

광섬유 센서 및 그 응용

이 글에서는 광섬유 센서의 필요성, 장점, 그리고 광섬유 센서의 응용에 대해 소개한다.

글 · 김 기 수 / 호서대학교 첨단산업기술학과, 교수 / (주)아이세스, 대표이사

e-mail · kissoo@office.hoseo.ac.kr

글 · 송 영 철 / 한국전력연구원 건전성평가그룹, 그룹장

글 · 방 기 성 / 한국전력연구원 건전성평가그룹, 선임연구

일반적으로 사용단계의 구조물은 시간이 경과함에 따라 초기의 설계, 시공상 오류에 의한 초기 결함, 반복하중 그리고 취약한 환경 등 외부 조건에 노출될 경우에는 구조물 본연의 성능을 점차 상실하게 되어 심지어는 인명과 재산을 위협하는 대형 붕괴사고를 일으키기도 한다. 따라서 구조물의 사용성을 적정 수준 이상으로 유지하기 위해서는 정기적인 점검을 통해 잔존수명을 미리 예측하여야 함은 물론, 최적의 보수시기와 보수방법을 알려줄 수 있는 시설물 모니터링시스템이 요구되고 있다.

전자통신 분야에서도 동축케이블이 광섬유를 이용한 통신케이블로 점차 전환되고 있듯이, 모니터링 분야에서도 종국에는 재래적인 전자식 또는 기계식 유지관리 계측시스템으로부터 광섬유 센서를 이용한 유지관리 계측시스템으로 바뀌게 될 것이라고 예측되고 있다. 그러나 이 광섬유 계측 기술 분야가 선진국에서조차도 워낙 최근에 생겨난 분야이기 때문에 전 세계적으로 볼 때 태동기라 할 수 있다. 따라서 이 분야의 연구개발에 집중적으로 투자할 경우 그 기대효과는 실로 막대한 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 현재의 안전진단체계에서 안고 있는 문제점을 극복하기 위해서는 구조물을 상시 모니터링하여 구조물의 상황을 상시 점검하고, 잔존수명을 예측하며 아울러 보수시기를 알려줄 수 있는 on-line 안전진단기술 개발이 반드시 필요하다. 더욱이 근래의 대형화 추

세에 따른 교량, 터널, 고층 아파트 및 초고층 주상복합건물 등은 끊임없이 하중의 변화, 구성재료의 열화, 바람, 온도변화, 지진, 태풍 등의 자연적 환경변화에 보다 극심한 변화 및 손상에 노출되어 있으며 만일 파괴 및 붕괴 시에는 그 피해가 매우 크므로 교량을 포함한 구조물의 on-line 안전진단을 통한 유지관리시스템의 필요성이 보다 절실히 요구되는 상황이다. 통상 구조물은 설계, 시공, 및 유지관리 등의 과정을 통하여 구조물의 기능을 발휘하게 되는데, 합리적이고 정확한 설계, 시공과 함께 구조물 시공 이후의 안전점검이나 효과적인 보수, 보장 그리고 안전도 감시체계의 확립 등은 구조물의 사용성을 극대화시킬 뿐만 아니라 구조물의 사용수명을 연장하고 아울러 구조물의 파괴나 붕괴 등에 대한 불안감을 해소할 수 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

이러한 문제의 해결책으로 구조물의 운용 중에 실시간으로 감지할 수 있도록 하여 구조물 상태의 이상 유무에 따라 적절하게 대처할 수 있는 기능이 구조물 자체에 부가되도록 하는 구조물을 일컬어 스마트 구조물(smart structure)이라고 한다. 이러한 기능은 무엇보다 막대한 재산과 인명 피해가 발생하는 구조물의 파괴를 미연에 경고할 수 있고 구조물의 유지 및 보수에 따른 비용절감효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 구조물의 안전성과 잔존수명을 예측하기 위해서 변형률 온도 등을 측정하는 것이 중요하다. 변형률은 구조물의 외부,

