

# 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크의 내부 변형을 모니터링

강동훈\*·김철웅\*\*·박상욱\*\*\*·박상오\*\*\*·김천곤\*\*\*

## Internal Strain Monitoring of Filament Wound Pressure Tanks using Embedded Fiber Bragg Grating Sensors

D. H. Kang, C. U. Kim, S. W. Park, S. O. Park and C. G. Kim

**Key Words:** FBG, Filament Winding, Pressure Tank, Internal strain, Water-pressurizing test

### Abstract

In-situ structural health monitoring of filament wound pressure tanks were conducted during water-pressurizing test using embedded fiber Bragg grating (FBG) sensors. We need to monitor inner strains during working in order to verify the health condition of pressure tanks more accurately because finite element analyses on filament wound pressure tanks usually show large differences between inner and outer strains. 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. We fabricated a standard testing and evaluation bottle (STEB) with embedded FBG sensors and performed a water-pressurizing test. In order to increase the survivability of embedded FBG sensors, we suggested a revised fabrication process for embedding FBG sensors into a filament wound pressure tank, which includes a new protecting technique of sensor heads, the grating parts. From the experimental results, it was demonstrated that FBG sensors can be successfully adapted to filament wound pressure tanks for their structural health monitoring by embedding.

### 1. 서론

필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크는 주로 항공우주 구조물의 연료탱크, 압력탱크 그리고 모터 케이스로 사용된다. 복합재료 구조물 중 하나인 필라멘트 와인딩된 압력탱크는 매우 복잡한 손상 메카니즘과 파손 모드를 가지고 있다. 반면, 대부분의 기존 손상평가 방법과 비파괴검사 방법은 많은 시간을 요하며 구조물 중 접근이 어려운 부분에는 적용이 어려우므로 구조물의 중요 부분을 지속적으로 모니터링하기 위해서는 구조물에

직접 설치된 평가 시스템의 개발이 필요하다.

광섬유 센서는 구조물에 쉽게 부착 혹은 삽입이 가능하며 전자기파의 영향을 받지 않는다. 그리고, 센서의 크기를 쉽게 조절할 수 있을 뿐만 아니라 높은 민감도를 가진다. 최근, 광섬유 센서 자체에 대한 연구뿐만 아니라 복합재 구조물에 적용하여 구조물의 변형률이나 온도 등을 측정할 연구[1-2]들이 많이 이루어지고 있다.

여러 광섬유 센서 중에서, 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 파중 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM)가 매우 용이하여 스마트 복합재 구조물의 구조 건전성 모니터링에 매우 적합한 센서로 많은 관

\* 한국철도기술연구원 철도정책·물류연구본부 국제철도팀, 교신저자(E-mail:dhkang@krti.re.kr)

\*\* (주)현대자동차 연구개발본부 차량해석팀

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

심이 집중되고 있다. 하지만, 작업의 어려움, 센서의 생존성 문제, 센서 신호의 안정성 문제 등으로 인해 FBG 센서를 필라멘트 와인딩된 복합재 압력탱크에 적용한 연구는 현재 몇몇에 불과한 실정이다.

Foedinger 등[3]은 STEB에 FBG 변형률 센서와 온도 센서를 각각 삽입하여 압력탱크의 성형과정 동안 온도와 변형률을 모니터링하고 광섬유의 ingress/egress 방법에 대한 연구를 수행하였다. Degrieck 등[4]은 복합재 압력 탱크 실린더 부분의 후프 와인딩 층에 FBG 센서 하나를 삽입하여 수압시험 동안의 가압과정을 통해 FBG 센서의 파장 이동량으로부터 압력 탱크의 내압변화를 측정하였다. 황병선 등[5]은 복합재료 산소 압력탱크의 내압 실험에서 FBG 센서를 삽입하여 내압에 따른 압력탱크의 변형률을 측정하였고, 그 결과를 외부에 부착한 변형률 게이지의 결과 및 유한요소해석 결과와 비교하였다. 강현규 등[6]은 필라멘트 와인딩으로 제작된 3단형 과학로켓 연소관 표면에 32개의 FBG 센서를 부착하여 수압시험을 통해 탱크의 변형률을 측정하였다.

