

# 점토와 혼합된 제강슬래그의 이온 용출 및 재활용 가능성 평가

## Assessment of Ion Leaching and Recycling Potential of Steel Slag Mixed with Clay

김형주<sup>1)</sup> · 이현기<sup>†</sup> · 함태규<sup>2)</sup> · 정소희<sup>3)</sup> · 김형수<sup>4)</sup>

Hyeongjoo Kim · Hyeonki Lee · Taegew Ham · Sohee Jeong · Hyeongsoo Kim

Received: April 12<sup>th</sup>, 2024; Revised: April 16<sup>th</sup>, 2024; Accepted: April 24<sup>th</sup>, 2024

**ABSTRACT** : In this study, the environmental implications of electric arc furnace steel slag, commonly used in road construction and soil reinforcement, were examined. Experiments were conducted to assess the leaching of heavy metals based on particle size and to investigate ion leaching from specimens with varying mixtures of steel slag and clay. The official waste test revealed no detectable heavy metals in the sample items. However, when subjected to leaching experiments and analyzed using ICP-OES, certain heavy metals were found. The reaction of steel slag with water, facilitated by free CaO within the slag, was identified as the cause of leaching. Results showed that aluminum, exhibiting the highest leaching rate, displayed an inverse relationship with particle size. In mixed soil containing steel slag and clay, higher steel slag content resulted in increased aluminum leaching. Nonetheless, the quantity of leached aluminum was notably lower in mixed soil compared to pure steel slag. Furthermore, leaching of other heavy metals remained within acceptable limits. These findings suggest that recycling mixed soil of steel slag and clay for road construction or soil stabilization presents reduced environmental risks compared to using steel slag alone. Utilizing such mixtures could offer an environmentally sustainable and safe alternative.

**Keywords** : Electric arc furnace steel slag, Clay, Ion leaching, Mixing soils, Recycle, Echo environmental

**요지** : 본 연구에서는 재활용 시 도로용이나 지반 보강재로 사용되는 전기로 제강슬래그의 입경별 중금속 용출 실험과 제강슬래그와 점토를 혼합한 혼합비별 공시체의 이온 용출을 실험하여 환경적 특성을 분석하였다. 폐기물 공정시험결과 시료 시험항목에서 중금속은 검출되지 않은 것으로 나타났으며, 물과 접하지 않은 제강슬래그의 경우 용출이 일어나지 않는 것을 알 수 있었으나, 제강슬래그의 중금속 용출 실험을 진행하여 ICP-OES 분석한 결과 일부 중금속이 검출되었다. 제강슬래그가 물과 반응하면 제강슬래그 내에 존재하는 Free CaO와 화학반응이 일어나 용출이 되는 것을 알 수 있었다. 제강슬래그의 입경별 용출 실험을 진행한 결과 가장 많은 용출이 일어난 알루미늄의 경우 입경이 작을수록 커지는 것으로 나타났으며, 제강슬래그와 점토를 혼합한 혼합토의 경우 제강슬래그의 함량이 증가할수록 알루미늄의 용출량은 증가하였다. 그러나 제강슬래그만을 사용했을 때보다 제강슬래그와 점토의 혼합토에서 용출되는 알루미늄의 양이 현저히 낮아졌으며, 다른 중금속들도 용출되는 양이 기준치 이하로 나타났다. 그러므로 제강슬래그와 점토의 혼합토를 재활용하여 도로용이나 성토용 재료로 사용 시 중금속의 용출에 대한 우려는 매우 낮아질 것으로 사료된다. 이러한 결과는 순수 제강슬래그만을 사용하는 것보다 제강슬래그와 점토를 혼합한 재료가 친환경적으로 지속가능하고 안전한 대안이 될 수 있다고 판단된다.

**주요어** : 전기로 제강슬래그, 점토, 이온 금속 용출, 혼합토, 재활용, 친환경

## 1. 서론

일반적으로 철강슬래그는 CaO 및 SiO<sub>2</sub>를 주성분으로 하고, 기타 전로슬래그는 FeO, MgO, MnO 등을 함유하고 있다. 보통의 암석, 광물 등의 조성과의 일치하는 이러한 성분은 화학적으로 일반적인 퇴적암 또는 포틀랜드 시멘트나 콘크리트와 같이 알칼리성을 나타낸다.

전기로에서는 전로와는 달리 주원료로 고철을 사용하는 것으로 외부에서 열을 가하여 원료를 용해하여 정련한다. 전기로의 특징은 전기로 내의 분위기를 산화성, 환원성으로의 자유로운 변화가 가능하며, 이 때 각각의 경우에 발생하는 슬래그가 산화·환원슬래그이다(Kim et al., 2010). 철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침에 따라 조사한 한국철강협회의 자료에 의하면 국내업체의 2023년 제강슬래그

1) Professor, Department of Civil Engineering, Kunsan National University

† Research Professor, Renewable Energy Research Institute, Kunsan National University (Corresponding Author : leehk@kunsan.ac.kr)

2) Research Professor, Renewable Energy Research Institute, Kunsan National University

3) Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

4) Research Professor, Renewable Energy Research Institute, Kunsan National University

발생량은 1,069만 톤/년으로 재활용률은 고로슬래그 95.6%, 제강슬래그 92.1%로 합계 94.1%를 나타내고 있으며, 철강슬래그 고시 이용목표율인 95%를 약간 하회하고 있다. 제강슬래그의 재활용 용도를 살펴보면 성복토용(R-7) 45.1%, 도로용(R-7) 26.7%, 제철원료(R-3) 18.3%, 시멘트 원료(R-4-2) 5.2%, 내화물 제품(R-4-2) 2.5%, 기타 2.2%로 전체 재활용의 71.8%가 도로용이나 성복토용으로 사용되고 있는 실정이다(Korea Iron & Steel Association, 2024). 전기로슬래그의 물리적 특성은 밀도가 자연사보다는 크고 안정성과 흡수율이 양호한 것으로 나타났다. 또한, 팽창률은 10% 이하로 팽창 붕괴성이 낮기 때문에 대부분이 토목 성토용으로 재활용되고 있다(Bae, 2005).

