

## 15년간 노출 시험한 일반 콘크리트의 탄산화 특성 검토

# Carbonation Properties of Ordinary Concrete Exposed for 15 Years

이빛나<sup>1</sup> · 이종석<sup>2\*</sup>Binna Lee<sup>1</sup> · Jong-Suk Lee<sup>2\*</sup>

(Received September 2, 2022 / Revised September 16, 2022 / Accepted September 19, 2022)

In this study, Long-term test specimens were tested in the outdoor exposure environment and the carbonation properties of concrete were analyzed. The test specimens were manufactured in 40 %, 50 % and 60 % according to the w/c ratio. Carbonation was measured at 3 years and 15 years of age. Based on the results, long-term carbonation prediction models(KICT model) were derived. As a result, carbonation increased according to the w/c. Based on the w/c 40 %, w/c 50 % increased about 1.8 times and w/c 60 % increased about 3.7 times. Comparison of carbonation according to age was that the carbonation at 15<sup>th</sup> year was about 3 times higher than that of 3<sup>rd</sup> year. As results of comparing the KICT models and other carbonation prediction models, the carbonation prediction showed different values.

**키워드** : 탄산화, 장기간, 옥외 노출, 예측모델

**Keywords** : Carbonation, Long-term, Outdoor, Prediction model

## 1. 서론

최근 신소재 개발 및 설계·시공 기술의 발전 등으로 인해 국내·외 콘크리트 구조물의 예측 수명 및 목표내구수명 등이 증가하고 있는 추세이다. 하지만, CO<sub>2</sub> 량의 증가 및 폭염/폭설 등의 각종 환경 변화로 인하여 콘크리트 구조물의 조기 열화 및 노후화가 증가하고 있으며 이로 인해 콘크리트 구조물의 성능 저하 및 유지 관리 비용 증가 등의 문제가 발생하고 있다. 특히, 철근 콘크리트의 구조물의 주요 열화 중 하나인 탄산화의 경우 대기 중의 CO<sub>2</sub>가 콘크리트 내부로 침투 및 확산하여 콘크리트 내의 알칼리성을 저하시키며 결과적으로 철근 부식을 초래하여 구조물의 안전성 및 내구수명을 단축하고 있다.

콘크리트 탄산화 관련 연구는 국내·외에서 많이 진행되었으며 특히, 콘크리트의 수명예측에 필수적인 탄산화 깊이 및 탄산화 속도 예측에 대한 다양한 예측식 및 모델이 제안되었으며 이를 활용하여 구조물의 유지관리 및 잔존수명 예측 등에 활용하고 있다. 그러나 이런 선행 연구의 경우 주로 초기 탄산화 속도 계수에 대해

서 일괄적으로 적용하거나 실내·축진 실험 등으로 인해 도출된 값을 사용하기 때문에 국내 환경에 노출된 탄산화 값과의 차이가 발생하며, 대상 콘크리트의 구조물의 특성 및 상태 등을 정확히 반영하기에 다소 어려움이 있다. 특히, 탄산화 예측식은 반경험식 형태를 가지고 있기 때문에 국내에 장기간 노출 실험하여 획득한 데이터가 반드시 필요한 상황이다.

탄산화 깊이를 예측하는 연구는 Fick의 확산 법칙을 기본으로 진행되며 Wierig(1984)는 장기간 노출 시험을 통해 획득된 탄산화 측정값과 이론값의 차이를 비교하여 실측값과 이론값의 차이가 일반적으로 일치함을 규명하였으며, Martin(1985)의 경우 축진 탄산화 시험을 통해 탄산화 깊이와 사용연한과의 관계를 도출하였으며 나아가 장기 시험 기간과 축진 시험 기간의 비를 이용하여 사용 연한을 제안하였다. 또한, Parrott(1989)는 장기 폭로 실험을 통하여 강우에 노출된 부재와 실내 장기 실험을 비교하여 실내와 실외의 탄산화 계수의 한계값을 제안하였으며, CEB(1989)에서는 습도, 온도, 태양의 방사, 단면의 변화에 따른 변동성 등 다양한 인자를 고려하여 탄산화 깊이 예측 모델을 제시하였으며 이를 장기 시험

\* Corresponding author E-mail: jslee@kict.re.kr

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원 (Department of Structural Engineering Research, KICT, Kyonggi-do, 10223, Korea)

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원 (Department of Structural Engineering Research, KICT, Kyonggi-do, 10223, Korea)

을 통하여 검증하였다.

일본의 경우에서도 여러 연구자들이 장기 폭로 실험을 토대로 예측 모델을 제시하였으며 이 중 Architectural Institute of Japan(2004)의 경우 20년간 자연 폭로 시험을 결과를 활용하여 탄산화 깊이에 대한 모델식을 제시하였다. 또한, Architectural Institute of Japan(2004)는 물/시멘트비를 고려하여 탄산화 깊이를 도출하였으며, 콘크리트의 재료 및 노출환경적인 요소 등을 고려하여 탄산화 예측 모델을 제시하였다. 또한, 국내에서 주로 활용되는 모델인 Kishitani(1963)의 경우 탄산화 속도를 물/시멘트비 60 %이하와 이상으로 구분하여 제시하였다.

