

Type4 복합재 용기의 돔 형상에 따른 파열형태에 관한 연구

조성민*, 김광석*, 조민식**, 이선규*, 이승국*, 류성기***,#

* 한국가스안전공사 가스안전연구원, ** (주)대흥정공, *** 경상대학교 기계항공학부, 항공연

A Study on Failure Modes of Type4 Composite Pressure Cylinders according to Shapes of Domes

Sungmin Cho*, Kwang Seok Kim*, Min-sik Cho**, Sun-kyu Lee*, Seung-kuk Lee*, Sung-Ki Lyu***,#

* Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, **DH Precision Industrial co., LTD,

*** School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT Gyeongsang National Univ.

(Received 13 June 2017; received in revised form 16 June 2017; accepted 22 June 2017)

ABSTRACT

In this work the augmented safety of Type 4 composite vessel in accordance with uniform-stress design has been demonstrated through a series of burst tests and structural analyses. For this end, three sample vessels were used: (1) designed as guided by the isotenoid dome theory (called iso-dome cylinder); (2) with dome longer compared to uniform-stress design (called prolate cylinder); and (3) with dome wider than uniform-stress design (called oblate cylinder). Structural analyses have been performed using ABAQUS finite element code based on the periodic symmetry to circumferential direction. As a result, the maximum stresses are induced around the bodies of all three cylinders. However, the analyses, with the assumption of possible defect demonstrate that the maximum stresses are induced around the dome knuckles for the prolate and the oblate cylinders. The results of the burst tests for the three cylinders show that the burst initiates from the cylinder body of the iso-dome cylinder and from the dome knuckles of the prolate and the oblate cylinders. Finally, it is recommended that, to comply with DOT CFFC 2007, the dome shape should be designed and fabricated as guided by the isotenoid dome theory.

Key Words : Type4 Pressure Cylinder(Type4 압력용기), Isotenoid Dome Theory(등장력 이론), Failure Mode(파열 양상), Burst Test(파열 시험), Dome Configuration(돔 형상)

1. 서 론

고압가스 저장용기의 일반적인 형상은 몸통과 돔(dome), 보스넥(boss neck)으로 구분한다. 오랜 경험에 따르면 예기치 못한 사고로 용기가 파열하더라

도 몸통에서 파열이 발생하는 것이 가장 안전하며, DOT CFFC 2007 규정 등에서는 기본적으로 용기의 파열이 몸통에서 발생하도록 요구^[1]하고 있으므로 압력용기에 관한 연구가 많이 수행되고 있다^[2-5]. 이러한 요구를 충족하는 용기를 설계하기 위해 등장력 이론을 제시하였다^[6]. 이 이론에 따라 용기를 제작하면 용기 가압 시 용기에 인가되는 응력이 몸통과 돔, 보스넥 부위에 고르게 분포하게 된다. 따라서 상대적으로 용기 두께가 얇은 몸통에서 파열이

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr
Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

발생하도록 유도하는 것이다.

최근 외국에서 제조된 Type4 복합재료 용기 중 일부가 위의 등장력 설계를 따르지 않는 것으로 파악되었다. 물론 DOT 규정이 등장력 설계를 의무화한 것은 아니므로 이들 용기 제조 및 유통사에 법적 제재조치를 할 수는 없으나 기술적인 측면에서 판단할 때 등장력 설계를 바탕으로 둔 제품의 안전성에 대해서 강조할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 국외 유통 및 국내 개발 중인 사용압 300 bar, 내용적이 6.8 L인 공기 호흡기용 Type4 복합재료 용기 세 가지 제품을 구입(Table 1 참조)하고, 용기 단면을 절단하여 분석하거나 제조업체로부터 라이너의 형상 데이터를 받아 3차원 형상을 얻고, 이를 바탕으로 구조해석을 통한 응력 집중 부위를 파악하였다. 또한, 수압 파열 시험을 통해 파열 부위를 관찰함으로써 해석결과를 검증하였다.^[7]

2. 등장력 이론

2.1 Type4 복합재료 용기

금속 재질 용기의 단점을 보완하고, 경량화를 위해 개발된 복합재료 용기는 맨드릴 역할의 라이너를 외곽 표면의 평탄부 또는 전체를 에폭시 수지로 함침한 탄소섬유 또는 유리섬유로 감아 제작한다. 탄소섬유의 인장강도가 금속보다 매우 높아 용기 벽면에 균열이 발생하더라도 파열 전 내용물(고압 가스)이 누출하는(a. k. a. Leak Before Burst) 긍정적 특징이 있다. 복합재료 용기는 라이너 재료에 따라 Type3(금속 재질) 또는 Type4(플라스틱 재질)로 구분되며, Type4 용기는 Type3 용기에 비해 반복수명이 높고 무게도 가벼우며 기밀을 담당하는 라이너가 플라스틱인 관계로 내부식성의 특성을 가진다.

