

# 무선 임피던스 계측을 이용한 콘크리트 강도 발현 모니터링 기법

## Monitoring of Strength Development in Concrete Using Wireless Impedance Measurements

김 동 진\* · 장 하 주\*\* · 박 준 현\*\*\* · 박 승 회\*\*\*\* · 박 선 규\*\*\*\*\*

Kim, Dong Jin · Chang, Ha Joo · Park, Jun Hyun · Park, Seunghee · Park, Sun Kyu

### 요 약

본 논문에서는 유/무선 임피던스 계측을 통하여 현장 타설 콘크리트의 강도 발현 모니터링 기법을 개발하였다. 최근 많이 사용되고 있는 고강도 콘크리트의 경우 강도 발현이 제대로 되지 않으면 건설 중 취성 파괴가 일어날 우려가 있으므로 현장에서의 강도 발현 모니터링이 중요시 되고 있다. 하지만 기존의 콘크리트 강도 평가 방법은 고가의 장비가 필요하거나 복잡한 수학적식을 통하여 이루어 졌기에 현장에서는 효율적으로 사용되기 힘들었다. 이에 압전 센서 기반 임피던스 측정을 통하여 콘크리트의 강도 발현을 모니터링하는 기법을 제안하였다. 구조물의 임피던스는 구조물 손상이나 강도 변화와 같은 구조물의 물성 변화 발생 시 공진주파수가 이동하는 특징이 있다. 이를 기반으로 콘크리트 구조물의 공진주파수 변화를 관찰하여 대상 구조물의 강도를 모니터링하는 기법을 개발하였으며 유/무선 임피던스 계측을 동시에 실시하여 무선 임피던스 측정의 유효성을 평가하였다. 그리고 고강도 콘크리트에서의 적용을 평가하기 위하여 설계 강도 30MPa, 100MPa의 콘크리트에 대하여 유/무선 임피던스 측정을 실시하였다. 이를 통해 본 논문에서는 무선 임피던스 계측을 이용하여 접근하기 어려운 곳이나 케이블 연결이 어려운 곳에서도 실시간으로 구조물의 강도 발현 모니터링이 가능한 시스템을 제안하였다.

**keywords** : 강도 발현 모니터링, 임피던스, 압전 센서, 무선 센서노드

## 1. 서 론

최근 들어 우리나라는 물론 세계 각국마다 경제 산업발전을 위한 사회기반시설의 확충으로 사회 공공핵심 구조물이 늘어나고 있으며 이러한 건설 규모는 계속 대형화 되고 있다. 특히 초장대 교량이나 초고층 건물들의 건설이 활발해지고 있는데, 이러한 대형 구조물의 건설은 막대한 초기 건설 투자는 물론 건설 후 유지관 리에도 많은 비용이 소요되고 있으며 또한 이들 대형구조물 건설이 늘어남에 따라 기존 강도의 콘크리트보다 압축 강도가 높아 부재 단면을 축소시키고 자중이 감소되며 낮은 W/C 비에 따른 콘크리트 구조물의 내구성 향상도 기대할 수 있는 고강도 콘크리트의 사용이 늘어나고 있는 상황이다. 하지만 이러한 고강도 콘크리트는 강도 발현의 변동에 따라 취성 파괴가 일어날 우려가 있으므로(Marzouk and Hussein, 1991) 발현 강도를 모니터링 해야만 한다.

