

## 스마트 센서의 현황과 콘크리트 건전도 평가

The State of the Art in Smart Sensor and Concrete Health Monitoring



김화중\*  
Wha-Jung Kim



김이성\*\*  
Ie-Sung Kim

### 1. 서 론

건설 재료로서 시멘트와 콘크리트는 우리나라 경제 성장과 더불어 없어서는 안 될 중요한 위치를 차지하고 있다고 말할 수 있다. 그러나 최근 환경문제와 관련하여 시멘트, 콘크리트가 사회적 문제로 언론매체에 언급이 되고 있어 시멘트, 콘크리트를 연구하는 입장에서 관심을 가지지 않을 수 없는 실정이다. 그렇다면 얼마나 시멘트와 콘크리트가 우리의 삶과 관련하여 불이익을 가져다주는 것인가 생각하여야 할 것이며, 이에 대한 대책은 무엇인지 신중하게 고려해야 할 것이다. 그 대책 중에 하나로 콘크리트의 기능성 부여를 생각해 볼 수 있으며 환경 친화적인 콘크리트 개발이 필요하다. 최근 환경 친화성을 비롯한 안전성, 내구성 등의 확보를 위한 새로운 개념의 고성능 콘크리트의 연구가 크게 각광을 받고 있다. 그 대표적인 것으로서는 스마트 콘크리트를 들 수 있다. 스마트(smart)라는 용어는 사전에서 보면 영리한, 현명한 등의 뜻으로 표현되고 있다. 따라서 스마트 콘크리트는 환경에 따라 움직이며 적응하는 생명체의 특성을 가진 콘크리트를 말하며 환경대응형의 지능을 지닌 재료라고 말할 수 있다.

본 고에서는 스마트센서의 최근 현황과 스마트계측에 의한 안전성 모니터링과 관련하여 개략적인 내용을 서술하고자 한다.

### 2. 스마트재료

스마트라는 용어는 원래 영리한, 현명한의 뜻을 가지고 있다. 최근 건설 영역에 있어서, 스마트 재료·구조라는 용어가 자주 등장하고, 그에 대한 관심이 고조되고 있다.

이 용어의 정의를 내리면 생물과 같이 환경조건 변화에 따라 스스로 그 기능을 대응시켜 나가는 재료와 구조를 의미한다.

무생물인 건설재료와 구조가 주변 환경의 변화를 감지하여 자기 스스로 진단하고 거기에 적응하여 스스로를 조절할 수 있는 능력이 있다면, 향후 사회 경제 발전에 크게 공헌한다는 것은 자명한 일이다. 스마트 재료는 크게 수동형 스마트재료, 능동형 스마트재료로 나눌 수 있고 이중 후자는 환경 변화를 감지할 수 있는 센서와 반응할 수 있는 액추에이터로 구성되어 있다.

수동형 스마트재료(passively smart materials)는 외부 환경이 달라짐에 따라 적당한 방법으로 반응하는 재료를 의미하며, 자기가 갖는 특성을 향상시키기 위해 외부 장(external force)이나, 힘, 또는 피드백 시스템을 갖고 있지 않다는 점에서 능동형 스마트재료(actively smart materials)와 다르다. 능동형 스마트재료는 센서와 액추에이터로 구성되며 센서와 함께 능동형 스마트 재료를 구성하는 액추에이터는 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)같은 것이 쓰인다. 지금까지의 재료는 기계적 성질, 열적 성질, 전자기적 성질, 화학적 성질, 광학적 성질 등의 기능성을 높이는 것을 목표로 하여 연구되어 왔다. 그러나 기계적 성질을 중시한 구조재료와 전자기적 성질이나 광학적 성질 등을 중시한 기능재료의 연구가 따로따로 행하여져 왔다. 또한 2가지 이상의 서로 다른 재료요소를 조합시켜 개개의 요소에 없었던 특성을 창출해 내는 복합재료도 구조재료와 기능재료의 연구가 별개로 행하여져 왔다. 약 10년 전에 일본에서 제안된 인텔리гент 재료의 개념은 합금과 같이 원자 레벨이 다른 것을 섞어 지적능력을 갖는 재료를 인공적으로 창제하는 것을 목표로 한 것으로 그 구체적인 연구 성과는 먼 장래가 될 것이다. 한편 같은 무렵 미국에서 제안된 스마트재료의 개념은 섞은 원래의 소재를 구별 할 수 있는 복합재료에 지적능력을 갖게 하는 것을 목표로 하는 것이다. 따라서 스마트 재료는 스마트 복합재료라고도 할 만한 것이다. 이들

\* 정회원, 경북대학교 건축학부 교수  
kimwj@kyungpook.ac.kr

\*\* 정회원, 동성중공업 기술연구소 선임연구원

은 어느 쪽도 지금까지의 물성과 기능에 초점을 맞추어 연구 개발해 온 재료에 정보과 제어 개념을 도입해 이들이 융합된 재료 시스템으로 자리 잡을 수 있는 새로운 시점에 와 있다.

### 3. 스마트 센서

센서를 이용해서 재료나 구조물 특정부위에서의 상태 변화를 감지하는 방법에는 다음 2가지 경우가 있다. 측정 점에서의 물리량, 예를 들면, 온도와 변형을 양적으로 구하는 경우와 측정량이 미리 정해진 일정치를 초과 했는가 안했는가를 판정하는 경우이다. 특히, 보수(保守)검사를 중심으로 한 건전성 모니터링(health monitoring)에서는 부재의 파손 박리 균열발생 변형량이 역치(threshold value)를 초과했는가 안 했는지 등, 후자의 경우에 해당하는 측정으로 충분히 유용한 경우가 있다. 스마트 재료용 센서로서의 조건은 우선, 센서를 구조재료와 복합화할 경우에 모재인 구조재료에의 영향을 가능한 한 작게 해야 한다. 이를 위해 센서 치수는 복합재료의 단위구조에 대해 충분히 작아야 한다. 또한, 센서의 강도와 내환경성은 모재와 거의 같은 수준에 있어야 한다. 더욱이 센서에는 점 측정으로부터 선가 면이 넓은 영역을 용이하게 커버해 얻을 수 있을 것, 측정결과가 신속히 얻어질 것, 내구성이 있을 것, 접촉해 사용하는 측정기까지를 포함하는 측정계 전체가 비교적 저가이고 대량으로 사용할 수 있을 것, 컴퓨터와 용이하게 결합할 수 있고 신호처리와 화상출력이 용이할 것 등의 성능이 요구된다.

특히, 센서가 커버하는 피측정 영역이 스마트재료용 센서로서 중요하다. 넓은 범위의 불특정 위치 또는 평균화 된 상태량을 센싱하는 광역형 센서, 센서부분을 갖는 복수의 센서로부터 된 분산형 센서, 센서의 특정 위치에 복수의 센서부분을 갖는 다점형 센서, 센서부분을 갖지 않고 센서 전체의 임의 위치에서의 센싱이 가능한 분포형 센서를 고려할 수 있다. 스마트재료용 센서로서 변형률게이지, 광화이버, 형상기억합금, 압전재료 등을 들 수 있다. 센서의 선택지침이 되는 재료의 종류, 피측정량, 측정영역, 응답속도, 비용을 각각의 센서에 대하여 나타내면, <표 1>와 같이 된다. 센서의 사용 환경으로부터 센서의 치수, 중량, 강도, 내환경성 등이 특정된다. 피측정량, 측정영역, 응답속도, 비용 등을 고려해서 목적에 적합한 센서를 선택하는 것이 중요하다.

#### 3.1 변형률게이지

변형률게이지는 극히 가는 저항금속선이나 금속호일이 신축하여 전기저항이 변하는 것에 의해 어느 점의 변형률을 측정하는 센서이다. 1센서 당 왕복 2 가닥의 리드선이 필요하기 때문에 너무 장거리에 있는 점에서의 측정은 곤란하다. 더욱이 변형

표 1. 스마트 재료용 센서

분류	재료	피측정량	측정영역	응답속도 (kHz)	비용
변형률 게이지	금속세선, 금속호일	변형률, 응력	다점	0-500	저
광화이버	석영유리, PMMA 등	변형률, 응력, 온도, 습도, 전자계	평균 분포, 다점	0-10	재료, 방법에 의함
압전재료	PVDF, PZT 등	변형률, 응력, 압력	평균, 다점	104-20	보통
형상기억 합금	Ni, Mn, Ga, Ti, Ni 등	온도, 자기	평균	10-3-10-1	재료에 의함

률게이지는 싸지만, 측정기를 포함한 측정계가 비교적 고가이다. 그러나 기본적으로는 양의 측정을 행하기 때문에 측정량을 정확히 측정할 수 있다.

