

# 무선센서네트워크를 이용한 터널 모니터링 시스템

김형우<sup>1</sup>, 한진우<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KT R&D부문 미래기술연구소 연구전문그룹, <sup>2</sup>KT R&D부문 인프라연구소 FTTH 개발담당

## Tunnel Inspection and Monitoring System by Wireless Sensor Network

<sup>1</sup>Kim, Hyung-Woo, <sup>2</sup>Han, Jin-Woo

<sup>1,2</sup>KT Research and Development Group

**Abstract** - In this paper, we deployed the tunnel inspection and monitoring system by wireless sensor network. It is shown that the wireless sensor network which is composed of sensor, wireless communication module, and gateway system can be applied to tunnel monitoring system. Sensors included herein are acceleration transducers, fire-alarm sensors, water-level sensors, and magnetic contact sensors. It is also found that the wireless sensor network can deliver sensing data reliably by ad-hoc networking technology. The gateway system that can send the sensing data to server by CDMA (code division multiple access) is developed. Finally, monitoring system is constructed by web service technology, and it is observed that this system can monitor the present state of tunnel without difficulties. Furthermore, the above system provides an alternative to inspect and monitor the tunnel efficiently where the conventional wired system cannot be applied.

*keywords:* Structure health monitoring; wireless sensor network; tunnel inspection

### 1. 서론

구조물의 상태 모니터링(Structural Health Monitoring) 분야에 IT기술을 적용하고자 하는 시도가 최근 활발히 진행되고 있다. 광섬유센서(optical fiber sensor)에 의한 교량의 안전상태를 24시간 감시할 수 있는 시스템이 개발되어 현재 많은 교량에 설치 운용되고 있는가 하면[1-3], 무선센서네트워크(Wireless Sensor Network)에 의해 구조물의 상태를 항상 감시하는 시스템도 개발되어 일부 분야에 적용되고 있다[4, 5].

유선에 의한 구조물의 상태 모니터링 방법은 안정된 계측이 가능하지만 센서를 설치할 수 없는 지역에 적용할 수 없으며 계측지점 수에 따른 설치비 및 운영

비가 선형적으로 증가하며 유지보수가 어려운 단점이 있다. 이에 반하여 무선센서네트워크에 의한 시설물 상태 모니터링 시스템은 센서의 설치 및 유지보수가 용이하며 설치비용이 저렴하고 많은 수의 센서 설치로 글로벌한 모니터링을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 지금까지 개발된 무선센서네트워크는 전원이 빨리 고갈되어 원하는 기간 동안 모니터링을 수행할 수 없다는 문제점이 지적되고 있다. 이를 해결하기 위하여 전력소모량이 적고 수명이 긴 무선센서네트워크 개발에 대한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다[6, 7].

본 논문에서는 구조물 안전점검의 필요성, 구조물 모니터링에 적합한 무선센서네트워크의 요구조건, 무선센서네트워크 기술동향, 실제 근거리 무선센서네트워크에 의한 구조물 감시시스템 적용사례를 소개하였다.

### 2. 구조물 상태 모니터링 (Structural Health Monitoring)

#### 2.1 구조물 상태 모니터링의 중요성

구조물의 붕괴사고는 지진과 같은 천재지변을 제외하고는 구조적 손상이 누적됨에 따라 점진적으로 발생하는 것이 일반적이므로 육안으로 구분할 수 없는 미세한 거동을 모니터링 시스템을 이용해 감지해낸다면 사전에 붕괴사고를 방지할 수 있다[5]. 지난 몇 년간 대형 건설사고 등으로 인하여 구조물 안전진단 및 모니터링 기술에 대한 중요성이 증가하고 있지만, 현재 시행하고 있는 구조물 안전진단 및 모니터링 기술은 대다수 인력에 의한 수동 계측에 의존하고 있으므로 데이터 수집이 비효율적이며 경비 및 인력을 많이 투입해야 하는 등의 문제점을 안고 있다. 이로 인하여 합리적이고 효과적인 구조물 모니터링 기술 개발이 절실히 필요하며 특히 공공시설과 사회간접자본시설의 경우 작은 구조상의 문제점으로도 엄청난 인명 및 재산피해를 야기할 수 있다는 점에서 구조물에 대한 실시간 상태 모니터링 시스템이 필요하다고 하겠다.

