

콘크리트 중성화 진행의 예측

Prediction of Carbonation Process in Concrete

고 경택* 김성욱** 김도겸** 조명석* 송영철**
Koh, Kyung Taeg Kim, Sung Wook, Kim, Do Gyeum Cho, Myung Sug Song, Young Chul

ABSTRACT

The carbonation process is affected both by the concrete material properties such as W/C ratio, types of cement and aggregates, admixture characteristics and the environmental factors such as CO₂ concentration, temperature, humidity. Based on results of preliminary research on carbonation, this study is to propose a carbonation prediction model by taking into account of CO₂ concentration and W/C ratio among major factors affecting the carbonation process.

1. 서론

본래 철근콘크리트구조물에 내장되어 있는 철근은 콘크리트의 높은 알칼리 농도에 의해서 보호되지만, 대기중 이산화탄소의 콘크리트 내부로의 확산에 의해서 서서히 중성화가 되어 철근에까지 도달하면 철근은 부식되어 콘크리트가 열화하기 시작한다. 대기중의 이산화탄소 농도는 환경조건에 따라서 다르지만, 일반적으로 실외에서는 0.035%전후이며, 실내에서는 0.1%전후이다.¹⁾ 그러나, 최근 석유, 석탄등 화석연료의 사용량이 증대되면서 이산화탄소 농도가 계속 증가되는 경향에 있다. 즉, 이런 추세로 이산화탄소 농도가 계속 증가된다면, 현재에서는 중성화에 대해서 별로 문제가 되지 않은 구조물일지라도 이산화탄소 농도의 증가에 의해서 차후에 문제가 될 수도 있다는 것을 의미한다. 따라서, 콘크리트의 경우 내구성 평가뿐만이 아니라 유지관리측면에 있어서도 중성화 진행을 미리 예측하여 시기 적절하게 대처하는 것이 매우 중요한 요소이다.

한편, 콘크리트구조물의 내구성능을 저하시키는 요인으로서 콘크리트 그 자체에 내재하고 있는 내적 열화요인과 구조물의 처한 환경 등에 의해서 결정되는 외적 열화요인으로 대별된다. 중성화속도에 미치는 배합 및 재료적 요인인 물시멘트비, 시멘트와 골재의 종류, 혼화재료의 종류와 첨가량, 양생조건에 대해서는 기존연구에 의해서 규명되어지고 있으며, 이런 요인을 포함한 중성화속도식도 여러 연구자에 의해서 제안되고 있다.^{2), 3)} 그러나, 이산화탄소 농도, 온도, 습도와 같은 외적요인을 고려한 중성화 진행 예측모델식에 대해서는 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다.

이상의 배경으로부터, 본 연구에서는 중성화의 수명예측 모델 구성의 제 1단계로서, 기존의 중성화에 관한 실험결과를 토대로 이산화탄소 농도와 물시멘트비를 고려할 수 있는 콘크리트 중성화 진행의 예측 모델식을 구성하고자 한다.

2. 중성화 수명예측 모델 구성

중성화 깊이는 경과시간의 평방근에 비례하며 중성화속도식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원
*** 정회원, 전력연구원 원자력연구실 선임연구원
**** 정회원, 전력연구원 원자력연구실 책임연구원

$$C = A\sqrt{t} \quad (1)$$

여기서, C는 중성화 깊이, t는 경과시간, A는 중성화속도계수이다. 식(1)에서 A는 중성화속도에 미치는 각종 요인에 대해서 실험적 또는 경험적으로 구해지는 계수이다.

2.1 중성화속도에 미치는 이산화탄소 농도의 영향

식(1)과 같이 기존의 중성화속도식은 이산화탄소 농도가 일정하다고 가정하여 구성되었기 때문에 일반적으로 이산화탄소 농도를 고려할 수 있는 항이 없다. 따라서, 콘크리트 중성화 진행을 정확히 예측하기 위해서는 이산화탄소 농도를 고려할 수 있는 중성화속도식을 구성하는 것이 중요하다.

