

돔 형상 변화에 따른 복합재 압력용기의 구조 거동 예측

황태경** · 박재범* · 김형근* · 도영대*

The Prediction of Structural Behavior for Composite Pressure Vessel with Changed Dome Shape

Taekyung Hwang** · Jaebyum Park* · HyungKun Kim* · Youngdae Doh*

ABSTRACT

Dome shape design method of filament wound (FW) composite pressure vessel, which can create various dome shape with fixed boss opening, was suggested. And, the performance indices (PV/W) for composite pressure vessel with same boss opening but different dome shape were investigated by finite element analysis (FEA) and hydro-test. The FEA showed good agreement with test results for burst pressure. Generally, as the dome shape of pressure vessel was changed to flat dome, the inner volume is increased and the burst pressure is decreased. In the case of above $\rho_0=0.54$, the performance index showed decreased value due to the low burst pressure. However, at $\rho_0=0.35$, the dome shape change brings not significant reduction of burst pressure and performance index.

초 록

동일 보스 오프닝에 대해 여러 형상의 돔을 설계할 수 있는 복합재 압력용기용 형상 식이 제시되었고, 이러한 돔 형상 변화에 따른 복합재 압력용기의 성능(파열압력*내부용적/복합재무게) 변화를 유한요소 응력해석과 시험을 통해 규명하였다. 해석을 통해 예측한 돔 형상 변화에 따른 압력용기의 파열압력이 시험 결과와 좋은 일치를 나타내었다. 전반적으로 돔 형상이 낮아짐에 따라 압력용기 내부 용적이 증가하였으나, 파열 압력은 저하되는 현상을 나타내었다. 보스 오프닝 비(ρ_0)가 0.54 이상인 경우, 돔 형상이 낮아짐에 따라 파열 압력이 저하되어 성능 저하가 나타났다. 그러나 보스 오프닝 비(ρ_0)가 0.34이하 경우 돔 형상 변화에 따른 파열 압력 저하가 크지 않음으로 성능의 큰 변화가 없었다.

Key Words: Composite Pressure Vessel(복합재압력용기), Dome Shape(돔형상), Burst Pressure (파열압력), Performance Factor(성능계수), Finite Element Analysis(유한요소해석)

* 국방과학연구소 1기-6부

** 국방과학연구소 1기-6부

연락처, E-mail: cais99@hanmail.net

1. 서 론

탄소 섬유 강화 복합재(CFRP)는 우수한 비 강

도, 비 강성특성으로 현재 항공 우주 분야에 널리 이용되고 있다. 특히 섬유유인장 특성이 설계의 중요 변수가 되는 고압 압력 용기 및 연소관(motor case)에는 복합재가 성공적으로 적용되어 왔다. 특히 연소관인 경우 무게 절감으로 인한 성능 향상이 필수적이기 때문에 1960년대부터 복합재 적용이 활발히 이루어져 왔다. 그러나 복합재의 적용은 금속재에 비해 적층 두께가 증가하여 연소관 내부추진제 충전량이 감소하는 단점이 존재한다. 이를 해결하기 위해 고 강도 탄소 섬유를 설계에 이용하거나 최적 적층 설계를 통해 적층 두께를 줄이는 연구가 진행되어 왔다. 또한 연소관 내부 용적(volume)을 늘이기 위한 방법으로 돔(Dome) 형상 변화 연구도 수행되어 기존의 돔 형상 설계[1-2]에서 벗어나 동일 보스 오프닝에 대해 여러 형상의 돔을 설계하는 이론[3-5]이 제시되었고, 돔 형상 변화 따른 내압 구조 거동 변화에 대한 연구[6]도 진행되어 왔다. 국내에서도 이러한 돔 형상 식을 이용하여 보스 오프닝 별 돔 형상 변화를 해석 변수로 하는 설계 변수 응력 해석을 수행하여 연소관의 성능 변화를 고찰하였다[7]. 그러나 많은 경우의 수를 변수로 다루다 보니, 각 경우별로 시험으로 규명하기가 불가능하였다. 그러므로 본 논문에서는 연소관에 적용 가능한 보스 오프닝과 돔 형상을 선정하여 돔 형상 변화에 따른 성능 변화를 해석과 시험을 통해 규명하였다.

