

군 소화기 사격장 부지의 납 토양오염 분포 특성

고일하^{1*} · 박창구¹ · 유광영² · 노승천² · 지원현³

¹환경기술정책연구원 (NeLab)

²육군본부 공병실 환경과

³호서대학교 일반대학원 에너지환경융합기술학과

The Characteristics of Soil Lead Contamination in Military Rifle Shooting Ranges

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 the soil contamination characteristics of military rifle shooting ranges. 4 shooting ranges, including zeroing range, were chosen for the investigation and were classified as 3 areas (berm, target, and range floor) in each shooting range for soil sampling. The leaching concentrations of lead in the berms by SPLP (synthetic precipitation leaching procedure), 0.13 mg/L ~ 2.14 mg/L, were significantly higher than those of copper and zinc, less than 0.2 mg/L. This indicates that lead is a major contaminant in shooting ranges. Concentrations of lead by aqua regia were higher in the berm, followed by the target area and lastly the range floor due to the influence of bullets. As target distances from a firing point increased, the concentrations also increased because shooting uphill is general due to the topography of the ranges. The concentration relationship between surface and subsurface soils was identified only in the range floors, where there are fewer bullets. Surface soil concentrations were higher than subsurface concentrations in the range floors due to the effects of contaminants leaching and soil loss from the berms and target areas. Therefore, the reduction of contaminant mobility and soil particulate loss has to be preferentially focused on in terms of the sustainable management of military shooting ranges.

Key words : military shooting range, lead, berm, target area, range floor

1. 서 론

군부대 소화기 사격장은 소총 등과 같은 소형 화기의 사용법을 숙지하기 위한 곳이다. 전차나 자주포의 포사격장이나 군 항공기의 폭격 훈련장과 같은 대형 화기의 훈련장과 비교했을 때 그 규모는 상당히 작다. 그러나 국내

조성된 숫자와 사용되는 빈도를 고려하면 환경학적인 측면에서 미치는 영향은 적지 않다고 할 수 있는데, 대략 1,300여개의 군부대 사격장이 존재했던 것으로 알려졌다 (Moon et al., 2010).

환경학적 측면에서 확인되는 사격장 문제점은 비소(As), 안티모니(Sb), 구리(Cu), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn) 등 중금속(준금속)에 의한 토양오염이다(Ahmad et al., 2012). 사격장 내 토양오염을 일으키는 오염물질의 배출원은 탄알이라고 할 수 있는데, 탄알은 물리적 구조로 볼 때 크게 탄두(bullet)와 탄피(casing)로 구분된다(Rhee et al., 2016). 총기에서 탄피는 탄두를 발사하는 역할을, 발사된 탄두는 총기의 실질적인 목적인 살상 역할을 담당한다. 탄두는 대부분의 납과 소량의 경화제(hardening agent)로 사용된

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. 9

Accepted : 2025. 9. 22 Discussion until : 2025. 12. 31

안티모니 및 일부 불순물인 비소로, 탄피는 구리 이외에 합금 처리에 사용된 아연이나 니켈로 구성된다(Sanderson et al., 2011). 일반적으로 국내 대부분의 군 사격장에서는 재활용 목적으로 탄피를 회수하고 있으므로, 토양오염을 유발하는 주요 원인은 탄두라고 할 수 있다. 따라서 사격장 토양 내 관측빈도가 높은 오염물질은 탄두 내 함량이 높은 납과 소량의 구리로 알려져 있다(Hong and Hyun, 2014; Laidlaw et al., 2017). 이들 오염물질은 탄두 파편에 존재하는 원상태, 탄두로부터 용해되어 토양의 점토질 입자에 흡착된 형태, 또는 침전물 형태로 존재한다(Lee et al., 2021).

사격장 토양오염과 관련해 국내외 많은 조사와 연구가 수행되었다. 토양오염은 사격장보다는 피탄지의 토양특성이나 식생의 분포 등 풍화와 관련된 항목의 영향을 더 크게 받을 수 있다는 보고가 있었다(Hong and Hyun, 2014). 아울러 토양 입경이 작을수록 납의 농도는 증가하지만, 납탄 조각의 포함여부에 따라 농도값의 차이가 있을 수 있어 정화공정 수립 시 금속 파편 선별기술의 필요성이 검토된 바 있다(Kim and Choi, 2008). 사격장은 다른 부지와는 달리 지속적인 훈련에 따른 토양오염이 불가피하게 발생하는 곳이다. 따라서 사격장 운영 중에는 오염물질의 제거보다는 이동성 저감이나 오염확산 방지 관점에서 사격장 환경관리 방안을 검토한 연구도 있었다(Cao et al., 2008; Etim, 2016; Lee and Hyun, 2016; Yong et al., 2016). 본 방안은 탄두 회수 시설이나 사격장 하류에 저류지를 조성하여 오염원의 지표 유입을 차단하거나 오염물질의 이동을 억제하는 물리적 처리방식으로 현재 국내 일선 군부대에서도 적용하고 있다.

