

물질이동에 기초한 균열콘크리트의 철근부식 해석

Corrosion Analysis of Cracked Concrete based on Mass Transfer

김태환^{*}

송하원^{**}

김호진^{***}

변근주^{**}

이승훈^{****}

Kim, Tae-Hwan

Song, Ha-Won

Kim, Ho-Jin

Byun, Keun-Joo

Lee, Seung-Hoon

ABSTRACT

The early-age cracks have bad effects on the diffusion movement of chloride ions and oxygen. In this study, a corrosion analysis algorithm for cracked concrete is proposed to examine the influence of early-age cracks on corrosion of RC structures. For different environmental exposure conditions of RC structures, a corrosion model is combined with models for activation polarization and concentration polarization. From the finite element corrosion analysis using the proposed algorithm and the models, the effects of early-age cracks to the corrosion is simulated.

1. 서론

철근 콘크리트 구조물에 있어서 철근부식은 콘크리트 피복의 균열, 박리·박락 등을 일으켜 열화현상을 발생시키는 내구적인 측면의 문제와 더불어 철근 부착응력의 저하, 철근의 단면결손 등의 구조적인 측면의 문제를 일으키게 된다. 콘크리트 내의 철근부식 현상은 부동태 피막을 파괴시키는 염화물 이온과 부식 전지 반응을 일으키는 산소의 물질 이동 현상에 의하여 지배를 받는다. 한편, 콘크리트의 초기 재령에서 발생된 미세 균열은 이러한 염화물과 산소의 물질이동 현상을 촉진시켜 콘크리트 구조물의 수명을 단축시킬 수 있으므로 콘크리트의 균열과 철근부식과의 상관관계를 정량적으로 파악하는 것은 구조물의 내구성 확보 측면에서 중요한 과제라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 철근 콘크리트 구조물의 철근부식 현상에 있어서 균열의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 물질 이동에 기초하여 균열을 가진 콘크리트의 철근부식 해석 알고리즘을 구축하고 부식 해석을 시도하였다.

2. 균열 콘크리트의 철근 부식 해석 알고리즘

콘크리트 내부로 침투한 염화물이 철근주위에 축적되어 한계 염화물량에 도달하면, 부동태 피막이 파괴되

* 정희원, (주) 다산컨설팅턴트 도로부 사원

** 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

*** 정희원, 연세대학교 토목공학전공 박사과정

**** 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원

면서 철근부식이 시작된다. 이러한 부식 반응은 충분한 산소의 공급이 이루어지는 조건 하에서 부식전지 작용에 의해 발생한다. Andrade(1989)는 실험을 통하여 외부 대기 습도가 약 50 %~99 %의 범위에서는 부식에 필요한 산소의 공급이 충분히 이루어지지만, 수중 침지 구조물에서는 산소의 부족 현상으로 부식현상이 억제되는 현상을 연구하였다¹⁾. 따라서 본 연구에는 산소의 공급 조건에 따라 염화물 확산 지배하의 활성화 분극모델과 산소 확산 지배하의 농도 분극모델로써 해석모델을 구성하여 부식현상을 해석하였다.

2.1 활성화 분극모델

본 연구의 활성화 분극 모델에서 철근부식이 시작되는 한계 염화물량은 1.2kg/m³의 전염분량으로 설정하였으며, 부동태 피막이 파괴되어 추가적인 염화물 침투에도 부식속도가 증가하지 않고 공극수의 pH에 의해 부식속도가 지배를 받는 시점을 Hausmann(1967)의 연구결과를 토대로 2.4kg/m³의 전염화물량으로 설정하였다²⁾. 설정된 전염화물량은 고정화 계수 α_{fixed} 를 도입하여 콘크리트 내부에서 부식에 직접 영향을 미치는 자유염화물 형태로 환산하였으며, 배합에 따른 시멘트 단위중량에 대한 자유 염화물량인 $[C_{CS}]$ 와 $[C_{BP}]$ 로 각각 정의하였다.

