

대형 사회기반시설물의 스마트 건전성 평가기술

이 글에서는 대형구조물의 건전성 평가의 관점에서 계측 및 모니터링과 관련된 국내외 연구동향 우리 연구센터에서 수행하고 있는 관련 연구에 대해 간략히 소개한다.

글·윤정방 / 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 교수
e-mail · ycb@kaist.ac.kr

글·이진학 / 한국과학기술원 스마트사회기반
시설연구센터, 연구교수

글·김정태 / 부경대학교 해양공학과, 교수

최근 교량 및 발전구조물, 고층빌딩과 같은 대형 사회기반시설물의 유지관리를 위한 스마트 계측 및 모니터링 기술에 관한 관심과 연구개발 및 적용사례가 증가하고 있다. 특히 국내에서는 과거 '한강의 기적'이라 일컬어지는 초고속 경제성장 과정에서 교량, 터널, 항만, 공항, 발전소, 댐 등 대형 사회기반시설물의 건설이 급증하였으나, 설계 당시에 고려되지 못하였던 각종 하중 조건과 환경 요인으로 인해 구조 건전성(structural integrity)의 저하가 일어나고 있다. 또한 최근 도서생활권의 향상 및 물류비용의 개선, 고속전철 사업 등으로 인한 장대 교량의 건설, 효율적 국토 이용을 위한 초고층빌딩의 건설, 석유자원의 고갈에 대비한 다양한 형태의 발전구조물의 건설 등이 증가하고 있으며, 이들 사회기반시설물의 유지관리를 위한 스마트 계측 및 모니터링 시스템이 더욱 중요해지고 있다.

최근 국내에서도 사회기반시설물의 유지관리에 많은 투자를 하고 있으나, 현재까지 구조물의 총 유지관리비용은 신설투자비의 5% 수준이며, 이를 선진국의 10~50% 수준과 비교한다면 여전히 부족한 실정이라 할 수 있다. 현재까지는 사용기간이 50년이 지난 사회기반시설물이 별로 없지만, 향후 10년 이내 이러한 노후구조물이 증가할 것이므로, 이들의 안전성 확보를 위한 더 많은 연구개발 투자와 전문인력의 양성이 필요하다.(대한토목학회, 1999)

지난 2002년도에는 과학기술부와 한국과학재단 지정 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC : Smart Infra-Structure Technology Center)가 한국과학기술원에 설립되면서, 교량을 비롯한 여러 사회기반시설물에 대한 유지관리를 위하여 센서, 재료, 해석, 모니터링, 제어 등 관련 핵심기술에 대한 장기적인 연구수행의 기틀을 마련하였다. 여기서는 대형구조물의 건전성 평가의 관점에서 계측 및 모니터링과 관련된 국내외 연구동향을 소개하였으며, 다음으로 우리 연구센터에서 수행하고 있는 관련 연구에 대해 간략히 정리하였다.

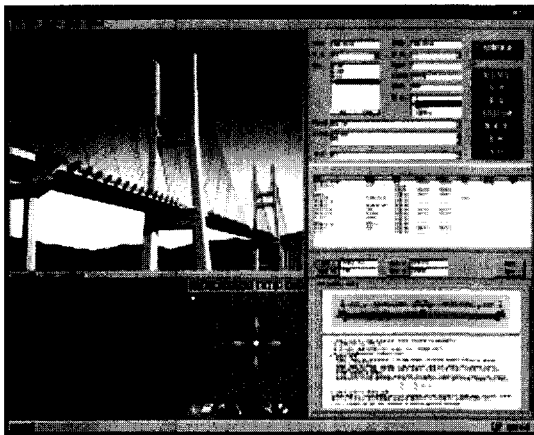
국내·외 관련 기술 동향

개요

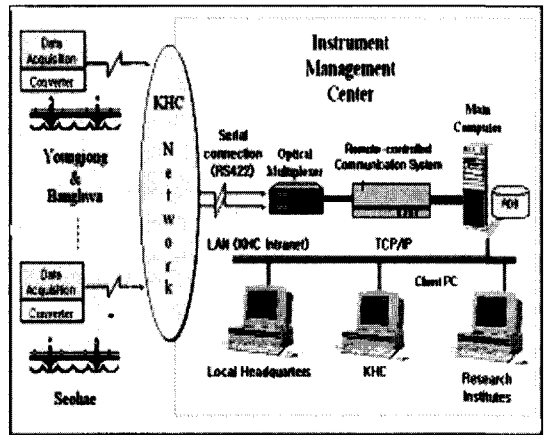
미국, 일본 등 선진국의 경우, 대형 사회기반시설물의 건설 경험 및 노하우가 풍부할 뿐만 아니라, 유지관리와 관련된 전문인력이 많이 양성되어 있고, 또한 시공단계에서부터 사용단계에까지 체계적인 유지관리 절차가 마련되어 있어 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 토대가 마련되어 있다. 일례로 미국의 경우 미연방도로국의 주관 하에 교량점검기준인 NBIS(National Bridge Inspection Standard)를 제정하여, 모든 주에 있는 교량은 이 기준에 따라 점검하며, 이를 위하여 PONTIS라는 전문 소프트웨어를 개발, 활용하고 있다. 또한, 첨단 IT 기술과 스마트 기술을 도입하여 모니터링을

