

제강슬래그의 친환경적 매체접촉형 재활용 방안: 용출시험 및 국내외 재활용 지침 비교

김동현¹ · 황인성² · 신원식^{1*}

¹경북대학교 건설환경에너지공학부

²부산대학교 사회환경시스템공학과

Guideline for Media-contact Recycling of Steel-Making Slag: Leaching Tests and Comparison of International Recycling Guidelines

Donghyun Kim¹ · Inseong Hwang² · Won Sik Shin^{1*}

¹School of Architecture, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University

²Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

Slags from steel-making industry have been recycled at a target rate of 95% and most of them are recycled as media-contact type such as fill and cover materials in Korea. However, as they contain free phase CaO during their generation, they may not only expand and collapse upon contact with water, but high pH leachate and heavy metals leaching may occur. In this study, the Korean leaching procedure (KLP) and up-flow percolation test were performed for the samples collected from 17 steel-making production plants in Korea. The waste quality criteria were met in all tests, but pH of the samples was above 10. There are no regulations on the pH of leachate in most of the countries, however, Germany, Italy, and Australia have set a pH range of 10 to 13 for the leachates. Although slag leachate cannot be considered hazardous based only on its high pH, it is necessary to reduce the pH of leachate to minimize the impact on the surrounding environment. Furthermore, conflicting regulations on wastes handling and management in Korea created confusion on the types of wastes subject to recycling. Therefore, an appropriate management plan for steel-making slags needs to be established. To this end, this study attempted to provide a guideline for managing steel-making slag waste by considering international guidelines and current management practices in Korea.

Key words: Steel-making Slag, Leaching test, Media-contact recycling, Guideline

1. 서 론

철강산업이 성장함에 따라 국제사회의 철강생산량은 꾸준히 증가하고 있으며, 2022년 세계 철강생산량은 1,885 백만톤에 달하는 것으로 나타났다(WSA, 2023). 그에 따라 철강산업의 주요 부산물인 슬래그의 양도 증가하고 있으며, 국내에서는 2022년 2,450만 톤의 철강슬래그가 발생하였고 그중 고로슬래그(Blast Furnace Slag)는 1,460만

톤, 제강슬래그(Steel-making slag)는 990만톤으로 나타났다(KISA, 2023). 국내에서 철강슬래그는 95% 수준의 재활용 목표율이 부여된 중요 지정부산물로 고려되고 있으며, 폐기물관리법 시행규칙에 따른 용출시험 기준을 만족하는 경우 재활용이 가능하다(KMOE, 2023a). 국내에서 발생하고 있는 철강슬래그는 제철원료, 시멘트 원료, 성토용 등 다양하게 재활용되고 있으며, 그중 제강슬래그는 대부분 도로용, 성복토용 골재와 같이 토양, 하천 등의 환경매체와 접촉하는 매체접촉형 유형으로 재활용되고 있다(Fig. 1).

제강슬래그는 생성과정에서 유리석회(Free CaO)를 포함하게 되며, 수분과 반응하는 경우 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 생성되어 슬래그가 팽창/붕괴될 뿐만 아니라 용출되는 침출수는 고 pH 특성을 나타낼 수 있다(Kim et al., 2010;

주저자: 김동현, 석사과정

공저자: 황인성, 교수

*교신저자: 신원식, 교수

Email: wshin@knu.ac.kr

Received : 2024. 01. 10 Reviewed : 2024. 01. 26

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

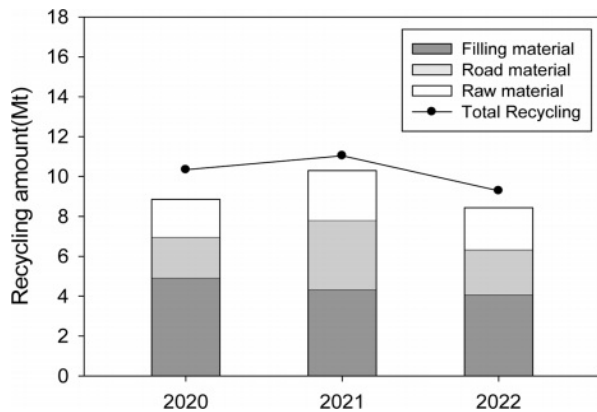


Fig. 1. Steel-making slag recycling purpose and generation amount (2020 to 2022).

Lee et al., 2021). 이를 방지하기 위해 재활용하기 전에 숙성(aging)을 통해 대기 중의 수분 등과 반응시켜 안정화시키는 방안이 제시되고 있다(Lee et al., 2021). 하지만, 숙성만으로는 유리석회를 완전히 제거하는 데 어려움이 있으며, 이로 인해 제강슬래그의 매체접촉형 재활용 현장에서의 환경성 논란은 계속되고 있다(Na, 2021; Park, 2022). 또한 재활용 유형과 관련된 법률 간 상충하는 내용으로 인하여 혼선이 발생함에 따라 생산, 재활용, 판매 등에 있어 갈등 요소 또한 존재하고 있다(Min and Lee, 2015). 따라서, 본 연구에서는 국내에서 발생하고 있는 제강슬래그에 대해 매체접촉형 재활용 환경성평가에 준하여 폐기물 용출시험 및 상향류 투수방식 유출시험에 따른 환경기준 만족 여부를 평가하고, 국내외 제강슬래그 재활용 관리 지침을 검토하여 국내실정에 적합한 관리방안을 제시하고자 하였다.

2. 연구방법 및 범위

2.1. 제강슬래그 용출특성 평가

2.1.1. 제강슬래그 시료

국내 주요 철강사의 17개 사업장으로부터 100 mm 이하의 제강슬래그 시료를 Jaw crusher(Pulverisette 1, Fritsch, Germany)를 사용하여 16 mm 이하로 파쇄한 다음 용출시험용 시료로 사용하였다. 시험 전 통풍이 잘되는 곳에서 72시간 자연건조한 후, 공기가 통하지 않는 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 재질의 병에 넣어 보관하였으며, 시험에 따라 체거름하여 사용하였다.

2.1.2. 용출시험

폐기물공정시험기준 ES 06150.e에 따라 제강슬래그의

용출특성을 평가하였다. 0.5-5 mm로 체거름한 제강슬래그 시료를 용출시험용 시료로 사용하였으며, 용매는 0.1 M hydrochloric acid(HCl, Duksan, Electronic grade)을 사용하여 pH 5.8~6.3으로 조절한 초순수를 사용하였다. 시료와 용매의 비가 1:10(W/V)이 되도록 하여 2 L의 폴리프로필렌 재질의 삼각 플라스크에 넣고 200 rpm, 진탕 폭 4-5 cm 조건에서 6시간 동안 연속 진탕하였다.

