

## 항공유 오염 지역에서 주입정과 회수트렌치를 이용한 원위치 토양세정법 현장 적용

이규상<sup>1\*</sup> · 김양빈<sup>2</sup> · 장재선<sup>1</sup> · 엄재연<sup>1</sup> · 송성호<sup>1</sup> · 김을영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원, <sup>2</sup>한국농어촌공사 환경지질처

## A Field Study of Surfactant Enhanced In-Situ Remediation using Injection Wells and Recovery Trench at a Jet Oil Contaminated Site

GyuSang Lee<sup>1\*</sup> · Yangbin Kim<sup>2</sup> · Jaesun Jang<sup>1</sup> · Jaeyeon Um<sup>1</sup> · Sung-Ho Song<sup>1</sup> · Eulyoung Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rural Research Institute, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

<sup>2</sup>Office of Environmental Geology, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

### ABSTRACT

This study reports a surfactant-enhanced in-situ remediation treatment at a test site which is located in a hilly terrain. The leakage oils from a storage tank situated on the top of the hill contaminated soils and groundwater in the lower elevation. Sixteen vertical injection wells (11 m deep) were installed at the top of the hill to introduce 0.1-0.5 vol.% of non-ionic Tween-80 surfactant. The contaminated area that required remediation treatment was about 1,650 m<sup>2</sup>. Two cycles of injecting surfactant solution followed by water were repeated over approximately 7.5 months: first cycle with 0.5 month of surfactant injection followed by 3 months of water injection, and second cycle with 1 month of surfactant followed by 3 months of water injection. The seasonal fluctuation in groundwater table was also considered in the selection of periods for surfactant and water injection. The results showed that the initial Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) concentration of 1,041 mg/kg (maximum 3,605 mg/kg) was reduced significantly down to 76.6 mg/kg in average. After 2nd surfactant injection process finished, average TPH concentration of soils was reduced to 7.5% compared to initial concentration. Also, average BTEX concentration of soils was reduced to 10.8%. This results show that the surfactant enhanced in-situ remediation processes can be applicable to LNAPL contaminated site in field scale.

**Key words :** Soil flushing, LNAPL, TPH, In-situ, Surfactant, Tween-80

### 1. 서 론

국내 최초의 대규모 정화사업인 육군 제2정비창 오염부지 정화사업 및 현재까지 수행 중인 국내 최대 규모의 오염정화 사업인 미군반환기지(LPP, land partnership plan) 정화공사 등에서 볼 수 있듯이 대형 정화공사는 주로 토양경작법(land farming), 열탈착법(thermal desorption), 토양세척법(soil washing) 등의 굴착공법(ex-situ method)이 주 공법으로 적용되며, 자유상 유류의 회수나 지하수 정화를 위해 양수처리법(pump and treat)이 보조공법으로 적용되고 있다(농업기반공사, 2002; 한국농촌공사, 2008a).

국내에서 수행되는 대규모 정화공사에서 굴착공법이 선호되는 이유는 국내 토양의 불균질성으로 인해 정해진 기간 내에 정화 기준을 만족할 때 까지 토양오염을 제거하기가 어렵고, 풍수기 갈수기에 따른 지하수위의 변동, 동절기의 낮은 기온이 지중처리공법(In-situ method)의 적용을 제한하고 있기 때문이다. 하지만, 굴착공법이 적용되는 정화 현장에서도 특정 제약조건(굴착 불가능한 심도, 지중 매설물, 하천제방 등)이 있는 경우 지중정화공법이 병행되어 적용되고 있다.

국내에 적용된 오염토양 정화기술 중 토양증기추출법(SVE), 생물학적 통풍법(Bioventing), 토양경작법(Land

\*Corresponding author : leegs@ekr.or.kr

원고접수일 : 2011. 5. 8 심사일 : 2012. 1. 10 게재승인일 : 2012. 1. 10

질의 및 토의 : 2012. 4. 30 까지

farming)을 제외하면 가장 많이 적용된 공법은 토양세정법(soil flushing)이다(환경부, 2007). 이 중 토양증기추출법, 생물학적 통풍법은 지중의 불포화대를 대상으로 하는 지중정화공법이고 토양경작법은 굴착공법으로서, 실제로 유류오염지역에서 포화대에 분포하는 유류를 대상으로 하는 지중정화 공법은 토양세정법이 가장 많이 적용되었다. 토양세정법은 전통적으로 이용되던 양수처리법을 보완하여 계면활성제를 이용하여 토양 내 함유된 유해화합물을 굴착하지 않고 지상으로 회수하여 처리하는 공법으로, 토양 및 지하수에 분포하는 NAPL(non-aqueous phase liquid) 제거에 많이 적용되는 공법이다(Abdul et al., 1990; Wunderlich et al., 1992; Lowe et al., 1999). 토양세정법에서 계면활성제를 주입하는 목적은 용해도가 낮은 NAPL의 용해도를 높여 지하수와 함께 회수하거나, NAPL과 지하수 사이의 계면장력을 감소시켜 NAPL의 이동성을 증대시켜 제거하는 것이다(Santanu, 2008).

국내에서 수행된 기존의 연구는 주로 실험실 규모의 토양 칼럼 실험이나 실증 부지에서의 소규모 토양세정 효율 연구가 대부분이며, 실제 오염 지역에 대한 현장규모(field scale) 적용은 거의 이루어 지지 않았다. 또한, 토양 칼럼 실험에서는 계면활성제를 이용한 NAPL의 용해도 증가에 따른 세정 효율은 분석하였으나, 계면활성제 작용에 의한 토양 내 NAPL의 이동성 증가에 의한 세정효율은 연구되지 않았다(김철웅 외, 2001; 손봉호 외, 2006; 최애정 외, 2006). 이민희 외(2002)는 국내 최초로 pilot scale 토양세정법 현장적용을 수행하여 계면활성제를 주입하였을 경우가 지하수만 주입한 경우에 비해 170배 높은 유출수의 TPH 농도의 증가를 관측하고, 토양세정법을 통하여 총 18.5 kg의 유류(TPH)의 제거를 확인하여 토양세정법이 토양·지하수의 정화에 효과적으로 사용될 수 있음을 입증하였다.

