

균열 폭에 따른 콘크리트 구조물에서의 염화물 흡수 평가

김건수¹, 박기태², 김재환^{3*}

Evaluating Chloride Absorption of Reinforced Concrete Structures with Crack Widths

Kun-Soo Kim¹, Ki-Tae Park², Jaehwan Kim^{3*}

Abstract : Deterioration of reinforced concrete structure caused by chloride ingress is the main issue and regarding this, many studies have been investigated with both experiments and computational modelling. In addition to chloride diffusion, chloride sorption should be considered as a chloride transport mechanism in concrete structure and cracks formed in concrete structures are the main variable to evaluate the performance of the structures. In this study, after making two types of cracks width (0.1 and 0.3 mm) in reinforced concretes, chloride absorption tests were performed. Weight change and colour change using 0.1 AgNO₃ solution from the samples were performed to measure chloride ingress. Image processing was also carried out to quantify range of colour change in crack face. From the result, it were confirmed that the amount of chloride absorption increases with exposure time and increasing crack width, and chlorides reached at steel depth within 1 hour. It would be possible that chloride can move through interface between steel and concrete, thereby further study regarding this is required.

Keywords: Chloride, Absorption, Reinforced concrete, Image processing

1. 서 론

철근 콘크리트는 전 세계적으로 사용되고 있는 건설재료로써, 국내 사회기반시설물에도 널리 적용되고 있다. 공용중인 철근 콘크리트 구조물은 염화물 침투, 동결융해, 탄산화 등 다양한 요인에 의해 열화가 발생되며, 목표수명 동안 구조물의 성능을 유지하기 위하여 다양한 설계 및 시공 방안이 마련되어 있다(British Standards Institution, 2014). 특히 철근의 부식은 철근 콘크리트 구조물의 성능을 저하시키는 주요 원인으로 알려져 있으며, 염화물은 철근 부식을 일으키는 대표적인 열화인자 중 하나이다 (Jones et al., 1997; Angst et al., 2012). 겨울철 도로의 결빙을 예방하기 위해 사용되는 제설제나 해안 환경의 염분이 콘크리트에 유입되어 철근의 부동태피막이 파괴되면 철근 부식이 발생하게 된다. 도로교의 경우 겨울철 도로 이용자의 안전 및 통행량 확보를 위해 다량의 제설제가 살포되고 있으며, 그 사용량은 매년 꾸준히 증가하고 있는 실정이다.

국내외적으로 구조물의 장수명화에 대한 요구가 점차 증가하고 있는 시점에서, 염화물 침투에 의한 철근부식을 예방하기 위한 철근 콘크리트의 내구성 확보는 필수적이라 할 수 있다. 이를 위한 대표적인 방안으로 철근의 부식저항성 또는 콘크리트의 염화물 침투저항성을 높이는 방법이 사용되고 있다. 철근의 부식저항을 높이는 방법으로 불침투성 코팅제를 철근에 직접적으로 도포하여 부식을 방지하는 방법이 있고, 콘크리트의 염화물 침투저항을 높이는 대표적인 방법으로는 플라이 애쉬 (Fly ash; FA)나 고로슬래그 (Ground granulated blast-furnace slag; GGBS)와 같은 다양한 결합재를 사용하거나 노출환경에 따라 피복두께를 증가 시키는 방법 등이 사용되고 있다(ACI Committee 318, 2014; British Standards Institution, 2014; Japan Society of Civil Engineers, 2010; Kim et al., 2015). 하지만 과거 1970~1980 년대에 급속한 경제발전과 함께 구축된 사회기반시설의 경우, 위에서 언급한 철근부식 방지기술이 적용되지 않은 것이 대부분이며, 공용연수 30년 이상의 노후화가 진행되고 있어 염화물 침투에 의한 철근 콘크리트 구조의 성능저하를 예방하기 위한 대책이 시급한 실정이다.

콘크리트 표면에는 미세균열과 내부 공극이 존재하고 있으며, 이러한 재료적 특성으로 인해 기상환경에 따라 콘크리트의 습윤상태는 끊임없이 변화한다. 콘크리트 표면의 균열과 습윤상태는 외부로부터 유입되는 열화인자들의 침투 속도에 상당한 영향을 주며, 균열을 따라 유입된 열화인자는 골재와

¹정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 선임연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 박사후연구원

*Corresponding author: jaehwan.kim@kict.re.kr

Korea Institute of Civil and Building Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

