해양 대기 환경 하에서 탄산화 콘크리트에 대한 염소이온 침투 해석

Analysis on Penetration of Chloride Ion into Carbonated Concrete in Marine Atmospheric Conditions

최두만* 장승엽**
Choi, Doo man Jang, Seung Yup

ABSTRACT

Chloride attack and carbonation induced corrosion of reinforcement are those of the main factors which cause the deterioration of concrete structures. The objective of this study is to suggest an analytic model for the prediction of chloride penetration into carbonated concrete, in order to make up for the current codes. Carbonation depth model considering the moisture effect is validated by being compared with the test data and the analytic model on chloride penetration into carbonated concrete is developed. Finally, the corrosion-initiation time has been predicted by the present model, being compared with that by the current code equation. The comparison shows that the current code equation can underestimate the chloride penetration into carbonated concrete in marine atmospheric conditions.

1. 서론

염해와 탄산화에 의해 발생하는 철근의 부식은 콘크리트 구조물의 성능저하를 유발하는 가장 중요한 요인이다. 그러나 각각의 열화인자에 대한 연구에 비해 열화요인이 복합적으로 작용할 때의 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 또한 부식에 의한 콘크리트구조물의 성능저하를 막기 위해서는 부식개시시기와 사용수명을 정확하게 예측할 수 있어야 한다.

본 연구는 대기 중에 있는 해상 콘크리트 구조물의 염소이온 침투농도를 측정하고 설계에 적용할 경우 기존의 시방서 식을 보완하기 위해서 탄산화와 염소이온 침투가 동시에 작용할 경우의 염소이온 침투농도 예측 모델을 제시하고자 하였다. 이를 위해 먼저 수분의 영향을 고려한 콘크리트 구조물의 탄산화 깊이를 구하여 기존 실험 및 실측자료와 비교하여 타당성을 검증하였고, 탄산화가 발생되었다는 가정 하에서 염소이온 침투를 예측할 수 있는 모델을 수학적으로 유도하였다. 그리고 최종적으로 철근의 임계부식농도를 바탕으로 기존의 모델과 유도된 모델을 이용하여 부식개시시기를 예측하여 비교하였다.

2. 콘크리트 확산계수 산정

2.1 시멘트 페이스트의 확산계수

정상적인 확산에 대한 수학적인 해는 아래와 같이 유도된 식을 사용하였다[1].

$$\Delta_{\phi}(D_p/D_0) = [0.5[(D_s/D_0)^{1/n} + 1.22\phi_{cap}[1-(D_s/D_0)^{1/n} - 0.22] + \sqrt{0.25[(D_s/D_0)^{1/n} + 1.22\phi_{cap}1-(D_s/D_0)^{1/n} - 0.22]^2 + 0.22(D_s/D_0)^{1/n}}]^n \quad \text{(식2.1)}$$

* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정
**정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

여기서, $\frac{D_p}{D_0}$는 고체상태의 정상적인 확산, n은 침투지수, D_m은 공극성 물질의 유효확산계수(m^2/s), D_0는 연속체에서의 확산계수(m^2/s), ϕ_{wp}는 모세공극도, β는 공극구조계수를 나타낸다.

2.2 콘크리트에서의 확산계수산정

골재 미립자 함유물의 확산도를 0이라고 가정하여 유도된 다음 식을 사용하였다[2].

$$\Delta_a(D^{ref}/D_p) = 1 + \frac{V_a}{\frac{1}{2(D_i/D_p)\epsilon - 1} + \frac{1-V_a}{3}} \quad (식2.2)$$

여기서, V_a는 골재 체적비, D_i는 ITZ(interfacial transition zone)에서의 확산계수(m^2/s), D_p는 시멘트 페이스트의 확산계수(m^2/s), D_i/D_p는 시멘트 페이스트의 확산계수에 대한 ITZ의 확산계수 비, ϵ는 ITZ의 두께비이다. 최종적으로 위에 제안된 모델들을 이용해 콘크리트와 모르타르에 대한 확산계수 D^{ref}를 다음과 같이 구한다.

$$D^{ref} = D_0 \cdot \Delta_\phi \cdot \Delta_a \quad (식2.3)$$

2.3 환경 인자를 고려한 확산계수

본 연구에서는 이동특성의 환경영향계수를 고려하기 위해서 최종적인 확산계수로 다음 식을 사용하였다.

$$D = D^{ref} \cdot f_{RH} \cdot f_t \cdot f_T \quad (식2.4)$$

여기서, f_{RH}, f_t, f_T는 각각 수분분포(상대습도), 재령, 온도에 대한 확산계수의 변동을 나타낸다.

