

# 무선 네트워크를 이용한 실시간 교량 상태 계측

## Real Time Bridge Condition Monitoring Using Wireless Sensor Network

채명진\* · 유현석\*\* · 김정렬\*\*\* · 박재우\*\*\*\* · 조문영\*\*\*\*\*

Chae, Myung Jin · Kim, Jeongryeol · Yoo, Hyunseok · Park, Jaewoo · Cho, Moonyoung

### 요 약

교량의 고성능화, 고효율화 및 센서기술의 발전에 따라서 최근의 장대교량의 경우 교량에 각종 센서를 부착하여 상태를 실시간으로 교량의 상태를 계측하는 시스템이 개발되어 사용되고 있다. 하지만, 기존의 센서와 데이터 로거를 이용한 계측시스템은 높은 설치비가 요구되며 센서 설치비의 50%이상이 통신케이블에 관련된 비용이다. 본 논문에서는 설치비용 절감과 저렴한 유지관리비용 및 센서의 추가 및 교체가 손쉬운 무선기반의 계측시스템 개발에 관하여 논하고자 한다. 교량의 부재에 부착되어있는 센서들 사이 근거리 무선통신은 ZigBee를 이용한 무선통신네트워크를 구성하였으며, 교량과 교량관리소 사이의 장거리 통신에는 국내 휴대전화에 사용되고 있는 CDMA 통신망을 이용하여 데이터를 전송하는 방식을 취하고 있다.

키워드: USN, WSN, ZigBee, CDMA, 교량 계측, 교량 유지관리

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

세계 최장의 현수교인 일본의 Akashi Kaikyo Bridge의 경우 실시간 모니터링 시스템은 세계적으로 명성이 나 있으며 MBM (Monitoring Based Maintenance)라는 방식으로 실시간 상태 평가를 하고 있다<sup>1</sup>. MBM은 풍하중과 지진하중에 대하여 동적 반응을 계측하여 교량의 상태를 파악하는 것으로도 유명하다. 사용되고 있는 센서의 종류는 seismometer(지진계), anemometer(풍속계), accelerometer(가속도계), velocity gauge(속도계) 등을 이용하고 있다. 국내의 경우 총 14개 교량에서 센서를 이용한 자동계측 시스템이 이용되고 있다<sup>2</sup>. 예를 들면, 국내 최대의 사장교인 서해대교에는 10종류 180개의 계측센서로부터 신호를 수집

하고 수집된 신호는 데이터로거를 통해 광통신방식으로 관리소의 계측서버로 전송되는 형태를 띠고 있다<sup>3</sup>. 특히 이 관측 시스템의 경우 기존의 교량 계측시스템의 운영방식이었던 주기적인 계측이 아닌 실시간으로 계측신호를 수집하여 상시 교량을 감시하고 분석한다. 본 연구개발의 테스트 베드로 운영되고 있는 영종대교의 경우에는 14개 종류의 센서가 300여개 설치되어 교량의 상태를 실시간으로 관측되고 있다.

현재 사용되고 있는 센서계측시스템은 모두 유선을 기반으로 한 계측 시스템이다. 즉, 센서간 유선 통신 케이블이 연결되고, 교량관리소까지 수 킬로에 이르는 거리는 값비싼 광케이블을 통하여 데이터가 전송된다. 이러한 유선기반의 교량용 계측시스템은 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 그중 대표적인 다섯 가지 문제점을 예를 들면, 1) 유선 케이블의 설치비가 과다하게 소요되고, 2) 케이블 설치를 위한 스틸 파이프 배관설비 설치의 어려움이 있으며, 3) 케이블에의 온도보상 문제가 발생하고, 4) 접지부분에 필터링하기 어려운 노이즈가 발생하고, 5) 계측시스템, 즉 케이블 및 계측기의 문제 발생시 확인하기 어려우며, 문제발생 부분의 교체작업에 어려움이 있다.

