

Research Paper

폐석탄광산 농경지(논) 토양개량복원 시 복토두께 조정에 따른 비소의 벼 전이효과 현장실증

고일하* · 권요셉*,** · 고주인*** · 지원현****

환경기술정책연구원(NeLab)*, 세종대학교 에너지자원공학과**,
한국광해광업공단 기술연구원***, 호서대학교 창의교양학부****

Transfer of Arsenic from Soils to Rice Grains through Reducing the Thickness of Soil Covering in Soil Reclamation in an Abandoned Coal Mine Area

Il-Ha Koh* · Yo Seb Kwon**,** · Ju In Ko*** · Won Hyun Ji****

National Environment Lab.(NeLab)*

Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University**

Technology Research & Development Institute, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation***

Department of General Education for Human Creativity, Hoseo University****

요약: 폐석탄광산 주변 농경지의 주요 토양오염물질은 비소이며, 폐금속광산과는 달리 그 오염수준이 관련 환경기준을 경미하게 초과하는 특성을 가진다. 이에 선행연구에서는 폐석탄광산 농경지의 토양개량·복원사업(안정화 처리 및 복토층 조성) 시 복토층 두께를 기존 40 cm에서 20 cm 두께로 낮추는 방안의 적용성을 실내 포트실험으로 확인한 바 있다. 금번 후속연구에서는 본 방안을 실제 농경지에서 벼 재배를 통해 실증하였다. 4개월이 넘는 벼 재배기간 중 쌀알로 전이된 비소의 농도는 20 cm 두께의 복토 시 44% 이상의 전이감소율을 보였다. 특히 오염된 원지반을 안정화 처리한 후 복토한 경우엔 이의 감소율이 56%까지 증가하였다. 따라서 본 실증연구를 통해 복토층 두께 20 cm의 적용성을 확인하였고, 이는 곧 복토재 사용량 감소로 인한 사업비 절감도 가능성을 시사한다.

주요어: 폐석탄광산, 토양복원·개량, 비소, 복토, 벼

Abstract: In Korea, a major contaminant of farmland soils in the vicinity of abandoned mines is arsenic, for which the general soil reclamation method is contaminated soil stabilization and cover the stabilized soil with clean soil at a thickness of 40 cm. In a previous pot experiment study we confirmed the feasibility of a lower thickness (20 cm) of covering soil for such reclamation in abandoned coal mines, where arsenic contamination levels are generally lower than in metal mines.

First Author: Il-Ha Koh, Tel: +82-2-928-4327, E-mail: ilha@nelab.re.kr, ORCID: 0000-0002-4349-7542

Corresponding Author: Won Hyun Ji, Tel: +82-41-540-9664, E-mail: greenidea@hoseo.edu, ORCID: 0000-0001-5344-5941

Co-Authors: Yo Seb Kwon, Tel: +82-2-929-4328, E-mail: Kwonys@nelab.re.kr, ORCID: 0009-0001-0794-7243

Ju In Ko, Tel: +82-33-736-5827, E-mail: Kojuin@komir.or.kr, ORCID: 0000-0002-5912-6607

Received: 31 January, 2023. Revised: 30 April, 2023. Accepted: 10 May, 2023.

In this subsequent study a field experiment including rice plant cultivation in field test plots was conducted. For over 4 months, the transfer of arsenic from the contaminated soil to the unpolished rice grains was reduced by 44% when a clean soil covering with a thickness of 20 cm was applied. The maximum decrease (56%) was shown when the stabilization process was performed before the covering. These results reveal a lower thickness of clean soil covering has a high feasibility and it can increase cost-efficiency in the reclamation of an abandoned coal mine.

Keywords : abandoned coal mine, reclamation, arsenic, soil covering, rice

I. 서론

폐금속광산 내 갱구로부터 유출되는 갱내수나 목적 금속을 추출·회수하고 남은 광폐석, 광미 등의 광물찌꺼기는 산성도가 높고 비소나 중금속과 같은 무기 오염물질의 함량이 높다(Wuana and Okieimen 2014; Karaca et al. 2018). 따라서 갱내수의 하천 유입에 따른 수계오염, 광물찌꺼기장 붕괴나 유실에 따른 주변 지역 토양오염 등 폐금속광산에서 나타나는 오염형태는 비교적 다양하다. 아울러 광산지역에 분포하는 농경지에서는 이러한 광물찌꺼기의 유입이나 갱내수의 농업용수 활용에 따라서 토양과 함께 농작물까지 오염이 확대될 가능성이 있다(Jung and Jung 2006).

