



하중조건과 콜드조인트를 고려한 GGBFS 콘크리트의 탄산화 거동

황상현¹⁾ · 윤용식²⁾ · 권성준^{3)*}

¹⁾한남대학교 건설시스템공학과 석사과정 ²⁾한남대학교 건설시스템공학과 박사과정 ³⁾한남대학교 건설시스템공학과 부교수

Carbonation Behavior of GGBFS Concrete Considering Loading Conditions and Cold Joint

Sang-Hyeon Hwang,¹⁾ Yong-Sik Yoon,²⁾ and Seung-Jun Kwon^{3)*}

¹⁾Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Rep. of Korea

²⁾Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Rep. of Korea

³⁾Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Rep. of Korea

ABSTRACT In this paper, carbonation behavior in cold joint concrete is analyzed considering binder types and tensile/compressive loading. Referred to the case without loading effect, the carbonation velocity coefficient decreases by -12.0~4.7 % due to the pore densification in 30 % of the compressive loading condition. Regardless of binder type, GGBFS and OPC concrete with cold joint have insignificant variations of -1.7~5.8 % of carbonation velocity coefficient by loading conditions, however they have higher carbonation velocity coefficient than concrete without cold joint by 9.7~53.3 %, which shows that in cold joint areas, carbonation is accelerated. So, Consideration of that is more reasonable in durability design for cold joint concrete under concentrated loading.

Keywords : carbonation, cold joint, GGBFS, compressive load, tensile load

1. 서 론

콘크리트는 경제적, 공학적 이점으로 인하여 현재까지 가장 많이 사용되는 건축 및 토목재료이다. 하지만 인장력에 취약하여 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 구조물로서 철근 등의 보강재와 함께 사용되고 있다. 1990년대 이후 도시개발과 산성비 및 이산화탄소의 배출량이 증가하면서 지하구조, 교량, 터널, 해양구조물 등의 탄산화로 인한 철근 부식의 문제가 주목받고 있다(Oh 2002; Yang and Kim 2013; Cui et al. 2015). 철근콘크리트 구조물은 외부환경에 의한 여러 유해인자에 노출될 경우 열화현상이 나타나 내구성능이 감소하게 된다. 내구성능을 저하시키는 요인으로는 염화물 침투 및 확산에 의한 철근 부식, 이산화탄소 증가에 의한 콘크리트의 탄산화, 기온 저하 및 반복 사이클에 의한 동결융해, 유해 이온의 침투 및 화학반응에 의한 화학적 침식 등이 있다(Sisomphon et al. 2010; Aye and Oguchi 2011; Wang et al. 2014). 이 중 지구온난화의 주원인 중 하나인 이산화탄소(CO₂)가 콘크리트 내부로 침투하게 되어 확산하게 되면 시

멘트의 수화생성물인 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 반응하여 탄산칼슘(CaCO₃)과 물(H₂O)이 생성되고 pH가 10.5 이하로 낮아져 최종적으로 철근의 부식이 발생한다. 이로 인해 콘크리트의 박락 및 균열의 진전이 발생하며, 최종적으로 구조물의 안정성에 영향을 미친다(Neville 1995; Broomfield 1997).

콘크리트 탄산화 거동에 영향을 미치는 인자는 크게 환경에 의한 요인과 재료적 요인으로 구분할 수 있다. 환경에 의한 요인은 온도, 습도, 외부의 염화물량이 있으나 외부의 이산화탄소 농도와 습도가 지배적이다. 재료적 요인은 콘크리트의 공극률 및 최대 공극경과 같은 물리적 인자와 콘크리트 내부의 pH를 결정짓는 수산화칼슘의 잔존량 및 세공용액의 특성에 따른 반응물로 구분할 수 있다. 콘크리트의 배합설계 시 물-시멘트비 조정과 혼화재의 치환 혼입은 재료적인 측면에서 탄산화 확산을 제어할 수 있는 효과적인 수단이다(Choi et al. 2009). 1990년대 이후부터는 실태조사 방법뿐만 아니라(Izumi et al. 1986), 다양한 수치해석 방법으로 미세구조의 변화, 투수특성, 초기균열 예측, 기초재형 모델링과 물리-화학적 특성을 이용하여 탄산화 거동을 평가하려는 연구들이 진행되고 있다(Saeki et al. 1990; Papadakis et al. 1991a; Papadakis et al. 1991b; Song and Kwon 2007).

콘크리트는 시공 시 건전부 이외에도 균열부, 타설 이음부와 같이 취약부가 발생하게 되고 내부 및 외부의 응력에

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

Received March 08, 2019, Revised April 16, 2019,

Accepted April 25, 2019

©2019 by Korea Concrete Institute

노출되어 있다. 콜드조인트란 앞서 타설한 층의 콘크리트가 경화하기 시작한 후 다음 층이 계속 타설됨으로써 생기는 불연속적인 접합면이다. 콜드조인트면은 압축력에 대해서는 큰 영향을 받지 않지만, 전단력에 취약하여 국부적으로 열화 속도가 증가하는 것으로 알려져 있다(JSCE 2000; ACI 2001; Park 2001). 또한, 콘크리트 구조물은 자체의 자중이 높은 편이며 각 지점에서 다양한 응력 상태에 놓이게 된다. 응력이 과도하게 작용할 경우 미세균열에 의한 내구성 저하가 가속화되어서, 콜드조인트에 의한 취약부에 직접적인 영향을 줄 수 있다(Yoon 2007; Kwon and Na 2011). 일반적으로 하중재하에 따른 콘크리트는 압축력에 대해서는 확산성 및 투수성이 어느 정도의 응력까지는 감소하였다가 증가하고, 인장력에 대해서는 작은 크기의 응력부터 확산성 및 투수성이 선형적으로 증가한다(Kermani 1991; Banthia et al. 2005; Hoseini et al. 2009). 혼화재를 혼입한 콘크리트의 투수 및 염화물 확산성에 대해서는 콜드조인트 및 하중조건에 변화를 정량적으로 분석한 연구가 있으나(Yoo and Kwon 2016), 탄산화 거동에 대해서는 매우 빈약한 수준이다.

