

원전 콘크리트 구조물의 중성화 진행 예측 모델 개발

Development of Carbonation Process Prediction Model for Concrete Structures of N.P.P.

조명석*, 송영철*, 김성욱**, 김도겸**, 고경택**

* 한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 106-16

** 한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

요 지

중성화 진행은 물-시멘트비, 시멘트, 골재, 혼화재료와 같은 콘크리트의 재료 특성과 이산화탄소 농도, 온도, 습도와 같은 환경적 요인에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 기존의 중성화에 관한 국내·외 실험결과를 토대로 물-시멘트비, 이산화탄소 농도, 온도, 습도를 고려 한 계수를 구하였으며, 원전 배합에 적합한 중성화 예측 모델식을 구성하기 위해 중성화 촉진 시험을 실시한 결과를 토대로 원전 배합에 맞는 시험계수를 구하였고, 또한 실제 원전 구조물의 적합성을 향상시키기 위해 현장 데이터를 토대로 현장계수를 구하여 원전 콘크리트 구조물의 중성화 진행 예측 모델식을 구성하였다.

Abstract

The carbonation process is affected both 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 study on carbonation, this study is to develop a carbonation prediction model by taking account of CO₂ concentration, temperature, humidity and W/C ratio among major factor affecting the carbonation process. And to constitute a model formula which correspond to the mix design of the nuclear power plant, test coefficient that correspond to the design of the nuclear power plant is obtained based on the results of accelerated carbonation test. Also a field coefficient which is obtained based on results of the field examination is included to improve the conformity of the actual structures of nuclear power plant.

1. 서 론

철근 콘크리트 내부의 철근은 콘크리트의 높은 알칼리 농도에 의해 보호되고 있지만, 대기중의 이산화탄소가 콘크리트 표면으로부터 확산되어 중성화가 진행된다. 그리고 중성화가 철근이 있는 내부까지 도달하면 철근이 부식되어 콘크리트의 내구성능 저하가 시작된다.^{1), 2)}

대기중의 이산화탄소 농도는 환경조건에 따라 다르지만, 일반적으로 실외에서는 0.035% 전후이며, 실내에서는 0.07% 전후이다. 그러나 최근 석유, 석탄 등 화석 연료의 사용량이 증대되면서 이

산화탄소 농도는 계속 증가되는 경향에 있다. 즉, 이런 추세로 이산화탄소 농도가 계속 증가된다면 현재에 있어서는 중성화에 대해 별로 문제가 되지 않은 구조물일지라도 향후에 문제가 발생할 수도 있다는 것을 의미한다. 따라서 콘크리트 중성화의 진행은 콘크리트 구조물의 내구성을 파악하는 데에 있어서 극히 중요하다. 또한 콘크리트 구조물의 유지관리 측면에 있어서도 중성화의 진행을 미리 예측하여 시기 적절하게 대처하는 것이 매우 중요하다.

한편 콘크리트 구조물의 성능을 저하시키는 내구성능 저하의 요인으로서 콘크리트 그 자체에 내재하고 있는 내적 내구성능 저하 요인과 구조물의 처한 환경 등에 의해서 결정되는 외적 내구성능 저하 요인으로 대별된다. 중성화 속도에 미치는 내적 내구성능 저하 요인인 물-시멘트비, 시멘트와 골재의 종류, 혼화재료의 종류 및 첨가량, 양생조건 등의 영향에 대해서는 기존 연구에 의해 어느 정도 규명되었으며, 이러한 요인을 포함한 중성화 속도식도 여러 연구자에 의해서 제안되어 있다. 그러나 이산화탄소 농도, 온도, 습도와 같은 외적 내구성능 저하 요인을 고려한 중성화 진행 예측 모델식에 대해서는 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다. 그리고 중성화 속도는 사용하는 배합 및 시멘트의 종류에 따라 다르게 진행되므로 보다 정확한 중성화 진행을 예측하기 위해 사용하는 콘크리트의 배합 등을 고려할 필요가 있다. 또한 실험 데이터로 구성된 중성화 속도 예측식은 실제 구조물에서 발생할 수 있는 상황을 전부 고려할 수 없으므로 적합성이 저하될 수 있다.

따라서 본 연구의 중성화 예측 모델식에는 기존의 중성화에 관한 국내·외 실험결과를 토대로 물-시멘트비, 이산화탄소 농도, 온도, 습도를 고려 한 계수를 구하였으며, 원전 배합에 적합한 중성화 예측 모델식을 구성하기 위해 중성화 촉진 시험을 실시한 결과를 토대로 원전 배합에 맞는 시험계수를 구하였고, 또한 실제 원전 구조물의 적합성을 향상시키기 위해 현장 데이터를 토대로 현장계수를 구하였다.

2. 기본 모델식 구성

2.1 기본 가정

중성화에 의한 잔존수명 예측모델을 구성하는 데에 있어서 기본 가정은 다음과 같다.

- 중성화는 콘크리트의 표면으로부터 진행된다.
- 이산화탄소의 확산계수는 이산화탄소의 농도 및 콘크리트 조직의 밀실성의 영향을 가장 크게 받는다.
- 콘크리트 조직의 밀실성은 물-시멘트비의 영향을 가장 크게 받는다.
- 중성화에 의한 콘크리트의 수명종결 상태는 중성화의 진행이 철근의 피복두께를 초과하는 시점이다.