철근을 따라 콘크리트 내부로 퍼지게 된다(Alaswad et al, 2018; Wang et al., 2016; Yang et al., 2011). 이러한 현상은 제설제가 녹은 염화물 용액 또는 산성비에 함유된 열화인자가 철근 콘크리트 내부로 급속하게 침투하는 조건을 제공할 수 있다. 내부로 침투된 열화인자는 철근 부식 개시 및 진전을 더욱 가속화시킨다. 또한 철근에 발생된 부식 부산물에 의한 철근 주위의 팽창압은 콘크리트의 균열을 더욱 증가 시키거나, 공식에 의한 철근의 단면 손실을 발생시킨다. (Broomfield, 1997). 이러한 현상은 피복 콘크리트의 박락 및 구조물의 구조 성능 저하를 야기 할 수 있으며, 국내 고속국도 교량에서도 이러한 사례가 보고되기도 하였다(Chung et al., 2014).

콘크리트 균열은 강우 또는 강설에 의한 수분의 직접적인 침투를 가속화하며, 이를 예방하기 위해서는 정기점검을 통하여 균열 폭 수준을 관리하거나 유입경로를 원천적으로 차단하는 조치가 요구된다. 국내 도로교의 경우, 시설물안전법에 의한 주기적인 점검 및 진단이 이루어지고 있으나 육안조사를 통한 점검이 대부분으로, 발생된 균열에 대한 정밀한 대응이 어려운 실정이다. 또한 시설물안전법의 철근 콘크리트 거더 상태평가 기준에 의하면 균열 폭에 대한 등급을 0.1 mm 이하는 a 등급, 0.1 mm ~ 0.3 mm 수준은 b 등급으로 관리하도록 제시하고 있으며, 0.1 mm 미만의 균열은 콘크리트 부재에서 흔히 발생할 수 있는 미세균열로 분류하고 있다. 하지만 이러한 콘크리트 균열 수준이 열화인자 침투에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 뿐만 아니라 체계적인 유지관리가 이루어지지 않은 중소 노후교량의 콘크리트 표면 균열 조건은 고속국도 또는 일반국도의 교량에 비해 더욱 열악한 상황이다.

기존 염화물 침투 관련 연구는 주로 농도 구배에 따른 염화물 확산에 대한 연구가 주로 이루어졌으며, 염화물 확산계수를 통하여 염화물 침투속도를 산정하고 있다(Yoon and Kwon, 2019). 외부에 노출된 콘크리트의 염화물 이동 메커니즘은 확산(Diffusion) 및 흡수(Absorption)를 통해 주로 이루어진다. 이때 염화물 확산은 콘크리트가 수분 포화 상태인 경우에 해당되는데, 옥외에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 경우는 대부분 수분 불포화 상태로 존재하기 때문에 염화물 확산계수만으로는 염화물 침투 현상을 설명하는데 분명한 한계가 있다. 특히, 외부환경에 직접 노출된 피복 콘크리트의 경우에는 표면 균열이 존재하고, 강우 또는 강설 전에는 건조한 상태를 유지하므로 이로 인한 흡수현상을 필수적으로 고려해야 한다.

본 연구에서는 도로교 노면에 살포된 제설제가 강우 또는 강설에 의해 녹아 흘러내린 후, 거더 또는 바닥판의 표면 균열을 통해 내부로 흡수되는 현상을 실험적으로 모사하였다. 이를 위해 휨균열을 갖는 철근 콘크리트 실험체를 제작하고, 제

설제 용액 수면과 균열면이 접하도록 하여 철근 콘크리트 균열을 통한 직접적인 염화물 침투현상을 분석하였다. 균열 폭 0.1 mm, 0.3 mm 를 갖는 실험체에 제설제 용액을 1 시간, 3 시간, 5 시간 침투시킨 후, 실험체의 중량 변화 및 균열면의 염화물 침투 면적을 분석하였다.

2. 실험

2.1 사용 재료 및 실험체 제원

본 연구에서는 레디믹스트 콘크리트로 보통 포틀랜드 1 종 시멘트를 사용하여, 27 MPa 의 설계 강도(f_{ck})를 갖도록 배합하였고 배합설계는 Table 1 과 같다. 사용된 재료의 물리화학적 성분을 Table 2, 3 에 각각 나타내었다. 실험체 제원은 100 mm × 100 mm × 400 mm 이며, D16 이형철근을 1 열 배근하였고, 피복 두께는 30 mm 이다(Fig. 1). 실험체 타설 24 시간 후에 몰드를 제거하였고, 28 일 동안 습윤 양생을 실시한 후 재령 35 일 짜 염화물 흡수 실험을 수행하였다.