본 연구에서는 1년의 양생기간의 콜드조인트를 고려한 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트와 GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) 콘크리트를 대상으로 축진 탄산화 실험방법(KS F 2584)에 따라 파괴하중 30%, 60%의 압축 및 인장하중을 고려하여 탄산화 속도계수를 평가하였다. 압축 및 인장 응력 하에서 콜드조인트의 유무에 따른 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 탄산화 속도계수가 정량적으로 고찰될 것이다.

2. 실험방법

2.1 콘크리트 배합 및 특성

본 연구에 사용된 콘크리트의 배합은 설계기준강도 24 MPa, 슬럼프 180 mm, 공기량 4.5 %, 물-결합재비(Water-Binder ratio, W/B) 0.6을 적용하였으며 고로슬래그 치환율은 40 %

Table 1 Mix proportions for this study

Case	G _{max} (mm)	S/a (%)	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)				
				W	C	GGBFS	S	G
OPC	25	41.4	60	180	300	0	732	1,056
GGBFS					180	120	724	1,044

W: water, C: cement, S: sand, G: gravel

Table 2 Chemical and physical compositions of OPC and GGBFS

Case	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
GGBFS	32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.2	2.89	4,340

를 고려하였다. 시멘트는 국내 C사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 고로슬래그 미분말은 국내 S사의 혼화재를 사용하였다. Table 1에서는 실험에 사용된 배합표를 나타내고 있다. 또한, Table 2와 Table 3에서는 본 연구에서 사용된 OPC와 GGBFS의 물리-화학적 구성과 골재의 특성을 나타내고 있다.

2.2 콘크리트 시편 제작

압축하중 재하 조건을 위해서는 100×100×400 mm의 빔 모델을 활용하여 시편을 제작하였고, 인장하중 재하 조건을 위

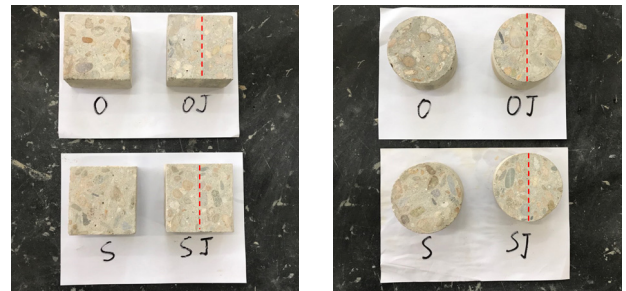
Table 3 Properties of sand and gravel

Items Types	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Sand	-	2.60	1.00	2.70
Gravel	25.00	2.62	0.78	6.78

F.M.: Fineness Modulus



Fig. 1 Photos for making specimens



(a) Compressive load specimens

(b) Tensile load specimens

Fig. 2 Photos of concrete specimens considering GGBFS, cold joint, and loading type

O: OPC, OJ: OPC with cold joint

S: GGBFS, SJ: GGBFS with cold joint

해서는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 실린더 몰드를 활용하여 시편을 제작하였다. 또한, 콜드조인트 콘크리트를 유도하기 위하여 몰드의 반을 타설한 뒤 24시간 동안 기건양생한 후 나머지 반을 타설하였다. 콘크리트의 촉진 탄산화 실험을 위해 두께 40 mm로 실린더 및 빔 시편을 절단하였으며, 이후 재령 1년 까지 수중양생을 실시하였다. Fig. 1에서는 건전부 콘크리트와 콜드조인트 콘크리트의 몰드 타설 전경을 나타내었으며, Fig. 2에서는 콘크리트의 촉진 탄산화 실험을 위한 디스크 시편을 나타내고 있다. 시편제작방법 및 콜드조인트 유도방법은 기존의 연구에서 참고하였다(Oh and Kwon 2017).

2.3 압축강도 평가방법

압축강도 평가는 재령 1년의 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체에 대해 KS F 2405(KATS 2010a)에 따라 실시하였다.

2.4 하중재하 실험방법

압축 및 인장재하영역의 콘크리트의 탄산화 거동 평가 실험을 위해 하중을 고정할 수 있는 별도의 강제 프레임을 제작하였고, UTM(Universal Testing Machine)을 이용하였다. 기존의 문헌을 참고하여 하중 수준을 설정하였는데 압축하중 30%에서 공극의 압밀을, 60%에서 내부 균열의 진전 효과를 기대하고 설정하였으며, 인장하중 재하에서는 하중의 증가에 따른 확산성이 증가 정도를 평가하고자 설정하였다(Mun and Kwon 2016). 파괴하중의 30%, 60%로 하중을 고정할 때, 콘크리트 및 프레임의 탄성으로 인하여 하중의 손실이 발생할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 기준이 되는 시편에 변형률게이지를 부착하여 재하하중기준 변형률을 평가하였다. 파괴하중 대비 도입하중에 대한 비율은 식 (1)과 같다.

$$R = \frac{P_i}{P_c} \times 100 \quad (1)$$

여기서, R 은 압축 및 인장력에 대한 하중비(%), P_i 는 재하된 하중(kN), P_c 는 압축 및 인장력에 대한 파괴하중(kN)을 나타낸다. 하중재하 여건상 정확히 목표하중을 재하 하는 것은 어려운 일이므로 각 재령일 및 배합의 기준이 되는 시편의 압축 및 인장강도와 응력-변형률 그래프를 통해 파괴하중의 30%, 60%에서 $\pm 5\%$ 에 해당하는 오차 기준을 적용하였다. 또한 콜드조인트 콘크리트의 인장재하 유도 시 직접 인장하중이 가장 이상적이지만, 이 경우 하중조절이 어렵고 골재 영향이 크기 때문에 할렬인장을 실시하였으며, 콜드조인트 면의 박락으로 인하여 시편을 약 30° 정도 기울여 하중을 재하하였다. Fig. 3과 Fig. 4에서는 압축 및 인장재하 전경과 콘크리트의 응력-변형률 그래프를 나타내고 있다.

