

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.10.941>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 최대 내용적을 갖는 수소압력용기의 형상설계 및 성형해석

박건영\* · 곽효서\*\* · 이광오\*\* · 김 철\*\*\*†

\* 부산대학교 기계융합기술전공, \*\* 부산대학교 기계기술연구원, \*\*\* 부산대학교 기계공학부

### Design of Bottom Shape and Forming Analysis of Hydrogen Pressure Vessel with Maximum Volume

Gun Young Park\*, Hyo Seo Kwak\*\*, Kwang O Lee\*\* and Chul Kim\*\*\*†

\* Mechanical Convergence Technology, Pusan Nat'l Univ.,

\*\* Research Institute of Mechanical Technology, Pusan Nat'l Univ.,

\*\*\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received May 12, 2017 ; Revised June 12, 2017 ; Accepted July 10, 2017)

**Key Words:** Hydrogen Pressure Vessel(수소압력용기), Capacity(내용적), Structural Analysis(구조해석), Elliptical Bottom(타원형 바닥부), Bottom Forming(바닥 성형),

**초록 :** 최근 화석연료 고갈 및 환경오염 문제를 해결할 수 있는 대안으로 수소에너지가 주목받고 있으며, 고효율 및 주행거리 향상을 위한 수소 자동차 개발에 따라 수소 저장 압력용기의 내용적 증가 및 구조안전성이 요구되고 있다. 그러나, 반구형의 바닥부보다 내용적이 큰 타원형 바닥부의 형상설계가 이루어지지 않았으며, 타원형 바닥부의 성형공정에 관한 연구 또한 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 수소압력용기 라이너의 타원형 바닥부 장단축비에 따른 최대 내용적을 계산하고 유한요소해석을 통한 구조안전성 검증 및 이에 대한 이론적 고찰을 검토하였다. 또한, 바닥부 성형 공정해석을 통하여 제안된 최대 내용적을 갖는 타원형상의 성형 가능성을 확보하였다.

**Abstract:** Recently, hydrogen energy has been in the spotlight as an alternative to diminishing fossil fuels and as a potential solution to environmental pollution. The development of hydrogen-fueled vehicles and the demands for improved fuel efficiencies have resulted in the need to increase the volume of the hydrogen pressure vessels. Pressure vessels having an elliptical bottom, as opposed to one that is hemispherical, allow for a greater capacity. However, there are insufficient studies on the feasibility of the forming process required for an elliptical bottom. In this study, the liner capacity is calculated according to the ratios of the major to the minor axes of the elliptical bottom part in a hydrogen pressure vessel. Structural safety is verified through finite element analyses, and the results are compared to the theoretical results. The feasibility of the proposed elliptical shape of the pressure vessel bottom, while filled to maximum capacity, is validated through forming analysis.

### 1. 서 론

최근 화석연료 고갈 및 환경오염 문제를 해결할 수 있는 대안으로 수소에너지가 주목받고 있으며,<sup>(1)</sup> 연비 및 주행거리 향상을 위한 수소 연료 전지 자동차가 개발되고 있다. 수소 저장 압력용기는 수소 자동차의 핵심 부품으로, Fig. 1과 같

이 알루미늄 라이너(Liner)에 복합재(Composite material)를 헬리컬 와인딩(Helical Winding)으로 보강한 Type III(700bar)가 적용되고 있다.<sup>(2)</sup> 압력용기의 바닥부(Bottom part) 형상에는 반구형(Hemispheric type), 타원형(Elliptical type) 및 접시형(Torispherical type)이 있는데, 내용적 증가를 위하여 타원형 및 접시형이 적용되고 있으며 라이너 성형을 위한 D.D.I(Deep drawing and ironing) 공정 중, 3차 드로잉 공정에서 바닥부 성형이 이

† Corresponding Author, [chulki@pusan.ac.kr](mailto:chulki@pusan.ac.kr)

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

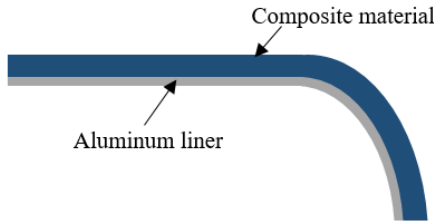


Fig. 1 Hydrogen pressure vessel (Type III, 700bar) with aluminum liner and composite material

