



## 콘크리트의 투기계수를 이용한 CO<sub>2</sub> 확산 탄산화진행 예측모델

강석표<sup>1)</sup> · 김영선<sup>2)</sup> · 송하원<sup>3)</sup> · 김규용<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>우석대학교 건축 · 인테리어디자인학과 <sup>2)</sup>충남대학교 건축공학과 <sup>3)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부

## The Prediction Model of Carbonation Process by CO<sub>2</sub> Diffusion Using the Air Permeability Coefficient for Concrete

Suk-Pyo Kang,<sup>1)</sup> Young-Sun Kim,<sup>2)</sup> Ha-Won Song,<sup>3)</sup> and Gyu-Yong Kim<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture and Interior Design, Woosuk University, Jeonbuk 565-701 Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Taejon 305-764 Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749 Korea

**ABSTRACT** Recently, some mathematical models for the prediction on progress of carbonation of concrete were reported. These models take account for CO<sub>2</sub> diffusion and chemical reaction between Ca(OH)<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. Based on the assumption that CO<sub>2</sub> diffuses in the carbonation zone and reacts with Ca(OH)<sub>2</sub> at the outer face of carbonation zone and non-carbonation zone. In this study, a mathematical model to predict the progress of carbonation of concrete has been established based on the reducing concentration of Ca(OH)<sub>2</sub> in the carbonation progress zone, where Ca(OH)<sub>2</sub> reacts with CO<sub>2</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub> and CaCO<sub>3</sub> coexist. Also, the prediction model of carbonation progress rate of concrete using the air permeability coefficient regarding to CO<sub>2</sub> diffusion is developed. As a result of this study, an expression, the model equation is obtained for the prediction of carbonation based on the time and interaction velocity between CO<sub>2</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub> dependent air permeability coefficient. The prediction by the model satisfied the experimental data of the accelerated carbonation for painted concrete. Consequently, the model can predict the rate of carbonation and the potential service life of concrete structure exposed to atmosphere.

**Keywords** : carbonation, prediction model, CO<sub>2</sub> diffusion, air permeability coefficient, Ca(OH)<sub>2</sub>

### 1. 서 론

콘크리트의 탄산화는 철근을 부식시키는 요인으로서 철근콘크리트의 내구성에 매우 중요한 영향을 미치기 때문에 기존에 많은 실험적 · 이론적 연구가 행하여졌다. 실험적인 연구로서는 장기적인 자연폭로시험과 축진시험 등이 행하여져 있고, 탄산화기간과 탄산화깊이와의 관계로서 탄산화속도식이 浜田 · 岸谷式과 依田式 등으로 제안되어지고 있다.<sup>1)</sup> 이들 식은 콘크리트중의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 확산이 Fick의 제1법칙에 따르는 것으로 가정하고 탄산화기간 t와 탄산화깊이 x와의 사이에  $x = A\sqrt{t}$ 의 관계가 성립한다는 것을 기본으로 하고 있다. 그렇지만 그 후의 연구에서는 콘크리트중의 수화반응 진행, 건조 조건, 탄산화에 의한 세공량 감소 등을 고려한 경우 탄산화깊이는 탄산화기간의 0.4~0.5승에 비례한다는 것이 보고되어지고 있다.

이들의 실험적 연구에 대한 이론적인 연구도 수행되어졌으며 福島<sup>2)</sup>는 CO<sub>2</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 확산과 반응을 고려한 비정상 속도론적 해석을 행하였고, 前田<sup>3)</sup>은 CO<sub>2</sub>의 확산 및 CO<sub>2</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 반응을 정식화한 비선형해석을 행하였다.

또한 梶田佳寛<sup>4)</sup>와 黄光律<sup>5)</sup>은 콘크리트중의 CO<sub>2</sub>의 확산 및 탄산화진행영역에서의 CaCO<sub>3</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 공존을 고려한 CO<sub>2</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>와의 반응을 모델화 하였다. 그러나 이 논문에서는 수학적 모델에서 가장 중요한 변수 중 하나인 CO<sub>2</sub>확산계수를 변화시켜 측정치와 비교적 적합한 값을 제시하고 있어 콘크리트 사용재료의 변화라든지 마감재의 사용에 따른 변수요인을 포함시키지 못하고 있다. 이에 국내 연구<sup>6)</sup>에서는 다양한 마감재 종류에 따른 탄산화 억제성능을 FEM 해석을 통하여 실시하였으나 CO<sub>2</sub>확산계수는 기존 문헌에서 제시하고 있는 값을 고정시키고 있다.

따라서 이 논문에서는 콘크리트중의 CO<sub>2</sub> 확산 및 CO<sub>2</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>와의 반응을 고려하는<sup>4,5)</sup> 기존 모델에서 중요한 인자 중 하나인 CO<sub>2</sub>확산계수를 실험을 통한 투기계수로서 유추하여 콘크리트구조물의 다양한 변화인자에 대응할 수 있는 탄산화진행 예측모델을 제안하고자 한다.

\*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr

Received September 29, 2009, Revised December 21, 2009,

Accepted January 15, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

## 2. 탄산화진행 기초 모델화

### 2.1 콘크리트 중 CO<sub>2</sub>의 확산방정식

콘크리트내부의 미소구간  $[\chi, \chi + d\chi]$ 를 고려하여  $\Delta t$ 시간에 이 미소구간  $X = \chi$ 의 면으로부터 확산에 의해 들어오는 CO<sub>2</sub>의 양은 CO<sub>2</sub>의 농도구배에 비례하므로 CO<sub>2</sub>의 농도를  $C = C(\chi, t)$ 로 나타내고  $\Delta t$ 시간당의 CO<sub>2</sub>농도 변화를  $\Delta C$ , 콘크리트에서의 CO<sub>2</sub>의 확산계수를  $D$ 라 할 때 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

또한  $[\chi, \chi + d\chi]$ 의 면으로부터 확산해 나가는 CO<sub>2</sub>의 양은 식 (2),  $\Delta t$ 시간에 이 미소구간에서 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응해서 소비되는 CO<sub>2</sub>의 양은 Ca(OH)<sub>2</sub>의 농도를  $Ca = Ca(x, t)$ 로 하고 반응속도정수를  $k$ 라 할 때 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta C \cdot dx = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta C \cdot dx = -D \cdot \left( \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx \right) \cdot dt \quad (2)$$

$$\Delta C \cdot dx = -k \cdot C \cdot Ca \cdot dx \cdot \Delta t \quad (3)$$

따라서  $\Delta t$ 시간에 이 미소구간에 대한 CO<sub>2</sub>의 변화량은 식 (1), (2), (3)으로부터 기본확산방정식으로서 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \cdot Ca \quad (4)$$

