

# 서울시내 콘크리트 구조물의 중성화 진행 속도의 확률분석

이 창 수\* · 윤 인 석\*\* · 김 용 혁\*\*\*

## Probability Analysis on Carbonation Rate of Concrete Structures in Seoul Metropolitan Area

Chang-Soo Lee\* · In-Seok Yoon\*\* · Yong-Hyuk Kim\*\*\*

**요약** : 본 연구에서는 중성화의 진행성을 알아보기 위하여 서울시내의 콘크리트 구조물을 대상으로 현장조사를 실시하여 얻어진 자료를 기초로 확률분석을 통하여 중성화 속도 계수 및 CO<sub>2</sub> 확산 계수를 구하였고, 이를 바탕으로 중성화 진행성을 예측하였다. CO<sub>2</sub> 확산 계수를 이용한 중성화 예측에서는 물-시멘트비를 변수로 하여 중성화 진행성을 예측하였다. 콘크리트 구조물의 현장조사는 무작위 추출방법에 의하여 교량 140개소, 고가차도 39개소를 선정하고 교대, 교각, 슬래브 등 각 부위에 대한 현장조사를 실시하였다. 중성화 모델은 정상흐름 상태에서 유체의 흐름을 표현하기 위해 Fick의 제1법칙을 중성화에 대한 시간 모델로 변형하여 중성화 속도 계수 및 CO<sub>2</sub> 확산 계수의 값들을 구하였다. 이를 확률분석하여 비초과 확률 50%~90%에 대한 값들을 선정하였으며 재차 회귀분석하여 시간에 따른 중성화 깊이를 예측하였다. 중성화 속도 계수와 CO<sub>2</sub> 확산 계수는 표준 범위에 들어 본 연구에서 얻어진 값들이 적절함을 확인하였다. 확률분석을 통해 중성화 속도 계수를 구하여 중성화 진행성을 예측한 결과는 50년 경과시 비초과확률 50%~90% 범위에서 최대 중성화 깊이는 최소 28.84 mm에서 최대 51.79 mm로 나타났다. CO<sub>2</sub> 확산 계수를 물-시멘트비를 고려하여 중성화 진행성을 예측한 결과에서는 물-시멘트비에 따라 비초과확률 50%~90% 범위에서 최소 27.63 mm에서 최대 45.13 mm로 나타났다. 염소이온 적재 여하에 따라서는 최소피복두께를 경년 50년에서 염소이온 비적재환경에서는 최소 38.84 mm에서 최대 61.79 mm, 염소이온 적재환경에서는 최소 53.84 mm에서 최대 76.79 mm의 최소피복두께가 요구되었다.

**주제어** : 현장조사, 확률분석, 중성화속도계수, CO<sub>2</sub> 확산계수

**ABSTRACT** : The CO<sub>2</sub> concentration and temperature at atmosphere is sharply increased with time due to global warming phenomena. The most common deterioration cause of concrete structures in urban environment is carbonation. Thus, in this study, the in-situ investigation of carbonation of concrete structures is accomplished. The carbonation progress of concrete structures is estimated and compared with other studies. The carbonation rate coefficient  $K$  and CO<sub>2</sub> diffusion coefficient  $D_{CO_2}$  are calculated through the probability analysis. From these results, the maximum carbonation depth on carbonation rate coefficient is 51.79 mm in 50 years and carbonation progress of concrete structures is increased by high chloride concentration. In

\* 서울시립대학교 토목공학과 교수(Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul)

\*\* 서울시립대학교 토목공학과 연구원(Researcher, Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul)

\*\*\* 서울시립대학교 토목공학과 석사과정(Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul)

comparative analysis with carbonation progress of other countries, UK is slowest than any other countries and the others are similar to South Korea. The maximum carbonation depths on CO<sub>2</sub> diffusion coefficient are 41.51 mm, 43.36 mm, 45.13 mm with 0.55, 0.60, 0.65 water-cement ratio.

