

스마트 재료 및 구조를 이용한 손상관리기술의 개발

Development of Damage Management Technology Using Smart Materials and Structures



김 화 중*



김 이 성**

*경북대학교 건축학부 교수
**경북대학교 박사과정

1. 서 론

1.1 연구동향

스마트 재료에 대한 일반적인 인식은 스마트재료가 신 재료로 알려져 있으며, 또한 이를 이용한 구조물은 아주 최근의 것으로 인식되고 있다. 그러나 이러한 재료 및 구조는 이전부터 친숙하게 재료 실험 및 구조물의 손상을 감지하거나 유지하는 방법으로 사용되어져 왔으며, 대표적인 재료는 압전소자(PZT)와 변형게이지(Strain Gauge)이다. 압전소자는 로드셀 내부에 정치되어 유압계의 물리적 양을 로드셀 피복재인 강재의 변형에 의해 전기적 신호로 나타내며, 이러한 전기적 신호에 하중계수를 곱하여 최종 하중상태를 감지한다. 또한, 변형게이지는 로드셀 및 LVDT 등의 내부에 사용되는 센서로 압축재 및 인장재의 변형을 측정하는데 사용되며, 변형에 의해 발생된 저항값에 게이지 계수를 곱하여 최종 변위량을 환산한다. 따라서 이러한 재료내부에 사용되던 센서를 부재 내부나 외부에 부착하여 구조물의 손상이 발생하면 이를 모니터링할 수 있는 기술이 스마트 재료 및 구조에서 주요한 점이라 할 것이다.

일반적인 스마트 재료의 의미를 살펴보면 재료 및 구조가 환경에 따라 움직이며 적응하는 생명체의 특징을 지닌다는 것이다. 스마트 재료는 기존의 재료들이 단지 주어

환경변화를 수동적으로 견딘다는 한계를 넘어서 생물체처럼 환경에 반응한다는 점에서, 앞으로 급격한 환경변화에 따른 사용자 및 환경적 요구를 만족시킬 수 있는 특성을 가질 것으로 기대되고 있다. 스마트 재료는 크게 수동형 스마트 재료와 능동형 스마트 재료로 나누어 볼 수 있다.

수동형 스마트 재료(Passively Smart Materials)는 외부 환경이 달라짐에 따라 적당한 방법으로 반응하는 재료를 의미하며, 자기가 갖는 특성을 향상시키기 위해 외부장(External Force), 또는 피드백 시스템을 갖고 있지 않다는 점에서 능동형 스마트 재료(Actively Smart Materials)와 다르다.

능동형 스마트 재료는 센서와 액츄에이터로 구성되며 센서와 함께 능동형 스마트 재료를 구성하는 액츄에이터는 신호에 반응하는 특성을 갖추고 있으며, 피에조 재료(Piezoelectric Materials), 일렉트로스트릭티브 재료(Electrostrictive Materials), 형상기억 합금, 열조절 가능 재료(Thermally Controllable Materials), 전자레올로지 액체(Electrorheological, ER, Fluid)등과 같은 것이 쓰인다.

현재 이에 대한 국내 연구는 자기진단 및 자기치료를 콘크리트 개발, 환경대응 스마트 콘크리트의 개발, 광섬유 FBG 센서 시스템 및 대형 구조물에 대한 응용 기술개발, 광섬유 OTDR 시스템의 기본구성 완성과 이를 위한 스마트 유한 요소개발, 손상해석 개발, 상시모니터링 시스템

개발, 손상평가 시스템 개발, 토목구조물의 진동제어 기술 개발, 유지관리 시스템 개발, 지반 설계 및 안정화 기술 개발 등의 연구가 진행 중에 있다. 국외의 연구 동향으로는 주로 압전소자와 광섬유센서를 이용한 손상예측시스템 개발을 하고 있으며, 미시적으로 전기저항센서를 이용한 연구도 진행 중에 있다. 이러한 연구는 국내나 국외나 연구 진행 중에 있는 상태로 기초적인 발전상황에 있다.

스마트 구조가 도래하게 된 원인은 대표적인 기존해석법으로 실제 구조물을 유한요소 모델로 이상화시키기 위해서는 많은 경험과 지식이 필요하기 때문이다. 따라서 이러한 부분에 대해 신뢰성을 극대화하기 위해 구조물의 부재 내에 센서를 직접 내포함으로써 그 상태를 직접 모니터링하는 기법을 개발하게 되었다. 이러한 적용센서 중 대표적인 것은 압전소자(PZT)와 광섬유센서(FBG)이다. 압전소자는 물리적인 양을 전기적 신호로 전환해주는 역압전체를 말하며, 주로 소자에서 발생하는 임피던스의 변화에 의해 손상을 감지한다. 이러한 압전소자는 주위의 온도나 노이즈에 의해 임피던스 측정시 영향을 받게 된다. 광섬유센서(Fiber Bragg Grating)의 원리는 굴절율이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행될 때, 그 경계면에서 일정한 각도 내의 빛이 모두 반사되는 전반사의 원리에 있으며, 광섬유 코어로 입사된 빛은 굴절율이 높은 코어층과 굴절율이 낮은 클래딩층의 경계면에서 반사되어 광섬유 코어부분을 따라 전파되게 된다. 이러한 광섬유의 주성분은 실리카 유리로 이루어져 있으며, 그 구조는 굴절율이 약간 높도록 게르마늄을 첨가한 광섬유 중심인 코어 부분과 중심을 보호하는 덧겹층인 클래딩 부분으로 구성되어 있다. 이러한 광섬유 센서에 의한 손상 계측시 별도의 피복(Housing)이 필요하며, 부재의 파괴시 할렬(Tear)되는 단점을 가지고 있다.

이러한 센서에 의한 손상감지 이외에 전기저항을 이용한 손상예측 및 감지기술에 대해 본 연구실에서 현재 진행 중인 연구에 대해 간단히 소개하고자 한다.

1.2 유리관을 응용한 자기손상자현 센서의 개발배경

유리는 가상의 온도(Fictive Temperature)로 불리는 고온에서 내부 핵들의 정렬로 결정이 만들어진다. 결정은 실리카(SiO₂)에 Na₂O와 CaO가 첨가되면서 만들어진다. 파이렉스유리(Pyrex-Type)는 B₂O₃가 첨가된 저팽창의 유리이다. 이에 관한 응력강도에서 주어지는 탄성계수는 7.1380×10²tonf/cm²이다. 이를 SI단위로 치환하면 70GPa이며, 열팽창 계수는 3.6400×10⁻² 1/[T]이다. 일반적으로

유리가 강도에 취약한 것으로 알려져 있으나, 급격한 취성 파괴를 줄이거나 중공유리관 내부에 중합체를 내포하여 중합시켜 고분자물질로 만든다면 보강효과가 발생하게 된다. 또한 비교적 선형파괴를 하기 때문에 여러 용도로 적용할 수 있다.

