

인공강우 모사를 통한 소석회의 군 소화기 사격장 피탄지 토양유실 억제 및 납 안정화 효과

고일하^{1*} · 박창구¹ · 유광영² · 노승천² · 지원현³

¹환경기술정책연구원 (NeLab), ²육군본부 공병실 환경과,

³호서대학교 일반대학원 에너지환경융합기술학과

Reducing Soil Loss and Pb Stabilization of Berms using Hydrated Lime in Military Rifle Shooting Ranges under Rainfall Simulation

Il-Ha Koh^{1*}, Chang Koo Park¹, Kwang Young You², Seung Cheon Noh², and Won Hyun Ji³

¹National Environment Lab. (NeLab), Seoul 02841, Korea

²Environmental Division, Engineer Office, Republic of Korea Army Headquarters, Gyeryong 32800, Korea

³Department of Energy & Climate Environment Fusion Technology, Graduate School, Hoseo University, Asan 31499, Korea

ABSTRACT

This study investigated a treatment method using hydrated lime to reduce Pb-polluted soil loss and Pb leaching from the soil in the berms of two military shooting ranges. We used hydrated lime as the soil amendment and conducted an artificial rainfall experiment for the investigation. During the rainfall simulation, the soil loss reduction rates of the amended soil were 20% and 47% for the two ranges due to the improvement of soil particulate aggregates. In a comparison of Pb concentration, the sediments were 25% and 34% higher than the residual soils. This indicates that fine soil particulates, having higher specific surface area for pollutants adsorption, must be controlled to prevent pollution spread. Pb in runoff waters was detected only in a shooting range which had a higher concentration in the soil. Therefore polluted soil particulate loss is the major mechanism rather than pollutant leaching in terms of pollution spread. In this shooting range, Pb concentration of runoff water from amended soil was 35% lower than that of the control soil due to the stabilization effect of lime precipitation. Pb concentrations of the residual soils by SPLP (synthetic precipitation leaching procedure) also indicated the stabilization effect with a reduction of 63% and 56%, respectively. Overall results suggested that reducing soil particulate loss and stabilization of polluted soils using hydrated lime could be a key method for the sustainable management of military shooting ranges.

Key words : military shooting range, lead, berm, rainfall simulation, runoff water

1. 서 론

납(Pb)은 인체 유입 시 신경계 손상, 신장 장애 등을 일으키는 중금속 오염물질로 광산, 제련소, 사격장, 하수 슬러지가 주요 배출원이다(Kabata-Pendias and Mukherjee,

2007; Steinnes, 2013). 이중 사격장은 사격 활동으로 인해 발생하는 토양오염이 문제가 되는데, 미국에서는 2012년 대략 60,100 t의 납이 탄약 제조에 사용된 것으로 알려졌다(Laidlaw et al., 2017). 국내에서도 군사격장 내 확인되는 주요 토양오염 물질이 납으로 보고되고 있다(Hong and Hyun, 2014; Kim and Choi, 2008)

군 소화기 사격장에서 확인되는 납 토양오염은 소형화 기로부터 발사된 탄두 즉, 납 탄알이 피탄지에 직접된 것이 주요 원인이다(Ahmad et al., 2012; EPA Victoria 2019; Hong and Hyun, 2014). 총알은 크게 탄피(casing)와 탄두(bullet)로 구분할 수 있는데, 각각의 주원료는 차이가 있다. 탄피의 주재료는 구리(Cu)이며, 구리합금에 아연(Zn)과

주저자: 고일하, 책임연구원

공저자: 박창구, 선임연구원; 유광영, 사무관; 노승천, 서기관; 지원현, 교수

*교신저자: 고일하, 책임연구원

E-mail: ilha@nelab.re.kr

Received : 2025. 9. 3

Reviewed : 2025. 9. 20

Accepted : 2025. 10. 3

Discussion until : 2025. 12. 31

니켈(Ni)이 사용된다. 탄두는 납의 함량이 높고 구리와 일부 불순물로서 비소(As)가 확인된다(Sanderson et al., 2011). 따라서 사격장에서는 토양오염물질로서 납과 구리의 관측 빈도가 다른 중금속 항목보다 높고, 이중 납의 오염 수준이 가장 높게 나타난다.

군 사격장은 군 장병의 사격 훈련을 위해 활용되는 곳으로, 오염의 발생 측면에서 일반적인 토양오염 부지와는 다른 특성을 가진다. 통상적으로 토양오염의 주요 발생 원인은 토양오염 유발물질이나 이를 취급하는 시설의 부실한 관리 또는 사고이다. 즉, 부정적인 행위가 원인이 되어 발생하는 것이다. 이에 비해서 사격장 토양오염은 군 장병의 사격 훈련에 따라 발생하는 불가피한 현상이다. 오염토양을 정화하더라도 사격 훈련을 지속한다면 일정 기간 경과 후 다시 토양오염이 발생할 수밖에 없다. 이에 따라서 지속적이고 환경적으로 안전한 사격장 활용을 위해 부지 이용 중에는 오염물질의 확산을 억제하는 관리방안이 검토되고 있다. 본 방안은 강우 발생 시 피탄지 주변 유거수의 흐름을 사격장 하류의 침전조로 유도하고, 침전조에서 유거수 내 오염토양 입자를 침전시킴으로 사격장 외부로의 오염확산을 억제하는 것이다(Lee and Hyun, 2016; Shin et al., 2025).

