

# 철근콘크리트 구조물의 철근부식과 부식균열의 발생 예측

## Prediction of Steel Corrosion and Corrosion Cracking in Reinforced Concrete Structures

김 호 진\*      조 호 진\*      송 하 원\*\*      변 근 주\*\*  
Kim, Ho Jin      Jo, Ho jin      Song, Ha Won      Byun, Keun Joo

### ABSTRACT

In this study, a micro-corrosion model of steel in RC structure is established for micro-structure development in view to micro-mechanics and the model is composed of chloride penetration model and oxygen diffusion model to evaluate for corrosion rate and accumulated corrosion amounts. Also the model is composed of corrosion-cracking model for prediction of corrosion-cracking. The time and space dependent induced corrosion-cracking of RC structures including changes of corrosion rates and concentrations of chloride ion are simulated using the finite element analysis adopted the proposed model. Then, results of the analysis are compared with test results for verification.

### 1. 서론

철근부식은 철근콘크리트 구조물에 있어 가장 중요한 열화현상의 하나이며 일단, 부식이 발생되면 급속한 속도로 부식생성물을 형성하여 부식균열을 야기시켜 구조물의 내하력 뿐 아니라 내구성능에 막대한 악영향을 끼치는 결과를 초래할 수 있다. 철근콘크리트 구조물에서 이미 철근에 부식이 진행된 경우에는 유지관리를 수행함에 있어서 보수나 보강이 쉽지가 않고, 구조물의 내구수명을 평가하는 데도 많은 어려움이 따른다. 따라서, 설계단계에서부터 철근부식에 의한 부식균열을 고려한 내구적 설계 개념의 도입이 필요하다.

\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정

\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

본 논문에서는 시공당시의 배합조건과 사용중의 환경조건을 고려하며, 콘크리트의 복합수화발열 및

세공구조를 고려한 정량적인 해석방법으로 염화물이온의 침투이력과 부식속도의 예측을 시도함으로써 철근콘크리트 구조물에 있어 철근부식으로 인한 열화의 평가를 시도한다.

## 2. 콘크리트 내의 철근부식 모델

### 2.1 염화물 침투 모델

본 연구에서는 콘크리트의 복합수화발열 모델, 세공구조 및 수분이동 모델로 구성된 열역학 해석모델과의 연계성을 유지시켜, 구조물의 초기재령에서부터 임의의 조건에서의 염화물 침투 확산 거동을 시공간축으로 추적할 수 있는 염화물 침투 모델을 적용하였다<sup>1)</sup>. 콘크리트 내의 염화물 이온량은 염화물 농도 및 콘크리트 내 공극률과 함수율로부터 구한 미수화 수분량에 의해서 산출된다. 불포화 상태인 콘크리트에서의 염화물 침투 과정은 모세관 흡입에 의한 세공액의 모세관 흐름과 농도차에 의한 이온확산의 합으로 표현되며 농도구배와 공극수압 구배를 고려하여 염화물 이온의 침투를 해석하였다.

$$J_{cl} = J_{ca} + J_{df} \text{ (mol/m}^2\text{s)} \quad (1)$$

여기서,  $J_{ca}$ 는 모세관 흡착흐름에 의한 플럭스이며,  $J_{df}$ 는 염화물 확산에 의한 플럭스이다.

한편, 염화물 침투 모델에 적용된 염화물 이온의 확산계수는 이온이 전기화학적 물질이동을 정의한 Nernst-Planck의 식과 공존이온의 영향을 반영한 Debye-Hückel 이론을 고려하고 온도, 골재 및 습도에 관한 영향을 개별적인 인자의 변동성을 반영한 계수를 도입하여 표현하였다.

$$D_{cl} = D_{cl,w} \cdot f_1(T) \cdot f_2(g_i) \cdot f_3(h) \quad (2)$$

본 연구에서 적용한 염화물 침투 모델로 염화물 침투과정을 해석하기 위해서는 각 요소의 시간에 따른 공극률, 함수비 및 수분의 유속 등의 입력값이 필요하다. 따라서, 해석에 있어 상호 관련된 수화발열, 수분이동 및 공극구조 형성모델 등을 연성 해석을 위해 초기재령에서부터 콘크리트의 고체형성 과정을 임의의 단계로 시뮬레이션이 가능한 3차원 유한요소해석 시스템 DuCOM에 염화물 침투 해석 모델을 연성시켜 해석하였다<sup>2)</sup>.

