

## 論文

## 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크에 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서의 생존율 향상

강동훈<sup>+</sup>, 박상욱<sup>\*\*</sup>, 박상오<sup>\*\*</sup>, 김천곤<sup>\*\*</sup>

## The Improvement of Survivability of Fiber Bragg Grating Sensors Embedded into Filament Wound Pressure Tanks

D. H. Kang<sup>+</sup>, S. W. Park<sup>\*\*</sup>, S. O. Park<sup>\*\*</sup>, C. G. Kim<sup>\*\*</sup>

## 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. For this reason, it is necessary to monitor the tank through its operation as well as whole fabrication process. A large number of sensors must be embedded into multi points of the tank from its fabrication step for monitoring the whole tank. Fiber optic sensors, especially fiber Bragg grating(FBG) sensors are widely used for various applications because of good multiplexing capabilities. However, we need to develop the embedding technique of FBG sensors into harsh inner environment of the tank for the successful embedment. In this paper, we studied the embedding technique of a number of FBG sensors into filament wound pressure tanks considering multiplexing.

## 초 록

여러 복합재료 제작기법 중에서 필라멘트 와인딩 제작 기법은 압력탱크, 파이프 등과 같은 실린더 형태의 축대칭 구조물의 제작에 가장 효율적인 방법이다. 또한, 필라멘트 와인딩으로 제작된 복합재료 압력탱크는 운용 중 큰 내압을 받게 되며 복잡한 손상 메커니즘과 파손 모드를 가지고 있다. 그러므로, 필라멘트 와인딩으로 제작된 복합재료 압력탱크는 탱크의 제작 과정과 제작 후 전 과정 동안의 탱크에 대한 건전성 모니터링이 필요하며 이를 위해 탱크의 제작 시부터 탱크 내부의 여러 지점에 센서가 삽입 적용되어야 한다. 여러 센서 중에서 광섬유 센서는 복합재료 내부에 삽입이 용이한 센서이며 특히, 광섬유 브래그 격자 센서(fiber Bragg grating Sensors, FBG센서)는 다중화(multiplexing)가 용이한 것을 큰 장점으로 가장 많이 채택되고 있다. 하지만, FBG 센서를 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크에 성공적으로 삽입 적용하기 위해서는 극심한 탱크의 삽입 환경에 대한 센서의 삽입 기법의 개발이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크의 제작 시 FBG 센서를 탱크 내부에 다중화하여 삽입적용하기 위한 기법에 대하여 연구하였다.

**Key Words** : 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating), 필라멘트 와인딩(filament winding), 압력 탱크(pressure tank), 다중화(multiplexing), 삽입(embed)

<sup>+</sup> 한국철도기술연구원 철도정책·물류연구본부 국제철도연구팀, 교신저자(E-mail:dhkang@krti.re.kr)

<sup>\*\*</sup> 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 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. 대부분의 기존 손상 평가 방법과 비파괴 검사 방법은 많은 시간을 요하며 구조물 중에서 접근이 어려운 부분에는 적용이 어려웠다. 이러한 이유로, 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 자체의 특성에 대한 연구[1-2] 뿐만 아니라 복합재 구조물에 적용하여 구조물의 변형률이나 온도 등을 측정하는 연구[3-4]가 많이 이루어지고 있다. 여러 광섬유 센서 중에서, 광섬유 브래그 격자 센서는 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM)가 용이하여 스마트 복합재 구조물의 구조 건전성 모니터링에 매우 적합한 센서로 많은 관심이 집중되고 있다. 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크에 대한 연구들 중에서 광섬유 센서를 적용한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Foedinger 등[5]은 STEB (standard testing and evaluation bottle)에 FBG 변형률 센서와 온도 센서를 각각 삽입하여 압력탱크의 성형과정 동안 온도와 변형률을 모니터링하고 광섬유의 ingress/egress 방법에 대해 연구하였다. Lo 등[6]은 동일한 중심 파장을 갖는 두 개의 FBG센서를 하나의 쌍으로 압력 용기에 부착하고 수압시험(water-pressurizing test) 동안 발생하는 두 FBG 센서의 중심 파장 이동량의 차이로부터 비평형된(unbalanced) 변형률 값을 측정하였다. 그러나, 이 연구에서는 두 FBG 센서의 중심 파장 이동량의 차이만을 측정하므로 센서가 부착된 위치에서의 절대적인 변형률을 구하지는 못하였다. Martin 등[7]은 필라멘트 와인딩된 튜브 제작 시 광강도형 센서를 삽입하여 제작하고 튜브에 충격을 가해 충격손상에 의한 강성 변화를 감지하였다. 이상의 연구에서는 적은 수의 FBG 센서를 삽입 적용하여 탱크 전체의 거동을 모니터링 할 수 없다는 단점이 있다. 한편, 강현규 등[8]은 필라멘트 와인딩으로 제작된 3단형 과학로켓 연소관 표면에 4채널, 32개의 FBG 센서를 부착하여 수압시험 동안 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. 이상의 연구들에서,

