

급냉 제강 슬래그 잔골재 대체율에 따른 모르타르의 유동성 및 압축강도 특성

조성현^{1)*} · 김진만²⁾ · 한기석³⁾ · 김무한¹⁾

¹⁾ 충남대학교 건축공학과 ²⁾ 공주대학교 건축공학과 ³⁾ 공주대학교 자원재활용 신소재연구센터

(2004년 5월 20일 원고접수, 2005년 1월 12일 심사완료)

The Properties of Flow and Compressive Strength of Mortar According to Replacement Ratio of Rapidly-Chilled Steel Slag Fine Aggregate

Sung-Hyun Cho¹⁾, Jin-Man Kim²⁾, Moon-Han Kim³⁾, and Ki-Suk Han¹⁾

¹⁾ Dept. of Architecture Engineering, ChungNam National University, Taejon, 305-764, Korea

²⁾ Dept. of Architecture Engineering, Kongju National University, ChungNam, 151-742, Korea

³⁾ RRC/NMR, Kongju National University, ChungNam, 151-742, Korea

(Received May 20, 2004, Accepted, January 12, 2005)

ABSTRACT

The steel slag, a by-product which is produced by refining pig iron during the manufacture of steel, is mainly used as road materials after aging. It is necessary to age steel slag for long time in air because the reaction with water and free-CaO in steel slag could make the expansion of volume. This problem prevents steel slag from being used as aggregate for concrete. However, steel slag used in this study was controlled by a air-jet method which rapidly cools substance melted at a high temperature. The rapidly-chilled method would prevent from generation of free-CaO in steel slag.

This study dealt with the influence of the using rate of rapidly-chilled steel slag on flow, dosage of SP, W/C ratio, and strength of mortar by statistical experimental design. Also, the results of this experiment were approved by statistical analysis methods, such as analysis of variance and F-testing.

As results of F-testing, this paper proved at 1% level of significance that the more the using rate of rapidly-chilled steel slag increased, the more this affected the enhancement of flow, the decrease of dosage of SP and W/C ratio, and the development of compressive strength. Also, considering the fluidity and compressive strength of mortar, it is desirable to use 75% of rapidly-chilled steel slag for river sand.

Keywords : rapidly-chilled steel slag, statistical analysis, flow, dosage of SP

1. 서 론

철강 제조공정에서 발생하는 부산물은 크게 고로 슬래그와 제강 슬래그로 나누어진다. 고로 슬래그는 콘크리트용 혼화재 및 골재 등의 건설재료로 사용하기 위한 연구가 국·내외적으로 많이 진행되어 왔으며, 실제 실용화되고 있는 실정이다. 제강 슬래그는 free CaO에 의한 팽창 붕괴성 때문에 건설재료로 사용하는데 많은 제약을 받고 있다. 제강 슬래그는 고로 슬래그와 달리 free CaO를 적게는 0.1% 많게는 20%까지 다양하게 함유하고 있다. free CaO의 함량이 1% 이상이 되면 free CaO는 슬래그 내부로 침투되는 물과 반응하여 Ca(OH)₂를 생성시켜 체

적 팽창을 일으켜 제강 슬래그의 붕괴를 초래한다¹⁾.

이러한 문제 때문에 제강 슬래그 처리는 일반적으로 용융된 슬래그를 서냉시키고, free-CaO에 의한 팽창붕괴성을 방지하기 위하여 약 6개월에서 1년간의 야적에 의해 에이징(Aging)한 후 도로용 노반재 등으로 사용한다. 이러한 공정은 오랜 시간, 넓은 야적장의 요구와 그에 따른 부가적인 비용을 발생시킨다. 최근에는 용융된 제강 슬래그를 서냉시키지 않고 급냉시켜 제강 슬래그 중의 CaO는 화합물 상태로 존재시키므로써 free CaO의 생성량을 감소시키는 방법이 연구가 활발히 진행되고 있다²⁻⁵⁾. 용융된 제강 슬래그를 고속의 공기를 이용하여 급냉시키면, 급냉된 제강 슬래그는 입형이 구형에 가까운 잔골재 형태를 갖게 된다⁶⁾. 일본 등 외국의 경우 이러한 급냉 제강 슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나, 국내 연구들은 대부분 공기중에서

* Corresponding author

E-mail : shcho@kongju.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

서냉시켜 에이징 처리한 제강 슬래그에 대한 연구가 주를 이루고 있고, 이에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고속의 공기로 급냉시킨 제강 슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 일련의 연구로서 먼저 콘크리트용 잔골재로서의 활용 가능성을 검토하고, 급냉 제강 슬래그를 강모래에 대하여 용적 대체한 모르타르의 유동성 및 압축강도 특성을 검토하였다. 또한, 급냉 제강 슬래그 대체율이 모르타르의 유동성 및 압축강도에 유의한 영향을 미쳤는가를 검토하기 위하여 분산분석에 의한 F검정 및 최소유의차 분석 등의 통계적 검정을 실시하여 신뢰성 있는 자료를 제시하고자 하였다.

