

이미지 분석을 이용한 균열 콘크리트 내 염화물 침투 정량화 평가

김건수¹, 박기태², 김재환^{3*}

Quantifying Chloride Ingress in Cracked Concrete Using Image Processing

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

Abstract: Chloride, which is one of the main deterioration factors in reinforced concrete structures, can degrade the performance of the structure due to chloride-induced corrosion of steel. Chloride content at steel depth or the rate of chloride penetration is necessary to determine deterioration of reinforced concrete or to calculate initiation time of steel corrosion caused by chloride attack. Chlorides in concrete are generally identified with typical two methods including chloride profiling using potentiometric titration method and discoloration method using AgNO₃ solution. The former is advantageous to estimate chloride penetration rate (diffusion coefficient in general) with measured chloride contents directly, but it is laborious. In the case of latter, while the result is obtained easily with the range of discoloration, the error may occur depending on workmanship when the depth of chloride ingress is measured. This study shows that chloride penetrated depth is evaluated with the results obtained from discoloration method through image analysis, thereby the error is minimized by workmanship. In addition, the effect of micro-crack in concrete is studied on chloride penetration. In conclusion, the depth of chloride penetration was quantified with image analysis and as it was confirmed that chlorides can rapidly penetrate through micro-cracks, caution is especially required for cracks in concrete structure.

Keywords: Concrete, Chloride ingress, Micro-crack, Image analysis

1. 서론

철근 콘크리트 구조물의 열화 현상은 불가피하며, 열화 현상의 대표적인 원인으로는 철근 부식이다. 한편 철근 콘크리트 구조물의 사용 수명을 예측하거나 평가하는데 있어서 콘크리트 재료 자체의 불균질성, 노출 환경 그리고 표준화되지 않는 분석 방법등과 같은 다양한 요인들에 의해 여전히 어려움이 많다. 새로운 재료의 경우에는 현장에 적용할 경우 실제 노출 환경에서 장기 성능 유지와 관련된 실제 데이터가 많이 부족한 실정이다. 이러한 제한 사항들을 극복하기 위해서 콘크리트의 내구성능 평가를 성능 중심적 접근(Performance based approach)에 의해 평가할 필요가 있다(BS EN 206, 2014). 이러한 방법으로 콘크리트의 내구성능을 경험적 관계식에 의한 것이 아니라 표준화된 실험 결과를 기반으로 평가하는 것으로, 이와 관련하여 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 염화물에 의한 철근 부식은 철근 콘크리트 구조물에서 대표적인 열화현상 중 하

나이다. 겨울철 도로의 결빙을 예방하기 위해 사용되는 제설제나 해안환경에서 유입되는 염화물이 콘크리트 염해의 주원인이다(Sajid et al., 2022). 콘크리트로 침투된 염화물이 철근 깊이에 도달하게 되면, 부동태피막을 파괴시키면서 부식을 가속화 시켜 구조물의 사용성을 급격하게 저하시키게 된다(Tuutti, 1982). 국내의 경우, 겨울철 도로 안전을 위해 제설제의 사용량이 급격하고 증가되고 있는 추세이다.

철근 콘크리트 구조물에서 염화물 침투를 정량적으로 평가하기 위한 다양한 방법들이 제시되었다. 그중에서 하나는 콘크리트내의 존재하는 염화물을 깊이별로 시료를 채취하여 전위차 측정법, 흡광광도법, 질산은 적정법, 이온크로마토그래피법에 의해 직접 농도를 측정하는데 이러한 방법으로는 콘크리트내에 존재하는 염화물 농도를 정확하게 정량화 할 수 있지만, 측정을 위해 필요한 작업이 상당히 번거롭다는 단점이 분명히 있다(Abbas et al., 2018). 정량화 과정을 간소화하기 위해 현장에서는 간이 측정 시험지를 이용하여 측정하는 방법이 있지만, 이 시험법의 경우에는 콘크리트 내 존재하는 고정염화물을 측정하기 위해서는 추가적인 선행 작업을 수행해야 하는 단점이 있다. 이러한 방법들의 단점을 극복하고, 콘크리트의 염해 저항성을 평가하기 위한 방법으로 NT Build 492(1999)나 ASTM C 1202(2022)와 같은 급속 염화물 침투 실험법이 개발되었고, 현재 성능 중심 접근법에 의해 콘크리트

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

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

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

•본 논문에 대한 토의를 2022년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

트 염해 저항성을 평가하는데 있어서 유럽 시방서에서는 NT Build 492가 표준 시험법으로 제시되고 있으며, 북미 지역에서는 ASTM 1202를 제시하고 있다. 한편, 유럽 지역에서 주로 사용되는 NT Build 492에서는 0.1M AgNO₃ 용액을 이용하여 콘크리트의 변색으로부터 염화물 침투 깊이를 측정하고, 측정된 깊이를 이용하여 시방서에 제시된 식에 의해 염화물 이동계수(Migration coefficient)를 계산한다. 변색법에 의한 염화물 이동계수 측정법은 변색 반응에 의한 측정이 쉽고 빠르다는 장점이 있지만, 변색범위를 구분하는데 있어서는 작업자의 적절한 판단이 필요하다. 이로 인해 발생될 수 있는 실험적 오차는 분명하게 존재한다.

