

# 고강도 고품량 고로슬래그 콘크리트의 강도 발현 특성 및 내구성 Strength Development and Durability of High-Strength High-Volume GGBFS Concrete

김주형<sup>1</sup> · 정지용<sup>2</sup> · 장승엽<sup>2\*</sup> · 정상화<sup>1</sup> · 김성일<sup>2</sup>

Joo-Hyung Kim<sup>1</sup> · Ji-Yong Jeong<sup>2</sup> · Seung-Yup Jang<sup>2\*</sup> · Sang-Hwa Jung<sup>1</sup> · Sung-Il Kim<sup>2</sup>

(Received September 20, 2015 / Revised September 23, 2015 / Accepted September 27, 2015)

To develop high-strength high-volume ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) concrete, this study investigated the characteristics of strength development and durability of concrete with the water-to-binder ratio of 23% and the GGBFS replacement ratio of up to 65%. The results show that the compressive strength of GGBFS blended concrete is lower than that of ordinary Portland cement (OPC) concrete up to 3-day age, but the becomes higher after 7-day age. Together with strength increase, the pore structure becomes tighter, and thus the resistance to chloride ion penetration increases. Therefore, the GGBFS blended concrete has high resistance to freezing and thawing without additional air-entraining, and high resistance to carbonation despite low amount of calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>). On the other hand, if silica fume (SF) is blended with GGBFS, the strength becomes lower than that of the concrete blended with GGBFS only, and the resistance to chloride ion penetration decreases. Therefore, it needs further studies on the reaction of SF in high-strength high-volume GGBFS concrete.

**키워드** : 고로슬래그 미분말, 고강도, 고품량, 강도, 내구성

**Keywords** : Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS), High strength, High volume, Strength, Durability

## 1. 서론

최근 콘크리트 산업에서 구조물의 슬림화와 건축물의 고층화를 위한 고강도화와, 온실가스 감축을 위한 시멘트의 사용량 감축 노력이 활발히 진행되고 있다. 시멘트 사용량의 감축을 위해 플라이 애쉬, 고로슬래그와 같은 광물질 혼화재를 대량으로 사용하거나 지오폴리머와 같은 무시멘트의 개발과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다(Choi et al. 2013; Cho et al. 2012).

광물질 혼화재 가운데 특히 고로슬래그 미분말(ground granulated blast-furnace slag, GGBFS)은 콘크리트의 수화발열량 감소, 유동성과 장기강도 개선, 수밀성 증대, 염해 및 동결융해 저항성, 부식저항성 향상 등의 장점을 갖고(Hester et al. 2005; Leng et al. 2000), 시멘트 보다 저렴한 가격 때문에 폭넓게 사용되어 오고 있다.

GGBFS가 사용된 콘크리트의 압축강도 발현은 초기에 낮지만 장기로 갈수록 포졸란 반응에 의해 증가하는 것으로 알려져 있다(Hogan et al. 1981). 고로슬래그 미분말은 일반적으로 결합재량의 최대 60~80%까지 치환할 수 있지만, 치환율이 너무 높아지면 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>) 생성량이 낮아 포졸란 반응에 의한 장기강도의 증가가 나타나지 않기 때문에(Ryu et al. 2012a) 고강도 콘크리트에서는 치환율이 40% 이하로 제한되어 사용되고 있고, 고강도 고품량 GGBFS 콘크리트에 대한 연구는 실험실 수준에서만 진행되고 있다(Ryu et al. 2012a, b; Gengying et al. 2003; Chong et al. 2012; Halit et al. 2010).

Jeong et al. (2015a)은 물-결합재비 20%의 고강도 시멘트 페이스트에서 GGBFS를 시멘트의 35~80%까지 치환하여 수화 및 포졸란 반응 특성을 검토하였다. 연구결과에 따르면 GGBFS로 시

\* Corresponding author E-mail: [syjang@kri.re.kr](mailto:syjang@kri.re.kr)

<sup>1</sup>한국건설생활환경시험연구원 첨단건설재료센터 (High-tech Construction Materials Center, Korea Conformity laboratories, Seoul 08503, Korea)

<sup>2</sup>한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Gyeonggi-do 16105, Korea)

