

고유동 대량치환 슬래그 모르타르의 공학적 특성

배주룡¹, 김태완^{2*}, 김인태³, 김민정⁴

The Engineering Properties of High Fluidity mortar with High Volume Slag Cement

Ju-Ryong Bae¹, Tae-Wan Kim^{2*}, In-Tae Kim³, Min-Jeong Kim⁴

Abstract: This report presents the results of an investigation on the fundamental properties of mortars high fluidity high volume slag cement(HVSC) activated with sodium silicate(Na_2SiO_3). The ordinary Portland cement(OPC) was replaced by ground granulated blast furnace slag(GGBFS) from 40% to 80% and calcium sulfoaluminate(CSA) was 2.5% or 5.0% mass. The Na_2SiO_3 was added at 2% and 4% by total binder(OPC+GGBFS+CSA) weight. A constant water-to-binder ratio(w/b)=0.35 was used for all mixtures. The research carried out the mini slump, V-funnel, setting time, compressive strength and drying shrinkage. The experimental results showed that the contents of superplasticizer, V-funnel, setting time and drying shrinkage increased as the contents of CSA and Na_2SiO_3 increase. The compressive strength increases with and an increase in CSA and Na_2SiO_3 . One of the major reason for these results is the accelerated reactivity of GGBFS with CSA and Na_2SiO_3 . The maximum performance was CSA 5.0% + Na_2SiO_3 4% specimens.

Keywords: High fluidity mortar, High volume slag cement, Calcium sulfoaluminate(CSA), Sodium silicate

1. 서 론

국내외 건설환경은 구조물의 기능과 역할 등에 따라 높은 내구성에 대한 요구가 높아지고 있다. 이는 구조물의 기능과 안전성은 물론 유지보수의 관점에서 높은 내구성을 가지는 콘크리트의 개발과 시공기술의 확립이 중요해지고 있다. 특히 과거와 달리 점차 구조물의 형상이 복잡해지고 과밀한 철근 배근이나, 단면의 제약조건 등에 따라 설계와 시공의 어려움이 발생하고 있다. 더구나 최근의 콘크리트에 사용되는 재료인 골재의 수급문제와 시멘트 제조시 발생하는 이산화탄소, 고에너지를 소비하는 제조방식 등의 문제도 고려되어야 할 것이다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 여러 방안 중 충분한 내구성을 확보하고, 다양한 혼화재료를 사용하여 시공성과 경제성을 고려한 콘크리트 또는 시멘트의 연구개발이 진행되고 있는데 자기충전 콘크리트(self-compacting concrete, 이하

SCC) 또는 고유동 콘크리트(high fluidity concrete, 이하 HFC)가 그 중 하나이다. 이러한 콘크리트는 높은 유동성과 재료분리 저항성을 기본 특성으로 하여 다양한 형상의 콘크리트 구조물과 과밀한 철근 배근의 구조물을 비롯해 높은 수밀성과 고품질을 요구하는 구조물이 적용하려는 연구와 적용이 이루어지고 있다.

SCC 또는 HFC에 대한 선행 연구는 결합재, 골재, 혼화제 등에 따른 재료와 배합시간, 배합 특성 등의 방법, 그리고 유동특성, 건조수축, 수화열, 내구성, 압축특성 등에 대한 공학적 특성 등에 대한 많은 결과들이 언급되고 있다.

SCC를 구성하는 결합재에 대한 연구에는 다양한 혼화재료를 여러 혼합비율로 배합한 연구가 있다. 보통 포트랜드 시멘트(ordinary Portland cement: OPC), 플라이애시(fly ash: FA), 실리카 폼(silica fume; SF)을 이성분계(binary) 또는 삼성분계(ternary)로 혼합한 연구(Turk. K., 2012), OPC와 Coarse fly ash(CFA), Fine fly ash(FFA), Ultra fine fly ash(UFFA), metakaoline(MK) 그리고 silica fume(Ferraris et al., 2001)을 혼합한 연구도 수행되었다. OPC, blast furnace slag(BFS), FA 그리고 SF를 이성분계(binary) 또는 삼성분계(ternary) 연구(Park et al., 2005), 두 종류의 OPC, limestone powder(LSP) 그리고 natural pozzolan을 사용한 이성분계 배합(Hallal et al., 2010), OPC, FA, LSP, amorphous rice husk ash(RHA) 그리고 SF(Rizwan and Bier, 2012), OPC, natural pozzolan 그리고 marble powder

¹정회원, 부산대학교 건설융합학부 토목공학전공, 박사과정

²정회원, 부산대학교 건설융합학부 토목공학전공, 연수연구원, 교신저자

³정회원, 부산대학교 건설융합학부 토목공학전공, 교수

⁴학생회원, 부산대학교 건설융합학부 토목공학전공, 석사과정

*Corresponding author: ring2014@naver.com

Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

(Belaidi et al., 2012), OPC, red mud 그리고 FA(Liu and Poon, 2016), OPC, FA 그리고 LSP(Silva and Brito, 2015; Park et al., 2009; Libre et al., 2010), 7종의 국내 생산된 OPC(Choi et al., 2012), OPC와 GGBFS(Jang and Jee, 2013) 등 다양한 재료를 SCC의 배합을 구성하는 결합재로 사용하였다. 대부분의 연구에서 단일 재료 보다는 2종류 이상의 혼화재료를 혼합한 배합을 사용하였다. 이는 유동특성과 함께 결합재간 다른 특성이 상호 보완적인 효과로 인해 성능을 향상시키기 위한 목적이다. 또한 SCC를 구성하는 골재의 특성에 따른 연구도 수행되었는데, 잔골재(sand)의 영향(Benabed et al., 2012), 굵은골재의 흡수 특성(Choi et al., 2016), 굵은 골재와 잔골재의 입도(Kim et al. 2012)의 영향을 검토한 결과도 있다.

