



미세균열이 콘크리트의 염소이온 침투에 미치는 영향 : 현상학적 모델

윤인석^{1)*}

¹⁾델프트공과대학 토목공학부

Effect of Micro-Cracks on Chloride Ions Penetration of Concrete: Phenomenological Model

In-Seok Yoon^{1)*}

¹⁾Microlab, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, TU Delft, 2600 GA, Delft, The Netherlands

ABSTRACT Over the past few decades, considerable numbers of studies on the durability of concrete have been carried out extensively. A lot of improvements have been achieved especially in both measuring techniques as well as modeling of ionic flows. However, the majority of these researches have been performed on sound uncracked concrete, although most of in-situ concrete structures have more or less micro-cracks. It is only recent approach that the attention has shifted towards the influence of cracks and crack width on the penetration of chloride into concrete. The penetration of chlorides into concrete through the cracks can make a significant harmful effect on reinforcement corrosion. On the other hand, a general acceptable crack width of 0.3 mm has been recognized for keeping the serviceability of concrete structures in accordance with a lot of codes. However, there seems to be rare established description to explain the critical crack width in terms of the durability of concrete. To make a bad situation worse, there is little agreement on critical crack width among a few of literatures for this issue. Critical crack width is still controversial problem. Nevertheless, since the critical crack width is important key for healthy assessment of concrete structures exposed to marine environment, it should be established. The objective of this study is to define a critical crack width. The critical crack width in this study is designed for a threshold crack width, which contributes to the first variation of chloride diffusion coefficient in responsive to the existence of cracks. A simple solution is formulated to realize the quantifiable parameter, chloride diffusion coefficient for only cracked zone excluding sound concrete. From the examination on the trend of chloride diffusion coefficient of only cracked zone for various crack widths, a critical crack width is founded out.

Keywords chlorides penetration, micro-crack, critical crack width, durability

1. 서 론

염소이온 침투에 의한 콘크리트의 내구성 저하는 1980년대 이후로 전세계적으로 높은 관심을 갖고 꾸준히 연구되어 온 분야이다. 특히 90년대 중반 이후에는 빠른 시간 내에 염소이온의 침투성을 추정할 수 있는 실험 방법론 및 이론적 해석 방법이 다수 제안되었으며 이를 고려한 콘크리트의 내구성 설계 시스템의 개발은 활발히 연구되어 왔다^{1,2)}. 그러나 실제 환경에서 공용 중인 대다수의 콘크리트 구조물에는 환경, 하중 조건, 재료 및 시공상의 이유로 균열이 존재함에도 불구하고, 대부분의 연구들이 비균열된 콘크리트를 대상으로 염소이온 확산계수 추정 및 염소이온 프로파일 예측 등에 집중되었다.

균열부를 통한 염소이온 침투에 대한 연구는 최근의

관심 분야로서 기존의 연구 자료는 제한적인 실험 데이터일 뿐, 체계적으로 정리된 연구는 매우 드문 상황이다³⁾.

한편 콘크리트에 균열이 발생하면 크기 및 형상과 무관하게 구조물의 장기 내구성에 커다란 영향을 미칠 수 있다는 것은 기존의 연구에서 제시된 공통된 견해이다^{4,5)}. 그래서 염소이온 침투에 대한 균열의 한계치는 유지관리 차원에서 필요하지만, 대부분의 콘크리트 코드는 사용성의 견지에서 허용 균열폭을 보편적으로 0.3 mm로 제한할 뿐, 염소이온 침투 및 내구성의 견지에서 임계 균열폭에 대한 규정도 부재한 실정이다^{6,7)}. 더우기 이미 제안된 값도 연구자들마다 상이하어 논란의 여지가 있다⁸⁻¹³⁾.

본 연구의 목적은 콘크리트의 표면에 존재하는 미세균열이 염소이온 침투에 미치는 영향을 고찰하는 것이다. 그런데 염소이온 침투를 지배하는 재료 매개변수로 실험적 방법에 의하여 염소이온 확산계수를 얻을 수 있으나, 비균열부 콘크리트까지 포함된 값이라는 문제점이 있었다. 그래서 투수계수와 확산계수의 의미 및 상호관계의

*Corresponding author E-mail : yisconcrete@uos.ac.kr
Received July 16, 2006, Accepted December 8, 2006
©2007 by Korea Concrete Institute

수식적 정의를 정립함으로써 비균열부 단독부 만의 염소이온 확산계수를 도출하였다.

먼저 본 연구에서는 다양한 균열 폭과 균열 깊이를 갖는 콘크리트 시험편을 제작한 후, 급속 염소이온 침투 실험 RCMT(rapid chloride migration test)를 행하였다. 실험 결과에 의해 얻어진 콘크리트 횡단면적에 대한 염소이온 프로파일로부터 본 연구에서 제안된 다층 매체의 확산 모델을 사용하여 균열부만의 겉보기 염소이온 확산계수가 획득되었다. 이 겉보기 염소이온 확산계수는 콘크리트의 균열 부분 만의 확산계수로서 균열 폭의 변동에 따른 추이를 관찰하였다.

2. 균열부 콘크리트의 염소이온 확산계수

균열이 콘크리트에 미치는 영향에 대한 기존의 문헌들은 균열부와 비균열부로 나누어 구분하지 않고 균열된 콘크리트 전체에 대한 염소이온 확산계수의 변화율만 고려하였다. 즉 균열부와 비균열부가 공존하는 총 염소이온 확산계수와 비균열된 콘크리트의 염소이온 확산계수와의 비율인 상대 확산계수로 확산속도를 정량화시킨 연구가 다수였다^{4,5,8-13}). 그러나 이러한 방법은 비균열부의 염소 특성까지 내재되어 있어 비합리적이며 더우기 균열의 크기에 대한 주요 변수인 균열폭과의 명확한 함수관계의 도출도 기대하기 어렵다. 그러므로 균열부 단독부와 비균열된 콘크리트 부가 각각 독립적으로 염소이온 확산계수가 평가되어야 합리적이며 이때 균열이 존재하는 부분의 염소이온 확산계수는 기존의 상대 확산계수보다 균열폭에 대해서 더욱 민감할 것이다. 균열이 없는 콘크리트의 염소이온 확산계수에 대한 추정 방법은 이미 많은 문헌에서 보고되었으므로 본 연구에서는 균열부 단독부 만의 염소이온 확산계수의 산출 기법을 구현하여 균열폭과의 민감성을 고찰하였다.