Table 1. Mixture proportions

Type	W/B (%)	GGBFS (%, binder weight)	SF (%, binder weight)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						HRWRA <sup>1)</sup> (%, binder weight)
				Water	OPC	GGBFS	SF	Sand	Gravel	
OPC	23	0	0	169	735	0	0	571	987	0.52
BS65		65	0	169	257	478	0	558	965	0.58
BS60-SF5		60	5	169	257	441	37	554	958	0.60

<sup>1)</sup>high-range water-reducing admixture

멘트를 다량 치환하면 시멘트와 반응하는 자유수(free water)의 양이 증가되는 희석효과(dilution effect)에 의해 시멘트 수화가 촉진됨으로써 초기 강도가 증가하는 것으로 나타났고 재령 91일 기준으로 GGBFS의 치환률이 65%일 때 압축강도가 가장 높게 나타났다. 이 결과는 설계강도 80MPa 이상의 고강도 콘크리트에서도 GGBFS를 적어도 65% 이상 적용하는 것이 가능함을 시사하고 있다.

또한 GGBFS는 포졸란 반응으로 공극의 구조를 더 치밀하게 만들고 수산화칼슘을 감소시킴으로써 내구성을 향상시킨다. 최근 연구에 따르면(Jeong et al, 2015a) GGBFS를 다량 함유한 경우에도 초기 수화도의 증가로 인해 공극율이 감소하고 공극 크기가 감소하여 시멘트 매트릭스의 조직이 더욱 치밀해 지며, 수산화칼슘의 감소는 pH를 줄이는 결과를 초래하여 알칼리 골재 반응과 황산염 침식에 대해 우수한 저항성을 갖게 한다(Mindess et al, 2003; Mehta et al, 2004). 반면, 수산화칼슘의 감소로 pH가 줄어들게 되면 탄산화를 가속시키는 결과를 초래할 수 있다. Ryu et al. (2012a)의 연구에서 GGBFS의 치환율이 높을수록 탄산화 속도가 증가된다고 보고하고 있다. 따라서 GGBFS를 다량 함유한 콘크리트는 탄산화 저항성에 대한 검토가 요구된다.

본 연구는 고강도 고탍량 고로슬래그 콘크리트의 실용화를 위해 기존 연구(Jeong et al, 2015a)에서 확인한 시멘트 페이스트의 수화 및 포졸란 반응 특성에 따라 강도발현 특성이 콘크리트에서도 동일한 경향으로 나타나는가를 확인하고, 내구성을 검증하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)만을 사용한 배합과 결합재 중량 대비 65%를 GGBFS로 치환한 배합, 그리고 GGBFS과 실리카퓌름(silica fume, SF)을 각각 60%, 5% 치환한 배합을 적용한, 물-결합재비가 23%인 고강도 콘크리트를 대상으로 재령에 따른 강도 발현 특성과 동결융해저항성, 탄산화 저항성, 염소이온 투과 저항성 등을 평가하고 분석결과를 제시한다.

## 2. 실험계획

### 2.1 배합비

고강도 고탍량 고로슬래그 콘크리트의 강도 발현 특성과 내구성 평가를 위해 Table 1과 같이 콘크리트 배합비를 설정하고, 각 배합에 대해 슬럼프 플로우와 각 재령별 압축강도를 측정하고, 내구성 평가를 위해 동결융해 저항성 시험, 촉진 탄산화 시험, 염소이온 투과 저항성 시험을 실시하였다.

결합재 구성에 따라 OPC 100%, OPC 35% + GGBFS 65% (BS65), OPC + 35% + GGBFS 60% + SF 5% (BS60-SF5) 세 개의 배합으로 구성하고, 물-결합재비는 23%, 잔골재율은 36.5%로 설정하였다. 고성능 감수제로 폴리카르본산계 고성능 감수제를 결합재 중량의 0.5~0.6% 가량 사용하였다(Fig. 2 참조).