#### 2.2 구조물 상태 모니터링을 위한 무선센서네트워

### 크 요구조건

인터넷 기술의 발달로 교량과 고속도로와 같은 구조물 모니터링 기술이 크게 발전하였는데, 예를 들면 비디오 신호를 포함한 센서 데이터는 구조물의 장기적인 상태를 평가하고 교통량을 제어할 수 있으며 지진발생과 같은 응급상황 시 안전대책을 수립하는데 활용될 수 있다. 이를 위하여 개발된 자동화된 신호분석 알고리즘은 입력신호를 처리한 후 만일 처리된 신호가 미리 설정해 둔 어느 한계치를 벗어나면 위험신호를 보내주게 된다. 이때 구조물 특성에 적합한 센서를 선정하여 설치하고 구조물의 안전에 영향을 미칠 수 있는 한계치를 정확히 설정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

무선센서네트워크의 장점은 앞에서 언급한 바와 같이 여러 가지 센서를 조밀하게 설치함으로써 구조물의 전체적인 거동을 분석할 수 있으며 계측장비를 간단히 구축할 수 있다는 데에 있다. 이를 위하여 최근에 개발되고 있는 무선센서네트워크는 센서노드의 멀티홉 네트워크에 의해 구조물의 거동을 수집한 후 이를 베이스 스테이션에 디스플레이 하거나 저장을 하게 된다. 구조물의 거동은 발생 시 매우 빠르게 진행되므로 일반적인 센싱항목, 예를 들어 온도, 습도, 조도 등과 달리 샘플링 주파수를 매우 빠르게 설정하여야 한다(일반적으로 약 100Hz). 또한 구조물 모니터링은 데이터 전송 시 자료가 누락되지 않아야 하며 서로 다른 센서로부터 획득된 값의 시간차이가 없어야 한다[8]. 다시 말하면 기존의 무선센싱유닛은 수집된 데이터가 한 개의 홉에 의해 베이스 스테이션에 직접 전달되었지만, 최근에는 다중 홉에 의해 데이터의 전송이 이루어지게 되어 서로 다른 센서로부터 획득된 데이터의 시간일치가 중요함을 의미한다[9].

#### 2.2.1 센서의 구조적 응답

구조물을 모니터링 하기 위해서는 여러 가지의 센서, 예를 들면 변형량센서, 스트레인게이지, 가속도계 등이 필요하다. 이 가운데 가속도계의 경우를 예로 들면 가속도 센서의 민감도가 매우 중요하며 동적인 범위와 잡음에 의해 영향을 받고 구조물의 주파수 응답은 수십 Hz 범위 내에 있으므로 샘플링 주파수를 최소한 100Hz로 설정해야 한다[8]. 이와 같이 구조물의 모니터링 시스템은 구조물 종류, 측정대상, 적용센서에 따라 적합한 요구조건을 각각 만족해야 한다.

#### 2.2.2 구조적 자료획득시스템

대형 구조물에 센서를 설치하기에 앞서 구조물의 취약부분과 파괴 시 큰 피해를 줄 수 있는 부재에 센서를 집중적으로 배치해야 한다. 기존에는 전선을 각각의 센서에 연결하여 데이터 수집장비 까지 연결하였

으나 비용이 많이 들고 또한 데이터 수집장비는 고정된 수의 채널만을 지원하며 매우 정교한 신호분석을 포함하고 있으므로 현장에 적용하기에 어려움이 많다. 한편, 간단하고 데이터를 수집하는데 있어서 쉽게 대응할 수 있는 데이터로거는 자료해석능력이 없으나 수집된 데이터를 저장하고 넓은 대역폭을 가지면서 전달할 수 있는 특성을 가지고 있다. 수 많은 센서에 의해 수집된 데이터를 무선통신 방식으로 데이터로거에 의해 중앙서버 해석시스템에 전달된다면 구조물의 전체적인 거동을 해석하거나 모니터링을 수행할 수 있을 것이다. 이러한 데이터로거는 전력소모량이 적어야 하며 최소한 구조물 모니터링 기간 동안 그 기능을 수행할 수 있어야 한다[8].

