

고성능 하이볼륨 슬래그 시멘트 페이스트의 고로슬래그 미분말 분말도에 따른 수화 및 강도 특성

최영철¹, 신동철², 황철성^{3*}

Effect of Fineness of GGBS on the Hydration and Mechanical Properties in HIGH Performance HVGGBS Cement Paste

Young Cheol Choi¹, Dongcheol Shin², Chul-Sung Hwang^{3*}

Abstract: Recently, lots of researches on concrete with high volume mineral admixtures such as ground granulated blast-furnace slag(GGBS) have been carried out to reduce greenhouse gas. The high volume GGBS concrete has advantages such as low heat, high durability, but it has a limitation in practical field application, especially low strength development in early ages. This study investigated the compressive strength and hydration characteristics of high performance and volume GGBS cement pastes with low water to binder ratio. The effects of fineness(4,330 cm²/g, 5,320 cm²/g, 6,450 cm²/g, 7,650 cm²/g) and replacement(35%, 50%, 65%, 80%) of GGBS on the compressive strength, setting and heat of hydration were analyzed. Experimental results show that the combination of high volume slag cement paste with low water to binder ratio and high fineness GGBS powder can improve the compressive strength at early ages.

Keywords: GGBS, Compressive strength, Fineness, Heat of hydration

1. 서 론

건설산업에서 주요 핵심 재료인 시멘트는 석회석, 점토 등의 원재료를 약 1,450°C에서 소성하는 공정이 필요하기 때문에 1톤 생산 시 0.73~0.99톤의 CO₂가 발생하게 된다. 시멘트 산업은 발전분야 다음으로 가장 많은 CO₂를 배출하는 분야로, 매년 세계 CO₂ 발생량의 약 7%인 1.9GT CO₂를 배출하고 있으며 약 9.6EJ의 에너지를 소비하고 있다(Li et al., 2013). 이와 같은 대표적 CO₂ 다배출, 에너지 다소비 산업인 시멘트 분야에서는 지구환경보존을 위해 다양한 정책과 기술 개발을 위해 노력하고 있다.

미국 PCA는 고전적인 설비를 최신의 고효율 제조설비로 교체하고 온실가스 방출을 저감할 수 있는 대체 연료 및 원료를 활용하여 2020년까지 1990년 대비 시멘트 1톤 제조 시 CO₂

발생량의 10% 감축을 목표로 설정하고 있다³⁾. 영국도 시멘트 분야에서 에너지 저감 및 CO₂ 배출량 저감을 위하여 대체 연료 활용 증대, 고효율 설비 도입, 혼합시멘트 사용 증대 등을 내용으로 하는 중장기 계획을 수립하였으며, 2050년 목표는 1990년 대비 약 81% 수준으로 CO₂를 감축하는 것이다. 국내의 경우에도 2014년 1월 정부에서 발표한 국가온실가스 감축 로드맵을 통해 시멘트 분야의 온실가스 감축률을 2020년 배출전망치 대비 8.5%로 정하고 있어 효과적인 CO₂ 저감을 위한 기술개발이 시급한 실정이다.

국내의 시멘트 산업구조에서 CO₂ 감축 목표를 달성하기 위한 가정 현실적인 대안은 CO₂ 발생의 주요 요인인 클링커 대신 플라야에서, 고로슬래그 미분말 등 시멘트 대체재료 사용을 확대하는 것이다(Papayianni and Anastasiou, 2006; Setién et al., 2009). 특히 고로슬래그 미분말의 경우 플라야에 비해 원재료의 품질편차가 적으며, 다량의 클링커를 대체하여 사용할 수 있는 장점이 있다(Malhotra, 2000; Mehta, 2000). 최근 많은 연구자들에 의해 시멘트 클링커를 대체하여 고로슬래그 미분말(Ground granulated blast-furnace slag, GGBS)을 다량 치환한 하이볼륨 슬래그 시멘트에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 하이볼륨 GGBS 콘크리트의 경우 낮은 수화열에 의한 온도 상승 억제, 우수한 내구성 등 다양한 장점이 있음

