

## 군 사격장 층위별 특성에 따른 오염토양의 FeCl<sub>3</sub> 기반 세척 적용성 평가

곽녹일 · 박재우 \*

한양대학교 건설환경공학과

### Evaluation of FeCl<sub>3</sub>-Based Washing Applicability for Pb-Contaminated Soils According to Stratigraphic Characteristics at a Military Shooting Range

Kwak, Nogil and Jae-Woo Park\*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, South Korea

#### ABSTRACT

This research evaluated the applicability of FeCl<sub>3</sub>-based soil washing for Pb-contaminated soils collected from a military shooting range, focusing on stratigraphic differences. Through a systematic investigation of washing reagent type, concentration, liquid-to-solid ratio (L/S), agitation conditions, and magnetic separation intensity based on the subsoil (1.0-2.0 m), the optimal operating parameters were determined as FeCl<sub>3</sub> 0.1 M, L/S = 1:3, 20 min, 300 rpm, and 6,000 G. Under these conditions, the subsoil showed removal efficiencies of 74.2% in the 2.00-0.85 mm particle range and 88.8% in the 0.85-0.15 mm range, Pb concentrations below the remediation standard (200 mg·kg<sup>-1</sup>). In contrast, when the same conditions were applied to the topsoil (0.0-0.6 m) and intermediate soil (0.6-1.0 m), high variability in removal efficiency was observed due to the presence of particulate lead bullets and metallic residues, and the target standard could not be met even after repeated washing. Additional washing following density separation improved the topsoil and intermediate soil by approximately 60%; however, final concentrations remained over three times higher than the regulatory threshold. Statistical analysis confirmed that the difference in washing efficiency between the subsoil and the upper layers was significant ( $p < 0.005$ ). Therefore, this study demonstrates that FeCl<sub>3</sub> washing alone is applicable for subsoil remediation, while for topsoil and intermediate layers, combined advanced separation processes are required. These findings provide a scientific basis for developing stratified remediation strategies for Pb-contaminated military sites.

**Key words :** FeCl<sub>3</sub> washing, Soil remediation, Heavy metal contamination, Pb removal

#### 1. 서 론

국내의 산업화와 도시화, 그리고 군사 활동이 누적된 부지에서는 납(Pb), 비소(As), 구리(Cu), 아연(Zn), 카드뮴(Cd) 등 잠재독성원소(PTEs)가 동시에 높게 검출되는 복합오염이 광범위하게 관찰된다. 전 세계 농경지의 14-17%가 금속 오염의 영향권에 있으며 해당 지역 인구 9-14억 명이 보건·생태 위험에 노출됨을 보였다(Hou et al., 2025).

이는 대규모 산업·도시·채광 지역뿐 아니라 군사 활동 지역과도 공간적으로 겹친다(Su et al., 2022). 이러한 토양은 개발·재이용 대상임에도 오염으로 인해 생태계 기능과 인체 건강에 직접적 위험을 유발하며, 위험도는 중금속의 종류·농도·화학종·생물학적 가용성에 의해 좌우된다(Ondrasek et al., 2025). 중금속은 자연 생분해가 불가능하고 토양·지하수 시스템에서 수십 년 이상 잔류·축적된다. 산업·군수 시설 및 도시개발지에서의 채광·제련, 화석 연료 연소, 전자폐기물 처리 등과 같은 지속적 배출은 대기·토양·수계 전이를 통해 오염 수준을 상승시키며, 이는 산업 밀집 지역에서 농도 상승과 함께 공간적 오염 패턴을 만든다(Wang et al., 2025). 군사 훈련장·사격장·탄약 제조·폐기 시설은 군사 활동에 의한 오염의 대표적 원천으로, 폭발 및 사격으로 인한 토양 손상 등으로 토양의 물리·화학적 교란을 야기하고 금속·추진제·연소 잔사가 난분해성

주저자: 곽녹일, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정학생

공저자: 박재우, 한양대학교 건설환경공학과 정교수

\*교신저자: 박재우

E-mail: jaewoopark@hanyang.ac.kr

Received : 2025. 8. 25 Reviewed : 2025. 9. 29

Accepted : 2025. 9. 30 Discussion until : 2025. 12. 31

형태로 장기 잔류하여 독성을 나타낸다(Broomandi et al., 2020). 이러한 금속은 작물 뿌리·지상부로 전이되어 식품 사슬에 축적되고, 사람에게 노출되는 경로를 형성한다.

입도 의존적 거동 측면에서, 미세입자(fine fraction), 특히 <0.063 mm 실크-점토 분획은 비표면적이 크고 Fe/Mn 산화물-점토피막에 금속이 강하게 결합되어 오염의 핫스팟으로 기능하는 것이 일반적이다(Niarchos., 2018). 규제·기술 자료와 최신 연구에 따르면 오염물질의 대부분이 미세분획에 농축되고, 입도 분리 기반 세척에서 거친 모래(0.25-2 mm)는 세척 용이하나 <0.063 mm 분획은 세척이 곤란하다(Cho et al., 2022). 현장 및 실험실 연구에서도 <0.063 mm 분획 비율이 높을수록 Cu·Zn·Pb·Cd 등의 농도와 분획별 위험지표가 유의하게 상승하고, 세척 효율이 저하되는 경향이 보고된다(Nawrot et al., 2020). 이러한 배경 속에서, 산성 용액과 킬레이터를 이용한 토양세척은 오랫동안 연구·적용되어 왔다(Zhang et al., 2010). 염산(HCl)과 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)은 H<sup>+</sup>에 의한 용출과 탄산염/산화물 용해로 초기 용출속도가 크지만, 토양의 성상 변형과 생태학적 영향이 동반된다. 복합산계 세척에서 As 제거율이 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 35.8%보다 인산(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) 63.0%가 더 높게 나타났으며, 입도 0.106 mm 전후 분획에서 산 세척의 영향이 뚜렷하였다(Cho et al., 2020). 또한 HCl·H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·EDTA·염화철(III)(FeCl<sub>3</sub>) 등으로 세척한 토양에서 종자 발아율이 3.6-32.1% 감소하는 생태독성 징후가 관찰되었다. 이는 산성 및 강력 킬레이트 기반 세척 후 토양 기능 회복의 어려움을 보여준다(Deng et al., 2023).