유리 이외의 물질로는 폴리머를 들 수 있다. 폴리머의 역학적 거동을 결정짓는 중요한 요소는 온도와 변형시간이다. 폴리머는 주제와 경화제, 촉진제에 의해 중합되며, 일단 중합된 폴리머는 유리에 비해 연성거동에 가깝다. 반면에 열에 노출되면 특성이 변화하기 때문에 파이렉스유리에 비해 성능이 저하된다. 이러한 폴리머 구조의 한 종류로 시안화 아크릴레이트(Acrylonitrile)가 있다. 시안화 아크릴레이트의 구조는 [(CH₂)_n]이다. 이는 H-C-N단위에 의해 H-C-H단위로 변화하기 때문에 유리관 내부에 보수제로써 적용할 수 있다. 폴리머의 탄성계수는 700MPa로 파이렉스유리에 비해 강도가 떨어진다. 그러나 다양한 모양으로 성형할 수 있다는 이점이 있다.

이러한 재료의 물성은 파괴역학에서 초기의 연구인 세라믹, 유리, 철, 폴리머 등의 역학적인 정보 및 실험결과를 제공하고 있으나 콘크리트 내부의 적용에 대해서는 연구 결과가 미진한 실정이다.

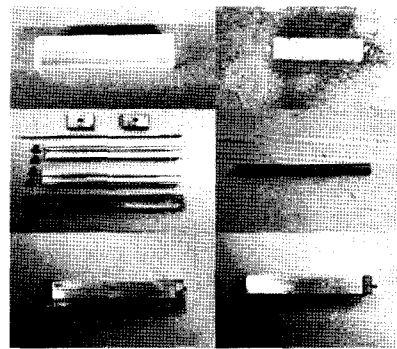


그림 1 유리관 센서와 불포화폴리에스테르 센서 성형몰드 및 제작 센서

중공의 유리관을 콘크리트내부에 내포하면 균열의 진전 및 가속에 의해 파괴되며, 이러한 유리관 내부에 보수제 및 간단회로를 이용하면 센서로 활용할 수 있다. 이를 이용한 기초실험으로 부재의 손상예측을 하기 위하여 불포화 폴리에스테르 센서 하부에 나전선 삽입한 후 성형하여 실험하였다.

1.3 센서적용 기초 실험

전기저항이란 전기의 흐름을 방해하는 부품으로 방해의

크기를 전기저항이라 한다. 이러한 전기선을 유리관과 불포화 폴리에스테르 하부에 완전고정을 하여 하중재하에 의해 내부 동선의 단면축소 및 이에 의한 동선의 신장량에 따라 저항 계측하는 센서를 구상하였다.

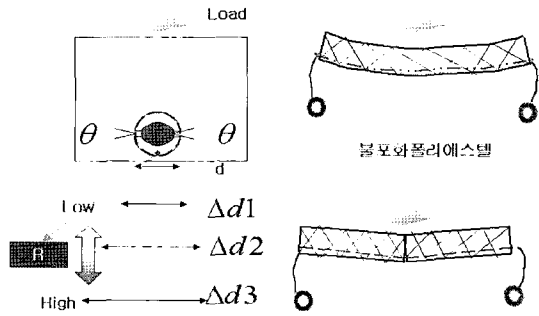


그림 2 전기선의 저항을 응용한 센서의 개요

이러한 기초실험을 바탕으로 고유의 저항값을 지니는 리드저항을 이용하여 손상을 감지는 방법을 구상하였다. 일반적으로 부재의 변위를 측정하는 변형계이지는 부재의 신장에 의해 게이지 내부의 코일선의 단면변화에 의해 저항이 증가한다. 이러한 변형계이지를 이용한 변위계측방법을 응용하기 위해 저항값이 안정된 리드저항을 센서의 재료로 구상하였다. 리드저항은 안정된 저항과 콘크리트 타설시 발생하는 수분에 강한 구조로 되어 있으며 직렬 및 병렬 조합에 의해 저항값을 응용하여 힘시험체 및 판시험체에 삽입하여 실험하였다.

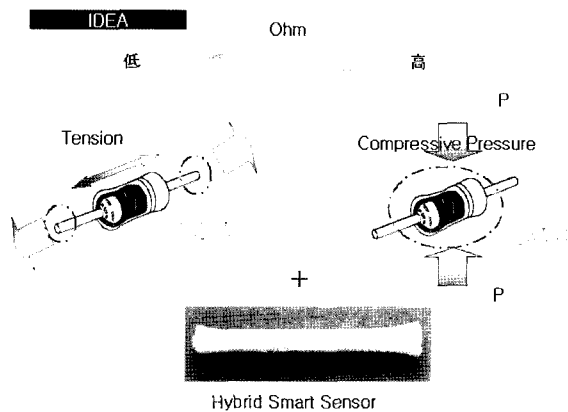


그림 3 리드 저항의 특성

적용실험에서는 콘크리트용 게이지와 동일한 크기의 저항값을 지니는 리드저항을 사용하여 비교실험을 하였으며 변형계이지와 같은 조건을 유도하기 위하여 리드저항의 중앙소자에 압축을 받도록 불포화 폴리에스테르로 피복하여 변위 결과값을 치환하였다.

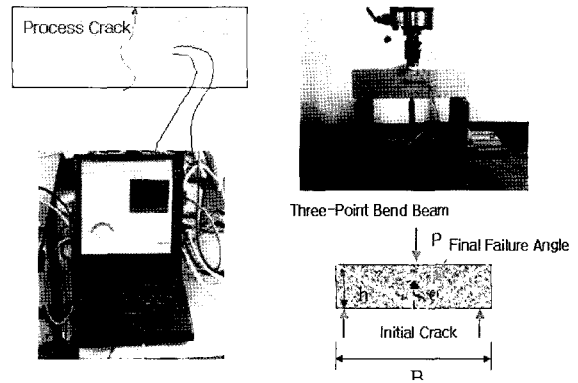


그림 4 Strain Gage와 리드저항과의 비교

시각적으로 부재의 손상을 예측하기 위한 방법으로 발광 다이오드(LED)를 사용하였으며, 유리관 스위치를 이용하여 판시험체의 균열 발생시 발광 다이오드가 점멸하도록 구성하고 유리관 내부의 나전선 간격은 부재의 허용변위로 결정하였다.

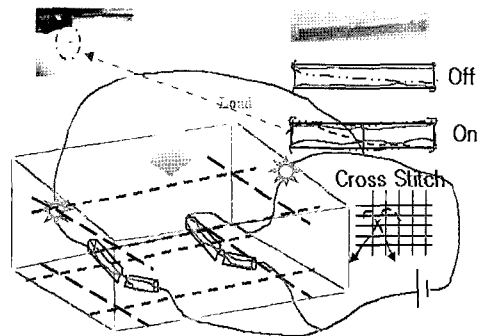


그림 5 크로스 스티치를 응용한 LED 센서의 개요

이를 바탕으로 가력 하중의 물리량에 의해 손상신호를 발신하는 무선 손상계측시스템을 개발하기 위하여 FDMA 방식의 상용 송수신장치를 이용하여 실험하였으며, 철골 부재의 국부좌굴을 감지하기 위하여 부재의 변형에 의해 손상신호를 보내는 시스템을 구상하여 실험하였다.