2.2 기본 모델식의 구성 방향

중성화 속도는 콘크리트 표면으로부터의 중성화 깊이를 나타내는 것으로서 경과 시간의 평방근에 비례하며, 중성화 속도식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.^{3), 4)}

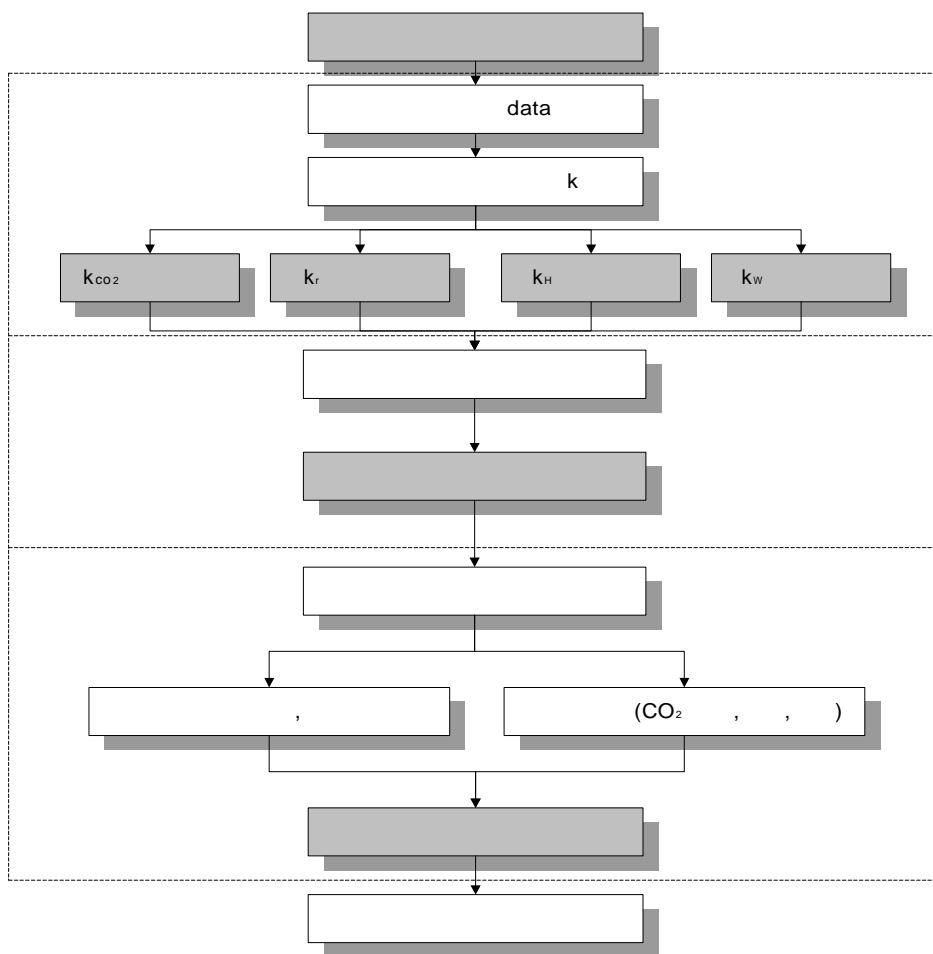
$$C = A\sqrt{t} \quad (1)$$

여기서, C : 중성화 깊이
 t : 경과시간
 A : 중성화 속도 계수

식 (1)은 통상 \sqrt{t} 법칙으로 불려지고 있으며 가장 일반적으로 사용되는 식이다. 그리고 식 (1)에서 중성화 속도 계수 A는 중성화 속도에 미치는 각종 요인에 대해서 실험적 또는 경험적으로

구해지는 계수이다. 그러나 식 (1)로는 중성화 속도에 미치는 각종 요인들의 영향이 중성화 속도 계수에 전부 포함되어 있으므로 이산화탄소 농도, 온도, 습도, 물-시멘트비, 시멘트 종류 등과 같은 각각의 영향에 대해 파악하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 중성화 진행 기본 모델식을 구성하는 데에 있어서 중성화 속도에 미치는 각종 요인에 대해 외적 내구성능 저하 요인으로서 이산화탄소 농도, 온도, 습도를, 내적 내구성능 저하 요인으로서 물-시멘트비를 고려하였다. 이처럼 내적 내구성능 저하요인으로서 물-시멘트비만을 고려한 것은 원전 구조물에 사용하는 혼화제의 종류와 양, 양생 및 시공정도가 거의 동일하다고 보면, 결국 내적 내구성능 저하 요인에 관계되는 콘크리트 조직의 밀실성은 물-시멘트비의 영향을 가장 크게 받을 것이라고 판단되었기 때문이다. 그리고 원전 배합에 적합한 중성화 예측 모델식을 구성하기 위해 중성화 촉진 시험을 실시한 결과를 토대로 원전 배합에 맞는 시험계수를 구하였으며, 실제 구조물에 적합한 모델을 구성하기 위해 현장 중성화 측정 데이터를 토대로 현장계수를 구하였다. 본 연구에서 중성화 진행 속도식을 구성하는 흐름도를 <그림 1>에 나타내었다.



<그림 1> 중성화 속도식 구성 흐름도

2.3 모델의 정식화

2.3.1 이산화탄소 농도를 고려한 예측모델

일반적으로 대기중의 이산화탄소 농도는 실외에서는 0.035% 전후이며, 실내에서는 조건에 따라 다르지만 0.07% 전후이다. 그러나 최근 석유, 석탄 등의 화석 연료의 사용량이 증대되면서 이산화탄소 농도가 증가되는 경향이 있고, 이런 경향으로 이산화탄소 농도가 계속 증가된다면 2050년경에는 산업화 초기에 비해 이산화탄소 농도가 2배 이상으로 증가될 것이라고 예상하고 있다. 기존의 중성화 속도식은 이산화탄소 농도가 일정하다고 가정하였기 때문에 이산화탄소의 농도를 고려

하는 항이 없는 것이 대부분이다. 그리고 중성화 속도는 일반적으로 이산화탄소 농도가 높을수록 빨리 진행된다. 따라서 콘크리트의 중성화 진행 속도를 정확히 예측하기 위해서는 이산화탄소 농도를 고려할 수 있는 중성화 속도식을 구성할 필요가 있다.