**Key Words** : in-situ investigation, probability analysis, carbonation rate coefficient, CO<sub>2</sub> diffusion coefficient

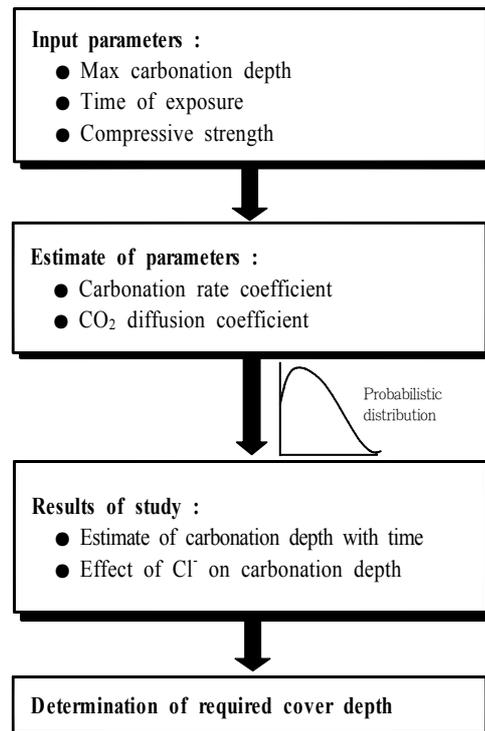
## I. 서론

지구 온난화 현상으로 인한 지표기온의 상승 및 산성비의 증가로 대도시에 위치한 콘크리트 구조물은 이전보다 열악한 환경에 직면해 있다. 따라서 지구 온난화 현상이 뚜렷한 대도시의 콘크리트 구조물의 열화는 심각할 것으로 우려되고 있어 설계수명 동안 콘크리트 구조물의 내구성을 확보하는 것이 주요한 기술적 과제가 되고 있다.

최근 서울 시내에 위치한 콘크리트 구조물의 열화상태 조사에 대한 연구에 의하면 철근이 부식된 구조물에서 약 23%가 중성화가 원인인 것으로 나타났으며 이에 대한 대책마련이 시급한 상황이다(서울특별시, 1998).

그래서 본 연구에서는 서울 시내에 위치한 콘크리트 구조물을 대상으로 현장조사를 실시하여 확률분석을 행하였으며 중성화 속도 계수 및 CO<sub>2</sub> 확산계수에 대한 비초과확률을 각각 도출하여 중성화 깊이의 예측에 반영하였다. 본 연구의 결과는 향후 서울 시내 콘크리트 구조물의 유지관리 정책의 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구의 흐름도는 <그림 1>과 같다.

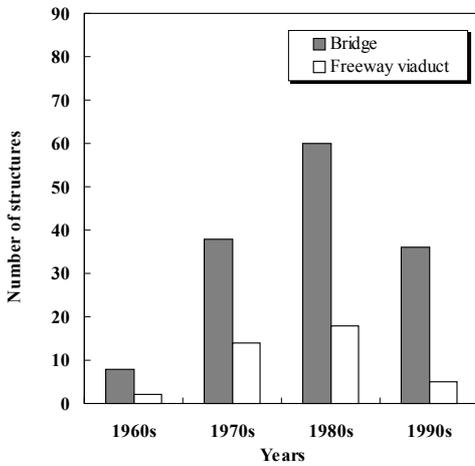


<그림 1> 확률분석의 흐름도

## II. 현장조사방법 및 지배방정식

### 1. 대상구조물의 선정 및 조사방법

무작위 추출방법에 의하여 교량 14개소, 고가차도 39개소를 각각 선정하고 교대, 교각, 슬래브의 각 부위에 대한 현장조사를 수행하였다.



〈그림 2〉 경년별 구조물의 분포

대상구조물의 각 부위에 대해 코어를 채취하여 압축강도를 측정하였고 중성화 깊이는 천공된 콘크리트 표면에 1% 페놀프탈레인-알콜 용액을 분무하여 무착색깊이로 간주하였다.

한편, 염화물이 중성화에 미치는 영향을 알아보기 위해 콘크리트 시료를 채취하여 수용성 염화물량(콘크리트 중량 대비)을 측정하였다. 조사대상 구조물의 경년별 현황은 〈그림 2〉와 같다.