부식을 시작되는 한계염화물농도는 염화물이온의 구속도, 세공용액의 pH, 콘크리트의 확산저항성, 비저항 등 콘크리트의 특성, 외부 환경요인 등 여러 가지 인자가 복합적으로 작용하는 것이기 때문에 일관된 값을 제시하기는 어렵지만, 콘크리트 단위부피 당 염화물이온의 양보다 시멘트의 양에 따라 부식반응에 관여하는 자유염화물이온의 양이 달라지므로 자유염화물의 농도로 한계염화물의 농도를 제시하는 것이 더 의미있다고 판단하여 콘크리트내부의 자유염화물량이 0.04(% wt of cement)를 상회하는 시점에서 부식이 개시한다고 가정하였다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 OPC를 사용한 콘크리트 시편에 대한 염해 분무시험을 실시하여 침투 깊이 및 깊이별 자유 염화물량을 측정된 결과와 염화물 침투 모델로 해석한 결과를 비교분석 하였다. 시편은 10×20cm 원주형 공시체를 사용하였으며 2주간 수중양생 후 시편 측면 및 하면을 파라인 코팅하여 물질이동의 방향을 1차원으로 제한하고 재령 28일까지 기건양생한 후 종합내구성 시험기를 이용하여 시험하였다. 시험 조건과 시험에 사용된 시편의 배합은 표 1, 표 2와 같고 자유염화물의 분포를 해석한 결과는 그림 1, 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

표 1 염화물 확산 모델 구속 및 초기 해석조건

구속 조건			초기 조건		
열전도	수분이동	염화물이동	열전도	수분이동	염화물이동
20℃	건조개시후 RH 90%	외부 농도 0.5mol//	20℃	RH 100%	초기 농도 0mol//

표 2 시험시편의 배합

No	W/C (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/cor)				건 조 조 건
			C	W	S	G	
1	45	44.5	406	183	805	1004	상대습도 : 60% 온도 : 20℃
2	55	46.5	333	183	869	1000	

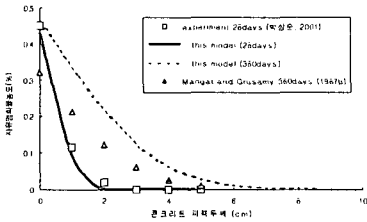


그림 6 OPC에 대한 자유염화물량 분포 해석 및 실험

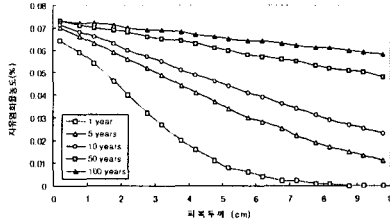


그림 7 피복두께에 따른 자유염화물 농도의 분포

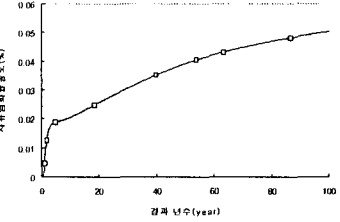


그림 8 피복두께 10cm에서의 자유염화물농도

2.2 산소확산 모델

철근부식은 염화물이온에 의한 부동태피막의 파괴로부터 시작되지만 부식전지를 형성하기 위한 충분한 산소가 콘크리트 내에 함유되어 있지 않다면 철근부식은 진행되지 않는다. 결국, 부동태피막 파괴 후에는 철근콘크리트 구조물에서의 철근부식은 산소의 농도에 의해 부식 속도가 지배된다고 볼 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 콘크리트 내의 산소의 농도를 파악하기 위해 산소확산 모델을 도입하기로 하며, 물시멘트비, 피복두께, 공극의 굴곡도 등이 산소확산계수를 지배하는 주요한 인자로 고려하였다.

