

Smart Material 개념을 이용한 지반구조물 정보화

Total Instrumentations for Geotechnical Structures Using Smart Materials

송 정 략¹⁾, Chung R. Song, 전 기 찬²⁾, Gy-Chan Jun

¹⁾ 삼보기술단 이사, Director, Sambo Engineering Co. Ltd., Seoul, Korea,
e-mail:sambo166@kornet.net

²⁾ 삼보기술단 대리, Lead Engineer, Sambo Engineering Co. Ltd., Seoul, Korea,

요지

기계, 전기, 전자, 재료, 전산공학 등은 근래에 이르러 혁명적인 발전을 거듭하고 있으며, 이에 따라 새로운 개념의 기기들이 등장하고, 토목계측분야에서도 새로운 방식 및 기기들이 등장하고 있다. 특히 최근의 Smart Material, MEM (Micro-Electro-Machine), Nano- Technology 및 통신기술들은 과거의 공상과학소설에서나 가능하였던 내용들을 실제로 가능케 하였으며, 일부 기술들은 경제성까지 갖춰 상용화되고 있다. 본 고에서는 지반공학적 관점에서 본 이러한 신기술과, 이를 이용한 지반구조물의 정보화에 대하여 살펴보았다.

Abstract

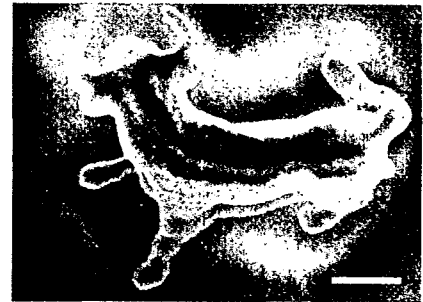
개요

인류의 역사에 있어 문명발전의 속도에 현저한 변화를 준 사건은 산업혁명이라고 말한다. 산업혁명 이전 인류의 문명은 그야말로 청동기 시대, 철기 시대 정도로 대별될 수 있을 정도로 삶의 질에 있어 큰 변화가 없었기 때문에 산업혁명은 인류문명에 있어 큰 획을 긋는다고 할 수 있다. 산업혁명 이후 가속된 인류문명의 발전은 오늘날의 컴퓨터 시대로 넘어오면서, 그 발전의 속도를 가히 초고속으로 바꾸었다. 어떤 목자님은 오늘날 보통 사람들의 생활 수준은 옛날 로마제국 전성기의 로마황제보다 더 나은 상태라는 말을 하기도 하고, 또 어떤 사람은 오늘날 군용 헬기 한대 정도의 무장수준이면 삼국시대에서 하루만에 삼국을 통일할 수도 있었다는 말도 한다. 이러한 비교는 대개 1000여년 전과 현재를 비교한 것이다. 그런데 최근의 기술발전은 1000여년의 세월을 비교할 필요도 없이 몇 년의 시간속에서도 그러한 현저한 기술차이를 발생시키고 있다. 90년대 초까지만 해도 우리나라의 거의 모든 회사에서는 전산실이 있었고, 전산실에서는 커다란 컴퓨터와 저장장치, 프린터 등이 있었다. 그러나 오늘날의 개인용 컴퓨터들은 대부분 과거 전산실에 있던 커다란 컴퓨터들의 능력을 넘어선다. 10년이 채 되지 않아 일어난 일이다. 분야에 따라 기술발달을 크게 실감하지 못하는 분야도 있지만, 대개의 경우 우리는 컴퓨터기술의 발달을 피부로 느끼고 있다.

최근에는 컴퓨터 기술의 발달이외에 기계, 전기, 전자, 재료분야 등에 있어서도 가히 혁신적인 발달을 거듭하고 있다. 쌀알보다 작은 센서 및 모터, 50,000 rpm 이상에서도 견디는 베어링, 전류를 이용한 기존 신호전달 체계의 한계를 뛰어 넘는 광학섬유 신호전달 체계, 시속 60km 정도로 빛의 속도를 조절하는 기술, 같은 무게의 철에 비해 수십배의 강도를 갖는 섬유 등의 작은 혁명들이 일어나고 있다.