위한 자동시스템을 개발하기 위하여 많은 연구를 하고 있는데, 필라델피아에 있는 Commodore Barry Bridge에 대한 인터넷 기반 실시간 모니터링 시스템(RISCS : Real-time Integrated Surveillance and Control Systems)은 정보기술과 계측기술이 잘 융합된 시스템의 한 예라 할 수 있다 (그림 5) (Aktan 등 2001). 한편, San Diego에 있는 Coronado Bridge 모니터링 시스템의 경우, 교

량에서부터 UC San Diego에 있는 중앙처리시설 까지 무선 인터넷을 이용하여 자료를 전송하고, Caltrans, SPAWAR, US Coast Guard 등의 연구자 및 기관들이 공동으로 정보를 이용하고 연구할 수 있는 시스템을 구축되어 운영 중에 있다. 산업체의 경우 ISIS Canada를 비롯하여, Digitexx, LMS International 등에서 관련 시스템을 개발(제공)하고 있다. 그러나 미국과 같은 기술 선진국에서도

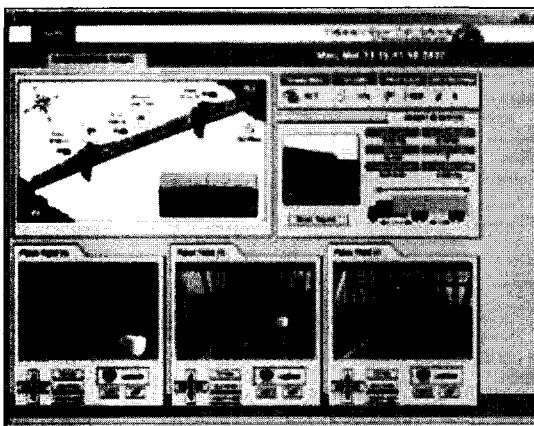


(a) 서해대교 교량 모니터링 시스템

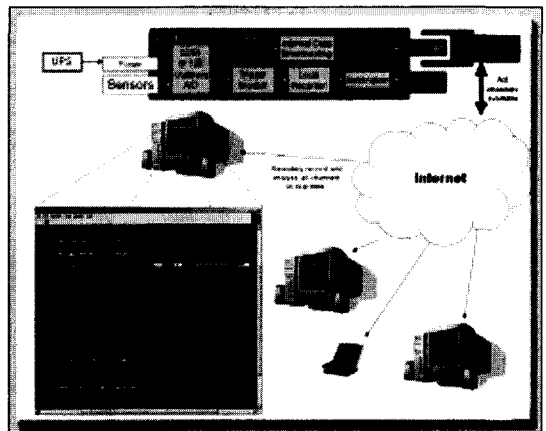


(b) 한국도로공사 교량 모니터링 네트워크

그림 1 국내의 모니터링 시스템



(a) Drexel 대학의 RISCS



(b) Digitexx 사의 SHM 시스템

그림 2 해외의 모니터링 시스템

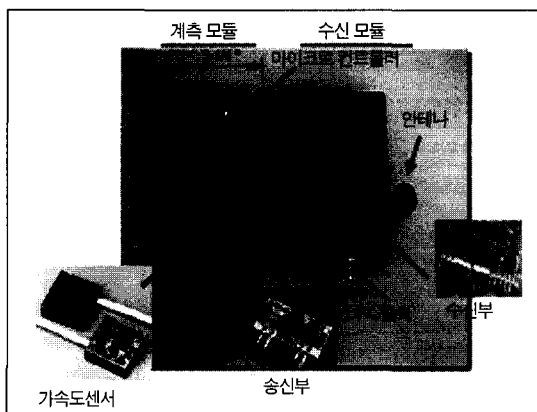
가장 신뢰성 있는 안전점검 방식은 여전히 전문가에 의한 육안검사 혹은 정기점검으로, 이를 위하여 많은 인력을 필요로 하고 있는 실정이다. 샌프란시스코의 랜드마크인 금문교에 대한 유지관리를 예로 들면, 기능적 조사요원에 의하여 일상적인 1차점검을 하고, 판단이 어려울 경우 기술자가 직접 현장을 관찰하게 되며, 이들에 의하여 추가 시험 및 보수/보강이 결정되게 된다. 이러한 업무를 위하여 금문교 관리사무소에는 400명 이상의 인력이 근무하고 있고, 도장공만 40여 명이 확보되어 있다.(김정호, 1998)