서로 다른 세 종류의 혼화제(superplasticizer)의 사용(Hallal et al., 2010), air-entrained superplasticizer, Viscosity enhancing agent(Safawi et al., 2005) 또는 Viscosity-modifying admixture (VMA)(Libre et al., 2010) 등을 사용한 배합의 특성, 배합시간의 증가에 따른 시멘트 입자의 응집과 초기유동성의 불안정성향 증가에 대한 연구(Mehdipour et al., 2013)가 있다. 각 배합에 따라 다양한 혼화제를 사용하고 있으며, 초기 유동 특성에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나로 언급되고 있다.

Mini-cone 실험을 통한 항복응력(yield stress)의 측정(Roussel and Leroy, 2005), 연구실(lab)과 현장(field)에서 측정할 수 있는 SCC의 유동성 측정 방법에 대한 설명(EFNARC, 2002; EFNARC, 2005)으로 SCC의 품질을 객관적으로 평가하기 위한 연구도 있다. 아직까지 SCC의 유동성을 정확하게 평가할 수 있는 최적의 방법은 없다. 많은 연구자들이 SCC의 유동성을 평가하는 적합한 방법을 찾기 위한 연구가 계속되고 있다.

SCC의 거꾸집 측압에 미치는 영향(Ko et al., 2015), 압축강도와 점성의 관계(Felkoğlu et al., 2006), 결합재의 종류와 배합에 따른 건조수축의 영향(Rizwan and Bier, 2012), 결합재의 종류와 배합에 따른 3수준의 강도변화를 가지는 SCC 제조를 위한 연구(Choi et al., 2009a), 3성분계 SCC의 압축강도와 수화열 관계(Choi et al., 2009b), OPC+LSP+FA의 3성분계 SCC의 염화이온 침투 성능에 관한 연구(Choi et al., 2010b), SCC를 적용한 PSC 거더의 균열분석(Lho et al., 2013) 등의 결과가 있다. 이를 통해 SCC를 사용할 때 고려되어야 하는 강도를 포함한 현장 적용성, 내구성 등에 대한 연구도 지속되고 있다. 일반적으로 SCC 또는 HFC는 높은 유동성을 가지면서 재료 분리에 저항할 수 있는 점성을 가진 콘크리트 배합에 관한 연구가 중심이다. 그러나 일부 연구자들은 골재의 영향을 최소화하고, 구조물의 보수보강과 다양한 활용성을 고려한 모르타르에 대한 연구도 수행하고 있다. 이를 통해 추후 골재의 특성을 고려한 SCC의 배합을 설계하는데 기초자료로 활용하고

자 하는 목적이다.

또한 기존의 대량치환슬래그 시멘트에 관한 연구결과들에서 초기강도 저하와 응결지연 등의 문제점을 해결하기 위해 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag, 이하 GGBFS)의 수화작용을 촉진하는 방법으로 다양한 활성화제를 사용한 연구결과들이 발표되어 있다. GGBFS를 100% 사용한 알칼리 활성화 슬래그 시멘트(alkali-activated slag cement; AASC)에 대한 연구에서 사용되는 활성화제로 liquid sodium silicate(LSS), sodium hydroxide(SH) 그리고 sodium carbonate(SC) (Atiş et al., 2012)가 있다. 다양한 비율로 GGBFS를 치환한 OPC-GGBFS 시멘트의 활성화제로 sodium silicate를 사용하고(Bilim and Atiş, 2012), high volume slag cement에 경석고(anhydrite)와 황산나트륨(sodium sulfate, Na_2SO_4)를 단독 또는 혼합한 연구도 있다(Moon and Choi, 2015). OPC-GGBFS 시멘트에서 GGBFS를 80% 까지 치환하고 GGBFS의 분말도를 달리하여 수화반응을 고찰한 연구(Jeong et al., 2015)도 수행되었다. 이러한 시도는 GGBFS 치환에 따른 초기 유동특성, 강도 등의 성능 향상을 위한 것으로 주로 GGBFS의 수화작용 촉진을 위한 활성화에 초점이 맞춰져 있다.

선행연구를 바탕으로 슬래그를 대량 치환한 고유동 모르타르에 Na_2SiO_3 를 적용하여 기초특성을 파악하고 진행 중인 고유동 시멘트 관련 후속연구들의 자료로 활용하고자 한다.

본 연구는 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary Portland cement, 이하 OPC)의 40% 이상을 GGBFS로 치환한 대량치환슬래그 배합을 기본으로 하는 고유동 모르타르의 개발을 위한 실험적 연구이다. GGBFS를 40% 이상 치환함으로써 OPC의 사용량을 줄여 친환경적 특성을 고려하고, GGBFS의 치환에 따른 초기 강도 저하, 응결 지연 등의 특성을 고려한 혼화제의 사용과 유동특성을 살펴보고자 한다. 또한 Na_2SiO_3 를 혼합하여 GGBFS의 활성화를 통한 공학적 특성에 대해 알아보하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

실험에 사용된 OPC와 GGBFS 그리고 CSA의 성분은 XRF 분석을 통해 Table 1에 나타내었다. 잔골재는 조립률(F.M) 2.64, 표면건조포화상태 밀도 2.61 g/cm^3 의 강모래를 사용하였다.

또한 GGBFS의 수화작용을 촉진하기 위해 사용된 활성화제는 Na_2SiO_3 (sodium silicate, Ms = 2.0, liquid type)이다. 활성화제는 배합 전에 배합수에 미리 일정 농도를 계량하여 혼합한 뒤 사용하였으며, 농도는 결합재(binder) 질량의 2%와 4%이다. SCC mortar의 적용시 과도한 건조수축으로 인한 균열 등을 방

Table 1 The chemical properties of OPC, GGBFS and CSA

	Chemical components(%)						Density (g/cm ³)	Fineness (m ² /kg)	Ig-loss (%)	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O				SO ₃
OPC	21.32	5.61	3.12	3.94	61.72	0.79	2.51	3.15	330	2.31
GGBFS	35.30	12.58	0.79	3.19	41.30	0.63	4.75	2.84	420	0.32
CSA	4.85	13.46	0.27	1.13	49.84	-	29.17	2.95	250	2.36

지하기 위해 Ca계 팽창제인 Calcium Sulfoaluminate(이하 CSA)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 혼화제(superplasticizer)는 Polycarboxylate계의 고성능 유동화제로 밀도는 1.04 ± 0.05 (20°C기준) g/cm³, pH 5.0±1.5의 옅은 갈색의 액체이다.

