

特輯

광섬유센서의 사회기반 구조물에의 활용

김기수*, 송영철**, 방기성**, 윤덕중**

1. 서론

전자통신 분야에서 동축케이블이 광섬유를 이용한 통신케이블로 점차 전환되고 있듯이, 토목건축의 계측 분야에서도 재래적인 전자식 또는 기계식 계측시스템으로부터 광섬유센서를 이용한 유지관리 계측시스템으로 바뀌게 될 것이라고 예측되고 있다. 그러나 이 광섬유 계측기술분야가 선진국에서조차도 워낙 최근에 생겨난 분야이기 때문에 전 세계적으로 볼 때 태동기라 할 수 있다. 따라서 이 분야의 연구개발에 집중적으로 투자할 경우 그 기대효과는 실로 막대할 것으로 예상된다.

미국의 EPRI를 비롯한 선진국을 중심으로 원자력 분야에서도 내구성이 좋고 정확도가 높은 광섬유센서 계측기술을 원자력 발전소에 적용하려는 노력이 지속되고 있다. 현재 국내의 원자력 구조물을 살펴보면 시공 중에 약간의 기본적인 계측을 하게 되고, 발전소를 가동하기 전에 격납건물의 안전성과 사용성을 시험하기 위하여 계측기를 사용하여 SIT와 ILRT를 시행하며, 이후 구조물 상태감시를 위한 별다른 계측은 없으며, 다만 5년에 한번씩 ILRT를 시행하고 있다. 따라서, 광섬유센서를 이용하여 SIT와 ILRT 수행시 변위를 계측하고, 광섬유센서 모니터링 시스템을 구축하여 항상 상태감시를 할 수 있다면 대단히 바람직할 것으로 보이며, 이러한 상시감시 시스템을 구축하여 활용하지 못한다 할지라도 매번 ILRT를 수행할 때 구조 건전성도 같이 점검해 볼 수 있다면 원자력구조물의 유지관리에 크게 도움을 줄 수 있는 것으로 보여진다.

이러한 광섬유센서는 원자력구조물 뿐만이 아니라, 교량, 터널, 댐 등 사회기반 구조물의 장기간의 구조물 외부의 변형률을 측정하는데 적합하며 장기적인 내부의 결집이나 거동을 표시하고 예측하기에는 적합한 것으로 알려져 있다. 점차적으로 더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측 할 수 있는 기술적인 체계가 요구되고 있는 시점에서, 점차 세계적으로 광섬유 센서를 이용한

시스템이 구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다[1-9].

2. 광섬유센서의 장점 및 측정원리

2.1 광섬유센서의 장점

이러한 광섬유 센서는 신뢰성 있는 On-Line 모니터링을 위한 재료로서 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 먼저 재질이 석영이므로 부식이 되지 않아 장기계측에 적합하며, 전자기파에 의해 영향을 받지 않는다는 점이다. 따라서 측정값이 무선 송신기 등과 같은 전자기적 잡음에 의하여 방해, 간섭을 받지 않으므로 계측의 안정성이 높다. 특히 고속철도와 같은 전자기적 잡음이 측정신호에 영향을 주는 환경에는 필수적으로 광섬유 센서가 적용되어야 한다고 판단된다. 그리고 정보가 빛의 속도로 전달되므로 엄청난 양의 정보처리가 가능하다고 광섬유의 직경이 1mm 보다 작으므로 측정범위와 정도에 따라 광범위하게 센서가 사용될 수 있고 구조물 거동에 영향을 거의 미치지 않는다.