### 2.2 사용재료

시멘트는 KS L 5201:2013 포틀랜드 시멘트에서 규정하는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, GGBFS는 KS F 2563:2009

Table 2. Chemical compositions and physical properties of binders

Type	OPC	GGBFS	SF	
Chemical compositions	SiO <sub>2</sub>	21.2	34.0	97.96
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.64	16.4	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.91	0.50	
	CaO	61.9	37.2	
	MgO	1.87	6.29	0.06
	K <sub>2</sub> O	1.22	0.45	
	Na <sub>2</sub> O	0.29	1.33	
	SO <sub>3</sub>	2.31	2.71	1.03
	LOI	2.48	0.17	1.6
	C <sub>3</sub> S	55.3	-	-
	C <sub>2</sub> S	17.9	-	-
	C <sub>3</sub> A	7.1	-	-
	C <sub>4</sub> AF	10.7	-	-
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.15	2.89	2.31	
Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3,250	4,330	167,000	

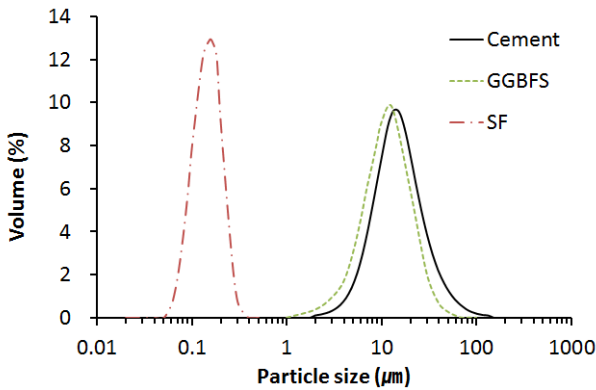


Fig. 1. Particle size distributions of binders

에서 규정하는 3종을 사용하였다. SF는 KS F 2567:2009에 적합한 것을 사용하였다. 시멘트, GGBFS, SF의 화학적 조성과 물리적 특성은 Table 2와 같고 결합재의 입도 분포는 Fig. 1에 나타났다.

잔골재는 밀도 2,600kg/m<sup>3</sup>의 일반 해사, 굵은 골재는 밀도 2,700kg/m<sup>3</sup>의 일반 쇄석을 사용하였으며, 잔골재 및 굵은 골재 모두 표준 입도를 만족하는 골재를 사용하였다.

### 2.3 실험방법

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405:2010 콘크리트의 압축강도 시험방법에 준하여 ϕ100 × 200mm의 원주형 공시체를 제작하고 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 배합별로 3개의 공시체를 시험하였다.

동결융해 저항성 시험은 KS F 2456:2013의 B법(기중동결, 수중 융해)에 준하여 수행하였다. 배합별로 2개의 공시체에 대해 50cycle 마다 상대동탄성계수를 측정하였다.

촉진 탄산화 시험은 100 × 100 × 400mm의 각주형 공시체를 제작하여 KS F 2584:2010 콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법에 준하여 20±2℃, R.H 60±5%, CO<sub>2</sub> 농도 5±0.2%의 항온항습 조건에서 양생하면서 재령 28, 56, 91일에 배합별로 3개의 공시체를 시험하였다.

염소이온 투과 저항성은 시험은 NT Build 492에 따라 실시하였다. 이 방법은 일정한 전압으로 일정 시간 동안 콘크리트 시편에 전류를 흘려서 염소이온이 강제로 투과하도록 한 후 시편을 절단하여 염화물의 침투깊이를 측정하고, 식 (1)을 이용하여 비정상 상태의 염화물 확산계수를 측정하는 방법이다. 공시체는 ϕ100 × 50mm의 원주형으로 제작하였고, 재령 28, 56, 91일에 배합별로 3개의 공시체를 시험하였다. 양극용액은 0.3N NaOH의 용액, 음극 용액은 10% NaCl의 용액을 사용하였다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \times (x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}}) \quad (1)$$

여기에서  $D_{nssm}$ 는 비정상 상태의 염소이온 확산계수 ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/sec),  $U$ 는 전압 (V),  $T$ 는 양극용액의 시험 초기 및 최종 온도의 평균값 (°C),  $L$ 는 공시체 두께 (mm),  $x_d$ 는 평균 염화물 침투 깊이 (mm),  $t$ 는 시험 기간 (hour)이다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 유동성

Fig. 2는 결합재의 종류에 따른 슬럼프 플로우와 고성능 감수제 사용량을 나타낸 것이다. 고성능 감수제를 결합재 중량의 0.52~0.60% 첨가할 때 슬럼프 플로우는 650~670mm의 범위의 값을 나타냈다.

