한국토양환경학회지 Vol.5, No.1 13~23, 2000
Journal of KoSES Vol.5, No.1 13~23, 2000

原著

토양증기추출법에 의한 휘발유 오염토양의 현장복원 연구

김 재 덕 · 김 영 래 · 황 경 엽 · 이 성 철*

*한국과학기술연구원 환경복원연구센터, 한양대학교 화학공학과**

A Field Study on Remediation of Gasoline Contaminated Site by Soil Vapor Extraction

Jae-Duck Kim, Young-Lae Kim, Kyung-Yub Hwang, Sung-Chul Yi*

Korea Institute of Science and Technology
*Hanyang University**

ABSTRACT

The effects of operating condition of soil vapor extraction system and the characteristics of site on the remediation of oil contaminated soil were investigated. Thorough investigation showed that the site was contaminated with gasoline leaked from underground storage tank and the maximum concentration of BTEX and TPH were 1,081 ppm and 5,548 ppm respectively. The leaked gasoline were diffused to 6m deep and the area and volume of the polluted soil were assumed to 170㎡ and 1,000㎥ respectively. The site were consisted of three different vertitical layers, the top reclaimed sandy soil between the earth surface and 3~4m deep, middle silty sand between 3~4m and 6m deep, and the bottom bedrock below the 6m deep. The air pemeability of soil was measured to $1.058-1.077\times10^{-6}$㎠ by vacuum pump tests. The groundwater which level was 3~4m deep was observed in some areas of this site. The soil vapor extraction system which had 7.5 HP vacuum pump and 8 extraction wells was constructed in this site and operated at 8 hrs/day for 100 days. The BTEX was removed with above 90% efficiency

where no groundwater and silty sand were observed. On the contrary, the efficiency of BTEX and TPH were dramatically decreased where groundwater and silty sand were observed. The flow rate of soil air induced by soil vapor extraction system was reduced in deeper soil.

Key words : soil vapor extraction, SVE, gasoline, air permeability, remediation efficiency

요 약 문

본 연구에서는 유류가 오염된 토양을 복원하기 위해 실제 현장의 토양성상과 오염현황을 조사하고 이 자료를 바탕으로 in situ복원기술인 토양증기추출법을 적용할 때 복원효율에 영향을 미치는 토양증기추출 장치의 운전조건과 토양성상의 영향을 검토하였다. 본 부지는 지하저장고에서 누출된 휘발유가 오염되어 있었고 그 농도는 BTEX가 최대 1,081ppm, TPH가 최대 5,548ppm이 포함되어 있었으며, 장기간에 걸쳐 지하 6m깊이까지 확산되어 오염물의 분포 면적은 170㎡, 오염토양의 총 부피는 약 1,000㎥으로 추산되었다. 오염부지의 토양은 지하 3~4m 까지는 사질매립토이고 지하 4~6m에서는 불균질한 점토질이 섞인 미사토였으며 토양의 공기투수계수는 $1.058-1.077\times10^{-6}$㎠이었다. 이 부지내 일부지역에 지하수 흐름이 있으며 지하수위는 지하 약 3~4m부터 존재하였고 지하6m이하에는 암반이 존재하였다. 이 부지에 깊이 6m인 8개의 추출정과 7.5마력 용량의 진공펌프가 포함된 토양증기추출 장치를 설치하여 하루 8시간씩 100일간 운전한 결과 지하수가 존재하지 않는 사질토양에 있었던 BTEX는 90%이상의 효율로 제거하였으나 지하수대가 존재하는 지역에서는 BTEX와 TPH의 제거효율이 대폭 낮아졌다. 또한 토양증기장치에 의해 유도된 토양내 공기흐름은 토양깊이가 깊어질수록 공기흐름량은 감소하여 복원효율이 떨어졌다.

주제어 : 토양증기추출, 휘발유, 공기투수계수, 복원효율

1. 서 론

우리 나라는 1970년대 이후 급속한 경제적 발전과 이에 따른 산업화로 유류 소비가 비약적으로 증가하였고 그에 따른 저장 시설의 증가 및 시설의 노후화로 인해 유류에 의한 토양오염 사례가 적지 않은 실정이다. 이 유류가 오염된 토양의 복원기술로는 미생물을 이용한 생물학적 처리방법, 세척수의 기계적 마찰력을 이용한 토양세척법, 온도를 높여 오염물을 토양과 분리하는 열탈착법, 화학적 변환에 의해 오염물의 위해도를 감소시키는 화학적 처리방법 및 토양사이의 공기를 계외로 배출할 때 오염물질을 함께 배출시키는 토양증기추출법 등이 있다.

이중 실제 유류 오염토양의 정화를 위한 복원기술의 선택은 오염물의 종류와 농도, 오염분포, 토양 및 지하수특성 등의 기초자료를 토대로 복원효율, 처리비용 및 기간, 오염부지의 사용현황 등을

종합적으로 감안하여 결정된다[1].

특히 유류중 휘발유가 오염된 토양의 경우 일반적으로 가장 먼저 적용을 검토하는 기술이 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction, SVE)이다. 이 기술은 토양사이의 공기를 대기압보다 낮은 압력분위기로 유지한 후 계외로 배출시킬 때 토양에 함유된 오염물질이 기화되어 공기와 함께 동반하는 원리를 이용한 것이다. 따라서 SVE는 토양을 있는 그대로 복원하는 in situ 기술이며 사용되는 설비와 장비가 비교적 간단하고 파일럿 규모는 물론 대규모의 오염토양도 복원할 수 있어, 휘발유와 같이 휘발성 물질로 오염된 토양을 복원하는 기술중에서 경제성이 있는 기술의 하나로 평가되고 있다[2].

