스마트 구조기술을 활용한 건설 분야의 혁신

The Innovation of Civil Engineering Utilizing Smart Structures Technology

글 | 윤정방 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 042-869-3612 **이메일 |** ycb@kaist.ac.kr
글 | 이진학 스마트사회기반시설연구센터 연구조교수 042-869-8291 **이메일 |** yijh@kaist.ac.kr

01 머리말

지난 5개월 동안 장승필 교수님의 "한국토목공학의 비전과 혁신"에 대한 글이 연재되어, 국내 건설 산업의 현재, 미국과 영국, 일본 등 선진국의 미래 비전과 전략, 그리고 한국 건설 산업의 전망과 혁신 방안에 대한 논의가 이루어졌다. 이러한 논의가 여러 정세와 폭넓은 여러 분야에 대한 전반적인 고찰을 할 수 있는 기회가 되었다면, 이번 칼럼에서는 미래 건설 분야의 혁신에 대하여 매우 기술적이며, 또한 보다 구체적인 혁신 방안의 하나로 스마트 구조기술(smart structures technology)을 다루어 보고자 한다. 건설 분야는 익히 알려진 바와 같이 국가의 근간을 이루는 사회기반시설물을 다루는 매우 중요한 분야로써, 특히 "국민의 안전한 삶"을 담보하고 있는 분야이다. 따라서 어떤 의미에서는 다른 분야보다도 보수적이어야 하며, 충분히 검증된 기술만이 적용될 수 있는 분야라 할 수 있다. 이러한 건설 분야의 특성으로 인하여 "土木"은 다소 진부한 공학 분야로 인식되어 온 것도 사실이며, 이러한 인식을 재고하기 위하여 이를 다른 명칭으로 바꾸는 것에 관한 문제가 논의된 바도 있으나 "土木"보다 함축적이며, 역사적인 용어가 없다는 인식에서 여전히 이 용어를 사용하고 있으며, 필자도 이에 동의하는 바이다.

요즘 세계와 한국의 경제를 논하면서, 한국을 "너트 크래커(Nut Cracker)"에 끼어 있는 호두로 비유하곤 하는데, 이는 미국, 일본 등 선진국과 중국이라는 신흥 경제대국 사이에서의 어려운 한국 경제의 현재와 미래를 이야기하는 것이다. 국내 경제가 이러하다면, 건설 분야의 상황은 다른 분야보다도 더 어려운 상황에 처해 있는 것이 사실이며, 이러한 위기상황을 극복하기 위해서는 이전 칼럼을 통해서 논의된 바와 같은 여러 방안이 지속적으로 추진되어야 하지만, 좁은 의미에서 기술만을 보자면, 기존의 기술만을 고집하지 않고, 새로운 기술을 받아들여 생산성을 향상시킴으로써 건설 산업을 고부가 가치산업으로 전환하는 노력이 필요하리라 판단한다. 우리 분야의 기술적인 향상을 위한 여러 시도가 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 건설교통부에서 주관하는 대형 국책과제는 이러한 환경변화에 건설 관련 대학, 연구소, 업계가 능동적으로 대응할 수 있도록 하는 기틀을 마련하기에 부족함이 없어 보인다. 특히 분산공유형 건설연구 인프라구축사업(Korea Construction Engineering Development Program,

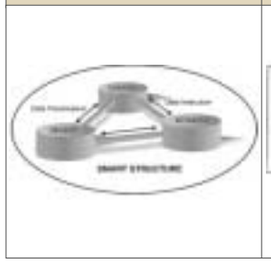
KOCED)에서 보여주듯이 이제는 건설 분야의 연구자가 중심이 되어 정보통신과 같은 타 분야의 기술을 활용하는 단계에까지 이른 것으로 판단할 수 있다. 즉, 학제간 연구(multidisciplinary research)를 견인하고 있다고 볼 수 있는데, 이러한 학제간 연구는 타분야에서는 90년대 중반부터 논의가 활발하게 이루어졌으나, 우리 분야에서의 학제간 연구는 최근 새롭게 인식되고 있는 사항이라 할 수 있다. 이는 건설 분야의 특성 중 하나인 학문적 폐쇄성 때문인 것으로 이해할 수 있으며, 향후 건설시장이 점차 개방되는 상황에서, 또한 더욱 치열해지는 건설시장에서의 대 중국과의 경쟁이 예상되는 상황에서는 새로운 학문을 받아들이는 유연한 개방적 사고가 필요한 시점이라 할 수 있을 것이다.

