

대기환경변화를 고려한 콘크리트 구조물의 중성화 예측

이창수^{1)*} · 윤인석¹⁾

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과

(2003년 3월 26일 원고접수, 2003년 6월 23일 심사완료)

Prediction of Carbonation Progress for Concrete Structures Considering Change of Atmospheric Environment

Chang-Soo Lee^{1)*} and In-Seok Yoon¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

(Received March 26, 2002, Accepted June 23, 2003)

ABSTRACT

The most common deterioration cause of concrete structures in urban environment is carbonation. Recently, the CO₂ concentration and temperature at atmosphere is sharply increased with time due to global warming phenomena. In this study, the climate scenario IS92a, which was suggested by the IPCC, is used to consider temperature and atmospheric CO₂ concentration change in the model of service life prediction. The modified mathematical solution, which was based on the Fick's 1st law of diffusion, was used to reflect concrete materials properties such as the degree of hydration of concrete with elapsed time, and important parameters, which associated with deterioration rate. The techniques of service life prediction are developed introducing the method of reliability and stochastic concept to consider microclimatic condition in Seoul, South Korea. From the result of service life prediction, concrete containing high W/C ratio is shown fast carbonation rate due to CO₂ concentration increase. It is concluded that the deterioration of concrete structures due to carbonation is insignificant problem on the conditions that below W/C 55%, well curing concrete.

Keywords : deterioration, carbonation of concrete, global warming phenomena, service life prediction, microclimatic condition

1. 서 론

21세기에 지구 온난화 현상은 큰 사회적 문제가 되고 있다. IPCC에 따르면 1861년 이후로 지구 지표기온은 $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 가량 상승하였다. 또한, CO₂농도는 전 세계적으로 매년 0.5%의 상승률을 보이고 있는데 우리나라의 경우 이산화탄소 배출량은 1999년 410백만톤으로 세계 10위에 해당하며 배출증가량은 연평균 6.5%로서 OECD국가의 평균인 1.1%에 대비하여 매우 높은 상황이다.¹⁾

그러나 이러한 대기 오염은 환경적 문제 이외에도 복사 에너지, 높은 온도와 습도 등으로 콘크리트 내부로 이온의 유동성을 활성화시키고 염소이온의 용해도를 높여서 콘크리트 비저항의 감소를 초래할 뿐만 아니라, 중성화에도 커다란 영향을 미칠 수 있다. 따라서 향후 콘크리트 구조물의 중성화 열화환경은 총체적으로 심화될 것으로 예상되

며 특히 대도시의 콘크리트 구조물은 그 피해가 더욱 심각할 것으로 우려된다. 더욱이, 최근 서울 시내에 위치한 콘크리트 구조물의 상당수가 중성화가 주요 열화요인인 것으로 나타나 이에 대한 수명예측기법 및 수명연장을 위한 적절한 조치가 필요할 것으로 사료된다.²⁾

본 연구는 2100년대까지 지구규모 대기환경변화를 고려하고 물질전달법칙에 근거한 지배방정식에 실내 실험결과에서 얻은 재료적 특성을 배합특성별로 다양하고 단순화된 매개변수로 가정하여 결합하였다. 또한, 현장조사 결과를 추계학적 및 통계학적 기법을 응용하여 내구수명예측에 반영하였다. 본 연구의 흐름은 Fig. 1과 같다.

2. 대기환경변화와 확산법칙

2.1 대기 온도 및 CO₂ 농도 상승률의 예측

콘크리트의 중성화는 대기 중의 온도 및 CO₂농도에 의존된다. 본 연구에서는 IPCC³⁾에서 제안한 기상조건 가상

* Corresponding author
Tel : 02-2210-2955 Fax : 02-2214-2908
E-mail : yisconcrete@hotmail.com

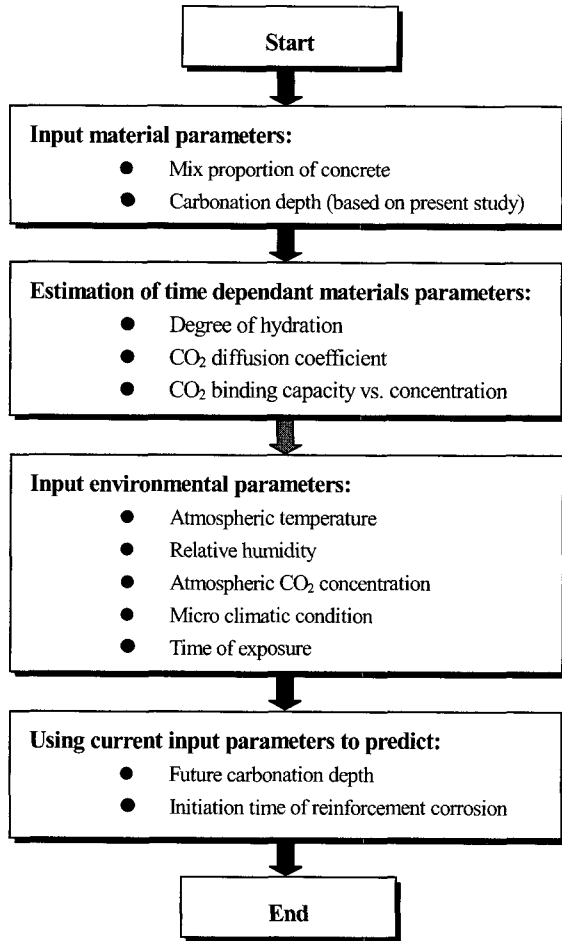


Fig. 1 Procedure of proposed prediction model on carbonation of concrete

시나리오 IS92a를 기초로 2100년까지 지구규모 대기상태의 평균적 변화율을 고려하여 이를 콘크리트의 중성화 예측에 반영하였다(Fig. 2). 그런데 일반적인 CO₂의 농도 단위는 체적비율로서 이를 물질 이동 법칙에 적용하기 위해서는 이상기체 상태법칙과 보일-샤를의 법칙을 기초로 식 (1)을 이용하여 중량단위로 환산해야 한다.

$$[CO_2] = \frac{V_{CO_2} \cdot p}{R \cdot T} \quad (1)$$

여기서,

[CO₂]: CO₂ 몰농도 (mol/m³)

V_{CO₂}: CO₂의 체적비 (%)

p: 대기압력 (atm)

T: 온도 (K)

R: 가스상수 (= 82.06×10⁻⁶ m³ atm/mol K)

순수이상기체로 간주된 CO₂의 몰중량은 44이며 표준상태에서 1몰당 22.4ℓ의 부피를 갖는 조건을 고려하면 CO₂ 농도는 중량단위로 환산할 수 있다. 그런데 이상기

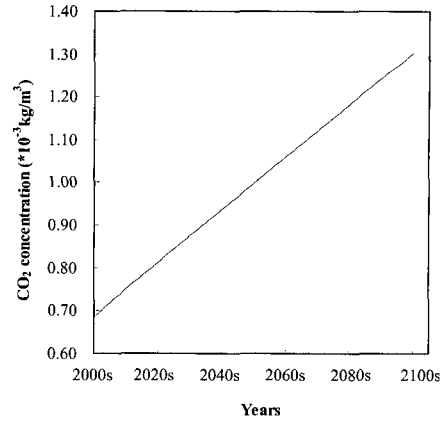


Fig. 2 Prediction of CO₂ mass

체의 농도는 온도환경에 크게 영향을 받으므로 중량단위로 환산시 이에 대한 고려가 있어야 한다. 따라서 2000년까지 서울시의 연평균온도가 12.2℃인 점을 기준으로 대기온도 상승률⁴⁾을 고려하여 CO₂ 중량농도를 예측한 결과가 Fig. 2이다.