### 2.2 화학반응을 기초로 한 탄산화 진행

식 (4)의  $Ca$ 는 Ca(OH)<sub>2</sub>의 농도를 표현하며 CO<sub>2</sub>와의 반응에 의해 감소하게 된다.  $Ca$ 값의 감소는 콘크리트 pH의 감소 및 콘크리트의 탄산화를 의미한다. 또한  $Ca$ 는 미소구간에서 소비된 CO<sub>2</sub>양에 의해 표현이 가능하며 Ca(OH)<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 화학반응을 1차 반응으로 가정하고 있기 때문에  $\Delta t$ 당의 Ca(OH)<sub>2</sub>의 농도변화  $\Delta Ca$ 는 식 (5), (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta Ca = -k \cdot C \cdot Ca \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$\frac{1}{Ca} \cdot \frac{dCa}{dt} = -k \cdot C \quad (6)$$

여기에서  $t = 0$ 일때  $Ca = Ca_{t=0}$ 이므로 식 (6)의 해로서 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$Ca = Ca_{t=0} \cdot \exp \left\{ -k \cdot \int_t^0 C(\tau) d\tau \right\} \quad (7)$$

식 (7)은 임의의 시간에  $t$ 대한 Ca(OH)<sub>2</sub>의 농도를 표현하고 있으며  $Ca$ 가 어느 수치까지 저하한 시간에 그 부분에서의 콘크리트가 탄산화되었다고 판단할 수 있다.

식 (4)에 식 (7)을 대입하면 CO<sub>2</sub>가 Fick의 제 1법칙에 따른 탄산화 진행속도의 기본방정식 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \cdot \left[ Ca_{t=0} \cdot \exp \left\{ -k \cdot \int_0^t C(\tau) d\tau \right\} \right] \quad (8)$$

여기서  $D$  : 확산계수(cm<sup>2</sup>/day)

$\Delta t$  : 시간 mesh interval(day)

$C$  : 표면의 CO<sub>2</sub>농도(mol/cm<sup>3</sup>)

$\Delta x$  : 공간 mesh interval(cm)

$k$  : CO<sub>2</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 반응속도(day<sup>-1</sup>)

$Ca_{t=0}$  :  $t = 0$ 일때의 콘크리트내의 Ca(OH)<sub>2</sub>의 초기농도(mol/cm<sup>3</sup>)

### 2.3 경계조건

물질이 콘크리트 표면으로부터 내부로 침투·확산해 가는 경우 확산방정식의 경계조건은 일반적으로 다음과 같다.

[초기조건]

$$x = 0, 0 \leq x < \infty : C(x, t_0) = 0 \quad (9)$$

[경계조건]

$$t > 0, x = 0, : C(x_0, t_j) = C_0 \quad (10)$$

여기서  $C_0$  : 콘크리트 표면부의 CO<sub>2</sub>농도(mol/cm<sup>3</sup>)

### 2.4 차분방정식에 의한 방정식의 유사해

식 (8)의 좌변 및 우변의 제1항과 제2항 지수부분은 각각의 차분방정식에 의한 유사해를 구하면 다음의 식 (11)~(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j}{\Delta x^2} \quad (12)$$

$$\exp \left\{ -k \cdot \int_t^0 C(\tau) d\tau \right\} = \exp \left\{ -k \cdot \sum_{i=0}^j C_i^j \cdot \Delta t \right\} \quad (13)$$

이러한 식들을 식 (8)에 대입하여  $C(x_i, t_{j+1})$ 을 구하기 위한 초기조건  $C(x_i, t_1) = 0$  및 경계조건  $C(x_1, t_j) = C_0$ 을 이용하여 순차적으로  $C(x_i, t_{j+1})$ 을 구하게 되면 CO<sub>2</sub>농도의 유사해가 식 (14)와 같이 얻어진다.

$$C_i^{j+1} = \left\{ 1 - 2d - \left( \Delta t \cdot k \cdot Ca_{t=0} \cdot e^{-k \cdot \sum_{i=1}^j C_i^j \cdot \Delta t} \right) \right\} C_i^j + d(C_{i+1}^j + C_{i-1}^j) \quad (14)$$

$$Ca = Ca_{t=0} \cdot e^{-k \cdot \int_0^t C(\tau) d\tau} = Ca_{t=0} \cdot e^{-k \cdot \sum_{i=1}^j C_i^j \cdot \Delta t} \quad (15)$$

Ca(OH)<sub>2</sub>의 분포는 식 (15)에 Ca<sub>t=0</sub>을 대입하여 구할 수 있고, 탄산화깊이는 Ca(OH)<sub>2</sub>의 농도가 최초의 농도에 대해서 일정량 감소하거나 일정비율 감소한 점을 구하여 산출할 수 있다.

### 2.5 콘크리트 내의 Ca(OH)<sub>2</sub> 농도

시멘트는 그 종류에 따라 화학조성이 조금은 다르지만, 일반적으로 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF로 구성되어 있다. 시멘트 수화반응에 있어서는 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S가 주가 되며, 식 (16) 및 (17)과 같이 CSH 화합물을 생성함과 동시에 Ca(OH)<sub>2</sub>가 생성된다.



보통 포틀랜드 시멘트에서는 수화율이 100%인 경우, 시멘트 질량의 약 30% Ca(OH)<sub>2</sub>가 생성된다. 따라서, 콘크리트 1 m<sup>3</sup>중의 Ca(OH)<sub>2</sub>의 몰농도는 단위시멘트량(Q)과 시멘트 수화율에 따라 식 (18)과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$Ca = 0.3Q \cdot \frac{\alpha}{74} \quad (18)$$

여기서 Ca : Ca(OH)<sub>2</sub>의 몰농도(mol/cm<sup>3</sup>)

Q : 단위시멘트량(kg/m<sup>3</sup>)

α : 시멘트의 수화율

### 2.6 콘크리트표면부의 CO<sub>2</sub>의 농도

콘크리트 표면부 공극 중 CO<sub>2</sub>의 농도는 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도와 동일하다고 가정하면 콘크리트 표면부 CO<sub>2</sub> 농도는 대기 중 단위체적당의 CO<sub>2</sub>농도에 콘크리트 공극률 체적비율을 곱한값이 된다. 이 논문에서는 콘크리트의 일반적인 공극율 체적을 20%로 가정하여 콘크리트 표면부의 CO<sub>2</sub>농도는 대기 중 CO<sub>2</sub>농도의 20%로 계산하였다.<sup>4,6)</sup>

### 2.7 콘크리트의 탄산화와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 농도

콘크리트의 탄산화는 일반적으로 페놀프탈레인 1%알코올 용액에 의해 적자색으로 변한 지점까지의 깊이로

결정되지만, 이러한 적자색의 착색경계선과 콘크리트의 Ca(OH)<sub>2</sub>농도 또는 pH값과의 관계는 조건에 따라 변동하게 되므로 항상 일정하다고 말할 수는 없다.

