

센서 네트워크 기반 실시간 교량 안전관리를 위한 지능형 구조 건전성 모니터링시스템 개발

Development of Real Time Smart Structure Monitoring System for Bridge Safety Maintenance using Sensor Network

조병완, 김현, 이윤성, 김도근
한양대학교 건설환경공학과

Byung-Wan Jo(joycon@hanmail.net), Heon Kim(military744@nate.com),
Yun-Sung Lee(nikeshoo@nate.com), Do-Keun Kim(dk76kim@nate.com)

요약

최근 교량의 장수명화와 이용자의 안전을 보장하기 위한 첨단IT기술을 이용한 유지관리 기법이 세계적으로 각광을 받고 있다. 이에 본 논문에서는 무선계측센서를 이용하여 교량의 정적·동적 데이터를 취득 및 분석하여 교량의 거동상태를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 지능형 교량 구조 건전성 모니터링시스템을 개발하였다. 본 논문에서 개발한 모니터링 시스템은 교량의 주요 부재의 거동을 계측하기 위한 센서 및 계측데이터 전송을 위한 무선송수신시스템, 전체 시스템 관리를 위한 운영프로그램 및 데이터베이스로 구성되어 있다. 개발한 무선계측센서 기반의 모니터링 시스템의 성능검증을 위해 올림픽대교에 5종의 무선계측센서를 설치하였으며, 센서의 전원은 태양광 발전장치를 설치하여 자가 전원공급이 가능하도록 하였다. 성능검증을 위한 데이터는 시스템 구축완료 후 일주일간의 데이터를 활용하여, 유선시스템으로부터 취득된 데이터와 비교 분석하였으며, 이를 통해 지능형 구조 건전성 모니터링 시스템의 성능 및 실 교량 적용성을 검증하였다.

■ 중심어 : | 구조 | 안전 | 지능형 교량 모니터링 시스템 | 무선 | 센서 |

Abstract

As structures' long term performances and users' safety have been highlighted, a new maintenance technique using IT has drawn attention around the globe. Therefore, throughout the paper, by analyzing bridge's static and dynamic data using wireless measuring sensor, a "real time smart bridge monitoring system" has developed. Smart bridge monitoring system is consists of three main parts—a sensor that can measure major members' movement, a wireless system that informs the data from the sensor, and the database system that analysis the data. In order to test the performance of the system, five different were placed on the Olympic Bridge, Seoul. The power system of the sensors was replaced by self-sustain solar energy system. In order to validate data from the real time smart bridge monitoring system, the data was collected for a week from both wireless system and the wired system and the two data were compared to see the relevance.

■ keyword : | Structure | Safety | Smart Bridge Monitoring System | Wireless | Sensor |

* 본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(06건설핵심 B05)에 의해 수행된 것으로 본 연구를 가능케 한 국토교통부에 감사드립니다.

접수일자 : 2015년 08월 17일

수정일자 : 2015년 09월 07일

심사완료일 : 2015년 09월 09일

교신저자 : 김현, e-mail : military744@nate.com

I. 서론

교량은 국가 기간시설인 도로에 있어서 중요한 구조물로서 최근 들어 장대화와 함께 그 형태와 기능이 매우 복잡해지고 있으며[1], 주요부위 손상으로 제 기능을 다하지 못하는 경우 교통단절 및 보수보강 비용 증가 등 사회 경제적으로 미치는 영향이 매우 크다[2]. 또한 1994년 성수대교 붕괴사고와 2013년 미국 워싱턴주 I-5 교량 붕괴사고 등 사고 발생 시 대형사고로 이어질 수 있어 교량의 장수명화와 이용자의 안전을 보장하기 위한 유지관리 기술이 매우 중요한 이슈로 부각되고 있다[3].

최근에는 정보통신기술 및 안전진단센서 기술의 비약적인 발전으로 초소형, 고성능, 저비용의 가속도센서, 변형률 센서와 온도센서 등을 이용하여 교량의 구조적 건전성을 실시간으로 모니터링하여 이상상태를 조기에 예측하여 대형사고를 예방하는 교량 구조 건전성 모니터링 시스템에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있으며 많은 교량에 구축이 되고 있다[4][16]. 일반적으로 교량 구조 건전성 모니터링 시스템은 계측센서 및 유무선 통신장비와 같은 하드웨어, 신호처리 및 손상추정을 위한 소프트웨어로 구성 된다[5][6].

