

중성화와 염화물 침투가 동시에 발생하는 철근콘크리트 단면의 매개변수 분석

주홍길¹, 김소의², 콧동우², 배경태³, 지광습^{4*}

Parametric Analysis for the Simultaneous Carbonation and Chloride Ion Penetration in Reinforced Concrete Sections

Xingji Zhu¹, Soye Kim², Dong-Woo Kwak², Kyung-Tae Bae³, Goangseup Zi^{4*}

Abstract: The objective of this study is the investigation of the influence of carbonation on the penetration of chloride ions in reinforced concrete sections for different mix proportions and environmental conditions. A comprehensive numerical model based on the change of the pore structure and the chemical equilibrium was used for this combined action of carbonation and chloride ingress. The empirical formulae of some parameters in this model are estimated according to numerous experimental data. And, a set of data analysis is carried out to simplify the estimation of model variables to reduce the computational cost. A coupled simulation of the transports of carbon dioxide, chloride ions, heat and moisture is carried out. Then, the parametric analysis is given and the numerical results show that the effect of carbonation of the free chloride ingress is significant and depends on the binder types and concrete mix proportion.

Keywords: Corrosion, Chloride ingress, Carbonation, Offshore structures, Anchor joint

1. 서 론

최근 RC 구조물의 내구성을 감소시키는 철근 부식과 콘크리트의 중성화가 매우 중요한 문제로 화두가 되고 있다. 철근 표면의 염화물 농도가 일정한 임계농도를 초과하거나, 콘크리트 중성화 반응에 의해 공극수의 임계 pH 값이 감소하는 경우, 철근의 부식과정이 촉발될 수 있다. 가용 산소에 의해, 철근 표면에 부식 생성물을 발생시키는 전기화학적 반응이 서서히 진행되어 부식이 진행된다. 부식 생성물은 부식 이전에 비해 4-6배 정도로 부피가 팽창하므로 인접 콘크리트에 균열을 발생시키며, 부식에 의해 하중에 저항할 수 있는 철근의 단면적 또한 감소한다. 그러므로 부식작용을 촉발할 수 있는 메커니즘을 정확하게 예측하는 도구를 개발하는 것이 중요하며, 이는 RC 구조물의 내구성 디자인과 사전 계획, 유지관리 작업에 활용 될 수 있다.

철근 또는 긴장재의 부식은 콘크리트 피복의 손상 뿐만 아니라, 철근과 긴장재의 순단면적을 감소시켜 해당 구조물의 내하력을 크게 감소시킨다. 최근 발생한 서울시 정릉천고교의 긴장재 파단이 대표적인 예라 할 수 있다.

많은 연구에서는 개별적인 고려를 하고 있지만, 콘크리트의 중성화와 염소이온의 침투는 동시에 진행된다. 해양 대기 환경에서는 바닷물을 통해 염소이온이 끊임없이 공급되고, 항만 근처에서는 상대적으로 이산화탄소 농도가 높기 때문에 복합적인 문제를 고려해야 하는 상황이 형성된다. 예를 들어 항만 근처에 건설되는 콘크리트 구조물 지지되는 중력식 해상풍력 구조물의 타워-구조물 연결부는 외부로 노출되어 있기 때문에 이 복합적인 부식 문제를 반드시 고려해야 한다.

국내 도심지내에서도 점점 증가하는 제설염 사용량과 차량에서 배출되는 이산화탄소량은 이 복합열화 문제를 이해하는 것이 매우 중요하다는 점을 시사하고 있다.

앞서 해상 콘크리트 구조물의 연결부와 도심지 구조물을 언급했지만 대부분의 철근콘크리트 구조물에 공히 적용되는 것이므로 일반화된 접근법을 채택하였다.

실험적으로 이 문제를 분석하는 것은 고비용과 많은 노력이 소요되므로, 일반적으로, 중성화 시험을 먼저 수행하고, 그 이후 염소이온 투과 시험을 실시하여 중성화가 염소이온 투과 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 하지만 이 시험방식에서는 중성화 진행이 염소이온 투과에 미치는 영향을 구체적

¹학생회원, 고려대학교 박사과정

²학생회원, 고려대학교 석사과정

³정회원, 대우건설기술연구원

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: g-zi@korea.ac.kr

School of Civil, Architectural & Environmental Engineering, Korea University

•본 논문에 대한 토의를 2016년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 파악하기가 어렵다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해 중성화와 염화물 침투를 교번하여 시험하는 복합 내구성 시험을 시행한 결과, 일반적인 시험의 결과와 대조되는 현상이 관찰되었다. 시험체 표면에서 약 1.5 cm 정도 떨어진 지점에서 최대의 염소이온 농도가 측정되었다. 그러므로 중성화와 염화물 침투의 복합작용을 분석 및 예측하기 위해 중성화와 염소이온 이동의 상호작용을 구현할 수 있는 현실적인 모델 개발이 필수적이다.

최근 중성화와 염소이온의 침투 작용을 복합적으로 분석할 수 있는 역학적인 내구성 평가 모델이 개발된 바 있다. 미세공극구조의 변화, 화학반응, 이온 및 수분의 전달, 가스의 전달 등이 정량적으로 구현되어 있으므로 본논문의 목적에 적합하다고 판단된다. 본 논문에서는 이 모델을 이용하여 대상 복합 내구성 문제에 영향을 미치는 주요 변수들의 효과를 매개변수 분석을 통해 연구하였다.

본 논문의 구성은 본 서론이후, 2장에는 본 논문에서 채택한 내구성 모델을 요약하였고, 3장에서는 모델변수의 단순화에 대해 설명하였고, 4장에서는 수치해석 모델의 구현기법을 제시하였고, 5장에서는 수치해석 결과를 설명하였고, 결론은 6장에 제시하였다.