또한, 프레임의 릴렉세이션에 따른 하중의 손실을 관측하기 위해 프레임에 별도의 게이지를 부착하여 변형률을 12시간 관측한 결과, 변형률의 변화가 없어 릴렉세이션에 따른

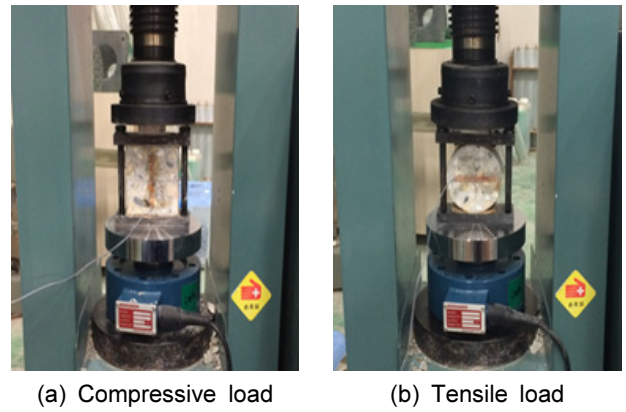


Fig. 3 Photos of inducing loads

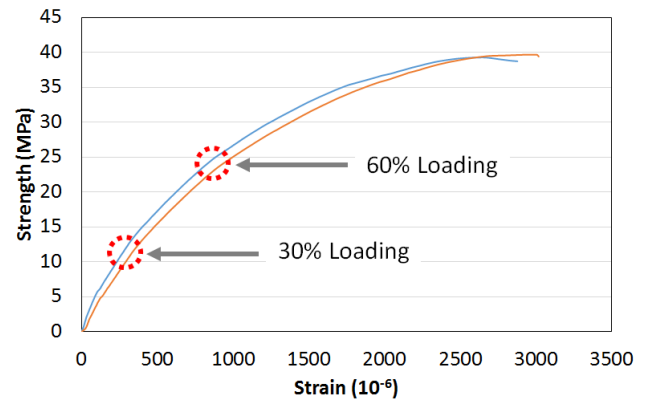


Fig. 4 Stress-Strain curve graphs for this study

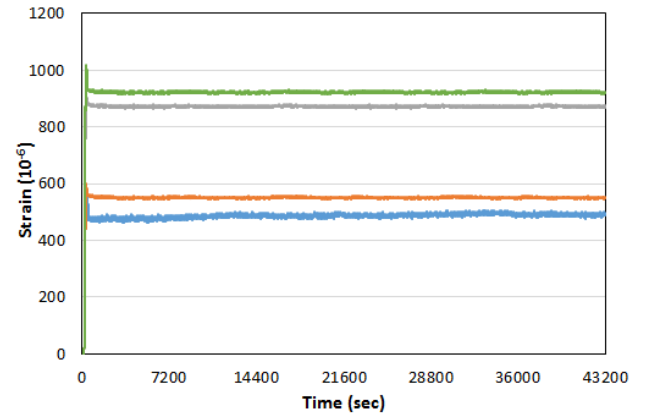


Fig. 5 Strain variation after inducing loading

하중의 손실은 발생하지 않은 것으로 판단된다. 이는 기존의 연구와 같은 경향으로 보인다(Oh and Kwon 2017). Fig. 5에서는 콘크리트 시편에 하중재하 후 시간에 따른 변형률 변화를 나타내고 있다.

2.5 탄산화 거동 평가방법

본 연구에서는 탄산화 거동을 평가하기 위해 재령 1년 시편을 대상으로 KS F 2584(KATS 2010b)에 따라 실험을 진행하였다. 시편의 균등한 탄산화 침투조건을 위해 상대습도

60±5 %, 온도 20±2 °C의 항온항습실에서 8주 동안 존치하였다. 또한, 이산화탄소의 일방향 침투를 위해 예폭시를 이산화탄소 침투 방향을 제외한 나머지 면인 옆면과 밑면에 도포하였으며, 촉진 탄산화 시험장비를 통해 이산화탄소 농도 5±0.2 %로 조건에 맞추어 4주, 8주에 탄산화 깊이를 평가하였다. Table 4와 Fig. 6에는 콘크리트의 촉진 탄산화 실험조건과 촉진 탄산화 시험장비를 나타내고 있다.

촉진 탄산화 시험이 완료된 콘크리트 시편을 할렬한 후 할렬된 콘크리트 면에 KS M 8238(KATS 2015)에 적합한 페놀프탈레인 용액을 분무하였으며, KS F 2596(KATS 2004)을 통해 Fig. 7과 같이 콘크리트 시편 양측 가장자리 10 mm를 제외하고 5 mm 간격으로 Engauge 프로그램을 통해 침투 깊이를 측정하여 평균값을 도출하였다. 또한, 탄산화 깊이를 이용하여 탄산화 속도계수를 식 (2)를 통해 회귀분석하여 도출하였다. 탄산화 깊이는 시간의 제곱근에 비례하여 증가하는 것으로 많은 문헌에서 이론적, 실험적으로 증명되었다(Izumi et al. 1986; Papadakis et al. 1991b).

$$D = A \times \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, D 는 탄산화 깊이(mm), A 는 탄산화 속도계수(mm/week^{0.5}), t 는 노출시간(week)을 나타낸다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축강도 평가 결과

OPC 및 GGBFS 콘크리트의 압축강도를 KS F 2405에 준하여 평가하였으며, 재령 1년 압축강도 평가 결과를 Table 5와 Fig. 8에 나타내었다.

