Research Paper

Evaluation of Stabilization Capacity for Typical Amendments based on the Scenario of Heavy Metal Contaminated Sites in Korea

Jihye Yang, Danu Kim, Yuna Oh, Soyoung Jeon, Minhee Lee*

Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University

*Corresponding author : heelee@pknu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 07 January 2021
Received in revised form 09 January 2021
Manuscript accepted 12 January 2021
Available online 26 February 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.1.21>

Research Highlights

- Matching the optimal amendment according to different contamination scenarios is a novel approach.
- Mine drainage treatment sludge (MDS) was determined as the priority amendment for heavy metals.
- MDS, limestone and steel-making slag showed the high stabilization efficiency at 5 site scenarios.

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the order of priority for the use of amendments, matching the optimal amendment to the specific site in Korea. This decision-making process must prioritize the stabilization and economic efficiency of amendment for heavy metals and metalloid based on domestic site contamination scenarios. For this study, total 5 domestic heavy metal contaminated sites were selected based on different pollution scenarios and 13 amendments, which were previously studied as the soil stabilizer. Batch extraction experiments were performed to quantify the stabilization efficiency for 8 heavy metals (including As and Hg) for 5 soil samples, representing 5 different pollution scenarios. For each amendment, the analyses using XRD and XRF to identify their properties, the toxicity characteristics leaching procedure (TCLP) test, and the synthetic precipitation leaching procedure (SPLP) test were also conducted to evaluate the leaching safety in applied site.

From results of batch experiments, the amendments showing > 20% extraction lowering efficiency for each heavy metal (metalloid) was selected and the top 5 ranked amendments were determined at different amount of amendment and on different extraction time conditions. For each amendment, the total number of times ranked in the top 5 was counted, prioritizing the feasible amendment for specific domestic contaminated sites in Korea. Mine drainage treatment sludge, iron oxide, calcium oxide, calcium hydroxide, calcite, iron sulfide, biochar showed high extraction decreasing efficiency for heavy metals in descending order. When the economic efficiency for these amendments was analyzed, mine drainage treatment sludge, limestone, steel making slag, calcium oxide, calcium hydroxide were determined as the priority amendment for the Korean field application in descending order.

Keywords : stabilization, soil contamination, soil remediation, amendment, mine drainage treatment sludge, steel making slag

Citation: Yang, J., Kim D., Oh, Y., Jeon, S., Lee, M. (2021) Evaluation of Stabilization Capacity for Typical Amendments based on the Scenario of Heavy Metal Contaminated Sites in Korea, v.54, p.21-33, doi:10.9719/EEG2021.54.1.21.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.
pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

국내 중금속 부지오염시나리오를 고려한 안정화제의 중금속 안정화 효율 규명

양지혜 · 김단우 · 오유나 · 전소영 · 이민희*

부경대학교 지구환경과학과

*책임저자 : heelee@pknu.ac.kr

요 약

국내 오염시나리오별 안정화 효율과 경제성이 뛰어난 안정화제를 선택하여 적용할 수 있도록, 국내외에서 연구된 대표적인 안정화제를 대상으로 국내 중금속 오염 현장 부지 특성별 중금속 안정화 효율이 높은 안정화제 순위를 결정하였다. 총 5종류의 오염시나리오를 가정하여 각각 해당되는 국내 오염부지 토양을 확보하였다. 국내외 활용도와 안정화 효율 연구 결과, 오염특성별 부지 시나리오에 적용 가능성 등을 고려하여 기존에 연구되었던 안정화제 13가지를 선정하였다. 선정된 오염 토양과 안정화제의 오염 가능성과 현장 적용 가능성을 평가하기 위하여 XRD/XRF 분석, 독성용출시험과 인공강우용출시험 등을 실시하였다. 부지 오염시나리오를 대표하는 5종류 오염 토양에 대하여 선정된 13종의 안정화제에 의한 비소, 수은, 납, 6가 크롬, 아연, 니켈, 구리 등 총 8종의 중금속(반금속인 비소 포함) 용출 저감 효과를 규명하는 용출 배치실험을 수행하였다.

총 5개 오염 토양에 대하여 13개 안정화제 주입 비율 3%, 5%, 7% 적용 시, 각 중금속(비소 포함)에 대한 중금속 용출 저감 효율이 안정화제를 주입하지 않은 토양 대비 20% 이상을 나타내는 안정화제 중에서 저감 효율이 높은 순위부터 5개 안정화제(Top 5)를 선택하였다. 각 안정화제에 대하여 안정화제 주입비율, 중금속 종류, 부지별 조건에 따라 수행된 배치실험 결과에 대하여 Top 5에 해당하는 총 횟수를 합산하여, 다양한 국내 부지 오염시나리오에 적용할 수 있는 안정화제의 순위를 결정하였다. 5개 오염 토양에 대하여 8개 중금속 항목별 용출 저감 효율이 20% 이상인 경우, 가장 안정화 효율이 높은 순위는 광산배수처리 슬러지(mine drainage treatment sludge), 산화철, 생석회, 소석회-석회석, 황화철, 바이오차 순으로 나타났다. 위 안정화제들에 대하여 안정화제의 효율대비 단가를 산정한 결과, 광산배수처리 슬러지, 석회석, 제강슬래그(비소의 경우), 생석회, 소석회 순으로 경제성이 높게 나타나 현장 적용성이 뛰어난 것으로 밝혀졌다.

