

국내 철강슬래그의 재활용 부지에 대한 환경오염 영향조사

김동진¹ · 김정우² · 박기훈² · 조혁진³ · 김재민⁴ · 천정용^{2*}

¹강원대학교 환경연구소

²(주)지오그린21

³한국수자원공사 안동권지사

⁴(주)영풍

Environmental Impact Assessment of Steel Slag Recycling Sites in Korea

Dongjin Kim¹, Jeongwoo Kim², Gihun Park², Hyukjin Cho³, Jaemin Kim⁴, and Jeong-yong Cheon^{2*}

¹Environmental Research Institute, Kangwon National University, Gangwon-Go 24341, Republic of Korea

²Geogreen21 Co., Ltd., Seoul 08376, Republic of Korea

³K-water, Andong, 36611, Republic of Korea

⁴Young Poong Co., Ltd., Bonghwa 36272, Republic of Korea

ABSTRACT

This study surveyed the environmental pollution impacts of a steel slag recycling site located in Dangjin, Korea. Approximately 257,000 tons of steel slag were used, and public concerns were raised due to turbidity and high pH leachate observed after rainfall events. To assess potential contamination, analyses and field surveys were conducted, including leaching tests, up-flow leaching tests, and environmental monitoring of soil, groundwater, and surface water. The steel slag samples met the national regulatory limits for all detected heavy metals, cyanides, and fluorides. However, the pH of the slag was elevated, ranging from 8.1 to 10.4. Soil analysis results showed that the concentration of contaminants was below the Korean soil contamination concern standard and no direct evidence of slag contamination was found. Groundwater and surface water quality also met drinking water and environmental standards, although slightly higher pH and fluoride levels were observed at some locations, which were more likely attributable to local geological conditions rather than the slag. Overall, this study confirmed that the steel slag used in the field is environmentally recyclable. However, high pH may pose a potential risk to the surrounding ecosystem. Therefore, long-term maturation, pH control, and long-term environmental monitoring are necessary to ensure the safe and sustainable reuse of steel slag in land reclamation and construction.

Keywords: Free CaO, Steelmaking slag, Slag recycling site, Leachate, Alkaline leachate, Slag aging

1. 서 론

제철산업은 현대사회에서 건축, 토목, 자동차 등 다양한 분야에 필수적인 철과 특수 강철을 생산하는 중요한 기간 산업이다. 그러나 철과 조강 생산 과정 중에 고체 부산물

은 슬래그(질량 기준 90%), 먼지, 슬러지 등이 발생된다. 평균적으로 강철 1 ton을 생산하면 고로-전로(blast furnace-basic oxygen furnace (BF-BOF))에서 약 400 kg의 고로 슬래그와 전기로(electric arc furnace (EAF))에서 약 200 kg의 제강슬래그가 발생되며, 전 세계적으로 매년 4억 ton 이상 발생한다(Worldsteel Association, 2025; Fig. 1). 슬래그는 강철 생산 공정 단계에 따라 ‘고로슬래그(blast furnace slag (BFS))’와 ‘제강슬래그(steelmaking slag (SS))’로 구분되며, 고로슬래그는 냉각방식에 따라 수재슬래그(granulated slag), 피재슬래그(air cooled slag)로 분류된다. 또한 제강슬래그는 제조공정에 따라 전로슬래그(BOF Slag)와 전기로슬래그(EAF Slag), 그리고 전기로슬래그는 운전조건에 따라

주저자: 김동진, 연구교수

공저자: 김정우, 부사장; 박기훈, 부장; 조혁진, 부장 ;

김재민, 이사; 천정용, 대표이사

*교신저자: 천정용, 대표이사

E-mail: cildon@geogreen21.com

Received : 2025. 8. 28 Reviewed : 2025. 9. 24

Accepted : 2025. 10. 30 Discussion until : 2025. 12. 31

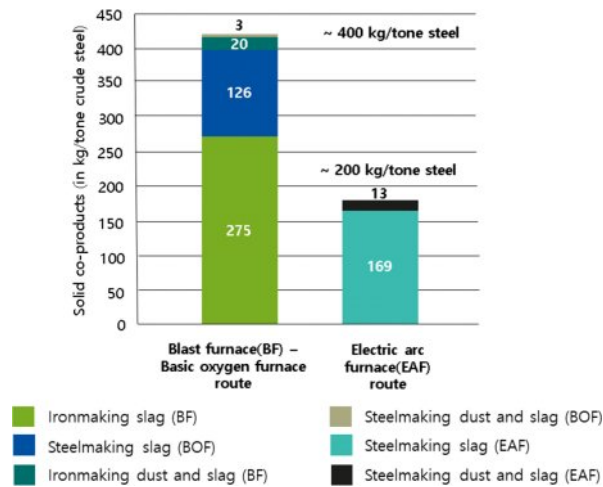


Fig. 1. Main solid co-products per steelmaking route (average outputs in kg/ton crude steel; Worldsteel Association, 2025).

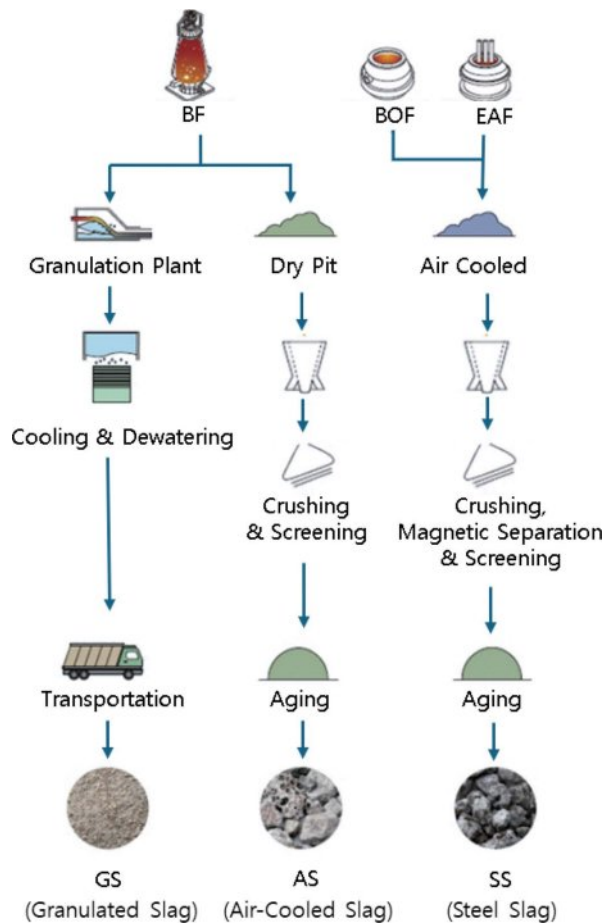


Fig. 2. Schematic diagram of steelmaking processes (KOSA, 2025).

산화슬래그(oxidizing slag) 또는 환원슬래그(reducing slag; ladle furnace slag(LFS))가 생성된다(POSCO, 2019; Fig. 2).

본 연구는 특정 부지의 환경영향 평가에 그치지 않고,

철강슬래그의 발생·재활용 현황과 제도적 배경, 환경문제의 특성을 함께 고려해야 연구 목적을 설명할 수 있다. 이에 따라 서론에는 이러한 내용을 포함하였으며, 이는 재활용 부지의 환경영향을 해석하기 위한 필수적 배경이다. 다음 절에서는 국내외 철강슬래그의 발생량과 재활용 현황을 살펴본다.

1.1. 국내외 철강슬래그의 발생량과 재활용 현황

전 세계적으로 2024년에 고로슬래그의 생산량은 330백만 ~ 390백만 ton, 제강슬래그는 190백만 ~ 290백만 ton으로 추정하고 있다(USGS, 2025).

미국은 2024년에 철강슬래그 재활용량은 약 16백만 ton으로 추산되며, 고로슬래그가 약 54%를 차지하며, 주로 콘크리트 골재(공랭식 고로슬래그)와 아스팔트 포장재, 채움재, 도로 기층으로 사용되고 있다(USGS, 2024).

유럽연합(European Union (EU))은 2023년에 독일, 프랑스 등 11개국에서 철강슬래그가 약 22.1백만 ton(고로슬래그 13.6백만 ton, 제강슬래그 8.5백만 ton)이 생산되었으며, 저장량을 포함하여 22.6백만 ton(102.3%)이 재활용되었다. 이 중에 고로슬래그는 약 108.1%의 높은 재활용률을 보였으며, 96.8%가 시멘트 및 콘크리트 혼화제로 재활용되었다. 제강슬래그는 약 92.9%의 재활용률을 보였고, 62.5%가 도로 건설용으로 재활용되었고, 1.1백만 ton은 최종 매립되었다(Euroslag, 2024).

일본은 2023년에 철강슬래그가 31.1백만 ton(고로슬래그 17.6백만 ton, 제강슬래그 11.6백만 ton)이 생산되었으며, 저장량을 포함하여 29.4백만 ton(96.7%)이 재활용되었다. 이중에 고로슬래그는 100% 재활용되었으며, 시멘트용으로 1,616만 ton(81.6%) 재활용되고, 제강슬래그는 도로용, 기반개량제, 토목용 등으로 793.2만 ton(68.0%)이 재활용되었다(NSA, 2024).

