

Research Paper

건축물 균열 모니터링을 위한 역학변색센서 활용 기법에 관한 연구

A Study on the Application Method of Mechanochromic Sensor for Crack Monitoring in Buildings

최경철¹ · 김홍섭^{1*} · 전준서² · 이문환³ · 편수정⁴ · 남정수⁵

Choe, Gyeong-Chol¹ · Kim, Hong-Seop^{1*} · Jeon, Jun-Seo² · Lee, Mun-Hwan³ · Pyeon, Su-Jeong⁴ · Nam, Jeong-Soo⁵

¹Senior Researcher, Department of Building Research, Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

²Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

³Senior Research Fellow, Department of Building Research, Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

⁴PhD Course, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

⁵Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

*Corresponding author

Kim, Hong-Seop
Tel : 82-31-910-0038
E-mail :
hongseopkim@kict.re.kr

ABSTRACT

In this study, an experimental study was conducted on the development of crack monitoring technology in buildings using a mechanochromic sensor. After attaching a mechanochromic sensor to the cracks induced in the concrete specimen, the color variation image of the sensor according to the progress of the cracks was taken. In addition, a method of analyzing a sensor color variation image was proposed, and an equation for deriving a crack's width from the relationship between the analysis result and the crack width was also proposed. In addition, the possibility of using an mechanochromic sensor for monitoring cracks in buildings was confirmed through the verification of crack width monitoring technology.

Keywords : mechanochromic sensor, crack, monitoring, color variation

Received : November 17, 2022

Revised : December 13, 2022

Accepted : December 14, 2022

1. 서론

철근 콘크리트(RC) 구조물은 시공성 및 내구성이 뛰어나기 때문에 건축 및 토목 구조물에 널리 사용되고 있다. 그러나 최근 전 세계적으로 철근 콘크리트를 사용한 사회기반시설물이나 건축물의 노후화로 인한 재산·인명 피해가 발생하고 있어, 구조물의 안전성 모니터링 및 체계적인 유지관리 시스템에 대한 요구가 증가하고 있다.

구조물 건전성 모니터링 기술(Structural Health Monitoring)은 구조물의 상태를 실시 진단 및 평가하는 기술로 측정 센서, 데이터 수집 및 관리 장치, 데이터 분석 알고리즘 등을 포함하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 또한, 최근에는 콘크리트 자체나 철근 부식 등 내구성 열화 진단을 위한 비파괴 시험 기법의 일환으로 내구성 헬스 모니터링 기술(Durability Health Monitoring) 개발도 이루어지고 있다[1-4]. 구조물의 구조 상태 및 거동, 계측 모니터링 센서는 설치와 운영에 정교성이 요구된다. 현재 운영되는 모니터링 방법은 다수의 시간과 인력이 요구되며, 모니터링 과정에서 점검자의 주관이 개입되어 객관적 분석에 어려움이 있다. 또한, 구조물에 접근이 불가능할 경우 센서의 설치와 모니터링이 곤란하며, 균열 및 변형 등 계측



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

데이터는 일정 소프트웨어를 활용하여 추가적인 분석이 필요하므로 유지관리 모니터링 프로세스의 단순화 및 최적화가 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 구조물 외벽을 촬영한 이미지를 이용한 손상 평가 기법에 대한 연구가 수행되고 있으나, 장기적으로 외부에 노출된 콘크리트의 경우 표면의 오염, 변색, 외벽 마감재의 유무 등의 요인으로 인해 이미지 처리가 어려운 한계가 있다[5-8].

한편, 기존 시공 현장의 균열 관리 또는 구조물 안전진단 시 균열의 측정은 점검자가 균열 스케일 등을 이용하여 측정하고 수기로 기입하여 관리하는 등 재래식 방법이 주로 사용되고 있다. 이러한 재래식 측정 방법은 장기적인 균열 모니터링 및 데이터 관리에 어려움이 있으며, 균열의 진행 여부를 직관적으로 파악하기에는 한계점이 있다.

본 연구에서 사용하고자 하는 역학변색센서는 일반적으로 강재와 같은 균질한 재료의 변형률 측정을 위하여 사용되고 있으며, 신체 관절의 곡률, 디스플레이의 탄성 등 다양한 분야에서 기계적 변색을 탄성으로 표현하는데 사용되고 있다[9,10]. 이는 별도의 전력이나 장비 없이 변형에 의한 센서의 색변화로 구조물의 균열 측정 및 모니터링이 가능한 것으로 구조물의 보수 및 안전성 평가에 필요한 시간과 비용을 크게 저감시키고, 균열 발생 및 진전에 따라 발생하는 센서의 변색은 작업자 또는 진단자 등이 균열의 진행 상태를 육안으로 실시간 확인할 수 있으며 이미지 촬영만으로 균열 폭을 측정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 역학변색센서를 활용한 콘크리트의 균열 모니터링 가능성에 대하여 검토하기 위하여 콘크리트 시험체에 역학변색센서를 부착하고 균열을 유도한 후 시험체의 변형과 센서의 변색 과정을 촬영하였다. 이렇게 촬영된 영상을 기반으로 센서의 변색 이미지 분석 기법을 구축하고, 센서의 변색 이미지 분석 결과와 균열 폭과의 상관관계 도출을 통하여 역학변색센서를 활용한 균열 모니터링 기법 개발에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 역학변색센서의 개요