¹정회원, 가천대학교 건축공학과, 부교수

²정회원, 가천대학교 건축공학과, 교수

³정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 교수, 교신저자

*Corresponding author: cshwang@gachon.ac.kr

Dept. of Civil and Environmental Eng. Gachon University, Seongnam-si, 13120, Korea

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

에도 불구하고 기존 시멘트 콘크리트 배합에 비해 상당히 적은 클링커 양 때문에 응결 지연, 초기 재령에서의 낮은 강도 발현 등의 문제점으로 인해 실제 현장의 적용에 한계점을 가지고 있다(Hester et al., 2005; Leng et al., 2000). GGBS를 시멘트 대체재료로 60% 이상 다량 혼입할 경우, 시멘트량의 감소로 강도가 낮아지는 결과를 초래한다(Ryu et al., 2012). 따라서 이러한 콘크리트는 낮은 압축강도의 매스콘크리트 등에 사용되었다. 이러한 초기재령에서의 낮은 압축강도 발현 문제점을 해소하고자 상당히 낮은 물-바인더 비를 갖는 고강도 콘크리트에서의 GGBS 다량 혼입하는 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있다(Gengying and Xiaohua, 2003; Kim et al., 2010; Chong et al., 2012). 또한 가성소다 등의 알칼리 자극제를 이용하거나 GGBS의 분말도를 높여 강도를 향상시키는 방법이 제안되고 있다 (Siddique and Bennacer, 2012).

본 연구에서는 고성능 하이볼륨 GGBS 시멘트 페이스트에 대한 GGBS의 분말도에 따른 수화 및 조기강도 특성에 대한 영향을 분석하였다. 이를 위해 분말도에 따른 GGBS 4종류와 4수준의 GGBS 치환율에 대해 압축강도, 응결 및 미소수화열 분석을 수행하였다.

2. 재료 및 실험변수

2.1 재료

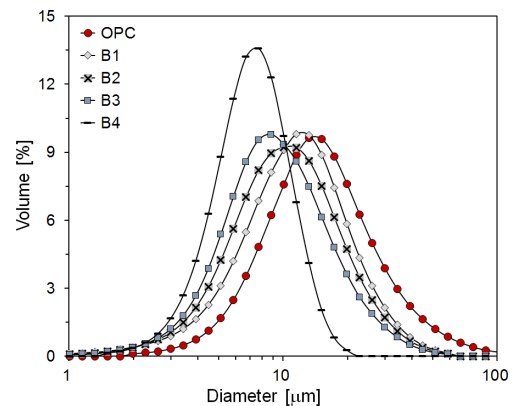
시멘트는 KS L 5201에 적합한 밀도 3.14 g/cm^3 , 분말도 $3,250$ 의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용 하였다. GGBS는 국내 P사에서 생산된 제품을 사용하였으며, KS F 2563 콘크리트용 고로슬래그 미분말의 품질기준을 만족하였다. GGBS의 밀도는 2.89 g/cm^3 , 분말도 $4,330$ 이다. 사용된 시멘트 및 GGBS의 화학성분 및 물리적 성질은 다음 Table 1에 나타내었다. 화학분석은 XRF 기기분석을 통하여 산정한 결과이며, 사용된 기기는 RIGAKU ZSX Primus이다. XRF 기기분석에 의한 시멘트 화학조성(Table 1 참조)를 기반으로 Bouge식에 의해 계산된 OPC의 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 의 구성비는 중량비로 각각 55.3%, 17.9%, 7.1%, 10.7%이다. GGBS의 분말도에 따른 HVGGBS의 수화특성 및 압축강도 발현 특성을 살펴보기 위해 동일한 화학성분의 GGBS(Table 1 참조)를 대상으로 볼밀을 이용하여 4가지의 분말도($4,330 \text{ cm}^2/\text{g}$, $5,320 \text{ cm}^2/\text{g}$, $6,450 \text{ cm}^2/\text{g}$, $7,650 \text{ cm}^2/\text{g}$)의 미분말을 제조하였다(Fig. 1의 B1, B2, B3, B4). Fig. 1은 OPC와 GGBS의 입도분포를 나타내고 있다.