2. Zhu-Zi(2016)의 중성화 및 염화물 침투의 복합열화 모델

2.1 중성화의 지배방정식

본 모델에서는 (1) 이산화탄소의 이동, (2) 이산화탄소와 용해 수산화칼슘 반응 (3) 공극수 내에서 이루어지는 고체 수산화칼슘의 용해, (4) 콘크리트 내의 CSH와 이산화탄소의 화학적 반응을 중성화 반응으로 고려하였으며, 각 반응의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\phi - \phi_{we})C_{CO_2}}{\partial t} + \nabla \cdot J_{CO_2} = -I_{ch} - I_{CSH} \quad (1)$$

$$\frac{\partial\phi_{we}C_{ch,d}}{\partial t} + \nabla \cdot J_{ch,d} = -I_{ch} + I_d \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_{ch,s}}{\partial t} = -I_d \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_{CSH}}{\partial t} = -r_{CSH} \quad (4)$$

여기서, C_{CO_2} 는 공극중 이산화탄소기체의 몰 농도, ϕ 는 현재 콘크리트 공극률, ϕ_{we} 는 증발 가능한 공극수의 부피비, J_{CO_2} 는 이산화탄소의 플럭스, I_{ch} 와 I_{CSH} 는 각각 $Ca(OH)_2$ 와 CSH의 화학반응으로 인한 이산화탄소 소비율, $C_{ch,s}$ 는 고체 수산화칼슘의 몰 농도, C_{CSH} 는 콘크리트 속 CSH의 몰 농도, 그리고 r_{CSH} 는 이산화탄소와 CSH의 반응속도이다. ϕ_{we} 과 수분 h 사이의 관계는 BSB 모델에 의거하여 기술될 수 있다. 참고로 I_{ch} , I_{CSH} , I_d 는 Papadakis의 중성화 모델에서 소개된 매개변수이다.

식 (1)와 (2)로부터 용해 수산화칼슘의 농도변화를 계산하면 콘크리트의 pH값을 추정할 수 있다. 콘크리트의 pH 값은 공극수에 용해된 수산화칼슘의 농도로 계산한다.

$$pH = \begin{cases} 14 + \log(2 \times 10^{-3} C_{ch,d}) & \text{for } C_{ch,d} \geq 1 \times 10^{-3} \\ 8.3 & \text{for otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

완전히 중성화된 콘크리트의 pH 하한 값은 주변에서 공급되는 이산화탄소의 농도에 따라 달라진다.

중성화도를 평가하기 위해 중성화 반응에 의해 소비된 공극수 내 수산화칼슘 용액의 소비량을 이용하는 것이 일반적이다. 하지만, 이산화탄소는 경화된 수화물의 고체 성분과도 직접적으로 반응한다. 그러므로 이 영향을 고려한 중성화도 α_c 는 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha_c = 1 - \frac{C_{ch,s} + \phi_{we}C_{ch,d} + 3C_{CSH}}{[C_{CaO}]_0} \quad (6)$$

여기서, $[C_{CaO}]_0$ 는 콘크리트 내 총 수산화칼슘의 초기 몰농도이다. 이는 콘크리트의 종류와 바인더의 화학적 조성도에 의해 직접적으로 결정된다.

2.2 중성화에 의한 공극 구조의 변화

중성화가 발생하면 콘크리트의 공극구조와 재료특성이 변한다. 이는 수분, 염화이온, 그리고 이산화탄소의 이동에 영향을 미친다. 본 모델에서는 공극률과 이온 이동경로의 임계반지름의 변화를 고려했다. 중성화와 공극률 ϕ 의 관계는 다음과 같이 선형관계로 나타냈다.

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi_c \alpha_c \quad (7)$$

여기서, ϕ_0 는 중성화전 콘크리트의 공극률이고, $\Delta\phi_c$ 는 콘크리트가 완전히 중성화 되었을 때의 공극률의 감소량이다.

이온의 이동 특성은 이동 경로의 임계반지름을 이용해서

공극구조의 연결성과 염소이온의 이동성의 영향을 반영한다. 입계반지름의 변화와 중성화도의 관계는 비례한다고 가정한다.

$$r_p = 5 \times 10^{-8} r_{p,ref} [(\bar{r}_{p,c} - \bar{r}_{p,0}) \alpha_c] + \bar{r}_{p,0} \quad (8)$$

여기서, $r_{p,ref} = 1m$ 는 단위 조절을 위한 기준 크기, $\bar{r}_{p,0}$ 과 $\bar{r}_{p,c}$ 는 중성화 전후의 입계반지름의 무차원 변수이고 각각 물-시멘트비와 플라이애쉬 함량에 의존한다.

$$\bar{r}_{p,0} = f_h(w/b) \quad (9)$$

$$\bar{r}_{p,c} = f_h(w/b) f_c(w/b) f_c(FA) \quad (10)$$

여기서 $f_h(w/b)$, $f_c(w/b)$ 와 $f_c(FA)$ 는 각각 물시멘트비와 플라이애쉬 대체비에 대한 영향 함수이다.

2.3 염소이온의 이동에 대한 중성화의 영향

중성화 이후에도 염소이온 이동은 Fick의 확산 제2법칙을 만족한다고 가정한다. 콘크리트의 단위 부피에 해당되는 염화물의 총량은 공극수 내의 자유 염소이온과 프리텔염 형태인 결합 염화물의 합과 같다. 여기서, 염화물의 결합능력이 저하되면서 공극수로 방출될 수 있다. 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_{we} C_{fc}}{\partial t} + \nabla \cdot J_{fc} = I_{rc} \quad (11)$$

$$J_{fc} = - \frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_{we}} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} (D_{fc}^{car} \nabla \phi_{we} C_{fc} + D_h^{car} \phi_{we} C_{fc} \nabla h) \quad (12)$$

$$I_{rc} = \frac{d \alpha_L \phi_{we} C_{fc} (I_{ch} + I_{CSH})}{1 + \frac{1}{\phi_{we}} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} [1 + \beta_L M(C^-) \phi_{we} (C_{fc}/b)]} \quad (13)$$