본 연구에서는 이미지 분석을 이용 콘크리트에 침투된 염화물과 AgNO₃ 용액의 반응에 의해 변색된 범위를 정량적으로 구분하는데 주목적을 두고 있다. 염화물 침투 속도를 증가시키기 위해서 휨 균열을 갖는 건조된 철근 콘크리트 실험체를 제작하여 흡수현상을 유도하였다. 균열 폭은 0.1 mm를 갖는 실험체에 염화물 용액을 15분, 30분, 60분 침투 시킨 후, 이미지 분석을 이용하여 균열면의 염화물 침투 면적 및 침투 깊이를 분석하였다.

2. 실험

2.1 사용 재료 및 실험체 제원

콘크리트 실험체 제작을 위한 사용 재료는 레디믹스트 콘크리트로 보통 포틀랜드 1종 시멘트로 27 MPa의 설계 강도

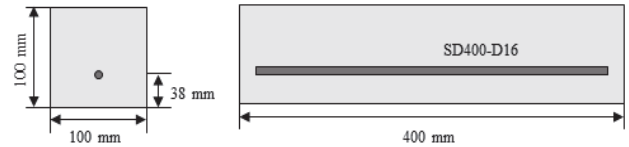


Fig. 1 Sample design

(f_{ck})를 갖도록 배합 설계하였다. 배합표는 Table 1에 나타내었고, 사용된 재료의 물리화학적 성분을 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 실험체는 Fig. 1에서와 같이 100 × 100 mm 정사각형 단면에 길이 400 mm인 각주형으로 제작하였고, 실험체 하면으로부터 38 mm 떨어진 위치에 SD400-D16 철근을 배근 피복 두께 30 mm를 확보하였다. 콘크리트는 타설 24 시간 후에 몰드에서 탈형 하였다. 이후, 28일 동안 습윤 양생을 실시한 후 염화물 침투 실험 실시 전까지 기건 양생을 실시하였다. 염화물 침투 실험은 콘크리트 재령 90일에 수행하였다. 콘크리트 타설 시 28일 압축강도 시험을 위한 공시체(Ø150 × 300 mm)도 제작하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405(2010)에 따라 실시하였으며, 재령 28일 압축강도 실험결과는 Table 1에 나타내었다.

2.2 염화물 침투 실험

염화물의 침투 속도를 증가시키기 위하여 두 가지 전처리 과정을 실시하였다. 첫 번째 과정은 콘크리트 재령 83일에 3점 재하 방법을 이용하여 콘크리트 인장부에 균열 폭 약 0.1 mm

Table 1 Mix design

| W/B (%) | f_{ck} (MPa) | f_{28} (MPa) | S/a | Unit weight (kg/m ³) | | | | | |
|---------|----------------|----------------|------|----------------------------------|-----|----|------|-----|-----|
| | | | | W | C | FA | GGBS | S | G |
| 45.8 | 27 | 30 | 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

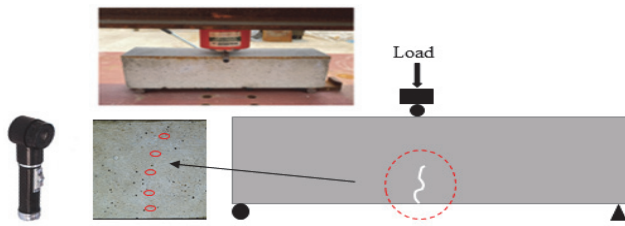


Fig. 2 Sample preconditioning

의 균열을 발생시켰다. Fig. 2에서와 같이 균열폭을 제어하고 발생시키기 위하여 가압단계를 수동으로 조절할 수 있도록 수동 유압잭을 사용하여 가압을 실시하였다. 한편 균열 폭을 측정 및 오차를 최소화하기 위하여, 가력 단계별로 균열경을 이용하여 콘크리트 하면에 생성된 균열을 길이 방향으로 6등분하고 5곳의 균열 폭을 측정된 후 균열 폭을 평가하였다. 균열 폭을 측정하는데 있어서 콘크리트 실험체의 변형에 대한 영향을 최소화하기 위하여 균열 폭 측정은 하중이 제거된 후 일정 시간이 경과하였을 때, 균열경을 이용하여 측정하였다. 두 번째 과정은 균열이 발생된 콘크리트 실험체를 오븐에서 무게 변화가 1% 이하에 도달할 때까지 건조시켰다. 이때, 고온에 의한 미세구조 변화를 최소화하기 위하여 50±2 °C의 온도에서 건조를 실시하였다(Streicher and Alexander, 1995). 추가로 염화물 용액이 콘크리트 하면의 균열을 통해 단일방향으로 침투하도록 유도하기 위하여 실험체에 에폭시 도포를 실시하였다. 에폭시 도포를 실험체 하부 균열을 중심으로 좌우 100 mm 구간을 제외하고 실험체의 전면에 실시하였다.