군 사격장 내부는 위치별로 사대(firing point), 표적 하류(range floor), 표적(target), 피탄지(berm)로 구분될 수 있다. 이중 피탄지는 표적 바로 뒤의 둔덕으로 표적을 관통하거나 표적을 맞추지 못한 고속의 탄두를 멈추게 하는 목적으로 설치한 곳이다. 표적 하류는 사대와 표적 사이 또는 실거리 사격장 내 앞 표적과 뒤 표적 사이의 지면이다. 표적이나 피탄지 보다 상대적 고도가 낮으므로, 본 조사에서는 표적 하류라는 명칭을 사용하였다. 따라서 사격장의 구조적인 형태를 볼 때 토양오염의 발생빈도가 높은 곳은 탄두의 영향을 높게 받는 표적 주변 구역과 피탄지로 볼 수 있을 것이다.

과거 사격장 토양오염과 관련한 많은 조사와 연구가 있었음에도 사격장 내 위치에 따른 토양오염 분포를 검토한 사례는 아직 미약한 상황이다. 이는 군 시설의 폐쇄적 특성으로 인해 접근이 쉽지 않고, 토양정밀조사를 실시하더라도 피탄지 위주의 고농도 오염구역 탐지에 조사역량이 집중된 것과 관련이 있다. 이에 본 조사에서는 사격장 내

관측빈도가 높은 오염물질인 납을 대상으로 영점사격장과 실거리 사격장으로 구분하여 사격장 내 구역별 오염분포 특성을 파악하고자 하였다. 이러한 토양오염 분포특성 자료는 향후 토양정밀조사 계획 수립이나 정화사업, 사격장 관리계획 수립 시 참조자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 조사내용 및 방법

2.1. 조사지역 선정

본 조사를 위해 강원도와 경기도에 위치한 군부대 2개소를 선정하였다. 해당 군부대는 영점사격장과 실거리 사격장 2개소를 모두 보유한 곳이었다. 각 사격장 종류별 비교를 통해 사격장 내 위치별 나타나는 오염분포가 보편적으로 나타나는 현상인지 확인하고자 하였다. 총기 격발이 이루어지는 사대로부터 표적 간 거리는 영점사격장이 30 m, 실거리 사격장은 최장 이격거리 표적 기준 200 m 이었다. 조사 시점 기준으로 강원도 군부대 사격장은 26년 동안 운영된 후 폐쇄되었고, 경기도 군부대 사격장은 28년째 운영되고 있었다.

2.2. 시료의 채취 및 분석

2.2.1. 시료채취

우선 사격장별 시료 채취 구역을 피탄지(berm), 표적 주변(target), 표적 하류(range floor)의 3개로 구분하였다. 피탄지는 앞서 설명한 바와 같이 표적을 관통하거나 표적을 맞추지 못한 고속의 탄두를 멈추게 하는 목적으로 조성한 표적 바로 뒤의 둔덕이다. 표적 주변은 표적 전방 1 m 이내, 하류는 표적 주변 시료를 채취한 지점으로부터 전방 3 m 이내의 위치로 설정하였다(Fig. 1). 즉, 사격이 이루어지는 사대로부터 가까운 시료 채취 구역의 순서는 표적 하류, 표적 주변, 피탄지가 된다.

각 채취 구역별로 좌측, 중앙, 우측의 3개 지점으로 구분하여 토양오염공정시험기준(NIER, 2022)에 따라 토양시료를 채취하였다. 채취 시 표토와 심토로 구분하였는데, 표토는 지표로부터 30 cm 이내, 심토는 30 cm ~ 60 cm 사이 심도의 토양이었다. 실거리 사격장의 경우 사대로부터 표적 이격 거리(50 m, 100 m, 200 m)별로 구분하여 시료를 채취하였다. 최종적으로 각 군부대 영점사격장에서는 9개 지점 18개 토양시료, 실거리 사격장에서는 27개 지점 54개 토양시료를 채취하였다.

2.2.2. 시료분석

우선 사격장별 오염물질의 종류와 하류 구역 확산의

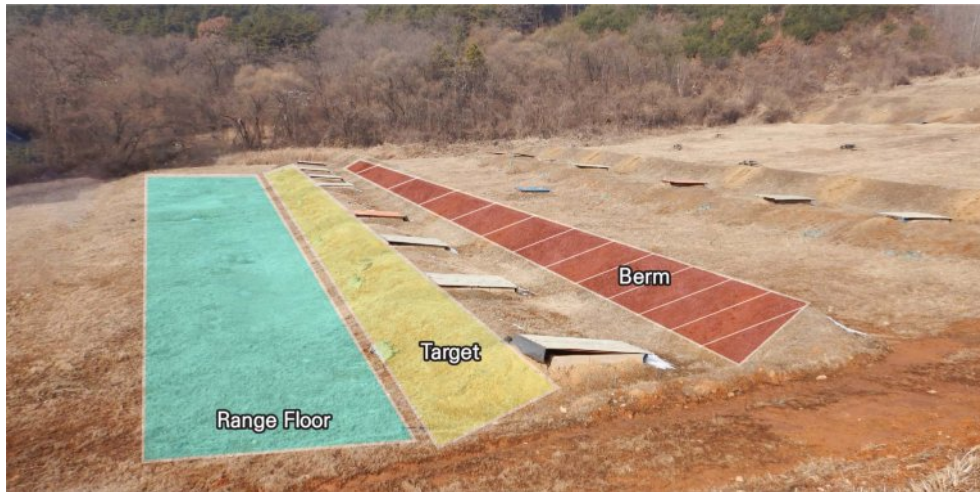


Fig. 1. Sample areas in each studied shooting ranges (each area has 3 sample points).