본 연구에서 사용된 역학변색센서는 Figure 1에 나타낸 바와 같이 전체 두께는 $1.0 \pm 0.3 \text{ mm}$ 이며, 얇은 상부 금속층(Thin Au layer, 10nm), SBS 유전층(Dielectric spacer), 하부 금속층(Thick Ag layer 100nm), 신축성 기판(PDMS)으로 구성된다. 센서에 입사된 빛 중 일부는 상부 금속층에서 반사되며, 상부 금속층을 통과한 빛은 SBS 층을 지나 하부 금속층에서 반사된다. 상부 금속층과 하부 금속층에서 반사될 때 빛의 위상차로 인한 특정 파장 간섭이 발생하게 되며, 이를 제어하기 위하여 금속층 사이 SBS 유전층의 두께를 조절하고 SBS 두께에 따라 초기 센서의 색상이 결정된다. 상부 금속층과 하부 금속층에 빛 반사 스펙트럼에 간섭이 일어나지 않는 SBS 유전층의 두께를 도출하여 제조한 결과 센서의 초기 색상은 녹색을 나타내며, 센서가 인장 응력을 받아 늘어날 때 상하부 금속층 및 SBS 유전층의 두께 변화와 함께 빛 반사 스펙트럼이 변화가 발생하여 센서의 색 변화가 생기는 원리다[9,10]. 이는 센서에 인장 응력이 가해져 구조체의 변형이 발생하였을 때 센서의 초기 색상에서 점차 색상 변화가 일어나는 현상을 설명할 수 있다.



Figure 1. Shape and structure of mechanochromic sensor

2.2 균열 폭 측정 실험 방법

역학변색센서를 활용한 균열 모니터링을 위하여 압축강도 40MPa, 강성유(길이: 13mm, 직경: 0.2mm, 밀도: 7.85g/mm³, 인장강도: 1,140MPa) 2.0vol.%를 혼입한 섬유보강 시멘트 복합체를 제작하였다. 일반 콘크리트의 경우 인장하중을 받을 경우 취성 파괴되어 균열 진전의 모니터링이 어려우므로 기존 연구를 통해 연성 거동이 검증된 섬유보강 시멘트 복합체를 대상으로 균열 모니터링을 수행하였다[11,12].

직접인장 시험은 Figure 2(a)에 나타난 250kN 용량의 직접인장 시험 장치를 사용하였으며, 3mm/min의 속도로 변위 재하하였다. 직접인장 시험체의 형상 및 크기는 Figure 2(b)와 같으며 시험체 중앙에서 균열이 발생하도록 노치를 제작하였으며, Figure 2(c)와 같이 10×30mm의 직사각형 형태의 역학변색센서가 늘어나는 방향과 균열의 진행 방향이 일치하도록 균열 발생이 예상되는 노치 중간에 부착하였다. 사전 연구에서 다양한 접착제를 활용하여 역학변색센서와 콘크리트와의 부착 특성을 검토한 결과를 헨켈사의 록타이트 SF770 프라이머와 406 접착제를 이용하여 센서를 부착할 때 센서와 콘크리트의 일체성이 확보되며, 직접인장 시험 시 센서의 탈락이 발생하지 않는 것으로 확인하였다[13].

균열 진전에 따른 역학변색센서의 변색 이미지를 촬영하기 위하여 Figure 2(c)와 같이 직접인장 시험 장치에 암실 및 조명 설치를 통하여 빛의 입사각 및 반사각, 카메라의 촬영 각도에 따라 센서 이미지에 차이가 발생하는 것을 방지하였으며, 센서 이미지 촬영용 카메라는 각도를 고정시킨 상태에서 촬영하였다.

역학변색센서의 변색 이미지 분석을 통해 얻어진 균열 값과 비교하기 위한 시험체의 균열 폭의 측정은 영상 신율계를 사용하였다. Figure 2(c)와 같이 영상 신율계는 인장변형을 평가를 위해 시험체 표면에 +형의 지점을 2개 이상 그리고, 이미지 맵핑을 통하여 영상 내에서 인장변형율을 측정하였다. 사용된 영상 신율계의 정확도는 ASTM E83-10a의 기준을 충족하며 정량 측정이 가능한 장치이다.

