

論文

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

강동훈^{*+}, 김철웅^{**}, 박상욱^{***}, 김천곤^{***}

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

D. H. Kang^{*+}, C. U. Kim^{**}, S. W. Park^{***}, C. G. Kim^{***}

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.

초 록

삽입된 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서를 이용하여 수압시험 동안에 필라멘트 와인딩 된 복합재료 압력탱크의 실시간 구조 건전성 모니터링을 수행하였다. 일반적으로 압력탱크의 내부와 외부의 유한요소해석 결과는 변형률과 응력 모두 큰 차이를 보인다. 그러므로, 압력탱크의 건전성을 검증하기 위해서는 운용 중 탱크 내부의 변형률 값을 정확하게 측정해야 한다. 여러 광섬유 센서 중 FBG 센서는 변형률 계이지에 비해 구조물에 삽입이 용이하고 많은 수의 센서를 한 가닥의 광섬유에 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 기법을 통해 쉽게 다중화 할 수 있다. 본 연구에서는 다중화 된 FBG 센서를 삽입한 표준압력용기(standard testing and evaluation bottle, STEB)를 제작하고 수압시험을 수행하였다. 삽입된 센서의 생존율을 높이기 위해 격자 부분에 대한 보강법을 포함한 새로운 삽입 적용 기법을 고안하였다. 제작된 탱크에 대한 수압 시험을 통해 FBG 센서가 필라멘트 와인딩 된 복합재료 압력탱크의 건전성 모니터링을 위해 성공적으로 삽입 적용될 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating), 필라멘트 와인딩(filament winding), 압력 탱크(pressure tank), 내부 변형률(internal strain), 수압 시험(water-pressurizing test)

*+ 한국철도기술연구원 철도정책·물류연구본부 국제철도연구팀, 교신지자(E-mail: dhkang@krii.re.kr)

** (주)현대자동차 연구개발본부 차량해석팀

*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

1. 서론

최근 금속 재료에 비해 높은 비강성, 비강도와 우수한 내부식성 및 피로특성을 가진 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크의 사용이 증가하고 있다. 필라멘트 와인딩된 압력탱크는 주로 항공우주 구조물의 연료탱크, 압력탱크 그리고 모터 케이스로 사용된다. 복합재료 구조물 중 하나인 필라멘트 와인딩된 압력탱크는 매우 복잡한 손상 메커니즘과 파손 모드를 가지고 있다. 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 위해 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 연구[1-2] 뿐만 아니라 복합재 구조물에 적용하여 구조물의 변형률이나 온도 등을 측정하는 연구[3-4]들이 많이 이루어지고 있다. 광섬유 브래그 격자 센서는 파중 분할 다중화가 매우 용이하여 스마트 복합재 구조물의 구조 건전성 모니터링에 매우 적합한 센서로 많은 관심이 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[5]은 STEB에 FBG 변형률 센서와 온도 센서를 각각 삽입하여 압력탱크의 성형과정 동안 온도와 변형률을 모니터링하고 광섬유의 ingress/egress 방법에 대해 연구하였다. Degrieck 등[6]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. 이 연구에서는, 복합재 압력탱크에서 비교적 FBG 센서의 삽입이 용이한 후프 와인딩 방향으로만 광섬유 센서를 삽입하였고 그 개수 또한 하나로써 다중화하지 못하였으며 실제로 많은 응력이 작용하는 돔 부분에는 센서를 적용하지 못한 단점을 보였다. 황병선 등[7]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. 하지만, 비교적 낮은 변형률 레벨(800 $\mu\epsilon$)에서부터 광섬유 센서 신호의 이상으로 인해 더 이상의 신호 취득에는 실패하였다. 한편, 강현규 등[8]은 필라멘트 와인딩으로 제작된 3단형 과학로켓 연소관 표면에 32개의 FBG 센서를 부착하여 수압시험을 통해 탱크의 변형률을 측정하였다. 하지만, 이 연구에서는 많은 수의 센서를 이용해 탱크의 전체적인 거동

변화는 측정할 수 있었지만 탱크 내부의 변형률에 대한 정보는 취득할 수 없었다.

위의 연구들에서, FBG 센서를 삽입 적용한 경우에는 센서의 개수가 적고, 센서의 개수가 많은 경우에는 탱크의 표면에 부착 적용하였음을 알 수 있다. 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 입구 부분과 돔과 실린더가 만나는 정선(junction) 부분으로 현재 해석결과에만 의존하고 있는 매우 중요한 부분이다.