주요어 : 토양 안정화, 토양 오염, 토양 정화, 안정화제, 광산배수 슬러지, 제강슬래그

1. 서 론

토양 안정화공법은 오염물질을 토양으로부터 직접적으로 제거하지는 않지만, 오염물질을 유동성, 독성, 용해성이 낮은 형태로 변환시켜 부지에서 기인하는 잠재적 위해성을 감소시키는 기법이다. 중금속 오염 토양을 정화하는 다른 물리/화학적 정화기술보다 비용-효율적인 측면에서 저렴하나, 오염원의 원천적인 제거가 어려워 오염확산 방지에 대한 안전성이 확보되는 환경에서 적용이 가능하다(Yun *et al.*, 2010). 미국 내 중금속 오염부지 정화 사례자료에 의하면, 안정화/고형화법이 79%(180/229건)를 차지하고 있으나(USEPA, 2007), 국내 중금속 오염부지 정화의 경우 토양세척법 74.3%(165/222건), 동전기법 21.6%(48건) 순으로 나타나며, 폐광산 활동 관련 오염 농경지 토양개량사업을 제외한 경우 국내 안정화공법의 적용은 거의 전무한 실정이다(Lee *et al.*, 2016). 지난 10여 년간 광해방지법(광산피해의 방지 및 복구에 관한

법률 제 11조)에 의거하여 석회석과 제강전로슬래그를 농경지 토양개량복원사업에만 제한적으로 적용하여 왔다(Lee and Jeon, 2010; MIRECO, 2017). 향후 국내 중금속 오염 토양 부지관리를 위한 위해성평가 제도의 도입 및 정화관련 법률 개정 등으로 토양 안정화공법에 의한 신규 시장 활성화가 예상되어, 다양한 오염부지 환경에서 중금속을 효과적으로 고정시킬 수 있는 안정화제의 개발이 요구된다. 특히 광해방지법 적용대상 폐광산 주변 농경지와는 부지 특성과 주요 오염원이 상이한 공장 부지, 군부대 시설 부지, 지장물 하부 오염 토양, 사람출입(노출)이 빈번한 오염된 녹화생태지역, 위해성평가에 따른 대규모 안정화처리 대상부지 등에서 적용할 안정화제 개발이 필요하다. 국외에서는 국내와 달리 안정화공법을 다양한 오염 현장에 적용하고 있으며(기술 안정화 단계 도달), 최근에는 다양한 종류의 안정화제(예: Portland 시멘트, fly ash, lime, quicklime, 슬래그, 킬른더스트 등)를 사용하여 중금속 오염 토양의 복원뿐만 아니라 준설퇴적물,

유기 오염 토양 정화를 위한 실내 및 현장 파일럿 규모의 연구가 진행되고 있다(Yoon *et al.*, 2010; James and Pandian, 2016; USEPA, 2000; Rachman and Trihadiningrum, 2018; Furlan *et al.*, 2020; Gu and Chen, 2020; Kim *et al.*, 2020).

본 연구의 목적은 기존 연구되었던 대표적인 토양 안정화제 13종에 대하여 다양한 오염시나리오를 가지는 국내 오염부지 토양을 대상으로 정량적인 중금속 안정화 효율을 규명함으로써, 국내 오염부지 특성에 적합한 안정화제의 사용 근거를 제시하여 토양 안정화공법의 상용화 기반을 마련하는 데 있다. 각 안정화제에 대하여 5종류의 오염시나리오별 국내 오염 토양에 대한 8종류의 중금속 안정화 효율을 실내 배치실험을 통하여 규명하였다. 배치실험 결과로부터 각 부지오염시나리오별 중금속 안정화 효율이 높은 안정화제의 순위를 산정하여, 국내 오염부지에 적용할 수 있는 안정화제 선정 매뉴얼을 제공하고 하였다.

2. 실험 방법 및 내용

2.1. 오염 토양 및 안정화제 선정

국내 중금속 오염부지 현황 자료로부터 대표적 부지 오염시나리오를 폐광산 관련 농경지(이하 ‘S1’), 광산폐기물 매립지(이하 ‘S2’), 주거지 주변 금속 폐기물 투기 부지(이하 ‘S3’), 급경사지 부지(이하 ‘S4’), 유류와 중금속이 복합 오염된 부지(이하 ‘S5’) 등 5종류로 가정하였다. 연구를 위해 각 오염시나리오에 해당되는 국내 오염부지별 중금속 오염 토양 5종류를 확보하였으며, 오염 토양 시료채취 지점과 부지 오염 특성을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 지난 20년간 국내외 중금속 오염부지에서 안정화제로 사용되었거나 실험실 규모의 연구를 통해 안정화 효율이 높은 것으로 보고되었던 물질 중에서 총 13개 물질을 선정하여, 5종류의 오염 토양을 대상으로 다양한 실내 실험을 통해 중금속 안정화 효율을 규명하고자 하였다.

Fig. 1. The soil sampling sites for the study (S1 – S5 soils).

었다. 선정한 안정화제는 산화철, 망간산화물, 황화철, 황산철, 영가철 등 철과 망간이 주 성분인 철질 물질(Fe-Mn-계열) 5종, Fe와 Ca성분을 다량 포함하고 있는 제강슬래그 2종, 광산배수처리 슬러지 2종(국내 석탄광산과 금속광산배수처리 슬러지)(Fe-Ca-계열), Ca성분이 주 성분인 Ca-계열 3종(생석회, 소석회, 석회석), 유기물질이 주 성분이 바이오차 2종(배치실험에는 1종류만 사용) 등이다.

토양의 오염 정도 및 주 오염 대상 중금속을 규명하고 안정화제 투입에 따른 추가 오염 가능성을 평가하고자, 선정한 오염 토양과 안정화제에 대하여 국내 토양공정시험법에서 제시한 전함량법으로 총 8종류의 중금속 농도(Cu, Ni, Zn, Pb, Cd, Cr+6, As, Hg)를 측정하였다(ISO 11466). 안정화제의 광물학적 특성을 규명하기 위하여,

Table 1. Soil samples based on 5 different pollution scenarios

Type of pollution scenario	Pollution Source	Main target	Soil name
Abandoned mine site	Oxidation of sulfide mineral (including AMD)	As and Hg	Farm land soil (S1)
		As and Hg	Mine tailing storage site soil (S2)
Residential area (required In-situ cleanup process)	Heavy metal waste	Heavy metals such as Pb, Zn and Ni	Illegal metal and construction waste storage site soil (S3)
Steep slope site (required In-situ cleanup process)	Artillery shell fragments	Heavy metals such as Cu and Zn	Military bomb test site soil (S4)
Multi-contaminated site	Heavy metal and oil waste	TPH + heavy metals (Pb, Zn, Cu and Cr+6)	Waste storage site soil (S5)

XRD (X-ray diffraction) 분석과 XRF (X-ray fluorescence) 분석을 실시하였으며, 안정화제의 중금속 용출 특성을 이해하고, 토양에 투입 시 부지 및 주변 수계 오염 가능성을 평가하기 위하여 독성용출시험(TCLP : Toxicity Characteristics Leaching Procedure)과 인공강우용출시험(SPLP : Synthetic Precipitation Leaching Procedure)을 실시하였다(USEPA, 1992; USEPA, 1996; Lu *et al.*, 2019).