내부의 결점 혹은 스마트 구조물의 형태까지도 측정할 수 있는 요소이다. 지금까지 전자식 스트레인 게이지 등을 통하여 구조물 외부의 변형률을 측정해 오고 있다. 그러나 이러한 센서들은 단기간의 구조물 외부의 변형률을 측정하는 데 적합하며 장기적인 내부의 결점이나 거동을 표시하고 예측하기에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 전자식 스트레인 게이지를 건물 내 매입(embedding)하는 경우, 구조물의 잔존기간 동안 전자식 스트레인 게이지와 리드선 사이에 예상치 못한 결점이 생길 수 있으며 또한 전자식 스트레인 게이지는 병렬 즉, 하나의 센서에 하나의 리드선이 생긴다는 단점 때문에 구조물의 장기 계측용 시스템(on-line system)에는 문제가 있는 것으로 판단되고 있다. 더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측 할 수 있는 기술적인 체제가 대두되고 있는 시점에서, 점차 세계적으로 광섬유 센서를 이용한 시스템이 구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

광섬유 센서의 필요성은 위에 언급한 사실 외에 신뢰성 있는 on-line 모니터링을 위한 재료로서 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

□내구성

재질이 석영이므로 부식이 되지 않아 장기계측에 적합하다.

□전자기적 중성(electro-magnetic neutrality)

광섬유센서는 센서로서의 기능을 수행하기 위해 빛 또는 광파기 등이 필요한데, 빛의 가장 중요한 특성 중의 하나는 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 영향

을 주는 환경에는 필수적으로 광섬유 센서가 적용되어야 한다고 판단된다.

□측정정보 전달능력

정보가 빛의 속도로 전달되므로 엄청난 양의 정보처리가 가능하다.

□작은 크기

광섬유의 직경이 1mm보다 작으므로 측정범위와 정도에 따라 광범위하게 센서가 사용될 수 있고 구조물 거동에 영향을 거의 미치지 않는다.

이러한 광섬유센서는 반도체 제조 공정의 사진식각 공정과 유사한 방법으로 대량생산이 가능하고 다중화가 용이한 광섬유격자센서를 중심으로 폭을 넓혀가고 있다. 광섬유 격자센서는 광섬유 안에 주기적인 굴절률 변화를 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 측정하므로 스트레인 또는 온도를 측정할 수 있게 된다. 그리고 파장을 측정하는 방식을 사용하면 한 번에 여러 개의 파장을 한꺼번에 측정할 수가 있어 센서라인 하나에 여러 개의 센서를 배치하여 측정할 수 있다. 이를 다중화측정이라 하는데 이는 광섬유격자센서가 가지는 큰 장점이다.(그림 1)

광섬유센서의 구조물 적용성을 살펴 보기 위하여 보기등 접합부를 제작하여 실험하였다. 일반적으로 보-기등 접합부에서는 구조물이 지진력을 받게 되면, 지진동의 성분이 정·부 방향으로 반복하여 가해지므로 기등은 인장과 압축이 교대로 반복되는 변동축력을 경험하게 된다. 이러한 변동축력은 기등의 내력과 강성을 변화시키고, 접합부내에서의 보 주근의 정착 및 접합부의 전단 거동에 영향을 주어 구조물의 내력 및 변형 능력이 변화될 가능성이 있으므로 접합부에서의 보 주근의 정

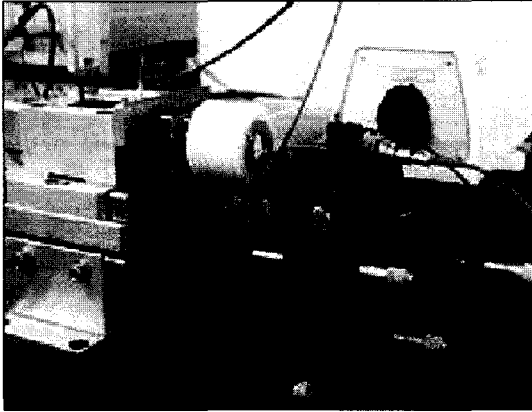


그림 1 자의선 레이저를 이용해 광섬유 격자센서를 제작하는 모습으로 격자의 패턴을 새기기 위한 위상마스크와 레이저 축과의 정렬이 대단히 중요하다.