2.2 광섬유센서의 제작

광섬유센서 중에서 반도체 제조 공정의 사진식각 공정과 유사한 방법으로 대량생산이 가능하고 다중화가 용이한 광섬유격자센서를 중심으로 폭을 넓혀가고 있다. 광섬유 격자센서는 광섬유 안에 주기적인 굴절률변화를 갖는 격자를 설치하여 이 격자의 주기에 딱 맞는 빛은 반사되도록 고안된 일종의 거울인데, 스트레인 또는 온도에 의해 길이가 늘어나면 격자의 주기가 달라져 반사되는 빛의 파장이 달라지고 이 파장변화를 측정함으로써 스트레인 또는 온도를 측정할 수 있게 된다. 그리고 파장을 측정하는 방식을 사용하면 한번에 여러 개의 파장을 한꺼번에 측정할 수가 있어 센서라인 하나에 여러개의 센서를 배치하여

*+ 한호서대학교 정보통신공학부 교수, 교신지자(E-mail: kisoo@office hoseo.ac.kr)

** 한국전력연구원 구조연구실

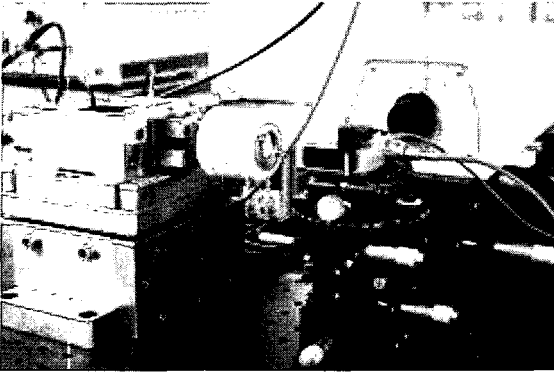


Fig. 1 자외선 레이저를 이용해 광섬유 격자센서를 제작하는 모습.

측정할 수 있다. 이를 다중화 측정이라 하는데 이는 광섬유 격자센서가 가지는 큰 장점이다.

아래의 Fig. 1은 자외선 레이저를 이용해 광섬유 격자센서를 제작하는 모습으로 격자의 패턴을 새기기 위한 위상마스크와 레이저 축과의 정렬이 대단히 중요하다.

2.3 광섬유센서의 측정원리

상기와 같이 제작된 광섬유 격자센서는 Fig. 2와 같은 구조를 가지며 Figure에서 보이는 바와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식(1)과 같은 Bragg 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 grating에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

위의 식에서 n 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(effective refractive index)이며, Λ 는 grating 과 grating 사이의 간격(grating period)이다.

grating에서 반사되는 Bragg 파장은 식(1)과 같이 유효 굴절률과 grating간격의 함수이며, FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 Bragg 파장이 달라진다. 그러므로 Bragg 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 인가된 물리량을 구할 수 있다. strain 변화에 대한 Bragg 중심 파장의 변화는 아래의 식 2과 같으며,

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

여기서 P_e 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리(germano-silicate glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가지며, ϵ 은 광섬유 grating에 가해진 strain이다.

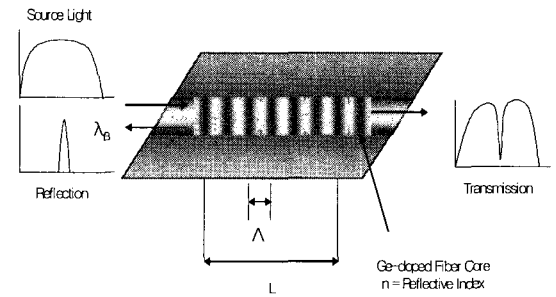


Fig. 2 Fiber Bragg Grating 구조.

3. 광섬유센서를 이용한 계측 사례

3.1 보기둥 접합부 측정 사례

광섬유센서의 구조물 적용성을 살펴 보기 위하여 보기둥 접합부를 제작하여 실험하였다. 일반적으로 보-기둥 접합부에서는 구조물이 지진력을 받게 되면, 지진동의 성분이 정,부 방향으로 반복하여 가해지므로 기둥은 인장과 압축이 교대로 반복되는 변동축력을 경험하게 된다. 이러한 변동축력은 기둥의 내력과 강성을 변화시키고, 접합부내에서의 보 주근의 정착 및 접합부의 전단 거동에 영향을 주어 구조물의 내력 및 변형능력이 변화될 가능성이 있으므로 접합부에서의 보 주근의 정착특성 및 접합부의 전단특성을 명확히 파악할 필요가 있다.