## 2. 중성화 진행에 대한 지배 방정식

정상흐름 상태에서 유체의 흐름을 표현하기 위해 Fick의 제 1 법칙에 의한 콘크리트 구조물의 중성화 진행속도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\chi = \frac{2D}{a} (C_1 - C_2)t \quad (1)$$

여기서,

$\chi$  : 완전 중성화된 깊이 (cm),

$C_1$  : 외부의  $CO_2$  농도 ( $g/cm^3$ ),

$C_2$  : 중성화 경계면의  $CO_2$  농도 ( $g/cm^3$ ),

$D$  : 확산계수 ( $cm^2/sec$ ),

$t$  : 시간 (sec),

$a$  : 단위 부피당 콘크리트를 완전 중성화시키기 위한  $CO_2$  소모량 ( $g/cm^3$ ).

상기 식에서  $CO_2$ 의 확산이 이루어지는 중성화 경계면을 중성화 깊이( $\chi_c$ )로, 외부  $CO_2$  농도를 대기 중  $CO_2$  농도로 각각 가정하면 중성화에 대한 시간 모델은 식 (2)와 같다. 여기서 대기 중  $CO_2$  농도는 기존의 연구결과를 참고로 하여  $6.8 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 으로 가정하였다(이창수·윤인석, 2003).

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

여기서,

$\chi_c$  : 재령  $t$  (s)에서의 중성화 깊이 (cm),

$D_{CO_2}$  :  $CO_2$  확산계수 ( $cm^2/sec$ ),

$C_{ex}$  : 대기 중  $CO_2$  농도 ( $g/cm^3$ ),

$a$  :  $CO_2$  흡착량 ( $g/cm^3$ ).

그런데 단위체적당 콘크리트를 완전 중성화시키는데 소모되는  $CO_2$ 량  $a$ 는 시멘트의 종류, 화학적 성분, 배합조건 및 경년 등에 의존된다. 특히, 중성화의 화학적 반응성을 고려해 볼 때 이에 대한 지배인자는  $CaO$ 와  $CO_2$ 량이다. 그래서  $CO_2$  흡착량은 단위수량을  $190 \text{ kg/m}^3$ 으로 가정한 상태에서 수화도와 시멘트 내의  $CaO$ 량과의 관계에 의하여 식 (3)에 의하여 산출하였다.

또한, 시멘트 내의 CaO량은 <표 1>의 보통포틀랜드시멘트의 화학적 조성을 기초로 하였다.

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

여기서,

C : 단위시멘트량 (kg/m<sup>3</sup>),

CaO : 시멘트 내의 CaO 량

$\alpha_H$  : 시멘트의 수화도,

M : 물중량 (CO<sub>2</sub> : 44g/M, CaO : 56g/M).

<표 1> 보통시멘트의 화학적 성분

Chemical composition	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
Proportion (percentage)	65	21.1	6.2	2.9	2.0

1) 물-시멘트비 및 시멘트의 수화도

콘크리트의 28일 압축강도는 코어강도를 측정한 후, 보통시멘트를 사용하였다는 가정조건에서 CEB-FIP의 강도발현식인 식 (4)와 식 (5)로 물-시멘트비를 추정하였다(CEB-FIP, 1999).

$$f_{cm}(t) = \exp s \left\{ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \right\} \cdot f_{cm} \quad (4)$$

여기서,

$f_{cm}(t)$  : 재령 t일의 평균 압축강도 (MPa),

$f_{cm}$  : 재령 28일 압축강도 (MPa),

t : 콘크리트의 재령(days),

s : 시멘트종류에 따른 계수 (OPC :0.25).

$$W/C = \frac{27}{f_{28} + 13.5} \quad (5)$$

여기서,

$f_{28}$  : 재령 28일 압축강도 (MPa).

한편, 시멘트의 수화도를 구하기 위해 Avrami 형태의 식 (6)을 이용하여 보통포틀랜드시멘트의 화합물에 대한 수화도를 각각 구하였으며 이때 시멘트의 화합물에 따른 상수는 <표 2>를 참고로 하였다. <표 3>은 시멘트의 수화도를 계산하는데 이용된 보통포틀랜드시멘트의 화합물 조성이다.

$$\alpha_n = 1 - \exp \left\{ -\alpha_i (t - \beta_i)^{\gamma_i} \right\} \quad (6)$$

여기서,

$\alpha_i$  : 화합물의 수화도

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  : 화합물에 따른 상수

<표 2> 화합물에 따른 상수

constant compound	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$
C <sub>3</sub> S	0.25	0.90	0.70
C <sub>2</sub> S	0.46	0	0.12
C <sub>3</sub> A	0.28	0.90	0.77
C <sub>4</sub> AF	0.26	0.90	0.55