국내의 경우, 시설물의 안전관리에 관한 경험이 상대적으로 부족하며, 무엇보다도 전문인력의 공급이 부족한 상황으로 판단된다. 또한, 학계·연구소 등 연구기관에서 수행하고 있는 연구 내용과 실제 시설물의 유지관리를 담당하는 주무부서의 업무 내용에 상당한 차이가 있는 것으로 파악되고 있다. 학계와 연구소에서 수행하고 있는 관련연구는 주로 스마트 센서의 개발 및 동적, 정적자료를 활용한 구조물의 손상평가에 집중되어 많은 이론적, 실험적 연구를 수행하여 왔다. 한편, 고속도로

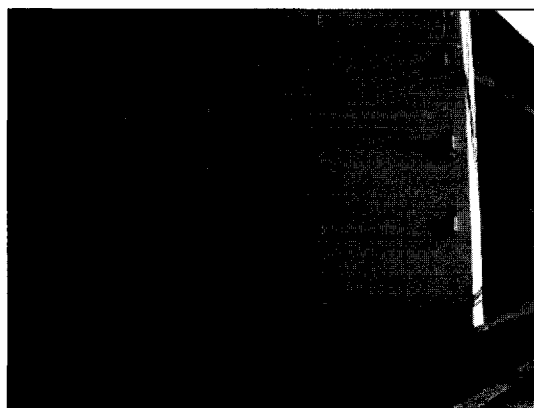
상의 교량을 관리하는 한국도로공사 등 실무부처에서는 계측시스템의 도입과 적용을 활발히 진행하여 왔으며, 최근 개통된 서해대교, 영종대교 등 여러 장대교량에 대하여 상당히 수준 높은 모니터링 시스템을 구축한 바 있다(Kim and Kim 2000; 윤정방 2003). 그러나 계측된 자료를 이용한 첨단 신호처리기법 및 정보처리에 관한 연구는 부족한 실정으로 이에 대한 보완연구가 이루어지고 있다. 한편, 인터넷을 활용한 IT 기반 모니터링 시스템은 이동통신망 등 유비쿼터스 네트워크 환경을 효율적으로 이용한 원격관측시스템을 개발하는 등, 생활 속의 유비쿼터스를 건설분야에서 응용하고자 하는 노력을 경주하고 있다. 이와 같이 실무기관과 학계, 기업체 사이에 많은 연구가 이루어지고, 또한 유지관리에 필요한 시스템을 전체적으로 총괄할 수 있는 전문인력이 양성된다면 국내의 유지관리 기술은 충분히 발전할 수 있으리라 보인다.

스마트 센서 기술 동향

최근 광섬유센서와 압전센서, MEMS 센서, 무선 센서기술 등이 많은 관심을 받고 있으며, 또한 활



(a) 무선 MEMS 센서 시스템



(b) 무선 MEMS 센서를 이용한 진동대 실험

그림 3 무선 MEMS 센서 시스템

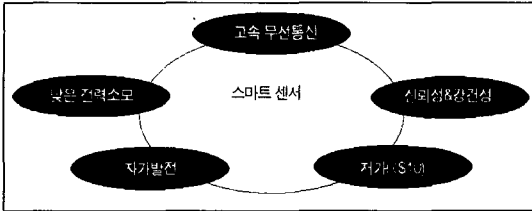


그림 4 스마트 센서

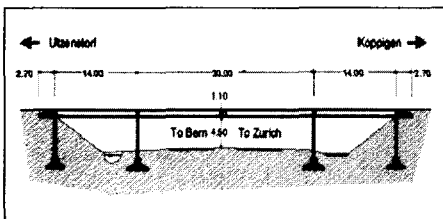
발한 연구가 진행되고 있다. 특히, 미국 MIT에서 발행하는 Technology Review 최신호에서 '세상을 바꿀 10대 미래기술'의 첫 번째로 선정된 무선 센서기술은 MEMS 센서 등 전력소모가 작고, Data Processing이 On-Board 상태에서 가능하며, RF 모듈을 이용하여 무선 송신/수신이 가능한 차세대 센서기술의 핵심으로 부각되고 있다. 또한 이러한 MEMS 센서들은 전력 소모를 최소화하여 자가발전(energy harvesting) 시스템의 응용이 가능하도록 하는 첨단 스마트센서라 할 수 있다. 특히 MEMS 센서와 같은 경우, 성능이 급속히 개선되고 있으며, 가격은 더욱 낮아지는 과정에 있어, 컴퓨터에 적용되고 있는 '무어의 법칙'이 센서에도 적용되고 있다고 할 수 있다. 또한 RF모듈이 장착된 무선 MEMS 센서는 기존의 고가 센서 사용으로 인한 센서수의 제한 및 과도한 케이블 작업 등을 현저하게 개선시켜, 앞으로의 사회기반시설물의 모니터링을 위하여 매우 중요하게 이용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그림 3(a)는 전형

적인 무선 MEMS 센서(Chung et al. 2002)를, 그림 3(b)에서는 무선 MEMS 센서를 이용하여 진동대 실험을 수행하고 있는 캘리포니아 공과대학의 실험현장을 보여준 그림이다(Glaser 2002). 한편, 지난 2003년 SPIE Conference에서 개최된 바 있는 NSF(National Science Foundation) 포럼에서 발표된 여러 주제강연을 요약하여, 스마트 센서의 조건을 다음의 그림 4와 같이 정리하였다.