Aluminum mandrel + Rubber liner

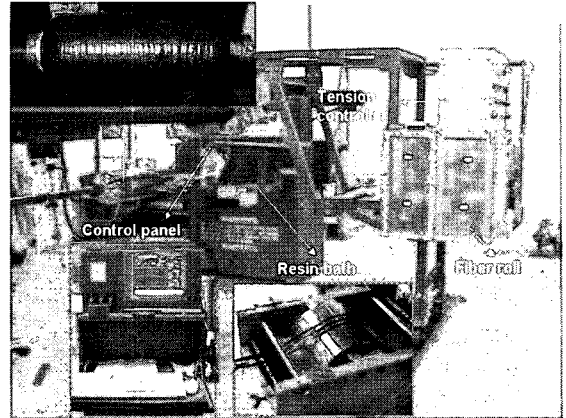


Fig. 1 Experimental setup for the Fabrication of a filament wound pressure tank.

압력탱크 내부에 센서를 삽입 시 센서의 생존성 문제와 생존했을 경우에도 운용 중 센서 신호의 안정성 문제로 인해 적은 수의 센서를 삽입하는데 그쳤으며 많은 수의 센서를 적용한 경우는 탱크의 표면에 부착 적용하여 연구를 수행하였다. 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크는 운용 중 큰 내부 변형률이 발생하고 위치에 따라 그 차이도 매우 커 운용 과정 동안 내부에 삽입된 센서를 통한 변형률을 모니터링하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크 내부에서의 FBG 센서의 생존율을 높일 수 있는 기법을 개발함으로써 탱크의 제작 시부터 많은 수의 FBG 센서를 탱크 내부에 삽입 적용할 수 있는 기법을 개발하고자 한다.

## 2. 필라멘트 와인딩된 압력탱크 제작

### 2.1 예비 탱크 제작 - STEB1

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 과정 중에 FBG 센서를 삽입 적용할 경우 발생하는 문제점 파악과 효율적인 삽입 기법을 찾기 위해 기존 시편 단위의 실험에 사용되는 방법으로 제작된 FBG 센서를 이용하여 예비 탱크(STEB1)를 제작하였다. Fig. 1은 와인딩 장치를 보여주고 있다.

그림과 같이 알루미늄 맨드릴(mandrel) 위에 탱크의 운용 중 누수 방지를 위해 고무 라이너(liner)를 이용하여 1차 와인딩을 수행한 후 복합재료를 이용한 본 와인딩을 수행한다. 와인딩 과정은 다음과 같다. 우선, 인장 조절기(tension controller)에 의해 인장력이 조절된 섬유 가닥은 레진 용기(resin bath)를 거치면서 섬유에 수지가 함침되고 컴퓨터에 의해 입력된 와인딩 패턴에 따라 자동으로 와인딩이 이루어진다. 본 연구에 사용된 와인딩 머신은 3축 와인딩 머신이다.

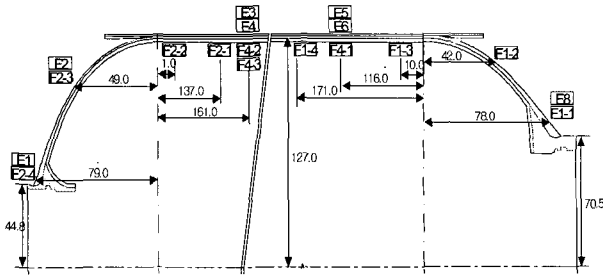


Fig. 2 Configurations and sensor positions of STEB1.

