특집
구조물 안전 진단

스마트 무선센서를 이용한 대형구조물의 구조건전성 모니터링

김정태*, 박재형
(부경대학교 해양공학과 스마트구조공학연구실)

1. 머리말

구조건전성 모니터링은 구조물로부터 구조응답을 계측하고, 이를 이용하여 구조물의 손상위치 파악 및 손상에 따른 구조물의 상태를 평가하는 것을 말한다. 1970년대 부터 구조건전성 모니터링을 위한 기법들이 꾸준히 개발되고 있으며, 최근 국내외에서의 크고 작은 구조물 붕괴사고는 구조건전성 모니터링의 중요성을 부각시키는 계기가 되었다. 현재, 국내외 초고층 빌딩이나 장대교량에 대해서는 구조건전성 모니터링 시스템을 설치하여 운용 중에 있다.

구조건전성 모니터링 시스템은 수많은 센서와 신호 취득 장비, 센서와 신호 취득 장비를 연결하는 케이블 및 데이터 저장 서버로 구성된다. 그러나 이들 시스템을 구성하기 위해 사용되는 장비들이 비교적 고가이며, 케이블을 설치하는데 상당한 시간이 걸린다. 홍콩의 Tsing Ma 현수교의 경우, 350개 이상의 센서가 설치되었으며, 시스템설치비용은 약 80억원으로 추정된다. 또한 시스템 총 설치비용 중 약 25 % 이상이 케이블을 설치하는데 소요되며, 시스템 설치 시간의 약 75 % 정도가 케이블 설치 작업을 위해 필요하다고 추정되고 있다.

기존 구조건전성 모니터링 시스템의 단점을 극복하기 위하여 1990년대 후반에 무선센서가 소개되었다. 이후로 현재 국내외 기업에서 상용화되어 판매되는 무선센서도 많이 있다. 그러나 일반적인 무선센서는 기존에 케이블을 통해 전송되던 데이터를 단지 무선으로 바꾼 정도의 기능만을 가지고 있어, 확장성에 문제가 제기되었다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 많은 연구자들은 각각의 무선센서노드에서 필요한 신호처리 및 해석기능을 수행할 수 있는 스마트 무선센서의 개발에 노력을 기울이고 있다.

이 글에서는 교량의 구조건전성 모니터링기법에 대해 간략하게 소개하고, 이를 위한 스마트 무선센서 기술과 건전성 평가 기술 및 그 응용 기술들을 소개하고자 한다. 이를 통해 앞으로의 구조건전성 모니터링에 대한 미래를 언급하고자 한다.

2. 구조건전성 모니터링 기법

구조건전성 모니터링은 그림 1과 같이 신호취득, 손상경보, 손상검색, 손상평가의 4가지 단계로 구분된다. 또한, 구조건전성 모니터링은 사용되는 구조응답에 따라 크게 전역적인 기법과 국부적인 기법으로 나눌 수 있다. 전역적인 기법은 구조물의 변위나 가속도 등 소수의 센서로부터 전체 구제계의 상태를 모니터링하는 기법이고, 국부적인 기법은 변형률이나 전기-역학적 임피던스 및 파전달 특성 등을 이용하여 국부 구조계

* E-mail : idis@pknu.ac.kr / (051) 629-6585

나 특정부재를 모니터링하는 기법이다.

2.1 전역적 구조건전성 모니터링 기법

전역적 구조건전성 모니터링 기법은 진동응답 신호의 특성 변화만을 이용하는 신호기반기법과 진동응답특성의 변화와 해석적 모델을 이용하는 모델기반기법으로 분류된다. 신호기반기법에는 응답 가속도의 자귀회귀 모델을 이용하거나, 주파수 응답함수의 변화, 고유진동수의 변화, 모드형상의 변화를 이용하는 기법들이 있다. 그러나 이들 기법들은 손상발생 경보 수준의 'Level 2' 건전성 모니터링이 가능하다.