이를 회귀식으로 나타낸 것이 (2)로서 향후 100년 후인 2100년대에는 지금보다 약 1.9배 수준까지 CO₂ 농도가 크게 상승하는 것으로 나타났다.

$$C_{CO_2} = 12.611 \ln(t) - 95.172 \quad (2)$$

여기서, C_{CO₂}: CO₂ 중량농도(×10⁻³ kg/m³), t: 년대

2.2 물질전달법칙

콘크리트의 중성화는 2단계를 거쳐 진행되는 연속적인 화학현상으로 1단계에서 중성화된 콘크리트를 통하여 중성화 경계면(carbonation front)까지 CO₂가 확산되며 2단계에서 CO₂ 가스와 콘크리트의 Ca(OH)₂간의 화학작용이 발생한다. 그래서 본 연구는 1단계에서 물질전달 법칙에 근거한 Fick의 제 1 확산법칙을 적용하였으며, 2단계는 CO₂ 고정화를 고려하였다.

먼저, 정상흐름 상태에서 유체의 흐름상태를 묘사할 수 있는 Fick의 제 1법칙을 콘크리트의 중성화 예측에 적용하기 위하여 식 (3)과 같이 표현하였다.

$$x = \frac{2D}{a} (C_1 - C_2)t \quad (3)$$

여기서, x: 완전 중성화된 깊이 (cm)

C₁: 외부의 CO₂ 농도 (g/cm³)

C₂: 중성화 경계면의 CO₂ 농도 (g/cm³)

D: 확산계수 (cm²/s), t: 시간 (s)

a: 단위 부피당 콘크리트를 완전 중성화시키기 위한 CO₂ 소모량 (g/cm³)

상기 식에서 CO₂의 확산이 이루어지는 중성화 경계면을 중성화 깊이(x_c)로, 외부 CO₂ 농도를 대기 중 CO₂ 농도로 가정하면 중성화에 대한 시간 모델은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}}{a} \cdot C_{ex} \cdot t} \quad (4)$$

여기서, x_c : 재령 t (s)에서의 중성화 깊이 (cm)

D_{CO₂} : CO₂ 확산계수 (cm²/s)

C_{ex} : 대기 중 CO₂ 농도 (g/cm³)

a : CO₂ 흡착량 (g/cm³)

위의 식은 중성화 속도 계수 K를 변수로 한 식 (5)와 같이 √t의 법칙으로 널리 알려진 단순방정식으로 표현된다.

$$x_c = K \cdot t^n, \quad n = 0.5 \quad (5)$$

다음으로 단위체적당 콘크리트를 완전 중성화시키는데 소모되는 CO₂량 a는 시멘트의 종류, 화학적 성분, 배합조건 및 경년 등에 따라 상이하다. 특히, 중성화의 화학적 반응성을 고려해 볼 때 이에 대한 지배인자는 CaO와 CO₂량이다. 그래서 CO₂ 흡착량은 수화도와 시멘트 내의 CaO량과의 관계에 의하여 자연폭로 및 대기 중 조건에서 식 (6)에 의하여 구할 수 있다.

$$a = 0.75 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (kg/m^3) \quad (6)$$

여기서, C : 단위시멘트량 (kg/m³)

CaO : 시멘트내 CaO 량

α_H : 시멘트의 수화도

M : 몰중량 (CO₂ : 44g/M, CaO : 56g/M)

2.3 시멘트의 수화모델링

클링커의 광물화학적 조성에 따른 포틀랜드 시멘트 경화체의 시간 의존적인 발현특성에 의한 알칼리 생성물량을 추정하기 위하여 수화도 이론을 적용하였다. 수화도는 포틀랜드 시멘트의 각 광물학적 성분 및 시멘트에서 차지하는 중량을 고려하면 식 (7)과 같다.

$$\alpha_H = \alpha_1 \cdot W_{C_3S} + \alpha_2 \cdot W_{C_2S} + \alpha_3 \cdot W_{C_3A} + \alpha_4 \cdot W_{C_4AF} \quad (7)$$

여기서, α_i : 각성분의 반응율

W_i : 각성분의 중량 백분율

Byfors⁵⁾가 제안한 수화도 모델은 식 (8)과 같다.

$$\alpha_H = \exp\left(-\lambda_1 \ln\left(1 + \frac{t_{eq}}{t_1}\right)^{-k_1}\right) \quad (8)$$

여기서, λ₁, t₁, k₁ : 시멘트의 화학적 성분에 따른 재료상수

위식에서 온도, W/C, 수분분포가 영향을 미치는 반응을 β_T, β_{w/c}, β_w를 고려한 등가재령(t_{eq})을 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$t_{eq} = \int_0^t \beta_T \beta_{w/c} \beta_w dt \quad (9)$$

양생온도에 따른 반응률 계수 β_T는 Arrhenius 타입의 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\beta_T = \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)\right) \quad (10)$$

여기서, E/R : 활성화온도 (K), 20°C가 기준온도

물-시멘트비에 따른 반응률계수 β_{w/c}는 다음의 식 식 (11)과 같다.

$$\beta_{w/c} = \beta_{w/c}(W/C, \alpha_H) = \left(\frac{\alpha_{max} - \alpha_H}{\alpha_{max}}\right)^r \quad (11)$$

여기서, r : 재료상수, α_{max} : 최종수화도

최종 수화도는 W/C 0.45, W/C 0.50, W/C 0.55의 조건에서 각각 0.87, 0.89, 0.90인 Bentz 와 Garboczi⁶⁾의 연구 결과가 반영되었다. 콘크리트내의 수분분포가 수화속도에 미치는 반응률 계수 β_w는 식 (12)와 같으며 이에 대해서는 차⁷⁾의 연구결과를 이용하였다. 최종적으로 얻어진 수화도 곡선은 Fig. 3과 같다.

$$\beta_w = \frac{A_{wat}(\alpha_H)}{A_{tot}(\alpha_H)} \quad (12)$$

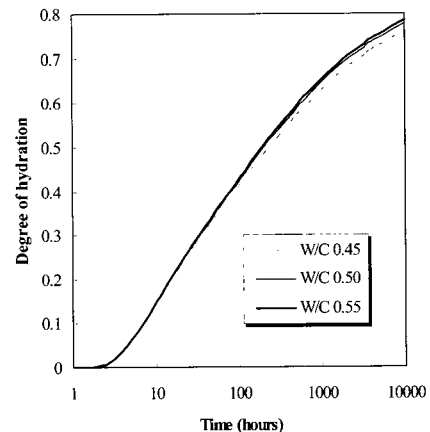


Fig. 3 Degree of hydration with W/C ratio

3. 실험 개요

3.1 실내실험 방법

사용된 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트로서 Table 1과 같이 물-시멘트비를 3단계로 배합 변수화 하였다. 완성된 콘크리트 시험체는 $10 \times 10 \times 20$ cm 크기로서 직경 0.8cm, 길이 19cm인 철근에 통전선이 연결되어 피복두께 1.2cm로 매입되어 있다.

