

건설분야에서의 스마트 콘크리트 기술의 현황 및 전망

박 석 균(대전대학교 토목공학과 조교수)

1. 서론

사회기반시설을 구축하는 다양한 토목·건축분야의 주요구조부재에 스마트 구조물(Smart Structure)과 같은 지적구조시스템을 도입하려는 연구가 최근 크게 각광받고 있다. 이러한 시스템이 실현될 수 있다면, 각종 재해에 대해 생명과 재산을 보전할 수 있어 안전성 향상에 기여함은 물론, 내구성이나 노후화 점검에도 유효하여 구조물의 장수명화에 따른 라이프사이클코스트의 저감으로도 이어질 수 있다. 토목·건축분야에서는 소위 파괴예지센서로서 건전성 모니터링(Health Monitoring)의 기능만이라도 실용화 될 수 있다면, 이러한 효과는 크게 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

특히, 직접 육안조사하기 어려운 기둥과 보의 접합부나 지중 파일 등에서는 비파괴로 검사하기가 매우 어렵다. 이와 같은 경우에 지적구조시스템을 가진 구조재가 이용된다면 매우 용이하게 확실한 진단을 할 수 있어 재해의 방지와 재해시 보다 경제적이고 신속한 복구가 가능해질 것으로 내다 볼 수 있다.

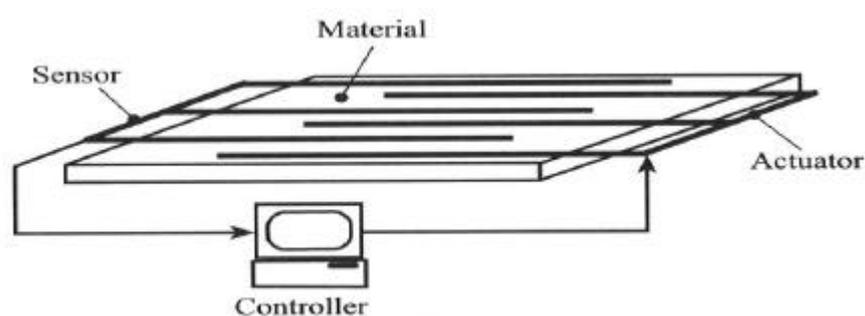
이상과 같은 지적구조시스템의 토목·건축분야에서의 사회적 필요성을 들면 <표-1>과 같이 정리할 수 있다.

<표-1> 지적구조시스템의 토목·건축분야에서의 사회적 필요성

분야	필요성
건전성 모니터링 기능	<ul style="list-style-type: none"> · 고속도로, 철도, 상하수도, 전력·가스 등 인프라구조물의 파괴예지에 의한 안전성 향상 · 지중·해중 구조물(예: 터널, 해중터널, 파일 등)로 직접 육안조사에 의한 안전성의 확인을 할 수 없는 구조물의 안전성 향상 · 원자로 등 인간이 접근할 수 없는 구조물의 파괴예지와 자기복구 · 낙석, 눈사태, 토사붕괴 등의 예지
경제적효과	<ul style="list-style-type: none"> · 장수명에 의한 라이프사이클의 저감 · 모니터링시스템의 완비에 따른 설계안전율의 저감 · 지구에 온순하고 환경에 부하를 주지 않는 리사이클 가능한 재료
다기능재료	<ul style="list-style-type: none"> · 전자파흡수성, 열선흡수, 흡음효과 등의 다기능 부가 · NO_x, SO_x를 제거하는 환경조경 기능부가
거주성향상	<ul style="list-style-type: none"> · 바람 등에 의한 구조물의 진동제어 · 고가철도 등의 구조체진동의 제어 · 역티브노이즈제어 (분포경수계 스마트역츄에이터) · 환경조결형 기능재 (알레르겐대척 등)