<표 3> 보통시멘트의 광물학적 조성

Compound composition	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Proportion (%)	53.7	19.9	11.4	8.8

2) 중성화 속도 계수의 산정

식 (2)는 중성화 속도 계수 K를 변수로 하여 식 (7)과 같은  $\sqrt{t}$  법칙으로 알려진 단순방정식으로 표현된다.

$$\chi_c = K \cdot t^n, \quad n = 0.5 \quad (7)$$

중성화 속도 계수를 평균값( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )를 이용한 식 (8)의 Gaussian 확률밀도함수를 이용하여 확률분석을 하였다.

$$P(\chi) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\chi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

### 3) CO<sub>2</sub> 확산계수의 산정

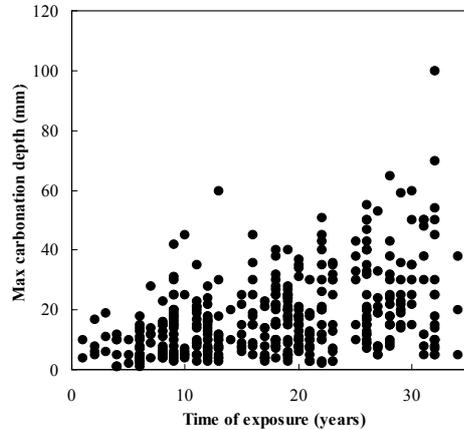
CO<sub>2</sub> 확산계수의 산정도 현장조사를 통해 얻은 측정치를 토대로 물-시멘트비, 시멘트의 수화도, CO<sub>2</sub> 흡착량을 구한 후 CO<sub>2</sub> 확산계수를 역산하여 구하였다. 그러나 CO<sub>2</sub> 확산계수의 산정과정에서도 물-시멘트비의 값이 시공시의 정확한 자료가 아닌 추정식에 의해 얻어진 값들이며 콘크리트의 수화 반응진행, 중성화로 인한 세공량 감소 등의 이유로 CO<sub>2</sub> 확산계수의 값은 불확실성을 가지므로 식 (8)의 Gaussian 확률밀도함수를 이용하여 CO<sub>2</sub> 확산계수의 확률밀도함수를 구하였다.

## III. 연구결과 및 분석

### 1. 중성화 속도 계수의 확률분석

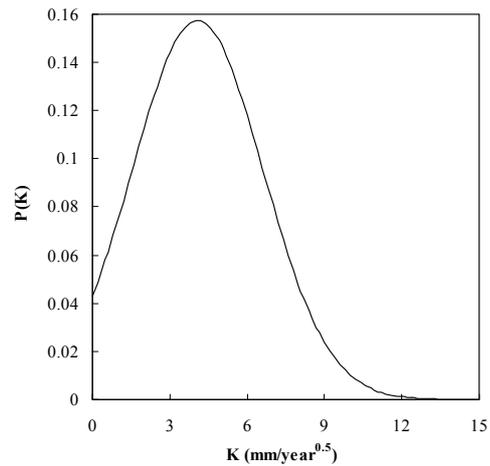
상기 식에 현장조사에서 얻어진 구조물의 경년과 최대 중성화 깊이의 조사 결과는 <그림 3>과 같다. 대체적으로 경년이 증가함에 따라 최대 및 평균 중성화 깊이도 증가하는 경향을 보였으나 일부는 산발적인 분포를 보여 적합성이 높지 않았는데 이는 배합 및 양생조건은 물론 미세기후 노출정도 등에 따라 중성화 속

도가 매우 상이하기 때문인 것으로 사료된다.



<그림 3> 경년별 중성화 깊이

중성화 속도 계수의 확률분포는 <그림 4>와 같다. 중성화 속도 계수의 평균은 4.078 mm/year<sup>0.5</sup>이고, 표준편차는 2.533 mm/year<sup>0.5</sup>이다. 중성화 속도 계수에 의한 콘크리트의 품질기준 (Miguel, et at., 2001)은 <표 4>와 같으며 본 연구결과가 대체적으로 평균 이상의 범위에 내재되어 있어 적절한 값을 가진다고 판단 된다.