계면활성제는 친수성기를 가진 머리 구조와 소수성기를 가진 꼬리 구조를 가진 분자로 수용액 상에서 일정농도 이상(임계미셀농도, critical micelle concentration, CMC)에서 미셀을 형성하며, 형성된 미셀내부는 계면활성제 소수성기가 모여져 있기 때문에 소수성 오염물을 쉽게 흡수 및 저장할 수 있다(양중석 외, 2008). 계면활성제는 머리 구조의 특성에 따라 양이온성(cationic), 비이온성(nonionic), 음이온성(anionic)으로 나눌 수 있으며, 과거에는 점토광물에 대한 흡착의 영향을 감소시키기 위하여 음이온성 계면활성제에 대한 연구가 주를 이루었으나, 최근에는 독성이 적고 토양에 대한 흡착도 적으면서 임계미셀농도가 낮아 저농도에서도 용해도 증가의 효과가 좋은 비이온성 계

면활성제의 연구가 활발하다(안치규 외, 2008; Santanu, 2008).

본 연구의 목적은 계면활성제 용액을 이용한 원위치 토양세정법의 현장적용으로, 항공유에 의해 오염된 지역을 대상으로 실제 토양 오염을 정화하는 공정을 적용하고, 시간에 따른 오염저감 효율을 분석하여 실제 공정 적용에 있어 고려되어야 할 인자에 대해 검토하였다. 또한, 오염 지역의 분포가 급경사의 사면위에 위치하여 기존의 주입/추출정에 의한 정화설계 보다는 사면 하부에 수평회수정과 트랜치를 이용하여 계면활성제 및 NAPL 회수가 되도록 설계하는 기법의 효율에 대해서도 검토하였다. 계면활성제 주입 시기의 결정에 있어 지하수위의 변동과 오염지역의 깊이의 영향을 고려하였으며, 현장 적용 시 용해도 증가에 의한 효과뿐만 아니라, NAPL의 이동성 증가에 따른 정화공정 설계에 대해서도 검토하였다.

## 2. 연구지역

연구 대상지역은 경기도 이천시에 위치하는 000부지로서 1988년 설치된 200,000L 용량의 항공유 저유시설로부터 1991년 지하배관 조인트부분 파손과 2000년 드레인 밸브 손상으로 인해 유류가 누출되는 사고가 발생하여, 2002년 ~ 2004년에 걸쳐 1차 오염정화가 완료된 부지이다. 1차 정화 완료 후에도 유류고 하류 배수로 등에서 유류오염의 정황이 관찰되어 2007년 오염원 조사를 다시 수행한 결과, 지표로부터 6 m 이상의 심도에서 TPH 및 BTEX가 오염기준을 초과하여 검출되었다(한국농촌공사, 2008b).

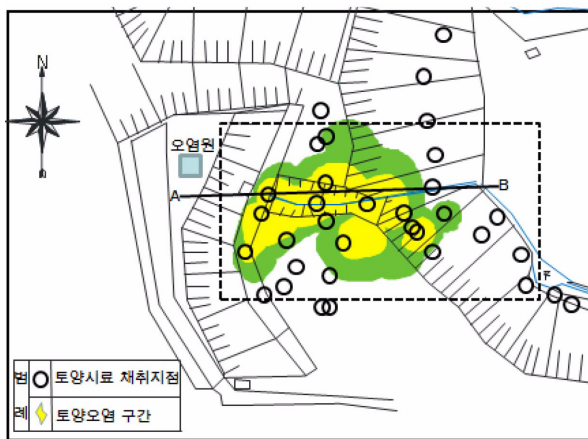
오염부지는 화강암 분지의 낮은 구릉지에 위치하며 북서쪽이 높고 남동쪽이 낮은 지형을 이루고 있으며(Fig. 1), 기반암인 화강암의 풍화가 진행되어 조립질의 투수성이 양호한 토양이 분포하고 있다. 정밀조사 결과에 따른 지하수 유동방향은 북서에서 남동방향으로 형성되어 있으며, 지하수위는 오염원이 분포하는 사면부는 지표면 하 6m에서, 트랜치 등이 설치된 사면하류 평지는 1~2 m에 형성된다(한국농촌공사, 2008b).

토양오염도 분석을 위해 사면부에 웨도형 토양시료 채취장비를 이용하여 32공, 61점(Fig. 1)의 시료를 채취하여 토양오염을 분석결과 오염구간은 지표 하 6~14 m 구간에 주로 분포하며 TPH의 최대 오염농도는 3,605 mg/kg로 조사되었다. 토양오염 정화가 필요한 구간의 오염면적은 1,650 m<sup>2</sup>, 오염토량은 2,825 m<sup>3</sup>이며 특히 TPH와 BTEX로 복합오염된 구간은 지표 하 8~12 m로 조사되었다(한

**Table 1.** Calculated volume of contaminated soil with depth (m<sup>3</sup>)

Depth	TPH	BTEX	Overlay	Depth	TPH	BTEX	Overlay
0~1 m	—	—	—	7~8 m	—	477	477
1~2 m	—	—	—	8~9 m	264	277	372
2~3 m	—	120	120	9~10 m	—	—	—
3~4 m	—	—	—	10~11 m	266	294	513
4~5 m	—	181	181	11~12 m	383	245	601
5~6 m	—	—	—	12~13 m	—	71	71
6~7 m	—	374	374	13~14 m	—	116	116
				Sum	913	2,155	2,825

\* 출처 : 한국농어촌공사, 2008b



**Fig. 1.** Location of soil sampling point and contaminated area.

국농촌공사, 2008b, Table 1). 토양오염구간은 주로 화강암의 풍화대로서 사질토가 우세하게 분포하고, 그 하부에 연약대 발달이 미약한 풍화암이 분포하여 수직적인 오염물의 이동을 차단하고 있다. 순간수위변화시험에 의한 수리전도도는  $1.61 \times 10^{-3}$  cm/sec로 조사되었다.

