

용융개질 전기로슬래그의 시멘트 혼화재로서 특성

김기석 · 배인국 · 서주범 · 최재석* · 이윤규** · †김형석

한국지질자원연구원 광물자원연구본부, *한국건설생활환경시험연구원 융합기술팀, **태영건설

Properties of Reformed Electric Arc Furnace Slag as Cement Admixtures

Kee-seok Kim, In-kook Bae, Joo-beom Seo, Jae-Seok Choi*, Yoon-kyu Lee**
and †Hyung-seok Kim

Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*Convergence Technology Division, Korea Conformly Laboratories

**Tea-Young ENC.

요 약

철강산업 부산물 중 고로슬래그는 시멘트혼화재로 재활용되고 있지만 제강 슬래그들은 주로 골재로서 활용되고 있다. 본 연구는 전기로 산화슬래그를 대상으로 용융상태에서 철을 환원시켜 개질한 후 물로 급랭하여 제조된 비정질 슬래그를 시멘트 혼화재로 활용하고자 하였다. 개질된 전기로 산화슬래그는 고로수쇄슬래그 보다 분쇄성이 높았으며, 고로슬래그와 개질산화슬래그를 혼합하여 제조한 슬래그 시멘트의 모르타르 실험결과 고로슬래그에 대한 개질산화슬래그 대체율 20%까지는 비교시편체의 98%에 해당하는 압축강도 특성을 나타냈다.

주제어 : 전기로슬래그, 고로슬래그, 개질전기로슬래그, 시멘트혼화재

Abstract

Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) which is by-product of steel industry has been recycled as a cement admixture though the other steel slags are used as aggregates. In this study, the electric arc furnace slag (EAFS) was used as a cement admixture after the reduction of iron oxide in the slag at the interface of molten slag and water quenching. Consequently, the reformed EAFS (REAFS) had higher grindability than that of granulated blast furnace slag. And in mortar tests, the strength properties of specimens using REAFS were 98% of plain specimens of GGBFS upto 20% replacement ratio of GGBFS with REAFS.

Key words : Electric arc furnace slag, ground granulated blast furnace slag, reformed electric arc furnace slag, cement admixture

· Received : September 7, 2015 · Revised : October 8, 2015 · Accepted : November 13, 2015

†Corresponding Author : Hyung-seok Kim (E-mail : hskim@kigam.re.kr)

Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 34132 Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

천연자원의 고갈과 환경오염물질의 과부하로 인하여 세계적으로 온실가스 발생량을 감축하고, 폐자원을 재활용하는 등의 노력이 이루어지고 있다. 철강산업은 이러한 노력의 중심에 있는 산업중 하나로 국내의 경우 기존에 방치되어 있는 슬래그까지 재활용 하여 슬래그의 배출량 보다 재활용량이 더 많은 것으로 보고되고 있다. 이러한 철강슬래그는 크게 두 종류로 나뉘는데 철광석을 원료로 고로(blast furnace)에서 용선을 생산하는 공정에서 발생하는 슬래그를 고로슬래그(blast furnace slag)라 하며, 고로에서 생산된 용선이나 고철을 대상으로 하는 제강공정에서 발생하는 슬래그를 제강슬래그라 한다. 제강슬래그는 다시 용선을 용강으로 만드는 전로(converter)에서 발생하는 전로슬래그(converter slag), 고철을 원료로 하는 전기로(electric arc furnace)에서 발생하는 전기로슬래그(electric arc furnace slag) 및 래들로(ladle furnace)에서 발생하는 래들로 슬래그(ladle furnace slag)로 구분된다. 이러한 슬래그 중 고로슬래그의 경우 비교적 그 성분이 일정하며 공정상 불순물의 제어를 위해 투입되는 석회석등의 원료로 인하여 슬래그 내 CaO성분 함량이 높아 수쇄 후 미분쇄하여 시멘트 혼화재료로 사용되고 있다. 그러나 제강슬래그의 경우 철근, 형강, 열연 등 제강공정에 따라 슬래그 제어를 위한 용제(flux)의 종류 및 양이 다르기 때문에 슬래그 성분차이가 크다. 또한 대부분의 제강슬래그는 그 재활용처가 미정해져 있어 공정의 종류에 따라 분리 배출하지 않고 일정기간의 에이징(aging)을 거쳐 도로 보조기층 및 노반재료 등 고로슬래그에 비해 비교적 부가가치가 낮은 용도로 사용되고 있다. 본 연구는 이러한 제강슬래그 중 용융상태로 배출된 전기로 슬래그를 대상으로 슬래그 내 산화철 성분을 금속철로 환원시키고 나머지 슬래그는 고로슬래그와 유사한 시멘트 혼화재료의 원료로 활용이 가능한지를 알아보려고 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1. 사용재료

