

구조 건전성 감시 기술을 활용한 첨단 비파괴 검사 기술

Recent Nondestructive Testing Using Structural Health Monitoring Techniques

김대현 (서울과학기술대학교 기계공학과)

E-mail: dkim@seoultech.ac.kr

비파괴 검사 및 평가기법은 다양한 과학적 이론을 바탕으로 구조물 내부에 존재하는 손상과 결함 등을 비파괴적으로 검사/진단/평가하는 방법이며, 현재까지 Thermography, Shearography, Radiography, Ultrasonics 등의 다양한 개별기술로 발전해 왔다. 하지만 대부분의 NDT/NDE는 부피가 큰 접촉식 프로브 및 센서를 사용하여 한 포인트 씩 스캐닝(scanning)하는 방식으로 측정을 하기 때문에 복잡한 형태의 구조물 내부를 검사하기 위해서는 제약점이 다소 발생한다. 또한, 이와 같은 기존의 검사 방식은 많은 시간과 노동력이 필요하고 이에 따라 많은 비용이 소모되고 사람이 손상 여부를 판단하기 때문에 경험이 많은 숙련된 전문가가 필요하며, 구조물의 운용 중에는 검사가 불가능하기 때문에 운용 중 발생할 수 있는 손상을 알기가 어렵다[1,2]. 일례로, 최근 다양한 구조물에 적용되는 복합재료(composite)는 재료의 특성 때문에 기존의 NDT/NDE 기법이 적용되기 어렵다. 특히 항공기의 기체 결함 검사에서는 복합재 소재의 사용량 증가로 인해 기존의 금속 구조 항공기에서 발생하는 결함과는 상이한 결함이 발생함으로써 기존의 비파괴 검사 기법으로는 검사 시간 지연 및 검사 비용이 크게 증가한다. 또한, 항공기의 가동시간(downtime) 동안 수행되는 기존의 비파괴 검사 기술을 최신의 복합재료 항공기에 적용 시 그 한계가 예측되고 있다. 이러한 이유로 인해, 최근 구조물의 검사/예측/진단/평가 방법이 기존의 전통적인 NDT/NDE 방식에서 구조 건전성 감시(SHM)라는 신개념 기법으로 패러다임이 옮겨지고 있다. 그림 1은 구

조물 검사 및 평가 방법의 변천 과정을 간략히 보여주고 있다[3].

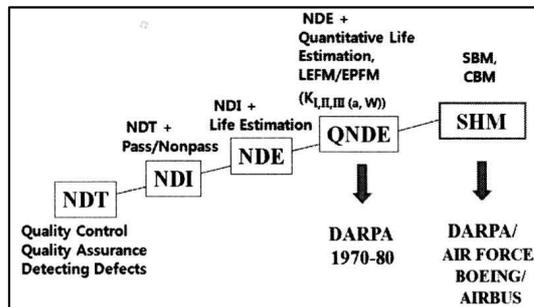


그림 1. 구조물 검사 및 평가 기법의 변천 과정 [3]

구조 건전성 감시란, 운용 중인 구조물 또는 구성품(structure or component)의 구조적 상태(structural status, health)를 연속적으로 감시하기 위해 구조물 내에서 손상(damage)을 감지(detection)하는 기술로 정의 될 수 있다. 이때, ‘건전성(health)’이란 구조물의 전 수명기간을 통해 구조물의 원래상태, 기능, 성능을 유지하는 것이라 정의할 수 있다. 그리고 ‘감시(monitoring)’란 진단(diagnosis)하고 예측(prognosis)하는 처리과정이라고 정의 할 수 있으며 ‘손상(damage)’이란 재료 내지 구조의 파손(failure) 또는 기능적 고장(functional failure)을 의미한다. 그러므로 ‘구조 건전성 감시’란 용어는 ‘구조물의 손상을 감지, 진단하고 예측하는 것’과 같은 의미로 해석할 수 있다[3].