국내의 경우 Kim et al.(2001)이 국내 철근 콘크리트 아파트의 실태조사를 통해 지역별 중성화 속도를 산정하였으며 이를 토대로 잔존수명을 예측하였으며, Park(2002)은 국내 노출환경을 고려하여 강도 및 물/시멘트비의 상관관계를 기준으로 탄산화 예측 모델을 개발하였다. Kwon et al.(2007) 및 Kim et al.(2008)은 국내 환경의 실제 콘크리트 구조물의 탄산화깊이에 대해 자료를 수집·분석하여 지리적 위치, 강도별, 부재종류 등 주요 인자별로 콘크리트 탄산화 속도계수를 제시하는 등의 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 이러한 연구는 주로 실태조사를 통한 단발성으로 진행되고 있으며 실태조사를 토대로 획득된 제안식은 서로 다른 다양한 노출환경과 사용재료의 차이에 따라 오차 범위가 크게 발생할 가능성이 존재한다. 또한, 단발성이기 때문에 초기 탄산화계수를 일괄적으로 적용하여 대상 콘크리트 구조물의 시간에 따른 특성 및 상태를 반영하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내 환경에서 콘크리트의 장기 내구성능을 분석하기 위하여 국내에서 사용되는 재료를 바탕으로 물/시멘트비에 따라 콘크리트 시험체를 제작하였다. 또한, 제작한 시험체를 국내 환경에 약 15년간 노출시험을 수행하여 콘크리트 장기 내구성능을 검토하였으며 이 중 본 연구에서 콘크리트의 탄산화 특성에 대해 분석하였다. 또한, 획득한 데이터를 바탕으로 장기 탄산화 예측 모델을 도출하였으며 이를 국내 콘크리트 구조 내구성 설계기준에서 제시하고 있는 예측모델 및 기존 문헌의 예측 모델 등과 비교·검토 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험개요

본 연구에서 사용되는 시험체는 2006년에 제작된 시험체로 국내 해안환경에서 약 15년간 옥외 노출 시험을 수행하였으며 배합

Table 1. Mixture proportions of concrete

Type	w/c	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Compressive strength at 28 days (MPa)
			W	C	Coarse agg.	Fine agg.	
OPC40	40	42	175	438	1012	667	39.0
OPC50	50		175	350	1020	730	29.5
OPC60	60		175	292	1012	786	24.1

Table 2. Chemical composition of OPC

Type	Main components (%)				
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>3</sub>	CaO
OPC	21.01	6.40	3.03	2.15	61.30

Table 3. Physical properties of fine and coarse aggregates

Type	Gmax	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption (%)	Fineness modulus (FM)
Fine	-	2.56	2.62	2.59
Coarse	25	2.64	0.82	6.87

은 물/시멘트비에 따라 40 %, 50 % 및 60 %로 설정하였다. 시험체의 배합 및 물리적·화학적 특성은 Table 1~3과 같으며, 시험체의 28일 압축강도는 Table 1에 표기하였다(KICT, 2006).

제작된 시험체는 200 × 200 × 300 mm의 각주형 시험체로 제작하였으며 양생은 현장 타설과 유사하게 타설 후 2일간 습윤포와 비닐을 덮어 습윤 양생을 실시하였으며, 이후 28일까지 기건 양생을 실시한 후 노출 시험장으로 이동시켜 시험을 수행하였다.

탄산화 측정은 KS F 2596에 따라 수행하였으며, 제작한 시험체의 중심부를 절단한 후 페놀프탈레인 시약을 분무하여 표면으로부터 변색한 부분까지의 거리를 측정하였다.

### 2.2 옥외 노출 시험장

옥외노출 시험장은 전라북도 고창 인근으로 해안으로부터 약 60 m 지점에 위치하였다. 옥외노출 시험장의 연평균 최고 및 최저 기온은 각각 37 °C에서 -13.9 °C로 자세한 사항은 Table 4와 같으며 본 자료는 기상청 자료를 참고하여 정리하였다.

### 2.3 탄산화 예측모델 검토

콘크리트 탄산화 예측 모델은 정상상태에서 탄산가스가 콘크리트 내부 확산에 따라 생긴다는 가정하에 탄산화 깊이  $C$  (mm)는 경과시간  $t$ (년)의 제곱근에 비례한다는 Fick의 법칙(식 (1) 참조)을 기본 모델로 활용되고 있다. 이때, 탄산화 속도 계수  $A$ 는 콘크리트

Table 4. Environment of outdoor

Environmental condition		Site
Highest temperature (°C)		37.0
Low temperature (°C)		-13.9
number of days with precipitation		122
Relative humidity(day)	RH≥90 %	56.8
	RH≥95 %	18.3
Average wind speed (m/s)		2.66
Maximum wind speed (m/s)		18.7
Wind direction at maximum wind speed		Northwest
Number of days with snowfalls		16.2
Distance from sea shore (m)		60



Fig. 1. Outdoor exposure test site

의 물/시멘트비, 혼화제 사용유무, 시멘트 및 골재의 종류, 양생정도, 노출환경, 이산화탄소 농도, 온도 및 습도 등 다양한 변수에 의해 결정된다.

$$C = A \sqrt{t} \tag{1}$$

Table 5는 식 (1)에 근거한 연구자 중 국내에서 많이 활용되는 모델식과 국내 구조물의 실측 데이터를 활용한 모델식 및 국내외 설계기준에서 제시한 예측식(국내 콘크리트 구조 내구성 설계기준 및 일본의 JSCE에서 제시한 예측식)을 정리한 것으로 시멘트 및 골재의 종류, 혼화제의 유무, 표면 포장 유무 등 다양한 변수를 고려하여 식을 제안하였다(Park 2002; Kwon et al, 2007; Yang et, al, 2010).