그러나 이 SVE기술을 적용하기 위해서는 현장의 정밀조사를 통해 오염토양의 공기투과도, 지하수 흐름 및 높이, 오염분포에 관한 정보를 미리 갖고 현장 조건에 맞는 시스템 설계 후에 복원 작업에 들어가야 한다[1), 3), 4)]. 또한 이러한 과정을 거쳐 복원을 시작했더라도 복원과정에서 지하수흐름 및 높이의 변화, 토양공기의 channelling 등에 의해 복원효율이 기대에 미치지 않을 경우가 많으며 이 때는 수시로 SVE장치의 운전조건을 변화시키거나 Bioventing, 토양의 가열, 공기의 주입, Cover의 사용 등을 병행하는 것이 필요하다.

이 SVE에 의한 휘발유 오염토양의 복원사례가 외국에는 많이 있지만[5] 이 기술을 국내에 바로 적용한 예는 많지 않으며, 국내토양의 성상과 지하수 흐름 및 높이가 외국과 전혀 다른 현실을 감안할 때 법적 규제이하로의 복원이 이루어지지 않을 위험도 있으며 이 위험은 SVE의 실제 현장적용 시험을 통해서 줄일 수 있다.

본 연구에서는 실제 휘발유가 오염된 부지의 오염토양 현황조사 및 예비 현장적용 시험을 실시하고 이 자료를 토대로 SVE시스템을 구성하여 현장에 적용하였을 때 오염토양의 복원효율과 이 효율에 영향을 미치는 요인들을 검토하였다.

2. 부 지 조 사

2.1 현장개황

연구 현장은 00시에 위치한 00주유소로 대지 550m²의 면적에 북동 방향으로 경사가 있는 주거지역에 위치하고 있으며, 지하유류 저장탱크(UST)는 총 106,000 l (휘발유 40,000 l, 등유 40,000 l, 경유 26,000 l)와 복식 5기 및 단식 1기의 주유기를 설치, 운영하고 있었다. 토양오염에 관한 법적 조사시 BTEX가 법적 기준치 이상으로 평가되어 토양오염대책지역으로 분류되었던 곳이다.

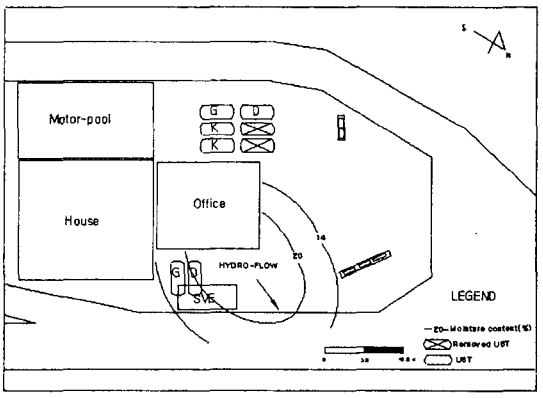

Fig. 1. Remediation site by SVE.

2.2 토양의 성상

오염 토양의 물리적 성상을 검토하기 위하여 부지의 4개의 지점을 선정하여 깊이별로 토양시료를 채취한 후 토양의 종류, 수분함량, 용적밀도, 공극율 등을 측정하였다.

부지의 지하 3~4m 지점의 토양은 사질토로 그 아래의 4~6m의 토양과는 전혀 다른 토양으로 이루어져 있으며 이는 주유소의 건축시 경사지를 평탄하게 하기 위해 사용된 인위적인 매립토로 판단

된다. 지하 3~4m에서 6m 깊이사이는 지하탱크 및 건물 인접 지역의 토양이 불균일한 점토질이 섞인 미사토로 이루어졌으며 부지 외각의 주유대 쪽은 사질성 매립토와 사질성 점토층으로 구성되어 있었으며, 지하 6m 이상의 토양에서는 암반층이 존재하였다. 지하 비포화층 토양의 수분함량은 7~23%이었고 용적밀도는 1.19−1.71 g/㎖이었으며 토양 공극률은 외각 지역인 주유대 쪽에서 30~50%로 대체적으로 높게 나타났으나 사무실 근처와 지하수 흐름대의 아래쪽에서는 15~20%로 공극률이 크게 낮았다.

오염 부지의 지반은 서쪽에서 동쪽 방향으로 경사를 이루고 있었으며 지하수의 흐름 또한 지형구조와 비슷하게 남서방향에서 북동방향으로 흐르고 있었으며 지하수 깊이는 지하 3~4m이었고 부지내 지하수 분포층에서 토양의 수력전도도(Hydraulic conductivity)는 $5\times10^{-6}-10^{-4}$cm/s 이었다.

