〔논 문〕 - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 27, No. 2 (2007. 4)

철근대용 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서의 변형률에 관한 연구

FBG Optical Fiber Sensors Embedded in Fiber Reinforced Polymer Composite Reinforcing Bars

김명세*, 조형식*, 조성규*, 윤재준**, 백현덕***, 김기수***,†

Myong-Se Kim*, Hyung-Sik Cho*, Sung-Kyu Cho*, Jae-Jun Yoon**, Hyun-Deok Baek*** and Ki-Soo Kim***,†

초 록 본 연구에서는 섬유 광학의 감지 장치 중 하나인 FBG 센서 및 시스템에 관하여 검토하였다. FBG 센서의 문제는 매우 가늘고 약하다는 것이다. 이를 위해 충격과 같은 외부의 요인으로부터 FBG 센서를 보호할 수 있는 방법을 다각적으로 모색하였다. 철근을 대체할 수 있는 FRP 복합재에 FBG 센서를 삽입하여 실험을 실시하여 그 결과를 검토하였으며, 삽입되기 전의 자연스러운 Fiber 상태와 비교 분석하였다. 이 연구에서 철근 대용 복합재료에 삽입된 FBG 센서는 기존의 삽입되지 않은 일반 광섬유센서와 비교 시, 복합재료의 보강효과에 의해 최대 변형률이 기존보다 크게 나타났으며, 내구성 측면에서도 좋은 성능을 발휘할 것으로 예상된다.

주요용어: 철근대용 FRP 복합재, FBG 센서, 콘크리트 슬러브, 광섬유 구조계측, 변형률

Abstract In our research, we focused on the FBG sensor system which is one of the fiber optic sensor system. The FBG sensor system is used for structural measurements. The problem of FBG sensor is very thin and weak. The methods that can protect FBG optical fiber sensor from outside forces such as the impacts are investigated. The FBG sensor embedded in the fiber reinforced composites which can replace the reinforcing steel bars in concretes can be applied to the concrete structures by embedding to the composite materials. The progresses in tensile strength of FBG sensor embedded in the reinforcing FRP bars in the concrete structures compare to plain FBGs were observed and the good long term durability is expected.

Keywords: Fiber Reinforced Polymer, FBG Sensor, Concrete Slab, Optic Fiber Data Logger, Strain

1. 서 론

사회가 고도화되고, 산업기반시설물이 대형화가 됨에 따라 교량, 댐, 터널, 대형 건물 등의 안전성을 효과적으로 판단하고, 적절한 유지 보수를 위한 영구 계측 시스템이 날로 증가되고 있다. 현재는 주로 기존의 전기적인 변형률 게이지들을 이용한 구조물 계측이 이루어지고 있으나, 여러 지점을 동시에 계측하기 어렵고, 시공성이 떨어지며, 센서 설치 시에 많은 시간이 소모된다. 또한 주위의 전기적인 잡음들에 의해 정확한 계측이 어렵고, 각 센서마다 라인이 나오므로 라인이 복잡하며, 케이블

(접수일: 2007. 2. 27, 심사완료일: 2007. 3. 20) * (주)아이세스, ** 홍익대학교 대학원 재료공학부, ** 홍익대학교 재료공학부, † Corresponding author: School of Materials Science, Hongik University, Chochiwon Chungnam 339-701 (E-mail: kisookim55@paran.com)

길이에 따른 부수적인 문제점도 많다.

광섬유 센서는 주위의 전기적인 잡음이나 노이즈에 손실이 적고, 가늘며 쉽게 휘기 때문에 기하학적 응용성이 우수하고, 쉽게 장착할 수 있어 시공시간을 많이 단축 할 수 있으며, 녹이 슬지 않고 부식이 잘 안되므로 외부 노출에 보호될 수 있다. 또한 하나의 광섬유에 여러 개의 광섬유 센서를 장착할 수 있고, 높은 감도와 빠른 감지 속도를 가지고 있으므로 센서로의 이용 가치가 매우 높기 때문에 여러 분야로 연구가 진행 중이다[1-9].

근래에는 전기식 센서로 측정하였던 분야에서 위의 장점을 가진 광섬유 센서를 사용하여 측정하는 방법들이 많이 개발되고 있으며, 이중 여러 지점의 변형률을 동시에 계측하면서 온도 센서의 기능까지도 할 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서(fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)가 각광을 받고 있다. FBG 센서는 가늘고 가벼우며, 부피가 작고, 유리섬유이기 때문에 수명이 반영구적이며, 특히 노이즈가 적고, 전자기파 간섭에 무관하기 때문에 정밀 측정이 가능하다. 또한 한 가닥의 광섬유에 수십 개의 센서를 동시에 제작, 설치 할 수 있으므로 시공이 용이하다는 장점이 있다. 또한 광섬유는 손실 없이 신호를 10 km 이상 전송할 수 있어 계측 시 원격 측정이 용이하다[10-12].