2. 스마트 콘크리트란

생물과 같이 환경조건변화에 따라 스스로 그 기능을 바꾸어 적응하는 재료, 소위 스마트재료(인텔리전트재료라고도 함)에 지금 관심이 높아지고 있다. 무생물인 재료로 주위의 환경변화를 감지하여, 스스로 진단하고, 스스로 조절·적응하거나 손상을 스스로 복구·복원하는 능력, 수명을 판단하는 능력, 학습하는 능력 즉 지적 능력을 가질 수 있다면, 안전성, 건전성, 신뢰성이 대폭 향상될 것이다. 1989년에 일본에서 제안된 인텔리전트재료의 개념은 합금과 같이 원자레벨이 다른 것을 섞어 지적능력을 갖는 재료를 인공적으로 창조하는 것을 목표로 한 것이다. 한편, 같은 무렵, 미국에서 제안된 스마트재료의 개념은 섞은 원래의 소재를 구별할 수 있는 복합재료에 지적능력을 갖게 하는 것을 목표로 하는 것이다. 복합재료를 스마트(또는 인텔리전트)화하기 위해서는 환경의 변화를 감지하는 「센서」, 센서신호를 판단하고 명령하기 위한 제어신호를 출력하는 「컨트롤러」, 제어신호에 따라 구조기능을 바꾸는 「액츄에이터」가 필요하다. 이를 위해, 센서, 컨트롤러, 액츄에이터 기능을 갖는 기능재료와 강도를 중시하는 구조재료를 융합해 일체화한 복합재료를 창조함으로써 스마트재료를 실현할 수 있다. 일체화 방법, 즉 센서, 컨트롤러, 액츄에이터의 분포방식, 연결방식에 따라 스마트함 정도가 달라져, 먼저 구조설계가 필요하다. 복합재료는 비(比)강도, 비(比)강성, 내식성, 감쇠성이 뛰어나지만, 신뢰성이 약간 부족하고 고가이다. 또, 재료설계와 구조설계를 동시에 행하여 일체로 성형하여야 한다. 이들 장점을 살리고 단점을 장점으로 바꾸는 방법이 스마트화이다. 섬유강화 복합재료에서는 강화섬유의 일부를 센서와 액츄에이터 기능을 갖는 섬유로 치환한 <그림-1>과 같은 스마트재료(고지능 복합재료)를 생각할 수 있다. 이것은 센서·어레이로 환경변화와 내부변화를 센싱하고, 외부연결 컴퓨터로 정보를 처리하여 그 지령을 액츄에이터·어레이에 전달해 적절히 응답한다. 더욱이, 컴퓨터를 칩화하여 재료 중에 매립함으로써 완전히 스마트화 할 수 있다.



<그림-1> 스마트재료

또한, 이들 3가지 기능을 모두 재료자체에 내장하지 않는 경우라도 기존의 구조와 재료 혹은 장치를 조합시켜 구조물 혹은 시스템 전체로서 고지능성을 발현시키려고 하는 소위 「스마트 구조」의 연구도 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 스마트 재료와 스마트 구조시스템에 관한 연구는 항공·우주, 기계·금속·세라믹스, 바이오·생체·의료 등의 분야를 중심으로 활발히 시도되고 있다.

스마트(고지능) 콘크리트란 콘크리트재료 내에 짜 넣어진 미세한 재료와 장치를 구사하여 상술한 3가지 기능을 발휘시킬 수 있는 것이다. 스마트콘크리트에 관한 연구는 이제 시작단계에 불과하고 실험실 수준이라도 실현된 사례는 아직 극히 한정되어 있다.

