

광섬유 센서를 이용한 복합재료 고압탱크 변형률 측정

박재성*·윤종훈*·공철원*·장영순*·이원복**·노태호**

Strain monitoring of the composite high pressure tanks using the FBG sensors

Jaesung Park, Jong-Hoon Youn, Cheol-Won Kong, Young-Soon Jang, Won-bok Lee and
Tae-Ho No

Key Words: FBG 센서(FBG sensor), 복합재료 탱크(composite tank), 변형률 측정(strain monitoring).

Abstract

The FBG sensors are inserted on the liners of the filament wound pressure tanks. The strains near the welding region of the liners are monitored in the hydro-pressurizing tests. The hydro-pressurizing tests consist of the proof tests at 4500 or 3300 psi and repeated test at the operating pressure, 3000 psi. The FBG sensors work well under 3000 $\mu\epsilon$, but the strains calculated from the reflected signals are instable at the high strain level. The transverse compression on the sensor head results in the split of the reflected peaks, and the calculating algorithm from the split peaks is not robust under the various signal condition. The FBG sensors fracture near 7500 $\mu\epsilon$ level and lose their function permanently.

기호설명

FBG(Fiber Bragg Grating)

CHPT(Composite High Pressure Tank)

MEOP(Maximum Expected Operating Pressure)

1. 서론

KSLV-I에 필요한 고압탱크 제작방식으로 금속재료 라이너위에 복합재료를 와인딩하는 방법이 검토되고 있다. 일반적으로 복합재료 탱크의 효율은 크기가 작을수록 낮아지지만 여전히 금속재료 탱크에 비교하면 높은 수준이라고 할 수 있다. 최근 제작된 복합재료 고압탱크의 성능은 금속재료 라이너의 하중분담 정도나 용접부위의 피로 강도에 의해 좌우되고 있다.

금속재료 탱크의 설계가 항복점 이하에서 이루어지며, 반복하중에 대하여 어느 정도 안정성을 갖고 있는 것에 반하여 복합재료 탱크의 경우 적층 복합재료의 인장 파손 강도로 설계가 이루어진다. 특히 금속재료 라이너위에 복합재료 와인딩을 수행한 탱크는 라이너 재료의 강도나 용접부위의 강도를 고려하여 설계를 수행하여야 한다. 또한 반복 사용이 필요한 탱크는 라이너와 복합재료 적층에 대한 반복 수명을 고려해야 하는 어려움이 있다.

따라서 반복 사용에 대한 라이너와 라이너 용접부위의 잔류 변형률을 관찰함으로써 탱크의 건전성을 확인하는 것이 필요하다. 현재는 복합재료 외피에 부착된 스트레인 게이지로부터 변형률을 측정하였는데 이 값이 금속재료 라이너의 변형률과 일치하지 않으므로 라이너에 대한 직접적인 변형률 측정이 필요한 시점이다. 이 곳에 광섬유 FBG 센서를 삽입함으로써 라이너의 변형률을 직접 측정하고, 반복 시험시 나타나는 복합재료 고압탱크의 거동을 관찰하였다.

*항공우주연구원 구조그룹

** (주)한화 대전공장

국내에서 광섬유 FBG 센서를 통해 압력용기의 변형률을 측정하는 연구가 수행되었는데 표면에 스트레인 게이지 센서와 함께 부착한 경우이다.[1] 복합재료 외피에 부착된 광섬유 센서로부터 최대 2500 $\mu\epsilon$ 정도까지 변형률을 측정하였다.

FBG센서의 부착위치에 변형률 구배가 크거나 횡방향 응력 등에 의하여 반사 신호의 peak가 깨져서 변형률 측정에 오차가 발생할 수 있다.[2] 이를 극복하기 위해서는 센서부위를 유리튜브로 보호하여 횡방향 응력으로부터 센서를 보호하고 변형률 구배를 센서 전체에 일정하게 분포하도록 해야한다.