2.2 배합 및 실험방법

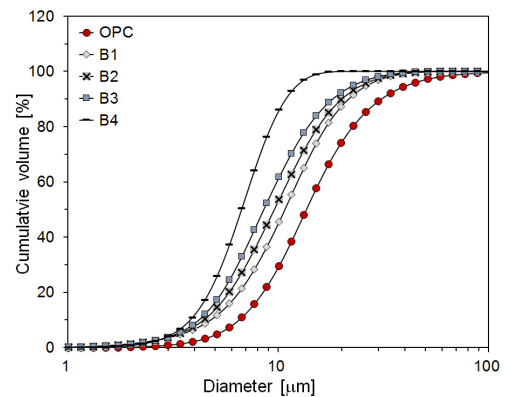
OPC 중량 대비 GGBS를 다량 치환한 하이볼륨 슬래그 시멘트 페이스트의 수화 및 역학적 특성을 살펴보기 위해 GGBFS

Table 1 Chemical compositions and physical properties of OPC and GGBS used

	Chemical compositions(%)	
	OPC	GGBS
SiO ₂	21.2	34.0
Al ₂ O ₃	4.64	16.4
Fe ₂ O ₃	2.91	0.50
CaO	61.9	37.2
MgO	1.87	6.29
K ₂ O	1.22	0.45
Na ₂ O	0.29	1.33
SO ₃	2.31	2.71
LOI	2.48	0.17
Sum	98.82	99.05
density(g/cm ³)	3.14	2.89
fineness(cm ² /g)	3250	4330



(a) Particle size distribution



(b) Cumulative

Fig. 1 Particle size distributions of raw material used

의 치환율을 35%, 50%, 65%, 80%로 하였다. 또한 각각의 혼입율에 대해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 B1, B2, B3, B4의 GGBS의 분말도가 다른 4종류의 GGBS를 Table 2와 같은 배

Table 2 Mixture proportions of HVGGBS pastes

ID	Unit weight(kg)						
	water	OPC	GB1	GB2	GB3	GB4	
0% Plain	2.4	12.0	-	-	-	-	
35%	HV35B1	2.4	7.8	4.2	-	-	-
	HV35B2	2.4	7.8	-	4.2	-	-
	HV35B3	2.4	7.8	-	-	4.2	-
	HV35B4	2.4	7.8	-	-	-	4.2
50%	HV50B1	2.4	6	6	-	-	-
	HV50B2	2.4	6	-	6	-	-
	HV50B3	2.4	6	-	-	6	-
	HV50B4	2.4	6	-	-	-	6
65%	HV65B1	2.4	4.2	7.8	-	-	-
	HV65B2	2.4	4.2	-	7.8	-	-
	HV65B3	2.4	4.2	-	-	7.8	-
	HV65B4	2.4	4.2	-	-	-	7.8
80%	HV80B1	2.4	2.4	9.6	-	-	-
	HV80B2	2.4	2.4	-	9.6	-	-
	HV80B3	2.4	2.4	-	-	9.6	-
	HV80B4	2.4	2.4	-	-	-	9.6

함비에 의해 페이스트를 제작하였다. 물-바인더 비는 모든 변수에 대해 0.2로 고정하였으며, 적절한 플로우를 얻기 위해 화학혼화제를 바인더 중량비로 약 0.53% 정도 적용하였다. 폴리카르복실계 화학혼화제를 사용하였다.

하이볼륨 슬래그 시멘트 페이스트의 응결시간(setting time)은 ISO 9597에 따라 ACMEI사 PA8 automatic setting tester를 사용하여 초결과 종결 시간을 측정하였다. 원재료의 입자 크기 분포는 레이저 회절법에 의한 Beckman Coulter LS 230 장비를 이용하여 측정하였다.