2.2 균열 유도 및 전처리 과정

실험체의 균열 유도는 재령 28 일에 3 점 재하를 통해 수행되었으며, 균열 폭 약 0.1 mm 실험체 3 개, 균열 폭 약 0.3 mm 실험체 3 개를 제작(총 6 개)하였다. 균열 폭의 측정은 하중이 제거된 후 일정시간이 경과하였을 때 균열경을 이용하여 측정하였다. 실험체 하면에 생성된 균열을 길이 방향으로 6 등분하여 5 곳의 균열 폭을 측정한 후 평균값을 균열 폭으로 판단하였다. 균열을 통한 제설제 용액의 단일방향 침투를 유도하기 위하여, 균열이 유도된 실험체 하면의 일부를 제외한 모든 면에 에폭시를 코팅하였다.

실험체 하면의 경우, 균열 유도를 위한 3 점 재하시 양지점 부에 생성된 미세 균열에 의한 추가적인 제설제 용액 침투가 발생할 우려가 있으므로 중앙 휨균열을 기준으로 좌우 각각 100 mm 간격을 제외하고 코팅을 실시하였다. 공용 중인 교량은 동절기에 낮은 상대습도에 노출되어 강우 또는 강설 전에는 건조한 상태를 유지하고 있다. 이러한 콘크리트 부재의 습윤조건을 고려하여, 에폭시가 코팅된 실험체를 오븐에 건조시켰다. 고온 건조에 따른 콘크리트의 미세구조 변화를 최소화하고 에폭시 코팅의 손상을 방지하기 위하여 50 ± 2 °C 의 온도에서 건조를 실시하였다 (Streicher and Alexander, 1995). 오븐에서 건조 상태를 확인하기 위하여 매일 실험체의 무게 변화를 측정하였고, 무게 변화가 1 % 이하에 도달할 때까지 건조를 실시하였다. 마지막에 측정된 무게를 실험체의 겉보기 완전 건조 상태로 가정하고 염화물 흡수 실험을 실시하였다.

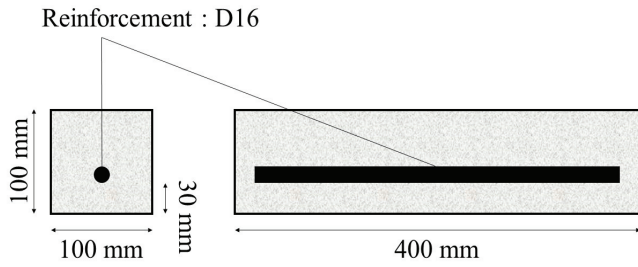


Fig. 1 Dimension of specimen

Table 1 Mix design

W/B (%)	fck (MPa)	S/a	Unit weight (kg/m ³)					
			W	C	FA	GGBS	S	G
45.8	27	52.7	168	220	55	92	919	897

W/B: Water/Binder, W: Water, C: Cement, FA: Fly Ash, GGBS: Ground Granulated Blast-furnace Slag, S: Sand, G: Gravel

Table 2 Chemical compositions

	Chemical composition (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
OPC	22.0	5.3	3.4	63.4	2.1	2.0	0.8
FA	58.9	20.9	5.3	3.8	1.31	0.5	4.9
GGBS	33.4	15.8	0.6	41.8	5.3	1.5	1.5

Table 3 Properties of aggregates

Type	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Sand	-	2.58	1.01	2.90
Gravel	25	2.64	0.82	6.87

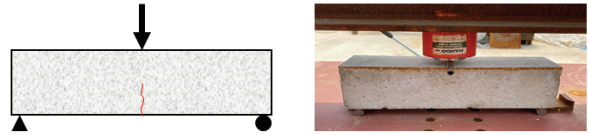
F.M.:Fineness Modulus

건조가 완료된 후, 상온에 24 시간동안 거치시킴으로써 콘크리트의 온도가 외부 환경과 동일하도록 만들어, 실험체와 염화물 용액의 온도 차이가 염화물 침투 속도에 미치는 영향을 최소화 하였다. 실험체 균열 유도 및 전처리 과정을 Fig. 2 에 나타내었다.