제강슬래그는 중금속 오염물질과 높은 흡착특성을 가지고 있어 이에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있다. 해양구조물로 재활용되는 제강슬래그의 경우 납, 구리, 카드뮴과 수은의 용출 유해성은 낮은 것으로 평가하였으며(Lee & Lee, 2005), 제강슬래그는 중금속 이외에도 다른 오염물질과 반응성을 가지고 있으므로 해저 퇴적물 오염 개선을 위해 복토정화법으로 활용하는 연구를 진행하였다(Park et al., 2006). 그리고 카드뮴의 초기농도와 pH에 따른 카드뮴의 제거량을 반응시간에 대하여 실험적 확인을 하였고(Lee et al., 2011), 제강슬래그 침출수의 중금속 분석과 물을 혼합하여 용출된 침출수의 pH 변화 및 환경적 특성을 분석하였다(Park et al., 2012).

제강슬래그는 유리석회(Free CaO)의 수화에 의해 팽창 및 붕괴가 발생하므로 사전에 숙성(aging)이 필요하며, 숙성 방법은 물을 살수하거나 공기 중에 노출하는 방법으로 안정화 시켜야 한다. 일반적으로 제철소에서는 넓은 부지를 이용하여 자연적인 숙성방법을 채택하여 용출로 인한 환경오염을 방지하기 위해 실시되고 있다.

환경부고시 「철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침」 별표 2에 따르면 숙성기간은 제강슬래그 입경이 100mm 이하인 경우에는 1개월 이상, 100mm 이상인 경우에는 3개월을 요구하고 있다.

그러나 제강슬래그의 경우 반응성은 단기간이 아닌 장기간 반응하여 용출될 경우 환경오염을 유발할 수 있다. 특히 이러한 용출된 침출수는 강알칼리성으로 주변 환경을 오염시키고 백탁수를 유발하는 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 주로 도로용이나 지반 보강재로 사용되는 전기로 제강슬래그의 입경별 중금속 용출 실험과 제강슬래그와 점토를 혼합한 비율에 따른 공시체의 중금속 용출 실험을 통해 환경적 특성을 분석하였다. 이를 토대로 제강슬래그와 점토를 혼합한 혼합토의 기초자료로 활용하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료

본 연구에 사용된 제강슬래그와 G시에 소재한 철강정련 회사의 전기로 제강슬래그를 활용하였으며, 점토는 새만금 유역에서 채취한 점토를 사용하였다. 제강슬래그의 입경은 입도분포에 맞게 9.500mm, 4.750mm, 2.000mm, 0.850mm, 0.425mm, 0.250mm로 분류하여 용출시험을 진행하였다. 제강슬래그와 점토의 혼합토는 제강슬래그의 혼합비율을 10%, 20%, 30%, 40%, 50%로 증가시켜 만든 공시체를 가지고 실험을 진행하였다. 일반적인 제강슬래그의 생성과정 및 처리과정과 사용처에 관하여 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 실험조건 및 방법

#### 2.2.1 실험기기

제강슬래그의 용출 실험을 위하여 일정한 속도로 교반시킬 수 있는 자테스터를 사용하였으며, 용출수 분석시험은 Table 1과 같이 질량분석실의 ICP-OES 기기를 이용하였다.

유도결합플라즈마 분석법(ICP)은 고주파 유도코일에 의하여 형성된 아르곤(Ar) 플라즈마에 시료용액을 주입하여

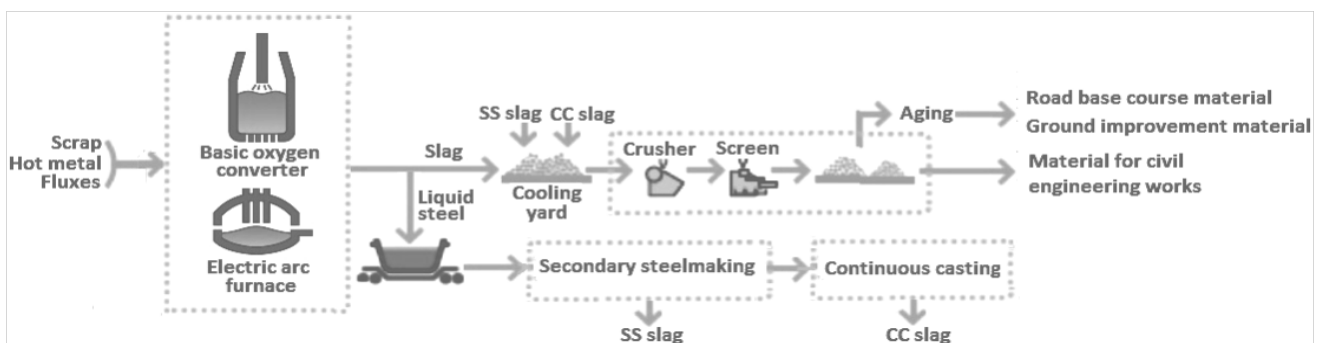




Fig. 1. Production processing and uses of the steel slag

Table 1. Used analysis device

Photo image	Device	Model
	ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy)	Thermo scientific iCAP7400DUO
	Ultra High FE-SEM	HITACHI SU8220

6,000 ~ 8,000K의 고온에서 이온화된 원자가 바닥상태로 이동할 때 방출하는 발광선 및 발광강도를 측정하여 원소의 정성 및 정량분석에 이용하는 분석 장비이다(Official Test Standards for Water Pollution, 2023). 적용분야로는 대기, 수질(하천수, 해수 내 미량원소 분석), 토양환경(무기물 및 중금속), 화학 및 의학, 식품 및 금속, 화장품 등에 함유된 다량원소 및 미량원소 분석에 이용되고 있다.