추가로, 구조 건전성 감시는 전기/전자/항공/토목공학과 물리학, 재료과학과 같은 다양한 분

아가 결합된 종합적인 분야라 할 수 있다. 구조 건전성 감시 기법의 핵심은 센서를 구조물의 표면에 부착하거나 내부에 삽입하여 구조물을 감시하는 것이다. 구조물에 내장(built-in)된 센서를 통해서 전체적이고 통합적인 내/외부 손상 계측과 센서 응답에 대한 시간적 히스토리를 알 수 있으며 구조물을 운용하는 동안에 데이터의 실시간 수집이 가능해 진다. 이와 같은 특징으로 인해 구조물의 운용 중의 손상 감시를 빠르게 수행할 수 있으며 또한 앞으로의 구조 성능의 진단과 평가도 할 수 있다[4]. 따라서 전통적인 NDT/NDE와 비교했을 때, 구조 건전성 감시 기술은 구조물의 국부적 감시뿐만 아니라 전체적인 감시를 할 수 있으며, NDT/NDE로 감지하기 어렵거나 불가능한 구조물의 영역을 분해하지 않고 감시할 수 있으므로 검사 시간 및 유지 비용을 대폭 감소시킬 수 있다. 또한 이와 같은 구조 건전성 감시 시스템은 구조물의 가용성을 상승시키고 자동화를 통한 노동력 사용이 줄어들며, 원격 및 현장 제어가 가능해진다는 특징이 있다. 따라서 숙련된 작업자가 필요했던 NDT/NDE에 비해 상대적으로 작업이 단순화되며, 손상 평가에 있어서 사람의 주관성이 개입될 여지가 적어진다. 최종적으로 기존 NDT/NDE가 스케줄 기반의 구조물 감시 및 유지관리 체계였다면, 구조 건전성 감시는 상태 기반 유지관리 체계가 됨으로써 구조물의 안전을 더욱 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 구조 건전성 상태 감시 기술의 주요 기술들 중 하나인 손상 감지 및 진단 기법들과 센서 네트워크 기술에 대해 간략히 기술하였다.

1. 손상 감지 및 진단 기법

구조 건전성 감시 기법은 손상의 발생을 감지하는 단계(Level 1), 손상의 위치를 알아내는 단계(Level 2), 손상 상태의 심각성을 진단하는 단계(Level 3), 구조물의 수명을 예측하는 단계(Level 4) 그리고 구조물 스스로 진단, 예측, 치료할 수 있는 단계(Level 5)로 구분될 수 있다. Level이 낮을수록 비교적 간단하고 신속하게 손상을 감지할 수 있으나 감시 정확도는 상대적으로 낮으며, Level이 높을수록 감시 정확도가 높은 반면, 신호 취득, 특징 추출, 정보 분석 과정이 복잡하며 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 현

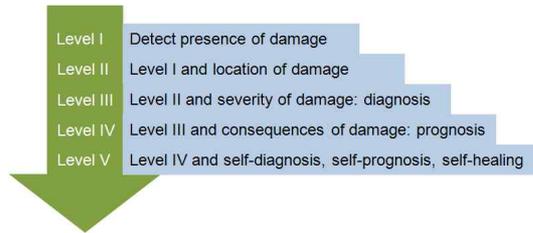


그림 2. 구조 건전성 감시의 발전 단계

재 국내외로 보고되는 연구 결과를 보면 구조 건전성 감시 기법이 Level 3에서 주로 진행되고 있는 것으로 판단되고 있으며 4, 5 단계로의 진입을 위한 일부 연구가 진행되고 있다. 그림 2는 앞서 설명한, 구조 건전성 발전 단계를 간략한 개략도로 보여준다[5].

또한 손상 감지 및 진단 기법은 크게 검사 영역에 따라 전체적(Global) 감시 기법과 국부적(Local) 감시 기법으로 구분될 수 있다. 전체적 감시 기법은 구조물 전체 영역을 대상으로 구조물의 손상을 감시하는 기법이며, 국부적 감시 기법은 일부 영역에서 발생하는 손상을 감시하는 기법이라 할 수 있다. 전체적 감시 기법은 크게 하중 조건 기반 손상 감지 기법과 진동 기반 감지 기법이 있으며, 국부적 감시 기법은 파동 전파 기반 감지 기법이 주로 연구되고 있다. 그리고 구조 건전성 감시에 사용되는 센서의 특징에 따라서 검사 영역과 감지 기법이 정해지며, 대표적으로 적용 및 연구되는 센서로는 광섬유 센서(fiber optic sensors)와 압전 센서(piezoelectric sensors)가 있다. 특히 본 논문에서는 손상 감지 기법을 스마트 센서 기반, 진동 기반 그리고 파동 전파 기반 손상 감지 기술로 분류하여 설명하였다.

1.1. 스마트 센서 기반 손상 감지 기법

손상 감지 기법은 구조물이 운용 중에 발생하는 진동 하중, 충격 하중, 열하중, 피로 하중 등의 다양한 하중 조건에서 발생하는 손상을 감지하는 기법을 말한다. 이 기법의 특징은 전체적인 구조물의 운용 중에 감지하는 것이기 때문에 기존 센서와 달리 다양한 기능을 갖고 있는 스마트 센서를 이용하여 구조물의 거동을 감시하는 연구가 국내외로 활발히 진행되고 있다. 특히, 기존

