

무선센서 계측 및 전산모델 개선기반 교량 내하력 산정 자동화 시스템

Smart Bridge Rating System using Wireless Sensors and Finite Model Updating

1. 개요

교량 및 건물 등 대형구조물에 대한 건전성 감시 및 상태평가와 관련하여 다양한 진동시험과 이를 이용한 모드 해석기법의 적용이 증가하고 있다. 이러한 사례로 신공항고속도로 상의 영종대교의 경우, 개통에 앞서 영종대교의 주요 저차모드의 모드계수를 추정하기 위하여 강제진동시험을 수행한 바 있으며, 진동시험으로부터 구한 추정결과를 설계도면을 바탕으로 작성된 수치해석모델의 해석결과와 비교함으로써 시공 직후 교량의 상태가 안전하다는 것을 확인하였다. 진동시험은 제어 가능한 하중을 이용하여 구조물에 특정한 입력하중을 가함으로써 구조물의 진동을 유발하는 강제진동시험과 풍하중 및 교통하중 등 구조물에 상시 작용하는 하중으로부터 발생하는 진동을 이용하는 상시진동시험으로 크게 나눌 수 있다.

일반적으로 강제진동시험은 많은 비용이 소요되며 교통의 차단 및 통제가 요구되므로 규모가 작은 교량에 대하여 용이한 방법이라 할 수 있으며, 규모가 큰 장대교량이나 댐구조물 등의 상시진동시험이 더 효율적이라 할 수 있다. 또한, 교통하중 등에 의한 상시진동자료 혹은 지진발생시 계측된 구조물의 응답자료만을 이용하여 실험모드해석을 수행하는 경우, 미지입력하중의 특성을 감안할 수 없는 단점이 있으나, 장시간의 계측 자료를 활용하는 경우 특정 하중에 대한 영향을 줄일 수 있으므로 상시진동시험으로부터 구한 모드특성을 구조물의 고유한 모드특성으로 간주할 수 있게 된다. 고유진동수 및 모드형상과 같은 교량의 동특성 추정을 위해 주로 가속도계를 이용하여 현장에서 진동데이터를 수집하고 있다. 현재 교량의 동특성 추정을 위한 현장에 설치된 대부분의 계측시스템은 유선시스템으로, 이러한 유선계측시스템은 설치에 많은 비용과 노력을 필요로 한다. 최근에는 이러한 유선시스템의 단점을 극복하기 위하여 무선센서 장치에 대한 적용이 활발하다(Lynch and Loh, 2006).

본 기사에서는 한국도로공사와 세종대학교에서 개발한 무선센서 진동계측기반 실교량 동특성 추출과 추출된 동특성을 기초로 유한요소모델의 개선을 통해 교량의 내하력을 산정하는 자동화시스템을 소개한다.

2. 무선센서

본 연구에서 사용된 무선센서의 주요구성은 그림 1과 같이 무선통신을 위한



이 중 재

세종대학교 건설환경공학과 교수



박 영 수

세종대학교 건설환경공학과 박사과정

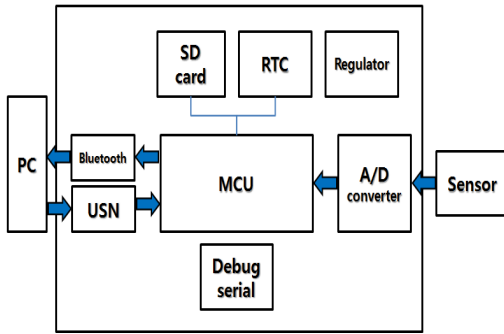


그림 1 무선센서 Hardware block

표 1 무선센서의 주요사양

항 목	사 양
채널 수	1ch
센서 전원	센서 전원 9~24V 지원
Input range	±10V
Resolution	24bit
통신거리	200m 이상(~1km)
Resolution	24bit
Sampling Frequency	10Hz~10KHz
CPU	ARM Cortex M3 32bit 80MHz
저장장치	Micro SD Card
통신	USN, Bluetooth, Ethernet

통신부(Bluetooth, Ethernet), 칩셋을 컨트롤하고 데이터를 주고받기 위한 CPU부, 센서의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위한 ADC(24bit)부, 시각동기화를 위한 RTC부, 센서의 DATA를 저장하기 위한 외부메모리 부, 그리고 전원 공급부로 구성된다. 무선센서의 주요사양은 표 1과 같다.

