

균열을 갖는 초기재령 콘크리트의 염화물 침투 해석

Chloride-Penetration Analysis in Cracked Early-Age Concrete

송 하 원* 박 상 순** 변 근 주***
Song, Ha Won Park, Sang Soon Byun, Keun Joo

Abstract

In this study, a mathematical model is established for prediction of chloride penetration in unsaturated cracked early-age concrete. The model is combined with models for thermo-hygro dynamic coupling of cement hydration, moisture transport and micro-structure development. Chloride permeability and water permeability at cracked early-age concrete specimens are evaluated using a rapid chloride permeability test and a low-pressure water permeability test, respectively. Then, a homogenization technique is introduced into the model to determine equivalent diffusion coefficient and equivalent permeation coefficient. Increased chloride transport due to cracks at the specimen could be predicted fairly well by characterizing the cracks using proposed model. Proposed model is verified by comparing diffusion analysis results with test results.

1. 서론

콘크리트의 균열은 염화물 이온의 침투 거동에 큰 영향을 미친다.^{1,2)} 특히 균열을 허용균열폭 내에서 허용하는 RC 구조물의 경우 재령 초기에 열적 팽창과 수축작용 등에 의해 미세균열이 발생할 가능성이 높기 때문에 이온 침투 해석시 손상에 의한 균열의 영향이 반영되어야 하나 이를 고려한 연구는 매우 부족한 실정이며 수화작용으로 인해 재료특성이 변화하는 초기재령에서의 침투특성에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 초기 재령에서 균열이 발생한 콘크리트의 염화물 침투 확산 해석 수법을 개발하고 그 타당성을 입증하는 것을 연구의 목적으로 한다. 이를 위해 콘크리트에서의 수화발열반응, 세공구조형성, 수분이동 및 유지의 상호연관을 고려하여 초기재령에서의 콘크리트 거동 해석과 염화물 침투 거동을 연성시켜 유한요소 해석하였다. 초기재령에서 발생한 콘크리트 균열의 영향을 고려하기 위해 평균화 기법을 도입하여 등가 확산 및 투수계수를 도출하여 염분확산 모델에 반영시켜 균열이 발생한 콘크리트의 염화물 침투 확산의 해석이 가능하도록 하였다. 균열이 도입된 콘크리트 공시체에 대한 촉진 확산 및 저압 투수 시험을 실시하여 그 결과를 평균화 기법으로 구한 등가 확산 및 투수계수와 비교하였다. 또한 불포화 상태에서의 염해분무시험을 실시하여 그 결과를 동일한 조건의 염분확산 모델의 해석결과와 비교하여 제안된 해석모델의 타당성을 입증하였다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

2. 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 확산 및 투수 모델

2.1 확산모델

균열의 영향을 해석모델에 반영하기 위하여 본 연구에서는 균열을 가진 콘크리트의 대표체적요소 (Representative Elementary Volume: REV)를 가정하고 균열부와 건전부의 확산계수를 등가 확산계수로 평균화시키는 평균화 기법을 도입하였다. REV내에는 이온 확산경로인 모세관 공극이 다양한 크기의 반경 r_i 와 면적 A_i 를 가진 원통형관이 평행하게 배열되어 있는 것으로 가정하였으며 균열도 균열폭을 직경으로 하며 균열면적 A_{cr} 을 갖는 하나의 원통형관으로 가정하였다. 또한 이동이온과 콘크리트내 고형체와의 상호작용 및 이온 상호작용은 고려하지 않으며 균열부는 포화상태로 가정한다. 이런 가정을 기초로 REV의 세공용액에 대한 이동이온의 평균 흐름비 \overline{Q}_i^L (mol/s)은 모세관을 통한 이온 평균 흐름비 \overline{Q}_{icp}^L 와 균열을 통한 이온의 평균 흐름비 \overline{Q}_{icr}^L 의 합으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{Q}_i^L = \overline{Q}_{icp}^L + \overline{Q}_{icr}^L \quad (1)$$

