

급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 입도 변화에 따른 모르타르의 특성

Properties of Mortar according to Gradation change of Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Fine Aggregate made by Rapidly Cooled Method

(Received December 5, 2011 / Revised January 27, 2012 / Accepted January 27, 2012)

김진만^{1)*}, 광은구²⁾, 최선미³⁾, 김지호⁴⁾, 이원영⁵⁾, 오상윤⁶⁾

1. 2. 3. 4)공주대학교, 건축공학과, 5. 6)(주)에코마이스터 기술연구소

Jin-Man Kim¹⁾, Eun-Gu Kwak²⁾, Sun-Mi Choi³⁾, Ji-Ho Kim⁴⁾, Won-Young Lee⁵⁾, Sang-Youn Oh⁶⁾
Department of Architecture, Kongju University, Cheonan-City, Chungcheongnam-Do, 330-717, Korea
Ecomaister R&D Center, In-Cheon, 404-251, Korea

Abstract

Steel industry produces many by-products and wastes such as blast furnace slag, electric arc furnace slag, and converter slag. As in the case of rock, the main component of steel slag are CaO and SiO₂; further, steel slag is as alkaline as portland cement or concrete. Electric arc furnace oxidizing slag is possible to use as an aggregate for concrete; however, it has been reclaimed because of its expansibility caused by free CaO. Recently, a innovative rapid cooling method for melting steel slag has been developed in Korea, which reduces free lime content to minimum level and increases the stability of iron oxide. Therefore, this study describes the results of a series of research to utilize globular shape of electric arc furnace oxidizing slag fine aggregates made by rapidly cooled method for the construction industry by cooling rapidly melted slag from the steel industry. First of all, an experiment was carried out to investigate the quality characteristics of rapidly cooled electric arc furnace oxidizing slag fine aggregates in order to determine whether they can be applied to the construction industry. Then, by applying them to concrete of various particle sizes, we explored experimentally the desired condition to apply rapidly cooled electric arc furnace oxidizing slag fine aggregates to concrete.

키워드 : 급냉 전기로 산화슬래그, 콘크리트용 골재, 모르타르

Keywords : Rapidly cooled electric arc furnace oxidizing slag, Concrete aggregate, Mortar

1. 서론

철강 산업은 그 제조 공정의 특성상 다량의 원료와 에너지를 사용할 뿐만 아니라 많은 부산물을 발생시키고 있다. 철 1ton을 생산할 때 발생하는 부산물은 고로슬래그 400kg, 제강슬래그 200kg로 보고되고 있다.¹⁾ 이 부산물 중 고로슬래그는 시멘트 원료나 콘크리트용 혼화재료로 사용되어 고부가가치적으로 사용되고 있으나, 제강슬래그는 대

부분 도로기층용 또는 노반재 등의 부가가치가 낮은 용도로 사용되고 있다. 제강슬래그의 재활용이 고로 슬래그에 비해 부가가치가 낮은 이유는 슬래그 내에 존재하는 유리석회로 인한 것이다. 유리석회는 물과 반응할 경우 약 1.96배 정도의 팽창을 일으켜 슬래그 내의 균열을 발생시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제안된 것이 아토파이징 기술이다. 고온으로 용융된 염기도(CaO/SiO₂)가 높은 슬래그에서는 상온으로 냉각되는 과정에서 산화석회가 화합물상에서 분리되는 현상이 발생한다. 이러한 이유로 상온으로 냉각된 슬래그는 높은 유리석회(free CaO)함유량을 보이게 된다. 그러나 냉각의 속도를 매우 빠르게 하면

* Corresponding author

E-mail: jmkim@kongju.ac.kr Tel:041-566-8651

산화석회는 분리되지 못하고 화합물상을 유지하기 때문에 상온으로 냉각되어도 유리석회의 함유량이 낮아지게 된다. 냉각속도를 빠르게 하기 위해서는 수냉방식을 사용하지만 아토마이징 기술은 공냉방식으로 급냉의 효과를 달성한 새로운 기술이다.²⁾ 즉, 고속의 공기를 상온의 공기중으로 분사하여 용융상태의 슬래그를 미세한 크기의 액적으로 분산시켜 급냉효과를 달성한 것으로 매우 신속하게 효율적으로 슬래그를 자원화하는 방법이다. 아토마이저 공정을 건길 경우 유리석회의 함유량이 약 0.15% 이하로 고정되며, 이 공정에 의한 입자 크기는 5mm 이하의 구상형 입자이다.³⁾ 이 아토마이징 공정은 현재 전기로 공정에 의해 생산되는 철 생산 공정에서 배출되는 전기로 산화슬래그에 적용하고 있다.

