

장대교량 구조건전성모니터링 기술의 발전

Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-scale Bridges

J.M. Ko^a, Y.Q. Ni^a

^aDept. of Civil and Structural Eng., Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong



강형택*



박종칠**

*한국도로공사 도로교통기술원 구조연구그룹 책임연구원

**한국도로공사 도로교통기술원 구조연구그룹 전임연구원

이 논문은 Engineering Structures Vol. 27, No. 12(2005)에 게재된 논문 중 발췌하여 번역한 것이다. 최근 국내외적으로 관심을 받고 있는 교량건전성모니터링시스템(Structural Health Monitoring System)에 대한 사례를 통하여 최근 기술동향, 계측자료의 활용방안 및 앞으로의 발전방향에 대한 연구내용을 담고 있다.

1. 서 론

오늘날 기존 또는 신설 교량의 관찰 및 평가를 위한 구조건전성모니터링 기술은 성숙단계에 이르렀다. 구조물상의 장기 구조건전성모니터링시스템은 유럽, 미국, 캐나다, 일본, 한국, 중국 등지에서 적용되고 있다. 구조건전성모니터링시스템은 일반적으로 (1) 유사한 구조물에 대한 설계기준 및 지침을 개선할 목적으로 한 설계가정 및 변수의 검증하고, (2) 구조상 또는 기능상 안전성 확보를 위하여 비정상적인 하중작용과 응답, 초기 단계에서의 손상/열화를 감지하고, (3) 재해 직후에 즉각적인 구조물의 안전성 평가를 위한 실시간 정보를 제공하고, (4) 교량 점검, 보강, 유지관리 및 보수의 우선순위 결정 및 계획 수립에 필요한 자료를 제공하고, (5) 유지관리, 보강 및 보수 작업의 효과를 평가하는 관점에서 보수와 재시공을 모니터링하며, 그리고 (6) 내풍 및 내진설계, 새로운 형식 또는 신재료가 사용된 구조물과 같은 교량공학에 있어서 첨단분야 연구를 위한 방대한 양의 현장 데이터 획득 등의 목적을 위하여 사용한다.

이와 같은 목적과 이점을 제공할 수 있는 구조건전성모니터링시스템의 개발 및 활용은 현재에도 도전적인 분야

이며, 다른 분야에서 개발된 혁신적인 기술이 토목분야에서 활용하기 위하여 잘 조직된 학제간 연구가 요구된다. 실제로 구조건전성모니터링은 최근의 국제적인 연구에 있어서 주요한 주제중 하나이다. 이 분야의 연구는 센싱, 통신, 신호처리, 데이터관리, SI, 정보기술 등을 포함한다. 이 연구에는 토목, 기계, 전기, 컴퓨터공학 등의 협업이 요구된다. 교량 구조건전성모니터링 분야에서 현재의 관심사는 분산 매입형 센싱, 데이터 관리 및 저장, 데이터 마이닝 및 지식개발, 진단법, 교량 소유자 또는 관리주체에게 유지관리에 필요한 의사결정을 위한 유용하고 실질적인 정보를 제공하는 것이다. 이 글에서는 현재 실용화된 장대교량 건전성모니터링시스템의 현황을 알아보고, 연구자와 실무자의 관점에서 몇몇 건전성모니터링 기술을 참고하여 앞에서 언급한 주제들에 대한 주요 논점에 대하여 알아보겠다.

2. 교량 모니터링시스템의 실용화 현황

교량의 장기 구조건전성모니터링시스템의 성공적인 실용화 및 운용 사례는 여러 곳에 많이 있다. 지금까지 세계적으로 약 40여개의 장경간(기간 100m 이상) 교량에 구

표 1 장기모니터링시스템이 설치된 중국의 주요 교량

순번	교량명	교량형식	위치	주경간(m)	설치센서
1	Jiangyin Bridge (after upgrade)	현수교	Jiangsu	1385	1), 2), 3), 4), 5), 6), 9), 10), 13)
2	1st Nanjing Yangtze River Bridge	트리스교	Jiangsu	160	1), 2), 3), 4), 5), 7), 14)
3	2nd Nanjing Yangtze River Bridge	사장교	Jiangsu	628	1), 2), 3), 4), 7), 9), 13), 16)
4	Runyang South Bridge	현수교	Jiangsu	1490	1), 2), 3), 4), 6)
5	Runyang North Bridge	사장교	Jiangsu	406	1), 2), 3), 4)
6	Sutong Bridge	사장교	Jiangsu	1088	1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 8), 9), 10), 11), 16), 18)
7	Tsing Ma Bridge	현수교	Hong Kong	1377	1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 12), 18)
8	Kap Shui Mun Bridge	사장교	Hong Kong	430	1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 12), 18)
9	Ting Kau Bridge	사장교	Hong Kong	475	1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 12), 18)
10	Shenzhen Western Corridor	사장교	Hong Kong	210	1), 2), 3), 4), 5), 7), 8), 15), 16), 17), 18)
11	Stonecutters Bridge	사장교	Hong Kong	1018	1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 8), 9), 10), 11), 15), 16), 17), 18)
12	Tongling Yangtze River Bridge	사장교	Anhui	432	1), 2), 4), 11), 13)
13	Wuhu Bridge	사장교	Anhui	312	2), 3), 4), 5), 10), 12)
14	Humen Bridge	현수교	Guangdong	888	3), 6), 11), 12)
15	Zhanjiang Bay Bridge	사장교	Guangdong	480	1), 2), 3), 5), 6), 9), 11), 14), 16)
16	Xupu Bridge	사장교	Shanghai	590	2), 3), 4), 7), 12)
17	Lupu Bridge	아치교	Shanghai	550	2), 3), 4), 12)
18	Dafosi Bridge	사장교	Chongqing	450	2), 3), 4), 5), 10), 12)
19	Binzhou Yellow River Bridge	사장교	Shandong	300	1), 2), 3), 4), 6), 10)
20	4th Qianjiang Bridge	아치교	Zhejiang	580	1), 2), 3), 4), 9), 13)

주:1) 풍향풍속계; 2) 온도센서; 3) 변형률계; 4) 가속도계; 5) 변위계; 6) GPS; 7) WIM 시스템; 8) 부식센서; 9) EM(elasto-magnetic) 센서; 10) 광섬유센서; 11) 경사계; 12) 고저차계; 13) total stations(형상측량용 기기); 14) 지진계; 15) 기압계; 16) 비중계; 17) 우량계; 18) 비디오카메라.