2.2. 안정화제에 의한 오염 토양 중금속 용출 저감 배치실험

본 연구에서는 안정화제의 안정화 효율을 안정화제 투입에 의한 토양의 중금속 용출 저감 효과로 가정하였다. 부지오염시나리오를 대표하는 5종류 오염 토양에 대하여 1차 선정된 13종의 안정화제에 의한 비소(As), 수은(Hg), 납(Pb), 6가 크롬(Cr+6), 아연(Zn), 니켈(Ni), 구리(Cu) 등 총 8종의 중금속(준금속 포함) 용출 저감 효과를 규명하는 용출 배치실험을 수행하였다. 오염 토양과 안정화제는 40 °C 이하에서 건조(수은 오염 토양의 경우 15 ~ 20 °C 상온 건조)한 후 체거름을 실시하여 토양은 직경 2 mm 이하 입자를 사용하였고, 안정화제는 전동분쇄기를 사용하여 분쇄한 후 체거름을 실시하여 직경 0.2 mm 이하인 분말상을 사용하였다. 용출액은 산성강우 조건을 고려하여 pH 6 ± 0.2로 적정한 증류수를 사용하였다. 오염 토양 1 kg에 각 안정화제를 0%, 1%, 3%, 5%, 7% (wt%: 총 5종류) 투입하여 전동 롤러를 이용하여 10분간 150 rpm으로 혼합하였다(0%는 안정화제를 투입하지 않은 순수 오염 토양을 의미함). 뚜껑 있는 300 ml 유리 삼각플라스크에 안정화제를 투입한 토양 50 g과 용출액 150 ml를(1:3 wt%) 혼합하여 150 rpm으로 2시간 용출 후, 정지 시간별로 용출액의 상등액을 채취하여 중금속 농도를 측정하였다(정지 후 8시간, 20시간, 44시간, 68시간). 정지 시간별 안정화제를 투입한 오염 토양의 중금속 용출 농도와 안정화제를 첨가하지 않은 오염 토양의 용출 농도를 비교하여, 안정화제의 중금속 용출 농도 저감 효율(안정화 효율)을 아래 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Stabilization efficiency (\%)} = \frac{(C_o - C_s)}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

여기서 C_o 는 안정화제를 첨가하지 않은 오염 토양의 중금속 용출 농도, C_s 는 안정화제를 첨가한 오염 토양의 중금속 용출 농도를 의미한다. 안정화제 적용 후 토양의 급격한 pH 변화는 토양 생태계뿐 아니라, 중금속 용출 특성에도 영향을 끼칠 수 있으므로(Yun *et al.*, 2011), 용출 배치실험 전/후 토양의 pH 변화를 측정하였다.

2.3. 중금속 용출 저감 배치실험 결과와 경제성 평가에 근거한 안정화제 순위 선정

국내 중금속 오염부지에 적합한 안정화제를 선정하기 위하여, 총 13개 안정화제를 대상으로 5개 오염 토양(S1 - S5)에 대하여 Cu, Ni, Zn, Cd, Pb, As에 대한 중금속 용출 저감 효율결과를 크게 4가지(매우 우수, 우수, 보통, 미약)로 분리하여 정리하였다. 각 오염 토양에 대하여 중금속 용출 저감 효율이 안정화제 1%, 3%, 5%, 7%를 첨가한 4종류의 경우 중에서 3개 이상에서 50% 이상의 용출 저감 효과를 보인 경우 녹색으로 표시(① 용출 저감 효과 “매우 우수: excellent”), 50% 이상이 1개 이상 + 20% ~ 50% 1개 이상, 20 ~ 50%가 3개 이상 나타난 경우 파란색으로 표시(② 용출 저감 효과 “우수: good”), 50% 이상이 1개 + 0 ~ 20% 1개 이상, 20 ~ 50% 1개 이상 + 0 ~ 20% 1개 이상, 0 ~ 20% 3개 이상인 경우 노란색으로 표시하고(③ 용출 저감 효과 “보통: intermediate”), 그 외 경우(④ 용출 저감 효과 “미약: weak”)는 주황색으로 표시하여, 각 안정화제 효율을 중금속 용출 저감 효율에 따라 4분류로 나누어 평가하였다. 다만 안정화제를 첨가하지 않은 오염 토양에 대하여 초기 중금속 용출 농도가 매우 낮은 경우 (< 0.005 mg/L)에는 안정화제 첨가에 따른 용출 저감 효율을 비교하는 것이 무의미하다고 판단되어, 이 경우에는 흰색으로 표시하였고, 효율 평가 과정에서 제외하였다. 위에서 설명한 중금속 용출 저감 효율에 근거하여 안정화 효율을 평가하였고, 평가 결과에 따라 오염 토양별 안정화제를 분류한 분류 방식은 Table 2에 나타내었다. 위 중금속 용출 저감 효율 평가 결과를 바탕으로, 안정화제 주입 비율 3%, 5%, 7% 적용 시 5개 토양에 대하여 중금속 항목별로 용출 저감 효율이 20% 이상을 나타내는 안정화제 중에서 저감 효율이 높은 순위부터 5개 안정화제(Top 5)를 선택하였으며, 이 결과로부터 각 오염 토양에 대하여 중금속 항목별로 안정화 효율이 뛰어난 Top 5 안정화제 종류를 찾을 수 있었다. 위 결과들을 종합하여, 총 5개 토양에 대하여 중금속 항목별 용출 저감 효과가 20% 이상을 나타내는 Top 5 안정화제에 해당하는 총 횟수를 합산하여, 가장 많은 횟수를 가지는 순서대로 안정화제의 순위를 결정함으로써 국내 중금속 오염부지에 효과가 좋은 안정화제를 선정하였다.

안정화제의 중금속 용출 저감 효율이 높으나 제조단가가 매우 높은 경우, 현장에서 다량으로 사용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 13개의 안정화제에 대한 중금속 용출 실험 결과를 바탕으로, 중금속 용출 저감 효율이 높은 10가지 안정화제에 대한 경제성 분석을 실시하였다.

