

# 탄산화가 진행된 기존 RC구조물의 보수 공법 적용 후 탄산화 진행 예측

## Predicting Carbonation Progress of Carbonation Repaired RC Structures Repair

이 형 민<sup>1</sup>

이 한 승<sup>2\*</sup>

Lee, Hyung-Min<sup>1</sup>

Lee, Han-Seung<sup>2\*</sup>

*Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Sangnok-Gu, Ansan, 15588, Korea <sup>1</sup>*

*School of Architecture, Hanyang University, Sangnok-Gu, Ansan, 15588, Korea <sup>2</sup>*

### Abstract

Carbonation of concrete is being occurred due to interaction of atmospheric carbon dioxide with hydroxides. Reinforce concrete (RC) structure is getting collapse or accident due to corrosion of embedded steel rebar. The maintenance of reinforced concrete structure recently has the attention of researchers regarding durability of structure and its importance day by day is increasing. In order to study the carbonation progress of pre-repaired concrete, present study was carried out to measure the carbonation velocity for different repair materials up to 100% of carbonation. The obtained results have predicted the carbonation progress of repair materials in service condition. These results have been verified by FEM and FDM analysis. As a result, the carbonation depth can be predicted by using the carbonation prediction formula after the repair, and the analytical and the experimental values are almost similar when the initial Ca(OH)<sub>2</sub> concentration is assumed to be 40%.

Keywords : carbonation prediction, repair, concrete, finite elements method, finite difference method

### 1. 서 론

콘크리트의 탄산화는 철근콘크리트 구조물의 주요 열화 요인 중 하나이다[1,2,3]. 대기중의 CO<sub>2</sub>가 콘크리트 내부로 침투하여 콘크리트의 알칼리성을 저하시킨다[4,5]. 이는 철근을 감싸고 있는 부동태 피막을 파괴시켜 철근이 부식될 환경에 노출된다. 철근이 부식하게 되면 팽창하여 체적이 증가함에 따라 콘크리트에 균열이 발생한다. 이 때문에 부재의 내력이 저하되어 구조물의 내구성을 저하시킨다[6,7]. 이러한 문제점으로 인하여 최근 기존 RC구조물을 대상으로 보수가 많이 이루어지고 있다. 다수의 연구자들은 보수를

실시하지 않은 경우에 실내 촉진 실험 및 폭로실험을 통하여 탄산화 깊이를 예측하는 탄산화 예측식을 제안하였다. 국외의 경우 Hamada et al.[8]은 자연폭로 20년의 실험결과에 이론적 고찰을 이용해 탄산화 예측을 했으며, Kisitani et al.[9]는 촉진 및 자연폭로 시험에 Hamada의 식을 수정하여 일반적으로 많이 사용되고 있다. Masuda and Tanano[10]과 Fukushima[11]는 CO<sub>2</sub>의 확산을 고려한 연구를 하였으며, Yoda and Yokomuro[12]는 40년간 자연폭로 시험결과를 기초로 시멘트 종류에 따른 탄산화 예측을 하였다. 국내의 경우 Koh et al.[4]은 탄산화 속도에 미치는 CO<sub>2</sub>농도에 대해 연구하였으며, 한국콘크리트학회에서는 W/B등을 이용하여 탄산화를 예측하였다.

한편 보수를 고려한 콘크리트의 탄산화 예측 연구도 다수 진행되었다. Baba and Senbu[13]는 콘크리트의 표면층의 종류에 따라 보수가 없을 경우, 시멘트계, 비시멘트계 재료로 나누어 연구를 실시하였다. Shirayama[14]와 Izumi and Oshida[15], AIJ(Architectural Institute of Japan)[16]

Received : January 24, 2017

Revision received : March 15, 2017

Accepted : May 19, 2017

\* Corresponding author : Lee, Han-Seung

[Tel: 82-31-400-5181, E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

에서는 보수재 종류에 따라 계수를 정하여 탄산화 예측을 하였다. 그러나 이러한 탄산화 예측식은 신축시의 탄산화 예측 이거나 이미 보수재가 시공된 탄산화 진행 예측 연구이다. 탄산화된 콘크리트의 보수후 탄산화 진행에 관련된 연구는 거의 없으며, 실험적, 해석적 연구가 없으므로 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 탄산화가 이미 진행된 콘크리트 구조물을 대상으로 예비 촉진 탄산화를 통해 탄산화가 진행된 건축물을 가정한 후 표면 보수공법을 적용하여 보수시 각 보수재에 따른 탄산화 속도 비교를 위해 100% CO<sub>2</sub> 농도로 촉진 탄산화 실험을 실시하였다. 각 보수재별 탄산화 속도계수를 도출 후 보수후의 탄산화 진행 예측식을 이용하여 탄산화 진행 예측한다. 또한 신뢰성 확보를 위하여 FDM과 FEM 해석을 통한 탄산화 깊이 예측을 비교했다. 이를 통하여 탄산화가 진행된 기존 RC구조물의 보수공법 적용 후 탄산화 진행예측을 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 계획

Table 1은 실험 인자이다. 보수재 유/무로 나누어 표면보수후의 콘크리트를 가정했다. 보수재 종류로 유기계 알칼리 방청제(OAI), 방청표면 피복재(ISC), 방청모르타르(IM), 수성페인트(WP)를 시공했다. Table 2는 콘크리트 배합표이다. 100×100×400mm 콘크리트용 몰드를 이용해 물시멘트비 55%인 콘크리트 실험체를 제작하였다.