2.1.3. 상향류 투수방식 유출시험

국내 매체접촉형으로 재활용하고자 하는 폐기물의 양이 12 만톤 이상 또는 재활용 대상 부지 면적이 3만 제곱미터 이상인 경우 재활용환경성평가 대상으로 구분되어 상향류 투수방식 유출시험을 수행해야 한다(KMOE, 2023a). 본 연구에서는 폐기물공정시험기준 ES 06151.1에 따라 상향류 투수방식 유출시험에 따른 유출액의 특성을 평가하였다. 16 mm 이하로 체거름한 제강슬래그 시료를 용출시험용 시료로 사용하였으며, 내경 10 cm, 높이 44 cm 크기의 유리관(glass column)에 충전하였다. 충전된 건조 시료의 무게를 바탕으로 식 (1)에 따라 유리관 내 공극을 계산하였다. 여기서 θ 는 공극, m_d 는 유리관 내 제강슬래그 시료의 건조 중량(g), ρ_s 는 제강슬래그 시료의 진밀도(g/cm^3), h_s 는 유리관 내 제강슬래그 시료의 충전 높이(cm), r 는 유리관 내경의 반지름(cm)을 의미한다.

$$\theta = 1 - \frac{m_d}{\rho_s \times h_s \times \pi \times r^2} \quad (1)$$

계산된 공극(θ)을 통해 식 (2)에 따라 유출속도를 산정하였으며 v 는 펌프유속(mL/h), t_c 는 포화시간(h) 또는 유출시간(h)을 의미한다. 초순수를 peristaltic pump(BVP Standard, Ismatec™, USA)를 사용하여 유리관 상단까지 채웠으며, 이때 포화시간(t_c)은 2시간이 되도록 펌프의 속도를 조정하였다. 포화가 끝난 후 펌프를 멈추고 유출시간(t_c)을 5시간이 되도록 속도를 조정하였으며, Liquid/Solid (L/S) 비 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2마다 시료를 채취하고 시간에 따른 유출액의 특성을 비교하였다.

$$v = \frac{h_s \times \pi \times r \times \theta}{t_c} \quad (2)$$

2.1.4. 용출시료 분석

제강슬래그 용출시료 및 유출액의 pH, 전기전도도(Electrical Conductivity, EC), 용존산소(Dissolved Oxygen, DO), 산화환원전위(Oxidation-Reduction Potential, ORP)를 즉시 측정하고, 0.45 μm Cellulose nitrate Membrane

filter(Whatman)로 여과한 다음 중금속 분석용 시료로 사용하였다. ICP-OES(Agilent, 5800DV)를 사용하여 모든 용출시료의 중금속 농도를 측정하였으며, 비소와 수은은 VGA 77(Agilent, Vapor Generation Accessory 77)를 ICP-OES 장비와 연결하여 측정하였다. 6가크롬은 10% sulfuric acid(H_2SO_4 , Duksan) 3 mL를 30 mL 용출시료에 넣고 온도가 약 $15^{\circ}C$ 로 떨어질 때까지 기다린 다음, 다이페닐카바자이드 용액($C_{13}H_{14}N_4O$, Duksan) 용액(1%) 1 mL를 넣고 초순수로 50 mL를 맞춘 시료를 UV-Vis Spectrophotometer(Thermo Scientific™ Orion™ Aquamate 8000, USA)로 540 nm에서 흡광도를 측정하였다.

2.2. 국내외 제강슬래그 관리 지침 비교

제강슬래그를 매체접촉형 유형으로 재활용하기 위한 적정 관리 방안을 마련하기 위한 참고자료로 활용하고자 국내외 제강슬래그 재활용 지침 및 가이드라인을 조사하였다. 국내에서 발생하고 있는 제강슬래그를 매체와 접촉하여 재활용하는 경우 폐기물관리법에 따른 용출기준을 우선적으로 만족하여야 하나(Table 1), 재활용 유형에 따라 다르게 적용되는 세부기준이 있어 이를 고려하여 재활용

되어야 한다. 따라서, 「폐기물관리법」을 기준으로 유형별 관련 법률 및 지침을 비교 조사하였다(KMOE, 2020a; KOME, 2023a). 국외의 경우 일본, 유럽, 미국 등 주요 선진국들의 국가별 재활용 기준, 관리지침 및 보고서를 참고하여 조사하였으며, 국내외 자료 중 유일하게 문서화되어 있는 일본 철강슬래그협회의 「철강슬래그 제품의 관리에 관한 지침」을 참고하여 제강슬래그의 특성 및 국내 상황을 반영한 제강슬래그 관리방안을 제안하였다(ISIJ, 2019).

3. 결과 및 고찰

3.1. 제강슬래그 용출특성 평가

3.1.1. 진탕시험(ES 06150.e)

국내 용출시험방법에 따른 제강슬래그 용출시료의 수소이온농도, 전기전도도, 용존산소, 산화환원전위는 Table 2와 같다. 모든 제강슬래그 시료의 용출수 pH는 10.2~12.9로 높게 나타났다. 용출수의 중금속 분석결과 As, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni은 검출되지 않았으며, 용출수의 Cr^{6+} 의 농도는 검출한계 미만(Below Detection Limit,

Table 1. Hazardous waste quality standards (Korea)

Content	As	Cd	Cr^{6+}	Cu	Hg	Pb
Waste Quality Criteria (mg/L)	1.5	0.3	1.5	3.0	0.005	3.0

Table 2. Leaching characteristic of steel-making slags by Korean Leaching Procedure

Steel-making Slag	pH	EC ¹⁾ ($\mu S/cm$)	DO ²⁾ (mg/L)	ORP ³⁾ (mV)
A	12.8	3.98	5.3	-84
B	12.9	3.93	4.2	-132
C	11.8	667.3	4.6	-68
D	10.8	311.6	3.4	-78
E	11.4	341.6	3.5	-68
F	11.6	402.3	4.6	-91
G	11.9	673.9	4.5	-64
H	11.7	589.1	4.3	-142
I	12.1	1153.8	4.8	-55
J	11.3	44.8	4.8	-111
K	11.7	569.7	4.7	-60
L	10.5	147.5	5.3	25
M	10.3	95.2	4.6	26
N	10.2	116.4	4.9	54
O	11.1	188.1	4.4	-30
P	11.0	173.5	4.1	21
Q	10.3	88.4	4.3	53

¹⁾Electrical Conductivity(EC); ²⁾Dissolved Oxygen(DO); ³⁾Oxidation-Reduction Potential(ORP)

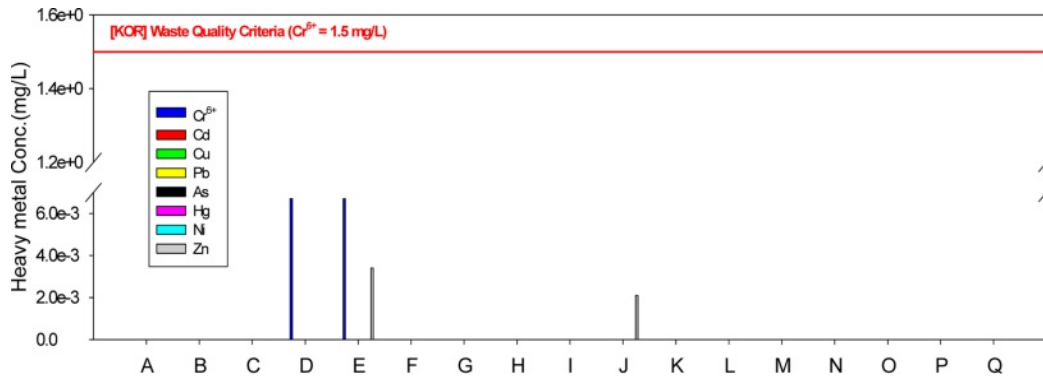


Fig. 2. Heavy metals concentration of the leachate by Korean Leaching Procedure.

BDL, 0.001 mg/L)-0.0067 mg/L로 나타났고, Zn의 농도는 검출한계 미만(BDL, 0.002 mg/L)-0.0034 mg/L로 확인되었다(Fig. 2). 모든 시료에서 제강슬래그의 용출수 pH는 높게 나타났으나, 중금속 농도는 국내 기준(Table 1)을 만족하는 수준으로 검출되었다.