#### 3.2 광화이버 센서

광화이버를 이용하는 센서는 이론적으로 여러 종류의 물리량 및 화학량의 측정이 가능하며 측정대상에는 온도, 변형도, 변위, 유속, 회전속도, 진동, 압력, 전계, 자계, 전류, 가스농도 등을 들 수 있다. 콘크리트 구조물의 경우 변위 및 변형량이 일반적으로 측정의 대상이 되며 광화이버 센서에 의해서 구조물에 발생하는 변위 및 변형량의 측정원리로 센서에 작용하는 변형량에 의해 변화하는 광의 특성(광의 간섭호(F涉縮), 후방 산란현상, 광의 강도 변화)이 이용되어 변위 및 변형량을 평가하는 것이다.

##### 3.2.1 광학요소감시체계(OSMOS : Optical Strand Monitoring System)

광화이버를 통과하는 광(光)은 경로에 휩이 있으면 그 경로에서 광이 외부로 노출되어 화이버 내부를 통과하는 광의 강도가 감소한다. 이 원리에 의해 구조물의 변형을 감지하는 것이 광학요소감시체계(OSMOS)이다(그림 1).

##### 3.3.2 브리유앵 광섬유시험기(BOTDR : brillouin optical time donain reflectometer)

변형의 측정원리는 산란광의 주파수 분포가 광화이버 내에 발생하는 변형에 비례하여 이동하는 특징을 이용하는 것이다(그림 2).

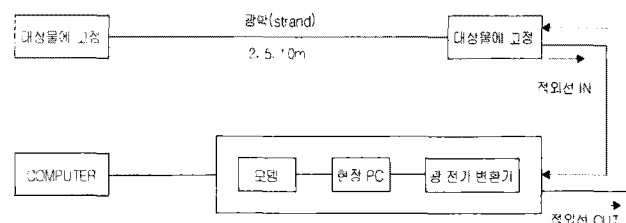


그림 1. 광학요소감시체계(OSMOS)의 사양 기기 구성

### 3.3.3 섬유 브래그 격자판(FBG : fiber bragg grating)

섬유 브래그 격자판(FBG)는 통신용 광화이버 코어(CORE)의 일부분에(길이 10 mm 정도) 자외선에 의한 가공으로 굴절율의 주기변화를 가지도록 층을 낸 구조로 되어 있다. 광화이버에 연속적인 파장의 광을 입력하면 섬유 브래그 격자판(FBG)의 틸(Slit)의 피치(Pitch)  $\Lambda$ 가 변화하여 그것에 상응하는 파장  $\lambda$ 도 변화하기 때문에 섬유 브래그 격자판(FBG) 측정 시스템의 출력에 의해 변형량을 측정할 수가 있다(그림 3).

### 3.3.4 패브리 페로 간섭계(Fabry-Pe[rot interferometer)

2개의 평범한 거울면 간에 입사한 광이 2개면을 몇 번이고 반사해 거울로부터 빠져나가면 거울간의 거리의 미소한 변화에 대응하는 간섭호(干涉縞)가 생긴다. 이를 이용하여 변위를 측정하는 방법이다(그림 4).

### 3.3.5 마이켈슨 스텔라 간섭계(Michelson Steller interferometer)

평행광선을 반 투과 거울에서 2개로 나누어 각각의 광을 평면경에 반사시키면 되돌아오는 빛(光)은 간섭이 생긴다. 한편의 평면거울을 이동시키면 반파장마다 간섭호(縞)의 염양이 반복되는 현상을 이용, 변위를 측정하는 방법이다.

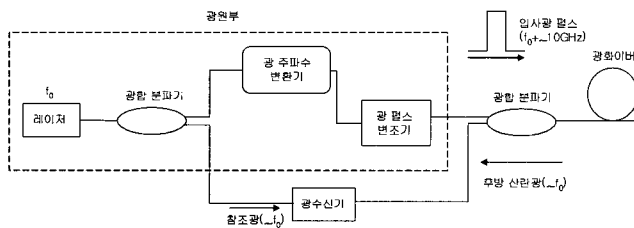


그림 2. 브리유앵 광섬유시험기(BOTDR)의 기본 구성

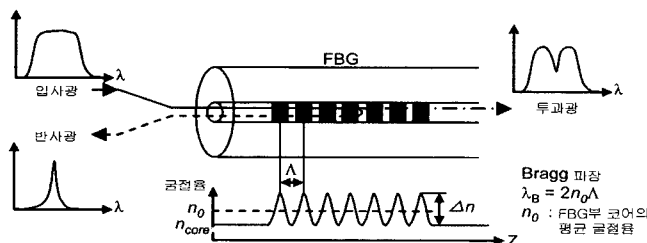


그림 3. 섬유브래그격자판(FBG)의 구성

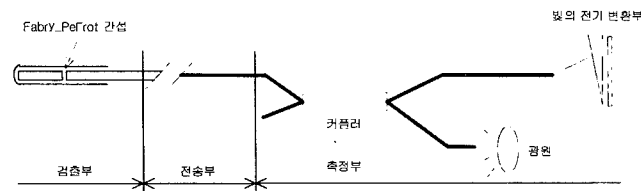


그림 4. 패브리 페로(Fabry-Pe[rot) 간섭계의 구성

### 3.3 압전재료

압전재료는 인가(印加) 전압에 따라 신축하고, 외력에 따라 전하가 유기된다. 즉, 압전재료는 센서와 액츄에이터 양방의 기능을 갖는 재료이다. 압전재료에는 압전세라믹과 압전고분자 및 이들의 복합체가 있다. 압전세라믹으로서는 PZT, PLZT 등이 있고, 압전고분자로서는 PVDF 등이 있다.

압전소자는 티탄산바륨이나, 로셀염 등 압전세라믹이나 수정 등의 외부 응력에 대한 전기분극 현상 즉, 압전현상을 이용한 것으로 0.1 Hz ~ 40 KHz의 범위에서 10<sup>-3</sup> ~ 10<sup>4</sup> G에 이르기까지의 광범위한 가속도를 측정하는데 사용되고 있는 센서이다. (그림 6)과 같이 티탄산바륨, 티탄산지르코늄 등의 결정 표면에 전극을 취하고 진동충격 등의 동적 하중을 가하면 결정 표면에 외력에 비례한 전하가 발생한다. 진동으로 가해지는 압축력이나 장력은 구조에 따라 달라지며, 압전정수를 크게 취할 수 있기 때문에 고가속도, 고주파수, 고감도센서에 가속도에 비례한 전하의 변화를 이용한다. 압전형 가속도계는 소형, 경량으로 외부전원이 필요 없으며, 주파수 범위가 넓기 때문에 일반기계, 진동, 차량 등의 진동이나 고주파수, 큰 가속도, 충격측정에 사용된다. 또한 출력력을 적분하여 속도를 산출할 수 있으므로 대단히 높은 주파수에서 미소한 범위의 속도 측정이 가능하며, 기계계 진동의 고속퓨리에 변환(FFT)나 모델 해석을 위한 검출기로 사용된다.

### 3.4 형상기억합금

저온에서 부여된 소성변형률이 가열에 의해 회복되는 현상을 형상기억효과라 한다. 마틴사이트상변태에 기인하는 형상기억효과를 갖는 합금을 형상기억합금이라 한다. 대표적인 형상기억합

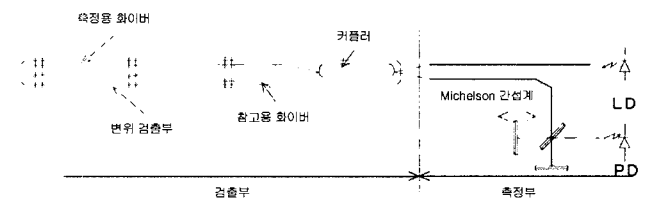


그림 5. 마이켈슨(Michelson) 간섭계의 구성

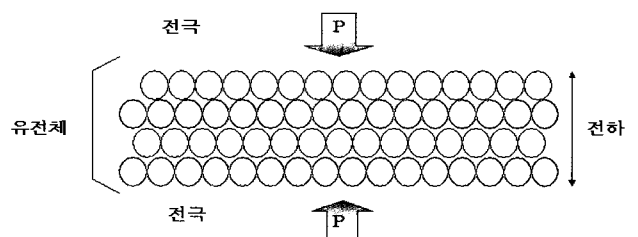


그림 6. 압전현상의 개요

금은 TiNi, CuAlNi, NiAl 금속간 화합물계와 철계의 FeNiCo, FeNiCo, FeMnCi 등 10 종류이상에서 발견되고 있다. 또한 형상기억합금에는 고온측 오스테나이트상에서의 응력유기(論起) 머틴사이트상태에 의해 일어나는 초탄성효과가 있다. 따라서, 형상기억합금은 센서로서 보다 액추에이터로서의 응용에 주안을 두어 연구되고 있다. 형상기억합금의 온도와 응력센서로서의 능력은 다른 센서와 같이 상태량 변화를 정보로서 얻는 것은 아니고, 형상기억효과가 일어나는 온도나 초탄성효과가 일어나는 응력을 검지함과 더불어 액추에이터로서의 형상변화를 일으킨다. 즉, 센서와 액추에이터가 일체로 된다고 하는 점에 특징이 있다.