압축강도 평가 결과 설계기준강도 대비 재령 1년 OPC 콘크리트에서 238.5 % 증가한 반면 GGBFS 콘크리트에서 256.9%가 증가하였다. 이는 재령 1년 동안의 수중 양생한 콘크리트가 지속적인 수화반응으로 인해 공극이 감소했음을 알 수가 있었다. 재령 28일 GGBFS 콘크리트 대비 OPC 콘크리트가 압축강도가 1.52배 높게 나타났지만, 재령 1년 압축강도는 GGBFS 콘크리트가 1.08배 높게 나타났다. 이는 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 잠재수경성 반응에 따른 수화물 증가, 공극 구조 개선 등이 주된 원인이라고 판단된다. GGBFS 콘크리트는 초기강도가 낮고 동결기에는 강도 발현이 지연되는 단점이 있지만 염해 및 동결융해 저항성, 부식 저항성, 수화발열량 감소, 워커빌리티 개선 등의 공학적 장점을 갖고 있다고 알려져 있다(Lee et al. 2013).

Table 4 Accelerated carbonation test conditions

Temperature	Relative humidity	CO ₂
20±2 °C	60±5 %	5±0.2 %



Fig. 6 Accelerated carbonation testing equipment

Table 5 Result of compressive strength

Case		Strength (MPa)			
		No. 1	No. 2	No. 3	Average
28 days	OPC	31.16	31.45	31.87	31.49
	GGBFS	20.35	21.03	20.66	20.68
91 days	OPC	33.49	35.65	34.78	34.64
	GGBFS	31.78	28.48	29.29	29.85
365 days	OPC	60.13	57.08	54.55	57.25
	GGBFS	66.11	58.41	60.45	61.66

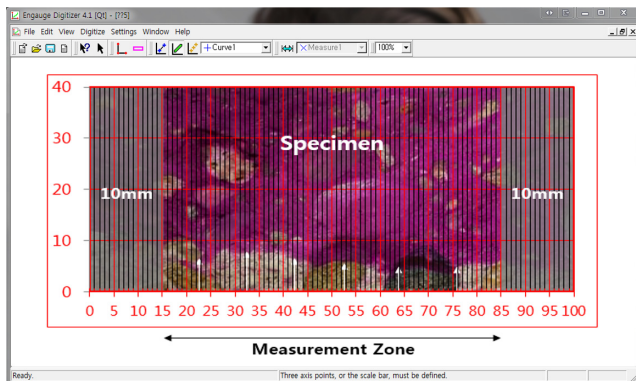


Fig. 7 Carbonation depth measurement area

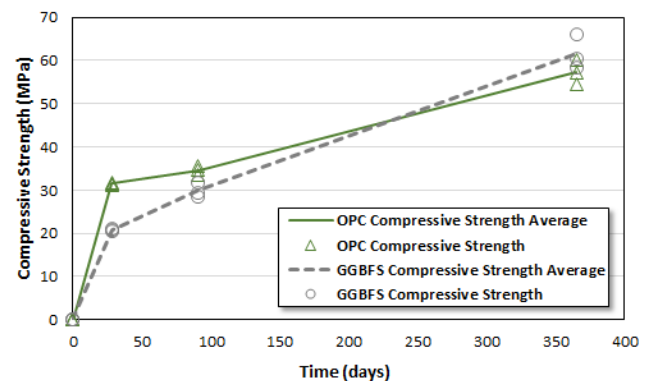


Fig. 8 Result of compressive strength

3.2 하중을 재하하지 않은 경우의 탄산화 거동

본 연구에서는 재령 1년 하중을 재하하지 않은 경우의 탄산화 침투가 된 시편의 사진을 Fig. 9에 나타내었으며, Fig. 10에서는 탄산화 침투 깊이를 이용하여 위의 식 (2)를 통해 회귀분석하여 탄산화 속도계수를 도출하였다. 재령 1년의 탄산화 속도계수를 Table 6에 나타내었다.

하중을 재하하지 않은 경우의 실험결과, 재령 1년 OPC 콘크리트에서 탄산화 속도계수는 3.00 mm/week^{0.5}로 평가되었으며 GGBFS 콘크리트에서는 3.59 mm/week^{0.5}로 평가되었다. 콜드조인트부는 건전부 대비 OPC 콘크리트에서 28.6 % 증가율을, GGBFS 콘크리트에서 12.0 % 증가율이 평가되었다. OPC-J 및 GGBFS-J에서 탄산화 속도계수가 더 높게 평가되었는데, 이는 기존의 연구와 같이 콜드조인트를 가진 콘크리트는 투수 및 탄산화가 증가하는 경향을 보였으며(Yokozeki