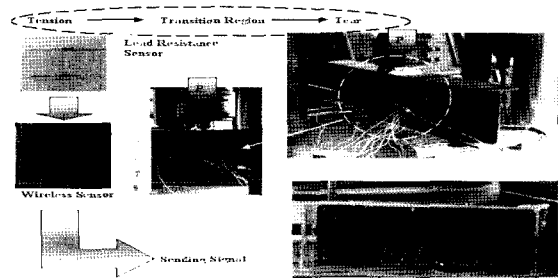


그림 6 저항제어에 의한 손상자현 센서의 개요

표 1 사용재료

시험체 크기	사용 센서 및 재료
10×10×40cm	콘크리트(210kgf/cm ²), 파이렉스 유리관(ø10), D13 이형철근, Read Resistance(120 Ohm), LED(3V), 외부전원(3V)
4×4×16cm	시멘트 페이스트, ø10 파이렉스 유리관, SS41 보강피복(ø0.01), Read Resistance(120 Ohm), Strain Gauge(Gauge Resistance 120.3±0.5 Ohm), 2×2×1cm 성형 불포화 폴리에스텔 피복
4×4×16cm	시멘트 페이스트, 불포화 폴리에스텔, 0.1mm 나전선
36×36×10cm	콘크리트(210kgf/cm ²), 파이렉스 유리관(ø10), D10, 13 이형철근, Read Resistance(120 Ohm), LED(3V), 외부전원(3V)
36×36×10cm	콘크리트(210kgf/cm ²), 파이렉스 유리관(ø10), SS41 보강피복(ø0.01), Read Resistance(120 Ohm), LED(3V), 외부전원(3V)
H208×100×5×8	Read Resistance(8.3k Ohm, 1m Ohm), Type: FDMA, 전원: 12V

1.4 센서의 매입위치의 결정

구조물의 내력부재인 인장재와 압축재에서의 센서삽입 위치를 결정하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 이용하였으며, 응력이 최대가 되는 부분에 센서를 삽입하였다.

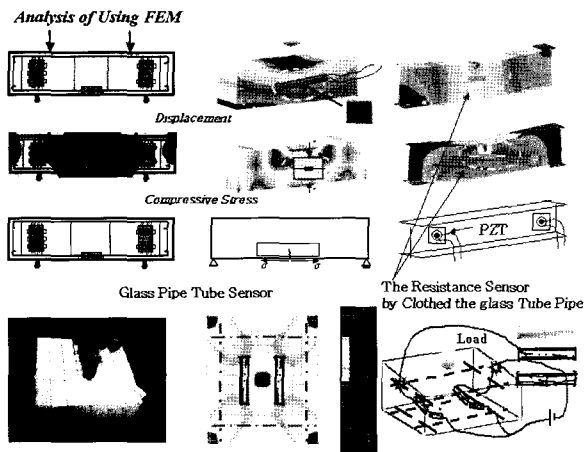


그림 7 시험부재에서의 유한요소해석에 의한 센서위치 결정

인장부재에서 발생하는 전단 및 휨균열을 감지할 수 있도록 중공 파이렉스 유리관 내부에 단순회로를 삽입하였으며, 균열의 진전에 의해 유리관 파괴를 유도하고, 이러한 파괴에 의해 손상정황을 자현할 수 있도록 구상하였다.

일반적으로 도체는 고유의 저항을 가지고 있으며, 이러한 저항은 전류를 제어하는 기능을 할 수 있으며 무선센서에서의 발신신호 주기를 지연시키거나 빨리 진행시킬 수 있다.

The Switch by Adapting Physical Fracture

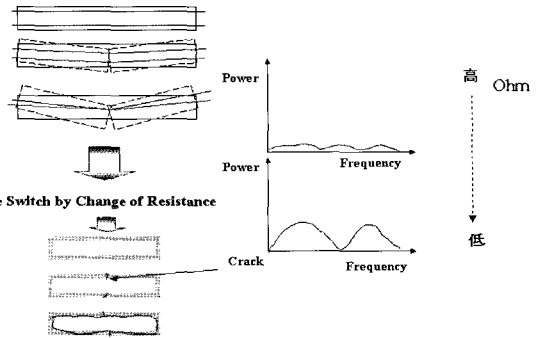


그림 8 물리적 파괴와 저항의 변화에 의한 전압의 변화

일반적으로 파괴되지 않은 전선주위에는 전기장이 발생되고 두개의 나전선은 가까워질수록 저항의 크기가 감소하여 전류가 잘 흐르는 상태가 된다. 또한 전류가 흐르는 나전선에 고저항의 소자를 연결하면 전압을 낮출 수가 있으며, 이러한 결과는 발신기능이 있는 송신장치의 전파주기를 조절할 수 있다. 리드저항의 구성은 중앙부에 지르코늄 소자와 이를 둘러싸고 있는 탄소피막으로 구성되어 있다. 이러한 저항소자의 중앙부에 압력을 받게 되면 저항의 값이 증가하게 되며, 이러한 압력에 의하여 탄소피막에 균열이 증가하게 되고 일정 압력이상이 되면, 탄소피막과 중앙부소자와의 박락현상에 의해 고유의 저항을 잃게 되고 합선으로 인하여 일시적으로 전류가 잘 흐르는 상태가 된다. 이러한 현상을 응용하여 주파수 분할 다중화(Frequency Division Multiple Access)의 송수신자의 패킷에서 저항의 값을 받을 수 있을 것으로 사료되며, 이에 대한 연구가 진행 중이다.

2. 실험

2.1 유리관 및 불포화폴리에스텔 튜브와 나전선을 이용한 전기저항기초 실험

일반적인 전기선은 길이에 따라 혹은 단면의 지름에 의해 저항이 결정되어지곤 한다. 그러나 전기선에 의한 저항 측정에는 고성능센서에 비해 가격이 저렴하기 때문에 여러 분야에서 시험적으로 사용되고 있다. 이를 이용하여 불포화폴리에스텔을 이용한 연성거동 튜브센서와 유리관센서를 사용하여 저항을 측정하였다.

전기선의 배치는 불포화폴리에스텔을 이용한 연성거동 튜브센서 및 유리관센서의 하단에 완전 고정된 다음 보강피복으로 보강하여 콘크리트 휨시험체 중앙부하단에 배치

한 다음 콘크리트를 타설하여 양생하였다.