#### 4. 스마트 콘크리트

##### 4.1 유리관센서를 이용한 손상자현 콘크리트

콘크리트의 안전성을 평가하는데 있어서 휨이나 전단파괴에 영향을 주는 균열을 감지하는 것은 매우 중요하다. 이러한 균열을 감지하는 수법으로는 육안으로 검사하는 방법이 일반적인 방법이다. 이러한 방법은 모든 균열을 감지 할 수 없기 때문에 균열을 감지하기 위해 많은 인력이 필요하다. 이러한 방법을 보완하기 위해 콘크리트 내부에 균열자현 액체를 내포함으로써 능동적으로 균열을 감지하기 위하여 콘크리트와 유사한 취성재료인 유리관을 균열손상이 예상되는 부분에 매입하여 타설함으로써 균열이 발생될 때 유리관을 파손시켜 유리관 내부에 균열자현액체가 흘러나와 균열을 감지하도록 하는 방법이다(표 2, 그림 7~9).

##### 4.2 전기적 소자와 무선 송수신기를 이용한 모니터링 스마트 콘크리트

건축구조물의 부재변형을 감지하는 방법으로 변형게이지(strain gauge)를 많이 사용하고 있다. 변형게이지는 재료에 따라 종류가 여러 가지 있으며, 부재에 부착하여 변형이 발생하면 게이지 내부의 저항이 변하므로 이때 자료기록장치(DATA Logger)에서 흘러주는 전압의 강하를 측정하여 게이지 계수를 곱하여 변

표 2. 사용재료

사용재료	특징
시멘트	보통포틀랜드 시멘트, 비중: 3.15, 분말도: 3,260 cm <sup>2</sup> /g
잔골재	낙동강모래, 비중: 2.56, 최대치수: 2.5 mm
굵은골재	철곡산 깬자갈, 비중: 2.6, 최대치수: 13 mm
유리관	∅ 4, ∅ 6, ∅ 8, ∅ 10 파이렉스 유리
내포액	알코올과 붉은색 잉크 혼합물, K사의 이액형보수제(에폭시수지, 경화제), 일액형보수제(acrylonitrile)

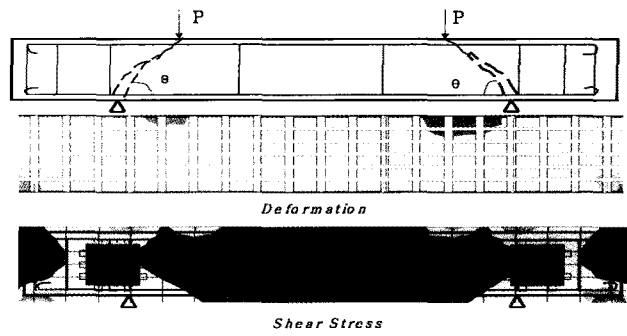


그림 7. 양방향 센서 위치그림

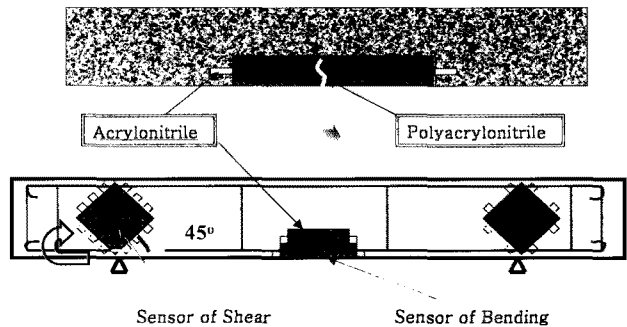


그림 8. 시험 센서 및 보수제의 위치

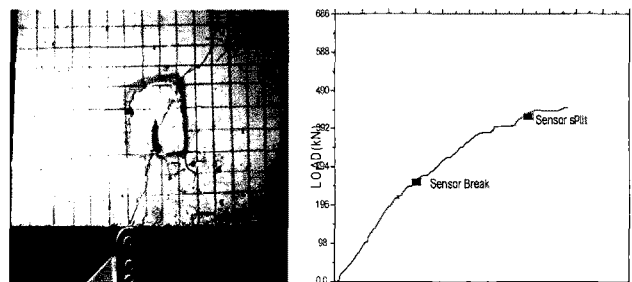


그림 9. 하중-변위곡선

형량으로 산출한다. 이러한 방법은 측정의 1회성에 머무를 수 있는 단점이 있고 측정 장소에 대한 단점과 상시측정을 위한 제약, 시공 상 습기로 인한 누전 등의 문제가 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 인간이 시각적 감지를 할 수 있는 발광다이오드(LED)를 이용한 방법과 전기선의 저항을 이용하는 방법, 무선발신자의 전압강하를 이용한 단순 손상발신기능을 이용하는 방법, 철분말(iron powder) 폴리에스테르의 저항변화를 이용하는 방법이 있다(그림 10).

##### 4.3 자기보수 기능을 갖는 콘크리트

재료의 파괴를 방지하거나 부하의 크기 등을 제어할 수 있으면, 구조물의 안전성은 매우 증대된다. 재료의 지능화는 이와 같은 요구조건에 응하는 것이라 할 수 있다. 이를 위해서는 센

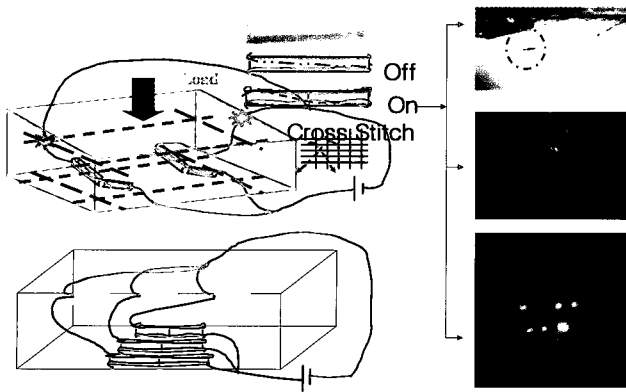


그림 10. 손상시 무선발신 계통도

서, 프로세서, 액추에이터 등의 요소가 필요한 것은 이미 언급하였지만, 현실 문제로서 이와 같은 복잡한 시스템을 생각하지 않더라도 환경자극이나 상황변화에 대응할 수 있는 지능화가 진행되고 있다.

여기서 소개하는(그림 11) 「① 마치 생체의 상처가 자연적으로 치유되도록 미세한 균열을 자기복구하는 프라스틱계 복합재료」의 개발이라고 할 수 있다. 이 연구는 미국 일리노이대학의 연구그룹에 의해 수행된 것으로, 상세내용은 영국과학지 「Nature」 (2001년 2월 15일 발행)에 보고된 것이다.

이 상처를 스스로 치료할 수 있는 프라스틱계 복합재료는 액상의 복구재가 들어간 직경 0.05 ~ 0.2mm의 마이크로캡슐과 복구재를 경화시키는 촉매입자를 다수 혼합시켜 고화시킨 것으로, 에폭시수지를 베이스로 한 복합재료이다. 즉, 이 에폭시계 복합

재료는 일단 재료에 균열이 발생하면, 재료의 파괴와 동시에 이 캡슐이 파괴되어 액체가 유출되고 복구재가 촉매와 접촉해서 균열 틈에 침입하는 구조로 되어 있다. 더구나 이와 같은 조작이 파괴가 진행되는 과정에서 자동적으로 이루어짐으로써 파괴면은 서로 접촉되고 재료자체의 복구가 이루어지는 것이다.

#### 4.4 환경대응 광촉매 콘크리트

실험의 개요는 대기 환경을 악화시키는 VOCs 벤젠(VOCs Benzene), 톨루엔(Toluene) 등, 휘발성 유기화합물과 질소산화물(NOx) 및 실내의 포름알데히드(HCHO)등의 유해 가스를 광촉매 반응 원리를 이용하여 흡수·제거하기 위한 콘크리트를 개발하기 위하여 콘크리트 배합시에 광촉매를 첨가하여 유해가스 정화 기능을 부여하고, 이와 함께 광촉매의 치환율에 따른 콘크리트의 유해물질 제거 성능과 물리적 특성을 알아보려 한다.

광촉매 콘크리트의 제작하기 위해 우선 광촉매 종류별 대기 유해 물질 제거 성능 및 물리적 특성을 확인하는 기초실험을 통하여 콘크리트에 대한 최적의 광촉매 첨가량과 실험배합을 도출하고, 광촉매 콘크리트의 대기 및 실내 유해물질 제거 성능을 평가하여 실용화를 도모하는 것을 목적으로 한다. <표 3>은 실험인자 및 수준으로 콘크리트에 적용할 적절한 광촉매 치환율과 광원의 종류에 따른 대기 유해물질 제거성능을 결정하여 아래의 표와 같은 실험 인자와 수준으로 실험을 행하였다.

