

복합재 압력용기의 돔형상 설계에 따른 구조 해석

김민식* · 배주찬*[†] · 김동건*

A Study on the Structural Analysis with Geometry Design for Dome of a Composite Pressure Vessel

Minsik Kim* · Joochan Bae*[†] · Donggeon Kim*

ABSTRACT

In this study, we perform the design of dome geometry for the composite pressure vessel with applying the equation of Fulton and Vasiliev considering external load(thrusts). Variables of the dome geometry are opening radius ratio(ρ_0) from 0.1 to 0.5 and thrust level from 40kN to 200kN. We conduct Finite Element Analysis(FEA) by using ABAQUS. As a result, the strain of the composite pressure vessel has shown strain gradient from inner to outer of dome surface. And the strain gradient may cause crack of resin inside the composite laminate. Strain gradient of Fulton dome is monotonously decreased as the ρ_0 increases, but the strain gradient of Vasiliev dome has shown some different trend. when $\rho_0 \leq 0.1$, strain gradient of Fulton's is higher than Vasiliev's. But when $0.1 < \rho_0 < 0.35$, strain gradient of Vasiliev's becomes higher than Fulton's. And in the case of $0.35 \leq \rho_0$, strain gradient of Vasiliev's is higher than Fulton's. So the Vasiliev dome is more effective in $\rho_0 \leq 0.1$ condition and Fulton dome is more effective in $0.35 \leq \rho_0$ condition. So, it's important for dome design to consider the crack of resin cause of the strain gradient.

초 록

본 연구에서는 외부하중을 고려하여 Fulton과 Vasiliev가 제안한 돔형상 식을 적용하여 복합재 압력용기의 돔형상을 설계하고 해석하였다. 돔형상 설계변수로는 0.1 ~ 0.5 의 오프닝 반경비와 40kN ~ 200kN의 추력을 적용하고, 해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 복합재 압력용기 내면과 외면의 섬유방향 변형률을 계산한 결과, Fulton 돔의 경우 ρ_0 가 커질수록 변형률 기울기가 작아지고, Vasiliev 돔은 뚜렷한 경향성이 나타나지 않는다. 또한 $\rho_0 \leq 0.1$ 일 경우 모든 추력에서 Fulton 돔이 변형률 기울기가 더 큰 것을 확인 할 수 있었다. $0.1 < \rho_0 < 0.35$ 인 경우 주어진 추력 범위에서 변형률 기울기가 역전되는 현상을 보이며, $0.35 \leq \rho_0$ 에서는 모든 구역에서 Vasiliev 돔이 변형률 기울기가 더 크게 나타나 압력용기의 설계에 적용하는 것이 효과적이라고 판단된다. 또한 복합재 압력용기의 변형률 기울기로 인해 발생하는 수지균열을 고려한 돔형상 설계가 필수적이다.

Key Words: Composite Pressure Vessel(복합재압력용기), Strain Gradient(변형률 기울기), Structure Analysis(구조해석), Dome Shape(돔형상)

1. 서 론

탄소섬유강화복합재(carbon fiber reinforced composites)는 금속재에 비해 비강도 및 비강성이 우수하여 항공우주 및 방산 분야 등에 널리 이용되고 있다. 특히 필라멘트 와인딩(filament winding) 공법으로 제작되는 압력용기는 섬유 연속성을 가진다. 또한 하중 전달방향으로 섬유를 집중적으로 보강함으로써 섬유강화복합재의 장점을 극대화할 수 있다. 이런 복합재 압력 용기는 전후방 돔과 원통부로 구성된다. 이때 돔부위 설계는 섬유의 미끄러짐과 물림 현상 등으로 제작 가능성을 고려해야한다. 또한 원통부와 경계인 접선부가 존재하여 급격한 응력 및 변형률의 기울기현상이 발생한다. 이러한 이유로 돔의 형상 설계에 대해 많은 연구가 진행되어왔다 [1-3]. 본 연구에서는 추력을 고려한 돔형상 설계식 중 Fulton이 제시한 설계기법을 보완한 설계식[4]과 Vasiliev가 제시한 설계 식[5]을 이용하여 돔형상을 설계하였고, 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 이때 변수로는 추력과 보스 오프닝 비를 선정하였으며 돔의 내면과 외면의 섬유방향 변형률 기울기를 비교하고 고찰하였다.