### 3. 무선센서네트워크 기술동향

#### 3.1 블루투스

##### 3.1.1 블루투스의 개요

블루투스는 전화기, 노트북, 컴퓨터, 카메라, 프린터 등과 같이 서로 다른 기능을 가진 장치들을 연결하기 위해 설계된 무선랜 기술이다. 블루투스 랜은 네트워크가 자발적으로 형성되는 애드혹 네트워크이다. 장치들은 서로를 발견하여 피코넷이라는 네트워크를 만든다. 블루투스 랜은 장치 중 하나가 연결기능이 있다면 인터넷에 연결될 수 있다. 현재 블루투스 기술은 IEEE 802.15 표준안으로 정의된 프로토콜의 구현물이다[10].

블루투스는 비허가 방송파 대역인 2.4GHz의 주파수를 사용하며 10~100m 까지 통신이 가능하다. 통신 방식은 간섭 방지를 위하여 주파수 호핑방식을 사용(79채널/1MHz, 1600hop/sec)하며 소비 전력은 대기 상태 시 0.3mA, 송수신시 최대 30mA이다. 블루투스의 송수신 장치는 79개의 1MHz 채널을 초당 1,600번씩 동일한 절차에 따라 채널을 바꾸어 가면서 통신을 한다. 이와 같이 대역확산통신방식으로 주파수 호핑을 사용하며 초당 1,600번 주파수를 번갈아가며 전송하므로 전파의 중첩을 방지할 수 있다. 하나의 패킷을 송신하면 현재의 주파수와 다른 주파수로 호핑을 하며 이러한 동작이 매우 빠르게 일어나므로 동일 주파수에 머무르는 시간이 아주 짧고 다른 신호와 간섭을 방지하는 것이 가능하다.

##### 3.1.2 블루투스의 네트워크

블루투스는 마스터와 슬레이브 개념을 사용하여 통신하게 되는데 블루투스의 네트워크 형식에는 피코넷과 스캐터넷이 있다. 피코넷은 하나의 마스터를 중심으로 최대 7개의 슬레이브가 연결되어 통신을 할 수 있고 피코넷의 슬레이브 하나를 중심으로 또 다른 피코

넷의 형성이 가능한데 이러한 피코넷의 집합을 스케터넷이라 한다. 하나의 피코넷에서는 마스터가 모든 슬레이브를 관할하며 슬레이브는 마스터에게만 통신이 가능하다.

### 3.2 지그비

지그비는 데이터의 전송속도가 느리며 전원을 적게 소모하며 값이 저렴하며 스스로 망을 구성할 수 있다는 점에서 다른 무선기준보다 다르다. 따라서, 지그비는 다른 무선기준이 부적합한 분야에 적용될 수 있으며 유비쿼터스 네트워킹을 우리에게 보다 가깝게 만들어준다. 주요 적용분야로는 (1) 주택, 공장, 창고의 자동화와 제어분야, (2) 안전, 건강, 환경 모니터링, (3) 군사작전, 화재진압, 실시간 재고관리와 같은 상황인지 및 자산관리, (4) 오락 등을 들 수 있다.

#### 3.2.1 지그비의 개요

지그비는 무선개인영역네트워크를 위해 IEEE802.15.4의 표준에 근거하여 저전력으로 운영되는 무선네트워크 통신규약이다. 지그비는 건전지 1개로 수개월 이상 작동할 수 있으며 소량의 데이터를 20~250kbps의 속도로 처리할 수 있기 때문에 최근 모니터링이 요구되는 분야인 센서 네트워크에 적용 가능한 무선통신 프로토콜로 인식되고 있다. 지그비의 도달거리는 10~300m이며 메쉬네트워크를 지원하고 1개의 마스터당 65,536개의 노드가 존재할 수 있다.

#### 3.2.2 지그비 프로토콜과 네트워크

지그비 프로토콜은 비콘 네트워크와 논비콘 네트워크의 두 가지를 모두 지원하는데 비콘 네트워크에서는 네트워크 노드와 다른 노드들 간에 그들의 존재를 확인할 수 있는 신호를 보내고 신호와 신호사이에는 휴지 상태로 들어간다. 이렇게 하여 노드의 작동 시간을 줄이고 전원의 수명을 연장할 수 있다. 일반적으로 지그비 프로토콜은 통신에 의한 전력소비를 절감할 수 있으며 통신 시간을 최소화 할 수 있다. 비콘 네트워크에서는 특정 시간에 노드들간의 정보를 주고받기 위해 각 노드들의 작동과 휴면을 동기 시킨다. 논비콘 네트워크에서는 어떤 디바이스는 항상 작동하며 또 다른 디바이스는 거의 항상 휴지상태에 있기 때문에 전력을 비대칭적으로 소비한다.

