무선주파수를 응용한 건축부재의 손상자현 시스템에 관한 연구

A Study on the Diagnostic System for Architectural Elements Using Radio Frequency

김 동 현¹⁾

최 영 화^{2)*}

Kim, Dong Hyun Choi, Young Wha

Abstract

Reinforced concrete buildings will be deteriorated as passed time or effect of an earthquake, etc in main elements. In order to manage such cracks, time and efforts, expense, etc, are required. So micro lead switch sensors are embedding or bonding in flexible specimens, and these are smart elements for diagnostic crack damages by external force such as physical load, dynamic load, etc in this study. The monitoring to crack damages are studied using radio frequency system. If load is received on the center of flexible specimens, embedded and bonded lead switch sensors will be destroyed, and these become to send signals of damages at radio frequency system connected with lead switch sensors. This study is fundamental research of the diagnostic system for architectural elements using radio frequency.

Keywords : Flexible Specimen, Crack, Damage, Lead Switch Sensor, Radio Frequency, Signal of Damage

1. 서 론

최근 뉴질랜드의 크라이스트처치 (Christchurch)와 일본 동북부 후쿠시마현에서 발생한 지진 등으로 외력에 대한 건축구조물의 구조적 안전성에 대해 관심이 증대되고 있다. 국내외적으로 고에너지의 동적하중이 건축구조물에 작용하면 건축구조물을 구성하고 있는 주요 부재(Element)가 스스로 위험을 알려주는 기능에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 연구는 건설·건축구조물에 주요 구성요소인 콘크리트 부재와 철골 부재에 센서를 매입하거나 부착하여 주요 부재에 발생한 손상을 검토했는 연구가 주로 이루어지고 있으며, 새로 건설되는 중요 구조물이나 터널 및 발전소 등에 연구과제로 개발된 계측시스템을 적용하는 사례가 늘고 있다. 이들을 이용한 연구는 대부분 국내외 센서와 계측기 (Data Logger)를 사용하고 있고 이러한 계측기 및 계측비용이 고가이며, 이들 기기들을 이용하여 검출된 구조물 손상의 자료(Data)를 검토하기 위해서는 별도의 전문성이 요구되고 있는 실정이다. 따라서, 시공 중인 건설현장의 여러 여건상 이들 계측 센서를 매입하거나 부착하여 이를 계측기에 연결하는 문

제가 매우 번거로운 작업이기 때문에 현장적용성에 한계가 발생하여 왔다. 이러한 문제를 해결하기 위해 시공 중인 건설재료가 콘크리트일 경우, 센서와 계측기의 연결성에 대한 문제를 단순화하고 무선 주파수 (Radio Frequency)를 이용하였다.

본 연구는 구조물 내부의 여러 휨부재에서 발생할 수 있는 심각한 균열손상에 대한 정보를 스스로 알려주는 기능성 건축부재를 위한 시스템의 기초적 연구이다.

2. 연구 동향

건축부재에서 발생한 손상검토에 대한 국외연구로 Sandettin Orhan et al (2005)는 충격반향기법을 이용하여 균열손상을 입은 보의 해석에 대한 연구를 하였다. 축소모델을 이용하고 모델에 발생한 균열의 폭과 위치를 파악하기 위해 충격파를 가진하여 주파수 영역에 대한 비교분석을 수행한 연구를 하였다. Jri Zacal et al (2006)는 초음파 전달 단층촬영기법을 위한 파동방정식과 계측 센서의 교정에 대한 연구를 하였다. 일방향 전달파에 대하여 Single-frequency Wave 방정식을 이용하여 실질

1) 정회원, 대구대학교 건축공학과 연구교수

2) 정회원, 대구대학교 건축공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : ywchoi@daegu.ac.kr 053-850-6512