본 연구의 부식모델에서는 石田(1997)의 산소확산모델을 연계하여 적용하였다. 콘크리트 내의 물질이동 연속방정식은 연속체에서 계 내에 존재하는 물질의 질량보존법칙을 적용하여 표현할 수 있으며, 기체산소와 용존산소로 존재하는 콘크리트 내의 산소의 질량보존법칙을 적용하여 산소이동의 연속방정식을 식(3)과 같이 표현할 수 있다<sup>4), 5)</sup>.

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

여기서,  $\phi$ 는 공극률,  $S$ 는 공극의 포화도이며,  $\rho_{gO_2}$ 는 기체산소밀도( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\rho_{dO_2}$ 는 용존산소밀도( $\text{kg}/\text{m}^3$ )이다. 또,  $J_{O_2}$ 는 기체 및 용존 산소의 유속( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )이며,  $Q_{O_2}$ 는 생성·소멸하는 산소량( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ )이다.

부식에 소비되는 산소량은 상당히 많기 때문에 부식전류밀도와 Faraday법칙을 적용하여  $Q_{O_2}$ 를 산출한다

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

여기서,  $M_{O_2}$ 는 산소의 분자량이고,  $i_{corr}$ 는 부식전류밀도이다.  $z_{O_2}$ 는 산소의 전하수이며,  $F$ 는 Faraday 정수이며  $A_{bar}$ 는 요소 내에 존재하는 철근 표면적,  $V_{elem}$ 는 요소의 체적이다.

한편, 기체 및 용존 산소의 유속  $J_{O_2}$  는 분자확산이론과 Knudsen확산이론을 모두 고려한다. 공극의 경로가 찌그러져 있으며, 공극의 구조가 불규칙하게 되어 있는 콘크리트와 같은 고체 내에서의 확산속도는 공극률과 길이인자 및 형상인자를 고려한 유효확산계수로서 질량 플럭스를 표현할 수 있다.

$$J_{O_2} = -(D_{gO_2} \nabla \rho_{gO_2} + D_{dO_2} \nabla \rho_{dO_2}) = -(D_{gO_2} \cdot K_{O_2} + D_{dO_2}) \nabla \rho_{dO_2} \quad (5)$$

$$D_{gO_2} = \frac{\phi \cdot D_O^g}{\Omega} \frac{(1-S)^3}{1 + l_m/2(r_m - t_m)} \quad D_{dO_2} = \frac{\phi S}{\Omega} D_O^d \quad (6)$$

여기서,  $D_{gO_2}$  은 공극을 통과하는 기체산소 확산계수이며,  $D_{dO_2}$  는 공극 내의 용존산소 확산계수이다.  $\Omega$  는 공극의 굴곡도를 표현하는 파라미터,  $r_m$  는 불포화공극의 평균반경,  $t_m$  은 반경  $r_m$  의 공극 내의 흡착수층의 두께,  $D_O^d$  는 용존산소의 확산계수( $=1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )이다.

### 3. 철근의 부식균열 모델

부식이 발생한 후 부식생성물로 인한 부식균열의 발생 예측은 Liu(1996)가 제안한 부식균열 유발 한계식에 부식에 의한 철근의 변위와 부식생성물에 의한 콘크리트 내부 압력을 고려하고 부식균열을 야기시키는 부식생성물의 두께  $d_s$  를 대입하여 수정함으로써 부식균열발생 한계식을 식(7)에 제안하였다<sup>6)</sup>.

$$W_{crit} = \pi D \frac{\rho_{st} \rho_{rust}}{\rho_{st} - \kappa \rho_{st}} \left\{ \left[ d_o + \frac{D(1 + \nu_r) \beta q_{cr}}{(1 + \nu_r) \beta q_{cr} - 2E_r(K^2 - 1)} \right] \right\} \quad (7)$$

여기서,  $D$  는 철근의 지름,  $\rho_{st}$  는 부식된 철근의 밀도,  $\rho_{rust}$  는 부식생성물의 밀도,  $\kappa$  는 철분자량과 부식생성물의 분자량의 비이다. 또,  $d_o$  는 공극의 두께이며  $\nu_r$  는 부식생성물의 포아송비,  $q_{cr}$  은 균열을 야기시키는 인장응력,  $E_r$  은 부식생성물의 탄성계수이며,  $\beta$  는 변형계수,  $K$  는 부식생성물에 관한 계수이다.

