

論文

복합재료 산소 압력용기의 성형 및 내압 시험

황병선^{**,}, 김병하^{*}, 김병선^{*}, 박승범^{*}, 엄문광^{*}

Processing and Pressure Test of Filament Wound Composite Pressure Vessels for Oxygen Tanks

B. S. Hwang^{**,}, B. H. Kim^{*}, B. S. Kim^{*}, S. B. Park^{*}, M. K. Um^{*}

ABSTRACT

A research was performed to develop composite pressure vessels in conjunction with design, fabrication, and test. Fiber pattern and angles were decided by CADCIL software and they were [liner/15°/15°/90°/18°/90°/21°/21°/90°]. Fabrication of bottles were done by 5-axis filament winding machine. During fabrication fiber optic sensors were embedded to measure the strain at points when internal pressure was applied by water pump. Conventional strain gage instrumentation showed the stable test results. The test results were compared to finite element analysis results and they were close each other in strain values. One can see the successful design and fabrication of single boss composite vessels.

초 록

복합재료 압력용기를 개발하기 위하여 설계, 제작, 시험을 연계한 연구가 수행되었다. 섬유의 와인딩 패턴 및 각도는 CADCIL 코드를 활용하여 결정하였고, 그 각도는 [liner/15°/15°/90°/18°/90°/21°/21°/90°] 이었다. 압력용기의 제작은 5축 필라멘트 와인딩기를 활용하여 이루어졌다. 제조 공정 중에 광섬유 센서를 매립하여 내부 압력이 가해질 때 각 지점에서 스트레인을 측정하였다. 광섬유가 실험적으로 사용된 반면에 일반적으로 적용하는 스트레인 게이지를 부착하여 안정적인 시험결과를 확보하였다. 가압 시험결과는 유한요소 해석 결과와 비교하였고 그 결과는 유사한 일치를 보여주었다. 이 과정을 통하여 개구부 한계를 지닌 복합재료 압력용기의 설계, 제작 및 시험평가가 성공적으로 이루어져 제조기술의 확보가 가능하였다.

1. 서 론

복합재 구조물은 물성이 방향성을 갖고 있기 때문에 기존의 금속이나 플라스틱 같은 등방성 재료로 만든 구조물에 적용되는 원리를 그대로 설계에 적용하기는 곤란하므로 복잡한 응력해석 및 설계 기술 그리고 경제성 있는 성형기

술을 필요로 한다. 특히 필라멘트 와인딩 압력용기(filament wound pressure vessel)는 세계적으로 복합재료 부품 제조 회사들이 항공기, 미사일, 인공위성 및 수중 장비 등에 사용하기 위해서 생산하고 있고[1-2], 이에 비교하여 국내에서는 군사, 우주, 항공용으로 필요성에 의하여 개발하는 중간 단계[3-5]이나 상업적으로는 기술의 대중화, 신뢰성, 경

*+ 한국기계연구원 재료공정연구부 복합재료그룹, 교신저자(E-mail:hbs@kmail.kimm.ac.kr)

* 한국기계연구원 재료공정연구부 복합재료그룹

제성 문제 등으로 널리 응용되지는 않고 있는 실정이다.

최근 환경문제와 관련하여 국내에서 천연가스 버스의 도입으로 CNG(compressed natural gas)용 가스용기의 경량화와 함께 관심이 모아지고 있다. 본 논문에서는 이러한 까다로운 요구형상을 만족할 수 있는 산소호흡기용 복합재료 용기 제작공정 및 파괴실험을 실시하여 요구치를 만족하는지를 실험하고 압력거동을 스트레인게이지를 이용하여 확인하였다. 또한 광섬유센서(fiber optic sensor)를 활용하여 스트레인 게이지를 복합재료 고압 용기(composite pressure bottle)을 제작할 때 삽입하여 그후 가압에 의한 거동을 감지할 수 있는 기술의 활용 가능성을 확인하고자 하였다. 또한 내압을 받는 압력용기의 거동을 유한요소 해석을 수행하여 결과를 실험치와 비교하여 설계, 제작 공정의 타당성을 확인하였다.