페이스트 시편체의 압축강도 측정은 ISO 679에 따라 각 실험 채령 3, 7, 28, 56, 91, 365일에 실시하였다. 채령별로 크기 40×40×160 mm의 시편체 3개의 강도를 측정하고, 그 평균을 결과 값으로 사용하였다. 바인더의 수화열(heat flow of hydration) 측정을 위해 사용된 등온열량계는 8채널의 TAM Air 장비를 사용하였다. 각 실험 변수별 배합비에 따라 바인더와 증류수를 혼합하여 페이스트를 제작하였다. 페이스트 혼합 후 약 4g의 페이스트를 20 ml 유리 앰플병에 넣고 등온열량계에 투입하였다. 등온열량계의 온도 조건은 23°C로 설정하고, 3일간 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 응결

GGBS의 혼입률 및 분말도에 따른 하이볼륨 슬래그 시멘트

Table 3 Setting times of HVGGBS pastes

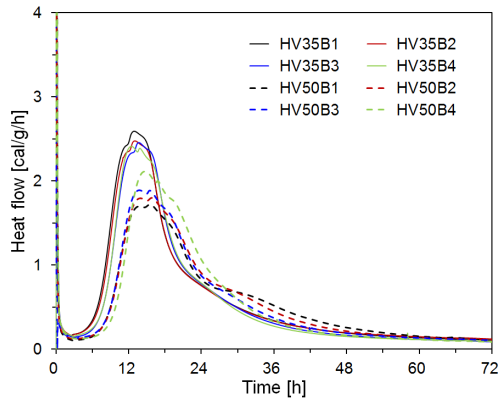
ID	Setting time(min)	
	Initial	Final
Plain	255	321
HV35B1	366	455
HV35B2	371	458
HV35B3	390	491
HV35B4	396	470
HV50B1	435	556
HV50B2	414	541
HV50B3	415	530
HV50B4	442	560
HV65B1	330	645
HV65B2	375	652
HV65B3	345	825
HV65B4	581	748
HV80B1	205	1105
HV80B2	255	1105
HV80B3	365	1140
HV80B4	385	735

페이스트의 응결시간을 Table 3에 나타내었다. GGBS 치환율이 35%, 50%까지 증가한 경우, 예상한 것과 같이 초결 및 종결 모두 약간의 증가를 보였다. 하지만 GGBS의 분말도 증가에 따라 초결 및 종결시간은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

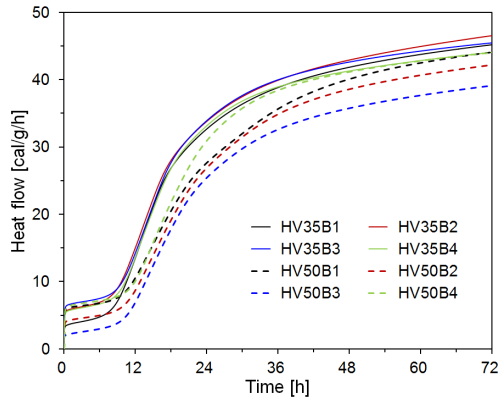
GGBS의 혼입률이 65%, 80%인 경우, 혼입률의 증가에 따라 종결시간은 전체적으로 상당히 증가하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 GGBS의 혼입률 증가에 따라 초기에 수화반응에 관여하는 시멘트의 양이 절대적으로 부족하여 발생된 현상으로 볼 수 있다. 하지만 GGBS 혼입율이 65% 이상인 경우 초결시간은 예상과 다르게 나타났으며, 특히 GGBS 혼입율이 80%인 경우 초결시간이 가장 작았다. 이러한 현상은 Table 2에서 제시된 배합은 물-바인더 비가 상당히 작고, 화학혼화제가 일반적인 배합보다 많이 첨가된 고강도 페이스트 배합으로 점성(viscosity)이 크다. 비카침에 의한 응결시간 측정은 시간에 따라 침투되는 깊이를 바탕으로 초결과 종결시간을 측정하는데, 초기 높은 점성으로 인해 침이 침투하는데 저항하여 침투깊이가 작게 나온 것으로 판단된다. 이런 이유와 더불어 적은 시멘트 양에 따른 느린 경화속도로 인해 초결시간은 작게, 종결시간은 상당히 크게 나타난 것으로 판단된다.

