

삼성분계 콘크리트와 저분말도 슬래그를 혼입한 콘크리트의 내구 특성

Durability Characteristics in Concrete with Ternary Blended Concrete and Low Fineness GGBFS

김태훈¹ · 장승엽² · 권성준^{3*}Tae-Hoon Kim¹ · Seung-Yup Jang² · Seung-Jun Kwon^{3*}

(Received August 28, 2019 / Revised October 1, 2019 / Accepted October 1, 2019)

GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) has been widely used in concrete for its excellent resistance chloride and chemical attack, however cracks due to hydration heat and dry shrinkage are reported. In many International Standards, GGBFS with low fineness of 3,000 grade is classified for wide commercialization and crack control. In this paper, the mechanical and durability performance of concrete were investigated through two mix proportions; One (BS) has 50% of w/b(water to binder) ratio and 60% replacement ratio with low-fineness GGBFS, and the other (TS) has 50% of w/b and 60% replacement ratio with 4000 grade and FA (Fly Ash). The strength difference between TS and BS concrete was not great from 3 day to 91 day of age, and BS showed excellent performance for chloride diffusion and carbonation resistance. Two mixtures also indicate a high durability index (more than 90.0) for freezing-thawing since they contain sufficient air content. Through improvement of strength in low fineness GGBFS concrete at early age, mass concrete with low hydration heat and high durability can be manufactured.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 저분말도, 염화물 확산, 동결융해, 탄산화

Keywords : GGBFS, Low fineness, Chloride diffusion, Freezing-thawing, Carbonation

1. 서론

최근 콘크리트 구조물은 대형화되고 있으며, 열화 환경에서 소요 성능을 만족하기 위해 고강도, 고유동성 및 고내구성 가진 고성능 콘크리트 연구가 집중되고 있다(Song et al. 2006). 콘크리트는 최소 사용 성능을 확보하기 위해 양생 과정이 필요하고, 타설 후 온도 및 습도와 같은 외부 환경 요인은 철근콘크리트에 물리적, 화학적 변화를 야기한다. 이러한 재료적 거동은 구조적 거동을 발현하기 전에 RC(Reinforced Concrete) 구조물의 성능을 결정하고 변화시킨다.

콘크리트의 열화 중 해수와 제설재 등에 노출되어 염화물 이온 확산으로 인한 염해 및 세계적인 CO₂ 급증과 공기 순환이 어려운

지하 구조물의 구조상 특징으로 인하여 발생하는 탄산화는 철근 부식을 유발한다(Kwon and Yang 2017; Seo and Lee 2002). 또한 한중 콘크리트 및 제설재 영향으로 발생하는 동결융해와 이와 관련된 열화현상은 콘크리트의 균열을 유발하여 사용성 및 구조 안전성에 문제를 야기하기도 한다(Koh et al. 2001).

1종 보통 포틀랜드 시멘트인 OPC(Ordinary Portland Cement)의 경우 과거에는 결합재로서 90% 이상 사용되었지만, 수화열 저감 및 내구성 문제로 1970년대 이후 다양한 혼화재료(Mineral admixture)와 함께 사용되어 개선된 성능을 나타내고 있다. 최근 들어, 이러한 혼화재료를 대단위로 사용하는 HVSC(High Volume Slag Concrete)나 HVFC(High Volume Fly ash Concrete)와 같은 연구도 지속적으로 수행되고 있는데, 이는 환경부하를 저감하고

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹한남대학교 토목환경공학과 석사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²한국교통대학교 교통시스템공학과 부교수 (Department of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Uiwang, 16106, Korea)

³한남대학교 토목환경공학과 부교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

공학적 장점을 극대화하려는 시도이다(Seo et al. 2017; Choi et al. 2012).

