

## 저분말도 고로슬래그 미분말(3000급)을 혼입한 콘크리트의 내구성능평가

이승현<sup>1</sup>, 조성준<sup>2</sup>, 권성준<sup>3\*</sup>

### Evaluation of Durability Performance in Concrete Incorporating Low Fineness of GGBFS (3000 Grade)

Seung-Heun Lee<sup>1</sup>, Sung-Jun Cho<sup>2</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>3\*</sup>

**Abstract:** When GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) with high blaine is incorporated in concrete, compressive strength in the initial period is improved, but several engineering problems arise such as heat of hydration and quality control. In this paper, compressive strength and durability performance of concrete with 3,000 Grade-low fineness slag are evaluated. Three conditions of concrete mixtures are considered considering workability, and the related durability tests are performed. Although the strength of concrete with 3,000 Grade slag is slightly lower than the OPC(Ordinary Portland Cement) concrete at the age of 28 days, but insignificant difference is observed in long-term compressive strength due to latent hydration activity. The durability performances in concrete with low fineness slag show that the resistances to carbonation and freezing/thawing action are slightly higher than those of concrete with high fineness slag, since reduced unit water content is considered in 3,000 Grade slag mixture. For the long-term age, the chloride diffusion coefficient of the 3000-grade slag mixture is reduced to 20% compared to the OPC mixture, and the excellent chloride resistance are evaluated. Compared with concrete with OPC and high fineness GGBFS, concrete with lower fineness GGBFS can keep reasonable workability and durability performance with reduced water content.

**Keywords:** GGBFS, Fineness, Compressive Strength, Durability

## 1. 서 론

최근 구조물의 초고층화 및 대형화가 됨에 따라 콘크리트의 높은 내구성과 성능이 요구되고 있다(Han and Kim, 2011; Park et al, 2013). 이러한 고기능성 구조물을 건설하기 위해서 콘크리트의 품질뿐만 아니라 내구적, 역학적 성능도 확보되어야 하기 때문에 합리적인 배합 및 혼화재료의 선택이 필요하다. 콘크리트는 뛰어난 공학적 장점과 내구성을 가지고 있는 대표적인 건설재료이다. 하지만 해양구조물의 해수에 의한 염해, 산성비와 같은 높은 이산화탄소의 노출로 인한 콘크리트 탄산화, 한랭지역 구조물의 동결융해 등 여러 열화인자에 노출되게 되면 물리적 혹은 화학적 요인으로 내구성이 크게 저하된다고 알려져 있다(Broomfield, 1997; RILEM, 1994; Kim, 2001). 이에 내구성저하 원인 분석 및 대책 방안에 대한 많은 연구가 진행되어지고 있다(ACI, 2008; Ishida and

Maekawa, 2000; Hong et al, 2017; Yoon et al, 2007; Lee and Park, 2018). 대책 방안 중 하나인 혼화재료의 사용은 시공 원가절감 및 수화열에 의한 온도상승 억제 등 여러 장점들을 가지고 있고, 열화환경에서의 저항성을 크게 개선시킬 수 있다(Kwon et al, 2007; Lee and Kwon, 2016). 대표적인 혼화재료로는 플라이애시, 고로슬래그, 실리카폼 등이 있는데, 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)의 경우 1950년대 이후 공학적 장점과 환경부하 저감성능으로 인해 콘크리트에 많이 사용되고 있다.

GGBFS 미분말은 공학적 성능이 입증된 혼화재료로서 현재 활발히 이용되고 있다. 일반적인 시멘트보다 분말도가 높으며, 잠재수경성 반응을 통하여 내부조직을 치밀화함으로써 내구성 향상에 도움을 준다. 하지만 초기강도 발현의 경우 잠재수경성반응이 충분히 발현되지 않아 일반 배합 대비 낮은 강도를 나타내지만 장기재령의 경우 잠재수경성으로 인해 보다 높은 강도가 발현되며 지속적으로 강도가 증진된다(Lee et al, 2012).

GGBFS 미분말은 공학적, 경제적인 장점을 많이 가지고 있으나, 초기재령 강도 저항성 문제, 양생기간의 확보, 건조수축의 증가 등 대형 구조물 적용시 문제점을 야기하기도 한다. 특히 단위 결합재량이 많은 고분말 GGBFS 배합의 경우, 작업성

<sup>1</sup>정희원, 군산대학교 신소재공학과 정교수

<sup>2</sup>정희원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

<sup>3</sup>정희원, 한남대학교 건설시스템공학과 부교수

\*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

문제가 발생하기 쉬우며, 건조수축 및 자기수축의 증가, 상대적으로 긴 수화열의 유지 등 재료거동에 따른 균열이 발생하기 쉽다. 또한 다량의 GGBFS를 사용하여 초기의 수화열이 제어되지 않을 경우 DEF(Delayed Ettringite Formation)로 인한 균열 및 콘크리트 팽창으로 인한 치수안정성(Dimensional Stability)에 대한 문제가 보고되고 있다(Rajamurugan et al, 2018; Nordine et al, 2016).