2. 급냉 제강 슬래그 골재의 특성 검토

2.1 물리적 성질

용융된 슬래그를 고속 공기로 뽑어 급냉시키면 비산된 슬래그는 표면장력에 의해 Fig. 1과 같이 구형에 가까운 입형의 잔골재로 만들어 진다.

Table 1은 급냉 제강 슬래그의 물리적 성질을 나타낸 것이다. 급냉 제강 슬래그 잔골재의 비중은 3.56으로 강모래가 2.55인 것에 비해 높게 나타났고, 흡수율은 0.42%로 강모래가 1.19%인 것에 비해 낮게 나타났다. 실적률은 동일한 수준을 보이고 있으나, 입형 판정에 의한 실적률은 급냉 제강 슬래그의 입형이 구형에 가깝기 때문에 강모래보다 약 2%정도 높은 실적률을 보이고 있다. 잔입자량 및 안정성 시험은 모두 KS F 2526 「콘크리트용 골재」 규준에 만족하고 있다.

Fig 2는 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 급냉 제강 슬래그는 0.6mm이하의 세립분이 적어 KS의 표준입도 곡선을 다소 벗어나고 있다.

2.2 화학적 성질

Table 2 급냉 제강 슬래그 잔골재의 화학성분을 나타낸 것이다. CaO, Fe₂O₃, SiO₂가 주성분으로 이루고 있으며, 특히, Fe₂O₃를 약 30% 함유하고 있어 위에서 서술한 바와 같이 급냉 제강 슬래그 잔골재의 비중이 높게 나타났다. 기존의 연구에 의하면 기존의 서냉 제강 슬래그는 free CaO를 1% 이상 함유하게 될 경우 팽창붕괴성을 발

생하는 경향이 커지게 되므로 free CaO의 함유량을 1% 미만이 되는 것을 사용하도록 권장하고 있다. 그러나, 급냉 제강 슬래그의 경우 Table 2에 나타낸 바와 같이 free CaO의 함유량은 0.15%로 낮다. 따라서, 급냉 제강 슬래그의 팽창붕괴 위험성은 적을 것으로 예상된다.

2.3 수침팽창성

KS F 2535 「도로용 철강 슬래그」에서는 제강 슬래그를 도로의 기층, 보조 기층 및 가열 아스팔트 혼합물에 사용할 경우에는 「80℃ 수침팽창성 실험」을 실시하여, 기층

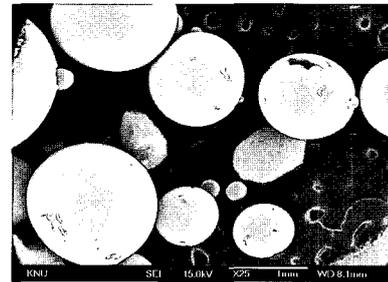


Fig. 1 The grain shape of rapidly -chilled steel slag

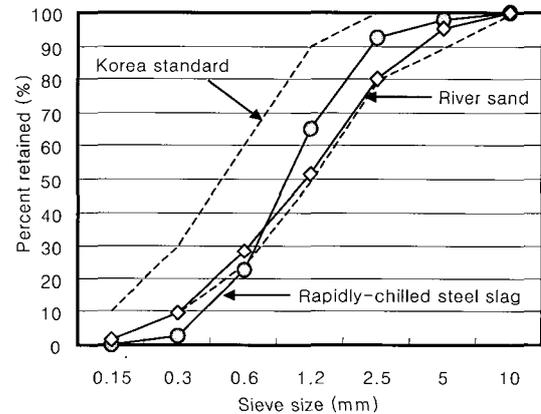


Fig. 2 The grading curve of fine aggregate

Table 2 The chemical compositions of the rapidly-chilled steel slag

Chemical composition (% by weight)							f-CaO (%)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	
13.0	9.6	30.2	39.9	8.0	0.03	0.1	0.15

Table 1 The physical properties of aggregate

Type	Max size (mm)	Absolute Specific gravity	Specific gravity	Water absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)	Solid volume (%)	Solid volume by grain shape (%)	Fine particle (%)	Soundness (%)
Rapidly-chilled steel slag	5	3.56	3.57	0.42	3.10	2.263	63.75	60.00	0.45	2.6
River sand	5	2.55	2.58	1.19	3.30	1.575	63.40	57.80	-	-
Korea Standard	-	over 2.5	-	under 3	-	-	-	-	under 3	under 10

및 보조 기층재용 철강 슬래그는 수침팽창비가 1.5% 이하, 가열 아스팔트 혼합물 및 역청 안정 처리용 철강슬래그는 수침팽창비가 2.0% 이하에서 사용하도록 규정하고 있다⁷⁾. 또한, 「日本 콘크리트工學協會 九州支部」에서 연구한 FS(fly ash and slag) 콘크리트용 골재에서는 수침팽창비가 0.5% 이하인 제강 슬래그를 사용할 것을 제안하고 있다.¹⁾

