

# 무수석고 함량이 고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트 특성에 미치는 영향

## Effect of Anhydrite on the Mechanical and Durability Properties of High Volume Slag Concrete

문규돈<sup>1</sup> · 김주형<sup>1</sup> · 조영근<sup>1</sup> · 최영철<sup>1\*</sup>

Gyu-Don Moon<sup>1</sup> · Joo-Hyung Kim<sup>1</sup> · Young-Keun Cho<sup>1</sup> · Young-Cheol Choi<sup>1\*</sup>

(Received September 18, 2014 / Revised September 23, 2014 / Accepted September 23, 2014)

High volume slag concrete is attracting new attention and are thought to have promising potential for industrial applications, partly due to the climate debate, but especially due to their very low heat of hydration and their good durability in chemically aggressive environments. However, High volume slag concretes tend to have slower strength development especially. In this study, the effect of anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) on the mechanical and durability performance of high volume slag concrete were investigated. The main variables were anhydrite contents (0, 4, 6, 8, 10%). Test results show that 4~8% anhydrite concrete have improved engineering properties (hydration, compressive strength, shrinkage, creep, carbonation) as control concrete at early ages.

**키워드** : 고로슬래그 미분말, 무수석고, 콘크리트, 역학성능, 내구성

**Keywords** : Ground granulated blast-furnace slag, Anhydrite, Concrete, Mechanical properties, Durability

### 1. 서론

시멘트·콘크리트 분야에서 대표적인 혼화재료로 사용되고 고로슬래그 미분말은 콘크리트의 성능개선, 제조원가 절감, 산업부산물의 재활용 및 자원의 절약 등의 다양한 이점이 있다(Park et al., 2012). 하지만 이러한 고로슬래그 미분말을 대량으로 사용한 콘크리트는 초기강도 발현이 늦기 때문에 건설현장에 적용하는데 어려움이 있다. 이와 같은 초기강도 발현 문제를 보완하기 위해 고로슬래그 미분말의 고분말화, 활성화제 도입 등의 방안이 제안되고 있다.

분말도가 높은 고로슬래그 미분말을 사용할 경우 강도 증진 효과가 나타나지만, 분말도 8,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 급 고로슬래그 미분말의 경우 보통 포틀랜드 시멘트(OPC) 가격과 차이가 없기 때문에 경제적 효과가 미흡하다. 또한, 알칼리게 활성화제를 적용하는 사례가 증가하고 있지만 NaOH, KOH의 경우 급결이나 콘크리트에서 알칼리

골재 반응을 유발할 수 있으며(Park et al., 2012), 부식성이 강한 화학물질로 현장 적용에 있어 주의가 필요하다. 반면, 황산염계 활성화제의 경우 상대적으로 안정적이며 혼화재료의 반응을 활성화하는데 유리한 것으로 보고되고 있다(Park et al., 2001).

보통 포틀랜드 시멘트 수화로 인한 알칼리 분위기는 고로슬래그 미분말의 Si, Al, Ca 이온의 용해를 촉진시키고, Fig. 1과 같이 Calcium Sulfate와 반응하여 수화 초기단계에 Ettringite와 C-S-H가 생성된다(R.X. Magallanes-Rivera et al., 2014). 이와 같은 수화 생성물들로 인해 초기강도 발현이 개선되기 때문에 고로슬래그 미분말용 활성화제로 Calcium Sulfate가 많이 사용되고 있다(T. Matschei et al., 2005; M. Singh et al., 1995; J.T. Song et al., 1997; Gruskovnjak et al., 2008).

본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트의 현장 적용을 위하여 Calcium Sulfate(무수석고)를 활성화제로 사용하고, 무수석고 함량에 따라 고로슬래그 미분말을 대량 활용한

\* Corresponding author E-mail: zerofe@kcl.re.kr

<sup>1</sup>한국건설생활환경시험연구원 첨단건설재료센터 (Korea Conformity Laboratories, Seoul, 153-803, Korea)

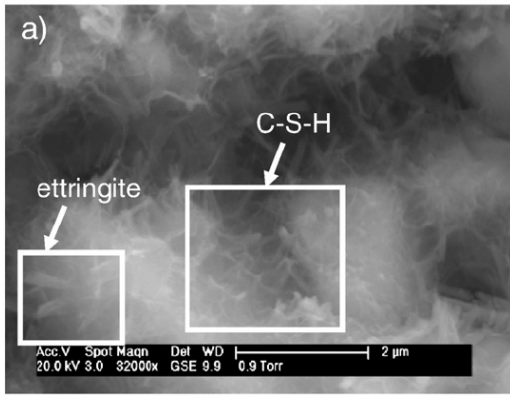


Fig. 1. Scanning electron micrographs of supersulfated slag pastes after 1 day of hydration(T. Matschei,et al., 2005)

콘크리트의 강도발현 특성, 크리프, 동결융해, 탄산화, 건조수축 특성 등을 분석하였다.

