



## 전기로 산화슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 성능 평가

조봉석<sup>1)\*</sup> · 이훈하<sup>1)</sup> · 양승규<sup>2)</sup> · 이용종<sup>2)</sup> · 엄태선<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>포항산업과학연구원 환경에너지연구본부 자원리사이클링연구실 <sup>2)</sup>쌍용양회공업(주) 기술연구소

### Appraisal of Concrete Performance and Plan for Stable Use of EAF Oxidizing Slag as Fine Aggregate of Concrete

Bong-Suk Cho,<sup>1)\*</sup> Hoon-Ha Lee,<sup>1)</sup> Seung-Kyu Yang,<sup>2)</sup> Woong-Jong Lee,<sup>2)</sup> and Tai-Sun Um<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Resources Recycling Research Dept. Environment&Energy Research Center, RIST, Pohang 790-330, Korea

<sup>2)</sup>Concrete Reserch Office, Technology Research Center, SsangYong Cement Industrial Co. Daejeon 305-764, Korea

**ABSTRACT** Recently, more focus is shift to imbalances in aggregate market supply and demand and an exhaustion of natural resources. In this situation, Electric arc furnace oxidizing slag (EAF slag) has high application possibility as aggregate for concrete due to similar property with general aggregate. However, it is inherent the problem which causes pop-out by free-CaO contained in slag. In this study, we've got the plan to assure the chemical stability of EAF slag, and then experimentally tested the mechanical performance and durability for the fine aggregate used EAF slag. On this test result, we suggest the application plan. At the result of this study, it shows that EAF slag would reduce the surface defect such as pop-out due to natural aging for the fixed hour and adjustment the grain size of EAF slag. And mechanical performance and durability according to the replacement rate of concrete service, were revealed more than equal or equal compare to general aggregate. Hereafter, quality control must precede not to impede the beauty of concrete surface as assure the safety for aging and processing. And, to establish the environmental resource recycling system for by-products of steel, it should be made development of various application and guideline of quality control for the EAF slag aggregate. Moreover, it must be constantly studied all kind of engineering performance and durability for related to this study.

**Keywords :** electric arc furnace oxidizing slag, free-CaO, aging, durability

#### 1. 서 론

종래 철강공정에서 부산물로 발생되고 있는 철강슬래그에는 유리석회 (free-CaO) 등의 불안정한 광물이 함유되어 있을 뿐 아니라 대부분 그 형태가 괴상으로 배출되기 때문에 콘크리트용 골재로서 이용하기에 부적절하다고 인식되어 왔다.<sup>1,3)</sup> 따라서, 콘크리트용 골재로의 활용을 위해서는 별도의 가공처리가 필요하며 이에 따른 가공비용이 수반됨에 따라 소비자의 활용요구가 있다 하더라도 현재까지는 경제적 타산이 맞지 않는 실정이다.

그러나 현재 제강슬래그 중에서 스테인레스 (stainless) 전기로 산화슬래그 (이하, 전기로 산화슬래그, electric arc furnace oxidizing slag)는 스테인레스강의 용해과정에서 발생하는 부산물로서 Fig. 1에서 보는 바와 같이 최종단계에서 배출되는 슬래그의 형태, 크기 및 특성이 콘크리트용 잔골재와 매우 유사하다는 특징을 가지고 있다.

한편, 최근 한국에서도 일본과 마찬가지로 전기로 산화슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 제도적 기반으로서 KS 규격 (KS F 4571 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재, '07.7)이 제정<sup>4)</sup>되어 부산물의 자원화 시스템 기반이 마련되어 있다.

그러나 현재까지는 전기로 산화슬래그 골재는 실용화 단계에는 도달하지 못하였으며 Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 부원료로서 투입된 생석회가 미반응 상태로 슬래그 중에 free-CaO 형태로 잔존하면서 모르타르 또는 콘크리트용 골재로 활용시 표면에서 소형의 팝아웃 (pop-out) 발생을 야기하는 경우가 있기 때문에 소비자의 신뢰도가 낮고 현장 활용실적이 미미한 실정이다. 따라서 산화슬래그 골재의 안정적이고 지속적인 활용을 위해서는 무엇보다도 팝아웃현상의 발생방지를 위한 안정성 확보방안이 확립되어야 할 필요가 있다.<sup>5,6)</sup>

본 연구에서는 전기로 산화슬래그 골재의 모르타르 및 콘크리트용 잔골재로서의 안정적 활용을 위해 전기로 산화슬래그 산화슬래그의 안정화 처리조건으로서 고온건조 및 온수침지, 입경조정, 자연 에이징 (aging)방법에 따른 팝아웃 저감현상을 실증적으로 평가함으로써 전기로 산

\*Corresponding author E-mail : chos8@rist.re.kr

Received February 25, 2009, Revised April 14, 2009

Accepted April 14, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

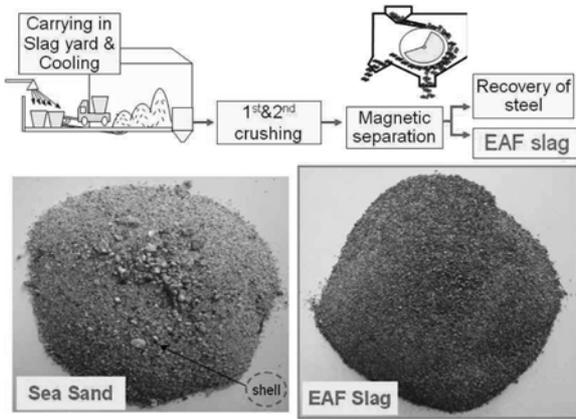


Fig. 1 Manufacture of stainless EAF slag

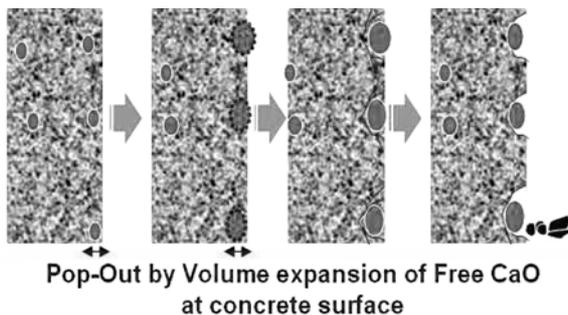


Fig. 2 Mechanism of pop-out generation

화슬래그의 안정화 방안을 도출하였다.

