

# 복합재 고압용기의 스마트 모니터링을 위한 FBG 센서의 삽입 적용성에 관한 연구

박상욱\*·박상오\*·김천곤\*\*

## Feasibility Study of Embedded FBG Sensors for the Smart Monitoring of High Pressure Composite Vessel

Sang-Wuk Park, Sang-Oh Park, Chun-Gon Kim

### Abstract

In this research, for the smart health monitoring of the hydrogen storage high pressure composite vessel, the feasibility study of an embedded fiber Bragg grating(FBG) sensor is carried out. To verify strain measurement in various temperature environment which is needed for the hydrogen pressure vessel, tensile test of a composite specimen with both an embedded FBG sensor and a strain gauge is made in low temperature. Before we try a real-size hydrogen storage pressure vessel, a small & cheap composite pressure vessel having the same structure is fabricated with embedded FBG sensors and tested. In the case of an aluminum liner inside the vessel, survivability of FBG sensors at the interface is lower than the other areas.

**Key Words:** Fiber Bragg Grating(FBG) Sensor, High Pressure Composite Vessel, Structural Health Monitoring, Filament Winding

### 1. 서 론

전 세계적인 에너지 부족의 경고가 국제유가의 가파른 상승으로 나타나고 있는 이 때, 고효율의 친환경적 에너지인 수소에너지는 수소자동차를 시작으로 점차 현실이 되고 있다. 그러나 고압수소탱크와 같이 위험부담이 큰 구조물의 경우 일반 승용차로의 적용을 위해서는 안전성의 검증이 필수적이다. 특히 경량화를 위해 필수적인 복합재료를 사용할 경우에는 신뢰성의 확보가 더욱 어려워진다. 항공기 및 우주선의 소재로 개발되는 복합재료의 경우 개발 단계에서 실시간 구조안전성 모니터링을 통한 신뢰성의 검증이 점차 일반화되고 있다.

압력탱크의 내압에 따른 거동을 관찰하기 위한 변형률 측정에 지금까지는 주로 변형률 게이지가 사용되었다. 하지만 최근에는 변형률 게이지가 갖는 여러 단점들의 대안으로서 광섬유 센서의

적용이 국내외에서 시도되고 있다[1-2]. 특히 다중화(multiplexing)에 큰 장점을 가지는 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)에 대한 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. 광섬유 센서는 변형률 게이지와 달리 삽입 적용을 통해 압력탱크 성형 과정과 성형 후 운용 과정까지의 전 과정에 대해 압력탱크 내부의 복잡한 변형률을 측정함으로써 복합재 수소압력탱크의 건전성을 모니터링 할 수 있게 된다.

본 연구에서는 광섬유 센서의 수소압력탱크 삽입 적용에 앞서 필요한 저온에서의 FBG 센서의 변형률 전달성을 검증하고, 소형 복합재 용기의 제작을 통해 광섬유 센서의 삽입 적용시 생존성을 조사하였다.

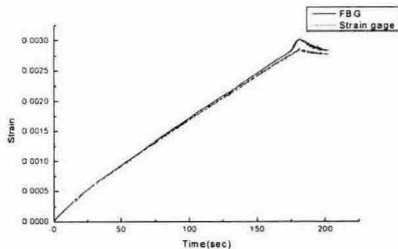
### 2. 저온에서의 FBG 센서 검증

수소저장 복합용기는  $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위

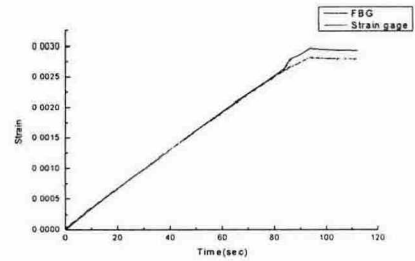
에서 사용되므로 이의 스마트 모니터링을 위해서는 FBG 센서의 각 온도에서의 변형을 전달성에 대한 검증이 수반되어야 한다. 상온 및 고온에서는 이미 본 연구팀에서 수행한 검증 결과가 있으며[3] 저온의 경우에도 해외에서는 수차례 온도 및 변형을 측정을 수행한 바 있다[4]. 그러나 기존 문헌과는 센서의 부착, 측정 방법 등이 상이하여 향후 광섬유 센서 적용의 정당성을 위해 수소압력탱크의 극한 온도 범위에서 복합재 인장시편을 통해 저온용 변형률 게이지와 변형률 전달성을 비교, 검증하는 실험을 추가적으로 수행하였다.