국내에서는 폐금속광산지역 내 물리적·화학적 위해 발생 시 오염수질 개선사업, 광물찌꺼기 유실방지사업, 산림복구사업, 농경지 토양개량·복원사업 등 오염원의 종류와 피해 대상을 구분하여 복구사업(광해방지사업)을 추진하고 있다. 이중 토양개량·복원사업은 주로 오염된 농경지 토양을 대상으로 하는 것으로 지속적인 작물재배, 생산활동이 가능한 토양으로의 복원이 주요 목적이다(KOMIR 2022). 본 사업은 오염토양을 안정화제와 혼합하여 안정화층을 조성한다. 상부에 40 cm 두께의 토사층(비오염 복토층)을 조성하는 것이다(Kim et al. 2019). 이는 곧 안정화제 혼합을 통해 무기 오염물질의 지중 이동성을 낮추고, 양질의 토사층을 경작토로 활용하여 오염물질의 식물체(농작물) 전이를 저감시키는 것이다. 다만, 복토층 조성에 있어서 농작물 재배에 적합한 양질의 토양수급이 어려워 사업비 증가로 이어지기도 한다

(Koh et al. 2018; Makino 2014).

폐금속광산과는 달리 폐석탄광산의 경우엔 오염원이 다르게 나타난다. 오염 관측빈도가 높은 항목이 비소(As)라는 공통점이 있지만, 폐석탄광산의 오염원은 무기원소가 고농도로 집적된 광물찌꺼기가 아닌 경석이다. 또 다른 오염원이라 할 수 있는 갱내수 역시 중금속 함량이 낮아 금속광에 비해 위해성 역시 상대적으로 낮게 나타난다(Jung et al. 2008; Koh et al. 2021a). 따라서 주변 농경지의 토양오염이 폐금속광산에 비해 낮은 특성을 가진다. Kwon et al.(2021)은 2014년에서 2018년까지 환경부의 폐석탄광산 토양오염실태 정밀조사 내용을 검토하였고, 그 결과 비소 오염이 확인된 토양시료의 44%가 토양오염우려기준(25 kg)을 경미하게 초과하는 수치인 35 mg/kg 미만임을 확인하였다. 이 같은 결과는 폐석탄광산 지역의 농경지 개량·복원사업 계획 시 폐금속광산과 다른 방향의 검토가 가능함을 제시한다. 즉, 폐금속광산 대비 비교적 낮은 오염농도를 가지므로 그만큼 오염물질의 농작물 전이도 낮을 것이다. 이는 오염토양 안정화 처리 후 조성하는 비오염 복토층의 두께조정에 대한 검토를 해 볼 필요가 있음을 의미한다. 선행연구(Koh et al. 2021a)에서는 이러한 복토층 두께의 감소가능성 확인을 위해 기존 대비 50% 수준인 20 cm 복토층 조성방안을 벼를 재배하는 실내 포트실험을 통해 오염물질의 전이수준을 검토하였다. 그 결과 전이감소율은 기존 공정(40 cm 복토층 조성) 대비 60% ~ 80%에 근접해 충분한 현장 적용성이 있음을 확인하였다.

이에 본 연구에서는 선행연구의 후속으로 실제 폐석탄광산 농경지에서 20 cm 두께의 복토층 조성으

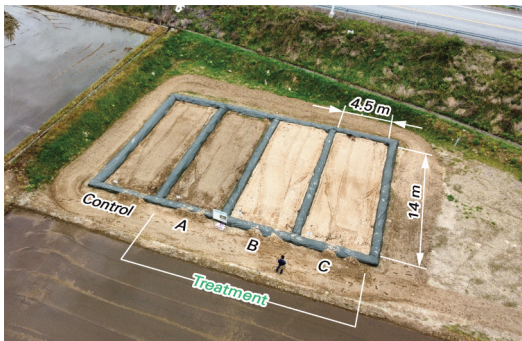
로 토양개량·복원의 효과를 얻을 수 있는지 실증하고자 하였다. 이의 효과가 확인된다면 향후 관련 사업 추진 시 양질의 복토재 확보의 어려움을 일정 부분 해소하고, 동시에 복토재 사용량 감소를 통한 사업비 절감도 가능할 것으로 판단된다. 아울러 본 연구결과를 토양개량·복원사업의 기획 및 설계단계에서 참조자료 활용이 가능할 것이다.