<표 4>는 콘크리트의 일반적인 배합을 기초로 하고 단위수량을 185, 물시멘트비를 50%로 고정하였으며 광촉매의 치환율

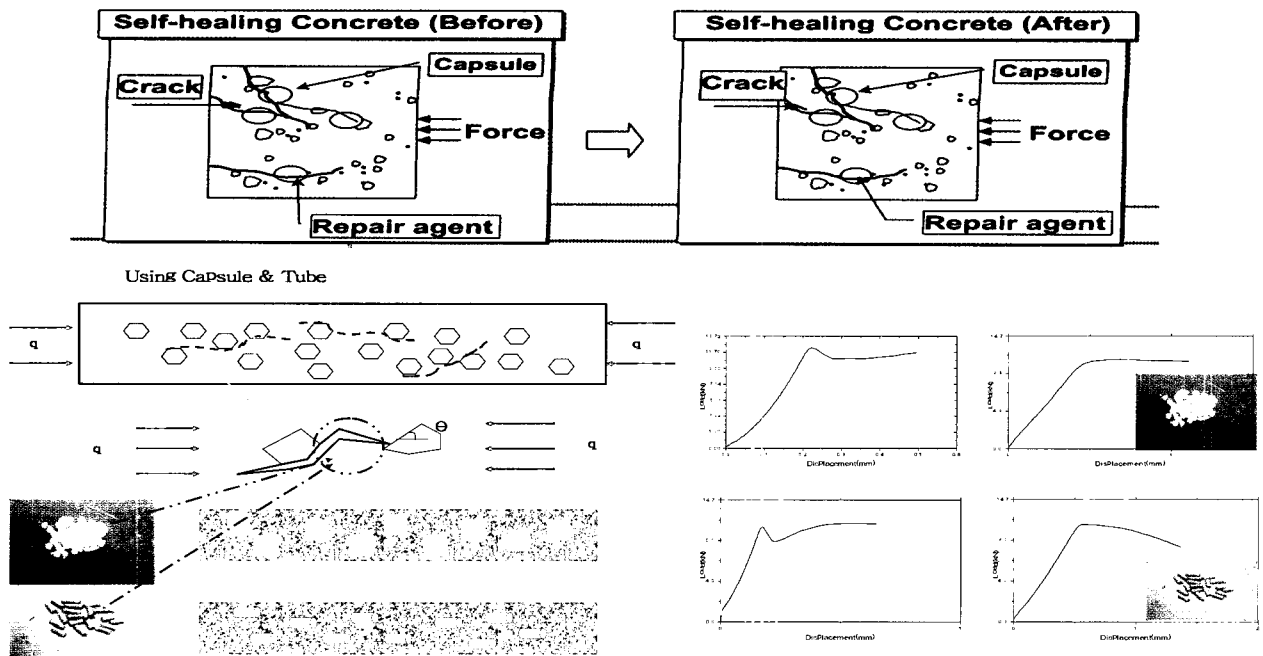


그림 11. 중성체 합성물의 자치치유(Autonomic healing of polymer composites)

표 3. 실험인자 및 수준

실험인자	실험변수	실험수준	측정항목
광촉매 콘크리트		0%	예추석(Anatase)형 광촉매 W/C = 50%
	광촉매 치환율	1%	
		3%	
		5%	
		7%	
광원	UV램프	1시간 간격	NOx 제거성능 VOCs 제거성능 HCHO 제거성능
	형광등 태양광	4시간 측정	

을 시멘트 중량비 각각 0%, 1%, 3%, 5%, 7%로 치환하여 배합을 적용하였다.

〈그림 12〉은 대기유해물질 성능 실험으로 35 cm × 35 cm × 6 cm의 크기로 제작된 시험체를 24시간 후 탈형한 뒤 28일간 수중 양생하여 밀폐식 진공시험장치와 태양광 시험장치를 이용하여 대기유해물질 제거성능을 측정하였다.

시험장치 안에 시험체를 거치시키고 UV라이트, 형광등, 태양광으로 광원을 달리하여 질소산화물, 톨루엔(Toluene), 포름알데히드 가스를 주입한 후 1시간 간격으로 4시간동안 검지판법을 이용하여 유해가스의 농도 변화를 측정하였다.

〈그림 13~15〉는 예추석형(Anatase형) TiO<sub>2</sub>을 치환하여 제조한 콘크리트 패널의 NOx 제거성능을 광원에 따라 나타내었다.

〈그림 16~18〉은 예추석형(Anatase형)TiO<sub>2</sub>을 치환하여 제조한 콘크리트 패널의 톨루엔(Toluene) 제거성능을 광원에 따라 나타내었다.

〈그림 19~21〉은 예추석형(Anatase형) TiO<sub>2</sub>을 치환하여 제조한 콘크리트 패널의 포름알데히드 제거성능을 광원에 따라 나타내었다.

0%, 1%, 3%, 5%, 7%의 예추석형(Anatase형) TiO<sub>2</sub>를 치환한 콘크리트의 질소산화물, 톨루엔(Toluene), 포름알데히드의 제거실험 결과 예추석형(Anatase형) TiO<sub>2</sub>를 치환한 콘크리트의 경우 대기유해물질 제거성능이 높게 나타났으며 TiO<sub>2</sub>를 치환하지 않은 콘크리트 경우 대기유해물질 제거가 거의 일어나지 않았다. TiO<sub>2</sub> 치환율에 따른 대기유해물질 제거성능은 0%, 1%, 3%, 5%까지의 치환율에서는 치환율이 높을수록 제거성능이 우수하게 나타났으나 5%와 7%의 치환율에서는 거의 비슷한 제거성능을 나타냈다. 광원별 제거성능은 치환율에 상관없이

표 4. 실험배합

W/C (%)	S/a (%)	광촉매 치환율 (%)	단위중량(kg/m <sup>2</sup> )			
			W	C	S	G
50	42	0	185	370	715	1032
		1				
		3				
		5				
		7				

