



미세균열이 콘크리트의 염소이온 침투에 미치는 영향 II: 임계 균열폭의 고찰

윤인석^{1)*}

¹⁾네델란드 델프트공과대학 토목공학부 / 한국건자재시험연구원 방수보수보강센터

Effect of Micro-Cracks on Chloride Ions Penetration of Concrete II: Examination of Critical Crack Width

In-Seok Yoon^{1)*}

¹⁾Faculty of Civil Engineering and Geoscience, TU Delft, The Netherlands / Waterproof Repair Rehabilitation Center, Korea Institute of Construction Materials, Seoul 137-073 Korea

ABSTRACT The vulnerability of concrete to its environment is significantly dependent on the fact that concrete is a porous material. For well-consolidated and well-cured concrete, its service life is a very long and an entrance of aggressive substance might be only pores. However, for cracked concrete, cracks should be preferential channel for the penetration of aggressive substance such as chloride ions. The effect of crack on chloride penetration depends on its size for example, crack width and crack depth. The purpose of this study is examining the effect of crack width and crack depth on chloride penetration. In order to visualize chloride penetration via cracks, RCM (rapid chloride migration) testing is accomplished. Crack width is examined using an optical microscope and CMOD value is used to estimate average crack width. From the examination on the trend of chloride diffusion coefficients of concrete specimens with various crack widths, a critical crack width and a critical crack depth are found out.

Keywords : chlorides penetration, micro-crack, critical crack width, crack depth

1. 서 론

콘크리트는 수밀성을 유지하여 외기의 유해 물질로부터 내부 매입된 철근을 보호하는 것이 내구성 측면에서의 주요 기능이다. 올바른 배합, 건전한 설계 및 시공을 고려한 조건에서 콘크리트는 반영구적인 수명을 갖는 것으로 알려져 있다. 그러나, 공용 중인 대다수의 콘크리트 구조물에는 작용 하중에 의한 응력, 구속된 조건에서의 건조수축이나 온도 변화에 의한 응력, 부등침하 및 기타 재료 및 시공상의 이유로 균열이 다소 존재한다. 그럼에도 불구하고, 대부분의 연구들은 비균열된 콘크리트를 대상으로 염소이온과 같은 유해 물질의 침투 특성에 집중되어 온 것이 사실이다. 따라서 균열을 갖는 콘크리트의 유해 물질 침투에 대한 연구는 콘크리트의 내구성 향상을 위한 필연적 연구로서 균열의 크기 및 기하학적 형상 등에 따른 염소이온의 침투 특성을 다룬 연구가 필요하다.

최근 저자는 균열이 콘크리트의 염소이온 침투에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 비균열부를 제외하고 균열부 단독만을 고려한 염소이온 확산계수의 산정 방법을 제안하여 균열폭에 대한 민감성을 고찰하였으며 염소이온의 침투에 영

향을 미치는 임계 균열폭은 0.03 mm 이하의 값에서 존재함을 확인하였다¹⁾. 본 논문에서 임계균열폭은 콘크리트의 장기 자생치료 (self-healing) 효과를 무시하고 균열 형상의 크기만을 고려하여 이것이 염소이온 침투에 영향을 미치기 시작하는 초기 균열폭으로 정의하였다. 본 논문은 콘크리트의 표면에 존재하는 미세균열이 염소이온 침투에 미치는 영향을 다룬 후속 연구로서 정확한 임계균열폭을 결정하고자 집중적으로 0.03 mm 내외의 균열폭을 갖는 콘크리트의 염소이온 침투 특성을 고찰하고자 하였다.

본 연구는 의도하는 균열폭 및 균열 깊이를 변수로 2가지 방법으로 균열을 제어하여 각각 실험 프로그램이 진행되었다. 빠른 시간내에 균열이 발생한 콘크리트의 염소이온 침투의 시각적 특성 및 확산계수를 얻고자 급속 염소이온 확산 실험인 RCM (rapid chloride migration) 실험을 행하여, 균열폭 및 균열 깊이와 염소이온 침투 깊이 및 확산계수의 관계에 대한 추이를 관찰하였다.

본 연구는 두가지 목적을 갖는다. 첫째는, 염소이온 침투에 영향을 미치기 시작하는 정밀한 임계균열폭을 도출하는 것이다. 콘크리트 구조물의 장기 내구 성능을 확보하기 위해서 콘크리트 표면에 존재하는 균열은 이 임계 균열폭보다 작아야 하며, 이는 올바른 건전도 평가를 위한 기준이 된다. 둘째는, 균열폭 대 균열 깊이에 대응하여 염소이온이 침투하기 시작하는 비율을 도출하는 것이다. 균열폭 만으로

*Corresponding author E-mail : yisconcrete@uos.ac.kr

Received March 5, 2007, Accepted July 23, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

는 균열의 크기 효과를 정확히 정량화하기 어렵기 때문에 폭과 길이의 비율을 고려하는 것이 적절한 방법이라고 생각된다^{1,3)}. 이는 토목기술자들이 콘크리트 구조물의 설계 측면에서 균열 제어에 대한 사용성 체크, 진단시 균열 검토에 대한 기준의 확립 및 향후 내구성 설계 기법의 개발에도 유용한 균열 함수로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 프로그램

2.1 콘크리트 시험편의 가공

콘크리트 표면에 균열을 생성하기부터 균열 관찰까지 본 연구의 실험적 방법 순서는 Fig. 1과 같다. 먼저, Table 1과 같이 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 물-시멘트비가 50%인 150×150×150 mm 크기의 큐빅폴드형 콘크리트 시험체가 제작되었다. 시험체는 타설 후 2일 동안 표준양생이 취해지고, 이후 재령 28일까지 기중양생되었다. 콘크리트의 균질성을 확보하기 위하여 직경 100 mm의 코어링 머신으로 중앙 부위를 천공한 후, 콘크리트 표면은 커팅머신으로 제거되었다.

2.2 균열의 제어 방법

2.2.1 균열폭의 제어 방법

두께 55 mm를 갖도록 시험편을 커팅한 후, 타설 방향별 일정하게 중앙 상부에 5×5 mm 크기의 노치(notch)를 만든 후, 노치 양측으로 2장의 강판이 부착되었다. 이때 시험편의 양쪽 측면에는 균열 개구 변위(crack mouth opening displacement, CMOD)를 제어하기 위하여 LVDT가 설치되었다. Fig. 1의

(4)와 같이 1사의 미세하중 재하기 8872 series로 부착된 강판에 인장응력을 가하였으며 이때, 측정 시간, 하중 크기, CMOD 등이 컴퓨터 상에서 기록된다. 균열 도입 후, 하중을 제거하면 균열 닫힘 현상이 발생하는데 Fig. 2와 같이 평균적인 유효폭으로 간주할 수 있는 유효 CMOD를 구하였다. 균열이 도입된 후, 커팅머신으로 노치를 제거하면 최종적인 콘크리트 시험편의 크기는 직경 100 mm, 두께 50 mm가 된다.