포졸란계 혼화재 중 대표적인 고로슬래그 미분말은 선철 제조 시 부산물을 급냉하여 만든 혼화재로서 뛰어난 염해 저항 성능과 수화열 저감, 잠재 수경성에 의한 높은 장기강도와 수밀성 증대, 알칼리 골재 반응 억제 효과 등 다양한 장점을 가지고 있다(Lee et al. 2012; Thomas and Bamforth 1999). 그러나 고로슬래그 미분말의 특성상 낮은 초기강도와 양생의 민감성의 문제를 가지고 있으며, 치환율이 증가하면 탄산화 저항성이 저감되는 등의 공학적 단점을 가지고 있다. 고분말도 고로슬래그 미분말은 언급된 초기강도 발현 문제를 어느 정도 보완하고 기존의 장점을 증대할 수 있어 저분말도 고로슬래그 미분말보다 많이 사용되어왔다. 하지만 분말도가 높아짐에 따라 수화열 증가와 낮은 단위수량에서 건조 및 자기 수축량이 증가한다는 단점이 보고되고 있으며 이러한 문제는 초기재령의 균열을 야기하고 내구성 및 수밀성과 같은 성능을 감소시킨다(Yang et al. 2010). 제시된 고분말도 고로슬래그 미분말의 성능 감소와 다르게 저분말도 고로슬래그 미분말은 비록 초기강도 발현은 낮지만 내구성 저하를 유발하는 수화열, 건조 및 자기 수축이 적다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 장점을 가지는 3,000급 저분말도 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트와 일반적으로 수화열 저감용으로 사용되는 삼성분계 콘크리트에 대한 강도와 내구 성능 평가를 분석하였다. 3,000 및 4,000급 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 활용한 2가지 배합에 대한 분석이 이루어지며, 고로슬래그 미분말 종류라는 큰 범주에서 저분말도 3,000급 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트에 대한 내구성 평가가 수행되었다.

2. 3000급 GGBFS 혼입 콘크리트의 규격 및 특성

우리나라를 비롯한 미국, 캐나다는 고분말도 고로슬래그 미분말에 대한 규격이 존재하나 저분말도 고로슬래그 미분말에 대한 규격이 없거나 상용화가 매우 부족하다. 그러나 영국, 일본, 프랑스는 수화열 저감과 건조수축 감소 등의 장점을 기대할 수 있는 다양한 저분말도 고로슬래그 미분말의 품질을 규격화하여 사용 중이다. 중국과 인도 등에서는 저분말도 고로슬래그 미분말을 다량 치환 혼입한 콘크리트의 휨피로 거동 및 파괴 기구에 대한 연구가 수행되었다(Guo et al. 2007). 또한 고온에서 고로슬래그 미분말을 치환 혼입한 콘크리트의 물성에 대한 연구가 보고되기도 하였다(Siddique and Kaur 2011).

초기재령에서의 낮은 초기강도 확보를 위하여 석고, 고분말도

고로슬래그 미분말 등을 활용한 많은 연구들이 수행 중이며, 이러한 정량적 연구들은 저분말도 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 실용화를 위한 좋은 기초 연구라고 할 수 있다(Ryu et al. 2012).

3. 실험계획 및 방법

3.1 사용재료 및 배합

본 연구에서 시멘트는 ASTM C 150에서 규정하는 1종 OPC를 사용하였다. 혼화재로는 3,000급 저분말도 고로슬래그 미분말과 KS F 2563에서 규격화된 3종 4,000급 고분말도 고로슬래그 미분말을 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 OPC, 3,000 및 4,000급 고로슬래그 미분말, 무수 석고, 플라이애시의 화학조성을 나타내었다. 배합 설계 시, 설계 압축 강도 24MPa, 목표 슬럼프 150mm, 목표 공기량 4.5%, 물-결합재비(W/B: Water to Binder) 50%를 설정하였으며, 총 2가지 배합에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 배합표는 Table 2와 같으며, 사용된 골재의 특성은 Table 3에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of OPC and GGBFS

Case	Chemical composition(%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	etc	Specific gravity (g/cm ³)	fineness (cm ² /g)
OPC	20.8	4.93	3.5	62.4	1.61	2.21	1.83	3.18	3270
4,000 GGBFS	34.0	16.4	0.5	37.2	6.29	2.71	2.02	2.89	4330
3,000 GGBFS	32.1	12.97	0.38	43.27	5.5	3.8	1.98	2.88	3050
Anhydrous gypsum	1.43	1.14	0.35	39.03	0.75	53.15	4.15	2.31	3810
FA	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3	2.19	3621

Table 2. Mix proportion for this study

Case	W/B	S/a	Unit weight: kg/m ³							
			W	C	BFS 3,000	BFS 4,000	FA	G	S	A.D (%)
BS	50	46	170	136	204	-	-	800	990	0.5
TS	50	47	170	136	-	136	68	789	977	0.4

BS: Binary System, TS: Ternary System, W/B: Water to Binder, S/a: Sand to aggregate, W: Water, C: Cement, BFS: Ground granulated Blast Furnace Slag, FA: Fly Ash, G: Gravel, S: Sand, A.D: Anhydrous gypsum

Table 3. Physical properties of the used aggregates

Types	Items	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
	Sand	-	2.58	1.01	2.9
	Gravel	25	2.64	0.82	6.87

F.M.: Fineness Modulus

3.2 3000급 GGBFS 혼입 삼성분계 콘크리트의 역학적·내구적 성능 평가 방법

3.2.1 압축 및 쪼갬 인장 강도 평가 방법

2가지 배합으로 제작된 콘크리트의 압축 및 쪼갬 인장 강도 거동을 파악하기 위하여 수중양생을 수행하였으며 3일, 7일, 28일, 91일에 대하여 강도를 평가하였다. Ø100×200mm 원주형 공시체를 사용하여 KS기준에 따라 압축강도(KS F 2405), 쪼갬 인장 강도(KS F 2423), 탄성계수(KS F 2438)를 측정하였다.