염화물 침투 실험은 콘크리트 재령 90일에 실시하였으며, 실험에 사용된 염화물 용액은 농도에 따라 고농도, 중농도, 저농도로 나누어 실시하였다. 염화물 농도 배합비는 Table 4에 나타내었는데, 제설환경에서의 염화물 침투를 모사하기 위하여 NaCl과 CaCl₂가 혼합된 용액을 사용하여 침투 시험을 실시하였다. 농도의 경우에는 국내 제설시 습염살포 기준을 참고하여, 강설량에 따라 농도를 설정하였다. 염화물 침투 시험 모식도(Fig. 3)와 같이 염화물 용액이 실험체 균열 면에 접촉하도록 하여 염화물 침투가 균열부에서 발생하도록 하였다. 수압에 의한 영향을 제거하기 위하여 염화물 용액은 실험 진행 동안 실험체 하부에서부터 10 mm 높이를 유지하였다. 염화물 침투 시간은 15분, 30분, 60분으로 정하였으며, 각 침투

Table 4 Mix design for chloride solution

| Type | Cl concentration | NaCl (g/L) | CaCl ₂ (g/L) |
|-----------|------------------|------------|-------------------------|
| Low_Cl | 1% | 14.6 | 1.9 |
| Medium_Cl | 2% | 29.1 | 3.7 |
| High_Cl | 4% | 58.1 | 7.5 |

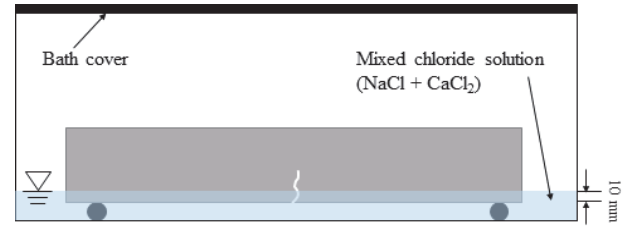


Fig. 3 Schematic of Sorption test

시간마다 3개의 실험체를 사용하였다. Table 5와 같이 본 실험에서 염화물 침투 시간과 염화물 농도를 변수로 하여 사용된 콘크리트 실험체는 총 27개로 이다.

염화물 침투가 완료된 실험체는 염화물 용액이 담긴 수조에서 꺼내어 염화물 침투 깊이를 확인하기 위하여 균열 위치에서의 횡단면으로 실험체를 분리하였다. 이때, 추가적인 3점 재하를 수행하여 균열면의 손상을 최소한 상태에서 실험체를 완전 파괴 하였다. 그 다음에는 균열면에 돌출된 철근을 절단하고, 염화물 침투면에 0.1M의 AgNO₃ 용액을 분사하여 화학적 반응에 따른 콘크리트의 변색을 확인하였다. 변색에 의한 염화물 오염도 평가 이외에도 염화물 침투량을 정량화하기 위하여 실험체의 중량 변화를 측정하였다. 중량변화 측정은 실험체 중 60분 동안 염화물 용액에 노출되는 실험체에 대해서 특정 시간 마다 중량을 측정하였다.

2.3 이미지 분석

실험체 균열이 발생된 면에서의 염화물 침투를 확인하기 위하여 NT Build 492에서 사용되는 0.1M AgNO₃ 용액을 분사하여 변색이 충분히 일어난 후, 디지털 카메라를 이용하여 고해상도 이미지(4144 × 7360 pixel)를 촬영하였다. NT Build 492에 따르면, 일반 포틀랜드 시멘트 콘크리트에서 0.1M AgNO₃ 용액에 반응되는 염화물의 농도는 대략 0.07 M로 제시되어 있다. 촬영된 이미지는 Matlab을 통해 변색 부분만을 추출하는 이미지 프로세싱 작업을 실시하였다. 변색된 부분의 이미지는 추출과정은 Fig. 4와 같이 나타내었다.

촬영된 이미지에서 각각에 필요한 이미지 부분에 대해서 이진영상으로 변환하였다. 균열면 전체 이미지와 변색 발현된 부분 이미지들을 각각 이진영상 이미지로 나타내어 해당 이미지

Table 5 Experimental framework

| Mix design (type) | Cl concentration (%) | Cl exposure periods (mins) | Replicate |
|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| w/c=0.458 (Concrete) | 1% | 15, 30,60 | 3 |
| | 2% | 15, 30,60 | 3 |
| | 4% | 15, 30,60 | 3 |