그러나 광섬유 센서는 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 가늘고 약하다는 단점을 가지고 있다. 즉, 전기식은 쉽게 끊어지지 않고, 심하게 구부러져도 센서에는 지장이 없으며, 단선이 되어도 케이블 연결이 용이하지만, 광섬유 센서는 가느다란 유리 섬유이므로 충격이나 심하게 구부러짐, 또는 큰 힘이 가해졌을 때는 끊어지기 쉽고, 단선이 되면 광섬유 접속 장치가 필요하다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 광섬유 센서의 큰 단점인 가늘고 약하다는 점을 보안하기 위해 FBG 센서를 FRP(fiber reinforced polymer) 복합재에 삽입하여 대용 철근을 만들고, 그 센서가 삽입된 대용철근을 실험하여 실제 현장에 적용 가능한 광섬유 센서가 내장된 콘크리트 구조물을 시험하였는데, 측정범위가 넓어지고 내구성이 양호해 질 것으로 보여, 이러한 광섬유 센서를 상용화한다면 국내외적으로 이 분야를 선점할 수 있는 기회를 가질 수 있다. 또한 국내 구조물 계측시스템의 수준도 한 단계 상승할 수 있는 계기가 될 것이다.

2. FBG 센서의 특성과 작동 원리

2.1. FBG 센서의 특성

FBG 센서는, 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 광섬유 브래그 격자를 일정한 길이에 따라 새긴 후, 온도나 강도 등의 외부의 조건변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이다.

일반적으로 사용되는 광섬유의 중심(core)에는 덧겹층(cladding)보다 굴절률을 높이기 위하여 보통 게르마늄(Ge) 물질이 첨가되는데, 이 물질이 실리카 유리에 안착하는 과정에서 구조 결함이 생길 수 있다. 이 경우 광섬유 코어에 강한 자외선을 쪼여주면, 게르마늄의 결합구조가 변형되면서 광섬유의 굴절률이 변화된다. FBG 센서는 이러한 현상을 이용하여 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킨 것을 말한다.

FBG 센서의 제조 방법에는 여러 가지가 있으나, Fig. 1과 같이 자외선 레이저를 이용하는 방법이 가장 많이 사용된다.

이 격자는 브래그 조건을 만족하는 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 투과시키는 특징을 갖는다. 격자의 주변 온도가 바뀌거나 격자에 인장이 가해지면, 광섬유의 굴절률이나 길이가 변화되므로 반사되는 빛의 파장이 변화된다.

따라서 광섬유 브래그 격자 부분에서 반사되는 빛의 파장을 측정함으로써 온도나 인장, 또는 압력, 구부림 등을 감지할 수 있다.

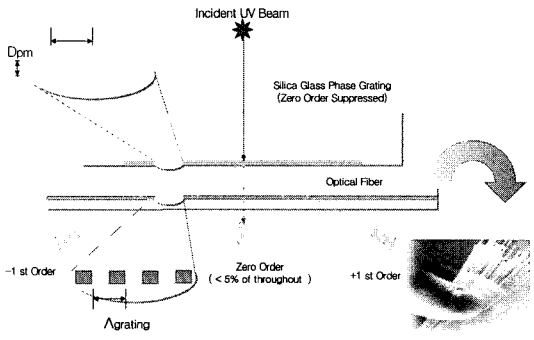

Fig. 1 Manufacturing method of FBG sensor use ultraviolet-rays laser

2.2. FBG 센서의 동작원리

FBG 센서에는 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 격자가 사용되는데, 이 경우 각 격자의 반사 파장을 모두 다르게 함으로써, 반사된 빛의 스펙트럼으로부터 특정 격자가 겪는 물리량을 쉽게 구분할 수 있다. 이러한 방법을 파장분할방식이라 하는데, 이 방법에서는 광원의 한정된 선폭에 의하여 동시에 측정할 수 있는 격자의 개수에 제약을 받는다. 측정할 수 있는 격자의 개수를 증가시키기 위한 방법으로 파장분할방식과 시간분할방식을 병행하기도 한다.

브래그 격자 센서 어레이의 가장 큰 응용 중에 하나는 구조물의 상태를 진단하는 스마트 구조(smart structure)가 있다. 교량, 댐, 건축물 등의 건설 시에 콘크리트 안 등에 광섬유 격자 어레이를 포설하고, 구조물 내부의 인장 분포나 구부림 정도를 감지하여 구조물의 안전 상태를 진단할 수 있다. 이는 항공기나 헬리콥터 등의 날개 상태 진단 등에도 응용되고 있다.

Fig. 2는 FBG 센서의 구조를 나타낸다. 그림에서와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 식 (1)과 같은 브래그 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

여기서, n은 광섬유 코어의 유효 굴절률(effective refractive index)이며, Λ는 격자와 격자 사이의 간격(grating period)이다.