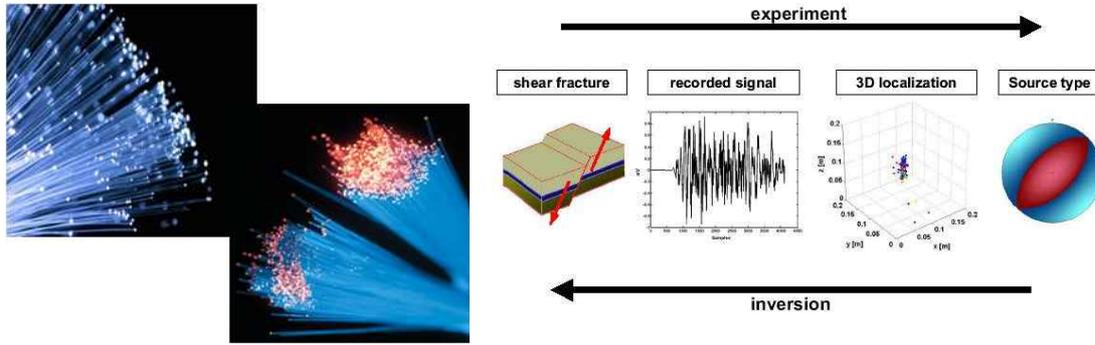


그림 3. 광섬유 센서 및 음향방출 기술

표 1. 광섬유 센서 측정 기술

형식	FBG	OTDR	BOTDR	BOCDA
분류	<ul style="list-style-type: none"> • 포인트 센서 • 멀티플렉싱을 활용하여 준 분포형 센서로 확장 가능 	분포형 센서 (전범위 측정)	분포형 센서 (전범위 측정)	분포형 센서 (측정지점 임의 선택기능으로 포인트 센서로 확장 가능)
측정 방법	브래그 격자를 광섬유에 생성시켜 그 지점을 센서로 사용	레이리 산란광의 크기 변화로 파손 및 균열 위치 측정	브릴루앙 산란광의 주파수 변화로 온도 및 변형률 측정	브릴루앙 산란광 주파수 변화로 온도 및 변형률 측정
측정 정확도	$\pm 10^{-6}$ (변형률)	39dB (동적범위)	$\pm 20 \times 10^{-6}$ (변형률)	$\pm 20 \times 10^{-6}$ (변형률)
측정 속도	1Hz~1kHz	수 초~수 분	수 분	수 초
측정 거리	-	40km	50km	1km
측정 신호	브래그 파장	레이리 산란	브릴루앙 산란	브릴루앙 산란

전기 기반 센서의 제한점을 극복할 수 있는 다양한 종류의 광섬유 센서 활용 연구 및 구조물의 실시간 손상 유무를 판단하기 용이한 음향 방출(acoustic emission) 센서 기술 연구가 활발히 수행되고 있다. 그림 3은 광섬유 센서 및 음향 방출 기술에 대해 보여준다.

스마트 센서 중 하나인 광섬유 센서는 빛을 신호로 사용하기 때문에 전자기적 잡음의 영향을 받지 않아 기존 전자기 기반 센서로 접근이 용이하지 못한 거친 환경 내에서 적용이 가능하고, 원거리 신호의 전달이 효율적이며 부식에 대한 염려가 없어 수중에서도 사용 가능하다는 장점과 변형률, 온도, 가속도 등의 다양한 정·동적 물리량을 측정할 수 있는 감지기로 사용이 가능하[6]. 특히, 광섬유 센서 중에 FBG 센서 및 OTDR, BOTDR 방식은 준 분포형 및 분포형 센서로서 구조물 전 구간의 물리량을 동시 다점 측정할 수 있기 때문에 구조 건전성 감시 분야에서 매우 유망한 센서이다. 현재 국내외로 대형 구조물에 분포형 광섬유 센서를 이용한 건전성 감시 연구가

활발히 진행되고 있다[7]. 표 1은 현재 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있는 광섬유 센서의 기술 현황을 나타낸다[8].

또한 현재 국내외로 분포형 광섬유 센서를 이용하여 대형 구조물의 변형 측정 및 상태 감시에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국내의 경우 사회 기반 시설인 철도, 교량, 터널, 수송관 건전성 감시 연구와 원자력 발전, 조력 발전과 같은 대형 기계 설비 그리고 항공기 관련 연구 등이 최근 수행되었다. 특히 한국철도기술연구원 에서 철도 차량, 철도 레일, 철도 터널, 지하 역사의 건전성 감시를 위해 FBG 센서 및 BODCA 방식의 분포형 광섬유 센서를 적용하였으며 [8-13], 한국건설기술연구원에서는 FBG 센서를 이용한 암반 사면의 균열 감지에 관한 연구가 활발히 진행되었다[14-16]. 이외에도 주목할 만한 연구는 부산대학교에서는 FBG 센서를 이용하여 남해대교와 현수교와 같은 실 교량의 처짐 감시 연구를 수행하였으며[17,18], 풍력 발전용 터빈 블레이드의 모드 해석[19], 조력발전소의 하중 감