2.3 오염물질의 종류 및 분포

부지에서 오염물의 종류와 확산분포를 알기 위해 토양시료를 채취하여 토양오염 공정시험방법[6]에 의해 BTEX와 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)을 측정하였다. 측정결과 오염물질은 BTEX의 함유율이 높은 휘발유가 주요 오염 성분인 것으로 판명되었으며 그 결과를 Fig.2에 나타내었다. 주유소 부지내 오염농도는 BTEX 총량 기준으로 법적 대책기준치 200ppm이상을 초과하여 나타났으며, 최대 1,081ppm(BTEX), 5,548ppm(TPH)으로 검출되었다. 특히, 사무실 근처의 지하 3m 부근에서 가장 높게 오염되었으며, 6m지점에서도 BTEX의 농도가 높게 검출되었다. 이 근처에서 오염 농도가 높게 나타난 것은 이 지역의 토양밀도가 높고 공극률이 낮아 오염물질이 다른 곳으로 흐르지 않고 많이 잔류된 때문으로 판단된다.

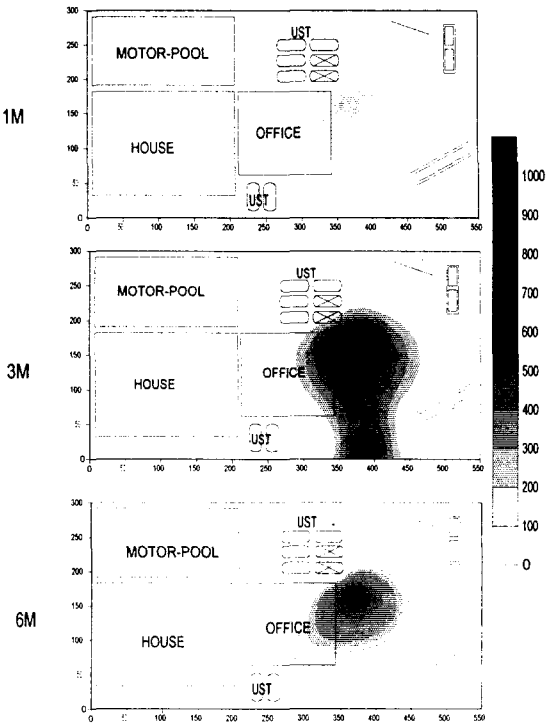

Fig. 2. Distribution of BTEX in soil.

오염물의 이동은 부지 위쪽의 UST에서 누출되어 동쪽에서 서쪽 방향인 사무실 아래쪽으로의 일정한 방향으로 진행되고 있었으며 부지중 비교적 제한된 범위가 오염되어 있었다. 분석 결과를 통한 오염 면적은 약 170㎡ 정도이며, 오염 평균 깊이 6m 기준으로 부지 내의 오염토양 총 부피는 약 1,000㎥ 정도로 평가된다.

3. 재료 및 방법

3.1 SVE장치의 구성

SVE에 의한 오염토양 복원시스템의 공정도는 Fig.3에 나타내었으며 크게 지상구조물과 지하구

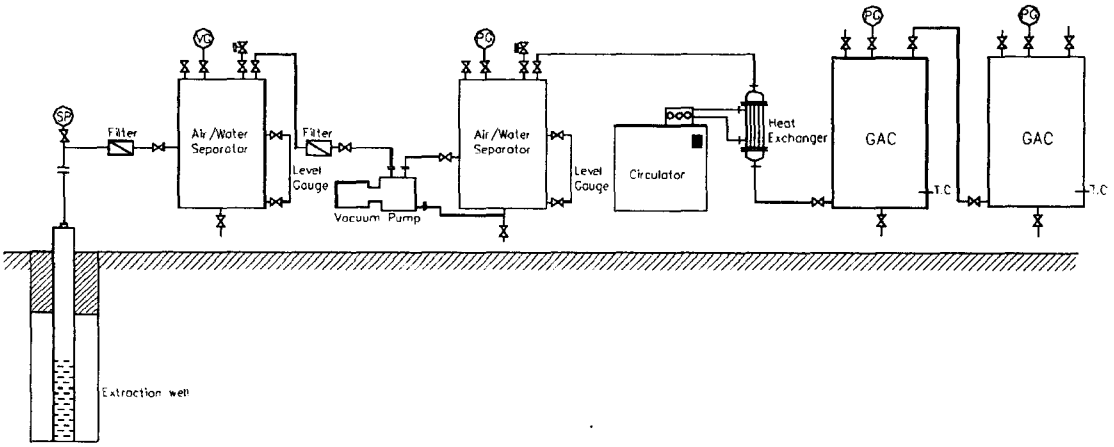

Fig. 3. Process flow diagram of soil vapor extraction equipment.

조물로 구분된다. 지상구조물로는 여러 추출정 중에서 운전하는 추출정을 선택하는 선택밸브와 토양공기와 함께 유입되는 고형불순물을 제거하는 필터, 토양 속에 진공압을 적용하여 압력차에 의해 공기의 흐름을 유도하는 진공펌프, 공기와 물을 분리하는 기액분리기, 흡입공기의 온도를 낮추는 냉각기 및 유류를 흡착하는 흡착탑 등으로 구성되어 있다.