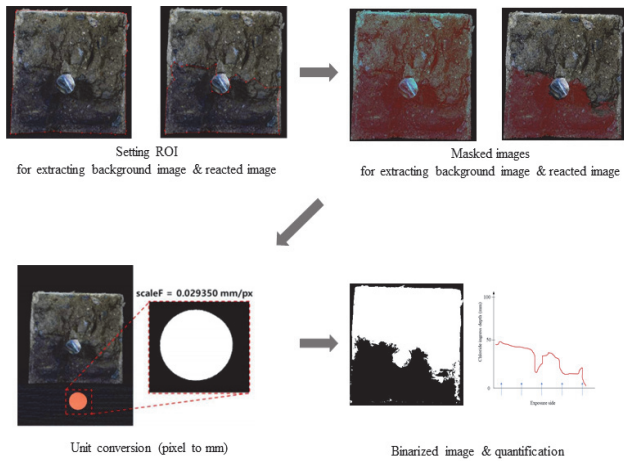


Fig. 4 Image analysis procedure

에 대한 픽셀 수를 구하였다. 균열면에서 변색된 부분을 추출할 때에는 RGB 형태의 원본 이미지로부터 Lab 에 해당되는 값으로 변색 범위의 값을 설정한 후, 이미지를 이진영상으로 변환시켰다. Lab 색 모델은 출력장치에 영향을 받지 않고 독립적인 방법으로 색상을 구현하기 위해 개발된 색상 모델로 L (luminosity)은 밝기인 명도를 나타내며, a는 녹색에서 적색의 보색, b는 황색에서 청색의 보색을 의미한다. 이미지 분석을 통한 침투 깊이를 픽셀수로 계산하기 위하여 기준 원을 균열면 촬영 시 동시에 촬영하였다. 기준 원 픽셀수와 기준 원의 직경 사이의 관계를 이용하여 침투 깊이를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 염화물 침투 실험

Fig. 5에서는 60분동안 균열 콘크리트로 침투된 염화물의 누적 침투량을 나타내었다. 일반적인 경향으로 초기에 염화

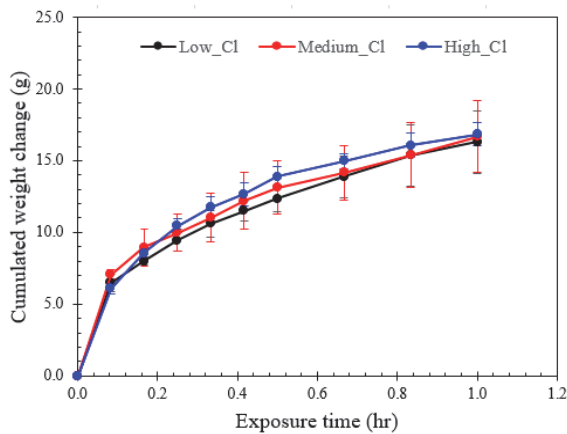


Fig. 5 Weight change of cracked concrete by chloride sorption

물이 급격하게 침투되는 반면, 시간이 지남에 따라 침투량이 감소하는 경향을 보이며, 전체 침투 중량의 대략 40% 이상 침투 시작 5분 이내에 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 침투 초기에 발생하는 급격히 증가된 중량 변화는 콘크리트 건조 상태에서 염화물이 침투하는 현상으로 모세관 현상에 의한 흡수 현상이 주된 염화물 이동 현상이라고 할 수 있다. Fig. 6에서는 시간 제곱근 축으로 노출 면적당 흡수되는 염화물량의 변화와 식 (1)을 이용하여 근사식을 나타내었다.

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

여기서, i 단위면적당 흡수되는 액체의 무게(g/cm^2), S 흡수계수($cm/t^{0.5}$), t 흡수시간(hour) 이다.

흡수계수의 값($0.066 - 0.075 cm/t^{0.5}$)은 염화물의 농도에 관계없이 유사한 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 그렇기 때문에 흡수 현상에서 염화물의 농도가 미치는 영향은 미비하다고 판단된다. 한편, 이전 연구에서 얻은 결과에서 흡수계수의 값은 $0.038 cm/t^{0.5}$ 로 본 실험 결과에 상당히 낮을 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트내의 흡수 현상을 노출 시간에 따라 초기 흡수(initial sorption)와 2차 흡수(Secondary sorption)로 나눌 수 있고, 초기 흡수 현상이 2차 흡수 현상에 비해 상당히 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다. 이전 연구 결과를 고려한다면, 초기 흡수 현상이 철근 콘크리트 구조물의 내구성능에 지배적으로 미칠 것이기 때문에 이에 대한 주의가 필요하다. 콘크리트 내에서 염화물 이동 현상에는 압력에 의한 침투 현상, 모세관 현상에 의한 흡수 현상 그리고 이온의 농도 구배에 의한 확산현상으로 나눌 수 있다. 이 중에서 확산현상에 의한 연구에 대해서는 여러 연구 진행되었지만, 콘크리트 내의 흡수 현상에 대한 연구는 상대적으로 적은 편이다. 하지만, 현상 콘크리트의 경우에는 콘크리트 내의 수분이 완전 포화 상태인 경우 보다는 콘크리트 내의 수분 상태가 불포화 상태를 유지하는

