

# 자력 선별 전로슬래그 미분말을 결합재로 활용한 모르타르의 기초특성

## Fundamental Properties of Mortar with Magnet-Separated Converter-Slag Powder as SCM

김범수<sup>1</sup> · 최선미<sup>2</sup> · 김진만<sup>3\*</sup>Beom-Soo Kim<sup>1</sup> · Sun-Mi Choi<sup>2</sup> · Jin-Man Kim<sup>3\*</sup>

(Received February 2, 2023 / Revised September 5, 2023 / Accepted September 5, 2023)

Converter slag is a by-product generated by refining the pig iron produced into molten steel in the blast furnace, occupying about 15 % of the weight of steel production. It has a high free-CaO content that can generate expansion cracks when used for concrete aggregate. This is the main reason to make it difficult to recycle. To solve this problem, government guideline requires that converter slag has to be aged in an open yard for 90 days. However, aging can not be perfectly performed because it entails time and cost. In this study, we tried to investigate the applicability of converter slag as a cementitious material rather than an aggregate by mixing converter slag with mortar formulations. According to the EDS results of the converter slag in the experiment, we found that screening in the aggregate phase was more effective than that in the powder phase. When the particles separated by a magnet in the aggregate state were pulverized and used for concrete up to a 15 % replacement ratio, various engineering characteristics, such as flow, length change, and compressive strength, showed engineering characteristics similar to those of the control mix.

**키워드** : 전로슬래그, 시멘트 대체재료, 자력선별, 분쇄효율**Keywords** : Converter slag, Substitute cementitious material, Magnetic selection, Grinding efficiency

### 1. 서론

철강산업은 높은 에너지와 다수의 원료를 소비하고, 철강을 생산하고 남은 부산물인 슬래그를 다량 발생시키고 있으며, 대부분 유효활용되지 못하고 매립 처분되고 있다. 그러나 슬래그는 총 철 분함량(이하 T.Fe로 약기함), C 및 Ca 등 재활용이 가능한 유효한 조성을 다량 함유하고 있어 이들을 활용도 없이 매립하는 것은 자원 및 에너지 낭비일 것이다. 매립에 따른 환경문제 또한 큰 이슈가 되고 있는 상황을 생각할 때 각종 철강부산물의 폐기량을 줄이고, 발생하는 것을 자원화하여 처리비용을 경감하는 동시에 환경문제를 방지해야 한다. 따라서 고갈되어가는 천연자원을 철강부산물로 대체하여 활용량을 극대화하려는 노력이 필요하다.

전로는 고로에서 생산된 선철을 용강으로 제련하는 제강로를

지칭한다. 고로에서 생산된 쇳물은 탄소 함유량이 많고 인, 유황 등 불순물들이 포함돼 있어 제품의 가공성이 낮고 제품에 균열이 발생하기 쉽다. 이에 좋은 강을 제조하기 위해서는 제강공정을 거치게 된다. 용선을 전로에 넣고 순수한 산소를 불어 넣게 되면 선철 내의 불순물인 Si, Mg, P 등이 산화되어 발열하고 이때 탄소도 산화하여 제거되며, 이러한 공정을 거친 쇳물을 용강이라고 한다. 이 과정에서 불순물들은 슬래그로 배출하게 되는데, 이를 전로슬래그라 하며, 상위분류로는 제강슬래그의 범위에 속한다. 2021년 국내에서 발생된 전로슬래그는 약 724만톤으로 전로 용선 생산량 대비 약 15 %에 상당하는 양이다(Korea Iron & Steel Association 2022).

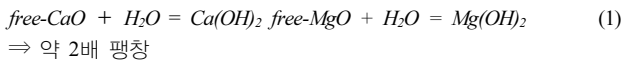
철강슬래그 중 배출량이 많은 고로슬래그는 1980년대부터 연구가 시작되었고, 현재는 시멘트 콘크리트용 혼화재 및 기능성 골

\* Corresponding author E-mail: [jkim@kongju.ac.kr](mailto:jkim@kongju.ac.kr)<sup>1</sup>㈜씨에스엠 연구원 (CSM, Chungnam, 31080, Korea)<sup>2</sup>㈜씨에스엠 대표 (CSM, Chungnam, 31080, Korea)<sup>3</sup>공주대학교 그린스마트건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

재로 활용되고 있다. 또한 본 연구의 전로슬래그와 동일한 제강슬래그 범위에 속하고 철을 원료로 하는 전기로 공정에서 발생하는 전기로 산화슬래그에 관해서도 연구가 수행되었고, 안정성이나 흡수율이 양호한 특성이 인정되어 콘크리트용 골재인 KS F 2527 표준이 제정되어있다.