시[21], 원자력 발전소 격납 건물 건전성 감시 [22]에 관한 연구가 관련 국가 연구소에서 수행되었다. 해외의 경우 국내와 유사하게 분포형 광섬유 센서를 적용한 대형 구조물(재생 에너지 구조물, 수송 구조물, 토목 구조물, 석유·가스관 등) 건전성 감시 연구 사례가 상당수 발표되고 있으며 점점 더 큰 대형 구조물에 대한 적용 연구가 진행되는 추세에 있다. 차후 분포형 광섬유 센서를 이용한 실시간 건전성 감시 관련 연구는 활발히 진행될 것으로 전망하며 적용 대상 구조물이 더욱 다양해질 것으로 예측된다.

1.2. 진동 기반 손상 감지 기법

진동 기반 감지 기법은 진동 특성치(고유 진동수, 모드 형상 등)의 변화를 감지하여 손상 발생에 의한 구조물의 물리적 특성치(질량, 강성 등)의 변화를 감지하는 기법이다[23]. 진동 기반 감지 기법의 해외 동향은 전통적인 기법에서 현대적 기법으로 변화되는 추세를 갖고 있다. 전통적인 방법이란 고유 진동수, 모드 감쇠, 모드 형상과 같은 구조 특성치만을 이용한 손상 감지 기법이며, 현대적 기법은 statistical process control, neural networks, advanced signal processing, genetic algorithm, wavelet analysis 등을 이용하여 구조 건전성 감시를 위한 동적 반응을 효과적으로 볼 수 있도록 한 기법이다[24]. 이와 같은 기법이 발전된 이유는 강성의 변화보다 손상이 더욱 민감한 복합재료(composite) 구조물에 대한 건전성 감시 연구가 진행되고 있기 때문이다. 국내에서는 현대적 기법을 이용한 진동 기반 손상 감지 기법에

관련 연구가 아직 미미한 실정이며, 해외 동향을 보았을 때 차후 손상의 감지, 위치 측정 및 정량화를 위한 실시간 신호 처리 기법 혹은 확률·통계적 기법이 적용된 지능형 알고리즘의 개발 및 적용 연구와 유한 요소 해석과 접목된 손상 감지, 위치 측정 및 정량화 연구가 유망할 것으로 전망된다. 그림 4는 진동 기반 감지 기법의 대표적인 적용 대상인 교량과 주파수 분석에 의한 진동 기반 감지 기법을 보여준다.

1.3. 파동 전파 기반 손상 감지 기법

파동 전파 기반 감지 기법은 작동기로부터 발생되어 전파되는 파의 신호 변화를 감지하여 손상 발생 여부와 손상 위치 및 손상의 정도를 판단하는 기법이다. 이 기법은 압전 센서를 파의 발생과 수신을 위한 작동기/감지기로 활용한 연구가 주로 되고 있으며 Lamb wave를 이용한 유도초음파 기법이 활발히 진행되고 있다. 대표적인 손상 감지 기법은 pitch-catch(PC) 기법, pulse-echo(PE) 기법, time-reversal(TR) 기법 등이 있다. 그림 5는 Lamb wave를 이용한 유도초음파 기법을 보여준다[25,30].

그리고 국내에서 최근 pitch-catch 기법과 time-reversal 기법을 이용하여 기준 데이터 없이 손상을 검출할 수 있는 연구를 수행하였다 [25-27]. 해외의 경우 최근 Lamb wave를 통해 얻어진 데이터의 손상 검출을 위한 통계적 기법을 적용 알고리즘 개발 및 분석 연구가 진행되고 있으며, 손상 위치와 크기 그리고 형상을 정량화하기 위한 Lamb wave의 세기, 에너지 분석, 이미지