이에 비해 모델기반기법에는 구조계의 모드변형에너지를 이용하는 손상지수법(그림 2)이나, 모드유연도를 이용한 기법(그림 3), 인공신경망을 이용한 기법(그림 4), 유전알고리즘과 같은 메타 휴리스틱 기법(그림 5)을 이용한 해석모델개선법 등이 있다. 이들 기법들을 통해 손상발생 경보 및 손상위치 추정의 'Level 3' 건전성 모니터

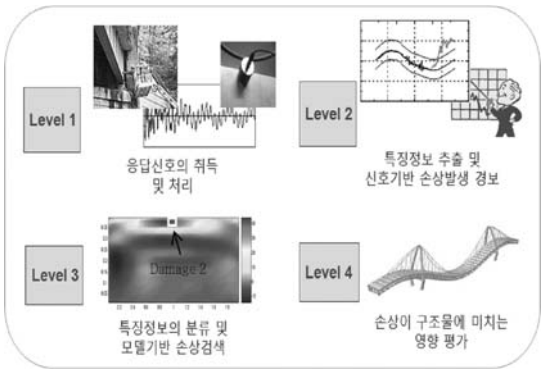


그림 1 구조건전성 모니터링의 단계들

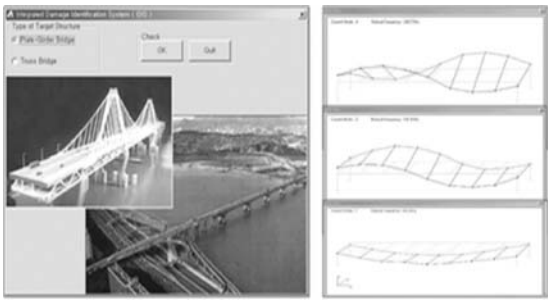


그림 2 모드변형에너지를 이용한 구조건전성 모니터링 (부경대)

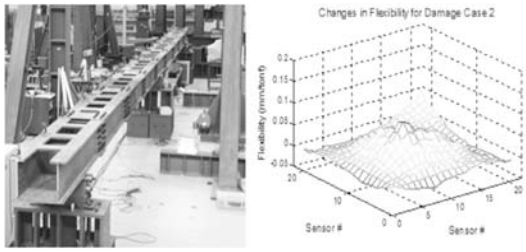


그림 3 모드유연도를 이용한 구조건전성 모니터링 (KAIST)

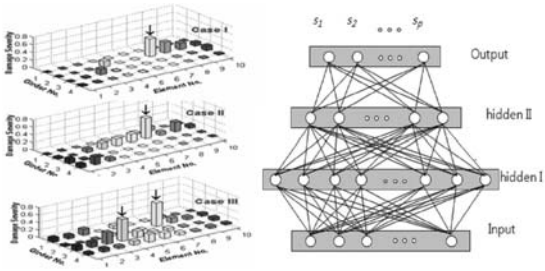


그림 4 인공신경망을 이용한 구조건전성 모니터링 (KAIST, 부경대)

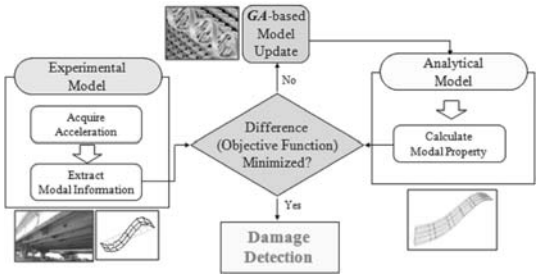


그림 5 유전알고리즘을 이용한 구조건전성 모니터링 (부경대)

그림 6 해석모델개선법을 통한 교량의 내하력 평가 (KAIST)

링이 가능하다. 또한, 최근 KAIST 연구진은 그림 6과 같은 교량의 내하력 평가 모델을 개발하여 'Level 4' 건전성평가에 응용하였다.