부지 내 토양에 대한 물리적 특성 분석 결과, 사면부의 토성은 모래 83.52%, 실트 8.52%, 점토 7.96%로 사질이 우세한 loamy sand에 해당하여 원위치 토양세정에 적합한 토양 특성을 나타내었다. 토양세정법 적용 구간의 지층 상태를 판단하기 위해 사면 상부에 구경 76 mm로 시추한 결과, 상부 50 cm는 실트질 모래의 매립토층이 분포하며 하부 12.5 m까지는 풍화토가 분포하는 것으로 조사되었다. 풍화토에 대한 표준관입시험 결과는 (12~16)/30 cm로서 Peck and Water(1974)가 제안한 상대밀도는 중간 정도를 나타낸다. 풍화토 하부는 풍화암으로 분류되며 표준관입시험 결과 50/(2~8) cm로 매우 조밀한 특성을 나타내며, 풍화암층 이하는 연암층으로 분류된다(한국농촌공사, 2008b). 토양세정법을 위한 주입정은 지표면에서 11

m까지 76 mm 구경으로 설치하였으며, 지하수면 상부에서 계면활성제가 주입되면 수직 및 수평방향 흐름에 의해 오염물질에 도달하도록 설계하였다(Fig. 3).

### 3. 토양세정법 적용 조건 및 장비

#### 3.1. 주입, 추출정 설치

연구지역에서 항공유에 의해 주로 오염된 지점은 지형이 주변보다 낮은 골짜기 부분에 해당하여, 상부에서 계면활성제를 주입하더라도 주변으로의 확산보다는 골짜기 하부에 설치된 회수트렌치로 오염된 지하수의 회수가 가능할 것으로 판단하였다. 또한, 회수트렌치와 사면사이에 자갈로 충전된 배수층을 설치하여 오염된 지하수의 회수가 용이하도록 하였다(Fig. 2). 수평정은 오염 토양이 분포하는 심도 하부에 설치하여, 계면활성제 주입에 따라 용해된 NAPL 및 지하수가 중력에 의해 수평정으로 이동할 수 있도록 설계하였다(Fig. 3, Fig. 4).

일반적인 토양세정법 적용은 주입정과 추출정을 수직으로 설치하여 운영하는 방법이 주로 이용되나, 본 연구에서는 오염구간이 사면상부에 위치하여 수직 추출정의 설치가 어려워 회수트렌치와 수평정을 설치하는 것으로 추출정 운영 방법을 결정하였다. 오염 토양이 분포하는 상류구배에 계면활성제 주입공 16공을 설치하여 주입하고, 주입된 계면활성제 및 오염된 지하수를 회수하기 위하여 60 m의 수평정 3공(수평정 간격 12.8 m, 회수트렌치에서 10° 상향 천공)과 길이 45 m, 폭 0.5 m, 깊이 3 m의 회수트렌치를 설치하였다(Fig. 2, Fig. 3). 토양세정 운영을 위한 계면활성제 주입정은 오염구간의 상류구배에 위치하여 계면활성제 주입 후 자연적인 흐름에 의해 계면활성제가 오염구간 전체를 흐를 수 있도록 배치하였으며, 계면활성제 주입에 따른 지하수의 TPH 농도 변화를 관측하기 위한 모니터링 공(NX-1, MW-1)을 운영하였다(Fig. 4).

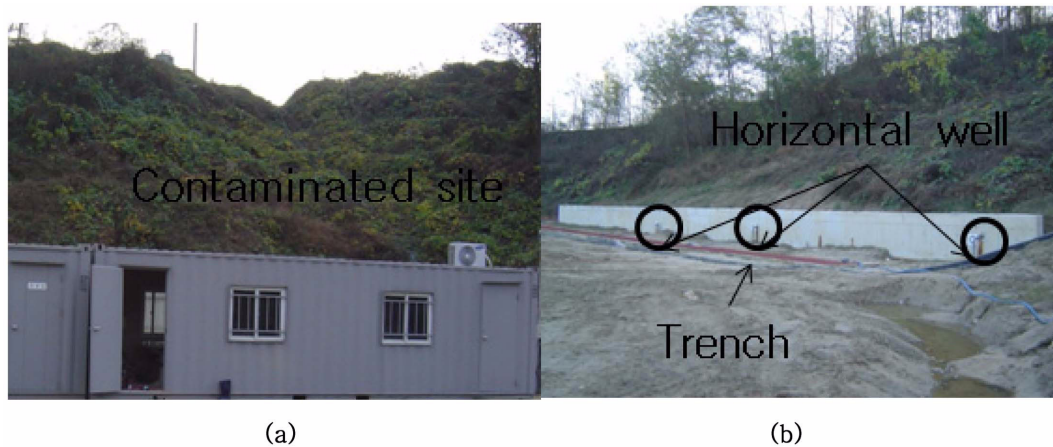


Fig. 2. View of contaminated site (a) & trench (b).

