

석담광산 주변 토양오염 및 생물농축 특성 연구

송병철¹ · 최병선² · 김영훈³ · 권희원³ · 김정진^{1*}

¹국립경국대학교 지구환경과학과, ²중앙대학교 의과대학 예방의학교실, ³국립경국대학교 환경공학과

Soil Contamination and Bioconcentration Characteristics around the Seokdam Mine, Korea

Byeong Cheol Song¹, Byung Sun Choi², Young Hun Kim³, Hee Won Kwon³, and Jeong Jin Kim^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea

²Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

³Department of Environmental Engineering, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea

ABSTRACT

This study evaluated the transfer characteristics and potential exposure of heavy metals among environmental media by comprehensively analyzing soil, water, rice, and human biomarkers in agricultural areas affected by the Seokdam mine located in Seomyeon, Hongcheon, Korea. In soils, relatively high concentrations of As (8.8–19.5 mg/kg), Cd (0.1–1.2 mg/kg), and Zn (62.2–134.0 mg/kg) were observed at specific sites, while water samples showed localized contamination with maximum concentrations of As (3.62 µg/L) and Zn (382.93 µg/L). In rice, Cd concentrations averaged 0.11 mg/kg (maximum 0.52 mg/kg), exceeding the standard in some samples, and bioconcentration factors were relatively high for Cd (0.215) and Zn (0.166). Correlation analyses between soil and rice, as well as rice and human biomarkers, showed generally weak relationships, indicating multi-pathway exposure characteristics. These results suggest that the transfer and exposure of heavy metals in abandoned mine areas can occur through a continuous pathway linking water, soil, crops, and humans.

Key words : Biomarkers, Heavy metals, Bioconcentration factor, Correlation analysis, Abandoned mine

1. 서 론

폐금속광산은 채광 활동 종료 이후에도 광물찌꺼기(tailings), 폐석(waste rock), 갱내수 및 산성광산배수(acid mine drainage, AMD) 등 잔존 광산폐기물로 인해 장기간 환경오염을 유발하는 대표적 오염원으로 인식되고 있다. 국내에는 약 2,000여 개 이상의 휴-폐광산이 분포하며, 이들 중 상당수는 적절한 차수 및 정화시설 없이 방치되어 토양

및 수계로의 중금속 확산이 지속되어 왔다(Jung and Jung, 2006). 특히 황화광물의 산화 반응에 의해 생성되는 AMD는 낮은 pH와 높은 농도의 황산염 및 Al, As, Cd, Cu, Zn, Pb를 포함하고 있으며, 산화, 중화, 공침 및 흡착 과정을 거쳐 퇴적물에 축적되거나 하류 지역으로 이동함으로써 2차 오염을 유발한다(Nordstrom, 2011). 폐광산 인근 지역은 지형적 특성상 하부에 농경지가 분포하는 경우가 많아, 강우 유출 및 범람에 의해 오염물질이 농경지 토양으로 유입되어 축적될 가능성이 높다(Lottermoser, 2010). 토양에 축적된 중금속은 pH, 유기물 함량, 점토광물 조성, 양이온교환용량, 철/망간 산화물 존재 여부 등 토양의 물리화학적 특성에 따라 이동성과 생체이용 가능성이 달라진다(Alloway, 2013). 토양에 존재하는 중금속은 뿌리 흡수 및 체내 이동(translocation)을 통해 작물의 가식부(edible portion)에 축적될 수 있으며, 이는 인체 노출의 주요 경로로 작용한다(Nan et al., 2002; Cui et al., 2004). 특히 카드뮴과 비소는 작물체 내 이동

주저자: 송병철, 국립경국대학교 지구환경과학과, 석사
공저자: 최병선, 중앙대학교 의과대학 예방의학교실, 교수;
김영훈, 국립경국대학교 환경공학과, 교수;
권희원, 국립경국대학교 환경공학과, 박사후 연구원
*교신저자: 김정진, 국립경국대학교 지구환경과학과 교수
E-mail: jjkim@andong.ac.kr

Received : 2026. 03. 24 Reviewed : 2026. 04. 02
Accepted : 2026. 04. 24 Discussion until : 2026. 06. 30

성이 비교적 높고 만성 독성을 유발하는 대표적 원소로 보고되어 왔다(Smedley and Kinniburgh, 2002).

토양-식물 전이 정도를 정량화하기 위해 생물농축계수(Bioconcentration Factor, BCF)가 널리 활용된다. BCF는 토양 중 금속 농도에 대한 작물 가식부 내 농도의 비로 정의되며, 오염물질의 생물학적 이동성과 위해성을 평가하는 핵심 지표이다(Dudka et al., 1996; Puschenreiter and Horak, 2000). 일반적으로 Cd와 Zn은 비교적 높은 전이 특성을 보이는 반면, Pb는 토양 내 불용성 화합물로 존재하는 비율이 높아 전이율이 낮은 경향을 나타낸다(Alloway, 2013). 그러나 논토양과 같이 환원 조건이 형성되는 환경에서는 As의 이동성이 증가하여 쌀로의 전이가 상대적으로 커질 수 있으며, 이는 토양 특성 및 수문 조건에 따라 지역적 편차가 크게 나타난다(Zhao et al., 2010). 국내에서도 폐금속광산 영향권 농경지에서 벼 조직(줄기, 잎, 왕겨, 쌀)으로의 금속 전이가 토양 특성에 따라 유의하게 달라질 수 있다는 연구 결과가 있다(Lee et al., 2005; Kim et al., 2024; Go et al., 2022).

강원도 홍천군 서면에 위치한 석담광산은 과거 금속 채굴 활동이 이루어졌던 폐광산 지역으로, 채광 과정에서 발생한 광물찌꺼기 및 폐석과 같은 채굴 잔재물의 장기적인 풍화와 강우에 의한 유출 과정에 의해 주변 환경으로 중금속이 확산되었을 가능성이 있다. 이러한 폐광산 지역에서는 비소(As), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb) 등과 같은 중금속이 토양 및 농경지로 유입되어 장기간 축적될 수 있으며, 이는 농작물을 통한 인체 노출 가능성을 증가시키는 중요한 환경 문제로 인식되고 있다.

본 연구에서는 석담광산 인근 농경지를 대상으로 논토양과 재배 중인 쌀 시료를 채취하여 주요 중금속(As, Cd, Cu, Zn, Pb 등)의 농도를 정량적으로 분석하였다. 또한 토양 내 중금속 농도와 작물체 내 축적 농도 간의 관계를 평가하기 위하여 생물농축계수(Bioconcentration Factor, BCF)를 산출하고, 토양-식물 간 중금속 전이 특성을 규명하고자 하였다. 토양오염 수준과 작물체 내 중금속 축적 농도 간의 상관성을 분석함으로써 폐광산 인근 농경지의 환경위해 잠재성을 평가하고, 수질-토양-작물-인체로 이어지는 중금속 오염 경로의 연계성을 종합적으로 평가하고자 한다.

2. 연구지역 개요

석담광산은 강원도 홍천군 서면의 산악지대에 위치하며, 팔봉산, 종자산, 두릉산 등으로 둘러싸인 급경사의 산지 지형을 이룬다. 광산 인근을 흐르는 서천은 홍천강으로

유입되며, 하류에는 총적평야가 발달하여 논농사가 활발히 이루어지고 있다.

연구지역의 지질은 신생대 제4기 총적층과 선캄브리아기 춘천계층군에 속하는 편마암류가 분포하는 지역으로, 장락층군이 용문산 호상편마암층 위에 부정합으로 놓인다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1974). 광산 주변 암상은 주로 흑운모석영장석편마암, 규암 및 운모편암으로 구성되어 있다. 광상은 이들 편마암에 발달한 열극을 충진한 합금은 석영맥 형태로 산출되며, 구조적 제어를 받는 맥상 광체의 특성을 보인다.

석담광산은 과거 금, 은, 구리, 납 등을 대상으로 개발되었다. 채광 당시에는 갱구와 폐석 적치장이 조성되었으나, 현재는 복토 및 광해방지사업으로 대부분 정비되어 지표상 채광 흔적은 제한적으로 남아 있다. 광산 인근 하천에서는 과거 황갈색 침전물(Yellowboy) 형성이 보고되었으며, 이는 산성광산배수 유출에 따른 철 산화물 침전에 기인한 것으로 판단된다(Ministry of Environment, 2007). 일부 폐석 적치장에서 발생한 침출수는 인근 하천으로 유입되며, 해당 하천수는 하류 농경지의 농업용수로 이용되고 있다. 2007년 실시된 폐금속광산 토양오염 정밀조사 결과, 토양에서 Pb, As, Zn, Ni가 토양오염우려기준을 초과하였고 특히 As의 오염도가 높은 것으로 확인되었다(Ministry of Environment, 2007). 또한 수질 조사에서는 As 및 Cd가 수질환경기준을 초과한 사례가 보고되었으며, 일부 지하수에서는 생활용수 기준을 초과하는 pH가 측정되었다. 광산 하류 지역에는 약 72,000명 규모의 논농경지가 분포하며, 주민들은 지하수 및 간이상수도를 농업용수와 생활용수로 이용하고 있어 광산 기원 오염물질의 농경지 확산 가능성이 존재한다.

