

FBG 센서 기술의 응용 사례

Applications of Fiber Bragg Grating Sensor Technology

강 동 훈*

Kang, Dong-Hoon

ABSTRACT

Among many fabrication methods of composite materials, filament winding is the most effective method for fabricating axis-symmetric structures such as pressure tanks and pipes. Filament wound pressure tanks are under high internal pressure during the operation and it has the complexity in damage mechanisms and failure modes. Fiber optic sensors, especially FBG sensors can be easily embedded into the composite structures contrary to conventional electric strain gages (ESGs). In addition, many FBG sensors can be multiplexed in single optical fiber using wavelength division multiplexing (WDM) techniques. In this paper, we fabricated several filament wound pressure tanks with embedded FBG sensors and conducted some kinds of experiments such as an impact test, a bending test, and a thermal cycling test. From the experimental results, it was successfully demonstrated that FBG sensors are very appropriate to composite structures fabricated by filament winding process even though they are embedded into composites by multiplexing.

Keywords: FBG sensor, composite, filament winding, pressure tank, multiplexing.

1. 서 론

최근 금속 재료에 비해 높은 비강성, 비강도와 우수한 내부식성 및 피로특성을 갖는 복합재료는 기계, 항공분야 뿐만 아니라 건축, 토목분야에서도 새로운 유지보수(maintenance) 재료로 그 활용도를 높여가고 있다. 여러 복합재료 구조물 중에서, 필라멘트 와인딩된 압력탱크는 항공우주 구조물의 연료탱크, 압력탱크, 모터 케이스 그리고 파이프 등의 축대칭 구조물에 주로 사용되고 있다. 하지만, 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크는 매우 복잡한 손상 메카니즘과 파손 모드를 가지고 있어 이에 적합한 손상평가 시스템이 절실한 실정이다. 반면, 대부분의 기존 손상 평가 방법과 비파괴 검사 방법은 많은 시간을 요하며 구조물 중에서 접근이 어려운 부분에는 적용이 어려우므로 구조물의 중요 부분을 지속적으로 모니터링 하기 위해서는 구조물에 직접 설치된 평가 시스템이 필요하다.

광섬유 센서는 구조물에 쉽게 부착 혹은 삽입이 가능하며 전자기파의 영향을 받지 않는다. 그리

* 한국철도기술연구원 미래기술실용화사업단 선임연구원 E-mail: dhkang@krri.re.kr

고, 센서의 크기를 쉽게 조절할 수 있을 뿐만 아니라 높은 민감도를 가진다. 변형률, 온도, 가속도, 변위 등 여러 물리량을 측정할 수 있는 광섬유 센서는 복조 기법에 따라 광강도형, 간섭형, 파장이동형 등으로 구분할 수 있으며 그 중에서 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM)가 매우 용이하여 스마트 복합재 구조물의 구조 건전성 모니터링에 매우 적합한 센서로 많은 관심을 받고 있다.

본 연구에서는 여러 가지 장점을 갖는 FBG 센서를 필라멘트 와인딩 된 복합재료 압력탱크에 삽입 적용하고 충격 시험, 굽힘 시험, 온도 사이클 시험 등을 수행함으로써 FBG 센서의 복합재료 구조물에 대한 적용성을 확인하였다.

2. FBG 센서

광섬유의 측면에 248 nm 근방의 자외선 레이저를 이용하여 간섭무늬를 형성하면 그림 1과 같이 광섬유 코어에 주기적으로 굴절률이 변화하는 격자를 만들 수 있다. 브래그 격자라 불리는 이 격자는 입사된 광폭 스펙트럼에서 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분만을 격자부분에서 반사시키고 나머지 파장 성분은 통과시키는 특성을 갖는다.

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

위 식에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다.