원통형관을 통한 이온확산은 Fick의 제 1법칙을 따른다고 가정하고 이를 기초로 모세관 단면을 통한 이온 흐름비 \overline{Q}_{icp}^L 는 다양한 반경을 가진 모세관의 플럭스와 단면적 곱의 합으로 식(2)와 같다.

$$\overline{Q}_{icp}^L = \overline{J}_{cp}^L \sum A_i = -D_{cl} \overline{F}^L A_{cp} \quad (2)$$

여기서 \overline{J}_{cp}^L (mol/m²s)과 A_i (m²)는 각각 공극 반경 r_i (m)를 가진 원통형관에서의 평균 이온 플럭스와 단면적이며, A_{cp} 는 모세관 단면적의 총합인 $\sum A_i$ 이고 \overline{F}^L (mol/m⁴)은 콘크리트내 이온 농도구배이다. 균열은 균열폭을 직경으로 하는 원통형관으로 가정하면 균열에서의 평균 이온 흐름비 \overline{Q}_{icr}^L 은 식(3)과 같다.

$$\overline{Q}_{icr}^L = \overline{J}_{cr}^L A_{cr} = -D_{crack} \overline{F}^L A_{cr} \quad (3)$$

REV를 통과하는 총염화물 이온의 흐름비 \overline{Q}_i^L 은 등가 유효확산계수 D_{cl}^{eq} 를 이용해 식(4)와 같다.

$$\overline{Q}_i^L = \overline{J}_i^L (A_{cp} + A_{cr}) = -D_{cl}^{eq} \overline{F}^L A_o^L \quad (4)$$

식(2),(3),(4)를 식(1)에 대입하여 정리한 후, A_o^L/A_{cr} 를 R_a^L 로 정의하고 양변을 D_{cl} 로 나누어주고 $R_a^L - 1 \approx R_a^L$ 로 가정하고 R_a^L 과 R_a 의 관계를 $R_a^L = \frac{\theta}{\Omega} R_a$ 로 정의하면 REV 전단면에 대한 등가 유효확산계수를 식(5)와 같이 도출할 수 있다.

$$D_{cl}^{eq} = \left(\frac{\Omega D_{crack}}{R_a \theta} + D_{cl} \right) \quad (5)$$

균열면에서의 확산계수 D_{crack} 은 촉진 확산실험을 통해 균열폭의 함수로 결정한다.

2.2 투수모델

균열을 가진 콘크리트의 투수의 모델링을 위해 확산모델에서와 동일한 가정을 전제로 REV에 대한 수분의 흐름비 \overline{Q}_s^L (kg/s)은 모세관을 통한 수분의 흐름비 \overline{Q}_{scp}^L 균열을 통한 수분의 흐름비 \overline{Q}_{scr}^L 와 의 합으로 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s^L = Q_{scp}^L + Q_{scr}^L \quad (6)$$

이 때 원통형관에서의 흐름은 Hagen-Poiseulle 식을 따른다고 가정하고 REV 모세관에서의 흐름비 Q_{scp}^L (kg/s)는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{Q_{scp}^L} = \sum_i \rho q_i A_i = -\frac{\pi \rho}{8\mu} \left(\sum_0^{r_c} r^4 \right) \frac{dP}{dx} \quad (7)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도(kg/m³)이다. 또한 균열의 경우 균열폭을 직경으로 하는 원통형관으로 가정하고 균열에서의 흐름비 $\overline{Q_{scr}^L}$ (kg/s)를 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{Q_{scr}^L} = \rho q_{crack} A_{cr} = -\frac{\pi \rho r_{crack}^4}{24\mu} \frac{dP}{dx} \quad (8)$$

식(7)과 (8)을 식(6)에 대입하면 $\overline{Q_s^L}$ 은 식(9)와 같다.

$$\overline{Q_s^L} = -\frac{\pi \rho}{8\mu} \left(\sum_0^{r_c} r^4 + \frac{r_{crack}^4}{3} \right) \frac{dP}{dx} \quad (9)$$