임의의 농도의 이산화탄소가 정상상태에서 콘크리트 중에 확산에 의해서 중성화가 발생한다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다.⁴⁾

$$\frac{dX}{Dt} = k \cdot \frac{C}{X} \quad (2)$$

여기서, X는 중성화 깊이, t는 경과시간, k는 비례정수, C는 이산화탄소 농도이다. 식(2)을 적분하여 미분방정식을 풀고, 시간 0일 때(t=0), 중성화 깊이가 0(X=0)으로 놓으면 다음 식으로 표현된다.

$$X = k\sqrt{C \cdot t} \quad (3)$$

앞에서도 언급했지만, 종래의 중성화속도식은 이산화탄소 농도를 고려하는 항이 포함되어 있지 않지만, 식(3)은 이산화탄소 농도를 고려할 수 있는 항이 포함되어 있다. 또, 식(3)에서 C가 정수라면 식(1)이 얻어진다.

본 연구에서는 중성화속도에 미치는 이산화탄소 농도의 영향에 대해서 비교적 상세하게 이루어진 高田 등의 연구 결과³⁾를 토대로 하여 이산화탄소 농도를 고려할 수 있는 중성화속도식을 구성하고자 한다. 高田 등의 연구에서는 물시멘트비 50%, 60%, 70%의 3종류 콘크리트에 대해서 온도 20℃, 상대습도 55%를 일정하게 유지된 조건하에서 이산화탄소 농도를 0.07%, 1.0%, 10% 3종류로 하여 중성화 촉진시험을 실시하였다. 여기서, 이산화탄소 농도 0.07%는 실내 환경하에서의 이산화탄소 농도를 상정한 것이다. 이 시험에서 얻어진 결과에 대해서 이산화탄소 농도 0.07%를 1로 놓고 비례정수 k를 구한 결과가 그림 1이다. 그 결과, k값은 일정하지 않고 이산화탄소 농도가 높을수록 작게 되는 경향을 나타내고 있다. 식(3)에서 k값을 이산화탄소 농도의 함수로서 이산화탄소 농도가 0.07%일 때 1이 되도록 하면, 다음과 같이 이산화탄소 농도의 요인을 가미한 중성화속도식이 얻어진다.

$$X = (0.747 - 0.226 \log C) A \sqrt{(C/0.07) \cdot t} = (2.823 - 0.854 \log C) A \sqrt{C \cdot t} \quad (4)$$

그림 2는 중성화에 관한 기존연구의 촉진시험결과에 대해서 물시멘트별로 정리한 결과를 나타내었다. 조사한 기존연구의 문헌 수는 15개이다. 그림 3은 그림 2에 대해서 이산화탄소 농도를 고려하기 위해서 식(4)을 적용한 결과이다. 그 결과 그림 2에서는 중성화속도계수가 폭 넓게 분포하고 있으나,

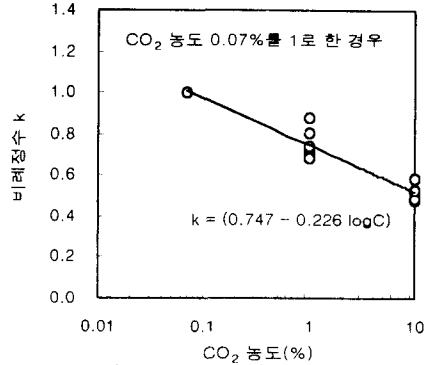


그림 1 CO₂ 농도와 k와의 관계

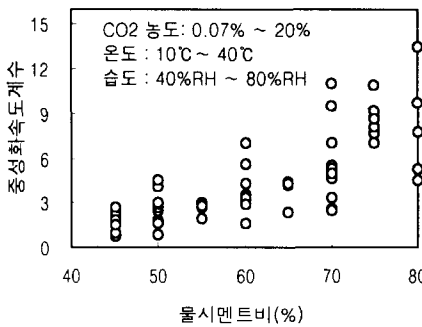


그림 2 기존의 중성화 촉진시험 결과

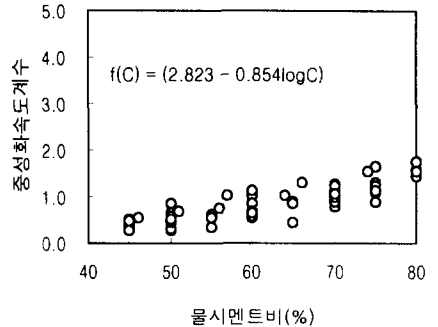


그림 3 CO₂ 농도를 고려한 결과

이산화탄소 농도를 고려한 그림 3의 중성화속도 계수는 그에 비해 약 7배까지 작아지고 있다.