2.2.2 균열 깊이의 제어 방법

Fig. 1의 (1~4)와 동일하게, 두께 150 mm인 시험편의 중앙상부에 5×5 mm 크기의 노치를 만든 후, 노치를 기준으로 한 양측으로 2장의 강판과 시험편 양쪽 측면에는 균열개구 변위(CMOD)의 제어를 위하여 LVDT를 부착하였다. 균열의 도입 후, 광학 현미경 Koester를 이용하여 균열 깊이를 관찰하였고, Fig. 3과 같이 균열 종점부에서 균열깊이 d_2 가 20, 25, 30, 35, 40, 45 mm 씩 갖도록 시험편을 커팅하였다. 균열폭의 제어 방법에 의한 시험편과 동일하게 최종 콘크리트 시험편의 두께는 50 mm가 된다.

2.3 염소이온의 침투 실험

균열이 도입된 콘크리트로 급속 염소이온 침투 실험인 RCM(rapid chloride migration) 실험을 수행하였다⁴⁾. 시험 전, 시험편은 1 kPa~5 kPa의 압력을 갖는 진공 챔버에 5분 동안 보관된 후, Ca(OH)₂ 포화용액에 침지되었다. 다시 진공 챔버에서 1시간 동안 보관된 후 18시간 동안 재차 진공챔버에서 Ca(OH)₂ 포화 용액에 침지되었다.

RCM 실험을 수행하기 위하여 시험편의 양극부에 0.3 N

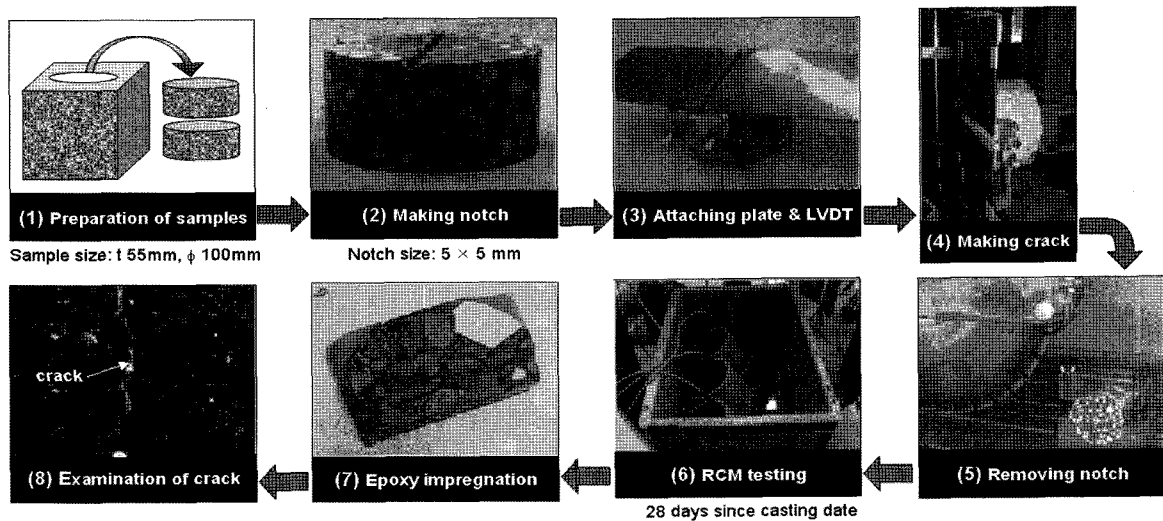


Fig. 1 Outline of experimental procedures: from making concrete samples to getting data

Table 1 Mixing proportion of concrete

28 days 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

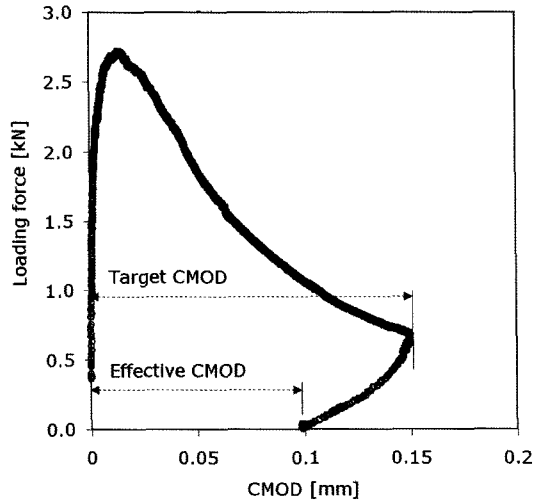


Fig. 2 Getting effective CMOD from the relationship between loading force and target CMOD

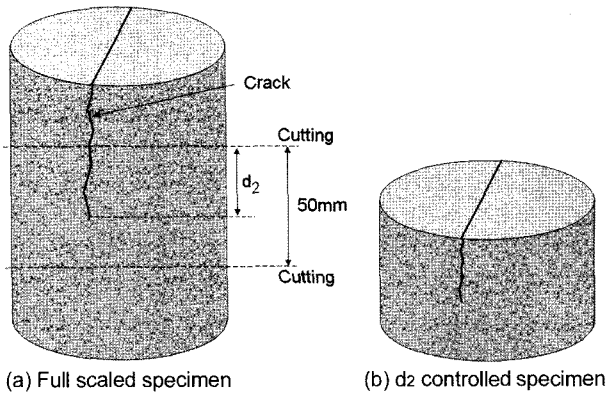


Fig. 3 Schematic method: how to control crack depth

NaOH 용액, 음극부에는 2 N NaCl 용액으로 확산셀을 구성하였다. 통전성을 확인한 후 15~20 V의 전압이 확산셀에 인가되었으며, 시험편의 온도 및 인가전류가 지속적으로 측정되었다. 실험 종료 후 Fig. 4와 같이 시험편을 2회 할렬 인장시켰으며, 할렬된 시험편 (b)에 0.1 M AgNO₃ 용액을 살포하여 한 시험체당 두 단면의 염소이온 프로파일을 얻었다. 비니어캘리퍼스를 이용하여 표면으로부터 염소이온의 침투 깊이를 0.1 mm 단위까지 엄밀 측정하였다. 유효 CMOD는 평균적 균열폭의 의미이므로 CMOD와의 관계를 비교할 때에는, Fig. 4의 단면 (1)과 (2)의 평균적인 염소이온 침투 깊이가 이용되었다.