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

적인 기하학적 조건에 대한 결과를 획득하기 위한 연구를 하였다. Chung Bang Yun et al (2006)는 진동정보를 이용하여 강거더 교량 (Steel Girder Bridges)의 손상검토에 대한 연구를 하였다. 모달 (Modal) 변형에너지를 기초로 한 손상검토 방법을 한남대교에 적용하여 수치해석과 실험을 수행한 연구였다. C.P. Fritzen et al (2009)는 스마트 구조시스템의 동적 특성을 이용한 자기손상자원에 대해 연구를 하였다. SHM (Structural Health Monitoring)을 위해 주파수와 시간영역에서 칼만 필터 (Kalman Filters)를 이용한 진동해석법을 이용하여 토목구조물과 항공기 등에 발생한 손상을 검토하는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

건축부재에서 발생한 손상검토에 대한 국내연구로 김화중 (2008) 등은 무근과 철근콘크리트 부재내부에 ϕ 6mm의 유리관 스위치 센서를 제작하여 외력에 의해 균열손상이 발생하면 이를 LED로 나타내어주는 스마트 콘크리트에 대해 연구를 하였다. 이종원 (2011)은 분포형 광섬유센서와 변형률 모드를 이용한 구조물의 손상탐지기법에 대해 연구를 하였다. 분포형 광섬유센서에서 측정되는 동적 변형률 자료로부터 구조물의 고유진동수와 변형률 모드를 구하고 이를 이용하여 구조물의 손상을 탐지할 수 있는 연구를 하였다.

이들 대부분의 연구는 수치해석을 이용하여 구조물 또는 주요 부재에서 발생하는 손상을 검토하거나 진동센서를 이용하여 탄성파가 구조물이나 주요 부재내부를 통과할 때 발생하는 시간영역과 주파수영역에서 발생하는 변위차를 이용하여 손상을 검토하는 방법에 대한 연구가 대부분이었다. 그러나, 철근콘크리트 내부에 손상검토형 센서를 매입하는 경우는 이미 건설된 건축물에 적용하기에 어려운 문제점이 발생하였다.

3. 실험 및 해석 모델

3.1 실험 계획

이미 건설된 건축구조물을 구성하고 있는 주요 철근콘크리트 부재에 외력으로 인하여 균열이 발생한 경우에 이를 주요 부재 스스로가 구조물의 관리자나 거주자에게 손상 및 위험신호를 무선으로 전달하는 시스템을 개발하기 위하여 미장층 및 부재의 표면에 부착하는 형태의 센서로써 리드 스위치 (Lead Switch)를 이용하였다. 리드 스위

치는 비활성 가스를 충전한 박막의 파이렉스 유리관 속에 봉입되어 있는 스위치 센서이다. 코일에 전류를 흘리면 자력선이 자성체로 만들어진 리드내부로 많이 통과하기 때문에 자기적 흡인력이 생겨 접촉하게 되며, 다른 곳에서 오는 신호에 의해 코일에 전류가 흐르게 되면 자기장이 형성되어 스위치 역할을 하는 센서이고, 점점의 동작과 복귀가 빠르며 신뢰도가 높아 자동 전화교환기 등에 사용되는 센서이다. Fig. 1은 3종류의 리드 스위치를 철근콘크리트 부재의 미장층이나 부재 표면에 부착하기 위한 위치 및 형태를 나타내고 있다.

Table 1은 실험에 사용된 센서의 종류, 크기 및 재료를 나타내고 있으며, Table 2는 시멘트 모르타르로 피복된 하우징 센서의 크기와 재료적 조성을 나타내고 있다.

리드 스위치 센서가 콘크리트 내부에 매입될 경우에 물 (H_2O) 등이 센서 내부에 침투하여 센서의 오동작이 발생시킬 수 있으므로 합성고무의 원료인 클로로프렌(Chloroprene)으로 코팅하였고, 골재의 타설 등의 영향으로 발생할 수 있는 센서의 파손을 방지하기 위하여 시멘트 모르타르로 센서의 하우징 (Housing)을 처리하였다. Fig. 2는 시멘트 모르타르로 하우징되기 전의 센서들을 나타내고 있으며, Fig. 3은 시멘트 모르타르를 타설하기 전의 클로로프렌을 이용한 센서의 방수처리와 시멘트 모르타르로 양생된 리드 스위치 센서들을 나타내고 있다.