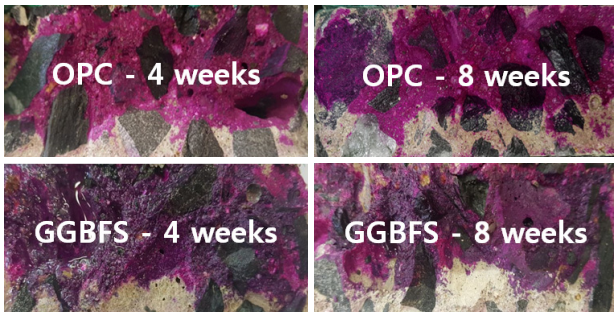


Fig. 9 Photos of concrete after accelerated penetration of CO₂

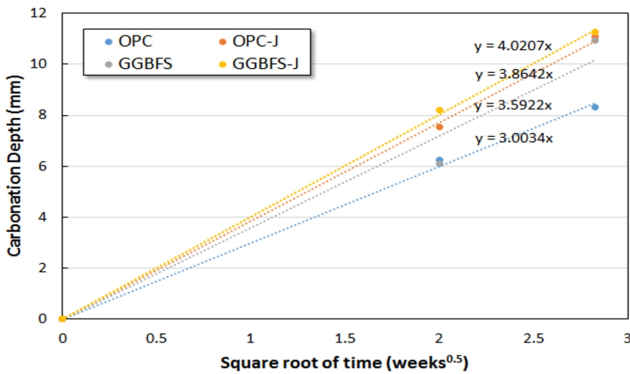


Fig. 10 Result of carbonation velocity coefficient

Table 6 Result of Depth and velocity coefficient of carbonation

Case	Carbonation depth (mm)		Carbonation velocity coefficient (mm/week ^{0.5})
	4 weeks	8 weeks	
OPC	6.24	8.33	3.00
GGBFS	6.11	10.92	3.59
OPC-J	7.53	11.07	3.86
GGBFS-J	8.2	11.26	4.02

et al. 1998; Hyun et al. 2008; Kwon and Na 2011), OPC 콘크리트 대비 GGBFS 콘크리트 탄산화 속도계수는 건전부에서 19.6 % 증가율을, 콜드조인트부에서는 4.1 %로 OPC 콘크리트보다 더 높게 나타났다. 이는 고로슬래그의 더 많은 실리카(SiO₂) 성분이 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 반응하여 콘크리트의 알칼리 성분을 더 빠르게 감소시켜 탄산화가 더욱더 빠르게 발생한 것으로 판단되었다(Izumi et al. 1986).

3.3 하중을 재하한 경우의 탄산화 거동

3.3.1 압축하중 재하시의 탄산화 거동

압축재하영역을 고려하여 파괴하중의 30 %, 60 % 조건하에서 탄산화 속도계수를 평가하였다. Table 7과 Fig. 11에서는 재령 1년 압축재하영역 30 %, 60 %에서의 탄산화 속도계수를 나타내었다.

재령 1년 압축재하영역에 대한 탄산화 깊이가 평가 결과 축전 탄산화 노출 4주 대비 8주에서의 탄산화 깊이가 23.0~144.7 % 더 높게 나타났다. 또한 탄산화 속도계수는 압축재하영역 30 % 대비 60 %일 때 11.7~37.3 % 크게 나타났다.

Table 7 Result of depth and velocity coefficient of carbonation (compressive load)

Case	Carbonation depth (mm)		Carbonation velocity coefficient (mm/week ^{0.5})	
	4 weeks	8 weeks		
Compressive load (30 %)	OPC	5.51	8.06	2.82
	GGBFS	4.25	10.40	3.16
	OPC-J	6.79	10.54	3.62
	GGBFS-J	7.32	11.09	3.83
Compressive load (60 %)	OPC	6.90	8.49	3.15
	GGBFS	7.09	13.41	4.34
	OPC-J	10.58	13.02	4.83
	GGBFS-J	10.62	12.69	4.76

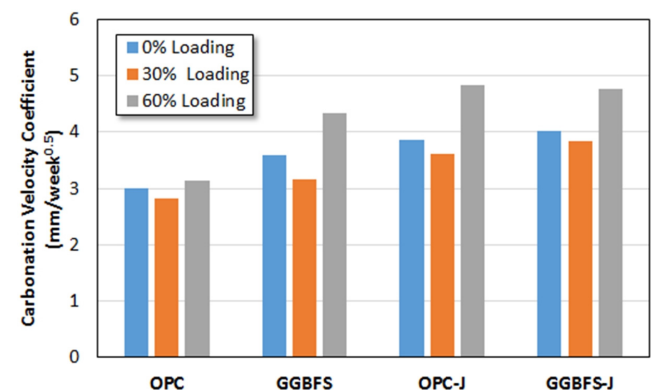


Fig. 11 Result of carbonation velocity coefficient (compressive load)

압축재하영역 30%와 하중을 재하하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수는 OPC에서 -6.0%, GGBFS에서 -12.0%, OPC-J에서 -6.2%, GGBFS-J에서 -4.7% 감소하는 경향을 보였다. 이는 초기하중이 재하 될 경우, 내부 미세공극 압밀의 영향으로 확산성이 저감되었기 때문으로 사료되며 투기성 및 투수성 시험결과와 비슷한 경향을 나타낸다(Kermani 1991; Banthia et al. 2005; Kim et al. 2009). 또한 이와 같은 결과는 하중재하 조건을 고려한 염화물 확산 거동에서도 같은 경향을 보였다(Oh and Kwon 2017). 압축재하영역 60%와 하중을 재하하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수는 OPC에서 5.0%, GGBFS에서 20.9%, OPC-J에서 25.1%, GGBFS-J에서 18.4% 증가하는 경향을 보였다. 이는 압축력에 의한 유효공극의 감소보다는 미세 균열 발생의 영향력이 더 크다고 판단되었으며, OPC 콘크리트가 GGBFS 콘크리트보다 탄산화 속도계수가 압축재하영역 30%에서는 12.1%, 60%에서는 37.8% 낮게 나타났다. 또한 하중조건을 고려하는 경우 건전부에 비해 콜드조인트부는 탄산화 속도계수가 높게 나왔는데 이는 콜드조인트에 의한 취약부에서의 탄산화 침투가 가속화되어 저항성능은 낮아졌다고 판단할 수 있었다. Table 6에서 나타난 하중을 재하하지 않은 경우의 탄산화 속도계수를 기준으로 압축재하 시의 탄산화 속도계수 변화비를 Table 8과 Fig. 12에 나타내었다.