이와같이 슬래그의 사용이 일반화 되고 있거나 그 실용화 연구가 활성화 되어 있는 것과는 달리 전로슬래그의 사용실적이나 실용화 연구는 비교적 미진한 상황이다. 이러한 이유는 전로슬래그가 유리석회(free-CaO)와 유리 마그네슘(free-MgO) 및 철산화물의 함량이 높은 것에 기인한다.

식 (1)과 같이 팽창하여 콘크리트와 같은 경화체에 균열을 발생시키게 된다(Navarro et al, 2010).



이런 문제를 방지하기 위해 전로슬래그는 약 1개월 내지 6개월 기간 동안 야적에 의한 에이징 처리를 한 후 사용해야 한다. 그러나, 에이징 후에도 전로슬래그는 높은 CaO 및 MgO로 인해 팽창붕괴 가능성을 가지고 있어 골재로 활용되고 있지 않다. 전로슬래그 활용을 위한 연구 결과를 보면 토질 안정재로의 적용성(Karmacharya et al, 1979) 및 팽창 특성을 활용한 팽창재(Song et al, 2014) 등이 있다.

철산화물의 함량이 높은 것을 화학조성상 문제와 피분쇄율이 낮은 문제점을 발생시킨다(Wu et al, 2021). 최근 시멘트 산업의 탄소 관련 이슈가 높아짐에 따라 시멘트 제조시 발생하는 탄소를 저감하기 위한 수단으로서 전로슬래그의 SCM(Supplementary Cementitious Material)화는 필요하지만, 전로슬래그 내 높은 T,Fe가 분쇄효율 저하 및 수화특성 저하를 유발하여 사용상 제약요인이 되고 있다.

이에 본 논문에서는 전로슬래그를 미분쇄하여 자력선별함으로써 T,Fe를 제거하고, 제거된 슬래그를 시멘트의 SCM으로 사용할 수 있는지의 여부를 평가하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서는 전로슬래그를 이용한 시멘트 결합재료로서의 활용 전에 제강슬래그의 T,Fe 성분을 선별 제거하기 위하여 자력선별을 진행하였다. 선별을 위한 자력은 10,000 Gauss로 고정하였다.

실험에 사용된 전로슬래그의 화학적 조성은 XRF(ZSX Primus II)를 통해 분석하였으며, Table 1에 나타내었다. 전로슬래그의 비중을 확인하기 위해 시멘트의 밀도 시험방법인 KS L 5110 표준에 맞게 측정하였다. 원시료(B)의 비중은 3.63 g/cm<sup>3</sup>, 자착분(M)은 3.72 g/cm<sup>3</sup>, 비자착분(N)은 3.44 g/cm<sup>3</sup>이다. Fig. 1은 전로슬래그의 골재상과 분말상의 T,Fe 선별을 나타낸 것이며, 자력세기는 10,000 Gauss로 고정하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 전로슬래그를 나타낸 것이다. 분쇄 후 미분말로 사용하기 위해 입도는 5 mm 이하의 전로슬래그를 원료로 제한하여 사용하였다.

Table 1. Oxide composition of converter slag (%)

Type	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	T.Fe	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
CS (B)	44.4	11.7	6.9	4.4	25.4	0.2	2.4
CS (M)	40.0	13.6	3.2	4.3	31.8	0.1	2.4
CS (N)	44.0	12.2	8.7	4.5	23.5	0.3	2.0

CS : Converter slag.



Aggregate



Powder

Fig. 1. Magnetic separation of converter slag

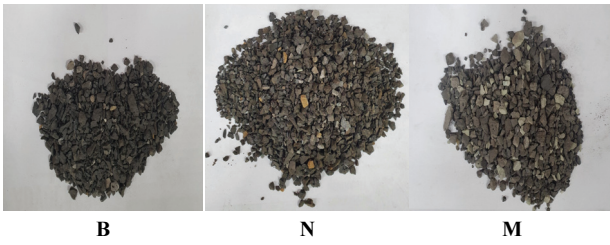


Fig. 2. Selected converter slag in aggregate phase

### 2.2 산화물 조성의 분포

Fig. 3은 전로슬래그의 T,Fe 분포를 FE-SEM(MIRA-LMH)를 사용하여 EDS 원소 맵핑을 통해 나타낸 이미지이다. 슬래그 내 Fe 조성물은 전체 매트릭스에 분산되어 있지만, 수십에서 수백 마이크로 크기로 덩어리져 있는 것을 알 수 있다. 따라서 적절한 크기로 분쇄할 경우 자력선별에 의해 Fe 조성물을 분리해 내는 것이 가능할 것이라 판단하였다.