용이성 정도를 파악하기 위해 고농도의 오염물질이 집적되었을 것으로 예상되는 피탄지 토양을 대상으로 인공강우용출시험(synthetic precipitation leaching procedure, SPLP) (US EPA, 1994)를 실시하였다. 본 시험법은 황산과 질산을 혼합하여 pH 4.2로 조정된 용매로 대상 시료를 18시간 동안 교반하여 용출된 오염물질의 농도를 파악하는 것이다. 용출시험 대상은 사격장별 1개 지점(중앙 표적지) 표토 및 심토로 각 실거리 사격장 6개 시료(표적 이격거리별 표·심토), 각 영점사격장 2개 시료(표·심토)였다. 용출시험 대상 항목은 토양환경보전법에서 오염물질로 지정된 비소, 구리, 니켈, 납, 아연이었다.

이후 3개 구역(표적 하류, 표적 주변, 피탄지) 토양을 대상으로 왕수추출 방식인 토양오염공정시험기준(NIER, 2022)을 적용해 납의 농도를 정량하였다. 그 대상은 앞서 언급한 바와 같이 영점사격장별 9개 지점 18개 시료, 실거리 사격장별 27개 지점 54개 시료였다. 검토 대상 오염물질 항목을 납으로 한정된 이유는 앞서 언급했듯이

사격장 토양이 납탄알의 영향을 높게 받기 때문이었다. 뒤에서 설명하겠지만 연구대상 사격장 토양 대상의 인공강우용출시험 결과에서도 이의 영향이 높음을 확인하였다.

인공강우용출시험과 토양오염공정시험기준에 따른 중금속 항목의 농도정량은 ICP-OES(model 8300, Perkin-Elmer Inc.)를 이용하였다. 이후 표기되는 표와 그림에 표기된 농도는 산술평균이며, 평균값 도출 과정 중 별도의 이상치는 제외하지 않았다. 이는 이상치가 있다면 사격과정에서 오발로 인한 오염원의 비정상적 분포 및 미세한 탄두 파편에 존재하는 납(metallic Pb)의 영향을 더 높게 받은 결과로 판단했기 때문이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 용출시험 결과

Table 1은 강원도와 경기도에 위치한 연구대상 군부대의 개별 사격장(영점사격장, 실거리 사격장)의 피탄지 표토와

Table 1. The leachability of soil contaminants in the studied shooting ranges (mg/L, mean \pm SD)

		As	Cu	Ni	Pb	Zn
	River water quality standard ⁽¹⁾	0.05	-	-	0.05	-
	Groundwater quality standard ⁽²⁾	0.05	-	-	0.1	-
A	Zeroing range	ND ⁽³⁾	0.197 \pm 0.007	ND	2.143 \pm 0.644	0.032 \pm 0.012
	Shooting range	ND	0.009 \pm 0.009	ND	0.128 \pm 0.110	0.006 \pm 0.008
B	Zeroing range	ND	ND	ND	0.404 \pm 0.326	0.010 \pm 0.009
	Shooting range	ND	0.096 \pm 0.030	ND	0.658 \pm 0.292	0.019 \pm 0.004

A: Shooting ranges in Gangwon province; B: Shooting ranges in Gyeonggi province

(1) Criteria from Framework Act on Environmental Policy of Korea

(2) Criteria for residential uses from Groundwater Act of Korea

(3) ND: Not Detected

심토를 대상으로 한 인공강우용출시험(USEPA, 1994) 결과를 나타낸 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 납의 제련 과정에서 불순물로 존재할 수 있는 비소와 구리 합금 과정에 사용되는 니켈은 검출되지 않았다. 따라서 본 항목으로 인한 환경학적 영향은 낮은 것으로 판단된다.

납은 0.13 mg/L ~ 2.14 mg/L의 범위로 다른 어느 항목보다 용출농도가 높게 나타났다. 이 같은 결과는 사격장 피탄지 토양오염이 납 탄알의 영향을 높게 받는다는 기존 문헌조사 내용과 일치하는 것이다(Ahmad et al., 2012; Alasmay, 2025; EPA Victory, 2019; Hong and Hyun, 2014). 아울러 국내 환경정책기본법 하천수 수질기준(0.05 mg/L)을 간접적 평가지표로 활용하여 비교했을 때 본 용출농도는 2배 이상 높은 것이었다. 강우에 의한 용출액이 지하로 유입되어 지하수가 된다고 가정했을 때도 관련 지하수 기준(0.1 mg/L)을 초과한 것으로 나타났다. 인공강우용출 시험으로 확인한 납의 높은 용출농도는 그만큼 오염의 확산에 용이한 형태의 납이 고농도로 존재한다고 할 수 있다. 강우 발생 시 토양 내 오염물질은 강우에 용탈되며, 오염물질을 함유한 강우(유거수)가 주변 수계에 유입되면 수생태계에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 하천수나 지하수를 농업용수로 활용하면 농경지 오염과 함께 오염물질의 농작물 전이까지 발생할 수 있다. 즉, 생물학적 농축(bioaccumulation) 과정을 통해 최종적으로는 인체에 유입되는데, 인체에 유입된 납은 완전한 제거가 어렵기 때문에 예방하는 것이 중요하다(Collin et al., 2022; Emom et al., 2023). 따라서 군사격장 내 오염확산 억제를 위해 토양 내 존재하는 오염물질의 강우 용출과 같은 이동성을 저감시키는 방안이 필요하다고 할 수 있다(Shin et al., 2025).