2.2 중성화속도에 미치는 물시멘트의 영향

그림 4는 그림 3의 결과에 대해서 물시멘트비가 중성화속도에 미치는 영향을 고려하기 위해서 1차 식으로 근사한 결과이다. 이것은 중성화속도가 물시멘트비에 대해서 거의 직선적으로 변한다고 보고되고 있기 때문이다.

이상므로, 중성화속도에 미치는 이산화탄소 농도와 물시멘트비의 영향을 포함한 중성화 진행 예측식을 나타내면 다음과 같다.

$$X = (2.823 - 0.854 \log C) \times (0.0303 \frac{W}{C} - 1.0187) \times \sqrt{C \cdot t} \quad (5)$$

2.3 이산화탄소 농도의 예측

중성화 진행을 예측하기 위해서는 이산화탄소 농도를 예측하는 것도 중요하다. 福島¹⁾는 미국해양 기상국 하와이 측정소(북위 19.5°, 해발3401m)에서 측정한 이산화탄소 농도의 데이터를 토대로 대기중의 이산화탄소 농도의 경시변화의 예측을 다음과 같이 하였다.

$$C(t) = 14.4128 \exp(0.00357t) + 1.9946 \sin(-1.9867 + 0.553598t) + 300.7913 \quad (6)$$

(이 식은 1958년 이후를 원점으로 한다. t[month])

그림 5에 식(6)을 이용하여 이산화탄소 농도의 경시변화를 예측한 결과를 나타내었다. 식(6)에서 예측한 이산화탄소 농도를 식(5)에 대입하면 연도별로 이산화탄소 농도가 증가되는 영향을 고려한 중성화 깊이를 예측할 수 있다.

3. 수명예측식의 적용

3.1 이산화탄소 농도가 일정한 경우

이산화탄소 농도가 일정하다고 가정하여, 본 연구에서 구성한 중성화 진행 예측식(5)을 적용한 결과를 그림 6에 나타내었다. 여기서, 이산화탄소의 농도 0.07%는 실내환경, 0.035%는 실외환경을 상정한 것이다.

표 1에는 중성화 깊이가 철근 피복두께 20mm, 50mm를 초과하는 시점을 실내외, 물시멘트비별로

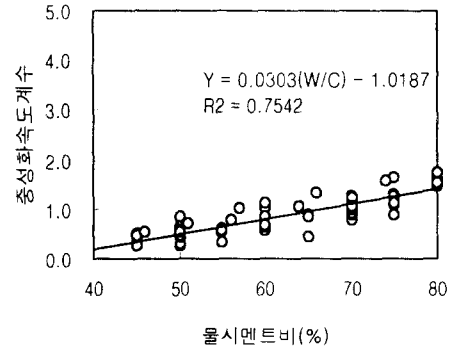


그림 4 CO₂ 농도와 W/C를 고려한 결과

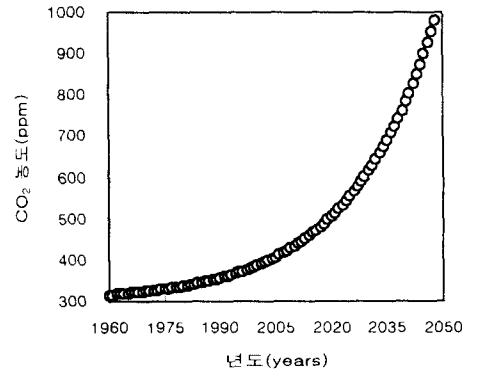


그림 5 연도별 CO₂ 농도 예측

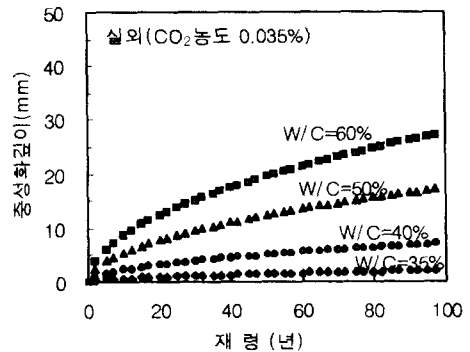
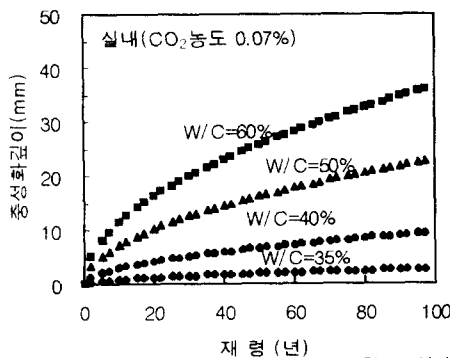


그림 6 실내외 별 중성화깊이 예측

추정한 결과를 나타내었다. 그 결과, 실내는 실외보다 약 1.8배정도 중성화 진행이 촉진되고 있으며, 이것은 依田의 연구결과⁶⁾와 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다.