격자에서 반사되는 브래그 파장은 식 (2)와 같이 유효 굴절률과 격자 간격의 함수로 표현되며, FBG 센서의 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그 파장이 달라진다. 이에 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG 센서에 인가된 물리량을 구할 수 있다. 먼저 온도 변화(ΔT)에 대한 브래그 중심파장 λ_B의 변화량 $\Delta\lambda_{B^T}$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

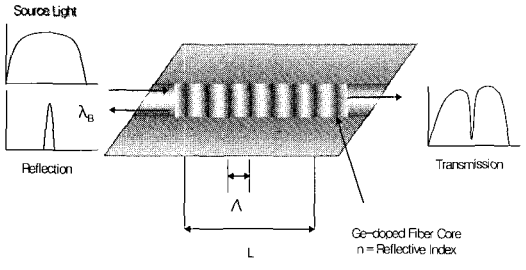

Fig. 2 Schematic diagram of FBG sensor

$$\Delta\lambda_{B^T} = \lambda_B(\alpha+\xi)\Delta T \tag{2}$$

여기서, α는 광섬유의 온도에 따른 팽창 계수(thermal expansion coefficient)로 실리카(Silica) 유리의 경우 약 $0.55\times10^{-6}/℃$이며, ξ는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열 광학계수(thermal-optic coefficient)로서 약 $8.3\times10^{-6}/℃$이다. 위와 같이 온도에 의한 브래그 파장의 변화는 유효 굴절률 변화에 기인함을 알 수 있다. 또한 변형률 변화에 대한 브래그 중심 파장 변화량($\Delta\lambda_{B'}$)는 다음과 같다.

$$\Delta\lambda_{B'} = \lambda_B(1-P_e)\epsilon \tag{3}$$

여기서, P_e는 광탄성상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리(germano-silicate glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가지며, ϵ은 광섬유 격자에 가해진 변형률이다. 그러므로 위의 식 (2), (3)에 의하여 FBG의 중심파장 변화는 온도와 변형률에 의해 변화함을 알 수 있다.

이러한 FBG 센서의 물리적 측정을 변형률과 온도의 변화량으로 식 (2)와 식 (3)을 더하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_B &= \Delta\lambda_{B^T} + \Delta\lambda_{B'} \\ \Delta\lambda_B/\lambda_B &= (1-p_e)\epsilon + (\alpha+\xi)\Delta T\end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 광섬유 브래그 격자는 변형률이나 온도 등에 의해 FBG 센서의 값이 변화하므로 반사되는 브래그 파장의 변화를 측정한다면 광섬유 브래그 격자에 가해진 미지의 변형률과 온도를 구할 수 있다.

광섬유 브래그 격자는 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변조하여 특정 파장의 빛을 반사시키는 광섬유 소자로써 광섬유와의 연결 손실이 작고 파장 선택도가 높으며 편광에 무관한 특성 등으로 현재 전 세계적으로 광통신용 소자나 광섬유 센서 등으로 활발히 연구되고 있다.

광섬유 내에서 빛의 전파 원리는 굴절률이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행될 때, 그 경계면에서 일정한 각도 내의 빛이 모두 반사되는 전반사의 원리에 있으며, 광섬유 코어로 입사된 빛은 굴절률이 높은 코어 층과 굴절률이 낮은 클래딩 층의 경계면에서 반사되어 광섬유 코어부분을 따라 전파되게 된다. 이러한 광섬유의 주성분은 실리카 유리로 이루어져 있으며, 그 구조는 굴절률이 약간 높도록 게르마늄을 첨가한 광섬유 중심(core)부분과 중심을 보호하는 덧겹층(cladding) 부분으로 구성되어 있다. 광섬유 격자소자는 게르마늄(Ge)이 첨가된 광섬유 코어 부분이 자외선 영역의 빛에 노출되면, 굴절률이 약간 증가하게 되는 현상을 이용하여 광섬유 격자를 개발하여 광통신이나 광섬유 센서로 뛰어난 성능을 나타내는 새로운 소자로 개발되었다.

광섬유 센서는 전자기 간섭에 영향을 받지 않고 감도가 높으며, 소형, 경량이므로 보통의 센서가 사용될 수 없는 위험한 장소나 고감도를 요하는 특수 목적에 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 광섬유 센서는 광섬유를 통과하는 빛의 진폭, 위상, 혹은 편광 등을 이용하여 측정하고자하는 물리량의 변화 즉, 전자기장의 세기, 회전율, 온도, 압력, 수위, 음향, 가스농도 등을 측정할 수 있으므로 이에 대한 기초 및 응용 연구가 1970년대 후반부터 이루어져 왔다. 그러나 고전적인 광섬유 센서의 문제는 대체적으로 신호대 잡음 지수가 낮으며, 특정 지점을 측정하기 위해서는 광섬유를 절단하여 코팅한다든지 기타 특수 처리된 광섬유 센서를 사용해야하는 문제가 있었다.

그러나 FBG 센서는 광섬유 측면에 조사하여 광섬유의 특정 부위에 원하는 파장에 대해서 반사 특성을 보이는 브래그 격자를 새길 수 있음을 보인 이후 광섬유 센서의 연구가 괄목할만한 발전을 이루었다. 보고된 바에 의하면 광섬유의 강도를 저하 시키지 않고 1% 변형률에 의해 12 nm 영역에 걸친 브래그 파장의 가변이 이루어질 수 있으며, 압축력에 의해 약 32 nm의 파장 가변이 이루어졌으며, 또한 100℃ 정도의 주위 온도 변화로 1.1 nm의 파장 가변이 이루어졌다. 예를 들면 약 0.01 nm Bragg 파장을 정확히 이동시키기 위해서는 변형률과 온도의 분해능은 각각 대략 8×10^{-6}, 0.9 ℃이며, 다른 실험 장치를 통해 더 큰 분해능을 갖도록 하여 더 작은 브래그 파장의 이동을 측정할 수 있다. 이런 파장의 이동은 다른 광섬유 격자 소자와 광섬유 패브리 페로(Fabry-Perot) 공진기 형태의 광학 필터나 비대칭 Mach-Zehnder 간섭계로 관찰할 수 있었고, 또한 간단한 장치로 온도 변화에 무관한 스트레인 측정 장치를 구성할 수도 있다. 또한 다중점(multi-point) 센서로의 확장이 용이하며 이를 이용하면 교량 및 건축물의 사전 감시 시스템을 구성할 수 있고, 또한 복합 구조물에 대한 진단이나 음향센서 어레이(Array)로서 성공적으로 시험되었다[13,14].