이번 칼럼에서는 서두에 밝힌 바와 같이 기술적인 측면에서 보다 좁은 분야인 유지관리와 관련하여 스마트 구조기술이 향후 미래의 건설 분야에 어떻게 활용될 수 있는지를 전망하고자 하며, 이를 위하여 스마트 구조기술의 현재와 관련된 여러 기술 및 적용 분야를 소개하고, 앞으로의 교육 커리큘럼에의 반영을 통한 새로운 인재 양성에 대한 의견을 개진하고자 한다.

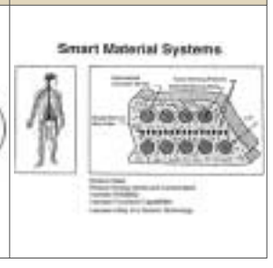
02 스마트 구조기술의 현재

석기시대, 청동기시대, 철기시대 등 인간의 문명 발전 단계를 새로이 등장한 재료를 기준으로 하는 것과 같이 새로운 재료의 등장은 인간의 문명 발전에 큰 기여를 하여 왔다. 현재의 복합재료는 기존 재료에 비하여 보다 뛰어난 성능을 가진 구조물이 가능하도록 하고 있으나, 복합재료를 포함하여 위에서 언급한 재료들은 어떠한 의미에서 매우 수동적이라고 할 수 있다. 즉, 외부의 자극에 의해서 어떤 정해진 응답을 하도록 설계되어져 있다는 것을 의미한다. 이러한 구조물은 정해진 설계조건에서 최적의 거동을 하도록 되어 있을 것이다. 그러나 Gandhi & Thompson은 이미 1992년도에 바이오 기술(bio-technology), 생체모방기술(biomimetics), 나노기술, 정보통신기술의 비약적인 발전에 의하여 새로운 스마트 재료의 시대가 다가오고 있다고 예견한 바 있다(Gandhi & Thompson, 1992). 이러한 스마트 재료는 외부의 자극을 감지하고, 판단하여, 능동적으로 반응하는 모든 기술을 통합한 공학적 시스템을 가능하도록 하는데, 이러한 스마트 시스템은 피드백 구조를 통하여 매우 능동적으로 대응할 수도 있고, 혹은 피드백을 필요로 하지 않고 재료 단위에서 충분한 기능을 발현하기도 한다. 이러한 스마트 재료 혹은 스마트 시스템과 관련된 기술을 스마트 구조기술(smart structures technology)이라 일컬을 수 있으며, 이 분야의 기술은 최근 몇 년 동안 국내외에서 많은 관심을 받으며, 비약적으로 발전하고 있는 기술로써, 항공, 기계 분야에서는 우리 건설 분야보다 먼저 이러한 기술을 받아들여 기술에 따라서는 성숙한 단계에까지 이르고 있다〈그림 1〉. 건설 분야에서의 스마트 구조기술의 시초는 교량이나 건물에 대한 능동/반능동 제어기술에서 찾아볼 수 있을 것이다. 물론 이러한 기술이 오래전부터 적용되어 온 것은 사실이나, 자기유변유체(Magento-Rheological Fluid)를 이용한 반능동제어 등 스마트 재료와 기존의 제어기술이 융합되면서 자연스럽게 제어분야가 스마트 구조기술의 한 부분으로 인식되었다. 사실 구조물이 능동적으로 내부 또는 외부의 환경에 대응하기 위해서는 제어기술이 가장 핵심이 될 수 있을 것이다. 특히 최근에는 다른 분야에서 개발, 적용되고 있는 압전소자, 형상기억합금, 광섬유센서 등 스마트 재료를 적극적으로 수용하면서〈그림 2〉, 이들 기술을 구조 및 지반분야에 적용하고 있기 때문에 건설분야에서의 스마트 구조기술은 이러한 스마트 재료 및 센서기술과 함께 이들을 적용하는 기술까지를 포함하는 총괄적인 의미로 사용되고 있다고 할 수 있다. 스마트 구조기술에 대하여 보다 구체적으로 살펴보기 위하여 다음과 같이 스마트 센서기술, 구조해석기술, 적용기술로 나누어 이를 소개하고 각 절마다 관련 분야의 미래 기술을 소개하고자 하였다.