STEB1의 제작을 위해 삽입된 FBG 센서 라인은 다음과 같은 방법으로 제작하였다. (주)삼성전자의 단일모드 광섬유(single mode fiber, SMF)를 고온수소처리(high temperature hydrogen loading)를 통해 광민감성을 향상시킨후 위상마스크(phase mask)와 엑시머 레이저를 이용해 격자를 형성하였으며 격자를 형성한 후 아크릴레이트(acrylate) 리코팅(recoating)을 통해 격자부분을 보호하였다. 그리고, 제작된 각각의 FBG 센서를 용착접속기(arc-fusion suplicer)를 이용하여 연결함으로써 탱크에 삽입하게 될 광섬유 센서 라인을 제작하였다.

Fig. 2는 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서의 위치와 향후 수압시험을 위해 탱크의 표면에 부착된 변형률 게이지의 위치를 나타내고 있다. 그림에서 'E'는 변형률 게이지를 'F'는 FBG 센서를 의미하여 문자 뒤의 숫자는 채널과 센서 번호를 각각 나타낸다.

탱크의 내부에서 외부로, [(27.5)/90s]의 적층각으로 제작된 STEB1에는 4개 채널 총 14개의 센서가 삽입되었고 각 채널당 센서 수와 삽입 층은 다음과 같다.

- Ch1 : 4개, 후방돔 헬리컬층 1-2층 사이 섬유 방향
- Ch2 : 4개, 전방돔 헬리컬층 2-3층 사이
- Ch3 : 3개, 실린더 후프층 1-2층 사이 축방향
- Ch4 : 3개, 실린더 후프층 3-4층 사이 후프방향

위의 4채널 중에서 Ch3은 와인딩 과정에서, Ch1은 경화 과정에서, 그리고 Ch2는 경화 후 탈형과정에서 각각 파손되어 경화가 끝난 후 센서 신호를 취득할 수 없었다. 결국, 탱크의 제작이 완료된 시점에서는 Ch4만 생존하였으며 Fig. 3과 같은 신호를 보였다. Ch4가 삽입된 실린더 후프층의 후프방향은 실제 삽입 환경이 가장 곡률이 적고 응력구배도 없는 구간으로 일반적으로 삽입이 가장 용이한 곳으로 알려져 있다.

2.2 삽입된 센서의 생존성 향상 기법 - STEB2

STEB1의 제작과정을 통해, 필라멘트 와인딩된 복합재 압력탱크에 FBG 센서를 삽입 적용할 경우 FBG 센서는 탱크

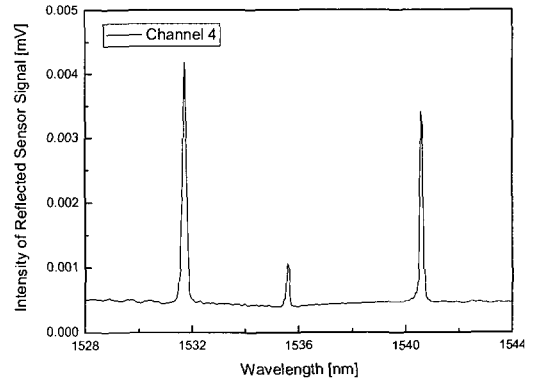


Fig. 3 Reflected spectra of the channel 4 of STEB1.

Table 1 Comparison between the processes of previous and revised

Method Content	Previous	Revised
Fiber type	single mode fiber + hydrogen loading	photo-sensitive fiber
Multiplexing	arc-fusion splicing	simultaneously
Protection	recoating	recoating + adhesive film
Ingress/egress	one direction	both directions

내부의 극심한 삽입환경에 노출되어 매우 낮은 생존율을 보임을 확인하였다. 따라서, 탱크 내부에 삽입된 센서의 생존율을 높이기 위해 FBG 센서 라인의 제작 방법을 Table 1과 같이 수정하였다.

Table 1에서와 같이 광섬유의 민감성 향상을 위해 고온 수소처리를 할 경우 광섬유 센서의 강도가 저하되므로[9] STEB2에서는 광민감성 광섬유(PS1250/1500, Fibcore)를 사용하여 수소처리 없이 브래그 격자를 형성하였다. 그리고, 센서 라인 제작을 위한 센서의 다중화는 용착 접속으로 인한 접속부위의 강도저하 문제를 해결하기 위해 용착 접속 없이 한 라인 위에 여러 개의 센서를 동시에 제작하였다. 또한, 삽입 시 횡방향 응력에 대한 격자 부분의 보호를 위해서 기존의 리코팅을 이용한 1차 보강 뿐만 아니라 폴리머 성분의 접착필름을 이용하여 2차 보강을 하였다. 다음과 같은 방법으로 제작된 센서 라인은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4 An FBG sensor line fabricated with a revised process.