여기서, C_{fc} 는 자유 염소 이온의 양, C_{bc} 는 결합된 염소량이다. J_{fc} 는 염소이온 흐름이고, I_{rc} 는 중성화에 의한 프리텔염으로부터 방출된 자유염소이온을 지칭하는 생성 항이다. 여기서 D_{fc}^{car} 와 D_h^{car} 은 중성화도에 의존하는 자유 염소이온과 수분의 확산계수이다. 여기서 $M(\cdot)$ 은 (\cdot) (kg/mol)의 단위로서 물질량을 의미한다. α_L 과 β_L 는 콘크리트 종류에 의해 결정되는 재료상수이며, $d = 0.88$ 로서 중성화로 인한 염소이온 결합 능력의 감소를 뜻한다.

염소 이온 및 수분의 확산계수도 중성화에 의해 변화하는데, 본 모델에서는 tortuosity Ω 와 constrictivity δ 를 이용해서 다음과 같이 표현하였다.

$$D_{fc}^{car} = D_{fc} f_P(\Omega, \delta) \quad (14)$$

$$D_h^{car} = D_h f_P(\Omega, \delta) \quad (15)$$

여기서, D_{fc} 와 D_h 는 중성화 전 염소이온 및 수분의 초기 확산계수이며 이 두 변수의 값은 문헌을 통해 입수할 수 있다. $f_P(\Omega, \delta)$ 는 공극구조 변화가 확산계수에 미치는 영향이며 다음과 같다.

$$f_P(\Omega, \delta) = \frac{\delta}{\delta_0} \frac{\Omega_0}{\Omega} \quad (16)$$

여가서, δ_0 와 Ω_0 는 콘크리트의 초기 constrictivity와 tortuosity이다. tortuosity와 constrictivity는 참고문헌을 참조하여 계산할 수 있다.

3. 모델변수의 단순화

콘크리트 공극률의 중성화 유도감소 계산은 매우 복잡하다. 따라서 문헌에서 얻은 많은 실험 데이터를 요약한 후, 중성화를 반영한 콘크리트 공극률의 변화요인을 Fig. 1에 도시하였다.

중성화에 의한 tortuosity Ω 변화는 초기 콘크리트 공극률을 변수로 가지는 다항함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Omega}{\Omega_0} = -24.35 \phi_0^3 + 15.91 \phi_0^2 - 1.69 \phi_0 + 1 \quad (17)$$

for $0 \leq \phi_0 \leq 0.5$

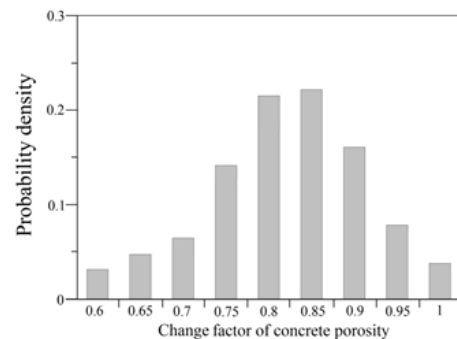


Fig. 1 Change of concrete porosity due to carbonation

콘크리트 임계 반지름의 변화를 반영하는 경험적 공식과 중성화에 의한 constrictivity δ_0 변화에 대한 영향함수는 매우 복잡하다. 중성화로 인한 constrictivity δ_0 의 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\delta}{\delta_0} = 106.60FA_0^3 - 6.71FA_0^2 + 1.16FA + 1 \quad (18)$$

for $0 \leq FA \leq 30\%$

여기서, 물-바인더비(w/b)가 constrictivity δ_0 변화에 적은 영향을 미치므로, 간략화를 위해 이 항을 1로 대체한다. 이어서, 식 (16)은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$f_p(\Omega, \delta) = \frac{106.60FA_0^3 - 6.71FA_0^2 + 1.16FA + 1}{-24.35\phi_0^3 + 15.91\phi_0^2 - 1.69\phi_0 + 1} \quad (19)$$

일부 경우에 콘크리트의 결합능력을 반영하는 바인딩 등온선과 자유 이온 농도의 관계를 선형적으로 단순화시킬 수 있다.

$$C_{bc} = m C_{fc} \quad (20)$$

여기서, m 값은 결합 염화물과 자유 염화물의 관계를 나타내는 상수이다. 자유 염화 농도와 중성화 정도에 따라 변화하는 결합 염화물의 함량은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = (1 - \alpha_c)m \quad (21)$$

결합 염화물 함유량 또한 자유 염소 이온 농도에 영향을 받기 때문에, 염화물 결보기 확산계수에 대한 중성화 함수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f_{\alpha}(\alpha_c) = \frac{f_p(\Omega, \delta)}{1 - \frac{da_L \alpha_c}{\alpha_L + [1 + \beta_L M(\text{Cl}^-) \phi_{we} (C_{fc}/b)]^2}} \quad (22)$$

4. 모델 해석을 위한 수치적인 구현

앞서 언급한 지배방정식을 상용 유한요소 프로그램인 COMSOL의 Physics Builder의 기능을 이용해서 사용자 개발모듈을 기반으로 새로운 모델을 구축하였다. 각 지배방정식 사이의 관계와 해석 순서를 Fig. 2에 도시하였다.

계산 절차는 다음과 같다.

