

# 국내 사회기반시설물에 대한 스마트 구조기술의 연구현황

윤정방\* · 이진학\*\*

\*한국과학기술원 건설 및 환경공학과

\*\*한국해양연구원 연안개발연구본부

## Smart Structure Technologies for Civil Infrastructures in Korea

CHUNG-BANG YUN\* AND JIN-HAK YI\*\*

\*Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

\*\*Coastal Engineering Research Department, KORDI, Ansan, Korea

**KEY WORDS:** Smart Sensors 스마트 센서, Non-Destructive Evaluation 비파괴검사, Structural Health Monitoring 구조건강성 감시

**ABSTRACT:** In this paper the recent research and application activities on smart structure technologies for civil infra structures in Korea are briefly introduced. The developments of structural health monitoring systems and effective retrofit / maintenance methodologies for infra structures have become active in Korea since the middle of 1990's, as the number of the deteriorated infra structures, mostly built on the rapidly industrialized period of 1970's, has increased very rapidly. Discussions are made on smart sensors, non destructive technologies, monitoring and assessment methods and systems for civil infra structures.

### 1. 서 론

1990년대 초반 국내에서도 사회기반시설물에 대한 건전성 평가 및 제어 등을 위하여 스마트 구조기술이 도입되기 시작하였다. 1970년대의 이른바 “급속한 경제 개발 시기”에 건설되어 지금은 노후화가 많이 진행된 시설물의 수가 증가하면서 자연재해 또는 인위재해에 의한 시설물의 위험도가 증가하고 있으며, 특히 1990년대 중반 성수대교와 삼풍백화점 사고로 인하여 시설물 안전관리에 대한 국민적 인식이 확산되었다. 이러한 시설물의 안전성을 확보하고, 효율적인 유지관리를 위하여 “시설물 관리에 관한 특별법”이 제정되었으며, 관리공단이 설립된 바 있다. 이후 시설물의 유지관리를 위하여 체계적인 육안검사와 내하력 평가 등을 비롯한 정밀진단 및 교량 등에 대한 장기 모니터링 시스템이 체계적으로 구축되기 시작하였다.

이 논문에서는 스마트 센서를 중심으로 국내에서의 스마트 구조기술에 관한 연구 개발 내용을 정리하였다. 우선 광섬유 센서, 압전센서, 무선센서와 같은 스마트 센서기술, 그리고 압전센서를 이용한 비파괴검사법, 이미지 처리를 통한 콘크리트 구조물의 균열조사, 상시진동을 이용한 시설물 모니터링 등에 대한 내용을 다루고 있다. 이들은 주로 교량 등과 같은 육상 사회기반 시설물에 대하여 수행된 연구결과이나 향후 연안 및 해양구조물에 대한 적용을 기대할 수 있으며, 현재 건설 중인 울돌목 시험 조류발전시설에 하이브리드 모니터링 시스템을 구축할 계획에 있다.

### 2. 스마트 센서 및 비파괴검사

#### 2.1 광섬유센서 (Optical Fiber Sensors)

광섬유센서(Optical fiber sensors, OFSs)는 구조물에 대한 매립 및 부착이 용이하고, 다중화(multiplexing)가 가능하며, 또한 전자기적 잡음이 없고, 계측 길이를 수 cm에서 수 km까지 매우 다양하게 할 수 있는 장점이 있어, 시설물의 실시간 건전성 평가에 매우 유용하게 적용될 수 있는 센서로 많은 연구가 진행되고 있다. 센서, 센서 네트워크, 데이터 로거 등의 개발을 위한 연구가 주로 기계, 항공, 재료분야에서 많이 수행되고 있으며, 건설 분야에서는 다음과 같은 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