또한, 안정화 처리된 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 잔골재로서의 적용성을 평가하기 위하여 일반 건축구조물, 도로포장 콘크리트, 해양 소파블럭<sup>7)</sup> 등 콘크리트 용도에 따라 역학적 성능 및 내구성능을 검토함으로써 최종적으로 전기로 산화슬래그 골재의 자원순환 시스템 기반구축을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

본 연구의 진행 플로우 및 실험은 Fig. 3 및 Table 1에

나타낸 바와 같으며, 전기로 산화슬래그 골재의 안정적 활용방안 도출과 콘크리트의 적용성 평가로 크게 구분하여 연구를 진행하였다.

### 2.1 실험 계획

본 연구의 실험 계획 및 진행은 Table 1에 나타낸 바와 같이 먼저, 전기로 산화슬래그의 안정성 확보방안을 도출하기 위해 현재 최종 배출되고 있는 전기로 산화슬래그 (최대크기 2.0~2.5 mm 이하)를 그대로 사용, 또는 Ball Mill에 의해 최대크기 0.85 mm 이하로 입도조절한 골재 2수준을 활용하여 실험을 진행하였다.

식(1)에 나타낸 바와 같이 전기로 산화슬래그 내에 잔존하는 free-CaO를 강제적으로 수화시키기 위하여 사전처리를 실시하였으며 Series I에서는 고온건조온도 (3수준 : 140, 160, 180°C) 환경 내에서 지속시간 (3수준 : 10, 20, 30 min)을 변화시키는 방법을 채용하였다.



Series II에서는 95°C정온의 온수에 최대크기 2 mm 이하 및 0.85 mm 이하로 조정된 슬래그 골재를 15분간 침지하였으며, Series III에서는 자연대기상태에서 0, 1, 3, 5, 6개월동안 에이징함으로써 전기로 산화슬래그 골재의 안정화 사전처리를 실시하였다.

이와 같이 각각의 안정화 방법에 따라 처리된 전기로 산화슬래그 골재를 100% 활용하여 모르타르 시험체를 제작한 후, 온도 80°C 조건의 습윤챔버에서 약 1개월간 노출시킴으로써 모르타르 표면에서 발생한 팽아웃 성상을 평가하였다.

또한, 전기로 산화슬래그를 콘크리트용 잔골재로서의 활용가능성을 평가하기 위하여 일반 자연대기상태에서 6개월 이상 노출, 에이징을 실시하여 안정화 처리된 슬래그를 대상으로 일반 건축구조물용 콘크리트 (25-24-15), 도로포장용 콘크리트 (25-2.5(휨강도)-4), 해양 소파블럭

Table 1 Experimental plan

Series	Max. size of EAF slag (mm)	Aging method	Temperature (°C)	Exposure term	Measurement item	
Stability security of EAF slag aggregate	I	2.5	Drying in high temperature condition	140, 160, 180 (in dry oven)	10, 20, 30 min.	- Number of pop-out generated at surface of mortar (ea) - Free-CaO (%) (KS L 5120)
	II	2.0, 0.85	Soaking in hot water	95 (hot water)	15 min.	
	III	2.5	Air aging (exposure in open air)	Air condition	1, 3, 5, 6 months	
Application evaluation as fine aggregate for concrete	-	2.5	Air aging (exposure in open air)	Air condition (*08.1~*08.12)	over 6 months	- Three types of concrete a. General concrete of architect b. Pavement c. Tetrapod - Compressive & bending strength, Carbonation, freezing&thawing, Chloride ion penetration

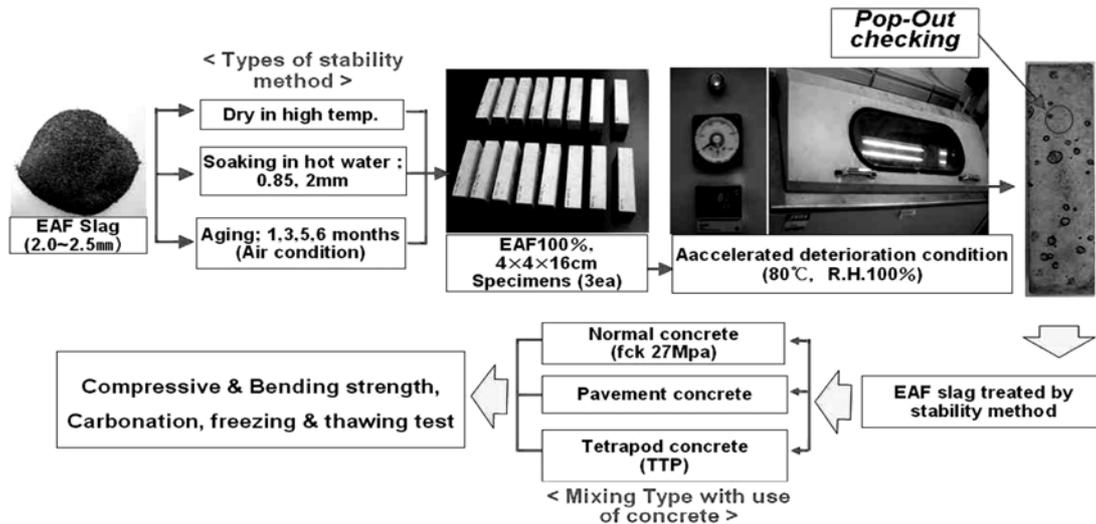


Fig. 3 Experiment progress and test method

용 콘크리트 (25-18 -12)의 시방배합을 선정 후, 전기로 산화슬래그 잔골재의 치환율에 따른 콘크리트의 굳지않은 성상, 역학적 성능 및 염해, 탄산화, 동결융해 등의 내구성능을 중심으로 평가하였다.

