

폐광산 토양개량·복원사업 완료 농경지 안정화 효율 및 화학성 평가

고주인¹ · 박미선¹ · 박관인¹ · 백승한¹ · 고일하^{2*}¹한국광해광업공단 기술연구원²환경기술정책연구원 (NeLab)

Assessment of the Feasibility of the Hydrochloric Acid Extraction Method and the Chemical Properties of Agricultural Soils in reclaimed mines

Ju-In Ko¹ · Mi-Sun Park¹ · Gwan-In Park¹ · Seung-Han Baek¹ · Il-Ha Koh^{2*}¹Technology Research & Development Institute, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation, Won-ju, 26464, Korea²National Environment Lab. (NeLab), Seoul, 02841, Korea

ABSTRACT

In Korea, the common remedial process for reclamation of agricultural soils nearby abandoned mines involves chemical soil stabilization followed by covering with clean soil. This study investigated the chemical properties of cover soils and the validity of HCl extraction method in assessing the degree of As and heavy metal stabilization in stabilized soils collected from 14 plots where mine reclamation had been completed. The results revealed there were no major differences in contaminants extraction rate between the stabilized soils and contaminated soils, suggesting HCl extraction procedure is a less feasible method to determine the efficiency of the stabilization. Soil quality indicators including OM, SiO₂, P₂O₅, etc. of the land-covering soils were generally lower than those of stabilized soils that used to be the cultivation layer before the stabilization. Nonetheless, the value of those indicators didn't meet the regulatory limits of agricultural soil. Therefore, future strategy for mine reclamation should concentrate not only on contaminant concentration but also on soil quality parameters for agricultural use of the reclaimed soil.

Key words: Stabilization, Arsenic, Heavy metal, HCl extraction method, Soil quality

1. 서 론

국내 광해방지사업의 일환으로 폐광산 주변 지역의 중금속 오염 농경지에 시행되고 있는 토양개량·복원사업은 주로 오염된 농경지 토양을 대상으로 하는 것으로 지속적인 작물재배, 생산활동이 가능한 토양으로의 복원이 주요 목적이다(Koh et al., 2023). 토양개량·복원사업은 대부분 안정화 공법을 적용하고 있다. 안정화 공법은 오염물질을 토양으로부터 직접적으로 제거하지는 않지만, 오염토양에 안정화 물질을 적용하여 비소(As)나 중금속의 용해도나 독성을 낮춰 잠재적 위해성을 감소시키는 방법이다(Yun

et al., 2010).

농경지에 안정화 공법을 적용할 경우 주로 복토와 환토가 동반되어 수행된다. 복토는 오염토를 안정화 처리하고 상부에 오염되지 않은 외부토양을 성토하는 방식이다. 그러나 지반고 상승에 문제가 있는 경우에는 오염토를 제거하고 오염되지 않은 외부토양으로 치환하는 환토를 적용한다. 안정화 공법은 오염된 토양을 대상으로 지표면 하부 20 cm ~ 30 cm까지 안정화제(석회석, 제강슬래그 등)를 혼합하여 안정화층을 조성하고, 안정화층 하부 토양 내 존재하는 중금속의 상층부 및 작물로의 전이를 억제한다. 이 외 추가적으로 본 안정화층 상부에 약 40 cm 두께의 경작층(복토층)을 오염되지 않은 외부 토양(복토재)을 사용하여 조성한다(Kim et al., 2019; KOMIR, 2022).

폐광산 광해방지사업에서 농경지 토양 모니터링은 토양 시료를 채취하여 그 목적에 따라 토양의 물리, 화학 및 생물학적 특성을 분석하여 평가한다. 그간 수행되어 온 토양 모니터링은 주로 경작층 토양의 일부 화학적 특성(pH,

주저자: 고주인, 차장

공저자: 박미선, 차장; 박관인, 팀장; 백승한, 처장

*교신저자: 고일하, 책임연구원

Email: ilha@nelab.re.kr

Received : 2023. 12. 22 Reviewed : 2024. 01. 22

Accepted : 2024. 02. 19 Discussion until : 2024. 04. 30

EC 등)과 오염물질(중금속, 비소 및 석면 등)을 분석해 토양 내 오염물질의 법적 환경기준 만족여부를 판단하고 그 결과를 활용하였다. 하지만, 최근 토양 관리 전략은 작물 생산성의 향상 뿐만 아니라 토양을 보존하기 위해 토양 질(Soil quality)을 관리하는 방향으로 전환되고 있다(Hong et al., 2022). 토양질은 토양 기능의 크기로, 농경지 토양 관리 목표가 작물 생산성에서 농산물의 안정성, 환경부하의 최소화, 생태계 보전 등으로 확장되면서 이에 대한 개념도 변화되어 왔다(Lee et al., 2021). 일례로 Mukhopadhyay et al.(2014)은 토양유기탄소와 염기포화도, CO₂ 플럭스 등을 활용해 산출한 토양질 지수(mine soil quality index)를 광산지역 복원사업 성공여부를 판단하는 근거로 활용하였다. 아울러 Yi and Sung(2023)은 토양세척 또는 토양경작을 통한 오염토양 처리 시 정화완료 토양의 건강성(서식처 기능, 물질순환능, 완충능, 식물생산성 등)도 중요한 고려사항으로 판단하였다.

