

병렬저항회로에 기반한 표면 전도성 균열감지패턴을 사용한 콘크리트 휨 부재의 균열 감지

신경준^{1*}, 이도근², 홍재현³, 신동찬³, 채중현³

Crack Monitoring of RC beam using Surface Conductive Crack Detection Patterns based on Parallel Resistance Network

Kyung-Joon Shin^{1*}, Do-Keun Lee², Jae-Heon Hong³, Dong-Chan Shin³, Jong-Hyun Chae³

Abstract: A large number of concrete structures are built and used around the world. To ensure their safe and continuous use, these structures require constant inspection and maintenance. While man-powered inspection and maintenance techniques are efficient, they can only provide intermittent status checks at the time of on-site inspection. Therefore, there is a growing need for a system that can continuously monitor the condition of the structure. A study was conducted to detect cracks and damage by installing a conductive coating on the surface of a concrete structure. A parallel resistance pattern that can monitor the occurrence and progression of cracks was developed by reflecting the structural characteristics of concrete structure. An empirical study was conducted to verify the application of the proposed method. The crack detection pattern was installed on the reinforced concrete beams, and the crack monitoring method was verified through applying a load on the beams.

Keywords: Cracks, Detection, Monitoring, Conductive parallel pattern, Concrete

1. 서 론

우리나라의 산업화가 진행됨에 따라 많은 수의 사회기반시설물이 지속적으로 건설되었다. 산업화의 성숙기에 접어들어 노후 시설물의 비중이 지속적으로 증가하고 있으며, 2020년 이후에는 노후화된 시설물의 수가 현재의 2배 이상 집중될 것으로 예상된다(Kim, 2015; Shin and Kim, 2015).

노후화된 시설물은 유지관리가 적절히 이루어지지 않을 경우 구조물의 목표 사용수명을 담보할 수 없으며, 극단적인 경우에는 인명과 경제적 손실이 매우 큰 사고 등으로 이어질 수 있다. 따라서, 노후화된 사회기반시설물의 안전성을 확보하기 위하여 정기적인 시설물의 점검과 안전진단이 필요하다. 우리나라는 지난 사고를 교훈 삼아 제도적으로 법령을 정비하였고, 유지관리를 꾸준히 수행하고 있다.

인력을 활용한 점검과 유지관리 기법은 효율적이긴 하지

만, 점검자의 주관적인 경험으로 진단과 분석이 이루어지기 때문에 진단결과의 신뢰도에 편차와 한계가 있을 수 있다. 또한, 현장 점검이 이루어지는 시점에서 단속적인 상태에 대한 점검만 가능한 실정이다.

이에 남해대교, 진도대교 등의 케이블 교량과 같이 상시 모니터링이 필요한 중요 구조물에 대해서는 상시 모니터링 시스템을 운용하고 있다. 그러나, 시설 구축에 많은 비용이 소요되고 데이터의 이상 응답 측정 수준에 머물러 있는 실정이다(Kim, 2015; Shin and Kim, 2015). 이에 구조물의 상태를 정밀하고 지속적으로 계측할 수 있는 센서 및 시스템의 필요성이 높아지고 있으며, 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

전통적인 매립식 또는 접촉식 센서들을 이용한 모니터링은 센서가 부착된 국부적인 위치에서만 구조물의 거동을 계측할 수 있고, 센서의 수명이 구조물과 비교하여 짧으며, 특히 매립형 센서의 경우 교체가 불가능한 단점이 있다.

콘크리트 구조물에 발생하는 균열이나 손상을 감지하기 위한 연구도 많이 수행되고 있으나, 이미 발생한 균열의 국부적인 정보를 정확하게 모니터링 하는 것에 초점을 맞춘 방법이 다수이다.

균열이나 손상 발생시에 방출되는 소음을 감지하여 위치를 탐지하는 AE (Acoustic Emission) 기법 등이 오래전부터 연구됐으나, 제한된 환경에서만 적용할 수 있는 단점이 있다.

¹정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

²정회원, 충남대학교 스마트인프라건설연구소 연구원

³학생회원, 충남대학교 토목공학과 학부생

*Corresponding author: kjshin@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

최근 재료 자체의 전기적 특성을 활용한 자기감지 콘크리트의 연구개발이 광범위하게 진행되고 있다. 특정소재를 혼합하여 콘크리트를 전도체로 제작하여, 균열이나 손상으로 유발되는 전기적 특성 변화를 감지하는 방법이다. 기본 원리는 간단하지만, 콘크리트 구조물 또는 콘크리트 표면의 균열에 의한 유발되는 미세하고 국부적인 전기적 특성 변화를 감지하는 일은 쉽지 않은 일이다. 소규모 부재의 직접인장실험과 같이 단순한 역학적 조건에 대하여 균열을 성공적으로 감지한 결과가 보고되었고(Kim et al., 2022), 관련하여 실용화를 위한 다양한 연구 개발이 진행되고 있으나, 아직 실질적으로 구조물에 적용된 기술은 없는 실정이다(Cheng et al., 1989; aukkonen et al., 1999; Cheney et al., 1999; Cheney et al., 1999).

전기 비저항 영상법(electrical resistivity tomography, ERT) 나 전기 임피던스 영상법(electrical impedance tomography, EIT) 기법과 같이 전도성 물체의 경계에서 전기적 특성을 계측하여 내부 정보를 추정하는 방법도 연구되고 있다. 계측하는 영역 전체에 대한 손상을 탐지할 수 있는 장점이 있어, 향후 기술 발전이 이루어진다면 구조물 내의 손상 탐지 등에 유용할 것으로 기대된다(Hallaji et al., 2014). 그러나, 아직 실규모 부재에 적용된 사례가 없고, 소규모 검증 실험만 이루어진 실정이다. 또한, 대규모의 연산이 필요한 기법들이기 때문에 구조물의 계측에 실시간으로 직접 활용하기 어렵다.