3. 연구방법

3.1. 시료채취 및 분석

Fig. 1은 연구지역의 시료채취 지점을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 석담광산 영향권 내 농경지를 대상으로 토양, 벼, 음용수 및 인체 시료(혈액 및 요)를 채취하여 환경 매체 간 중금속 이동 특성과 노출 연계성을 평가하였다(Fig. 2). 시료 채취 지점은 광산과의 거리, 수계 흐름 방향, 농경지 분포 및 실제 농업용수 이용 여부를 종합적으로 고려하여 선정하였다. 논토양과 벼 시료는 벼 수확기에 맞추어 채취하였으며, 해당 필지 소유주의 음용수와 혈액 및 요 시료를 확보하여 토양-작물-음용수-인체 간 중금속 이동 및 노출 특성을 분석하였다.

논토양 시료는 각 조사 필지(S-1-S-8)에서 벼 수확 직전

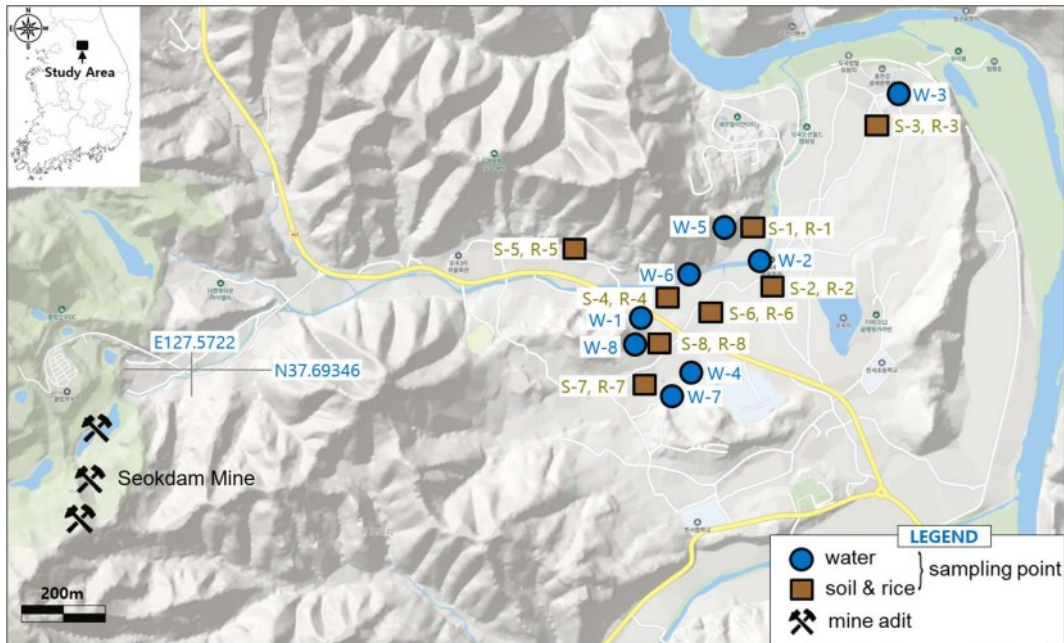


Fig. 1. Location of sampling sites in the Seokdam mine area.



Fig. 2. Field sampling procedures for soil, rice, water, blood, and urine in the Seokdam mine-impacted agricultural area.

표토층(0-15 cm)을 대상으로 채취하였다. 각 필지에서 3-5개의 지점을 지그재그 방식으로 선정하여 채취한 후 혼합시료(composite sample)를 구성하였다. 채취된 시료는 폴리에틸렌 백에 밀봉하여 실험실로 운반한 후 자연건조하여 2 mm 체로 체거름한 뒤 균질화하였다. 토양 시료의 중금속 분석은 토양오염공정시험기준(Ministry of Environment, 2017)에 따라 산 분해 전처리를 수행한 후 ICP-OES (Optima 8300, PerkinElmer, USA)를 이용하여 분석하였다. 분석 대상 원소는 폐금속광산에서 주요 오염물질로 보고되는 As, Cd, Cu, Zn 및 Pb를 중심으로 선정하였다.

쌀 시료는 논토양 시료 채취 지점과 동일한 필지에서 재배된 벼를 수확하여 가식부를 분리하였다. 각 필지별 대표 시료를 확보하기 위하여 동일 지점에서 수확된 벼를 혼합하여 시료를 구성하였다. 실험실로 운반한 시료는 건조 후 도정하여 쌀을 분리하고 분쇄하여 균질화하였다. 이후 시료는 식품의약품안전처 식품공전에 따라 마이크로웨이브 분해를 통해 유기물을 완전히 분해한 후 여과 및 정량하여 ICP-OES로 중금속 농도를 분석하였다.

음용수 시료는 해당 논 소유주가 실제로 섭취하는 수원에서 채수하였다. 채수 전 일정 시간 예비 방류(flushing)를 실시한 후 0.45 μm membrane filter로 여과하였으며, 분석 시까지 냉장보관하였다. 수질 시료의 중금속 농도는 ICP-MS (Agilent 7900, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 분석하였다.

인체 시료는 해당 조사 필지 소유주를 대상으로 혈액 및 요 시료를 채취하였다. 혈액 시료는 정맥혈을 채혈하여 중금속 분석용 전용 튜브에 보관하였으며, 요 시료는 1회 채뇨 중간뇨(midstream urine)를 수집하여 분석 전까지 냉장 보관하였다. 요중 중금속 농도는 질병관리청 지침에 따라

ICP-MS로 정량하고 크레아티닌(creatinine) 보정을 적용하여 희석 효과를 보정하였다. 분석의 신뢰도 확보를 위하여 공인 표준물질을 이용한 정확도 검증과 반복 분석을 수행하였으며, 분석 과정에서 공시료(blank) 및 중복 시료를 포함하여 정밀도를 평가하였다. 또한 기기 검출한계 및 정량한계를 고려하여 데이터의 품질을 관리하였다.

3.2. 생물농축계수 및 통계 분석

토양으로부터 작물로의 중금속 전이 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 생물농축계수(Bioconcentration Factor, BCF)를 산출하였다. BCF는 토양 중 금속 농도에 대한 작물 가식부 내 금속 농도의 비로 정의되며, 다음 식에 따라 계산하였다.

$$BCF = \frac{C_{rice}}{C_{soil}}$$

여기서 C_{rice} 는 쌀 가식부 중 중금속 농도(mg/kg), C_{soil} 은 동일 지점에서 채취한 토양 중 중금속 농도(mg/kg)를 의미한다. BCF 값이 1보다 클 경우 토양 대비 작물 내 금속 농도가 상대적으로 높음을 의미하며, 일반적으로 BCF 값이 높을수록 토양-식물 간 전이 가능성이 큰 것으로 해석된다. 토양과 쌀 시료 간 중금속 농도의 상관성을 평가하기 위하여 Pearson 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 이용한 선형 상관 분석을 수행하였다. 또한 토양과 쌀 간 농도 관계를 정량적으로 평가하기 위하여 단순 선형회귀 분석(simple linear regression analysis)을 실시하고 결정계수(R^2)를 산출하였다. 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 수준에서 검정하였다.

Table 1. Concentrations of heavy metals in soil samples (S-1 to S-8) collected in the vicinity of the Seokdam mine.

Sample No.	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
S-1	8.8	0.2	84.4	27.7	57.5	26.1	92.3
S-2	17.7	0.2	71.8	38.4	36.4	27.9	88.2
S-3	15.2	0.2	73.4	37.4	35.7	25.9	82.2
S-4	19.5	0.4	67.1	22.7	33.8	30.1	99.7
S-5	15.1	1.2	66.0	26.1	31.5	26.7	134.0
S-6	13.0	0.2	64.3	19.3	31.3	26.1	79.6
S-7	12.7	0.1	72.3	22.7	34.6	24.6	62.2
S-8	10.5	0.2	61.1	19.5	31.6	31.1	88.9
Min.	8.8	0.1	61.1	19.3	31.3	24.6	62.2
Max.	19.5	1.2	84.4	38.4	57.5	31.1	134.0
Avg.	14.1	0.3	70.1	26.7	36.6	27.3	90.9
SD	3.6	0.4	7.2	7.5	8.7	2.2	20.6

4. 연구결과 및 토의

4.1. 토양 중 중금속 농도 분포 특성

석담광산 인근에서 채취한 토양 시료의 중금속 농도 분석 결과와 분포는 각각 Table 1과 Fig. 3에 제시하였다.

