

## 등방성 및 이방성 균열을 가진 콘크리트의 염화물 확산계수 모델링

### Modeling on Chloride Diffusivity in Concrete with Isotropic and Anisotropic Crack

이 학 수<sup>1)</sup>      배 상 운<sup>2)</sup>      권 성 준<sup>3)\*</sup>  
Hack-Soo Lee      Sang-Woon Bae      Seung-Jun Kwon

#### Abstract

Deterioration is accelerated due to additional intrusion of chloride ion in crack width in cracked concrete. In this paper, modeling on equivalent diffusion coefficient in cracked concrete is performed for 1-D (Anisotropic) and 2-D (Isotropic) diffusion based on steady state condition. In the previous research, rectangular shape of crack was considered but the shape was modified to wedge shape with torturity. For verification of the proposed model, crack is induced in concrete sample and migration test in steady state is performed for 1-D diffusion. For 2-D diffusion, previous test results are adopted for verification. Through considering wedge shape of crack with torturity, diffusion coefficients in 1-D and 2-D diffusion are reduced, and the more reasonable prediction is obtained. The results from the proposed model with torturity of 0.10~0.15 are shown to be in the best agreement with the test results.

Keywords : Crack, Chloride diffusion coefficient, Wedge shape crack, Crack torturity

#### 1. 서론

다공성 매체인 (Porous media) 콘크리트는 내부에 공극을 포함하고 있으며, 수분과 염화이온의 이동 및 침투의 주된 통로는 공극 또는 공극망 (Pore network)으로 설명할 수 있다 (Ishida and Maekawa, 2001; Kwon et al., 2012). 일반적으로 염해에 대한 저항성을 높이기 위하여, 낮은 공극을 통한 확산계수의 감소와 자유염화물의 고정화를 높이기 위하여 플라이애쉬나 고로슬래그 미분말과 같은 혼화재료를 사용한다 (Song et al., 2005a; Thomas and Bamforth, 1999). 콘크리트는 타설부터 경화에 이르기까지 많은 재료적 또는 경계적인 구속이 발생하게 되고 이로 인해 균열이 쉽게 발생한다.

최근에 주로 사용되는 고성능 콘크리트에서는 단위시멘트량이 많으므로 수화열 및 건조수축 등에 의한 균열이 발생하게 된다 (Song et al., 2001). 균열을 가진 RC (Reinforced Concrete) 구조물에서는 공극을 통한 염화인자의 유입 외에

도 균열폭을 통하여 직접적인 염화인자의 유입이 발생하므로 염화가 가속화되며 철근부식이 더욱 빠르게 발생한다 (Park et al., 2012a; 2012b; Kwon et al., 2009). 균열부 콘크리트의 염화물 이동 모델링을 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 기존의 이론은 1방향 (이방성) 또는 2방향 (등방성) 균열 패턴을 간단히 직사각형으로 모델링하여 균열인자를 도입하여 모델링하였으나 균열의 형상을 구현하지 못한 관통균열 형태의 모델링이므로 실험결과와 상당한 차이가 발생하였다 (Gerard and Marchand, 1999). 균열을 가진 콘크리트에서 이온 또는 질량의 흐름은 주로 등가대표체적 (REV: Representative Element Volume)을 이용하여 전체의 이온흐름이 건전부 콘크리트와 균열폭을 통과하는 각각의 이온흐름의 합과 같다는 가정하에 진행된다 (Park et al., 2012b; Song et al., 2005b; 2006; Park et al., 2001). 이러한 평균화 기법은 비단 염화물 확산에만 국한되는 것이 아니라, 이산화탄소 침투에 의한 탄산화 (Song et al., 2006) 및 투수성 (Park et al.,

1) 정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과  
2) 정회원, 다산건설컨트  
3) 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과, 교신저자

\* Corresponding author : jjuni98@hannam.ac.kr  
• 본 논문에 대한 토의를 2013년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2012a)에 대해서도 적용되는데, 정상상태의 흐름이 가정된다면 일반적인 이온 및 질량 흐름에 적용할 수 있다. 이론적인 확산 모델링이외에도 실태조사를 통하여 균열부 콘크리트의 염화물 확산계수 모델링에 대한 연구도 진행되고 있으며 (Kwon et al., 2009; Yokozeki, 1998), EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)와 같은 특수장비를 이용하여 균열폭 및 깊이에 따른 염화물 분포를 분석하려는 연구가 최근들어 수행되고 있다 (Win et al., 2004). 특히 이러한 장비의 분석에서는 균열폭이 어느정도 진전하면 균열폭보다는 균열깊이가 더욱 지배적인 인자라고 제시하고 있다.

평균화 기법을 가정하여 물질이동을 평가할 때 균열의 패턴은 매우 중요한데, 균열폭이 일정하다 해도 균열패턴에 따라 유입되는 단면적이 변화하기 때문이다. 물론 균열면의 조도계수 (Maekawa et al., 2009)와 균열밀도 (Crack density) 등도 큰 영향을 주는 인자이다. 국내외 지방서에도 균열을 영향을 고려하여 균열밀도 및 폭을 고려한 염화물 확산계수 식을 제시하고 있다 (KCI, 2004; JSCE, 2002).