한편, 콘크리트 체적의 65~80%를 차지하는 골재는 그 품질에 따라 콘크리트 품질에 많은 영향을 준다. 골재의 입형과 크기는 굳지 않은 콘크리트에서는 워커빌리티와 작업성, 경제성을 경화 콘크리트에서는 강도와 내구성에 영향을 미치는 중요한 요인으로 작용한다. 이에 국내에서는 「콘크리트 표준시방서」에서 콘크리트에 사용되는 골재의 품질을 제한하고 있다.⁴⁾

이에 본 연구에서는 아토마이징에 의해 급냉한 전기로 산화슬래그 잔골재를 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 기초 연구로 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 구형율과 비표면적 특성을 검토하고 콘크리트 표준 시방서에서 제시하고 있는 골재표준입도 분포에 준하여 슬래그의 입도 분포별에 따른 모르타르의 강도 특성을 검토하여 최적의 입도 분포를 도출하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험 계획

Table 1 Experimental plan

F.M. of Fine aggregate	Test items		
	Aggregate	Fresh mortar	Hardened mortar
1.92	·Weight of unit volume ·Percent of Solid volume ·Surface area ·Spherical ratio	·Flow ·Air content	·Compressive Strength ·Flexural Strength
2.10			
2.43			
3.10			
3.43			
3.76			

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 모르타르의 배합비는 시멘트와 잔골재 비가 1:3이고, 천연골재의 용적에 대해 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재를 100%로 대체하였다. 잔골재 입도 분포는 「콘크리트 표준시방서」에서 규정하는 표준 입도 범위를 기준으로 조립률(F.M.) 1.92, 2.10, 2.43, 3.10, 3.43, 3.76 총 6수준으로 선정하였다. 또한 목표 플로우는 200±5mm로 설정하였으며, 물시멘트비는 44%로 고정된 후 고성능감수제를 첨가하여 유동성을 조정하였다. 측정항목은 골재에서 입도 조정 후 단위용적질량과 실적률, 비표면적 및 구형율을, 모르타르 시험에서는 굳지 않은 정상에서는 플로우와 공기량, 경화정상에서는 재령 3, 7, 28일에서의 압축 및 휨강도이다.

2.2 실험재료

Table 2 Physical properties of Cement

Type	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time		Compressive strength (MPa)
			Initial (min)	Final (h:min)	
OPC	3.15	3,300	59	6:39	38.2

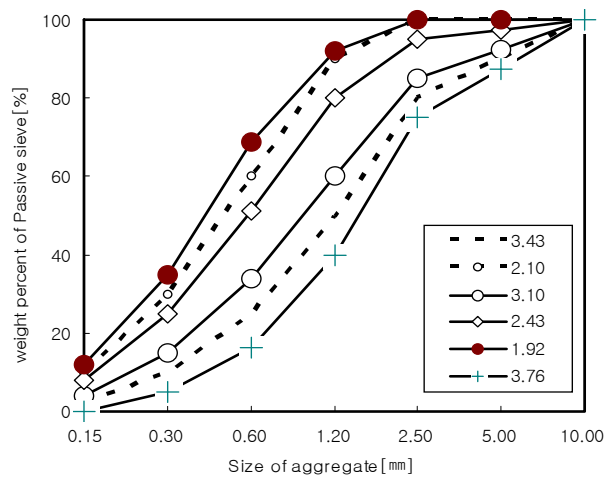


Fig. 1 FM. of fine aggregate

Table 3. Physical properties of RCSS*

Size(mm)	Density (g/cm ³)	Absorption ratio(%)	Weight of unit volume (kg/m ³)	Percent of Solid content (%)
2.50	3.81	0.54	1,745	46
1.25	3.75	0.12	2,192	58
0.60	3.84	0.08	2,365	62
0.30	3.88	0.08	2,437	63
0.15	3.83	0.12	2,449	64