Table 1. Experimental conditions

	Type
Repair materials	Water Paint (WP) Organic Alkali Inhibitor (OAI) Inhibitor Surface Covering (ISC) Corrosion-Inhibitor Mortar (IM)

Table 2. Concrete mix proportions

W/C(%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )				AE Plasticizer (C×%)
	Water	Cement	Sand	Coarse aggregates	
55	173	315	891	923	0.2

Figure 1과 같이 콘크리트 시험체 제작후 4주간 수중양생, 4주간 기건 양생을 실시했다. 그 후 비시험면에 에폭시를 도포했다. 7일간 에폭시를 건조한 후 예비탄산화로 5일간 온도 20℃, 60% 상대습도, 100% CO<sub>2</sub> 촉진탄산화 챔버 넣

은후 콘크리트 탄산화 깊이 측정방법에 준하여 탄산화 깊이를 측정한다. 그 후 시험체의 침투면에 각 보수재를 시공후 다시 100% 촉진탄산화 챔버 정치후 탄산화 깊이 측정을 실시하였다.

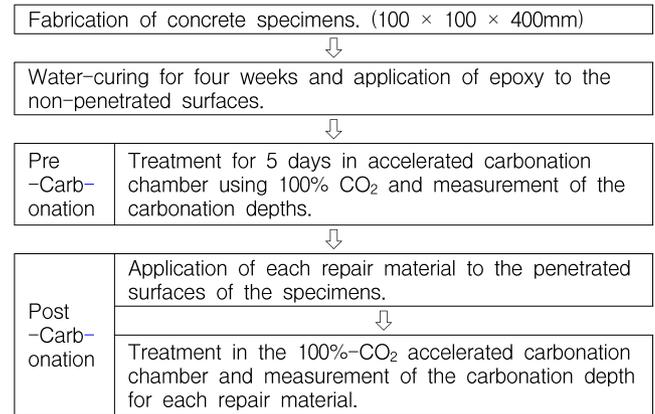


Figure 1. Experimental flow chart

### 2.2 사용재료

사용재료로는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 유기계 알칼리 방청제는 Table 3과 같은 재료를 사용하였다. 주요 성분은 (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH로 pH 11.9이며 밀도는 1.07인 것을 사용하였다. 방청표면 피복재는 SBR계 라텍스가 혼입된 점도 20 CPS 이하를 사용하였다. 방청모르타르는 아크릴계 폴리머로 98% 이상의 고형분으로 pH 6.5~8.5이다. 수성페인트는 국내 S사에서 만든 것을 사용하였으며, 아크릴 에멀전 수지를 주성분으로, 밀도는 1.63g/cm<sup>3</sup>이다.

Table 3. Physical properties of the OAI

Type	Specific gravity	pH	Viscosity (CPS)	Main component
Organic inhibitor	1.07	11.9	11	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH

### 2.3 실험체 제작 및 실험방법

Figure 2는 콘크리트 시험체 보수재 시공 모식도이다. 콘크리트의 표면 보수후 탄산화 진행 예측 실험을 위하여 콘크리트 실험체의 양생이 완료된 뒤 시험체의 CO<sub>2</sub> 침투면을 제외한 나머지 면에 에폭시를 도포하고 CO<sub>2</sub>농도 100%로 촉진탄산화 챔버에서 5일간 예비탄산화를 실시 한 후, 할렬하여 탄산화 깊이를 측정하였다. 예비탄산화 후 콘크리트 표면에 각각의 보수재를 시공하였다.

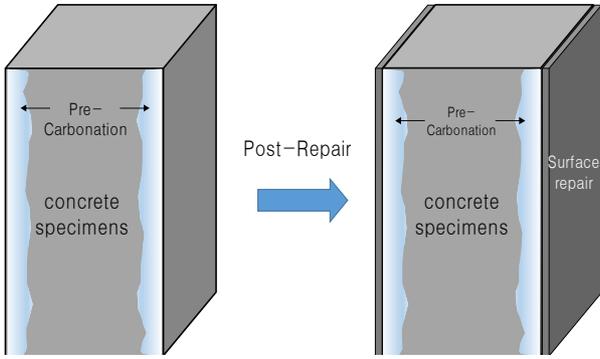


Figure 2. Description of the application of repair materials to the concrete specimens

Table 4는 보수재의 종류와 두께이다. WP는 0.1mm, OAI는 spread, ISC는 두께 2mm, IM 두께 6mm로 4가지 방법으로 보수재를 시공하였다. Figure 3은 시험체의 탄산화 깊이 측정사진이다. KS F 2596[17]에 따라 탄산화 깊이를 측정하고 보수재 시공후 7일간 건조시킨 뒤 예비탄산화 실험과 동일한 조건으로 CO<sub>2</sub> 농도 100% 탄산화 챔버에서 탄산화를 실시한 후 7, 14일 재령에서 탄산화 깊이를 측정하였다.