3. 전산모델 개선기법

현재까지의 유한요소모델 개선기법은 제한된 계측 데이터를 사용하고, 이로부터 추정된 구조물의 동특성을 이용한 유한요소모델 개선이 주를 이루었다. 이러한 계측 데이터의 양과 종류의 제한은 개선된 유한요소모델의 신뢰성을 저하시킨다. 신뢰성이 낮은 유한요소모델을 이용하여 교량의 건전성을 평가하는 경우, 교량의 성능이 과대 또는 과소 평가되는 문제점을 발생시킨다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 교량의 부재별, 거동별 주요 변수(예, 지점부, 바닥판,

휨 부재, 비틀림 부재 등)를 설정하고, 각각의 변수를 개선하기 위한 많은 양과 종류의 데이터를 계측하여 유한요소모델 개선에 대한 불확실성을 줄이고 신뢰도 높은 유한요소모델을 구축하는 연구가 필요하다. 또한, 개선된 유한요소모델을 이용하여 교량의 손상탐지 및 성능평가와 같은 현재 상태 파악 및 앞으로의 거동 예측에 활용하는 방안에 대한 연구가 필요하다.

유한요소모델 개선기법은 1) 상시진동시험으로 교량의 모드계수를 추정(Brincker et al., 2001; Peeters and De Roeck, 1999) 하고, 2) 교량 유한요소모델로부터 계산된 모드계수를 이용하여 아래 식 (1)(단, $\gamma=0$)과 같이 Cost Function을 구성하고, 3) Cost Function이 최소화되도록 구조계수를 최적화한다.

$$\begin{aligned}
 CostFun = & \alpha \sum_{i=1}^N \omega_i^m \left(\frac{f_i^{EXP} - f_i^{FEM}}{f_i^{EXP}} \right)^2 \\
 & + \beta \sum_{i=1}^N \omega_i^m (1 - MAC(\phi_i^{EXP}, \phi_i^{FEM}))^2 \\
 & + \gamma \sum_{j=1}^M \omega_j^d \left(\frac{y_j^{EXP} - y_j^{FEM}}{y_j^{EXP}} \right)^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, α, β, γ 는 물리량별 가중치로써 $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$, $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 이다. w_i^m 와 w_j^d 는 각각 i -번째 모드와 j -번째 계측변위의 가중치로써 $\sum_{i=1}^N \omega_i^m = \sum_{j=1}^M \omega_j^d = 1$ 이다. f_i^{EXP} , ϕ_i^{EXP} 는 각각 유한요소모델로부터 계산된 i -번째 모드의 고유진동수, 모드형상, 실험으로부터 구한 i -번째 고유진동수, 모드형상이다. MAC은 Modal Assurance Criterion이다. y_j^{FEM} , y_j^{EXP} 는 각각 j -번째 하중 경우에 대한 유한요소모델로부터 계산된 정적응답, 실험으로부터 구한 정적응답이다. N 은 사용된 모드의 개수, M 은 사용된 하중위치의 개수이다.

4. 교량 내하력 산정 시스템

한국도로공사에서는 스마트 내하력 평가기법을 개발하여 유한요소모델 개선기법을 이용한 교량의 내하력 평가를 다양한 교량에 적용하고 있다. 스마트 내하력 평가기법은 교량의 동적데이터를 무선센서기반의 상시진동시험으로 계측하여 동특성을 추정하고 유한요소모델을 개선하여 내하력을 산정하는 방법이다. 스마트 내하력 평가기법은 기존의 재하시험의 단점인 계측 장비의 설치 및 계측 데이터