본 연구는 1-D (Anisotropic) 및 2-D (Isotropic) 균열을 가진 콘크리트의 염화물 이온 확산모델링을 위하여 균열패턴과 조도계수를 고려하여 확산 모델링을 수행하였다. 또한 제안된 모델의 해석결과와 실험결과를 비교하여 검증을 수행하였다.

## 2. 균열부 콘크리트의 염화물 이동 (Anisotropic and Isotropic)

Gerard and Marchand (1999)의 연구에서는 균열부 콘크리트를 Fig. 1과 같이 가정하여 평균화이론을 적용하였다. 등온조건과 이온의 물리적 화학적 작용이 없으며, 이온간의 상호작용을 무시하는 것을 기본 가정으로 하였는데, 이는 이온의 정상상태의 흐름을 가정한 것이다.

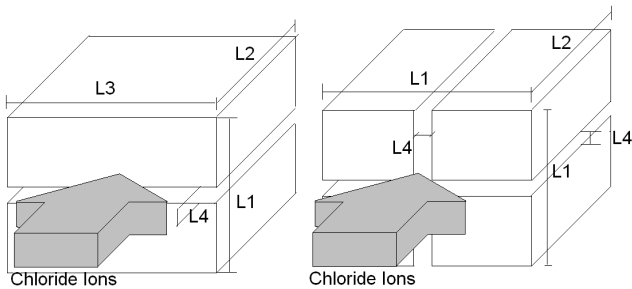


Fig. 1 REV of chloride diffusion in cracked concrete (1-D Anisotropic and 2-D Isotropic)

Fig. 1의 REV에서 균열을 고려한 콘크리트의 확산계수에 대한 영향인자는 평균균열간격과 평균 균열폭을 기초로 균열간격인자 (crack spacing factor)  $f$ 를 식 (1)과 같이 가정하였다.

$$f_1 = \frac{L_1}{L_4} \quad (1)$$

여기서  $L_1$  평균 균열간격,  $L_4$ 는 평균 균열폭이다.

정류상태 (steady state)에서는 Flux가 안정되고 일정하므로 1차원 전단면에서의 Flux ( $F_{total}$ )는 균열폭을 통한 흐름 ( $F_c$ )과 건전부 콘크리트를 통한 흐름 ( $F_u$ )의 합으로 나타낼 수 있다. 이는 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

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

정류상태를 가정하였으므로 REV를 통과하는 Flux ( $J_{total}$ )는 건전부 콘크리트 면적 ( $A_u$ )과 이에 해당하는 Flux ( $J_u$ ), 균열폭 면적 ( $A_c$ )과 이에 해당하는 Flux ( $J_c$ )의 조합으로 구성할 수 있으며 식 (3)과 같이 나타난다.

$$J_{total} = \frac{J_c A_c + J_u A_u}{A_c + A_u} \quad (3)$$

식 (3)에 대하여 건전부의 확산계수 ( $D_0$ )와 균열폭 확산계수 ( $D_1$ )를 고려하면 식 (4)와 같이 전체 REV에 대한 등가 확산계수 (Equivalent diffusion coefficient:  $\bar{D}$ )를 도출할 수 있다. 또한 건전부 및 균열 콘크리트의 면적비 ( $S = A_u/A_c$ )를 고려하면 식 (4)는 식 (5)와 변화된다.

$$\bar{D} = \frac{D_1 A_c + D_0 A_u}{A_c + A_u} \quad (4)$$

$$\frac{\bar{D}}{D_0} = \frac{D_1/D_0 + S}{1 + S} \quad (5)$$

Fig. 1의 REV를 고려하면  $S$ 는 식 (6)으로 표시할 수 있고 식 (6)과  $f$ 를 고려하면 최종적으로 1-D (Anisotropic) 균열부 콘크리트의 등가 염화물 확산계수 ( $\bar{D}$ )는 식 (7)과 같이 구현된다.

$$S = A_u/A_c = (L_1 - L_4)/L_4 = f - 1 \quad (6)$$

$$\frac{\bar{D}}{D_0} = \frac{D_1}{D_0 f} + 1 \quad (7)$$

또한 2-D에서  $A_c$  및  $A_u$ 는 식 (8) 및 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$A_c = L_1^2 - (L_1 - L_4)^2 = L_1^2 [1 - (\frac{f-1}{f})^2] \quad (8)$$

$$A_u = L_1^2 (\frac{f-1}{f})^2 \quad (9)$$

2차원에서  $S$ 를 도출하면, 식 (10)과 같이 쓸 수 있고 이를 식 (5)에 대입하면, 최종적으로 2-D (Isotropic)에서 등가확산계수를 식 (11)과 같이 도출할 수 있다.

$$S = A_u/A_c = \frac{(f-1)^2}{2f+1} \simeq \frac{f}{2} \quad (10)$$

$$\frac{\bar{D}}{D_0} = \frac{2}{f} \frac{D_1}{D_0} + 1 \quad (11)$$

기존의 연구 (Gerard and Marchand, 1999)에서는 균열부가 수분에 의해 포화되었을 경우  $D_1$ 은  $10^9 \text{m}^2/\text{sec}$  수준으로 가정하였다.