따라서 탄산화 영역과 미탄산화 영역의 경계를 판단하는데 있어서, 이 연구에서는 콘크리트 중 Ca(OH)<sub>2</sub>농도가 최초농도의 90%범위까지 감소한 지점을 탄산화깊이로 계산하였다.<sup>4,6)</sup>

## 3. 탄산화 촉진실험 및 투기계수 산출

### 3.1 콘크리트배합 및 사용재료

이 실험에서의 콘크리트 배합은 Table 1에 나타내었으며 사용재료의 물리적 성질은 Tables 2 및 3과 같다. 마감용 재료는 무도포와 국내 아파트의 외벽마감에 주로 사용되는 페인트 1급 및 2급으로 하였다.

### 3.2 시험체 제작

탄산화깊이 측정용 시험체는 100 × 100 × 400 mm의 각주형 시험체로 제작하였고 양생 종료 후 타설면에 직각인 한 면을 측정면으로 선정한 후 나머지면은 에폭시코팅을 실시하여 탄산가스의 침투를 억제시켰으며 탄산화 촉진 시험을 실시하기 전에 각각의 마감재를 측정면으로 선정된 면에 도포하였다.

투기량 측정용 시험체는 양생 종료 후 Ø100 × 200 mm 원주형 시험체의 중심부를 절단하여 두께 30 mm의 시편

**Table 1** Mixture proportion and fresh properties

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				SP (%)	Slump (cm)	Air (%)
		W	C	S	G			
47	46	193	411	775	914	0.3	19	2.5
55	48	193	351	832	907	0.1	19	2.6
60	49	193	322	861	901	-	17	2.4

**Table 2** Physical properties of materials

Cement	Normal Portland cement Fineness : 3,200 cm <sup>2</sup> /g, Density : 3.15 g/cm <sup>3</sup>
Fine aggregate	Natural sand Maximum size : 2.5 mm, Density : 2.54 g/cm <sup>3</sup>
Coarse aggregate	Crushed coarse aggregate Maximum size : 20 mm, Density : 2.65 g/cm <sup>3</sup>
Admixture	High range water reducer Naphthalene type, liquid phase(dark brown), Density : 1.18 g/cm <sup>3</sup> , pH 8.0

**Table 3** Physical properties of paint

	Density	Viscosity	pH	Volatile matter	Component
Paint I	1.38	88	8.8~9.5	41%	Acrylic emulsion type
Paint II	1.40	87	8.8~9.5	46%	

을 채취하였으며, 절단면의 한 면에 각각의 마감처리를 실시하였다. 한편, 투기시험시 압력공기의 유출을 방지하기 위하여 원주면은 에폭시로 코팅하였다.

### 3.3 측정항목 및 측정 방법

시험체 제작 1일 후에 탈형하여 각각의 양생조건에 따라 양생을 실시한 후, 탄산화 촉진실험전의 양생으로서 중량이 일정해질 때까지 1주간 기건양생을 실시하였다. 탄산화 촉진실험은 온도 20°C, 습도 50%, CO<sub>2</sub>농도 5%의 조건에서 실시하였다.

#### 3.3.1 탄산화깊이

탄산화깊이 측정은 압축강도 시험기를 이용하여 시험체를 약 50 mm의 두께로 할렬한 후 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 시험체의 표면으로부터 발색되지 않은 5개소의 평균깊이로 하였다. 탄산화깊이는 마감재의 두께를 제외한 콘크리트만의 탄산화깊이로 하였다. 탄산화깊이 측정 후 측정면은 탄산가스의 침투를 방지하기 위하여 에폭시코팅을 하였다.

#### 3.3.2 투기계수

탄산화촉진 시험시 투기량 측정용 시험체는 탄산가스 노출면만을 탄산화시키기 위하여 나머지면은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 탄산가스의 침투를 억제하였다. 투기량은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 직경 75 mm의 실린더에 시험체를 고정시켜 실링을 한 후 약 0.2 MPa의 압력을 가하여 투과되는 공기를 수중에서 메스실린더를 사용해 물과 치환하는 방법으로 투기량을 측정하였으며, 투기량 측정 결과로부터 식 (19)에 의하여 투기계수를 산출하였다.<sup>9,10)</sup>

$$K = \frac{2P_2 h \gamma}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (19)$$

여기서  $K$  : 투기계수(cm/sec)

$P_1$  : 재하압력(MPa)

$P_2$  : 대기압(0.1 MPa)

$h$  : 시험체의 두께(cm)

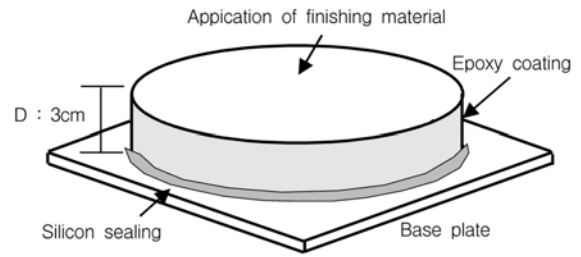


Fig. 1 Specimen of air permeability coefficient while carbonation test

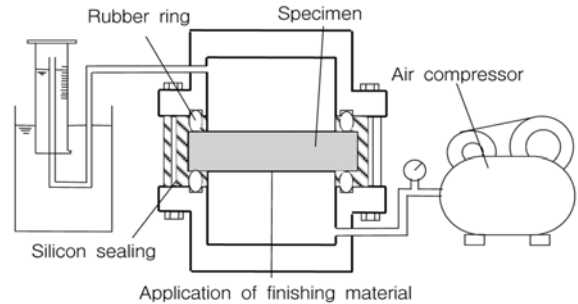


Fig. 2 Measurement machine of air permeability coefficient

$Q$  : 투기량(cm<sup>3</sup>/sec)

$A$  : 투기면적(38.465 cm<sup>2</sup>)

$\gamma$  : 기체의 단위용적중량(공기 : 1.205 × 10<sup>-6</sup> kgf/cm<sup>3</sup>)

### 3.4 측정 결과

이 연구에서 실시한 물시멘트비별 마감재 종류에 따른 촉진 탄산화 깊이 측정 결과 및 투기계수 산출 결과를 Table 4에 나타내었다.

## 4. 확산방정식의 적용 및 결과의 비교 · 검토

### 4.1 탄산화 진행 예측모델

#### 4.1.1 입력조건

탄산화 촉진실험의 CO<sub>2</sub>농도는 5%이며, 콘크리트 표면 CO<sub>2</sub>농도는 CO<sub>2</sub>의 체적농도를 5%로 할 경우 체적농도는 1%가 되고 물농도로 환산하면 0.3 × 10<sup>-6</sup> mol/cm<sup>3</sup>가 된다.