(a) Compressive strength test (b) Failure condition after test

Fig. 1. Photos for compressive strength

3.2.2 촉진 염화물 확산 실험 방법

염소 이온 침투 저항성 측정은 KS F 2711에 의거하여 진행하였는데, 강전위 상태에서 콘크리트 시편의 침투 저항성을 정성적으로 평가하는 실험 방법이다. Ø100×200mm 실린더 공시체 중앙부 50mm를 절단하고 1시간의 공기 건조를 진행한 시편은 에폭시 도막제를 시편 양단을 제외한 측면에 도포하였다. 1방향 염화물 이온의 침투를 유도한 시편을 아크릴 실험셀에 부착하여 실험을 진행하였다. 전원 공급장치(DC power supply)를 설치한 후 (+)극에 0.3% 수산화나트륨(NaOH)를, (-)극에 3.0% 염화나트륨(NaCl)을 실린더 내부에 주입하였다. 진공 포화된 환경에서 전압(60V)을 실험 시작과 종료까지 온도(20~25°C)의 조건에서 6시간 동안 통전하여 염화물 이온의 이동을 유도하였다. 통과 전하량은 식(1)을 통

하여 도출하였다.

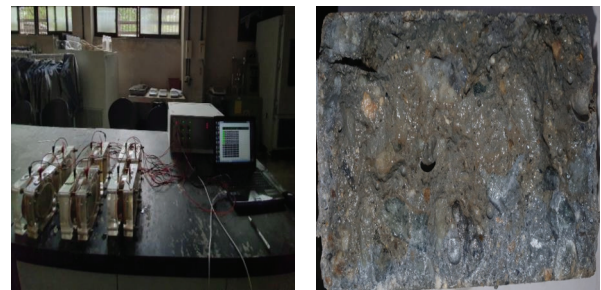
$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서 Q는 통과 전하량을 나타내고, I₀는 전압을 가한 직후의 전류(A) 그리고 I_t는 전압을 통전한지 t분 경과 후의 전류를 나타낸다. Table 4는 KS F 2711에 준한 통과 전하량 평가 기준을 나타낸다.

위에 제시된 KS F 2711을 통한 통과 전하량 뿐만 아니라 통과 전하량 실험이 완료된 시편을 대상으로 할렬하여 절단부에 0.34%의 질산은(AgNO₃) 수용액을 분무함으로써 염화물 이온의 침투 깊이를 변색법으로 측정하였다. Fig. 2는 통과 전하량 평가 전경과 질산은에 의해 변색된 콘크리트 시편의 모습을 나타낸다.

Table 4. Total passed charge of KS F 2711 standard

Total passed charge (Coulomb)	Chloride ions permeability
> 4,000	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
< 100	Negligible



(a) Photo of RCPT (b) Specimen after spraying AgNO₃

Fig. 2. Photo of chloride diffusion test

3.2.3 동결융해 저항성 실험 방법

동결융해 저항성 실험은 KS F 2456에 의거하여 진행하였다. 기준 공시체 중심부의 온도를 원칙으로 4°C에서 -18°C로 동결한 뒤 -18°C에서 4°C로 융해하는 것을 동결융해 1Cycle로 정의하였다. 30Cycle 간격으로 총 300Cycle까지 상대 동탄성 계수를 측정하였다. 각 Cycle마다 KS F 2456에서 규준된 환경을 조성한 후 종량 변화율과 식 (2)를 통한 상대 동탄성 계수를 도출하였다.

$$P_c = \left(\frac{n_c}{n_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, P_c 는 각 동결융해 Cycle 후의 상대 동탄성 계수(%)를, n_c 는 c 회 동결융해 Cycle 후의 1차 공명 진동수(Hz)를, n_0 는 동결융해 Cycle 0회의 1차 공명 진동수(Hz)를 나타낸다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 동결융해 실험 장비를 나타내고 있다.