3. 탄산화 환경 하에서의 염소이온 침투모델의 유도

3.1 수분의 영향을 고려한 탄산화 깊이 모델

탄산화 깊이에 대한 수학적인 계산모델은 다음 식을 사용하였다[3].

$$x_c dx_c = D_{\omega 2} Q_c dt \quad (식3.1)$$

여기서, x_c는 탄산화 깊이(m), $D_{\omega 2}$는 탄산화 된 깊이에서의 CO_2 확산계수(m^2/s)이고 Q_c는 시멘트에서 탄산화물질의 양에 대한 대기의 CO_2의 양의 비로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_c = \frac{[CO_2]}{[CH] + 3[CSH] + 3[C_3S] + 2[C_2S]} \quad (식3.2)$$

3.2 탄산화 깊이 모델의 검증

모르타르에 대한 촉진 탄산화 실험[4]과 상대습도 65%, 대기온도 20°C의 환경 하에서 수행된 실내실험[5]결과 값들을 본 연구에서 사용할 수분의 영향을 고려한 탄산화 깊이 모델과 비교한 결과 비교적 실험결과와 잘 일치하였다.

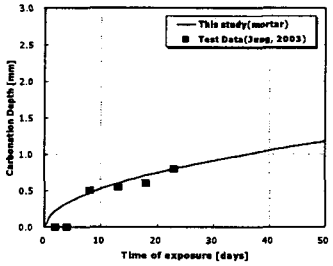

그림 1 모르타르의 촉진 탄산화 실험 자료(Jung, 2003)와 탄산화 깊이 모델과의 비교

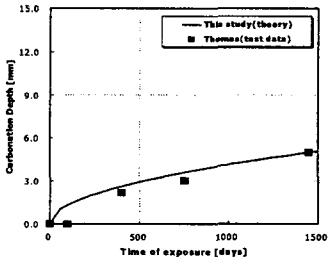

그림 2 Thomas의 촉진 탄산화 실험 자료와 탄산화 깊이 모델과의 비교

3.3 탄산화에 의한 콘크리트의 특성변화

콘크리트에 탄산화가 발생하면 수화물의 변형과 소멸을 수반하기 때문에 내부의 공극 구조에 큰 변화를 가져다준

다는 연구결과가 있다. 따라서 탄산화에 의한 공극의 변화는 콘크리트의 특성을 변화시키게 된다. 즉 수분 흡수능(moisture sorption capacity), 염소이온 구속(chloride binding), 이동특성(transport property)등 콘크리트의 특성이 변하게 된다.

이 중에서 본 연구에서는 앞에서 언급했던 것과 같이 이동특성, 즉 확산계수와 염소이온 구속이 탄산화에 의해 받는 영향을 고려하였다. 탄산화에 의한 공극변화량과 탄산화 생성물의 양을 산정하면 확산방정식에서 변화된 확산계수 값을 반영할 수 있다[1].

3.4 탄산화의 깊이를 고려한 염소이온농도의 확산방정식과 해

그림 3에서와 같이 $0<x<X$ 일 때 확산방정식 $\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}$ 와 $x>X$ 일 때 $\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}$ 로 각각 나타낼 수 있다. 그리고 초기조건과 경계조건을 가정하여 최종적인 해를 구할 수 있고 그림 4와 같은 프로화일을 얻을 수 있다[6]. 탄산화를 고려하는 경우 확산계수 값의 변화하므로 탄산화 깊이에서 염소이온 농도프로화일의 꺾인 점이 그림과 같이 나타났다.

$$C_1 = C_2 = C_x,\ x = X \qquad (식3.3)$$

$$D_1\frac{\partial C_1}{\partial x} = D_2\frac{\partial C_2}{\partial x},\ x = X \qquad (식3.4)$$

$$C_1 = C_s,\ x = 0 \qquad (식3.5)$$

$$C_2 = C_\infty,\ x = \infty \qquad (식3.6)$$

$$X = k\sqrt{t} \qquad (식3.7)$$

$$C_1 = C_s + A\,\mathrm{erf}\frac{x}{2\sqrt{(D_1 t)}} \qquad (식3.8)$$

$$C_2 = C_\infty + B\,\mathrm{erf}\frac{x}{2\sqrt{(D_2 t)}} \qquad (식3.9)$$

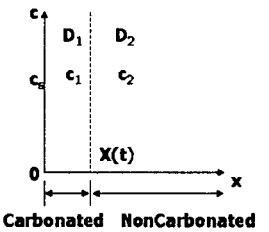

그림 3 콘크리트에서 탄산화에 의해 가정된 두 가지 층

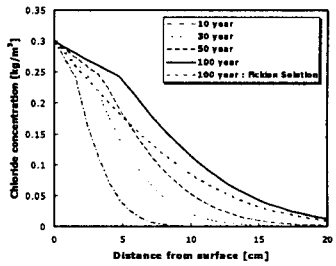

그림 4 탄산화 깊이에 따른 염소이온 농도 profile

3.6 모델의 검증

최종적으로 유도된 모델을 검증하기 위하여 기존의 논문에서 측정한 실측 자료를 이용하였다[7]. 실선은 탄산화와 염소이온의 복합작용을 고려한 염소이온 농도침투곡선이고 점선은 베네수엘라의 해양구조물에서 채취한 코어에서 염소이온농도를 측정한 자료이다. 현행 콘크리트 표준시방서에서 사용하고 있는 식과 비교해보았을 때 유도된 모델이 실측된 염소이온 농도에 비교적 더 가깝게 예측하는 것으로 나타났다.

