



## 대형 교량의 진동 감시

구기영\*, J. Brownjohn\*\*, 정형조\*\*\*

(\*경일대학교 건설공학부, \*\*Univ. of Sheffield, UK, \*\*\*KAIST 건설및환경공학과)

### 1. 머리말

1994년 성수대교 붕괴사고와 2007년 I-35W Mississippi River Bridge 붕괴사고로 부터 비극적인 대형 구조물 붕괴사고 방지기술에 대한 필요성이 전 세계적으로 제기되었고, 이를 실현하는 기술로써 구조건전도 감시(structural health monitoring)가 중요한 연구분야가 되었다.

우리나라에서는 성수대교, 삼풍백화점 붕괴사고 이후 “시설물안전관리에 대한 특별법”이 제정되었고, 국내에서 건설된 대부분의 대형 교량은 준공과 함께 구조응답 계측시스템을 설치하여, 구조 진동을 포함하여 유사정적 변위, 경사 및 변형률 등의 여러 물리량을 계측하고 있다. 대형 교량에 대한 감시의 목적은 계측된 물리량의 변화로부터 교량의 이상상태를 조기에 발견하는 것을 일차적 목적으로 하고, 더 나아가 적절한 보수보강을 통해 비용효율적인 유지관리를 실현하는 것을 목적으로 한다.

이 글은 영국의 Tamar Bridge, Humber Bridge의 구조건전도 감시의 사례를 진동 감시 중심으로 기술하고, 감시를 쉽게 실현가능하게 해주는 무선센서시스템 기술에 대해 소개하고, 마지막으로 개별 교량 감시 시스템을 하나의 네트워크로 묶어서 통합관리하는 노력의 하나인 일반국도 특수교 통합유지관리센터를 소개하고자 한다.

### 2. Tamar Bridge 감시

1961년 완공되어 현재까지 50여년 이상 사용 중인 Tamar Bridge(그림 1)는 매우 특이한 이력으로 인해 구조건전도 감시의 필요성이 매우 높은 교량이다. Plymouth시와 Saltash Council을 잇는 고속국도 상에 위치하며, 주경간 335 m, 보조경간 각 114 m로 총 연장 642 m이고, 3개 차선으로 설계/시공되었다.

1990년대 후반에 Tamar Bridge는 “40ton의 대형 트럭을 통과할 수 있게 해야 한다”는 유럽연합 새로운 도로교지침을 만족할 수 없게 되었는데, 이 경우에 발생 가능한 지역 경제에 대한 피해를 막기 위해 2000년 교량에 대한 보수보강이 수행되었다.

그림 2에서 보는 바와 같이 총 18개의 사장 케



그림 1 Tamar Bridge, UK

이블 ([S1-S4, P1-P4, 5]\*[양쪽])이 더 많은 하중 지지를 위하여 추가되었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 상판 양쪽에 캔틸레버 형식의 차선이 각각 개씩 추가되었고, 무거운 콘크리트 상판이 가벼운 직교 이방성 상판으로 바뀌었다. 원래는 현수교 형식이었으나 사장케이블의 추

가로 인해 현수교와 사장교의 하이브리드 형식이 되었고, 그 특이한 구조형식으로 인해 보수보강 시공 중 감시가 요구되었고, 사장케이블 장력, 온도, 습도, 풍향풍속, 중앙경간 레베 계측 시스템이 설치 운용되었다. 보수보강 완료 후에도 감시가 지속되고 있는데, 셰필드 대학의 연구진