2.2 실험계획

OPC의 질량에 대해 GGBFS를 40%, 60% 그리고 80% 치환하였으며, CSA를 혼합하는 경우 OPC의 질량에 대해 2.5%와 5.0% 치환하였다. 결합재와 잔골재는 질량비로 1 : 1의 비율로 하였다. 물결합재 비(W/B)는 0.35로 하였다. 자세한 배합비는 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서는 GGBFS가 OPC의 질량에 대해 40%, 60% 그리고 80% 치환되는 배합이다. 따라서 GGBFS의 수화작용을 촉진시키기 위한 방법 중 활성화제를 사용한 방법을 선정하고 Na₂SiO₃를 활성화제로 투입하였다(Atiş et al., 2012; Bilim and Atiş, 2012). 또한 기존의 두 가지 이상의 재료를 혼합한 결합재를 사용한 SCC 배합에서 사용되지 않았던 CSA를 사용하여 건조수축과 OPC-GGBFS의 수화반응을 촉진시키는 역할을 하고자 하였다. CSA의 경우, 선행 예비실험을 강도, 응결 등의 특성을 측정하여 5%이하의 혼합 범위를 선정하였다.

CSA 또는 Na₂SiO₃가 혼합되지 않고 단지 OPC와 GGBFS만 혼합된 배합(S0, S4, S6, S8)을 비교군으로써 control로 하였다. 각각의 치환비율과 혼합률에 따라 재료를 준비하고 기본적인 배합순서와 시간은 KS L 5109에 제시된 방법으로 수행하고, 마지막 순서의 믹싱 후 저속으로 3분간 더 배합하였다. 이는 혼합되는 결합재와 고성능 유동화제의 충분한 혼합을 통해 균질한 배합을 얻기 위함이다.

배합 후 24h 동안 상대습도(relative humidity; RH) 90±5%, 온도 23±2°C의 항온항습기에 보관하였다. 그 다음 몰드를 제거하고 측정재령까지 동일한 습도와 온도 조건의 항온항습기에 보관하였다.

압축강도 시험은 50 mm×50 mm×50 mm 몰드를 사용하였고, 건조수축은 40 mm×40 mm×160 mm 몰드를 사용하였다. 응결시간 측정은 KS L 5103 방법으로, 미니슬럼프(mini slump)와 V-funnel 유하시간 시험은 EFNARC(2002)에 제시된 기기와 방법으로 수행하였다. 길이변화 측정은 KS F 2424

Table 2 Mix Properties

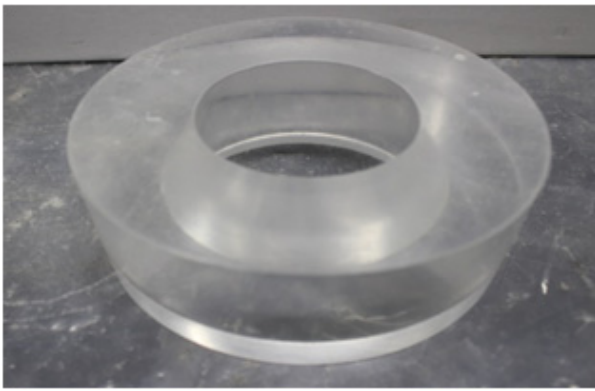
Level	Ratio(wt %)			
	OPC	GGBFS	CSA	Na ₂ SiO ₃
S0	100			
S4	60	40		
S6	40	60		
S8	20	80		
S4C2	57.5	40	2.5	
S6C2	37.5	60	2.5	
S8C2	17.5	80	2.5	
S4C5	55.0	40	5.0	
S6C5	35.0	60	5.0	
S8C5	15.0	80	5.0	
N2S4C2	57.5	40	2.5	2
N2S6C2	37.5	60	2.5	2
N2S8C2	17.5	80	2.5	2
N4S4C2	57.5	40	2.5	4
N4S6C2	37.5	60	2.5	4
N4S8C2	17.5	80	2.5	4
N2S4C5	55.0	40	5.0	2
N2S6C5	35.0	60	5.0	2
N2S8C5	15.0	80	5.0	2
N4S4C5	55.0	40	5.0	4
N4S6C5	35.0	60	5.0	4
N4S8C5	15.0	80	5.0	4

의 다이얼게이지 방법에 따라 수행하였다. 길이변화는 배합에 따른 초기 건조수축 경향을 파악하기 위해 63일까지만 측정하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 미니슬럼프와 V-funnel 측정 장치이다.

3. 결과 및 토의

3.1 유동화제 사용량

본 연구에서는 SCC mortar를 기본 배합으로 하고 있으며 이



(a) Mini slump cone



(b) V-funnel

Fig. 1 Shape of Mini slump and V-funnel

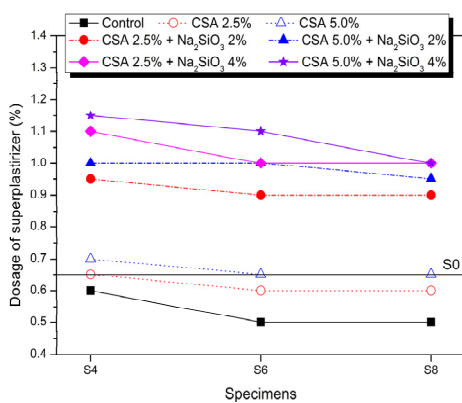


Fig. 2 Dosage of superplasticizer for each mixture

는 추후 균열부 보수보강, 철도 자갈도상의 콘크리트 도상화 등의 다양한 활용성을 고려하고자 하였다. 예비실험과 선행연구결과들을 참고하여 목표 유동성을 미니슬럼프 기준으로 280±10 mm가 되도록 하였다. 이는 콘크리트 구조물의 파손 및 균열 부위의 보수보강, 자갈도상의 콘크리트 포장화 등의 활용성을 고려하여 선정하였다. Fig. 2은 각 배합의 미니슬럼프를 280±10 mm로 유지하기 위해 사용된 혼화제의 양을 표시한 것이다.