FBG 센서의 응용 사례로는 캐나다 Calgary에서 고가차도용 콘크리트 구조물에(길이 19.5 m) 4개의 광섬유 격자소자 센서를 넣어 총 5개의 구조물을 광섬유 격자 센서 어레이(array)로 감시 시스템을 구성했으며, 유럽의 European Brite-Euram (no. BE5553 of CEC) Stabilos project는 광섬유 격자소자 센서 기술을 바탕으로 탄광이나 터널굴착 및 폭발 작업환경에 대한 안정성을 증진시키는 정밀 안정 관리 시스템 구축에 그 목적이 있다.

3. 실험 방법

3.1. 철근대용 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서

FBG 센서가 삽입된 FRP 복합재 제작은 Fig. 3과 같이 여러 가닥의 FRP 복합재를 하나로 뽑아내는 장치에 끼워 넣는다. 이때 여러 가닥의 FRP 복합재 사이에 FBG 센서를 넣어 센서 부분을 표시한다. FBG 센서가 끼워진 FRP 복합재를 하나로 굳히기 위해 FRP 복합재가 에폭시를 통과하게 한 후 에폭시가 충분히 묻은 상태에서 뽑아낸다.

뽑아낸 FRP 복합재는 FBG 센서가 잘 위치하고 있는지 확인한 후 열 가압기의 틀에 맞게 길이를 절단한다.

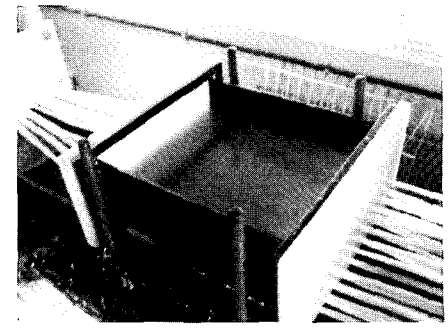

Fig. 3 Cutting process of FBG sensor embeded in FRP composite reinforcing bars

Fig. 4와 같이 열 가압기에 먼저 이탈재를 발라준 후 길이에 맞게 절단한 FBG 센서가 들어있는 FRP 복합재를 열 가압기 틀에 올려놓는다. 그리고 열 가압기에 열을 가하여 FBG 센서가 들어있는 FRP 복합재를 가압하여 굳힌다.

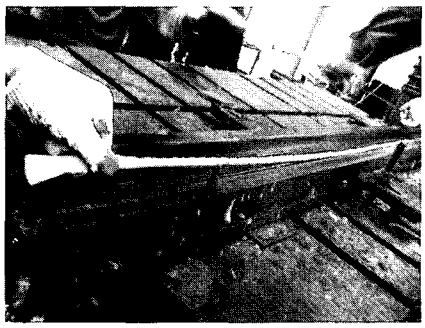

Fig. 4 Heat treatment of FBG sensor embeded in FRP composite reinforcing bars

열 가압이 끝난 후 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서의 양쪽 끝단에서 나오는 라인을 보호하기 위하여 Fig. 5와 같이 FRP 복합재 양쪽 끝단에 나일론 튜브를 끼운다.

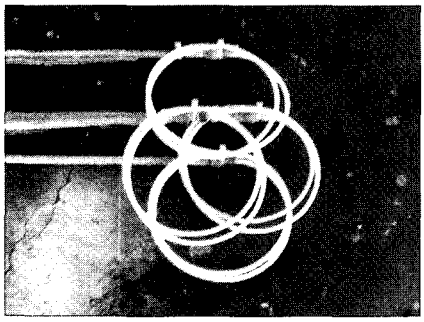

Fig. 5 Protected FBG sensor embeded in FRP composite reinforcing bars

이런 과정을 다 거치고 표면을 깔끔히 정리한 후 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서마다 초기 파장을 표시하면 최종적으로 Fig. 6과 같이 FBG 센서가 삽입된 철근대용 FRP 복합재가 완성된다.

이때 완성된 FBG 센서가 삽입된 철근대용 FRP 복합재의 FBG 센서 양쪽 끝단에서 나오는 라인을 통해 FBG 센서의 초기 파장이 철근대용 FRP 복합재에 삽입한 후의 파장과 일치하는지를 확인하는 것이 중요하다.