쌀알보다 작은 센서 및 모터는 과거 소설속에서나 존재하던 몸속의 질병을 치료하는 캡슐의 핵심기술이며, 50,000 rpm 이상에도 견디는 베어링은 이러한 초고속 기계를 위한 부품으로 사용되며, 광학섬유 및 빛의 속도를 제어하는 기술은 새로운 신호전달 매체 및 미래컴퓨터의 핵심 기술이며, 철의 수십배의 강도를 갖는 재료는 고성능 군용항공기 및 우주산업의 재료이다. 이러한 첨단 기계장치 및 재료들은 대개 군사적 또는 전략적 목적으로 개발되지만 일단 성공적으로 개발되면 지금까지 인류의 문명이 진보되어 왔던 형태 및 속도를 뛰어 넘게 한다. 이러한 기술 하나 하나가 작은 산업혁명이라고 할 수도 있다. 질병을 치료하기 위한 소형기계(Tunnel Boring Machine과 유사)가 개발되어서 혈관속의 콜레스테롤 등의 노폐물을 청소할 수 있다고 하면 혁명이라 아니할 수 없을 것이다. 현재 이러한 기계가 개발되었다는 보고는 없지만 여기에 필요한 기술은 속속 개발되고 있으며, 실제로 세계 유수의 대학들은 의료, 기계, 전자, 토목 등의 여러 분야가 합동으로 연구에 임하고 있다.

일례로, 최근 일본 오사카 대학 물리학 연구팀은 레이저 광선을 이용해 머리카락 10분의 1 굵기의 초소형 황소를 만들어 냈다.<그림 1> 이는 인간이 만들어낸 황소상중 가장 작은 것으로 알려졌으며, 이 방법을 응용해 초소형 의료기계를 만들면 인체내 동맥과 정맥을 고속도로처럼 누비며 치료약을 운반할 수 있을 것으로 평가되고 있다.



(사진 오른쪽 아래 흰막대기의 크기 2마크론)

그림 1, 초소형 황소상

이러한 첨단기술들은 Smart material, Nano Technology 및 MEM 등으로 대표되며 이들 기술과 별로 상관이 없어 보이는 토목공학 또는 지반공학분야에서도 최근 현장계측 또는 정보화 system 분야를 중심으로 연구가 활발히 진행중에 있다. 이제 그 내용들을 보다 자세히 살펴보기로 하자.

Smart Material

Smart Material은 글자 그대로 “똑똑한 재료”이다. 얼마나 똑똑한가 하면 Smart Material로 만들어진 터널 라이닝의 경우, 일부에 일정 수준 이상의 집중응력이 작용하면 그 지역 라이닝재료가 적절히 긴장 또는 이완하여 집중응력을 해소하며, 균열이 발생하면 균열부위에 균열치료약을 분비하여 균열 자체를 치료할 수 있을 정도로 똑똑하다. 즉 지능을 가진 생명체와 같이 똑똑하다고 하여 Smart Material이라고 부른다. 이러한 재료를 가지고 만들어진 구조체 또는 이와 유사한 기능을 하도록 만들어진 구조체는 Smart Structure라고 부르기도 한다. 그러면 이제 이와 같은 재료가 정말로 가능한지, 그리고 정보화 System과 어떤 관계가 있는지 살펴보자.

전술한 터널 라이닝에는 형상기억합금을 사용한 철근이 들어가고, 콘크리트에는 모래알맹이 정도 크기의 응력측정 센서(센서는 측정치의 무선발신장치 포함), 그리고 모래알맹이 정도의 에팍시입자(무선신호 수신장치 및 에팍시를 터뜨리는 액추에이터 포함)가 골재와 함께 배합되어 있다. 응력측정 센서에서 과도한 응력이 측정되면 이는 형상기억합금의 액추에이터에 전달되고, 이 액추에이터는 형상기억합금의 온도를 변화시키고 형상기억합금은 변형을 유발하여 집중응력을 해소한다. 균열이 발생할 경우 또한 콘크리트에 포함된 센서에 의하여 균열발생 사실이 보고되고, 이러한 사항은 에팍시입자에 전달된다. 에팍시입자에 포함된 액추에이터는 에팍시입자를 터뜨려 에팍시가 균열을 봉합할 수 있도록 한다. Smart Material의 도식적 개념도는 <그림 2>에 나타난 바와 같다. <그림 2>에서 Sensor들은 재료

또는 구조물의 상태를 감지하고, 감지한 정보는 Control System에서 분석/판단되며, 그 결과에 따라 Actuator에서 필요한 조치가 내려진다. 이러한 과정은 지속적으로 반복된다. 이는 마치 구조물 자체가 하나의 두뇌계(control system)와 신경계(sensor) 및 근육계(actuator)를 형성하도록 하여 예상치 못한 외부의 환경변화에도 안정성을 유지할 수 있도록 사태를 파악하고 거기에 필요한 조치를 내리는 것과 같다.