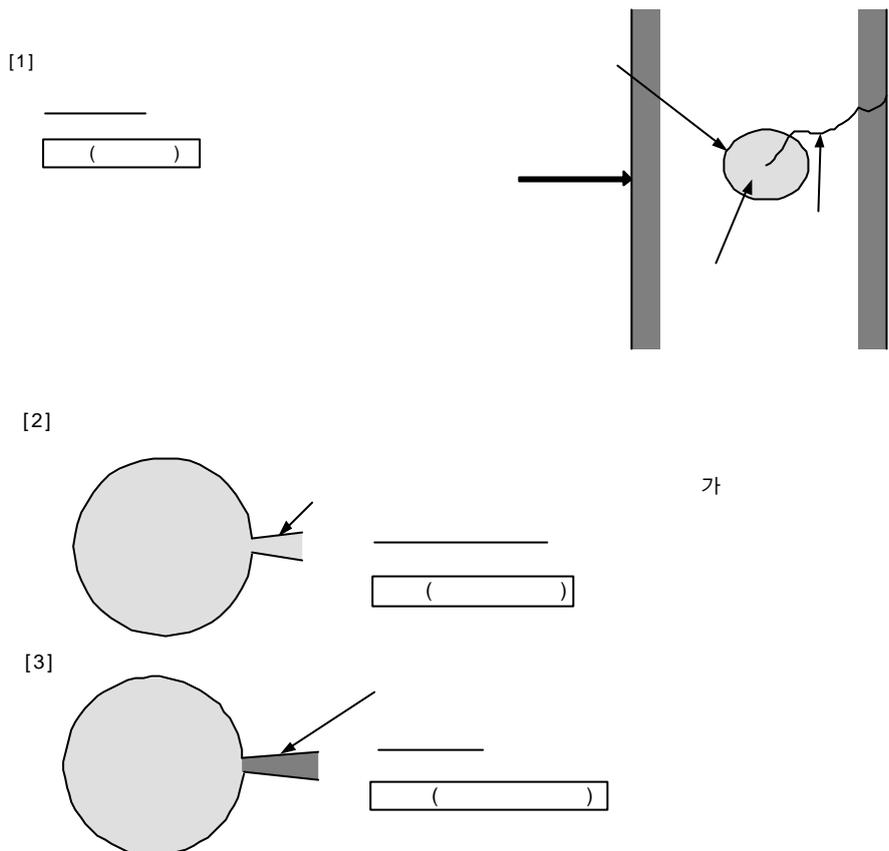
항공·우주분야와 생체·의료분야등 비용보다는 기능이 훨씬 중요시되는 분야에 비해 토목·건축분야에서는 실용화를 고려하는 상에서 비용을 무시할 수는 없다. 따라서, 콘크리트재료에 맞춘 「센서기능」, 「프로세서기능」, 「엑츄에이터기능」을 가진 재료를 각각의 목적에 맞추어 찾아내거나 창출하는 것이 스마트 콘크리트를 개발하는 상에서 중요한 키포인트가 된다.

3. 균열 자기복구기능

균열이 발생하면 콘크리트의 강도는 저하하게 될 뿐만 아니라 공기중의 탄산가스와 산성비 혹은 염분 등이 구조체 내에 침입하기 쉽게 되기 때문에, 탄산화와 염해 등의 열화를 조기에 일으키는 원인이 된다. 그러나, 이와 같은 조기열화가 발생했다고 하더라도 지중 구조물과 위험물 처리시설 등에서는 사용기간중의 보수는커녕 검사조차 어려운 경우가 많다. 이와 같은 경우야말로 <그림-2>에서와 같이 균열의 발생을 자동적으로 검지하여 보수해야 할 것인가 말 것인가를 판단하고, 필요에 따라 보수를 자동적으로 실시하는 콘크리트가 필요할 것이다.

이와 같은 기능을 콘크리트에 갖추게 하기 위해, 균열의 검지기능 역할을 담당하는 재료와 균열을 복구할 수 있는 보수제의 선택이 열쇠가 된다. 보수제를 봉입한 캡슐이 균열에 대해 민감하게 반응하는 것이라면, 균열의 발생과 함께 캡슐이 파괴되고, 어느 균열쪽에 달한 때에 캡슐내의 보수제가 유출되어 균열을 채워 복구가 실행될 것으로 기대된다.

예를 들면, 내부공간이 파괴되기 쉬운 섬유내에 보수제를 내포한 것을 콘크리트내에 매설하는 것을 생각할 수 있다. 그러나, 콘크리트의 비빔 및 타설 때에 이런 류의 섬유를 파괴시키지 않고 콘크리트내에 분산시키는 것은 곤란하여, 실용화에는 이어지지 못하고 있다. 「파괴는 쉽게 되고, 깨지기는 어려운 캡슐을 만든다」고 하는 전문답(禪問答)과 같은 과제가 여기에 있다.