중국은 세계 최대 철강 생산국이나, 정확한 철강슬래그의 발생량 및 재활용률을 확인할 수 없었다. 다만, 중국 국가통계국에 따르면, 2016년 중국의 조강 생산량은 약 881백만 ton이었으며, 제강슬래그는 1000백만 ton이 넘었다. 그중에 재활용률은 약 29.5%에 불과하며 매년 70백만 ton 이상이 폐기된다고 한다. 결론적으로 중국에서는 약 3억 ton의 철강슬래그가 효과적으로 사용되지 않고 있다(Guo et al., 2018; Yi et al., 2012).

국내 철강슬래그 발생량은 2019년 27.6백만 ton에서 2024년 24.9백만 ton으로 감소하는 추세이다. 고로슬래그는 매년 97% 이상 높은 재활용률을 유지하고 있다. 그러나 제강슬래그의 재활용률은 2021년 이후 92.1 ~ 94.5% 수준

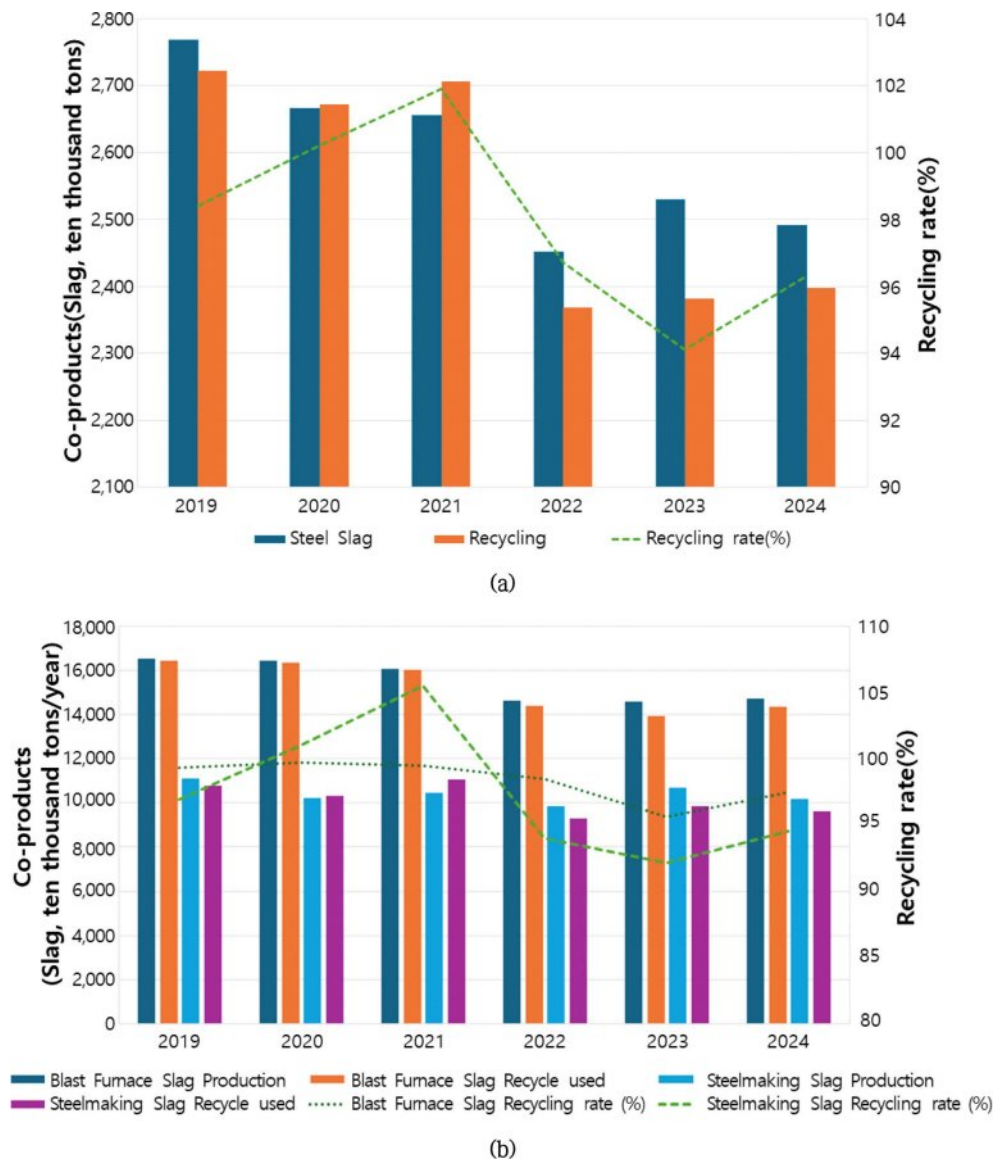


Fig. 3. Steel slag production and recycling status in Korea. (a) Production and recycling of total steel slag, (b) Production and recycling of blast furnace slag and steelmaking slag.

으로 낮았다. 특히 2023년에는 철강슬래그 재활용 목표치인 95%에 못 미치는 94.1%로 감소하였다(Fig. 3). 2024년 철강슬래그의 재활용은 고로슬래그의 경우 시멘트원료(86.6%), 도로·복토용(10.6%) 및 비료용(2.3%) 순으로 재활용되었다. 제강슬래그는 도로·토목용(70.1%)이 가장 많이 재활용되었으며, 그 외에 제철원료(19.2%), 시멘트원료(5.2%) 및 벽돌·골재용(2.4%) 순으로 기초 토목용에 이용되고 있다(KOSA, 2025).

1.2. 철강슬래그의 재활용 방법

세계적으로 철강슬래그의 재활용은 중요한 이슈이며,

재활용 기술 개발과 법적, 경제적 인센티브를 통해 재활용률을 높이려는 노력을 기울이고 있다. 세계철강협회는 철강슬래그를 부산물(co-products)로써 폐기물(waste)과 구분되도록 법률로 규정하고, 재활용을 장려하여 순환 경제에 기여하는 관련 제도 및 정책 마련을 요청하고 있다(Worldsteel Association, 2025). 특히 유럽연합(EU)은 2008년 폐기물 기본지침(Waste Framework Directive (WFD)) 제6조를 개정하여 ‘폐기물 종료(End-of-Waste)’라는 개념을 도입하고, 철강슬래그 등 산업부산물을 재활용하도록 유도하고 있다. 이에 따라, ‘유럽 폐기물 목록(EWC코드 10 02 01)’에서는 철강슬래그를 ‘절대 무해성(Absolute Non-hazardous)’폐기물로

분류함으로써 환경적 무해성을 인정하였으며, 이를 통해 슬래그의 재활용을 장려하고 있다. 아울러, REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemical)와 바젤협약 부속서 IX, 목록 B, B1200에서는 철강슬래그를 비유해(Absolute Non-hazardous)로 분류하여 관련 규제를 완화하고 있다(Basel Convention Secretariat, 2025).

그 외에 일본 자원의 유효 이용 촉진에 관한 법률(Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources, 資源の有効な利用の促進に関する法律)과 독일 순환경제법(Circular Economy Act, Germany, Kreislaufwirtschaftsgesetz)은 폐기물 관련 법률에서 철강슬래그를 “부산물” 또는 “대체 건설 자재(Alternative Construction Materials; Ersatzbaustoff)”로 인정하고, 재활용을 의무하거나 권장하고 있다(APEUR, 2018; KrWG, 2023). 우리나라에서도 「폐기물관리법」 및 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에서 철강슬래그를 “지정부산물”로 규정하고, 환경부와 산업통상자원부의 ‘철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침’을 통해 재활용 방법 및 목표율(95%)을 규정하고 있다. 또한 이 지침에 따라 재활용 용도를 원료용(시멘트, 제철 등) 및 골재용(콘크리트, 도로 등)으로 나누고, 16개의 용도로 재활용하도록 하고 있다(MOE, 2021).

1.3. 철강슬래그의 재활용 시 환경문제

그러나, 앞서 언급한 것과 같이 EU, 일본, 한국 등 각 나라의 철강슬래그 중에 제강슬래그의 재활용률은 68 ~ 94.5% 정도로 고로슬래그(97.5 ~ 108.1%)에 비해 낮은 수준이다(Euroslag, 2024; NSA, 2024; KOSA, 2025). 이러한 이유는 제강슬래그에 유리석회(free CaO) 및 유리마그네슘(free MgO)을 함유하고 있기 때문이다(Hong et al., 2019). 제강슬래그는 광물학적으로 Belite(Ca_2SiO_4), Calcium Ferrite($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$), Westite($(\text{Fe}_{1-x-y}\text{Mg}_x\text{Mn}_y)\text{O}_2$), 그리고 유리석회(free CaO)와 같은 광물로 구성되어 있다(EUROSLAG, 2025). 이와 같이 제강슬래그는 철 화합물의 영향을 받아 천연 암석보다 밀도가 높고 강도와 마모 저항성이 우수하여 재활용 가치가 매우 크다. 하지만 제강슬래그는 정련 과정에 투입되는 생석회(CaO)로 인해 미반응된 유리석회(free CaO)를 0.1%에서 최대 20%까지 포함할 수 있다. 이 유리석회는 물(H_2O)과 반응하여 알칼리 화합물인 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)을 생성하며, 팽창 반응을 일으킨다. 이러한 팽창은 콘크리트에 균열을 발생시킬 수 있어 제강슬래그의 재활용을 어렵게 하는 주요 원인이 되고 있다(MOE, 2011; Kim et al., 2014; Kim et al., 2023). 또한, 제강슬래그를 매립한 현장에서 백태 현상과 백탁수가 발생하고, 유출수의

pH가 11.5 ~ 12.5 정도의 강알칼리성을 나타내어 환경오염 우려를 일으키고 있다(Park et al., 2012). 최근에는 광양, 여수, 새만금 등에서 슬래그 유출수로 인한 피해 사례가 보고되고 있으며, 본 연구 대상지역인 충청남도 당진시 송산2일반산업단지(2-1공구)도 2022년 민간환경감시센터가 성토된 제강슬래그에서 유출된 빗물이 인근 농경지와 호수로 유입되어 환경을 훼손한다는 민원이 제기되기도 하였다. 해당 슬래그는 환경표지 인증 제품으로 등록이 되어 있으나, 유출수의 pH가 12.5 이상 높아 민원이 발생되었다(Hwang, 2021; Na, 2021; Park, 2022; Im, 2022; Kim, 2023).