시멘트는 KS L 5201에서 규정하고 있는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC, Ordinary portland cement)를 사용하였다. 고로슬래그(GGBFS, ground granulated blast furnace slag)는 주로 배출 즉시 수쇄 및 분쇄처리를 거쳐 시멘트 혼화재료로 사용된다. 이러한 고로슬래그 미분말은

Table 1. Chemical composition of GGBFS

Chemical composition (wt.%)						
CaO	AlO ₃	MgO	SiO ₂	T-Fe	TiO ₂	P ₂ O ₅
42.4	13.8	6.1	33.1	0.29	0.96	0.008

Table 2. Chemical composition of EAFS

Chemical composition (wt.%)						
CaO	T-Fe	SiO ₂	AlO ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅
22.03	21.34	20.00	13.29	7.82	0.86	0.17

잠재수경성을 띠기 때문에 보통포틀랜드 시멘트에 혼합하여 사용하는 경우 장기강도 발현에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 국내 H사에서 발생하는 고로수쇄슬래그에 석고를 4 wt% 첨가 한 후 약 4,300 cm²/g수준으로 분쇄하여 사용하였으며 XRF로 분석한 성분비는 Table 1과 같다.

전기로 슬래그는 조업 시 생산품의 종류에 따라, 또는 조업 업체의 특성에 따라 그 구성물질이 상이한 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 국내 H사의 제강공정에서 발생하는 전기로슬래그(EAFS, Electric arc furnace slag)를 사용하였으며 XRF로 분석한 슬래그의 성분은 Table 2와 같다.

모르타르 실험을 위한 잔골재는 KS L ISO 679에서 규정하고 있는 미분이 포함된 표준사를 사용하였다.

2.2. 실험방법

전기로슬래그를 고로슬래그와 같이 시멘트 혼화재료 사용하기 위해서 적절한 개질이 필요하며, 본 연구에서는 슬래그 내 산화철 성분을 환원시켜 금속철 상태로 회수한 뒤 나머지 슬래그를 급랭처리하는 방법으로 개질하고자 하였다. Table 3은 본 연구에서 진행된 실험 방법을 나타낸 표로서 유도를 사용하여 슬래그를 용융시켰다. 슬래그 내 산화철 성분을 20 wt%로 가정하면 이론상 약 슬래그 중량의 약 3 wt%에 해당하는 카본이 필요하지만, 카본과 용융슬래그의 비중차이에 의해 충분한 반응면적을 확보하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 탄소막대를 사용하여 충분한 환원제를 공급함과 동시에 용융슬래그를 교반하는 방법으로 슬래그 내 Fe 성분을 환원시켰다. 슬래그의 용융 시 사용된 유도로는 카본도가니가 사용되므로 슬래그와 도가니의 반응을 방지하기 위하여 카본도가니 내에 알루미늄이나 도가니를 장입하여 알루미늄이나 도가니 내에서 환

Table 3. Test method (reforming EAFS)

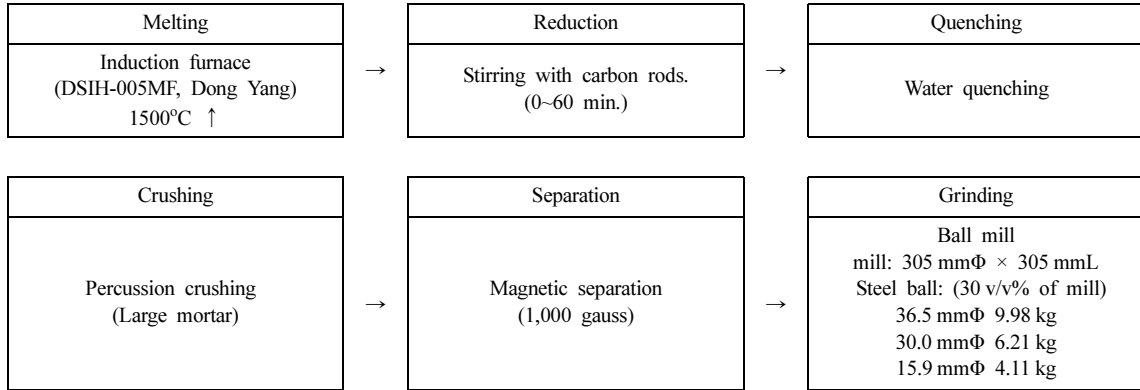


Fig. 1. Slag reforming using carbon rods.