전로슬래그를 골재상(5 mm under)과 분말상(45 μm under)으로 분류하였다. 각각의 전로슬래그 자력선별 전후 산화물 조성을 EDS로 분석하여 Table 2에 나타내었다. 자력선별은 10,000 Gauss의 고정자력을 사용하였다. 골재상 전로슬래그의 T,Fe의 양은 자착물에서 29.5 %이고 비자착물에서 15.6 %로 13.9 %의 차이가 발생하였다. 반면, 분말상 전로슬래그의 T,Fe의 양은 자착물에서 31.8 %이고 비자착물에서 23.5 %로 8.3 %의 차이를 보이고 있다. 이와 같이 골재상 입자에서 자력선별의 효과가 더 우수한 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 현상을 보이는 것은 분말상 입자는 크기와 질량이 작기 때문에 적은양의 자성체를 함유하고 있더라도 자력에 쉽게 분리될 수 있기 때문이다. 그러므로 이후의 실험에서는 골재상 입자를 대상으로 자력선별한 것을 사용하였다.

### 2.3 광물 분석

XRD 광물 분석은 5~70도의 각도로 측정하였고, 속도는 1 min/1°로 측정하였다. 전로슬래그의 원시료(B), 자착분(M)과 비자착분(N)을 대상으로 XRD(Ultima IV, Rigaku, Cu Ka anode) 광물 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 자착분(M)에서 Wustite(FeO) 함량이 원시료 대비 증가하고, 비자착분(N)에서는 Merwinite(C<sub>3</sub>M<sub>5</sub>) 광물상이 상대적으로 높아지는 것을 확인하였으며, Merwinite는 슬래그 내 존재하는 광물 중 수화에 일부 기여한다고 보고됨에 따라 자력선별에 따라 증가한 위 광물에 의해 비자착분(N)을 SCM으로 활용시 강도발현에 일부 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

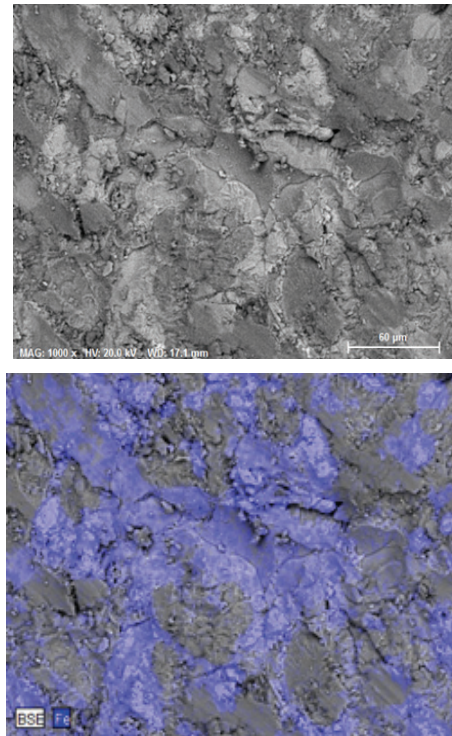


Fig. 3. Mapping of converter slag powder

Table 2. EDS analysis of selected converter slag (%)

Type		Ca	Si	Al	Mg	T,Fe	Cr	
CS	Aggregate	M	57.6	6.7	3.4	2.4	29.7	0.2
		N	72.2	6.7	5.0	0.4	15.6	0.1
	Powder	M	49.5	10.6	3.7	4.7	31.8	0.3
		N	52.1	9.1	3.5	5.3	23.5	0.4

CS = Converter slag, M = magnetics, N = non-magnetics.