Table 4 Carbonation depth and air permeability coefficient

W/C (%)	Finishing material	Carbonation depth (mm)								Air permeability coefficient (cm/sec)			
		1 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	5 weeks	6 weeks	7 weeks	8 weeks	Before	1 weeks	4 weeks	8 weeks
47	Without paint	6.0	8.0	8.0	9.0	9.8	10.4	9.5	10.6	5.8E-10	5.7E-10	4.8E-10	3.6E-10
	Paint I	3.6	5.1	6.2	6.9	7.8	6.1	10.5	9.6	1.9E-09	1.7E-09	1.6E-09	1.9E-09
	Paint II	5.1	7.9	8.0	8.5	8.1	9.4	9.8	10.8	4.1E-09	9.0E-10	1.6E-09	1.3E-09
55	Without paint	8.7	11.3	11.9	13.0	15.4	16.0	16.9	16.0	8.2E-07	2.4E-07	2.0E-07	1.8E-07
	Paint I	4.2	7.1	6.8	5.8	8.9	9.7	11.1	10.5	2.9E-08	1.2E-08	1.4E-08	1.6E-08
	Paint II	6.8	10.3	11.1	10.3	11.6	13.6	14.6	15.2	9.1E-08	3.8E-08	4.1E-08	4.6E-08
60	Without paint	12.0	15.5	16.2	18.9	20.4	21.8	23.9	24.7	4.5E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.3E-06
	Paint I	8.0	9.6	11.5	12.3	14.2	14.2	17.7	17.2	2.2E-06	4.0E-07	3.2E-07	3.5E-07
	Paint II	9.7	12.6	13.0	14.9	15.1	17.9	18.7	20.4	4.2E-06	1.5E-06	1.4E-06	9.0E-07

또한  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 농도는 이 연구에서 적용한 시멘트 단위용적중량을 식 (18)에 적용하면 W/C 60%의 경우  $1.0 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ , W/C 55%의 경우  $1.1 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ , W/C 47%의 경우  $1.3 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ 을 적용하였다.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와  $\text{CO}_2$ 의 반응속도 정수는 기존 연구 결과<sup>4,5,8)</sup>를 바탕으로 W/C 60%의 경우 500,000/day, W/C 55%의 경우 250,000/day, W/C 47%의 경우 100,000/day을 적용하였으며,  $\text{CO}_2$ 의 확산계수는 예측모델에 다양한 수치를 적용하여 해석치가 실험 결과와 가장 유사하게 나타나는 값을 선정하였다. 또한 탄산화 예측모델에 있어서  $\Delta x = 10 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 1 \text{ day}$ 로 설정하였다.

#### 4.1.2 적용성 검토 및 분석

이 연구에서 적용한  $\text{CO}_2$  확산계수는 기존 연구 결과를 바탕으로 탄산화 촉진실험 결과의 평균 탄산화속도정수와 유사하게 표현하고 있는  $\text{CO}_2$  확산계수를 적용하였으며 각 물시멘트비 및 마감재종류에 따른  $\text{CO}_2$  확산계수는 Table 5에 나타내었다.

탄산화 촉진실험 결과와 유사하게 나타나는 확산계수 D는 물시멘트비가 작아질수록 작아지고, 무처리와 비교하여 페인트 마감재가 작고, 특히 페인트 2급과 비교하여 페인트 1급에서 작게 나타났다. 이는 물시멘트비가 작아질수록 조직이 치밀화 됨으로서 확산계수는 작아지게 되고 반응속도정수도 작아지게 된다. 반응속도정수가 작아지는 이유로서는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와  $\text{CO}_2$ 의 반응에 의하여  $\text{H}_2\text{O}$ 가 생성되지만 물시멘트비가 작아지게 되는 경우 생성되는  $\text{H}_2\text{O}$ 의 확산속도가 작아짐으로서 반응이 억제되어지기 때문으로 사료된다.

Fig. 3은 물시멘트비 47%에서의 반응속도정수 k를 100,000/day로 하였을 경우의 마감재종류에 따른  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 농도변화를 나타낸 것으로서 탄산화촉진실험에 의한 실측치와 유사하게 표현되는  $\text{CO}_2$  확산계수 D는 무처리  $0.060 \text{ cm}^2/\text{day}$ , 페인트 1급  $0.043 \text{ cm}^2/\text{day}$ , 페인트 2급  $0.055 \text{ cm}^2/\text{day}$ 인 것으로 나타났다. Fig. 4는 물시멘트비 55%에서의 반응속도정수 k를 250,000/day로 하였을 경우의 마감재종류에 따른  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 농도변화를 나타낸 것으로서 탄산화촉진실험에 의한 실측치와 유사하게 표현되는  $\text{CO}_2$  확산계수 D는 무처리  $0.120 \text{ cm}^2/\text{day}$ , 페인트 1급  $0.050 \text{ cm}^2/\text{day}$ , 페

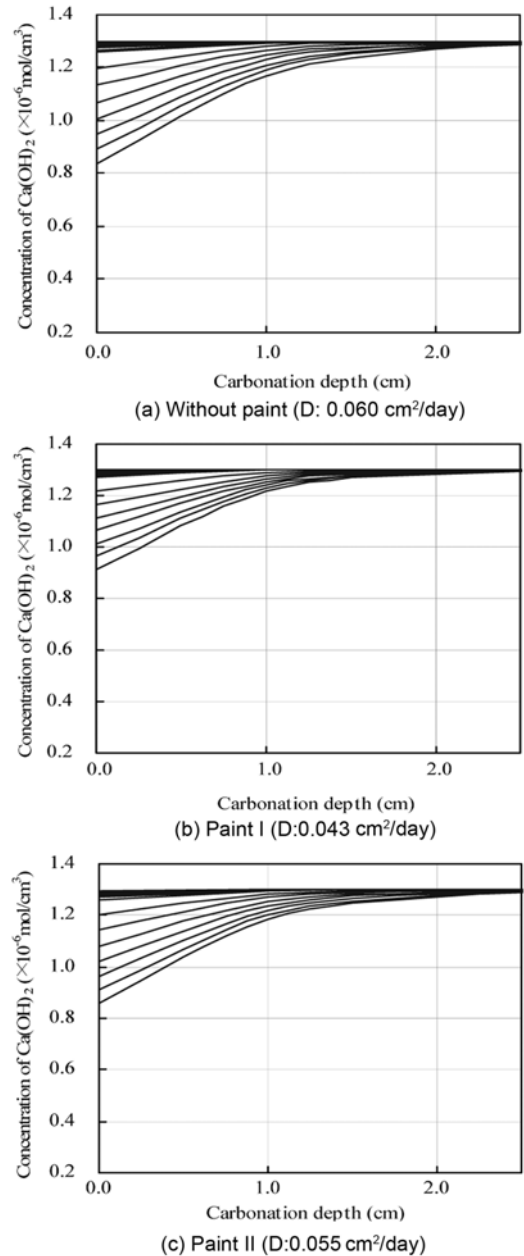


Fig. 3 Change density of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (W/C = 47%)

인트 2급  $0.100 \text{ cm}^2/\text{day}$ 인 것으로 나타났다.