2.1 투수계수와 염소이온 확산계수의 상관 관계

투수계수(K) 및 염소이온 확산계수(D)는 유체의 흐름에 따른 콘크리트의 밀실성을 판단할 수 있는 기준으로 간주되어 콘크리트의 밀실성을 기초로 내구성 설계 시스템을 구축하기 위한 가장 중요한 재료 매개변수이다. 유체의 흐름에 대한 구동력이 상이하기 때문에 두 재료 매개변수 간의 상관 관계를 표현하는 것이 쉽지 않지만, 양자가 콘크리트의 미세구조에 의해 지배된다는 공통된 견지에서 상관성을 구명할 수 있다¹⁴). 먼저 공극의 굴곡 특성을 무시하면 Hagen-Poiseuille의 법칙에 의하여 콘크리트의 투수성은 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{\pi \cdot r_{K(e)}^4}{A} \quad (1)$$

여기서,
 $r_{K(e)}$: 투수계수 K 에 영향을 미치는 유효 공극반경

A : 매체의 횡단면적

반면 염소이온 확산계수는 액체에서의 순수 염소이온 확산계수와 콘크리트의 미세공극에 의해 지배되며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = D_o \cdot a_{D(e)} = D_o \frac{\pi \cdot r_{D(e)}^2}{A} \quad (2)$$

여기서,

D_o : 액체상태에서 순수한 염소이온 확산계수
 $r_{D(e)}$: 확산계수 D 에 영향을 미치는 유효 공극반경
 $a_{D(e)}$: 확산계수 D 에 영향을 미치는 유효공극에 대한 면적비

투수계수는 정상흐름 상태에서 측정되며, 비정상 흐름 상태에서의 확산계수(D_{nss})를 정상흐름 상태의 확산계수(D_{ss})로 전환하면 다음의 관계를 이용할 수 있다¹⁵).

$$D_{nss} = \frac{D_{ss}}{\varepsilon + k_b \cdot w_{gel}} \quad (3)$$

여기서, ε : 공극률
 k_b : 구속계수
 w_{gel} : 시멘트겔 중량

정상흐름 상태에서, 투수계수 K 와 확산계수 D 에 각각 영향을 미치는 유효 공극 반경 $r_{K(e)}$, $r_{D(e)}$ 는 상호 같고 균열에 대한 염소이온 고정화 효과를 일정하다고 가정하면 식 (4)가 유도된다. 여기서 투수체는 물, 확산체는 이온일 경우에 n 값은 3/2이 된다. 전체 상수 C 는 온도 조건에 따른 액체 상태에서 이온 확산계수의 초기치와 염화물의 고정화 인자의 영향을 받으며 균열에 대해서 일정하다고 간주하였다. 균열이 염소이온의 고정화에 미치는 영향은 향후의 연구 과제로 한다.

$$K = \frac{A}{8\pi D_o^2} (\varepsilon + k_b \cdot w_{gel}) D^2 \approx C \cdot D^n \quad (4)$$

2.2 균열부 콘크리트의 염소이온 확산계수

Fig. 1과 같은 1차원 다층 매체의 투수성은 Darcy의 법칙에 의하여 식 (5)와 같이 정의된다.

$$K_T \cdot i_T = K_I \cdot i_I + K_{II} \cdot i_{II} \quad (5)$$

여기서, K_T : 매체 I과 II의 전체 투수계수
 K_I : 매체 I의 투수계수
 K_{II} : 매체 II의 투수계수
 i_T : 매체 I과 II의 전체 압력구배
 i_I : 매체 I의 압력구배
 i_{II} : 매체 II의 압력구배

여기서, 총 압력 수두 h 는 다음과 같다.

$$h = H_I \cdot i_I + H_{II} \cdot i_{II} \quad (6)$$

3. 실험 프로그램

3.1 콘크리트 시험편의 가공

Table 1과 같이 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 물-시멘트비가 50%인 150×150×150 mm 크기의 큐빅몰드형 콘크리트 시험체가 제작되었다. 시험체는 타설 후 2일동안 표준양생이 취해지고, 이후부터 28일까지는 기중양생되었다. Fig. 2와 같이 콘크리트의 균질성을 확보하기 위하여 직경 100 mm의 코어링 머신으로 중앙 부위를 천공한 후, 콘크리트 표면은 커팅머신으로 제거되었다. 내부 콘크리트를 대상으로 두께 55 mm를 갖도록 시험편을 커팅한 후, 타설방향별 일정하게 중앙상부에 5×5 mm 크기의 노치(notch)를 만든 후, 노치 양측으로 2장의 강판이 부착되었다. 이때 시험편의 양쪽 횡방향에는 균열개구 변위(CMOD)를 제어하기 위하여 LVDT가 설치되었다. Fig. 3과 같이 I사의 미세하중 재하기 8872 series로 부착된 강판에 약 3시간 동안 인장응력을 가하면 균열폭의 제어가 가능하다. 균열이 도입된 후, 커팅머신으로 노치를 제거하면 최종적인 콘크리트 시험편의 크기는 직경 100 mm, 두께 50 mm가 된다. 콘크리트 시험편은 각 의도 균열폭별로 3개씩 제작되었다.

