

스마트 고로슬래그 미분말을 첨가한 시멘트 모르타르의 초기 압축강도 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Early-age Compressive Strength of Smart BFS Powder Added Cement Mortar

이 성 태^{1)*}
Yi, Seong Tae

노 재 호²⁾
Noh, Jae Ho

김 진 형³⁾
Kim, Jin Hyung

이 강 진⁴⁾
Lee, Kang Jin

Abstract

In this study, to improve the early-age compressive strength of mortar, the compressive strength tests of mortar mixed smart BFS powder added powder of rapid setting additives milled by processing, using functional grinding aid, the power-typed rapid setting cement clinker developed by sintering industrial waste and by-products with much $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ to cement were performed. From the tests, the followings are found that (1) for BFS early-age strength improvement test (Series I): early-age strength improvement of BFS mixed rapid setting additive milled after adding functional grinding aid, when the clinker is milled, is superior and (2) for OPC early-age strength improvement test (Series II): case of additive mixed rapid setting powder typed activator milled after adding functional grinding aid to Clinker-C showed the higher compressive strength.

Keywords : SMART blast furnace slag powder, Early-age, Compressive strength, Mortar

1. 서 론

저탄소 녹색성장이라는 국가 환경정책의 추진에 따라 건설산업 분야에서 발생하는 CO_2 가스 발생량을 저감시키기 위한 노력으로 국내뿐만 아니라 세계적으로 많은 연구와 적용이 진행되고 있다. 또한, 선철의 제조과정에서 발생하는 고로슬래그 (Blast Furnace Slag, BFS) 미분말을 시멘트 대체재로 사용하는 것은 산업부산물을 활용하는 유효한 방안의 한 가지로 이전부터 널리 이용되어지고 있으며 최근 이를 더욱 활성화하는 연구 (Shi et al., 2011; Yang and Song, 2007) 가 국내 및 국외에서 활발히 진행되고 있다.

그러나 보통포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland Cement, OPC)를 대체하기 위하여 상용적으로 널리 사용되는 분말도 값인 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 정도의 BFS 미분말을 혼입한 콘크리트는 초기재령에 압축강도가 저하한다는 단점때문에 건설분야에서는 공기지연의 문제를 발생시킬 수 있으므로 그 사용이 제

한되고 있는 실정이다.

이러한 BFS 미분말을 혼입한 콘크리트의 초기강도 발현의 지연에 따른 문제를 해결하기 위해 알칼리 활성화 슬래그 (Alkali-activated Slag: AAS)와 칼슘설포알루미네이트 (Calcium Sulpho Aluminate: CSA) 등으로 시멘트의 수화 초기에 다량의 에트링자이트 (ettringite)의 생성을 유도하여 초기강도를 향상시키는 등의 다양한 연구 (Han et al., 2006; Kim et al., 2012c; Kim and Hahm, 2012)가 수행되어 왔다.

알칼리 활성화제를 사용하여 BFS 미분말을 자극하여 초기의 강도를 증진하는 것에 대해서는 해외 연구자 (Bilim and Atis, 2012)와 국내연구자 (Kim et al., 2012a; Kim et al., 2011) 등에 의해 많은 연구가 진행되고 있으나 이는 BFS 미분말을 자극하여 초기강도의 증진을 실시하는 것으로 아직 배합방법과 양생조건 등의 기준정립이나 이에 대한 적용이 이루어지지 않고 있으며, 경제적인 측면에서도 아직은 상용화가 어렵다고 판단된다. 또한 3일과 7일을 대상으로 하는

1) 정희원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수, 교신저자
2) 정희원, (주)제이엔티아이엔씨 대표이사
3) 정희원, 한양대학교 건축환경공학전공 석·박사통합과정
4) 정희원, 영진글로벌(주) 기술연구소장

* Corresponding author : yist@inhac.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

초기재령에서의 강도향상에만 효과적이고 28일 재령에 대하여는 효과가 밝혀진 바 없다. 따라서, 거푸집의 탈형시기를 고려하여 OPC 100%를 사용한 콘크리트와 전체 재령에서 동등 이상의 압축강도를 발현시킬 수 있는 BFS 미분말의 활성화에 대한 연구가 반드시 필요한 실정이다.