Table 5의 Kishitani의 경우 국내에서 가장 많이 사용되는 예측 모델로서 물/시멘트비 60 %를 기준으로 식을 구분하여 제시하였다. Hamada의 경우 Kishitani 모델과 유사하지만 물/시멘트비를

Table 5. Prediction model of carbonation

Type	Prediction models
Kishitani	$t = \frac{0.3(1.15 + 3W/C)}{R^2(W/C - 0.25)^2} \cdot C^2 \quad (W/C > 0.6)$ $t = \frac{7.2}{R^2(4.6W/C - 1.76)^2} \cdot C^2 \quad (W/C \leq 0.6)$ $R = \gamma_c \cdot \gamma_a \cdot \gamma_s$
	<p><math>C</math>: Carbonation depth(cm), <math>t</math>: Time(year),  <math>\gamma_c</math>: Cement type, <math>\gamma_a</math>: Aggregate type,  <math>\gamma_s</math>: Admixture type, <math>W/C</math>: water/cement ratio</p>
Hamada	$t = \frac{k}{R} \cdot C^2$ $k = \frac{0.3(1.15 + 3W/C)}{(W/C - 0.25)^2}$ $R = \gamma_c \cdot \gamma_a \cdot \gamma_s$
	<p><math>C</math>: Carbonation depth(cm), <math>t</math>: Time(year),  <math>\gamma_c</math>: Cement type, <math>\gamma_a</math>: Aggregate type,  <math>\gamma_s</math>: Admixture type, <math>W/C</math>: water/cement ratio</p>
Kwon	$C = \frac{(W/C - 0.25)}{\sqrt{0.3(1.15 + 3W/C)}} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (W/C > 0.6)$ $C = \frac{(4.6W/C - 1.76)}{\sqrt{7.2}} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (W/C \leq 0.6)$ $\alpha = -0.0265x + 1.2538$
	<p><math>C</math>: Carbonation depth(cm), <math>t</math>: Time(year),  <math>\alpha</math>: Coefficient factor of strength,  <math>x</math>: Compressive strength(MPa),  <math>W/C</math>: water/cement ratio</p>
JSCE	$C = (-3.57 + 9W/B) \sqrt{t}$ $W/B = W/(C_p - k \cdot Ad)$ <p><math>C</math>: Carbonation depth(cm), <math>t</math>: Time(year),  <math>C_p</math>: Cement contents  <math>k</math>: Admixture type,  <math>Ad</math>: Admixture contents</p>
KDS	$C = 1.38(-3.57 + 9.0W/B) \sqrt{t}$ <p><math>C</math>: Carbonation depth(cm), <math>t</math>: Time(year),  <math>W/B</math>: water/binder ratio</p>

고려하여 하나의 식으로 탄산화 깊이를 예측하는 모델을 도출하였다. Kwon의 경우 국내 구조물의 실험자료를 활용하여 구조물에 따른 탄산화 실측값을 바탕으로 탄산화 예측 모델을 도출하였으며, 이때 콘크리트 강도에 따른 보정계수를 고려하였다. 일본의 경우 콘크리트 표준시방서의 유지관리편을 참고하였으며 국내의 경우 콘크리트 구조설계기준의 콘크리트구조 내구성 설계기준(KDS 14 20 40)을 참고하였다.

### 3. 실험 결과

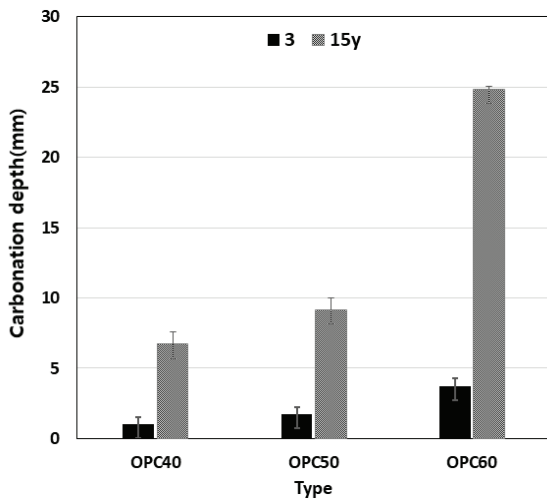
#### 3.1 물/시멘트비에 따른 탄산화 깊이

Fig. 2는 물/시멘트비에 대한 탄산화 깊이 및 탄산화 속도 계수를 정리한 그래프이며, 재령 3년차 및 재령 15년차에 시험체를 수거하여 탄산화 깊이 및 탄산화 속도 계수를 도출하였다. 이때, 탄산화 속도 계수는 위의 식 (1)에서 탄산화 깊이 및 재령을 역산하여 도출하였다.