2. 설계 및 구조

복합재료 고압 용기의 내부라이너는 Fig. 1(a)와 같은 형상을 지니고 있으며 aluminum 6061-T6 ($t=2.4\text{mm}$) 소재로 되어있다. 이 기본적인 형상에 따라 filament winding (F/W) 공법을 이용하여 압력용기를 제작하게되며 최종 제품의 규격 및 요구사항은 Table 1과 같다. 용기의 적층 설계를 위하여 CADFIL software[6]를 이용하여 실험에서 이용된 섬유의 winding각도, 적층수, 섬유의 패턴 및 경로 등을 결정하였다. 이 소프트웨어는 일종의 CAD 패키지(package)로써 CNC filament winding기에서 부품 프로그램을 가능하게 하는 것이다. 짧은 시간 내에 사용자가 winding 각도를 어떤 형상 위에 결정하고, 섬유의 경로, 섬유의 량 등을 예측하게 해준다. 맨드릴 위에 요구되는 적층 구조를 예측하게 해주며 일정한 F/W기(machine)의 수치 제어되는 서브 프로그램을 만들게 된다. CADFIL은 메뉴방식으로 운용되며, PC의 Window 및 DOS version에서 작동한다.

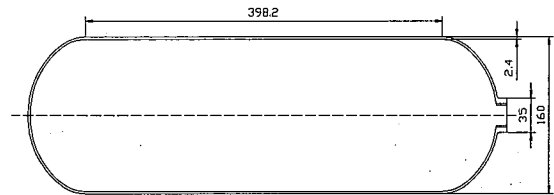
Table 1 복합재료 용기 요구사항

항 목	요구사항
Burst Pressure	62MPa (9,000psi)
Working Pre.	25MPa (3,626psi)
Weight	<4,100g
Type	One boss

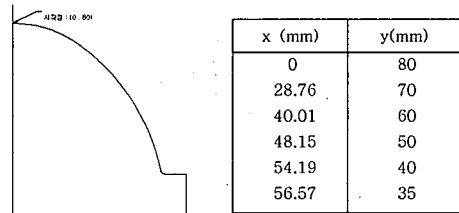
맨드릴 규격: Diameter: 160mm, Length: 398mm, Thick: 2.4t, Boss 35mm

Table 1의 요구사항에 따라 설계된 섬유의 적층 각도는

[liner/15°/15°/90°/18°/90°/21°/21°/90°], 이었다. 이에 상응하는 각 층별 평균두께는 [2.4/0.17/0.69/1.25/0.69/0.9/0.69/0.345/0.9 mm]이다. 돔(dome)의 형상은 boss의 크기(35 mm), 내압, 라이너 재료, 복합재료의 특성 등을 고려하여 계산하였고 계산된 결과는 Fig. 1(b)와 같았다.



(a)



(b)

Fig. 1 복합재료 고압용기 라이너 및 dome 부위 형상.

3. 재료 및 제작공정

용기제작에 사용된 라이너는 실제로 산소호흡기용 복합재료 라이너로 사용되고있는 미국 Structural Composites Industries (SCI) Inc. 제품이다. 이 제품은 aluminum 6061 소재를 T6열처리하여 강도를 향상시킨 것으로 무게가 약 2kg이며 두께는 2.4mm정도이다. 복합재료 적층설계를 위해서 알루미늄 라이너가 갖는 내압강도 시험을 실시하였다. 라이너는 내압 9.10MPa에서 알루미늄의 최대연신을 포인트가 나타남을 확인하고 이를 기준으로 복합재료 winding 적층 구조를 설계하였다. 일반적으로 winding구조물은 축대칭 구조를 갖는다. 그러나 본 연구에 사용된 상업용 산소호흡기는 일반적인 압력용기와 다르게 한쪽에만 고압가스 출입구가 있는 단일개구부(one boss type) 형상을 갖고 있다. 이 형상도 축대칭 구조라고 말할 수 있지만 좌우대칭 아니고 용기의 한 방향에 개구부가 없기 때문에 winding시 helical fiber가 돔 부위를 감을 때 최단거리인 원의 중심을 지나야 하므로 계산된 정확한 경로를 지나지 않

으면 섬유유 미끄러짐이 발생하기 쉽다. 이를 고려해서 결정된 공정변수는 Table 2에 요약하였다.

