

도막의 열화인자 차단 효과를 고려한 콘크리트 탄산화 깊이에 관한 연구

Concrete Carbonation Considering the Protective Performance of Concrete Coating

박 동 천* 김 정 진** 조 봉 석*** 박 재 홍**** 전 봉 민***** 오 상 균*****
Park, DongCheon Kim, JeongJin Cho, BongSuk Park, JaeHong Jeon, BongMin Oh, SangGyun

ABSTRACT

A concrete carbonation model has been constructed that takes account of the diffusion of carbon dioxide through a coating and reaction with calcium hydroxide, and this model has been validated by an accelerated carbonation experiment.

(1) By using values for the coatings calculated on the basis of a diffusion - permeation theory as input data for the analysis of diffusion - reaction carbonation in an unsteady state, the effect of the coatings in reducing carbonation can be represented with high accuracy.

(2) Through a sensitivity analysis of the diffusion - reaction carbonation model and the experimental results, we found that the diffusion coefficient of calcium hydroxide shows a high interrelationship at $1e-12(m^2/s)$. The reaction rate constant for carbonation shows a high interrelationship at $5e-5(m^3/mol/s)$.

요 약

도막을 통한 이산화탄소의 확산과 수산화칼슘과의 반응을 고려한 콘크리트 탄산화 모델을 구축하여, 촉진 탄산화 실험을 통해 모델의 타당성을 확인하였다. 일련의 실험과 모델화, 수치해석을 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 확산 투과 이론에 근거한 도막의 평가값을 비정상 확산-반응 탄산화 해석의 입력조건으로 이용함으로써 도막의 중성화 억제효과를 높은 정확도로 예측할 수 있었다.

2) 확산-반응 탄산화모델과 실험결과의 감도해석을 통해 수산화칼슘 확산계수는 $1e-12(m^2/s)$ 에서, 탄산화반응 속도는 $5e-5(m^3/mol/s)$ 에서 높은 상관성을 나타내었다.

- * 정회원, 한국해양대학교 해양공간건축학부 전임강사
- ** 정회원, 롯데건설(주) 건설기술연구소 책임연구원
- *** 정회원, 포항산업과학연구원(RIST) 선임연구원
- **** 정회원, 동의대학교 건축공학과 대학원 석사과정
- ***** 정회원, 동의대학교 건축공학과 대학원 박사과정
- ***** 정회원, 동의대학교 건축공학과 부교수

1. 서론

철근콘크리트조 구조물의 표면에는 도료, 타일, 석재 등의 외장재료가 시공되어져 있는 경우가 많으며, 이들은 의장적인 기능뿐만 아니라, 열화 인자 차단성능도 동시에 수행한다. 그러나 현재로서는 마감재료의 구체 보호 효과가 적절히 평가되어 있지 않아 합리적인 유지관리 계획의 입안이 힘든 실정이다. 본 연구에서는 건축물 표면 마감재중에서 도막을 대상으로 이산화탄소 투과계수와 확산계수를 측정하였으며 그 데이터를 입력값으로 하는 확산-반응 탄산화 모델을 구축하였으며, 촉진 탄산화 시험을 통한 측정값과 비교함으로써 모델의 정합성(整合性)을 검증하였다.

2. 연구개요

2.1 확산-반응 탄산화모델의 개요

이산화탄소는 도막을 투과하여 콘크리트에서 확산, 수산화칼슘과 반응하는 것으로 모델링하였다. 도막의 이산화탄소 확산계수는 기체 투과 계측(차압법)시험 장치를 이용하였고, 콘크리트 탄산화 반응은 페놀프탈렌시약 변색법, 시차열주사 열량 분석기(DSC)를 이용하여 평가하였다.

2.2 도막의 확산계수 측정

시험체(도막) 상부에서 이산화탄소를 도입(100~120kPa)하여 시험체를 통과한 이산화탄소의 농도(압력)의 시간변화를 측정하여 식(1), 식(2)로부터 산출하였다. 사용한 도막의 재료는 표1과 같다.

$$D = \frac{l^2}{6 \cdot \theta} \text{ (cm}^2\text{/sec)} \quad (1)$$

$$P = \frac{273}{T} \cdot \frac{V}{A} \cdot l \cdot \frac{1}{P_1} \cdot \frac{1}{760} \cdot \frac{dP_2}{dt} \text{ (cm}^3\text{(STP)cm/cm}^2\text{sec cmHg)} \quad (2)$$