- 파장분할 다중화 방식과 코드분할 다중화 방식에 의한 데이터 로거 개발(Ryu et al., 2001; Ryu and Hong, 2002)
- 다양한 계측길이를 갖는 소형 FBG 센서 어셈블리
- 변형률 모드형상과 모드유연도를 이용한 손상검색
- FBG 센서를 이용한 터널 라이닝 모니터링
- 매립형 FBG 센서를 가진 탄소섬유보강소재를 이용한 보강
- FBG 센서를 이용한 WIM 시스템(Kim et al., 2003)
- FBG 센서를 이용한 원자력 격납구조물의 건전성 평가(Kim et al., 2005)
- BOTDA 센서를 이용한 화재경보시스템 (Kwon and Cho, 2004)

#### 2.2 압전센서 (Piezoelectric Sensors)

압전센서는 크기가 작고, 가벼우며, 가격이 저렴하여 건전성 모니터링을 위하여 많은 연구가 진행되고 있는 스마트 센서이

다. 특히 압전센서는 압전성을 이용하여 가진기 및 센서로 활용이 가능한 장점이 있다. 초기에는 PVDF 등의 압전센서에 대한 연구가 활발한 반면, 현재는 다음과 같이 PZT 센서 및 MFC 센서에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

- 산업시설물에 대한 구조 결합 모니터링을 위한 PZT 어레이의 활용(Yoon et al., 2005)
- 임피던스 변화를 이용한 강재의 손상 검출((Park et al., 2004)
- 유도파를 이용한 강재의 손상검출(Park et al., 2005, 2006a)
- PZT센서를 이용한 콘크리트 구조물의 손상검출(Park et al., 2006b)
- 웨이블릿을 이용한 균열검출
- 신경망기법, SVM 등에 의한 통계적 패턴인식에 의한 손상검출(Yun et al., 2006; Park et al., 2005b)
- MENS, 무선센서 등을 이용한 실시간 PZT 센서기반 모니터링

들을 통하여 국부적으로 신호를 FFT 처리하여 전송함으로써 자료전송량을 감소시킬 수 있도록 하였다 (그림 2).

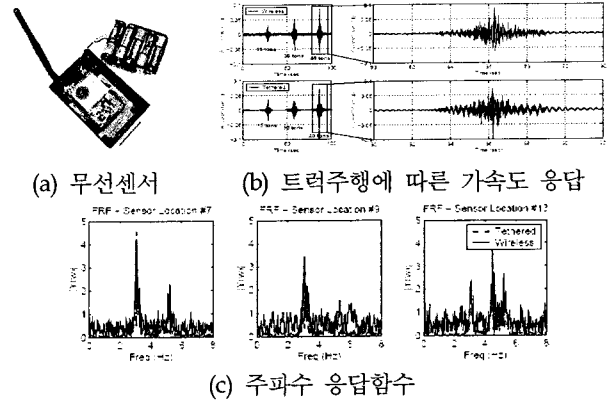


그림 2. PSC 박스교량에 대한 현장실험용 무선센서

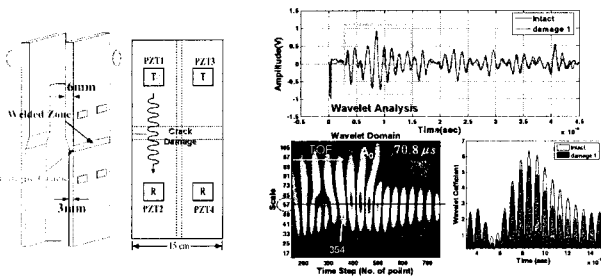


그림 1. 압전센서 및 스마트 구조건전성 평가(Park et al 2006)

### 2.3 무선센서

무선센서 시스템은 효과적인 센서 케이블의 설치 운용을 위하여 활발히 개발되고 있으며, 최근에는 기존의 계측센서에 부착하여 표준 안테나를 사용할 경우 300m까지, 패치 안테나를 사용하여 1.2km까지 무선으로 계측자료를 송신하는 장비가 개발된 바 있으며, 이들 장비는 유선장비와 함께 교량 등 여러 시설물에 현장적용되어 그 성능이 검증된 바 있다.