위의 연구들에서는, 적은 개수의 FBG 센서를 삽입 적용하거나 많은 수의 FBG 센서를 사용한 경우에는 탱크 표면에 부착 적용한 한계를 보였다. 또한, 실린더 부분과 같이 변형률이 일정한 부분으로 센서의 삽입 위치가 한정되어 있다. 하지만, 실제 압력탱크에서 변형률 구배가 크고 변형률 게이지로는 측정이 불가능한 부분은 양쪽 돔의 보스 부분과 돔과 실린더가 만나는 정선(junction) 부분으로 현재 전적으로 해석결과에만 의존하고 있는 실정이다.

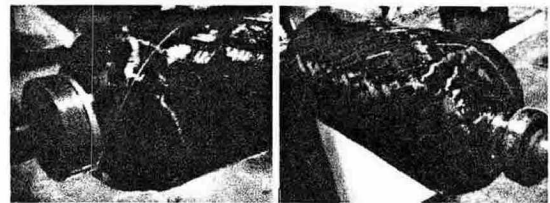
본 연구에서는, 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크의 돔과 실린더 모두에 FBG 센서를 다중화 하여 삽입 적용하고 수압시험 과정동안 탱크 내부의 FBG 센서로 측정된 변형률 값을 유한요소 해석결과와 비교하였다. 그리고, 탱크의 표면에 부착한 변형률 게이지로 측정된 값과도 상호 비교함으로써 FBG 센서로 취득된 변형률 값의 타당성을 검증하였다. 이를 통해, 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크의 건전성 모니터링을 위해 다중화된 FBG 센서의 삽입 적용 가능성을 확인하였다.

## 2. FBG 센서가 삽입된 압력탱크 제작

본 연구에서 압력탱크에 삽입된 FBG 센서 라인의 제작방법은 다음과 같다.

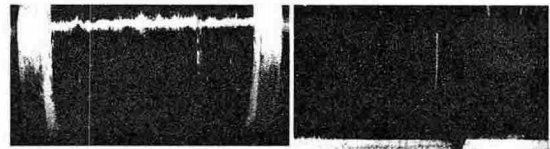
광민감성 광섬유(PS1250/1500, Fibercore)를 사용하여 수소처리과정(hydrogen loading)에 의한 강도저하 문제를 해결하였다. 그리고, 한 광섬유 라인에 여러 개의 센서를 동시에 일체 제작하는 방법으로 다중화 함으로써 개별 센서의 융착접속(arc-fusion splicing)에 따른 강도 저하를 해결하였다. 또한, 아크릴 레이트(acrylate)를 이용한 리코팅(recoating)과 폴리머 재료의 접착 필름(adhesive film)을 이용해 격자부분을 이중으로 보강하였다. 그리고, 광섬유 선의 ingress/egress 부분을 두 곳으로 하여 광섬유 라인의 파손에 대한 센서의 생존율을 향상 시켰다.

본 연구에서 제작한 압력탱크는 표준압력용기(standard testing and evaluation bottle, STEB)이며 탱크의 제작 시 7채널 총 22개의 FBG 센서를 삽입 적용하였다. 또한, 헬리컬층과 후프층의 경우 각각  $[(\pm 27.5)_3]_T$ ,  $[90_2/(\pm 45)_2/90_3]_T$ 와 같은 패턴으로 와인딩을 수행하였다. 제작된 각 센서 채널들은 Fig. 1에서와 같이 와인딩 과정동안 압력탱크의 내부에 삽입하였다.



(a) 후방돔 - Ch1

(b) 전방돔 - Ch2



(c) 실린더(측방향) - Ch3,5,6,7 (d) 실린더(후프방향) - Ch4

Fig. 1 Embedded FBG sensor lines.

삽입된 7채널 중, Ch1과 Ch2는 각각 후방돔과 전방돔 부분에 Ch3, Ch5, Ch6, Ch7은 실린더 후프층에 측방향에 대해 90°각격으로 삽입하였으며

Ch4는 후프층에 후프방향으로 각각 삽입하였다. 각 채널 별 센서의 삽입 위치는 Fig. 2와 같다.