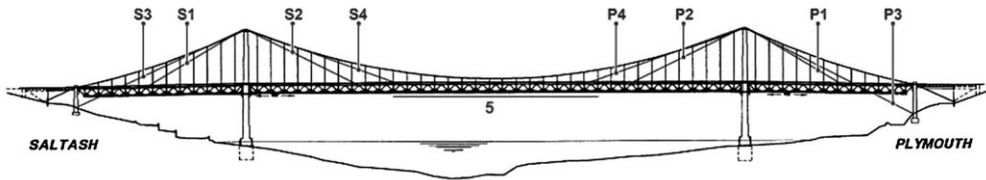


그림 2 사장 케이블의 추가

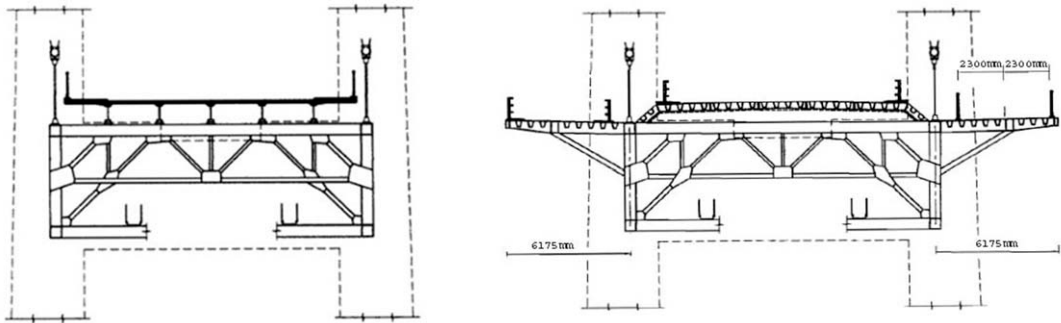


그림 3 교량 상판의 보수보강(이전: 좌, 이후: 우)

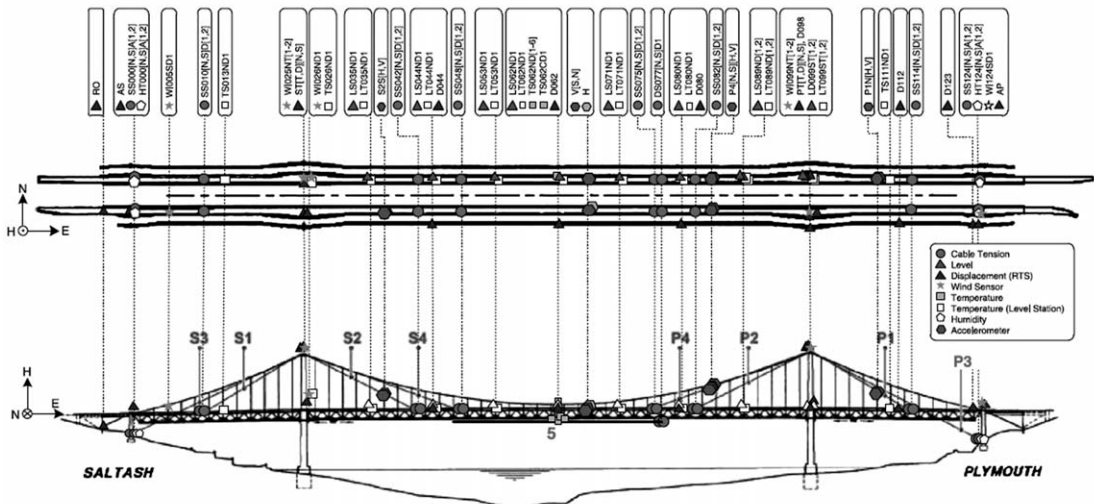


그림 4 Tamar Bridge에 설치된 계측 센서

VES(vibration engineering section)는 가속도계, 신축이음 변위계, robotic total station을 추가하였다(그림 4).

