토양내 NAPL 제거를 위한 스팀주입 실험

이상일, 장연수, ○김선기

1. 서론

최근 지속적인 경제발전과 도시인구 집중으로 토양 및 지하수 오염이 심화되고 있다. 이중 특히 물과 섞이지 않는 유기용매나 유류제품(NAPL)으로 인한 오염은 쓰레기 매립장, 지하저장탱크, 사고로 인한 기름유출 등 여러 경로로 발생하고 있다. 물에 극히 미량만이 녹는 NAPL의 특성 때문에 보편적으로 사용되는 양수정화법(Pump-and-Treat)으로는 그 제거에 오랜 시간과 과다한 비용이 소요된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근 생화학적 처리(Biochemical Remediation), 흙세척(Soil Washing), 진공추출(Vacuum Extraction), 전기삼투(Electro-Osmosis), 차폐저장법(Containment), 열적 처리법(Thermal Treatment) 등 다양한 대안이 개발되고 있으며, 이들은 각각 장·단점을 가지고 있다(Grubb and Sitar, 1994; 환경부, 1995, 1996).

본 논문에서는 열적 처리법의 하나인 스팀주입에 의한 NAPL의 제거 가능성과 효율을 연구하였다. 이를 위하여 1차원 칼럼 실험장치를 제작하여 다양한 조건하에서 실험을 시행하고, 그 결과를 분석하였다.

2. 본론

2.1 실험장치 및 방법

스팀주입 정화공법은 스팀이 통과하는 온수영역에서의 오일성분의 증발, 점성의 감소, 휘발성이 있는 성분의 스팀영역에서의 증발, 스팀 전면에서의 축적 및 용해물로서의 이동으로 설명될 수 있다. 이 같은 과정은 NAPL 및 토양의 종류, 스팀과 주변의 온도차 및 스팀 주입 압력 등에 따라 각기 다른 양상을 띠며 진행된다.

다양한 상황에서의 NAPL 제거효율을 관찰하기 위하여 그림 1과 같은 실험장치

동국대학교 토목공학과

를 제작하였다. 그림에서 보는 바와 같이 길이 50cm, 내경 5cm의 스텐레스 스틸로 된 칼럼에 간극수압 측정장치, 온도측정을 위한 thermocouple등이 부착되고 일정시간 간격으로 칼럼내 압력과 온도자료를 PC에 자동으로 전송하여 저장되도록 하였다. 본 실험을 수행하기에 앞서 다음과 같은 사전과정이 이루어졌다.

1) 실험에 사용될 토질시료의 기본특성과 시료 내에서 대상 화학물질의 잔류포화도를 측정한다.
2) 스팀을 이용하여 추출한 NAPL을 분석하는데 사용되는 Gas Chromatography-Mass를 보정한다.
3) 칼럼내의 온도와 온도조절장치의 전압간의 상관성을 파악한다.

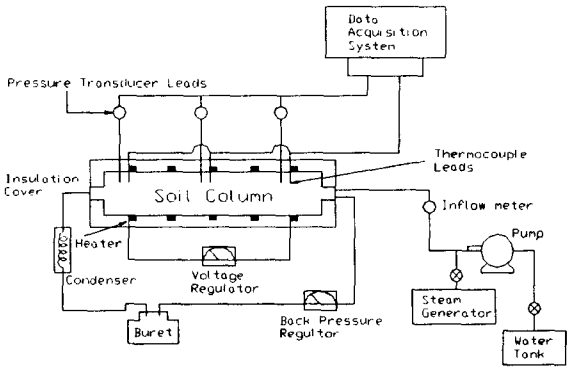

그림 1. 1-D 스팀 주입실험장치 개요도

LNAPL(n-Octane, Toluene, o-Xylene), Gasoline, DNAPL(Chlorobenzene)을 대상으로 모래와 화강토에서의 제거특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 절차에 의해 실험을 수행하였다.