| 그림 1 | 스마트 구조기술의 기본 요소(Akhras, 2000)



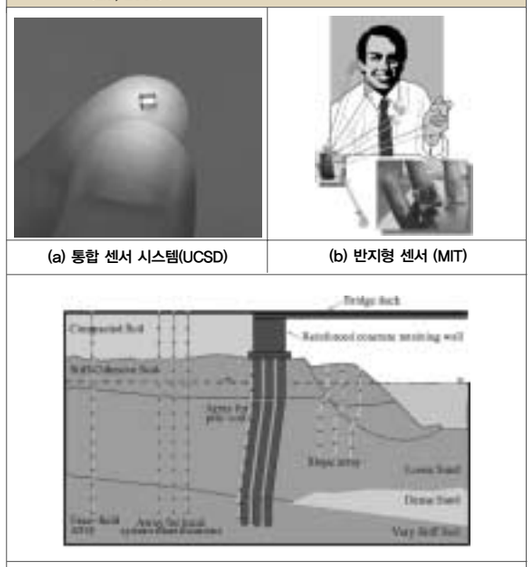
| 그림 2 | 스마트 재료 시스템 (Liu, 2003)



2-1. 스마트 센서기술의 현황

스마트 센서 기술은 건설 분야보다는 다른 분야에서 먼저 시작되었으며, 또한 재료나 전자 분야와의 공동연구가 무엇보다 중요한 기술이라 할 수 있다. 이러한 스마트 재료 및 센서기술에 관한 최근 연구경향을 살펴보기 위하여 미국과학재단(National Science Foundation, NSF)의 자료를 먼저 참고하기로 하였다. 현재 NSF의 토목-기계분야(Civil and Mechanical Systems)에서는 연간 5백만불 이상을 센서 및 관련기술의 개발을 위하여 투자하고 있는데, 2003년도에 지원과제로 선정된 센서 관련 연구는 다음과 같다〈그림 3〉. 우선 임베디드 네트워크, 신호처리, 마이크로 센서 기술 등을 통합한 자기모니터링이 가능한 구조재료를 개발하고 있으며(UC San Diego), 또한 기존의 FBG(Fiber Bragg Grating)형 광섬유센서와 다른 형식의 moire 효과를 이용한 광섬유센서를 UC Irvine에서 개발하고 있다. 또한 MIT에서는 심장혈관의 상시모니터링을 위하여 착용이 용이한 바이오센서를 개발하고 있으며, RPI에서는 광섬유센서와 MEMS 기술을 이용한 지반의 실시간 모니터링을 위한 무선 형상-가속도 센서 어레이를 개발하고 있음을 알 수 있다. 이와 함께 NSF에서 제안하고 있는 스마트 센서관련기술로는 다음과 같은 사항을 들 수 있다. ① 구조물의 모니터링 및 건전성 평가를 위한 분산 센서 시스템(distributed sensory system)의 개발 ② 시공비용과 유지관리 비용의 균형적인 계획을 위한 해석적 기법 ③ 생체모방기술(biomimetics)을 이용한 센서기술 ④ 유비쿼터스 컴퓨팅 환경을 능동적으로 활용한 센서기술 등을 제시한 바 있다. 이러한 스마트 센서의 개발과 함께 기존의 센서 설치에서 가장 큰 문제로 지적할 수 있는 유선 시스템의 개선을 위하여 무선통신기술을 이용한 무선센서의 개발이 활발한데, 이러한 무선통신기술의 적용에 있어서 가장 큰 취약점은 센서 또는 데이터 취득 장치에서 필요로 하는 전원을 공급하는 데에 있다〈그림 4〉. 즉 계측신호는 무선통신으로 보내더라도 전원을 무선으로 공급할 수 없기 때문인데, 이를 해결할 수 있는 방법으로는 두 가지 접근 방식이 있을 것이다. 최근 DMB(Digital Media Broadcasting), 노트북, PDA 등 휴대용 IT 제품개발이 활발하게 이루어지면서, 고효율의 배터리 개발이 활발하게 이루어지고 있는데, 이러한 배터리 기술에 의하여 개발된 배터리를 사용하는 것이 현재로써는 전원문제를 해결할 수 있고, 또 다른 방법으로는 교량이나 빌딩의 상시진동에 의한 소출력 발전을 통하여 자가발전 시스템을 개발함으로써 전력공급을 해결할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이러한 자가발전을 Energy Harvesting 혹은 Power Harvesting이라고 하며, 미국 등에서는 어느 정도의 연구결과가 발표되고 있는 단계이다.