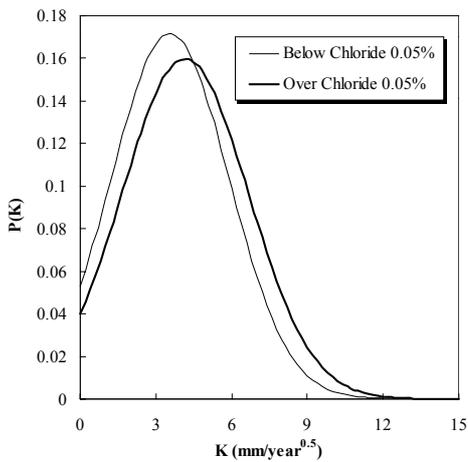


<그림 4> 중성화 속도계수 K의 분포

<표 4> 중성화 속도계수 K값의 판단기준

Con'c quality	K (mm/ $\sqrt{year}$ )	No. structures (%)
Poor	>10	3 (1.66%)
Average	5 ~ 10	54 (29.83%)
Good	<5	124 (68.51%)

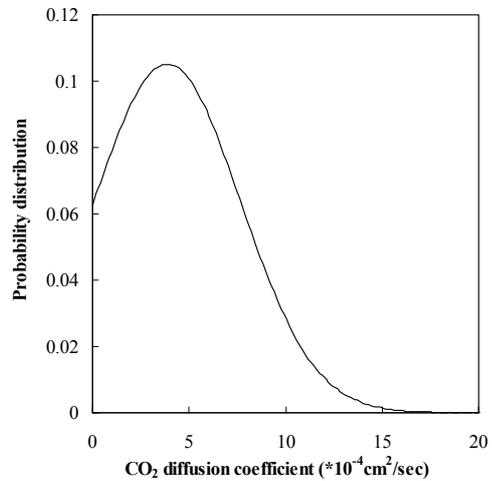
한편, 콘크리트 중의 염화물은 중성화를 촉진시키는 요인이 되는데 즉, 시멘트 중의 C<sub>3</sub>A가 시멘트량의 0.4% 수준까지 염화물과 결합하여 프리텔염이 생성되고 결국 고상으로 존재하는 수산화칼슘이 용출되어 콘크리트 중의 수산기 이온의 농도가 상승하는 것이 주요 요인이다. 이에 실구조물에서 염화물이 중성화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 수용성 염화물 농도가 0.05% 초과 및 비초과된 콘크리트로 구분하여 중성화 깊이의 확률밀도를 보인 것이 <그림 5>이다. 여기서 염화물 농도 0.05%를 초과한 콘크리트의 경우에서 중성화 속도계수가 17% 확률밀도가 큰 것으로 나타나 염소이온이 중성화의 진행을 촉진시키는 것이 확인되었다.



<그림 5> 염소이온이 중성화에 미치는 영향

## 2. CO<sub>2</sub> 확산 계수의 확률분석

CO<sub>2</sub> 확산계수를 확률분석을 통해 비초과확률 50%~90%의 수준에 해당하는 각각의 CO<sub>2</sub> 확산계수의 값을 결정하여 <그림 6>에 제시하였다. 여기서 CO<sub>2</sub> 확산계수의 평균은  $3.87 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec, 표준편차는  $3.79 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec이다. 이를 <표 5>와 비교하면 각각의 비초과 확률에 대한 CO<sub>2</sub> 확산계수는 모두 낮은 확산계수를 갖는 것으로 평가되었으며 보편적인 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub>의 확산계수의 범위  $0.5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/sec을 만족하는 것으로 나타났다(CEB-FIP, 1999). 따라서 본 연구에서 산출한 비초과확률에 대한 CO<sub>2</sub> 확산계수는 비교적 적절한 것으로 판단된다.