3.2 균열의 관찰

하중 제거 후 유효 균열 폭(w_{cr})과 균열 깊이(d_{cr})가 각각 측정되었다. 균열의 관찰 방법은 콘크리트를 진공펌프가 설치된 챔버 내에서 3시간 동안 진공시킨 후, 발광성 에폭시를 주입하여 콘크리트 내의 균열을 완전 함침시켰다. 함침된 시험편은 1일간 공기 중에 경화시킨 후, 각 횡 단면별로 콘크리트의 균열 상태를 관찰하기 위하여 2 mm 두께로 커팅되었다. UV라인이 설치된, I사의 마이크로 전자 현미경 DM RXP를 이용하여 40배율로 균

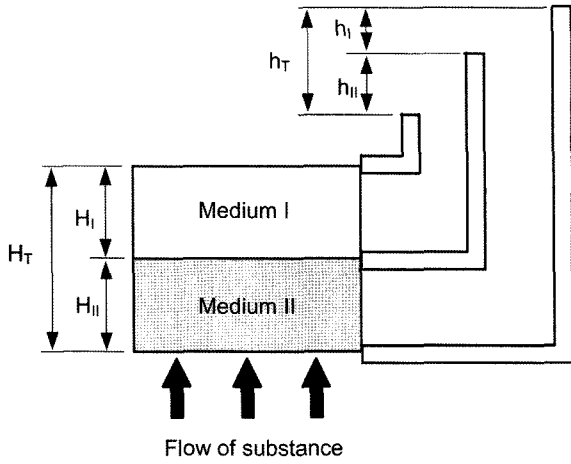


Fig. 1 Schematic of permeability in multi-layered medium

따라서, 다층 매체의 전체 투수 방정식은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{H_T}{K_T} = \frac{H_I}{K_I} + \frac{H_{II}}{K_{II}} \quad (7)$$

식 (5)를 식 (7)에 대입하면 복합매체에 적용할 수 있는 확산 방정식 (7)이 유도된다.

$$\frac{H_T}{\sqrt{D_r^3}} = \frac{H_I}{\sqrt{D_I^3}} + \frac{H_{II}}{\sqrt{D_{II}^3}} \quad (8)$$

상기 식에서 매체 I은 균열이 발생한 콘크리트, 매체 II는 비균열의 콘크리트로 각각 간주하면 식 (9)와 같이 균열 부분만의 콘크리트의 염소이온 확산계수를 구할 수 있는 공학적 실용해가 도출된다. 균열부 단독부의 염소이온 확산계수 D_{cr} 는 균열을 통한 염소이온의 평균유입률로 간주할 수 있으며 이는 균열부와 비균열부를 구분하지 않고 전체 균열된 콘크리트의 총 염소이온 확산계수보다 균열폭에 대하여 더욱 민감성을 갖을 것이다.

$$D_{cr} = \left[\frac{\frac{d_{cr}}{1}}{\frac{d_T}{\sqrt{D_T^3}} - \frac{d_{ucr}}{\sqrt{D_{ucr}^3}}} \right]^2 \quad (9)$$

- 여기서, d_{cr} : 균열 깊이
 d_T : 균열부에서 염소이온 침투 깊이
 d_{ucr} : 비균열부에서 염소이온 침투 깊이
 D_{cr} : 균열부 콘크리트의 염소이온 확산계수
 D_{ucr} : 비균열부 콘크리트의 염소이온 확산계수
 D_T : 비균열부가 포함된 균열된 콘크리트의 염소이온 확산계수

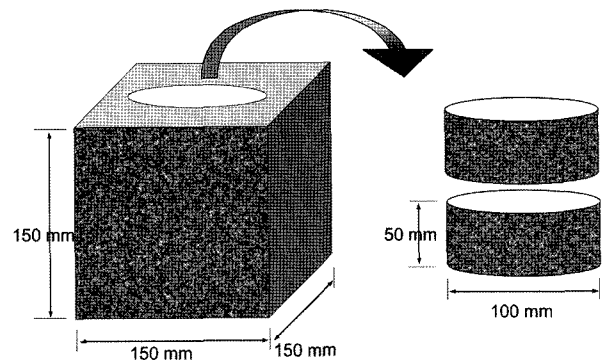


Fig. 2 Preparation of concrete specimen

Table 1 Mixing proportion of concrete

28days strength (MPa)	Slump (mm)	G_{max} (mm)	w/c	Unit weight (kg/m ³)			
				Water	Cement	Sand	Gravel
28.5	150 ± 10	16	0.50	185	370	720	1,021

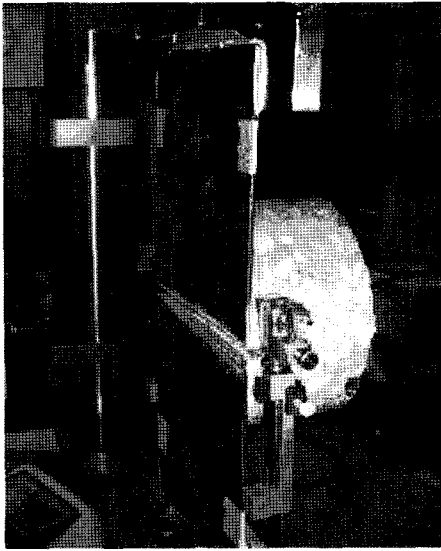


Fig. 3 Method to make artificial cracks

열 형상을 관찰하였다. Fig. 4와 같이 디지털 사진을 촬영한 후, 화소를 이용한 디지털 화상기법으로 균열폭과 균열깊이를 측정하였다.

3.3 염소이온의 침투 실험

균열이 도입된 콘크리트로 금속 염소이온 침투 실험 방법인 RCMT(rapid chloride migration testing)를 수행하였다¹⁶⁾. 시험 전 시험편은 1~5 kPa의 압력을 갖는 진공 챔버에 5분 동안 보관된 후 Ca(OH)₂ 포화 용액에 침지되었다. 다시 진공챔버에서 1시간동안 보관된 후, 18시간 동안 재차 진공챔버에서 Ca(OH)₂ 포화 용액에 침지되었다.