2. 돔형상 설계

Fig. 1은 복합재 돔형상의 자오선과 원주방향의 곡률과 와인딩 궤적을 나타내고 있다. r_1 은 자오선 방향 곡률이고, r_2 는 원주방향 곡률이다. ϕ 는 자오선 방향 각도이고, θ 는 원주 방향 각도

이다. 또한 r_c 는 원통부 반경이며, r_0 는 오프닝부 반경이다.

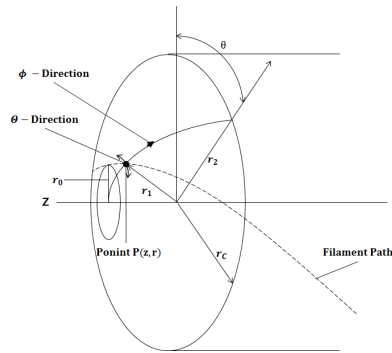


Fig. 1 Dome curvature and filament winding path

2.1 복합재 돔형상의 기본 요소 식

Fulton 돔과 Vasiliev 돔은 다음과 같은 기본 요소 식을 이용하여 돔형상 설계 식을 제시하고 있다.

$$r_1 = -\frac{(1+z^2)^{\frac{3}{2}}}{z} \quad (1)$$

$$r_2 = -\frac{r\sqrt{z^2+1}}{z} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)는 각 자오선과 원주방향 곡률 방정식을 나타내고 있다.

$$\frac{N_\phi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} = p \quad (3)$$

식 (3)은 내압에 작용하는 막 응력 식을 나타

* 한국 화이버

† 교신저자, E-mail: everbjc@hiber.com

내고 있다.

$$\tan^2 \alpha = \frac{N_\theta}{N_\phi} \quad (4)$$

식 (4)는 섬유만이 하중을 견디고 수지는 하중을 견디지 못한다고 가정하는 넷팅(netting)이론 방정식을 나타내고 있다. 여기서 α 는 자오선 기준으로 섬유 적층 각도이다.

$$r \sin \alpha = r_0 \sin \alpha_0 \quad (5)$$

$$\sin \alpha = \frac{r_0}{r} \quad (6)$$

식 (5)는 곡면 상 최단경로인 측지선(Geodesic Line) 관계식을 나타내고 있다. 여기서 오프닝 부에서 적층각도는 90° 이므로 식 (5)를 정리하면 식 (6)로 나타낼 수 있다.

2.2 돔형상 기본 가정식

식 (10)은 Fulton 돔형상의 기본 가정식이다. 돔의 가해지는 추력이 돔 전체에 가해지며, 돔에 오프닝 부가 없는 상태에서 돔에 압력이 작용한다고 가정한다.

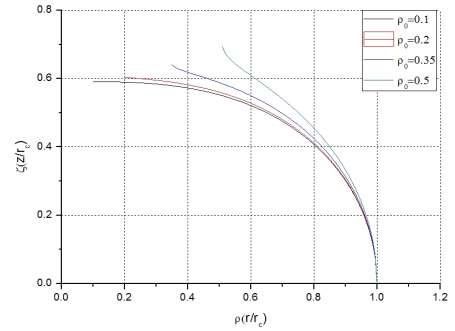
$$2\pi r N_\phi \sin \alpha = \int_0^r p 2\pi r dr - F \quad (10)$$

식 (11)은 Vasiliev 돔형상의 기본 가정식이다. 돔의 자오선 방향에 가해지는 추력이 오프닝부셀의 단면에 일정하게 분포되어 있는 단위길이 당 축 방향 하중 T 로 가정하였으며, 압력은 돔에 오프닝부 부터 작용한다고 가정하였다.

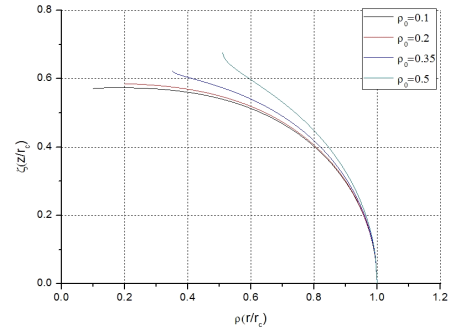
$$2\pi r N_\phi \sin \alpha = 2\pi \left(\int_{r_0}^r p r dr - T r_0 \right) \quad (11)$$

각 돔형상 설계 식을 이용하여 추력(40kN, 100kN, 200kN)과 오프닝 부 반경비($\rho_0=0.1, 0.2, 0.35, 0.5, \rho_0 = r_0/r_c$)를 변수로 하여 돔형상을

