

## 중연계 무선네트워크 환경의 도로유지관리계측 시스템 개발에 관한 연구

### A Study of Development of Highway Maintenance System of RFID Multiple Wireless-Network Environment

이 상 우<sup>\*</sup> 송 종 결<sup>\*\*</sup> 남 왕 현<sup>\*\*\*</sup> 김 학 수<sup>\*\*\*\*</sup>  
Lee, Sang-Woo Song, Jong-Keol Nam, Wang-Hyun Kim, Hark-Soo

#### Abstract

Wireless Sensor Networks provide a new paradigm for sensing and disseminating information from various environments, with the potential to serve many and diverse applications. Recent advancement in wireless communications and electronics has enabled the development of low-cost sensor networks. The sensor networks can be used for various application areas. For different application areas, there are different technical issues that researchers are currently resolving. The current state of the art of sensor networks is captured in this article, where solutions are discussed under their related protocol stack layer sections. This article also points out the open research issues and intends to spark new interests and developments in this field. In order to evaluate the application of field monitoring system, lab tests, field test and FEM analysis are conducted. Therefore the accuracy of RFID wireless sensor data is verified.

키워드 : 중연계, 무선네트워크, 도로유지관리 시스템  
Keywords : RFID, Wireless-Network, Highway Maintenance system

#### 1. 서론

도로의 상태를 실시간으로 모니터링하여 세부적 상태 및 전반의 종합적 상황을 파악하고 원거리 종합 상황실에서도 유지관리 전반을 컨트롤할 수 있는 시스템을 구축하기 위하여 기존에는 유선망을 이용한 방안이 사용되어져 왔으나, 이는 계속지점이 많거나 그 측정 길이가 길 경우 계속설비 자체의 설치 및 유지관리에 어려움이 따르며, 또한 측정 노드의 추가와 삭제가 어렵고 센서와 연결선의

손실에 대한 대처가 힘들며, 노이즈에 따른 데이터의 불확실성이 큰 단점을 가지고 있다. 따라서 도로 내의 모든 인공물에 컴퓨터 기능을 심고, 이들이 다중 무선 네트워크로 연결될 수 있게 함으로써 사람 또는 기기들이 언제 어디서나 네트워크에 실시간으로 연결되어 다양한 서비스를 실현하는 유비쿼터스 환경을 토대로 통합 도로 유지관리시스템을 개발하는 것이 우선적으로 필요하다[4]. 유비쿼터스의 응용기술로 도로 유지관리시스템을 구현하기 위해서는 맞춤형, 저전력, 초소형 컴퓨팅센서와 RFID 다중연계 무선 데이터 교류 시스템, 도로 구조물 유지관리 방안 및 시스템의 3가지 기술 개발로 대표될 수 있다[1]. 그리고 추가적으로 데이터 저장과 관리를 위한 최적화된 데이터베이스와 결과를 표현하는 기술인 WEB 환경 구축 및

\* 강원대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사  
\*\* 강원대학교 토목공학과 조교수, 공학박사  
\*\*\* 강원대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사  
\*\*\*\* 강원대학교 토목공학과 석사과정, 공학사

프로그래밍이 필요하다. 무엇보다 양방향 정보 교류 및 도로 상의 인공물 유지관리 시스템을 모두 포함, 통합되고 일관된 시스템과 정확하고 신뢰성 있는 패키지의 구축이 가장 중요하다.