본 연구에서 사용한 급냉 제강 슬래그는 Fig. 3에 나타난 바와같이 수침팽창비가 약 0.4%로 에이징을 하지 않은 일반 제강 슬래그 보다 수침팽창비가 매우 낮게 나타났다. 그러므로 KS F 2535 「도로용 철강 슬래그」 기준 및 「日本 콘크리트工學協會 九州支部」에서 제안하고 있는 FS 콘크리트용 골재로도 적합한 것으로 나타났다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

급냉 제강 슬래그는 위에서 살펴본 바와 같이 입형이 구형에 가깝고, 흡수율이 적기 때문에 콘크리트용 골재로 사용할 경우 콘크리트의 유동성 개선효과 및 그에 따른 압축강도 증진효과가 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 실험에서는 급냉 제강 슬래그의 사용에 따른 모르타르의 유동성 및 그에 따른 압축강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Table 3과 같이 3시리즈로 계획하여 실험을 실시하였다.

본 실험에 사용된 모르타르의 배합비는 각 시리즈 모두 동일하게 시멘트와 모래비가 1:2.45이고, 급냉 제강 슬래그의 대체율은 모래와 급냉 제강 슬래그의 비중차가 크기 때문에 모래의 용적에 대하여 0, 25, 50, 75, 100%로 하여 5수준을 실시하였다.

시리즈 I에서는 물-시멘트비를 44%로 고정하고, 급냉 제강 슬래그 대체율에 따른 유동성과 그에 따른 압축강도를 검토하였다.

시리즈 II와 III는 목표 플로우 210±5mm를 확보하기 위한 고성능감수제의 첨가율과 물-시멘트비의 변화를 검토 하고, 그에 따른 압축강도 특성을 검토하였다.

또한, 급냉 제강 슬래그의 대체율에 따른 모르타르의 유동성 및 그에 따른 압축강도 특성에 유의한 영향을 미치는지를 검토하기 위하여 각 시리즈를 실험계획법 중 일원배치법에 따라 3회 반복 실험하였고, 그 결과를 분산분석 후 F검정을 실시하여 영향성을 검증하였다.

3.2 사용재료

시멘트는 비중이 3.15인 S사 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 고성능감수제는 A사 폴리카르본산계를 사용하였다. 잔골재로 강모래와 급냉 제강 슬래그를 사용하였으며, 각각의 물리적 성질은 앞에서 언급한 Table 1과 같다.

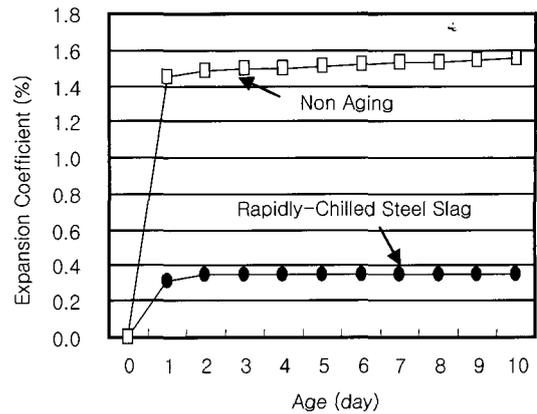


Fig. 3 The expansion coefficient of steel slag in 80°C water

Table 3 The design of experiment

Series	The replacement ratio of RCSS* (%/Vol)	Mix ratio	W/C (%)	Aim flow (mm)	The subject of experiment
I	0, 25, 50, 75, 100	Cement : Sand = 1:2.45 (by weight)	44	-	The variance of flow
II				210±5	The dosage of SP
III			-	-	The variance of W/C ratio

* RCSS : Rapidly-chilled steel slag

3.3 시험방법

급냉 제강 슬래그 대체율에 따른 유동성 및 압축강도를 검토하기 위해 KS F 5105 「수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법」에 준하여 플로우 실험 및 압축강도용 공시체를 제작하였다.

압축강도 시험은 소정의 재령까지 20±2°C에서 수증양 생을 실시한 후, 재령 3, 7, 28일에 실시하였다.

3.4 실험계획법과 통계적 분석⁸⁾

3.4.1 일원배치법(one-way factorial design)

실험계획법의 종류는 일원배치법, 이원배치법, 직교배열법, 요인배치법, 혼합물법, 다구찌법 등 다양하다. 그러므로 실험목적에 따라 실험계획법을 선정하는 것은 매우 중요하다. 본 실험에 사용된 실험계획법은 일원배치법이다.

일원배치법은 어떤 관심있는 특성치에 대하여 1개 인자의 영향을 조사하기 위하여 쓰이는 실험계획법으로 가장 단순한 실험계획법이다. 이 실험계획법은 수준수와 각 수준에서 얻어지는 측정치의 반복수에는 별로 제한이 없으나, 일반적으로 수준수는 3~5수준, 반복수는 3~10회 정도 하는 것이 많이 사용된다.