2.4 염소이온 확산계수의 산출

균열이 발생한 콘크리트의 염소이온 프로파일을 살펴보면 Fig. 5와 같다. 여기서, 비균열부에서 콘크리트의 염소이온 침투 깊이를 d_1 , 균열 깊이는 d_2 , 균열부의 최대 염소이온 침투 깊이는 d_T 가 각각 측정되었다. 비균열 부위에서는 등간격마다 얻은 6회의 침투 깊이에 대한 평균값 (d_1)과 균열부위에서 1회 측정된 침투 깊이 (d_T)를 토대로 다음 식에 의하여 염소이온 확산계수 (D)가 추정되었다. 이때, 염소이

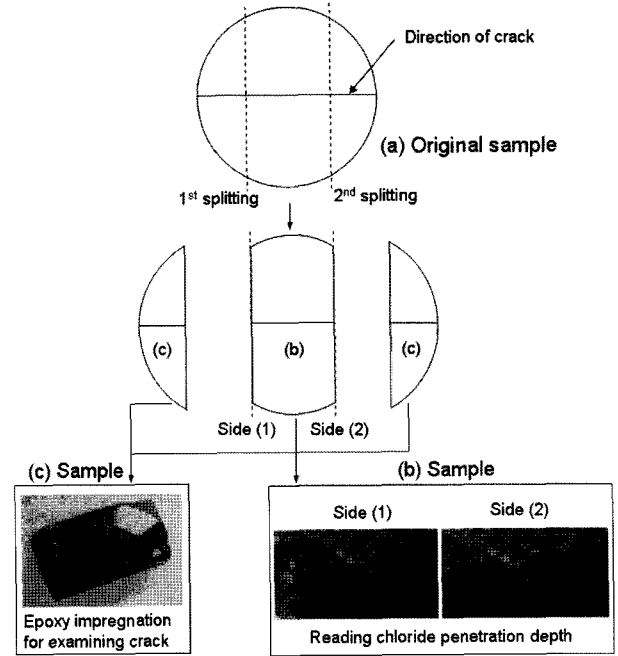


Fig. 4 Usage of concrete samples

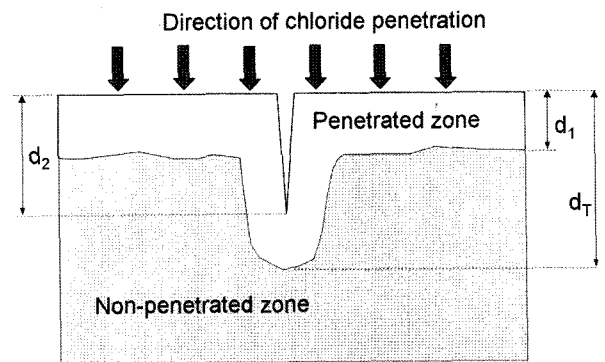


Fig. 5 Chloride profile of cracked concrete after RCM testing

온 확산계수는 2가지 값이 얻어졌는데, 즉 비균열부에서 얻은 침투 깊이 (d_1)를 식 (1)에 대입하여 얻은 비균열부 염소이온 확산계수 (D_1)와 균열부에서 얻은 침투 깊이 (d_T)에 의한 균열부 염소이온 확산계수 (D_T)이다.

$$D = \frac{RT x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{zFE} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } E = \frac{U-2}{L},$$

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

z : 이온가 (염소이온의 경우 1)

F : Faraday 상수 (= $9.648 \times 10^4 \text{ J/(V}\cdot\text{Mol)}$)

U : 인가전압 (V)

R : 가스상수 (= $8.314 \text{ J/(K}\cdot\text{Mol)}$)

T : 절대온도 (K)

L : 시험편의 두께 (m)

x_d : 침투된 평균 깊이 (m)

t : 시험시간 (sec)

erf^1 : 오차역함수

C_d : 침투 깊이에서 염소이온의 농도 (= 0.07N)

C_o : 음극셀 내 염소이온의 농도 (= 2N)

2.5 균열의 관찰

RCM 실험의 종료 후, Fig. 4의 할렬 시험편 (c)를 진공펌프가 설치된 챔버 내에서 3시간 동안 진공시키고, 형광성 에폭시를 주입하여 콘크리트 내의 균열을 완전 함침시켰다. 함침된 시험편은 1일간 공기 중에 경화시킨 후, 각 횡 단면 별로 콘크리트의 균열 상태를 관찰하기 위하여 2 mm 두께로 커팅하였다. 완성된 균열 관찰용 에폭시 함침 시험편은 Fig. 4의 샘플 사진 (c)와 같다. UV (ultra violet)라인이 설치된, L사의 마이크로 광학 현미경 DM RXP을 이용하여 40배 확대하여 균열을 관찰하였다. 이때, 균열폭과 염소이온 침투에 대한 정확한 상관 관계를 유도하기 위하여 콘크리트 표면에 존재하는 균열을 Fig. 6과 같이 주균열 1개만 존재하는 (a), 복수의 균열이 존재하는 (b) 등, 2가지 균열로 구분하였다. 광학현미경 상에서 균열 사진을 촬영하고 이미지 화일로 변환시킨 후, 화소를 이용한 디지털 화상기법으로 균열폭과 균열 깊이가 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균열폭을 변수로 한 실험 결과 및 고찰

Fig. 7은 균열폭을 변수로 제작된 시험편의 CMOD 및 균열 깊이 d_2 를 보인 것이다. 목표로 한 균열폭의 범위는 0.025~0.20 mm였으나, 응력 제거 후 균열 닫힘으로 인하여 유효 CMOD는 0.012~0.122 mm 이내에 존재하였다. 또한, 균열 깊이는 17.4~45.5 mm까지 다양하게 도입되었다.

Fig. 8은 RCM 실험 종료 후, 광학현미경으로 화상 촬영하여 디지털 기법으로 측정된 균열폭과 유효 CMOD값의 상관성을 보인 것이다. 균열폭이 CMOD보다 작은 결과를 보였는데 이는 Fig. 6에서 원인을 찾을 수 있다. 즉 광학현미경으로 촬영 및 측정된 균열은 단일 균열폭만을 측정할 수 있을 뿐, 실제로 콘크리트에는 복수의 주균열이 존재하면 평균적인 균열폭을 얻는 것이 불가능하다. 그러나 CMOD는 변위의 의미로서 균열수와 무관하게 평균적인 균열폭을 산정할 수 있기 때문에 콘크리트 표면에 다수의 균열이 존