임의의 농도의 이산화탄소가 정상상태(steady state)에서 콘크리트 중에 확산되어 중성화가 발생한다고 가정하면 다음 식이 성립된다.⁵⁾

$$\frac{dX}{dt} = K \cdot \frac{C}{X} \quad (2)$$

- 여기서, X : 중성화 깊이(mm)
 ,, : 경과시간
 , : 중성화 기본 모델식 계수 ($K = k \cdot \alpha \cdot \beta$)
 ,, : 일반적 중성화 속도 계수
 α : 시험계수
 β : 현장계수
 , : 이산화탄소 농도(%)

식 (2)를 정수로서 적분하여 미분방정식을 풀고, 시간 0 일 때 ($t=0$), 중성화 깊이를 0 ($X=0$)으로 하면 다음 식으로 표현된다.

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

앞에서도 언급했지만, 기존의 중성화 속도식에서는 대부분 대기중의 이산화탄소 농도를 일정하다고 가정하였기 때문에 이산화탄소 농도를 고려할 수 있는 항이 들어있지 않지만, 식 (3)은 이산화탄소 농도를 고려할 수 있는 항이 포함되어 있다. 또 식 (3)에서 C가 정수라고 하면 종래 식 (1)이 얻어진다.

본 연구에서 중성화에 관한 기존 연구들 중에서 이산화탄소 농도의 영향을 비교적 상세하게 검토한 Takada et.al의 연구⁶⁾ 결과를 토대로 하여 다음과 같이 콘크리트 중성화 진행 속도식에 이산화탄소 농도의 영향을 고려하였다. Takada et. al의 연구에서는 물-시멘트비 50%, 60%, 70%의 3종류 콘크리트에 대해 일정하게 유지된 온도 20℃, 상대습도 55%와 이산화탄소 농도 0.07%, 1.0%, 10%의 조건에서 중성화시험을 실시하였다. 여기서 이산화탄소 농도 0.07%는 실내 자연환경 하에서의 이산화탄소 농도를 상정한 것이다. 이 연구 결과에 의하면 10% 이산화탄소 농도는 0.07% 농도보다 33~49배, 1% 농도보다 7~11배의 촉진된다고 하였다. 그리고 <그림 2>에 0.07% 이산화탄소 농도에서 중성화 속도 계수를 1로 놓았을 때 각 이산화탄소 농도의 중성화속도 계수의 결과를 나타내었다. 물-시멘트비, 초기 양생조건에 상관없이 거의 일정한 비율을 나타내고 있으며, 이것은 콘크리트의 종류에 관계없이 이산화탄소 농도에 의한 촉진 배율이 거의 일정하다는 것을 의미한다.

이상과 같이 이산화탄소 농도에 따라 콘크리트의 특성이 변하지 않은 경우, 콘크리트 중성화 깊이는 $\sqrt{C \cdot t}$ 에 비례한다고 가정하여 이산화탄소 농도 0.07% 될 때의 비례정수 k를 구한 결과를 <그림 2>에 나타내었다.

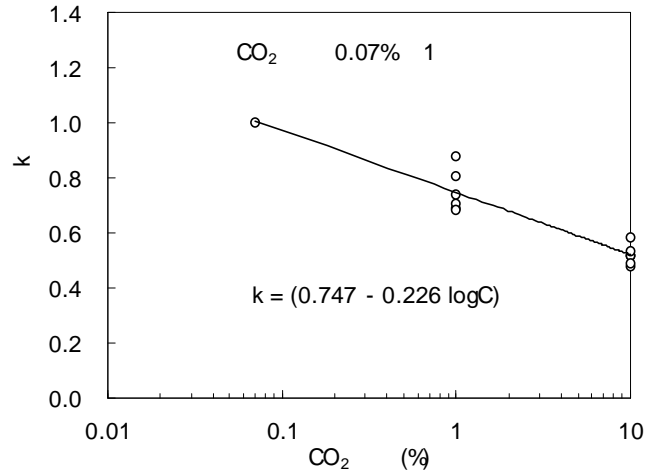
여기서, 식 (2)에 있어서 k의 값은 다음 식에 표시한 것처럼 이산화탄소 농도(k_{CO2}), 온도 (k_T) 및 습도(k_H)과 같은 환경조건에 기인하는 항과 또 물-시멘트비(k_w)의 배합조건에 기인하는 항으로 표현된다고 가정한다.

$$k = k_{CO2} \cdot k_T \cdot k_H \cdot k_w \quad (4)$$

식 (4)에 있는 k_T , k_H 및 k_w 는 일정한 조건으로 가정했기 때문에 정수가 되지만, 이산화탄소 농도의 항 k_{CO_2} 는 정수가 되지 않으므로 k_{CO_2} 의 값을 이산화탄소 농도의 함수로서 이산화탄소 농도 C 가 0.07%일 때 1이 되도록 이하의 식으로 나타내었다.

$$k_{CO_2} = (0.747 - 0.226 \log C) \quad (5)$$

따라서 다음과 같이 이산화탄소 농도의 요인을 가미한 중성화 진행 속도식이 얻어진다.



