

토양세정 기술을 활용한 윤활유와 아연 복합오염 철도토양의 정화 연구

박성우¹ · 조정민² · 이재영³ · 박준규¹ · 백기태^{2*}

¹다산컨설팅트, ²금오공과대학교 환경공학과, ³한국철도기술연구원

Feasibility Study on Soil Flushing for Railway Soil Contaminated with Lubricant Oil and Zinc

Sung-Woo Park¹ · Jung-Min Cho² · Jae-Young Lee³ · Joon-Kyu Park¹ · Kitae Baek^{2*}

¹Dasan Consultants Co. Ltd.

²Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

³Korea Railroad Research Institute

ABSTRACT

The feasibility study of soil flushing was investigated to remediate lubricant oil and zinc contaminated railway soil. In this study, mixed washing agents of surfactant and inorganic acid/base were used for the simultaneous removal. The mixed washing agent of non-ionic surfactant and HCl removed 15% of the lubricant oil and 40% of zinc, respectively. Alkaline-enhanced soil washing process increased the removal of lubricant oil up to 40%. This is because alkaline solution reduced the interfacial tension between water phase and lubricant oil phase due to the soap formation reaction. To simulate in-situ soil flushing for the remediation of railroad-related contamination, two dimensional soil flushing was carried out based on the results of batch soil washing. In the soil flushing, the removal efficiencies of lubricant oil and zinc were 34% and 16%, respectively. Even though the removal efficiency was low, the mixed washing agent can remove metal and lubricant oil simultaneously.

Key words : Railroad-contaminated soil, Lubricant oil, Zinc, Soil flushing, Soil washing

1. 서 론

철도와 관련된 토양오염은 크게 중금속에 의한 오염과 석유계 오염으로 구분할 수 있다. 석유계 오염은 디젤유를 연료로 사용하기 때문에 디젤유의 보관 및 주유 등의 과정에서 발생하는 누유에 의해 발생하는 오염과 엔진 및 선로분기기 등 유지보수 시 사용하는 윤활유에 의한 오염으로 구분할 수 있다(박성우 외, 2008; 박성우 외, 2009; Park et al., 2009; Park et al., 2010). 철도토양은 디젤 또는 윤활유 및 중금속이 복합적으로 오염되어 있는 경우가 많으며, 중금속 중에서 아연의 오염이 심각한 것으로 보고되고 있다. 디젤로 오염된 철도오염 토양에 대한 정화사례는 많이 보고되고 있으나 윤활유로 오염된 토양의 정화사례는 거의 없는 실정이다. 윤활유는 탄소수 18~50

으로 구성된 중질유계 난분해성 탄화수소화합물을 주성분으로 하기 때문에 토양오염공정시험법에 의해 총석유계탄화수소(TPH)를 분석하면 윤활유의 일부도 TPH로 분류된다(박성우 외, 2008). 일반적으로 디젤은 생물학적인 분해가 가능하며, 철도토양뿐만 아니라 군부대 오염토양의 정화에서도 많은 사례가 있기 때문에 현장상황이 양호하다면 비교적 손쉽게 처리할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 윤활유의 경우 디젤에 비해 오염사례가 많지 않아 연구자재도 적을 뿐 아니라 윤활유에 의해 야기된 오염토양을 정화한 사례도 많지 않다.

석유류의 오염에 대해서 미생물의 분해 작용을 활용하여 석유계탄화수소를 분해하여 제거하는 생물학적 방법이 많이 사용된다. 그러나 윤활유 유래 오염토양의 처리효율은 낮을 뿐만 아니라 중금속 오염토양의 처리에는 부적절

*Corresponding author : kbaek@kumoh.ac.kr

원고접수일 : 2011. 4. 16 심사일 : 2011. 7. 10 게재승인일 : 2011. 7. 12
질의 및 토의 : 2011. 10. 31 까지

하다. 생물학적 처리 방법의 대안으로 화학적 산화법과 토양세척법이 있다. 화학적 산화법은 과산화수소나 오존과 같은 산화제를 사용하여 오염물질을 물과 이산화탄소로 완전 산화시켜 처리하는 방법이다. 그러나 화학적산화법 또한 중금속 처리에는 부적절한 것으로 알려져 있다(김남호 외, 2006; 김민경 · 공성호, 2006). 토양세척법은 토양을 세척제가 포함된 수용액과 접촉하여 토양에서 오염물질을 탈착시켜 제거하는 방법이다(백기태 외, 2007; 박성우 외, 2008; 박성우 외, 2009). 세척제는 오염물질의 특성에 따라 달라지며 유류에 의한 오염토양의 세척에는 계면활성제가 많이 사용되며, 중금속에 의한 오염토양에는 유기산 및 무기산을 세척제로 사용한다(이종열 외, 2004; 황정성 외, 2005; 백기태 외, 2007; 박성우 외, 2009). 토양세척법은 *ex-situ*로 처리해야 하는 단점이 있으며 계속 운영되고 있는 철도의 운영특성을 고려할 때 적용의 한계가 있다. 토양세정법은 토양 내 오염물질의 용해도를 증가시키기 위해 세정액을 토양 내 공극에 주입하여 오염물질을 토양으로부터 분리하여 지중으로 추출하여 처리하는 기술이다. 토양세정의 세정액으로는 오염물질에 따라 계면활성제 및 유기산, 무기산 등이 사용될 수 있다. 또한 토양세정은 원위치 처리가 가능하기 때문에 철도차량이 운행 중인 철도오염 부지의 정화에 적용이 가능하다.