실험에 사용된 모든 광섬유 브래그 격자는 90%의 반사율을 가지도록 하였으며 시편은 그라파이트/에폭시 프리프레그 테이프를 사용하여  $[0_8/\{0\}/0_8]_T$  으로 적층하였다. 여기서 '{ '는 광섬유 브래그 격자가 삽입된 위치를 나타내고 안의 숫자는 센서의 삽입 방향을 나타낸다. 저온에서의 인장 실험을 위해 액체질소 탱크가 연결된 저온 챔버를 장착한 만능시험기가 사용되었다. 변형률 게이지는 TML 사의 CFLA-3-350-11 저온용 게이지가 사용되었다. 온도 보상을 위해 더미 게이지(dummy gauge)가 부착된 시편이 하중을 받지 않는 상태로 사용되었다.

총 3개의 시편이  $-25^\circ\text{C}$ 와  $-50^\circ\text{C}$  두 가지 온도에서 시험되었다. 저온 인장 시험에서 급격한 온도 저하로 인한 탭의 미끌림 현상을 방지하기 위해 시편은 3 kN의 초기 하중(pre-load)을 받은 후 각 온도에 노출되었다[5]. 10분 정도의 열평형 대기시간을 가지며 열응력에 의한 하중 증가를 상쇄시켜준 후 4 kN의 초기 하중에서 9 kN까지 하중을 가했다. FBG 센서와 변형률 게이지 공히 초당 10개의 데이터를 입력받았다.



(a)  $-25^\circ\text{C}$  측정 결과



(b)  $-50^\circ\text{C}$  측정 결과

그림 2.1 인장실험시 FBG 센서와 변형률 게이지의 변형률 전달성 비교

각 시편의 중앙에 삽입된 FBG 센서와 표면에 부착된 변형률 게이지와의 측정 데이터를 그림 2.1에 그래프로 나타내었다. FBG 센서의 변형률 측정 결과는 변형률 게이지의 결과와 잘 일치하였으며 복합용기 삽입시 저온에서의 변형률 측정의 정당성을 보여주었다.

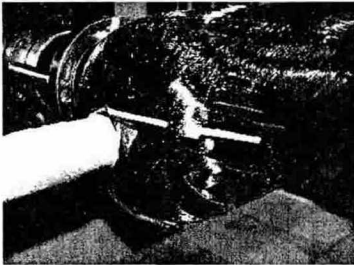
### 3. 소형 복합용기 제작

광섬유 센서를 직접 차량용 수소압력탱크에 적용하기 전에 저렴한 소형 복합재 용기를 사용하여 필라멘트 와인딩(Filament winding) 시의 센서 삽입 노하우를 습득하고 광섬유 센서의 삽입 적용시 센서 생존성을 알아보았다. 수소저장 용기의 제작을 담당한 (주)이노컴의 9 L 소형 복합용기에 4채널, 총 11개의 FBG 센서를 적용하였다. 센서 제작에 사용된 시스템의 2장과 같고 각 센서는 리코팅기를 사용하여 센서 부분을 보강하였다. 측정에는 (주)Fiberpro의 IS7000이 사용되었다.

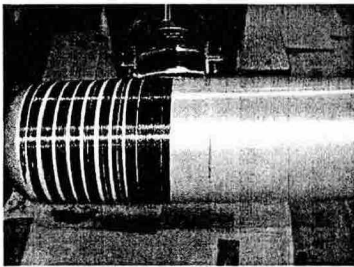
미리 정해진 위치에 놓이도록 각 채널별로 한 가닥의 광섬유 라인 상에 제작된 광섬유 센서를 필라멘트 와인딩 과정 중에 각 층(layer)에 삽입하였다. 삽입된 FBG 센서 라인은 모두 4 라인으로 헬리컬층(helical layer)에 들어가는 라인은 3개의 FBG 센서, 후프층(hoop layer)에 들어가는 라인은 4개의 FBG 센서를 갖도록 제작하였다. 삽입 적용 전에 복합재 시편의 탭 부착용 접착 필름(adhesive film)을 사용하여 보강하였다.