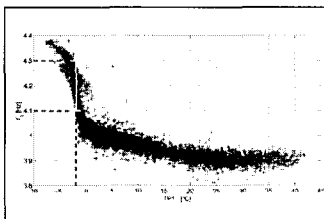
압전센서(piezoelectric sensor)의 경우, 기계적 신호에 의하여 전기적 신호를 발생시키고(압전효과), 전기적 신호에 의하여 기계적 신호를 발생시키는(역압전효과) 재료로서 이러한 특성을 이용하여 센서와 가진기의 역할을 동시에 수행할 수 있는 장점이 있다. 특히, 사회기반시설물과 같은 대형구조물의 경우, 국부적으로 탄성파를 생성시키고, 센싱하는 방법을 통하여 구조물의 균열 등을 원격에서 탐색할 수 있는 가능성이 있어 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 외에도 전자기파(electromagnetic wave)를 이용한 스마트 센서 등이 최근 많은 연구가 되고 있는 스마트 센서 분야라 할 수 있다.(Kim et al 2003)

스마트 건전성 평가기술

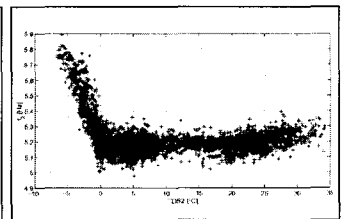
구조물의 상태 평가를 위한 방법을 크게 나눈다면 모델기반기법(model based approach)과 신호기반기법(signal based approach)으로 나눌 수 있



(a) Z-24 Bridge

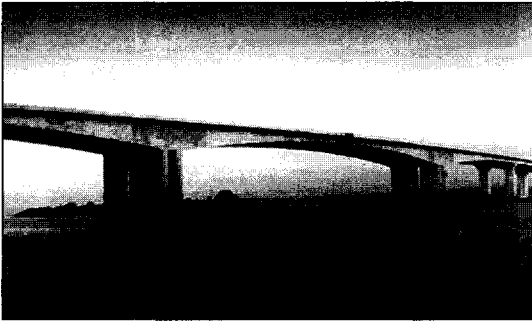


(b) 온도-1차고유주파수 비교

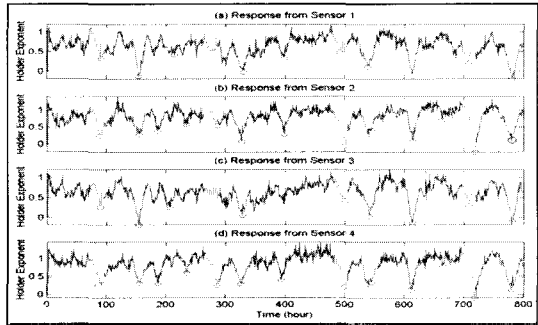


(c) 온도-2차고유주파수 비교

그림 5 온도에 따른 교량의 고유주파수 변화(Peeters and de Roeck, 2001)

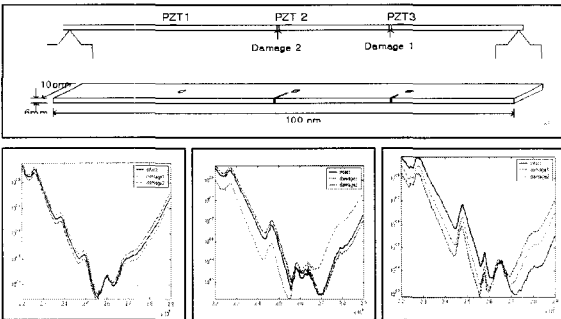


(a) Singapore-Malaysia Second Link Bridge

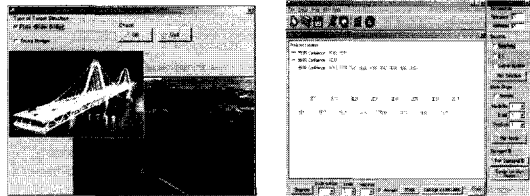


(b) Holder Exponent Analysis

그림 6 Holder Exponent 해석에 의한 Discontinuity Detection (Sohn 등 2002)