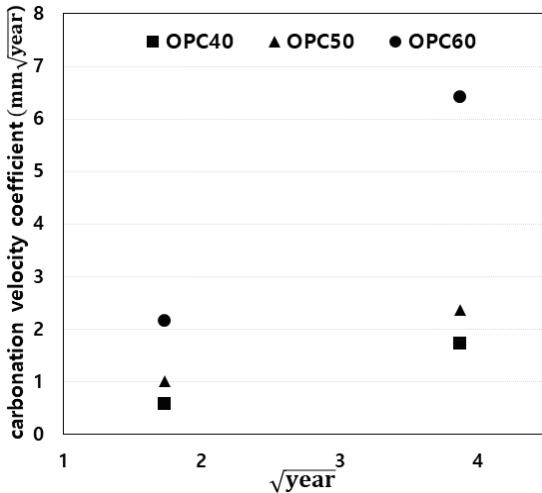
국내 환경에서 장기간 노출된 시험체의 탄산화 경우 Papadakis et al.(1991)의 연구에서처럼 물/시멘트비가 증가함에 따라 증가하

는 경향을 보였으며 재령 15년차 탄산화 값은 물/시멘트비 40 %의 경우 약 6.7 mm, 물/시멘트비 50 %의 경우 약 9.2 mm, 물/시멘트비 60 %의 경우 약 24.8 mm를 나타내었다(Fig. 2(a) 참조). 또한, Fig. 2(b) 그래프의 경우 물/시멘트비에 따른 탄산화 속도 계수를 표현한 것으로 탄산화 속도 계수는 물/시멘트비가 40 % 기준으로 물/시멘트비 50 %의 경우 약 1.4배, 물/시멘트비 60 %의 경우 약 3.7 배 증가하였다. 이러한 원인은 기존 문헌에서처럼 물/시멘트비가 커지면서 콘크리트의 밀실성이 저하되고 이는 단위 용적당 전체 공극량을 증가시키기 때문에 이산화탄소의 투과를 용이하게 만들고 이로 인해 탄산화의 속도가 증가한 것으로 판단된다(Sarja and Vesikari 1996; Seo and Lee 2002).

본 연구의 시험체의 경우 물/시멘트비가 10 % 증가함에 따라 탄산화 속도 계수가 1.7배 증가하는 경향을 보였으며 향후 지속적인 연구를 통해 국내 환경에서의 물/시멘트비와 탄산화 속도 계수와의 관계를 검토할 예정이다.



(a) Carbonation depth of w/c



(b) Carbonation velocity coefficient of year

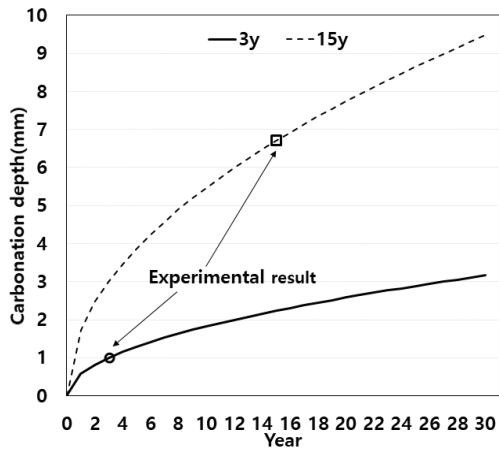
Fig. 2. Carbonation of w/c

#### 3.2 재령에 따른 탄산화 깊이

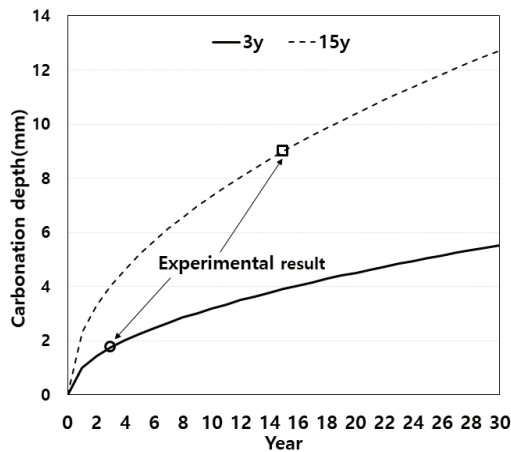
Fig. 3은 재령에 따른 탄산화 깊이를 나타낸 것으로 재령 3년차 및 재령 15년차 탄산화 실측값을 바탕으로 식 (1)을 참조하여 재령에 따른 탄산화 깊이를 나타내었다. 그래프에서 3y는 재령 3년차 탄산화 실측값으로 도출한 탄산화 속도계수를 활용하여 사용연한에 따른 탄산화 깊이를 예측한 그래프이며, 15y는 재령 15년차 탄산화 실측값을 활용하여 예측한 것이다.

분석결과, 물/시멘트비에 관계없이 재령 15년차 예측 그래프가 재령 3년차 예측모델 대비 약 3배 정도 높게 도출되었다. 물/시멘트비 40 %의 3년차 예측 그래프의 경우 재령 15년차의 탄산화 값을 2.2 mm로 예측하였으나, 실제값은 6.7 mm로 측정되었다. 또한, 물/시멘트비 50 %의 경우에도 3년차 예측 그래프를 기준으로 재령 15년차 탄산화 값을 3.9 mm로 예측하였으나, 실측값은 9 mm로 측정되었으며, 물/시멘트비 60 %의 경우에도 3년차 예측 그래프 기준 재령 15년차 예측값이 8.4 mm, 실측값은 24.8 mm로 측정되어 3년차의 속도계수를 적용할 경우 탄산화 예측에 대한 신뢰도가 크게 떨어지는 것을 알 수 있었다.