총 4개의 채널을 제작하였으며 헬리컬층에 삽

입되는 채널 1, 2는 각각 3개의 FBG 센서를 가지며, 후프층에 삽입되는 채널 3, 4는 각각 4개의 FBG 센서를 갖도록 제작되었다. 그러나 리코팅 및 접착필름 보강 작업 도중 채널 3의 센서 2개와 채널 2의 센서가 1개가 소실되어 구조적 중요도가 높은 층에 FBG 센서 개수가 많은 채널을 삽입하였다. 초기 제작된 총 14개의 센서 중 11개의 센서만으로 실험을 수행하였다.



(a) 헬리컬층에 삽입된 채널 2



(b) 라이너 계면의 후프층에 삽입된 채널 3

그림 3.1 필라멘트 와인딩 작업시의 센서 라인 적용

가장 먼저 알루미늄 라이너와 첫 번째 후프층 사이에 두 개의 FBG 센서를 가진 채널 3을 삽입하였다. 바깥으로 나오는 부분은 PVC 튜브로 보강하였으며 와인딩 작업시 자리를 이탈하지 않도록 순간접착제를 사용하여 고정하였다. 성형 중 흘러나오는 레진(resin)이 묻어 취성이 강해지는 것을 막기 위해 연결봉을 이형제인 테프론 필름(Teflon film)으로 감싸고 PVC 피복으로 보강한 광섬유 라인을 그 위에 열테이프를 이용하여 부착하였다. 그림 3.1은 위부터 채널 2와 3의 센서 부착 모습이다.

특히 그림 3.2 (a)와 같이 헬리컬층에 광섬유 센서 라인을 삽입할 때는 바른 섬유방향 변형률을 얻기 위해 헬리컬층의 탄소섬유 테이프 위에 테

이프의 각도와 평행하도록 부착하여야 한다. 또한 부착된 센서 위를 수직된 방향으로 또다른 테이프가 지날 때 센서의 파손이 일어날 수 있으므로 와인딩 속도를 늦추고 센서가 밀리지 않도록 세심한 주의를 기울여야 한다.

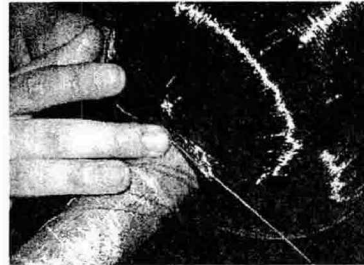


그림 3.2 용기 바깥쪽으로 나오는 센서 라인

그림 3.2은 PVC 튜브로 보강된 광섬유 센서 라인이 돔 쪽으로 빠져나와 연결봉에 감긴 모습을 보여준다. 특히 실린더에 수직 방향으로 놓인 센서의 경우 센서 라인을 미끄러운 테이프 위로 고정시키기가 어렵다. 센서 라인을 돔에 감는 형태로 빠져나오게 되는데, 이때 곡률을 최대한 크게 고정하여 라인 위쪽으로 다시 테이프가 감길 때 광섬유 라인이 제 위치를 벗어나거나 뒤틀려서 광량 손실이 일어나거나 라인이 파손되는 것을 막는다.

#### 4. 복합용기의 내압 실험

표 4.1 성형 후 FBG 센서 상태

Sensor Channel	FBG 1	FBG 2	FBG 3	FBG 4	Etc.
Ch. 1	○(1528)	×(1531)	○(1542)		inside 1 <sup>st</sup> helical layer
Ch. 2	○(1528)	△(1531)	broken by handling		inside 2 <sup>nd</sup> helical layer
Ch. 3	△(1533)	△(1533)	broken by handling	broken by handling	Between liner & 1 <sup>st</sup> hoop layer
Ch. 4	○(1533)	○(1541)	○(1533)	○(1533)	inside 3 <sup>rd</sup> hoop layer

성형 후 각 FBG 센서 채널의 생존 여부를 검사하여 표 4.1에 나타내었다. 성형 후 채널 1에서 1531 nm FBG 센서가 파손되었으며 다른 센서들은 모두 생존하였다. 그러나 채널 2의 1531 nm 센서와 채널 3의 두 센서는 광량의 손실이 생겨

상대적으로 낮은 반사율을 보였다. 또한, 1528 nm의 파장을 갖는 센서들은 성형 후 잔류응력에 의해 중심파장이 짧아져 측정범위 밖으로 벗어나고 말았다. 예상보다 훨씬 큰 잔류응력을 고려하여 FBG 센서의 중심파장을 결정해야 한다. 이후 수행된 내압 실험에서 센서가 생존해 있음을 확인할 수 있었다.

