

# 과학 로켓용 복합재 가압탱크 성형에 관한 연구

엄문광<sup>\*</sup>· 최창근<sup>\*</sup>· 김병하<sup>\*</sup>· 이영무<sup>\*\*</sup>· 공철원<sup>\*\*</sup>

## A Study on Manufacturing of Composite Pressure Vessel for Science Rocket

Moon-Kwang Um, Chang-Keun Choi, Byung-Ha Kim, Yeong-Moo Yi and Cheol-Won Kong

**Key Words:** Composite, Plastic liner, Pressure vessel, Filament winding

### Abstract

A manufacturing process of composite pressure vessel was studied. The vessel was fabricated using the filament winding process. It is utilized as a container of high pressure Helium gas which propels a rocket fuel and an oxidizer. The layup patterns were determined based on the lamination theory. 3-axis controlled filament winding machine was developed to realize the patterns. The vessel was successfully fabricated using the developed machine. And the hydraulic pressure test was performed to measure an applied pressure-strain relations on the composite vessel.

### 1. 서 론

로켓을 개발에는 연료나 산화제를 추진하기 위한 압력 용기가 필요하다. 대기 중으로 발사되는 로켓은 구조적 요구 조건을 만족하면서 무게가 절감되는 것이 필수적인데, 이를 만족시키기 위해 최적의 재료가 복합재료라고 할 수 있다. 개발 품의 형상이 축대칭이므로 이러한 형상 부품 제조에 가장 적합한 공정인 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 공법[1]을 채택하여 제품 개발을 시도하였다. 본 연구에서 개발하고자 하는 연료 및 산화제 추진용 복합재 가압 탱크[2]는 사용압력이 4,500 psi이고, 파괴압력은 9,000 psi 이상을 요구하고 있다. 용기 실린더 부의 대략적인 직경은 약 1m 이고 내용적=0.57 m<sup>3</sup> 정도이다.

본 연구에서는 압력 용기를 개발하기 위하여 아래와 같은 내용에 대하여 연구를 수행하였다.

- 복합재 와인딩 패턴 및 적층 설계
- 맨드렐(CLPE Liner+Steel Boss) 설계/제작
- 와인딩 성형 공정 개발 및 시제 제작
- 용기의 기밀 시험을 통한 안전성 검사

### 2. 성형 예비 연구

#### 2.1 재료 선정 및 수지 분석

압력용기 제작에 사용된 섬유는 Toray T700 탄소섬유이고, 수지는 국도화학의 Epoxy 수지(KBR-1729, KBH-1089, 배합비=100:90)이다.

우선 복합재의 경화사이클 결정에 참고하기 위하여 DSC(Differential Scanning Calorimetry)를 이용한 수지 열분석을 수행하였다(Fig.1). 열분석은 Isothermal scanning을 통하여 화학 반응 시간 및 정도를 확인하였는데, 개략적으로 100℃에서는 총 반응 시간이 65분 정도이고, 120℃에서는 25분, 140℃에서는 8분 정도로 온도가 증가함에 따라 화학 반응 시간이 줄어듦을 확인하였다.

<sup>\*</sup> 한국기계연구원 복합재료그룹

<sup>\*\*</sup> 한국항공우주연구원 로켓구조/재료연구그룹

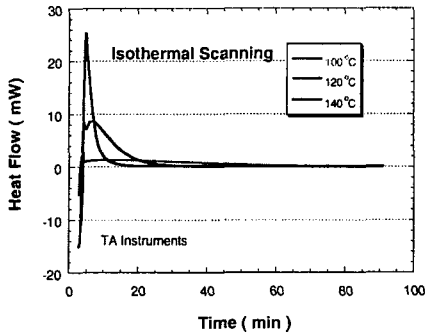


Fig.1 에폭시 수지의 DSC 열분석

필라멘트 와인딩은 통상적으로 섬유 와인딩 시간이 매우 길다. 특히 본 연구의 개발품 같은 대형 용기의 경우는 총 와인딩 시간이 50 시간 이상 소요되므로 함침 베스 내에서 수지가 겔화 되면 섬유 손상을 유발하여 제품 물성이 저하되거나, 심하면 와인딩을 더 이상 할 수 없는 경우가 생기기도 한다. 본 연구에서는 Brookfield 점도계를 이용하여 상온에서 시간에 따른 수지의 점도 변화를 측정하였는데, 수지 배합 후 초기 점도는  $0.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 이고 5시간 경과 후에는  $1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  정도로 증가함을 확인하였다. 이 정도의 점도 증가는, 함침조에 수지를 계속 첨가시키는 것을 고려할 때 수지의 겔화에 의한 성형상의 문제점은 무시할 수 있다.