제강슬래그와 점토를 혼합하여 공시체의 표면을 분석하기 위해 수행한 SEM분석은 SU8220(HITACHI)을 이용하였다. 주사전자현미경은 아주 미세한 Gun Electron Source로부터 인가된 일차 전자가 시료에 조사되면서 이때 발생하는 다양한 전자(Secondary Electron, Backscattered Electron, Cathode Luminescence, etc.)를 이용하여 시료 표면의 미세한 구조를 확대, 관찰하는 기기로 일반 광학현미경과 비교하여 분해능

과 집점심도가 우수하여 sample의 표면관찰은 물론 조성 등을 관찰함으로써 시료의 특성, 표면구조 및 결합을 관찰하는데 사용되는 분석기기이다. 특히 저진공에서 metal coating 없이 시료를 관찰할 수 있어서 생물 시료를 관찰하기에 용이하다.

### 2.2.2 실험조건

본 연구에서는 제강슬래그와 제강슬래그 점토를 혼합한 재활용 골재가 환경에 미치는 영향을 파악하기 위해 자테스터를 이용하여 용출 실험을 Table 2와 Table 3과 같이 실시하였으며, 이를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 제강슬래그의 물리적 성질을 파악하기 위하여 체가름시험을 진행하였으며, 체가름시험에서 나온 입경별로 용출 실험을 진행하였다.

Table 2. Steel slag elution test conditions

No.	Particle size (mm)	Experimental conditions	Analysis item
S1	9.500	Slag 50g + Water 500mL RPM : 30, Time : 24hr	Se, Mg, Al, Zn, Mn, Fe, Pb, Cu, As, Cd, Cr
S2	4.750		
S3	2.000		
S4	0.850		
S5	0.425		
S6	0.250		

Table 3. Steel slag + clay elution test conditions

No.	Steel slag (%)	Clay (%)	Experimental conditions	Analysis item
SC1	10	90	Slag+Clay 100g + Water 1,000mL RPM : 30, Time : 24hr	Se, Mg, Al, Zn, Mn, Fe, Pb, Cu, As, Cd, Cr
SC2	20	80		
SC3	30	70		
SC4	40	60		
SC5	50	50		



Fig. 2. Jar-Test by steel slag particle size

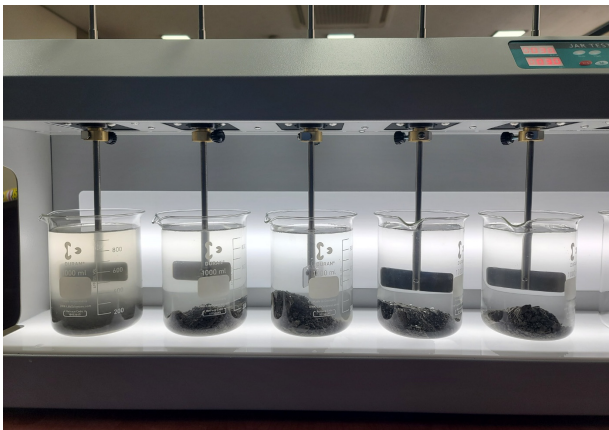


Fig. 3. Jar-Test by steel slag content

본 연구에서는 제강슬래그의 용출 실험 조건은 제강슬래그의 입경을 9.500mm, 4.750mm, 2.000mm, 0.850mm, 0.425mm, 0.250mm로 분류하여 각각 슬래그 50g과 물 500mL를 30rpm으로 24시간 동안 교반하여 상등수를 채취한 후 SS여과지로 여과한 여액을 test tube에 채취하여 ICP-OES로 분석하였다.

제강슬래그와 점토의 혼합토는 제강슬래그의 혼합비율을 10%, 20%, 30%, 40%, 50%로 증가시켜 만든 공시체를 가지고 실험을 진행하였다. 점토와 혼합한 혼합토의 용출 실험의 조건은 점토와 혼합한 제강슬래그 비율이 10%, 20%, 30%, 40%, 50%인 각각의 혼합토 100g과 물 1,000mL를 혼합하여 교반기를 분당 30회로 24시간 교반 후 상등수를 채취하여 여과 후 여과 여액으로 ICP-OES 분석을 실시하였다.

### 2.2.3 실험재료의 물리·화학적 특성

제강슬래그와 점토의 입도분포곡선 및 균등계수, 곡률계수를 Fig. 4에 나타내었으며, 물리적 특성은 Table 4에 나타냈다.

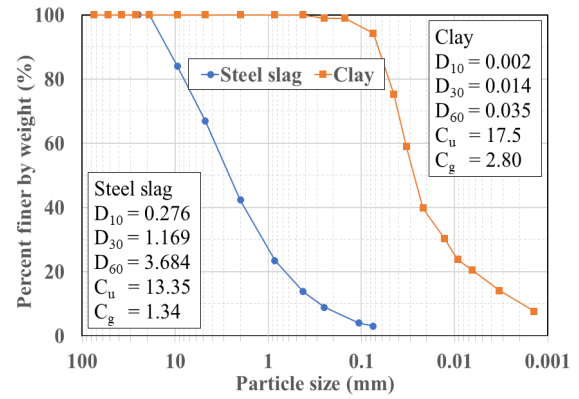


Fig. 4. Particle size distribution curve of steel slag and clay

Table 4. Physical of G city river clay and steel slag

Property	River bed clay	Steel slag (Less than 19mm)
Moisture content (%)	41.60	2.58
Liquid limit (%)	31.03	-
Plastic limit (%)	22.46	-
Plasticity index (%)	8.57	-
Specific gravity	2.649	3.150
Fine-grained soil (%)	94.30	3.1
Uniformity Coefficient ( $C_u$ )	13.35	17.50
Curvature Coefficient ( $C_c$ )	1.34	2.80
Unified Soil Classification System (USCS)	CL	SW

제강슬래그 100% 시료는 통일분류법에 의해 No.200체 통과량이 3.1%로 5% 미만이고, No.4체(4.75mm) 통과량이 66.9%로 50% 이상이므로 모래질 흙이다. 초기 수분 함량은 2.58%, 비중은 3.150으로 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_c$ )는 17.50과 2.80으로 흙을 분류하는 방법인 통일분류법에 따라서 SW(입도분포가 좋은 모래질 흙)에 해당한다.