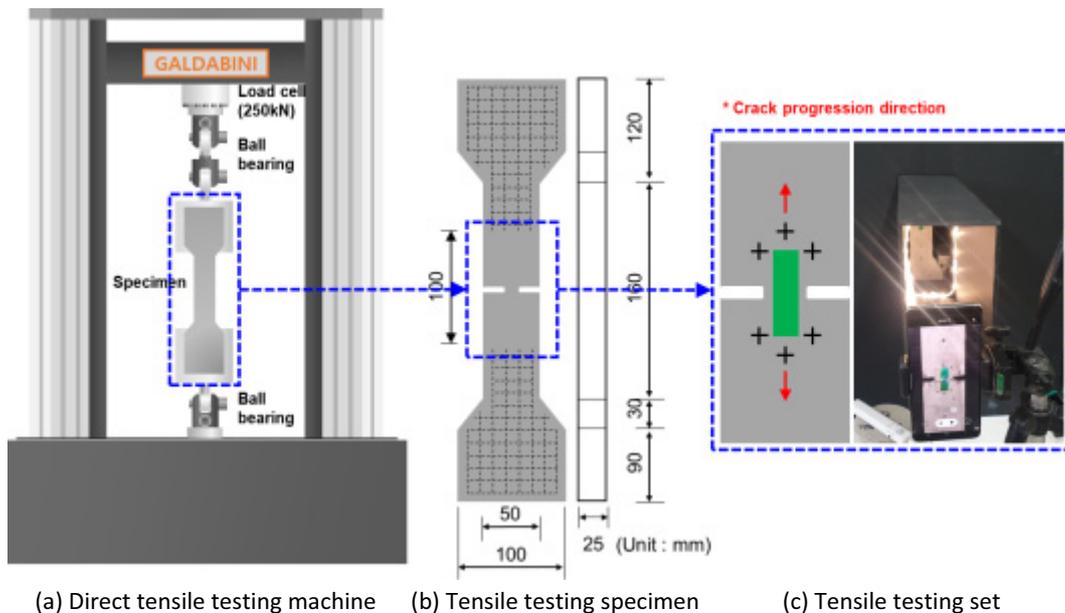


Figure 2. Test method for crack monitoring using mechanochromic sensor

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시험체 인장변형에 따른 역학변색센서의 색상변화

Figure 3에 직접인장 시험 시 시험체 노치 부분에서 발생하는 균열의 진행에 따른 역학변색센서의 색변화 과정을 나타내었다. 사진에서 확인할 수 있듯이 시험체의 노치 부분에서 인장변형이 증가함에 따라 센서의 색상이 단계적으로 변화하는 현상이 관찰되었다. 변형이 발생하지 않은 부착 초기의 센서는 녹색 계열이며, 균열이 증가함에 따라 센서의 색상이 파란색 계열을 거쳐 보라색 계열로 변하는 것으로 나타났다.

이러한 센서의 변색과정은 실험 중에 육안으로도 명확하게 확인할 수 있었으나, 센서의 변색영역에서 관찰되는 색상은 반복적인 실험에서 균일하지 않은 것으로 나타났다. 특히, 주변 광원에서 발생하는 빛을 직접적으로 반사하는 것으로 추정되는 부분에서는 백색점(Whith Point)이 관찰되었다. 따라서, 본 연구에서는 인장변형에 따른 센서의 변색도를 정량적으로 분석하기 위하여 RGB와 HSV 색공간 좌표를 이용하여 센서의 색상을 정량화하였으며, 이 결과를 시험체의 인장변형률과 비교하였다.