광섬유는 여러 기법으로 온도와 변형을 계측에 활용되었다. 최근, BOTDA (Brillouin optical time domain analysis) 과 같이 광섬유 내부의 임의의 위치에서 변형을 변화를 감지하는 기술 등이 개발되었다. 이러한 광섬유센서 기술에 기반한 신경망 센서(Park et al., 2020)를 구조물에 적용한다면 구조물의 국부적인 변형을 변화와 전역적인 변형을 분포 등을 함께 측정할 수 있어 상시 모니터링 등에 활용도가 매우 높을 것으로 판단되나, 관련 장비가 매우 고가이어서 아직 범용적으로 사용하기가 어려운 실정이다.

영상촬영기법으로 구조물의 표면에 발생하는 균열과 손상을 감지하는 사례도 보고되었다. 소규모 실험실 시험체 등에서 정밀하게 균열 정보를 측정할 수 있었고, 드론을 활용하여 대규모 구조물의 진단을 수행한 사례도 있다. 그러나, 활용에 많은 제약이 있어서 구조물의 상시 모니터링 용도로 적용하기는 어렵다.

이와 같이 전역적으로 발생하는 구조물의 균열을 감지하기 위한 여러 가지 시도는 이루어지고 있으나 아직 실용적인 방법은 없는 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 전도성 도막을 사용하여 콘크리트 부재에 발생하는 균열이나 손상을 감지하는 기법을 개발하고자 한다. 전도성 도막이 설치된 구조물에 균열이 발생하면 도막의 전기적 특성이 변화하는 원리에 기반하여, 보 구조물에

발생하는 균열의 발생과 진전을 감지할 수 있는 병렬저항패턴을 개발하였다. 철근 콘크리트 보 부재를 제작하였고, 하중 재하 실험을 통해 제안된 병렬균열감지패턴의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 기본 개념

2.1 균열 및 손상 감지 원리

본 연구에서는 구조물의 역학적 거동에 적합한 균열 감지 패턴을 설치하여, 구조적 작용에 의해 발생하는 균열을 모니터링 하는 것을 목표로 한다. 콘크리트 부재의 표면에 전도성 도막을 설치한다. 콘크리트에 균열이 발생하면 표면 도막이 손상되어 전기저항의 변화가 발생하며, 이를 측정하여 균열을 감지하는 것이 기본원리이다.

Fig. 1에 균열 감지 기본 개념을 도시하였다. 직접 인장 부재의 축방향으로 전도성 도막을 설치한다. 인장력에 의해 균열이 발생하면, 부재의 표면에 설치된 전도성 도막이 파단되며, 도막의 전기저항이 변화한다. 따라서, 전기 저항의 변화를 감지하면 균열 발생여부를 확인할 수 있다.

2.2 병렬 패턴을 활용한 균열 감지 기법 개발

기본 원리에 따라 보와 같은 구조물의 하단부에 1열로만 전도성 도막을 배치하여도 균열 발생 여부를 확인할 수 있지만, 그것만으로 균열에 대한 충분한 정보를 얻기는 어렵다. 여러 개의 감지선을 설치하면 얻을 수 있는 정보도 많아지지만, 그에 따라 측정해야 하는 전극수도 늘어나는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 하나의 전극으로 균열의 발생과 진전을 감지할 수 있는 균열감지병렬패턴을 개발하였다.

개발된 방법은 균열을 감지하는 그림 1의 전기저항선을 기본으로 한다. 구조물에 발생하는 균열을 쉽게 감지할 수 있도록, 균열이 진전하는 방향에 수직으로 여러 개의 저항선을 설치하고, 이를 연결하여 Fig. 2와 같이 하나의 병렬패턴으로 구성한다. 균열이 발생하여 수평감지선의 저항이 증가하거나 끊어지면 병렬회로의 저항이 변화하며 이를 측정하여 균열의 발생과 진전을 감지할 수 있다.

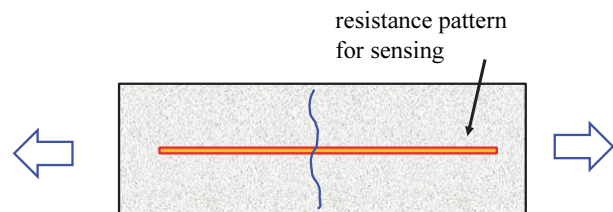


Fig. 1 Basic principles of crack detection using surface conductive coating

한편, 건설 구조물들은 주로 휨하중을 받으며, 구조물 또는 부재별로 역학적 거동과 균열 발생 경향을 명확하게 예측할 수 있다. 따라서, 부재의 구조적 특성에 따라 균열 발생 특성을 예측하여 균열 감지 회로를 구성할 수 있다.

정모멘트를 받는 휨부재는 부재 하단에서 최대 인장응력이 발생한다. 휨인장균열은 부재의 하부 연단에서 시작되고, 하중(모멘트)이 증가함에 따라 중립축이 상승하면서 상부로 진전한다. 따라서, 단계적으로 발생하는 균열을 감지할 수 있는 병렬 저항패턴 회로를 Fig. 2 와 같이 구성할 수 있다.