Fig. 3. Freezing-thawing apparatus in the test

3.2.4 촉진 탄산화 실험 방법

촉진 탄산화 실험 시 사용되는 시편은 탈형 후 목표한 재령 28, 91일차까지 수중양생을 진행한 $\varnothing 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 높이 60mm의 디스크로 절단하여 제작하였다. 디스크 시편에 1방향의 이산화탄소 침투를 유도하기 위해 밀면 및 옆면을 에폭시 도막제로 코팅하였다. 코팅이 완료된 디스크 시편은 촉진 탄산화 실험을 위하여 온도($20 \pm 2^\circ\text{C}$) 및 상대 습도($60 \pm 5\%$)의 환경이 유지되는 항온항습실에서 8주간 존치되었다. 그 후 탄산화 실험기에서 4주간 촉진 탄산화 실험을 진행한다. Table 5에서는 촉진 탄산화 실험 조건을 나타내었다.

Table 5. Conditions of accelerated carbonation test

CO ₂ concentration	$5 \pm 0.2\%$
Temperature	$20 \pm 2^\circ\text{C}$
Relative humidity	$60 \pm 5\%$
Experiment duration	4 Week

탄산화 깊이 평가는 재령 28, 91일차 시편에 대하여 KS M 8239에 따라 촉진 탄산화 실험기에 폭로 후 4주가 되었을때 1% 페놀프탈레인 지시약을 분무하여 변색되지 않는 부분의 깊이를 측정하였다.

4. 3000급 GGBFS를 혼입한 콘크리트와 삼성분계 콘크리트의 역학적 · 내구적 성능 비교 고찰

4.1 역학적 성능 평가

고로슬래그 미분말의 분말도에 따른 콘크리트의 압축 강도 발현 경향을 Fig. 4에 나타내었다. 재령 3일차의 BS 배합과 TS 배합은 선행 연구에서 혼화재가 치환되지 않은 OPC 배합의 3일차 압축 강도와 비교하면 40% 이상 치환된 두 종류의 고로슬래그 미분말의 영향으로 모두 낮은 초기강도를 보였으며(Lee et al. 2019), 28일 이후에는 두 배합 모두 설계 압축 강도 24MPa 이상의 값을 나타내었다. 각 측정 재령 기준 평균 강도 증진률은 BS 배합은 79.4%, TS 배합은 98.5%의 강도 증진률을 보이며 최종적으로 재령 91일에서 BS 배합은 25.5MPa, TS 배합은 26.2MPa를 나타내었다. 전반적으로 2MPa 이내의 강도 차이는 4,000급 고로슬래그 미분말보다 적은 비표면적을 갖는 3,000급 고로슬래그 미분말의 영향으로 사료된다. 이러한 분말도와 압축 강도의 상관성은 기존 연구에서도 보고되었다(Lee and Kwon 2013). 하지만 강도 차이가 근소할 뿐만 아니라 재령 91일에서 설계 압축 강도를 만족하여 두 배합 간의 확연한 강도 성능 차이를 보이지 않았다.

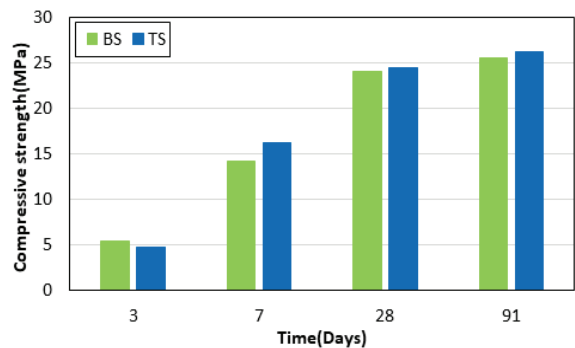


Fig. 4. Result of compressive strength

Fig. 5에는 두가지 배합의 탄성계수 평가 결과를 나타내었다. 재령 3일차에서는 BS 배합의 탄성계수는 11GPa, TS 배합은 12.3GPa로 근소한 차이가 있지만 비슷한 값을 보였다. 하지만 재령 7일차에 BS 배합이 17GPa, TS 배합이 17.1GPa로 거의 동등하다가 재령 28일차부터 BS 배합이 20.9GPa, TS 배합이 20GPa으로 근소한 차이로 BS 배합이 TS 배합을 능가하는 거동을 보였다. 또한 재령 3일 기준 7일, 재령 7일 기준 28일, 재령 28일 기준 91일

에서의 탄성계수 증진률을 평가하면 BS 배합이 29.7%로 TS 배합의 22.5%보다 높음을 알 수 있다.

