

Research Paper

폐 공용화기사격장 내 납오염 사격장 군부지의 물리적 토양세척정화기술 적용성 연구

정재윤 · 장윤영

광운대학교 환경공학과

A Study on the Application of Physical Soil Washing Technology at Lead-contaminated Shooting Range in a Closed Military Shooting Range Area

Jaeyun Jung · Yunyoung Jang

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

요약: 공용화기사격장 내 중금속 오염물은 대부분 탄두원형으로 존재하거나 입자로 존재하는 금속조각편이며 이들 미세한 금속입자들은 오랜 기간 풍화되어 표면이 산화물 또는 탄산화물로 존재할 가능성이 매우 높다. 특히 사격장 토양에서 대표적 오염물질인 납은 연성이 높아 무르고 잘 늘어나므로 더 미세입자로 존재한다. 따라서 물리적 세척 실험으로 입도분석, 입경별 중금속농도, 금속물질 성분분석, 비중, 자력, 부상선별의 적용성 평가를 실시하였다. 금속파편의 경우 FESEM분석과 무게측정결과 납은 무른 특성에 따라 얇게 조각나고 편모양의 구조로 비슷한 면적의 구형 토양보다 무게가 더 적게 나가는 것을 확인하였으며 비중선별 적용성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 적용하여 하이드로사이클론을 이용한 정화효율평가 결과 1회 71%, 2회 80%, 3회 91%의 누적 정화효율을 보였다. 이에 비해 자력선별은 17%의 낮은 효율을 보였고 부상선별은 입경 0.5 mm 미만으로 선별한 대상토는(-35 mesh) 39%로 비교적 높은 효율을 보였으나 입경 2 mm 미만으로 선별한 대상토의(-10 mesh) 효율은 16%에 불과하였다. 토양 세척의 대상 처리입경은 2 mm ~ 0.075 mm로 입도구분을 추가로 하여 실규모 장치에 적용하여야 하며 이는 설치비용과 공정이 추가로 구성됨에 따른 관리가 필요할 것으로 분석되었다. 결과적으로 공용화기사격장 오염의 토양정화는 탄두 원형을 유지한 탄두는 5.56 mm 이상으로 자갈입경보다 크므로 고비중을 이용한 비중선별을 실시하고, 금속파편으로 존재하는 오염물질은 얇게 조각나고 편모양의 구조로 같은 입경의 토양보다 무게가 더 적음에 따라 토양세척의 하이드로사이클론을 이용하여 분리하여 처리할 수 있음을 확인할 수 있었다.

주요어: 사격장부지, 납오염, 비중선별, 토양세척

Abstract: Heavy metal contaminants in the shooting range are mostly present in a warhead circle or a metal fragment present as a particle, these fine metal particles are weathered for a long period of

time is very likely that the surface is present as an oxide or carbon oxide. In particular, lead which is a representative contaminant in the shooting range soil, is present as more fine particles because it increases the softness and is stretched well. Therefore, by physical washing experiment, we conducted a degree analysis, concentration of heavy metals by cubic diameter, composition analysis of metallic substances, and assessment of applicability of gravity, magnetism and floating selection. The experimental results FESEM analysis and the measurement results lead to the micro-balance was confirmed that the weight goes out less than the soil of the same size in a thinly sliced and side-shaped structure according to the dull characteristics it was confirmed that the high specific gravity applicability. In addition, the remediation efficiency evaluation results using a hydrocyclone applied to this showed a cumulative remediation efficiency of 71%, twice 80%, 3 times 91%. On the other hand, magnetic sifting showed a low efficiency of 17%, floating selection -35mesh (0.5mm) target soil showed a relatively high efficiency to 39% -10mesh (2mm) efficiency was only 16%. The target treatment diameter of soil washing should be 2mm to 0.075mm, which is applied to the actual equipment by adding an additional input classification, which would require management as additional installation costs and processes are constructed. As a result, it is found that the soil remediation of shooting range can be separately according to the size of the warhead. The size is larger than the gravel diameter to most 5.56mm, so it is possible to select a specific gravity using a high gravity. However, the contaminants present in the metal fragments were found to be processed by separating using a hydrocyclone of the soil washing according to the weight is less than the soil of the same particle size in a thinly fragmented structure.

Keywords : A shooting range, Lead contaminated site, Gravity separation, Soil washing

I. 서론

국내 사격장은 군부대 1,300개, 사격경기장 15개, 레저용사격장 95개, 미군부대 95개로 대부분의 사격장이 군부대의 사격장으로 이용 중이다(Jeon 2013).

2013~2017년간 군부대에서 소총탄사격장에 대한 오염도 조사결과에 따르면 대부분의 사격장이 납으로 오염되어있으며 사격장의 토양정화를 위해 육군본부 자체적으로 예산을 투입예정이거나, 지방자치단체의 요구로 정화 예정 중(The Ministry of National Defense 2017) 이다.

미국 공병대자료에 의하면(U.S Army Engineer Waterways Experiment Station) 군사활동 지역에서 가장 많이 발견되는 중금속 오염물질은 납, 카드뮴, 크롬, 구리 등이며 수은과 비소는 상대적으로 적게 분포되어있다.

이처럼 군부대 지역 중 중금속 오염의 우려가 가장 큰 지역은 사격장으로 특히 납에 의한 오염수치가 매

우 높게 나타나고 있어 토양복원의 필요성이 대두되었다(Jang 2006).

사격장 내 중금속 오염물은 대부분 입자로 존재하는 금속조각편이며 이들 미세한 금속입자들은 오랜 기간 풍화되어 표면이 산화물 또는 탄산화물로 존재할 가능성이 매우 높다(Jang 2006).

국내 중금속 토양오염은 대부분 토양세척법으로 처리된다. 토양세척 공정은 1970년대 후반 미국 EPA에서 기름누출 사고로 오염된 해변을 정화하기 위해 처음으로 개발되었다(Grasso 1993). 토양세척의 개념은 기계적인 마찰력과 용매를 이용하여 토양입자로부터 오염물질을 물리·화학적으로 제거하는 기술이다.

이 기술은 오염된 토양을 굴착하여 외부의 처리장치를 이용하여 처리하는 것으로 최종처분이 아닌 오염물질 처리 대상량을 감소 시키는 기술로 많이 활용된다(Freeman and Harris 1995).

토양세척기술은 물리적 선별과정(Physical Sepa-

ration, PS)와 화학적인 추출(Chemical Extraction, CE) 기술이 단독 또는 병합한 공정으로 사용된다(The Department of the Environment, 2007). 이 중 물리적선별에 주로 사용되는 방법은 기계적 체질, 수리적 분급, 비중선별, 자력선별, 부유선별, 정전선별, 고속교반이 있다(G Dermont et al, 2008).