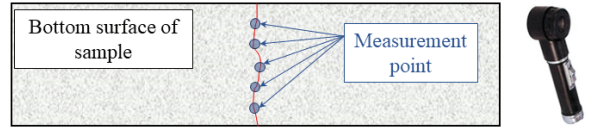
2.3 염화물 흡수 실험

제설제 용액을 이용한 염화물 흡수 실험은 재령 35 일에 수행되었다. 제설제 용액은 한국도로공사에서 습염 제설제로 사용하는 염화칼슘(CaCl₂) 용액과 염화나트륨(NaCl) 혼합된 포화 염화물 용액을 사용하였다. 30 % 농도의 염화칼슘 용액에 염화나트륨을 섞어 제작하였으며, 염화칼슘 용액과 염화나트륨의 중량비는 3:7 이다. 실험체 균열부로부터 염화물 흡수를 유도하기 위하여, 실험체의 균열면을 염화물 용액에 직접 접촉하게 하였으며, 수압에 의한 영향을 제거하기 위하여

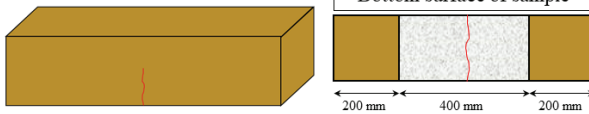
Step 1 : Inducing concrete crack



Step 2 : Crack measurement using crack scope



Step 3 : Epoxy coating



Step 4 : Drying process

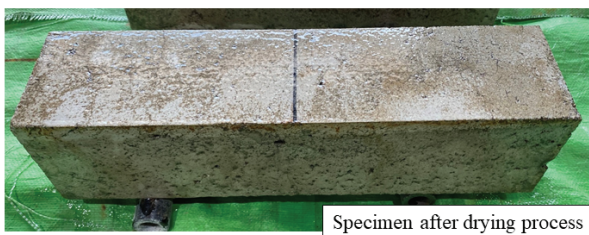


Fig. 2 Pre-conditioning of sample for absorption test

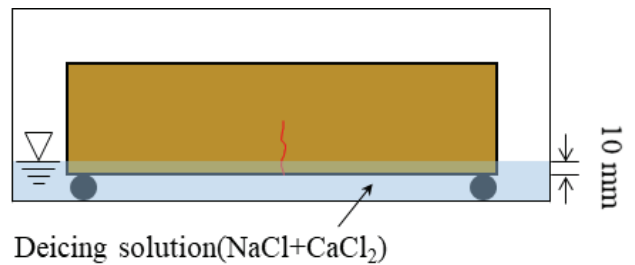


Fig. 3 Schematic of absorption test

염화물의 용액은 실험이 진행 동안 실험체에서부터 10 mm 높이를 유지 하였다.염화물 흡수 실험 도식도를 Fig. 3 에 나타내었다.

염화물 흡수 실험은 총 6 개의 실험체에 대해 수행되었으며, 균열폭 0.1 mm 와 0.3 mm 실험체에 대해서 흡수시간을 1 시간, 3 시간, 5 시간으로 분류하여 실험조건 당 1 개의 실험체를 사용하였다. 시간에 따른 염화물 침투 면적을 확인하기 위하여 염화물 흡수 실험이 종료된 실험체를 수조에서 꺼내고 균열면을 따라 분리하여, 침투면에 0.1 M 의 AgNO₃ 용액을 분사하여 반응에 따른 콘크리트의 변색을 확인 하였다(NORDTEST, 1999).

변색이외에도 흡수량을 확인하기 위하여 매시간 중량변화를 측정하였다. 중량변화 측정은 가장 오랜 시간 동안 염화물 용액에 노출되는 5 시간 실험체에 대하여 수행되었다. 또한 염화물 용액 침투 실험과 별도로, 수분 침투 실험을 수행하고 중량변화를 측정하여 염화물 용액과 수분의 침투속도를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균열 폭에 따른 염화물 및 수분 흡수

균열 폭에 따른 염화물 및 수분 누적 흡수량을 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 5 에는 시간 제곱근 축으로 용액흡수 1 시간 이후의 노출 면적당 염화물 및 수분 흡수량에 대한 데이터를 표시하였고, 실험에서 얻어진 데이터를 바탕으로 근사식을 식 (1)을 이용하여 나타내었다.

$$i = S\sqrt{t} + i_0 \quad (1)$$

여기서, i 는 단위면적당 누적 흡수량 (g/cm^2), S 는 흡수 계수 ($\text{cm}/\text{t}^{1/2}$), t 는 시간 (hr), i_0 는 1 시간까지의 누적 흡수량이다.

