

광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 입도별 중금속 오염 특성 및 물세척법 저감 효율 평가

강차원^{1,2*} · 김태용^{1*} · 송재용³ · 정지윤⁴ · 양민준^{5,6*} · 이민희^{7*}

¹국립부경대학교 지구환경시스템과학부 지구환경과학전공 박사과정, ²(주)산하이앤씨 부장,

³(주)산하이앤씨 전무이사, ⁴(주)산하이앤씨 이사,

⁵국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경지질과학전공 부교수, ⁶(주)와이블 대표이사,

⁷국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경지질과학전공 교수

Particle-Size-Specific Contamination and Removal Efficiency of Heavy Metals in River Sediment Containing Mine Tailings

Cha Won Kang^{1,2*} · Taeyong Kim^{1*} · Jae Yong Song³ · Ji Yoon Jung⁴ · Minjune Yang^{5,6*} · Minhee Lee^{7*}

¹Ph.D. Student, Major of Earth and Environmental Sciences, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University

²General Manager, SanHa Engineering & Construction Co., Ltd.

³Managing Director, SanHa Engineering & Construction Co., Ltd.

⁴Director, SanHa Engineering & Construction Co., Ltd.

⁵Associate Professor, Major of Environmental Geosciences, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University

⁶President, Wible Co., Ltd.

⁷Professor, Major of Environmental Geosciences, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University

Abstract

The contamination of river sediment with heavy metals caused by the release of mine tailings has emerged as a critical environmental issue, significantly impacting water quality and ecosystems. Although previous studies have investigated the spatial distribution and seasonal variations of heavy metals in river sediment and their particle-size-specific characteristics, research into heavy metal concentrations across particle size fractions and the reduction of heavy metals after soil washing remains insufficient. This study aimed to evaluate the heavy metal contamination of different particle-size fractions of river sediment containing mine tailings and analyze the reduction in heavy metals after applying a soil washing method. River sediment above the Andong Dam in the Nakdong River basin was classified into four particle-size fractions (2.00~1.00, 1.00~0.25, 0.25~0.075, and <0.075 mm) to measure the heavy metal concentrations. The results indicate that smaller particles have higher concentrations of heavy metals, with As exceeding warning limit (As > 150 mg/kg) in all size fractions. After applying the soil washing method, the heavy metal concentrations decreased by an average of 35.6% across all particle size fractions, with the highest reduction efficiency (mean 46.29%) being observed in the 1.00~0.25 mm fraction. The results suggest that soil washing is an economical and effective remediation technique for reducing heavy metal contamination in river sediment containing mine tailings. The findings will contribute to the restoration of contaminated river sediment and the development of sustainable management strategies.

Keywords: mine tailings, river sediment, soil contamination, soil washing, particle size analysis

OPEN ACCESS

^{*}These authors equally contributed to this study as first author.

*Corresponding authors

Minjune Yang (E-mail: minjune@pknu.ac.kr)

Minhee Lee (E-mail: heelee@pknu.ac.kr)

Received: 16 December, 2024

Revised: 24 December, 2024

Accepted: 26 December, 2024

© 2024 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

광물찌꺼기의 유실로 인한 하천퇴적토의 중금속 오염은 수질과 생태계에 심각한 영향을 미치는 환경 문제로 대두되고 있다. 선행 연구에서는 하천퇴적토 내 중금속의 공간적 분포 및 계절적 변화, 입도별 중금속 농도 특성 등 다양한 연구가 수행되었으나, 입도별 중금속 농도 특성과 물세척법 적용 전·후의 저감 효율을 분석한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 낙동강 상류 안동댐 유역에서 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토를 대상으로 입도별 중금속 농도를 평가하고, 물세척법을 적용하여 중금속 오염 저감 효율을 분석하였다. 하천퇴적토를 4개의 입도 구간(2.00~1.00, 1.00~0.25, 0.25~0.075, <0.075 mm)으로 분류하여 중금속 농도를 분석한 결과, 입자가 미세해질수록 중금속 농도는 증가하는 경향을 보였으며, As는 모든 입도구간에서 토양오염대책기준 2지역 대책기준치(As > 150 mg/kg)를 초과하는 것으로 확인되었다. 물세척법을 적용한 결과, 모든 토양 입도 구간에서 중금속 농도가 평균 35.6% 감소하였으며, 특히, 1.00~0.25 mm의 입도 구간에서 가장 높은 저감 효율(평균 46.29%)을 보여주었다. 본 연구는 물세척법이 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 중금속 오염 저감에 있어 경제적이고 효율적인 정화 기술로 활용될 수 있음을 보여주었으며, 하천퇴적토의 효과적인 복원과 지속 가능한 관리 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 광물찌꺼기, 하천퇴적토, 토양 오염, 물세척법, 입도 분석

서론

우리나라의 광산 개발은 경제발전과 사회 기반 인프라 구축에 기여하였으나, 환경적 인식 부족으로 인한 광물찌꺼기(tailings) 문제는 심각한 환경 오염 요인으로 남아있다. 광물찌꺼기는 주로 금속 광석을 선광하는 과정에서 생성되는 부산물로, 중금속 성분이 포함되어 있어 적절한 관리가 이루어지지 않을 경우 환경에 악영향을 미친다(Jung et al., 2004; Lee et al., 2007). 과거에는 이러한 광물찌꺼기가 체계적으로 관리되지 못하여 방치되는 경우가 존재하였으며, 집중호우와 같은 자연현상으로 인해 방치된 광물찌꺼기는 하천으로 유입되거나 주변 농경지로 유실되어 심각한 환경오염을 초래할 수 있다(Choi et al., 2004; Park et al., 2018; Kim et al., 2022a). 중금속은 토양 내에서 장기적으로 잔류하며, 생물학적 축적을 통해 생태계 전반에 걸쳐 피해를 확대시킬 수 있다. 중금속 오염은 하천의 생태적 기능을 저하시킬 뿐 아니라, 인근 주민의 농업 생산성과 건강에도 위협을 가할 수 있다(Arunakumara and Zhang, 2008).