Table 2. The evaluation criteria used in the ranking for amendments

Evaluation grade	Evaluation criteria	Color index
Excellent	• Three or more cases, showing the extraction lowering efficiency $\geq 50\%$	Green
Good	• One or two cases, showing the extraction lowering efficiency $\geq 50\%$ + More than one case, showing the extraction lowering efficiency 20 – 50% • Three or more cases, showing the extraction lowering efficiency 20 – 50%	Blue
Intermediate	• One case, showing the extraction lowering efficiency $\geq 50\%$ + More than one case, showing the extraction lowering efficiency 0 – 20% • More than one case, showing the extraction lowering efficiency 20 – 50% + More than one case, showing the extraction lowering efficiency 0 – 20% • Three or more cases, showing the extraction lowering efficiency 0 – 20%	Yellow
Weak	• Other cases (showing no distinct extraction lowering efficiency)	Orange
Exclusion for evaluation	• When the concentration of extracted water for the initial soil (without amendment) was less than 0.005 mg/L	White

실험 결과 오염 토양의 주 오염원으로 밝혀진 중금속 Pb, Zn과 준금속인 As를 대상으로 용출 저감 효율을 적용하였다. 안정화제의 경제성 분석은 원재료의 가격, 생산비, 중금속 용출 저감율 등을 평가인자로 활용하였으나, 운반비용은 안정화제 사용 지역에 따라 비용의 차이가 발생하므로 본 분석에서 제외하였다. 경제성 검토 대상 안정화제는 실험실에서 평가된 것과 동일한 제품을 원칙으로 하되, 실제 현장에서 쓰이는 것을 감안하여 비용적 측면에서 경제성이 있는 산업용 자재를 대상으로 선정하였으며, 각 안정화제의 경제성은 안정화제의 효율대비 단

가(제조단가(재료가격 + 생산비) ÷ 용출 저감율)로 산정하여 비교함으로써, 실제 오염부지 규모가 커서 다량의 안정화제가 필요한 현장에 대한 적용가능성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오염 토양 및 안정화제 특성 규명

채취한 오염 토양 5종류에 대하여 중금속 농도 분석 및 pH 측정 결과를 Table 3에 나타내었다. 오염 토양 S3의 경우 금속 폐기물 무단 투기로 오염된 토양으로, Hg와

Table 3. The pH and extraction results for 5 soil samples

Soil type	pH	Type of extraction	Concentration of extracted solution (Unit: mg/L or mg/kg)							
			Cd	Cu	Pb	Ni	Zn	As	Hg	Cr+6
S1	8.01	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.875	0.318	0.076	0.000
		SPLP	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.147	0.014	0.000
		Aqua regia extraction ⁽¹⁾	57.86	16.73	337.75	12.57	245.84	136.28	4.7	2.520
S2	8.06	TCLP	0.033	0.018	0.000	0.038	1.973	1.550	0.144	0.000
		SPLP	0.024	0.006	0.087	0.003	0.117	1.251	0.063	0.000
		Aqua regia extraction ⁽¹⁾	3.50	32.97	39.63	11.00	133.20	2225.28	27.3	2.084
S3	7.26	TCLP	0.245	3.973	0.865	0.180	73.320	0.025	-	0.000
		SPLP	0.000	0.112	0.153	0.827	0.524	0.009	-	0.000
		Aqua regia extraction ⁽¹⁾	36.63	1560.11	1606.06	119.47	4796.87	75.01	-	4.476
S4	7.91	TCLP	0.028	1.617	2.145	0.008	7.146	0.000	-	0.000
		SPLP	0.000	0.078	0.009	0.000	1.083	0.000	-	0.000
		Aqua regia extraction ⁽¹⁾	3.410	451.300	76.920	6.580	702.960	6.330	-	1.088
S5	6.15	TCLP	0.825	3.345	28.943	0.195	26.110	0.030	-	0.000
		SPLP	0.000	0.008	0.009	0.000	0.028	0.000	-	0.000
		Aqua regia extraction ⁽¹⁾	45.12	366.05	1573.26	57.44	2428.74	5.24	-	8.364
Tolerance limit of waste extraction process (TLWEP)			0.300	3.000	3.000	-	-	1.500	0.005	1.500

* Unit of (1): mg/kg; Red color: $\geq$ TLWEP

* Red: $\geq$ soil pollution warning limit of 3 area; yellow: $\geq$ soil pollution warning limit of 2 area; green: $\geq$ soil pollution warning limit of 1 area

* -: no data

Cr+6을 제외한 6개 중금속에 대하여 토양오염우려기준을 초과하는 것으로 나타났다. S5 토양의 경우 TPH와 중금속이 복합오염된 토양으로, Zn, Pb, Cu, Cr+6, Cd가 우려기준을 초과하였다. 폐광산 활동과 관련된 오염 토양 S1과 S2의 경우 As와 Hg가 우려기준을 초과하여, 광물 찌꺼기 투기와 선광과정에서 유래한 As-Hg 오염 토양으로 별도 분류하여 용출 배치실험을 실시하였다. S4 토양의 경우 탄피와 폭발물의 주 중금속 성분인 Cu와 Zn 농도가 우려기준을 초과하여 전형적인 군부대 오염 토양 특성을 나타내었다. 오염 중금속 종류, 중금속 농도 분포 등을 고려하면 선택한 오염 토양 5종류는 부지 오염이나 리오의 특성을 반영하는 오염 특성을 나타내어 안정화제 선정을 위한 실내 실험 토양으로 적절한 것으로 밝혀졌다. 오염 토양의 TCLP 및 SPLP 분석 결과, S4를 제외한 4종류 오염 토양에서 As, Hg, Cd, Cu, Pb가 폐기물 용출 기준치(Tolerance limit of waste extraction process: TLWEP) 이상을 나타내어, 토양으로부터 중금속 용출을 저감시킬 수 있는 추가 처리법이 필요한 것으로 나타났다(Table 3).