일반적으로 GGBFS는 콘크리트의 유동성을 향상시키는 것으로 알려져 있고, GGBFS가 대량으로 혼합된 고강도 페이스트와(Jeong et al. 2015a) 모르타에(Jeong et al. 2015b) 대한 연구결과에서도 GGBFS를 사용한 배합의 유동성이 더 높은 것으로 나타났다. 콘크리트 배합에서는 고로슬래그 배합의 고성능 감수제 첨가량이 약간 증가하는 것으로 나타났지만, 그 차이는 0.1% 가량이므로 거의 유사한 수준의 유동성을 보이는 것으로 볼 수 있다. 콘크리트는 페이스트 자체의 유동성에 의한 영향 외에도 페이스트-골재의 마찰에 영향을 받기 때문에 GGBFS에 의한 유동성의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

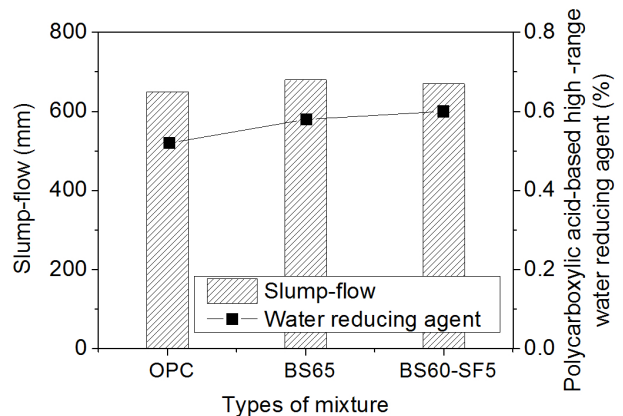


Fig. 2. Slump flow and water reducing agent

### 3.2 압축강도 발현 특성

Fig. 3은 재령에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 재령 3일에서 OPC가 가장 높고, BS65와 BS65-SF5는 OPC 보다 약10MPa 정도 낮게 나타나지만, 재령 7일부터 GGBFS 및 SF를 사용한 배합의 압축강도가 OPC보다 높아졌다. 이 결과는 Jeong et al. (2015a)의 연구에서 제시된 고강도 시멘트 페이스트의 강도 발현 특성과 일치하는 것이다. Jeong et al. (2015a)의 연구에 따르면 GGBFS를 혼입한 배합은 치환율이 클수록 수화열 발열 피크는 낮아지고 피크가 발생하는 시간이 길어져 초기 수화는 지연되지만, 76시간까지의 누적 발열량은 오히려 OPC 배합보다 높은 것으로 나타났고, 재령 7일 이후부터 강도가 높아지는 결과를 보였다. Jeong et al. (2015a)에 따르면 물-결합재비가 극히 낮은 조건에서 GGBFS로 시멘트를 대체하여 상대적인 물-시멘트비가 증가하게 됨으로써