2.2 국부 구조건전성 모니터링 기법

전역적 모니터링 기법에 사용되는 응답신호는 구조물 전체의 어떠한 상태변화에도 변화하는 특성을 가지고 있는 반면, 국부 모니터링을 위해 사용되는 응답신호는 센서가 부착된 부근의 구조적 변화에만 변화한다는 점에서 전체 구조물을 모두 모니터링 하기에는 비효율적이라는 단점이 있다. 그러나 전역적 모니터링 기법에 비해 초기의 작은 손상에도 민감하게 변화한다는 장점을 가진다.

최근 개발된 대표적인 국부 구조건전성 모니터링 기법으로는 전기-역학적 임피던스를 이용한 기법과 파 전달 특성을 이용한 기법 등이 있다. 그림 7과 같이 전기역학적 임피던스는 PZT(납, 지르코늄, 티타늄을 결합하여 만든 압전센서)에 전압을 가하면 PZT에 변형이 일어나고, 압전효과에 의해 전기장이 형성된다. 이 때 변형 특성은 부착된 구조물에 영향을 받게 된다. 따라서 생성된 전기장의 전류를 측정하면 전기-역학적 임피던스를 계측할 수 있게 된다.

임피던스 기법은 그림 8과 같은 구조연결부의 볼트풀림이나 주요 부재의 손상을 모니터링하는데 적용되고 있다. 그림 8에서와 같이 임피던스 기법은 모니터링 범위가 국소하기 때문에 볼트풀림이 발생한 위치에서는 임피던스 특성이 변화하는데 반해, 손상 위치로부터 떨어진 부재에서는 변하지 않는 것을 알 수 있다.

파 전달 특성을 이용한 기법은 그림 9와 같이 구조물을 따라 전달되는 파의 특성이 결함에 의해 변화하는 원리를 이용하는 기법이다. 이러한 파 전달 특성을 이용한 기법들은 판형 구조물이나 원통형 구조물 등의 다양한 구조물에 적용성

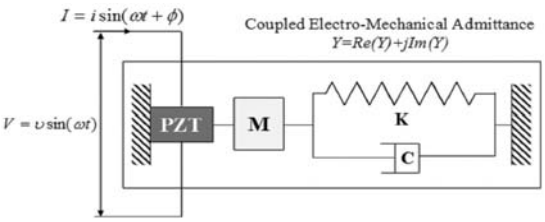


그림 7 전기-역학적 임피던스 모델

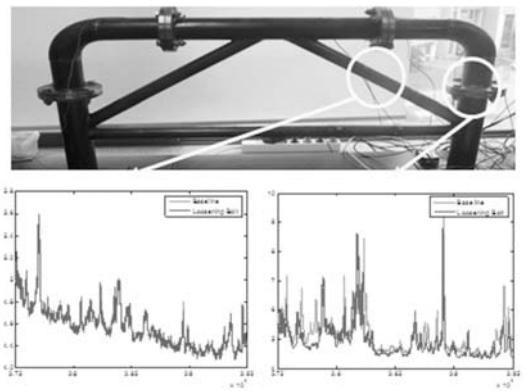


그림 8 임피던스를 이용한 구조연결부의 볼트풀림 모니터링(KAIST)