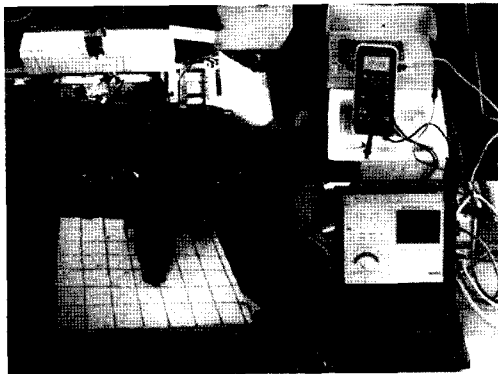


그림 9 힘실험과 판실험

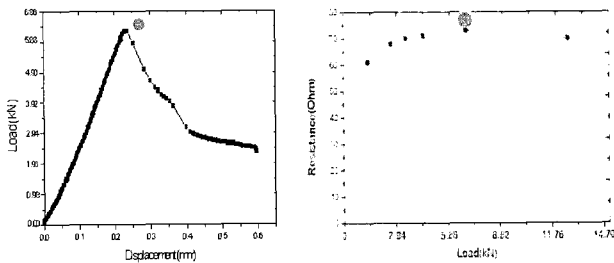


그림 10 불포화폴리에스테르 튜브센서의 전기저항과 하중변위 비교

저항측정의 결과, 하중이 증가하게 되면 전기선의 저항이 커지는 것을 알 수 있었으며, 유리관 튜브를 이용한 경우 불포화폴리에스테르 보다 저항이 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 유리관이 취성파괴를 하기 때문으로 사료된다.

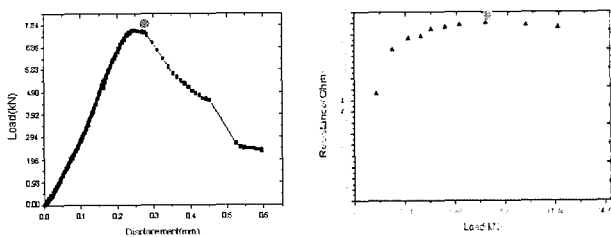


그림 11 유리관 튜브센서의 전기저항과 하중변위 비교

2.2 변형 게이지(Strain Gauge)를 이용한 전기저항 측정

변형 게이지(Strain Gauge)는 현재 콘크리트 및 철근의 실험에서 많이 사용되고 있는 센서의 일종으로, 본 연구에서는 120 Ohm의 Quarter-Bridge를 시험체 표면에 완전 고정하여, 또한 변형 게이지의 저항과 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)에 의한 하중 변위를 비교하여 측정하였다.

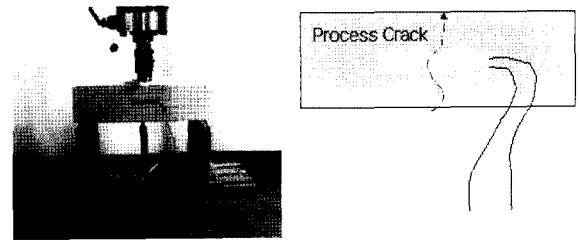


그림 12 힘시험체의 실험과 균열증진예상도

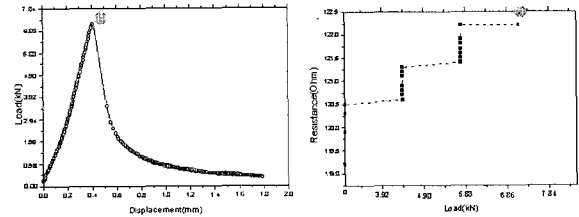


그림 13 무근 힘시험체에서의 하중변위와 측정저항

그림 13은 무근 힘시험체의 하중변위와 저항을 나타낸다. 콘크리트의 균열은 미세균열에서 큰 균열로 발전하기 때문에 변형게이지(Strain Gauge)는 결국 보수시점에서 단선되어 무한대로 발산하게 되는 것을 응용하였다. 실험 결과 95%정도의 콘크리트파괴에서 변형게이지(Strain Gauge)의 저항이 최대가 되었다.

2.3 판시험체에서의 리드저항에 의한 하중변위와 저항의 관계

리드저항소자는 일반적으로 전자회로에 사용되는 저항으로 120~500Ohm 등의 종류로 다양하다. 이 소자의 특징으로는 중앙의 세라믹부분에 압력이 가해지면 전기저항이 증가하지만 주위에 인장이 가해지면 저항이 줄어들다가 결국 내부 합선으로 0Ohm되는 특성을 지니고 있다.

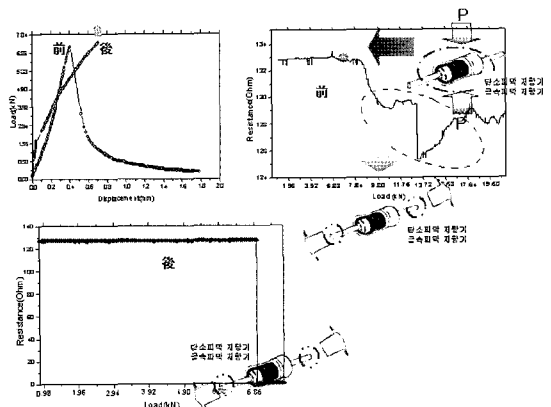


그림 14 첫 번째 가력 후와 보수작업 후 두 번째 가력 했을 때의 리드저항에 의한 하중변위와 저항의 관계

철근대신 유리관에 보강피복과 저항 및 일액형 보수제를 첨가한 시험체를 검토하기 위해 두번 가력하였다. 첫 번째 가력 후, 보수제가 작용하였고, 보수제가 작용하고 난 뒤 다시 가력을 하였다. 이때의 리드저항의 변화를 살펴 보았다. 실험결과 리드저항을 이용한 경우, 스텝 형태의 변화를 가지는 변형 게이지(Strain Gauge)보다 하중의 변화에 대해 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 유리관 튜브 센서에서 내부 보수제의 보수작용 후 리드 저항은 원래의 저항을 회복하지만, 중국에는 내부합선에 의해 0 Ohm이 되는 것을 알 수 있다. 전기선을 이용한 측정의 경우는 하중증가에 따른 내부전선의 단면손실에 의한 저항증가로 보수시기 및 파괴시점을 알 수 있었으나, 리드 저항의 경우 보수작용 후의 손상예측센서로 적용 가능한 것으로 사료된다.

센서를 이용한 판시험체와 철근 D10을 적용한 시험체와의 비교에서는 일반 이형철근을 적용한 시험체의 경우, 철근 대신 유리관 튜브 센서를 적용한 경우보다 시험체의 중량이 2.1kg 더 증가하였다.

또한, 판 시험체의 철근 중앙부와 단부에 리드 저항을 부착하였으며, 내부철근의 회전을 감지하기 위하여 철근의 윗면에 변형 게이지(Strain Gauge)를 부착한 후 콘크리트를 타설하여 실험을 하였다.