국내의 토양오염공정시험기준(NIER, 2022)은 토양격자 내 높은 결합력의 중금속까지 추출이 가능한 왕수추출방식(aqua regia)을 적용하고 있다. 왕수추출방식은 토양 무기원소의 식물체 전이와 같은 이동성 평가에서는 그 적용성이 떨어진다. 이에 안정화 또는 식물체 전이와 관련한 연구에서는 연구 목적에 맞는 다양한 종류의 토양 추출법(단일 용출법)이 적용되고 있다. Choi et al.(2021)은 바이오차의 안정화제 적용성 평가를 위해 TCLP와 SPLP 시험을, Koh et al.(2021)은 석탄광산배수슬러지의 평가를 위해 유기산추출법(Gongzaga et al., 2012)과 Mehlich 3

추출법(Mehlich, 1984)을 이용한 바 있다. Park et al. (2009)와 Kim et al.(2012)는 구.공정시험기준으로 알려진 HCl 용출법으로 토양 중금속의 식물체 흡수이행 정도를 검토한 바 있다. 이는 곧 HCl 용출법이 안정화 효과검증에 활용될 수 있음을 의미한다.

이에 본 연구에서는 광해방지를 위한 토양개량·복원사업에 적용하는 모니터링이 토양 질 관리가 포함되는 방안으로 전환할 수 있도록 개선하고자 폐광산지역 주변 사업 완료 농경지 토양의 화학적 특성을 파악하였다. 근본적으로는 복토층이 농작물의 생육에 적합한 수준을 유지하는지 확인하고자 하였다. 아울러 안정화층 즉, 복토층 하부 안정화 처리된 원지반층의 기능·성능 유지여부 확인을 위한 HCl 용출법의 적용성을 추가적으로 검토하였다. 본 연구에서 유의미한 결과가 확인된다면 향후 토양개량·복원사업의 발전방향 검토에 있어서 주요 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 연구지역 및 검토대상 항목 선정

2.1.1. 연구대상 광산지역

본 연구를 위해 토양개량·복원사업이 완료된 7개 사업대상지, 6개 광산(울진, 붓든, 상주, 남경상, 야로, 보라)을 선정하였다(Table 1). 대상 지역은 한국광해광업공단에서 토양개량·복원사업을 완료한 농경지 중 경상도 지역의 광산주변 농경지 필지이었다. 토양은 불균질성을 갖고 있으

Table 1. The studied mine and agricultural lands where mine reclamation took place

Mine	Administrative location	The year of reclamation completion	Stabilizing agent for surface soil (mixing rate, %(wt))	The No. of sampling plots	The type of land use
Uljin	Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do	2010	Limestone (5)	3	
Butdeun	Bonghwa-gun, Gyeongsangbuk-do	2013	Limestone (5)	1	
Uljin	Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do	2014	Limestone (5)	3	a rice paddy
Sangju	Sangju-si, Gyeongsangbuk-do	2016	Steel slag (3) + Limestone (2)	1	
Namgyeongsang	Gyeonggi-si, Gyeongsangbuk-do	2016	Steel slag (2.5) + Limestone (2.5)	1	
Yaro	Hapcheon-gun, Gyeongsangnam-do	2018	Limestone (5)	2	a farm
Bora	Bonghwa-gun, Gyeongsangbuk-do	2020	Limestone (5)	3	

며, 지역마다 농경지의 토양 질 차이가 있는 것으로 알려져 있다(RDA, 2021). 따라서 복토재 수급지 등 지역적 차이에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 하고자 사업완료 대상지역을 경북 전역과 이와 인접한 경남 합천군 지역으로 한정하였다. 또한 농경지 안정화층 기능·성능 발현여부 평가를 위해 동일 비율(5%, wt.)의 안정화제를 투여한 농경지 필지로 선정하였다. 즉 대상 필지의 안정화제는 안정화 처리대상 토양의 5% 무게비를 갖는 석회석 또는 석회석/제강슬래그 혼합물이었다.

최종적으로 선정된 광산지역 농경지는 Table 1에서 볼 수 있듯이 7개 사업이 실시된 6개 광산 내 총 14개 필지로 농경지 이용형태를 보면 논이 9개, 밭이 5개로 분포하였다. 대상 농경지의 사업완료 시기는 2010년부터 2020년까지 다양하게 나타났다. 본 광산지역은 광산별로 차이는 있겠으나 대체적으로 비소, 카드뮴(Cd), 납(Pb), 아연(Zn)의 우려기준 초과로 토양개량·복원사업을 수행한 것으로 확인되었다. 다만, 본 연구에서의 대상 농경지의 비소, 카드뮴, 납 농도가 우려기준의 70% 수준인 것으로 나타나 토양 비균질성에 따른 차이를 보였다.

