

# 골재 지역 특성이 불분명한 콘크리트의 탄산화 속도 및 강도 상관성

## Relationship between Carbonation Rate and Compressive Strength in Concrete with Unclear Local Aggregate Qualities

남진원<sup>1</sup> · 김형기<sup>2</sup> · 권성준<sup>3\*</sup>Jin-Won Nam<sup>1</sup> · Hyeong-Ki Kim<sup>2</sup> · Seung-Jun Kwon<sup>3\*</sup>

(Received May 28, 2024 / Revised June 20, 2024 / Accepted June 24, 2024)

When concrete with slag powder or fly ash is under an accelerated carbonation test at early age, a very complicated carbonation behavior occurs since several reactions covering cement hydration, pozzolanic reaction, and carbonation reaction occur simultaneously. In particular, fine and coarse aggregates with poor quality were used, the trend with strength development and carbonation behavior was not clear. In this study, concrete samples with three design strength grade (24 MPa, 27 MPa, and 30 MPa) were manufactured with different aggregates site (A, B, and C). Compressive strength test were performed considering curing ages (7 and 28 days), and the accelerated carbonation tests were performed for 8 weeks for evaluating carbonation rate. The relationship between compressive strength and carbonation rate was analyzed considering mix properties and the aggregate site conditions. In addition, the minimum cover depth satisfying intended service life was obtained through carbonation design based on Domestic Design Code, and the necessities for improving design parameters (direction coefficient and effective water-binder ratio) were suggested.

**키워드** : 슬래그 분말, 플라이애시, 골재 특성, 촉진 탄산화, 압축강도**Keywords** : Slag powder, Fly ash, Aggregate quality, Accelerated carbonation, Compressive strength

### 1. 서론

최근 들어 대기 중의 이산화탄소 농도의 증가, 골재 품질의 저하, 내구성 설계기준의 강화에 따라 탄산화에 대한 관심이 증가하고 있다. 탄산화는 이산화탄소의 침투에 의해 콘크리트 내의 공극수의 pH가 낮아져서 매립된 철근 부식이 용이한 상태로 변화하는 열화현상을 의미한다(Kwon 2017; Izumi et al. 1986). 지하구조물과 같이 이산화탄소의 농도가 높거나 대도시 또는 공업지역 등에 탄산화에 의한 열화현상은 증가하고 있으며, 각국의 지방 및 설계기준에서도 탄산화에 대한 영향을 고려하여 내구성 설계와 확보 방안을 유도하고 있다(KCI 2022; JSCE 2007; AIJ 2009; ACI 2008).

탄산화(Carbonation)는 외부 산성영향인자(산성비, 약산, 폭기

조의 산성화)에 따라 내부의 시멘트 매트릭스가 열화되면서 공극수의 pH가 저감되는 중성화(Neutralization)보다는 좁은 의미의 열화현상을 의미한다. 탄산화의 진행에 따라 콘크리트 공극수 내의 pH 저감 이외에도 내부의 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변화되면서 질량의 변화, 표면경도의 증가, 공극률의 변화 등이 발생한다. 또한 탄산화에 따라 생성된 수분의 발산으로 탄산화에 의한 건조수축이 크게 증가하는 것은 많이 알려진 사실이다(Papadakis et al. 1991; Meakawa et al. 2003). 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변환하면서 pH의 감소가 발생하지만 수산화칼슘과 유입된 이산화탄소 반응을 통하여 물질량 및 Volume fractile이 증가하게 되므로 수산화칼슘이 많이 생성된 배합에서는 공극률이 감소하게 되며, 이를 감소함수(decay function)로 고려한 연구들이 진행되었다(Maekawa et al. 2003; Saeki et al. 1990). 이러한 영향은 투수계

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

<sup>1</sup>인하공업전문대학 건설환경공학과 조교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon, 22212, Korea)

<sup>2</sup>조선대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Chosun University, Gwangju, 64452, Korea)

<sup>3</sup>한남대학교 토목환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

수 및 투기계수의 감소를 유도하여 콘크리트 구체만 고려할 경우 긍정적인 영향을 미치기도 한다(Saeki et al, 1990; Kwon and Song 2010; Song and Kwon 2007; Kwon and Kwon 2019).