\* 학생회원 · 성균관대학교 u-City 공학과 석사과정 kd135@lycos.co.kr

\*\* 성균관대학교 u-City 공학과 석사과정 hajooc@nate.com

\*\*\* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 sigfriedk@naver.com

\*\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 조교수 shparkpc@skku.edu

\*\*\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 skpark@skku.edu

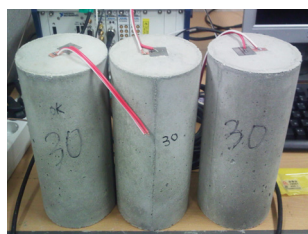
기존 현장타설 콘크리트의 발현강도 평가와 관련한 대부분의 연구는 주로 적산온도를 이용하는 방법이나, 전기 화학적 촉진법, 그리고 각종 비파괴 시험법 등을 대상으로 하고 있다. 또한 수학적 모델링에 의해 제안된 이론식 뿐 만 아니라 실제 실험을 수행하거나 경험에 근거한 식의 형태로도 제안되고 있는데, 이러한 평가방법은 고가의 장비가 필요하거나 제안식 자체가 복잡하여 실무에서 크게 활용되지 못하는 실정이다. 따라서 현장타설 콘크리트의 발현강도 평가를 고려한 효율적인 실시간 상시계측 모니터링을 통하여 이상 거동을 감지하고, 적절한 조치를 취함으로써 시설물 붕괴를 미연에 방지해야 한다.

이에 본 연구에서는 향후 건설 분야에 유비쿼터스 환경에 맞는 IT 융합기술을 적용한 콘크리트 강도 발현 무선 계측 모니터링의 가능성 검토를 위하여, PZT 센서를 이용한 임피던스 계측으로 고강도 콘크리트의 발현강도를 측정하는 기법에 대한 적용 가능성을 연구하고, 실용적인 측면에서의 연구를 위하여 무선 임피던스 노드를 이용한 모니터링 기법에 대한 적용 가능성을 연구하기 위한 목적으로 수행되었다.

## 2. 유무선 임피던스 측정을 통한 콘크리트 강도 발현 모니터링

### 2.1 실험 방법

본 연구에서는 구조물의 공진주파수가 손상이나 강성 변화 등에 따라 달라지는 특성을 이용하여 콘크리트의 양생 진행에 의한 강성 변화로 공진주파수 값이 변화하는 것을 측정함으로써 콘크리트의 강도 발현을 모니터링 한다. PZT센서의 임피던스를 이용하여 강도발현의 무선계측 시스템 검증에 위해 그림1과 같이 설계 강도 30MPa, 100MPa의 두 가지 공시체로 구분하여 임피던스 데이터를 측정하였다. 각 공시체에 PZT 센서를 부착하고, 먼저 유선 임피던스 측정기기인 NI PXI-1042Q를 사용하여 강도변화가 큰 양생 3일째 강도부터 7일째 강도까지(Annanddas and Rizzo, 2010) 임피던스 값을 측정한다. 그와 동시에 무선 임피던스 노드를 이용하여 마찬가지로 3일 강도부터 7일 강도까지 임피던스 값을 측정한다. 측정한 임피던스 값을 비교하여 무선 임피던스 노드의 적정성을 평가하고, 양생 진행에 따른 강도 변화와 측정한 임피던스 값으로부터 얻게 되는 공진주파수 변화 간의 상관관계를 고찰한다.



(a) 30MPa 공시체



(b) 100MPa 공시체

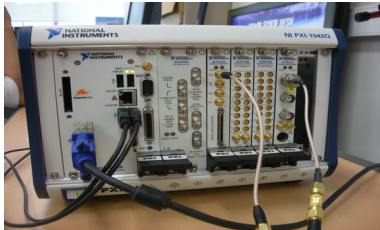
그림1 실험에 사용한 공시체

### 2.2 실험 장비

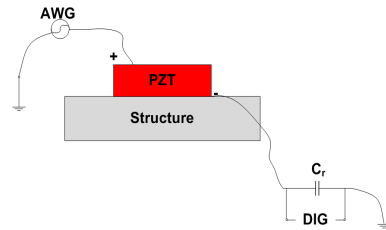
유선 계측 장비는 그림2와 같이 National Instruments사의 PXI-1042Q와 Reference capacitor를 사용한 circuit board를 이용하여 측정하였다. 이 기기는 PZT센서와 유선으로 연결되며 Waveform Generator와 Digitizer로 구성되어 있으며 계측 프로그램은 Lab View를 사용하였다. Impedance Resolution은 1Hz로 측정되며 총 5000개의 샘플링 데이터를 받았다.