모든 배합에서 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 목표 슬럼프를 얻기 위한 유동화제의 사용량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 OPC가 감소하고, 증가된 GGBFS는 OPC와 비교하여 상대적으로 느린 수화반응으로 인해 유동화제의 사용량이 감소하는 것으로 판단된다(Park et al., 2009). Jang and Jee (2013)의 실험에서 GGBFS를 0, 15 그리고 30% 치환한 고유동 콘크리트에서 동일 W/C비와 고성능 AE감수제를 혼합한 배합에서 GGBFS의 치환율이 증가하면 슬럼프 플로우도 증가하는 경향의 결과를 보였다. 또한 Jeong et al. (2015)의 대량치환 슬래그 시멘트에 대한 연구에서도 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 플로우

값이 증가하는 결과를 보였고 이러한 결과는 슬래그 입자의 형상이 비정형이지만 표면이 매끄러운 특성을 가지고 있어서 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 유동성이 향상된다고 하였다.

Han et al. (2009), Lee et al. (2000), Han et al. (2010)은 활성 화제를 사용하지 않은 대량치환슬래그 콘크리트의 플로우는 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 증가하는 유사한 경향을 보고하였다. 따라서 GGBFS의 치환율 증가는 상대적으로 단위부피당 OPC가 감소하여 수화반응이 낮아지는 효과와 GGBFS 입자의 형상에 따른 효과로 유동성이 증가한다.

CSA만 혼합한 시험체들과 CSA와 Na₂SiO₃를 함께 혼합한 시험체들 모두 control 시험체 보다 유동화제의 사용량이 증가하였다. 또한 CSA만 치환한 시험체들에서 CSA 치환율에 대한 유동화제 혼합량은 2.5% 보다 5.0% 치환한 시험체들이 목표 슬럼프를 얻기 위해 더 높은 유동화제 사용량을 나타내었다.

CSA와 Na₂SiO₃를 함께 혼합한 시험체들에서 동일 CSA 치환율에 대해 Na₂SiO₃ 혼합률이 2%에서 4%로 높아짐에 따라 유동화제 혼합량의 증가가 유사한 경향성을 보였다. 이는 CSA와 Na₂SiO₃의 혼합으로 인해 GGBFS의 수화작용이 향상되고, OPC의 응결도 촉진되었기 때문이다(Atiş et al., 2012; Bilim and Atiş, 2012).

특히 CSA 5.0% + Na₂SiO₃ 4% 시험체가 가장 높은 유동화제 사용량을 나타내었다. 따라서 OPC-GGBFS 배합에서 CSA와 Na₂SiO₃를 동시에 혼합할 경우 유동성저하가 크게 일어나 상대적으로 다량의 유동화제 사용이 필요하였다.

3.2 V-funnel 유하시간

Fig. 3은 V-funnel 유하시간 측정 결과이다. 유하시간 측정 결과 CSA 또는 Na₂SiO₃를 혼합하지 않은 control 배합의 경우 GGBFS의 치환율이 40%, 60% 그리고 80%로 높아짐에 따라

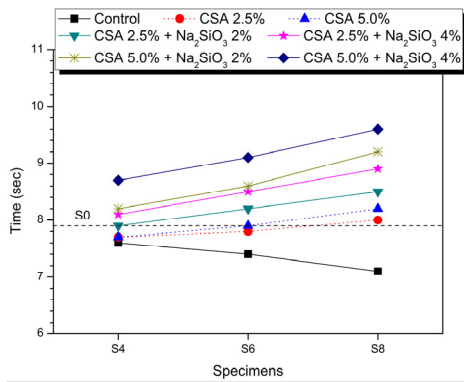
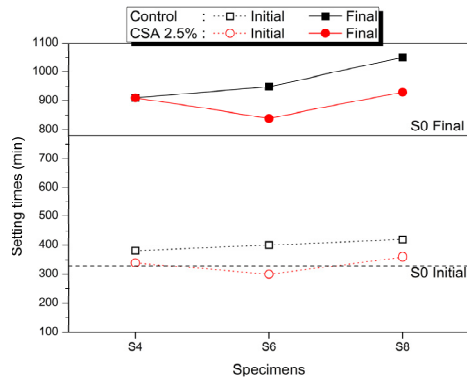
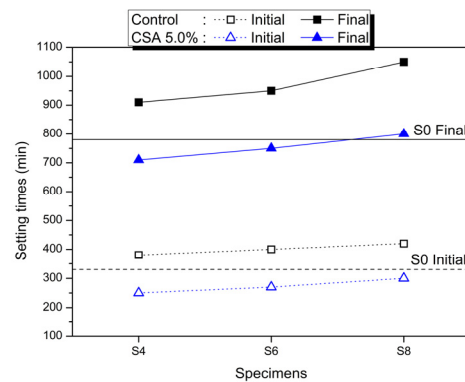