균열이 하연에서 발생하여 위로 진전하면 병렬회로의 수평 저항선이 아래쪽부터 순차적으로 파단되며, 그에 따라 감지 패턴의 저항값도 변화한다. 감지 패턴의 저항변화는 식 (1)의 병렬저항이론에 따라 계산 가능하다.

$$1/R = 1/r_1 + \dots + 1/r_5 + 1/r_6 \quad (1)$$

여기서, R은 병렬회로의 저항, r은 수평감지선의 저항을 뜻한다.

만약, 균열로 r1과 r2 저항선이 파단된 경우에는 병렬회로의 저항을 다음과 같이 계산한다.

$$1/R = 1/r_3 + \dots + 1/r_6 \quad (2)$$

이 방법은 단순하지만 효과적으로 균열감지선의 파단, 즉 균열의 발생과 진전을 감지할 수 있다. 또한, 큰 부재에도 쉽게 적용 가능하다.

단순한 원리에 따라 한계도 명확하다. 균열감지패턴이 설치된 이후의 변화만을 측정할 수 있다. 감지선을 통과하는 균열만 감지할 수 있고, 그 외의 위치에 발생한 균열은 감지할 수 없다. 또한, 모니터링 중인 병렬패턴의 저항이 증가하였다는 것은 ‘설치된 병렬 패턴의 수평감지선이 균열로 파단되었다’이며, 그 값의 변화량을 통해 파단된 수평감지선의 개수를 이론적으로 추정할 수는 있으나, 파단된 균열감지선의 위치를

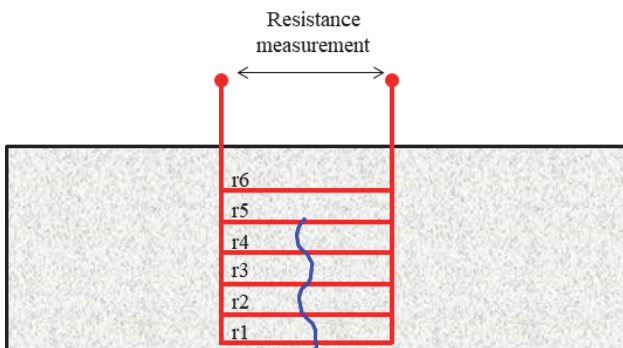


Fig. 2 Pattern for monitoring a flexural crack of beam

구분할 수 없다. 그리고, 균열의 폭이나 개수 같은 구체적인 정보도 확인할 수 없다.

제안된 방법은 세부적인 균열의 정보를 추정하기보다는, 전체 구조물의 구조 거동을 추정하는 측면에서 효율적으로 사용될 수 있을 것이다. 콘크리트 구조물에서 부재의 구조적 거동을 고려하여 저항패턴을 설계하면 효율적으로 구조물의 안전에 영향을 주는 균열을 감지할 수 있다. 예를 들어 하연에서 균열이 발생하여 진전하는 콘크리트 휨부재의 경우, 극한 상태 중립축 아래에 6개의 수평 감지선을 설치한다면 균열 발생부터 극한 상태에 이르는 하중 단계를 6단계로 구분하여 모니터링 할 수 있다. 이는 연성 설계가 적용된 철근콘크리트 휨부재의 구조거동을 모니터링하는 실용적인 측면에서 합리적인 것으로 판단된다.

3. 실험 연구

3.1 개요

앞서 소개한 병렬회로를 사용한 균열감지패턴을 검증하기 위한 실험연구를 수행하였다. 소규모 철근콘크리트 보를 제작하고 균열감지를 위한 패턴을 설치하였다. 부재에 대한 가력 실험을 수행하여 균열 발생과 진전을 모니터링 하였다.

본 연구에서는 개별 균열에 대한 국부적인 거동 보다는, 전역적인 구조 거동을 나타낼 수 있는 ‘처짐’ 또는 ‘하중’ 과 ‘계측 정보’ 간의 상관관계를 중심으로 실험을 계획하고 결과를 정리하였다.

3.2 부재 제작

3.2.1 철근콘크리트 보

실증 실험을 위해 철근콘크리트 보를 3개 제작하였다. 부재의 크기는 150 mm×150 mm×550 mm으로 3개가 모두 동일하며, 균열 발생시 급작스럽게 파괴되는 취성적인 성질을 제어하기 위하여 D13 철근을 1개 또는 2개 배치하였다. Fig. 3은 시험체의 단면을 보여준다.

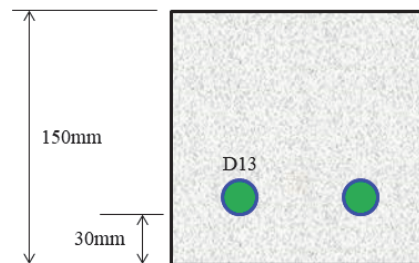


Fig. 3 Cross section of the beam

3.2.2 전도성 균열감지패턴

제작이 완료된 콘크리트보의 표면에 전도성 도료를 사용하여 균열감지 병렬저항패턴을 설치하였다. Fig. 4와 같이 보의 중앙부는 휨균열이 전형적으로 발생하며 이를 위한 패턴을 설치하였다. 보의 양단부에는 전단균열이 전형적으로 발생하며 이를 감지를 위한 패턴을 설치하였다.