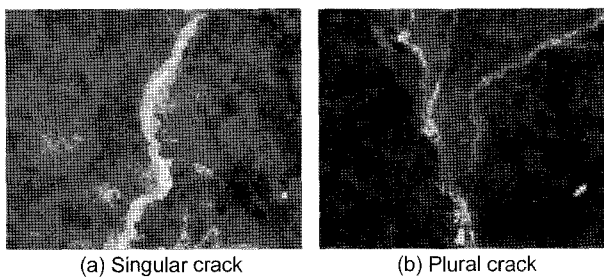


Fig. 6 Various forms of crack at the surface of concrete

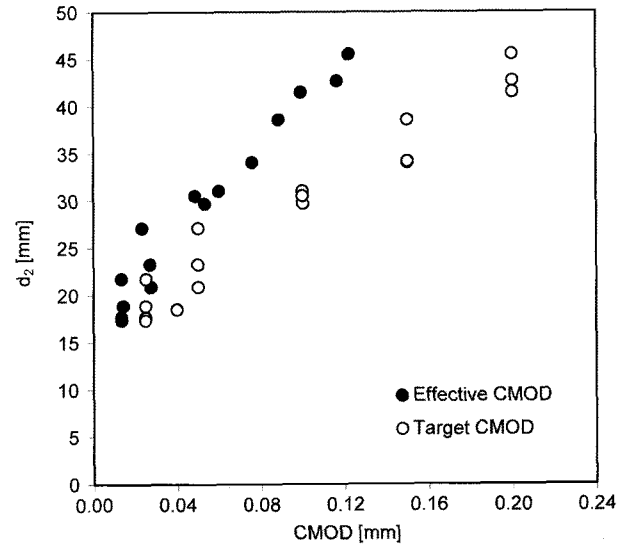


Fig. 7 Crack scale of specimen: crack depth d_2 and CMOD

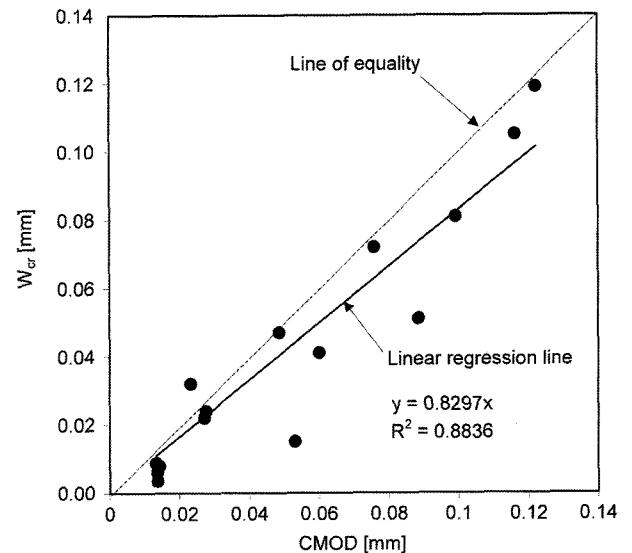


Fig. 8 Crack width vs. CMOD

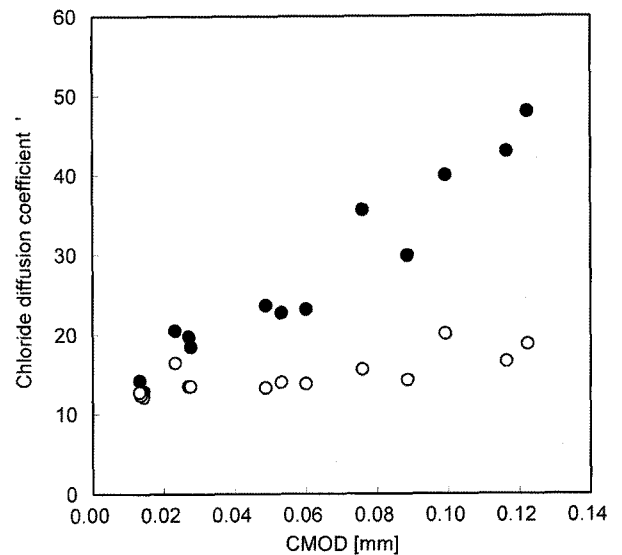


Fig. 9 Chloride diffusion coefficient with CMOD

재할 경우, 주균열 1개만이 측정된 균열폭 값이 평균적 의미인 CMOD보다 작을 수 밖에 없다.

Fig. 9는 전체 측정 데이터를 토대로 비균열부에서 측정된 염소이온 확산계수 D_1 과 균열부에서 측정된 염소이온 확산계수 D_T 를 CMOD값에 대응하여 보인 것이다. 비균열부에서 측정된 염소이온 확산계수 D_1 은 균열폭의 함수인 CMOD와 무관하나 균열부에서 측정된 염소이온 확산계수 D_T 는 CMOD에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 균열폭이 염소이온의 침투에 직접적인 영향을 주는 것은 명확하다.

Figs. 10 및 11은 상대 확산계수 (D_T/D_1)와 CMOD, 그리고 상대 확산계수 (D_T/D_1)와 화상 측정된 균열폭의 상관관계를 각각 보인 것이다. Fig. 10의 경우 정밀한 상관관계의 도출이 이루어지지 않았으나, Fig. 11의 경우는 보다 의미있는 분석이 가능하다. 즉, Fig. 11은 Fig. 4에서 보여지듯이 한 개

