

한국과학기술원 건설 및 환경공학과 스마트 구조 시스템 연구실

손 훈*

(한국과학기술원 건설 및 환경공학과)

1. 머리말

스마트 구조시스템 연구실(Smart Structures & Systems Laboratory)은 2007년부터 손 훈 교수의 지도 아래 2011년 현재 박사과정 5명, 석사과정 4명, 학부연구생 2명의 연구 인력이 구조물 안전진단 및 손상 감지, 센싱 기술 및 신호처리, 스마트 센서 분야에 대한 연구를 진행하고 있다.

교량, 빌딩, 도로 등으로 대표되는 사회기반시설은 우리의 일상생활과 직접적인 연관성이 있기 때문에 사회기반시설이 붕괴되면 그 피해는 상상을 초월한다. 국내적으로 94년 성수대교, 95년 삼풍백화점 붕괴사건과 국제적으로 2005년 미국 뉴올리언스 제방붕괴, 2007년 미네소타 I-35W 교량 붕괴사고가 그 대표적인 예이다. 또한 항공기, 철도, 선박 등의 기체 결합으로 인한 사고 또한 큰 인명피해 및 사회·경제적 손실을 가져 온다. 구조물 안전진단 기술은 구조물로부터 응답신호를 계측하고, 이 계측정보를 이용하여 구조물의 손상 위치 파악 및 손상에 따른 구조물의 상태를 평가하는 기술로서 구조물 붕괴로 인한 대규모의 인명 피해 및 경제 손실을 최소화할 수 있으며 보다 안정적인 구조물의 사용성을 보장 받을 수 있다. 우리 연구실은 스마트 센서 및 센싱 기술을 이용한 세계 수준의 구조물 손상 감지 기술 개발을 목표로 연구를 수행하고 있다.

* E-mail : hoonsohn@kaist.ac.kr
TEL : (042) 350-3625
<http://web.kaist.ac.kr/~sohnhoon/>

2. 연구 분야

현재 우리 연구실에서 수행하는 연구 분야는 구조물 안전진단을 위한 손상감지 기술개발을 목표로 크게 압전센서 기반의 손상 감지 기법 개발, 레이저 기반의 손상 감지 기법 개발로 이루어져 있다.

2.1 압전센서 기반의 손상 감지 기법 개발

(1) 램파 및 임피던스 기반의 무기저 손상 감지 기법 개발

이 연구팀은 구조물에 부착된 압전센서로부터 계측된 램파(Lamb wave) 및 임피던스(impence) 신호를 이용하여 기저 신호(baseline) 없이 현재 계측된 신호만을 이용하