2.2 등장력 설계

등장력 돔의 곡면 형상 설계 방법은 양쪽 보스 부분의 반경이 같은 때 사용되는 방법으로 망목이론의 가정과 곡면상의 섬유 방향 장력이 일정하다

는 등장력 가정으로부터 유도한다. 또한 용기의 위치에 따른 두께를 구하기 위하여 다음의 두 가지 가정을 한다.

(가) 섬유의 함유율이 일정

$$(2\pi r)t \cos \alpha = (2\pi r_c)t_c \cos \alpha_c \quad (1)$$

$$t = \frac{r_c \cos \alpha_c}{r \cos \alpha} \times t_c \quad (2)$$

(나) 돔 부분을 자오선의 수직(gradient) 방향으로 단면을 통과하는 섬유의 수가 일정

$$N_\psi = t \sigma_f \cos^2 \alpha \quad (3)$$

$$N_\phi = t \sigma_f \sin^2 \alpha \quad (4)$$

여기서, r_c , α_c , t_c 는 각각 실린더 부분의 반경, 와인딩 각도와 헬리컬층의 두께이며, N_ψ 와 N_ϕ 는 구형 좌표계에서 ψ 와 ϕ 방향 섬유의 수이다. 식(2)-(4)를 연립하여 섬유방향 응력에 관한 미분방정식을 얻는다.

$$\sigma_f = \frac{pr^2}{2r_c t_c \cos r \alpha_c} - \frac{\sqrt{(1+r^2)}}{\cos \alpha} \quad (5)$$

식(5)에서 섬유방향 응력 σ_f 가 곡면을 따라 일정하므로 r 에 대한 미분방정식을 풀어 와인딩 각을 구한다.^[8-9]

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{r_b}{r} \right) \quad (6)$$

Table 1 Type4 composite pressure vessels purchased and examined in this research

Class	Model	Manuf.	Working Pressure	Capacity
Iso-dome	N/A	DH PIC(Korea)		
Prolate	T000455	CTS(Italy)	300 bar	6.8 L
Oblate	N/A	DH PIC(Korea)		

3. 실험 및 재료

3.1 시험용기

시험을 위해 세 가지 용기를 길이 방향으로 절단하여 단면형상을 관찰한 결과, 한 개의 용기가 등장력 돔으로 제작되어 있었으며 이를 iso-dome 용기로 명명하였다. 다른 한 개의 용기의 돔은 제3축이 등장력 설계보다 긴 타원체였으며 이를 prolate 용기로 명명하였다. 마지막 용기의 돔은 제3축이 등장력 설계보다 짧은 타원체였으며 이를 oblate 용기로 명명하였으며 Fig. 1에 각각의 특징을 나타냈다.

3.2 3차원 구조해석

시험용기는 Fig. 2와 같이 헬리컬층의 존재로 인해 원통형 좌표에서 θ 방향으로 주기적 대칭성을 갖는다(예, $\Delta\theta = 15^\circ$). 이를 구조해석에 적용하기 위하여 ABAQUS(Dassault Systems, France)에서 다점 구속 조건을 사용하였다. 또한, 필라멘트 와인딩 구조의 이방성으로 인한 실린더 몸통과 돔 연결 부위의 국부 응력 분포를 정확하게 예측하기 위해 3차원 고체 요소 중 20절점의 2차 변위 요소를 적용하고, 라이너의 소성거동과 비선형 거동을 예측하기 위한 기하학적 비선형 및 재료 비선형 해석기법을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석에는 육면체 mesh(size=0.2 cm)를 사용하였고 i5-4200U CPU(1.60 GHz)와 RAM 4 GB 조건에서 1회 계산에 약 20분이 소요되었다.