원실험을 진행하였다. 환원반응이 완료된 슬래그는 반응성을 떨 수 있는 유리질 상태로 만들기 위해 용융상태로 배출된 슬래그에 충분한 물을 공급하여 급랭시켰으며 쉽게 부스러지는 유리질 슬래그와 단단한 금속철의 강도 차이를 이용하여 철구형태의 분쇄기로 두 물질을 단체분리 시켰다. 이 후 금속 철은 자력선별을 거쳐 슬래그로부터 분리해 낸 후 나머지 슬래그를 불밀을 사용해서 분말형태로 제조하였다. 개질된 슬래그 시료와 분쇄 슬래그 시료는 XRF, XRD 및 분말도를 측정하여 개질 슬래그의 특성을 파악하였다.

개질전기로슬래그(REAFS, Reformed electric arc furnace slag)가 시멘트 혼화제로 적용되었을 때의 기초

Table 5. Mixture design (kg/m³)

ID	Binder			Fine aggregate	Water
	Cement	REAFS	GGBFS		
Cement	508.4	0.0	0.0	1,525.3	254.2
GGBFS	251.7	0.0	251.7	1,510.0	251.7
10-REAFS	251.7	25.2	226.5	1,509.9	251.7
20-REAFS	251.6	50.3	201.3	1,509.8	251.6
30-REAFS	251.6	75.5	176.1	1,509.7	251.6
100-REAFS	251.5	251.5	0.0	1,509.0	251.7

*Number in ID means replacement ratio of REAFS for GGBFS

물성 평가를 위해 모르타르 실험을 진행하였다. 모르타르 실험은 KS L ISO 679에서 규정하고 있는 방법을 따라 물 바인더비는 1:2, 바인더 골재비는 1:3으로 진행하였다. Binder로는 시멘트와 고로슬래그 개질전기로슬래그를 사용하여 보통보틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트(시멘트:고로슬래그 혼합비율이 1:1인 시멘트) 비교 시험체를 제작한 후 고로슬래그 시멘트의 고로슬래그부분을 개질산화슬래그로 일부 혹은 전량 치환하여 모르타르 공시체를 제작한 후 24시간 후에 몰드로부터 탈형하여 상온에서 수중양생을 진행하였다. 공시체는 제작으로부터 1, 3, 7, 28일이 되는 시간에 강도특성을 살펴보았으며 실험방법과 실험배합은 Table 4 및 5와 같다.

Table 4. Test method (KS L ISO 679)

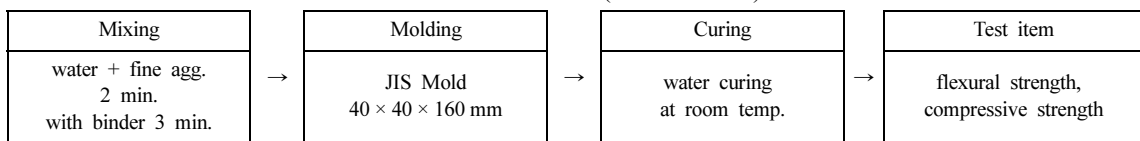


Table 6. Chemical composition of reforming slag according to reduction time

Reduction time (min.)	Chemical composition (wt.%)							Reduction ratio (%)	Basicity
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	T-Fe	TiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅		
0	20.00	13.29	21.34	0.86	22.03	7.82	0.17	0.0	2.16
10	22.04	22.31	7.47	0.95	25.03	7.98	0.16	65.0	2.51
20	22.88	23.32	6.39	0.97	25.69	8.49	0.15	70.1	2.51
30	23.06	24.49	5.28	0.98	26.09	8.54	0.14	75.3	2.56
60	23.89	24.52	2.10	1.14	31.26	11.45	0.13	90.1	2.81

