

KSR-III 복합재 가압탱크의 설계 및 제작

공철원*, 윤종훈**, 장영순***, 이영무****

Design and Fabrication of KSR-III Composite Pressure Tank

Cheol-Won Kong*, Chong-Hoon Yoon**, Young-Soon Jang***, and Yeong-Moo Yi****

Abstract

This paper described the structural design and the fabrication procedure of KSR-III composite pressure tank. The type of the composite pressure tank was COPV (Composite Overwrapped Pressure Vessel). A non-load sharing liner was made of aluminum 6061-0 and the liner provided a helium gas seal. The composite pressure tank was wound using T700 carbon/epoxy on the liner. Because the aluminum liner was thin, multiple cure cycles were applied to the filament winding technique. The multiple cure cycles prevented the liner-cylinder from losing a circular shape. A fitting force at the metallic boss was spread to the carbon fiber by a boss ring. The boss ring also prevented a local deformation at the boss part.

초 록

본 논문에서는 “KSR-III 복합재 가압탱크”에 대한 구조 설계/제작 과정을 기술하였다. 복합재 가압탱크는 라이너 위에 복합재가 덮여 씌워진 형태이다. 하중을 부담하지 않는 라이너는 Al 6061-0로 만들어 졌으며, 라이너는 헬륨가스 기밀만을 담당하였다. 복합재 탱크는 라이너 위에 T700/Epoxy로 와인딩 하였다. 알루미늄 라이너가 얇았기 때문에 다단계 경화 공정이 필라멘트 와인딩 기법에 적용되었다. 다단계 경화 공정은 라이너의 실린더가 원형 형상을 잃지 않게 하였다. 보스부의 체결력은 보스링에 의하여 카본섬유로 분산되었다. 또한 보스링은 보스부의 국부적 변형을 막았다.

키워드 : 라이너(liner), 필라멘트 와인딩(filament winding), 압력 탱크(pressure tank), 하중지지 없는 라이너(non-load sharing liner), 보스(boss)

1. 서 론

KSR-III 추진제 탱크의 가압은 복합재 가압탱

크가 담당하였다. 복합재 탱크의 형태는 라이너의 하중 분담율에 따라 나누어 질수 있는데, 가압탱크의 경우 복합재가 100 %의 내압을 지지하

* 구조그룹/kcw@kari.re.kr

*** 구조그룹/ysjang@kari.re.kr

** 구조그룹/yjh@kari.re.kr

**** 우주발사체기술실/ymy@kari.re.kr

고 라이너는 기밀만을 담당하였다. 가압탱크와 같이 복합재가 내압의 100 %를 담당하는 형태에 사용된 라이너는 하중을 분담하지 않는 라이너(non-load sharing liner)라고 한다. Non-load sharing liner의 경우 제작성과 반복사용 횟수 등을 추가적으로 고려해야 하는 점이 있는데, 이러한 non-load sharing liner에 대한 문헌은 제한적이다. Gary [1]등은 pure titanium 소재의 라이너를 완전폴립처리한 후 복합재를 라이너 위에 와인딩 하였다. Vicker [2]등은 얇은 알루미늄 라이너로 두께 2.032 mm를 추천하였다. 하중 분담 라이너(load sharing liner)는 복합재가 내압의 50 %만 부담하는 형태와 복합재가 내압의 20-50 %를 부담하는 형태로 나눌 수 있다. 대부분의 문헌은 이러한 형태의 라이너와 복합재 탱크에 대하여 보고하고 있다. George [3]등은 Ti-6Al-4V 라이너를 hot forming 방법으로 반구를 만든 후 용접하였는데 Ti 라이너는 전체 내압의 26 %를 담당하였다. Veys [4]등은 하중 분담율 7-12 %의 알루미늄 라이너를 사용한 복합재 탱크를 제작하였다.

발사체에 적용되는 고압탱크의 leak나 파손은 발사 실패로 이어진다. 금속재 탱크는 순간적인 파손이 발생하며 복합재 탱크는 leak-before-burst의 파손형태를 보인다. Henry [5]등은 Delta-IV에 적용된 복합재 탱크를 설명하면서, titanium 압력탱크의 파손으로 인한 Saturn SIV-B 발사 실패와 복합재 탱크의 leak에 의한 Proton 발사 연기를 소개하였다. 이때 복합재 탱크는 Al 6061-T6 라이너를 사용하였다.