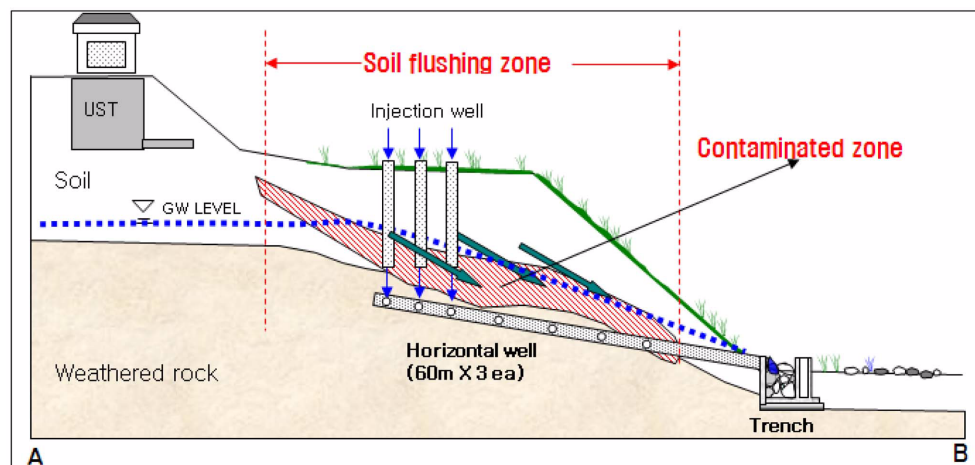


Fig. 3. Installation of injection, horizontal well and trench profile (A-B line in Fig. 1).

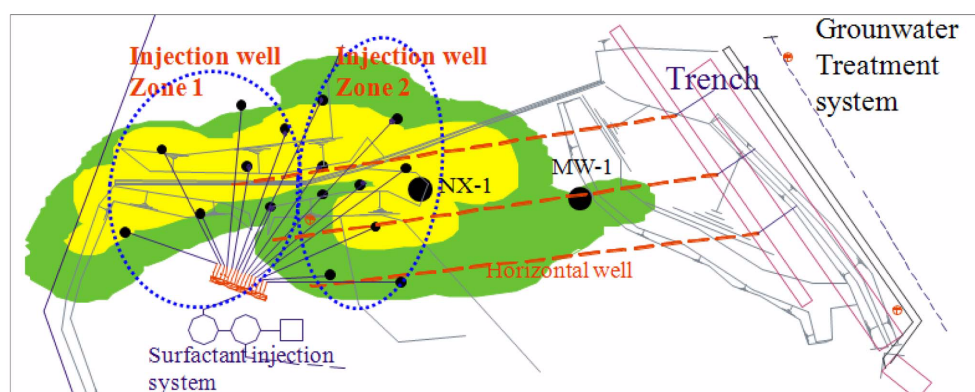


Fig. 4. Installation of injection and monitoring well (dashed box in Fig. 1).

토양세정액 제조를 위하여 토양세정주입 장치 옆에 설치된 교반기에 의해 계면활성제 농도를 목표 농도가 되도록

로 제조한 후 분배기를 통하여 16개 주입정에 공급되도록 하였으며, 트렌치 및 수평정에서 회수되는 지하수는 활성





Fig. 5. surfactant storage tank & stirring system (a) and injection distributor (b).

Table 2. Summary of soil flushing process

Flushing process	Surfactant injection (days)	Water injection (days)	Concentration of surfactant (% v/v)	Injection rate (m <sup>3</sup> /day)	Used surfactant volume (L)
1st injection period	17 (no data)	54 (36)	0.1	23.6	No data
2nd injection period	23 (17)	93 (64)	0.5	25.5~26.1	2,375

탄 필터 장치를 통해 정수한 후 다시 주입되도록 하였다 (Fig. 5). 수처리시스템에서 정수된 지하수의 TPH의 농도를 분석한 결과, 모두 방류수 수질기준을 만족하여 적절한 지하수 수처리가 이루어져 재주입 문제가 없는 것으로 판단하였다. 계면활성제가 주입되는 관정은 16개의 관정 중에서 오염농도의 변화를 모니터링 하면서 오염원을 효과적으로 제거하도록 적절한 주입관정을 선택하였다(Fig. 4 zone1 & zone2).

### 3.2. 계면활성제 주입 및 추출

토양세정법은 계면활성제를 이용하여 NAPL의 이동성 증대 및 용해도 증가를 목적으로 하는 공법이다. 공정은 크게 계면활성제 용액 주입 단계와 지하수만 주입하여 주입된 계면활성제 용액이 오염지역을 충분히 통과하도록 수위를 조절하는 단계로 나눌 수 있다. 현장에서의 계면활성제 주입 공정은 크게 2008년 12월의 계면활성제 주입, 2009년 4월 ~ 6월의 지하수 주입의 첫 번째 단계와, 2009년 6월 ~ 7월의 계면활성제 주입, 2009년 7월 ~ 10월 까지 지하수 주입의 두 번째 단계로 나누어 수행되었다. Table 2는 전체공정의 주입조건에 대한 요약이며, 계면활성제와 지하수가 주입된 일수는 주입 시작 시간부터 주입이 종료된 총 일수로 표시하였으며, ( ) 안의 일수는 장비 점검이나 휴일로 인해 주입이 이루어 지지 않았던 날을 제외한 일수로 실제로 지하수와 계면활성제가 주입된 일

수이다.

현장에서 주입한 계면활성제는 현장 적용성 시험결과 세척효율이 좋은 것으로 분석된 비이온 계면활성제인 Tween 80(polyoxyethylene 계열)을 사용하였다(한국농촌공사, 2008b). Tween 80과 같은 비이온성 계면활성제는 임계미셀농도가 낮아 저농도로 주입하더라도 NAPL 용해도 증가에 따른 정화효율을 높일 수 있는 장점이 있으며, 저농도 주입은 계면활성제의 소모량을 줄여 정화비용도 감소되는 효과가 있다. 현장 토양에 대한 회분식 시험 결과 계면활성제 농도 1.0%가 최적의 농도로 분석되었으며, 주입속도에 따른 영향은 체류시간이 길수록 세정의 효율은 증가되는 것으로 조사되었다(한국농촌공사, 2008b). 실제 정화 현장에서 1.0% 농도의 계면활성제 용액을 주입하는 것은 많은 비용이 소요된다. 따라서, 본 현장에서는 세정 효율을 유지하면서 경제성을 달성하기 위하여 1차 주입에서는 0.1%(v/v), 2차시험에서는 0.5%(v/v) 농도로 주입하였다. 계면활성제가 주입될 때 하류부에 설치된 연속수평정 및 양수정에서 TPH 농도를 분석하여 용해도 증가에 따른 오염원 제거 양상을 분석하였으며, 각 시험 완료 후 토양시료채취장비를 이용하여 토양세정구간에 대한 토양의 TPH 변화를 분석하여 NAPL의 이동과 오염 제거 경향을 분석하였다. 본 연구에 사용된 TPH 및 BTEX 분석은 모두 토양공정시험법에 따라 서울대학교 농생명과학공동기구에 의뢰하였다.