이뿐만 아니라 유선기반의 교량계측시스템의 데이터 처리상의 문제점은 1) 시스템의 특성상 다수의 데이터 로거가 사용되게 됨에 따른 고가의 장비비가 소요되며, 2) 다수의 데이터 로거를 사용함에 따라서 많은 전력이 소요되는 단점이 있다. 또한 장거리 통신의 경우 광케이블이나 전

\* 일반회원, 한국건설기술연구원건설관리연구부선임연구원  
공학박사, E-mail:chae@kict.re.kr  
\*\* 일반회원, 한국건설기술연구원 건설관리연구부 연구원  
E-mail:hsyoo@kict.re.kr  
\*\*\* 일반회원, 한국건설기술연구원 건설관리연구부 연구원  
공학박사, E-mail:jrkim@kict.re.kr  
\*\*\*\* 일반회원, 한국건설기술연구원 건설관리연구부 연구원  
E-mail:jwpark@kict.re.kr  
\*\*\*\*\* 종신회원, 한국건설기술연구원 건설관리연구부  
연구위원, 공학박사, E-mail:mycho@kict.re.kr

용선 사용에 따른 문제점으로 1) 고가의 설치비용이 발생하고, 2) 케이블 및 전용선 유지관리에 고가의 유지비용이 발생하는 문제점이 있다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

이러한 유선기반의 교량용 계측시스템의 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 무선통신 기반의 교량 계측시스템을 개발하였다. 본 연구에서 제안한 무선기반의 교량계측시스템은 1) 근거리 통신을 센서네트워크를 기본 기술로 활용하기 위하여 ZigBee 기반의 무선 센서모듈을 개발하여 이용하기 때문에 상대적으로 저가의 설치비가 소요되며, 2) 별도 설비가 필요없고, 3) 계측시스템의 문제 발생시 유선시스템과 비교하여 교체가 간편하며, 4) 데이터 액세스를 필요로 하지 않고, 5) Ad-Hoc 및 Multi-Hop을 이용하므로 센서네트워크의 재구성이나 시스템 Application 재설치를 무선으로 용이하게 처리할 수 있기 때문에 근거리 통신에 있어서 계측시스템의 문제 해결 능력이 탁월하다. 또한 장거리 통신(교량과 교량관리소까지의 거리)에 CDMA를 사용하므로 유선기반의 시스템에 비해서 상대적으로 저렴한 설치비용과 저렴한 유지 비용이 소요될 것이다. 본 연구의 목표는 ZigBee 기반의 무선 진동 센서, 온도센서, 및 변형률 센서를 설치하여 교량의 진동과 하중에 따른 거동을 계측하기 위한 무선기반 계측시스템 구축을 목표로 하고 있다.

## 2. USN의 구성

### 2.1 근거리 통신망 구성

근거리 통신을 지원하는 IEEE 802.15.4 표준 중 하나인 ZigBee라는 새 무선 통신 기술은 다른 무선 통신 기술(bluetooth 등)과 달리 전력소모도 적고 저가 제품 구현이 가능해 산업전차·군사용으로 폭넓게 쓰일 수 있는 무선 통신망으로 10-20m 내외의 근거리 통신(증폭기를 이용하면 1km이상)의 거리를 낼 수 있는 유비쿼터스 컴퓨팅 기술이다. 무선통신 분야에서 IEEE802.1이나 다른 802.15와는 달리 단순기능이 요구되는 매우 작은 크기, 저전력, 저가격 시장에 적합하여 본 연구에서 블루투스나 무선랜(IEEE802.11)대신에 사용하게 되었다.

ZigBee의 특징으로서 본 연구에서 중요하게 사용되고 있는 개념은 바로 ZigBee간 데이터의 전달(hopping)이 가능하다는 점이다. 이는 데이터를 수집하고 정리하는 게이트웨이의 개수를 최소화 할 수 있다는 점에서 매우 간편하며, 또한 센서와 ZigBee 통합모듈의 설치 및 유지관리가 이상적인 형태로 간편해진다는 장점이 있다.