용출된 납의 주요 형태는 산화물(PbO)과 탄산염($PbCO_3$)으로 판단된다. 사격장 토양에 유입된 탄두 또는 탄두 파편으로부터 유래된 납은 수분, 유기물, pH 등의 풍화 조건에 따라 종(species) 변화가 다르게 나타나는데, 대체로 $Pb \rightarrow PbO \rightarrow PbCO_3/Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ 의 3단계 변화로 나타난다(Alasmay, 2025; Ma et al., 2007; Chrástný, 2010). 이에 따르면 지중 유입된 납이 대기중 산소(O)와 반응하여 산화물이 되고, 이후 이산화탄소(CO_2)가 탄두(파편) 표면의 수분에 용해되면서 납이 탄산염으로 변화한다. $PbCO_3$ 는 PbO 에 비해 낮은 용해도를 가지고 있다. 이에 토양 중금속의 존재형태 파악을 위한 연속추출분석 과정에서는 탄산염 형태의 중금속 농도 정량을 위해 pH 5의 추출액을 사용한다(Li et al., 1995). 따라서 pH 4.2의 용매를 사용하는 인공강우시험 특성상 탄산염으로 존재하는 납까지 용출되었을 것으로 판단된다.

구리와 아연은 각각 불검출 ~ 0.20 mg/L, 0.01 mg/L ~ 0.03 mg/L의 범위로 납과 비교하면 상대적 저농도의 수치를 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 이 같은 오염물질은 탄두에 포함된 소량의 구리와 구리 합금에 사용된 아연이 토양 내 존재하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 이상의 항목별 용출농도로 봤을 때, 사격장 토양오염 관리 방안 수립 시 다른 어느 오염물질보다 납을 우선하여 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2. 납 오염도 분석결과

3.2.1. 영점사격장

Fig. 2는 강원도와 경기도에 위치하는 조사 대상 군부대 영점사격장 내 구역별 토양의 납 농도를 표토와 심토로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 피탄지, 표적 주변, 표적 하류의 순서로 농도가 높은 것으로 확인되었다.

표적 주변에 비해 피탄지의 농도가 높게 나타난 이유는 사격장의 지형 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다. 영점사격장은 주로 사대로부터 일정 거리 이격 후 급경사의 언덕 등으로 막혀 있거나 비교적 높은 둔덕을 조성한 형태이다. 따라서 지형적 구조로 볼 때 표적 주변의 지표보다는 표적과 동일 높이거나 이보다 더 높은 피탄지에 탄알이

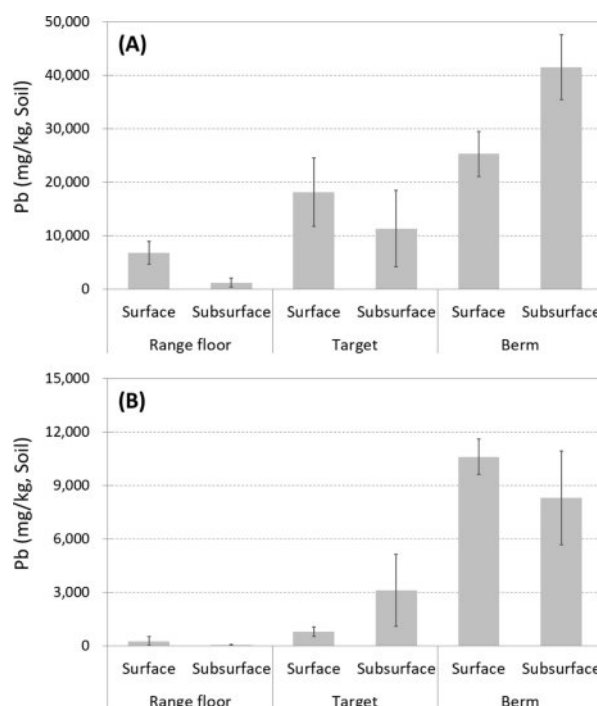


Fig. 2. Pb concentration of soils in the zeroing ranges by sampling area (A: Shooting range in Gangwon province; B: Shooting range in Gyeonggi province)