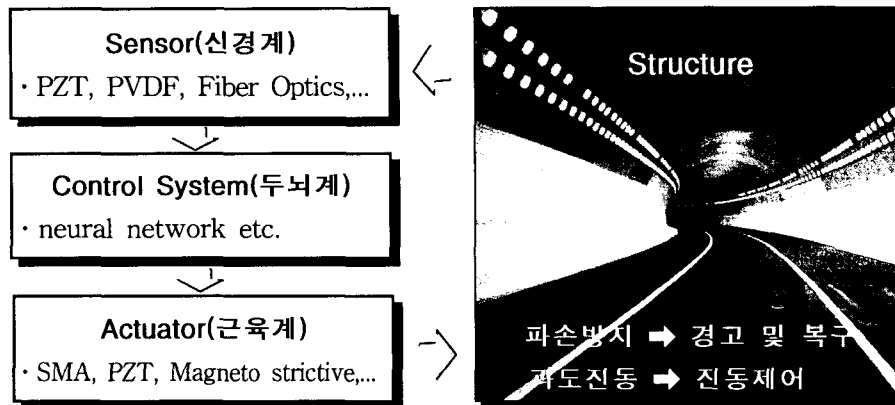


그림 2, Smart Material의 개념도

이러한 “똑똑한 재료”는 미래의 이야기 같지만 실제로 연구되고 있는 분야이다. 일본의 가지마 건설은 이미 10여년 이상 Smart Material 또는 Smart Structure를 연구하여 왔다. 지반공학 분야는 아니나 우리생활에서 이와 같은 Smart Structure가 널리 활용되고 있는 분야가 있는데 바로 로봇산업 및 자동차분야가 그것이다. 현재 상업화가 되어 있는 로봇중 가정청소용 로봇이 있는데 이 경우 사물 식별용 센서를 통하여 받아들여진 상황은 CPU에서 분석되어 필요한 경우 돌아가거나 계속 전진하는 등 조치가 내려지는데 이때 실제로 필요한 조치를 취하는 것이 Actuator이다. 자동차의 전자식 충격완충기는 자동차 바퀴 앞부분에 지면의 요철을 감지하는 센서가 설치되어 있고, 이 센서의 측정결과에 따라 충격완충기의 강성도 및 이완정도를 사전에 조절하여 충격완충 효과가 극대화되도록 하고 있다. 그리고, Power Steering도 Actuator를 이용한 것이다. 즉 운전자가 자동차의 핸들을 돌리려고 힘을 가하면 속칭 Power Steering이라는 부분에서 그 힘을 증폭시켜 작은 힘으로 쉽게 자동차의 핸들을 돌릴 수 있다 (구형 소형차의 수동식 핸들과 신형 대형차의 Power Steering의 핸들을 조작하는 데 필요한 힘을 비교해보라.). 자동차의 Power Break 도 마찬가지이다.

Fortner(2000)는 Smart Bolt라는 것을 소개하였다. Smart Bolt는 TRIP(Transformation Induced Plasticity) steel이란 재료와 부가의 장치를 이용하여 Bolt 스스로가 자신이 받았던 응력을 기억하고 있어, 외부에서 측정기가 Bolt에 닿기만 하면 Bolt의 응력을 알아낼 수 있는 장치이다. Smart Bolt는 본래 미국 공군에서 군용항공기의 날개를 동체에 부착하기 위하여 사용하는 Bolt들이 피로하중에 의하여 손상되는 것을 확인하여 교체하는 것을 쉽게 하기 위하여 개발되었다. 즉 C-130 수송기의 날개부착부위의 볼트들을 정기적으로 점검하여야 하는데 통상적인 방법으로는 볼트를 하나씩 빼내어 점검하여야 하므로 시간과 노력이 많이 드는 과정이었다. 그러나 Smart Bolt를 사용할시 빼낼 필요가 없어 전 과정이 15분

정도 밖에 소요되지 않는다고 보고하였다. Smart Bolt는 미국 공군비행기를 위하여 개발되었지만, 강교에 적용하면 어떻게 될까? 트러스교의 리벳이나 볼트를 Smart Bolt로 대체하면 강교량의 유지관리 및 안전도 확보가 혁신적으로 쉬워지지 않을까?