디젤오염 토양에 효과적이라고 알려진 계면활성제에 대해서 윤활유오염 토양에 적용한 결과 다소 낮은 효율을 나타내었다. 이는 계면활성제가 토양의 윤활유로 흡착되기 때문이다(Park et al., 2010). 따라서 세척 및 세정실험 시 계면활성제는 오염물질과 토양사이의 계면장력을 낮추어 주면서 토양의 윤활유에 흡착이 최소한으로 이루어져야 한다. 일반적인 유류오염 토양에 적용되는 비이온 계면활성제를 사용하여 윤활유 오염토양을 대상으로 세척실험을 진행한 결과 계면활성제의 HLB값이 높을수록 제거율이 높아지는 경향을 나타낸다. 즉, 계면활성제의 친수성이 증가할수록 윤활유제거에 효과적이라고 보고되고 있다(Park et al., 2010). 이는 친수성이 높은 계면활성제일수록 토양과 결합되어 있는 윤활유로의 계면활성제의 흡착이 최소화되기 때문이다. 또한 윤활유의 제거율을 향상시키기 위해서 NaOH를 첨가한 결과 계면활성제를 단독으로 사용했을 때 보다 높은 제거율을 나타냈다. 이는

NaOH가 비누화반응을 통해 윤활유의 계면장력을 낮추어 주는 효과를 가지기 때문이다(Park et al., 2010).

유류와 중금속은 처리 기작이 다르기 때문에 한 가지 공법으로 처리하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 윤활유와 아연으로 복합 오염된 철도토양을 정화하기 위해 계면활성제와 무기산을 혼합한 세척액을 토양세척 및 토양세정에 적용하여 활용 가능성을 평가하였다. 세척실험 결과를 바탕으로 선정된 세정액을 사용하여 윤활유와 아연으로 복합 오염된 철도토양의 원위치 정화가능성을 알아보기 위하여 2차원 반응기에서 토양세정실험을 진행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 오염 토양

본 연구에 사용된 오염토양은 철도역 2곳(A, B)에서 채취하였다. 채취된 토양은 상온에서 충분히 건조하였으며 실험에 사용한 토양은 2mm체로 체질음하여 2mm 이하의 토양만 사용하였다. 총석유계탄화수소 (TPH)와 중금속 분석은 토양오염공정시험 기준에 의해 가스크로마토그래프(Varian CP3900, USA)와 아연은 AAS(Shimadzu 6300, Japan)를 이용하여 분석하였으며, Table 1에 정리하였다. TPH 분석 크로마토그램을 분석해본 결과 디젤과는 구분되는 윤활유 오염 토양으로 확인이 되었으며, 중금속은 Zn만이 검출되었다. 철도용지는 토양오염기준 3지역에 해당하며 TPH의 경우 대책기준(6,000 mg/kg)을 초과하였다. 아연은 3지역 우려기준에 미치지 않았지만 2지역 우려기준을 초과하는 농도였다. 또한 A, B 토양의 pH는 각각 6.24, 6.59를 보였다.

2.2. 회분식 토양세척

본 연구에서는 윤활유 오염토양에 효과적이라고 알려진 Brij35(Sigma aldrich, USA)를 사용하여 세척실험 및 세정실험을 진행하였다(Park et al., 2010). Brij35의 기본적인 물리화학적 특성을 Table 2에 정리하였다. 윤활유와 아연으로 동시에 오염된 토양을 정화하기 위해서 혼합 세척액을 제조하였다. Brij35의 농도에 대한 영향을 알아보기 위하여 0.1 N HCl과 0.5, 1.0, 5.0 wt% Brij35를 혼합하여 혼합 세척액을 만든 후 용액 100 mL와 오염토양

Table 1. Initial concentration of TPH and Zn

	A	B	토양오염우려기준 (3지역)	토양오염대책기준 (3지역)
TPH (mg/kg)	16,550	11,760	2,000	6,000
Zn (mg/kg)	1,138	1,021	2,000	5,000