다만, 이러한 방안은 오염된 토양입자의 물리적 제어에 집중된 면이 있다. 다시 말해 강우에 의한 토양입자의 유실이 발생한 이후를 관리하는 방안인 것이다. 이에 오염토양에 대한 보다 적극적인 처리방안의 필요성이 제기된다. 즉, 강우 발생 시 토양유실에 저항하고, 유거수로의 오염물질 용출을 최소화하는 방안(안정화)의 도입을 검토해 볼 필요가 있다. 특히, 토양유실 억제는 국내에서 경사 농경지 관리의 일환으로 연구가 시작되었다. 강우 발생에 따른 토양입자의 유실은 주로 미세토양에서 나타난다(Choi et al., 2009; KME, 2001). 미세토양이 농작물에 공급할 영양분을 흡착하고 있으므로, 미세토양의 유실억제는 곧 농경지 토양의 활용성 측면에서 중요하다. 이에 유실억제제로서 석회물질이나 유기물질로 토양을 개량해 유실억제 효과를 확인한 다수의 연구가 있었다(Koh et al., 2018; Koh et al., 2019; Yun et al., 2022). 유기물질은 토양 미생물 활성도를, 석회물질은 음하전된 점토입자를 서로 뭉치게 하는 가교역활을 하여 토양의 입단화를 유도한다. 입단화된 토양은 그만큼 강우 유실에 저항하는 능력을 가진다(Brady and Weil, 2014). 아울러 석회물질은 토양 내 존재하는 양이온 중금속을 침전시켜 이동성을 저감시키는 특성을 가지므로 중금속 오염부지에서 오염물질의 안정화제로 사용되고 있다(KOMIR, 2022; Pierzynski

et al., 1994).

이에 본 연구에서는 납으로 오염된 사격장 피탄지 토양을 대상으로 소석회를 이용해 강우 발생 시 오염물질의 용출능을 낮추고, 유거수에 의한 토양입자의 유실에 저항하도록 하는 동시 처리 방안을 인공강우 시험을 통해 검토하고자 하였다. 군 사격장의 피탄지는 경사지로 구성되어 있는 만큼, 급경사 농경지 토양유실억제와 유사한 관점에서 관리대책 수립이 가능할 것이다. 아울러 고농도의 납으로 오염된 곳이므로 석회물질을 통한 안정화 효과까지 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 현행 군 사격장에서 검토하고 있는 강우로 유실된 오염 토양입자의 관리 방안보다 앞선 선제적 대응조치로서 오염토양의 유실과 함께 토양에 흡착되어 있는 오염물질의 용출을 저감하는 동시 처리방안의 가능성을 확인하고자 하였다. 이의 가능성이 확인된다면, 본 연구결과는 향후 지속가능하고 환경적으로 안전한 사격장 관리 방안 수립에 참조자료로 활용이 가능할 것이다.

2. 연구내용 및 방법

본 연구는 2단계로 진행되었다. 1단계에서는 강우 발생 중에 일어나는 토양유실 특성, 2단계에서는 강우 발생 이후 토양 내 오염물질(납)의 안정화 특성을 파악하고자 하였다. 아울러 2개 사격장 대상의 실내 실험을 통해 석회물질에 의한 효과가 보편적으로 확인되는 수준인지를 검토하였다.

2.1. 실험 대상 토양

본 연구를 위해 경기도 군부대 사격장(A)과 강원도 군부대의 사격장(B)을 선정 후 사격장 내 피탄지 지표로부터 30 cm 이내 심도의 토양을 채취하였다. 채취 시 현장에서 바로 체질을 실시해 5 mm 이하의 입자를 가진 토양을 실험 대상으로 하였다. 이후 채취된 토양을 실험실로 이송하여 실내에서 35일 동안 상온 건조하였다.

토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)과 토양오염공정 시험기준(NIER, 2022a)에 의한 실험 대상 토양의 이화학 특성과 납의 농도를 Table 1에 나타내었다. 두 토양 모두 약산성의 범위로 국내 토양오염우려기준(700 mg/kg, 3지역)을 5배 이상 초과한 납 농도를 보였다. 이중 B사격장의 납 농도는 18,964 mg/kg으로 A사격장(3,787 mg/kg)에 비해 5배 높은 수준을 보였다. 두 사격장 모두 사양토의 토성을 보였지만, 미세토(실트 및 점토) 함량은 A사격장이 상대적으로 높았다.

Table 1. Pb concentration and physicochemical characteristics of studied soils

	pH	Pb (mg/kg)	Particle distribution (%)			Soil texture
			Sand	Silt	Clay	
Shooting range A	6.0	3,787	63.15	19.42	17.43	Sandy loam
Shooting range B	6.5	18,964	70.86	15.85	13.29	Sandy loam

2.2. 인공강우 실험

2.2.1. 토조배치 및 강우모사

인공강우 실험을 위해 내측 기준 가로, 세로, 높이 각각 39 cm, 19 cm, 17 cm의 아크릴 재질 토조 2개를 사격장 별로 준비하였다. 토양으로 스며든 수분(인공강우)의 배수를 위해 토조 바닥에는 지름 3 mm 이하의 구멍을 6개 조성하였다.

