시하였다. 0.2 L/min (두개의 주입 정에서 각각 0.1 L/min)으로 주입정에 공기를 주입하였으며, 추출된 가스는 모두 바이오필터를 통과한 후 배출하였다. Fig. 12는 염색된 가솔린이 토양 공극 내 존재하는 NAPL 형태와 SVE 공정 후 시간에 따라 공극 내 가솔린이 제거되는 것을 나타낸다. 조립질 사질토층의 하부에 가솔린의 자유상(free phase)이 분포하고 있으며, 토양 공극 내 상당 부분이 가솔린으로 채워져 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 12(a)의 중앙부분과 좌측부분). 그러나 4.3일 동안의 증기추출 후에는 자유상의 가솔린들이 공극 내에서 효과적으로 제거된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 12(c)). 추출정으로부터 배출된 가스의 가솔린 농도와 배출 가스량으로부터 계산된 가솔린 제거량은 약 223 g으로서, 이는 토양 내 주입된 초기 가솔린 양(250 g)의 약 92%이상이 토양증기추출법을 이용하여 5일 이내에 제거되었음을 나타내는 것으로, 가솔린으로 오염된 토양 복원에 SVE의 제거효과가 매우 뛰어나다는 것을 보여준다.

Fig. 13은 SVE에 의하여 추출정 으로부터 배출되는 가스상의 가솔린 농도와 바이오필터를 통과한 후 배출되는 가스상의 가솔린 농도를 공기 주입량에 따라 나타내었다. 약 1.8시간 가스 추출 후(22 L 공기 주입 후) 추출정으로부터 배출되는 가솔린 농도가 최고인 1139 mg/L을 나타내었으며, 2.1일 후에는 배출 가스의 가솔린 농도가 대기환경 보전법의 벤젠화합물 배출기준치인 50 ppm 이하를 유지하였고, 가스추출 4.3일 후의 가솔린 농도는 10 ppm 정도를 유지하였다. 토양증기추출에 의해서 추출정으로부터 배출된 가스가 바이오필터를 통과한 후, 함유하고 있는 가솔린의 양과 바이오필터의 처리 효율을 Table 6에 나타내었다. Table 6과 Fig. 13의 결과로부터 추출정으로 배출된

Table 5. Removal efficiency and capacity of active carbon sorption tower for real soil SVE experiment