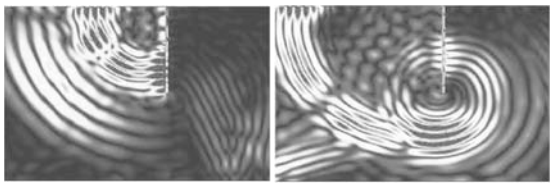


그림 9 손상에 따른 파 전달 특성 변화

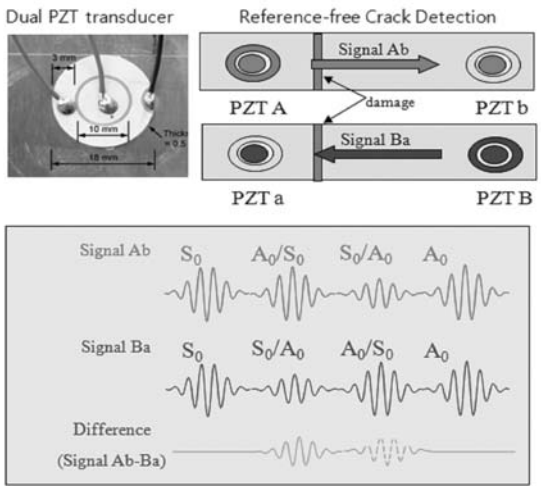


그림 10 파 전달 특성변화를 이용한 균열 모니터링(KAIST)

이 평가되고 있으며, 최근에는 그림 10과 같이 dual PZT를 이용하여 비손상 상태에서의 계측데이터가 없이도(reference-free), 손상 여부를 판별하는 기법이 개발되었다.

3. 스마트 무선센서 기술

스마트 무선센서는 다음과 같은 다섯 가지 특징을 가지는 센서로 정의된다. 첫째, 취득된 데이터의 신호처리 및 해석을 위한 마이크로컨트롤러를 가진다. 둘째, 센서와 신호를 취득하기 위한 회로가 내장된다. 셋째, 무선 통신을 통해 데이터를 송/수신한다. 넷째, 배터리를 통해 전원이 공급된다. 마지막으로 저가이다. 현재까지 많은 연구자들은 원하는 측정 항목(가속도, 변형률, 임피던스 등)에 따라 그에 적합한 스마트 무선센서를 개발하고, 그 적용성을 평가하였다. 이 글에서 가속도와 임피던스 측정을 위한 스마트 무선센서를 소개하고자 한다.

3.1 가속도 기반 스마트 무선센서

구조물로부터 계측되는 가속도는 고유진동수와 같은 구조물의 전역적 거동 특성을 추출할 수 있다는 장점으로 인해 구조건전성 모니터링에 많이 이용된다. 현재까지 많은 연구진들에 의해 가속도 기반 스마트 무선센서가 개발되어져 왔다. 대표적으로 미국 미시간 대학의 Lynch 교수 연구진에 의해 개발된 스마트 무선센서와 미국 일리노이스 대학 UIUC의 Spencer 교수 연구진에 의해 개발된 Imote2 기반의 스마트 무선센서가 있다. 여기서 Imote2는 1990년 후반 미국의 Berkeley 대학에서 개발된 Berkely Mote에서 발전된 모델로 현재 미국의 Crossbow사에서 판매되고 있다.

Lynch 교수 연구진은 그림 11과 같이 개발한 스마트 무선센서에 모드해석기법을 내장하고 이를 극장 발코니에 설치하여 자동화된 모니터링 시스템을 구축하였다. 또한 이들은 최근 국내 연구진과의 연구를 통해 한국도로공사에서 제공하는 testbed 교량에 스마트 무선센서를 적용하여 그 성능을 평가하기도 하였다.

Spencer 교수 연구진은 스마트 무선센서의 하드웨어 보다는 미들웨어와 소프트웨어의 개발에 보다 집중하였다. 이들은 그림 12와 같이 상용 무선센서에 무선센서간 시간동기화 기술과 비분산형 무선센서 네트워크를 바탕으로 하는 손상 모니터링 기법을 내장하고, 이를 트러스 구조물에 대하여 그 성능을 평가하였다. 또한 이들 역시 국내연구진과 공동으로 진도대교에 스마트