그러므로 본 연구에서와 같이 하나 인자인 급냉 제강 슬래그 대체율이 모르타르의 특성에 어떠한 영향을 미치

는 지를 검토하기에는 가장 적합한 실험계획법이라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 일원배치 실험계획법에 따라 급냉 제강 슬래그 대체율 수준수는 0, 25, 50, 75, 100% 5수준, 실험반복 횟수는 3회 실시하였다.

3.4.2 분산분석(analysis of variance)

실험계획법에서 가장 많이 사용되는 분석방법은 분산분석이다. 분산분석은 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제곱평균이 되며 이 평균 제곱이 오차의 평균제곱에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. (F-검정)

따라서 분산분석이란 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이라고 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 급냉 제강 슬래그 대체율이 모르타르의 플로우, 고성능감수제의 첨가율, 물-시멘트비 및 압축강도에 어느 정도 큰 영향을 주었는지를 분산분석을 통하여 검토하였다.

3.4.3 최소유의차에 의한 각 수준별 상호간 유의성 검토

앞의 분산분석에 의해 급냉 제강 슬래그 대체율이 모르타르의 플로우, 고성능감수제의 첨가율, 물-시멘트비 및 압축강도에 차이가 있을 경우에는 어느 대체율 수준간에서 차이가 존재하는지를 검정해 보아야 한다.

본 연구에서는 급냉 제강 슬래그의 각 대체율 수준별 상호간에 유의성을 검토하기 위하여 최소유의차(LSD : least significant difference) 방법을 사용하였다.

최소유의차 방법은 두 수준간 차이가 유의하려면 두 수준의 모평균차는 최소한 아래식보다 커야 한다.

$$|x_1 - x_2| > t(\phi_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{2V_E}{m}} \quad (1)$$

여기서, x_1, x_2 : 각 수준에서의 모평균
 t : t-분포표, ϕ_E : 오차의 자유도
 α : 유의수준, V_E : 오차의 평균제곱
 m : 측정 데이터 수

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유동성

4.1.1 플로우, 고성능감수제 첨가율 및 물-시멘트비의 변화

Table 4는 급냉 제강 슬래그 대체율에 따른 각 시리즈 별 3회 반복 실험한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4은 3회 반복한 실험결과와의 모평균을 이용하여 급냉 제강 슬래그 대체율에 따른 플로우, 고성능감수제 첨가율 및 물-시멘트비의 변화를 나타낸 것이다.

급냉 제강 슬래그 대체율 75%까지는 동일 물-시멘트비에서 급냉 제강 슬래그 대체율이 증가할수록 플로우는 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 목표 플로우 210±5mm를 얻기위한 고성능감수제의 첨가율과 물-시멘트비는 감소하는 것으로 나타났다.

그러나 급냉 제강 슬래그 대체율 75%와 100%는 거의 동일한 수준의 플로우, 고성능감수제의 첨가율, 물-시멘트비를 보이고 있다. 따라서, 급냉 제강 슬래그 대체율을

Table 4 The results of test

Series	The replacement ratio of RCSS ^a (%/Vol)	W/C (%)	I : Flow (mm)				Compressive strength (MPa)											
			II : Dosage of SP (%)				3 days				7 days				28 days			
			III : W/C (%)				1	2	3	Ave.	1	2	3	Ave.	1	2	3	Ave.
I	0	44	114	109	111	111	22.5	22.8	23.5	22.9	33.4	34.9	35.5	34.6	43.0	43.6	47.1	44.6
	25		143	143	127	137	26.0	25.6	26.5	26.1	38.3	39.7	40.8	39.6	51.0	53.5	52.0	52.2
	50		169	145	167	160	27.6	27.3	29.2	28.0	40.8	41.2	40.8	40.9	54.5	53.1	54.9	54.2
	75		203	206	205	205	34.5	32.1	33.4	33.3	45.1	43.3	43.8	44.1	54.4	54.0	57.0	55.1
	100		205	207	208	206	30.4	25.7	27.5	27.9	41.2	40.7	40.2	40.7	48.1	48.4	50.0	48.8
II	0	44	3.0	3.2	3.0	3.1	16.7	16.1	17.7	16.8	23.5	24.6	25.4	24.5	31.9	34.5	30.7	32.4
	25		2.0	2.2	2.0	2.1	22.6	25.0	24.3	24.0	33.4	35.2	34.5	34.4	38.8	40.5	39.1	39.5
	50		0.7	0.9	0.7	0.8	28.4	27.5	30.5	28.8	41.2	40.2	41.9	41.1	53.2	55.5	53.6	54.1
	75		0.0	0.0	0.0	0.0	34.5	32.1	33.4	33.3	45.1	43.3	43.8	44.1	54.4	54.0	57.0	55.1
	100		0.0	0.0	0.0	0.0	30.4	25.7	27.5	27.9	41.2	40.7	40.2	40.7	48.1	48.4	50.0	48.8
III	0	-	58	59	58	58.3	19.2	17.7	19.8	18.9	26.3	25.8	27.3	26.4	36.4	37.3	34.3	36.0
	25		53	54	54	53.7	20.6	21.6	21.1	21.1	28.8	29.7	28.6	29.0	42.9	40.2	41.7	41.6
	50		49	50	49	49.3	23.2	22.8	25.1	23.7	33.5	37.3	35.3	35.4	49.1	53.0	41.0	47.7
	75		44	44	44	44.0	34.5	32.1	33.4	33.3	45.1	43.3	43.8	44.1	54.4	54.0	57.0	55.1
	100		44	44	44	44.0	30.4	25.7	27.5	27.9	41.2	40.7	40.2	40.7	48.1	48.4	50.0	48.8