1.4. 국내외 법/제도 및 사례 분석

국내외적으로 철강슬래그의 백탁수(또는 고농도 pH) 및 팽창 문제를 방지하기 위하여 슬래그를 일정 기간 “숙성(Aging) 과정”을 통해 침출 발생 가능성과 잠재적인 팽창성을 줄여 환경적으로 안전한 구조로 활용하도록 하고 있다. 이에 따라 한국은 철강슬래그를 1~3개월, 미국은 고로 및 제강슬래그를 1~6개월, 호주, 뉴질랜드, 벨기에 및 네덜란드는 최소 12개월 이상 숙성하고, 유리석회 함량을 4.5% 이하까지 낮추도록 규정하고 있다(Lee et al., 2021).

환경부에서는 철강슬래그를 골재 또는 토목공사용, 공유수면 매립지 뒷채움재, 옹벽 및 뒷채움재, 기초잡석용으로 사용되는 경우, 황(S) 성분·생석회 등 용출에 따른 환경오염을 방지하고, 팽창성을 억제하기 위하여 물을 뿌리거나 공기 중에 노출시켜 슬래그를 숙성(aging) 등 안정화된 이후에 재활용하도록 규정하고 있다. 이러한 숙성 기간은 100 mm를 기준으로 파쇄하고, 슬래그 입경이 100 mm 이하일 경우에는 1개월 이상, 100 mm 이상일 경우에는 3개월 이상을 숙성하도록 규정하고 있다. 그러나 슬래그가 숙성기간을 초과하거나, 그 이상의 기간이 지나도 생석회(free CaO) 성분이 용출되어 강알칼리성 침출수로 인한 주변 환경을 오염시키고 백탁수를 발생하는 문제를 일으키고 있다(Park et al., 2012).

외국에서는 철강슬래그의 재활용 지역에 대해 별도의 환경관리 기준을 마련하고 있다. 일본에서는 “철강슬래그 제품 관리에 관한 가이드라인”에 따라 환경문제를 우려하여 높은 pH에 대한 관리 기준을 적용하고 있다. 특히 「수질오탁방지법」에 명시된 배수기준(pH 5.8 ~ 8.6, 해역의 경우 5.0 ~ 9.0)을 초과할 경우 대책을 수립하고 이행하도록 규정하고 있다. 이 대책에는 출하 전 검사, 시공 중 및 시공 후에 조사와 점검이 포함되어 있으며, 문제가 해결되지 않는 경우 제품 판매를 보류하도록 권고하고 있다(Nippon

Slag Association, 2025). 유럽연합(EU)은 CINDERELA 프로젝트를 통해 2차 원자재(Secondary Raw Materials (SRM)) 사용 시에 재활용지역의 투수 여부에 따라 비소 등 17개 항목의 침출수 기준을 제안하고 있다(Juez, 2021). 오스트리아와 독일은 철강슬래그 등 폐기물의 재활용에 대해 사용 등급을 구분하고, 포장 여부, 수리지질학적 민감성 등을 고려하여 재활용지역에 대한 환경관리를 하고 있다(LAGA, 2003; ACMRA, 2007). 국내에서도 「폐기물관리법」에 따라 폐기물을 재활용하는 과정에서 토양, 지하수, 지표수 등 자연환경 매체에 직접 접촉되어 오염을 유발할 가능성이 있는 경우, 사전에 환경영향을 평가하여 재활용 허용 여부를 결정하는 “재활용 환경성 평가”를 시행하고 있다. 이에 따라 토양이나 공유수면 등에 성토재·보조기층재·복토재·도로기층재·채움재로 재활용하는 고로슬래그와 제강슬래그(R-7-1, R-7-2유형)에 대해 “매체접촉형 재활용 환경성 평가”를 시행하고 있다. 이러한 평가를 통해 슬래그의 유해물질 함량 및 용출 특성(pH 변화 등)을 분석하여 재활용 과정에서 발생할 수 있는 환경오염을 사전에 검토하고 있다(MOE, 2017; MOE, 2025b).

그동안 국내 철강슬래그 관련 연구는 슬래그의 발생, 재활용 현황, 그리고 건설 재료로서의 적용성 평가 등을 통한 재활용률 향상에 집중되어 왔다. 최근 들어 철강슬래그의 재활용 기준이나 재활용 방식에 대한 문제점을 다루는 연구가 진행되고 있지만, 백탁수 및 강알칼리성 침출수로 인한 토양, 지하수, 지표수 등 주변 환경영향에 대한 조사나 연구는 여전히 부족한 실정이다. 이러한 정보 부족은 환경오염 우려로 이어져 철강슬래그의 재활용률을 낮추는 원인이 되고 있으며, 이에 따른 슬래그의 적치 문제와 부지확보, 적치장의 환경오염 처리와 재활용 목표 미달성 등 환경적·경제적·법률적 문제를 가지고 있다. 따라서 본 연구는 충청남도 당진시 “송산2일반산업단지” 내에 철강슬래그를 재활용한 부지의 환경오염 피해를 명확히 파악하기 위해 주변 지역의 환경(토양, 지하수, 지표수 등)영향을 정량적으로 조사·연구하여 철강슬래그의 재활용을 확대할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 지역

연구 지역(송산2일반산업단지 2-1공구)의 면적은 약 3,240,000 m²로 H제철소가 약 257,000 ton의 철강슬래그를 재활용하여 성토한 지역이다. 다만, 2022년 7월에 발생한 강우로 인해 발생한 백탁수 및 강알칼리(pH > 12) 유출

수가 배수관로와 석문호(호수)에 유입되어 환경오염 민원이 제기됨에 따라 2022년 8월부터 10월까지 성토된 철강슬래그를 전량 회수하고, 배수관로의 퇴적물 준설 및 침사지 설치를 통해 부지에서 발생하는 유출수를 중화 처리하였다.

충청남도 당진시 송산2일반산업단지는 서해안에 인접한 평야 지대에 위치하여 전반적으로 해발고도가 낮고 평탄한 지형을 이루고 있다. 연구 지역을 중심으로 동쪽에는 H제철소가, 서쪽에는 역천(지방하천)이 북서 방향으로 흘러 석문호로 유입되며, 남동쪽 하류에서는 서원천(지방하천)이 H제철소 북쪽을 지나 서해로 유입되고 있다.

연구 지역의 지질은 선캄브리아기 변성암이 광범위하게 분포하는 기반암 지역에 백악기의 석영섬록암(Quartz diorite)이 관입해 있는 형태이다. 하천과 호수 주변은 제4기 충적층(Quaternary Alluvium)이 넓게 분포되어 모래, 자갈, 점토 등으로 퇴적된 지층으로 구성되어 있다(KIGAM, 2025).

2.2. 슬래그의 특성 분석

H제철소에서 생산된 슬래그를 제공받아 실험 전에 통풍이 잘되는 곳에서 자연 건조한 후에 공기가 통하지 않는 폴리프로필렌(Polypropylene (PP)) 재질의 병에 넣어 보관하였으며, 시험 항목에 따라 체거름하여 사용하였다.

2.2.1. 용출시험

철강슬래그를 0.5 ~ 5 mm 이하로 체거름한 시료를 국립환경과학원의 폐기물공정시험기준 중에 ES 06150.e의 “시료의 준비”에 따라 용출실험을 시행하였다(NIER, 2022c). 시료는 정확히 100 g을 채취하였고, 추출용매는 초순수에 0.1 M hydrochloric acid(HCl, Daejung, Extra Pure grade)를 사용하여 pH 5.8 ~ 6.3으로 조절하여 사용하였다. 시료와 용매의 비는 1:10(W/V)이 되도록 하여 2 L의 폴리프로필렌 재질의 삼각 플라스크에 넣고 200 rpm, 진탕 폭 4 ~ 5 cm의 왕복 진탕기에서 6시간 동안 진탕하였다. 진탕이 끝난 후에는 GF/B(1.0 μm, whatman)를 사용하여 여과한 후에 분석용 시료로 사용하였다.