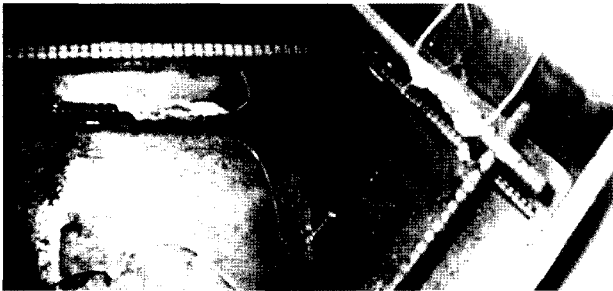


그림 15 Strain Gauge와 리드저항의 부착위치

실험결과 중앙부의 리드저항은 철근에 작용한 인장력에 의해 하중이 증가할수록 감소하였으며, 변형 게이지(Strain Gauge)의 저항은 증가하였다. 중국에는 변형 게이지(Strain Gauge)의 저항이 무한대가 되어 미소한 회전에 의해 변형 게이지(Strain Gauge)가 파단된 것으로 사료되었다.

판시험체의 중앙부하단에 적용한 휘스톤·브리지는 병렬로 연결하였으며, 실험결과 최대하중시 저항이 최대가 되었으며, 시험체 항복시 리드저항이 감소됨을 알 수 있었다.

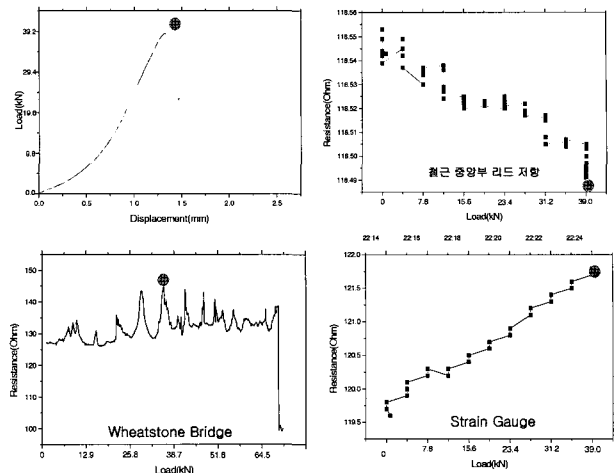


그림 16 D10 이형철근을 적용한 판시험체의 실험결과 비교

2.4 스마트센서를 적용한 무근 휨시험체의 전기저항 측정 및 LED 강약비교

스마트센서를 적용하여 무근 시험체에서의 LED와 저항고저를 하중변위와 비교검토 하였다. 크로스 스티치에서의 나전선의 간격은 휨시험체에서의 예상변위를 간격으로 제작되었다. 균열의 증진이 될수록 유리관 내부의 스위치의 간격은 좁혀지게 되며 초기 균열이 시작되어 최대내력 70%에 도달하면, LED는 불완전 합선에 의해 점등되게 되며, 95%에 도달하게 되면 완전 점등이 되게 된다. LED의 완전 점등이 되는 시점의 전기저항은 2.5m Ohm으로 리드저항센서의 저항 최대와 LED의 점등 그리고 하중변위곡선의 최대 시점이 일치함을 나타내고 있다. 따라서 직접적인 리드저항의 고저를 LED를 사용하여 균열의 발생시점과 중국파괴를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

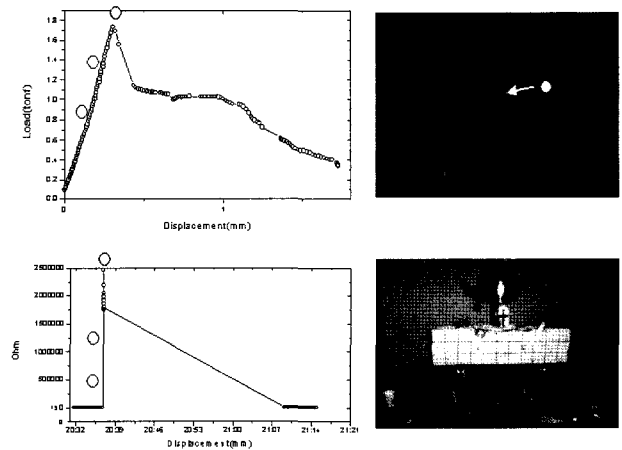


그림 17 무근시험체의 하중-변위와 저항의 LED 점등위치

2.5 LED와 리드 저항을 응용한 철근 D13를 적용한 전단 시험체의 전기저항 측정

전단센서를 15×15×55cm의 시험체에 내포해 실험한 경우, 초기 균열시 시멘트페이스트를 피복한 센서의 경우 LED가 점등되었으나 균열이 센서를 통과한 후 LED는 소등되었다. 이는 센서 내부의 나전선이 균열에 의해 할렬되었기 때문으로 사료된다. 반면 불포화 폴리에스테르 센서를 피복한 경우 보강의 효과를 나타냈다. 그림 18에서 균열이 진전되지 않은 부분이 불포화폴리에스테르를 전단센서로 적용한 부분을 나타낸다. 또한, 시험체의 중앙부에 유리관 길이가 6, 8, 10cm인 크로스 스티치 스위치를 이용하여 시험체의 초기 균열시 어떠한 변화가 발생하는지에 대해 검토하였다. 실험결과 유리관 길이가 긴 스위치에서부터 LED에 점등이 발생되었으며, 시멘트 페이스트를 통과하는 시점인 1.5tonf에서 LED가 점등되었다. 2.5tonf에서는 전단균열이 완전히 통과되어 LED가 소등되었다. 불포화 폴리에스테르를 피복한 센서의 경우 부재가 항복할 때까지 LED의 점등이 유지되었다. 리드저항은 철근에 부착하여 시험하였으며, 적용된 리드센서는 150Ohm으로 측정하였다. 무근시험체가 비해 저항의 고저가 균일함을 알 수 있었으나, LED의 변화에 의해 종국파괴시점의 위치를 파악할 수 있었다.

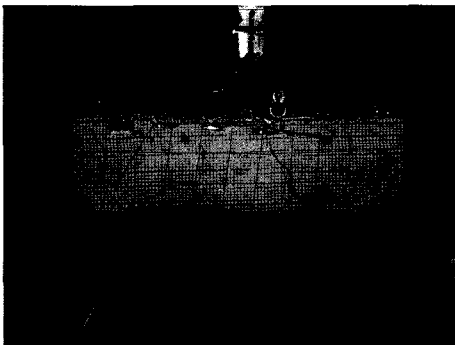


그림 18 전단시험체의 하중재하 실험

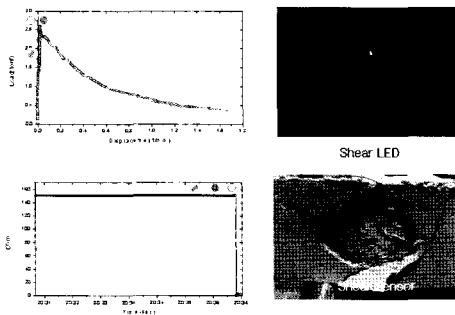


그림 19 철근 시험체의 하중-변위와 저항의 LED 점등위치

LED를 활용한 이러한 계측방법은 교각의 주각에 활용될 수 있으며 블루투스(Bluetooth)나 기타 무선장비를 이용하여 내부에서도 계측이 가능할 것으로 사료된다. 전지의 소모량은 LED가 3V를 요구함으로 3년간 일반전지의 수명이 예측되나 태양전지와 축전지를 활용하면 수명을 더 연장할 수 있을 것으로 사료된다.