2. 돔 형상 설계 및 성능 변화

Figure 1은 전형적인 복합재 돔 형상과 돔을 구성하는 각 방향 곡률(curvature) 그리고 와인딩되는 섬유의 궤적을 나타내고 있다. 그림에서 r_1 , r_2 는 돔을 구성하는 자오선(meridian)과 원주(hoop)방향의 곡률을 나타내고, ϕ 와 θ 는 자오선과 원주 방향 각도를 의미한다. 그리고 r_c 와 r_o 는 원통부와 보스 오프닝(opening)부의 반경을 나타낸다. 복합재 압력 용기의 돔은 내압 응력과 제작성(섬유 미끄러짐)을 고려하여 결정되며, Fig.1의 기하학적 형상식과 돔 부의 섬유응력 관계식

에 의해 형상이 결정된다. 이때 Fig.2와 같이 보스 오프닝의 하중을 고려한 하중 평형 방정식을 이용하면 Fig. 3과 같이 동일 보스 오프닝에 대해 다양한 돔 형상을 구현할 수 있는 설계 식을 유도할 수 있다[7]. 여기서 I_F 는 관성력 무차원 지수로서 관성력이 없는 $I_F=0$ 인 경우는 기존의 등장력 돔(Isotensoid dome)과 일치하고, 관성력이 커짐에 따라 I_F 가 증가하여 돔 형상이 원통부 쪽으로 낮아지는 형상을 나타낸다. 이때 오프닝 압력하중인 $I_F=\sin^2\alpha_o$ 까지는 오프닝 끝단 영역까지 변곡점 없는 곡선을 얻을 수 있으나, 이 값 이상의 경우에는 돔이 함몰되는 이상(異狀)형상을 나타낸다. 그러므로 본 논문에서는 오프닝 압력하중의 돔 형상까지 고려한 해석과 시험을 수행하였다.

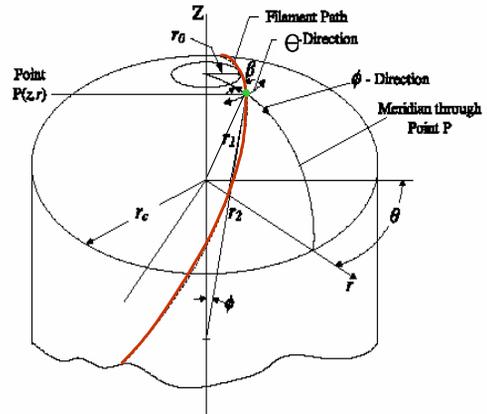


Fig. 1 Dome curvature and fiber path

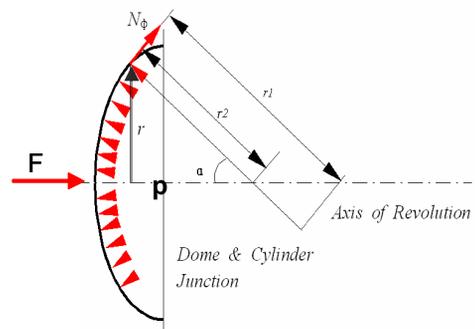
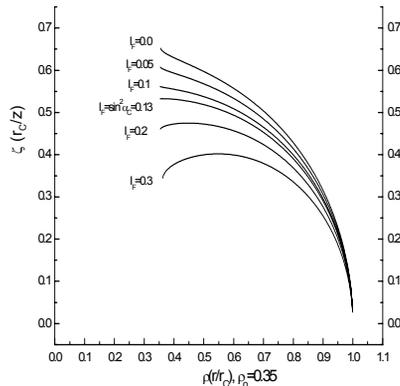
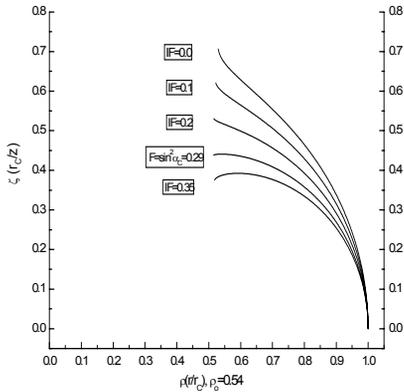


Fig. 2 Force equilibrium on the dome considering inertia force



(a)



(b)

Fig. 3 Dome shape for the index of inertia force (I_F): (a) $\rho_0=0.35$, (b) $\rho_0=0.54$