집적될 가능성이 높다. 다만, 표적 주변이나 피탄지에서의 표·심토 구분에 따른 오염분포 경향은 파악할 수 없었다. 이는 60 cm 이내 심토에서는 오염물질의 중력 이동보다는 오염물질의 유출원인 탄두의 운동성에 더 큰 영향을 받기 때문으로 판단된다. 즉, 오염물질이 지표로부터 수직으로 중력 유입되는 형태보다는 탄두가 초고속으로 표적 후단의 언덕이나 둔덕의 측면부로부터 지중에 박힌 후 오염물질의 유출원으로 작용했기 때문일 것이다. 따라서 일정 깊이까지의 수직적 오염분포는 강우와 같은 수분으로의 오염물질 용탈 후 수직으로 이동하는 특성보다는 탄두가 가지는 운동에너지에 의한 오염 유발원의 직접적인 지중 이동에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

이에 비해 하류 확산지 토양 내 납의 분포는 표·심토 구분에 따른 차이가 명확하게 나타났다. 강원도 군부대 영점사격장의 평균 납 농도는 표토 6,800 mg/kg, 심토 1,200 mg/kg으로 표토가 심토 대비 6배 가까이 높은 것으로 나타났다. 경기도 군부대 영점사격장에서는 표토 262 mg/kg, 심토 59 mg/kg으로 표토에서의 농도가 4배를 초과하였다. 해당 구역은 탄두가 직접적으로 유입될 가능성이 상당히 희박한 곳이다. 따라서 본 구역에 존재하는 오염물질의 기원은 피탄지와 표적 주변에서 유래된 오염 토양 입자의 강우 유실 후 하류 지역에서의 집적 또는 오염물질의 강우 용탈 후 하류 지역에서의 토양 표면 재흡착 영향으로 판단된다(Ahmad et al., 2012; Etim, 2016).

US EPA의 주거지 토양 관리기준(removal management level)은 200 mg/kg이다. 본 농도는 인체에 위협이 될 수 있는 수준을 의미한다(US EPA, 2024). 아울러 국내 토양 환경보전법에서 적용하고 있는 군 사격장 대상의 납 환경 기준은 700 mg/kg이다. 이에 따르면 강원도 사격장 하류 확산지의 표토와 심토는 평균 농도로 봤을 때 국내 기준을 초과했고, 인체건강에 충분한 위협을 가진 수준이라고 볼 수 있다. 경기도 군부대 사격장의 경우에도 표토 일부 지점에서 632 mg/kg의 농도를 나타내어 기준치에 근접한 수준임을 보였다. 이는 피탄지와 표적 주변의 오염토양의 유실과 오염물질의 용출 및 하류지역 재흡착 등의 오염확산으로도 오염수준을 높일 수 있음을 나타낸 것이다. 따라서 앞선 용출시험결과에서 언급한 바와 같이 오염물질의 이동성(용출) 억제 이외에 피탄지와 표적 주변 토양을 대상으로 토양유실을 저감하는 방안의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.2. 실거리 사격장

Fig. 3~Fig. 5에 조사 대상 군부대 실거리 사격장 토양의

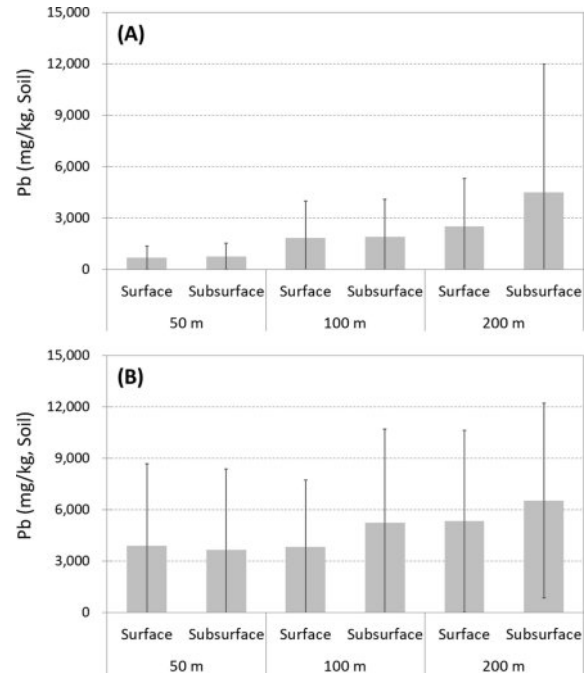


Fig. 3. Pb concentration of soils in the shooting ranges by target distances (A: Shooting ranges in Gangwon province; B: Shooting range in Gyeonggi province).

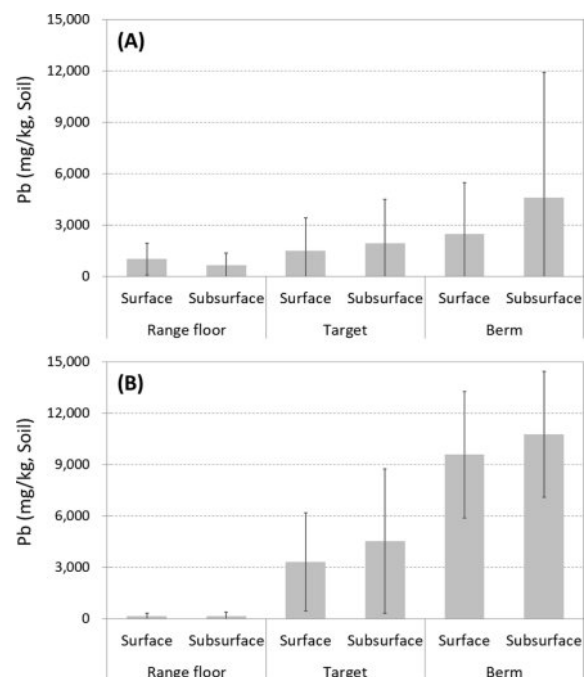


Fig. 4. Pb concentration of soils in the shooting ranges by sampling areas (A: Shooting range in Gangwon province; B: Shooting range in Gyeonggi province)