수소이온농도(pH)는 pH meter(Thermo Scientific, Orion Star™ A215), 시안(CN) 및 불소(F)는 UV-VIS Spectrophotometer(Thermo Scientific, Orion AquaMate 8000), 카드뮴(Cd) 등 중금속은 ICP-OES(Agilent Technologies, 5800DV)를 이용하여 분석하였다.

2.2.2. 상하류 투수방식의 유출시험

국립환경과학원의 폐기물공정시험기준 ES 06151.1의 “상하류 투수방식의 유출시험”에 따라 16 mm 이하로 체

거름한 뒤에 건조중량 및 밀도를 측정하고 시험용 시료로 사용하였다(NIER, 2022c). 시료를 유리관(내경 10 cm, 높이 44 cm)에 충전하고, 공극을 계산한 후에 일정한 유속으로 용리액을 주입하여 포화시킨 뒤 유출 유속을 시험방법에 따라 조정하였다. 총 유출액은 약 11 L였으며, 여과 등을 거쳐 항목별 분석은 용출시험과 동일한 분석 장비를 이용하여 분석하였다.

2.2.3. 함유량 시험

철강슬래그의 함유량 분석은 토양시료 채취 및 분석 결과 등과 비교하기 위하여 국립환경과학원의 토양오염공정시험기준 중에 ES 07130.c의 “시료의 채취 및 조제”에 따라 전처리한 후에 항목별 시험방법을 적용하여 분석하였다(NIER, 2002a). 항목별 분석은 용출시험과 동일한 분석

장비를 사용하여 분석하였다.

2.3. 부지 환경영향 조사

철강슬래그를 재활용한 송산2산업단지 2-1공구 및 주변 농경지, 그리고 석문호 등 환경오염이 예상되는 지역을 대상으로 환경영향 조사를 하였다(Fig. 4). 시료채취 시기는 토양, 지하수 및 지표수를 각각 구분하여 경우에 따른 영향 피해를 파악하기 위해 강수 시기를 고려하여 각 2회에 걸쳐 조사하였다.

2.3.1. 토양오염 조사

토양시료는 직관타격식 장비를 사용하여 환경부의 “토양 정밀조사의 세부방법에 관한 규정” 따라 시료를 채취하였다(MOE, 2020). 시료채취 위치는 송산2산업단지 2-1공구를

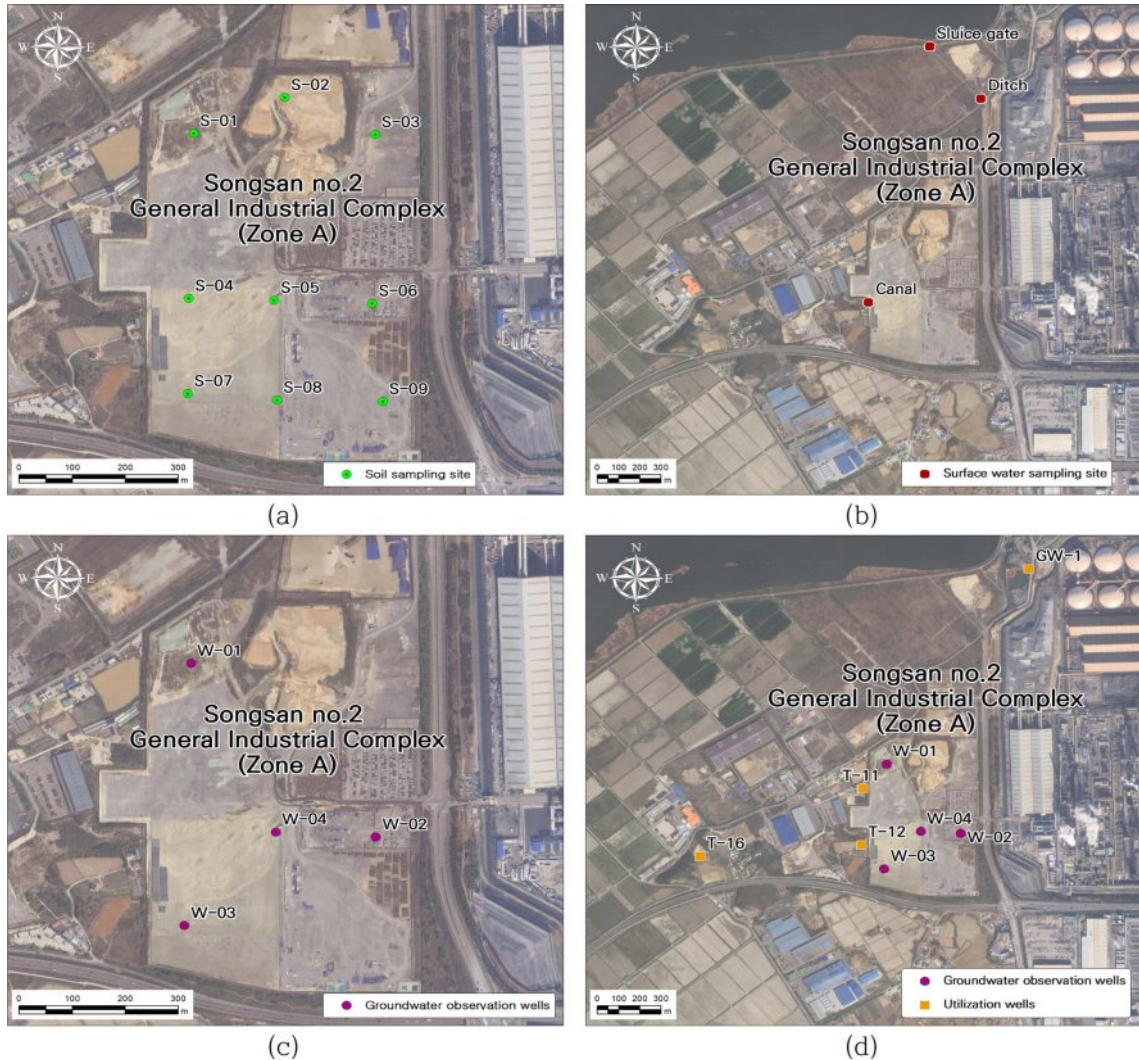


Fig. 4. Soil, groundwater, and surface water survey sites. (a) Soil sampling site (n = 9), (b) Surface water sampling site (n = 2), (c) Groundwater observation wells (n = 4), (d) Groundwater sampling site (observation and utilization wells, n = 9).

중심으로 9개 지점을 선정하였으며, 표토(지표면 밑 0~1 m)와 심토(지표면 밑 1~2 m)로 나누어 각각 채취하였다. 비강우시(1차) 시료는 2023년 4월 27일에 채취하였고, 강우시(2차)는 2023년 9월 22일에 조사하였다. 2차 조사 시기에는 2일(9월 20일) 전에 당진시의 일일 강우량이 62.5 mm를 기록하였다.

채취한 시료는 수소이온농도, 중금속 및 불소 시험용 시료는 폴리에틸렌 봉투, 시안 및 유기물질 시험용 시료는 유리병에 넣어 4°C의 냉장 상태로 실험실로 운반하여 분석 항목에 따라 전처리를 한 후에 분석하였다. 항목별 분석은 위의 용출시험과 동일한 분석 장비를 사용하여 분석하였다.

2.3.2. 지하수 관측정 설치 및 지하수 수질조사

지하수 오염 여부와 지하수 흐름방향을 파악하기 위해 연구 지역에 지하수 관측정을 4개 설치하였다. 관측정은 압축공기 회전식 천공법을 이용하여 천공한 후에 관측정용 관정 스크린(screen)과 덮개(casing)를 설치하였다. 덮개는 벤토나이트로 그라우팅하여 강우 및 오염수 등 이물질이 유입되는 것을 막았다.

지하수 수질조사는 지하수 관측정 4개 지점과 주변지역의 이용관정 5개 지점 등 총 9개 지점을 조사하였다. 조사 시기는 2023년 6월 30일(1차)과 9월 22일(2차)에 2회 조사하였으며, 1차 조사 시에는 1일(6월 29일) 전에 일일 강우량이 34.0 mm, 2차 조사 시에는 2일(9월 20일) 전에 일일 강우량이 62.5 mm로 확인되었다.

2.3.3. 지표수 수질조사

지표수 조사는 조사 대상 지역의 북쪽 배수관로(SW-1)

에서 1개 지점과 석문호 유입 수문(SW-2)에서 1개 지점 등 총 2개 지점에 대해 2회에 걸쳐 조사하였다. 조사 시기는 지하수 조사와 같은 날에 시료를 채취하였다.