$$[C_{CS}] = \frac{1.2}{W_{cement}}(1 - \alpha_{fixed}), [C_{BP}] = \frac{2.4}{W_{cement}}(1 - \alpha_{fixed}) \quad (1)$$

철근 위치에서의 자유 염화물량 해석에는 콘크리트의 복합수화발열과 수분이동현상을 고려한 유한요소해석 시스템 DuCOM을 이용하였으며, 송하원(2002)이 제안한 균열 콘크리트의 염화물 확산 모델을 연성 해석하였다³⁾. 콘크리트 내의 자유 염화물량은 식(2)와 같이 질량 보존법칙에 의하여 산출된다.

$$\phi S \frac{\partial C_{cl}}{\partial t} + \text{div} \phi S (-D_{cl} \nabla C_{cl} / \Omega + q_s^{eq} C_{cl}) + Q_{cl} = 0 \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 공극률, S 는 포화도, C_{cl} 은 자유 염화물농도, q_s^{eq} 는 등가 수분 유속, D_{cl}^{eq} 는 등가 염화물 확산 계수 ($= 2099w^2 + 95w + 1$)이며, Q_{cl} 은 생성·소멸항이다.

한편, 자유 염화물량에 따른 Tafel 기울기의 변화는 그림 1과 같이 3단계로 나누어 고려할 수 있으며 각 단계에서의 부식 전류 밀도는 표 1과 같다.

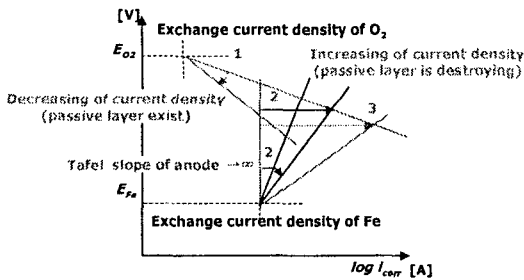


그림 1. 자유 염화물량에 따른 Tafel 기울기 변화

표 1. 자유 염화물량에 따른 부식 전류 밀도

단계	부동태 피막 상태	부식 전류 밀도 (A/m ²)
1	존재	$i_{corr} = i_{0_a}$
2	파괴 진행	$i_{corr} = 10^{\left(\frac{0.996 - 0.06pH - 0.059 \log i_{0_a} + \beta \log i_{0_a}}{\beta + 0.059} \right)}$ $\beta = 0.059 \frac{[C_{BP}] - [C_{CS}]}{Cl^- - [C_{CS}]}$
3	파괴	$i_{corr} = 10^{8.458 - 0.508pH + 0.5 \log i_{0_a} + 0.5 \log i_{0_a}}$

2.2 농도 분극모델

수중 침지 구조물과 같이 부식현상에 의해 소비되는 산소량에 비해 외부로부터의 산소 공급이 부족한 환경에서는 산소의 농도차에 의한 농도분극 현상이 발생하게 되는데 이러한 산소 확산 지배하에서의 부식속도는 산소의 공급 플럭스에 의해 지배받게 된다. 산소의 공급 플럭스는 식(3)과 같은 산소의 질량 보존 법칙을 통해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \{0[(1-S) \cdot \rho_{gO_2} + S \cdot \rho_{dO_2}]\} + \text{div} J_{O_2} - Q_{O_2} = 0 \quad (3)$$

여기서, ρ_{gO_2} 는 기체 산소의 밀도(kg/m³), ρ_{dO_2} 는 용존 산소의 밀도(kg/m³), J_{O_2} 는 철근에 공급되는 산소의 플럭스(kg/m²·s), Q_{O_2} 는 생성·소멸항이다.

본 연구에서는 균열을 갖는 콘크리트의 산소확산 현상을 모델링하기 위해 그림 2와 같이 1-D 이방성 균열모델을 수정하여 산소 공급 플럭스에 적용하였다.