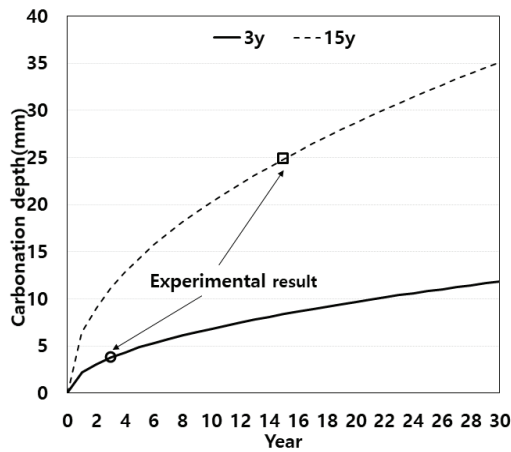
이러한 재령에 따른 탄산화 속도 계수와의 차이가 발생하는 원인으로서는 탄산화 예측 모델의 경우 탄산화 속도 계수가 시간에 따른 변수임에도 불구하고 초기 탄산화 계수를 일괄적으로 적용하기 때문에 시간에 따른 특성 등을 반영하기에는 다소 한계가 존재하였을 것으로 판단된다. 또한, 국내 환경에서 장기간 노출 시험하여 획득한 데이터의 부재 등으로 인하여 국내 환경에 최적화된



(a) w/c 40 %



(b) w/c 50 %



(c) w/c 60 %

Fig. 3. Carbonation with year

속도 계수를 도출하지 못한 것이 이러한 차이를 발생시키는데 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉, 재령 3년차의 탄산화 깊이는 전반적으로 4 mm 이하로 나타내고 있으며 비교적 짧은 노출 시험 기간으로 인해 탄산화의 진행이 많이 발생하지 않았으며 이에 따라 신뢰성 높은 탄산화 속도 계수를 도출하기 어려웠던 것으로 판단된다.

### 3.3 기존 탄산화 예측모델과 비교

본 연구에서 획득한 재령 3년차 및 재령 15년차 탄산화 값을 바탕으로 국내 환경에서 재령에 따른 탄산화 예측 모델을 도출하였으며 Table 6에 정리하였다. 이때, 탄산화 예측 모델은 식 (1)을 기본 모델로 설정하여 도출하였다.

Fig. 4는 국내 환경에서 장기간 실측한 탄산화 데이터를 바탕으로 도출한 장기 탄산화 예측 모델(이후 KICT 모델을 2.2절에서 언급한 예측 모델과 비교한 그래프이며, Table 7은 Fig. 4의 모델을 대상으로 재령 15년차의 탄산화 깊이 및 탄산화 속도 계수를 정리한 그래프이다.

Fig. 4는 15년간 장기 노출 시험한 시험체의 물/시멘트비에 따른 탄산화 예측 모델(KICT 모델을 기존 예측 모델과 비교한 그래프이다.

Table 6. KICT carbonation prediction model

Type	Equation
OPC40	$C = (0.05 \ln(t) + 1.595) \sqrt{t}$
OPC50	$C = (0.05 \ln(t) + 2.19) \sqrt{t}$
OPC60	$C = (0.05 \ln(t) + 6.274) \sqrt{t}$

C: Carbonation depth(mm), t: year

Table 7. Prediction carbonation depth and coefficient at 15<sup>th</sup> year

Type	OPC40		OPC50		OPC60	
	D <sup>1)</sup>	A <sup>2)</sup>	D	A	D	A
KICT	6.7	1.730	9.0	2.324	24.8	6.409
Kwon	5.2	1.353	16.5	4.263	23.5	6.058
Kishitani	1.2	0.298	7.8	2.012	14.4	3.727
Hamada	6.8	1.784	10.9	2.804	14.4	3.720
JSCE	0.1	0.030	3.6	0.930	7.1	1.830
KDS	0.2	0.041	5.0	1.283	9.8	2.525

1) Carbonation depth of 15 year(mm)

2) Carbonation velocity coefficient(mm /  $\sqrt{\text{year}}$ )

Fig. 4(a)는 물/시멘트비 40 %에 대한 탄산화 예측 모델을 비교한 그래프로, KICT 모델과 비교한 결과 기존 예측 모델 중 Hamada가 제안한 모델이 본 연구에서 도출한 KICT 모델과 가장 유사한 값을 나타내었다. 또한, Kwon 모델은 KICT 모델보다 약 22 % 정도 낮은 값을 나타내었다. 한편 KCI 및 JSCE의 경우 재령 15년차 탄산화 값이 장기 탄산화 예측 모델 기준 약 98 % 정도 낮은 값을 나타내었으며, Kishitani 식의 경우 KICT 모델 대비 약 85 % 정도 낮은 값을 나타내었다.

