

토양 세정법을 이용한 실제 유류 오염 토양 및 지하수 정화

강현민 · 이민희 · 정상용 · 강동환

부산광역시 남구 대연 3동 599-1 부경대학교 환경해양대학 환경지질과학과

napl1004@empal.com

요 약 문

Surfactant enhanced in-situ soil flushing was performed to remediate the soil and groundwater at an oil contaminated site, and the effluent solution was treated by the chemical treatment process including DAF(Dissolved Air Flotation). A section from the contaminated site(4.5m×4.5m×6.0m) was selected for the research, which was composed of heterogeneous sandy and silt-sandy soils with average Hydraulic conductivity of 2.0×10^{-4} cm/sec. Two percent of sorbitan monooleate(POE 20) and 0.07% of iso-propyl alcohol were mixed for the surfactant solution and 3 pore volumes of surfactant solution were injected to remove oil from the contaminant section. Four injection wells and two extraction wells were built in the section to flush surfactant solution. Water samples taken from extraction wells and the storage tank were analyzed by GC(gas-chromatography) for TPH concentration with different time. Five pore volumes of solution were extracted while TPH concentration in soil and groundwater at the section were below the Waste Water Discharge Limit(WWDL). Total 18.5kg of oil (TPH) was removed from the section. The concentration of heavy metals in the effluent solution also increased with the increase of TPH concentration, suggesting that the surfactant enhanced in-situ flushing be available to remove not only oil but heavy metals from contaminated sites. Results suggest that in-situ soil flushing and chemical treatment process including DAF could be a successful process to remediate contaminated sites distributed in Korea.

key word : surfactant, soil flushing, TPH, DAF

1. 서론

최근 국내의 많은 지역에서 유류와 관련된 토양 및 지하수 오염이 중요한 환경 문제로 대두되면서, 오염 지역에서 유류 오염물의 분포와 이들을 정화하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어져 왔다.¹⁻²⁾ 이러한 정화방법들 중에서 원위치 토양 세정법(In-Situ soil flushing)은 유류로 오염된 토양과 지하수를 동시에 정화하는 방법으로서, 기존의 채수주입법(pump and treat method) 형태를 그대로 유지하면서 오염지역의 주변 환경을 변화시키지 않고 토양과 지하수를 함께 처리할 수 있다는 장점을 가지고 있어서, 외국의 토양/지하수 정화 사업에 이미 활발히 사용되어져 왔으며, 특히 계면활성제를 이용한 원위치 토양 세정법은 다양한 실내 실험과 현장 적용 시험들로부터 그 효율성을 인정받아 국외에서는 실제 현장 오염 토양과 지하수를 정화하는데 사용되고 있다.³⁾ 본 연구에서는 계면활성제 용액을 이용한 원위치 토양 세정법으로 부산시에 위치한 유류 오염 지역의 토양과 지하수를 정화함으로써 아직까지 국내 오염 현장에서 거의 실시되지 않았던 계면활성제 원위치 토양 세정법의 현장 정화 효율을 규명하고자 하였으며, 또한 용존공기가압부상장치가 포함된 화학적 처리공정을 사용함으로써, 실제적인 지하수 처리 공정의 현장 적용 사례가 거의 없는 국내 형편에서 유류와 중금속(특히 납)으로 오염된 오염지역의 오염

지하수를 정화함으로써, 오염 지하수 정화를 위한 처리공정의 향후 연구에 중요하게 사용될 현장 자료 및 기술적 정보를 제공하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 정화 시험 준비 실험

본 오염 현장에서 토양 세정법에 가장 적합하다고 판단되는 계면활성제를 선택하기 위하여, 비이온 계면활성제인 sorbitan monooleate 국내산 2개 제품과, 미국 Akzo noble 회사제품의 Oleamide를 이용하여, 대상 오염물을 가솔린, 등유, 경유로 세분하여 각각에 대한 3종류의 계면활성제 용액의 용해도 증가 실험을 실시하여, 점도가 낮고, 가격이 싸고, 독성이 없는 Celnon 회사 제품의 sorbitan monooleate를 사용하되, Oleamide와 비슷한 용해도 효과를 얻기 위하여 2% 농도를 이용하고, 추적자로서 사용이 가능하고 점도를 줄일 수 있는 이소프로필 알콜 0.07%를 혼합하여 최종 세정 용액으로 사용하였다.