그 중 FeCl<sub>3</sub>은 가수분해 과정에서 pH를 낮추어 금속 용출을 유도하고, 동시에 염소 이온이 금속과 착물을 형성하여 이동성을 증가시키며 또한 pH 회복 단계에서 생성되는 Fe(OH)<sub>3</sub>/FeOOH 플록(Floc)이 용출된 금속을 공침 및 흡착하여 회수하는 두 가지 장점을 지니고 있다(Guo et al., 2016; Shi et al., 2020). pH>2.4 조건에서는 HCl보다 Cd 추출이 우수하였고, 20 mmol·L<sup>-1</sup> FeCl<sub>3</sub>에서 Cd 66.5% 제거가 보고되는 등, 메커니즘-성능 연계 데이터가 제시되어 왔다(Dong et al., 2021). 그럼에도 다성분계 또는 신토 기반의 파일럿/현장 규모에서 입도 및 분획별 처리 성능, 농도, 고액비, 시간 간의 상호작용 통계적 유의성, 그리고 산화-마쇄(oxidative attrition) 전처리와의 시너지 효과를 정량적으로 규명하고, 세척수 재이용·Fe/Cl 수치(Mass balance)까지 통합 제시한 연구는 제한적이다. 특히 미세분획(<0.15 mm)에서의 성능 저하 및 컷오프 기준의 과학적 근거는 현장 적용성 관점에서 핵심 공백으로 남아 있다.

본 연구에서는 다음과 같은 세가지 목표를 설정하였다:

(i) 사격장 Pb 오염 토양을 대상으로 FeCl<sub>3</sub> 기반 세척 공정의 입도 및 분획 의존적 성능을 정량적으로 규명하고, (ii) FeCl<sub>3</sub> 농도(0.05-0.5 M), 고액비(L/S = 1:1-1:3), 접촉 시간(20-60분)의 상호작용을 고려하여 최적 세척 조건을 도출하고, (iii) 실증시험을 통해 층위별(표토-중토-심토) 세척 효율을 분석하며, 0.15 mm Cut-off 기준의 적용 타당성을 검증하는 것이다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 시료 채취 및 전처리

연구 대상지는 경기도 고양시 덕양구 화전동(북위 37.6071°, 동경 126.8722°) (구) 사격장 및 주거지역 예정 일대이다. 시료는 표토 0.0-0.6 m, 중토 0.6-1.0 m, 심토 1.0-2.0 m 깊이에서 채취하였다. 채취 시료는 실험실로 이송하여 통풍 건조하고 2.00 mm 체로 거른 뒤 균질화하였다. 표토에는 탄피 및 금속 잔재가 다량 존재하여 오염의 불균질성이 크므로, 세척 조건 최적화는 상대적으로 균질한 심토를 기준으로 설계하였다. 세척 전처리로 자성 선별을 적용하였다. 봉타입 영구자석(Ø27 × 300 mm)을 이용하여 4,000 G 및 6,000 G를 비교하였다. 자성체 및 비자성체 분획을 분리한 뒤 각각을 후속 세척 실험에 사용하였다. 채취된 각 층위별 토양에 대해 유도결합플라즈마 분광 분석법(ICP-OES, PerkinElmer Avio 200, 미국)을 이용하여 Pb 농도를 사전 분석하였다. 표토는 평균 27,454 mg·kg<sup>-1</sup>, 중토는 24,395 mg·kg<sup>-1</sup>, 심토는 492 mg·kg<sup>-1</sup> 수준으로 확인되었으며, 이는 표토와 중토에서 납탄 잔재의 직접적인 영향으로 주거 예정 지역 기준인 1지역 토양오염우려기준 기준(200 mg·kg<sup>-1</sup>)을 수십 배 이상 초과하였음을 보여준다(토양환경보전법 시행규칙, 환경부, 2022). 반면 심토는 풍화와 화학적 변환을 거쳐 비교적 낮고 안정된 농도를 나타냈다.