본 연구에서는 사격장 오염특성을 파악하고 오염 특성을 반영한 물리적 선별기술을 평가하여 토양과 혼재된 입자상으로 존재하는 납을 토양과 물리적으로 분리하는 공정을 수립하여 토양세척법에 적용, 효율적인 정화방법을 제시하는데 있다.

1. 군사격장 오염특징

사격장의 대표적인 오염물질은 납(Lead), 구리(Copper), 아연(Zn)이며 이는 탄두의 물질이 납과 구리, 아연 합금으로 만들어져 있기 때문이다.

탄약의 구성은 크게 뇌관, 탄피, 화약(추진약)과 탄자로 구성되어 있다. 탄환 맨 앞부분인 탄자의 경우 대개 납덩어리로 만든 본체를 얇은 구리판이나 철판으로 만든 껍질이 둘러싸여 있고 탄두의 표면을 질기고 연한 구리합금으로 제작한다(Hong 2015). 소화기 탄약은 구경이 30 mm (0.6inch)이하의 탄약으로 소화기 탄약에는 권총탄약(구경 9·22 mm, 구경 38·45권총), 소화기 탄약(5.56 mm : K2, K1, KM16A1, 7.62 mm : M1, 갈빈 등), 기관총 탄약

(5.56 mm : K3, 7.62 mm : M60, 구경 50 : MG50), 엽총 탄약이 있으며, 본 연구부지에서 사용되는 탄약은 5~10 mm의 탄두이다.

타겟지에 명중한 탄두는 탄두를 회수하기 위한 회수장치에 의해 원형을 유지하지만 타겟지에 명중하지 못한 탄두는 충격에 의해 금속파편으로 존재한다. 이러한 금속파편은 오랜 기간 풍화되어 토양입자와 같은 다양한 크기로 토양과 혼재된다(Figure 1, Figure 2).

이러한 특성으로 사격장에의 토양오염은 광산의 모암에 의한 중금속오염이나, 산업단지에서의 오염과는 다른 양상을 나타낸다. 반복된 사격으로 인하여

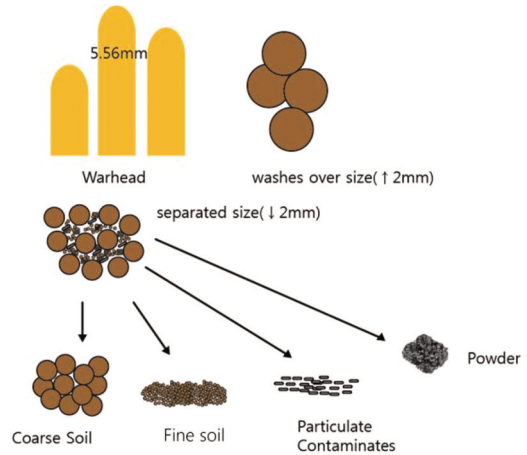


Figure 2. Heavy Metal Pollution Pattern.

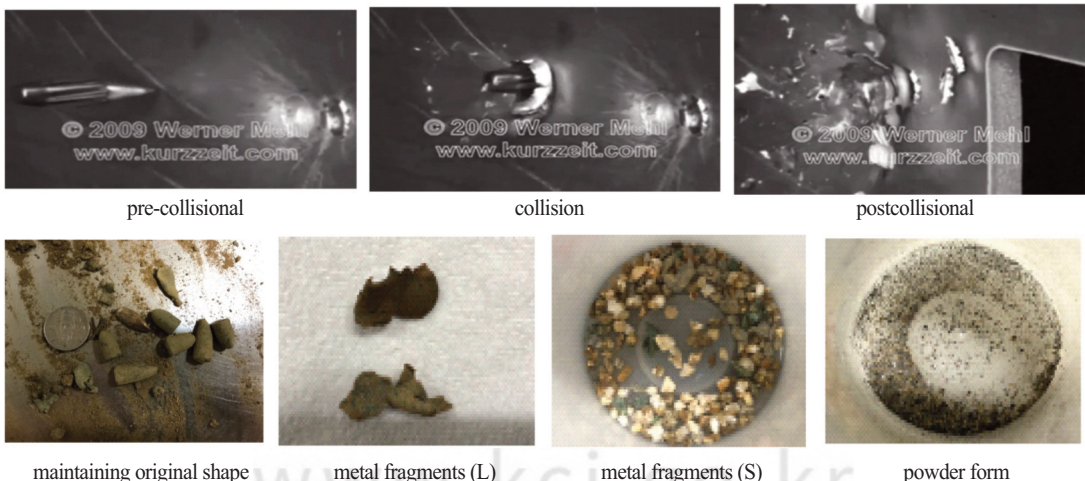


Figure 1. Fragmentation of ammunition.

탄약파편들이 부식되어 깨지고 토양입자와 같은 크기로 섞여 주변 토양을 오염시키고 토양입자에 화학적으로 결합된 것이 아닌 금속 입자상으로 혼재되어 있으므로 물리적으로 분리하지 않으면 정화가 매우 어렵다.

따라서 사격장의 주요 오염원인 납의 오염특성을 분석하여 물리적으로 분리를 하여야 한다. 공용화기사격장에서의 중금속 오염양태는 Figure 2와 같다.

2. 토양세척공정 중 물리적 선별

토양세척 공정은 1970년대 후반 미국 EPA에서 기름누출 사고로 오염된 해변을 정화하기 위해 처음으로 개발되었다(Grasso 1993). 토양세척의 개념은 기계적인 마찰력과 용매를 이용하여 토양입자로부터 오염물질을 물리·화학적으로 제거하는 기술이다.

이 기술은 오염된 토양을 굴착하여 외부의 처리장치를 이용하여 처리하는 것으로 최종처분이 아닌 오염물질 처리 대상량을 감소 시키는 기술로 많이 활용된다(Freeman and Harris 1995).

토양세척 공정은 중금속을 함유하고 있는 토양 입자와 그렇지 않은 토양 입자의 입경, 비중, 자성 등 물리적인 특성차이를 이용하여 중금속을 함유하고 있는 토양을 선별하여 최종적으로 처리해야 할 토양의 양을 줄여주는 역할을 수행하는 물리적인 선별과

정(Physical Separation, PS)과 산이나 킬레이트제 등의 화학약품을 이용하여 토양에 포함된 중금속을 용해시켜 제거하는 기술인 화학적인 추출(Chemical Extraction, CE)로써, 적용방식에 따라 In-situ 토양세척 공정(토양세정)과 Ex-situ 토양세척 공정(토양세척)으로 대별할 수 있다(The Department of the Environment 2007).