<그림 2> CO₂ 농도와 k와의 관계

$$\begin{aligned} X &= (0.747 - 0.226 \log C) K \sqrt{(C/0.07) \cdot t} \\ &= (2.823 - 0.854 \log C) K \sqrt{C \cdot t}, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, X : 중성화 깊이 (mm)
 C : 이산화탄소 농도 (%)
 , : 경과시간 (주)
 , : 중성화 속도 계수

종래식에서는 중성화 촉진시험을 실시했을 경우, 이산화탄소 농도에 의한 중성화 속도계수 k_{CO_2} 가 식 (6)에 표시한 중성화 속도 계수 K 중에 포함되어 있으므로 중성화 촉진시험과 자연환경 하의 중성화 진행 속도를 정량적으로 연관시킬 수 없었지만, 본 연구에서 구성한 식 (6)으로부터는 촉진 중성화시험과 자연환경 하의 이산화탄소 농도를 알고 있으면 촉진계수를 추정할 수 있다.

중성화 속도에 미치는 각종 요인을 고려한 예측 기본 모델식을 구성하기 위해 중성화에 관한 기존 연구를 조사하여 정리하였다. 조사한 문헌의 범위는 <표 1>에 나타난 것처럼 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트, 골재는 강모래, 강자갈을 사용한 것만을 대상으로 하였다.

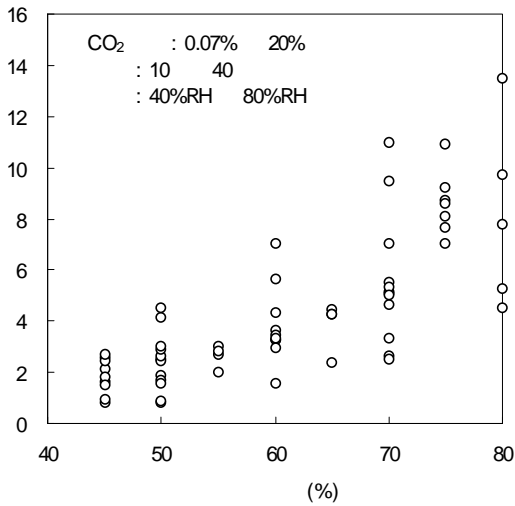
<그림 3>은 조사된 기존 연구^{(7)~(20)}의 촉진 중성화 시험결과를 물-시멘트비별로 나타낸 결과이다. 이 결과는 이산화탄소 농도, 온도, 습도가 다른 조건에서 중성화시험을 실시한 결과이므로 동일한 물-시멘트비에서도 중성화 속도 계수가 큰 차이를 나타내고 있다. <그림 3>에 대해 이산화탄소 농도만을 고려하기 위해 식 (6)을 적용한 결과가 <그림 4>이다. 이산화탄소 농도를 고려하지 않은 <그림 3>에서는 중성화 속도 계수가 폭넓게 분포하나, 이산화탄소 농도를 고려한 <그림 4>에서는 동일한 물-시멘트비에서 중성화 속도 계수의 분포 폭이 상당히 작아지는 결과를 나타내고 있다.

<표 1> 기존 연구의 중성화 시험조건

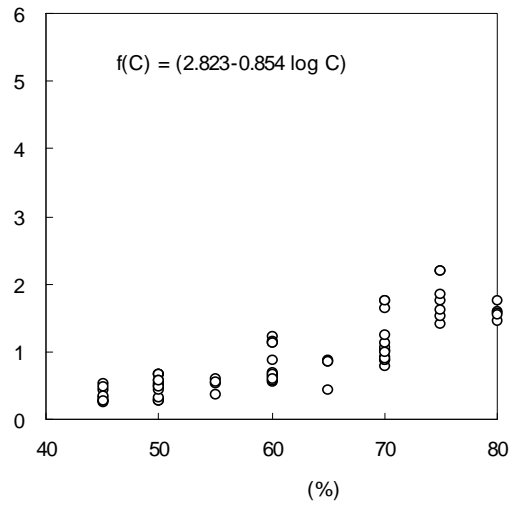
환경조건 인자	이산화탄소 농도	0.007%~20%
	온도	10℃~40℃
	습도	40%~80%
재료 및 배합 인자	시멘트	보통 포틀랜드 시멘트
	골재	강모래, 강자갈
	물-시멘트비	45%~80%

2.3.2 이산화탄소 농도 예측식

최근 화석 연료의 사용량이 증대되면서 이산화탄소 농도가 계속 증가되는 추세에 있으므로 중성화에 의한 콘크리트의 수명을 보다 정확히 예측하기 위해서는 이산화탄소 농도를 예측하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Fukushima²¹⁾가 미국해양 기상국 하와이 측정소(북



<그림 3> 기존연구의 중성화 촉진시험 결과

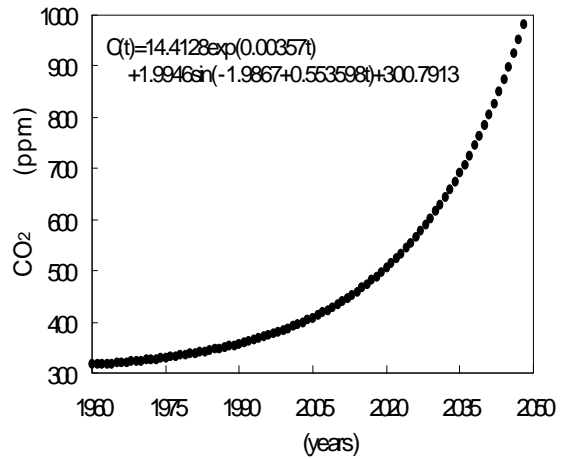


<그림 4> CO₂ 농도를 고려한 결과

북위 19.5°, 해발 3401m)에서 측정된 이산화탄소 농도의 데이터에 최소 좌승법을 적용시켜 대기중의 이산화탄소 농도의 경시변화를 예측하는 식 (7)을 사용하여 이산화탄소 농도를 예측하였다.