MEM (Micro-Electro-Machine)

MEM은 최근 하나의 용어로, 그리고 하나의 분야로 생성된 매우 새로운 분야이다. 그 이름에서도 알 수 있듯이 기계공학과 전기/전자 공학의 합동 분야이다. 경우에 따라 Micro의 특성 때문에 속칭 Nano-Technology 분야와도 밀접하게 연관된다. Nano-Technology는 재료의 원자 및 분자 구조와 관계되므로 물리/화학 분야와 관계된다. 재료의 원자 및 분자구조는 재료의 특성을 좌우하므로 재료공학과도 연계된다. 재료공학은 토목공학의 한 분야이기도 하므로 MEM은 토목공학과도 연관된다. 즉 MEM은 그 발생배경이 어떻었던 이제는 토목공학에서도 관여하고 있고, 장차에는 보다 적극적으로 관여하여야 할 것이다.

현재 가장 실질적으로 토목공학에 활용되고 있는 MEM은 소형센서 및 Actuator분야이다. 물론 MEM을 이용한 소형센서들이 토목공학 또는 지반공학을 염두에 두고 개발된 것은 아니나, 우리분야에서 MEM의 적용처를 찾고 가치창조를 하는 것은 우리의 몫이다. 소형센서 및 Actuator를 이용하여 Smart Structure를 개발하고 활용하는 것은 인류의 문명을 다음 단계로 발전시킬 것이기 때문이다.

MEM을 이용한 소형센서의 예는 <그림 3>에 나타난 바와 같은데 근래에는 대량생산의 영향으로 비용이 매우 저렴해지고 지고 있다. 특히 최근의 microprocessor의 발달로 센서와 microprocessor를 한 몸체로 제작하여 사용이 용이한 제품이라는 특성을 갖는다. 그림 3.a는 크기가 약 $100\mu\text{m}$ (0.1mm)인 가속감지장치를 보여주고 있다. 그림 3.b는 앞의 가속감지장치를 micro processor 칩에 내장한 형태를 보여주고 있는데 이 상태에서도 너무나 작아 돋보기를 통해서 그 모양을 확인할 수 있다. 이러한 소형 센서들은 콘크리트와 배합하여 구조물로 제작하면 바로 Smart Structure의 근간을 이루게 된다.

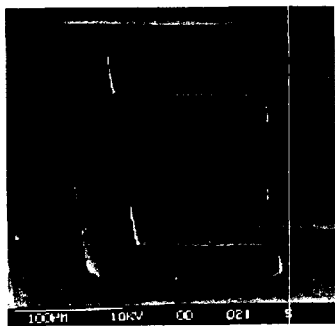


그림 3.a, 초소형 가속감지기의 감지장치
(Analogue Devices, 2001)

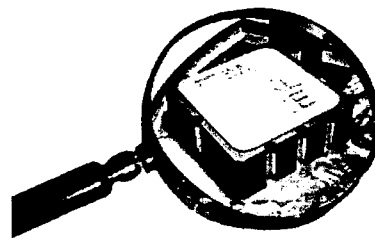


그림 3.b, 초소형 가속감지장치를 내장한
Microprocessor (Analogue Devices, 2001)

Nano-Technology

Nano의 본래 의미는 10^{-9} 이다. Nano-Technology라 함은 10^{-9} m 정도의 작은 단위를 다루는 극소형 기술이라는 뜻이다. 근래에는 꼭 10^{-9} m 정도의 작은 단위를 다루지 않더라도 극소형 기술들을 총괄하여 Nano-Technology라고 한다. 처음 Nano-Technology의 발단은 물질의 특성을 규명할 때 물질의 원자

또는 분자상태의 특성이 궁극적 물질의 특성을 좌우한다고 하여, 원자 또는 분자의 크기가 10^{-9}m 정도라는 데에서 유래되었다. 근래의 Nano-Technology는 주로 신재료의 개발에 사용되고 있는데, 그 중의 하나를 소개하면 다음과 같다. 물리학에서는 물질이 녹는 것은 그 물질의 분자구조가 15도 이상 변형된 상태를 말한다. 따라서 열에 의하여 물질을 녹히는 것은 열이라는 수단을 이용하여 물질의 분자배열을 15도 이상 변형하는 것을 말한다. 그러면 열 이외의 다른 수단을 이용하여 물질의 분자구조를 15도 이상 변형시키면 어떻게 되는가? 그 결과는 역시 그 물질이 녹는다는 것이다. 물리학도들의 장난섞인 이야기를 소개하면 “나무의 분자배열을 15도 이상 변화시키면 나무도 녹힐 수 있다.”는 것이다. 문제는 아직까지 나무의 분자배열을 15도 이상 변화시키는 방법이 개발되지 않았다는 것이다. 그러나 언젠가 그러한 방법이 개발될 것이라는 것이다. 나무를 녹힐 수 있다면 우선 현재 사용할 수도 없는 잡목들도 사용될 수 있을 것이며, 진짜 나무같은 합판이 등장할 것이고, 그 이외의 용도도 무궁무진할 것이다. 유사한 기술이 Smart Material에 적용되고 있는데 지금까지 개발된 Smart Material은 크게 세가지이다. 첫째 형상기억합금(SMA, Shape Memory Alloys) 계통, 둘째 MR(MagnetoRheological) Fluid (또는 Magneto-Strictive Iron) 이라 불리는 액체/고체 상태를 왔다갔다하는 재료, 셋째 Piezoelectric 재료이다.