진공펌프는 한창진공(주)제품의 수봉식 펌프(모델 : HWVP-1-400)로 전기사용량은 7.5마력, 최대진공도 6.7×10^{3}Pa, 최대토출 유량은 4,000 *l* /min이다. 기액분리기는 직경 400 mm, 높이 1000 mm의 PVC제 Column을 사용하였고 상부에 수분의 entrainment를 방지하기 위하여 1 mm mesh의 스텐레스 Demister가 부착되어 있으며 진공펌프의 앞과 뒤에 2기를 설치하였다. 진공펌프의 가동에 의해 높아진 배출가스의 온도를 낮추기 위한 냉각기는 Shell and Tube형 열교환기로 열교환면적이 3 m²이고 스텐레스로 제작하였으며 냉각기의 Cooling Medium은 Refrigerated Circulator(JeioTech Model RBC30)에서 공급되

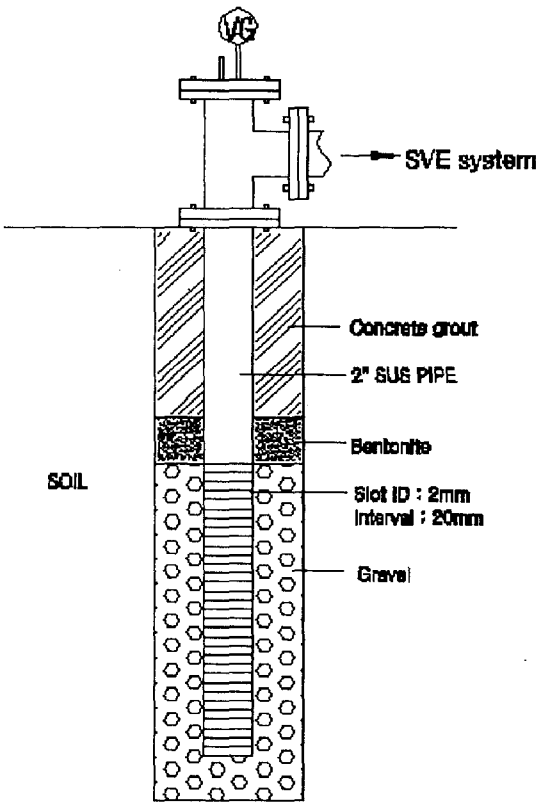

Fig. 4. Details of extraction well.

는 약 5℃의 물을 사용하였다. 흡착탑은 직경 500 mm, 높이 1300 mm의 PVC제 Column에 흡착제로 유니온카본(주)제 입상활성탄을 충진하여 제작하였으며 2기를 연속으로 설치하였다. 이 지상구조물들은 운전시 운전조건의 변화에 대비하여 이동이 편리하도록 바퀴가 달린 구조물내에 설치하였다.

지하구조물로는 지하 토양공기의 흡입을 용이하게 하기 위한 추출정(Extraction Well)이 있으며 자세한 구조는 Fig.4에 나타내었다. 추출정에 사용된 Pipe는 직경 50 mm, 길이 6m의 스텐레스관을 사용하였으며 Pipe의 하부 3m에 360° 방향, 20mm 간격으로 폭 2mm의 slot을 제작하였다. 또한, 추출정 내부에는 SVE의 운전시 외부에서의 공기 주입과 추출정내 기체시료의 채취를 용이하게 병행할 수 있도록 직경 9.5mm Tube를 수직방향으로 설치하였다.

이 추출정은 Auger Drill을 사용하여 오염부지에 직경 300 mm의 well을 먼저 보링한 다음 추출 Pipe를 넣은후 slot외부에 공기의 흐름을 원활히 함과 동시에 토양입자에 의한 slot의 막힘을 방지하기 위해 자갈층을 형성하였으며 자갈층 상부는 Bentonite시멘트와 콘크리트로 공기의 흐름을 방지하였다. 이 추출정의 수와 간격은 오염현황 정밀조사와 예비시험결과를 토대로 산정하였으며 본 연구에서는 Fig.5에서와 같이 5~8m 간격으로 8개의 추출정을 설치하였다.

이밖에도 지상구조물과 지하구조물을 연결하는 배관으로는 추출정에 사용된 Pipe와 같은 직경 50 mm의 Pipe를 사용하여 배관에서의 압력손실을 줄였고 각 지상구조물과 각 추출정의 온도는 백금 RTD type의 Thermister와 연결된 Recorder(Yokogawa Model 4156, Accuracy : ±0.1℃)로 측정하였으며 진공도는 Vacuum