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

(이 식은 1958년 이후를 원점으로 한다. t[month]) (7)



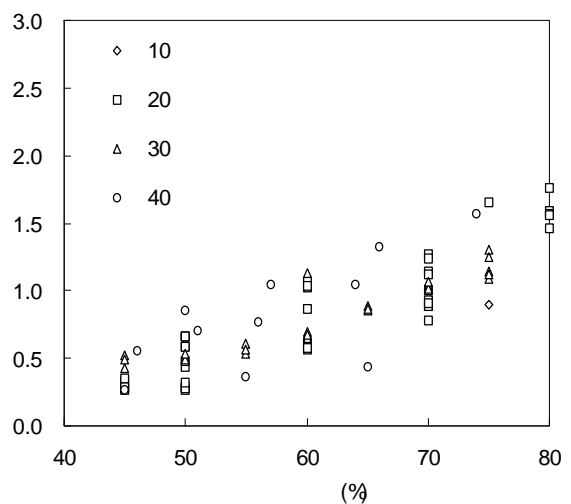
<그림 5> CO₂ 농도의 경시 변화 예측 결과

식 (7)을 이용하면, 미래뿐만 아니라 과거의 대기중의 이산화탄소 농도를 추정할 수가 있으며, <그림 5>에 이산화탄소 농도의 경시 변화를 예측한 결과를 나타내었다.

식 (7)으로 예측한 이산화탄소 농도를 식 (6)에 대입하면 이산화탄소의 농도를 고려한 중성화 진행 깊이를 예측할 수가 있다.

2.3.3 온도의 영향을 고려한 예측 모델

중성화 속도는 60°C이하의 범위에서 일반적으로 온도가 높을수록 빨리 진행된다. Fig. 6은 Fig. 4에 있어서 중성화 속도에 미치는 영향들 중에서 온도의 영향을 검토하기 위해 온도별로 중성화 속도 계수를 나타낸 결과이다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 어느 정도 편차는 있지만, 온도가 높을수록 중성화 속도 계수가 커지는 경향을 하고 있다.



<그림 6> 온도별 중성화 속도 계수

중성화는 대기중의 이산화탄소와 콘크리트 중의 수화 생성물인 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과의 화학반응에 의해 진행된다. 따라서 화학반응의 반응 속도에 미치는 온도의 영향은 온도가 높을수록 지수 함수적으로 반응이 진행되는 Arrhenius의

이론에 따른다고 가정할 수 있다.²²⁾ <그림 6>에 나타낸 데이터에 대해 30℃에 있어서 중성화 속도 계수를 1로 하였을 경우의 Arrhenius의 이론을 적용한 결과를 <그림 7>에 나타내었다. 횡축의 절대온도의 역수와 종축의 중성화 속도 계수와의 직선관계가 얻어지므로 Arrhenius법칙에 따른다고 가정할 수 있으며 중성화 속도에 미치는 온도의 영향은 식 (8)로 표시된다.

$$\ln k_T = (8.953 - 2713/T)$$

$$k_T = e^{(8.953 - 2713/T)} \quad (8)$$

식 (8)은 30℃를 기준으로 식이며, 온도가 30℃일 때 k_T 가 1이 되는 식이다. T는 절대온도(K)이다. 식에서 온도 10℃, 20℃, 40℃ 및 50℃의 조건에 있어서 중성화 속도 계수는 30℃ 경우의 0.53배, 0.74배, 1.33배 및 1.74배가 된다.

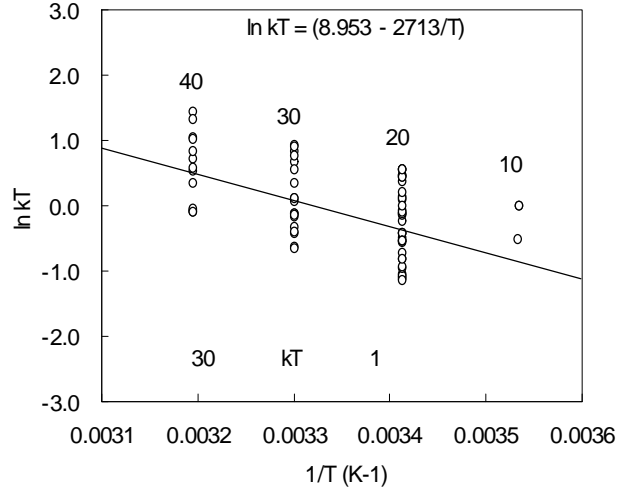
이산화탄소 농도의 영향만을 고려한 <그림 4>에 대해 중성화 진행 속도에 미치는 온도의 영향을 고려하기 위해 식 (8)을 적용한 결과를 <그림 8>에 나타내었다. 이산화탄소 농도의 영향만을 고려한 <그림 4>와 이산화탄소 농도와 온도의 영향을 고려한 <그림 8>을 비교해보면, <그림 4>보다 <그림 8>에 도시된 중성화 속도 계수의 범위가 더욱 좁혀지고 있음을 알 수 있다. 단, 여기서 중성화 속도 계수는 이산화탄소 농도(0.07%), 온도(30℃)가 일정한 환경 하에서 중성화 속도 계수를 예측한 값이고, 습도의 영향이 포함되어 있는 상태이다.