형상기억합금은 온도에 의하여 형상이 변하는 합금으로서 그 원리는 <그림 4>에 나타난 바와 같이 특정한 분자구조의 특성을 이용한 것이다. 즉 온도에 따라 입자의 배열이 달라져서 형상이 달라지는 성질을 이용한다.

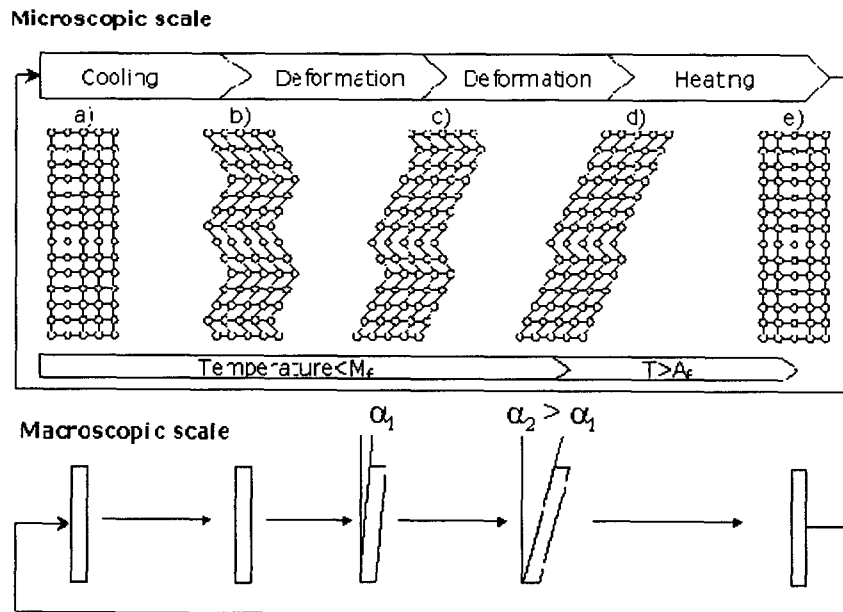


그림 4, 형상기억합금의 원리(Intellimat, 2001)

MR Fluid는 자력에 의하여 상태가 변화하는 재료, 즉 자력이 작용하면 고체가 되지만, 자력이 없으면 용융상태로서 액체가 되는 것이다. 따라서 MR은 <그림 5>와 같이 내진구조물 등에 이용되어 구조물의 진동에 따라 선택적으로 액체상태와 고체상태를 가지게 되어 지진 등이 발생하여 구조물이 흔들릴 때 흔들림을 상쇄시켜주는 방향으로 상태를 바꾸어 진동에 대하여도 안전한 구조물을 만들어준다.

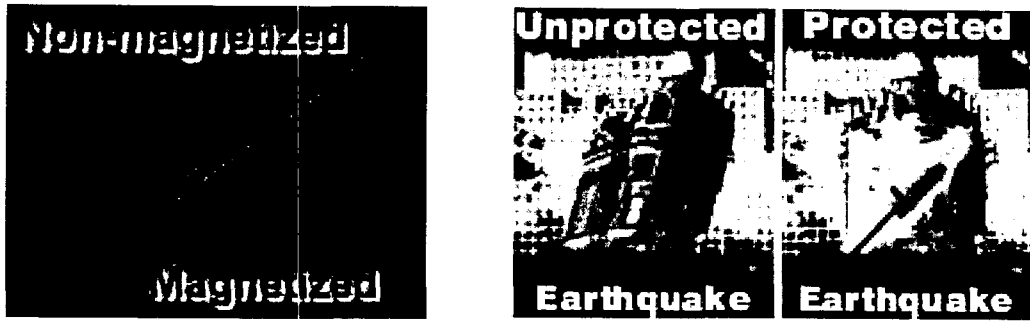


그림 5, MR 재료의 원리 및 이를 이용한 내진 구조물 (Martial Brain, 2001)

Piezoelectric 재료는 압력을 받았을 때 전기적 신호가 발생되거나, 전기장 속에서 변형되는 특성이 있어, 주로 Smart Material의 센서나 Actuator 로 사용된다. 주로 많이 사용되는 Piezoelectric 재료로는 PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 및 PZT(Lead Zirconate Titanate)등이 있다. <그림 6>은 이러한 Piezoelectric 재료를 Smart Material 에 사용하는 원리를 보여주고 있다.