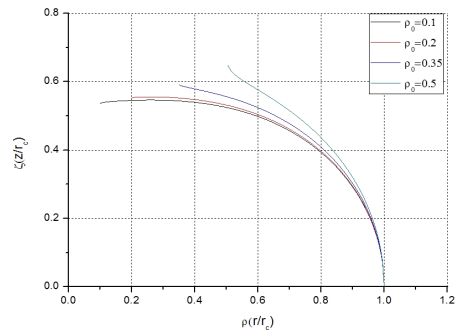
설계하였다. Fig. 2에는 Fulton 돔형상 설계 식을 이용하여 설계한 돔형상이 나타나있다. Fig. 3에는 Vasiliev 돔형상 설계 식을 이용하여 설계한 돔형상을 나타내고 있다.



(a) F=40 kN

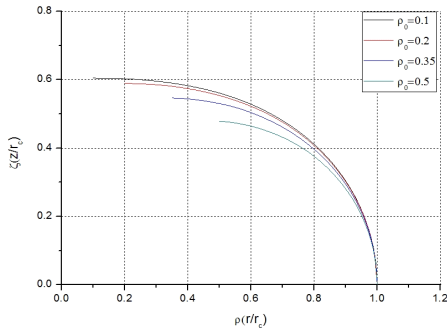


(b) F=100 kN

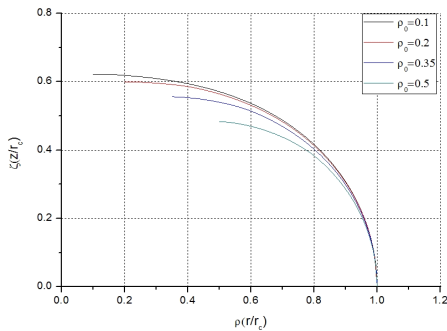


(c) F=200 kN

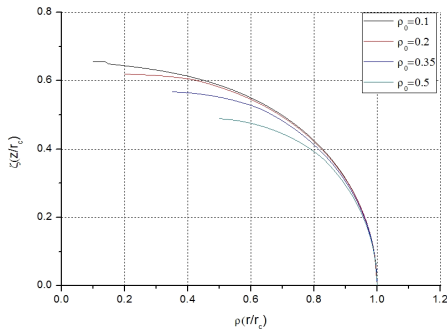
Fig. 2 Fulton dome shape for the index of opening radius(ρ_0)



(a) F=40 kN



(b) F=100 kN



(c) F=200 kN

Fig. 3 Vasiliev dome shape for the index of opening radius(ρ_0)

3. 구조 해석

3.1 구조 해석 모델

본 연구에 적용한 압력용기는 원통부의 반경은 250 mm이며, T800/epoxy 탄소섬유 복합재

를 적용하였다.

Table 1은 물성 정보를 나타내고 있다. 또한 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.14를 이용하여서 해석을 수행하였다. 원통부에서 오픈 링 부로 갈수록 와인딩 밴드가 중첩되면서 두께 변화를 고려하기 위해서 솔리드 격자(C3D8R)를 적용하여 모델링하였다. 또한 식 (6)을 이용하여 돔 부 반경에 따른 와인딩 각도를 계산하여 적용하였다.

Table 1. material properties of T700/epoxy

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)
161.3	8.820	8.820
G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
5.331	5.331	2.744
ν_{12}	ν_{13}	ν_{13}
0.33	0.33	0.45

3.2 경계 조건

해석의 단순화를 위해 연소관의 5° 만 모델링하여 순환대칭 조건을 적용하였으며, 압력용기의 전방부만 모델링하여 돔의 축 방향(z-axis)으로 면대칭 조건을 적용하였다. 보스 끝단에는 반경 방향으로 변위를 고정하였으며, 내압은 15 MPa를 적용하였다. 추력은 분포 하중으로 금속 보스 끝단에 적용하였다.