Table 4. Thickness of each repair material

No.	Type	Thickness (mm)
1	WP	0.1
2	OAI	spread
3	ISC	2
4	IM	6

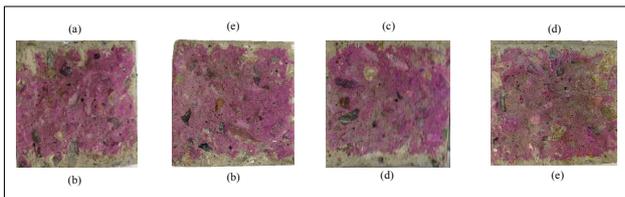


Figure 3. Measured carbonation depths of the splitting specimens. (a) unrepaired, (b) WP, (c) OAI, (d) ISC, and (e) IM

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 보수후 탄산화 깊이 및 탄산화율

##### 3.1.1 보수후 탄산화 깊이

Table 5는 보수후 탄산화 깊이 결과를 나타낸 표이다.

예비탄산화 기간의 탄산화 깊이를 측정한 결과 약 5.11mm 침투한 것을 알 수가 있었다. 보수재를 시공하고 나서 7일간 촉진탄산화를 실시한 뒤 탄산화 깊이를 측정한 결과 Plain은 약 8.82mm로 탄산화 속도계수는  $2.32mm/\sqrt{t}$ 로 산정되었으며 예비 탄산화 보다 약 3.71mm 가 침투한 것을 알 수 있었다. 14일 경과후 보수재에 따른 탄산화 침투 깊이 비교에서는 ISC의 탄산화 침투가 약 9.37mm, 탄산화 속도계수는  $0.79mm/\sqrt{t}$ 로 가장 많이 침투가 된 반면에 WP의 탄산화 깊이는 7.76mm, 탄산화 속도계수는  $0.39mm/\sqrt{t}$ 로 탄산화 침투깊이가 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Table 5. Carbonation depths after repair

Type of concrete specimens	Carbonation depth (mm)			Carbonation Coefficients ( $mm/\sqrt{year}$ )
	Pre-carbonation depth	Accelerated carbonation +7 day	Accelerated carbonation +14 day	
Plain	5.11	8.82	11.99	2.32
WP	5.11	6.24	7.76	0.39
OAI	5.11	6.60	8.69	0.60
ISC	5.11	7.13	9.37	0.79
IM	5.11	6.38	8.25	0.44

##### 3.1.2 탄산화율

각 보수재에 따른 콘크리트의 탄산화율을 비교하기 위하여 촉진 탄산화 실험시 CO<sub>2</sub> 농도가 100% 조건을 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도에 맞추어서 현재 환경으로 바꾸어 보정할 필요가 있다. 따라서 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도로 보정해주기 위해 식 (1)[16]을 이용하여 탄산화 속도계수를 CO<sub>2</sub> 농도 0.05%로 변환하여 나타내었다.

$$C = A \sqrt{CO_2/0.05} \times \sqrt{t} \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기에서,  $A=mm/\sqrt{t}$ ,  $C=mm$ ,  $t=year$

Table 6은 대기 중 농도에서의 탄산화 속도계수를 나타낸 표이다. 탄산화 속도계수는 달라졌지만 탄산화 농도 100% 일 때와 동일한 양상을 나타내었다. Plain의 경우 탄산화 속도계수는  $0.52 mm/\sqrt{t}$ 이었지만 WP를 이용하여 보수한 경우 탄산화 속도계수는  $0.09 mm/\sqrt{t}$ 으로 낮아지는 것을 알 수 있었다.

Table 6. Carbonation coefficients of normal atmospheric conditions

No.	Type of concrete specimens	Carbonation coefficient (mm/√t)
1	A Plain	0.52
2	A' WP	0.09
3	A' OAI	0.14
4	A' ISC	0.18
5	A' IM	0.10

탄산화율은 식(2)를 이용하여 각 보수재에 따른 탄산화율을 나타낼 수 있다. 탄산화율이란 보수재가 없는 시험체의 탄산화 속도계수(A)를 100%로 가정한 후 각 보수재를 시공한 시험체의 탄산화 속도계수(A')를 나눈 것이다. 탄산화율 비교를 통하여 탄산화 억제율을 동시에 평가 할 수 있다.

$$\text{Carbonation Rate} = \frac{A'}{A} \times 100 \quad \text{----- (2)}$$

여기에서,

A: Plain 시험체의 탄산화 속도계수

A': 보수재 시공한 시험체의 탄산화 속도계수

Figure 4는 각 시험체에 따라 탄산화율을 비교한 표이다. Plain의 탄산화율을 100%로 가정했을 경우 ISC의 탄산화율이 가장 높게 나타나므로 탄산화 억제 효과가 가장 낮은 것으로 판단된 반면 WP의 탄산화율이 17.3%로 가장 낮게 나타나므로 탄산화 억제효과가 가장 좋은 것으로 판단되었다. 실험에 사용된 WP가 조합형으로 아크릴 수지를 베이스로 하며 마감두께를 0.1mm로 하여 CO<sub>2</sub>의 투기를 효과적으로 억제했기 때문이라고 판단되었다. 한편 IM의 경우 아크릴계 폴리머를 혼입한 것으로 시공두께가 비교적 큼에도 불구하고 CO<sub>2</sub> 투기가 상대적으로 크게 나타나 탄산화율이 높은 것으로 나타났다고 판단된다. OAI는 콘크리트 표면에 피막을 형성하고 콘크리트 표면공극을 충전 함으로써 탄산화율이 상대적으로 작게 나타났다고 판단된다. 다만, 무기계 계통의 표면피복재, 방청모르타르의 양생기간이 7일로 짧게 설정한 후 촉진탄산화를 실시하여 이러한 점이 마감재의 투기성에 영향을 미칠 수 있었다는 점이 본연구의 한계라고 판단되어 마감재의 충분한 양생 후 탄산화 촉진시험이 필요하다고 판단된다.