조건전성모니터링시스템이 설치되어 있다. 대표적인 사례로는 덴마크의 Great Belt교, 캐나다의 Confederation교, 홍콩의 Tsing Ma교, 미국의 Commodore Barry교, 일본의 Akashi Kaiyo교, 한국의 Seohae교가 있다. 표 1은 중국(홍콩특구를 포함)의 장경간 교량 중에서 교량 실시간 모니터링시스템이 설치된 20개 교량을 보여주고 있다. 이 목록에는 현재 장기 구조건전성모니터링시스템이 설계중인 East Sea교(주경간 420m 및 332m의 사장교로 구성), Hangzhou Bay교(주경간 448m 및 318m의 사장교로 구성), 제3 Nanjing Yangtze River교(주경간 648m의 사장교)는 포함되어 있지 않다.

장대교량의 구조건전성모니터링 적용에 있어 아래와 같은 몇 가지 최근의 경향은 주목할 만하다. (1) Shenzhen Western Corridor, Stonecutters교, Shanghai Chongming Crossing(주경간 1200m의 사장교), 및 Messina Strait교(주경간 3300m의 현수교)와 같은 최근 계획 중인 교량에 있어서 모니터링시스템의 설계는 교량설계의 일부분으로써 입찰시 요구되고 있다. 교량설계와 모니터링시스템 설계의 통합은 모니터링시스템이 교량설계의 일부로 간주되고 있는 상황에서 교량설계자의 주요 관심이 모니터링시스템에 있음을 확인시켜주고 있다. (2) 4th Qianjiang교, Shenzhen Western Corridor, Stonecutters교, 그리고 Sutong교와 같은 새로운 교량에 적용되는 장기 건전성모

니터링시스템은 교량의 시공 과정과 동시에 진행되도록 설계되어 있다. 이와 같이 함으로써, 부식센서, 변형률계, 광섬유 센서와 같은 특별한 종류의 센서를 구조물에 매입 할 수 있다. (3) 최근에 고안된 장기 건전성모니터링시스템은 교량의 일체성, 내구성 및 신뢰성 등 다양한 모니터링 기능이 강조되고 있다. 홍콩의 경우, Tsing Ma교의 모니터링시스템에서 Stonecutter교의 모니터링 시스템으로 가면서 발전하였는데, 교량의 안전과 신뢰성 평가를 위해 부식센서, 기압계, 비중계, 그리고 우량계와 같은 환경을 측할 수 있는 센서가 추가되었다. 또 다른 예인 Sutong교 모니터링시스템의 경우에는 교량 내구성 평가를 위한 상부구조 장기 모니터링시스템을 강화하고자 현재 (시공중 계측의 목적으로만 설치된) 기초의 안정/안전 모니터링 시스템에 포함되어 있는 다수의 매입형 센서를 통합하여 사용할 것이다.

3. 센싱(sensing)과 데이터수집 시스템

지난 십년간 센싱기술에 있어서 큰 진보가 이루어 졌으며 광섬유 센서, 무선 센서와 같은 혁신적인 센서들이 상용화되었다. 센싱시스템은 교량 건전성모니터링을 실현하는데 필수적이다. 장래의 교량 건전성모니터링시스템은 하중과 환경의 영향, 구조 특성과 응답에 대한 실시간 정

보를 필요할 때마다 취득할 수 있는 값싸고, 공간적으로 분산되어 있으므로, 무선으로 연결된, 매입형 센서로 구성될 것이다. 광섬유센서는 장대교량의 장기 구조건전성 모니터링에 성공적으로 활용되고 있으나, 교량 모니터링에서의 무선센서의 활용은 아직 기술적으로 시험적용의 수준에 있다.

장대교량의 장기 모니터링에 있어서 전통적인 센서 중 일부는 적용성이 떨어진다. 실 예로, 장경간 교량의 처짐(절대변위)을 측정하는 것은 어려운 일이다. 전통적인 변위계는 상대적인 변위만을 측정할 수 있으며, 레이저 변위계는 장경간 교량의 장기 모니터링에 적합치 않은 것으로 판명되었다. 이 문제에 해결책으로는 현재 GPS를 이용하는 방법이 있으나, GPS를 이용한 교량 모니터링에서는 두 가지 제약 조건이 있다. (1) GPS의 정밀도가 교량 건전성 모니터링에서 요구되는 정밀도만큼 충분하지 않다. (2) GPS는 교량 상판 아래 있는 교각의 변위(선박의 충돌, 침하 등으로 생기는) 측정에는 적합지 않다. 교량 건전성평가에서 필수적인 응력의 측정은 또 다른 논의의 대상이다. 현재 전기저항식 변형률계와 진동현식 변형률계의 2종류가 널리 사용되고 있다. 두 가지 모두 결점을 갖고 있다: 전기 저항식 변형률계는 동적 변형률을 측정할 수 있으나 안정성이 낮아 측정값의 시간적 드리프트가 발생할 수 있다. 진동현식 변형률계는 안정성을 높으나 유사 정직 변형률 측

정에만 사용할 수 있다. 이와 같은 전통적 센서의 단점 때문에 장대교량의 장기 모니터링에 광섬유센서의 적용방안이 모색되고 있다. 그림 1은 광섬유센서가 변형률과 온도를 측정하기 위하여 현수교인 Jiangyin교의 상판 전 구간에 적용된 사례를 보여 주고 있다. 광섬유센서의 가장 큰 장점은 분산 센싱과 계측이 가능하여 장대교량에서 정교한 상태 모니터링이 가능하다는 것이다. 광섬유센서가 교량 모니터링에 널리 사용되는 것을 방해하는 주요 요인은 혹한 환경에서의 내구성과 부재에 부착되어 장기간 거동을 하는 것에 대한 공학적 실증이 없다는 점이다.