보-기둥 접합부의 실제적인 거동을 파악하기 위하여 슬래브가 있는 접합부 시편을 제작하여 실험을 실시하였다. 철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 반복하중상태에서의 거동을 계측하기 위하여 슬래브가 있는 보-기둥 접합부 시험체를 2개 제작하였으며, ACI 318-96 및 ACI-ASCE 352 위원회 설계지침에 만족하도록 설계하였다. 반복하중상태에서의 접합부의 거동을 얻기 위하여, 기둥부분에 일정한 축력을 유지하면서 보 양끝단에 반복하중을 주어 그에 따른 내력상태를 재현하였다. 기둥의 양 끝단에는 재하판을 설치하고 재하판과 기둥 양 단부사이에는 hydraulic jack과 하중계(loadcell)를 설치하여 축력을 도입하였으며, 실제건물 변형에서의 반곡점을 재현하며 비틀림을 방지하기 위해 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 상하 가력판의 연결점을 힌지로 처리하였다.

이상의 실험에 의해 고층구조물의 취약부(보-기둥 접합부)에 대한 장기계측을 위한 각 센서의 성능을 비교 평가할 수 있었는데, 보-기둥 접합부의 장기 계측을 위한 시스템을 구성하기 위하여 접합부의 대각변형계측을 위해서는 광섬유 격자센서를 사용하는 것이 가장 효과적이며, 보와 기둥의 대변형을 계측에도 광섬유 격자센서가 대단히 유효한 것으로 판단된다. 실험결과는 보 기둥 접합부의 구조특성상 변형이 크기 때문에 박막형상의 스트레인 게이지는 쉽게 손상이 되어

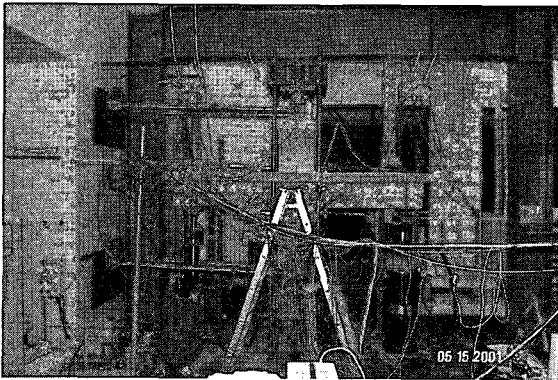


Fig. 3 콘크리트 보기둥 연결부분의 거동을 보기위한 시험체 설치.

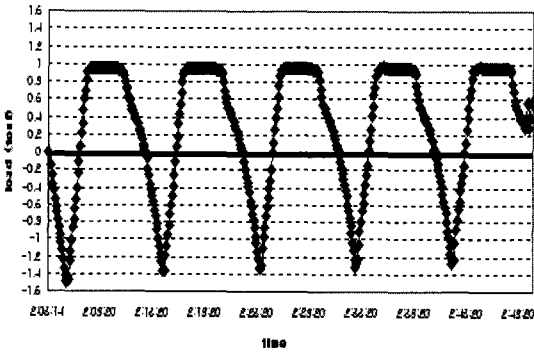


Fig. 4 실험에 적용된 하중이력.

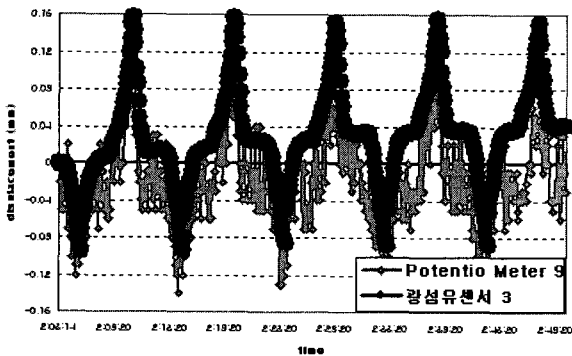


Fig. 5 potentio meters와 광섬유센서의 비교 그래프.