### 2.2. 토양 이화학적 특성

측정 항목은 pH, 유기물 함량(OM), 양이온교환용량(CEC), 진비중, 입도/토성, X선 형광 분석(XRF)에 의한 주요 원소 조성이다. 기준은 환경부 토양오염공정시험기준 및 농촌진흥청 토양 이화학 분석방법을 준용하였다. 시료 10.0 g(건중)과 탈이온수 50.0 mL를 250 mL 비이커에 넣고 자기교반기로 200 rpm, 30 min 교반하였다(시료:용액 1:5, w/v). 교반 후 실온에서 10 min 정체시켜 큰 입자를 가라앉힌 뒤 상등액에서 pH를 측정하였다. 시료를 105°C, 24 h 예건조하여 수분을 제거하고, 도가니에 정확히 5.000 g

표 1. 오염 토양의 이화학적 분석결과

시료명	pH	유기물 함량 (%)	CEC (cmolc/kg)	진비중 (g/cm <sup>3</sup> )	입경 분석			토성
					점토 (%)	미사 (%)	모래 (%)	
심토	6.7	0.55	7.89	2.96	24.19	13.27	62.54	사질식양토 (Sandy clay loam)

표 2. 오염 토양의 XRF 분석 결과

오염 토양 (단위: %)										
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	PbO
55.90	23.10	12.30	5.47	1.08	0.88	0.37	0.37	0.13	0.11	0.10

을 담아 550°C, 2 h 강열하였다. 데시케이터에서 30 min 냉각 후 무게를 측정하고, 강열감량률(%)으로 산출된 값을 OM으로 분석하였다. 시료 5.00 g에 1 M NH<sub>4</sub>OAc(pH 7.0)을 가하여 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 포화(진탕 30 min, 3회)시킨 후, 에탄올(95%)로 3회 세척하여 잉여 NH<sub>4</sub>OAc를 제거하였다. 이어서 1 M KCl 용액 100 mL로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 치환(진탕 30 min)하여 여액을 회수하여 CEC를 분석하였다. 진비중은 건조-분쇄한 시료를 피크노미터(50 mL)에 넣고 탈기된 탈이온 수(DI water)로 정용하여 25°C 항온 수조에서 밀도를 측정하였다. 공피크노미터와 DI water만을 이용해 보정한 뒤, 시료 질량과 체적 차이로 산출하였다. 체 진탕기(Jisco, J-VSS, 한국)에 2.00-0.85-0.15-0.075 mm 체를 적층하고, 분산된 슬러리를 투입하여 습식선별하였다. 각 체 상부에 잔류한 질량 기준으로 분획별 비율을 산출하였다. 토성 분류는 입도 결과를 USDA 삼각도(USDA textural triangle)에 대입하여 판정하였다.

XRF는 규정 전처리 후 산화물 환산(%)으로 보고하였다. 본 연구의 심토에서는 표 2과 같이 PbO ≈ 0.24% 등 주요 산화물 조성이 확인되었다.

아울러 판상 진동 비중선별기(Jiangxi Well-tech사, 조립 질·세립질 분리형)를 적용하여 F-0 에서 F-6 구간으로 분획(Fraction)하였다. 각 분획 구간에 대해서는 ICP-OES로 Pb 농도를 분석하였다. 비중이 높은 F-6 구간에서 납탄 조각이 집중적으로 관찰되었으며, 이를 보완적으로 SEM-EDS(Apreo 2S, Thermo)를 사용해 표면 이미지와 원소 조성을 분석하여 금속 잔재 및 교질물 부착 형태를 규명하였다.

### 2.3. 세척 조건 설정

세척제는 구연산(Citric acid), 옥살산(Oxalic acid), HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, FeCl<sub>3</sub>를 비교하였다. 초기 실험에서 FeCl<sub>3</sub>가 가장



그림 1. 세척 반응기

높은 Pb 제거 효율을 보여, 주 세척제로 선정하였다. 세척제 농도는 0.05-0.5 M, 고액비는 1:2, 1:3, 1:5, 1:10, 세척 시간은 20, 30, 60분, 교반강도는 100, 150, 300 rpm 조건으로 설정하였다. 반응은 그림 1과 같이 500 mL 삼비커에 토양 150 g을 투입하고 세척제를 가하여 진탕 교반한 후 체분리를 통해 분리하는 방식으로 수행하였다. 세척 전·후 토양은 혼산(HNO<sub>3</sub>:HCl = 1:3)으로 70°C, 2시간 소화하여 여과 후 100 mL로 정용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 심토의 세척 특성

사격장 심토(1.0-2.0 m)를 대상으로 세척 조건을 단계적으로 최적화하였다. 우선 세척제 종류를 비교한 결과, 그림 2와 같이 구연산, 옥살산, 황산, 염산 대비 FeCl<sub>3</sub>가 가장 안정적이고 높은 제거 효율을 보였다. 초기 Pb 농도

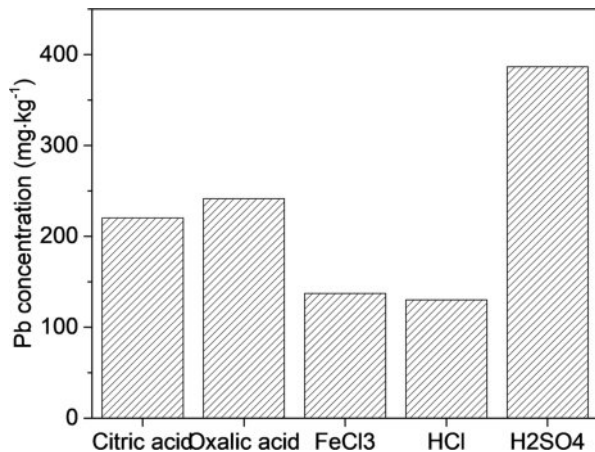


그림 2. 세척제 종류 별 토양 세척 후 토양 내 잔류하는 Pb 농도(초기농도: 468.98 mg·kg⁻¹).