한편 무선 MEMS 센서를 개발하기 위한 KAIST, Stanford 대학, Michigan 대학 사이의 국제공동연구가 진행되고 있다 (Lynch et al., 2005). 기존 유선시스템을 대체할 수 있는 저렴한 무선센서를 이용한 구조 건전성 감시시스템을 개발하는 것을 목적으로, 무선 MEMS 센서 시작품을 제작하고, 이를 시험도로 상의 콘크리트 박스 교량에 대하여 차량 주행 시험 등의 현장시험을 수행함으로써 유선 계측시스템과의 성능을 비교한 바 있는데, 그 결과 주요저차모드의 주파수 및 모드형상 등의 동특성을 추정하는데 충분한 성능을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다. 무선센서 시스템은 centralized beacon signal을 이용하여 구성되어 있는 시간 동기화 시스템은 각 센서 네트워크에 분포되어 있는 시간장차와 동기화함으로써 무선 계측시스템에서 발생할 수 있는 계측 시간의 불일치 문제를 해결하였고, 그 결과를 평가한 바 있다. 한편 현장실험에 사용된 무선센서는 각 센서에서 계측된 응답을 MEMS 센서와 같이 구성되어 있는 신호처리모

### 2.4 균열 검출을 위한 이미지 처리 기법

콘크리트 표면의 균열 조사를 위한 디지털 이미지 처리기술이 개발되고 있다(Lee et al., 2005). 균열의 폭과 길이, 방향 등에 대하여 자동화된 계측이 가능하도록 개발된 이 장비는 단위픽셀에 해당하는 길이를 결정하고, morphological shading correction 기법, 향상된 이진화 및 형상해석, 그리고 균열의 특징을 결정할 수 있도록 되어 있다. MATLAB으로 작성된 이 프로그램을 사용함으로써 기존 결과보다 우수한 성능이 있음을 검증하였다.

한편 한국도로공사에서는 로봇기술과 디지털 이미지처리기법을 이용하여 콘크리트 슬라브의 표면을 검사할 수 있는 자동시스템을 개발한 바 있다(Lee et al., 2006). 이 시스템은 (1) DGPS를 장착한 디지털 카메라 장비, (2) 카메라와 붐을 장착한 원격 제어로봇, (3) 자료처리, 데이터 베이스 관리, 균열인식 시스템으로 구성되어 있다. 이 장비를 개발함으로써 기존의 육안조사를 위한 장비를 많이 대체할 수 있을 것으로 기대되며, 보다 효율적이고 신뢰성 높은 균열 감시가 가능할 것으로 기대되고 있다 (그림 3).