지표수와 지하수 시료는 ‘수질오염공정시험기준’과 ‘먹는물수질공정시험기준’을 준용하여 채취한 후에 분석하였다(NIER, 2022a; NIER, 2022d). 채취한 시료는 4°C로 보관 및 운반하여 실험실에서 분석하였으며, 수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(Electrical Conductivity (EC)), 용존산소(Dissolved Oxygen (DO)), 산화환원전위(Oxidation-Reduction Potential (ORP)) 등 현장수질측정 항목은 다항목수질측정기(YSI, EXO)를 이용하여 측정하였다. 카드뮴(Cd), 납(Pb), 구리(Cu), 크롬(Cr), 니켈(Ni), 아연(Zn), 비소(As), 수은(Hg) 등 중금속은 8종은 ICP-MS(Perkin Elmer, ELAN 6000), 불소(F)는 Ion Chromatography(Dionex, ICS-2000), 시안(CN)은 자동분석기(BLTEC QuAAtro39)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 철강슬래그의 오염물질 용출 특성

철강슬래그는 강철 제조공정에서 발생하는 부산물이다. Table 2과 같이 철강슬래그의 화학적 조성은 주로 산화칼슘(CaO), 철(Fe), 산화철(FeO), 이산화규소(SiO₂), 산화마그네슘(MgO), 산화망간(MnO) 등을 포함하고 있다. 철강슬래그는 CaO 함량은 38.62 ~ 47.71%, SiO₂ 함량은 11.0 ~ 33.80%를 함유하고 있다. 이 중에 제강슬래그는 Fe 함량이 17.40 ~ 24.36%를 함유하여 자력 선별을 한 후에 분리 배출되고 있다. 슬래그의 구성성분에는 CaO, MgO,

Table 1. Regulations for the recycling of slag in different countries (Lee et al., 2021)

Country	Slag Type	Regulation and Guideline About Slag Aging
Republic of Korea	Steel slag	- Size \leq 100 mm, stockpiled for at least 1 month - Size \geq 100 mm, stockpiled for at least 3 months
	Air-cooled slag or blast furnace slag	Stockpiled for a minimum of 1 month
USA (DOT)		- Must pass the test of leachate determination (bucket test)
	Steelmaking slag	- Stockpiled for 6 months to allow hydration and expansion - ASTM D4792 [00(2006) Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions]
Belgium	Steelmaking slag	- Stockpiled for a minimum of 12 months
		- Free CaO: \leq 4.5%
Netherlands	Steelmaking slag	- Stockpiled for a minimum of 12 months
		- Free CaO: \leq 4.5%
Australia	Steelmaking slag	- Stockpiled for 1~3 months
New Zealand	Steelmaking slag	- Stockpiled for 1~3 months
Brazil	Steelmaking slag	- Stockpiled for a minimum of 6 months

Table 2. Chemical contents of steel slag in Korea and different countries (wt.%, Guo et al., 2018; KOSA, 2025)

		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	Fet	S
Korea	BF slag	41.81	33.80	11.80	6.90	-	-	0.50	0.50
	Steel slag	44.30	13.80	1.50	5.30	-	-	21.20	-
Countries	Turkey	38.62	19.28	2.71	8.05	7.52	-	22.61	0.28
	Japan	45.80	11.00	1.90	6.50	5.30	1.70	17.40	0.06
	Brazil	45.20	12.20	0.80	5.50	7.10	-	18.80	0.07
	Sweden	45.00	11.10	1.90	9.60	3.10	0.23	23.90	-
	France	47.71	12.25	3.04	6.37	2.64	1.47	24.36	-
	China	42.92	11.51	1.40	4.36	4.04	0.83	23.74	0.07

Table 3. Results of analysis of the pollutant dissolution characteristics of steel slag

	Soil test method		Waste test method			
	Content Test Result (mg/kg)	Soil Standards ²⁾ (mg/kg)	Dissolution Test Result (mg/L)	Up-flow Test Result (mg/L)	Waste Standards ³⁾ (mg/L)	Environmental Mark Standards (mg/L)
pH	10.4	-	-	8.1	-	-
Cr ⁶⁺ (or Cr)	0.6	40	N.D.	N.D.	1.5	0.10
F	287	800	-	N.D.	-	-
CN	N.D. ¹⁾	2	N.D.	N.D.	1	0.20
Cd	N.D.	60	N.D.	N.D.	0.3	0.10
Cu	35.8	2,000	N.D.	N.D.	3	1
As	2.23	200	N.D.	N.D.	1.5	0.50
Hg	N.D.	20	N.D.	N.D.	0.005	0.0030
Pb	9.0	700	N.D.	N.D.	3	1
Zn	408.5	2,000	-	0.064	-	5
Ni	27.1	500	-	N.D.	-	1

1) N.D.: Not Detected.

2) Annex 3: Soil Contamination Concern Standards (3 area) in Annex Enforcement Rule of Soil Environment Conservation Act.

3) Annex 1: Hazardous substances contained in designated waste in Enforcement Rule of Waste Control Act.

MnO 함량이 높아 석회석, 백운석, 망간 광석의 대체재로 사용되는 것으로 알려져 있다(Shen et al., 2003).

철강슬래그의 유해물질 용출 특성은 용출시험과 상향류 투수방식 유출시험을 통해 확인되었으며, 그 결과는 Table 3에 정리하였다.

철강슬래그의 pH는 10.4를 나타냈으며, 상향류 투수방식의 유출시험에서 pH가 8.1로 측정되었다. 국내에서는 철강슬래그의 pH에 대한 환경기준은 없으나, 비교적 알칼리 범위를 나타내고 있다.

철강슬래그의 중금속 등 함유량 분석결과에서 모든 항목이 토양오염우려기준(3지역)보다 현저히 낮은 수준을 보였다. 다만 6가크롬(Cr⁶⁺)은 0.6 mg/kg으로 소량 검출되었고, 불소(F)는 287 mg/kg으로 검출되었으나 우려기준(3지역) 800 mg/kg보다 낮은 수준이었다. 그 외에 니켈(Ni)은

27.1 mg/kg, 구리(Cu)는 35.8 mg/kg, 비소(As)는 2.23 mg/kg, 납(Pb)은 9.0 mg/kg으로 매우 낮은 수준으로 조사되었다. 아연(Zn) 역시 408.5 mg/kg으로 토양오염우려기준(3지역) 2,000 mg/kg보다 낮았으며, 특히 시안(CN), 카드뮴(Cd), 수은(Hg)은 모두 불검출로 확인되었다.

폐기물 시험방법에 따른 용출 및 상향류 투수방식의 유출시험 결과, 6가크롬(Cr⁶⁺), 시안(CN), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 수은(Hg), 납(Pb)은 용출시험과 상향류 투수방식의 유출 시험에서 모두 불검출되어 「폐기물관리법 시행규칙」의 <별표1>에 제시된 기준을 모두 충족하였다. 다만, 상향류 투수방식의 유출시험에서 아연(Zn)이 0.064 mg/L로 소량 검출되었으나, 환경부의 “환경표지 인증기준” 5 mg/L에 비해 현저히 낮은 농도 수준이었다(MOE, 2022).

결론적으로 철강슬래그는 「토양환경보전법」, 「폐기물관리법」 및 「환경표지 인증기준」에 제시된 모든 항목을 충족하였다. 이에 따라 「폐기물관리법 시행규칙」의 <별표 5의3>에 따른 토양이나 공유수면 등에 성토재·복토재·도로기층재·채움재 등으로 재활용하는 “R-7 유형”의 재활용 기준을 만족하였다. 다만, pH에 대한 규정은 없지만, 철강슬래그의 pH 농도가 2023년 토양측정망 운영결과에서 나타난 자연배경농도인 6.0 ± 0.91 (3.7~8.7)보다 높게 측정되었다. 따라서 철강슬래그를 재활용할 경우, 주변 토양에 영향을 줄 가능성이 있으므로 보다 면밀한 검토가 필요하다(MOE, 2025).

3.2. 토양오염 조사 결과

토양오염 조사는 연구 지역에 9개 지점을 표토(0 ~ 1 m)와 심토(1 ~ 2 m)로 구분하여 2회에 걸쳐 총 36개의 시료를 채취하여 분석하였다.

토양의 pH는 1차 조사에서 표토가 8.4 ~ 9.6, 심토가 7.9 ~ 9.9 범위를 보였으며, 2차 조사에서는 표토가 6.4 ~ 9.4,

심토가 6.6 ~ 8.9 범위를 나타냈다. 공간적 농도분포는 조사 시기 및 심도에 따라 일정한 경향을 보이지 않았으나, 대체로 1차 조사보다 2차 조사에서 pH가 낮은 경향을 보였다(Fig. 5(a)).

시안(CN)은 1차 및 2차 조사에서 모두 불검출되었고, 수은(Hg)도 1차 조사에서 모두 불검출되었다. 카드뮴(Cd)도 대부분의 시료에서 불검출 또는 2.3 mg/kg 이하로 낮은 농도를 보였다. 그외에 6가크롬(Cr^{+6})은 N.D. ~ 1.2 mg/kg, 구리(Cu)는 13.4 ~ 187.0 mg/kg, 비소(As)는 1.0 ~ 84.3 mg/kg, 납(Pb)은 4.8 ~ 478.3 mg/kg, 아연(Zn)은 8.7 ~ 765.4 mg/kg, 니켈(Ni)은 N.D. ~ 260.6 mg/kg 등으로 표토 및 심토 토양에서 검출되었으나 모두 토양오염우려기준(3지역)보다 낮은 수준이었다.