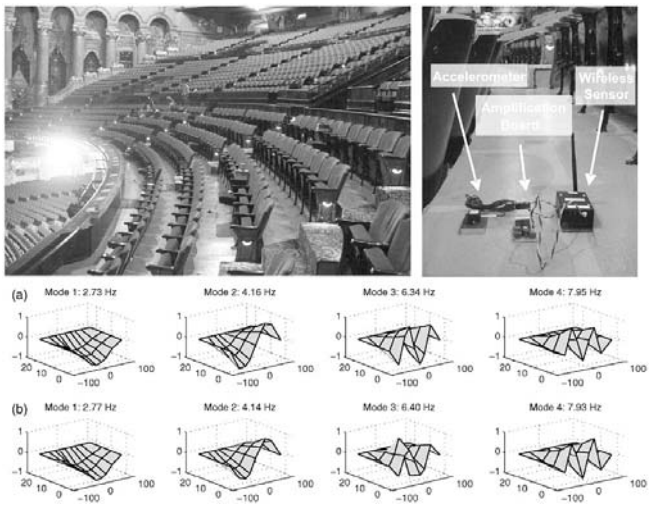


그림 11 미시간 대학에서 개발된 가속도 기반 스마트 센서와 성능

무선센서를 설치하여 그 성능을 평가하는 연구를 수행 중에 있다.

3.2 임피던스 기반 스마트 무선센서

임피던스 기반 모니터링을 위한 스마트 무선센서는 2006년 미국 Virginia Tech의 Inman 교수 연구진에 의해 처음 소개되었으며, 2007년에는 미국 University of California at San Diego(UCSD)의 Todd 교수 연구진은 그림 13과 같이 소형 임피던스 칩 AD5933을 이용한 임피던스 기반 스마트 센서를 개발하였다. 이들은 너트에 PZT를 붙이고 임피던스 기반 무선센서노드를 이용하여 볼트의 풀림을 모니터링하였다. 임피던스 기반 스마트 센서는 국내에서도 그림 14와 같이 KAIST와 전자부품연구원(KETI)에서 개발되어, 교량 연결부 볼트 풀림이나 균열에 대해서 적용한 바 있다.

임피던스 기반 스마트 무선센서에 사용되는 AD5933은 Analog Devices사에서 개발된 초소형, 저가형 임피던스 칩으로 칩 내부에 신호발생기, D/Ac(digital-to-analog converter), current-to-voltage amplifier, AA 필터, A/Dc 및 이산푸리에 변환 해석기가 내장되어 있다. 이와 같은 직접화된 임피던스 칩의 성능에 의해 임피던스 기반 스마트 무선센서는 다른 무선센서들에 비해, 구성이 간단하여 비교적 쉽게 제작할 수 있다는 장점을 가진다.