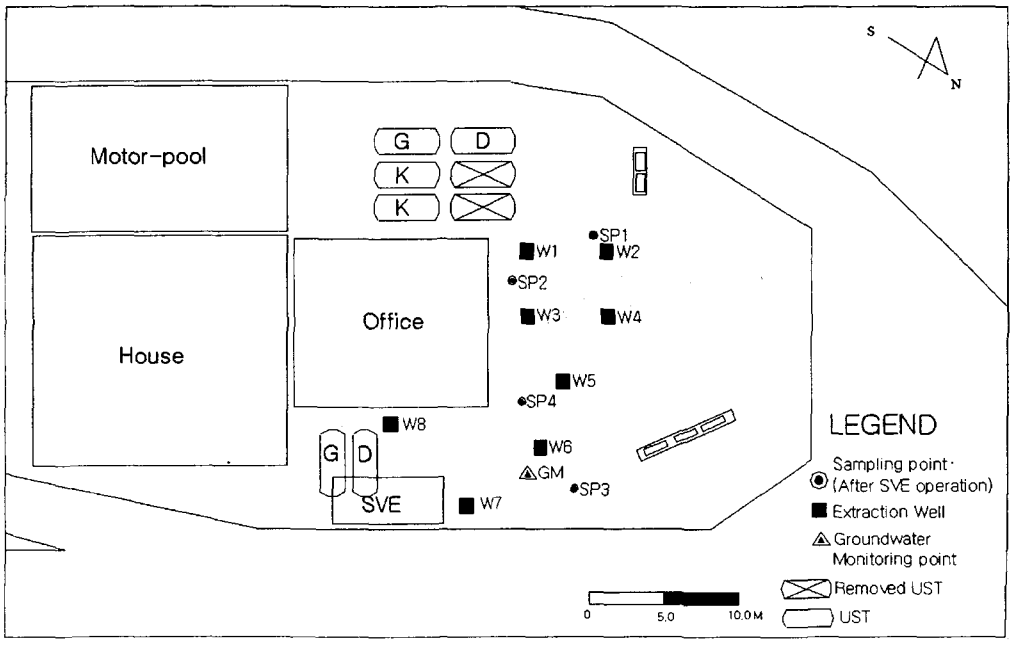

Fig. 5. Extraction well location and sampling point.

Transducer와 연결된 Pressure Indicator (Instek Model SM-20, Accuracy : ± 0.01 bar)와 진공Gauge(Accuracy : 0.02 bar)로 측정하였다. 또한 진공펌프에 의해 토출되는 공기유량은 Rotameter형의 유량계로 측정하였다.

3.2 SVE 시스템 운전

SVE 장치의 운전은 하루 8시간씩 100일 동안 운전하였으며, 운전기간동안 추출되는 기체의 유량과 농도를 측정하였다. 추출기체 시료는 추출정과 지상구조물사이의 Sample port에서 Gas sampler(GilAir5, Gilian, Inc.)를 이용하여 활성탄 칼럼(SKC, Cat No. 226-01)에 흡착시켜 채취하였으며 대기오염공정시험방법[7]에 의하여 조성을 분석하였다.

SVE 장치를 가동할 때 추출되는 기체에 지하수가 동반하여 기액분리기에서 축적되므로 일정량이 축적되면 수시로 장치외부로 배출시켰다.

SVE장치를 100일동안 운전후 토양의 복원효율을 판단하기 위해 토양의 시료를 채취하여 조성을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 공기투수계수

설치된 추출정의 하나에 진공을 걸고 주위 추출정의 압력을 측정하는 Pump test의 결과에 기초하여 다음 식[4]에 의해 비포화층 토양의 공기투수계수를 측정하였다.

$$K = \frac{Q\mu \ln(Rw/Ri)}{\pi HPw[1-(Patm/Pw)^2]} \quad (1)$$

여기서 K는 공기투수계수(㎟), Q는 공기유량(㎥/hr), μ는 공기점도(cp), Pw는 추출정의 압력(bar), Patm은 대기압(bar), Ri는 추출정 Pipe의 직경(m), Ri는 영향반경(m)이다.

지하 3m에서 공기투수계수의 값은 1.058×10^{-6} ㎟이며, 지하 6m에서는 $1.077\times$ ㎟이었다. 일반적으로 공기투수계수가 10^{-7}㎟ 이상이고[8], 비포화층 토양의 수분함량이 30%이하[9]이면 SVE의 적용이 가능하다고 보고 있으므로 본 부지도 SVE기술의 적용이 가능할 것으로 판단하였다.

4.2 공기추출유량

SVE장치의 운전 초기 진공압력은 0.85 bar로 유지하다가 이후 0.77 bar에서 운전하였으며 운전시작 40일 이후의 진공압력은 0.80 bar로 운전하였다. 또한 추출되는 기체의 유량은 Fig.6에 나타난 것과 같이 운전 초기 진공압력이 높아짐에 따라 증가되는 추세였지만 운전시작 40일 이후 진공압력의 감소와 같이 추출유량도 감소하였다. 이처럼 진공압력과 추출유량이 감소한 것은 SVE장치의 운전시 지하수위가 상승하여 토양기체의 이류(Advection)속도를 감소시켜 전체적인 공기의 추출유량이 감소한 것으로 판단된다.

이와 같은 지하수위의 상승현상은 SVE시스템의 가동시 일반적으로 발생하므로 SVE에 의한 오염토양 복원효율을 높이기 위해서는 지하수 추출정을 별도로 설치하여 지하수를 지표로 배출시키거나[3] 공기와 지하수를 동시에 추출하는 Dual Extraction법[4] 등에 의해 지하수위 상승억지대책을 함께 강구하는 것이 바람직하다.

4.3 추출공기 조성

SVE장치의 운전중 추출된 공기중 함유된 BTEX 각 성분의 조성을 Fig.7에 나타내었다. SVE장치의 운전초기에는 Xylene의 조성이 높았다가 운전시작 8일경에는 Toluene의 조성이 더 높았으며 운전시작 20일경이후부터 운전종료시까지

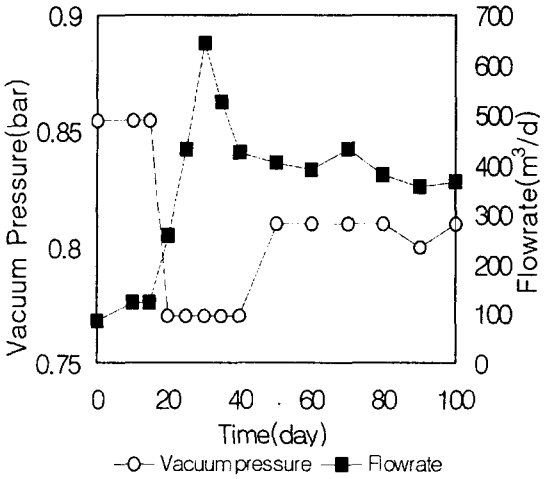

Fig. 6. Vacuum pressure and extraction flow rate of air during SVE operation.