As 농도는 8.8~19.5 mg/kg 범위(평균 14.1 mg/kg)로 비교적 좁은 변동폭을 보였으며 S-4에서 최대값(19.5 mg/kg)

을 나타냈다. Cd는 0.1~1.2 mg/kg 범위(평균 0.3 mg/kg)로 전반적으로 낮은 수준을 보였으나 S-5에서 1.2 mg/kg으로 상대적으로 높은 값을 나타내 국지적 농축 특성이 확인되었다. 이는 광산 기원의 황화광물 풍화 과정에서 금속이 토양으로 유입되면서 국지적으로 농축될 가능성과 관련될 수 있다(Lottermoser, 2010). Cr은 61.1~84.4 mg/kg(평균 70.1 mg/kg), Ni는 31.3~57.5 mg/kg(평균 36.6 mg/kg)

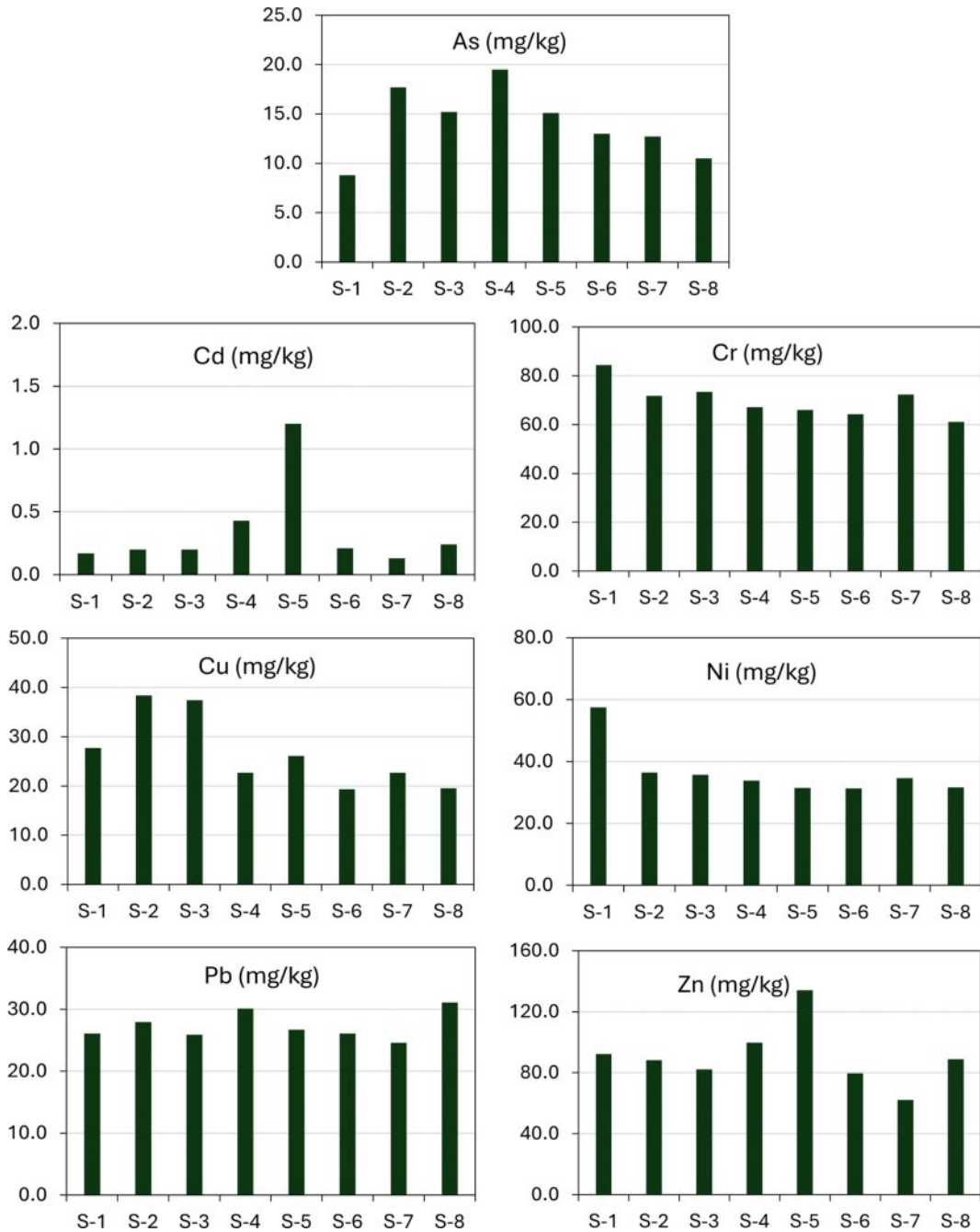


Fig. 3. Heavy metal concentrations in soil samples (S-1 to S-8) collected in the vicinity of the Seokdam mine.

Table 2. Concentrations of heavy metals in water samples (W-1 to W-8) collected from the Seokdam mine area

Sample No.	As ($\mu\text{g/L}$)	Cd ($\mu\text{g/L}$)	Cr ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Ni ($\mu\text{g/L}$)	Pb ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
W-1	0.24	0.07	0.04	10.21	0.12	0.06	61.55
W-2	0.35	0.13	0.35	27.03	0.64	0.11	172.62
W-3	0.16	0.19	0.64	10.00	0.89	0.17	99.23
W-4	0.27	0.25	0.83	19.46	0.42	0.11	26.31
W-5	0.34	0.02	0.08	2.27	0.10	0.05	1.60
W-6	0.43	0.51	0.42	16.12	2.26	0.08	382.93
W-7	3.62	0.27	0.18	72.31	2.06	0.37	221.10
W-8	0.46	0.11	0.14	20.63	0.70	0.14	134.60
Min.	0.16	0.02	0.04	2.27	0.10	0.05	1.60
Max.	3.62	0.51	0.83	72.31	2.26	0.37	382.93
Avg.	0.73	0.19	0.34	22.25	0.90	0.14	137.49
SD	1.2	0.2	0.3	21.6	0.8	0.1	123.4

범위로 비교적 높은 농도를 나타냈다. 특히 S-1에서 Cr(84.4 mg/kg)과 Ni(57.5 mg/kg)가 동시에 최대값을 나타내어 모암 또는 광산 활동의 영향을 반영하는 것으로 해석된다. 두 원소는 일반적으로 토양의 지질학적 배경(background)에 의해 농도가 좌우되는 경우가 많으며, 공간적 분포에서도 비교적 완만한 변동 경향을 보였다(Kabata-Pendias, 2011).

Cu는 19.3–38.4 mg/kg(평균 26.7 mg/kg), Pb는 24.6–31.1 mg/kg(평균 27.3 mg/kg) 범위로 나타났다. Cu는 S-2와 S-3에서 상대적으로 높은 값을 보였으며, Pb는 S-8과 S-4에서 다소 높은 농도를 나타냈다. Pb는 광산 및 제련 활동과 관련성이 높은 금속으로 알려져 있으나 토양 내에서는 인산염 및 탄산염과 결합하여 비교적 낮은 이동성을 가지는 것으로 보고되어 있다(Alloway, 2013). Zn은 62.2–134.0 mg/kg 범위(평균 90.9 mg/kg)로 분석 원소 중 가장 높은 평균 농도를 나타냈으며 S-5에서 최대값(134.0 mg/kg)이 확인되었다. Zn은 광산 영향 지역에서 상대적으로 높은 농도를 나타내는 대표적인 금속 원소이다(Lottermoser, 2010).

석담광산 인근 토양은 전반적으로 Zn, Cr 및 Ni에서 상대적으로 높은 농도를 보였으며 Cd와 As는 비교적 낮은 수준을 나타냈다. 그러나 일부 지점에서는 국지적 고농도 특성이 확인되었다. 원소별 농도 분포는 지점 간 변동성을 보이거나 특정 지점(S-1, S-4, S-5 등)에서 다원소 농축 특성이 나타나 광산 활동의 영향 가능성을 시사한다. 또한 Cr과 Ni는 비교적 균일한 분포를 보여 지질학적 배경의 영향을 반영하는 반면, Cd와 Zn은 국지적 변동성이 커 인위적 기원의 영향을 고려할 필요가 있다. 향후 오염도 지수(I_{geo} , EF 등) 분석을 통해 자연 기원과 인위 기원을

구분하는 정량적 평가가 필요할 것으로 판단된다(Müller, 1969).

4.2. 수질 중 중금속 특성

석담광산 인근 수계에서 채취한 수질 시료의 중금속 농도 분석 결과와 분포는 Table 2와 Fig. 4에 제시하였다.

As 농도는 0.16–3.62 $\mu\text{g/L}$ 범위(평균 0.73 $\mu\text{g/L}$)로 전반적으로 낮은 수준을 보였으나 W-7에서 3.62 $\mu\text{g/L}$ 로 상대적으로 높은 값이 확인되었다. 대부분 지점에서는 0.5 $\mu\text{g/L}$ 이하로 나타났으며 일부 지점에서만 국지적 증가 경향이 나타났다. 자연수계에서 As의 이동성은 산화-환원 상태와 철 산화물의 용해 및 흡착 과정에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Smedley and Kinniburgh, 2002). Cd는 0.02–0.51 $\mu\text{g/L}$ 범위(평균 0.19 $\mu\text{g/L}$)로 전반적으로 낮은 농도를 보였으며 W-6에서 최대값(0.51 $\mu\text{g/L}$)이 확인되었다. Cd는 황화광물의 풍화 과정에서 용출될 수 있는 대표적인 금속 원소로, 특정 지점에서 광산 기원 금속 용출의 영향을 반영할 가능성이 있다(Lottermoser, 2010).

Cr은 0.04–0.83 $\mu\text{g/L}$ 범위(평균 0.34 $\mu\text{g/L}$)로 나타났으며 W-4에서 최대 농도(0.83 $\mu\text{g/L}$)가 확인되었다. 전반적으로 비교적 낮은 농도 분포를 유지하고 있으며 이는 Cr이 자연수계에서 비교적 낮은 용해도를 가지는 특성과 관련될 수 있다. Cu는 2.27–72.31 $\mu\text{g/L}$ 범위(평균 22.25 $\mu\text{g/L}$)로 분석 원소 중 두 번째로 높은 평균 농도를 나타냈다. 특히 W-7에서 72.31 $\mu\text{g/L}$ 로 상대적으로 높은 값이 확인되어 국지적 오염 영향 가능성을 반영하는 것으로 해석된다. Cu는 광산 지역에서 산화된 황화광물의 용출 또는 광산 배수와 관련하여 증가할 수 있는 금속으로 알려져 있다(Younger et al., 2002).