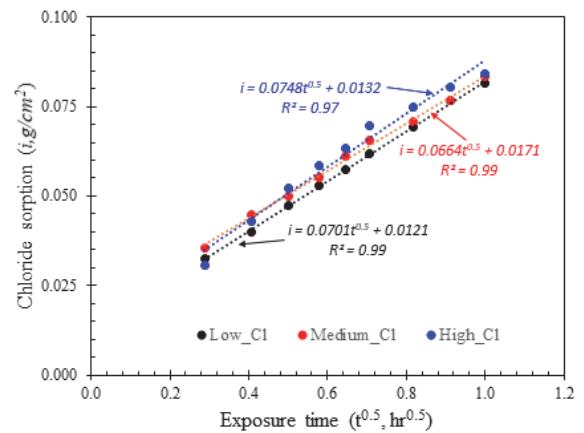


Fig. 6 Chloride sorption profiles

경우가 대부분이다. 이러한 불포화 상태를 유지하는 경우, 염화물의 이동은 확산에 의해서만 이루어지는 것이 아니라, 확산과 흡수 현상이 동시에 일어나는 것이 일반적이라고 할 수 있다. 그리고 상대적으로 수분 포화도가 낮은 부분에서는 흡수 현상이 지배적으로 발생하게 되는데, 일반적인 현장 콘크리트에서는 이 부분이 콘크리트의 노출면에 해당하며, 이 부분에서 균열이 발생될 가능성이 가장 높다는 점에서 유의할 필요성이 있다. 특히 제설제와 같은 염화인자 침투가 용이한 상황에서는 염화인자들이 철근 깊이로 침투가 매우 빠르게 발생하게 되고 이로 인해 발생되는 철근 부식은 다양한 형태로 구조물의 성능(공식에 의한 철근 단면적 감소, 피복 콘크리트의 박리/박락에 의한 철근 노출)을 저하시켜, 구조물의 사용 수명을 급격하게 줄이는 문제점이 발생할 있다.

3.2 이미지 분석을 통한 염화물 침투 평가

이미지 분석에 의한 염화물 침투 평가를 실시하였다. 이미지 평가에서 변색 부분에 대해서 RGB 이미지에서 Lab 값을 추출한 후, 이미지를 이진 영상으로 변환하여 변색 부분을 가지고 침투깊이와 침투정도를 계산하였다. Fig. 7에서는 각각의 염화물 농도에서 1시간동안 침투 시킨 후 $AgNO_3$ 용액에 의해 변색된 콘크리트에 대한 대표 원본 이미지, 이진 변환 이미지와 침투 깊이를 나타내었다. Fig. 7에서 원본 이미지를 살펴보면, 염화물 농도에 따른 변색 정도가 조금 다른 것을 확인 할 수 있다.

기존 연구 결과에 따른 질산은 변색법에 의한 염화물 농도에 따른 변색 정도가 다른 것을 확인 할 수 있는데, 주요 요인으로는 질산은 용액과 반응을 할 수 있는 염화물 이온과 수산화 이온에 의한 것으로 나타났다(Kim et al., 2013). 하지만, 본