RCMT 실험을 수행하기 위하여 시험편의 양극부에 0.3 N NaOH 용액, 음극부에는 2 N NaCl 용액으로 확산셀을 구성하였다. 통전성을 확인한 후, 15~20 V의 전압을 콘크리트 시험체에 인가시켰으며 시험편의 온도 및 인가전류가 지속적으로 측정되었다. 실험 종료 후 시험편의 파단면에 0.1 M AgNO₃ 용액을 살포하고 버니어 캘리퍼스를 이용하여 표면으로부터 염소이온의 침투깊이를 0.1 mm 단위까지 엄밀 측정하였다. 비균열 부위에서는 등간격마다 얻은 6회의 침투 깊이에 대한 평균값(d_{ucr})과 균열부위에서 1회 측정된 침투 깊이(d_T)가 각각 획득되었다. 측정 깊이를 토대로 다음 식에 의하여 염소이온 확산계수 (D)가 추정되었다.

$$D = \frac{RTx_d - \alpha\sqrt{x_d}}{zFEt} \quad (10)$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2C_d}{C_o}\right)$$

z : 이온가 (염소이온의 경우 1)

F : Faraday 상수(=9.648 × 10⁴ J/(V·Mol))

U : 인가전압 (V)

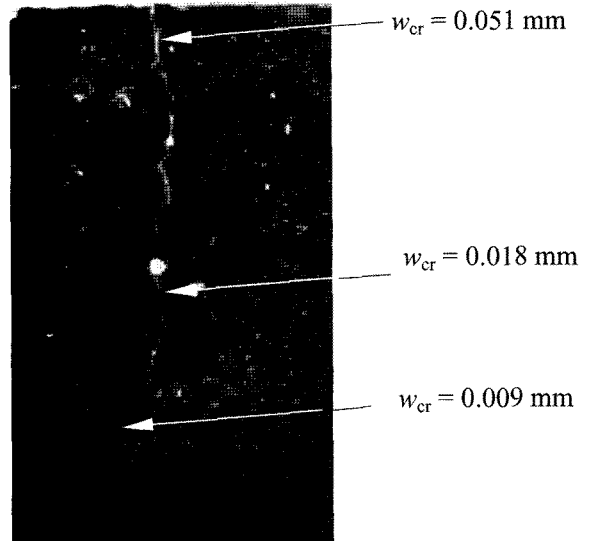


Fig. 4 Investigation of cracks in concrete

R : 가스상수(=8.314 J/(K·Mol))

T : 절대온도 (K)

L : 시편의 두께 (m)

x_d : 침투된 평균 깊이 (m)

t : 시험 시간 (sec)

erf^{-1} : 오차역함수

C_d : 침투 깊이에서 염소이온의 농도 (=0.07 N)

C_o : 음극셀 내 염소이온의 농도 (=2 N)

Fig. 5와 같이 균열부위에서 측정된 총 침투 깊이 (d_T)에 의하여 균열부와 비균열부가 포함된 총 염소이온 확산계수 (D_T), 순수한 콘크리트 재료적 특성에 의해 의존되는 비균열부위에서의 침투깊이 (d_{ucr})에 의하여 비균열부의 염소이온 확산계수(D_{ucr})가 각각 추정되었다. 또한, 앞서 제안된 식 (9)에 의하여 균열부 단독부분 (d_{cr} 영역)에서의 염소이온 확산계수(D_{cr})가 구해졌다.

4. 결과 및 분석

4.1 균열 규모와 염소이온 침투와의 관계

실험 결과에 대한 평균값을 정리하여 Table 2에 정리하였다. 여기서 W_{ucr} 은 초기에 목표로 하였던 균열폭이지만, 하중이 제거되면서 콘크리트의 탄성회복으로 인한 균열의 닫힘이 반영된 유효 균열폭 W_{cr} 수준까지 감소되었다.

Fig. 6은 전체 측정 데이터를 토대로 RCMT전에 인공 균열이 도입된 콘크리트를 전자 현미경으로 관찰하여 균열 폭과 균열 깊이를 보이고 있다. RCMT 시험편의 규격화된 두께는 50 mm로 제한되어 있으므로 최소 20 mm에서 최대 45 mm까지 균열 깊이를 갖도록 제작되었다. 균열 폭은 0.05 mm에서 0.20 mm까지 0.05 mm 씩 4단계로 변화시켜 균열을 유도하였으나 탄성 회복에 의한 균열 닫힘에 의하여 하중제거 후 측정된 유효 균열폭은 최

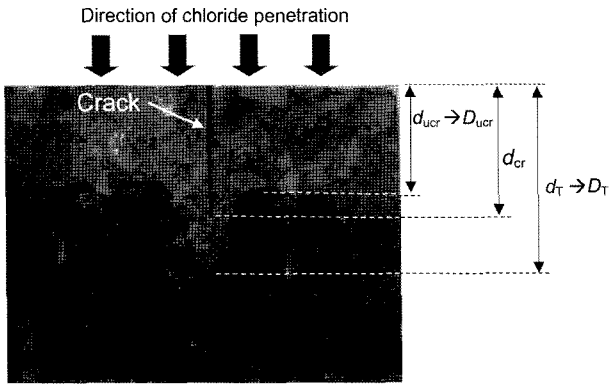


Fig. 5 Method to calculate chloride diffusion coefficient for cracked concrete and uncracked concrete

Table 2 Experimental data of RCMT

W_{tcr} (mm)	W_{cr} (mm)	d_{cr} (mm)	U (V)	d_{ucr} (mm)	d_T (mm)
0.05	0.032	27.10	20	24.0	29.5
	0.018	22.65	20	22.5	28.5
0.10	0.012	21.50	20	20.5	26.8
	0.039	28.00	20	22.0	32.5
	0.041	31.50	20	21.3	33.1
0.15	0.047	30.50	20	20.5	33.8
	0.051	38.60	20	21.2	42.0
	0.072	36.15	15	18.0	37.3
0.20	0.068	34.20	15	19.0	36.3
	0.105	42.70	15	18.5	47.3
	0.081	41.50	15	22.0	44.5
	0.119	45.50	15	20.7	49.3

소 0.012 mm에서 최대 0.117 mm까지 분포하였다. 한편, 비균열부에서 측정된 콘크리트의 염소이온 확산계수는 총 15개 시험체에 대하여 $16.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 평균값과 $1.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 표준편차 값을 보였다.