2. 수압시험

2.1 시험 준비

복합재료 고압탱크 (CHPT) 3기에 대한 수압시험을 수행하였다. 설계 최대작동압력(MEOP)은 3000 psi, 부피는 15.5 liter이다. 총 6기를 제작하였고, CHPT 4 ~ 6번의 시편에 광섬유 센서를 삽입하였다. 사용된 광섬유 센서 종류는 CHPT 4의 경우 10개의 변형률 센서, 1개의 온도센서이고, CHPT 5는 1개의 변형률 센서, CHPT 6은 4개의 변형률 센서이다. CHPT 4번에 처음 적용하였으나 센서 삽입에 어려움이 있어서 센서수를 줄여 적용하였다.

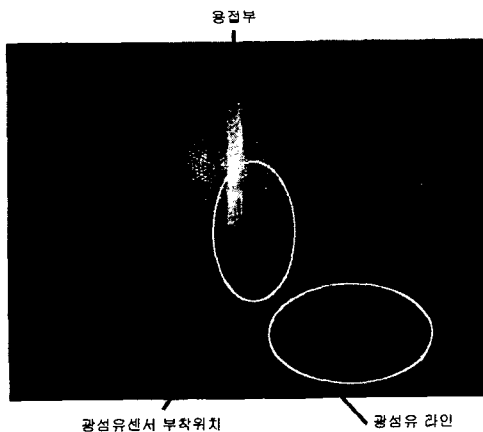


그림 1 접착필름 위에 광섬유 센서부착

CHPT 4의 경우에는 그림 1과 같이 라이너위에 접착필름을 붙인 후에 광섬유 센서를 부착하였는데, 부착 초기에 한 개의 광섬유 라인이 끊어지고,

성형 과정에서 나머지 1개의 광섬유 라인이 끊어져서 변형률을 측정할 수 없었다. 접착필름 위에 일단 부착된 센서는 이동과 방향변경이 불가능하였다. 또한 광섬유 부착 후에 복합재료 프리프레그를 센서위에 덮어 고정하는 과정이 필요하다. 향후 여러 개의 센서를 삽입할 경우에는 금속재료 라이너위에 센서를 정렬하고 그 위에 접착필름을 부착하는 것이 바람직한 것으로 보이고, CHPT 5의 경우에 적용하였다.

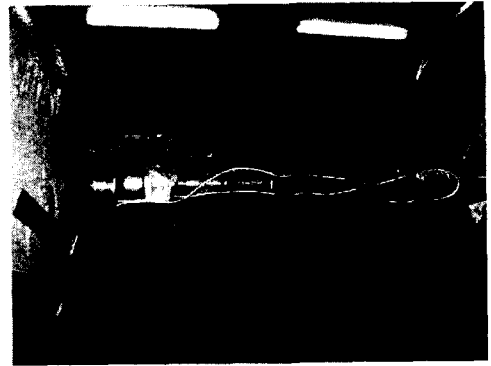


그림 2 센서라인 처리

그림 2는 와인딩 장비의 축에 광섬유 센서 라인을 고정한 모습이다. 부착 후 와인딩 과정에서 축이 회전하므로 그 축에 광섬유를 고정시켜야 하고 신호측정 시스템에 연결하기 위한 광섬유 길이를 확보해야한다. 피복이 있는 광섬유 라인이 돔과 보스부분에 일부 삽입되어 와인딩과정에서 복합재료에 덮이게 된다. 너무 깊이 피복이 삽입될 경우 탱크의 성능저하를 유발할 수도 있으므로 삽입 깊이는 광섬유 라인을 보호하면서 최소로 삽입되도록 해야 한다.

그림 3은 보스 끝단에서 와인딩 장치의 축까지 연결되는 광섬유 라인의 모습으로 성형에 들어가기 위해 진공처리를 수행하면서 날카로운 모서리에 의해 끊어지기 쉽다. 따라서 일단 구조물 외부로 나온 광섬유 라인은 보다 두껍고 안전한 피복으로 처리하여 성형 후 공정에서도 라인의 안전성을 확보해야한다.