## 2. 실험 연구

### 2.1 사용 재료

콘크리트 배합에 사용된 시멘트는 KS L 5201을 만족하는 국내 A사의 1종 시멘트와 KS L 2563을 만족하는 국내 H사의 고로슬래그 미분말(GGBS)을 결합재로 사용하였다.

사용된 시멘트와 GGBS의 화학성분 및 물리적 성질은 다음 Table 1에 나타내었다. 시멘트의 화학분석은 XRF 기기분석을 통하여 산정된 결과이며, 사용된 기기는 RIGAKU ZSX Primus이다. 사용된 시멘트의 주요 4대 광물 조성은 Bogue식을 이용하여 계산한 결과 C3A 51.6%, C3S 22.0%, C2S 7.4%, C4AF 8.9%으로 나타났다. GGBS의 화학조성 중 CaO 37.2%, MgO 6.29%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 16.4%, SiO<sub>2</sub> 34.0%로 염기도는 1.76이다.

Fig. 2는 시멘트와 GGBS에 대해 KS L 1614방법에 의한 입자크기 분석을 한 결과를 나타내고 있다. 입도 분석에 사용된 기기는 Partica LA-950V2(일본 HORIBA)를 사용하였으며, 분산용매는 물(water)을 사용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 GGBS의 평균 입도가 시멘트의 평균입도보다 작은 것을 확인할 수 있으며, 잔입자가 상대적으로 고르게 분포되어 있다. 이는 Blaine 분말도(시멘트 3,250cm<sup>2</sup>/g, GGBS 4,330cm<sup>2</sup>/g)의 결과와 일치한다.

Table 2는 콘크리트 배합에 사용된 골재의 기본적인 특성을 나타내고 있다. 잔골재는 밀도 2.55 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 0.7%의 해사를 사용하였으며, 굵은골재로는 밀도 2.7, 최대골재크기는 25mm, 흡수율 0.84%의 부순골재를 사용하였다.

Table 1. Physical properties and chemical composition of OPC and GGBS

	Physical properties		Chemical composition (%)						
	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
OPC	3.15	3,250	21.2	4.64	2.91	61.9	1.87	1.22	0.29
GGBS	2.89	4,330	34.0	16.4	0.5	37.2	6.29	0.45	1.33

OPC=Ordinary Portland Cement,  
GGBS=ground granulated blast-furnace slag

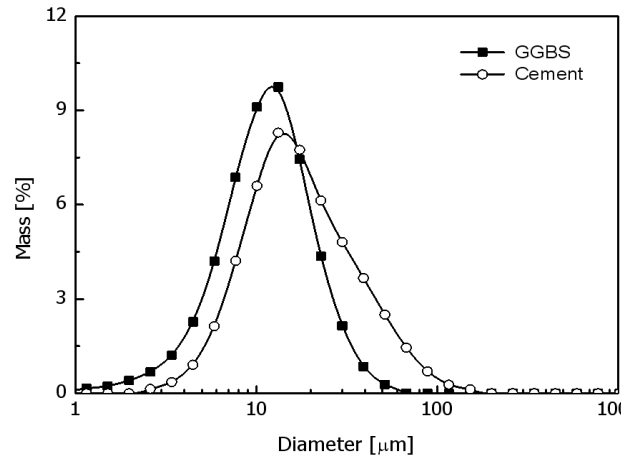


Fig. 2. Particle size distribution of OPC and GGBS

Table 2. Physical characteristic of aggregate

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	Fineness modulus
Fine aggregate	2.55	0.7	2.85
Coarse aggregate	2.70	0.84	6.81

### 2.2 콘크리트 배합

시멘트를 대신하여 GGBS를 대량 치환한 바인더의 무수석고(CaSO<sub>4</sub>) 함유량에 따른 특성을 살펴보기 위한 콘크리트 배합표를 Table 3에 나타내었다. GGBS의 사용량은 기본적으로 전체 바인더의 중량비로 80%로 고정하였으며, 나머지를 시멘트와 무수석고로 구성하였다. 무수석고의 함량에 따른 영향을 살펴보기 위해 무수석고 치환율을 0, 4, 6, 8, 10%로 5수준으로 하였다. 전체 콘크리트 배합에 대해 물-바인더 비를 35%, 잔골재 비율은 42%로 고정하였다.