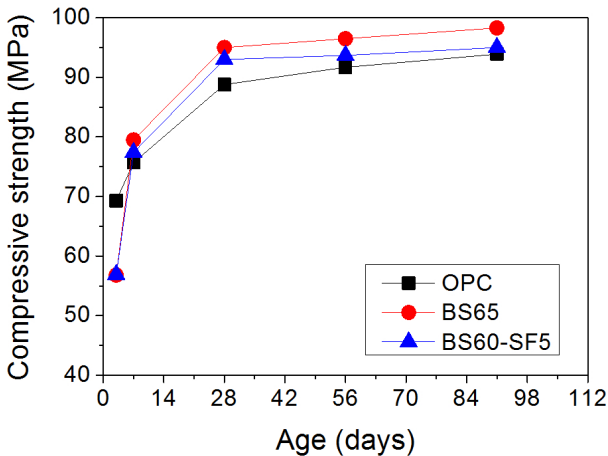


Fig. 3. Compressive strength development with age

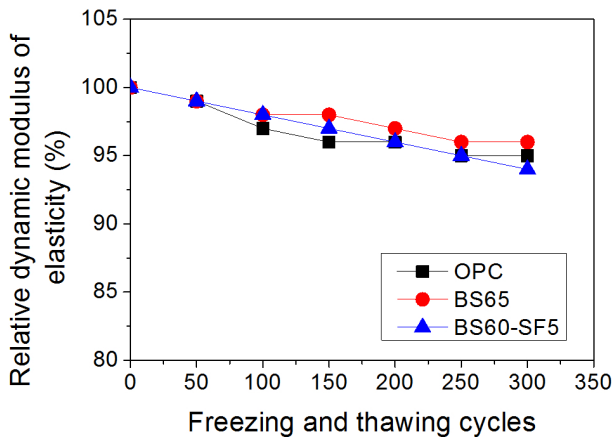


Fig. 4. Relative dynamic modulus of elasticity with freezing and thawing cycle

시멘트의 수화도가 증가하는 효과(이를 dilution effect라 함)가 초기 강도 증가의 원인이라고 판단된다.

보통강도의 GGBFS를 혼입한 콘크리트가 재령 28일 이후부터 장기강도 발현이 나타난 것과는 달리(Mehta et al. 2004), 재령 28일 이후에도 GGBFS를 65% 혼입한 배합(BS65)의 하중 증가 곡선의 기울기는 OPC와 거의 유사하거나 약간 낮고, GGBFS 60%에 SF를 5% 혼입한 배합(BS60-SF5)의 기울기는 OPC보다 더 낮았다. 이는 시멘트의 반응 생성물인 수산화칼슘이 매우 적기 때문에 수산화칼슘과의 포졸란 반응이 보통강도 콘크리트에 비해 충분히 활성화되지 못한다는 것을 시사한다(Jeong et al. 2015a).

또한 SF의 사용에 따른 강도 개선 효과가 없고 오히려 강도가 낮아진 것은 물-결합재비가 매우 낮은 배합에서 분말도가 높은 SF를 혼입하게 되면 SF가 수분을 흡착함으로써 시멘트와 GGBFS의 수화반응을 억제하는 작용을 했기 때문이라고 판단된다(Madani et al. 2012; Jeong et al. 2015a).

### 3.3 내구성

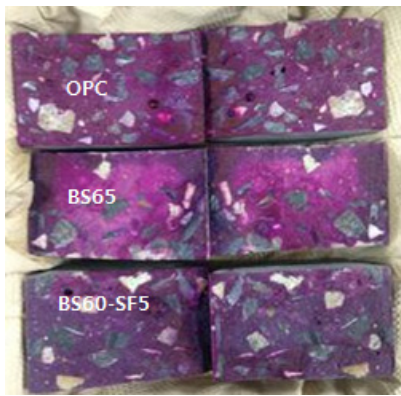
#### 3.3.1 동결융해 저항성

Fig. 4는 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수를 나타낸 것이다. 300cycles에서 상대동탄성계수는 모든 배합에서 94% 이상으로 나타나 동결융해 저항성이 매우 우수하고, GGBFS 및 SF의 혼입에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 별도의 공기연행제를 사용하지 않았으므로 굳지 않은 상태에서 측정된 공기량은 1.4% 내외의 값을 나타냈다. 이와 같이 적은 공기량으로도 동결융해 저항성이 높게 나타나는 것은 낮은 물-결합재비를 가지는 고강도 콘크리트는 수분의 침투가 억제되기 때문이며, 이는 공기연행 없이 동결융해에 의한 열화작용에 저항하기 위해서는 물-시멘트비가 0.24 이하이어야 하는 기존의 연구결과(Mindess et al. 2003)와 일치한다.

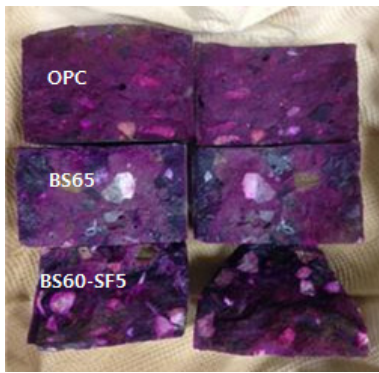
#### 3.3.2 탄산화 저항성

콘크리트의 탄산화는 공기 중의 CO<sub>2</sub>와 수화반응으로 생성된 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이 반응해 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 생성하면서 콘크리트의 pH가 낮아지는 현상을 말한다. GGBFS를 대량으로 사용할 경우 Ca(OH)<sub>2</sub>의 생성량이 적어지고 포졸란 반응으로 Ca(OH)<sub>2</sub>가 소비되면서 콘크리트의 pH가 낮아지므로 탄산화 속도가 빨라질 수 있다. Ryu et al. (2012a)은 GGBFS의 치환율이 증가할수록 탄산화 속도가 증가한다고 보고하였다.