불소(F)는 1차 조사에서 표토가 62 ~ 727 mg/kg, 심토가 168 ~ 771 mg/kg, 2차 조사에서는 표토가 208 ~ 546 mg/kg, 심토가 117 ~ 674 mg/kg 범위를 보였으나, 모두 토양오염우려기준(3지역, 800 mg/kg)보다 낮았다(Fig. 5(b)). 불소 농도는 토양 심도와 관계없이 일정한 공간분포에 따라

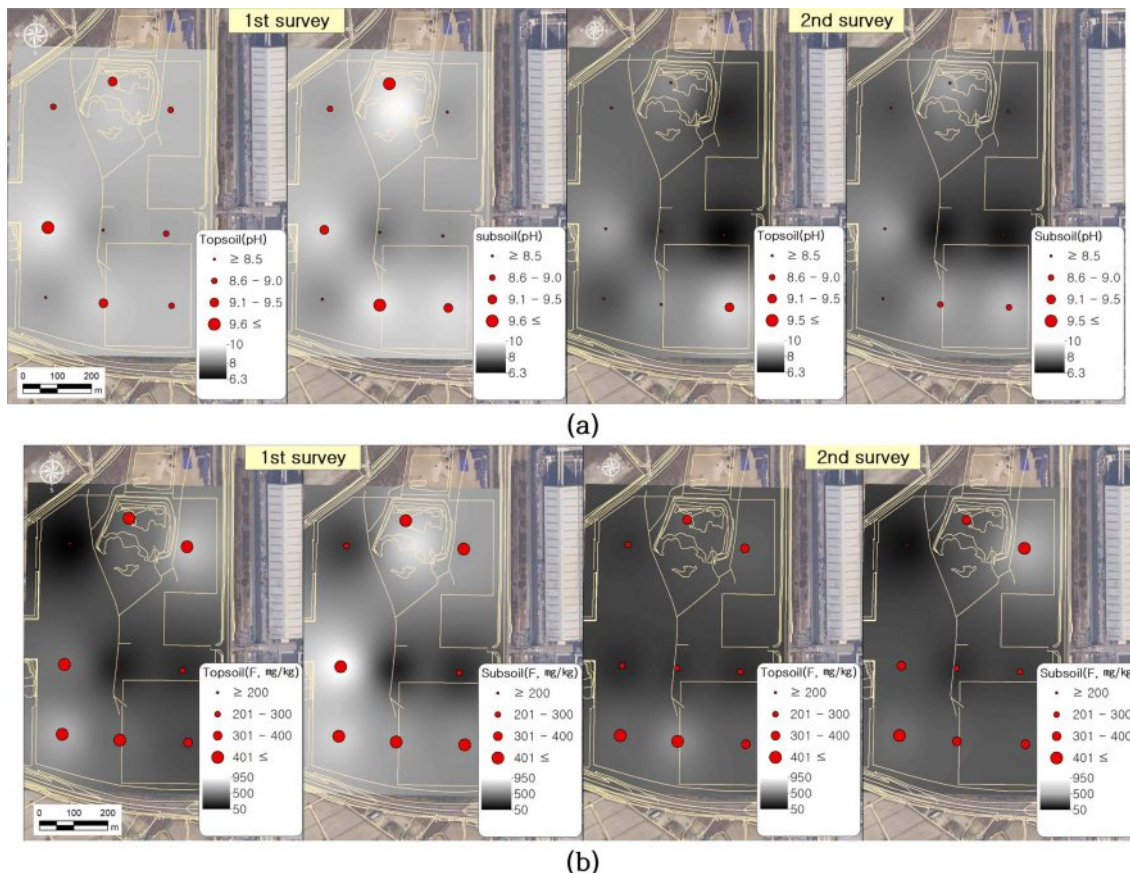


Fig. 5. Soil contamination survey results. (a) pH concentration of topsoil and subsoil in the first and second surveys, (b) fluoride concentration of topsoil and subsoil in the first and second surveys.

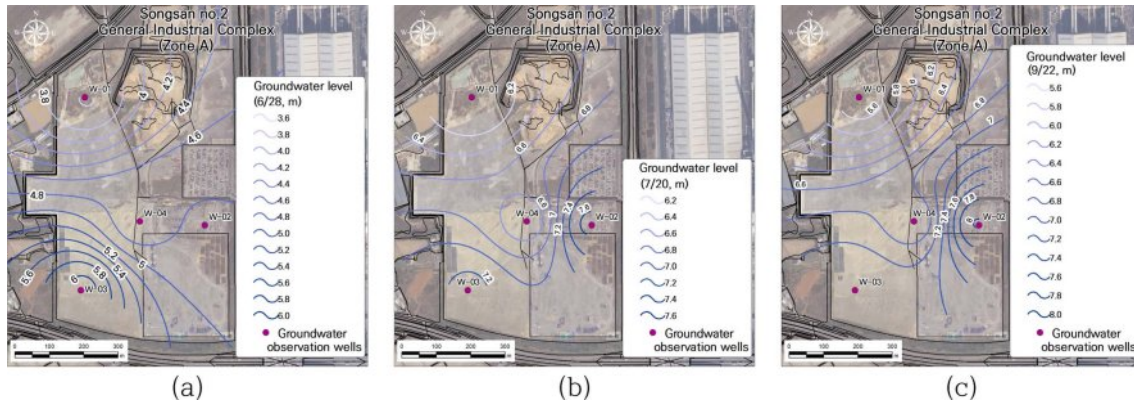


Fig. 6. Distribution of groundwater level in the study area. (a) 1st time (June 28, 2023), (b) 2nd time (July 20, 2023), (c) 3rd time (September 22, 2023).

높은 경향을 보였다. 이러한 경향성은 지질, 지형 및 토지이용 등에 의한 영향으로 추정된다. 불소 농도가 상대적으로 낮은 지점은 주로 석영반암(Kqp) 지역이었고 높은 지점은 주로 충적층(Qa)에 해당하는 지역이었으며, 모암(parent material)에 지질적 특성이 토양의 불소 배경농도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 일반적으로 이러한 현상은 충적층 지역에서는 다양한 불소 함유 광물이 퇴적되고 풍화되면서 토양과 지하수로 불소가 용출되어 그 농도가 높게 나타낸다. 반면에 석영암반 지역은 주요 광물인 석영의 안정성으로 인해 불소 용출원이 적기 때문에 불소 농도가 상대적으로 낮다(Choo et al., 2008). 또한, 변성암(metamorphic rock)이 모암인 지역의 토양에서 불소 농도가 화강암(igneous rock) 및 퇴적암(sedimentary rock)이 모암인 토양보다 높게 보고되기도 하였다(Lim et al., 2018).

결론적으로 송산2산업단지 2-1공구의 토양오염도는 토양오염위험기준(3지역)을 만족하는 것으로 확인되었다. 또한 철강슬래그의 전함량 분석 결과가 토양오염 농도보다 높은 배경농도 수준을 보여 철강슬래그에 의한 오염 피해 영향은 없는 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 제시한 해석은 정량적 통계분석보다는 관찰과 선행연구에 기반한 추정적 설명에 해당하며, 향후 토양 및 지하수 불소농도와 지질학적 특성 간의 인과관계를 통계적으로 검증하는 추가 연구가 필요하다.

3.3. 지하수 및 지표수 수질 조사결과

3.3.1. 지하수위 및 흐름방향 추정

연구 지역의 지하수 환경에 미치는 영향을 파악하고자 4개의 지하수 관측정(W-01 ~ 04)을 설치하였다. 관측정은 구경은 50 mm이며, 심도는 W-01, W-03이 10.0 m, W-02는 11.72 m, W-04는 15.0 m로 설치하였으며, 설치

직후의 지하수 심도는 1.92 ~ 4.14 m였다.

지하수 관측정의 현황 측량을 통해 TM좌표와 해발고도(EL.m)를 확인하였으며, 2023년 6월 28일(1차), 7월 20일(2차), 그리고 9월 22일(3차) 등 총 3회에 걸쳐 지하수위를 측정하였다. 측정된 지하수위 값은 공간보간법(역거리가중치법, IDW)을 이용하여 지하수의 분포도로 작성되었으며, 이를 통해 지하수의 흐름방향을 추정하였다.

지하수 흐름방향은 각 조사 시기별로 설치 직후인 1차 조사(6월 28일)에는 대체로 남쪽에서 북쪽으로 흐르는 경향을 보였다. 이후 2차 조사(7월 20일)와 3차 조사(9월 22일)에는 모두 남동쪽에서 북서쪽으로 흐르는 것으로 확인되었다. 결론적으로 연구 지역의 지하수 흐름은 북서쪽에 위치한 석문호 방향으로 흐르는 것으로 추정된다(Fig. 6).

3.3.2. 지하수 및 지표수 수질조사 결과

지하수 수질조사는 연구 지역 내에 지하수 관측정 4개와 주변 지역에서 이용하고 있는 지하수 관정 5개를 포함하여 총 9개 지하수 관정에 대해 2회에 걸쳐 조사하였다.