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 와인딩 복합재료 압력탱크의 건전성 모니터링을 위해 다중화된 FBG 센서의 삽입 적용 가능성을 확인하였다.

2. FBG 센서가 삽입된 압력탱크 제작

2.1 FBG 센서 라인 제작

FBG 센서는 격자가 형성된 부분과 그렇지 않은 부분의 경계면에서 강도에 취약한 특성이 있으며 무엇보다 횡방향 응력에 매우 취약하다. 또한, 필라멘트 와인딩 공정은 인장력을 가진 섬유다발을 일정한 폭의 띠(band) 형태로 감아 나가는 과정이므로 필라멘트 와인딩 공정으로 복합재료 압력탱크를 제작할 경우 삽입되는 FBG 센서의 생존율을 향상을 위한 기법의 개발이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 시편 단위의 시험에 사용되는 FBG 센서의 제작법과 달리 극심한 삽입 환경에서 보다 높은 생존율을 갖게 하기 위해 다음과 같이 수정된 FBG 센서 라인 제작 방법을 제안하였다.

광민감성 광섬유(PS1250/1500, Fibercore)를 사용하여 수소처리과정(hydrogen loading)에 의한 강도저하 문제를 해결하였다. 센서의 다중화를 위해서는 개별 센서를 용착 접속(arc-fusion splicing)하지 않고 한 광섬유 라인에 여러 개의 센서를 동시에 일체 제작하는 방법을 사용하였다. 또한, 격자 부분의 보호를 위해 아크릴 레이트(acrylate)를 이용한 리코팅(recoating)뿐만 아니라 폴리머 재질의 접착 필름(adhesive film)으로 2차 보강을 실시하였다. 그리고, 광섬유 선의 ingress/egress 부분을 두 곳으로 하여 광섬유 라인의 파손에 대한 센서의 생존율을 향상 시켰다. 위의 방법으로 제작된 광섬유 센서 라인은 Fig. 1과 같다.

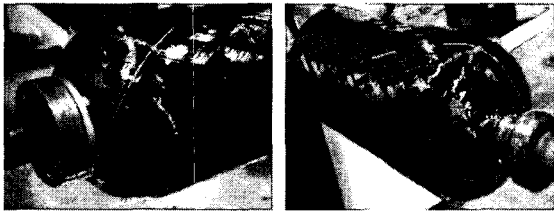


Fig. 1 An FBG sensor line fabricated with a revised process.

2.2 FBG 센서가 삽입된 압력탱크 제작

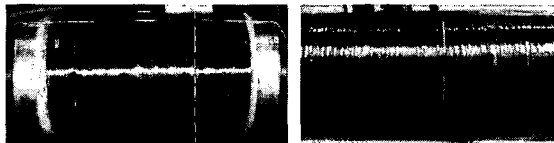
본 연구에서 제작한 압력탱크는 STEB, 즉 표준압력용기이며 탱크의 제작시 7채널 총 22개의 FBG 센서를 삽입 적용하였다. 또한, 와인딩 패턴은 헬리컬 층의 경우 $[(\pm 27.5)_3]_T$ 로 후프 층의 경우 $[90_2/(\pm 45)_2/90_3]_T$ 와 같이 와인딩을 수행하였다.

제작된 각 센서 채널들은 Fig. 2에서와 같이 와인딩 과정에서 압력탱크의 내부에 삽입하였다. 삽입된 FBG 센서의 삽입 위치는 축방향으로 가이드 된 레이저 포인터를 이용하여 mm 단위로 측정하였다.



(a) 후방돔 - Ch1

(b) 전방돔 - Ch2



(c) 실린더(축방향) - Ch3

(d) 실린더(후프방향) - Ch4

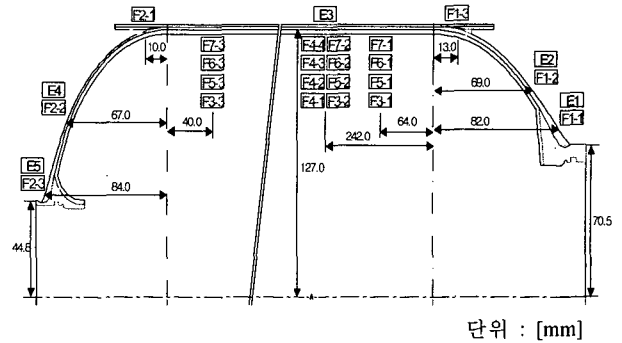
Fig. 2 Embedded FBG sensor lines during the fabrication.