이를 위하여 다중 연계형 무선통신(RFID, 2.4 GHz)을 기반으로 디지털 초소형센서와 마이크로 프로세싱, 데이터 취합 및 관리를 위한 데이터베이스, 각종 제어 프로그램, 인터넷 데이터 전송 프로세서를 기본적으로 구축하였고, 교량 유지관리계측의 주요 콘텐츠를 웹언어로 프로그래밍 하여 무선으로 수신된 데이터를 수집하고 분석하도록 하였다. 각각의 연구 개발된 모듈들은 실시간이며, 무선통신(RFID)을 기반으로 상호연계가 가능한 양방향성을 지니며, 또한 다중으로 노드들간에 데이터 중계가 가능한 다중연계 방식의 통합 시스템이다. 다중 센서 노드들의 연계를 위하여 MultiHop 라우팅 기법을 이용한 데이터 중계의 자체 구성능력을 부여하였고, 센서 노드간의 시간차를 보정하기 위하여 MultiHopAccel을 탑재한 시스템을 통한 시간동기화를 부여, 현 무선 계측의 문제점인 데이터 손실과 시간차 발생에 대한 해결 방안을 제시하여 무선 데이터의 신뢰성을 높이도록 하였다[2]. 그리고 이러한 프로세싱 검증에 위하여 실내실험과 현장실험이 동일조건에서 디지털 방식과 아날로그 방식으로 병행 수행되었고, 결과들은 각각의 구조해석을 통한 비교 검증을 실시하였다. 이러한 연구를 통하여 유선 아날로그 방식 또는 근거리 무선통신을 이용한 방식의 대체 방안으로 RFID 무선통신 방식의 디지털 센서와 그 통합시스템의 성능 및 정확성을 검증하고 현장 적용성도 평가하였다.

## 2. 시스템 구성

### 2.1 RFID 기반의 초소형 컴퓨팅센서 모듈 개발

컴퓨팅센서 모듈의 기본적 구조는 대부분 같다고 할 수 있지만, 적용 인공물의 특성에 따라 작동 환경과 운용 범위가 달라지기 때문에 도로 내의 인공물에 사용된다면 그것에 맞는 특성화된 것을 개발하여야 한다. 하드웨어 적으로는 소형화 및 저전력화가 관건이며, 이를 각 부분에 알맞게 작동하도록 하는 운영 시스템을 Micro processor에 프로그래밍 하여야 한다. 즉, 계측용 센서는 초소형 디지털 센서 또는 기존 아날로그 타입 중 적합한 것을 사용하고, 여기서 획득한 데이터를 디지털화 시켜 필요한 형태로 가공하고 이를 무선으로 전송하며, 이를 통합 관리하고 연산하도록 하는 프로그래밍 된 Micro processor를 포함하는 소형 컴퓨팅 패키지를 구성하였다. 컴퓨팅 센서는 센서 네트워크 운영체제인 TinyOS를 지원하는 Micaz 모드를 사용하였고 센서 모트에는 교량 및 노면의 진동을

감지하고 전송하는 Sampler 프로그램을 개발 및 설치하였다. 진동을 감지하는 센서는 초소형 디지털 2축 가속도계가 자체 탑재되었으나 기존 아날로그 센서를 추가로 설치하여 사용하였으며, 아날로그 신호를 센서모트에 전달해주기 위해 데이터 수집보드인 MDA300CA를 사용하였다.

그리고 디지털 전송기는 원격지와 접근이 어려운 지역에서 동작시킬 수 있고, 센서 자체가 데이터 중계가 가능한 최신 스마트 전송기를 사용함으로써 설치 여건에 따라 센서 수준까지도 분산화 시키는 물론 장거리 무선 계측도 가능하다. 그리고 초소형화, 저전력화, 다채널 및 다기능 특성을 갖추어 다양한 센서에 지능적으로 인터페이스 할 수 있기 때문에 유연한 시스템 구성 및 확장이 가능하다. 또한, 각 센서와 전송기간의 양방향 전송이 가능하므로 향후 센서의 교정과 조정을 소프트웨어적으로 할 수 있으며 데이터 수신기는 컴퓨터와 연결된 상태에서 컴퓨터 프로그램을 이용한 센서의 원격제어가 가능하다. 따라서 본 시스템은 센서 주변 환경 변화에 대해 지능적으로 대처함으로써 계측 신호의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

