

## 자가진단형 스마트 콘크리트 개발

### Development of Self-Diagnostic Smart Concrete

김 화 중\* · 김 이 성\*\*

Kim, Wha-Jung · Kim, Ie-Sung

#### ABSTRACT

In People usually think that smart materials and smart structures have not been developed until recent years. But those kinds of sensors have already been used for sensing damage in a variety of materials and structures. Two typical examples are piezoelectric materials (e.g., PZT) and electric strain gauges. Load cell is an example that utilizes the piezoelectric property to measure the change in physical quantities occurred by applied loads, while strain gauges are used to measure the deformation of compressive and tension members. The feasibility of using smart materials is realized for a monitoring technology when those sensors are used to monitor damages at inside or outsider of the structures.

In this study, a fundamental study on the development of self-diagnostic smart concrete using PZT, and unsaturated polyester electric resistance sensor.

*Keywords: FFT, Crack, Moving Load, Prediction damage*

#### 1. 서 론

콘크리트는 압축강도가 높고 유지관리가 비교적 쉬운 재료이기 때문에 널리 사용되고 있으나, 콘크리트의 균열은 설계하중, 외적환경의 원인, 재료특성, 배합조건 및 시공적인 요인으로 인하여 균열에 대한 문제가 발생하게 된다.

이러한 건축 구조물의 성능 상태점검 및 보수·보강에 대한 방법으로는 육안으로 검사하는 방법과 초음파 탐지법, 슈미트 해머에 의한 강도 추정, 중성화 감지법, 복합법 등이 대부분이다. 그러나 이러한 방법은 신뢰성을 가지기 어려운 방법이며, 손상부위의 예측 및 검지방법이 국한되어 있는 결점이 있다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 모니터링을 이용한 스마트 기법이 활용되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 스마트 구조 기술은 이미 항공분야에서 활용되고 있으며, 항공기의 균열 및 손상을 감지하기 위한 비파괴 기법으로 활용되어져 왔다. 이러한 기술을 건축 및 토목구조물에 사용하는 범위는 변위와 내력상태를 파악하기 위한 방법으로 여러 해

\* 정희원 · 경북대학교 건축학부 교수 E-mail: kimwj@knu.ac.kr

\*\* 정희원 · 경북대학교 건축학부 시간강사 E-mail: kismua@unitel.co.kr

석기법을 개발하고 있으며, 부분적으로 적용하고 있는 실정이지만 아직 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 기존에 널리 사용되고 있는 압전소자(PZT)와 불포화 폴리에스테르로 성형된 아이언 파우더 저항센서를 이용하여 부재에 이동하중이 작용하였을 때 부재에서 손상이 발생된 것을 무선으로 검증하기 위한 기초적 연구이다.

## 2. 연구동향

본 연구에서 콘크리트 구조물의 손상추정을 위한 국외의 연구는 A. van Beek(2003) 등의 콘크리트의 사용주기를 예측하기 위한 유효모델 연구를 하였다. 고속도로 교량에 대한 모델을 가상변수를 적용하여 상태 모델과 재료 모델로 나누어 연구하였다.

Lounis, Z(2000)는 콘크리트 교량의 텍크부분에 대한 신뢰성을 기초로 한 주기 예측을 하였으며, Bogdanoff의 누적 손상모델을 이용하여 수치적 해석을 통한 신뢰성 해석을 하였다.

Sashi K. Kunnath(1997)는 원형주각에서의 증가 손상에 대한 평가에 대해 연구하였으며, 힘과 변위관계와 주기하중에 대한 에너지특성을 연구하였다.

국외의 연구에서 손상추정연구는 주로 토목구조물의 동특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 건축구조물에 대한 연구는 전체 구조물을 축소하여 응답특성에 대한 연구가 대부분이며 실제 구조물에서의 적용은 미흡한 것으로 나타났다.

국내에 연구로는 문도영(2000) 등의 손상특성을 고려한 콘크리트 구조물의 손상모형연구를 하였다. 토목구조물에서 균열의 방향 및 깊이 등의 손상특성을 반영 될 수 있는 개선된 모델을 제안하고, 기존의 실험결과와 비교하여 적정성을 검증하였으며, 이는 강재 교량의 손상추정 기법인 시간영역과 주파수 영역으로 수치적 해석을 한 것이다.

한만엽(1997) 등은 실구조물의 손상상태를 평가하기 위한 기초적 연구를 하였으며, 균열 발달특성을 수치화하고 특성값이 항복하중 전후로 어떻게 되는가에 대한 연구를 하였다.