468.98 mg·kg⁻¹에서 구연산 처리 후 220.31 mg·kg⁻¹, 옥살산 241.64 mg·kg⁻¹, 황산 386.64 mg·kg⁻¹, 염산 130.14 mg·kg⁻¹로 각각 감소했으나, FeCl₃에서는 137.35 mg·kg⁻¹로 가장 낮은 수준을 기록하였다. 이는 FeCl₃가 단순한 산성 세척

제를 넘어, 가수분해 산성화(H⁺)에 의한 용출, Cl⁻ 착염에 의한 이동성 증가, Fe(OH)₃/FeOOH 플록 형성에 의한 공침·흡착 회수를 동시에 유도하는 이중 메커니즘을 갖기 때문이다(Orienkhova and Stoll., 2014).

농도 효과를 검토한 결과, 그림 3(a)와 같이 0.05 M에서는 세척 후 농도가 206.74 mg·kg⁻¹로 Pb의 1지역 토양 오염우려기준(200 mg·kg⁻¹)을 초과하였다. 그러나 0.1 M 조건에서는 128.69 mg·kg⁻¹로 안정적으로 기준 이하로 감소하였다. 0.2 M과 0.5 M 조건에서도 각각 130.57 mg·kg⁻¹, 137.35 mg·kg⁻¹로 유사한 결과가 나타났으며, 이는 농도를 0.1 M 이상으로 높여도 효율 개선은 제한적임을 보여준다. 따라서 경제성과 환경 부하를 고려했을 때 0.1 M이 최적 농도로 도출되었다. 고액비(L/S)의 경우, 그림 3(b)와 같이 1:2 조건에서 세척 후 Pb 농도는 348.09 mg·kg⁻¹로 기준을 초과했으나, 1:3과 1:5 조건에서는 각각 166.15 mg·kg⁻¹과 152.46 mg·kg⁻¹로 크게 감소하여 기준치를 만족하였다. 그러나 1:5 조건에서 나타난 농도 저감 폭은 1:3 조건과 비교했을 때 뚜렷한 추가 개선 효과를 보이지 않았다. 이는 고액비가 증가하면 산성 용액의

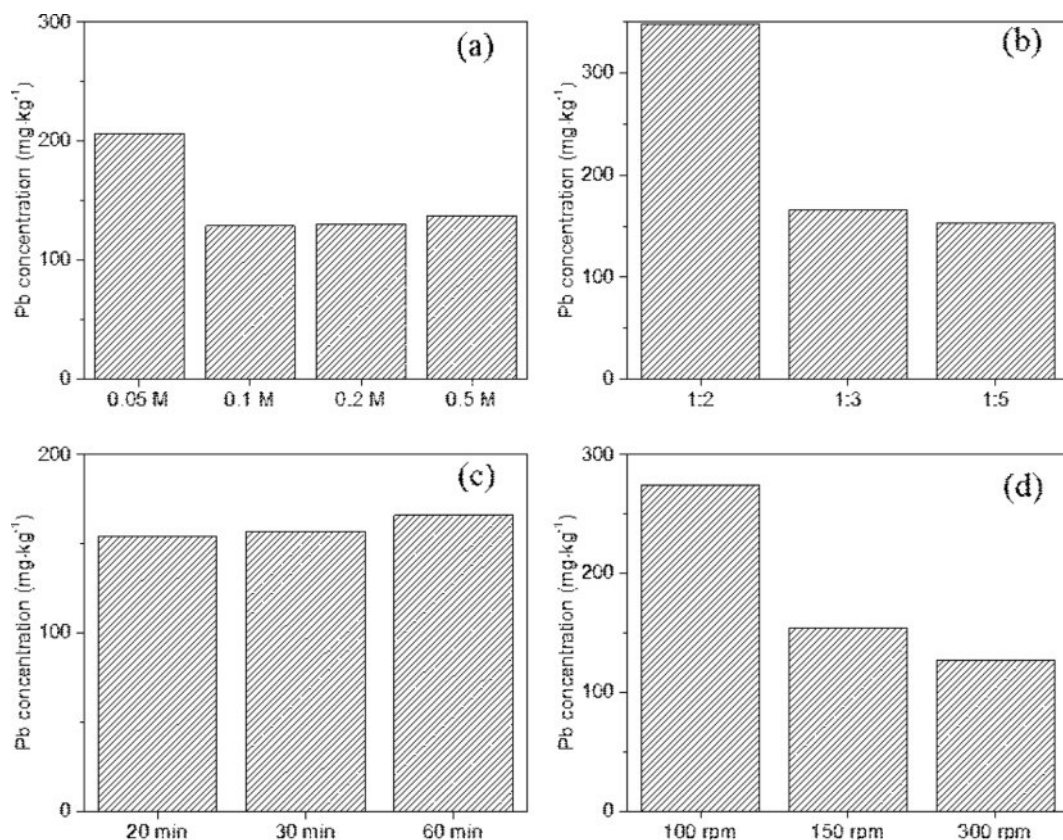


그림 3. 세척 조건 별 토양 내 Pb 농도 (초기농도: 468.98 mg·kg⁻¹), (a) 세척제 농도 별, (b) L/S 별, (c) 교반 시간 별, (d) 교반 속도 별 세척 후 토양 내 농도.