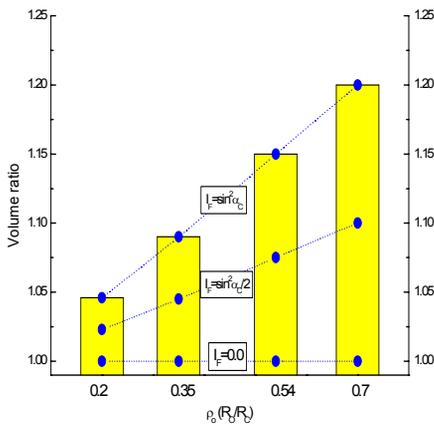
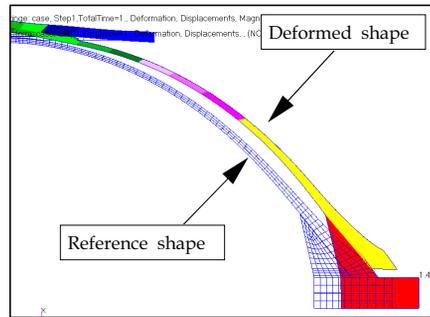


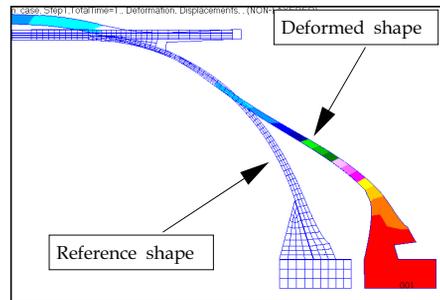
Fig. 4 Inner volume ratio for the index of inertia force (I_F) according to the value of ρ_0

Figure 3은 원통부와 보스오프닝 비(ρ_0)가 0.35, 0.54인 경우의 관성력 지수에 따른 돔 형상을 나타내고 있고, Fig.4는 보스 오프닝과 관성력 지수 변화에 따른 내부 용적변화를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 보스오프닝과 관성력이 클수록 내부 용적비(volume ratio)가 크게 증가함을 볼 수 있다. 여기서 용적비는 관성력이 “0”인 등 장력 돔 기준 값이다.

3. 구조 응력해석



(a)



(b)

Fig. 5 Deformed shape for the boss opening of $\rho_0=0.54$: (a) $I_F=0.0$, (b) $I_F=0.3$

관성력에 지수에 의한 돔 형상 변화가 연소관 내압거동에 미치는 영향을 예측을 위해 유한요소 응력해석이 수행되었다. Figure 5는 $\rho_0=0.54$ 일 때 관성력 지수에 따라, 연소관의 내압 변형 거동을 나타내고, Fig.6은 이때의 섬유 응력 분포를 나타내고 있다. 관성력 지수가 “0”인 경우 돔 부위 변형이 균일하게 팽창하지만, 관성력 지수

가 최대값인 경우 돔 형상이 매우 낮음으로 인해 보스경계부에 변형이 집중되어, 섬유 응력이 매우 크게 나타난다. 그리고 내압에 의해 돔에 굽힘 변형이 발생하여 Fig.6 (b)에서 보듯이 내부와 외부의 섬유 응력 구배가 발생한다.

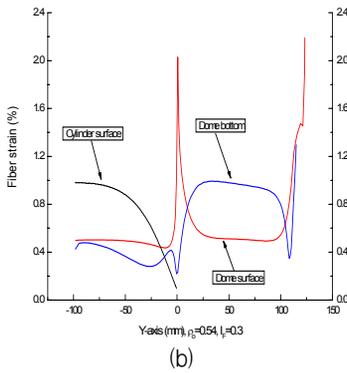
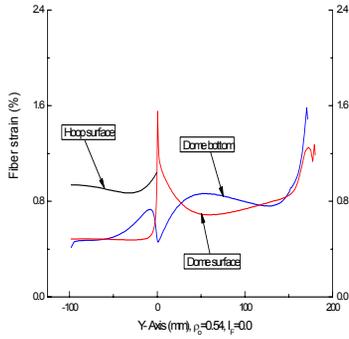


Fig. 6 Fiber strain distribution on the surface and bottom layer for $\rho_0=0.54$: (a) $I_F=0.0$, (b) $I_F=0.3$