### 3. 뼈기형 균열패턴과 조도를 가지는 염화물 확산계수 모델링 (Anisotropic and Isotropic)

#### 3.1 수정된 균열패턴 및 조도 (1-D) : Anisotropic

실제로 균열은 뼈기형을 가지지만 완벽한 삼각형이 아니므로 균열형상을 다각형으로 모델링하여 균열형상 변화에 따른 확산계수를 도출하도록 한다. Fig. 2에서는 균열형상을 일반화한 확산계수 모델링을 나타내고 있다.

Fig. 2에서  $k$ 는 균열면 길이 ( $l$ )의 중간에 직각으로 향하는 길이이며, 조도변화를 고려하여 균열 폭 내부에서 다각형으로 변화하는 것을 고려한 것이다.

대표체적 ( $V$ )를 고려한 흐름비에 대해서 식 (4)는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

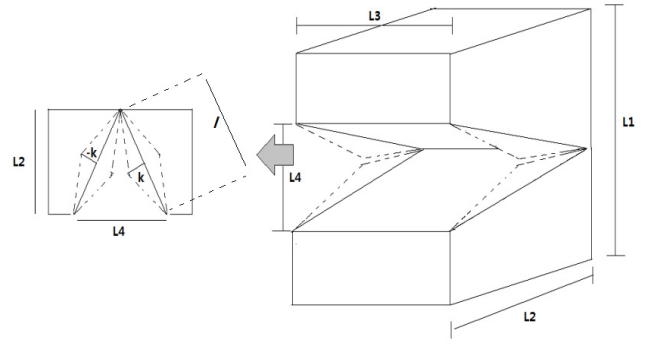


Fig. 2 Modified REV with crack width (1-D: Anisotropic)

$$\frac{\bar{D}}{D_0} = \frac{D_1/D_0 + V}{1 + V}, \quad V = V_u/V_c \quad (12)$$

여기서  $V_u$ 는 건전부의 체적,  $V_c$ 는 균열부의 체적이다.

$V_u$  및  $V_c$ 는 식 (13) 및 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$V_u = (L_1 - L_4)L_2L_3 \quad (13)$$

$$V_c = \frac{1}{2}L_2L_3L_4 - lkL_3 \quad (14)$$

식 (14)에서  $l$ 은  $L_4/2$  (균열폭의 1/2) 와  $L_2$  (균열깊이)가 이루는 삼각형의 빗변이며  $L_4 \ll L_2$ 인 조건이므로 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$l = \sqrt{(L_4/2)^2 + L_2^2} \simeq L_2 \quad (15)$$

$k$ 는  $l/2$  위치에서 수직으로 증가 또는 감소되는 길이로서 균열폭의  $\alpha$ 배 ( $k = \alpha L_4$ )로 가정할 수 있다. 또한  $f (= L_1/L_4)$ 는 1보다 매우 큰 수이므로  $V$ 는 다음과 같이 식 (16)으로 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{(L_1 - L_4)L_2L_3}{1/2(L_2L_3L_4) - lkL_3} = \frac{2(L_1 - L_4)}{L_4 - 2\alpha L_4} \\ &= \frac{2(f-1)}{1-2\alpha} \simeq \frac{2f}{1-2\alpha} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)을 고려하면 식 (12)는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\bar{D}}{D_0} = \frac{D_1(1-2\alpha)}{2fD_0} + 1 \quad (17)$$

식 (17)에서  $\alpha$ 가 0일 경우, 즉 균열에 조도가 없다고 가정하면, 단순한 켜기형 균열패턴을 나타낸다.

### 3.2 수정된 균열패턴 및 조도 (2-D) : Isotropic

2-D에서도 기존의 연구에서는 직사각형 균열패턴을 가정하였으나 Fig. 3과 마찬가지로 굴곡이 있는 켜기형 균열을 가정하도록 한다.

REV를 통과하는 염화물에 대하여 확산계수비는 식 (12)를 그대로 사용할 수 있으며,  $V_u$  및  $V_c$ 가 2-D이므로 이 점을 고려해야 한다.  $V_u$  및  $V_c$ 는 식 (18) 및 식 (19)와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$V_u = L_1^2 L_2 (f-1)^2 / f^2 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} V_c &= 2AL_1 - V_m \\ &= L_1 L_2 L_4 (1-2\alpha) - V_m \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)에서  $A$ 는 Fig. 3의 좌측 켜기형의 면적이고 중복으로 고려되는 다각 삼각뿔의 체적은  $V_m$ 으로 나타내었으며 식 (20)과 같다. 또한  $L_4$ 는  $L_2$ 에 비해 매우 작은 값이므로 식 (21)은 식 (22)와 같이 정리할 수 있으며  $q$ 는 식 (21)과 같다. 즉  $\theta$ 가 충분히 작을 때,  $q$ 와  $k$ 가 같아지는 것이다.

