스테인리스 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 잔골재 활용방안 검토

Study on Stable Use of Stainless EAF Oxidizing Slag as Fine Aggregate of Concrete

조 봉 석^{1)*}

Bong-Suk Cho

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. 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 : STS electric arc furnace oxidizing slag, Free-CaO, Aging, Fine aggregate for concrete, Durability

1. 서 론

종래 철강공정 중 부산물로 발생되고 있는 제강슬래그는 1~2%수준의 free-CaO를 함유되어 있어 팽창우려가 있을 뿐 아니라 대부분 괴상(塊狀)으로 배출되기 때문에 콘크리트용 골재로 이용하기에 부적절하다고 인식되어 왔다.

콘크리트용 골재로 활용하기 위해서는 별도 가공처리에 따른 비용이 수반되므로 소비자의 활용요구가 있더라도 경제적 타산이 맞지 않는 실정이었다. 그러나, 최근 천연골재 채취제한에 따른 수급불균형 및 가격상승에 따라 대체골재 활용에 대한 기대가 높아지고 있는게 사실이다.

현재 제강슬래그 중에서 Stainless 전기로 산화슬래그(이하, 전기로 산화슬래그, Electric arc furnace oxidizing slag)

는 Stainless강의 용해과정에서 발생하는 부산물로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 최종단계에서 배출되는 슬래그의 형태, 크기 및 특성이 콘크리트용 잔골재와 유사한 특성이 있다.

한편, 전기로 산화슬래그 골재에 대한 KS규격(KS F 4571 콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재)이 기 마련되어 있으나, 현재까지 상용화 단계에는 이르지 못했으며 Fig. 2에 나타난 바와 같이 부원료로 투입된 생석회 미반응 상태로 슬래그 중에 free-CaO형태로 잔존하면서 콘크리트용 골재로 활용시에 소형의 팝아웃(Pop-out)발생을 야기하는 경우가 있어 신뢰도가 낮고 현장 활용실적도 미미한 실정이다.

전기로 산화슬래그 골재의 안정적인 활용을 위해서는 발생→품질관리→콘크리트 제조 및 성능검증→현장적용→상용화 확대로 연계되는 일련의 건설생산공학적 프

1) 정회원, 제)포항산업과학연구원(RIST) 에너지환경연구소 책임연구원, 교신저자

* Corresponding author : chos8@rist.re.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Fig. 1 Manufacture of stainless EAF slag

Fig. 2 Mechanism of pop-out generation

로세스 확립이 필요하며, 무엇보다도 팝아웃 발생방지를 위한 안정성 확보방안이 확립되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 전기로 산화슬래그 골재의 품질관리 방안을 도출하기 위해 고온건조 및 온수침지, 입경조정, 자연 에이징 (Aging) 조건에 따른 팝아웃 발생현상을 평가하였다.

또한, 안정화 처리된 전기로 산화슬래그의 잔골재 활용성을 평가하기 위하여 일반 건축구조물, 도로포장용 콘크리트, 해양 소파블럭 (Tetrapod) 등 콘크리트 용도에 따른 역학적 성능 및 내구성능을 검토함으로써 전기로 산화슬래그 잔골재 활용기반확립을 위한 데이터베이스를 구축하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

Fig. 3은 본 연구의 진행 프로세스 및 실험방법을 나타낸 것으로 전기로 산화슬래그 골재의 안정적 활용방안을 제시하고 콘크리트 골재 활용시 역학적 특성, 내구성능 등 제반 물성을 평가하고자 하였다.

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1에 나타난 바와 같이 전기로 산화슬래그의 안정성 확보방안을 도출하기 위해 현재 최종 배출되고 있는 전기로 산화슬래그 (2mm 이하)를 그대로 사

Fig. 3 Experiment progress and test method

Table 1 Experimental plan

Series		Max. Size of EAF Slag	Aging method	Temperature (°C)	Exposure term	Measurement item
Stability security of EAF Slag aggregate	I	2.5mm	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	2.0mm, 0.85mm	Soaking in hot water	95 (hot water)	15 min.	
	III	2.5mm	Air Aging (Exposure in open air)	Air Condition	1, 3, 5, 6 months	
Application evaluation as fine aggregate for concrete		2.5mm	Air Aging (Exposure in open air)	Air Condition ('09.1~'09.12)	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

용, 또는 Ball Mill에 의해 최대크기 0.85mm 이하로 입도 조절한 잔골재 2수준을 활용하였다.