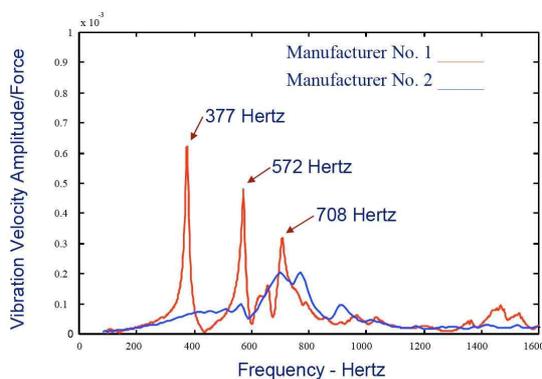


그림 4 교량(Yokohama Bridge, Japan)과 주파수 분석에 의한 진동 기반 감지 기법

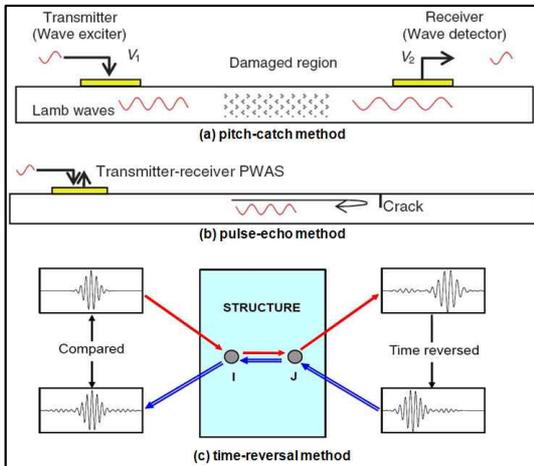


그림 5 Lamb wave를 이용한 유도초음파 기법그림

화를 위한 연구가 진행되고 있다[28-31]. 또한 온도에 의한 Lamb wave의 영향을 분석하기 위한 연구와 임피던스 변화에 의한 손상 감지 연구도 수행되고 있다[32]. 앞으로의 전망은 손상 감지 및 손상 크기, 형상 등을 이미지화 기법 등을 적용한 정량화와 관련된 연구 그리고 하중 조건 및 온도 등과 같이 파에 영향을 주는 외부 환경적 영향 하에서의 감지 방법 등이 매우 유망할 것으로 보인다.

2. 센서 네트워크 기술

센서 네트워크 기술은 크게 세 단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째로 정확한 구조 건전성 감시를 위한 실시간 고속 데이터 취득 하드웨어와 소프트웨어의 구축, 두 번째는 센서에서 취득된 데이터의 정확한 전송, 마지막으로 전달된 데이터의 알고리즘 및 소프트웨어에 의한 지능형 손상 예측 신호처리이다. 구조 건전성 감지에서 위와 같은 기술이 적절히 구축되지 않아 구조물에 부착된 많은 수의 센서로부터 얻어지는 엄청난 양의 데이터를 적절히 관리하지 못한다면 모니터링 시스템의 오작동 및 오탐지로 인한 정보가 남발하는 문제를 갖게 되고 더 나아가 구조물에 결함이 생겼음에도 신호를 제대로 감지하지 못하게 되어 끔찍한 대형 사고를 야기할 수 있다. 하지만 반대로 데이터 취득 및 신호처리 기술을 적절히 응용한다면 구조 건전성 감시의 목적에 맞게 컴퓨터나 스마트폰을 통하여 실시간으로 구조물

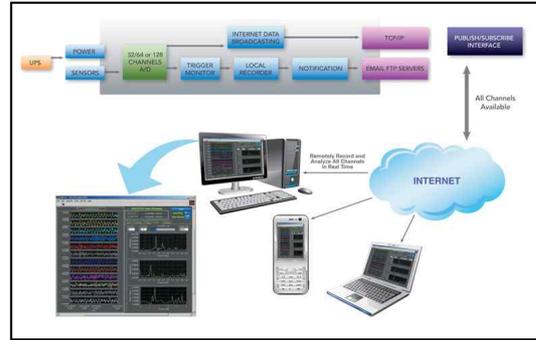


그림 6 센서 네트워크 기술을 이용한 온라인 감시 시스템

에 대한 정보를 정확하고 손쉽게 확인할 수 있게 되어 손상의 위치를 조기 발견함으로써 여러 가지 대형 사고들을 미연에 방지할 수 있으며, 보수/보강에 소요되는 시간과 비용도 절감할 수 있게 될 것이다[33-35]. 그림 6은 센서 네트워크 기술을 이용한 온라인 감시 시스템의 개략도를 보여준다.

또한 센서 네트워크 기술은 여러 가지 형태로 개발되고 있는데, 대표적으로 각종 센서에서 감지한 정보를 무선으로 수집할 수 있도록 구성한 네트워크인 USN(ubiquitous sensor network), 계측 이력관리 등의 기능을 제공하는 SOA(service oriented architecture)기반의 온라인 안전감시 및 실시간 경보시스템, 망구조에서 효율적으로 원격 감시 및 데이터 수집 기능을 수행할 수 있는 예약기반 MAC(media access control) 프로토콜, 네트워크 관리 프로토콜인 SNMP(simple network management protocol)의 정보 전달 기법, ANN(artificial neural network)의 손상 평가법, BEP(back error propagation)기반의 신경회로망 알고리즘, 저비용 고효율 측정 및 저장을 위한 지그비(Zigbee)기술 등이 있다[36-43]. 뿐만 아니라 구조물의 측정 관리에 필요한 시스템의 현황을 파악하고 센서 네트워크 기술을 이용한 감시 시스템을 향상시키기 위하여 여러 가지 관련연구가 활발히 진행되고 있으며, 표 2와 같이 여러 분야에서 실제적으로 서비스를 구현 및 예정하고 있다[44].