1) NAPL을 칼럼에 주입한다.
2) 유속 1.5 m/day 이하로 물을 통과시켜 용해되는 정도를 파악한다.
3) 스팀을 주입시켜 출구를 통하여 분출되어 나올 때까지 계속한다.
4) 추출된 용액은 냉각기를 통과시켜 응축시킨 후 샘플링병에 집수한다.
5) 수집된 용액을 G.C.-Mass 를 이용하여 분석한다.

2.2 실험결과

가) LNAPL 제거 실험

모래시료를 건조밀도 1.5t/m^3, 간극비 로 칼럼에 채운 후 스팀이 주입되는 칼럼 상부로부터 1/3 지점에 시료 공극 피 5%(잔류포화도)에 해당되는 20cc의 Octane을 주입하고 1kg/cm^{2}의 스팀압 가하였다. 그림 2는 스팀주입구로부터 10cm, 25cm, 40cm 지점에 있는 port에 온도의 시간에 따른 변화를 기록한 것이다. 스팀이 통과하면 초기온도 20°C로부터 급속한 온도의 상승이 이루어지며 스팀 주입 후 약 7분 경과시 칼럼 출구로 스팀이 나오게 됨을 알 수 있다. 그림 3은 압력상승이 각 port에 스팀이 통과하는 시점에 이루어지고 있음을 보여주며, 각 port에서의 최종압은 0.8, 0.65, 0.55kg/cm^{2}로서 주입구의 스팀압 1kg/cm^{2}로부터 거리에 따라 압력강하가 선형적으로 일어나고 있음을 알 수 있다.

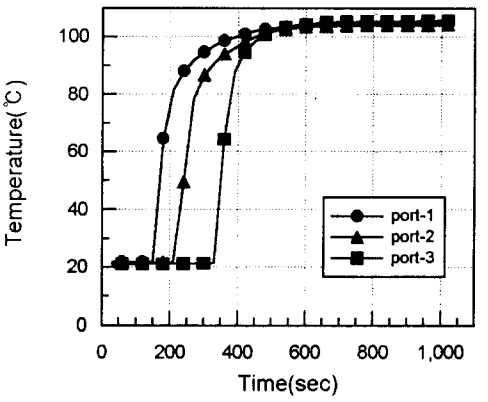

그림 2. 온도변화 (모래 + Octane)

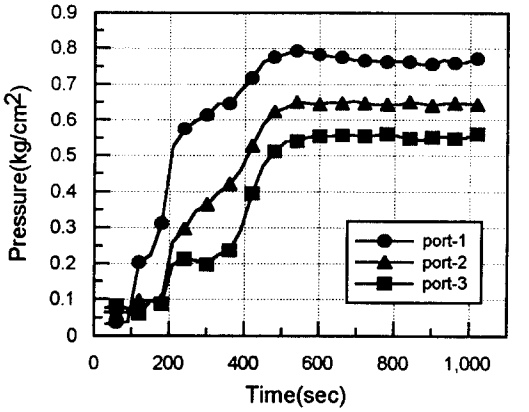

그림 3. 압력변화 (모래 + Octane)

화강토시료의 경우, 모래와 동일한 건조밀도와 공극비를 갖도록 하고 칼럼 내 온도를 50°C로 예열한 것을 제외하고는 모래의 경우와 동일한 조건하에서 실험을 수행하였다. 그림 4와 5는 화강토 중의 Octane제거 과정에 대한 칼럼 내 온도 및 압력변화를 도시한 것으로서, 모래와는 달리 스팀을 주입함과 동시에 압력이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 모래에 비해 상대적으로 낮은 화강토의 투수성으로 인해 스팀압이 초기에 칼럼 전체에 전달되기 때문으로 설명될 수 있다.