시험편은 단일면을 제외한 전단면을 수지성 재료로 실링한 후, 실험 프로그램 (a), (b)로 구분하여 중성화 촉진 실험을 행하였다. 먼저 실험 프로그램 (a)에서는 3%, 5%, 10%의 CO₂ 농도 조건에 따라 중성화 촉진이 수행되었다. 실험 프로그램 (b)에서는 5% CO₂ 농도조건에서 지속적인 중성화 촉진과 1주일 사이클로 중성화와 수중침지가 반복 수행되었다. 실험 프로그램 (a), (b)는 상대습도는 65%, 온도는 20 °C의 동일조건에서 진행되었다.

중성화 깊이는 콘크리트 시험체의 파단면에 1% 페놀프탈레인-알콜 용액을 1분 간격씩 2회 살포하고 버니어캘리퍼스를 이용하여 0.1mm 감도까지 정밀 측정되었다.

철근의 부식전류밀도는 분극저항법에 기초로 한 Gecor 6(미국 NDT James사)로 중성화 진행 동안 일정시간을 유지하며 지속적으로 측정되었다. 철근의 중량감소량은 시험체 제작 전의 중량을 측정하고 실험 종료 후, 매입된 철근을 꺼내어 ASTM G1에 따라 중량감소량을 구하였다.

3.2 현장조사방법

서울시에 위치한 콘크리트 구조물을 무작위로 선별한 후, 이 중 비파괴 압축강도가 21 ~ 24MPa 를 갖는 178 개소에서 중성화 깊이를 측정하였다. 이때 상부구조는 우수에 노출된 슬래브 난간부위와 우수에 노출되지 않은 교대 및 교각에서 각각 중성화 깊이를 측정하였다.

4. 중성화진행 예측

4.1 CO₂ 농도가 중성화에 미치는 영향

일반적으로 CO₂ 농도가 상승하면 중성화 속도도 빨라

Table 1 Mix proportion of concrete

Specimen	Unit weight (kg/m ³)				
	W/C	Cement	Water	Sand	Gravel
OPC45	0.45	411	185	706	1001
OPC50	0.50	370	185	720	1021
OPC55	0.55	336	185	732	1038

지는데 Fick의 1법칙에 따르면 콘크리트의 중성화 깊이는 $\sqrt{[CO_2] \cdot time}$ 에 비례한다. 그래서 농도로 인한 물질전달과 시간에 대한 연속성과의 상관성을 규명한 것이 Fig. 4로서 결정계수 0.9232의 충분한 적합도가 얻어졌다. 따라서 Fick의 1법칙으로 CO₂ 농도의 상승에 따른 중성화 진행속도의 증가를 적절히 반영할 수 있음이 입증되었다.

4.2 CO₂ 의 고정화율

순수 확산이론⁸⁾에 의하면 물질의 이동은 농도와는 무관하지만 콘크리트의 경우에는 물질의 고정화현상으로 인하여 이동율이 상이할 수 있다. 따라서 CO₂의 고정화를 반영하는 식 (6)은 자연폭로 상태와 실험실 내 높은 CO₂ 촉진상태를 구분하여 적용하여야 한다. 본 연구는 자유롭게 유동할 수 있는 CO₂ 농도(C_{CO₂})와 중성화의 화학적 반응에 의하여 소비된 CO₂ 농도(a)와의 관계를 식 (13)과 같이 단순 고정화 모델인 선형 흡착 등온식으로 표현하였다.

$$\beta_{CO_2} = a / C_{CO_2} \quad (13)$$

여기서, β_{CO_2} : CO₂ 고정화율

식 (13)은 콘크리트의 최대밀도 증가가 이루어질 때 대기상태와 중성화되고 있는 콘크리트 공극상태 상호 간의 CO₂농도의 평형상태가 된다는 사실에서 기인되었다. 흡착된 CO₂량은 중성화된 영역에서 깊이와 무관하게 일정하지만 비중성화된 영역에서는 깊이마다 상이하다. 일반적으로 후자가 전자보다 약 1/7~1/11정도인 것으로 알려졌다.⁹⁾ 그러나 본 연구에서 고려되는 CO₂ 확산은 중성화된 영역에서의 확산성이 반영되므로 흡착된 CO₂량도 중성화된 콘크리트에서 일정하다고 가정할 수 있다. 그래서 흡착된 CO₂량에 대응한 CO₂ 농도별 확산계수가 일정하다는

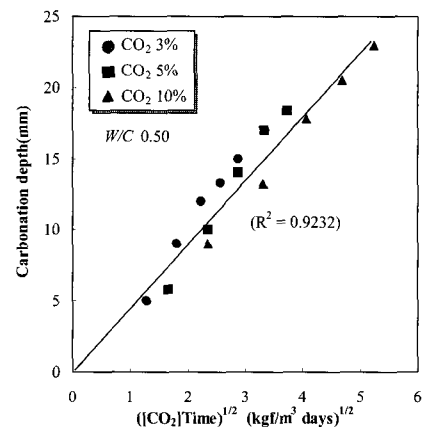


Fig. 4 Relationship between carbonation depth and $\sqrt{[CO_2] \cdot time}$

조건에서 CO₂ 고정화율을 얻었고 식 (14)와 같은 결정계수 0.9847수준의 CO₂ 선형흡착 등온식을 얻었다.

$$\frac{a}{\alpha_H} = 1253.1C_{CO_2} + B, \quad C_{CO_2} > 0 \quad (14)$$

상기의 등온식에서 대기 중 CO₂ 농도가 0.035%라는 가정 하에서 B(intercept)는 결정된다. 따라서 W/C 0.45인 콘크리트에서 B는 137.5, W/C 0.50인 콘크리트는 135.4, W/C 0.55인 콘크리트는 134.4을 얻을 수 있다.

4.3 중성화된 콘크리트의 CO₂ 확산성

CO₂ 5%의 조건에서 콘크리트의 중성화를 촉진하여 중성화깊이를 측정된 결과가 Fig. 5로서 물-시멘트비에 따른 중성화 깊이는 분명한 추이를 보였으며 \sqrt{t} 법칙을 만족하고 있다. CO₂확산계수는 일반적인 실험 혹은 해석적 방법론으로 접근하여 얻을 수 없으므로 이 실험결과를 기초로 촉진시간 및 환경적 촉진조건과 중성화 깊이로 판단한 확산 진행결과를 역산하여 CO₂ 확산계수를 산출하였다.