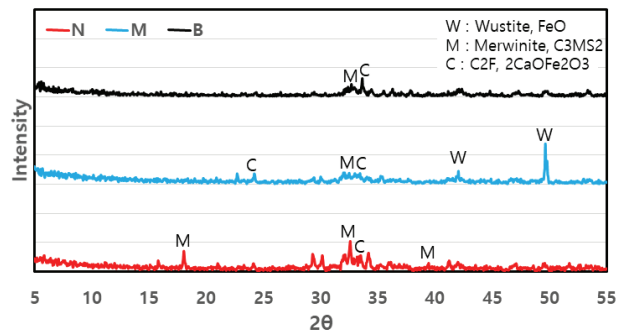


Fig. 4. XRD of converter slag

## 2.4 분쇄효율

전로슬래그를 SCM으로써 활용하기 위해 5 mm 이하 전로슬래그의 원시료(B), 자력선별된 자착분(M)과 자력분이 제거된 비자착분(N)을 2시간씩 분쇄해서 전로슬래그 미분말로 만들어 실험을 진행하였다. 전로슬래그의 분쇄효율 실험을 위해 분쇄 후 20분마다 시료를 채취하고, 채취된 시료를 대상으로 블레인 공기투과장치를 이용하여 분말도를 측정하였고, PSA를 이용하여 분쇄시간에 따른 전로슬래그 미분말의 입도 분포 변화를 평가하였다. 분쇄장비는 50 L 배치식 볼밀을 이용하였고, 볼밀 회전 RPM은 45로 고정하였다. 분쇄시 미분말의 응집 방지를 위하여 DEG(Diethyleneglycol)계 분쇄조제를 분쇄시료 중량 대비 0.02 % 첨가하여 분쇄하였다.

먼저 5 mm 이하의 전로슬래그를 이용하여 원시료(B), 자력선별 후 비자착분(N), 자착분(M)으로 분류 후 분쇄된 시료를 채취해서 KS L 5106 '공기 투과 장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험 방법' 준하여 분말도를 측정하였고, 또한 일본에서 제작된 PSA(Particle size analyzer : SALD-2300)를 이용하여 자착분 및 비자착분의 분쇄 시간에 따른 평균 입자 사이즈 변화를 관찰하였다.

## 2.5 모르타르 실험

모르타르 실험을 위해 사용된 시멘트의 분말도는  $3700 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이고, 전로슬래그 미분말은 분말도에 의한 영향 요인을 최소화하기 위하여 동일한 분말도인  $4,500 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 분쇄하여 시멘트 대비 5, 10, 15 % 용적 대체하여 실험을 진행하였다. 각각의 슬래그를 시멘트 혼합재로 사용한 모르타르 배합은 KS L ISO 679 기준에 준하여 설정하였으며, 실험 배합은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Mix design of mortar (g)

Type	OPC	CS (N)	CS (M)	CS (B)	Sand	Water
Plain (OPC)	450	-	-	-	1350	225
CS (N)	5	427.5	25.9	-		
	10	405	51.8	-		
	15	382.5	77.7	-		
CS (M)	5	427.5	-	24.5		
	10	405	-	49.1		
	15	382.5	-	73.6		
CS (B)	5	427.5	-	26.6		
	10	405	-	53.1		
	15	382.5	-	79.7		

OPC=ordinary portland cement, CS=Converter slag, B=raw converter slag, M=magnetics, N=non-magnetics.

측정 항목은 시멘트 대비 원시료(B)/자착분(M)/비자착분(N)으로 분류된 각각의 전로슬래그를 5, 10, 15 % 혼합한 모르타르를 대상으로 유동성 평가(Flow)를 평가하였고, 길이변화율(Length change) 및 압축강도를 기건양생 후 재령 1, 3, 7, 28일에 각각 측정하였다.

모르타르 제작은 KS L ISO 679 '시멘트의 강도 시험방법'에 준하여 기계적 혼합하였다. 모르타르 제조 후 KS L 5111 '수경성 시멘트 시험용 플로 테이블'에 준하여 플로를 측정하였다. 제작된 시험체는 온도  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  상대습도 90 % 이상인 습기실에서 양생을 진행하였고, 탈형 직후인 1일부터, 3, 7, 28일 양생시점에 길이변화율을 측정하였다. 길이변화는 KS F 2424 '모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법'에 준하여 측정하였다. 압축강도 시험체는 길이변화 시험체와 동일한 사이즈로 제작하였으며, 항온항습실에서 양생을 진행하였다. 압축강도 측정은 KS L 5105 '수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법'에 준하여 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 분쇄효율

전로슬래그의 원시료(B), 자착분(M)과 비자착분(N)을 분쇄 20 분 간격으로 시료를 채취하여 분말도를 측정된 결과를 Fig. 5에 입도분석 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 최종 2시간 분쇄된 시료의 중간입자 사이즈(Median D)와 평균 입자 사이즈(Mean V), 90 % 통과 사이즈( $X_{90}$ )를 Table 4에 나타내었다. 측정결과, 분쇄효율은 비자착분>원시료>자착분 순으로 우수한 것을 확인하였다. 일반적으로 T<sub>2</sub>Fe는 연성에 의해 분쇄에 악영향을 미치며, 슬래그 내에 T<sub>2</sub>Fe 함량에 따라 분쇄효율은 선형적으로 감소한다고 보고된 바 있다(Wu et al, 2021).