STEB2는 STEB1과 같은 형태로 제작되었으며 탱크의 바깥으로 출입하는 센서 라인을 이전 한쪽 방향에서 양쪽 방향으로 함으로써 ingress/egress부분에서의 파손에 대한 센서의 생존율 향상을 도모하였다.

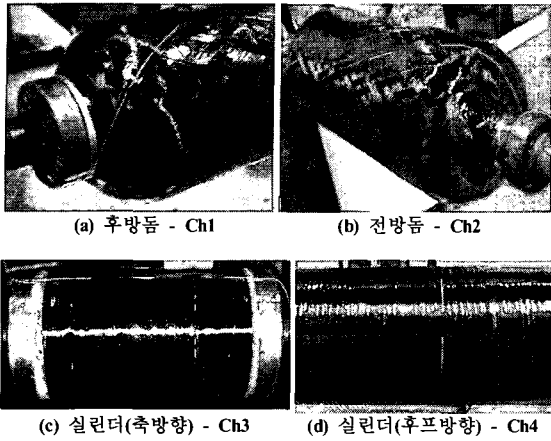


Fig. 5 Embedded FBG sensor lines during the fabrication.

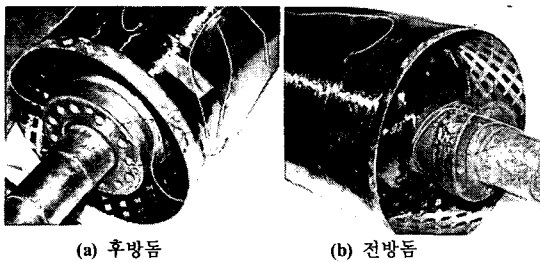


Fig. 6 Ingress/egress of FBG sensor lines for STEB2.

Fig. 5는 와인딩 과정 중간에 각 센서 채널이 삽입된 모습을 보여주고 있다. 또한, 삽입된 각 센서들의 위치는 축방향으로 움직일 수 있는 막대에 고정된 레이저 포인터(laser pointer)를 이용하여 돔 끝단에서부터 축방향 거리로 측정하였다. 와인딩이 끝난 탱크는 80℃(1hr)→120℃(1hr)→150℃(3hr)과 같은 사이클로 열챔버 내에서 회전 경화하였다. 경화가 끝난 후의 탱크 모습은 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 돔 끝단에서 출입하는 Ch1, Ch2와 실린더 부분에서 출입하는 Ch3, Ch4의 센서 라인을 확인할 수 있다.

경화 후 탱크 제작의 최종 과정인 탈형 과정까지 모두 마무리한 후 센서의 생존여부를 확인하였다. 탱크에 삽입된 센서 중 Ch3을 제외한 모든 채널의 센서가 100% 생존하였다. 한편, Ch3은 실린더에서 축방향으로 삽입된 센서 라인으로 와인딩 시 강화섬유가 센서의 격자 부분과 서로 수직하게 와인딩 되므로 센서의 파손확률이 상대적으로 매우 높은 라인이다. 생존한 세 채널에 대한 FBG 센서의 신호형상은 Fig. 7과 같다. 성형이 모두 끝난 후 생존한 센서들은 국부적인 굽힘 현상에 의해 일부 센서에서 광량의 손실이 부분적으로 발생하였지만 피크 신호의 갈라짐 없이 좋은 신호형상을 나타냈다.