II. 연구방법

1. 시험구 조성 및 운영

1) 시험구 설치

시험구가 조성된 곳은 강원 영월군 영월읍 지역의 폐석탄광산 인근 농경지(논)이었다. 해당 지역은 과거 농경지에서 비소의 오염의 확인되어 폐광지역 광해방지사업을 앞두고 있는 곳이었다. 시험구는 길이 14 m, 폭 4.5 m의 규격으로 총 4기를 인접하여 조성하였다(Figure 1). 4기 중 대조구(control)를 제외한 나머지 3기에 인위적 처리를 하였다. 즉, 기존의 광해방지사업에서 주로 적용하고 있는 농경지 토양개량·복원 공종이 오염토양의 안정화 처리 후 농작물 경작을 위한 40 cm 두께의 비오염토 복토임을 고려해, ①별도의 비오염토 복토 없이 원지반에 안정화 처리를 한 것(처리구 A), ②원지반 안정화 처리 후 비오염토로 복토를 한 것(처리구 B), ③원지반 안정화 처리 없이 비오염토로 복토를 한 것(처리구 C)으로 구성하



(A) Stabilization of contaminated soil with limestone; (B) Stabilization of contaminated soil with limestone and covering with clean soil; (C) Covering with clean soil

Figure 1. Photograph of the field test plots

였다. 각 처리구는 독을 쌓아 구분하되, 인접 시험구에 영향을 미치지 않도록 독을 방수포로 덮어서 차수 처리하였다.

복토층의 두께는 선행연구(Koh et al., 2021a)에서 검토한 20 cm이었다. 아울러 비소의 오염이 확인된 원지반층 토양(Table 1 참조)의 안정화는 지표로부터 20 cm 이내 심도구간의 오염토양을 대상으로 하였다. 안정화제는 폐광산지역 오염농경지 토양개량·복원사업에 주로 적용되고 있는 석회석(limestone, CaCO_3)이었으며, 그 적용비율은 안정화 대상 심도구간 오염토양 무게의 5% 수준이었다. 사용된 석회석은 입자크기 1.5 cm 미만으로, 원지반 비소 오염토양과 균질 혼합하여 비소의 이동성을 낮추기 위한 안정화층을 조성하였다. 시험구 조성 이후 관행방식으로 시비처방을 하였고, 주변 하천수로 각 시험구를 담수시켰다.

본 실증연구에서는 기존 광해방지사업 현장에서 적용하는 40 cm 두께 복토층 조건의 시험구를 별도로 설치하지는 않았다. 이는 실험실 규모의 벼 재배를 통해 검토한 선행연구(Koh et al., 2021a)에서 40 cm 복토층에서 성장한 벼의 경우 하부층(원지반층 또는 안정화층)의 영향을 직접적으로 받지 않았기 때문이었다. 즉, 하부층에서 발생하는 오염물질의 거동이 40 cm 두께의 복토층에 미치는 영향이 매우 제한적일 것으로 판단되어 별도의 검토가 불필요할 것으로 판단했다.

2) 농작물(벼) 재배

5월 중순 육묘이식 방식으로 벼 모종을 식재하였으며, 실험활동 용이성을 위해 각 시험구 내 3열로 식재하였다. 3열 식재를 제외한 모든 것이 주변 농경지(논)와 동일하게 관리되었다. 주변 농경지와 마찬가지로 농수로를 통해 유입되는 하천수를 공급하여 담수조건을 유지하였으며, 현장에서 운영되는 시험구 특성상 우기시에는 강우가 시험구 내부로 유입되기도 하였다.

벼 재배기간 중 자연적으로 발생한 식생(잡초)은 벼 성장에 영향을 미치는 경우에 대해서만 제거하였고, 이외 자연성장이 가능하도록 하였다. 즉, 시험구 운영 중의 인위적 간섭은 최대한 배제하였다. 실제 현

장조건에 맞춰 9월말 벼 수확을 위한 사전 준비단계로 9월초에 담수를 중단하였다.

2. 시료의 채취 및 분석

현장 시험구 운영기간 중의 분석대상 검체는 시험구 원지반 토양과 복토재, 벼(현미) 등이다. 대상 검체는 시험구 조성 시의 토양과 시험구 운영종료 시점의 농작물로 구분될 수 있다.

우선 시험구 조성 시 원지반 논토양과 복토에 사용된 토양에 대해 토양오염공정시험기준(NIER 2018)에 의한 비소 및 중금속 4개 항목(Cd, Cu, Pb, Zn)의 농도를 분석하였다. 본 과정을 통해 시험구 설치대상 농경지의 적정성 즉, 폐석탄광산 인근 농경지의 오염특성을 가지는 대표성 확보여부를 확인하고자 하였다.