Table 2. Physicochemical properties of Brij35

Surfactant	Chemical name	Chemical structure	HLB ^a	CMC ^b (mM)	MW ^c
Brij35	POE ^d (23) lauryl ether	C ₁₂ H ₂₅ (CH ₂ CH ₂ O) ₂₃ OH	16.9	0.046	1198

^aHLB : hydrophilic lipophilic balance^bCMC : critical micelle concentration^cMW : molecular weight^dPOE : polyoxyethylene

(A) 20 g을 혼합하여 150 rpm, 20°C, 30분 동안 세척하였다. 세척 후 고액 분리하여 상온에서 24시간 이상 풍건시켜 토양오염공정시험기준에 따라 토양 내 TPH와 아연의 잔류농도를 분석하였다.

윤활유의 제거율을 향상시키기 위해서 NaOH(Junsei, Japan) 주입에 따른 영향을 살펴보았다. 0.5 wt% Brij35와 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 wt% NaOH를 혼합한 혼합 세척액과 NaOH만 사용한 단독세척액을 이용하여 A토양을 대상으로 위와 같은 조건으로 세척실험을 진행하였다. 또한 TPH 농도가 상대적으로 낮은 B토양을 대상으로 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH의 혼합 세척액을 사용하여 TPH의 제거 가능성을 알아보았다. 본 실험은 연속세척방법으로 이루어 졌으며 1차 세척 후 고액 분리하여 토양 중 일부를 취하여 분석에 사용하고 나머지 토양을 다시 세척실험에 사용하는 방법으로 총 6회 연속 세척하였다.

2.3. 컬럼 세정

세척실험을 통해 얻어진 최적조건의 세척액을 이용하여 컬럼실험을 진행하였다. 세정액의 최적 주입량을 알아보기 위하여 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH의 혼합 세척액을 5, 10, 20 bed volume(BV) 주입하여 제거율의 변화를 살펴보았다. 유리 재질의 컬럼 (길이 30 cm, 직경 2.5 cm) 내 충전 된 토양의 BV는 83.5 cm³ 였다. 세정액은 쓸림 흐름 현상을 방지하기 위하여 정량펌프(Coleparmer, USA)를 이용하여 유속 1.7 mL/min으로 상향류로 공급하였다. 실험 종료 후 토양을 상온에서 24시간 이상 풍건 후 토양오염공정시험기준에 따라 전처리 후 토양 내 잔류 TPH와 Zn을 분석하였다. 분석은 모두 3회 반복으로 진행되었으며, 결과는 평균값을 사용하였다.

2.4. 2차원 토양세정

윤활유와 아연복합오염 토양의 원위치처리 가능성을 알아보기 위해 2차원 세정 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 반응기의 모식도는 Fig. 1과 같고, 반응기의 크기는 가로 70 cm, 세로 10 cm, 높이 50 cm였으며, 오염토양을 40 cm 채워 BV는 30 L였다. 세정액으로는 토양세척과 컬

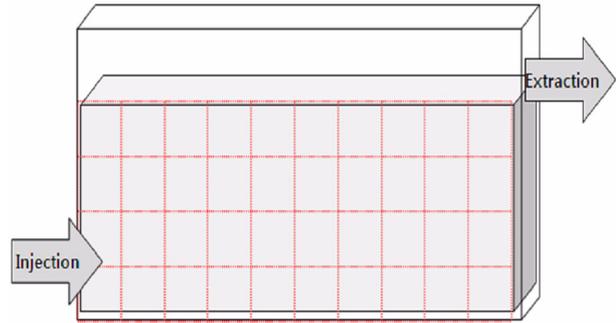


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for 2-dimensional soil flushing (width : 70 cm, depth : 10 cm, height : 50 cm).

럼실험에서 얻어진 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH의 혼합 세척액을 10 BV를 좌측하단에서 주입하여 우측상단에서 추출하였고 그 후 주입방향을 바꾸어 우측하단에서 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH의 혼합 세척액을 5 BV, 0.5 wt% Brij35 + 0.1 N HCl의 혼합 세척액 3 BV, 1.0 wt% NaOH 세정액을 2 BV 순서로 주입하여 좌측상단에서 추출하였다. 실험 종료 후 반응기를 분해하여 Fig. 1과 같이 토양을 40등분하여 채취하였다. 채취된 토양은 상온에서 24시간 이상 풍건 후 토양오염공정시험기준에 따라 전처리 후 TPH와 Zn의 토양 내 잔류농도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산성 혼합세척액에 의한 토양 세척