(a) PZT 센서를 이용한 NDT



(b) IDIS

그림 7 PZT센서를 활용한 NDT 및 진동기반 손상검색을 위한 IDIS 시스템

다. 모델기반기법은 교량 및 댐 등 시설물에 대한 수치해석모델을 계측결과를 이용하여 개선함으로써 현재의 상태를 평가하는 방법이며, 신호기반기법은 장기간의 계측을 통하여 임의의 구조물 응답에 관한 데이터베이스를 축적한 후, 일정 기간 동안의 응답을 기존 자료와 비교함으로써 이상상태를 감시하는 방법을 의미한다. 신호기반기법의 경우, 1년 이상의 장기 계측자료가 축적되어 있는 경우 활용이 가능하며, 복잡한 시설물의 수치해석 모델을 작성하지 않아도 되는 장점이 있으나, 정량적인 상태평가가 어렵다는 단점이 있다. 단지 시설물의 이상유무를 감시하는 시스템을 계획한

다면, 신호기반기법을 통하여 모니터링 시스템을 구축하는 것이 올바르다고 할 수 있다.

이러한 신호기반에 의한 모니터링 시스템 구축을 위해서는 여러 조건에 따른 기준치의 마련이 가장 중요한 단계이다. 시설물의 거동 특성은 온도, 습도 등의 환경조건과 통행차량의 속도 및 자중 등의 교통조건에 의하여 지배되는 경향이 많기 때문에, 이들의 영향을 고려한 기준치 확보 방안이 중요한 과제이다. 다음의 그림은 교량 아스팔트의 온도변화와 구조물의 첫 번째, 두 번째 고유주파수의 관계를 보여준 것으로서 이를 통하여 구조물의 거동이 구조특성의 변화뿐만 아니라 환경

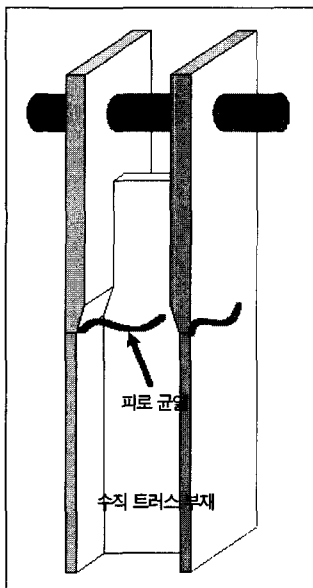
조건의 변화에도 영향을 받고 있음을 알 수 있다 (Peeters and de Roeck, 2001). 국내에서 교량 건전성 평가를 위한 현장시험 혹은 장기모니터링시스템을 구축하는 데에 있어, 해당 교량의 환경변화에 따른 영향을 미리 분석하고 있어야 함을 그림을 통하여 알 수 있다. Sohn 등은 신호기반 방법에서 Holder Exponent 해석을 제안하였는데, 그림 6에서 실제 교량의 건설 당시 계측된 변형률 자료를 이용하여, Post-Tensioning과 타설 등의 이벤트 시점을 규명하는데 매우 효과적이었음을 보인 바 있다. (Sohn 등 2002)

SISTeC 연구 현황

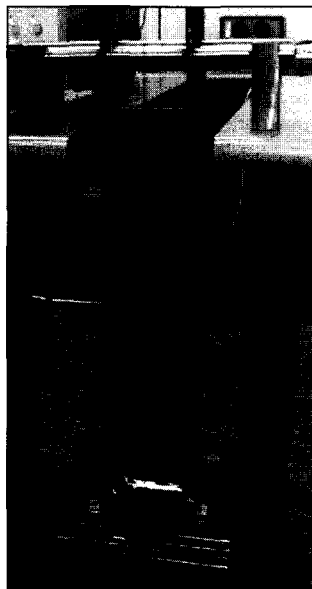
연구 개요

대형 사회기반시설조물의 건전성 평가를 위한

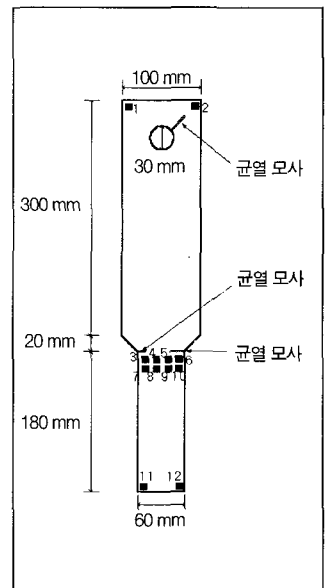
스마트 계측 및 모니터링 시스템 개발을 수행하는데 있어, 센서공학, 기계공학 등 타 분야와의 공동 연구는 효율적인 연구수행을 위하여 필요하며, 이러한 의미에서 볼 때 연구센터를 중심으로 학제간 연구가 더욱 중요하다고 할 수 있다. 연구센터에서는 신호기반 방법과 모델기반 방법을 함께 수행하고 있으며, 그림 7에서는 현재 적용성 평가를 위하여 수행한 크랙 발견을 위한 압전센서를 위한 내용과 진동기반 손상규명을 위하여 개발된 프로그램 보여 주고 있다. 스마트 광섬유센서에 의한 구조물의 국부손상 추정에 관한 연구도 동시에 수행 중이나 이는 이번 기계저널의 다른 원고에서 다뤄질 예정이므로 본 고에서는 PZT 센서에 대한 내용과 온도효과를 보정한 진동기반 손상규명에 관해서만 소개하기로 한다.