루어 진다.<sup>(3)</sup>

기존의 압력용기 형상설계 및 성형공정에 관한 연구에서 Choi 등<sup>(3)</sup>은 탄소섬유로 보강된 압력용기의 라이너 설계를 위한 자동화 프로그램을 개발하였으며, Liang 등<sup>(4)</sup>은 필라멘트 와인딩을 가능하도록 하는 기하학적 조건을 고려한 돔부의 최적 형상을 제안하였다. Zhou 등<sup>(5)</sup>은 비축지선 와인딩 기법을 적용하여 hyperelliptic 곡선 형상을 최적화 하였으며, Sharifi 등<sup>(6)</sup>은 세 가지 유형(반구형, 타원형, 접시형)의 복합재 적층형 셸에 대한 유한요소해석 및 실험적 연구를 수행하였다. Zheng 등<sup>(7,8)</sup>은 알루미늄 소재의 열간 딥 드로잉 공정 시 나타나는 주름에 대한 연구를 수행하였으며, Bac 등<sup>(9)</sup>은 D.D.I 공정 해석을 통하여 복합재층을 고려한 압력용기의 통합적 설계 방법을 제안하였다. 또한, Lee 등<sup>(10)</sup>은 트랙트릭스 다이의 높이에 따른 1차 딥드로잉 공정해석을 통하여 최적의 트랙트릭스 다이 형상을 제시하였다. 그러나 용기의 내용적 증가를 위한 바닥부 형상 설계와 이에 따른 구조안전성과 성형 공정에 관한 연구가 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 수소압력용기 라이너의 타원형 바닥부 장단축비에 따른 최대 내용적을 계산하고 유한요소해석을 통한 구조안전성 검증 및 이에 대한 이론적 고찰을 검토하였다. 또한, 바닥부 성형 공정해석을 통하여 제안된 최대 내용적을 갖는 타원형상의 성형 가능성을 확보하였다.

## 2. 실린더부의 타원형 바닥부 형상 설계

### 2.1 이론적 배경

용기의 바닥부 타원 방정식은 식 (1) 및 식 (2)와 같으며,  $a$  및  $b$ 는 타원의 장축 및 단축이다.

$$x = a \cos\theta \tag{1}$$

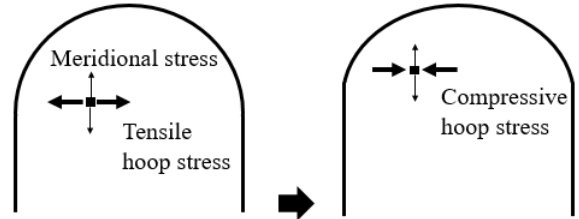


Fig. 2 Variation of hoop stress according to increase of ratio of major to minor axis

$$y = b \sin\theta \tag{2}$$

두께가 얇은 용기의 타원체 바닥부 한 지점에서 자오선방향 응력( $\sigma_1$ ), 원주방향 응력( $\sigma_2$ ) 및 유효응력을 식 (3)~식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 이때, 반경방향 응력( $\sigma_3$ )은 0으로 가정하며,  $p$ 는 용기에 작용하는 내압,  $t$ 는 용기의 두께이며 자오선방향의 주곡률반경인  $r_1$  및 원주방향의 주곡률반경인  $r_2$ 는 식 (6) 및 식 (7)과 같다.<sup>(11,12)</sup>

$$\sigma_1 = \frac{pr_2}{2t} \tag{3}$$

$$\sigma_2 = \frac{p}{t} \left( r_2 - \frac{r_2^2}{2r_1} \right) \tag{4}$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \tag{5}$$

$$r_1 = \frac{(a^4 y^2 + b^4 x^2)^{\frac{3}{2}}}{a^4 b^4} \tag{6}$$

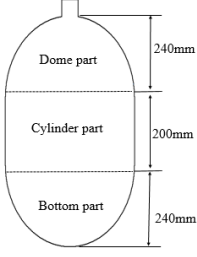
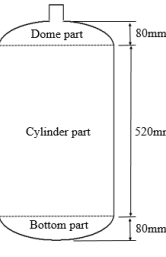
$$r_2 = \frac{(a^4 y^2 + b^4 x^2)^{\frac{1}{2}}}{b^2} \tag{7}$$

타원의 장단축비에 따라 바닥부 벽면에서의 응력변화가 나타나는데, Fig. 2와 같이 장단축비가 증가 할수록 용기 내용적은 증가하지만, 원주방향 응력(Hoop stress)이 감소하여 압축응력이 발생함에 따라 용기 바닥부에 국부 좌굴 및 파손이 발생할 수 있다.