시중에서 구할 수 있는 전도성 페인트는 구리, 니켈, 탄소, 흑연 등으로 제작된 것이 있다. 전도성 페인트에 대한 기본 특성은 제조사의 규격표와 사전 연구를 통해 확인하였다(Hong et al., 2022). 이 시험에서는 소요의 점성을 가지고 있어 패턴을 제작하기 용이하며, 도포 길이에 따라 측정 가능한 수준의 저항변화가 나타나는 니켈 페인트와 탄소 페인트를 사용하였다. 폭 10mm로 길이 100mm를 도포한 경우 니켈 페인트와 탄소 페인트는 각각 70옴과 9.90킬로옴 정도의 저항을 나타낸다.

도료는 붓을 사용하여 도포하였다. 한쪽 면은 니켈전도성 페인트(R1, R2, R3)를, 동일 시편의 반대쪽 면은 탄소전도성 페인트(R4, R5, R6)를 도포하였다. 중앙에 설치된 패턴은 R2와 R5이다. 5개의 수평으로된 균열감지 저항선(r1~r5)을 1cm 간격으로 설치하고, 이를 수직선으로 연결하여 병렬저항패턴을 구성하였다. 시공성을 고려하여 저항선의 폭은 1cm로 도포하였다.

3.3 실험 수행

철근콘크리트 부재에 균열감지회로를 도포하여 실험체를 완성한 후 250 kN 용량의 재료시험기로 휨하중을 가력하였다. 시험은 3등분점 재하 방법으로 수행하였다. 부재의 휨지간은 450 mm이고, 중앙에서 좌우 75 mm 떨어진 두 위치에 하중을 주었다. 하중은 0.5 mm/min 속도의 변위제어 방법으로 가하였다. 가력 도중 실험을 잠시 정지하여 균열을 관찰하였고, 전단균열이 진전되어 부재가 더 이상의 하중을 받을 수 없을 때까지 실험을 진행하였다.

균열감지 패턴의 저항은 데이터로거를 사용하여 측정하였다. 처음에는 National Instrument 사의 DAQ를 사용하여 측정하였으나, 나머지 부재의 탄소저항패턴은 저항의 측정범위가 넓은 Keysight 사의 계측기로 계측하였다.

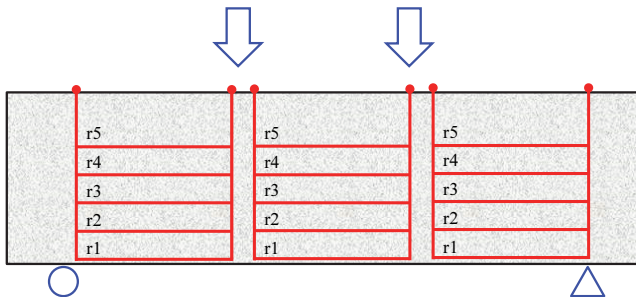


Fig. 4 Crack detection pattern applied on the beam

실험과정 중의 균열변화를 기록하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험체의 한쪽 면은 일정간격으로 사진 촬영을 하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 부재의 거동

부재 가력 및 균열 모니터링 시험모습을 Fig. 5에 나타내었다. 하중 재하에 따른 부재의 구조 거동을 나타내는 처짐과 하중의 측정 결과를 4.2절에 나타내었다. 실험 부재는 휨 철근만 배근되어 있다. 시험체는 짧은 전단지간을 가지며 전단 보강은 되어 있지 않기 때문에, 휨균열 먼저 발생하였지만 최종적으로 전단 균열이 진전하여 파괴되었다.

4.2 계측 결과

처짐-하중 곡선과 부재의 관찰 결과에 따르면, 하중이 증가함에 따라 중앙부에 휨균열이 먼저 발생하였다. 처짐이 증가함에 따라 휨균열이 진전하고 균열이 벌어졌다. 한편 하중이 지속적으로 증가함에 따라 전단 균열이 발생하였고 진전하였다. 취성적인 특성을 가진 전단균열은 균열 발생 이후 급격하게 균열이 진전하고 벌어졌으며, 이에 따라 부재의 하중 저항능력이 낮아지며 파괴되었다.

한편, 시험체에 균열이 발생하여 균열감지선을 통과하면서 균열감지패턴의 저항변화가 발생하였다. 균열이 감지패턴 내부에서 발생한 경우, 균열이 감지패턴의 수평 저항선을 명확하게 판단한다. 따라서, 감지패턴 저항값의 변화를 측정하여 균열 발생과 진전을 합리적으로 감지할 수 있었다.

그러나, 균열이 감지패턴의 경계를 따라 발생하거나 벗어날 때는 균열 감지가 어렵다. 이 연구는 균열감지패턴의 가능성을 확인하는 것에 중점을 두고 있어서, 단순하게 패턴을 구성하였다. 그러나, 만약 제안된 방법을 실제 적용한다면 균열 감지패턴을 중첩하여 시공하는 거나, 수직선을 기울여서 패턴을 구성하는 등의 방법으로 보완할 수 있다.