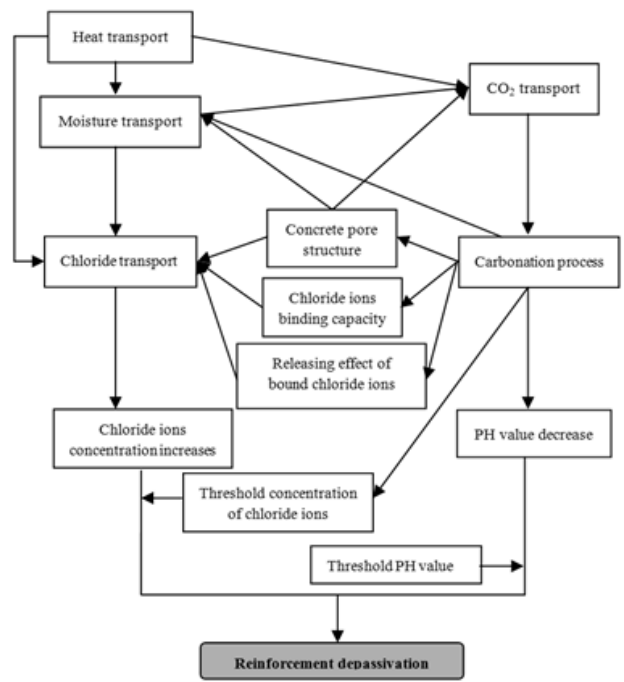


Fig. 2 Structure of the numerical model

- 1) 주어진 경계조건을 바탕으로 식 (5)~(7)을 이용하여 수산화칼슘 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 CSH의 함유량을 계산한다.
- 2) 식 (6)로 계산된 중성화 정도 α_c 는 식 (7)과 (8)에 대입하여 콘크리트 공극 구조의 변화를 추정한다.
- 3) 콘크리트의 tortuosity와 constrictivity을 계산한 후 식 (16)에 대입하면, 중성화가 진행된 부분의 염소이온의 확산계수가 결정된다.
- 4) 주어진 경계조건을 고려하여, 식 (11)를 토대로 염소이온의 농도 측정이 가능하다.

5. 수치해석을 통한 매개변수 분석

5.1 대상 콘크리트

본 논문에서는 Lee et al.(2013) 및 Yoon et al.(2007)가 보고한 중성화와 염소이온 침투가 복합된 시험결과를 이용하여 매개변수 분석 전 모델을 검증하였다. 300×300 mm 단면의 시험체를 대상으로 하였고, 이 때 철근의 지름은 20 mm, 콘크리트 피복두께는 40 mm로 설정했으며, 본 모델은 단면이 대칭이므로 절반만 구축하였다. 골재-바인더비(a/b)는 5, 물-바인더비(w/b)는 0.45, 플라이애쉬 대체 혼입율은 30%, 콘크리트 내 수산화칼슘의 몰비(P_{CSH})는 50%, 수분의 기준 확산계수($D_{h,ref}$)는 $3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$, 자유 염소 이온의 기준 확산계수

($D_{f,ref}$)는 5×10^{-12} m²/sec, 용해된 수산화칼슘의 확산계수 ($D_{ch,d}$)는 1×10^{-13} m²/sec 이다. 온도는 10°C부터 30°C 사이, 습도는 0.7과 0.8의 사이를 유지하여 삼각함수로 모사하였다. 경계면의 염화물 농도는 25 kg/m³이다. 시험체는 일반적인 대기 환경 상태에 놓인 것으로 가정하여 이산화탄소의 부피비율은 0.02%를 사용하였다.

온도, 습도, 이산화탄소, 그리고 염소 이온의 전달은 시험체 하면에서 진행되었으며 시험체의 윗면과 양측면의 플럭스는 영으로 유지하였다. 한 달을 시간 단위로 설정하여 염소 이온의 농도와 중성화도를 계산하였다.

Fig. 3은 50년 이후의 콘크리트 염소 이온 농도와 중성화도를 측정된 결과 값이다.

5.2 중성화 과정에 미치는 주요 배합성분의 영향

5.2.1 중성화 깊이에 영향을 미치는 w/b와 a/b

Fig. 4는 물-바인더 비(w/b)와 골재-바인더 비(a/b)가 중성화 깊이에 미치는 영향을 나타낸다. 골재-바인더 비(a/b)를 상수 5로 고정시킨 후 물-바인더 비(w/b)를 차례로 0.35, 0.45,

0.55로 결정하였다. 그 다음, 물-바인더 비(w/b)가 0.45로 고정되고, 골재-바인더비(a/b)는 각각 4, 5, 6으로 결정되었다. 물-바인더 비(w/b)가 증가할수록 이산화탄소의 확산계수가 증가하기 때문에 중성화도 또한 가속화된다. 또한 골재-바인더 비가 증가할수록 콘크리트 내의 바인더 함유량이 감소하여 외부로부터 침투하는 이산화탄소와 반응하는 콘크리트 내 화학물질도 감소하기 때문에 중성화도가 가속화된다.

5.2.2 중성화도와 pH값에 영향을 미치는 CSH 함유율

CSH 함유율이 다른 세 가지(15%, 30%, 50%) 콘크리트를 준비하여, 40년 노출 콘크리트의 중성화 깊이에 따른 중성화도와 pH값에 미치는 영향을 확인하였다. 그 결과, (1) 이산화탄소와 CSH가 반응하는 속도가 이산화탄소와 수산화칼슘이 반응하는 속도보다 느리기 때문에, (2) 공극수의 pH 값은 오직 용해된 수산화칼슘 농도로만 측정되기 때문에, 비록 수산화칼슘이 완전히 소비되어도 CSH가 함유된 콘크리트 내에서는 중성화 반응이 지속된다. 그러므로 Fig. 5(a)에 도시된 바와 같이, CSH 함유율이 증가함에 따라 중성화 속도가 느려지고, pH 값이 감소하는 속도는 오히려 가속화된다. Fig. 5(b)는 노