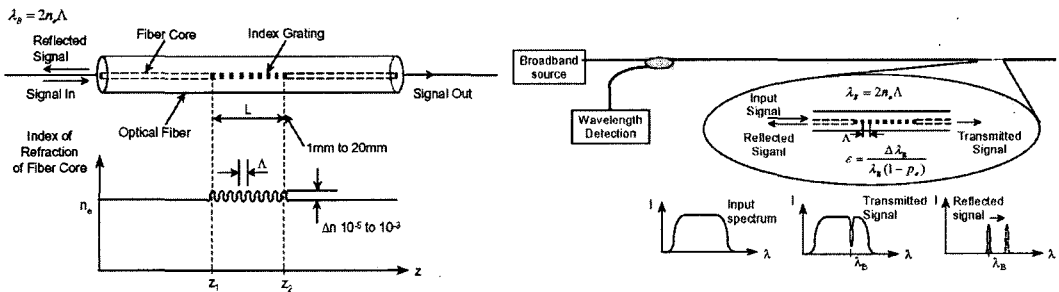


그림 1 FBG 센서의 측정 원리

식 (1)에서 알 수 있듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 브래그 조건에서 브래그 파장의 전미분을 취한 후 온도, 변형률과 유효 굴절률, 격자 간격의 식을 대입하면 식 (2)를 얻을 수 있고 변화된 브래그 파장을 측정하면 식 (2)로부터 광섬유 브래그 격자에 가해진 온도나 변형률을 계산해 낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \quad (2)$$

여기서, P_e 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)이며 다음과 같이 표현된다.

$$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

식 (2)에서 α 는 광섬유의 열팽창 계수(coefficient of thermal expansion, CTE)이고 ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. 그리고, 식 (3)에서 p_{11} 과 p_{12} 는 스트레인 광학 텐서(strain-optic constant)의 성분이며 n_e 은 코어의 유효 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송 비(poission's ratio)이다. 광탄성 상수 P_e 는 gemanosilicate glass의 경우 대략 0.22의 값을 가진다고 알려져 있으나 광섬유에 따라 다른 값을 가질 수 있으므로 정확한 변형률의 측정을 위해서 이 값의 측정이 요구된다. 식 (2)에서 만약, 센서들 간의 온도 차이가 없다면 $\Delta T=0$ 으로 둘 수 있고 식 (4)와 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다. (Udd, 1995)

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

또한, FBG 센서가 변형률을 받지 않는 자유상태(strain-free condition)에서 온도 변화만을 받는다고 가정하면 $\epsilon=0$ 이므로 식 (5)와 같이 간단하게 온도와 파장의 관계식을 얻을 수 있고 이것이 온도 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha + \xi} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

한편, FBG 센서가 구조물에 적용되어 열변형만을 받는 경우에는 식 (2)에서 $\epsilon=0$ 이 되고 센서의 부착이나 삽입으로 인한 영향을 고려하면 최종 파장 이동은 온도 영향으로 인한 브래그 격자의 굴절률 변화에서 기인한 항과 구조물의 열팽창으로 인한 기계적인 변형에서 기인한 항의 두 합으로 표현할 수 있고 식 (6)과 같다. (Sirkis, 1993)

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \xi \Delta T + (1 - p_e) \cdot (\alpha_{str} \Delta T) \quad (6)$$

식 (6)에서 $\alpha_{str}\Delta T$ 는 측정하고자 하는 구조물의 열변형률 $\epsilon_{thermal}$ 이므로 식을 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

그림 3과 같이 후방돔에서 전방돔 방향으로 실린더 부분 임의의 세 지점에 대해 고무망치로 적당한 충격을 가하고 이 때 발생하는 FBG 센서 신호를 측정하였다.

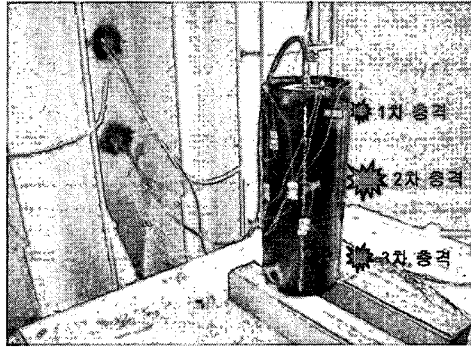


그림 3 고무망치를 이용한 충격 시험

그림 4의 결과에서 알 수 있듯이 충격 위치에서 가까운 곳에 위치한 센서는 상대적으로 큰 신호를 보였고 충격 위치로부터 멀어질수록, 삽입된 층이 더 아래쪽에 위치할수록 신호의 세기가 점차 낮아졌다. 만약 탱크에 전체적으로 분포되어 있는 센서들을 활용한다면 탱크에 가해지는 외부 충격 신호를 충격 위치에 관계없이 실제 운용 중에 실시간 모니터링을 통해 검출할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 각 센서로부터 취득된 신호의 세기와 신호 검출 시간을 통해 대략적인 충격 위치와 충격의 종류 또한 판단이 가능할 것으로 생각된다.