3.1.2. 상항류 투수방식 유출시험(ES 06151.1)

국내 상항류 투수방식 유출시험을 적용하여 시간에 따른 제강슬래그 유출수의 pH는 9.48-13.19로 높게 나타났다(Fig. 3). 또한, 중금속별 시간에 따른 용출 정도는 다르게 나타났으며, 일부 시료에서 유출수의 누적 Cr^{6+} , Zn의 농도가 증가하였다(Fig. 4). 제강슬래그를 매체접촉형으로 재활용함에 따라 용출이 지속되는 경우 중금속 및 고 pH 유출수가 주변 환경에 영향을 미칠 가능성이 있으며, 이를 방지하기 위한 공통되고 합리적인 재활용 방안이 마련되어야 한다.

3.2. 국내외 제강슬래그 용출시험 비교

3.2.1. 회분식 용출시험

국내외 제강슬래그의 용출 특성은 회분식으로 평가되고

있으며, 일본과 독일의 경우 시료의 입자크기별로 나누어 적용하고 있다. 일본은 시료를 2 mm 이하로 파쇄하였을 경우 진탕 시험을 적용하고 있다(JIS, 2005). 국가별 회분식 용출시험 조건은 Table 3과 같다.

3.2.2. 상항류 투수방식 유출시험

상항류 투수방식의 유출시험은 중금속 등 무기물의 침

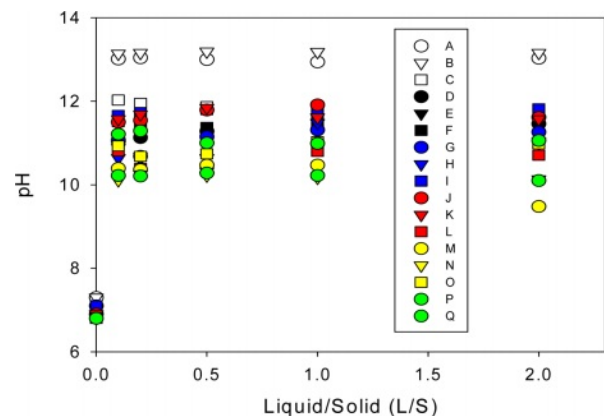


Fig. 3. pH of steel-making slag leachate by up-flow leaching test.

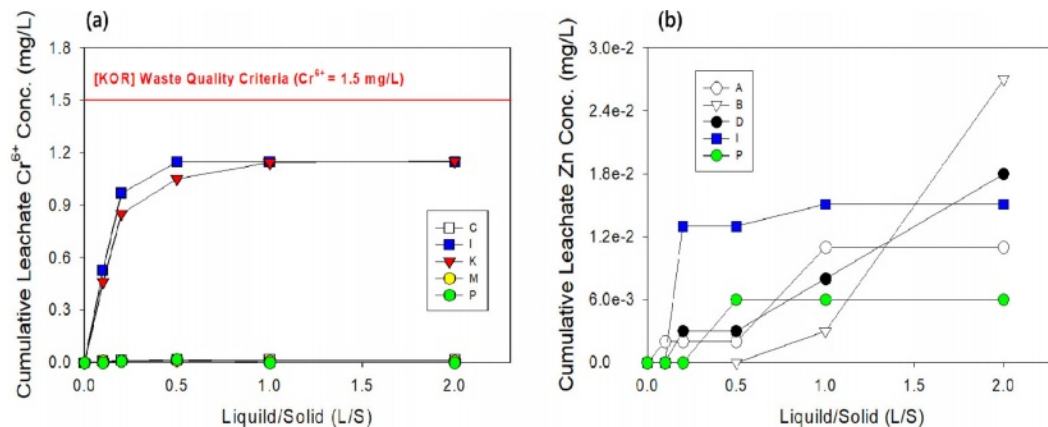


Fig. 4. Heavy metals concentration of steel-making slag leachate by up-flow leaching test.

Table 3. Comparison of Batch Leaching test conditions

Content	KOR ^{a)}	JPN ^{b)}	DEU ^{c)}	EU		USA ^{d)} /AUS ^{e)}	
	ES 06150.e	JIS K 0058-1	DIN 19529	EN 12457-2	EN 12457-4	TCLP (Method 1311)	
Min. Size (mm)	0.5-5	Min: 2 Max: 53	Min: 2 Max: 32	4	10	9.5	
Eluent (pH)	DI water (5.8-6.3)	DI water (5.8-6.3)	DI water (5.0-7.5)	DI water (5.0-7.5)		Acetic Acid (4.93 ± 0.05)	Glacial Acid (2.88 ± 0.05)
Liquid/Solid Ratio	10 : 1	10 : 1	2 : 1	10 : 1		20 : 1	
Time	6 hr	6 hr	24 hr	24 hr		18 hr	
RPM	200	200	5-10	10		30	

ISO 3166 (2006): ^{a)}Korea (KOR); ^{b)}Japan (JPN); ^{c)}Germany (DEU); ^{d)}the United states of America (USA); ^{e)}Australia (AUS).

Table 4. Comparison of Up-flow Column Leaching test conditions

Content	KOR ^{a)}	DEU ^{a)}	NLD ^{a)}	SWE ^{a)}	ISO
	ES 06150.e	DIN 19528	CEN/TS 14405		ISO 212168-3
Min. Size (mm)	16	32	Over 10 (Max: 5%)		2
Eluent (pH)	DI water (5.8-6.3)	DI water (5.0-7.5)	DI water (5.0-7.5)		1 mM CaCl ₂
Liquid/Solid Ratio	2 : 1	2 : 1	10 : 1		10 : 1

ISO 3166 (2006): ^{a)}Korea (KOR); ^{b)}Germany (DEU); ^{c)}Netherlands (NLD); ^{d)}Sweden (SWE).

출 특성을 통해 매체로의 영향을 평가하기 위해 적용되는 시험방법으로 국내에서 폐기물의 재활용환경성평가 시 적용되고 있으며, 주변 환경으로의 영향 예측 및 생태독성 평가 시료에 활용되고 있다(KMOE, 2019). 국내 폐기물 공정시험기준 ES 06151.1의 경우 독일의 DIN 19528에 준하며, L/S비, 포화 및 유출속도 등 시험에 적용되는 조건이 동일하다(NIER, 2017; DIN, 2015). 국가별 상향류 투수방식 유출시험 조건은 Table 4와 같다.

3.2.3. 국내외 제강슬래그 용출기준

국내의 제강슬래그 용출시험 및 그에 따른 환경기준을 비교한 결과, 회분식, 상향류 투수방식 유출시험 등 시험 방법뿐만 아니라, 시험에 적용되는 입자크기, L/S비에 따른 용매량, 시험시간 등 적용되는 기준이 모두 다르다. 국가별 전처리 방법과 분석방법이 상이하기 때문에 제강슬래그 용출기준의 객관적인 수치비교는 불가능하다. 유럽의 ‘End of waste criteria’ 독일, 이탈리아에서는 슬래그의 pH 기준을 제시하고 있으며 최대 pH 13까지 허용하고 있으나, 일본, 스페인, 미국 등 대부분의 국가에서는 pH를 별도로 규제하고 있지 않다(JRC, 2014; CINDERELA, 2021; US EPA, 2022). 일부 국가를 제외하고 슬래그 용출기준에 pH 항목을 포함하지 않는 것으로 볼 때, 슬래

그를 매체접촉형으로 재활용할 경우 별도로 규제하지 않는 것으로 해석할 수 있다.