2.1.2. 검토대상 항목

토양질은 토양의 물리, 화학 및 생물학적 특성 지표를 종합적으로 고려하여 평가한다(Kim et al., 2015; Kim et al., 2012). 본 연구에서는 폐광산 무기오염물질(비소 및 중금속) 안정화를 위한 농경지 복원에 초점을 맞춰 토양의 물리·생물학적 특성은 배제하고, 화학적 특성파악을 통해 토양질 평가를 수행하였다. 토양의 화학적 특성 평가를 위해 선정한 모니터링 항목은 국내 토양 화학성 변동 연구에 주로 사용되는 지표로 pH, EC(electrical conductivity, 전기전도도), OM(organic matter, 유기물 함량), 유효규산(available SiO₂), 유효인산(available P₂O₅)이었다(Heo et al., 2021; Kang et al., 2012; Kim et al., 2020; Yoon et al., 2004). 아울러 알칼리 기반의 안정화제로부

터 유래할 가능성이 높은 교환성 양이온 항목인 칼슘(exchangeable Ca)을 검토 대상으로 추가하였다.

또한 안정화층의 안정화 효율 검토를 위해 「토양환경보전법」상 토양 오염물질에 포함되는 무기원소 중 광산 주변 농경지에 주로 확인되는 비소 및 중금속 오염물질 3종(Cd, Cu, Pb)을 검토 대상으로 선정하였다.

2.2. 시료의 채취 및 분석

2.2.1. 시료채취

토양시료 채취를 2023년 3월부터 6월까지 3개월간 진행하였다. 시료채취 시 각 필지의 지표면으로부터 복토층(경작층, cover), 안정화층(stabilized), 원지반층(contaminated)의 수직층위를 구분하여 각 층의 토양 3개를 채취하였다(Fig. 1). 해당 시료의 채취심도는 과거 토양개량·복원사업 시행내용을 바탕으로 하여 복토층 GL (-) 0 cm ~ 40 cm, 안정화층 GL (-) 40 cm ~ 60 cm 또는 40 cm ~ 70 cm, 원지반층 GL (-) 60 cm ~ 80 cm 또는 70 cm ~ 90 cm으로 구분하였다. 시료채취 시 토양오염공정시험기준(NIER, 2022)에 따른 농경지 지역 시료채취 지점의 선정방식을 준용하였다.

2.2.2. 시료분석

현장에서 채취한 시료를 국내 토양환경보전법에 의한 전문분석기관(토양오염조사기관)에 이송하여 위탁분석하였다. 비소 및 중금속의 농도정량을 위한 전처리법은 현재 국내에서 적용하고 있는 왕수추출방식인 토양오염공정시험기준(NIER, 2022)과 과거 적용되었던 용출방식(0.1 N HCl, As는 1 N HCl) 등 두 가지 방법을 활용하였다. 이를 통해 서로 다른 무기원소 추출률을 보이는 분석방법을 이용하여 안정화층 기능 유지 혹은 성능을 평가하고자 하였다. 이외 토양 화학성 분석항목은 토양화학분석법(NIAST, 2010)에 따른 전처리방식을 준용하였다.

비소 및 중금속의 농도정량은 ICP-OES(model 8300,

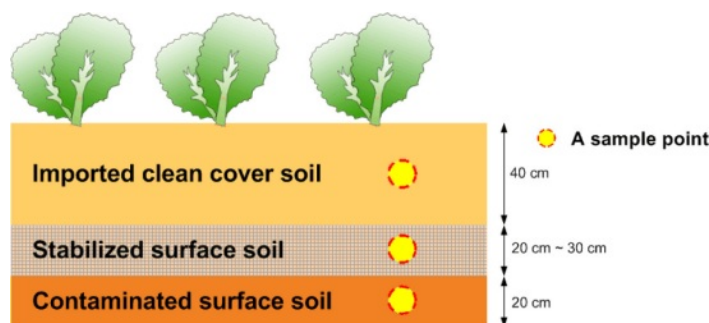


Fig. 1. A schematic diagram of agricultural soil reclamation and the soil sample points.