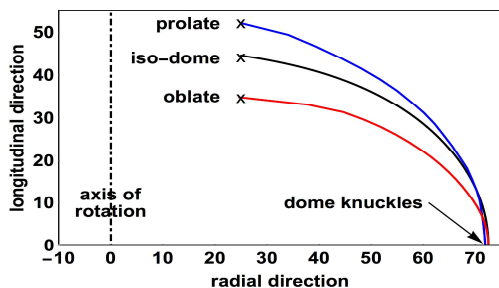


Fig. 1 Outer boundaries of the dome liners obtained from the Type4 cylinders to be tested

3.3 파열시험

세 종류의 시험용기에 대하여 DOT CFFC 2007 및 KGS AC411-2015에 명시된 수압 파열 시험(hydraulic burst test) 절차에 따라 시험을 실시하였다. 수압 파열 시험은 한국가스안전공사 가스안전 연구원에 구축된 지하 PIT에서 비 수조식으로 진행하였으며, 용기 내부에 공기가 존재하지 않도록 수돗물을 채운 다음 일정한 속도로 가압한다. Type4 용기의 경우(full wrapped cylinder) 내압 검사 압력(국내 기준 상 사용 압력의 5/3)의 1.8배의 압력까지 가압한 후 해당 압력에서 60초간 유지한다. 이후 같은 속도로 용기가 파열할 때까지 가압한다. 최소 파열 압력은 탄소섬유를 사용한 용기에 대하여 “섬유응력비”의 2.4배에 해당하는 900 bar이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 구조해석 결과

구조해석 결과, 등장력 설계와 관계없이 모든 용기가 파열 압력(1,100 bar)이 인가되었을 때 Fig. 2에서 보이는 것처럼 용기 몸통 부위 hoop층에서 최대응력이 발생하였다. 이 최대값은 섬유 파열 강도(2,548 MPa) 이상으로 용기는 몸통부위에서 파열이 발생할 것으로 예측되었다. 이는 DOT CFFC 2007의 기준에 적합한 파열 양상(failure mode)이다.^[10-13]

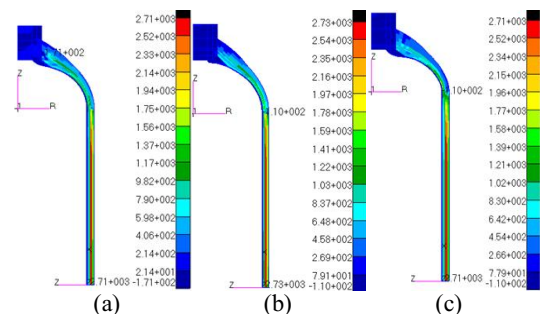


Fig. 2 Stress distributions of the sample cylinders at 1,100 bar

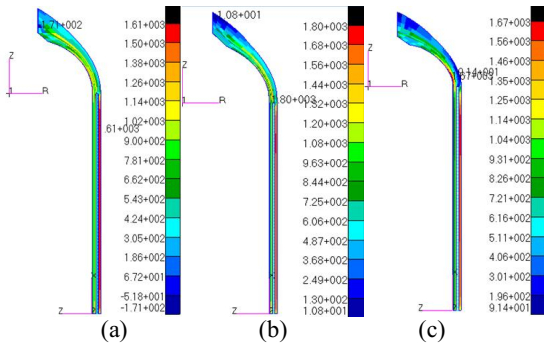


Fig. 3 Stress distributions of the sample cylinders at 1,100 bar (the outermost hoop layer removed)

위의 구조해석 결과에도 불구하고, 복합용기의 설계 적정성에 대한 결론을 내기 위해서는 다음과 같은 추가 해석이 필요하다. 복합용기는 제조상의 실수, 유통 및 사용 과정에서 발생하는 제품의 열화 등이 발생할 수 있다. 특히 길이 방향에 수직인 hoop층이 외부 충격에 취약하여 장시간 사용 시 내압을 담당하는 기능을 상실할 가능성이 크다. 이를 최 외곽 hoop층이 존재하지 않는다고 가정하고, 앞서 기술한 동일한 조건의 구조해석을 추가로 실시하였다.

그 결과 Fig. 3(a)에서 iso-dome 용기는 hoop층을 제거하여도 동일하게 몸통에서 최대 응력이 발생하였고, 파열형상 역시 몸통에서 발생할 것으로 예측된다. 이에 반해 Fig. 3(b) prolate 용기와 Fig. 3(c) oblate 용기의 경우, 돔과 몸통의 경계주변에서 최대 응력이 발생하게 됨을 확인하였다. 따라서 두 용기는 파열할 때 돔과 몸통이 분리될 것으로 예측할 수 있다.