케이블 교량에 적용하는 경우 광섬유 센서의 또 다른 장점은 온도와 변형률 측정을 위하여 케이블에 매입할 수 있다는 것이다. 홍콩공대의 학제간 연구팀은 사장교인 Sutong 교를 위하여 이와 같은 종류의 센서를 개발하였다. 그림 2에 예시된 것과 같이 케이블의 단면을 구성하는 7연 와이어중 일부가 광섬유센서를 설치하기 위한 스테인레스관으로 교체된 것을 볼 수 있다. 브릴루앵 산란(Brillouin scattering) 센서로 구성된 광섬유센서가 케이블의 분포온도를 측정하기 위하여 스테인레스관 안에 배치된다. 광 시간영역 반사 측정(B-OTDR, Brillouin-optical time-domain reflectometry) 기술이 사용되었다. 이 방법으로 감지기의 역할을 하는 광섬유에 레이저 신호가 들어가고 온도측정은 광섬유를 따라가는 레이저 신호의 전달시간과 산란정보를 종합하여

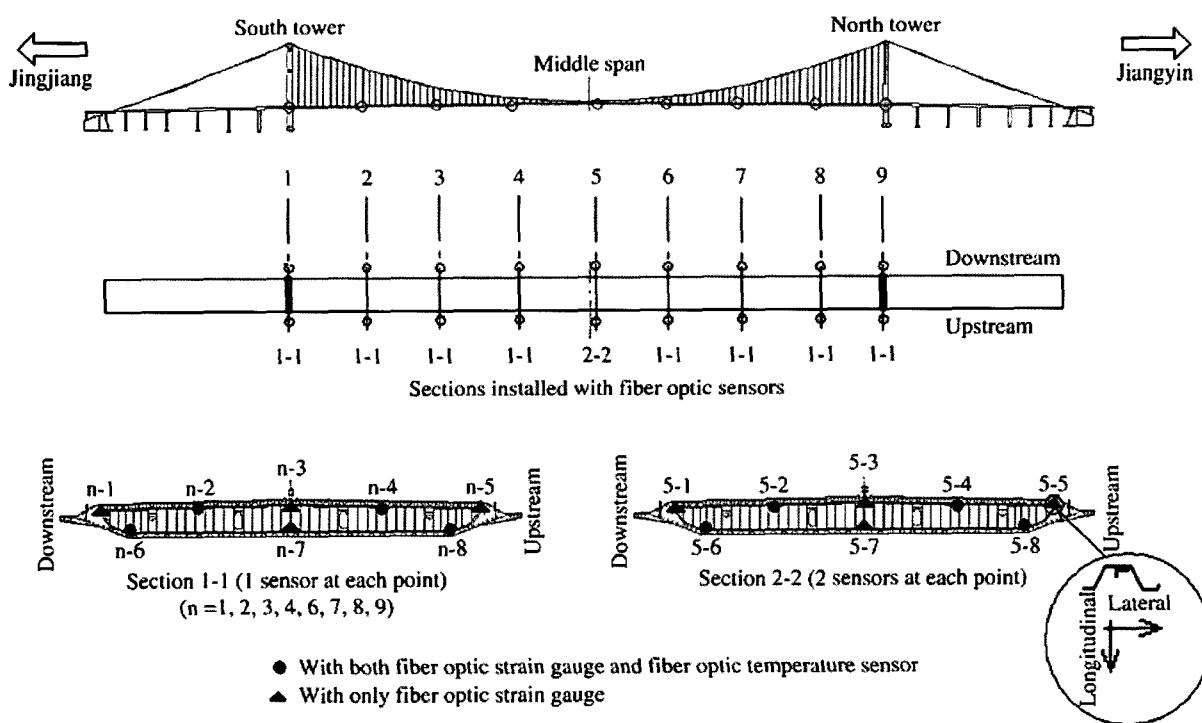


그림 1 Jiangyin교의 광섬유 센서 설치 개요도

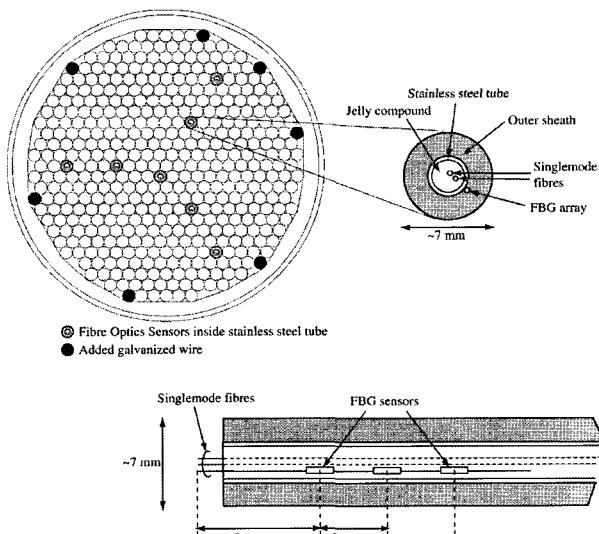


그림 2 교량 케이블 단면에 매입된 광섬유 센서

측정된다. 여기서 와이어의 전체 단면적이 변하지 않게 하기 위해 케이블의 최외측에 7개의 아연도금 와이어를 추가하였다. 또한, 변형률 측정을 위하여 케이블의 양단 끝에 섬유 브래그 격자(FBG) 센서를 매입하였다. 정착구 부근에서의 케이블의 변형률은 그림 2와 같이 강관의 외측에 부착된 FBG배열을 이용하여 측정한다. FBG 배열은 2m 간격으로 배치된 3개의 FBG센서로 구성되어 있다. FBG는 온도와 변형률에 민감하다. FBG의 온도는 B-OTDR시스템에 의하여 측정됨으로 FBG를 이용하여 변형률을 결정할 수 있다. FBG배열은 온도측정을 위한 B-OTDR가 설치된 강관을 따라서 설치되어 있기 때문에 추가적인 강관과 와이어의 단면적 감소를 피할 수 있다.