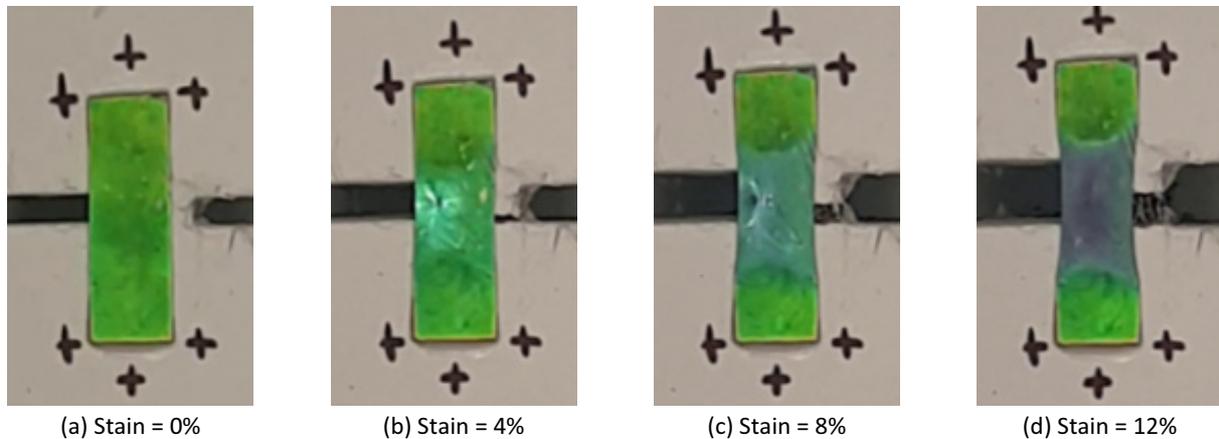


Figure 3. Color change of mechanochromic sensor with tensile strain

3.1.1 RGB성분 분석결과

직접인장 시험에 의해 시험체 균열이 진행되는 동안 부착된 역학변색센서를 카메라로 촬영한 이미지를 이용하여 인장변형에 따른 센서의 색변화를 분석하였다. 대부분의 이미지 데이터는 각 하나의 화소가 Red, Green, Blue 3종의 화소값을 동시에 갖는 RGB 이미지인 경우가 많다. 이 연구에서 사용한 이미지 데이터 역시 RGB형식의 이미지를 사용하였으며, RGB값은 분석의 목적에 따라 다른 종류의 색공간으로 변환이 가능하다.

우선, 별도의 색공간의 변환 과정을 거치지 않은 RGB값을 이용하여 센서의 변색에 따른 RGB값 변화와 인장변형의 관계를 검토하였다. Figure 4와 5는 변색이 발생한 센서의 사진 중 변형이 하지 않는 부분과 변형이 발생하는 부분의 RGB 성분의 수치를 나타낸다. Figure 4에서 확인할 수 있듯이 부착된 센서 영역 중 균열이 발생하는 영역을 벗어난 위치에서의 R, G, B 값은 균열의 발생 및 진행여부에 관계없이 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서, 역학변색센서의 변색은 센서의 변형이 발생하지 않은 부분에서는 부착초기의 색상을 비교적 일정하게 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

한편, Figure 5와 같이 균열에 의해 변형이 발생하는 영역에서는 균열이 증가함에 따라 R, G, B값이 변하는 것을 확인할 수 있었지만 RGB 각 성분 값과 시험체 변형 사이에서 일정한 관계는 나타나지 않았다. 이는 빨강색, 초록색 및 파란색의 3가

지 색의 조합으로 색을 표현하는 RGB 색상 좌표계의 특성 상 채도와 명도차이에 따라 달라지는 미소한 색상 차이도 RGB 3 색의 조합으로만 분석되는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

3.1.2 HSV성분 분석 결과

RGB 색 공간은 3원색의 조합으로 모든 색을 만들어 낸다는 개념으로 인간이 색을 느끼고 표현하는 관점에서 밝고 어두움, 선명함 정도를 표현하기에는 좋은 시스템이 아니다. 한편, HSV 색 공간은 인간의 시각체계와 유사한 색 모델로 인간의 시각 처리와 비슷한 방법으로 영상을 처리할 수 있다. 따라서, RGB 색 공간을 HSV 색 공간으로 변환함으로써 역학변색센서의 색을 색상(Hue), 채도(Saturation), 명도(Value)로 표현할 수 있어 RGB 색 공간에서 발생하는 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단하였다[14,15].

Figure 6은 변색이 발생한 센서 사진 중 변형이 발생하는 부분의 HSV 성분 수치를 나타낸다. 시험체의 균열이 발생한 부분에서 변형이 증가함에 따라 HSV 각 성분의 값이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 먼저, H 값은 시험체의 변형과 비교적 선형증가의 관계를 갖는 것으로 나타났다. 즉, 변형이 증가함에 따라 역학변색센서의 인장변형이 발생하고 SBS(유전층)이 얇아져 반사되는 빛의 중심 파장이 감소하기 때문에 HSV 색공간의H(색상) 값이 증가하는 것을 판단된다. 한편, S(채도)와 V(명도)는 시험체의 인장변형이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 채도와 명도의 변화는 색의 순수성을 판단하는 지표로서 이 두 값이 감소한다는 것은 순색에서 멀어진다는 것을 의미한다. 따라서, 콘크리트의 인장변형과 역학변색센서의 관계를 규정하는 지표로서 HSV 색공간 중 H 값을 선택하는 것이 가장 유효한 것으로 판단된다.

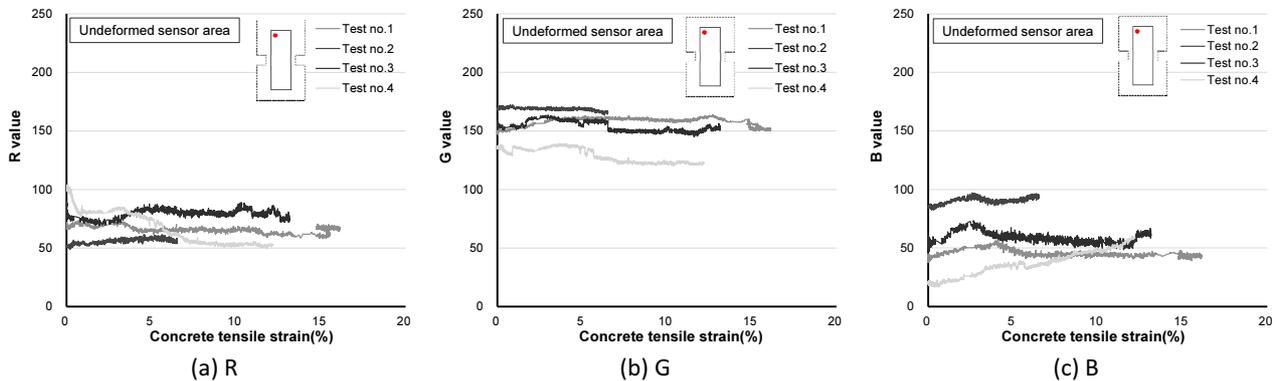


Figure 4. RGB color analysis(Undeformed area in mechanochromic sensor)