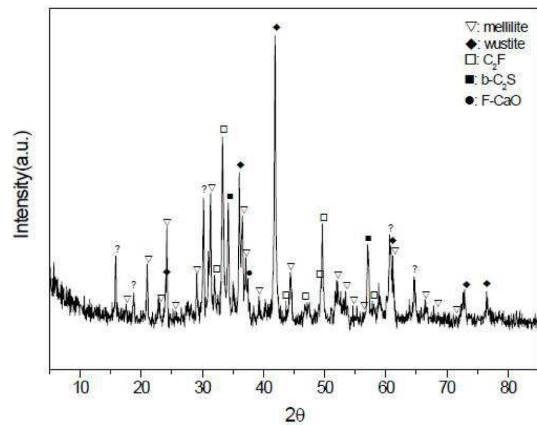
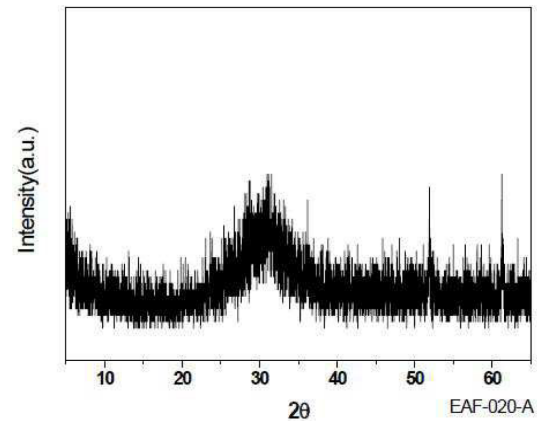
$$\text{Basicity} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$$

3. 실험결과

용융상태의 슬래그를 탄소막대로 교반하여 진행된 환원실험의 결과는 Table 6와 같다. 환원반응이 시작된 후 10분이 경과하였을 경우 철성분이 21.34%에서 7.47% 까지 낮아졌으며, 반응시간이 증가함에 따라 더 많은 철이 환원되어 60분 반응 시 약 90%에 해당하는 철이 환원된 것으로 나타났다. 그에 따라 나머지 성분들의 구성비가 증가되었으며 알루미늄 성분 경우 환원반응과 동시에 대폭증가 하였는데 이는 반응 시 사용된 알루미늄이 도가니에서 일부성분이 용출되었기 때문으로 추정된다.

Fig. 2와 3은 개질 전과 개질 후 전기로슬래그의 XRD 측정결과이다. 개질 전 슬래그의 경우 melilite, wustite 등의 결정상이 뚜렷하게 나타나는 것에 반해 개질 후 급랭된 시료는 비정질화 되어 결정이 나타나지 않는 것으로 나타났다. 이 후 진행된 실험은 60분간 반응시킨 슬래그를 급랭시켜 비정질화 된 시료를 대상으로 진행 하였다.

고로수쇄슬래그를 시멘트 혼화재로 제조하기 위해서는 미분쇄과정을 거치는데 이 공정은 고로슬래그 미분말을 제조하는 공정에서 가장 큰 경제적 비중을 차지하고 있다. 고로수쇄슬래그를 분쇄하는 공정에서 약 4,000 Blaine (cm²/g)까지는 비교적 쉽게 분쇄되지만 그 이상의 분말도를 얻기 위해서는 분쇄시간이 급격히 증가하기 때문에 분쇄비용 또한 그에 비례하여 증가하여 통상 4,000 ~ 5,000 Blaine의 고로슬래그 미분말이 상용되고 있으며 그 이상의 분말도를 갖는 고로슬래그 미분말은 경제성 때문에 주로 실험용도로만 사용되고 있다. 따라서 본 실험은 고로수쇄슬래그와 개질된 전기로 산화슬래그의 피분쇄성을 파악하고자 한 것으로 재료의 미분쇄 시 주로 사용되는 볼밀타입의 분쇄기를 사용하여 두

**Fig. 2.** XRD pattern of raw slag.**Fig. 3.** XRD pattern of reformed slag after water quenching.

시료의 피분쇄성을 입도 분석 및 분말도 측정을 통해 비교하였다.