점토의 경우 No.200체 통과량이 94.3%이고, 액성한계 31.03%, 소성한계 22.46%, 소성지수는 8.57, 비중은 2.649로 통일분류법에 CL(저소성 점토)에 해당한다.

제강슬래그와 점토의 성분비율을 Table 5에 나타내었다. 제강슬래그와 점토에서 함유량이 높은 주요 구성성분을 살펴보면 입경별 용출실험에 사용한 제강슬래그는 CaO(34.1%) + MgO(21.5%) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(16.7%) + SiO<sub>2</sub>(13.0%) + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(8.6%)로 총 93.9%가 구성되어 있으며, 제강슬래그와 혼합한 점토의 구성성분은 SiO<sub>2</sub>(67.3%) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(17.0%) + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(4.9%) + MgO(2.3%) + CaO(1.1%)로 총 92.6% 함유되어 있었다.

Table 5. Components of steel slag and clay

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
Clay	67.27	17.03	4.91	3.79	2.28	1.70	1.08	0.82	0.78	0.12	0.11	0.09	0.17	-
Steel slag	13.02	16.74	8.61	-	21.48	-	34.07	0.34	2.89	-	0.12	1.67	0.56	0.48

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 폐기물 공정시험 결과

제강슬래그는 물과 접촉 시 화학반응에 의해 유해물질이 검출될 수 있다. 따라서 도로용이나 성복토용으로 활용하기 위해서는 유해물질의 용출이 되지 않아야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 한국건설생활환경시험연구원에 폐기물 공정 시험기준(국립환경과학원고시 제2023-17호, 2023.04.20.)에 의한 시험을 의뢰하였다.

제강슬래그 시료는 전기로 제강슬래그 1종을 의뢰하였다. 시험 항목은 납, 구리, 비소, 수은, 시안, 6가크롬, 카드뮴, 유기인화합물, 기름성분, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌이다. 폐기물 공정시험결과 Table 6과 같이 모든 시험항목에서 중금속은 검출되지 않았으며, 물과의 반응이 없는 경우 제강슬래그의 구성성분은 용출이 되지 않는 것으로 판단된다.

Table 6. Official waste test results of steel slag

Analysis item	Result	Method
Pb	Not detected	Waste Process Testing Standards (National Institute of Environmental Research Notice No. 2023-17)
Cu	Not detected	
As	Not detected	
Hg	Not detected	
CN	Not detected	
Cr6+	Not detected	
Cd	Not detected	
Organophosphorous compound	Not detected	
Oil	Not detected	
Tetrachloroethylene	Not detected	
Trichloroethylene	Not detected	

#### 3.2 제강슬래그 입경별 용출 실험 분석 결과

제강슬래그의 입경별로 용출 실험을 실시하여 중금속 검출 여부를 판단하기 위해 자테스터를 30rpm으로 24hr 교반

Table 7. ICP analysis results by steel slag particle size (unit : ppm)

No.	Se	Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Pb	Cu	As	Cd	Cr
S1	0.006	2.097	13.531	ND	0.001	0.002	ND	0.011	0.006	ND	0.002
S2	0.002	2.250	26.746	ND	0.001	ND	ND	0.002	0.003	ND	0.002
S3	0.004	1.007	52.573	ND	ND	ND	ND	0.005	0.007	ND	0.005
S4	0.005	0.680	67.003	ND	ND	ND	ND	0.006	0.009	ND	0.006
S5	0.008	0.450	90.080	ND	ND	ND	ND	0.006	0.008	ND	0.011
S6	0.008	0.639	87.465	ND	ND	ND	ND	0.006	0.007	ND	0.011

※ ND : Not Detected

하여 반응된 상등수를 채취하여 여과 후 여액으로 ICP-OES를 분석하였으며, 그 결과를 Table 7과 Fig. 5~Fig. 8에 나타내었다.

