

항만 콘크리트 구조물의 현장환경변화에 따른 염소이온 침투해석

Analysis of Chloride Ion Penetration for Harbor Concrete Structure with In-situation Environment

한 상 훈* 장 인 성*
Han, Sang Hun Jang, In Sung

ABSTRACT

In order to estimate the chloride ion penetration, the model, which considers diffusion and sorption, is proposed on the basis of Finite Element Method (FEM). The FEM program provides the estimation of chloride concentration according to cyclic humidity and sorption. After the humidity diffusion analysis is carried out, the chloride ion diffusion and sorption analysis are conducted on the basis of the preestimated humidity data in each element. Each element has different analysis variables at different ages and locations. At early ages and constant outer humidity, the difference between inner and outer relative humidity causes the chloride ion penetration by sorption. As the humidity diffusion reduces the difference with age, the effect of sorption on the chloride ion penetration decreases. By the way, the cyclic humidity increases the effect of sorption on the chloride ion penetration at early ages, and the quantity of chloride ion around steel at later ages. Therefore, the in-situ analysis of chloride ion penetration for marine concrete structures must be performed considering the cyclic humidity condition and the long term sorption.

1. 서 론

콘크리트 내부의 염소이온은 크게 2가지 메카니즘에 의해서 그 농도가 변화하게 된다. 하나는 일반적으로 알려진 염소이온의 확산에 의한 것이다. 염소이온의 농도가 높은 콘크리트 외부에서 내부로 확산현상이 발생하여 염소이온이 내부로 이동하는 메카니즘이다. 다른 하나는 흡착을 들 수 있다. 실제의 해양환경하에서는 습도의 증감이 발생하고 내부의 습도가 외부의 습도보다 낮으면 외부의 수분이 내부로 이동한다. 이때, 염소이온도 이러한 수분과 함께 이동하여 콘크리트 내부의 염소이온량을 증가시키게 되는 것이다. 따라서, 현장상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 해석을 수행하기 위해서는 2가지 메카니즘이 함께 고려되어야한다.

본 연구에서는 대기 중에 노출된 현장상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온농도를 모델링하기 위해서 확산과 흡착의 작용을 모두 고려하여 염소이온침투량을 유한요소법으로 모델링하였다. 또한, 실제에 가까운 콘크리트 성질을 모델링하기 위해서 환경조건에 따라 유한요소 각각의 확산계수와 흡착특성을 달리하여 해석을 수행하였다.

* 정희원, 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부, 선임연구원

2. 유한요소법에 염소이온 침투 모델링

2.1 수분확산의 유한요소법에 의한 정식화

미소체적 내부에서 확산과정이 등방성이고 확산계수가 일정하다면 수분의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D_h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] = D_h (\nabla^2 h) \quad (1)$$

일반적인 요소 평행방정식 유도과정을 거치면 다음과 같은 요소내의 평행방정식을 구할 수 있다.

$$[C]_h \left\{ \frac{dh(t)}{dt} \right\} + [K]_h \{h(t)\} - \{Q\}_h = 0 \quad (2)$$

여기서, $[C]_h = \int_{V'} [M]^T [M] dV$

$$[K]_h = \int_{V'} D_h \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV \\ + \int_{V'} \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \Big\} dV + \int_{S'} f_h [M]^T [M] dS$$

$$\{Q\}_h = \int_{S'} f_h [M]^T h_{en} dS$$

f_h : 수분확산의 표면계수

h_{en} : 외기의 상대습도

2.2 염소이온침투의 유한요소법에 의한 정식화

염소이온침투는 확산과 흡착이 동시에 일어나므로 수분확산보다는 정식화과정이 조금 복잡하다. 확산과정이 등방성이고 미소체적내부에서 자유염소이온에 대한 고정염소이온의 변화율과 확산계수 및 증발가능수량이 일정하다면 자유염소이온의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Saetta et al, 1993).