스팀이 각 port를 통과하는 시간은 시간에 따른 온도 변화를 보아 스팀주입 후 5분, 16분, 25분 경이었으며 스팀이 컬럼을 통과하는데 걸린 총 시간은 40분 정도 소요되었다. 각 port에 가해진 스팀압력의 최대값은 스팀주입구로부터 가까운 지점으로부터 0.95, 0.55, 0.44kg/cm^{2}로서 주입구에서 멀어질수록 스팀압력의 강하가 모래의 경우보다 급하게 이루어지는 것을 나타내고 있다.

모래와 화강토에서의 스팀주입을 통해 얻어진 LNAPL의 제거효율을 표 1에 나타내었다.

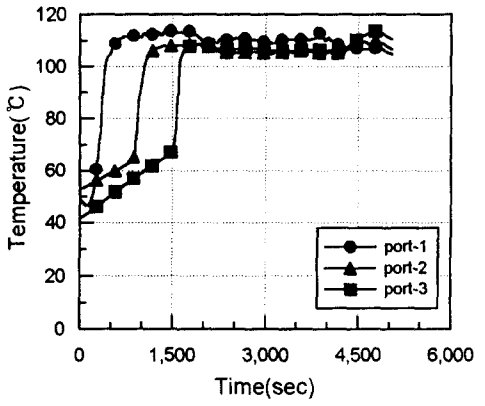

그림 4. 온도변화 (화강토 + Octane)

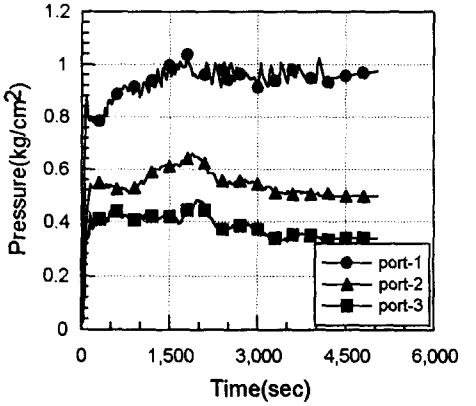

그림 5. 압력변화(화강토 + Octane)

표 1. 모래와 화강토에서의 LNAPL 제거효율 (단위: %)

LNAPL	모래	화 강 토
n-Octane	66.61	45.44
Toluene	78.09	73.27
o-Xylene	74.34	50.00

토양의 온도가 제거효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 화강토를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험 시간을 단축하기 위하여 1 pore volume만의 스팀 주입후 추출된 용액을 분석하였다. Voltage regulator를 조절하여 칼럼내 토양의 온도를 실험조건까지 상승시킨 후 스팀을 주입하였으며, 이때 주입스팀의 온도는 150℃, 압력은 1kg/cm^{2}로 일정하게 유지하였다.

예상한 바와 같이, 토양의 온도가 높을수록 Octane의 제거효율은 높아지는 결과를 얻었다. 이는 주변온도가 높게 유지되면 스팀의 응축이 지연되고 따라서 간극에 존재하는 Octane의 점도가 낮아져 유동성이 향상되며, 증발이 가속되는데 기인하는 것으로 해석할 수 있다. Hunt 등(1988a, b)은 스팀과 주변의 온도차가 80℃인 상태에서 스팀 1 pore volume 주입에 의한 Benzene-Toluene 혼합물의 제거율을 50%로 보고한 바 있어 본 실험결과(No. 2)를 뒷받침해 주고 있다.