표 3. 입도 분포 별 Pb 오염 토양 세척 전 후 농도 비교

입도범위 (mm)	세척제	고액비	농도	체류시간 (분)	처리 전 (mg·kg <sup>-1</sup> )	처리 후 (mg·kg <sup>-1</sup> )
2.0~0.85	FeCl <sub>3</sub>	1:3	0.1	20	492	127
0.85~0.15	FeCl <sub>3</sub>	1:3	0.1	20	492	55
0.15~0.075	FeCl <sub>3</sub>	1:3	0.1	20	521	403
0.075이하	FeCl <sub>3</sub>	1:3	0.1	20	521	410

비율이 높아지면 초기 용출에는 유리하지만, 일정 농도 이상에서는 희석 효과와 토양 손상 때문에 제거 효율이 감소하는 경향을 나타낸 것으로 해석된다(Duan and Gregory, 2003; Li et al., 2006). 세척시간별 비교 결과는 그림 3(c)와 같이 20분 조건에서 Pb 농도가 154.05 mg·kg<sup>-1</sup>로 이미 기준 이하로 감소하였으며, 30분과 60분에서는 각각 156.96 mg·kg<sup>-1</sup>, 166.15 mg·kg<sup>-1</sup>로 오히려 다소 증가하였다. 이는 초기 20분 이내에 대부분의 Pb 용출이 이루어지고 이후에는 평형에 도달하면서 추가적인 제거 효과가 미미해지는 것을 의미한다. 마지막으로 교반 강도의 경우, 그림 3(d)와 같이 100 rpm에서는 세척 후 Pb 농도가 274.52 mg·kg<sup>-1</sup>로 기준을 초과하였으나, 150 rpm에서는 154.05 mg·kg<sup>-1</sup>, 300 rpm에서는 127.0 mg·kg<sup>-1</sup>로 감소하였다. 이는 교반 강도가 높을수록 토양 입단이 분쇄되어 비표면적과 약품 반응성이 증대되고, 결과적으로 금속 용출 효율이 향상된 데 기인한 것을 의미한다. 따라서 300 rpm이 적정 교반 강도로 도출되었다. 종합적으로 볼 때, 사격장 심토의 최적 세척 조건은 FeCl<sub>3</sub> 0.1 M, L/S = 1:3, 세척시간 20분, 교반강도 300 rpm, 자력선별 강도 6,000 G로 선정되었다. 이 조건은 반복 실험에서도 평균 제거율 65.4% ± 12.7%를 기록했으며, 일원분산분석(ANOVA) 분석 결과  $p < 0.005$  수준에서 통계적으로 유의한 효율을 보였다.

### 3.2. Cut-off size

세척 효율과 입경별 상관성을 규명하기 위해 심토(1.0-2.0 m)를 대상으로 Cut-off size 선정을 수행하였다. 2.00-0.85 mm와 0.85-0.15 mm 분획 구간에서 처리 전 Pb 평균 농도 492 mg·kg<sup>-1</sup>에서 각각 127 mg·kg<sup>-1</sup>(74.2% 저감), 55 mg·kg<sup>-1</sup>(88.8% 저감)로 감소하여 정화기준을 만족하였

다. 그러나 0.15-0.075 mm 분획에서는 처리 전 521 mg·kg<sup>-1</sup>에서 403 mg·kg<sup>-1</sup>로 감소하여 제거율이 22.6%에 불과했으며, 0.075 mm 이하 분획은 521 mg·kg<sup>-1</sup>에서 410 mg·kg<sup>-1</sup>로 21.3% 저감에 머물렀다.

ANOVA 검정 결과, 0.15 mm 이상과 미만 그룹 간 제거율 차이는  $p < 0.005$  수준에서 통계적으로 유의하였다. 특히 0.85-0.15 mm 분획에서는 반복 실험 간 표준편차가 ±5% 이내로 안정적이었으나, 0.15 mm 미만 분획에서는 ±15% 이상으로 변동성이 커 신뢰도가 낮았다. 이러한 결과는 납탄이 풍화·분해되는 과정에서 형성된 미세입자가 세립 분획에 집중적으로 분포하고 있거나 비정질 산화철이나 점토 표면에 강하게 결합되어 있어, 화학적 세척만으로는 제거가 어렵다는 점을 시사한다.

따라서 Cut-off size를 0.15 mm로 설정하고, 세척 대상 입경 범위를 2.00-0.15 mm로 한정하는 것이 현장 적용성 측면에서 가장 합리적이다. 이는 기존 문헌에서 보고된 ‘세척 효율은 미세분획에서 저하되며, 특정 입경 이상에서만 실효성이 있다’는 결과와도 일치한다(Nawrot et al., 2020; Cho et al., 2022).