안정화제의 광물학적 특성을 규명하기 위하여, XRD와 XRF 분석을 실시하였다. XRF 분석 결과는 Table 4에 나타내었으며, XRD 분석 결과로부터 각 안정화제의 주 구성 광물과 구성 광물 특징을 요약하여 Table 5에 나타내었다. 본 실험에서 사용한 안정화제의 XRD와 XRF 분석 결과, 안정화제는 크게 Fe 성분비가 가장 높은 Fe-계열(황산철, 영가철, 황화철), 주 성분이 Ca인 Ca-계열(생석회,

소석회, 석회석), Fe와 Ca가 주요 성분이며 비슷한 함량으로 구성된 Fe-Ca-계열(CMDS, MMDS), 그 외 유기탄소-계열(biochar)로 분류가 가능하였다. 제강슬래그의 경우 Ca-성분 45%를 차지하는 Ca-제강슬래그(제강슬래그 1)와 Fe-성분이 24%로 가장 높은 성분비를 보인 Fe-제강슬래그(제강슬래그2)로 구분하였다. 광산배수처리 슬러지의 경우, 석탄광산배수처리 슬러지(CMDS)가 금속광산배수처리 슬러지(MMDS)보다 Fe와 Ca 성분이 높게 나타났으며, 두 슬러지 모두 Fe 성분이 Ca 성분보다 함량이 높게 나타났다. 안정화제의 TCLP와 SPLP 분석 결과는 Table 6에 나타내었음. TCLP와 SPLP 분석결과, 사용한 안정화제 모두 용출기준이하를 나타내어 오염 토양에 적용할 수 있을 것으로 밝혀졌으며, 바이오차의 경우 중금속 용출 농도가 가장 적은 한 종류(Biochar1)만을 선정하여 이후 실험에 사용하였다.

3.2. 안정화제에 의한 오염 토양 중금속 용출 저감 배치실험 결과

오염 토양에 안정화제를 다양한 비율(0 - 7%)로 투입한 토양의 시간에 따른 용출 농도 자료로부터, 안정화제를 첨가하지 않은 오염 토양의 용출 농도를 비교하여 용출 농도 저감 효율을 계산하여 그래프로 나타내었다(총 455개). Fig. 2는 S2 토양에 대하여 안정화제를 첨가하지 않은 경우 대비 3종류의 안정화제 첨가에 의한 중금속(아연, 카드뮴, 비소) 용출 저감 효율을 비교한 결과이다. S2

Table 4. Chemical compositions of amendments from XRF analysis

Compound	Weight %									
	Biochar1	Biochar2	Steel making slag1	Steel making slag2	CMDS	MMDS	CaO	Ca(OH) ₂	Calcite	
SiO ₂	88.2	26.92	13.06	29.74	8.67	7.99	5.26	1.79	1.88	
Al ₂ O ₃		10.32	2.01	12.13	10.03	9.74	2.99	0.82		
Fe ₂ O ₃		4.66	26.59	24.27	38.79	30.84	0.85	0.61		
CaO	1.56	22.56	44.65	19.31	34.57	27.28	84.33	84.77	96.65	
MgO	0.91	5.58	5.84	4.28	5.1	7.91	5.6	11.08		
MnO	0.13	0.27	3.08	6.68	0.97	1.12				
CuO						2.34				
ZnO						2.12				
Na ₂ O		4.37								
K ₂ O	4.95	7.22		0.17			0.23	0.17		
P ₂ O ₅	1.35	3.98	2.42				0.07			
TiO ₂		0.51	0.59	0.91						
V ₂ O ₅			0.56							
Cr ₂ O ₅			0.35	1.87						
SO ₃	2.77	13.59	0.85	0.64	1.86	10.65	0.67	0.74	1.47	
Cl										
Total	99.87	99.98	100	100	99.99	99.99	100	99.98	100	

Table 5. Major minerals of amendment resulted from XRD analysis

Amendment	Major minerals	Formula	Properties
Iron sulfate	Rozenite	$\text{FeSO}_4 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	The secondary mineral originated from melanterite ($\text{FeSO}_4 \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$)
Biochar1	Cristobalite	SiO_2	Amorphous organic material with small dose of cristobalite and calcite
	Calcite	CaCO_3	
	Organic material	-	
Biochar2	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Amorphous organic material with dolomite, calcite and small dose of quartz
	Calcite	CaCO_3	
	Quartz	SiO_2	
	Organic material	-	
Steel making slag1	Wuestite	FeO	Amorphous silicate minerals with wuestite and brownmillerite
	Brownmillerite	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$	
Steel making slag2	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Amorphous silicate minerals with dolomite and pyroxene
	Pyroxene	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$	
Coal mine drainage sludge (CMDS)	Aragonite	CaCO_3	Aragonite, calcite and quartz with amorphous iron bearing silicate minerals
	Calcite	CaCO_3	
	Quartz	SiO_2	
Metal mine drainage sludge (MMDS)	Calcite	CaCO_3	Calcite and gypsum with amorphous iron bearing silicate minerals
	Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	
Calcium oxide	Lime	CaO	Lime with small dose of portlandite and quartz
	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	
	Quartz	SiO_2	
Calcium hydroxide	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandite with calcite
	Calcite	CaCO_3	
limestone	Calcite	CaCO_3	Calcite with small dose of quartz
	Quartz	SiO_2	

토양에 대하여 CMDS를 안정화제로 사용한 경우 Zn의 용출 저감 효율은 3% 이상 혼합 시 80% 이상을 나타내었으며(Fig. 2(a)), As의 경우에는 95% 이상을 나타내어(Fig. 2(b)) 매우 효과가 높았다. 제강슬래그2의 경우에도 안정화제 3% 이상 혼합 시 60% 이상의 높은 As 저감 효율을 보였다(Fig. 2(c)). 황화철의 경우 3% 이상 혼합 시 Cd의 용출 저감 효율이 60% 이상을 나타내었다. 위와 같은 방법으로 총 5종류 오염 토양에 대하여, 13종의 안정화제 투입량에 따라 안정화 시간별로 중금속 용출 저감 효율을 안정화제를 투입하지 않은 토양의 중금속 용출 농도와 비교하여 계산하였다(총 455개 용출 저감 효율 자료 확보). 수은의 경우, 수은 함량이 높게 나타난 S2 토양(광물찌꺼기 매립지 상부 토양: 초기 수은 농도 27.3 mg/kg)에 대하여, 안정화제를 적용하여 용출 저감 배치실험을 수행하였으며, 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 광산배수처리 슬러지와 황을 함유한 Fe-계열의 안정화제에서 수은 용출 저감 효율 80% 이상을 나타내었다.