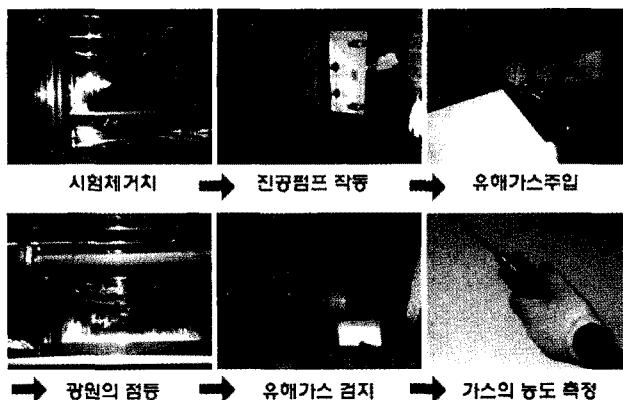


그림 12. 밀폐식 진공시험장치의 실험순서

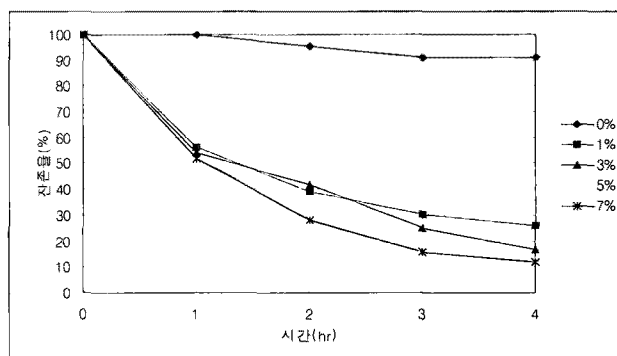


그림 13. UV램프 광원 하에서의 질소산화물(NOx) 제거성능

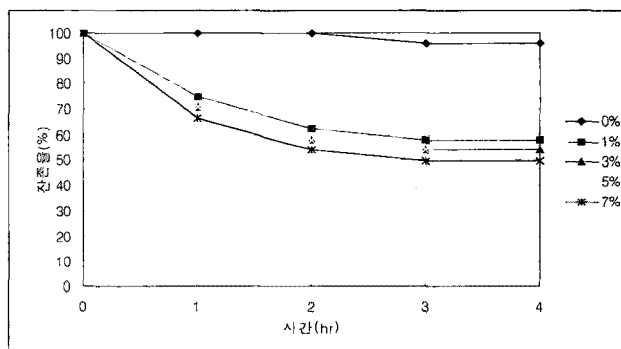


그림 14. 형광등 광원 하에서의 질소산화물(NOx) 제거성능

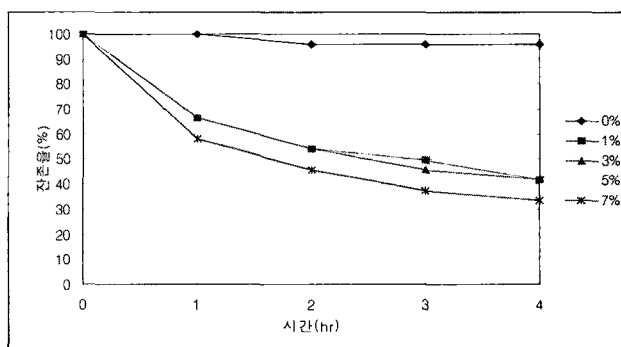


그림 15. 태양광 하에서의 질소산화물(NOx) 제거성능

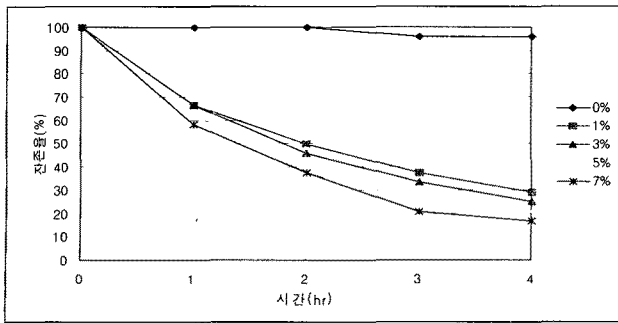


그림 16. UV램프 광원 하에서의 톨루엔(Toluene) 제거성능

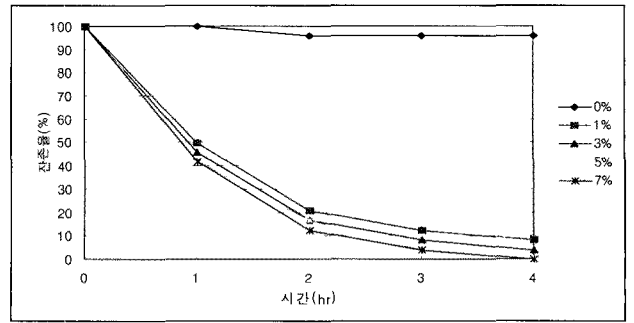


그림 19. UV램프 광원 하에서의 포름알데히드(HCHO) 제거성능

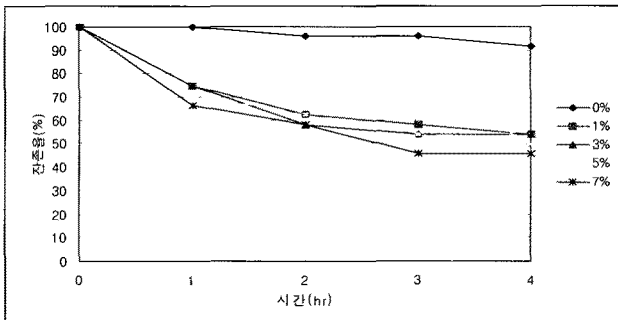


그림 17. 형광등 광원 하에서의 톨루엔(Toluene) 제거성능

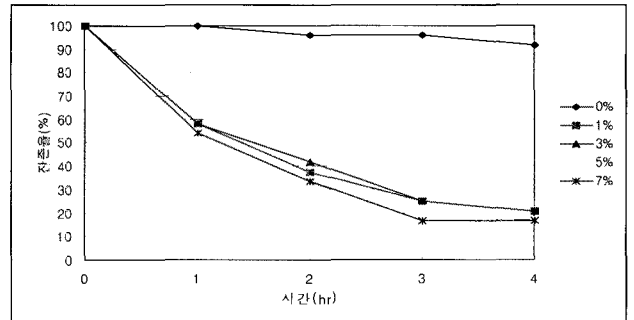


그림 20. 형광등 광원 하에서의 포름알데히드(HCHO) 제거성능

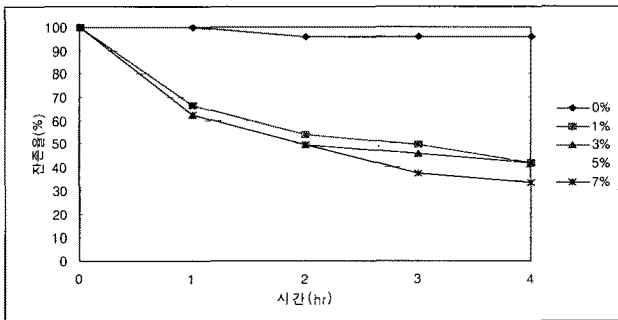


그림 18. 태양광 하에서의 톨루엔(Toluene) 제거성능

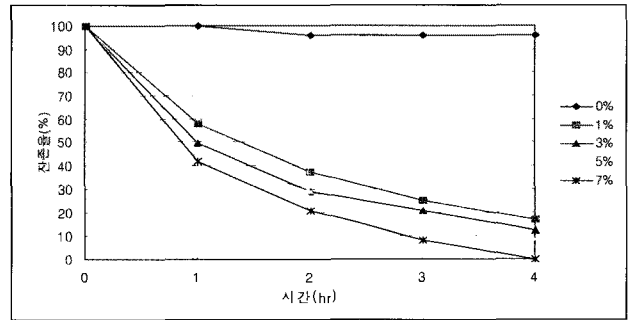


그림 21. 태양광 하에서의 포름알데히드(HCHO) 제거성능

밴드갭 이상의 파장이 많이 포함된 UV라이트, 태양광, 형광등 순으로 나타났으며 광원별 제거성능에서도 5%와 7%의 치환율 일 때도 거의 비슷한 제거성능을 나타냈다.

결론적으로, TiO<sub>2</sub>를 콘크리트에 적용시, TiO<sub>2</sub>의 치환율이 증가할수록 대기유해물질 제거성능이 우수한 것으로 나타났다.

이상과 같이 TiO<sub>2</sub>를 콘크리트에 적용하여 개발한 건설재료가 대기오염물질을 흡착 및 제거할 수 있다는 것을 확인하였다.

## 5. 콘크리트 건전성 모니터링

### 5.1 콘크리트 강도추정연구

콘크리트의 강도를 추정하는 비파괴 시험법으로 탄성반발법과 초음파 전파 속도법, 복합법, 코어채취에 의한 압축강도 시

험법등이 주로 사용되고 있으며, 기존의 압축 강도 추정식을 이용하는 방법이 많이 사용되고 있다. 기존의 비파괴 시험법은 신뢰성면에서 좋지 못한 결과를 얻는 경우가 있고, 실제로 얻어진 결과를 회귀 분석하여 회계식을 제안하고 있다.

국내외적으로 압축강도에 관한 여러 연구를 수행하고 있으나 이러한 연구는 해석에 의한 신뢰성 평가에 대한 연구를 대부분 수행하고 있으나, 실험적으로 연구하고 있는 부분은 아직 미진한 실정이다. 현재 많은 연구분야에서 사용되고 있는 압전소자를 이용하여 새로운 비파괴 검사법을 제안하고자 한다. 기존에 제시된 탄성파에 의한 파동 전파 방법은 충격반향 기법과 MiSA(modified impact-echo test)-수정반향기법, 다채널 수정반향기법<sup>1)</sup>이 있다(그림 22 ~ 24).