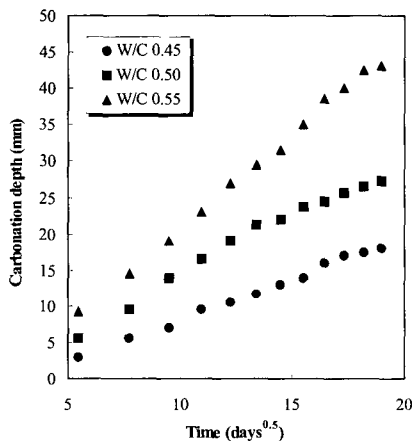


Fig. 5 Carbonation depth with W/C ratio

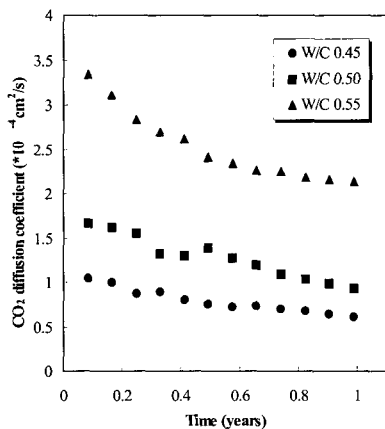


Fig. 6 Mean D_{CO_2} with time

한편, 엄밀한 의미에서 중성화 진행속도는 \sqrt{t} 에 일치하지 않는데 이는 콘크리트의 수화 반응진행, 중성화로 인한 세공량 감소 등이 주요원인이다. 이러한 재료적 특성으로 식 (5)에서 $0.4 < n < 0.5$ 이 제안된 바 있다¹⁰⁾.

본 연구는 Fick의 1법칙을 콘크리트에 적용시 매체를 통한 물질의 확산계수가 시간에 일정하다는 조건을 수정하여 시간 의존적인 CO₂ 확산계수(D_{CO_2})로 반영되었다. 즉, 시간경과에 따른 콘크리트의 수화로 인한 미세구조의 향상, 표면에서부터 깊이별로 상이한 수화조건 등에 의한 콘크리트 경화체의 물리적 경시 변화특성을 CO₂ 확산계수의 감소율을 통하여 고려하였다. 시간에 따른 CO₂ 확산계수의 감소추세는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{CO_2}(t) = D_1 \cdot t^{-n_d} \quad (15)$$

여기서, D_1 : 1년경과 후 CO₂ 확산계수($\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$)

n_d : 확산계수 감소를 반영한 시간계수

Fig. 6은 시간에 따른 CO₂ 확산계수의 경시 변화율을 보인 것으로 시간계수 n_d 는 물-시멘트비에 따라 상이하다. 즉, 여기서 도출된 감소계수의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 물-시멘트비가 큰 콘크리트 일수록 CO₂ 확산계수가 비교적 크게 감소되고 있는데, 이는 물-시멘트비가 큰 콘크리트가 최대수화도가 높으며 중성화로 인한 콘크리트 미세구조가 더욱 밀실성이 향상된다는 기존의 연구결과^{11,12)}와 유관된 것으로 생각된다.

Table 2는 콘크리트의 배합특성별 평균 CO₂ 확산계수를 산출하기 위한 시간계수를 얻은 결과이다. 이를 Table 3과 비교하면 모든 콘크리트에서 낮은 확산계수를 갖는 것으로 평가되었으며 CEB 1990 Model Code¹⁴⁾에서 제안된 콘크리트의 CO₂ 및 O₂의 확산계수인 $0.5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위에 포함되었다. 따라서 본 연구에서 산출된 CO₂ 확산계수는 적절한 것으로 생각되며 CO₂ 확산계수로 판단한 콘크리트의 품질은 물-시멘트비 55% 이하에서 충분한 양생을 취한다면 양호할 것으로 판단된다.

Table 2 D_1 and n_d with W/C ratio

	D_1	n_d
W/C 0.45	0.6496	0.2180
W/C 0.50	1.2358	0.2348
W/C 0.55	2.2248	0.2395

Table 3 Typical values of K and D_{CO_2} ¹³⁾

Con'c quality	K (mm/ $\sqrt{\text{year}}$)	$D_{CO_2} (\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s})$
Poor	> 10	> 50
Average	5 ~ 10	50 ~ 5
Good	< 5	< 5

다음으로 수분이 중성화에 미치는 영향에는 2가지 측면이 고려되는데 시멘트 경화체의 포화상태에 따른 CO₂ 가스의 확산성과 CO₂ 가스 및 Ca(OH)₂간의 반응에 대한 매개체를 들 수 있다. 즉, 과다한 수분은 시멘트 경화체의 공극내부를 차단하여 CO₂ 확산속도를 방해하는 반면, 수분이 충분하지 않으면 CO₂ 가스가 콘크리트 공극수에 용해되는 현상을 감소시켜 Ca(OH)₂와의 반응속도가 현저히 저하된다. 그래서 상대습도 50~70% 정도에서 콘크리트의 중성화는 가장 빠르게 진행되는 것으로 보고되고 있다.¹⁵⁾ 이에 대한 상대습도와 CO₂ 확산계수와와의 관계는 Papadakis¹⁶⁾, CEB¹⁷⁾, Houst¹⁸⁾ 등에 의하여 식 (16)과 같이 제안되었는데 이 식은 RH > 50%에서 유효할 것으로 생각된다.

$$D_{CO_2} \propto (1 - RH/100)^m \quad (16)$$

본 연구에서 제안된 방법에 의하여 *Ceukelaire*¹⁹⁾ 등의 실험결과를 토대로 얻은 영향계수 m 은 약 1.03으로 계산된 반면, *Papadakis*¹⁶⁾는 상대습도에 따른 확산계수의 영향계수 m 이 2.2로 제안되어 다소간의 차이를 보였다. 이외에 배합조건 및 습도 이외에도 콘크리트의 양생에 미치는 시공조건 및 온도 등의 환경조건이 CO₂ 확산계수의 주요 영향인자로 작용된다.

4.4 미세기후조건에 따른 중성화 속도

우수에 노출된 콘크리트 구조물에서 경년이 상당히 경과하였음에도 중성화 깊이가 매우 작게 진행된 경우가 문헌²⁰⁾에서 보고되고 있는데 이것은 우수가 콘크리트 표면의 공극을 차단하여 CO₂ 확산의 감소가 초래되었기 때문이다. 그래서 RILEM²¹⁾은 우수에 노출된 구조물에서 식 (5)에서 $0.2 \leq n < 0.5$ 의 시간함수 조건을 제안하고 있다.

우수 노출에 따른 중성화의 시간함수는 각 국가별 및 지역별 강우량과 상당한 관련을 갖는데, 서울시의 경우 연평균 강우량은 세계 주요도시보다 비교적 많은 1,344mm로서 콘크리트의 함수상태에 따른 중성화의 진행성에 커다란 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이를 콘크리트의 중성화 진행의 예측식에 고려하기 위하여 Fick의 1법칙에 식 (17)과 같이 경년에 따른 미세기후 조건을 반영하였다.