그림 2 콘크리트 보기둥 연결부분의 거동을 보기 위한 시험체가 철골로 된 프레임 안에 액추에이터에 물려서 상하방향으로는 축력을 받고 좌우방향으로 흔들림을 줄 수 있도록 설치되어 있다.

착특성 및 접합부의 전단특성을 명확히 파악할 필요가 있다.

따라서, 고층 골조 구조물의 안전성 및 내진성능을 적절히 평가하기 위해서 보-기둥 접합부에 반복하중을 적용할 때의 광섬유 센서를 사용한 상시 계측에 대해 연구할 필요가 있다. 보-기둥 접합부의 실제적인 거동을 파악하기 위하여 슬래브가 있는 접합부 시편을 제작하여 실험을 실시하였다.

철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 반복하중 상태에서의 거동을 계측하기 위하여 슬래브가 있는 보-기둥 접합부 시험체를 두 개 제작하였으며, ACI 318-96 및 ACI-ASCE 352 위원회 설계지침에 만족하도록 설계하였다. 기둥단면은 400mm×270mm, 보단면은 270mm×370mm, 슬래브 두께는 95mm 이었으며, 시험체의 콘크리트 압축강도는 270kg/cm²으로 제작하였다.

반복하중상태에서의 접합부의 거동을 얻기 위하여 기둥 부분에 일정한 축력을 유지하면서 보 양끝단에 반복하중을 주어 그에 따른 내력상태를 재현하였다. 기둥의 양 끝단에는 재하판을 설치하고 재하판과 기둥 양 단부 사이에는 hydraulic jack과 하중계(load cell)를 설치하여 축력을 도입하였으며, 실제건물 변형에서의 반곡점을 재현하며 비틀림을 방지하기 위해 상하 가력판의 연결점을 힌지로 처리하였다. 각 재하위치에서 하중계를 사용하여 하중을 검출하였으며, 접합부와 기둥, 보 부재가 접하는 위치에서 주근과 보강근의 변형을 측정하기 위하여 주요 부위에 아홉 개의 wire strain gage를 이용하여 철근의 변형도를 측정하였고, 접합부 변형 및 부재 회전을 측정하기 위해 접합부 및 보, 기둥의 소성힌지 부분을 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer), potentiometer 등으로 측정하였으며, 보의 끝단에는 Long LVDT를 사용하여 보의 변위를 측정하였다.(그림 2)

이상의 실험 결과에 의해 고층구조물의 취약부(보-기둥 접합부)에 대한 장기계측을 위한 각 센서의 성능을 비교 평가할 수 있었는데, 스트레인 게이지와 전자식 변위측정기, 광섬유격자센서 중 보-기둥 접합부의 거동을 정확히 계측하기 위해서는 광섬유격자센서가 가장 적합함을 알 수 있었으며, 기존의 계측기 중 전자식 변위계의 경우 적용은 가능하나 신호에서 노이즈가 많이 측정되었으

며, 스트레인게이지의 경우, 광섬유격자센서와 가장 유사하게 접합부의 거동을 계측할 수 있었으나 역시 미소변형에서는 노이즈가 많이 검출되었다. 보-기둥 접합부의 장기 계측을 위한 시스템을 구성하기 위하여 접합부의 대각변형계측을 위해서는 광섬유격자센서를 사용하는 것이 가장 효과적이며, 보와 기둥의 대변형을 계측에도 광섬유 격자센서가 대단히 유효한 것으로 판단된다.