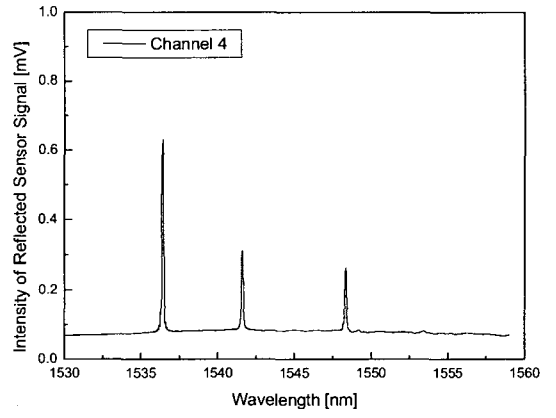
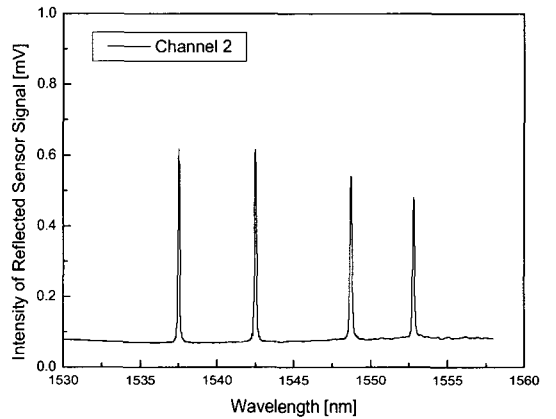
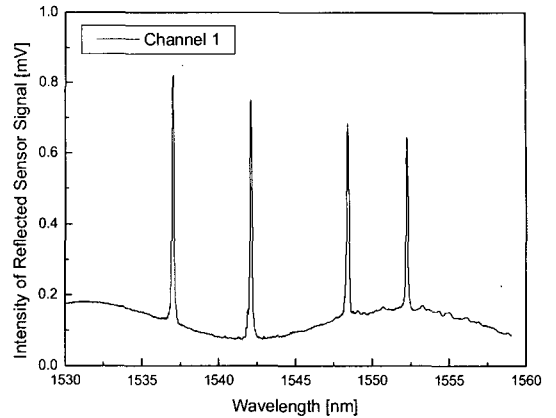


Fig. 7 Reflected spectra of FBG sensors of Ch1, 2, 4.

복합재 압력탱크는 고온, 고압의 성형 환경에서 성형 과정을 거쳐야 하며 이로 인해 성형 후 냉각과정 동안 복합재로 내부에 잔류변형을 및 잔류응력이 발생하게 된다. 본 연구에서는 STEB2에 삽입된 FBG 센서를 통해 탱크 성형 전후의 센서 신호를 취득함으로써 FBG 센서의 파장 이동량

Table 2 Residual strains of STEB2

Channel	Sensor No.	Residual strain ( $\mu\epsilon$ )
Ch1	F1-1	-359
	F1-2	-158.4
	F1-3	-11.5
	F1-4	-136.8
Ch2	F2-1	-492.5
	F2-2	-522.9
	F2-3	-580.6
	F2-4	-485.0
Ch3		
Ch4	F4-1	-401.2
	F4-2	-302.1
	F4-3	-503.9

Table 3 Maximum measured strains during the burst test

Channel	Sensor No.	Max. measured strain (pressure)
Ch1	F1-1	0.95% (2900psi)
	F1-2	0.90% (2900psi)
	F1-3	0.80% (2900psi)
	F1-4	0.90% (2900psi)
Ch2	F2-1	0.67% (1400psi)
	F2-2	0.52% (1400psi)
	F2-3	0.32% (900psi)
	F2-4	0.35% (1000psi)
Ch3		
Ch4	F4-1	0.58% (1400psi)
	F4-2	0.62% (1400psi)
	F4-3	0.60% (1400psi)

으로부터 성형 과정동안 탱크에 발생한 잔류변형률(residual strain)을 측정하였다. 결과는 Table 2와 같다. 표에서와 같이, STEB은 돔과 실린더 모두에서 탱크의 경화 과정을 통해 수백  $\mu\epsilon$  정도의 압축 잔류응력이 발생하며 후방돔에서 상대적으로 적게 발생함을 알 수 있다. 한편, F1-3과 F2-2와 같이 압력탱크에서 상대적인 대응 부위에 삽입된 센서의 경우 잔류 변형률 값에서 큰 차이를 보이는 이유로는 헬리컬 와인딩 이후 스커트 체결과 후프 와인딩, 그리고 최종 경화 과정을 거치는 동안 양 지점에서 서로 다른 잔류응력이 발생했음을 의미한다. 이를 통해 스커트 체결이 탱크 내부에 미친 영향을 판단할 수도 있으리라 생각된다.

탱크 내부에 삽입된 FBG 센서의 검증을 위해 파열시험(burst test)을 수행하였다. 탱크는 로터리 펌프(rotary pump)로 가압하였고 각 센서 채널에 대한 FBG 센서의 신호는 광섬유 센서 시스템(IS-7000 FBG Interrogator, FiberPro Co.)을 이용하여 취득하였다. 시험을 통해 취득된 각 센서의 최대 측정 변형률은 Table 3과 같다.