### 3.3. 깊이별 세척 효율 비교

층위별 차이를 확인하기 위해 표토(0-0.6 m), 중토(0.6-1.0 m), 심토(1.0-2.0 m)를 대상으로 동일한 최적 조건(FeCl<sub>3</sub> 0.1 M, L/S = 1:3, 20분, 300 rpm, 6,000 G)을 적용하였다. 표토의 경우, 2.00-0.85 mm 분획은 처리 전 Pb 농도가 27,454 mg·kg<sup>-1</sup>에서 10,214 mg·kg<sup>-1</sup>로 감소하였으나, 여전히 기준치의 약 50배 수준이었다. 0.85-0.15 mm 분획은 13,627 mg·kg<sup>-1</sup>에서 5,839 mg·kg<sup>-1</sup>로 감소하여 57.2% 저감되었지만 기준치의 29배였으며, 0.15 mm 미만

Table 4. 표토 (0.0-0.6 m 깊이) 토양 세척 결과

입도범위 (mm)	세척제	고액비	농도	체류시간 (분)	마쇄교반 (rpm)	처리 전 (mg·kg <sup>-1</sup> )	처리 후 (mg·kg <sup>-1</sup> )
2.0~0.85	FeCl <sub>3</sub>	1:3	0.1	20	300	27,454	10,214
0.85~0.15	FeCl <sub>3</sub>	1:3	0.1	20	300	13,627	5,839
0.15이하	FeCl <sub>3</sub>	1:3	0.1	20	300	14,435	8,207

표 5. 중토 (0.6-1.0 m 깊이) 토양 세척 결과

입도범위 (mm)	세척제	고액비	농도	체류시간 (분)	마쇄교반 (rpm)	처리 전 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	처리 후 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
2.0~0.85	$\text{FeCl}_3$	1:3	0.1	20	300	24,395	4,902
0.85~0.15	$\text{FeCl}_3$	1:3	0.1	20	300	7,375	4,053
0.15이하	$\text{FeCl}_3$	1:3	0.1	20	300	5,754	1,321

Table 6. 심토 (1.0-2.0 m 깊이) 토양 세척 결과

입도범위 (mm)	세척제	고액비	농도	체류시간 (분)	마쇄교반 (rpm)	처리 전 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	처리 후 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
2.0~0.85	$\text{FeCl}_3$	1:3	0.1	20	300	492	127
0.85~0.15	$\text{FeCl}_3$	1:3	0.1	20	300	492	55
0.15이하	$\text{FeCl}_3$	1:3	0.1	20	300	521	450

분획은  $14,435 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 에서  $8,207 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 43.1% 저감에 그쳤다. 표토에서 제거율의 평균은  $18.3\% \pm 15.2\%$ 였고, ANOVA 분석에서  $p > 0.05$ 로 통계적 유의성이 없었다.

중토에서는 2.00-0.85 mm 분획은 Pb 농도가  $24,395 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 에서  $4,902 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 감소하여 79.9% 저감되었으나, 여전히 기준치의 25배 수준이었다. 0.85-0.15 mm 분획은  $7,375 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 에서  $4,053 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 감소하여 45.0% 저감되었고, 0.15 mm 미만 분획은  $5,754 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 에서  $1,321 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 77.0% 저감되었으나 여전히 기준치를 초과하였다. 중토의 평균 제거율은  $24.6\% \pm 12.9\%$ 였고, 실험 반복 간 변동계수(CV)는 25% 이상으로 결과의 재현성이 낮았다.

반면 심토에서는 2.00-0.85 mm와 0.85-0.15 mm 분획 모두 정화기준을 충족하였으며, 평균 제거율은  $65.4\% \pm 12.7\%$ 로 나타났다. 95% 신뢰구간을 비교했을 때 심토는 기준치 이하를 포함하였으나, 표토와 중토는 모든 구간에서 기준치를 상회하였다.

따라서 깊이별 비교 결과, 표토와 중토는 세척 공정만으로는 정화가 불가능하며, 입자성 Pb 물질을 제거하기 위한 선별·분리 공정 병행이 요구되었다. 반대로 심토는 세척 공정만으로도 정화기준을 만족할 수 있어, 층위별 차등 적용이 필요하다.

특히 표토와 중토 내의 잔존하는 입자성 Pb 물질은 화학적 세척만으로는 안정적인 정화가 어려운 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 표토와 중토를 대상으로 선별·분리 공정의 적용 가능성을 검토하기 위해 판상 진동 비중선별기를 이용하여 시료를 비중에 따라 구간별로 분류하였다. 시료가 물의 흐름에 의해 스크린 경사를 따라

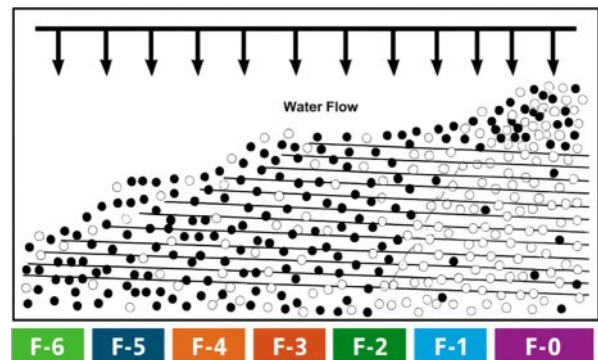


그림 5. 표토의 F-6 주사전자현미경-에너지분산형 분광분석 이미지.

이동하면서 그림 4와 같이 ‘Fraction 0(F-0)’에서 ‘Fraction 6(F-6)’으로 갈수록 고비중 물질이 집중되며, F-0은 가장 저비중 입자들이 모이고 F-6은 가장 고비중 입자들이 모이는 구간으로 확인되었다. 장치의 최적 운전 조건은 스크린 각도  $7^\circ$ , 진동 진폭 4.5 cm였다.

분리 결과 비중이 가장 높은 F-6에서 그림 5와 같이 표토에서 납 탄두 조각들이 많이 관찰되었다.