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} + \frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp} \quad (3)$$

여러 유한요소 정식화 과정을 거치면 다음과 같은 요소 매트릭스 방정식을 유도할 수 있다.

$$[C] \left\{ \frac{dC_f(t)}{dt} \right\} + ([K_1] - [K_2] - [K_3] + [K_4]) \{C_f(t)\} - \{Q\} = 0 \quad (4)$$

여기서, $[C] = \int_{V'} [M]^T [M] dV$

$$[K_1] = \int_{V'} D_c \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV$$

$$[K_2] = \int_{V'} k_h [M]^T \left[\frac{\partial [M]}{\partial x} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial x} + \frac{\partial [M]}{\partial y} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial y} + \frac{\partial [M]}{\partial z} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \right] dV$$

$$[K_3] = \int_{V'} \frac{\partial H}{\partial h} [M]^T [M] \left\{ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} [M] dV \quad [K_4] = \int_{S'} f_c [M]^T [M] dS$$

$$Q = \int_{S'} f_c [M]^T C_{f, en} dS$$

3. 해석결과 및 토의

3.1 흡착에 따른 염소이온 침투량의 변화

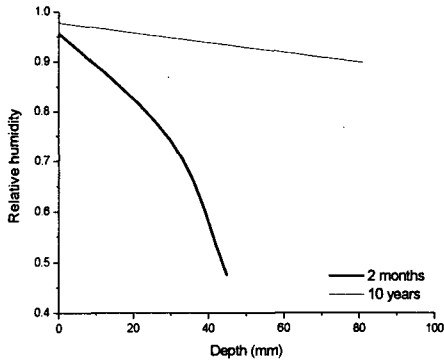
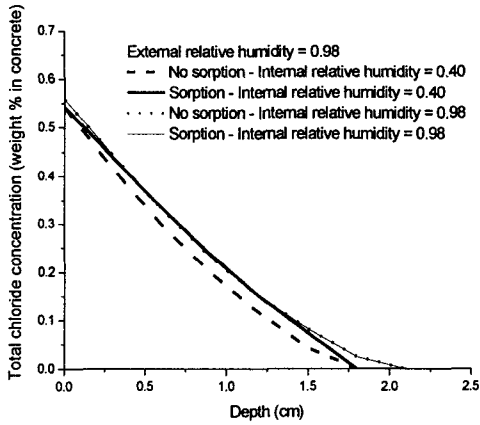


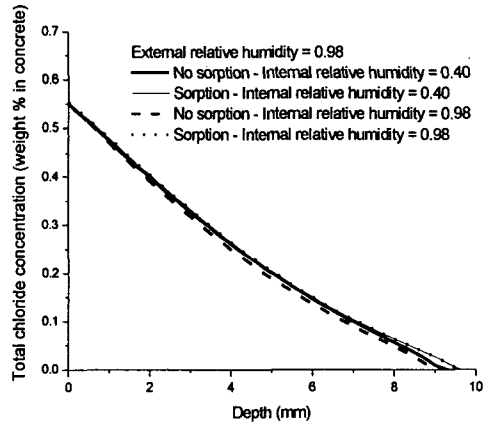
그림 1 시료내부의 상대습도변화
(시료내부의 초기상대습도 = 0.40)

부수분의 확산에 의해 내외부의 상대습도의 차이가 크게 줄어든다. 따라서, Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 초기의 내부상대습도의 차이에 따른 염소이온침투량의 차이가 거의 없어지고 흡착의 영향도 거의 발생하지 않는다. 따라서, 내외부의 상대습도의 변화가 크면 흡착에 의한 염소이온침투량의 변화가 발생하지만 그렇지 않은 경우에는 흡착의 효과가 미미함을 알 수 있다.

흡착의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 염소이온침투량 해석을 수행하여 흡착이 염소이온침투량에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 그림 2는 재령 2개월과 10년으로 나누어서 염소이온침투량에 따른 흡착의 효과를 나타내고 있다. 흡착에 의한 염소이온이동을 발생시키기 위해서 초기 콘크리트 내부의 상대습도를 0.40으로 하였다. 또한, 내부의 상대습도가 0.98인 경우에도 해석을 수행하여 흡착이 발생하지 않는 경우의 염소이온변화량도 고찰하였다. 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 콘크리트 내부의 상대습도가 0.40이면 흡착을 고려한 해석의 염소이온침투량이 고려하지 않은 것보다 크고, 15 mm 정도의 깊이에서는 그 상대적인 차이가 50% 이상임을 알 수 있다. 그러나, 콘크리트 내부의 상대습도가 0.98이면 흡착이 발생하지 않으므로 흡착 고려 유무에 따른 염소이온침투량의 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 재령이 10년인 경우의 흡착에 따른 염소이온침투량을 나타내고 있다. 재령이 10년 정도 경과하면 그림 1에 나타낸 바와 같이 초기 0.40의 내부 상대습도를 가진 시료가 외