이 때 총흐름비 $\overline{Q_s^L}$ (kg/s)에 공극반경 r_i 의 면적비 ΔA_i 의 관계인 $r_i^2 = \Delta A_i / \pi$ 와 단면 공극률과 체적 공극률의 관계인 $dA = \phi dV / \Omega$ 를 적용시켜 용액의 유속 q_s^{eq} (m/s)로 환산해서 정리하면 식(10)과 같다.

$$q_s^{eq} = -\frac{\Omega}{8\mu A_o \theta} \left(\phi \int_0^{r_c} r^2 dV + \frac{\pi r_{crack}^4}{3} \right) \frac{dP}{dx} \quad (10)$$

콘크리트가 완전 포화에 가까울수록 r_c 는 ∞ 에 가까워지는데 식(10)의 해법에 중요한 변수인 콘크리트 내부 상대 습도와 열역학 평형공극 반경 r_c 의 도출은 Kelvin의 열역학 평형방정식과 Chaube(1996)의 수분 등온선모델에 기초하여 도출한다.

3. 실험

할렬인장응력을 통해 정해진 균열폭으로 균열을 도입한 시편에 염분 확산모델 및 투수모델의 타당성 검증을 위해 촉진 염화물 침투시험(Rapid Chloride Penetration Test : RCPT), 저압 투수시험(Water Permeability Test : WPT) 및 염해분무시험(Chloride Spray Test : CST) 실시하여 균열폭에 따른 확산계수, 투수계수 및 침투깊이를 측정하였다. 시험을 위하여 $\phi 10 \times 20$ cm 원통형 몰드로 시편을 제작후 1일간 기건 양생을 거친 후 탈형 하여 시험 시까지 수중양생 시켰다. 사용시편은 보통 1종 시멘트를 사용한 W/C 44%, S/a 44.5%로서 28일 압축강도는 350kgf/cm²이다. RCPT는 재령 3일, 7일 및 28일에 각각 실시하였고 WPT는 재령 3일부터 28일간 실시하였고 CST는 재령 28일 56일 및 100일에 실시하였다. RCPT와 WPT에서는 길이가 5cm($\phi 10 \times 5$ cm)인 원통형 시편을 사용했고 CST는 10cm($\phi 10 \times 10$ cm)를 사용하였다. 균열은 할렬인장을 통해 도입하였으며 제작후 균열 현미경으로 엄밀하게 균열폭을 관찰하여 평균 균열폭이 0, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4mm이 되도록 조절하였다. RCPT는 전기적 포텐셜을 통해 이온의 이동을 가속시켜 신속하게 염화물을 침투시키고 그에 따른 확산계수를 도출하는 시험으로서 본 연구에서는 균열이 도입된 시편을 대상으로 Andrade³⁾ 및 Tang and Nilsson⁴⁾의 방법을 기초로 정상 및 비정상 상태 영동 시험을 모두 실시하였다. 그림 1와 같이 비정상 상태 시험 결과를 통해 균열면에서의 염화물 확산계수 D_{crack} 을 도출하였고, 정상 상태 시험 결과는 등가 확산계수의 타당성을 입증하는데 사용되었다. 또한 균열폭에 따른 콘크리트 시편의 수분 유속 변화를

Ludirdja 등⁵⁾에 의해 개발된 WPT를 통해 측정하였으며 그 결과는 그림 2 및 3과 같다. CST는 중합 내구성 시험기를 통해 재령 3일에서부터 97일간 실시했으며 그림 4에서와 같이 재령 28, 56, 100일에 0.1N AgNO₃ 분무를 기초한 변색법으로 균열폭에 따른 침투 깊이를 측정하였다. 또한 재령 100일에는 KS F 2515에 규정된 적정법을 이용하여 깊이별 자유 염화물량을 측정하였다.