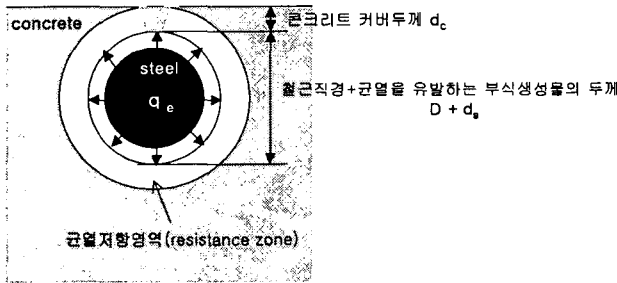


그림 9 부식생성물에 의한 부식팽창 모식도

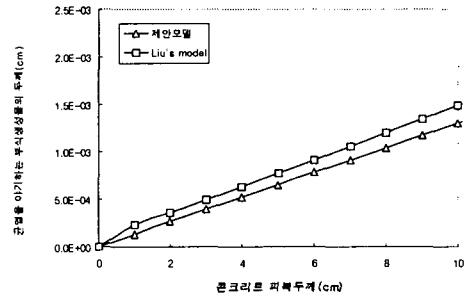


그림 10 피복두께인 다른 한계부식생성물의 두께

#### 4. 철근부식속도와 부식균열 해석

본 논문에서 제안된 철근부식 모델을 적용하기 위하여 그림 6과 같은 대상 구조에 대해 2차원 유한요소 해석을 실시하였다. 또한, 해석 결과를 적용하여 염해에 의한 철근부식의 열화단계를 평가하였다. 표 3에는 열화단계의 해석조건을 나타내었다.

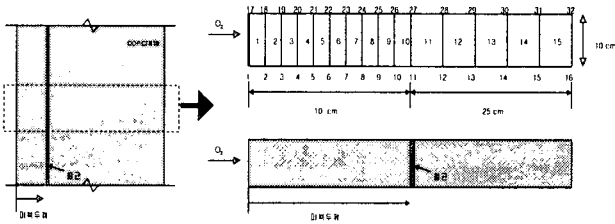


그림 11 철근부식 평가를 위한 유한요소 해석 대상구조물

표 3 열화단계 해석조건

변수명	값	변수명	값
압축강도 $f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	350.00	공극영역두께 $d_0$ ( $\mu$ m)	12.50
인장강도 $f_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	29.20	콘크리트 (kg)	2,357.00
탄성계수 $E_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	280,624.30	시멘트 (kg)	407.00
포아송비 $\nu_c$	0.18	굵은골재 (kg)	983.00
크리프 계수 $\phi_c$	2.00	잔골재 (kg)	788.00
철근직경 $D$ (cm)	1.90	물시멘트 비 (%)	44.00
철근비중 $\rho_{st}$ (g/cm <sup>3</sup> )	7.85	외기 염화물농도 (mol/l)	0.10
부식생성물비중 $\rho_{rust}$ (g/cm <sup>3</sup> )	4.00	상대습도 (%)	60.00
분자량비 $\kappa$	0.57	외기온도 (°C)	25.00

해석 결과로 철근주변에 자유염화물농도가 0.04%에 도달하여 부식이 발생하는 내구수명은 피복두께가 5cm인 경우에는 약 6년, 피복두께가 10cm인 경우에는 약 36년으로 해석되었고 그림 7에 나타내었다. 또한, 제안한 식(7)을 이용하여 부식균열이 발생하는 한계부식생성물량의 해석을 그림 8에서와 같이 피복두께 5cm와 10cm의 경우에 대해 각각 나타내었다. 한편, 본 논문의 해석모델을 이용한 FEM해석을 통해 대상구조물에서의 누적부식량을 계산한 결과는 그림 9에 나타내었다.

본 연구에서 제안되어 계산한 각각의 피복두께에 따른 부식균열이 발생하는 한계부식생성물량을 초과하는 시점은 그림 9에서의 누적부식생성물량과의 비교를 통해 피복두께가 5cm인 경우에는 약 1.6년, 피복두께가 10cm인 경우에는 1년으로 계산되었다.