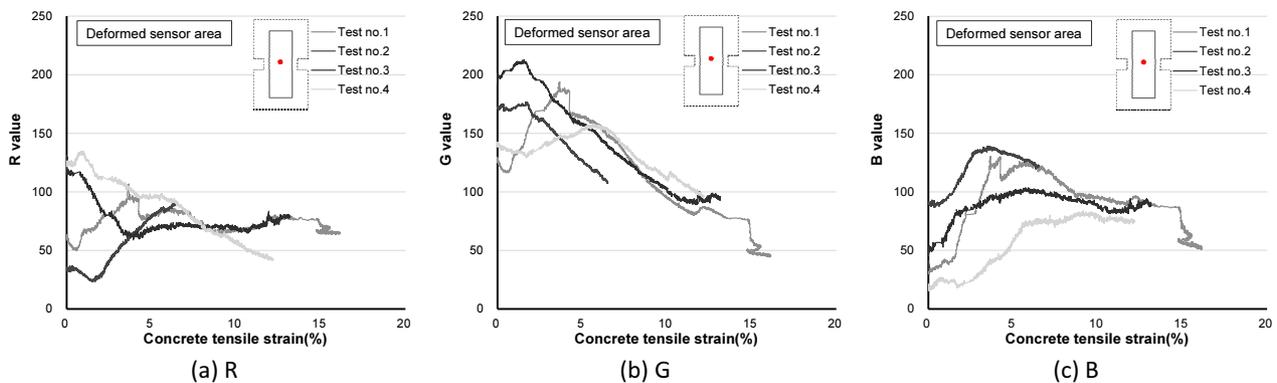


Figure 5. RGB color analysis(Deformed area in mechanochromic sensor)

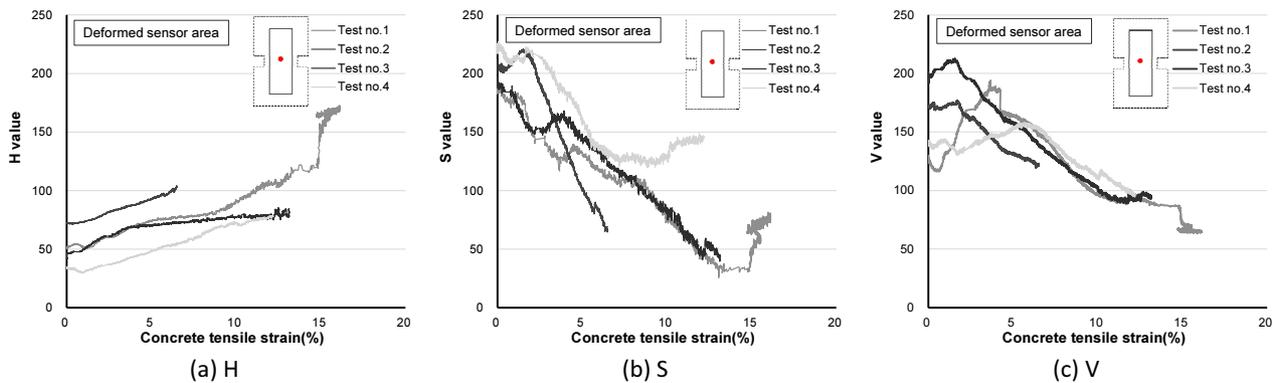


Figure 6. HSV color analysis(Deformed area in mechanochromic sensor)

3.2 콘크리트의 변형 추정을 위한 역학변색센서의 활용 방법

3.2.1 역학변색센서의 색상 이미지 분석

앞서 색상분석에서 역학변색센서에서 변색 되는 부분의 색상을 HSV 색공간으로 변환하여 H 성분을 추출한 결과가 시험체의 변형과 선형적인 관계를 갖는 것을 확인하였다. 그러나, 실제 현장 또는 건축물의 모니터링을 위하여 센서를 부착한 후 카메라로 촬영하는 경우 센서 부분만 촬영하는 것은 현실적으로 어려우며, 이 경우 센서의 변색 범위의 지정이 어려워 균열 폭 도출 결과에 영향을 미칠 우려가 있다. 따라서, 촬영된 이미지 전체에서 역학변색센서 영역만의 색상 정보를 취득하기 위하여 촬영 이미지 중 색상분석 범위를 결정하여 센서 이외의 부분을 제거하도록 하였다.