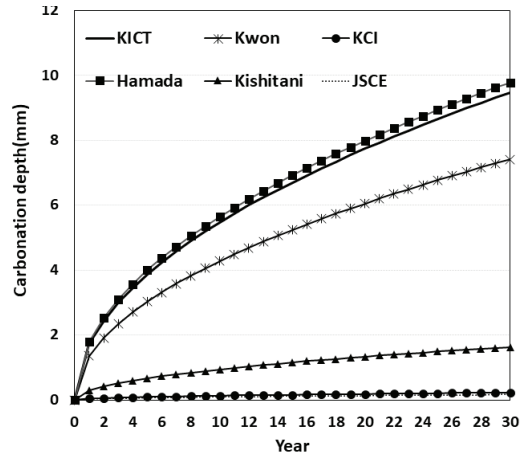
Fig. 4(b)는 물/시멘트비 50 %에 대한 KICT 모델과 기존 모델식과 비교한 그래프로, 기존 예측 모델 중 Kishitani 식과 Hamada 식이 KICT 모델과 약 15 %의 차이를 보이며 가장 유사한 값을 나타내었다. KCI 및 JSCE의 경우 KICT 모델 대비 45 % 및 60 % 정도 낮은 값을 나타내었다. Kwon 식의 경우에는 다른 예측 모델과 달리 KICT 모델보다 다소 높은 탄산화 값을 나타내었다.

Fig. 4(c)는 물/시멘트비 60 %에 대한 KICT 모델과 기존 예측 모델을 나타낸 것으로 Kwon 모델을 제외하고 다른 예측은 KICT 모델보다 낮은 탄산화 값을 나타내었다. Kishitani 및 Hamada의 경우 KICT 모델 대비 약 59 % 정도 낮은 값을 나타내었으며, KCI 및 JSCE의 경우에도 KICT 모델 대비 각각 약 41 % 및 31 % 정도 낮은 값을 나타내었다.

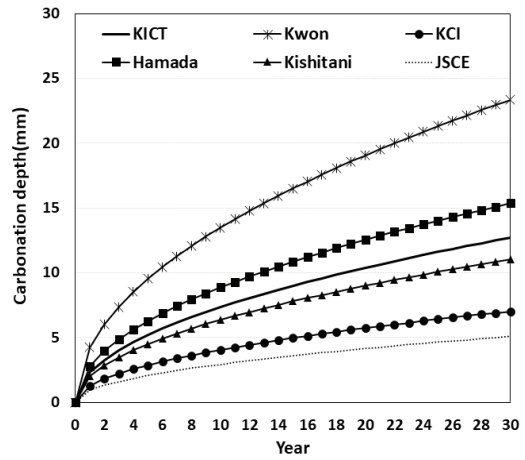
이상에 서술한 내용을 종합적으로 볼 때 KICT 모델의 경우 물/시멘트비에 관계없이 국내에서 많이 사용되는 예측식 중 하나인 Kishitani 모델보다는 Hamada가 제안한 모델과 유사한 값을 나타내었으며, 국내 구조물의 실측 데이터를 활용한 Kwon 모델과도 유사한 값을 보였다. 반면, 국내외 콘크리트 기준보다 KICT 모델이 제시한 탄산화 값이 최소 1.8배 이상의 높은 값을 나타내었다.

KICT 모델과 기존 예측 모델(Hamada, Kishitani, JSCE)과의 차이가 발생하는 원인은 기존 예측 모델의 경우 해당 지역에서 장기 노출 실험 결과를 토대로 탄산화 예측 모델을 도출한 것으로 KICT 모델과 지리·지형적 및 환경적인 특성 등으로 인한 차이가 발생된 것으로 판단된다. 또한, 국내에서 사용되는 시멘트, 골재 등의 재료적 특징 및 성능 등의 인자 역시 이러한 차이에 영향을 미친 것으로 판단된다.

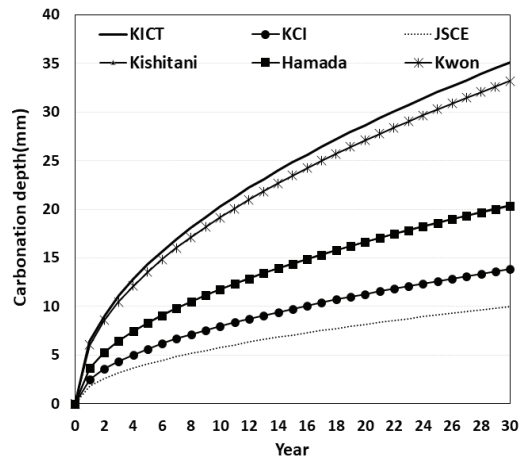
Kwon 모델의 경우 KICT 모델과 마찬가지로 국내 환경에 노출된 구조물에서 실측한 값을 바탕으로 탄산화 예측식을 제안한 것으로 KICT 모델과 물/시멘트비 50 %를 제외하고는 거의 유사한 탄산화 깊이를 나타내었다. 이러한 결과를 통해 향후 실 구조물의 탄산화를 예측할 때 KICT 모델을 활용하여 탄산화 깊이를 예측할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었으며 지속적으로 데이터를 업데이트 및 검증을 통해 신뢰도를 높여갈 예정이다.