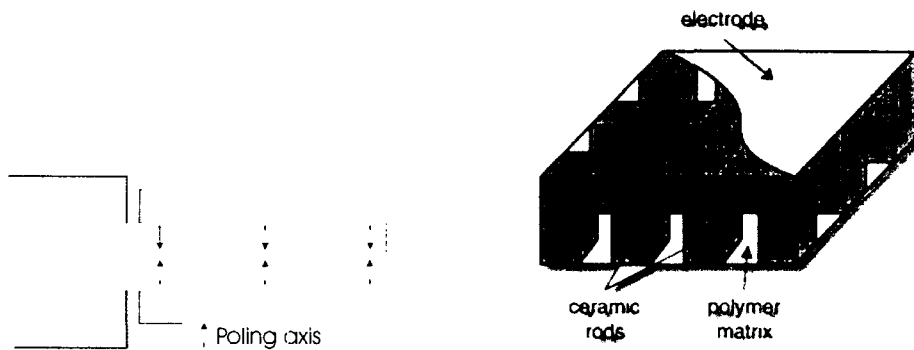


그림 6, Piezoelectric 재료의 원리(Sensortech, 2001)

Nano-Techonlogy는 재료특성을 평가시 재료의 원자 및 분자구조부터 시작한다. 그러나 실제 원자 또는 분자의 기동특성을 실측하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 Nano-Technology에서도 실질적인 측정은 가능한한 최소단계에서의 측정을 수행한다. 현재 가능한 최소단위의 측정은 모래알맹이 수준이다. 이를 위하여는 MEM에 기반을 둔 초소형 센서들을 사용하는데 이로서 다시 Nano-Technology는 MEM과 연결이 되어있다.

Smart Material, MEM, Nano-Technology와 지반구조물의 정보화

전술한 바와 같이 Smart Material, MEM, Nano-Technology등은 상호간 유기적으로 연결되어 있으며 Smart Structure를 구성하는데 필요한 핵심기술임을 알 수 있다. 이러한 기술들은 새로운 재료와 새로운 계측개념에 의하여 지반공학분야에서 계측 또는 정보화 system이 나아가야 할 방향을 제시해 주고 있다. 지금까지의 계측은 센서를 구조체에 설치하고, 구조체의 상태변화를 센서로 파악하고 이를 분석하는 것이다. Smart Material의 개념은 구조체에 설치 또는 내장된 센서로부터 구조체의 상태변화를 파악하고, 문제 발생시 Actuator가 대책까지 조치하는 것이다. 즉 Smart Material 개념은 상태파악이란 통상적 계측개념에 대책시행이라는 개념이 추가된 것으로서 보다 발전된 정보화 System이다. 여기서 발전된 계측개념이라고 하지 않고 발전된 정보화 System이라고 한 것은 계측이라함은 일반적으로 상태파악 수준의 개념이기 때문이다. 이러한 발전은 과거에는 "Sensing & Control"이라는 용어로 사용되어 왔으나 근래 로봇산업의 발전과 Smart Material의 개발과 함께 "Sensing & Actuation"이란 용어로 사용되고 있다. 그러면 실제로 지반구조물에 위와 같은 첨단 System이 어떻게 적용되는지 사례를 들어서 살펴보자.

<그림 7>은 일본이나 유럽에 비하여 지하공간 개발기술이 뒤졌다고 생각한 미국사람들이 이를 만회하기 위하여 총체적 지하공간 개발기술 우위 확보를 위하여 미국의 과학재단(NSF, National Science Foundation)에 제안된 내용의 일부이다. 그림 6에서 보면 지하공간 시공중에는 전면의 지반상태를 GPR 등 비파괴 시험과 CPT등 관입시험결과를 최신 이론 및 컴퓨터 Visualization 기술에 의하여 분석하고 지반상태를 파악하며, TBM(Tunnel Boring Machine)이 지반을 굴착한다. 굴착시의 Data 또한 기록되고 분석된다. 지보재로는 Smart Structure 및 무선 디지털 센서(Fiber Optic Sensor 포함)를 내재한 지보재를 사용하고 이들 구조물에서는 자가진단 결과를 본부의 중앙컴퓨터에 지속적으로 보내주고, 자가 보호 조치를 취하거나 또는 필요시 본부에서 보수반이 투입되어 보수를 하는 개념이다.