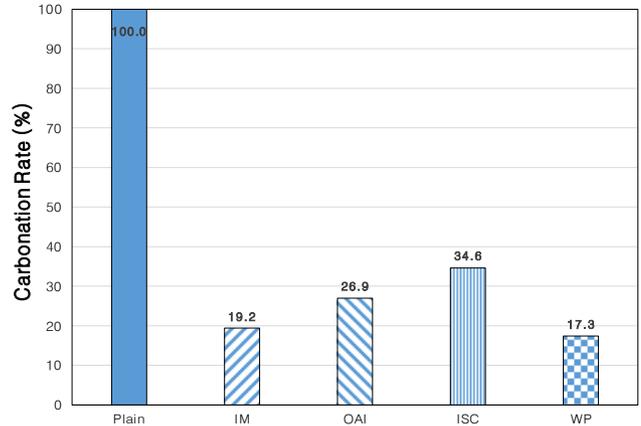


Figure 4. Comparison of the carbonation rates for the different specimens

### 3.2 촉진 탄산화 실험에 기초한 보수후 탄산화 깊이 진행 예측

Figure 5는 보수재별 탄산화 진행예측 비교이다. 35년이 경과한 경우 WP로 보수할시 5mm가 침투하는 것을 알 수 있었으며 Plain 대비 WP로 보수시 25mm 정도 탄산화 억제 효과가 있는 것으로 판단되었다. Table 7은 35년경과 시 보수재에 따른 탄산화 침투깊이 비교를 나타내었다. 탄산화 속도 계수 비교를 통하여 Plain인 경우 약 35년에서 철근 피복두께인 30mm 까지 침투하는 것을 알 수 있었다. 하지만 보수재를 시공했을 경우 약 10mm 탄산화가 진행예측을 할 수 있었다.

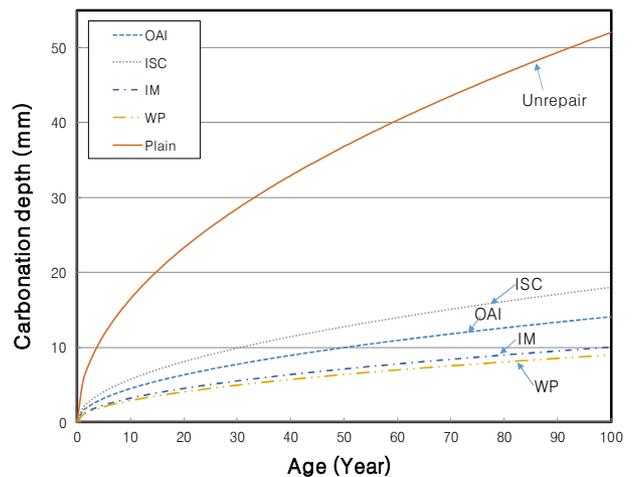


Figure 5. Predicted progresses of the carbonation depth for the different repair materials

Table 7. Comparison of the carbonation depths for the different repair materials (after 35 years)

No.	Type of concrete specimens	Carbonation depth (mm)
1	Plain	30
2	WP	5.32
3	OAI	8.28
4	ISC	10.65
5	IM	5.92

보수후의 탄산화 진행 예측은 기존 콘크리트의 탄산화의 진행은 탄산화 속도 계수로  $C = A\sqrt{t}$  와 같이 식(3)에서 구할 수 있다. 식(3)에 따라 예비 탄산화 후 콘크리트 면에 보수를 실시한다. 다시 측진 탄산화 실험을 실시 후 각 시험체마다 탄산화 깊이를 측정한다. 측정된 콘크리트의 탄산화 깊이는 식(4)로 나타낸다. 보수전과 보수후의 탄산화 속도계수를 도출한 뒤  $C' = A'(\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) + A\sqrt{t_0}$  으로 나타내었다.

$$C_0 = A\sqrt{t_0} \text{ ----- (3)}$$

여기에서,  $C_0$  : Carbonation depth (mm)

$A$  : Carbonation Coefficients of plain(mm/ $\sqrt{t}$ )

$t_0$  : time (year)

$$C' = A'(\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) + A\sqrt{t_0} \text{ ----- (4)}$$

여기에서,

$C'$  : Carbonation depth (mm)

$A'$  : carbonation coefficient of the specimen with a given repair material(mm/ $\sqrt{t}$ )

Figure 6은 탄산화로 인해 보수후의 내구수명 산정 개념을 나타낸 그림이다.  $t_0$  기간까지 예비 탄산화가 진행됨에 따라 탄산화가  $C_0$ 까지 침투한 것을 알 수 있다. 이때 콘크리트 표면에 보수를 할 경우  $t'$  까지 탄산화진행은 예비 탄산화일 때의 탄산화 속도계수로 진행하지 않고 식  $C' = A'(\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) + A\sqrt{t_0}$  에 의해 진행되는 것을 알 수 있다. 보수재를 이용하여 보수후 탄산화 진행 예측 비교를 위하여 앞서 구한 보수재 각각의 탄산화 속도계수를 이용하였다. 보수후의 탄산화 진행 예측식을 Table 8과 같이 나타냈다.