지그비는 점 대 점, 점 대 다수의 점, 멀티홉 메쉬 타입의 네트워크를 구성할 수 있도록 관련 기능을 지원한다. 이러한 세 가지 형태의 네트워크 구성은 각 필요에 따라서 구성될 수 있으나 유비쿼터스 센서넷이 추구하는 멀티홉 메쉬 기능의 구현은 지그비 네트워크 프로토콜이 지니는 장점이 될 수 있다. 지그비는 스타, 메쉬, 클러스터 트리의 형태로 네트워크 토폴리

지를 구성할 수 있으며 이에 따른 관련 기능을 지원한다.

## 4. 근거리 무선센서네트워크에 의한 구조물 모니터링 시스템 적용사례

### 4.1 개요

유비쿼터스 환경의 구조물 모니터링의 도입 가능성을 확인하기 위하여 먼저 적용대상 구조물을 선정하고 모니터링 항목 및 모니터링에 필요한 요구조건을 분석하였다. 해당 구조물은 지하에 건설되어 있는 터널로서 다수의 센서가 요구되며 구조물의 상태에 따라 센서가 추가될 가능성이 높고 유선방식에 의한 모니터링 시스템의 적용이 어려운 현장이다. 또한 구조물의 모니터링 자료가 네트워크 상에서 공유되어 관련 전문가의 해석을 필요로 하나 실제로 이러한 자료의 공유방법이 없는 곳을 선정하였다.

적용할 시스템은 통신이 열악한 지하 환경에서도 무선시스템을 구성할 수 있으며 데이터의 호환성이 우수하여 여러 시스템과 용이하게 결합할 수 있도록 설계하였다. 그리고 애드혹 기반의 메쉬네트워크 환경이 구현되어 있어 오토라우팅과 다중홉 기능을 제공할 수 있도록 하였다.

### 4.2 시스템 구성

본 연구에서는 지그비 모듈을 이용하여 센서네트워크를 구축하고 이를 통해 수집된 데이터를 가공 후 최종 서버단에 전송하는 기능을 수행하는 게이트웨이 시스템으로 구성하였다. 센서네트워크는 센싱노드, 릴레이노드, 싱크노드(게이트웨이)로 구성하였으며 게이트웨이는 지그비와 코드분할다중접속 통신 방식을 적용하였다. 적용한 지그비 모뎀은 가시거리가 완전히 확보된 환경에서 1 홉의 도달거리가 약 1km 이상되는 제품이지만 지하터널에서는 1 홉의 도달거리가 약 25~30m로 감소하여 통신상태가 매우 불량해짐을 확인할 수 있었으며 오토릴레이를 이용한 다중홉 통신 기능의 신뢰성이 매우 떨어지는 것으로 나타났다. 이를 해결하기 위하여 시스템 구성에 필요한 노드를 재배치하고 시스템의 안정성을 도모하기 위해 안전율을 고려한 노드 수를 산정하였다.

최종 설치된 각 노드별 시스템 가운데 센싱노드는 수위, 가속도, 화재 등을 감지하는 센서, 지그비 모뎀, 소형 배터리로 구성되어 있으며 릴레이노드는 지그비 모뎀과 소형 배터리로 구성되어 있다. 이와 같이 구축된 네트워크에 의하여 센싱된 데이터가 릴레이노드를 통해 무선으로 게이트웨이까지 전달되며 다시 게이트웨이에서 서버에 전송될 수 있도록 구성하였다.

### 4.3 무선센서네트워크 모니터링 웹페이지 구현

센싱노드에서는 10분 간격으로 모니터링을 하도록 세팅하였으며 게이트웨이는 센싱노드로부터 전송된 데이터를 처리하여 코드분할다중접속방식의 무선데이터 통신을 이용하여 서버로 전송된다. 또한 전송된 데이터는 인터넷이 가능한 모든 컴퓨터에서 모니터링할 수 있도록 하기 위하여 웹페이지를 구축하였으며 그림 1에 실시간으로 센싱된 자료를 모니터링한 웹페이지를 제시하였다.