국내의 연구도 토목구조물에 대한 수치적 연구에 대해 연구가 활발히 진행되는 것으로 나타났으나, 실험에 의한 손상 추정연구는 미흡한 것으로 나타났다.

## 3. 연구의 방법 및 절차

### 3.1. 압전소자를 이용한 실험방법

200×200×1000mm와 140×270×3000mm의 콘크리트 휨 및 전단시험체를 제작하였다. 띠근과 주철근에 압전소자를 부착하여 타설하였으며, 시험체 측면과 하단 중앙부에 압전소자와 콘크리트 게이지를 부착하고 33kg의 원형 강관을 굴러가며 이때 시험체 내부의 압전소자와 시험체 측면과 하단 중앙부에 압전소자의 발생하는 전압을 비교하였다.

또한 3점 휨가력을 하고 내부와 외부에 부착된 압전소자의 발생전압과 균열이 발생했을 때 동일한 조건으로 33kg의 강관을 굴렀을 때의 압전소자의 발생전압을 비교하였다.

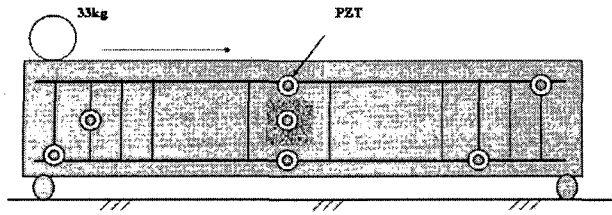


그림 1 200×200×1000mm의 철근콘크리트 휨시험체

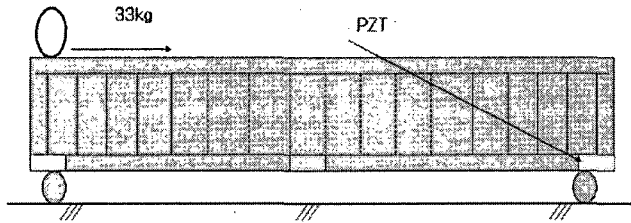


그림 2 140×270×3000mm의 철근콘크리트 전단시험체

### 3.2. 불포화 폴리에스테르 아이언 파우더 저항센서를 이용한 실험방법

400×800×9000mm의 전단시험체를 1/3로 축소하여 Iron Powder 저항센서를 철근의 스페이서로 사용하여 압축강도 20.59Mpa의 콘크리트를 타설하고 28일 양생한 후, 33kg의 강관을 손상이 없을 때와 4점 전단시험 후 손상이 발생하였을 때 Iron Powder 저항센서의 저항을 비교하였다.

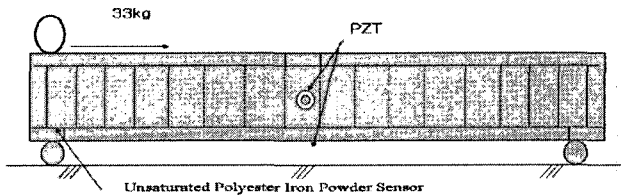


그림 3 140×270×3000mm의 전단시험체에서의 저항센서 배치

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1. 압전소자를 이용한 실험

200×200×1000mm의 콘크리트 휨시험체 옆면과 하부 중앙부에 압전소자를 부착하여 손상이 없는 경우와 3점 휨시험을 한 후 손상이 발생하였을 때를 주파수응답으로 비교하였다.

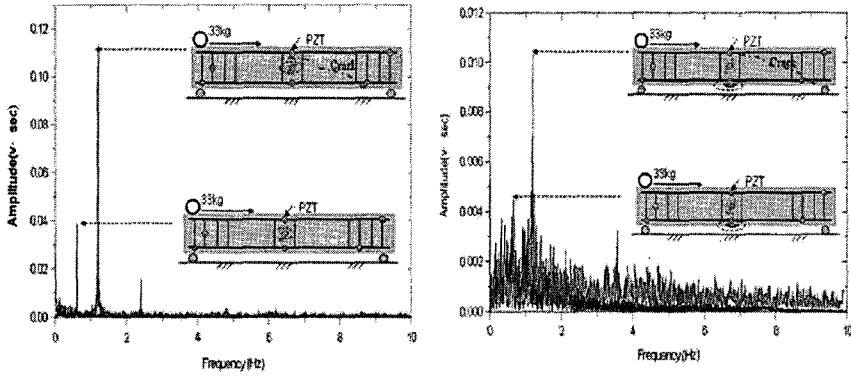


그림 4 33kg의 이동하중이 작용할 때 오실로스코프를 이용한 손상실험

압전소자를 휨시험체 옆면 중앙에 부착하여 실험한 결과 손상이 없는 경우보다 손상이 발생했을 때 5배의 주파수응답 차이가 발생하였으며, 주파수 영역은 0.5Hz만큼 이동하였다. 압전소자를 휨시험체 하부 중앙에 부착하여 실험한 경우, 손상이 없는 경우보다 손상이 발생했을 때 2배의 주파수응답 차이가 났으며, 주파수 영역은 0.5Hz만큼 이동하였다.