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t, RH)}{a} \cdot C_{CO_2} \cdot t \left(\frac{t_r}{t}\right)^{n_m}} \quad (17)$$

여기서, n_m : 미세기후 노출조건에 따른 시간계수
(우수노출유: $n_m = 0$, 노출무: $n_m > 0$)
 t_r : 기준시기 (1년)

Fig. 7은 콘크리트의 포화상태가 중성화에 미치는 영향

을 고찰하기 위하여 지속적인 중성화 촉진(Cb.)과 1주일 간격으로 중성화와 수증침지를 반복한 실험결과(Cb.+W)를 정리한 것으로 이에 대한 중성화 깊이 감소비율을 고려한 결과, Fig. 8과 같이 0.2503 ~ 0.2773의 시간계수가 얻어졌다. 그러나 실제 자연조건에서 우기와 비우기간에 대한 콘크리트의 노출 시간 비율이 1:1의 환경이 되지 못하므로 실내 실험결과와는 상당한 차이를 보일 수 있다.

그래서 현장조사결과인 Fig. 9를 토대로 서울시의 미세기후조건 상태에서 시간계수를 얻기 위하여 노출조건에 따른 중성화 깊이의 표준편차(σ)와 평균값(\bar{x}_c)을 이용한 식 (18)의 Gaussian 함수 확률분포가 이용되었다.

$$p(x_c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

Fig. 10은 확률분석을 보인 결과이며 이를 토대로 우수의 노출유무에 따른 시간계수가 얻어졌다. 여기서 시간계수는 우수의 노출 유무에 따른 평균적인 중성화 깊이 및 95% 신뢰성을 가졌을 때의 중성화 깊이 비율을 도출한

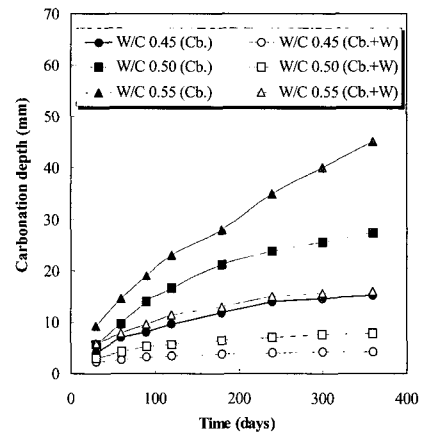


Fig. 7 Effect of water immersion on carbonation

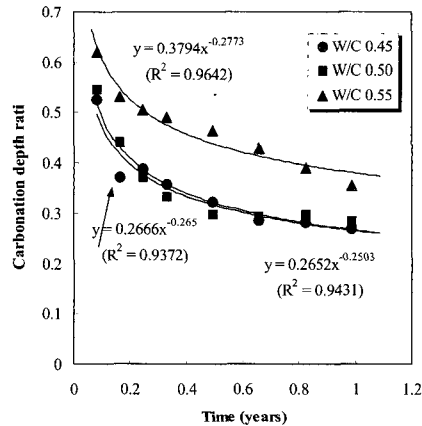


Fig. 8 Effect of water immersion on carbonation

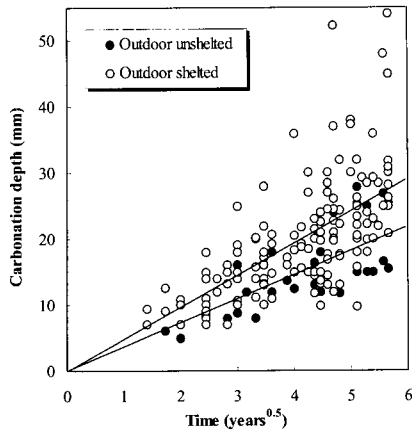


Fig. 9 Carbonation depth of in-situ concrete with exposure conditions

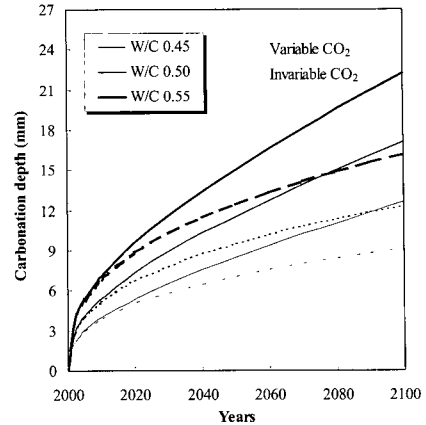


Fig. 11 Prediction of carbonation depth with CO₂ and W/C ratio

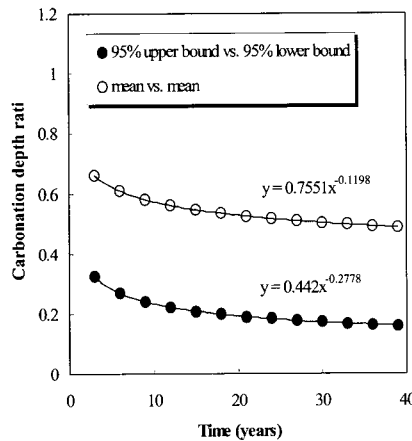


Fig. 10 Difference of carbonation depth between outdoor sheltered & unsheltered

것으로 각각 0.1198, 0.2778로 나타났다. 즉, 우수로 인한 평균적인 중성화 깊이의 감소율은 실내실험에서 행한 1:1의 시간비율조건보다 작은 반면, 95%의 신뢰성을 갖는 조건에서는 비슷한 수준이다.

4.5 중성화 진행의 예측

이상의 결과로 2000년에 건설된 콘크리트 구조물을 기준으로 중성화 진행을 예측하여 보인 것이 Fig. 11이다. 예상했던 바와 같이 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 중성화 추이는 뚜렷하였다. 실험변수로 가장 높은 물-시멘트비 55%의 조건에서 충분히 양생된 콘크리트라면 100년 경과하였을 때 최대 중성화 깊이 27mm, 평균 중성화 깊이 22mm 수준인 것을 나타냈다. 그러나 국내의 현장조사 결과²⁾에서는 매우 빠른 중성화 속도를 보였는데, 이는 충분한 양생조건을 취하지 못하였거나 재료 및 구조상 생김 균열, 지나치게 높은 물-시멘트비 등이 원인으로 사료된다.

다. 또한 높은 물-시멘트비를 갖는 콘크리트가 CO₂ 량 증가에 따른 중성화에 대한 취약성이 더하였다. 따라서 지구 온난화 현상에 의한 중성화 열화 환경의 심화를 고려한다면 향후 콘크리트 구조물의 배합시 중성화의 충분한 제어를 위하여 최대 물-시멘트비는 55% 이하의 수준에서 결정하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

다음은 Fig. 12에 미세기후조건에 따른 중성화 깊이의 예측결과를 제시하였다. 여기서, 가는 실선은 우수에 노출된 조건과 비노출된 조건에서 각각 평균적인 50% 신뢰성을 갖는 조건에 대응한 예측결과이며 점선은 노출조건에 따른 95% 신뢰 상한선과 95% 신뢰 하한선 간의 대응조건으로 우수노출로 인한 중성화 깊이의 최대 감소율을 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에 의하면 우수 노출된 콘크리트의 중성화 깊이는 비노출된 상태의 중성화 깊이와 비교하여 시간경과에 따른 격차가 더욱 커지고 있음을 알 수 있으며 따라서 미세 기후조건은 콘크리트의 장기 중성화 진행성에 큰 영향을 미치는 것으로 귀결된다.