오염 정화 부지의 토양 특성과 오염물 분포 양상을 파악하기 위하여, Geoprobe 장치를 이용하여 연속적인 토양 시료를 4개의 지점에서 심도 6m 까지 채취하였으며, 토양 내 TPH 와 BTEX 성분분석을 하였으며, 토양입도분석을 실시하여 토양 주상도를 작성하였다(Fig 1).

이 중 S-1 하부와 S-2 층이 가장 많이 오염되어 있었으며, 이러한 특징으로서 정화 시험 부지를 4.5m×4.5m×6.0m 로 선정하였으며, 정화 부지 내에 주입정 6개와 채수정 3개의 시스템을 설치하였다(Fig. 2).

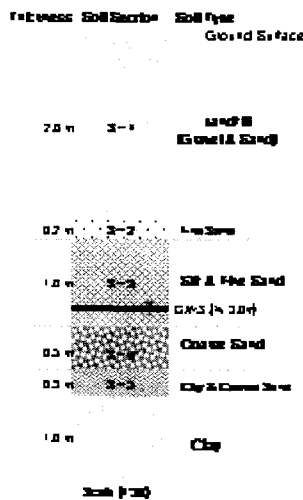


Fig. 1. Soil cross section of the remediation site (scale 1 : 30)



Fig. 2. In-situ soil flushing system in the remediation site

3 원위치 토양 세정공정 시스템

토양 세정법 적용시 주입량과 채수량을 정확하게 파악하고, 세정 기간동안 제거된 오염물의 양을 정량적으로 계산하며, 세정 기간을 줄이기 위하여 오염 정화 부지 주변에 차수막을 설치하였으며, 오염 정화 부지 내 토양 세정 시스템을 설치하였다.

주입 시스템은 처리된 오염 부지 지역의 지하수를 사용하여 계면활성제와 이소프로필 알콜을 혼합하여 세정용액을 만들어 주입하였고, 일정한 주입률(1.8-0.5l/min)로 4개의 주입공에 주간(8시간)에 연속 주입되었다. 채수 시스템은 2개의 채수정을 이용하여, 야간-1시간, 주간-30분 간격으로 양수 펌프를 이용하여 채수하였으며, 매일 09시, 17시에 각각의 채수정으로부터 시료(200ml 이상)를 채취하였다. 채취된 시료들은 가스크로마토그래피(GC)로 분석하여 세정시간에 제거된 유류(TPH)의 양을 계산하여 오염처리 효율을 산출하였다. 또한 분석시료에 대하여 무작위 등간격으로 시료를 선택하여 중금속 농도를 측정하였다.

4. 용존공기가압부상장치가 포함된 화학적 처리공정

본 연구에서는 오염된 지하수를 폐수처리배출허용기준 이하로 처리하기 위하여 용존공기가압부상조, 반응조, 응집조, pH 조정조를 결합한 하나의 처리공정 시스템을 운영하였다. 반응조에서는 NaOH를 첨가하여 pH를 염기상태로 조정한 다음, 응집제인 PAC(Poly Aluminum Chloride)를 첨가하여 입자를 크게 뭉치게 함으로써 침전을 용이하게 하였다. 혼합시 pH와 응집제의 양을 최적화 하기 위하여 Jar Test를 실시하여 적절한 반응조 운영 방법을 선택하여, 응집효율을 극대화 하였다. 응집조는 폴리머(Polymer)를 응집보조제로 첨가하였으며, Jar Test 실험의 반복을 통하여 응집제인 PAC와 응집보조제인 Polymer의 투입량을 선정하여, 최적의 프로그램과 처리효율로 정화 처리를 실시하였다. pH 조정조에서 황산을 공급해서 처리수의 pH를 다시 중성으로 맞추어 배출하였다.