<그림-2> 스마트 콘크리트의 자기복구과정 개념도²⁾

그 밖에도 독립형 캡슐에 보수제를 내포한 연구 예도 몇 가지 있지만, 기본적으로는 2가지의 문제점을 들 수 있다. 첫 번째는 캡슐의 크기가 어느 정도 이상에 달하면 콘크리트의 강도저하를 일으키는 초기결함이 될 위험성이 있다는 점이다. 그러나, 그 치수를 작게 하면 캡슐 자체는 파괴되지 않은 채로 콘크리트에 균열을 진전시킬 위험성이 발생하게 된다. 두 번째는 보수제의량은 캡슐에 내포된 양이 상한이어서 균열의 체적을 충전하는데 충분한 량이라고는 반드시 얘기할 수 없다는 점이다. 이것을 해결하는 방법으로는 취성재료 극세(極細)파이프의 네트워크를 이용하는 것 등을 생각할 수 있다.

강도의 복구에는 보수제의 성능도 중요한 점이고, 또 그 적용 균열폭에 대해서도 검토가 필요하다. 균열폭이 크게 벌어진 후에는 강도의 큰 회복율을 바라기는 어렵고, 보수제로 그 균열을 충전하는 것조차 곤란하게 된다. 그 때문에 콘크리트의 균열폭 그 자체가 어느 한계치 이상으로는 커지지 않도록 하는 제어가 필요하게 된다. 예를 들면, 고성능 섬유 혼입에 의한 균열의 가교(架橋)메커니즘 등을 병행해 이용하는 재료설계가 보다 효과적이다. 더욱이 보수제가 캡슐내에 봉입된 상태라 하더라도 장기간에 걸쳐 화학적으

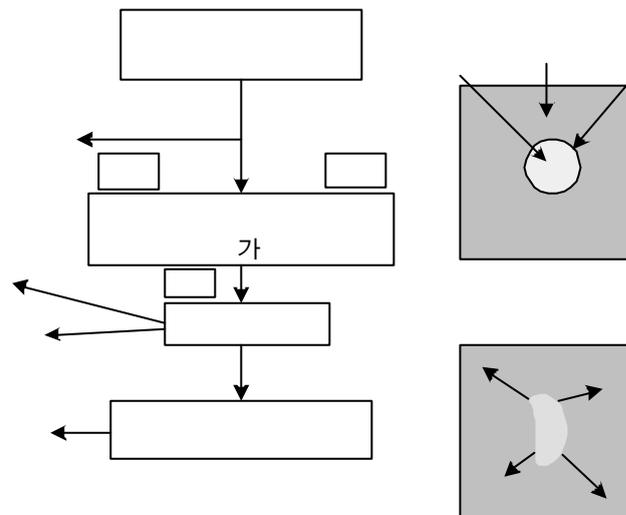
로 안정한 상태로 보존되어 있는 것도 중요한 점이다.

또한, 균열 자기복구기능을 갖는 스마트 콘크리트의 방법은 지수성능의 자기복구에도 적용할 수 있다. 균열의 발생은 누수의 원인으로도 되기 때문에 지수기능을 자기복구할 수 있으면 그 이점은 크다.

4. 수화열 억제기능

부재가 커지면 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도균열이 발생되어 이에 대한 대책이 필요하다. 이에 대해 <그림-3>에서와 같이 지연제를 봉입한 파라핀제의 마이크로캡슐을 이용하면, 콘크리트 온도가 상승해 소정의 온도에 달할 때 캡슐이 용해하여 지연제가 용출됨으로써 자동적으로 시멘트 수화반응이 정체되어, 그 이상 온도가 상승하지 않는 방법이 고안되었다⁴⁾.

이 방법에 의해 수화반응을 필요이상으로 지연시키지 않고 또 파라핀 재질을 적절히 선택함으로써, 최고도달온도를 미리 설정할 수 있다. 그 결과, 콘크리트의 급격한 온도상승과 온도강하 및 최고온도를 억제할 수 있음을 확인하였다⁴⁾.



<그림-3> 시멘트 수화열의 자기억제기능 발현개념도²⁾

5. 설계상의 고려방식

콘크리트의 스마트(고지능)화에 대해서는 그 재료를 설계할 때에 고려해 두어야 할 것이 수많이 존재한다. 예를 들면, 이하와 같은 제반사항에는 특히 배려할 필요가 있다.