CHPT 6번은 CHPT 4와 동일한 방법으로 접착필름 위에 광섬유 센서와 라인을 배치하고 그 위에 복합재료 프리프레그를 덮는 방식을 채택하였

다. 진공 처리 및 성형 과정에서의 광섬유 라인 손상을 막기 위하여 광섬유 라인이 지나가는 보스부분에 흠을 내었고, 진공처리 전에 부드러운 실런트(sealant)로 라인 주변을 감싸서 균일한 압력을 받도록 조치하였다. 양쪽 보스부분에 충분한 실런트를 적용하여 광섬유 라인을 보호하였으며, 진공팩의 제거시에도 주의를 기울여 작업을 수행하였다.



그림 3 성형 후 손상 부위

그림 4는 수압시험 장치에 장착된 고압탱크 형상으로 보스주변으로 노란피복의 광섬유 라인이 나오는 것을 알 수 있다.(CHPT 5) 아래쪽 보스를 통해 가압장비와 연결하여 시험을 수행하였고, 수압의 조절은 작업자가 수동으로 조정하였다.



그림 4 보스부분으로 돌출된 광섬유 센서 라인

FBG 센서의 신호는 IS7000(Fiberpro, 도남시스템) 장비를 통해 측정하였으며, CHPT 5에 사용된

FBG 센서의 중심파장은 1558 nm 근방의 센서이고, CHPT 6에 사용된 센서는 1541, 1548, 1551, 1555 nm 근방의 센서이다.

2.2 CHPT 5번의 수압시험

CHPT 5의 경우는 삽입한 광섬유 센서 1개에 대하여 수압시험시 변형률을 측정할 수 있었다. 그림 5는 CHPT 5에 수행된 수압시험 압력 프로파일이다. 4500 psi의 인증시험을 수행하고, 3000 psi에서 50회 반복시험을 수행하였다.

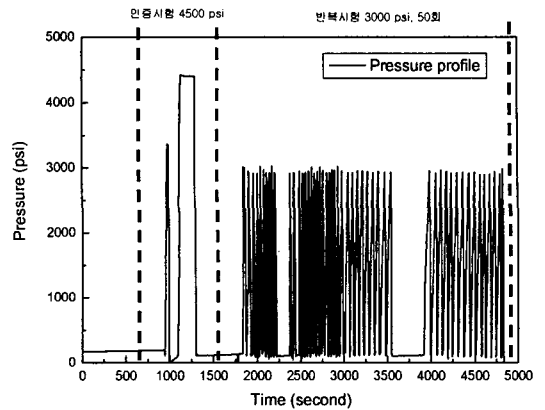


그림 5 CHPT 5의 수압시험 프로파일

초기 3300 psi 정도의 압력은 인증시험 수행과정에서 장비에 문제가 발생하여 해압된 것이다. 이때 측정된 변형률을 광섬유센서와 스트레인 게이지 센서에 대해 비교해 보았다.

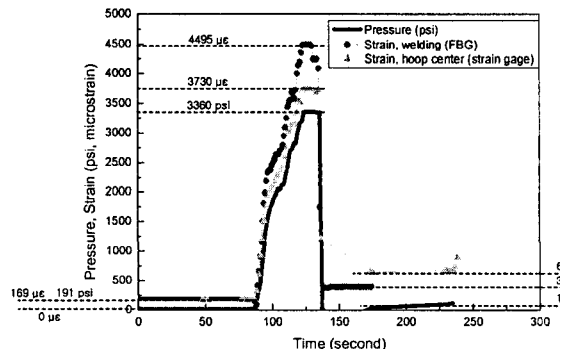


그림 6 CHPT 5의 인증시험 결과 I

광섬유 센서는 금속재료 라이너의 실린더 부위에 부착되었고, 스트레인 게이지는 실린더부분 표

면에 부착되었다. 내부 광섬유 센서에서 측정된 스트레인이 외부에 부착된 스트레인 게이지 신호보다 크게 나타났다. 이는 실린더 부분이라도 광섬유 센서는 중앙에 부착되었고, 스트레인 게이지는 둘 부분에 치우쳐서 부착되어 차이가 발생하였다.