여기서, D : 도막의 확산계수, P : 기체 투과 계수, T : 측정온도(K), V : 저압측의 용적(ml), P_1 : 고압측의 기체 압력(cmHg), P_2 : 저압측의 기체압력(cmHg), dP_2/dt : 기체곡선의 구배(cmHg/sec), STP: 표준상태의 온도와 압력, l : 막의 두께(cm), θ : 지연 시간(sec)

표1. 도막의 조성

기본수지(분자구조)	경화제	반응형식
폴리우레탄	-	1액 습기 경화
폴리염화비닐	-	1액 가열 경화
에폭시	폴리아미드	2액 가열 경화
아크릴	멜라민 수지	2액 가열 경화

2.3 촉진 탄산화 시험

2.3.1 콘크리트 탄산화

콘크리트 배합은 표2와 같으며, 촉진 탄산화의 조건은 이산화탄소 농도 20%(60%R.H.), 8주, 16주째 페놀프탈렌 시약 및 DSC측정을 통해 탄산화 깊이 및 성분분석을 실시하였다.

2.3.2 도막이 시공된 콘크리트의 탄산화

촉진 탄산화의 이산화탄소 농도는 20%(60%R.H.)이다. 8, 16, 32, 48주째에 페놀프탈렌 변색법에 의한 탄산화 깊이를 측정하였다.

표2. 콘크리트의 배합

W/C(%)	W(kg/m ³)	C	S	G	s/a(%)	Slump(cm)	Air(%)	AE water reducing agent(g/m ³)
65	185	285	798	954	46	18	4.5	500

2.4 이산화탄소의 확산-반응을 고려한 콘크리트 탄산화 모델

2.4.1 기초 미분방정식

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = D_{CO_2-suf} \frac{\partial^2 C_{CO_2}}{\partial x^2} \quad (3), \quad \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = D_{CO_2} \frac{\partial^2 C_{CO_2}}{\partial x^2} - R \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] [C_{Ca(OH)_2}] \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{Ca(OH)_2}}{\partial t} = D_{Ca(OH)_2} \frac{\partial^2 C_{Ca(OH)_2}}{\partial x^2} - R \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] [C_{Ca(OH)_2}] \quad (5), \quad \frac{\partial C_{CaCO_3}}{\partial t} = R \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] [C_{Ca(OH)_2}] \quad (6)$$

여기서, t : 시간, x : 콘크리트 표면으로부터의 거리, D_{CO_2} : 이산화탄소 확산계수, $D_{Ca(OH)_2}$: 수산화칼슘 확산계수, D_{CO_2-suf} : 외장재의 겉보기 확산계수, C_{CO_2} : 이산화탄소 농도, $C_{Ca(OH)_2}$: 수산화칼슘 농도, C_{CaCO_3} : 탄산칼슘의 농도, R : 반응속도 정수

2.4.2 초기조건과 경계조건

(1) 초기조건

$$t = 0$$

$$x > 0: C_{CO_2} = 0, C_{Ca(OH)_2} = C_{Ca(OH)_2-init} \quad (7)$$

$$-l_{suf} < x < 0: C_{CO_2} = 0 \quad (8)$$

콘크리트의 이산화탄소 확산계수는 Papadakis et al.의 제안식(식(9))¹⁾에 근거하여 해석하였다.

$$D_c = 1.64 \times 10^{-6} \varepsilon^{1.8} \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{2.2} \quad (9)$$

여기서, D_c : 이산화탄소의 확산계수(m²/s), ε : 전공극량, RH : 상대습도(%)

전공극량의 감소:

$$\varepsilon' = \alpha \cdot \varepsilon_0 \quad (10)$$

여기서, ε' : 탄산화후의 전공극량, α : 공극량 감소계수²⁾, ε_0 : 탄산화전의 전공극량

(2) 경계조건

$$x = -l_{suf}: C_{CO_2-suf} = S \cdot p \quad (11)$$

여기서, C_{CO_2-suf} : 도막 표면에서의 이산화탄소 농도, S : 용해도 계수, p : 이산화탄소 분압

$$t > 0$$

$$x = 0: C_{Ca(OH)_2} = 0, C_{CO_2} = \varepsilon \cdot C_{CO_2-out} \quad (12)$$

$$x \rightarrow +\infty: C_{Ca(OH)_2} = C_{Ca(OH)_2-init}, C_{CO_2} = 0 \quad (13)$$