전형적인 토양세척 공정은 물리적인 선별과정, 화학적인 추출 그리고 이들 두 과정을 병합한 공정으로 나눌 수 있다(G Dermont et al, 2008).

이 중 본 연구에서 수행하는 물리적선별에 주로 사용되는 방법은 기계적 체질, 수리적 분급, 비중선별, 자력선별, 부유선별, 정전선별, 고속교반이 있다(G Dermont et al, 2008).

이처럼 사용되고 있는 물리적 선별기술 중 토양세척의 물리적 선별로 적용하여 반영할 수 있는 기술은 입도선별, 비중선별, 부유선별, 자력선별이 주로 적용되고 있다. 입도선별은 체분리방법이 주로 사용되며, 비중선별은 하이드로사이클론과, 습식침강분리방법, 테이블선별 및 지그선별법등이 있으며 부유선별은 기포를 이용하여 소수성 표면을 만들어 오염물질을 선별하는 방법이다. 자력선별은 반자성물질을 이용한 선별방법과 강자성물질을 이용한 선별방법이 있다.

Table 1. Types of physical screening techniques

Sort	Screening method
size selection	<ul style="list-style-type: none"> • Screening as a criterion representing the magnitude of the elevation and the stage of its distribution • Mesh separation using the size of the mesh
gravity concentration	<ul style="list-style-type: none"> • A Method for screening particles according to the characteristics of the precipitation of particles in a fluid • A non-linear method of separating by using specific gravity fluids into light and heavy minerals by means of separation using the specific gravity difference of solid particles • A method of depositing heavy minerals lower than light minerals in the flow of vertical reciprocating water in the upward and downward direction • It is mainly used to separate the sedimentary particles from the heavy ones to the light ones in a flat film
floatation	<ul style="list-style-type: none"> • A Method to select by artificially making the surface of particles, such as ore, a hydrophobic surface and floating the mineral with a bubble.
magnetic separation	<ul style="list-style-type: none"> • A Method of screening using magnetically attracted properties of minerals • A Method for screening dia-magnetic substance with opposite tendency to magnetize and ferromagnetic substances with magnetically attracted properties

II. 연구방법

1. 연구대상지역 조사

본 연구 대상부지는 경기도 하남시 학암·감이동 일원의 위례신도시 택지개발사업 지구 일대에 설치되어 운영되었던 사격장부지다. 해당부대는 특수전사령부로 서울공항과 가까운 곳에 서울과 국가 안보의 배치가 필요함에 따라 1970대부터 특수전사령부, 기무부대, 육국종합행정학교, 국군체육부대 등 대규모 군사시설로 사용되어 왔다. 연구 지역인 위례신도시는 경기도 하남시에 위치하고 있어 한강수계 상수원수질개선 및 주민지원등에 관한 법률에 따라 폐수배출시설 설치 제한구역이다. 따라서 토양세척장치에 화학적인 방법을 적용할 수 없었고 물리적세척으로 적용을 하여 실험을 실시하였다.

연구대상지역에 대한 토양정밀조사 보고서를 참조하여 Figure 3과 같이 추가적으로 토양시료를 채취하였고 오염도분석은 환경부의 공정시험법에 의해 실시하였다. 연구대상 지역의 오염특성 파악을 위해 단계별 추출(Tessier et al, 1979) 및 3D모델(Voxler)을 통한 오염양상분석을 실시하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 공용화기 사격장의 남은 탄두의 특징에 따라 원형을 유지한 납과, 사격 후 충격에 의한 금속파편으로 구분할 수 있었다. 원형을 유지한 납은 5.56 mm 이상의 입경으로 토양세척의 자갈입경(2 mm초과) 이상이며 고 비중 특성을 가지므로 쉽게 분리가 가능하므로 분리가 어려운 금속파편의 분리효율을 평가하였다.

연구대상지역의 물리적 선별기술 적용으로 입도선별, 비중선별, 부유선별 및 자력선별을 실시하였다.

1) 입경별 중금속 분석

실험시료는 2 mm이상은 제거하고 실시하였으며 입도선별은 KS F 2302 흙체분석을 준용하여 수행하였으며 체의 크기는 10~200 mesh (입경: 2, 0.425, 0.15, 0.075 mm)를 사용하여 입경을 분리하고 각 입경별로 납과 구리를 분석하였다.

2) 비중선별

(1) 패닝접시 실험

비중선별은 먼저 패닝접시를 이용하여 흙과 금속을 물에 담근 후 전후 좌우로 흔들고 원을 그리며 돌



Figure 3. Sampling of test site.

Table 2. Hydrocyclone designing data of the Rietema and Bradley

Hydrocyclone	Di/Dc	Do/Dc	L/Dc	l/Dc	θ
Bradley	1/7	1/5	-	1/3	9°
Rietema	0.28	0.34	5	0.4°	9°~20°

려주어 패닝접시를 45도로 기울여 가벼운 토사는 흘러보내고 무거운 금속물질은 잔존하는 방식의 비중선별을 실시하였다.

(2) 무게측정

크기가 비슷한 토양과 분리한 납을 마이크로저울로 측정하였다. 면적이 비슷한 토양과 납의 비중차이와 비중선별 적용성 분석을 실시하였다.

(3) FESEM (Field-Emission Scanning Electron Microscope)촬영 및 EDS (Energy-dispersive X-ray Spectrometer) 분석

FESEM 및 EDS 분석은 Carl Zeiss사의 SUPRA 55VP모델로 실시하였다.

토양입자를 에폭시를 이용하여 고정하고 표면 광택작업, 탄소 코팅한 시료를 이용하여 15Kev에서 200배율로 촬영하였다.

(4) Lab-scale 실험

토양세척공정에서 가장 대표적으로 이용되는 하이드로사이클론을 통해 설계인자 획득과 정화효율 평가를 실시하였다. 지금까지 Hydrocyclone에 대한 표준 모델은 없지만 가장 잘 알려진 모델로 Bradley (1965)와 Rietema(1961)의 Hydrocyclone이 있으며, 이들 모델들은 장치의 구조 변화 및 외부조건 변화 실험을 통해서 최적의 설계 기준을 제시하고 있다 (Table 2).