Fig. 4, 5 에 나타난 바와 같이, 침투 용액의 종류(염화물, 수분)는 흡수량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보이지만, 균열 폭의 증가는 초기 흡수량에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 모든 실험 조건에서 흡수 초기에 중량이 급격하게 증가하다가 완만한 기울기를 갖는 것을 확인할 수 있는데, 본 연구의 시간 측정 간격을 고려한다면, 용액 흡수 1 시간 이내에 균열로 인한 흡수량 증가 효과가 발휘되었을 것으로 판단된다. 즉, 콘크리트 균열면을 따라 염화물 및 수분 용액이 침투하는 현상은 순간적으로 발생됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 얇은 두께의 박판을 설치한 후 모르타르를 타설하여 0.3 mm 균열폭을 갖는 실험체를 제작한 후, 수분 용액 침투 실험을 수행한 Belleghem et al. (2016)의 결과와 유사하다. 콘크리트 내의 염화물 이동을 모델링 할 때, 염화물 고정화 현상(Chloride binding), 염화물 이온과 공극수에 존재하는 이온들 사이의 상호 작용 그리고 전기 이중층의 존재로 인한 수화물과 염화물 사이의 전기 모세관 현상(Electro-capillary process)을 고려하게 된다. 이러한 현상들에 따르면 염화물 이온은 이동 속도를 늦추는 역할을 하게 되고, 이는 확산 현상이 일어나는 경우 고려되어야 하는 현상들이다 (Nguyen and Amiri, 2014). 하지만 염화물 및 수분 흡수 실험의 결과에서 보는 바와 같이 위의 언급된 현상이 발생되기 이전에 모세관 현상에 의한 염화물 또는 수분 침투가 충분히 일어난 것으로 보아, 직접적인 염화물 수분의 흡수가 발생하는 경우에는

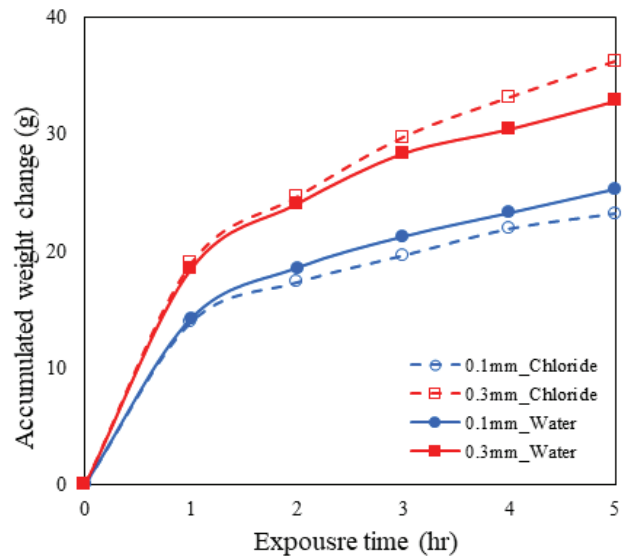


Fig. 4 Accumulated weight change with time

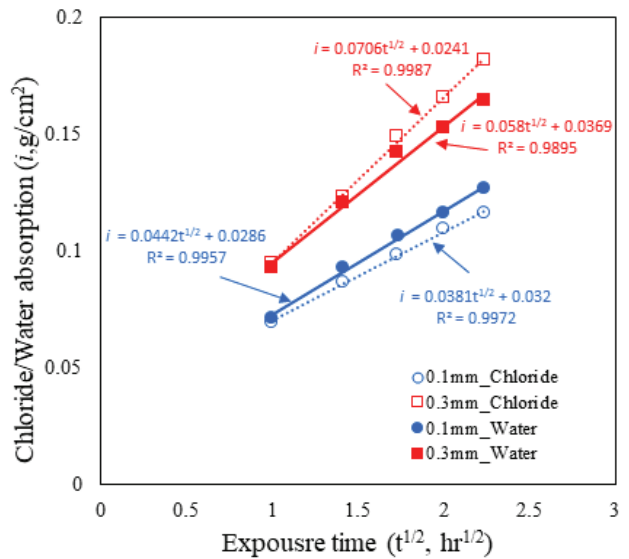


Fig. 5 Chloride/water absorption profile from experiment results

모세관 현상에 의한 순간적인 침투가 지배적인 것으로 판단된다. 본 실험 결과로 미루어볼 때, 콘크리트 균열을 통한 염화물의 직접 침투 경향을 보다 정밀하게 추정하기 위해서는 추가적인 실험이 수행되어야 할 것이다. 그러나 실제 경우 또는 강설의 지속시간을 고려할 때, 1 시간의 흡수시간은 결코 짧지 않은 시간임을 고려하면 경우 또는 강설로 인한 열화인자의 침투를 고려할 필요가 있다고 판단된다.