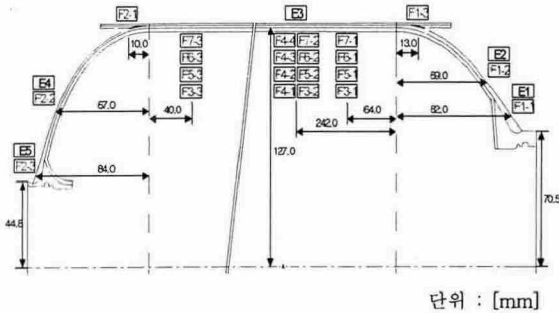


Fig. 2 Configurations and sensor positions.

STEB의 제작에 사용된 FBG 센서는 Ch4를 제외한 모든 채널에서 압력탱크의 내압증가에 따라 발생하는 변형을 구배의 영향으로부터 FBG 센서의 신호 안정성을 높이기 위해 5mm 격자 길이의 FBG 센서를 사용하였다.

탱크의 제작이 완료된 후 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서의 탱크 경화 전·후의 파장 이동량으로부터 경화 과정에 따른 탱크의 잔류변형률(residual strain)을 측정하였다.

### 3. 수압 보증 시험

Fig. 3과 같이 FBG 센서가 삽입된 압력탱크에 대해 수압 보증 시험(water-proof test)을 수행하였다. 수압 보증 시험은 제작된 탱크의 기밀을 확인하기 위함으로 본 연구에서는 1,000psi의 내압까지 로터리 펌프를 이용해 100psi 간격으로 내압을 증가시키면서 시험을 수행하였다.

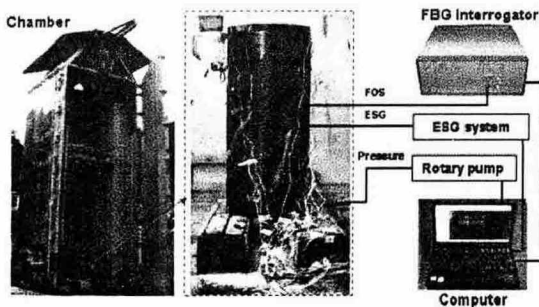


Fig. 3 Experimental setup of water-proof test.

본 연구에서는 FBG 센서 신호의 취득을 위해 IS-7000 광섬유 센서 시스템(FBG Interrogator, FiberPro Co.)과 LabVIEW<sup>®</sup>로 제작한 신호처리 프로그램을 이용하였다.

### 4. 유한요소해석

Fig. 4는 상용프로그램 PATRAN을 이용하여 STEB을 상세 모델링한 유한요소모델이다. 반복대칭(cyclic symmetric) 경계조건을 고려하여 원주방향에 대해 3차원 적층 고체 요소(3-D layered solid element)로 부분 모델링을 수행하였다. 또한, 상용프로그램 ABAQUS를 이용한 비선형 점진적 파손해석(nonlinear progressive failure analysis)을 수행하였으며 하신의 파손 기준(Hashin's failure criterion)과 ABAQUS ver 6.3의 사용자 서브루틴(USDFLD)으로 파손에 따른 기계적 물성 변화를 구현하였다. 해석에 사용된 T700/Epoxy의 물성값은 다음과 같다.

$$E_1=134.6\text{GPa}, E_2=7.65\text{GPa}, G_{12}=3.68\text{GPa}, \nu_{12}=0.3$$

$$\sigma_f=2,290\text{MPa}, \sigma_t=31.8\text{MPa}, S=75.8\text{MPa}$$

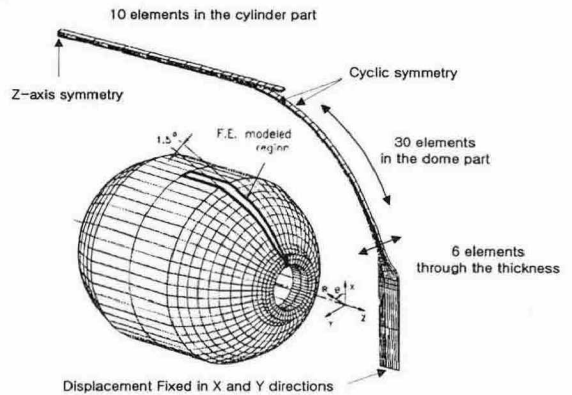


Fig. 4 The FEA model of STEB.