## 2.2 사용재료 및 배합

본 연구의 사용재료는 Table 2에 나타낸 바와 같으며 특히, 전기로 산화슬래그 골재는 일반 천연골재에 비하여 다소 비중이 큰 편이며 화학성분은 Table 3에서 보는 바와 같이 CaO 및 SiO<sub>2</sub> 성분이 주를 이루며 염기도 (CaO/SiO<sub>2</sub>)가 1.5이하로 다른 제강슬래그에 비하여 상대적으로 매우 안정하다.<sup>8)</sup>

또한, 중금속 용출시험 (폐기물관리법 시행규칙 [별표 1]) 평가 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 Pb, Cu, As, Hg, Cd 등이 용출되지 않는 것으로 나타나거나 극미량으로 검출되어 환경적으로 무해한 것으로 평가되었다.<sup>9)</sup>

본 연구에서 활용한 전기로 산화슬래그는 최종단계에서 배출되는 입경이 2~2.5 mm (FM 1.96~2.24) 이하 수준이며, 실적률은 53% 이상 (54~56%)으로 평가되었다.

또한, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 콘크리트용 잔골재로 단독사용하기에는 입자가 매우 미립한 수준으로 표준입도분포곡선을 벗어나는 것으로 나타나지만, 입도분포특성 측면에서 보면 일반쇄사와 혼합활용시에는 40~60% 수준으로 혼합사용이 가능할 것으로 판단된다.

전기로 산화슬래그의 안정성 확보방안 도출을 위한 모르타르시험체의 배합은 물과 보통포틀랜드시멘트와 전기로 산화슬래그 골재의 중량비를 0.5 : 1:2.45로 설정하였으며 40 × 40 × 160 mm의 모르타르 시험체를 3ea씩 제작한 후 7일간 기건양생 후 촉진열화 실험을 진행함으로써 모르타르 표면에서 발생하는 팝아웃 특성을 평가하였다.

또한, 콘크리트용 잔골재로서 전기로 산화슬래그의 활용가능성을 평가하기 위한 콘크리트의 배합은 Table 5에 나타낸 바와 같이 구조물의 용도에 따라 건축구조물용

콘크리트 (EAF 치환율; 0, 25, 50, 75, 100%), 도로포장용 콘크리트 (0, 40, 100%), 해양 소파블럭용 콘크리트 (0, 40, 100%)용 현장시방배합을 선정하여 전기로 산화슬래그의 치환율별 굳지않은 성상, 역학적 성능 및 내구성능을 평가하였다.

## 2.3 실험 방법

본 연구에서 전기로 산화슬래그의 안정성 확보방안 도

Table 2 Physical property of using materials

Material	Physical property
Cement	Ordinary portland cement, specific gravity 3.15 g/cm <sup>3</sup>
Fly-ash	Specific gravity 2.17 g/cm <sup>3</sup> , fineness 3,610 cm <sup>3</sup> /g
EAF slag	Specific gravity 2.89~3.12 g/cm <sup>3</sup> , absorption 1.11%, FM 1.96~2.24 (Gmax; 2.5 mm),
Fine aggregate	Crushed sand, Specific gravity 2.61 kg/cm <sup>3</sup> , absorption 1.57%
	Sea sand, Specific gravity 2.54 kg/cm <sup>3</sup> , absorption 1.29%
Coarse aggregate	Crushed granitic aggregate, (size 25 mm) specific gravity 2.67 kg/cm <sup>3</sup> , absorption 0.98%

Table 3 Chemical component of EAF slag sand

Compo.	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
(%)	32.7	5.95	6.6	24.0	6.04

Table 4 Leaching test result of heavy metals

	Leaching concentration of heavy metals (mg/L)						
	Pb	Cu	As	Hg	Cd	Cr	CN
EAF slag	N.D*	0.019	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Standard	< 3	< 3	< 1.5	< 0.005	< 0.3	< 1.5	< 1

\*N.D; not detected

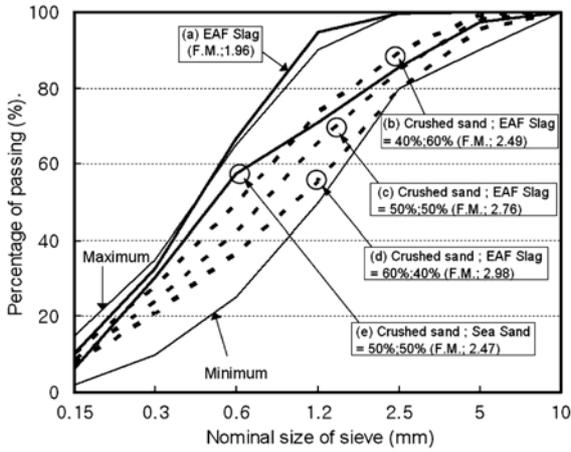


Fig. 4 Grading curve of banded EAF slag aggregate

출실험을 진행하는데 있어 모르타르 표면의 미세한 팝아웃일지라도 잠재적인 발생가능성을 인위적으로 평가하기 위한 가혹조건을 재현하기 위하여 온도 80°C, 상대습도 100%의 조건을 설정하여 시험체 타설 후 7일 기건양생 실시 직후 고온습윤환경에서 촉진열화하였다.

전기로 산화슬래그 내에 free-CaO가 고온습윤환경에서 급격한 수화반응에 의해 모르타르표면에서 체적팽창을 야기할 경우 발생하는 직경 2~10 mm 정도의 팝아웃 (POP-out)을 관찰하여 표면면적당 (40 × 40 × 160 mm, 면적 28,800 mm<sup>2</sup>) 누적 발생수를 산출하였다. 또한, free-CaO의 정량분석을 위하여 KS L 5120보통포틀랜드 시멘트

의 화학분석방법에 준하여 free-CaO의 함량 측정을 실시하였다.

Table 6은 전기로 산화슬래그 안정성 확보방안 도출실험 series 에서 고온건조기 내에서 시간경과에 따른 함수율 변화를 나타낸 것으로 본 연구에서 적용한 전기로 산화슬래그는 습식설비에 의해 최종 배출되기 때문에 배출 직후 자체 함수율은 약 10% 내외 수준이다.