(a) 성수대교 수직부재

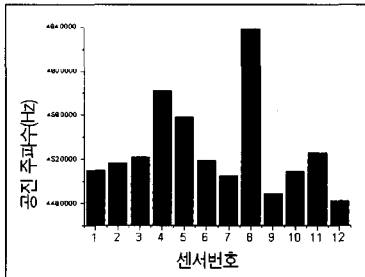


(b) 실험시편

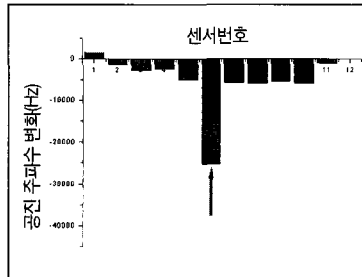


(c) 센서부착위치 및 손상위치

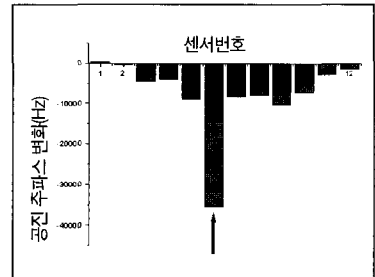
그림 8 성수대교의 수직부재에 대한 균열탐지를 위한 모의실험



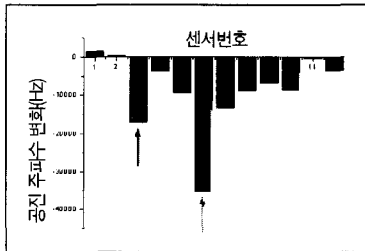
(a) 건전상태



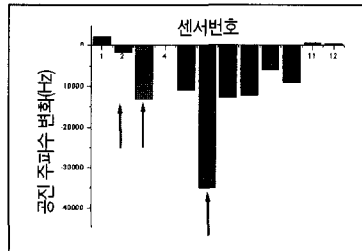
(b) 손상단계 1



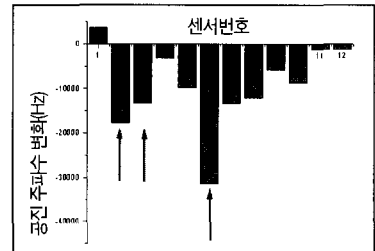
(c) 손상단계 2



(d) 손상단계 23



(e) 손상단계 4



(f) 손상단계 5

그림 9 각 손상단계별 공진주파수의 차이 및 손상위치(화살표는 손상위치를 의미)

스마트 PZT 센서를 활용한 구조물의 국부 손상 탐색(Roh et al. 2004)

현재 건설분야에서의 스마트 PZT 센서에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이나, 다른 공학분야에서는 이미 실용화되어 있는 센서기술이라 할 수 있다. 따라서, 연구센터를 통한 학제간 연구를 통하여, 빠른 기술이전 및 실용화 연구가 가능해 질 수 있을 것으로 기대하고 있다. 우리 연구센터에서는 교량 등의 실제 사회기반시설물의 건전성 상시 모니터링 시스템으로서의 스마트 PZT 센서의 적용 가능성을 평가하기 위하여, 지난 1994년 발생한 성수대교 붕괴사고의 원인으로 밝혀진 편연결 수직재의 피로균열 탐색에 대한 실험연구를 수행하였다. 그림 8과 같이 길이가 500mm, 웹의 두께가 6mm, 플랜지의 두께가 8mm인 수직트러스 부재를 제작하였고, 8X8X0.2mm 크기의 PZT 센서 12개를 플랜지의 외측 표면에 부착하였다. 응력집중이 가장 많이 일어나는 세 지점에 순차적으

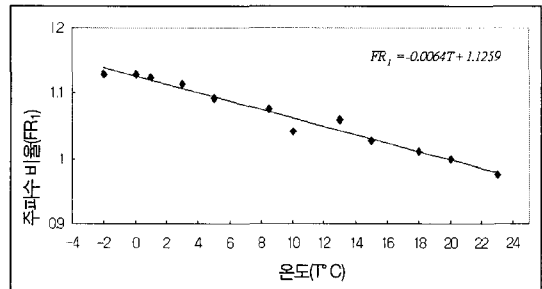
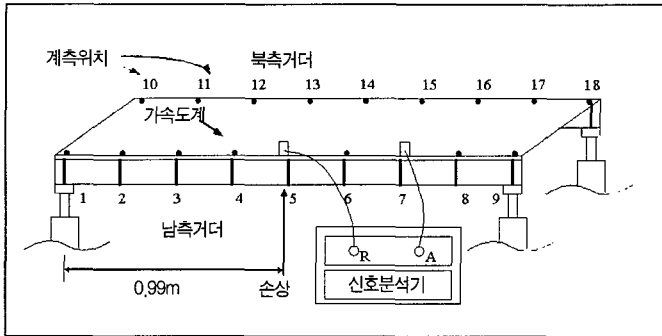