3.3. 국내외 제강슬래그 매체접촉형 재활용 지침 비교

3.3.1. 한국

제강슬래그는 광재료로 구분되며, 폐기물 용출기준(Table 1)을 만족하는 경우 R-7(매체접촉) 유형과 R-4-2(골재 제조) 유형으로 재활용 가능하다(KMOE, 2023a). 먼저, R-7 유형의 경우 중금속 용출기준뿐만 아니라 재활용 부지 주변 환경에 대한 사후관리를 수행하여야 한다. 사후관리 는 크게 ‘사후관리 준비단계’, ‘사후관리 단계’로 구분된다. ‘사후관리 준비단계’는 매체접촉형 재활용을 계획한 폐기물과 재활용 부지 인근 토양, 지하수 등에 대하여 배경농도 조사를 수행해야 한다. ‘사후관리 단계’는 1단계 기본조사와 2단계 정밀조사로 구분되며, 1단계 기본조사에서는 재활용 부지 인근 지하수를 기본 분석 대상으로 규정하고 있다. 지하수를 분석할 수 없는 경우, 재활용 부지 500 m 이내 하천·호소수 또는 해수를 대체하여 분석할 수 있다. 분기별 1회 수행하며, 수질 매체의 오염확인 시 2단계 정밀조사로 재활용 부지 인근 토양에 대한 정밀조사를 추가로 수행하여야 한다(KMOE, 2020a).

R-7 유형 중 재활용하고자 하는 폐기물의 양이 12 만

톤 이상 또는 재활용 대상 부지 면적이 3만 제곱미터 이상인 경우 재활용환경성평가 대상으로 구분되어 사후관리와 더불어 상향류 투수방식의 유출시험 및 물벼룩 생태독성 평가, 모델링평가 등 추가적인 분석이 필요하다(KMOE, 2019). 하지만, 2016년 이후 재활용환경성평가 승인사례는 단 1건에 불과하며, 평가기관의 부족, 평가 소요기간의 장기화 및 수수료의 현실성 부족에 대한 논쟁은 계속되고 있다(NARS, 2021). 또한, 구체적인 이력정보의 부재로 인한 재활용 대상부지 및 시료채취 지점 선정과 주변 매체의 오염확인 시 슬래그 재활용 또는 과거 이력에 대한 인과관계 확인의 어려움이 예상된다(Min and Lee, 2015).

R-4-2 유형의 경우 제강슬래그가 골재 제품으로서 「환경표지인증」, 「우수재활용제품」, 「한국산업표준」 등의 품질 및 환경기준을 만족하는 경우, 재활용환경성평가를 면제받을 수 있다(KATS, 2019a; KATS, 2019b; KMOE, 2020b; KMOE, 2023a). 환경표지인증기준의 경우 폐기물관리법의 1/3에 해당하는 강화된 중금속 용출기준을 적용하고 있다(Table 5). 하지만, 재활용환경성평가 면제로 사후관리가 배제됨에 따라 해당 기준의 타당성에 대한 검토가 필요하며, 제강슬래그 용출수의 고 pH 특성으로 인해 주변 환경을 고려한 점검과 관리를 이행하는 방안이 필요하다. 또한, 「재활용 관리제도 종합해설서」에 따르면 성복토재 등 건설용 골재로 재활용하는 모든 폐기물의 경

우 순환골재 품질 기준에 따라 제품의 함량 분석결과가 「토양환경보전법」에 따른 토양오염우려기준을 만족해야 한다(KMOE, 2016; KMOE, 2023b). 하지만, 순환골재는 폐콘크리트, 건설오니 등 건설폐기물을 물리적 또는 화학적 처리 과정을 통해 재활용한 것으로 정의되고 있으며, 제강슬래그 골재는 이에 해당하지 않는다(MOLIT, 2021). 따라서, 동일한 재활용 유형에 대해 지침별 상충하는 내용으로 혼선이 발생함에 따라 제강슬래그 원활하게 재활용될 수 있는 공통되고 합리적인 방안이 필요하다.

3.3.2. 일본

제강슬래그를 매체접촉형으로 재활용하고자 하는 경우, 일본 환경성의 「토양오염에 관한 환경기준 시행규칙」에 따른 용출기준(Table 5)을 만족해야 한다. 별도의 제품규격이 있을 경우 해당 기준을 만족해야 하며, 슬래그와 관련하여 별도의 산업표준규격이 마련되어 있다(JIS, 2018a; JIS, 2018b). 또한, 생산에서 폐기까지 환경에 대한 부담이 적고 환경보전에 도움이 된다고 인정된 상품에 대해 에코마크를 시행하고 있으며, 48,700개의 제품에 대하여 인증제도를 시행하고 있으며 자원생산, 유통, 소비, 재활용, 폐기에 걸친 전 과정에서 환경평가를 시행하고 있다(JEA, 2022). 에코마크는 지정유해물질 용출기준 또는 제품규격을 만족하는 경우 인증을 받을 수 있으며, 각 현에서 우선적으로 사용할 수 있는 혜택을 받을 수 있다.

Table 5. Comparison of slag (waste) quality standards in different countries

Content	KOR ^{a)}		JPN ^{b)}		USA ^{c)}		AUS ^{d)}		EU					
	Waste Quality	Eco Label (EL744)	Waste Quality	Road Construction (JIS A 5015)	Waste Quality (TCLP)	BOF	EAF	DEU ^{e)}			ESP ^{f)}		BEL ^{g)}	ITA ^{h)}
								Z0 ^{j)}	Z1.1 ^{j)}	Z1.2 ^{k)}	Water proof			
											Partially	Fully		
pH	-	-	-	-	-	7-13	8-13	6.5-9.0	6.5-9.0	6-12	-	-	-	5.5-12.0
As	1.5	0.50	0.01	0.01	5.0	-	-	0.01	0.01	0.04	0.05	0.06	0.08	0.05
Cd	0.3	0.1	0.003	0.01	0.11	-	-	0.002	0.002	0.005	0.004	0.005	0.003	0.005
Cr	-	-	-	-	0.6	0.2	2	0.015	0.03	0.075	0.05	0.2	0.05	0.05
Cr ⁶⁺	1.5	0.1	0.05	0.05	-	-	-	-	-	-	0.01	0.04	-	-
Cu	3.0	1.0	-	-	-	-	0.2	0.05	0.05	0.15	0.2	0.3	0.05	0.05
Hg	0.005	0.003	0.0005	0.0005	0.25	-	-	0.0002	0.0002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Ni	-	1.0	-	-	11	-	0.5	0.004	0.005	0.15	0.04	0.05	0.075	0.01
Pb	3.0	1.0	0.01	0.01	0.75	-	-	0.02	0.04	0.1	0.05	0.06	0.13	0.05
Zn	-	5.0	-	-	-	1.5	4	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	0.28	3.0
Se	-	-	0.01	0.01	5.7	-	-	-	-	-	0.01	0.04	-	0.01
Mo	-	-	-	-	-	0.1	0.2	-	-	-	0.05	0.28	-	-

ISO 3166 (2006): ^{a)}Korea (KOR); ^{b)}Japan (JPN); ^{c)}the United States of America (USA); ^{d)}Australia (AUS); ^{e)}Germany (DEU); ^{f)}Spain (ESP); ^{g)}Belgium (BEL); ^{h)}Italy (ITA); ⁱ⁾Z0: Recyclable in any soil within criteria; ^{j)}Z1.1: Groundwater may be affected; ^{k)}Z1.2: Little impact on groundwater.