교량의 장수명화와 대형 사고를 미연에 방지하기 위한 교량 구조 건전성모니터링은 센서의 신호 계측과 데이터 분석 및 특정 분류를 통해 구조물의 거동응답과 구조성능의 이상 유무를 자동으로 판별하여 경보하는 일련의 과정으로 이루어져야한다. 하지만 현재 국내에 구축된 교량 구조 건전성 모니터링 시스템은 기술적 한계로 센서를 통한 단순 데이터 취득에 초점을 두고 있으며, 이상 상황 발생 시 수동으로 제어해야 하는 문제를 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위하여 계측센서를 통해 교량 구조물의 정적·동적 데이터를 수집하여 교량의 거동상태를 실시간으로 분석하고 중대한 결함 같은 이상신호 발생 시 관리자에게 경보를 발생하여 원인을 파악하고 신속하게 대처하여 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 센서 네트워크 기반 실시간 교량 안전관리를 위한 지능형 구조 건전성 모니터링 시스템

을 제안하였고, 실제 올림픽대교에 구축하여 성능을 검증하였다.

II. 관련 연구 동향

Straser은 유선에 기반의 모니터링 시스템을 대체하고 성능을 개선하기 위한 방안으로 무선계측시스템에 대한 연구를 1996년에 처음으로 수행하였으며, 구조물에 설치된 다양한 계측센서로 부터 수집한 데이터를 무선장치를 이용하여 데이터 획득 시스템으로 전송하는 무선 시스템을 제안하였다[7].

이 후 무선계측센서를 이용하여 실시간으로 교량의 손상에 따른 거동메커니즘의 변화를 조기에 감지한 후, 손상이 구조물 전체에 미치는 영향을 평가하는 센서 네트워크 기반 구조 건전성 모니터링 시스템 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8][9]. Kiremidjan은 저가형 무선계측센서 기반의 시설물 모니터링 시스템 적용 기술을 소개하였으며[8], Maser 등은 교량의 상태를 원격 감시할 수 있는 무선 교량 감시 시스템을 제안하였고[10], Linch 등은 개념 증명용 무선 센서 장치인 WIMMS(Wireless Modular Monitoring System)을 개발하였다[11]. 국내에서는 배인환 등이 GPS기술을 이용한 교량 건전도 모니터링에 관한 연구를 수행하였으며[12], 김경목 등은 효율적으로 원격 감시 및 데이터 수집을 할 수 있는 예약 기반 무선 센서 네트워크 시스템을 제안하였고[13], 김현수 등은 Mahalanobis지수를 적용한 구조건전성 모니터링 위한 데이터 분석 기법을 제시하였다[14].

현재 국내외에서 구조건전성 모니터링 시스템이 적용된 대표적 교량으로는 미국의 Commodore Barry교, 일본의 Akashi Kaiyo교, 홍콩의 Tsing Ma교, 덴마크의 Great Belt교, 캐나다의 Confederation교, 한국의 인천대교와 서해대교 등이 있으며, 최근은 세계적으로 일 정규모 이상의 교량에 있어서 모니터링시스템의 설계 및 구축이 입찰시 발주자에 의해 요구되고 있다[15].

III. 센서 네트워크 기반 지능형 구조 건전성 모니터링시스템

1. 시스템 개요

교량 구조 건전성 모니터링 시스템은 현장에 설치된 센서에서 획득한 데이터를 완벽하게 수신하고 이를 저장할 수 있어야 하며, 구조물에 중대한 결함이나 이상 징후가 발생하였을 경우 관리주체가 이를 파악할 수 있도록 경보를 하고 원인을 찾을 수 있는 데이터를 제공하여야 한다.

본 시스템은 가속도센서, 경사센서, 온도센서, 풍향풍속센서 등 다양한 계측 센서로부터 교량의 실시간 거동을 파악하여, 교량의 안전성과 사용성을 확보하는데 그 목적이 있으며, 계측된 주요 자료들은 초기 설계 데이터와 비교하여 교량의 현 상태를 파악하여 교량의 잔존 수명과 보수 보강시기를 판단하는데 이용된다. 또한 무선네트워크를 이용한 원격 모니터링을 통해 장소와 시간에 구애받지 않고 원격지에서 서버에 접속하여 효율적으로 관리자가 시스템을 관리할 수 있고, 현장에서 문제가 발생할 경우 프로그램 내에서 2단계 경보를 받