고온노출시간이 길어질수록 수분의 증발과 더불어 함수율이 감소하였다. 또한 온수침지에 있어서 95°C의 온수에 2 mm 및 0.85 mm의 전기로 산화슬래그를 투입하였을 경우 투입직후 수온은 5분 후 66°C, 10분 후 58°C, 15분 후 52°C의 수준으로 낮아졌다.

전기로 산화슬래그 잔골재 치환율에 따른 용도별 콘크리트의 성능평가는 공기량 (KS F 2421), 슬럼프 (KS F 2402), 압축강도 (KS F 2405), 휨강도 (KS F 2408), 촉진탄산화 (KS F 2584), 동결융해 시험 (KS F 2456), 내염해성 (KS F 2711)을 중심으로 평가하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 전기로 산화슬래그의 안전성 확보방안 도출

##### 3.1.1 고온건조처리에 의한 안정성 (series I)

Fig. 5는 고온건조하에서 사전 처리한 전기로 산화슬래그 모르타르의 팝아웃 발생현상을 나타낸 것이다. 전반

Table 5 Mix proportion with type of concrete

Type of con'c	EAF slag rep.(%)	Target slump (mm)	f <sub>ck</sub> (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Unit weights (kg/m <sup>3</sup> )					Fresh properties		
							C	FA	EAF slag	Sand (crushed sand)	Gravel (crushed stone)	AD (C×%)	Slump (mm)	Air (%)
Normal con'c (25-24-15)	0	150±25	24	48	49.0	165	292	52	335 (sea sand)	503	910	1.30	155	4.7
	25			48	48.5	165	292	52	237	622	919	1.36	160	6.1
	50			48	47.5	165	292	52	463	406	937	1.36	155	4.8
	75			48	47.0	165	292	52	388	201	946	1.37	150	4.3
	100			48	46.5	165	292	52	907	0	955	1.35	145	4.0
Pavement con'c (25-2.5-4)	0	80±2.5	2.5 (bending strength)	42.5	48.6	165	338	50	333 (sea sand)	506	907	0.51	70	5.2
	40			42.5	48.6	165	338	50	414	506	907	0.53	80	4.9
	100			42.5	44.6	165	338	50	949	0	978	0.53	75	5.9
Tetrapod (25-18-12)	0	150±2.5	18	63.5	50.5	176	235	42	360 (sea sand)	544	907	0.67	145	3.1
	40			63.5	50.5	176	235	42	446	544	907	0.72	150	3.4
	100			63.5	46.5	176	235	42	1027	0	980	0.80	155	3.3

Table 6 Variation of water content of EAF slag in dry oven with high temp.

Temp. in dry oven (°C)	Water content before inputting into dry oven (%)	Water content in drying machine with elapsed time		
		10 min.	20 min.	30 min.
140	9.66	9.03% (104°C*)	7.42% (120°C)	2.55% (125°C)
160		7.94% (129°C)	6.73% (139°C)	0.67% (155°C)
180		7.20% (155°C)	4.70% (163°C)	0.89% (178°C)

\*Internal temperature after inputting EAF slag into dry oven

적으로 노출온도가 높아질수록 팝아웃 발생수가 다소 저감되었다. 또한 고온노출 지속시간이 길어질수록 팝아웃에 대한 저항성이 다소 향상되었으며, 팝아웃이 가장 적게 발생한 경우 (180°C, 30분 지속; 24일 경과 22ea 발생)를 보면 고온건조 처리에 의해서 미처리 경우 (air-dry) 대비 50% 수준의 저감효과가 나타나고 있긴 하나, 그 이상의 저감효과는 현저하게 나타나지 않고 있다.

이러한 현상은 고함수 상태 (약 10%)의 전기로 산화슬래그를 고온의 건조환경에 노출할 경우 산화슬래그 내부의 수분과 free-CaO의 수화반응 속도에 비하여 수분의 증발 속도가 보다 빠르기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구의 범위에서는 습식설비에 의해 최종 배출되는 전기로 산화슬래그의 함수율을 저감함과 동시에 free-CaO의 강제수화를 수반하는 효과는 현저하지 않은 것으로 평가되었다.

### 3.1.2 온수침지 및 입경조절에 의한 안정성 (series II)

Fig. 6은 온수침지 및 골재입경의 조절을 통한 전기로 산화슬래그의 팝아웃 저감효과를 나타낸 것이다. 온수침지처리를 행하지 않은 시험체에 비하여 온수침지를 실시한 경우가 팝아웃 발생수가 감소되는 것으로 나타났다. 그러나 온수침지를 실시한다 하더라도 표면의 팝아웃 발생현상은 여전히 나타나고 있다.

한편, 기존 전기로 산화슬래그 골재는 최대크기 2.0~2.5 mm 이하로 배출되지만, 이를 0.85 mm 이하로 입경을 조절할 경우에는 온수침지 여부에 관계없이 전기로 산화슬래그 모르타르의 팝아웃 발생이 현저하게 감소, 또는 거의 발생하지 않음을 확인하였다.

실제 현장 적용조건을 고려할 경우, 0.85 mm 이하의 전기로 산화슬래그 골재를 콘크리트용 골재로서 단독으로 사용하기는 어려울 것으로 판단되지만, 기존의 쇄사는 오히려 입경이 조립한 결점이 있으므로 EAF 골재를 입도보정용 잔골재로서 활용하는데는 무리가 없을 것으로 판단된다.