3.2 이미지 분석을 통한 염화물 침투 수준 분석

염화물 흡수 실험이 종료된 실험체 균열면에서의 염화물

침투 수준을 확인하기 위하여 0.1 M 의 AgNO_3 용액을 균열면에 분사하여 변색 반응을 분석하였다. 보다 정량적인 분석을 위하여 이미지 분석 기법이 적용되었다. 먼저 실험이 종료된 실험체에 추가적인 3점 재하를 수행하여 균열 깊이를 증가시킨 후, 한쪽 단면에 할렬 파괴를 발생시켜 균열면의 손상을 최소화 하였다. 그 다음에는 균열면에 돌출된 철근을 절단하고, AgNO_3 용액을 분무 하여 변색이 발현된 후에 사진촬영을 수행하였다. Fig. 6 에 나타난 바와 같이, 촬영된 이미지를 회색조 이미지로 변환을 실시하였다. 전체 실험체에서의 균열면과 철근은 회색조 이미지에서 이진영상으로 변환하여 각각의 픽셀 수를 구하였다. 균열면에서 변색된 부분을 추출할 때에는 회색조로 변환된 이미지로부터 다시 채도 값을 추출하였다. 변색된 부분에서의 채도값 범위를 설정하고 난 후, 이미지를 이진영상으로 변환 시켰다. 변환된 이미지에서 픽셀수를 계산하여 식 (2)을 이용하여 염화물의 침투 정도를 계산하였다.

$$P_{area} = \frac{P_n}{T_n - S_n} \times 100 \quad (2)$$

여기서, P_{area} 는 변색된 면적 비율(%), P_n 는 균열면에서 변색이 된 부분의 픽셀 수, T_n 는 실험체 부분의 픽셀 수, S_n 는 철근 부분의 픽셀 수이다.

이미지 분석으로 얻어진 균열면의 염화물 침투면적을 Fig. 7 에 나타내었다. 앞에서 언급했듯이, 이미지 분석에서도 침투 시간이 지나면서 염화물의 침투정도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이미지 분석 결과에 의하면, 1 시간 동안 용액에 노출 되었을 때, 0.1 mm 균열 폭을 가진 실험체 균열면의 53.6 %, 0.3 mm 균열 폭을 가진 실험체 균열면의 68.1 % 가 각각 염화물 침투가 발생하여 변색이 된 것을 확인 하였다. 또한 앞서 중량변화 분석과 마찬가지로 균열면 변색 수준에서도 초기 1 시간 이내에 염화물 침투가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 비록 본 연구에서는 철근 깊이까지 도달하는 데 걸리는 시간을 확인 할 수 없었지만, 초기에 빠른 속도로 균열면을 따라 염화물이 침투하게 된다는 것은 실험적으로 확인할 수 있었다. 균열면의 흡수면적 비율을 보면, 1 시간 흡수된 시점에서 균열 폭 0.1 mm 와 0.3 mm 실험체의 차이가 약 15 % 정도 수준이지만 시간이 지날수록 차이가 감소하면서 5 시간 경과 후에는 2.5 % 정도 수준으로 비슷해진다. 이는 균열 폭이 작으면 균열면을 따라 초기 염화물이 퍼지는 속도가 감소하지만, 시간이 경과하면서 그 차이는 많이 상쇄되는 것을 의미한다. 하지만 Fig. 5 에서 나타낸 바와 같이, 균열 폭 증가에 따른 중량증가율(흡수계수)는 차이가 없지만 Fig. 7 의 흡수면적의 증가율은 균열 폭 0.1 mm 실험체에서 더 크게 나타