삽입된 7채널 중, Ch1과 Ch2는 각각 후방돔과 전방돔 부분에 Ch3, Ch5, Ch6, Ch7은 실린더에 후프 방향 90°간격으로 축방향으로 삽입하였으며 Ch4는 후프방향으로 각각 삽입하였다.

와인딩이 끝난 탱크는 80°C(1hr)→120°C(1hr)→150°C과 같은 사이클로 열챔버 내에서 3시간 동안 회전 경화하였다. 탱크의 제작이 완료된 이후, 수압시험동안 FBG 센서로 측정된 변형을 값과의 비교를 위해 Fig. 3과 같이 탱크의 표면에 변형률 게이지를 부착하였다. Fig. 3에서 'F'는 FBG 센서를, 'E'는 변형률 게이지를 각각 나타내며 문자 뒤의 숫자는 채널 번호와 해당 채널의 센서 번호를 순서대로 나타내고 있다.

STEB에 삽입 적용된 7채널의 FBG 센서들에 대한 각 채널 별 센서 수와 센서가 삽입된 위치는 표 1과 같다.

STEB의 제작에 사용된 FBG 센서의 경우 Ch4를 제외한 모든 채널에서 5mm 격자 길이의 센서를 사용하였다. 그 이유는, 압력탱크 돔 부분의 경우 기하학적인 구배로 인해 탱크가 내압을 받을 경우 변형률 구배가 발생한다. 한편,



단위 : [mm]

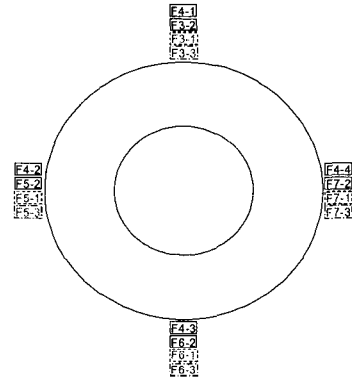


Fig. 3 Configurations and sensor positions of STEB.

Table 1 Specifications of embedded FBG sensors

Channel	Sensors	FBG2
Ch1	3개	Between 1 st helical layer & 2 nd helical layer
Ch2	3개	Between 2 nd helical layer & 3 rd helical layer
Ch3	3개	After ± 45 layers
Ch4	4개	Inside the last hoop layer
Ch5	3개	After ± 45 layers
Ch6	3개	After ± 45 layers
Ch7	3개	After ± 45 layers

FBG 센서의 경우 격자 길이가 길수록 변형률 구배에 대한 센서의 신호 안정성이 급격히 저하[9]되어 센서의 측정 가능 변형률이 감소하는 결과를 가져온다. 또한, FBG 센서의 격자 길이가 길수록 와인딩 과정에서 격자 부분이 강화 섬유 의 횡방향 응력에 의해 파손될 가능성이 높으므로 본 연구에서는 짧은 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하여 적용하였다.

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

Table 2 Residual strains of a fabricated tank

Channel	Sensor No.	Residual strain ($\mu\epsilon$)
Ch1	F1-1	-229.1
	F1-2	-47.1
	F1-3	-185.5
Ch2	F2-1	-457.1
	F2-2	-451.3
	F2-3	-326.3
Ch3	F3-1	-200.3
	F3-2	-395.2
	F3-3	-262.3
Ch4	F4-1	-109.2
	F4-2	-398.2
	F4-3	-409.5
	F4-4	-423.6
Ch5	F5-1	52.5
	F5-2	-82.6
	F5-3	-622.5
Ch6	F6-1	-351.1
	F6-2	-550.0
	F6-3	361.5
Ch7	F7-1	-423.7
	F7-2	-175.2
	F7-3	-481.1

표 2의 결과에서 제작된 복합재료 압력탱크는 경화 과정에서 인해 탱크의 대부분 지점에서 100~800 $\mu\epsilon$ 정도의 압축변형률이 작용하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 실린더 부분에 삽입된 센서들(Ch3, Ch5, Ch6, Ch7)의 경우 압축뿐만 아니라 인장변형률도 발생하였으며 그 이유로는 와인딩 과정 동안 FBG 센서가 삽입되는 과정에서 강화섬유의 장력에 의해 센서의 격자 부분에 국부적인 굽힘이 발생했기 때문으로 생각된다.