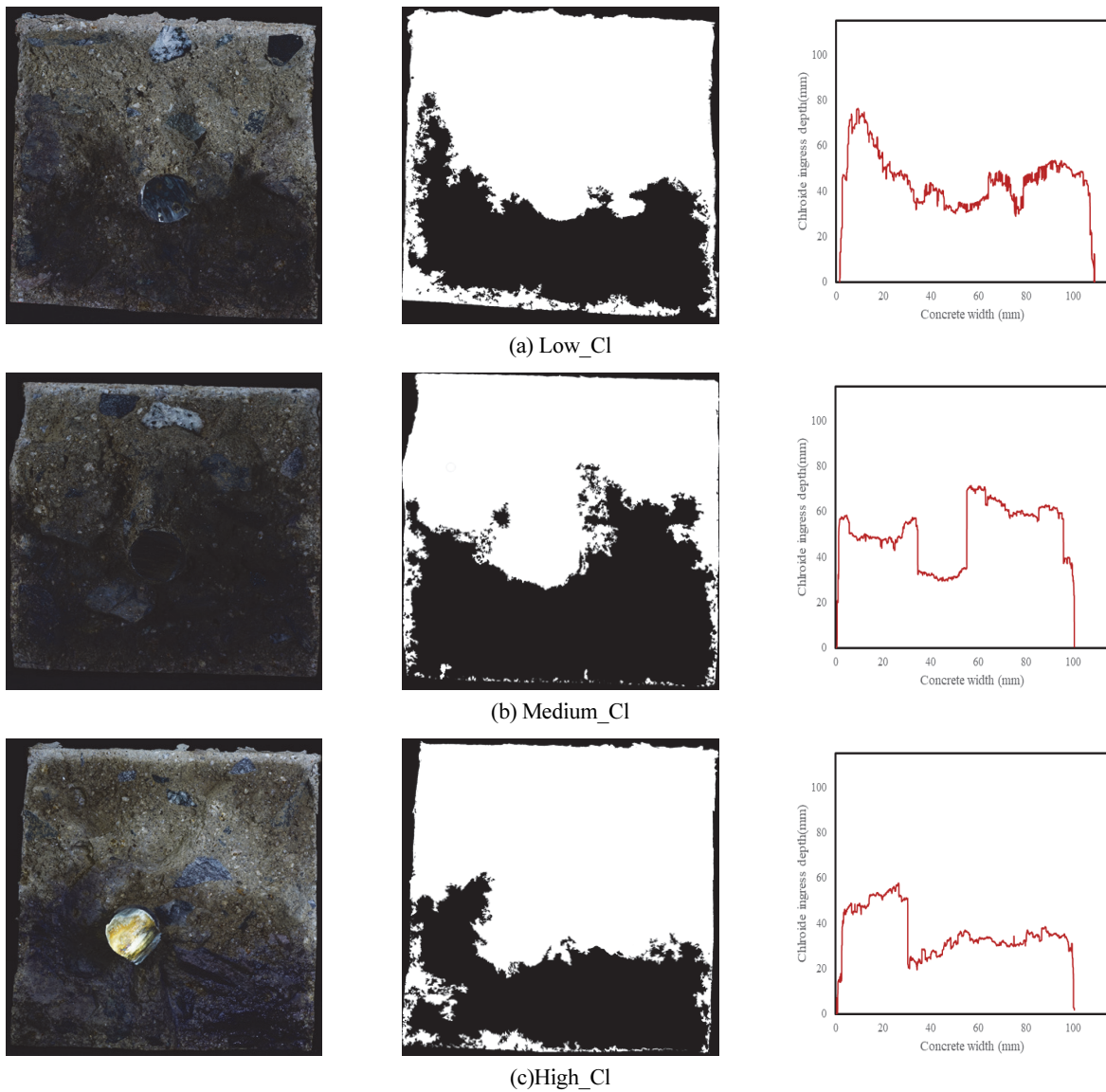


Fig. 7 Original images (left), image-processed image (middle), and quantification (right) regarding $AgNO_3$ reacted concrete by chlorides

연구에서는 염화물 농도 측정을 실시하지 않았기 때문에 염화물 농도와 변색 정도에 대한 내용을 다루지는 않았다.

Fig. 8에서 침투 시간(15분, 30분, 60분)에 따른 염화물 오염도 평가를 나타내었는데, 우선 시간에 따라 염화물 침투가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만, 초기에 염화물 침투가 발생하였다고 하였을 때, 초기 15분 동안 실험체 균열면에서의 대략 28 - 38% 정도 염화물에 오염된 반면, 이후 60분에서는 대략 40% 정도 오염된 것을 확인 할 수 있다. 이는 중량변화 평가에서와 비슷한 결과라고 할 수 있다. 다시 말해서, 시간이 증감함에 따라 침투 속도가 감소하게 되는데, 이는 콘크리트내의 주요 침투 메커니즘이 미세공극에 의한 흡수에서 농도 차이에 의한 확산으로 전환 되는 과정과 흡수 실험 실시 전에 콘크리트를 건조시켰지만 콘크리트 표면 코팅에 의해 깊이에 따른 수분 구배가 발생한 것으로 판단된다. 한편 이미지 분석에 의한 오염도 평가가 중량 변화보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 염화물은 균열면 이외에도 철근 방향으로 흡수가 발생하지만 균열면을 타고 흡수되는 속도가 상당히 빠르다. 이는 미세 균열면이 상대적으로 건조 현상이 빠르게 발생하여 발생한 것으로 판단된다. 각 실험체마다 변색도 차이가 에러바 형태로 Fig. 8에 나타났다. 콘크리트 내에는 골재와 시멘트 페이스트 사이의 미세 계면이 존재하는데, 이를 통해 염화물의 이동을 쉽게 만들기 때문이다(Delagrave et al., 1997).

3.3 균열 콘크리트의 염화물 흡수

염화물에 의한 철근 부식은 철근 콘크리트 구조물에서 중요한 열화요인 중 하나이다. 그리고 균열이 발생한 콘크리트 경우 콘크리트의 염화물 이동 속도는 더욱 가속화된다는 것은 잘 알려진 사실이다(Ye et al., 2013). 염화물에 의한 철근 부식을 줄이기 위한 방법으로 본 연구 결과를 보면 골재 분포도를 분명히 고려해야 할 필요가 있다고 판단한다. Angst and Polder(2014) 연구결과에 따르면, 골재와 시멘트 페이스트 사

이의 미세계면에 의한 염화물 이동 영향은 최대골재 치수의 대략 2배정도의 깊이부터는 그 영향이 줄어들 수 있다고 보고되었다. 피복 콘크리트의 상태가 주로 불포화 상태이고 염화물에 노출되기 쉬운 환경에서는 피복 콘크리트의 두께 산정에 있어서 최대 골재 치수를 고려해야 할 필요가 있다.