$$V_m = \frac{1}{6} L_4^2 L_2 + \frac{1}{3} \left( \frac{L_4}{2} - 2q \right)^2 \left( \frac{L_2}{2} \right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} q &= \frac{2\alpha L_4 \sqrt{(4\alpha^2 + 1/16)L_4^2 + L_2^2/4}}{\sqrt{L_2^2 + L_4^2/4}} \simeq \alpha L_4 \\ &= k \end{aligned} \quad (21)$$

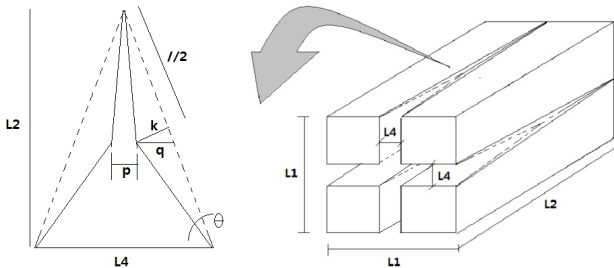


Fig. 3 Modified REV with crack width (Isotropic)

식 (20)과 식 (21)을 식 (9)에 대입하여  $V$ 를 도출하기 위한 수식정리는 식 (22)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V_u}{V_c} &= \frac{L_1^2 (f-1)^2}{f^2 [L_1 L_4 (1-2\alpha) - L_4^2/6 [1 + (1/2 - 2\alpha)^2]]} \\ &= \frac{(f-1)^2}{(1-2\alpha)f - 1/6 [1 + (1/2 - 2\alpha)^2]} \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)에서  $f (=L_1/L_4)$ 는 매우 큰 값이므로 식 (23)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{f^2 - 2f + 1}{(1-2\alpha)f - 1/6 [1 + (1/2 - 2\alpha)^2]} \\ &\simeq \frac{f-2}{(1-2\alpha)} = \frac{f}{(1-2\alpha)} \end{aligned} \quad (23)$$

식 (23)를 식 (12)에 고려하면 최종적으로 식 (24)와 같은 이방성 균열을 가진 균열부 콘크리트의 등가 확산 모델식을 도출할 수 있다.

$$\frac{\bar{D}}{D_0} = \frac{D_1(1-2\alpha)}{fD_0} + 1 \quad (24)$$

## 4. 균열패턴과 조도를 고려한 확산계수 검증

### 4.1 변수의 영향

제안된 모델에서 주요 인자는 균열간격이라고 할 수 있는  $f$ 와 조도계수 인자  $\alpha$ 이다.  $\bar{D}/D_0$ 의 변수의 변화에 따른 확산계수의 변화비를 Fig. 4에 나타내었다. 기존의 실험값 (Gerard and Marchand, 1999)을 인용하여,  $D_0$ 를  $9.7 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{sec}$ 로  $D_1$ 를  $1.0 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 가정하였다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 동일한 균열폭이라도 단히는 정도 ( $\alpha$ )에 따라 균열폭은 32%~73% 수준으로 감소하였다. 또한  $f$ 가 증가할수록 균열밀도가 낮아지는 것이므로 건전부 콘크리트 확산성에 지배를 받아  $f$ 가 1,000에 이를 때, 1.1~1.5배의 비교적 작은 수준을 나타내었다.

Fig. 5에서는 2차원 균열부의 확산계수 증가를 나타내었다. 식 (17)과 식 (24)를 비교하면 동일한  $\alpha$ 에 대하여 2차원 확산이 1차원 확산의 2배 정도 증가함을 알 수 있다.

두가지 해석조건에서 균열간격 즉,  $f$ 가 감소하여 전체 확산계수가 균열폭의 확산성에 의존하게 될수록 균열부 콘크

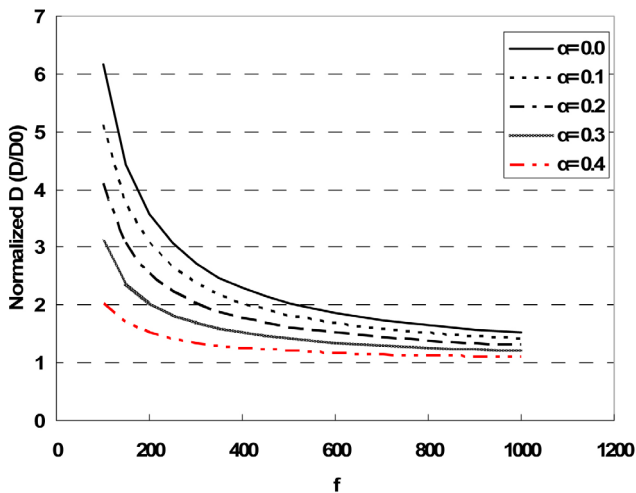


Fig. 4 Effect of  $f$  and  $\alpha$  (Anisotropic-1-D)