(a) w/c 40 %



(b) w/c 50 %



(c) w/c 60 %

Fig. 4. Prediction model of carbonation

한편, 국내 기준에서 제시한 탄산화 예측 모델의 경우 실측값을 기반으로 만들어진 KICT 모델 및 Kwon 모델과 큰 차이가 발생하였으며, 이는 국내 환경에서 장기간 노출 시험한 데이터의 부재로 인하여 국내의 환경적인 요소(내륙 및 해안환경, 도심지, 해역, 해안으로부터 거리 등의 특수 환경 등의 노출 환경) 및 재료적인 품질(국내에서 생산되는 시멘트 및 골재 등의 품질) 등을 제대로 반영할 수 없었기 때문에 이러한 차이가 발생한 것으로 판단되며 향후 국내 기준을 활용하여 탄산화 예측할 경우 실측값보다 낮을 수 있기 때문에 신중을 기할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 3.4 내구성 설계기준과의 비교 검토

본 연구에서 도출된 탄산화 값을 바탕으로 국내 콘크리트 구조 내구성 설계기준인 KDS 14 20 40에서 규정하고 있는 항목을 다음과 같이 비교 검토하였다.

본 연구의 장기 시험체는 내구성 설계기준의 콘크리트 부재의 노출 EC(탄산화) 범주의 4개 등급 중 EC4로서 ‘건습이 반복되는 콘크리트로 매우 높은 탄산화 위험에 노출되는 경우’에 해당된다. 이러한 노출범주에서 최소 설계기준 압축강도는 30 MPa 이상으로 규정되어 있으며, 콘크리트 표준시방서인 KCS 14 20 10 일반콘크리트 편 EC4 노출범주에는 최대 물/결합재비를 0.45 이하로 규정하고 있다. 또한, 콘크리트 구조 철근 상세 설계기준인 KDS 14 20 50에 따르면 프리스트레스하지 않는 부재의 현상치기 콘크리트에서 옥외의 공기에 직접 노출되는 콘크리트는 철근 두께에 따라 최소 피복두께가 40 혹은 50 mm이며 본 연구에서는 피복두께를 40 mm로 가정하여 Table 6의 KICT 모델을 사용하여 탄산화

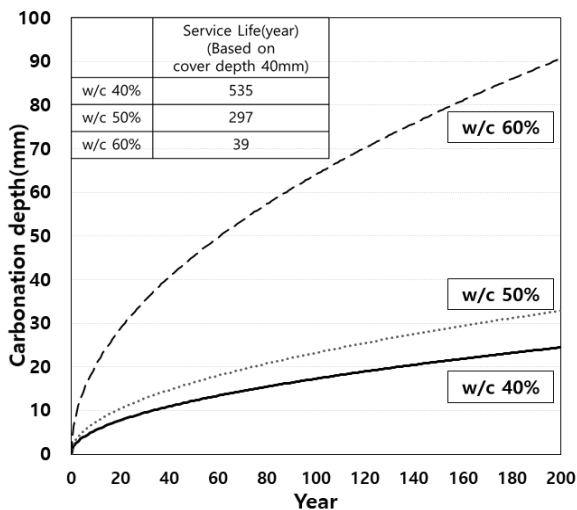


Fig. 5. Carbonation depth of w/c 40 % and w/c 50 %

의 진행속도를 예측하였다.

예측결과, 탄산화 깊이가 콘크리트 내부의 최외측 철근깊이에 도달하는 시점(내구수명)을 Fig. 5에 나타내었다. 분석결과, 피복 두께 40 mm 기준으로 내구수명이 물/시멘트비 40 % 및 50 %의 경우 200년 이상, 물/시멘트비 60 %의 경우 39년이 소요될 것으로 계산되었으며, 물/시멘트비 50 % 이하에서 충분한 내구수명이 확보될 것으로 예상되었다.

또한, EC4 노출범주에서는 표준시방서 기준 압축강도 30 MPa 이상으로 규정하고 있으며 본 연구의 압축강도 데이터 기준으로 w/c 50 %가 이에 부합될 것으로 판단되며 결과적으로 압축강도의 측면에서도 30 MPa 이상을 확보하는 경우도 목표 내구수명을 확보하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 국내 환경에서 장기간 노출된 시험체를 대상으로 탄산화 특성을 검토하여 재령에 따른 탄산화 예측 모델을 도출하였으며 기존 예측 모델과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 국내 환경에서 장기간 노출 시험한 시험체를 대상으로 물/시멘트비에 따른 탄산화를 측정된 결과 물/시멘트비 40 %의 경우 약 6.7 mm, 물/시멘트비 50 %의 경우 9.2 mm, 물/시멘트비 60 %의 경우 24.8 mm를 나타내었다.
2. 재령 3년차 및 재령 15년차의 탄산화를 측정된 결과 물/시멘트비에 관계없이 재령 15년차 탄산화 값이 재령 3년차 탄산화 값보다 약 3배 정도 증가하는 것으로 나타났다.
3. 장기간 국내 환경에서 획득한 탄산화 결과를 바탕으로 사용연한에 따른 탄산화 예측 모델(KICT 모델)을 도출하였으며 이를 기존 예측 모델과 비교한 결과 많은 차이를 보이고 있어 탄산화 예측에 대한 신뢰성을 향상시키는데 도움이 될 것으로 판단되며 향후 20년차의 데이터를 확보하여 개선할 예정이다.
4. 본 연구에서 도출된 모델식을 바탕으로 피복두께 40 mm의 철근콘크리트의 내구수명을 예측한 결과, EC4의 노출범주에서 최대 물/시멘트비 50 %, 최소 압축강도 30 MPa은 탄산화에 대하여 충분한 내구성을 가지고 있다고 판단된다.

### Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영 지원사업(주요사업)인 ‘국민 안전과 건전한 인프라 환경을 위한 지속가능한 인프라 구조 기술 연구(수행과제번호: 20220263-001)’과제에 의해 수행되었습니다.

## References

Architectural Institute of Japan (2004). Recommendations for durability design and construction practice of reinforced concrete, **99**, 92–108.

CEB General Task Group 20 (1989). Durable Concrete Structure—Design Code, CEB, Thomas Telford, 27–57.

Chai, W.K., Lee, M.G., Son, Y.H. (2015). Field research for the durability assessment factor for deriving the carbonation of concrete bridges in the marine environment, *International Journal of Safety*, **30(6)**, 102–109.

Japan Society of Civil Engineers (2010). Standard Specifications for Concrete Structures – 2007 Maintenance, 110–112.

KDS 14 20 40 (2022). Concrete Standard Specification Durable Side, Ministry of Construction and Transportation, 11–17 [in Korean].

KICT. (2006). Long-term Measurement of Airborne Chloride and Durability of Concrete Mixed with Sea Sand [in Korean].

Kishitani, K. (1963). Durability of Reinforced Concrete, Kibodang Press.

Korea Meteorological Administration (KMA), www.kma.go.kr

KS F 2584. (2015). Standard Test Method for Accelerated Carbonation of Concrete, Korea Industrial Standards, Korean Standards & Certification Information Center, 1–4 [in Korean].

Kim, M.H., Kwon, Y.J., Kang, S.P., Kim, G.Y. (2001). A study on the investigation of carbonation velocity and remaining life by actual condition for reinforced concrete apartments in Korea, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **17(1)**,

45–50 [in Korean].

Kwon, S.J., Park, S.S., Nam, S. (2007). A suggestion for carbonation prediction using domestic field survey data of carbonation, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **11(5)**, 81–88 [in Korean].

Kim, J.H., Oh, K.C., Park, S.B. (2008). A study on carbonation velocity for concrete structures, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **12(2)**, 163–170 [in Korean].

Martin, J. (1985). Service life predictions from accelerated aging tests using reliability theory and life testing analysis, *Problems in Service Life Prediction of Building and Construction Materials*, Master, L.W. ed., Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 191–212.

Papadakis, V.G., Constantinos G.V., Michael N.F. (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *ACI Materials Journal*, **88(4)**, 363–373.

Park, Y.G. (2002). Development of Carbonation–Prediction Equation of Concrete Under Domestic Exposure Environments, Ph.D Thesis, Yonsei University [in Korean].

Parrott, L. (1989). Water absorption in corner concrete, *Materials and Structures*, **25(149)**, 284–292.

Sarja, A., Vesikari, E. (1996). Durability Design of Concrete Structures : Report of RILEM Technical Committee 130–CSL, London : E&FN Spon, 28–52.

Seo, C.H. Lee, H.S. (2002). Mechanism and effect factors of carbonation in concrete, *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, **14(1)**, 2–12 [in Korean].

Wierig, H.J. (1984). Longtime Studies on the Carbonation of Concrete Under Normal Outdoor Exposure, *RILEM Seminar on Durability of Concrete Structures Under Normal Outdoor Exposure*, Hannover, 239–249.

Yang, J.W., Yoon, S.Y., Cho, H.K., Song, H., Lee, H.S. (2010). A study on the factors which influence on evaluating service life for carbonation of RC structures, *KIEAE Journal*, **10(3)**, 103–110 [in Korean].

### 15년간 노출 시험한 일반 콘크리트의 탄산화 특성 검토

본 연구에서는 국내 환경에서 장기간 옥외 노출 시험을 수행하였으며 이 중 콘크리트의 탄산화 특성에 대해 분석하였다. 시험체는 물/시멘트비에 따라 40 %, 50 % 및 60 %로 총 3종류를 대상으로 수행하였으며, 재령 3년차 및 재령 15년차의 탄산화 측정 및 분석하였으며 이를 대상으로 장기 탄산화 예측 모델을 도출하여 국내외 탄산화 예측 모델과 비교·분석하였다. 분석결과, 물/시멘트비에 따라 탄산화가 증가하는 경향을 보였으며 물/시멘트비 40 %를 기준으로 물/시멘트비 50 %의 경우 약 1.8배, 물/시멘트비 60 %의 경우 약 3.7배 증가하였다. 재령에 따른 탄산화를 비교한 결과 기존 문헌처럼 재령에 따라 증가하는 경향을 보였으며 본 시험체의 경우 재령 15년차 탄산화 값이 재령 3년차 기준 약 3배 정도 높게 나타났다. 본 연구에서 실측한 탄산화를 바탕으로 국내외 탄산화 예측 모델과 비교한 결과 기존 예측 모델과 많은 차이를 보이고 있으며, 추후 지속적으로 데이터를 확보하여 검증 및 개선할 예정이다.