토양으로부터 농작물로 전이되는 오염물질의 식물체의 농도는 뒤에 언급하겠지만 오염항목으로 확인된 비소의 가식부(쌀알) 내 함량으로 확인하였다. 시험구의 규모가 비교적 컸기 때문에 시험구 내 모든 벼를 분석대상으로 선정하기엔 어려움이 있었다. 따라서 우선 각 시험구 내 3개열을 대상으로 앞으로부터 5, 10, 15번째의 벼를 채취하였다. 이후 지상부의 무게를 측정된 다음 쌀알을 채취해 분석대상 쌀알시료의 표본수를 각 처리조건별 9개로 하였다. 벼 지상부는 지표로부터 3 cm 이내 구간의 줄기를 잘라서 무게 측정용 대상으로 하였다. 쌀알의 분석은 식품공전(MFDS 2020)의 전처리 방식을 준용하였다. 식품공전에서는 쌀알 분석 시 쌀겨를 제거한 백미를 분석하도록 하고 있다. 그러나 본 연구에서는 쌀겨를 포함하는 현미를 분석대상으로 하였다. 이는 쌀겨에 토양으로부터 전

이된 무기물질의 함량이 높은 만큼 토양오염물질의 전이평가 관점에서 현미의 분석이 타당하다고 판단했기 때문이었다(Koh et al, 2021a; Meharg and Zhao 2012; Sun et al, 2008).

III. 결과 및 고찰

1. 실험대상 토양 오염도

Table 1에 현장 실증시험 대상 논토양과 복토재 토양의 비소 및 중금속 함량 분석결과를 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 대상 농경지 토양의 양이온 중금속 4개 항목(Cd, Cu, Pb, Zn) 농도는 모두 기준치 이내로 확인되었다. 비소의 함량은 국내 토양환경보전법의 토양오염우려기준(25 mg/kg)을 초과하였으나, 기준치를 약간 상회하는 29 mg/kg으로 농도로 오염수준은 크지 않았다. 이 같은 결과는 폐광산에서 비소의 오염빈도가 높다는 것과 폐석탄광 오염토양의 비소농도가 대부분 35 mg/kg 미만으로 낮게 나타난다는 Koh et al.(2021a)과 Kwon et al.(2021)의 연구결과를 뒷받침한다.

외부에서 반입된 복토재 토양의 오염도는 검토대상 전 항목에서 토양오염우려기준 미만의 당연한 결과를 보였다. 특히 대상 농경지 토양의 오염물질인 비소는 5 mg/kg으로 우려기준의 20% 수준으로 나타나 복토층의 경작지 활용에 무리가 없는 것으로 나타났다.