### 2.2 반구 및 타원형 용기의 내용적 비교

반구형 바닥부를 가지는 압력용기에 내압이 작용할 때, 내부 벽면에서는 모든 방향으로 균일한 인장응력이 발생하기 때문에 구조적으로 가장 안정적인 형태이지만, 자동차에 적용될 경우 탑재할 공간의 폭이 제한되기 때문에 실린더부의 길

**Table 1** Comparison of capacities of hemispheric type and elliptical type pressure vessels

	Hemispheric type	Elliptical type
Vessel shape		
Capacity	94.1L	113.40L

이가 짧아져 내용적이 줄어들게 된다. 반면, 타원형 바닥부를 가지는 압력용기는 반구형 용기에 비하여 실린더부의 길이가 길기 때문에 내용적이 더 크므로 많은 수소를 저장할 수 있다. Table 1은 입구부를 제외한 총 길이가 680 mm 및 장반경이 240 mm로 주어졌을 때, 반구형 용기의 내용적( $V_h$ )과 장단축비가 1:3인 타원형 용기의 내용적( $V_e$ )을 비교하였다. 여기서  $r$  및  $L$ 는 용기의 반경 및 실린더부의 길이이다. 식 (8) 및 식 (9)을 이용하여 계산한 두 용기의 내용적은 각각 94.1 L 및 113.40 L로, 타원형 용기의 내용적이 약 20% 크다. 따라서, 본 연구에서는 용기의 내용적 증가를 위하여 타원형의 바닥부 형상 설계를 수행하였다.

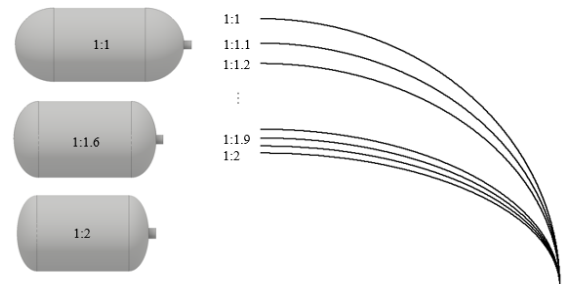
$$V_h = \pi r^2 L + \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (8)$$

$$V_e = \pi r^2 L + \frac{4}{3} a^2 b \pi \quad (9)$$

장반경이 240mm이고 두께가 6mm인 수소 압력용기의 라이너에 대하여 타원의 장단축 비에 따른 타원형 바닥부의 단축길이, 실린더부 길이 및 내용적을 계산하였다. 이때, 용기의 장축(장반경)은 고정된 값이기 때문에 단축을 변경하였으며, 장단축비가 1:1인 반구형부터 현장에서 제안하는 장단축비의 최대값인 1:2<sup>(11)</sup>로 범위를 설정하여 총 10가지 모델을 생성하였다. Table 2에 의하면 장단축비가 증가할수록 단축이 감소하고 실린더부의 길이가 증가하여 용기의 내용적이 늘어남을 알 수 있다.

**Table 2** Capacities of pressure vessels according to the ratios of major to minor axis of elliptical bottom

Ratio of major to minor axis	Minor axis length (mm)	Cylinder length (mm)	Capacity (L)
1:1	240	200	94.1
1:1.1	218.18	243.64	96.73
1:1.2	200	280	96.73
1:1.3	184.62	310.77	100.78
1:1.4	171.43	337.14	102.37
1:1.5	160	360	103.75
1:1.6	150	380	104.95
1:1.7	141.18	397.65	106.02
1:1.8	133.33	413.33	106.97
1:1.9	126.32	427.37	107.81
1:2	120	440	108.57
1:3	80	520	113.4



**Fig. 3** Elliptical curves and 3D modeling of vessels according to the ratios of major to minor axis

### 3. 타원형 바닥부의 장단축비에 따른 용기의 구조해석

상용 소프트웨어 Ansys workbench 17.1ver을 이용하여 최대 내용적 및 구조안전성을 만족하기 위한 수소압력용기 라이너의 타원형 바닥부 장단축비에 따른 구조해석을 수행하였다.

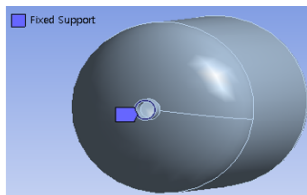
#### 3.1 모델링 및 해석조건

타원형 바닥부의 장단축비에 따른 Table 2의 10가지 모델에 대한 타원 곡선 및 3D 모델링을 Fig. 3에 나타내었다.