1차 계면활성제 주입은 2008년 12월에 17일간에 걸쳐 수행하였으며, 주입량은 1일 평균  $23.6 \text{ m}^3$ 을 0.1% 농도로 주간 8시간 동안 주입하였다. 1차 계면활성제 주입이 완료된 후 계절적으로 동절기에 해당하여 지하수를 위한 주입/추출정 운영이 불가능하여 후속공정인 지하수 주입을 중단하였으며, 1차 계면활성제 주입에 따른 토양의 TPH 변화를 분석하기 위하여 주입구간에 대하여 8개 지점, 27 점의 토양 시료를 채취하였다.

계면활성제의 1차 주입이 완료된 이후 지하수 주입은 2009년 4월 ~ 6월에 약 54일 동안 수행하였으며 장비점검과 휴무일수를 제외한 실 주입일수는 36일이다. 시험 기간은 지하수위가 낮은 갈수기로 주 토양오염 심도보다 지하수위가 낮게 형성되어 계면활성제 주입 없이 지하수만 주간 8시간 동안 1일 평균  $23.6 \text{ m}^3$ 를 주입하고 세정 구간 하류부에 양수정(Fig. 1 NX-1)을 추가로 설치하여 인위적인 지하수두 변화를 유도하여 오염물을 회수를 촉진하였다.

2차 주입공정은 1차 주입 결과 회수트렌치에서의 지하수 TPH 농도의 증가현상이 나타나지 않아, 계면활성제 농도를 0.5%(w/w) 증가시켜 2009년 6월 ~ 7월에 수행하였으며, 이 기간 동안 계면활성제 주입은 주간 8시간 동안 평균  $25.5 \text{ m}^3/\text{일}$ 로 총 23일간 이루어 졌다. 계면활성제 주입이 완료된 이후 회수되는 지하수량에 따라서 일평균  $15.0 \sim 40.0 \text{ m}^3/\text{일}$ 의 지하수를(전체 평균  $26.1 \text{ m}^3/\text{일}$ ) 주간 8시간 동안 주입하여 계면활성제의 하류방향 유동을 지속적으로 유도하여 오염물질을 지속적으로 회수하였다. 계면활성제 용액을 제조하기 위한 용수는 트렌치에서 회수되는 지하수를 지하수 정화장치에서 수처리 한 후 재이용 하였다. 갈수기에 해당하는 12월 ~ 6월의 주입량은  $23.6 \text{ m}^3/\text{일}$  이지만, 풍수기에는 트렌치에서 회수되는 지하수의 양이 증가하여 계면활성제 주입량은  $25.5 \text{ m}^3/\text{일}$ 에서  $26.1 \text{ m}^3/\text{일}$ 까지 점차 증가하였다.

#### 4. 결과 및 토의

계면활성제 주입에 의한 토양 세정은 NAPL의 용해도를 높여 지하수를 통해 회수하는 방법과, NAPL과 토양 입자사이의 표면장력을 낮추어 이동성을 높여 회수하는 방법을 이용한다. 본 연구에서 총 2차에 걸쳐 계면활성제 용액의 주입/추출을 실시한 결과는 다음과 같다.

1차 주입시험에서 계면활성제를 0.1% 농도로 주입한 결과, 하류부의 회수트렌치에서 측정된 지하수에서 TPH 농도가 검출되지 않았다. 이는 주입정과 추출정의 거리가 멀

어서(최하단 주입정에서 트렌치사이 거리 46 m) 계면활성제 주입에 따른 NAPL의 용해도 증가 효과가 모니터링 과정에 충분히 반영되지 못한 것으로 판단된다. 추가적인 계면활성제 주입 없이 지하수만 주입하는 후속 공정에서 모니터링정 NX-1(최하단 주입정과 같은 위치)에 펌프를 설치하여 지속적으로 양수를 진행하였다. NX-1에 설치된 펌프는 심도 12 m 하부에 설치하여 2009년 5월 6일부터 6월 18일까지 32일동안 주간 평균 8시간 동안 평균  $1.7 \text{ m}^3/\text{일}$ 로 양수하였다. 그 결과 지하수의 TPH 농도가 기존에 주입된 계면활성제의 영향으로 평균  $64.0 \text{ mg/L}$ , 최대  $107.0 \text{ mg/L}$ 로 측정되어 계면활성제에 의한 지하수의 TPH 농도가 변화된 것을 관측하였다.

1차 계면활성제 주입 이후 지하수위가 낮은 2009년 4월 ~ 6월 기간 중에는 계면활성제를 추가로 주입하더라도 NAPL의 최상위 분포심도(지표로부터 10 m)보다 지하수위(지표로부터 12.7 m, NX-1)가 낮게 형성되어 주입된 계면활성제가 전체 오염된 토양층을 통과하지 못하는 현상이 발생한다. 주입시기와 방법을 결정하는 공정 회의에서 기존에 주입된 계면활성제가 오염층 내를 충분히 통과하도록 조정하는 수위조절 단계를 추가하여 1차 계면활성제가 주입되고 동절기 기간이 경과한 시점부터 3개월 동안 지속적으로 지하수만 주입하는 공정을 운영하도록 하였다.