ZigBee와 센서의 정합모듈을 개발하고 교량에 설치를 함에 있어서 최적의 네트워크 구성을 위한 수 차례의 실험을 통하여 그림 1와 같은 결과를 얻었다. 영종대교의 경우 동적센서(실시간으로 초당 60개 또는 100개의 데이터 전송)를 이용함에 따라서, Mesh방식보다는 Star방식의 네트워크를 구성하며 정적센서(초당 2개 이하의 데이터 전송)

의 경우 Mesh방식을 이용하는 형태를 띠도록 하였다. 동적 센서로는 행어에 설치되는 가속도계, 보강형의 거동을 계측하기 위한 가속도계, 보강형 변형률계 등이며, 정적 센서는 풍향풍속계, 온도계 등이다.

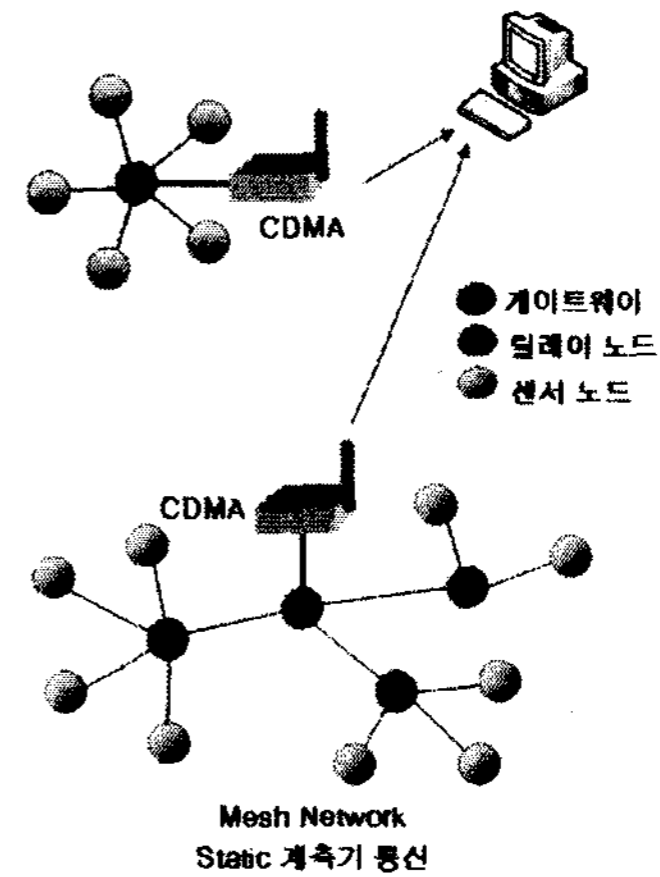


그림 1. ZigBee 네트워크: 동적센서의 경우 star방식, 정적센서의 경우 mesh방식의 네트워크 구성

u-gateway에 모인 데이터는 CDMA모뎀을 통하여 관리시스템까지 무선으로 정보가 전송되는 형태를 구성하였다. 기존의 유선기반의 시스템의 경우 광케이블을 이용하는 것 보다, 전국에 깔려있는 CDMA통신망을 이용하므로 별도의 설치 및 유지관리가 필요하지 않은 장점이 있다.

### 2.2 센서모듈 (u-node)구성

센서(가속도, 변형률, 온도 등)와 ZigBee노드 및 A/D 보드를 통합한 패키지는 u-node라 한다(그림 2). 기본적으로 u-node에는 이 세 가지가 통합되어 있으며, 센서를 부착하는 위치가 곧 ZigBee노드가 위치하게 되며 그림 1과 같이 적절한 형태(mesh방식 또는 star방식)로 네트워크를 구성하게 된다. 행어에 설치되는 가속도계의 경우 u-node는 하나의 패키지로 통합되며 동적센서들의 네트워크는 star방식으로 u-gateway와 통신하는 방식을 취하였다. 보강형 내부의 경우, 보강형이 steel로 이루어져 있어, 전파간의 간섭으로 인하여, 동적센서들간 star 방식의 네트워크를 구성할 수 없다. 이러한 경우에 한하여, 동적 센서들의 u-node는 센서/AD-Board와 ZigBee는 분리되어 ZigBee모듈을 보강형 외부에 설치하는 방식을 취하였다. 단, 온도 센서의 경우 정적센서로서 보강형 내부 및 외부 모두 mesh방식의 네트워크가 가능하다.