5. 결과 및 토의

Fig 3.는 채수정 P2와 P3로부터 채수된 채수량을 오염 정화 부지의 공극체적으로 나타내어, 채수 시간에 따른 각 채수정의 TPH 농도를 나타낸 그래프로써, 최대 유출 농도는 P3가 1761ppm이고 P2가 364ppm으로서 약 4.8배 차이를 보이며, 세정 기간 동안 채수정 P3에서 채수된 TPH 농도가 P2보다 훨씬 높게 나타났다. 그 이유는 오염 부지에 유류오염물이 매우 불규칙하게 분포하고 있기 때문으로 사료된다. Fig 4.는 본 토양 세정 정화 시험에서 처리 지하수만을 이용한 세정의 경우와 계면활성제를 이용한 경우 시간별 누적 채수 용액의 농도를 비교한 것이다. 계면활성제를 이용하였을 경우에 지하수만을 이용한 세정보다 농도가 최고 150배 이상 높았으며, 총 제거 유류의 양은 80배 이상이었다. 즉 이 결과는 실제 오염 지역에서 계면활성제를 이용한 원위치 토양세정법이 짧은 시간에 고농도의 유류 오염토양을 정화하는데 매우 효과적이라는 것을 의미한다. 채수된 채수액과 농도를 기초로 하여 세정기간 동안 제거된 총 TPH의 양을 계산하였을 때 총 18.5kg의 유류(TPH)가 제거되었다.

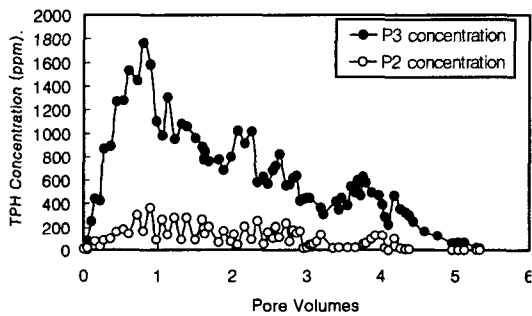


Fig. 3. Effluent TPH concentration from extraction wells (P2 and p3) during soil flushing

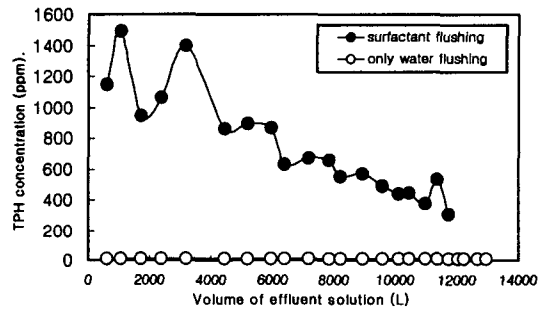


Fig. 4. Comparison of effluent concentration between surfactant solution flushing and only water flushing

Table 1. Comparison of heavy metals concentration between injection solution and effluent solution during soil flushing (unit:ppb)

	Cd	Cu	Cr	Mn	Ni	As	Pb
Injection solution (pretreated groundwater)	0.1	8.0	19.3	1564.3	10.3	3.0	0.5
Effluent solution WB-1	0.5	30.5	142.8	4952.1	22.8	76.6	50.4
Effluent solution WB-10	0.6	43.2	319.2	4763.4	19.6	152.3	121.5
Effluent solution WB-16	0.5	26.2	339.3	6494.5	25.3	134.5	60.2

토양세정 기간동안 주입용액과 채수용액의 중금속 농도를 비교하여 계면활성제 용액 세정에 의한 중금속의 제거 효과를 측정하였는데, 처리지하수 주입 용액의 중금속 농도와 계면활성제 용액 세정 후 채수액의 중금속 농도가 Table 1에 나타나 있다. 대표적인 7개의 중금속에 대하여, 계면활성제 용액 세정 시, 채수액은 유류 뿐 아니라 중금속 농도도 함께 증가하고 있으며, 이는 계면활성제 분자들이 형성한 micelle 구조에 중금속들이 흡착되어 함께 수용액상으로 나타나는 것으

로 사료되며, 이러한 현상은 중금속 오염 토양을 정화하는데 매우 유리하게 사용될 수 있음을 나타낸다.