또한 탄산화에 대한 내구수명 평가 방법은 기존의 실험 또는 실태조사 결과에 근거한 반경험식의 연구진행에서 내부 공극구조 및 수화물의 이산화탄소 반응을 고려한 열역학적 모델로 크게 발전하고 있다(Kwon and Song 2010; Glasser et al, 2008; Ishida et al, 2007). 시멘트 내의 수화물(수산화칼슘, C-S-H 겔, 에트링 자이트)뿐 아니라 미수화된 클링커의 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S와의 이산화탄소 반응을 고려한 연구도 진행되고 있다. 이러한 탄산화에 대한 영향은 단일 열화뿐 아니라 염화물의 침투에 따른 복합열화에서도 발생하는데, 이때는 내부 pH의 저감에 따라 염화물 이온의 비가 더욱 증가하여 부식이 활성화된다. 또한 이산화탄소의 유입에 따라 비교적 안정화된 수화물의 재용해가 시작되고 이로 인해, 고정화된 염화물 이온이 자유 염화물로 변환하여 철근부식에 큰 영향을 미치게 된다(Greve-Dierfeld and Gehlen 2016; Kuosa et al, 2014). Table 1에서는 시멘트 수화물과 이산화탄소 반응을 요약하였으며, 탄산화 진행에 따른 pH 저감에 따른 화학반응 개요도를 Fig. 1에 도시하였다.

Table 1. Chemical reaction of CO<sub>2</sub> with hydrates and unhydrates

Types	Chemical reaction*	Produced hydrates
Calcium hydrates (solid or dissolved conditions)	$CH(s \text{ or } aq) + \bar{C} \rightarrow \bar{C}\bar{C} + H$	CaCO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O
C-S-H gel (various C/S ratio)	$C_xSH + x\bar{C} \rightarrow x\bar{C}\bar{C} + SH_t + (z-t)H$	CaCO <sub>3</sub> , Silica gel, Water
Ettringite (C-Al-S hydrates)	$C_3A \cdot 3\bar{C}\bar{S} \cdot 32H + 3\bar{C} \rightarrow 3\bar{C}\bar{C} + 3\bar{C}\bar{C}H_2 + AH_x + (26-x)H$	CaCO <sub>3</sub> , Al-gel, Water
C <sub>3</sub> S and C <sub>2</sub> S	$x(C_3S) + (x-y)\bar{C} + zH \rightarrow yC_2SH_2 + (x-y)\bar{C}\bar{C} (x=2,3)$	C-S-H gel, CaCO <sub>3</sub>

\*Note: CaO(C), SiO<sub>2</sub>(S), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(A), CO<sub>2</sub>(C), SO<sub>3</sub>(S)

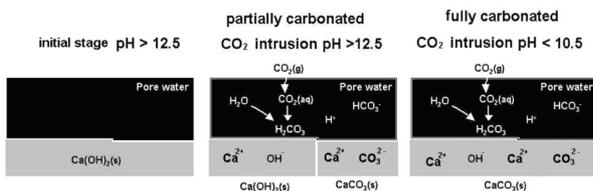


Fig. 1. Carbonation process with CO<sub>2</sub> intrusion

공극수의 pH를 유지하는 시멘트 알칼리, 즉 수화반응에 따른 수산화칼슘과 용해에 따른 pH 유지는 가장 중요한 탄산화 저항인 자이지만 사용골재의 특성이 변화할 경우, 탄산화 및 강도 변화에 큰 영향을 미치게 된다. 내부에 공극을 많이 가지고 있는 경량골재의 경우, 이산화탄소의 침투가 직접적으로 골재를 통과하여 탄산화 깊이가 크게 증가한다. 또한 플라이애시나 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 경우, 초기재령에서 포졸란 반응에 따른 수산화칼슘의 소모와 슬래그 산화 피막을 제거하기 위해 사용된 Ca<sup>2+</sup> 이온으로 인해, 탄산화가 증가하게 된다. 특히 장기재령이 아닌 경우에는 수산화칼슘의 소모분에 비하여 이산화탄소 확산계수의 감소가 크게 이루어지지 않아 촉진 탄산화 실험에서는 더 큰 탄산화 깊이가 평가되고 있다(Cho et al, 2018; Kim and Kwon 2020).

본 연구에서는 3개 지역의 골재를 사용하여 3개의 배합강도군을 가진 콘크리트를 제조하였으며, 재령별 압축강도와 촉진실험을 통한 탄산화 속도계수를 도출하여 둘 간의 관련성을 도출하였다. 또한 국내에서 차용하고 있는 Meso-Level의 탄산화 평가식을 사용하여, 목표내구수명을 확보하는 피복두께를 도출하였으며, 설계방법의 제한성을 분석하였다.

본 연구에서 도출된 강도는 배합강도를 의미하는 것으로 실제 설계강도는 이보다 안전측이다.