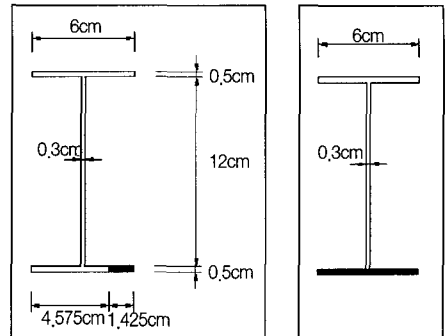
그림 10 첫 번째 모드에 대한 고유진동수 보정식($f_1 = FR_1 \times 67.635 \text{ Hz}$)

로 다섯 개의 균열을 가하였다. 즉, 손상단계 1은 PZT 6 근방에 1cm의 균열을, 손상단계 2는 PZT 6 근방에 2cm의 균열을, 손상단계 3은 PZT 6과 PZT 3 근방에 2cm와 1cm의 두 개의 균열을, 손상단계 4에서는 PZT 6, 3, 2에서 각각 2cm, 1cm, 1.5cm의 세 개의 균열을, 마지막 손상단계 5에서는 PZT 6, 3, 2에서 각각 2cm, 1cm, 2.5cm의 균열을 가지도록 하였다. 각각의 손상경우에서 PZT



(a) 손상위치

그림 11 손상위치 및 형태



(b) 손상형태 (손상단계 1(왼쪽), 2(오른쪽))

센서로부터 impedance 공진주파수의 변화를 비교하였고, 이로부터 손상감지를 수행하였다.

위의 실험을 통하여 PZT 센서의 건설분야에서의 응용을 검토하였으며, 앞으로는 이와 같은 스마트센서를 이용하여 보다 경제적이고, 신뢰성이 높은 사회기반시설물의 모니터링 시스템이 개발될 수 있을 것으로 기대한다.

온도효과를 보정한 진동기반 구조물의 손상 탐색(Kim et al. 2004)

앞 절에서 언급한 바와 같이, 구조물의 진동 특성은 강성, 질량 등의 구조물의 특성변화뿐만 아니라 온도 등의 외부 환경에 의해서도 영향을 받는데, 외부환경요인 중에서는 온도에 의한 영향이 지배적인 것으로 알려져 있다. 우리 센터에서는 이러한 온도 변화에 의한 영향을 배제하기 위하여, 온도와 고유진동수의 관계를 먼저 평가한 후, 임의의 온도에서의 고유진동수를 보정하여 이로부터 손상위치와 손상크기를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

먼저, 실험 온도 -3°C 에서 23°C 까지의 온도 조건에 대하여 초기 네 개 진동모드(1차 굽힘, 1차 비틀림, 2차 굽힘, 2차 비틀림)의 모드형상과 고유진동수를 구하고, 이로부터 1차 굽힘, 1차 비틀림,

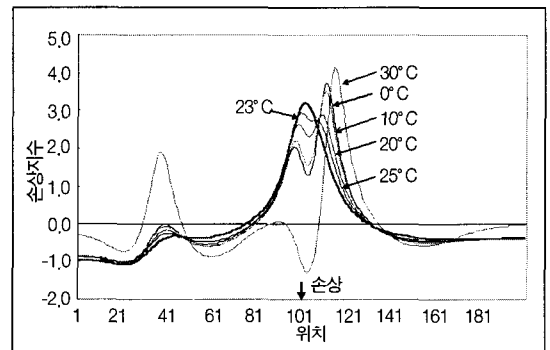


그림 12 손상위치 검색 결과

(손상의 경우 23°C 계측, 전진상태의 경우 $0^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 계측)

2차 굽힘 및 2차 비틀림 모드에 대한 온도-고유진동수 사이의 선형관계를 구할 수 있었다. 그림 11은 1차 모드에 대한 온도-고유진동수 사이의 관계를 구한 것이다.

한편, 손상실험은 23°C 의 일정한 온도 하에서 수행하였는데, 이 때 구조손상은 남쪽 관형 지간 중앙 하부 플랜지에 쇠톱 절단을 통해 가하였으며, 모형 강관형교에 도입된 손상은 하부플랜지 1/4의 절단과 하부플랜지 전체 절단의 두 가지 손상단계로 고려하였다.