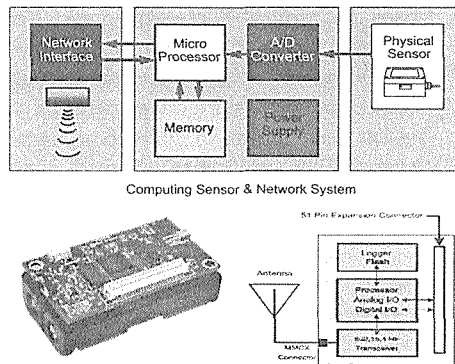


그림 1 RFID 기반의 초소형 컴퓨팅센서 모듈

### 2.2 센싱 모트 운영체제 및 소프트웨어 개발

마이크로 컴퓨팅 센싱을 위하여 모트에는 이벤트 발생에 의한 상태 천이 방식을 채택한 TinyOS를 사용하고 최적화시켜 메모리 공간의 효율적인 이용과, 프로세싱의 동시성을 지원하였다. 그리고 센싱 모트 소프트웨어는 메인, 제어, 샘플링, AD 변환, 시간, RF통신, LED 등의 기본 컴포넌트들 조합과 유지관리계측 중 가속도에 적합한 MultiHopAccel로 개발되었다. MultiHopAccel은 모든 노드들이 베이스 노드와 동일한 시간을 갖도록 시간동기화 하며, MultiHop 라우팅 기능으로 노드와 노드간에도 베이스를 거치지 않고 동기화뿐만 아니라 패킷의 수신 및 재전송 등의 다중 연계가 가능하도록 하였다. 여기서 패킷의 중복 수신을 방

지하기 위하여 오실로스코프 프로세싱 모듈에 시퀀스 번호인식 및 전송여부 판단을 위한 브로드캐스트 패킷 관리 컴포넌트를 추가하여 개발하였다.

### 2.3 데이터 취합과 관리를 위한 데이터베이스 및 Web 기반 환경 구축

본 시스템에 사용된 DBMS인 MySQL의 큰 특징은 상업적으로도 무료로 사용할 수 있으며 동급의 서버와 비교했을 때 매우 빠르고, 데이터의 양이 작거나 큰 경우에 모두 매우 안정하며 다양한 API를 제공해 준다. 이 중 Java를 위한 JDBC를 이용하여 실시간 모니터링과 동시에 웹 인터페이스를 사용하여 모니터링 하기 위해 측정된 데이터를 데이터베이스에 기록하는 기능을 구현하였다. 또한 빠른 질의 실행 속도로 인해 센서 모드로부터 오는 많은 데이터를 실시간으로 데이터베이스에 기록할 수 있다. 그리고 이상 징후가 예상되거나 중요 데이터로 분류된 결과는 XML문서화하여 데이터베이스에 기록되어져 영구 보존도 가능하고 차후 타 프로그램들과의 호환성도 대비하였다.

서버 모니터링 프로그램인 호스트 컴퓨터의 오실로스코프 프로그램은 Java를 이용해 구현되었으며, RF를 통해 수신된 데이터를 분석하여 그래프 형태로 호스트 컴퓨터에 출력하며, 이와 동시에 데이터베이스에 저장함으로써 차후 웹을 통한 모니터링을 가능토록 하였다. 컴퓨팅 센서에서 전송된 데이터가 메인 시스템에 모두 모이게 되면, 메인 시스템은 전체 데이터를 통합 관리하며 이를 WEB 상에서 유지관리 할 수 있도록 환경을 제공하고, 도로상의 자동차나 보행자에게 정보를 제공한다. 유지관리시스템이 WEB 언어로 구성되어 있기 때문에 Internet을 기반으로 데이터를 송수신하며, 이를 사용자 또는 관리자에게 graphic 형태의 비주얼 환경을 제공하여 손쉽게 언제 어디서나 시간과 공간의 제약을 벗어나서 사용할 수 있다.

## 3. 실내외 실험 및 검증

### 3.1 실내 모형 실험

본 연구에서는 구조물 모니터링을 통해 무선 계측 센서로부터 측정된 신호를 무선 데이터 전송 시스템을 이용하여 수집된 데이터의 신뢰성을 검증하기 위하여 축소모형을 이용한 정적 및 동적특성 실내실험을 통하여 유무선 센서의 계측결과를 비교·분석을 실시하였다. 연구에 이용한 대상 구조물은 전체높이는 2m이고, 넓이는 0.5m, 폭은 0.1m 이며, 두께가 0.002m인 강판을 이용하여 제작된 부재를 볼트로 연결한 5층의 구조물을 선택하여 정적실험과 동적실험을 수행하였다.