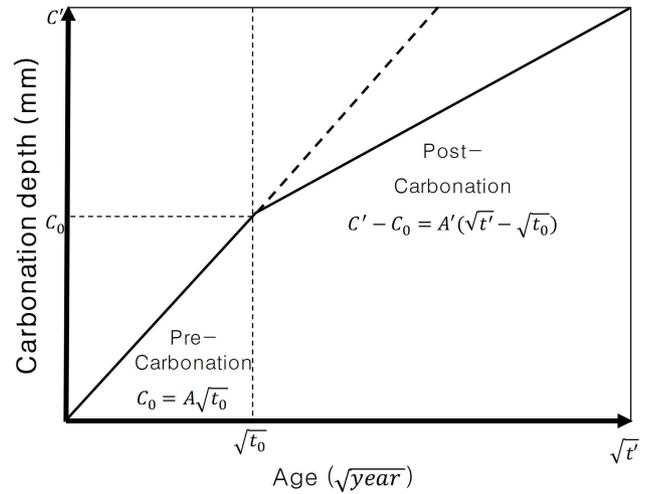


Figure 6. Illustration of the concept of the estimation of the post-repair endurance life under carbonation

Table 8. Carbonation progress prediction equations

Type of concrete specimens	Carbonation progress prediction equations
Plain	$C = 0.52\sqrt{t_0}$
WP	$C = 0.09(\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) + 0.52\sqrt{t_0}$
OAI	$C = 0.14(\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) + 0.52\sqrt{t_0}$
ISC	$C = 0.18(\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) + 0.52\sqrt{t_0}$
IM	$C = 0.10(\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) + 0.52\sqrt{t_0}$

$C$  is Carbonation depth after repair (mm),  $t_0$  is repair timing (year),  $t$  is time(year)

Figure 7은 보수후 탄산화 진행 예측이다. Table 8에서 도출된 탄산화 진행 예측식을 이용하여 나타내었다. 약 30년 경과후 보수재를 이용하여 보수했을 때 100년 경과 시 ISC를 이용할 경우 36.5mm 침투되는 반면, WP를 이용할 경우 33.9mm가 침투되는 것을 알 수 있었다.

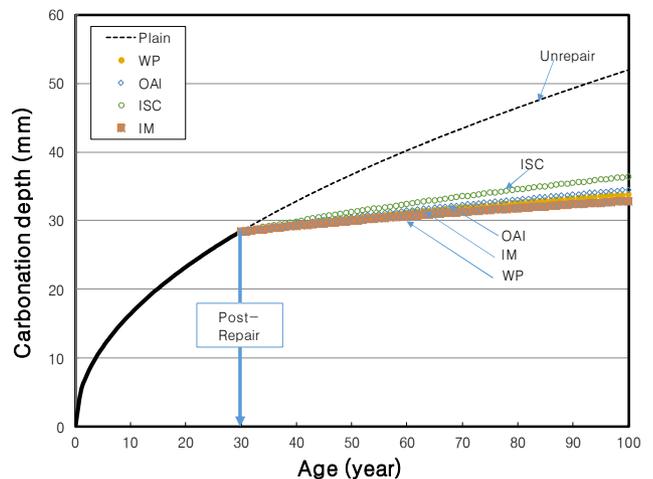


Figure 7. Predicted post-repair progresses of the carbonation

### 3.3 FEM 및 FDM에 의한 보수후 탄산화 진행 예측

#### 3.3.1 보수후 탄산화 깊이 FEM 해석

FEM 해석을 위하여 일본 콘크리트학회에서 만든 LECCA2 프로그램을 이용하여 실시하였다. 해석을 위한 조건입력은 Table 9와 같이 가정하였다. 철근 피복두께는 30mm, 콘크리트의 기본 물성 값은 시험체 제작과 동일한 조건을 입력하고 일본건축학회 탄산화 예측식인 식(5)와 식(6)[16]을 이용하여 FEM 분석을 실시하였다.

$$C = A(\sqrt{(t + R_1)} - R_2) \quad \text{----- (5)}$$

$$A = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad \text{----- (6)}$$

여기에서,

- $\alpha_1$  : Coefficient of concrete type
- $\alpha_2$  : Coefficient of cement type
- $\alpha_3$  : W/C coefficient
- $\beta_1$  : Temperature
- $\beta_2$  : Humidity
- $\beta_3$  : CO<sub>2</sub> Concentration
- k : coefficient of Kisitani Equation)
- R<sub>1</sub> : Repair coefficient 1
- R<sub>2</sub> : Repair coefficient 2