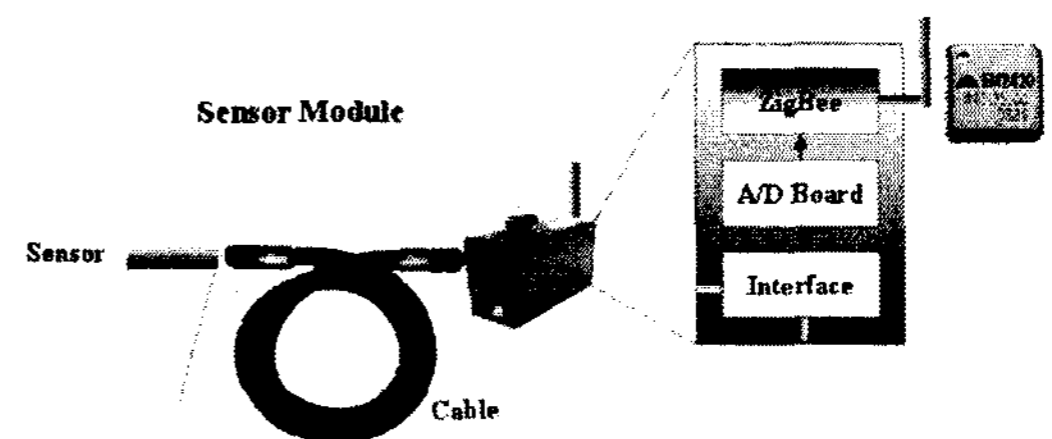


그림 2. u-node (ubiquitous-node)

### 2.3 장거리 통신망의 구성

센서모듈 (u-node)의 데이터는 근거리 Zigbee 통신망으로 통해서 Zigbee 모듈과 CDMA 모뎀의 정합모듈은 u-gateway로 전달이 된다. CDMA 모뎀의 경우 이미 상용화 되서 널리 사용되고 있으므로 본 연구에서는 따로 실험을 통하여 신뢰도를 측정하지 않았다. CDMA를 이용한 장거리 데이터 전송을 통하여, 값비싼 광케이블 설치 및 유지관리가 필요 없어 졌다. 아래 그림에서 보는 바와 같이 u-node의 데이터는 u-gateway를 통해서 관측 시스템으로 전송이 된다.