조사결과에 따르면, 수소이온농도(pH)는 5.8 ~ 8.3 범위로 먹는물 수질기준 및 지하수 수질기준(생활용수, 5.8 ~ 8.5)을 모두 충족하였다. 불소(F)도 5개 관정에서 0.17 ~ 1.41 mg/L로 검출되었으나, 먹는물 수질기준(1.5 mg/L)보다 낮았다. 특히 연구 지역에서는 철강슬래그가 성토된 구간에서 불소 농도가 주변 지역보다 다소 높게 검출되었습니다. 이는 토양오염조사 결과와 같이 충적층의 특성상 불소 함량이 높은 배경농도가 지하수로 유출되었을 것으로 판단된다. 그 외에 비소(As)는 지하수 이용관정(T-15), 크롬(Cr)은 지하수 관측정(W-02)에서 각각 0.01 mg/L, 0.012 mg/L로 미량 검출되었으나, 먹는물 및 지하수 수질기준(0.05 mg/L)보다 낮은 수준이었다. 구리(Cu)는 이용관정 4곳(0.005 ~

Table 4. Groundwater and surface water quality analysis results

			pH	F (mg/L)	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Hg (mg/L)	Ni (mg/L)	CN (mg/L)		
Ground water	1st	Minitering Wells	W-01	7.9	0.19	N.D. ¹⁾	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.008	N.D.	N.D.	N.D.	
			W-02	7.1	1.05	N.D.	N.D.	0.012	N.D.	N.D.	0.008	N.D.	N.D.	N.D.	
			W-03	7.4	0.27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
			W-04	7.2	0.40	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.010	N.D.	N.D.	N.D.
	Utilization Wells	GW-1	5.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.018	N.D.	N.D.	N.D.	
		T-11	5.8	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.006	N.D.	0.040	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
		T-12	5.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.005	N.D.	0.059	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
		T-15	5.9	N.D.	0.010	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.011	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
		T-16	6.0	0.17	N.D.	N.D.	N.D.	0.022	N.D.	0.084	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	2nd	Minitering Wells	W-01	6.5	0.69	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
			W-02	8.3	1.41	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
			W-03	7.6	0.30	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
			W-04	6.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Utilization Wells	GW-1	7.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.015	N.D.	0.010	N.D.	N.D.
		T-11	7.2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.090	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		T-12	6.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.037	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		T-15	6.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		T-16	7.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.010	N.D.	0.055	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Surface Water	1st	SW-1	8.1	0.74	N.D.	N.D.	N.D.	0.006	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
		SW-2	7.5	0.78	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	2nd	SW-1	11.3	0.69	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
		SW-2	8.4	0.74	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Drinking water standards ²⁾			5.8~8.5	1.50	0.050	0.005	0.050	1.00	0.05	3.000	0.001	-	0.01		
Groundwater standards ³⁾ (Living water)			5.8~8.5	-	0.05	0.01	0.050	-	0.100	-	0.001	-	0.01		
Permitted discharge standards ⁴⁾ (Clean area)			5.8~8.6	3.00	0.05	0.02	0.500	1.000	0.100	1.000	0.001	0.1	0.2		

1) N.D.: Not Detected.

2) Annex 1: Drinking Water Quality Standards, in the Rules on Drinking Water Quality Standards and Inspection etc.

3) Annex 9: Groundwater Quality Standards in Enforcement Rules of the Groundwater Act.

4) Annex 13: Water Pollutant Discharge Standards in Enforcement Rules of the Water Environment Conservation Act.

0.022 mg/L), 아연(Zn)은 지하수 관측정 및 이용관정에서 0.008 ~ 0.090 mg/L 검출되었으나, 먹는물 수질기준(3 mg/L) 보다 낮았다. 니켈(Ni)도 주변 이용관정(GW-1)에서 0.01 mg/L로 검출되었으나, WHO 권고기준(0.07 mg/L)을 만족하는 수준이었다. 그외에 중금속류(Cd, Pb, Hg, CN)는 1차 및 2차 조사에서 모두 불검출되었다(Table 4).

지하수 관측정 및 주변 이용관정 모두에서 조사된 11개 항목의 수질은 먹는물 및 지하수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났으나, 일부 항목에서는 차이가 확인되었다. 수소이온농도(pH)와 불소(F)는 관측정에서 더 높은 농도를 보였고, 아연(Zn), 구리(Cu), 니켈(Ni)과 같은 중금속류는 주변 지역 지하수 이용 관정에서 더 높은 농도와 검출 빈

도를 나타냈다. 이러한 결과로 볼 때, 철강슬래그 재활용에 따른 지하수 환경영향은 확인되지 않았다.

지표수 조사는 강우가 발생한 이후에 연구지역의 동쪽과 북쪽에 있는 배수관로(SW-1)와 수문(SW-2)에서 총 2회에 걸쳐 실시하였다.

수질 조사 결과, 대부분 지점에서 수소이온농도(pH)는 수질환경기준(Ia, 6.5 ~ 8.5)과 배출허용기준(청정지역, 5.8 ~ 8.6)을 모두 충족했다. 다만, 2차 조사 시 SW-1 지점에서 pH가 11.3으로 높게 측정되었다. 이는 SW-1 지점과 주변 배수관망이 복잡하여 pH 증가 원인을 특정하기에는 어려웠다. 다만 강우 시 산업단지(불명수 유입 등)나 성토지역의 유출수가 pH를 일시적으로 증가시켰을 가능성이 있었다.

본 연구에서는 이러한 pH 증가 원인을 확인하기 위해 2023년 11월 5일 강우(31.7 mm)가 발생 시점에 1시간 단위로 pH를 재조사하였다. 재조사한 결과, SW-1 지점의 pH가 6.6 ~ 8.0 범위로 확인되어 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 철강슬래그 재활용에 따른 pH 영향은 불분명한 것으로 판단된다. 지표수 관측 지점은 배수관로 내에 위치하여 강우 시에만 유량이 발생하므로, 강우 시 확보된 자료는 희석 효과보다는 부지 영향이 반영된 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 조사 한계를 고려하여 결과를 해석하였다.

또한, 불소(F) 농도가 0.69 ~ 0.78 mg/L로 검출되었지만, 배출허용기준(청정지역, 3 mg/L)보다 낮은 수준이었다. 다만, 이러한 농도는 일반적인 지표수의 배경농도(0.01 ~ 0.3 mg/L) 보다 다소 높은 수준이다(WHO, 2002). 구리(Cu) 농도는 1차 조사 시 SW-1 지점에서 0.006 mg/L로 미량 검출되었다. 그러나 철강슬래그의 용출실험 및 상향류 투수방식의 유출시험에서 불소와 구리가 모두 검출되지 않았기 때문에 이들 항목의 검출이 철강슬래그에 의한 원인으로 특정하기에는 어렵다. 그외에 중금속류(Cd, Cr, Pb, Zn, Hg, Ni, CN)는 1차 및 2차 조사에서 모두 불검출되었다(Table 4).

종합적으로 지표수의 수질 조사 항목 11개 모두가 수질 기준을 만족했으며, 철강슬래그 재활용에 따른 지표수 오염 영향은 확인되지 않았다.

결론

철강슬래그의 재활용 지역에 대한 환경오염 현황을 분석하고, 주변 환경에 미치는 영향을 실측 자료를 바탕으로 평가하였다. 우리나라는 철강슬래그의 재활용 목표를 95%로 정하고 재활용을 추진하고 있다. 그러나, 슬래그에 함유된 유리석회(Free CaO) 성분으로 인해 백탁수 및 강알칼리성(pH > 12) 유출수가 발생할 수 있다는 환경오염 우려가 지속해서 제기되고 있어 슬래그 재활용 활성화에 제한 요인이 되고 있다.

본 연구는 충청남도 당진시 “송산2 일반산업단지” 내에 철강슬래그 재활용 부지를 대상으로 슬래그의 재활용이 주변 환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

철강슬래그에 대한 함유량 및 용출시험 결과, 「토양환경보전법」, 「폐기물관리법」, 「환경표지 인증기준」 등에서 정한 중금속류 등 모든 항목에서 기준을 만족하였으며, 환경적으로 재활용이 가능한 수준임을 확인하였다. 다만, 철강슬래그의 수소이온농도(pH)가 10.4, 상향류 투수방식의

유출시험에서 pH가 8.1로 나타내어 철강슬래그가 강알칼리성을 띠는 특성을 보였다. 토양오염 조사 결과에서도 9개 지점에서 표토 및 심토 토양이 모두 토양오염우려기준(3지역) 이하를 나타내어 철강슬래그에 의한 직접적인 토양오염은 확인되지 않았다. 다만, 불소 농도가 충적층 지역에서 다소 높게 검출되었으나, 지질 특성에 의한 자연 배경농도에 의한 영향으로 판단되었다.

지하수 및 지표수의 수질분석 결과에서도 대부분 항목이 먹는물 수질기준, 지하수 수질기준(생활용수) 및 수질환경기준을 충족하였다. 일부 지점에서 일시적으로 pH가 상승하거나 불소가 미량 검출되었으나, 강우현상, 불명수 유입 또는 지질학적 요인 등 복합적 영향을 받은 것으로 판단되며 철강슬래그의 영향으로 볼 수 없었다. 본 연구의 모니터링 회수와 기간에는 한계가 있어 pH 상승의 원인을 특정하기는 어렵다. 다만 숙성된 철강슬래그는 지하수에서 불소 외의 영향을 보이지 않았으며, 불소는 자연기원으로 해석된다. 지표수의 경우도 불명배관망의 복잡한 영향으로 일시적 pH 상승이 관찰되었으나, 이를 슬래그 기여로 단정하기는 어렵다. 따라서 원인 불확실성을 인정하면서도 현 시점에서는 복합적 요인의 결과로 해석하였다.