안정화제 적용 후 토양의 급격한 pH 변화는 토양 생태계 뿐 아니라, 중금속 용출 특성에도 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Yun *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2020). 따라서 안정화제 적용 후 토양의 pH 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 황산철의 경우 3% 이상 혼합한 경우 S3 토양을 제외한 모든 토양에서 pH 5 이하를 나타내었고, 5% 이상 혼합한 경우 모든 토양에서 pH 5 이하를 나타내어 Fe-S-계열의 안정화제 적용 시 토양의 pH를 회복할 수 있는 별도의 추가 처리가 필요할 것으로 판단되었다. 대표적인 Ca-계열의 안정화제인 생석회와 소석회 첨가 시, 토양의 pH는 10 이상으로 증가하였으며, Ca-제강슬래그1의 경우에도 5% 이상 투입 시 토양의 pH가 10 이상을 나타내었다. 생석회나 소석회를 토양 안정화제로 사용하는 경우 초기에는 pH 증가에 의해 형성되는 탄산염 광물의 공침에 의해 중금속 용출 저감 효율이 높으나, 안정화 시간이 지남에 따라 토양의 버퍼링에 의한 pH 감소에 의해 초기에 형성되었던 탄산염

Table 6. Extraction results for amendments

Amendment	pH	Type of extraction	Concentration of extracted solution (Unit: mg/L)							
			Cd	Cu	Pb	Ni	Zn	As	Hg	Cr+6
Iron sulfide	3.33	TCLP	0.000	0.000	0.037	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.000	0.623	0.000	0.124	0.000	0.000	0.000
Biochar1	9.85	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.569	0.000	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Biochar2	7.34	TCLP	0.047	0.052	0.073	0.020	1.859	0.018	0.000	0.000
		SPLP	0.005	0.033	0.034	0.009	0.187	0.014	0.000	0.118
Steel making slag1	9.28	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Steel making slag2	8.31	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.087
		SPLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Coal mine drainage sludge (CMDS)	8.65	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.070	0.012	0.000	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Metal mine drainage sludge (MMDS)	9.39	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.071	0.000	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Calcium oxide	12.63	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Calcium hydroxide	12.46	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000
Limestone	8.81	TCLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000
		SPLP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Tolerance limit of waste extraction process (TLWEP)			0.300	3.000	3.000	-	-	1.500	0.005	1.500

(a) Zn for CMDS

(b) As for CMDS

(c) As for steel making slag2

(d) Cd for iron oxide

Fig. 2. Stabilization efficiency of three amendments for S2 soil.

Fig. 3. Hg stabilization efficiency of 13 amendments for S2 soil.

광물의 용해에 의한 중금속 용출이 증가할 수 있는 것으로 보고되고 있어서(Basta and McGowen, 2004; Zhang, 2020), 이러한 pH 버퍼링에 의한 안정화제 효율 감소 영향을 최소화하기 위한 방법들이 고려되어야 할 것으로 판단되었다. 나머지 안정화제들의 경우, 토양 첨가에 의한 급격한 토양 pH 변화를 보이지 않았다.

3.3. 중금속 용출 저감 배치실험 결과와 경제성 평가에 근거한 안정화제 순위 선정 결과

Table 2에서 설명한 분류방식에 따라 안정화제를 용출 시간별(44시간과 68시간)로 정리하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 결과로부터 부지 오염시나리오별 특정 중금속에 대하여 안정화 효율이 높게 나타나는 안정화제를 선정할 수 있다. 대부분의 안정화제에서 Cu, Ni보다는 Zn, Pb의 안정화 효율이 높게 나타났다. 본 결과로부터 국내 중금속 오염 토양의 경우 Fe-계열보다는 Ca-계열과 Fe-

Table 7. The pH change of soil after the addition of amendment (0 – 7%)

Amendment	%	pH			
		S3 soil	S2 soil	S1 soil	S4 soil
Iron oxide	0	8.0	6.9	7.8	7.1
	1	8.1	7.0	7.9	7.3
	3	8.1	7.1	7.8	7.1
	5	8.1	7.1	8.0	6.5
	7	8.0	7.2	7.7	6.8
Manganese oxide	0	8.1	6.9	7.8	7.2
	1	8.2	7.5	7.9	7.5
	3	8.1	7.3	7.9	7.3
	5	8.1	7.6	7.9	7.5
	7	8.2	7.5	7.7	7.2
Iron sulfide	0	8.1	7.0	8.0	7.3
	1	8.1	6.9	7.8	7.3
	3	8.1	6.3	7.6	7.0
	5	8.0	6.6	7.4	5.2
	7	7.9	5.2	7.3	5.6
Iron sulfate	0	8.0	6.9	7.9	7.3
	1	7.4	4.2	5.0	4.1
	3	5.9	3.8	4.1	3.7
	5	4.4	3.7	3.9	3.4
	7	4.5	3.6	3.8	3.3
Zero iron	0	8.1	7.1	7.8	6.7
	1	8.0	7.2	7.9	6.7
	3	8.1	7.3	7.8	6.9
	5	8.0	7.6	7.9	7.6
	7	8.1	7.7	7.8	7.4
Biochar1	0	8.3	7.3	7.8	6.4
	1	8.1	7.5	7.9	6.3
	3	8.1	7.8	8.1	7.3
	5	8.1	8.0	8.2	7.5
	7	8.1	8.0	8.2	7.7
Steel making slag2	0	8.1	7.1	7.9	6.9
	1	8.1	7.7	8.1	7.2
	3	8.1	7.6	8.2	7.5
	5	8.1	8.0	8.2	7.7
	7	8.1	8.1	8.2	7.7
Amendment	%	pH			
		S3 soil	S2 soil	S1 soil	S4 soil
Steel making slag1	0	8.0	7.1	7.9	6.6
	1	8.3	8.6	9.0	8.3
	3	9.8	10.4	10.3	9.3
	5	9.9	10.7	11.0	10.6
	7	10.2	11.3	11.0	10.6
CMDS	0	8.3	7.3	7.6	6.4
	1	8.2	8.2	7.9	8.0
	3	8.2	8.3	8.1	8.2
	5	8.2	8.4	8.2	8.3
	7	8.4	8.3	8.2	8.4
Calcium oxide	0	8.2	7.1	7.8	6.4
	1	11.0	12.0	12.0	12.2
	3	12.4	12.7	12.6	12.7
	5	12.7	12.7	11.8	12.8
	7	12.7	12.7	11.7	12.8
Calcium hydroxide	0	8.2	7.4	7.5	6.4
	1	11.0	11.5	11.4	12.1
	3	12.4	11.9	12.1	12.7
	5	12.6	12.0	12.3	12.8
	7	12.7	12.5	12.1	12.8
Limestone	0	8.3	7.7	7.9	6.4
	1	8.3	8.4	7.9	7.7
	3	8.3	8.2	8.4	7.9
	5	8.3	8.3	7.9	7.8
	7	8.3	8.3	7.9	7.9
MMDS	0	8.2	7.5	7.9	6.2
	1	8.2	8.2	8.1	7.9
	3	8.1	7.7	8.3	7.6
	5	8.3	7.7	8.7	7.8
	7	8.5	7.6	9.1	7.9

(a) 44 hours

(b) 68 hours

Fig. 4. Evaluation of the stabilization efficiency for amendments based on the color index at two different stabilization time.