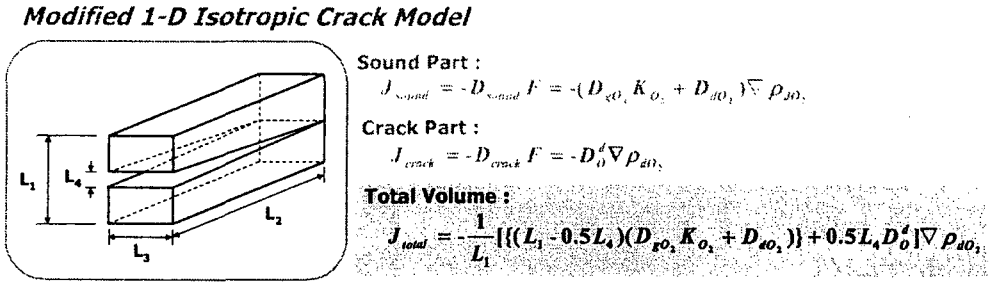


그림 2. 균열 콘크리트의 산소 공급 플럭스

생성·소멸항 Q_{O_2} 는 콘크리트 내에서 소비되는 산소의 양을 의미하며 Faraday법칙을 이용하여 식(4)와 같이 철근 부식으로 인해 소비되는 산소량을 부식전류밀도의 함수로 표현할 수 있다.⁴⁾

$$Q_{O_2} = -\phi S \frac{M_{O_2} i_{corr}}{z_{O_2} F} \cdot \frac{A_{bar}}{V_{elem}} \quad (4)$$

여기서, M_{O_2} 는 산소의 분자량, i_{corr} 은 부식 전류 밀도, z_{O_2} 는 산소의 전하수, F 는 Faraday정수, A_{bar} 는 요소 내에 존재하는 철근의 표면적, V_{elem} 은 요소의 체적이다. 한편, 콘크리트 내에서 농도 분극 현상이 발생하게 되면 캐소드 전위는 산소의 농도 분극에 해당하는 과전압만큼 감소되어 한계전류밀도로 고려될 수 있으며 이때의 용존산소 공급 플럭스는 식(5)와 같이 한계전류밀도에 비례한다고 가정할 수 있다.

$$i_L / z_{Fe} F = J_{O_2} \quad (5)$$

3. 재료 및 환경 조건에 따른 균열 콘크리트의 철근 부식 해석

본 연구에서는 그림 3과 같이 콘크리트를 모델링하고 표 2의 환경 및 재료 조건을 제한된 철근부식 해석 알고리즘에 적용하여 해석을 실시하였다. 철근 피복 두께는 5cm로 설정하였으며 재령 28일 이후에 염해 환경에 노출되는 것으로 설정하였다. 또한 균열폭은 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5mm의 5가지 경우를 설정하여 w/c 45% 와 65%에 대하여 각각 해석하였다.

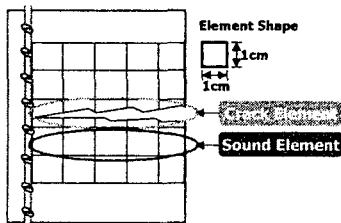
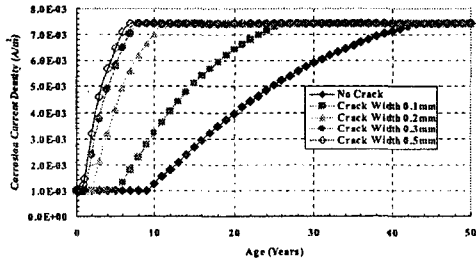