1차 계면활성제 주입 이후 토양 내의 NAPL의 분포심도 및 농도변화를 모니터링 하기위하여 2008년 12월 23일 토양 내 시료채취를 하여 TPH 분석을 실시한 Fig. 6과 같다. 그림에서 점선으로 표시된 구역은 Fig. 1에서의 노란색에 해당하는 부분으로 토양오염 대책기준을 초과하는 지역이다. 그림에서 서측이 상류구배에 해당하며 계면활성제가 주입된 구간이고, 동측이 하류구배이며 양수정 및 트렌치가 설치된 구간이다. 주입구간 상류구배에 해당하는 SL-3 지점에서 실시설계단계에서 조사된 TPH 오염농도는  $3,140 \text{ mg/kg}$ 이었으며, 계면활성제 주입 이후  $2,324 \text{ mg/kg}$ 으로 감소하여 계면활성제 주입이 토양의 오염도를 낮추는 효과가 있는 것으로 판단되었다. 하지만 주입구간 하류구배에 해당하는 SL-5 지점에서는 주입 전 TPH 농도  $3,605 \text{ mg/kg}$ 에서 주입 후  $9,125 \text{ mg/kg}$ 으로 변화한 것이 관측되었다. 계면활성제 주입에 따라 주입지점 상류구배에 해당하는 SL-03 지점은 오염농도가 낮아진 효과가 나타났으나, 주입지점 하류구배에 해당하는 SL-05 지점은 오염농도가 증가하여 계면활성제 주입에 따른 NAPL의 이동가능성을 확인하였다. 즉 주입구간 상류구배에 분포하던 NAPL이 계면활성제의 영향으로 주입구간 하류구배로 이동하여 토양 내 NAPL 농도가 높아지는 효과

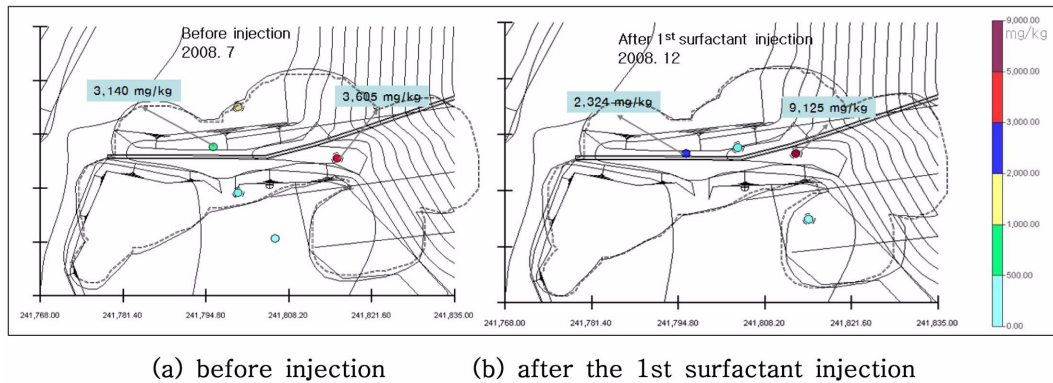


Fig. 6. Changes of TPH concentration in soil as a result of 1st surfactant injection.

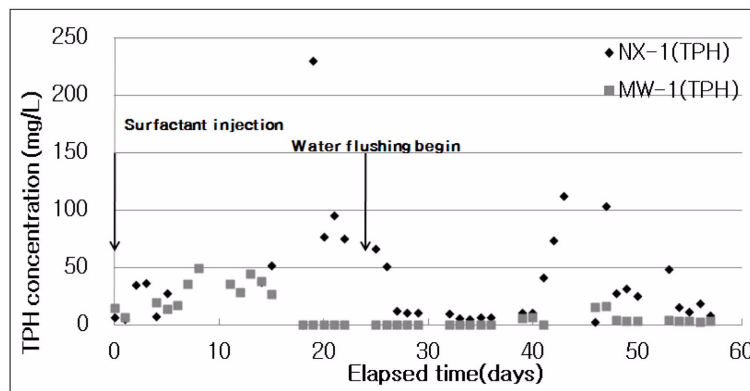


Fig. 7. Change of TPH concentration in groundwater during 2nd surfactant injection.

로 나타났다. 이후의 공정설계에서는 계면활성제 주입에 따른 NAPL의 이동현상을 공정운영에 반영하여, 2차 주입계획은 Fig. 4에 주입정 16개 중에서 오염 농도가 높아진 하류구배 8개 주입정(Fig. 4에 zone 2로 표시) 위주로 주입정을 운영하였다.

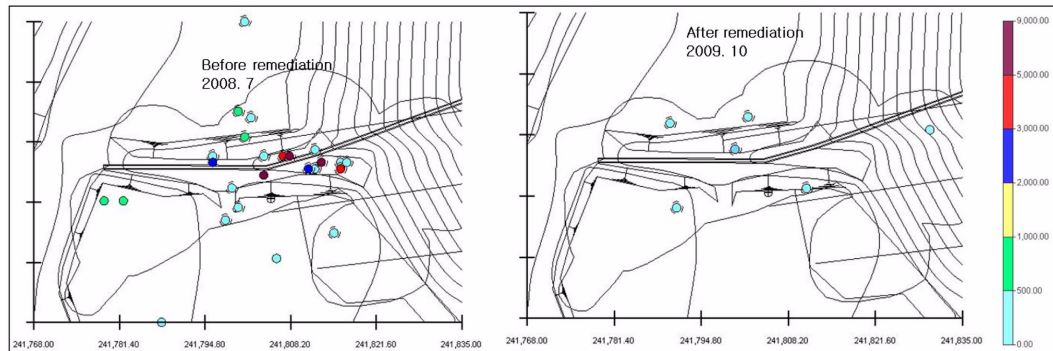
1차 주입시험 결과 0.1% 계면활성제 농도는 NAPL의 용해도 증가보다는 NAPL의 하류구배 이동의 효과가 큰 것으로 판단되어, 2차 주입시험은 계면활성제를 0.5% 농도로 주입하였다. 주입 기간 동안 하류부에 설치된 NX-1 모니터링정에서 채수한 지하수의 TPH 농도는 평균 38.0 mg/L, 최대 230.0 mg/L로 분석되었다(Fig. 7). 1차 지하수 주입공정보다 최대 농도는 증가하였으나, 평균 농도는 감소하는 영향이 나타나는데, 이는 1차 주입공정에서 NAPL의 농도감소가 나타난 원인으로 판단된다(Table 3). 계면활성제 주입 이후 약 2일 경과한 시점에서 NX-1공에서, 4일이 경과한 시점에서 MW-1 관정에서 지하수의 TPH 농도 증가 현상이 나타났으며, 계면활성제 주입이 완료되고 지하수만 주입한 이후에도 지하수 내의 TPH 농도