3.3 미소수화열

GGBFS 혼입 페이스트의 수화발열 특성을 GGBS 치환율 GGBS 분말도에 따라서 대해 미소수화열 분석을 수행하였다.

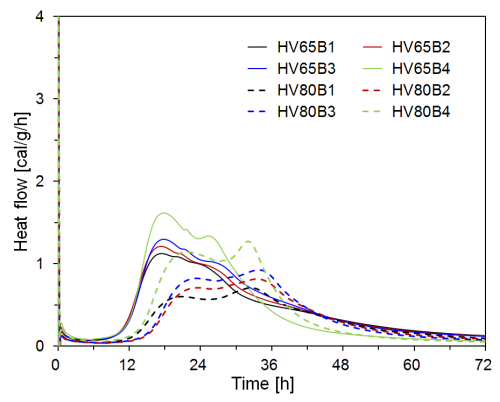


(a) Heat flow

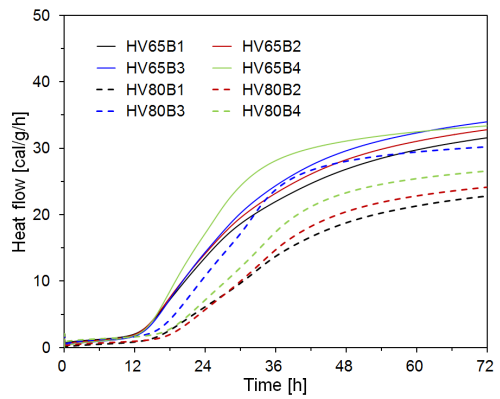


(b) Cumulative heat

Fig. 2 Heat of hydration(GGBS 35%, 50%)



(a) Heat flow



(b) Cumulative heat

Fig. 3 Heat of hydration(GGBS 65%, 80%)

Fig. 2~3는 GGBS 치환율에 따른 시간별 수화반응열과 누적 반응열을 나타내고 있다. GGBS의 혼입량이 증가 할수록 발현 피크 높이는 감소하며, 발현 시기는 증가하는 것을 알 수 있다. 다음 그림에서 알 수 있듯이 발열량의 두 번째와 세 번째 피크 발현 시기는 GGBS의 혼입량이 증가할수록 늦어지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 3에서와 같이 두 번째 피크 이후, 감속기(deceleration period) 동안 “shoulder”가 관찰되었다. 이는 황산칼슘(calcium sulphate)의 소모와 연관되며, 두 번째 알루미늄산염 반응의 결과로 생긴 에트링자이트(ettringite) 또는 AFm 상으로 판단된다(Yilmaz and Olgun, 2008). 이러한 “shoulder” 효과는 OPC 보다 GGBS가 혼입된 경우, 더 뚜렷하게 나타나다. 이는 OPC 수화물에 대한 충전재 표면의 추가적인 핵 생성처를 제공하는 충전효과(filling effect)와 시딩효과(seeding effect)와 관계가 있다. GGBS를 치환율이 커질수록 두 번째 피크의 값은 OPC의 사용량에 비례하여 감소하지 않았다. 이는 GGBS의 시딩효과가 규산염 반응(silicate reaction)보다는 알루미늄산염 반응(aluminate reaction)에 영향을 준 결과이다.

누적 발열량은 GGBS의 치환율이 커짐에 따라 감소하는 추세를 보이고 있다. 전반적으로 GGBS 치환율에 상관없이 분

말도가 클수록 발열량이 큰 경향을 나타내지만, 본 연구에서는 B3를 사용한 경우, 발열 피크의 크기가 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 비표면적이 시멘트와의 최적 충전에 의해 시멘트의 수화도를 가장 크게 촉진한 결과라 판단된다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 GGBS 치환율 35%의 경우 누적 수화발열량에 큰 차이가 나지 않지만, 50%이상의 치환율에서는 GGBS의 분말도에 따라 누적 수화발열량에 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