## 2. 지역 골재 품질을 고려한 배합 및 탄산화 시험

### 2.1 사용재료 및 배합

본 연구에서는 3개 지역 골재를 수급하여 배합을 수행하였으며, 배합강도 및 탄산화 시험을 수행하였다. 강도등급은 24 MPa, 27 MPa, 30 MPa로 고려하였으며, 목표 슬럼프와 단위수량은 150 mm 및 168 kg/m<sup>3</sup>으로 설정하였다.

A 지역 골재를 가진 배합에서는 결합재로 시멘트, 슬래그 미분말, 플라이애시를 사용하였으며, B 지역에서는 결합재로 시멘트, 슬래그 시멘트, 플라이애시를 사용하였다. 압축강도 24 MPa 및 27 MPa에 대해 배합은 OPC와 슬래그 시멘트를 5:5 로, 30 MPa 배합은 OPC와 슬래그 시멘트, 플라이애시 비를 3:6:1 로 배합하였다. C 지역의 24 MPa 및 27 MPa 배합에서는 OPC와 슬래그 미분말 비를 8.5:1.5 로 설정하였다. 압축강도 30 MPa 배합은 OPC와 슬래그 미분말, 플라이애시 비를 6.5:2.5:1 로 배합하였다.

Table 2에서는 사용된 배합표를 나타내었으며, 실험시 재료배합 및 슬럼프 측정 관련 사진은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2. Mixing proportions for test

Mixture strength (MPa)	Sites	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )								
				W	C	Slag cement	Slag powder	FA	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G <sub>max</sub>	AD
									Crushed sand	Natural sand	25 mm	(Binder %)
24	A	46.7	49	168	252	-	108	-	636	265	953	0.9
27		43.7	48	168	270	-	115	-	616	256	959	0.9
30		40.3	46	165	287	-	82	41	581	242	982	0.9
24	B	46.7	49	168	180	180	-	-	437	437	931	0.9
27		43.7	48	168	193	192	-	-	423	426	923	0.9
30		40.8	46	165	122	243	-	41	400	403	945	0.9
24	C	46.7	53	168	216	-	144	-	665	285	874	0.9
27		43.7	52	168	231	-	154	-	645	277	850	0.9
30		40.8	50	165	267	-	102	41	611	262	873	0.9

Table 2에서 고로슬래그 미분말은 밀도 2,90 (g/cm<sup>3</sup>)의 3종을, 플라이애시는 밀도 2,22 (g/cm<sup>3</sup>) 2종을 사용하였다. 골재의 경우, 산지별로 정보가 명확하지 않았으나 굵은 골재는 밀도 2,62~2,65 g/cm<sup>3</sup>, 조립률 6.81~6.93의 범위에 있었다. 잔골재의 경우 부순 잔골재는 조립률 2.37~2.59의 범위를, 밀도는 2.59~2.64 g/cm<sup>3</sup>의 범위를 나타내었다. 자연사의 경우, 조립률이 약간 증가하여 2.37~2.86의 범위를, 밀도는 2.59~2.55 g/cm<sup>3</sup>의 범위를 가지고 있었다.

잔골재의 사용 질량비는 A 지역에서는 부순모래 70 %와 자연사 30 %를 사용하였으며, B 지역에서는 부순모래 50 %와 해사 50 %를, C 지역에서는 부순 60 %와 자연사 40 %를 사용하였다.



Fig. 2. Photos for concrete slump test

## 2.2 압축강도 및 촉진탄산화 실험

탄산화 촉진 실험은 KS F 2584(콘크리트 촉진 탄산화 시험 방법)과 KS F 2596(콘크리트 탄산화 깊이 측정 방법)에 따라서 실시하였다. 실험체 탈형 후 일정 기간 양생한 시험체를 KS 규격에 준하여 온도 20 °C, RH 60 %, CO<sub>2</sub> 농도 5.0 %의 조건의 탄산화 시험기에 초치시킨 뒤, 4주와 8주에 탄산화 깊이를 측정하였다.

압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 재령 7일 및 28일에 실험을 수행하였다. Fig. 3에서는 압축강도 및 탄산화 평가 사진을 나타내었다.



(a) Compressive strength (b) Carbonation test

Fig. 3. Photos for strength and carbonation test

## 3. 탄산화 실험결과 분석 및 수명에 따른 피복두께 도출

### 3.1 슬럼프 및 공기량 평가

A 지역의 경우, 배합강도 24 MPa, 27 MPa, 30 MPa에 대하여 각 155 mm, 155 mm, 170 mm의 슬럼프가 측정되었다. 또한 공기량의 경우 4.1~4.8 %로 목표 공기량 4.0±1.5 % 범위를 만족하였다. B 지역의 경우, 각 165 mm, 160 mm, 160 mm의 슬럼프가 측정되었으며, 공기량은 4.4~5.0 %의 범위로 큰 차이는 없었다. C 지역의 경우, 150 mm, 170 mm, 160 mm의 슬럼프가 각각 측정되었으며, 공기량 시험 결과는 4.4~4.5 %의 범위를 나타내었다. 각 실험결과를 Fig. 4에 정리하였다.