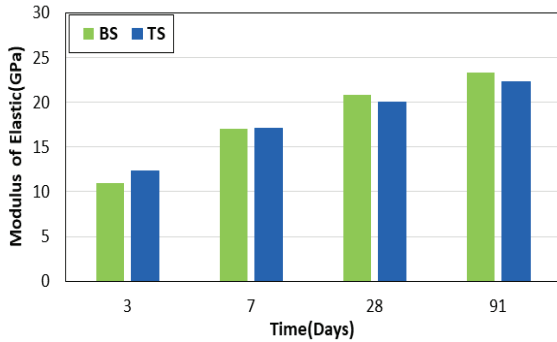


Fig. 5. Result of modulus of elasticity

Fig. 6에는 쪼갬 인장 강도 특성을 나타내었다. 재령 3일 기준 7일, 재령 7일 기준 28일 쪼갬 인장 강도 증진율을 평균하여 평가하면 BS 배합은 138.2%, TS 배합은 136.4%를 나타내었다. 최종적으로 재령 91일에 BS 배합은 2.52MPa, TS 배합은 2.61MPa를 나타내어 BS 배합과 TS 배합 간의 강도 차이가 크지 않았으며 강도 증진률 역시 비슷한 경향을 나타내었다.

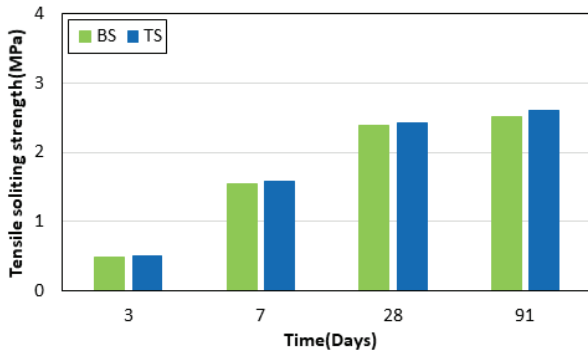


Fig. 6. Result of tensile splitting strength

4.2 내구적 성능 평가

4.2.1 통과 전하량 평가 결과

Fig. 7에서는 KS F 2711에 준한 통과 전하량 평가 결과를 나타내었다. 재령 28일차의 경우 TS 배합이 1822Coulomb를 나타내어 BS 배합의 1701Coulomb 대비 약 7% 높은 값을 나타내었다. 재령 28일 기준 91일에서 TS와 BS 배합은 각각 54.9%, 75.5%의 통과 전하량 감소율을 보이며, 최종적으로 재령 91일에서 TS 배합은

822Coulomb, BS 배합은 417Coulomb의 통과 전하량을 나타내었다. KS F 2711의 평가 기준에 따르면 두 배합은 재령 28일에서는 ‘Low’등급을 재령 91일에서는 ‘Very low’를 나타내어 높은 저항성을 가지고 있음을 보였다.

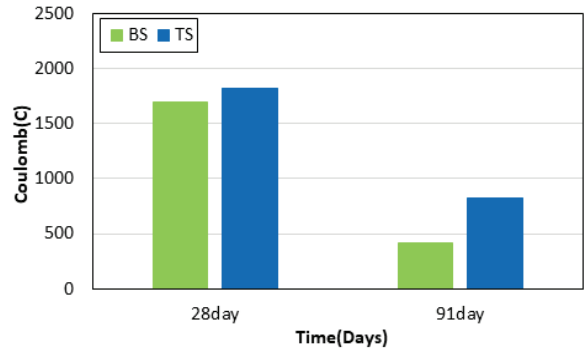


Fig. 7. Result of average coulomb by accelerated period

Fig. 8은 배합에 따라 촉진 염화물 침투 실험을 진행한 시편의 측정된 염소 이온 침투 깊이를 나타낸다. 염소 이온 침투 깊이 측정 결과, 재령 28일차에서 침투 깊이는 TS 배합은 11.43mm 그리고 BS 배합은 9.49mm로 측정되었다. 또한 재령 91일차에서 침투 깊이는 재령 28일차를 기준으로 각각 TS 배합은 57.3% 그리고 BS 배합은 59%의 침투 깊이 감소율을 보이며 TS 배합은 4.88mm 그리고 BS 배합은 3.89mm를 나타내었다. 침투 깊이 측정 결과 거동은 통과 전하량 평가 결과와 유사한 거동을 나타내었다.