* RCSS : rapidly cooled electric arc furnace oxidizing slag

Table 4. Physical properties of admixture

Type	Percent of solid (%)	Specific gravity	pH	Color
Naphthalene type	35.6	1.2	7±1	Brown

시멘트는 국내에서 생산되고 있는 분말도 3,300cm³/g의 I 중 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 골재는 아토마이징 된 급냉 전기로산화 슬래그를 사용하였다. 혼화재료는 K사에서 생산된 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였다. 시멘트 및 골재의 물리적 특성은 Table 2, 3과 같으며, 혼화제의 물리적 특성은 Table 4와 같다. 또한 골재의 입도 분포는 Fig. 1과 같다.

2.3 실험방법

2.3.1 구형율

급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 구형율과 입형에 대한 시험 방법은 다음과 같다. 구형율 분석방법은 BS 812에 제시하고 있는 방법과 광학 현미경을 이용하여 입자를 측정 후 이미지 프로그램을 이용하는 방법이 있다. BS 812 방법에 의한 구형율 계산은 골재의 체가름 한 후에 각 체 가름후의 입자 크기를 현미경에 의해 촬영한 후 입자의 크게 장축, 중간변, 단축으로 분류하는 것이다. 다음과 같은 식 1.1 및 1.2를 이용하여 계산된다.⁵⁾

- BS 812 : 구형율(Spherical ratio)

$$S = \frac{d}{a} \text{ ----- 식 1.1}$$

$$S = \sqrt{\frac{bc}{a^2}} \text{ ----- 식 1.2}$$

여기서 a는 입자의 장축, b는 입자의 중간변, c는 입자의 단축, d는 입자의 구로 가정된 반지름이다. 본 연구에 서는 식 1.2를 선택하여 구형율을 계산하였다.

- 이미지 프로그램에 의한 구형율

이미지 프로그램은 TOMORO Scope Eye를 사용하였으며, 구형율은 다음과 같이 식 1.3을 이용하여 계산하였다.

$$R = \left(\frac{4 \times Area}{\pi \times D^2} \right) \text{ ---식 1.3}$$

여기에서 D는 입자의 지름, Area는 이미지가 분석한 면적을 의미한다.

2.3.2 비표면적 분석

급냉 전기로 산화슬래그의 비표면적을 측정하기 위하여 입형 분석은 SEM(MIRA LMH2, TESCAN korea)을 통하여 측정하였으며, 골재의 비표면적 계산은 BS 812에서 제시하고 있는 다음 식에 의해 계산하였다.

$$s_w = \frac{6}{G_b d} \text{ -----식 1.4}$$

또는

$$s = \frac{6000}{d} \text{ -----식 1.5}$$

여기에서 Sw, s는 계산된 골재의 비표면적을 의미하며, Gb는 골재의 부피 비중, d는 입자 크기를 의미한다.^{6,7,8)}

2.3.3 재료 혼합

재료 혼합은 KS ISO 679에 따라 Fig. 2와 같이 실시하였다. 시험체 제작 직후 온도 21±2°C, 습도 60%의 조건에서 양생을 실시하였다.⁹⁾ 플로 시험과 공기량 측정은 KS L 5111에 의해 실시하였으며, 압축과 휨강도는 KS L 5105 및 5104에 의해 재령 3, 7, 28일에 실시하였다.

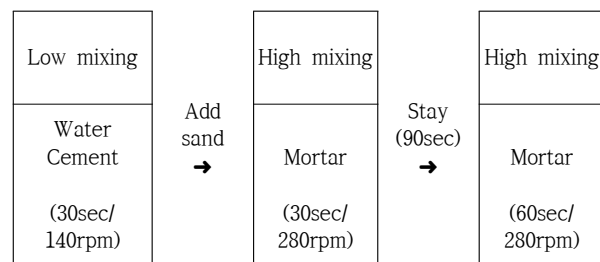


Fig. 2 Mixing method

3. 실험결과 및 분석

3.1 구형율 및 입형

급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 구형율은 Fig. 3과 같다. 완전한 구형율을 1이라고 하면, 일반 천연골재는 0.5~0.7의 값을 가지지만, 아토마이징한 슬래그 골재의 구형율은 0.81~0.93으로 천연 골재에 비해 매우 높은 값을 보이고 있다. 급냉 슬래그의 구형율을 입자 크기별로 살펴보면, 2.5mm 골재의 경우 0.81~0.82 값을, 1.25~0.15mm의 경우 0.89~0.93의 값을 보이고 있다. 이와 같이 입자의 크기

가 줄어들수록 구형율은 높아지고 있으며, 이는 아토마이징 공정을 견치게 되면 좀 더 작은 입자가 구를 형성하기 용이하기 때문으로 판단된다.