Ca-계열 안정화제에서 중금속 안정화 효과가 높게 나타남을 알 수 있다(Fig. 4에서 녹색과 파랑색으로 표시되는 영역 참조). 위 중금속 용출 저감 효율 결과를 바탕으로, 안정화제 투입 비율 3%, 5%, 7% 적용 시 5개 토양에 대하여 중금속 항목별로 용출 저감 효율이 20% 이상을 나타내는 안정화제 중에서 저감 효율이 높은 순위부터 5개 안정화제(Top 5)를 선택하였다. 각 안정화제에 대하여 5개 오염 토양에 대하여 중금속 항목별 용출 저감 효과가 20% 이상을 나타내는 Top 5 안정화제에 해당하는 총 횟수를 합산하여, 가장 안정화 효율이 높은 순서대로 안정화제의 순위를 결정하였으며, 그 결과를 Table 8에 나타내었다. 부지 오염시나리오가 다른 총 5개 오염 토양에 대하여 8개 중금속 항목별 용출 저감 효율이 20% 이상인 경우, 가장 안정화 효율이 높은 순위는 CMDS (석탄광산배수 슬러지), MMDS (금속광산배수 슬러지), 산화철, 생석회, 소석회=석회석, 황화철, 바이오차 순으로 나타났다. 이러한 결과는 국내 중금속 오염 토양에 대하여 전반적으로 Fe-S-계열보다는 Ca-계열, 또는 Fe-Ca-계열의 안정화제가 중금속 안정화 효율이 더 높다는 것을 의미한다(산화철만 제외). 수은의 경우 수은으로 오염된 S1 토양과 S2 토양만을 대상으로 용출 저감 결과를 적용하여, 안정화 우선순위를 산정하였으며, 그 결과 황산철, 생석회, 소석회, MMDS 순으로 저감 효율이 높았으며, 산화철, 망간산화물, 황화철, CMDS 등이 그 다음으로 비슷한 안정화 효율을 나타내었다.

안정화제 투입량 5%에 대한 안정화제 효율을 용출 저감율에 비례하는 것으로 가정하고, S3 토양의 Pb, Zn의 평균 저감율과, S2 토양의 As 저감율을 반영하여 경제성 평가를 수행하였다. 5종류의 국내 중금속 오염 토양에 대하여 Hg와 As를 포함한 8개 중금속에 안정화 효율이 높게 나타난 10가지의 안정화제(Table 8 결과 참조)에 대하여, 안정화제의 효율대비 단가(재료비 + 생산비용)를 산정하여 경제성 분석을 실시한 결과를 Table 9에 나타내었다. 일반 중금속에 대하여 Ca-계열의 안정화제인 석회석의 경우 저감 효율 대비 단가가 50원/kg 이하로, 안정화제 중에서 가장 낮은 것으로 나타났으며, 생석회, 소석회 등은 As의 경우 효율 대비 단가가 300원/kg 이하를 나타내었다. 석탄광산배수처리 슬러지(CMDS)와 금속광산배수처리 슬러지(MMDS)의 경우 일반 중금속과 비소에서 모두 저감 효율이 높게 나타났으며 단가도 비교적 저렴하여(101원/kg), 경제성이 매우 높은 것으로 나타났다. Fe-계열의 안정화제의 경우 일부 중금속(비소 포함)에 대하여 높은 용출 저감 효율을 나타내나 구입 단가가 높았다. 산화철의 경우 중금속 평균 저감율이 87%(비소 93%)로 높게 나타났으나 구입 단가가 8,500원/kg으로 높아서 경제성이 낮게 나타났으며, 황산철의 경우 비소에 대하여 저감 효율을 매우 높았으나, 초기 구입 단가도 높아(3,420원/kg), 현장 적용에 제한이 있을 것으로 판단되었다. Zn과 Pb를 기준으로 일반 중금속에 대하여 경제성이 높은 안정화제는 석회석, 광산배수처리 슬러지, 생석

Table 8. Ranking of amendments for heavy metals (metalloid) based on the stabilization efficiency

3% addition		5% addition		7% addition		Total case number	Rank
Amendment	Cases ranked in the top 5	Amendment	Cases ranked in the top 5	Amendment	Cases ranked in the top 5		
Iron oxide	6	Iron oxide	10	Iron oxide	13	29	3
Manganese oxide	3	Manganese oxide	1	Manganese oxide	1	5	
Iron sulfide	5	Iron sulfide	6	Iron sulfide	9	20	
Iron sulfate	4	Iron sulfate	4	Iron sulfate	3	11	
Zero iron	1	Zero iron	1	Zero iron	1	3	
Biochar	8	Biochar	5	Biochar	5	18	
Steel making slag1	0	Steel making slag1	5	Steel making slag1	3	8	
Steel making slag2	0	Steel making slag2	2	Steel making slag2	4	6	
CMDS	25	CMDS	20	CMDS	14	59	1
Calcium oxide	9	Calcium oxide	9	Calcium oxide	6	24	4
Calcium hydroxide	9	Calcium hydroxide	8	Calcium hydroxide	6	23	5
Limestone	9	Limestone	9	Limestone	5	23	5
MMDS	19	MMDS	7	MMDS	6	32	2

Table 9. The analysis for the economic efficiency of amendments

Amendment	S3 soil			S2 soil		
	A. Manufacturing (or purchasing cost)/kg (won)	B. The average of stabilization efficiency for Zn and Pb	The ratio A/B (won)	A. Manufacturing (or purchasing cost)/kg (won)	B. The average of stabilization efficiency for As	The ratio A/B (won)
Iron oxide	8,500	87%	9,970	8,500	93%	9,140
CMDS	101	84%	120	101	99%	102
MMDS	101	88%	115	101	99%	102
Limestone	14	78%	18	14	61%	23
Zero iron	92,100	22%	418,636	92,100	28%	328,929
Iron sulfate	3,240	-	-	3,240	100%	3,240
Steel making slag1	78	-	-	78	33%	236
Biochar1	2,143	77%	2783	2,143	-	-
Calcium oxide	130	37%	351	130	97%	134
Calcium hydroxide	270	57%	474	270	97%	278

회, 소석회 순으로 나타났으며, As의 경우에는 석회석, 광산배수처리 슬러지, 생석회, 제강슬래그 순으로 나타났다.