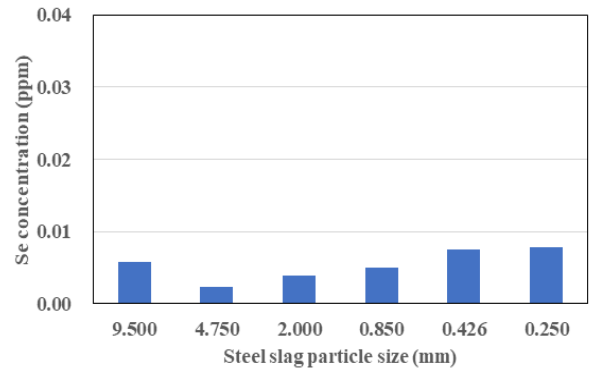


Fig. 5. Se concentration of steel slag by particle size

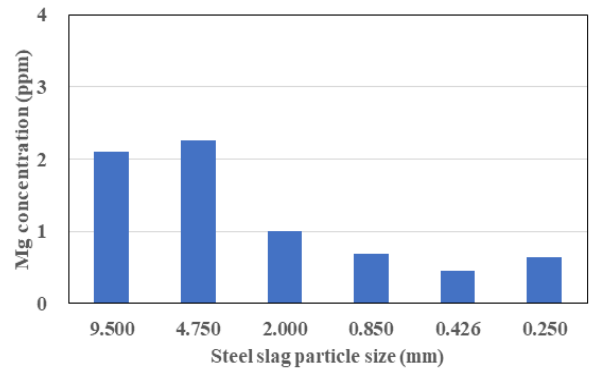


Fig. 6. Mg concentration of steel slag by particle size

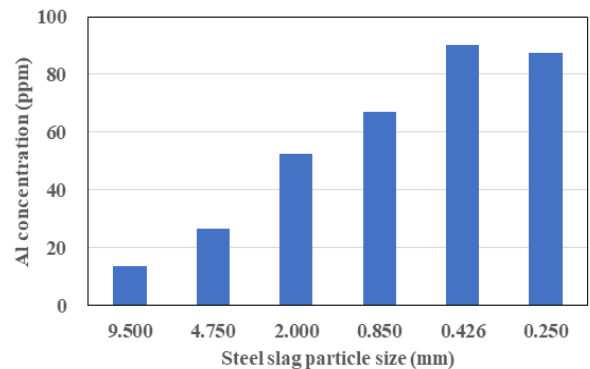


Fig. 7. Al concentration of steel slag by particle size

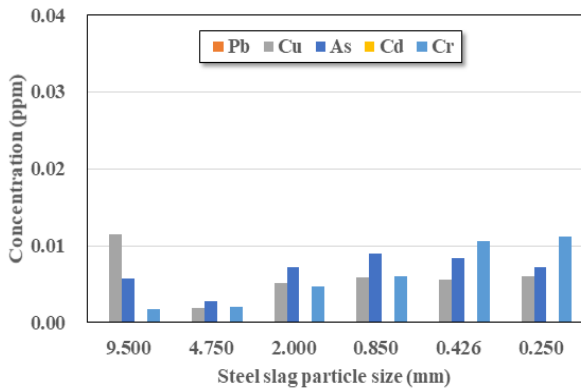


Fig. 8. Heavy metal concentration of steel slag by particle size

ICP-OES를 이용한 용출수의 분석 결과 입경별 제강슬래그에서 11개 항목 중 8개 항목이 검출되었으며, 3개 항목인 카드뮴, 납, 아연은 불검출 되었다. 망간과 철은 입도가 작아 질수록 따라 불검출 되는 것으로 볼 때 미량의 원소로 사료된다. 망간과 철은 각각 0.001mg/L, 0.002mg/L로 측정되었으며, 먹는물 수질기준은 0.3mg/L이고, 셀레늄의 경우 0.002~0.008mg/L로 측정되었으며, 이는 먹는물의 수질기준인 0.01 mg/L 이하로 나타나 용출될 경우 지하수에 대한 영향은 적을 것으로 판단된다.

제강슬래그는 폐기물 재활용 기준의 유형별 재활용 기준에서 R-7에 해당하며, 이는 전체 재활용의 71.8%를 차지한다. R-7은 토양이나 공유수면 등에 성토재·복토재·도로기층재·채움재 등으로 재활용하는 유형으로 별도의 용출기준이 존재하지 않는다.

그러나 제강슬래그의 경우 수분과 접촉하면 중금속이 용출되는 것이 확인되었으므로, R-4 유형의 용출기준을 적용하여 검토하였다.

검토 결과 본 연구에서 분석한 5가지 항목의 용출기준은 납 1.0mg/L 이내, 구리 1.0mg/L 이내, 비소 0.50mg/L 이내, 카드뮴 0.10mg/L 이내, 크롬 0.10mg/L 이내로 규정되어 있으며, 분석 결과 5가지 항목은 불검출 되거나 기준치를 크게 하회하는 것으로 나타났다. 토양환경보전법의 토양오염우려기준에 해당하는 오염 기준도 만족하는 것으로 나타났으며, 매립시설 침출수의 오염물질 배출허용기준에 적용하여

도 만족하는 수준이었다.

용출 시험 결과 마그네슘 함량의 경우 0.639~2.250mg/L로 측정되었으며, 이는 한국소비자원의 먹는샘물 시험 결과 요약보고서에서 조사된 국내 판매 14개 먹는 샘물의 마그네슘 함량인 1~27mg/L 보다 비슷하거나 낮게 나타나 물에 비교적 많이 함유되어 있는 성분임을 알 수 있었다.

알루미늄의 경우 용출기준은 없으나 13.531~90.080mg/L로 함량이 매우 높게 나타났으며, 제강슬래그의 입경이 작을수록 알루미늄의 용출량이 높게 나타났다.

이는 제강슬래그의 입자가 작을수록 물과 접촉하는 표면적이 늘어나 알루미늄의 용출량이 증가된 것으로 판단된다. Fig. 2에 나타난 자테스트 시험 시 오른쪽으로 갈수록 입자가 작아 물과 접촉 시 현탁해 지는 것을 알 수 있다.

### 3.3 제강슬래그+점토 함량별 용출 실험 분석 결과

제강슬래그와 점토를 혼합한 혼합점토(SC)의 중금속 검출여부를 판단하기 위하여 제강슬래그의 함유량을 10%, 20%, 30%, 40%, 50%로 한 각각의 혼합비별로 제작된 공시체의 시료 100g을 물 1,000mL와 혼합하여 30rpm으로 24hr 교반을 실시하였다. 교반된 용출수의 상등액을 채취하여 여과장치로 여과 후 ICP-OES 실험을 수행하였다. 분석 결과를 Table 8과 Fig. 9~Fig. 12에 나타내었다.

ICP-OES를 이용한 용출수의 분석 결과 제강슬래그가 포함된 혼합점토에서 11개 항목 중 8개 항목이 검출되었으며, 3개 항목인 카드뮴, 납, 아연은 불검출 되었다. 셀레늄의 측정치는 0.002~0.005mg/L로 제강슬래그만 사용하였을 때보다 같거나 더 적게 측정되어 용출로 인한 문제는 크게 없을 것으로 판단된다. 용출시험에서 측정된 유해 중금속은 각각 구리 0.022~0.033mg/L, 비소 0.009~0.020mg/L, 크롬 0.003~0.005mg/L로 측정되었다. 구리와 비소의 경우 제강슬래그만 용출한 것보다 제강슬래그와 점토의 혼합토에서 용출한 양이 미세하게 높아졌는데, 이는 점토에 함유된 양이 용출된 것으로 사료된다. 그러나 이러한 결과는 토양 환경보전법의 토양오염우려기준에 해당하는 오염 기준 중

Table 8. ICP analysis results by steel slag content (unit : ppm)