3. 시험결과와 유한요소 해석

본 연구에서 구축한 탄산화 예측 유한요소 모델에 있어서 탄산화 반응정수 및 수산화칼슘의 확산을 산정하기 위해, 실험값과 해석값을 이용한 감도해석을 실시하였다. 그림1에 16주째의 측정된 수산화칼슘 및 탄산칼슘의 농도와 해석값을 나타내었다. 페놀프탈렌 시약 변색 깊이는 기존연구에서 밝혀진 바

와 같이 수산화칼슘 농도가 절반이 되는 지점과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 수산화칼슘 확산계수 $1e-12(m^2/s)$ 와 탄산화반응 속도정도를 $5e-4(m^3/mol/s) \sim 5e-6(m^3/mol/s)$ 으로 변화 시킨 감도해석 결과, $5e-5(m^3/mol/s)$ 의 입력조건에서 해석값과 실험값이 상당히 일치하는 것을 알 수 있었다.

장기 탄산화 예측을 위하여 Kishitani실험식³⁾과 비교한 결과, 그림2와 같이 상당히 높은 정확도로 실험값을 재현할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

이산화탄소 투과 계측(차압법) 시험 장치를 이용한 도막의 투과계수 및 확산계수의 측정 결과 도막의 투과계수는 폴리염화비닐, 폴리우레탄, 에폭시, 아크릴의 순으로 증가하였으며, 대체로 $10^{-17} (kmol / sec \cdot m \cdot kPa)$ 의 범위였다. 도막의 확산계수도 투과계수와 같은 순이었으며, $10^{-12}(m^2/s)$ 의 범위였다.

도막 도포 콘크리트의 촉진 탄산화 시험결과 중, 아크릴 도막을 도포한 경우의 페놀프타렌 변색 깊이 측정값과 확산-반응 탄산화모델의 해석값을 그림3에 나타내었다. 폴리염화비닐, 폴리우레탄, 에폭시의 경우에는 48주까지 페놀프타렌 시약에 의해 변색되는 탄산화 영역이 나타나지 않았지만, 확산-반응 탄산화모델을 이용한 해석 결과에서는 수산화칼슘의 농도가 약간 저하되는 것이 확인되었다. 아크릴 도막의 경우에는 32주 이후 탄산화 영역이 관찰되었으며, 확산-반응 탄산화모델을 통해서도 그 경향을 높은 정확도로 예측할 수 있었다.

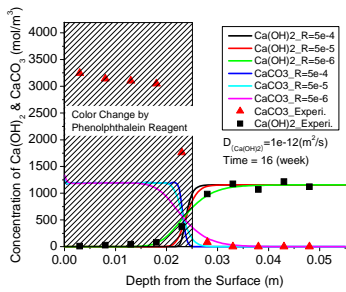


그림1 수산화칼슘과 탄산칼슘의 농도분포

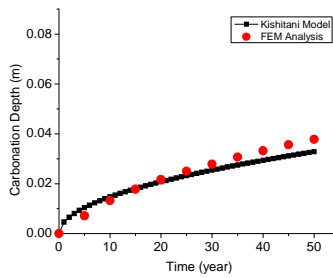


그림2 장기 탄산화 깊이

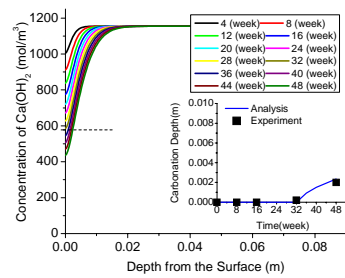


그림3 도막도포 콘크리트의 촉진탄산화 깊이와 해석값(아크릴(두께:89μm))

4. 결론

- 1) 차압법을 이용한 이산화탄소 투과계측 장치로부터 도막의 이산화탄소 확산계수를 산출할 수 있으며, 본 실험의 범위에서는 아크릴, 에폭시, 폴리우레탄, 폴리염화비닐의 순으로 차단성능이 뛰어났다.
- 2) 확산 투과 이론에 근거한 도막의 평가값을 비정상 확산-반응 탄산화 해석 모델의 입력조건으로 이용함으로써 도막의 중성화 억제효과를 높은 정확도로 표현할 수 있었다.

참고문헌

1. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N.: Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete, ACI Materials Journal, Vol.9, No.2, pp.186-196, 1991
2. 李春鶴, 石田哲也: 微細空隙構造と物質平衡移動の強連成に立脚したセメント水和生成物の炭酸化反応モデル, 콘크리트工学년次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 701-706, 2006
3. 鐵筋콘크리트造建築物의耐久設計施工指針(案)同解説, 日本建築學會, 2004