식 (1)에 나타난 바와 같이 전기로 산화슬래그 중 잔존하는 free-CaO를 강제적으로 수화시켜 Ca(OH)₂로 전환시킴으로서 안정성을 확보하고자 하는 사전처리방법으로 Series I에서는 고온조건 (3수준, 140, 160, 180°C)에서 지속시간 (3수준, 10, 20, 30min)을 변화시키는 방법을 채용하였다.

또한, Series II에서는 95°C 온수에 최대크기 2mm 이하 및 0.85mm 이하로 입도조정한 슬래그 골재를 15분간 침지하였으며, Series III에서는 자연대기상태에서 0, 1, 3, 5, 6개월 동안 에이징(Aging)하는 조건하에서 전기로 산화슬래그 골재의 안정화 처리를 실시하였다.

이와 같이 각각 안정화 처리된 전기로 산화슬래그 골재를 100% 활용하여 모르타르 시험체를 제작한 후, 온도 80°C 조건의 습윤챔버에서 약 1개월간 노출시킴으로서 모르타르 표면에서 발생한 팽아웃 성상을 관찰하였다.

또한, 전기로 산화슬래그를 콘크리트용 잔골재로서의 활용 가능성을 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 소파블럭용 콘크리트 (25-18-12)의 시방배합을 선정 후, 전기로 산화슬래그 잔골재의 치환율에 따른 콘크리트의 굳지않은 성상, 역학적 성능 및 염해, 탄산화, 동결융해 등의 내구성능을 평가하였다.

2.2 사용재료 및 배합

Table 2는 사용재료를 나타낸 것으로 전기로 산화슬래그는 일반 천연골재에 비하여 비중이 큰 편이며 화학성분은 Table 3에서 보는 바와 같이 CaO 및 SiO₂ 성분이 주를 이루며 염기도 (CaO/SiO₂)가 1.5 이하로 일반 전로슬래그에 비하여 상대적으로 안정하다 할수 있다. 또한, 중금속 용출시험 (폐기물관리법 시행규칙) 평가결과 Table 4에서 보는 바와 같이 Pb, Cu, As, Hg, Cd 등이 중금속이 용출되지 않거나, 기준대비 극미량으로 검출되어 환경적으로 무해한 것으로 평가되었다.

본 연구에서 활용한 전기로 산화슬래그는 최종단계에서 배출되는 입경이 2~2.5mm (F.M. 1.96~2.24)수준이며, 실적율은 54~56%수준이다.

또한, Fig. 4에 나타난 바와 같이 콘크리트용 잔골재로 단독사용하기에는 입자가 과도하게 세립하여 표준입도분포곡

Table 2 Physical property of using materials

Material	Physical property
Cement	Ordinary portland cement, Specific gravity 3.15g/cm ³
Fly-ash	Specific gravity 2.17g/cm ³ , Fineness 3,610cm ³ /g
EAF Slag	Specific gravity 2.89~3.12g/cm ³ , absorption 1.11%, F.M.1.96~2.24 (max ; 2.5mm),
Fine aggregate	Crushed sand, Specific gravity 2.61kg/cm ³ , absorption 1.57%
	Sea sand, Specific gravity 2.54kg/cm ³ , absorption 1.29%
Coarse aggregate	Crushed granitic aggregate, (Size 25mm) Specific gravity 2.67kg/cm ³ , absorption 0.98%

Table 3 Chemical component of EAF slag sand

Compo.	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
(%)	34.7	5.95	6.6	28.0	20.04

Table 4 Leaching test result of heavy metals

	Leaching concentration of heavy metals (mg/L)						
	Pb	Cu	As	Hg	Cd	Cr	CN ⁻
EAFF 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

선을 벗어나지만, 일반쇄사 등과 혼합 활용시에는 40~60% 수준으로 혼합사용이 가능한 것으로 평가되었다.

전기로 산화슬래그의 팽아웃 현상 평가용 모르타르시험체의 배합은 물과 보통포틀랜드시멘트와 전기로 산화슬래그

골재의 중량비를 0.5 : 1 : 2.5로 설정하였으며 40 × 40 × 160mm의 모르타르 시험체를 3개씩 제작한 후 7일간 기건양생 후 80℃ 습윤양생을 실시하였을 경우 발생하는 모르타르 표면의 팽아웃 성상을 평가하였다.

또한, 잔골재로의 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 슬래그 치환율별 굳지않은 성상, 역학적 성능 및 내구성상을 평가하였다.

2.3 실험방법

전기로 산화슬래그의 안정성 확보방안 도출실험을 진행하는데 있어 모르타르 표면의 미세한 팽아웃일지라도 잠재적인 발생가능성을 평가하기 위한 가혹조건을 재현하기 위하여 온도 80℃, 상대습도 100%의 조건을 설정하여 시험체 타설 후 7일 기건양생 후 고온습윤환경에서 촉진양생하였다.