표 2. 주변온도 변화에 따른 Octane 제거효율

실험 No.	주변온도 (℃)	Octane 주입량(g)	Octane 추출량(g)	제거효율 (%)
1	50	14	6.36	45.44
2	80	14.7	8.3	56.7
3	100	14	8.24	58.9

나) Gasoline 제거 실험

앞서의 실험과 동일한 방법으로 상업용 무연가솔린 20ml를 화강토 칼럼에 주입하고 스팀에 의해 제거되는 효율을 살펴보았다. 실험결과 Benzene 28%, Toluene 5.8%, 그리고 Xylene 14.7%가 제거되었다(표 3). 제거된 양을 질량으로 환산하면 각각 0.008g, 0.130g, 0.263g에 해당하는데, 가솔린 중 Benzene, Toluene, Total-Xylene 그리고 기타 Hydrocarbon이 차지하는 비율을 각각 2.3%, 6.9%, 12.2%, 78.6%로 보면 기타 Hydrocarbon 1.874g이 함께 추출된 것으로 볼 수 있다. 따라서 총 Hydrocarbon 제거효율은 12.8%가 된다.

표 3. Gasoline 제거 실험결과

조건 / 물질	1 pore volume 스팀주입	스팀주입 후 60℃ 온수 1 pore volume 주입	스팀주입 후 100℃ 온수 1 pore volume 주입
Benzene	28.7%	42.5%	43.39%
Toluene	5.8%	6.1%	49.29%
Total-Xylene	14.7%	14.7%	59.53%

표 3에는 스팀주입 후 60℃ 1 pore volume의 온수를 주입하여 칼럼내에 증기 및 액상상태로 존재하는 가솔린이 제거되는 양을 측정한 결과도 나타내고 있다. 즉, Benzene과 Toluene이 0.0039g 및 0.0072g 추가로 제거되고 Total-xylene은 검출되지 않음으로써 이들 물질에 대한 전과정 제거효율은 각각 42.5%, 6.1%, 14.7%로 나타났다. 또한, 온수를 100℃로 유지하였을 때는 Benzene의 경우 제거효율에 큰 변화가 없었으나, Toluene과 Xylene의 경우는 각각 49.3%와 59.6%로 크게 증가하여 제거효율이 온수의 온도에 민감함을 알 수 있었다.

다) DNAPL 제거 실험

DNAPL의 하나인 Chlorobenzene을 대상으로 제거실험을 수행하였다. 100℃ 1kg/cm^2 조건에서의 제거효율은 1 pore volume의 스팀주입만을 주입할 때 17.5%, 100℃ 온수주입시는 매 1 pore volume마다 추가로 약 3.6%의 제거효율 향상을 나타내었다. 이는 LNAPL인 Octane의 경우보다 전체적으로 제거효율이 떨어지는 결과이다.

3. 결론

스팀주입에 의한 NAPL 제거성능을 실험적으로 연구한 본 논문의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 스팀주입에 의한 LNAPL의 제거율은 본 실험조건에서 모래의 경우 66~78%, 화강토의 경우 45~73%로 나타났다.
2) 주변의 배경온도를 높일수록 제거율은 향상되었다.
5) 스팀을 통과시킨 후 온수를 유입시켰을 때 제거율이 물질에 따라 50%에서 최고 200% 이상 향상되었다.
6) DNAPL의 경우 동일 조건에서의 LNAPL 제거율에 비해 낮게 나타나 현장적용시 NAPL의 종류에 따라 운전조건을 적절히 조절해야 함을 알 수 있었다.

4. 참고문헌

1. 환경부, *유해폐기물 처리기술 개발: 오염토양 정화기술 개발*, 1차년도 보고서, 1995.
2. 환경부, *유해폐기물 처리기술 개발: 오염토양 정화기술 개발, 2*차년도 보고서, 1996.
3. Grubb, D.G. and N. Sitar, *Evaluation of technologies for in-situ clean up of DNAPL contaminated sites,* US EPA/600/R-94/120, August, 1994.
4. Hunt J., N. Sitar, and K. Udell, "Non-aqueous phase liquid transport and clean up : 1. Analysis of mechanisms", *Water Resources Research*, 24(8), 1247-1258, 1988a.
5. Hunt J., N. Sitar, and K. Udell, "Non-aqueous phase liquid transport and clean up : 2. Experimental studies", *Water Resources Research*, 24(8), 1259-1269, 1988b.