Sample No.	Inflow					Outflow				
	Injection time (hr)	Injected gasoline mass (g)	accumulated mass (g)	Inflow gasoline concentration (mg/L)	Inflow gasoline loading (g/L/hr)	Extraction time (hr)	Outflow gasoline concentration (mg/L)	Outflow gasoline loading (g/L/hr)	Removal efficiency (%)	Removal capacity (g/L/hr)
1	0	0.46	0.47	672.62	1.10	0	1.24	0.00	99.8	1.10
2	2	1.74	2.21	762.56	1.25	2	1.38	0.00	99.8	1.25
3	3	1.24	3.45	387.43	0.63	3	0.99	0.00	99.7	0.63
4	5	0.49	4.79	576.10	0.94	5	1.13	0.00	99.8	0.94
5	8	2.86	9.22	763.16	1.25	8	3.10	0.01	99.6	1.24
6	9	0.76	9.98	776.37	1.27	9	1.90	0.00	99.8	1.27
7	11	0.71	12.55	802.45	1.31	11	2.57	0.00	99.7	1.31
8	12	1.72	14.26	810.69	1.33	12	1.55	0.00	99.8	1.32
9	13	2.47	16.74	837.68	1.37	13	1.78	0.00	99.8	1.37
10	15	1.83	18.56	831.02	1.36	15	1.26	0.00	99.8	1.36
11	16	2.11	20.68	769.04	1.26	16	1.25	0.00	99.8	1.26
12	18	2.15	22.82	754.79	1.24	18	1.24	0.00	99.8	1.23
13	18	1.17	23.99	715.86	1.17	18	1.25	0.00	99.8	1.17
14	20	1.47	25.46	684.11	1.12	20	1.30	0.00	99.8	1.12
15	21	1.53	26.99	656.93	1.07	21	1.31	0.00	99.8	1.07
16	22	1.40	28.40	608.12	1.00	22	1.53	0.00	99.7	0.99
17	24	2.05	30.45	549.12	0.90	24	1.35	0.00	99.8	0.90
18	27	0.44	32.84	562.16	0.92	27	1.32	0.00	99.8	0.92
19	28	1.26	34.09	556.21	0.91	28	1.11	0.00	99.8	0.91
20	29	1.27	35.36	515.10	0.84	29	1.04	0.00	99.8	0.84
21	31	1.61	36.98	471.62	0.77	31	0.85	0.00	99.8	0.77
22	35	1.12	39.99	334.55	0.55	35	1.79	0.00	99.5	0.54
23	37	0.73	40.73	235.09	0.38	37	1.02	0.00	99.6	0.38
24	39	0.88	41.60	247.25	0.40	39	0.54	0.00	99.8	0.40
25	41	1.05	42.66	257.10	0.42	41	0.68	0.00	99.7	0.42
26	44	0.44	44.01	207.53	0.34	44	0.46	0.00	99.8	0.34
27	45	0.48	44.50	194.43	0.32	45	0.46	0.00	99.8	0.32
28	47	0.67	45.17	185.89	0.30	47	0.52	0.00	99.7	0.30
29	51	1.12	46.29	159.51	0.26	51	0.42	0.00	99.7	0.26
30	53	0.56	46.85	153.96	0.25	53	0.40	0.00	99.7	0.25
31	68	2.51	50.15	85.58	0.14	68	0.29	0.00	99.7	0.14
32	73	0.67	50.82	65.97	0.11	73	0.28	0.00	99.6	0.11
33	80	0.45	51.53	48.78	0.08	80	0.17	0.00	99.7	0.08
34	92	0.90	52.43	35.13	0.06	92	0.28	0.00	99.2	0.06
35	97	0.19	52.76	28.55	0.05	97	0.28	0.00	99.0	0.05
36	104	0.29	53.05	22.90	0.04	104	0.10	0.00	99.6	0.04
37	116	0.44	53.49	17.73	0.03	116	0.25	0.00	98.6	0.03
38	140	0.29	54.13	13.79	0.02	140	0.23	0.00	98.3	0.02
39	148	0.20	54.33	13.68	0.02	148	0.23	0.00	98.4	0.02
40	164	0.33	54.67	10.57	0.02	164	0.19	0.00	98.2	0.02
41	173	0.17	54.84	9.29	0.02	173	0.14	0.00	98.4	0.01

가스 내 상당량의 가솔린이 바이오필터 반응기를 통과하면서 활성탄에 흡착되거나 미생물 분해에 의하여 제거되었음을 알 수 있었다. Fig. 14는 바이오필터에 주입되는 가스

내 가솔린의 양에 대한 운전 시간별 제거 효율을 보여주는데, 평균 84.1% 안정되고 높은 제거 효율을 나타낸다. 바이오필터에 유입되는 가솔린의 부하량에 대한 제거 용