<그림 6> CO<sub>2</sub> 확산계수 D<sub>CO<sub>2</sub></sub>의 확률분포

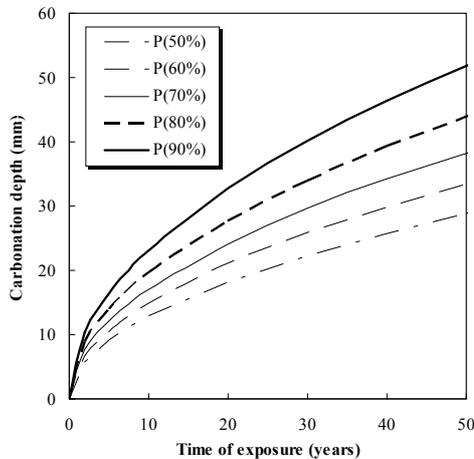
<표 5> CO<sub>2</sub> 확산계수 D<sub>CO<sub>2</sub></sub>값의 판단기준

Con'c quality	D <sub>CO<sub>2</sub></sub> ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)	No. structures (%)
Poor	> 50	0 (0%)
Average	50 ~ 5	62 (34.25%)
Good	< 5	119 (65.75%)

### 3. 중성화 진행의 예측

#### 1) 중성화 속도 계수에 의한 중성화 예측

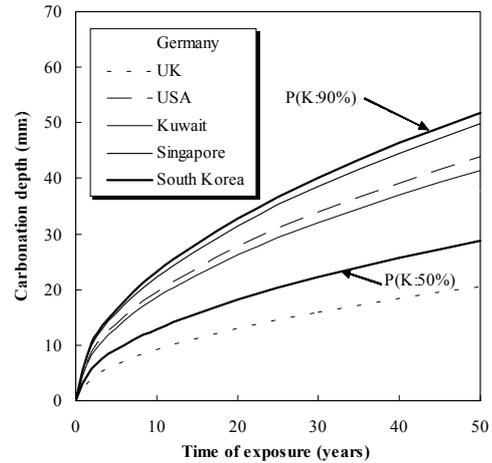
경년에 따른 중성화 깊이를 예측하기 위해서 앞서 도출한 Gaussian 확률밀도분포에서 비초과확률 50%~90%에 해당하는 중성화 속도 계수 및 CO<sub>2</sub> 확산계수를 구하였고 물-시멘트비에 따른 CO<sub>2</sub> 침투성의 변화를 고려하여 중성화 진행성을 예측하였다. 중성화 속도 계수를 이용하여 시간에 따른 최대 중성화 깊이를 예측한 결과는 <그림 7>과 같다. 본 결과에 의하면 90%의 확률을 갖는 조건에서 일반적인 토목구조물의 내구수명인 50년이 경과하였을 때 최대 중성화 깊이는 51.79 mm까지 도달하는 것으로 예측되었다.



<그림 7> 경년별 중성화 깊이의 진행 확률

<그림 8>은 신뢰도 50%, 90%에 대한 국내 환경에서의 중성화 진행성을 예측한 결과와 USA(Bawesa, 1987), UK(Brown, 1991), Germany (Currie, 1986), Singapore(Roy, et al., 1996), Kuwait (Shalaby, 1985) 등의 중성화 속도 계수에 대한

연구자료를 비교한 것이다. 영국의 경우 중성화 속도가 가장 느리게 나타났으며 그 외의 다른 나라는 국내의 50% 확률을 초과하는 수준으로 진행되었다. 그러나 싱가포르의 경우 국내의 90% 확률수준과 비슷한 수준으로 중성화가 진행되고 있는 것을 알 수 있다.