No.	Se	Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Pb	Cu	As	Cd	Cr
SC1	0.002	1.574	0.339	ND	0.002	0.043	ND	0.033	0.020	ND	0.003
SC2	0.002	1.161	1.513	ND	0.001	0.035	ND	0.030	0.016	ND	0.003
SC3	0.002	0.540	4.624	ND	0.001	0.002	ND	0.023	0.011	ND	0.004
SC4	0.005	0.355	12.878	ND	ND	ND	ND	0.028	0.009	ND	0.003
SC5	0.002	0.369	17.563	ND	ND	ND	ND	0.022	0.009	ND	0.005

※ ND : Not Detected

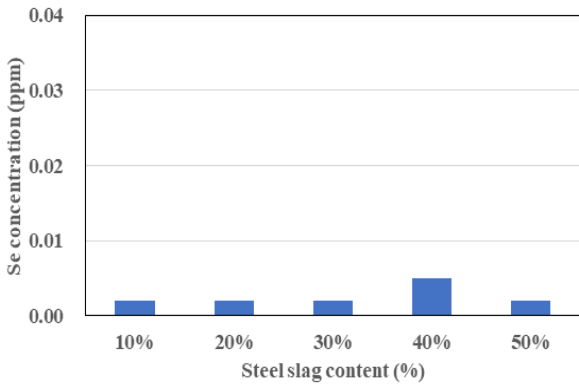


Fig. 9. Se concentration of steel slag by content

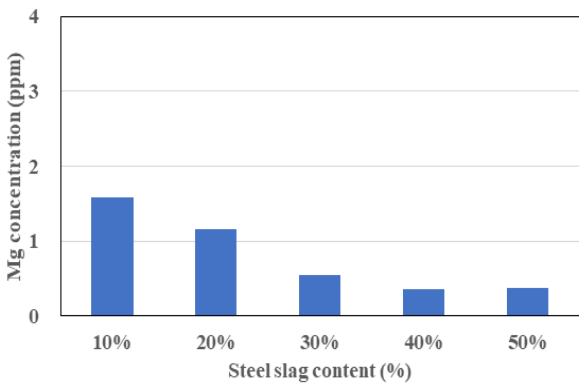


Fig. 10. Mg concentration of steel slag by content

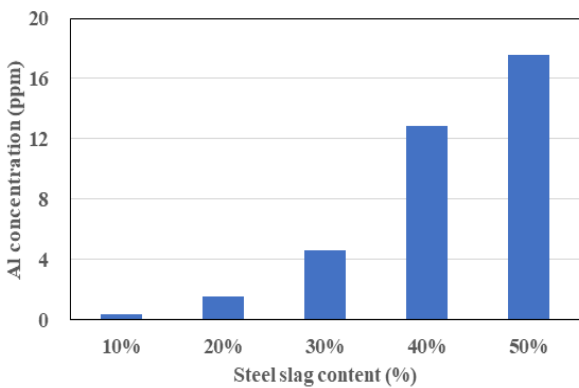


Fig. 11. Al concentration of steel slag by content

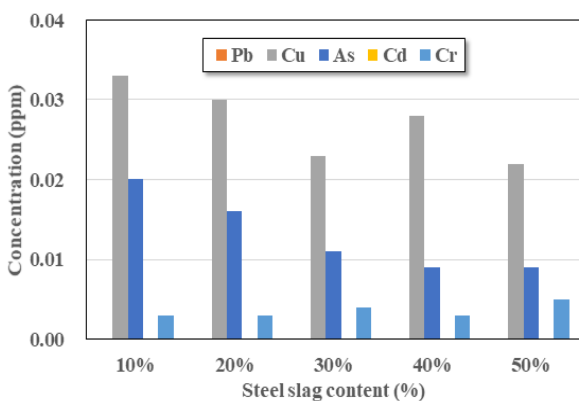


Fig. 12. Heavy metal concentration of steel slag by content

가장 강화된 1지역 기준치를 적용하면 납 200mg/kg, 구리 150mg/kg, 비소 25mg/kg, 카드뮴 4mg/kg, 크롬 5mg/kg으로 기준치를 만족하였으며, 수분과 접촉하여 발생할 수 있는 중금속의 용출량은 매립시설 침출수의 오염물질 배출허용기준 중 청정지역의 기준이 납 0.2mg/L 이하, 구리 0.5mg/L 이하, 비소 0.1mg/L 이하, 카드뮴 0.02mg/L 이하, 크롬 0.5mg/L 이하로 규정되어 있어 이를 적용하여도 만족하는 수준이었다.

마그네슘의 함량의 경우 0.355~1.574mg/L로 측정되었으며, 이는 제강슬래그만 용출시켰을 때 보다 더 적게 용출됨을 알 수 있다.

Fig. 3에 나타낸 자테스트 시험 시 점토의 함량이 많은 경우 점토로 인하여 물과 접촉 시 현탁해지는 것을 알 수 있었으며, 제강슬래그의 함량이 늘어나고 점토의 함량이 감소할수록 맑은 층을 형성하고 있어 제강슬래그와 점토의 결합이 이루어졌다는 것을 육안관찰로 확인하였다.

알루미늄 용출량을 제강슬래그와 점토가 결합된 혼합토의 함량별로 비교하기 위하여 제강슬래그에서 발생하는 알루미늄 용출농도의 평균치를 다음과 같이 계산하였다.

$$C_s = \frac{(V_{S1} \cdot C_{S1} + V_{S2} \cdot C_{S2} + V_{S3} \cdot C_{S3} + V_{S4} \cdot C_{S4} + V_{S5} \cdot C_{S5} + V_{S6} \cdot C_{S6})}{V_m} \quad (1)$$

- 여기서,  $C_s$  : 제강슬래그의 알루미늄 용출 평균농도
- $C_{Sn}$  : 제강슬래그 입경별 알루미늄 용출 농도
- $V_m$  : 제강슬래그 입경별 체적의 합
- $V_{Sn}$  : 제강슬래그 입경별 체적

계산 결과 제강슬래그 알루미늄 용출의 평균농도는 49.737 mg/L로 예측되었으며, 이를 제강슬래그의 함량별로 예측하여 실제 측정된 값과 예측치를 Fig. 13에 나타내었다. 이때 점토에서의 알루미늄 용출량은 없다고 가정하고 제강슬래그의 알루미늄 용출량만 적용하였다.