윤활유와 아연으로 동시에 오염된 토양을 정화하기 위해서 Brij35와 HCl의 혼합 세척액을 이용한 토양세척결과를 Fig. 2에 나타내었다. HCl은 대부분의 중금속 제거에 효과적인 세척액으로 알려져 있으며, 철도 토양에서도 Zn의 세척능이 우수한 것으로 보고되었다(백기태 외, 2007; 박성우 외, 2009). 혼합 세척액을 사용한 본 연구에서도 Zn은 40% 이상의 제거율을 보여 아연의 제거에 HCl이 효과적임을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 반면 철도 토양에서는 윤활유에 포함된 Zn이 주된 오염원이기 때문에 일반적인 토양에서보다는 낮았으며(박성우 외, 2009), Brij35

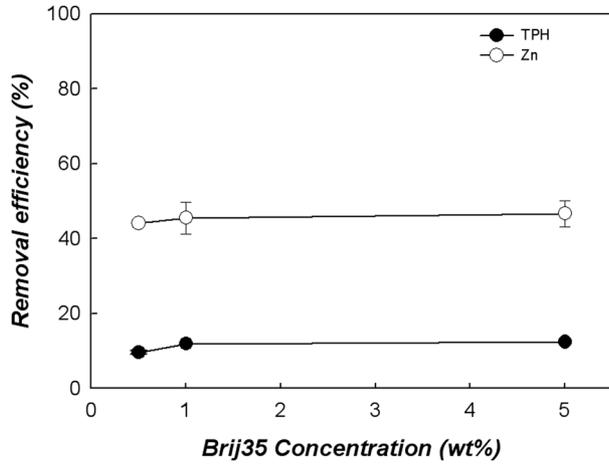


Fig. 2. Batch soil washing of acidic mixed agents. A soil was used; Temperature : 20°C; solid to liquid ratio : 20 g/100 mL; washing agent : 0.1 N HCl + Brij35; mixing speed: 150 rpm.

의 농도에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. TPH의 제거율을 살펴보면, Brij35의 농도 변화에 따라 TPH의 제거율을 변화는 거의 없었으며 약 15%의 제거율을 보였다. 이와같이 윤활유의 제거율이 낮은 이유는 계면활성제가 윤활유의 계면장력을 낮추어 제거를 하는 반면에 계면활성제가 토양과 결합되어 있는 윤활유로 흡수 또는 흡착되기 때문이다. 이는 GC 크로마토그램을 통해서도 확인할 수 있었다(Fig. 3). 세척 전 크로마토그램(Fig. 3a)과 세척 후 크로마토그램(Fig. 3b)를 비교한 결과 Brij35를 사용하여 세척을 진행한 경우 일반적인 윤활유 오염토양에서 나타나지 않는 peak 형태를 보였다. 혼합세척액에서 HCl은 Zn의 제거에 기여하며, 함께 사용된 비이온성계면활성제는 윤활유의 탈착과 윤활유로의 흡착에도 관여하는 것으로 나타났다. 따라서 토양과 결합되어 있는 윤활유로의 계면활성제의 흡착을 최소한으로 줄이는 방법이 필요하며 많은 양의 계면활성제 사용은 오히려 제거율을 감소시키는 원인이 된다.

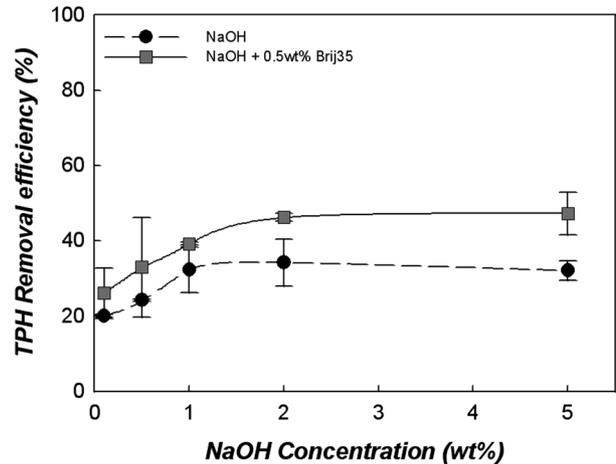


Fig. 4. TPH removal using alkaline mixed agents. Temperature : 20°C; solid to liquid ratio : 20 g/100 mL; washing agent : 0.5 wt% Brij35 + NaOH; mixing speed: 150 rpm.