Malvern사의 Mastersizer 2000 (측정범위 0.02 μm ~ 2,000 μm)을 사용하여 습식분산 법으로 진행된 입도분

Table 7. Particle size analyse according to grinding time

Grinding time (min.)	Particle size (μm)					
	GGBFS ¹⁾			REAFS ²⁾		
	D (0.1)	D (0.5)	D (0.9)	D (0.1)	D (0.5)	D (0.9)
60	2.731	29.202	92.821	7.431	47.011	154.645
80	1.923	22.458	72.052	3.211	32.480	115.870
100	1.908	18.906	56.599	1.976	22.111	80.164
120	1.471	15.728	48.383	2.003	18.763	62.805
140	1.223	13.708	43.422	1.291	15.223	52.093
160	1.079	11.822	38.313	0.960	12.244	45.171
180	0.976	10.685	36.109	0.758	9.596	38.368

¹⁾GGBFS: Ground granulated blast-furnace slag

²⁾REAFS: Reformed electric arc-furnace slag

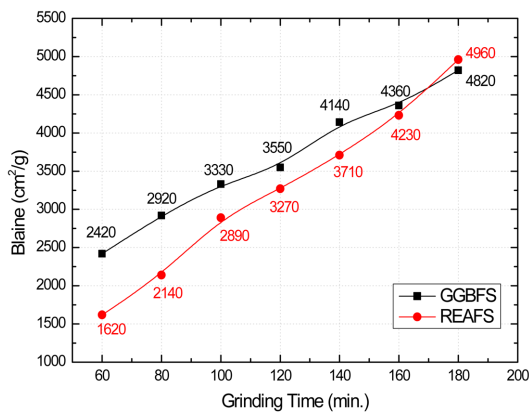


Fig. 4. Fineness result according to grinding time.

석 및 KS L 5106 (공기투과장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험방법에 따라 분석한 분말도 측정 결과는 Table 7 및 Fig. 4와 같다. 초기투입시료의 입도 차이 때문에 실험 초반 고로슬래그 시료의 입도가 더 가늘고 분말도는 더 높은 것으로 나타났지만, 분쇄시간이 증가함에 따라 고로슬래그 보다 개질전기로슬래그의 분말도가 더 가파르게 증가하여 4,600 cm²/g 이상부터 고로슬래그 보다 더 값을 나타냈다.

고로슬래그 시멘트를 사용한 공시체(GGBFS)의 경우 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 시험체(OPC)에 비하여 1, 3, 7 일 재령에서 압축강도가 절반 수준이었지만 28 일 재령에서는 90% 수준까지 강도가 상승한 것으로 나타났다. 슬래그시멘트의 고로슬래그를 개질전기로슬래그로 대체한 시험체(10, 20, 30, 100-REAFS)의 경우

대체율 20%까지는 GGBFS 시험체 압축강도의 97%이 상에 해당하는 강도특성을 보였으나, 그 이상의 대체율 조건에서는 대체율이 증가함에 따라 강도 하락의 폭이 커지는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

슬래그가 시멘트혼화제로 사용된 이래 슬래그의 품질이 혼화제의 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 꾸준히 이루어져 왔다. 시멘트 혼화제로서 사용되는 대표물질인 고로슬래그는 주 구성성분이 SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO 등으로 전체 슬래그 성분의 96% 가량을 차지하고 있다. 이러한 성분들은 시멘트의 주요성분과도 같은 것으로 시멘트의 경우 그 사용 목적에 따라 위 성분비를 조절하여 제품화 하고 있다.