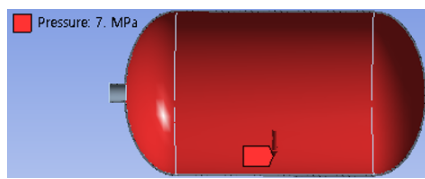
용기가 탑재될 때 입구부가 차량에 고정되므로 Fig. 4와 같이 완전고정조건(Fixed support condition)을 설정하였으며, 실린더부에 소성변형을 발생하

**Table 3** Material properties of aluminum 6061 for structural analysis

Density, ( $kg/m^3$ )	Elastic modulus $E$ , (GPa)	Poisson's ratio, $\nu$
2800	73	0.33
Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)
276		310



**Fig. 4** Boundary condition (Fixed support)



**Fig. 5** Internal pressure (7MPa) working at the liner of vessel

게 하는 직전 내압인 7MPa을 라이너 내벽에 부여하여 Fig. 5에 나타내었다. 구조해석에 사용되는 라이너 소재(알루미늄 6061)의 물성치는 Table 3와 같다.

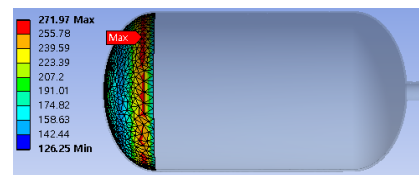
3.2 구조해석 결과 및 고찰

압력용기의 바닥부 및 돔부에서는 압축 원주방향응력에 의하여 라이너에 좌굴 및 파단이 발생할 수 있기 때문에,<sup>(11)</sup> 본 연구에서는 바닥부에 압축 원주방향응력이 발생하지 않으면서, 최대유효응력이 항복강도를 초과하지 않는 응력상태를 기준으로 바닥부 타원 형상을 설계하였다.

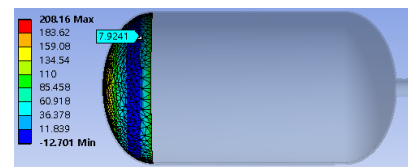
용기의 바닥부 형상에 따른 구조해석을 수행하여 최대유효응력이 발생하는 노드점의 원주방향 응력, 자오선 방향 응력을 도출하여 Table 4에 나타내었다. 장단축비가 증가함에 따라 자오선방향 응력은 증가하는 반면 원주방향 응력이 감소하여 장단축비 1:1.6 이후부터는 압축 원주방향응력이 발생하고 소재의 항복강도(276MPa) 이상의 최대유효응력이 나타나 소성변형이 발생할 것으로 사료된다. 따라서, 최대 내용적과 구조안전성을 동시

**Table 4** Results of structural analyses according to ratios of major to minor axis

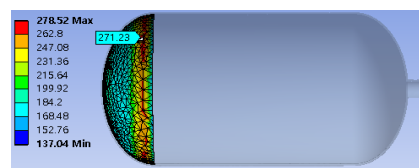
	Maximum equivalent stress (MPa)	Hoop stress (MPa)	Meridional stress (MPa)	
1:1	171.87	156.08	172.87	stable
1:1.1	180.77	149.12	191.22	stable
1:1.2	186.96	134.86	203.66	stable
1:1.3	195.55	91.41	218.51	stable
1:1.4	212.94	74.35	233.95	stable
1:1.5	240.96	32.22	205.6	stable
1:1.6	271.97	7.92	271.23	stable
1:1.7	302.19	-15.76	292.25	unstable
1:1.8	334.51	-33.62	312.81	unstable
1:1.9	373.83	-47.58	345.47	unstable
1:2	421.19	-82.56	365.48	unstable



(a) Maximum equivalent stress



(b) Hoop stress



(c) Meridional stress

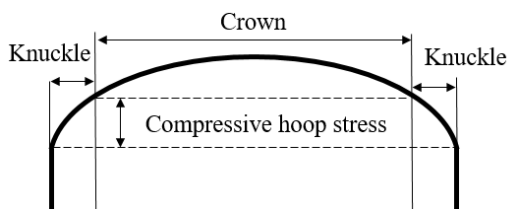
**Fig. 6** The result of structure analysis regarding to the proposed pressure vessel

에 만족하는 바닥부 타원 형상의 장단축비를 1:1.6으로 결정하였다. 선정된 최종 모델(장축 240 mm 및 단축 150mm)은 반구형 모델보다 내용적(104.95L)이 11.6 % 증가하였으며, 최대유효응력, 원주방향 응력 및 자오선 방향 응력은 Fig. 6과 같이 각각 271.97MPa, 7.92MPa 및 271.23MPa이다.