저분말도 GGBFS를 사용할 경우, 초기강도의 저하를 가장 큰 문제로 들 수 있지만, 수화열에 대한 균열저항성을 높일 수 있으며, 작업성 개선에도 큰 효과를 줄 수 있다. 국내의 KS 기준의 경우, GGBFS 미분말 4000 ~ 6000 cm<sup>2</sup>/g의 분말도를 3등급으로 고려하고 있으나, 이미 일본의 JIS A 6206-13에서는 2750 ~ 3500 cm<sup>2</sup>/g 분말도 사용을 고려하고 있으며, BS 6699-92에서도 2750 cm<sup>2</sup>/g 이상의 분말도를 사용하고 있는 실정이다(JIS A 6206, 2013; BS 6699, 1992).

본 연구는 3000급 GGBFS를 제조하여 동일 설계강도를 가지는 OPC 배합 및 4000급 GGBFS 배합과의 강도 및 내구특성 비교에 대한 연구이다. 설계강도 24 MPa를 기준으로 하였으며, 4000급 GGBFS의 일반배합과 단위수량을 조절하여 작업성(동일 슬럼프)을 고려한 3000급 GGBFS 배합, 그리고 물-시멘트비 50%인 OPC 배합을 사용하여 역학적, 내구적 성능을 평가하여 분석하였다. 특히 장기적으로 GGBFS 콘크리트의 대표적인 장점인 내구성 개선이 분말도 감소 시 어떻게 변화할지에 대한 분석을 위하여 다양한 내구특성 실험이 수행되었다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험개요

본 연구는 서로 다른 분말도를 가지는 GGBFS (4200cm<sup>2</sup>/g, 3000cm<sup>2</sup>/g) 콘크리트와 OPC 콘크리트에 대해 역학적 특성 및 내구성능실험을 실시하였다. 측정항목으로는 압축강도, 동결융해시험, 급속 염화물 침투 저항성 시험, 촉진 탄산화 시험, 흡수율 시험을 실시하여 그 결과를 분석하였다.

### 2.2 배합 및 사용재료

본 연구를 위해 설계강도 24 MPa, 목표 슬럼프 150 ± 25 mm, 목표 공기량 4.5 ± 0.5%을 가진 콘크리트 배합이 고려되었으며, 2 수준의 GGBFS 미분말의 분말도(4200 cm<sup>2</sup>/g, 3000 cm<sup>2</sup>/g)를 고려하여 배합을 진행하였다. 배합에 따른 혼합은 트윈 타입 믹서를 사용하였다. 강제식 팬타입 믹서에 시멘트, 골재를 투입하여 건비빔을 30초 동안 저속(20 rpm)으로 진행하였고, 건비빔 후 물을 넣고 60초 동안 중속(30 rpm)으로 비

빈 후, 혼화제를 첨가하여 90초 동안 고속(40 rpm)으로 비빔하여 믹싱을 완료하였다. 계획된 실험을 진행하기 위해 Ø 100 × 200 mm 원주형 공시체와 100 × 100 × 400 mm 직사각형 공시체를 제작하였다. 제작 후 24시간 기건양생을 마친 몰드를 탈형하여 20°C 항온 수중양생을 수행하였다. 3000급 GGBFS 미분말은 급냉 고로슬래그와 태국산 무수석고를 실험실용 볼밀에서 각각 분쇄한 후, SO3 3.8 mass%를 기준으로 헨셀믹서에서 혼합하여 제조하였다.

Table 1 및 Table 2는 본 연구에서 사용된 배합사항과 화학적 특성을 나타내었고, Table 3 골재특성을 나타내었다.

**Table 1** Mix proportions for all cases

Case	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	GGBFS		S	G	A.D (%)
					3000	4200			
OPC	50	46	170	340	-	-	807	998	0.5
4200BFS	50	45	170	170	170	-	784	1010	0.7
3000BFS	47	46	160	170	-	170	813	1006	0.5

**Table 2** Chemical composition of OPC and GGBFS

Case	Chemical composition (%)							Physical properties	
	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>	etc.	Specific gravity (cm <sup>3</sup> /g)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	1.83	3.16	3,214
4200BFS	32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	2.02	2.89	4,340
3000BFS	32.10	12.97	0.38	43.27	5.50	3.80	1.98	2.88	3,050
Anhydrite	1.43	1.14	0.35	39.03	0.75	53.15	4.15	2.31	3,810

**Table 3** Properties of aggregate

Types	Items	Gmax (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.
Fine Agg.		-	2.58	1.01	2.90
Coarse Agg.		25.00	2.64	0.82	6.87