3.2 플로우 및 압축강도

Table 4는 GGBS 치환율 및 분말도에 따른 압축강도 시험 결과를 나타내고 있다. 전반적으로 압축강도 발현은 GGBS의 분말도에 크게 영향을 받지 않는 결과를 나타냈다. GGBS 치환율 35% 경우에는 고로슬래그 미분말 B1의 경우가 가장 큰 압축강도 발현이 나타났다. 또한 3, 7일 정도의 초기 재령에서 B2, B3, B4가 B1보다 높은 압축강도를 나타내고 그 후에는 유사한 압축강도를 보이는 것으로 나타났으며, GGBS의 분말도는 조기강도에만 영향을 미치며 28일 이후 장기강도에서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 높은 비표면적으로 인한 초기 높은 pH 상태에서 고로슬래그 미분말의 빠른 반응에

Table 4 Flow of Compressive strength

ID	flow (mm)	Compressive strength(MPa)			
		3 day	7 day	28 day	91 day
Plain	202.0	82.0	91.9	107.3	131.3
HV35B1	415.0	87.2	104.2	136.7	152.5
HV35B2	411.5	90.5	110.7	141.2	151.5
HV35B3	405.5	88.1	113.4	136.5	153.9
HV35B4	363.0	95.4	111.2	142.5	154.7
HV50B1	424.5	78.3	111.9	142.5	157.2
HV50B2	425.0	86.6	112.6	145.8	158.3
HV50B3	410.0	90.7	114.6	144.2	156.1
HV50B4	366.0	92.7	112.0	123.7	154.5
HV65B1	458.5	75.3	126.0	142.2	163.7
HV65B2	442.0	80.2	119.8	128.0	155.0
HV65B3	436.0	78.5	117.5	128.0	142.6
HV65B4	407.0	82.8	118.4	131.9	149.0
HV80B1	441.5	60.7	109.4	118.1	125.7
HV80B2	448.0	68.1	114.7	121.5	138.2
HV80B3	453.5	70.3	117.9	119.3	136.2
HV80B4	412.0	78.6	97.7	113.1	121.0