본 연구에서 사용된 Hydrocyclone은 가장 널리 알려진 Hydrocyclone 모델 중 분리 성능이 뛰어난 것으로 알려진(Castilho 2000) Rietema의 Hydrocyclone의 규격을 참조하였으며, 스테인리스 재질로 상부 몸통직경이 30, 50, 80 mm의 Hydrocyclone(이하 Hydrocyclone-S, -M, -L) 3set을 제작하였다. 제작한 Hydrocyclone을 통해 유입속도와 크기에 따른 Rf변화를 통해 선별효율을 분석하였고, Hydrocyclone을 통한 선별효율과 정화효율을 평가하였다.

3) 부유선별

부유선별은 공기유량 조절기가 부착된 Sub-A형 부선기(KHD Humboldt Wedag AG)를 이용하여 실시하였다.

일정 농도로 제조한 오염토양 슬러리를 충분히 황화(sulfidization)시킨 다음 부선cell(용량 1.5 l)에 넣고 소정의 부선시약을 투입하고 일정시간 동안 교반하면서 조건부여(conditioning)한 다음 일정량의 압축공기를 주입하여 부유물과 잔유물을 회수하였다. 부선 종료 후, 회수한 부유물과 부선cell 내에 남아있는 토양슬러리를 진공여과하고 여과케익(filtering cake)을 완전 건조시켜 부유물(오염토)과 잔유물(정화토)의 무게를 측정하고 Pb 농도(mg/kg)를 측정하였다.

4) 자력선별

자력선별은 10,000가우스의 영구자석을 이용하여 습식으로 자성물질과 비자성물질로 선별하였다. 자성물질과 비자성물질을 환경부 공정시험법에 의해 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구대상지역조사결과

1) 연속추출 결과

구리와 납에 대한 연속추출분석(Tessier et al. 1979) 결과를 Table 3과 Figure 4에 나타내었다. 본 연속추출분석결과를 전함량 분석결과와 비교하였으며, 납과 구리에 대한 함이 유사한 수치(오차율: -0.7%~4.7%)를 보였다.

납과 구리 모두 유기물/황화물결합(4단계), 잔류성(5단계)이 30% 내외로 분석되어 졌으며 광산의 모암에 의한 중금속오염과 비교하면 4,5단계의 오염이

낮게 분석되었다 또한 비교적 오염분리가 쉬운 이온 교환성(1단계), 탄산염(2단계), 철/망간산화물(3단계)의 함량이 50%이상으로 분석되었다. 폐광산 주변

지역 내 중금속오염의 잔류성 형태가 80% 이상을 차지하는 것을 감안하면(Chon, 2010), 잔류성 오염형태는 낮게 분석되었다.

Table 3. Heavy metal shape ratio by particle size through continuous extraction analysis

sort		Pb		Cu	
particle size (mm)	continuous extraction phase	concentration (mg/kg)	content (%)	concentration (mg/kg)	content (%)
2.0 ~ 0.4	Exchangeable	184.7	14.2	31.2	17.7
	Carbonate	248.2	19.1	19.0	10.7
	Fe-Mn oxides	276.2	21.3	51.2	29.0
	Organic matter	278.9	21.5	32.2	18.2
	Residual	310.4	23.9	43.2	24.4
	Sum	1,298.4	100.0	176.8	100.0
	Total contents	1,306.8		178.6	
	Error rate	0.6%		1.0%	
0.4 ~ 0.15	Exchangeable	152.2	10.1	18.5	9.2
	Carbonate	250.2	16.6	19.8	9.8
	Fe-Mn oxides	367.2	24.3	68.5	33.9
	Organic matter	420.2	27.8	42.7	21.1
	Residual	319.4	21.2	52.8	26.0
	Sum	1,509.2	100.0	202.3	100.0
	Total contents	1,559.3		212.3	
	Error rate	3.2%		4.7%	
0.15 ~ 0.075	Exchangeable	528.3	38.0	16.2	8.0
	Carbonate	416.9	30.0	26.6	13.0
	Fe-Mn oxides	124.3	8.9	86.2	42.3
	Organic matter	201.2	14.5	56.2	27.6
	Residual	121.2	8.6	18.4	9.1
	Sum	1,391.9	100.0	203.6	100.0
	Total contents	1,381.8		236.0	
	Error rate	-0.7%		1%	

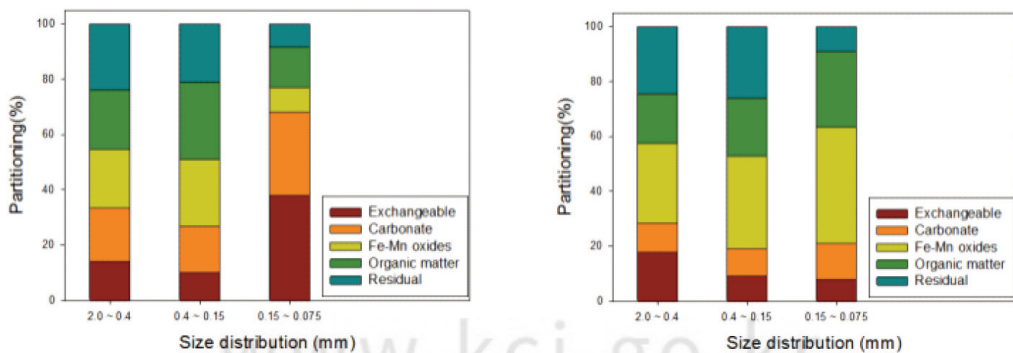


Figure 4. Heavy metal shape ratio according to step-by-step extraction (left : Lead, right : Copper).

입경별로는 구리의 경우 미세토일수록 이온교환성(1단계)이 감소하였으나, 납의 경우는 그렇지 않았다.

2) 3D모형을 통한 오염양상분석 결과

해당부지의 오염특성을 파악하기 위하여 정밀조사와 추가조사 결과를 Voxler 프로그램을 이용하여 3D로 모델하여 분석하였다. 3D모델결과는 Figure 5와 같다.

분석결과 사격장의 오염은 100, 200, 250 m 표적지 인근으로 오염이 대부분 모델되었다. 주 오염인 납과 구리는 복합오염이 되었음을 확인할 수 있었고 아연은 일부지역의 경우 단독오염이 존재하였다. 일부 오염 플럼의 경우 100, 200, 250 m 표적지와 상관없이 분포하거나 고 심도에 단독적으로 오염된 경우도 존재하였다. 이러한 오염은 매립에 의한 오염으로 판단되어 진다.