사용된 섬유 보강재는 T700 등급(grade) 탄소섬유로써 12K(12,000 mono-filament, T800HB 12K 40B Start (g) = 714 End(g)) 규격이었다. 기지 재료는 에폭시계 수지로써 Ciba-Geigy사의 MY 750/HY917 /DY070수지이며, 비교적 고온용이다.

Table 2 계산된 공정변수의 요약

Wind No.	Angle	Fiber pitch	Mandrel Dia.	Thick	Layer No.	Fiber Wt.	Banc No.	Circuits
BHRT15A	15.0	2.15	162	0.69	0.25	48.85	44	58
BHRT15	15.0	4.29	162.35	0.69	1	195.81	28	115
BHRT15	90.0	5.93	163.73	0.25	5	302.66		
BHRT90	18.0	4.29	166.23	0.69	1	200.49	19	112
BHRT18	90.0	6.58	167.61	0.225	4	222.72		
BHRT90	21.0	4.29	169.41	0.69	1	204.33	31	112
BHRT90	21.0	4.29	170.79	0.69	0.5	103.00	17	56
BHRT21	90.0	6.58	171.48	0.225	4	227.87		
BHRT21A								
BHRT90								

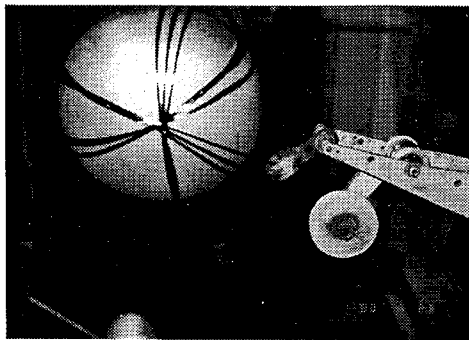
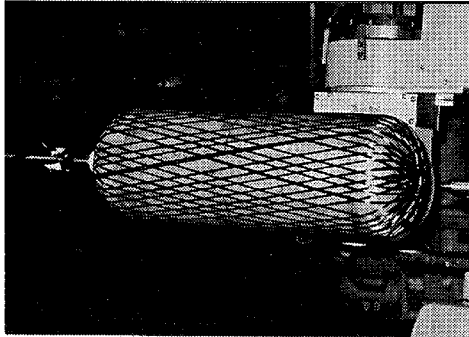


Fig. 2 복합재료 압력용기 winding장면.

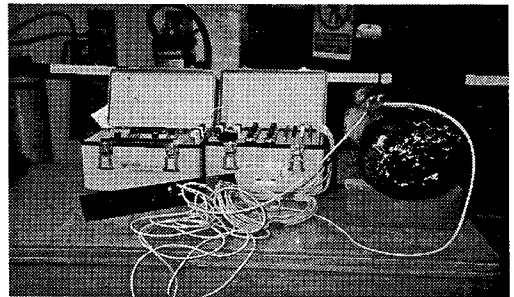
3액형의 재료로써 경화제 및 촉진제를 (100/87/0.5)의 비율로 혼합하여 사용하였다. 알루미늄계의 liner를 사용하기 때문에 수지와의 접착성을 향상시키기 위하여 프라이머 (Hysol EA930)를 미리 도포하였는데 Hysol EA930 제품을 사용하였다. 압력용기의 경화는 상온에서 2시간, 100도에서 4시간, 160도에서 4시간 동안 경화용 오븐에서 계속 회전시키면서 진행시켰다.

본 연구에서는 5축 filament winding장치를 이용하여 Fig. 2와 같이 실험용으로 KIM01, KIM02 시험편 용기 2개 및 광섬유를 삽입한 용기를 제작하였다.