그림 6을 통해 인증시험 후에 잔류변형률이 남는 것을 확인할 수 있다. FBG 센서의 경우 1분간의 압력 유지과정에서 갑자기 250 ~ 300 $\mu\epsilon$ 의 변형률이 내려가는 모습을 볼 수 있다. 이것은 광섬유 센서가 인장에서 4495 $\mu\epsilon$ 까지 측정하였지만 압력이 조금 내려가 수축되는 과정에서 일부 파손되거나 두께방향 압축에 따라 peak의 모양이 깨진 것으로 판단된다. 물론 압력 profile과 스트레인 게이지 신호에서도 해압과 스트레인 감소가 나타나지만 광섬유 센서처럼 급격하지는 않다. 따라서 안정적으로 4500 $\mu\epsilon$ 정도까지 변형률을 측정하려면 센서부분에 대한 리코팅(recoating)을 하거나 패키지(package)된 센서를 구매하여 사용해야한다. 또한 일부 peak 신호가 깨진 경우에도 반사과장을 정확하게 검출할 수 있는 강건(robust)한 신호처리 방법이 요구된다.

2.4 CHPT 6번의 수압시험

그림 7은 CHPT 6의 수압시험 프로파일이다. 광섬유 센서의 파손을 막기 위하여 인증시험을 3300 psi까지만 수행하였다.

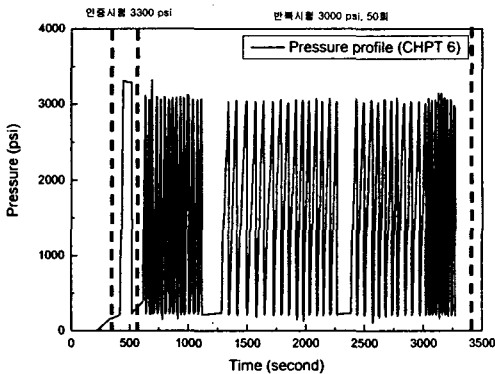


그림 7 CHPT 6의 수압시험 프로파일

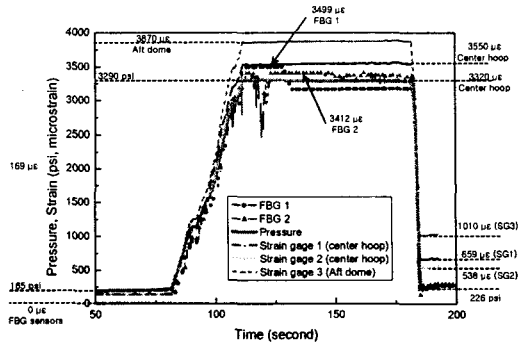


그림 8 CHPT 6의 Proof 시험

그림 8에 인증시험에 따른 압력, 변형률 변화를 나타내었다. 광섬유 센서와 스트레인 게이지 1, 2 번은 실린더 부분에 부착된 것으로 위치가 정확하게 일치하지는 않는다. 스트레인 게이지 신호로부터 실린더부분의 후프방향 변형률은 3320 ~ 3550 $\mu\epsilon$ 임을 알 수 있다. 광섬유 센서 신호는 인증시험 중 1분간 3290 psi로 유지하는 동안에도 변화가 나타나는데 이는 신호처리 프로그램의 오류로 판단된다. 변형률의 증가에 따라서 광섬유 센서에 굽힘 및 압축 하중이 가해져서 peak 모양이 일그러지는데 이를 변형률 발생으로 인식해서 생기는 문제이다. 향후 peak 검출 프로그램의 보완과 센서의 보호처리를 통하여 개선해야만 충분한 변형률 크기까지 의미가 있는 신호를 받을 수 있다. 광섬유 센서로부터 측정된 실린더 부분의 후프방향 변형률은 3412 ~ 3499 $\mu\epsilon$ 으로 스트레인 게이지로부터 측정된 범위내에 있다. 같은 실린더 부분의 경우에도 센서 부착 각도와 위치, 국부적인 변형률 차이에 의하여 최대 7% 정도의 차이가 발생하였다.

그림 9는 CHPT 6의 50회 반복시험 과정에 나타나는 변형률 신호로 실린더 부분의 금속재료 라이너에서는 잔류변형률이 남지 않는 것을 확인할 수 있다.