### 5. 실험 결과 분석

전·후방돔 부분에 각각 삽입된 3개의 FBG 센서 중 스커트 쪽에 삽입되어 변형을 게이지의 부

측이 불가능한 한 곳을 제외한 나머지 두 곳과 실린더 부분에 각각 한 개의 게이지를 부착하여 수압 시험을 수행하였으며 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5는 FBG 센서와 변형률 게이지의 결과와 모두 측정된 지점들에 대해서 실험결과를 해석결과와 비교한 그래프이다. FBG 센서가 삽입된 모든 층과 변형률 게이지가 부착된 외곽층의 해석결과를 동시에 도시하였다.

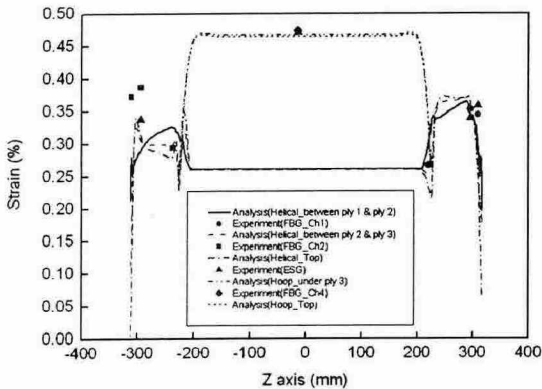


Fig. 5 The results of FBGs, ESGs and FEA at 1,000 psi.

실린더 후프층과 후방돔의 경우 FBG 센서와 변형률 게이지 결과는 거의 유사하고 해석결과와도 비슷한 레벨의 변형률을 보였다. 반면, 전방돔 부분의 경우에는 FBG 센서와 변형률 게이지로 측정된 변형률 값이 비교적 큰 차이를 보였으며 해석 결과와도 어느 정도의 차이를 보였다. 하지만 이 경우에도 변형률 값의 경향 면에서는 해석결과와 비슷한 특징을 보였다. 오차에 대한 원인으로, 양쪽 돔의 보스 끝단으로 갈수록 변형률 게이지와 FBG 센서는 축방향을 기준으로 조금의 위치 차이로도 큰 변형률 차이를 보일 수 있음을 해석 및 실험 결과로부터 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 22개의 많은 FBG 센서를 삽입하여 압력탱크에 대한 전체적인 모니터링을 성공적으로 수행하였다. 그리고, 돔과 실린더가 만나

는 정션 부분에 대한 변형률 값을 취득함으로써 기존 센서로는 측정이 불가능하였던 지점에 대한 변형률 정보를 얻을 수 있었다. 이를 통해, 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크에 FBG 센서를 삽입 적용하여 탱크의 운용 중 건전성을 모니터링 할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) D. H. Kang, et al., "Development of embedding methods of fiber Bragg grating sensor under consideration of strain transfer," *KSCM*, Vol. 14, No. 6, 2001, pp. 32-37.
- (2) D. H. Kang, et al., "Signal characteristics of fiber Bragg grating due to internal strain gradient," *KSCM*, Vol. 15, No. 4, 2002, pp. 32-36.
- (3) R. C. Foedinger, et al., "Embedded fiber optic sensor arrays for structural health monitoring of filament wound composite pressure vessels," *Proc. of SPIE*, Vol. 3670, 1999, pp. 289-301.
- (4) J. Degrieck, et al., "Monitoring of fibre reinforced composites with embedded optical fibre Bragg sensors, with application to filament wound pressure vessels," *NDT&E International*, Vol. 34, 2001, pp. 289-296.
- (5) B. S. Hwang, et al., "Processing and pressure test of filament wound composite pressure vessels for oxygen tanks," *KSCM*, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 10-17.
- (6) H. K. Kang, et al., "Strain monitoring of filament wound composite tank using fiber Bragg grating sensors," *Smart Mat. and Stru.*, Vol. 11, No. 6, 2002, pp. 848-853.