광물찌꺼기 혼합토는 자갈, 모래, 실트, 점토 등 다양한 입도분포를 가지며, 입자의 크기와 성질에 따라 중금속 농도가 상이하다. 특히, 미세입자는 높은 비표면적과 강한 흡착력을 가지기 때문에 중금속이 집중적으로 흡착되는 경향이 있어, 미세입자에 부착된 중금속이 쉽게 용출되거나 주변 환경으로 이동한다면 하천 및 지하수 오염을 유발할 수 있다(Qian et al., 1996; Kim et al., 2010). 반면, 상대적으로 큰 입자는 중금속 농도가 낮고, 물리적 세척을 통해 효과적으로 제거될 수 있는 특성을 지니고 있다. 이러한 입도별 특성은 광물찌꺼기로 인한 오염 양상과 정화 효율을 결정하는 중요한 요소로 작용한다.

광물찌꺼기 혼합토와 관련된 선행연구에서는 주로 하천 퇴적토 내 중금속 분포와 오염의 공간적·시간적 특성을 평가하고, 입도별 중금속 농도의 차이를 분석하였다. Kim et al.(2022b)은 광물찌꺼기가 낙동강 상류 하천퇴적물에서 중금속 농도 증가에 미치는 영향을 분석하였으며, Kim et al.(2023)은 건기와 우기로 구분하여 낙동강 상류 지역의 중금속 농도 변화를 평가하였으며, 강우 시 부유사로 중금속이 이동할 수 있기 확산 가능성을 시사하였다. Gwon and Kim(2018)은 국내 광산 인근 토양에서 입도별 중금속 분포와 정화효율의 상관성을 평가하였으며, 미세입자에서 상대적으로 낮은 정화효율을 보이는 경향을 확인하였다. 이 외에도 광물찌꺼기 오염과 관련된 다양한 논의가 존재하였으나, 광물찌꺼기의 입도별 중금속 농도와 물세척법 적용 전·후의 오염 저감 효율을 평가한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구는 광물찌꺼기 유입으로 인한 하천 퇴적토를 이용하여 하천 퇴적토의 입도분석, 중금속 농도 평가, 물세

척법 적용 전후의 오염 저감효율을 비교·분석하였다. 이를 통해 하천 퇴적토의 중금속 오염 특성을 평가하고, 물세척법을 활용한 경제적이고 실용적인 하천 오염 저감 기술의 가능성을 제시하고자 하였다.

연구지역 및 연구방법

연구지역

연구지역은 경북 봉화군 석포면 승부리 일원의 안동댐 상류 하천 지역으로, 과거 금속광산 운영으로 인해 발생한 광물찌꺼기가 하천으로 유입되고 퇴적된 곳이다(Fig. 1). 연구지역은 낙동강 상류 구간에 위치하고 있으며, 다수의 휴·폐광산 및 일부 가행 광산에서 발생한 광물찌꺼기(mine tailings)와 산성광산배수(acid mine drainage, AMD), 제련소(smelter)에서 기인한 오염원이 하천 및 주변 환경에 영향을 미친다고 보고되었다(Park et al., 2012; Kim et al., 2016). 연구지역은 집중호우와 같은 자연현상으로 인해 광물찌꺼기가 하천으로 유입되어 퇴적층을 형성하고, 주변 농경지에 중금속 오염을 유발하고 있다고 보고되었다(Kim et al., 2022b; Kim et al., 2023). 본 연구는 광물찌꺼기 유입으로 인한 하천 퇴적토의 중금속 오염 특성을 평가하고, 물세척법을 이용한 오염 저감 효과를 평가하기 위해 안동댐 하천 양안에서 굴착(P-19~P-32, n = 14)하여 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토를 채취하였다.

