

# 균열이 발생한 콘크리트에서의 염화물 이온 확산에 관한 연구

## A Study on Chloride Ion Diffusion in Cracked Concrete

배 상 운\*  
Bae, Sang Woon

박 상 순\*\*  
Park, Sang Soon

변 근 주\*\*\*  
Byun, Keun Joo

송 하 원\*\*\*\*  
Song, Ha Won

### ABSTRACT

In this study, a method to evaluate diffusion coefficient of chloride ion in cracked concrete is proposed. For cracked concrete having either anisotropic or isotropic crack network, each crack of saturated concrete is considered as a V shape crack, and an effective diffusion coefficient is expressed with diffusion coefficients of cracked part and noncracked part and a so-called crack spacing factor. A comparison with experimental results shows that the diffusion coefficient for cracked concrete is accurately predicted by the effective diffusion coefficient. Prediction results also show that the cracks in concrete markedly change the diffusion properties and accelerate penetration of drifting species. The method in this paper can be effectively used to consider the effect of cracks on concrete diffusion coefficient of cracked concrete.

### 1. 서 론

해양환경하에 건설되는 콘크리트 구조물의 경우, 염화물이온과 같은 유해이온이 확산되어 콘크리트 중의 철근을 부식시키므로 내구적인 콘크리트 구조물을 건설하기 위해서는 콘크리트중의 염화물이온과 같은 유해이온의 콘크리트중에서의 확산계수의 정확한 평가가 선행되어야 한다. 현재의 확산계수의 평가는 시방기준에서 RC구조물의 균열을 허용균열폭이내에서 허용하고 있음에도 불구하고, 균열을 고려하지 않는 온전한 콘크리트에 대해 염화물이온의 확산계수를 적용·평가하는데 한계점이 있다.

따라서 본 논문에서는 염화물이온의 확산계수를 산정하는데 있어서 균열이 발생한 콘크리트에서의 염화물이온 확산해석기법을 해석적 접근에 의해 이론적으로 콘크리트의 건전부와 균열부의 확산계수의 관계로 제안하였다. 이 해석기법을 사용하여 균열이 발생하지 않은 콘크리트에서의 염화물확산계수

- \* 정회원, (주) 대한콘설탄트, 사원
- \*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과, 박사과정
- \*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과, 교수
- \*\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과, 부교수

와의 관계를 비교하고, 균열이 발생한 콘크리트에서의 염화물이온 확산계수 산정방법을 제안하는 것을 연구의 목적으로 한다.

## 2. 균열이 발생한 콘크리트에서의 염화물 이온 확산 해석

### 2.1 단순 균열의 확산 모델

Gérard et al.(2000)은 균열의 형태를 물질의 이동관점에서 균열이 발생한 콘크리트 균열망(crack network)이 균질한 기준재료에 중첩되는 복합재료로 동질화시킬 수 있으며, 그림 1과 같이 역학적 하중에 의해 발생하고 동일한 방향성을 갖는 모든 횡단균열을 이방성 균열(1-D : anisotropic crack)로, 또한 그림 2와 같이 동결융해, 건조수축 등에 의해 발생하고 특별한 방향성을 지니지 않는 균열을 등방성 균열(2-D : isotropic crack)로 단순하게 구분하였다. 이와 같은 균열모델은 평균균열간격,  $L_1$ 와 평균균열폭,  $L_4$ 의 변수를 기초로 특성화했다. 콘크리트시편의 두께,  $L_2$ 는 전체 확산셀에 있어서 동일 차원의 경우로만 제한한다. 상단셀의 분자 또는 이온확산은 실험동안 상수로 유지된다. 또한 하단 셀의 체적은 충분히 크기 때문에 샘플을 통한 입자의 이동에 의한 미세한 농도변화는 무시할 수 있다.