그러나 Fig. 5에서 알 수 있듯이 GGBFS를 결합재의 65%까지



(a) Age 56days



(b) Age 91days

Fig. 5. Photograph of measured specimens for accelerated carbonation of concrete

치환한 경우를 포함한 모든 배합에서 재령 91일까지 탄산화의 진행이 관찰되지 않았다. 이는 콘크리트의 압축강도가 90MPa 이상으로 조직이 매우 치밀하여 이산화탄소의 침투가 억제되기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로 90MPa 이상의 고강도 콘크리트는 다량의 GGBFS를 혼입한 경우에도 OPC만을 적용한 경우와 동등 이상의 탄산화 저항성을 가진다는 것을 알 수 있다.

### 3.3.3 염소이온 투과 저항성

Fig. 6은 재령에 따른 염소이온 확산계수를 나타낸 것이다. 배합 종류별 염소이온 확산계수를 살펴보면 BS65가 가장 낮고, OPC가 가장 높아 GGBFS를 혼입함으로써 염소이온 투과 저항성이 크게 향상된다는 것을 알 수 있다. 반면 GGBFS 60%와 SF 5%를 치환한 배합(BS60-SF5)은 OPC보다 염소이온 확산계수가 낮지만, GGBFS만 65% 혼입한 배합(BS65)보다는 높아졌다. 이와 같은 현상은 앞서 강도 발현 특성에서 설명한 바와 같이 분말도가 높은 SF가 시멘트 수화에 필요한 수분을 흡착함으로써 시멘트의 수화를 방해하고, 결과적으로 공극률이 증가하기 때문이라고 판단된다. Jeong