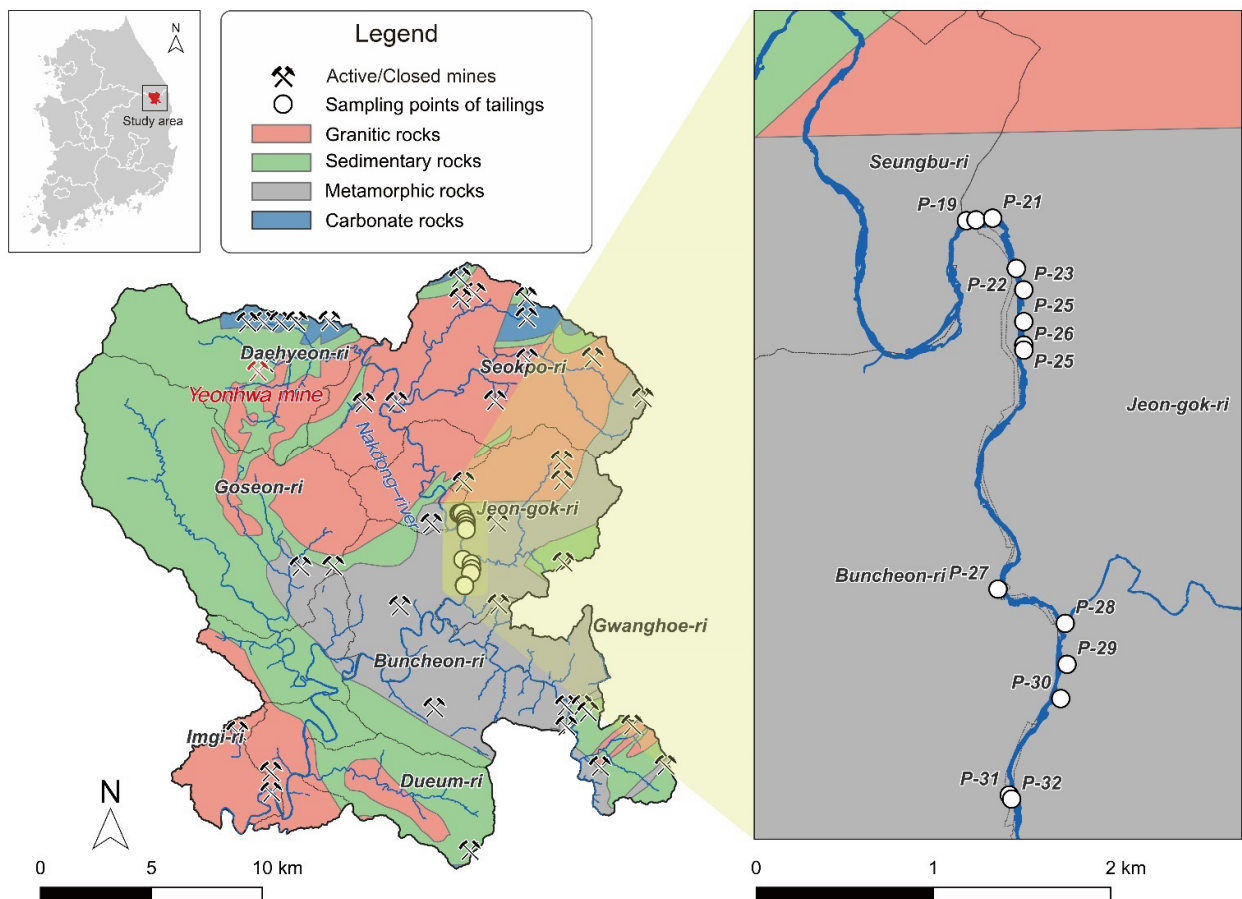


Fig. 1. Map of the upper Nakong River basin, showing the locations of active/closed mines, distribution of geological formations, and sites at which samples of tailings were collected (samples P-19 to P-32, n = 14) in study area.

연구방법

광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 전처리

안동댐 상류 하천 양안에서 굴착(P-19~P-32, n = 14)을 통해 채취된 퇴적토는 임시저장장에 보관한 뒤, 20 mm 이상의 자갈과 호박돌을 제거하였다. 제거된 자갈과 호박돌을 제외한 시료는 혼합 및 균질화 과정을 거쳐 약 50 kg의 혼합토 시료로 준비하였다. 준비된 혼합토 시료는 분석의 객관성을 확보하기 위해 5개의 시료로 나누었으며, 준비된 시료를 이용하여 입도분석 및 물세척법을 이용하여 토양 시료를 전처리하였다. 전처리된 시료를 이용하여 토양시료의 중금속 함량 분석, 토양시료의 물세척 전·후 오염 저감효율 평가를 수행하였으며, 전체적인 연구 과정은 Fig. 2에 제시하였다.