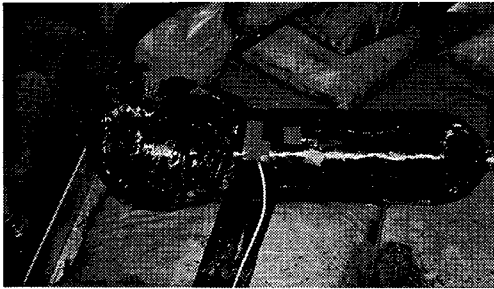
4. 스트레인 측정

제조된 압력용기의 성능시험으로 수압을 이용한 내압시험이 가장 중요하다. 내부압력에 의하여 변형되는 정도를 측정하기 위하여 제작된 압력용기 표면 위에 양방향 스트레인 게이지(biaxial strain gauge)를 접착하고 Fig. 3(a)와 같이 스트레인 값을 받을 수 있는 장치를 구성하였다. 스트레인 값을 읽기 위해서는 portable strain indicator system (Vishay, Micromerement)을 사용하였다. 표준시편(reference piece)이 그림에서 보이며, 4 채널(channel)을 선택적으로 읽을 수 있었다. KIM01은 가압파괴 시험(burst test)을 실시하여 스트레인 거동을 측정하고 파괴 모드(mode)를 확인하였다. KIM02는 확인시험(proof test)용으로 용기표면에 스트레인 게이지를 부착하고 사용압력(working pressure)내에서 압력 거동에 의한 스트레인 값의 변화를 측정하였다.

이와 함께 최근 복합재료 분야의 측정기술분야로써 활용되기 시작한 광섬유를 이용한 방법을 동시에 시도하였다. 와인딩 및 경화과정을 거친 용기의 내압을 측정할 때 발생하는 변형을 fiber optic sensor를 이용한 실험은 장치의 신뢰성(reliability)의 확인용으로 아직 개발단계에 있는 기술이다.

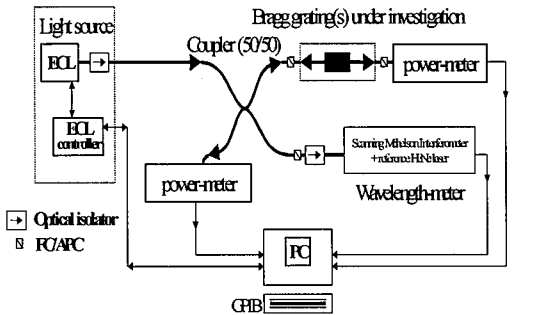


(a)



(b)

Fig. 3 복합재료 고압용기 가압 준비 및 파괴.

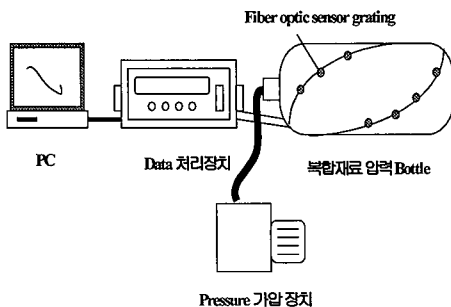


ECL : External Cavity Laser

FC/APC : Fiber Connector/Angled Physical Contact

GPB : General Purpose Interface Bus

(a)



(b)

Fig. 4 Fiber optic sensor 감지구조 및 장치 구성 개략도.

따라서 본 실험에서는 센서를 복합재료 filament winding 구조물에 삽입(embedding) 시키는 기술 및 전체시스템을 구성하고 데이터(data)를 얻는 방법 등에 관한 실험을 실시하였고 측정치를 스트레인 게이지 결과와 비교하였다.

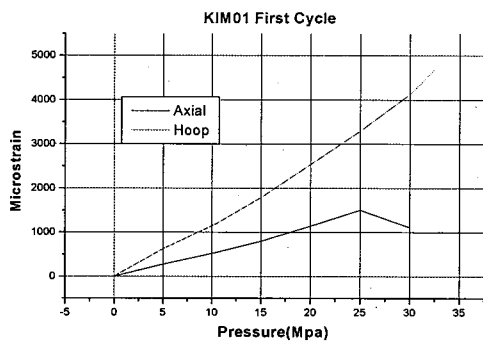
광섬유 센서를 섬유의 helical winding 방향과 일치된 섬유배열 방향으로 삽입시키고 고압 용기내부에 압력을 가하여 센서의 거동으로부터 스트레인을 감지하여 재료의 변화를 실험하였다. 이 센서의 장점은 미세한 하나의 케이블에 다수개의 센서가 연결되어 성형과정에서 삽입이 가능하며 성형 후 제품과 동일하게 거동하며 각각의 부위에 대한 재료의 특성변화를 감지하는 것이다. 감지되는 지점을 grating 하고 센서 및 측정부의 구성도는 Fig. 4(a)에 나타내었다. Fig. 4(b)에 장치구성 개략도 및 winding각도를 나타내었다.