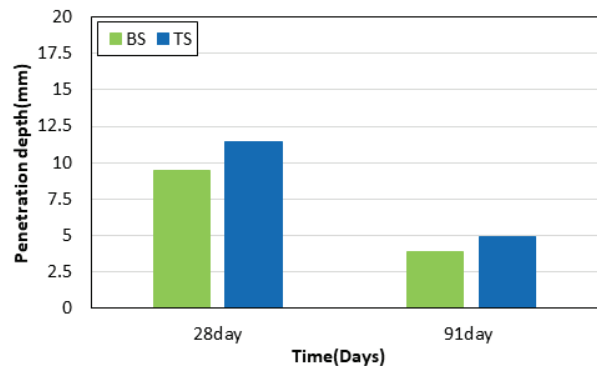


Fig. 8. Result of average chloride diffusion depth

전반적으로 통과 전하량을 비롯한 침투 깊이의 측정치와 감소율을 보면 BS 배합이 약간 우수하게 평가됨을 알 수 있다.

4.2.2 동결융해 저항성 평가 결과

Fig. 9와 Fig.10은 각각 배합에 따른 1차 공명 진동수와 상대 동탄성 계수를 나타낸다. 0Cycle과 300Cycle에서 BS 및 TS 배합의 1차 공명 진동수는 0Cycle에서 21.2kHz와 21.45kHz를 나타내었고 300Cycle에서는 각각 0Cycle을 기준으로 4.7%와 4.8% 정도의 감소율을 나타내었다. 또한 300Cycle에서 상대 동탄성 계수는 BS 배합이 90.8%, TS 배합이 90.7%로 100%를 가지는 0Cycle을 기준으로 BS 배합은 9.2%, TS 배합은 9.3%의 감소율을 보였다. 이러한 측정치의 거동을 보면 TS와 BS 배합의 1차 공명 진동수와 상대 동탄성 계수는 300Cycle까지 거의 선형적인 감소 거동을 나타내었음을 알 수 있다.

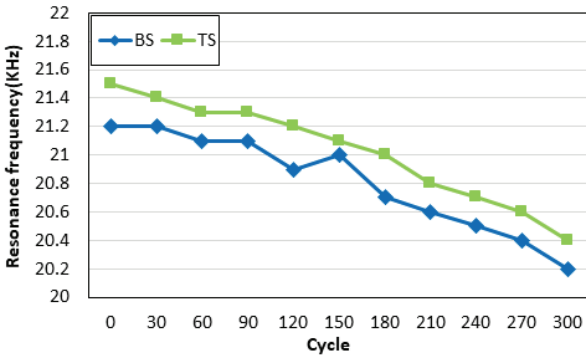


Fig. 9. Result of resonance frequency

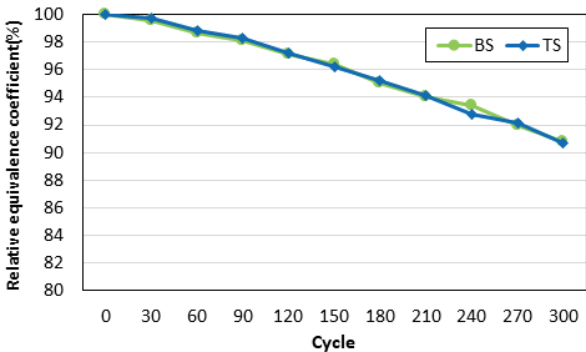


Fig. 10. Result of relative equivalence coefficient

Fig. 11은 두 배합의 동결융해 사이클 증가에 따른 중량 감소율 거동을 나타낸다. 최종적으로 300Cycle에서 TS와 BS 배합은 0.04%와 0.045%를 나타내며 0.005%의 미소한 차이를 보여 두 배합 사이의 동결융해에 의한 중량 감소율은 큰 차이를 나타내지 않았다.