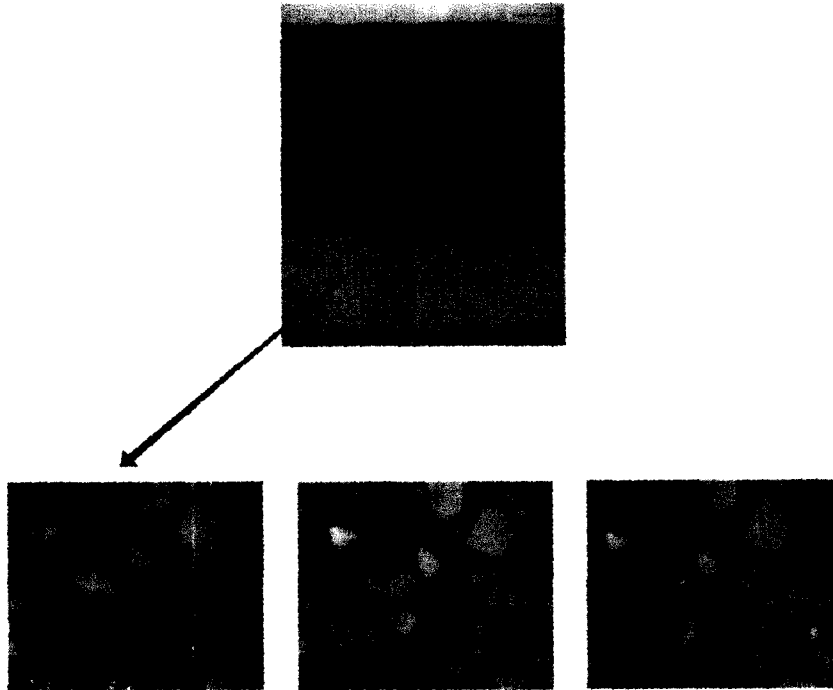


Fig. 12. Photograph of gasoline removal using SVE ((a) Distribution of gasoline before SVE, (b) Distribution of gasoline after 1.5 days of SVE, and (c) Distribution of gasoline 4.3 days of SVE).

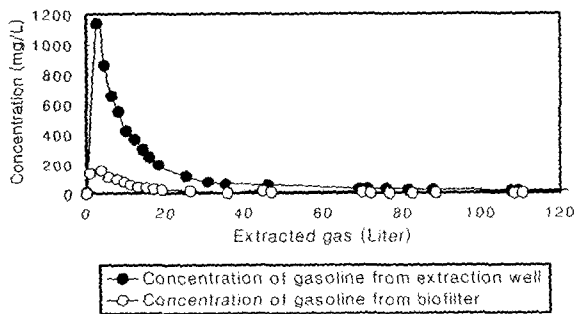


Fig. 13. Result of SVE box experiment with the biofilter.

량은, 가솔린의 유입 부하량이 상당히 높은 경우(10 g/L/hr 이상)를 제외하고는 유입되는 가솔린의 부하량에 대하여 거의 선형적으로 증가하였다(Fig. 15). 이러한 결과는 SVE에서 배출되는 가스의 유입부하량이 현장에서 10 g/L/hr 보다 낮은 것을 고려한다면, 바이오필터를 SVE에서 배출되는 가스의 VOCs 농도가 다양한 환경에서도 광범위하게 적용할 수 있으며, 특히 고농도의 가스상을 처리하는데도 매우 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다. 바이오필터의 성능을 평가하는 인자 중 부하량에 대한 결과를 살펴보면 먼저 최대 유입부하량은 초기에 12.4 g/L/hr로 산정되었으며, 유입부하량은 0.1 g/L/hr까지 감소하였다. 최대제거용량은 최대 유입부하량인 조건에서 나타났으며, 그 값은 10.7 g/L/hr로 산정되었는데, 이 값은 일반적인 바이

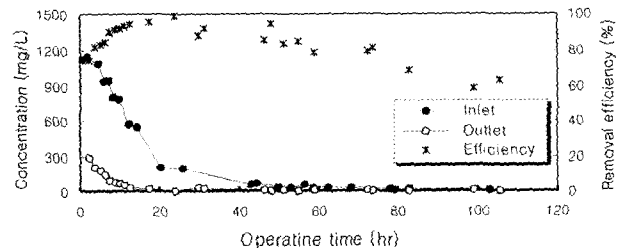


Fig. 14. Removal efficiency of gasoline under inlet concentration in the biofilter.