이에 산업폐기물과 산업부산물을 원료로 하여 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 주성분의 속경성 분말을 소성하고 미분쇄한 후, 여기에 시멘트의 수화를 촉진하기 위해 BFS 미분말과 혼합한 Smart BFS 미분말을 만든 다음, 시멘트와 혼합하여 슬래그 시멘트를 제조하였으며 이 슬래그 시멘트를 이용하여 모르타르의 초기강도를 증진시키고 경제성을 확보하려는 연구 (Song and Cheon, 2002; Kim et al., 2012b)도 실시되었다.

본 연구에서는 기능성 분쇄조제를 첨가하여 상기의 속경성 클링커를 분쇄한 속경재를 혼합한 BFS 미분말 (이하 스마트 BFS 미분말이라 함)을 사용한 시멘트 콘크리트의 초기 및 28일 압축강도가 OPC를 100% 사용한 시멘트 콘크리트와 동등 이상으로 확보하기 위한 실험적 연구를 실시하였다.

2. 실험 계획

2.1 실험계획 및 연구방법

기존 철근콘크리트 구조체에서의 공기단축 기술로는 조강형 혼화제와 조강시멘트를 사용한 콘크리트의 조기강도 향상기술 등을 활용하고 있다. 본 연구에서는 BFS 미분말을 혼합함으로써 초기재령 (1일, 3일)에서의 압축강도 향상에 의한 공기를 단축하기 위해 산업폐기물과 산업부산물을 적극적으로 활용하였다. 즉, OPC를 자극하고, BFS 미분말을 자극하는 소성분말을 개발하는데 그 목적을 두었다. 실험으로는 BFS 미분말을 자극시키는 분말형 자극제의 선정 실험 (Series I)과 시멘트를 자극시키는 분말형 자극제의 선정 실험 (Series II)을 실시하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 BFS 미분말

BFS 미분말은 콘크리트용 BFS 미분말 규정 (KS F 2563)을 만족하는 국내 A사의 BFS 미분말 3종을 사용하였으며, 분말도는 4241 (cm²/g) 밀도는 2.90 (g/cm³)이었다. 무수석 고로는 혼합되지 않은 BFS 미분말을 사용하였으며, 특성은

Table 1과 같다.

2.2.2 시멘트

시멘트는 포틀랜드 시멘트 규정 (KS L 5201)에 만족하는 국내 B사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 2와 같다.

2.2.3 분말형 자극제

산업부산물 및 산업폐기물을 혼합하여 전기로에서 600°C~1350°C의 온도로 소성하여 속경성 시멘트 클링커를 제조하였으며 Table 3은 소성된 속경성 클링커의 화학성분을 나타낸다.

또한 속경성 클링커를 실험용 볼 밀 (ball mill)로 분쇄하여 분말도 약 4200cm²/g의 속경성 시멘트계 혼합재를 제조하였다.

2.2.4 기능성 분쇄조제

기능성 분쇄조제는 Fig. 1에 나타낸 IR Spectrum에 나타낸 작용기를 갖는 화합물로 구성되었으며 물리적인 물성은 Table 4와 같다.

Table 1 Characteristics of ground blast furnace slag powder Type III

item	chemical composition (%)				density (g/cm ³)	blaine value (cm ² /kg)
	MgO	SO ₃	ig. loss	CL ⁻		
KS	≤ 10.0	≤ 4.0	≤ 3.0	≤ 0.02	≥ 2.80	4000~6000
test result	5.59	0.06	0.03	0.002	2.90	4241

Table 2 Physical properties of OPC

item	blaine value (cm ² /g)	initial set (min)	final set (hr)	autoclave (%)	compressive strength (MPa)		
					3day	7day	28day
KS	≥ 2800	≥ 60	≤ 10	≤ 0.8	≥ 12.7	≥ 19.6	≥ 28.4
test result	3300	200	5.5	0.08	30	42	58

Table 3 Chemical compositions of rapid set typed cement clinker (unit: %)

sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
Clinker-A	2.1	0.7	1.0	39.2	0.5	54.3	0.1	1.7
Clinker-B	0.5	0.3	0.2	96.7	1.9	0.1	0.0	0.0
Clinker-C	47.6	39.7	5.4	1.0	1.6	0.6	2.2	0.6