2. 입경별분석 결과

입도분석과 각 입경별 구리와 납의 분석결과를 Table4에 정리하였다. 토양입경별 중량분포를 살펴보면, 전체의 약 23.48%(21% ~ 25%)가 2.0 mm 이상의 입도크기를 갖는다. 미세토로 분류할 수 있는 0.075 mm 크기 이하의 경우에는 약 27.82%(26% ~ 29%) 이내의 함량분포를 보인다. 납의 토양환경보전법 1지역 우려기준은 200 mg/kg이며 대책기준은 600 mg/kg 이다. 연구부지는 가장 높은 오염지역이 우려기준의 50배를 초과하는 고농도의 10,000 mg/kg이상이 검출되었고 우려기준은 5배를 초과하는 1,000 mg/kg 이상을 초과하는 지역이 대부분이었다. 따라서 본 연구에서는 50배를 초과하는 고농도를 10,000 mg/kg 으로 분류하고 중농도를 1,000 mg/kg로 분류하여 분석하였다.

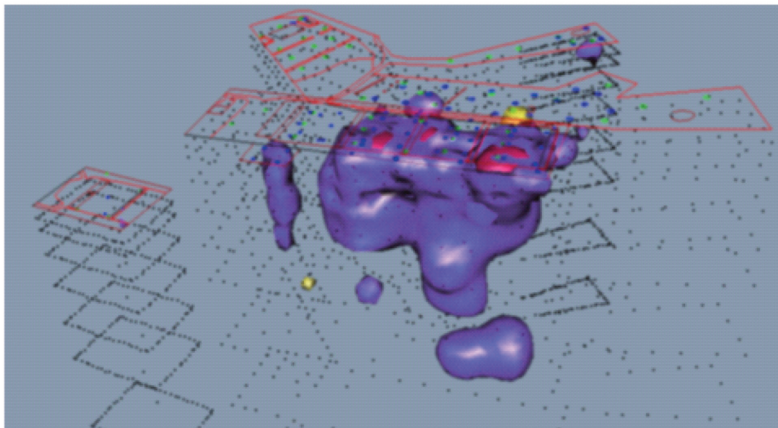
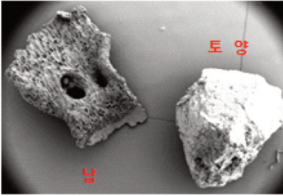
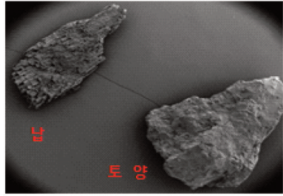
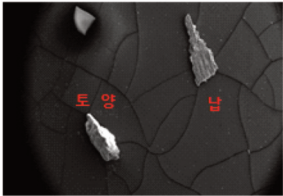
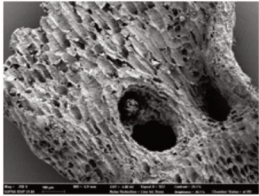



Figure 5. Result of 3D Modeling.

Table 4. Weight by particle size and heavy metal contamination

sort	particle size (mm)	content (%)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)
			200	150
High- concentration	> 2.0	21.51	40,151.0	3,618.1
	2.0 ~ 0.4	35.58	34,373.4	9,844.9
	0.4 ~ 0.075	16.48	45,251.7	2,880.4
	0.075 <	26.43	36,991.9	2,432.5
Midium-concentration	> 2.0	25.45	4,447.9	482.8
	2.0 ~ 0.4	37.10	1,721.9	209.5
	0.4 ~ 0.075	8.24	2,175.7	230.9
	0.075 <	29.21	2,044.9	274.6

Table 5. Lead (empty cartridge) & SEM photo, thickness, area & weight

Lead (empty cartridge) & SEM photo, thickness, area & weight								
	Soil				Soil			
	Thickness	Area	Weight		Thickness	Area	Weight	
	20nm	1.12mm ²	12.3mg		1.2nm	1.48mm ²	280μg	
	Pb				Pb			
	Thickness	Area	Weight		Thickness	Area	Weight	
	2nm	1.29mm ²	8.2mg		2nm	1.29mm ²	100μg	
Lead (empty cartridge) & SEM photo, thickness, area & weight				250 times magnification of Lead				
	Soil					Soil		
	Thickness	Area	Weight			Thickness	Area	Weight
	20nm	1.12mm ²	12.3mg					
	Pb				Pb			
	Thickness	Area	Weight		Thickness	Area	Weight	
	2nm	1.29mm ²	8.2mg					

입경별 오염농도 분석결과 타 중금속 오염현장의 미세토에 오염물질이 많이 검출되는 것과 달리 전 입경에서 고르게 오염이 분포되어 있음을 확인할 수 있었다.

3. 비중선별결과

1) 무게측정

DSRL 촬영결과를 바탕으로 납과 토양의 무게비교를 위해 마이크로저울로 분석을 실시하였으며, 동시에 크기측정을 위해 FESEM으로 촬영하여 두께와 면적을 측정하였다(Table 5).

측정결과 납은 무른 특성에 따라 얇게 조각나고 편모양의 구조로 같은 크기의 토양보다 무게가 더 적게 나가는 것을 확인하였으며 비중선별 적용성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 특히 납의 두께가 확연한 차이가 났다.

2) FESEM (Field-Emission Scanning Electron Microscope) 촬영 및 EDS (Energy-dispersive X-ray Spectrometer) 분석

좀 더 자세한 입자상의 오염분포를 알기 위해 Figure 7와 같이 SEM 촬영을 ①분리전, ②부상물질, ③분리후로 구분하여 평가하였다.

부상물질이 FESEM 촬영한 사진과 같이 실제 절편형태가 많이 나타나는 것으로 촬영 되었다. 이에 EDS촬영을 실시하여 실제 납 성분이 분포하는 것을 촬영 하였으며, Figure 7에서 보여지는 것과 같이 부상전에는 절편형상과 구형형상이 동시에 관찰되었고, 부상물질에서는 절편형태가 우세하게 관찰되었다. 분리 후 토양에서는 토양의 특성인 구상 형태가 나타남을 알 수 있었다.