본 연구는 콘크리트 강도를 측정하기 위해 압전소자간의 속도차를 측정하기 위하여 다채널 수정반향기법을 이용하여 콘크

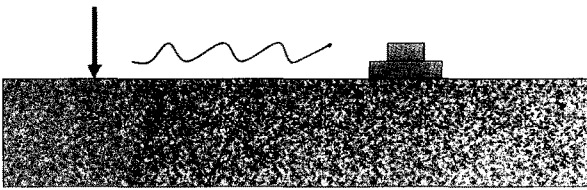


그림 22. 충격반향 기법

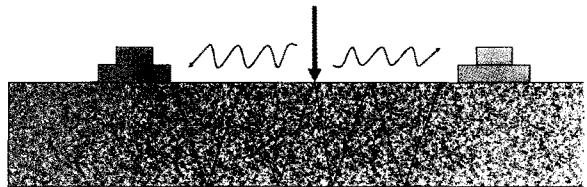


그림 23. MiSA-수정 반향기법

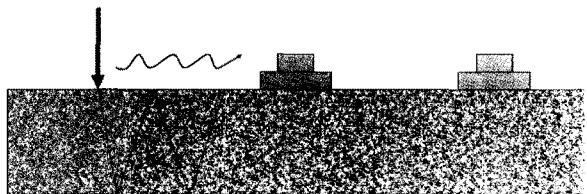


그림 24. 다채널 수정 반향기법

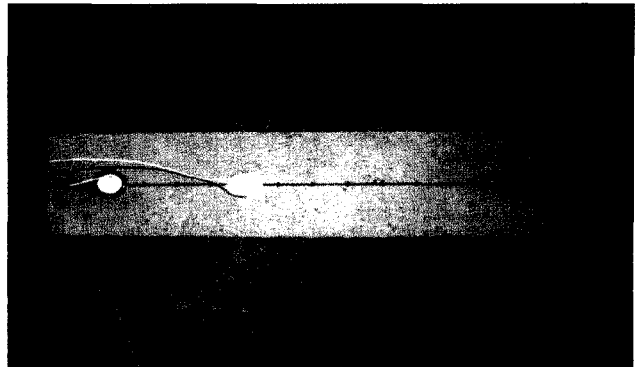


그림 25. 압전소자가 부착된 보 시험체

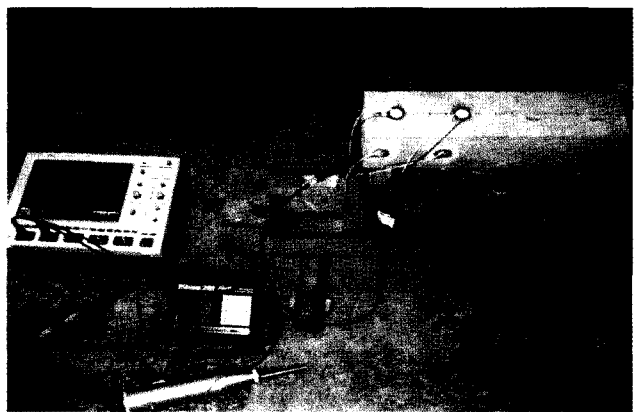


그림 26. 휨 시험체의 슈미트해머의 타격

리트 강도를 예측하였다.

압축강도가 서로 다른 공시체(∅ 100 X 200 mm), 보 시험체(100 X 100 X 200 mm)에 각각 압전소자를 일정한 간격으로 부착하고 슈미트 해머를 가격, 슈미트 해머에서 발생하는 탄성파에 의해 부착된 압전소자의 전압을 측정하고 측정된 속도차로 콘크리트의 강도를 예측하였다(그림 25, 26).

측정에 사용된 압전소자는 MURATA사의 원판형(type of disk) 소자를 이용하였으며, 압전소자의 전압의 측정은 르크로이(lecroy)의 웨이브서퍼 454 오실로스코프(wavesuffer 454 oscilloscope)와 만능재료시험기(UTM)를 사용하였다. 그리고 만능재료시험기(UTM)으로 실제 압축강도를 측정 비교 검증하였다.

다음은 강도가 서로 다른 ∅ 100 x 200 mm인 공시체와 100 x 100 x 200 mm인 보 시험체의 측정된 속도 차이(그림 27 ~ 34).

압축강도가 클수록 전압값의 속도는 빨라지고 압축강도가 작을수록 속도는 늦어짐을 알 수 있다. 회귀분석을 이용한 결과 다음과 같은 식을 얻었다(그림 35).

$$Y = 14.32 x + 12.73$$

## 5.2 모터가진에 의한 콘크리트 손상예측

국내 대부분의 구조물은 철근콘크리트 구조물이며, 이러한 구조물에서 발생하는 결함은 콘크리트 표면에 발생하는 균열로

아기된다. 이러한 평가방법은 결함의 종류를 평가하기 어렵고, 검증하려는 재료의 내부상태 및 계층자의 숙련도에 따라 결과가 상이한 결점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 국내외적으로 여러 연구를 수행하고 있으나 이러한 연구는 해석에 의한 신뢰성 평가에 대한 연구를 대부분 수행하고 있으며, 실험적으로 연구하고 있는 부분은 아직 미진한 실정이다.

콘크리트는 유지보수가 쉬운 재료이기는 하지만 발생하는 손상 즉, 균열은 시공상, 구조적 문제등 여러 가지 요인으로 발생된다. 기존의 연구방법의 문제점은 재료의 매질, 공극, 공극, 균열의 방향, 철근의 유무와 배근상태에 따라 결과가 상의 하게 나타날 수 있다. 여기에서는 이러한 영향을 저감할 수 있도록 모터(motor)진동의 가진에 의한 압전소자의 진폭(amplitude)과 주파수(frequency) 응답을 콘크리트 표면에 발생한 균열 손상을 발생하기 전과 발생한 후를 비교하는 것을 소개한다.

실험에 사용된 시험체는 <그림 36 ~ 37>과 같다. 실험에 사용된 모터제원은 <그림 38>과 <표 5>와 같다.

<그림 39 ~ 43>은 100 x 100 x 400 mm의 무근 콘크리트 휨시험체를 모터 7500 RPM으로 가진 시의 실험결과이다.