420×810×9000mm의 콘크리트 교량 보를 3분의 1로 축소하여 140×270×3000mm의 시험체로 하여 균열이 발생하기 전과 발생하고 난 뒤에 압전소자에 발생하는 전압을 비교하였다.

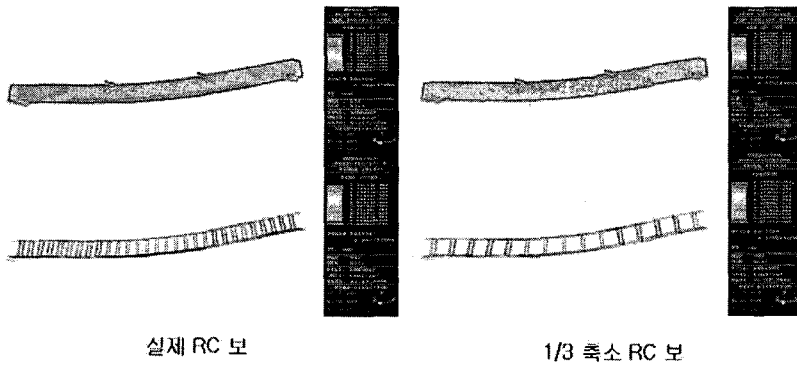
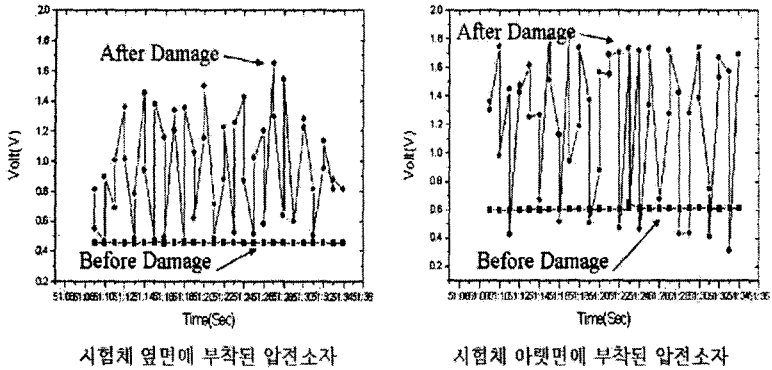


그림 5 Midas를 이용한 RC보의 응력 비교

오실로스코프는 실시간 계측기기로 정밀하지만 가격이 고가이며 측정할 수 있는 채널수가 적은 것이 단점이다. 따라서 계측기로 저렴하고 다채널이면서 무선으로 계측할 수 있는 멀티미터를 이용하여 측정하였다.

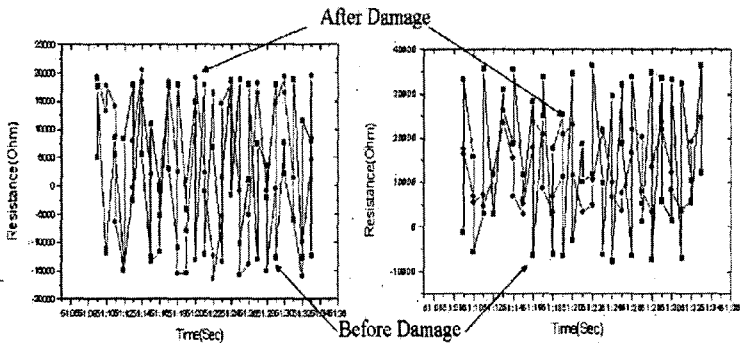


시험체 옆면에 부착된 압전소자      시험체 아랫면에 부착된 압전소자  
 그림 6 33kg의 이동하중이 작용할 때 멀티미터를 이용한 손상실험

실험결과 휨시험체 옆면 중앙에 부착하여 실험한 결과 손상이 없는 경우보다 손상이 발생했을 때 3.7배의 전압차이가 발생하였으며, 하부 중앙에 부착하여 실험한 경우, 손상이 없는 경우보다 손상이 발생했을 때 2배의 전압차이가 발생하였다.