2.3.4 습도의 영향을 고려한 예측 모델

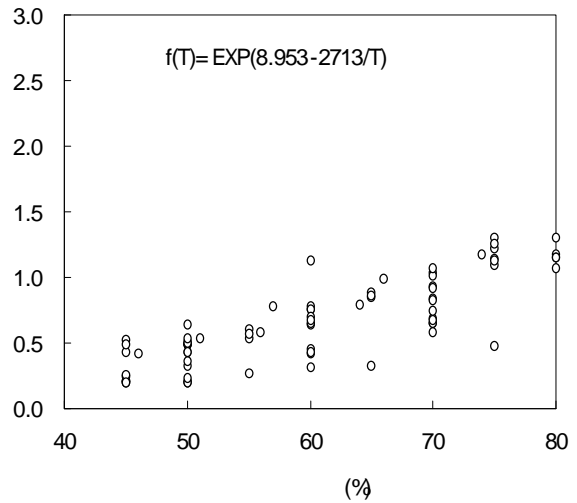
중성화 진행 속도에 미치는 습도의 영향은 상대습도가 0% 또는 100%일 때에는 중성화는 진행되지 않으며, 연구 결과에 따라 다르지만 일반적으로 상대습도 40~60%인 경우에 중성화 진행 속도가 최대가 되는 경향이 있다. 또, 그 보다 습도가 높으면 이산화탄소 농도가 콘크리트의 공극 중에 존재하는 수분에 의해 저지되어 중성화 진행 속도는 늦어진다.^{23), 24)}

기존 연구의 중성화시험은 대부분 촉진시험이기 때문 중성화 진행이 최대로 일어나는 40~60%인 상대습도의 조건하에서 시험을 실시한 것이 대부분이다. 즉, 기존 연구의 시험결과만으로는 중성화 속도에 미치는 습도의 영향을 검토하는 것은 어렵다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 柳²⁵⁾가 상대습도 0%와 100%에서 중성화 속도 계수가 0이 되도록 하여 상대습도 60%에 대한 중성화 속도 계수의 비로 구한 식 (9)를 적용하여 중성화 속도에 미치는 습도의 영향을 검토하였다.

$$k_H = H(100 - H)(140 - H)/192000 \quad (9)$$



<그림 7> Arrhenius 이론을 적용한 결과



<그림 8> CO₂ 농도와 온도를 고려한 결과

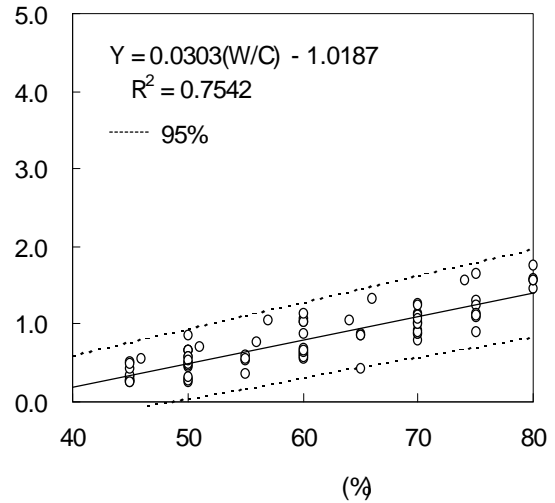
습도의 영향을 고려하기 위해 식 (9)를 <그림 8>의 결과에 적용한 결과를 <그림 9>에 나타내었다. 습도의 영향을 고려한 <그림 9>의 결과와 습도의 영향을 고려하지 않은 <그림 8>의 결과를 비교해 보면, 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서서도 언급했지만 기존 연구의 촉진시험이 대부분 40~60%인 상대습도의 조건하에서 실시되었으므로 습도의 영향이 차이가 나타나지 않았기 때문이라고 판단된다.

2.3.6 물-시멘트비의 영향을 고려한 예측 모델

물-시멘트비가 중성화 진행 속도에 미치는 영향을 검토하기 위해서 <그림 9>의 결과에 대해 1차식으로 회귀분석 하였다. 이것은 중성화 진행 속도는 물-시멘트비에 대해서 거의 직선적으로 변하기 때문이다. 이렇게 해서 얻어진 중성화 속도에 미치는 물-시멘트비의 영향은 다음의 식으로 표현된다.

$$k_w = (0.0303 \frac{W}{C} - 1.0187) \quad (10)$$

그리고 <그림 9>에서 점선은 95% 상하 신뢰 수준이며 모든 데이터가 이 범위 안에 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 나타난 10%정도의 편차는 시멘트, 골재 등과 같은 사용재료의 종류와 양생 등의 차이에 의한 결과라고 판단된다.



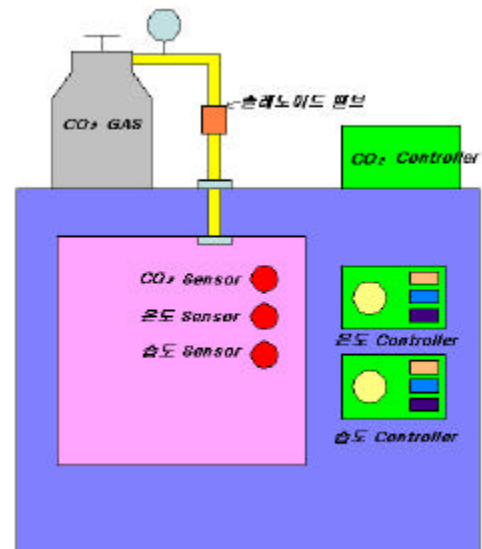
<그림 9> CO₂ 농도, 온도, 습도, W/C를 고려한 결과

3. 촉진시험

3.1 개요

앞에서 구성한 중성화 수명예측 기본 모델식은 기존의 중성화에 관한 연구의 데이터를 토대로 구성되어 있으므로 원전배합의 적용성을 입증할 수가 없다. 그리고 식 (3)은 I종 시멘트만을 대상으로 하였기 때문에 원전배합에 사용되는 V종 시멘트에 대해서는 적용성이 저하될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 원전배합에 적합한 중성화 예측 모델식을 구성하기 위해 중성화 촉진시험 결과를 토대로 원전배합에 적합한 시험 계수를 산출하였다.