고로슬래그 또한 그 성분비에 따라 혼화제로서의 품질이 달라지기 때문에 슬래그의 성분에서 다른 염기도 및 구성광물비로서 그 품질을 판단한다. 염기도의 경우 그 산정식이 국가마다 혹은 업종마다 각기 다른데, 철강업계의 경우 대표적인 염기성산화물인 CaO와 기본적인 산성산화물인 SiO₂만을 기준으로 하여 CaO/SiO₂비로 슬래그의 염기도를 파악하고 있으며, 슬래그를 시멘트 혼화제로 사용하는 시멘트 업계의 경우 CaO, MgO, Al₂O₃ 및 SiO₂성분을 활용하여 (CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂비로 염기도를 파악하고 있다. 일반적으로는 CaO, MgO, Al₂O₃성분이 많을수록 수화에 관여할 수 있는 성분의 양이 많은 것을 의미하므로 염기도가 높은 슬래그가 시멘트 혼화제로서 사용될 때 품질이 좋게 판단되고 있다. 본 실험에서 제조된 개질 슬래그의 경우 환원 개질 시간이 늘어나 슬래그 내 철분의 함량이 줄어들수록 다른 성분들의 상대적으로 높아져 개질 전 슬래그 보다 60분 이상 환원반응을 거친 개질 슬래그가 시멘트혼화제로서의 품질이 더 높다고 할 수 있다. 이러한 염기도 계산에 사용되는 CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂의 성분은 그 구성비에 따라 gehlenite (Ca₂Al[AlSiO₇])와 akermanite(Ca₂Mg[Si₂O₇])의 고용체인 melilite((Ca,Na)₂(Al,Mg,Fe)[(Al,Si)SiO₇])를 구성하여 모르타르 강도에 영향을 미치는데, 이들 광물의 구성비에 따른 모르타르 강도특성에 관한 연구를 살펴보면 Fig. 6와 같이 gehlenite와 akermanite는 5 : 5 비율로 존재할 때 장기 강도 발현이 가장 뛰어나며, 6 ~ 7 : 4 ~ 3 비율일 때 초기강도가 좋으나 한 성분으로 치우칠 때는 강도특성이 좋지 않은 것을 알 수 있다.⁷⁾

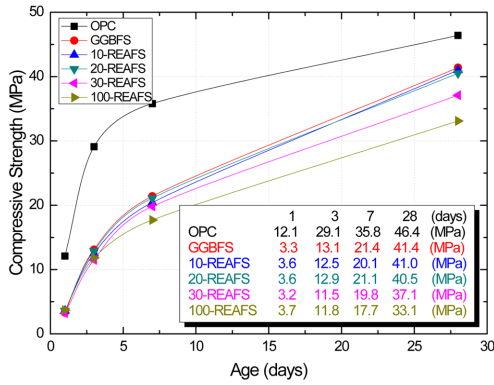


Fig. 5. Compressive strength of specimens.

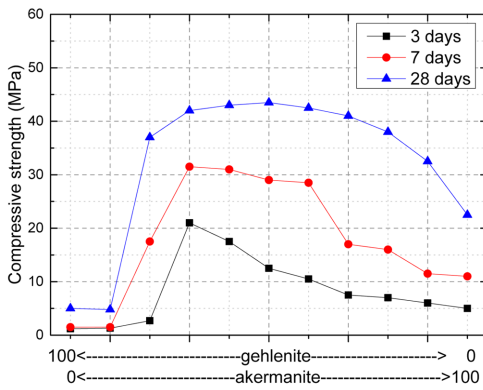


Fig. 6. Compressive strength of mortar according to mineral components ratio.⁷⁾

본 실험에서 제조된 개질전기슬래그의 경우 Table 6의 성분비를 참조하면 탄소도가니와 직접적인 환원반응을 방지하기 위해 장입한 알루미늄이 도가니에서 용출된 것으로 보이는 높은 알루미늄 성분으로 인해 gehlenite와 akermanite의 구성비가 약 7:3정도 일 것으로 보이며 이는 초기강도발현에 적합한 비율이다. 그러나 Al₂O₃, MgO 및 SiO₂ 성분 에 비해 CaO성분의 양이 적기 때문에 gehlenite 및 akermanite가 충분히 생성되지 못하고 그로 인해 개질슬래그의 사용이 많아지는 경우 고로슬래그만을 사용한 시험체에 비하여 모르타르 강도가 비교적 낮게 나타나는 것으로 판단되며, 실 작업상의 슬래그 용탕이 담겨있는 슬래그 포트나 그라파이트 도가니 등을 사용하여 실험이 진행될 경우 본 논문에서 진행된 실험의 결과와 상이할 수 있다. 그러나 시멘트 산업에서 주요 원가절감요인으로 작용하고 있는 고로슬래그의 수요가 공급량보다 많은 점과 고로슬래그

의 20%까지 개질산화슬래그로 대체하여 사용한 경우 고로슬래그만 사용한 시험체의 97%이상의 강도성상을 나타내는 것을 고려하면 고로슬래그와 산화슬래그를 일정 비율 혼합하여 시멘트계 혼화재료로 사용하는 것은 가능할 것으로 보이며 전기로 조업 시 순도가 높은 강을 얻기 위해 칼슘원 첨가가 많은 공정에서 발생하는 슬래그를 따로 배출하여 사용할 수 있다면 개질 산화슬래그의 시멘트 혼화재료로서의 품질은 보다 높아질 수 있을 것으로 추정된다.