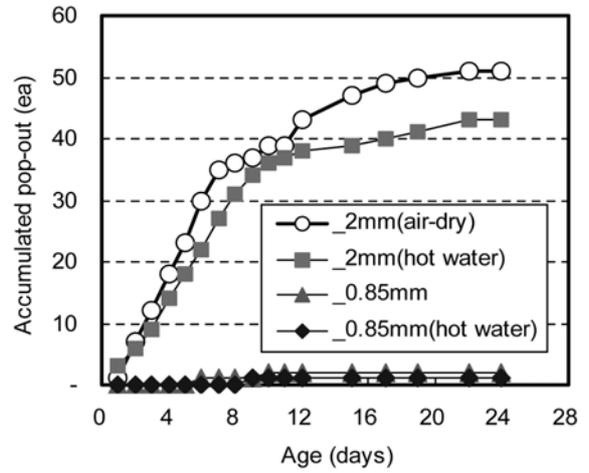


Fig. 6 Reduction effect of pop-out by soaking in hot water and size down (80°C, RH 100%)

Table 7 External pop-out of specimen with size-down of EAF slag

under 2 mm	under 0.85 mm

### 3.1.3 자연 에이징처리에 따른 안정성 (series III)

Fig. 7은 일반대기 환경하에서 자연에이징에 의한 팝아웃 발생저감효과를 나타낸 것으로 전기로 산화슬래그의 배출 즉시, 시료를 채취하여 인위적 팝아웃 발생 촉진실험 (80°C, R.H 100% 조건)을 진행했을 경우 자연에이징을 실시하지 않은 경우 (none-aging)와 비교하여, 1,

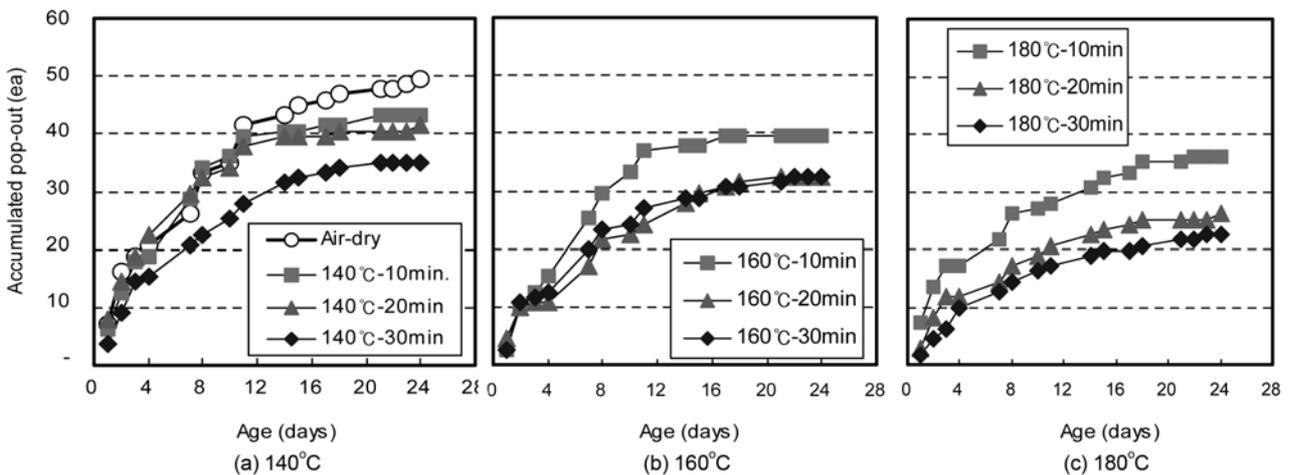


Fig. 5 Number of pop-out at mortar surface in dry condition exposed by high temperature

3, 5, 6개월 동안 자연에이징을 실시한 경우 모르타르 표면에서 발생한 팝아웃 발생수는 현저히 줄어드는 것으로 나타났다.

특히, 1개월 이상 에이징을 실시하더라도 그 효과는 명확히 나타나고 있으며, 3~5개월간 에이징을 실시할 경우 팝아웃 현상은 거의 발생하지 않는 것으로 평가해도 무방할 것으로 판단된다. 일본의 경우 일본토목학회('03) 및 일본건축학회('05)의 「전기로 산화슬래그골재를 이용한 콘크리트 설계시공지침(안)」에서는 혼합사 형태로 30% 미만 대체 활용시에는 일반 표준시방서에 준하여 시공해도 무방함을 제시하고 있다.<sup>10,11)</sup>

향후, 레미콘용 골재로 활용하기 위하여 소정의 기간 동안 자연대기 에이징을 선행한다면 혼합골재로서 일정 비율 대체 활용이 적극 가능할 것으로 기대된다.

또한, Table 8 및 Fig. 8은 free-CaO와 팝아웃 발생과의 상관관계를 나타낸 것으로 As-Is 대비 1개월 에이징 시 free-CaO 함량은 대폭 줄어드는 것으로 나타났다. free-CaO 함량 감소에 따라 전기로 산화슬래그를 활용한 모르타르 및 콘크리트의 팝아웃 현상 역시 감소되는 것으로 나타나 상관관계가 매우 밀접한 것으로 평가되며, 향후 전기로 산화슬래그 골재의 품질관리를 위한 유용한 평가지표가 될 것으로 판단된다.

### 3.2 전기로 산화슬래그 잔골재의 콘크리트 적용성 평가

본 절에서 콘크리트 적용성 검토를 위해 활용한 전기로 산화슬래그 잔골재는 일반대기 환경에서 6개월 이상 에이징 (우수 노출, free-CaO; 0.1~0.2%)을 실시한 것으로 180일 장기 압축강도 평가 실시 전후에 있어서 콘크리트 표면에 팝아웃 현상은 발생하지 않았으며 이후 장기 모니터링 실시 결과에서도 표면결함은 나타나지 않았다.