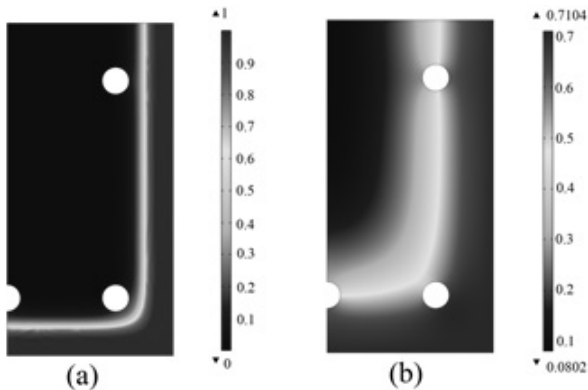


Fig. 3 Numerical simulation results (a) the degree of carbonation and (b) free chloride ions content(% of binder wt.) after 50 years of exposure

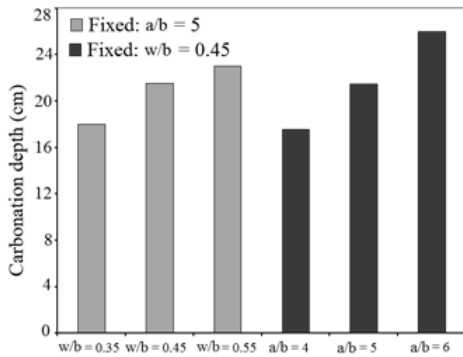


Fig. 4 Influence of water-to-binder ratio and aggregate-to-binder ratio on carbonation depth after 50 years of exposure

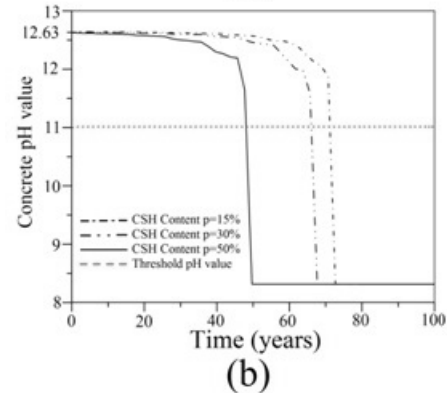
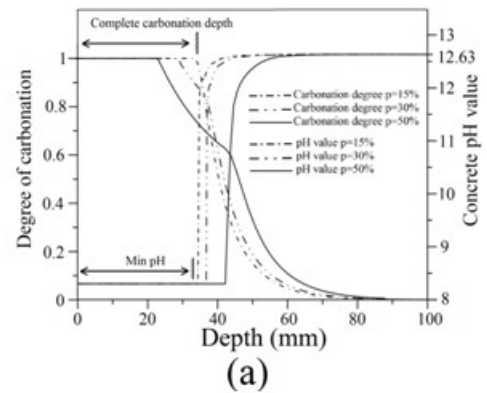


Fig. 5 Influence of CSH proportion on (a) concrete carbonation degree and pH value change according to different depths and (b) pH value change of concrete pore solution around the bottom reinforcement versus exposure time

출시간에 따라 철근 주변의 pH값 변화를 나타내며 CSH 함유율이 증가할수록 임계 pH값에 도달하는 시간이 지연됨을 알 수 있다. 이를 통해, 콘크리트 중성화 깊이만을 토대로 철근 부식 개시를 판단하는 것은 명확한 방법이 아님을 알 수 있다.

5.3 중성화 및 염소이온 침투의 복합열화에 미치는 주요 변수의 영향

5.3.1 플라이애쉬 함량의 영향

Fig. 6에는 중성화와 염소 이온의 침투가 50년 동안 동시에 진행된 후 바인더의 플라이애쉬 함량의 영향을 10%에서 30%의 플라이애쉬 함량에 대해 분석하였다. 중성화와 염소 이온 이동의 복합작용에 의해, 플라이애쉬 함량이 증가할수록 자유 염소 이온의 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

5.3.2 콘크리트 배합비에 따른 $f_p(\Omega, \delta)$

Fig. 7은 중성화에 의한 공극구조 변화가 서로 다른 배합비를 가진 콘크리트의 수분과 염소 이온의 확산계수에 미치는 영향을 보여준다. 일반 포틀랜드 콘크리트의 경우, 골재-바인더 비(a/b)는 상수 5로 고정시키고, 물-바인더 비(w/b)는 각각

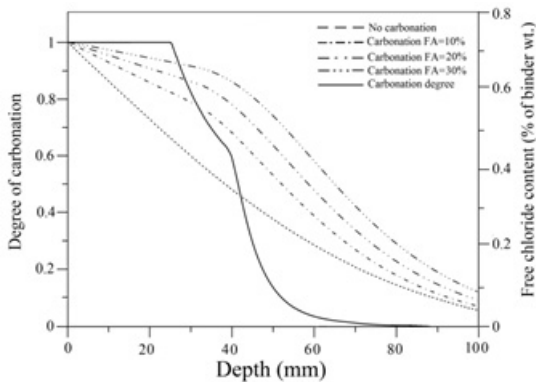


Fig. 6 Effect of fly ash replacement on free chloride content distribution according to different depths

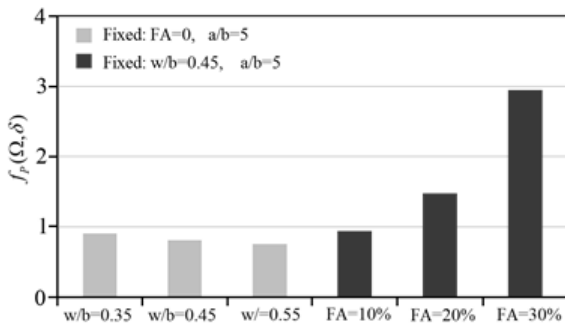


Fig. 7 Influence of carbonation-induced pore structure change on the diffusion coefficients of chloride and moisture

0.35, 0.45, 0.55로 지정하였다. 플라이애쉬 콘크리트의 경우, 물-바인더 비(w/b)는 0.45로, 골재-바인더 비(a/b)는 5로 고정시키고, 플라이애쉬 함량은 각각 10%, 20%, 30%로 지정하였다. 그 결과, 중성화 영향은 바인더 종류와 콘크리트 배합비에 크게 좌우되는 것으로 확인되었다. 일반 포틀랜드 콘크리트의 경우, 중성화가 염화물의 확산계수와 수분을 미미하게 감소시킨다. 즉, 물-바인더 비(w/b)가 증가할수록 확산계수는 감소한다. 플라이애쉬 콘크리트의 경우, 플라이애쉬 함량이 증가함에 따라 염화물 침투가 가속화된다. 즉 플라이애쉬 함량이 증가할수록 확산계수 또한 급격히 증가한다.