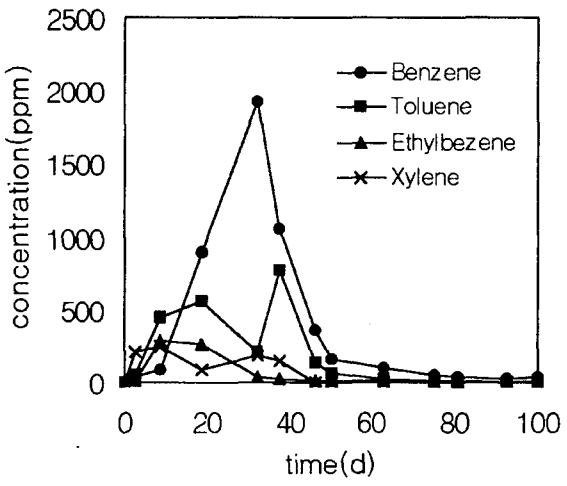

Fig. 7. BTEX composition of extracted air.

는 Benzene의 농도가 가장 높았고 다음으로 농도가 높은 물질은 Toluene이었다. 이것은 SVE장치의 운전초기에는 추출정주위의 토양공기내 오염물조성이 크게 변하지 않고 그대로 추출되다가 시간이 경과함에 따라 추출정에서 가까이 존재했던 오염물질이 서서히 줄어드는 대신에 추출정에서 상대적으로 멀리 떨어져 있는 오염물질중에서 휘발성이 큰 순서인 Benzene과 Toluene이 다른 물질보다 먼저 기화되어 추출되기 때문으로 판단된다.

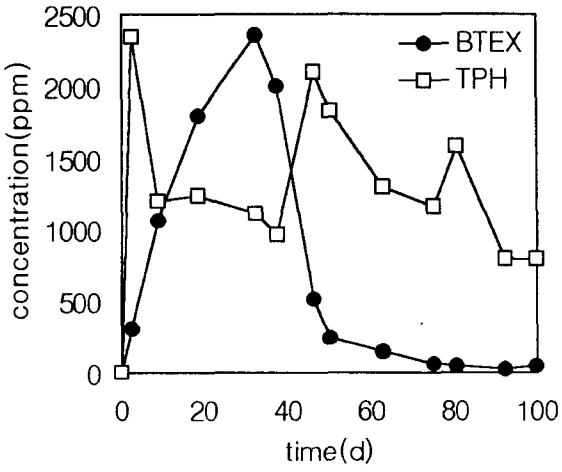

Fig. 8. BTEX, TPH concentration of extracted air.

SVE장치의 운전중 추출된 공기중 함유된 BTEX함량과 TPH를 Fig.8에 나타내었다. 추출공기중 BTEX함량은 운전시작 30일경 최고 2,351ppm까지 나타났다가 운전시작 40일 이후부터는 급격히 떨어져 운전종료시 까지는 약 100ppm이내로 감소하였다. TPH는 최고 2337ppm에서 792ppm까지 감소하였지만 BTEX보다는 감소되는 경향이 크게 완만하였다. 이와 같은 실험결과로부터 휘발성이 상대적으로 높은 BTEX는 운전시작부터 50일경까지 대부분이 제거되었지만 고비점 물질인 TPH는 100일 가동후에도 SVE장치를 계속적으로 가동한다면 토양중 TPH를 줄일 수 있음을 보여주고 있다.

SVE장치의 운전결과 얻은 공기추출유량과 공기중 휘발유의 농도를 토대로 계산하여 얻은 휘발유 제거속도를 Fig.9에 나타내었다. 휘발성 오염물질

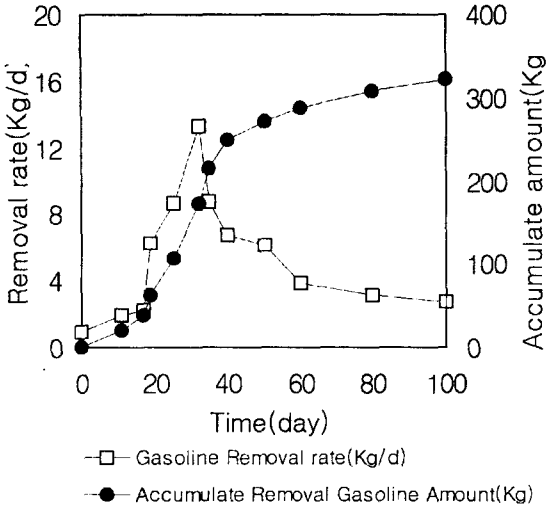

Fig. 9. Gasoline removal rate and accumulated removal amounts.

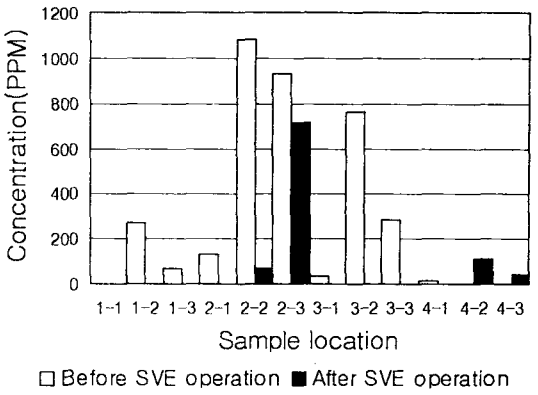

Fig. 10. BTEX concentration of soil.