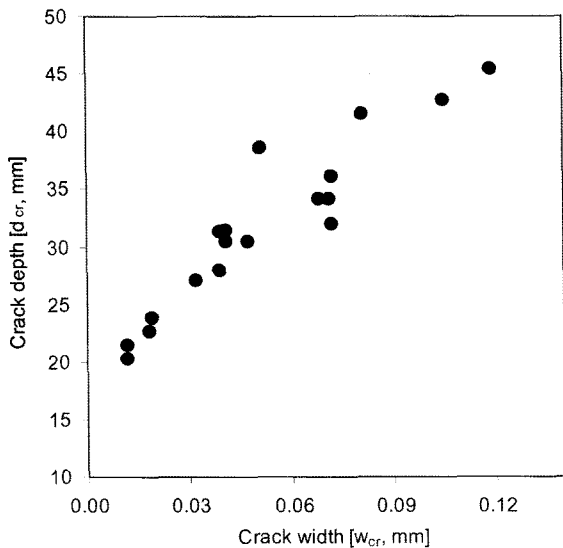


Fig. 6 Crack depth and crack width of cracked concrete samples

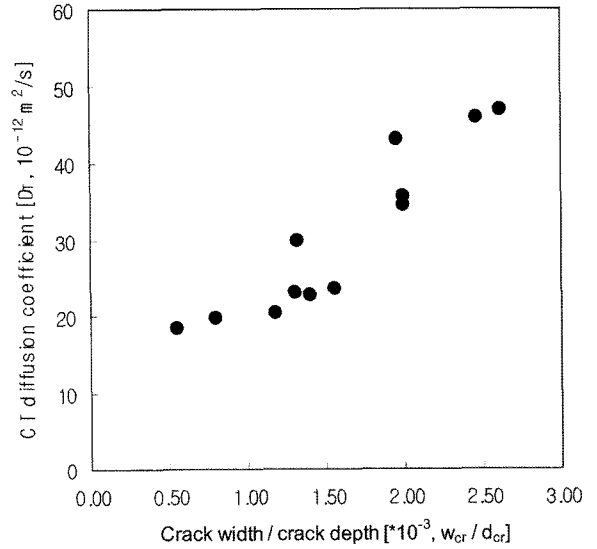


Fig. 7 Relationship between total chloride diffusion coefficient and ratio of crack width and crack depth

다음으로 균열폭 대 균열 깊이의 비율 (W_{cr}/d_{cr}) 및 염소이온 확산계수와 비교한 것이 Fig. 7로서 결정계수 0.76 수준의 선형함수를 보였으며 명확한 상관관계가 도출되지 못하였다.

Fig. 8은 균열부와 비균열부를 포함한 총 염소이온 확산계수와 균열 폭과의 관계를 보인 것이다. 예상했듯이 균열폭이 증가함에 따라 총 염소이온 확산계수도 상승하였는데 앞서 설명한 W_{cr}/d_{cr} 의 방법보다는 결정계수 0.89로서 좀 더 높은 상관 관계가 형성되었다. 특히, 약 0.03~0.05 mm의 균열폭을 기준으로 총 염소이온 확산계수가 증가하는 추이를 보였다.

Fig. 9는 비균열 부분의 염소이온 확산계수 대비 총 염소이온 확산계수의 비율인 상대 염소이온 확산계수 (D_T/D_{ucr})를 대상으로 균열 폭과의 상관성을 보인 것이다. 앞서 설명한 바와 유사하게 0.03 mm의 균열 폭에서 상대 염소이온 확산계수가 상승하고 있음이 확인되었다. 단,