가. 대상을 집약해 개발

콘크리트의 스마트화라고 하더라도 그 기능발현의 대상이 되는 열화와 파

괴 등의 현상과 그들에 대한 스마트화 방법은 다양하리라 사료된다. 이들 현상 전체에 대해 무엇에라도 대응할 수 있는 방법의 개발은 극히 곤란할 것으로 사료된다. 따라서, 스마트 기능의 발현대상을 집약시켜 그에 대해 최적이라 여겨지는 방법을 이용한 개발이 바람직하다고 생각된다.

나. 간편한 방법

콘크리트 타설은 현장시공으로 되는 경우가 많다. 따라서, 스마트화를 실시하는 방법은 각별히 고도의 기술을 요하는 일없이, 종래의 콘크리트시공기술에 준하는 정도의 간편한 방법일 것이 바람직하다.

다. 저비용

콘크리트가 이만큼 대량으로 사용되고 있는 요인의 하나는 안정된 비교적싼 비용을 들 수 있다. 따라서, 스마트화를 지향하는 기능성재료도 또한 싸고 대량생산이 가능한 것, 혹은 극히 소량의 사용으로 충분히 기능할 수 있는 것이 바람직하다.

라. 재료의 안전성

스마트화라고는 하더라도 예를 들면 자극성이 있는 기능성 재료를 이용하거나 취급방식에 매우 민감한 재료 등을 이용한 경우, 그 구조물의 시공시에 사고가 일어날 가능성도 고려할 수 있다. 따라서, 자극성 있는 재료 등의 사용은 피하고, 재료자체는 다양한 각도로부터 보아 안전한 것을 사용하도록 충분히 배려해야 한다.

마. 장점·단점의 종합판단

예를 들면, 스마트화에 의한 재료의 내구성 향상이 역으로 해체시의 사고를 불러올 위험성으로 이어지지 않을까? 혹은 또 기능성 재료의 사용에 의해 그 대상으로 된 열화현상은 억제할 수 있었다고 하더라도 그 결과 강도 등 다른 성능이 훼손되지는 않을까? ... 등, 스마트화의 장점뿐 아니라 단점도 확실히 배려한 재료설계가 필요하다.

6. 관련연구개발현황

스마트 재료 또는 스마트구조시스템의 관련연구개발은 현재 연구를 시작한 상태라고 말할 수 있다. 토목·건축 건설재료에 한정하여 보면, 본래의 구조재료기능을 가지면서 하중의 검지와 손상·파괴 등의 센서기능을 갖는 재료의 개발성과보고는 몇 건인가 발표되고 있다. 그러나, 건설분야에서 이러한 종류의 연구가 아직 초기단계여서 센서기능과 자기복구기능을 합쳐 갖는 재료의 개발보고는 아직 발표되고 있지 않다.

가. 광화이버

광화이버는 구조재료로서의 기능은 가지고 있지 않지만, 광통신 등의 급속

한 발전에 따라 광화이버 자체가 가격적으로 싸지고, 더욱이 계측기도 개발이 진행되어 왔기 때문에 광화이버 자신을 센서로서 이용하는 예가 많아지게 되었다. 광화이버 중을 전파하는 광파의 위상, 편파상태, 편파면, 손실 혹은 산란은 외적 요인에 따라 변화하고, 이것이 광화이버의 센서기능으로서 이용된다. 전파되는 빛의 위상변화를 이용하는 분산형 광화이버 센서는 열(온도), 신축, 압력 등을 검지할 수 있고, 이 중 신축은 변형률과 관련되어 구조부재에의 하중검지를 행하는 것이 가능하다.

현재의 계기조합에 의해 광화이버 센서에 의한 위치 분해능은 온도로 1m 정도, 변형률에서는 10m 정도의 평균적인 값이 계측 가능하다고 보고되고 있다.