4. 결 론

국내 부지 오염시나리오를 고려하여 특성별 5가지 중금속 오염시나리오를 가정하고, 이에 해당하는 국내 중금속 오염 토양에 대하여 총 13가지 기존 안정화제를 대상으로 중금속 용출 저감 효율 규명, 경제성 평가 등을 수행하여 현장에서 적용할 수 있는 안정화제 우선순위를 결정하였다. 중금속 용출 저감 효율만을 근거로 선정한 안정화제 우선순위는 광산배수처리 슬러지, 산화철, 생석회, 소석회, 석회석, 황화철 순이었다. 1차 선정된 안정화제들에 대하여 저감 효율 대비 단가를 적용한 경제성 분석 결과, 비록 중금속 용출 저감 효율은 상대적으로 낮으나 구입 단가가 저렴하여 현장 적용성이 높은 안정화제는 석회석, 광산배수처리 슬러지, 제강슬래그(As의 경우), 생석회, 소석회 등으로 밝혀졌다. 구입 단가가 높은 안정화제의 경우, 단가가 낮은 안정화제와 혼합하거나 단가를 낮출 수 있는 처리과정의 개발을 통하여 현장의 활용도를 높일 수 있을 것으로 판단되었다.

지난 10여 년간 국내 중금속 오염 토양을 안정화하는데 제강슬래그와 석회석만을 적용하여온 국내 상황을 고려한다면, 본 연구를 통하여 제시된 안정화제 우선순위 결과는 다양한 안정화제를 향후 국내 중금속 오염부지에 효과적으로 적용할 수 있는 정량적 자료를 제시하였다는 점에서 의미가 크며, 향후 국내 부지 오염시나리오에 적용할 수 있는 안정화제를 선정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 2019년도 부경대학교 자율창의연구비(2019년)의 지원을 받아 연구되었습니다. 본 논문을 세심하게 심사하여주신 심사자들에게 감사드립니다.

References

- Basta, N.T. and McGowen, S.L. (2004) Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. *Environ. pollut.*, v.127, no.1, p.73-82.
- Furlan, A.P., Razakamanantsoa, A., Ranaivomanana, H., Amiri, O., Levacher, D. and Deneele, D. (2020) Effect of Fly Ash on microstructural and resistance characteristics of dredged sediment stabilized with lime and cement. *Constr. Build. Mater.* 121637
- Gu, K. and Chen, B. (2020) Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction. *Constr. Build. Mater.* 117195
- James, J. and Pandian, P.K. (2016) Industrial wastes as auxiliary additives to cement/lime stabilization of soils. *Adv. Civ. Eng.* v.2016.
- Kim, S.H., Jeong, S., Chung, H. and Nam, K. (2020) Contribution of precipitation and adsorption on stabilization of Pb in mine waste by basic oxygen furnace slag and the stability of Pb under reductive condition. *Chemosphere*, v.263.
- Lee, J.Y., Lee, M. and Yu, M. (2016) Draft Guideline Matching the Treatment Technology to the Soil Contaminated Site Based on the Site Properties in Korea. *J. Soil & Groundwater Env.* v.21, no.6, p.1-13.
- Lu, C.C., Hsu, M.H. and Lin, Y.P. (2019) Evaluation of heavy metal leachability of incinerating recycled aggregate and solidification/stabilization products for construction reuse using TCLP, multi-final pH and EDTA-mediated TCLP leaching tests. *J. Hazard. Mater.* v.368, p.336-344.

- MIRECO (Mine Reclamation Corp) (2017) The Law about Mine Damage Prevention and Recovery
- Rachman, R.M., Bahri, A.S. and Trihadiningrum, Y. (2018) Stabilization and solidification of tailings from a traditional gold mine using Portland cement. *Environ. Eng. Res*, v.23, no.2, p.189-194.
- USEPA (1992) Toxicity Characteristics Leaching Procedure, Method 1311
- USEPA (1996) Synthetic Precipitation Leaching Procedure, Method 1312
- USEPA (2000) Solidification/stabilization use at superfund sites, EPA/542/R-00-010, p. 2-6
- USEPA (2007) Treatment technologies for site cleanup: annual status report
- Twelfth Edition, Solid Waste and Emergency Response, 5203P, EPA542-R-07-012.
- Yoon, I.H., Moon, D.H., Kim, K.W., Lee, K.Y., Lee, J.H. and Kim, M.G. (2010) Mechanism for the stabilization/solidification of arsenic-contaminated soils with Portland cement and cement kiln dust. *J. Environ. Manag*, v.91, no.11, p.2322-2328.
- Yun, S.W., Kang, S.I., Jin, H.G., Kim, H.J., Lim, Y.C., Yi, J.M. and Yu, C. (2011) An investigation of treatment effects of limestone and steel refining slag for stabilization of arsenic and heavy metal in the farmland soils nearby abandoned metal mine. *Korean J. Soil Sci. Fert*, v.44, no.5, p.734-744.
- Yun, S.W., Jin, H.G., Kang, S.I., Choi, S.J., Lim, Y.C. and Yu, C. (2010) A comparison on the effect of soil improvement methods for the remediation of heavy metal contaminated farm land soil. *J. Korean geotechni. society*, v.26, no.7, p.59-70.
- Xu, T., Nan, F., Jiang, X., Tang, Y., Zeng, Y., Zhang, W. and Shi, B. (2020) Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium (III). *Ecotoxicol. Environ. Saf*, v.195.
- Zhang, S. (2020) The relationship between organoclastic sulfate reduction and carbonate precipitation/dissolution in marine sediments. *Mar. Geol*, v428.