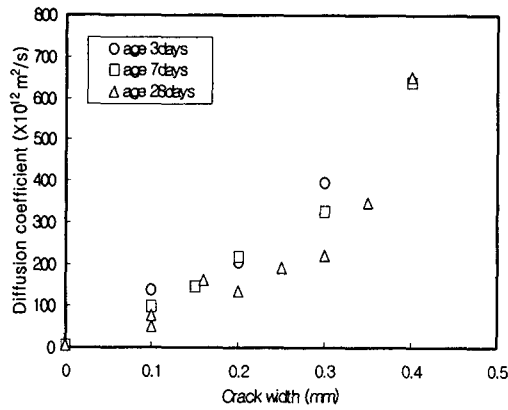


그림 1 균열면에서의 염화물 확산 계수

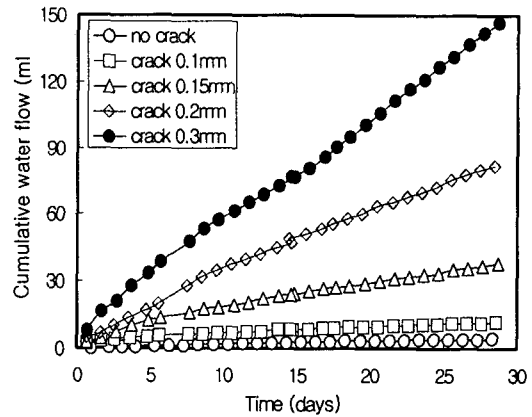


그림 2 균열폭에 따른 투수계수 변화

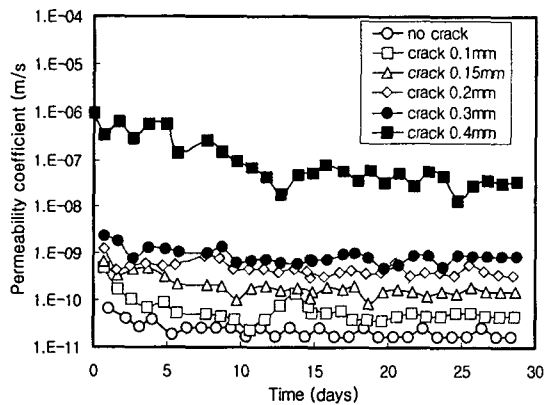


그림 3 균열폭에 따른 투수계수변화

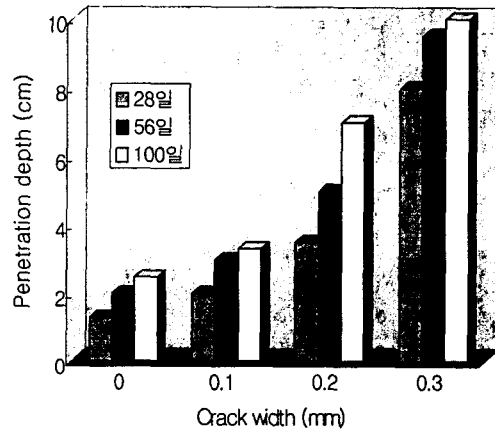


그림 4 균열폭에 따른 침투깊이

4. 수치해석 및 검증

4.1 열역학 연성 해석

본 연구에서 제안한 염화물 침투 확산 모델을 통해 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 침투과정을 해석하기 위해서 초기재령에서부터 콘크리트의 경화과정을 임의의 단계로 시뮬레이션 하는 것을 목적으로 개발된 수화발열반응, 세공구조형성, 수분이동 및 유지의 상호연관을 고려한 3차원 유한요소해석 시스템 DuCOM[®]에 염화물 침투 해석 모델을 연성시켜 해석하였다. 열역학 연성해석 흐름도는 그림 5와 같다.