Fig. 5는 물시멘트비 60%에서의 반응속도정수 k를 500,000/day로 하였을 경우의 마감재종류에 따른  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Table 5 Input condition of estimate model while carbonation

W/C (%)	Finishing material	$\text{CO}_2$ density ( $\times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ )	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ density ( $\times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ )	Reaction velocity coefficient k (/day)	$\text{CO}_2$ diffusion coefficient D ( $\text{cm}^2/\text{day}$ )
47	Without paint	0.3	1.3	100,000	0.060
	Paint I				0.043
	Paint II				0.055
55	Without paint	0.3	1.1	250,000	0.120
	Paint I				0.050
	Paint II				0.100
60	Without paint	0.3	1.0	500,000	0.210
	Paint I				0.120
	Paint II				0.158

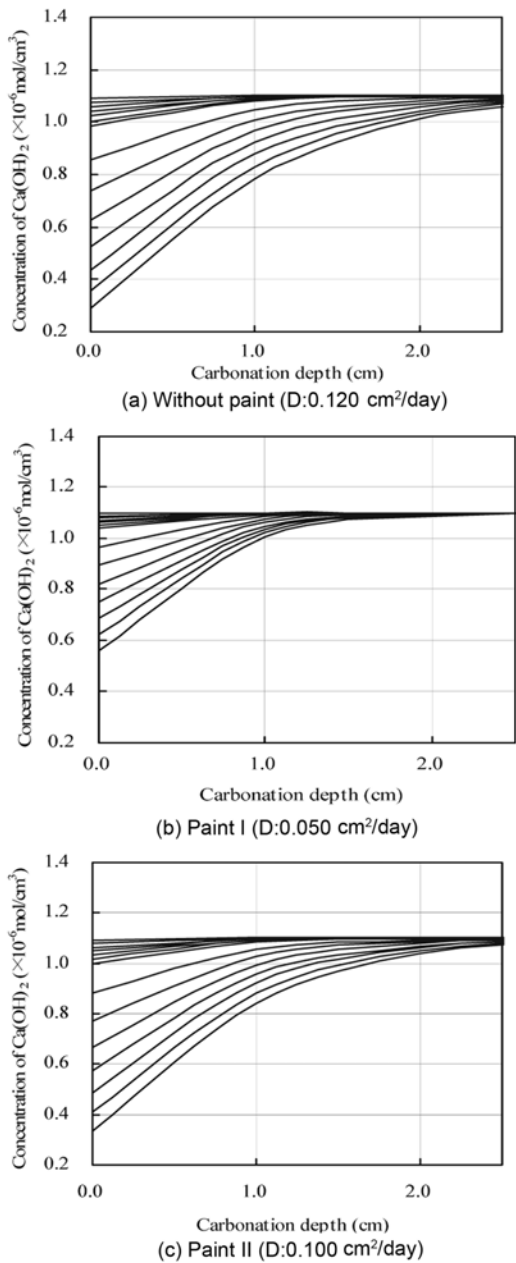


Fig. 4 Change density of  $\text{Ca(OH)}_2$  (W/C = 55%)

의 농도변화를 나타낸 것으로서 탄산화촉진실험에 의한 실측치와 유사하게 표현되는  $\text{CO}_2$  확산계수  $D$ 는 무처리  $0.210 \text{ cm}^2/\text{day}$ , 페인트 1급  $0.120 \text{ cm}^2/\text{day}$ , 페인트 2급  $0.158 \text{ cm}^2/\text{day}$ 인 것으로 나타났다.

$\text{CO}_2$  확산계수  $D$ 가 증가할수록  $\text{Ca(OH)}_2$ 의 농도구배가 완만해지고, 탄산화진행속도가 증가하게 되며 재령에 따른  $\text{Ca(OH)}_2$ 농도의 좁혀지는 간격 비율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 탄산화진행 포물선으로 나타내어보면 일반적인 탄산화 속도식인  $x=A\cdot t^n$ ( $x$ :탄산화깊이,  $A$ :탄산화계수,  $t$ :탄산화기간,  $n$ :일반적으로 0.5)에서  $\text{CO}_2$  확산계수  $D$ 가 증가할수록  $n$ 이 작아지고 있으며 탄산화속도가 가장 빠른 W/C 60%의 무도포 시험체의 경우  $n = 0.4899$ 로서 일반적인  $\sqrt{t}$ 로 나타났다.

Figs. 6-8은 물시멘트비 47, 55 및 60%에서의 각각에 대한 마감재종류에 따른 해석치와 탄산화촉진실험에 의

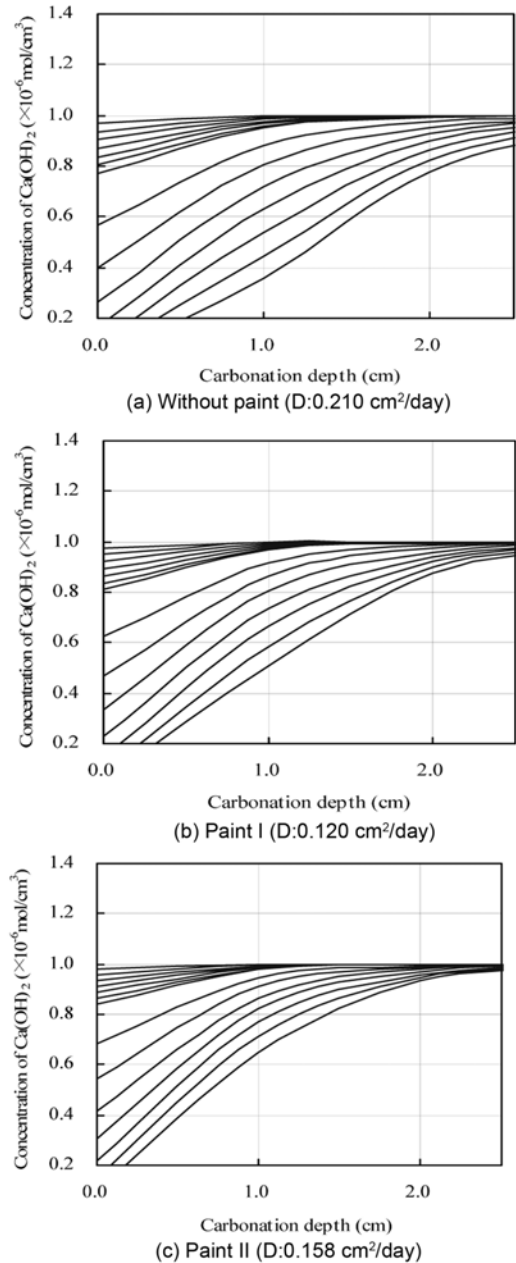
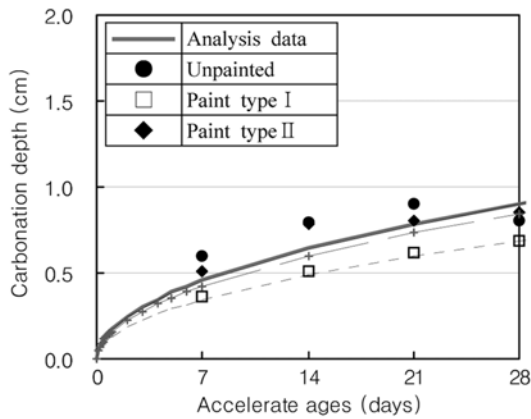