광섬유 격자센서의 또 다른 응용 분야는 섬유복합재료에 설치하는 것이다. 이 분야의 하나로 본 연구팀에서는 콘크리트 구조부재에 탄소섬유시트를 비롯한 섬유복합재료를 이용하여 보수·보강하는 공법에 광섬유격자센서를 적용하는 연구를 수행하였다. 원래 섬유복합재료 보강공법은 기존의 보수·보강공법에 비해 구조부재의 내하력을 증가시킬 수 있고 기존에 발생한 균열을 구속하는 효과를 얻을 수 있으며, 탄소섬유와 같은 복합재료는 강재에 비교해 강도가 8~10배이고, 탄성률은 거의 같은 특징을 가지고 있어 철근 콘크리트 구조물의 보수·보강에 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, 취성 파괴를 나타낼 수도 있기 때문에 섬유재료를 이용한 보수·보강공법의 단점을 보완하기 위해 자기진단 기법을 도입할 필요가 있으며 이를 위해 광섬유 격자센서가 내장된 시스템 계측의 활용을 검

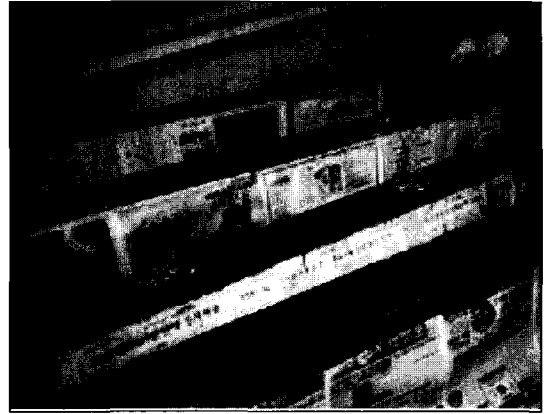


그림 3 보강용 탄소섬유시트를 콘크리트 보에 시공하고 있는 모습, 광섬유 격자센서를 탄소섬유시트 사이와 콘크리트 모재에 적용하여 시공하였음.

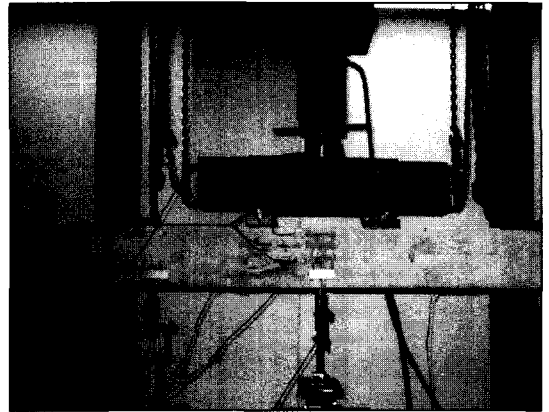


그림 4 탄소섬유시트와 광섬유격자센서를 적용한 콘크리트 보강시편에 힘을 가하는 모습

토하였다.(그림 3, 4)

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 탄소섬유시트에 부착된 광섬유센서는 초기 하중에서는 동일한 거동을 보이다가 하중이 증가하면서 거동이 달라짐을 보였는데, 이는 두 구조시스템이 특정하중이 상에서는 일체로 거