### 2.3 실험방법

TA Instruments사 TAM Air 8-channel Calorimeter 장비를 사

Table 3. Mixing Proportions of Concrete

MIX	W/B	W (kg/m <sup>3</sup> )	Binder (kg/m <sup>3</sup> )				Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )		S.P (B×%)
			C	GGBS	AH	Total	Fine	Coarse	
OPC	0.35	155	445	-	-	445	700	1023	0.4
HVSC1	0.35	155	89	356	-	445	690	1008	0.5
HVSC2	0.35	155	89	333.75	22.25	445	688	1005	0.55
HVSC3	0.35	155	89	311.5	44.5	445	687	1004	0.6
HVSC4	0.35	155	89	289.25	66.75	445	686	1003	0.6
HVSC5	0.35	155	89	267	89	445	685	1002	0.7

W/B= Water-binder ratio, C=Cement, GGBS=ground granulated blast-furnace slag and AH=Anhydrite

용하여 GGBS 대량 활용 바인더의 미소수화열을 측정하였다. 미소수화열 측정은 온도 23℃ 조건에서 페이스트 약 4.6g을 사용하여 ASTM C 1702에 따라 약 72시간 동안 연속적으로 측정하였다. 굳지 않은 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 응결시간, 슬럼프 플로, 공기량을 측정하였다.

응결시간은 KS F 2436에서 제시하고 있는 관입저항에 의한 콘크리트의 응결시험방법에 준하여 실시하였다. 슬럼프 플로는 KS F 2594 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로 시험방법에 따라 3회 측정하였으며, 공기량은 KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법에 따라 측정하였다.

KS F 2403에 제시하고 있는 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법에 따라 Φ100×200mm 크기의 원주형 압축강도 시험용 공시체를 제작하고, 해당 재령까지 수중양생(20℃)을 실시하였다. 압축강도는 KS F 2405 콘크리트 압축 강도 시험방법에 따라 재령 3일, 7일, 28일, 91일에 측정하였다.

길이변화 측정은 KS F 2424 모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험 방법에 준해 실시하였다. 각주형 공시체(75×75×300mm)에 콘크리트용 매립 스트레인 게이지를 이용하여 30분 간격으로 측정하였으며, 배합 1일 후에 탈형하여 항온항습 조건에서 양생을 실시하였다. 수화과정에서 발생하는 양생조건에 따른 영향을 알아보기 위해 HVSC2 배합에 대해 수중에서의 길이변화 측정을 병행 실시하였다.

크리프 변형 측정은 KS F 2453 콘크리트 압축 크리프 시험방법에 준해 실시하였으며, 재령 28일에 시험체를 강도 수준의 40%를 재하하여 발생하는 변형을 항온항습 조건에서 측정을 실시하였다. 콘크리트의 탄산화 특성 평가는 2가지 전처리 조건(수중양생 기간: 14일, 56일)에서 실시하였다. 시험편을 14일, 56일간 수중양생한 후 온도 20℃, 상대습도 60% 조건에서 14일간 양생하였다. 이와 같이 전처리가 완료된 시험편들을 온도 20℃, 상대습도 60%, CO<sub>2</sub> 농도 5%의 탄산화 챔버 56일 동안에 투입하였다. 탄산화 깊이 측

정은 KS F 2596에 따라 탄산화 시험 개시 후 해당 재령에 맞춰 시험편을 할렬한 후 페놀프탈레인 용액을 분무하여 시험편의 탄산화 깊이를 측정하였다.

동결융해 저항성 실험은 KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법에 따라 실시하였다. 14일간 수중양생한 시험편의 초기 동탄성계수를 측정하고, 실험 개시 후 해당 Cycle(50, 100, 150, 200, 250, 300cycle)에 동탄성 계수를 측정하여 상대동탄성계수를 산정하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 수화 특성

Fig. 3는 HVSC1~HVSC3의 페이스트의 미소수화열 실험결과를 나타내고 있다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 두 번째 피크가 3.0~4.0cal/(g·h)의 값을 갖는 일반 OPC와 다르게 GGBS를 다량 함유한 경우 Heat flow가 0.8cal/(g·h) 이하로 상당히 작게 나타났다. OPC의 경우