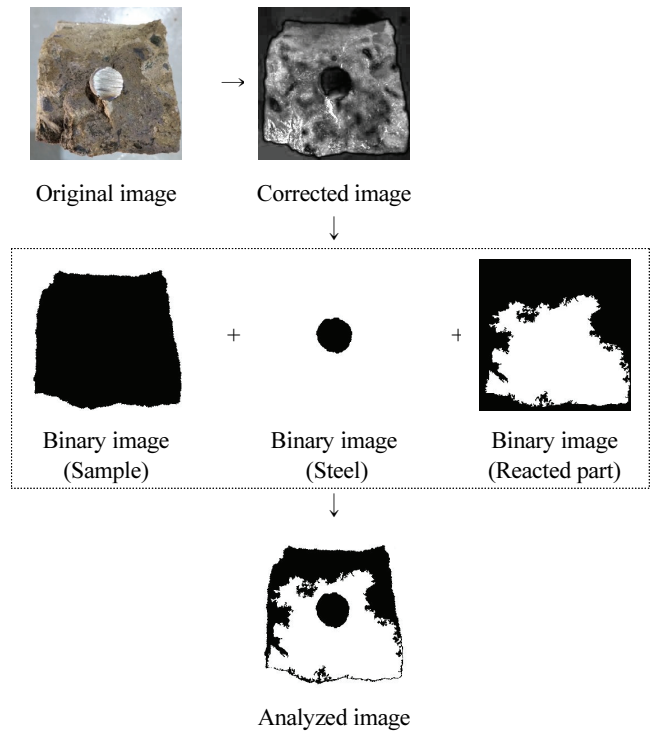


Fig. 6 Example of simplified image processing using Matlab

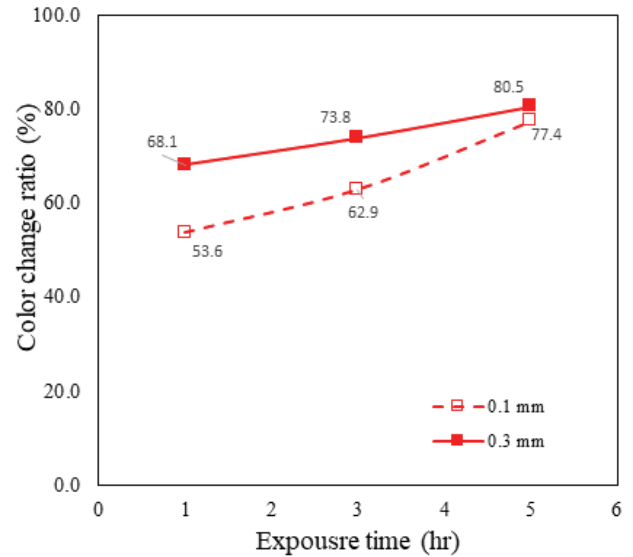


Fig. 7 Color change ratio with exposure time after chloride absorption

났다. 이는 초기 급격한 흡수현상이 발생된 이후, 균열 폭 크기가 흡수면적 증가에는 영향을 미치지 않지만 흡수량 증가에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 철근 깊이 까지 도달한 염화물이 균열면 이외에 철근과 콘크리트 계면을 통해 전파됨을 의미한다. 염화물이 철근을 따라 이

동한다는 것은 부동태피막의 형성이 상대적으로 취약한 곳으로 염화물이 도달할 가능성을 높이게 되고, 이로 인한 철근 부식의 가능성이 높아질 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 균열 폭에 따른 철근 콘크리트 보에서의 염화물 흡수 현상을 실험적으로 분석하였다. 콘크리트는 보통 포트랜드 1 종 시멘트를 사용하였고, 피복 두께 30 mm 위치에 D16 철근을 1 열 배근하였다. 또한 3점 재하를 통해 0.1 mm, 0.3 mm 휨 균열을 발생시켜 교량 상부구조 하면에 발생하는 균열을 모사하였다. 균열 침투 용액은 제철제 조건을 고려하여 포화 염화물 용액을 제작하여 사용하였고, 중량변화를 분석하여 흡수 시간에 따른 염화물 흡수량을 분석하였다. 또한 균열면의 염화물 침투 수준을 정량적으로 분석하기 위해 이미지 분석을 수행하였다. 실험을 통해서 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 염화물 및 수분 용액 흡수시간에 따른 중량변화를 분석한 결과, 염화물과 수분 용액의 흡수계수는 큰 차이가 없는 것으로 나타나, 콘크리트 균열을 통한 직접적인 용액 침투 상황에서는 모세관 현상이 지배적인 것을 알 수 있었다.
- 2) 콘크리트 균열 폭에 대한 염화물 흡수량에서는 균열 폭이 커지면 흡수량이 많아지는 것을 확인하였으며, 흡수 초기 이후의 변화량(흡수계수)은 큰 차이를 보이지 않았지만, 모든 실험체에서 철근 깊이를 초과하는 염화물 침투가 발생하였다. 따라서 철근 콘크리트 구조물에 일반적으로 존재하는 0.1 mm 균열에서도 염화물 용액에 의한 침투가 발생할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 앞서 언급한 바와 같이 균열 에 따른 염화물 흡수량의 변화(흡수계수)는 큰 차이가 없었으나, 균열면의 염화물 침투면적의 증가율은 균열 폭에 따라 차이를 보였다. 이는 염화물 용액의 흡수가 균열면에 국한 되는 것이 아니라 철근 계면을 따라 이동할 수 있음을 의미하며, 이로 인한 철근 부식 발생 가능성을 고려할 필요가 있다고 판단된다.
- 4) 본 실험에서는 철근 콘크리트 부재의 미세 균열에서도 염화물 용액의 직접적인 침투로 인한 영향이 클 수 있다는 것을 확인하였으며, 추후 다양한 조건에 대한 실험 및 해석을 통하여 콘크리트 균열을 통한 염화물 침투 현상에 대한 자세한 분석을 수행할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “노후 인프라 시설물 유지관리를 위한 중장기 데이터 기반 표준 플랫폼 구축 및 서비스 기술 개발” 과제(20200035-001)를 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. ACI Committee 318 (2014) Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-14), American Concrete Institute, USA.
2. Alaswad, G., Suryanto, B., & McCarter, W.J. (2018) Moisture movement within concrete exposed to simulated hot arid/semi-arid conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 171(8), 1-15.
3. Angst, U.M., Hooton, R.D., Marchand, J., Page, C.L., Flatt, R.J., Elsener, B., Gehlen, C., Culikers, J., Present and future durability challenges for reinforced concrete structures, *Materials and Corrosion*, 63(12), 1047-1051.
4. Bellegheem, B.V., Montoay, R., Dewankele, J., Van den Steen, N., De Graeve, I., J. Deconinck, Cnudde, V., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2016) Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar - A comparison between experimental study and finite element analysis, *Construction and Building Materials*, 110(5), 154-162.
5. British Standards Institution (2016) BS EN 206:2013+A1:2016 Concrete-Specification, Performance, Production and Conformity; British Standards Institution.
6. Broomfield, J.P. (1997) Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair, E&FN Spon, London.
7. Chung, J. S., Kim, B. H., & Kim, I. S. (2014) A case study on chloride corrosion for the end zone of concrete deck subjected to de-icing salts added calcium chloride, *Journal of the Korean Society of Safety*, 29(6), 87-93.
8. Japan Society of Civil Engineers (2010) Standard specifications for concrete structures-2007 ‘Design’, Japan Society of Civil Engineers, Japan.
9. Jones, A.E.K., March, B., Clark, L., Seymour, D., Basheer, P., Long, A., (1997) BCA Research Report C/21, Development of a holistic approach to ensure the durability of new concrete construction, British Cement Association, UK.
10. Kim, J. H., Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Jeong, S. H., & Kim, S. I. (2015) Strength development and durability of high-strength high-volume GGBFS concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 3(3), 261-267.
11. Nguyen, P.T. & Amiri, O. (2014) Study of electrical double layer effect on chloride transport in unsaturated concrete, *Construction and Building Materials*, 50(1), 492-498.
12. NORDTEST (1999) NT BUILD 492: Concrete, mortar and

cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, NORDTEST.

13. Streicher, P.E., and Alexander, M.G. (1995) A chloride conduction test for concrete, *Cement and Concrete Research*, 25(6), 1284-1294.
14. Wang, J., Basheer, P.A.M., Nanukuttan, S.V., Long, A.E., & Bay, Y. (2016) Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 108(4), 55-66.
15. Yang, E.I., Jin, S.H., Kim, M.Y., Choi, Y.S., & Han, S.H. (2011) Effect of inisital flexural crck on resistance to chloride penetration into reinforced concrete members, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(2), 79-87.
16. Yoon, Y.S., & Kwon, S.J. (2019) Evaluation of apparent chloride diffusion coefficient and surface chloride contents of FA concrete exposed splash zone considering crack width, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 18-25.

Received : 08/13/2020

Revised : 09/25/2020

Accepted : 10/29/2020

요 지 : 철근 콘크리트 구조물에서의 염화물 침투에 따른 구조물의 열화는 주요한 문제로 이와 관련하여 현재까지 많은 연구들이 수행되고 있다. 콘크리트 구조물의 염화물 침투에 있어서 염화물 확산 이외에도 염화물 흡수에 의한 침투도 고려되어야 하며, 구조물의 사용기간 중에 발생하는 균열은 염화물 침투의 주 경로가 될 수 있기 때문에 이러한 변수들이 구조물의 내구성능 평가에 고려되어야 한다. 본 연구에서는 철근 콘크리트에 두 가지 균열 폭 (0.1 mm, 0.3 mm)을 발생 시킨 후, 염화물 흡수 실험을 실시하였다. 염화물 흡수 실험으로부터 흡수에 따른 무게 변화와 AgNO₃ 용액을 이용한 변색법으로 균열면에서의 염화물 침투 정도를 확인하였다. 변색 범위를 이용한 이미지 분석 또한 실시하였다. 흡수 시간 및 균열 폭이 증가하면 염화물 흡수량이 증가하는 것을 확인 하였다. 모든 균열 폭에서 1 시간 이내에 염화물이 철근 깊이까지 도달하였다. 또한 철근 계면을 통한 염화물 이동 가능성을 확인하였으며, 이는 철근 부식의 주요한 원인으로 작용할 수 있어 추가적인 실험을 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 염화물, 흡수, 철근 콘크리트, 이미지 분석