#### 3.2.1 용도별 전기로 산화슬래그 콘크리트의 역학성능

Fig. 9는 콘크리트의 용도별 전기로 산화슬래그 잔골

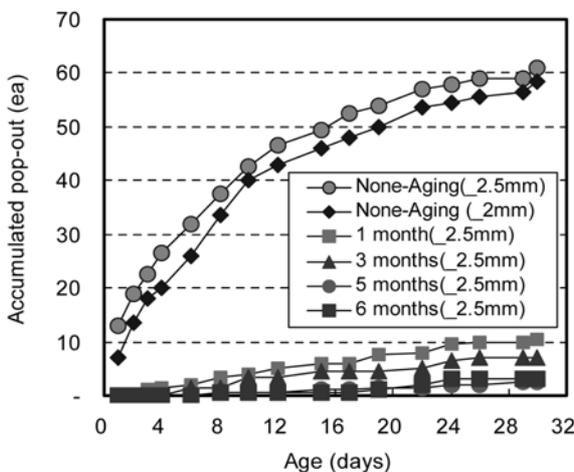


Fig. 7 Reduction effect of pop-out with aging period of EAF slag (80°C, RH 100%)

Table 8 Number of pop-out and free-CaO contents by aging

Aging (months)	Free-CaO (%)	Number of pop-out (ea)	Average of pop-out (ea)
None-aging	0.6178	53	61.0
	0.7367	67	
	0.7042	63	
1	0.2503	11	10.7
	0.3712	9	
	0.2459	12	
3	0.1854	5	7.0
	0.2836	8	
	0.1988	8	
5	0.1584	0	2.7
	0.1893	3	
	0.1806	5	
6	0.1505	3	3.0
	0.2011	4	
	0.1491	2	

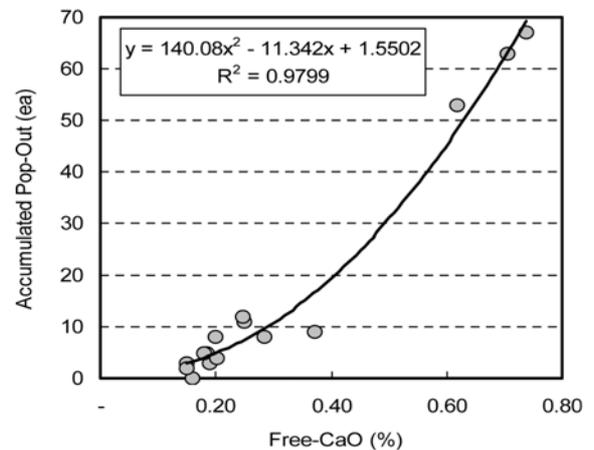


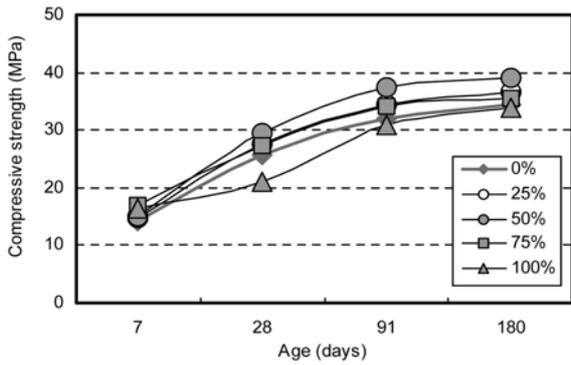
Fig. 8 Correlation between accumulated pop-out and free-CaO contents

재 대체율에 따른 콘크리트의 강도특성을 나타낸 것으로 일반 건축구조물 배합의 경우, 28일 압축강도에 있어 전기로산화슬래그의 100% 대체를 제외하면 일반 골재를 사용한 경우와 비교하여 동등 이상의 강도를 발현하였다. 또한, 재령 91일 및 180일 장기 압축강도에서 우수한 성능을 발현하는 것으로 평가되었다.

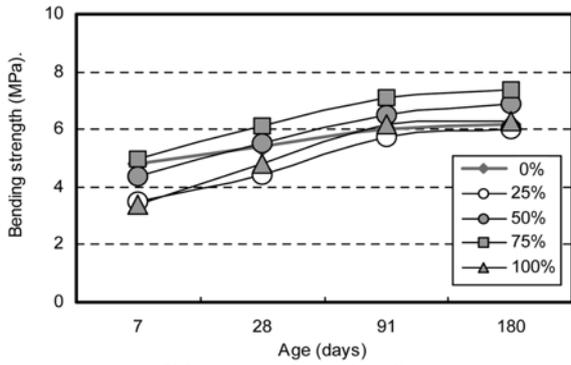
전기로 산화슬래그 잔골재를 100% 활용할 경우에는 콘크리트용 잔골재 표준입도범위를 크게 벗어나게 되고, 전기로 산화슬래그 잔골재의 미립한 특성으로 인해 필요로 되는 결합재량이 상대적으로 많이 요구되므로 강도저하 현상<sup>12,13)</sup>이 야기되는 것으로 판단된다.

또한, 28일 휨강도의 경우 EAF 50% 및 75%에서 plain 대비 동등이상의 수준을 나타내었으며, 장기강도에서는 대체적으로 일반골재와 유사한 수준으로 평가되었다.

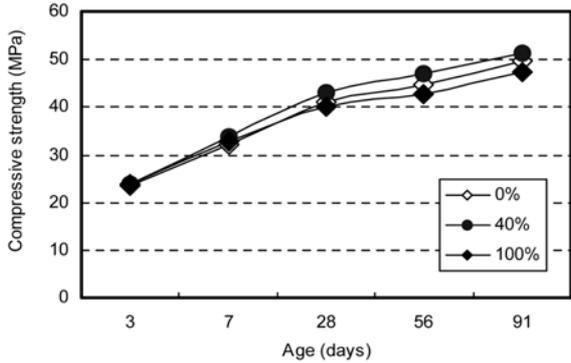
한편, 도로포장용 및 소파블럭용 콘크리트 배합에 있어서는 전기로 산화슬래그 100% 활용의 경우 압축강도 값이 다소 하회하는 것으로 나타났으며 유의할 만한 경



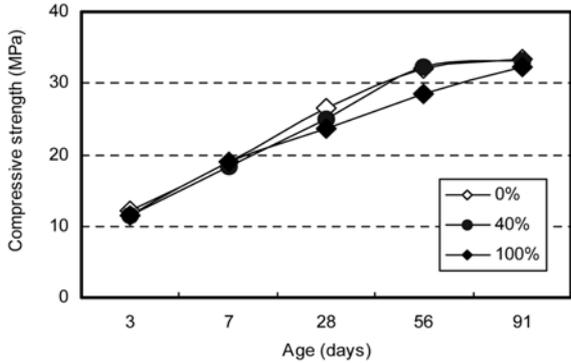
(a-1) Normal concrete (compressive strength)



(a-2) Normal concrete (bending strength)



(b) Pavement concrete



(c) Tetrapod

Fig. 9 Strength performance with concrete mix

향은 아닌 것으로 판단되며, 40% 대체한 경우에는 plain에 비해 동등 이상의 수준을 발현하였다.