Table 9. Input data for FEM analysis

	Input parameter	unit
Cover thickness	30	mm
$\alpha_1$ (Coefficient of concrete type)	1	-
$\alpha_2$ (Coefficient of cement type)	1	-
$\alpha_3$ (W/C coefficient)	0.17	-
$\beta_1$ (temperature)	20	°C
$\beta_2$ (Humidity)	60	%
$\beta_3$ (CO <sub>2</sub> Concentration)	0.05	%
k (Coefficient of Kisitani Equation)	1.72	-
R <sub>1</sub> (Repair coefficient 1)	0	-
R <sub>2</sub> (Repair coefficient 2)	30	-

Figure 8은 FEM 해석을 통한 탄산화 진행 예측이다. 약 30년 경과후 보수했을 때 100년경과 시 ISC를 이용할 경우 39mm 침투되는 반면, WP를 이용할 경우 35mm 가 침투되는 것을 알 수 있었다. 또한 30년경과 시 Plain에 비해 WP를

이용할 경우 약 15mm의 탄산화 억제 효과가 있는 것으로 판단되었다.

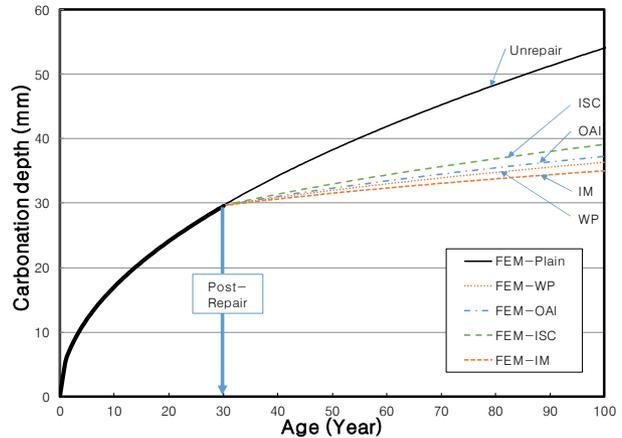


Figure 8. Carbonation progresses predicted by FEM analysis.

Figure 9는 FEM 해석과 측진 탄산화 실험값의 탄산화 깊이 예측을 비교한 그림이다. 그 결과 100년 경과후 Plain 실험값에 비해 FEM 해석이 약 2mm 더 침투 되는 것을 알 수 있었다. WP는 3mm, OAI는 3mm, ISC는 2.5mm, IM은 2mm 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

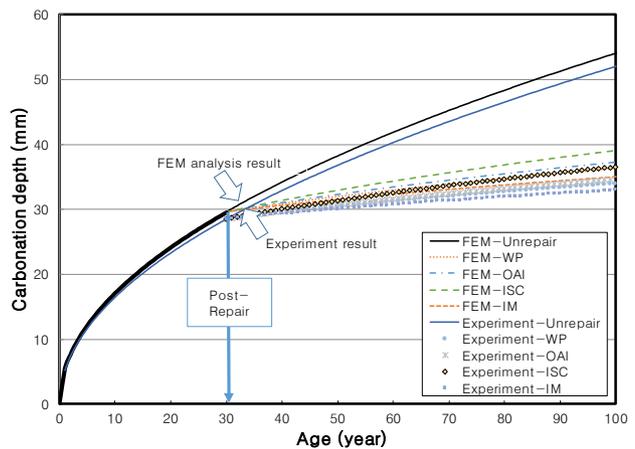


Figure 9. Prediction of carbonation depth of FEM analysis and experimental value

#### 3.3.2 보수후 탄산화 깊이 FDM 해석

Figure 10은 FDM 해석 플로우이다. FDM 분석 방법은 I) 보수재의 CO<sub>2</sub>농도 FDM 계산, II) 콘크리트의 CO 농도 FDM 계산, III) Ca(OH)<sub>2</sub> 농도 계산, IV) 탄산화 속도 계수 A, A' 도출을 하는 순서로 분석을 실시하였다.

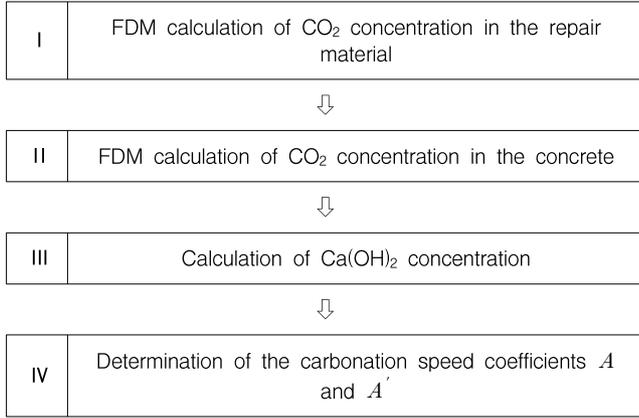


Figure 10. Flowchart of the FDM analysis.