콘크리트의 염화물 결합력으로 인해 염화물 확산계수를 직접적으로 얻는 것은 어렵다. 하지만 염화물의 겉보기 확산계수는 쉽게 계산될 수 있으며, 염화물 침투예측의 정확성을 높여준다.

앞서 언급한 바와 같이, 중성화로 인해 공극구조가 변형되고, 염화물 결합력이 감소되면서 염화물 침투에 영향을 미친다. 여기서 염화물 결합력은 자유 염소이온 농도에 좌우되는데, 이는 중성화 효과에 영향을 미친다.

Fig. 8은 다양한 배합비와 자유 염소 이온 농도를 가진 콘크리트 시험체를 준비한 후, 중성화가 콘크리트 염화물 확산계수에 미치는 영향을 나타낸다. 중성화는 콘크리트 내의 자유 염소 이온 농도가 상대적으로 낮을 때 가속화 되는 것으로 확인되었다.

5.3.3 주변 환경의 이산화탄소 농도가 염소 이온 이동에 미치는 영향

Fig. 9은 복합열화 환경에 50년 동안 노출 후 콘크리트 시험체 표면의 이산화탄소 농도가 염소 이온의 이동에 미치는 영향을 도시하였다. 이 분석에서는 표면의 이산화탄소의 농도만 0%에서 5%까지 변동하고 나머지 변수는 동일하게 고정시켰다. 이산화탄소의 농도가 증가함에 따라 중성화가 완료되는 깊이가 점점 증가한다. 또한 중성화에 의해 바인더의 염소

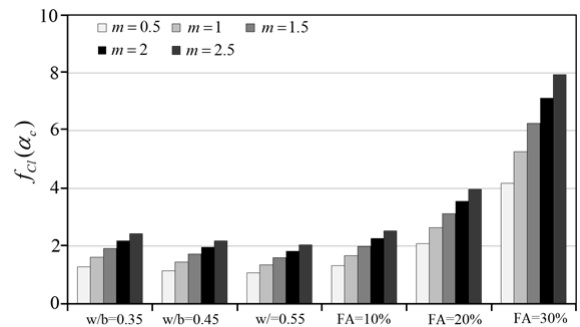


Fig. 8 Influence of carbonation on the apparent diffusion coefficient of chloride for concretes with different mix proportions and free chloride concentration

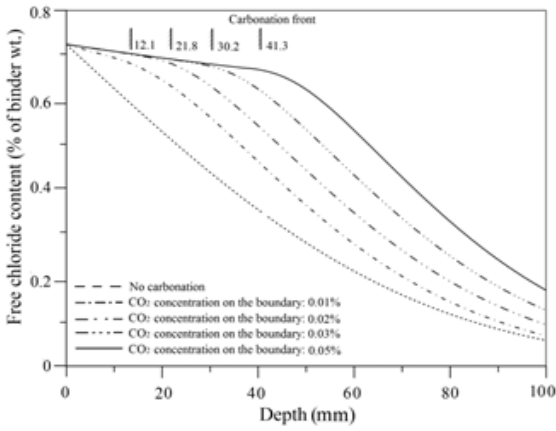


Fig. 9 Influence of carbon dioxide concentration on the surface to the distribution of chloride ion concentration in concrete after 50 years

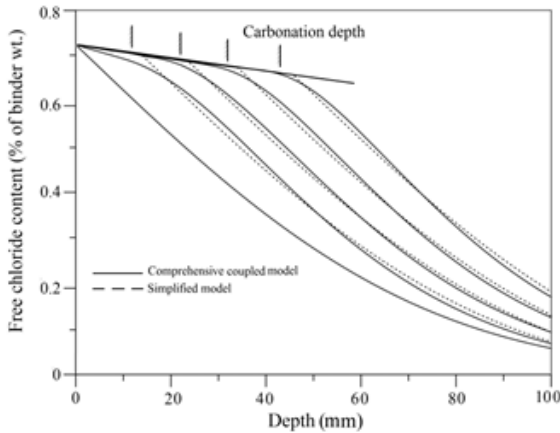


Fig. 10 Comparison of comprehensive coupled model and simplified model

이온 결합능력이 감소하므로 공극수 내 자유 염소 이온의 농도가 증가한다.

Fig. 9의 결과를 참조하면 복합열화 효과를 간단히 분석할 수 있는 근사 법을 제안할 수 있다. 중성화가 완료되는 지점의 자유 염소 이온의 농도는 중성화 깊이에 대해 거의 선형적으로 감소한다. 또한 Fig. 10과 같이 중성화가 완료된 지점 이후에는 자유 염소 이온의 분포에 중성화의 영향은 매우 작다. 그러므로 Fig. 10과 같이 중성화가 완료된 경계면을 자유 염소 이온의 침투가 이루어지는 가상의 표면으로 선택하고, 자유 염소 이온의 농도를 일차원 확산방정식의 해로 모사해도 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이는 마치 중성화의 영향으로 자유 염소 이온의 경계면이 안쪽으로 이동하는 것 과도 유사한 효과를 의미한다. 물론 중성화가 완료되는 지점의 자유 염소 이온의 농도를 추정하는 것에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