Figure 6과 같이 직접인장시험에서 촬영된 센서 이미지의 HSV 성분 중 모든 H 값은 20~150의 범위에 있으며, S와 V의 값은 50 이상의 범위에 있는 것으로 나타났다. 따라서, 각 이미지 픽셀에서 추출한 HSV 성분 값을 범위에 따라 Table 1과 같이 반환하도록 하여 Figure 7과 같이 센서 이외의 배경을 제거하고 센서의 색상 성분만을 도출하도록 단순화하였다.

Table 1. HSV analysis range for background Removal

	Range	Return value
Step 1	$H < 20, H > 150, S < 50, V < 50$	$H, S, V = 0, 0, 0$
Step 2	$H > 20$	$H, S, V = H, 255, 255$

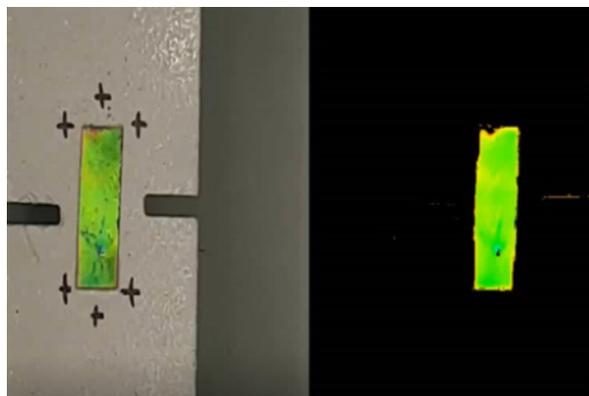


Figure 7. Process of removing background from a captured image

3.2.2 역학변색센서의 변색도 지표 설정 및 균열 폭 도출식 제안

전술한 바와 같이 역학변색센서를 촬영한 이미지에서 센서의 모든 영역에서 변색이 생기는 것은 아닌 것으로 나타났다. 즉 변형이 발생하지 않는 부분의 센서는 초기의 색상을 유지하기 때문에 이 부분의 H값은 초기 값과 같고, 전체 센서 영역 중 H값이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 또한, Figure 8과 같이 인장변형과 H값은 선형 증가 관계를 가지고 있기 때문에 센서 영역 중 가장 높은 H값은 가장 큰 변형의 결과라고 생각할 수 있다.

따라서, 센서의 이미지에서 가장 낮은 H값을 H_{min} 으로 정의하고 가장 높은 H값을 H_{max} 로 정의하여 두 값의 비인 dH 를 식 (1)과 같이 구하였다.

$$dH = H_{max} / H_{min} \tag{1}$$

Figure 9는 dH 값과 변형과 관계를 나타낸 것으로 dH 와 변형의 관계를 식 (2)과 같이 도출하였고, 이를 이용하여 역학변색 센서의 색변화로부터 시험체의 인장변형을 정량적으로 도출할 수 있다.