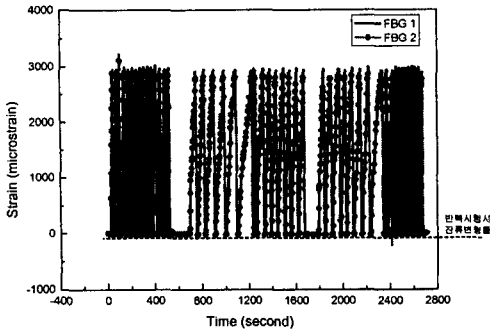


그림 9 반복시험 후 잔류변형률 (FBG 센서)

반복시험이 완료된 후 최종파열 압력을 측정하기 위하여 burst 시험을 수행하였다. 그림 10은 시간에 따른 압력, 광섬유센서, 스트레인 게이지 센서의 신호를 나타낸 것이다. 실린더 부분의 후프 방향 스트레인은 4개의 센서에서 비슷하게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 9000 psi의 내압에서도 고압탱크가 파열이 발생하지 않아 시험을 중단하였다.

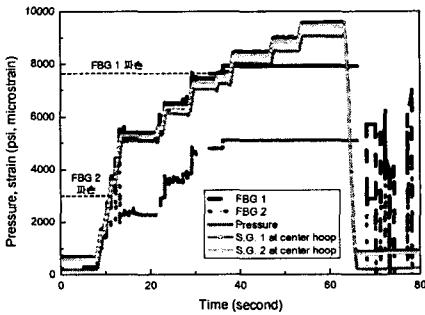


그림 10 파열 시험에 따른 센서 신호

광섬유 센서의 경우 $3000\mu\epsilon$, $7500\mu\epsilon$ 부근에서 비정상적인 신호가 발생하였다. FBG 2의 경우 인증시험과 반복시험에서 발생하는 신호와 비교하면 $3000\mu\epsilon$ 까지는 peak가 완전하여 신호가 깨끗하고, $3300\mu\epsilon$ 부근에서부터 peak가 깨짐을 알 수 있다. 광섬유 자체가 $3300\mu\epsilon$ 에서 파손되지는 않지만 peak의 형태가 일그러져서 변형률 측정이 불가능하고, FBG 1과 비교한 신호로부터 $7500\mu\epsilon$ 부근에서 광섬유의 완전파손이 발생하는 것을 확인할 수 있다. peak가 일부 변형된 신호에 대해서도 정상

적으로 스트레인 측정이 이루어질 수 있도록 신호 처리 소프트웨어에 대한 보강이 필요하다.

3. 결론

◎ 광섬유 센서의 적용

광섬유 FBG 센서를 금속재료 라이너 위에 부착하여 변형률을 측정하였다.

- 외부에 부착된 스트레인 게이지 센서와 경향은 비슷하였고, 부착위치 등에 따라서 절대값은 차이가 있었다.
- 광섬유 센서의 경우 구조물 내부에 삽입하면 낮은 변형률에서도 peak가 일그러지거나 센서부위의 파손으로 인하여 정확한 측정이 불가능한 경우가 있다. 주변 응력상태나 센서에 따라 다르기 때문에 안정된 변형률 측정을 위해서는 리코팅이나 package 처리된 센서를 사용하고, 보다 강건한 신호처리 시스템이 요구된다.
- $3000\mu\epsilon$ 이하에서는 반복, 인증 시험에서 변형률 신호를 잘 측정할 수 있었다.
- $7500\mu\epsilon$ 부근에서 광섬유 센서가 완전히 파손되어 변형률 측정이 불가능하였으며 해압 후에도 센서의 기능을 회복하지 못하였다.

참고문헌

- (1) 강현규, 박재성, 김철용, 강동훈, 홍창선, 김천곤, “필라멘트 와인딩된 복합재 탱크의 거동해석과 변형률 측정 II. 광섬유 센서를 이용한 변형률 측정”, 한국항공우주학회지, 29권, 8호, 2001.
- (2) 강동훈, 김대현, 홍창선, 김천곤, “광섬유 브래그 격자의 내부 변형률 구배로 인한 신호 특성”, 한국복합재료학회지, 15권, 4호, 2002.