Fig. 5 Change density of  $\text{Ca(OH)}_2$  (W/C = 60%)

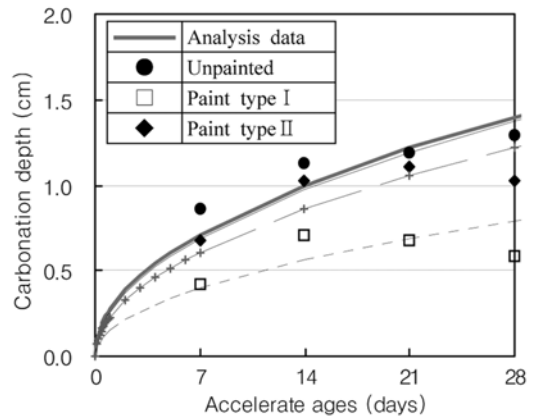
\*The concentration of  $\text{Ca(OH)}_2$  at the surface of concrete specimens is gradually increases from day 1 to 8th week. And It presented in 15 different levels

한 실측치와의 관계를 나타낸 것으로 탄산화촉진실험에 의한 측정치와 탄산화진행예측모델에 의한 해석치가 유사하게 나타나고 있다.

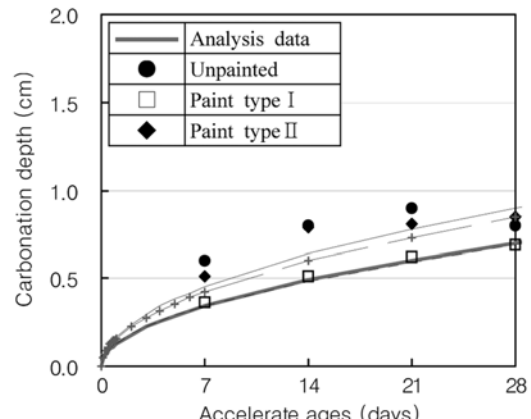
그러나 물시멘트비 및 마감재종류에 관계없이 촉진재령을 7주 이상에서의 해석치가 탄산화촉진 실험에 의한 측정치와 비교하여 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 촉진재령을 사용한 경우 실측치를 바탕으로 한 탄산화속도정수와 유사하게 증가할수록 해석치와 측정치와의 차는 더욱 커질 것으로 표현할 수 있는  $\text{CO}_2$  확산계수를 적용하여보면 콘크리트 탄산화진행을 표현하는 경과시간에 관한  $\ln$ 에서의  $n$ 이 0.5보다 크게 나타나고 있어 촉진 재령이 증가할수록 해석치와 측정치와의 차가 더욱 크게 나타나고 있다.



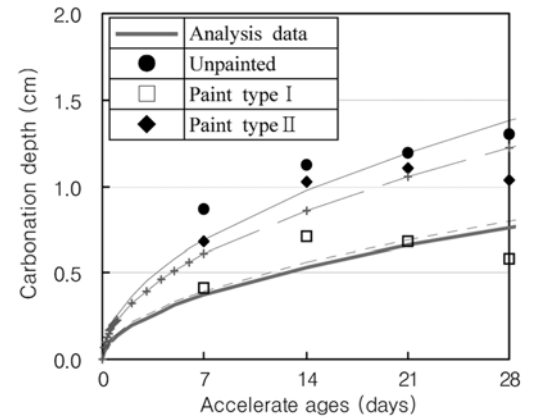
(a) Without paint (D:0.060 cm<sup>2</sup>/day)



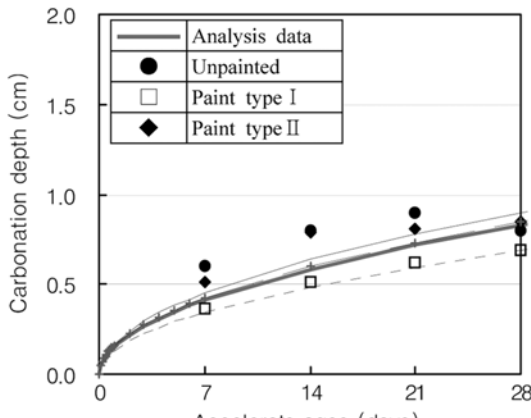
(a) Without paint (D:0.120 cm<sup>2</sup>/day)



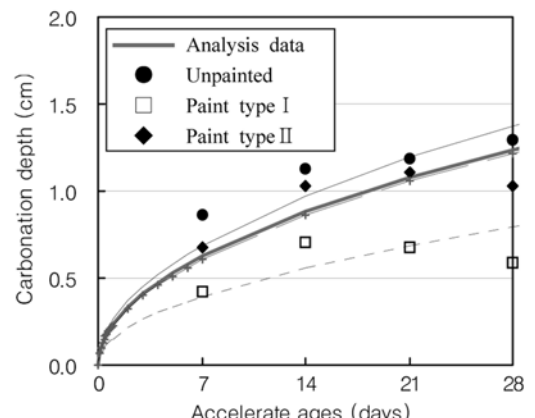
(b) Paint I (D:0.043 cm<sup>2</sup>/day)



(b) Paint I (D:0.050 cm<sup>2</sup>/day)



(c) Paint II (D:0.055 cm<sup>2</sup>/day)



(c) Paint II (D:0.100 cm<sup>2</sup>/day)

**Fig. 6** Comparison with experimental value and analysis result (W/C = 47%)

**Fig. 7** Comparison with experimental value and analysis result (W/C=55%)

#### 4.2 투기계수와 CO<sub>2</sub> 확산계수와의 관계 검토 및 분석

Fig. 9는 탄산화속진 재령에 따른 콘크리트 투기계수와 CO<sub>2</sub>확산계수와의 관계를 나타낸 것으로서 측정된 콘크리트 투기계수와 이 연구에서 적용한 CO<sub>2</sub>의 확산계수와의 유효한 상관관계를 가지고 있다.