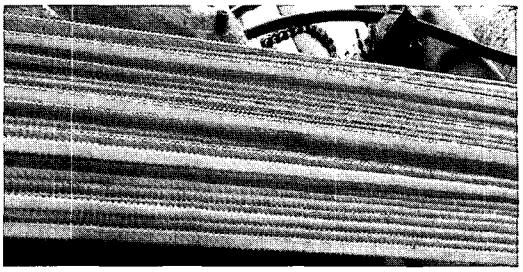

Fig. 6 FBG optical fiber sensors embedded in FRP composite reinforcing bars

Fig. 7은 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서의 구조도로 FRP 복합재 중심에 FBG 센서가 위치하고 있는 것을 볼 수 있다.

즉, 가는 유리 섬유로 만들어진 FBG 센서를 같은 유리 특성을 가진 복합재 FRP에 삽입해 FBG 센서의 가늘고 약하여 센서 패키지 제작과 다양하고 광범위한 현장 적용 및 설치가 어렵다는 단점을 보완한 것이다.

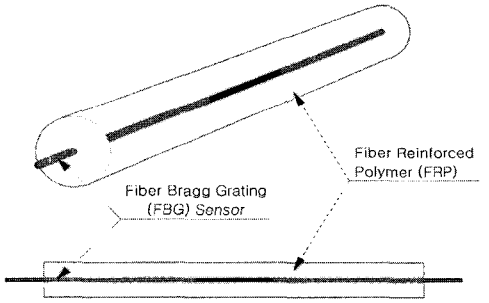

Fig. 7 Structure of FBG sensor embedded in FRP composite reinforcing bars

3.2. FRP 복합재 FBG 센서가 삽입된 콘크리트 시험체 제작

FRP 복합재에 삽입된 FBG센서 인장강도 실험은 대형 가압기로 이루어지므로 완성된 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서를 시험체 속에 두개씩 배열하여 시험체를 Fig. 8과 같이 제작하였다.

이때 시험체 속에 있는 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서의 양쪽 끝 라인이 시험체 밖으로 나와 있어야 실험 시에 센서를 측정할 수 있으므로 라인이 안전하게 나올 수 있도록 제작하고 보호하는 것이 중요하다.

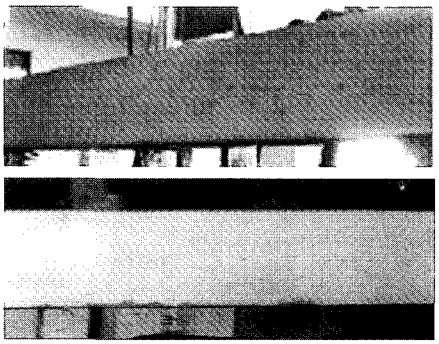

Fig. 8 FBG sensor embedded in concrete

이렇게 FBG 센서가 삽입된 콘크리트 슬래브 시험체 제작이 끝나면 시험체 양쪽으로 나온 FRP 복합재에 삽입된 FBG센서 라인을 광섬유 센서 로거 시스템(optic sensor logger system)에 연결하여 실시간으로 모니터링한다.

Fig. 9는 FRP 복합재 FBG 센서가 삽입된 콘크리트 시험체 구조도이다. 구조도에서 FRP 복합재 FBG 센서가 콘크리트 시험체 안에 어떻게 배근되어 있는지를 자세히 볼 수 있다.

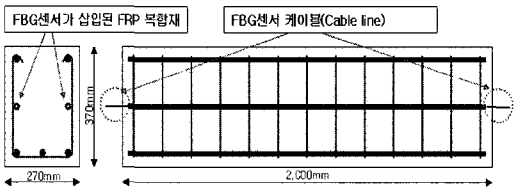

Fig. 9 Structure of FBG sensor embedded in concrete

4. 실험결과 및 분석

4.1. FRP 복합재에 삽입하지 않은 FBG센서의 인장실험 결과 및 데이터 분석

FRP 복합재에 삽입하지 않은 FBG센서의 인장실험 결과는 Table 1과 같다. 이때 FBG센서가 인장에 의한 최대 변형률 값이 제조사별로 다를 것으로 예상되어 가장 많이 쓰이고 있는 두 개의 FBG센서 제작회사를 선별하여 실험하였다.

Fig. 10은 Table 1을 그래프로 나타냈다.

이 실험을 통해 FRP 복합재에 삽입하지 않은 FBG 센서의 인장실험 결과 S사의 평균 최대 변형률 값은 $8,550\times10^{-6}$, L사의 평균 최대 변형률 값은 $10,560\times10^{-6}$ 이라는 결과를 얻을 수 있었다.

Table 1 Maximum strain of FBG sensor according to the companies

실험횟수	S사 ($\times10^{-6}$)	L사 ($\times10^{-6}$)
1	8,500	11,100
2	8,200	10,800
3	9,000	9,800
4	8,000	10,500
5	8,700	10,700
6	8,900	10,200
7	8,500	10,700
8	8,600	10,200
9	8,300	10,300
10	8,800	11,300
평균 변형률 값 ($\times10^{-6}$)	8,550	10,560

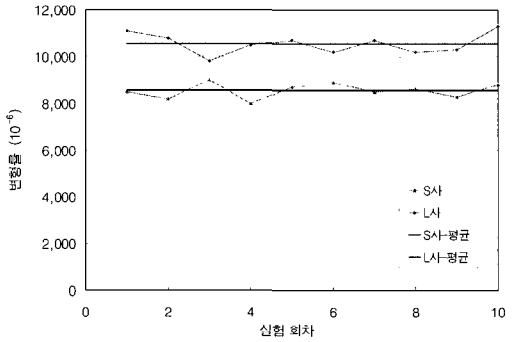

Fig. 10 Maximum strain of FBG sensor a manufacturing company

4.2. FBG 센서가 삽입된 FRP 복합재의 인장실험 결과 및 데이터 분석

FBG 센서가 삽입된 FRP 복합재의 인장실험은 앞에서 제작한 FBG 센서가 삽입된 철근대용 복합재를 일정 시간동안 가압을 증가시키는 가압기를 사용하여 인장실험을 하는 것으로 실험 결과는 Fig. 11과 같다.