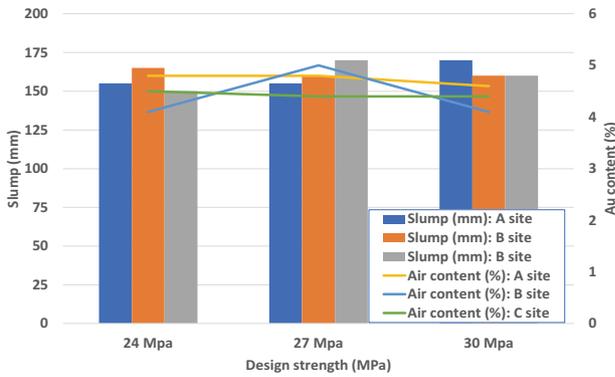


Fig. 4. Results of slump and air content test

### 3.2 압축강도 평가

3개의 site 골재에 대하여 콘크리트 배합을 수행하여, 재령 7일 및 28일에 대한 압축강도 평가결과를 Table 3에 정리하였으며, 이를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 재령별 강도는 증가하여 목표 설계강도를 만족하였지만 B지역의 압축강도는 다른 지역에 비하여 낮은 수준이었다. OPC의 사용량이 상대적으로 낮고, 초기재령에서 플라이애시의 낮은 강도 발현성, 자연골재가 없는 점(부순골재)등이 주된 원인이라고 판단된다.

Table 3. Results of compressive strength

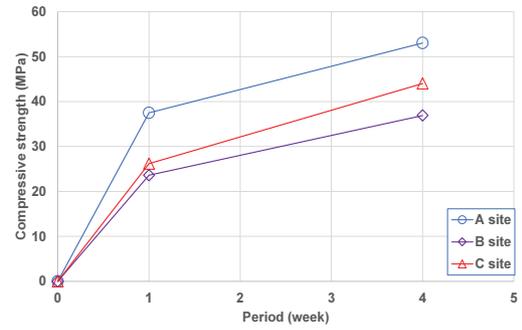
Grade (MPa)	Compressive strength (MPa)					
	A site		B site		C site	
	7 days	28 days	7 days	28 days	7 days	28 days
24	37.5	53.0	23.6	36.9	26.2	44.0
27	33.9	48.1	22.0	39.5	32.8	47.1
30	35.4	51.5	25.0	35.1	35.0	54.7

### 3.3 탄산화 깊이 평가

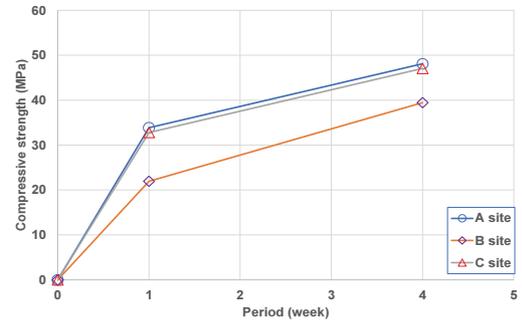
압축강도 평가와 마찬가지로 3개의 골재군을 가진 지역에 대하여 4주, 8주의 촉진 탄산화 시험을 수행한 결과는 Table 4와 같다. 또한 그 결과를 회귀분석하여 Fig. 6에 나타내었으며, 탄산화 속도

Table 4. Carbonation depth with exposed period(4 and 8 weeks)

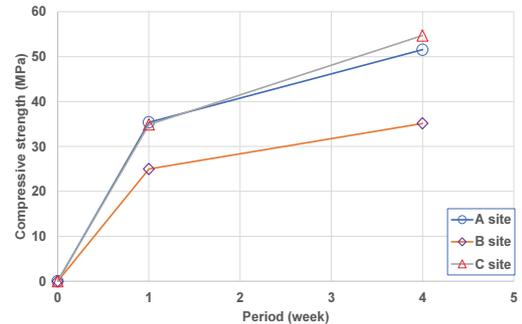
Strength grade (MPa)	Carbonation depth (mm)					
	A site		B site		C site	
	4 weeks	8 weeks	4 weeks	8 weeks	4 weeks	8 weeks
24	4.5	6	7.5	12.0	3.5	9.3
27	4.5	5.8	7.3	11.3	3.5	4.8
30	3.5	5.8	8.8	9.8	2.8	4.3