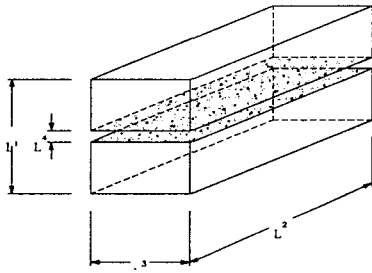


그림 1 이방성 균열의 확산 모델

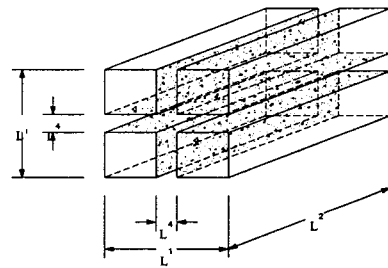


그림 2 등방성 균열의 확산 모델

균열이 발생한 콘크리트에서의 확산계수에 대한 영향인자로서 평균균열간격  $L_1$ 과 평균균열폭  $L_4$ 을 기초로 한 균열간격인자 (crack spacing factor),  $f$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$f = \frac{L_1}{L_4} \quad (1)$$

### 2.2 이방성(anisotropic) 균열의 확산 모델

Gérard et al.(2000)이 제안한 확산식에서는 균열형태를 사각형 형태로 제시하였으나, 수정·제안된 식에서는 실제 균열의 형태가 그림 3과 같이 V형의 균열을 발생하므로 V형 균열로 수정·제안하였다.

단일 차원에서의 이동입자의 흐름,  $F_{total}$ (mol·m/s)은 균열부를 통한 입자의 흐름,  $F_c$ 과 건전부를 통한 흐름,  $F_u$ 의 합으로 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$F_{total} = F_c + F_u \quad (2)$$

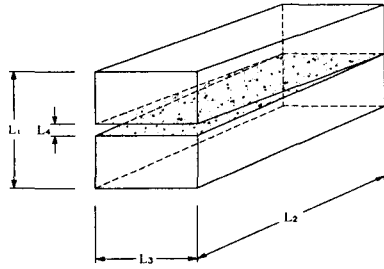


그림 3 1-D 균열의 확산 모델 제안

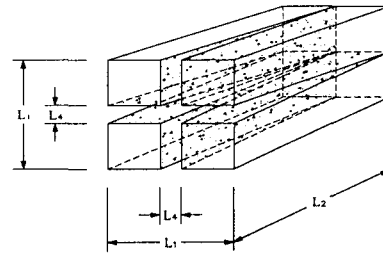


그림 4 2-D 균열의 확산 모델 제안

샘플을 통과하는 flux,  $J_{total}$  (mol/m<sup>2</sup>s)는 식 (3)과 같이 콘크리트의 전체체적에 대해 평균화시킬 수 있다.

$$J_{total} = \frac{J_c V_c + J_u V_u}{V_c + V_u} \quad (3)$$

여기서,  $V_c$ 는 균열부의 체적(m<sup>3</sup>),  $V_u$ 는 건전부의 체적(m<sup>3</sup>),  $J_c$ 는 균열부를 통과하는 이온 flux,  $J_u$ 는 건전부를 통과하는 이온 flux이다. 확산 또는 이동문제에서 입자의 확산은 추동력  $F$ 와 확산계수  $D$ 의 곱으로 표현하면, 식 (4)~(6)과 같다.

$$J_c = -D_1 F \quad (4)$$

$$J_u = -D_0 F \quad (5)$$

$$J_{total} = -DF \quad (6)$$

여기서  $D_0$ 와  $D_1$ 는 각각 건전부와 균열부의 확산계수(m<sup>2</sup>/s)이다.

식 (4), (5)과 (6)를 식 (3)에 대입하면, 식 (7)과 같이 된다.

$$\frac{D}{D_0} (V_c + V_u) = \frac{D_1}{D_0} V_c + V_u \quad (7)$$

균열부와 건전부의 체적비  $V$ 는 다음 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$V = \frac{V_u}{V_c} \quad (8)$$

식 (8)에 따라 다시 정리하면, 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$V_u + V_c = V_c (V + 1) \quad (9)$$

식 (8)~(9)에 의해 식 (7)을 정리하면, 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\frac{D}{D_0} = \frac{\frac{D_1}{D_0} + V}{1 + V} \quad (10)$$

식 (8)은 다시 식 (11)과 같이 표현된다.

$$V = \frac{V_u}{V_c} = \frac{(L_1 - L_4) \cdot L_3 \cdot L_2}{\frac{1}{2} L_4 \cdot L_3 \cdot L_2} = \frac{2(L_1 - L_4)}{L_4} = 2(f - 1) \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)의 관계로부터 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\frac{D}{D_0} = \frac{\frac{D_1}{D_0} + 2(f - 1)}{2f - 1} \quad (12)$$

만약  $L_1 \gg L_4$ 이면,  $f \gg 1$ 이므로, 식 (12)는 식 (13)과 같이 된다.