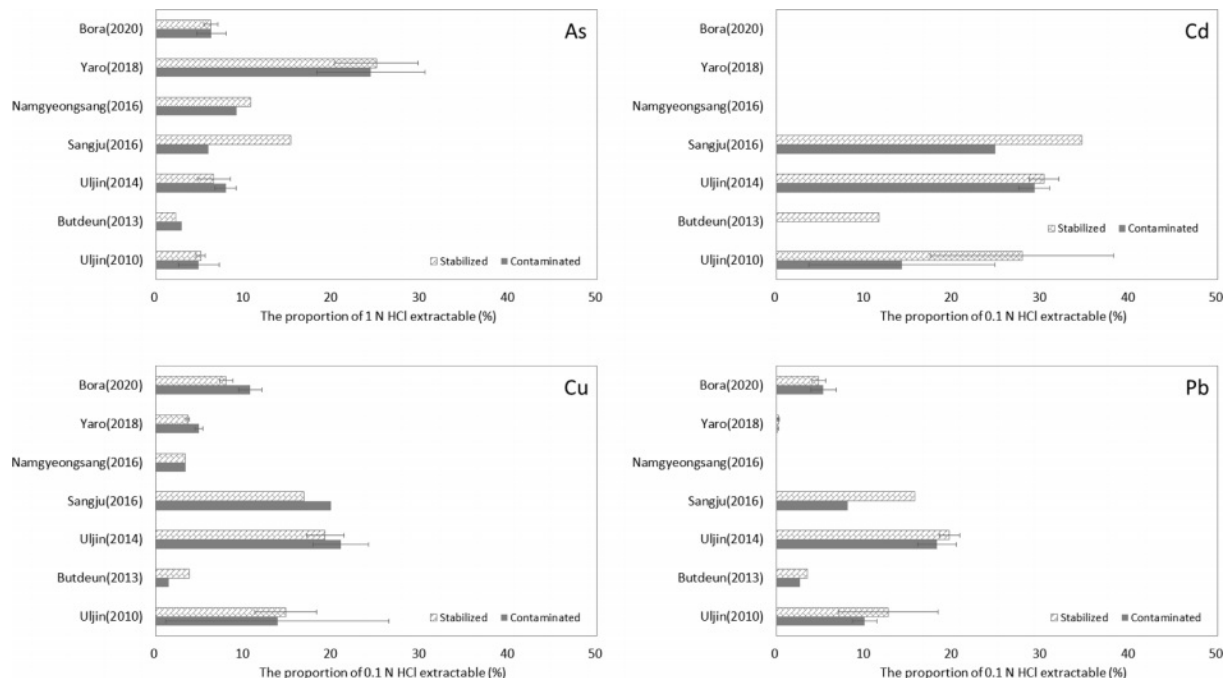


Fig. 2. The proportion of As and heavy metals extracted by 1 (0.1) N HCl in the soil samples (1 N for As and 0.1 N for Cd, Cu, and Pb; The number in the parentheses is the completion year of mine reclamation).

Perkin-Elmer Inc.)를 이용하였다. 교환성 칼슘이나 유효인산 등과 같은 무기원소와 관련한 토양화학성 분석 시에는 ICP-OES와 UV-VIS(model Lamda 25, Perkin-Elmer Inc.)를 이용하여 그 농도를 정량하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. HCl 용출법의 안정화 효율평가 적용성

Fig. 2는 7개 광해방지사업 완료 농경지 내 안정화층과 안정화층 하부의 원지반층 토양을 대상으로 각 무기원소별 왕수추출 전함량 농도대비 HCl 용출농도의 비율을 나타낸 것이다. 왕수(Auqa regia)는 규산염에 결합된 중금속을 추출할 수 없다. 그러나 토양 내 주요 구성물질에 결합된 중금속을 추출할 수 있어 유사전함량 추출방식(pseudo total digestion)의 추출용매로 사용된다(Davison, 2013). 따라서 안정화 처리된 토양(stabilized)을 대상으로 한 비소 및 중금속의 왕수추출에 대한 HCl 용출 결과의 비율은 원토양(contaminated)의 비율과 비교했을 때 이론상 낮게 나타나야 할 것으로 추정할 수 있다. 이는 안정화처리를 통해 오염물질의 이동성이 낮아져 용출농도가 저감된 효과를 확인할 수 있음을 의미한다.

그러나 본 연구결과에서는 Fig. 2에서 나타났듯이 이러한 경향을 확인할 수 없었다. 대부분의 필지 내 안정화층

과 원지반층 토양의 중금속 용출율은 안정화 처리여부에 상관없이 유사한 비율을 나타내었다. 이는 다수의 연구(Lee et al., 2014; Koh et al., 2015a; Koh et al., 2015b)에서 확인된 바와 같이 알칼리 안정화제 통해 안정화층에서 탄산염이나 수산화물, 칼슘공침 형태로 침전된 무기원소라도 HCl 용출액의 산도로 충분히 추출될 수 있음을 나타낸 것이다. 따라서 현장규모의 본 연구에서는 토양 내 비소 및 중금속의 안정화 효과 검토를 위한 1 N 또는 0.1 N HCl 용출법의 적용성을 확인할 수 없었다. 다만, 여러 연구에서 HCl 용출방식으로 안정화 효과를 검토한 만큼(Islam et al., 2017; Ok et al., 2011; Yoon et al., 2010), 토양 내 오염수준의 차이에 따른 안정화 효과 등 여러 조건에 대한 사례검토가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

비소는 안정화층 토양에서 원지반층 대비 2.6배의 용출율 차이를 보인 상주광산을 제외하면 대부분의 광산에서 상하층 모두 유사한 용출율을 보였다. 용출율이 유사하게 나타난 보라광산과 울진광산의 광해방지사업 완료시점이 각각 2020년과 2014년임을 볼 때 안정화 경과년수 역시 용출율에 영향을 미치는 인자는 아닌 것으로 확인되었다. HCl 추출법에 따른 용출율은 안정화층 2.3%~25.0%, 원지반층 2.9%~24.3%이었다.

카드뮴은 보라광산과 야로광산에서 HCl 용출법으로는

검출되지 않았고, 남경상 광산에서는 용출법과 왕수추출법 모두 검출되지 않았다. 따라서 상하층 용출비율의 검토가 가능한 상주, 울진광산만을 보면 안정화층 27.8%~34.6%, 원지반층 14.2%~29.2%이었다. 아울러 안정화 경과년수에 따른 용출률 차이를 확인할 수 없었다.

구리(Cu)는 2배 넘는 용출률 차이를 보인 붓든광산을 제외하면 역시 비소와 마찬가지로 안정화 처리여부, 시간 경과 여부에 따른 큰 차이를 보이지 않았다. HCl 추출법에 따른 용출율은 붓든광산을 제외하면 안정화층 3.3%~19.2%, 원지반층 3.4%~21.0%이었다.