<그림 10> 중성화 촉진시험 장치

3.2 시험방법

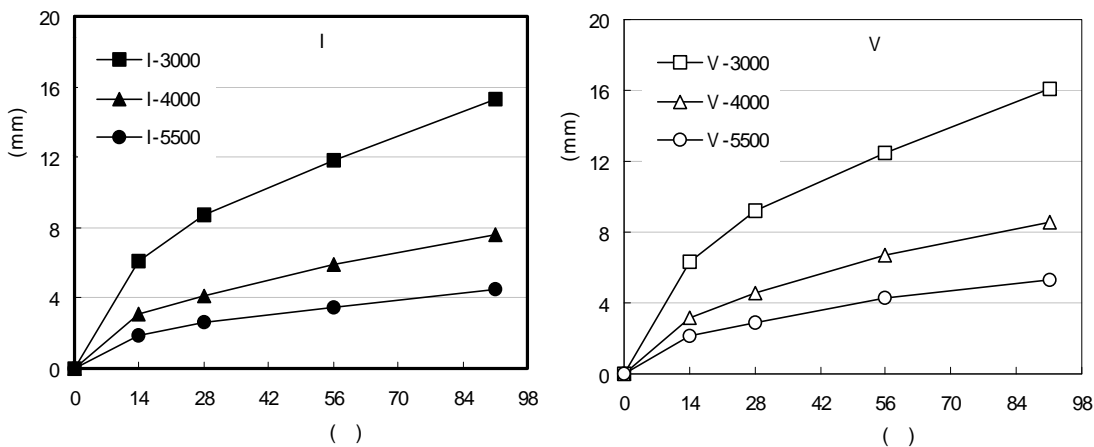
본 시험에 사용한 V종 시멘트, 굵은골재, 잔골재, 고성능감수제, AE제는 영광 5,6호기의 건설에 사용중인 재료로 하였으며, 시멘트의 영향을 분석하기 위하여 I종 시멘트에 대하여도 동일배합의 공시체를 제작하였다. <표 2>는 본 연구에 사용한 콘크리트 배합이다. 공시체는 10×10×20cm로 3개를 제작하여 이산화탄소 가스의 측면침투를 방지하기 위해 측면을 에폭시수지로 2~3회 도포하였다.

<그림 10>은 중성화 촉진시험 장치이다. 촉진시험은 이산화탄소 농도 10%, 온도 20℃, 습도

60% 조건을 유지하도록 하였다. 페놀프탈레인 용액에 의한 중성화 깊이를 측정하며, 측정방법은 측면을 연마한 후 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 발색깊이를 측정하였다. 측정 후에는 재시험을 위해 고무계우레탄을 재 도포 하였다.

<표 2> 콘크리트 배합표

강도 (psi)	W/C (%)	S/a	W (lb)	C (lb)	S (lb)	G (lb)	WRA (ml)	AEA (ml)	배합근거
5500	42	46	285	678	1275	1505	923	16	영광 3,4호기
4000	48	46	300	625	1303	1505	852	16	"
3000	62	45	278	448	1359	1657	813	31	월성 2,3,4호기



<그림 11> 중성화 촉진시험 결과

3.3 시험결과

<그림 11>에 중성화 시험 결과를 나타내었다. 설계기준강도가 중성화에 미치는 영향은 매우 크게 나타나고 있다. 즉 시멘트 종류에 관계없이 설계기준강도가 작을수록 중성화 진행 속도가 빨라지고 있다. 시멘트 종류가 중성화에 미치는 영향은 V종 시멘트가 I종 시멘트보다 중성화 속도가 빨리 진행되는 경향을 나타내고 있으나 그 차이는 그리 크지 않다.

4. 수명저하 예측모델로의 적용

4.1 시험계수 산출

본 연구에서는 국내 원전배합에 적합한 모델을 구성하기 위해 국내에 사용되는 콘크리트 배합으로 제조된 공시체에 대해 중성화 촉진시험을 실시하여 다음과 같이 시험계수를 산출하였다. 그리고 I종 시멘트에 대해 식 (11)을 적용하고 V종 시멘트에 대해 식 (12)를 적용했다.

$$\alpha = \frac{\alpha_t}{\alpha_k} \tag{11}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_V}{\alpha_t} \tag{12}$$

여기서, α : 시험계수
 α_t : 축진시험에 의해 구해진 중성화 속도 계수
 α_k : 비례정수만 고려하여 구해진 중성화 속도 계수
 α_v : V종 시멘트 사용 콘크리트의 중성화 속도 계수

이렇게 산출된 시험계수와 시멘트 종류 계수를 식 (3)에 넣으면 국내 원전배합을 고려한 중성화 진행 모델식이 배합별로 구성된다. <표 3>에 원전배합으로 실시한 중성화 시험결과와 식 (11)과 식 (12)를 이용하여 산출한 시험계수 α 를 나타내었다. 그리고 이 계수를 식 (3)에 입력하면 설계기 준강도별 원전배합을 고려한 중성화속도 예측식이 구성된다.