그림 4.1은 각각의 소형 복합용기의 실제 운용 중 압력을 가했을 때 FBG 센서에서 측정된 변형률 값을 나타낸다. 압력의 증가에 따라 변형률이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 그러나 후프층 사이에 삽입된 채널 4의 경우 섬유와 같은 방향으로 삽입되어 있으나 변형률의 크기가 각 센서마다 다른 결과를 보였는데 이는 필라멘트 와인딩 중 FBG 센서 부착시 일정한 각도로 부착하지 못했거나 와인딩이나 성형 도중 정렬이 틀려졌기 때문으로 사료된다.

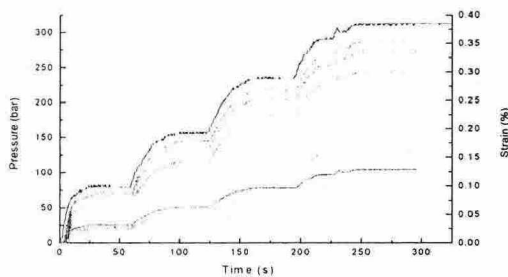


그림 4.1 사용압력시험 변형률 결과 :  
(위로부터 압력, Ch.4 (3개), Ch1 & Ch.2)

## 5. 결 론

본 연구에서는 수소저장 복합재 고압용기의 스마트 모니터링을 위한 FBG 센서의 적용에 대하여 저온에서의 변형률 전달성 검증 및 필라멘트 와인딩 과정에서의 삽입 적용성 검증의 두 가지 실험을 수행하였다. 수소저장 복합용기의 극한 저온이  $-40^{\circ}\text{C}$ 임을 고려하여  $-25^{\circ}\text{C}$ 와  $-50^{\circ}\text{C}$ 에서 인장실험을 수행하였으며 부착된 변형률 게이지와 삽입된 FBG 센서의 변형률 결과가 잘 일치하였다. 필라멘트 와인딩 과정에서는 손실된 FBG 센서가 없으며, 성형 과정에서 총 11개의 FBG 센서 중 1개가 손실되어 91%의 생존률을 얻었다. 자진압력시험 중 라이너에 부착된 후프 방향 센

서 2개가 파손되었으며, 한 개의 센서는 광량 손실이 너무 심해 변형률 측정이 불가능했다. 따라서 최종 측정가능한 센서는 총 7로서 63.6%의 운용 상태에서의 센서 생존률을 얻었다. FBG 센서는 압력에 따른 변형률을 충실하게 나타내 주었으며 라이너 계면에서의 센서의 보강을 통한 생존성 향상과 센서 삽입시의 정렬 문제는 해결해야 할 과제이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21C 프런티어 연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) R. C. Foedinger, D. L. Rea, J. S. Sirkis, C. S. Baldwin, J. R. Troll, R. Grande, C. S. Davis and T. L. VanDiver, "Embedded fiber optic sensor arrays for structural health monitoring of filament wound composite pressure vessels," *Proc. of SPIE*, Vol. 3670, 1999, pp. 289-301.
- (2) D. H. Kang, C. U. Kim, S. W. Park, C. S. Hong and C. G. Kim, "In-situ Health Monitoring of Filament Wound Pressure Tanks using Embedded FBG Sensor", *Proceeding of ACCM 4*, 2004
- (3) 강동훈, 박상욱, 김수현, 김천곤, 홍창선, "광 섬유 브래그 격자 센서를 이용한 고온용 복합재료의 물성 측정," *한국복합재료학회지*, 제 16권, 제 6호, 2003, pp. 41-47
- (4) S. W. James, R. P. Tatam et al., "Strain response of fiber Bragg grating sensors at cryogenic temperatures," *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, 2002, pp 1535-1539.
- (5) 김명곤, 강상국, 김천곤, 공철원, "극저온 환경에서 탄소섬유강화 복합재의 인장물성에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, 제17권, 제6호, 2004, pp. 52-57