3.3 구조 해석 결과

Fig. 5는 Fulton 돔의 내면과 외면의 섬유 방향 변형률을 나타내고 있다. Fig. 5는 Vasiliev 돔의 내면과 외면의 섬유 방향 변형률을 나타내고 있다. 해석결과 돔의 외면과 내면에 변형률 기울기가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 돔 형상 설계 식에 따라 변형률 기울기의 경향성을 확인하기 위해서 돔의 축 방향의 중간 지점에서의 변형률 기울기($(\epsilon_{inner} - \epsilon_{outer})/t$, t 는 복합재 두께)를 계산하였다. Fig. 6은 돔의 중간지점에서 계산된 변형률 기울기를 나타내고 있다. Fulton

돔의 경우 ρ_0 가 커질수록 변형률 기울기가 작아지는 것을 확인 할 수 있었고, Vasiliev 돔의 변형률 기울기는 특정 영역에서 유지하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 $\rho_0 \leq 0.1$ 일 경우 모든 추력에서 Fulton 돔이 Vasiliev 돔보다 변형률 기울기가 더 큰 것을 확인 할 수 있었으며, $0.1 < \rho_0 < 0.35$ 에서 변형률 기울기가 역전되어 $0.35 \leq \rho_0$ 에는 Vasiliev 돔이 Fulton 돔보다 변형률 기울기가 더 큰 것을 확인 할 수 있었다.

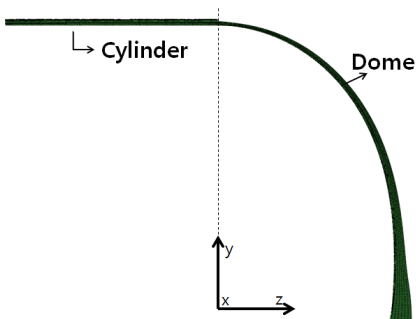
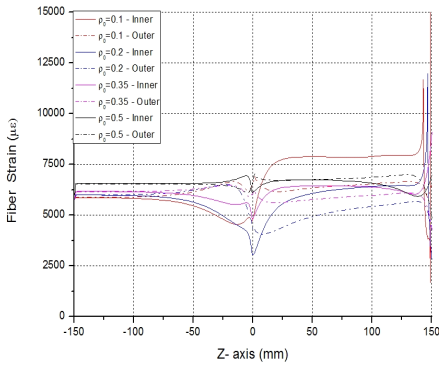
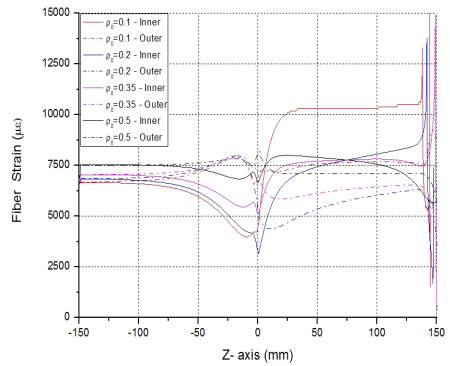