정적측정 실험은 실험 구조물의 수직방향과 횡방향으로 정적하중을 재하하여 각 하중단계에 대

한 변위응답을 측정하였다. 실험구조물에 설치된 2개의 변위계(LVDT)는 최대한 동일한 조건을 갖도록 설치하였다. 이 중 1개는 유선으로 측정하는 계측장비에 연결하였으며 다른 하나는 무선 센서에 연결하여 데이터를 수집하였다. 정확한 비교효과를 나타내기 위하여 실험을 통해 수집된 유·무선 데이터를 하나의 그래프에 나타내어 비교를 하였다. 데이터의 비교평가 기준은 유선으로 수집된 데이터가 정확하다고 가정하고 무선 센서로 수집된 데이터와의 불일치율을 비교하는 것으로 하였다.

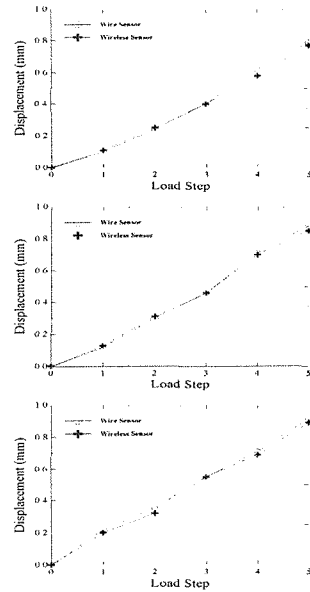


그림 2 예제구조물에 대한 3회 정적실험 결과 비교

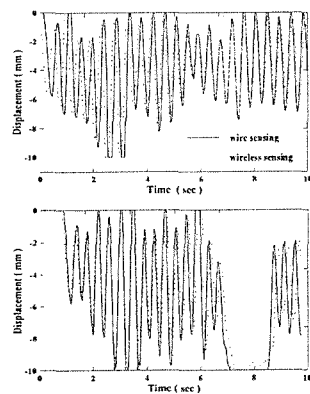


그림 3 예제구조물에 대한 3회 동적실험 결과 비교 (계속)

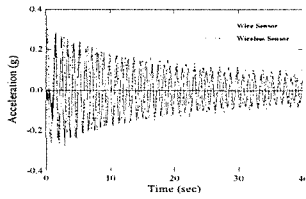


그림 3 예제구조물에 대한 3회 동적실험 결과 비교

비교결과를 전반적으로 유선 및 무선 데이터의 파형의 형태가 전체적으로 유사하게 나타났으며, 최대 압축변위 또한 동일하게 계측되었다. 그러한 초기 데이터를 수집하는 단계와 측정의 끝부분에서는 두 데이터의 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 원인은 무선센서를 이용하여 데이터를 실시간으로 수집하기 위해서는 계측데이터를 무선센서의 데이터 패킷 프로토콜 규정에 맞게 암호화하는데 걸리는 시간, 데이터 패킷을 시리얼 포트를 통하여 데이터를 전송하기 위한 준비 시간과 데이터를 전환하는 과정에서의 지체 등으로 인한 유선 데이터와의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 실험결과와 검증작업으로는 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 예제 구조물에 대한 구조해석을 수행하였다. 해석을 통해 예제 구조물의 고유진동주기와 측정된 고유진동주기를 비교하였다.

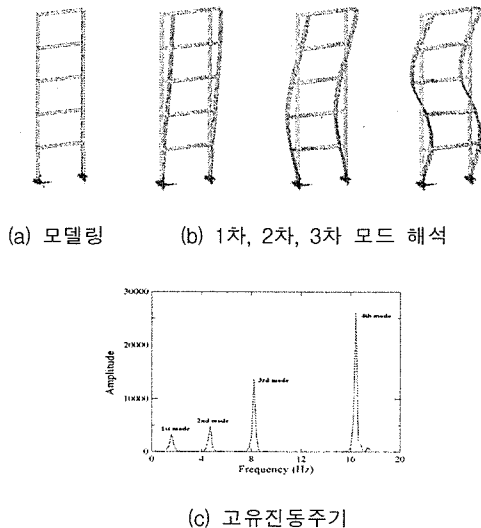


그림 4 예제 구조물에 대한 구조해석

표 1 실내 모형실험의 해석값과 측정값의 비교

Mode	Eigenvalue	Frequency (Hz)		불일치율 (%)
		구조해석값	측정값	
1	82.023	1.44	1.56	8.3
2	839.819	4.61	4.69	1.7
3	2838.73	8.48	8.40	-0.9