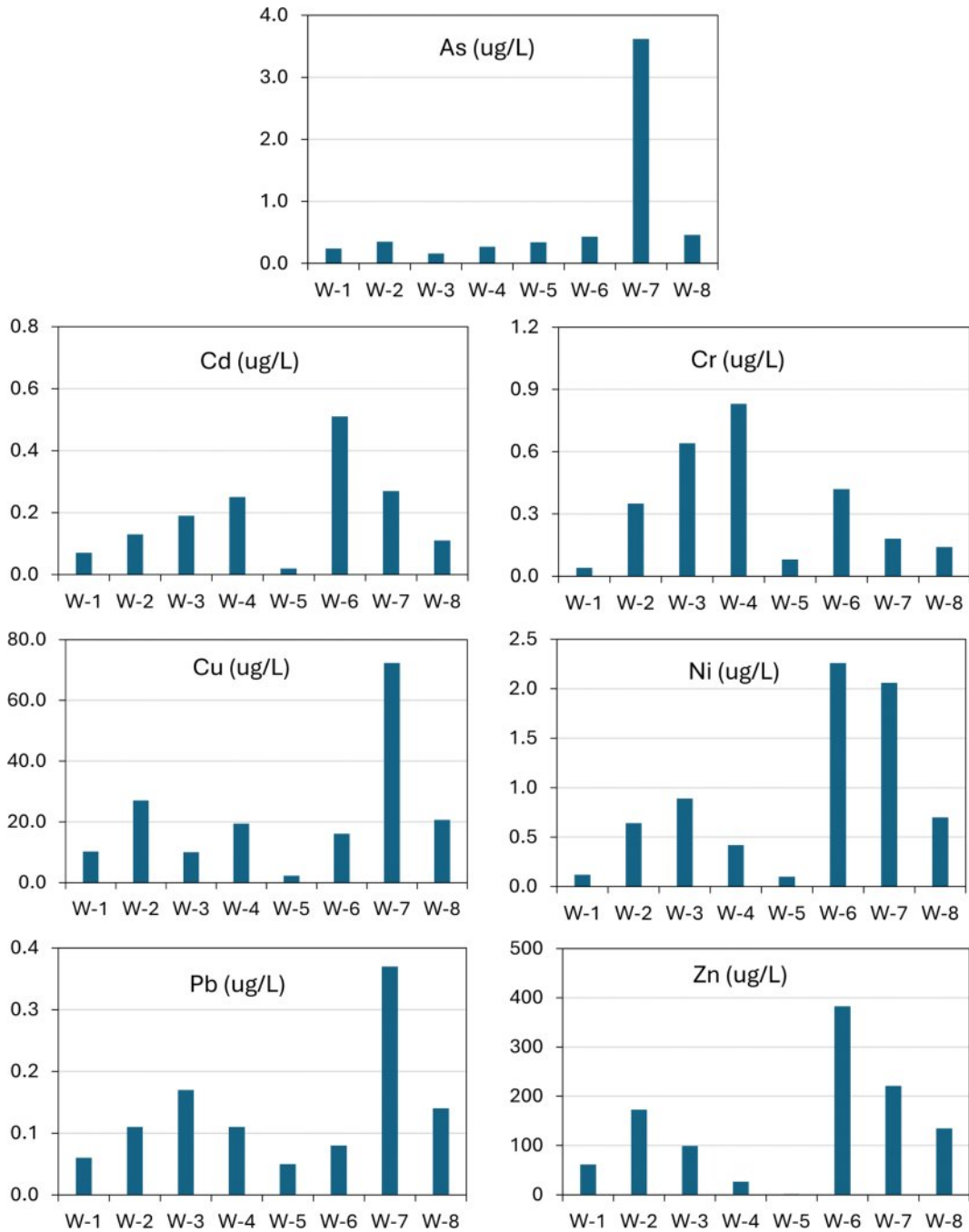


Fig. 4. Heavy metal concentrations in water samples collected from the Seokdam mine area.

Ni는 0.10–2.26 $\mu\text{g/L}$ 범위(평균 0.90 $\mu\text{g/L}$)로 나타났으며 W-6과 W-7에서 상대적으로 높은 농도(각각 2.26 $\mu\text{g/L}$, 2.06 $\mu\text{g/L}$)를 보였다. 이러한 결과는 특정 수계 구간에서 금속 용출이 상대적으로 활발하게 이루어지고 있음을 시사한다.

Pb는 0.05–0.37 $\mu\text{g/L}$ 범위(평균 0.14 $\mu\text{g/L}$)로 비교적 낮은 농도를 보였으며 W-7에서 최대값이 확인되었다. Pb는 자연

수계에서 입자상 물질에 흡착되거나 침전되는 경향이 강해 용존 농도가 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다 (Kabata-Pendias, 2011). Zn은 1.60–382.93 $\mu\text{g/L}$ 범위(평균 137.49 $\mu\text{g/L}$)로 분석 원소 중 가장 높은 농도를 나타냈으며 W-6(382.93 $\mu\text{g/L}$)과 W-7(221.10 $\mu\text{g/L}$)에서 뚜렷한 농도 증가가 확인되었다. Zn은 광산 영향 지역에서 대표적으로 증가하는 금속 원소로, 광물 풍화 및 금속 용출 과정

의 영향을 반영하는 지표 원소로 알려져 있다(Lottermoser, 2010). 전반적으로 Zn과 Cu에서 상대적으로 높은 농도가 확인되었으며 이는 광산 영향 지역에서 흔히 관찰되는 금속 분포 특성과 유사한 경향을 보였다(Nordstrom, 2011).

4.3. 쌀 중 중금속 농도 특성

석담광산 영향권 농경지에서 수확한 쌀 시료의 중금속 농도 분석 결과 및 분포는 각각 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다.

Cd 농도는 평균 0.11 mg/kg(범위 0.01–0.52 mg/kg)으로 나타났으며 R-5에서 0.52 mg/kg의 최대값이 확인되었다. 이는 국내 식품 기준(0.2 mg/kg)을 초과하는 값으로 해당 지점에서 국지적인 오염 영향을 받을 가능성을 시사한다. 토양 평균 Cd 농도(0.30 mg/kg)와 비교할 때 생물농축계수(BCF)는 평균 약 0.37로 비교적 높은 수준을 나타냈다. Cd는 식물체 내 이동성이 높은 금속으로, 뿌리에서 흡수된 Cd²⁺가 목부(xylem)를 통해 지상부와 종실로 전이되는 특성이 있다(Nan et al., 2002). 다만 토양 Cd 농도가 증가하더라도 전이율이 반드시 비례적으로 증가하지 않는 경향이 관찰되었는데 이는 환원 조건에서 CdS 형성 등 화학적 고정화 과정과 관련될 수 있다.

쌀 중 As 농도는 평균 0.14 mg/kg(범위 0.10–0.19 mg/kg)으로 나타났다. 토양 평균 As 농도(14.1 mg/kg) 대비 BCF는 약 0.01 수준으로 낮은 편이었다. 그러나 논토양은 환원 환경이 형성되기 쉬운 As(V)가 As(III)로 환원될 경우 이동성이 증가하고 뿌리 흡수가 촉진될 수 있다(Zhao et al., 2010). Meharg and Zhao(2012)는 일반 논토양에서 쌀 중 총 As 농도가 0.05–0.30 mg/kg 범위로 나타난다고 보고

하였으며 본 연구 결과 역시 해당 범위 내에 포함된다. Zn은 평균 14.49 mg/kg(범위 11.33–16.37 mg/kg)으로 분석된 원소 중 가장 높은 농도를 나타냈다. 토양 평균 Zn 농도(90.9 mg/kg)에 비해 BCF는 약 0.16 수준이었다. Zn은 식물 생장에 필수적인 미량원소로 능동적 수송체(active transport system)에 의해 흡수되며 종실 내 농도가 비교적 높게 유지되는 경향이 있으며, 일반 농경지 쌀의 Zn 농도는 약 15–30 mg/kg 범위로 본 연구 결과 역시 유사한 범위에 해당한다(Alloway, 2013).

Pb는 평균 0.04 mg/kg(범위 0.03–0.10 mg/kg)으로 분석된 원소 중 가장 낮은 농도를 나타냈다. 토양 평균 Pb 농도(27.3 mg/kg)에 비해 BCF는 약 0.002 수준으로 매우 낮은 전이 특성을 보였다. 이는 Pb가 토양 내에서 인산염 및 탄산염 형태로 존재하면서 이동성이 제한되기 때문이다(Kabata-Pendias, 2011). 국내 연구에서도 벼 가식부 Pb 농도는 일반적으로 0.01–0.05 mg/kg 범위로 보고되어 있으며(Lee et al., 2005), 본 연구 결과와 유사한 경향을 보였다. Cu는 평균 1.59 mg/kg으로 토양 평균 농도(26.7 mg/kg)에 비해 BCF 약 0.06 수준을 나타냈다. Cu 역시 필수 원소이지만 토양 유기물과 강하게 결합하는 특성 때문에 토양에서 식물로의 이동성이 상대적으로 제한된다(Alloway, 2013). Ni는 평균 0.37 mg/kg(BCF ≈ 0.01)로 비교적 낮은 전이 특성을 보였으며 Cr은 평균 0.23 mg/kg으로 전반적으로 일정한 분포를 나타냈다. Cr은 주로 Cr(III) 형태로 존재하며 토양 내에서 생체 이용 가능성이 낮은 것으로 알려져 있다(Kabata-Pendias, 2011).