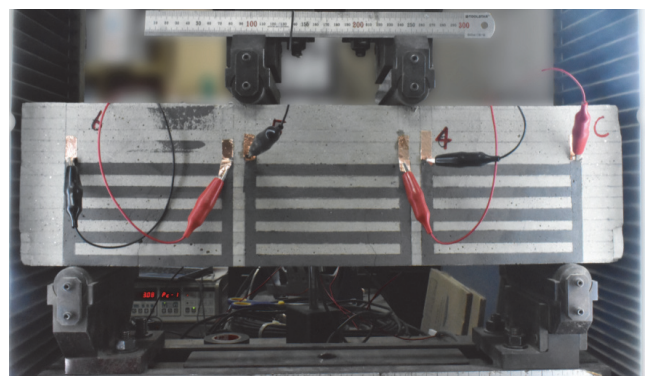
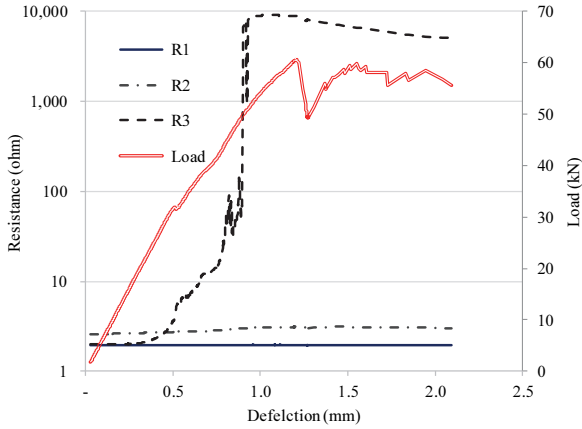


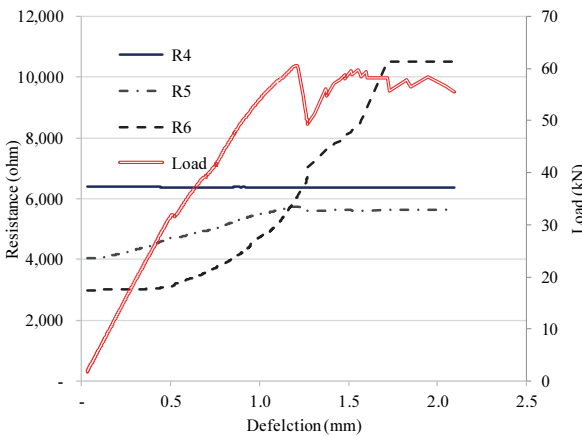
Fig. 5 View of the experiment

4.2.1 시험체 1

Fig. 6은 처짐의 증가에 따라 변화하는 하중과 감지패턴의 저항변화를 나타낸다. 전도성 니켈 페인트는 단위길이당 저항이 낮은 재료이며 설치된 저항패턴은 초기 저항이 10옴 이하였다. 실험이 진행됨에 따라 균열이 발생하여 저항패턴의



(a) Results for nickel patterns



(b) Results for carbon patterns

Fig. 6 Measurements for specimen 1

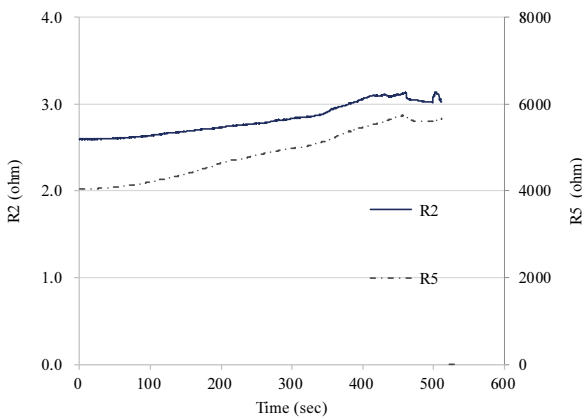


Fig. 7 Measurements for a flexural crack of the beam

저항이 증가하였다.

R2와 R5는 지간 중앙에 설치된 저항패턴으로 휨균열을 감지하는 목적으로 설치되었다. Fig. 7은 중앙부 감지패턴의 저항변화를 나타내었다. 시험 시작 약 100초 후(처짐 약 0.1mm 부터) 에 중앙부에 1개의 휨균열이 발생하였고, 그에 따라 R2 저항과 R5 저항의 변화가 발생하였다. 탄소패턴은 초기 4000 옴에서 휨균열의 진전에 따라 5800옴까지 저항값이 증가하였고, 니켈패턴은 2.0옴에서 3.6옴으로 값이 증가하였다.

Fig. 8은 실험이 종료된 이후의 시편의 모습을 나타낸다. 부재가 전단으로 파괴되었기 때문에, 휨균열은 시험이 끝날 때까지 미세한 균열폭을 유지하며 벌어지지 않았다. Fig. 7의 계측결과도 이러한 경향을 보여준다. 휨균열로 인하여 하연에서부터 세 개의 저항선이 파단된 것으로 나타났다.

R3과 R6은 전단균열의 발생과 함께 저항값의 급격한 변화가 발생하였다. 계측결과에 따르면 약 0.5mm의 처짐이 발생한 시점부터 전단균열이 발생하였다. R3은 초기 2옴에서 최대 9,000옴까지 증가하였고, R6은 초기 3000옴에서 10,500옴으로 증가하였다, 여기서 10,500옴은 사용된 NI 계측기가 측정 가능한 저항의 최대값으로 실제로는 그 이상임을 나타낸다. R3과 R6 패턴은 전단균열에 의해 수평선이 모두 파단되었다.

4.2.2 시험체 2

2번 시험체는 Fig. 9에 보인 것과 같이 휨균열이 중앙에서 벗어난 위치에서 발생하여 R1과 R4 패턴의 수직저항선을 부분적으로 파단하였다. 그러나, 균열을 감지하는 역할을 하는 수평 저항선에 영향을 주지 않았기 때문에, Fig. 10에서와 같이 R1과 R4 저항값은 휨균열에 의해 크게 변화하지 않았다.