납은 2배 가까운 용출율 차이가 야로광산과 상주광산에서 확인되었다. 본 광산지역의 원지반 토양에서 전함량 농도대비 용출농도가 상당히 낮은 특성을 보였다. 특히 야로광산은 토양자체의 풍화정도가 낮아서 추출효과 역시 낮게 나타난 것으로 판단된다. 즉, 극단적으로 낮은 용출 농도로 인해 필지 상하층간 용출율 차이가 확연하게 나타난 것으로 보인다. HCl 추출법에 따른 용출율은 불검출된 남경상광산을 제외하면 안정화층 0.2%~19.6%, 원지반층 0.1%~18.2%이었다. 아울러 다른 항목과 마찬가지로 안정화 경과년수에 따른 규칙적인 용출률 차이는 나타나지 않았다.

3.2. 토양화학 특성

Fig. 3은 7개 광해방지사업 완료 농경지 내 복토층과 안정화층, 안정화층 하부의 원지반층 토양을 대상으로 토양 화학특성을 분석한 결과이다. 일부 그래프의 경우 Yang et al.(2008)에 의한 논밭의 적정 허용범위를 표기하여 나타내었다. 대체적으로 식물체 성장에 필요한 영양물질 함량은 복토층(경작층)이 안정화층보다 낮은 것으로 확인되었다.

pH는 4개 사업지역에서 안정화 처리에 따라 안정화층 토양에서 증가하는 경향이 확인되었다. 이 같은 결과는 알칼리 안정화제에 의한 영향으로 볼 수 있다. 다만, 7개 사업대상 지역 모두 안정화층과 원지반층의 pH 차이가 크게 나타나지는 않았다. 이는 원지반 토양이 7 이상의 pH를 가지고 있을 정도로 해당 지역이 약알칼리의 특성을 가지고 있기 때문에 알칼리물질 추가 투여에 따른 급격한 pH 증가가 이루어지지 않았음을 의미한다. 외부로부터 반입된 토양으로 볼 수 있는 복토층의 pH 역시 1개 광산(남경상)을 제외하면 모두 7에 근접하거나 7을 넘는 수치를 보였다. 일반적으로 복토재의 수급지는 사업대상 인근지역이었을 가능성이 높다. 따라서 광산지역 인근의 동일 지질대의 토양이 반입되었을 경우 토양 pH 역시 사

업지와 같이 알칼리의 특성을 띠었을 가능성이 있다. 아울러 사업완료 시점에서 사업수행 업체에 의해서 처리되었거나 토지주에 의해 지속적으로 경작층에 투여된 알칼리 비료의 영향도 있었을 것으로 판단된다. 남경상광산 농경지의 복토층 pH는 5.25로 원지반 토양의 7.21보다 낮은 것으로 확인되었다. 대상 지역은 논으로 이용되고 있다. 작물생육의 적정 pH 범위는 pH 6~7이며, 특히 벼 생육에는 6.0~6.5임을 고려하면, 남경상광산 농경지의 경작층 pH는 다소 낮다고 할 수 있다(Chae et al., 2013; Yang et al., 2008). 따라서 농작물 생육을 위해서는 적정 pH의 유지가 필요할 것으로 판단된다.

전기전도도는 7개 사업대상 농경지 중에서 5개에서 안정화층의 토양이 복토층이나 원지반 오염토층에 보다 높은 것으로 나타났다. 특히, 복토층이 사업지역 외부에서 반입된 것임을 고려해 안정화층과 원지반층만을 비교하면 모든 광산지역에서 안정화층의 전기전도도가 높았다. 이는 안정화 처리에 따라서 안정화제로부터 탈리된 칼슘과 같은 물질의 영향으로 볼 수 있으며, 교환성 칼슘 그래프에서도 동일한 경향이 확인된다. 토양의 전기전도도가 4 dS/m 이상이면 식물 성장을 심각하게 저해하는 염류 토양이라 한다(Brady and Weil, 2014). 이에 따르면 복토층과 안정화층 모두 평균 1 dS/m 이하의 전기전도도로 염류로 인한 식물생육의 악영향은 없을 것으로 판단된다. 다만, 경작층을 대상으로 한 교환성 칼슘의 경우엔 영향 정도가 다른 것으로 확인되었다. 본 항목의 농경지 적정 허용범위는 논밭의 구분없이 5.0 cmol_e/kg ~ 6.0 cmol_e/kg이다(Yang et al., 2008). 이를 기준으로 하면 7개 사업 대상지 농경지 중 적정 범위는 2개(울진(2010), 상주), 과량으로 존재하는 곳은 3개(보라, 야로, 붓든), 부족한 곳은 2개(남경상, 울진(2014))인 것으로 나타났다. 안정화층의 전기전도도는 당연히겠지만 원지반보다 높고, 남경상을 제외한 나머지 광산지역에서 모두 적정기준을 초과하였다. 이는 토양개량·복원사업 시 복토층 조성을 계획하지 않는 경우 안정화제의 적용비용을 오염물질의 이동성 저감효과와 더불어 식물체의 생육조건까지 고려하여 선정해야 함을 의미한다.