구조물 상의 레이터수집장치(DAUs) 또는 현장측소

(outstation)는 장대교량의 구조건전성모니터링 시스템에 있어서 필수적인 장비이다. DAUs는 부근의 센서로부터 신호를 수집하고 아날로그 신호를 디지털화하여 교량 외부의 중앙통제실로 데이터를 전송하는 역할을 한다. 또한 단기간의 데이터 축적과 기초적인 신호처리 기능을 갖고 있다. 다수의 센서를 갖춘 장대교량에 있어서 DAUs를 적절하게 배열하는 것은 기록되는 데이터의 질과 양의 신뢰성에 중요한 역할을 한다. 필요한 DAUs의 수량은 데이터 축적빈도와 센서의 채널수량에 의하여 결정된다. DAUs의 배치는 아날로그 센서 특히 민감도가 낮은 전압-신호를 출력하는 센서의 위치에 따라서 결정된다. 전송 손실/노이즈를 제거하고, DAUs를 전파간섭으로부터 보호하기 위하여 사용 환경과 센서-DAUs 사이의 허용 최대거리가 고려되어야 한다.

Sutong교에 적용된 구조건전성모니터링 시스템의 경우에는 PXI/SCXI와 MXI-3 기술을 이용한 분산 데이터 수집 시스템이 DAUs의 수를 최소화하면서 전송 케이블 길이에 대한 한계를 극복하기 위하여 고안되었다. 이 시스템에서는 7개의 DAUs가 FDDI 듀얼(dual-loop) 광섬유 망에 의하여 중앙통제실에 연결되도록 구성되어 있다. 각각의 DAUs는 그림 3에 예시된 것과 같이 1개의 주측소(main station)와 추가적인 보조측소(sub station)로 구성되었다. 주측소는 PXI장비 플랫폼, 신호조절시스템 그리고 데이터취득모듈로 구성되어 있으며, 보조측소는 PXI 플랫폼을 가지고 있지 않다. 각각의 보조측소는 MXI-3 인터페이스를 통하여 주측소와 연결되며 주측소로부터 원격으로 조정된다. PXI 컨트롤러가 있는 PXI장비 플랫폼은 DAU의 작동, 신호처리 및 중앙통제실과의 통신을

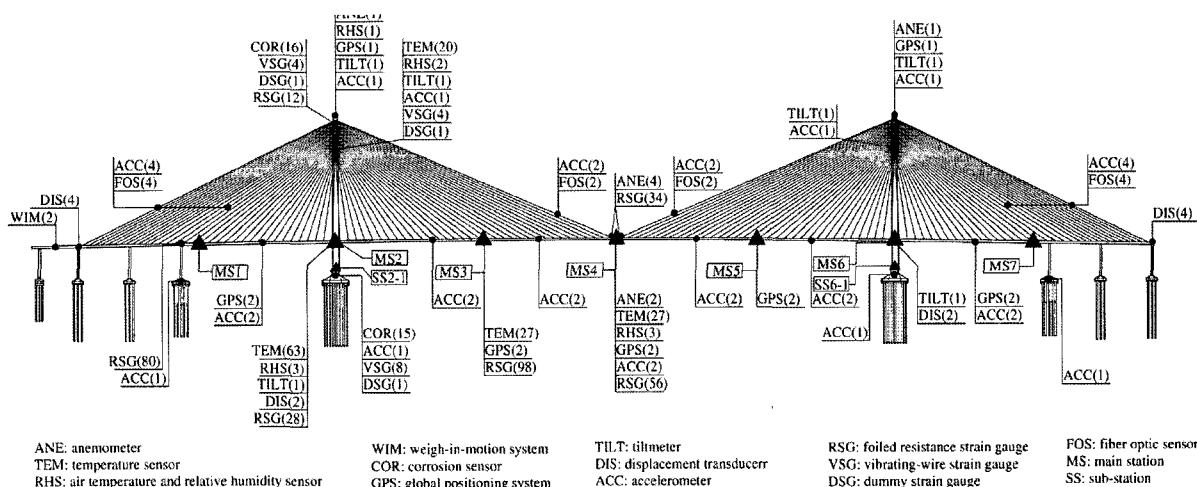


그림 3 Sutong교의 계측기 및 DAUs 배치 개요도

담당한다. Sutong교의 경우에 각각 주측소 MS2와 MS6에 연결된 2개의 보조측소(SS2-1과 SS6-1, 그림 3)가 주탑의 기저면 아래에 위치한 센서들로부터 데이터를 수집하기 위하여 두 개의 주탑 하단 내부에 위치하고 있으며, 이들 센서 중 일부는 현재 1400개 이상의 센서로 구성된 기초의 안정/안전 모니터링시스템에 포함되어 있다. MSI-3 기술을 이용하여 추가적인 DAUs를 사용하지 않고 전송 케이블 길이의 한계를 극복하였다. 여기서는 각각의 DAU는 MXI-3의 확장 슬롯을 이용하여 최대 8개의 보조측소까지 지원한다.