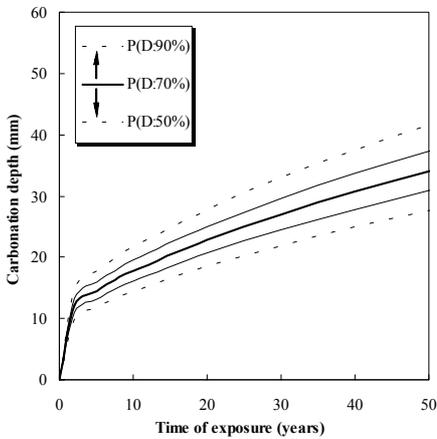
<그림 8> 외국과의 비교 검토

#### 2) CO<sub>2</sub> 확산 계수에 의한 중성화 예측

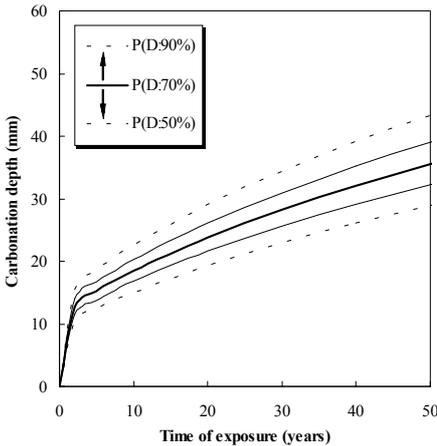
물-시멘트비에 대한 시멘트의 수화도  $\alpha_H$ , CO<sub>2</sub> 흡착량  $a$ 를 계산한 후, 비초과확률 50%~90%에 대해 구한 CO<sub>2</sub> 확산계수를 이용하여 시간에 따른 중성화 깊이를 예측하였다. 최대 중성화 깊이에 대해 구한 각각의 CO<sub>2</sub> 확산계수와 관련하여 물-시멘트비에 따른 중성화 깊이의 예측은 <그림 9>~<그림 11>과 같다.

물-시멘트비가 0.55, 0.60, 0.65일 때 비초과 확률 50%~90% 범위에서 중성화 깊이는 각각 최소 27.63 mm, 28.86 mm, 30.04 mm이며 최대 41.51 mm, 43.36 mm, 45.13 mm의 결과를 보였다. 기존의 실내 실험 연구(이창수 외, 2003)에 의하면 물-시멘트비 0.55의 조건에서 충분히 양

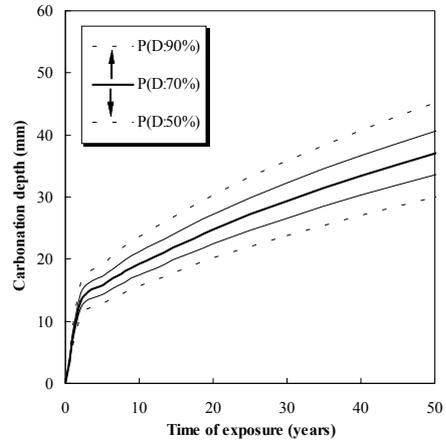
생된 콘크리트는 100년 경과 시 최대 중성화 깊이가 27 mm로 예측되어 실구조물을 대상으로 한 본 연구의 확률분석에 의한 예측결과보다 중성화 속도가 느린 것으로 나타났다. 이는 시공시에 충분한 양생조건을 취하지 못하였거나 재료 및 구조상 발생한 균열, 지나치게 높은 물-시멘트비 등으로 본 연구의 중성화 진행 예측 결과가 빠르게 나타난 것이라 판단된다.



〈그림 9〉 물-시멘트비 55%인 콘크리트의 중성화 깊이의 예측결과



〈그림 10〉 물-시멘트비 60%인 콘크리트의 중성화 깊이의 예측결과

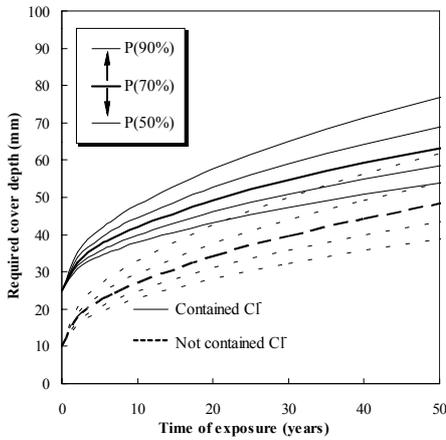


〈그림 11〉 물-시멘트비 65%인 콘크리트의 중성화 깊이의 예측결과

### 3) 내구성 확보를 위한 최소 피복 두께

이상의 결과를 종합하여 서울시 콘크리트 구조물의 중성화에 대한 최소 피복 두께를 제안하였다. 그런데 서울시내의 콘크리트 구조물에서 염화물의 외부침투 요인은 겨울철의 용빙제 살포와 시공시 해사 혹은 혼화제 등에 의한 것이 보편적이며 따라서 염화물 도입이 초기시공시 유입되었을 가능성에 대비하여 최소 피복두께가 결정되어야 한다.

실내실험에서 행한 문헌적 보고에 의하면 염화물이 함유되지 않은 콘크리트는 8 mm, 염화물이 함유된 콘크리트는 20 mm의 비중성화 깊이(피복두께 - 중성화 깊이)가 잔존할 때 부식이 시작되는 것으로 보고되고 있는데 일본 콘크리트 표준시방서(일본토목학회, 1999)에서는 중성화로 인한 콘크리트 구조물의 안전성을 비중성화 깊이로 판단하고 있으며 염화물 비적재환경에서는 10 mm, 염화물 적재환경에서는 25 mm의 비중성화 깊이를 보장할 것을 제안하고 있다.