토양유실 억제 및 납의 안정화를 위한 처리제로 소석회를 선정했으며, 그 적용 비율은 토양 무게비의 5% 수준이었다. 본 적용 비율은 소석회의 적용성 검토차원에서 선정한 것으로, 폐광산 지역 토양개량·복원사업 시 경사지 토양 침식 방지를 위한 유실억제제 사용비율(3%–5%)을 바탕으로 산정한 것이다(KOMIR, 2022). 토조는 사격장별 처리제가 혼합된 토양(처리구)과 미처리된 토양(대조구)이 적재된 것으로, 토조 내 토양의 무게는 건조토양 기준으로 10 kg이었다. 토양 적재 후 포장용수량의 70%에 해당하는 수분(수돗물)을 투여하였고, 인공강우 실험까지 3일간 에이징(aging)하였다.

인공강우 실험은 수돗물을 토조 상부에 살수하는 방식으로 진행하였다(Fig. 1). 토조의 경사각은 10°로 설정하였는데, 이는 실제 해당 군부대의 실거리 사격장 경사도와 동일한 것이었다. 강우강도는 집중 호우 시 발생할 수 있는

시간당 100 mm로 설정했으며, 토조로부터 110 cm 이격된 상부에서 노즐을 이용하여 강우를 가정한 수돗물을 60분 동안 살포하였다.

2.2.2. 시료 채취 및 분석

채취대상 시료는 강우 살포 과정 중 토조에서 발생한 유거수(runoff water)와 살포 완료 이후 토조 내 토양, 집수된 유거수 내 유실토양이었다. 강우 살포 시 10분 간격으로 유거수 발생량을 확인하였다. 아울러 강우 시작 30분 동안에는 5분 간격으로, 이후에는 10분 간격으로 채취한 유거수를 대상으로 부유물질(suspended solid, SS)과 수질 오염공정시험기준(NIER, 2022b)에 의한 납 농도를 분석하였다. 강우 살포가 완료된 이후에는 충분한 건조시간을 거친 후 유실토와 토조 내 잔류토를 대상으로 토양오염공정시험기준(NIER, 2022a)에 의한 납 농도를 분석하였다. 아울러 토조 내 잔류토 대상으로 인공강우용출시험(synthetic precipitation leaching procedure, SPLP)(USEPA, 1994)에 따른 납 농도를 추가 분석하였다.

유거수의 SS 농도는 휴대용 분광광도계(model DR 2800, HACH)를 이용하여 측정하였다. 이외 토양과 유거수의 납 농도는 ICP-OES(model 8300, Perkin-Elmer Inc.)를 이용하여 정량하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공강우 실험

3.1.1. 토양유실 특성

Fig. 2는 인공강우가 살포되는 과정 중 유거수의 SS 농도와 유거수량을 바탕으로 산출한 누적 토양 유실량을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 사격장 토양별 소석회 처리조건에서 유실량이 상대적으로 낮게 나타났다.

사격장별 유실저감 효율은 A사격장에서 20%, B사격장에서 47% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 감소 효과는 소석회가 사격장 피탄지 토양유실을 효율적으로 억제할 수 있음을 나타낸 것이다. 칼슘(Ca)이 포함된 석회물질은 2가 양이온(Ca^{2+})의 가교역할로 음하전된 점토입자를 뭉치게

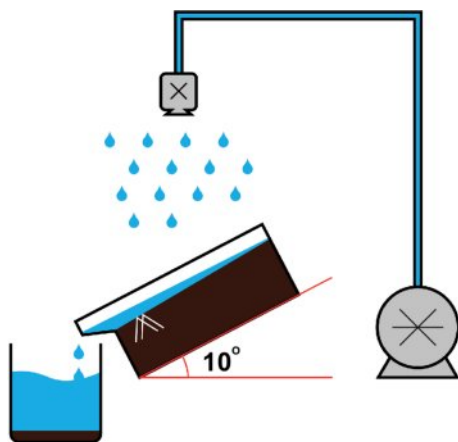


Fig. 1. Schematic diagram of rainfall simulation (Koh et al., 2021).

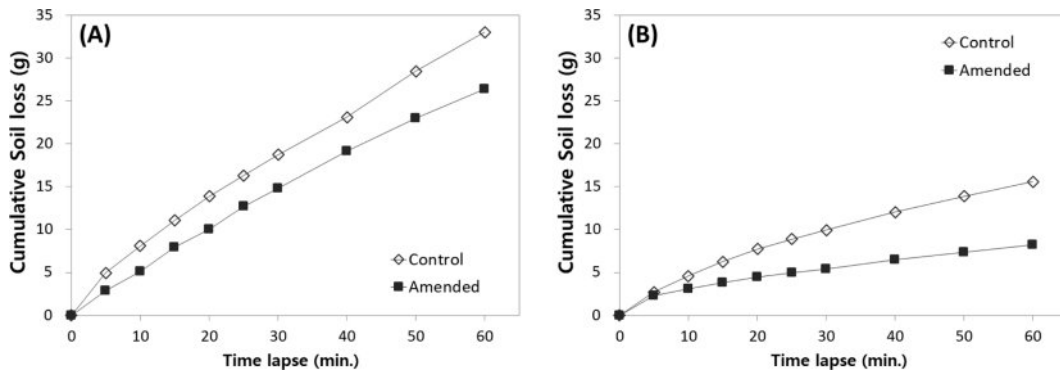


Fig. 2. Soil loss from amended soils in the rainfall simulation experiment ((A) shooting range A; (B) shooting range B).