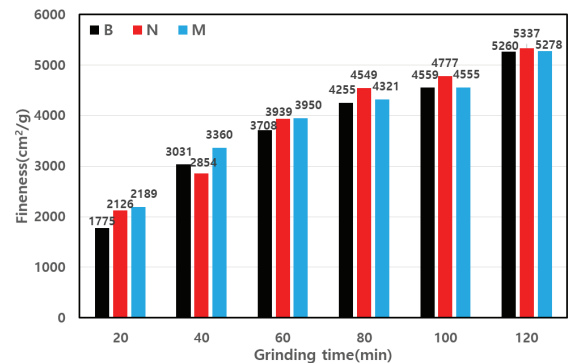


Fig. 5. Fineness of Converter slag according to grinding time

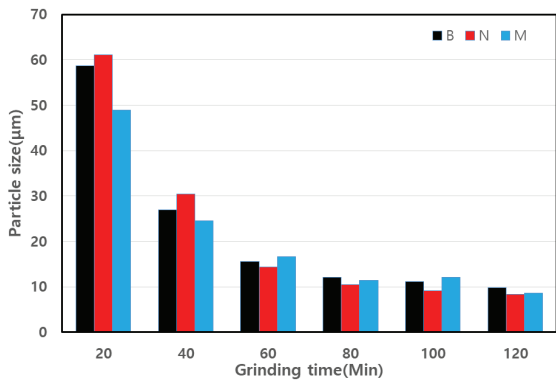


Fig. 6. Analysis on mean particle size of slag according to grinding time

Table 4. Analysis on particle size distribution of slag

Type	Particle size distribution (µm)		
	Median D	Mean V	X <sub>90</sub>
CS (B)	11.5	9.8	32.2
CS (N)	10.5	8.4	26.8
CS (M)	11.5	8.6	37.8

CS=Converter slag, B=bulk, M=magnetics, N=non-magnetics.

실험결과에 따라 자성체와 비자성체 간의 분쇄효율 차는 미미하지만, SCM로 활용시 T,Fe 함량 차에 따른 분쇄를 위한 필요에너지는 비자성체에서 더 유리한 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 모르타르 실험

#### 3.2.1 모르타르 플로

전로슬래그의 혼입율에 따른 유동성을 평가하고자 측정한 플로 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 측정결과, 전로슬래그의 치환율이 증가할수록 플로가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 치환율 15

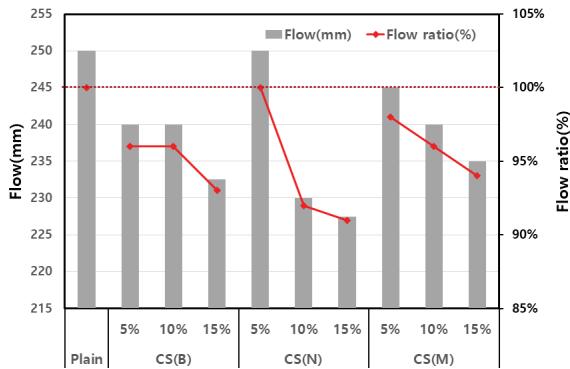


Fig. 7. Flow test results of the mortar with slag

%에서 분말도가 높은 비자착분(N)이 Plain 대비 플로가 가장 많이 감소하였다. 이는 Plain 대비 전로슬래그의 고분말도로 인한 수분 흡수량이 증가함에 따라 플로 저하를 가져온 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 압축강도