전기로 산화슬래그 내에 free-CaO가 고온습윤환경에서 급격한 수화반응에 의해 모르타르표면에서 체적팽창을 야기할 경우 발생하는 직경 2~5mm 정도의 팽아웃을 관찰하여 표면 면적당 (4×4×16cm, 면적 288cm²) 누적 발생수를 산출하였다. 또한, free-CaO의 정량분석을 위하여 KS L 5120 「보통 포틀랜드 시멘트의 화학분석방법」에 준해 free-CaO의 함량을 측정하였다.

Table 5 Mix proportion with type of concrete

Type of Con'c	EAF slag Rep. (%)	Target slump (mm)	f _{ck} (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Water (kg/m ³)	Unit weights (kg/m ³)						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 Water content of EAF slag in dry oven with high temp.

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

* Internal temperature after inputting EAF Slag into dry oven

Table 6은 Series I의 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.

한편, 온수침지방안 검토 (Series II)에 있어서 95℃의 온수에 2mm 및 0.85mm의 전기로 산화슬래그를 투입하였을 경우 투입직후 수온은 5분 후 66℃, 10분 후 58℃, 15분 후 52℃의 수준으로 변화하였다.

콘크리트의 성능평가 항목은 공기량 (KS F 2421), 슬럼프 (KS F 2402), 압축강도 (KS F 2405), 휨강도 (KS F 2408), 축진탄산화 (KS F 2584), 동결융해 시험 (KS F 2456), 내염해성 (KS F 2711)으로 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전기로 산화슬래그의 팝아웃 안정성 확보방안 도출

3.1.1 고온건조처리를 통한 안정성 평가 (Series I)

Fig. 5는 고온건조 조건에서 노출시킨 전기로 산화슬래그

모르타르의 팝아웃 발생현상을 나타낸 것이다. 전반적으로 노출온도가 높아질수록 팝아웃 발생수가 다소 저감되었다. 또한 고온노출 지속시간이 길어질수록 팝아웃에 대한 저항성이 향상되었으며, 팝아웃이 가장 적게 발생한 경우 (180℃, 30분 지속; 24일 경과 22ea발생)를 보면 고온건조 처리에 의해서 미처리 경우 (Air-dry) 대비 50% 수준의 저감효과를 나타내고 있다. 그러나, 고온건조 처리에 의해 팝아웃 발생을 근본적으로 제어할 수는 없다. 이러한 현상은 고풍수 상태 (약 10%)의 전기로 산화슬래그를 고온의 건조환경에 노출시킬 경우, 산화슬래그 내부의 H₂O와 free-CaO의 수화반응 속도에 비하여 수분의 증발속도가 보다 빠르기 때문에 CaO의 Ca(OH)₂로의 강제수화에 필요한 수분이 부족해지기 때문으로 판단된다.

3.1.2 온수침지 및 입경조절을 통한 안정성 평가 (Series II)

Fig. 6은 온수침지 및 골재입경의 조절을 통한 전기로 산화슬래그의 팝아웃 저감효과를 나타낸 것이다. 온수침지처리를 실시하지 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 2.0~2.5mm 이하로 배출되지만, 이를 0.85mm 이하로 입경을 조절할 경우에는 온수침지 여부에 관계없이 팝아웃 발생이 현저하게 감소, 또는 거의 발생하지 않음을 확인하였다. 실제 현장 적용조건을 고려할 경우, 0.85mm 이하의 전기로 산화슬래그 골재를 콘크리트용 골재로서 단독으로 사용하기는 어려울 것으로 판단되지만, 기존의 쇄사는 오히려 입경이 조립한 특

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

Fig. 6 Pop-out reduction by soaking in hot water and size down (80℃)

Fig. 7 Reduction of pop-out with aging of EAF slag (80℃)

성이 있으므로 슬래그 골재를 입도보정용 잔골재로서 활용하는데는 무리가 없을 것으로 판단된다.

3.1.3 자연 에이징처리에 따른 안정성 (Series III)

Fig. 7은 일반대기 환경하에서 자연에이징에 의한 팽아웃 발생저감효과를 나타낸 것으로 팽아웃 발생 촉진실험 (80℃, R.H 100%조건)을 실시한 결과, 자연에이징을 실시하지 않은 경우 (None-aging)와 비교하여, 1, 3, 5, 6개월 동안 자연 에이징을 실시한 경우 모르타르 표면에서 발생한 팽아웃 발생수는 현저히 줄어드는 것으로 나타났다.