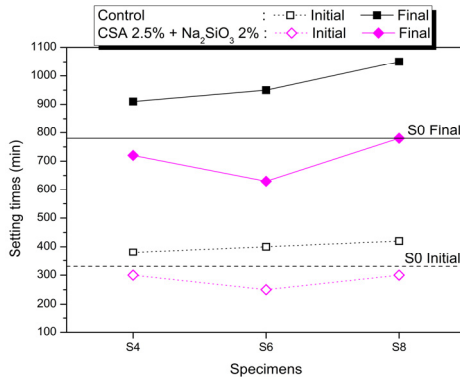
Fig. 3 Time of V-funnel test



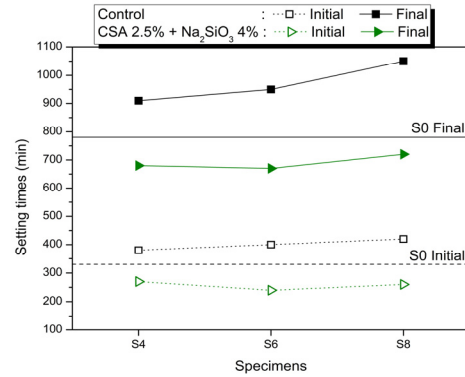
(a) CSA 2.5%



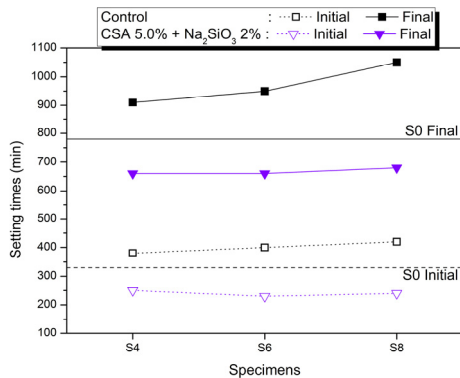
(b) CSA 5.0%



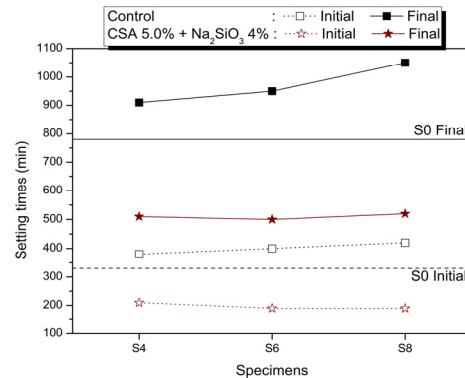
(c) CSA 2.5%+Na₂SiO₃ 2%



(d) CSA 2.5%+Na₂SiO₃ 4%



(e) CSA 5.0%+Na₂SiO₃ 2%



(f) CSA 5.0%+Na₂SiO₃ 4%

Fig. 4 Results of setting time

점차 유하시간이 감소하고 있다. 이는 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 상대적으로 OPC의 양이 감소하고 이는 수화반응이 늦어지고 반응생성물질의 양이 감소함에 따라 유하시간도 줄어든 것으로 판단된다.

Park et al. (2005)의 연구에서도 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 배합의 항복응력(yield stress)와 소성점도(plastic viscosity)가 감소한 결과를 보였다. 또한 Choi et al. (2009)의 연구에서 SG(blast furnace slag)의 혼합률이 높아질수록 slump flow가 다소 증가하고 V-funnel은 감소한다고 하였다. control 배합의 경우 선행 연구자들의 결과와 유사한 경향을 보인다.

그러나 CSA 또는 CSA + Na₂SiO₃를 혼합한 시험체들의 경우 GGBFS 치환율이 증가함에 따라 점차 유하시간이 증가하고 있었다. 이는 CSA와 Na₂SiO₃가 GGBFS를 활성화하여 초기 수화반응을 증가시켜 모르타르의 점성을 증가시키기 때문이다. 특히 Na₂SiO₃는 GGBFS의 수화작용 촉진하는 효과가 있다(Atiş et al., 2012; Bilim and Atiş, 2012).

CSA의 치환율이 2.5%에서 5.0%로 증가하고, Na₂SiO₃가 2%에서 4%로 증가하면 유하시간이 증가하였다. 특히 CSA만 사용한 배합보다 CSA + Na₂SiO₃의 배합들이 유하시간이 가장 길게 측정되었다. 따라서 GGBFS의 치환율이 높은 대량치환 슬래그 시멘트 모르타르의 초기 유동특성은 GGBFS의 활성화에 따라 조절할 수 있을 것으로 생각된다.

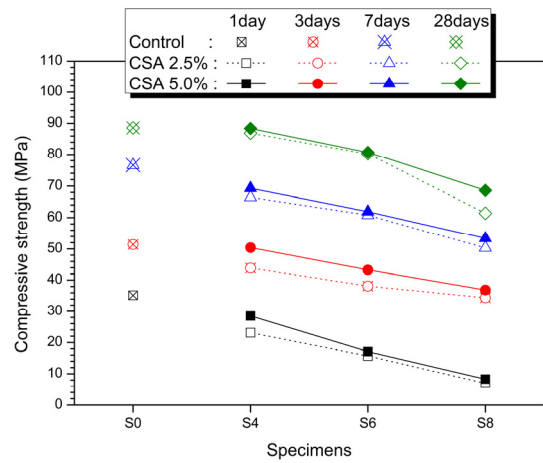
3.3 응결시간

Fig. 4는 응결시간을 나타내고 있다. control 시험체의 경우 OPC 100%인 S0 배합보다 증가한 초결과 종결 시간을 나타내었다. 또한 GGBFS의 치환율이 증가할수록 초결과 종결 시간은 점차 증가하였다. 그러나 CSA를 2.5%를 혼합한 시험체들은(Fig. 4(a)) 초결과 종결은 control보다는 감소하였지만 S0와 비교하여 초결은 유사하고 종결은 증가하였다. CSA 5.0%는(Fig. 4(b))은 S8의 종결만 S0 종결보다 다소 증가하였을 뿐 응결시간이 감소한 것으로 나타났다. CSA + Na₂SiO₃를 혼합한 시험체들(Fig. 4(c)~(f))은 모든 GGBFS 치환율에서 control과 S0보다 짧은 응결시간이 측정되었다. 이는 CSA와 GGBFS의 활성화를 촉진하여 수화반응을 증대시켜 반응생성물질의 생성이 증가하였기 때문이다(Atiş et al., 2012; Bilim and Atiş, 2012).