전로슬래그의 원시료(B), 자착분(M)과 비자착분(N)의 치환율에 따른 압축강도 결과를 Fig. 8과 OPC 대비 수화활성도를 Fig. 9에 나타내었다. 측정 결과, 전체적으로 OPC에 전로슬래그 미분말의 혼입율이 증가할수록 강도는 저하하였다. 이는 전로슬래그가 고로 슬래그보다 적은 비정질로 인해 반응성이 적은 것으로 판단되며, free-CaO와 free-MgO의 반응으로 인해 팽창이 발생하여 강도 손실을 유발한 것으로도 판단된다. 특히 재령 1일에서는 10 % 혼입 시에도 60 %대까지 수화활성도가 감소하였다. 이는 반응성이 낮은 전로슬래그가 시멘트 매트릭스 내에서 불순물로 작용하고, Table 1에서 산화물 조성에 확인된 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>가 2.4 %까지 포함되어 있어 초기 수화를 지연시켰기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 그러나 재령 3일의 경우 10 %까지 혼입한 모든 시험체의 수화활성도는 90 % 이상인 것을 확인하였고, 특히 비자착분 15 %를 혼입한 시험체는 재령 28일에서 Plain과 비슷한 97.1 %의 수화활성도를

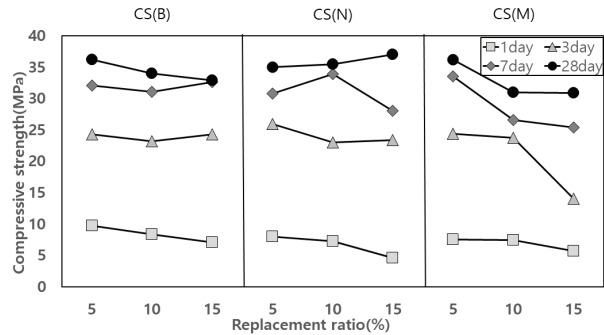


Fig. 8. Compressive strength of converter slag

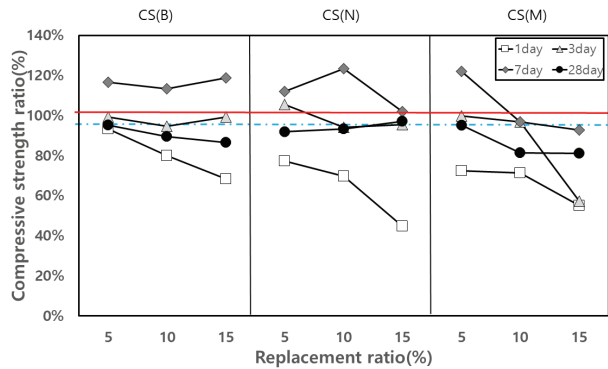


Fig. 9. Compressive strength ratio of converter slag

나타내었다. KS F 2563 ‘콘크리트용 고로슬래그 미분말’에 규정된 고로슬래그 미분말 2종은 재령 28일에 95 % 이상의 수화활성도를 나타내야 한다. 원시료(B)와 자척분(M)에서는 5 % 혼입까지, 비자척분(N)에서는 15 %까지도 재령 28일 OPC 대비 95 % 이상의 수화활성도를 보이는 것으로 나타났다. 이는 자척분(M) 대비 비자척분(N)에서 상대적으로 높은 Merwinite(C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub>) 광물상이 수화반응에 기여하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

### 3.2.3 길이변화

Fig. 10은 전로슬래그의 길이변화를 측정한 실험결과를 나타낸 것이다. Plain의 길이변화를 경우 재령 3, 7, 28일에서 각각 -0.029, -0.04, -0.071 %의 길이변화가 나타났다. 치환율에 따른 전로슬래그 타입별 길이변화율은 재령이 길어질수록 변화율이 커지지만, Plain의 변화율과 큰 차이가 없으며, 전로슬래그 타입별 변화율 또한 차이가 미미한 것으로 나타났으며, 전로슬래그 미분말이 길이변화에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.

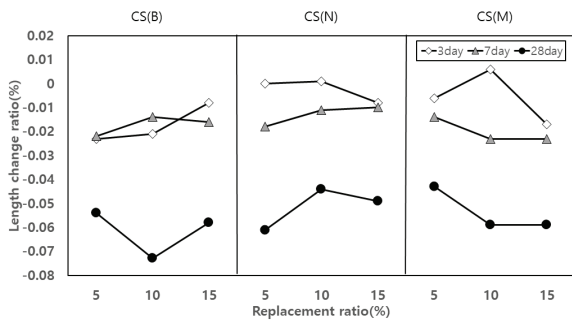


Fig. 10. Length change ratio of Converter slag

## 4. 결론

본 연구의 범위 내에서는 전로슬래그 미분말을 시멘트 혼화제로서의 사용을 위해 자력선별의 유무와 치환율에 따른 기초특성 분석을 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 전로슬래그의 골재상과 분말상의 자력선별 전후의 EDS 분석 결과, 골재상의 T.Fe 성분이 분말상의 T.Fe 성분보다 약 12 % 정도 더 높아 골재 상태에서의 Fe 분리 효율이 우수한 것을 확인하였다.
2. 동일 시간 분쇄 후 전로슬래그의 원시료(B), 자척분(M)과 비자척분(N)의 분말도 차이 결과, 비자척분(N)의 분말도가 가장 높게 나왔으며, 평균 입자 사이즈 또한 가장 작게 나오는