무선 계측 장비는 그림3과 같이 KETI에서 개발된 소형 무선 임피던스 센서 노드와 RF Receiver로 구성되어 있다. 무선 임피던스 센서 노드는 PZT센서와 유선으로 연결되며 Micro-controller에 의해 제어된다. 임

피턴스 신호는 임피던스 칩(AD5933)에 의해 측정되며 RF Transmitter와 RF Receiver에 의해 무선으로 PC와 연결된다. 임피던스 측정 프로그램은 Matlab으로 구성하였으며 Impedance Resolution 10Hz로 총 500개의 샘플링 데이터를 받았다.

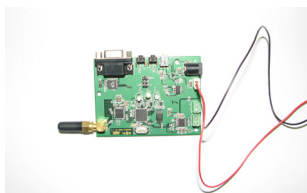


(a) NI PXI-1042Q

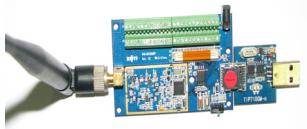


(b) Schem of capacitor based impedance circuit

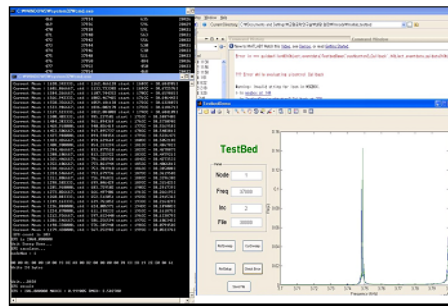
그림2 유선 임피던스 측정 시스템



(a) Impedance Sensor Node



(b) RF Receiver



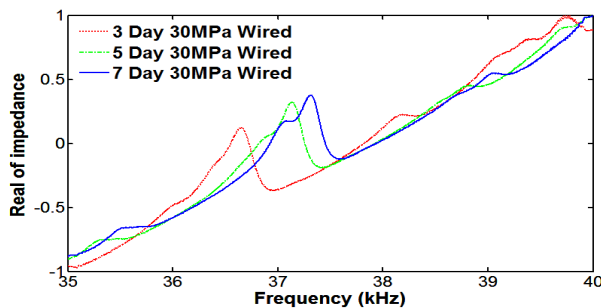
(c) MatLab

그림3 무선 측정 시스템

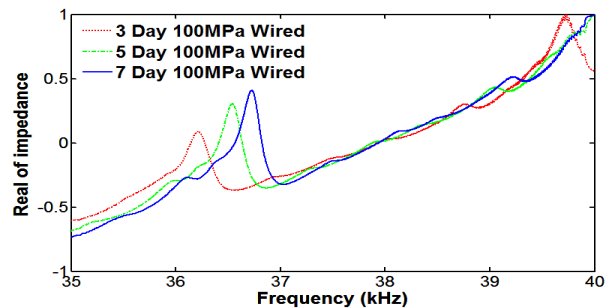
## 2.3 실험 결과

### 2.3.1 유선 임피던스 측정 결과

그림4는 유선 임피던스 측정 장비를 통해 측정된 결과이다. 양생이 진행될수록 공시체의 공진주파수는 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 양생이 진행될수록 공시체의 강도가 증가하여 공진주파수가 높아진다는 이론과 일치한다. 공진주파수의 이동량은 각각 (1) 30MPa 공시체에서는 3~5일 간격 : 약 0.5 kHz, 5~7일 간격 : 약 0.2 kHz, (2) 100MPa 공시체에서는 3~5일 간격 : 약 0.3 kHz, 5~7일 간격 : 약 0.2 kHz 정도이다.



(a) 30MPa 35~40kHz



(b) 100MPa 35~40kHz

그림4 유선 임피던스 측정 결과

### 2.3.2 무선 임피던스 측정 결과

그림5는 무선 임피던스 센서 노드를 이용하여 임피던스를 측정한 결과이다. 유선 임피던스 측정 결과와 유사하게 공시체의 강도가 강해짐에 따라 공진주파수가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이때 공진주파수의 이동량은 각각 30MPa 공시체에서는 (1) 30MPa 공시체에서는 3~5일 간격 : 약 0.4 kHz, 5~7일 간격 : 약 0.2 kHz, (2) 100MPa 공시체에서는 3~5일 간격 : 약 0.3 kHz, 5~7일 간격 : 약 0.2 kHz 정도로써 이는 유선 임피던스 측정 결과와 유사하다. 따라서 이를 통해 무선 임피던스 측정을 통한 발현 강도 모니터링의 유효성을 확인하였다.