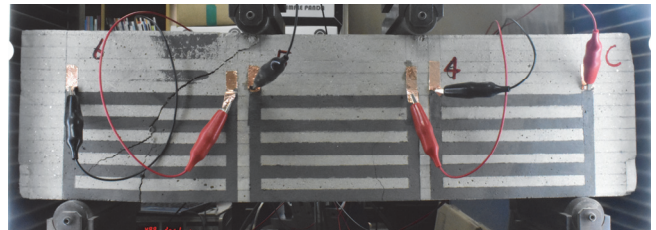


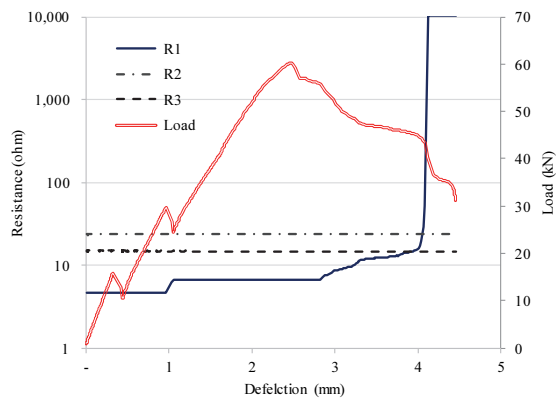
Fig. 8 View of the specimen 1 after testing



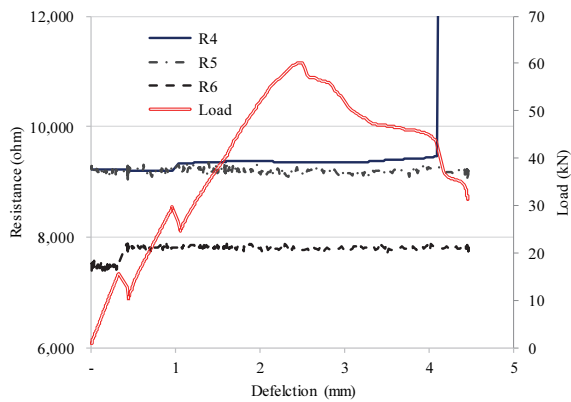
(a) R1 pattern

(b) R4 pattern

Fig. 9 Cracks occurred in R1 and R4 patterns for specimen 2

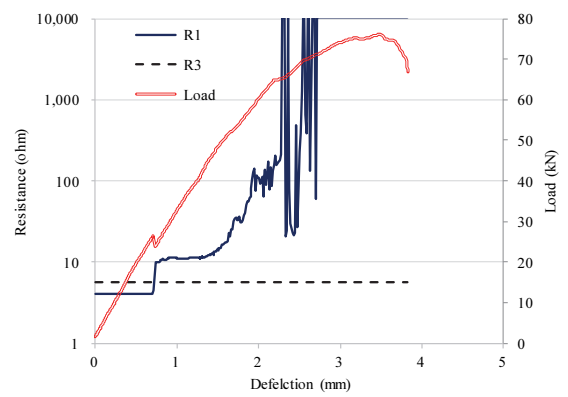


(a) Results for nickel patterns

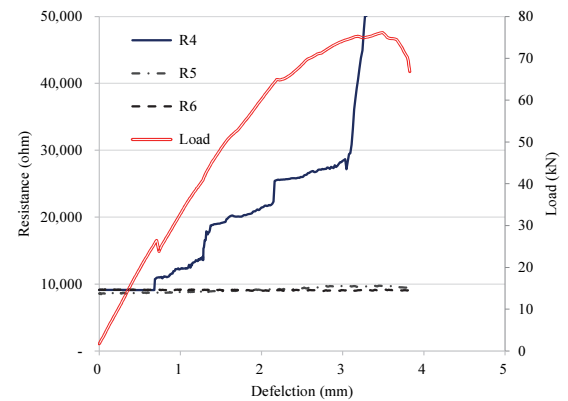


(b) Results for carbon patterns

Fig. 10 Measurements for specimen 2



(a) Results for nickel patterns



(b) Results for carbon patterns

Fig. 11 Measurements for specimen 3

이렇게 감지패턴이 없는 곳이나 수직저항선에 균열이 발생한 경우에는 발생을 감지 못하는 경우가 발생할 수도 있다. 따라서, 제안된 방법의 활용시에는 이러한 부분에 주의하여야 한다. 패턴의 모양을 변경하거나, 패턴을 중첩하는 등의 방법으로 보완할 수 있다.

전단균열은 R1과 R4 저항패턴을 통과하여 발생하였고, 전단균열 발생으로 부재가 파괴되었다. 따라서, R1과 R4 저항패턴은 전단균열 발생과 함께 저항이 급격히 증가하였다. 시험에 사용한 측정기는 측정할 수 있는 최대 저항이 12,000옴이었다. R1과 R4 패턴은 균열에 의해 수평저항선이 모두 차단된 것이다.

4.2.3 시험체 3

시험체 3의 측정결과를 Fig. 11에 나타내었다. 실험 중 촬영된 사진을 기준으로 분석하면, 시험 시작 후 110초 가량 지난 후(약 25kN) 휨균열과 전단균열이 발생하였고, 180초 경과한 시점(40kN)에 전단 균열이 진전하였다. 이후 하중의 증가에 따라 전단 균열이 추가 진행하면서 부재가 파괴되었다. 측정의 오류로 R2 패턴의 저항은 측정되지 않았다.

휨균열은 초기에 발생하였지만 Fig. 12와 같이 미세한 균열



Fig. 12 Flexural crack in R5 pattern after testing

폭으로 유지가 되었다. 중앙부에 위치한 R5 패턴의 저항은 휨균열의 진전에 따라 초기 8,600옴에서 9,600옴까지 증가하였고, 시험 종료시 하중이 일부 제거되면서 9,400옴으로 감소하였다.