Table 8 Rate of change in carbonation velocity coefficient

Case	Carbonation velocity coefficient (mm/week ^{0.5})		
	Compressive 0 %	Compressive 30 %	Compressive 60 %
OPC	3.00 (100 %)	2.82 (94.00 %)	3.15 (105.00 %)
GGBFS	3.59 (100 %)	3.16 (88.02 %)	4.34 (120.89 %)
OPC-J	3.86 (100 %)	3.62 (93.78 %)	4.83 (125.13 %)
GGBFS-J	4.02 (100 %)	3.83 (95.27 %)	4.76 (118.41 %)

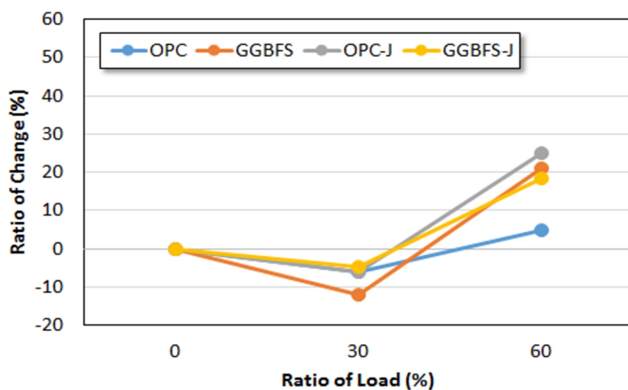


Fig. 12 Ratio of carbonation velocity coefficient to control

3.3.2 인장하중 재하 시의 탄산화 거동

인장재하영역을 고려하여 각 배합의 탄산화 거동을 평가하였다. Table 9과 Fig. 13에서는 재령 1년 인장재하영역 30%, 60%에서의 탄산화 속도계수를 나타내었다.

재령 1년 인장재하영역에 대한 탄산화 깊이결과 압축재하영역과 동일하게 인장재하영역에서도 촉진 탄산화 노출 4주 대비 8주에서 탄산화 깊이가 8.4~62.8% 더 높게 나타났으며, 탄산화 속도계수 또한, 인장재하영역 30%일 때 대비 60%일 때 9.0~20.0% 크게 나타났다.

인장재하영역 30%에서는 압축재하영역과 달리 탄산화 속도계수가 증가하는 경향을 보였으며, 인장재하영역 30%에서는 하중을 재하하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수가 OPC에서는 9.7%, GGBFS에서는 5.5%, OPC-J에서는 11.4%, GGBFS-J에서는 6.0% 증가하는 경향을 보였다. 또한, 인장재하영역 60%의 경우 하중을 재하하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수는 OPC에서 27.7%, GGBFS에서 14.5%, OPC-J에서 33.7%, GGBFS-J에서 26.1% 증가하는 경향을 보였다. 이는 콘크리트가 인장력에 취약한 재료이기 때문에 비교적 적은 크기의 인장력에 의해 발생한 미세균열이 주원인이라고 판단되었으며, 인장재하영역에서는 콜드조인트와 상관없이 탄산화 속도계수의 증가율이 비슷하게 나타났다.

Table 9 Result of depth and velocity coefficient of carbonation (Tensile load)

Case		Carbonation depth (mm)		Carbonation velocity coefficient (mm/week ^{0.5})
		4 weeks	8 weeks	
Tensile load (30 %)	OPC	6.90	9.07	3.29
	GGBFS	6.85	11.15	3.77
	OPC-J	8.68	12.10	4.30
	GGBFS-J	9.43	11.41	4.26
Tensile load (60 %)	OPC	8.33	10.35	3.83
	GGBFS	7.84	11.88	4.11
	OPC-J	12.23	13.26	5.16
	GGBFS-J	10.87	13.82	5.07

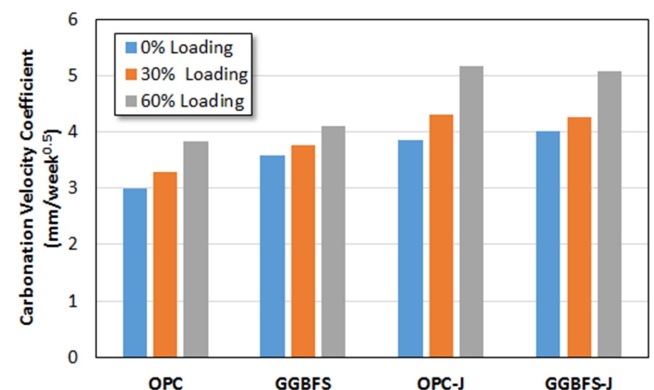


Fig. 13 Result of carbonation velocity coefficient (Tensile load)

Table 6에서 나타난 하중을 재하하지 않은 경우의 탄산화 속도계수를 기준으로 인장재하 시의 탄산화 속도계수 변화율을 Table 10과 Fig. 14에 나타내었다. 또한 Fig. 15는 재령 1년의 압축재하영역과 인장재하영역의 탄산화 속도계수를 나타내었다.

GGBFS 콘크리트가 OPC 콘크리트 대비 탄산화 속도계수가 모든 하중조건에서 높게 나타났다. 압축재하영역 60%에서 37.8% 가장 높은 증가율을 보였으며, 인장재하영역 60%에서 7.3%로 가장 낮은 증가율을 보였다. 이는 하중조건과 상관없이 GGBFS 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 낮은 탄산화 저항성능을 갖는다고 판단된다.