| 그림 3 | NSF에서 지원하고 있는 스마트 센서 및 센서 네트워크 연구과제 (Liu, 2004)



(a) 통합 센서 시스템(UCSD) (b) 반지형 센서 (MIT)

(c) 무선 형상-가속도 센서 어레이 (RPI)

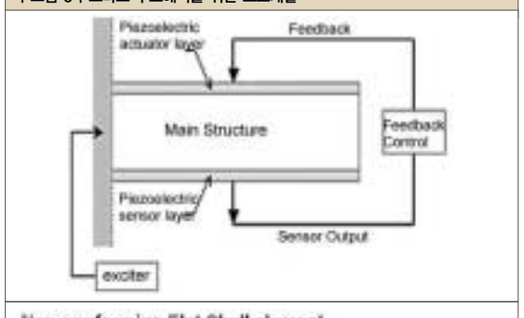
| 그림 4 | 스마트 센서의 조건 (SPIE, 2002)

2-2. 스마트 구조 해석기술

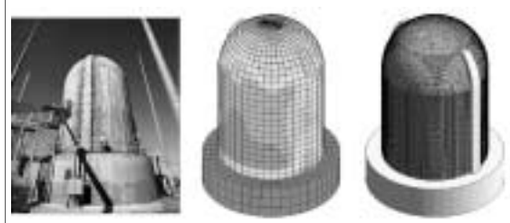
일반적인 구조해석을 위한 도구로 유한요소법을 이용한 상용프로그램들이 많이 개발되어 있으며, 특히 설계업무에서는 SAP2000, MIDAS, RM, ABAQUS 등이 많이 이용되고 있다. 그러나 이들 프로그램은 일반적인 구조물의 정적, 동적, 수화열, 시공단계별 해석을 위하여 적용되고 있으며, 이러한 프로그램을 이용하여 제어장치가 도입된 구조물의 해석을 수행한다든지, 혹은 모니터링을 위하여 적용된 스마트 센서의 계측신호를 분석한다든지 등의 해석은 현재까지는 특수한 프로그램에 의존할 수밖에 없는 상태이다. 또한 향후 이루어질 스마트 재료를 도입한 시설물의 경우에는 그 특성을 정확하게 반영할 수 있는 새로운 이론

에 의한 해석프로그램이 개발되어야 할 것이다. 또한 시설물의 현 상태를 평가, 즉 Diagnosis와 이를 반영한 향후 성능에 대해 예측하는, 이른바 Prognosis를 위한 해석 등은 현재 수행되고 있는 스마트 구조기술과 관련된 해석분야의 과제라 할 수 있을 것이다. 이러한 스마트 구조해석은 개발된 스마트 재료 및 센서 기술과 이를 활용한 스마트 구조물의 진동제어, 모니터링, 평가를 연결시켜주는 기능을 수행할 것으로 보여 진다. 다음 그림은 스마트 압전재료를 해석하기 위한 유한요소 모델을 개발한 예와 함께 비부착 텐던으로 보강된 구조물의 Prognosis를 위한 해석 예를 보여주고 있다〈그림 5, 그림 6〉.