리드 스위치 센서를 $40 \times 40 \times 160$ mm 크기의 시멘트 모르타르 시험체에 매입하여 휨시험체를 제작하였다. Fig. 4는 휨시험체에 내포하기 위해 하우징된 센서가 매입된 휨시험체들을 나타내고 있다. Fig. 5는 하중재하에 따라 휨시험체에 발생한 휨 모멘트 (Bending Moment)에 의해 균열손상이 발생하면 휨시험체 내부의 센서가 동작하여 손상된 정보를 RF시스템으로 전달하는 방법을 나타내고 있다. Fig. 6은 센서에 전달된 손상자료를 무선으로 수신하기 위해 RF방식의 상용 무선 송수신기를 나타내고 있으며, Table 3은 무선 송수신기의 크기 등을 나타내고 있다. 본 연구에 이용된 리드 스위치 센서는 휨변형으로 센서의 파괴가 발생하기 전의 상태가 off이고, 휨변형으로 센서의 파괴가 발생하면 동작하는 센서이다. 따라서, 휨시험체에 외력이 작용하지 않으면 센서의 저항값은 무한대이고, 외력이 작용하여 휨시험체에 균열손상이 발생하면 센서의 저항값은 0에 가까워져 RF 방식의 상용 무선송수신기를 동작시키도록 설계하였다.

현재 건축구조시험에 널리 이용되고 있는 변형률 센서

(a) Mortar Coat of RC Beam

(b) Sensor and Position

Fig. 1 Plan of Sensor Specimens

Table 1 Size of Sensors and Materials

Lead Switch Sensor	Length(mm)	Diameter(mm)	Housing Material
Sensor 1	9.64	1.72	Pyrex
Sensor 2	13.54	2.09	Pyrex
Sensor 3	47.01	5.13	Pyrex

나 균열 게이지 등은 후크의 법칙 (Hook's Law) 처럼 하중이 증가하면 센서의 저항값이 증가되도록 설계되어 있다. 따라서, 이러한 센서를 이용하여 무선 손상자현시스

템으로 응용하기 위해서는 센서의 저항 변형을 측정할 수 있는 별도의 데이터 로거 (Data Logger)가 요구되고 균열손상의 증가량을 원거리로 전송하기 위해서는 데이터 전송시스템과 이에 따른 별도의 컴퓨터가 필요하다. 이러한 시스템의 가격은 고가이기 때문에 현장에 적용하기 위해서는 비용적 측면의 문제가 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 건설현장에서의 적용성을 증대하기 위해 저가격의 단순한 RF 상용무선 송수신기를 적용하였다.

Table 2 Size of Housing and Materials for Embedded Sensors

Lead Switch Sensor	Size (mm)	Material (C:S:W)
Sensor 1	10×10×60	1:2.45:0.485
Sensor 2	15×15×70	1:2.45:0.485
Sensor 3	20×20×100	1:2.45:0.485

C: Cement, S: Sand, W: Water Cement Ratio

Fig. 2 Used Lead Switch Sensors

Fig. 3 Coating and Housing of Sensors

3.2 해석 모델

시멘트 모르타르 하우징된 센서를 미장층에 부착하기 위해 시멘트 모르타르 휨시험체 내부에 매입된 경우와 휨시험체 외부의 모르타르층에 센서가 부착된 경우를 비교하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 Midas 프로그램을 이용하였다. 휨시험체의 내부에 리드 스위치센서가 매입된 위치와 외부에 부착되어 있는 위치에 대한 하중-변위를 비교하였다.