석담광산 영향권 농경지에서 채배된 쌀 시료는 Zn과 Cu에서 상대적으로 높은 농도를 보였으나 이는 필수 미량원소

Table 3. Concentrations of heavy metals in rice samples (R-1 to R-8) collected from paddy fields in the vicinity of the Seokdam mine

Sample No.	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
R-1	0.17	0.15	0.26	2.43	1.06	0.10	16.13
R-2	0.13	0.02	0.25	2.14	0.42	0.03	15.49
R-3	0.10	0.01	0.25	1.80	0.24	0.04	16.37
R-4	0.12	0.16	0.22	1.94	0.33	0.04	14.14
R-5	0.15	0.52	0.22	1.75	0.25	0.03	13.77
R-6	0.19	0.03	0.22	0.67	0.27	0.05	16.26
R-7	0.10	0.01	0.21	1.33	0.15	0.03	12.39
R-8	0.13	0.01	0.19	0.67	0.21	0.03	11.33
Min.	0.10	0.01	0.19	0.67	0.15	0.03	11.33
Max.	0.19	0.52	0.26	2.43	1.06	0.10	16.37
Avg.	0.14	0.11	0.23	1.59	0.37	0.04	14.49
SD	0.03	0.18	0.02	0.65	0.29	0.02	1.90

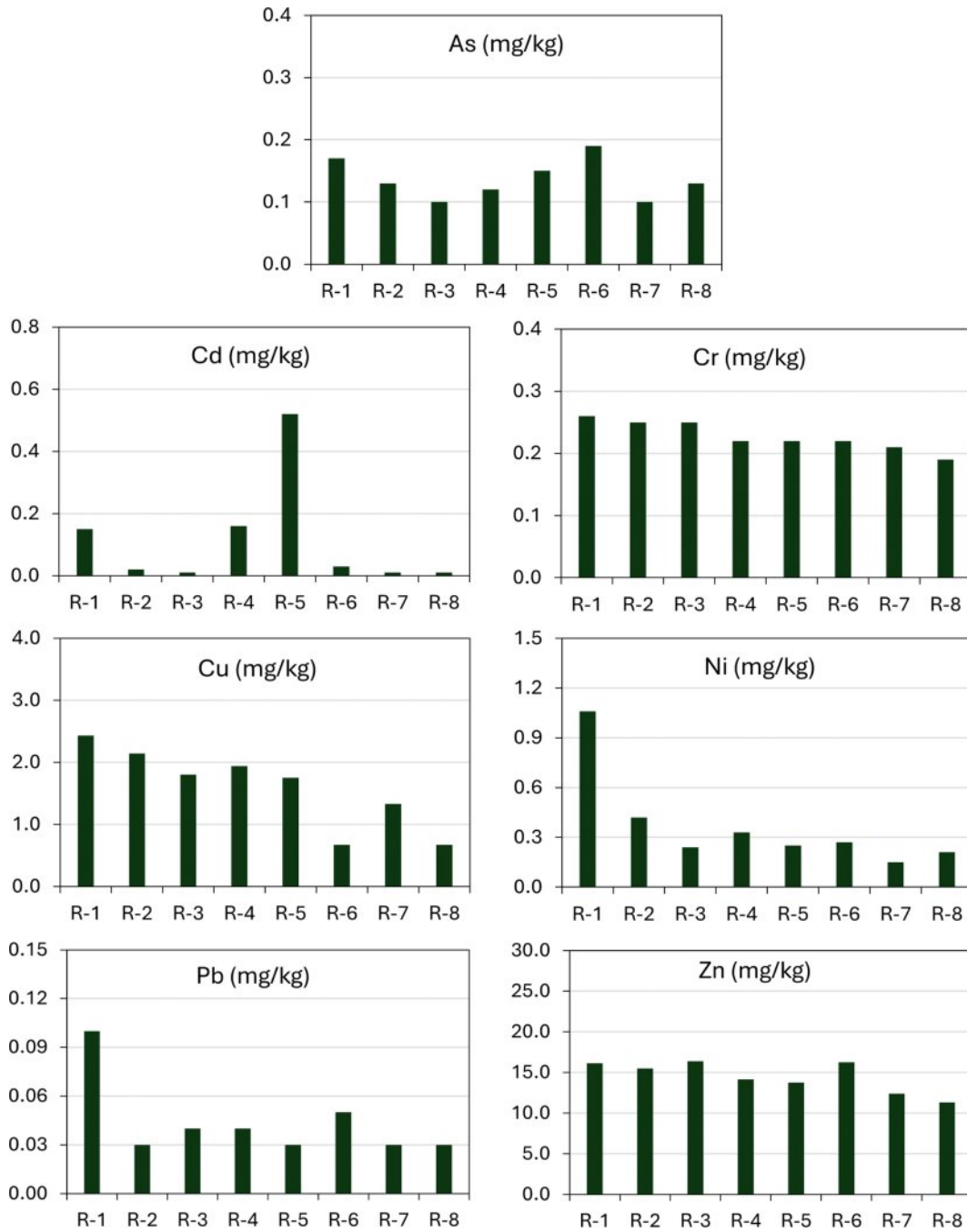


Fig. 5. Distribution of heavy metal concentrations in rice grains (R-1 to R-8) cultivated in paddy fields in the vicinity of the Seokdam mine.

특성에 따른 정상 범위 내 축적으로 판단된다. 반면 Cd는 일부 지점에서 국지적 고농도가 확인되어 지속적인 관리가 필요한 금속으로 판단된다. As는 평균적으로 낮은 BCF 값을 보였으나 논토양의 환원 조건을 고려할 때 장기적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

4.4. 토양-쌀 상관성 분석

동일 지점에서 채취한 논토양과 쌀 시료의 중금속 총농도 간 상관성을 선형회귀분석(linear regression analysis)을 통해 평가하였다(Fig. 6). 원소별 결정계수(R^2)는 큰 차이를 보였으며, 이는 금속의 존재형태(speciation), 이동성(mobility) 및 생체이용 가능성(bioavailability)의 차이를 반영하는 것

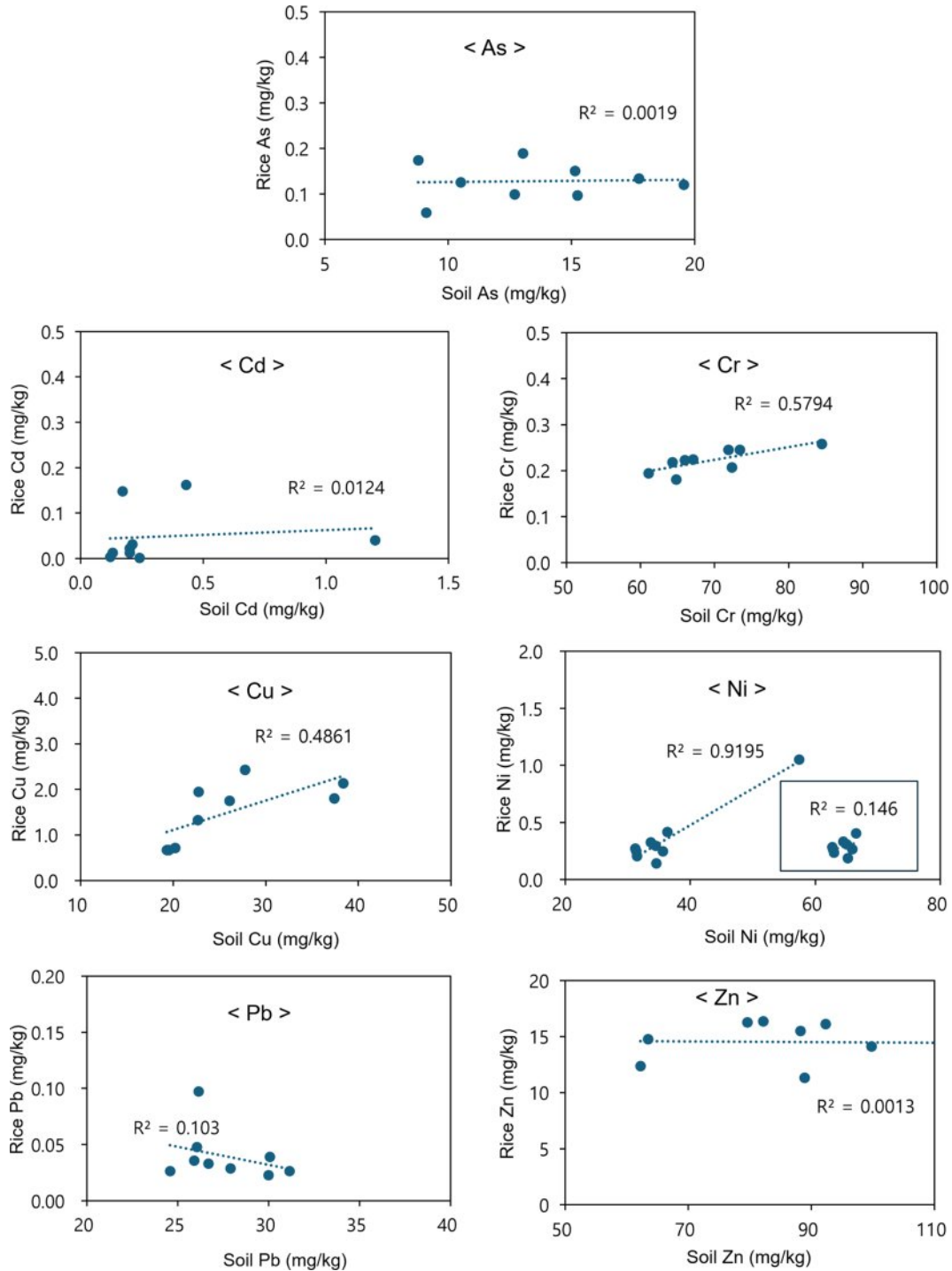


Fig. 6. Scatter plots showing the relationships between heavy metal concentrations in paddy soils and rice grains collected from identical sampling locations.