센서 네트워크 기술은 하드웨어, 소프트웨어 및 전송기술이 주된 관심 연구 및 개발 분야라 할 수 있는데, 해외 연구 및 개발의 사례를 보면 우선 미국 일리노이스(Illinois) 대학 UIUC의

표 2 네트워크 기술 응용 서비스

분류	구현 및 예정 서비스
교통	지능형 교통신호 제어 서비스 불법 주정차 단속 서비스 버스 정보화 서비스
보건복지	건강 관리 서비스 독거 노인 안전 관리 서비스 응급 환자 이송 서비스 보건 시설 관리 서비스
도시기반 시설물 관리	지상 시설물 통합 관리 서비스 지하 시설물 통합 관리 서비스 원격 점검 서비스
환경/재난재해 대응	대기 오염 감시 및 관리 서비스 종합 환경 오염 관리 서비스 수질 감시 및 관리 서비스
행정지원	원격 민원 발급 서비스 전자 행정 정보 제공 서비스 시민 참여 행정 서비스
문화/관광	관광 정보 종합 안내 서비스 문화 행사 안내 서비스 문화재 관리 서비스

Spencer 교수 연구진에 의해 개발된 Imote2 기반의 무선센서, 미국 미시간(Michigan) 대학의 Lynch 교수 연구진에 의해 개발된 모드해석기법 내장 무선센서를 주목할 필요가 있으며, 이는 실 구조물에 적용한 자동화 모니터링 시스템을 구축하는데 쓰였다[34]. 또한 미국 샌디에고(San Diego) Coronado Bridge의 경우, 2002년 3월 미국 샌디에고에 위치한 Coronado 교량에 대한 모니터링 시스템을 IEEE 802.11b 근거리 무선 네트워크 시스템을 이용하여 시범 구축하였고, 미국 UC Berkeley에서는 GDI(great duck idland) 프로젝트로 바다제비의 서식지 굴속으로부터 수백 미터 떨어진 곳에서 실시간으로 데이터를 수집하였으며, Redwood 프로젝트로 숲속 전체 나무의 상태를 실시간으로 파악하는 연구를 수행하였다[33,35,45].

또한 최근 국내에서는 데이터 취득 및 신호처리 기술을 응용하여 구조물의 파손 예측 및 검출 등의 구조물 감시뿐만 아니라 지하 역사의 공기 질 모니터링, 지하수 모니터링, 해양안전관리 등의 여러 가지 분야에 적용하는 연구가 진행되고 있다[42,46]. 이는 모두 실생활에 직접적으로 연관되어 실질적인 도움을 줄 수 있는 것들이기 때문에 모든 연구들은 바로 실용화도입이 가능하다. 특히 표 3은 실제로 현장시험이나 시범사업이 이루어지고 있는 것을 보여준다[44]. 결국 이

표 3 국내 현장시험 및 시범사업

수행기관	서비스 분야
국방부	제주-해양환경
케이엠아이	건설현장(콘크리트양생)
동부정보기술	농산물 재배환경
연세대	혈액/항생제
현대정보	강원도-식수관리
에스원	경주-문화재관리
KT	인천송도-도시기반시설관리
KT	제주-기상해양관측
KMI	부산-교량관리
대전	3대하천 생태복원
해양수산부	RTLS u-Port
도로공사	고속도로 시설물 관리
제주	지하수 모니터링
제주	어린이 환우를 위한 Blue Band 시스템

러한 기술들은 물리공간과 네트워크 기반의 가상 공간을 융합하여 새로운 유비쿼터스 컴퓨팅 세계를 창출하여 인간의 생활을 보다 안전하고, 생산적이며, 풍요하게 변화시킨다고 할 수 있다[45].

향후 데이터 취득 및 신호처리 기술의 신뢰성과 활용성을 높이기 위하여 지속적인 연구 및 개발이 필요할 것이다. 이를 위해 고속 데이터 처리를 위한 하드웨어와 소프트웨어를 구성해야 하며, 하드웨어인 센서는 저비용으로 주요 검사 대상지역 전체를 포괄하여 감시할 수 있도록 구성해야 한다. 또한 정확한 신호처리를 위하여 센서에서 취득하는 데이터는 실시간으로 신뢰성 있게 목적지에 전달되어야 하며, 추가로 집적회로기술을 응용한 신호처리회로, 알고리즘 및 소프트웨어에 의한 지능형 손상 예측 소프트웨어 기술, 데이터베이스 및 그래픽스 기술들에 대한 집중적인 연구와 개발이 필수적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다[43,45,47].