라이너의 연신율은 매우 높아 단위 면적당 하중을 계산하는 선형응력분석법은 적절하지 않을 수 있다. 선형응력분석법으로는 몸통부에서 돔까지 소재 인장강도(57 MPa)의 응력이 모든 용기에 대해서 공통적으로 발생하고(Fig. 4), 이 부분에서 파단이 될 것으로 예측하게 된다. 반면, 라이너의 높은 연신율을 고려한 비선형 변형률 분석을 실시하면, 모든 용기에 대해서 공통적으로 보스넝 부위에서 최대 변형률이 발생하였다(Fig. 5). 차순위 변형 발생 부위는 용기 몸통의 중간 부위이었다.

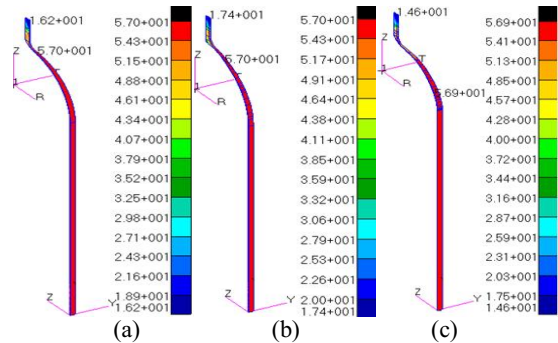


Fig. 4 Stress distributions of the plastic liners of the sample cylinders at 300 bar

이는 oblate 용기의 경우 돔과 몸통의 경계에서 높은 변형이 발생하여 바람직하지 못한 파열 형상을 가질 확률이 높다는 것이다.

3.2 파열시험 결과

본 연구에 사용된 세 가지 형식의 용기(iso-dome, prolate, oblate)를 각각 1개씩 KGS AC 411에 규정된 절차에 따라 상온 수압 파열시험을 실시한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. 우선 Fig. 6은 파열시험 도중 시간에 따른 용기의 압력 데이터이고, Fig. 7은 파열시험 종료 후 촬영한 사진이다. Iso-dome 용기는 약 1,158 bar에서 파열이 발생하였으며, 파열 부위는 몸통 중앙이었다.

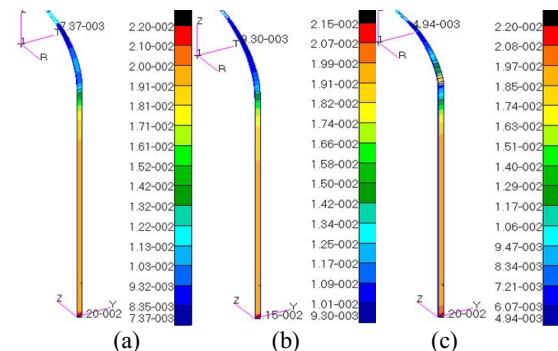


Fig. 5 Stress distributions of the plastic liners of the sample cylinders at 300 bar (boss necks removed)

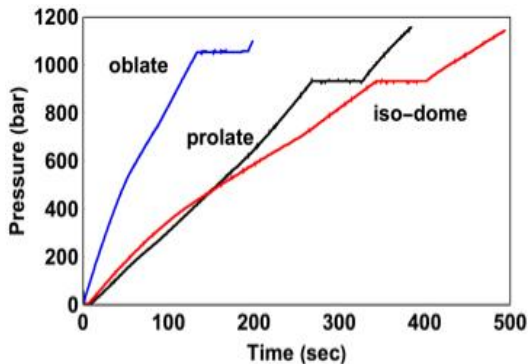


Fig. 6 Pressure profiles during the burst tests



Fig. 7 Failure modes of the sample cylinders as a result of burst tests with (a) iso-dome; (b) prolate; and (c) oblate cylinders

Prolate 용기의 경우, 약 1,100 bar에서 파열하였으며, 돔 너클 부위가 파열하였다. Oblate 용기는 약 1,144 bar에서 파열하였으며, prolate 용기와 동일한 돔 너클 부위에서 파열하였다. 등장력 설계를 벗어난 제품의 경우, 실제 파열 양상이 구조해석으로 예측한 결과와 상이하게 돔 너클이 취약한데, 이는 실제 필라멘트 와인딩 공정에서 발생하는 와인딩 밀립으로 설명할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 우리나라에서 유통되는 공기 호흡기용 Type4 복합재료 용기의 돔 형상에 따라 용기 파열 시 파열 양상(failure mode)이 달라짐을 구조해석과 파열시험을 통해 확인하기 위해 수행하였다. 몸통 우선 파열 양상은 북미 규정인 DOT CFRC 2007에 명시되어 있으며, 다른 규정에는 없더라도 충격파가 완화될 수 있는 안전상의 이유로 국내외 실무자들에 의해 받아들여지고 있다.