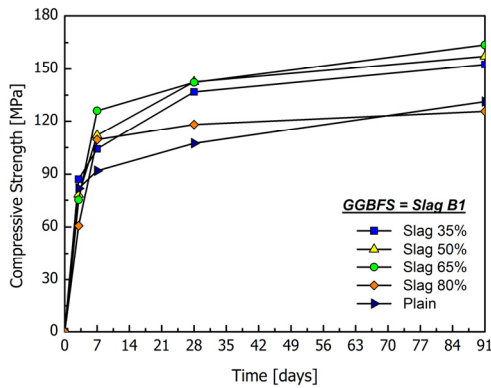


Fig. 4 Compressive strength of specimens containing B1

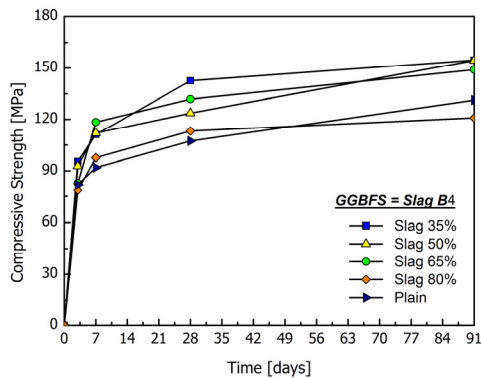


Fig. 5 Compressive strength of specimens containing B4

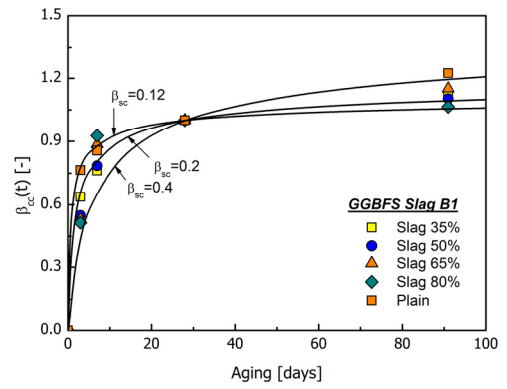


Fig. 6 Compressive strength at 28 days of age GGBFS B1

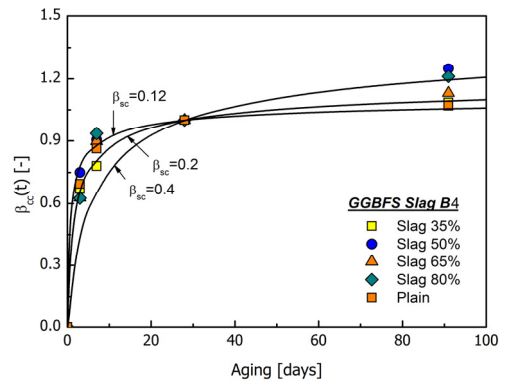


Fig. 7 Compressive strength at 28 days of age GGBFS B4

기인한 결과로 판단된다.

Figs. 4, 5는 GGBS B1, B4에 대해 GGBS 치환율에 대한 압축강도 결과를 나타내고 있다. 3일 이전의 압축강도 결과는 OPC 100% 사용한 Plain에 비해 낮은 압축강도를 나타냈지만 그 후 장기강도에서는 전체적으로 GGBFS 혼입 페이스트가 더 높은 강도를 나타내고 있는 것으로 나타났다.

이는 GGBFS 혼입한 경우 OPC를 사용하는 경우보다 유동성이 향상되어 페이스트 내부의 갇힌 공기가 외부로 좀 더 빠져나와 압축강도가 향상된 것으로 판단된다.

Figs. 6, 7은 압축강도 실험결과로부터 재령 28일 기준에 의한 압축강도 발현특성을 검토하였다. 또한 콘크리트 구조설계기준(KSCDC, 2007)에 의한 일반 OPC 콘크리트의 압축강도 발현 곡선과 비교하였다, 콘크리트 구조설계기준에 의한 콘크리트 압축강도 발현 특성은 다음과 같다.

$$f_{cu} = f_{ck} + 8 \quad (1)$$

$$f_{cc}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cu} \quad (2)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[\beta_{sc} \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] \quad (3)$$

여기서, $\beta_{sc}=0.35$ (1종 시멘트 습윤양생), 0.15 (1종 시멘트 증기양생), 0.25 (3종 시멘트 습윤양생), 0.12 (3종 시멘트 증기양생), 0.4 (2종시멘트)이다.

분말도 B1의 GGBS를 사용한 페이스트의 압축강도 발현특성은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 β_{sc} 가 $0.12\sim 0.4$ 의 범위에 있는 것을 확인할 수 있었다. Plain의 경우 β_{sc} 가 0.12 정도이며, GGBS 혼입률 35%와 50%는 β_{sc} 의 값이 0.2 에 가까웠다. GGBS 혼입률 65%, 80%의 경우는 일정한 값을 나타내지 않고 0.12 와 0.4 범위에 있는 것으로 나타났다.

분말도 B4의 GGBS를 사용한 페이스트의 압축강도 결과는 분말도 B1의 GGBS를 사용한 페이스트 압축강도 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 하지만, 초기 3, 7일에서의 압축강도 발현이 더 높아 전반적으로 β_{sc} 의 값이 $0.12\sim 0.2$ 사이에 있는 것으로 나타났다.

3. 결론

본 논문에서는 GGBFS 혼입률에 따른 페이스트의 압축강도, 수화열 등의 재료 특성을 파악하기 위해 분말도에 따른 고로슬래그 4종류와 혼입율 35, 50, 65, 80% 4수준 총 16개의 종류의 배합 이용하여 실험을 수행하였으며, 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) GGBS 치환율 및 분말도에 따른 압축강도는 초기강도에 서만 차이를 보이며 7일 이후 장기강도에서는 유사한 압축강도 발현을 보이고 있다.
- 2) 응결시간은 GGBS 치환율이 증가하면 서서히 종결시간이 증가하다가 치환율 65%이후 급격히 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 미소수화열은 혼입량 증가에 따라 발현시간이 늦어지는 경향을 보이며, 누적발열량의 경우 치환율이 높아질수록 감소하는 추세로 나타났다.
- 4) GGBS를 다량 치환한 고성능 하이볼륨 슬래그 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령 3일 이전에는 OPC 100% 사용한 Plain에 비해 낮은 압축강도를 나타냈지만 그 후 장기강도에서는 전체적으로 GGBFS 혼입 페이스트가 더 높은 강도를 나타내고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 환경산업선진화기술개발사업에서 지원받았습니다(No. 2017000150001).