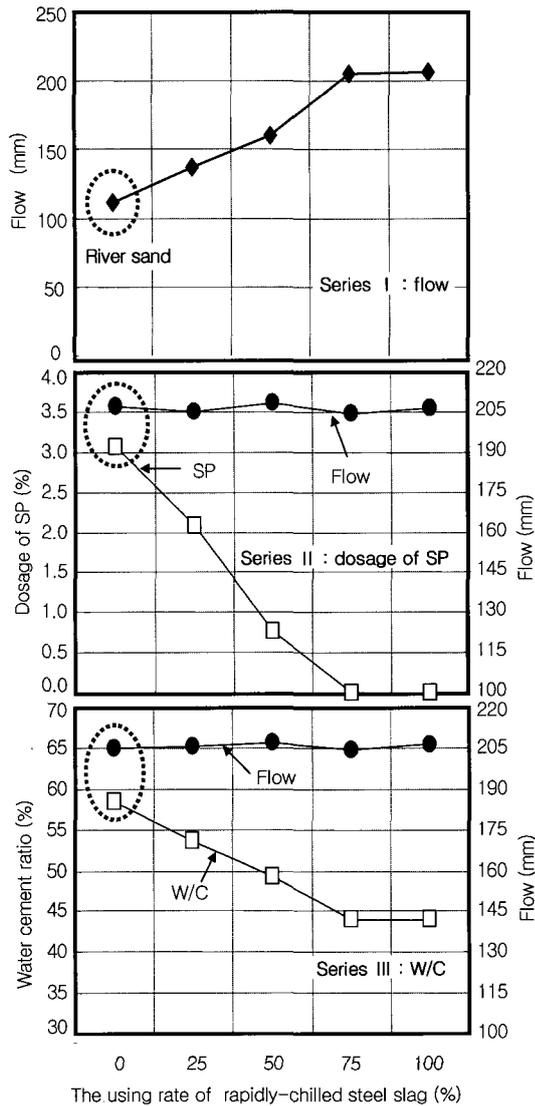


Fig. 4 The variance of flow, dosage of SP, and water/cement ratio

75%이상으로 대체할 경우 더 이상의 유동성 증진효과 및 고성능감수제의 첨가율과 물-시멘트비의 감소효과는 없는 것으로 나타났다.

강모래(급냉 제강 슬래그 대체율 0%)만을 사용한 것과 비교하여 급냉 제강 슬래그 대체율 25%에서는 약 20%, 대체율 50%에서는 약 40%, 대체율 75%와 100%서는

약 80% 정도 플로우 값이 증가하는 것으로 나타났다.

고성능감수제의 첨가율은 목표 플로우를 얻기 위해 강모래만 사용한 모르타르는 고성능감수제가 약 3.1% 첨가된 것에 비해 급냉 제강 슬래그 대체율 25%는 약 2.1%, 대체율 50%는 약 0.8%, 대체율 75% 및 100%는 0%가 첨가되었다. 물-시멘트비의 경우는 강모래만 사용한 것에 비해 급냉 제강 슬래그 대체율 25%는 약 4.7%, 대체율 50%는 약 9.0%, 대체율 75% 및 100%는 약 14.3%정도 물-시멘트비가 감소하였다.

이는 급냉 제강 슬래그 골재의 입형이 강모래 보다 구형에 가깝고, 흡수율이 적기 때문에 사용량이 증가할수록 모르타르의 유동성 증진에 기여한 것으로 생각된다.

4.1.2 플로우, 고성능감수제 첨가율 및 물-시멘트비에 대한 통계분석

Table 5는 급냉 제강 슬래그 대체율에 따른 플로우, 고성능감수제의 첨가율과 물-시멘트비의 분산분석 결과를 나타낸 것이다.