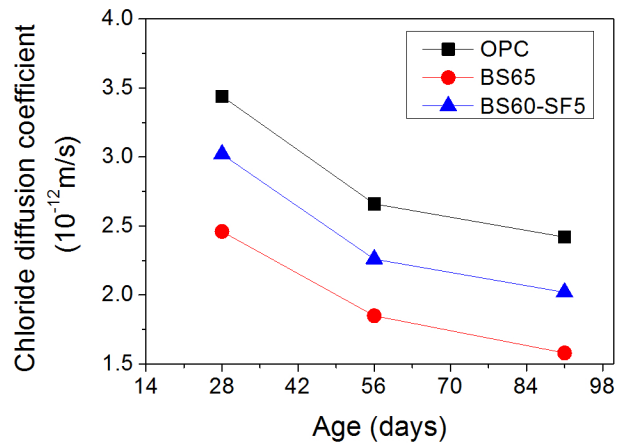


Fig. 6. Chloride diffusion coefficient with age

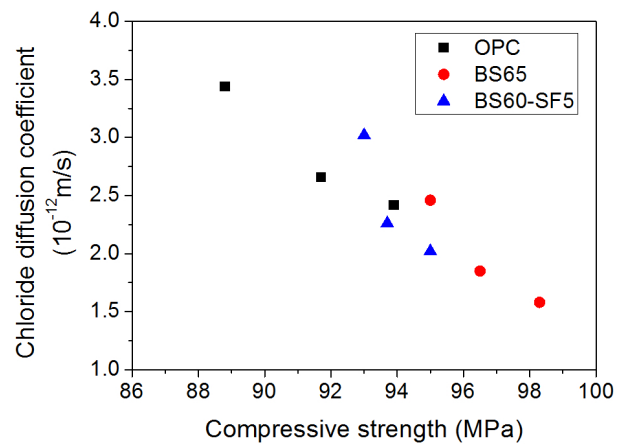


Fig. 7. Relation between compressive strength and chloride diffusion coefficient

et al. (2015a, 2015b)의 연구결과에 따르면 GGBFS를 혼입한 고강도 시멘트 페이스트는 압축강도 향상과 함께 공극률이 감소하였으나, SF를 GGBFS와 함께 혼입하면 GGBFS만 혼입한 경우보다 강도는 낮아지고 공극률은 커지는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 압축강도와 염소이온 확산계수의 관계를 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 염소이온 확산계수는 압축강도가 증가할수록 감소한다. 요컨대 GGBFS를 혼입한 고강도 콘크리트는 강도의 증가와 함께 공극구조가 더 치밀해짐으로써 염소이온 투과 저항성 뿐 아니라 탄산화 저항성과 동결융해 저항성 등 내구성이 전반적으로 향상될 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 GGBFS를 결합재의 65%까지 혼입한 물-결합재비

23%의 고강도 고품량 고로슬래그 콘크리트의 강도 발현 특성과 내구성을 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. GGBFS를 결합재의 65% 혼입한 고강도 콘크리트와 GGBFS와 SF를 각각 60%, 5% 혼입한 고강도 콘크리트의 유동성은 OPC만을 사용한 경우와 거의 유사한 수준으로 나타났다. 시멘트 페이스트는 GGBFS를 혼입하면 유동성이 증가되지만, 콘크리트의 유동성은 페이스트 자체의 유동성 외에도 시멘트 페이스트-골재 간의 마찰에 영향을 받기 때문에 GGBFS에 의한 유동성의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않았다.
2. GGBFS를 65% 혼입한 고강도 콘크리트와 GGBFS와 SF를 각각 60%, 5% 혼입한 고강도 콘크리트의 압축강도는 재령 3일까지는 OPC만을 사용한 콘크리트보다 낮지만 재령 7일 이후부터 더 높아졌다. 이것은 물-결합재비가 극히 낮은 조건에서 GGBFS로 시멘트를 대체하여 상대적인 물-시멘트비가 증가하게 됨으로써 시멘트의 수화도가 증가하는 dilution effect에 기인한 것으로 판단된다.
3. 보통강도 콘크리트와 달리 재령 28일 이후의 장기 강도의 발현 속도는 GGBFS를 혼입한 경우와 GGBFS와 SF를 함께 혼입한 경우가 OPC만을 사용한 배합보다 오히려 낮았다. 이것은 고강도 콘크리트에서 GGBFS를 다량 혼입하면 시멘트의 수화반응 생성물인  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 지나치게 적어져 포졸란 반응이 충분히 활성화되지 못하기 때문이라고 볼 수 있다.
4. GGBFS와 함께 SF를 5% 혼입한 배합은 OPC만 사용한 배합보다는 높은 강도를 나타냈지만, GGBFS만을 혼입한 배합보다는 강도가 낮아져 물-결합재비가 극히 낮은 경우에는 분말도가 높은 SF가 시멘트 수화에 필요한 수분을 흡착함으로써 오히려 시멘트 수화를 억제한다는 기존 연구결과와 일치하는 결과를 보였다.
5. 동결융해 저항성과 탄산화 저항성은 GGBFS와 SF의 유무에 관계없이 우수한 것으로 나타났다. 물-결합재비 23%의 고강도 콘크리트는 조직이 매우 치밀하여 수분과 이산화탄소의 침투가 억제되기 때문에 별도의 공기연행 없이도 우수한 동결융해 저항성을 확보할 수 있으며,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 감소에도 불구하고 우수한 탄산화 저항성을 확보할 수 있다.
6. GGBFS를 혼입한 고강도 콘크리트는 강도의 증가와 함께 공극 구조가 더 치밀해짐으로써 염소이온 투과 저항성이 커지고, 이로 인해 탄산화 저항성과 동결융해 저항성 등 내구성이 전반적으로 향상된다.
7. SF를 GGBFS와 함께 혼입하면 GGBFS만 혼입한 경우보다 강