손상이 없을 때 모터의 가진과 압전소자의 응답결과는 같게



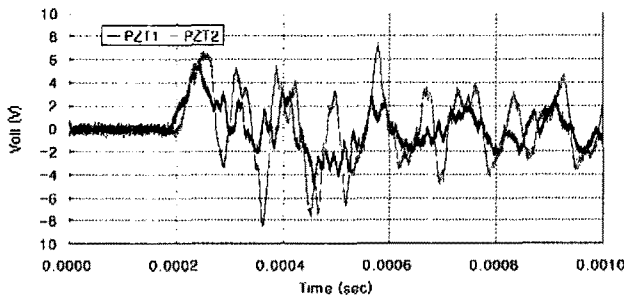


그림 27. A 공시체의 전압

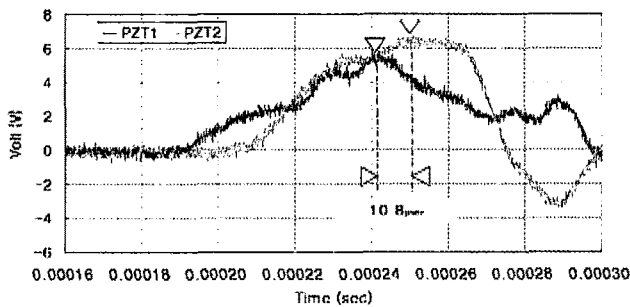


그림 28. A 공시체의 속도차

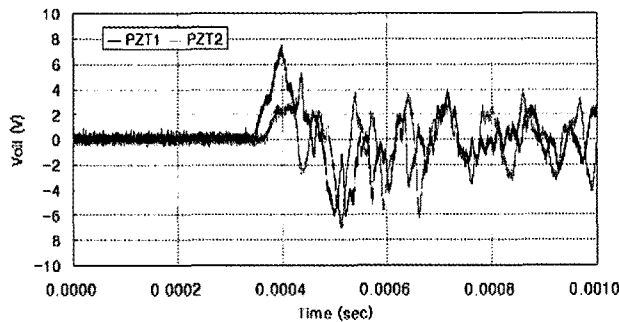


그림 29. B 공시체 전압

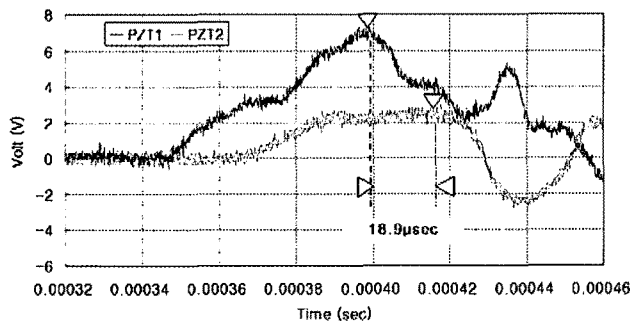


그림 30. B 공시체의 속도차

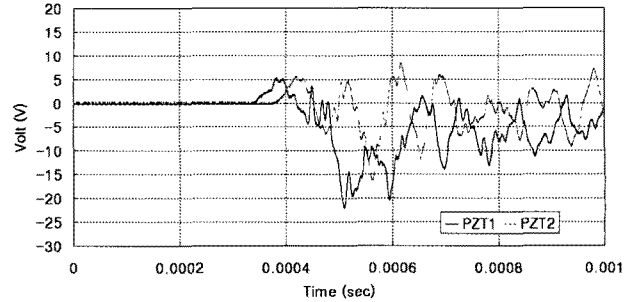


그림 31. 고강도 보(High Strength Beam)의 전압

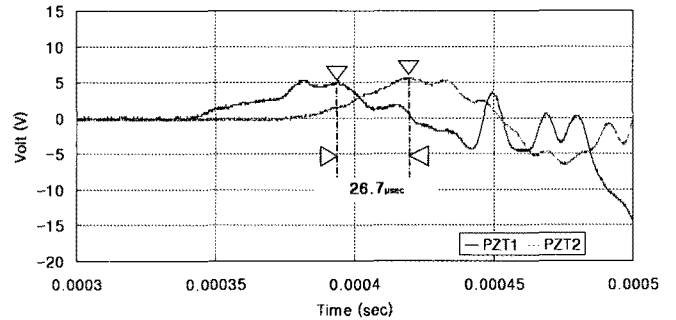


그림 32. 고강도 보(High Strength Beam)의 속도차

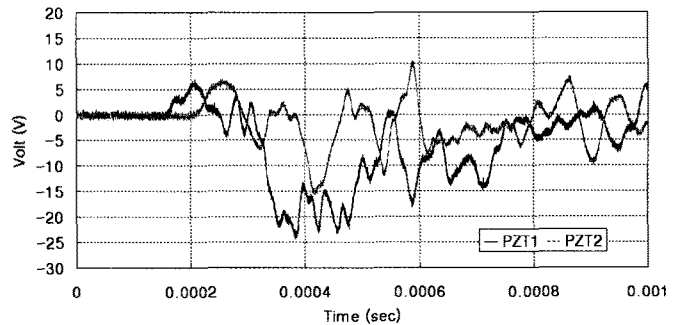


그림 33. 표준강도 보(Normal strength Beam)의 전압

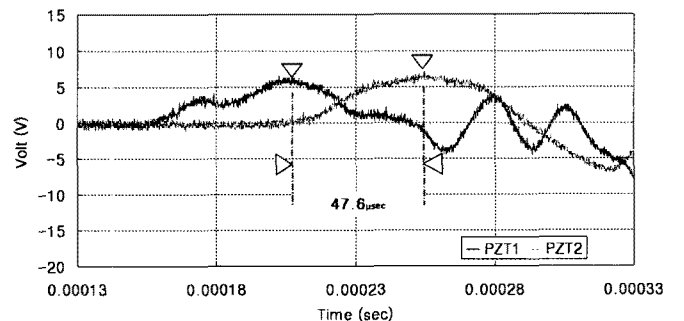


그림 34. 표준강도 보(Normal strength Beam)의 속도차

나타났으며, 손상이 부재 길이 방향으로 1/3지점, 1/2지점에 각각 노치를 준 경우에 모터의 가진과 같은 전압영역에서 진폭의 변화가 발생하였다.

〈그림 44 ~ 49〉는 200 × 200 × 1000 mm의 무근 콘크리트 휨시험체를 모터 7500 RPM으로 가진 시의 실험결과이다.

모터의 가진거리가 300 mm일 경우 균열이 발생하지 않은 부분과 발생한 부분에 대해 비교검토한 결과 모터의 가진 거리 300 mm일 경우, 균열이 발생하지 않은 경우 보다 발생한 경우가 모터의 가진이 3 × 10<sup>5</sup> Hz에서 1.1배 증가하였으며, 150 mm 일때 1.1배 감소됨으로 초음파법에서의 단점에서처럼 철근 배근