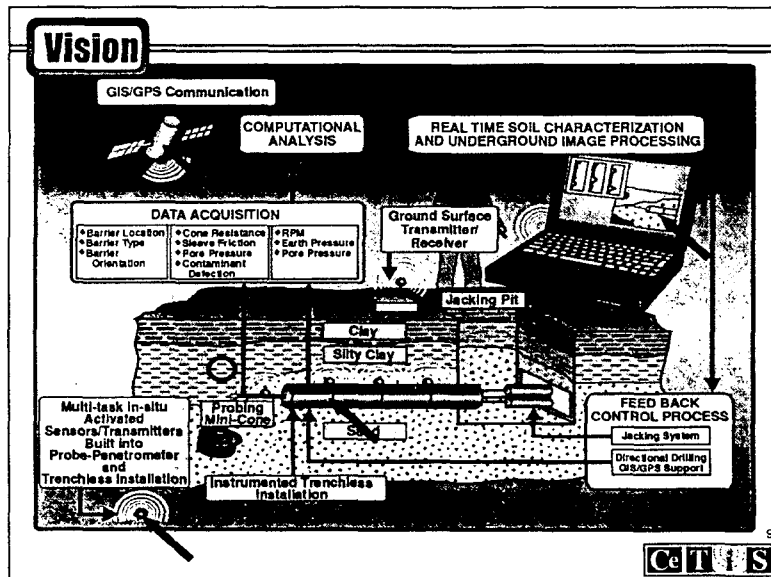


그림 7.a, 지하구조물의 총체적 시공 및 유지관리 (Sterling and Tumay, 1999)

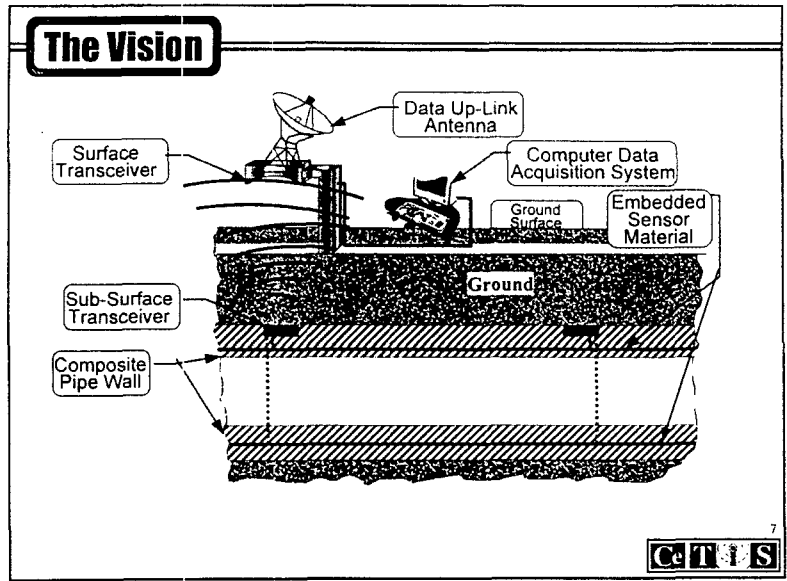


그림 7.b, 지하구조물의 총체적 시공 및 유지관리 (Sterling and Tumay, 1999)

물론 보수반의 작업내용 또한 본부의 컴퓨터에 직접입력되어 사후관리에 활용되도록 하고 있다. 보수반은 <그림 8>과 같은 “착용하는 컴퓨터 (Wearable Computer)”라고 하는 컴퓨터 및 이와 연계된 작업도구로 구성된 장비를 착용하고 있어, 우주과학영화에서 외계에 투입된 병사와 본부가 서로 화상을 통해 교신하면서 전투를 함께 수행하는 것과 매우 흡사하다.



그림 8, Wearable Computer를 착용한 기술자(Wearable Central, 2001)

즉 보수반의 기술자는 우주과학영화에서 병사가 총 대신 지하공간 구조물 수리도구를 들고 있는 것과 같은 개념이다. 그림 8과 같은 Wearable Computer를 착용한 기술자는 미국 Pennsylvania 주의 교량 점검원들이 실제로 사용하는 장비이다.