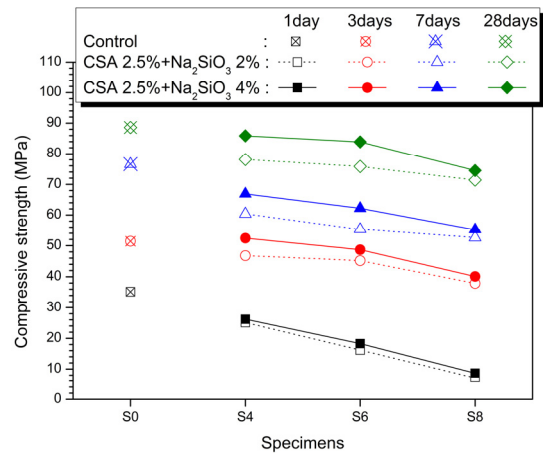
Jeong et al. (2015), Han et al. (2009), Lee et al. (2000), Han et al. (2010) 등은 활성화제를 사용하지 않은 대량치환 슬래그 시멘트의 연구에서 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가하면 응결시간이 증가하는 결과를 나타내었다. 활성화제를 사용한 대량치환슬래그 시멘트에 관한 선행연구에서 Moon et al. (2015)은 경석고와 황산나트륨을 활성화제로 사용한 대량치환슬래그 시멘트의 수화특성 연구에서 활성화제의 사용에 따라 응결시간이 감소한 결과를 보였다. 따라서 활성화제는 GGBFS의 수화반응을 촉진시켜 응결시간을 단축시키는데 효과적이지만 GGBFS 치환율, 적절한 농도의 활성화제 그리고 목표 유동성을 확보하기 위한 양질의 고성능 유동화제와 적정 양등의 종합적인 고려가 필요하다.

3.4 압축강도

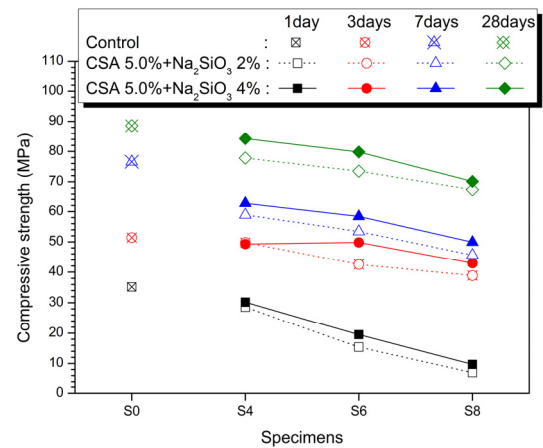
Fig. 5은 압축강도 측정결과를 보여주고 있다. 모든 시험체들의 압축강도는 GGBFS 치환율, CSA와 Na₂SiO₃의 혼합에 관계없이 S0보다 작게 측정되었다. GGBFS의 치환율이 증가



(a) CSA 2.5% and CSA 5.0% specimens



(b) CSA 2.5% + Na₂SiO₃ 2% and CSA 2.5% + Na₂SiO₃ 4% specimens



(c) CSA 5.0% + Na₂SiO₃ 2% and CSA 5.0% + Na₂SiO₃ 4% specimens

Fig. 5 Compressive strength of each mixtures

함에 따라 CSA와 Na₂SiO₃의 혼합양에 관계없이 모든 측정제령에서 강도가 점차 감소하고 있다. CSA만을 혼합한 시험체들(Fig. 5(a))에서 CSA 2.5%에서 CSA 5.0%로 증가할 때 강도 증가율과 비교하여 CSA + Na₂SiO₃를 혼합한 시험체들의

(Fig. 5(b), (c)) CSA 2.5%와 CSA 5.0% 간의 강도증가율이 더 크게 나타나고 있었다. 이는 Na_2SiO_3 가 CSA와 함께 GGBFS의 활성화 작용에 일부 기여하였기 때문으로 판단된다.

특히 Fig. 5(b)와 (c)에 나타난 CSA + Na_2SiO_3 의 시험체들은 1일 강도와 3일 강도의 차이가 CSA만 혼합한 시험체(Fig. 5(a))보다 크게 나타나고 있다. 따라서 CSA와 Na_2SiO_3 를 혼합하여 사용할 경우 강도 증가가 초기 3일까지가 가장 크게 나타났다. 활성화제를 사용하지 않은 경우 대량치환슬래그 시멘트의 강도는 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 감소한다.

Moon et al. (2015)은 경석고와 황산나트륨을 활성화제로 사용한 대량치환슬래그 시멘트의 수화특성 연구에서 활성화제의 사용에 의해 강도가 증가한 결과를 언급하였다. Bilim and Atiş (2012)는 GGBFS를 OPC 질량에 대해 0%, 20%, 40%, 60%, 80% 그리고 100% 치환한 시멘트를 액상 규산나트륨(liquid sodium silicate)으로 활성화한 연구에서 동일 활성화제 농도에서 GGBFS의 치환율이 증가하면 초기에는 강도가 감소하지만 재령이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 보였다. Acevedo-Martinez et al. (2012)은 GGBFS 치환율을 0%, 30%, 50%, 80%, 그리고 100%를 가지는 OPC-GGBFS 시멘트의 배합에서 활성화제로 Na_2SiO_3 를 사용한 강도결과에서 활성화제를 사용하지 않은 경우는 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 강도는 감소하였고, 모든 치환율에서 OPC 100% 시험체 보다 작았다. 그러나 활성화제를 사용한 경우는 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 점차 강도가 증가하고 있었다. 이는 활성화제의 농도가 높을수록 재령이 증가할수록 그리고 GGBFS의 치환율이 80% 이상일수록 확연히 나타나고 있었다.

그러나 본 연구에서는 Bilim and Atiş(2012)와 Acevedo-Martinez et al. (2012)의 결과처럼 재령 28일에서의 GGBFS 치환율의 증가에 따른 강도 증가는 나타나지 않았는데, 이는 본 연구에 적용된 Na_2SiO_3 농도가 선행연구들보다 낮았기 때문이다.

3.5 건조수축

Fig. 6는 각 시험체들의 63일까지 측정된 건조수축 결과 중 최종 63일에 측정된 건조수축만을 나타낸 것이다. 건조수축 정 결과 control의 경우 OPC 100%인 S0의 63일 최종건조수축은 -0.0031%였다. GGBFS를 치환한 모든 시험체들은 S0보다 작은 건조수축률이 측정되었다.