참고 문헌

[1] Douglas E. Adams, "Comparison of NDT and SHM techniques," Wiley, England, pp. 16-18 (2007)
 [2] Victor Giurgiutiu and Giola Santoni-Bottai, "Structural health monitoring of composite structures with piezoelectric-wafer active

- sensors," *AIAA Journal*, Vol. 49, No. 3, pp. 565-581 (2011)
- [3] 최홍섭, "항공기 구조건전성감시 기술 동향 및 개발방향", *한국복합재료학회지*, Vol. 23, No. 3, pp. 69-77 (2010)
- [4] Adam Cobb, "A state estimation framework for ultrasonic SHM of fastener hole fatigue cracks," Thesis, Georgia Institute of Technology, 2008
- [5] Jose Miguel Lopez-Higuera et al., "Fiber optic sensors in structural health monitoring," *J. Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 587-608 (2011)
- [6] 이건호, 안병준, 김대현, "구조 건전성 모니터링을 위한 광섬유 변위 센서 시스템 개발," *한국비파괴검사학회지*, Vol. 31, No. 4, pp. 374-381 (2011)
- [7] Branko Glisic and Daniele Inaudi, "Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors," *Structural Health Monitoring* (2011)
- [8] 윤혁진, 송광용, "광섬유 센서 기술을 이용한 교통 재해 감시 기술 개발", *한국방재학회지*, 제11권, 제1호, pp. 99-102 (2011)
- [9] 은종필, 최성훈, 박춘수, 강동훈, 송성진, 김기환, "고속철도차량 모니터링을 위한 FBG 센서의 응용", *한국철도학회 추계학술대회 논문집*, pp. 544-548 (2008)
- [10] 윤혁진, 송광용, 김대상, 김기환, 김정석, 권태수, 나희승, "광섬유센서를 이용한 열차하중 작용시 레일의 변형을 모니터링", *한국철도학회 추계학술대회* (2009)
- [11] 이수형, 신민호, 김현기, 송명근, "광섬유를 이용한 철도터널 균열 감지", *한국철도학회 추계학술대회* (2009)
- [12] 윤혁진, 송광용, 김현민, 김정석, "분포형 광섬유 센서를 이용한 교량의 변형 측정에 관한 연구", *한국철도학회 추계학술대회* (2010)
- [13] 신정열, 안태기, 이우동, 한석윤, "광섬유 센서 및 USN 기술의 지하역사 구조건전성 감시시스템 적용방안 연구", *한국철도학회 추계학술대회 논문집*, pp. 224-231 (2008)
- [14] 권오일, 백용, "광섬유센서를 이용한 사면시설물 계측시스템 시범구축 사례 연구", *한국지반공학회 춘계학술발표회*, pp. 1026-1031 (2009)
- [15] 백용, "광섬유센서를 이용한 암반사면 계측 시스템 구축 기술", *한국방재학회지*, 제9권, 제2호, pp. 34-37 (2009)
- [16] 권오일, 백용, 김진환, "광섬유를 이용한 암반사면 균열감지 경량 계측 센서 개발", *대한지질공학회 춘계학술발표대회*, pp. 65-66 (2011)
- [17] 조남소, 김남식, "FBG 변형률센서를 이용한 현수교의 정적 처짐형상 추정", *대한토목학회 논문집A*, 제28권, 제5A호, pp. 699-707 (2008)
- [18] 장성진, 김남식, "모드분해기법을 이용한 변위응답추정 알고리즘의 실교량 적용", *대한토목학회 논문집A*, 제30권, 제3A호, pp. 257-264 (2010)
- [19] 김창환, 백인수, 유능수, 남윤수, "광섬유 브래그격자 센서를 이용한 풍력발전기 날개의 모드 해석", *대한기계학회논문집B* (2011)
- [20] 김창환, 백인수, 유능수, "광섬유 센서를 이용한 풍력발전기 날개의 모드 해석", *대한기계학회 춘계학술대회 논문집* (2010)
- [21] 박현준, 윤정방, 박진순, "광섬유 FBG 센서를 활용한 조류발전시설물의 거동 분석 및 손상검색", *한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 812-813 (2009)
- [22] 장정범, 이홍표, 황경민, 송영철, "광섬유센서를 이용한 부착식 텐던의 유효 긴장력 평가에 관한 연구", *대한토목학회 정기학술대회*, pp. 3519-3522 (2009)
- [23] Wei Fan and Pizhong Qiao, "Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study," *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 1, pp. 83-111 (2011)
- [24] Amir Shahdin et al., "Correlating low energy impact damage with changes in modal parameters: diagnosis tools and FE validation," *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 2, pp. 199-217 (2011)
- [25] 고한석, 이우식, "구조물의 건전성 모니터링을 위한 유도초음파 응용 구조손상 탐지 방법", *한국철도학회 논문집*, 제12권, 제3호, pp. 412-419 (2009)