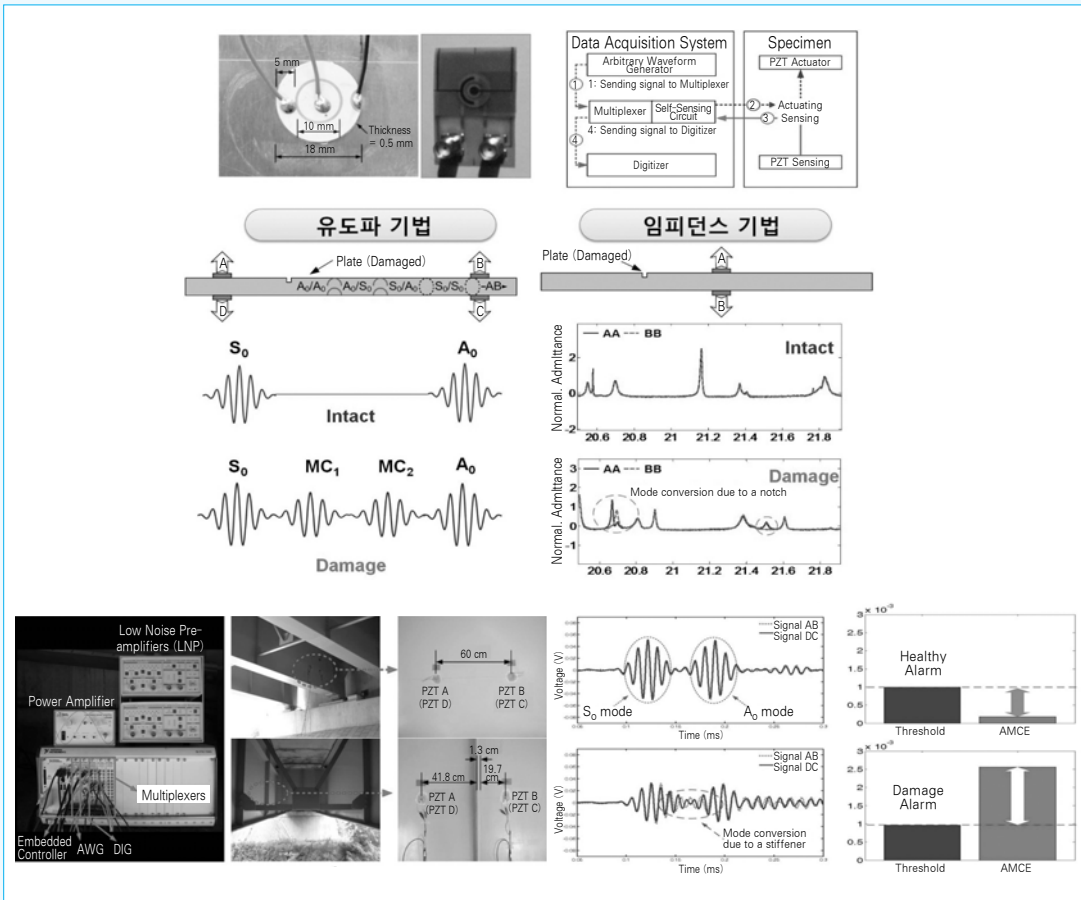


그림 1 압전센서를 이용한 무기저 손상 감지 기법 개발 및 현장 적용성 검증

여 즉시적으로 손상을 감지하는 무기저 손상 감지 기법을 세계 최초로 개발하였다. 기존의 스마트 기술을 이용한 구조물 안전진단 기법들은 구조물의 손상이 없을 때 획득된 기저 자료들과 새롭게 측정된 자료들을 비교하여 구조물의 손상을 감지하는데 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 이러한 안전진단 방법들은 구조물에 가해지는 다양한 환경 변화(온도 변화, 정적 및 동적 하중) 및 사용 상태의 변화에 대한 영향을 고려하지 않고 있기 때문에 손상이 없는 경우에도 손상 발생으로 오보하는 위험을 가지고 있어 실제 구조물에 적용하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하고 신뢰도 높은 손상 감지 기법을 개발하기 위해 우리 연구실은 유도파 및 임피던스 신호를 이용하여 기저 정보 없이 현재 계측되는 신호를 이용하여 손상을 감지하는 무기저 손상 감지 기법을 개발하였다. 유도파를 이용한 무기저 손상 감지 기법은 두쌍의 PZT 센서를 부착하여 신호를 추출하는 방법으로 램파(Lamb wave)를 이용하여 구조물에 손상(crack damage)이 발생 하였을 때 발생하는 모드 컨버전(mode conversion)을 추출함으로써 손상을 감지한다. 또한 임피던스 기반의 무기저 손상 기법은 한쌍의 PZT 센서를 부착하여 신호를 추출하는 방법으로 임피던스(impedance) 신호를 이용하여 구조물의 손상으로 발생하는 모드 컨버전을 추출하여 손상을 감지한다. 개발된 무기저 손상 기법들은 기저 신호 없이 계측된 신호를 조합하여 모드 컨버전의 에너지 크기를 기준으로 형성된 알고리즘을 이용하여 즉시적으로 손상을 감지하는 기술이다.