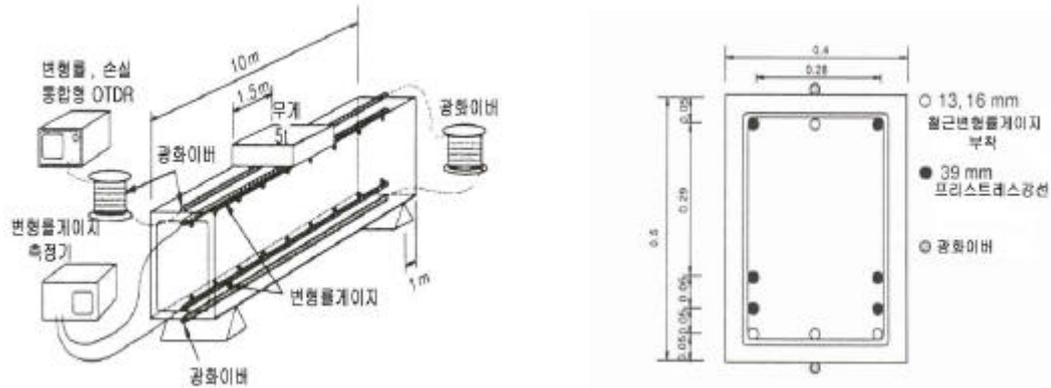
다음은 단순보에 발생하는 변형률을 단순보에 부착한 광화이버와 변형률·손실통합형 OTDR을 이용하여 측정된 변형률 값과의 비교를 행한 연구 예를 소개하고자 한다.

<그림-4>(1)에 콘크리트 단순보를 이용한 휨실험계, <그림-4>(2)에 콘크리트 단순보의 단면도를 나타내었다. 모델실험은 콘크리트 단순보(가로0.4m×높이0.5m×길이10m)의 표면길이방향으로 광화이버를 부착하고, 단순보의 중앙에 무게 5톤의 하중을 가함으로써 휨을 발생시켜 그 때 단순보에 발생하는 변형률을 단순보에 부착한 광화이버와 변형률·손실통합형 OTDR을 이용해서 측정하는 것이다. 동시에 변형률게이지를 설치하여 광화이버를 이용해 측정된 변형률 값과의 비교를 행하였다.

콘크리트 단순보의 변형방법은 <그림-4>(1)에 나타낸 바와 같이 2점 지지된 콘크리트 단순보의 중앙에 무게 5톤의 추(길이1.5m×폭1.5m×높이0.2m)를 재하시킴으로써 행하였다. 모델실험에 사용한 광화이버는 통신용 광화이버이고, 콘크리트 단순보의 상면 및 저면의 길이방향으로 부착했다. 또한, 변형률게이지는 콘크리트 단순보 내의 철근에 1m 간격으로 부착했다.

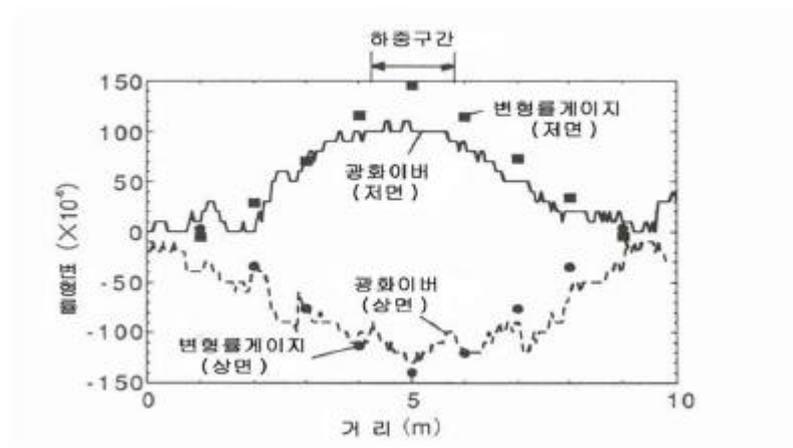
콘크리트 단순보를 이용한 휨시험 시험결과 일례를 <그림-5>에 나타내었다. ■ 및 ●가 콘크리트 단순보에서의 하측 및 상측의 철근에 1m 간격으로 부착한 변형률게이지에 의한 각 포인트마다의 변형률 측정결과이고, 점선 및 실선이 콘크리트 단순보의 상면 및 하면에 부착한 광화이버에 의한 변형률 측정결과이다. 광화이버와 변형률게이지가 부착되어 있는 위치가 콘크리트 단순보의 높이방향에서 0.05m만큼 떨어져 있기 때문에 변형률게이지에 의해 측정된 변형률 값을 콘크리트 단순보의 상면 및 저면 위치의 변형률로 환산함으로써 광화이버 및 변형률게이지를 이용해서 측정된 변형률 값을 비교하였다. <그림-5>로부터 광화이버 길이방향의 연속적인 변형률분포 측정결과