본 연구에서 평가한 용도별 콘크리트의 역학적 성능 측면에서 볼 때, 콘크리트용 골재로서 전기로 산화슬래그 잔골재 활용시 적정 대체율은 40~50%로 사료된다.

단, 건축구조물의 경우 어느 정도 소정의 안전율을 고려한다면, 일본의 경우와 마찬가지로 30% 이내가 적합할 것으로 판단되며, 물론, 슬래그 골재는 충분히 에이징된 것으로 팽아웃에 대한 안정성이 확보된 것을 활용해야 할 것이다.

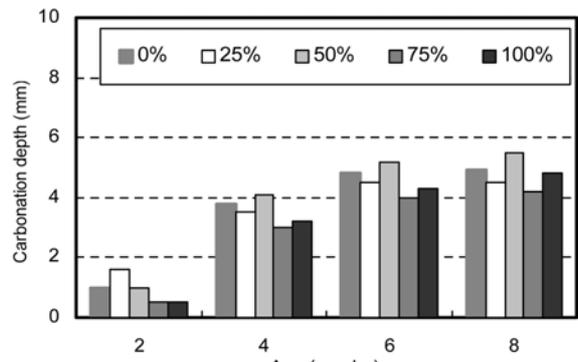
### 3.2.2 용도별 전기로 산화슬래그 콘크리트의 내구성능

Table 9 및 Fig. 10은 콘크리트의 용도 및 전기로 산화슬래그 잔골재 대체율에 따른 탄산화 및 내동해성을 나타낸 것으로 탄산화의 경우, 전기로 산화슬래그 잔골재 활용에 따른 유의할 만한 경향은 나타나지 않는다.

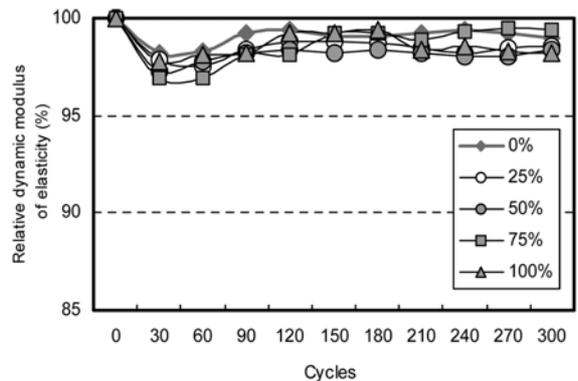
내동해성의 경우에도 마찬가지로 유의할 경향은 없는 것으로 평가되었으며 전 측정사이클에서 상대동탄성계수가 90% 이상 확보되는 것으로 나타나, 전기로 산화슬래그 잔골재의 활용에 따른 콘크리트의 내구성능 저해는 없는 것으로 판단된다.

Table 9 Carbonation depth at 4 weeks in accelerated condition

0%	25%	50%	75%	100%



(a) Carbonation



(b) Freezing & thawing

Fig. 10 Durability of normal concrete mix with EAF slag

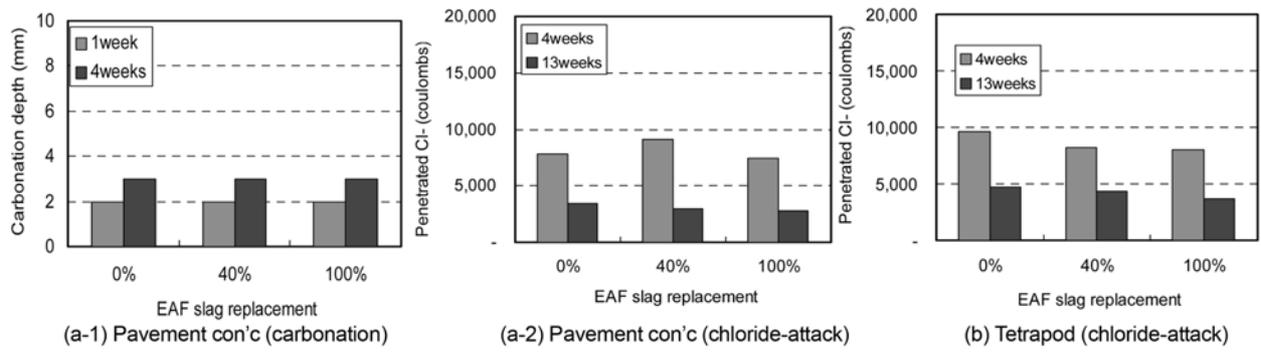


Fig. 11 Durability of concrete with EAF slag for pavement & tetrapod concrete

또한, Fig. 11은 도로포장용 콘크리트와 소파블럭용 콘크리트 배합에 있어서 탄산화 및 염해 저항성을 평가한 것이다. 배기가스 및 겨울철 제설재에 노출될 수 있는 도로용 구조물, 그리고 해수환경에 설치되는 소파블럭의 환경적 열화조건을 고려할 때 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재를 적용할 경우, 성능결함은 나타나지 않았으며 일반골재 활용시와 비교하여 동등이상의 내구성능을 발현하는 것으로 평가되었다.