표 1 철근피복두께 20mm, 50mm를 초과하는 시점(년)의 예측결과

철근피복 두께 (mm)	실내(CO ₂ 농도 0.07%)				실외 (CO ₂ 농도 0.035%)			
	물시멘트비 (%)				물시멘트비 (%)			
	60	50	40	35	60	50	40	35
20	30	75	435	5,000	55	135	780	8,500
50	190	470	2,750	32,000	330	830	4,800	55,000

3.2 이산화탄소 농도가 증가되는 경우

이산화탄소 농도가 증가되는 경우를 상정하여 경시변화에 따른 물시멘트비를 고려한 중성화 깊이를 예측하기 위해서, 본 연구에서 구성한 중성화 진행 예측식(5)와 福島가 제안한 이산화탄소 농도를 예측하는 식(6)을 적용한 결과를 그림 7에 나타내었다. 물시멘트비가 높을수록 중성화 진행이 빨라지는 경향을 하고 있으며, 물시멘트비 33%이하정도부터는 중성화 진행이 되지 않은 결과를 얻었다. 이런 결과는 기존의 중성화에 관한 연구^{1), 2)}와 일치하며, 본 연구에서 구성한 중성화 진행 예측식은 이용 가능성이 높다는 것을 나타내는 결과라고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 중성화속도에 미치는 영향 중에 이산화탄소 농도와 물시멘트비를 고려한 중성화 진행 예측식을 기존의 중성화시험의 결과를 토대로 구성하였다. 그리고, 본 연구에서 구성한 중성화 진행 예측식을 적용해 본 결과, 기존의 중성화에 관한 연구와 거의 일치하는 결과를 얻었다.

향후, 이산화탄소 농도이외의 온도, 습도를 고려할 수 있는 중성화 진행 예측식의 구성과, 또한 중성화 촉진시험을 실시하여, 구성된 중성화 진행 예측식의 타당성을 입증하는 연구를 수행할 예정이다.

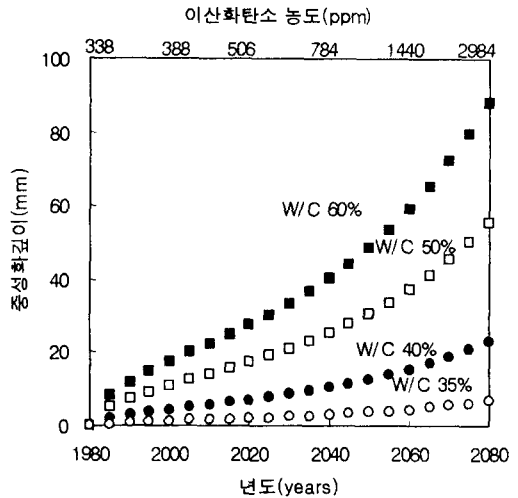


그림 7 연도별 중성화깊이 예측

참고문헌

- (1) 福島, “鉄筋コンクリート造建築物の寿命 -中性化と鉄筋の腐食進行を基礎として-”, 技報堂出版, 1990
- (2) 岸谷, 西沢, “コンクリート構造物の耐久性シリーズ -中性化-”, 技報堂出版, 1988(1)
- (3) Hamada, M., “Neutralization (Carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel”, 5th Int. Symposium on the Chemical of cement. Tokyo, 1968
- (4) 魚本, 河合, “アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化予測に関する基礎的研究”, 콘크리트構造물의壽命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集, 1988, 4
- (5) 高田, 魚本, “炭酸가스濃도가콘크리트의中性化に及ぼす影響”, 콘크리트의炭酸化に関するシンポジウム論文集, 콘크리트工学協會, 1993
- (6) 依田, “高炉セメントコンクリートの中性化”, セメント・コンクリート, No. 429, 1982, 11