특히, 1개월 이상 에이징을 실시하더라도 그 효과는 명확히 나타나고 있으며, 3~5개월간 에이징을 실시할 경우 팽아웃 현상은 거의 발생하지 않는 것으로 판단해도 무방할 것으로 판단된다.

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

under 2mm	under 0.85mm

Table 8 Pop-out number 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	

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. 향후, 레미콘용 골재로 활용하기 위하여 소정의 기간동안 자연 대기 에이징을 선행한다면 혼합골재로서 일정비율 활용이 가능할 것으로 기대된다.

또한, Table 8 및 Fig. 8은 free-CaO와 팽아웃 발생과의 상관관계를 나타낸 것으로 None-aging 대비 1개월 에이징 시 free-CaO함량은 대폭 줄어드는 것으로 나타났다. 이와 같이 free-CaO함량 감소에 따라 팽아웃 현상 역시 감소되는 것으로 나타나 상관관계가 밀접한 것으로 평가되며, 향후 전기로 산화슬래그 골재의 품질관리를 위한 유용한 평가지표로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

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

3.2 전기로 산화슬래그 잔골재의 콘크리트 적용성 평가

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 팽아웃 현상은 발생하지 않았으며 이후 장기모니터링 실시 결과에서도 표면 결함은 나타나지 않았다.

3.2.1 용도별 전기로 산화슬래그 콘크리트의 역학성능

Fig. 9는 콘크리트의 용도별 전기로 산화슬래그 잔골재 대체율에 따른 콘크리트의 강도특성을 나타낸 것으로 일반 건축구조물 배합의 경우, 28일 압축강도에 있어 전기로 산화슬래그의 100% 대체를 제외하면 일반 골재를 사용한 경우와 비교하여 동등 이상의 강도를 발현하였다. 또한, 재령 91일 및 180일 장기 압축강도에서 우수한 성능을 발현하는 것으로 평가되었다. 슬래그 잔골재를 100% 활용할 경우에는 콘크리트용 잔골재 표준입도범위를 크게 벗어나게 되고, 전기로 산화슬래그 잔골재의 미립한 특성으로 인해 필요로 되는 결합재량이 상대적으로 많이 요구되므로 강도저하 현상이 야기되는 것으로 판단된다.

또한, 28일 휨강도의 경우 EAF 50% 및 75%에서 plain대 비 동등 이상의 수준을 나타내었으며, 장기강도에서는 대체

(a-1) Normal con'c (compressive strength)

(a-2) Normal con'c (bending strength)

(b) pavement Con'c

(c) Tetrapod

Fig. 9 Strength performance with concrete mix

적으로 일반골재와 유사한 수준이다. 한편, 도로포장용 및 소파블럭용 콘크리트 배합은 슬래그 100%에서의 압축강도 값이 다소 낮게 나타나지만, 유의할만한 경향은 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 판단된다.

단, 건축구조물의 경우 어느 정도 소정의 안전율을 고려한다면, 일본의 경우와 마찬가지로 30% 이내가 적합할 것으로 판단되며, 물론, 슬래그 골재는 충분하게 에이징된 것으로 팽이웃에 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 않았다.

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

또한, Fig. 11은 도로포장용 콘크리트와 소파블럭용 콘크리트 배합에 대한 탄산화 및 염해 저항성을 나타낸 것이다. 배기가스 및 겨울철 제설재에 노출될수 있는 도로용 구조물,

Table 9 Carbonation at 4weeks in accelerated condition

0%	25%	50%	75%	100%

(a) Carbonation

(b) Freezing & thawing

Fig. 10 Durability of Normal concrete mix with EAF slag

(a-1) Pavement con'c (carbonation)

(a-2) Pavement con'c (chloride-attack)

(b) Tetrapod (chloride-attack)

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

Photo 1 Field application of tetrapod using EAF slag

그리고 해수환경에 설치되는 소파블록의 환경적 열화조건을 고려할 때 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재를 적용할 경우, 성능결합은 나타나지 않았으며 천연골재 활용시와 비교하여 동등 이상의 내구성능을 발휘하는 것으로 평가되었다.

본 연구의 도출결과를 기반으로 Photo 1에 나타낸 바와 같이 소파블록 (tetrapod)을 제조하여 실제 현장에 적용 (포항 장길리, 8톤×110기)하였다. 산화슬래그 골재는 대기 중 6개월 에이징한 것을 30% (해사 대체)대체하였으며 콘크리트 규격은 25-21-120으로 시공성은 양호하였고 7, 28일 압축강도는 각각 21.7, 28.8MPa 수준으로 안정적으로 발휘되었다.