2. 벼 성장현황 및 쌀알 비소전이

1) 벼 성장현황

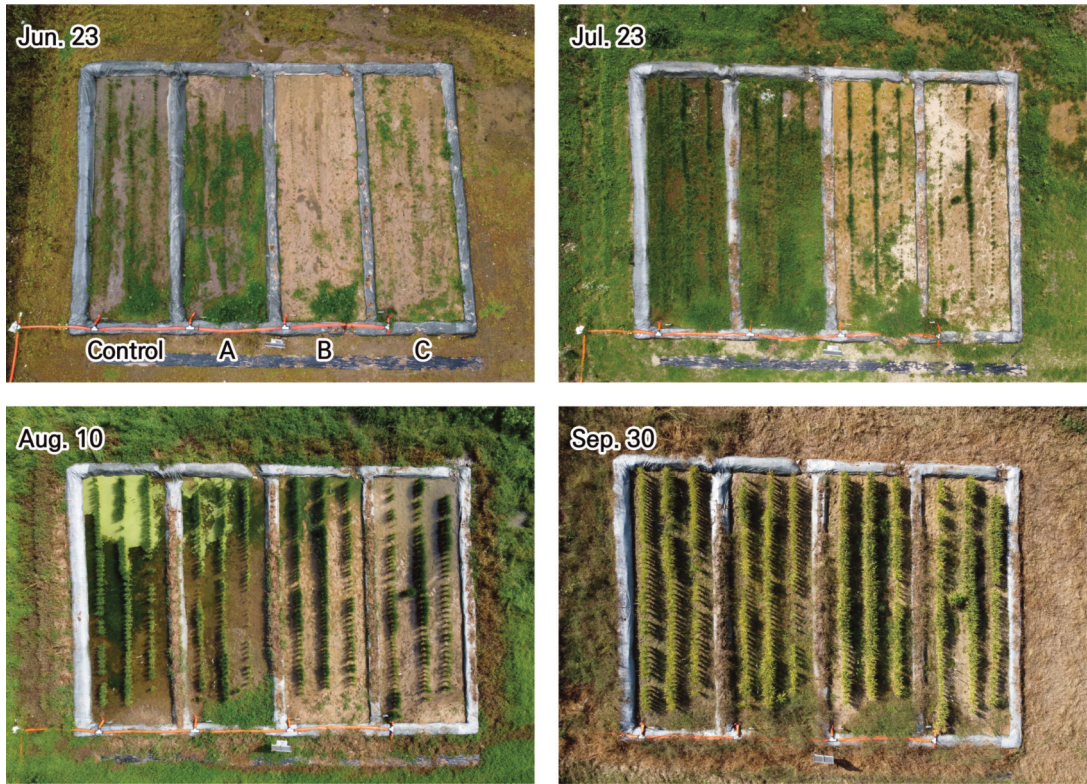
현장 시험구 운영기간 중 사진으로 기록한 벼의 성

Table 1. The concentration of inorganic contaminants of the studied soils

		Conc. (mg/kg)				
		As	Cd	Cu	Pb	Zn
Standard ⁽¹⁾	Worrisome	25	4	150	200	300
	Countermeasure	75	12	450	600	900
Studied soil	Cover soil	4.82	N.D. ⁽²⁾	2.00	10.30	49.40
	Farmland soil	29.19	N.D.	48.70	28.10	97.60

(1) Criteria for agricultural soil from soil environment conservation act of Korea

(2) N.D. : Not Detected

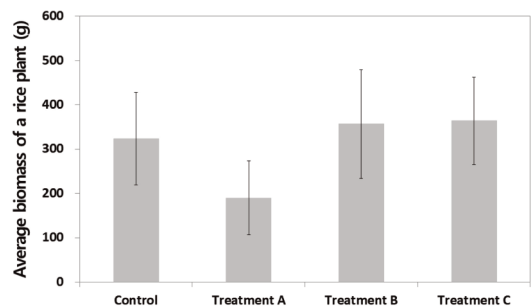


(A) Stabilization of contaminated soil with limestone; (B) Stabilization of contaminated soil with limestone and covering with clean soil; (C) Covering with clean soil

Figure 2. Photograph of rice plants growth in the field test plots

장현황을 Figure 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 복토재의 영향으로 처리구 B와 처리구 C는 대조구와 처리구 A에 비해 지반 색상에 다소 차이를 보인다. 아울러 원지반 토양의 노출이 있는 대조구와 처리구 A는 벼 이외 잡초의 성장도 두드러지게 확인되었다. 이는 오랜 기간 농경지로 활용된 만큼 기존 농경지 내 투여된 비료효과와 함께 앞서 언급한 비와 같이 시험구에 대한 인위적 간섭을 최대한 배제했기 때문에 과거 주변으로부터 유입된 식생(잡초 등)의 발아율이 높았기 때문으로 판단된다.

기존의 농경지 토양과 외부에서 반입된 복토재의 이질적인 토양특성에도 불구하고 육안상 확인되는 벼 성장의 차이는 없는 것으로 나타났다. 외부에서 반입된 토양의 특성상 농경지 토양에 적합한 이화학적 조건에 미달되었을 수 있으나, 본 시험구 운영 중의 시비처방으로 적정수준의 벼 성장이 가능했던 것으로



Treatment A: Stabilization of contaminated soil with limestone; Treatment B: Stabilization of contaminated soil with limestone and covering with clean soil; Treatment C: Covering with clean soil

Figure 3. Average biomass of aerial part of a rice plant produced from the test plots

판단된다.

Figure 3은 각 시험구 내 3개 열 중 앞으로부터 5, 10, 15번째의 벼를 채취하여 측정된 지상부의 평균무

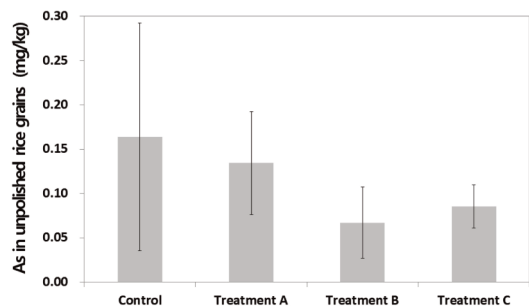
계(n=9)를 나타낸 것이다. 대조구와 처리구 A (안정화 처리), 처리구 B (안정화 처리 후 복토), 처리구 C (복토)에서 채취한 벼 지상부의 평균 무게는 각각 323 g, 191 g, 357 g, 364 g으로 측정되었다. 벼 뿌리의 대부분이 지표로부터 23 cm 이내에 위치하므로 (Chae 2012; Kirk et al. 2014), 벼의 생체량은 처리 조건에 따라 시험구 내 20 cm 두께의 안정화층 토양과 20 cm 두께의 복토재 토양의 영향을 직접적으로 받았다고 할 수 있다. 따라서 상대적으로 낮은 측정치를 보인 처리구 A의 벼는 안정화제 처리를 위해 투여한 석회석이 벼의 성장에 어느 정도 영향을 미친 결과로 판단된다. 석회석은 알칼리 물질로 토양의 pH를 상승시킨다. 시험구 조성 직후 측정된 각 경작층 토양의 pH는 대조구 5.6, 처리구 A 6.5, 처리구 B 6.0, 처리구 C 6.0으로, 알칼리 안정화제(석회석)의 영향을 직접적으로 받는 처리구 A의 안정화층 토양에서 가장 높게 나타났다. 다만, 벼 재배를 위한 논 토양의 적정 pH가 6.0~6.5이므로(Yang et al. 2008), 안정화 처리에 따른 토양 pH 증가가 벼의 지상부 생체량에 영향을 미쳤다고는 할 수 없다.