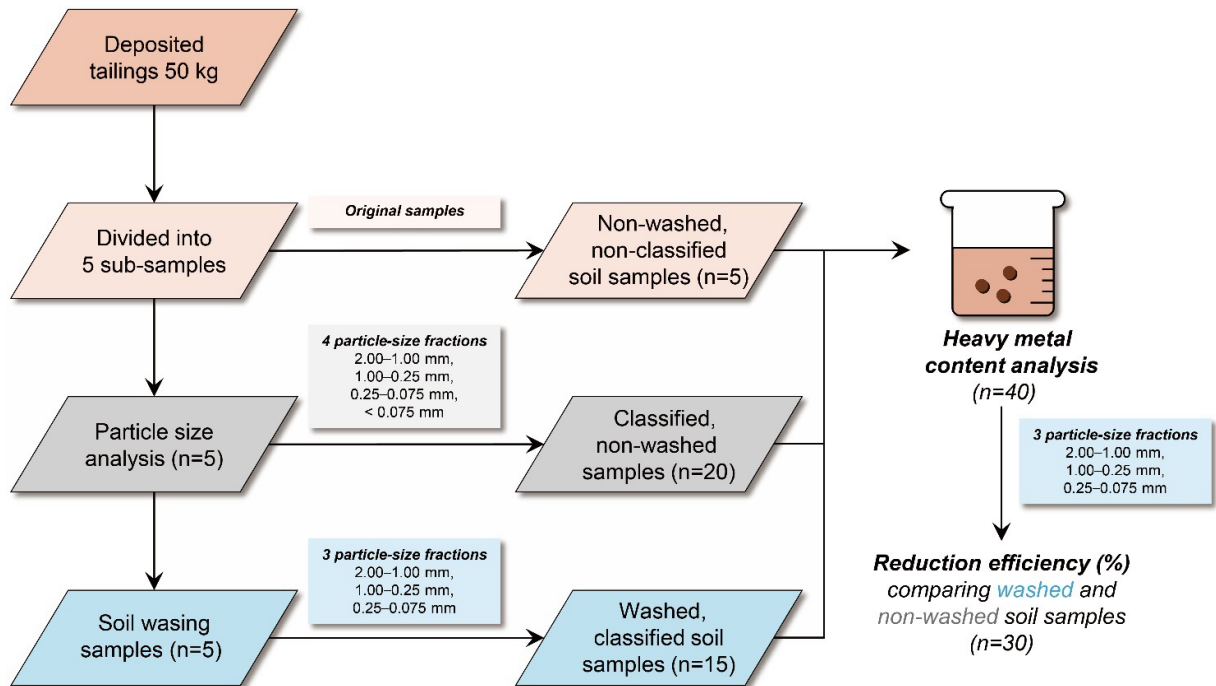


Fig. 2. Experimental workflow showing the preprocess (particle size analysis and soil washing method), heavy metal content analysis and reduction efficiency comparing washed and non-washed soil samples applied to river sediment containing mine tailings.

광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 입도분석

전처리된 5개의 혼합토 시료를 대상으로 흙입도 시험 방법 표준(KS F 2302, 2022)을 적용하여 입도분석을 수행하였다. 체분석(sieve analysis)을 실시하여 4개의 입도 구간(2.00~1.00, 1.00~0.25, 0.25~0.075, <0.075 mm)으로 분류하였다. 분류된 입도별 시료의 질량을 측정하여 입도분포 곡선을 작성하였으며, 각 시료의 대표적 입도(D_{10} , D_{30} , D_{60})를 계산하였으며, 균등계수($C_u = D_{60}/D_{10}$)를 산출하여 입도 분포의 균일성을 평가하였다. 균등계수(C_u)는 입도분포의 균일성을 나타내는 지표로 C_u 값이 1에 가까울수록 토양 시료가 단일 입도로 구성되어 균일한 분포를 보이는 것으로 해석되며, C_u 값이 클수록 다양한 입도의 입자를 포함하여 비균질한 분포를 나타내는 것으로 해석된다.

광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 중금속 오염 특성 평가

입도분석을 수행하지 않은 토양 원시 시료(n=5)와 입도분석이 적용된 물세척법 적용 전·후 시료(n=35)를 대상으로 토양오염공정시험기준(ME, 2022)에 따라 광물찌꺼기의 주요 오염원소인 As, Cd, Cu, Pb, Zn을 대상으로 중금속 함량분석을 수행하였다. 중금속함량 분석은 전함량분석법을 수행하였으며, (재)환경기술정책연구원(National Environmental Lab., NeLab)의 ICP-OES를 이용하였다. 또한, 분석결과를 검증하기 위해 부경대학교 지구환경융합분석센터 내 ICP-OES를 이용하였다. 분석결과는 토양환경보전법(ME, 2023)의 토양 우려기준 및 대책기준치와 비교하여 각 입도별 중금속 오염특성을 평가하였다.

물세척법 적용 및 중금속 저감효율 평가

중금속으로 흡착된 토양을 세척하기 위해 물세척법을 수행하였으며, 그에 따른 중금속 저감효율을 평가하였다. 본 연구에서 수행한 물세척법은 토양과 물 중량을 1:10 비율로 물세척을 수행하여 토립자에 부착된 미세토양(<0.075 mm)을 분리하였다. 이후, 중금속 함량 분석을 위해 3개의 토양입도 구간(2.00~1.00, 1.00~0.25, 0.25~0.075)으로 나누었으며, 입도 분류 후 물세척한 총 15개의 토양시료를 획득하였다.

물세척을 수행한 15개의 토양시료와 물세척을 수행하지 않은 15개의 토양시료(2.00~1.00 mm, 1.00~0.25 mm, 0.25~0.075 mm)를 대상으로 물세척에 따른 입도별 오염 저감 효율을 계산하기 위해 식 (1)을 사용하였다.

$$Reduction\ efficiency\ (\%) = \frac{C_{non-washing} - C_{washing}}{C_{non-washing}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, $C_{non-washing}$ 은 물세척을 하지 않은 토양 시료의 중금속 농도(mg/kg)를 의미하며, $C_{washing}$ 은 물세척 후 토양 시료의 중금속 농도(mg/kg)를 의미한다. 토양 원시시료와 물세척 전·후 시료에서 측정된 5개의 주요 오염원소(As, Cd, Cu, Pb, Zn)를 대상으로 중금속 오염 저감 효율을 비교·분석하였다.