FBG 센서가 삽입된 FRP 복합재를 가압기로 가압하면 일정 시간동안 변형률 값이 늘어나다가 최대 변형률 값에서 항복하게 된다.

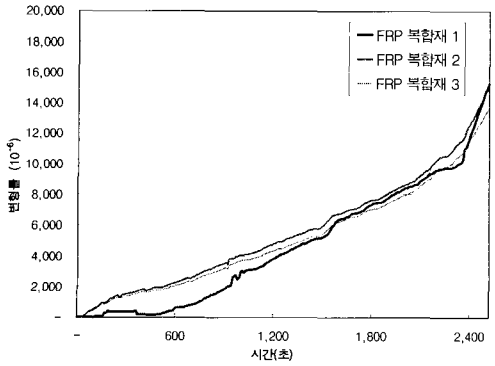

Fig. 11 Strain variation of FBG sensor embedded in FRP composite reinforcing bars

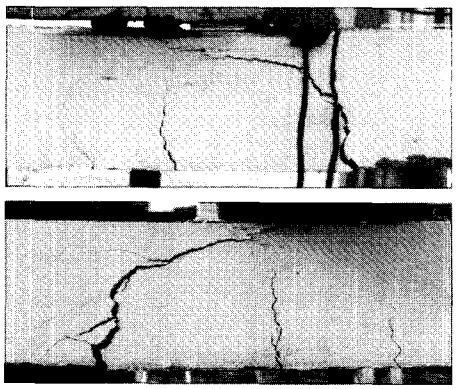

Fig. 12 Test of FBG sensor embedded in concrete

Fig. 11에서 보듯이 FBG 센서가 삽입된 FRP 복합재의 휨 인장실험 변형률 변화 값은 FRP 복합재에 삽입하지 않은 FBG 센서의 인장실험 변형률 변화 값보다 월등히 향상된 변화 값인 최대 변형률 $14{,}000\times10^{-6}$ ~ $16{,}000\times10^{-6}$ 의 실험값을 얻게 되었다.

여기서, 휨 인장실험 최대 변형률 변화 값인 $14{,}000\times10^{-6}$ 과 실험값 $16{,}000\times10^{-6}$ 의 차이는 FBG 센서가 삽입된 FRP 복합재의 가압 위치가 정확하지 못했거나, FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서 간의 변형률 차이라고 예상된다.

4.3. 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서의 휨 인장실험 결과 및 데이터 분석

대형 가압기에 제작한 콘크리트에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서 시험체를 배치하고, 일정한 시간 동안 하중을 가하여 Table 1에 나타난 바와 같이 FBG 센서의 최대 변형률에 비하여 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서의 인장에 의한 최대 변형률을 살펴보는 실험을 실시하였다.

이때 일정한 시간동안 하중을 가하면 시험체는 변형이 생겨 Fig. 12와 같이 시험체에 균열이 진행하면서 콘크리트 슬래브는 항복하게 되고, 이에 따라 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서도 인장 항복점에 도달하게 된다.

시험체인 콘크리트 보 중간부에 초기 파장이 다른 두개의 FRP 복합재 FBG 센서를 배열하였고, 시험체의 인장실험에 대한 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 총 3개의 시험체로 인장실험을 실시하였다. 시험체 명칭은 시험체 1, 시험체 2, 시험체 3으로 정하고, 각 시험체에 FRP 복합재 FBG 센서가 두개씩 배열되었으므로 그 두개의 FRP 복합재 FBG 센서의 명칭은 시험체 1 경우 시험체 1-1, 시험체 1-2로 정하였다.

이렇게 각 콘크리트 시험체 1, 2, 3을 차례로 똑같은 조건으로 일정한 시간동안 가압하여 각 콘크리트 시험체 안의 FRP 복합재 FBG 센서의 변형률 변화 값을 얻었다.

이 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서의 휨 인장실험 최대 변형률 값 결과가 FBG 센서가 삽입된 FRP 복합재를 시험체로 만들지 않고 인장실험한 최대 변형률 값의 결과와 거의 일치하게 나와야만 콘크리트 시험체에 일정한 시간 동안 가압을 했을 때 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서가 콘크리트 슬래브와 일치하게 거동한다고 볼 수 있다.

Fig. 13은 시험체 1의 휨 인장실험에 의한 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서의 변형률 값의 변화이다.