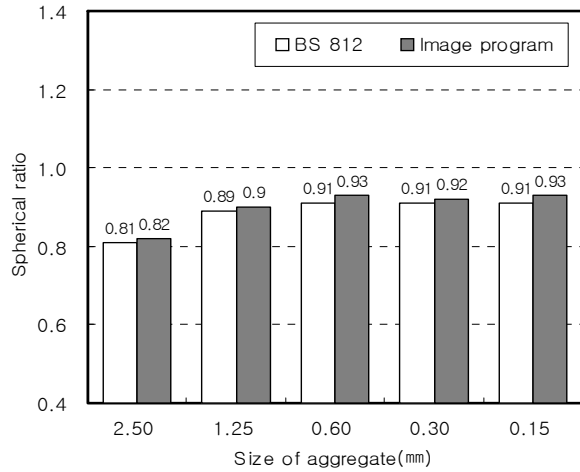


Fig. 3 Spherical ratio of aggregate

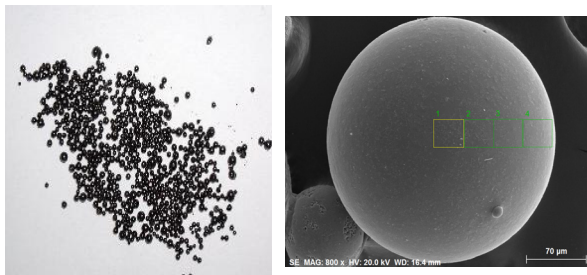


Fig. 4 Shape of atomized slag aggregate

Fig. 4는 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 입형을 광학 현미경과 SEM에 의해 촬영한 영상을 나타낸 것이다. 그림으로부터 아토마이징 공정을 견칠 경우 슬래그 골재가 구형이라는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 골재의 입형이 구형을 가지게 될 경우 콘크리트용 골재로 채택할 경우 불베어링 효과에 의해 콘크리트의 유동성이 뛰어난 것으로 판단된다.

3.2 단위용적질량과 실적울

급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 크기에 따른 단위용적질량과 실적울은 Fig. 5와 같다. 단위용적질량은 조립률 1.92, 2.10, 2.43에서는 거의 균등하게 2,700kg/m³ 정도로 나타났으며, 조립률 3.10, 3.43, 3.76에서는 단위용적질량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 입자의 크기가 증가할수록 실적울이 낮아지기 때문이다.

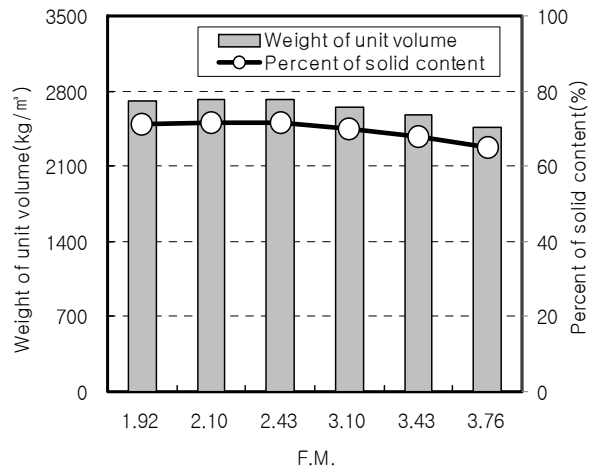


Fig. 5 Unit volume weight and percentage of solid content of atomized slag aggregate

3.3 비표면적

Table 5. Specific surface area of FM.