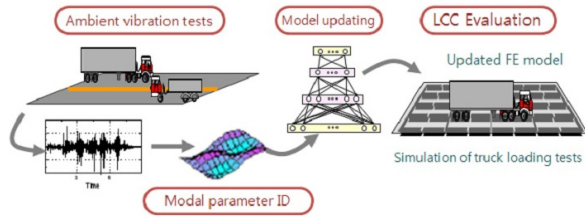


그림 2 스마트 내하력 평가 기법 절차

양의 제한과 재하시험 시 통행 제한으로 인한 사회적 비용의 발생을 극복하기 위하여 개발되었다. 스마트 내하력 평가기법은 그림 2와 같이, ① 주변의 상시진동원(바람 및 주위 교량 및 도로에서 오는 진동)을 통한 교량 상부의 상시진동 무선센서 계측, ② 실험모드 해석기법(FDD나 SSI)을 통한 상시진동 가속도의 해석으로 교량의 해석모드(교량의 고유주파수 및 모드형상) 추출, ③ 추출한 해석모드를 기반으로 하여 최적화 기법을 이용한 해석 모델의 개선, ④ 개

신된 모델에서의 하중 재하 시뮬레이션을 통한 처짐보정계수 산정으로 진행된다.

자동화된 스마트 내하력 평가 소프트웨어는 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용한 GUI기반의 교량 유한요소모델 개선 프로그램이다. 자동화된 스마트 내하력 평가 소프트웨어는 현장 계측을 통해 계측된 가속도를 이용하여 동적 특성을 추출, 이를 기반으로 교량의 유한요소모델을 개선시키는 스마트 내하력 평가를 위한 일련의 작업들을 자동적으로 수행한다. 동적 특성을 추출하는 작업이나 최적화 기법을 이용한 모델 개선 작업은 교량의 동적 특성 및 형식에 대한 이해나 최적화 기법에 대한 경험이 없이는 손쉽게 수행할 수 없다. 자동화된 스마트 내하력 평가 소프트웨어는 교량의 유한요소모델 개선을 자동적으로 수행하는 프로그램과 이를 편리하게 사용하기 위한 GUI(Graphic User Interface)를 연동하여 스마트 내하력 평가기법을 사용하여 손쉽게 교량의 내하력 산정이 가능하도록 하였다.