것을 확인하였다. 이는 분쇄에 악영향을 미치는 Fe를 제거하였기 때문에 분쇄효율이 높아진 것으로 판단된다.

3. 전로슬래그의 혼입율이 높아질수록 플로우는 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, OPC 대비 전로슬래그 미분말의 분말도가 높아 수분 흡수량이 증가되었기 때문으로 판단된다.
4. 압축강도 특성은 Plain 대비 모든 배합에서 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>에 의한 영향으로 초기 강도는 매우 낮은 발현율을 보이나, 장기 재령으로 갈수록 강도발현율은 회복되는 것이 확인되었다. 특히 비자척분을 이용한 모르타르에서는 15 %의 혼입에서도 KS F 2563에 규정된 고로슬래그 미분말 사용시 재령 28일 기준 95 % 이상의 활성도 지수와 비교하여 OPC 대비 97.1 %의 강도를 발현하고 있어 OPC에 근접하는 결과를 얻었다. 이는 자력선별로 인한 T.Fe 함유량이 적어 강도 저감에 미치는 영향이 적어졌기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.
5. 길이변화율의 경우, 재령이 증가할수록 변화율이 증가하지만, Plain과 유사한 변화율을 나타내었다. 전로슬래그 미분말의 혼입이 길이변화율에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 골재 크기에서 자력선별로 Fe를 일부 제거하고, 이를 분말화하여 모르타르에 적용한 결과 최대 15%를 혼입한 경우에도 비교배합의 성능에 크게 떨어지지 않는 강도를 발현하는 것을 확인하였다. 이에 Fe 제거가 효율적으로 된다면 전로슬래그 미분말을 시멘트 혼합재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

추후 전로슬래그 미분말을 활용할 경우 자력(Gauss) 조절을 통한 최적의 자력선별 조건을 찾아 더 효율적인 T.Fe 선별 방법이 필요할 것으로 판단된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 논문은 한국연구재단의 이공분야기초연구사업 중 중견연구자지원사업(과제번호 2020R1A2C2013161) 및 창의도전연구기반지원(No. 2020R111A1A01074492)의 지원을 받아 수행한 연구로 이에 감사드립니다. 또한 본 논문은 현대제철의 ‘철강슬래그의 고부가가치적 활용 연구’ 수행을 위한 원료 제공을 통해 진행된 연구로서 이에 감사드립니다.