압력용기의 타원형 바닥부 및 돔부는 Fig. 7과 같이 크라운부(Crown) 및 압축 원주방향응력이 발생하는 너클부(Knuckle)로 이루어져 있다. 바닥

**Table 5** Comparison of stress components obtained from theoretical calculation with those of FEM

	Maximum equivalent stress	Hoop stress	Meridional stress
Theoretical calculation	154.61 MPa	72.38 MPa	177.52 MPa
FEM	154.73 MPa	71.50 MPa	171.16 MPa
Error	0.08%	1.21%	3.58%



**Fig. 7** Knuckle and crown part of elliptical bottom

안전성은 유한요소해석 결과로 판단한다.<sup>(12)</sup> 따라서, 식 (3)~식 (7)은 너클부를 제외한 크라운부에 적용되므로, 유한요소해석 기법의 타당성 검증을 위하여 선정된 타원형 바닥부의 크라운부에서 이론 응력성분을 도출하였다. 크라운부 위의 임의의 점인  $x(187.51\text{mm})$  및  $y(93.63\text{mm})$ 에서 구조해석에서 도출한 최대유효응력, 원주방향응력 및 자오선방향응력은 Fig. 8과 같이 각각 153.73MPa, 71.50MPa 및 171.16MPa이다. 또한, 식 (6)~(7)을 이용하여  $x$  및  $y$  좌표로부터  $r_1$  및  $r_2(191.12\text{mm}, 72.38\text{mm})$ 값을 계산하였으며, 응력성분이 154.61 MPa, 72.38MPa 및 177.52MPa으로 나타났다. 이는, 유한요소해석에서 얻은 값과 비교하여 Table 5와 같이 각각 0.08%, 1.21% 및 3.58%의 작은 오차를 보이므로, 해석 기법이 타당한 것으로 사료된다.

#### 4. 타원형 바닥부의 성형 해석

##### 4.1 타원형 바닥부의 성형 공정 개요

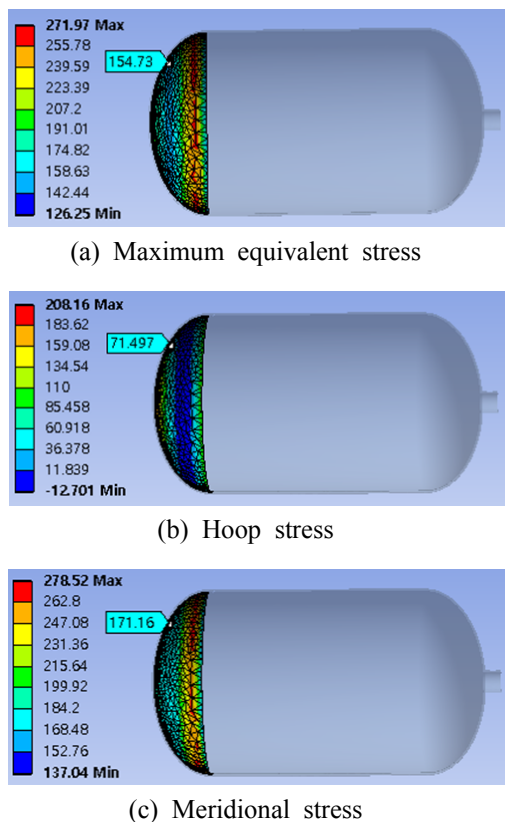
압력용기 라이너 제조는 Fig. 9와 같이 하나의 펀치를 이용하여 한 번의 프레스 행정에 덩 드로잉 및 여러 개의 아이어닝 공정을 연속적으로 수행하는 D.D.I 공정을 통해 이루어진다. 1차 성형 단계에서는 단동형 수직 프레스에서 블랭크(Blank)의 컵 드로잉(Cup drawing) 공정이 이루어지며, 2차 성형단계에서는 1200톤급 수평식 프레스를 이용하여 채드로잉, 아이어닝 1 및 아이어닝 2 의 3번의 공정을 연속적으로 진행한다. 3차 성형단계에서 채드로잉과 아이어닝의 연속 공정을 수행하며, 드로잉 공정이 끝나고 아이어닝 공정의 끝 시점에서 Fig. 10과 같이 타원형 바닥부가 성형되어 진다.<sup>(5)</sup>

##### 4.2 타원형 바닥부 성형 공정 해석

###### 4.2.1 모델링 및 해석조건

최종 선정된 장단축비가 1:1.6인 타원형 바닥부의 성형 가능성을 검토하기 위해, 상용 유한요소해석 프로그램 Forge NxT 2.0을 이용하여 바닥부 형상이 성형되는 공정해석을 수행하였다.