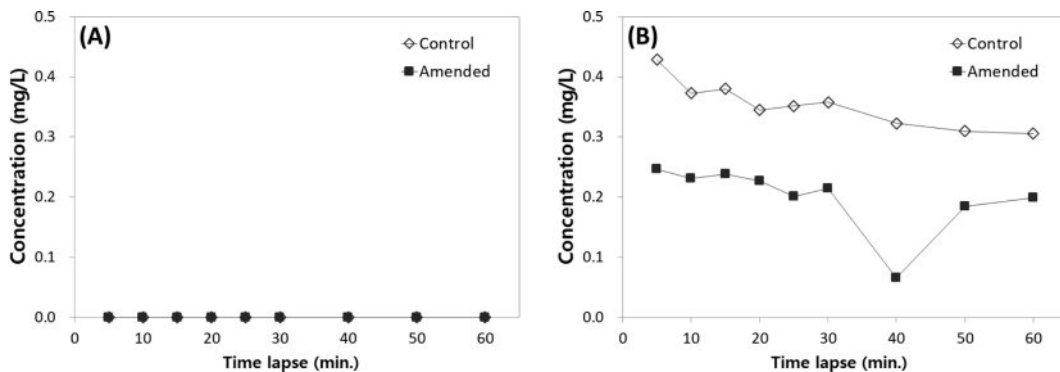


Fig. 3. Pb concentration of runoff water in the rainfall simulation experiment ((A) shooting range A; (B) shooting range B).

해서 입단을 형성시킨다(Brady and Weil, 2014). 강우에 대한 토양이 침식 저항성은 내수성 입단(water-stable aggregates)의 안정성에 의존하는데, 강우의 물리적 타격에 저항하고, 수분 배수 능력도 증가해 그만큼 강우 유실에 대한 저항성이 증가함을 의미한다(Choi et al., 2009). 소식회를 이용한 본 연구의 유실 저감 효과도 이에 기인한 것으로 판단된다. 유실억제제로서의 소식회의 적용성은 급경사 농경지 대상의 연구에서도 확인된 바 있다(Koh et al., 2019).

다만, A사격장의 경우 소식회 처리 여부에 상관없이 B사격장보다 높은 유실량을 보였다. 이는 앞선 Table 1에서 볼 수 있듯이 A사격장 토양의 상대적으로 높은 미세토 함량에 기인한 결과로 판단된다. 강우발생 시 토양유실이 점토와 같은 미세토에서 집중적으로 발생함을 고려한다면 당연한 결과일 것이다(KME, 2001). 본 연구에서는 적용성 평가를 위한 기초 실험으로 우선 토양 무게비 대비 5% 수준의 소식회를 투여했다. 보다 높은 효율과 최대 유실 억제 효과를 얻기 위해서는 5% 이상의 혼합비율이 필요했을 것으로 판단된다.

3.1.2. 유거수 납 농도

Fig. 3은 인공강우가 살포되는 과정 중 채수된 유거수의 납 농도를 나타낸 것이다. A사격장의 경우 소식회 처리 여부에 상관없이 모든 시간대에서 납이 검출되지 않았다. 이에 비해 B사격장의 경우에는 소식회 처리조건에서 유의미한 농도 저감효과를 확인하였다.

A사격장과 B사격장에서 나타난 유거수 납 농도 차이는 근본적으로 대상 토양이 가진 농도 차이에 기인한 것으로 판단된다. 앞선 Table 1에서 확인했듯이 A사격장의 납 농도는 3,787 mg/kg으로 B사격장(18,964 mg/kg)의 20% 수준이다. 따라서 그만큼 수분(강우)에 용출될 수 있는 형태의 납 농도 역시 낮았을 것이다.

B사격장 한정으로 소식회 처리에 따른 오염물질의 용출 저감 효과를 보면, 강우 종료 시점에서 35%의 효율을 보였다. 강우 초기시점에서의 효율이 42%였음을 감안하면 전 실험기간 동안 충분히 용출을 억제한 것으로 판단된다. 이 같은 용출저감 효과는 소식회 투여로 인한 양이온 중 금속의 알칼리 침전 영향일 것이다(Kumpiene, et al., 2008; Pierzynski et al., 1994). 이에 사격장에서 납 이외의 오염물질로 확인될 수 있는 구리 역시 충분한 안정화 효과를

발휘할 것으로 판단된다. Kumpiene et al.(2008)에 따르면 알칼리 물질에 의한 안정화 효과의 확실성은 구리가 납보다 높다. 그러므로 사격장에서 구리의 동시 오염이 확인되는 경우에도 납 이상의 용출저감 효과를 얻을 수 있을 것이다.

B사격장에서 나타난 소석회 처리조건에서의 유거수 납 농도는 대체로 0.2 mg/L 전후로 국내 환경정책기본법의 하천수 수질기준(0.05 mg/L)을 초과하였다. 이는 관련 환경기준 만족을 위해서 소석회의 투여량이 더 필요했음을 의미한다. 따라서 향후 실제 현장에 적용하기 위해서는 다양한 적용 비율을 대상으로 한 효율 검토가 필요할 것이다. 아울러 지표 유거수 이외 실제 토조 토양 내 공극수의 SS와 납 농도까지 검토한다면 지하수질 관점을 포함해 보다 현장에 근접한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

농도의 차이는 있지만 A사격장 토양 역시 토양오염 우려기준을 초과한 토양이다. 인공강우 실험을 통해 유거수 내 용출된 납은 없는 것으로 확인됐으나, 토양입자의 유실량은 B사격장에 비해 대조구 기준 2배 높았다(Fig. 2). 이 같은 결과를 볼 때 강우 발생에 따른 사격장 피탄지로부터의 오염확산은 제한된 시간 내 토양 중금속의 이온 용탈보다는 오염된 토양입자 자체의 유실 영향을 더 높게 받는다고 볼 수 있다. 따라서 사격장 토양오염 관리대책 수립 시 기습 폭우와 같은 단기적 관점에서는 오염물질의 안정화보다는 토양유실 억제를 우선하여 검토할 필요가 있을 것으로 보인다.