그림 3. 대상 구조물 및 FEM 모델링

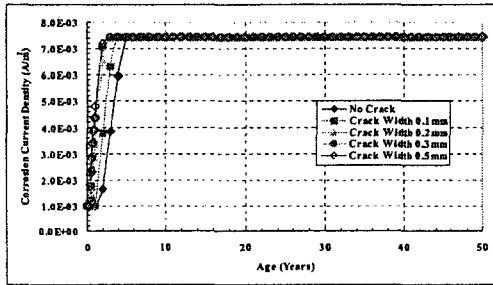
표 2 해석에 사용된 환경조건 및 재료조건

환경 조건				
구분	외부 염화물 농도	외부 습도		
비말대 구조물	0.3 mol/ℓ	70 %		
침지 구조물	0.5 mol/ℓ	100 %		
재료 조건				
물-시멘트비	시멘트	굵은 골재	잔골재	물
45 %	365 kg	1102 kg	735 kg	164 kg
65 %	246 kg	1059 kg	867 kg	160 kg

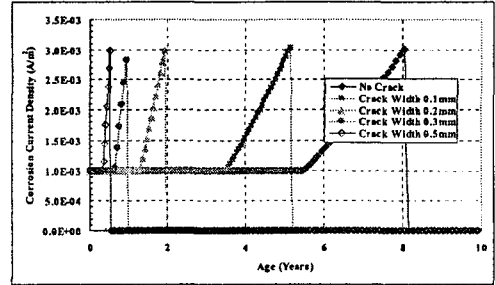
비말대 구조물과 침지 환경하의 구조물에 대한 해석 결과는 각각 그림 4, 그림 5와 같다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 비말대와 침지 구조물 모두 45%의 낮은 물-시멘트비 배합에서 균열의 영향이 더 크게 나타났으며, 균열폭이 0.1mm보다 큰 경우에는 균열의 영향이 급격히 증가되는 것으로 해석되었다. 따라서 염해 환경 하의 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 증진을 위해 낮은 물-시멘트를 사용하고 균열폭에 대한 제한을 두어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.



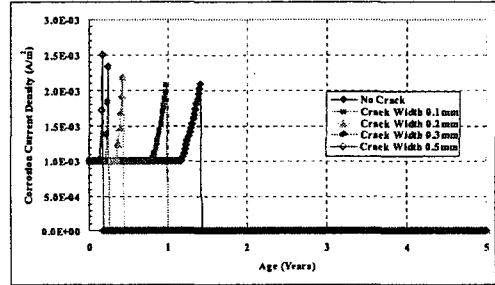
(a) W/C=45%



(b) W/C=65%



(a) W/C=45%



(b) W/C=65%

그림 4. 비말대 환경에서 부식 전류 밀도의 시간에 따른 변화

그림 5. 침지 환경에서 부식 전류 밀도의 시간에 따른 변화

4. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 산소 공급조건에 따라 염화물 확산 지배하의 활성화 분극모델과 산소지배하의 농도 분극모델로 이루어진 부식모델을 구성하였다.
- (2) 콘크리트의 부식에 대한 균열의 영향을 고려하기 위하여 등가 산소확산계수 개념을 도입한, 수치 해석적인 방법을 통하여 균열 콘크리트의 철근부식 현상을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다.
- (2) 철근부식 해석을 통해 물-시멘트비에 따른 균열효과를 관찰하였으며, 0.1mm 이상의 균열폭은 철근부식의 관점에 서 구조물의 급격한 성능저하를 초래할 수 있다는 것을 해석을 통해 확인하였다.

참고문헌

1. Andrade, C., Alonso, C., Rz-Maribona, I. and Garcia, M. (1989), "Suitability of the Measurement Technique of Oxygen Permeability in order to Predict Corrosion Rates of Concrete Rebars", *Paul Klieger Conference*, ACI, San Diego
2. Hausmann, D. A. (1967), "Steel Corrosion in Concrete", *Materials Protection*, Vol. 11, pp. 19
3. 송하원, 박상순, 변근주 (2002), "초기재령에서 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 침투 해석", *대한토목학회 논문집*, Vol. 21, No 6-A, pp 925-936
4. Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. (2003), "Multi-scale Modeling of Concrete Performance", *Journal of Advanced Concrete Technology*, JCI, Vol. 1, No. 2, pp. 91-126