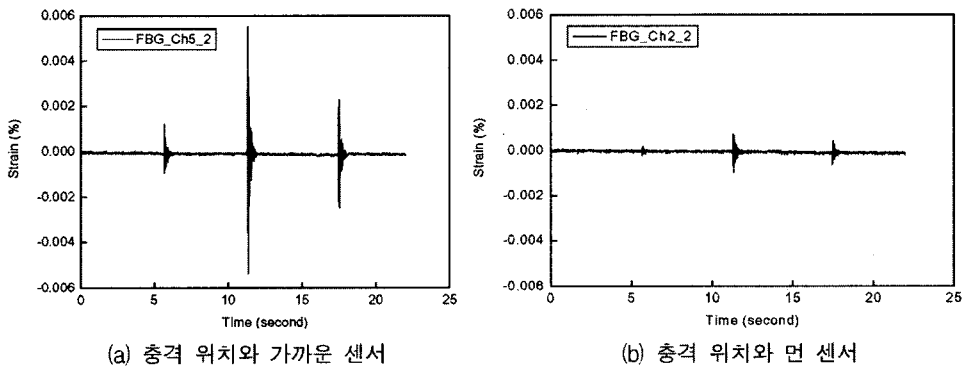


그림 4 충격 시험 결과

4.2. 굽힘 시험

그림 5에서와 같이 탱크의 전방돔이 아래로 향하도록 지그를 장착하여 몰드 위에 고정하고 후방돔에 장착된 지그는 하중이 작용하도록 구성된 강철 줄과 연결한다. 연결을 완료한 후, 단위 무게 9.94 kg의 추를 추 받침대 위에 10 개 올린 후(총 중량 104 kg) 추 받침대와 탱크에 연결된 강철 줄을 연결하는 챔버 상단에 설치된 고정 레버를 풀어 탱크에 하중을 인가하였다.

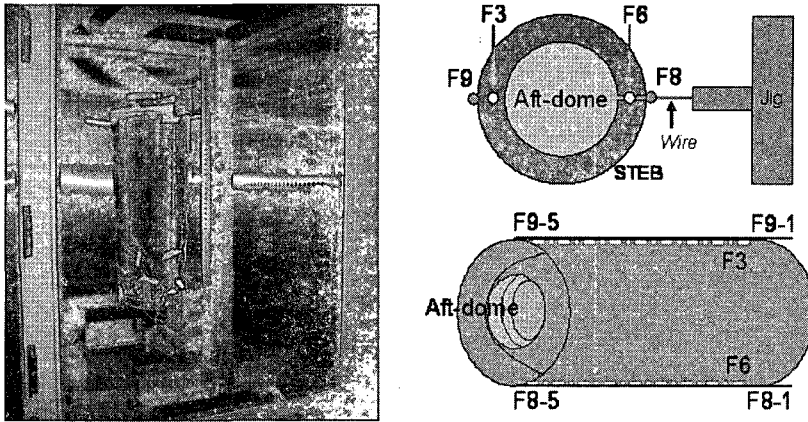


그림 5 굽힘 시험 장치와 시험 개념도

그림 6의 결과에서, 굽힘 하중에 따라 인장을 받게 되는 FBG 센서 채널 3, 9번의 경우 삽입된 F3-1, F3-2, F3-3번 센서에 비해 표면에 부착된 센서 F9-1, F9-3, F9-5번 센서에서 같은 하중에 대해 더 큰 변형률이 작용함을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 가장 큰 인장이 작용하는 1번 센서에서 인장의 크기가 점차 작아지는 5번 센서로 갈수록 측정된 변형률 값이 점차 줄어들음을 확인할 수 있다. 한편, 변형률 값의 비교를 위해 표면에 부착한 변형률 게이지에서는 F9-3, F9-5번 센서와 같은 위치의 ESG2, ESG3번 게이지의 경우 잘 일치된 결과를 보였다. 하지만, F9-1번 센서와 ESG1번 게이지와의 값 차이는 비교적 크게 나타났다. 이는 후프 와인딩 된 탱크의 실린더 부분 표면 상태가 매우 불균일한 상태임을 볼 때, 탱크 표면에 FBG 센서를 강화섬유와 수직하게 부착하는 과정에서 탱크가 굽힘을 받을 때 FBG 센서가 실제보다 과도하게 변형률을 취득했기 때문으로 생각된다.