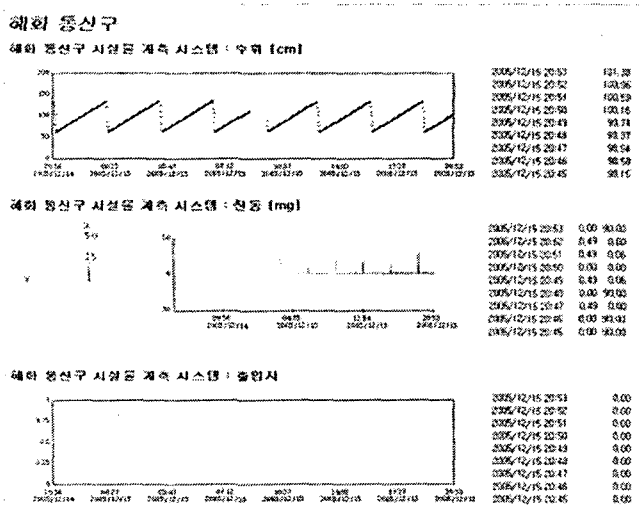


그림 1. 무선센서네트워크에 의한 모니터링 (예)

## 5. 결론

본 논문은 무선센서네트워크에 의한 터널모니터링시스템 개발에 관한 것으로서 주로 터널내부의 화재, 침수, 진동, 출입자 통행 감지를 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 화재감지, 수위, 가속도, 접촉 센서를 각각 설치하였으며 근거리통신모듈(지그비)를 사용하여 센싱노드를 구성하였다. 또한 센싱노드에서 관측된 데이터를 게이트웨이까지 전달할 수 있도록 릴레이노드를 일정간격으로 배치하였으며 게이트웨이에서 서버까지의 통신은 코드분할다중접속 방식을 사용하였다. 본 시스템을 지하 터널에 적용한 결과 센싱된 데이터는 다중홉핑과 에드혹 네트워크 기술에 의해 게이트웨이까지 안정적으로 전송됨을 확인하였으며, 웹 서비스 기술에 의해 터널의 상태를 언제 어디서나 24시간 감시할 수 있는 것으로 파악되었다. 본 시스템은 종래의 유선방식에 의한 모니터링을 적용하기 곤란하고 터널 내부 환경이 열악한 경우에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### [참고 문헌]

[1] Chan T.H.T., Yu L., Tam H.Y., Liu S.Y.,

Chung W.H., Cheng L.K., "Fiber Bragg grating for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation," *Engineering Structures*, Vol.28, 2006, pp.648-659.

[2] Ren-Guey Lee, Kuei-Chien Chen, Chien-Chih Lai, Shao-Shan Chiang, Hsin-SHeng Liu, Ming-Shyan Wei, "A backup routing with wireless sensor network for bridge monitoring system," *Measurement*, Article in Press, 2006.

[3] J.M. Ko, Y.Q. Ni, "Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges," *Engineering Structures*, Vol.27, 2005, pp.1715-1725.

[4] Ning Xu, Sumit Rangwala, Krishna Kant Chintalapudi, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, "A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring," *SenSys '04*, Baltimore, Maryland, November 3-5, 2004.

[5] 이정석, "인터넷기반 구조조건도 모니터링 시스템," 한국시설안전기술공단 시설물 보수보강 및 진단 기술.

[6] Jose A. Gutierrez, Marco Naeve, Ed Callaway, Monique Bourgeois, Vinay Mitter, Bob Heile, "IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks," *IEEE Network*, September/October, 2001, pp.12-19.

[7] Vijay Raghunathan, Saurabh Ganeriwal, and Mani Srivastava, "Emerging Techniques for Long Lived Wireless Sensor Networks," *IEEE Communication Magazine*, April 2006, pp.108-114.

[8] Elgamal A., Conte J.P., and Fraser M. "Health Monitoring For Civil Infrastructure".

[9] Jeongyeup Paek, Nupur Kothari, Krishna Chintalapudi, Sumit Rangwala, Ning Xu, John Caffrey, Ramesh Govindan, Sami Masri, John Wallace and Daniel Whang, "The Performance of a Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring".

[10] Behrouz A. Forouzan, "Data Communication and Networking," 3rd edition, McGraw-Hill, 2005.