용존공기가압부상장치가 포함된 화학적 처리공정으로 처리시 오염지하수의 부유물질 농도는 폐수배출허용기준치를 최고 5배 이상 초과하였으나, 정화 처리 후 약 50ppm 이하의 낮은 농도를 유지하였으며, n-헥산 추출물질 농도와 Pb의 경우에도 모두 배출허용 기준치 이하로 효과적으로 처리하였다(Fig 5과 Fig 6).

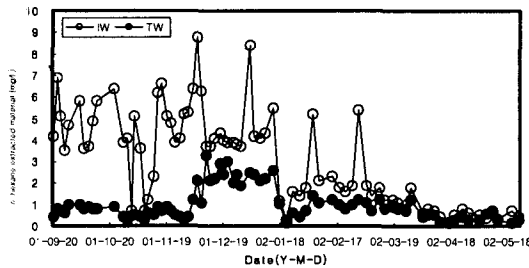


Fig. 5. Comparison of n-hexane extracted material concentration of treated water(TW) and original groundwater(IW)

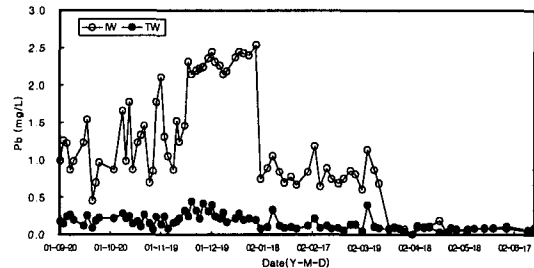


Fig. 6. Comparison of Pb concentration of treated water(TW) and original groundwater(IW)

6. 결론

계면활성제를 이용한 원위치 토양 세정법으로 실제 유류오염 지역을 정화함으로써, 원위치 토양 세정방법의 정화 작업 공정을 확립하였으며, 국내 유류 오염 농도가 심한 지역의 토양/지하수 정화에 효과적으로 적용될 수 있음을 입증하였다. 또한 DAF 장치를 포함한 화학적 처리공정을 이용하여 유류와 납으로 오염된 현장 오염 지하수를 폐수처리배출 허용 기준 이하로 처리함으로써, 향후 오염 지하수 처리 공정의 설계와 운영에 실질적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Lowe, D. F. and Oubre, C. L. and Ward C. H., surfactant and cosolvents for NAPL remediation, Lewis Publishers, New youk, 403pp, 1999.
2. Anderson, W.C., Innovative site remediation technology:Soil Washing/Soil Flushing, volume 3., American Academy of Environmental Engineers, pp. 1-57, 1993.
3. 환경부, 오염토양정화 기술 개발,삼성건설(주) 기술 연구소, 558pp, 1995.
4. 농업기반공사,육군구2정비창오염부지정화사업공법실증시험,한국지하수토양환경학회,833pp,2002.
5. 이민희,“계면활성제 원위치토양세정법을 이용한 유류 오염지역 토양·지하수정화실증시험, 한국지하수토양환경학회지, Vol. 7, No.4, pp.77-86, 2002.
6. 그린엔텍, 수처리 시스템 준공도서 및 운전요령서. pp 1-17, 2001.
7. 손주형,용존공기가압부상장치가 포함된 화학적 처리공정에 의한 오염 지하수 정화, 자원환경지질 Vol.35, No.6, pp 581-588, 2002.