3.2. 알칼리 혼합 세척액을 이용한 토양 세척

실험결과 무기산의 Zn에 대한 제거는 양호하나, 계면활성제의 윤활유 제거는 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 따라서 윤활유 제거 시 계면활성제의 흡착은 최소화 하면서 TPH의 제거율을 향상시키기 위하여 NaOH를 첨가하여 세척액을 제조하였다. NaOH는 유류성분 또는 토양 유기물과 반응하여 비누화반응을 일으켜 계면활성제와 유사한 효과를 나타낼 수 있으며, 윤활유의 계면장력을 낮추어 주는 효과를 기대할 수 있다(Park et al., 2010). NaOH 단독으로 세척을 진행한 것과, Brij35 + NaOH의 혼합 세척액을 이용하여 진행한 세척실험 결과를 Fig. 4, 5에 나타내었다. TPH의 경우 NaOH단독 세척액으로도 약 30%의 제거율을 보였다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 염기성 수용액이 윤활유의 계면장력을 감소시키는 역할을 하기 때문이다. 첨가한 NaOH의 농도가 증가하면 윤활유의 제거율은 소폭 증가하나 1.0 wt% 이상의 NaOH에서는 더 이상의 증가를 나타내지 않았다. 이러한 결과는 S.W

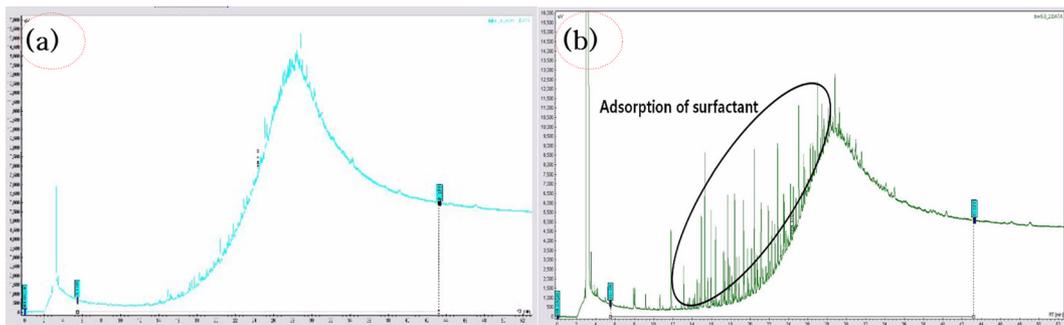


Fig. 3. (a) Chromatogram of GC before soil washing, (b) : Chromatogram of GC after soil washing using 0.1 N HCl + 5.0 wt% Brij35.

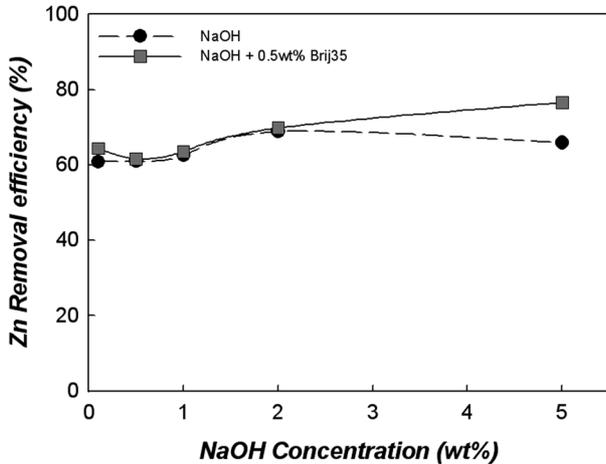


Fig. 5. Zn removal using alkaline mixed agents. A soil was used; Temperature : 20°C; solid to liquid ratio : 20 g/100 mL; washing agent : 0.5 wt% Brij35 + NaOH; mixing speed: 150 rpm.

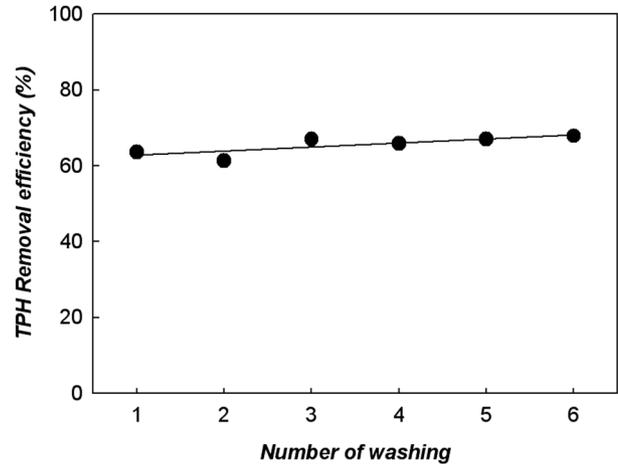


Fig. 7. Sequential soil washing using alkaline mixed agent. B soil was used; Temperature : 20°C; solid to liquid ratio : 20 g/100 mL; washing agent : 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt %NaOH; mixing speed: 150 rpm.