와 변형률게이지에 의한 각 포인트마다의 변형률 측정결과가 변형률·손실 통합형 OTDR의 측정성능(변형률 측정정도 $\pm 30 \times 10^{-6}$)에서 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(1) 콘크리트 단순보의 휨시험계 (2) 콘크리트 단순보의 단면도(단위:m)

<그림-4> 콘크리트 단순보의 시험양상

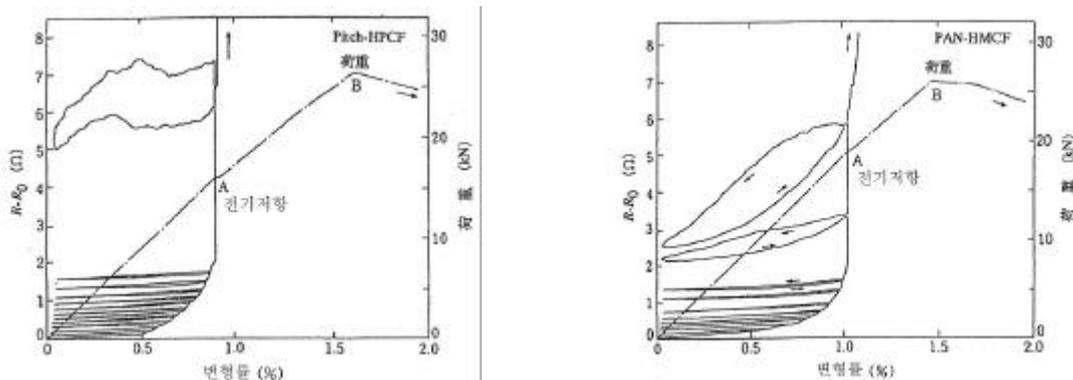


<그림-5> 콘크리트 단순보의 변형률분포 측정결과

나. 탄소섬유와 유리섬유단을 보강재로 한 강화플라스틱

탄소섬유(CF)와 유리섬유(GF)의 섬유단(다발)이 에폭시수지 또는 비닐에스테르수지 등을 매트릭스재로 한 복합재료(CFGFRP)도 구조재로서의 기능을 가짐과 동시에 변형률센서로서 기능을 갖는 것이 보고되고 있다. 단면형상으로는 봉상(棒狀), 단(短)형상, 쉬트상, 네트상인 것 등 여러 가지 형상인 것이 제작되고 있다. 또한, 이 복합재는 탄소섬유와 세라믹섬유, 탄소섬유와 아라미드섬유의 조합을 바꾸어 각각의 섬유특징을 살려 사용되고 있다. 여기서, 변형률검지의 원리를 설명하면 다음과 같다. 즉, CFGFRP재료는 그 구성재료의 탄소섬유단은 도전성 재료이고, 또 탄소섬유의 한계신장률이 유리섬유