납 농도를 표토와 심토로 구분하여 나타내었다. 이중 Fig. 3은 표적 이격 거리(50 m, 100 m, 150 m)별 평균을, Fig. 4는

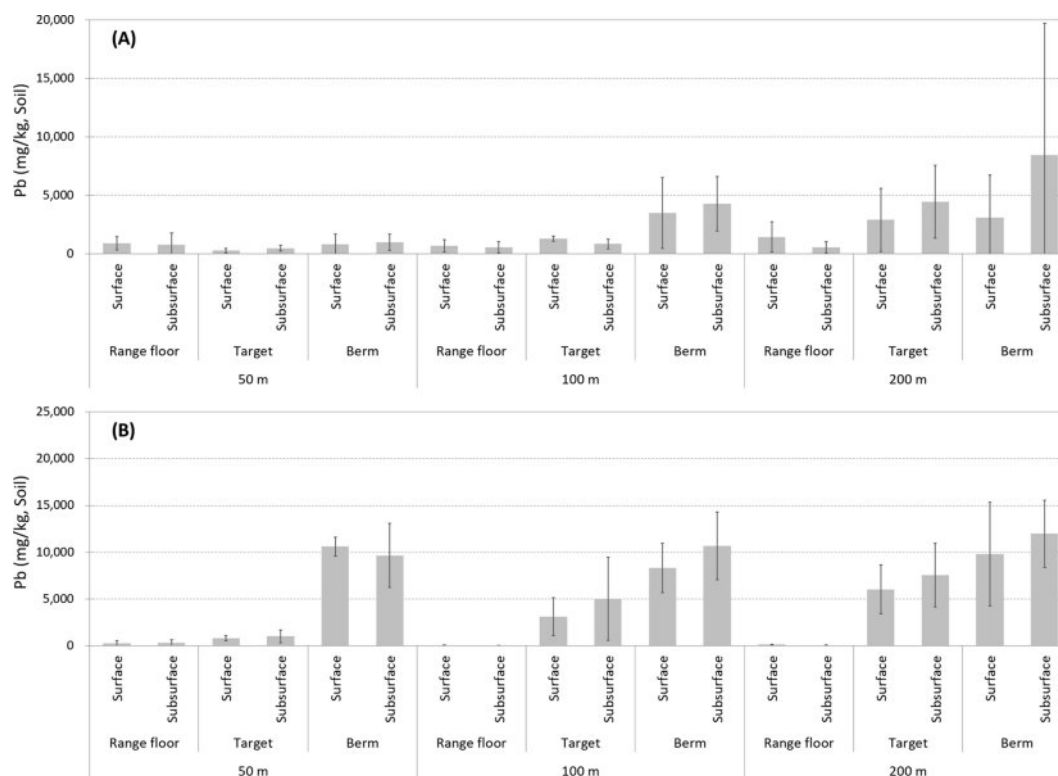


Fig. 5. Pb concentration of soils in the shooting ranges (A: Shooting range in Gangwon province; B: Shooting range in Gyeonggi province).

토양 채취구역(피탄지, 표적 주변, 표적 하류)별 평균농도를 나타낸 것이다. 아울러 Fig. 5는 표적 이격 거리에 대한 토양시료 채취구역별 농도를 상세히 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 실거리 사격장에서는 대체로 표적의 이격거리가 멀수록 토양 내 납 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 표토 기준으로 보면 강원도 군부대 사격장은 50 m 표적 구역의 평균 농도기준으로 100 m에서 3배 가까이, 200 m에서 4배 가까이 증가하였다. 경기도 사격장은 100 m에서는 동일한 농도를 보였으나, 200 m에서 1.4배 가까이 증가하였다. 이러한 경향은 실거리 사격장의 구조적인 특성에서 그 원인을 확인할 수 있다. 일반적으로 실거리 사격장의 표적은 총기 격발이 이루어지는 사대보다 높은 고도에 위치하며, 이격거리가 먼 표적일수록 그 고도는 더 높아진다. 이에 따라 사수는 상향 사격을 하는데, 상대적으로 가까운 표적이나 표적 바로 뒤의 피탄지를 타격하지 못하는 경우 탄두는 다음 표적 위치로 넘어가게 된다. 따라서 근거리보다는 상대적 원거리 표적 주변의 토양에서 탄두가 집적될 가능성이 높고, 납의 오염도 역시 원거리에서 높게 나타났던 것으로 판단된다.

사격장 내 구역별 납의 농도는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 피탄지, 표적 주변, 표적 하류의 순서로 높게 나타났다.