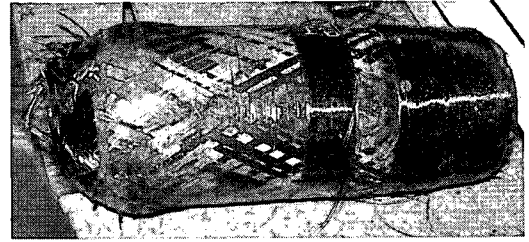


Fig. 8 The failure shape of STEB2.

파열시험을 통해 측정된 탱크의 최대내압은 3,430psi이다. 하지만, Table 3에서 알 수 있듯이 탱크의 파열이 일어나기 전에 탱크 내부에 삽입된 FBG 센서들이 먼저 파손되었다. 센서의 평균적인 최대변형률은 0.6~0.7% 정도였으며 후방돔에 삽입된 센서에서 0.9% 정도로 비교적 높게 나타났다.

한편, Ch2의 3번과 4번 센서의 경우에는 전방돔 부분에서 돔의 보스와 인접한 센서로 탱크가 내압을 받을 경우 기하학적인 급구배가 야기한 극심한 변형률 구배로 인해 센서의 최대 측정변형률이 매우 낮게 나타났다. 그러므로, 변형률 구배가 발생하면 FBG 센서 신호는 피크 갈라짐 현상이 발생해 측정범위가 감소[10]하므로 보다 높은 내압까지 센서의 생존성을 보장하기 위해서는 격자 길이를 감소시켜야 함을 확인하였다. Fig. 8은 파열시험이 끝난 후 STEB2의 파손 형상을 보여주어 주고 있으며 전형적인 필라멘트 와인딩된 압력탱크의 파손형상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 2.3 센서의 신호 안정성 확보 - STEB3

STEB2의 파열시험에서 나타난 삽입된 FBG 센서 신호의 안정성 문제를 해결하기 위하여 FBG 센서 제작 시 사용되는 엑시머 레이저의 파장대역 (248nm)만을 거의 전반 사시키는 특수코팅이 처리된 반사 프리즘을 이용하여 기존 10mm의 격자 길이보다 짧은 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하였다[11].

본 제작 방법은 3축 이송장치(3-axis translation stage)와 CCD 카메라를 이용하여 위상 마스크와 반사 프리즘과의 간격을 정밀하게 조절함으로써 센서 제작 시 원하는 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 제작하는 방법으로 제작에 사용된 반사 프리즘은 Table 4와 같은 사양을 가지고 있다. 이러한 방법으로 STEB2에서는 10mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 사용하였지만 STEB3에서는 5mm의 격자 길이를 갖는 센서를 제작하여 적용하였다.

STEB3에는 변형률 구배가 전혀 없고 강화섬유와 평행하게 삽입되어 상대적으로 매우 안전한 Ch4번을 제외한 모든 채널(Ch1, Ch2, Ch3)에 5mm의 격자 길이를 갖는 FBG 센서를 사용하였다. 또한, 강화섬유와 수직하게 삽입되어 가장 파손확률이 높은 Ch3에 대해서는 세 가닥의 여분 라인

Table 4 Specifications of the reflection prism

	Specifications
Material	Fused Silica
Size	0.5"×0.5"×0.5"
Coating	R>99.0%, At λ=248nm
Model	KRF-RAP-050-UV
Producer	Korea Electro-Optics Co., LTD.

Table 5 Specifications of embedded FBG sensors (STEB3)

Sensor Channel	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4
Ch1	○ (5mm)	○ (5mm)	○ (5mm)	
Ch2	○ (5mm)	○ (5mm)	○ (5mm)	
Ch3	○ (5mm)	○ (5mm)	○ (5mm)	
Ch4	○ (10mm)	○ (10mm)	○ (10mm)	○ (10mm)
Ch5	○ (5mm)	○ (5mm)	○ (5mm)	
Ch6	○ (5mm)	○ (5mm)	○ (5mm)	
Ch7	○ (5mm)	○ (5mm)	○ (5mm)	

Table 6 Residual strains of STEB3 - Ch3, 5, 6, 7

Channel	Sensor No.	Residual strain (με)
Ch3	F3-1	-200.3
	F3-2	-395.2
	F3-3	-262.3
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

(Ch5, Ch6, Ch7)을 후프방향으로 90°간격으로 추가 삽입하였다. 최종적으로 STEB3에는 7채널 총 22개의 FBG 센서(5mm : 18개, 10mm : 4개)를 삽입하였다. 탱크를 제작한 후 각 채널 별 센서의 생존유무와 각 센서의 격자 길이 등은 Table 5와 같다.