결과 및 토의

광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 입도분석 결과

5개의 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토 시료에 대한 입도분석 결과는 Fig. 3과 같다. 5개의 토양 시료에 대한 자갈(4.75 mm 이상)의 평균 함량은 $15.1 \pm 2.7\%$ 로 나타났으며, 모래(4.75~0.075 mm)의 평균 함량은 $71.1 \pm 2.8\%$ 로 가장 높은 비율을 차지하였다. 미사 및 점토(<0.075 mm)의 평균 함량은 $13.8 \pm 0.4\%$ 로 분석되었다. 이러한 결과는 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토가 모래 성분이 우세한 특징을 가지고 있음을 보여준다. 또한, 입도 분포 곡선을 통해 계산된 5개의 토양 시료에 대한 평균 균등 계수(C_u)는 9.23 ± 2.31 로, 연구지역의 퇴적토가 비교적 다양한 입도를 포함하고 있으며 토양 시료의 비균질적인 특성을 확인할 수 있었다. 이는 광물찌꺼기의 퇴적 및 하천 유출과정에서 크기별로 상이한 퇴적 환경이 존재한 것으로 판단된다.

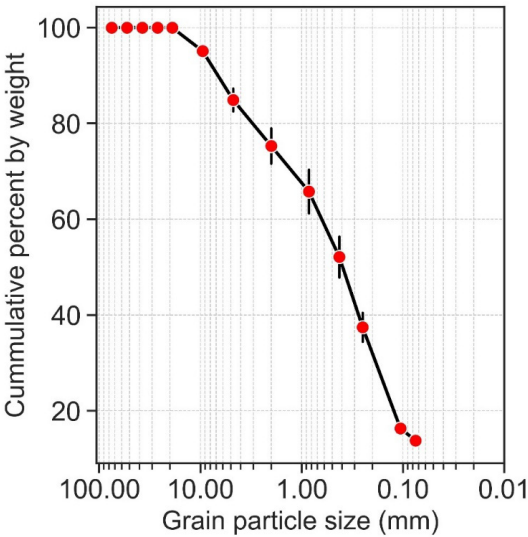


Fig. 3. Grain size distribution of river sediment samples containing tailings. The figure illustrates the proportion of gravel (>4.75 mm), sand (0.075~4.75 mm), and silt/cay (<0.075 mm) in the samples, and highlights the predominance of sand and the heterogeneous composition of the sediments. The mean concentrations of five samples are represented by red scatters, and the standard deviations are shown as error bars.

광물찌꺼기 유입 하척퇴적토의 중금속 오염 분석 결과

입도별 토양 시료의 오염 분석 결과의 통계치는 Table 1에 요약되어 있다. 먼저, 세척 전 토양 원시료와 각 입도 구간 (2.00~1.00, 1.00~0.25, 0.25~0.075, <0.075 mm)에 대한 중금속(As, Cd, Cu, Pb, Zn)의 농도를 비교분석 한 결과, 입자가 미세해질수록 중금속 농도가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4). As의 경우, 모든 입도 구간에서 토양환경보전법의 토양오염대책기준 2지역(하천, 임야 및 기타 비거주·비산업용 토지 등) 오염대책기준치(warning limit, As > 150 mg/kg)를 초과하였다. 특히, 미세토양 입도(<0.075 mm)에서 평균 농도는 2,743.85 mg/kg으로 대책기준치의 약 18배를 초과하였다. Pb의 경우, 0.25~0.075 mm의 토양 입도 구간에서 평균 농도가 670.62 mg/kg으로 나타났으며, 우려기준치(concerning

Table 1. Statistics of heavy metal concentrations by particle size in river sediment containing tailings, with a comparison of non-washing and washing results

Type	Particle size (mm)	Heavy metals concentration (mg/kg)									
		As		Cd		Cu		Pb		Zn	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Non-washing	Original	338.12**	47.22	2.47	0.55	34.06	4.53	255.60	21.43	290.28	18.16
	2.00~1.00	262.82**	28.29	1.68	0.38	25.14	2.87	152.00	25.14	216.92	30.94
	1.00~0.25	410.20**	34.48	2.37	0.26	37.62	2.53	265.16	27.17	342.36	32.41
	0.25~0.075	870.26**	29.03	4.09	0.64	56.38	4.87	670.62*	15.54	563.86	20.55
	<0.075	2,743.85**	166.28	8.11	1.01	101.58	7.58	1,832.90**	137.72	1,198.22*	56.30
Washing	2.00~1.00	221.89**	36.10	1.23	0.34	17.60	3.32	103.62	11.58	156.12	15.89
	1.00~0.25	171.65**	28.38	1.80	0.23	26.30	1.87	143.48	21.93	223.10	17.26
	0.25~0.075	6,253.85**	18.11	3.25	0.48	50.98	4.39	514.12*	14.99	466.06	19.44

* Exceeds the concerning limit (As > 50 mg/kg, Cd > 10 mg/kg, Cu > 500 mg/kg, Pb > 400 mg/kg, Zn > 600 mg/kg; ME, 2023).
** Exceeds the warning limit (As > 150 mg/kg, Cd > 30 mg/kg, Cu > 1,500 mg/kg, Pb > 1,200 mg/kg, Zn > 1,800 mg/kg; ME, 2023).

limit, Pb > 400 mg/kg)를 초과한 것으로 확인되었다. 또한, <0.075 mm의 토양 입도구간에서는 평균 농도가 1,832.90 mg/kg으로 확인되었으며, 대책기준치(Pb > 1,200 mg/kg)를 모두 초과하였다. Zn의 경우, <0.075 mm의 토양 입도구간에서 평균 농도가 1,198.22 mg/kg으로 우려기준치(Zn > 600 mg/kg)를 초과하였으며, 다른 토양 입도 구간에서는 우려기준 이하로 확인되었다. 이는 금속광산에서 발생한 광물찌꺼기가 과거 방치되거나 강우에 의해 유실되어 하천 퇴적토에 축적된 결과로 판단되며, 특히 As는 광물찌꺼기의 주요 오염원소로 미세입자에 강하게 흡착되어 높은 농도로 농축된 것으로 판단된다.