3.1.3. 유실토양 및 토조 잔류토양의 납 농도

Fig. 4는 인공강우 실험 후 채취한 토조 내 잔류토양과 유실토양의 납 농도를 나타낸 것이다. 그래프의 Y축 단위는 g/kg이다. 각 사격장별 대조구 잔류토양의 납 농도는 앞선 Table 1의 실험대상 토양 기초특성 분석결과와 유사한 수치를 나타내었다.

소석회 처리조건인 잔류토양과 유실토양 납 농도는 2개 사격장 모두 대조구 잔류토양과 유실토양의 농도와 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았다. A사격장에서는 소석회 처리 유무에 상관없이 토조 잔류토양의 납 농도는 4.6 g/kg 전후, 유실토양에서는 농도는 6.0 g/kg 전후를 나타내었다. B사격장에서도 소석회 처리 유무에 상관없이 토조 잔류토양에서 19.6 g/kg 전후, 유실토양에서 29.7 g/kg 전후의 납 농도를 보였다. 각 사격장별 토조 잔류토양 사이, 아울러 유실토양 사이의 농도 유사성은 왕수(acua regia) 추출을 기반으로 하는 토양오염공정시험기준(NIER, 2022a)의 전처리 방식에 기인한 결과일 것이다. 즉, 납의 토양 내 알칼리 침전 효과보다 강산성의 추출 효과가 더 컸기 때문으로 판단된다(Davidson, 2013).

다만, 각 사격장별 잔류토양과 유실토양 사이의 납 농도의 분포는 2개 사격장 모두 소석회 처리 여부에 상관없이 일정한 경향을 보였다. 그림에서 볼 수 있듯이 유실토양 내 납의 농도는 토조 내 잔류토양의 납 농도와 비교해 일정한 비율로 증가하였다. A사격장 유실토양의 납 농도는 잔류토양 대비 대조구에서 27%, 소석회 처리조건에서 22% 증가하였다. B사격장에서는 대조구에서 33%, 소석회 처리조건에서 35% 증가하였다. 즉, 사격장별 2개 토조에서 나타난 유실토양의 납 농도 증가비율은 A사격장 25% 전후, B사격장에서 34% 전후로 나타났다.

유실토양에서 나타나는 높은 납 농도는 해당 토양이 가지는 물리적 특성, 즉 토조 내 잔류토양 대비 상대적으로 높은 미세토 함량에 기인한 것으로 판단된다. 앞서 언급한 바와 같이 토양의 유실은 미세토에서 높게 나타나며, 이는 농경지 토양을 대상으로 유실저감 효과를 검토한 선행연구에서도 확인한 바 있다(Koh et al., 2018; Koh et al., 2021). 아울러 토양의 입자가 작을수록 비표적이 증가하기 때문에 오염물질의 흡착량 역시 증가하게 된다(Bradl,

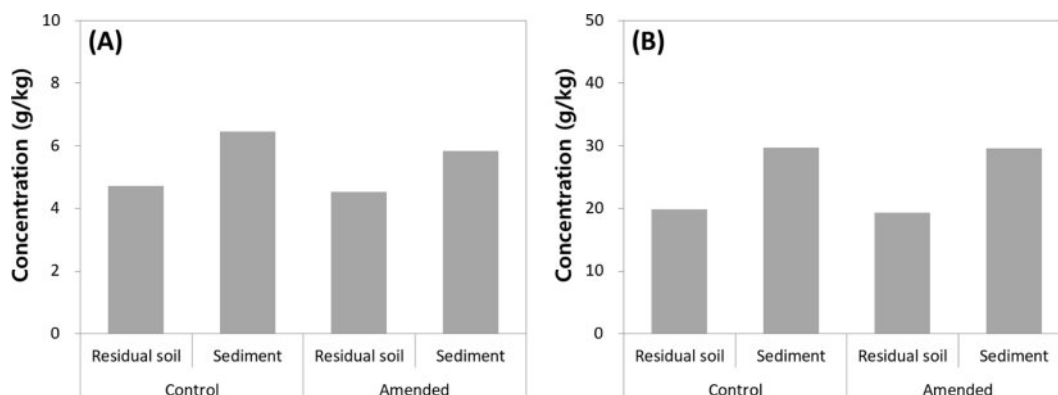


Fig. 4. Pb concentration of the soils after the rainfall simulation experiment ((A) shooting range A; (B) shooting range B).