으로 해석된다 (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011).

As는 $R^2 = 0.0019$ 로 토양과 쌀 간 상관성이 거의 나타나지 않았다. 이는 논토양의 환원 환경에서 Fe(III) (수)산화물의 환원 용해와 같은 산화-환원 과정이 As의 용출과

이동성을 지배하기 때문으로, 토양의 총농도보다 토양 화학조건이 식물 흡수에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다(Zhao et al., 2010; Meharg and Zhao, 2012).

Cd 역시 전체 자료에서 $R^2 = 0.0124$ 로 낮은 상관성을

Table 4. Bio-concentration factors (BCF; C_{rice}/C_{soil}) of heavy metals in soils and rice grains collected from paddy fields in the vicinity of the Seokdam mine

Sample No.	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
SR-1	0.020	0.871	0.003	0.088	0.018	0.004	0.175
SR-2	0.008	0.112	0.003	0.056	0.011	0.001	0.176
SR-3	0.006	0.065	0.003	0.048	0.007	0.001	0.199
SR-4	0.006	0.378	0.003	0.086	0.010	0.001	0.142
SR-5	0.010	0.033	0.003	0.067	0.008	0.001	0.103
SR-6	0.015	0.151	0.003	0.035	0.009	0.002	0.204
SR-7	0.008	0.100	0.003	0.059	0.004	0.001	0.199
SR-8	0.012	0.007	0.003	0.034	0.007	0.001	0.128
Min.	0.006	0.007	0.003	0.034	0.004	0.001	0.103
Max.	0.020	0.871	0.003	0.088	0.018	0.004	0.204
Avg.	0.011	0.215	0.003	0.059	0.009	0.002	0.166

나타났다. Cd는 pH 변화에 따라 가용성이 크게 변하는 이동성 금속으로, 토양 조건에 따라 식물체로의 전이 특성이 달라질 수 있다(Kabata-Pendias, 2011).

Cr($R^2 = 0.5794$)과 Cu($R^2 = 0.4861$)는 중간 이상의 상관성을 나타냈다. 이는 일정 농도 범위에서 토양 내 금속 농도가 쌀 내 농도에 부분적으로 반영되었음을 의미한다. 다만 Cu는 토양 유기물 및 점토광물과 강하게 결합하는 특성 때문에 생체이용 가능성이 제한될 수 있는 것으로 알려져 있다(Kabata-Pendias, 2011).

토양 Ni와 쌀 Ni 간 회귀분석 결과, 전체 자료를 포함한 경우 결정계수는 $R^2 = 0.9195$ 로 매우 높은 양의 상관성을 나타냈다. 그러나 Fig. 6에서 제시된 바와 같이 특정 고농도 지점을 제외한 하위 자료군만을 분석할 경우 $R^2 = 0.146$ 으로 급격히 감소하였다. 이는 일부 고농도 지점이 전체 상관성에 큰 영향을 미쳤음을 의미하며, 토양-식물 간 금속 전이 관계 해석 시 자료 분포 특성을 함께 고려할 필요가 있다는 것을 시사한다.

반면 Pb($R^2 = 0.103$)와 Zn($R^2 = 0.0013$)은 낮은 상관성을 나타냈다. Pb는 토양 내에서 난용성 광물 또는 흡착 형태로 존재하는 비율이 높아 식물체로의 전이가 제한적인 것으로 알려져 있다(Kabata-Pendias, 2011). Zn은 식물 생장에 필수적인 미량원소로 생리적 조절 기작에 의해 흡수가 조절되기 때문에 토양 총농도와 작물 내 농도 간 단순 상관성이 낮게 나타날 수 있다(Alloway, 2013).

4.5. 생물농축계수(BCF) 분석 결과

연구지역에서 채취한 논토양과 동일 지점에서 채배된 쌀 시료를 이용하여 생물농축계수(Bioconcentration Factor, BCF)를 산정하였다(Table 4). BCF는 토양 중 총금속

농도에 대한 쌀 가식부 농도의 비로 정의되며, 토양-식물 전이 특성을 정량화하는 지표로 널리 활용된다(Dudka et al., 1996; Puschenreiter and Horak, 2000). 분석 결과, 금속별 전이 특성은 뚜렷한 차이를 보였으며 이는 금속의 화학적 거동, 토양 내 존재 형태(speciation), 생체이용 가능성(bioavailability) 및 식물의 흡수 조절 기작 차이에 기인하는 것으로 해석된다(Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011).

비소의 평균 BCF는 0.011로 분석 대상 원소 중 가장 낮은 수준을 보였다. 일부 지점(SR-1)에서 0.020의 값을 나타냈으나 전반적으로 토양 대비 쌀로의 전이는 매우 제한적인 것으로 나타났다. As는 토양 내에서 철-알루미늄(수)산화물에 강하게 흡착되어 존재하는 경우가 많으며, 총합량 대비 식물 이용 가능 분획은 제한적인 것으로 보고 되어 왔다(Zhao et al., 2010). 특히 논토양에서 환원 환경이 형성될 경우 As의 이동성이 증가할 수 있으나(Meharg and Zhao, 2012), 본 연구 지역에서는 총합량 대비 전이율이 낮게 유지된 것으로 판단된다.

카드뮴은 평균 0.215로 가장 높은 생물농축 특성을 보였다. 특히 SR-1에서 0.871의 매우 높은 값을 나타내 토양 Cd가 쌀로 효과적으로 전이되었음을 시사하였다. 이는 다른 금속 대비 약 6-30배 높은 수준이다. Cd는 토양에서 비교적 이동성이 높으며 pH 감소 및 경쟁 양이온 감소 시 식물체 흡수가 증가하는 것으로 알려져 있다(Kabata-Pendias, 2011). 또한 Cd²⁺는 Ca²⁺ 및 Zn²⁺와 유사한 이온 반경을 가져 수송체를 통해 흡수될 수 있어 벼 조직으로의 축적 가능성이 상대적으로 크다(Nan et al., 2002). Cd는 체내 반감기가 길고 만성 독성을 유발하는 축적성 금속이므로 낮은 농도라도 지속적인 관리가 요구된다.

크롬은 모든 시료에서 0.003으로 거의 일정한 값을 나타냈다. 이는 Cr의 생체이용 가능성이 매우 낮음을 의미한다. 일반적으로 Cr(III)는 토양 내에서 낮은 용해도를 가지며 식물 흡수가 제한적인 것으로 알려져 있다(Alloway, 2013). 니켈의 평균 BCF는 0.009로 낮은 수준이었다. 일부 시료(SR-1: 0.018)에서 상대적으로 높은 값을 보였으나 대부분 0.01 이하로 나타났다. Ni는 식물의 미량 필수 원소이나 고농도에서는 독성을 나타내며, 토양 pH 및 경쟁 양이온 농도에 따라 흡수율이 달라지는 것으로 알려져 있다(Alloway, 2013). 본 연구 지역에서는 전이 가능성이 비교적 낮은 것으로 평가된다. 납은 평균 0.002로 가장 낮은 전이 특성을 보였다. 일부 시료에서 0.004가 관찰되었으나 전반적으로 토양 내 불용성 화합물(인산염, 탄산염 등) 형태로 존재하여 이동성이 매우 낮은 것으로 해석된다(Dudka et al., 1996; Kabata-Pendias, 2011). 아연은 평균 0.166으로 Cd 다음으로 높은 전이 특성을 나타냈다. Zn은 식물 생장에 필수적인 원소로 능동적 흡수 기작이 존재하며 일정 농도 범위 내에서는 전이율이 비교적 높게 나타날 수 있다(Alloway, 2013). 다만 과잉 축적 시 식물 성장 및 생태계에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있다.

BCF 분석 결과, 금속의 전이 특성은 $Cd > Zn > Cu > As \approx Ni > Cr > Pb$ 순으로 나타났다. 특히 Cd는 평균 0.215, 최대 0.871로 가장 높은 생물농축 특성을 보여 폐광산 인근 농경지에서 관리 우선순위가 높은 원소로 판단

된다. Zn 또한 상대적으로 높은 전이 가능성을 보여 잠재적 위해 요소로 평가된다. 반면 As, Cr, Ni 및 Pb는 낮은 전이 특성을 나타냈으나 이는 토양 총함량 기준 결과이며 토양의 산화-환원 조건 변화에 따라 전이 특성이 달라질 가능성을 배제할 수 없다(Zhao et al., 2010).