이 같은 결과는 앞선 영점사격장 분석결과와 동일한 것이다. 당연하겠지만 탄두가 주요 오염원인 만큼 탄두가 집적될 가능성이 높은 지역에서 농도가 높게 나타났다고 볼 수 있다. 표토 기준으로 보면 강원도 군부대 사격장은 표적 하류의 평균 농도기준으로 표적 주변에서 1.5배, 피탄지에서 2.4배 증가하였다. 경기도 군부대 사격장은 표적 주변에서 22배, 피탄지에서 63배로 급격하게 증가한 수치를 보였다. 피탄지를 기준으로 본 강원도 군부대 사격장과 경기도 군부대 사격장의 납 농도 분포는 사격장 종류별로 다르게 나타났다. Fig. 2와 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 영점사격장은 강원도 군부대, 실거리 사격장은 경기도 군부대에서 농도가 상대적으로 높았다. 시료채취 시점을 기준으로 두 군부대의 사격장은 27년 전후의 유사한 운영기간을 가지므로 이러한 농도 분포 차이는 결국 사격량에 기인할 것이다. 국내 군사시설 특성상 사격량에 관한 정보를 얻기는 어렵다. 다만, 제한적인 정보를 통한 추정은 가능하다. 강원도 군부대 사격장은 신병 훈련소로 운영되었고, 경기도 군부대 사격장은 일반 장병의 훈련 목적으로 운영되고 있다. 따라서 강원도 군부대 사격장은 신병 훈련에 따른 사격량이 많았을 것이다. 경기도 군부대에서는 실거리 사격장에 한해 타 부대에서도 활용하고 있어 사격량이 상대적으로 높았던

것으로 보인다. 즉, 실거리 사격장은 영점사격장과 달리 그 규모를 고려할 때 모든 일선 모든 부대에 설치할 수 없으므로, 거점 사격장(경기도 군부대 실거리 사격장)을 선정한 후 주변 부대에서도 활용함으로 해서 사격량이 많았던 것으로 판단된다.

표적 이격 거리 증가에 따른 납 농도 증가 경향 및 표적 이격거리별 시료 채취 구역의 농도분포 특성은 Fig. 5에서 상세하게 확인이 가능하다. 그림에서 볼 수 있듯이 납의 농도 분포는 이격거리와 정비례하지는 않는다. 다만, 탄두의 영향을 직접적으로 받는 표적 주변과 피탄지로 한정했을 때 일정 경향이 확인된다. 대체로 이격거리에 상관없이 피탄지의 농도는 다른 어느 표적 주변보다 높으며, 피탄지만 비교했을 때는 이격거리가 증가할수록 그 농도 역시 증가한 것으로 나타났다. 이는 곧 실거리 사격장 내 고농도의 납은 피탄지에서, 그중에서도 사대로부터 이격거리가 가장 먼 피탄지에서 최고 농도로 확인될 가능성이 높다고 할 수 있다.

표적 주변 지역과 피탄지에서의 표·심토간 평균 농도 비교에서는 일관적인 경향을 보이지는 않았으나, 100 m 표적 구역 이후로는 심토의 농도가 높게 나타났다. 이는 상향 사격에 따른 탄두의 후단부 표적으로의 집중화 및 고속의 운동성에 따른 영향으로 판단된다. 아울러 2개 실거리 사격장 모두 표적별 하류 지역에서의 표토에서 심토보다 상대적으로 높은 농도가 확인되었다. 앞선 영점 사격장에서 검토한 바와 같이 해당 구역은 탄두가 직접적으로 유입될 가능성이 상당히 희박한 곳이므로, 피탄지와 표적 주변 오염토양 입자의 유실 또는 오염물질의 강우 용탈 영향으로 판단된다(Ahmad et al., 2012; Etim, 2016). 따라서 환경학적으로 안정하며, 지속적인 사격장 활용을 위해서는 피탄지와 같은 고농도 오염구역에 대한 오염물질 또는 오염 토양입자의 확산억제 조치가 필요할 것으로 판단된다. 확산억제 조치로서 고농도 오염특성을 갖는 피탄지 및 표적 주변에 대해 토양 유실 억제에 고려한 안정화가 우선적으로 고려될 수 있을 것이다. 중금속 안정화에 효과가 있는 알칼리 물질을 이용한 농경지 토양의 유실억제 검토사례가 있는 만큼 이의 적용성은 충분할 것으로 판단된다(Koh et al., 2019; Koh et al., 2021; Yun et al., 2022). 중금속 흡수를 목적으로 하는 식물 정화법(식생피복)의 적용도 고려할 수 있겠으나, 탄환의 물리적 타격으로 인해 피탄지에서의 식생의 성장은 상당히 제한적일 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강원도와 경기도에 위치한 군부대의 영

점사격장과 실거리 사격장을 대상으로 피탄지, 표적 주변, 표적 하류로 구분하여 구역별 납 토양오염 분포 특성을 파악하였다. 이를 통해 향후 사격장 환경관리 방안 수립을 위한 참조자료로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

우선 피탄지 토양을 대상으로 5개 오염물질(As, Cu, Ni, Pb, Zn)을 인공강우용출시험으로 분석한 결과 구리, 납, 아연 등 3개 항목이 검출되었다. 이중 납의 농도가 0.13 mg/L ~ 2.14 mg/L의 범위로 0.2 mg/L 미만으로 나타났던 구리와 아연에 비해 상당히 높게 검출되었다. 이는 기존의 연구 사례와 마찬가지로 사격장 토양오염 관리 방안 수립 시 납을 우선하여 고려할 필요가 있음을 나타낸 것이다.