2004). 사격장을 대상으로 한 오염토양 입경별 농도비교에서도 이를 확인한 바 있는데, 비표면적이 높은 미세토양에서 납의 흡착량이 높았기 때문이다(Kim and Choi, 2008). 따라서 강우발생 시 피탄지에서는 유거수를 따라 오염물질 흡착량이 높은 미세토양의 유실이 발생하고, 유실된 미세토양이 집적되는 하류에서 오염수준이 높게 나타날 수 있다. 그러므로 미세토양의 유실 제어는 오염확산을 억제할 수 있는 주요한 방안으로 활용될 수 있을 것이다. Fig. 2의 결과에서 확인한 바와 같이 피탄지 토양 알칼리 처리 역시 미세토양 유실을 저감하는 방안으로 검토될 수 있다.

3.2. 납 안정화 효과

Fig. 5는 인공강우 실험 후 SPLP 방식으로 분석한 토조 내 잔류토양의 납 용출농도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 소석회로 처리한 토양에서의 용출농도가 대조구 대비 낮게 나타났다.

소석회 처리에 따른 낮은 용출농도는 앞서 언급한 바와 같이 안정화제(유실억제제)로 사용된 소석회에 의한 납의 알칼리 침전 영향일 것이다(Kumpiene et al., 2008; Pierzynski et al., 1994). 토양 내 납의 용출저감 효율은 A사격장 63%, B사격장 56%이었다. 소석회를 포함하는 알칼리 물질을 통한 중금속의 안정화 및 이동성 저감 효과는 다수의 연구에서 그 효과가 증명된 바 있다(Kumpiene et al., 2008; Lee and Lee, 2012; Lim et al., 2013; Oh et al., 2012). 사격장 피탄지 토양을 대상으로 한 본 연구에서도 이를 확인한 것이다. 따라서 사격장 토양관리의 방안으로 소석회 이용은 그 적용성이 높다고 할 수 있다.

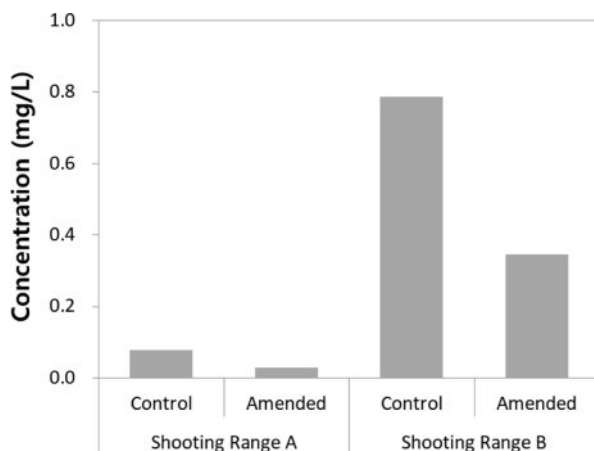


Fig. 5. Pb leachability in the residual soils by SPLP (the synthetic precipitation leaching procedure) after the rainfall simulation experiment.

다만, B사격장 소석회 처리 토양에서 확인된 높은 용출저감 효과에도 불구하고 그 용출농도(0.35 mg/L)는 국내 하천수 수질기준(0.05 mg/L)을 초과한 것이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 소석회의 투여량이 더 필요했음을 의미한다. 따라서 향후 실제 현장에 적용하기 위해서는 우선 SPLP 농도 검토 후 인공강우시험 검증의 단계가 필요할 것으로 판단된다. 즉, 다양한 적용 비율의 소석회 처리 토양을 대상으로 SPLP 농도를 검토한 후 최적 안정화 효과를 보인 적용 비율로 인공강우 시험을 실시해 종합적인 효과(오염물질 안정화 및 토양입자 유실 억제)를 검토하는 것이다.

실험결과 확인한 용출경향은 앞선 인공강우 살포 시 채취한 각 토조의 유거수 납 농도(Fig. 3)와 유사한 것으로 파악된다. B사격장의 용출농도가 A사격장에 비해 상당히 높게 나타난 점, B사격장 대조구와 소석회 처리조건의 농도 차이를 고려하면 인공강우 모사 실험의 유거수 농도와 토조 내 토양의 SPLP 농도 사이의 유사성은 더욱 확연하게 나타난다. 다만, A사격장의 결과에서도 볼 수 있듯이 불검출의 유거수 농도와는 달리 SPLP 농도에서는 납이 검출되는 등 SPLP 농도가 유거수 농도에 비해 다소 높게 나타났다. 이는 인공 강우와 SPLP 용매의 pH와 실험 지속 시간의 차이에 기인한 것이다. 본 연구에서 인공강우 모사 실험에 사용한 강우는 수돗물이었다. 수돗물의 pH는 7.0을 약간 상회하는 수준으로 관리되는데, 이는 상수도관의 부식을 막기 위한 것이다(Min et al., 2009). 따라서 황산과 질산을 혼합하여 pH 4.2로 조정된 용매를 사용하는 SPLP 방식에 비해 중성-약알칼리 영역의 수돗물을 사용한 인공강우 시험에서의 토양 내 중금속 추출 효과가 낮았다고 할 수 있다. 아울러 본 연구 인공강우 모사 과정에서는 강우 살포 시간을 1시간으로 했는데, US EPA Method 1312 (SPLP)에서는 18시간의 교반을 규정하기 때문에 용매와 토양간 물리적 접촉 방식과 시간에서도 SPLP에 의한 납 농도가 인공강우 유거수에 비해 높게 나타났을 것이다. 즉, 인공강우 시험 유거수의 납 농도보다 SPLP 납 농도가 높게 나타난 이유는 용매의 낮은 pH와 강제 교반 방식에 의한 물리적 추출 효과, 토양-용매 사이의 상대적으로 긴 접촉 시간에 기인한 것으로 판단된다.