유한요소해석 모델은 Fig. 11과 같이 펀치, 소재 및 다이로 구성되며, 펀치 및 다이가 소재와 맞닿는 부분은 제안된 타원 형상으로 3D 모델링을 수행하였다. 해석 시간 절감을 위하여 Fig. 12



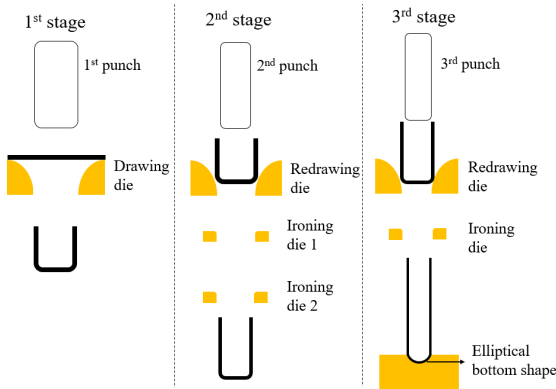
**Fig. 8** The stress analysis results of crown part

부의 최대유효응력은 너클부에서 발생하는데, 이 부분에서 응력은 지금까지 연구에 의하면 단순한 공식으로 표현할 수 없기 때문에 너클부의 구조

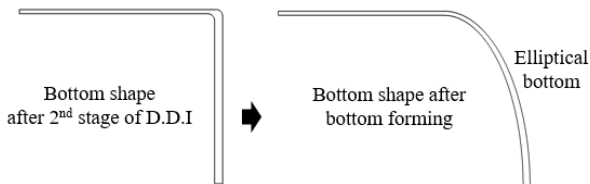
**Table 6** Strain-flow stress relational expression of aluminum 6061 for simulating bottom forming

$$\sigma_f = A e^{m_1 T} T^{m_2} \epsilon^{m_3} e^{m_4/\epsilon} (1 + \epsilon)^{m_5} T^{m_6} e^{m_7 \epsilon} e^{m_8 \cdot m_9 T}$$

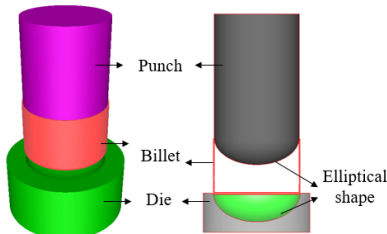
A:	260.49451	m7:	0
m1:	-0.00168	m8:	0
m2:	0.16992	m9:	0
m3:	0.0184	Temperature:	20~250
m4:	0.00073	(°C)	
m5:	0	Strain:	0.04~3
m6:	0	Strain rate:	0~500



**Fig. 9** D.D.I. process for forming the liner of hydrogen pressure vessel

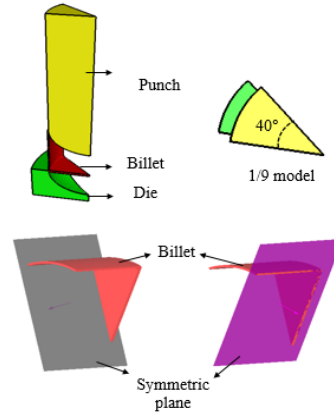


**Fig. 10** Bottom shape of liner after bottom forming in 3<sup>rd</sup> stage

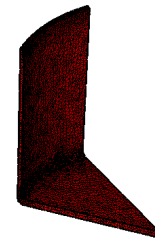


**Fig. 11** Analysis model of bottom forming

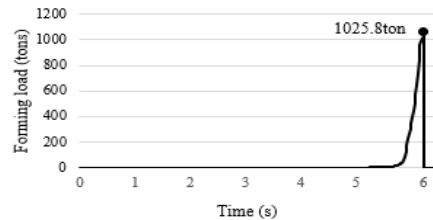
와 같이 1/9 모델을 생성하여 축대칭(Symmetry) 조건을 설정하였으며, 마찰계수의 경우 쿨롱 마찰계수 0.05로 정의하였다.<sup>(10)</sup> 소재에는 Fig. 13과 같이 약 1만개의 사면체(Tetrahedron) 격자를 생성