표 1 기본적인 변수값

	Maracaibo 교량
RH	83%
온도	26.3°C
W/C Ratio	0.44
Cement(kg/m^3)	390

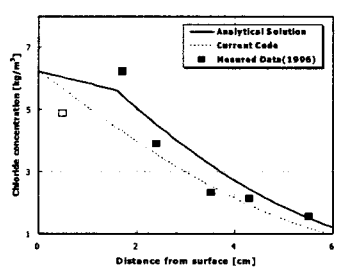

그림 5 Maracaibo 교량의 실측 염소이온 농도와 유도된 모델 비교(재령 33년)

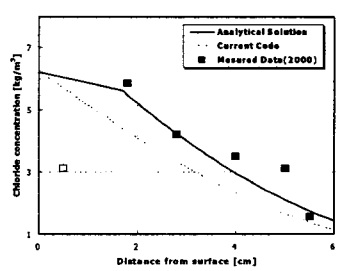

그림 6 Maracaibo교량의 실측 염소이온 농도와 유도된 모델 비교(재령 38년)

3.7 부식개시시기 산정

아래 그림은 보통강도 1종 시멘트를 앞에서 유도된 탄산화의 영향을 고려한 염소이온농도 침투모델을 이용하여 부식개시시기를 산정한 결과를 나타내었다. 그리고 그림 8은 현행 콘크리트 표준시방서 내구성 조항에서는 제시한 염소이온 농도식을 이용하여 부식개시시기를 산정한 결과이다. 부식임계농도는 콘크리트 표준시방서에서 1.2kg/m^3

으로 일괄적으로 제안하고 있으므로 이 값을 이용하였다. 그 결과 본 연구에서 유도된 모델식을 이용하여 산정한 부식개시시기가 더 짧다는 결과가 나왔는데 이는 탄산화의 영향을 고려했으므로 탄산화에 의해서 염소이온침투가 촉진되었다는 결과를 반영하고 있다.

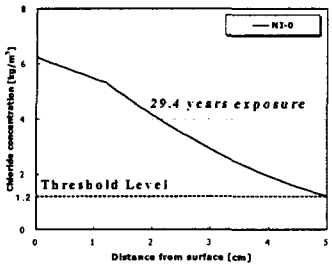

그림 7 유도된 모델에 의한 부식개시시기 결정

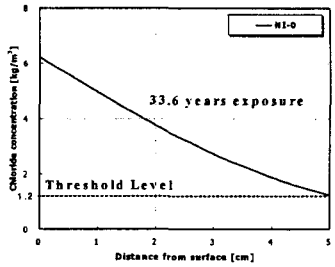

그림 8 기존의 시방서 식에 의한 부식개시시기 결정

4. 결론

1) 상대습도의 영향을 고려한 탄산화 깊이 모델이 기존의 실험데이터와 비교적 일치하였다.
2) 탄산화의 영향을 고려한 염소이온침투 모델을 유도하였고, 탄산화를 고려하는 경우 탄산화 깊이에서 염소이온 농도프로화일의 꺾인 점이 나타났다.
3) 대기 중에 있는 해양구조물의 경우 기존 콘크리트 시방서에서 제시된 염소이온 침투모델보다 본 연구에서 유도한 모델을 사용했을 경우 실측자료와 더 잘 일치하였다.
4) 해양 대기 환경 하에서 탄산화 콘크리트에 대해 본 연구에서 유도한 모델을 사용했을 경우 부식개시시기가 더 짧아지므로 현행 콘크리트 시방서에서 제안된 식은 염소이온농도에 대해 과소평가할 수 있다.

참고문헌

1. Jang, Seug. Yup. (2003). Modeling of Chloride Transport and Carbonation in Concrete and Prediction of Service Life of Concrete Structures Considering Corrosion of Steel Reinforcements. Doctoral Thesis, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea.
2. Hashin, Z. (2001). Thin interphase/imperfect interface in conduction. Journal of Applied Physics, 89(4), 2261-2267.
3. Schiessl, P. (1988). Corrosion of steel in concrete. Report of Rilem Report Technical Committee 60-CSC, RIlem, Chapman & Hall, London.
4. Jung, Sang Hwa (2003). Diffusivity of Carbon Dioxide and Carbonation in Concrete through Development of Gas Diffusion Measuring System. Doctoral Thesis, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea.
5. Thomas, M. D. A. and Matthews, J. D., "Carbonation of fly ash concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 160, September, 1992, pp.217-228
6. Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion; Oxford University Press : New York.
7. Troconis de Rincón, O., Castro, P. Moreno, E.I. Torres-Acosta, A.A., Morón de Bravo, O., Arrieta, García,I. C., García, D., Marínez-Madrid, M. (2004) Choride profiles in two marine structures-meaning and some predictions. Building and Environment 39, 1065-1070.