## 2.2 플라스틱 라이너 특성 분석

압력 용기는 맨드릴(보스+라이너)과 그 위에 감긴 복합재로 구성되는데, 용기와 외부를 연결하기 위하여 Boss를 사용하며, 초기 와인딩시 복합재는 형상 유지에 필요한 강성이 없으므로 라이너가 그 역할을 담당한다. 라이너는 금속(강재, 알루미늄)이나 플라스틱을 사용한다.

본 연구에서는 무게 절감을 극대화하기 위하여 가교 폴리에틸렌(CLPE)을 사용하였다. CLPE 라이너 재질의 강도 및 강성은 와인딩 및 경화시의 용기 형상 유지에 필수적이므로, ASTM D638에 준해서 인장강도(E) 및 강성도(S)를 측정하였다(Fig.2).

$$E = 490 \text{ MPa}, S = 18.0 \text{ MPa}$$

온도 상승에 따른 CLPE의 강성 저하를 확인하기 위하여 유리 천이 온도( $T_g$ )와 연화 온도를 측정하였는데, DSC 열분석 및 ASTM D1525에

준해서 측정된 결과 각각  $130^\circ\text{C}$  와  $116^\circ\text{C}$ 를 얻었다.

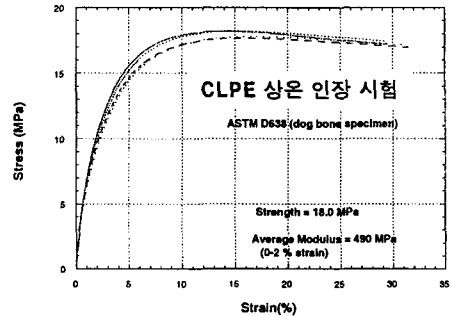


Fig.2 라이너(CLPE)의 하중 변형 거동

## 2.3 Steel Boss 설계 · 제작

압력 용기와 외부를 연결하는 Boss는 밖으로는 NPT 나사와 연결되고 안으로는 라이너와 접촉되어 있다. 따라서 연결 및 접촉부가 존재하므로 용기내 고압 기체의 기밀성을 확보하기 위해서는 Boss 형상이 매우 중요하다. 외부 연결부의 기밀은 NPT 나사의 압착을 통하여 확보하였으며, 라이너와의 기밀은 쇠기 형상의 NPT 형상을 이용하여 CLPE를 물리적으로 압착하는 방식을 채택하였다(Fig.3). 이때 CLPE는 탄성 영역(6% Strain)내에서 압착하도록 설계하였다. Boss는 S45C 강재를 가공 후 Liner와 접촉 표면을 증가시키기 위하여 샌드 브라스트 표면처리를 하였다.

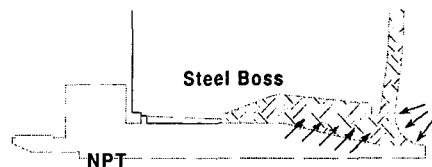


Fig.3 설계된 보스 형상

## 2.4 경화 사이클

적층 설계에 의해서 제작된 복합재 압력 용기의 부위별 두께를 조사해 보면, 돔부는 약 50mm, 돔/실린더 연결부는 약 30mm이며 실린더부는 약 35mm 정도로 두께가 매우 두꺼워 경화 온도가 높으면 복합재 내부의 급격한 발열에 의한 복합재 열화의 가능성이 높다. 그리고, 경화 초기에는 복합재가 아직 강성을 갖지 않으므로 라이너에 의한 용기 형상 유지가 필요하다. 따라

서 수지의 열분석 및 라이너의 열분석 결과를 고찰해 보면 2단계 경화 사이클을 적용하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 본 연구에서는 65℃에서 10시간, 85℃에서 5시간 경화 후 서냉하는 경화 사이클을 채택하였다.