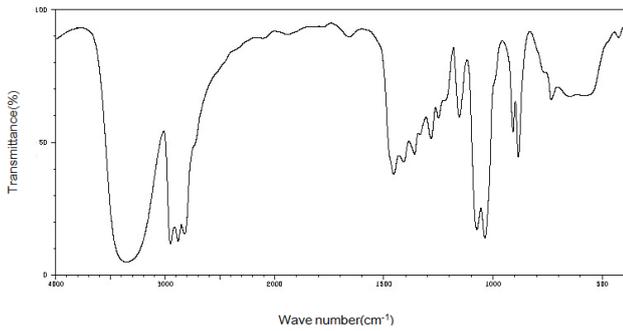


Fig. 1 IR Spectrum of functional grinding aid

Table 4 Physical properties of functional grinding aid

item	test result	remark
color	light yellow	-
specific gravity	1.12	at 25°C
pH	8.5	-
typical viscosity	25 cps	at 25°C

2.2.5 잔골재

잔골재로는 KS L ISO 679 규정에 적합한 시멘트 강도 시험용 표준사를 사용하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 소성과정 및 시료의 화학성분

Fig. 2는 속경형 클링커의 제조과정을, 그리고 Table 5는 혼합 소성된 시료의 화학성분을 나타낸다.

2.3.2 분쇄 및 기능성 분쇄조제 첨가

Table 5에 나타난 혼합 소성된 시료를 OPC 자극제와 BFS 자극제로 구분하여 기능성 분쇄조제를 0.05 wt%와 0.1 wt% 씩 각각 첨가하여 분쇄하였다. Fig. 3에는 기능성 분쇄조제를 첨가하여 분쇄한 시료와 첨가하지 않고 분쇄한 시료의 분말 상태를 사진으로 비교하였다.

Table 6에 나타난 것과 같이 기능성 분쇄조제를 첨가한 시료와 첨가하지 않은 시료의 분쇄시간을 이용해 분쇄효율을 측정하고, 시료의 강도 발현성능을 평가하기 위해 분말도는

Table 5 Chemical compositions of rapid set clinkers

(unti: %)

sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC activator	8.0	7.2	2.4	51.7	3.7	23.2
BFS activator	12.9	11.8	2.4	44.6	1.2	24.8



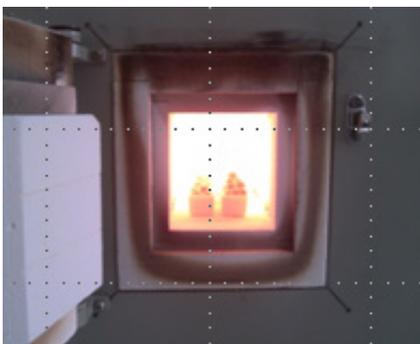
(a) mixing with water



(b) preparing as ball type



(c) putting mixtures into furnace



(d) sintering at 600°C~1350°C



(e) quenching clinkers



(f) milling of clinkers

Fig. 2 Preparation of the rapid set additives



(a) without functional grinding aid



(b) with functional grinding aid

Fig. 3 Powder status of samples with and without grinding aid

Table 6 Milling time and blaine value of rapid set additives with dosages of functional grinding aid

sample	dosage of functional grinding aid (wt%)	milling time of ball mill (min)	blaine (cm ² /g)
OPC activator-A	-	45	4180
OPC activator-B	0.05%	22	4190
OPC activator-C	0.1%	10	4220
BFS activator-A	-	38	4230
BFS activator-B	0.05%	19	4180
BFS activator-C	0.1%	8	4220

약 4200cm²/g 정도로 동일하게 제조하였다.

2.3.3 배합

모르타르의 혼합에서 W/C는 50%로 고정하고 시멘트와 잔골재를 1:3의 중량비로 하여 KS L ISO 679에 따라 혼합 및 제작하였으며, 3개의 실험체를 한 조로하여 재령별로 실험을 실시하였다. 이때 매회 사용되는 재료는 시멘트, 모래 그리고 물이 각각 450g±2g, 1350g±5g 그리고, 225g±1g이었다.

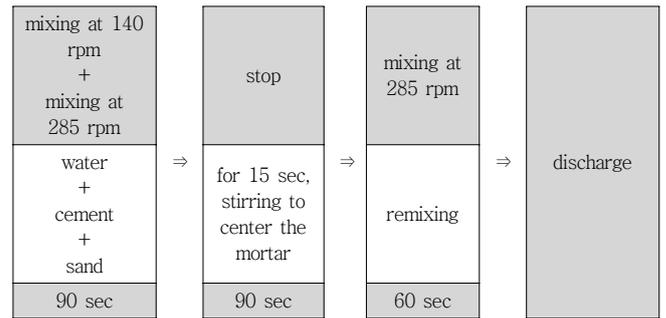


Fig. 4 Mixing method of mortar (KS L ISO 679)

2.3.4 혼합 및 공시체의 양생

조합된 각 시료의 모르타르는 Fig. 4와 같은 과정으로 혼합하였다. 공시체는 40mm×40mm×160mm의 각주로 하였으며, 공시체의 양생은 항온항습실 (온도 20℃, 상대습도 약 95%)에서 실시하였다.