개발된 무기저 손상 감지 기법의 효용성을 알아보기 위해 실내 부재 실험과 현장 실험을 수행하였다. 이와 더불어 실제 구조물의 적용성을 확인하기 위해 사용 하중 및 온도 변화의 영향에 관련한 연구를 수행하였다. 2010년 실교량에서 현장 적용성 실험을 진행하였고, 그 결과 이 기술은 온도 변화 및 외부 하중 영향에 관계없이 구조물에 존재하는 손상을 성공적으로 감지할 수 있음을 검증 하였다. 따라서, 이 기술은 구조물의 유지/보수 시스템과 연동하여 실제적으로 적은 비용으로 신뢰도 높은 손상 감지를 수행할 것으로 기대한다.

(2) 임피던스 기반의 데이터 정규화 기법 개발

이 연구는 압전센서로부터 취득한 임피던스를 이용하여 주변 환경 영향에 관계없이 구조물의국부 손상 감지가 가능한 데이터 정규화 기법을 개발하는 내용이다. 임피던스 신호는 온도와 하중의 변화에 따라서 임피던스 값이 변화하여 실 구조물 적용 측면에 어려움이 있다. 이 연구는 데이터 정규화 기법(data normalization)이라는 새로운 알고리즘을 적용함으로써 온도 및 정·동적 하중의 영향과 관계없이 구조물의 손상 감지가 가능하다. 그림 2는 데이터 정규화 기법의 검증을 위한 환경 영향 실험이고 그림 3은 데이터 정규화 기법을 이용한 구조물 손상 감지 결과를 나타낸다. 이 기법을 적용하지 않은 경우(그림 3 왼쪽)에는 온도 및 하중 변화에 의해 거짓된 손상 판별 결과를 야기하지만 이 데이터 정규화 기법의 적용 시(그림 3 오른쪽)에는 환경적 변수에 관계없이 정확한 손상 판별 결과를 나타낸다.



그림 2 데이터 정규화 기법 검증을 위한 환경영향 실험

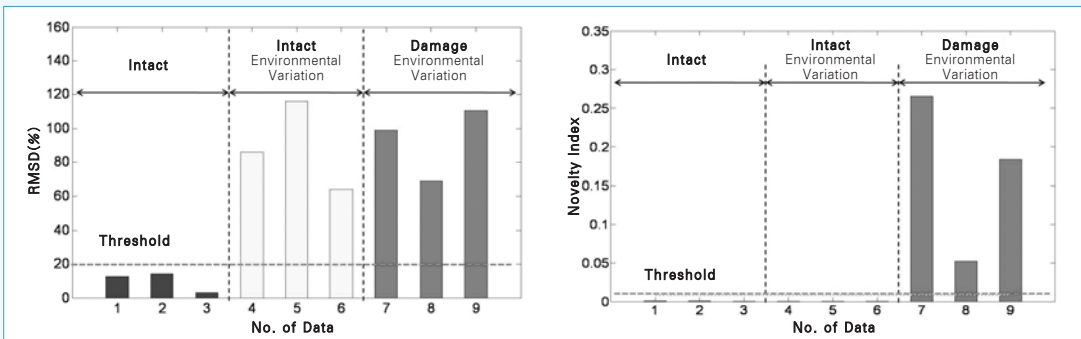


그림 3 데이터 정규화 기법의 효과

(3) 임피던스와 유도파의 통합 손상 감지 기법 개발

이 연구는 앞서 언급한 임피던스 기반의 손상 감지 기법과 유도파 기반의 손상 감지 기법을 통합한 하드웨어 및 알고리즘 개발에 관한 것이다. 임피던스 및 유도파 기반의 손상 감지 기법은 그 원리 및 적용성 측면에서 대상 구조물의 재료 특성, 손상의 종류 및 손상 감지 영역 등의 요인에 따라 그 효율성이 다르다. 임피던스 및 유도파의 통합 손상 감지 기법은 손상 감지의 성능 및 신뢰성을 증대시킴으로써 예측하기 어려운 실 구조물의 손상을 효율적으로