이를 위해, 내용적이 6.8 L, 사용압이 300 bar인 Type4 세 종류의 용기를 구매하여 단면을 절단하고 돔 형상을 그래프화 하였다. 등장력 돔 이론을 해당 용기에 적용한 결과, 한 용기는 등장력 설계대로 제작되었으며(iso-dome 용기), 다른 한 용기는 제 3축의 길이가 등장력 설계 형상보다 긴 타원체였고(prolate 용기), 나머지 한 용기는 제 3축의 길이가 등장력 설계 형상보다 짧은 타원체였다(oblate 용기). 복합재료 용기의 특징인 원주방향 주기적 대칭 조건을 적용하여 실시한 구조해석 결과, 원 용기 모두 몸통부위에서 최대 응력이 유발되는 것으로 나타났다. 이는 용기 파열이 몸통부위에서 시작할 수 있음을 의미한다. 그러나 용기의 제작 및 유통, 사용과정에서 발생할 수 있는 결함을 가정한 구조해석 결과는, 등장력 설계 용기를 제외하고는 모두 돔 부위에서 최대 응력이 유발되었다.

KGS AC411-2015에 규정된 절차에 따라 세 용기에 대해 상온 수압파열시험을 실시한 결과, 등장력 설계를 준수한 용기만 몸통에서 파열이 시작되었으며, 나머지 용기는 돔과 몸통의 사이에서 파열이 진행되었다. 몸통 우선 파열 양상을 만족하는 용기는 등장력 돔 설계를 준수한 용기뿐이었다. 이는 복합재료 용기 제작과정 중 필라멘트 와인딩 시, 필라멘트가 원 설계대로 감아지지 않고 위치 이탈이 일어나기 때문인 것으로 예측한다. 이 결과를 바탕으로 DOT CFRC 2007 규정에 적합한 용기를 생산하기 위해서는 등장력 돔 이론을 적용하여 설계 및 제작할 것은 권장한다.

후 기

“본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업(20143030040840&20162220100080) 및 소재부품기술개발사업(10049636) 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.”

REFERENCES

1. KGS AC411-2015: Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Storage Tanks and Pressure Vessels for High-pressure Gases.
2. Cho, S. M., Kim, K. S., Kim, C. J., Lyu G. J., Lee Y. J., Jo Y. S., Lyu S. K., "Temperature Variations of Air Pocket in Type-3 Composite Vessel during Ambient Hydraulic Cycling Test", J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 14, No. 5, pp. 120-125, 2015.
3. Choi, K. S., Park, J. H., Park, J. H., "A Structural Analysis by Finite Element Method under the Dropping Condition of Standardized IP-2 Metal Container for Decommissioning Radwaste Transportation", J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 14, No. 6, pp. 35-40, 2015.
4. Jang, J. H., Ha, C. K., Chu, B. S. Park, J. Y., "Development of Fault Diagnosis Technology Based on Spectrum Analysis of Acceleration Signal for Paper Cup Forming Machine", J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 15, No. 6, pp. 1-8, 2016.
5. Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. H., Kim, H. Y., "Design of a Cylinder Valve Solenoid for a CNG Vehicle using Electromagnetic Field Analysis", J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 15, No. 2, pp. 89-96, 2016.
6. DOT CFRC 2007: Basic Requirement for fully Wrapped Carbon-Fiber Reinforced Aluminum Lined Cylinders
7. ASTM E8-01, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, p. 14.
8. Rosata, D. V. and Grove, C. S. Filament winding : Its Development, Manufacture, Application and Design, Interscience Publishers, 1984.
9. Sun, X. K., Du, S. Y. and Wang, G. D., Bursting Problem of Filament Wound Composite Pressure Vessels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, pp. 55-59, 1999.
10. Engineering Materials Handbook-Composites, ASME International, pp. 503-518, 1987
11. Krolewski, S., Economic comparison of Advanced Composite Fabrication Technology, 34th International SAMPE Symposium, May 1989.
12. Kwang, T. K., Jung, S. K., Doh, Y. D., Cho, W. M. and Jung, B., The Performance Improvement of Filament Wound Composite Pressure Vessels, International SAMPE Symposium, pp. 1427-1438, 2000.
13. Loisse, M., Production Oriented Design of Filament Wound Composites, K. U. Leuven, PhD Thesis, April, 1990.