Specific surface area (cm ² /g)	Fineness Modulus(F.M.)					
	1.92	2.1	2.43	3.1	3.43	3.76
2.50	-	-	5,244	15,733	20,977	26,221
1.25	16,782	20,977	31,465	52,442	62,931	73,419
0.60	101,607	131,105	125,861	114,717	109,255	103,792
0.30	294,987	262,211	228,998	163,882	131,105	98,329
0.15	402,057	349,615	297,172	192,288	139,846	87,404
0.08	393,316	327,764	262,211	131,105	65,553	-
sum	1,208,749	1,091,672	950,952	670,168	529,666	389,165

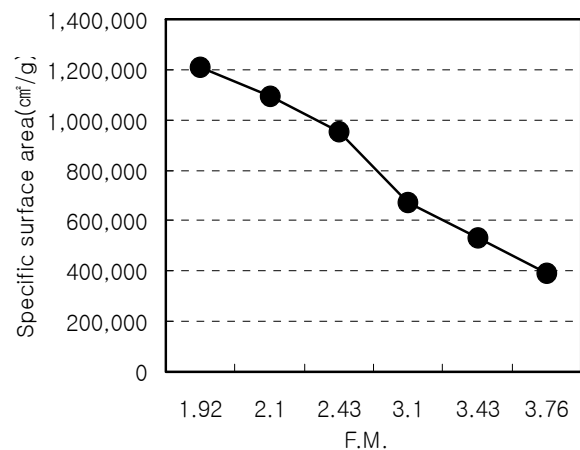


Fig. 6 Specific surface area of aggregate according to FM

급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 비표면적을 분석한 결과는 Table 5, Fig. 6과 같다. 분석 결과 조립률이 증가

할수록 비표면적은 감소하고 있으며, 특히 조립률 2.43과 3.1 사이에서의 감소 비율이 높은 것으로 나타났다. 이상의 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 조립률에 따른 비표면적을 종합해보면, 선형적인 관계를 보이고 있다.

3.4 모르타르의 플로우

Fig. 7은 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 조립률에 따른 모르타르의 플로우를 나타낸 것이다. 실험 결과 골재의 조립률이 작아질수록 플로우는 감소하고 있으며, 이는 골재의 조립률이 작을 경우 골재의 비표면적이 증가하여 유동성에 기여하는 액상재료의 양이 상대적으로 줄어들기 때문으로 판단된다.

골재의 조립률 감소에 따른 모르타르의 플로우 감소를 회복하기 위해 고성능 감수제(SP)를 첨가하였다. 첨가된 고성능감수제의 양은 조립률 1.92, 2.10, 2.43에 대해 각각 1.5, 1.0, 0.5%로 나타나 조립률과 첨가율은 선형적으로 나타났다. 그러나 조립률 3.10 이상에서는 조립률에 따른 유동성의 차이가 거의 나타나지 않았다.

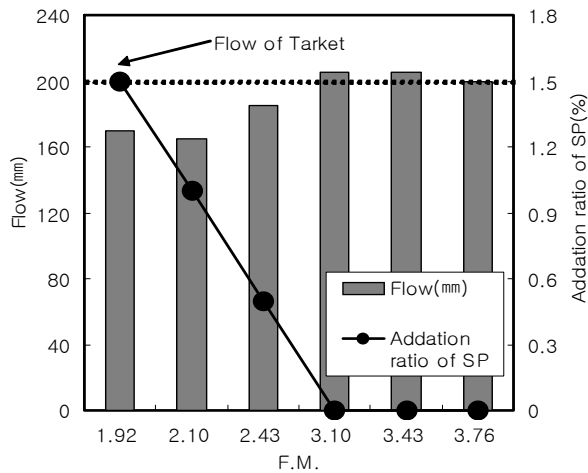


Fig. 7 Flow of mortar

3.5 모르타르의 공기량

Fig. 8은 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재 입도별 모르타르의 공기량 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과 조립률 2.43의 기준으로 2.43보다 작을 경우에는 공기량이 증가하는 것으로 나타났으나, 2.43이상일 경우에는 공기량이 다시 감소하는 경향을 보이고 있다 이는 조립률이 작을 경우 골재와 골재 사이의 공기가 많이 존재하는 것을 의미하는 것으로 판단된다.