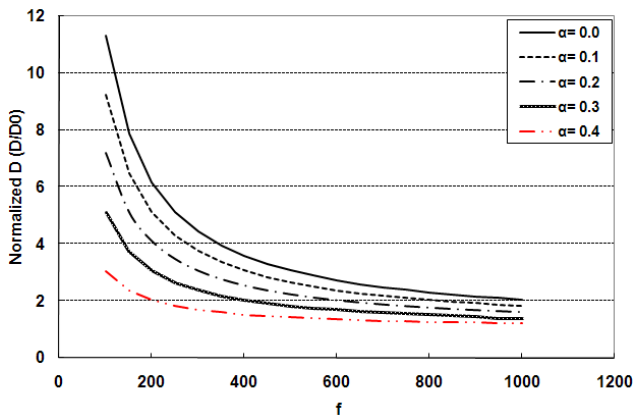


Fig. 5 Effect of  $f$  and  $\alpha$  (Isotropic, 2-D)

리트의 등가확산계수는 급진적으로 증가하게 된다.

## 4.2 제안 모델식의 검증

### 4.2.1 1-D (Anisotropic) 균열 모델

#### 1) 균열을 가진 콘크리트 시편의 제조

균열부 콘크리트를 제조하기 위하여 28일 양생을 거친 콘크리트 실린더 시편에 대하여 균열을 도입하였다. 100×200mm 실린더 시편을 50mm 높이로 커팅을 하여 균열도입 시편을 제조하였다. 쪼갬인장시험을 수행하여 균열을 도입하였으며, 균열발생방향과 수직하게 LVDT를 설치하여 하중 재하 및 제하시의 균열을 측정하였다. 하중 제하시 균열폭이 약간 감소하므로 이를 최종적인 균열폭으로 평가하였다. Table 1에서는 본 실험에 사용된 콘크리트 배합표를 나타낸다.

원하는 소정의 균열폭을 유도하기 어려웠으므로 다수의

Table 1 Mix proportions for

W/C (%)	S/a (%)	Slump (mm)	G <sub>max</sub> (mm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Chemical Ad. (ml)	
				W	C	S	G	AE*	WRA**
44	44.5	100	25	179.0	406.9	787.8	982.9	17.3	1951.0

\*: Air Entrainer

\*\* : Water Reducing Agent

균열시편을 제작하였으며, 이를 0.1mm 그룹으로 분류하여 염화물 확산시험을 수행하였다.

### 2) 정상상태의 염화물 확산계수 평가

정상상태 실험에서는 균열부를 포함한 시편 전체에 대한 염화물 확산을 평가할 수 있는 침투 시험이 요구되며, 본 연구에서는 Andrade (1993)에 의해 제안된 방법을 사용하였다. 28일간 수중 양생시킨 50mm 두께의 원통형 시편을 전술한 방법으로 균열을 도입하고 측면을 파라핀으로 완전 밀봉한 후 ASTM C 1202에서 규정된 장치와 실험방법을 적용하였다. 시편의 양쪽에 확산셀을 장착하고 양극부에는 0.1M NaOH 용액을, 음극부에는 0.1M NaOH가 포함된 0.5M의 NaCl 용액을 각각 채우고 30V의 전압을 소정의 시간동안 작용시켰다. 또한 염화물 침투확산이 정상 상태에 도달할 때까지 전류계를 통해 일정한 간격으로 통과 전류를 측정하였다. 식 (25)에 따라 염화물 이온의 정상상태 확산계수 ( $D_{eff}$ )를 도출하였다.

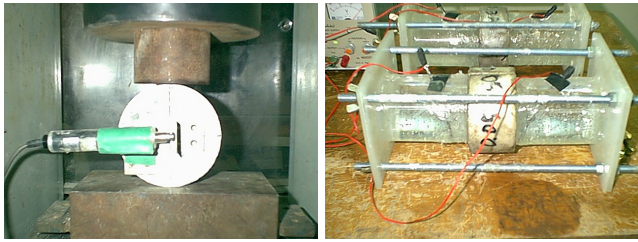
$$D_{eff} = \frac{RT}{nF^2} \frac{i}{\Delta E} \frac{t_{cl}}{A} \frac{1}{C_{cl}z} \quad (25)$$

여기서,  $R$  (8.314 J/K · mol)은 기체상수,  $T$  (K)는 절대 온도,  $Z$ 는 이온가,  $F$  (9.648×10<sup>4</sup>J/V · mol)는 패러데이 상수,  $i$  (Ampere)는 시편 통과 전류,  $t_{cl}$ 은 transport number,  $A$  (m<sup>2</sup>)는 시편의 단면적,  $\Delta E$  (Volt)는 전압,  $L$  (m)은 시편의 두께,  $C_{cl}$ 은 확산셀에서의 염화물 이온 농도 (mol/l)이다.

