

인천대교의 풍응답 계측 및 분석

Measurement and Analysis of Wind Response of InCheon Bridge

김 상 범* · 임 덕 기** · 박 현 우***

Kim, Saang Bum · Im, Duk Ki · Park, Hyun Woo

요 약

장대 케이블 교량의 풍응답을 계측할 수 있는 무선센서네트워크 기반의 풍응답 계측시스템을 개발하고, 이를 사용하여 인천대교의 시공단계별로 고유진동수, Mode Shape과 같은 Modal Parameters의 변화를 추정하고 보강형에서의 풍압분포와 보강형, 주탑, 케이블의 가속도를 계측하여 내풍 성능을 분석하였다. 개발된 계측 시스템은 인천대교 사장교의 전체 거동을 계측할 수 있도록, 1.5km 범위에 넓게 분포된 최대 55 Nodes에서 최대 1kHz의 동기화된 계측을 수행할 수 있으며, 각 Node별로 3축가속도나 풍압을 측정할 수 있다. 전체 Node에서 가속도를 계측하는 경우에는 최대 165 Channel을 1kHz로 측정할 수 있다. Modal 해석의 경우에, 고가교, 접속교, 사장교 주탑, 보강형, 케이블의 시공 단계별 동특성의 변화를 추정하였으며, 고가교에서는 모드해석을 통해 역추정한 구조계수를 정적재하실험 및 실험실에서의 Mold 시험결과와 비교하였으며 사장교 케이블에서는 케이블 댐퍼의 성능을 분석하였다. 또한 인천대교 보강형에서의 풍압분포를 계측하였으며, 풍압의 공간상관관계를 분석하였고, 풍하중 및 풍진동 특성을 분석하여 가속도 계측 결과와 비교하였다. 계측 및 분석 결과를 바탕으로 장대교량의 내풍성능을 확보하고 향상시키는데 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

keywords : wind response analysis, wireless sensor network, modal analysis, manometer, anemometer

1. 서 론

장대 케이블 교량은 매우 유연한 구조물로서, 바람이나 지진과 같은 동적하중에 대한 안전성과 사용성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 인천대교의 시공단계별로 동적특성을 확인하고 내풍성능을 평가할 수 있는 무선센서네트워크 기반의 풍응답 계측시스템을 개발하였다. 이를 사용하여 인천대교의 시공단계별로 고유진동수, Mode Shape과 같은 Modal Parameters의 변화를 추정하고 보강형에서의 풍압분포와 보강형, 주탑, 케이블의 가속도를 계측하여 내풍 성능을 분석하였다.

개발된 시스템은 1) 인천대교 사장교의 1.5km 범위에 넓게 분포된 2) 최대 55 Nodes에서 3) 동기화된 최대 1kHz의 계측을 4) 수행할 수 있도록 개발되었다. 시스템은 1) Base Station, 2) Sync Stations, 3) Sensor Nodes, 4) Sensor로 구성되어 있으며, Sensor Nodes는 55set의 Motes로 구성되어 있고, 각 Mote에는 Girder Accelerometers, Cable Accelerometers, Wind Pressure Manometers가 연결될 수 있다. 3축 가속도의 경우 최대 165 channel (55Nodes x 3axis)을 1kHz로 계측할 수 있다. 계측 목적에 따라 3가지 타입의 센서 연결

* 정희원 · 삼성물산(주) 건설부문 연구원 saangkim@gmail.com

** 삼성물산(주) 건설부문 도로/철도팀 부장 dk.im@samsung.com

*** Withrobot Lab. Platform Team 팀장 irmusy@gmail.com

가능하며, 시간 동기 정보를 수신하여 각 Sensor Node간 시간 동기를 유지한다. Sensors는 현재 1) 보강형 가속도 센서, 2) 케이블용 가속도 센서, 3) 풍압 센서가 있다. 무선네트워크는 두개의 RF Channel로 구성되어 있으며, 1) IEEE 802.15.4 (2.4GHz, Zigbee) 네트워크는 Mesh network를 구성하여, Sensor Node를 제어하고, Sensor Node의 상태를 Base Station에서 모니터링하기 위한 양방향 통신 채널이며, 2) AFSK (424Mhz) 네트워크는 시간 동기를 위한 broadcast 채널로서, Base/Sync station에서 Sensor Node로의 단방향 통신을 수행하며, Base/Sync station간 채널 TDMA로 식별되며 600m Coverage를 갖는다.