$$\frac{D}{D_0} = \frac{D_1}{2 \cdot f \cdot D_0} + 1 \quad (13)$$

### 2.3 등방성(isotropic) 균열의 확산 모델

그림 4와 같이 2-D 균열에서 균열부와 건전부의 체적은 각각 식 (14), (15)와 같다.

$$V_c = L_1^2 \cdot L_2 \cdot \left[ \left( \frac{1}{f} \right) - \frac{2}{3} \left( \frac{1}{f} \right)^2 \right] \quad (14) \quad V_u = L_1^2 \left( \frac{f-1}{f} \right)^2 L_2 \quad (15)$$

식 (14)~(15)을 식 (8)에 대입하면, 식 (16)과 같다.

$$V = \frac{V_u}{V_c} = \frac{L_1^2 \cdot L_2 \cdot \left( \frac{f-1}{f} \right)^2}{L_1^2 \cdot L_2 \cdot \left[ \frac{1}{f} - \frac{2}{3} \left( \frac{1}{f} \right)^2 \right]} = \frac{(f-1)^2}{f - \frac{2}{3}} \quad (16)$$

만약  $f \gg 1$ 이면, 식 (16)은 식 (17)과 같다.

$$V = f \quad (17)$$

식 (17)를 식 (10)에 대입하면, 식 (18)과 같다.

$$\frac{D}{D_0} = \frac{D_1}{f \cdot D_0} + 1 \quad (18)$$

한편, 균열부가 수분에 의해 완전포화된 상태로 가정하면,  $D_1 = 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s이다.

## 3. 균열이 발생한 콘크리트에서의 수정된 염화물이온 확산 해석 검증

### 3.1 수정된 염화물이온의 확산 해석 검증

Jacobsen et al.(1996)은 공기연행제를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대해 W/C=0.40인 배합으로 실험을 실시하였다. 슬럼프(slump)는 70~90mm이고 시멘트는 Canadian Ordinary Portland

Cement type 10을 사용하였다. 잔골재는 자연산으로 0~5mm이고 굵은골재는 화강암골재로 0~10mm이다. 양생은 습윤양생을 하였다. 균열은 동결융해에 의해 균열을 주었다. Jacobsen et al의 실험결과를 통해 기존의 염

화물이온 확산식과 수정된 염화물이온 확산식에 의한 결과를 표 1과 같이 비교하였다. 균열이 동결융해에 의해 발생하기 전에 측정된 확산계수( $D_0$ )는  $9.70 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고, 동결융해가 진행되면서 확산계수( $D$ )는  $76.52 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서  $76.52 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 까지 증가하였다.

Gérard et al.(2000)의 예측식을 사용한 경우 예측값과 실험값의 오차범위는 2.3~2.9로 나타났다. 그리고 수정·제안식을 사용한 경우 예측값과 실험값을 비교한 결과는 1.12~1.27의 오차범위를 나타내어 수정·제안식을 통해 예측정도가 개선됨을 알 수 있다. 결과 그래프는 그림 5~6과 같다.

표 1 확산계수의 예측값과 Jacobsen의 실험값과의 비교(Gérard et al, 2000)

f	Crack aperture ( $\mu\text{m}$ )	Diffusion coefficient ( $\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )	$D/D_0$			Gérard/Exp.	Pro./Exp.
			Experiments	Gérard	Proposed		
-	-	9.70	-	-	-	-	-
440	5	24.48	2.5	5.6	2.8	2.3	1.12
180	9	41.64	4.3	12.0	6.0	2.9	1.40
105	12	76.52	7.9	20.0	10.0	2.6	1.27