### 2.3 측정항목

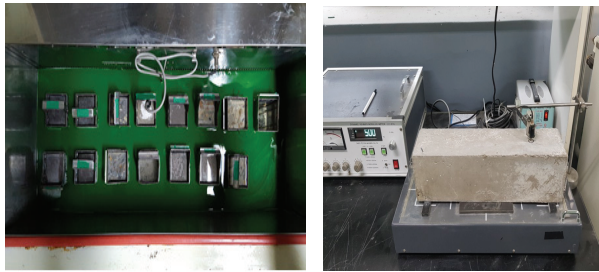
#### 2.3.1 압축강도

3 가지 배합의 압축강도 평가방법으로는 제작된 Ø 100 × 200 mm 원주형 공시체를 탈형 후 양생기간(3, 7, 28, 91일)이 끝난 시점에 KS F 2405에 의거하여 측정하였다.

#### 2.3.2 동결융해시험

동결융해시험은 KS F 2456에 준하여 수중 급속 동결융해 실험을 실시하였다. 일반적인 동결융해실험 반복 사이클은 공시체의 온도를 2 ~ 4 시간 사이에 4 °C ~ - 18 °C로 교대로 변환시키는 조건을 1 Cycle로 설정하고 있다. 본 실험에서는 목

표 사이클 0 Cycle, 100 Cycle, 200 Cycle, 300 Cycle로 설정하여 공시체의 온도와 동결융해 시험의 요구조건과 일치시켰다. 각 사이클에 배합별 공명진동수, 질량, 외관변화를 측정하고 측정된 데이터를 활용하여 상대동탄성계수비 및 중량 감소율을 계산하였다. Fig. 1 (a)에서는 동결융해실험 평가 전경을 나타내었고, (b)와 같이 공명진동수를 측정하였다. 또한 목표 Cycle의 공명진동수와 동결융해 반복작용을 받기 전 공시체의 공명진동수를 식 (1)에 대입하여 상대동탄성계수비로 산출하였다.



(a) Specimens in apparatus (b) A photo for resonance frequency

Fig. 1 Picture of specimen in freezing/thawing apparatus

$$E_{dc} (\%) = (n_1/n)^2 \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $E_{dc}$  는  $c$  사이클에서 상대동탄성계수비 (%),  $n_1$  는  $c$  사이클에서의 공명진동수 (Hz),  $n$  는 초기 공명동수 (Hz)이다.

### 2.3.3 급속 염화물 침투 저항성 시험

본 실험에서는 염화물 침투 저항성을 평가하기 위해 KS F 2711에 의거하여 전기전도도에 의한 콘크리트의 통과 전하량을 측정하였다.  $\varnothing 100 \times 50$  mm의 디스크 시편을 제작 후 1방향 침투를 위해 침투면을 제외한 바깥쪽 면을 전처리하였다. 이후 촉진 염화물 측정장비를 활용하여 실험장치 (+)극에는 NaOH 0.3N을 투입, (-)극에는 3.0%의 NaCl을 투입하여 실험을 진행하였다. KS F 2711에서 제시하는 통과 전하량 산정식에 측정된 전류값을 대입하여 통과 전하량을 산출하였고, 산출한 통과 전하량에 따라 배합별 염소이온 침투성을 확

Table 4 Evaluation standard by KS F 2711

Total passed charge (Coulomb)	Chloride Ions Permeability
$\geq 4,000$	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
$\leq 100$	Negligible

인하였다. Table 4는 범위구간과 비교하여 산출된 전하량에 따른 염소이온 침투성 기준을 나타내었다.

식 (2)에서는 KS F 2711에서 제시하는 통과 전하량 산정식을 나타내었다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2)$$

여기서,  $Q$  는 통과 전하량(C),  $I_0$  는 전압을 가한 직후의 전류(A),  $I_t$  는 전압을 가한 후  $t$ 분 경과 후의 전류(A)이다.

또한 통과 전하량을 통해 환산된 촉진 염화물 확산계수를 도출하기 위해 기존의 연구(Yoon and Kwon, 2018)를 이용하여 ASTM C 1202에 제시된 식을 활용하여 촉진 염화물 확산계수를 도출하였다. 식 (3)은 ASTM C 1202에 제시된 통과 전하량과 촉진 염화물 확산계수 상관식을 나타내었다.

$$D = Q_{total}^{0.84} \times 0.0103 \times 10^{-12} \quad (3)$$

여기서,  $D$  는 촉진 염화물 확산계수 ( $m^2/sec$ ),  $Q$  = 통과 전하량 (C)이다.