Table 10과 Table 11은 콘크리트 정보 입력변수와 보수재 입력변수이다. 각종 입력조건을 식(7)과 식(8)[19]을 이용하여 FDM분석을 실시하였다. 탄산화에 의해 철근의 부식이 시작되어 보수가 필요하다고 판단되는 시기를 철근 매입 깊이보다 20mm 얇은 위치에서 Ca(OH)<sub>2</sub>의 농도가 초기값의 40~70%까지 감소한 때를 가정하였다[18]. Figure 11은 FDM 해석과 실험값의 탄산화 깊이 예측이다. 촉진실험결과와 비교해 Ca(OH)<sub>2</sub> 초기농도의 40%로 가정했을 때 탄산화 침투깊이가 가장 유사하게 나타났다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{CO_2} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kCCa \quad (7)$$

여기에서,

$k$  : 반응속도정수(1/day),

$D_{CO_2}$ : 보수재 CO<sub>2</sub> 확산계수 (cm<sup>2</sup>/day)

$P$ : 기체의 투과계수 (cm<sup>3</sup>·cm/(cm<sup>2</sup>·Sec· cmHg))

$S$ : 용해도 계수 (mol/m<sup>3</sup>)

$$P = D_{s_{CO_2}} \times S \quad (8)$$

여기에서,

$C$  : 이산화탄소 농도

$t$  : 시간

$x$  : 탄산화 깊이

$D_{CO_2}$  : 콘크리트 중 탄산가스 확산계수

$Ca$  : 수산화칼슘농도

Table 10. Input variables for the concrete

Parameter	Input Value	Unit
Diffusion coefficient of CO <sub>2</sub> in concrete	0.0005	cm <sup>2</sup> /day
Rate constant (k) of reaction between CO <sub>2</sub> and Ca(OH) <sub>2</sub>	500000	1/day
Thickness of concrete specimen	20	cm
Ca(OH) <sub>2</sub> concentration on specimen surface	0.000003	mol/cm <sup>3</sup>

Table 11. Input variables for the repair materials

Type	Diffusion coefficient of CO <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /s)	Air permeability (cm <sup>3</sup> (STP)·cm/(cm <sup>2</sup> ·sec·cmHg))
WP	0.000055	0.06
OAI	0.000052	1
ISC	0.000058	0.2
IM	0.000018	0.2

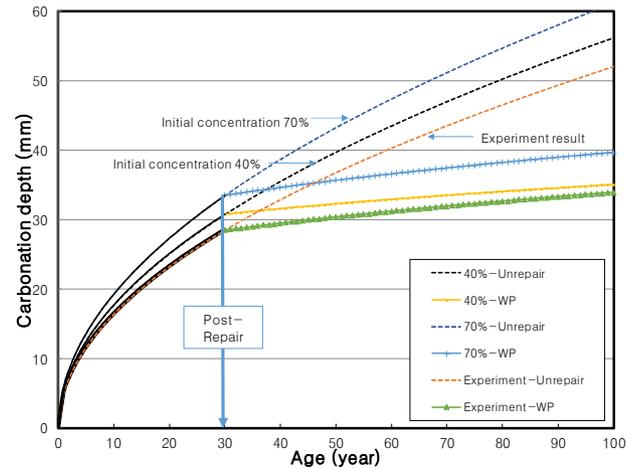


Figure 11. Carbonation depths predicted by FDM analysis and determined by experiment

### 3.4 촉진탄산화 실험과 FEM 및 FDM 보수후 탄산화 깊이 진행 예측 비교

Figure 16은 해석과 실험값의 탄산화 예측 결과이다. 100년 경과후 Plain 실험값 기준으로 FEM 해석이 실측치와 가장 유사한 것으로 판단되었다. FDM 해석이 FEM 해석보다 탄산화 침투 깊이가 2mm 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 이는 해석시 Ca(OH)<sub>2</sub>의 확산을 고려했기 때문이라고 판단된다.

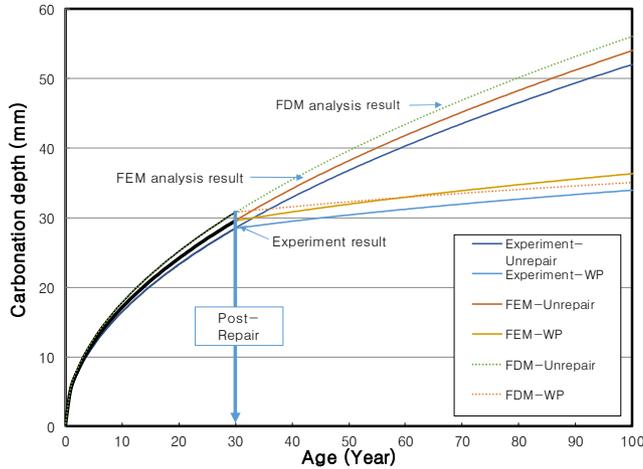


Figure 12. Carbonation depths determined by experiment and FEM and FDM analyses.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 탄산화가 진행된 기존 RC구조물의 보수 공법 적용 후 탄산화 진행 예측을 실시하였다. 축진 탄산화 실험과 FEM, FDM 해석으로 탄산화 침투 깊이를 예측한 결과는 다음과 같다.

- 1) 축진탄산화를 통해 각 시험체별 탄산화 깊이 비교를 통하여 ISC의 탄산화 침투가 약 9.37mm로 가장 많이 침투된 반면에 WP는 7.76mm로 탄산화 침투 억제에 가장 좋은 보수재인 것으로 나타났다.
- 2) FDM 해석과 축진탄산화 실험값의 탄산화 진행 예측 유사도 비교 결과 초기 Ca(OH)<sub>2</sub> 농도 40%로 가정할 때 오차율이 약 10% 이내로 FDM 해석값과 실험값이 거의 유사함을 알 수 있었다.