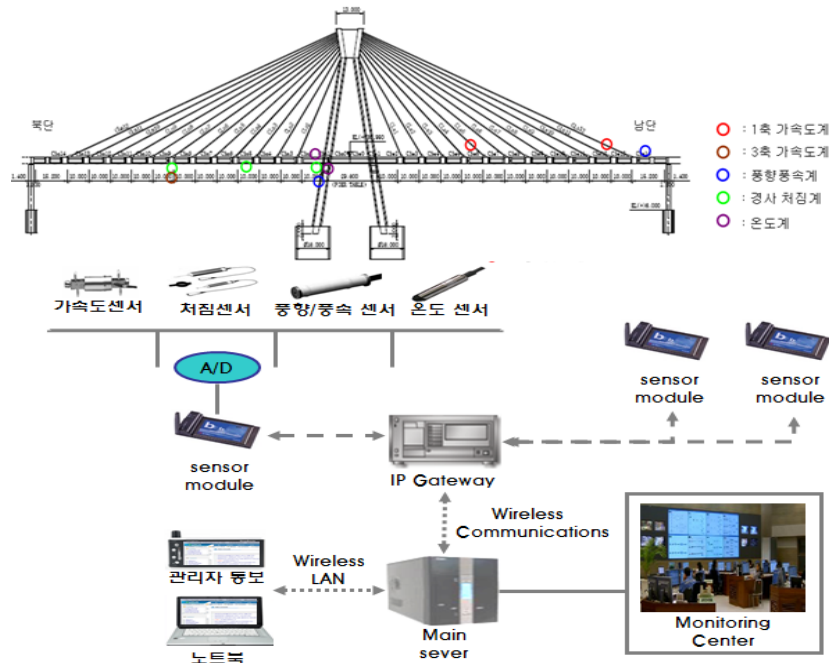


그림 1. 시스템 구성도

표 1. 시스템 구성

구분	내용
계측 센서 Unit	-가속도 센서, 온도센서, 풍향풍속계 등을 통한 교량의 동적응답 계측
무선 데이터 송수신 시스템	-각 센서에서 수집되는 데이터의 송수신을 담당하며, 데이터 송신을 담당하는 USN 송신기와 데이터 수신을 담당하는 Gateway로 구성
모니터링 프로그램	-계측을 수행하여 입력되는 계측결과를 처리하고 분류 -교량 전경 및 설치된 센서 위치 제공 및 상태 모니터링(연결상태, 통신상태, 전력 등) -센서별 이상 징후 또는 중대한 결함이 있을 경우 경보 및 원인 분석 데이터 제공
데이터베이스	-센서 종류, 수량(개소)별 데이터 모니터링(그래프) 등 관련 자료 저장

행하도록 하여, 신속하게 대응 할 수 있는 연계방안 체계를 구축하였으며, 효율적인 계측관리시스템이 운영 되도록 하였다[17].

2. 시스템 개발

본 논문에서 개발한 센서 네트워크 기반 지능형 구조 건전성 모니터링시스템은 계측센서unit, 무선데이터 송수신 시스템, 운영 모니터링 프로그램, 데이터베이스로 구성하였으며 각 모듈별 주요 기능은 [표 1]과 같다.

계측센서 unit는 1축 가속도계와 3축가속도계, 온도계, 경사계, 풍향풍속계의 5종류의 센서로 구성하였고, 가속도계는 교량 박스 거더 특성을 계측하며, 1축 가속도계의 사양은 [표 2]와 같다. 3축가속도계는 1축 가속도계 3개를 이용하여 3축 방향으로 설치하며 기본사양은 1축가속도계와 같다. 경사계는 박스 거더 처짐을 계측하며 기존시스템의 처짐계는 한 지점의 처짐만을 계측하는 반면 본 시스템에 적용된 처짐계는 3곳의 위치에서 계측할 수 있어 더 정확한 교량의 처짐을 계측할 수 있다.

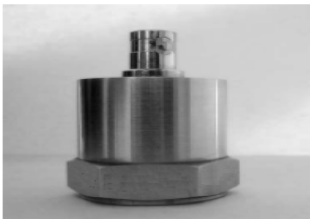


그림 2. 1축 가속도계

표 2. 1축 가속도계 상세 사양서

Dynamic range (g)	0.5
Sensitivity (mV/g)	10,000
Frequency Range (Hz, ±10%)	0.05 - 300
Resonant Frequency (kHz)	1.2
Broadband resolution (g)	0.000002

무선데이터 송수신 시스템은 각 센서에서 수집되는 데이터를 송수신하며, 데이터 송신을 담당하는 USN송신부와 데이터 수신을 담당하는 Gateway로 구성된다.

본 논문에서 개발한 무선데이터 송수신 시스템은 모니터링 소프트웨어를 사용하여 계측기 별로 계측 주기 및 계측시간 조정이 가능하다. 통신 모듈은 Buffer Memory를 사용하여 통신 장애시 데이터를 보관할 수 있으며, 통신 장애가 해결되면 서버에 전송하여 모든 데이터를 획득할 수 있다. 본 시스템을 이용하여 현장에 설치된 센서에서 모니터링 스테이션까지 무선통신 방식으로 데이터를 획득하는 것이 가능하며, 관리자가 원거리에서 접속하여 모니터링을 할 수 있는 원격 모니터링 서비스도 구현가능하다. [표 3][표 4]는 무선데이터 송수신 시스템의 상세사양을 나타낸다.