기체의 투기계수는 일반적으로 높은 기체 압력하에서의 기체 흐름값이지만 확산계수는 기체의 국부적인 압력하에서 측정된다. 기체의 투기계수 및 확산계수는 측정기간에 건조되지 않거나 동일한 건조조건하에서 측정이 이루어진다면 동일한 공극구조에서 발생하는 흐름진행과정

이기 때문에 상호간에 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>7)</sup>

$$D = a \times K^b \quad (20)$$

여기서 D = 기체의 확산계수,

K = 기체의 투기계수, a, b = 실험정수

이 연구의 탄산화진행예측 모델에서 탄산화속진실험에 의한 탄산화진행과 유사하게 표현할 수 있는 CO<sub>2</sub>확산계수와 탄산화속진 재령에 따른 투기계수와의 관계는 실험정수 a의 경우 1.0522 ≤ a ≤ 1.8356, 실험정수 b의 경우 0.1514 ≤ b ≤ 0.1757 수준인 것으로 나타났으며 이들의 결정계수 R<sup>2</sup>은 0.8이상의 유효한 상관계수를 보이고 있다.

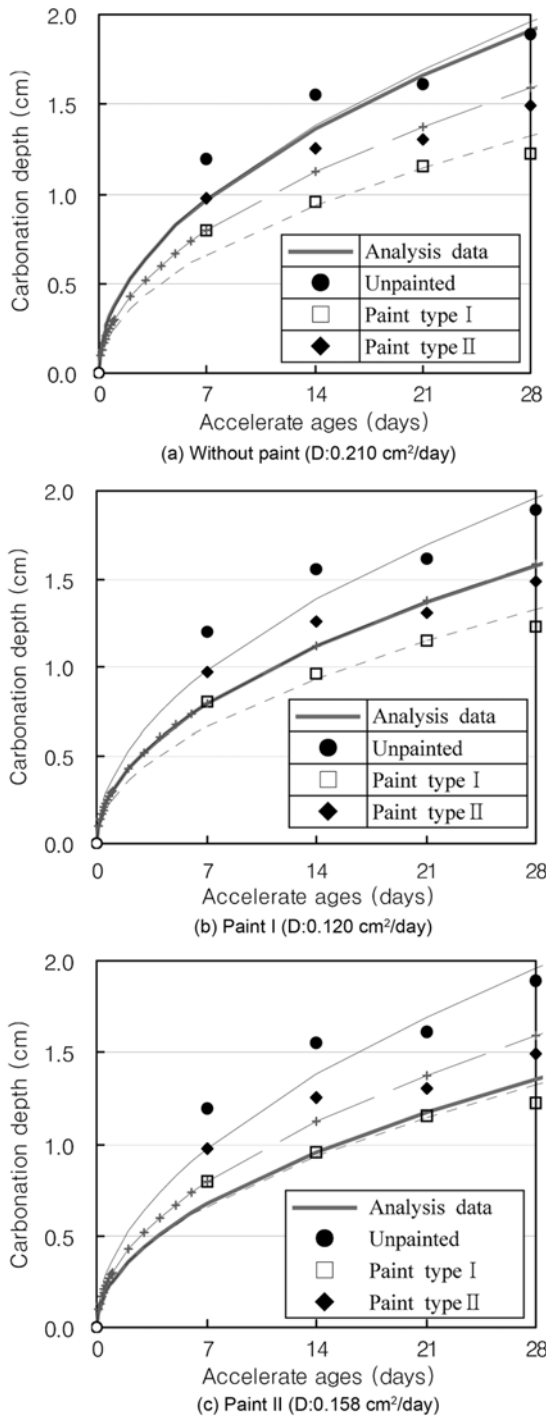
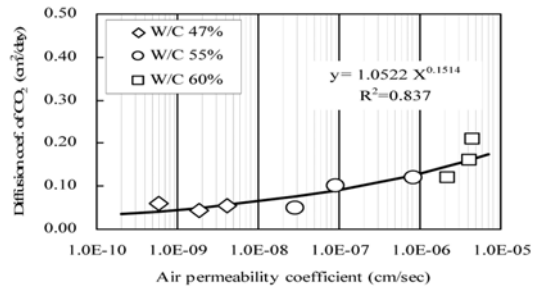


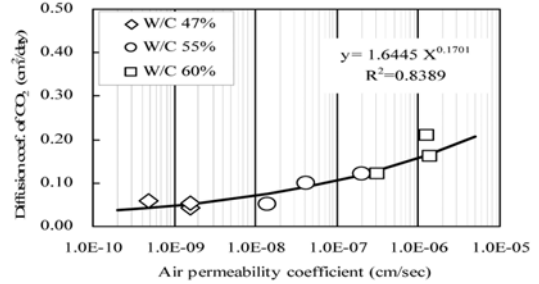
Fig. 8 Comparison with experimental value and analysis result (W/C = 60%)

탄산화촉진 재령에 따른 투기계수와 CO<sub>2</sub>확산계수와의 관계는 탄산화촉진 재령 8주에서 측정된 투기계수와 CO<sub>2</sub> 확산계수와의 결정계수가 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 이는 탄산화촉진 재령이 증가함에 따라서 온도 20°C, 상대습도 50%, CO<sub>2</sub>농도 5% 조건하의 챔버에서 방치되는 시험체내의 함수율이 변하게 되고, 탄산화촉진 재령이 증가할수록 콘크리트 투기계수는 일정한 값을 유지하게 되었기 때문으로 사료된다.

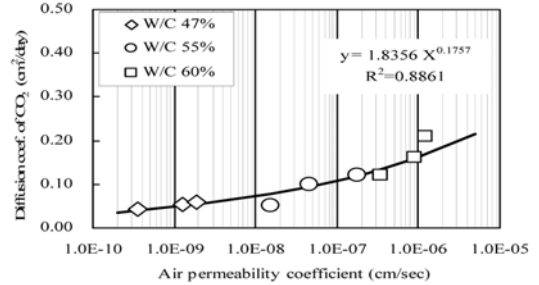
따라서 콘크리트의 투기계수로서 CO<sub>2</sub>확산계수를 유추하기 위해서는 투기계수 측정시 투기계수가 일정한 값을



(a) Permeability coeff. before accelerating carbonation test



(b) Permeability coefficient after accelerating carbonation test for 4weeks



(c) Permeability coefficient after accelerating carbonation test for 8weeks

Fig. 9 Relation of permeability coefficient and CO<sub>2</sub> diffusion coefficient

유지하게되는 재령에서의 시험체 함수상태에 유의하여야 할 것으로 사료되며 이 연구의 범위에서 콘크리트 투기계수와 CO<sub>2</sub>확산계수는 식 (21)과 같은 관계를 지니고 있는 것으로 나타났다.