4. 결 론

전기로 산화슬래그의 콘크리트용 잔골재 활용기반 데이터베이스를 구축하기 위하여 슬래그 잔골재의 안정적 활용방안을 도출하고 콘크리트에 활용하여 역학적 성능 및 내구성능 평가에 관한 실험적 연구를 진행하였으며 연구의 범위에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 전기로 산화슬래그 골재입경을 0.85mm 이하로 조절할 경우, 팝아웃에 대한 안정성이 확인되었으며 혼합사 형태로 그 활용이 가능하다.
- (2) 자연대기 에이징에 의해 팽창안정성을 확보할 수 있으며, 에이징에 따른 free-CaO함유량 변화 및 팝아웃 발생의 상관관계는 품질관리 지표로 활용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 용도별 콘크리트의 역학적 성능 측면에서 볼 때, 콘크

리트용 골재로서 전기로 산화슬래그의 활용가능성은 매우 높을 것으로 판단된다.

- (4) 전기로 산화슬래그 잔골재 활용에 따른 탄산화, 내염해성 및 내동해성은 일반 골재 활용시와 비교하여 동등 이상의 내구성능을 발휘하는 것으로 평가되었다.
- (5) 전기로 산화슬래그 골재를 일부 대체하여 소파블록을 제조하고 실제현장에 적용해 본 결과 시공성 및 목표 압축강도 등을 안정적으로 만족하였다.
- (6) 향후, 산화슬래그 골재를 안정적이고 지속적으로 활용해 나가기 위해서는 발생→품질관리→콘크리트 제조 및 성능검증→현장적용→상용화 확대로 연계되는 일련의 건설생산공학적 프로세스 확립이 필요하며, 다양한 용도개발에 관한 지속적 연구도 진행되어야 할 것이다.

References

1. Cho, S. H., Kim, M. H., Kim, J. M. (2005), The Properties of Flow and Compressive Strength of Mortar According to Replacement Ratio of Rapidly-Chilled Steel Slag Fine Aggregate, *Journal of KCI*, 17(1), 77-84.
2. Kim, H. S., Park, K. S. (2002), Manufacture of slag concrete for artificial reef structure, *Journal of RIST*, 16(2), 155-159.
3. Kim, K. H., Lim, J. Y., Ryu, D. H., Choi, S. W. (2007), The Present Situation of Production and It's Utilization of Electric Arc Furnace Oxidizing Slag in Korea, *Concrete magazine of KCI*, 19(6), 51-57.
4. Korean society of civil engineers (1997), Manual of road pavement using electric arc furnace slag, 63-69.
5. Lee, S. H., Kim, G. S. (1993), Study of properties of road base using electric arc furnace slag, *Proceeding of Korean society of civil engineers*, 18(2), 43-46.
6. Moriya, K. N., Yamahiro, H. S. (1999) Field application of concrete structure using electric arc furnace slag, *Cement Science and Concrete Technology*, (53), 507-511.

Received : 05/06/2014

Revised : 05/09/2014

Accepted : 05/12/2014

요 지

최근 골재 수급불균형 문제 및 천연자원 고갈에 관한 사회적 관심이 집중되는 가운데, 중래 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 확보 방안을 도출하고 이를 통해 안정화된 슬래그 골재를 용도별 콘크리트용 잔골재로 활용하여 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성능을 실험적으로 평가함으로써 최종적으로 전기로 산화슬래그 잔골재의 활용방안을 제시하는 데 그 목적이 있다. 본 연구결과, 전기로 산화슬래그의 골재입경 조정, 소정 기간 동안의 자연 에이징 처리에 의해 팽아웃 등의 표면결함을 대폭 저감할 수 있는 것으로 나타났으며, 콘크리트 용도별 대체율에 따른 역학적 성능 및 내구성능은 일반 골재와 비교하여 동등 또는 동등 이상의 성능을 발현하는 것으로 평가되었다. 향후 전기로 산화슬래그 잔골재 활용시에는 콘크리트의 미관저해 현상이 나타나지 않도록 충분한 사전 에이징 또는, 가공처리 등 안정성 확보를 위한 품질관리가 선행되어야 할 것이다. 또한, 철강부산물의 친환경적인 자원순환 시스템을 확립하기 위해서는 전기로 산화슬래그 골재에 대한 품질관리방안 확립과 더불어 다양한 용도개발이 이루어져야 하며 각종 공학적 특성 및 내구성에 관한 지속적인 연구개발이 이루어져야 할 것이다.

핵심 용어 : 전기로 산화슬래그, free-CaO, 에이징, 콘크리트용 잔골재, 내구성능