**Fig. 12** Symmetric condition of 1/9 model to carry out bottom forming



**Fig. 13** Meshes to carry out bottom forming



**Fig. 14** The forming loads according to the time

하였으며, 공정이 진행됨에 따라 주기적으로 격자의 재구성(Remesh)이 일어난다. 성형해석에 필요한 라이너 소재(알루미늄 6061)의 물성치인 변형률-유동응력의 관계식 및 상수를 Table 6에 나타내었다. 다이 및 펀치는 변형이 발생하지 않도록 강체(Rigid body)로 설정하였으며 소재, 펀치 및 다이가 서로 접촉한 상태에서부터 성형이 시작되어 소재가 다이를 완전히 빠져나간 후에 공정이 종료된다.

4.2.2 타원형 바닥부 성형 공정의 해석 결과

시간에 따른 펀치의 성형하중을 분석해보면, Fig. 14과 같이 6초에서 1025.8ton의 최대 성형하중이 발생하였으며, 이는 현장에서 사용 중인 1200ton 프레스보다 낮은 값이므로 실제 공정에



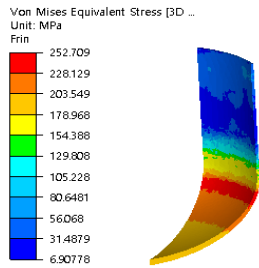


Fig. 15 Equivalent stress of the bottom when maximum forming load occurs (6s)

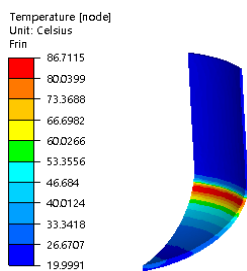


Fig. 16 Temperature of the bottom when maximum equivalent stress occurs (6s)

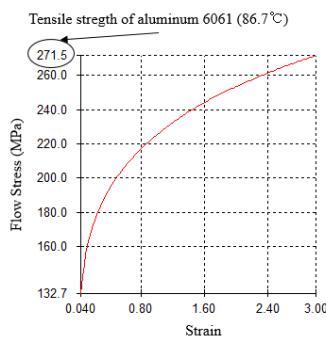


Fig. 17 Strain-flow stress and tensile strength of aluminum 6061 (86.7°C)

서도 성형이 가능함을 알 수 있다.

성형 도중, 소재의 찢어짐 및 과단 발생 여부를 파악하기 위하여 최대 성형하중이 발생하는 시점에서 최대유효응력을 Fig. 15에 나타내었다. 또한, 알루미늄 6061의 변형률-유동응력 선도로부터 최대유효응력이 발생하는 노드점의 온도(86.7°C)에서 인장강도를 도출하여 Fig. 16 및 Fig. 17에 나타내었다. 그 결과, 최대유효응력(252.71 MPa)이 소재의 인장강도(271.5MPa)보다 낮으므로 성형 중 결함이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 성형 완료 후 바닥부의 장축 및 단축의 길이는 Fig. 18과 같이 240.06mm 및 149.0mm로, 도면상의 치수와 오차가 0.024% 및 0.67%로 매우 낮게 나타났다.

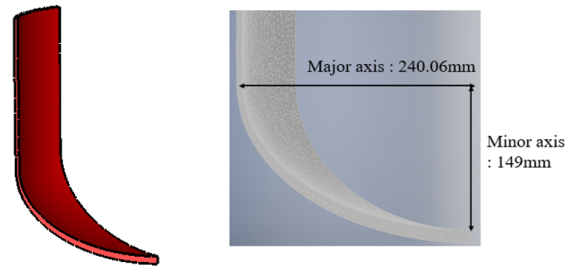


Fig. 18 The dimensions of bottom part after forming

#### 4. 결론

본 연구에서는 수소압력용기라이너 바닥부 타원형의 장단축비에 따른 최대 내용적을 계산하였으며, 유한요소해석을 통하여 제안된 라이너의 구조안전성 검증 및 이에 대한 이론적 고찰을 검토하였다. 또한, 바닥부 성형 공정해석을 통하여 제안된 최대 내용적을 갖는 타원형상의 성형가능성을 확보했다.