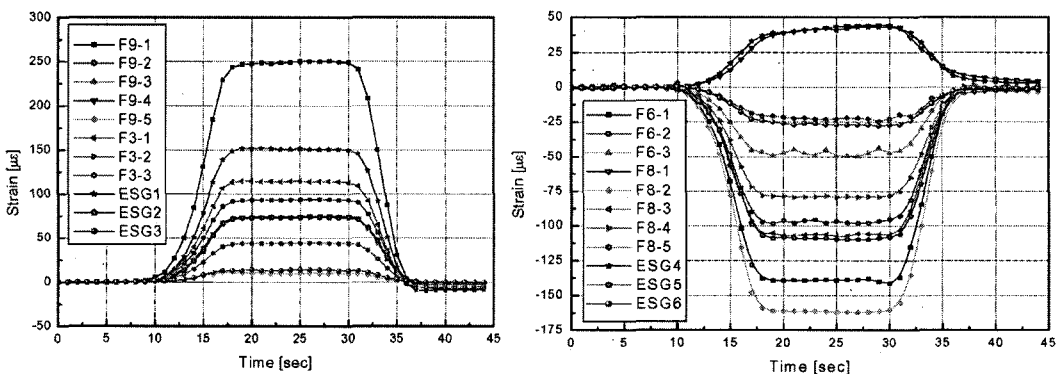


그림 6 굽힘 시험 결과

한편, 굽힘 하중에 대해 압축을 받을 것으로 예상되는 채널 6, 8번의 경우 두께 방향으로의 삽입 위치 차이에서 오는 차이를 보여주며 모든 위치에서 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다. 하지

만, F8-1번 센서에서 압축이 아닌 인장 변형률이 발생하였다. 이러한 현상은 같은 위치에 부착한 변형률 게이지에서도 같은 결과 값을 나타내는 것으로 보아 실험 치구의 문제로 인해 탱크의 해당 지점에서 압축을 받지 못하고 인장 변형률이 발생했기 때문으로 생각된다.

4.3. 온도 사이클 시험

필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 복합재 압력탱크는 운용 과정에서 저온(-50 °C)에서 고온(50 °C)의 영역까지 변화하는 반복적인 열하중을 받을 수 있다. 운용 중이 아니더라도 제작 후 보관 과정을 통해 계절의 변화에 따라 반복적인 열하중이 작용할 수 있으며 이러한 반복적인 열하중은 압력 탱크의 건전성에 적지 않은 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 선행연구가 필요하다. 본 연구에서는 복합재 압력탱크에 -50 °C에서 50 °C까지의 열하중이 작용할 경우 압력탱크의 거동을 모니터링 하였으며 시험 과정은 다음과 같다.

- ① -50 °C의 온도를 유지하고 있는 냉장고에 탱크를 넣어 온도 평형을 이루게 한 후 약 12 시간동안 온도를 유지한다.
- ② 냉장고에서 탱크를 꺼내 상온에서 다시 온도 평형을 이루게 한다.
- ③ 55 °C의 온도를 유지하고 있는 열챔버에 탱크를 넣어 온도 평형을 이루게 한 후 약 1 시간동안 온도를 유지한다.
- ④ 열챔버에서 탱크를 꺼내 상온에서 다시 온도 평형을 이루게 한다.

시험 시 FBG 센서의 데이터 취득은 온도 변화가 급격하게 발생하는 과정에서는 10 Hz로, 온도 평형이 이루어진 후에는 1 Hz로 취득하였다. 또한, 탱크 내부와 외부에 각각 부착한 열전대를 이용하여 탱크의 온도 변화를 동시에 측정하였다.