그림 5에서 보는 바와 같이 진동 감시를 위한 가속도계가 교량 상판 주경간 남측에 2개(vertical, lateral), 북측에 1개(vertical), 추가 사장케이블 4개소에 각 2축(vertical, lateral)에 대해 설치되었다. 이로부터 나온 가속도를 이용하여 output-only modal analysis를 사용하여 모드특성의 변화를 감시 중에 있다. 감시 중에 있는 모드들은 표 1에 나타나있다. 그림 6에 2007년 9월에 감시 된 모드 고유주파수가 표시되어 있다. 교량

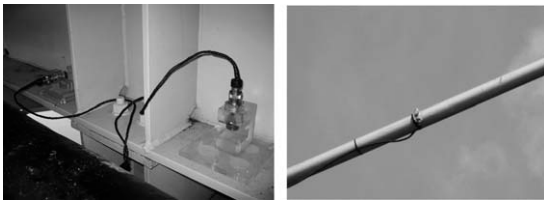


그림 5 가속도계(좌: 교량상판, 우: 추가 사장재)

표 1 Tamar Bridge의 모드특성

Mode	Side span	Frequency (Hz)	Damping (%)	Mode Shape
VS1	Strong	0.39	1.7	
LS1a	Negligible	0.46	3.5	
VA1	Weak	0.59	1.8	
LS1b	N.A. <sup>a</sup>	0.69 <sup>b</sup>	N.A.	
TS1	Weak	0.73	1.1	

<sup>a</sup>NEXTERA method missed this mode. The mode shape given on the right is from a FE model. LS1b is different from LS1a in the main-cable mode shape.  
<sup>b</sup>Estimated frequency from finite element model.

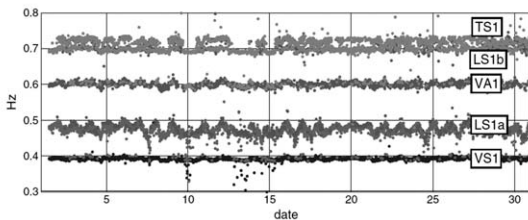


그림 6 모드 특성의 변화 시계열

에 손상이 없고 정상적인 운용 상태임에도 불구하고 교량의 고유주파수가 변하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 주로 온도변화로 인한 구조계 및 경계조건 변화와 차량증가로 인한 추가질량 효과 등이 그 원인인데, 이에 대한 명확한 예측모델을 확립하는 것이 구조건전도 감시를 사용한 교량의 이상상태 판정에 있어서 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다.

## 2. Humber Bridge 감시

1981년도에 준공된 현수교인 Humber Bridge(그림 7)는 중앙경간 1410 m, 보조경간 280 m, 530 m로 총 연장 2220 m으로 건설당시 세계에서 가장 긴 현수교였으며, 현재에도 6번째로 긴 현수교이다. Humber Bridge 관리소는 교량에 온도계, 풍향풍속계 등을 운용하고 있고 VES는 2009년 이후 진동 감시를 위한 가속도계, GPS를 이용한 변위계, 풍향풍속계, 경사계, 신축이음부 변위계를 설치하였다(그림 8).

교량 중앙경간에 설치된 3개의 가속도계로부



그림 7 Humber Bridge



그림 8 신축이음부에 설치된 변위계(좌)와 중앙경간주케이블 위에 설치된 GPS 수신기(우)

터 교량의 모드특성을 지속적으로 감시하고 있으며 첫 번째 횡방향 모드(LS1)의 고유주파수와

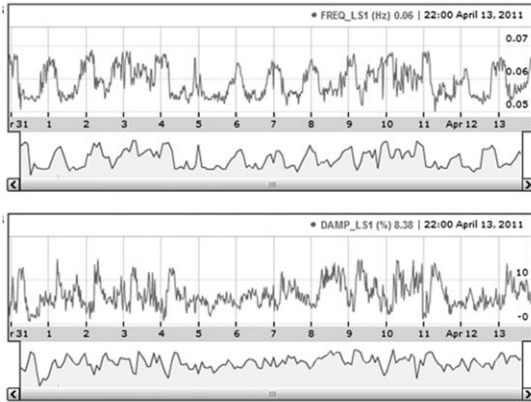


그림 9 첫 번째 횡방향 모드특성의 시계열(위: 고유주파수, 아래: 감쇠비)