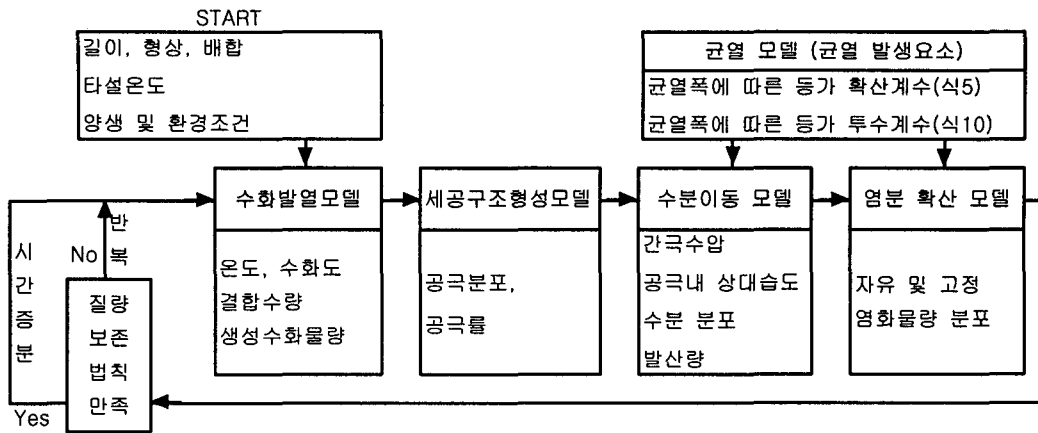


그림 5. 열역학 연성 해석 흐름도

4.2 확산 및 투수모델의 검증

제안된 균열을 가진 콘크리트의 염화물 확산 계수 및 투수 모델을 이용해서 계산된 확산 및 투수 계수를 정상상태 RCPT 및 WPT로 구한 확산 및 투수계수 결과와 비교하여 제안된 모델의 타당성을 검증하였다. 그림 6에서는 식(14)를 통해 구한 염화물 등가확산계수와 정상상태 RCPT로 구한 확산 계수값을 비교하였으며 그림 7에서는 균열폭에 따른 WPT 및 해석 결과를 비교하여 나타내었다.

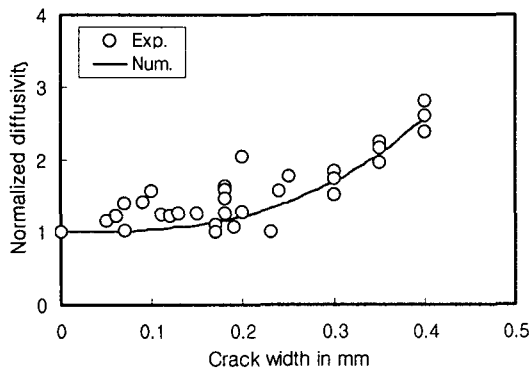


그림 6 정규화된 확산계수의 실험 및 해석

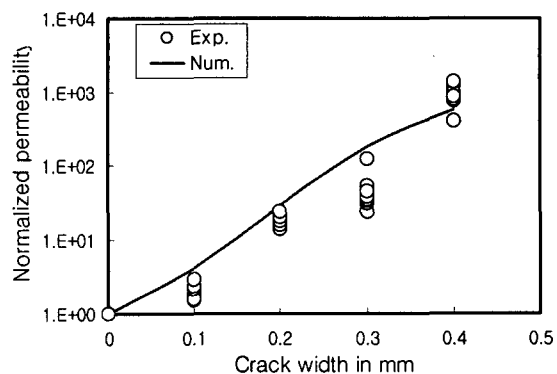


그림 7 정규화된 투수계수의 실험 및 해석

4.3 균열을 가진 콘크리트의 염화물이온 침투 해석결과

해석 대상 구조의 메쉬는 CST 실험에 사용한 원통형 시편과 동일하게 균열면에 수직인 방향으로 2차원으로 구성했으며 그림 8에서는 재령 100일에서 해석 모델을 통해 도출한 시편의 위치별 자유 염화물량의 해석결과를 측정결과와 비교하였고 그림 9에서는 균열폭에 따른 재령별 염화물 이온 침투깊이의 변화의 실험 및 해석결과를 나타내었다. 해석결과는 실험결과와 잘 일치하였으며 제안된 염화물 침투 해석 기법의 타당성을 입증하였다.