3. 수압 보증 시험

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 펌프(rotary pump)를 이용해 100psi 간격으로 내압을 증가시키면서 시험을 수행하였다.

수압 시험을 위한 장비 셋업(experimental setup)은 Fig. 4

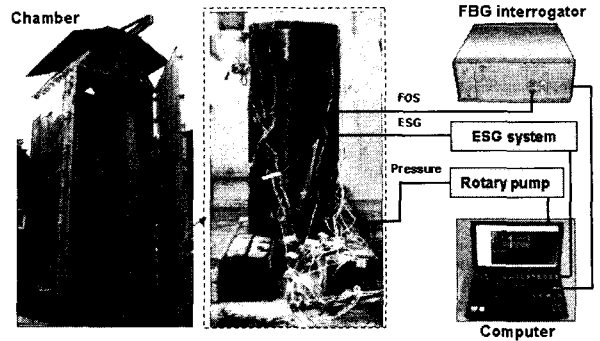


Fig. 4 Experimental setup of water-proof test.

와 같다. 수압 시험은 압력탱크가 파손까지 갈 경우 매우 위험한 시험이므로 Fig. 4에서와 같이 두꺼운 철판으로 제작된 시험 장소에서 시험을 수행한다. 제작된 압력탱크를 시험대의 중간에 위치시키고 광섬유 센서 라인들과 변형률 게이지 선들은 시험장의 옆 부분에 있는 구멍을 이용해 외부로 연결하여 시험장과 격리된 공간에서 시험 데이터를 취득하였다.

본 연구에서는 FBG 센서 신호의 취득을 위해 IS-7000 광섬유 센서 시스템(FBG Interrogator, FiberPro Co.)과 LabVIEW[®]로 제작한 신호처리 프로그램을 이용하여며 사용된 FBG 센서 시스템의 사양은 표 3과 같다.

Table 3 Specifications of FBG interrogator

IS-7000 FBG interrogator (FiberPro Co.)	
Wavelength range	35 nm (1530~1565nm)
Average output power	3 mW
Resolution	< 2 pm
Measurement speed	200 Hz
# of channels	8
Temperature range	10~40°C

4. 유한요소해석

내압에 대한 STEB의 거동을 해석을 통해 예측하고, 실험에서 측정된 변형률 결과와 비교하기 위하여 상용프로그램 ABAQUS를 이용한 비선형 점진적 파손해석(nonlinear progressive failure analysis)을 수행하였다. Fig. 5는 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. 해석에 사용된 T700/Epoxy의 물성값은 다음과 같다.

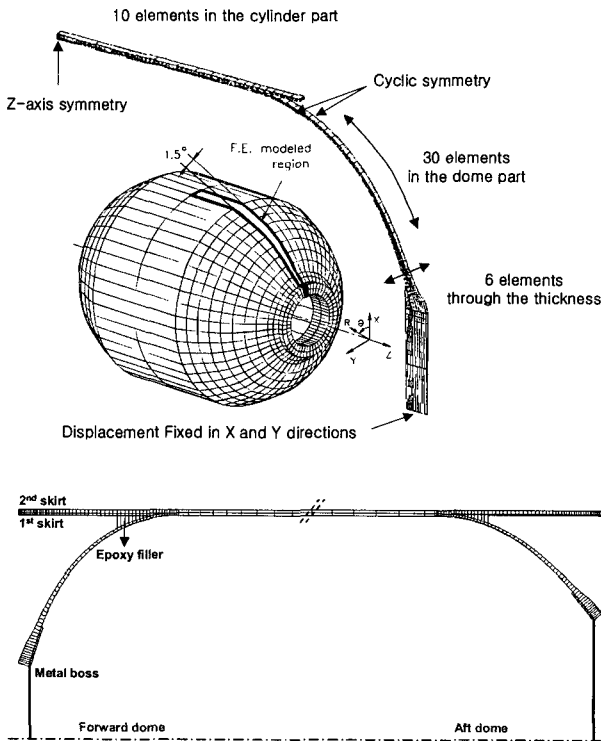


Fig. 5 The FEA model of STEB.