## References

- Choi, Y.W., Choi, B.K., Oh, S.W., Cho, B.S. (2015). A study on fundamental properties of rapid cooling slag to utilize as fine aggregate for concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **3(2)**, 171–179.
- Karmacharya, M.R., Uchida, I., Idemitsu, T., Takayama, S.I. (1979). On the studies of utilisation of converter furnace slag in road bases, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, **1979(282)**, 101–113.
- Kim, J.S., Park, E.S., Ann, K.Y., Cho, W.J. (2021). A study on the fundamental properties of mortar mixed with converter slag and ferronickel slag, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(2)**, 152–160.
- Kim, W.K. (2014). Current state of recycling and properties of steel slag, *Magazine of RCR*, **9(2)**, 11–15.
- Korea Iron & Steel Association (2002). Crude Steel Production in 2022, <https://www.kosa.or.kr/>.
- Korea Iron & Steel Association. (2021). <https://www.kosa.or.kr/>
- KS F 2527 (2020). Concrete Aggregate, Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KS F 2563 (2020). Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- KS L 5110 (2021). Test Method of Density of Hydraulic Cement, Korea.
- KS L 5111 (2017). Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- KS L 5210 (2017). Portland Blast-Furnace Slag Cement, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- KS L ISO 679 (2009). Cement – Test Methods – Determination of Strength, Seoul, Korea.
- Kwack, K.J., Son, S.J., Kim, K.S. (1994). A study on the characteristics of concrete mixed with the converter furnace slag, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **6(4)**, 113–122.
- Liu, S., Li, L. (2014). Influence of fineness on the cementitious properties of steel slag, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **117**, 629–634.
- Min, T.B., Kim, H.Y., Lim, H.S. (2019). Characteristics of electric arc furnace oxidized slag and domestic and international research trend, *Magazine of RCR*, **14(2)**, 40–47 [in Korean].
- Muhmood, L., Vitta, S., Venkateswaran, D. (2009). Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags, *Cement and Concrete Research*, **39(2)**, 102–109.
- Navarro, C., Díaz, M., Villa-García, M.A. (2010). Physico-chemical characterization of steel slag. Study of its behavior under simulated environmental conditions, *Environmental Science & Technology*, **44(14)**, 5383–5388.
- Ryu, D.H., Kim, G.H. (2009). The prospect for utilization of electric arc furnace oxidizing slag as concrete's aggregate, *Magazine of RCR*, **4(1)**, 17–25.
- Song, Y.L., Park, J.H., Jung, S.W., Lee, M.H., Han, M.C., Han, C.G. (2014). Expanding properties of the mortar with high-volume steel slag aggregate, *Proceedings of Architectural Institute of Korea*, **34(2)**, 583–584 [In Korean].
- Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., Koroneos, C. (2008). Utilization of steel slag for Portland cement clinker production, *Journal of Hazardous Materials*, **152(2)**, 805–811.
- Wang, R., Jin, P., Dong, H., Liu, Y., Ding, Z., Zhang, W. (2021). Effect of moist content on the bio-carbonated steel slag bricks, *Construction and Building Materials*, **269**, 121313.
- Wang, Y., Suraneni, P. (2019). Experimental methods to determine the feasibility of steel slags as supplementary cementitious materials, *Construction and Building Materials*, **204**, 458–467.
- Wu, L., Liu, K., Rao, L., Wang, J., Wang, H. (2021). Effect of binary basicity and ferric oxide content on the soundness, grindability, and cementitious activity of converter steelmaking slag, *Construction and Building Materials*, **300**, 124287.
- Yoo, J.H., Cho, Y.K., Kim, K.H., Lee, J.G., Shim, J.S., Park, C.W. (2006). A study on the properties of electric arc furnace slag and converter slag aggregate, *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, 149–152.
- Yoon, J.K., Sim, J.D. (2004). Introduction to Ferrous Metallurgy, DaeWoong Books, Korea.

### 자력 선별 전로슬래그 미분말을 결합재로 활용한 모르타르의 기초특성

전로슬래그는 용광로에서 생산된 선철을 용융강으로 정제하는 과정에서 배출되는 부산물로, 컨버터에서 생산되는 양의 약 15 %가 배출된다. 이 전로슬래그는 유리 CaO 함량이 높아 콘크리트 골재로 사용 시 팽창균열 가능성이 있어 재활용이 어렵다. 이를 해결하기 위해 전로슬래그를 야드에서 숙성시키지만 완벽하게 제어하기는 어렵다.

본 연구에서는 전로슬래그에 모르타르 제제를 혼합하여 연구를 수행함으로써 골재가 아닌 시멘트 대체재로 전로슬래그를 사용할 수 있는 가능성을 검토하였다.

실험에 사용된 전로슬래그의 EDS 결과, 분말상 대비 골재상일 때 자력선별을 진행하는 것이 T,Fe를 제거하는데 더 효과적인 것을 확인하였다. 분쇄효율 실험은 T,Fe가 많이 분류된 비자착분이 가장 높은 분말도를 나타내었다. 이런 고분말도로 인해 전로슬래그를 15 % 치환했을 때 Plain 대비 비자착분의 플로가 가장 많이 감소하였다. 전로슬래그를 혼합한 모르타르의 길이변화는 재령이 증가할수록 변화율이 커지지만 Plain 대비 유사한 변화율이 나타났다. 압축강도에서는 Plain 대비 비자착분은 치환율 15 %까지 91.9~97.1 %의 강도 발현을 나타내었다. 추후 전로슬래그 미분말을 시멘트 대체재로 활용할 경우, 분쇄 전 자력(Gauss) 조절을 통한 최적의 자력선별 조건을 찾아 더 효율적인 T,Fe 선별 방법이 필요할 것으로 판단되며, EDS 및 Mapping은 국부적인 분석방법으로 큰 편차율을 보이기 때문에 다수의 시료 평가가 필요할 것으로 판단된다.