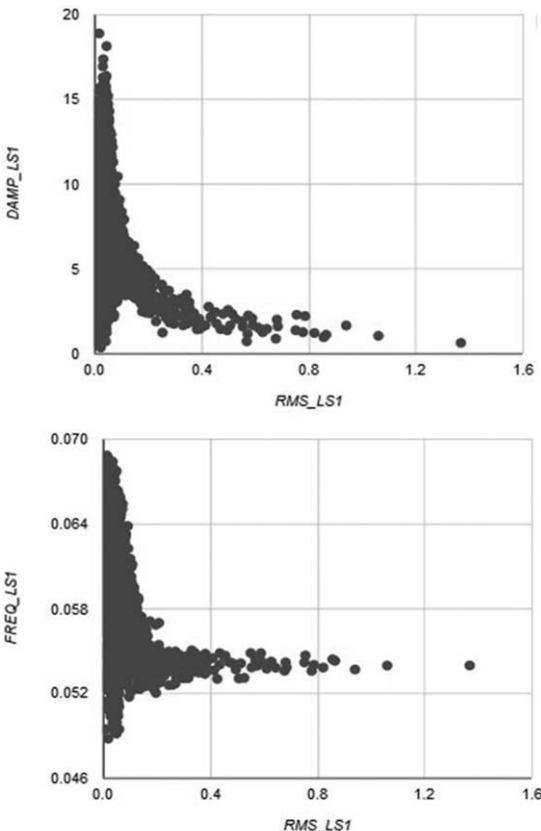


그림 10 첫 번째 횡방향 모드(LS1) 모드특성과 진동크기와의 관계

감쇠비가 그림 9에 나타나 있다. 고유주파수는 일간 변화에 따라 20% 정도의 변화를 보이고 있고, 감쇠비도 0~10%까지 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 변화의 원인은 아직 정확하게 밝혀지지 않았으며, 많은 연구가 필요하다. 한 가지 주목할 만한 사실은 고유주파수와 감쇠비가 진동크기와 연관관계를 가지는 것처럼 보인다는 것이다. 그림 10에 나타난 바와 같이 진동크기가 커질수록 감쇠 비는 1% 정도까지 감소하며, 고유주파수는 0.054 Hz 인근 값으로 수렴된다.

#### 4. 무선센서시스템

대형 토목구조물에 대한 진동 감시의 중요한 문제 중 하나는 다수의 계측센서와 DAQ장비를 전선으로 연결하는 작업이 총 연장 1~2 km인 대형 교량에서는 쉽지 않다는 것이다. 무선센서네트워크 기술이 최근 전자/전산분야에서 개발/보편화되면서 토목구조물의 진동 감시를 획기적으로 쉽게 만들어줄 수 있는 기반이 마련되었다.

한국의 KAIST, 서울대, 미국의 일리노이주립대, 일본 동경대의 연구진들은 Imote 2를 이용한 SHM smart sensor node 개발 및 적용에 관한 공동 연구를 제 2진도대교(그림 11)에서 수행하였다.

그림 12는 사용된 스마트 센서 노드를 보여준다. 위 그림은 센서 노드를 구성하는 핵심요소로써 Imote 2와 일리노이주립대에서 개발한 가속도계를 포함하는 센서 보드이다. 아래 그림은 센



그림 11 제 2진도대교 전경



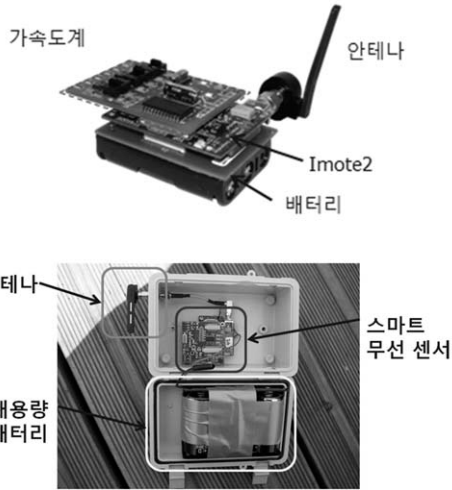


그림 12 스마트 무선센서시스템 (위: Imote2 노드, 아래: 현장설치 패키지)