적용하지 못하였고, 치구를 사용하여 Potentio-Meter로 측정하였다. Fig. 4와 같이 반복하중을 주어 센서들의 응답을 측정하였으며, Potentio-Meter와 같은 위치에 광섬유 브래그 격자 센서의 양 끝단을 고정하여 측정하였으며, Fig. 5와 같이 박막형상 스트레인게이지와 유사하거나 좀더 양호한 분해능을

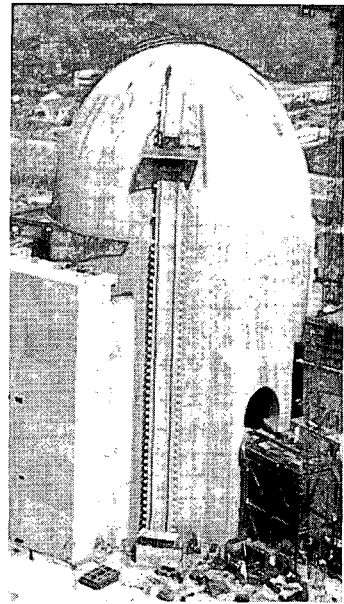


Fig. 6 건설 중인 원전 격납구조물의 형태.

보이는 광섬유브래그 격자센서는 우수한 분해능으로 변형을 잘 표시하고 있고, 상대적으로 스트레인 게이지보다 분해능이 떨어지는 Potentio-Meter는 노이즈를 보이고 있으나, 광섬유 브래그 격자센서와 유사한 경향을 보이고 있다.

또한, 접합부의 미소변형부분은 낮은 level의 하중에서 ± 0.06 mm 정도의 변형을 보였으며, 대각 방향으로 부착된 광섬유 센서는 Figure과 같이 반복 하중 시 Potentio meter와 유사하지만, 비교적 정확한 대칭형으로 측정되었다. 이와 같이 광섬유 브래그 격자센서가 좋은 감지 성능을 보이고 있어 스마트 구조물용 센서로 적합함을 알 수 있다.

3.2 원자력발전소 격납구조물 측정사례

광섬유센서의 좋은 적용사례는 원자력발전소의 격납 건물이다. Fig. 6과 같은 원자력발전소의 격납 건물은 원자로 내부의 방사능 누출을 방지하기 위한 중요시설물중의 하나로 냉각재 유출사고 시, 고압과 지진하중에 견디도록 설계되어 있다. 이러한 설계시의 기본성능을 시공 후 발전소 가동 전에 압력을 부가하고 계측기를 부착하여 실제시험으로서 원자로격납건물의 구조적 안전성과 기밀성을 입증하기 위하여 구조적 건전성시험 (SIT, Structural Integrity Test)을 수행하는데, 이의 내용은 격납건물을 가압 및 감압하면서 격납건물 구조물의 반경 및 수직방향 구조적 변위와 격납건물 외부콘크리트 벽의 균열진행상태를 측정하고 감압후의 변위값 및 회복률을 측정하여 탄성적 거동을 확인하는 시험이다.

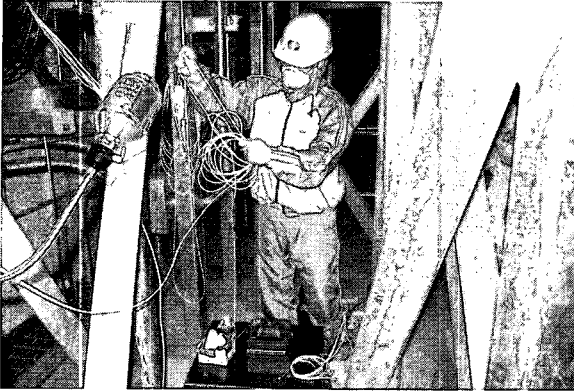


Fig. 7 격납 건물 내부에 광섬유격자센서 설치 작업.