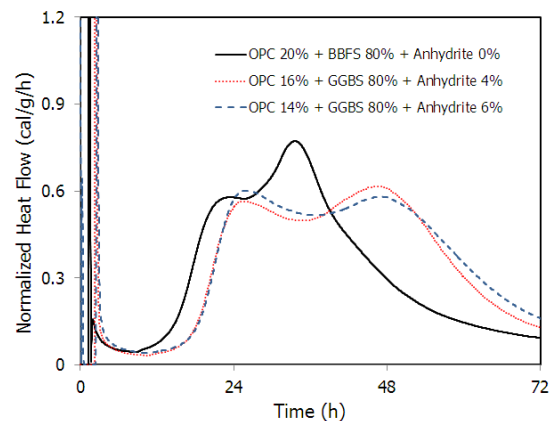


Fig. 3. Hydration heat flow

약 12시간 후 두 번째 피크가 발생하는데, 무수석고 없이 GGBS 80%와 OPC 20%로 구성된 바인더의 경우 약 24시간 정도에 나타나 OPC에 비해 2배 정도 지연된 결과가 나타났다.

또한, 36시간 정도에서 세 번째 피크가 가장 크게 발생하였으며, 이는 시멘트가 수화되면서 강알칼리 상태로 변화하면서 GGBS의 잠재수경성을 촉진하여 수화되면서 나타난 결과이다. 무수석고를 4%, 6% 혼입한 경우, 혼입하지 않은 경우 보다 유도기 시간이 조금 더 증가된 양상을 보였다. 무수석고 혼입에 따라 세 번째 피크의 크기가 감소하였으며, 발생시기도 48시간 정도로 12시간 정도 지연된 결과를 보였다. 이와 같은 결과는 무수석고를 혼입할 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 상대적으로 C<sub>3</sub>S량이 감소에 의한 것으로 사료된다.

### 3.2 굳지 않은 콘크리트 특성

콘크리트 배합에 따른 응결시간 및 슬럼프-플로우 실험결과는 Table 4와 같다. 관입저항에 따른 응결시간은 OPC보다 GGBS를 혼입한 배합이 초결은 27~61분, 종결은 93~161분 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 GGBS는 일반 포틀랜드 시멘트에 비해 수화정도가 느림에 따른 결과로 사료되며, 무수석고 혼입이 증가할수록 초결은 지연되나, 종결은 단축되는 것으로 확인되었다.

배합설계시 슬럼프-플로우 기준을 600±50mm로 결정하였으며, 모든 배합이 기준값을 만족하는 것으로 나타났다. 상대적으로 GGBS를 혼입한 콘크리트에서 OPC보다 슬럼프-플로우 값이 크게 나타났으며, 이는 GGBS 자체 특성상 표면이 매끄럽고 촘촘하기 때문에 워커빌리티 상승에 따른 결과로 사료된다. 또한, 무수석고를 함유량이 증가하여도 화학혼화제 추가로 슬럼프-플로우 값을 조절 가능하였으며, 추후 작업성에도 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 3.3 압축강도

재령에 따른 압축강도 시험 결과는 Table 4에 나타내었다. 일반

적으로 GGBS를 사용한 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 초기강도 발현율이 낮고 장기강도 발현율이 우수하다고 보고되고 있다 (AIJ, 1996). 본 연구에서도 마찬가지로 결과에서 보는 바와 같이 GGBS를 혼입하면 OPC에 비해 초기 강도가 저하되고 장기강도에서는 OPC 콘크리트 수준의 강도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4에서는 보는 바와 같이 28일 강도 대비 강도 발현율을 나타낸 것으로 무수석고를 혼입율이 증가할수록 강도 발현율은 증가하였다.

또한, Fig. 5는 무수석고 혼입율에 따른 초기 압축강도 값을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 무수석고를 혼입한 배합에서 초기강도가 높게 나타나고 있으며, 혼입율이 4% HVSC2 배합에서 가장 높게 나타났다. 이는 GGBS 콘크리트의 초기 강도를 보완하기 위한 자극제 개념의 무수석고 혼입 적정량이 있음을 확인할 수 있었다. 초기강도 보완을 위해 고분말도 슬래그(6,000cm<sup>2</sup>/g~8,000cm<sup>2</sup>/g)를 적용한 기존 연구결과와 비교하면, 고분말도 슬래그를 적용할 경우 재령 3일의 강도 증진 효과가 약 30%~80% 수준인 것에 비하여 본 연구의 경우 무수석고 치환율(4%~10%)에 따라 76%~190%로 나타났다(Kim et al., 2005; Lim et al., 2007)