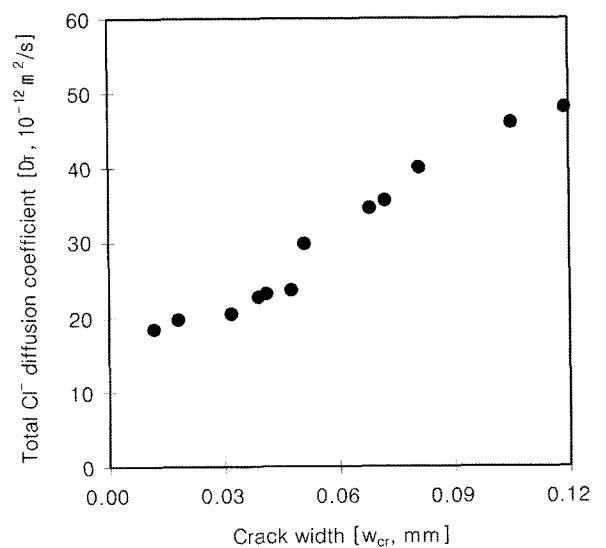


Fig. 8 Total chloride diffusion coefficient for various crack widths

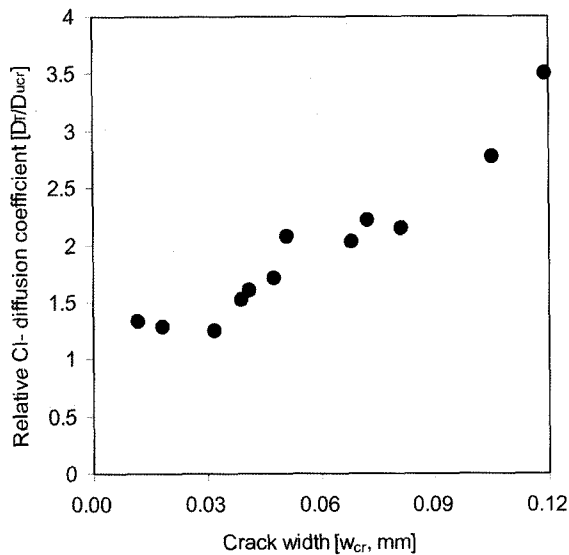


Fig. 9 Relative chloride diffusion coefficient for various crack width

상대 염소이온 확산계수와 균열폭이 명확한 함수관계가 형성되지는 못했으나 Tognazzi 등의 연구¹⁷⁾에서 제시한 바와 같이 선형함수 형태와 유사하게 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 앞서 제시된 식 (8)에 의하여 균열부 콘크리트 단독만의 염소이온 확산계수를 얻은 값으로서 콘크리트 표면에 존재하는 균열폭(W_{cr})과의 상관성을 제시한 그림이다. 앞서 설명한 균열폭 대 균열 깊이의 비율보다 더욱 정밀한 관계가 도출되었는데 2가지 사항이 이 그림에서 주목된다. 첫째는 균열폭 0.03 mm 내외에서 균열부 콘크리트의 염소이온 확산계수는 일정하지만, 0.03 mm를 초과하면서 균열폭에 따라 뚜렷하게 상승하는 현상이다. 이는 균열로 인한 콘크리트의 염소이온 침투에 영향을 미치는 초기치가 0.03 mm 내외라는 의미를 갖는다. 둘째는 0.03 mm를 초과하면서 최대 균열폭 0.105 mm 이내까지 균열부 콘크리트의 염소이온 확산계수가 균열폭과 선형 비례하는 뚜렷한 함수 관계를 보인 점이다. 이러한 결과는 앞서 설명한 Tognazzi 등의 연구내용과 상호 부합하며 특히, 본 연구에서 제안한 균열부 단독부의 염소이온 확산계수에 대한 실용적 모델식이 의미있음을 보여준다. 그러나 0.03 mm 이내의 균열폭에 대한 염소이온 확산계수의 실험적 데이터 개수에 한계가 있으므로 추가적으로 0.03 mm 이내의 미세균열이 도입된 콘크리트의 RCMT 실험 결과를 토대로 추후 엄밀한 임계 균열폭의 값을 도출할 예정이다.

Fig. 11은 균열 깊이와 콘크리트의 염소이온 침투 깊이를 비교한 결과이다. 앞서 제시된 Fig. 5를 보면 비균열부 표면으로부터 침투 깊이를 d_{ucr} , 균열깊이를 d_{cr} , 균열을 통해 침투된 총 침투깊이를 d_T 로 각각 정의하였다. 본 연구에 의하면 비균열 콘크리트 표면에서의 침투 깊이 (d_{ucr})가 총 침투 깊이 (d_T)에서 균열 깊이 (d_{cr})을 제외하고 남은 잔여 깊이 ($d_T - d_{cr}$)보다 크게 나타났다. 이는 염소이온이 균열열림과 동시에 균열중점까지 순간적으로

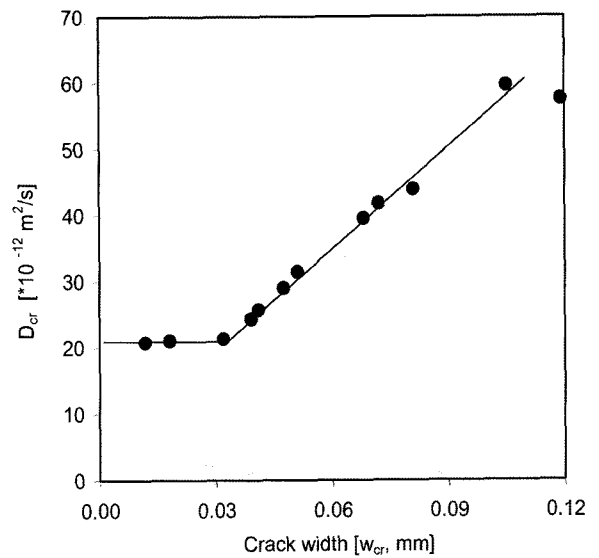


Fig. 10 Chloride diffusion coefficient of cracked zone

침투하지 못하였음을 의미한다.

이에 대한 원인은 균열이 콘크리트 내부로 들어갈수록 균열폭이 감소하며, 균열의 굴곡 특성 및 미세균열의 상호간 비연결부가 존재하기 때문에 균열 중점까지 급속한 염소이온 침투 현상이 발생하지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

4.2 임계 균열폭

Table 3은 콘크리트의 내구성 견지에서 임계 균열폭을 제안한 문헌들을 정리한 것이다. 본 연구의 실험적 결과를 통하여 임계균열폭으로 간주할 수 있는 0.03 mm 내외의 균열폭은 다른 문헌들의 제안값보다 비교적 작은 값이다. 이중 주목할만한 것은 모세관 흡수와 염소이온 침투현상에 기인한 Reinhardt와 수분 침투를 고려한 Mivelaz의 제안 값으로 대체로 본 연구에서 제안한 값과 대등소이한 것을 알 수 있다. Schiessel과 Li가 제안한 0.1 mm 값은 투수성에 기초로 제안한 값으로 실험 진행 과정 중 투수압력에 의하여 균열의 열림이 확장되었을 가능성이 높아 본 연구의 제안값과는 다소 큰 폭의 차이를 보인 것으로 생각된다. 0.03 mm의 균열폭은 다소 엄격한 제한치일 수 있으나 20~50 μm의 피두께를 갖는 천이영역 (interfacial transition zone)에서의 염소이온의 확산율이 시멘트 경화체의 2.83배라는 연구¹⁸⁾에서 유추할 수 있듯이 0.03 mm의 균열폭이 과소평가 되어서는 안될 것으로 생각된다.

한편 콘크리트에 균열이 발생하면 비록 미세 균열일지라도 물질이동을 확산현상에 의하여 구명하기는 어렵다. 균열을 통해 침투하는 유체의 점성 및 압력 구배를 좌우하는 위치 에너지 등이 물질 이동의 주요 구동력이 되기 때문이다. 그러나, 콘크리트 내부로 침투한다는 공통된 견지에서 본 연구에서 제안한 겉보기 염소이온 확산계수의 산출은 균열을 통해 유입되는 염소이온 침투의