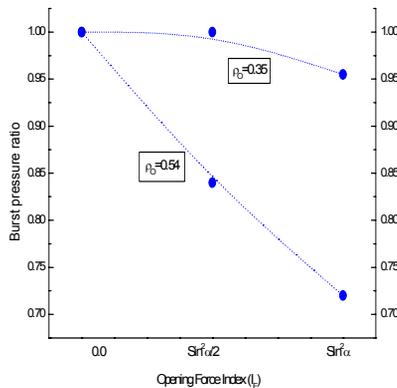


Fig. 7 Burst pressure ratio for the index of inertia force (I_F) according to the value of ρ_0

Figure 7은 해석 결과로부터 추정된 파열 압력으로, 현재 가장 많이 적용되고 있는 보스 오프닝 2종과 관성력 지수 3종에 대한 해석결과를 종합 정리하였다. 그림에서 보듯이 보스 오프닝이 클수록 돔 형상 변화에 민감하게 파열 압력이 저하됨을 볼 수 있다.

4. 시험용 압력용기 제작/시험평가

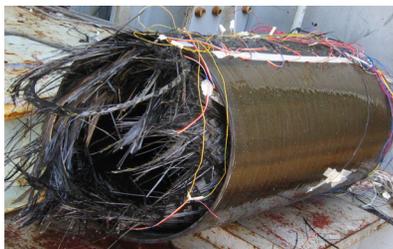
해석 결과의 타당성 입증을 위해 시험용 압력용기를 제작/시험하였다. ρ_0 가 0.54인 압력용기를 관성력 지수를 변수로 3종이 제작/시험되었다. 이때 파열 지점을 돔 부위로 유도하기 위해 응력비 (Stress ratio)를 0.9로 적층 설계하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Photo. for failed pressure vessel for the boss opening of $\rho_0=0.54$:(a) $I_F=0.0$, (b) $I_F=0.15$, (c) $I_F=0.3$

Figure 8에서 수압 파괴 시험한 장면으로, 3조 압력용기 모두 후방 돔 부위가 파괴되었다. 그러나 파열 압력은 각각 4,500, 4,100, 3,400psi로 큰 차이를 나타내었다. 이 값을 등 장력 돔 파열 압력 기준으로 무 차원하여 해석 결과와 비교 정리하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Comparison of burst pressure index for the boss opening of $\rho_0=0.54$

I_F	0.0	0.15	0.3
FEA	1.0	0.84	0.72
Test	1.0	0.91	0.77

해석이 시험보다 다소 낮게 예측하였으나 비교적 좋은 일치율을 보임을 알 수 있다. 이상과 같이 해석 결과의 타당성이 입증됨으로서, 다른 보스 오프닝 크기의 압력 용기 해석 결과도 신뢰성이 있을 것으로 추정되며 이를 이용한 구조 설계도 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

돔 형상 변화에 따른 연소관의 성능 변화를 유한요소 응력해석과 시험을 통해 규명하였다. 해석을 통해 예측한 돔 형상 변화에 따른 압력용기의 파열 압력이 시험 결과와 좋은 일치율을 나타내었다. 보스 오프닝 크기에 따라 돔 형상 변화에 따른 내부 용적 증가와 파열 압력 변화가 다르게 나타나므로, 시험과 해석을 통한 돔 형상 설계가 요구된다. 원통부 파괴 적층 설계와 돔 부위의 효

과적인 국부 보강 설계가 보완되면, 돔 형상 변화를 통해 연소관의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

1. J. Zickel, "Isotensoid Pressure Vessels," *ARS Journal*, June, 1962, pp.950-951
2. R. F. Hartung, "Planar Wound Filamentary Pressure Vessels," *AIAA Journal*, Vol.1, 1963, pp.2842-2844
3. W. S. Read, "Equilibrium Shapes for Pressurized Fiberglass Domes," *J. of Engineering for Industry*, Feb., 1963, pp.115-119
4. J. F. Fulton, "Structural Design and Analysis of Filament Wound Rocket Motor Case," Technical Report S-267, ROHM and HAAS Company, Nov., 1970
5. V. V. Vasiliev, A. A. Krikanov and A. F. Razin, "New Generation of Filament Wound Composite Pressure Vessels for Commercial Applications," *Composite Structures*, Vol.62, 2003, pp.449-459.
6. E. W. Tackett, G. A. Merrel and S. B. Kulkarni, "Carbon Pressure Vessel Performance with Changing Dome Profiles," AIAA-84-1351, 1984
7. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, "복합재 압력용기의 돔 형상 설계 및 성능 평가," 한국 복합재료학회지, 제20권 4호, 2007, pp.31-41