일본 철강슬래그 협회에서는 철강슬래그 제품의 판매에 있어 판매자로서 관리해야 할 사항을 「철강슬래그 제품의 관리에 관한 지침」에 나타내고 있으며, 철강슬래그 제품을 제조하거나 판매하는 회사는 지침에 따라 각각 제품관리 매뉴얼을 정비해야 한다(ISIJ, 2019). 철강슬래그 제품의 품질관리는 법령이나 일본산업규격 등에서 정해져 있는 품질 기준 및 규격을 준수하고 출하 검사가 이루어진다. 철강슬래그 제품의 판매관리는 주문 전, 수주 및 납품, 운송, 시공 중 조사 4단계로 이루어진다: 1단계) 판매자는 수주 전 수요자에게 서면으로 제품에 대한 품질 특성과 pH, 팽창 등 사용 시 주의사항을 설명하고, 수요자로부터 사용 장소, 사용상태, 시공 내용, 시공 방법 등의 설명을 받은 후 현지 조사 필요 여부나 수주 가능 여부, 시공 중 및 시공 후 조사 필요 여부를 판단한다. 2단계) 판매자가 수주를 결정하고 철강슬래그 제품을 납품하는 경우, 수요자에게 시험 성적표와 사용 장소에 따른 환경 안전품질 및 적합성, 안정성 데이터시트 등의 정보를 제시한다. 3단계) 판매자가 철강슬래그 제품을 운송하는 경우, 제품 전달이 확실히 되었음을 확인할 수 있도록 대금 수령, 운반 전표 등을 작성한다. 4단계) 시공 중 조사가 필요하다고 판단된 경우, 판매자는 시공장소를 조사하여 고 pH 수 유출 대책 및 분진 대책 등의 상황을 확인한다. 확인 결과 결함이 있다면 반드시 수요자에게 올바른 취급 방법에 대해 환기하고 기록한다. 특히, 시공 중 일시 보관에 대해서 판매자는 정기적으로 순찰 조사를 진행하고, 일시 보관에 있어 채고 파다에 의한 야적이 생기지 않도록 한다.

해당 지침은 3,000톤 이상의 물량에 대해서 수주 전 현지 조사, 3개월에 1회 이상의 시공 중 조사, 시공 후 조사를 시행해야 한다고 명시하고 있다. 또한 조사 및 조치 결과나 수요자와의 면담 등 전반적인 작성 기록에 대해서는 적어도 10년 이상의 보관기한을 정하여 보관하여야 한다. 또한, 시공 후 조사가 필요하다고 판단된 경우, 판매자는 수요자와 면담 후 필요한 기간과 빈도에 따라 조사를 실시 및 기록한다. 조사 결과 환경영향이 있다면 신속히 필요한 조치를 취한다.

3.3.3. 유럽연합(EU)

(1) 독일

제강슬래그와 같은 광물성 폐기물을 재활용하는 경우 지하수에 미치는 영향에 따라 유형을 구분하고 있으며, 유형에 따라 폐기물 용출기준을 만족해야 재활용이 가능하다(Table 5). 슬래그로부터 발생한 고 pH수가 유출되어 지하수에 미치는 영향이 적은 경우 유출수의 pH는 최대 12까지 허용하고 있으며, 이는 슬래그의 고 pH 특성을 반영한 것으로 해석된다. 광물성 폐기물 기준을 만족한다면, 더 이상 폐기물 관리법의 영향을 받지 않으며 제품으로서 기준을 만족해야 한다(JRC, 2009; JRC, 2014). 매체접촉형 유형의 슬래그 제품에 대한 환경기준은 독일 건축 기술 연구소에서 발행한 ‘기술 건축 규정(MVV-TB)’과 독일 연방 조례에 따른 ‘건축용 재활용 골재(EBV)’를 참고하였다(Table 6)(BFJ, 2022; DIBt, 2022). 광물성 폐기물 기준을 만족한 슬래그 제품을 활용할 경우, 공통적으로 pH, 전기전도도(EC), 중금속으로는 크롬(Cr), 마나듐

Table 6. Quality criteria for slag products (Germany)

Content	MVV-TB ^{a)}		EBV ^{b)}	
	mg/L	mg/kg	SWS1 ^{c)} [=Z1.1 ^{d)}]	SWS2 [=Z1.2 ^{e)}]
pH	10-13	-	9-13	9-13
EC(μS/cm)	1,500	-	10,000	10,000
Cr	0.1	600	0.11	0.19
V	0.25	-	0.18	0.45
As	-	150	-	-
Cd	-	10	-	-
Cu	-	400	-	-
Hg	-	5	-	-
Ni	-	500	-	-
Pb	-	700	-	-
Zn	-	1,500	-	-
Mo	-	-	0.055	0.4

^{a)}Muster Verwaltungsvorschrift-Technische Baubestimmungen (Deutsches Institut für Bautechnik, 2022); ^{b)}Erstbaustoffv (Bundesamt für Justiz, 2022); ^{c)}Stahlwerksschlacke der Klasse; ^{d)}Z1.1: Groundwater may be affected; ^{e)}Z1.2: Little impact on groundwater.

(V)을 규제항목으로 두고 있으며, 건축용 재활용 골재 규제에서는 폴리브텐(Mo)을 추가 규제항목으로 제시하고 있다. pH의 경우 폐기물과 제품에서 9-13의 범위로 설정되어 있으며, 이는 불순물 제거를 위한 생석회 첨가 등 생성 과정에서 발생하는 슬래그의 고유 특성을 반영한 것으로 볼 수 있다.

독일에서는 국내 환경표지 인증과 같이 생산 및 사용, 폐기 및 재활용에 이르기까지 제품 전과정에 대하여 평가하고 제품의 환경 영향, 사람의 건강 보호와 관련한 기준 만족 및 일반 제품과 동일한 사용 및 품질을 보장한 제품에 부여하는 Blue Angel 제도가 운영되고 있으나 한국, 일본과 같이 슬래그를 활용한 제품에 대한 인증사례는 없다(BMUV, 2022).

(2) 스페인

스페인 Basque 지역에서는 생산폐기물이나 제품으로서 수명이 다한 물질을 이용하여 기술적으로 재활용 가능한 Secondary Raw Materials에 대해 규제하고 있으며, 건설 폐기물과 철강슬래그가 이에 해당한다. 해당 물질을 매체

접촉형으로 재활용할 때 전체 방수(Waterproof)하는 경우 일부 방수(semi-waterproof)보다 같거나 완화된 용출기준을 적용하고 있다(CINDERELA, 2021). ‘전체 방수’는 재활용 골재 주위로 불투수 재료로 층이 형성된 경우, ‘일부 방수’는 반방수 소재(semi-waterproof material)를 사용한 옹벽, 제방 등에 재활용 골재가 사용되는 경우가 포함된다(Fig. 5). 이를 통해 슬래그의 특성에 맞추어 물과의 접촉을 고려한 규제가 적용되고 있음을 알 수 있다.