5. 결과 및 고찰

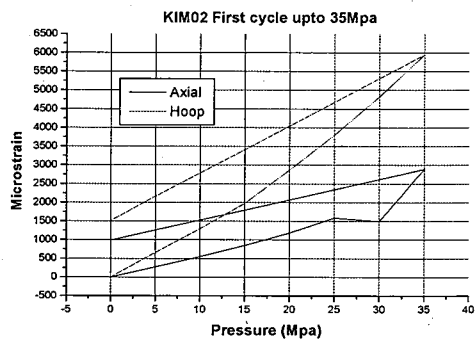
5.1 가압시험 결과

KIM01 샘플에 대한 1차 가압(first cycle)의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 축방향(axial) 및 원주방향(hoop)으로의 스트레인 측정치를 기록하였다. 이론적으로 압력용기에서 원주방향으로 축 방향의 약 1/2 배의 압력을 받는 것을 실험적으로 확인 할 수 있으며 실험이 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 1단계의 가압시험 후에 최종 파괴점에 이르도록 가압을 하였다. KIM01용기의 파괴시험에서 목표치를 상회하는 85.4MPa (12,380psi)를 나타내었고 파괴 모드는 돔과 실린더가 연결되는 부위에서 전형적인 압력용기 파괴모습을 보였다. 이는 적층(layer)의 각도 및 두께가 비교적 잘 예측되었음을 알려준다. 파괴 시험을 수행할 때 축 방향으로의 스트레인 게이지의 조기 파괴가 발생하였는데 이는 접착 부분이 조기에 떨어져 나갔기 때문이다(Fig. 5(b)). Fig. 3(b)는 KIM01시편의 파괴시험이 끝난 상태이며 이상적인 파괴 모드인 실린더와 돔 연결부 파괴모습을 보여주고 있다.

KIM02용기를 35MPa (5,076psi)까지 가압한 결과 스트레인이 6000 $\mu\epsilon$ 정도이며, 25MPa (3,626psi)에서 5분간 압력을 유지시킨 후 압력을 감소시켰을 때 정확하게 원래상태로 되돌아오는 것을 Fig. 6에서 확인하였다. 또한 25MPa의 사용압력에서 10회 피로시험을 수행한 결과 4800 $\mu\epsilon$ 정도로 스트레인이 안정적인 변화를 보이고 있음을 Fig. 7을 통하여 확인하였다.

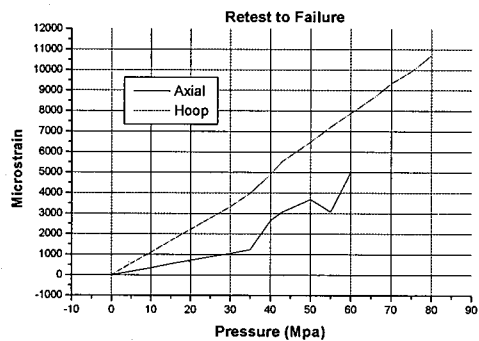


(a)



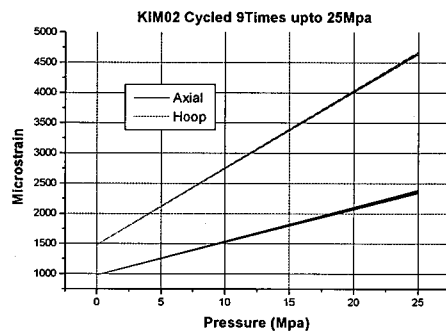
(b)

Fig. 6 KIM02 용기의 사용압력에서의 거동 확인.

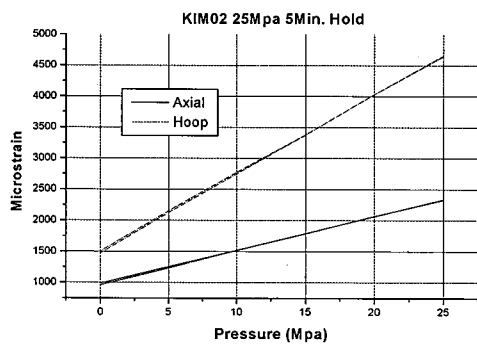


(b)

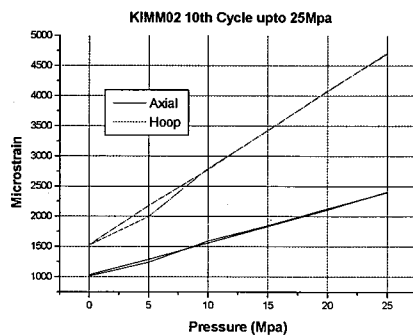
Fig. 5 KIM01 시편의 strain 측정 결과.