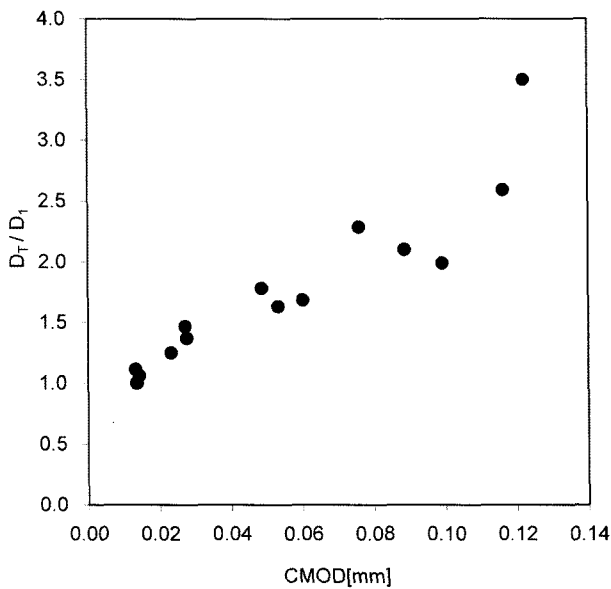


Fig. 10 Relative diffusivity with CMOD

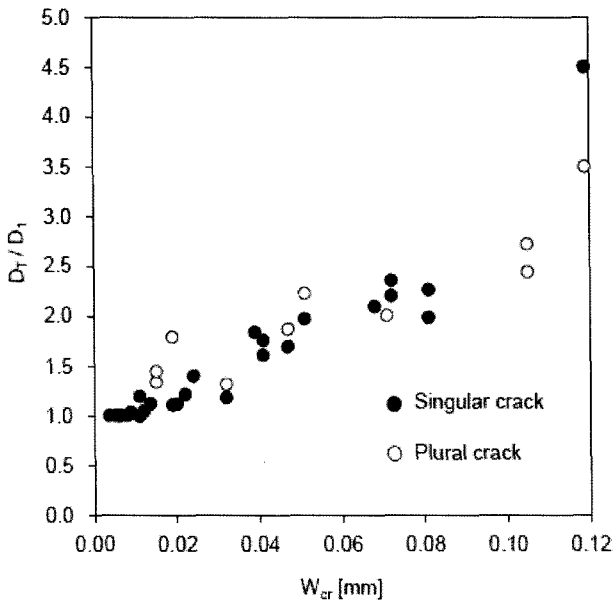


Fig. 11 Relative diffusivity (D_T / D_1) with crack width W_{cr}

의 시험체에서 파단면 (1), (2)를 두번 측정하여 화상 측정된 균열폭과 상대확산계수 (D_T/D_1)의 관계를 보인 것이다. 이때 콘크리트 표면에 존재하는 균열수가 단복수인지에 따라서 상대 확산계수에 미치는 영향을 각각 다르게 표시하였다. 균열이 복수로 존재할 경우, 상대 확산계수와 균열폭과의 상관성이 정밀하게 도출되기를 기대하기 어렵다. 즉, 균열이 주균열 1개만 표면에 존재할 경우만을 고려하면 상관성이 보다 분명해 진다. 여기서, 0.012 mm 내외의 균열폭에서부터 상대 확산계수가 1이상으로 상승하는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 균열부를 통한 염소이온의 침투 깊이와 비균열부에서의 침투 깊이의 차이, 즉 d_T-d_1 값을 통하여 균열 깊이 d_2 가 염소이온 침투에 미치는 영향을 고찰한 것이다. 균열 깊이 d_2 가 17.38 mm 이하의 수준에서 d_T-d_1 값이 0이 되며, 이는 균열을 통한 염소이온의 침투가 이루어지지 않았음을 의미한다. CMOD와 균열 길이의 관계를 보인 Fig. 7에 의하면 균열길이 d_2 가 17.38 mm 이하일때 CMOD는 약 0.012~0.015 mm의 값에 대응한다. 즉, 균열폭 0.012~0.015 mm 이내, 균열 깊이 d_2 17.38 mm 이내일 때, 균열을 통한 염소이온의 침투는 이루어지지 않는다고 판단할 수 있다.

이를 더욱 명확히 고찰하고자 d_T-d_1 값을 통하여 CMOD와 균열 깊이 d_2 의 비율이 염소이온 침투에 미치는 영향을 고찰한 것이 Fig. 13이다. 선형 회귀분석식에 의하면 CMOD/ d_2 의 비율이 0.6819×10^{-3} 일때 염소이온의 침투는 0이 된다. Fig. 12에서는 염소이온 침투에 영향을 미치지 않는 균열 깊이 값이 17.38 mm이었으므로 이를 0.6819×10^{-3} 의 CMOD/ d_2 비율에 대입하면 CMOD는 0.012 mm 값이 도출된다.

4.2 균열 깊이를 변수로 한 실험 결과 및 고찰

균열 깊이를 변수로 제작된 균열이 존재하는 시험체에서 균열폭은 광학현미경으로 촬영 후 화상 기법에 의해서 측정되었다. 시험편에 대한 균열폭과 균열 깊이를 측정하여