오필터의 제거용량보다 최소 10배 이상 높은 결과이며, 가솔린에 대한 바이오필터의 제거 성능이 매우 우수하다는 것을 나타내고 있다. 결론적으로 바이오필터 반응기를 이용하여 가솔린 오염 토양으로부터 토양 복원시 발생하는 고농도의 VOCs 성분들을 효과적으로 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

대표적 휘발성 오염물질(VOCs)인 가솔린을 토양으로부터 제거하는 SVE 박스 실험을 실시하여, 토양 내 가솔린의 92% 이상을 수 일 내 제거함으로써, SVE가 토양내 휘발성 오염물질을 제거하는데 매우 효과적인 방법임을 입증하였다. SVE의 추출정으로부터 배출되는 오염된 공

Table 6. Removal efficiency and capacity of biofilter

Sample No.	Inflow					Outflow				
	Injection time (hr)	Injected gasoline mass (g)	accumulated mass (g)	Inflow gasoline concentration (mg/L)	Inflow gasoline loading (g/L/hr)	Extraction time (hr)	Outflow gasoline concentration (mg/L)	Outflow gasoline loading (g/L/hr)	Removal efficiency (%)	Removal capacity (g/L/hr)
1	1	9.4	9	1124	12.3	2	291	3.2	74.1	9.1
2	2	14.6	24	1139	12.4	4	204	2.2	82.1	10.2
3	5	37.5	62	1090	11.9	5	182	2.0	83.3	9.9
4	6	13.6	75	933	10.2	6	145	1.6	84.5	8.6
5	7	14.5	90	945	10.3	7	96	1.0	89.9	9.3
6	8	11.4	101	804	8.8	9	72	0.8	91.1	8.0
7	10	12.1	113	788	8.6	10	65	0.7	91.8	7.9
8	12	18.4	132	578	6.3	11	56	0.6	92.9	5.7
9	14	12.8	144	543	5.9	13	32	0.4	94.4	5.6
10	20	14.7	159	205	2.2	17	23	0.3	95.7	2.0
11	26	14.0	173	201	2.2	24	3	0.0	98.6	2.2
12	43	10.8	184	53	0.6	30	24	0.3	97.9	0.3
13	44	1.0	185	67	0.7	31	16	0.2	92.0	0.6
14	50	2.6	188	39	0.4	46	10	0.1	95.5	0.3
15	53	1.1	189	30	0.3	48	4	0.0	94.1	0.3
16	56	2.5	191	58	0.6	51	6	0.1	93.9	0.6
17	59	0.7	192	25	0.3	55	5	0.1	94.7	0.2
18	62	1.0	193	24	0.3	59	5	0.1	78.8	0.2
19	68	1.7	195	24	0.3	72	5	0.1	79.3	0.2
20	78	1.9	196	16	0.2	74	4	0.0	81.2	0.1
21	79	0.1	197	10	0.1	83	3	0.0	68.4	0.1
22	83	0.6	197	14	0.2	99	6	0.1	58.5	0.1
23	103	2.6	200	11	0.1	106	4	0.0	62.6	0.1

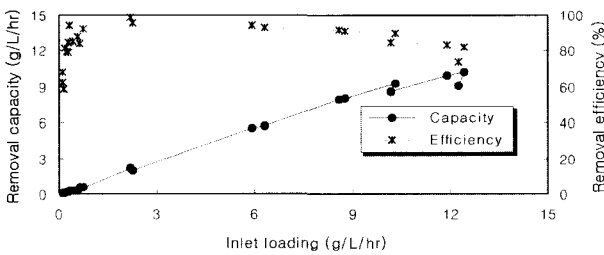


Fig. 15. Removal capacity of gasoline under inlet loading in the biofilter.