| 그림 5 | 스마트 구조해석을 위한 요소개발



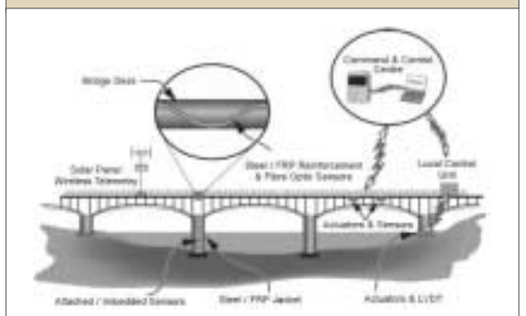
| 그림 6 | 비부착 텐던 모델을 이용한 비선형 해석



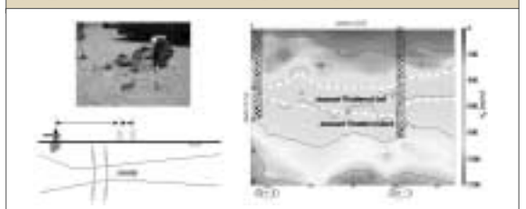
2-3. 스마트 구조기술의 구조물에의 적용

스마트 구조물은 카멜레온이 주위 환경에 따라 자신의 피부색을 바꾸듯이 환경조건에 따라 능동적으로 반응함으로써 보다 스마트해 질 수 있는데, 구조물이 이와 같이 스마트해지기 위해서는 기존의 시설물에 비하여 보다 첨단의 계측기술, 정보처리기술, 패턴인식기술 등이 도입되어져야 하며, 이러한 스마트 구조기술이 적용될 수 있는 예는 무궁무진하다고 할 수 있다. 다음의 〈그림 7〉은 스마트 교량의 예를 들어 준 것이다. 스마트 교량(smart bridge)은 계측장비가 설치된 하나의 시스템으로써, 풍속, 온도와 같은 환경적인 변화에서부터 교량을 통과하는 과적차량에 대한 교통정보, 교량의 안전성을 스스로 진단하여 통보할 수 있는 시스템으로 구성할 수 있다. 한편 〈그림 8〉은 스마트 구조기술을 지반에 적용한 사례로써 지반의 전단파 속도를 추정하기 위하여 HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 기법을 적용한 결과를 보여주고 있다. 이와 같이 스마트 구조기술을 교량이나 건축구조물, 지반 등에 적용하여 구조물의 경제성 및 안전성을 극대화할 수 있으며, 이를 통하여 현재 신설 및 유지관리에 필요한 비용을 상당히 감소시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

| 그림 7 | 스마트 교량의 미래(Akhras, 2000)



| 그림 8 | HWAW기법에 의한 지반물성치의 2D 영상화



03 스마트 사회기반시설 연구센터의 소개

대형 사회기반시설물의 안전성, 사용성 및 경제성을 극대화하기 위하여, 이들 구조물들의 계획, 설계, 시공, 유지관리의 각 단계에 스마트 구조기술을 도입하기 위한 핵심기술의 개발과 실용화를 통한 국내 관련산업의 발전을 유도할 목적으로 설립된 스마트 사회기반시설 연구센터(Smart Infra-StrucSISTeC)는 한국과학재단에서 지정한 우수연구센터(ERC)로 2002년 7월에 한국과학기술원(KAIST) 내에 설립된 바 있다. 우리 연구센터에서 스마트 재료, 스마트 센서, 이상상태 모니터링 · 평가, 구조제어, 스마트 보수보강, 스마트 구조계의 해석 · 설계 및 스마트 지반공학기술 등에 관한 연구를 수행하고 있으며, 국내외 여러 기관과의 협력체계를 갖춰 균형 잡힌 연구를 수행하고자 하고 있다. 이러한 연구는 학제적 연구와 국제협력연구를 필요로 하고 있는데, 이러한 접근 방식은 NSF의 접근 방식과 일치하고 있다. NSF에서는 스마트 센서의 개발을 위하여 학제 간의 연구를 적극 권장하고 있으며, 또한 개별 연구실 단위의 협동연구가 아닌 센터 간의 국제공동연구를 위한 지원도 아끼고 있지 않다. 이는 곧 스마트 센서기술의 성공적인 개발을 위해서는 토목, 기계뿐만 아니라 전자, 재료, 물리 등 기반이 될 수 있는 분야와의 공동연구, 그리고 국제적인 규모의 공동연구가 필수적이라는 인식 때문이다. 현재 한국에서는 우리 연구센터가 이러한 국제협력활동을 위한 네트워크에서 초대의장을 배출하는 등 적극적인 활동을 펼치고 있는 것은 매우 고무적인 일이라 할 수 있을 것이다〈그림 9〉.