(a)



(a)



(b)

Fig. 7 KIM02 25Mpa (3,626psi) strain의 반복 측정 결과.

5.2 유한요소 해석 비교

내압을 받는 복합재료 압력용기의 거동을 살펴보기 위하여 유한요소해석을 행하여 내압시험에 의한 결과와 비교 검토하였다. 유한요소해석은 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS V5.5를 사용하여 유한요소해석을 행하였다. 필라멘트 와인딩에 의하여 섬유가 다수의 일정한 방향으로 보강된 압력용기를 모델링하기 위하여 적층복합재 요소인 SHELL 99 Layer Shell Element를 사용하였다. 압력용기의 축방향으로 20개, 원주방향으로 9° 간격으로 요소를 분할하였다. 압력용기의 내압시험과 해석조건을 일치시키기 위하여 용기의 내면에 Fig. 8과 같이 균일한 압력을 부여하였다.

해석은 KIM01과 KIM02의 두 가지 압력용기에 대하여 해석하였으며, 내압시험에서 측정된 변형률과 비교하였다. 두 용기는 제작과정에서 주어진 각도의 와인딩 작업이 끝나면서 두께를 측정하였고 약간씩 다른 두께를 지니면서 만들어졌다. 이 내용을 반영하여 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

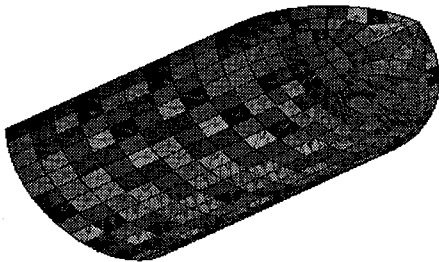
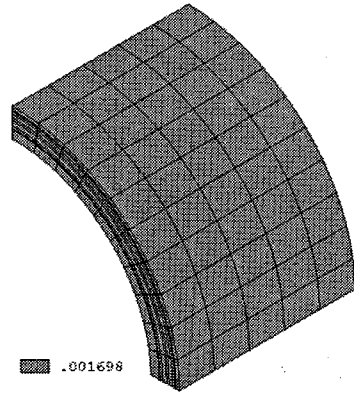


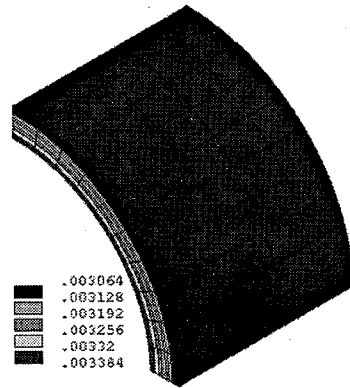
Fig. 8 압력용기의 내압 경계조건.

내압 25 MPa이 작용할 때의 KIM01 압력용기에 발생하는 축방향과 원주방향의 변형률의 크기는 Fig. 9에 각각 나타내었다. 축방향의 변형률은 용기의 두께에 관계없이 균일한 1698 $\mu\epsilon$ 이 발생하였으며, 이는 내압시험에서 측정된 1500 $\mu\epsilon$ 에 비하여 약 13 %의 차이를 보인다. 원주방향의 변형률은 그림과 같이 와인딩각도에 따라 서로 다른 크기의 변형률이 발생하며 90°의 각도로 와인딩되어 있는 표면에서는 3064 $\mu\epsilon$ 이 발생하였다. 이는 내압시험에서 측정된 3300 $\mu\epsilon$ 과 7 %의 차이를 보인다.

KIM02 압력용기의 내면에 내압 25 MPa이 작용할 때 축방향과 원주방향으로 발생하는 변형률은 Fig. 9와 유사한



(a) 축방향 변형률



(b) 원주방향 변형률

Fig. 9 내압 25 MPa을 받는 KIM01 압력용기의 변형률성분.