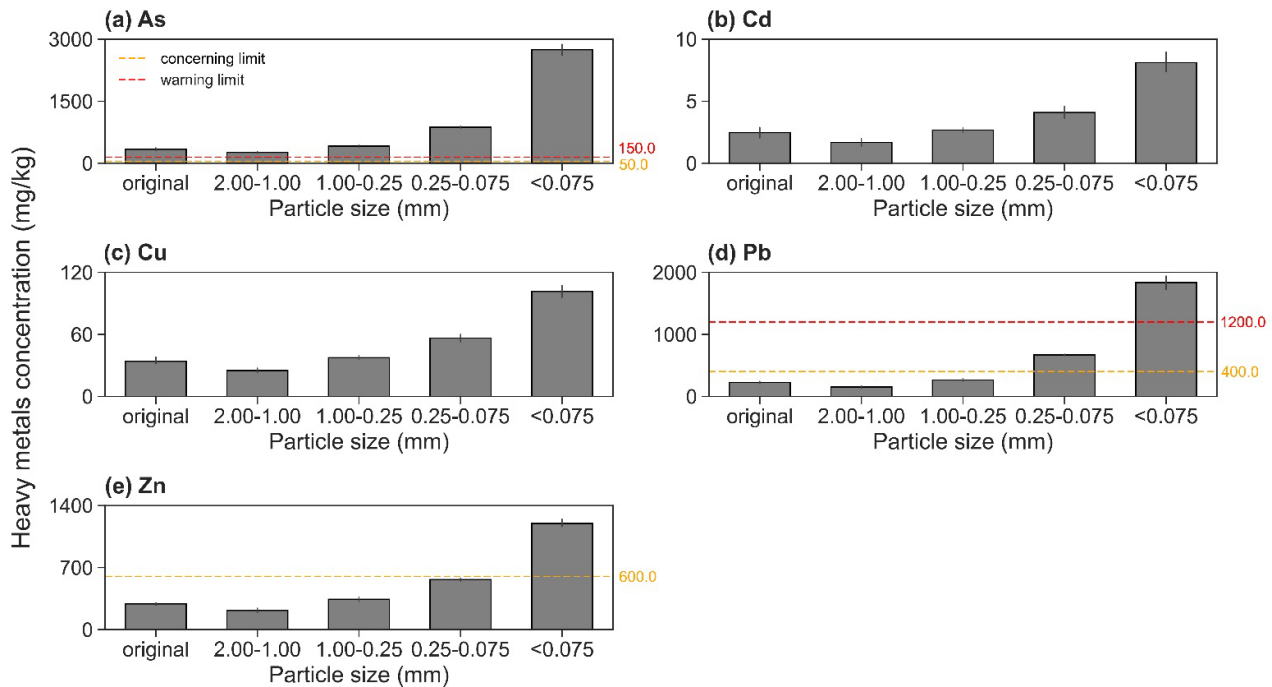


Fig. 4. Heavy metal concentrations (As, Cd, Cu, Pb, and Zn) by particle size in river sediment containing tailings. The orange and red dashed lines represent the concerning and warning limits, showing contamination levels across various particle-size fractions.

물세척법을 이용한 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 입도별 오염 저감 분석결과

물세척법을 이용한 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 입도별 오염 저감 효율을 분석하기 위해, 물세척 전·후 토양 시료의 입도 구간(2.00~1.00, 1.00~0.25, 0.25~0.075)에 대한 중금속(As, Cd, Cu, Pb, Zn) 농도를 비교·분석하였다(Fig. 5). 2.00~1.00 mm의 토양 입도 구간에서 전체 평균 오염 저감 효율은 25.14%로 나타났으며, 가장 높은 저감 효율을 보인 오염원소는 Pb로, 세척 전 152.00 mg/kg에서 세척 후 103.62 mg/kg으로 약 31.83% 감소하였다. 2.00~1.00 mm의 토양 입도 구간에서 세척 전·후 가장 큰 농도 차를 보인 오염 원소는 Zn으로, 세척 전 216.92 mg/kg에서 세척 후 156.12 mg/kg으로 약 60.80 mg/kg 감소하였다. 1.00~0.25 mm의 토양 입도 구간에서는 전체 평균 오염 저감 효율이 46.29%로 다른 토양 입도 구간 대비 가장 높은 효율을 보여주었으며, 특히 As가 약 58.15%의 저감 효율로 가장 큰 감소율을 보여주었다. 1.00~0.25 mm의 토양 입도 구간에서 세척 전·후 가장 큰 농도 차를 보인 오염 원소는 As로, 세척 전 410.20 mg/kg에서 세척 후 171.65 mg/kg으로, 약 238.55 mg/kg의 감소를 보였다. 0.25~0.075 mm의 토양 입도 구간에서 전체 평균 오염 저감 효율은 22.94%로 가장 낮게 나타났으며, 가장 높은 저감 효율을 보인 오염원소는 Pb로, 세척 전 670.62 mg/kg에서 세척