4.6. 혈중 및 요중 중금속 농도

본 연구에서는 중금속 농도가 상대적으로 높게 나타난 8명을 대상으로 혈중 납(Pb), 혈중 카드뮴(Cd), 요중 비소

Table 5. Summary statistics of heavy metal concentrations in blood and urine samples from H-1 to H-8

Sample No.	Blood Lead ($\mu\text{g/dL}$)	Blood Cadmium ($\mu\text{g/L}$)	Urinary Arsenic ($\mu\text{g/L}$)	Urinary Cadmium ($\mu\text{g/g creatinine}$)
H-1	2.01	6.11	0.70	3.68
H-2	1.47	1.90	1.71	5.93
H-3	3.77	1.76	15.79	4.15
H-4	1.81	11.02	1.46	4.40
H-5	3.12	4.26	3.82	2.88
H-6	7.81	1.41	2.93	2.11
H-7	3.48	3.17	1.67	4.57
H-8	1.49	5.93	4.01	10.95
Min.	1.47	1.41	0.70	2.11
Max.	7.81	11.02	15.79	10.95
Avg.	3.12	4.45	4.01	4.83

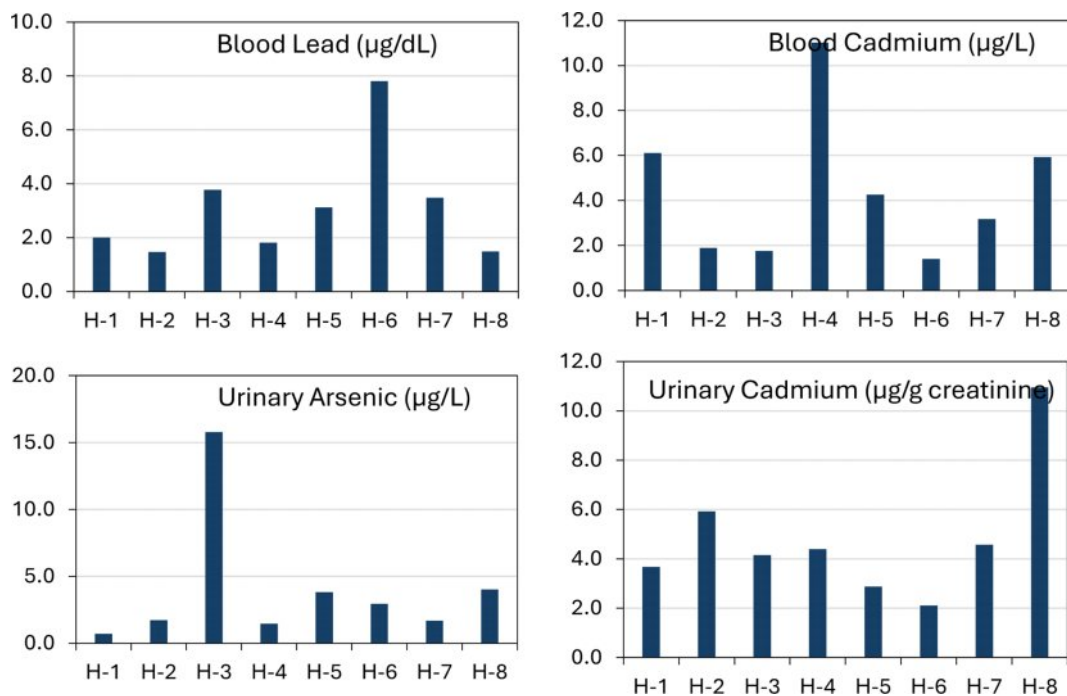


Fig. 7. Concentrations of heavy metals in blood and urine samples collected from H-1 to H-8.

(As) 및 요중 카드뮴(Cd) 농도를 분석하였다(Table 5, Fig. 7).

혈중 납 농도는 1.47-7.81 $\mu\text{g/dL}$ 범위로 나타났으며 평균은 3.12 $\mu\text{g/dL}$ 였다. H-6에서 7.81 $\mu\text{g/dL}$ 로 가장 높은 농도가 확인되었고 H-2에서 1.47 $\mu\text{g/dL}$ 로 가장 낮았다. 일부 시료(H-3, H-5, H-7)는 평균보다 높은 값을 보였으나 전반적으로 개인 간 변동성이 비교적 크게 나타났다. 혈중 Pb는 최근 노출을 반영하는 대표적인 생체지표로 알려져 있으며 환경적 노출원(토양, 음용수, 식품 등)의 영향을 받을 수 있다(Alloway, 2013). 혈중 Cd 농도는 1.41-11.02 $\mu\text{g/L}$ 범위로 나타났으며 평균은 4.45 $\mu\text{g/L}$ 였다. H-4에서 11.02 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높은 값을 나타내 다른 시료와 뚜렷한 차이를 보였다. 혈중 Cd는 비교적 최근 노출을 반영하는 지표로 알려져 있으며 식이섭취 및 흡연 여부 등의 영향을 받을 수 있는 것으로 보고되어 있다(Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011). 본 연구 결과에서도 특정 개인에서 상대적으로 높은 농도가 확인되어 국지적인 노출 가능성을 시사한다.

요중 As 농도는 0.70-15.79 $\mu\text{g/L}$ 범위로 나타났으며 평균은 4.01 $\mu\text{g/L}$ 였다. H-3에서 15.79 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높은 값을 나타냈으며 이는 다른 시료 대비 약 3-20배 높은 수준이었다. 요중 As는 단기간 노출을 반영하는 대표적인 생체지표로 알려져 있으며 음용수 또는 식품 섭취와 밀접한 관련이 있다(Meharg and Zhao, 2012). 특히 쌀과 같은 곡류 식품은 식이성 비소 노출의 주요 경로로 알려져 있어 본 연구 지역에서도 특정 노출원의 존재 가능성을 시사한다. 요중 Cd 농도(크레아티닌 보정)는 2.11-10.95 $\mu\text{g/g creatinine}$ 범위로 나타났으며 평균은 4.83 $\mu\text{g/g creatinine}$ 였다. H-8에서 10.95 $\mu\text{g/g creatinine}$ 로 가장 높은 값을 나타냈다. 요중 Cd는 체내 축적량을 반영하는 지표로 알려져 있으며 장기적 노출 또는 만성 노출 평가에 활용된다(Kabata-Pendias, 2011). 일부 시료에서 상대적으로 높은 값이 확인되어 장기적인 노출 가능성을 시사한다.

혈중 및 요중 중금속 농도는 개인별 변동성이 크게 나타났으며 특정 시료(H-3, H-4, H-6, H-8)에서 개별 원소에 대해 상대적으로 높은 농도가 확인되었다. 특히 요중 As(H-3), 혈중 Cd(H-4), 혈중 Pb(H-6) 및 요중 Cd(H-8)는 각각 최대값을 나타내 국지적인 노출 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 중금속 노출이 단일 환경 매체보다는 식이섭취, 음용수 및 생활환경 등 다양한 경로의 영향을 복합적으로 받을 수 있음을 의미한다.

4.7. 쌀과 혈중 및 요중 중금속 농도 간 상관관계

석담광산 영향권에서 생산된 쌀 중 중금속 농도와 주민의

혈중 및 요중 중금속 농도를 비교 분석한 결과, 금속별로 상관관계의 강도와 양상은 상이하게 나타났으며 전반적으로 강한 선형 상관성은 확인되지 않았다. 이는 인체 생체지표가 단일 식품 섭취에 의한 노출뿐 아니라 수질, 토양 분진, 기타 식이원 및 개인별 생리적 요인 등 다양한 노출 경로를 종합적으로 반영하기 때문으로 해석된다(Alloway, 2013).

카드뮴(Cd)의 경우, 쌀 중 Cd 농도는 일부 지점에서 상대적으로 높은 값(최대 0.52 mg/kg)을 보였으며 토양-쌀 간 생물농축 특성 또한 비교적 높은 수준으로 나타났다. 그러나 쌀 Cd 농도와 혈중 Cd(1.41-11.02 $\mu\text{g/L}$) 및 요중 Cd(2.11-10.95 $\mu\text{g/g creatinine}$) 간 상관성은 전반적으로 낮은 수준으로 나타났으며 통계적으로 유의한 관계는 확인되지 않았다. 이는 Cd의 체내 반감기가 길고 혈중 Cd는 비교적 최근 노출을 반영하는 반면 요중 Cd는 장기적인 체내 축적을 반영하기 때문에 노출 시점에 따른 차이가 존재하기 때문이다(Kabata-Pendias, 2011). 또한 흡연, 음용수, 기타 식품 섭취 등 다양한 노출원이 존재하므로 쌀 Cd 농도가 인체 Cd 농도에 직접적으로 비례한다고 보기는 어려운 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 Cd는 식이 경로를 통해 체내로 유입될 가능성이 높은 금속으로 알려져 있어 쌀 섭취가 잠재적 기여 요인으로 작용할 가능성은 배제할 수 없다(Nan et al., 2002).