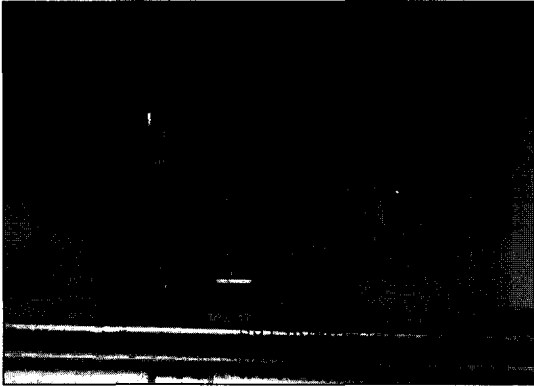


그림 5 FBG센서 부착용 고정구가 설치 원자력 발전소 격납 건물 내부에 설치된 모습

동하지 않음을 보여주는 좋은 예이며 이를 이용하여 구조물의 이상을 판별해 낼 수 있을 것으로 보이고, 그 원인은 콘크리트의 균열의 발생과 콘크리트와 탄소보강재 사이의 delamination과 접착면에서의 슬립에서 찾아 볼 수 있다. 이러한 결과들을 이용하면 구조물의 효과적인 보강량과 추가적 보강 시점 등을 산출해낼 수 있으며 구조물의 유지관리를 위한 정기적인 구조 진단에 따르는 비용을 절감하는 데 일조 할 수 있다. 아울러 보다 체계적이고 정량적인 기준을 수립하기 위해서는 광섬유 계측 기술의 발전과 더불어 복합재료 보강재의 실험적 연구자료가 보다 축척되어야 할 것이다.

또 다른 응용사례는 원자력발전소의 격납 건물이다. 원자력발전소의 격납 건물은 원자로 내부의 방사능 누출을 방지하기 위한 중요시설물 중의 하나로 냉각재 유출사고 시, 고압과 지진하중에 견디도록 설계되어 있다. 이러한 설계시의 기본성능을 시공 후 발전소가동 전에 압력을 부가하고 계측기를 부착하여 실제시험으로서 원자로 격납건물의 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. 이 시험에는 40여 개의 extensometer를 사용하는 데, 기존의 extensometer는 wire의 자중 처짐에 의해 정확한 길이의 변화를 측정하기 곤란하다. 그 이유는 미소 변형의 측정에 정확도도 낮을 뿐만 아니라 데이터 logger까지의 도선의 길이가 길어 건물 내외의 전기설비로부터 발생하는 전자기적 노이즈의 영향을 받기 때문이다.

FBG센서를 설치하여 구조물의 거동을 판단하고 FBG센서의 성능을 검토하기위하여 기존의 계측방법인 extensometer와 병행하여 extensometer가 설치된 부근에 장애물과 접근의 용이성을 고려하여 격납구조물 내부에 두 개소 입구의 해치부분에 두 개소 씩 도합 네 개소 센서를 설치하고 온도 보상용 reference를 각기 한 개소 씩 설치하여 도합 여섯 개의 센서를 설치하여 현장적용 가능성 평가하였다.

FBG센서는 가볍고 부착이 용이하기 때문에 기존의 extensometer가 설치된 부근에 FBG센서에 tension을 주기가 용이한 다음 사진과 같은 부착 고정구(固定具)를 이용하여 부착하였다.(그림 5)

FBG센서는 광섬유 안에 내장되도록 하여 tension을 가하였으며 센서와 광섬유가 일체가 되도록 하여 센서의 게이지길이가 57m가 되도록 하였다. FBG센서는 고정구를 이용하여 벽면에 부착된 후 아라미드섬유와 플라스틱으로 피복된 광섬유를 리드선으로 하여 시스템에 연결하였다. 이러한 광섬유 리드선은 그림 6과 같은 선 설치작업을 통해 각기 격납건물 내부의 시스템과 격납건물 외부에 설치된 시스템에 연결되도록 하였으며 내부

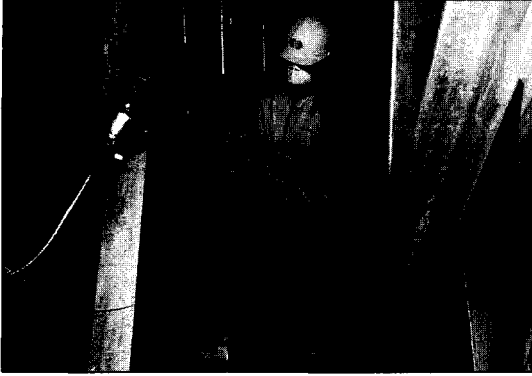


그림 6 격납 건물 내부에 광섬유센서 및 광섬유 리드선의 설치 작업

의 시스템은 LAN을 통해 외부에서도 관찰하고 제어할 수 있도록 하였다.