4.6 기존 연구와 비교검토

본 연구에서 얻은 중성화 예측 기법을 현재의 CO₂ 농도를 반영한 기존의 연구결과인 *Kishitani*²²⁾, *Masuda*²³⁾ 등의 연구결과 및 일본 토목학회(JSCE)의 제안식과 비교하여 결과를 나타낸 것이 Fig. 13이다. 일본 토목학회의 콘크리트 표준시방서²⁴⁾에서 제안된 식에서 B는 습윤 상태를 반영한 환경계수로서 B=1은 건조한 북쪽조건이며, B=1.6은 비건조한 남쪽지역의 조건을 의미한다. 기존연구와 비교 검토한 결과에서 물-시멘트비 45%의 조건에서 예측된 평균적인 중성화 깊이는 기존의 결과보다 다소 높았으나 물-시멘트비 50%와 55% 조건에서는 매우 근사하였다. 또한, Fig. 14와 같이 옥내 외에서 15년 동안 장기 폭로실험을 한 *Nagataki*²⁵⁾ 등의 연구결과와 비교한 결과

에서도 비교적 근사한 결과가 형성되었다. 따라서 본 연구에서 제안된 중성화 예측 기법은 대기환경 및 시간의존적인 재료특성을 반영하여 콘크리트 구조물의 중성화 진행성을 예측하는데 유효한 것으로 생각되며 향후 다양한 콘크리트의 품질상태 및 혼합 콘크리트에도 적용할 수 있도록 연구를 확대하고 다각적인 검토가 필요하다.

4.7 내구수명 확보를 위한 최소피복두께

대체로 중성화 깊이가 철근위치까지 도달하면 부식시작시기가 도래되는 것으로 알려졌으나 실제로는 그 이전에 부식은 시작된다. 이것은 중성화 측정의 방법적인 면에서 철근의 부동태피막이 pH 11.4에서 완전히 파괴되는 반면, 1% 페놀프탈레인-알콜 용액은 pH 9.5의 중성화 깊이를 지시하기 때문이다.²⁶⁾ 또한, 중성화 경계면의 콘크리트의 전해질 상태와 철근부식의 활성을 유발하는 캐소드 반응의 영향인자에 따라서 철근의 부식유무는 달라질 수 있다. 이러한 내용은 기존 문헌에서 찾을 수 있는데 실내 연구결과^{27,28)}에서 염화물이 함유되지 않은 콘크리트의 경우 8mm, 염화물이 함유된 콘크리트에서는 20mm의 비중성화 깊이(피복두께 - 중성화 깊이)가 잔존할 때 부식이 시작되며 장기폭로시험에서는²⁹⁾ 12~13mm의 비중성화 깊이가 잔존할 때 부식이 시작되는 것으로 나타났다. 그래서 일본 콘크리트 표준시방서²⁴⁾에서는 중성화로 인한 콘크리트 구조물의 부식에 대한 안전성을 비중성화 깊이로 판단하여 염화물 비적재환경에서는 10mm, 염화물 적재환경에서는 25mm의 비중성화 깊이를 보장할 것을 제안하고 있다.

본 연구에서는 실험종료후, 중량감소량을 측정하고 Fig. 15와 같이 철근의 부식전류밀도를 시간에 대한 변화율로 나타내어 부식시작시기에 대응한 비중성화 깊이를 산출하였다. 먼저, 중량감소량을 측정하여 부식결손율을 식 (19)에 의하여 얻을 수 있다.

$$S.L = \frac{W}{A \cdot t \cdot \rho \cdot 10^4} \quad (19)$$

여기서, S.L : 부식결손율 (Section loss : $\mu\text{m}/\text{year}$)

W : 중량감소량 (mg)

A : 철근의 표면적 (cm^2)

t : 시험시간 (years)

ρ : 철근의 비중 (=7,850 mg/cm^3)

상기 식에서 Faraday의 법칙을 이용하여 부식결손율을 부식전류밀도로 환산하고 부식전류는 시간에 따라 일정하지 않으므로 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$W = 6,826,087 \cdot A \cdot \int_{t_i}^{t_e} I_{corr}(t) dt \quad (20)$$

여기서, I_{corr} : 부식전류밀도 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

t_i : 부식시작시간 (years)

t_e : 실험종료시간 (years)

실험종료 후 철근의 부식결손량(W)으로 식 (20)에 의하여 부식시작시기(t_i)를 역산하였으며 부식시작시기가 도래되었을 때 비중성화 깊이를 구하여 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서도 중성화 깊이가 도래되기 전에 부식이 시작되는 것으로 나타났는데 즉, 비중성화 깊이가 최대 5mm 잔존할 때 부식은 시작되며 이는 일본 콘크리트 표준시방서보다는 다소 작은 것을 알 수 있다.

본 연구결과와 비중성화 깊이와 일본 콘크리트 표준시방서에서 제안된 비중성화 깊이의 규정치를 반영하여 목표 내구수명에 대응한 최소 피복두께를 Fig. 16과 같이 제안하였다. 물-시멘트비 55% 이하, 충분한 양생을 취한다는 조건에서 중성화 열화환경만 고려할 경우 피복두께는 최대 33mm까지 확보된다면 2100년까지 충분한 내구성을 얻을 수 있는 것으로 귀결된다.³⁰⁾ 다만, 콘크리트 표면의 균열과 양생조건 및 혼합콘크리트를 사용한 콘크리트의 중성화 진행예측에 대해서는 향후의 연구로 한다.

Table 4 Determination of uncarbonation depth

	Weight loss (mg)	Time to corrosion (days)	Uncarbonation depth (mm)
W/C 0.45	219.5	155	0
W/C 0.50	384.7	75	-2
W/C 0.55	534.3	18	5