### 2.3.4 촉진탄산화 시험

탄산화 실험은 KS F 2584에 준하여 촉진탄산화 실험으로 진행하였다. 제작된 원주형 공시체를 거푸집에서 탈형 후 목표재령일(28일, 91일)까지 수중양생을 진행하였고, 양생을 마친 공시체는 실험을 진행하기 위해 KS규격에 맞추어  $\varnothing 100 \times 40$  mm의 디스크 시편으로 제작하였다. 제작된 시편은 1 방향 이산화탄소 침투를 유도하기 위하여 침투면을 제외한 나머지 면을 에폭시로 도포한 뒤 상대 습도 ( $60 \pm 5\%$ ), 온도 ( $20 \pm 2$ )  $^{\circ}C$ 의 항온 항습실에서 8주동안 정치하였다. 항온 양생까지 마친 시편은 이산화탄소 농도 ( $5.0 \pm 0.2\%$ )로 설정한 탄산화 시험기에 투입하여 촉진탄산화 시험을 실시하였다. 시험기에 내부에 시편을 존치 후 노출기간을 4주로 설정하여 시험을 진행하였다. 4주간의 노출기간이 지나게 되면 시편을 꺼내어 할렬한 뒤 1%인 페놀프탈레인-알코올 지시약을 분무하여 탄산화 침투깊이를 측정하였다. Table 5에서는 촉진탄산화 실험의 실험조건을 나타내었다.

Table 5 Accelerated carbonation test conditions

Temperature	Relative Humidity	CO <sub>2</sub>
$20 \pm 2$ $^{\circ}C$	$60 \pm 5\%$	$5 \pm 0.2\%$

### 2.3.5 흡수율 시험

콘크리트내의 수분 및 이온의 이동은 공극구조와 관련이

있으며 이러한 공극구조를 평가하는 기본적인 실험으로는 흡수율 시험을 들 수 있다. 물론 공극분포 등에 대해서는 MIP 및 질소흡착법과 같은 방법이 사용되기도 하지만, 많은 연구에서 흡수율(Absorption ratio) 및 이와 관련된 Sorptivity에 대한 연구는 내구성의 지표로 사용되어 진다. 수분이동에 대한 연구는 수화반응을 제외하고 바인더에 흡착 또는 반응하지 않기 때문이다(Ishida et al, 1998; Song and Kwon, 2007).

3가지 배합의 시편별 흡수율을 측정하기 위해  $\varnothing 100 \times 50$  mm 디스크시편으로 실험을 진행하였다. 시편의 함수 상태를 표면 건조 포화 상태로 만들기 위해  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 의 수중에 24시간 충분히 수분을 포화시켰다. 이후 시편을 꺼내어 흡수천 위에 올려 수막을 제거하고 표면 건조 포화 상태의 질량을 측정하였다. 질량 측정을 마친 후  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 의 건조기에 투입하여 질량의 변화가 없을 때까지 건조 시키고, 실온까지 냉각하여 절대 건조 상태의 질량을 측정하였다.

$$Q = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (4)$$

여기서  $Q$ 는 흡수율(질량백분율)(%),  $A$ 는 절대 건조 상태 시편의 질량(g),  $B$ 는 표면 건조 포화 상태 시편의 질량(g)이다. 각 함수상태의 측정된 질량을 위에 제시된 산정식에 대입하여 흡수율을 산출하였다.

### 3. 저분말 슬래그 콘크리트의 내구성능 평가

#### 3.1 배합에 따른 재령별 강도특성

배합별 재령에 따른 압축강도 측정 결과를 Fig. 2에 그래프로 도시하였다.

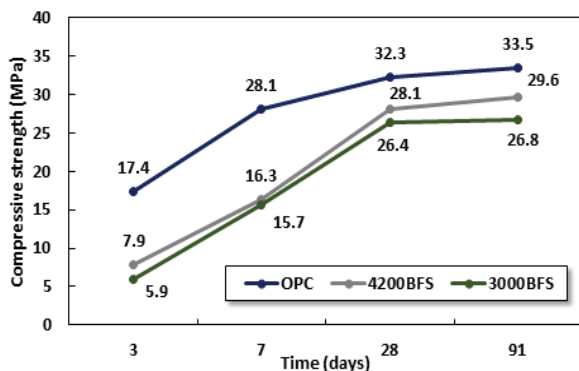


Fig. 2 Result of compressive strength

모든 배합은 재령 28일의 시점에서 24 MPa 이상의 값을 모두 만족하였다. 재령 7일 대비 91일의 강도는 OPC 배합에서는 1.2

배, 3000BFS 배합에서는 1.7배, 4200BFS 배합에서는 1.8배로 증가하는 경향이 나타났다. 재령 91일에서의 강도를 비교평가해보면 OPC 배합 대비 GGBFS 배합은 80.1%~88.2%로 큰 차이는 나타나지 않는다. 이는 초기재령 3일 때의 비교강도 33.9%~45.4%일 때 보다 상당히 높아진 결과를 측정할 수 있다. 이는 재령증가에 의한 GGBFS 배합의 잠재수경성 반응으로 인해 수화물 증가, 공극구조 개선 등의 원인으로 사료된다(Han et al, 2009). 4200BFS와 3000BFS의 차이는 재령 91일까지 7.1%~10.3%으로 차이는 크게 확인되지 않았다.