FBG센서 시스템은 시공이 거의 완료된 시점에서 설치하였기 때문에 연결 챔버를 통하여 격납구조물 안으로 광섬유를 설치하여 시공하는 것이 불가능하여, 격납구조물의 내부에 설치하였으며, 내압용기를 이용하여 시스템을 보호하였다. 시스템

을 구동하기 위한 220V 전원 공급도 원활하지 못하여 연결 챔버 내의 설치되어 있는 동선으로 5V 직류 전원을 공급하여 시스템과 노트북 컴퓨터를 설치하여 구동하였으며, 격납구조물 내부의 시스템을 제어하기 위하여 연결 챔버의 몇 개의 동선을 이용하여 LAN을 구성하고, 그 LAN을 통하여 원격 구동하였는데, FBG센서 시스템을 이용하여 성공적으로 긴 길이의 변형을 측정하는 것이 가능하였고, FBG센서는 긴 게이지 길이를 갖는 격납 건물의 변형을 측정할 수 있는 좋은 수단임을 확인하였다.

격납건물의 내부와 외부에 각각 두 지점씩 실제로 적용하여 측정하였으며 격납건물 내의 측정지점에서는 내부에 설치된 컴퓨터가 과열로 인해 작동을 중지할 때까지 정확히 잘 측정되었으며, 그림 7에서 보여 주는 바와 같이 외부의 측정지점에서는 시험의 처음부터 끝까지 압력의 증가, 감소에 따라 부피팽창 및 감소를 잘 표현하였다. 그리고

LAN을 통하여 내부시스템을 외부에서 제어할 수 있음을 보여 주었고, 같은 방식으로 격납구조물에 설치된 시스템을 본사 및 연구소에서도 원격 제어할 수 있음을 확인하였다.

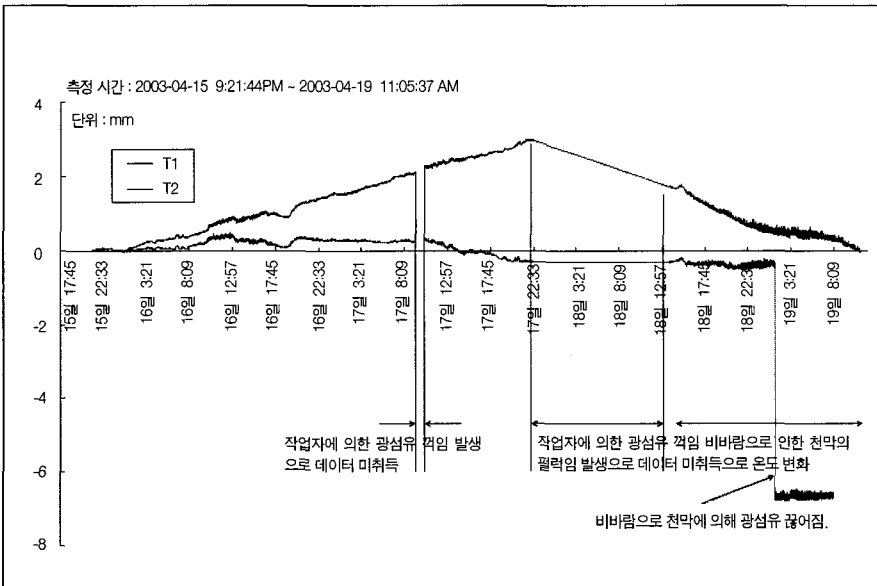


그림 7 격납구조물의 해치부분에서의 FBG센서 데이터