정상 상태에 도달하는 기간은 시편마다 차이가 있으나, 대략 2~3일 후에 정상상태에 도달하였다. Fig. 6에서는 균열도입 과정에 따른 실험사진과 염화물 확산 측정 사진을 나타내고 있다.

정상상태의 염화물 확산계수의 변화는 Table 2에 나타내었는데, 균열폭이 증가함에 따라 확산계수도 증가하여 0.4mm의 균열폭의 경우, 건전부의 2.47배 정도 증가하였다.

확산 시험체 (100 (D)×50 (H)mm)의 유입면적인 원의 넓이 ( $D^2\pi/4$ )와 제안식에서의 유입면적 ( $L_1 \times L_3$ )을 동일하



(a) Crack inducing in sample (b) Test cell for chloride diffusion

Fig. 6 Test setup for diffusion coefficient in cracked concrete

Table 2 Diffusion coefficient in stationary condition

Crack width	Diffusion coefficient (m <sup>2</sup> /sec)	Crack width	Diffusion coefficient (m <sup>2</sup> /sec)
0	5.80E-12	0.13	7.53E-12
0.05	6.87E-12	0.15	7.22E-12
0.06	7.34E-12	0.18	9.68E-12
0.07	8.36E-12	0.24	9.42E-12
0.09	8.48E-12	0.25	1.00E-11
0.1	9.35E-12	0.3	1.05E-11
0.11	7.32E-12	0.35	1.31E-11
0.12	7.35E-12	0.4	1.48E-11

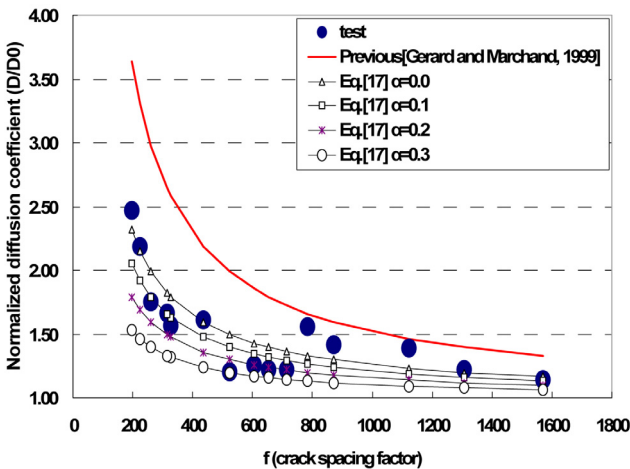


Fig. 7 Verification of the proposed model (1-D: Anisotropic)

계 하기 위하여 폭 ( $L_3$ )은 100mm로, 높이 ( $L_1$ )는 실린더의 등가면적을 고려하여  $100\pi/4$  (mm)로 고려하였다. 또한 본 실험에서는 기존의 실험 (Gerard and Marchand, 1999)에서 사용된 10V보다 높은 30V의 전압을 사용하였으므로  $D_1$ 을  $3.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 가정하였다. Fig. 7에서는 실험과 해석결과를 나타내고 있다.

기존의 제안식은 실험값에  $f$ 가 클 경우, 즉 균열폭이 작을

경우에서는 큰 영향이 없으나, 균열폭이 증가할수록 큰 차이가 발생하였다. 제안된 1-D 모델식은 기존의 확산계수식보다 1/2정도 낮고  $\alpha$ 를 고려하고 있으므로 더욱 합리적인 확산계수를 제시하고 있다. 실험결과  $\alpha=0.1$ 일 경우 실험값을 잘 모사하였다.

#### 4.2.2 2-D (Isotropic) 균열 모델

일정한 격자 형태의 균열은 일반적으로 망상균열 형태이며 인위적으로 균열폭을 제어하기는 매우 어려운 일이다. 기존의 연구에서는 (Jacobsen et al., 1996) 동결융해를 거친 실험자료를 대상으로 질량결손률을 통하여 식 (26)와 같이  $f$ 를 도출하였으며 2-D 조건에 대하여  $\bar{D}/D_0$ 를 실험적으로 도출하였다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{A_c}{A_m} = \frac{f^3}{(f-1)^3} - 1 \quad (26)$$

여기서,  $\Delta V$ 와  $V$ 는 체적변화와 초기체적을 나타내며,  $A_c$  및  $A_m$ 은 균열폭 면적과 초기 대표면적을 나타낸다. 본 모델식과의 비교를 Table 3에 나타내었으며, Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 썩기형 형태의 균열이 합리적인 결과를 제시하고 있으며, 조도계수를 고려함으로써 정확도가 개선됨을 알 수 있다. Table 4에서는 확산계수비 ( $\bar{D}/D_0$ )가 아닌 균열폭에 따른 확산계수를 직접 나타내었으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다.