#### 3.2 동결융해저항성

동결융해저항성시험은 비틀림 진동의 1차 공명진동수를 구하여 상대동탄성계수비를 평가하였다. Table 6에는 산출한 상대동탄성계수비를 나타내었다.

Table 6 Result of relative dynamic modulus of elasticity

Case	Cycle	Relative dynamic modulus of elasticity(%)									
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
OPC-1	100	99.7	99	98.3	96.8	95.6	95.1	93.7	92.9	91.6	89.7
OPC-2	100	99.8	98.9	97.8	96.7	95.8	95.1	94.3	93	91.7	90.1
4200BFS-1	100	99.8	99	98.2	97.1	95.8	95.1	93.9	92.8	91.5	89.8
4200BFS-2	100	99.6	98.7	98.4	96.9	95.7	94.9	94.1	92.7	92.2	89.6
3000BFS-1	100	99.8	98.6	97.8	97.4	95.9	95.3	94.3	92.9	92.4	91.3
3000BFS-2	100	99.9	99	98	96.5	96.5	95	93.9	93.2	92.3	91.3

모든 배합에서 상대동탄성계수비는 80%를 넘는 높은 동결융해저항성을 나타내었는데, 이는 콘크리트 배합 시 AE 감수제를 통하여 충분한 연행공기량이 확보되었기 때문이다. 보통 4.0% 이상의 연행공기량을 포함할 경우, 동결 시 미세공극에서 발생한 팽창압을 근처의 매트릭스에 전달할 수 있으므로 동결융해저항성이 우수한 것으로 알려져 있다(Mun and Kwon, 2016; Park et al, 2016). 초반 Cycle의 경우 상대동탄성계수비는 3가지 배합 모두 큰 차이가 발생하지 않았으나, 최종적으로 300 Cycle 이후 OPC배합과 4200BFS 배합에서 89.7%~90.1%로 비슷한 경향을 보였고, 3000BFS 배합에서 91.3%로 1.02배 높게 측정되었다. 이는 동일 슬럼프를 기준으로 배합을 진행하였기 때문에 3000BFS 배합에서 47%의 비교적 적은 물-결합재비의 영향으로 사료된다. 또한 높은 분말도의 GGBFS를 혼입할 경우 콘크리트 내부의 공극 크기가 감소하여 동해시 팽창압을 크게 받게 되어 동결융해 저항성능에 영향을 미치게 된다. 중량 감소율은 모든 배합에서 0.05% 이하 값으로 산출되었다. 300 Cycle 이후 OPC 배합의 경우 0.0429%, 4200BFS 배합은 0.0465%, 3000BFS 배합은 0.0428%으로 큰 차이가 발생하지 않았다.

### 3.3 염화물 저항성 실험 결과

축진염화물 시험 결과 OPC의 경우 재령 28일에서 전하량은 8186 Coulombs에서 재령 91일에서는 20% 감소된 6561 Coulombs으로 측정되었다. 재령 및 GGBFS의 혼입유무에 따라 일반 OPC 콘크리트의 결과에 비하여 우수한 내염해특성을 나타내었다. 3000BFS 배합의 경우 재령 28일과 91일의 측정결과 1722 Coulombs, 413 Coulombs이 측정되었고, 4200BFS 배합의 경우 1963 Coulombs, 991 Coulombs으로 측정되었다. Fig. 3의 (a) 재령 28일, (b) 재령 91일의 배합별 통과 전하량과 염화물확산 계수를 그래프에 도시하였다.

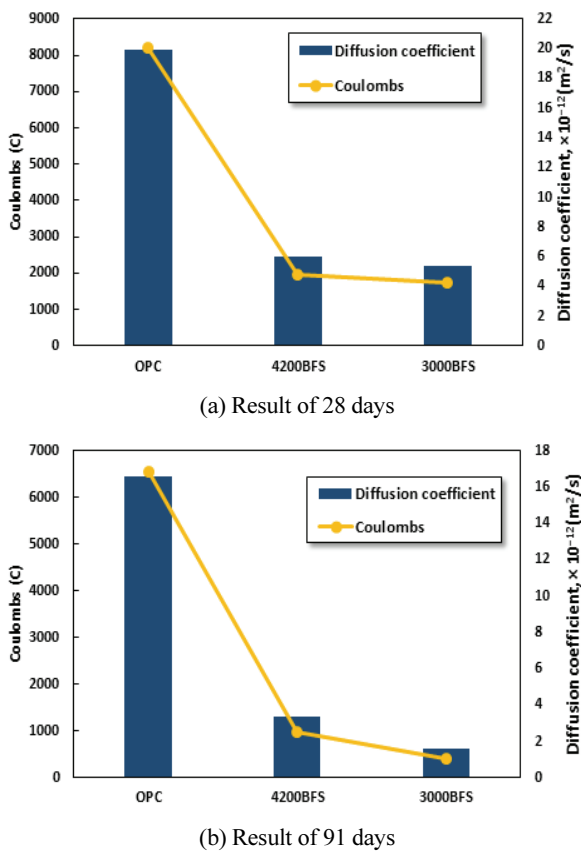


Fig. 3 Total charge passed through concrete and diffusion coefficient of chloride ions