따라서 안정화 처리조건의 토양에서 재배한 벼의 지상부 무게 감소는 토양 pH 증가에 따른 영향보다는 토양 내 유효인산(available P_2O_5) 감소가 주요 원인인 것으로 판단된다. 보다 근본적으로는 Ca-P 침전에 따른 유효도 감소가 벼 생체량 증가에 영향을 미쳤을 것이다. 인(P)은 탄소(C), 질소(N) 등과 함께 식물체 성장에 필수적인 다량원소 중 하나이다 (Jordanova 2017; Gwak and Yoon 2011). 식물체는 인산의 형태로 인을 흡수하는데, 이러한 인산은 토양 내 칼슘(Ca)과 반응하여 불용화 된다(Brady and Weil 2014). 탄산칼슘($CaCO_3$)이 철산화물과 함께 인의 흡착에 영향을 미치는 주요인자로 알려진 만큼 탄산칼슘의 형태로 주입된 석회석의 칼슘이온이 경작층 내 유효인산의 벼 흡수를 저해해 다른 시험구에 비해 생체량이 상대적으로 낮았던 것으로 판단된다(Pierzynski et al. 1994). Koh et al.(2021b)와 Koh et al.(2018)의 연구에서도 바이오차, 광산배수 슬러지 등 칼슘을 함유한 물질을 안정화제로 사용했을 때 무기원소 안정화제에 의한 토양 내 인산의 유

해도 저감효과를 확인한 바 있다.

2) 쌀알 비소 전이

각 시험구별 채취한 쌀알(현미) 시료 9개의 평균 비소 함량을 Figure 4에 나타내었다. 본 쌀알은 앞서 생체량을 측정했던 벼로부터 채취한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 쌀알의 비소 농도는 대조구에서 0.04 mg/kg ~ 0.42 mg/kg의 범위를 보였고, 나머지 처리조건에서는 모두 0.2 mg/kg 미만으로 나타났다. 국내 식품의약품안전처의 식품공전에서는 쌀알의 비소 함량을 현미를 도정한 백미를 대상으로 0.2 mg/kg으로 제한하고 있다(MFDS 2020). 따라서 현미와 백미는 물리적 특성이 다르므로 백미 기준의 식품공전 기준을 본 현미 분석결과와 비교하기엔 무리가 있다. 그러나 통상적으로 현미의 쌀겨에 무기질이 풍부함을 고려하면, 대조구 쌀알 중 일부 시료의 비소 농도는 관련 기준을 초과했을 개연성이 있는 것으로 판단된다. 각 처리조건별 쌀알(현미)로 전이된 비소의 농도수준은 대조구 (0.16 ± 0.13 g) > 처리구 A (0.13 ± 0.06 g) > 처리구 C (0.09 ± 0.02 g) > 처리구 B (0.07 ± 0.02 g)의 순서로 나타났다. 경작층을 비오염토로 조성하는 복토처리 조건에서 그 농도가 낮게 나타났고, 대조구와 비교했을 때 44% 이상 비소의 전이가 감소하였다. 이러한 결과는 토양오염물질로 주로 비소가 확인되며, 그 농도가 폐금속광산과 달리 토양오염우려기준을 경미하게 초과하는 특



Treatment A: Stabilization of contaminated soil with limestone; Treatment B: Stabilization of contaminated soil with limestone and covering with clean soil; Treatment C: Covering with clean soil

Figure 4. As concentrations of unpolished rice grains produced from the field test plots

성을 가지는 폐석탄광산 주변 농경지의 토양개량·복원사업 시 20 cm 두께의 복토층 조성이 타당함을 의미한다.