다시 말해서 현장에 노출되어 있는 대부분의 철근 콘크리트 구조물은 건습작용이 활발하게 일어날 수 있는 환경에 노출되어 있으므로 피복 콘크리트에서 농도 구배에 따른 염화물 확산이 아니라 염화물 흡수가 주요한 이동 메커니즘이라고 할 수 있다. 이는 콘크리트가 주로 수분 포화상태가 아니라 부분적 불포화 상태를 유지하고 있기 때문이다. 염화물이 노출되기 쉬운 환경에서는 특히 흡수현상에 대한 연구가 필요할 것이다. Fig. 9에서는 이미지 분석에 의한 균열면에서의 염화물 침투 깊이를 나타내었다. 균열면에서의 침투 깊이는 이미지 분석을 통해 계산과정에서 실험체 경계면에서의 침투부분은 고려하지 않았다. 다시 말해서 양쪽 경계면에서 10 mm를 제외한 침투깊이를 산정하였다. 침투시간이 지남에 따라 침투깊이가 증가하는 것을 알 수 있으며, 초기 15분 동안 침투 흡수현상에서 지배적인 것을 확인 할 수 있었지만, 염화물 농도에 따른 차이는 확인 할 수 없었다. 최대 침투 깊이를 평균 침투 깊이와 비교해보면, 대략 최대 골재 치수 크기 정도 차이가 나는데, 염화물 침투가 발생할 수 있는 노출 환경에서는 최대 골재 치수도 중요한 변수가 될 수 있음을 확인하였다. 균열이 발생된 피복 콘크리트의 경우 균열면을 따라 염화물의 이동이 분명하게 나타나는 것을 이미지 분석으로 확인 할 수 있었다(Fig. 7). 결과적으로 염해에 노출될 수 있는 환경에서 구조물의 균열이 발생된 경우에는 이전 연구결과(Kim et al., 2020; Kim et al., 2021)와 같이 균열폭(0.1 mm이하)에 관계없이 염화물에 의한 철근 부식의 위험도는 상당하다고 할 수 있을 것이다. 한편, NT build 492에서 제시된 내용을 참고해보면, 변색된 최대 깊이에서의 염화물 농도를 대략 시멘트 중량

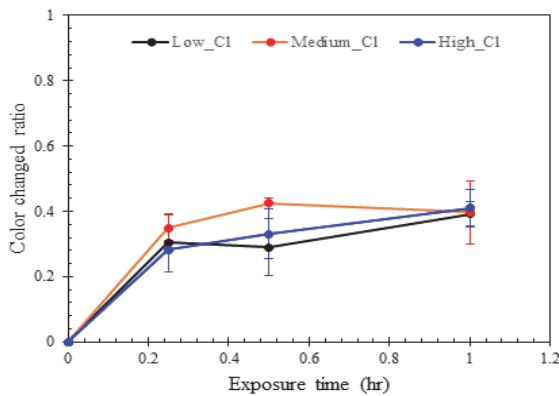


Fig. 8 Discoloration ratio with exposure time

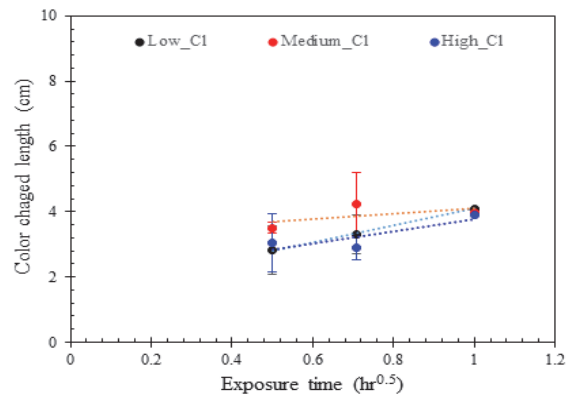


Fig. 9 Discoloration length change from chloride exposure side on concrete with time

대비 0.1%정도가 되는 것을 추정 할 수 있다. 이는 일반적으로 알려진 철근부식을 일으키는 임계염화물량보다 작은 값이지만, 철근 깊이에서는 더 높게 나타날 수 있음을 유의할 필요가 있다. 특히, 겨울철 지속적인 제설제 사용 시 균열이 발생된 피복 콘크리트가 건조 상태로 존재하게 된다면 철근 부식에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 균열이 발생된 콘크리트의 염화물 흡수 실험을 실시하였다. 실험 결과로 부터 콘크리트 균열면에서 염화물 오염도 및 염화물 침투 깊이를 이미지 분석을 통하여 정량화를 하였고, 결론은 다음과 같다.

- 1) 염화물의 흡수현상에 대해서 중량변화와 균열면에서 이미지 분석을 통하여 평가하였다. 침투 시간이 증가함에 따라 염화물의 오염도도 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 특히 초기 침투 시간인 15분 이내 측정되었는데, 콘크리트 내의 모세관 흡수에 의해 발생하는 것으로 판단되므로, 염화물 혹은 수분 흡수를 막을 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.
- 2) 균열면에서 염화물의 침투정도를 이미지를 이용하여 분석하였다. 변색법에 의한 이미지 분석은 쉽고 빠르게 결과를 얻을 수 있는 장점이었지만, 이미지 분석 이용하여 깊이별 염화물 농도 평가에는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 이미지 분석에 살펴보면, 염화물 흡수 현상의 경우 골재 영향이 상당하다는 것을 확인 할 수 있었다. 염화물 침투 깊이 분석결과를 살펴보면, 골재의 분포에 따른 그 영향이 분명하게 확인 할 수 있었다. 염화물에 따른 내구성 설계에 있어서 최대 골재 치수도 중요한 영향 인자로 고려 되어 할 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 2022-0217-001, DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발)

References

1. Abbas, Y., Pargar, F. Koleva, D. A. van Breugel, K. Olthuis, W. van den Berg, A. (2018). "Non-destructive measurement of

chloride ions concentration in concrete – A comparative analysis of limitations and prospects" *Construction and Building Materials*, Vol. 174, pp. 376-387, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.135.