기존의 직사각형 모델링을 이용한 확산계수식은 균열폭이 5, 9, 12 $\mu\text{m}$ 로 진전함에 따라 121%, 179%, 105%의 오차를 나타내었는데, 개선된 썩기형 모델링 ( $\alpha=0.0$ )에서는 10.9%, 39.9%, 26.8%로 정확도가 크게 개선됨을 알 수 있다. 또한  $\alpha$ 가 0.15인 경우 오차는 각각 7.4%, 9.8%, 4.0%로 크게 감

Table 3 Verification of the proposed model-2D

$f$	Diffusion coefficient $\times 10^{-13}$ (m <sup>2</sup> /sec)	$\bar{D}/D_0$			Test (Jacobsen et al., 1996)
		Precited		Test (Jacobsen et al., 1996)	
		Previous (Gerard and Marchand, 1999)	This model		
0	9.7	-	-	-	-
440	24.48	5.68	3.34	2.34	2.50
180	41.64	12.45	6.72	4.71	4.30
105	76.52	20.82	10.91	7.64	7.90

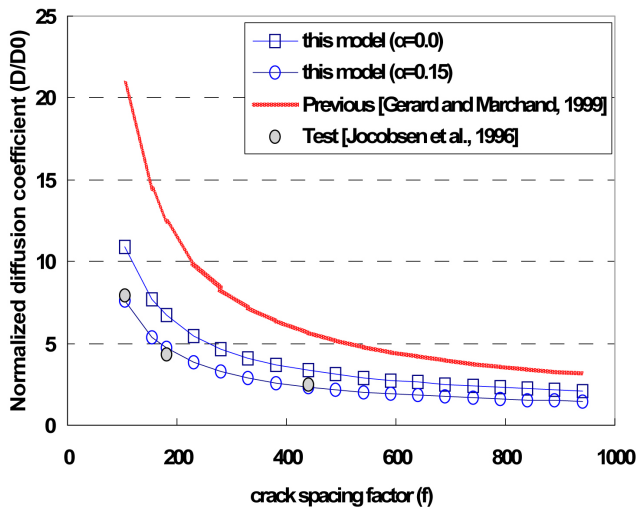


Fig. 8 Normalized diffusion coefficient from previous and this model

Table 4 Comparison of diffusion coefficient in REV

Crack width ( $\mu\text{m}$ )	Diffusion coefficient in REV: $\bar{D}$ ( $\times 10^{-13} \text{m}^2/\text{sec}$ )			
	Test [Jacobsen et al., 1996]	Previous [Gerard and Marchand, 1999]	This study	
			$(\alpha=0)$	$(\alpha=0.15)$
5.00	24.50	54.32	27.16	22.70
9.00	41.60	116.40	58.20	45.68
12.00	76.50	194.00	97.00	73.46

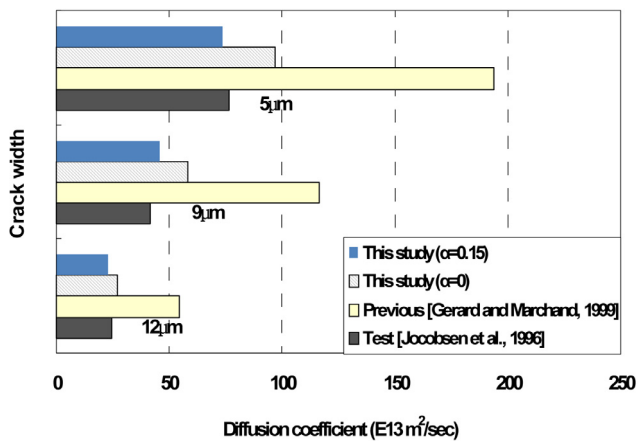


Fig. 9 Comparison of diffusion coefficients

소함을 알 수 있다.

본 연구에서는 제안된  $\alpha$ 는 균열깊이에 대한 높이의 비로 얼마나 균열깊이에서 폭이 감소되는 지를 의미하는 변수이다. 10~20% 수준으로 균열폭 내부가 감소된다고 가정하였을 때, 실험결과와 가장 근접한 해석결과를 찾아낼 수 있었다. 이는 기존의 쉘기형 모델에서 균열내부의 조도 등으로 인해

확산이 감소되는 것을 고려한 것인데, 균열조도가 10~20% 수준을 의미한다. 이는 추후 균열모델링의 한계조건을 고려할 때 큰 의미를 줄 수 있다. 실제로 기존의 연구 (Park et al., 1012b)역시 일정한 조도계수 ( $\Omega = \pi/4$ )를 고려하였는데, 본 연구결과와 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

- (1) 본 연구에서는 기존의 직사각형 형태의 균열을 가정한 등방성 및 이방성 균열모델을 가진 콘크리트에 대하여 균열패턴 및 조도를 고려하여 개선된 모델링을 수행하였다. 개선된 모델링의 검증에 위하여 1-D 유입에 대해서는 쪼갬인장강도 시험을 수행하여 염화물 확산계수를 측정하였다. 개선된 모델은 확산계수의 감소를 적절히 모사하였으며, 특히 조도계수 ( $\alpha$ )가 0.10일 때 실험값에 가장 근사한 결과를 도출할 수 있었다.
- (2) 2-D 염화물 유입에 대해서는 기존의 실험값을 이용하여 개선된 모델의 검증에 수행하였다. 기존의 직사각형 모델링을 이용한 확산계수식이 균열폭이 5, 9, 12 $\mu\text{m}$ 로 진전함에 따라 121%, 179%, 105%의 오차를 나타내었는데, 개선된 쉘기형 모델링 ( $\alpha=0.0$ )에서는 10.9%, 39.9%, 26.8%로, 조도계수  $\alpha$ 가 0.15인 경우 오차는 각각 7.4%, 9.8%, 4.0%로 크게 감소함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한남대학교 교내연구비 (2013)에 의해 지원된 것으로 저자는 이에 감사드립니다.