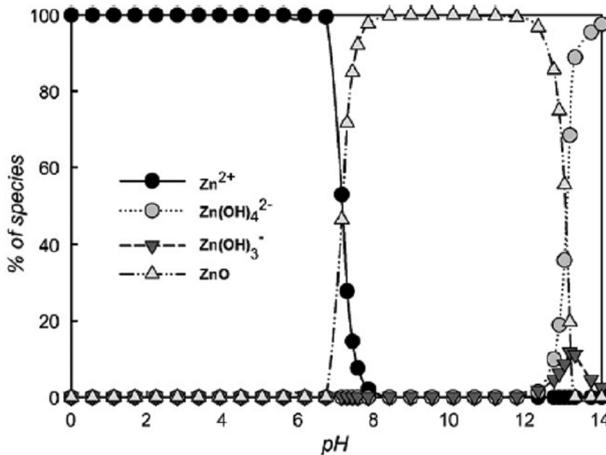


Fig. 6. The speciation of Zn at various pH. The result was simulated using visual MINTEQ 3.0.

Park et al.(2010)의 연구에서도 비슷한 경향을 보인다. 계면활성제의 첨가는 윤활유의 제거를 증가시켜 44%의 윤활유를 제거할 수 있었다. NaOH의 첨가는 비누화 반응을 통한 계면장력을 낮추는 역할과 계면활성제의 윤활유로의 흡수를 줄이는 역할을 하는 것으로 판단된다. GC 크로마토그램에서 계면활성제의 흡착 감소를 확인할 수 있었다. 계면활성제와 NaOH가 함께 사용된 경우에도 1.0 wt% 이상의 NaOH 조건에서 약간의 제거율 향상을 있었으나, 이후 실험에서는 1.0 wt%의 NaOH를 사용하여 실험을 진행하였다. Zn의 경우 NaOH 단독 세척액, 계면활성제와 NaOH 혼합 세척액을 사용했을 때 제거율의 차이가 크게 나타나지 않는다. 이는 아연의 제거에 있어 Brij35의 영향은 거의 없음을 의미한다. NaOH에 의한

Zn의 제거는 pH 상승으로 인한 Zn의 용해로 인한 것으로 판단된다. pH에 따른 Zn의 존재형태를 모사한 결과 pH 12 이상에서 Zn은 OH와 결합하여 음이온 형태로 용출될 것으로 판단된다. 즉 Zn(OH)₃⁻ 또는 Zn(OH)₄²⁻ 형태를 띠어서 토양 또는 윤활유에서 용해되어 세척된 것으로 판단된다(Fig. 6). 따라서 NaOH의 첨가는 윤활유 및 아연의 제거율을 높이는 데 기여하는 것으로 판단된다. 또한 1.0 wt% 이상의 NaOH 첨가는 제거율 향상에 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 추후 실험에서는 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH를 최적조건의 세척액으로 선정하여 실험을 진행하였다.

3.3. 알칼리 혼합 세척액의 적용성 평가

알칼리 조건의 혼합세척액이 산성조건의 혼합세척액보다 세척능이 우수하였으나 전체적인 제거율이 높지 않아, 다른 토양인 B를 대상으로 연속세척 실험을 수행하였다. 연속세척 실험결과 세척횟수 증가에 따른 제거율의 증가는 거의 보이지 않았다(Fig. 7). 반면 A토양에 비하여 높은 제거율을 얻을 수 있었다. 이는 A토양이 상대적으로 고농도의 윤활유로 오염되어 있었기 때문으로 사료된다. 따라서 연속세척에 대한 효과는 상대적으로 적으며, 제거율 향상에 크게 기여하지 않는다고 판단하였으며, 저농도로 오염된 토양에 대해서도 NaOH와 Brij35의 혼합 세척액은 윤활유 제거에 효과적인 것으로 나타났다.

토양세정에의 적용 가능성을 평가하기 위해서 알칼리 혼합 세척액을 사용하여 컬럼 세정 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 세정액 주입량은 전체

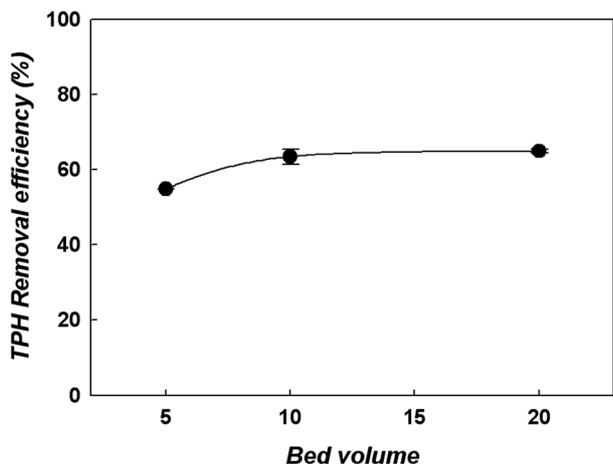


Fig. 8. Soil flushing in a column using alkaline mixed agent. B soil was used; Temperature : 20°C; bed volume : 83.5 cm³; washing agent : 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt %NaOH.