또한 CSA를 혼합한 시험체들의 건조수축이 감소한 결과도 확인할 수 있었다. 이는 CSA의 팽창작용에 의한 것으로 CSA 2.5%보다 CSA 5.0% 시험체들의 건조수축 감소가 더 크고, Na_2SiO_3 를 함께 혼합한 시험체들도 CSA의 치환율이 높을수록 건조수축의 감소가 더 크게 나타나고 있다. 따라서 CSA와

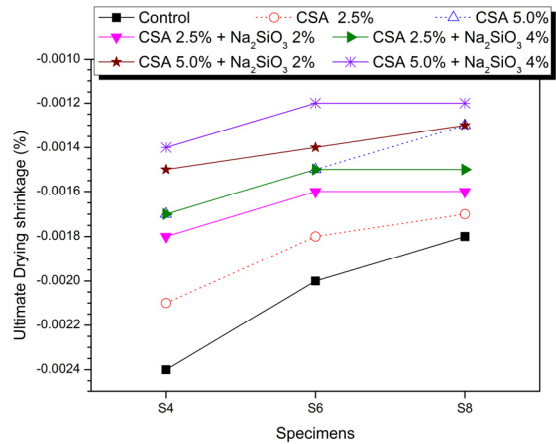


Fig. 6 Ultimated drying shrinkage

같은 팽창제를 일부 치환한다면 GGBFS의 치환율이 40% 이상인 대량치환 슬래그 시멘트에서도 건조수축률을 충분히 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

활성화제를 사용하지 않은 대량치환슬래그 콘크리트의 경우 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 건조수축은 증가한다 (Kim et al., 2015). 그러나 장기재령을 갈수록 GGBFS의 치환율이 높을수록 건조수축이 감소하는데 이는 GGBFS의 공극 체움효과로 수분증발이 어려워졌기 때문으로 판단하였다 (Kim et al., 2015).

활성화된 슬래그 시멘트의 건조수축에 대한 영향은 여러 가지가 있으며 그중 내부 공극양과 크기가 주요 영향요인으로 언급되고 있다. 본 연구에서 GGBFS의 치환율이 증가하면 건조수축이 감소하고 있는데, 이는 GGBFS를 활성화하면 시험체 내부의 모세관공극이 시간이 지남에 따라 활성화된 GGBFS의 수화반응생성물질들에 의해 감소하기 때문이다 (Kim et al., 2015).

4. 결론

고유동 대량치환 슬래그 모르타르의 기초특성에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미니슬럼프와 V-funnel 유하시간 측정을 통해 CSA와 Na_2SiO_3 를 혼합한 배합은 미니슬럼프가 감소하고 유하시간이 증가한 것을 확인하였다. OPC-GGBFS 배합에서 CSA와 Na_2SiO_3 를 사용하면 GGBFS의 수화작용을 촉진시켜 유동을 감소시킨다. 이러한 GGBFS 수화촉진 효과는 CSA와 Na_2SiO_3 를 단독으로 혼합한 경우보다 두 가지를 동시에 혼합할 경우 더 효과가 큰 것으로 나타났다.
- 2) 응결시간은 CSA와 Na_2SiO_3 를 혼합한 배합이 응결시간의

- 감소가 두드러지게 나타났다. CSA를 단독으로 사용한 배합보다 CSA와 Na₂SiO₃를 혼합하여 사용한 배합은 OPC 100% 배합(S0)보다 짧은 응결시간이 측정되었다. 특히 CSA 5.0% + Na₂SiO₃ 4% 배합은 가장 짧은 응결시간을 나타냈다. 그러나 재료의 품질, 배합의 변동, 시공성, 현장상황 등을 고려하여 과도한 응결시간 감소에 대응할 수 있는 고성능 혼화제(superplasticizer)의 사용을 검토하여야 한다.
- 3) 고유동 대량치환 슬래그 시멘트의 강도는 CSA만 치환한 경우보다 CSA와 Na₂SiO₃를 함께 사용한 배합의 강도향상이 크게 나타났다. CSA와 Na₂SiO₃의 혼합사용은 GGBFS의 수화작용을 영향을 미쳐 반응생성물질의 생성을 촉진하고 이는 강도 향상으로 나타난다. 특히 Na₂SiO₃는 GGBFS의 수화작용 촉진과 CSA는 내부 공극의 감소를 통한 조직의 치밀화 작용을 통해 강도 향상에 기여한다. 또한 충분한 목표 슬럼프를 확보 할 수 있는 범위 내에서 Na₂SiO₃의 농도를 증가시킨다면 선행연구들의 결과들처럼 높은 강도를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) CSA를 단독으로 사용한 배합과 CSA와 Na₂SiO₃를 혼합하여 사용한 배합 모두 63일 최종 건조수축이 감소하였다. 특히 CSA의 팽창작용과 Na₂SiO₃의 GGBFS 수화에 의한 반응생성물질들의 반응생성물질을 치밀하게 만들어 건조수축을 감소시키는 것으로 판단된다.

본 연구를 바탕으로 OPC-GGBFS 배합에서 응결시간을 더 단축시키고, 다양한 범위의 유동성을 가질 수 있으며, 목적에 맞는 적합한 수준의 강도등을 고려한 최적 Na₂SiO₃와 CSA의 혼합율의 연구와 함께 염해, 동결융해, 중성화 등의 내구성에 관한 실험이 이어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015R1D1A3A01019583).