Table 4는 휨시험체의 외부에 부착하기 위한 센서의 하우징 크기와 재료적 조성을 나타내고 있다. Fig. 7은 휨시험체 내부에 센서가 매입되어 있는 경우와 휨시험체 표면의 모르타르층에 센서가 내포되어 있는 경우에 대한 유한요소해석 모델을 나타내고 있다. 시멘트 모르타르 휨시험체의 외부에 부착하기 위한 유한요소해석결과에서 센서가

Specimen 1 (Small)

Specimen 2 (Middle)

Specimen 3 (Large)

Fig. 4 Embedded Housing Sensor

Fig. 5 Damage Detection using Radio Frequency System

내부에 매입된 경우와 휨시험체 표면의 미장층에 내포된 경우는 하중재하에 따른 수직 변위차가 미소한 것으로 나

Transceiver

FM Repeater

Small Transmitter

Vibration Transmitter

Fig. 6 Radio Frequency Transceiver for Experiment

Table 3 Size of Radio Frequency Transceiver

Type of RF Moudle	Size (mm)	Power (Volt)
Transceiver	250X160X40	DC 12
FM Repeater	150X70X30	DC 6
Small Transmitter	50X45X10	DC 3
Vibration Transmitter	22X60X30	DC 3

Table 4 Mortar Coat and Materials for Bonded Sensors

Lead Switch Sensor	Size (mm)	Material (C:S:W)
Sensor 1	10×10×60	1:2.45:0.485
Sensor 2	10×10×70	1:2.45:0.485
Sensor 3	15×15×100	1:2.45:0.485

C: Cement, S: Sand, W: Water Cement Ratio

타났다. Fig. 8은 휨시험체의 외부에 센서가 크기별로 부착되었을 때의 하중재하에 따른 각 센서들의 위치별 수직 변위차를 나타낸다. Fig. 9는 휨시험체 내부에 리드 스위치 센서가 매입된 휨시험체들과 비교하기 위해 휨시험체 측면의 표면에 시멘트 모르타르로 부착한 센서 시험체들을 나타내고 있다.

Fig. 7 Models of Finite Element Method

Fig. 8 Results of comparison by Position of Sensors

4. 실험 결과 및 분석

4.1 하우징 센서

리드스위치 센서 1이 매입되어 있는 10×10×60 mm 크기의 하우징 센서에 대한 휨시험을 하였다. Fig. 10은 하우징 센서 휨시험체의 중앙집중재하 시험을 나타낸다. 실험결과에서 하우징 센서의 내력 55%에서 손상정보

Fig. 9 Sensors of Mortar Coat on Flexible Specimens

Fig. 10 Experiments of Flexible Specimens

Fig. 11 Experiment of Mortar Housing Sensor 1

를 발신하는 것으로 나타났다. Fig. 11은 하우징 센서에 하중이 재하될 때, 하우징 내부센서의 저항을 측정하고 저항이 급격히 저하되는 부분이 센서가 동작한 시점을 나타낸다. Fig. 12는 리드스위치 센서 2가 매입되어 있는 $15 \times 15 \times 70$ mm 크기의 하우징 센서가 내력 27%에서 손상 정보를 발신하는 것을 나타낸다. Fig. 13은 리드스위치 센서 3이 매입되어 있는 $20 \times 20 \times 100$ mm 크기의

Fig. 12 Experiment of Mortar Housing Sensor 2

Fig. 13 Experiment of Mortar Housing Sensor 3

Fig. 14 Experiment of Embedded Sensor in Flexible Specimen

하우징 센서가 내력 36%에서 손상 정보를 발신하는 것을 나타낸다.

하우징 센서 1, 2와 3의 실험결과, RF 상용무선 송수신기에 의해 균열손상정보의 무선 전송시간은 센서 1, 센서 2, 센서 3의 순서로 센서의 크기가 증가될수록 지연되는 것으로 나타났다.

4.2 하우징 센서가 매입된 모르타르 휨시험체

Fig. 14는 시멘트 모르타르 하우징된 리드스위치 센서

Fig. 15 Experiment of Embedded Sensor in Specimen 1

Fig. 17 Experiment of Embedded Sensor in Specimen 3

Fig. 16 Experiment of Embedded Sensor in Specimen 2

1, 2와 3을 휨시험체 내부의 하단 중앙에 매입한 휨시험을 나타낸다.