2.4 압축강도의 측정

압축강도 실험은 KS L ISO 679에 따라 실시하였다. 초기 압축강도를 중점적으로 검토하기 위해 1일과 3일에서의 강도를 확인했다. Fig. 5는 압축강도를 구하기 위한 실험전경을 나타낸다.

3. 실험결과

3.1 Series I (BFS 조기강도 향상 실험)

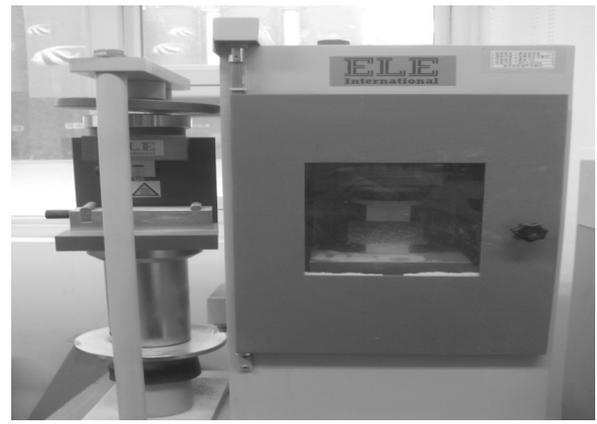
Table 7과 Fig. 6에는 BFS (93%)+ NaOH (7%)를 사용한 경우의 압축강도와 각각의 BFS 자극제와 소성된 분말형 자극제를 사용한 경우의 압축강도를 비교하였다. BFS-1~3에서는 분쇄시 기능성 분쇄조제를 첨가하지 않았고 BFS-4~6에서는 기능성 분쇄조제를 첨가하여 BFS 자극제를 분쇄하였다.

Clinker-A 분말을 첨가한 BSF-1의 경우, 초기재령인 1일과 3일에서 다량의 SO₃ 함유량으로 인해 응결지연 작용이 발생된 것으로 사료되며 7일 재령에서는 지속적인 SO₃의 공급으로 기준 BFS (93%)+ NaOH (7%)의 압축강도 결과 값과 유사한 결과를 나타내었다. Clinker-C의 경우, SiO₂의 함유량이 (47.6%)이 높아 단독으로서는 BFS에 대한 자극제의 역할을 하지 못하고 응결이 일어나지 않았다.

클링커 분쇄시 기능성 분쇄조제가 첨가되어 분쇄된 분말형 속경재가 BFS와 혼합된 경우의 초기강도 발현은 BFS 자극제로 사용된 NaOH 첨가의 경우와 비교하여 강도의 발현



(a) measuring machine of compressive strength



(b) compressive strength test of mortar

Fig. 5 Compressive strength measurement of mortar

Table 7 Mixing ratio of mortar series I test (Unit: weight %)

Mix. No.	BFS	Clinker-A	Clinker-B	Clinker-C	NaOH
BFS	-	-	-	-	7
BFS-1	7	-	-	-	-
BFS-2	-	7	-	-	-
BFS-3	-	-	7	-	-
Mix. No.	93	BFS activator-A	BFS activator-B	BFS activator-C	-
BFS-4	7	-	-	-	-
BFS-5	-	7	-	-	-
BFS-6	-	-	7	-	-

Table 8 Mixing ratio of mortar series II test (Unit: weight %)

Mix. No.	OPC	BFS	Clinker-A	Clinker-B	Clinker-C
OPC	100	-	-	-	-
OPC-1	70	23	7	-	-
OPC-2			-	7	-
OPC-3			-	-	7
Mix. No.	OPC	BFS	OPC activator-A	OPC activator-B	OPC activator-C
OPC-4	70	23	7	-	-
OPC-5			-	7	-
OPC-6			-	-	7