3.3 가속도-임피던스 스마트 센서를 이용한 하이브리드 구조건전성 모니터링 시스템

구조물의 건전성 모니터링 시스템은 구조물의 구조적 특성이나 손상 유형에 따라 적절하게 설계/구축되어야 한다. 예를 들어 프리스트레스트

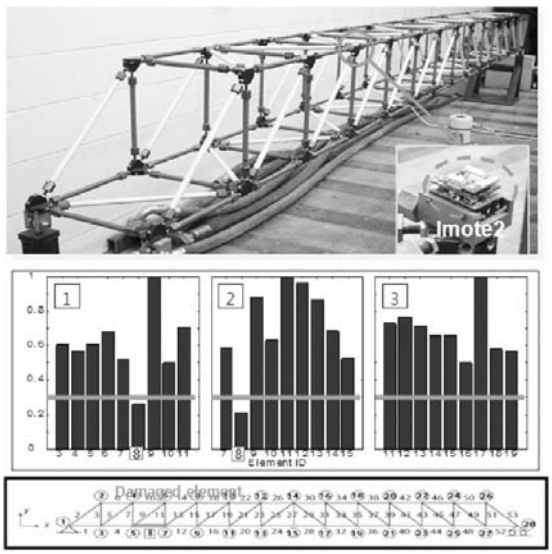


그림 12 UIUC에서 개발된 가속도 기반 스마트 센서와 성능

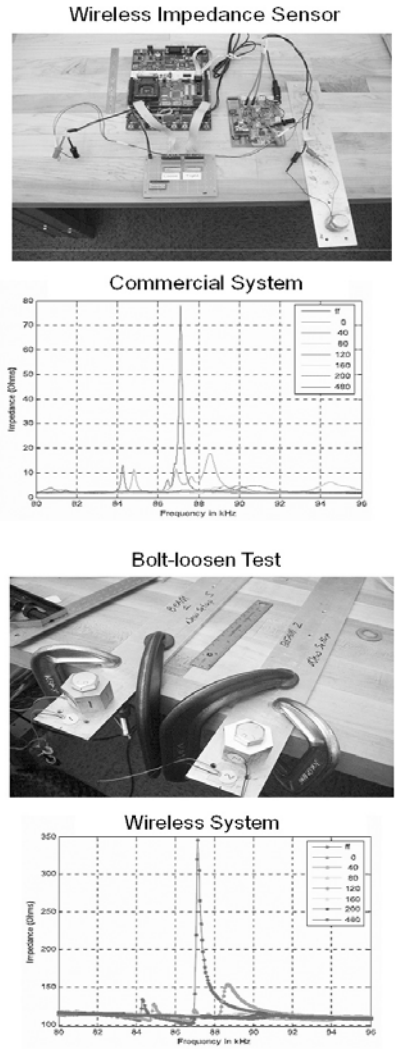


그림 13 UCSD에서 개발한 임피던스 기반 스마트 센서와 성능

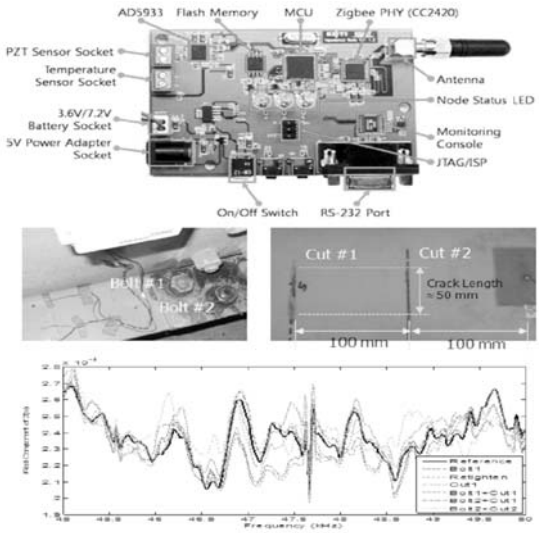
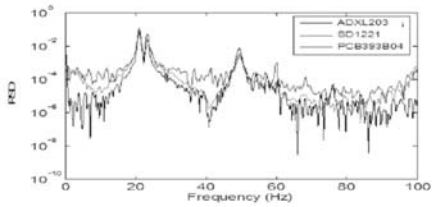


그림 14 국내 개발된 임피던스 기반 스마트 센서와 성능 (KAIST, KETI)