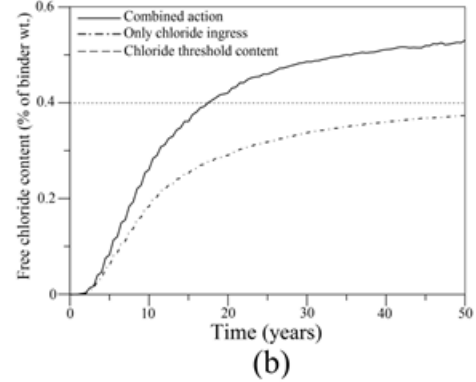
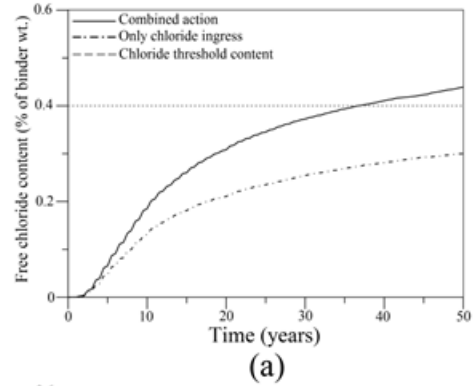


Fig. 11 Free chloride concentration and corrosion initiation time the (a) bottom reinforcement and (b) corner reinforcement versus the exposure time

5.4 철근 하부 및 모서리 부근의 자유 염소이온 함량

철근 하부 및 모서리 주위의 자유 염소이온 침투와 노출시간에 대한 결과는 Fig. 11과 같다. 본 예시 모델에서의 염화물 임계치 함량은 0.4% of binder wt.이다. 철근 부식은 하부 보다 모서리 부근에서 일찍 시작하지만, 철근의 하부와 모서리 부근 모두 중성화에 의한 자유 이온 함량 증가는 상당하다. 하부의 침투 개시시간은 중성화에 의해 70년에서 40년 이하로 앞당겨졌고, 모서리 또한 55년에서 15년으로 당겨졌다. 여기서 알 수 있듯이, 중성화는 철근 부식을 판단할 때 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

6. 결론

- 1) 중성화와 염소 이온의 침투가 동시에 진행되는 복합열화 내구성 문제를 분석하기 위해 개발된 다중물리 지배방정식을 COMSOL의 사용자 모듈형태로 구현하였다.
- 2) 물-바인더비(w/b), 골재-바인더비(a/b), 플라이애쉬 함량, CSH 함량, 콘크리트 초기공극률과 중성화속도가 염화이온 침투에 미치는 영향을 매개변수 분석을 통해 연구하였다.

- 3) 수치적 결과에 의하면, 자유염화물에 대한 중성화의 영향은 상당하며 철근의 부식을 가속할 것이며, 염화물 확산계수에 대한 중성화 영향도는 바인더 종류와 콘크리트 배합비에 영향을 받는다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 산하 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 연구비지원(과제명: 해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술 개발/20120093)을 받아 수행되었습니다.

References

- Backus, J., Mcpolin D., Basheer, M., Long, A., and Holmes, N. (2013), Exposure of Mortars to Cyclic Chloride Ingress and Carbonation, *Advances in Cement Research*, 25(1), 3-11.
- Bastidas-Arteaga, E., Chateaufneuf, A., Sanchez-Silva, M., Bressolette, P. H., and Schoefs, F. (2011), A Comprehensive Probabilistic Model of Chloride Ingress in Unsaturated Concrete, *Engineering Structures*, 33(3), 720-730.
- Bazant, Z., and Najjar, L. (1971), Drying of Concrete as a Nonlinear Diffusion Problem, *Cement and Concrete Research*, 1(5), 461-473.
- Bazant, Z., and Najjar, L. (1972), Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materials and Structures*, 5(1), 546-552.
- Chindaprasirt, P., and Rukzon, S. (2009), Pore Structure Changes of Blended Cement Pastes Containing Fly Ash, Rice Husk Ash, and Palm Oil Fuel Ash Caused by Carbonation, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 21(11), 666-671.
- Delnavaz, A., and Ramezani-pour, A. (2012), The Assessment of Carbonation Effect on Chloride Diffusion in Concrete Based on Artificial Neural Network Model, *Magazine of Concrete Research*, 64(10), 877-884.
- Dong, B., Qiu, Q., Xiang, J., Huang, C., Xing, F., Han, N., and Lu, Y. (2014), Electrochemical Impedance Measurement and Modeling Analysis of the Carbonation Behavior for Cementitious Materials, *Construction and Building Materials*, 54, 558-565.
- Gerven, T., Cornelis, G., Vandoren, E., and Vandecasteele, C. (2007), Effects of Carbonation and Leaching on Porosity in Cement-Bound Waste, *Waste Management*, 27(7), 977-985.
- Ishida, T., Iqbal, P., and Anh, H. (2009), Modeling of Chloride Diffusivity Coupled with Non-Linear Binding Capacity in Sound and Cracked Concrete, *Cement and Concrete Research*, 39(10), 913-923.
- Lee, M., Jung, S., and Oh, B. (2013), Effects of Carbonation on Chloride Penetration in Concrete, *ACI Materials Journal*, 110(5), 559-566.
- Martin-Perez, B., Pantazopoulou, S., and Thomas, M. (2001), Numerical Solution of Mass Transport Equations in Concrete Structures, *Computers and Structures*, 79(13), 1251-1264.
- Metalssi, O., Ait-Mokhtar, A., Turcry, P., and Ruot, B. (2012), Consequences of Carbonation on Microstructure and Drying Shrinkage of a Mortar with Cellulose Ether, *Construction and Building Materials*, 34, 218-225.
- Morandea, A., Thiery, M., and Dangla, P. (2014), Investigation of the Carbonation Mechanism of CH and C-S-H in Terms of Kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cement and Concrete Research*, 56, 153-170.
- Morandea, A., Thiery, M., and Dangla, P. (2015), Impact of Accelerated Carbonation on OPC Cement Paste Blended with Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, 67, 226-236.
- Nakari, K., Ishida, T., and Maekawa, K. (2006), Multi-Scale Physicochemical Modeling of Soil Cementitious Material Interaction, *Soils and Foundations*, 46(5), 653-663.
- Ngala, V., and Page, C. (1997), Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, 27(7), 995-1007.
- Niu, D., Chen, L., and Zhang, C. (2007), Computational Model of Gas Diffusion Coefficient in Concrete, *Journal of Xian University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 39(6), 741-745.
- Papadakis, V., Vayenas, C., and Fardis, M. (1989), A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation, *Journal of the American Institute of Chemical Engineers*, 35(10), 1639-1650.
- Papadakis, V., Vayenas, C., and Fardis, M. (1991), Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation, *ACI Materials Journal*, 88(4), 363-373.
- Papadakis, V., Vayenas, C., and Fardis, M. (1991), Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete, *ACI Materials Journal*, 88(2), 186-196.
- Pham, S. (2014), Effects of Carbonation on the Microporosity and Macro Properties of Portland Cement Mortar CEM I, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2(7), 40-52.
- Phung, Q., Maes, N., Jacques, D., Bruneel, E., Driessche, I., Ye, G., and Schutter, G. (2015), Effect of Limestone Fillers on Microstructure and Permeability Due to Carbonation of Cement Pastes Under Controlled co2 Pressure Conditions, *Construction and Building Materials*, 82, 376-390.
- Pizzol, V., Mendes, L., Frezzatti, L., Jr., H. S., and Tonoli, G. (2014), Effect of Accelerated Carbonation on the Microstructure and Physical Properties of Hybrid Fiber-Cement Composites, *Minerals Engineering*, 59, 101-106.
- Puatatsananon, W., and Saouma, V. (2005), Nonlinear Coupling of Carbonation and Chloride Diffusion in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 17(3), 264-275.
- Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2010), Strength and Carbonation Model of Rice Husk Ash Cement Mortar with Different Fineness, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 22(3), 253-259.
- Saetta, A., and Vitaliani, R. (2004), Experimental Investigation and Numerical Modeling of Carbonation Process in Reinforced Concrete Structures Part I: Theoretical Formulation, *Cement and Concrete Research*, 34(4), 571-579.
- Saetta, A., Scotta, R., and Vitaliani, R. (1993), Analysis of Chloride Diffusion Into Partially Saturated Concrete, *ACI Materials Journal*, 90(5), 441-451.
- Thiery, M., Baroghel-Bouny, V., Morandea, A., and Dangla, P. (2012), Impact of Carbonation on the Microstructure and Transfer Properties of Cementbased Materials, *Transfert, Ecole Centrale de Lille*, pp. 1-10.
- Tolentino, E., Lanmeiras, F., Gomes, A., Silva, C., and Vasconcelos,