기존의 교량모니터링시스템을 운용하면서 얻은 교훈은 DAUs의 관리에 최선을 다해야 한다는 것이다. 표 1에 열거된 교량 중 최소 두 개의 교량에 설치된 견전성모니터링시스템은 몇 년의 사용 후 부적절한 보호로 인하여 전부 또는 일부 DAUs가 오작동한 사례가 있다. 교량 현장에 설치되는 DAUs는 온도, 습도, 번개 그리고 전자기방해와 같은 다양한 환경을 극복할 수 있도록 설계되어야 한다. Sutong교는 이와 같은 문제에 대한 최적의 사례를 보여주고 있다. 통행차도 공간에 제약이 있어서, 5개의 DAUs는 강상자 거더 내부에 설치되어 있다. 강상자 거

더는 부식을 방지하기 위하여 제습장치를 이용하여 박스 내부의 습도가 일정하게 유지되고 내부 공기는 외부와 순환되지 않도록 구조설계에서 고려되었다. 이와 같은 설계 조건이 DAUs의 보호시스템에도 적용되었다. 각각의 DAUs를 감싸고 먼지, 온도, 습도 및 전자기간섭으로부터 보호하기 위하여 그림 4에 있는 스텐실린더 캐비넷이 고안되었다. 0도에서 60도를 오르내리는 강상자 거더의 혹독한 온도변화에 대응하기 위하여 냉각시스템을 설치하였다. 강상자 내부의 공기가 DAU 박스내부의 공기와 통풍되는 것을 방지하기 위하여 주측소 근방의 하부 테크 플랜지에 150mm 지름의 구멍 두 개를 만들어 냉방장치의 공급관 및 배출관이 캐비넷 내부의 공기가 외부로 직접 환기되도록 하였다. 또한, 각각의 DAUs에 절연장치를 추가하여 낙뢰에 의한 피해를 예방하였다.

4. 계측 데이터에 대한 환경요소의 영향

기존의 계측시스템과 대별되는 구조전성모니터링시스템의 주요한 특징은 손상평가 및 예측 알고리즘을 시스템에 포함한 것이다. 구조 손상 식별 알고리즘에 관한 광