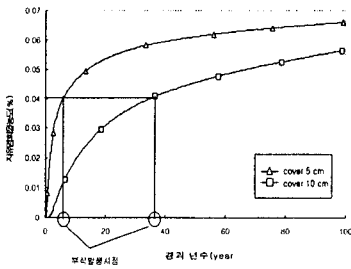


그림 12 피복두께에 따른 철근주변의 자유염화물농도

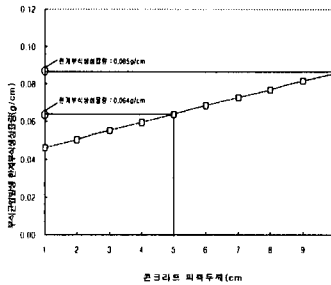


그림 13 콘크리트 피복두께에 따른 부식균열발생한계량

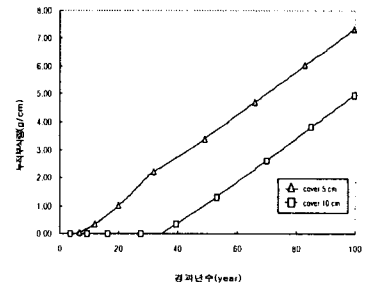


그림 14 해석모델에 의한 누적부식량 해석

해석결과를 종합한 열화단계의 해석결과는 그림 10과 같고 Liu의 모델과 SVB모델과의 해석값 비교는 표 4에 나타내었다.

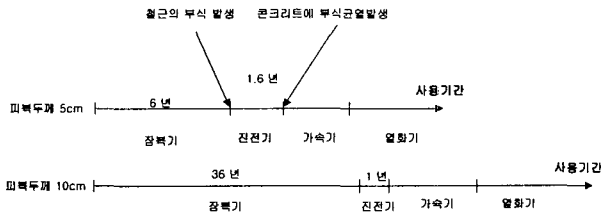


그림 15 해석모델을 통한 사용기간에 따른 구조물의 열화단계의 해석결과

표 4 제안모델과 Liu의 모델과 SVB 모델과의 해석비교

	cover depth	initiation period (year)	propagation period (year)	$T_{\text{life}}$ (year)
제안 모델	5cm	6	1.6	7.6
	10cm	36	1.0	37.0
Liu's model	5cm	-	0.6	0.6
	10cm	-	1.1	1.1
SVB model	5cm	-	5.5	5.5
	10cm	-	11.0	11.0

- Liu model과 SVB model의  $i_{\text{corr}}$ 은 대상구조물의 평균  $i_{\text{corr}}$ 로 계산된  $3.0 \mu A/cm^2$ 로 적용

## 5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 제안된 철근부식모델을 통해 구조물에 부식이 발생하는 부식시점과 부식이 진행됨에 따라 콘크리트 피복에 부식균열이 발생하는 시점의 예측을 시도하였고 타당성을 검증하였다.
- (2) 부식속도의 추정을 위해 산소확산에 의한 산소공급량에 의존하게 되는 부식이론을 도입하였고, 철근의 부식속도에 콘크리트의 공극률과 공극의 포화도, 피복두께 등이 지배적인 인자임을 밝혀내었다.

## 참고문헌

1. 박상순(2001), "염해에 노출된 콘크리트에서의 초기 균열 및 염화물 이동 평가", 박사학위논문, 연세대학교, 서울, 대한민국.
2. Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T. (1999), *Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London and New York.
3. Broomfield, J. P.(1997), *Corrosion of Steel in Concrete Understanding : Investigation and Repair*, E&FN SPON, pp.187-197.
4. 石田哲也, Chaube, R.P., 岸 利治, 前川宏一 (1997a), "微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮, 乾燥収縮及びその複合に関する解析的検討", *土木學會論文集*, Vol. 37, No. 578, pp. 111-121.
5. 石田哲也, Chaube, R.P., 岸 利治, 前川宏一 (1997b), "任意の乾濕繰り返しを受けるコンクリートの含水状態豫測モデル", *土木學會論文集*, Vol. 35, No. 414, pp. 199-209.
6. Liu, Y. and Weyer, R. E.(1998), "Modelling of Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures", *ACI Materials Journal*, Nov.-Dec., pp. 675-681.