References

- Acevedo-Martinez, E., Gomez-Zamorano, L.Y., Escalante-Garcia, J.I. (2012), Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: - Part 1: Effect of slag replacement and alkali concentration, *Construction and Building Materials*, 37, 462-469.
- Atis, C. D., Bilim C., Celik O., and Karahan O. (2012), Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 23, 548-55.
- Belaidi, A. S. E., Azzouz, L., Kadri, E., and Kenai, S. (2012), Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 31, 251-257.
- Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., and Kenai, S. (2012), Properties of self-compacting mortar made with various types of sand, *Cement & Concrete Composites*, 34, 1167-1173.
- Bilim, C. and Atis, C.D. (2012), Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, 28, 708-712.
- Choi, S. W., Jo, H. T., Ryu, D. H., and Kim, G.Y. (2012), An Experimental Study on the Influence of the Qualities of Ordinary Portland Cement on the Flowability of High Flow Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24, 37-44.
- Choi, Y. W., Choi, B. K., and Oh, S. R. (2016), Absorption Properties of Coarse Aggregate according to Pressurization for Development of High Fluidity Concrete under High Pressure Pumping, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(3), 122-129.
- Choi, Y. W., Jung, J. G., and Jung, W. Y. (2009a), Properties of mixing proportions with compressive strength level of high flowing self-compacting concrete, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers A*, 29(2A), 163-169.
- Choi, Y. W., Jung, J. G., Lee, J. N., and Kim, B. K. (2009b), Properties of hydration heat with compressive strength level of high flowing self-compacting concrete, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers A*, 29(5A), 531-541.
- Choi, Y. W., Kim, K. H., Park, S. J., and Jung, J. G. (2010a), High fluidity concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 22, 45-47.
- Choi, Y. W., Moon, J. H., and Eom, J. H. (2010b), Chloride Ion Penetration Properties of Normal Strength High-Fluidity Concrete Using Lime Stone Powder, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 14(4), 160-168.
- EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002.
- EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, 2005.
- Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., and Uyulgan, B. (2006), The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, *Cement and Concrete Research*, 36, 1719-1726.
- Ferraris C. F., Obla, K. H., Hill, R. (2001), The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 245-255.
- Hallal, A., Kadri, E. H., Ezziane, K., Kadri, A., and Khelafi, H. (2010), Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste, *Construction and Building Materials*, 24, 1418-1423.
- Han, C. G., Han, M. C., and Kim, S. W. (2010), Prediction of setting time of the concrete incorporating blast furnace slag with equivalent age method, *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 26, 71-78.
- Jang, H. O. and Jee, N. Y. (2013), An experimental study on the mixing of normal strength and high fluidity concrete using ground granulated blast furnace slag, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 29(6), 81-88.
- Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Choi, Y. C., Jung, S. H., and Kim, S. I. (2015),

- Effects of replacement ratio and fineness of GGBFS on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength high-volume ggbfs blended cement paste, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27, 115-125.
- Kim, B. J., Park, C. H., and Yi, C. K. (2015), Shrinkage properties and cracking of high-strength concrete containing high-volume blast furnace slag, *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 31, 51-58.
- Kim, S. C., Kim, Y. T., and Shin, D. C. (2012), Effects of aggregate grading on the performance of high-flowing concrete with general strength, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(6), 63-72.
- Ko, Y. K., Kim, C. H., Hwang, J. W., and Yi, S. T. (2015), Experimental study on lateral pressure characteristics of a formwork for high-flowable and high-strength concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(3), 130-138.
- Lee, S. S., Won, C., Kim, D. S., and Park, S. J. (2000), A study on the engineering properties of concrete using blast-furnace slag powder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 12, 49-58.
- Lho, B. C., Ahn, G. S., Kwak, and K. H. (2013), The analysis of crack in psc girder using high flowing concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(3), 126-135.
- Libre, N. A., Khoshnazar, R., and Shekarchi, M. (2010), Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 24, 1262-1271.
- Liu, R. X. and Poon, C. S. (2016), Effects of red mud on properties of self-compacting mortar, *Journal of Cleaner Production*, 135, 1170-1178.
- Mehdipour, I., Razzaghi, M. S., Amini, K., and Shekarchi, M. (2013), Effect of mineral admixtures on fluidity and stability of self-consolidating mortar subjected to prolonged mixing time, *Construction and Building Materials*, 40, 1029-1037.
- Moon, G. D. and Choi, Y. C. (2015), Hydration of high-volume GGBFS cement with anhydrite and sodium sulfate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27, 177-184.
- Moon, G. D., Kim, J. H., Cho, Y. K., and Choi, Y. C. (2014), Effect of anhydrite on the mechanical and durability properties of high volume slag concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2, 239-246.
- Park, C. K., Noh, M. H., and Park, T. H. (2005), Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, 35, 842-849.
- Park, S. J., Kim, K. M., and Sho, K. H. (2009), Effect of particle size distribution of binder on the fluidity of high flowing concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 25(8), 167-174.
- Rizwan, S. A. and Bier, T. A. (2012), Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars, *Construction and Building Materials*, 27, 398-403.
- Roussel, N., Stefani, C., and Leroy, R. (2005), From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, *Cement and Concrete Research*, 35, 817-822.
- Safawi, M. I., Iwaki, I., and Miura, T. (2005), A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete, *Cement and Concrete Research*, 35, 1834-1845.
- Silva, P. R. and Brito, J. (2015), Fresh-state Properties of Self-compacting Mortar and Concrete with Combined Use of Limestone Filler and Fly ash, *Materials Research*, 18(5), 1097-1108.
- Turk, K. (2012), Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume, *Construction and Building Materials*, 37, 326-334.

Received : 02/09/2017

Revised : 04/06/2017

Accepted : 07/27/2017

요 지 : 본 연구는 규산나트륨(Na_2SiO_3)으로 활성화된 고유동 대량치환슬래그 시멘트의 기초특성에 관한 연구이다. 고로슬래그 미분말(GGBFS)은 보통포틀랜드 시멘트(OPC)의 40%에서 80%까지 질량치환하고 칼슘설포알루미네이트(CSA)는 2.5%와 5.0% 치환하였다. 규산나트륨(Na_2SiO_3)은 전체 결합재(OPC+GGBFS+CSA) 질량의 2%와 4% 추가하였다. 모든 배합의 물-결합재 비(w/b)는 0.35이다. 본 연구에서는 미니슬럼프, V-funnel, 응결시간, 압축강도와 건조수축을 측정하였다. 실험결과 유동화제 양, V-funnel, 응결시간과 건조수축은 CSA와 Na_2SiO_3 가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 압축강도는 CSA와 Na_2SiO_3 가 증가함에 따라 증가하였다. 이러한 원인 중 하나는 CSA와 Na_2SiO_3 가 GGBFS의 활성화를 촉진하였기 때문이다. 최고의 성능을 나타낸 배합은 CSA 5.0% + Na_2SiO_3 4%를 혼합한 시험체이다.

핵심용어 : 고유동 모르타르, 대량치환슬래그 시멘트, 칼슘설포알루미네이트(CSA), 규산나트륨