### 3. 제품 성형 및 검사

#### 3.1 맨드릴 성형

분말 상태의 CLPE를 회전하는 금형(Fig.4) 내에 넣고 열을 가한 상태에서 2축 회전(x축 8rpm, y축 10rpm)을 적용하여 두께 10mm로 제작하였다(Fig.5). 이때 온도는 250℃이며, 35분 유지 후에 자연 냉각하여 탈형하였다.

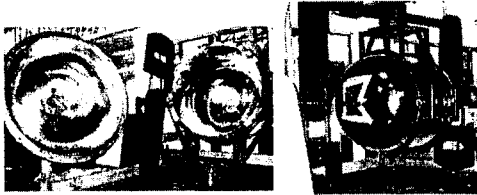


Fig.4 맨드릴 제작용 금형

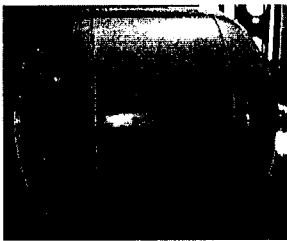


Fig.5 제작된 맨드릴

라이너 뒀부의 형상은 압력이 작용할 때 복합재가 Bending moment를 받지 않도록 아래식을 이용하여 결정하였다.

$$R_1/R_2 = 2 - \tan^2 \theta$$

- ∴ 뒀상의 한 점에서 Tangential방향의 곡률반경
- ∴ 뒀상의 한 점에서 Longitudinal방향의 곡률반경
- ∴ 뒀상의 한점에서 Helical winding된 섬유가 Longitudinal 방향과 이루는 각도

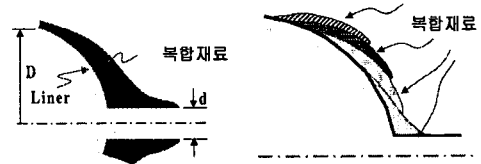
#### 3.2 적층 패턴 및 와인딩 방식

압력 용기 제작시 복합재 적층의 기본 패턴에는 Hoop와 Helical이 있다. 우선 Helical Winding으로 요구 파괴 강도를 만족하도록 적층각도 및 적층수를 결정해야 한다. 그러나 Cylinder부위는

Hoop방향 응력이 Longitudinal 방향 응력의 2배이므로 Hoop Winding으로 필요한 만큼 보충하여야 한다[1]. 설계된 패턴은 아래와 같다.

- hoop 90도 5층
- helical 0도 5층
- helical 0 ~ 90도 43층

Helical Winding의 경우 Cylinder 부위 직경(D)에 비해 Boss 부위 직경(d)가 현저히 작기 때문에 일반적인 Winding을 하면 Cylinder 부위의 복합재 두께에 비해 Boss 부위 복합재 두께가 몇십 배가 두꺼워져 성형이 불가능하게 된다. 따라서 뒀부에 가상 보스를 두는 방식으로 적절히 복합재 두께를 배분하는 방식으로 와인딩하는 방식이 필요하다(Fig.6).



일반적인 Helical Winding      분할 Helical Winding  
Fig.6 가상 보스 개념에 의한 Helical Winding

#### 3.3 용기 성형

압력 용기 제작에 필요한 필라멘트 와인딩 장비는 제어부, 기구부, 함침 베스, 스펀 등으로 구성되어 있으며, 이밖에도 복합재 경화용 오븐이 있다. 장비는 3축 제어(맨드릴 회전, Eye x,y 제어)가 가능하며 윈도우즈 기반 프로그램에 의해 제어된다(Fig.7).

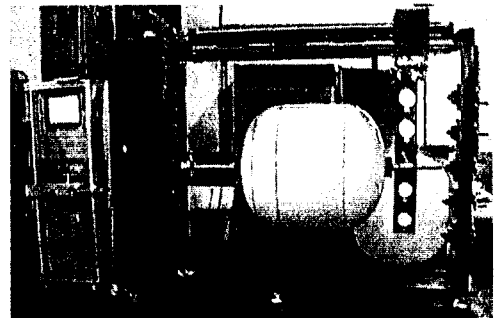


Fig.7 용기 성형에 사용된 와인딩 장비

실제 제품 와인딩 장면이 Fig.8에 주어져 있다. 용기는 19 개의 가상 보스를 채택하였으며 제작된 시제가 Fig.9에 주어져 있다.