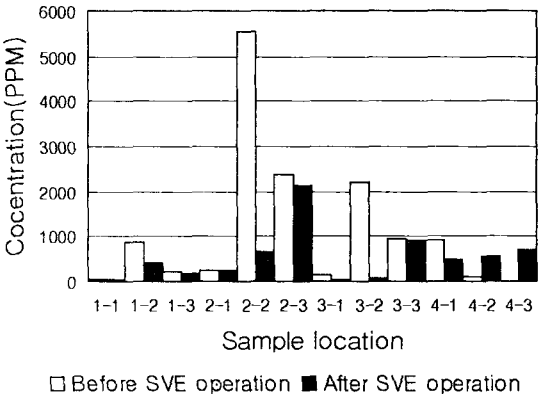

Fig. 11. TPH concentration of soil.

제거 속도는 SVE장치의 운전시작 30일경 최고 13.3 kg/d였으나 그 이후 제거속도는 점점 감소하여 운전시작 100일경에는 약 3.6 kg/d로 감소하였다. 이와 같은 현상은 대부분의 SVE장치의 운전결과와 유사하며 복원효율이 현격하게 떨어지는 이 시점부터 운전조건에 변화를 주어 효율을 높이려는 노력이 가미되어야 한다. 운전조건에 변화를 주는 방법[10]으로는 일정기간동안 SVE장치를 가동 또는 정지하는 pulsation운전을 하던가, 외부에서 공기를 주입하거나, 토양을 가열하여 오염물질의 휘발성을 높이거나, 생물학적 처리를 병행하는 등의 방법이 있다.

4.4 복원효율 평가

SVE장치를 100일동안 운전한 후 토양의 복원효율을 평가하기 위하여 지하 1m, 3m, 6m 등 깊이별로 토양시료를 채취하여 BTEX함량과 TPH의 비교하였으며 그 결과를 Fig.10, Fig.11, Fig.12에 나타내었다. 이 그림에서 시료위치를 나타내는 번호중 앞의 숫자는 Fig.5에 도시한 시료채취위치를 나타내고 뒤의 숫자는 1은 지하 1m, 2는 지하 3m, 3은 지하6m의 토양시료를 나타낸 것이다.

시료채취지점 1(SP1)은 SVE장치의 가동전 지하 3m에서의 BTEX 농도가 273ppm이었으나 가동후 거의 모든 BTEX가 제거되었고 TPH는 886 ppm에서 421 ppm으로 약 50%이상 제거율을 보였다. 지하 6m지점에서는 SVE장치의 가동전 존재하던 70 ppm의 BTEX가 거의 모두 제거되었으

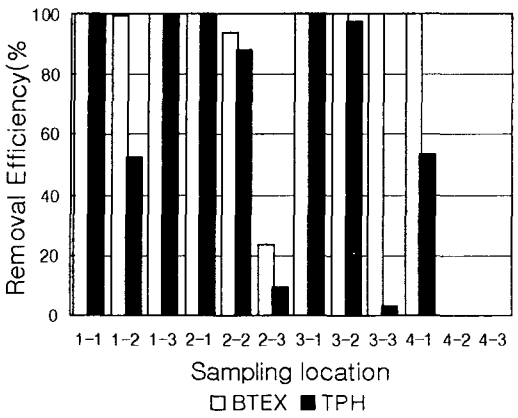

Fig. 12. Removal efficiencies of BTEX and TPH.

나 TPH는 가동전후 큰 차이를 나타내지 않았다. 이 시료채취지점1의 위치는 2번 추출정(W2)에서 1.5m의 거리에 떨어져 있고 지하 6m까지는 지하수가 흐르지 않고 점토질의 토양이 없는 지역이다. 이와 같은 결과로부터 지하수가 존재하지 않고 공기투과도가 높은 토양에서는 추출정을 설치한 깊이까지 높은 효율로 BTEX를 제거할 수 있지만 TPH의 경우 토양깊이가 깊어질수록 제거효율이 급격하게 떨어짐을 확인하였다. 이것은 SVE장치의 진공펌프로 추출정의 공기를 추출할 때 토양사이에서 발생하는 공기흐름이 추출정의 깊이방향에 따라 유량이 크게 달라지는 channeling이 발생하는 것을 의미한다.

시료채취지점 3(SP3)은 6번추출정(W6)과 3.0m 거리에 위치한 지점으로 SVE장치를 가동하기 전 BTEX농도가 지하 1m지점에서 36 ppm, 지하 3m에서 760 ppm, 지하 6m지점에서 282 ppm이었으나 가동후 거의 모든 BTEX가 제거되었다. TPH는 지하 1m지점에서 152 ppm, 지하 3m지점에서 2183 ppm, 지하 6m지점에서 953 ppm이었던 것이 지하 1m, 3m지점은 60 ppm이하로 대폭 줄어들었으나 지하 6m지점에서는 거의 변화가 없었으며, 이 결과는 시료채취지점 1의 복원결과와 거의 같은 경향을 보여주었다.