공정의 운전 시간과 정화 비용에 직접적인 영향을 준다. 따라서 세정액 주입량과 제거율에 따른 TPH 제거율을 평가하였다. Fig. 8에 보는 바와 같이, 10 BV 이상에서는 제거율 증가가 거의 없으며, 10 BV에서 앞서 수행한 토양세척과 유사한 63%의 제거율을 얻었다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서 평가된 혼합 알칼리 세척액이 토양세정 및 토양세척에 활용할 수 있다고 판단하였다.

3.4. 2차원 토양세정

위의 세척실험과 세정실험을 통해 얻은 최적조건의 세척액을 이용하여 원위치 정화의 가능성을 평가하기 위해 2차원 반응기를 활용하여 토양세정 실험을 수행하였다. 세정액은 20 bed volume 주입하였으며 실험 종료 후 잔류 TPH 및 아연의 농도분포는 Fig. 9, 10과 같다. 또한 평균제거율은 Table 3에 정리하였다. TPH는 약 45 cm

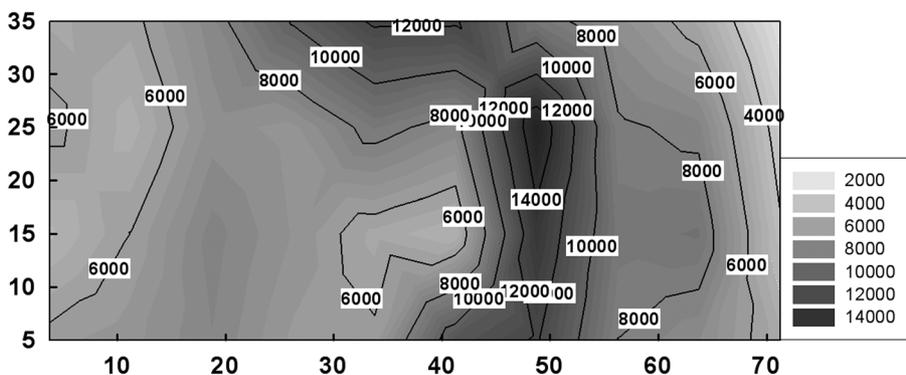


Fig. 9. Distribution of residual TPH concentration in 2-dimensional soil flushing. B soil was used; temperature : 20°C; bed volume : 30 L; 10 BV of 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH was injected at the left bottom and the flushing solution was extracted from the right top. After then 5 BV of 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH, 3 BV of 0.5 wt% Brij35 + 0.1 N HCl, and 2 BV of 1.0 wt% NaOH were injected sequentially at the right bottom and was extracted from the left top.

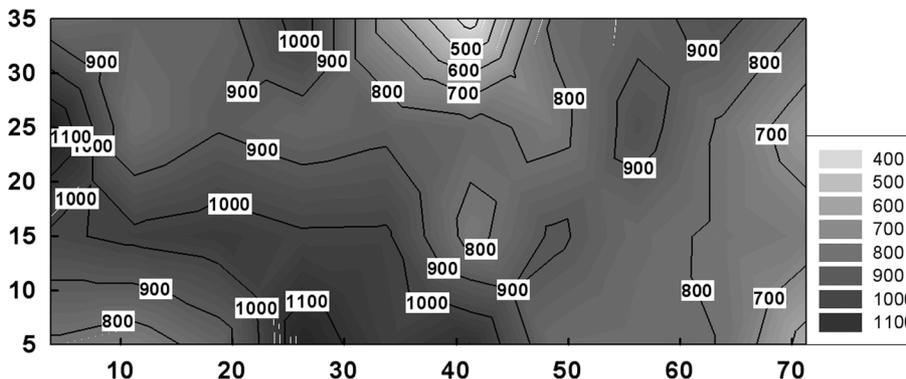


Fig. 10. Distribution of residual Zn concentration in 2-dimensional soil flushing. B soil was used; temperature : 20°C; bed volume : 30 L; 10 BV of 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH was injected at the left bottom and the flushing solution was extracted from the right top. After then 5 BV of 0.5 wt% Brij35 + 1.0 wt% NaOH, 3 BV of 0.5 wt% Brij35 + 0.1 N HCl, and 2 BV of 1.0 wt% NaOH were injected sequentially at the right bottom and was extracted from the left top.