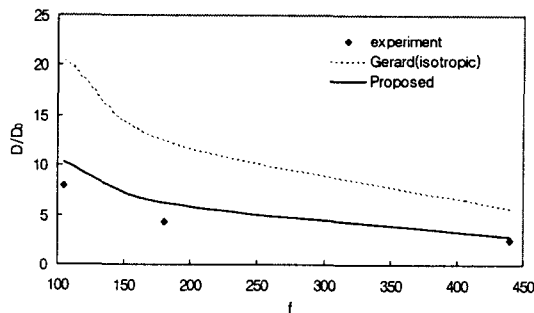


그림 5 제안식과 실험값의 비교

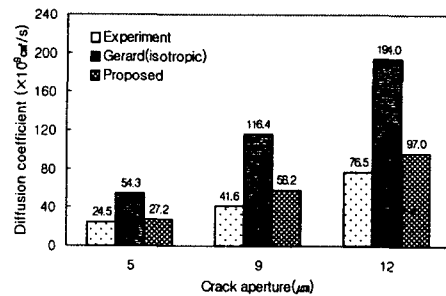


그림 6 균열폭과 확산계수의 관계

### 3.2 수정·제안된 콘크리트에서의 염화물이온의 확산 해석 고찰

수정·제안된 염화물이온의 확산 모델에 의해,  $D_1/D_0$ 와 균열간격인자  $f$ 에 따른 콘크리트에서의 확산계수의 변화( $D/D_0$ )를 그림 7에 나타냈다. 투수의 경우에는 균열의 크기에 따라 투수계수가 확연히 증가되어진다고 보고하고 있다(Aldea et al., 1999). 본 연구에서 나타난 해석 결과를 살펴보면  $D_1/D_0$ 가 커짐에 따라 또한  $f$ 가 작아짐에 따라 균열을 통한 확산이 급격히 증가하게 되므로  $D/D_0$ 가 증가함을 알 수 있다. 이런 경향은 이방성 균열뿐만 아니라 등방성 균열에서도 나타난다.

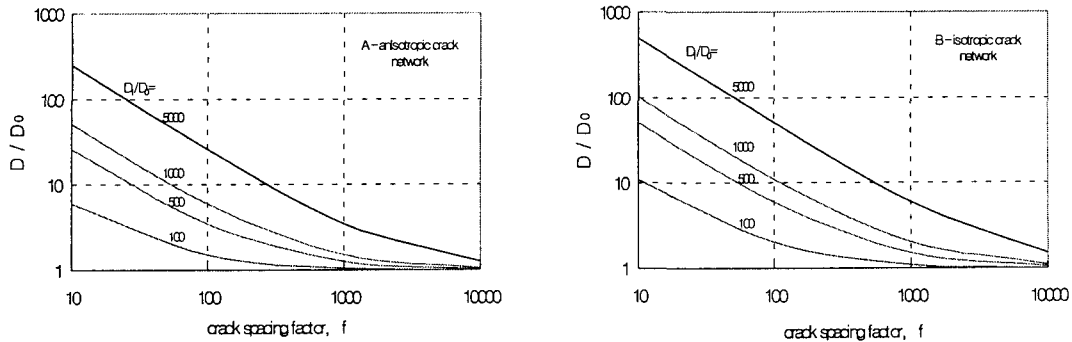


그림 7  $D_1/D_0$ 와  $f$ 에 따른 콘크리트의 확산계수의 변화

즉  $f$ 가 작아짐에 따라 콘크리트의 확산계수의 산정에 균열의 영향을 반드시 고려하여야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 균열이 발생한 콘크리트에서의 염화물 이온 확산계수( $D$ )는 쉘기형 균열모델을 갖는 이방성(1-D : anisotropic)과 등방성(2-D : isotropic) 균열을 도입하여 균열간격인자 ( $f$ ), 균열부의 확산계수 ( $D_1$ ), 균열이 발생하지 않은 콘크리트에서의 확산계수( $D_0$ )의 함수로 표시된 새로운 확산 모델을 제안하였고, 이 확산모델에 의하여 균열이 발생한 콘크리트에서의 확산계수를 예측할 수 있도록 하였다.
- (2) 등방성 균열이 발생한 콘크리트에서의 확산계수는 균열이 발생하지 않은 콘크리트에서의 확산계수보다 2~10배의 범위로 증가함을 구명하였다. 또한  $D_1/D_0$ 가 증가함에 따라 균열이 발생한 콘크리트에서의 확산계수는 급격히 증가하고, 균열간격인자( $f$ )가 증가할수록 균열이 발생한 콘크리트에서의 확산계수는 감소함을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Aldea, C. M., Shah, S. P., and Karr, A. (1999), "Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 181-186.
2. Gérard, B., Marchand, J. (2000), "Influence of Cracking on the Diffusion Properties of Cement-Based Materials Part I: Influence of Continuous Cracks on the Steady-State Regime", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 37-43
3. Jacobsen, S., Marchand, J., and Boisvert, L. (1996), "Effect of Cracking and Healing on Chloride Transport in OPC Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 6, pp. 869-881.
4. Kroff, J., and Hilsdorf, H. K. (1995), "Performance Criteria for Concrete Durability," *Rilem Report 12*, Rilem, E & FN Spon, London