감지할 수 있다. 하지만 임피던스 기법과 유도파 기법은 온도 및 하중 등의 주위 환경 변화에 취약하여 손상 감지의 오보의 가능성을 내포하고 있다. 특히 온도 변화에 의한 임피던스 신호와 유도파 신호의 민감성은 실제 구조물의 손상 감지를 어렵게 하고 있다. 따라서 이 연구팀은 이러한 단점을 극복하기 위해 통합화된 손상 감지 기법, 일명 IIG(integrated impedance & guided wave) 기법을 개발하였다. 그림 4, 5는 각각 유도파 및 임피던스 신호 계측 개념을 나타낸 것으로 이 두 기법이 하나의 하드웨어와 소프트웨어로 통합되어 자동화 시스템을 구축하

⇒ ⇒ ⇒ 국내연구실 소개

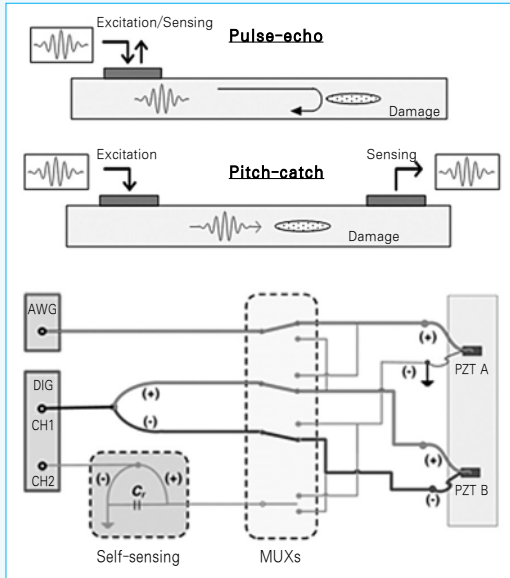


그림 4 유도파 신호 측정 개념 및 전기 회로도

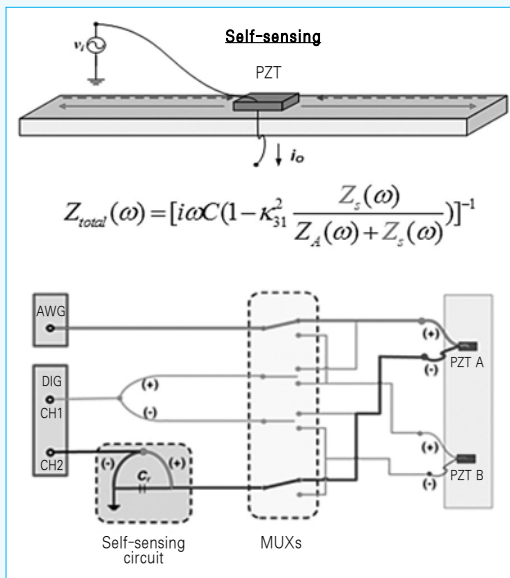


그림 5 임피던스 신호 측정 개념 및 전기 회로도

었다. 이 기법은 임피던스 기법과 유도파 기법의 장점을 모은 기술로 복잡한 구조물의 여러 종류의 손상을 감지하고 온도 변화로 인한 손상 감지 오보를 최소화할 수 있다.

2.2 레이저 기반의 손상 감지 기법 개발

(1) 레이저 진동계 시스템(LDV)의 다중 센싱 기반의 비접촉 손상 감지 기법 개발

이 연구는 레이저 진동계(LDV)를 이용하여 구조물의 손상을 시각적으로 나타내는 비접촉 손상 감지 기술개발을 목표로 한다. 레이저 스캐닝 진동계는 비접촉 센싱으로 소음과 진동문제를 해결할 수 있어 다양한 산업분야에 활용되고 있다. 접촉식 센서의 경우 그 응답이 구조물의 표면 재질 및 상태에 따라 변화하여 정밀 측정이 필요한 진동측정 분야나 구조물 안전 진단에는 제약이 따른다. 이러한 단점을 해결하고자 레이저 진동계 기반의 다중 센싱을 이용한 손상 감지기법을 개발하고 있다. 유도파에 의하여 구조물에 생성된 신호의 양상을 관찰하고, 손상정보를 추출하기 위하여 취득된 신호를 바탕으로 유도파 진행 동영상을 구축한다. 계측된 신호는 구조물 표면 수직방향으로의 변위 및 속도가 되며, 이는 평면상의 좌표와 시간에 따라 표현된다. 그림 6은 레이저 진동계를 활용한 실험 구성 및 실험체를 나타내고 그림 7은 손상 감지 결과를 나타낸다. 유도파 진행 동영상에서 유도파 운동 에너지(신호의 RMS값)를 계산하여 동영상으로 표현할 경우, 구조물 내 손상을 부각시킬 수 있다. 이에 laplace 필터와 같은 영상 처리 기법도 도입하면, 손상에 의한 유도파 신호의 분산 효과