휨시험체 1에 매입된 하우징 센서는 내력 10%, 14%, 20%에서 순차적으로 손상정보를 발신하는 것으로 나타났다. Fig. 15는 하중이 재하될 때, 휨 균열이 발생되어 휨시험체 내부에 매입된 $10 \times 10 \times 60$ mm 크기의 센서가 동작하여 시험체 외부에 연결된 RF발신기에 의해서 손상신호를 전송하는 것을 나타내고 있다. 휨시험체 2에 매입된 하우징 센서는 내력 19%, 34%에서 손상정보를 발신하는 것으로 나타났고, 휨시험체 3에 매입된 하우징 센서는 내력 21%, 28%, 36%에서 손상정보를 발신하는 것으로 나타났다.

Fig. 16은 하중이 재하될 때 휨 균열이 발생되어 휨시험체 내부에 매입된 $15 \times 15 \times 70$ mm 크기의 센서가 동작하여 휨시험체 외부에 연결된 RF발신기에 의해서 손상신호를 전송하는 것을 나타내고 있고, Fig. 17은 하중이 재하될 때 휨 균열이 발생되어 휨시험체 내부에 매입된

Fig. 18 Experiment of Bonded Sensors on Flexible Specimens

$20 \times 20 \times 100$ mm 크기의 센서가 동작하여 시험체 외부에 연결된 RF발신기에 의해서 손상신호를 전송하는 것을 나타내고 있다.

하우징 센서가 매입된 모르타 휨시험체 1, 2와 3의 실험결과에서 RF 상용무선 송수신기에 의해 균열손상정보의 무선 전송시간은 센서 1, 센서 2, 센서 3의 순서로 센서의 크기가 증가될수록 지연되는 것으로 나타났다.

4.3 모르타 휨시험체의 외부센서

Fig. 18은 휨시험체 옆면에 리드스위치 센서 1, 2와 3을 부착한 휨시험을 나타낸다.

휨시험체 옆면에 리드스위치 센서가 부착된 휨시험체 1은 내력 18%에서 손상정보를 발신하는 것으로 나타났다. Fig. 19는 휨시험체 외부에 부착된 $10 \times 10 \times 60$ mm 크기의 센서가 하중이 시험체에 재하될 때, 휨균열이 발생되면 시험체 외부에 연결된 RF발신기에 의해서 손상신호를 전송하는 것을 나타내고 있다. 휨시험체 2는 하우징 센서의 내력 24%에서 손상정보를 발신하는 것으로 나타났다.

Fig. 20은 휨시험체 외부에 부착된 $10 \times 10 \times 70$ mm

Fig. 19 Experiment of Bonded Sensors on Specimen 1

Fig. 21 Experiment of Bonded Sensors on Specimen 3

Fig. 20 Experiment of Bonded Sensors on Specimen 2

크기의 센서가 하중이 시험체에 재하될 때, 휨균열이 발생되면 시험체 외부에 연결된 RF발신기에 의해서 손상신호를 전송하는 것을 나타내고 있다. 휨시험체 3은 하우징 센서의 내력 37%, 61%에서 손상정보를 발신하는 것으로 나타났다. Fig. 21은 휨시험체 외부에 부착된 15×15×100 mm 크기의 센서가 시험체에 하중이 재하될 때 휨균열이 발생되면 시험체 외부에 연결된 RF발신기에 의해서 손상신호를 전송하는 것을 나타내고 있다.

모르터 휨시험체의 외부센서 1, 2와 3의 실험결과에서 RF 상용무선 송수신기에 의해 균열손상정보의 무선 전송 시간은 센서 1, 센서 2, 센서 3의 순서로 센서의 크기가 증가될수록 지연되는 것으로 나타났다.

5. 결론

건축구조물을 구성하는 주요 콘크리트 부재에 발생하

는 균열손상을 부재 스스로 나타내는 기능을 위해 리드스위치 센서와 무선주파수를 응용한 해석과 실험에 의한 결론은 다음과 같다.