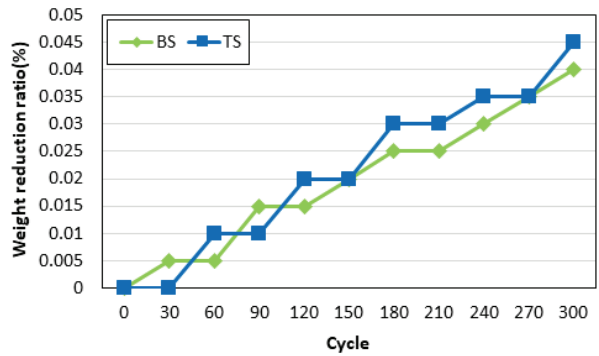


Fig. 11. Result of weight reduction rate by freezing-thawing cycles

4.2.3 탄산화 저항 성능 평가 결과

Fig. 12은 4주간 탄산화를 마친 재령 28, 91일차 시편을 KS F 2596에 기준하여 측정된 탄산화 깊이를 나타낸다. 재령 28일차 경우 BS 배합에서 11.85mm, TS 배합에서 12.89mm의 탄산화 깊이가 측정되었다. 재령 91일차의 경우 BS 배합은 7.18mm 그리고 TS 배합은 7.29mm으로 각각 재령 28일차를 기준으로 40%와 44%의 탄산화 깊이 감소율을 보였다. 일반적으로 수화열 저감으로 사용되는 배합인 TS에 비하여 BS 배합에서의 탄산화 거동은 큰 차이가 발생하지 않았다. 혼화재의 치환율이 높은 배합에서 플라이 애시를 사용할 경우 탄산화 깊이는 초기의 포졸란 반응으로 인하여 더욱 증가한다고 알려져있다(Liu et al, 2016).

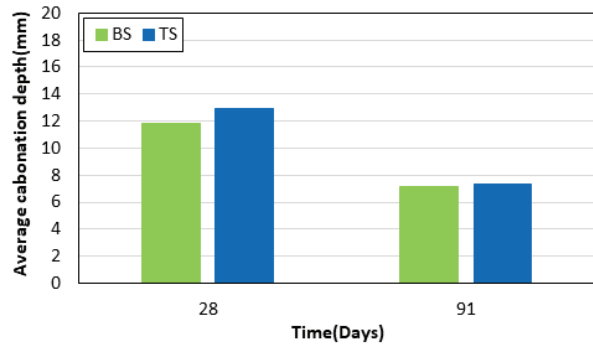


Fig. 12. Result of accelerated carbonation test

5. 결론

본 연구에서는 3,000급 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트와 4,000급 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 치환한 삼성분계 콘크리트의 역학적 및 내구적 성능에 대하여 기초적인 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 염화물 저항성 분석 결과, 통과 전하량 측정 시 BS와 TS 배합은 재령 28일차에서는 ‘Low’ 등급을 나타내었으며 재령 91일차에서는 가장 낮은 ‘Very low’ 등급을 나타내었다. 재령 91일차에서의 염화물 침투깊이를 평가한 결과 BS 배합이 3.89mm 그리고 TS 배합이 4.88mm를 나타내어 같은 통과 전하량 등급을 가지고 있지만 BS 배합이 TS 배합보다 우수한 염해 저항성을 가지고 있다고 판단된다. 이는 저분말 고로슬래그미분말을 다량 함유한 경우 장기재령에서 염해저항성이 플라이애시를 포함한 배합(TS)보다 우수함을 나타낸다.
2. 동결융해에 따른 BS 및 TS 배합의 0Cycle에서 300Cycle까지 1차 공명 진동수와 상대 동탄성 계수를 비롯한 중량 감소율 평가 결과, 상대 동탄성 계수에서는 300Cycle에서 90.8%와 90.7%를 보였고 중량 감소율에서는 0.04%와 0.045%를 보였다. 두 배합에서 모두 충분한 공기량을 가지고 있었으므로 큰 차이는 발생하지 않았다.
3. 촉진 탄산화를 통한 탄산화 저항성 평가 결과 재령 28일차에서 BS 배합은 11.85mm 그리고 TS 배합은 12.89mm이 측정되었다. 재령 91일차에서는 재령 28일차를 기준으로 BS 배합은 39.4%감소한 7.18mm 그리고 TS 배합은 43.4% 감소한 7.29mm로 측정되어 전반적으로 BS 배합이 TS 배합보다 우수한 탄산화 저항성을 나타내었다.
4. 현재 규격화되지 않은 3,000급 고로슬래그 미분말을 혼입한 BS 배합은 일반적으로 수화열 저감으로 사용되는 TS 배합보다 강도에서는 큰 차이를 보이지 않으며, 내구 특성에서 동등 이상의 성능을 보이고 있다. 3,000급 고로슬래그 미분말의 치환율 조정과 적절한 석고의 혼입을 한다면 우수한 콘크리트의 내구특성을 기대할 수 있다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

2018년 포스코(포항산업과학연구원)의 지원에 의해 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