후 514.12 mg/kg으로 약 23.34%의 저감효율을 보였다. 0.25~0.075 mm의 토양 입도 구간에서 세척 전·후 가장 큰 농도 차를 보인 오염 원소는 As로, 세척 전 870.26 mg/kg에서 세척 후 625.38 mg/kg로 약 244.88 mg/kg의 감소를 보였다. 모든 토양 입도 구간에서 중금속 농도가 감소하였으며, 1.00~0.25 mm의 토양 입도 구간에서 전체 평균 오염 저감효율이 가장 높게 나타났다. 반면, 0.25~0.075 mm의 토양 입도 구간에서는 저감 효율이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 미세입자가 높은 비표면적과 강한 흡착력을 가지기 때문에, 물리적 세척만으로는 제거 효과가 제한적이기 때문이라고 판단된다.

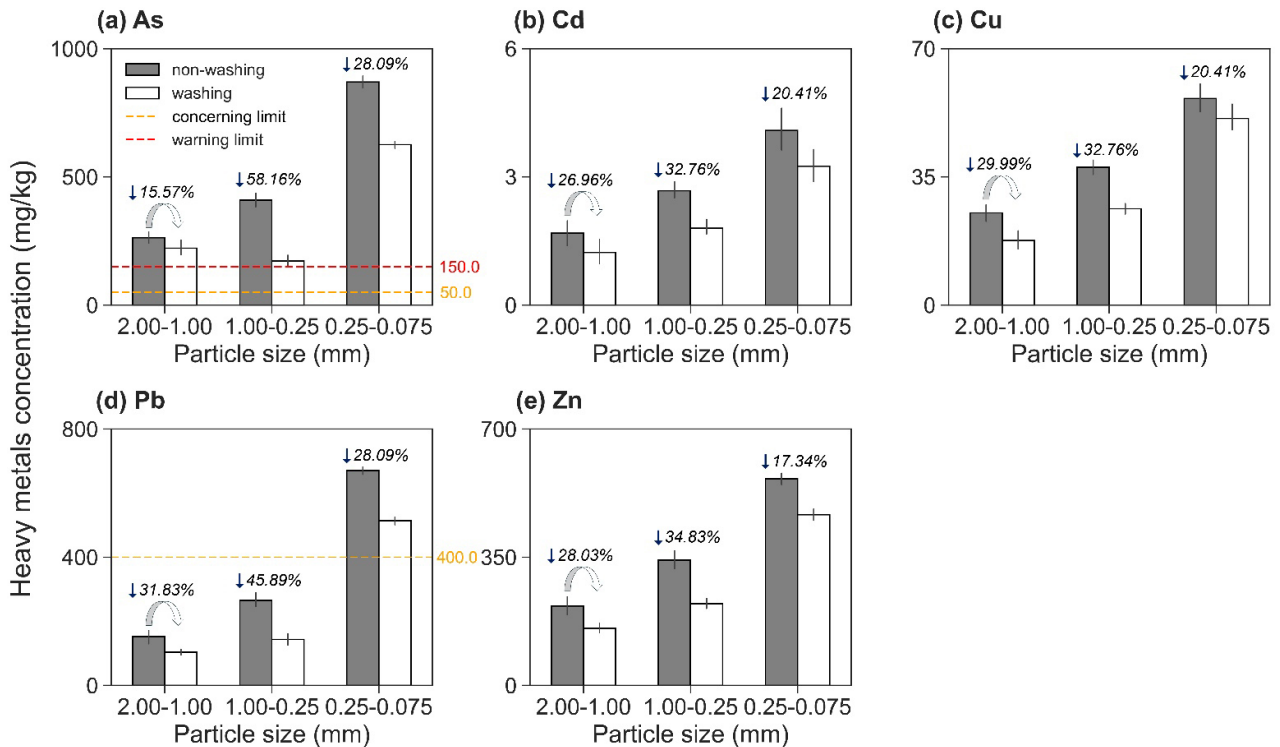


Fig. 5. Reductions in heavy metal concentrations (As, Cd, Cu, Pb, Zn) as a result of soil washing for different particle-size fractions (2.00~1.00, 1.00~0.25, and 0.25~0.075 mm) of river sediment containing tailings.

결론

본 연구는 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 입도별 중금속 오염 특성을 분석하고, 물세척법을 적용하여 중금속 저감 효율을 평가하였다. 이를 위해 물세척 전·후 토양의 중금속 농도를 입도 구간별로 비교하였으며, 광물찌꺼기 및 금속광산의 주요 오염원소인 As, Cd, Cu, Pb, Zn을 대상으로 오염 특성을 분석하였다.