부재의 허용변위를 응용한 크로스 스티치 유리관 스위치를 이용한 실험에서 저항의 경향과 하중-변위의 경향을 비교 검토하였다. 그 결과 저항의 증가는 선형적으로 증가하였다.

2.6 저항의 변위값 치환과 무선발신자를 이용한 기초실험

일반적으로 스트레인 게이지는 코일의 저항변화에 의해 그 값에 게이지계수(Gauge Factor)를 곱하여 변위를 구하였으며, 이를 이용하여 리드저항의 값을 변위로 치환하였다. 리드저항은 일반적으로 120~350Ohm을 주로 이용하며, 이러한 저항값은 센서조합에 의해 병렬과 직렬로 외부 피복의 성형에 따라 그 저항값이 달라질 수가 있다. 따라서 초기의 저항값을 빼주게 되면 초기 저항값은 0이 되며 여기에 120Ohm의 스트레인게이지의 게이지계수(Gauge Factor)를 곱하여 환산하였다.

$$D = \{ \alpha (\Omega_N - \Omega_{i0}) - G_R \} \times 10^{-1}$$

- D : Displacement
- α : Gage factor
- G_R : Gage resistance
- Ω_N : Value of increacement
- Ω_{i0} : Initial value

그림 20 유도된 저항센서의 변환식

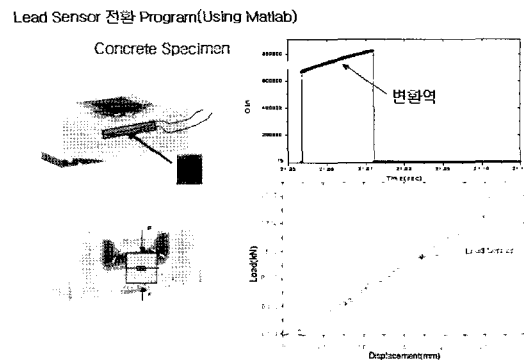


그림 21 변형게이지에 의해 측정된 저항값과 리드저항의 변환된 저항값과 비교

매트릭스 해석 프로그램을 이용하여 구한 저항변위의 값은 선형적인 분포를 나타내고 있다. 이러한 이유는 저항 센서의 피복이 센서의 민감도를 결정하기 때문으로 사료되며, 이에 대한 연구가 진행 중이다. 또한 저항의 변화를 이용한 스마트 콘크리트의 개발 일환으로 FM방식의 무선 송수신기를 이용하여 부재의 손상예측실험을 하였다. 이에 대한 기초실험으로 $\phi 10$ 의 파이버스 유리관튜브를 이용한 무선 손상계측 실험을 하였으며 시험체의 크기는 $22 \times 8 \times 2.5\text{cm}$ 이다.

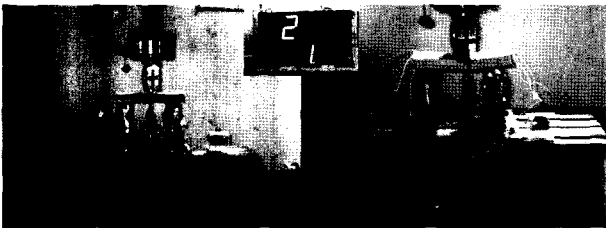


그림 22 피복된 센서의 파괴시 신호응답

피복된 센서의 내부에는 10, 12cm의 일중 유리관이 내포되어 있으며, 이는 개별 응답에 대한 기초실험을 위해 제작되었다. 사용된 무선발신기는 상용화된 FM방식의 수신기와 12V의 전원으로 공급되는 발신기이며, 서로에게 패킷을 주고 받을 때 동시에 패킷을 전송하면 충돌의 여지가 있으므로 이를 해결하기 위해 0초에는 A가, 1초에는 B가 2초에는 C가 패킷을 전송하면 충돌을 피할 수 있는 TDMA(Time Division Multiple Access)방식이 아닌 일반방식의 무선 송수신기(FDMA)를 사용하였다. 일반방식의 무선 송수신기의 결점은 동시에 발생하는 신호를 받을 수 없는 단점이 있으므로 휨과 전단의 파괴가 동시에 발생할 때를 대비하기 위해 유리관센서의 길이 및 스위치 간격을 이용하였다.

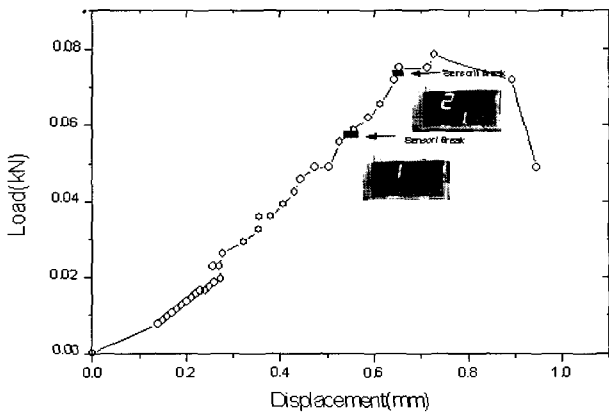


그림 23 무선 발신기를 이용한 하중변위의 비교

실험결과 유리관길이가 긴 스위치가 먼저 파괴되어 내력 79%에서 먼저 신호를 수신기에 발신하였으며, 내력 95%에서 나머지 유리관스위치가 동작하였다.

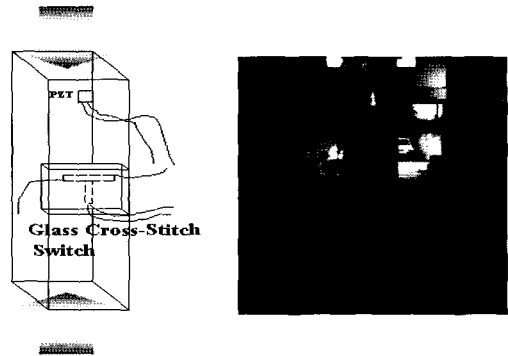


그림 24 압축실험체의 개요

이를 이용하여 일반적인 기둥의 1/2축소실험을 하였다. 콘크리트강도는 300kgf/cm^2 이며, D10의 이형철근을 사용하였으며 시험체의 크기는 $20 \times 20 \times 100\text{cm}$ 이다. 휨 및 전단 파괴에 대응할 수 있도록 시험체의 중앙에 $13.5 \times 7 \times 2.5\text{cm}$ 크기의 전단센서를 부착하여 타설하고 양생하였다.