하중 25kN 정도에서 전단균열이 시작되었고, 하중-변위곡선에서 국부적인 변동이 관찰되었다. 하중이 증가함에 따라 전단 균열이 위로 진전하면서 벌어졌고, 이러한 과정이 R1과 R4번 저항패턴에서 관찰되었다.

Table 1 Resistance variation of sensing patterns with respect to the number of broken line

Number of broken line	Nickel pattern (Ω)			Carbon pattern ($k\Omega$)			Average ratio
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	
0	6.94	14.54	5.38	7.80	9.12	8.90	1.00
1	7.09	14.73	5.41	7.86	9.56	9.22	1.02
2	7.88	15.42	5.70	8.70	11.13	10.09	1.12
3	10.95	20.37	7.38	11.80	14.86	13.29	1.50
4	24.10	43.55	14.06	27.35	30.26	28.16	3.18
5	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf

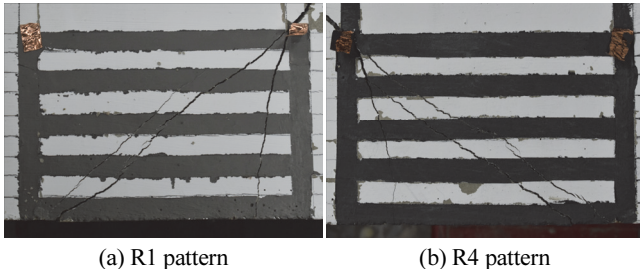


Fig. 13 Flexural and shear cracks occurred in specimen 3

R1저항 패턴은 Fig. 13에 보인 것과 같이 균열이 수평저항선을 모두 지나가면서 진전하였다. 따라서, 처짐 2.7mm에서 저항패턴의 저항선이 완전히 파단되어 저항값이 무한대가 되면서 측정이 더 이상 되지 않았다.

시험체3의 R4 감지패턴은 중앙이 아닌 단부에 설치되었지만 휨균열이 발생하였다. Fig. 14와 같이 R4패턴의 왼쪽에 휨균열이 발생하여 하중의 증가에 따라 진전하였고, 그에 따라 계단식으로 저항이 증가하는 것으로 관찰되었다.

4.3 균열감지 패턴의 저항변화

균열감지패턴의 저항은 수평 저항선의 파단에 따라 값이 변화하며, 이를 응용하여 균열의 발생과 진전 높이를 유추할 수 있다. 가력 시험이 끝난 부재의 손상되지 않은 패턴을 이용하여 저항선의 파단에 따른 병렬저항의 변화를 분석하였다. 하단에서부터 하나씩 저항선을 끊어서 패턴의 저항변화를 측정하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

앞서 하중 가력 실험에서 얻어진 저항값의 변화 경향과 유사하지만 다소 차이는 있었다. 저항선을 직접 끊은 결과인 Table 1은 저항선의 파단과 함께 명확한 값의 증가가 나타났지만, 시험 결과의 저항값은 점진적인 변화를 보였다. 이는 가력실험에서 저항선이 한번에 파단되지 않고 균열의 진전에 따라 천천히 파단되었기 때문이다.

5개의 수평선이 병렬로 연결된 회로에서 수평 감지선의 파단에 따른 저항값의 증가율은 초기에는 낮고, 개수가 많아질수록 높아졌다. 감지선이 하나씩 차례로 파단되면서 감지패턴의

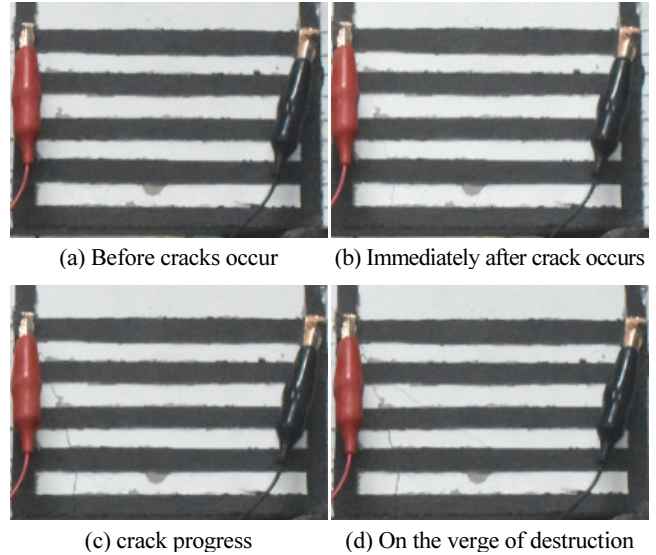


Fig. 14 Crack progression process of R4 pattern

저항은 2%, 12%, 50%, 200% 증가하였으며, 모든 수평선이 파단되면서 무한대 값을 보였다. 따라서, 균열감지패턴의 저항변화를 측정하여 구조물의 균열 진전을 감지하고, 구조물의 위험성 진단을 실시간으로 합리적으로 할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구는 콘크리트 구조물에 발생하는 균열의 발생과 진전을 감지하기 위하여 표면에 설치하는 병렬저항회로의 균열감지패턴을 제안하였고, 실험을 통하여 그 적용성을 검증하였다.

- (1) 콘크리트 구조물의 표면에 전도성 도막을 사용하여 균열 감지용 저항패턴을 설치하였다. 저항선이 파단되면 저항값이 변하는 기본원리를 응용하여, 균열이 발생하여 진전하는 방향에 수직으로 다수의 저항선을 병렬로 설치하였다. 균열이 발생하면 저항선이 파단되어 감지패턴의 저항값이 변화하고, 이를 모니터링하여 균열의 진전 높이를 추정할 수 있다.