## References

1. Andrade, C., "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurement", Cement and Concrete Research, Vol. 23, No. 3, 1993, pp.724-742.
2. Gerard, B., Marchand, J., "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. 2, pp.37-43.
3. Ishida, T., Maekawa, K., "Modeling of PH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory", Concrete Library of JSCE, Vol. 37, No. 1, 2001, pp.151-166.
4. Jacobsen, S., Marchand, J., Boisvert, L., "Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, 1996, pp.869-881.

5. JSCE - Concrete Committee. Standard Specification for Concrete Structures, 2002.
6. Korea Concrete Institute. Concrete standard specification -Durability Part, 2004 (in Korean).
7. Kwon, S. J., Lee, H. S., Park, S. G., "Effect of additional water on durability and pore size distribution in cement mortar", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 3, No. 3, 2012, pp.75-83.
8. Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., Jung, S. H., "Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack : Probabilistic approach for chloride diffusion", Structural Safety, Vol. 31, No.1, 2009, pp.75-83.
9. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T., Multi-Scale Modeling of Structural Performance, Taylor & Francis, 2009, pp.322-325.
10. Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H., "Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation", Construction and Building Materials, Vol. 29, No. 2, 2012b, pp.183-192.
11. Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H., Lee, S. W., "Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure", Construction and Building Materials, Vol. 27, No. 1, 2012a, pp.597-604.
12. Park, S. S., Song, H. W., Byun, K. J., "Model for chloride diffusivity and water permeability in cracked concrete", J. of KSCE, Vol. 21, No. 6-B, 2001, pp.925-924 (in Korean).
13. Song, H. W., Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K. J., Maekawa, K., "Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure", Concrete Science Engineering, Vol. 3, No. 1, 2001, pp.62-72.
14. Song, H. W., Kim, H. J., Kwon, S. J., Lee, C. H., Byun, K. J., Park, C. K., "Prediction of service life in cracked reinforced concrete structures subjected to chloride attack and carbonation", 6th International Congress Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, Scotland, 5-7 July, Vol. Cement Combinations for Durable Concrete, 2005b, pp.767-776.
15. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., Park, C. K., "Predicting carbonation in early-aged cracked concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 5, 2006, pp.979-989.
16. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., Park, C. K., "A Study on analytical technique of chloride diffusion considering characteristics of mixture design for high performance concrete using mineral admixture", Journal of KSCE, Vol. 25, No. 1A., 2005a, pp.213-223 (in Korean).
17. Song, H. W., Park, S. W., Lee, C. H., Kwon, S. J., "Service life Prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration", J. of Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 12, No. 4, 2006, pp.265-284.
18. Thomas, M. D. A., Bamforth, P. B., "Modeling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 4, 1999, pp.487-495.
19. Win, P. P., Watanabe, M., Machida, A., "Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 2, 2004, pp.1073-1079.
20. Yokozeki, K., Okada, K., Tsutsumi, T., Watanabe, K., "Prediction of the service life of RC with crack exposed to chloride attack", Japan Symposium of Rehabilitation of Concrete Structure, Vol. 10. No. 1, 1998, pp.1-6.

Received : 07/10/2013

Revised : 07/25/2013

Accepted : 07/31/2013

## 요 지

균열을 가진 콘크리트에서는 균열쪽으로 유입되는 염화물 이온에 의해 열화가 가속화된다.

본 연구는 균열을 가진 콘크리트의 염화물 확산에 대한 모델링으로, 정상상태를 가정하여 1차원 (이방성) 및 2차원 (등방성) 균열 모델링을 수행하였다. 기존의 균열 모델링에서는 직사각형 균열패턴으로 모델링을 수행하였으나, 본 연구에서는 조도를 가진 썸기형 형태로 균열을 모델링하였다. 검증을 위하여 1차원 유입에 대해서는 콘크리트 시편에 균열을 유입하여 염화물 영동실험을 수행하였으며, 2차원 유입에 대해서는 기존의 실험결과를 이용하여 검증을 수행하였다.

모든 경우에서 균열형태를 썸기형으로 고려하여 염화물 확산성이 감소되었으며, 조도를 고려함으로써 합리적인 결과가 도출되었다. 특히 0.10~0.15의 조도계수를 고려할 때, 실험값에 가장 근접한 결과를 나타내었다.

**핵심 용어** : 균열, 염화물 확산계수, 썸기형 균열, 등방성, 균열조도