또한, F-0, 1에서도 그림 6과 같이 금속 잔재가 중토에서 밀도 분획에 농축되는 경향이 있음을 확인했으며, 데이터의 극단성을 제거하기 위해 실제 정화 대상으로는 F-2에서 F-5 분획을 중심으로 세척 실험을 진행하였다. 이때, 세척 대상 입경 범위를 2.00-0.15 mm로 한정하였다.

사격장 표토(0.0-0.6 m)와 중토(0.6-1.0 m)를 대상으로 비중선별 후 최적 조건에서 세척 실험을 수행하였다.

표토의 경우, 처리 전 Pb의 평균 농도가 그림 7과 같이  $1,393.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 1지역 토양오염우려기준 기준치 ( $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )를 크게 초과하였다. 세척 후에는  $695.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$



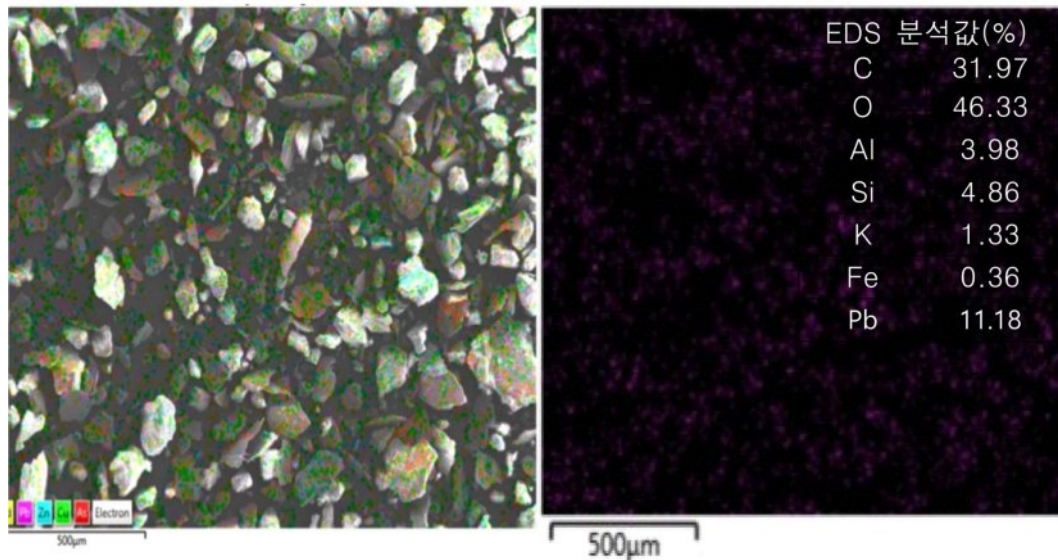


그림 5. 표토의 F-6 주사전자현미경-에너지분산형 분광분석 이미지.

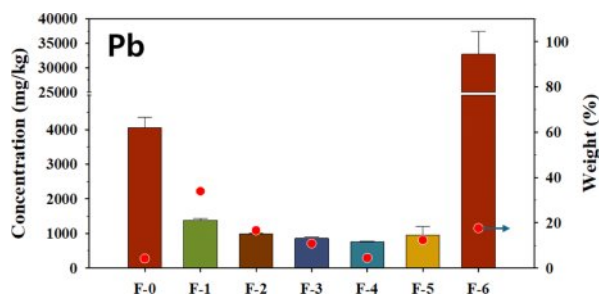


그림 6. 중토의 비중선별 후 Pb 농도 및 중량 비율.

로 약 50.1%의 저감 효과가 확인되었으나, 여전히 기준치의 세 배 이상을 상회하였다. 이는 비중선별을 통해 일부 입자성 금속이 제거되었음에도 불구하고, 잔여 오염원이 토양 내에 여전히 집중적으로 잔존하고 있음을 보여준다.

중토의 경우도 유사한 경향을 보였다. 처리 전 Pb의 평균 농도는 879.61 mg·kg<sup>-1</sup>이었으며, 세척 후에는 324.14 mg·kg<sup>-1</sup>로 낮아져 약 63.1%의 저감율을 나타냈다. 그러나 여전히 기준치의 약 1.6배 높은 수준으로, 세척 공정만으로는 정화 기준을 충족할 수 없었다.

따라서 표토와 중토 모두에서 비중선별 후 세척을 적용했음에도 불구하고, 정화기준에는 도달하지 못하였다. 이는 토양 내에 잔여하는 입자성 금속 오염원이 세척으로는 충분히 제거되지 않고 남아있기 때문이며, 세척 단독 공정의 한계를 의미한다. 따라서 표토와 중토는 추가적인 선별·분리 공정의 병행이 필수적이며, 단순 세척만으로는 현장 적용이 어렵다는 결론에 도달할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 사격장 토양을 대상으로 FeCl<sub>3</sub> 기반 세척 공정의 효율성을 심도별·입도별로 평가하였다. 실험 결과, 심토에서는 최적 조건(FeCl<sub>3</sub> 0.1 M, L/S = 1:3, 20분, 300 rpm, 6,000 G) 적용 시 2.00-0.85 mm 및 0.85-0.15 mm 분획 모두에서 정화기준 이하로 저감 되었으며, 평균 제거율은 65% 이상으로 통계적으로 유의하였다. 반면 표토와 중토는 동일 조건에서도 제거율의 CV가 20% 이상으로 불안정하였고, 세척 후 농도 역시 기준치의 수 배를 초과하였다. 특히 비중선별과 병행한 세척에서도 표토는 처리 전 1,393.56 mg·kg<sup>-1</sup>에서 695.54 mg·kg<sup>-1</sup>(50.1% 저감), 중토는 879.61 mg·kg<sup>-1</sup>에서 324.14 mg·kg<sup>-1</sup>(63.1% 저감)으로 낮아졌으나 여전히 기준치를 만족하지 못하였다. 이는 입자성 탄피와 금속 잔재가 집중 분포하는 표토·중토에서는 화학적 세척만으로는 한계가 있다. 따라서 본 연구의 결론은 표토와 중토는 세척만으로 정화 불가하고, 심토는 세척 단독 적용 가능한 것으로 요약된다. 이는 군사 사격장과 같은 중금속 오염부지의 정화 전략에서 층위별로 차등 구분하여 분리 및 세척 공정을 차등 적용하여야 한다는 것을 나타내었다.