$$Strain = 3.0523 \times dH - 4.4955 \tag{2}$$

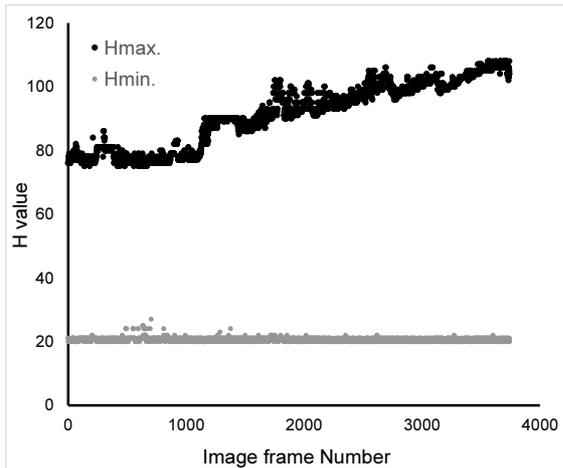


Figure 8. H_{max} and H_{min} values per sensor image frame

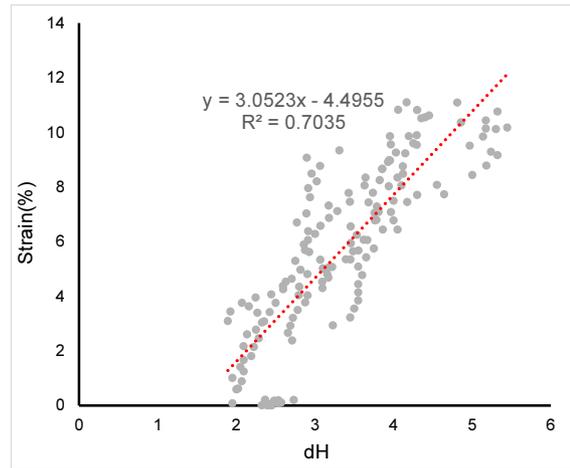


Figure 9. Relationship between tensile strain and dH

3.3 역학변색센서를 활용한 균열 모니터링 기법 검증

3.3.1 역학변색센서를 활용한 구조 부재 균열 폭 측정 개요

본 연구에서 개발된 역학변색센서를 활용한 콘크리트의 균열 폭 측정 방법에 대한 검증을 위하여 대형 보 부재의 균열 유도 실험에서 발생하는 균열 부위에 센서를 부착하여 센서의 색변화를 통해 균열 폭을 도출하고 균열 스케일로 측정된 실제 균열 폭 값과 비교하였다. 해당 실험은 보 부재 내부의 철근 배근에 따른 휨 및 전단 균열 형상을 파악하기 위한 것으로 보 부재의 크기는 $H600 \times B450 \times L3600\text{mm}$ 이고, Figure 10과 같이 균열 발생 초기 시점에 센서를 부착하여 하중 재하에 따라 진전 되는 균열 폭을 측정하였다.



Figure 10. Sensor attachment status for beam member crack monitoring

3.3.2 역학변색센서를 활용한 구조 부재 균열 폭 측정 결과

Table 2에 보 부재에서 발생한 균열의 진행에 따라 균열 스케일로 측정된 균열 폭과 역학변색센서의 변색 이미지 분석을 통해 도출한 균열 폭을 비교하여 나타내었다. 보 부재에 발생하는 균열은 사인장 균열로 센서와 일축 인장 방향으로 균열이 진전되지 않으므로 변색 범위에 대한 구분이 명확하게 관찰된 센서만을 대상으로 하였으며, 균열의 발생 위치의 변색 이미

Table 2. Results of comparison of crack width derived by image analysis and crack scale

Sensor NO.	A-4-1	A-4-2	A-4-3
Sensor image			
Cw by crack scale(mm)	0.050	0.250	1.400
Cw by color variation analysis(mm)	0.043	0.272	1.517
Sensor NO.	B-7-1	B-7-2	B-7-3
Sensor image			
Cw by crack scale(mm)	0.500	0.950	1.000
Cw by color variation analysis(mm)	0.528	0.611	0.482
Sensor NO.	C-6-1	C-6-2	C-6-3
Sensor image			
Cw by crack scale(mm)	0.250	0.600	1.700
Cw by color variation analysis(mm)	0.334	1.041	2.094

지에 초점을 맞추어 분석한 결과 값으로 균열 폭을 도출하였다. 그 결과, A부재와 C부재의 균열 폭은 실제 균열 스케일로 측정한 값과 유사한 결과가 도출되었다. 반면, B부재의 경우 균열 발생 부위 이외의 범위에서 변색이 관찰되었으며, 이 부분은 배제한 상태에서 분석하였으나 균열이 진전됨에 따라 센서에 의한 균열 폭 값의 정확도가 감소하는 경향이 나타났다.

구조 부재를 활용한 센서의 균열 폭 측정 결과에서 센서의 변색 이미지 분석을 통한 균열 폭의 측정 가능성은 확인되었으나, 센서의 제조 상태나 균열 이외의 변색 발생, 균열 형태에 따른 불규칙한 변색 등으로 인해 정확도 높은 데이터를 도출하기에는 한계가 있다는 것이 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 역학변색센서를 활용한 건축물 균열 모니터링 기술 개발을 위하여 센서의 변색 이미지 분석 기법을 개발하고 이미지 분석 결과와 균열 폭과의 상관 관계식을 도출하였다.

- 1) 역학변색센서의 변색 이미지를 정량적으로 분석하기 위하여 RGB, HSV 색좌표계를 이용하였으며, HSV 색좌표계를 이용할 때 색상 정량화가 유효한 것을 나타냈으며, HSV 중 H 값과 콘크리트 변형과의 선형증가 관계를 이용하여 균열 폭 도출이 가능함을 확인하였다.
- 2) 역학변색센서 촬영 이미지 중 배경 이미지 제거를 위한 분석 범위를 설정하고 센서 이미지 중 H값의 최대·최소값을 비교하여 변색 정도를 정량하고 콘크리트 변형과의 관계성을 도출하였으며, $dH(=H_{\max}/H_{\min})$ 값을 이용하여 콘크리트의 균열 폭을 도출할 수 있는 식을 제안하였다.
- 3) 본 연구에서 도출한 역학변색센서를 활용한 균열 폭 도출 기법의 검증을 위하여 보 부재에서 발생하는 균열을 모니터링한 결과 센서의 제조 상태 균열 이외의 변색, 불규칙한 균열 형태 등의 요인으로 정확한 균열 폭 측정에는 한계가 있었으나, 균열 폭 증가에 따른 센서의 변색이 뚜렷하게 관찰되었으며 변색 이미지 분석을 통하여 균열 폭 도출이 가능함을 확인하였다.
- 4) 본 연구에서 사용한 역학변색센서를 건축물 모니터링에 활용하기 위해서는 센서의 변색 이미지 분석 결과와 균열 폭과의 관계에 대한 다수의 데이터를 확보하여 더 높은 정확도를 갖는 균열 폭 도출 모델을 개발할 필요가 있으며, 센서의 장기적 활용 관점에서 실내 조건이 아닌 다양한 환경 조건에서의 검토품이 수행되어 할 것으로 판단된다.