이 시험에서 광섬유격자센서의 성능을 검토하기 위하여 기존의 계측 방법인 extensometer와 병행하여 격납구조물 내부에 2개소 입구의 해치부분에 2개소 씩 도합 4개소센서를 설치하고 온도 보상용 reference를 각기 1개소 씩 설치하여 도합 6개의 센서를 설치하여 현장적용 가능성 평가하였다.

FBG센서는 광섬유 안에 내장되도록 하여 tension을 가하였으며 센서와 광섬유가 일체가 되도록 하여 센서의 게이지 길이가 57m가 되도록 하였다. FBG센서는 특별히 제작된 고정구를 이용하여 벽면에 부착된 후 Fig. 7과 같이 아라미드 섬유와 플라스틱으로 피복된 광섬유를 리드선으로 하여 시스템에 연결하였다.

이러한 작업은 다음 Figure과 같은 설치작업을 통해 각기 격납건물 내부의 시스템과 격납건물 외부에 설치된 시스템에 연결되도록 하였으며 내부의 시스템은 LAN을 통해 외부에서도 관찰하고 제어할 수 있도록 하였다.

상기 Fig. 8에서 보여 주는 바와 같이 해치부위에 적용된 광섬유센서는 시험의 처음부터 끝까지 압력의 증가, 감소에 따라 부피팽창 및 감소를 잘 표현하였다. 그리고 LAN을 통하여 시스템을 외부에서 제어할 수 있음을 보여 주었고, 같은 방식으로 격납구조물에 설치된 시스템을 본사 및 연구소에서도 원격 제어할 수 있음을 확인하였다.

3.3 복합재료 보강구조물내의 측정사례

광섬유 격자센서의 또 다른 응용 분야는 섬유복합재료에 설치하는 것이다. 이 분야의 하나로 본 연구팀에서는 Fig. 9에서와 같이 콘크리트 구조부재에 탄소섬유시트를 비롯한 섬유복합재료를 이용하여 보수보강하는 공법에 광섬유격자센서를 적용하는 연구를 수행하였다. 원래 섬유복합재료 보강공법은 기존의 보수보강공법에 비해 구조부재의 내하력을 증가시킬 수 있고 기존에 발생한 균열을 구속하는 효과를 얻을 수 있으며, 탄소섬유와 같은 복합재료는 강재에 비해 강도가 8~10배이고, 탄성률은 거의 같은 특징을 가지고 있고, 유리섬유도 그보다는 약하지만, 유사한 특성을 가지고 있어 철근 콘크리트 구조물의 보수보강에 효과적이다. 또한 파괴강도까지 거의 탄성체로 거동할 뿐만 아니라, 비중은 철의 약 0.2배로 여타 공법에 비해 고정하중 증가의 부담이 없고 작업공간이 협소한 곳에서도 별도의 부대장치 없이 손쉽게 작업할 수 있다. 아울러 구조부재의 손상정도와 손상부위에 따라 보강량이 다르게 적층수를 조절할 수 있으므로 상태에 따라 적절한 보강이 가능하다.

이와 같이 여러 장점을 가진 섬유복합재료보강 공법이지만, 보강 후 강성이 달라지고 이를 예측하기가 어려우며, 시야를 가리게 되므로 균열을 관찰할 수가 없고, 취성파괴를 나타낼 수도 있기 때문에 섬유재료를 이용한 보수보강