#### 사 사

이 연구는 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업과 수생태계 건강성 확보 기술개발사업(과제번호: 2021003040004)의 지원을

받아 수행된 연구임

## References

- Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*, **12**(21), 9002.
- Cho, K., Kim, H., Purev, O., Choi, N., Lee, J. (2022). Physical separation of contaminated soil using a washing ejector based on hydrodynamic cavitation. *Sustainability*, **14**(1), 252.
- Cho, K., Myung, E., Kim, H., Park, C., Choi, N., Park, C., (2020). Effect of soil washing solutions on simultaneous removal of heavy metals and arsenic from contaminated soil. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **17**(9), 3133.
- Deng, Y., Wang, S., Beadham, I., Gao, X., Ji, M., Wang, G., Zhang, C., Ruan, W. (2023). Effect of soil washing with an amino-acid-derived ionic liquid on the properties of Cd-contaminated paddy soil. *Toxics*, **11**(3), 288.
- Dong, H., Qiu, W., Liang, S., Wang, D., (2021). Mechanisms of FeCl<sub>3</sub> washing for heavy-metal removal from soils: Hydrolysis, complexation and flocculation. *J. Hazard. Mater.*, **403**, 123-134.
- Duan, J., Gregory, J., (2003). Coagulation by hydrolysing metal salts. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **100-102**, 475-502.
- Guo, X., Wei, Z., Wu, Q., Li, Q., Wu, W., Zhang, C., (2016). Enhanced removal of heavy metals from contaminated soil using FeCl<sub>3</sub> washing coupled with subsequent stabilization. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **23**, 18902-18911.
- Hou, D., Jia, X., Wang, L., McGrath, S. P., Zhu, Y.-G., Hu, Q., Zhao, F.-J., Bank, M. S., O'Connor, D., Nriagu, J. (2025). Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, **388**(6744), 316-321.
- Li, T., Zhu, Z., Wang, D., Yao, C., Tang, H., (2006). Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. *Powder Technol.*, **168**(2), 104-110.
- Ministry of Environment (2022). Enforcement Rules of the Soil Environment Conservation Act, Appendix 3: Soil Contamination Concern Standards. National Law Information Center (Republic of Korea).
- Nawrot, N., Wojciechowska, E., Matej-Lukowicz, K., Walkusz-Miotk, J., Pazdro, K., (2020). Spatial and vertical distribution analysis of heavy metals in urban retention tanks sediments: A case study of Strzyza Stream. *Environ. Geochem. Health*, **42**, 1469-1485.
- Niarchos, G., (2018). Electrodialytic remediation of PFAS-contaminated soil. *MSc Thesis, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby*, 120 pp.
- Oriekhova, O., Stoll, S. (2014). Investigation of FeCl<sub>3</sub>-induced coagulation processes using electrophoretic measurement, nanoparticle tracking analysis and dynamic light scattering: Importance of pH and colloid surface charge. *Colloids Surf., A: Physicochem. Eng. Asp.*, **461**, 212-219.
- Ondrasek, G., Shepherd, J., Rathod, S., Dharavath, R., Rashid, M. I., Brtnicky, M., Shahid, M. S., Horvatinec, J., Rengel, Z., (2025). Metal contamination – A global environmental issue: Sources, implications & advances in mitigation. *RSC Adv.*, **15**(5), 3904-3927.
- Rinklebe, J., Shaheen, S. M., Tsang, D. C. W. (2020). Immobilization and phytoavailability of potentially toxic elements in contaminated soils using biochar and other amendments: A review. *RSC Adv.*, **10**, 21551-21574.
- Su, C., Meng, J., Zhou, Y., Bi, R., Chen, Z., Diao, J., Huang, Z., Kan, Z., Wang, T., (2022). Heavy metals in soils from intense industrial areas in South China: Spatial distribution, source apportionment, and risk assessment. *Front. Environ. Sci.*, **10**, 820536.
- Wang, X., Cairang, S., Du, J., Wei, Z., Wu, Q., Hu, L., Xu, M., (2025). A large-scale assessment of soil heavy metal pollution using field-collected earthworms as bio-indicators in Shaoguan, South China. *Environ. Health*, **3**(6), 616-625.
- Zhang, W., Tong, L., Yuan, Y., Liu, Z., Huang, H., Tan, F., Qiu, R., (2010). Influence of soil washing with a chelator on subsequent chemical immobilization of heavy metals in a contaminated soil. *J. Hazard. Mater.*, **178**(1-3), 578-587.