F-검정을 실시한 결과 F_0 값은 플로우 95.30, 고성능감수제 49.45, 물-시멘트비 582.17로 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서의 기각치 5.99보다 크게 나타났다. 그러므로 급냉 제강 슬래그 대체율은 유의수준 1%에서 플로우 증가, 고성능감수제의 첨가율 및 물-시멘트비의 감소에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

분산분석 결과, 급냉 제강 슬래그 대체율에 따라 모르타르의 플로우, 고성능감수제의 첨가율 및 물-시멘트비가 차이가 있으므로 어느 대체율 수준간에서 차이가 존재하는지를 검정하는 것이 필요하다.

Table 6은 최소유의차(LSD : least significant difference) 방법을 이용하여 급냉 제강 슬래그 대체율 각각의 수준 상호간에 어느 정도 차이가 있는지를 다중비교한 결과이다.

분석결과, 플로우, 고성능감수제 첨가율, 물-시멘트비 모두에서 급냉 제강 슬래그 대체율 75%와 100% 상호간의 유의한 영향은 없는 것으로 나타났다.

그러나 나머지 수준간에는 유의수준 1%에서 모두 유의한 영향이 있는 것으로 나타났다. 이는 급냉 제강 슬래그 대체율 75%까지는 유동성에 매우 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

Table 5 The analysis of variance table for flow, dosage of SP, and water/cement ratio

Factor	ϕ	Series I : flow			Series II : dosage of SP			Series III : W/C			F (0.05)	F (0.01)
		S	V	F_0	S	V	F_0	S	V	F_0		
The replacement ratio of RCSS* (%/Vol)	4	20864.40	5216.10	95.30**	459.41	114.85	49.45**	465.73	116.43	582.17**	3.48	5.99
Error	10	547.33	54.73		23.23	2.32		2.00	0.20			
Total	14	21411.73			482.64			467.73				

Table 6 The analysis of LST for flow, dosage of SP, and water/cement ratio

The replacement ratio of RCSS*(%/Vol)	Flow				Dosage of SP					W/C					
	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100
0															
25	**					**					**				
50	**	**				**	**				**	**			
75	**	**	**			**	**	**			**	**	**		
100	**	**	**	**		**	**	**	**		**	**	**	**	**

** 1% Level of significance, * 5% Level of significance

4.2 압축강도

4.2.1 재령별 압축강도의 변화 및 파괴특성

Fig. 5는 3회 반복한 실험결과와 모평균을 이용하여 급냉 제강 슬래그 대체율에 따른 각 시리즈에서의 재령별 압축강도의 변화를 나타낸 것이다.

각 시리즈별로 다소 차이가 있으나 대체적으로 급냉 제강 슬래그 대체율 75%까지는 각 재령에 관계없이 대체율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 보이고, 대체율 100%에서는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 급냉 제강 슬래그 대체율 75%까지는 대체율이 증가함에 따라 모르타르의 유동성 향상, 고성능감수제 첨가율과 물-시멘트비의 감소가 압축강도를 증진시켰기 때문으로 판단된다.

재령 28일을 기준으로 하여 강모래(급냉 제강 슬래그 대체율 0%)만 사용한 것과 비교하면, 급냉 제강 슬래그를 대체할 경우 시리즈 I에서는 약 10~24% 압축강도가 증가하고, 시리즈 II에서는 약 25~70%, 시리즈 III에서는 약 16~53% 정도 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6는 광학현미경으로 재령 7일과 28일에서 모르타르의 파괴 단면을 촬영한 것이다. 그림에서 점선은 강모래이고, 실선은 급냉 제강 슬래그이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 재령 7일에서는 강모래와 급냉 제강 슬래그 모두 골재의 계면에서 파괴가 일어났다. 그러나 재령 28일에서는 강모래는 골재 자체가 파괴된 반면에 급냉 제강 슬래그는 골재의 계면에서 파괴가 일어났다.

따라서 급냉 제강 슬래그 대체율 100%는 대체율 75%와 동등한 유동성 향상을 가져오지만 대체율 75%에 비해 상대적으로 계면파괴가 많이 일어나기 때문에 대체율 75%보다 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다.

4.2.2 압축강도에 대한 통계분석

Table 7은 급냉 제강 슬래그 대체율에 따른 각 시리즈의 재령별 압축강도에 대한 분산분석 결과를 나타낸 것이다.

F-검정을 실시한 결과, 각 시리즈에서 재령별 압축강도의 F_0 값은 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서의 기각치 5.99보다 크게 나타났다. 그러므로 급냉 제강 슬래그 대체율은 유의수준 1%에서 압축강도 증진에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Table 8은 급냉 제강 슬래그 대체율 각각의 수준 상호간에 압축강도 차이가 있는지를 다중 비교한 실험 결과이다. 각 시리즈에서 강모래만 사용한 것은 급냉 제강 슬래그 대체율을 한 모든 배합과 재령에 관계없이 유의한 영향을 보이고 있다.