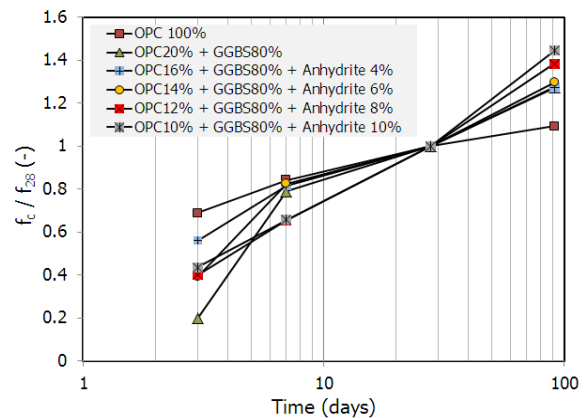


Fig. 4. Results of compressive strength

Table 4. Test Results of Fresh Properties and Compressive Strength

MIX	Setting (min)		Slump-flow (mm)	Air (%)	Compressive Strength (MPa)			
	Initial	Final			3days	7days	28days	91days
OPC	241	315	580	4.3	39.9	48.8	58.0	63.4
HVSC1	268	476	645	4.7	9.0	35.9	45.5	57.8
HVSC2	290	467	635	4.4	26.3	38.4	47.0	59.8
HVSC3	301	445	630	4.6	18.5	39.0	47.2	61.2
HVSC4	298	414	620	4.8	15.6	25.6	39.1	54.1
HVSC5	302	408	615	4.5	15.9	24.0	36.5	52.7

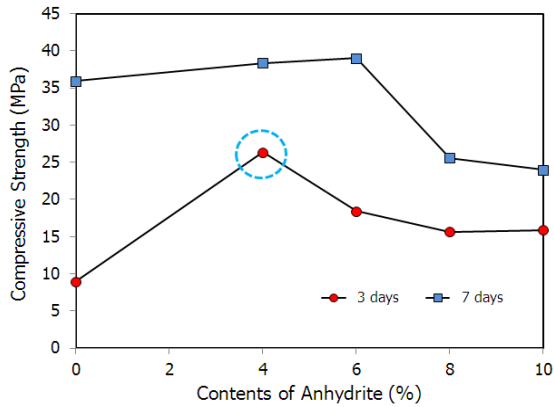


Fig. 5. Compressive strength for contents of anhydrite at early-age (3, 7 days)

### 3.4 건조수축

Fig. 6은 항온항습 조건에서의 길이변화 측정 결과를 그래프로 나타내었다. 대량으로 GGBS를 혼입한 콘크리트의 경우는 상대적인 분말도의 차이로 인해 미세공극 및 공극이 채워짐으로 인해 건조수축량을 감소시킨다는 연구결과(Jianyong et al., 2012)와 비슷한 경향을 나타내었다. OPC 콘크리트가 상대적으로 GGBS를 혼입한 콘크리트 보다 다소 많은 수축량을 보이고 있다. 또한, 무수석고를 혼입에 따라 다소 수축량을 줄어드는 경향을 나타내고 있으며, 수축량의 수준은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이는 공극충전 효과에 의해 모세관 공극량이 감소하여 수분 손실이 적음에 따른 결과로 판단된다.

Fig. 7은 HVSC2 배합에 대한 양생조건에 따른 길이변화 실험결과를 나타내었다. 그림에서 보논바와 같이 재령 3일 기점으로 양생 조건을 달리하였으며, 수중에서 결과는 팽창이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 수화과정에서 생기는 Ettringite가 상대적 부피를 증가시킴으로 인해 발생하는 변형으로 판단된다(Lerch, W, 1945; Syam et al., 2009).

### 3.5 크리프

크리프 실험결과를 Fig. 8에 나타내었다. 크리프 변형률은 측정된 전체 변형률에서 동시에 측정된 건조수축 변형률을 고려하여 산정된 결과이다. 재령 28일에 측정된 탄성계수 결과는 Fig. 10에 나타냈으며, GGBS가 다량함유한 경우 탄성계수가 OPC 콘크리트에 비해 70~80% 정도 수준으로 크리프 변형률도 상대적으로 OPC에 비해 크게 나타난 것으로 판단된다. 무수석고 함유량에 따라 전반적으로 크리프 변형률은 감소하는 경향을 나타내지만, 4%