복합재 와인딩에 사용되는 라이너의 소재로는 steel, 알루미늄, 티타늄, 폴리에틸렌 등이 있다. 가압탱크의 라이너는 용접형태의 알루미늄으로 제작되었는데, non-load sharing liner는 load sharing liner와 달리 파단 연신율을 크게 할수록 유리하기 때문에 완전폴립 처리하였다. 가압탱크는 Al 6061-0 라이너 위에 복합재를 와인딩하는 방법으로 제작되었는데 라이너는 2개의 돔과 1개의 실린더를 제작한 후 용접하였다. 이 라이너 위에 T700/Epoxy 복합재를 와인딩하였으며 이때와인딩 방법은 prepreg winding으로 진공 성형하였다.

2. 본 론

2.1 설계요구사항

KSR-III 복합재 가압탱크의 MEOP (Maximum Expected Operation Pressure)는 4500 psi 였으며 부피는 0.55 m³ 이었다. 헬륨기체를 저장하며 이때 leak 수준은 2x10⁻³ ml/sec 이하를 규격으로 설정하였다. 탱크 내부의 clean 조건은 20 micron 이하였으며 건조 조건은 이슬점 -30 td C이하를 허용하였다. 내부 헬륨이 모두 배출되는 60초 이후에는 내부 온도가 극저온 영역으로 하강함을 고려하였다. 타 구조물과의 체결은 알루미늄 외피부와 복합재 탱크의 스커트를 볼트 체결하며, 체결부위는 KSR-III가 비행 중 받는 구조하중을 고려하였다. 설계 결과 스커트 체결요소 포함하여 가압탱크의 무게는 200 kg으로 제작 되었다.

이때 라이너 실린더부 외경은 920.5 mm, 두께는 3 mm 였다.

2.2 복합재 두께 계산

복합재 압력용기의 모든 내압은 카본섬유가 담당한다는 가정하에 두께를 계산하면 식 (1), 식 (2), 그리고 식 (3)과 같다.

$$t = \frac{3PD}{4S} \quad (1)$$

$$t_{hoop} = \frac{\frac{2}{3} - \sin^2 \theta}{1 - \sin^2 \theta} \times t \quad (2)$$

$$t_{helical} = t - t_{hoop} \quad (3)$$

P : 과압

D : 실린더 직경

S : 복합재료 섬유방향 강도

θ : 와인딩 각도

t : 총 두께

t_{hoop} : 후프층 두께

$t_{helical}$: 헬리컬층 두께

위 식에서 와인딩 각도인 θ 는 22°로 가정하였

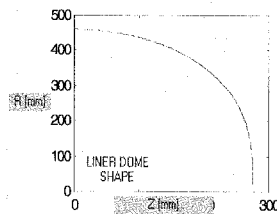
다. 그리고 파압은 작동압력의 2배로 설정하였으며 S는 그림 1과 같은 NOL 링 시험으로 얻은 값을 사용 하였는데 T800/epoxy의 경우 2690 Mpa였다. 그런데 그림 2와 같은 ASTM D3039의 인장시험 결과는 2442 MPa이며 파단 변형률은 1.2 % 였다. 위 식의 계산 결과, 제조공정 그리고 체결부 두께를 고려하여 실린더 부의 복합재 두께를 30 mm로 결정하였다. 30 mm의 두께에는 축방향 하중을 담당하는 스킨트 두께와 초기 라이너 레벨링 두께가 포함되어 있다.

실제 KSR-III 비행시험용 및 비행시험 인증을 위한 시험에는 T800/epoxy와 유사한 T700/epoxy 소재를 사용하였다. 초기 설계에서는 탱크의 형상과 무게를 그림 3과 같은 프로그램[6]으로 개념설계를 하였다 이때 돔은 등장력 돔 형상을 고려하였다.

COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL(ver 1)

DESIGN PARAMETER	
TOTAL VOLUME(m ³)	0.95
MEQ(Ring)	4500
CYLINDER RADIUS(mm)	460.25
BOSS RADIUS(mm)	20
SAFETY FACTOR	2.385
WINDING ANGLE(°/25°)	20
T800/EPOXY	1
LINEAR(1/1)-GST-3	1
LINER THICK(mm)	2
2nd SKIRT THICK(mm)	3

DESIGN RESULTS	
APPLY	
TOTAL WEIGHT(kg)	163.0946
COMPOSITE WEIGHT(kg)	126.753
LINER WEIGHT(kg)	43.5238
SKIRT WEIGHT(kg)	12.4178
TANK LENGTH(mm)	980.1232
DOMELINELENGTH	276.0518
CYLINDER LENGTH(mm)	428.0255



APPLY	
TNT(kg)	8.651
EXPLOSION LENGTH(mm)	489.2102
OVER PRESSURE(mm)	20.5205
EFFICIENCY(1/10 ³ in)	0.88239
COMPOSITE THICK(mm)	30.4783
HOOP THICK(mm)	18.973

그림 3. 복합재 탱크의 두께 및 무게 계산



그림 1. NOL 링 시험시험

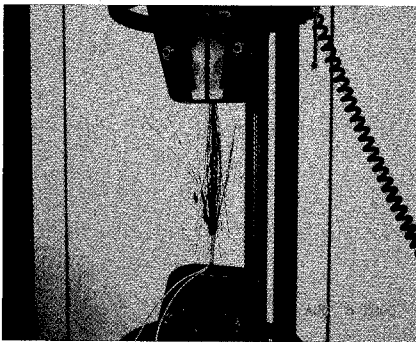


그림 2. 인장 시험

2.3 보스 설계

2.2 절에서와 같이 돔 형상, 두께 그리고 무게를 계산한 후 상세한 해석은 상용 유한요소 코드를 이용한 비선형해석을 수행하였다. 해석의 주된 관심은 보스부의 변형과 실린더의 최대 변형률이었다. 그림 4는 제작 완성된 라이너로 상하 두개의 돔과 중앙 실린더가 용접되어 있다. 보스부에는 용접부가 없으며 보스설계에 따라 SUS 링이 조립되어 있다. 그림 5는 보스 설계의 개념도로 알루미늄 라이너위에 SUS 링이 조립되어 있다. 가압탱크는 대용량 고압탱크이기 때문에 보스부의 국부적인 변형이 크며 NPT 체결력이 크게 요구된다. 특히 non-load sharing liner의 특성상 나사선의 강도를 올리는데 한계가 있다. 그리고 용접이 없는 보스부의 와인딩을 위하여 보스부의 길이방향 공간이 필요하였다. 이러한 부분을 해결하기 위하여 adapter를 통하여 boss ring으로 체결력을 전달하면, boss ring은 카본섬유로 체결력을 분산하였다. 그 결과 boss ring은 와인딩의 길이 방향 공간을 제공하고 국부적 변형을 막는 역할을 하였다. A 부분의 초기개념 설계에서는 후프 와인딩만을 하였는데 설계 변경에

따라 헬리컬 와인딩을 도입하고 UD를 보강하였으며, 또한 보스링의 라운드 형상을 바꾸었다. 그 결과 축방향 변위를 줄일 수 있었는데 내용은 다음과 같다.

그림 6은 변위를 측정된 부분이며, 표 1은 6000 psi에서 변위의 유한요소 해석과 시험 결과를 나타낸다. 실린더 중앙에서 변위계이기로 측정된 시험 값은 3.3 mm 이고 해석에서는 5.2 mm 였다. 그리고 보스부의 축방향 변위는 NPT 체결부에 가까운 보스링에서 측정하였는데 시험 값은 14.3 mm이고 해석에서는 9.9 mm를 얻었다. 시험과 해석의 보스부 축방향 변위차이는 해석에서 사용된 단순화된 모델이 원인으로 추정된다. 이 결과의 설계수정 방향은 다음과 같다. 과도한 변형은 leak의 가능성이 있고 또한 탱크의 반복 성능에 불리하므로 축방향 변위를 줄이는 설계가 필요하였다.

보스부 헬리컬 와인딩을 도입하는 등의 설계 수정 결과 표 2에서와 같은 결과를 얻었다. CPT-03은 설계 변경 전으로 축방향 변위가 9.8 mm 였는데, CPT-09에서는 2.9 mm로 70 %의 변위가 감소하였다. 단 실린더 변형률과 무게는 같았다.