요약

본 연구에서는 역학변색센서를 활용한 건축물의 균열 모니터링 기술 개발에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 콘크리트 시험체에 유도된 균열에 역학변색센서를 부착한 후 균열의 진행에 따른 변색 이미지를 촬영하였다. 그리고 센서의 변색 이미지 분석 결과와 균열 폭과의 관계식으로부터 균열 폭 도출 식을 제안하였다. 또한, 제안된 균열 폭 모니터링 기법의 검증을 통하여 건축물 균열 모니터링을 위한 역학변색센서의 활용 가능성을 확인하였다.

키워드 : 역학변색센서, 균열, 모니터링, 변색

Funding

Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement

Acknowledgement

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport(Grant 21CTAP-C163910-01).

ORCID

Gyeong-Chol Choe,  <http://orcid.org/0000-0001-9177-5327>

Hong-Seop Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-6777-8939>

Jun-Seo Jeon,  <http://orcid.org/0000-0001-5193-7184>

Mun-Hwan Lee,  <https://orcid.org/0000-0003-3168-9552>

Su-Jeong Pyeon,  <http://orcid.org/0000-0001-7768-5958>

Jeong-Soo Nam,  <http://orcid.org/0000-0002-9723-5994>

References

1. Kim EJ, Cho SJ, Sim SH. A recent research summary on smart sensors for structural health monitoring. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2015 May;19(3):10-21. <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.3.010>
2. Heo GH, Lee WS, Kim MG. Structural health monitoring system employing smart sensor technology part 1: Development and performance test of smart sensor. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2007 Mar;11(2):134-44.
3. Lee HS, Kim SK. Research trends of durability monitoring sensors for RC structures. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 2018 Jan;30(1):39-45.
4. Sim SH, Yoon HC, Kim EJ, Cho SJ. Infrastructure monitoring research using AI and sensing data. *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2022 Sep;26(3):13-9.
5. Jo BW, Lee YS, Kim JH, Kim DK, Yoon KW. Development of Structure Dynamic Characteristics Analysis System Prototype using Image Processing Technique. *The Journal of the Korea Contents Association*. 2016 Mar;16(3):11-21. <https://doi.org/10.5392/JKCA.2016.16.03.011>
6. Ryu DW, Park WJ. IT-based concrete technology. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 2015 Jan;27(1):31-5.
7. Kim JH, Shin YS, Min KW. Line laser image processing for automated crack detection of concrete structures. *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*. 2018 Jun;31(3):147-53. <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2018.31.3.147>
8. Cho HW, Yoon HJ, Park JJ. An experimental study on crack recognition characteristics of concrete structure based on image analysis according to illuminance and measurement distance. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2014 Feb;14(1):85-91. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.1.85>
9. Bae GJ, Seo MS, Lee SJ, Bae DH, Lee MK. Colorimetric detection of mechanical deformation in metals using thin-film mechanochromic sensor. *Advanced Materials Technologies*. 2021 Jul;6(10):2100479. <https://doi.org/10.1002/admt.202100479>
10. Bae GJ, Seo MS, Lee SJ, Bae DH, Lee MK. Angle-insensitive fabry-perot mechanochromic sensor for real-time structural health monitoring. *Advanced Materials Technologies*. 2021 Jun;6(8):2100118. <https://doi.org/10.1002/admt.202100118>
11. Kim HS, Kim GY, Son MJ, Choe GC, Nam JS. Strain rate effects on the compressive and tensile behavior of bundle-type polyamide fiber-reinforced cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Mar;160:50-65. <https://doi.org/>

10.1016/j.compositesb.2018.10.008

12. Kim HS, Kim GY, Gucunski N, Nam JS, Jeon JK. Assessment of flexural toughness and impact resistance of bundle-type polyamide fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2015 Sep;78:431-46. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.011>
13. Pyeon SJ, Choe GC, Kim HS, Kim GY, Nam JS. An experimental study on the applicability of mechanochromic sensors for monitoring tensile strain of concrete materials. *Journal of The Korea Institute of Building Construction*. 2021 Dec;21(6):573-81. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2021.21.6.573>
14. Kim JS, Jung GI, Lee TH, Choi JH, Oh HB, Kim AH, Jung HC, Jun JH. Detection of color information using optical method. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. 2015 Jan;64(1):159-64. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.1.159>
15. Lee SK, Park YS, Lee GS, Lee JY, Lee SH. An automatic object extraction method using color features of object and background in image. *Journal of Digital Convergence*. 2013 Dec;11(12):459-65. <http://dx.doi.org/10.14400/JDPM.2013.11.12.459>