실험결과 내력 89%에서 수평 유리관 스위치(Glass Switch)가 작동되어 손상감지를 할 수 있었다.

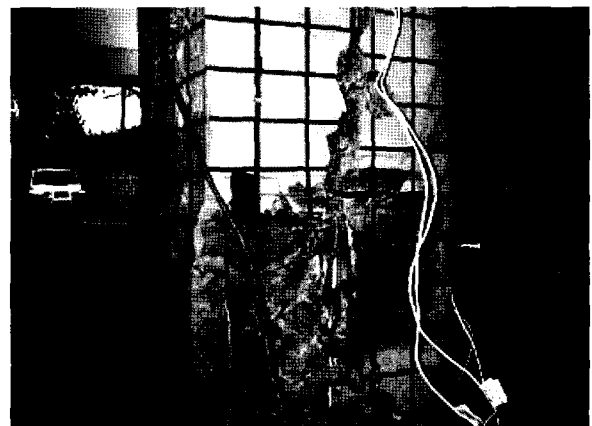
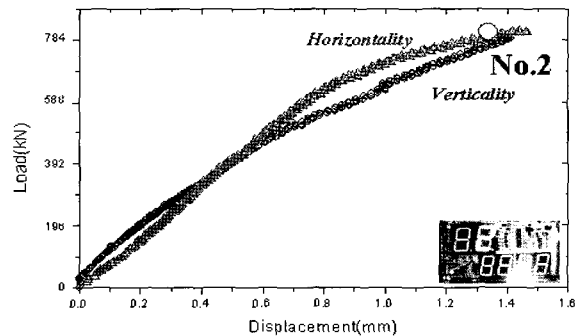


그림 25 압축재에서의 T형 전단센서의 실험결과

PZT전압에 의한 시험체 내력상태의 측정실험을 하였다. 계측장비로는 National Instrument사의 SCXI-1314로 측정하였다.

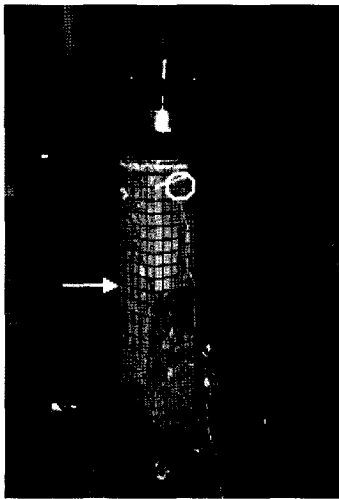
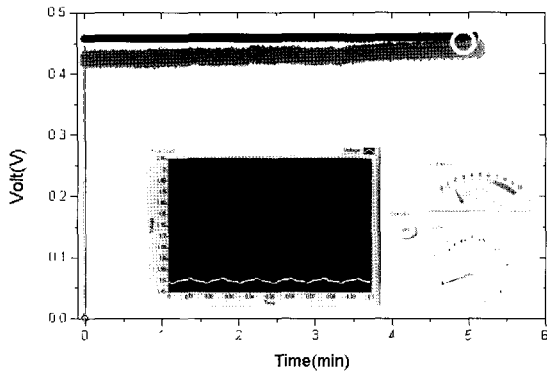


그림 26 PZT에 의한 부재의 손상 검토

압축재의 중앙부와 하중 재하면과 단접한 부분에 압전 소자(PZT)를 시험체 표면에 부착하여 실험하였다. 실험결과 하중이 증가할수록 PZT의 전압이 증가하였으며, 기둥의 중앙부보다 기둥 단부의 PZT의 전압이 증가하였다.

2.7 저항의 변화에 의한 무선발신자에서의 손상신호 자현

일반적으로 압전소자(PZT)의 측정을 위해서는 측정장비와 압전소자와의 연결의 복잡성, 계측장비와 컴퓨터의 연결로 인한 측정장소의 국한성 등의 문제가 발견되고 있으며, 이와 함께 임피던스 측정시 발생할 수 있는 주변 노이즈(Noise)와 온도의 영향 등 측정상의 문제가 발생할 수 있다.

이와 달리 압전소자의 전압에 의한 측정은 주변 노이즈(Noise)와 온도의 영향에 민감하지 않기 때문에 이에 대하여 좌굴시 측정을 하였다.

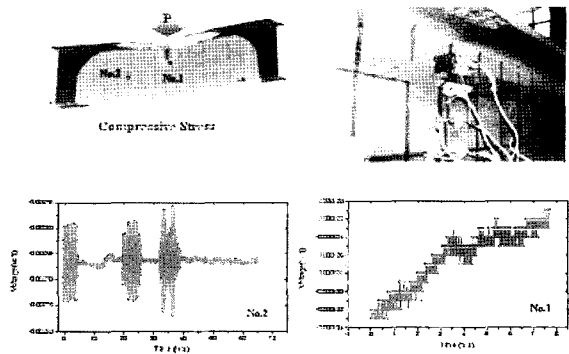


그림 27 PZT전압의 변화에 의한 부재 손상측정

유리관과 리드저항을 응용한 실험을 기반으로 리드저항의 특성을 응용하여 H208×100×5×8의 휨 시험체에서 응력이 최대인 곳을 선정하여 리드저항이 인장을 받도록 부착하여 실험하였다. 또한 FDMA(Frequency Division Multiple Access) 방식의 무선 송수신장치를 이용하여 저항 변화에 의해 하중상태를 발신하도록 구상하여 실험하였다.

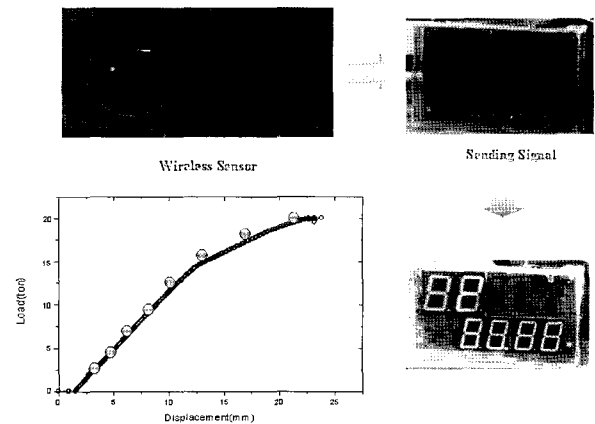


그림 28 저항의 변화에 의한 손상신호 발신위치

표 2 하중재하 시 저항의 변화에 의한 신호발신

하중재하시 손상신호 발신	2번	1.11m Ohm	3톤
	2번	1.09m Ohm	4.5톤
	2번	1.1041m Ohm	6톤
	2번	1.1062m Ohm	7톤
	2번	1.1091m Ohm	9톤
	2번	1.1153m Ohm	15톤
	2번	1.1215m Ohm	17톤
	2번	1.1277m Ohm	20톤

실험결과 하중재하시 3톤 이상에서 재하하중이 약 1톤 씩 증가할 때마다 손상신호를 발신하였다. 이러한 계측시스템은 많은 벽이 존재하지 않는 곳에서의 손상예측이나

공장이나 실험시설 등에 사용된 철골 큰 보의 좌굴예상지점에 부착하여 위험성을 검토할 수 있을 것으로 사료된다.