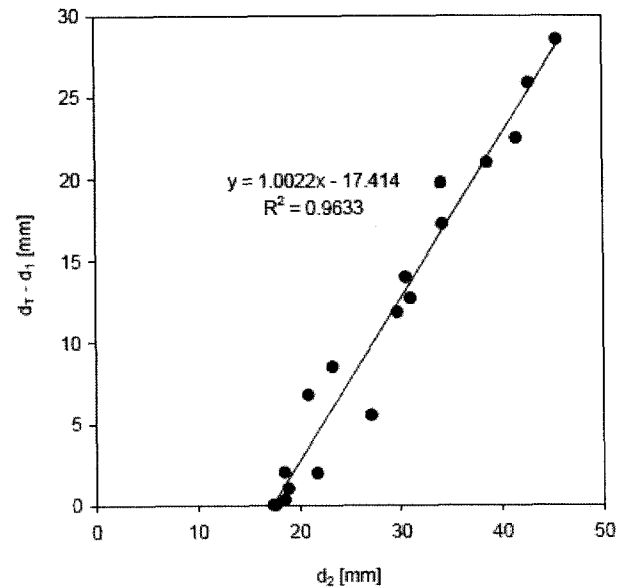


Fig. 12 Effect of crack depth d_2 on chloride penetration

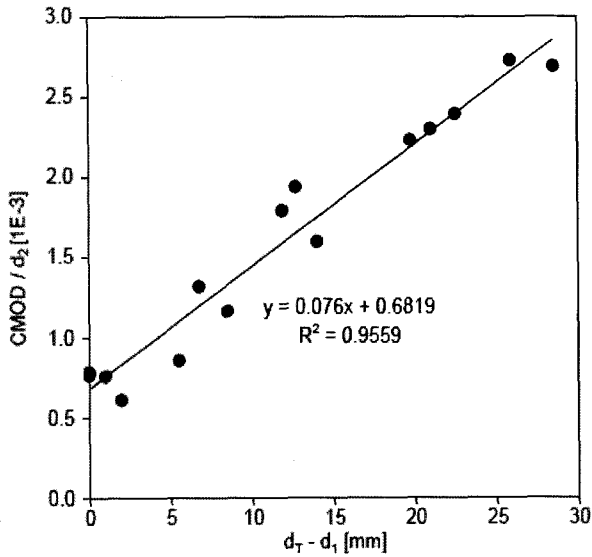


Fig. 13 Effect of CMOD and crack depth d_2 on chloride penetration

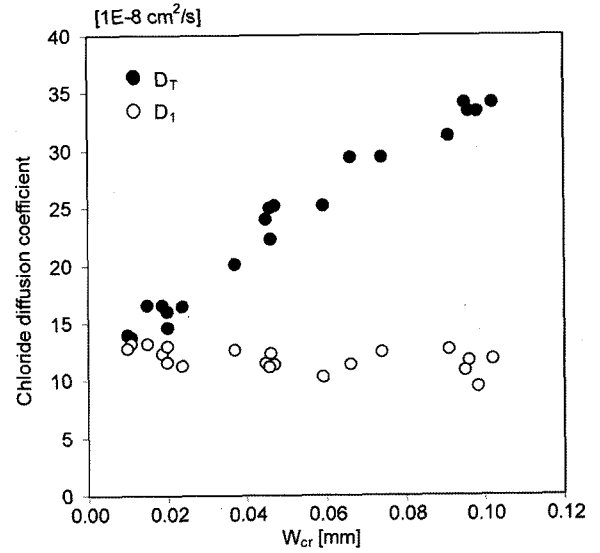


Fig. 15 Chloride diffusion coefficient with CMOD

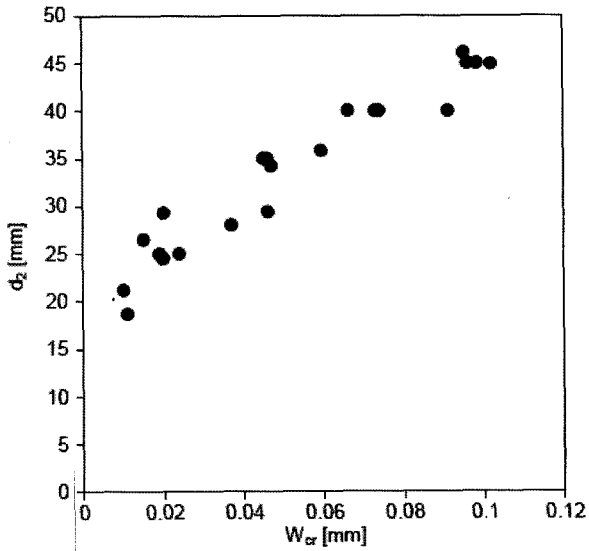


Fig. 14 Crack scale of specimen: crack depth d_2 and crack width W_{cr}

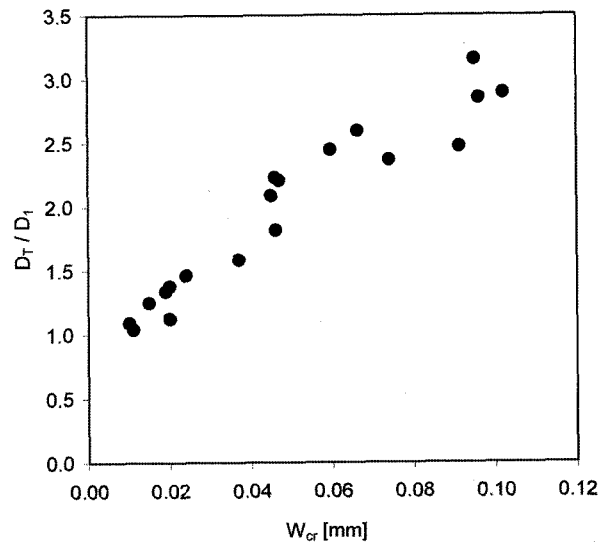


Fig. 16 Relative diffusivity vs. crack width

보인 것이 Fig. 14이다. 시험편의 커팅 과정에서 정확히 목표했던 균열 깊이와 다소의 오차가 발생하였다.

Fig. 15는 균열 깊이를 변수로 제작된 시험편의 균열폭에 따른 확산계수의 변화 추이를, 그리고 Fig. 16은 균열폭에 따른 상대 확산계수의 변화 추이를 각각 보인 것이다. 균열 깊이를 변수로 시험한 결과인 Fig. 15를 균열폭을 변수로 시험한 결과인 Fig. 10과 비교하여 염소이온의 확산계수 변화율이 균열폭에 대한 높은 상관성을 보이면서 뚜렷한 상승 추이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 17은 Fig. 12와 동일한 방법으로, 균열을 통해 침투한 염소이온의 침투 깊이와 비균열부에서의 침투 깊이, $d_T - d_1$ 값을 통하여 균열 깊이 d_2 가 염소이온 침투에 미치는 영향을 고찰한 것이다. 균열 깊이 d_2 가 19.38 mm 이하일때, $d_T - d_1$ 값이 0이 된다.

균열폭 대 균열 깊이 비율과 $d_T - d_1$ 값을 보인 Fig. 18의 결과를 이용하면 0.552×10^{-3} 의 균열폭 대 균열 깊이 비율

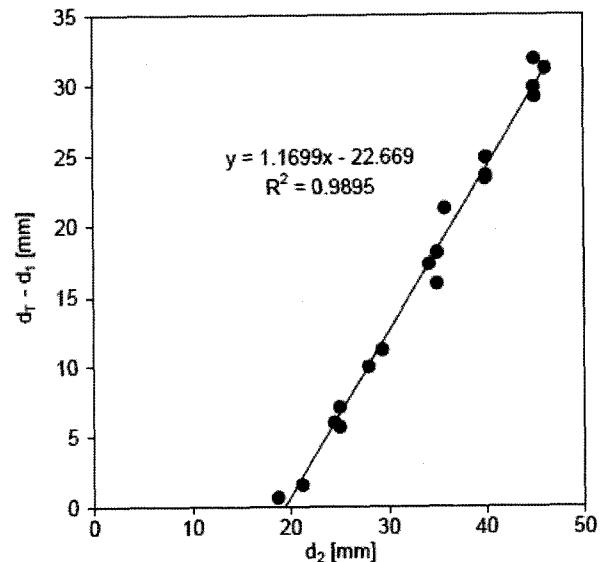


Fig. 17 Effect of crack depth d_2 on chloride penetration

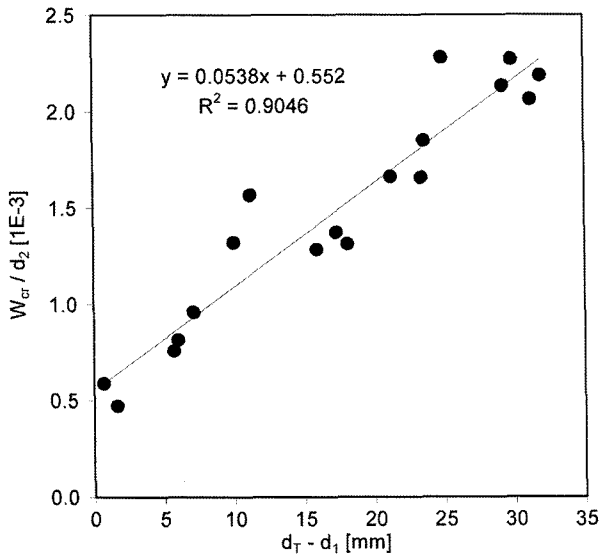


Fig. 18 Effect of crack width W_{cr} and crack depth d_2 on chloride penetration

에서 균열을 통한 염소이온의 침투는 이루어지지 않으며, 이 비율을 이용하여 균열 깊이 d_2 에 대응하는 균열폭은 약 0.011 mm이 된다. 이는 앞서 균열폭을 변수로 도출한 임계 균열폭 0.012 mm와 유사한 수준이다.