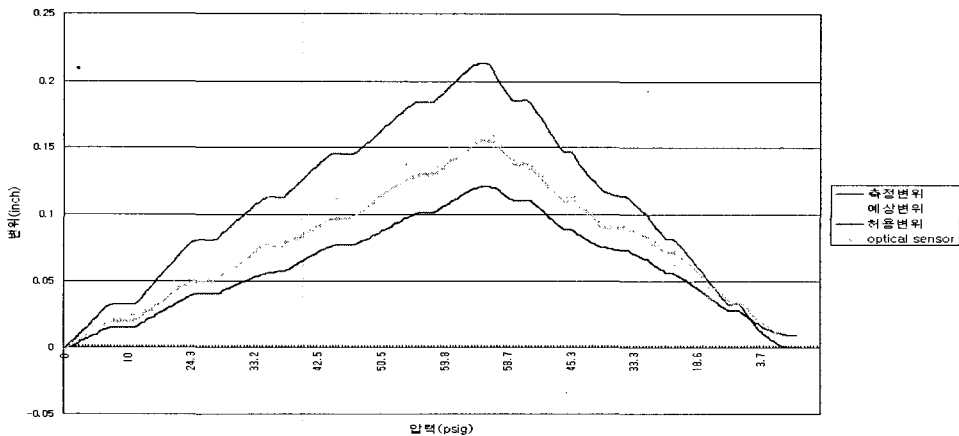


Fig. 8 격납 건물에 설치된 광섬유센서의 응답특성.

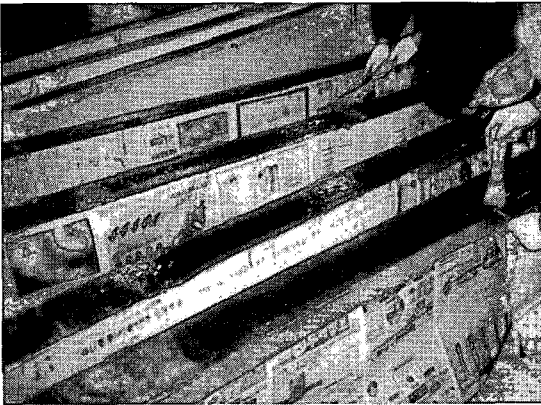


Fig. 9 보강용 탄소섬유시트를 콘크리트 보에 시공하고 있는 모습 (광섬유 격자센서를 탄소섬유시트사이와 콘크리트 모재에 적용하여 시공).

공법의 단점을 보완하기 위해 자기진단 기법을 도입할 필요가 있으며 이를 위해 광섬유 격자센서가 내장된 시스템 계측의 활용을 검토하였다.

상기 Fig. 10과 같은 실험을 통하여 효율적인 복합재료 보강재의 조합과 광섬유 계측 기술을 건축/토목 보강 구조물에 적용하였고, 복합재료의 탈락을 효과적으로 예측할 수 있었다. 특히 콘크리트에 부착된 광섬유센서와 보강용 탄소섬유 시트에 부착된 광섬유센서는 Fig 11에서 보이는 바와 같이 초기 하중에서는 동일한 거동을 보이다가 하중이 증가하면서 거동이 달라짐을 보였는데, 이는 두 구조시스템이 특정하중이상에서는 일체로 거동하지 않음을 보여주는 좋은 예이며 이를 이용하여 구조물의 이상을 판별해 낼 수 있을 것

로 보이고, 그 원인은 콘크리트의 균열의 발생과 콘크리트와 탄소보강재 사이의 delamination과 접착면에서의 슬립에서 찾아 볼 수 있다. 이러한 결과들을 이용하면 구조물의 효과적인 보강량과 추가적 보강 시점등을 산출해낼 수 있으며 구조물의 유지관리를 위한 정기적인 구조 진단에 따르는 비용을 절감하는데 일조 할 수 있으며, 아울러 구조물에 문제가 있어 보수보강하는 시기에 모니터링도 같이 할 수 있어 유효적절한 보수보강과 유지관리 모니터링이 동시에 이루어지는 구조물이 됨을 보여 주고 있다. 그러나 보다 체계적이고 정량적인 기준을 수립하기 위해서는 광섬유 계측 기술의 발전과 더불어 복합재료 보강재의 실험적 연구자료가 보다 축적되어야 할 것이다.