연구결과, 세척 전 토양에서 입자가 미세해질수록 중금속 농도가 증가하는 경향이 확인되었다. 특히, As는 모든 토양 입도 구간에서 대책기준치를 초과하였으며, <0.075 mm의 토양 입도 구간에서 대책기준치의 약 18배를 초과하는 것으로 확인되었다. 물세척법을 적용한 결과, 모든 입도 구간에서 중금속 농도가 감소하였으며, 1.00~0.25 mm의 토양 입도 구간에서 가장 높은 저감 효율을 보여주었다. As는 1.00~0.025 mm의 토양 입도 구간에서 약 58.18%의 저감 효율을 보였으며, 이는 물세척법이 경제적이고 실용적인 오염 저감 기술로 활용될 수 있음을 보여주었다. 또한, 물세척법은 별도의 장비나 고가의 화학적 처리 없이도 토양의 특정 입도 구간에서 높은 정화 효율을 나타내어 경제적이고 실용적인 정화 기술로 활용될 수 있음을 확인하였다. 그러나, 0.25~0.075 mm 구간에서는 저감 효율이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 미세입자에

중금속이 강하게 흡착되어 물리적 세척만으로는 제거가 어려운 특성을 반영하기 때문인 것으로 해석된다. 이러한 결과는 물세척법이 미세입자보다는 비교적 큰 입자 구간에서 효과적으로 작용되는 것을 확인하였으며, 미세입자의 오염 저감을 위해서는 추가적인 화학적 세척제의 사용이나 고도화된 기술의 보완이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 광물찌꺼기 유입 하천퇴적토의 입도별 중금속 오염 특성과 물세척법의 저감 효율을 평가함으로써 하천 환경 정화 기술의 적용 가능성을 제시하였다. 특히, 물세척법은 1.00~0.25 mm의 토양 입도 구간에서 높은 정화 효율을 보이며, 경제적이고 실용적인 정화 방법으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 광물찌꺼기 유입 퇴적토를 대상으로 추가적인 사례분석을 통해 정화 및 복원 기술의 적용 범위를 확장하고, 화학적 세척제와 같은 보조 공정과 결합하여 효율성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구의 결과는 광물찌꺼기로 유입된 하천퇴적토의 효과적인 복원과 지속가능한 관리 전략을 수립하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 한국광해광업공단의 연구과제인 “광물찌꺼기를 활용한 환경여재 제조기술개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Arunakumara, K.K.I.U., Zhang, X., 2008, Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae, *Journal of Ocean University of China*, 7(1), 60-64.
- Choi, S.G., Pak, S.J., Lee, P.K., Kim, C.S., 2004, An overview of geoenvironmental implications of mineral deposits in Korea, *Economic and Environmental Geology*, 37(1), 1-19 (in Korean with English abstract).
- Gwon, Y.S., Kim, E.J., 2018, Effects of soil particle sizes on soil washing, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 18(1), 53-60 (in Korean with English abstract).
- Jung, M.C., Jung, M.Y., Choi, Y.W., 2004, Environmental assessment of heavy metals around abandoned metalliferous mine in Korea, *Economic and Environmental Geology*, 37(1), 21-33 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.G., Kim, B.J., Ko, M.S., 2022a, Geochemical contamination assessment and distribution property investigation of heavy metals, arsenic, and antimony vicinity of abandoned mine, *Economic and Environmental Geology*, 55(6), 717-726 (in Korean with English abstract).
- Kim, J., Choi, U., Baek, S.H., Choi, H.B., Lee, J., 2016, A study on chemical compositions of sediment and surface water in Nakdong River for tracing contaminants from mining activities, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 37(4), 211-217 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.W., Jung, M.C., Lee, H., Kim, H., Heo, H., 2022b, Status and evaluation of characteristics of deposited tailings in the upstream of Andong Dam, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 59(6), 607-618 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.W., Si, B.L., Ji, H., Lee, H., Jung, M.C., Heo, H., Kim, H., 2023, Evaluation of the seasonal characteristics of sediments and suspended sediments in the upstream of the Andong Dam, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 60(2), 65-77 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.R., Choi, K.Y., Kim, S.H., Hong, G.H., 2010, Feasibility of present soil remediation technologies in KOREA for the control of contaminated marine sediment: Heavy metals, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(12), 1076-1086 (in Korean with English abstract).

KS F 2302, 2022, Test method for particle size distribution of soils (in Korean).

Lee, J.S., Kwon, H.H., Shim, Y.S., Kim, T.H., 2007, Risk assessment of heavy metals in the vicinity of the abandoned metal mine areas, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12(1), 97-102 (in Korean with English abstract).

ME (Ministry of Environment), 2022, Standard methods for soil contamination (in Korean).

ME (Ministry of Environment), 2023, Soil environment conservation act (in Korean).

Park, C.K., Kim, J.W., Jung, M.C., Park, H.S., Kim, D.K., Oh, Y.S., 2018, Current occurrence and heavy metal contamination assessment of seepage from mine waste dumping sites in Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(6), 588-595 (in Korean with English abstract).

Park, J.J., Kim, K.J., Yoo, S.M., Kim, E.H., Seok, K.S., Huh, I.A., Kim, Y.H., 2012, Distribution of heavy metals and mercury in sediment from the lake An-dong, *Analytical Science & Technology*, 25(6), 441-446 (in Korean with English abstract).

Qian, J., Shan, X., Wang, Z., Tu, Q., 1996, Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil, *Science of The Total Environment*, 187(2), 131-141.