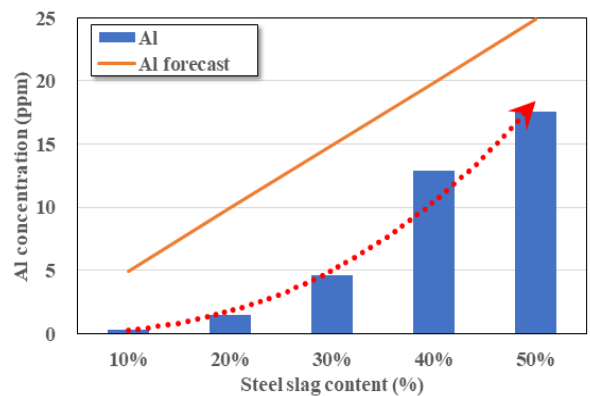


Fig. 13. Differences between measured and forecast aluminum values depending on steel slag content

제강슬래그로부터 용출된  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  이온은  $\text{OH}^-$  이온과 결합하여  $\text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^-$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  음이온을 형성하고,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  이온은 그대로 양이온으로 존재한다. 그 후 포화농도가 되면 음이온과 양이온이 결합하여 칼슘실리케이트 수화물 ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ )이나 칼슘알루미네이트 수화물( $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ )을 형성하면서 혼합토는 경화한다.

예측치와 측정치를 비교한 결과 혼합비가 제강슬래그 30%, 점토 70%일 때 알루미늄의 용출량이 예측치와 측정치의 차이가 가장 크게 나타났으며, 이때 결합이 다른 비율보다 강하게 이루어져 용출량의 차이가 높게 나타난다고 사료된다.

알루미늄의 경우 제강슬래그의 함량이 증가할수록 같이 증가하는 경향을 보였으나 제강슬래그만을 사용했을 때보다 현저히 낮아졌으며, 다른 중금속들도 용출되는 양이 기준치 이하로 나타나는 것을 확인하였다.

알루미늄의 용출에 관한 국내의 기준이 없어 FAO와 캐나다 농업용수에서 권고하는 기준치인 5.0mg/L(Kim et al., 2003)를 적용하였을 때 기준치에 만족하였다. 제강슬래그의 재활용 측면에서 살펴보면 FAO와 캐나다의 권고기준에 만족하는 제강슬래그 중량비 30% 이하인 혼합토를 사용하였을 때 적정하다고 판단되며, 용출이 우려된다면 10% 이하인 혼합토의 사용이 적정하다고 사료된다.

그러므로 제강슬래그와 점토의 혼합점토를 성토용 재료로 사용 시 중금속의 용출에 대한 우려는 매우 낮아질 것으로 사료된다.

### 3.4 SEM 분석 결과

본 연구에서는 G시의 공장에서 발생하는 제강슬래그 시료와 새만금 유역에서 채취한 점토 시료를 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 분석하였다. Fig. 14에서

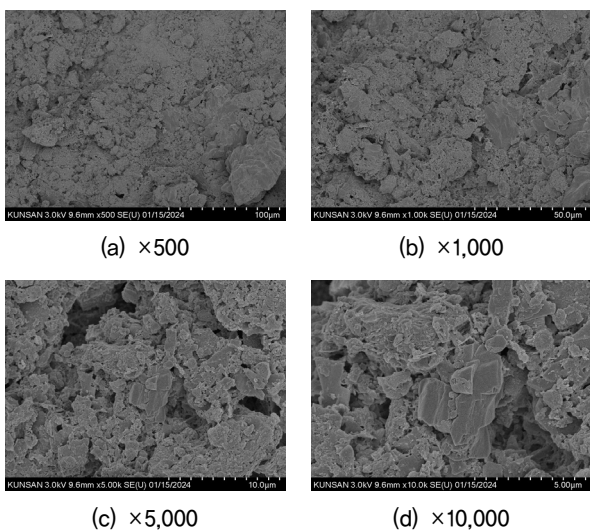


Fig. 14. SEM image of steel slag

보는 바와 같이 제강슬래그의 경우 입자가 균일하지 않고 배열 또한 매우 불규칙한 모습을 볼 수 있었으며, 입자의 표면이 거칠고 층상구조를 볼 수 있는 것이 특징으로 나타났다.

점토의 경우 Fig. 15에서 볼 수 있듯이 입자가 비교적 부드러우며, 제강슬래그와는 다르게 입자들이 뭉쳐있는 모습이 확인되었다. 뭉쳐있는 모습은 넓은 층상구조의 형태를 보였고 천연 포졸란으로 알려진 구조토가 존재하는 것으로 나타났다. 점토질 포졸란은 실리카, 알루미나 구조를 불규칙하게 형성시킴으로서 포졸란 반응성을 높일 수 있다.

구조토의 경우 담수나 해수에 서식하는 단세포 조류의 일종인 구조의 잔해물이 쌓여 만들어진 퇴적물 혹은 퇴적암을 말하는 것으로 주로 비정질의 실리카로 구성되어 있으며, 소량의 결정질 실리카를 포함하기도 한다. 구조류의 높은 공극률과 복잡한 내부 구조 때문에 구조토의 밀도는 매우 낮은 경우가 있다.