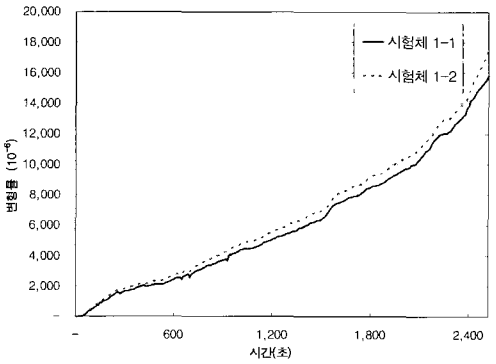

Fig. 13 Strain variation of specimen 1 by bending -tensile

Fig. 14는 시험체 2의 휨 인장실험에 의한 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서의 변형률 값의 변화이다.

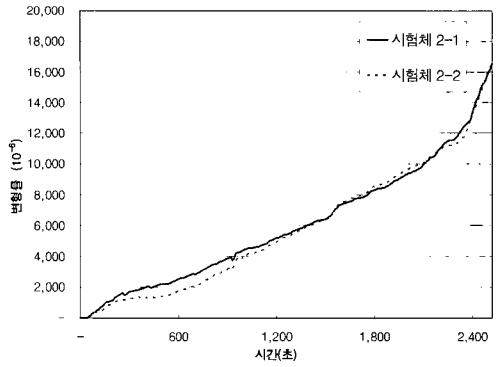

Fig. 14 Strain variation of specimen 2 by bending -tensile

Fig. 15는 시험체 3의 휨 인장실험에 의한 콘크리트 슬래브에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서의 변형률 값의 변화이다.

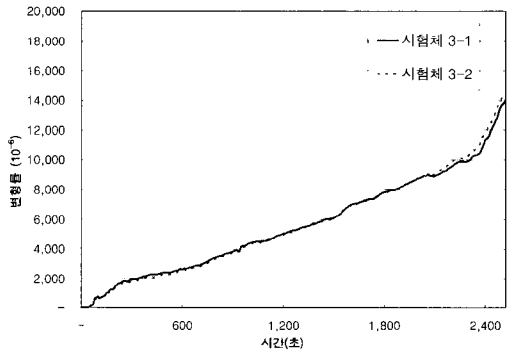

Fig. 15 Strain variation of specimen 3 by bending -tensile

이 철근대용 FRP 복합재에 삽입된 FBG 센서의 시험체 1, 2, 3의 인장실험에서 최대 변형률 $14{,}000\times10^{-6}$ ~ $18{,}000\times10^{-6}$ 의 실험값을 얻었다.

여기서, 실험값 $14{,}000\times10^{-6}$과 실험값 $18{,}000\times10^{-6}$의 차이는 1차적으로 FBG 센서 별로 최대 변형률 값이 차이가 있었을 것이고, 2차적으로는 시험체 3개의 센서 배열 위치가 조금 달라졌거나, 가압한 위치가 조금 달라졌을 것으로 예상된다.

Fig. 16은 시험체 1, 2, 3의 휨 인장 실험 변형률 변화 값을 모두 모아 비교한 그래프이다.

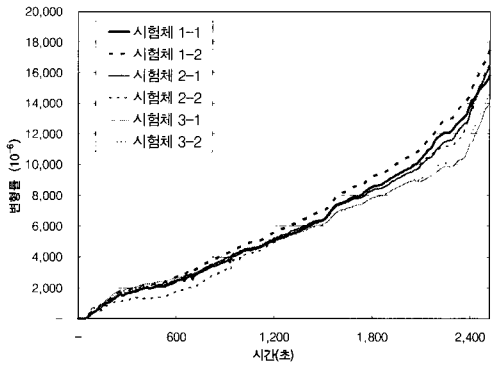

Fig. 16 Strain variation of specimen 1, 2, 3 by bending-tensile

또한 시험체에 삽입된 FRP 복합재 FBG 센서 인장실험 결과가 시험체에 삽입하지 않은 FRP 복합재 FBG 센서 인장실험 결과가 거의 일치했다.

4.4. 실험 결과 분석

철근대용 FRP 복합재에 삽입하지 않은 FBG 센서의 인장실험은 FBG 센서 제조사 별로 차이는 있으나, $8{,}000\times10^{-6}$ ~ $10{,}000\times10^{-6}$ 정도에서 센서가 파괴되어 최대 변형률 값을 나타내었지만, 철근대용에 삽입된 FBG 센서의 콘크리트 슬래브 시험체 휨 인장실험은 위의 Fig. 16에서 볼 수 있듯이 FBG 센서가 단락되어 신호가 사라지기전 최대 변형률 값이 $14{,}000\times10^{-6}$ ~ $18{,}000\times10^{-6}$ 이므로, 복합재에 삽입하지 않은 FBG센서보다 약 $6{,}000\times10^{-6}$ ~ $8{,}000\times10^{-6}$ 정도가 향상된 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 FRP 복합재와 FBG 센서가 강력하게 접착되어 FRP 복합재가 FBG 센서를 보호하는 형태가 됨에 따라 발생하는 현상으로 생각된다.

또한 가늘고 약한 단점을 가지고 있는 FBG 센서를 철근대용 FRP 복합재에 삽입하여 가늘고 약한 단점을 보안함으로서 센서 설치와 이동이 용이해 졌으므로 다양하고 폭넓은 현장 적용이 가능할 것으로 예상된다.