(a) 24 MPa Grade



(b) 27 MPa Grade



(c) 30 MPa Grade

Fig. 5. Compressive strength with period and sites

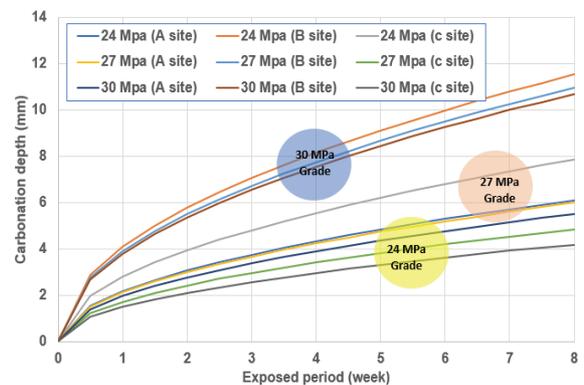
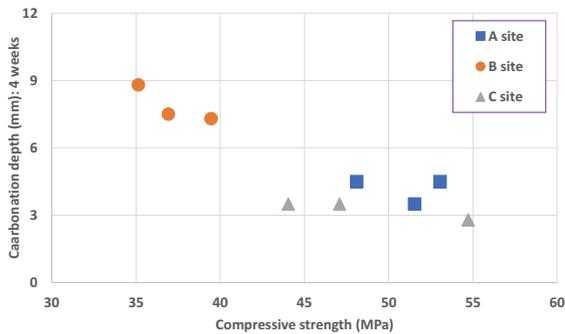


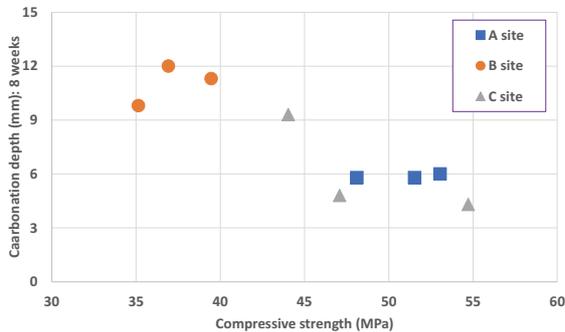
Fig. 6. Regression analysis of carbonation depth

Table 5. Carbonation velocity and determination coefficient

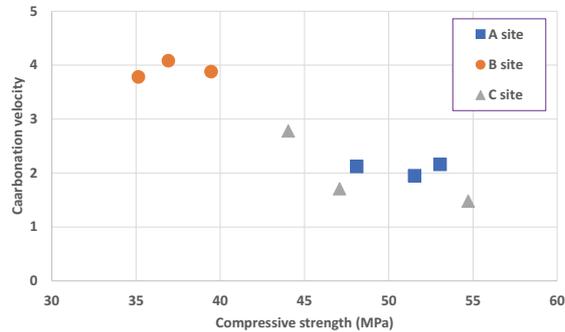
Strength grade	Carbonation velocity (mm/week <sup>0.5</sup> )					
	A site		B site		C site	
	Velocity	R <sup>2</sup>	Velocity	R <sup>2</sup>	Velocity	R <sup>2</sup>
24	2.16	0.998	4.08	0.997	2.78	0.936
27	2.12	0.998	3.88	0.998	1.71	0.999
30	1.95	0.995	3.78	0.987	1.48	0.998



(a) Carbonation depth and compressive strength(4 weeks)



(b) Carbonation depth and compressive strength(8 weeks)



(c) Carbonation velocity and compressive strength

Fig. 7. Relationship between compressive strength and carbonation behavior

계수 및 결정계수를 Table 5에 정리하였다. 또한 Fig. 7에서는 강도에 따른 탄산화 속도계수의 변화를 지역별로 나타내었다.