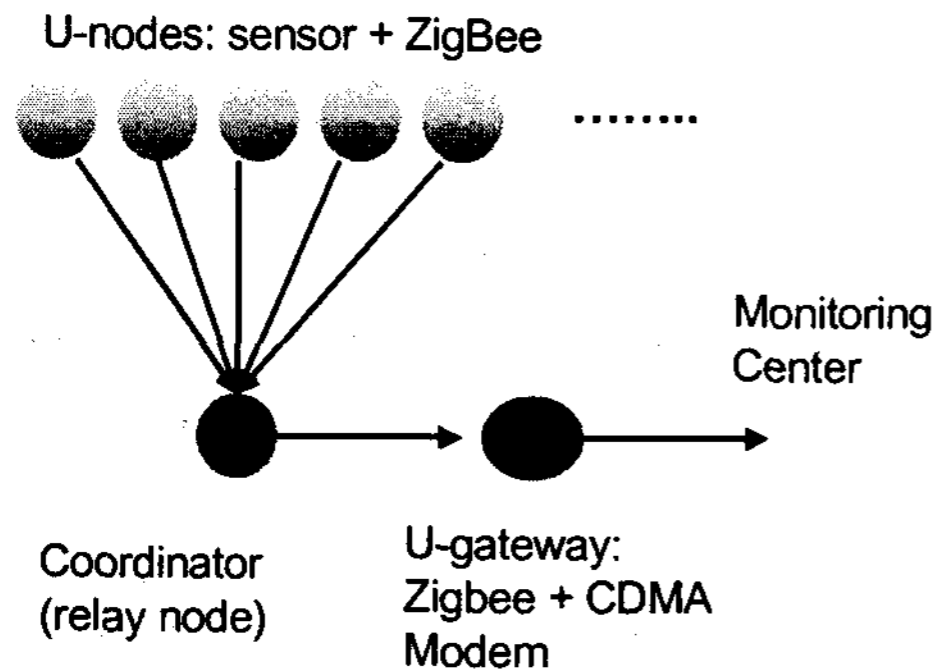


그림 3. 무선 데이터 흐름도

## 3. USN의 신뢰도 테스트

### 3.1 보강형 내부의 USN 테스트

USN을 이용한 실시간 교량계측 시스템의 경우 전송되는 데이터의 신뢰도가 매우 중요하다. 저자들은 장거리 부분과 근거리 부분의 통신망을 따로 구성하여 따로 실험을 수행하였다. 장거리 부분은 SKTelecom이 이미 상업적으로 사용하고 있었기 때문에 별도의 실험은 수행하지 않았으며 교량의 보강형 내부에서의 ZigBee 통신 테스트를 수행하였으며, 교량 외부에서의 ZigBee통신 테스트를 수행하였다.

모든 센서는 동적센서 (초당 60-100개의 데이터)를 전송하는 것을 가정으로 하여 실험을 수행하였다.

보강형 내부는 steel로 이루어져있어 무선통신의 경우 매우 열악한 상황이다. 외부와의 통신은 물론이고, 내부에서도 fading 현상이 극심하여, 최적의 antenna 조합과 최적의 위치 선정을 위한 수백차례의 실험을 거듭하였다.

아래 그림에서는 보강형 내부에 설치되는 2축방향의 가속도계와 변형율계의 설치 위치를 보여주고 있다. 표 1에서는 보강형 내부의 동적센서의 통신테스트 결과를 보여주고 있다. 내부의 열악한 통신환경을 고려해 볼때에 실험실에서와 같은 높은 성능 (1개의 코디네이터가 20개의 동적센서 관리)은 얻을 수 없었으며, 최대 12개의 u-node를 1개의 코디네이터가 관리할 수 있음을 보여주었다. 이는 지향성안테나 및 무지향성 안테나, 그리고 메모리 버퍼의 조절 등으로 최적화된 통신 조건을 구성하였다.