이는 사격장에서 납은 발사되는 매우 강한 힘이 토

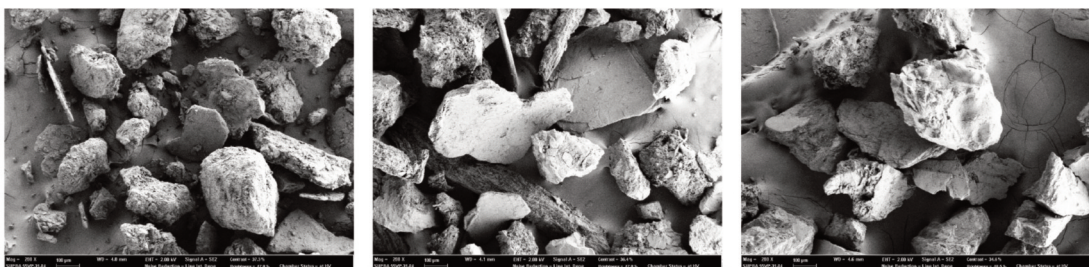
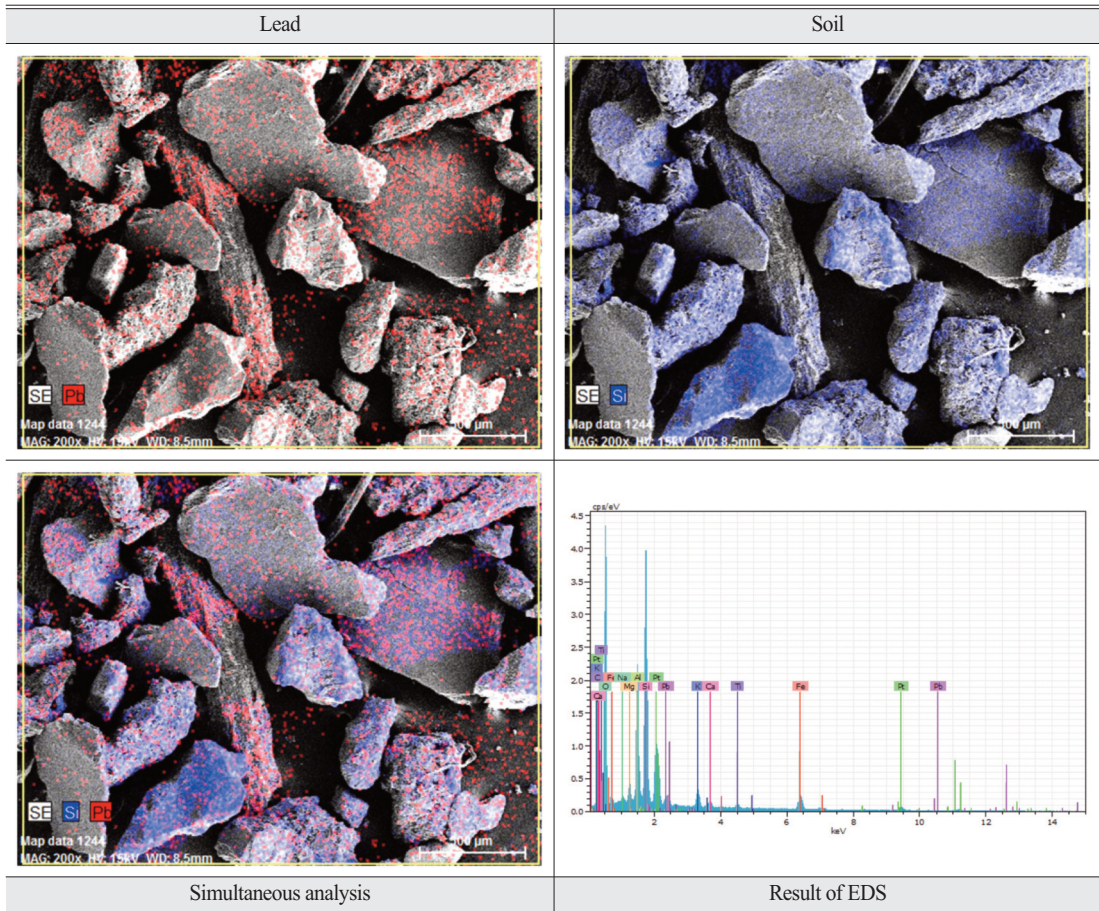


Figure 6. before and after condition of floating Lead of the FESEM photographing (left : before floating, middle : floating matter, right : after separation).

Table 6. Result of EDS



양 또는 암석과 충격을 받기 때문에 매우 가늘게 파편 형태나 찢어지기 때문이다. 실제 현장에서 이런 특성을 확인할 수 있었다. FESEM 촬영결과를 바탕으로 EDS (Energy-dispersive X-ray Spectrometer) 분석결과에서도 토양의 원형구조에서는 Si가 많이 검출되었고 편구조에서는 납이 많이 검출되었다 (Table 6).

분석결과 Si성분이 가장 높게 나타났으며, 이 외 Pb, Fe, Ca, K, Al, Mg등이 검출되었다.

편 구조에서 실제 납이 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 납이 미세하게 잘린 편 모양으로 토양과 입자상으로 공존하여 존재함을 확인 하여 편구조를 제거하면 고농도 오염토의 정화방안이 수립될 수 있음을 확인할 수 있었다.

3) Lab-scale 실험

제작한 Hydrocyclone을 통해 유입속도와 크기에 따른 Rf변화를 통해 선별효율을 분석하였고, Hydrocyclone을 통한 선별효율과 정화효율을 평가하였다.

Hydrocyclone의 장치 내에서 발생하는 2가지 흐름으로 외부동력에 의해 Hydrocyclone으로 공급된 시료는 상, 하 배출구를 통해서 배출된다. Rf 값은 공급되는 시료량(feed rate) 대비 하향으로 배출되는 시료량(underflow rate)의 비율로서 공급되는 시료가 Hydrocyclone의 처리를 통한 용량분할(volume split)의 정도를 나타내는 값이다. 일반적으로 Hydrocyclone에서의 입자의 분리는 Rf 값이 0.2 이하부터 분리가 이루어진다고 하고 있다(Derek 1981;

Table 7. Screening and remediation efficiency evaluation of the Hydrocyclone

Screening efficiency assessment according to size and pressure of the Hydrocyclone	Remediation efficiency evaluation of the Hydrocyclone
<p>Structure of the Hydrocyclone</p>	<p>Making Hydrocyclone (Do:80mm, 50mm, 30mm)</p>

Ladislav Svarovsky, 1981). Hydrocyclone의 장치 내부에서 발생하는 마찰에 의해서 분리되는 특성으로 Rf 값이 낮을수록 분리가 잘 이루어진다. 따라서 하이드로사이클론 크기와 유입속도 증가에 따른 Rf 분석을 통해 크기에 따른 효율과 유입속도에 따른 효율을 분석하였다. 분석결과 Rf값은 2m/sec부터 급격히 감소됨을 확인할 수 있었으며, 하이드로사이클론의 직경이 작을수록 더 높은 분리 효율을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 하이드로사이클론 가동에 따른 정화효율을 평가하였다. 정화효율은 80 mm 하이드

로사이클론으로 고액비 1:3조건으로 실시하였다. 세척공정에서와 같이 하이드로사이클론 하부토를 정화토양으로 제거농도와 잔존농도를 측정하였고 선별제거율은 하이드로사이클론 상부로 배출되는 제거율을 측정하였다. 또한 하이드로사이클론을 이용한 다회세척을 고려하여 누적선별제거율과 누적납제거율을 3회까지 측정하였다. 1회시 선별제거율은 27%, 정화효율은 71%로 분석되었고, 2회시 각각 35%, 80%, 3회시 각각 39%, 91%로 높은 효율을 보였다.