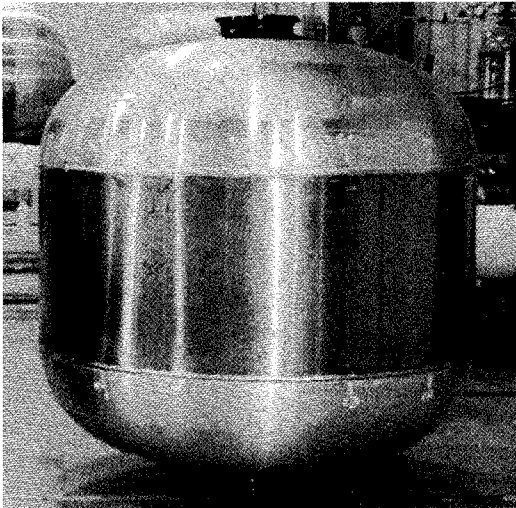


그림 4. 알루미늄 라이너

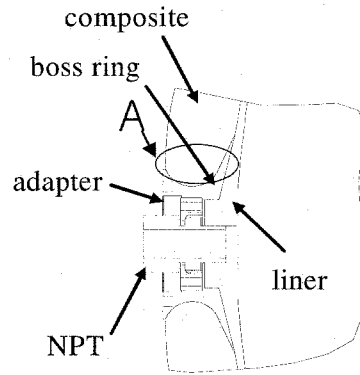


그림 5. 보스부 설계

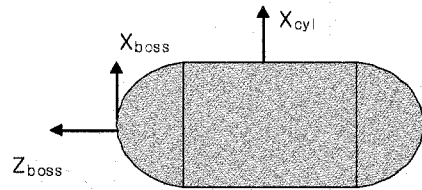


그림 6. 변위 결과의 방향 정의

표 1. 6000 psi에서 변위 비교

Deflection	Analysis [mm]	Experiment [mm]
X_{cyl}	5.2	3.3
Z_{boss}	9.9	14.3
X_{boss}	0.3	-

표 2. 4500 psi에서 시험결과 비교

Tank number	cylinder strain [ue]	Z_{boss} [mm]
CPT-03	6160	9.8
CPT-09	6100	2.9

2.4 복합재 탱크의 제작

알루미늄 라이너는 스피닝 기법으로 제작된 돔과 sheet를 롤링한 실린더를 TIG 용접으로 조합하였다. 그리고 보스팅 부위는 기계적 체결을 하였다. 만약 load sharing liner의 개념으로 라이너를 제작하였다면 열처리를 한 Al 6061-T6 소재로 사용하였을 것이다. 그러나 가압 탱크의 제작 개념은 non-load sharing liner이기 때문에 탱크의 반복 가압마다 라이너의 소성변형이 발생한다. 따라서 라이너의 파단 연신율은 반복 수명에 영향을 주므로 Al 6061은 와인딩 전 완전풀림 처리 하였다.

완성된 라이너는 그림 7과 같이 접착필름을 도포하였다. 접착필름을 도포하는 이유는 탱크에 채워진 압이 빠질 때 라이너의 좌굴을 방지하는 역할을 하며 복합재와 라이너의 접착면에서 발생할 수 있는 부식문제를 해결하기 위해서다.

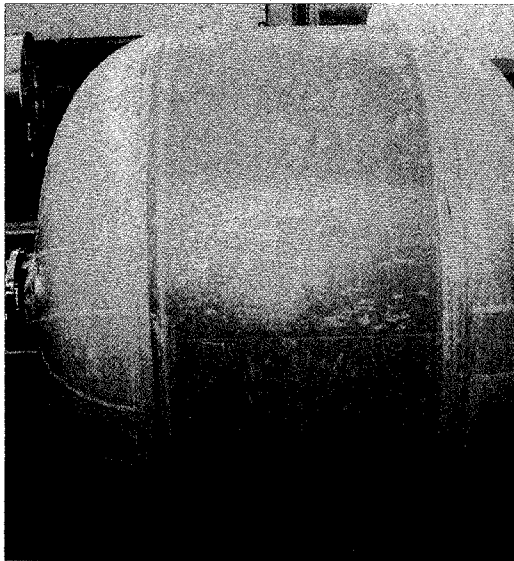


그림 7. 접착필름 도포된 라이너

초기 복합재 탱크는 접착필름이 도포된 라이너 위에 섬유 장력 6 lb로 와인딩한 후 한번의 성형으로 제작하였다. 그 결과 그림 8의 표시된 부위가 성형 후 국부적으로 함몰하는 현상이 발생하였다.