결과를 나타내었다. 축방향의 변형률은 균일한 1638 MPa이 발생하였으며, 이는 내압시험에서 측정된 1615 $\mu\epsilon$ 과 거의 일치한다. 원주방향의 변형률은 와인딩각도에 따라 서로 다르며 용기의 표면에서의 변형률값은 3429 $\mu\epsilon$ 으로 내압시험에서의 측정값 3775 $\mu\epsilon$ 과 약 9 %의 차이를 보인다.

복합재료 압력용기에 작용하는 내압의 크기가 증가할수록 재료의 비선형이 크게 나타나기 때문에 해석결과와 시험결과와의 차이가 크게 나타나지만, 재료의 선형성이 유지되는 작은 내압의 범위에서는 전체적으로 유한요소해석에 의하여 구한 변형률 값은 내압시험에서 측정된 변형률 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

KIM01 압력용기의 내압시험에서 파괴가 발생하는 85.4 MPa의 압력을 작용시켰을 때 유한요소해석을 행하여 발생하는 응력 가운데 각각의 와인딩각도에 대하여 섬유 방향의 응력값을 계산하여 Table 3에 나타내었다.

양단이 막혀있는 원통용기에 내압이 작용하는 경우에 원주방향으로 작용하는 응력은 축방향으로 작용하는 응력의 2 배가 되는데, 섬유가 원주방향으로 배열되어 있는 90° 각도로 와인딩된 부분에서는 다른 각도의 와인딩에 비하여 매우 높은 응력이 발생하였다. 섬유방향의 응력은 1246 MPa, 1247 MPa, 그리고 1275 MPa가 발생하는데, 이 응력 값은 재료의 섬유방향 인장강도 2451 MPa에 비하여 약 1/2의 값이므로 충분히 안전하다고 할 수 있다.

그러나 용기의 내면에 위치하고 있는 알루미늄 라이너에 발생하는 최대 주응력이 1071 MPa의 크기로 발생하는 데 이 값은 알루미늄 재료의 항복강도 276 MPa보다 약 3.9배 높다. 따라서 85.4 MPa의 내압에 의하여 복합재 부분의 파괴가 발생하기 이전에 알루미늄 라이너가 항복점에 먼저 도달하여 압력용기의 파괴 원인이 될 것으로 예상된다.

Table 3 KIM01의 파괴압력(85.4 MPa) 작용시 주응력

Wind No.	Principal Stress
Liner	1071 MPa
BHRT15A	1246 MPa
BHRT15	570 MPa
BHRT90	1299 MPa
BHRT18	548 MPa
BHRT90	1275 MPa
BHRT21	530 MPa
BHRT21A	528 MPa
BHRT90	1247 MPa

5.3 광섬유센서 측정 결과

광섬유를 삽입하여 제조된 압력용기에 Fig. 4와 같은 장치의 구성을 통한 실험 결과 광섬유 센서의 측정치에서는 800 $\mu\epsilon$ 이하의 값에서는 Fig. 10과 같은 데이터를 얻었고 이것은 기존 스트레인게이지에서 얻을 수 있는 값과 유사한 측정치임을 확인하였다. 그러나 800 $\mu\epsilon$ 이상에서 고압용기의 boss 부위의 압력 누출로 인하여 고압에서의 실험 데이터를 확인할 수는 없었다. 광섬유는 21° 층에 함께 삽입되었고 그레이팅(grating)은 30 mm간격으로 이루어져 압력용

기의 중앙부, 중간부, 돔부위에서의 스트레인 변화를 측정하였다. 특히 5 MPa에서의 압력 사이클이 Fig. 10에 표현되었다. 약 5분 간격으로 추가 5 MPa의 가압 및 강압의 결과 중앙부에서의 스트레인 값이 520 - 615 $\mu\epsilon$ 이었다. 이 값은 같은 압력하에서 hoop 방향의 스트레인에서 재료방향으로의 변환된 스트레인값인 835 $\mu\epsilon$ 보다는 다소 낮은 값이다. 하지만, 중간부 및 돔부위에서의 비교는 이루어지지 않았고 중앙부의 위치에서의 스트레인 값과의 비교에서 낮은 값을 보임으로써 실험적으로 큰 무리가 없음을 보이고 있다. 따라서 광섬유 센서의 삽입 방안, 가압 방법 등에서 연구가 필요하나 복합재료 고압용기에 광섬유 센서 삽입(fiber optic sensor embedding)기술, 실험장치의 구성(set-up) 등 이번 실험을 통하여 복합재료 압력용기에 광섬유 센서의 활용 가능성을 확인하였다.