Fig. 19는 대표적인 균열폭에 대한 염소이온의 침투 깊이의 사진을 정리하여 보인 것으로 균열폭이 증가함에 따라 뚜렷히 침투 깊이가 상승하는 추이를 확인할 수 있다.

4.3 균열폭 및 균열 크기에 대한 제한

콘크리트 구조물의 균열폭을 제어하는 주요 이유는 외관,

누수 및 부식 등이 그 원인으로서, 해양 구조물의 경우에는 더욱 엄격히 제한되어야 한다. CEB⁵⁾는 외관의 견지에서 0.25 mm~0.33 mm 이내로 균열폭을 제한하였으며, 사용성 측면에서는 환경적 조건에 따라 Table 2의 허용균열폭을 기준으로 검토할 것으로 제안하였다. 그러나 고부식성 환경일 지라도 균열폭 대 피복두께의 비율을 0.0035로 규정하고 있으며, 이는 본 연구에서 제안한 균열폭 대 균열 깊이의 비율인 $0.552 \times 10^{-3} \sim 0.6819 \times 10^{-3}$ 보다 5.1 ~ 6.3배 크게 허용한 값으로 균열에 의한 염소이온의 침투가 과소평가되고 있다.

Table 3은 각국에서 제안한 허용균열폭 대비 피복두께의 비율을 보인 것으로 ACI의 경우 균열폭 대 피복두께의 비율을 0.0025~0.0030 수준으로 타 시방서보다 비교적 엄격히 제한하고 있다. 그러나 이 기준도 본 연구에서 제안한 균열폭 대 균열 깊이의 비율인 $0.552 \times 10^{-3} \sim 0.6819 \times 10^{-3}$ 보다 3.67~5.4배 높게 허용한 값으로, 각국의 모든 코드가 균열폭을 크게 제한하고 있다고 생각된다.

Table 4는 콘크리트의 내구성 견지에서 임계 균열폭 (W_{crit})을 제안한 문헌들을 정리한 것이다. 본 연구에서 도출한 0.011~0.012 mm 내외의 임계 균열폭보다 다른 문헌들의 제안치가 매우 큰 것을 알 수 있다.

그러나, 본 연구에서 제안한 임계균열폭을 실구조물에 적용하기에는 지나치게 엄격한 규제가 되기 때문에 실질적인 어려움이 있다. 따라서 현실적인 적용방법으로서 유효 균열 깊이의 개념이 적용될 수 있다. 여기서, 유효 균열 깊이 (d_e)는 Fig. 20과 같이 임계 균열폭 이하의 균열 깊이는 무시하고 표면으로부터 임계 균열폭이 존재하는 균열 깊이로 정의되며, 내구수명 예측 기법에 의한 피복두께의 계산시, 추가적인 피복두께로 고려되어야 한다. 이러한 유효 균열 깊

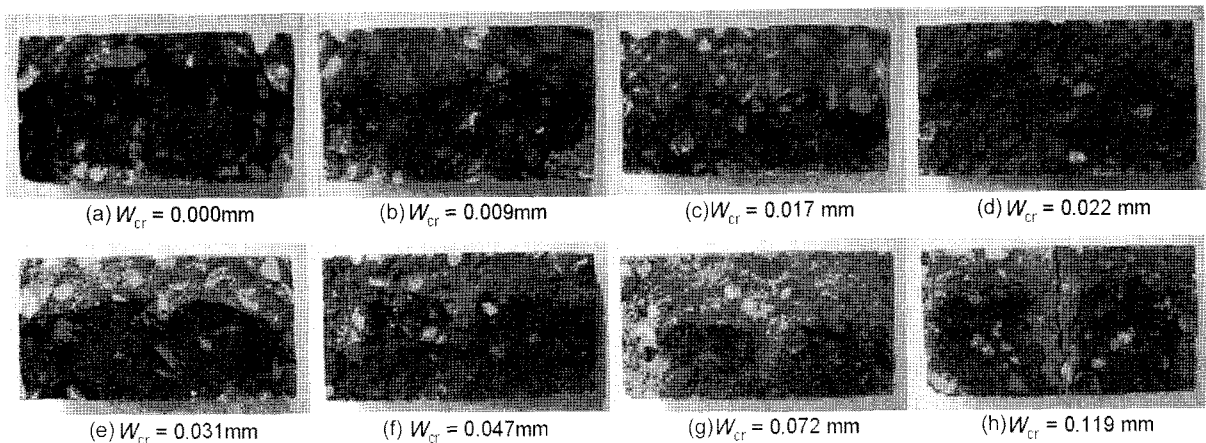


Fig. 19 Visualization of chloride penetration depth

Table 2 Acceptable crack width in terms of serviceability^{6,7)}

Type		Exposure condition			
		Drying	Wetting	Corroding	High corroding
RC	Building	0.4 mm	0.3 mm	0.004 t_c	0.0035 t_c
	Extra structures	0.006 t_c	0.005 t_c	-	-
Prestressing tendon		0.005 t_c	0.004 t_c	-	-

* t_c : minimum cover depth

Table 3 Ratio of crack width vs. crack depth from various codes⁸⁾

	Acceptable W_{cr} (mm)	Cover depth (mm)	W_{cr} / t_c
CEB/FIP model code ⁹⁾	0.30	40	0.0075
ACI Manual ¹⁰⁾	0.15	50~60	0.0025~0.003
ENV 1991 ¹¹⁾	0.30	40	0.0075
BS 8110 ¹²⁾	0.30	50	0.0060
AS 3600 ¹³⁾	-	40~50	-

Table 4 Literature review of critical crack width in terms of durability of concrete^{1,3)}

Researcher	W_{cri} (mm)	Condition
Reinhardt <i>et al.</i> ¹⁴⁾	0.03	Capillary absorption
	0.05	Chloride penetration
Mivelaz ¹⁵⁾	0.04	Water flow
Schiessel ¹⁶⁾ , Li ¹⁷⁾	0.10	Permeability
Francois <i>et al.</i> ¹⁸⁾	0.30	Seawater immersion vs. corrosion
Mohammed <i>et al.</i> ¹⁹⁾	0.70	Corrosion rate
This study	0.011~0.012	RCM testing