2. Angst, U. M., Polder, R. (2014) "Spatial variability of chloride in concrete within homogeneously exposed areas" *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, pp. 40-51, DOI:10.1016/j.cemconres.2013.10.010.

3. ASTM C 1202 (2022) Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, ASTM International, West Conshohocken.

4. BS EN 206 (2014). Concrete-Specification, performance, production and conformity, British Standards, Institution, London.

5. Delagrave, A., Bigas, J. P., Ollivier, J. P., Marchand, J. and Pigeon, M. (1997) "Influence of the interfacial zone on the chloride diffusivity of mortars" *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 86-92, DOI:10.1016/S1065-7355(96)00008-9.

6. Kim, K-. S., Park, K-. T., Kim, J. (2020) "Evaluating chloride absorption of reinforced concrete structures with crack widths" *Journal of the Korea Institute for structural Maintenance and Inspection*, Vol. 24, No. 6, pp.10-16, DOI:10.11112/jksmi.2020.24.6.10. (in Korean)

7. Kim, K-. S., Park, K-. T., Kim, J. (2021) "FEA simulations on water absorption in various pre-cracked concretes" *Journal of the Korea Institute for structural Maintenance and Inspection*, Vol. 25, No. 5, pp.68-75, DOI:10.11112/jksmi.2021.25.5.68. (in Korean)

8. Kim, M-. Y., Yang, E-. I., Yi, S-. T. (2013) "Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures" *Construction and Building Materials*, Vol.41, pp.239-245, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.084.

9. KS F 2405 (2010) Standard test method for compressive strength of concrete, Korean Standards Association (in Korea)

10. NT Build 492 (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials:Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest, Espoo

11. Sajid, H. U., Jalal, A., Kiran, R. and Al-Rahim, A. (2022). "A survey on the effects of deicing materials on properties of Cement-based materials" *Construction and Building Materials*, Vol. 319, pp. 126062, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126062.

12. Streicher, P. E. and Alexander, M. G. (1995) "A chloride conduction test for concrete" *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 6, pp. 1284-1294, DOI: 10.1016/0008-8846(95)00121-R.

13. Tuutti, K. (1982) Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

14. Ye, H., Tian, Y., Jin, N., Jin, X. and Fu, C. (2013) "Influence of cracking on chloride diffusivity and moisture influential depth in concrete subjected to simulated environmental conditions" *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 66-79, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.024.

Received : 07/06/2022

Revised : 07/06/2022

Accepted : 07/28/2022

요 지 : 염화물은 철근 콘크리트 구조물의 주요 열화 요인 중 하나로 철근 부식을 발생시켜 구조물의 성능을 저하시킨다. 염해에 의한 철근 콘크리트 구조물의 열화정도 또는 철근 부식 개시 시기를 확인하기 위해서는 철근 깊이에서의 염화물 농도 또는 콘크리트 내에서 염화물 침투 속도를 확인할 필요가 있다. 일반적인 콘크리트내 염화물 침투를 확인할 수 있는 방법으로는 염화물 침투 깊이별로 전위차 측정법과 같은 방법으로 염화물 농도를 측정하는 염화물 프로파일링 방법이나 질산은 용액을 이용하여 콘크리트의 변색된 범위를 다지점 측정하여 침투 깊이를 측정하는 방법이 대표적이다. 전자의 경우에는 정확하게 염화물 농도를 직접 측정하기 때문에 염화물 침투 속도(일반적으로 확산계수)를 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있지만, 작업이 번거롭다는 단점이 있다. 후자는 질산은 용액과의 반응에 따른 변색 범위를 측정하여 염화물 침투 깊이를 산정하는 것이기 때문에 간편하고 결과의 신뢰성도 확보할 수 있는 장점이 있지만, 침투 깊이를 산정하는데 있어서 작업자의 숙련도에 따라 오류가 발생할 수 있는 단점이 있다. 본 연구에서는 변색법에 의해 얻어진 결과를 이미지 분석을 통해 콘크리트 내의 염화물 침투 깊이를 분석하였다. 이를 통해 작업자에 의해 발생될 수 있는 오류를 최소화할 수 있도록 하였다. 또한 콘크리트의 미세 균열이 염화물 침투에 미치는 영향에 대해서도 확인하였다. 이미지 분석을 통해 염화물 침투 깊이를 정량화한 결과 염화물은 미세 균열부를 통해 빠른 속도로 염화물 침투가 발생한다는 것을 확인 하였기 때문에, 콘크리트 구조물에서는 특히 균열 발생에 주의가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트, 염화물 침투, 미세균열, 이미지 분석