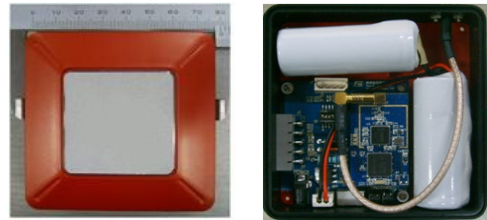


그림 3. USN 기반 통신 모듈 - 송신기

표 3. USN 기반 통신 모듈 송신기 사양

Processor	MSP430F1611
Internal Memory	RAM: 10Kb Flash: 48Kb
RF Chip	Chipcon(TI) CC2420
Frequency	2.4GHz
Data Rate	250KB
Network	Star, Multihop, Ad-hoc(Mesh network)
Serial Communications	Uart port 2EA
Interface	SPI/12C/3LEDs
Power	5V DC, 3.7V (Li-ion battery)
Size	3.8cm × 2.5cm

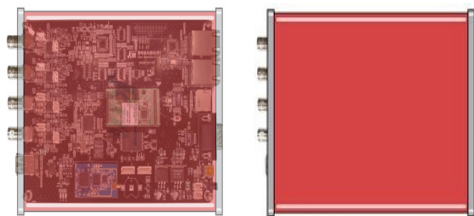


그림 4. USN 기반 통신 모듈 - Gateway

표 4. USN 기반 통신 모듈 Gateway 사양

Model name	Inogate1000
Processor	ARM926EJ-S (Eddy-CPU V2.1)
Internal Memory	RAM: 32MB SDRAM Flash: 8MB
External interface	19-bit address/16-bit data bus, Ethernet PHY
Ethernet interface	10/100 BASE-T (Auto/Half/Full)
Protocols	TCP, UDP, Telnet, ICMP, DHCP, TFTP, HTTP, SNMP 1&2, SSH, SSL
Operating system	Embedded real-time linux (Lemonix)
GPIO	Maximum 56 programmable IO pins
Operating temperature	-40℃~80℃
Power	3.3V
Size	18cm X 12.3cm

본 논문에서는 무선통신방식에서 발생하는 전원공급 문제를 해결하기 위해서 시스템에 사용되는 모든센서 및 USN 모듈을 운용하기 위해 태양광 발전장치를 개발 하였다. 태양광 발전장치는 교량 거더 박스 외부의 센서 및 통신모듈 운용을 위한 장치와 박스 내부의 센서 및 통신모듈을 운용하기 위한 장치로 구성되며 외부에 부착된 태양전지의 전원케이블이 교량내부의 덕트를 타고 들어와 전원을 공급하게 된다. [표 5]는 본 시스템에 사용된 각 센서별 소비전력과 태양 집광판의 필요 용량을 나타낸다.

센서를 통해 수집한 교량의 상시데이터 분석 및 관리 등 본 시스템 운영을 위한 모니터링 프로그램은 교량의 전경 및 설치된 센서 위치 제공 및 센서 위치를 클릭하

였을 경우 해당 센서 운영 현황을 제공하여, 센서 종류, 수량(개소)별 데이터 모니터링(그래프)이 가능하다. 또한, 가속도 계측의 경우 실시간 FFT분석과 진동응답을 통해 고유모드 추출 및 모드형상 Plot이 가능하며 케이블의 장력까지 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 설계 하였다. 또한 구조물에 중대한 결함이나 이상 징후가 발생하였을 경우 관리주체가 이를 파악할 수 있도록 경보를 하고 원인분석 데이터를 제공한다. 더불어 본 시스템은 계측과 동시에 기본적 통계처리 및 필요한 자료만 자동 필터링하는 알고리즘을 적용하여 자료의 저장 용량을 줄이고, 사용자가 쉽게 판단, 처리할 수 있는 환경으로 유저 인터페이스(UI)를 설계하였다.

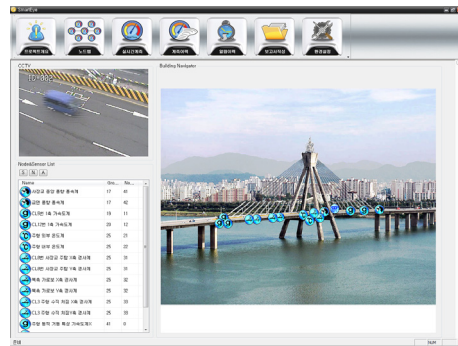


그림 5. 운영프로그램 메인화면

표 5. 센서별 소비전력

항 목	1축 가속도계	3축 가속도계	처짐용 경사계	온도센서	풍향풍속계	CCTV	
센서	모델번호	LC0116	LC0116	904-TH	PT100	Wind Sonic	SHC-740N
	전압(V)	24	24	12	3.7	12	12
	소비전류(mA)	2	6	14	5	50	375
센싱보드	전압	7.4	7.4	3.7	3.7	3.7	0
	소비전류	120	360	120	120	120	0
통신보드	종류	USN	블루투스	USN	USN	USN	Ethernet
	전압	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	0
	소비전류	100	90	100	100	100	0
소비전력(W)		1.27	3.11	0.94	0.79	1.37	4.50
12V 환산시 소비전류(mA)		105.50	258.75	78.50	66.04	114.50	375.00
태양전지 1일 발전전류량		3.72	9.13	2.77	2.33	4.04	13.24
태양전지 필요 전류량(A)		1.06	2.61	0.79	0.67	1.15	3.78
배터리 용량(W)		23.27	57.08	17.32	14.57	25.26	82.72
태양 집광판 필요 용량(W)		12.77	31.31	9.50	7.99	13.86	45.38