〈그림 12〉 경년별 요구되는 피복두께의 제안치

따라서, 본 연구에서는 중성화 속도 계수의 신뢰도 50%~90%에 대해 예측한 최대중성화 깊이를 토대로 일본 콘크리트 표준시방서에서 제안된 비중성화 깊이 규정치를 반영하여 중성화에 대한 최소피복두께를 〈그림 12〉와 같이 제안하였다.

**IV. 결론**

본 연구는 서울시내에 위치한 콘크리트 구조물의 중성화 진행에 대한 현장조사를 실시하여 확률분석 결과를 토대로 중성화 속도계수 및 CO<sub>2</sub> 확산계수를 도출하였다. 본 연구를 종합정리하면 다음과 같다.

- (1) 확률분석을 통해 중성화 속도 계수를 구하여 중성화 진행성을 예측한 결과, 중성화 깊이는 50년 경과시 비초과확률 50%~90% 범위에서 최소 28.84 mm에서 최대 51.79 mm로 나타났다.
- (2) 확률분석을 통해 구한 CO<sub>2</sub> 확산 계수를

물-시멘트비를 고려하여 중성화 진행성을 예측한 결과에서는 물-시멘트비에 따라 비초과확률 50%~90% 범위에서 최소 27.63 mm에서 최대 45.13 mm 수준이었다.

- (3) 염화물 농도 0.05%를 기준으로 중성화 속도계수는 17%의 차이를 보여 염화물이 중성화의 진행에 미치는 영향을 알 수 있었다.
- (4) 최소피복두께 산정한 결과에 의하면 경년 50년에서 염화물 비적재환경에서는 최소 38.84 mm 이상, 염화물 적재환경에서는 최소 53.84 mm 이상의 최소피복두께가 필요한 것으로 나타났다.

**참고문헌**

이창수·윤인석, 2003, "대기환경변화를 고려한 콘크리트 구조물의 중성화 예측", 「한국콘크리트학회 논문집」, No. 15, Vol. 4.

서울특별시, 1998, "콘크리트 구조물의 부식상태조사 및 방지대책", 서울특별시.

Bawesa, D., et. al., 1987, "Carbonation Characteristics of In-Situ Portland Cement and Fly Ash Concretes in Australia, England and the United States", *Fourth International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Singapore, pp. 694~702.

Brown, J. H., 1991, "The Carbonation Effect of Exposure and Concrete Quality: Field Survey Results from Some 400 Structures", *Durability of Building Materials and Components*, Baker, J. M.(EDS.), E & FN SPON, London, pp. 249~258.

CEB-FIP, 1999, *Structural Concrete-Textbook on Behaviour, Design and Performance*, Vol. 1, pp. 37~39.

Comite Euro-International du Beton, 1990, "CEB-FIP

- Model Code 1990", *Bulletin d'Information*, No. 195, 196, Lausanne.
- Currie, R. J., 1986, *Carbonation Depth in Structural-Quality Concrete: an Assessment of Evidence from Investigations of Structures and from Other Source*, Building Research Establishment(UK) Report.
- Miguel Angel Sanjun, Csar del Olmo, 2001, "Carbonation Resistance of One Industrial Mortar Used as a Concrete Coating", *Building and Environment*, Vol. 36, pp. 949~953.
- Roy, S. K., Beng, P. K., and Northwood, D. O., 1996, "The Carbonation of Concrete Structures in the Tropical Environment of Singapore and a Comparison with Published Data for Temperate Climates", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 177, pp. 293~300.
- Shalaby, H. M., 1985, "Case Studies of Corrosion and Deterioration of Reinforced Concrete Structures in the State of Kuwait", *Proceeding of First International Conference on Deterioration and Repair of Concrete in the Arabian Gulf*, Bahrain, Oct.
- 日本土木學會, 1999, 「コンクリート標準視方書(施工編) - 耐久性照査型」.
- 원 고 접 수 일 : 2004년 2월 25일  
최종원고채택일 : 2004년 3월 19일