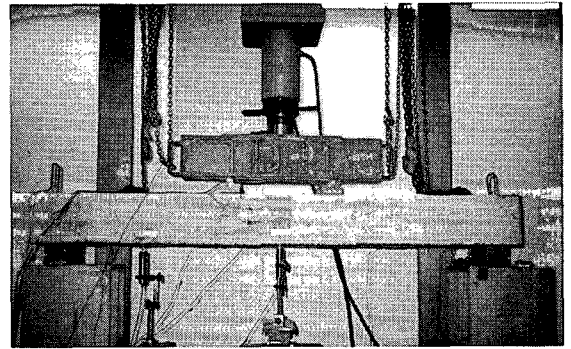


Fig. 10 탄소섬유시트와 광섬유격자센서를 적용한 콘크리트 보강시편에 힘을 가하는 모습.

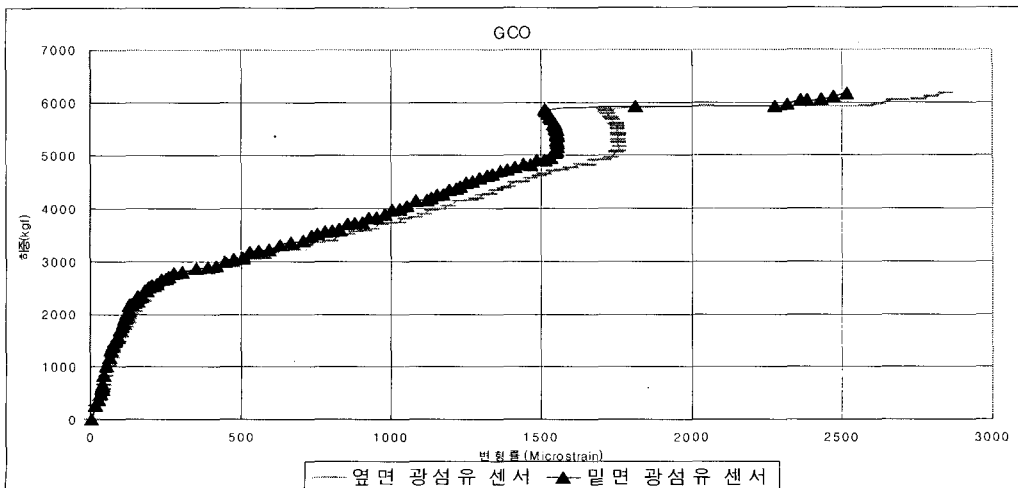


Fig. 11 복합재료로 보강된 시편에서의 광섬유센서의 응답특성.

4. 향후 진행방향 및 맺음말

4.1 향후 진행방향

광섬유격자센서가 주축이 되고 있는 광섬유센서는 크기가 작고 전자기파의 영향을 전혀 받지 않아 노이즈가 적고 정확도가 좋을 뿐 아니라 새로운 여러 가지 기능을 가지고 있어 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 빠르게 기존의 계측시스템을 대체해 나가고 있으며, 교량, 터널 등의 도로시설물 뿐만 아니라, 댐, 건물 등에도 적용이 되고 있고, 침입자감시 시스템, 송수관, 송유관, 공장의 모니터링 등에 폭넓게 활용 되고 있어 국내에서도 점차 그 수요가 늘어 날 것으로 보인다. 최근 광섬유센서 국제학술회의 (OFS-17, 벨기에, 2005. 5)에서 발표된 학술논문들에 의하면, 50%이상의 논문이 광섬유격자센서의 응용에 대한 논문으로 많은 사람들이 관심을 가지고 연구를 진행하고 있는 것을 알 수가 있다.

광섬유격자센서도 단순히 변형률이나 변위의 측정에만 그치지 않고, 여러 가지 다양한 패키지를 활용하여, 온도센서, 경사계, 가속도계, 로드셀 등의 물리량 뿐만 아니라 굴절율의 변화, 습도센서, 화학변화에 의한 흡수파장의 변화, 단백질량 등의 바이오센서 등 다양한 분야에서 연구가 이루어지고 실용화 단계에 이르고 있다.