유기물 함량의 적정범위는 논 2.5%~3%, 밭 2%~3%이다(Yang et al., 2008). 대상 사업지 경작층 토양의 유기물 함량은 평균 1.4±0.5%로 모두 적정 범위에 부족한 것으로 나타났다. 또한 토양개량·복원사업 시행 이전에 경작층으로 사용된 안정화층의 농도보다 대체적으로 낮은 것으로 확인되는데, 특히 야로광산, 남경상광산, 울진광산 2개 사업지에서 두드러졌다.

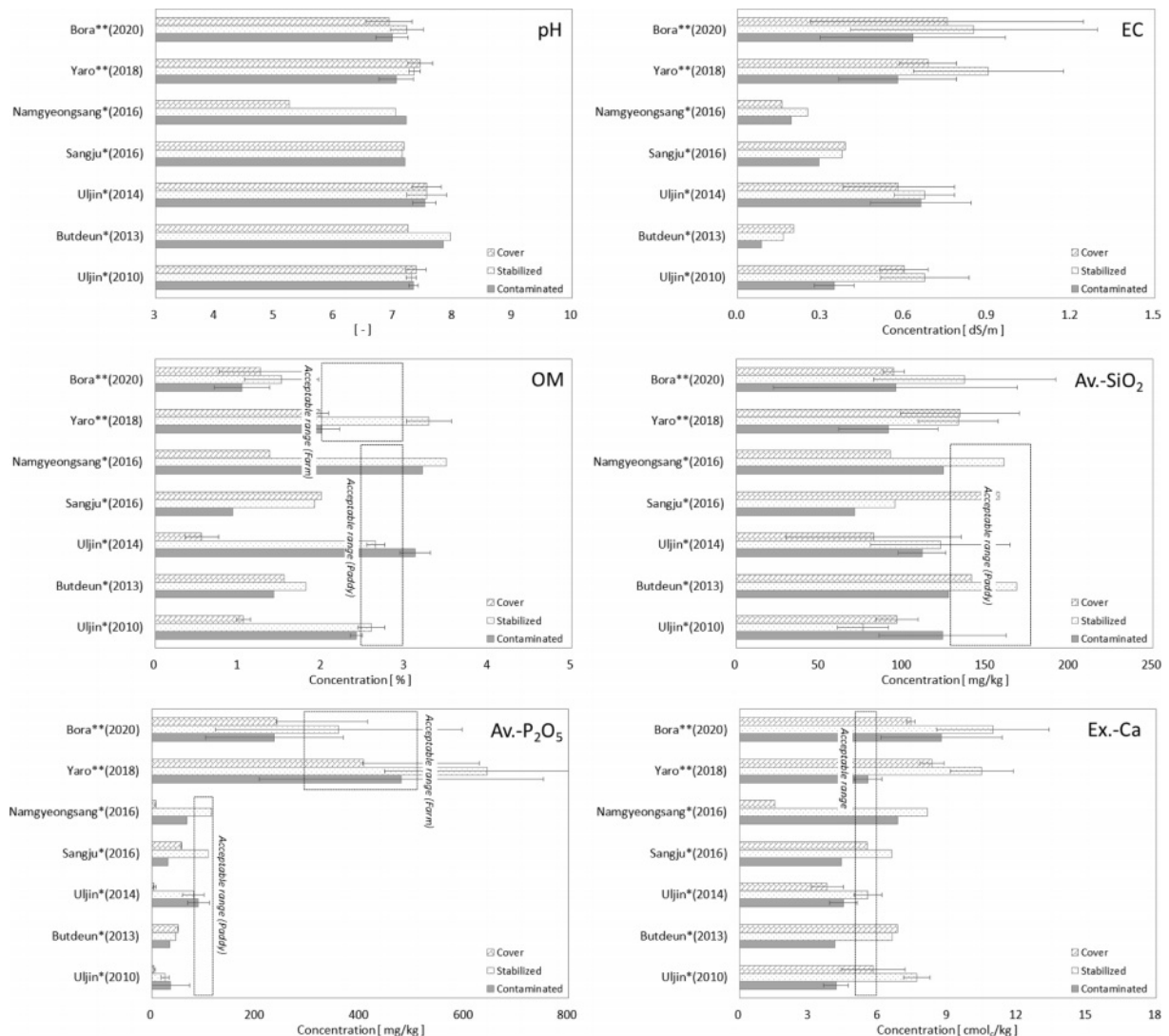


Fig. 3. The chemical properties of the soils in each layer in agricultural land (The number in parentheses is the completion year of mine reclamation) (* a rice paddy; ** a farm).

규산은 벼의 자세를 개선하여 광합성효율을 높임으로써 수량과 품질향상에 기여하는 것으로 알려졌다(Chae, 2012). 농경지 유효규산의 적정범위는 논에 대해서만 130 mg/kg ~ 180 mg/kg이다(Yang et al., 2008). 따라서 농경지 이용형태가 논으로 확인되는 5개 사업지, 4개 광산(남경상, 상주, 울진, 붓든)을 보면 상주와 남경상과 울진광산 사업지의 복토층 농도는 적정수준에 부족한 것으로 확인되었다. 특히 남경상광산과 울진광산(2014)은 앞선 유기물 함량과 마찬가지로 사업추진 이후 경작층 내 농도가 오히려 감소하였는데 그 감소율은 각각 43%, 33%이었다.