이를 염소이온 침투성 범위를 기준으로 분석하여 보면 OPC 배합의 경우 모든 재령일에서 'High' 범위인 반면, GGBFS를 혼입한 배합의 경우 재령 28일에서 두 배합 모두 'Low', 91일에선 'Very low'인 것으로 조사되었다. ASTM C 1202에 제시된 상관식을 활용하여 염화물 확산계수를 산출한 결과, GGBFS 배합에서 다소 낮은 경향을 확인할 수 있었고, 재령이 증가할수록 모든 배합에서 감소하는 경향을 보였다. 재령 91일의 OPC 배합에서 염화물확산계수는  $16.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 가 나타난 반면,

GGBFS 배합의 경우  $3.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $1.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 으로 3000BFS 배합에서 가장 낮은 결과값이 산출되었다. 이는 GGBFS의 잠재수경성에 따른 콘크리트 조직이 치밀해짐에 따라 수밀성 증가와 염화물 흡착량의 증가로 인해 전하량 및 염화물확산계수가 보다 낮게 측정된 것으로 사료된다(Lee, 2003; Park et al, 2018). 4200BFS 배합의 경우 전하량과 염화물확산계수가 3000BFS 대비 소폭 증가하는 것으로 나타났지만 큰 차이를 나타내지 않아 두 배합 모두 염화물 침투에 대한 충분한 저항성이 있는 것으로 판단된다.

### 3.4 탄산화 침투깊이

축진탄산화 실험을 마친 시편별 재령에 따른 탄산화 침투 깊이를 Fig. 4에 도시하였다.

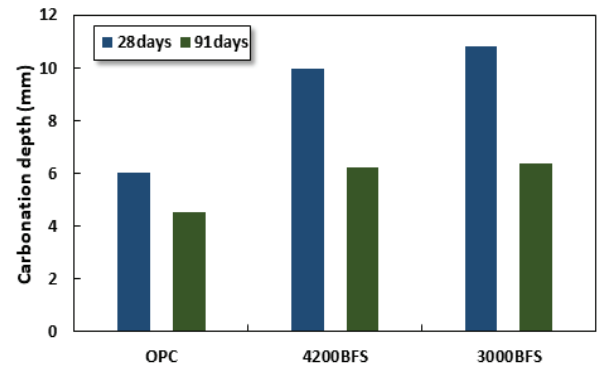


Fig. 4 Result of depth of carbonation

재령 28일의 탄산화 침투깊이를 살펴보면 OPC 배합에서 6.01 mm로 가장 낮게 나타났으며, 3000BFS 배합에서 10.83 mm로 가장 높게 측정되었다. 재령일이 증가할수록 모든 배합에서 침투깊이가 감소하는 경향이 나타나며, 이는 재령일에 증가에 따라 수화물의 생성과 공극구조가 조밀해진 변화가 탄산화 침투에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 91일 재령을 평가해보면 OPC 배합의 경우 침투깊이 1.50 mm로 25.0%의 감소경향을 보이고, 3000BFS 배합의 경우 6.38 mm의 깊이로 58.9% 감소비율을 보인다. 분말도 4200급 GGBFS 배합의 경우 6.23 mm로 62.4%의 가장 높은 감소경향을 나타내었다. GGBFS의 분말도에 따른 결과를 비교분석해보면 재령 28일에서 3000BFS 배합이 4200BFS 배합 대비 0.85 mm 깊게 측정되지만 재령 91일에서 3%의 미세한 차이를 보여 재령이 증가할수록 분말도에 따른 GGBFS의 탄산화 저항성능에 큰 차이가 없다고 판단된다.

### 3.5 흡수율

각 배합별 시편의 흡수율은 재령 28일과 91일로 나누어 측

정하였다. 산출된 흡수율은 Fig. 5의 그래프에 도시하였다.