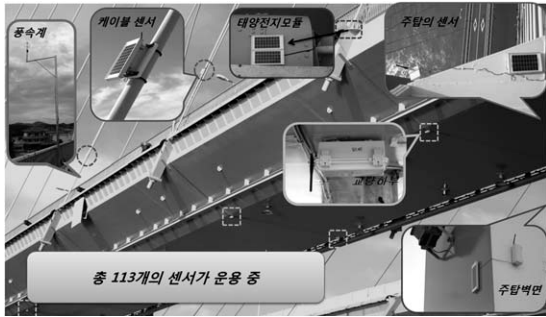


그림 13 설치된 센서 종류와 위치

서 노드의 패키징을 보여주는데, 태양광 충전패널을 사용하여 배터리를 충전하는 방식으로 전원을 공급하고 있다.

2009년 6월에 총 70개의 배터리로 작동되는 센서 노드를 처음으로 설치한 후, 2010년 8월에 총 113개로 센서 노드 개수를 증가시켰고, 태양광 충전패널과 충전배터리를 추가하였다. 연구진은 현재 총 113개의 스마트 센서 노드를 사용하여 중앙경간의 진동, 사장케이블의 진동, 주탑의 변형률, 풍향/풍속을 계측하고 있다(그림 13).

### 5. 특수교 통합유지관리센터

개별 교량에 대한 감시에서 더 나아가, 국토해



그림 14 통합유지관리 대상교량

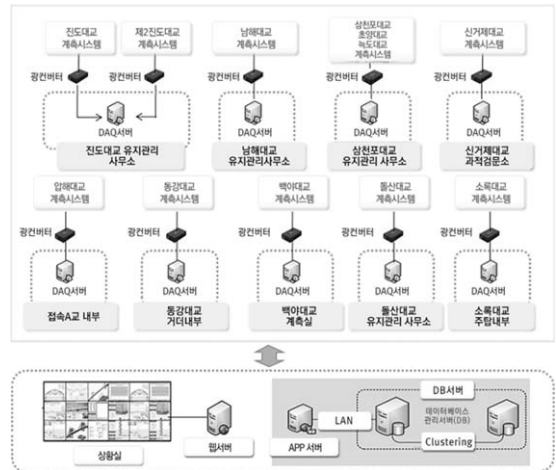


그림 15 통합유지관리 네트워크 구성도

양부는 국내 교량의 안전성 확보를 위하여 개별 감시 시스템을 통합하여 국가단위의 교량 감시 시스템을 구축하고자 노력하고 있다. 2008년 국토해양부는 일반국도상 특수교의 통합유지관리 업무 위탁기관으로 한국시설안전공단 및 한국건설기술연구원을 지정하였고, 2009년 9월부터 특수교통합유지관리센터가 한국시설안전공단에 설치되어 운용 중에 있다.