는 높게 형성되어 있다. 주입 후 45일이 경과한 시점에서 지하수의 TPH 증가현상이 다시 나타나며 이는 주입공 8개 관정에서 주입된 계면활성제가 하류부로 이동하는데 토양의 불균질 성으로 인해 다양한 통로를 거치기 때문에 시간에 따른 농도의 변화가 발생한 것으로 판단된다.

Table 3은 계면활성제 주입 전후의 토양 내 TPH 및 BTEX의 변화를 나타내고 있다. 토양 내 17지점에서 측정된 TPH 농도는 주입전 평균 1,041.1 mg/kg으로 분석되었으며, 1차 계면활성제 주입이 완료된 후 실시한 10지점에서 측정된 TPH 농도는 평균 2,759.5 mg/kg으로 상승하였다. 계면활성제 주입전 평균 농도는 정화기준인 2,000 mg/kg보다 낮지만, 일부 구간에서 최대 3,605 mg/kg 이상으로 측정되어 정화기준을 초과하여 토양정화 공사가 시작되었다. 1차 계면활성제 주입이후 평균 토양의 TPH 농도가 증가한 원인은 계면활성제의 영향으로 NAPL과 토양의 계면장력의 감소로 NAPL이 하류방향으로 이동한 영향으로 판단된다. 계면활성제 주입에 따른 토양 내 TPH 증가현상은 2차 계면활성제 주입 이후에도 나타나며 지하

**Table 3.** Change of TPH & BTEX concentration according to remediation process between of 8.0~14.0 m below surface

Flushing process	Average TPH concentration (mg/kg)	Average BTEX concentration (mg/kg)	No. of measured point
Before remediation action	1,041.1	58.6	17
After 1st surfactant injection	2,759.5	69.4	10
After 1st water injection	672.8	11.7	20
After 2nd surfactant injection	1,001.7	123.3	25
After 2nd water injection	76.6	6.3	19

**Fig. 8.** Distribution of TPH concentration in soil after remediation action.

수 주입에 따라 토양 내 TPH 농도는 점차 감소하고 있다. 최종적으로 2차 지하수 주입이 완료된 시점에서 토양 내 평균 TPH 농도는 76.6 mg/kg으로 분석되었으며 최초 토양오염 농도의 7.5%가 토양에 남아 정화효율은 92.5%로 계산되었다.

Fig. 8은 정밀조사 단계에서 2차 주입시험 완료 후 토양세정 구간에서 심도 8~12m 구간에서의 TPH 농도분포를 도시한 것이다. 1차 계면활성제 주입 및 지하수 주입의 영향으로, 상류구배에서 하류구배로 NAPL이 이동하여 일부구간의 오염 농도는 증가하지만 추가적인 계면활성제 주입 및 지하수 주입공정의 운영으로 전반적인 토양 오염 농도가 급격히 감소하였다. 2차에 걸친 계면활성제 주입과 지하수 주입에 따른 세정 운전결과 토양 세정 구간에서 토양 TPH 농도의 감소 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 최종적으로 세정구간 전체에서 토양오염 우려기준(2,000 mg/kg)보다 낮은 농도로 정화효율이 증대되는 것을 확인하였다.

계면활성제 주입은 필연적으로 지하수의 TPH 농도를 증가시키게 되고, 오염된 지하수는 하류로 유동하여 지하수 오염을 심화시킬 가능성이 있다. 지하수 오염의 확산 방지를 위하여 주입정 하류부에 트랜치를 설치하여 오염된 지하수를 전량 회수하는 것을 목적으로 하였으며, 실제로 트랜치는 효과적으로 하류방향의 지하수 오염확산을 방지한 것으로 확인되었다. 최종 정화검증 단계에서 트랜

치 하류부에 설치된 지하수 관정 GW-1에서 TPH는 검출되지 않았으며 벤젠 0.0064(수질기준 0.015 mg/L), 톨루엔 미검출(수질기준 1.0 mg/L), 에틸벤젠 0.0025(수질기준 0.45 mg/L), 크실렌 0.0531(수질기준 0.75 mg/L) mg/L로 각각 검출되었다. 정화공정이 수행되기 전 측정된 지하수 관정 GW-1의 농도는 TPH는 미검출, 벤젠 0.0442, 톨루엔 미검출, 에틸벤젠 0.006, 크실렌 0.005 mg/L로 측정되어 벤젠과 에틸벤젠의 농도는 감소하였고, 크실렌의 농도는 증가한 것으로 나타나 모두 생활용수 기준의 지하수 수질기준에는 적합한 것으로 분석되어, 계면활성제 주입에 따른 지하수의 오염확산은 없는 것으로 확인되었다.