| 그림 9 | 스마트사회기반시설연구센터의 국제협력체계

04 스마트 구조기술에 대한 교육과정

현재 국내 건설 분야에서는 이러한 스마트 구조기술과 관련된 정규 교과목이 없는 상태이며, 다만 필자가 소속된 한국과학기술원 건설 및 환경공학과에서는 최근 연구결과를 정리하여 2005년도 가을학기부터 스마트구조기술이라는 정규 교과목을 개설할 계획에 있다. 국내와는 달리 미국 등지에서는 스마트 구조기술에 관한 강좌가 개설되어 있는 대학이 있으며, 여기서는 미국 Lehigh 대학에서 개설되고 있는 "스마트 구조시스템(smart structural systems)"의 주요 내용을 다음과 같이 소개하였다.

(1) 기본 제어이론 및 수동, 반능동, 능동제어
(2) 스마트 재료 : 형상기억합금, 압전재료, 자기유변유체, 자기치유재료
(3) 스마트 센서 : 광섬유센서, 무선센서, MEMS 센서
(4) 자료취득 및 신호처리기술, 센서 네트워크
(5) 구조건전성 감시 이론 및 적용
(6) 스마트 구조시스템의 설계, 시스템 통합 및 생애주기 관리

이 교과목은 학부 4학년 과목으로 편성되어 있으며, 이 과목을 이수하기 위하여 구조해석, 선형대수, 동역학, 구조동역학을 요구하고 있는 반면, 한국과학기술원에서 개설하고자 하는 "스마트구조기술"은 대학원 과목으로 편성되어 있다.

05 맺는말

지난 2002년 정부는 국가경쟁력 강화를 목적으로 모든 과학기술 분야에 대하여 국가기술지도(National Technology Road Map, NTRM)를 작성한 바 있으며, 당시 건설 분야에서는 "인간친화형 고기능 건설기술" 개발을 핵심기술의 하나로 발표한 바 있다. 이 분야는 또 다시 통합설계기술, 스마트 모니터링 및 평가기술, 심볼릭 빌딩 시스템으로 분류되었으며, 이 칼럼에서 강조한 스마트 구조기술이 2005년부터 2011년까지 구현하는 것을 목표로 하고 있다. 물론 이 기술지도가 구체적으로 요소기술을 제시하고 있지는 않지만 큰 목표로 구조물의 스마트화를 지향하고 있음을 알 수 있다. 현재까지는 그 실용화 가능성이 높지 않으나 앞으로 10년 이내에 스마트 구조기술은 분명 현재의 건설 기술 수준을 한 단계 업그레이드 하는데 매우 중요한 기술로 다루어질 것이다. 그리고 그러한 기술 혁신을 통하여 국내 건설 분야의 국제적 경쟁력을 확보하게 될 것으로 기대할 수 있다.

◎ 참고문헌

1. Akhras, G. (2000), Smart materials and smart systems for the future, Canadian Military Journal.
2. Culshaw, B. (1996), Smart structures and materials, Artech House, Inc.
3. Liu, S.C. (2004), Sensor Technology for Civil and Mechanical Systems, Keynote Lecture in US-Korea Joint Symposium/Workshop, Seoul, 2004.
4. Liu, S.C. and Tomizuka, M. (2003) Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring.
5. Special Forum on Smart Sensors (2002), SPIE Symposium on Smart Materials and Systems.
6. Zhang, Y.F. (2004), Smart Structural Systems, Lecture Note, Lehigh University.