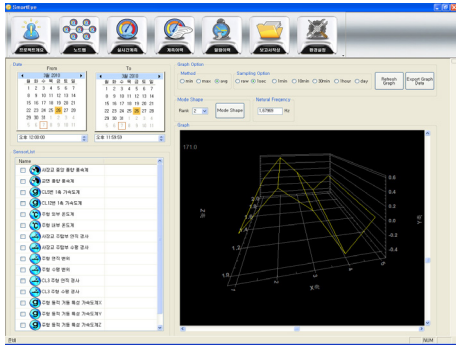


그림 6. 계측데이터 분석



그림 7. 1축 가속도계



그림 8. 태양전원시스템

1축 가속도계와 3축 가속도계 전원은 각각 독립적으로 구성되며 가속도계 부착 위치 부근에 태양광을 충분히 받을 수 있는 위치를 선정하여 태양전지를 설치하였다.

박스 거더 내부온도를 모니터링 하기 위해 거더 안쪽 벽면에 지그를 부착하고 USN 모듈과 온도계를 설치하였으며, 외부 온도를 모니터링 하기 위한 온도계는 거더 바닥면에 지그를 부착하고 USN 모듈을 설치하였다.

IV. 현장적용 및 검증

1. 대상 구조물 및 실험구성

본 논문에서는 시스템의 성능을 검증하기 위하여 올림픽대교를 대상으로 Pilot-test를 수행하였다. 올림픽대교는 서울 광진구 구의동과 송파구 풍납동을 연결하는 한강 상의 교량으로 길이 1,225m, 너비 32m(6차선)이며 1985년 11월 20일 착공하여 1990년 6월에 준공하였다. 올림픽대교는 콘크리트 공법에 의한 국내 최초의 사장교로서 사장교 구간은 300m이며, 높이 88m의 주탑 4개로 구성되어 있다.

Pilot-test에서는 올림픽대교 모니터링을 위해서 케이블의 장력 계측, 상판의 처짐 및 진동 계측, 풍향 풍속 계측, 콘크리트 박스 거더 내외부의 온도 계측 등을 수행 하였다. 올림픽대교 케이블의 장력을 계측하기 위하여 5번 케이블과 12번 케이블에 1축 가속도계를 2개 설치하였다.

1축 가속도계는 올림픽대교 주탑 케이블의 앵커에서 약 2m 지점에 가속도계 고정 치구와 U형 볼트를 이용하여 케이블에 장착하였고, 가속도계 고정 치구 내에는 가속도계가 설치되고 USN 통신모듈은 전원박스에 탑재하였다. 1축 가속도계 및 USN 모듈을 운용하기 위한 전원공급은 태양판을 이용하였으며, 올림픽대교 사장교 구간 메인 거더의 동적 거동을 모니터링은 3축 가속도계를 사용하였고, 사장교 케이블에 설치되는 1축가속도계와 동일한 센서를 3축 방향으로 각각 설치하였다.

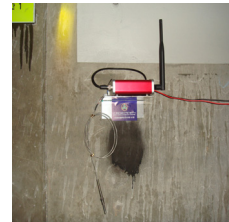


그림 9. 내부 온도계



그림 10. 외부 온도계

박스 거더의 처짐을 모니터링 하기 위해서 경사계를 설치하였으며, 기존 구조 건전성 모니터링 시스템에서는 교량의 중앙에 레이저 변위계 1개를 설치하여 처짐을 계측하였으나, 본 논문에서는 더욱 정밀한 값을 얻기 위하여 있도록 계측위치 2곳을 추가하여 모두 3곳에 경사계를 설치하였다.

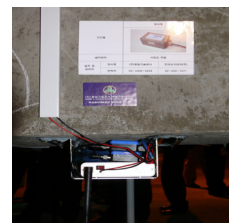


그림 11. 경사계



그림 12. 경사계

사장마지막으로 올림픽 대교 12번 케이블 끝단 사장교 구간 시작 지점과 주탑 주변 교 구간 중앙 지점에 풍향풍속계 1개를 설치하여 풍향풍속을 모니터링 하였다.



그림 13. 풍향풍속계



그림 14. 태양전지판

[그림 14]는 올림픽대교에 설치된 전체 센서 현황을 나타내고 있다.