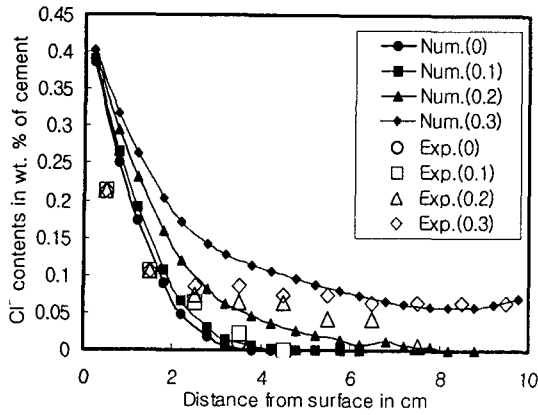


그림 8 정규화된 유속의 실험 및 해석결과

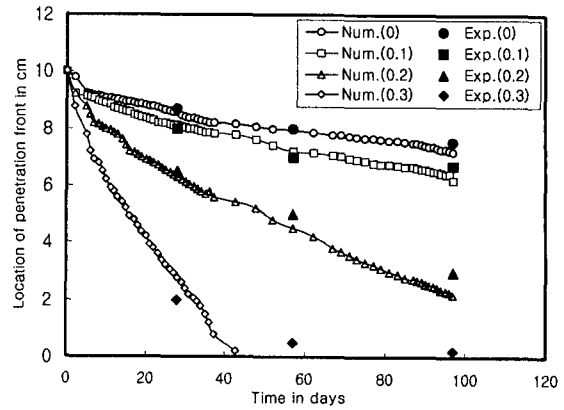


그림 9 자유 염화물량 분포 (재령100일)

5. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 균열을 가진 콘크리트의 경우 균열면을 통한 국부적인 수분 및 이온의 침투량 증가현상이 발생하며 본 연구에서는 균열을 가진 REV를 가정하고 균열을 균열폭을 직경으로 한 원통형 관으로 가정하고 평균화 기법을 도입하여 균열부와 모재의 확산 및 투수계수를 평균화시킨 등가 확산 및 등가 투수계수를 도출하였으며 RCPT와 WPT결과와의 비교를 통해 그 타당성을 입증하였다.
- (2) 수화발열반응, 세공구조형성 및 수분이동의 상호연관을 고려해서 초기재령 콘크리트의 고체형성모델과 염화물 침투 해석 모델을 연성시켜 초기재령에서의 염화물 침투 확산 해석을 가능하게 했으며 평균화 기법을 도입하여 균열면에서의 국부적인 침투 확산의 증가를 반영한 등가 확산 및 투수모델을 해석모델에 적용시켜 균열폭에 따른 물질이동 저항성능을 평가하였다.
- (3) 균열을 도입한 콘크리트 시편에 대하여 재령 3일부터 100일까지 CST를 통해 균열폭에 따른 균열면에서의 염화물 침투 깊이와 위치별 자유 염화물량을 변색법과 적정법을 통해 측정하고 동일한 조건의 해석결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 입증하였다.

참고문헌

1. Aldea, C.M., Shah, S.P. and Karr, A. (1999), "Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete," *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, V.11, No.3, pp.181-187.
2. Gérard, B. and Marchand, J. (2000), "Influence of Cracking on the Diffusion Properties of Cement-Based Materials, Part. 1: Influence of Continuous Cracks on the Steady-State Regime", *Cement and Concrete Research*, V.30, No.1, pp.37-43.
3. Andrade, C. (1993), "Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurement," *Cement and Concrete Research*, V.23, No.3, pp.724-742.
4. Tang, L. and Nilsson, L.O. (1992), "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying and Electrical Field," *ACI Materials Journal*, V.89, No.1, pp.49-53.
5. Ludirdja, D., Berger, R.L., and Young, F. (1990), "Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete," *ACI Materials Journal*, V.86, No.5, pp.433-439.
6. Chaube, R. P. (1996), "Simulation of Moisture Transport, Hydration and Microstructure Formation in Cementitious Materials", *Ph. D. Dissertation*, The University of Tokyo.