References

Chong, W., Changhui, Y., Fang L., Chaojun, W., and Xincheng, P. (2012), Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials, *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 538-544.

Gengying, L. and Xiaohua, Z. (2003), Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 293-299.

Hester, D., McNally, C., and Richardson, M. G. (2005), A Study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete, *Construction and Building Materials*, 19(9), 661-665.

Kim, S. D., Kim, S. Y., Bae, K. S., Park, S. H., and Lee, B. S. (2010), Field application of 80 MPa high strength fire resistant concrete using ternary blended cement, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 10(5), 113-119 (in Korean, with English abstract).

Leng, F., Feng, N., and Lu, X. (2000), An experiment study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(6), 989-992.

Li, J., Tharakan, P., Macdonald, D., and Liang, X. (2013), Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry, *Energy Policy*, 61, 1377-1387.

Malhotra, V. M. (2000), Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions, *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*, London: E&F Spon; Gjory, O.E., Sakai K(ed).

Mehta, P. H. (2000), Concrete technology for sustainable development - An overview of essential elements, *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*, London: E&F Spon; Gjory, O.E., Sakai, K(ed).

Papayianni, I. and Anastasiou E. (2006), Optimization of ladle furnace slag for use as a supplementary cementing material, *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, 411-417.

Ryu, D. W., Kim, W. J., Yang, W. H., and Park, D. C. (2012), An experimental study on the carbonation and drying shrinkage of concrete using high volumes of ground granulated blastfurnace slag, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 12(4), 393-400 (in Korean, with English abstract).

Ryu, D. W., Kim, W. J., Yang, W. H., You, J. H., and Ko, J. W. (2012), An experimental study on the freezing-thawing and chloride resistance of concrete using high volumes of GGBS, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 12(3), 315-322 (in Korean, with English abstract).

Setién, J., Hernández, D., and González, J. J. (2009), Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material, *Construction and Building Materials*. 23(5), 1788-1794.

Siddique, R. and Bennacer, R. (2012), Use of iron and steel industry by-product(GGBS) in cement paste and mortar, *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 29-34.

Yilmaz, B. and Olgun, A. (2008), Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone, *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 194-201.

Yilmaz, B. and Olgun, A.(2008), Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone, *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 194-201.

Received : 07/19/2017

Revised : 08/07/2017

Accepted : 08/08/2017

요 지 : 최근 온실가스 감축을 위해 시멘트 클링커를 대체하여 고로슬래그 미분말을 다량 치환한 하이볼륨 슬래그 시멘트에 대한 연구 활발히 진행되고 있다. 하지만, 수화열 및 내구성 등 다양한 장점에도 불구하고 초기 재령에서의 낮은 강도 발현 등의 문제점으로 인해 실제 현장의 적용에 한계점을 가지고 있다. 본 연구는 이러한 점을 극복하고자 GGBFS 혼입률에 따른 페이스트의 압축강도, 수화열 등의 특성을 분석하였다. GGBS 분말도에 따른 4종류와 치환율 35%, 50%, 65%, 80% 4수준으로 하여 총 16개의 배합에 대해 실험을 수행하였다. 실험결과 낮은 물-바인더 비에 의한 고성능 하이볼륨 슬래그 시멘트 페이스트 배합은 초기 재령에서의 낮은 압축강도의 한계점을 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 GGBS의 분말도는 고성능 하이볼륨 슬래그 시멘트 페이스트의 초기 재령에서의 압축강도 증진에는 효과가 있지만, 28일 이후의 장기 강도에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : GGBS, 압축강도, 분말도, 고성능 하이볼륨 슬래그, 미소수화열