유지관리센터는 그림 14에 나타난 바와 같이

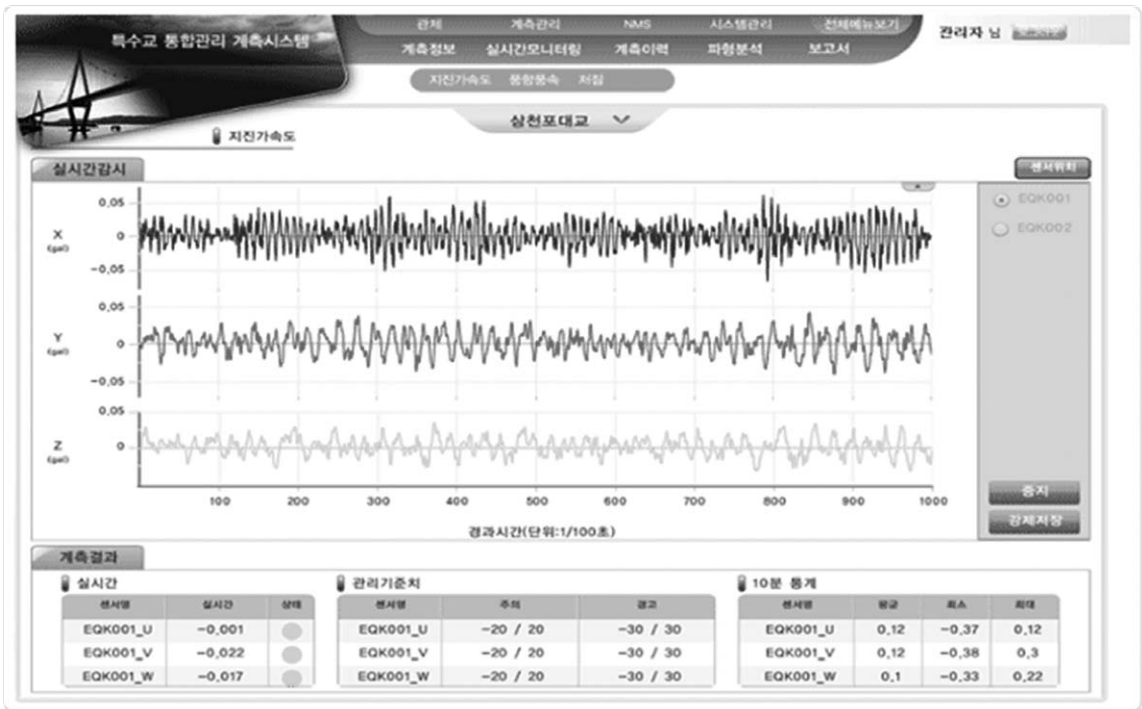


그림 16 모니터링 웹 화면(예시)

전국 16개의 특수교량에 대하여 그림 15과 같은 통합유지관리네트워크를 구성하고, 그림 16과 같은 통합관리시스템을 운용 중에 있다.

## 6. 맺음말

성수대교 붕괴사고(1994), 삼풍백화점 붕괴사고(1995), I-35W Mississippi Bridge 붕괴사고(2007) 등의 비극적인 붕괴사고로부터 대형 토목구조물의 구조안전성을 확보하기 위한 구조진동 감시 시스템에 대한 연구가 요구되었고, 최근에는 대형 교량들은 구조진동 감시 시스템을 갖추고 시공 감시와 함께 구조물의 열화를 지속적으로 감시하여 구조안전성을 확보하고자하는 노력이 이루어져왔다.

진동 감시를 통한 구조건전성 평가는 구조손상

혹은 열화가 모드특성의 변화를 일으킨다는 사실에 근거한다. 즉, 모드특성의 변화는 구조이상 상태를 의미할 수 있다. 그러나, 모드특성은 손상에 의해서 뿐만아니라 상시상태의 온도 하중에 의한 구조계의 변화 및 경계조건의 변화, 그리고 교통량이 증가했을 때의 질량추가효과 등에 의하여도 변하기 때문에 이를 유효하게 제거해주는 모드특성 예측모델의 개발이 필요하다.

무선센서네트워크 기술의 진보가 구조건전성 평가기술의 진보에 큰 기여를 할 것으로 기대되고, 각 개별 구조물에 대한 감시 정보가 통합관리되면서 교량에서 공통적으로 발견되는 패턴들을 쉽게 종합하여 새로운 지식을 창출하고 나아가, 대형교량 감시 및 유지관리기술에 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다. **KSNVE**