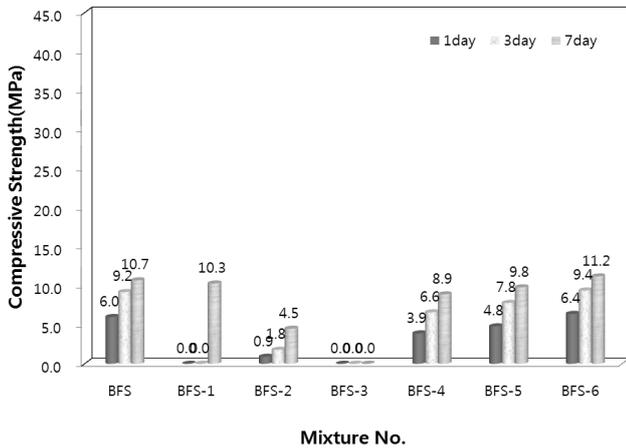


Fig. 6 Compressive strength of mortar using BFS activator

이 우수하여 기능성 분쇄조제가 첨가된 속경재 분말의 BFS 자극제로서의 사용이 유효한 것으로 확인되었다.

3.2 Series II (OPC 조기강도 향상 실험)

Table 8과 Fig. 7에서는 OPC를 100% 사용한 모르타르의 압축강도와 소성된 속경성 클링커를 분쇄한 분말형 OPC 자극제를 첨가한 모르타르의 압축강도를 비교하였다.

OPC-1~3에는 분쇄시 기능성 분쇄조제를 첨가하지 않았고 OPC-4~6에는 기능성 분쇄조제를 첨가하여 속경성 클링커 조성물을 분쇄하였다.

압축강도가 가장 높은 경우는 기능성 분쇄조제가 첨가되어 소성된 분말형 속경성 자극제로 나타났다. 특히 Clinker-C의 기능성 분쇄조제를 첨가하여 분쇄한 속경재 분말 7%와 BFS 미분말이 23%가 치환 혼합된 시멘트 모르타르의 압축강도는 초기재령에서 OPC 단독 사용의 경우보다 초기재령에서 더 우수한 강도발현성을 나타내어 기능성 분쇄조제를 첨가하여 분쇄된 분말형 속경재가 혼합된 BFS 미분말이 다량 사용된 경우도 모르타르의 초기재령에서 OPC와 동등 이상의 압축강도를 발현함을 확인하였다.

기능성 분쇄조제를 첨가하여 분쇄한 속경재를 7.0% 혼합

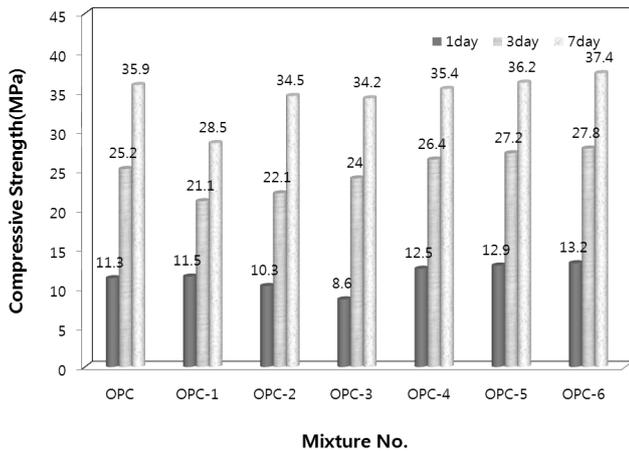


Fig. 7 Compressive strength of mortar using OPC activator

한 BFS 미분말을 OPC에 30.0%를 혼입한 모르타르 실험에서 OPC-6의 경우는 OPC와 비교하여 1일, 3일 그리고 7일에서 각각 116.8%, 110.3% 그리고 104.2%의 높은 압축강도를 발현했다.

4. 결론

BFS 미분말을 혼입한 콘크리트의 초기재령인 1일과 3일에서의 압축강도를 높여 아파트와 같은 건축구조물의 골조용 거푸집공사 시, 조기탈형을 통한 공사기간의 단축은 건설 분야에서 생산성향상을 위해 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 CaO-SiO₂-Al₂O₃가 다량 함유된 산업폐기물과 산업 부산물을 소성하여 개발된 분말형 속경성 시멘트 클링커를 기능성 분쇄조제가 처리하여 분쇄한 속경성 분말을 첨가한 스마트 BFS 미분말을 시멘트에 첨가한 모르타르의 압축강도 실험을 실시하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Series I (BFS 조기강도 향상 실험)

모르타르에서 초기재령인 7일까지, BFS에 NaOH를 자극제로 첨가한 경우와 비교하여 속경성 클링커 분말을 혼합한 경우, 모르타르 압축강도는 상당량 저하하나 클링커 분쇄시 기능성 분쇄조제가 첨가되어 분쇄된 속경재가 BFS와 혼합된 경우의 초기강도 발현은 BFS 자극제로 사용된 NaOH 첨가의 경우와 비교하여 더 우수하며 이로부터 기능성 분쇄조제가 첨가된 속경재 분말의 BFS 자극제로서의 사용이 유효함을 알 수 있었다.