기를 정화하는 후처리공정으로 입상활성탄 흡착탑과 바이오 필터를 이용한 제거 실험을 실시하여, SVE에 의해 발생하는 VOCs 에 대한 효율적인 제거 공정을 제시하였다. SVE로부터 배출되는 가스의 후처리 공정으로 활성탄의 흡착탑을 이용한 제거 공정과 바이오필터를 이용한 제거 공정은 가솔린의 유입부하량이 10 g/L/hr보다 낮은 경우, 유입부하량 증가에 따라 제거용량이 선형적으로 증가하여 평균 94% 의 높은 제거효율을 나타냈다. 후처리 후 배출

되는 가스의 농도자체도 SVE에서 배출되는 가스의 농도와 관계없이 매우 낮게 나타남으로서, 실제 오염지역에서 토양증기추출법과 결합 된 하나의 VOCs 제거공정으로서 효과적으로 적용될 수 있음을 검증하였다.

사 사

본 연구는 부경대학교 2003년 기성회 연구비로 지원되었음. 논문을 세심하게 검토하여 주신 익명의 심사자들에게 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 남궁완, 박준석, 이노섭, "바이오필터 기술의 원리와 적용에 관한 고찰", 폐기물자원화, 8, pp. 60-68 (2000).
2. 박상진, "악취 및 VOCs 제거를 위한 G-7 Biofilter의 개발 및 실용화 사례", 첨단환경기술, pp. 10-23 (2001).
3. 빈정인, "Biofilter를 이용한 생물학적 탈취기술에 관한 연구",

- 부경대학교 석사학위논문 (2002).
4. 유영석, "생물학적 악취처리시스템의 설계 및 운전", 건설기술정보, **176**, pp. 16-19 (1998).
 5. 이민희, 토양·지하수오염, 동화기술(2003).
 6. 이민희, 강현민, "토양증기추출 (Soil Vapor Extraction)을 이용한 토양 내 Trichloroethylene (TCE)과 Toluene 정화 실험", 자원환경지질, **35**, pp. 221-227 (2002).
 7. 이해경, 백승훈, "바이오필터의 기본이론 및 이용전망", 첨단환경기술, pp. 68-73 (1999).
 8. 염혜경, "Bacillus sp.을 이용한 하수처리에 있어서 질소제거의 특성", 부경대학교 석사학위논문 (2001).
 9. 한국도로공사, 고속도로주변과 주유소의 토양오염에 관한 연구, pp. 45-165 (1998).
 10. 환경부, 대기환경보전법(법률 제6826호), 시행규칙 별표8호 (2002).
 11. EPA, "Subsurface volatilization and ventilation system (SVVS)", EPA/540/R-94/529, pp. 91 (1995).
 12. EPA, "UVB (Vacuum Vaporization Well) system for treatment of VOC-contaminated soils: Innovative technology evaluation report", EPA/R-99/001, pp. 47 (1999).
 13. Johnson, P. C., Stanely, C. C., Kemblowski, M. W., Byers, D. L., and Colthart, J. D., "A practical approach to the design, operation, and monitoring of in situ soil-venting systems", *Groundwater Monitoring Review*, **10**, pp. 159-178 (1990).
 14. Kaleris, V., and Croise, J., "Estimation of cleanup time for continuous and pulsed soil vapor extraction", *Journal of Hydrology*, **194**, pp. 330-356 (1997).
 15. Kirtland, B. C., and Aelion, C. M., "Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/soil vapor extraction: impact of continuous or pulsed operation", *Journal of Contaminant Hydrology*, **41**, pp. 367-383 (2000).
 16. LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., and Evans, J. C., *Hazardous waste management*, McGraw-Hill, Inc. (2000).
 17. Swanson, W. J., and Loehr, R. C., "Biofiltration: Fundamentals, Design and Operations principles, and Applications", *J. of Envir. Eng.*, **123**, pp. 538-546 (1997).
 18. Webster, T. S., and Devinny, J. S., *Biofiltration*, by John Wiley and Sons, Inc., pp. 653-664 (1998).