5. 결 론

열연공정에서 발생하는 전기로슬래그를 대상으로 산화철 성분을 환원시키고, 급랭 후 분쇄 하여 시멘트 혼화재료로 적용한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 용융상태인 전기로슬래그를 탄소막대로 교반하여 산화철 성분을 환원시킨 결과, 교반시간에 따라 산화철 성분의 환원율은 상승하였으며 60분간의 환원을 거치면 90 wt%이상의 슬래그 내 산화철을 회수 할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 용융 개질된 전기로슬래그를 물을 사용하여 급랭시킨 결과, 반응성을 떨 수 있는 비정질 상태로 나타나 개질산화슬래그의 시멘트 혼화재료의 사용을 기대할 수 있었다.
3. 수쇄 처리 된 전기로 산화슬래그와 고로수쇄슬래그를 동일한 조건으로 분쇄한 결과, 전기로 산화슬래그가 고로슬래그에 비해 피분쇄성이 좋은 것으로 나타나 시멘트 혼화재료로 사용하는 경우 고로슬래그 미분말에 비해 적은 비용으로 분쇄공정을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 개질전기로슬래그를 슬래그시멘트의 고로슬래그부분을 대체하여 실험한 결과, 고로슬래그 대체율 20%까지는 고로슬래그만 사용한 시험체의 97%이상의 강도성상을 나타내는 것으로 나타났다.

이상의 결과 전기로 산화슬래그는 산화철 성분을 환원시키면 나머지 슬래그 성분을 시멘트 혼화재료로 사용하는 것이 가능하기 때문에 슬래그가 배출된 용융상태에서 환원공정을 적용할 경우 회수된 금속철의 활용으로 슬래그 개질 공정에 소요되는 비용을 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 환원 개질 된 전기로 산화슬래그는 고로슬래그와 성분차이 때문에 잠재수경성 물질로 사용하였을 때 고로슬래그 보다 강도특성은 떨어 지지만 같은 조건으로 분쇄하면 더 높은 분말도로 슬래

그를 분쇄할 수 있고, 고로슬래그의 일부를 대체하는 경우 고로슬래그만 사용한 시험체와 비교하여 강도 성상의 차이가 크기 않기 때문에 두 종류의 슬래그를 혼합 사용하여 개질산화슬래그의 부가가치 또한 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업소재핵심기술개발사업(금속재료)의 일환으로 수행하였음(과제번호: 10035222, 철강 용융 슬래그 기능재료 제조기술개발).

References

1. KS L 5106, Testing method for fineness of portland cement by air permeability apparatus.

2. KS L ISO 679, Method of testing cements – Determination of strength.
 3. KS L 5201, Portland cement.
 4. Yong-jun An, In-kyu Han, Jae-seok Choi, Kwang-hyun Bae, Hyung-seok Kim, 2010 : Hydration Property of Electric Arc Furnace Reduction Slag, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 19, No. 6., pp. 93-101.
 5. V.M. Malhotra, P. Kumar Metha, 1996 : Advanced in concrete technology, Pozzolan and cementitious materials, Vol.1, pp. 21-22.
 6. Ioannis Liapis, Ioannas Papayianni, 2014 : Advanced in chemical and physical properties of electric arc furnace carbon steel slag by hot stage processing and mineral mixing, J. of Hazardous Materials 283, pp. 89-97.
 7. Ken Akatsu, 1968 : Effects of Gehlenite-Akermanite system on strength and setting properties of blast furnace slag cement, Cement Technical annual report Vol 53, pp. 97-99.



김기석

• 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 선풍연구실 석사후 연수자



배인국

• 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 선풍연구실 책임연구원



서주범

• 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 선풍연구실 선임연구원



김형석

• 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 선풍연구실장, UST겸임교수
 • 당 학회지 제13권 3호 참조

최재석

• 현재 한국건설생활환경시험연구원 융합기술팀장

이윤규

• 현재 (주)태영건설 이사