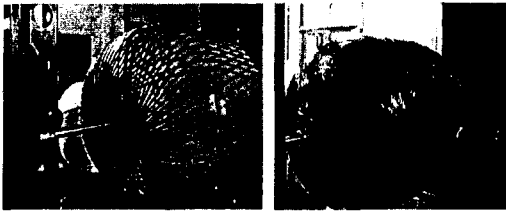


Fig.8 제품 와인딩 장면



Fig.9 제작된 시제 형상

### 3.4 용기 변형을 측정

용기에 압력이 가해졌을 때의 변형을 거동을 관찰하기 위하여 수압시험을 수행하였다(Fig.10). 수압 설비는 파괴용 수조, 가압 장치, 통신 및 Data Acquisition 장치 등으로 구성되어 있다(Fig.11). 가압 펌프는 영국 Hydratron사의 HP10/100으로 최대 10,000psi까지 수동으로 가압할 수 있으며 압력은 Pressure Transducer로 측정하였다. 변형량은 Strain gage를 이용하여 측정하였으며, 용기의 파괴로 인한 안전성을 확보하기 위하여 Strain Amp로부터 나온 신호는 직렬 통신(RS422/232 교차 방식, 최대 1km)을 통하여 파괴 수조로부터 원거리에 떨어진 Data 저장 PC로 전송된다.

수압을 이용하여 압력에 따른 변형율을 측정 한 결과가 Fig.12에 주어지 있다. 약 100 기압이 걸렸을 때 보스 부위(C1)는 섬유 방향으로  $2600 \mu\epsilon$ , 실린더 부  $1600 \mu\epsilon$ , 돔/실린더 연결부(C4)  $-140 \mu\epsilon$  정도가 나옴을 확인하였다. 측정 Strain 값으로 파괴압을 추정해 보면 7500 psi 이상은 무난할 것으로 생각된다.

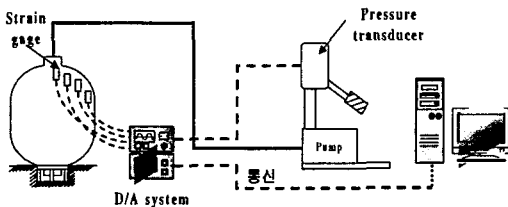


Fig.10 변형을 측정 시험 개략도



Fig.11 가압 장치, D/A 및 통신 장비

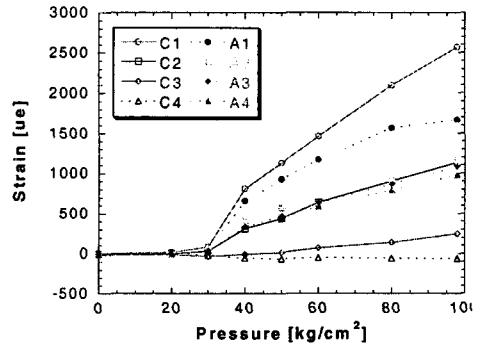


Fig.12 변형을 측정 결과

## 4. 결론

본 연구를 통하여 압력 용기 적층 패턴을 설계하였으며, 3축 제어 와인딩 장비를 제작하였고, 이를 이용하여 용기 시제를 성공적으로 성형하였으며 수압 시험을 통하여 일차적으로 안전성을 확인하였다. 향후 실제 파괴 시험을 통하여 적층 설계 보완이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 과기부 지원으로 한국항공우주연구원에서 수행하고 있는 '3단형 과학로켓 개발 사업(KSR-III)'의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 전의진, 김천곤, 이상관, 전성근, "FRP 압력 용기의 국산화 개발," 한국기계연구원 보고서, 1991
2. 엄문광, 김병하, 김진봉, 최창근, "복합재 가압 탱크 개발 연구," 한국기계연구원 보고서, 2000