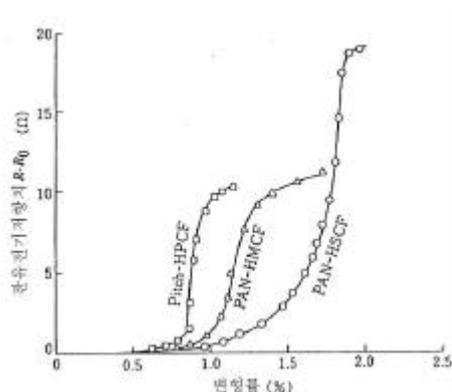
보다 작기 때문에 이 복합재료를 서서히 인장가력하면 <그림-6>에서 보는 바와 같이 그 신장에 따라 탄소섬유가 조금씩 파단되기 시작해 탄소섬유단의 전기저항치를 계측하고 있으면 서서히 변형률에 따라 저항치가 증가된다. 더욱 하중을 증가시키면 CFGFRP재는 파단되지 않지만, 탄소섬유는 완전히 파단되어 전기저항치는 무한대로 큰 값이 된다. 또, 하중을 제거하면 CFGFRP재는 거의 원래대로 복원되지만, 파단된 탄소섬유는 원래상태로는 돌아가지 않아 전기저항치가 원래상태보다 큰 값을 나타낸다. 이로부터 <그림-7>에서와 같이 사전에 하중-변형률-전기저항의 잔유치 관계를 조사해 두면 전기저항잔유치로부터 부재에 작용한 최대하중 혹은 구조부재의 최대 변형률을 무응력상태에서 추정할 수 있게 된다. 또한, 무엇보다도 전기저항치가 무한대로 될 때를 신호로 알리도록 하면 CFGFRP가 파괴되기 전에 파괴를 예지할 수 있다. 탄소섬유의 한계신장량을 여러 가지 다르게 함으로서 파괴예지의 감도를 조정할 수 있는 것이다. 이들 재료는 이미 실용화가 도모되고 있고, 제일 많이 이용되고 있는 것은 은행의 현금창구 등의 경비방법용 인텔리젠티기능으로서 금고실 벽과 천장, 바닥에 사용되고 있다.



(1) Pitch-HPCF를 이용한 경우

(2) PAN-HMCF를 이용한 경우

<그림-6> CFGFRP 인장시험 변형률과 전기저항증가 관계



<그림-7> 각 시험체의 잔유전기저항치와 변형률 관계

7. 스마트 콘크리트에 의한 콘크리트기술의 전망

스마트 콘크리트는 아직 그 고려방식을 실현하는 다양한 시도가 이루어지고 있는 단계이다. 다양한 스마트 콘크리트가 실용화되기까지는 아직 극복해야 할 과제는 산적되어 있다. 그러나, 그 실현 가능성은 충분히 있다. 가까운 장래, 많은 아이디어가 나올 것이라 사료되어, 이들 기술이 실용화되는 날도 머지 않을 것으로 기대된다. 그리고, 어떠한 방법에 의해 스마트 콘크리트가 실현되면 콘크리트 재료의 초기성능을 모든 점에서 현격히 높게 설정하지 않더라도 필요한 때(검지)에 필요에 따라(판단·명령), 필요한 곳에 효과를 발휘(실행)하도록 하는 기능을 부여하는 것이 가능하게 된다. 따라서, 필요한 부분에 적절한 시도를 행함으로써 보다 고성능인 콘크리트 구조물의 실현을 가능하게 할 수 있을 것으로 기대되는 등 참으로, 21세기에 요구되는 콘크리트기술의 하나이다. 또한, 이와 같은 스마트 재료·스마트구조 시스템의 연구개발은 인간사회가 자연에 대응하여 조화·협조할 수 있도록 재료·구조설계 그 자체에의 변혁을 지향하고 있는 점으로부터 보더라도 건설산업 뿐만 아니라 사회경제분야에도 광범위하고 큰 영향을 미쳐 갈 것이 예상된다.

8. 결론

최근의 환경조건 변화와 요구수준 향상 등의 문제가 복합화 되면서, 구조물의 유지관리에 대해서도 여러 의미에서 지금까지 경험하지 못한 새로운 문제가 대두될 것으로 예상되고 있다. 예를 들면, 철도·도로 등의 교통·수송 시스템, 수도·전력·가스과 같은 라이프라인 시스템 등의 기반구조물과 시설은 비록 단기간의 사용중지가 되더라도 사회활동과 생활에 막대한 영향을 미치기 때문에 용이하게 성능을 복구하거나 향상시킬 수 없는 상태에 처하게 된다.

이러한 문제에 대한 대책으로서는 사회기반시설을 구축하는 다양한 토목·건축분야의 주요구조부재에 스마트구조물(smart structure)과 같은 고지능형 구조시스템을 도입하는 것이 가장 효과적인 방법이 될 것이다. 이러한 시스템은 아직 초기연구단계에 있지만, 꾸준한 연구를 계속해 나갈 경우 과학의 발전과 더불어 실용화될 날도 머지 않을 것으로 예측해 볼 수 있다.