소석회 처리를 통해 피탄지를 안정화하더라도 사격활동으로 인해 오염물질은 지속적으로 유입된다. 따라서 오염물질의 안정화 효과 지속 기간에 대한 검토가 필요할 수 있다. 중금속의 불용화는 토양 pH 증가의 영향이므로, 일정 수준의 토양 pH를 지속시킬 필요가 있다(Kwon et al., 1998). 일반적으로 산성토양 개량 시 석회석 분말을 사용하면 그 효과는 4년 가까이 지속된다(Cho et al., 2002).

따라서 소석회를 이용한 납의 안정화 효과도 이와 유사할 것으로 보이므로, 주기적인 소석회 처리가 필요할 것이다. 다만, 실제 현장에서 이의 효과가 지속되는지에 대한 모니터링이 요구된다.

국내 토양환경 관리 체계에서는 우선 토양오염이 우려되는 부지에 대한 실태조사나 특정토양오염관리대상시설 대상의 오염도 검사를 통해 오염 여부를 확인한다. 오염이 확인되면 토양정밀조사를 통해 오염의 규모와 범위를 파악한 후 정화사업을 실시하고 있다. 사격장의 경우, 이 같은 체계에서는 사격 훈련에 따른 지속적인 토양오염 발생이 불가피하므로, 토양정밀조사와 정화사업도 오염이 발생하는 만큼 수행되어야 한다. 물론, 이에 따른 사업 예산도 지속적으로 필요하다. 따라서 사격장 운영기간 동안에는 오염물질의 이동 또는 오염의 확산을 억제하고, 사격장 폐쇄 후 오염의 근본적 제거를 실시하는 관리 방안을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서 검토한 오염토양 유실 억제를 통해 강우에 의한 단기적 관점의 물리적 오염확산을, 오염물질 대상의 안정화 처리를 통해 장기적 관점의 화학적 오염확산을 억제하는 것이 이의 방안으로 고려할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 2개 사격장 피탄지 토양을 대상으로 소석회를 이용한 오염토양 유실 억제와 오염물질인 납의 안정화를 동시 처리하는 방안을 인공강우 시험을 통해 검토하였다. 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

인공강우가 살포되는 과정의 토양 유실량을 검토한 결과 소석회를 처리한 경우 칼슘에 의한 토양입단 개선으로 2개 사격장 각각 20%, 47%의 유실저감 효율을 나타내었다. 미세토 함량이 높은 토양에서 유실이 높게 나타나, 오염의 확산 억제 측면에서도 미세토양 관리가 필요함을 확인하였다. 유실토양과 원토양의 납 농도를 비교한 결과에서도 유실토양에서 납 농도가 각각 25% 전후, 34% 전후로 높게 나타났다. 이는 오염물질의 흡착 비표면적인 높은 미세토 함량이 유실토양에서 높았기 때문으로 보인다.

오염수준이 높았던 토양에서 유거수 납 농도 역시 높게 나타났다. 소석회 처리 시 중금속의 알칼리 침전에 따른 용출억제 효과에 따라 인공강우 시험 종료시점에서의 유거수 농도는 35% 감소하는 것으로 나타났다. 이와는 별개로 다른 사격장 토양에서는 소석회 처리여부에 상관없이 유거수 내 납은 모두 검출되지 않았다. 따라서 강우 발생에 따른 오염의 확산은 제한된 시간에서는 오염물질의

강우 용탈에 따른 화학적 확산보다는 오염토양 입자의 유실에 따른 물리적 확산의 영향을 더 높게 받는 것으로 확인되었다.

인공강우 시험 종료시점의 토조 내 잔류토양을 대상으로 납의 SPLP 농도를 분석한 결과 2개 사격장 각각 63%, 56%의 용출저감 효율을 보였다. 이는 소석회 처리를 통해 오염물질의 안정화 효과가 충분히 발현됐음을 나타낸 것이다. 다만, 앞선 유거수 수질 분석결과와 비교했을 때 상대적으로 낮은 pH의 추출용매, 긴 교반시간의 차이로 그 농도가 높게 나타났다.

이상의 연구를 통해 사격장 피탄지를 소석회로 개량하는 경우 납 오염 토양의 유실 억제와 안정화의 동시 처리가 가능함을 확인하였다. 따라서 지속가능한 군 사격장 활용 관점에서 오염물질의 용탈과 토양입자의 유실에 선제적으로 대응하는 관리방안 적용을 검토할 필요가 있을 것이다.