이로서 철근대용 복합재에 삽입된 FBG 센서 변형률에 관한 연구의 결과는 실험 전에 기대했던 것만큼 만족할 만한 좋은 성과를 얻었다.

5. 결 론

광섬유 센서는 다른 센서들에 비해 많은 장점을 가지고 있고, 이로서 많은 연구 기술 분야나 산업 기반시설 구조물 계측에 반영되고 있으나[15,16] 가장 큰 문제인 가늘고 약하다는 광섬유 센서의 근본적인 단점을 보안하지 못한다면, 광섬유 센서의 활용도나 접목할 수 있는 분야가 날로 좁아질 수밖에 없을 것이다.

이런 점에서, 철근대용 복합재료에 삽입된 FBG 센서의 변형률에 관한 연구 결과는 다양하고 폭넓은 분야에 적용할 수 있음은 물론 광섬유 센서의 제작 및 이동, 현장 적용 시 센서 설치의 용이성, FBG 센서 패키지(Package)의 다양화를 가져올 수 있을 것이며, 전기식 센서를 포함한 모든 센서를 광섬유 센서로 접근할 수 있는 계기가 될 것이며, 전기식 센서로는 접근할 수 없었던 차세대 센서가 만들어질 것으로 예상된다.

또한, 광섬유 센서가 전기식 센서에 비해 노이즈가 적고, 부식이 잘 안되며, 전자기파 간섭에 무관하기 때문에 구조물 계측 시 정밀 측정이 가능하고, 고압 전류가 흐르는 지하철이나 철도, 교량, 터널 구조물에서도 측정에 방해를 받지 않으며, 한 가닥의 광섬유에 수십 개의 광섬유 센서 패키지를 동시에 제작, 설치, 영구 계측이 가능하다는 등의 장점을 최대한 살리고, 광섬유 센서의 가늘고 약하다는 단점을 극복할 수 있는 철근대용 복합재료에 삽입된 FBG 센서를 더욱 발전시키고 연구하여 교량과 터널, 고층 건축물 등의 건축·토목분야의 모든 콘크리트 구조물의 안전 유지 관리 계측 센서로는 물론 화재 감지 센서, 침입자 감시 센서 등 생활에 접목되는 센서까지도 폭넓게 사용될 수 있을 것이고, 더 나아가 국내·외적으로 센서 분야를 선점하여 국내·외의 건축·토목 구조물 계측 시스템의 수준도 한 단계 상승할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 우수연구센터인 "스마트사회기반시설연구센터"의 지원과 건설교통부의 "국가주요 기반시설물 안전관리 네트워크 연구단"의 지원 그리고 2006학년도 "홍익대학교 학술연구진흥비"의 지원으로 이루어진 것입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures," Proc. SPIE, Vol. 1588, pp. 282, (1991)

[2] W. W. Morey, J. R. Dunphy and G. Meltz, "Multiplexing fiber Bragg grating sensor," SPIE, Vol. 1586, Paper #22, Boston, pp. 216-224. (1994)

[3] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B.S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides. application to reflection filter fabrication", Appl. Phys. Lett., Vol. 32, No. 10, pp. 647-649, (1978)

[4] K. P. Koo and A. D. Kersey, "Bragg grating-based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing," Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 1243-1248, (1995)

[5] A. D. Kersey, K. P. Koo and M. A. Davis, "Fiber optic Bragg grating laser sensors", SPIE, Vol. 2292 Fiber Optic and Laser Sensors XII, pp. 102-112, (1994)

[6] M. Melle, Kexing Liu and Raymond M, "A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 4, NO. 5, pp. 516-518, (1992)

[7] J. Stone and L. W. Stulz, "Pigtailed high-finesse tunable fiber Fabry-Perot interferometer with large, medium and small free spectral range", Elect. Lett., 23-15, pp. 781-783, (1987)

[8] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, "Fiber optic Bragg grating sensors," SPIE, Vol. 1169, pp. 98-106, (1989)

[9] A. D, Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," Electronics Letters, 30th, Vol. 28, No. 3, pp. 516-518, (1992)

[10] K. S. Kim, L. Kollar and G. S. Springer, "A

model of embedded fiber optic Fabry-Perot temperature and strain sensors," J. of Composite Materials Vol. 27, pp. 1618-1662, (1993)

[11] J. T. Dewolf, P. E. Coon and P. N. O'Leary, "Continuous monitoring of bridge structures", Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 8, pp. 2437-2450, (1994)

[12] K. S. Kim, M. Breslauer and G. S. Springer, "The effect of embedded sensor on the strength of composite laminates" J. of Reinforced Plast and Comp, Vol. 2, pp. 949-958, (1992)

[13] Andreas Othonos and Kyriacos Kalli, "Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing," Artech House, (1999)

[14] Meltz, G., W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method," Optics Letters, Vol. 14, pp. 823-825, (1989)

[15] 김기수 "광섬유 센서를 이용한 탄소섬유시트 보수보강 콘크리트구조물에서의 자기진단기법", 비파괴검사학회지, 23권 2호, pp. 133-139, (2003)

[16] 김기수 "광섬유센서를 이용한 원자력발전소 격납구조물의 가동전 가압팽창을 통한 구조건전성 시험", 한국복합재료학회지 제16권, 6호 pp. 56-61, (2003)