## 5. 결 론

계면활성제를 이용한 원위치 토양세정법으로 항공유로 오염된 지역을 정화한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구는 계면활성제 용액을 이용하여 최초의 현장규모 토양세정법 운영을 통하여 정화검증을 완료한 현장 사례로서 토양세정법의 현장규모 운영은 계면활성제 주입 공정 뿐만 아니라 지하수만 주입하는 공정이 필요함을 입증하였다. 계면활성제를 주입한 효과는 NAPL의 용해도 증가뿐만 아니라 NAPL의 토양 내의 이동을 가져오며, 이를 공정 운영에 적절히 반영하면 정화효율 증대를 달성할 수 있다는 결론을 얻었다.



(2) 토양세정법의 현장 운영은 NAPL의 분포심도와 지하수의 변동을 동시에 고려하여야 하는 것으로 나타났다. NAPL의 분포심도 보다 지하수위가 낮은 경우 주입된 계면활성제는 토양 오염구간보다는 하부의 비오염구간을 통과하여 정화효율이 저하되므로, 갈수기 보다는 지하수위가 높은 시기에 토양세정법을 적용하는 것이 적절하다.

(3) 토양세정법의 공정운영은 적절한 모니터링을 통하여 현장상황에 맞도록 운영하는 것이 필요하다. 계면활성제 주입 이후 하류부 모니터링 관정에서의 TPH 등의 변화를 분석하여, 계면활성제 용액 주입에 따른 토양 정화 효율 분석이 동시에 진행되어야 한다.

(4) 1단계 정화단계에서 0.1% 농도의 계면활성제 1차 주입 이후 토양 내의 NAPL에 의한 오염도를 분석한 결과, 주입정이 16공 설치된 구간 중 상류 주입정 부근 토양은 토양 TPH 농도가 3,140 mg/kg에서 2,323 mg/kg으로 낮아짐을 확인하였으며, 주입 구간 하류 지점에서는 토양 내 TPH 농도가 3,605 mg/kg에서 9,125 mg/kg으로 변화하여, 계면장력 감소에 의한 NAPL의 이동을 확인하였다.

(5) 1단계 정화단계에서 0.1% 농도의 계면활성제를 주입한 4개월 후 지하수만 주입하는 공정 운영 중 하류부 NX-1 관정에서 지하수의 TPH를 측정된 결과 평균 64 mg/L, 최대 107 mg/L의 농도가 관측되어 계면활성제 용액이 오염된 토양층을 통과하는 기간 동안은 지하수 주입에 따른 수두구배의 형성만으로도 NAPL 제거가 가능한 것을 입증하였다.

(6) 2단계 정화단계에서 0.5% 농도의 계면활성제를 주입 후 NX-1 모니터링정에서 지하수의 TPH 농도는 평균 38.0 mg/L, 최대 230.0 mg/L로 계면활성제 주입에 따른 NAPL의 제거를 확인하였다.

(7) 2차주입 완료 후 토양세정 구간에 대한 토양 오염도 검사를 실시한 결과, 주입전 평균 농도에 비해 92.5%의 NAPL이 정화되어 모두 정화기준을 만족하는 것으로 분석되었다.

(8) 주입정 하류구배에 설치된 지하수 관정 모니터링 결과 지하수의 TPH, BTEX 농도는 생활용수 기준의 수질 기준을 만족하여 하류방향의 오염 확산의 영향은 없는 것으로 분석되었다.

## 사 사

본 연구는 한국농어촌공사 자체연구비와, 환경부의 토양지하수오염방지기술개발사업(173-092-011)의 지원으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- 김철웅, 김영호, 이기서, 구기갑, 이정민, 2001, 토양으로부터 오염의 제거에 있어서 비이온 계면활성제 종류의 영향, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(1), 88-93.
- 농업기반공사, 2002, 육군 구2정비창오염부지 정화사업 제안서.
- 손봉호, 임봉수, 어성욱, 이병호, 2006, 원위치 토양세척 공정의 효율향상을 위한 세제선정과 운전기법, *한국물환경학회지*, **22**(5), 824-830.
- 안치규, 우승환, 박종문, 2008, 계면활성제 재사용을 포함한 토양 세척 공정의 전산모사 평가, *지하수토양환경*, **13**(1), 32-42.
- 양중석, 이유진, 김성혜, 신현재, 양지원, 2008, 디젤 오염 토양 세척시 계면활성제 종류의 영향, *지하수토양환경*, **13**(3), 8-14.
- 이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철, 2002, 계면활성제 원위치 토양 세정법을 이용한 유류 오염 지역 토양·지하수 정화 실증 시험, *지하수토양환경*, **7**(4), 77-86.
- 최애정, 전지혜, 김인수, 이민희, 손주형, 2006, 계면활성제를 이용한 유류 오염 토양 세정법의 제거효율 연구, *KSEG Conference*, Daejeon, p. 389-394.
- 한국농촌공사, 2008a, LPP 정화사업 계획서.
- 한국농촌공사, 2008b, OOO부지 실시설계 보고서.
- 환경부, 2007, 오염토양 정화방법 가이드라인.
- Abdul, A.S., Gibson, T.L., and Rai, D.N., 1990, Selection of surfactants for the removal of petroleum products from shallow sandy aquifer, *Ground Water*, **28**, 920-926.
- Lowe, D.F., Oubre, C.L., and Ward, C.H., 1999, surfactant and Cosolvent for NAPL remediation, *A Technology practices manual*, Lewis Publishers, New York, p. 205-277.
- Peck, R. and Water H., 1974, *Foundation Engineering*, 2nd ed., John Wiley and sons Inc., New York.
- Santanu, P., 2008, Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soil and water, *Advances in colloid and Interface Science*, **138**, 24-58.
- Wunderlich, R.W., Fountain, J.C., and Jackson, R.E., 1992, In situ remediation of auqifers contaminated with dense nonaqueous phase liquids by chemical enhanced solubilization, *J. Soil Contam.*, **1**, 361-378.