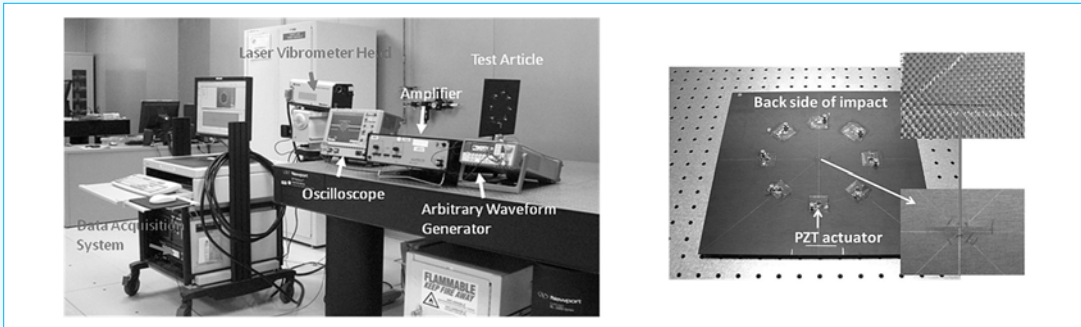


그림 6 레이저 진동계를 활용한 비접촉식 다중 센싱 실험 구성 및 실험체

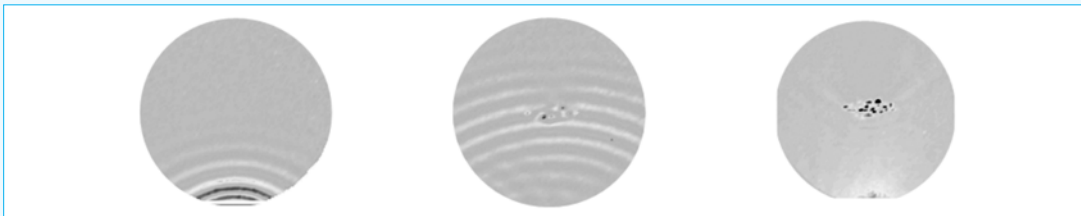


그림 7 레이저 진동계 시스템을 통해 생성한 유도파 진행 동영상상을 사용하여 손상 감지

를 더욱 더 뚜렷이 나타낼 수 있다.

(2) 레이저 및 광섬유를 활용한 다채널 시스템 개발

존의 압전센서와 전력 케이블을 이용한 비파괴검사법은 장거리 전력/데이터 전송시 전자기적 간섭(EMI)에 의하여 신호 왜곡과 감쇠 현상이 발생한다. 또한 각 압전센서마다 별도의 전력 케이블이 연결되어야 하기 때문에, 원전 시설과 같은 대형 구조물에 여러 개의 센서를 설치하는 경우 막대한 전력 케이블이 소요되는 문제점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, 우리 연구실은 단일한 레이저 광원과

광섬유를 활용하여 다채널 시스템을 개발하였다(그림 8). 이 시스템은 파장가변레이저를 단일 레이저 광원으로 하여, 광선을 특정 신호로 변조시켜 압전센서를 가진시키고, 동시에 이를 FBG 센서에 입사시켜 반사광선의 세기 변화를 통하여 유도파를 계측하는 원리로 구동된다. 특히 그림 8(b)의 단일 광섬유 기법의 경우 압전센서와 FBG 센서를 하나의 레이저 광원과 광섬유 망으로 구동할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 그림 9와 같이 여러 쌍의 압전센서와 FBG 센서를 연결할 경우, 신호 왜곡 및 감쇠의 영향을 받지 않는 다채널 능동센싱 시스템을 구축할 수 있다.