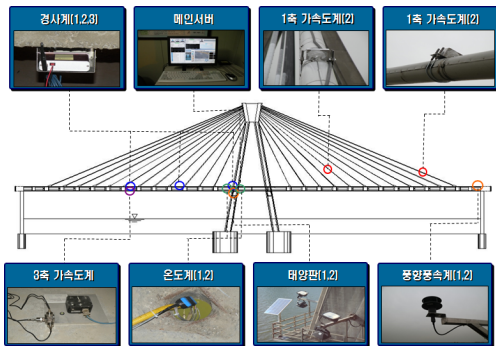


그림 15. 센서 설치

2. 무선 계측시스템 성능 비교

본 논문에서는 올림픽대교 모니터링 시스템 구축 완료 후 7일간 계측시스템으로부터 취득된 데이터를 활용하여, 교량 동특성(고유진동수)을 유선시스템으로부터 취득된 데이터와 비교분석하였다.

첫 번째로 무선계측시스템으로부터 취득된 가속도 응답을 활용하여 교축 직각방향, 교축 방향, 교량 연직방향 별 고유진동수를 추출하였으며, 각 축 방향별로 1차 모드를 산출하였다.

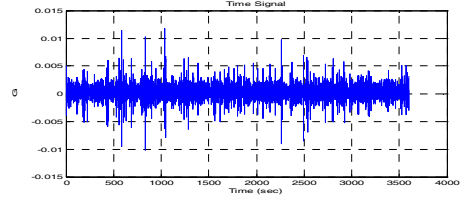


그림 16. 교축 직각방향 진동 가속도 응답

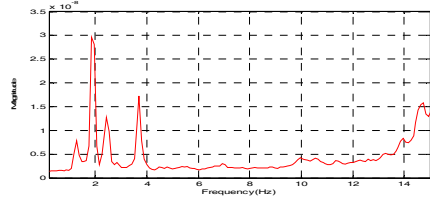


그림 17. 교축 직각방향 진동 응답 해석(주파수영역)

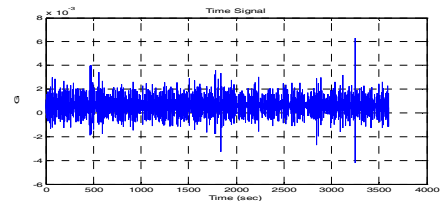


그림 18. 교축 방향 진동 가속도 응답

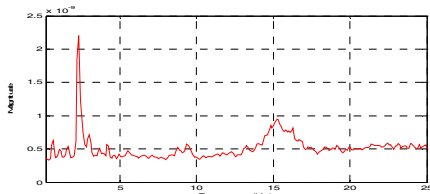


그림 19. 교축 방향 진동 응답 해석(주파수영역)

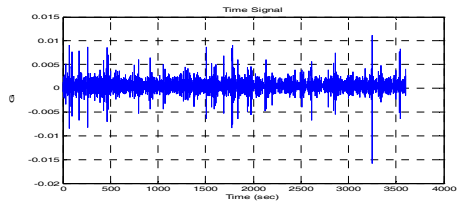


그림 20. 교량 연직방향 진동 가속도 응답

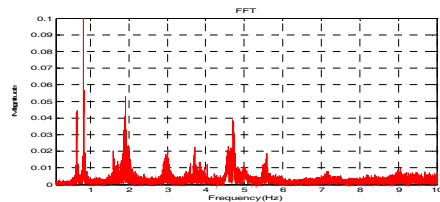


그림 21. 교량 연직방향 진동 응답 해석(주파수영역)