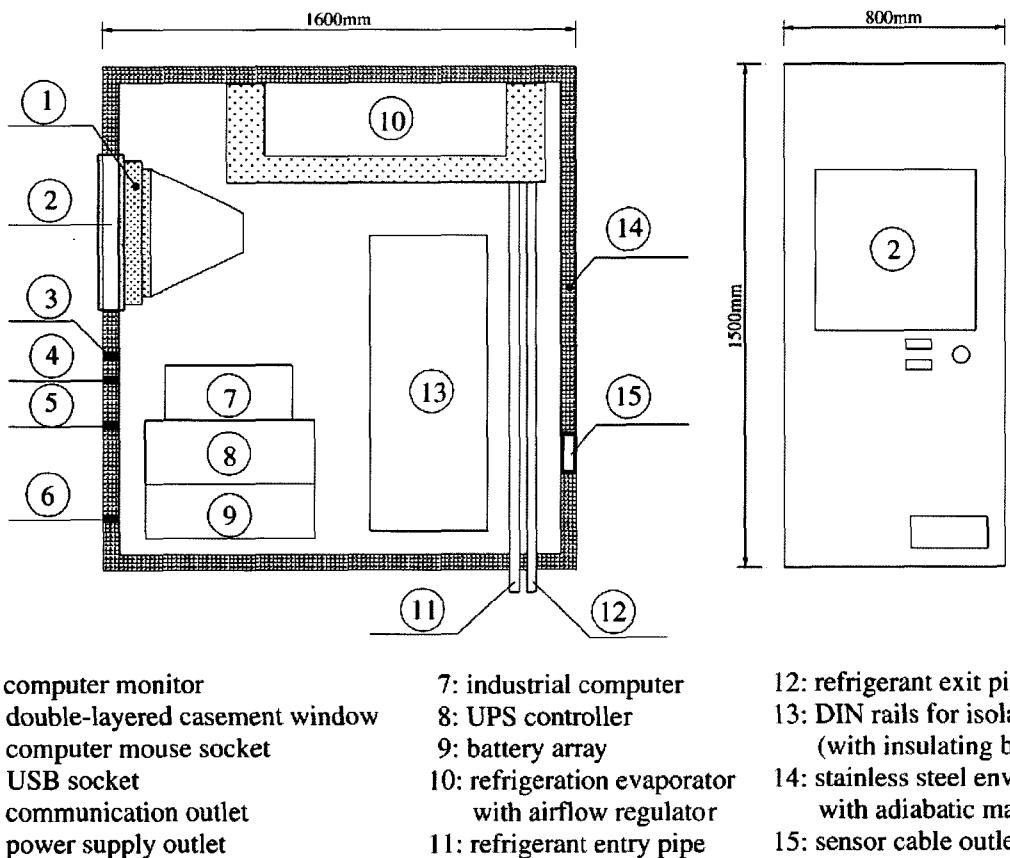


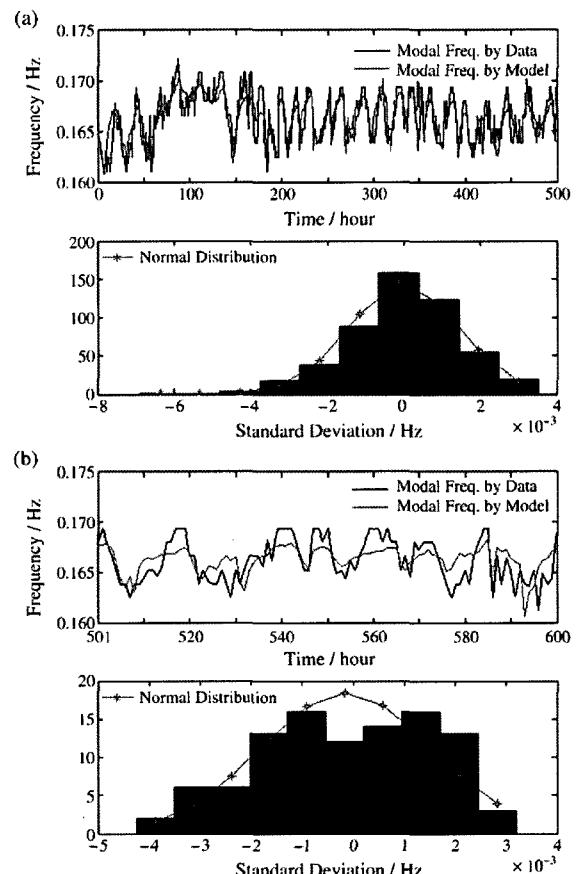
그림 4 DAU 보호 캐비넷 개요도

범위한 연구가 지난 수십년 간 수행되었으며, 이 분야에 대한 사항은 참고문헌을 참고 바란다. 가장 폭넓게 진행된 분야는 진동에 기초한 손상감지법이다. 진동에 기초한 손상감지법은 구조적 손상이나 열화를 암시하는 물리적 특성의 변화를 평가하기 위하여 측정한 동특성(주로 모드 변수)의 변화를 이용한다. 그러나 실제 토목 구조물은 교통, 습기, 바람, 태양 복사, 그리고 가장 중요한 온도와 같은 환경과 사용상의 조건에 따라 변화를 받게 된다. 이러한 환경적 효과는 마치 구조 손상에 의해 야기되는 변화인 것처럼 모드변수의 변화를 일으킨다. I-40교에 적용된 여러 가지 진동 손상감지법의 효과에 대한 평가결과, 환경적 요인들이 모드에 기초한 방법들의 실제 적용성을 제한하는 주요한 결림돌의 하나인 것으로 나타났다. 손상감지 알고리즘의 신뢰성을 위해서는 동특성의 비정상적인 변화와 환경적 사용상의 변동에 기인한 정상적인 변화를 구별해 내는 것이 가장 중요하다. 왜냐하면 손상감지시 정상적인 변화나 비정상적인 변화가 그릇된 경보를 일으킬 수 있기 때문이다. 모드변수에 대한 환경적 변동의 효과에 대한 깊은 이해를 바탕으로 하여, 제대로 환경효과를 정의한 모델을 적당한 손상감지 알고리즘과 결합시켜서 미묘한 구조적 손상을 감지하는 것이 가능하다.

많은 연구에 따르면, 온도가 모드 변동을 야기하는 주요 원인이다. 온도에 의해 야기된 모달 주파수의 변화는 고속도로 교량의 경우 5~10%에 이르며, 이는 대부분의 경우에 구조적 손상이나 열화에 의한 주파수 변화 범위를 초과한다. 일반적으로 장대교량의 장기 구조건전성모니터링 시스템은 진동센서와 온도센서를 포함하고 있기 때문에, 공용 중 다양한 환경상태에서 계측된 데이터를 사용하여 모달 특성에 대한 온도의 영향을 정량적으로 이해하고 모델링하는 것이 가능하다. Ting Kau교에서 일년 동안 측정한 데이터를 이용하여, 모달 주파수에 대한 온도효과를 모델링하기 위한 다양한 통계적 회귀/학습법의 효과를 평가하는 비교연구가 본 저자들에 의해 수행되고 있다. 이 교량의 장기 모니터링시스템의 일부로서 83개의 온도센서와 45개의 가속도계(67채널)가 설치되어 실시간 온도 및 동적 응답을 계측하고 있다. Ting Kau교의 모달 주파수는 자동 모드 식별 프로그램을 매 시간 계측된 가속도 데이터에 적용하여 얻어지고 있으며, 동시에 20개 센서 위치에서의 온도가 시간단위로 평균되어 얻어지고 있다. 일년의 측정기간 동안 수집된 770시간 데이터가 모달 주파수와 온도의 상관관계를 연구하기 위해 사용되었다.

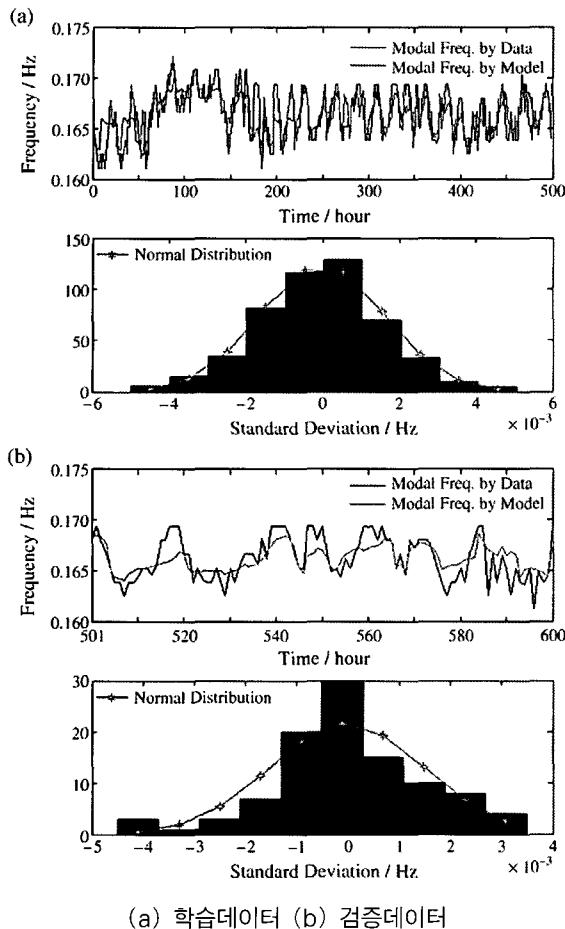
상관분석은 선형 및 비선형 회귀모델, 신경망 모델, 지

지벡터기(support vector machine) 모델을 이용하여 수행되었다. 몇몇 연구자들이 현재의 출력값을 현재의 입력값뿐만 아니라 이전의 입력값과도 연관시켜 온도효과를 고려하는 방안을 제시하였지만, 계측 데이터의 순차가 일정 샘플링 간격에서 항상 연속적이지는 않기 때문에 본 논문에서는 단지 정적 상관모델을 사용하였다. 그럼 5는 계측과 선형 회귀모델에 의해 얻어진 첫 번째 모달 주파수 순차를 나타낸 것이다. 선형 회귀모델은 학습데이터(training data)의 최소자승적합으로 얻어진 것이다. 이 모델이 학습데이터는 잘 모사하지만 새로운 검증데이터(validation data)를 예측하는데 있어서는 불충분한 것을 볼 수 있다. 또한 그림에 잔여오차분포를 나타냈으며, 적절한 모델이라면 가우시안(Gaussian) 모집단에 가까운 분포를 보여줘야 한다. 그림 6은 방사상 기반 커널 함수(radial basis kernel function)에 의하여 비선형 능형회귀모델(nonlinear ridge regression model)에 의해 얻어진 결과를 보여준다. 비선형 회귀모델이 선형 모델보다 더 강한 상관결과(낮은 잔여오차의 표준편차, 더 나은 오차분포의 정규성)를 보이지만 여전히 주파수 변동을 정확화