References

- Ahmad, M., Lee, S.S., Moon, D.H., Yang, J.E., and Ok, Y.S., 2012, A Review of Environmental Contamination and Remediation Strategies for Heavy Metals at Shooting Range Soils, In: Malik, A., and Grohmann E.(ed), *Environmental Protection Strategies for Sustainable Development*, Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 437-451 p.
- Bradl, H.B., 2004, Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents, *J. Colloid. Interf. Sci.*, **277**, 1-8.
- Brady, N.C. and Weil, R.R., 2014, *Elements of the Nature and Properties of Soils*, Pearson Education Limited.
- Choi, B.S., Lim, J.E., Choi, Y.B., Lim, K.J., Choi, J.D., Joo, J.H., Yang, J.E., and Ok, Y.S., 2009, Applicability of PAM(Polyacrylamide) in soil erosion prevention: rainfall simulation experiments, *Korean J. Environ. Agric.*, **28**(3), 249-257.
- Cho, S.J., Park, C.S., Um, D.I., 2002, *Soil Science*, Hyangmunsa.
- Davidson, C.M., 2013, Methods for the Determination of Heavy Metals and Metalloids in Soils, In: B.J. Alloway(ed.), *Heavy Metals in Soils*, Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, p.107-108.
- EPA Victoria (Environment Protection Authority Victoria), 2019, *Guide for managing contamination at shooting ranges*
- Hong, S.T. and Hyun, J.H., 2014, The comparison of the relationship between the gunfire shot and its resulting heavy metal pollution rate, *J. Soil Groundw. Environ.*, **19**(6), 1-5.
- Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A.B., 2007, *Trace Elements from Soil to Human*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York,

p.378-379.

Kim, H.S. and Choi, S.I., 2008, Effects of HCl and EDTA on soil washing to remediate lead-contaminated soil in a firing range, *J. Soil Groundw. Environ.*, **13**(1), 60-66.

KME (Korea Ministry of Environment), 2001, A Study on the Conservation of Surface Soil and Erosion Control.

Koh, I.H., Kwon, Y.S., Jeong, M.H., and Ji, W.H., 2021, Soil loss reduction and stabilization of arsenic contaminated soil in slope farmland using CMDS (coal mine drainage sludge) under rainfall simulation, *J. Soil Groundwater Environ.*, **26**(6), 18-26.

Koh, I.H., Roh, H., Hwang, W.J., Seo, H.G., and Ji, W.H., 2018, Reducing soil loss of sloped land using lime-organic compost mixtures under rainfall simulation, *J. Soil Groundwater Environ.*, **23**(3), 43-50.

Koh, I.H., Yu, C., Park, M.J., and Ji, W.H., 2019, Reduction of soil loss from sloped agricultural field by using hydrated lime, *J. Soil Groundwater Environ.*, **24**(2), 1-7.

KOMIR (Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp.), 2022, Guidebook : Mine Rehabilitation Technology in Korea – 2022 Edition.

Kwon, S.G., Kim, B.Y., Kim, J.S., Kim, T.C., Yoon, C.G., Jung, J.C., and Hong, S.G., 1998, Agricultural Engineering, Hyangmunsa.

Kumpiene, K., Lagerkvist, A., and Maurice, C., 2008, Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – a review, *Waste Manage.*, **28**, 215-228.

Laidlaw, M.A., Filippelli, G., Mielke, H., Gulson, B., and Ball, A.S., 2017, Lead exposure at firing ranges-a review, *Environ Health*, **16**, 34.

Lim, E.J., Ahmad, M., Lee, S.S., Shope, C.L., Hashimoto, Y., Kim, K.R., Usman, A.R.A., Yang, J.E., and Ok, Y.S., 2013, Effect of lime-based waste materials on immobilization and phytoavailability of cadmium and lead in contaminated soil, *Clean – Soil Air Water*, **41**(12), 1235-1241.

Lee, K.L. and Hyun, J.H., 2016, Modality of heavy metal contamination of soil in military rifle shooting range, *J. Soil Groundw. Environ.*, **21**(3), 58-63.

Lee, H.J. and Lee, M.H., 2012, Investigation of the rice plant transfer and the leaching characteristics of copper and lead for the stabilization process with a pilot scale test, *Econ. Environ. Geol.*, **45**(3), 255-264.

Min, S.K., Na, S.C., and Hwang, W.S., 2009, The influence of pH on corrosion behavior of copper tubes in tap water, *Corros. Sci. Tech.*, **8**(9), 232-237.

NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology), 2000, Methods for soil and plant analysis.

NIER (National Institute of Environmental Research), 2022a, Korea standard methods for soil analysis.

NIER (National Institute of Environmental Research), 2022b, Korea standard methods for water analysis.

Oh, S.J., Kim, S.C., Kim, R.Y., Ok, Y.S., Yun, H.S., Oh, S.M., Lee, J.S., and Yang, J.E., 2012, Change of bioavailability in heavy metal contaminated soil by chemical amendment, *J. Soil Sci. Fert.*, **45**(6), 973-982.

Pierzynski, G.M., Sims, J.T., and Vance, G.F., 1994, Soils and Environmental Quality, CRC Press, Inc.

Sanderson, P., Naidu, R., Asce, M., Bolan, N., and Bowman, M., 2011, Critical review on chemical stabilization of metal contaminants in shooting range soils, *J. Hazard Toxic Radio*, **16**(3), 258-272.

Shin, E.S., Nam, H., Park, Y.K., Park, H.G., Yoo, J.B., and Shin, H.M., 2025, Soil pollution management for sustainable operation of shooting range, Proceedings of 2025 Spring Conference of the KOSSGE, Pusan, Korea, p.65.

Steinnes, E., 2013, Lead, In: B.J. Alloway(ed.), Heavy Metals in Soils, Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, p.400-402.

US EPA, 1994, Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP), EPA Method 1312.

Yun, S.W., Kang, H.C., Kwon, Y.S., Koh, I.H., Jeong, M.H., and Yu, C., 2022, A pilot experiments for evaluation of cover soil loss from inclined upland around remediated abandoned mine site, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **64**(2), 37-45.