(3) 프랑스

프랑스의 경우 건설폐기물 및 철강슬래그를 이용하여 재활용 순환골재를 생산하고 있으며, 도로 기층재 등으로 활용 시 물과의 접촉을 차단하기 위한 유형별 조건을 충족하여야 한다(CINDERELA, 2021). 상부가 아스팔트 등으로 포장된 경우, 최소 1%의 표면 기울기를 만족하여야 불투수층으로 간주한다. 제방 설치 등 물과의 접촉을 차단하였을 경우 최소 5%의 표면 기울기를 만족하여야 하며, 상부의 30 cm 정도는 표토로 덮여야 한다. 물과의 접촉이 차단되어 있지 않은 경우, 인근 지표 수(호수, 연못

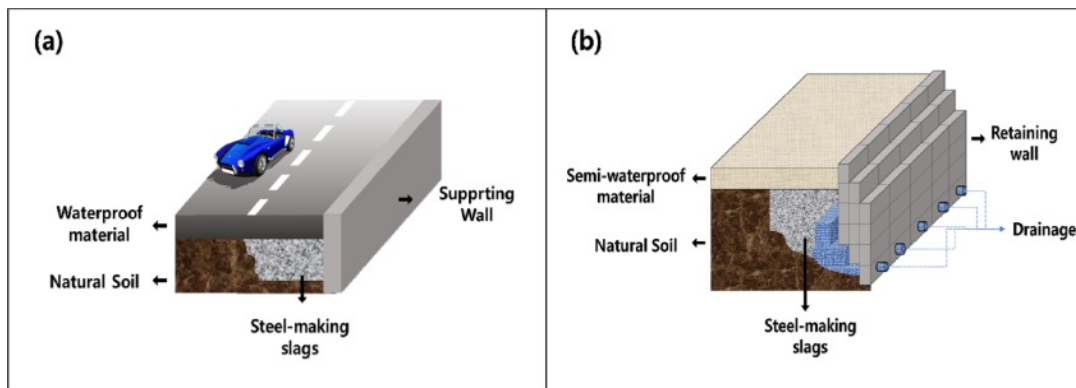


Fig. 5. Case of recycled aggregate application in Spain: (a) With waterproof and (b) With semi-waterproof.

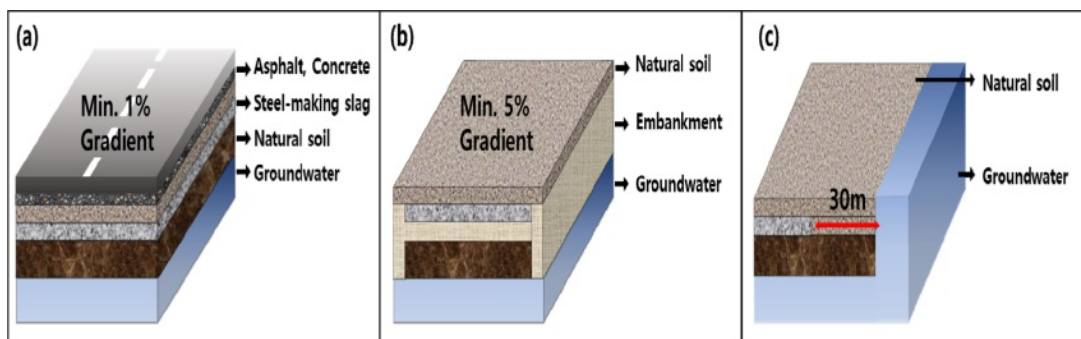


Fig. 6. Case of recycled aggregate application in France: (a) Paved with asphalt, (b) Embankment, and (c) Not protected from water contact.

포함)로부터 최소 30 m 이내 지역, 주변 수위보다 고도가 20 m 이상 낮은 경우에는 최소 60 m 이내 지역에서는 재활용 골재를 사용할 수 없다(Fig. 6). 프랑스에서는 스펙트럼과 같이 슬래그의 특성을 반영한 재활용이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

3.3.4. 미국

미국에서는 철강슬래그의 팽창률이 3.5%를 초과하는 경우 제방재료로 사용될 수 없다(SHA, 2015). 슬래그 팽창우려에 따라 잔류팽창률에 대한 지침은 주마다 다르게 관리되고 있다(Table 7)(WSDOT, 2015). 하지만, 잔류팽창률을 만족하더라도 제방을 통해 스며드는 강수는 제강슬래그로부터 오염 물질을 침출하고 하천과 강을 포함한 지표수를 오염시킬 수 있으며, 발생한 유출수의 pH는 단기적으로 회복될 수 없다(Bäverman, 1997). 또한, 구조적으로 안정된 제강슬래그의 pH를 저감시키기 위해 산성조건을 적용할 경우, 슬래그 구조의 변화로 중금속 용출 등의 문제가 발생할 수 있다(Król and Bozym, 2020).

이러한 문제를 고려하여 메릴랜드를 포함한 미국의 고속도로 기관에서는 정수슬러지와 점토층을 채움재로 배치하여 유출수가 채움재를 통과하도록 관리 방안을 제시하고 있다(SHA, 2015). 본 연구에서 제강슬래그와 정수슬러지, 제올라이트, 산성토양(pH 4.70)을 각각 1:1 / 1:3 / 1:5(W/W) 비율로 혼합하여 200 rpm, 6 시간동안 진탕시험한 결과, 정수슬러지 및 산성토양에서 pH 저감 가능성을 확인하였다(Table 8). 고 pH 특성만으로 슬래그 유출수가 위해하다고 평가할 수 없으나, 주변 환경으로의 영향을 최소화하기 위한 슬래그 유출수의 pH 저감방안은

필요하다고 판단된다.

3.4. 국내 친환경적 제강슬래그 재활용 가이드라인(안) 제안

본 연구에서는 제강슬래그 제품을 친환경적으로 재활용하기 위한 국내 관리지침이 부재함에 따라 일본의 철강슬래그 관리 지침과 국내외 제강슬래그 재활용 기준 및 관리지침을 바탕으로, 중금속 용출우려 및 고 pH 유출수 발생 등의 문제를 고려하여 주변 환경을 고려한 용도별 재활용 관리기준이 포함된 가이드라인(안)을 제안하고자 한다. 일본 지침의 경우 슬래그 제품을 판매함에 있어 슬래그 배출사와 재활용업체가 일원화된 상황을 반영하여 회원사(슬래그 배출사 및 재활용업체)와 수요자(시공사)로 나누어 지침을 적용하고 있다. 이에 국내의 경우 배출, 생산, 재활용 전 과정을 반영하여 슬래그 배출업체, 재활용업체, 판매업체 3부류 관계자로 나누어 적용하고자 한다.

배출업체, 재활용업체 및 판매업체는 제강슬래그 제품의 품질에 대한 우려(수침 팽창에 대한 우려 등), 제강슬래그 제품에 기인하는 고 pH 유출수 발생 등을 사전에 방지하여야 하며 다음의 단계를 따른다. 1단계) 제강슬래그 재활용 제품 품질관리: 제강슬래그 제품이 갖추어야 하는 환경안전품질이란, 「철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침」에 따른 수침 팽창률과 「자원의 절약 및 재활용촉진에 관한 법률」에 따른 「우수재활용제품(GR) 품질인증기준」, 「환경기술 및 환경산업 지원법」에 따른 환경표지 인증기준에서 규정하고 있는 유해물질 용출 기준을 의미한다. 제강슬래그 제품 생산업체는 제품의 기준 만족여부를 연 1회 확인하여야 하며, 그 결과를 5년간 보관하도록 한다. 2단계) 시공 전 현장관리: 슬래그