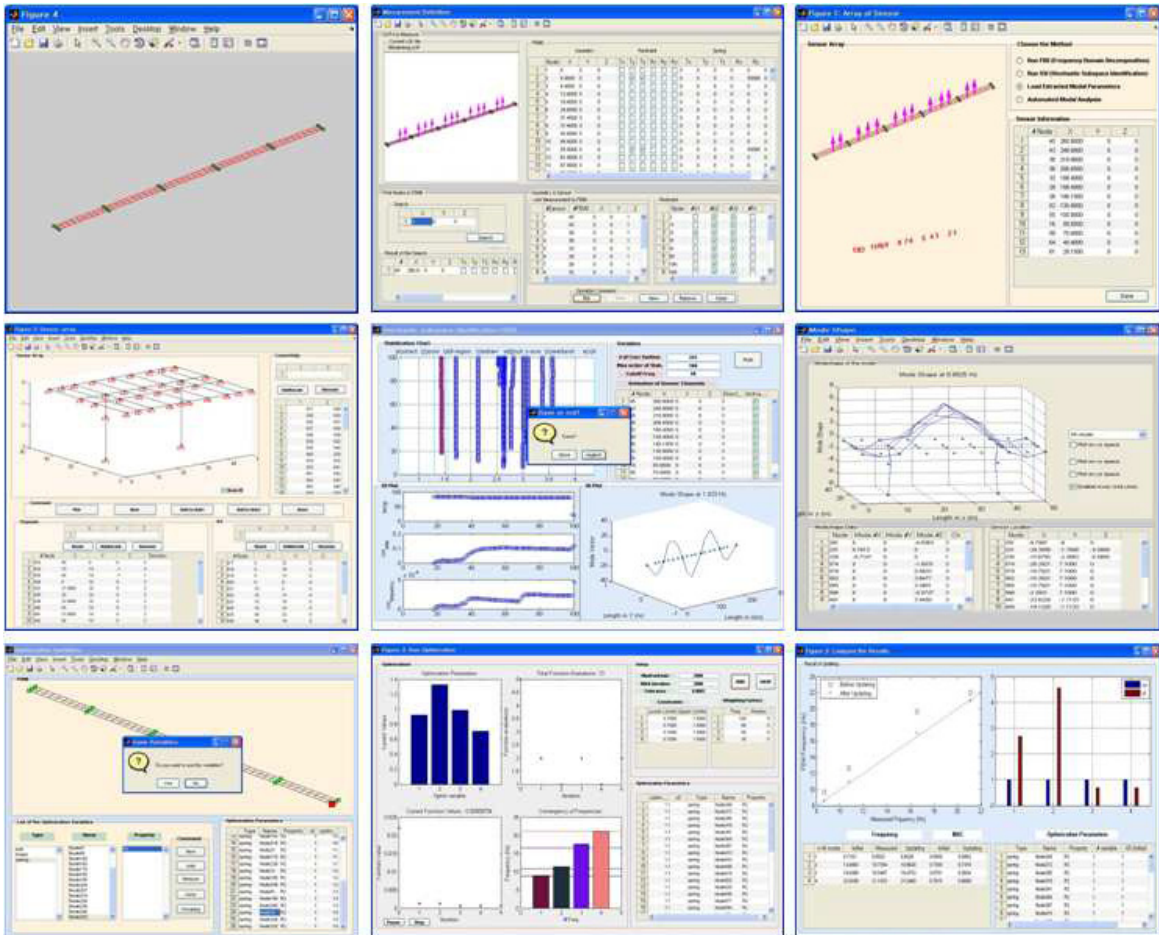


그림 3 모델 개선 자동화 프로그램의 최종 GUI 형태

자동화된 스마트 내하력 평가 소프트웨어는 실무 엔지니어가 쉽게 사용할 수 있도록 유한요소모델 해석 엔진으로 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000과 MIDAS를 사용하였으며, 스마트 내하력 평가기법의 실용성 강화를 위해 GUI 환경을 구축하였다.

이 과업에서 다루고 있는 스마트 내하력 평가기법의 경우, 계측한 진동을 기반으로 한 신뢰성 있는 해석모델의 구축이 매우 중요한 과정이며, 이는 해석모델개선(baseline model updating) 또는 구조수정(structural modification), 모델 검증(model validation) 등으로 일컬어진다. 해석모델개선을 위하여 여러가지 최적화 기법이 적용되어 왔는데, 기존에는 민감도 기법을 중심으로 민감도 기법의 약점을 보완하는 연구가 많이 수행되었으며 최근에는 유전자 알고리즘, 시뮬레이티드 어닐링, 다운힐 심플렉스 방법과 같이 추계론적인 최적화 기법이 많이 적용되고 있다.

5. 결어

교량과 같은 사회기반시설물은 공용중 안전성이 최우선으로 고려되어야 하는 구조물이므로 정확하고 정밀한 설계·시공과 함께 안전하고 편리한 건전성 확보를 위해 지속적인 세심한 유지관리가 반드시 필요하다. 본고에서는 고속도로 상의 노후 교량에 대하여는 구조적 안전성과 건전성을 확보하기 위해 공용 내하력 평가를 수행, 교량의 물리적 정보를 측정하고 진동 데이터를 처리할 수 있는 스마트 내하력 산정 시스템을 소개하였다. 이는 무선멀티 스케

일 센서, 내하력 평가 자동화 프로그램, GUI기반의 통합 시스템 개발, 개발된 소프트웨어와 하드웨어로 구성되며, 실제 고속도로 상의 10개의 교량에 대해 상시진동을 계측을 실시하였으며, 측정된 데이터의 동특성을 추정하였으며, 추정된 동특성을 바탕으로 초기 유한요소모델을 유전자알고리즘 방법을 이용하여 모델을 개선하였다. 개선된 모델의 차량재하시물레이션을 통해 얻은 변위를 이용하여 처짐 보정계수를 산정하였다. 향후 경제적인 무선센서와 상시진동 기반 내하력 평가기법을 이용한 교량의 건전성 평가기술은 해석 기법의 발전과 계측기술의 발전에 따라서 더욱 활발히 활용될 것으로 전망된다.

6. 참고문헌

1. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring, JP Lynch, KJ Loh - Shock and Vibration Digest, 38(2), 91-128, 2006
2. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. Rune Brincker, Lingmi Zhang, and Palle Andersen., Smart Materials and Structures, 10(3):441-445, 2001.
3. Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. Bart Peeters and Guido De Roeck., Mechanical Systems and Signal Processing, 13(6):855-878, 1999. 