- (2) 휨 부재를 대상으로 실증실험을 수행하였다. 니켈페인트와 탄소페인트를 사용하여 부재의 옆면에 각각 균열 감지패턴을 설치하였다. 부재의 한면에 3개의 패턴을 설치하였다. 부재에 하중을 가하여 변형과 균열을 발생시켰고, 계측장비로 균열 감지패턴의 저항값을 모니터링 하였다.
- (3) 균열이 발생함에 따라 균열감지패턴의 저항값은 변화하였다. 균열감지패턴의 수평감지선은 균열의 진전에 따라 순차적으로 파단되어 감지패턴의 저항변화가 나타났다. 두 개 이상의 감지선 파단은 10% 이상의 큰 저항변화를 유발하였다. 따라서, 균열감지패턴의 저항변화를 측정하여 하중에 의하여 발생하는 구조물의 균열 진전을 효과적으로 감지할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 제안된 방법은 복잡한 계측장치와 분석절차없이 간단한 원리로 균열감지패턴이 설치된 위치의 균열 발생과 진전을 감지할 수 있었다. 명확한 한계를 가지고 있지만 실용적인 측면에서 구조물의 균열을 감지하여 위험 상황을 파악하는 용도로 합리적으로 사용될 수 있을 것이다.

향후 구조물의 형식과 거동에 따라 균열감지패턴을 최적화하고 균열 감지 정밀도를 높이는 방법 등에 대한 추가 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 정부의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구이며 지원에 감사드립니다(NRF-2021R1A2C1094923).

References

1. Kim, Y. S. (2015), Paradigm Shift in Maintenance Policy for Infrastructure, Korea Infrastructure Safety Agency (in Korean).
2. Shin, C. G., and Kim, K. J. (2015), The 2nd Forum on Future Policies Civil Engineers Proposal for Safe Society-Preparation Strategy for the Aging SOC, Seoul: Korean Society of Civil Engineers, 4, 26-40 (in Korean).

3. Kwon, J. H., Han, S. S., and Kim, S. G. (2018), Integrated maintenance management system for ultra-long girder bridges, Proceedings of the 2018 Annual Meeting of the Korean Society of Civil Engineers (in Korean).
4. Chung, B. S, Kim, B. Y, Kang, J. W., and Hwang, J. H. (2019), Electrical impedance tomography technique for material property reconstruction of concrete structures, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 32(4), 249-256 (in Korean).
5. Cheng, K. S., Isaacson, D., Newell, J. C., and Gisser, D. G. (1989), Electrode Models for Electric Current Computed Tomography, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 36(9), 918-924.
6. Vauhkonen, P. J., Vauhkonen, M., Savolainen, T., and Kaipio, J. P. (1999), Three-Dimensional Electrical Impedance Tomography based on the Complete Electrode Model, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46(9), 1150-1160.
7. Cheney, M., Isaacson, D., Newell, J. C., Simske, S., and Goble, J. (1999), NOSER: An Algorithm for Solving the Inverse Conductivity Problem, *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2(2), 66-75.
8. Cheney, M., Isaacson, D., and Newell, J. C. (1999), Electrical Impedance Tomography, *SIAM Review*, 41(1), 85-101.
9. Park, S. Y, Kim, S. T, Park, Y. S., and Park, Y. H. (2020), Crack monitoring of reinforced concrete beams using neural network sensors, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2020-06 (in Korean).
10. Hallaji, M., Seppa, A., and Pour-Ghaz, M. (2014), Electrical Impedance Tomography-based Sensing Skin for Quantitative Imaging of Damage in Concrete, *Smart Materials and Structures*, 23(8), 085001.
11. Kim, T. W, Kim, M. K, and Kim, D. J. (2022), Investigation of electro-dynamic behavior of smart ultra-high strength fiber-reinforced concrete under bending loading, *Proceedings of the Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(5), 57-65 (in Korean).
12. Hong, J. H., Jang, S. J., Choi, C. M., and Lee, D. G. (2022), Conductive paint characterization for sensing system development, Proceedings of the Spring 2022 Conference, v.26 n.1 (2022-04), 129, Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection (in Korean).

Received : 07/11/2023
 Revised : 10/02/2023
 Accepted : 10/05/2023

요 지 : 세계적으로 많은 수의 콘크리트 구조물이 건설되어 사용되고 있다. 구조물을 안전하고 지속적으로 사용하기 위해서는 꾸준한 점검과 유지관리가 필요하다. 인력을 활용한 점검과 유지관리 기법은 효율적이긴 하지만, 현장 점검이 이루어지는 시점에 대한 단속적인 상태에 대한 점검만 가능하다. 이에 구조물의 상태를 연속적으로 모니터링 할 수 있는 시스템의 필요가 높아지고 있다. 따라서, 콘크리트 구조물의 표면에 전도성도막을 설치하여 균열 및 손상의 탐지하는 연구를 수행하였다. 콘크리트 구조물의 구조적 특성을 반영하여 균열의 발생과 진전을 모니터링 할 수 있는 병렬저항 형식의 균열감지패턴을 개발하였고, 이에 대한 실증연구를 수행하였다. 철근콘크리트 보부재를 제작하여 균열감지패턴을 설치하였고, 하중가력실험을 통해 균열 모니터링의 가능성을 검증하였다.

핵심용어 : 균열, 감지, 모니터링, 전도성 병렬 패턴, 콘크리트