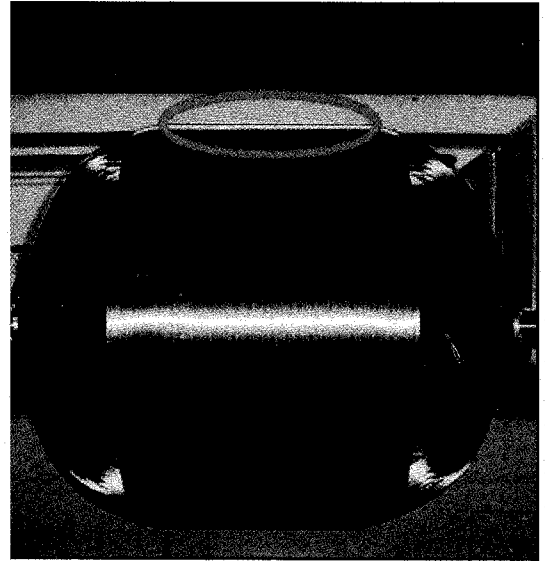


그림 8. 복합재 함몰 부위

이러한 성형 후 함몰현상은 풀림 처리된 라이너 위에 두꺼운 복합재를 와인딩할 때 발생하는 섬유장력과 compaction 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다단계 성형방법을 도입하였다. 라이너에 압을 채우는 방법도 있으나 실제 가압 탱크의 제작 시에는 제작성의 문제로 적용하기 어려웠다. 따라서 경화과정을 4단계로 나누는 방법을 시도하였다. 단계별 와인딩 두께를 계산하기 위하여 와인딩 장력의 영향만을 고려하였다.

섬유의 폭이 2.4 mm, 두께가 0.2 mm, 장력을 6 lb = 2.72 kg인 T로 정의한 힘이 가해질 때 외부에서 가해지는 압력 P는 식 (4)와 같다. t는 와인딩 두께, D는 실린더 외경이다. 이를 가압탱크에 적용하면 식 (5)와 같다. 여기서 t_{hoop} [mm]는 후프 와인딩 두께이며 t_{heli} [mm]는 헬리컬 와인딩 두께이다. 그리고 P [psi]는 외부에서 작용하는 압이며 θ 는 와인딩 각이다.

$$P = \frac{T 2 t}{D} \quad (4)$$

$$P = 16.8 t_{hoop} + 16.8 t_{heli} \sin \theta \quad (5)$$

이때 실린더 길이를 200 mm로 가정하고 알루미늄

늑 라이너의 강성은 10 GPa, 복합재의 강성은 190 GPa로 가정하여 외부 압에 의한 원통 실린더의 P_{cr} 을 구하는 경험적인 해를 계산하였다.[7] 그 결과 초기 2 mm의 후프 와인딩을 할 때 작용하는 외부압력은 17 psi였으며, 성형 후 라이너 합물 임계 압력은 76 psi였다. 계산결과를 기초로 초기 레벨링 장력 2 lb로 낮추었으며 2 mm 이내인 용접부 레벨링을 1차 경화 사이클로 선택하였다. 용접부 레벨링이란 헬리컬 와인딩을 하기 전 실린더 용접부 양쪽 비드와 비드 사이를 후프 와인딩으로 높이를 맞추는 작업으로 본 논문에서는 정의하였다. 이러한 레벨링을 통하여 라이너 실린더의 원형형상을 와인딩 이후에도 유지하는 결과를 얻었다.

2.5 스커트 체결부 설계

복합재 가압탱크부의 스커트와 스커트의 체결을 위한 체결부 사양을 결정하였다. 체결요소로 고려된 직경 0.25 in의 볼트 또는 Hi-Lok 요소를 표 3에서 비교하였다. Hi-Lok은 titanium alloy로 복합재와 친화적인 장점이 있었지만 복합재 탱크의 제작 효율을 고려하여 MS20004 볼트로 선정하였다. Hi-Lok은 영구 체결되는 반면 MS 볼트는 MS21059H의 너트 플레이트가 필요하다. 그림 9는 가압탱크부 스커트와 외피와의 체결부를 보여준다. 볼트의 개수는 외피에 작용하는 최대등가 압축하중인 582 kN과 가압탱크의 최고압인 4500 psi 일 때 예측되는 체결부의 하중인 660 kN의 합력인 1242 kN의 전단력을 견딜 수 있도록 설계하였다. 여기에 safety factor 1.5와 fitting factor 1.25를 고려하면 2334 kN이 된다. 따라서 볼트 한 개가 견딜 수 있는 전단력을 21 kN이라고 보면, 필요한 볼트의 개수는 110개이며 볼트 배열은 한쪽 스커트에 55개씩 2열로 배열하였다.