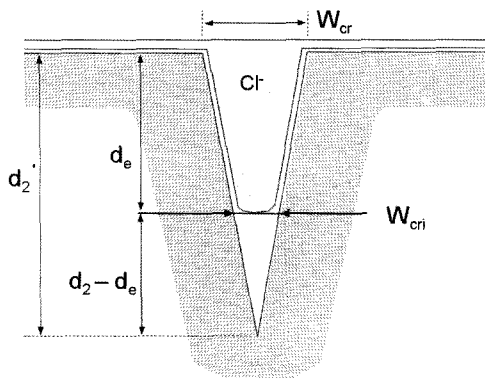


Fig. 20 Schematic representation of effective crack depth according to critical crack depth

이 개념을 도입하여 추가 피복두께를 결정하기 위해서는 모든 구조물에 균열폭과 균열 깊이의 비율이 획득되어 한다. 그러나, 균열폭과 균열 깊이의 비율은 콘크리트에 작용하는 응력 분포에 의존하기 때문에 본 연구에서 제작한 시험편의 균열폭과 균열 깊이의 비율을 일반화시켜 모든 구조물에 적용시키기는 어렵다. 이는 구조체에 가해지는 응력 분포 및 경계조건, 철근비 등을 고려하여 파괴 역학 모델에 의하여 추정할 수 있을 것으로 기대된다²⁰⁾.

한편 콘크리트의 자생치료 (self-healing) 효과로 인하여 균열 치료 및 균열 표면 사이에서 발생하는 역학적 상호작용도 유효 균열 깊이에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 살펴본 바와 같이, 유효 CMOD가 목표 CMOD보다 작은 것이 그 예로서, 역학적 상호 작용은 때로는 균열의 닫힘 효과를 초래하여 유효 균열 깊이를 감소시키는 긍정적 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

향후 본 연구를 필두로 해양구조물에 대한 광범위한 현장 조사로 균열을 통한 염소이온 침투의 거동을 분석하는데 방대한 데이터를 축적, 검증 및 보완이 필요할 것으로 생각된다.

5. 결 론

1) 균열폭과 균열 깊이를 변수로하여 2종류의 균열 제어 방법에 의하여 콘크리트 시험편을 제작하였으며, RCM 실험에 의하여 효과적으로 균열에 의한 염소이온의 침투를 분석할 수 있었다.

2) 균열폭을 변수로 한 실험에서는 CMOD가 0.012 mm, 균열 깊이는 17.38 mm, 즉 0.6819×10^{-3} 의 CMOD / 균열 깊이의 비율에서 균열을 통한 염소이온의 침투는 발생하지 않았다.

3) 균열 깊이를 변수로 한 실험에서는 균열폭이 0.011 mm, 균열 깊이는 19.38 mm, 즉 0.552×10^{-3} 의 균열폭 / 균열 깊이의 비율에서 균열을 통한 염소이온의 침투는 발생하지 않았다.

4) 균열폭과 균열 깊이를 변수로 한 2종류의 실험 결과는 내구성에 영향을 미치는 각종 균열 크기에 대한 기존의 시방서 및 관련문헌보다 매우 작았으며, 유효 균열 깊이의 개념을 도입함으로써 내구성 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 저자가 수행한 네델란드 교통부의 국책과제인 Delft Cluster Project의 일부로서, 델타지역에서 균열이 발생한 방파제 콘크리트의 염수 침투에 대한 소과제의 성과물입니다. 콘크리트의 현장 조사 및 실무적 영감을 얻는데 아낌없는 지원과 토론을 주신 델타지역 유지관리자 분들께 감사의 말씀 드립니다.

참고문헌

1. 윤인석, "미세균열이 콘크리트의 염소이온 침투에 미치는 영향; 현상학적 모델", 한국콘크리트학회 논문집, 19

- 권 1호, 2007, pp.57~65.
2. Yoon, In-Seok, Schlangen, Erik, Rooij, Mario de., and Van Breugel, Klaas, "The Effect of Crack on Chloride Penetration into Concrete", *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publication, Vol.348-349, 2007, pp.769~777.
 3. Yoon, In-Seok, Schlangen, Erik, Rooij, Mario de., and Van Breugel, Klaas, "Critical Crack Width and Chloride Ingress", *International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures*, Guimaraes, Portugal, Nov. 2007 (submitted).
 4. NT Build 492, Concrete, *Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiment*, Finland.
 5. CEB, *CEB Manual-Cracking and Deformations*, CEB, 1985, 232pp.
 6. ACI Committee 224, Control of Cracking in Concrete Structures", (ACI 224R-90) *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, Part3, 1999.
 7. ACI Note 318-99, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, PCA, 1999.
 8. Gowripalan, N., Sirivivatnanon, V., and Lim, C. C. "Chloride Diffusivity of Concrete Cracked in Flexure", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, 2000, pp.725~730.
 9. Federation International de la Precontrainte, *CEB-FIP Model Code*, Thomas Telford, London, 1990.
 10. ACI, *Manual of Concrete Practice*, Part3, ACI, 1999.
 11. British Standards Institution, *ENV 1991-1-1*, BSI, London, 1992.
 12. British Standards Institution, *BS 8110: Part 1*, BSI, London, 1992.
 13. Standard Association of Australia, *AS 3600*, North Sydney, 1994.
 14. 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.
 15. Mivelaz, P., *Estanchéité des Structures en Béton Armé, Fuites au Travers d'un Élément Fissuré*, PhD Thesis, EPFL, No.153, 1996.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. TRB-AHD45, *The Effect of Cracking in High Performance Concretes on Reinforcement Corrosion and Structural Durability*, Transport Research Board, RPS-AHD45-2005-01, 2005.

요 약 다공질성 특성을 갖는 콘크리트는 충분한 다짐과 양생 조건에서 장수명을 갖으며, 유해 물질의 주요 경로는 공극이다. 그러나 균열이 발생한 콘크리트의 경우, 균열은 염소이온과 같은 유해 물질의 우선적인 침투 경로가 된다. 균열이 염소에 미치는 영향은 균열폭과 균열 깊이의 크기에 의존한다. 본 연구는 미세균열이 콘크리트의 염소이온 침투에 미치는 영향을 다룬 실험적 연구로서, 연구 목적은 균열폭과 균열 깊이 등의 균열 크기 효과가 염소이온에 미치는 영향을 고찰하는 것이다. 균열을 통한 염소이온의 침투를 시각화 하기 위하여, 급속 염소이온 침투 실험인 RCM (rapid chloride migration) 실험을 수행하였다. 균열폭과 균열 깊이는 전자 현미경으로 관찰하였고, 평균적인 균열폭을 산정하기 위하여 균열 개구 변위가 측정되었다. 다양한 균열 크기에 따른 염소이온의 침투 깊이 및 염소이온 확산계수의 변화율로부터 염소이온이 침투되지 않는 균열 깊이 및 이에 대응한 균열폭이 도출되었다.

핵심용어 : 염소이온 침투, 미세균열, 임계 균열 깊이, 균열 깊이