제강슬래그와 점토를 혼합한 경우 Fig. 16에 나타난 것처럼

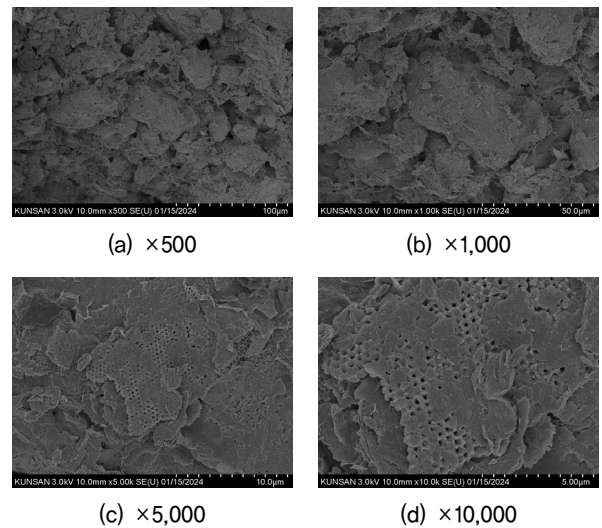


Fig. 15. SEM image of clay

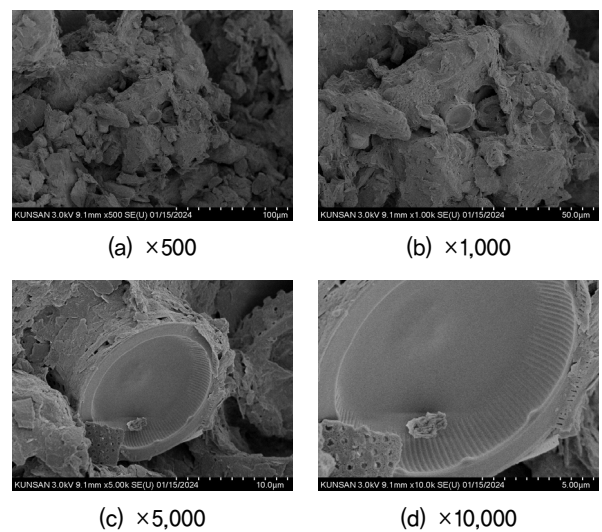


Fig. 16. SEM image of steel slag+clay (2:8)



럼 슬래그의 입자들이 비교적 골고루 섞여 입자의 크기가 크게 형성되어 있음을 볼 수 있었는데 이는 구조토와 혼합되어 입자가 커지고 포졸란 반응이 일어난 것으로 예상된다. 이러한 포졸란 반응으로 인하여 이온의 용출도 적게 일어난 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 재활용 시 도로용이나 지반 보강재로 사용되는 전기로 제강슬래그의 입경별 중금속 용출 실험과 제강슬래그와 점토를 혼합한 혼합비별 공시체의 중금속 용출을 실험하여 환경적 특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 폐기물 공정시험결과 시료 시험항목에서 중금속은 검출되지 않은 것으로 나타나, 물과 접촉하지 않은 제강슬래그의 경우 용출이 일어나지 않는 것을 알 수 있었다.
- (2) 제강슬래그의 중금속 용출 실험을 한 결과, 물과 반응하면 제강슬래그 내의 Free CaO와 화학반응이 일어나 용출이 되는 것을 알 수 있다.
- (3) 제강슬래그의 입경별 용출 실험을 진행한 결과 가장 많은 용출이 일어난 알루미늄의 경우 입경이 작을수록 커지는 것으로 나타났다. 이는 제강슬래그와 물이 반응할 때 입경이 작을수록 비표면적이 커지면서 활발한 반응이 이루어지는 것으로 판단된다.
- (4) 제강슬래그와 점토를 혼합한 혼합토의 경우 제강슬래그의 함량이 증가할수록 알루미늄의 용출량은 증가하였으나 이는 제강슬래그만을 사용했을 때보다 현저히 낮아졌으며, 다른 중금속들도 용출되는 양이 기준치 이하로 나타났다.
- (5) 그러므로 제강슬래그와 점토의 혼합점토를 도로용이나 성토용 재료로 사용 시 중금속의 용출에 대한 우려는 매우 낮아질 것으로 사료되나 순수 제강슬래그만을 건설재료로 활용 시 물이나 해수 등과 접하는 경우는 환경피해 영향이 있을 것으로 예측된다.

## 감사의 글

본 연구는 2020년도 및 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 4단계 BK21 미래인재양성사업과 기초연구사업(4299990614343, NRF-2021R1A6A1A03045185).

## References

1. Bae, Y. O. (2005), An Experimental Study on the Flowing and the Strength Properties of Concrete according to the Replacement of fine Aggregate with P.S Ball, Hanbat National University, pp. 25~10 (in Korean).
2. Korea Iron & Steel Association. (2024), Steel slag recycling performance in 2023 and 2024 recycling plan (in Korean).
3. Kim, J. H., Lee, J. S., Jung, G. B., Yun, S. G., Koh, M. H., Shim, J. C. and Kwun, S. K. (2003), Improvement of water quality standards for Korean agriculture by comparison with foreign countries' cases, The Journal of the Korean Society of International Agriculture, Vol. 15, No. 3, pp. 178~188 (in Korean).
4. Kim, J. M., Yoo, J. H. and Kwak, E. K. (2010), Properties of steel slag as construction material, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, Vol. 5, No. 1, pp. 33~40 (in Korean).
5. Lee, G. H., Kim, E. H., Park, J. B. and Oh, M. H. (2011), Estimation of the removal capacity for cadmium and calculation of minimum reaction time of BOF slag, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 27, No. 10, pp. 5~12 (in Korean).
6. Lee, H. K. and Lee, D. H. (2005), Evaluation of lead, copper, cadmium, and mercury species in the leachate of steel making slag by seawater, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 27, No. 1, pp. 75~84 (in Korean).
7. Official Test Standards for Water Pollution (2023), Metals-Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, Act on Environmental Testing and Inspection, etc. (in Korean)
8. Park, K. S., Kim, H. S. and Chun, H. D. (2006), Application of steel-making (BOF) slag for in-situ remediation of subaqueous contaminated sediments, *KCID journal*, Vol. 13, No. 2, pp. 310~322 (in Korean).
9. Park, J. B., Lee, B. C., Jang, M. H. and Na, H. H. (2012), Environmental characteristics of leachates from steel slag, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 11, No. 2, pp. 31~38 (in Korean).