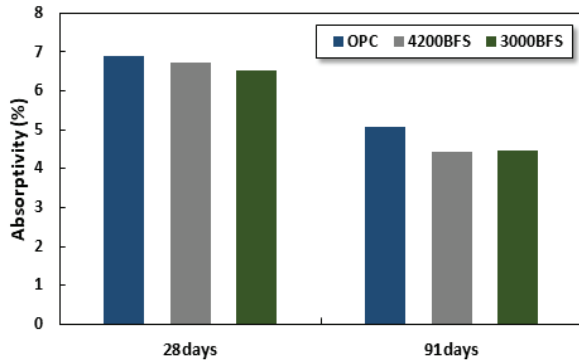


Fig. 5 Result of absorptivity

표면건조 포화상태에 대한 절대 건조중량의 비로 흡수율을 정의하였고, 재령의 증가에 따라 감소되는 경향이 확인되었다. OPC 배합의 경우 28일 대비 91일에서 26% 감소된 5.1%가 산출되었고, 4200BFS 배합과 3000BFS 배합의 경우 34%, 35%이 감소된 4.4%와 4.5%가 산출되었다. 4200BFS 배합에서 4.4%의 가장 낮은 흡수율이 나타났지만, 3000BFS 배합을 고려하였을 때 큰 차이는 나타나지 않아 분말도에 따른 흡수율은 영향이 없다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 분말도가 다른 2종류 GGBFS 미분말을 사용한 콘크리트와 OPC 콘크리트를 대상으로 다양한 내구성능 실험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 압축강도 특성결과 모든 배합에서 목표 설계강도 24 MPa 이상의 값을 만족하는 것으로 나타났으나 3000BFS에서는 4000BFS 배합 보다 10% 정도 낮게 평가되었다. 이는 고분말화가 될수록 반응에 따른 활성화에너지가 크므로 초기강도 확보를 위한 고려가 필요하다.
- 2) AE제를 혼입하여 목표 공기량 4.5%를 만족하였으므로, 모든 배합에서 80% 이상의 상대동탄성계수비가 평가되었으며, 0.05% 이하의 중량 감소율이 평가되었다. 분말도 차이에 따른 동결융해 저항성의 변화는 크지 않았다.
- 3) 염화물저항성능 평가결과 GGBFS 혼입 콘크리트에서 뛰어난 저항성능이 확인되었다. OPC 배합의 경우 모든 재령일에서 'High' 범위인 반면, GGBFS를 혼입한 배합의 경우 재령 28일에서 두 배합 모두 'Low', 91일에선

'Very low'인 것으로 조사되었다. 3000BFS 배합에서 가장 높은 염해 저항성능이 확인되었는데, 이는 4000BFS 보다 낮은 단위수량을 사용한 것이 주된 원인이다. 또한 탄산화 저항성능면에서 GGBFS를 혼입한 콘크리트는 OPC 배합 대비 상대적으로 낮은 저항성능이 발현되었는데, GGBFS 분말도에 따른 탄산화 속도 차이는 크게 평가되지 않았다.

- 4) 단위수량을 10 kg/m<sup>3</sup> 정도 조정하여 3000BFS 배합을 진행할 경우 OPC 배합과 4200BFS 배합 대비 강도특성 및 내구특성에 큰 차이점은 발생하지 않았다. 다만 동일한 물-결합재비를 고려한 배합을 통해 분말도 저하에 따른 특성 변화 등은 고찰할 필요가 있다.

#### References

1. American Concrete Institute Committee-201 (2008), Guide to Durable Concrete; ACI 201R-08; American Concrete Institute (ACI): Detroit, MI, USA.
2. Babu, K. and Kumar, V. S. R. (2000) Efficiency of GGBS in concrete, *Cem. Concr. Res*, 30(7), 1031-1036.
3. Broomfield, J. P. (1997) Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.
4. BS 6699:1992. (1992) Specification for ground granulated blastfurnace slag for use with Portland cement, British Standard.
5. Han, C. G. and Kim, J. B. (2011) Evaluation on the Durability of High Performance Concrete using High Blaine Blast Furnace Slag Powder, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 27(11), 135-142.
6. Han, C. G., Kim, S. H. and Son, H. J. (2009) Engineering Characteristics Analysis of High Strength Concrete Followed in replacement ratio increase in Blast Furnace Slag, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 4(3), 62-68.
7. Hong, S. I., Kim, Y. J. and Ann, K. Y. (2017) Durability Evaluation of Ternary Blended Concrete Structures Under Chloride-laden Environment, *Journal of Korea Concrete Institute*, 29(5), 493-498.
8. Ishida, T., Maekawa, K. (2000). Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory, *Concrete Library of JSCE*, 2000(37), 203-215.
9. Ishida T., Chaube R. P., Kishi, T. and Maekawa, K. (1997) Modeling of pore content in concrete under generic drying wetting conditions, *Concrete Library of JSCE*, 564(35), 275-287.
10. 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 Pastes, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(2), 115-125.
11. JIS A 6206:2013. (2013) Ground granulated blast-furnace slag for concrete, Japanese Standards Association.
12. Kim, J. H., Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Jung, S. H. and Kim, S. I. (2015) Strength Development and Durability of High-Strength High-Volume GGBFS Concrete, *Journal of the Korean Recycled*