Table 8. Remediation efficiency assessment of the Hydrocyclone

Sort	Cumulative screening removal rate (%)	Cumulative lead removal rate (%)	Initial concentration (mg/kg)	Removal concentration (mg/kg)	Residual concentration (mg/kg)
The first	27	71	1,384	982	401
The second	35	80	982	786	197
The third	39	91	786	715	71

4. 부유선별결과

1) 부유선별 정확효율

부유선별은 먼저 부선시약을 선정하여 포수제의 종류와 기포제의 종류를 결정하고 황화공정에서 NaCl농도, Na₂S농도, 황화반응시간을 부유선별공정에서 활성제 농도, pH, 포수제 농도를 선정하여 단계별로 최적 설계인자를 도출하였다.

단계별 최적설계인자 실험결과 최적의 황화공정 조건은 슬러리 농도 50 wt%, NaCl농도 5×10⁻³M, Na₂S첨가량 500g/ton, 교반반응시간 30분으로 도출되었고 최적의 부유선별공정 조건은 슬러리 농도 10 wt%, 자연 pH(7.8±0.2), 활성제 CuSO₄ 첨가량 200 g/ton, 포수제 KAX 첨가량 100 g/ton, 기포제 AF65 첨가량 400 g/ton, 교반속도 1500 rpm, 공기주입량 5 l/min 그리고 부유시간 7분으로 선정되었다.

이런 최적의 조건에서의 납제거율은 0.5 mm 이하 입경을 선별하여 실시하였으며 최적정확효율은 39%로 도출되었고 부상선별에의한 제거율은 5.3%로 분석되었다. 실험 대상토양은 초기농도 844 mg/kg으로 잔존농도는 548 mg/kg로 분석되어졌으며, 이는 토양환경보전법 우려기준(200 mg/kg)에는 도달하지 못하였다.

2) 부유선별 처리가능입경

부상선별은 처리입도가 수백 μm이하의 미립자의 경우에 적합한 방법이다.

하지만 토양세척에서는 2 mm ~ 0.075 mm의 모래를 정화도로 선별하기 때문에 앞선 실험 입경인 0.5 mm까지가 아닌 2 mm 토양에 대한 부상선별 효율을 평가하였다.

-10 mesh(2 mm) 오염토 제거율 및 Pb제거율은 각각 4.1% 및 16.8%로 -35 mesh(0.5 mm)에 대한 오염토 제거율(5.3%) 및 Pb제거율(39.%) 보다 매우 낮게 분석되었다.

이와 같은 현상은 -10 mesh(2000 μm) A토양 시료에 대한 부상선별의 부유물(오염토)의 입도분포곡선(Figure 9)처럼 중간경(median size)은 41 μm, 90% 통과누적입도(D90)는 307 μm로 나타나 부유된 최대 입경은 약 600 μm이었다. 이를 통해 35 mesh(500 μm) 이상의 입자는 거의 부유되지 못한다는 사실을 확인하였다.

5. 자력선별결과

자력선별은 10,000가우스의 영구자석을 이용하여 자성물질과 비자성물질로 구분하였다. 자력선별을

Table 9. Floating Screening Design Factor

remediation phase	Target experiments	experiment variable
Preliminary steps	Flotation reagent	collector, frother
1st step	sulfuration process	Nacl Concentration, Na ₂ S Concentration, sulfuration process time
2nd step	Floating Screening process	Activator Concentration, pH

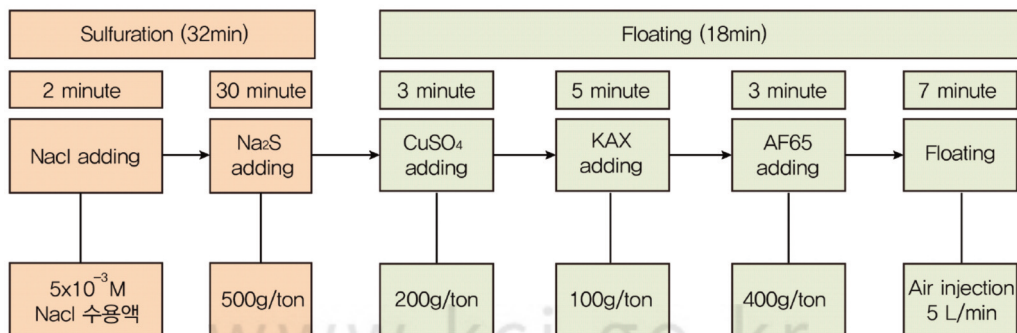
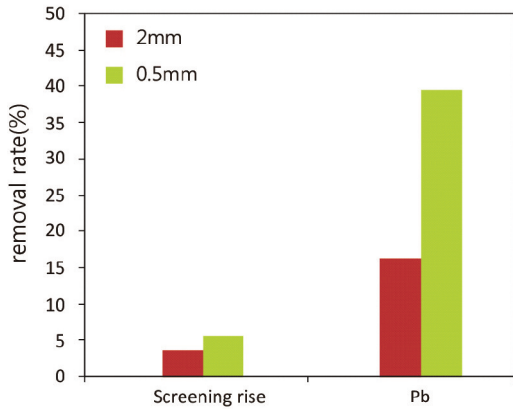


Figure 7. Optimal sulfide-side line process and remediation conditions.



HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-350

Sample name	20170202116037	Median size	41.0584 (µm)
DP#	1	Mean size	138.8258 (µm)
Data name	Dust-30F Floor	St. Dev.	130.4411 (µm)
Transmittance (%)	79.6 (%)	Geo. mean size	48.3374 (µm)
Circulation speed	5	Geo. St. Dev.	4.5231 (µm)
Ultrasonic	0.0010 (7)	Mode size	244.8663 (µm)
Iteration mode	Auto	Span	DP#
Distribution base	Volume	Diameter on cumulative %	(20.00 (%) - 6.4967 (µm))
Refractive index (RI)	1.60-0.00(1.333)		(99.00 (%) - 305.7354 (µm))
	(1.46 1.600 - 0.000)(water: 1.333)		

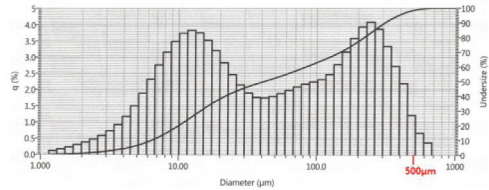


Figure 8. 2mm Target soil floating efficiency assessment.