특히 원자력 구조물에 있어서 단순히 격납구조물의 모니터링 뿐만 아니라, 접근이 용이 하지 않은 부위나 방사선에 노출가능성이 있어 위험한 부위, 온도가 높아 접근이 어려운 부위, 전기의 발생으로 노이즈가 많아 기존의 계측기를 적용하기 어려운 부위 등에 다양하게 사용할 수 있어서 향후 활용이 크게 늘어날리라고 예상된다.

원자력발전소 격납구조물에서의 활용은 SIT, ILRT시 데이터를 제공할 수 있을 뿐 아니라, 원자력발전소 가동 중 5년에 한번씩 ILRT를 시행할 때마다 데이터를 얻을 수 있고, 평소에도 온도, 압력, 잔존 스트레인의 레벨 등을 확인할 수 있어서 그 활용도가 크게 높아지리라고 예상된다.

4.2 맺음말

본 연구팀에서 개발한 광섬유센서 패키지와 시스템을 이용한 건축, 토목재료의 개발현황 및 그 향후 과제에 대하여 간단히 기술하였으며, 광섬유센서의 경우 최근 들어 연구개발이 활발히 진행되면서 다양한 상품이 출시되고 있으나, 광섬유센서 관련 시장은 아직 태동기라 할 수 있다. 광섬유센서의 다양한 특성을 고려 시 향후 그 시장은 매우 커질 것으로 판단되며 특히 그 시장의 많은 부분을 건축, 토목분야가 차지하리라 예상된다.

특히 광섬유센서의 자기모니터링 기능은 안전하고 쾌적한 환경을 추구하고자 하는 현대인의 요구사항과 잘 일치되어 향후 이러한 기능이 적용된 많은 건축, 토목재료가 출현할

것으로 판단된다. 국내의 경우 이러한 건축, 토목재료에의 광섬유센서의 적용은 매우 미흡한 실정이라 할 수 있으며, 보다 체계적인 연구개발이 추진된다면 선진국과의 기술격차가 크지 않은 것으로 판단되기 때문에 원자력발전소의 격납구조물 뿐만 아니라, 일반적인 토목건축 구조물에도 충분히 그 기술을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원과 한국과학재단에서 지원하는 스마트 사회기반시설 연구센터의 부분적 보조에 의해 이루어졌으므로 이에 관계자 여러분께 감사함을 드립니다.

참고문헌

- 1) R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures," *Proc. SPIE*, Vol. 1588, 1991, pp. 282.
- 2) F. BUCHOLTZ, A. D. Kersey, "Multiplexing of Nonlinear Fiber Optic Interferometric Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7, NO. 3, March 1989, pp. 514-519.
- 3) Sarah E. Mouring & Oscar Barton, Naval Academy, D. Kevin Simmons, "External Retrofit of R/C Beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates," *Stanford Univ, USA. Faults & Repair conference*, 2001.
- 4) K. S. Kim, et'al, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, 1993, pp. 1618-1662.
- 5) K. S. Kim, et'al, "Embedded Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors in the Cement Concrete Structure," *SPIE*, Vol. 2718, 1996, pp. 218-231.
- 6) J. W. Yoo, et'al, "In-situ Monitoring of Sungsan Bridge in Han River with a Optical Fiber Sensor System," *SPIE*, Vol. 3043, 1997, pp. 72-76.
- 7) S. H. Baek, et'al, "Optical Fiber Monitoring System of Bridge in Korea," *Proceeding of the 1st Health Monitoring Workshop*, pp. 555-563, Stanford Univ., 1997.
- 8) K. S. Kim, et'al, "The Effect of Embedded Sensors on The Strength of Composite Laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 11, 1992, pp. 949-958.
- 9) K. S. Kim, et'al, "The use of Strain Measurement for Detecting Delamination in Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 23, 1993, pp. 75-84.