(1) 장반경이 240mm이고 두께가 6mm인 수소압력용기의 라이너에 대하여 타원의 장단축 비에 따른 바닥부의 단축길이, 실린더부 길이 및 내용적을 계산하였다. 그 결과, 장단축 비가 증가할수록 단축이 감소하고 실린더부의 길이가 증가하여 용기의 내용적이 증가한다.

(2) 타원형 바닥부의 구조해석 결과에 의하면, 장단축비가 커질수록 자오선 방향 응력이 증가하고 원주방향 응력은 감소하였다. 장단축비 1:1.6 이상에서 압축 원주방향 응력이 발생하였으며, 최대유효응력이 소재의 항복강도를 초과 하므로, 최대 내용적 및 구조안전성을 동시에 만족하는 장단축비는 1:1.6이며, 이는 반구형 모델보다 내용적(104.95L)이 11.6% 증가함을 알 수 있었다.

(3) 바닥부 성형 공정 해석을 수행한 결과, 현장에서 사용 중인 1200ton 프레스보다 낮은 최대 성형하중(1026ton)이 도출되어 실제 공정에서도 성형이 가능함을 알 수 있었다. 또한, 소재에 발생하는 최대유효응력(252.71MPa)이 인장강도(271.5MPa)보다 낮으므로 성형 중 결함이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

향후, 본 연구에서 제안된 최대 내용적 및 구조안전성을 만족하는 타원형 바닥부를 가지는 라이너 형상을 토대로 ASME코드에서 제시한 안전계수를 고려하여 복합재층의 각도 및 두께 설계에 대한 연구를 수행할 것이며, 이를 수소 압력

용기에 적용하여 수소 자동차의 저장효율을 증가 시키는데 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

### 후 기

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016938870)

### 참고문헌 (References)

- (1) Han, W. H., Choi, J. s. and Choi J. H., 2010, "The Trends of Hydrogen Energy Technology Development and Application to Ship," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 16, No. 3, pp. 313~320.
- (2) Lee, J.H., Yoo, G.H. and Heo, S.B., 2004, "High Pressure Hydrogen Gas Cylinder for Fuel Cell Vehicle and Station," *Theories and Applications of chem. Eng.*, Vol. 10, No. 1.
- (3) Choi, J. C., Jung, S.Y. and Kim, C., 2004, "Development of an Automated Design System of a CNG Composite Vessel Using a Steel Liner Manufactured Using the DDI Process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 11, pp. 781~788.
- (4) Lian, C. C., Chen, H. W. and Wang, C. H., 2002, "Optimum Design of Dome Contour for Filament-wound Composite Pressure Vessels Based on a Shape Factor," *Composite Structures*, Vol. 58, No. 4, pp. 469~482.
- (5) Zhou, J., Chen, J., Zheng, Y., Wang, Z. and An, Q., 2016, "Dome Shape Optimization of Filament-wound Composite Pressure Vessels Based on Hyperelliptic Functions Considering Both Geodesic and Non-geodesic Winding Patterns," *Journal of Composite Materials*, Online Published November 13, DOI: 10.1177/0021998316662512.
- (6) Sharifi, S., Gohari, S., Sharifiteshnize, M., Vrcelj, Z., 2016, "Numerical and Experimental Study on Mechanical Strength of Internally Pressurized Laminated Woven Composite Shells Incorporated with Surface-bounded Sensors," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 94, No. 1, pp. 224~237.
- (7) Zheng, K., Lee, J., Lin, J., Dean, T. A., 2017 "A Buckling Model for Flange Wrinkling in Hot Deep Drawing Aluminium Alloys with Macro-textured Tool Surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 114, pp. 21~34.
- (8) Zheng, K., Politis, D.J., Lin, J., Dean, T.A., 2016, "A Study on the Buckling Behaviour of Aluminium Alloy Sheet in Deep Drawing with Macro-textured Blankholder," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 110, pp. 138~150.
- (9) Bae, J. H., Lee, H. W. and Kim, C., 2014, "A Study on Integrated Design for Manufacturing Processes of a Compressed Natural Gas Composite Vessel," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15, No. 7, pp. 1311~1321.
- (10) Lee, K.O., Sim, H.D., Kwak, H.S. and Kim, C., 2016, "Optimal Design of Tractrix Die Used in D.D.I. Process for Manufacturing CNG Pressure Vessel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 40, No. 10, pp. 879~886.
- (11) John F. Harvey, 1974, *Theory and Design of Modern Pressure vessels*, New York van Nostrand. pp. 41~47.
- (12) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division I.