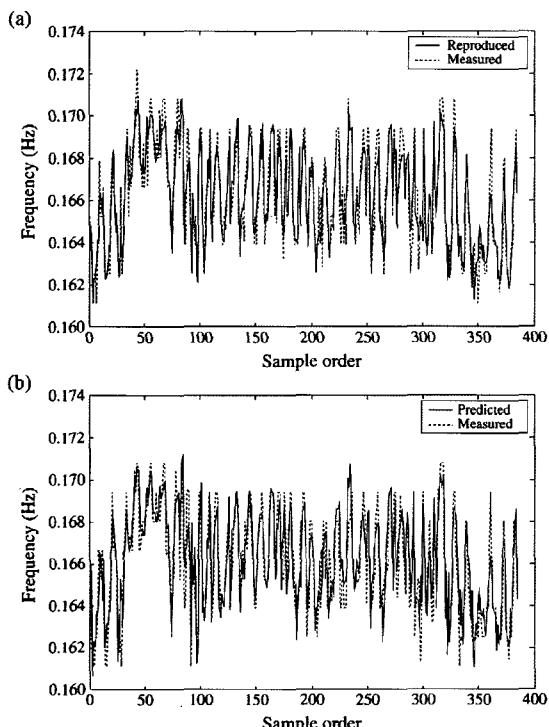
(a) 학습데이터 (b) 검증데이터

그림 5 선형 회귀모델에 의한 주파수 순차



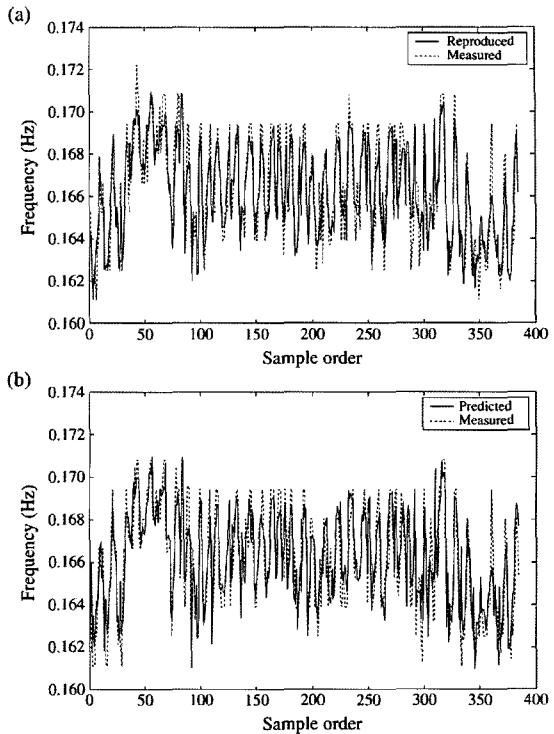
(a) 학습데이터 (b) 검증데이터

그림 6 비선형 회귀모델에 의한 주파수 순차



(a) 학습데이터 (b) 검증데이터

그림 7 신경망에 의한 주파수 순차



(a) 학습데이터 (b) 검증데이터

그림 8 지지벡터기 모델에 의한 주파수 순차

게 예측하기에는 충분치 않다. 그림 7과 8은 신경망과 지지벡터기 모델에 의해 얻은 재생 및 예측 결과를 각각 나타낸 것이다. 이 두 모델은 재생과 예측 모두에서 좋은 성능을 보인다. 단일 은닉층(single hidden layer)을 가진 퍼셉트론 신경망이 상관성을 모델링하는 데에 충분하며, 적정수의 은닉절점(hidden node)이 학습모델의 예측성능을 높이는 데에 중요한 것을 알 수 있다(지나친 은닉절점은 예측성능의 심각한 감소를 야기할 수 있다). 지지벡터기(SVM)를 상관성 모델링에 사용할 경우, 학습모델의 예측성능은 SVM 계수의 선택에 따라 매우 종속적이다. 만일 SVM 계수가 모델변수처럼 학습데이터를 사용하여 결정된다면, 그렇게 얻어진 모델은 명백히 과적합이거나 예측이 좋지 않을 수 있다. 바람직한 방법은 모델변수는 학습데이터로부터 결정하고, SVM 계수의 최적화는 별도의 검증데이터를 사용하는 것이다.

5. 교량 유지관리와의 결합

손상의 발생, 위치, 심각성을 감지하기 위한 구조건전성모니터링 방법의 개발은 어느 정도의 완성은 현재 이뤄졌다. 그러나 교량 점검과 유지관리에 정보를 주기 위한 모니터링 데이터/결과의 적용은 아직 초기 단계에 불과하

다. 건전성모니터링 기술과 교량 점검 및 유지관리 실무 사이에 차이가 존재하며, 이것이 교량 관리자들이 모니터링시스템으로부터 유용한 정보를 받지 못하게 하는 역할을 하고 있다. 모니터링 데이터로부터 교량 관리자는 다음과 같은 사용성과 신뢰성 논란에 대한 답을 얻고자 한다 : (a) 구조물의 하중저항능력이 변하였는가? (b) 구조부재와 전체 구조물의 파괴확률은 얼마인가? 소유주가 구조물의 점검, 유지, 보강에 재원을 할당할 수 있도록 하기 위해서는 이러한 성능논란에 대한 지표가 필요하다.