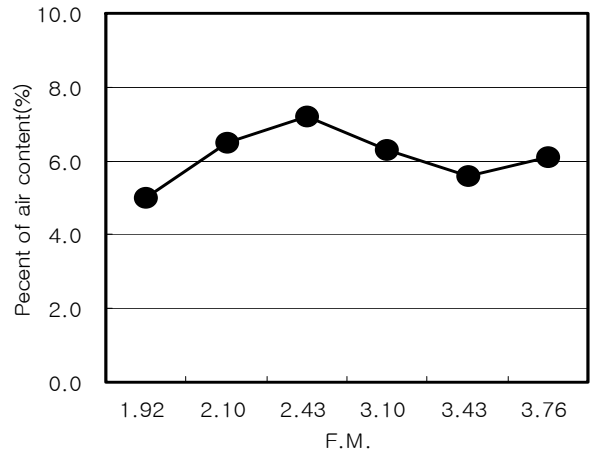


Fig. 8 Air content of mortar

3.6 모르타르의 강도 특성

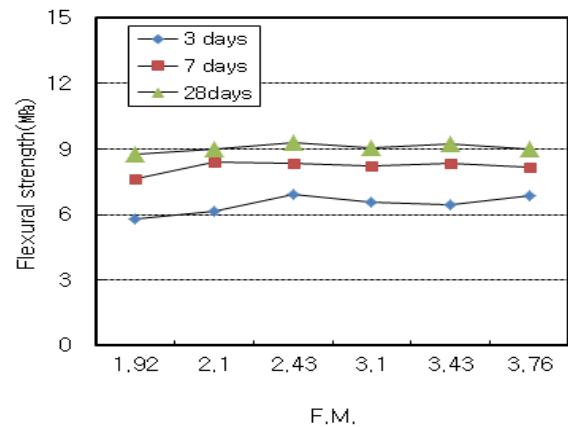


Fig. 9 Flexural Strength of mortar

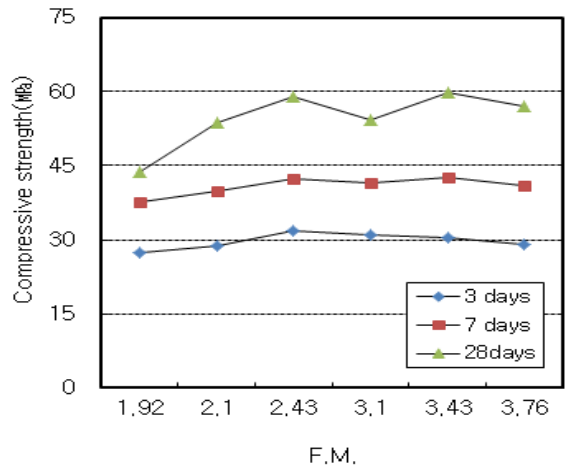


Fig. 10 Compressive Strength of mortar

Fig. 9은 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재 입도별에 따른 재령별 휨강도를 나타낸 것이다. 휨강도 측정결과 재령 28일 기준으로 잔골재 조립률 2.43에서 9.32%로 가장 높은 강도를 나타냈다. 강도 편차는 초기 재령에서의 조립률별에 따른 강도 편차가 28일 재령까지 거의 유사한 편차를 보이고 있다. 이러한 경향을 보이는 것은 조립률별에 따른 실적율과의 상관관계로 조립률 2.43에서 가장 높은 실적율을 보이고 있어 강도가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 10은 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재 입도별에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것으로 휨강도와 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