각 시험구 내 경작층 토양을 안정화 여부로 분류한다면 대조구·처리구 A, 처리구 B·처리구 C와 같이 2개 그룹으로 분류가 가능하다. 즉, 농경지 원지반 토양에 대한 안정화 처리유무, 복토층 하부의 안정화층 존재유무로 구분할 수 있다. 각 그룹 내 쌀알의 비소 농도는 공통점이 확인되는데, 안정화 처리와 연관된 경작층에서 그 농도가 상대적으로 낮게 나타났다. 복토층을 안정화처리 후 조성한 경우 쌀알의 비소 농도 감소율은 최대 56%로 나타나 안정화 처리를 하지 않은 경우에 비해 12% 포인트가 증가하였다. 따라서 안정화층을 조성한 후 복토를 하는 것이 전이감소 측면에서 가장 효과적이며, 복토층 조성이 불가능한 경우에 원지반 안정화 처리만을 검토할 필요가 있을 것이다. 본 실험결과 나타난 안정화제 혼합에 따른 비소의 전이감소 효과는 안정화제인 석회석으로부터 유래된 칼슘효과 즉, Ca-As 결합에 따른 공침이 그 원인일 것이다(Lee and Jeon 2010; Moon et al. 2004; Zhu et al. 2014). 아울러 토양 내 철산화물과 결합된 비소의 이동성이 철산화물의 거동에 영향을 높게 받으므로(Meharg and Zhao 2012; Nakamura and Katou 2013), 알칼리 안정화제 혼합에 의한 토양 pH 증가에 따른 철의 알칼리침전에 의해 철에 결합된 비소가 같이 침전되었을 가능성이 있다(Koh et al. 2015).

이상의 결과를 통해 폐광산지역 농경지 토양개량·복원사업에서 적용하고 있는 복토층 조성 시 대상 광산이 석탄광산인 경우 그 두께를 기존의 40 cm에서 20 cm로 줄여도 가능함을 확인하였다. 다만, 농경지(논) 이용에 있어서 논갈이 작업 시 부주의로 인해 복토층과 원지반층(안정화층) 토양이 물리적으로 혼합되어 복토층(경작층)에 오염물질(비소)이 유입되는 한계점도 있을 것으로 판단된다. 이 경우 원지반층 토양 내 오염물질 농도 자체가 토양오염우려기준을 경미하게 초과하는 수준이므로, 복토층 토양 내 농도는 상당히 낮을 것으로 예상되어 농작물 가식부로 전이되는 양은 무시할만한 수준일 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 폐광산 주변 농경지 토양개량·복원사업(광해방지사업) 시 적용하고 있는 오염토양 안정화 처리 및 복토 공정에 있어서 폐금속광산과 달리 토양오염의 수준이 낮은 폐석탄광산 지역의 특성을 고려해 현행 40 cm 두께로 적용하고 있는 복토층을 20 cm로 감소시키는 방안을 실제 농경지(논) 현장시험구 조성 및 비 재배를 통해 실증하였다. 검토조건은 복토 없이 안정화만 처리, 안정화 처리 후 복토층 조성, 안정화 없이 복토층 조성 등 대조구를 포함해 총 4개 조건이었다.

대상 농경지의 토양오염물질은 비소이었으며, 농도는 29 mg/kg으로 토양오염우려기준(25 mg/kg)을 경미하게 초과해 폐석탄광산 지역의 전형적인 오염특성을 가진 곳이었다. 4개월이 넘는 재배기간 중 육안상으로 확인된 비 성장 차이는 없었다. 다만, 수확 시점의 비 지상부 무게로 확인한 생체량은 복토없이 안정화 처리한 조건에서 가장 낮게 나타났는데, 석회석 처리에 따른 인산의 유효도 감소에 따른 영향으로 판단되었다. 비소의 현미 내 함량은 3개 처리조건 모두 대조구 대비 낮은 수치를 나타내었다. 전이감소 효과는 20 cm 두께의 복토처리 조건에서 높게 나타났으며, 이중 안정화 처리 후 복토를 한 경우 56% 이상의 가장 높은 감소효율을 보였다. 따라서 복토층을 조성하는 경우 안정화층을 조성한 후 복토를 하거나, 복토층 조성이 불가능한 경우 원지반 오염토양에 안정제를 혼합 처리를 하면 오염토양 내 존재하는 비소의 식물체로의 전이를 충분히 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 실험을 통해 폐석탄광산 지역의 오염 농경지에 대한 토양개량·복원사업 시 복토층 두께 20 cm의 적용성을 확인하였다. 이는 곧 폐석탄광산 지역 농경지 대상의 광해방지사업 계획 시 복토재 사용량 감소로 인한 사업비 절감도 가능함을 시사한다.

사사

본 연구는 한국광해광업공단으로부터 기술개발사업비를 지원받아 수행된 것임.