장기 모니터링 데이터와 시간 종속적 신뢰성 분석에 기초한 교량 요소의 파괴확률(또는 신뢰성 지수)을 평가하기 위한 방법이 본 저자들에 의해 제안되었으며, Sutong 교와 Jiangyin 교의 관리에 적용될 예정이다. 제안된 방법은 교량 관리자에게 교량 점검과 유지의 우선순위와 최적화에 대한 의사결정을 위한 정량적인 정보를 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 신뢰성 이론에 따르면, 구조 요소의 파괴확률 P_f (또는 신뢰성 지수 β)는 랜덤변수인 부재저항(능력) R 과 하중효과 S 를 고려하여 평가할 수 있다.

$$P_f = \iint_{r-s < 0} f_R(r)f_S(s)drds \quad (1)$$

여기서 $f_R(r)$ 과 $f_S(s)$ 는 R 과 S 의 확률밀도함수이다. 이 방법에서 하중 효과 S (응력, 굽힘모멘트, 전단력 등)의 확률밀도함수는 연속적인 계측에서 직접 얻거나, 연속적으로 계측한 변형률로부터 유도된다. 그럼 9는 Tsing Ma 교의 상판에서 계측한 응력의 분포를 나타낸 것이다. 확률밀도함수 $f_S(s)$ 는 이 분포로부터 추정되며, 반드시 가우시안(Gaussian) 분포가 되지는 않는다. 계측된 변형률/응력분포가 구조 손상이나 하중 조건에 따라서 변할 때, 구해진 확률밀도함수 $f_S(s)$ 도 따라서 변하게 된다.

인접(건전한) 부재의 저항능력 R 의 확률밀도함수는 시

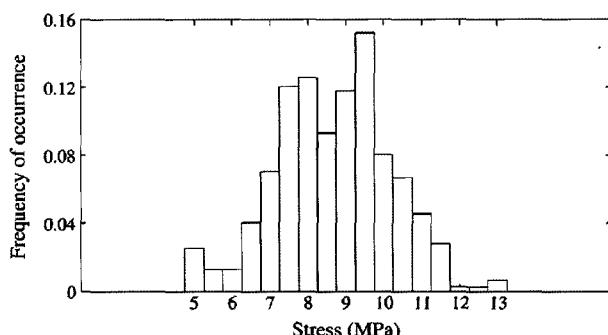


그림 9 구조 요소의 계측된 응력 분포

방 규정이나 현장 재료시험에 의해 얻어진 재료강도의 평균값과 표준편차를 사용하여 계산된다. 손상에 의해 야기된 부재 강성이나 구조 특성의 변화가 건전성모니터링시스템에 의해 감지될 때, 확률밀도함수 $f_R(s)$ 는 구조 손상에 따라서 변하게 될 것이다. 예로써, 모멘트 저항은 굽힘강성의 부분손실 $\alpha (= 1 - EI_d/EI_u)$ 가 감지되면 $\alpha/(1-\alpha)$ 만큼 감소될 것이다. 이런 식으로 파괴확률에 대한 감지 가능한 구조 손상(결정론적으로나 확률적인 방식으로 표현되는)의 효과는 설명된다.

부식과 피로는 교량의 구조적 성능에 영향을 끼치는 중요한 변수이다. 장기 모니터링시스템을 통해 계측한 염분데이터와 응력 이력을 가지고, 부식과 피로에 의해 야기된 파괴확률 효과를 신뢰성 모델을 사용하여 평가하고, 조건계수 f_c 를 이용하여 해석하였다. 전체 파괴확률은 식 (1)에 주어진 기저 파괴확률에 조건계수 f_c , 하중계수 f_l , 여용계수 f_r 를 곱하여 얻어진다.

$$P_f^0 = P_f \cdot f_c \cdot f_l \cdot f_r \quad (2)$$

모니터링 중인 구조 요소나 단면의 파괴확률(또는 신뢰성 지수)이 일정 간격으로 얻어지면, 신뢰성 지수값과 요구되는 유지 행위간의 조화가 이뤄지기 때문에 교량 점검/유지 전략을 결정하는 것이 쉽다. 모니터링 되지 않는 구조 요소에 대해서는 정적 보정된 구조(유한요소) 모델, 계측을 통해 결정된 재하 스펙트럼, 모니터링하고 있는 인접 부재의 계측 데이터를 종합적으로 이용하여 신뢰성 지수 평가를 한다. 제안된 방법은 다음과 같은 장점을 가지고 있다 : (1) 하중의 효과와 분포는 현장계측을 통해 결정되며, (2) 손상에 의해 야기된 부재 강성이나 구조 제원의 변화는 저항변수에 반영될 수 있으며, (3) 재료열화나 환경 요인에 의해 야기된 효과는 신뢰성 지수의 평가에서 설명된다.

6. 결 론

본 연구에서는 장대교량의 구조건전성모니터링과 관련한 다음과 같은 주요 기술 쟁점이 약술되어 있다. (1) 교량 건전성모니터링의 현재 및 최신 동향, (2) 장기 건전성모니터링에 있어서 혁신적인 계측 및 데이터취득시스템의 발전, (3) 계측 데이터로부터 정보 추론시 진보된 전산기술의 적용, (4) 구조건전성모니터링 기술과 교량 점검, 유지관리 업무와의 결합을 포함하고 있다. 계측 시스템,

신호처리, 통신, 데이터 검색 기술에서의 진보가 교량 안전 점검 및 유지관리를 위하여 새로운 장을 제공하는 것으로 보인다. 교량 건전성모니터링시스템은 구조적 일체성, 내구성, 신뢰성을 평가하고 최적의 유지계획과 안전한 교량 운영을 확보하는 데에 유용한 정보를 제공할 수 있

다. 적절한 결합을 통해 구조건전성모니터링은 교량 점검 및 유지관리시 직접적인 정보를 궁극적으로 제공할 수 있으며, 교량 소유주에게도 자산관리 측면에서 많은 혜택을 주게 될 것이다. 