본 연구를 통해 전기로 산화슬래그 잔골재의 활용가능성을 실험적으로 평가한 결과, 일반골재와 비교하여 동등 또는 동등이상 수준의 역학적 성능 및 내구성능 확보가 가능함을 알 수 있었다. 한편, 무엇보다도 콘크리트용 잔골재 활용시 팽아웃 등 표면결함에 의한 미관저해 현상이 나타나지 않도록 전기로 산화슬래그 잔골재에 대한 충분한 사전 에이징, 가공처리 등의 품질관리는 필수 요소라 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 잔골재 활용기반을 마련하기 위하여 슬래그 잔골재의 안정적 활용방안을 도출하고 이를 통해 안정화된 전기로 산화슬래그 잔골재를 콘크리트에 활용하여 역학적 성능 및 내구성능 평가에 관한 실험적 연구를 진행하였으며 연구의 범위에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 전기로 산화슬래그 골재입경을 0.85 mm 이하로 조절할 경우, 팽아웃에 대한 안정성이 확인되었으며 콘크리트용 잔골재의 혼합사 형태로 그 활용이 가능할 것으로 사료된다.
- 2) 자연대기 에이징에 의해 화학적 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며 전기로 산화슬래그의 품질관리에 있어 free-CaO 및 팽아웃 발생의 상관관계는 유용한 지표로 활용이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 콘크리트용 잔골재 활용시 표면결함에 의한 미관저해 현상이 나타나지 않도록 전기로 산화슬래그 잔골재에 대한 충분한 사전 에이징, 가공처리 등 안정성 확보를 위한 품질관리가 반드시 선행되어야

할 것이다.

- 4) 용도별 콘크리트의 역학적 성능 측면에서 볼 때, 콘크리트용 골재로서 전기로 산화슬래그 잔골재 활용 가능성은 매우 높을 것으로 판단된다.
- 5) 전기로 산화슬래그 잔골재 활용에 따른 탄산화, 내염해성 및 내동해성은 일반 골재 활용시와 비교하여 동등, 또는 동등이상의 내구성능을 발현하는 것으로 평가되었다.
- 6) 향후, 철강부산물의 친환경적인 자원순환 시스템을 지속적으로 확립하기 위해서는 전기로 산화슬래그 골재에 대한 품질관리 지표 구축과 더불어 다양한 용도개발이 이루어져야 하며 각종 공학적 특성 및 내구성에 관한 지속적인 연구개발이 요구된다.

#### 참고문헌

1. 김진만, 조성현, 오상윤, 곽은구, 김형석, 박광석, “철강슬래그의 콘크리트용 골재로서의 이용에 관한 최신기술 현황,” 콘크리트학회지, 19권, 6호, 2007, pp. 42~49.
2. 조성현, 김진만, 한기석, 김무한, “급냉 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 모르타르의 유동성 및 압축강도 특성,” 콘크리트학회 논문집, 17권, 1호, 2005, pp. 77~84.
3. 이승한, 서승, “전기로 슬래그 노반재의 기초적 특성에 관한 연구,” 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), 24권, 2호, 1993, pp. 43~46.
4. 조봉석, 이훈하, “스테인레스 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 잔골재 안정성 확보방안에 관한 연구,” 자원리싸이클링학회 추계학술발표대회, 2008, pp. 81~85.
5. 이훈하, 전기로 슬래그 골재 재활용 방법, 특허등록번호 0067456, 2006.
6. 대한토목학회, 전기로슬래그를 사용한 도로포장 설계·시공지침, 대한토목학회, 1997, pp. 63~69.
7. 김형석, “인공어초용 슬래그 콘크리트의 제조,” RIST 연구논문, 16권, 2호, 2002, pp. 155~159.
8. 森野奎二, 兒玉伸明, “電氣爐酸化スラグ骨材を使用したコンクリートの實構造物への適用性,” *Cement Science and Concrete Technology*, No. 53, 1999, pp. 507~511.
9. 曹俸頌 外, “コンクリート用ステンレス電氣爐酸化スラグ細骨材の安定性評価,” (社)日本建築學會 學術講演梗概集, A-1, 2008, pp. 631~632.
10. 콘크리트용슬래그骨材第4部, 電氣爐酸化スラグ骨材,

日本工業標準調査, 2003, 24 pp.

11. 電氣爐酸化スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計施工指針(案)・同解説, (社)日本建築學會, 2005, pp. 87~91.
12. Montgomery, D. G. and Wang, G., "Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete-Strength Related Properties,"

*Cement and Concrete Research*, Vol. 21, 1991, pp. 1083~1091.

13. Montgomery, D. G. and Wang, G., "Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete-Fracture Related Properties," *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, 1992, pp. 755~760.

---

**요 약** 최근 골재 수급불균형 문제 및 천연자원 고갈에 관한 사회적 관심이 집중되는 가운데, 종래 철강공정에서 부산물로 발생하는 슬래그 중 전기로 산화슬래그는 그 물리적 특성이 일반 골재와 유사한 특성이 있어 콘크리트용 골재로서 활용가능성이 높게 평가되나 슬래그 중 함유되어 있는 free-CaO에 의한 표면결함을 야기하는 문제를 내재하고 있다. 본 연구는 이러한 전기로 산화슬래그 골재의 화학적 안정성 확보방안을 도출하고 이를 통해 안정화된 슬래그 골재를 용도별 콘크리트용 잔골재로 활용하여 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성능을 실험적으로 평가하여 전기로 산화슬래그 잔골재의 활용방안을 제시하는데 그 목적이 있다. 본 연구결과, 전기로 산화슬래그의 골재입경 조정, 소정 기간 동안의 자연 에이징 처리에 의해 팝아웃 등의 표면결함을 대폭 저감할 수 있는 것으로 나타났으며, 콘크리트 용도별 대체율에 따른 역학적 성능 및 내구성능은 일반 골재와 비교하여 동등 또는 동등이상의 성능을 발현하는 것으로 평가되었다. 향후 전기로 산화슬래그 잔골재 활용시에는 콘크리트의 미관저해 현상이 나타나지 않도록 충분한 사전 에이징 또는, 가공처리 등 안정성 확보를 위한 품질관리가 반드시 선행되어야 할 것이다. 또한, 철강부산물의 친환경적인 자원순환 시스템을 확립하기 위해서는 전기로 산화슬래그 골재에 대한 품질관리 지표 구축과 더불어 다양한 용도개발이 이루어져야 하며 각종 공학적 특성 및 내구성에 관한 지속적인 연구개발이 이루어져야 할 것이다.

**핵심용어** : 전기로 산화슬래그, 유리석회, 에이징, 내구성능