따라서, 탄산화가 진행된 기존 RC구조물의 보수후 탄산화 진행 예측은 축진탄산화 실험과 FEM과 FDM해석을 통하여 탄산화 깊이를 예측할 수 있었으며 내구수명 확보를 위해 탄산화 깊이를 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 요 약

본 연구에서는 탄산화가 이미 진행된 콘크리트 구조물을 대상으로 축진 탄산화 실험을 실시하였다. 각 보수재별 탄산

화 속도계수를 도출 후 보수후의 탄산화 진행 예측식을 이용하여 탄산화 진행 예측한다. 또한 신뢰성 확보를 위하여 FDM과 FEM 해석을 통한 탄산화 깊이 예측을 비교했다. 그 결과 보수후 탄산화 예측식을 이용하면 탄산화 깊이를 예측할 수 있으며, 초기 Ca(OH)<sub>2</sub> 농도 40%로 가정할 때 해석 값과 실험값이 거의 유사함을 알 수 있었다.

**키워드 :** 탄산화 예측, 보수공법, 콘크리트, FEM, FDM

#### Acknowledgement

National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(No. 2015R1A5A1037548)

#### References

1. Kim MH, Kwon YJ, Kang SP, Kim GY. A study on the investigation of carbonation velocity and remaining life by actual condition for reinforced concrete apartments in Korea. Architectural Institute of Korea. 2001 Jan;17(1):45-50.
2. Lee CS, Kim YG, Kim YH. A suggestion of carbonation-prediction equations of viaducts and structures covered creek for road vehicle in Seoul metropolitan, Korea Concrete Institute. 2007 May;19(1):649-52.
3. Kwon SJ, Song HW, Byun KJ. Durability design for cracked concrete structures exposed to carbonation using stochastic approach. Korean Society of Civil Engineers. 2005 Sep;25(5):741-50.
4. Koh KT, Kim SW, Kim DG, Song MS, Cho YC. Prediction of carbonation process in concrete. Korea Concrete Institute. 1999 Nov;11(2):767-70.
5. Park YG. Development of carbonation-prediction equation of concrete under domestic exposure environments[master's thesis]. [Seoul (Korea)]: Yonsei University; 2002. 95 p.
6. Lee JG, Park KS, Kim HJ, Lee JJ. Prediction model of remaining service life of concrete for irrigation structures by measuring carbonation. Korea Concrete Institute. 2003 Jan;15(4):529-40.
7. Aguiar JB, Júnior C. Carbonation of surface protected concrete. construction and building materials. 2013 Dec;49:478-83.
8. Hamada M, Kishitani K, Yamane S. The influence of forms on the properties concrete : on absorption and carbonation of surface of concrete. Transactions of the Architectural Institute

- 
- of Japan, 1962 Sep;(76):1–36.
9. Kishitani K, Kobayashi K, Kashino N, Uno Y. The relationship between rebar corrosion and neutralization in the concrete containing chloride. *Concrete Research and Technology*. 1991 Jan;2(1):77–84.
  10. Masuda Y, Tanano H. Mathematical model on progress of carbonation of concrete. *Concrete Research and Technology*. 1991 Jan;2(1):125–34.
  11. Fukushima T. Tendency of the concentration of atmospheric carbon dioxide and new prediction/ evaluation methods of the progress of carbonation of concrete. *Proceedings of the Symposium on Global Environment*; 2001 Jun 26; Kitakyushu, Japan, Tokyo (Japan): Japan Society of Civil Engineers; 2001. p. 151–6.
  12. Yoda A, Yokomuro T. Strength and carbonation of high early–strength cement concrete in 32–year lapse after placement. *Ashikaga Institute of Technology Research report*. 2003 Dec;37:27–30.
  13. Baba A, Senbu O. A predictive method of carbonation depth of concrete with various. *Proceedings of the Japan Concrete Institute*; 1987 Sep 9; Tokyo, Japan, Tokyo(Japan): Japan Concrete Institute; 1987. p. 333–8.
  14. K. Shirayama, Structure of durability of present and future, *Japan Concrete Institute* 1988 Sep;26(11):4–10.
  15. Izumi I, Oshida F. Studies on concrete carbonation and reinforcement corrosion in reinforced concrete building. *Journal Of Structural And Construction Engineering*. 1989 Dec;(406) :1–12.
  16. Architectural Institute of Japan, Recommendations for durability design and construction practice of reinforced concrete buildings, 2nd ed, Tokyo(Japan): Architectural Institute of Japan; 2016. 260 p.
  17. KS F 2596, Method for Measuring Carbonation Depth of Concrete, Korea Industrial Standards, Seoul(Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2004. 7 p.
  18. Lee SH, Park WJ, Lee HS, Kyung JW, Byun YM, A study of fem analysis to evaluate restrain– performance of surface– finishes for carbonation, *Architectural Institute of Korea*. 2007 Sep;23(9):151–8.
  19. Japan Concrete Institute, Life Time Evaluation Program for Concrete Structures by Computation Analysis; Version 2,0, 2nd ed, Tokyo(Japan): Japan Concrete Institute; 2010. 46 p.