4. 결론

아토마이징에 의한 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재 입도변화에 따른 모르타르 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 구형율은 입자 크기 2.5mm의 경우 0.81, 0.82를, 1.25~0.15mm 크기의 경우 0.89~0.93으로 측정되었다. 이는 급냉 전기로 산화슬래그를 제조하는 공정인 아토마이저 공정에서 급속의 공기로 용융된 슬래그를 분사시키기 때문에 분사 시 공기와의 마찰력이 작은 입자에 영향을 준 것으로 판단된다.
- 2) 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 단위용적질량은 조립률 1.92, 2.10, 2.43에서는 유사하게 2,700kg/m³ 정도로 나타났으며, 3.10, 3.43, 3.76은 단위용적질량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 입자의 크기가 증가할수록 골재와 골재 사이의 밀실성이 떨어지기 때문이다.
- 3) 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 비표면적은 조립률이 증가할수록 전체 골재의 비표면적이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 조립률 2.43과 3.10 사이에서의 감소 비율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 골재 사이즈 0.15, 0.30mm의 차이가 크게 나타났기 때문으로 판단된다.
- 4) 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 입도별에 따른 모르타르의 특성을 분석한 결과 플로우는 조립률이 커질수록 유동성이 높게 나타났으며, 공기량은 낮은 조립률에서 가장 높게 나타났다. 이러한 이유는 조립률에 영향을 주는 작은 입자가 많이 존재하기 때문이다.
- 5) 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 입도별에 따른 모르타르의 특성 중 휨강도는 조립률 2.43이 가장 높게 나타났으며, 초기 재령의 조립률에 따른 강도 편차가 28일 재

령에까지 나타나고 있다. 압축강도의 경우 휨강도와 유사한 경향을 보이고 있다.

6) 이상의 실험 결과를 토대로 하면 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재를 사용할 경우 콘크리트용 골재로 활용하기 위해서는 콘크리트 표준 시방서에서 제시하고 있는 입도 분포 보다 작은 입도 분포 범위를 채택해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 환경부 글로벌 탐 사업제강 환원 슬래그의 고효율 급냉 재활용 기술 개발과 2010년 광역 경제권 연계협력사업[이산화탄소 고정화 원료의 토건재료화 기술개발]의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. 세계철강협회, 2010년 1월,
2. 김진만, 곽은구 : 급냉 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 골재로서의 활용성, 대한건축학회구조논문집, Vol.26, No. 2, pp. 63-70(2010)
3. 김진만, 곽은구, 조성현, 오상균 : 아토마이징 공정에 의한 급냉 제강슬래그의 특성, 한국콘크리트학회지, Vol.19, No. 6, pp. 39-45(2007)
4. 콘크리트표준시방서, 2010년
5. BS 812 Testing aggregate. Method for determination of particle size distribution
6. Tons, E., and Goetz, W. H., Packing Volume Concept for Aggregates, Highway Research Record No. 236, pp.76-95, Highway research Board, Washington, D.C., 1968
7. Edwards, L. N., Properties of the Materials of Mortars and Concrete by Surface Area of Aggregates, Proceedings, ASTM, vol. 18, part 2, 1918
8. Young, R., B., Some Theoretical Studies on Proportioning Concrete by the Method of Surface Area of Aggregates, Proceedings, ASTM, vol. 19, part 2, pp.445-457, 1919
9. KS L ISO 679 : 시멘트의 강도 시험방법

급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 입도 변화에 따른 모르타르의 특성

철강 산업에서는 고로 슬래그, 전기로 슬래그, 전로 슬래그 등 많은 부산물이 발생한다. 그 중 제강 슬래그는 일반 골재와 달리 높은 CaO와 낮은 SiO₂가 존재하며, 이를 시멘트와 콘크리트에 적용하게 되면 일부 알칼리 반응을 발생시키는 원인이 된다. 한편, 국내외적으로 제강 슬래그 중 전기로 산화슬래그의 콘크리트 구조용 골재로 사용하는 기준이 제정되어 사용을 장려하고 있지만, 슬래그에 대한 체적 안정성은 해결하지 못하였다. 최근에 이런 문제점을 해결하기 위하여 제강 슬래그의 고속의 공기로 냉각하는 방법이 국내에서 개발되었으며, 이를 적용할 경우 슬래그의 체적 붕괴를 야기시키는 유리 석회의 함유량을 최소화시키고 철 산화물에 대한 안정성을 갖는 것으로 보고되고 있다. 이에 본 연구에서는 철강 산업에서 발생하는 제강슬래그의 고속의 공기로 냉각한 급냉 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 골재로서 활용하기 위한 기초 연구이다. 이를 위해 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 품질 특성을 검토하였으며, 골재의 입도별에 따른 모르타르 특성을 검토하였다. 실험 결과 급냉 전기로 산화슬래그 잔골재의 특성은 아토타미저 공정에 의한 특성을 반영하고 있으며, 기존 콘크리트용 골재 입도 분포 범위에 비해 작은 입도 분포 범위를 가지는 것으로 나타났다.