Table 10 Rate of change in carbonation velocity coefficient

Case	Carbonation velocity coefficient (mm/week ^{0.5})		
	Tensile 0 %	Tensile 30 %	Tensile 60 %
OPC	3.00 (100 %)	3.29 (109.67 %)	3.83 (127.67 %)
GGBFS	3.59 (100 %)	3.77 (105.50 %)	4.11 (114.49 %)
OPC-J	3.86 (100 %)	4.30 (111.40 %)	5.16 (133.68 %)
GGBFS-J	4.02 (100 %)	4.26 (105.97 %)	5.07 (126.12 %)

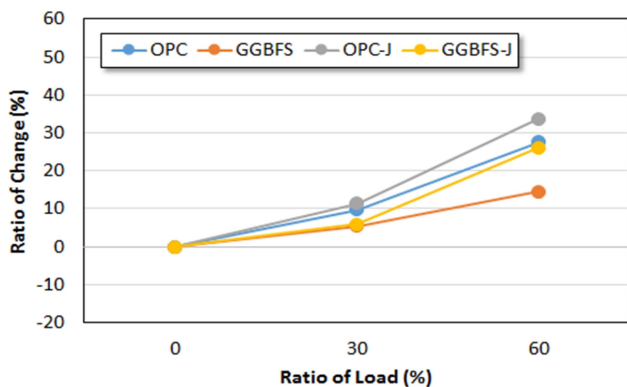


Fig. 14 Ratio of change of velocity coefficient

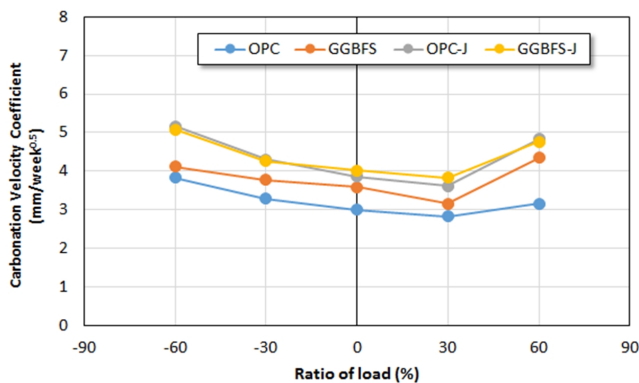


Fig. 15 Result of carbonation velocity coefficient considering loading condition

GGBFS-J 콘크리트가 OPC-J 콘크리트 대비 하중을 재하하지 않은 경우에서 4.2% 정도 탄산화 속도계수가 높게 나타났다. 또한, 하중을 압축 및 인장 30%, 60% 재하한 경우 탄산화 속도계수가 -1.7~5.8%로 크게 차이가 나지 않았다. 콜드조인트부에서는 하중조건을 고려하더라도 콜드조인트로 인한 취약부에서의 탄산화 침투가 가속화되어 탄산화 저항성능이 낮다고 판단된다. 기존의 연구인 콜드조인트부 콘크리트의 압축재하영역에서 염화물 이동은 선형적으로 증가하였는데(Oh and Kwon 2017), 장기 양생된 콜드조인트 콘크리트의 탄산화 평가에서는 압축재하영역에서 비선형적으로 감소 이후 증가하는 경향이 나타났으며, 인장재하영역에서는 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다. 콜드조인트부에서의 탄산화 열화 증진은 염해에 비하여 안정적으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 하중조건과 콜드조인트 영향을 고려하여 재령 1년 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 탄산화 거동을 평가하기 위하여 콘크리트의 축진 탄산화 실험을 하였다. 하중조건과 콜드조인트 유무에 따른 재령 1년 콘크리트 압축 및 인장재하영역의 30%, 60% 탄산화 속도계수 평가 및 분석을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 하중을 재하하지 않은 경우, 재령 1년 GGBFS 콘크리트에서 3.59 mm/week^{0.5}의 탄산화 속도계수가 나타났는데 이는 OPC 콘크리트 대비 19.7% 높게 나타났다. 또한, GGBFS-J 콘크리트에서는 4.02 mm/week^{0.5}의 탄산화 속도계수로 OPC-J 콘크리트 대비 4.2% 높게 나타났으며, 이를 고려할 때 GGBFS 콘크리트의 탄산화 저항성이 OPC 콘크리트보다 낮다고 판단할 수 있다.
- 2) 하중조건을 고려하지 않은 경우 대비 압축재하영역 30%에서 하중 재하에 따른 미세균열의 증가가 주된 원인으로 탄산화 속도계수가 -12.0~-4.7% 감소하는 경향이 나타났으며, 인장재하영역에서는 탄산화 속도계수가 5.5~33.7% 증가하는 경향이 나타났다. 이는 콘크리트가 인장력에 취약하므로 미세균열의 증가가 주된 원인으로 판단된다. 탄산화 속도계수는 압축재하영역 30%에서 하중을 재하하지 않았을 경우와 동등 이하의 값을, 이후 60%에서는 증가하는 비선형적인 경향이 나타났으며, 인장재하영역에서는 하중조건과 상관없이 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다.
- 3) OPC-J 및 GGBFS-J에서 건전부에 비해 탄산화 속도계수가 크게 평가되었으므로 콜드조인트와 같은 취약부는 내구성 설계에 추가로 고려해야 할 사항이라고 사료된다. 특히 응력이 집중되는 곳에서 하중 영향을 고려한 내구성 평가를 수행할 경우 더욱 합리적인 내구 수명을 평가할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단 기본 연구지원 사업(후속연구지원) 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다(NRF-2016R1D1 A1A09919224).