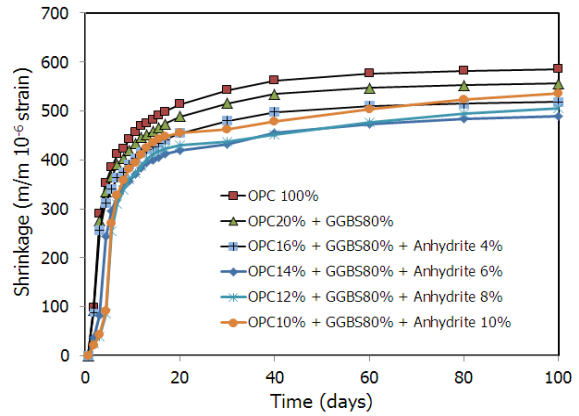


Fig. 6. Results of drying shrinkage

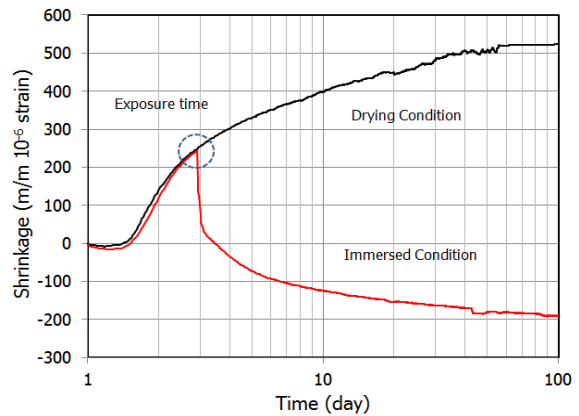


Fig. 7. Shrinkage of HVSC2 for curing condition

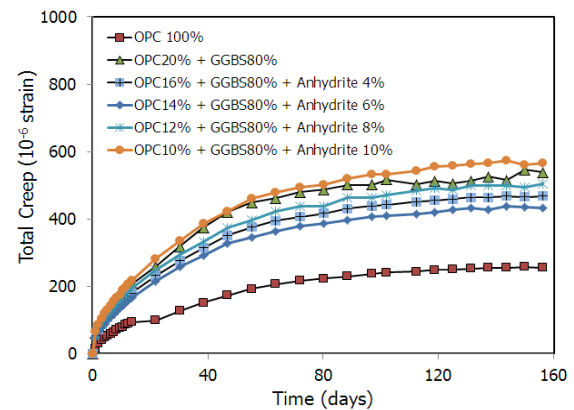


Fig. 8. Results of total creep displacement

를 혼입한 경우 가장 크게 나타났다. 무수석고 4, 6% 치환한 경우 무수석고를 치환하지 않는 경우(HVSC1) 보다 120일 기준으로 크리프 변형률이 각각 89%, 82%로 나타났다.

### 3.6 탄산화

수화정도에 따른 탄산화 정도를 알아보기 위해 양생 재령을 달리하여 탄산화 실험을 진행하였다. 그 결과는 Fig. 9와 같다. 그래프에서 보는 바와 같이 수중에서 14일을 양생한 후 탄산화를 시킨 경우에 GGBS를 혼입한 콘크리트가 OPC 콘크리트보다 탄산화 정도가 많이 나타나고 있다. 또한 수중에서 56일을 양생한 후 탄산화를 시킨 경우에 14일 양생 조건과는 달리 OPC 및 GGBS 콘크리트가 거의 동등하게 탄산화가 나타나고 있다. 이는 초기 재령에서는 GGBS 콘크리트가 경화속도가 느려 그만큼 탄산화에 취약한 것으로 보이며, 장기재령에서는 GGBS가 내부 조직을 치밀하게 하여 OPC 콘크리트와 유사한 경향을 보이는 것으로 사료된다.

### 3.7 동결융해 저항성

콘크리트중의 수분이 0°C 이하로 될 때의 동결팽창에 의해 발생하는 것이며, 장기간에 걸쳐 동결과 융해의 반복에 의해 콘크리트

가 서서히 열화된다. 일반적으로 동결융해는 콘크리트의 자유수나 흡수율이 큰 골재의 수분이 동결 융해 작용을 반복 받게 됨으로써 균열이 생기거나 표층 부분이 떨어지기도 한다. 동결융해를 받은 콘크리트 구조물에서는 콘크리트 표면에 스케일링, 미세균열 및 팝 아웃 (pop-out) 등의 형태로 열화가 현상이 발생하게 되는 것이 일반적이다. GGBS와 무수석고를 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성 실험결과를 Fig. 10에 나타내었다.