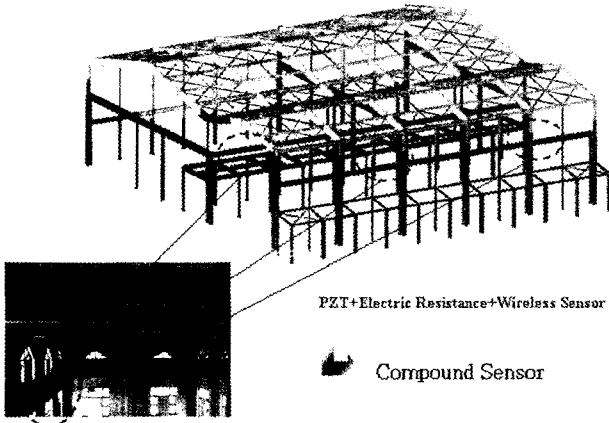


그림 29 FDMA 복합무선센서를 이용한 손상예측시스템

또한, 외부건물에서 주요건물의 손상예측이나 교량의 상태, 그리고 온도상태의 계측, 지진에 대한 응답의 경우도 코드 분할 다중화(Code Division Multiple Access) 방식의 송수신자와 이와 연결된 저항, 그리고 온도감지를 위한 바이메탈, 외부상태에 따른 압전소자의 전압발생을 응용한 복합센서를 사용하여 계측할 수 있을 것으로 사료되며, 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

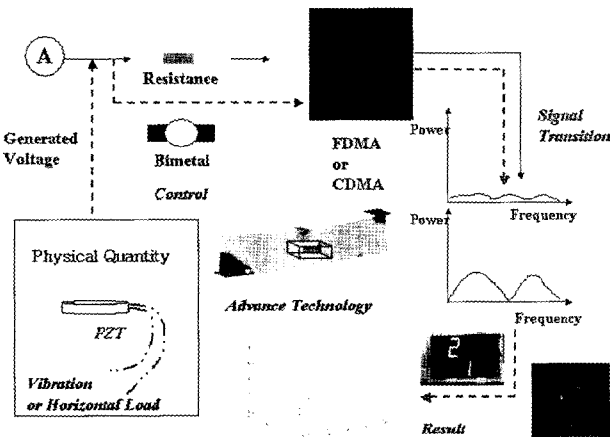


그림 30 복합센서를 이용한 손상예측시스템의 개요

3. 결 론

일반적인 센서의 적용만이 스마트 재료 및 구조라 할 수 없으며 이러한 스마트 재료 및 구조의 도래는 이전 연구의 끊임없는 반복과 보완, 적용으로부터 발전되었다.

현재 사용되고 시공 중인 구조물의 수명은 리노베이션

등으로 인하여 급격히 증가 될 것으로 예상되며 이러한 사회적 추세를 감안하면 앞으로 고기능, 유지보수에 경제적인 건축물이나 구조물이 필요하게 될 것이다. 따라서 이러한 사회적 요건에 부합하기 위한 연구가 스마트재료 및 구조물에 대한 연구라 할 수 있다.

스마트 재료 및 구조에 사용되고 있는 재료 및 기기는 대부분 국외에서 생산되는 고가의 센서와 계측장비이며, 센서의 적용 및 계측방법이 어렵기 때문에 이를 적용하기 위한 방법에 대한 연구가 국내에서도 활발하게 진행 중에 있다.

그러나 이러한 스마트 재료 및 구조가 널리 사용되기 위해서는 계측방법의 단순화와 센서의 국산화가 이루어져야 하며, 이러한 연구는 계속 진행될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2004년 과학 재단 지정, 스마트 사회기반 연구센터의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

참 고 문 헌

1. 三橋博三(2000) インテリジェントコンクリート—その展開と可能性, セメント・コンクリート, No.641, Jul
2. 三橋博三 外 1人(2000) 止水性能の自己修復機能を有する高耐久性インテリジェントコンクリートの開発に関する研究, 日本建築學會技術報告集, No.10
3. 三橋博三 外 3人(2000) 強度の自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究, 콘크리트工學論文集, Vol.11, No.2, pp.21-28
4. MIDAS Gen Users Manual. POSCO Engineering & Construction Co. Ltd, 2000.
5. Surendra P. Shah, Stuart E. Swartz, Chengsheng Ouyang, Fracture Mechanics of Concrete, JOHN WILEY & SONS, INC, 1995, pp.388-396
6. N. TAKEDA, Structureal Health Monitoring for Smart Composite Structure Sistem in Japan, Annales de chimie Science des Materiaux 2000, pp.545-549
7. M. Sun 外 3名 Thermoelectric Percolation Phenomenain in Carbon Fiber-Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research (2000) Vol.28, No.12. pp.1707-1712

8. David K. Felbeck, Anthony G. Atkins, Strength and Fracture of Engineering Solids, PRENTICE HALL, INC, 1996, pp.274-305
9. Richard W. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, JOHN WILEY & SONS, INC, 1976, pp.3-107
10. Jack A. Collins, Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction, Prevention, JOHN WILEY & SONS, INC, 1993, pp.1-133
11. Youg-Chan Kim, Ie-sung Kim, Jae-jun Lee, Load Distribution in Floor Slab and Support of Shearwall-Type RC Apartment Buildings during Construction, Structures Congress & Exposition, ASCE, 2003
12. Ie-Sung Kim, Wha-Jung Kim, "Development of the smart concrete using the sensor that serves as a reinforcement function", The 5th Korea-Japan Seminar/Workshop on System Identification and Structural Health Monitoring, 2004
13. Kwang-Ryun Kim, Yo-Hun Yun, Ie-Sung Kim, Wha-Jung Kim, "Development of Self-Diagnosis Concrete for Damages", The 1st International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, 2004
14. Ie-Sung Kim, Wha-Jung Kim, "Development of Self-Diagnosis in Addition to Ability of Repair Concrete for Damage", SPIE 11th Annual International Symposium Smart Structures and Materials, 2004
15. Ie-Sung Kim, Wha-Jung Kim, "Development of the Activity Type Smart Concrete Using the Glass Pipe", The 2nd International Symposium on the Safety Enhancement of Building and Special Works, 2004 