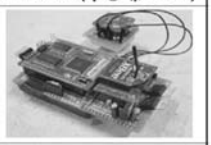
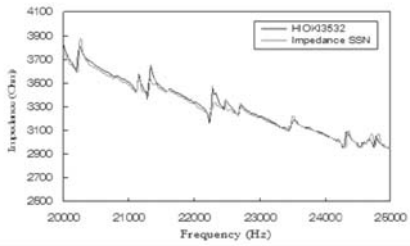
	U. Michigan (2006)	Acc-SSN(부경대, 2009)
H/W		
Micro-controller	ATmega128L (Atmel) - Clock Speed: 0 – 8MHz - RAM: 128kB (Ext.) - Power: 2.7-5.5 V / 5.5 mA	ATmega128 (Atmel) - Clock Speed: 0 – 16MHz - RAM: 32kB (Ext.) - Power: 4.5-5.5 V / 19 mA
A/D Converter	ADS8341 (Texas Instruments) - Resolution: 16 bits	ADS8341 (Texas Instrumnets) - Resolution: 16 bits
AA Filter	4-pole Bassel Filter	8-pole Butterworth Filter
Accelero-meter	3801D1FB3G (PCB) - Sensitivity: 700 mV/g - Noise Floor: 150 $\mu V/\sqrt{Hz}$	SD1221 (Silicon Designs) - Sensitivity: 2000 mV/g - Noise Floor: 5 $\mu V/\sqrt{Hz}$
Radio	9XCite (Digi International) - Radio Freq.: 900MHz - Outdoor range: 300m - Power: 2.85-5.5V / 35-55mA	XBee (Digi International) - Radio Freq.: 2.4GHz - Outdoor range: 100m - Power: 2.8-3.4V / 45-50mA

그림 15 우리 연구진이 개발한 가속도 기반 스마트 센서의 성능 비교

(PSC) 교량의 경우, 크게 콘크리트 거더와 긴장력 도입을 위한 텐던 및 지점부로 구성된다. 따라서 PSC 교량에서 중요한 손상 유형은 거더의 손상, 텐던의 긴장력 감소 및 지점부의 손상을 들 수 있다. 그러나 이들 각각의 손상은 모두 구조물의 진동 특성 변화를 야기하게 되어, 기존의 진동 기반 모니터링 기법만으로 구조건전성 모니터링이 힘들게 된다.



	Imp-SSN(부경대, 2009)	HIOKI3532-50
AD5933		
Impedance Range	$1k\Omega$ - $10M\Omega$	$10m\Omega$- $200M\Omega$
Frequency Range	1kHz – 100kHz	42Hz – 5MHz
Excitation Voltage	up to 1.98 Vp-p	up to 14 Vp-p
Costs	USD 100	USD 20,000

그림 16 우리 연구진이 개발한 임피던스 기반 스마트 무선 센서의 성능 비교

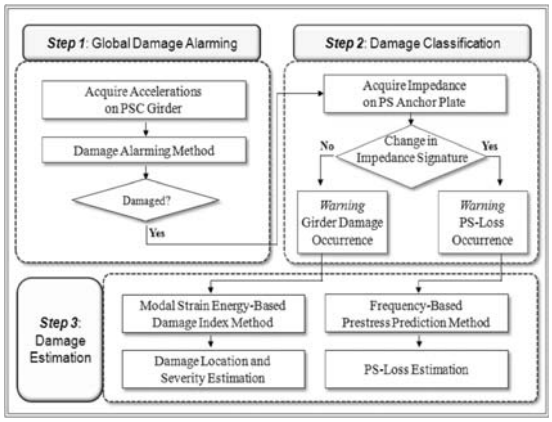


그림 17 하이브리드 구조건전성 모니터링 시스템의 체계

이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구진에서는 가속도와 임피던스 특징을 이용하는 하이브리드 구조건전성 모니터링 체계를 개발하였