- [26] 이우식, 김대환, 전용주, "구조물 건전성 모니터링을 위한 하이브리드 시간-반전기법", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 546-548 (2010)
- [27] 전용주, 최정식, 이우식, "Lamb 파의 시간-반전 특성을 이용한 구조물 건전성 모니터링", 대한기계학회 동역학 및 제어부분 춘계학술대회 논문집, pp. 128-129 (2010)
- [28] J. Ayers et al., "Phase gradient and mode conversion estimation in 1D damaged structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 1, pp. 65-82 (2011)
- [29] Lingyu Yu et al., "Corrosion detection with piezoelectric wafer active sensors using pitch-catch waves and cross-time-frequency analysis," *Structural Health Monitoring* (2011)
- [30] Bin Lin and Victor Giurgiutiu, "Power and energy transduction analysis of piezoelectric wafer-active sensors for structural health monitoring," *Structural Health Monitoring*, (2011)
- [31] Ning Hu et al., "Characterization of damage size in metallic plates using Lamb waves," *Structural Health Monitoring* (2011)
- [32] Fabriciao G Baptista et al., "Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring," *Structural Health Monitoring* (2011)
- [33] 주승환 외 3인, "도시인프라 구조물 건전성 통합 모니터링 시스템", *한국시플레이션학회*, 제19권, 제2호, pp. 147-155 (2010)
- [34] 정형조, "스마트 무선센서 네트워크를 이용한 사장교 건전도 모니터링:한-미-일 국제공동연구", *한국소음진동공학회*, 제20권, 제1호, pp. 14-19 (2010)
- [35] 김정태, 박재형, "스마트 무선센서를 이용한 대형구조물의 구조건전성 모니터링", *한국소음진동공학회*, 제20권, 제1호, pp. 7-13 (2010)
- [36] 김태봉, 이태희, "센서네트워크를 이용한 건설구조물의 모니터링 시스템 설계", 제34회 대한토목학회 정기학술대회, pp. 3758-3761 (2008)
- [37] 고정환, "BEP기반의 신경회로망을 이용한 LCD 패널 결함 검출", *전자공학회*, 제48권, 제2호, pp. 26-31 (2011)
- [38] 김양규, 김원, "순위 선택 기반 유전자 알고리즘에 의한 유비쿼터스 센서 네트워크 설계", 한국정보기술학회 IT기반 콘텐츠 융합 기술 워크숍 및 하계종합학술대회, pp. 187-190 (2010)
- [39] 김경목 외 3인, "교량 모니터링을 위한 예약 기반 무선 센서 네트워크에 관한 연구", *한국정보기술학회*, 제7권, 제6호, pp. 121-127 (2009)
- [40] 허광희, 전승곤, "롤러코스트 구조물의 실시간 안전성 평가를 위한 손상평가법 연구", 제36회 대한토목학회 정기학술대회, pp. 1317-1320 (2010)
- [41] 권종원 외 4인, "유비쿼터스 센서 네트워크 기술을 이용한 교량 구조의 온라인 안전감시 시스템 개발", CICS 2010 정보 및 제어학술대회, pp. 175-176 (2010)
- [42] 박덕신 외 4인, "무선센서네트워크에 기반한 공기질 모니터링 연구", 한국철도학회 추계학술대회, pp. 1756-1760 (2008)
- [43] 김창훈 외 4인, "OpenCable™ 수신기의 케이블 네트워크를 이용한 센서데이터 실시간 모니터링", *한국정보과학회 종합학술대회*, 제35권, 제1호, pp. 121-125 (2008)
- [44] 김선양 외 2인, "광역 USN 서비스를 위한 표준 기반의 센서 네트워크 모니터링 및 관리", *대한전자공학회*, 제36권, 제12호, pp. 38-44 (2009)
- [45] 이기욱, 성장규, "에너지 효율 제약조건을 가진 센서 네트워크 모니터링 시스템 구현", *한국멀티미디어학회*, 제13권, 제1호, pp. 10-16 (2010)
- [46] 권종원 외 3인, "비분산적외선 CO₂센서를 이용한 무선 센서 네트워크 기반의 지하 공기질 모니터링 시스템", *대한전자공학회*, 제46권, 제4호, pp. 28-38 (2009)
- [47] 이진이, 이지은, "IT기반 실시간 손상계측기술", 대한기계학회 재료 및 파괴부분 춘계학술대회, pp. 171-172 (2011)