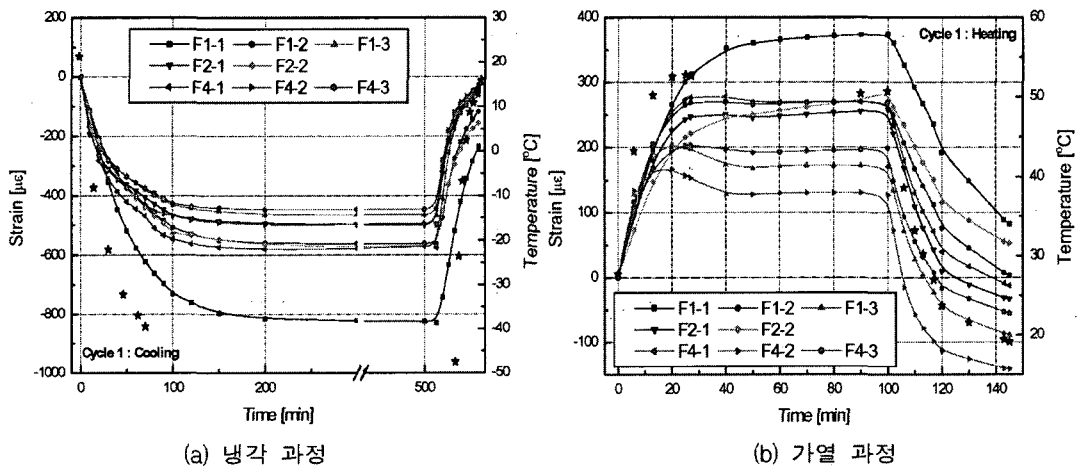


그림 7 온도 사이클 시험 결과

그림 7에서 별 모양은 오른쪽 좌표축의 온도를 나타낸다. 여기에 표시된 온도는 탱크 내부와 외부에서 각각 측정된 온도의 평균값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 탱크 표면에서의 온도 변화에 비해 약간의 시간 차이를 두고 탱크가 냉각되어 감을 확인할 수 있다.

냉각 과정에서는 초기에는 급격한 온도 변화를 보이다 점차 각 센서가 삽입된 위치에 따라 일정한 값으로 수렴하였다. 수렴에 걸리는 시간은 센서의 위치에 따라 약간의 차이를 보였으며 그 차이는 센서가 삽입된 위치가 표면에서 멀어질수록 더 오래 걸려 복합재의 낮은 열전도율을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 평형 온도에서 다시 상온으로 가는 과정에서도 마찬가지로 작용하여 탱크의 표면에서 가까운 센서들이 열평형이 이루어진 후에도 탱크 내부에 깊이 삽입된 센서에는 100~200 $\mu\epsilon$ 의 잔류 변형률이 존재하였다. 최대 압축 변형률은 후방돔 보스쪽에서 가장 가까운 F1-1번 센서에서 발생하였으며 그 크기는 약 820 $\mu\epsilon$ 이었다. 반면, 최소 압축 변형률은 실린더에 삽입된 F4-3번 센서에서 발생하였으며 그 크기는 약 450 $\mu\epsilon$ 이었다. 알루미늄 보스의 영향으로 인해 F1-1번 센서에서는 상대적으로 큰 변형률이 작용한 반면 조인트 부위에 삽입된 고무 밴드의 영향으로 F4-3번 센서에서는 상대적으로 낮은 변형률이 작용한 것으로 생각된다.

가열 과정에서는 분위기 온도를 낮춰 냉각하는 냉각 과정과 달리 열풍(hot wind)을 가하여 온도를 상승 시키는 방법으로 인해 열풍이 직접 작용하는 곳에 위치한 일부 센서들에서 약간의 오버-샷(overshoot) 현상이 발생하여 FBG 센서의 민감성을 시각적으로 확인할 수 있었다. 가열 시작 온도가 약 28 $^{\circ}\text{C}$ 였으므로 50 $^{\circ}\text{C}$ 로 온도 평형이 이루어진 후 탱크에 발생한 인장 변형률은 최대 약 370 $\mu\epsilon$, 최소 약 130 $\mu\epsilon$ 으로 비교적 적게 발생하였다. 최대 변형률이 발생한 곳은 냉각 때와 같았지만 최소 변형률이 발생한 곳은 F4-2번 센서가 있는 실린더 중간이었다. 또한, 다시 상온으로 온도를 냉각하였을 때 이전 냉각과정에 비해 상대적으로 상온으로 온도 평형이 이루어지는 데 걸리는 시간이 긴 특징을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크를 제작하였고 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서를 이용하여 충격 시험, 굽힘 시험, 온도 사이클 시험을 수행하였다. 실험을 통해, 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서가 여러 가지 구조 시험에 성공적으로 적용이 가능함을 확인하였다. 이는 온도가 일정한 환경에서의 정·동적 시험뿐만 아니라 온도가 변화하는 환경 하에서도 FBG 센서를 이용한 계측이 가능함을 의미한다. 또한, 탱크 내부에 삽입이 가능한 FBG 센서의 큰 장점으로 인해 기존의 변형률 게이지로는 측정이 불가능 하였던 여러 위치에서 탱크의 작용하는 내부 변형률을 성공적으로 규명할 수 있었다.

참고문헌

- Udd, E. (1995) *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, New York.
 Sirkis, J.S. (1993) Unified Approach to Phase-strain-temperature Models for Smart Structure Interferometric Optical Fiber Sensor : Part I, Development, *Optical Engineering*, 95(5), pp.752~761.