- (1) 무선 주파수 시스템과 휨에 반응하는 센서를 휨부재 내부에 매입한 경우나 부착한 경우, 외력에 의해 건축구조물을 구성하는 주요 부재에 균열손상이 발생하면 초기균열 손상을 검토할 수 있는 것으로 사료된다.
- (2) 센서 1, 센서 2와 센서 3을 시멘트 모르타르로 피복할 경우, 외력에 의한 손상신호의 전달시간은 센서의 크기가 증가될수록 지연되는 것으로 나타났다.
- (3) 리드 스위치센서를 부재내부에 내포하는 경우나 부재 옆면에 부착하는 경우는 외력에 의해 발생한 균열손상정보를 전달하는 것은 유사하게 나타났으므로 이를 이용하여 기존 구조물에 발생하는 균열손상을 검토할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

[NRF-2010-D00024]

참고문헌

1. 김이성, 이수곤, 고주환, 김동혁, 김하중, "LED와 유리관 스위치 센서를 이용한 스마트 콘크리트의 개발", 대한건축학회 논문집 구조계, vol. 24, No. 11, 2008, pp.61-69.
2. 이종원, "분포형 광섬유센서와 변형률 모드를 이용한 구조물

의 손상탐지기법”, 대한건축학회 논문집 구조계, vol. 27, No. 2, 2011, pp.47-55.

3. C. P. Fritzen, P. Kraemera, “Self-diagnosis of smart structures based on dynamical properties”, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 23, Issue 6, August 2009, pp.1830-1845.

4. David K. Felbeck, Anthony G. Atkins, “Strength and Fracture of Engineering Solids”, Prentice Hall, Inc., 1996, pp.274-305.

5. Emmanuel C. Ifeakor, Barrie W. Jervis, “Digital Signal Processing”, Prentice Hall, 2002, pp.317-341.

6. Ertugrul Cam, Sadettin Orhan, Murat Luy, “Analysis of Cracked Beam Structure using Impact Echo Method”, International Journal for NDT&E, 2005, pp.368-373.

7. Jack A. Collins, “Failure of Materials in Mechanical Design and Analysis”, Prediction, Prevention. John Wiley & Sons, Inc., 1993, pp.1-133.

8. Jiri Zacal, Dusan Hemzal, Jiri Jan, Adam Filipik, Radovan Jiri and Kolar, “Comparison Wave-Equation Versus Measurement-Processing Transducer Calibration for

Ultrasonic Transmission Tomography”, Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference New York City, USA, Aug 30-Sept 3, 2006, pp.2754-2757.

9. Jong Jae Lee, Chung Bang Yun, “Damage diagnosis of steel girder bridges using ambient vibration data”, Engineering Structures, vol. 28, Issue 6, May 2006, pp.912-925.

10. Richard W. Hertzberg, “Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials”, John Wiley & Sons, Inc., 1996, pp.634-641.

11. Surendra P. Shah, Stuart E. Swartz, Chengsheng Ouyang, “Fracture Mechanics of Concrete”, John Wiley & Sons, Inc., 1995, pp.388-396.

(접수일자 : 2011년 6월 20일)

(수정일자 : 2011년 10월 11일)

(심사완료일자 : 2011년 10월 13일)

요 지

철근콘크리트 구조물은 사용연한과 지진 등의 영향으로 균열손상이 주요부재에서 발생되며, 이러한 손상을 보수하기 위해 많은 시간과 노력이 낭비되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 소형 리드스위치 센서를 휨시험체 내외부에 매입하거나 부착하여 외력에 의한 균열손상을 스스로 나타내는 스마트 부재에 대하여 연구하였다. 균열손상을 모니터링하기 위해 RF시스템을 리드 스위치센서와 이용하였다. 휨시험체 중앙에 하중이 재하되면 매입되거나 부착된 리드 스위치센서가 파괴되고, 이와 연결된 RF시스템은 손상 정보를 전달한다. 본 연구는 무선주파수를 응용한 건축부재의 손상자현 시스템에 대한 기초적 연구이다.

핵심 용어 : 휨시험체, 균열 손상, 리드 스위치센서, 무선주파수, 손상신호