유효인산의 적정범위는 논·밭 각각 80 mg/kg ~ 120 mg/kg, 300 mg/kg ~ 500 mg/kg으로 다른데, 밭에서 상대적으로 높은 함량이 요구된다(Yang et al., 2008). 사업대상지

복토층 토양의 유효인산은 밭으로 사용되고 있는 야로광산에서만 평균 406.21 mg/kg의 적정수준을 보였고, 이외 모두 부족한 것으로 나타났다. 특히, 적정범위 만족여부에 상관없이 붓든광산을 제외하면 모두 안정화층의 농도 대비 33% ~ 93%의 감소율을 보였다. 5개 사업지(보라, 야로, 남경상, 상주, 붓든)의 안정화층의 유효인산 농도는 원지반 오염토층의 농도보다도 높은데, 이는 과거 안정화층이 개량·복원사업 이전에 경작지로 활용되어 인산질 비료의 투여가 있었음을 의미한다. 특히, 안정화층의 유효인산이 알칼리 안정화제로부터 유래한 칼슘과 결합·불용화되어 농도가 낮아졌을 가능성이 있음(Brady and Weil, 2014)을 고려하더라도 현재의 경작층 농도에 비해서는 높은 수준을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐광산지역 토양개량·복원사업이 완료된 9개 광산(10개 사업대상지)를 대상으로 토양 무기원소의 안정화효과 검증을 위한 HCl 분석법의 적용성과 농경지 토양 화학특성을 검토하였다. 이를 통해 향후 관련 사업에 적용되는 토양 모니터링이 토양질 관리가 포함되는 방안으로 개선할 수 있도록 다음과 같은 결론을 얻었다.

토양 무기원소의 안정화 효율검증을 위한 HCl 용출법(구·공정시험기준)의 적용성을 검토한 결과 안정화 처리여부에 상관없이 유사한 오염물질 추출율을 보여 그 적용성이 낮은 것으로 확인되었다. 다만, 본 용출법을 이용한 안정화 연구사례가 다수 있는 만큼 적용성 확보를 위한 추가적인 검토가 필요할 것이다.

복토층의 토양 화학특성 분석결과 유기물 함량, 유효규산, 유효인산 등은 관련 사업 이전에 경작층으로 사용된 안정화층에 비해 낮은 것으로 나타났다. 아울러, 대부분 적정 허용기준을 만족하지 못한 것으로 나타나, 관련 사업 시행 시 경작층 토양의 토양질도 고려해야 할 필요가 있는 것으로 확인되었다. 알칼리 안정화제 투여로 인한 안정화층 내 허용기준 이상의 칼슘 존재는 오염물질의 이동성 저감과 토양질 확보 사이에 타협점이 필요함을 확인한 것이다.

향후 폐광산 광해방지사업의 일환으로 추진되는 농경지 토양개량·복원사업은 오염물질의 안정화제 효율 검증을 위한 적정 시험법의 발굴, 오염물질의 이동성 저감 이외에 농경지 토양의 생산성을 고려한 토양질 관리가 포함된 방향으로 진행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국광해광업공단 연구사업비로 수행되었음.

References

- Brady, N.C. and Weil, R.R., 2014, Elements of the Nature and Properties of Soils, Pearson Education Limited, 358 p., 490 p.
- Chae, J.C., 2013, Science of Rice Production, Hangmunsa, Seoul, Korea, 138 p.
- Chae, J.C., Park, S.J., Kang, B.H., and Kim, S.H., 2013, Principles of Crop Cultivation, Hangmunsa, Seoul, Korea, 146-147 p.
- Choi, Y.L., Kim, D.S., Kang, T.J., Yang, J.K., and Chang, Y.Y., 2021, Immobilization of As and Pb in contaminated soil using bead type amendment prepared by iron nanoparticles impregnated biochar, *J. Environ. Impact Assess.*, **30**(4), 247-257.
- Davidson, C.M., 2014, 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, 106-108 p.
- Gonzaga, M.I.S., Ma, L.Q., Pacheco, E.P., and Santos, W.M., 2012, Predicting arsenic bioavailability to hyperaccumulator *Pteris Vittata* in arsenic-contaminated soils, *Int. J. Phytoremediat.*, **14**, 939-949.
- Hong, Y.K., Kim, J.W., Lee, C.R., and Kim, S.C., 2022, Soil quality assessment in agricultural soil based on soil physico-chemical and biological properties, *Proceedings of the 2022 Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, Korean Society of Soil Science and Fertilizer, Jeju-do, Korea, PA-36
- Heo, S.J., Lim, S.J., Seo, Y.H., and Hong, S.Y., 2021, Change in Soil Chemical Properties of Agricultural Land in Gangwon Province, *Proceedings of the 2015 Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, Korean Society of Soil Science and Fertilizer, Jeollabuk-do, PB-46
- Islam, M.N., Taki, G., Nguyn, X.P., Jo, Y.T., Kim, J., and Park, J.H., 2017, Heavy metal stabilization in contaminated soil by treatment with calcined cockle shell, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **24**, 7177-7183.
- Kang, S.S., Roh, A.S., Choi, S.C., Kim, Y.S., Kim, H.J., Choi, M.T., Ahn, B.K., Kim, H.W., Kim, H.K., Park, J.H., Lee, Y.H., Yang, S.H., Ryu, J.S., Jang, Y.S., Kim, M.S., Sonn, Y.K., Lee, C.H., Ha, S.G., Lee, D.B. and Kim, Y.H., 2012, Status and changes in chemical properties of paddy soil in Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **45**(6), 968-972.
- Kim, J.H., Chung, D.Y., Oh, S.J., Kim, R.Y., Yang, J.E., Park, G.I., Lee, J.S., and Kim, S.C., 2012, Determining soil quality of heavy metal contaminated agricultural field in Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **45**(6), 1237-1241.
- Kim, J.Y., Lee, J.H., Kunhikrishnan, A., Kang, D.W., Kim, M.J., Yoo, J.H., Kim, D.H., Lee, Y.J., and Kim, W.I., 2012, Transfer factor of heavy metals from agricultural soil to agricultural products, *Korean J. Environ. Agric.*, **31**(4), 300-307.
- Kim, M.S., Lee, E.J., Lee, T.G., Chae, M.J., and Jung, H.I., 2020, Changes of soil chemical quality index by farm-land use type between 2007 and 2019. *Proceedings of the 2020 Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, Korean Society of Soil Science and Fertilizer, Jeollabuk-do, Korea, PB-31.
- Kim, S.C., Hong, Y.K., Kim, E.Y., Kim, D.B., Shin, S.K., Lim, K.J., Kim, R.Y., and Yang, J.E., 2015, Establishing soil management system using soil quality assessment: case studies, *Proceedings of the 2015 Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, Korean Society of Soil Science and Fertilizer, Seoul,