Table 10. Heavy metal concentration fertilizer in the soil before and after magnetic separation

Sort		Pb (mg/kg)		note
		weight ratio (wt.%)	concentration (mg/kg)	
Before magnetic separation			1,526	
After magnetic separation (30 seconds of stay)	magnetic material	3.9%	2,559	1.6 times as heavy metal in the magnetic material
	Non magnetic materials	96.1%	1,257	Average 17% of heavy metal concentrations reduced
After magnetic separation (300 seconds of stay)	Magnetic material	8.69%	3,255	2.1 times the heavy metal in the magnetic material
	Non magnetic material	91.31%	1,072	Average 29% of heavy metal concentrations reduced

체류시간을 30초와 300초로 적용하여 자력선별 전/후 토양의 Pb농도를 측정하였다. 입자크기가 2mm 미만인 토양을 자력선별을 통하여 자성물질과 비자성물질로 분리시켜 실시하였으며 본 실험에서는 10,000가우스 봉자석을 이용하여 자력선별을 수행하였다.

비자성물질의 납 농도는 1,072 mg/kg으로 정확효율은 약 30%를 보였으나 토양환경보전법 우려기준 (200 mg/kg)에는 도달하지 못하였다. 하지만 10%의 자성물질에 2.1배의 납이 농축되어 있음을 확인할 수 있었고 토양세척의 부분공정으로는 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 공용화기 사격장의 오염토양 중 분

리가 어려운 금속 파편의 분리효율을 평가하기 위해 오염물질 특성분석 및 물리적 선별평가를 실시하였으며, 연구결과는 아래와 같다.

1. 오염물질 특성분석

- 연속추출분석결과 대상부지의 오염은 납과 구리 모두 유기물/황화물결합(4단계), 잔류성(5단계)이 30% 내외로 분석되어 졌으며 폐광산 주변지역의 모암기원 오염보다는 쉽게 분리될 수 있는 것으로 분석되었다.

- 오염특성을 파악하기 위해 3D 프로그램을 이용 분석결과 100, 200, 250µm 표적지 인근 위주로 오염이 확인되었으며 입경별 오염농도 분석결과 타 중금속 오염현장의 미세토에 오염물질이 많이 검출되는 것과 달리 전 입경에서 고르게 오염이 분포됨을 확인,

금속파편이 토양입경과 유사하게 분포함을 확인할 수 있었다.

• FESEM분석과 마이크로저울로 무게측정결과 공용화기 사격장의 충격을 받은 납은 무른 특성에 따라 얇게 조각나고 편모양의 구조로 같은 크기의 토양보다 무게가 더 적게 나가는 것을 마이크로저울 측정으로 확인하였으며 이를 이용한 비중선별 적용성이 높은 것을 확인할 수 있었다.

2. 물리적 선별평가

• 하이드로사이클론을 이용한 정화효율평가 결과 1회 71%, 2회 80%, 3회 91%의 누적 정화효율을 보였다. 이에 비해 자력선별은 17%의 낮은 효율을 보였고 부상선별은 -35 mesh (0.5 mm) 대상토는 39%로 비교적 높은 효율을 보였다. 이에 비해 자력선별은 17%의 낮은 효율을 보였고 부상선별은 입경 0.5 mm 미만으로 선별한 대상토는(-35 mesh) 39%로 비교적 높은 효율을 보였으나 입경 2 mm 미만으로 선별한 대상토의(-10 mesh) 효율은 16%에 불과하였다.

따라서 공용화기사격장 오염의 토양정화는 탄두 원형을 유지한 탄두는 5.56 mm 이상으로 자갈입경보다 크므로 고비중을 이용한 비중선별을 실시하고, 금속파편으로 존재하는 오염물질은 얇게 조각나고 편모양의 구조로 같은 입경의 토양보다 무게가 더 적음에 따라 토양세척의 하이드로사이클론을 이용하여 분리하여 처리할 수 있음을 확인할 수 있었다.

References

- Bradley D. 1965. The Hydrocyclone, Pergamon Press.
- Castlho LR, Medronho RA. 2000. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclones, Minerals Engineering, Vol. 13, No. 2: 183-191.
- Chon CM, Park JS, Kim JG, Lee YS. 2010. Relationship between Physicochemical Properties, Heavy Metal Contents and Magnetic Susceptibility of Soils, J. Miner. Soc. Korea, 23(4): 281-295. [Korean Literature]
- Derek BP. 1981. Soil/Liquid Separation Techenology, Uplands Press LTD, 249-275: 606-610.
- Freeman HM, Harris EF. 1995. In situ Soil Flushing, Hazardous Waste Remediation : Innovative Treatment Technologies, Technomic Publishing Company: 131-138.
- Dermont G, Bergeron M, Mercier G, Richer-Lafleche M, 2008. Soil washing for metal : A review of physical/chemical technologies and field applications, J.Hazard. Mater. 152: 1-31.
- Grasso D. 1993. Hazardous Waste Site Remediation, Lewis Publishers, USA.
- Hong ST. 2015. Investigation on the Relationship Between Gunfire Shot and Its Resulting Heavy Metal Pollution Rate, and the Study on Its Purification Method. [Korean Literature]
- Jang YY. 2006. A study on the contamination of Ammunition and Chemicals in the shooting range in the treatment of the waste Ammunition, The 8th Military Environmental Conservation Academic Conference: 11-48. [Korean Literature]
- Jang YY. 2002. Investigation of soil contamination at shooting range and Prevention of pollution spread. [Korean Literature]
- Jeon J. 2013. A study on fractionation and contamination of heavymetals in shooting range site. [Korean Literature]
- Rietema K. 1961. Performance and design of hydrocyclones-Part I-IV. Chemical Engineering Science. Vol. 15: 298-325.
- Tessier A, Campbell GC, Bisson M. 1979, Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals, Anal.Chem.

Vol.51: 844-851.
The Department of the Environment. 2007.
Guideline for the Cleanup of Contaminated
Soil . [Korean Literature]
The Ministry of National Defense. 2017.

Contamination of heavymetals in shooting
range site Ac. ([https://blog.naver.com/
assembly923/221113126608](https://blog.naver.com/assembly923/221113126608)). [Korean
Literature]