Table 7. USA Slag recycling guidelines considered expansion characteristics

Indiana	Expansion test before Recycling
Illinois	
Minnesota	
Pennsylvania	
Ohio	Keep in controlled and saturated stockpile for 1 month and expansion test before recycling
Missouri	Keep in controlled and saturated stockpile for 3 months
South Carolina	Keep in controlled and saturated stockpile for 6 months and expansion test before recycling
West Virginia	

Table 8. Effect of water treatment sludge and natural soil on the pH reduction in the slag leachate

Mixing Ratio (Slag:Substance)	pH after 6 hr		
	Zeolite	Water Treatment Sludge	Natural Soil (pH 4.70)
1:1	12.25	9.86	11.33
1:3	11.74	9.17	9.36
1:5	11.25	8.73	7.42

Table 9. Scope of influence depending on recycling amount

Standard (ton)	2021 Recycled Amount (Total: 7.6 Million ton)	2021 Number of Recycling Company
3,000 ^{a)}	92.9%	28.8%
10,000	79.3%	12.5%
20,000 ^{b)}	68.0%	7.2%
40,000	52.5%	3.3%
120,000 ^{c)}	30.5%	0.8%

^{a)}Japan (slag management guidelines); ^{b)}Korea (Simplified environmental evaluation); ^{c)}Korea (Environmental evaluation of recycling).

배출업체 및 재활용업체, 판매업체 중 제강슬래그 제품을 납품·판매하는 업체는 고객사로부터 골재 제품의 납품을 요청받은 경우 공사명, 골재 제품 사용 용도(성·복토용, 뒷채움재 등), 사용 장소의 공사 기간 등 제강슬래그 제품 활용 현장 정보를 확인해야 한다. 슬래그 배출업체 및 재활용업체, 판매업체 중 제강슬래그 제품을 납품·판매하는 업체는 납품 전 재활용 현장 조사의 필요 여부를 판단하고 필요한 경우에는 사전에 시공사에 이를 알리고 현장 조사를 시행하여야 한다. 또한, 시공 전 현장 조사 결과를 바탕으로 시공 중·후의 현장 조사 필요시 제강슬래그 제품 납품 현장에 대해서 시공 중·후에 현장 점검을 실시하여야 한다. 단, 제강슬래그 제품을 적어도 40,000톤 이상 재활용하는 경우, 시공 전 현장 조사를 시행하여야 한다. 슬래그 배출업체 및 재활용업체, 판매업체 중 제강슬래그 제품을 납품·판매하는 업체는 납품 전 현장 조사 시에 자사의 홍보·기술 자료를 활용하거나 제강슬래그 제품의 특성 및 재활용 시 유의사항을 시공사에 안내하여야 한다. 3단계) 시공 중 현장관리: 슬래그 배출업체 및 재활용업체, 판매업체 중 제강슬래그 제품을 납품·판매하는 업체는 2단계 ‘시공 전 현장관리’에 따라 현장 점검을 실시한 현장에 대해 시공 중에도 활용 현장 주변 고 pH 수 유출 여부를 확인해야 한다. 또한, 재활용 현장 인근으로부터 30 m 이내 하천, 호소, 해역, 논/밭 등 경작지 등이 존재하여 고 pH 유출수 발생이 우려되는 경우, 이를 시공사에 알리고 고 pH 유출수 관리 방안을 시공사에 안내하여야 한다. (1) 산성토양 등 복토 (2) 유출수 포집 시설 (pond) 설치 및 산중화, (3) 시트설치를 통한 슬래그와 빗물 접촉 방지. 4단계) 시공 후 현장관리: 슬래그 배출업체 및 재활용업체, 판매업체 중 제강슬래그 제품을 납품·판매하는 업체는 3단계 ‘시공중 현장관리’에 따라 현장 점검을 실시한 재활용 현장에 대해서 시공 장소나 용도 등에 따라 조사 기간, 빈도 등에 대한 기준을 설정하고 시공 후 현장 조사를 실시하여야 한다. 또한, 시공 전·중 조사에서 시공 후 조사가 필요하지 않다고 판단한 경우에도, 사용 장소에서 문제 상황 발생 시 시공 후 현장 조사를

실시한다. 시공 장소의 상황에 따라 조사 기간의 연장이나 빈도의 재검토를 실시하여야 하나, 40,000톤 이상의 경우에는 시공 후의 현장 점검 조사를 실시하고 조사 결과는 기록하여 5년간 보관하여야 한다. 일본의 경우 3천 톤 이상을 재활용할 때 현장조사가 필요함을 제시하였지만, 국내의 경우 3,000톤 이상을 기준으로 제시할 경우 92.9%에 해당하는 대부분의 재활용 현장을 조사해야 한다(Table 9). 현재까지 고 pH 유출수 문제가 발생한 현장의 경우 슬래그가 수십만 톤 이상 투입되는 점, 관리의 실효성 등을 고려하여 전체 재활용 비율의 50% 물량을 차지하는 40,000톤 이상 재활용한 현장에 적용하여 중점적으로 관리할 필요가 있다. 시공 후 현장 점검 결과, 사용 장소에 대한 고 pH 유출수 발생 등 환경으로의 영향이 우려되며 그것이 제강슬래그 제품으로 인한 경우에는 필요한 조치를 취해야 한다. 시공 과정에서 야기될 수 있는 문제들을 방지하기 위하여, 회원사 및 재활용업체, 판매업체 중 제강슬래그 제품을 납품·판매하는 업체는 제강슬래그 제품 사용에 따른 주 의사항을 시공사에 안내하여야 한다.

4. 결 론

국내 6개 배출사업장에서 발생하고 있는 제강슬래그에 대해 국내의 용출시험방법에 따른 용출 특성을 평가한 결과, 국가별 용출기준을 만족하였으며 매체접촉형 재활용 환경성 평가에 준한 상향류 투수방식의 용출시험 결과 폐기물 용출기준 및 먹는물 수질기준 또한 만족하는 것으로 나타났다. 제강슬래그가 환경표지인증제도, 우수재활용제품인증제도 등을 통해 제품으로서 재활용되는 경우, 매체접촉형 재활용에 따른 사후관리의 제외 대상에 해당한다. 환경표지인증제도 EL744(슬래그 가공제품)의 경우 폐기물관리법의 용출기준보다 1/3 수준의 강화된 기준을 적용하고 있어 이에 대한 타당성을 검토하기 위해 국외 제강슬래그 재활용 기준에 대해 비교 분석하였으나, 나라별 시험방법, 입자크기, 시험시간, 용매 등 전처리 방법과 분석

방법이 상이함에 따라 객관적인 수치 비교는 불가능하였다. 다만, 해당 제도에서 제시하는 용출기준만으로는 매체 접촉형 재활용에 따른 사후관리 상황을 반영할 수 없으므로, 제강슬래그 특성을 고려한 재활용 현장에서의 적절한 관리 방안이 마련되어야 한다.

제강슬래그는 생성 과정에 있어 생석회가 첨가됨에 따라 유리석회(Free CaO) 성분을 다량 포함하고 있다. 제강슬래그는 대기 중의 수분, 빗물 등 물과 접촉 시 고 pH 특성의 용출수가 나타날 수 있다. 국내외 제강슬래그 용출기준 검토 시 대부분의 국가에서 용출수의 pH에 대한 규제는 없다. 독일, 이탈리아, 호주에서 슬래그 용출수의 pH 기준을 제시하고 있으나 모두 10~13 범위를 수용하고 있다. 이는 제강슬래그 용출수의 고 pH 특성을 반영한 것으로 해석되며, 본 연구에서 수행한 제강슬래그의 용출 유출 시험 결과 또한 모두 만족하고 있음을 알 수 있다.