측정값과 구조해석을 통해 얻어진 고유진동주기의 불일치율이 모드별로 8.3%, 1.7%, -0.9%를 나타내고 있으며 이는 측정된 고유진동주기가 비교적 신뢰성이 높다는 것을 의미한다. 실험실 실험에서 유선 및 무선 계측 결과는 전체적으로 유사하게 나타내었다. 즉, 본 연구를 통해 개발된 무선 계측센서의 실험실 실험 결과는 신뢰할 수 있다.

### 3.2 실의 현장 실험

외부환경 영향 하에서 실구조물에 대한 현장 적용성을 평가하기 위하여 실제 교량구조물에 대한 현장실험을 실시하였다. 대상 구조물은 강원도 화천에 위치한 화천천교로, 이는 보도용 현수교로써 주탑 사이의 지간이 42m인 교량으로 측정위치는 각각 교량의 중앙부분과 1/4부분에 설치하여 대상 교량에 대한 유무선 센서를 이용하여 2회에 걸쳐 가속도를 측정하였다.

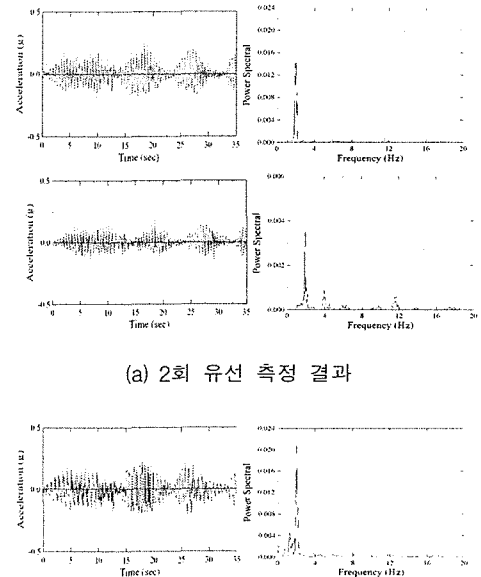
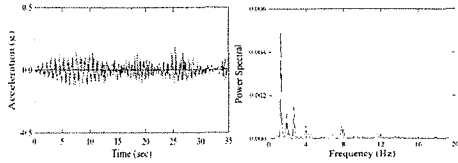


그림 5 현장구조물에 대한 동적실험 결과 비교 (계속)



(b) 2회 무선 측정 결과

그림 5 현장구조물에 대한 동적실험 결과 비교

현장 실험을 통해 얻어진 데이터의 신뢰성을 평가하기 위하여 구조해석을 통하여 대상교량의 고유진동주기와 모드형상을 계산하였다. 대상 교량에 대한 해석결과와 현장 실측 데이터는 완전히 일치하지 않지만 유사한 결과를 나타내었다. 이러한 원인은 유선 센서는 현장에서 구조해석처럼 완전 이상적인 환경의 계측결과를 측정한다는 것이 불가능하고, 또 교량 시공 중 사용된 재료와 설계 시 사용한 재료의 성질과는 완전히 같지 않기 때문에 오차가 발생하였다고 판단되어진다. 그리고 교량의 모드형상은 측정값과 동일한 모드형상을 나타내지만, 계산된 고유진동주기와 해석을 통해 얻어진 고유진동주기와는 다소 차이가 발생하였다. 이러한 원인은 센서를 설치할 때 발생하는 오차와 교량을 시공할 때 발생하는 오차 등의 원인으로 차이가 생기는 것으로 판단된다.