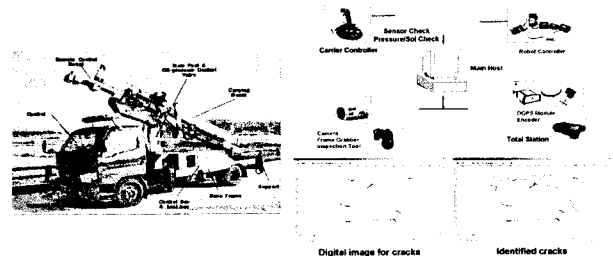


그림 3. 로봇과 디지털 이미지처리에 의한 교량점검시스템

## 3. 모니터링 및 손상검출기법

### 3.1 진동기반 구조물 손상평가

진동기반의 구조물 손상평가 방법은 계측자료로부터 동특성, 모드변형에너지 등의 특성을 구하기 위한 자료처리단계와 이들

특징으로부터 손상을 찾을 수 있는 정보처리단계로 구분할 수 있다. 최근에는 유전자 알고리즘, 신경망 기법과 같은 소프트웨어 컴퓨팅기법을 구조손상 규명에 적용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 신경망기법을 활용한 구조손상평가 방법은 신경망 기법의 특성상 훈련된 신경망을 이용하여 계측된 자료에 대한 결과를 신속하게 얻을 수 있기 때문에 실시간 구조건전성 평가를 위하여 매우 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있다. Lee et al. (2002)은 차량하중에 의한 교량의 손상을 평가하기 위하여 신경망기법을 이용한 손상평가를 수행한 바 있다. 한편 이 방법은 거저모델에 포함되어 있는 모델링 오차를 고려할 수 있도록 개선되었으며, 한남대교 복측 경간에 대한 실제 교량 손상실험을 통하여 실험적으로 기법의 성능을 검증하였다(Lee et al., 2005).

### 3.2 하이브리드 구조건전성 감시

구조건전성 감시기법은 전역적인 감시와 국부적인 감시 방법으로 크게 분류할 수 있다. 전체 구조물의 동적응답을 계측하고 이로부터 구조물의 동특성, 응답특성 등을 분석하는 전역적 감시를 통하여 구조물 전체의 전반적인 성능을 감시할 수 있으나 전역적 감시를 위해서는 제한된 비용으로 전체 영역을 계측하기 위하여 센서를 충분히 설치할 수 없으므로 국부적인 손상 등을 조기에 발견하기는 어렵게 된다. 이러한 전역적 안전감시 시스템의 단점을 극복하기 위하여 전역적 안전감시 시스템에 비파괴 검사 등을 도입한 하이브리드 안전감시 시스템이 제안되었다(Kim et al., 2006). 그림 4는 제안된 하이브리드 SHM 기법의 주요 개념을 보여주고 있는 것이며, 이는 신경망기법이나 손상지수법, 유전자알고리즘 등과 같은 전역적 안전감시 시스템과 전자기적 임피던스 계측 등과 같은 국부적 안전감시 기법을 유기적으로 통합한 시스템으로 구성될 수 있다. 제안된 방법을 소규모 모형교량에 적용함으로써 볼트 손상 등과 같은 손상을 조기에 발견할 수 있음을 검증하였다.

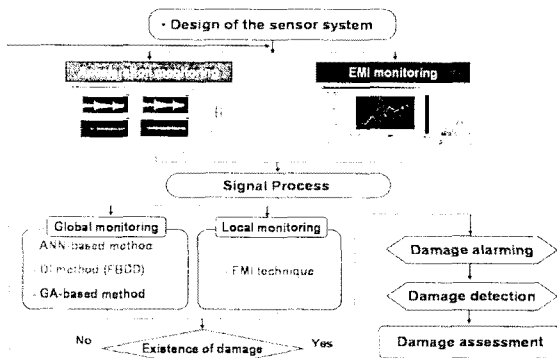


그림 4. 하이브리드 구조건전성 감시 시스템

### 3.3 웹-기반 시설물 위험경보 및 평가 시스템

한국시설안전기술공단에서는 소규모 시설물의 재해에 대비한 경보시스템을 개발하였다(Lee et al., 2005). 각 시스템은 개별 현장에서의 감시 시스템과 중앙관제소에서의 통합소프트웨어로 구성되어 있고, 감시 대상 구조물에 따라 구조물의 성능을 효율

적으로 평가할 수 있는 센서와 데이터 로거가 설치되어 있으며, 자료송신을 위한 CDMA 장비와 전원 공급을 위한 소형 태양광 발전 시스템이 추가적으로 설치되어져 있다. 각 현장에서 계측된 자료를 중앙관제소에서 취합하여, 분석함으로써 각 시설물의 안전감시를 수행하게 된다. 그림 5는 아파트 건물 인근의 높은 옹벽에 대하여 구축된 감시시스템과 계측된 자료를 보여주고 있다. 이 시스템에는 3기의 경사계가 설치 운영되고 있으며, 경사계 자료를 이용하여 수평변위를 계산할 수 있도록 하고 있다. 계절별 날씨별로 온도 및 수평변위를 분석함으로써 쉽게 옹벽 구조물의 건전성을 감시할 수 있다.