도는 낮아지고 공극률은 커져 염소이온 투과 저항성이 상대적으로 낮았다. 따라서 향후 고강도 고품량 고로슬래그 콘크리트에서의 SF의 반응에 대해서는 보다 심층적인 연구가 요망된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 연구비 지원(과제번호: PK1501B)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Cho, C.G., Lim, H.J., Yang, K.H., Song, J.K., Lee, B.Y. (2012). Basic mixing and mechanical tests on high ductile fiber reinforced cementless composites, *Journal of the Korea Concrete institute*, **24(2)**, 121–127 [in Korean].
- Choi, S.W., Ryu, D.H., Kim, H.S., Kim, G.Y. (2013). Hydration properties of low carbon type low heat blended cement, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **13(3)**, 218–226 [in Korean].
- Chong, W., Changhui, Y., Fang, L., Chaojun, W., Xincheng, P. (2012). Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials, *Cement and Concrete Composites*, **34**, 538–544.
- Gengying, L., Xiaohua, Z. (2003). Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, **25**, 293–299.
- Halit, Y., Mert, Y., Hüseyin, Y., Serdar, A., Selcuk, T. (2010). Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, **32**, 639–648.
- Hester, D., McNally, C., Richardson, M.G. (2005). Study of influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete, *Construction and Building Materials*, **19(9)**, 661–665.
- Hogan, F.J., Meusel, J.W. (1981). Evaluation for durability and strength development of a ground granulated blast furnace slag, *Cement, Concrete and Aggregate*, **3(1)**, 40–52.
- Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, S.I. (2015 a). Effects of cement replacement ratio and fineness of GGBFS on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength

- high-volume GGBFS blended cement pastes, Journal of the Korea Concrete Institute, **27(2)**, 115–125 [in Korean].
- Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, S.I. (2015 b). Effects of limestone powder and silica fume on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength high-volume GGBFS blended cement mortars, Journal of the Korea Concrete Institute, **27(2)**, 127–136 [in Korean].
- KS F 2405. (2010). Standard test method for compressive strength of concrete, KSA.
- KS F 2456. (2013). Standard test method for concrete to rapid freezing and thawing, KSA.
- KS F 2563. (2009). Ground granulated blast-furnace slag for use in concrete, KSA.
- KS F 2567. (2009). Silica fume for use in concrete, KSA.
- KS F 2584. (2010). Standard test method for accelerated carbonation of concrete, KSA.
- KS L 5201. (2013). Portland cement, KSA.
- Leng, F., Feng, N., 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**, 989–992.
- Madani, H., Bagheri, A., Parhizkar, T. (2012). The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement, Cement and Concrete Research, **42**, 1563–1570.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2004). Concrete, microstructure, properties, and materials, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 659.
- Mindess, S., Young, J.F., David, D. (2003). Concrete, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, 644.
- NT Build 492 (1991). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest method.
- Ryu, D.W., Kim, W.J., Yang, W.H., Park, D.C. (2012 a). An experimental study on the carbonation and drying shrinkage of concrete using high volumes of ground granulated blast-furnace slag, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **12(4)**, 393–400 [in Korean].
- Ryu, D.W., Kim, W.J., Yang, W.H., You, J.H., Ko, J.W. (2012b). 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].

### 고강도 고탐량 고로슬래그 콘크리트의 강도 발현 특성 및 내구성

본 연구에서는 고강도 고탐량 고로슬래그 콘크리트의 개발을 위해 고로슬래그 미분말(GGBFS)을 65%까지 치환한 물-결합재비 23%의 고강도 콘크리트를 대상으로 압축강도 발현 특성과 내구성을 분석하였다. 연구 결과에 따르면 GGBFS를 65% 혼입한 고강도 콘크리트의 압축강도는 재령 3일까지는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)만을 사용한 콘크리트보다 낮지만 재령 7일 이후부터 더 높아지는 것으로 나타났으며, 강도의 증가와 함께 공극구조가 더 치밀해짐으로써 염소이온 투과 저항성이 커지고, 이로 인해 별도의 공기연행 없이도 우수한 동결융해 저항성을 확보할 수 있으며, 수산화칼슘의 감소에도 불구하고 우수한 탄산화 저항성을 나타냈다. 반면 실리카푼(SF)을 GGBFS와 함께 혼입하면 GGBFS만 혼입한 경우보다 강도는 낮아지고 염소이온 투과 저항성이 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 향후 고강도 고탐량 고로슬래그 콘크리트에서의 SF의 반응에 대한 심층적인 연구가 요망된다.