영점사격장 납 오염도 분석 결과 피탄지, 표적 주변, 표적 하류의 순서로 농도가 높게 나타났다. 표적 주변과 피탄지에서의 표·심토 구분에 따른 오염분포 경향은 파악할 수 없었는데, 오염물질이 표토로부터 유입되는 것이 아닌 배출원(탄두)이 자체의 운동성으로 지중에 직접 유입되기 때문으로 보인다.

실거리 사격장 납 오염도 분석 결과 표적 주변과 피탄지 토양의 납 농도는 표적의 이격거리와 비례하는 경향을 나타내었다. 이는 상향 사격을 하는 실거리 사격장의 구조적인 특성에 기인한 결과로 보인다. 따라서 실거리 사격장 내 고농도의 납은 피탄지에서, 그중에서도 사대로부터 이격거리가 가장 먼 피탄지에서 최고 농도로 확인될 가능성이 높다고 할 수 있다.

영점사격장과 실거리 사격장 내 표적 하류구역에서는 심토보다는 표토에서 납의 오염이 집중된 것으로 나타났다. 이는 피탄지와 표적 주변 오염토양 입자의 유실 및 오염물질의 강우 용탈 후 하류 구역에서의 집적·흡착의 영향으로 판단할 수 있다. 따라서 지속적인 사격장 활용을 위해서는 피탄지와 같은 고농도 오염구역에 대한 오염물질 또는 오염 토양입자의 확산억제 조치가 필요할 것이다. 중금속 오염 부지라는 특성을 고려할 때 알칼리 물질을 통한 오염 토양입자의 유실 억제와 오염물질의 안정화를 동시에 이루는 방안이 고려될 수 있다.

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.
- Alasmay, Z., 2025, Lead (Pb) contamination in soil and plants

at military shooting ranges and its mitigation strategies: a comprehensive review, *Processes*, **13**(2), 345.

Cao, X., Dermatas, D., Xu, X., and Shen, G., 2008, Immobilization of lead in shooting range soils by means of cement, quicklime, and phosphate amendments, *Env. Sci. Pollut. Res.*, **15**(2), 120-127.

Collin, M.S., Venkatranman, S.K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S.M., Stacey, R.G.S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G.I., Senatov, F., Koppala, S., and Swamiappan, S., 2022, Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review, *J. Harzard. Mater. Adv.*, **7**, 1-8.

Emon, F.J., Rohani, M.F., Sumaiya, N., Jannat, M.F.T., Akter, Y., Shahjahan, M., Kari, Z.A., Tahiuiddin, A.B., and Goh, K.W., 2023, Bioaccumulation and bioremediation of heavy metals in fishes-A review, *Toxics*, **11**(6), 510.

EPA Victoria (Environment Protection Authority Victoria), 2019, Guide for managing contamination at shooting ranges, 9 p.

Etim, E.U., 2016, Distribution of soil-bound lead arising from rainfall-runoff events at impact berm of a military shooting range, *J. Environ. Prot.*, **7**(5), 623-634.

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.

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.

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., 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.

Laidlaw, M.A.S., Filippelli, G., Mielke, H., Gulson, B., and Ball, A.S., 2017, Lead exposure at firing ranges-a review, *Environ Health*, **16**(34), 1-15.

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, S.W., Lee, W.C., Lee, S.H., and Kim, S.O., 2021, Remediation of heavy metal-contaminated soil within a military shooting range through physicochemical treatment, *J. Soil Groundw. Environ.*, **26**(5), 9-19.

Li, X., Coles, B.J., Ramsey, M.H., and Thornton, I., 1995, Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES, *Chem. Geol.*, **124**(1-2), 109-123.

Moon, D.H., Cheong, K.H., Kim, T.S., Khim, J.H., Choi, S.B., Ok, Y.S., and Moon, O.R., 2010, Stabilization of Pb contaminated army firing range soil using calcined waste oyster shells, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(2), 185-192.

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

Rhee, P.M., Moore, E.E., Joseph, B., Tang, A., Pandit, V., and Vercruysse, G., 2016, Gunshot wounds: a review of ballistics, bullets, weapons, and myths, *J. Trauma Acute Care Surg*, **80**(6), 853-867.

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 the 2025 spring conference abstract of Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Pusan, Korea, p. 65.

US EPA, 1994, Synthetic Precipitation Leaching Procedure, EPA Method 1312.

US EPA, 2024, Updated Residential Soil Lead Guidance for CERCLA Sites and RCRA Corrective Action Facilities.

Yong, S.K., Zin, S.N.M., and Ariff, M.J.M., 2016, Effects of rain pH, soil organic matter, cation exchange capacity and total lead content in shooting range soil on the concentration of lead in leachate, Malays. *J. Anal. Sci.*, **20**(5), 1066-1072.

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.