시료채취지점 2(SP2)는 1번추출정(W3)에서 2.0m 거리에 있는 지점으로 지하수위가 지하 4m이고 점토질의 토양함유율이 높은 지역이다. 이 지역의 토양은 SVE장치를 가동하기 전 BTEX농도가 지하 1m지점에서 130 ppm, 지하 3m에서 1,081 ppm, 지하 6m지점에서 932 ppm으로 매우 높았고 TPH도 지하 1m지점에서 2550 ppm, 지하 3m에서 5,548 ppm, 지하 6m지점에서 2,138 ppm으로 오염농도가 가장 높은 지역이었다. SVE장치를 가동한 후 지하 1m지점에서의 BTEX는 거의 모두 제거되었고 지하 3m지점의 BTEX는 69ppm으로 상당량이 제거되었지만 지하 6m지점의 BTEX는 712 ppm으로 제거율이 별로 높지 않았고 이 지점에서 TPH의 제거율은 BTEX의 제거율보다도 더 낮았다. 즉 대수층인 지하 4m 이하의 지역에서는 SVE장치에 의해 토양층내 공기의 원활한 흐름을 유도하기 어렵기 때문에 휘발성이 높은 BTEX도 제거율이 낮았으며 휘발성이 낮은 TPH의 제거율은 더욱 낮았다.

시료채취지점 4(SP4)는 5번추출정(W5)에서 2.0m 떨어진 지점으로 지하 1m지점에서 BTEX와 TPH 모두 감소하였으나 지하 3m와 지하6m의 토양에서는 모두 오히려 증가하였다. 이것은 지하수가 없는 지하 1m지점에서는 SVE장치에 의해 복원이 일부 이루어졌지만 지하수가 있는 지하 3m와 지하6m에서는 복원이 거의 이루어지지 않고 오히려 휘발유NAPL이 지하수와 함께 이동하여 농도가 높아진 것으로 여겨진다.

결론적으로 휘발유가 오염된 이 부지에서 SVE장치를 100일동안 가동하여 총 320 kg의 휘발유를 제거하였으며, 이 방법에 의해 부지내 토양의 BTEX와 TPH 함량를 현재 시행중인 토양환경보전법의 규제치이하로 복원된 면적이 전체 오염된 면적의 약 70%에 달하였다. 이 규제치가 넘는 토

양은 이 SVE장치를 같은 방법으로 계속 가동하여도 높은 복원효율을 기대하기 어려우며 대신에 외부에서 공기를 주입하거나, 토양을 가열하여 오염물질의 휘발성을 높이거나, 생물학적 처리를 병행하는 등 운전방법에 큰 변화를 주어 운전하거나 오염토양을 비오염토양으로 대토하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 결 론

BTEX가 최대 1,081ppm, TPH가 최대 5,548ppm이 함유되어 있고 오염물이 지하 6m깊이까지 확산되어 있으며 사질토와 미사토로 이루어진 휘발유 오염부지(오염물의 분포 면적은 170m², 오염토양의 총 부피는 약 1,000m³)에서 토양증기추출장치를 설치하여 하루 8시간씩 100일간 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SVE장치에 의해 추출되는 공기유량은 토양의 공기투과도가 높고 지하수가 없는 지역일수록 증가한다.
2) SVE장치의 운전초기에는 추출된 공기에 함유된 BTEX중 Xylene의 함량이 높으나 계속 운전하면 Toluene함량이 높다가 최종적으로는 Benzene의 함량이 높아진다.
3) SVE장치에 의한 BTEX추출속도는 운전초기에 높다가 시간이 지남에 따라 급격하게 감소하나 TPH추출속도는 보다 완만하게 감소한다.
4) SVE장치에 의해 유도된 토양내 공기흐름은 깊이에 따라 channeling이 발생하며 깊이가 깊어질수록 공기흐름량은 감소하여 복원효율이 크게 떨어진다.
5) SVE장치에 의한 휘발유 오염토양의 복원시 복원효율에 가장 큰 영향을 미치는 것은 토양의 공기투과도와 토양내 지하수의 존재여부이다. 점토질의 토양과 지하수가 존재하는 지역은 SVE의 복원효율이 급격하게 떨어지므로 복원기술로 SVE방법의 적용이 바람직하지 않다.

참 고 문 헌

1. Anderson, William C., " Innovative Site Remediation Technology : Vacuum Vapor Extraction", American Academy of Environment Engineers, 8, pp157-158(1994)
2. 황경엽, 김재덕, "유류오염지역 복원기술", 한국과학기술연구원 환경복원기술자료집(Ⅰ), pp138-165(1997)
3. Pedersen, Tom A. and Curtis, James T., "Soil Vapor Extraction Technology" , Pollution Technology Review, pp15-128(1991)
4. US ARMY, " Soil Vapor Extraction and Bioventing", EM1110-1-4001, Department of The Army U.S., pp75-81(1995)
5. US EPA, "Remediation Case Studies : Soil Vapor Extractions", EPA Report, EPA/542/R-95/004, March(1995)
6. 환경부, "토양오염공정시험방법"(1998)
7. 환경부, "대기오염공정시험방법"(1996)
8. Fam, Sami, "Vapor Extraction and Bioventing", in "In Situ Treatment Technology" edited by Nyer, Evan K., Lewis Publishers, pp112-120(1996)
9. NATO, "Demonstration of Remedial Action Technologies for Contaminated Land and Groundwater", pp32-52(1993)
10. US EPA, "Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction", EPA Report, EPA/542/R-97/003, Sept.(1997)