Table 5로부터 탱크 제작이 완료된 후 모든 채널의 모든 센서가 생존하여 100%의 생존율을 보였다. 또한, STEB3에서는 STEB2와 달리 강화 섬유와 수직하게 삽입된 센서들 또한 모두 생존하여 격자 길이의 감소가 강화섬유와 수직 방향으로 삽입될 경우 생존율에 직접적으로 영향을 준다는 것을 확인하였다.

강화섬유와 수직하게 삽입된 센서들, 즉 Ch3, Ch5, Ch6, Ch7에 대한 성형 후 잔류변형률을 측정하였으며 결과는

Table 6과 같다.

Table 6의 결과를 보면, Table 2의 결과와는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. Table 2에서는 STEB의 잔류 변형률이 돔과 실린더에 구별 없이 전체적으로 압축 변형률로 나타났다. 하지만, Table 6과 같이 실린더 부분에 축방향, 즉 강화섬유와 수직하게 삽입될 경우에는 인장과 압축 모두 나타날 수 있으며 크기 또한 수십에서 수백 마이크로 정도로 비교적 넓은 범위를 보였다. 이는 강화섬유와 수직으로 삽입되는 과정에서 격자 부위에 국부적으로 발생한 굽힘 현상이 센서의 응력 상태에 영향을 주기 때문으로 생각된다.

### 3. 압력탱크 제작결과

본 연구에서는 STEB3의 제작을 통해 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크에 FBG 센서를 다중화하여 삽입 적용하는 방법을 확립하였다. 또한, 제시된 방법의 효용성 검증과 제작 과정에서 센서 파손에 영향을 미치는 인자에 대한 파악을 위해 추가적으로 4개의 탱크를 더 제작하였으며 제작 결과를 요약하면 다음과 같다.

우선, 이후 제작된 탱크를 순서대로 STEB4~7로 명명하고 각 탱크별 삽입 적용된 센서 수와 탱크의 제작이 완료된 후 생존한 센서 수로부터 생존율을 Table 7에 정리하였다. Table 7에서와 같이 5개의 탱크에 총 75개의 센서가 삽입 적용되었고 최종적으로 생존한 센서는 61개, 즉 81%의 생존율을 보였다. 또한, 센서의 삽입 위치별로 살펴보면 돔 부분에 32개의 센서가 적용되어 27개가 생존, 84%의 생존율을 보였고 실린더 부분에 43개의 센서가 적용되어 34개가 생존, 79%의 생존율을 보여 적용 위치에 관계없이 비슷한 정도의 결과를 나타냈다.

Table 7 Survivability of embedded FBG sensors

Content Model	Attempt	Survival	Survivability
STEB3	22	22	100%
STEB4	12	6	50%
STEB5	12	8	67%
STEB6	15	15	100%
STEB7	14	10	71%
Total	75	61	81%

위의 결과에서 알 수 있듯이 같은 제작 방법으로 제작 하더라도 여러 요인에 의해 센서가 파손되었으며 제작 과정 중 파손된 14개의 센서에 대한 파손 원인을 살펴보면 크게 와인딩 작업 과정, 경화 과정, 취급 과정의 세 가지로 구분할 수 있다.

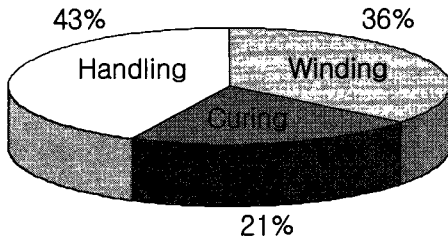


Fig. 9 The causes of FBG sensor failure.