표 6. 올림픽대교 고유진동수 - 유·무선 계측데이터 비교

측방향	구분 시간	일별 고유진동수 (hz)													
		1일		2일		3일		4일		5일		6일		7일	
		유선	무선	유선	무선	유선	무선	유선	무선	유선	무선	유선	무선	유선	무선
교축 직각 방향	00시	1.3158	1.2695	1.3221	1.2695	1.2995	1.2695	1.3070	1.2695	1.3146	1.2698	1.3233	1.2695	1.3020	1.2695
	07시	1.2745	1.2694	1.2860	1.2696	1.3133	1.2695	1.2958	1.2695	1.2983	1.2698	1.2983	1.2695	1.2883	1.2695
	12시	1.2820	1.2695	1.2545	1.2696	1.2582	1.2696	1.2795	1.2694	1.2795	1.2696	1.2920	1.2697	1.3095	1.2695
	19시	1.2983	1.2697	1.3283	1.2697	1.3020	1.2694	1.3058	1.2695	1.3020	1.2697	1.3008	1.2695	1.3045	1.2696
교축 방향	00시	0.6835	0.6836	0.6685	0.6836	0.6698	0.6836	0.6835	0.6835	0.6673	0.6836	0.6760	0.6835	0.6961	0.6836
	07시	0.6623	0.6835	0.6623	0.6836	0.6698	0.6835	0.6785	0.6836	0.6860	0.6836	0.6610	0.6835	0.6685	0.6834
	12시	0.6522	0.684	0.6860	0.6834	0.6735	0.6835	0.6685	0.6835	0.6810	0.6835	0.6936	0.6836	0.6823	0.6835
	19시	0.6760	0.6835	0.6610	0.6835	0.6936	0.6836	0.6773	0.6835	0.6823	0.6835	0.6873	0.6834	0.6735	0.6836
교량 연직 방향	00시	0.7108	0.6477	0.6862	0.6443	0.6994	0.6500	0.7119	0.6519	0.7170	0.6514	0.6991	0.6500	0.7147	0.6460
	07시	0.7092	0.648	0.6862	0.6508	0.7047	0.6435	0.7226	0.6455	0.6961	0.6447	0.7198	0.6466	0.7028	0.6538
	12시	0.7140	0.6447	0.7185	0.6502	0.7371	0.6469	0.7114	0.6428	0.7200	0.6465	0.7250	0.6523	0.7259	0.6482
	19시	0.6977	0.6447	0.7104	0.65	0.7223	0.6504	0.7096	0.6531	0.6773	0.6535	0.7042	0.6534	0.7012	0.6485

[그림 16-21]은 무선계측시스템으로 취득한 고유진동수를 나타내며, 교축 직각방향은 1.26hz, 교축 방향은 0.68hz, 교량 연직 방향은 0.65hz에서 1차 모드가 나타났다. [표 6]은 유선계측시스템 데이터로부터 추출된 고유진동수를 나타내며, 유선계측 시스템 데이터의 고유진동수는 교축 직각방향은 1.3hz, 교축 방향은 0.67hz, 교량 연직 방향은 0.7hz에서 1차 모드가 계측되었으며, 무선계측 시스템에서 추출된 고유진동수와 차이가 없음을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 교량의 구조건전성 모니터링을 위한 센서 네트워크 기반 실시간 교량 안전관리를 위한 지능형 구조 건전성 모니터링시스템을 개발하고 그 적용성을 올림픽대교를 대상으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 지능형 교량 구조 건전성 모니터링을 위한 시스템의 요구분석을 바탕으로 가속도응답, 처짐, 온도, 풍향 등 교량의 동특성을 계측하기 위한 센서unit와 데이터 송수신을 위한 무선데이터 송수신 시스템, 시스템 운영을 위한 모니터링 프로그램과 데이터베이스를 개발하였다.

2. 무선계측시스템의 실 교량 적용성을 위해 올림픽대교를 대상으로 1축가속도, 3축가속도, 온도, 경사, 풍향풍속계 5종류의 센서를 총 10개 설치하여 Pilot-test를 수행하였다.
3. 무선계측시스템에서 취득한 가속도 데이터를 바탕으로 유선시스템에서 취득한 응답신호와 비교분석을 하여 성능을 검증하였다. 무선계측시스템과 유선계측시스템에서 취득한 가속도 데이터를 기반으로 1차 진동모드를 추출하였고, 유사한 해석결과를 얻었고, 신뢰성을 검증하였다.
4. 지능형 교량 구조 건전성 모니터링 시스템은 인터넷기반 원격 모니터링을 통해 원격지에서 현장에서 문제가 발생할 경우 신속하게 대응할 수 있는 기능을 포함하여 효율적이고 체계적인 시설물관리가 가능하였다.

본 논문에서 개발한 지능형 교량 구조 건전성 모니터링 시스템 통해 기존 교량 및 향후 설계되는 교량의 설계, 해석기술 개발에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 지능형 시설물 유지관리에 필요한 인력비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 하지만, 본 시스템은 단일 교량에 대해서 모니터링 시스템 구축이 가능하다는 한계가 있다. 이에 향후 연구로 좀 더 효과적인 모니터링 시스템 구축을 위해 사물인터넷(Internet of Things),

ICT(Information and Communications Technologies), BIM(Building Information Modeling) 등 첨단기술을 활용한 통합 시설물 모니터링 시스템에 관한 연구를 진행하고자 한다.