150 사이클부터 상대 동탄성계수가 크게 감소하였지만, 모든 실험변수에서 300 사이클 동결융해 후 상대 동탄성 계수가 85% 이상으로 나왔다. 이러한 경향은 GGBS의 입자 크기가 시멘트 보다 상대적으로 작아, 시멘트 페이스트에 발생된 공극을 채워주게 되어 더욱 밀실한 구조를 만들기 때문인 것으로 판단된다.

무수석고의 경우도 입자 크기 영향 및 Ettringite 형성에 따라 미세공극을 채워주어 무수석고를 함유한 경우 전반적으로 동결융해 저항성이 향상된 것을 확인하였다.

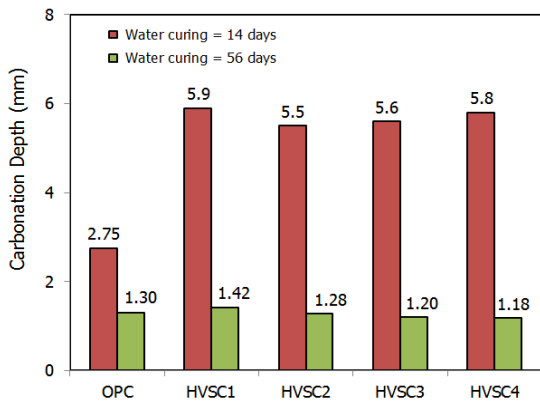


Fig. 9. Results of Carbonation depth

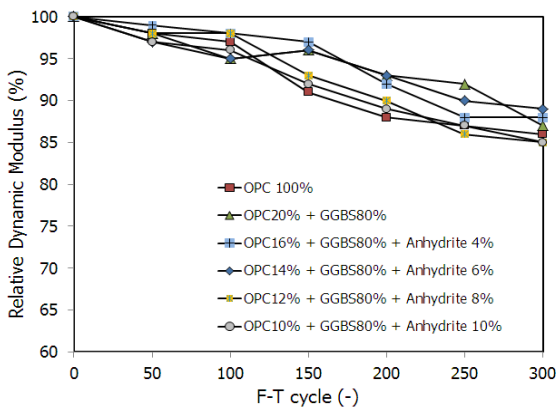


Fig. 10. Resistance of Freezing-thawing

## 4. 결론

본 연구에서는 GGBS 대량 활용한 콘크리트의 현장 적용을 위하여 무수석고를 활성화제로 사용하고, 무수석고 함량에 따라 역학적 특성 및 내구성에 대한 실험을 진행하였다. 그에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 미소수화열 측정 결과, 무수석고 혼입에 따라 세 번째 피크의 크기가 감소하였으며 발생시기도 48시간 정도로 12시간 정도 지연된 결과를 나냈다. 이와 같은 결과는 무수석고를 혼입할 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 상대적으로 C<sub>3</sub>S량 감소에 의한 것으로 사료된다.
2. GGBS 콘크리트는 일반적으로 OPC 콘크리트에 비해 초기 강도가 낮고 장기강도에서는 OPC 콘크리트 수준의 강도를 보인다. 본 연구에서 이러한 현상을 확인할 수 있었으며, 무수석고를 혼입율이 증가할수록 미세조직이 치밀해짐에 따라 28일 강도 대비 강도 발현율은 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 건조수축은 GGBS 콘크리트가 공극 충전 효과 및 모세관 공극량의 감소로 OPC 콘크리트보다 건조수축량은 적은 것으로 나타났다. 수중에서의 수축량은 일반 기건상태에서의 수축과 차이가 있었으며, 이는 수화과정에서 생긴 Ettringite 영향으로 판단된다. 크립 변형율은 GGBS 콘크리트가 탄성계수의 영향으로 인해 OPC 콘크리트보다 다소 크게 나타났으며, 무수석고 치환율이 증가할수록 증가하는 현상을 보였다.

3. GGBS 콘크리트는 초기재령에서 탄산화에 취약한 것으로 나타났다으나, 이는 경화속도에 따른 영향으로 판단되며, 장기재령에서는 OPC 콘크리트와 동등 이상으로 확인되었다. 동결융해 저항성은 GGBS 콘크리트가 강도가 낮더라도 GGBS와 무수석고가 콘크리트 내부 조직을 치밀하게 만들어 향상되었다.