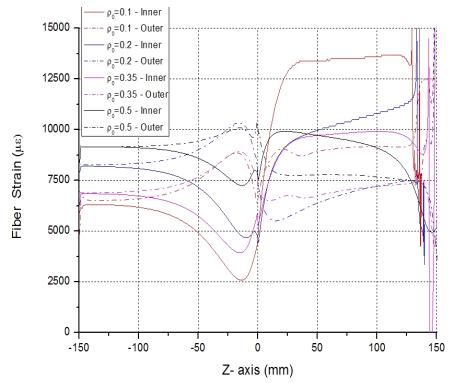
Fig. 4 Finite element models



(a) F=40 kN

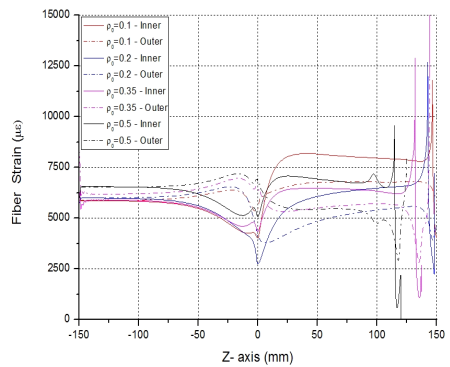


(b) F=100 kN

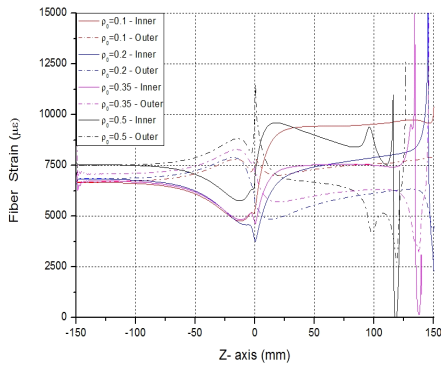


(c) F=200 kN

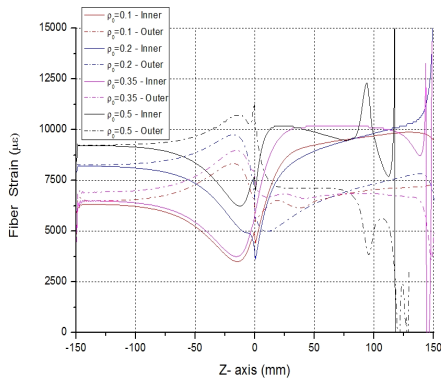
Fig. 5 Fiber strain - z axis graph of Fulton dome



(a) F=40 kN



(b) F=100 kN



(c) F=200 kN

Fig. 6 Fiber strain - z axis graph of Vasiliev dome

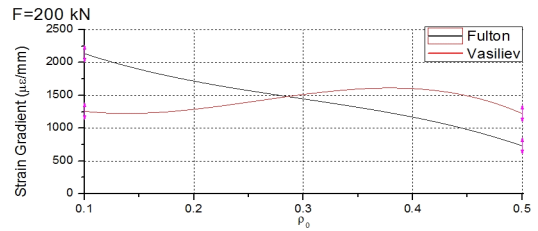
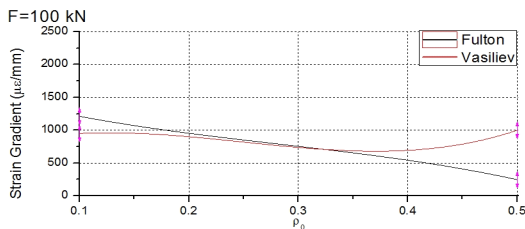
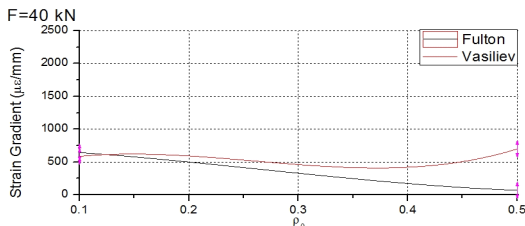


Fig. 7 Strain gradient - opening radius ratio

4. 결론

복합재 압력 용기의 오프닝 반경비와 추력을 변수로 설정하여 Fultou 돔형상과 Vasiliev 돔형상을 설계하고 구조해석을 수행하였다. 그 결과 돔 부에서 변형을 기울기가 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. Fulton 돔의 경우 오프닝 반경비가 커질수록 변형을 기울기가 작아지는 것을 확인 할 수 있었다. Vasiliev 돔의 뚜렷한 경향성이 나타나지 않았다. 또한 $\rho_0 = 0.1$ 일 경우 모든 추력에서 Fulton 돔의 변형을 기울기가 Vasiliev 돔보다 변형을 기울기가 더 컸다. $0.1 < \rho_0 < 0.35$ 에서는 주어진 추력 범위 안에서 변형을 기울기의 역전하는 형상을 보이며, $0.35 \leq \rho_0$ 에서는 Vasiliev 돔이 Fulton 돔보다 변형을 기울기가 더 크게 나타났다. Vasiliev 돔이 변형을 기울기가 더 크게 나타나 압력용기의 설계에 적용하는 것이 효과적이라고 판단된다. 또한 복합재 압력용기의 변형을 기울기로 인해 발생하는 수지균열을 고려한 돔형상 설계가 필수적이다.

참고 문헌

1. 도영대, 윤서호, 황태경, "복합재 압력용기의 돔 곡면 형상 설계 기법연구," 제6차 유도무기 추진기관 학술 대회, 국방과학연구소, pp. 229-237, 1996.
2. Kim, C. U., Kang, J. H., Hong, C. S., Kim, C. G., "Optimal design of filament wound

- structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm," *Composite structures*, 67.4, pp. 443-452, 2013.
3. DENOST, J. P., "New design concepts for filament-wound pressure vessel with unequal polar openings," 18th Joint Propulsion Conference. 1982.
 4. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, "복합재 압력용기의 돔형상 설계 및 성능 평가," *한국복합재료학회지*, 제20권 4호, pp.31-41, 2007.
 5. Vasiliev, V. V., Morozov, E. V., "Mechanics and analysis of composite materials," UK, Elsevier, 2001.