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

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

또한, 비선형 점진적 파손해석을 위해 하신의 파손 기준 (Hashin's failure criterion)을 적용하였으며 파손으로 인한 기계적 물성의 변화를 ABAQUS ver 6.3의 사용자 서브루틴 (USDFLD)으로 구현하였다.

5. 실험 결과 분석

Fig. 2에서와 같이 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서와 변형률 결과 값의 비교를 위해 제작이 완료된 탱크의 표면에 변형률 게이지를 부착하였다. 전·후방돔 부분에 각각 삽입된 3개의 FBG 센서 중 스킨트 쪽에 삽입되어 변형률 게이지의 부착이 불가능한 한 곳을 제외한 나머지 두 곳에 변형률 게이지를 부착하였다. 실린더 부분은 이론적으로 위치에 관계없이 일정한 변형률 결과를 보이는 것으로 알려져 있어 한 개의 게이지만 부착하였다. 센서 부착이 끝난 후 1,000psi까지 100psi 단위로 가압하면서 수압시험을 수행하였으며 실험 결과는 Fig. 6과 같다.

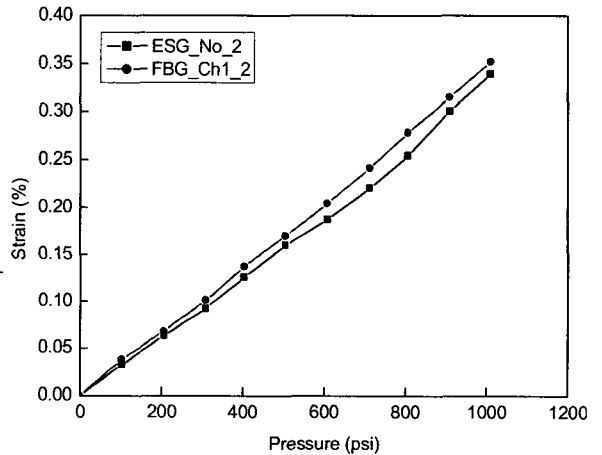
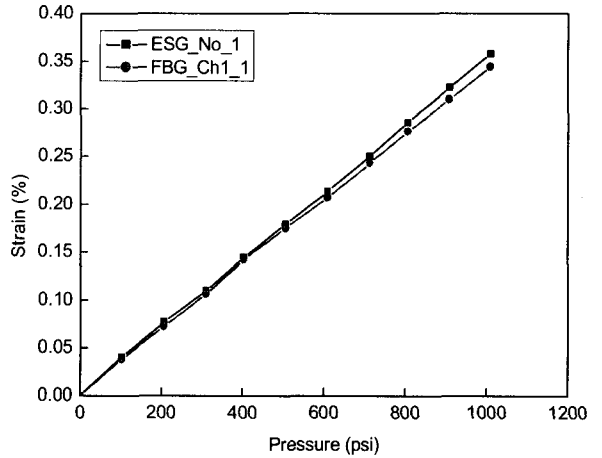


Fig. 6 Strain results of FBG and ESG with pressure - aft dome.

먼저, 후방돔 쪽에 부착된 두 개의 FBG 센서는 탱크의 압력 증가에 따라 변형률 게이지와 잘 일치된 결과를 보였으며 선형적으로 증가하였다. 결과에서 나타난 오차는 삽입된 센서와 표면에 부착된 게이지와의 위치 오차에서 비롯된 것으로 생각된다.

한편, Fig. 7과 같이 전방돔에 삽입된 FBG 센서의 경우 탱크 표면의 게이지 결과와 비교할 때 비교적 큰 오차를 보였다. 돔 부분은 헬리컬 와인딩 과정에서 두께 방향으로 와인딩 각도가 연속적으로 변하는 특징이 있다. 특히, 보스 부분은 반경이 작고 섬유가 되감기는 부분이기 때문에 실린더 부분에 비해서 상대적으로 두께가 더 두꺼워지며 이러한 현상은 곡률 반경이 작은 전방돔이 더욱 심하다. 이로 인해 와인딩 과정에서 발생한 FBG 센서 라인의 미끄러짐(slip) 현상이 실제 삽입된 FBG 센서의 위치를 변화시켜 측정 오차의 원인이 된 것으로 생각된다.