References

- Brady NC, Weil RR. 2014. Elements of the Nature and Properties of Soils, Pearson Education Limited; p. 490.
- Chae JC. 2012. Science of Rice Production. Hyangmunsa; p. 70. [Korean Literature]
- Gwak BH, Yoon KE. 2011. Plant Physiology. Hyangmunsa; pp. 82-85, 100. [Korean Literature]
- Jordanova N. 2017. Soil Magnetism: Applications in Pedology Environmental Science and Agriculture. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo: Academic Press; pp. 402-403.
- Jung MC, Jung MY. 2006. Evaluation and management method of environmental contamination from abandoned metal mines in Korea. J KSMER. 43(5): 383-394. [Korean Literature]
- Jung YK, Hong JH, Lee DJ, Kim JP, Kim DK, Joo SD. 2008. A study on mine drainage characteristics as abandoned coal mine in Gyeongsang province. Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference; 2008 Oct 10-11; Gwangju, Korea. [Korean Literature]
- Karaca O, Cameselle C, Reddy KR. 2018. Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. Rev Environ Sci Biotechnol. 17: 205-228.
- Kim MS, Park MJ, Yang JH, Lee SH. 2019. Human health risk assessment for toxic trace elements in the Yaro mine and reclamation options. Int J Environ Res Public Health 16: 5077.
- Kirk GJD, Greenway H, Atwell BJ, Ismail AM, Colmer TD. 2014. Adaptation of rice to flooded soils. In: Lutge U, Beyschlag W, Cushman J, editor. Progress in Botany 75. Berlin, Heidelberg: Springer; pp. 222-223.
- Koh IH, Kim EY, Ji WH, Yoon DG, Chang YY. 2015. 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. [Korean Literature]
- Koh IH, Kim JE, Kim GS, Chang YY, Yang JK, Moon DH, Choi YL, Ji WH. 2018. Transition of lead from agricultural paddy soil amended with lime to rice plant after bench-scale in-situ washing with FeCl₃. J Soil Groundwater Environ. 23(1): 74-84. [Korean Literature]
- Koh IH, Kwon YS, Jeong MH, Ko JI, Bak GI, Ji WH. 2021a. Transfer of arsenic from paddy soils to rice plant under different cover soil thickness in soil amendments in abandoned coal mine. Econ Environ Geol. 54(4): 483-494. [Korean Literature]
- Koh IH, Kwon YS, Jeong MH, Ji WH. 2021b. 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): 18-16. [Korean Literature]
- Kwon YS, Koh IH, Yang SC, In HJ. 2021. Characteristics of agricultural soil contamination in abandoned coal mine by regional river system. Proceedings of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment Conference; 2021 Apr 22-23; Gyeongju (Korea) [Korean Literature]
- KOMIR (Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp.). 2022. Guidebook: Mine Rehabilitation Technology in Korea – 2022

- Edition [Korean Literature]
- Lee MH, Jeon JH. 2010. Study for the stabilization of arsenic in the farmland soil by using steel making slag and limestone. *Econ Environ Geol.* 43(4): 305-314. [Korean Literature]
- Makino T. 2014. Heavy metal contamination in Japan. *Proceedings of International Forum on Soil and Groundwater*; 2014 Nov 1; Seoul (Korea).
- Meharg AA, Zhao FJ. 2012. *Arsenic & Rice*. Springer; pp. 25-27, 71-74.
- Moon DH, Dermatas D, Menounou N. 2004. Arsenic immobilization by calcium-arsenic precipitates in lime treated soils. *Sci Total Environ.* 330: 171-185.
- Nakamura K, Katou H. 2013. Arsenic and Cadmium Solubilization and Immobilization in Paddy Soils in Response to Alternate Submergence and Drainage. In: Selim HM, editor. *Competitive Sorption and Transport of Heavy Metals in Soils and Geological Media*. CRC Press; pp. 383-386.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2018. Korea standard methods for soil analysis. [Korean Literature]
- Pierzynski GM, Sims JT, Vance GF. 1994. *Soils and Environmental Quality*. Lewis Publishers; pp. 115-121.
- Sun GX, Williams PN, Carey AM, Zhu YG, Deacon C, Raab A, Feldmann J, Islam RM, Meharg AA. 2008. Inorganic arsenic in rice bran and its products are an order of magnitude higher than in bulk grain. *Environ Sci Technol.* 42(19): 7542-7546.
- Wuana RA, Okieimen FE. 2014. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks, and Best Available Strategies for Remediation. In: Asrari E. editor. *Heavy Metal Contamination of Water and Soil*. Apple Academic Press Inc.; p. 7.
- Yang JE, Jung JB, Kim JE, Lee GS. 2008. *Ag-Environmental Science*. CIR; p. 73. [Korean Literature]
- Zhu X, Qi X, Wang H, Shi Y, Liao T, Li Y, Liu C, Wang X. 2014. Characterization of high-arsenic sludge in copper metallurgy plant. In: Sarpenter JS, Bai C, Hwang JY, Ikhmayies S, Li B, Monteiro SN, Peng Z, Zhang M, editor. *Characterization of minerals, metals, and materials 2014*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.; pp. 173-184.