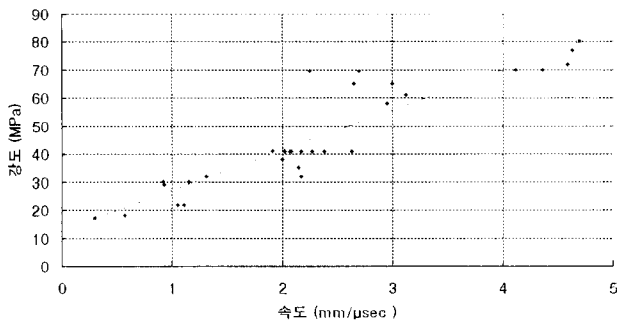


그림 35. 회귀분석을 이용한 강도-속도 그래프

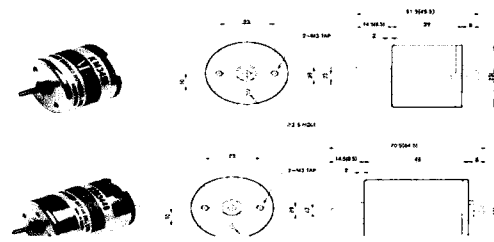


그림 39. 손상되지 않은 보

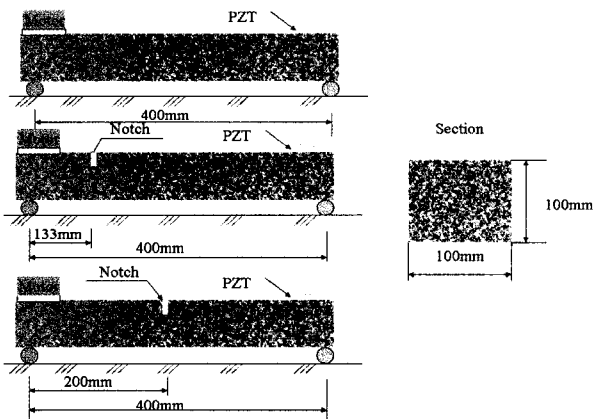


그림 36. 100X100X400mm의 휨 시험체 실험방법

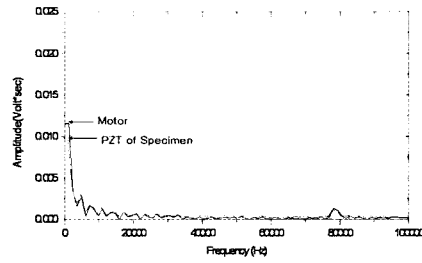


그림 40. 단부 1/3에 노치가 있는 보

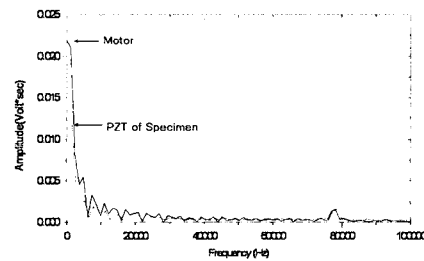


그림 41. 중앙부 1/2에 노치가 있는 보

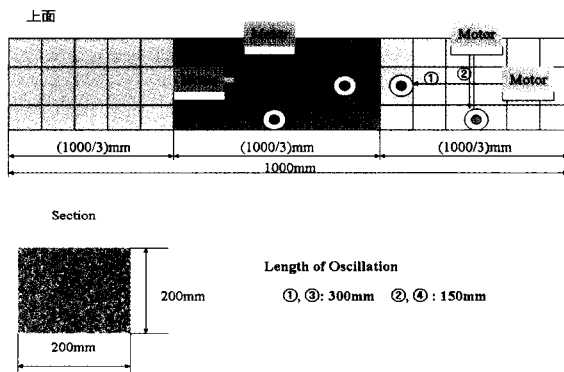


그림 37. 구획별 가진에 따른 압전소자의 동적응답 실험

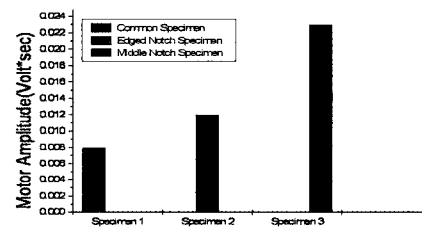


그림 42. 손상유무와 위치에 따른 모터 가진 비교결과

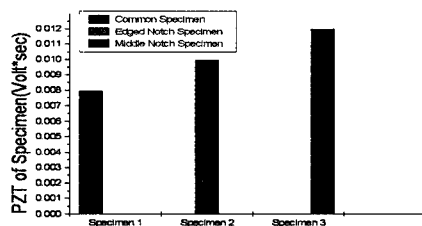


그림 43. 손상유무와 위치에 따른 시험체의 압전소자 진폭에 대한 비교결과

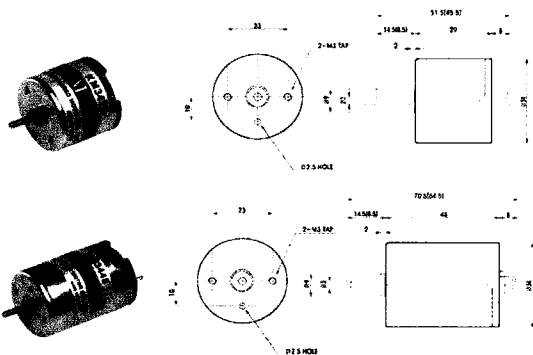


그림 38. 7500, 5200 RPM 소형모터의 개요

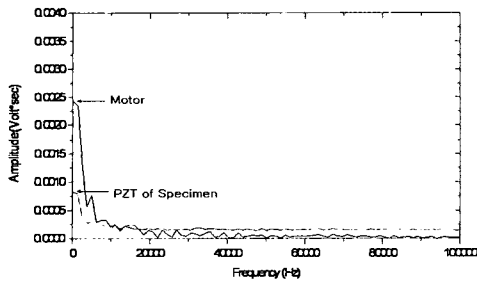


그림 44. 모터 가진 길이가 300mm인 손상이 없는 부분

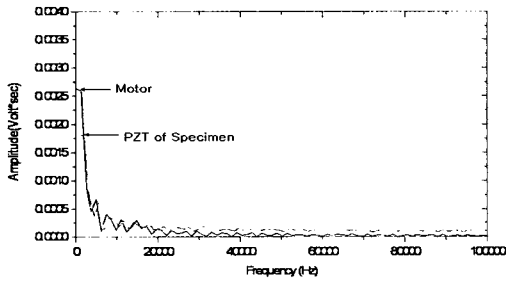


그림 45. 모터 가진 길이가 300mm인 균열이 발생한 부분

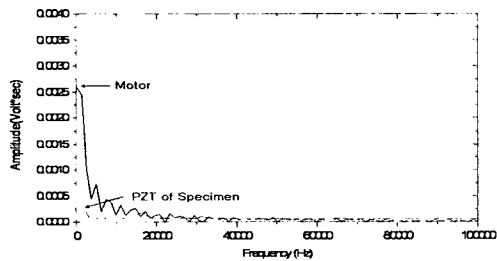


그림 46. 모터 가진 길이가 150mm인 손상이 없는 부분

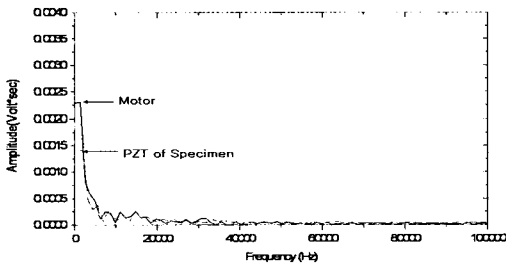


그림 47. 모터 가진 길이가 150mm인 균열이 발생한 부분

에 따른 영향으로 사료된다.

다음은 200×200×1000 mm의 무근 콘크리트 휨시험체를 모터 5200 RPM으로 가진 시의 실험결과이다.

모터 회전수가 5200 RPM일 때는 회전수가 7200 RPM일 때 비해 손상이 없는 경우 모터의 가진이 진동수저감으로 인하여 1.1배 감소하였다. □

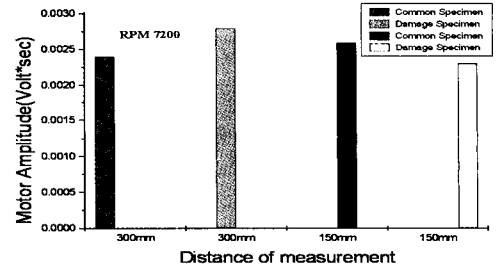


그림 48. 손상유무와 측정거리에 따른 모터가진 비교결과

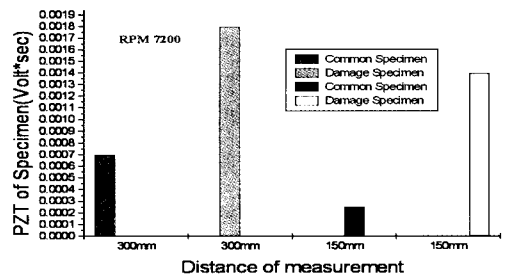


그림 49. 손상유무와 측정거리에 따른 시험체의 압전소자 진폭에 대한 비교결과

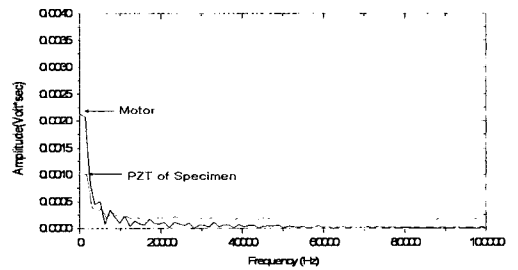


그림 50. 모터 가진 길이가 300mm인 손상이 없는 부분

### 참고문헌

1. 조미라, 이현석, 김기봉 “다채널 충격반향실험의 파동전파 특성 이해를 위한 유한요소해석” 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001, pp. 1 ~ 4.
2. 조미라 “다채널 충격반향실험의 제안과 그 역산해석을 위한 인공 신경망” 대한건축학회 논문집, 2001, pp. 849 ~ 861.
3. 김동수, 박형춘, 이광명, 충격반향기법과 표면파기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사” 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1995, pp. 164 ~ 168.
4. 김동수, 박형춘, “탄성과 이용 비파괴 시험을 위한 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 위상·그룹속도 결정법”, 대한토목학회논문집, Vol.21, No.6, 2001, pp. 651 ~ 660.
5. 이종재, 이종원, 윤정방, “상시진동 데이터를 이용한 교량의 손상 추정기법” 대한토목학회 논문집 Vol.25, No.2A, 2005, pp. 375 ~ 385.
6. 박승희, 윤정방, 노용래, “강 구조물의 손상 검사를 위한 램 웨이브와 웨이브렛 계수의 효율적인 사용”, 대한토목학회 논문집, Vol.25, No.3A, 2005, pp. 521 ~ 530.

7. 김이성, "자가진단형 스마트콘크리트 개발에 관한연구", 경북대학교 박사학위논문, 2005, pp. 105 ~ 119.
8. 오병환, 정범석, "정적변위 및 동특성 측정자료를 이용한 구조물의 손상도 측정", 대한토목학회 논문집, Vol.17, No.1-3, 1997, pp. 383 ~ 396.
9. 나원배, 류연선, 김정태, "PZT와 EMAT를 사용한 콘크리트와 철근 경계면의 비파괴검사", 대한토목학회 정기학술대회 발표논문, 2005, pp. 619 ~ 622.
10. Masato Abe, Toyota Fujioka, and Yoshifumi Nagata, "Location of a defect in a concrete block by a non-destructive technique", Acoust. Soc. Japan, *Acoustical Science Technology*, Vol.23, No.6, 2002, pp. 308 ~ 313.
11. Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Woods, R. D., "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice Hall, 1970, pp. 400 ~ 414.
12. R.F. Feldman, "Non-Destructive Testing of Concrete", NRC · CNRC Institute for Research in Construction, 1977, pp. 187 ~ 191.
13. Van Beek A, Gaal, G C M, van Noortwijk, J M Bakker, J D, "Validation Model for Service Life Prediction of Concrete Structures", *2nd International RILEM Workshop on life Prediction and Aging Management on Concrete Structures*, Paris, France, , Vol. 6, no. 14, 2003, 5-6 May, pp. 257 ~ 267.
14. SPIE, "Smart Structures and Materials", SPIE 9th International Symposium, 2004. March, pp. 1 ~ 221.

## 콘크리트 기술 전문도서 소개

- |    |   |
|----|---|
| 1  | <b>합성구조 설계기법 및 최근 기술</b> - 기술강좌 교재 -<br>· 회원 : 21,500원 · 비회원 : 27,000원                |
| 2  | <b>콘크리트 구조물 거푸집(동바리)의 설계 및 시공</b> - 기술강좌 교재<br>· 회원 : 20,000원 · 비회원 : 25,000원         |
| 3  | <b>노출 콘크리트 제조, 설계, 시공기술</b> - 기술강좌 교재 -<br>· 회원 : 13,500원 · 비회원 : 17,000원             |
| 4  | <b>시설물의 리모델링의 이해와 실제</b> - 2005년도 제1회 기술강좌 교재 -<br>· 회원 : 16,000원 · 비회원 : 20,000원     |
| 5  | <b>개정삼판 콘크리트용어집</b><br>· 회원 : 9,500원 · 비회원 : 12,000원                                  |
| 6  | <b>21세기 콘크리트 기술</b><br>· 회원 : 9,500원 · 비회원 : 12,000원                                  |
| 7  | <b>레미콘 플랜트 설비와 콘크리트 품질</b> - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP1 -<br>· 회원 : 8,000원 · 비회원 : 10,000원 |
| 8  | <b>콘크리트의 재활용</b> - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP2 -<br>· 회원 : 11,200원 · 비회원 : 14,000원          |
| 9  | <b>유동화 콘크리트</b> - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP3 -<br>· 회원 : 8,800원 · 비회원 : 11,000원            |
| 10 | <b>철근콘크리트구조물의 내화특성</b> - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP4 -<br>· 회원 : 10,000원 · 비회원 : 12,000원    |
| 11 | <b>콘크리트의 미학</b> - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP5 -<br>· 회원 : 10,000원 · 비회원 : 12,000원           |

▶ 도서 구입은 학회 홈페이지([www.kci.or.kr](http://www.kci.or.kr))에서 구입 가능하며, 방문 또는 전화로도 구입하실 수 있습니다. 전화로 구입하시고자 하실 때에는 아래 계좌에 입금을 하시고 학회로 연락 주시기 바랍니다. 우송료는 착불입니다.

씨티은행 : 102-53655-255 (예금주 : 한국콘크리트학회) (TEL 568-5985~7, FAX 568-1918)