4.2 현장계수 산출

앞에서 구성한 중성화 예측 모델식은 실험데이터 토대로 구성되어 있어 여러 상황이 복잡하게 작용하는 실제 구조물의 중성화 진행 속도를 정확하게 예측하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 국내 원전 구조물에 적합한 모델을 구성하기 위해 현장 점검 데이터를 토대로 다음과 같이 현장 계수를 산출하였다.

$$\beta = \frac{\beta_f}{\beta_t} \quad (13)$$

여기서, γ : 현장계수
 γ_t : 실험 데이터로 구성된 식에서 산출된 중성화 속도계수
 γ_f : 현장 데이터로 산출된 중성화 속도계수

<표 3> 시험계수 α

배합		α_k	α_t	α_v	α
I종	3000psi	1.7241	1.5928	-	0.9238
	4000psi	0.8945	0.7906	-	0.8839
	5500psi	0.5390	0.4669	-	0.8662
V종	3000psi	-	-	1.6830	1.0566
	4000psi	-	-	0.9041	1.1436
	5500psi	-	-	0.5610	1.2015

<표 4> 현장계수 산출에 필요한 데이터

요인	산출값 및 산출근거
재령	23년(사용년도 1978년~)
현 중성화 깊이	22mm (현장 점검 데이터)
W/C	48%(설계기준강도 4000psi 배합 사용)
온도	월별 평균 기온(기상청 데이터)
습도	월별 평균 습도(기상청 데이터)
CO ₂ 농도	식 (7)로 산출된 값

5. 결론

본 연구에서는 기존의 중성화에 관한 국내·외 실험결과를 토대로 물-시멘트비, 이산화탄소 농도, 온도, 습도를 고려 한 계수를 구하여 중성화 예측 기본 모델식을 구성하였으며, 원전 배합에 적합한 중성화 예측 모델식을 구성하기 위해 중성화 촉진 시험을 실시한 결과를 토대로 원전 배합에 맞는 시험계수를 구하였고, 또한 실제 원전 구조물의 적합성을 향상시키기 위해 현장 데이터를 토대로 현장계수를 구하였다.

참고 문헌

- 1) 岸谷, 西澤 : 콘크리트 구조물의 내구성 시리즈 -중성화-, 技報堂出版, 1988.
- 2) Parrott, L.J. : Assessing carbonation in concrete structures, in Durability of Building Materials and Components, Proceedings of Fifth International Conference, 1990.
- 3) Kropp, J. and Hilsdorf, H.K. : Performance criteria for concrete durability, RILEM Report 12, 1995.
- 4) Smolczyk, H : Discussion of principal paper on carbonation of concrete by Hamada, 5th Int. Conf. on Chemical of Cement, Vol. 3, Tokyo, 1968.
- 5) 高田, 魚本 : 炭酸가스濃도가콘크리트의중성화速度에及ぼす影響, 콘크리트工學年次報告集, Vol.13-1, 1991.
- 6) 高田, 魚本 : 炭酸가스濃도가콘크리트의중성화에及ぼす影響, 콘크리트의炭酸化に關するシンポジウム論文集, 콘크리트工學協會, 1993.
- 7) Funk, G. and Reinhardt, H.W. : Realistic computation for the depth of carbonation by taking material parameters and weathering exposure into consideration, BETONWERK+FERTIGTEILTECHNIK, HEFT, 1997.
- 8) Hamada, M. : Neutralization (Carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel. 5th Int. Symposium on the Chemical of cement. Tokyo, 1968.
- 9) Kishitani, K., Shiire, T., : Carbonation of concrete in existing structures up to 55 years old and a proposal of reliability technique for cover thickness of reinforcement, Annex 2. 2nd CEB-RILEM Workshop, 1986.
- 10) 依田 : 高爐セメント콘크리트의중성화, セメント・콘크리트, No. 429, 1982.
- 11) Vesikari, E., : Prediction of service life of concrete structures and reinforcement corrosion, Tech. Res. Centre Finland Rilem Report, 1985.
- 12) H. Ohga and S. Nagataki : Prediction of carbonation depth of concrete with Fly Ash, ACI SP114-12, 1989.
- 13) Ohama, Demura, Miyake : 폴리머-세멘트모르타ルの促進중성화における溫度及 び相對濕度の影響, 日本建築學會構造系論文集, No. 469, 1995.
- 14) Saeki, Ohga, Nagataki : 콘크리트의중성화의機構解明と進行豫測, 土木學會論文集, No. 414/V-12, 1990.
- 15) Ohga, Nagataki : 促進試験による콘크리트의중성化深さの豫測と評價, 土木學會論文集, No. 490/V-8, 1988.
- 16) Yoda, Yokomuro : Carbonation rate of air entrained concrete using eight types of cement, Cement Science and Concrete technology, No.52, 1988.
- 17) 日本土木學會 : フライアッシュを混合した콘크리트의중성화と鐵筋の發さびに關する長期研究(最終報告), 콘크리트・ライブラリー, No.64, 1988.
- 18) Ho, D. and Lewis, R. : Carbonation of concrete and its prediction, Cement and Concrete Research, Vol.17, 1987.
- 19) Dhir, R., Jones, M. and Munday, J. : A practical approach to studying carbonation of

concrete, Concrete, 1985.

- 20) 大岸 : コンクリートの炭酸化促進試験結果と長期進行との関係, セメント・コンクリート 論文
集 No.44, 1990.
- 21) 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.
- 22) RILEM International Symposium on Carbonation of Concrete, Cement and Concrete
Association, Wexham Springs, Slough, UK. 1976.
- 23) 日本建築學會 : コンクリートの調合設計・調合管理・品質調査指針案・同解説, 1976.
- 24) 三橋, 岩上, 金子 : コンクリートの中性化速度に及ぼす氣象環境條件の影響に関する研究, コン
クリート工学論文集, Vol. 10, No.1, 1999.
- 25) 柳啓 : コンクリートの中性化進行予測に関する実験, 建材試験情報 8, 1990.