(a) 재령 2개월



(b) 재령 10년

그림 2 흡착을 고려한 염소이온 침투 해석

3.2 현장환경하에서의 염소이온 침투 해석

실제 현장에서의 상대습도와 온도변화에 따른 염소이온침투량을 해석하기 위해서 부산지방에 대한 30년간의 기상측정데이터를 바탕으로 한 온도와 습도를 사용하였다(그림 3 참조). 온도와 습도의 평균값은 각각 14.5 °C와 0.66 정도이다. 그림 4는 온도와 습

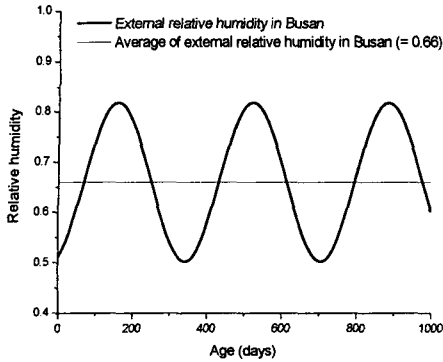
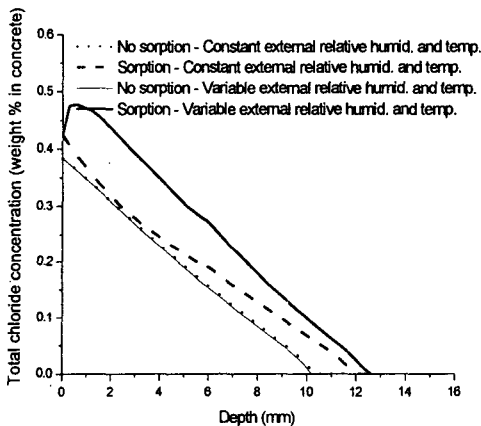
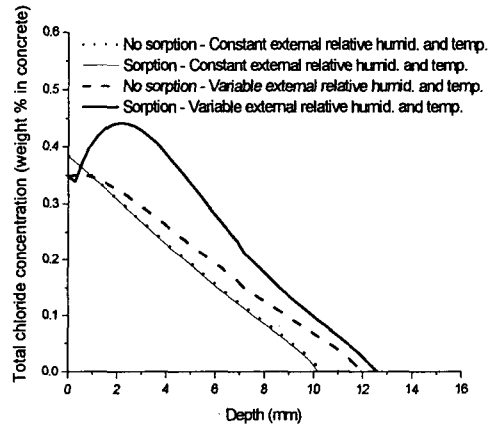


그림 3 상대습도의 변화

겨울에 해당하는 해석결과이다. 그러나, 시료이 내부로 갈수록 외기의 상대습도에 의한 흡착의 영향이 줄어들며 따라 깊이 50 mm이하에서는 재령 100년과 100년 6개월의 염소이온량이 큰 차이가 없음을 알 수 있다.



(a) 재령 100년



(b) 재령 100년 6개월

그림 4 부산지역의 상대습도와 온도변화에 따른 염소이온 침투 해석

3. 결 론

본 연구에서는 습도와 온도가 연속적으로 변화하는 경우의 염소이온침투량을 해석하기 위한 프로그램을 개발하고 그 결과를 제시하였다.

습도가 연속적으로 변화하는 경우에는 확산뿐만 아니라 흡착에 의해서도 염소이온침투량이 변화함이 관찰하였다. 현장상황과 같이 건설의 반복이 장기적으로 발생하게 되면 흡착과 확산을 함께 고려한 염소이온 침투량이 흡착을 고려하지 않은 염소이온 침투량보다 매우 크다. 또한, 흡착을 고려하지 않더라도 건설의 반복만을 모델링하여 염소이온 침투량을 구하면 평균상대습도와 온도를 사용한 것보다 침투량이 증가한다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업인 "항만구조물의 정량적 거동 분석을 위한 상사법칙 연구"의 일환으로 수행되었습니다.