초기재령에서 슬래그나 플라이애시를 사용한 콘크리트에서는 탄산화 거동은 매우 복잡하다. 강도발현과 다르게 수산화칼슘의 소모와 확산계수의 감소가 동시에 발생하므로 명확한 탄산화 저항에 대한 정량화는 어렵다. Fig. 6에서는 강도군에 따라 탄산화 속도가 감소되는 경향이 뚜렷하게 나타났으나, Fig. 7에서 알 수 있듯이, 사용골재의 특성에 따라 탄산화와 강도 특성이 명확하지 않은 영역이 발생한다. C 지역 경우 강도의 증가에 따라 탄산화 깊이 및 탄산화 속도가 감소하는 것을 알 수 있는데, 이 경우는 골재의 영향은 작은 것으로 판단된다. Fig. 7(a)와 (b)의 전체 값들에서는 강도의 증가에 따른 탄산화 깊이의 감소를 명확하게 알 수 있다. 그러나 A 지역과 B 지역에서는 강도와 탄산화 깊이의 상관성이 매우 떨어지는데, 강도 발현에 비하여 탄산화속도가 크게 평가된 지역이다. 그 원인으로서는 골재의 품질이 안 좋으며, 슬래그 혼입량이 많은 배합으로 고려할 수 있다. 특히 슬래그 미분말을 많이 혼입한 배합에서는 초기에 완전한 수화반응이 일어나기 전 높은 농도의 촉진 탄산화 시험이 수행될 경우 높은 탄산화 깊이가 발생한다. B 지역에 사용된 슬래그 시멘트의 경우, OPC 0.4와 슬래그 미분말 0.6의 비율, 그리고 일부 조강제가 혼입되어 있는데, 높은 강도를 가지고 있지만 상대적으로 탄산화 속도가 큰 것을 알 수 있다.

### 3.4 목표내구수명에 따른 탄산화 피복두께

#### 3.4.1 탄산화 깊이 평가를 통한 내구수명(KCI 2022)

일반적으로 각국의 코드에서는 비교적 간단한 반 경험식을 사용하고 있는데, 본 절에서는 KDS 14 20 40식에 따라 내구수명과 관련된 피복두께를 평가하였다. 사용식은 JSCE의 탄산화 설계식과 동일하게 적용되고 있으며, 혼화재료를 고려한 유효 물결합재비의 사용과 일조시간을 고려하여 남향쪽의 탄산화 깊이를 크게 산정하는 것이 특징이다. 식(1)에서는 탄산화 예측값과 한계값의 규정을 나타내었다.

$$\gamma_P y_p \leq \phi_K y_{lim} \tag{1}$$

여기서,  $\gamma_P$  는 탄산화에 대한 환경계수(1.1),  $\phi_K$ 는 탄산화에 대한 내구성 감소계수(0.92),  $y_p$ 는 탄산화 깊이의 예측값,  $y_{lim}$ 은 철근부식이 발생할 수 있는 탄산화 한계깊이 (mm)이다.  $y_{lim}$ 은 식(2)와 같이 피복두께에 일정 수준의 여유치를 고려하도록 제시되어 있다. 또한 탄산화 깊이의 예측값( $y_p$ )은 식(3)과 같이 산정한다.

$$y_{lim} = c - c_k \tag{2}$$

$$y_p = \gamma_{cb} \alpha_d \sqrt{t} \tag{3}$$

여기서,  $c$ 는 설계피복두께 (mm),  $c_k$ 는 한계 탄산화 깊이 여유 값(자연환경: 10 mm)이다.  $\gamma_{cb}$ 는 탄산화 깊이 예측식의 변동성을 고려한 안전계수(1.15)이다.  $\alpha_d$ 는 설계 탄산화 속도계수(mm/ $\sqrt{y}$ )를 의미하는데 식(4)와 같다.

$$\alpha_d = \alpha_k \beta_e \gamma_c \tag{4}$$

$\alpha_k$ 는 특성 탄산화 속도계수(mm/ $\sqrt{y}$ )를,  $\beta_e$ 는 환경작용의 정도를 나타내는 방향계수(북향: 1.0, 건조되기 쉬운 환경 및 남향: 1.6)이다.  $\gamma_c$ 는 콘크리트의 재료계수(1.0)이며,  $t$ 는 재령(년)을 나타낸다. 식(4)의 특성 탄산화 속도계수는 식(5)와 같은 한계값을 가진다.

$$\gamma_p \alpha_p \leq \phi_k \alpha_k \tag{5}$$

$\gamma_p$ 는 환경계수(1.1),  $\phi_k$ 는 내구성감소계수(0.92),  $\alpha_p$ 는 탄산화 속도계수의 예측값(mm/ $\sqrt{y}$ ),  $\alpha_k$ 는 콘크리트의 특성 탄산화 속도계수(mm/ $\sqrt{y}$ )를 나타낸다. 탄산화 속도계수의 예측값  $\alpha_p$ 는 식(6)과 같이 산정한다.

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0(W/B) \tag{6}$$

여기서,  $W/B$ 는 유효 물-결합재 비를 나타내며 이는 식(7)과 같다.

$$W/B = W / (C_p + k A_d) \tag{7}$$

여기서,  $W$ 는 단위체적당 물의 질량,  $B$ 는 단위체적당 유효 결합재의 질량,  $C_p$ 는 단위체적당 포틀랜드 시멘트의 질량,  $A_d$ 는 단위체적당 혼화재의 질량,  $k$ 는 재료상수(플라이애시의  $k = 0$ , 고로슬래그 미분말의  $k = 0.7$ )이다.