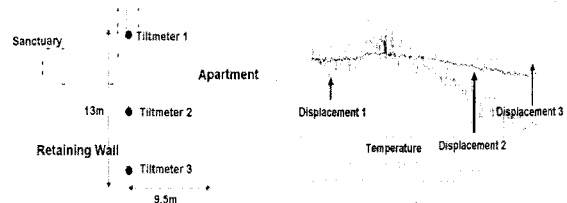


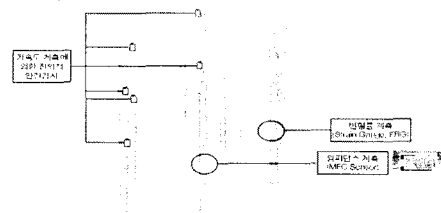
그림 6. 아파트 부근 옹벽 모니터링 시스템

## 4. 결론

이 논문에서는 국내 사회기반시설물에 적용되고 있는 스마트 센서기술, 안전감시시스템, 손상평가, 비파괴 검사 등의 스마트 구조기술을 간략히 정리하였다. 현재로서는 스마트 센서기술과 관련하여 광섬유센서, 압전센서 및 무선센서에 대한 기술개발이 활발하며, 향후에는 이들 센서기술과 구조물 평가기술이 통합되어 실제 시설물에 적용되는 방향으로 연구가 진행될 것으로 예정되어 있으며, 이러한 연구는 건설교통부에서 적극 추진하고 있는 연구과제이기도 하다. 한편 해양수산부에서 지원하고 있는 조력조류에너지 실용화 기술 개발 과제와 관련하여 2006년 12월 경에 국내 최초의 시험조류발전소가 울돌목에 건설될 예정에 있으며, 다음 그림과 같이 전역적 그리고 국부적 구조건전성 감시를 위한 하이브리드 모니터링 시스템이 설치될 계획에 있으며, 이와 같이 기존의 스마트 구조기술을 향한, 연안구조물에 적용함으로써 보다 효율적인 시설물 유지관리가 가능하게 될 것이다.



(a) 울돌목 시험조류발전소 조감도



(b) 조류발전시설물 하이브리드 SHM 시스템 설치계획  
그림 6. 울돌목 시험조류발전소 및 SHM 설치계획

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부 지원으로 설립된 한국과학기술원 스마트사회기반시설연구센터의 연구비 지원과 해양수산부 조력조류 에너지 실용화기술개발 연구과제로 수행되었으며, 저자들은 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한 귀한 연구자료를 제공해 주신 김기수 교수(홍익대), 김정태 교수(부경대), 이창근 박사(한국도로공사), 권일범 박사, 윤동진 박사(표준연)께도 감사드립니다.