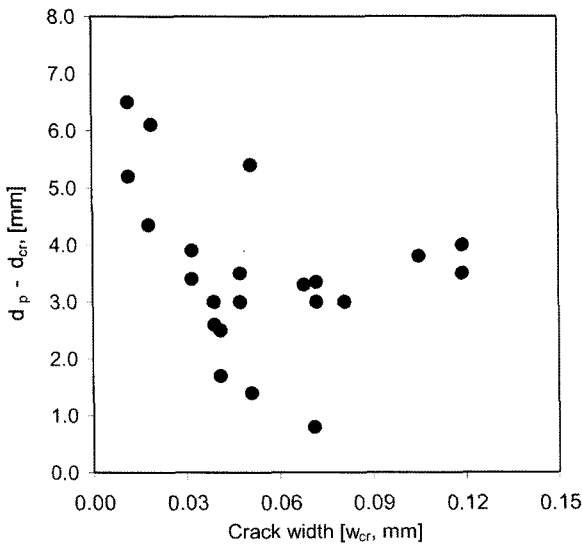


Fig. 11 Comparison of chloride penetration depth and crack depth

Table 3 Critical crack width in terms of durability of concrete

Researcher	W_{cr}	Condition
Reinhardt <i>et al.</i> ⁸⁾	0.03 mm	Capillary absorption
	0.05 mm	Chloride penetration
Mivelaz ⁹⁾	0.04 mm	Water flow
Schiessel ¹⁰⁾ , Li ¹¹⁾	0.10 mm	Permeability
Francois <i>et al.</i> ¹²⁾	0.30 mm	Seawater immersion vs. corrosion
Mohammed <i>et al.</i> ¹³⁾	0.70 mm	Corrosion rate
This study	0.03 mm below	To prevent increasing Cl ⁻ diffusivity at crack zone

실용적인 해석 방법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

4.3 임계 균열폭을 고려한 콘크리트의 현상학적 모델

본 연구의 결과를 토대로 균열이 발생한 콘크리트에 염소이온이 침투하는 경로를 현상에 기인하여 Fig. 12와 같이 제시하였다. 균열이 발생한 콘크리트는 3가지 부분으로 대별된다. 각 구간별 세부적 염소이온 침투 해석 방법은 향후의 연구 과제로 하며 개별적 침투 특성은 다음과 같다.

- 1) Zone I (확산 자유 영역): 콘크리트 표면의 주균열에서 궁극적으로 자유로운 물질이동 현상이 발생하므로 확산자유 영역(diffusion free zone)이라고 정의하였다. 이 영역은 콘크리트 표면에서 임계 균열폭 W_{cr} 까지로서 주균열이 존재한다. 이 구간은 다시 2구간으로 나뉘어진다. 첫번째 구간에서는 본 연구 결과에서 증명되었듯이 콘크리트의 균열폭이 증가함에 따라 염소이온 확산계수도 선형 함수로 증가한다. 그러나 일정 균열폭 (최소 0.107 mm) 이상이 되면 균열 열림과 동시에 급속한 염소이온 침투가 발생하므로 가속형에 가까운 비선형 곡선을 보이면

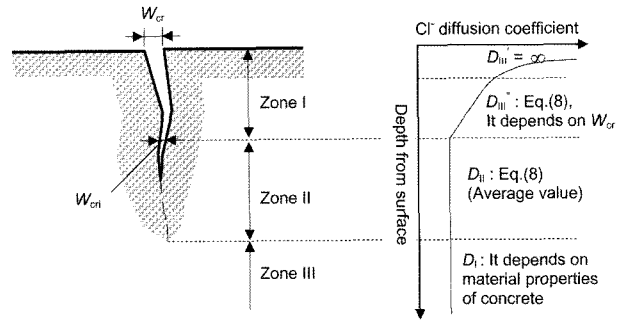


Fig. 12 Chloride diffusion coefficient of cracked concrete with depth

서 종국에는 무한대의 확산계수값을 갖는 것이 두번째 구간이다. 콘크리트의 표면 균열폭 W_{cr} 이 임계 균열폭 W_{cr} 보다 작은 경우에는 이 확산자유 구역은 존재하지 않으며 zone II와 zone III만이 존재할 뿐이다.

- 2) Zone II (확산 경화 영역): 일정 깊이 이상의 균열 내부에서 염소이온의 침투는 순수한 확산에 의해서 지배되지 않는다. 즉 임계 균열폭 이하 및 균열의 비연결성으로 확산 및 비확산현상이 공존하는 확산경화(diffusion hardening)현상을 보이기 때문이다. 확산경화 영역은 임계 균열폭(W_{cr})에서부터 균열깊이 종점까지의 구역으로서 주로 마이크로 균열이 공존하는 구간이다. 이 구간에서 깊이로 들어갈수록 균열폭은 감소하지만 매 깊이마다 균열이 상호 연결되어 있으면서 국부적으로는 끊기는 브리징(bridging)이 관찰된다. 본 연구에서 제안된 식 (10)은 평균적인 염소이온 유입율이 고려된 염소이온 확산계수의 실용해가 된다. 확산경화 구간에서 염소이온 확산계수는 균열의 굴곡 특성, 수, 연결 특성 등에 의해 지배되지만 콘크리트의 자기치료(self healing) 효과로 시간에 따라 감소되는 추이가 예상된다.
- 3) Zone III (순수 확산 영역): 균열이 없는 콘크리트의 구간으로서 깊이에 따른 염소이온 프로파일은 순수 확산(pure diffusion)에 지배되는 전형적인 확산 거동(Fickian)을 보인다. 이 구간의 염소이온 확산계수는 콘크리트의 배합에 따른 미세구조 특성, 시멘트의 수화도, 온도 및 습도 등에 의해 지배된다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 균열이 발생한 콘크리트의 염소이온 확산계수를 산출하기 위한 실용적 모델식이 제시되었다. 이를 이용하여 균열부 단독만의 염소이온 확산계수를 얻을 수 있었다.
- 2) 0.03 mm의 균열폭을 기준으로 균열부 단독부분의 염소이온 확산계수는 상승하였다. 콘크리트 구조물의 장기 내구성을 확보하기 위하여 0.03 mm는 임

계 균열폭으로 간주되었다.

- 3) 균열부 단독부의 콘크리트의 염소이온 확산계수는 균열폭 0.03 mm 이상을 초과하면서 0.105 mm 이내 까지 균열폭과 선형 비례 함수로 증가하였다.
- 4) 실용적 염소이온 침투 해석을 위하여 균열부가 발생한 콘크리트를 확산 자유 구간, 확산 경화 구간, 순수 확산 구간 등의 3구간으로 구분되었다. 임계 균열폭은 확산 자유 구간과 확산 경화 구간을 구분할 수 있는 기준치이다.