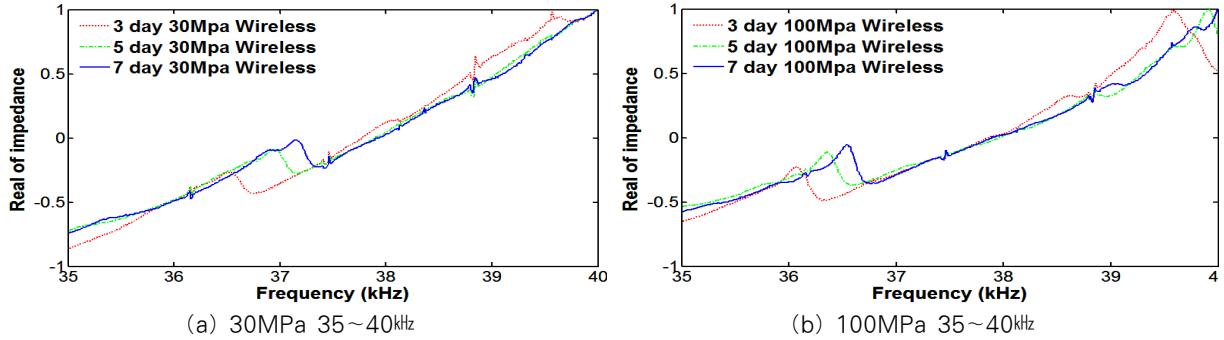


그림5 무선 임피던스 측정 결과

### 3. 결론

본 연구에서는 콘크리트 양생 강도를 타설 현장에서 손쉽게 측정해 볼 수 있는 임피던스 계측을 이용한 콘크리트 발현 강도 모니터링 기법을 개발하였다. 개발된 시스템의 유효성을 검증하기 위하여 실내 실험을 수행하였으며, 그 결과 양생 일자에 따른 공시체의 강도 증가로 인하여 공시체의 공진주파수 값이 일관적으로 증가하는 것을 명확히 확인할 수 있었다. 또한 유/무선 임피던스 계측 결과를 비교함으로써 무선 임피던스 센서 노드를 통한 발현 강도 모니터링의 유효성을 검증하였다. 이로써 개발된 무선 임피던스 계측을 통한 콘크리트 발현 강도 모니터링 기법을 이용하여 실제 현장에서의 콘크리트 발현 강도를 모니터링 하고 또한 무선 임피던스 센서 노드를 이용하여 케이블 연결이 어려운 지점이나 접근하기 어려운 지점에서의 실시간 강도 발현 모니터링이 가능하게 되었다. 이를 토대로 더 많은 변수를 설정하여 양생 강도에 따른 공진주파수 값을 정량화하고 강도 발현 모니터링을 위해 부착된 센서를 통해 시공 후 무선으로 해당 구조물의 건전성을 평가 할 수 있는 시스템으로까지 도입할 수 있도록 연구를 수행할 계획이다.

### 감사의 글

이 논문은 국토해양부의 u-City 석박사 과정 지원 사업과 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(06국토정보C01), 그리고 한국 건설교통기술평가원 지정 R&D(06건설핵심 B05) 및 한국 토지공사의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Annamdas, V. G. M. and Rizzo, P.** (2010) Monitoring concrete by means of embedded sensors and electromechanical impedance technique, submitted to *Proceedings of SPIE conference on smart structures and materials*, San Diego, CA, USA, March 7-11
- Marzouk, H. and Hussein, A.** (1991) Experimental investigation on the behavior of high-strength concrete slabs, *ACI Structural Journal*, 88(6), pp. 701-713