- W. (2002), Effects of High Temperature on the Residual Performance of Portland Cement Concretes, *Materials Research*, 5(3), 301-307.
- Tumidajski, P., and Chan, G. (1996), Effect of Sulfate and Carbon Dioxide on Chloride Diffusivity, *Cement and Concrete Research*, 26(4), 551-556.
- Villain, G., and Thiery, M. (2005), Impact of Carbonation on the Microstructure and Transport Properties of Concrete, 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components, LYON (France), pp. 17-20.
- Yoon, I. (2007), Deterioration of Concrete Due to Combined Reaction of Carbonation and Chloride Penetration: Experimental Study, *Key Engineering Materials*, 348-349, 729-732.
- Yoon, I. (2009), Simple Approach to Calculate Chloride Diffusivity of Concrete Considering Carbonation, *Computers and Concrete*, 6(1), 1-18.
- Younsi, A., Turcry, P., Roziere, E., Ait-Mokhtar, A., and Loukili, A. (2011), Performance-Based Design and Carbonation of Concrete with High Fly Ash Content, *Cement and Concrete Composites*, 33(10), 993-1000.
- Yuan, C., Niu, D., and Luo, D. (2012), Effect of Carbonation on Chloride Diffusion in Fly Ash Concrete, *Computers and Concrete*, 5(4), 312-316.
- Yuan, C., Niu, D., Chen, N., and Duan, F. (2013), Influence of Carbonation on the Microstructure of Concrete, *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 32(4), 687-691 (in Chinese, with English abstract).
- Zhu, X. J., Zi, G., Cao, Z., and Cheng, X. (2016), Combined Effect of Carbonation and Chloride Ingress in Concrete, *Construction and Building Materials*, 110, 369-380.

Received : 05/10/2016

Revised : 05/19/2016

Accepted : 05/23/2016

요 지 : 본 논문에서는 철근 콘크리트 단면에서 동시에 진행되는 중성화와 염화물 침투에 의해 진행되는 내구성 문제에 대해 서로 다른 콘크리트의 특성과 주변 환경의 영향을 매개변수 분석을 통해 수행하였다. 이를 위해 콘크리트의 미세 공극 구조의 변화 및 중성화와 염소이온 투과의 상호 화학반응이 직접 지배방정식 형태로 고려된 최신 모델을 사용하여 이 복합작용의 분석을 수행하였다. 이산화탄소, 염소이온, 열 및 수분의 복합적인 이동이 직접 고려되었다. 문헌상의 실험 데이터를 분석하여 모델의 입력변수를 결정하고 계산의 편의성을 증진시켰다. 이 모델을 상용유한요소 프로그램인 COMSOL의 사용자 모듈형태로 개발 하였다. 이 상호작용에 영향을 미치는 물-바인더비 (w/b), 골재-바인더비 (a/b), 플라이애쉬 함량, CSH 함량, 콘크리트 초기공극률 등을 정량적으로 분석하였다. 결과에 의하면, 중성화와 염소이온 침투의 상호작용은 다양한 재료 물성치에 영향을 받는다.

핵심용어 : 부식, 염화물 침투, 중성화, 해양구조물, 앵커 연결부