4.2. 불포화 폴리에스테르 아이언 파우더 저항센서를 이용한 실험

140×270×3000mm의 철근 콘크리트 진단 시험체 하부 단부에 저항센서를 부착하여 손상이 없는 경우와 4점 진단시험을 한 후 손상이 발생하였을 때를 비교하였다.



철근 스페이서로 사용된 단부 폴리머 저항센서      철근 스페이서로 사용된 중앙부 폴리머 저항센서

그림 7 33kg의 이동하중이 작용할 때 불포화 폴리에스테르 아이언 파우더 저항센서를 이용한 손상실험

실험결과 손상이 없는 경우보다 손상이 발생했을 때 중앙부 불포화 폴리에스테르 아이언 파우더 저항센서의 저항이 3배 감소하는 것으로 나타났으며, 단부의 불포화 폴리에스테르 아이언 파우더 저항센서에서는 저항의 변화가 거의 발생하지 않았다.

압전소자는 주로 수입에 의존하고 있으며, 상용화된 제품을 사용하기엔 고가의 센서이다. 또한 비교적 저렴한 압전형 소자를 사용하기 위해서는 LCR Meter와 같은 고가의 임피던스 측정장비나 오실로스코프와 감도가 좋은 멀티미터를 사용해야 하며, 측정방법 또한 여러 가지 방법이 있는 실정이다. 보다 큰 문제는 부착의 방법 이외에 부재 내부에 적용할 경우, 성형의 문제점이 발생한다. 따라서 이러한 아이언 파우더와 불포화 폴리에스테를 이용한 저항센서를 이용한 경우 계측의 방법이 간단하며, 여러 모양으로 성형이 가능하기 때문에 부재내부에 보수재를 내포하여 사용할 경우 보수의 시기와 부재의 내력상태를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2006년 과학재단 지정, 스마트 사회기반 연구센터의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

## 5. 결 론

자가진단형 스마트 콘크리트 개발을 위해 실험에 사용된 센서의 형태 및 위치에 따른 특성을 실험한 결과는 다음과 같다.

- (1) 압전소자와 불포화 폴리에스테를 아이언 파우더 저항센서를 이용한 콘크리트는 이동하중이 작용할 경우, 자기손상을 감지할 수 있다.
- (2) 압전소자를 이용한 휨 및 축소 전단부재의 손상예측에서 외력에 의해 손상을 받은 부재에 부착된 압전소자의 전압이 증가하는 것으로 나타났다. 측정하는 방법에 대해 오실로스코프로 측정할 경우 실시간 측정을 하기 때문에 정밀한 결과값을 얻을 수 있으나, 장비 가격이 고가이고 용량 및 측정 채널의 문제가 나타났다. 전압의 평균값(RMS)을 나타내주는 멀티미터의 경우 많은 채널과 빠른 전송속도, 주파수 변환을 거치지 않고도 간단하게 전압의 크기정도로 부재 및 구조물의 손상을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.
- (3) Polymer Iron Power 저항센서를 이용한 실험에서 철근의 간격재로 사용할 수 있으며, 외력을 받을 경우 저항의 크기가 변화하기 때문에 손상의 정도를 파악할 수 있으며, 여러 모양으로 성형이 가능하기 때문에 부재내부에 보수재를 내포하여 사용할 경우 보수의 시기와 부재의 내력상태를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- Van Beek, A., Gaal, G. C. M., van Noortwijk, J. M., Bakker, J. D., (2003) " Validation Model for Service Life Prediction of Concrete Structures", *2nd International RILEM Workshop on life Prediction and Aging Management on Concrete Structures*, Paris, France, 5-6 May, Vol. 6, No. 14, pp.257-267.
- Lounis, Z., (2000) "Reliability-Based Life Prediction of aging Concrete Bridge Decks", *Proceedings of the International RILEM Workshop on life Prediction and aging*

*Management of Concrete Structures*, Cannes, France, vol. 20, No. 2, pp.1-10.

**Kunnath, Sashi K., EI-Bahy, Ashraf.**, (1997) "An Evaluation of Progressive Damage in Reinforced Concrete Circular Bridge Column", *Cumulative Seismic Damage of Reinforced Concrete Bridge Piers*, Vol. 1, No. 4, pp.544-547.

**문도영, 이준석, 최일윤, 방춘석**, (2000) "손상특성을 고려한 콘크리트 구조물의 손상모형 연구", *대한토목학회논문집*, 제20호, 권 6-A호, pp.983-995.

**한만엽, 김보영**, (1997) "실구조물의 손상상태를 평가하기위한 기초적 균열연구", *대한토목학회 학술발표대회논문집*, pp.461-464.