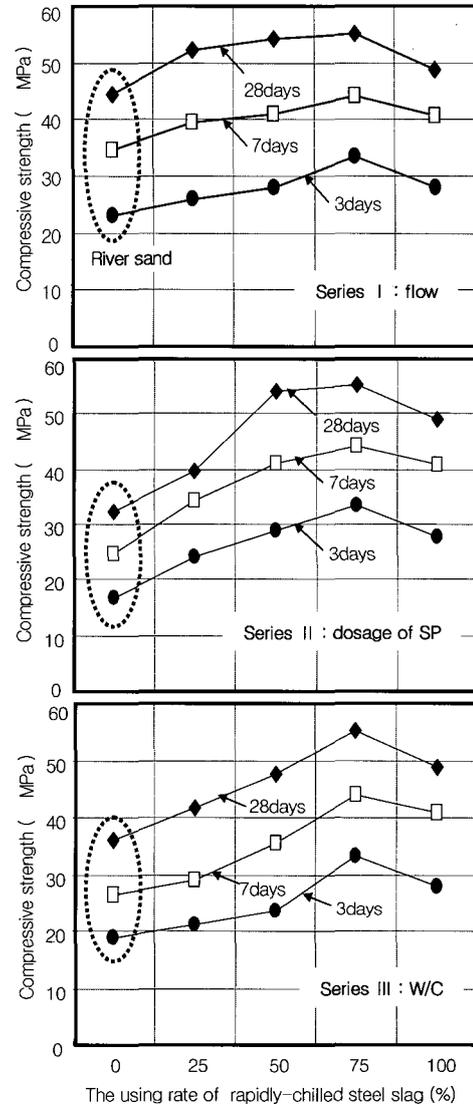


Fig. 5 The variance of compressive strength

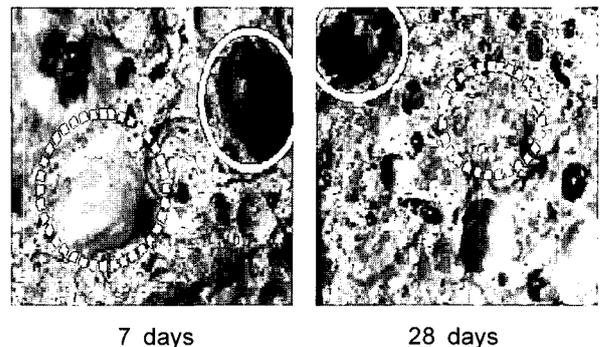


Fig. 6 The failure mode of mortar

Table 7 The analysis of variance table for compressive strength

Series	Factor	∅	Compressive strength									F(0.05)	F (0.01)
			3 days			7 days			28 days				
			S	V	F _o	S	V	F _o	S	V	F _o		
I	The replacement ratio of RCSS*	4	172.06	43.02	25.08**	141.65	35.41	45.32**	223.66	55.91	25.24**	3.48	5.99
	Error	10	17.15	1.72		7.81	0.78		22.15	2.22			
	Total	14	189.22			149.46			245.81				
II	The replacement ratio of RCSS	4	495.41	114.85	49.45**	730.82	182.71	255.41*	1158.65	289.66	148.80*	3.48	5.99
	Error	10	23.23	2.32		7.15	0.72		19.47	1.95			
	Total	14	482.64			737.98			1178.12				
III	The replacement ratio of RCSS	4	395.31	98.83	49.43**	669.50	167.38	148.03*	640.76	160.19	17.66**	3.48	5.99
	Error	10	19.99	2.00		11.31	1.13		90.73	9.07			
	Total	14	415.30			680.81			731.50				

Table 8 The analysis of LST for compressive strength

Series	The replacement ratio of RCSS*(%Vol)	Compressive strength														
		3 days					7 days					28 days				
		0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100
I	0															
	25	*					**					**				*
	50	**					**					**				**
	75	**	**	**		**	**	**	**		**	**				**
	100	**					**					**				
II	0															
	25	*					**					**				
	50	**	**				**	**				**	**			**
	75	**	**	**		**	**	**	**		**	**	**			**
	100	**	*				**	**				**	**			
III	0															
	25						*					*				
	50	**	*				**	**				**	*			
	75	**	**	**		**	**	**	**		**	**	**	*		*
	100	**	**	**			**	**	**			**	*			

** 1% Level of significance, * 5% Level of significance

따라서 급냉 제강 슬래그 대체하는 것은 압축강도를 증진시키는 것이 확인되었다.

급냉 제강 슬래그 대체율 25%, 50%, 75% 및 100% 상호간의 압축강도 유의성을 검토하면, 시리즈 I에서는 재령 28일을 기준하여 대체율 25%, 50%, 75%는 서로 상호간에 유의한 영향은 없고, 대체율 100%와는 유의한 영향을 보이고 있다. 즉 재령 28일에는 대체율 25%, 50%, 75%간의 압축강도 차이는 없고, 대체율 100%보다는 압축강도가 높게 나타나는 것이 검증되었다.