위 연구결과를 바탕으로 현장 적용성에 있어 GGBS 대량 혼입 콘크리트의 기초자료로 활용되어야 할 것으로 판단되며, 추후 이러한 영향에 대한 자세한 수화 모델 및 메카니즘 분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용한 고로슬래그 미분말 대량 활용 콘크리트의 바인더는 OPC 보다 상대적으로 가격이 낮은 분말도 4,000cm<sup>2</sup>/g급 고로슬래그 미분말 80%, 나머지 20%는 무수석고와 OPC로 구성되기 때문에 현장 적용시 OPC 100% 바인더(7만5천원/톤)에 보다 경제적 효과가 있을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 환경기술개발사업(2013000150007)에서 지원받았습니다.

## References

- Architectural Institute of Japan. (1996). Recommendation for practice of concrete make use of ground granulation blast furnace slag. Japan: Architectural Institute of Japan, 25–51.
- ASTM C 1702, American Society for Testing and Materials.
- Gruskovnjak, Lothenbach, Winnefeld, Figi, R. Ko, S.-C. Adler, M. M der, U. (2008). Hydration mechanisms of super sulphated slag cement, *Cement & Concrete Research*, **38(7)**, 983–992.
- Kim, M.H., Kim, J.H., Cho, B.K., Na, C.S., Kim, Y.D. (2005). An Experimental Study on the Engineering Properties and Durability of Concrete According to the Fineness and Replacement Ratio of Blast-Furnace Slag. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **5(1)**, 81–88 [in Korean].
- KS F 2403, KS F 2421, KS F 2424, KS F 2456, KS F 2594, KS F 2596, Korea Industrial Standards [in Korean].
- Jiayong L., Yan Y.(2001) A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, **31**, 1203–06.
- J.T. Song, S.Y. Go, J.S. Rho. (1997). Hydration in the System of Anhydrite II–Blastfurnace Slag. *Journal of the Korean Ceramic Society*, **34(8)**, 861.
- Lerch, W. (1945). Effect of SO<sub>3</sub> Content of Cement on Durability of Concrete. *PCA Research and Development* (1945) 0285, 9.
- Lim, M.K., Park, M.Y., Jung, S.J., (2007). Study of the Strength and Durability Properties on Recycled Aggregate Concrete and Blain of Blast Furnace Slag. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **7(4)**, 101–108 [in Korean].
- M. Singh, M. Garg. (1995). Activation of gypsum anhydrite–slag mixtures, *Cement & Concrete Research*, **25**, 332–338.
- Park, C.B., Ryu, D.H., Seo, C.Ho., (2012). Hydration of High Volume Mineral Admixtures Binder with Kind of Activators. *Journal of Architectural Engineering*, **28(10)**, 89–96 [in Korean].
- Park, C.B., Ryu, D.H., Seo, C.Ho., (2012). Properties of High Volume Mineral Admixtures Concrete using Inorganic Additives, *Journal of Architectural Engineering*, **28(3)**, 75–82 [in Korean].
- Park, E.M., Moon, K. J., So, Y. S., (2001). Effect of Inorganic Stimulus Agent on Compressive Strength and Pore Structure of Blast Furnace Slag Cement, *Journal of Architectural Engineering*, **17(9)**, 143–150 [in Korean].
- R.X. Magallanes–Rivera, J.I. Escalante–Garcia. (2014). Anhydrite/hemihydrate–blast furnace slag cementitious composites: Strength development and reactivity. *Construction and Building Materials*, **65**, 20–28.
- Syam Nair, Dallas Little. (2009). Water as the Key to Expansion of Ettringite in Cementitious Materials. *Journal of the Transportation Research Board*, 2104, 55–62.
- T. Matschei, F. Bellmann, J. Stark. (2005). Hydration behaviour of sulphate-activated slag cements, *Adv Cem Res*, **18**, 167–178.

#### 무수석고 함량이 고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트 특성에 미치는 영향

온실가스 저감 및 자원활용 목적으로 고로슬래그 미분말을 다량으로 활용한 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 조기강도 및 내구성능 확보에 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 무수석고 함량(0%, 4%, 6%, 8%, 10%)에 따라 고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트의 수화, 강도발현, 크리프, 탄산화, 건조수축 특성을 분석하였다. 무수석고를 바인더의 4~6% 수준으로 치환할 경우 고로슬래그 미분말 대량 활용 콘크리트의 가장 취약점인 초기강도 발현을 보완할 수 있으며, 내구성 측면에서도 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 유사한 성능을 발현하는 것을 알 수 있었다. 반면, 무수석고를 8% 이상 활용할 경우 초기강도 증진 효과가 미흡한 결과를 나타냈다.