표 3. 볼트 및 HI-LOK의 사양

	spec.	직경 (in)	인장강도 (ksi)	전단강도 (ksi)	재질
볼트	MS 20004	0.25	160	95	alloy steel
HI-LOK	HL 12V8	0.25	160	95	titanium alloy

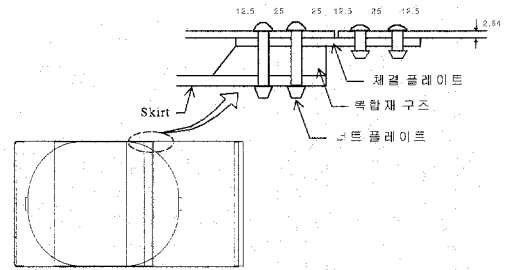


그림 9. 가압탱크 체결부

그림 10이 복합재료 체결부위라고 하면 베어링 파괴 모드가 발생하는 $W/d > 4$, $e/d > 4$ 로 알려져 있다. 또한 양열 배열시 복합재료에서 순수 인장파괴가 발생할 수 있는 S 는 $4d$ 로 알려져 있다. 현재 결정된 볼트의 수와 그림 5의 배치로 이를 검토하면 다음과 같다. $W/d=8.5$, $e/d=3.9$, $S/d=4$ 로 설계기준을 만족한다.

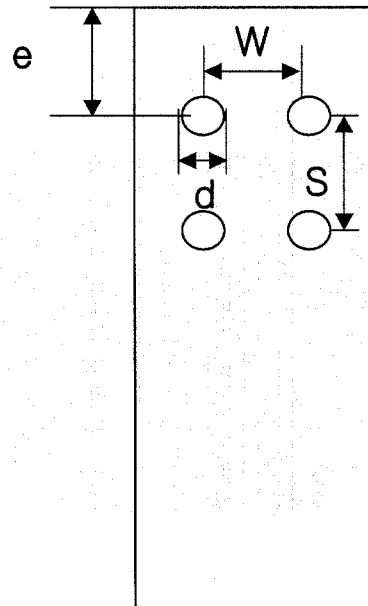


그림 10. 체결 간격

그림 11은 체결부를 시험한 시편이다. 파단 강도는 23 kN으로 홀 주위에 층간분리의 베어링 파손모드를 보였다.

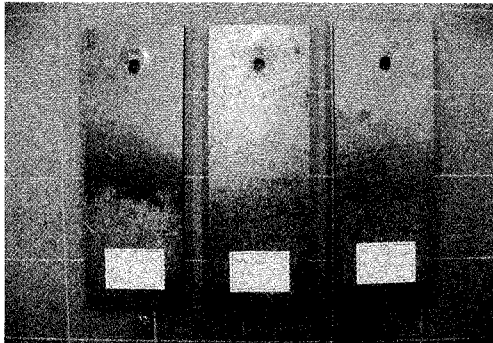


그림 11. 체결 시험

2.6 탱크 내부 세척 및 건조

가압탱크 내부는 알루미늄 세척제인 “메타크린 I” 세척액을 이용하여 유분을 제거 하였으며 질소 퍼지를 통하여 입자를 제거하였다. 입자 제거에는 15 micron mesh를 사용하였으며, 질소 퍼지 이후에는 탱크 내부의 이슬점을 확인한 결과 그림 12와 같이 -59.6 td C로 설계 규격을 만족하였다.

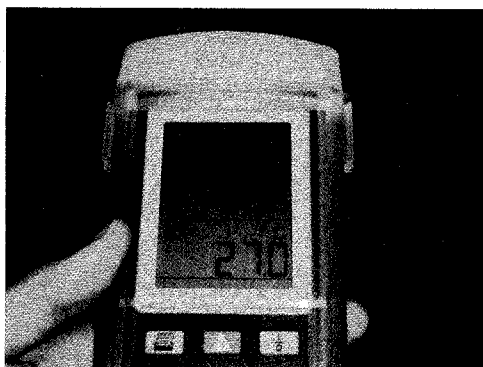


그림 12. 이슬점 온도.