Korea, p.72.

Kim, M.S., Park, M.J., Yang, J.H., and Lee, S.H., 2019, Human health risk assessment for toxic trace elements in the Yaro mine and reclamation options, *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, **16**(24), 5077.

Koh, I.H., Kim, E.Y., Ji, W.H., Yoon, D.G., and Chang, Y.Y., 2015a, The fate of As and heavy metals in the flooded paddy soil stabilized by limestone and steelmaking slag, *J. Soil Groundw. Environ.*, **20**(1), 7-18.

Koh, I.H., Kim, E.Y., Kwon, Y.S., Ji, W.H., Joo, W.H., Kim, J.H., Shin, B.S., and Chang, Y.Y., 2015b, Partitioning of heavy metals between rice plant and limestone-stabilized paddy soil contaminated with heavy metals, *J. Soil Groundw. Environ.*, **20**(4), 90-103.

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

Koh, I.H., Kwon, Y.S., Ko, J.I., and Ji, W.H., 2023, Transfer of arsenic from soils to rice grains through reducing the thickness of soil covering in soil reclamation in an abandoned coal mine area, *J. Environ. Impact Assess.*, **23**(3), 157-165.

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

Lee, C.R., Oh, Y.R., Hwang, H.Y. and Lee, S.M., 2021. Case study on organic soil quality assessment indicator, *Proceedings of the 2022 Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, Korean Society of Soil Science and Fertilizer, Jeju-do, Korea, PA-38

Lee, S.H., Ji, W.H., Lee, W.S., Koo, N.I., Koh, I.H., Kim, M.S., and Park, J.S., 2014, Influence of amendments and aided phyto-stabilization on metal availability and mobility in Pb/Zn mine tailings, *J. Environ. Manage.*, **139**, 15-21.

Mehlich, A., 1984, Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant, *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.*, **15**(12), 1409-1416.

Mukhopadhyay, S., Maiti, S.K., and Masto, R.E., 2014, Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study, *Ecol. Eng.*, **71**, 10-20.

NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology), 2010, Chemical methods for soil analysis.

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

Ok, Y.S., Lim, J.E., and Moon, D.H., 2011, Stabilization of Pb and Cd contaminated soils and soil quality improvements using waste oyster shells, *Environ. Geochem. Health*, **33**, 83-91.

Park, S.W., Yang, J.S., Ryu, S.W., Kim, D.Y., Shin, J.D., Kim, W.I., Choi, J.H., Kim, S.L., and Andrew, F.S., 2009, Uptake and translocation of heavy metals to rice plant on paddy soils in "top-rice" cultivation areas, *Korean J. Environ. Agric.*, **28**(2), 131-138.

RDA (Rural Development Administration), 2021, Monitoring Project on Agri-environmental Quality in Korea, RDA Report PJ012505, Jeollabuk-do, Korea.

Yang, J.E., Jung, J.B., Kim, J.E., and Lee, G.S., 2008, Ag-Environmental Science, CIR, Seoul, Korea, 72-74 p.

Yi, Y.M. and Sung, K.J., 2023, Soil health assessment of soil washing and landfarming treated soils, *J. Environ. Impact Assess.*, **32**(2), 112-122.

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, *Environ. Manage.*, **91**(11), 2322-2328.

Yoon, J.H., Jung, B.G., Jun, H.J., and Kwak, H.K., 2004, Soil quality assessment method of paddy and upland, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **37**(6), 357-364.

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, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, **26**(7), 59-70.