매체접촉형 재활용 시 주변 환경이 고려됨에 따라 제강슬래그의 고 pH 특성에 대한 우려가 제기되고 있으나, 구조적으로 안정된 슬래그의 pH를 저감시키기 위해 산성 조건을 적용할 경우, 슬래그 구조의 변화로 중금속 용출이 증가하는 것으로 나타났다. pH 특성만으로 슬래그 유출수가 유해하다고 평가할 수 없으나, 제강슬래그 용출수의 pH를 자연적으로 저감하는 것은 불가능함에 따라 적절한 대책을 마련하기 위한 추가적인 연구가 필요하다(Dayioglu and Aydilek, 2019).

국내 제강슬래그 적정 관리 방안을 마련하기 위하여 지침으로서 유일하게 문서화되어 있는 일본 철강슬래그 협회의 ‘철강슬래그 관리 지침’을 검토하고, 해당 지침에 상응하는 수준의 가이드라인(안)을 제시하였다. 일본의 경우 철강업체와 재활용업체가 제강슬래그 제품을 관리하는 데 있어 일원화되어 있지만, 국내의 경우 철강업체, 재활용업체, 판매업체가 모두 구분되어 있어 상호 긴밀한 협조 하에 관리할 필요가 있다. 국내 상황을 고려하여 제강슬래그 제품을 재활용하기 위한 환경 안전품질 기준뿐만 아니라, 시공 현장에서 주기적인 점검과 관리를 이행하는 방안이 필요함에 따라 제강슬래그 특성을 고려한 시공 전·중·후 관리방안을 제시하였다.

철강슬래그는 유용한 자원으로서 제강슬래그의 경우 성·복토재 등 매체접촉형 재활용 골재로 활용되고 있다. 국외 여러 나라에서 제강슬래그의 기본특성을 고려하여 골재로 활용하기 위한 재활용 지침이 마련되어 있으나, 국내에서는 명확한 지침이 부재함에 따라 법령 간 상충하는 내용으로 인하여 다양한 분쟁이 발생하고 있다. 제도적인 측면에서 검토를 통해 제강슬래그의 원활한 자원순환이

이루어질 수 있도록 일원화된 지침이 필요하다. 또한, 본 연구가 국내 제강슬래그 재활용 지침의 기초가 될 것으로 기대하나, 구체적인 용출수의 pH 저감방안 및 시공 현장에서 효율적인 관리방안 등을 수립하기 위해 제강슬래그의 특성을 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 한국철강협회의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Bäverman, C., 1997, Long-term leaching mechanisms of ashes and slag; combining laboratory experiments with computer simulations, Doctor's Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- BFJ, 2022, Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke(Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV), Bundesamt Für Justiz, Germany.
- BMUV, 2022, Blue Angel, Bundes Ministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare sicherheit und Verbraucherschutz, <https://www.blauer-engel.de/en> [accessed 18.10.22]
- CINDERELA, 2021, End of waste criteria protocol for waste used as aggregates, CINDERELA project report, European Commission.
- Dayioglu, A.Y. and Aydilek, A.H., 2019, Effect of pH and sub-grade type on trace-metal leaching from steel-slag embankments into groundwater, *J. Mater. Civ. Eng.*, **31**(8), 04019149.
- DIBt, 2022, Muster Verwaltungsvorschrift-Technische Baubestimmungen, Deutsches Institut Für Bautechnik, Germany.
- DIN 19528, 2015, Leaching of solid materials – Batch test for the examination of the leaching behavior of inorganic and organic substances at a liquid to solid ratio of 2 L/kg, Deutsches Institut für Normung, Germany.
- JEA, 2022, Eco Mark office, Japan Environment Association, Japan. https://www.ecomark.jp/nintei/index_en.html [accessed 18.10.22]
- JIS A 5011, 2018a, Slag Aggregate for Concrete, Japanese Industrial Standard, Japan. <https://kikakurui.com/a5/A5011-1-2018-01.html> [accessed 30.04.22]
- JIS A 5015, 2018b, Slag for Road Construction, Japanese Industrial Standard, Japan. <https://kikakurui.com/a5/A5015-2018-01.html> [accessed 30.04.22]
- JIS K 0058-1, 2005, Test methods for chemicals in slags, Part 1: Leaching test method, Japanese Industrial Standard, Japan.

- JRC, 2009, End-of-Waste Criteria, Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, European Commission.
- JRC, 2014, Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the possible development of end-of waste criteria under the EU Waste Framework Directive, Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, European Commission.
- KATS, 2019a, Iron and Steel Slag for Road Construction, Korean Agency for Technology and Standards, Korea.
- KATS, 2019b, Iron and Steel Slag for Embanking, Covering and Backfills, Korean Agency for Technology and Standards, Korea.
- KMOE, 2016, Comprehensive Commentary on the Recycling Management Regulation, Korea Ministry of Environment, Korea.
- KMOE, 2019, Recycling Environmental Assessment Manual, Korea Ministry of Environment, Korea.
- KMOE, 2020a, Follow-up Management Guide of Media-contact Recycling, Korea Ministry of Environment, Korea.
- KMOE, 2020b, Products Subject to Environmental Labeling and Certification Standards, Eco Label 744: Recycled Slag Products, Korea.
- KMOE, 2023a, Wastes Control Act, Korea Ministry of Environment, Korea.
- KMOE, 2023b, Act on Promotion of Recycling of Construction Waste, Korea Ministry of Environment, Korea.
- KISA, 2023, Recycling Performance in 2022 and Recycling Plan in 2023, Korea Iron and Steel Association, Korea.
- Kim, J.M., Yoo, J.H., and Kwak, E.G., 2010, Properties of steel slag as construction material, *Magazine of RCR*, **5**(1), 33-40.
- Król, A., Mizerna, K., and Bozym, M., 2020, As assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag, *J. Hazard. Mater.*, **384**, 121502.
- 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.
- Min, D.G. and Lee, S.H., 2015, Review of environmental properties of steel slag and research on ways to improve recycling system, Research Report, Korea Iron and Steel Association, Korea.
- MOLIT, 2021, Recycled Aggregate Quality Standards, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- Na, B.B., 2021, Environmental group "Stop importing steelmaking slag with hazardous substances detected into Saemangeum", Yonhap News Agency, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210729123051055> [accessed 03.01.22]
- NIER, 2017, Standard methods for the examination of Waste, ES 06151.1, National Institute of Environmental Research, Korea.
- NARS, 2021, Recycling environmental evaluation operation status and improvement tasks, National Assembly Research Service, Korea.
- Park, S.H., 2022, Saemangeum solar power pollution leachate, Ministry of Environment crushes without investigation for a half year, The Chosun Ilbo, <https://www.chosun.com/national/transport-environment/2022/05/31/T55266WZPNFHLAK5GYO-ZU2S4WY/> [accessed 30.06.22]
- SHA, 2015, Research report: Getotechnical and Environmental Impacts of Steel Slag Use in Highway Construction, State Highway Administration, MD, USA.
- ISI, 2019, Guidelines for Steel Slag Product Management, The Iron and Steel Institute of Japan, Japan.
- US EPA, 2022, Code of Federal Regulation, US Environmental Protection Agency, <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-268?toc=> [accessed 23.10.22]
- WSA, 2023, World Steel in Figures, World Steel Association, Belgium.
- WSDOT, 2015, Use of Steel Slag Aggregate in Pavements, Washington State Department of Transportation, WA, USA.