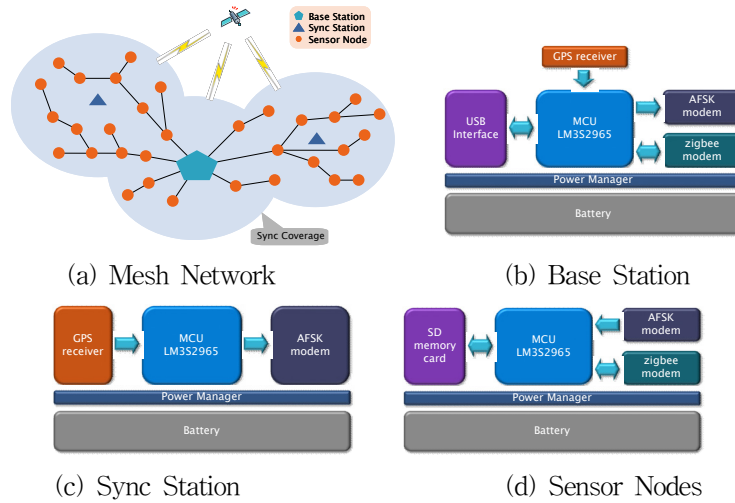
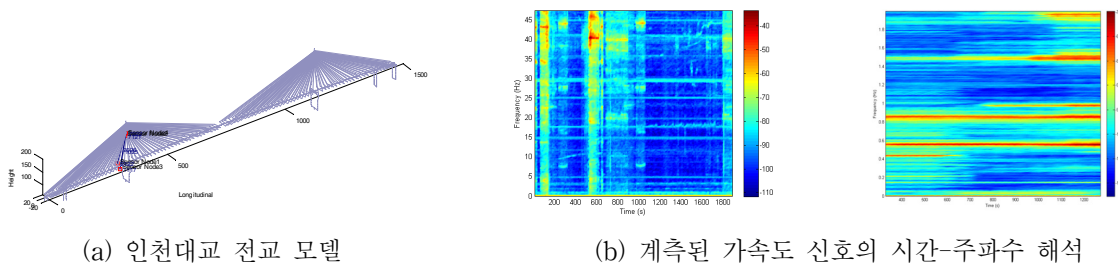


그림 1 무선동기체계측시스템

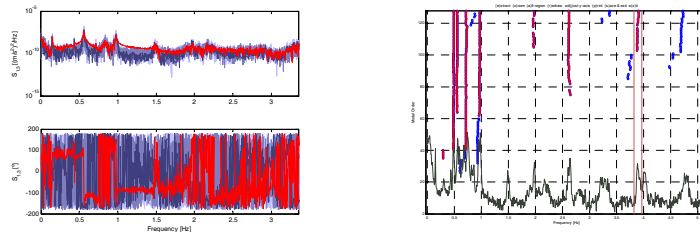
2. 시공단계별 모달 해석

45개의 3축 가속도계를 사강교 보강형과 주탑 위에 설치하였다. 그림2에 설치된 3축가속도계의 위치와 Sensor ID를 표시하였다. 계측된 신호로부터 주탑과 보강형의 Modal Parameters를 추정하였으며, 해석적으로 구한 결과와 비교하였다.