Table 3. Removal of TPH and Zn in the 2-dimensional soil flushing

	Initial Conc. (mg/kg)	Average Residual Conc. after treatment (mg/kg)	Removal efficiency (%)
TPH	11,760	7,680	33.9
Zn	1,021	853	16.5

부근에서 누적되었으며, 초기 농도와 유사한 것으로 나타났다. 이는 윤활유의 이동이 원활하지 않아 나타난 현상으로 판단된다. 전체적인 세정액의 흐름이 균일하지 않아 깊이별 편차도 관찰되었다. Zn의 경우 윤활유 보다는 비교적 균일하게 제거되었으나, 하단부의 제거율이 상대적으로 낮았다. 이 역시 세정액의 흐름과 연관된 것으로 판단된다. 2차원 세정 실험 결과는 세척실험 및 컬럼 세정 실험에서 얻었던 결과보다 낮은 제거율을 보였다. 세정액의 주입이 양쪽에서 이루어졌기 때문에 가장자리를 중심으로 제거가 이루어진 것으로 보인다. TPH의 경우 3지역 대책기준 6,000 mg/kg 미만으로 제거되지 않았지만 기존의 방법으로 제거가 어려운 윤활유를 처리 할 수 있다는 가능성을 확인 할 수 있었다. 또한 혼합 세척액을 이용하여 2 차원의 반응기에서도 윤활유와 아연을 동시에 제거할 수 있음을 알 수 있었다. 세척실험 및 컬럼실험의 결과보다 제거율이 낮게 나온 이유는 세정액의 주입이 일정하게 이루어지지 않았기 때문으로 판단되며, 향후 세정액의 주입을 일정하게 하기 위한 방법이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 윤활유와 아연으로 복합 오염된 철도토양에 대해서 토양세척 및 토양세정공법을 적용하였다. 계면활성제를 단독으로 사용한 경우에는 계면활성제의 토양으로의 흡착으로 인하여 높은 제거율을 보이지 않았지만, 계면활성제와 NaOH를 혼합하여 세척액을 제조한 결과 알칼리용액의 비누화반응에 의해 제거율이 향상되는 것을 알 수 있었다. 또한 계면활성제와 HCl의 혼합 세척액을 이용하여 윤활유와 아연을 동시에 제거가 가능함을 확인하였다. 세척실험에서 얻어진 조건을 이용하여 2-D차원의 bench-scale 테스트를 진행한 결과 비교적 낮은 제거율을 보였지만 복합오염 토양을 원위치 처리를 통해 정화가 가

능하다는 것을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김남호, 김인수, 최애정, 이민희, 2006, 과산화수소를 이용한 현장원위치 화학적 산화법과 공기분사법을 연계한 디젤 오염 토양/지하수 동시 정화 실내 실험 연구, 지하수토양환경, **11(6)**, 8-17.

김민경, 공성호, 2006, Modified Photo-Fenton Reaction을 이용한 Methyl Tert-butyl Ether(MTBE)의 분해 Kinetic 및 메커니즘 규명에 관한 연구, 지하수토양환경, **11(6)**, 69-75.

박성우, 신민철, 전철성, 백기태, 이재영, 2008, 윤활유 유래 철도 오염토양의 정화방법 연구, 지하수토양환경, **13(2)**, 30-35.

박성우, 이재영, 권태순, 김경조, 정근욱, 백기태, 2009, 세척제를 이용한 아연오염 철도토양의 정화 타당성 연구, 지하수토양환경, **14(1)**, 78-82.

백기태, 김도형, 서창일, 양중석, 이재영, 2007, 염산을 사용한 납 오염토양의 토양세척에 의한 정화, 지하수토양환경, **12(3)**, 17-22.

이종열, 김용수, 권영호, 공성호, 박신영, 이창환, 성혜련, 2004, EDTA와 붕산 혼합용출제를 이용한 중금속으로 오염된 토양의 처리에 관한 연구(I) : 납, 지하수토양환경, **9(4)**, 1-7.

황정성, 최상일, 한상근, 2005, 폐 철광산 주변 비소로 오염된 토양에 대한 연속 세척기법의 적용, 지하수토양환경, **10(1)**, 58-64.

Park, S.W., Lee, J.-Y., Yang, J.-S., Kim, K.-J., and Baek, K.T., 2009, Electrokinetic remediation of contaminated soil with waste-lubricant oils and zinc, *J. HAZARD. MATER.*, **169**, 1168-1172.

Park, S.-W., Lee, J.-Y., Kim, K.-J., Yang, J.-S., and Baek, K.T., 2010, Alkaline Enhanced-Separation of Waste Lubricant Oils from Railway Contaminated Soil, *SEP. SCI. TECHNOL.*, **45** (12&13), 1988-1993.