### 3.4.2 목표내구수명을 만족하는 피복두께의 산정

3.4.1에서 서술한 설계식을 이용하여 목표내구수명 100년과 65년에 대한 최소 피복두께를 도출하도록 한다. Table 6에 유효 물-

결합재와 도출된 피복두께를 정리하였으며, Fig. 8은 도출된 피복두께를 도시하였다.

목표 내구수명이 65년일 경우 25.8 mm~35.6 mm의 피복두께가, 100년일 경우는 29.5 mm~41.7 mm의 피복두께가 도출되었다. 설계상에서 크게 무리가 없는 피복두께이지만 C 지역에서는 높은 유효 물-결합재비에 따라서 타 지역보다 높은 피복두께가 요구되었다. 또한 B 지역에서는 물-결합재와 유효 물-결합재비가 차이가 발생하였는데, 이는 30 MPa에서 슬래그 시멘트와 플라이애시를 사용하여 유효 물-시멘트비가 증가하였기 때문이다.

현재 일본 및 국내의 탄산화 설계식은 방향계수, 피복두께 여유분, 복합열화 변수 등을 고려하고 있으나, 콘크리트 품질 특성과 강도 보정 등이 없는 상태이다. 일부 기존의 외국 시방서의 제안식에서는 촉진탄산화 실험 결과를 이용하여 제안된 식도 제안되고 있다(AJ 2009). 국내 환경과 특성을 고려한 유효 물-결합재비와 환경계수의 보정계수의 보완이 필요하다.

Table 6. Cover depth for service life(100 and 65 years)

Site and strength grade	Effective W/B (%)	Minimum cover depth for 100 years	Minimum cover depth for 65 years
		North	North
A site	24	51.28	37.5
	27	47.93	29.6
	30	47.91	29.5
B site	24	51.69	36.5
	27	48.31	30.5
	30	51.91	39.0
C site	24	53.03	41.7
	27	49.59	33.5
	30	48.76	31.6

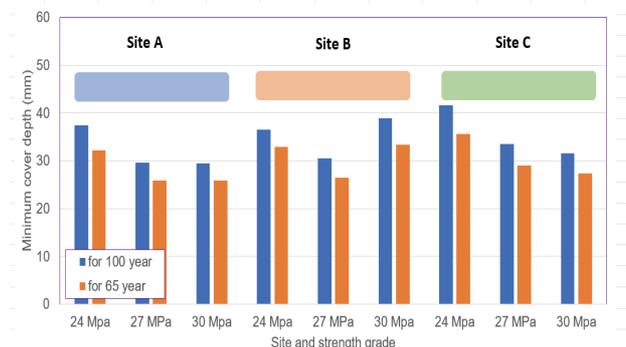


Fig. 8. Minimum cover depth for required service life with effective W/B ratio

## 4. 결론

본 연구에서는 3개 지역의 골재 특성과 3 수준의 배합강도를 가진 조건에 대하여 촉진탄산화 및 압축강도 실험을 수행하였다. 또한 국내의 설계기준식을 고려하여 목표내구수명을 만족하는 피복두께를 도출하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 3가지 다른 지역골재(A, B, C)를 고려하여 탄산화 실험을 수행한 결과, A 지역에서는 1.95~2.16 mm/week<sup>0.5</sup>의 탄산화 속도가, B 지역에서는 3.78~4.08 mm/week<sup>0.5</sup>의 속도가, C 지역에서는 1.48~2.78 mm/week<sup>0.5</sup>의 탄산화 속도가 평가되었다. 강도의 증가에 따라 탄산화 속도는 감소하고 있었지만, 일부 지역에서는 뚜렷한 상관성이 발견되지 않았다.
- 혼화재료(고로슬래그 미분말, 플라이애시)를 혼입한 콘크리트가 재령 초기에 고농도의 이산화탄소에 노출될 경우, 수화 반응과 포졸란 반응, 그리고 탄산화 반응이 동시에 발생하여 높은 탄산화속도를 가지게 된다. 슬래그 혼입량이 많고 플라이애시를 사용한 배합에서는 강도증가에 따른 명확한 탄산화 깊이의 감소가 확인되지 않았다.
- 국내 및 일본의 탄산화 설계식을 통해 65년 및 100년의 내구수명을 만족하는 피복두께를 유효 물-결합재비를 고려하여 평가하였다. 65년일 경우, 배합별로 차이는 있으나 25.8 mm~35.6 mm의 피복두께가, 100년일 경우는 29.5 mm~41.7 mm의 피복두께가 도출되었다. C 지역의 배합에서는 상대적으로 높은 유효 물-결합재로 높은 피복두께가 요구되었으며, B 배합에서는 강도를 위한 물-결합재비와 탄산화를 위한 유효 물-결합재비의 차이로 인해, 높은 설계강도에서 오히려 높은 피복두께가 요구되었다.
- 현재 사용하고 있는 탄산화 설계식의 경우, 건조/습윤을 고려한 탄산화계수와 유효 물-결합재비가 장기적인 탄산화 거동과는 차이를 보인다. 장기적인 자료의 축적과 강도 등 물리적 지표를 포함한 설계정수의 보완이 필요하다.