## 참고 문헌

- Kim, J.T., Na, W.B., Park, J.H. and Hong, D.S. (2006), "Hybrid Health Monitoring of Structural Joints Using Modal Parameters and EMI Signatures", Proc. of SPIE Conference on Smart Stru. & Mat., San Diego.
- Kim, K.S., Cho, S.K. and Bae, B. (2003), "High speed Weigh in Motion Measurement with Bragg Grating Sensors", Proc. of the SPIE's 10th Int'l Sym. on Smart Structures and Materials, San Diego.
- Kim, K.S., Song, Y.C., Pang, G.S., and Yoon D.J. (2005), "Study on the Application of Fiber Bragg Grating Sensors for the Containment Structures of Nuclear Power Plants", Proc. of 2nd Int'l Workshop on Adv. Smart Mater. and Smart Stru. Tech., Gyeongju, Korea, pp. 155-158.
- Kwon, I.B. and Cho, S.B., "Strain and Temperature Measurements Using Fiber Optic BOTRA Sensor", Proc. of the US Korea Workshop on Smart Str. Tech., Seoul, Korea, pp. 105-112.
- Lee, B.J., Lee, W.T. and Lee, C.G. (2006), "Development of Bridge Inspection Robot Using Digital Image Processing", Proc. of the US Korea Workshop on Smart Str. Tech. for Steel Str., Seoul, Korea.
- Lee, B.Y., Kim, J.K. and Kim, Y.Y. (2005), "Effective Measurement Technique for Concrete Cracks Using Digital Camera and Image Processing", Proc. of 2nd Int'l Workshop on Adv. Smart Mat. and Smart Str. Tech., Gyeongju, Korea, pp. 791-798.
- Lee, J.J., Lee, J.W., Yi, J.H., Yun, C.B. and Jung, H.Y. (2005), "Neural Networks based Damage Detection for Bridges Considering Errors in Baseline Finite Element Models", J. of Sound and Vibration, 280, pp. 555-578.
- Lee, J.W., Kim, J.D., Yun, C.B., Yi, J.H. and Shim, J.M. (2002), "Health Monitoring Method for Bridges under Ordinary Traffic Loadings", J. of Sound and Vibration, 257(2), pp. 247-264.
- Lee, S.S., Seong, J.H. and Juhn, G.H. (2005), "Safety Warning System for Infrastructures", Proc. of 4th Int'l Seminar on Safety of Infrastructure, Gyeongju, Korea, pp. 61-75.
- Lynch, J.P., Wang, Y., Law, K.H., Yi, J.H., Lee, C.G. and Yun, C.B. (2005), "Validation of a Large scale Wireless Structural Monitoring System on the Geumdang Bridge", Proc. of ICOSAR 2005, Rome, Italy.
- Park, S.H., Yi, J.H., Yun, C.B. Lee, S.H. and Roh, Y.R. (2004), "Impedance based Damage Detection for Civil Infrastructures", Proc. of the SPIE's 11th Ann. Int'l Sym. on Smart Stru. and Mater., San Diego.
- Park, S.H., Yun, C.B., Roh, Y.R., and Lee, J.J. (2005a), "Health Monitoring of Steel Structures Using Impedance of Thickness Modes of PZT Patches", Smart Structures and Systems, 1, pp. 339-354.
- Park, S.H., Yun, C.B. and Roh, Y. (2005b), "PZT induced Lamb Waves and Pattern Recognitions for on line Health Monitoring of Jointed Steel Plates", Proc. of SPIE Int'l Sym. on Smart Stru. and Mater., San Diego, pp. 364-375.
- Park, S.H., Yun, C.B., Roh Y.R. and Lee, J.J. (2006a), "PZT based Active Damage Detection Techniques for Steel Bridge Components", Smart Mater. Struct., 15, pp. 957-966.
- Park, S.H., Ahmad, S., Yun, C.B. and Roh, Y.R. (2006), "Multiple Crack Detection of Concrete Structures Using Impedance based Structural Health Monitoring Techniques", Experimental Mechanics, accepted.
- Ryu, C.Y. and Hong, C.S. (2002), "Development of Fiber Bragg Grating Sensor System Using Wavelength Swept Fiber Laser", Smart Materials & Structures, Vol. 11, No.3, pp. 468-473.
- Ryu, H., Lee, H., and Kim, K.S. (2001), "An economical and Multiple Fiber Grating System with a Rapid Response Using Code Division Multiple Access", Measurement Science and Technology, Vol. 12, pp. 906-908.
- Yoon, D.J., Lee, S.I. and Lee Y.S. (2005), "Characteristics of Patch Type Smart Piezo Sensor for Smart Structures", Key Engg. Materials, Vol. 297-300, pp. 2010-2015.
- Yun, C.B., Park, S., Inman, D. (2006), "Health Monitoring of Railroad Tracks Using PZT Active Sensors Associated with Support Vector Machines", Proc. of 4th China-Japan-US Symposium on Structural Control and Monitoring, Hangzhou, China.