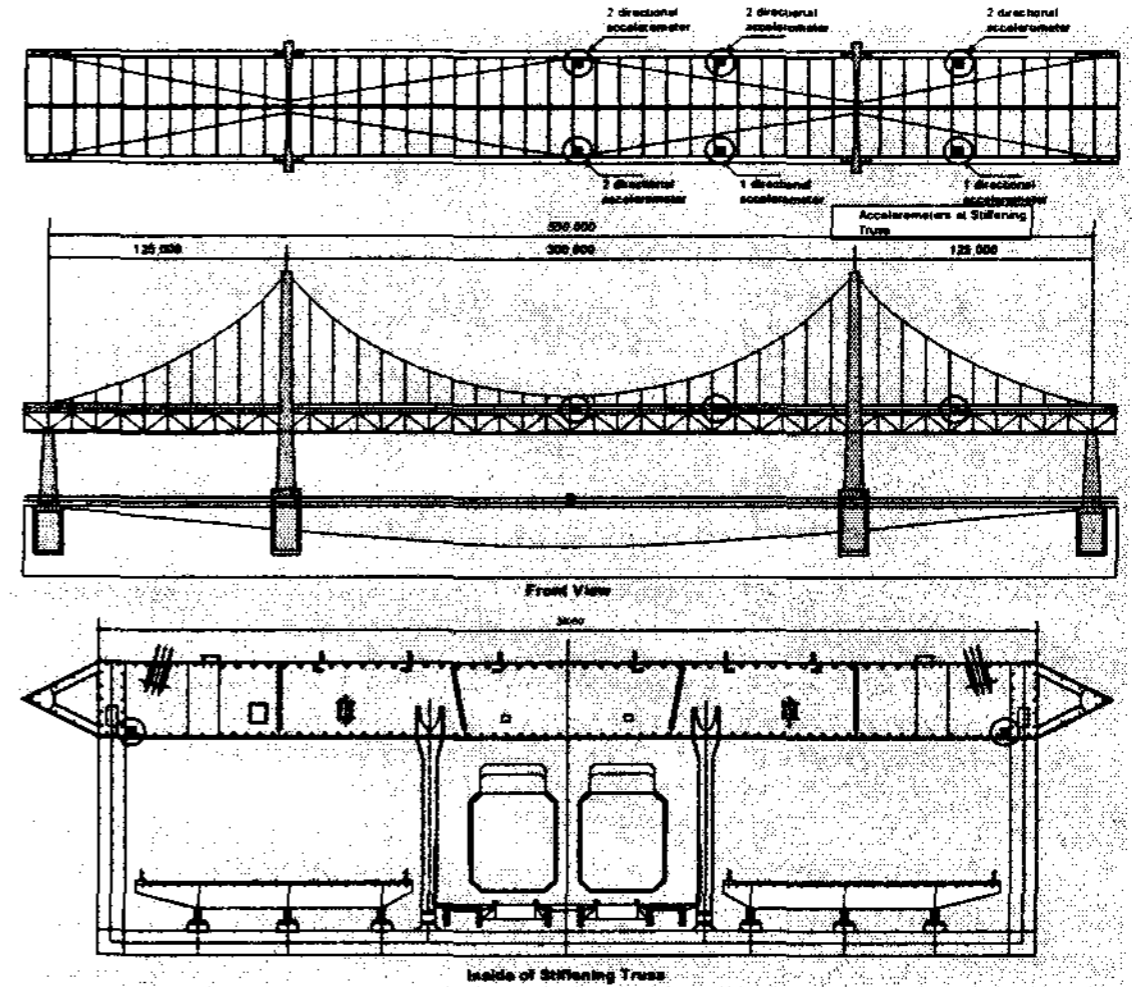


그림 4. 보강형 내부 u-node설치 위치

표 1. 보강형 내부 동적 u-node 실험 결과

메모리 버퍼	코디네이터/u-node의 안테나	작동하지 않는 유닛의 갯수	테스트한 유닛 갯수
메모리 버퍼 사용 안 함	무지향성/무지향성	5	12
	지향성/무지향성	6	12
	지향성/무지향성 (센서간의 간격을 넓게 벌림)	4	12
	무지향성/무지향성 (6개의 센서만으로 실험)	0	6
메모리 버퍼 사용	무지향성/무지향성 (13 개의 센서 실험)	3	13
	무지향성/무지향성	3	12
	지향성/무지향성	5	12
	지향성/무지향성 (넓은 앵글의 안테나 이용)	3	12
	무지향성/지향성	5	12

### 3.2 교량 외부의 USN 테스트

교량 외부의 경우 특별히 통신에 간섭을 주는 방해물이 없으며 단지 통신 거리만이 주요한 사항으로서 다음 그림에 나오는 것과 같은 결과를 얻었다. 코디네이터 1개가 센서의 수에 관계없이 300미터 이상의 거리를 관리 하는 것이 가능 하였다.