References

- ACI Committee 224 (2001) *Joints in Concrete Construction (ACI 224.3R-95)*. Farmington Hills, Michigan, US: American Concrete Institute (ACI), Reapproved 2013.
- Aye, T., and Oguchi, C. T. (2011) Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks. *Construction and Building Materials* 25(6), 2988-2996.
- Banthia, N., Biparva, A., and Mindess, S., (2005) Permeability of concrete under stress. *Cement and Concrete Research* 35(9), 1651-1655.
- Broomfield, J. P. (1997) Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair. *E&FN*, 1-15.
- Choi, S., Lee, K. M., Jung, S. H., and Kim, J. H. (2009) A Study on the Carbonation Characteristics of Fly Ash Concrete by Accelerated Carbonation Test. *Journal of the Korea Concrete Institute* 21(4), 449-55. (In Korean)
- Cui, H., Tang, W., Liu, W., Dong, Z., and Xing, F. (2015) Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction and Building Materials* 2015(93), 522-527.
- Hoseini, M., Bindiganabile, V., and Banthia, N. (2009) The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* 31(4), 213-220.
- Hyun, T. Y., Kim, C. Y., and Kim, J. K. (2008) Permeability of Cracked Concrete as a Function of Hydraulic Pressure and Crack Width. *Journal of The Korea Concrete Institute* 20(3), 291-298. (In Korean)
- Izumi, I., Kita, D., and Maeda, H. (1986) Carbonation. *Kibodang Publication, Japan*, 35-88.
- JSCE Committee 107 (2000) *Concrete Cold Joint Problems and Countermeasures*. Tokyo, Japan; Japan Society of Civil Engineers (JSCE), *Concrete Library* 103. (In Japanese)
- Kermani, A. (1991) Permeability of stressed concrete. *Building Research and Information* 19(6), 360-366.
- Kim, D. H., Lim, N. G., and Horiguchi, T. (2009) Effect of Compressive Loading on the Chloride Penetration of Concrete Mixed with Granulated Blast Furnace Slag. *Journal of the Korea Institute of Building Construction* 9(6), 71-78. (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2004) *Method for measuring carbonation depth of concrete (KS F 2596)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2010a) *Standard test method for compressive strength of concrete (KS F 2405)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2010b) *Standard test method for accelerated carbonation of concrete (KS F 2584)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2015) *Phenolphthalein (KS M 8238)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Kwon, S. J., and Na, U. J. (2011) Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation Based on Probabilistic Approach. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 5(1), 11-18.
- Lee, J. H., Kim, Y. R., Park, J. H., and Jeong, Y. (2013) Study on the Mineral Admixture Replacement Ratio for Field Application of Concrete with High Volume Mineral Admixture. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute* 1(2), 93-100. (In Korean)
- Mun, J. M., and Kwon, S. J. (2016) Evaluation of Chloride Diffusion Coefficients in Cold Joint Concrete Considering Tensile and Compressive Regions. *Journal of the Korea Concrete Institute* 28(4), 481-488. (In Korean)
- Neville, A. M. (1995) *Properties of concrete*. USA, New Jersey: WILEY, 482-490.
- Oh, B. H. (2002) Durability Design for Carbonation in Concrete Structures. KCI 2002 Spring Conference. 11 May 2002. Ansong, Korea; Korea Concrete Institute (KCI). 30-60. KCI Research Committee Report. (In Korean)
- Oh, K. S., and Kwon, S. J. (2017) Chloride Diffusion Coefficient Evaluation in 1 Year-Cured OPC Concrete under Loading Conditions and Cold Joint. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 21(5), 21-29. (In Korean)
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. (1991a) Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal* 88(4), 363-373.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. (1991b) Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *ACI Materials Journal* 88(2), 186-196.
- Park, M. S. (2001) Study on Control of Carbonation at Cold Joint of Reinforced Concrete Structures. *Master's Thesis*, Yonsei University. (In Korean)
- Saeki, T., Ohga, H., and Nagataki, S. (1990) Change in microstructure of concrete due to carbonation. *Concrete Library of JSCE* 18(12), 1-11.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., and Fraaij, A. L. A. (2010) Development of blast furnace slag mixtures against frost salt attack. *Cement and Concrete Composites* 32(8), 630-638.

- 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.
- Wang, Z., Zeng, Q., Wang, L., Yao, Y., and Li, K. (2014) Corrosion of rebar in concrete under cyclic freeze-thaw and Chloride salt action. *Construction and Building Materials* 2014(53), 40-47.
- Yang, K. H., and Kim, S. C. (2013) A Case Study on CO₂ Uptake of Concrete owing to Carbonation. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute* 1(1), 42-48. (In Korean)
- Yokozeke, K., Okada, K., Tsutsumi, T., and Watanabe, K. (1998) Prediction of the Service Life of RC with Crack Exposed to Chloride Attack. *Japan Symposium of Rehabilitation of Concrete Structure* 10(1), 1-6.
- Yoo, S. W., and Kwon, S. J. (2016) Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials* 115(15), 247-255.
- Yoon, I. S. (2007) Effect of Micro-Cracks on Chloride Ions Penetration of Concrete II: Examination of Critical Crack Width. *Journal of the Korea Concrete Institute* 19(6), 707-715. (In Korean)

요 약 본 연구에서는 콜드조인트를 가진 OPC 및 GGBFS 콘크리트에 대하여 압축 및 인장하중을 고려하여 탄산화 거동을 분석하였다. 건전부 및 콜드조인트의 하중을 재하하지 않았을 경우를 기준으로 압축재하영역 30 %에서는 공극압밀로 인해 탄산화 속도계수가 -12.0~4.7 % 감소하는 경향을 나타냈다. 콜드조인트를 가진 GGBFS 콘크리트와 OPC 콘크리트 모두 하중 영향에 대해서는 탄산화 속도계수가 -1.7~5.8 %의 증감률을 나타내어 큰 차이가 발생하지 않았지만, 건전부에 비하여 탄산화 속도계수는 9.7~53.3 % 수준으로 크게 발생하였다. 이는 콜드조인트부에서는 탄산화 침투가 가속화되므로 응력이 집중되는 콜드조인트부의 내구성 설계에서는 콜드조인트 효과를 고려하는 것이 합리적이다.

핵심용어 : 탄산화, 콜드조인트, 고로슬래그 미분말, 압축응력, 인장응력