비소(As)의 경우, 쌀 중 As 농도는 평균 0.14 mg/kg 수준이었으며 일부 개인에서 요중 As 농도가 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 그러나 쌀 As 농도와 요중 As 농도 간 상관성은 낮게 나타났다. 일반적으로 쌀은 무기비소 노출의 주요 식이 경로로 보고되지만(Meharg and Zhao, 2012), 요중 As는 단기간 노출을 민감하게 반영하며 해산물 섭취(유기비소 형태)나 음용수 등 다양한 노출 경로의 영향을 동시에 받을 수 있다. 또한 논토양의 환원 환경에서 As의 이동성이 증가할 수 있으나(Zhao et al., 2010), 본 연구에서는 토양-쌀-요 간 직접적인 선형 상관관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 쌀 As 농도가 인체 As 농도의 단일 결정요인이라기보다 복합적 노출 경로 중 하나로 작용했음을 의미한다.

납(Pb)은 쌀 중 농도가 매우 낮은 수준(평균 0.04 mg/kg)으로 나타났으며 혈중 Pb와의 상관성 또한 거의 확인되지 않았다. Pb는 토양 내에서 인산염 및 탄산염과 결합하여 난용성 형태로 존재하는 비율이 높고 식물체로의 전이가 제한적인 것으로 알려져 있다(Kabata-Pendias, 2011). 따라서 쌀 섭취가 혈중 Pb 농도에 미치는 영향은 매우 제한적인 것으로 판단되며 혈중 Pb 농도는 토양 분진 흡입이나 생활환경 노출 등 비식이 경로의 영향을 반영했을

가능성이 있다.

쌀과 혈중·요중 중금속 농도 간 상관관계는 전반적으로 약하거나 통계적으로 유의하지 않은 수준으로 나타났다. 이는 인체 생체지표가 특정 식품 농도와 단순한 비례관계를 형성하기보다는 다양한 환경 매체를 통한 다경로 노출의 누적 효과를 반영하는 지표이기 때문이다(Alloway, 2013). 특히 Cd와 As는 쌀을 통한 잠재적 노출 가능성이 존재하나 실제 생체 농도는 개인별 노출 이력, 생리적 흡수율 및 배설 특성 등에 의해 크게 영향을 받을 수 있다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 강원도 홍천군 서면 석담광산 영향권에 위치한 농경지를 대상으로 토양, 수질, 쌀 및 인체 생체지표 시료를 종합적으로 분석하여 중금속의 환경 매체 간 이동 특성과 잠재적 노출 가능성을 평가하였다.

토양 시료 분석 결과, As, Cd 및 Zn이 일부 지점에서 상대적으로 높은 농도를 나타냈으며, 특히 Cd는 특정 지점에서 국지적 축적 특성이 확인되었다. 이는 광산 기원의 황화광물 풍화와 같은 지구화학적 과정에 의해 토양 내 금속이 부분적으로 농축되었을 가능성을 시사한다. 수질 시료에서는 갭구 침출수에서 As 3.62 µg/L 및 Zn 382.93 µg/L의 상대적으로 높은 농도가 확인되어 일부 지점에서 광산 활동의 영향을 반영하는 것으로 판단된다. 쌀 가식부 분석 결과 Cd는 평균 0.11 mg/kg(최대 0.52 mg/kg), As는 평균 0.14 mg/kg으로 나타났으며, 생물농축계수(BCF)는 Cd(0.215)와 Zn(0.166)에서 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이는 Zn과 Cd가 토양-식물 전이 과정에서 비교적 높은 이동성을 가지는 금속임을 의미한다. 토양-쌀 간 상관성 분석에서는 Cd와 Zn에서 상대적으로 높은 결정계수($R^2 = 0.0124, 0.0013$ 수준의 낮은 상관성; 단, Cu와 Cr은 중간 수준)를 보였으나, 전반적으로 강한 선형 상관성은 확인되지 않았다. 이는 토양 내 금속의 지구화학적 형태와 토양 환경 조건이 식물 흡수에 중요한 영향을 미친다는 점을 시사한다.

본 연구의 중요한 특징은 환경 매체 자료와 인체 생체 지표를 직접 연계하여 분석하였다는 점이다. 분석 결과 쌀 중 중금속 농도와 혈중 및 요중 중금속 농도 간에는 전반적으로 낮은 상관성이 나타났으며 통계적으로 유의한 관계는 확인되지 않았다. 일부 시료에서 상대적으로 높은 값이 관찰되었으나 이는 개인별 노출 이력, 식이섭취, 음용수 및 생활환경 등 다양한 요인의 영향을 반영한 결과로 해석된다. 이러한 결과는 폐광산 영향권에서 중금속 노출이

단일 경로가 아닌 다경로를 통해 이루어질 수 있음을 시사한다.

본 연구 결과는 폐광산 영향 지역에서 중금속 오염이 단일 환경 매체에 국한되지 않고 수질-토양-작물-인체로 이어지는 연속적 노출 체계를 형성할 수 있음을 보여준다. 특히 생물농축계수 분석과 매체 간 상관성 분석을 결합한 통합 접근은 광산 영향 지역의 중금속 이동 경로를 이해하고 위해성 평가를 수행하는 데 중요한 방법론적 기반을 제공할 수 있다. 향후 쌀 섭취가 인체 중금속 농도에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위해서는 보다 많은 대상을 포함한 혈액·요 시료 분석과 식이 섭취량 자료를 확보하고, 금속의 화학종(speciation) 분석 및 다변량 회귀 분석을 포함한 통합 노출평가 연구가 필요하다. 이러한 접근은 폐광산 영향 지역 주민의 건강 위해성을 보다 정량적으로 평가하고, 향후 환경 관리 및 건강 보호 정책 수립을 위한 과학적 근거를 제공할 것으로 판단된다.

사 사

본연구는 환경부 국립환경과학원 토양오염우려 폐금속 광사지역 주민건강영향조사(V) 사업의 일환으로 수행된 결과입니다. 연구 수행에 협조해 주신 조사 지역 주민들과 현장 조사에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Alloway, B.J., 2013, Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability, 3rd ed., Springer, Dordrecht.
- Cui, Y.J., Zhu, Y.G., Zhai, R.H., Chen, D.Y., Huang, Y.Z., Qiu, Y., and Liang, J.Z., 2004, Transfer of metals from soil to vegetables near a smelter in Nanning, China, *Environ. Int.*, **30**, 785-791.
- Dudka, S., Miller, W.P., and Logan, T.J., 1996, Effects of chemical form of heavy metals in soils on their uptake by plants, *J. Environ. Qual.*, **25**, 826-834.
- Go, I.-H., Kim, J.-E., Park, S.-Y., Choi, Y.-L., Kim, D.-S., Moon, D.-H., and Chang, Y.-Y., 2022, Applicability evaluation of iron nanoparticles impregnated biochar as a soil stabilizer to reduce plant transfer of arsenic and heavy metals (in Korean), *J. Soil Groundw. Environ.*, **27**(6), 1-10.
- Jung, M.C., and Jung, M.Y., 2006, Heavy metal contamination and environmental assessment of abandoned metal mines in Korea, *Environ. Geochem. Health*, **28**, 33-47.
- Kabata-Pendias, A., 2011, Trace elements in soils and plants, 4th

ed., CRC Press, Boca Raton.

Kim, H.-Y., Park, G.-H., Choi, Y., Hwang, E.-J., Yoon, D., and Lee, J.-U., 2024, The effects of organic, inorganic, and microbiological stabilizers on the transfer of arsenic and heavy metals to rice plant (in Korean), *Econ. Environ. Geol.*, **57**(4), 417-429.

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1974, Geological report of the Hongcheon area, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea.

Lee, J.S., Chon, H.T., and Kim, K.W., 2005, Human risk assessment of As, Cd, Cu and Zn in the abandoned metal mine site, *Environ. Geochem. Health*, **27**(2), 185-191.

Lottermoser, B.G., 2010, Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts, 3rd ed., Springer, Berlin.

Meharg, A.A., and Zhao, F.-J., 2012, Arsenic and rice, Springer, Dordrecht, 157 p.

Ministry of Environment, 2007, Detailed investigation report on soil contamination in abandoned metal mine areas, Ministry of Environment, Seoul, Korea.

Ministry of Environment, 2017, Standard methods for the examination of soil contamination, Ministry of Environment, Sejong, Korea.

Müller, G., 1969, Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River, *Geologisches Jahrbuch*, **96**, 108-118.

Nan, Z., Zhao, C., Li, J., Chen, F., and Sun, W., 2002, Relations between soil properties and selected heavy metal concentrations in spring wheat grown in contaminated soils, *Water Air Soil Pollut.*, **133**, 205-213.

Nordstrom, D.K., 2011, Mine waters: Acidic to circumneutral, *Elements*, **7**, 393-398.

Puschenreiter, M., and Horak, O., 2000, Influence of different soil parameters on the transfer factor of heavy metals to plants, *Environ. Geochem. Health*, **22**, 161-170.

Smedley, P.L., and Kinniburgh, D.G., 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, *Appl. Geochem.*, **17**, 517-568.

Younger, P.L., Banwart, S.A., and Hedin, R.S., 2002, Mine water: Hydrology, pollution, remediation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 464 p.

Zhao, F.-J., McGrath, S.P., and Meharg, A.A., 2010, Arsenic as a food chain contaminant: Mechanisms of plant uptake and mitigation strategies, *Annu. Rev. Plant Biol.*, **61**, 535-559.