참고 문헌

- [1] S. Y. Kim, Y. S. Shin, and G. H. Kim, "Case Study on the Maintenance of a Construction Monitoring using USN-based Data Acquisition," *The Scientific World Journal*, Vol.2014, pp.1-11, 2014.
- [2] B. W. Jo, Y. S. Lee, H. Kim, and D. W. Lee, "A Study on Development of the Intelligent Bridge Maintenance System using RFID," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.5, pp.2107-2124, September, 2013.
- [3] H. Sohn, H. J. Jung, J. S. Kong, J. J. Lee, and S. H. Sim, "ICT Based Bridge Health Diagnosis and Integrated Maintenance Techniques," *Magazine of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, Vol.18, No.1, pp.1-4, 2014.
- [4] S. H. Sim, "Structural Health Monitoring of Bridges Using Wireless Smart Sensor Networks," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.3, pp.34-36, 2012.
- [5] J. J. Lee, Y. S. Park, C. B. Yun, K. Y. Koo, and J. H. Yi, "An Overview of Information Processing Techniques for Structural Health Monitoring of Bridges," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.21, No.6, pp.615-632, 2008.
- [6] B. G. Sim, S. B. Lee, and M. S. Chae, "Development of a Wireless Vibration Monitoring System for Structural Health Evaluation," Vol.20, No.2, pp.166-171, 2010.
- [7] E. G. Straser and A. S. Kiremidjian, "A Modular Visual Approach to Damage Monitoring for Civil Structures," *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials*, pp.112-122, 1996.
- [8] Ducduy Ho, P. Y. Lee, S. Y. Lee, and J. T. Kim, "Vibration-based Structural Health Monitoring of Full-Scale Cable-Stayed Bridges Using Wireless Smart Sensors," *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.1, pp.75-82, 2012.
- [9] D. S. Hong and J. T. Kim, "Monitoring of Full-Scale Concrete Girder Bridge Using Acceleration Response," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.14, No.1, pp.165-174, 2010.
- [10] K. Maser, R. Egri, A. Lichtenstein, and S. Chase, "Development of a Wireless Global Bridge Evaluation and Monitoring System (WGBEMS)," *Proceedings of the Specialty Conference on Infrastructure Condition Assessment*, pp.91-100, 1997.
- [11] J. P. Lynch, *Field Validation of a Wireless Structural Monitoring System on the Alamosa Canyon Bridge*, SPIE 10th, Sandiego, CA, USA, March 2003.
- [12] I. H. Bae and G. H. Ha, "Structural Health Monitoring of Yeongjong Suspension Bridge Using GPS," *National Asset Management of civil Infrastructure*, Vol.1, pp.173-177, 2008.
- [13] K. M. Kim, C. S. Kang, B. J. Oh, and Y. H. Lee, "A Wireless Sensor Network with Reservation-based MAC Protocol for Bridge Monitoring Systems," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol.7, No.6, pp.121-127, 2009.
- [14] H. S. Kim, Y. H. Kim, J. C. Park, and S. B. Shin, "Data Analysis and Health Index for Health Monitoring of Seohae Bridge," *Journal of*

the Korean Society of Civil Engineers, Vol.33, No.2, pp.387-395, Mar. 2013.

[15] J. M. Ko and Y. Q. Ni, "Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-Scale Bridges," Journal of the Engineering Structures, Vol.27, No.12, pp.1715-1725, 2005.

[16] H. J. Lee and Y. H. Choi, "Data Statical Analysis based Data Filtering Scheme for Monitoring System on Wireless Sensor Network," Journal of Korean Contents Association, Vol.10, No.3, pp.53-63, 2010.

[17] J. S. Kim and J. S. Lee, "Implemen tation of a Remote Controlling System between Server/Client based Mobile," Journal of Korean Contents Association, Vol.10, No.6, pp.106-114, 2010.

저 자 소 개

조 병 완(Byung-Wan Jo)

정회원



- 1979년 : 한양대학교 토목공학과 (공학사)
- 1985년 : Ohio. University 토목 공학과(공학석사)
- 1988년 : University of Florida 토목공학과(공학박사)

▪ 1993년 ~ 현재 : 한양대학교 건설환경공학과 교수
 <관심분야> : ICT기반컨텐츠, 시설물 유지관리, 무선 센서 네트워크, ICT기반재난관리컨텐츠

김 현(Heon Kim)

정회원



- 2006년 : 중부대학교 토목공학 과(공학사)
- 2009년 : 한양대학교 건설환경 공학과(공학석사)
- 2010년 : 한양대학교 건설환경 공학과(박사수료)

<관심분야> : ICT기반컨텐츠, 교량 유지관리, 시설물 자산관리, 무선 센서 네트워크

이 윤 성(Yun-Sung Lee)

정회원



- 2009년 : 한양대학교 토목공학 과(공학사)
- 2011년 : 한양대학교 건설환경 공학과(공학석사)
- 2014년 : 한양대학교 건설환경 공학과(박사수료)

<관심분야> : ICT기반컨텐츠, 구조건전성모니터링, ICT기반재난관리컨텐츠

김 도 근(Do-Keun Kim)

정회원



- 2003년 : 조선대학교 토목공학 과(공학사)
- 2005년 : 한양대학교 토목공학 과(공학석사)
- 2007년 : 한양대학교 토목공학 과(박사수료)

<관심분야> : 교량 유지관리, 시설물 자산관리, 센서 네트워크, 안전관리