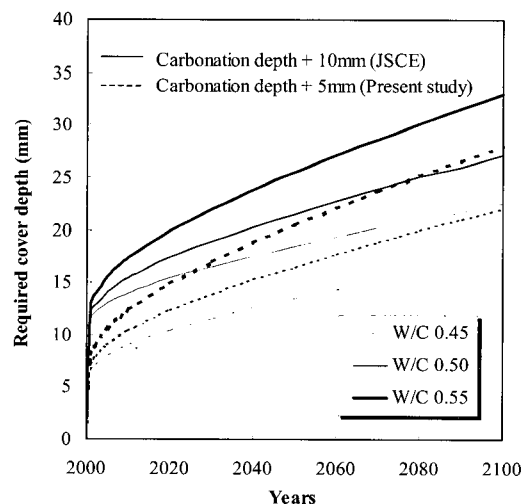


Fig. 16 Required cover depth with W/C ratio

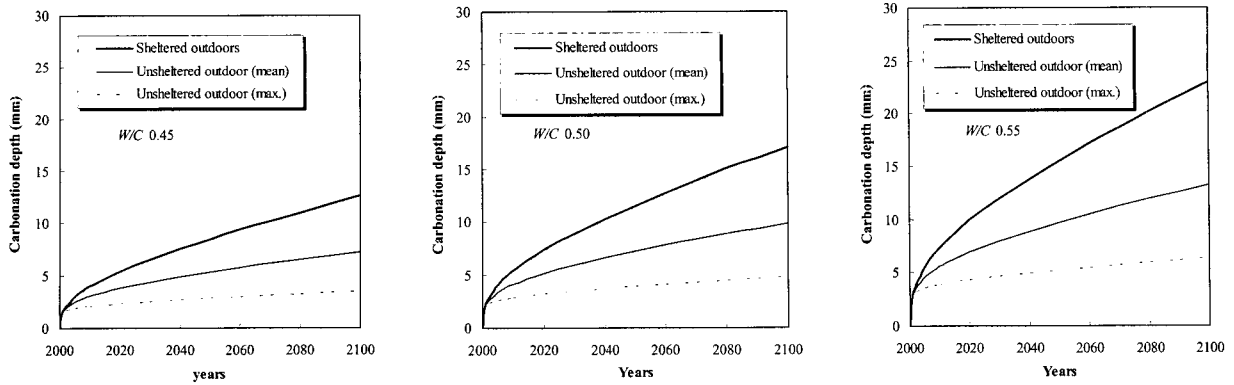


Fig. 12 Prediction of mean carbonation depth with years

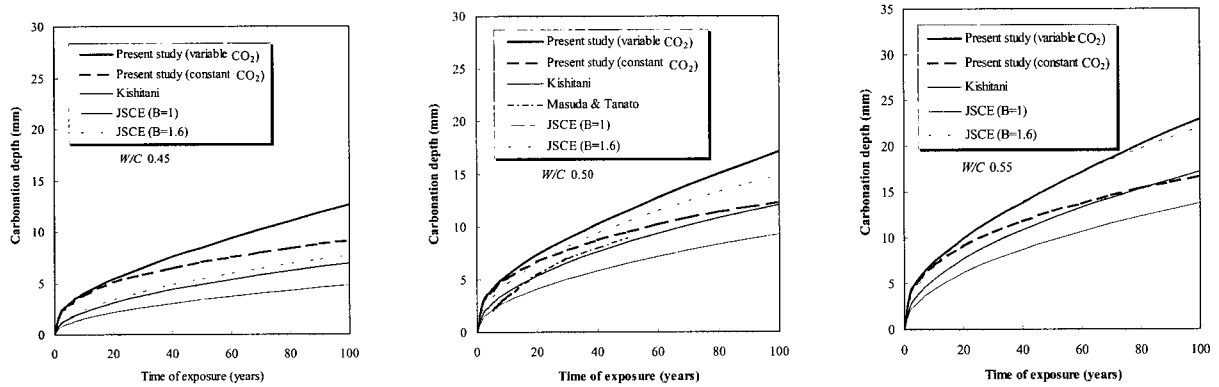


Fig. 13 Comparison of this result with codes

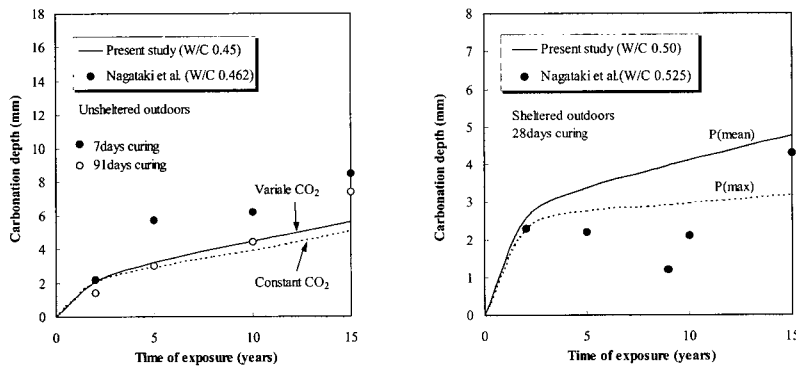


Fig. 14 Comparison of this result with in-situ investigation

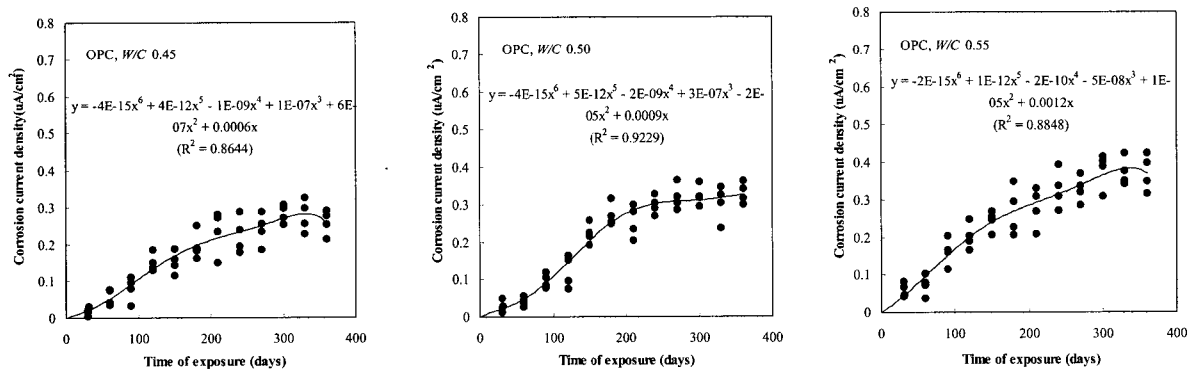


Fig. 15 Corrosion current density of reinforcement with time

5. 결 론

대기환경변화 및 실내, 외 실험결과에 따른 콘크리트의 배합별 물리적 특성을 매개변수로 설정하고 국내의 기후 조건을 고려하여 콘크리트 중성화 예측에 반영하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) CO₂ 농도가 상승하면 중성화 속도도 빨라지며 Fick의 1법칙에 따라 콘크리트의 중성화 깊이는 $\sqrt{[CO_2] \cdot time}$ 에 비례하였다.
- 2) 물-시멘트비에 따른 CO₂ 확산계수는 CEB 1990 Model Code의 기준범위를 만족하였으며 재령이 경과함에 따라 콘크리트의 수화로 인한 미세구조 향상 및 중성화로 인한 공극 치밀효과로 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 콘크리트의 중성화는 우수노출에 따른 미세기후조건에 대한 영향효과가 시간 경과함에 따라 더욱 뚜렷하였다. 따라서 우수 노출된 경우 장기 중성화 깊이를 예측하는데 미세기후조건이 반드시 고려되어야 한다.
- 4) 지구 온난화 현상에 의하여 대기 중의 CO₂ 농도가 상승할수록 물-시멘트비가 높은 콘크리트에서 중성화에 대하여 취약하였다. 따라서 콘크리트구조물의 초기 신설단계에서부터 지구 온난화 현상을 고려한 중성화 제어대책이 필요할 것으로 생각된다.
- 5) 철근의 중량감소량 및 부식전류밀도를 측정하여 철근의 부식시작시기를 산출한 결과, 비중성화 깊이가 최대 5mm 잔존할 때 부식은 시작되었는데 이는 일본 콘크리트 학회에서 제시한 것보다 다소 낮은 수치이다.
- 6) 본 연구결과를 종합하여 경년별 피복두께의 요구치를 제안하였으며 충분히 양생된 물-시멘트비 55% 이하의 보통콘크리트 조건에서 CO₂ 농도상승에 따른 중성화의 빠른 열화진행을 충분히 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. <http://www.me.go.kr>.
2. 이창수, 설진성, 윤인석, "서울시내 140개 철근콘크리트 교량의 내구성 현황분석," 한국구조물진단학회지, 제4권, 3호, 2000, pp.161-168.
3. Mike M., John M., William I. Jason L., Tim J., Mark N., and David V., "Climate Change Scenarios for Global Impacts Studies," *Global Environmental Change*, Vol.9, 1999, pp.S3~S19.
4. Kattenberg, A., Giorgi, F. Grassl, H., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Tokioka, T., Weaver A.J., Wigley, T.M.L., *Climate Models, 1996, Climate Models Projections of Future Climate*. In: Houghton, J.T., Meiro Filho, L.G., Callendar, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K.(eds.), *Climate Change 1995: the Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1995, pp.285~358.
5. Byfors J., "Plain Concrete at Early Ages," Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1980.
6. D.P. Bentz and E.J. Garboczi, "Modeling Leaching of Calcium Hydroxide from Cement Paste: Effects on Pore Space Percolation and Diffusivity," *Materials and Structures*, Vol.25, 1992, pp.523~533.
7. S.W. Cha, "Modeling of Hydration Process and Analysis of Thermal and Hygral Stresses in Hardening Concrete," Ph.D Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 1999.
8. Crank J., "The Mathematics of Diffusion," Second Edition, Oxford Press, Oxford, 1975.
9. L. Ying-yu and W. Qui-dong, "the Mechanism and Carbonation of Mortar and the dependence of Carbonation on Pore Structure," *Concrete Durability: Katharine and Bryant Mather International Conference*, ACI SP 100-98, American Concrete Institute, 1988, pp.1915~1943.
10. 友澤史紀, 福島敏夫, "コンクリートの中性化深さの物理化學的意味について," *セメント・コンクリート工學論文集*, 第43号, 1989, pp.424~429.
11. Ngala V.T. and Page, C.L., "Effect of Carbonation on Pore Structures and Diffusion Properties of Hydrated Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol.30, 1997, pp.1255~1261.