이러한 결과는 철강슬래그가 엄격한 기준 내에서 재활용될 경우 환경에 미치는 직접적인 영향은 제한적이지만, pH 변화 등 간헐적이고 국지적인 환경위험이 존재함을 시사하고 있다. 특히 국내의 경우 철강슬래그 재활용 시에 pH에 대한 기준이 없고, 재활용 대상 부지의 수리·지질학적 또는 투수성 등을 고려한 관리 방안 등이 미흡한 제도적 한계가 있다.

철강슬래그는 물리·화학적 특성 및 용출특성 측면에서 환경기준을 만족하며 재활용이 가능한 순환자원으로 국내 외적으로 인정받고 있으나, pH 상승과 같은 알칼리성 유출수(백탁수 등)에 의한 잠재적 오염원이 될 수 있다. 따라서 향후 친환경적 철강슬래그 재활용을 위해 슬래그의 숙성방법을 개선하고, 유리석회(Free CaO) 함유량 기준, 부지 특성을 고려한 재활용 골재의 사용 및 관리 방안, 철강슬래그 재활용 부지의 pH 관리 및 실효적인 사후 환경 모니터링 등 관련 제도 마련이 필요하다. 이러한 환경적 관심과 노력을 통해 철강슬래그의 안정적인 재활용과 환경 보호를 조화롭게 이룰 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 조사 횟수와 기간, 배경 지점 부재, 지화학 지표 및 유량 자료 부족 등에서 한계를 가진다. 따라서 지표수의 일시적 pH 상승이나 불소 검출의 원인을 슬래그로 단정하기는 어렵고, 지질 특성이나 산업단지 배수체계 등 복합적 요인의 영향으로 해석된다. 향후 연구에서는 대조 지점

설정, 지화학 지표 확충, 유량 기반 질량수지 검토, 장기 시계열 모니터링 등을 통해 원인 규명이 필요하다.

사 사

본 연구는 충남녹색환경지원센터의 2023년도 연구개발 사업 “당진 철강산업단지 내 철강슬래그 재활용 현황과 문제점 분석”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Act on Promotion of Effective Utilization of Resources in Japan (APEUR), 2018, e-Gov Legal Search, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=403AC0000000048> [accessed 2025.06.30]
- Austrian Construction Materials Recycling Association (ACMRA), 2007, Guideline for Recycled Building Materials, 7th ed., ACMRA, Vienna.
- Basel Convention Secretariat, 2025, The Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal: Protocol on Liability and Compensation; Annex IX, List B, B1200, <https://www.basel.int> [accessed 2025.06.30]
- Choo, C.H., Kim, J.T., Chung, I.M., Kim, N.W., and Jeong, G.D., 2008, Geochemical aspects of groundwater in granite area and origin of fluoride with emphasis on water-rock interaction, *JJ. Eng. Geol.*, **18**(1), 103-115.
- EUROSLAG, 2024, Statistics 2023, <https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2023> [accessed 2025.06.27]
- EUROSLAG, 2025, Properties of slag products, <https://www.euroslag.org/products/properties/> [Accessed 2025.07.17]
- Guo, J., Bao, Y., and Wang, M., 2018, Steel slag in China: treatment, recycling, and management, *Waste Manag.*, **78**, 318-330.
- Hong, S.H., Yuan, T.F., Choi, T.S., and Yoon, Y.S., 2019, Evaluating microstructure and self-sensing properties of high-strength concrete with electric arc furnace oxidizing slag, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **19**(5), 189-197.
- Hwang, W.H., 2021, Is the harmfulness of steel slag really serious?, *Environmental Media*, <https://m.ecomedia.co.kr/news/newsview.php?ncode=1065590159317297> [accessed 2025.06.26]
- Im, A.Y., 2022, Strengthen standards for steel slag contacting water, *Dangjin Sidae*, <https://www.djtimes.co.kr/news/articleView.html?idxno=95117> [accessed 2025.06.26]
- Juez, J.M., 2021, End-of-Waste Criteria Protocol for Waste Used as Aggregates, CINDERELA Project, <https://www.cinderela.eu/The-project/Reports/D5.5-End-of-waste-criteria-protocol-for-waste-used-as-aggregates> [accessed 2025.06.30]
- Kim, B.S., Choi, S.M., Shin, S.C., Park, S.G., and Kim, J.M., 2023, Physical and chemical properties of atomized electric arc furnace oxidizing slag as fine aggregate, *J. Korea Soc. Constr. Recycled Mater.*, **11**(1), 70-78.
- Kim, S.J., 2023, ‘White Taksu’ leaks again in Gwangyang, Gwangyang News, <https://www.gynet.co.kr/news/articleView.html?idxno=51688> [accessed 2025.06.26]
- Kim, W.K., 2014, Current state of recycling and properties of steel slag, *Magazine of RCR*, **9**(2), 11-15.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2025, GES Big Data Open Platform, https://data.kigam.re.kr/mgeo/map/main.do?process=geology_50k [accessed 2025.07.11]
- Korea Iron & Steel Association (KOSA), 2025, Steel Slag Recycling Performance in 2024 and Recycling Plan in 2025.
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), 2023, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/> [accessed 2025.06.30]
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), 2003, LAGA M20: Technical Rules for the Material Recovery of Mineral Waste, LAGA, Mainz.
- Lee, M.Y., Kang, J.H., Hwang, D.G., Yoon, Y.S., Yoo, M.S., and Jeon, T.W., 2021, Environmental Assessment of Recycling (EAoR) for Safe Recycling of Steelmaking Slag in the Republic of Korea: Applications, Leaching Test, and Toxicity, *Sustainability*, **13**(16), 8805.
- Lim, G.H., Lee, H.G., Kim, H.S., Noh, H.J., Ko, H.W., Kim, J.I., and Kim, H.K., 2018, Evaluation of fluoride distribution, fate and transport characteristics in soils, *J. Soil Groundwater Environ.*, **23**(6), 90-103.
- Ministry of Environment (Korea), 2011, Research on Improvement Plans for Steel Slag Recycling System, MOE.
- Ministry of Environment (Korea), 2017, Recycling Environmental Assessment Manual, MOE.
- Ministry of Environment (Korea), 2020, Detailed Guidelines for Soil Precision Survey, MOE Notice No. 2020-45.
- Ministry of Environment (Korea), 2021, Recycling Guidelines for Steel Slag and Coal Ash Discharge Businesses, MOE Notice No. 2021-77.
- Ministry of Environment (Korea), 2022, Environmental Labeling Product and Certification Criteria, MOE Notice No. 2022-275
- Ministry of Environment (Korea), 2025a, Soil and Groundwater Information System (SGIS), https://sgis.nier.go.kr/web/soilMeasure?pMENU_NO=16 [accessed 2025.07.10]
- Ministry of Environment (Korea), 2025b, Waste Control Act, MOE.
- Na, B.B., 2021, Environmental group calls to stop importing

- hazardous steel slag into Saemangeum, Yonhap News Agency, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210729123051055> [accessed 2025.07.03.]
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2022a, Standard Test Method for Drinking Water Quality, NIER Notice No. 2022-36.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2022b, Standard Test Method for Soil Contamination, NIER Notice No. 2022-38.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2022c, Standard Test Method for Waste, NIER Notice No. 2022-83
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2022d, Standard Test Method for Water Quality, NIER Notice No. 2022-12.
- Nippon Slag Association, 2024, Steel Slag Statistical Yearbook, 2023 ed., Nippon Slag Association, Tokyo.
- Nippon Slag Association, 2025, Guidelines on the Management of Steel Slag Products, Nippon Slag Association, Tokyo.
- Park, J.B., Lee, B.C., Jang, M.H., and Na, H.H., 2012, Environmental characteristics of leachates from steel slag, *J. Korean Geosynthetic Society*, **11**(2), 31-38.
- Park, S.H., 2022, Saemangeum solar power leachate, Ministry of Environment neglects investigation for half a year, The Chosun Ilbo, <https://www.chosun.com/national/transport-environment/2022/05/31/T55266WZPNFHLAK5GYOZU2S4WY/> [accessed 2025.06.26]
- POSCO, 2019, POSCO Eco Report 4: How are 98% Recycled Steel By-products Used? POSCO Newsroom, <https://newsroom.posco> [accessed 2025.06.30]
- Shen, H., and Forssberg, E., 2003, An overview of recovery of metals from slags, *Waste Manag.*, **23**(10), 933-949.
- U.S. Geological Survey, 2024, Mineral Commodity Summaries, 2024, U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- U.S. Geological Survey, 2025, Mineral Commodity Summaries, 2025, U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- World Health Organization (WHO), 2002, Environmental Health Criteria 227: Fluorides, WHO, Geneva.
- Worldsteel Association, 2025, Steel Industry Co-products, <https://worldsteel.org/wider-sustainability/steel-industry-co-products/> [accessed 2025.06.26]
- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., and Chen, H., 2012, An overview of utilization of steel slag, *Procedia Environ. Sci.*, **16**, 791-801.