⇒ ⇒ ⇒ 국내연구실 소개

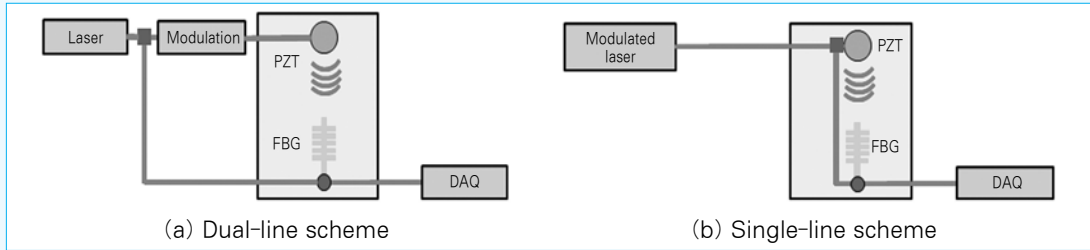


그림 8 레이저 및 광섬유 기반의 유도파 생성/계측 시스템

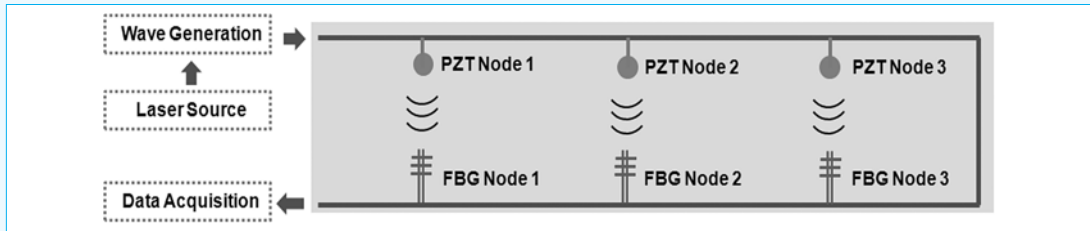


그림 9 여러 쌍의 압전센서와 FBG 센서를 이용한 다채널 센싱 시스템

(3) 레이저를 이용한 일체형 무선 가진 기술 개발

이 연구는 무선 레이저 및 유선 광섬유를 사용하여 압전소자를 가진하고 실시간으로 신호를 계측함으로써 원전 설비의 건전성을 검사할 수 있는 시스템을 개발하는데 목적이 있다. 우리 연구실은 광전자공학을 기반으로 레이저 신호를 임의의 파형으로 변조하고 무선으로 전송하는 기술을 개발하였다(그림 10). 또한 이러한 기술 개발에 이어 실제 원전 시설의 고온 및 방사능 환경에 적용가능한 일체형 고온용 가진기를 개발하고 있다(그림 11). 무선 가진 및 전력 공급 시스템의 경우, 레이저 다이오드를 통해 임의의 파형을 가지는 전기적 신호가 레이저 신호로 변환이 되고, 생성된

파형은 무선으로 가진 노드에 전송이 된다. 전송된 레이저 신호는 포토다이오드를 거치면서 다시 전기 신호로 변환이 되어 구조물에 설치된 압전소자를 가진하게 된다. 우리 연구실은 전력 무선 전송 효율이 15% 이상인 시작품을 개발하였고, 효율을 더 높이기 위한 최적화 실험을 진행 중에 있다. 무선 레이저 전송 시스템 외에도 유선 광섬유를 사용하여 임의의 파형을 생성하고 압전소자를 가진할 수 있도록 압전센서와 FBG 센서를 복합적으로 활용한 시스템을 구축하였다. 그림 11은 광섬유를 이용하여 원전 시설물과 같은 고온에서 신호 계측이 가능한 고온용 일체형 가진 시스템을 나타낸다. 고온용 일체형 가진기의 경우, 350°C 고온 환경에서 1 km 이상 신호 전송이 가능한