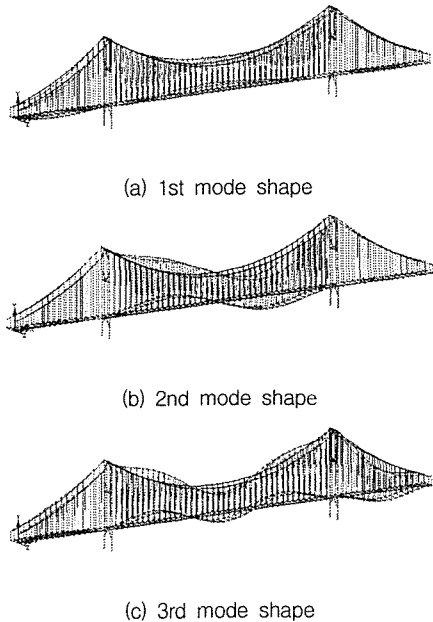


그림 6 대상 교량의 구조해석 모드형상

표 2 대상 교량의 고유진동수

Mode	해석결과 (Hz)	측정결과 (Hz)	
		유선	무선
1	1.15	1.16	1.21
2	1.28	1.33	1.80
3	2.30	2.85	2.65

#### 4. 결론

본 연구는 토목구조물에 유비쿼터스 기술을 적용함으로써 현재 당면한 문제점과 한계를 극복하고, 시대적 흐름에 부응하면서 토목구조물에 대한 계측 또는 유지관리 효율을 증가할 수 있는 방안을 개발하는 점에 매우 큰 의의가 있으며, 차세대 핵심 기반산업의 응용기술 확보 및 구조물의 성능과 내구성을 증진시키고, 운전자의 안전운행을 유도하여 국민의 생명과 재산을 보호를 이루는 데에 이바지 할 수 있을 것이다.

도로유지관리를 위한 모니터링 시스템에서 유선 망을 대체할 무선 네트워크 시스템 구축에서 가속도 기반의 양방향 다중연계 성능을 가진 MultiHopAccel을 개발하여 기존의 문제점 해결 및 차세대 시스템 구현을 시도하였고 이를 검증하였다.

유선센서의 측정값의 정확성을 구조해석을 통하여 유선 데이터의 신뢰성이 검증 후, RFID 기반의 무선 센서의 측정결과를 유선 센서의 결과와 비교하여 무선 센서의 측정 데이터 신뢰성을 평가한 결과 유선과 무선 센서의 위치에 상관없이 센서의 측정값이 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

유선으로 계측한 결과와 무선으로 계측하는 값의 차이는 크지는 않지만 무선센서로 데이터를 송수신하는 과정에서 데이터의 손실이 발생하는 것으로 나타났다. 이로 인한 결과값의 정확성이 다소 감소할 수 있는 원인이 된다. 또한 사용하는 무선 센서의 민감도 정도도 적용되는 구조물의 중요도에 따라 민감도가 우수한 센서를 사용하여야 한다.

구조물을 해석한 결과값과 현장에서 측정한 결과값과는 다소 차이가 발생하였다. 이러한 원인은 해석은 대상 구조물의 설계도를 바탕으로 해서 이루어지지만, 현장 측정은 시공오차, 교량의 손상정도 그리고 센서의 설치 시 발생하는 오차 등으로 인해 두 값의 비교에서 차이가 발생하게 되었다.

이러한 문제점들을 해결하게 되면 한계성을 극복하고 정확성을 한층 높인 교량의 계측시스템이 구축될 것으로 판단된다.

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제26권, A호, 2006.

이 상 우, 송 종 결, 남 왕 현, 김 학 수

#### 참 고 문 헌

- [1] H. chung, T. Enomoto and M. Shinozuka  
Real time visualization of structural response  
with wireless mems sensors, 13th world  
conference on earthquake engineering,  
vancouver, B.C. Canada, paper no. 121(2004).
- [2] H. chung, T. Enomoto and M. Shinozuka  
MEMS-type accelerometers and wireless  
communicatio for structural monitoring,  
Second MIT Conference on Fluid and Solid  
Mechanics, Cambridge, MA(2003a).
- [3] Analog Devices, <http://www.analog.com>
- [4] Silicon Designs, <http://www.silicondesign.com>  
resistant design, Earthquake Spectra,  
10, pp. 357-37, 1994.