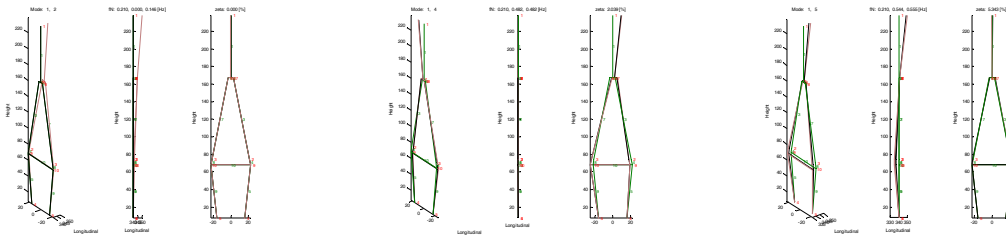


(a) 인천대교 전교 모델

(b) 계측된 가속도 신호의 시간-주파수 해석



(c) Correlation에서 재구성된 주파수응답 (d) Stability Chart using SSI

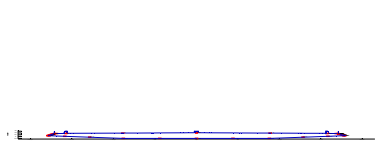


(e) Mode Shapes

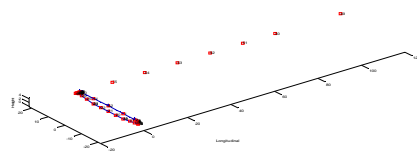
그림 2 Experimental Modal Analysis

3. 풍압 계측 및 풍진동 특성

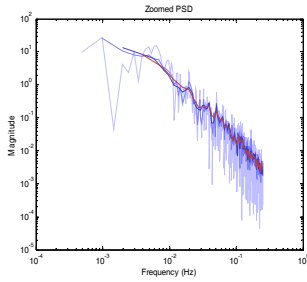
일반적으로 장대 케이블 교량에 작용하는 풍하중과 풍응답을 분석하고 내풍 안정성을 평가하기 위해서는 풍동실험을 수행하게 된다. 그러나 주어진 환경에 적합한 교량 구조 시스템과 단면 형상을 풍동실험을 통하여 설계하기 위해서는 많은 시간과 자원이 소요된다. 또한 주경간장이 수백m를 넘고 단면폭이 수십m에 이르는 장대교량에 대한 풍동실험을 위해서는, 적절한 상사법칙을 바탕으로 축소된 모형을 사용하게 되며, 풍동실험시설의 용량제한으로 인하여 많은 경우에 매우 낮은 Reynolds 수에 대해서만 실험이 가능하게 된다. Kubo등은 중앙경간 260m, 단면폭 11m인 5경간연속 PC 사장교에 대한 실교량 풍압계측을 수행하였다 (Kubo et al., 1997). 또한 Matsuda 등은 대형풍동을 사용하여 1:10 scale 교량 단면에서 Reynolds 수가 1.5×10^6 까지 높은 경우에 대한 풍동실험을 수행하여, 교량 단면의 내풍 특성에 대한 Reynolds 수의 영향을 분석하였다 (Matsuda et al., 2001). 그러나 최근에 건설되고 있는 장대교량은 규모가 매우 커서, 대형풍동을 사용하는 경우에도 Reynolds 수를 한계풍속에 가깝게 가져가는데에 많은 제약이 있다. 실교량에서 계측된 풍향-풍속값은, 바람과 교량의 상호작용에 의한 영향으로 인해 큰 영향을 받으며, 계측된 값으로부터 교량의 풍응답을 분석하기는 매우 어렵다 (Jones et al., 2001). 실교량에서의 풍압계측은 교량에 작용하는 하중을 직접 구함으로써, 보다 직접적인 풍응답 분석이 가능해지나, 계측기의 설치 및 운영이 어렵고, 계측기에 의해 왜곡된 풍압을 적절히 보정하기가 어렵다. 또한 계측된 풍압을 기존의 풍응답 해석기법을 사용하여 정량적으로 분석하기 위해서는, 결국 풍향-풍속에 의한 보정이 필요하다. 최근에는 초소형 풍압센서의 개발과 무선 계측시스템의 구현 등으로 풍압계측에 대한 제약을 많이 극복할 수 있으며, 교량 건설 지역에서 계측된 풍향-풍속 자료에 대한 공간-추계적인 분석을 통해 풍향-풍속에 의한 영향도 어느 정도 고려가 가능하다. 이 연구에서는, 각각의 55 nodes에서는 풍압이나 혹은 3축 가속도를 각각 100Hz와 1kHz로 Sampling하여 계측하였다. 무선 센서 네트워크에 기반한 시스템임으로, 계측의 목적에 따라 다양한 센서 배치를 비교적 손쉽게 구성할 수 있으며, 특히, 단면내 풍압분포와 풍압의 공간 상관관계를 분석하기 위하여, 주형의 Fairing 상부에 풍상/풍하측 각각에 11공씩, 단면상부에 7공, 하부에 13공을 설치하여, 단면내 총42공의 압력Tube를 설치하였으며, 교측방향으로 공간상관관계를 분석하기 위하여 13공의 압력 Tube를 거리를 달리하여 설치하였다. 설치된 가속도와 풍압 센서의 배열을 다음 그림에 나타내었다. 계측된 풍압분포는 교량상에서의 풍향-풍속 계측 결과와 교량이 건설된 지역에서의 공간-추계적인 분석을 통해 보정하였다.



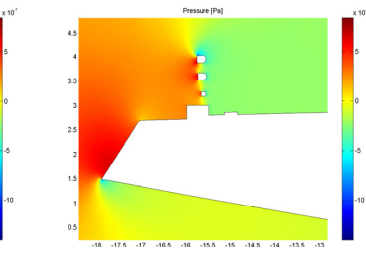
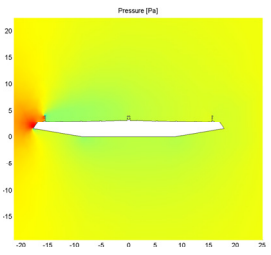
(a) 보강형 풍압 센서 분포 I



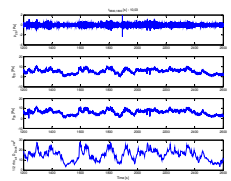
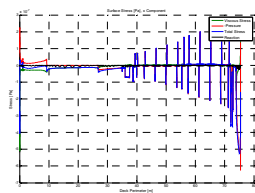
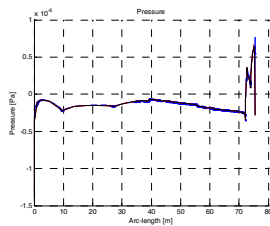
(b) 보강형 풍압 센서 분포 II



(c) PSD



(d) 풍압 분포



(e) 단면내 풍압분포 I

그림 3 Wind Pressure Distribution

참고문헌

Saang Bum Kim (2010) "Wind Effects on Cable Supported Bridges: Wind Response Measurement and Analysis of InCheon Bridge", Tech. Rep., Samsung Institute of Construction Technology.

Hyun Woo Park (2009) "장대교량 풍진동 계측 시스템", Tech. Rep., withrobot.

Withrobot (2010) S-Bridge 프로젝트, <http://withrobot.com/121>.

Saang Bum Kim, Dukki Im, Changyun Kim, Yu Seung Kim, Yong Hwan Lee (2008) "Application of Reference Based Stochastic Subspace Identification to a Long Span Bridge under Construction", KSNVE 2008.