시리즈 II에서는 재령 28일에 급냉 제강 슬래그 대체율 50%와 75%, 상호간을 제외하고, 모두 유의한 영향을 보이고 있다. 시리즈 III에서는 재령 28일에 급냉 제강 슬래그 대체율 50%와 100% 상호간을 제외하고, 모두 유의한 영향을 보이고 있다.

4. 결 론

급냉 제강 슬래그 잔골재 대체율에 따른 모르타르의 유동성 및 압축강도 특성에 관한 연구에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 급냉 제강 슬래그의 입형이 강모래보다 구형에 가깝고 흡수율이 적기 때문에 대체율 75%까지는 대체율이 증가할수록 동일 물-시멘트비에서는 모르타르의 유동성을 증가시키고, 동일 유동성을 확보하기 위한 고성능감수의 첨가율 및 물시멘비는 감소시키는 것으로 나타났다.

- 2) 급냉 제강 슬래그 대체율 75%까지는 대체율이 증가할 수록 모르타르의 유동성 향상, 고성능감수제 첨가율 및 물-시멘트비의 감소효과에 의해 압축강도가 증가 되는 경향을 보이고 있다.
- 3) 본 실험의 결과를 분산분석 후, F검정을 실시한 결과 강 모래에 대한 급냉 제강 슬래그의 대체율이 유의수준 1%내에서 유동성 향상, 고성능감수제의 첨가율 및 물-시멘트비의 감소, 그에 따른 압축강도 증진에 영향을 미치는 것으로 검증되었다.
- 4) 최소유의차 분석결과 급냉 제강 슬래그 대체율 75%에서 가장 우수한 유동성과 압축강도 발현을 보이는 것이 검증되었으며, 강모래를 사용한 것보다 약 80%의 유동성 향상, 약 14%의 물-시멘트비 감소, 24~70%의 압축강도 증진효과가 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 (주)에코마이스터가 연구비를 지원하고, 한국 전력연구원과 공주대학교 자원재활용신소재 연구센터(RRC/NMR)가 공동으로 수행한 연구의 일부로 관계기관에 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會九州支部, “各種産業廢棄物のコンクリート用材料としての適用性に關する購習會”, 日本コンクリート工學協會九州支部, Nov. 2000, pp.41~71.
2. D.G. Montgomery and G. Wang, “Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete - Strength Related Properties,” *Cement and Concrete Research*, Vol.21, 1991, pp.1083~1091.
3. D.G. Montgomery and G. Wang, “Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete - Fracture Related Properties,” *Cement and Concrete Research*, Vol.22, 1992, pp.755~760.
4. 森野 奎二ほか 3人, “電氣爐酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの諸性質”, *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol.16, No.1, 1994, pp.319~324.
5. 高橋達人, “新材料としての製鋼スラグ炭酸固化體”, *コンクリート工學*, Vol.38, No.2, 2000, pp.3~9.
6. 오옥수의 2인, “제강 슬래그 내의 지금 회수방법”, 특허청, 특허등록번호 10-0098062-0000. 1996.
7. KSA 한국표준협회, “KS F 2535 도로용 철강 슬래그”, KS 핸드북, 한국표준협회, 2002.
8. 박성현, “현대실험계획법”, 민영사, 2003.

요 약

제강 슬래그는 제강 공정에서 발생하는 부산물로서 주로 에이징 한 후 도로용 노반재로 사용된다. 제강 슬래그내에 포함된 free-CaO와 물과의 반응하여 체적팽창을 일으키기 때문에 공기중에 장시간 에이징 하는 것이 필요하다. 이러한 문제 때문에 제강 슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하는데 어려움이 있다. 그러나, 본 연구에서는 고온의 용융상태에서 고속공기로 뽑아 급냉시킨 제강 슬래그를 사용하였다. 이와 같이 급냉시키는 방법은 제강 슬래그내의 free-CaO의 생성량을 저감시킨다. 본 연구에서는 통계적 실험계획법 중 일원배치법을 이용하여 급냉 제강 슬래그 대체율이 플로우, 고성능감수제의 첨가율, 물-시멘트비 및 압축강도 등 모르타르의 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 또한, 이들 데이터를 분산분석 후 F-검정을 실시하여 급냉 제강 슬래그가 모르타르의 특성에 유의한 영향을 주고 있는 지를 검증하였다. F-검정결과 유의수준 1%내에서 급냉 제강 슬래그 대체율이 증가할수록 모르타르의 플로우 증가, 고성능감수제 첨가율 및 물-시멘트비의 감소, 압축강도의 증진에 크게 영향을 미치는 것을 검증하였다. 또한, 유동성 및 압축강도를 고려할 때 강모래에 대하여 급냉 제강 슬래그 대체율 75%를 사용하는 것이 가장 우수한 유동성과 압축강도 발현하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 급냉 제강 슬래그, 통계분석, 플로우, 압축강도, 고성능감수제 첨가율, 물-시멘트비