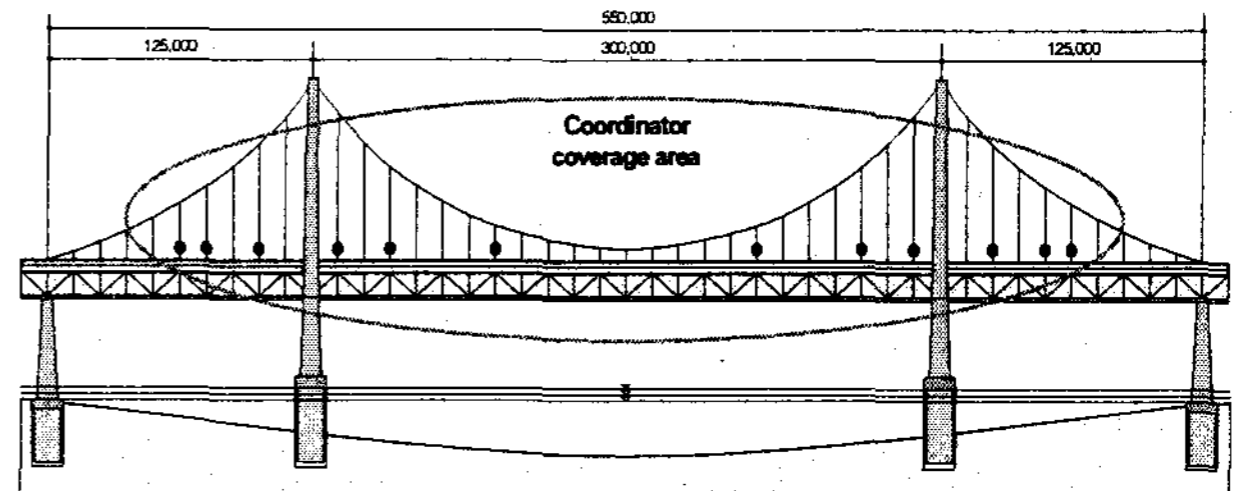


그림 5. 교량 외부 통신 가능 거리

### 3.3 향후 테스트 계획

저자들은 현재 테스트 베드 구축을 수행중이며 3개월간의 시험 운영을 통하여 상용화 가능한 시스템의 개발을 목표로 하고 있다. 교량 외부의 경우 통신상 전혀 문제가

없음을 알았고, 내부의 경우 fading을 최소화 할 수 있는 최적의 조건을 찾아내었다. 안정적인 테스트 베드 운영을 바탕으로 좀더 최적화된 u-node와 u-gateway의 위치를 판별할 것이다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구를 통하여서 ZigBee를 이용하여 매우 열악한 통신환경인 교량 내부에서의 통신이 실제 사용 가능한 수준으로 구성이 가능함을 밝혀내었다. 또한 교량 외부 (즉, 방해물이 없는 경우)에는 전혀 통신상의 문제가 없음을 밝혀내었다.

센서와 A/D보드는 직접 개발을 하여 값비싼 data logger를 대체 하였으며, CDMA를 이용하여 값비싼 광케이블을 대체 하였다.

u-node가 일체화되고 무선화 됨에 따라서 u-node의 고장 발생시 손쉽게 u-node를 교체 하는 것으로서 유지관리가 가능해 졌다. 또한 이미 상용화 되어 이용되고 있는 CDMA 통신망을 이용함에 따라서 교량 관리자는 장거리 통신망의 유지관리에 어려움을 덜게 되었다.

교량 상태의 실시간 모니터링 데이터를 바탕으로 교량 구조 및 관리 전문가에게 많은 유익한 정보를 제공할 뿐

아니라, 교량의 소유자에게도 교량 상태를 평가하고 자산 가치를 환산하는 데에 있어 과학적이고 합리적인 데이터를 제공한다는 점에서 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 SKTelecom의 연구비 지원사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 SKTelecom 관련자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Sumitro, S., Matsui, Y., Kono, M., Okamoto, T., and Fuji, K. (2001), "Long Span Bridge Health Monitoring System in Japan," Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, Proceedings of SPIE, vol 4337, pp. 517-524.
2. 박민석, 김성곤 (2000), "고속도로상 교량계측모니터링시스템의 통합", 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 503-506.
3. 박찬민, 박종철 (2003), "계측자료를 이용한 서해대교 사장교구간의 거동 분석", 대한토목학회 2003년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 571-576.