2.7 압력용기 안전거리

$$E = \frac{P_1 V_1}{1-r} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(r-1)/r} - 1 \right] \quad (6)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (7)$$

$$L = 294 W^{0.236} \quad (8)$$

식 (6)은 압축성 기체의 용기가 파열 될 때 방출되는 에너지 식이다. P_1 은 용기의 절대 압력이며 P_2 는 1기압이다. r 는 열 용량비이고 V_1 은 용기의 체적이다. 계산된 에너지 단위 J 에 2.38×10^{10} ton의 TNT 환산계수를 적용하여 TNT 상당 질량을 구한 후 과압을 측정하였다. 식 (7)에서 W [kg] 는 TNT 상당질량이며 R [m]는 폭발물로부터의 반경이며 Z [$m/kg^{1/3}$]은 환산거리이다. 즉 식 (6)과 환산계수를 이용하여 W 를 계산한 후 환산거리와 과압 관계의 도표[7]를 이용하여 과압을 구하였다. 17 kPa (2.5 psi) 이하의 과압에서 인체에는 이상이 없는 것으로 알려져 있다. 식 (8)은 폭발물 파편이 날아가는 최대 수평거리이다. L [m]은 거리이며 W [kg]는 TNT 질량이다. 가압탱크에 적용한 경우는 표 4에 정리하였다. 표 4에서 초기과압은 반경 1 m 이내 에서의 압력이며 R 은 과압 10 KPa이 걸리는 폭발물로부터의 거리이다.

표 4. 과압 및 최소 안전거리

과압 [psi]	체적 [m^3]	사용 기체	TNT [kg]	초기 과압 [kPa]	L [m]	R [m]
9000	0.5511	헬륨	7.26	1000이상	470	20

2.8 탱크 시험

그림 13은 가압탱크의 공압 및 수압시험이 준비된 모습이다. 공압시험은 헬륨 가압장치를 이용하여 MEOP까지 수행하였으며 수압시험은 각각의 목적에 맞게 proof test와 acceptance test를 수행하였다. 그림 14는 proof test에서 파단된 보스부의 모습으로 2.3 절에서 서술한 CPT-03이 가압탱크 외피부와 조립된 상태에서 시험한 것이다. 이러한 파단모드는 보스부의 큰 변형에 원인

이 있으며 2.3절에서 설명하였듯이 설계 변경을 통하여 이를 수정하였다.

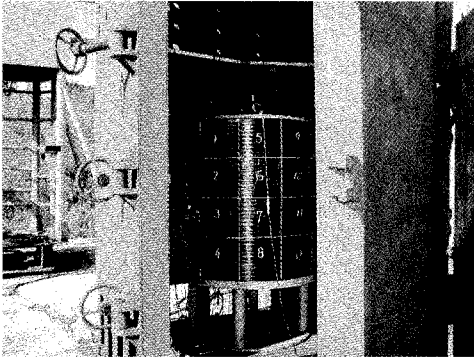
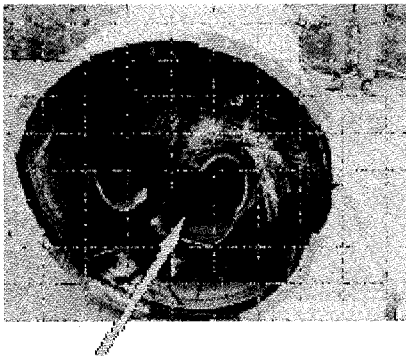


그림 13. 가압탱크 내압시험.

그림 15는 반복시험 시나리오 중 탱크의 zero to MEOP 까지의 반복 시험만의 변형률을 보인 것이다. 아래와 위 돔의 변형률이 다른 것은 변형률 게이지의 위치와 방향이 달랐기 때문이다. 상부 돔에서의 변형률의 증가는 잔류 변형이 남았기 때문으로 추정된다. 이러한 현상의 정확한 파악은 내부 라이너의 변형률 측정이 필요할 것으로 판단되었으나 이는 향후 소형 복합재 탱크 등에서 측정할 필요가 있다. 반복시험은 규격[8]에서 사용회수의 4배를 추천하였으나, 비행용과 동일한 모델의 경우에 반복시험은 총 8배를 수행하였다.