12. 이창수, 윤인석, 이규동, "콘크리트의 중성화가 피복콘크리트의 모세관력 흡수에 미치는 영향," 대한토목학회 논문집, 제20권, 4-A호, 2002, pp.717~725.
13. Comite Euro-International du Beton, "CEB-FIP Model Code 1990," Bulletin d'Information, No.195, 196, Lausanne, 1990.
14. Miguel Angel Sanjun, Csar del Olmo, "Carbonation Resistance of One Industrial Mortar Used as a Concrete Coating," *Building and Environment*, Vol.36, 2001, pp.949~953.
15. Mller A. and Sickert G., "Determination of the Carbonation Resistance of Concrete on the Basis of its Capillarity and Microstructure," *Concrete Precasting Plant and Technology*, No.11, 1995, pp.70~88.
16. Vagelis G. Papadakis, Costas G. Vayenas, and Michael N. Fardis, "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.8, No.8, March-April, 1991, pp.186~196.
17. CEB Bulletin d'Information No 238, "New Approach to Durability Design," 1997.

18. Yves F. Houst, Folker H. Wittmann, "Depth Profiles of Carbonates Formed During Natural Carbonation," *Cement and Concrete Research*, No.2151, 2002, pp. 1~8.
19. De Ceukelaire L., and Van Nieuwenburg D., "Accelerated Carbonation of BlastOfurnace Cement Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.23, 1993, pp.442~452.
20. Hussain S.E., Paul I.S., and Ruthaiyea H.M., "Evaluations and Repair Strategies for Shallow Foundations," *Proceedings of 6th Middle East Corrosion Conference*, Bahrain Society Of Engineers, Monama, 1994, pp.618~628.
21. RILEM REPORT 12, "Performance Criteria for Concrete Durability," *J. Kropp and H.K. Hilsdorf (eds.)*, E & FN Spon, 1995, pp.98~102.
22. Kishitani K., "Über die Beständigkeit von Stahlbeton unter dem Einfluß von CO₂," *Zement-Kalk-Gips*, Nr.4, 1964, pp.158~159.
23. 榎田佳寛, 棚野博之, "コンクリートの中酸化進行豫測モデル, 콘크리트工学論文集, 第2巻, 第1号, 1991, pp.125~134.
24. 日本土木學會, "標準視方書(施工編) - 耐久性照査型," 1999.
25. S. Nagataki, H. Ohga, and E.K. Kim, "Effect of Curing Conditions on the Carbonation of Concrete with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement in Long-Term Tests," *ACI SP 91-24*, 1996, pp.521~540.
26. Saeki, N., Takeda N., Fujita, "Influence Carbonation of Sea Water on Corrosion of Steel in Concrete," *Transport Japanese Concrete Institute*, Vol.6, 1984, pp.155~162.
27. 岸谷孝一, 檜野紀元, "コンクリート中の鐵筋の腐食に関する研究 (腐食の形式に関する研究)," *日本建築學會大會學術講演便概集*, 1977, pp.445~446.
28. 岸谷孝一, 檜野紀元, "コンクリート中の鐵筋の腐食に関する研究(その1コンクリートの中酸化深さが鐵筋腐食に及ぼす影響について)," *日本建築學會論文報告集*, 第283号, 1979, pp.11~16.
29. Shigeyoshi Nagataki, Hiroyuki Ohga, and Eun Kyum Kim, "Effect of Curing Conditions on the Carbonation of Concrete with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement in Long-Term Tests," *ACI SP91-24*, 1988, pp.521~540.
30. 윤인석, "중성화와 염소이온의 복합열화를 고려한 콘크리트 구조물의 내구수명예측," *박사학위논문*, 서울시립대학교, 2003.

요 약

도심지 환경에서 콘크리트 구조물의 열화를 일으키는 주요한 요인 중 하나는 중성화이다. 최근, 대기 중 CO₂농도와 온도가 크게 증가하는 지구 온난화 현상으로 인하여 중성화 열화환경도 더욱 심각해지고 있다.

본 연구에서는 IPCC에서 제안한 지구규모 대기환경 변화 시나리오인 IS92a를 토대로 향후 100년까지 대기 중 CO₂ 농도와 온도 상승율을 예측하였다. 질량보존의 법칙과 Fick의 1법칙을 기초방정식으로 하여 시간경과에 따른 콘크리트의 수화도, 콘크리트 열화에 미치는 각종 주요변수 등의 재료물성을 반영하였다. 또한, 서울시의 미세기후조건을 반영하기 위하여 추계학적 및 통계학적 기법을 도입하여 중성화로 인한 내구수명예측 기법에 반영하였다.

연구결과에 의하면 물-시멘트비가 큰 콘크리트에서 CO₂ 농도증가로 인한 중성화 진행속도가 뚜렷히 빨라지는 것으로 나타났다. 그러나 물-시멘트비 55% 이하에서 충분히 양생된 보통 포틀랜드 콘크리트의 조건에서 중성화에 대한 우려가 높지 않을 것으로 생각된다.

핵심용어 : 열화, 콘크리트의 중성화, 지구 온난화 현상, 내구수명예측, 미세기후조건