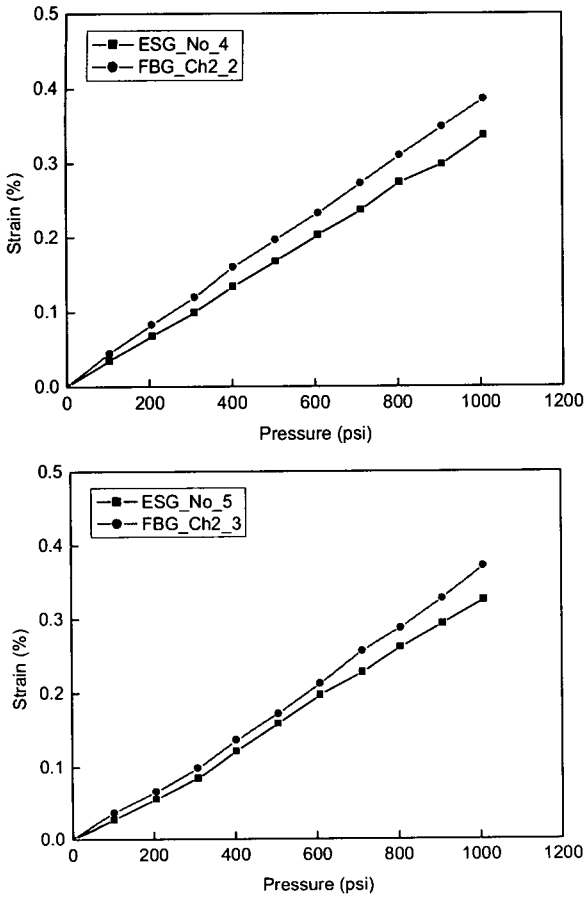


Fig. 7 Strain results of FBG and ESG with pressure - forward dome.

전후방 돔에 삽입된 FBG 센서와 달리 Fig. 8과 같이 실린더 부분에 삽입된 FBG 센서의 경우 변형률 게이지로 측정된 값을 중심으로 두 개의 FBG 센서는 일부 큰 결과를, 두 개의 FBG 센서는 반대로 작은 결과를 보였다. 이러한 결과는 Ch4의 FBG 센서 라인이 삽입과정에서 강화섬유와 평행하지 못하고 어느 정도의 기울기를 가지고 삽입되었기 때문으로 생각된다. 그러나, 압력 증가에 대한 변형률 경향은 모두 선형적인 증가를 보였다.

한편, Fig. 9는 FBG 센서와 변형률 게이지의 결과가 모두 측정된 지점들에 대해서 실험결과를 해석결과와 비교한 그래프이다. FBG 센서가 삽입된 모든 층과 변형률 게이지가 부착된 외곽층의 해석 결과를 동시에 도시하였다.

해석 결과만을 분석해 보면, 전방돔 헬리컬 층은 외부와 내부의 변형률 차이가 상대적으로 큰 반면에 후방돔은 그리 크지 않고 실린더 부분은 헬리컬층과 후프층 모두 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 그 이유는, 전방돔은 입구 반경이 매우 작는데 비해 후방돔은 반경이 상대적으로 커

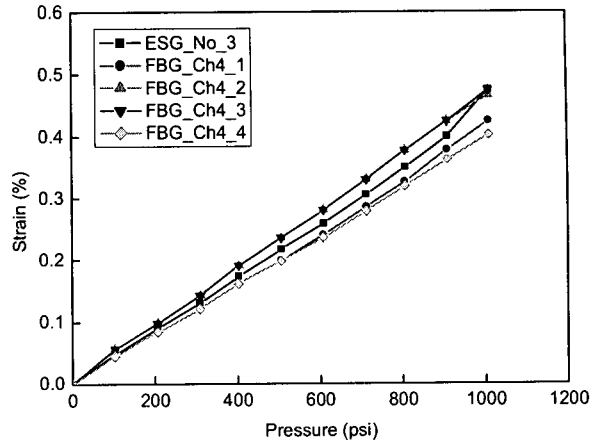


Fig. 8 Strain results of FBG and ESG with pressure - cylinder part.