Fig. 9에서 와인딩 작업 도중에 발생한 파손은 FBG 센서의 가장 취약부분, 즉 격자가 형성된 경계면이 강화섬유에 의해 횡방향 응력을 받아 발생한 것으로 주로 Ch3과 같이 강화섬유에 대해 센서가 수직으로 삽입 적용된 경우에 발생하였다. 이러한 문제는 격자의 길이를 더욱 줄이거나 센서가 강화섬유와 수직으로 삽입되는 것을 피한다면 해결 가능한 것으로 생각된다. 한편, 경화 과정 중에 발생한 파손은 복합재료의 성형 시 발생한 수지의 수축으로 인한 것이며 이는 센서의 삽입과정에서부터 과도한 응력이 작용했기 때문으로 생각된다. 따라서, 센서의 삽입과정에서 FBG 센서 라인에 과도한 응력이 작용하지 않도록 강화섬유의 장력을 적절히 조절하는 것이 중요함을 알 수 있다. 이와 같은 요인 외에 작업자가 탱크를 다루는 과정에서 전체 파손 중 약 43% 정도가 발생하였다. 특히, 삽입된 광섬유 라인의 입출력이 이루어지는 ingress/egress 부분에서 파손이 주로 발생하였다. 그 이유로, 다른 센서와 달리 FBG 센서는 실리카( $SiO_2$ ) 재질로 센서 자체의 취성(brittleness)도 매우 강하며 경화 시 흘러 나온 수지로 인해 입출력부에서 센서 라인의 취성이 더욱 증가했기 때문으로 생각된다.

위와 같은 문제점들에 대한 근본적인 해결책으로는 센서 자체의 강도를 높이는 연구가 필요하며 입출력단에 대한 새로운 보강기법이 개발이 이루어져야 할 것으로 본다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크에 FBG 센서를 다중화하여 삽입적용 하는 기법을 개발하였으며 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 필라멘트 와인딩된 복합재료 압력탱크에 FBG 센서를 삽입 적용할 경우 광민감성 광섬유 사용, 한 라인에 동시 제작을 통한 다중화, 리코팅과 접착필름을 통한 격자 부분의 보호 등을 통해 센서의 생존율을 향상시킬 수 있다.
2. STEB에서 돔부분, 특히 구배가 급한 전방돔에서는

탱크에 내압이 가해질 경우 발생한 변형을 구배가 FBG 센서의 신호 안정성에 영향을 주므로 격자 길이가 짧은 FBG 센서의 사용이 필수적이다.

3. STEB은 돔과 실린더 모두에서 탱크의 경화 과정을 통해 수백  $\mu\epsilon$  정도의 압축 잔류응력이 발생하며 그 크기는 후방돔에서 상대적으로 적다.
4. STEB에서 FBG 센서가 실린더부분에 축방향, 즉 강화섬유와 수직하게 삽입될 경우 성형 후 인장과 압축 잔류응력이 모두 나타날 수 있으며 그 크기도 수십에서 수백 마이크로 정도로 비교적 넓은 범위를 가진다.
5. 총 5개의 STEB 제작을 통해 FBG 센서는 평균 81% (61/75)의 생존율을 보였다. 센서의 파손 원인은 와인딩 작업 과정(36%), 경화 과정(21%), 취급 과정(43%)의 세 가지로 구분할 수 있으며 생존율 향상을 위해서는 FBG 센서의 강도 향상, 센서의 Ingress/egress 기법에 대한 연구가 필요하다.

이를 통해, FBG 센서를 복합재료 압력탱크 내부에 삽입하였을 경우 센서의 생존율을 높이기 위한 센서 라인의 제작 방법을 확립하였으며 실제 탱크 제작에 적용해봄으로써 타당성을 검증하였다. 또한, 파손된 센서들에 대한 파손원인 분석을 통해 센서 생존율 향상을 위한 연구의 방향을 제시할 수 있었다.

#### 후 기

이 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21C 프런티어 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

- laminates 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) Y. L. Lo, P. H. Sung, H. J. Wang and L. W. Chen, "Pressure vessel wall thinning detection using multiple pairs of fiber Bragg gratings for unbalanced strain measurements," *Journal of Nondestructive. Evaluation*, Vol. 19, No. 3, 2000, pp. 105-113.
  - 7) A. R. Martin, G. F. Fernando and K. F. Hale, "Impact damage detection in filament wound tubes using embedded optical fibre sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 4, 1997, pp. 470-476.
  - 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) C. Y. Wei, C. C. Ye, S. W. James, R. P. Tatam and P. E. Irving, "The influence of hydrogen loading and the fabrication process on the mechanical strength of optical fibre Bragg gratings," *Optical Materials*, Vol. 20, 2002, pp. 241-251.
  - 10) 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.
  - 11) D. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, "The fabrication method of fiber Bragg grating sensor with various grating length and signal characteristics of reflected spectra with grating length," *KSCM*, Vol. 17, No. 4, 2004, pp. 32-39.