(2) Series II (OPC 조기강도 향상 실험)

속경성 클링커 분쇄시에 기능성 분쇄조제를 첨가한 시료의 경우가 더욱 향상된 강도결과를 보였으며 또한 Clinker-A의 경우보다 Clinker-B 및 Clinker-C의 경우가 7일까지의 초기재령에서 우수한 압축강도 발현성을 나타내었다. 가장 압축강도가 높은 것은 Clinker-C의 기능성 분쇄조제가 첨가되어 분쇄된 속경성 분말형 자극제가 첨가된 모르타르로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 국토해양부 첨단도시개발사업 (과제번호 : 11첨단도시C06)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부이다.

참고문헌

1. Bilim Cahit, Atis Cengiz Duran, "Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag", Construction and Building Materials, vol. 28, No. 1, 2012, pp.708-712.
2. Han, C. G., Lee, M. H., Park, J. M., Pei, C. C., "Early Quality Improvement of Concrete Incorporating CSA Admixture", Journal of the architectural institute of Korea, vol. 22, No. 4, 2006, pp.127-134. (in Korean)
3. Kim, G. W., Kim, B. J., Yang, K. H., Song, J. K., "Strength Development of Blended Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Mortar", Journal of Korea Concrete Institute, vol. 24, No. 2, 2012a, pp.137-145. (in Korean)
4. Kim, J. H., Lee, H. S., Lee, K. J., "A Study on the Early Compressive Strength of Mortar with Ground Granulated Blast Furnace Slag Using the Plastic Deformation of Industrial Byproducts", Technological Advancements in Architecture, C-1-3, 2012b. (in Korean)
5. Kim, T. W., Hahm, H. G., "Mechanical Properties of the Alkali-Activated Slag Mortar with Gypsum", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 16, No. 3, 2012, pp.109-116. (in Korean)
6. Kim, T. W., Park, H. J., Seo, K. Y., "Influence of Blended Activators on the Physical Properties of Alkali-activated Slag Mortar", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 16, No. 6, 2012c, pp.26-33. (in Korean)
7. Kim, Y. S., Moon, D. I., Lee, D. W., "An Experimental Study on Alkali-Silica Reaction of Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag Mortars", Journal of Korea Institute Building Construction. vol. 11, No. 4, 2011, pp.345-352. (in Korean)
8. Shi Caijun, Jimenez A. Fernandez, Palomo Angel, "New

cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement”, Cement and Concrete Research, vol. 41, No. 7, 2011, pp.750-763.

9. Song, T. W., Cheon, S. M., “Formation and properties of clinker in the system CaO-Al₂O₃-SiO₂ Using wastes”, Journal of Advanced Materials. vol. 14, 2002, pp.107-111.

10. Yang, K. H., Song, J. G., “The Properties and Applications of Alkali-Activated Concrete with No Cement”, Magazine of

the Korea Concrete Institute, vol. 19, No. 2, 2007, pp.42-48. (in Korean)

Received : 12/28/2012

Revised : 01/25/2013

Accepted : 01/28/2013

요 지

본 연구에서는 CaO-SiO₂-Al₂O₃가 다량 함유된 산업폐기물과 산업부산물을 소성하여 개발한 분말형 속경성 분말을 초기강도의 향상을 위해 기능성 분쇄조제로 처리하여 분쇄한 속경성 미분말을 제조하였다. 이렇게 제조된 미분말을 BFS 분말과 일정비율로 혼합한 후, 시멘트에 첨가하여 모르타르 압축강도 실험을 실시하였다. 그 결과 BFS 초기강도 향상 실험 (Series I)에서는 클링커 분쇄시 기능성 분쇄조제가 첨가되어 분쇄된 속경재가 혼합된 BFS의 초기강도 발현이 우수하며 OPC 초기강도 향상 실험 (Series II)에서는 Clinker-C에 본 실험의 기능성 분쇄조제가 첨가되어 분쇄된 속경성의 분말형 자극제가 첨가된 경우에 가장 압축강도가 높은 사실을 알 수 있었다.

핵심 용어 : 스마트 고로슬래그 미분말, 초기, 압축강도, 모르타르