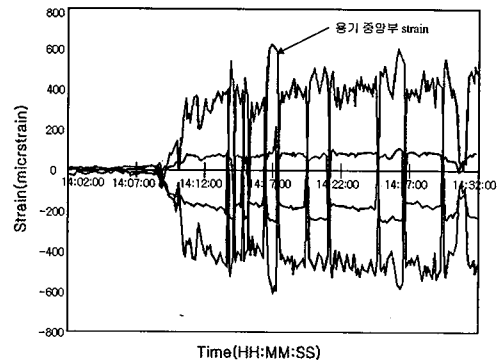


Fig. 10 Fiber optic sensor data.

6. 요약 및 결론

단일 개구부를 가지는 Filament wound 압력용기의 설계, 제작, 시험을 통하여 선정된 요구사항에 만족하는 압력용기를 성형하고 시험하는 방안을 확보하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1) CADFIL 및 5축 F/W기를 활용하여 요구 압력에 만족하는 섬유패턴 및 각도인[liner/15°/15°/90°/18°/90°/21°/21°/90°], 배열을 얻었다. 이에 따라 제조된 용기의 압력 시험 결과와 유한 요소 해석 비교는 근접한 결과를 보여주었다.
- 2) 광섬유 FBG sensor array의 F/W 용기에 활용 시도를 한 결과 만족스러운 결과는 얻지 못했으나 용기 구조물의 거동 측정의 가능성을 발견하였다.

3) 라이너 재료 및 섬유 배열에 의한 용기의 제작후 가압 시험 결과 휴대용 산소 용기의 요구 사항인 무게 및 압력 조건에 만족하는 결과는 KIM01 시편의 경우 라이너 무게 2,076g, 최종 제품 무게 4,266g 이었고, KIM02의 경우에는 각각 2,074g 및 4,045g으로 요구무게인 4,100g에 근접하였다. 파괴압력은 KIM01 시편의 경우 85.4MPa로써 요구압력인 62 MPa보다 약 38% 높게 나타났다. 따라서 본 실험 및 확인 과정을 통하여 현재 상용 산소 호흡기의 요구 사항을 만족하는 제품제작 방법을 개발하였고 특히 한쪽만 개방된 압력용기의 제작은 국내에서 시도된 적이 없는 어려운 제작 방안으로써 추후 국내 기술에 접목을 통하여 상업화에 활용해 볼 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 국제공동연구 사업 및 국가지정연구실 사업에 의하여 지원을 받았으며 과학기술부와 공동참여기관 AEA Technology plc. 에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) J. B. Carrigan, L. W. Smith, N. J. H. Holroyd, E. E. Morris, "CNG Fuel Container Systems for Maximum Payload Space and Vehicle Range," *SAMPE Journal*, Vol. 36, No. 6, Nov./Dec. 2000, pp. 26-33.
- 2) E. E. Morris, L. W. Smith, J. Ko, "New Generation Carbon Filament-Wound Composite Cylinders for Self-Contained Breathing Apparatus," *Proceedings of the 44th SAMPE Symposium and Exhibition*, 23-27 May 1999, Long Beach, CA.
- 3) 권진희, 주상건, 홍창선, 윤성호, 조원만, "원공이 존재하는 비축대칭 필라멘트 와인딩 압력용기의 응력해석," *한국복합재료학회 학회지*, Vol. 5, No.2. 1992, pp. 53-65.
- 4) 하성규, 이동건, 금속라이너-복합재 적층 압력용기의 최적 설계, *한국재료학회 학회지*, Vol. 10, No.1, 1997, pp. 1-11.
- 5) 황태경, 정현조, 정상기, 정발, 강병윤, 김종식, "필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 파열압력 향상에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, Vol. 8, No.3, 1995, pp. 84-93.
- 6) CADFIL Manual Ver 6.0, Crescent Consultants Ltd, Springfield Kegworth, Derby DE74 2DP, England.