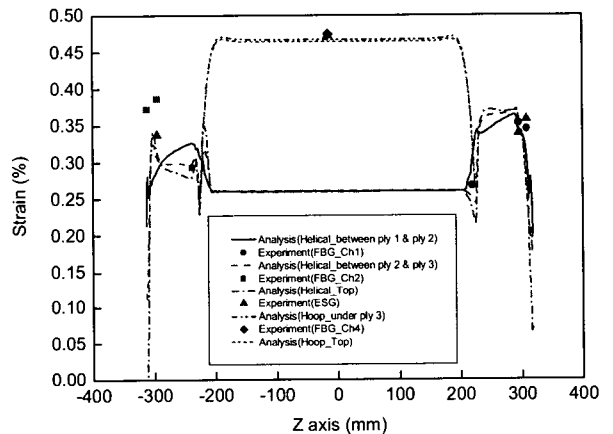


Fig. 9 The results of FBGs, ESGs and FEA at 1,000psi.

실린더와 유사한 거동을 보이기 때문으로 생각된다. 그리고, 실험결과와 비교해보면, 실린더 후프층과 후방돔의 경우 FBG 센서와 변형률 게이지 결과는 거의 유사하고 해석 결과와도 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.

앞서 언급한 오차의 원인 이외에, 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 있었다. 그러므로, 습식 와인딩(wet winding)과 같은 작업 환경에서는 FBG 센서 삽입시 와인딩 과정동안 센서 라인의 미끄러짐 현상을 방지하는 기법이 매우 중요함을 확인하였다. 이를 위해, FBG

센서 라인의 삽입시 광섬유의 인장력을 인위적으로 조절해 줌으로써 미끄러짐 현상을 어느 정도 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

또한, Fig. 9의 결과에서 돔과 실린더의 정선 부분과 같이 구조적으로 매우 중요한 반면 기존의 변형률 게이지로는 변형률 값의 측정이 불가능했던 지점에 대해 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서로는 변형률 값의 취득이 가능하다는 점은 FBG 센서를 삽입 적용해야 하는 큰 이유 중 하나라고 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 압력에 따른 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크의 변형률을 모니터링하기 위해 7채널 22개의 FBG 센서를 탱크 내부에 삽입하여 압력탱크를 제작하였으며 수압시험을 수행하였다. 수압시험을 통해 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서로부터 측정된 변형률 값은 변형률 값의 비교를 위해 탱크의 표면에 부착한 변형률 게이지로부터 측정된 변형률 값과 곡률이 급한 전방돔 부분을 제외한 모든 부분에서 잘 일치하였다. 또한, 두 센서로 측정된 변형률 값은 유한요소해석 결과와도 잘 일치하였으며 압력에 대해 선형적인 경향을 나타냈다. 일부 센서에서 나타난 오차의 원인으로는, 삽입된 FBG 센서 라인의 미끄러짐 현상과 삽입된 FBG 센서의 위치 측정으로 인한 오차를 생각할 수 있다.

무엇보다도 본 연구에서는 22개의 많은 센서를 삽입하여 압력탱크에 대한 전체적인 모니터링을 성공적으로 수행하였으며 특히, 돔과 실린더가 만나는 정선 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 프린터 연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) D. H. Kang, H. K. Kang, D. H. Kim, C. S. Hong and C. G. Kim, "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, D. H. Kim, C. S. Hong and C. G. Kim, "Signal characteristics of fiber Bragg grating due to internal strain gradient," *KSCM*, Vol. 15, No. 4, 2002, pp. 32-36.

3) H. K. Kang, D. H. Kang, C. H. Hong and C. G. Kim, "Simultaneous monitoring of strain and temperature during and after cure of unsymmetric cross-ply composite laminate using fiber optic sensors," *KSAS*, Vol. 30, No. 1, 2002, pp. 49-55.

4) H. K. Kang, D. H. Kang, H. J. Bang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors," *KSAS*, Vol. 30, No. 2, 2002, pp. 59-66.

5) 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.

6) J. Degrieck, W. De Waele, P. Verleysen, "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.

7) B. S. Hwang, B. H. Kim, B. S. Kim, S. B. Park and M. K. Um, "Processing and pressure test of filament wound composite pressure vessels for oxygen tanks," *KSCM*, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 10-17.

8) H. K. Kang, J. S. Park, D. H. Kang, C. U. Kim, C. S. Hong and C. G. Kim, "Strain monitoring of filament wound composite tank using fiber Bragg grating sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 6, 2002, pp. 848-853.

9) D. H. Kang, S. O. Park and C. G. Kim, "The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradient and grating lengths," *KSAS*, Vol. 33, No. 3, 2005, pp. 32-38.