References

- BS 6699 (1992). Specification for Ground Granulated Blastfurnace Slag for Use with Portland Cement, British Standard.
- Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, J.H., Choi, Y.J., Cho, Y.K. (2012). “Properties of high volume fly ash concrete with high blaine fly ash,” Proceedings of Korea Concrete Institute Academic Conference, Korea Concrete Institute, Gyeongju, Korea, 375–376 [in Korean].
- Guo, L.P., Sun, W., Zheng, K.R., Chen, H.J., Liu, B. (2007). Study on the flexural fatigue performance and fracta mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast furnace slag, *Cement and Concrete Research*, **37(2)**, 242–250.
- JIS A 6206 (2013). Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Concrete, Japanese Standards Association.
- Koh, K.T., Kim, D.G., Kim, S.W., Cho, M.S., Song, Y.C. (2001). A compound deterioration assessment of concrete subjected to freezing-thawing and chloride attack, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **13(4)**, 397–405 [in Korean].
- Kwon, S.J., Yang, H.M. (2017). Durability design technique and the related codes : chloride attack and steel corrosion, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **29(6)**, 33–44 [in Korean].
- Lee, H.H., Kwon, S.J. (2013). Evaluation of chloride penetration in concrete with ground granulated blast furnace slag considering fineness and replacement ratio, *Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute*, **1(1)**, 26–34 [in Korean].
- Lee, S.H., Cho, S.J., Kwon, S.J. (2019). Evaluation of durability performance in concrete incorporating low fineness of GGBFS (3000 Grade), *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **23(4)**, 95–101 [in Korean].
- Lee, S.H., Kim, W.K., Kang, S.H. (2012). Hydration mechanism of ground granulated blast furnace slag, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(6)**, 31–34 [in Korean].
- Liua, J., Qiu, Q., Chen, X., Wang, X., Xing, F., Han, N., He, Y. (2016). Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation aerosol ingress, *Corrosion Science*, **112**, 364–372.
- NF EN 15167-1 (2006). Ground Granulated Blast Furnace Slag for use in Concrete, Mortar and Grout-Part 1: Definitions, Specification and Conformity Criteria, Association Francaise de Normalisation.
- Ryu, S.H., Shin, K.J., Kim, Y.Y. (2012). Influence of blast furnace slag and anhydrite on strength of shotcrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(1)**, 87–95 [in Korean].
- Seo, C.H., Lee, H.S. (2002). “Mechanism and effect factors of

- carbonation in concrete,” Korea Concrete Institute Academic Conference, Korea Concrete Institute, Hanyang University, Korea, 3–12 [in Korea].
- Seo, E.A., Lee, J.H., Lee, H.J., Kim, D.G. (2017). Durability properties of high volume blast furnace slag concrete for application in nuclear power plants, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **5(1)**, 45–52 [in Korean].
- Siddique, R., Kaur, D. (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures, Journal of Advanced Research, **3(1)**, 45–51.
- Song, H.W., Pack, S.W., Lee, C.H., Kwon, S.J. (2006). Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, Journal of Restoration of Building and Monument, **12(4)**, 265–284.
- Thomas, M.D.A, Bamforth, P.B. (1999). Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag, Cement and Concrete Research, **29(4)**, 487–495.
- Yang, E.I., Kim, I.S., Yi, S.T., Lee, K.M. (2010). Comparison of measurement methods and prediction models for drying shrinkage of concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **22(1)**, 85–91 [in Korean].
- Song, H.W., Pack, S.W., Lee, C.H., Kwon, S.J. (2006). Service life

삼성분계 콘크리트와 저분말도 슬래그를 혼입한 콘크리트의 내구 특성

고로슬래그 미분말은 뛰어난 염해 저항성 및 내화학적성을 가지고 있어 콘크리트에 널리 쓰여왔으나, 고분말도에 따라 수화열과 건조 수축에 의한 균열이 보고되고 있다. 국제 표준에서는 콘크리트에 저분말도 고로슬래그 미분말의 폭 넓은 상용화 및 균열 저감을 위하여 3,000급 저분말도 고로슬래그 미분말이 포함되어 있다. 본 연구에서는 저분말도 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트(50%의 물-결합재비와 3,000급 고로슬래그 미분말을 60% 치환)와 삼성분계 콘크리트(50% 물-결합재비와 4,000급 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 총 60% 치환)가 고려되었다. 저분말도 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트와 삼성분계 콘크리트의 강도 차이는 재령 3일차에서 재령 91일차까지 확연한 차이는 없었으며 우수한 염해와 탄산화 저항성을 나타내었다. 또한 적절한 공기량을 함유하여 두 배합 모두 90.0 이상의 높은 내구성 지수를 나타내었다. 배합개선을 통하여 저분말도 GGBFS 콘크리트의 초기강도 개선한다면 낮은 수화열 및 고내구성을 가진 매스 콘크리트를 제조할 수 있으리라 판단된다.