## Conflict of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 한남대학교 교내연구비(2023)에 의해 수행되었으며, 저자는 이에 감사드립니다.

## References

- ACI Committee. (2008). 201.2 R-08: Guide to Durable Concrete Durability. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 19.
- Architectural Institute of Japan. (2009). Japanese Architectural Standard Specification for Reinforced Concrete Work JASS 5.
- Cho, S.J., Yoon, Y.S., Kwon, S.J. (2018). Carbonation behavior of GGBFS-based concrete with cold joint considering curing period, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(4)**, 259–266.
- Glasser, F.P., Marchand, J., Samson, E. (2008). Durability of concrete—degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and Concrete Research*, **38(2)**, 226–246.
- Greve-Dierfeld, S., Gehlen, C. (2016). Performance based durability design, carbonation part 1—benchmarking of European present design rules, *Structural Concrete*, **17(3)**, 309–328.
- Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T. (2007). Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, **37(4)**, 565–578.
- Izumi, I., Kita, D., Maeda, H. (1986). Carbonation, Kibodang Publication, 35–88.
- Japan Society of Civil Engineers Concrete Committee. (2007). Standard Specifications for Concrete Structures: Design.
- Kim, T.H., Kwon, S.J. (2020). Probabilistic service life analysis of GGBFS concrete exposed to carbonation cold joint and loading conditions, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **24(3)**, 39–46.
- KCI. (2022). Design Standard of Reinforced Concrete (KDS 14 20 00), Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Korea Concrete Institute (KCI) [In Korean].
- Kuosa, H., Ferreira, R.M., Holt, E., Leivo, M., Vesikari, E. (2014). Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life, *Cement and Concrete Composites*, **47**, 32–40.
- Kwon, S.J., Song, H.W. (2010). Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation

- modeling, *Cement and Concrete Research*, **40(1)**, 119–127.
- Kwon, S.J. (2017). Current trends of durability design and government support in South Korea: chloride attack, *Sustainability*, **9(3)**, 417.
- Kwon, S.H., Kwon, S.J. (2019). Carbonation assessment for superstructure of bridge used in urban area for 46–years by core specimens extracted from the structure, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **7(2)**, 151–157.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance integrated material and structural mechanics, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1(2)**, 91–126.
- Papadakis, V., Vayenas, C., Fardis, M. (1991). Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *ACI Materials Journal*, **88(2)**, 186–196.
- Saeki, T., Ohga, H., Nagataki, S. (1990). Change in micro-structure of concrete due to carbonation, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, **1990(420)**, 33–42.
- Song, H.W., Kwon, S.J. (2007). Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, **37(6)**, 909–915.

### 골재 지역 특성이 불분명한 콘크리트의 탄산화 속도 및 강도 상관성

혼화재(슬래그 미분말 또는 플라이애시)를 혼입한 콘크리트가 재령 초기에 촉진 탄산화 실험에 노출될 경우, 수화반응과 포졸란 반응, 그리고 탄산화 반응이 동시에 발생하므로 매우 복잡한 탄산화 거동이 발생한다. 특히 골재의 품질이 좋지 못한 경우에는 강도 특성과 탄산화 거동 특성이 명확하지 않다. 본 연구에서는 정보가 명확하지 않은 3개 산지 골재(A, B, C)를 대상으로 3 수준의 배합강도 등급 (24 MPa, 27 MPa, 30 MPa)의 콘크리트 시편을 제조하였다. 재령 7일과 28일 압축강도 실험을 수행하였으며, 촉진 탄산화 실험을 8주간 수행하여 탄산화 속도계수를 도출하였다. 도출된 압축강도, 탄산화 속도계수를 각 배합특성 및 골재특성을 고려하여 상관성을 분석하였다. 또한 국내 탄산화 설계식을 이용하여 목표 내구수명에 따른 최소 피복두께를 도출하였으며, 탄산화 설계의 변수(방향계수 및 유효 물-결합재 상수)의 보완 필요성을 제시하였다.