그림 12는 손상경우 2에 대하여 손상위치를 검색한 결과를 보여주고 있다. 결과로부터 손상추정에 있어서, 손상 전후의 온도가 각각 23°C 로 등

일한 경우에 대한 손상검색은 손상위치와 손상크기가 매우 정확하게 추정됨을 확인할 수 있었고, 23 °C에의 손상된 상태의 고유진동수와 비손상시의 진동수가 0 °C에서 30 °C까지 변동하는 경우, 온도-고유진동수 관계를 이용하여 보정해 주지 않을 경우, 손상의 영향이 온도에 의한 영향에 묻혀 손상추정이 불가능하였으나, 온도의 영향을 보정한 고유진동수를 사용한 경우 그림 12와 같이 어느 정도의 오차는 있지만, 각각 다른 온도에서 계속된 고유진동수를 이용하여 손상탐색을 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

맺음말

대형 사회기반시설물의 건전성 평가를 위한 스마트 계측 및 모니터링은 토목, 건축공학을 비롯하여 기계, 재료, 전자, 전산 등 여러 분야의 연구가 융합될 때 성공적으로 이루어질 수 있을 것이며, 앞으로의 연구는 센터 중심의 학제간의 공동 연구와 함께, 여러 제안 방법들이 서로 배타적인 관계가 아닌 상호보완적인 관계를 유지하면서 새로운 신기술과 잘 융화될 때 그 가능성이 매우 높아질 것으로 보여진다. 이를 위하여 우리 연구센터가 앞으로도 많은 역할을 할 수 있을 것으로 보이며, 학문간의 교류를 증진함으로써 보다 안전한 사회기반시설물의 구축에 도움이 되고자 하며, 앞으로 이 글을 읽는 많은 기계공학분야의 연구자들로부터의 도움을 기대한다.

[참 고 문 헌]

1. 김정호 (1998), 외국의 장대교량 유지관리시스템, 한국강구조학회지, 제10권, 제3호, 52-61쪽
2. 대한토목학회지 제47권 제4호 1999, 57-59쪽
3. 윤정방 (2003), Recent R&D Activities on Structural Health Monitoring for Civil Infra-structures in Korea, 소음진동공학회 추계학술발표회 주제강연

4. Aktan, A.E., Catbas, F.N., Pervizpour, M., Kulcu, E., Grimmelsman, K., Barrish, R., and Qin, X. (2000), "Real-time bridge health-monitoring for management," Proceedings of Second Workshop on Advanced Technologies in Urban Earthquake Disaster Mitigation, Kyoto University.
5. Chung, H., Enomoto, T., Shinozuka, M., (2003), MEMS-type accelerometers and wireless communication for structural monitoring, Second MIT Conferences on Fluid and Solid Mechanics, Cambridge, MA, June 17-20, 2003.
6. Conte, J.P. et al (2003), "Health monitoring framework and structural analysis," Proc. of Workshop on Structural Health Monitoring organized by UCSD and Caltrans.
7. Kim, J-T, Ryu, Y-S, Lee, Y-K, and Kim, J-H (2001) GUI Software System for Damage Identification in Plate-Girder Bridges, Proceedings on 4th Japan-Korea Workshop on Nonlinear System Identification and Structural Health Monitoring, DPRI, Kyoto Univ. Feb. 27, 2001
8. Kim, J.-T., Yun, C.-B. and Park, J.-H. (2004) Temperature Effects on Vibration-Based Damage Detection in Model Plate-Girder Bridges, Proceedings on the 5th Japan-Korea Workshop on System Identification and Structural Health Monitoring, January 30-31, 2004
9. Kim, S.K. and Kim, C.Y., "Bridge Monitoring Systems in Korea," Proceedings of US-Korea Workshop on Smart Infra-Structural Systems, 2002. pp.223-232.
10. Kim, Y.J., Jofre L, De Flaviis F, Feng, M.Q. (2003) "Microwave reflection tomographic array for damage detection of civil structures," IEEE Trans. Antennas and Propagations 51(11) 3022-3032.
11. Park, S.H., Yi, J.H., Yun, C.B., Roh, Y.R. (2003), Damage Detection for Structures Using smart PZT transducers, Annual Conference of Korea Society of Civil Engineers, 2003
12. Peeters, Bart, and De Roeck, Guido (2001), One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, pp.149-171.
13. Roh, Yong-Rae, Yi, J.H., Park, S.H. and Yun, C.B. (2004), Damage Detection for Civil Infrastructures Using Electro-Mechanical Impedance of PZT Sensors, Proceedings on the 5th Japan-Korea Workshop on System Identification and Structural Health Monitoring, January 30-31, 2004
14. Sohn, Hoon, Robertson, A.N., and Farrar, C.R. (2002), Holder exponent analysis for discontinuity detection, Proceedings of US-Korea Workshop on Smart Infra-structural systems, 23-24 August 2002, Busan, Korea
15. Websites from Digitexx: <http://www.digitexx.com/>
UCSD Team: <http://www.npaci.edu/online/v6.15/bridge.html>