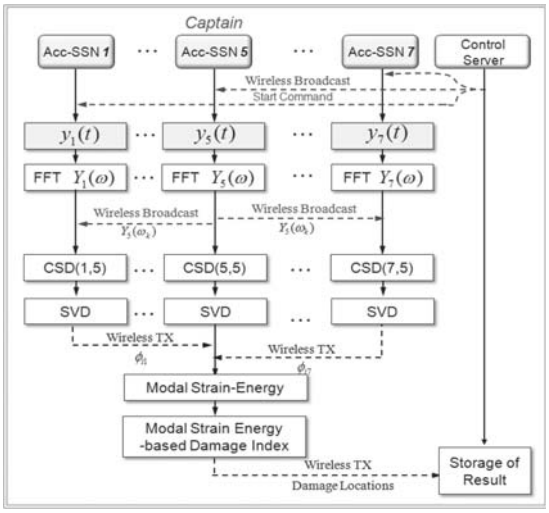


그림 18 스마트 무선센서의 독자적 구조건전성 모니터링 소프트웨어

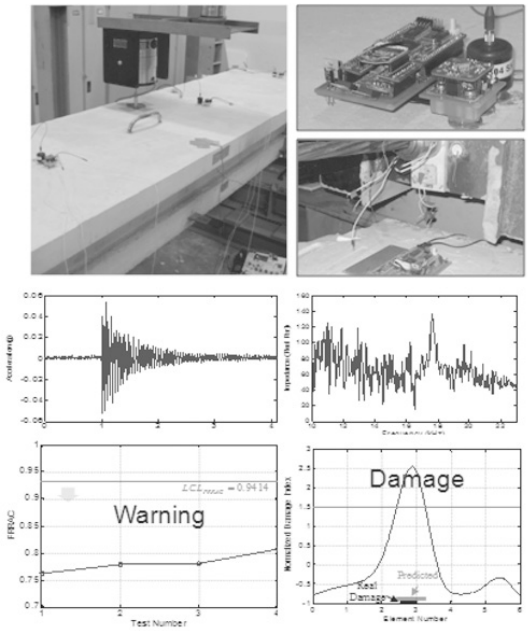


그림 19 스마트 센서를 이용한 PSC 거더 하이브리드 구조건전성 모니터링 결과

으며, 이를 수행하기 위한 스마트 무선센서노드를 개발하였다. 그림 15와 그림 16은 각각 우리 연구진이 개발한 가속도 기반 스마트 센서노드와 임피던스 기반 스마트 센서노드의 제원과 성능을 보여준다.

그림 17은 우리 연구진이 설계한 하이브리드 구조건전성 모니터링 체계를 보여준다. 이를 위해 가속도 기반 스마트 센서노드와 임피던스 기반 스마트 센서노드가 사용되었다. 그림 18은 스마트 센서노드를 사용한 독자적(autonomous) 구조건전성 모니터링 소프트웨어의 일례로 '모드변형에너지 기반 손상지수' 프로그램이며, 가속도 기반 스마트 센서에 내장되어 구조물에 가속도 신호취득, 주파수 분석, 진동모드추출, 모드변형에너지 계산 및 손상위치검색의 전 과정이 자동으로 수행된다.

그림 19는 우리 연구진이 실험실에서 수행한 PSC 거더에 대한 구조건전성 모니터링과정 및 결과를 보여준다. 가속도 스마트 센서와 임피던스 스마트 센서를 각각 거더와 텐던앵커에 설치하여 텐던 긴장력의 변화와 거더 휨 강성의 변화를 모니터링 하였다. 스마트 센서는 계측된 가속도 및 임피던스 신호를 서로 공유하여, 주파수 분석, 손상경보 및 손상위치검색을 성공적으로 수행하였다. 이 시스템에서는 임피던스 기반 스마트 센서를 통해 손상유형을 분류하였으며, 가속도 스마트 센서를 통해 손상의 위치와 크기가 추정되었다. 그림 19에서와 같이, 스마트 센서가 PSC 교량에 발생되는 손상을 정확하게 경보하고, 분류하였으며, 손상의 위치를 비교적 정확하게 추정하였다.

4. 맺음말

이 글에서는 구조건전성 모니터링을 위한 스마트 무선센서 개발 및 적용 사례에 대해서 살펴보았다. 앞으로 실 구조물에 대한 적용성 및 유용성이 평가되어야 할 것이며, 보다 우수한 성능의 스마트 무선센서가 개발될 것으로 판단된다. 이러한 스마트 무선센서 기술의 발전으로 인해 보다 안전하고 신뢰성있는 대형구조물 구조건전성 모니터링 시스템이 구축될 수 있기를 기대한다. KSNVE