본 연구는 콘크리트 표면에 존재하는 균열의 갯수를 무시하였으나 정확한 임계 균열폭을 도출하기 위해서는 일괄적으로 하나의 주균열만을 갖는 콘크리트를 대상으로 염소이온의 침투실험이 이루어져야 한다. 본 연구를 토대로 균열의 갯수를 고려하여 균열폭 0.03 mm 이내의 범위에서 염소이온 침투에 영향을 미치는 정확한 임계 균열폭이 도출될 예정이다

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단(KRF)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. (과제번호 No. D00171, M01-2005-000-10161-0)

참고문헌

1. 윤인석, “물리화학적 메커니즘에 기인한 콘크리트의 염화물 흡착등온에 대한 모델링”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 18권 2호, 2006, pp.537~540.
2. 윤인석, Ye Guang, Oguzhan Copuroglu, Erik Schlangen, and Klaas van Breugel, “해양성환경의 침지대콘크리트의 표면염소이온량 계산에 대한 이론적 접근방법”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 18권 1호, 2006, pp.197~200.
3. 윤인석, Erik Schlangen, and Klaas van Breugel, “콘크리트 중의 염화물침투에 영향을 미치는 균열폭에 대한 고찰”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 18권 2호, 2006, pp.945~948.
4. Samaha, H. R. and Hover, K. C., “Influencing of Micro-cracking on the Mass Transport Properties of Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.4, 1992, pp.416~424.
5. Rodriguez, O. G. and Hooton, R. D., “Influence of Cracks on Chloride Ingress into Concrete”, *ACI Material Journal*, Vol.100, No.4, 2003, pp.120~126.
6. British Standards Institution, *ENV 1991-1-1*, BSI, London, 1992.
7. Federation Internationale de la Precontrainte, *CEB-FIP Model Code*, Thomas Telford, London, 1990.
8. Reinhardt, H. W., Sosoro, M., and Zhu, X., “Cracked and Repaired Concrete Subjected to Fluid Penetration”, *Materials and Structures*, Vol.31, No.205, 1998, pp.74~83.
9. Mivelaz, P., *Estanchéité des Structures en Béton Armé, Fuites au Travers d'un Élément Fissuré*, PhD Thesis, EPFL, No.153, 1996.
10. Schiessl, P., *Admissible Crack Width in Reinforced Concrete Structures, Inter-Association Colloquium on the Behavior in Service of Concrete Structures*, Preliminary Reports II, Liege, 1975, pp.739~755.
11. Li, C. Q., “Initiation of chloride-Induced Reinforcement Corrosion in Concrete Structural Members-Prediction”, *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.2, 2002, pp.131~141.
12. Francois, R. and Arliguie, G., “Effect of Microcracking and Cracking on the Development of Corrosion in Reinforced Concrete Members”, *Magazine of Concrete Research*, Vol.51, No.2, 1999, pp.143~150.
13. Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hisada M., and Shibata, T., “Effect of Crack Width and Bar Types on Corrosion of Steel in Concrete”, *Journal of Materials Journal in Civil Engineering*, ASCE, Vol.13, No.2, 2001, pp.194~201.
14. RILEM Report 12, *Performance Criteria for Concrete Durability*, J. Kropp and H. K. Hilsdorf(Eds.), E & FN SPON, London, 1995, pp.15~31.
15. Tang, L., *Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction*, Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenborg, Sweden, 1996, pp.21~85.
16. NT Build 492, *Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiment*, NORDTEST, Finland, 1999.
17. Tongnazzi, C., Ollivier, J. P., Carcasses, M., and Torrenti, J. M., *Couplage Fissuration-Dégradation Chimique des Matériaux Cimentaires: Premiers Résultats sur les Propriétés de Transfert*, Ouvrages, Géomarériaux et Interactions, Ch. Petit, G. Pijaudier-Cabot and J. M. Reynouard (Eds.), Hermès, Paris, 1998, pp.69~84.
18. Yang, C. C. and J. K. Su, “Approximate Migration Coefficient of Interfacial Transition Zone and the Effect of Aggregate Content on the Migration Coefficient of Mortar”, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, No.4, 2002, pp.1559~1565.

요 약 지난 수년간 콘크리트의 염소이온 침투와 연관되어 실험 방법론 및 해석적 모델 기법의 개발에 많은 발전이 있어 왔다. 그러나 실제 콘크리트 구조물에는 다소의 균열이 존재하며 이는 장기 내구성에 큰 영향을 줄 수 있음에도 불구하고 대부분의 연구들은 비균열의 콘크리트를 대상으로 연구되어 온 문제점이 있었으며 균열이 존재하는 콘크리트의 염소이온 침투에 대한 연구는 매우 드문 실정이다. 염소이온 침투에 대한 균열폭의 임계치는 유지관리 차원에서 필요하지만, 대부분 콘크리트 코드는 사용성의 견지에서 허용 균열폭을 보편적인 값 0.3 mm로 제한하고 있을 뿐, 염소이온 침투 및 내구성의 견지에서 임계 균열폭에 대한 규정도 부재한 실정이다. 이미 제안된 값도 연구자들마다 상이하여 논란의 여지가 있다. 본 연구는 임계 균열폭의 도출을 목적으로 균열이 콘크리트의 염소이온 침투에 미치는 영향을 고찰하였다. 실험적 방법으로 다양한 균열폭과 균열 깊이를 실험 변수로 하여 급속 염소이온 침투 실험 (RCMT)를 행하였다. 한편, 임계 균열폭이 갖는 공학적 의미를 설명하고자, 균열폭에 따른 염소이온 침투의 현상학적 모델이 제안되었다. 즉, 균열된 콘크리트는 3 구간으로 나누어지며 내부 안쪽으로 들어갈수록 확산자유 영역, 확산경화 영역, 순수 확산 영역의 3가지 구간이 존재한다. 이는 균열폭에 따른 염소이온 확산계수를 산출하기 위한 해석적 방법론의 개발에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 염소이온 침투, 미세균열, 임계 균열폭, 내구성