- Construction Resources Institute*, 3(3), 261-267.
13. Kim, S. S. (2001) Environment of Deterioration in Reinforced Concrete Structure, *Journal of Korea Concrete Institute*, 2001(11), 3-17.
  14. Kwon, S. J., Park, S. S., Lee, S. M. and Kim, J. H. (2007) A Study on Durability Improvement for Concrete Structures Using Surface Impregnant, *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 11(4), 79-88.
  15. Lee, D. H. (2003) Investigation on the Resistance of Chloride Penetration of Concrete mixed with Granulated Blast Furnace Slag, *Seoul National University of Science and Technology Master Thesis*, 72-73.
  16. Lee, H. H. and Kwon, S. J. (2013) Evaluation of Chloride Penetration in Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag considering Fineness and Replacement Ratio, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 1(1), 26-34.
  17. Lee, S. H., Kim, W. K. and Kang, S. H. (2012) Hydration mechanism of ground granulated blast furnace slag, *Journal of Korea Concrete Institute*, 24(6), 31-34.
  18. Lee, S. T. (2014) Effect of Fineness Levels of GGBFS on the Strength and Durability of Concrete, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(4), 1095-1104.
  19. Lee, S. T. and Park, K. P. (2018) Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Subjected to Carbonation, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 19(2), 623-631.
  20. Mun, J. M. and Kwon, S. J. (2016) Evaluation of Chloride Diffusion Coefficients in Cold Joint Concrete Considering Tensile and Compressive Regions, *Journal of Korea Concrete Institute*, 28(4), 481-488.
  21. Nordine, L., Van, H. N. and Pierre M. (2016) The effect of the partial cement substitution with fly ash on Delayed Ettringite Formation in heat-cured mortars, *Journal of Civil Engineering*, 21(4), 1359-1366.
  22. Ortega, J. M., Sanchez, I. and Climent, M. A. (2012) Durability related transport properties of OPC and slag cement mortars hardened under different environmental condition, *Constr. Build. Mater*, 27(1), 176-183.
  23. Park, J. S., Kim, Y. J., Cho, J. R. and Jeon, S. J. (2013) Characteristics of Strength Development of Ultra-High Performance Concrete according to Curing Condition, *Journal of Korea Concrete Institute*, 25(3), 295-304.
  24. Park, J. S., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018) Relations Analysis between Strength and Time-parameter in High Performance Concrete Containing GGBFS Cured for 1 year, *Journal of Korea Concrete Institute*, 30(4), 375-381.
  25. Park, J. S., Park, S. M., Kim, H. J. and Kwon, S. J. (2016) Evaluation of Engineering Properties in Early-Age Concrete with TDFA, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(5), 1-8.
  26. Rajamurugan, S., Koji M., Kohei N. and Anupam A. (2018) Visual investigation method and structural performance evaluation for DEF induced damaged Indian Railway Pcsleepers, *Journal of Asian Concrete Federation*, 4(2), 103-115.
  27. RILEM. (1994) Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, London, 28-52.
  28. Song, H. W. and Kwon, S. J. (2007) Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37(6), 909-915.
  29. Yoon, I. S., Kim, E. K. and Lee, C. S. (2007) Material Modeling of Concrete for Chloride Diffusivity Considering Carbonation of Concrete, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 27(4), 617-625.
  30. Yoon, Y. S. and Kwon, S. J. (2018) Evaluation of Time-Dependent Chloride Resistance in HPC Containing Fly Ash Cured for 1 Year, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(4), 52-59.
  31. 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 Pastes, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(2), 115-125.

Received : 02/21/2019

Revised : 04/02/2019

Accepted : 05/27/2019

---

**요 지 :** 고분말도 슬래그를 사용할 경우 초기재령에서의 강도발현은 우수하나 수화열 및 품질관리에 따른 문제가 발생하기 쉽다. 본 연구에서는 3000급 저분말도의 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 강도특성 및 내구특성을 분석하였다. 작업성을 기준으로 3가지 배합을 고려하였으며, 압축강도와 내구특성시험이 수행되었다. 강도특성 결과 3000급 슬래그를 혼입한 콘크리트는 28일 재령에서 OPC(Ordinary Portland Cement) 배합 대비 강도가 떨어지지만 장기재령에서는 잠재수경성의 촉진으로 인하여 큰 차이가 나타나지 않았다. 탄산화 및 동결융해 실험에서는 4200급 슬래그 배합 대비 약간 우수한 저항성능이 나타났는데, 이는 동일 슬럼프를 목표로 배합을 진행하여 3000급 슬래그 배합에 단위수량을 적게 고려하였기 때문이다. 장기재령의 경우, 3000급 슬래그 배합의 염화물확산계수는 OPC 배합 대비 20% 수준으로 감소하여 우수한 내염해특성이 평가되었다. 단위수량을 조정하고 3000급 저분말도의 고로슬래그 미분말을 혼입하여 사용할 경우, 기존 분말도의 슬래그가 사용된 콘크리트 및 OPC 콘크리트와 비교시 우수한 작업성능과 내구특성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 고로슬래그 미분말, 분말도, 압축강도, 내구성능

---