상기 프로젝트는 아직도 심사중이지만, Smart Structure, MEM, Nano-Technology들이 지반구

조물 정보화 System을 위하여 얼마나 가까이 와 있는가 하는 것을 보여주고 있다. 물론 상기 프로젝트를 위하여 지반공학, 구조공학, 물리, 전기, 전자, 기계, 컴퓨터, 화학등 거의 모든 공학분야가 협력하고, 학계(LSU, Purdue 등), 연구기관(USGS, WES 등) 및 산업계(Fugro, Parsons Brinckerhoff 등)가 협력하고, 여러나라가(미국, 영국, 네덜란드 등) 협력하여 총 69개의 단체가 Consortium을 형성하고 있으며, 총 예상 연구비는 약 3000만불(약 400억원)이다.

Smart Material을 위시한 첨단기술의 적용은 비단 구조물 정보화에만 머무르는 것이 아니라 지반공학 관련 엔지니어의 창의와 노력으로 시공기술분야(예를들어, 스마트굴착기, 스마트 콘크리트를 이용한 그라우팅 등)에도 얼마든지 확장시킬 수 있을 것이다.

이상 보다 발전된 개념의 지반구조물 정보화 system에 대하여 토론하였다. 전술한 내용중에는 만화같은 내용도 있지만 이러한 내용들을 이미 연구단계에서 우리의 실생활에 다가와 있다. 공학도는 이러한 새로운 기술들을 과감히 실생활에 적용하여야 한다.

통상적으로 지반공학은 토목공학의 한 분야이다. 그러나 지반공학이 토목공학만의 한 분야가 되어서는 안된다. 지반공학은 재료공학의 한 분야일 수 있고, 기계공학의 한 분야일 수도 있다. 거꾸로 재료공학이 지반공학의 한 분야일 수 있고, 기계공학도 지반공학의 한 분야일 수도 있다. 이러한 개념은 필자만이 주장하는 것이 아니다. 최근 자연과학분야에서는 Inter-disciplinary 또는 Multi-disciplinary라는 용어가 있다. 우리말로 “사이 분야”, “다분야”라는 뜻이다. 최근 순수한 어느 분야보다는 Inter-disciplinary 분야에 보다 많은 연구투자가 이루어지고 있는데 이는 이러한 Inter-disciplinary 분야의 연구들이 보다 큰 가치창조를 가져오기 때문일 것이다.

지반공학과 센서공학의 사이 또는 지반 및 센서공학 등이 있다면 이는 Inter-disciplinary 또는 Multi-disciplinary 영역에 속하는 것이며, 오늘날 현장계측이 창출하는 가치는 Inter-disciplinary 개념이 창조해내는 가치이다.

결언 및 제언

기존개념의 지반공학 계측자체에도 발전은 있었다. 계측방식은 디지털 무선방식으로 바뀌고 있으며, 센서는 전통적인 센서에 광섬유센서들이 추가되는 추세이다. 광섬유센서는 센서의 개당 가격이 상대적으로 고가이나, 연속적인 측정이 필요한 구간에서는 기존의 재래식 센서에 비하여 오히려 경제적이기도 하다.

이러한 센서 및 계측방식의 발전뿐만 아니라, 오늘날 타분야에서 진행되고 있는 Smart Material, MEM, Nano-Technology 등의 괄목할 만한 기술발전은 공학분야에서, 특히 지반공학분야에서 기존의 재료 및 정보화 system을 통체로 새로운 방향으로 밀어가고 있다. 이에 따라 시공 및 유지관리가 전혀새로운 차원으로 발전하고 있다. 즉 Sensing 만 하는 기존의 정보화 system 개념에서 Sensing & Actuation 개념으로 발전하여 많은 새로운 분야들을 개척하고 있다.

참고문헌

Fortner, B. (2000), "On the Cutting Edge," Civil Engineering, ASCE, Vol.70, No.7, pp.44-47

Intellimat (2001), "Thermal Fields," http://www.intellimat.com/materials/thermal/thermal_fields.html

Micromega Dynamics (2000), "Smart Materials and Structures," <http://www.micromega-dynamics.com/smart.htm>

Martial Brain (2001), "How Smart Structures Will Work," <http://www.howstuffworks.com/smart-structure.htm>

Wearable Central (2001), <http://wearables.blu.org/showcase/10.html>

Analog Devices (2001), "Products and Data Sheets," <http://analog.com>

Sterling, R.L. and Tumay, M.T. (1999), "CeTis (Center for Trenchless Infrastructure Systems," Proposal to the National Science Foundation Division of Engineering Education and Centers

Adamson A. (1998), "Science Today : Magnetism to save buildings in earthquakes," Discovery Channel Canada, September 14, <http://www.exn.ca/Templates/Story.cfm?ID=1998091462>

Sensortech (2001), "Materials," <http://www.sensortech.ca>