$$D = 1.84 \times K^{0.18} \quad (21)$$

여기서 D=CO<sub>2</sub> 확산계수, K=투기계수

또한 촉진환경 및 일반 대기환경에서 탄산화진행은 CO<sub>2</sub>가 Fick의 제1법칙에 따라 확산하고 Ca(OH)<sub>2</sub>가 CO<sub>2</sub>와 반응하여 감소하는 것을 바탕으로 한 탄산화 진행속도 기본방정식 식 (8)에서 확산계수 D를 투기계수 K로 나타내면 다음 식 (22)와 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (1.84 \times K^{0.18}) \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \left[ Ca_{t=0} \cdot \exp \left\{ -k \int_0^t C(\tau) d\tau \right\} \right] \quad (22)$$

이와 같은 콘크리트 투기계수를 이용한 탄산화 진행속



도 기본방정식을 활용하여 축진환경 및 일반 대기환경에서 탄산화 진행예측이 가능함으로서 철근콘크리트구조물의 내구성설계를 위한 보다 정량적인 수명예측이 가능할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

CO<sub>2</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>와의 반응을 모델화하여 콘크리트 탄산화진행을 보다 정확하게 표현하고, 콘크리트투기계수로 탄산화진행모델에 적용하기 위한 CO<sub>2</sub>확산계수를 유추함으로서 철근콘크리트구조물의 내구성설계를 위한 정량적 수명예측기법의 기초자료를 확보하고자 한 이 논문의 결론은 다음과 같다.

- 1) 탄산화진행모델에 적용하기 위하여 탄산화축진 실험결과와 유사하게 나타나는 확산계수 D는 물시멘트비가 작아질수록 작아지고, 무처리와 비교하여 페인트 마감이 작아지며, 특히 페인트 2급과 비교하여 페인트 1급에서 작게 나타나고 있다.
- 2) 마감재를 사용하고 물시멘트비가 작아질수록 CO<sub>2</sub> 확산에 의한 탄산화진행 예측모델을 적용한 결과는 콘크리트 탄산화진행을 표현하는 경과시간에 관한 tn에서의 n이 0.5보다 크게 나타나고 있어 축진재량이 증가할수록 해석치와 측정치와의 차가 증가하는 경향을 보이고 있다.
- 3) 콘크리트의 투기계수로서 CO<sub>2</sub>확산계수를 유추하기 위해서는 투기계수 측정시 투기계수가 일정한 값을 유지하게 되는 재령에서의 시험체 함수상태에 유의하여야 할 것으로 사료되며, 이 연구에서 실시한 W/C 47, 55 및 60%의 범위에서 콘크리트 투기계수와 CO<sub>2</sub>확산계수의 관계는 다음과 같다.  

$$D = 1.84 \times K^{0.1757}$$
- 4) CO<sub>2</sub>가 Fick의 제1법칙에 따라 확산하고 Ca(OH)<sub>2</sub>가 CO<sub>2</sub>와 반응하여 감소하는 것을 바탕으로 한 탄산화 진행속도 기본방정식에서 확산계수 D를 투기계수 K로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (1.84 \times K^{0.18}) \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \left[ C_{a,t=0} \cdot \exp \left\{ -k \int_0^t C(\tau) d\tau \right\} \right]$$

**요 약** 최근 콘크리트의 탄산화 진행 예측을 위한 수식적 모델들이 보고되고 있으며, 이러한 모델들은 Ca(OH)<sub>2</sub>과 CO<sub>2</sub>의 화학적 반응과 CO<sub>2</sub>의 확산에 대한 관계를 연구하고 있다. 이 모델들은 콘크리트의 탄산화 영역에서 CO<sub>2</sub>가 확산하고 콘크리트 중의 탄산화 영역과 미탄산화 영역과의 경계면에서 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응한다는 가정에 기초하고 있다. 이 연구에서는 콘크리트중의 CO<sub>2</sub> 확산 및 탄산화진행영역에서의 CaCO<sub>3</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 공존을 고려한 CO<sub>2</sub>와 Ca(OH)<sub>2</sub>와의 반응을 모델화한 것이다. 콘크리트 탄산화진행을 보다 정확하게 표현하기 위해 콘크리트 투기계수로서 탄산화진행모델에 적용하여 CO<sub>2</sub>확산계수를 유추하였다. 모델에 의한 예측은 W/C에 따라 페인트처리를 실시한 콘크리트의 축진탄산화의 실험 결과와 아주 유사하게 나타나, 콘크리트 투기계수를 이용한 탄산화 진행속도 기본방정식을 활용하여 축진환경 및 일반 대기환경에서 탄산화 진행예측이 가능함으로서 철근콘크리트구조물의 내구성설계를 위한 보다 정량적인 수명예측이 가능할 것으로 사료된다.

**핵심어** : 탄산화, 예측모델, 이산화탄소 확산, 투기계수, 수산화칼슘

- 5) 콘크리트 투기계수를 이용한 탄산화 진행속도 기본방정식을 활용하여 축진환경 및 일반 대기환경에서 탄산화 진행예측이 가능함으로서 철근콘크리트구조물의 내구성설계를 위한 보다 정량적인 수명예측이 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 「건설교통R&D정책·인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화과제」와 「2010학년도 우석대학교 교내학술연구비」의 지원을 받아 수행된 연구이며, 참여한 연구자의 일부는 2단계 BK21사업의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 岸谷孝一, 西澤紀昭, “콘크리트 구조물의 내구성 시리즈 중성화,” 技報堂, 1988, pp. 34~40.
2. 福島敏夫, “콘크리트의 중성화 진행에 관한 기초적考察,” 日本建築學會學術講演梗概集, 1983, pp. 199~200.
3. 前田孝一, “콘크리트의 중성화의 수치解析에 관한研究,” 日本建築學會構造系論文報告集, 1989, pp. 11~20.
4. 樹田佳寛, 棚野博之, “콘크리트의 중성화 진행 예측 모델,” 콘크리트 공학 논문집, 1991, pp. 125~134.
5. 黃光律, 野口貴文, 友澤史紀, “フライアッシュ을 혼입한 콘크리트의 중성화 진행의 예측,” 日本建築學會構造系論文報告集, 541号, 2001, pp. 9~15.
6. 이상현, 박원준, 이한승, 경제운, 변영모, “콘크리트 표면 마감재의 탄산화 억제 성능 평가를 위한 FEM 해석연구,” 대한건축학회논문집(구조계), 23권, 9호, 2007, pp. 151~158.
7. 유재강, 최성우, 김용로, 강석표, 권영진, 김무한, “중성화에 영향을 미치는 물시멘트비와 마감재 종류에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 가을학술대회 논문집, Vol. 11, No. 2, 1999, pp. 667~670.
8. 深谷泰文, 露木尙光, セメント・コンクリト材料科学, 技術書院, 2006, pp. 151~154.
9. Kropp, J., *Performance Criteria for Concrete Durability*, E&FN Spon, London, 1995, pp. 103~111.
10. Castellote, M. and Andrade, C., “Modelling the Carbonation of Cementitious Matrixes by Means of the Unreacted-core Model, UR-CORE,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 12, 2008, pp. 1374~1384.