보스부 파단 후 이탈

그림 14. 가압탱크 파단 모습

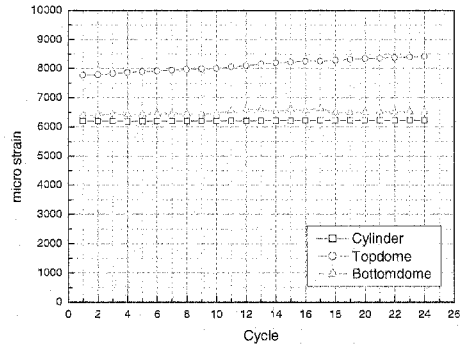


그림 15. 반복사이클과 변형률 변화

그림 16은 실제 KSR-III 비행시험 도중 받은 변형률 데이터로 A 점에서 추진제 탱크 가압과 함께 비행시험을 시작하였으며, 약 60초 후 B점에서 가압탱크 내부의 압력이 모두 빠진 것을 변형률 데이터로 알 수 있다. 변형률 게이지는 탱크 인증시험에서의 동일한 게이지가 비행 시험까지 부착되어 있었으며 A점에서의 변형률은 인증 시험에서 획득한 결과와 같았다.

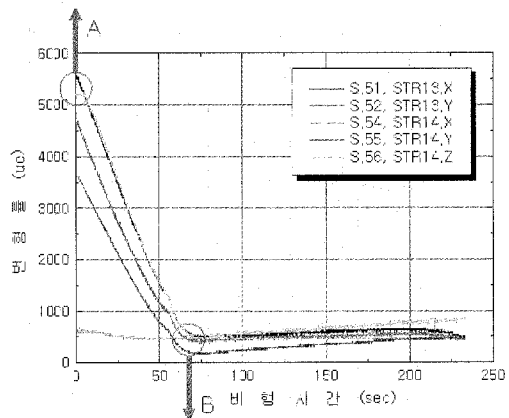


그림 16. KSR-III 비행시험시 변형률 변화

3. 결 론

KSR-III 복합재 가압탱크는 Al6061-0을 소재를

사용한 하중지지 없는 라이너 위에 복합재의 필라멘트 와인딩 기법으로 제작되었다. 하중지지 없는 라이너는 무게를 최소화 할 수 있는 장점이 있는 반면 설계, 제작, 그리고 운용에 있어서 하중지지 있는 라이너 보다 한 단계 높은 기술을 요구하였다. 특히 응력집중을 분산한 보스부 설계는 하중지지 없는 라이너를 대형 고압 탱크에 적용가능하게 하였다. 이러한 설계 개념은 향후 소형 고압 탱크에도 적용 가능하다. 다만 반복사용 시 라이너의 변형률 거동에 대한 관찰 및 검증은 본 논문의 다음 과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

1. Gary Kawahara, and Stephen F. McCleskey, "Titanium-Lined, Carbon Composite Overwrapped Pressure Vessel", AIAA/SAE/ ASME/ASEE 32th Joint Propulsion Conference : Lake Buena Vista, 1-3 July 1996, pp. 1-10.
2. Vicker, B.D., Babel, H.W., and Parechian, H.W., "Materials and Design Selection for Minimum Weight Pressure Vessels", AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference: Orlando, 16-18 July 1990, pp. 1-10.
3. George Thomas, R., Ganesan, S.K. Singh, and Bhanu Pant, " Development and Qualification of Plate Formed Liner Tank for the Composite Gas Bottle", Journal of Advanced Materials, April 2000, Vol. 32, No.2, pp.39-47.
4. Veys, Ronald B, Cederberg, Alvin R., and Jack D. Schimenti, " Design and Analysis Techniques for Composite Pressurant Tankage with Plastically Operating Aluminum Liners", AIAA /SAE/SME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference: Orlando, 16-18 July 1990, pp.1-7.
5. Henry W. Babel and Lorie Grimes-Ledesma, "Delta IV COPV Risk Mitigation", AIAA/SAE/ASME/ASEE 35th Joint Propulsion Conference: Los Angeles, 20-24 June 1999, pp. 1-12.
6. 공철원, "KARI-RSM-TM-2000-002", 한국항공우주연구원 기술자료, 2000.
7. 공철원, "KARI-RSM-TM-2000-007", 한국항공우주연구원 기술자료, 2000.
8. American National Standard, "Space systems-Composite Overwrapped Pressure Vessel (COPVs)", S-081-2000, 2000.