

소형 압력 용기의 변형 및 파열 경향에 대한 연구

임상식 · 장갑만[†] · 이진한 · 최예루 · 김기범*

한국가스안전공사 장치연구부 안전연구실, 충북대학교 기계공학부*

(2014년 5월 7일 접수, 2014년 9월 10일 수정, 2014년 9월 12일 채택)

A Study on the Propensity for the Deformation and Failure of a Small Pressurized Cylinder

Sang-Sik Yim · Kap-Man Jang[†] · Jin-Han Lee · Ye-Roo Choi · Ki-Bum Kim*

Equipment Research Department, Safety Research Division, Korea Gas Safety Corporation

*Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

(Received 7 May 2014, Revised 10 September 2014, Accepted 12 September 2014)

요약

캠핑 문화에서 주로 사용되던 부탄의 경우 증기압이 낮아 안전성의 확보가 쉽지만, 기화점이 높아 사용자의 부주의와 사고를 유발하는 계기가 되었다. 이와 같은 연유로 최근 부탄 연료의 불편함을 대체 할 캠핑용 연료로써 프로판 공급의 필요성이 대두 되었고, 프로판 용기의 개발이 진행되었다. 프로판은 연료 특성상 높은 증기압을 가지고 있어, 용기 제작에 있어 내압 성능이 가장 중요한 요소이다. 따라서 본 논문에서는 소형 프로판 용기의 내압 성능을 결정하는 하부 경판 변화에 따른 역학적 변화를 이론적으로 접근하였으며, 수압가압 실험을 통해 압력 용기의 변형 및 파열 특성을 관찰 하였다. 프로판 용기 하부 경판의 두께가 0.25 mm 증가 시 2.5 MPa의 내압성능이 향상되고, 곡률반경이 62 mm 감소 시 내압성능이 1.5 MPa 향상 되었다. 이론과 실험 결과의 비교를 토대로 향후 소형 프로판 압력 용기의 개선 방안을 제시하였으며, 이는 추후 소형 프로판 압력 용기의 보급에 있어 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

주요어 : 프로판, 압력용기, 내압성능

Abstract - Compared to Butane tank, the propane tank should have a higher compressive strength due to its higher vapor pressure. In this study, a theoretical analysis was performed to evaluate the effect of change in the geometry of bottom plate on the mechanical property of tank, and an experiment was also carried out to observe the propensity of the deformation and failure of the vessel using hydraulic pressurizing device. The compressive strength of the vessel was observed to improve 1.5-2.5 MPa as the curvature of the bottom plate was decreased 62 mm and the thickness of the bottom plate was increased 0.25 mm. This study are expected to provide viable information conducive to achieve on-going development of a small vessel for the pressurized propane gas.

Key words : Propane, Pressure cylinder, Pressure-resistant

1. 서 론

최근 언론에서 건전한 여가 활동으로 캠핑활동을 하는 것이 노출되었고, 그에 따라 여가를 즐기는 방

법으로 캠핑 문화가 급속도로 확산되고 있다. 캠핑을 즐기는 사람들이 중요하게 생각하는 것이 취사 및 난방이며, 이를 위해 보편적으로 부탄 연료가 사용된다 [1]. 부탄은 비교적 큰 연소열을 가지고 있으며, 낮은 증기압 및 높은 기화열로 인해 잠재적인 위험성이 낮기 때문에 쉽게 보급화 되었다. 하지만 겨울철 또는

[†]To whom corresponding should be addressed.

Korea Gas Safety Corporation

Tel : 043-750-1452 E-mail : kapman1006@kgs.or.kr

고산지대는 온도가 낮아, 부탄의 높은 기화점(-0.5°C)은 연소기나 난방장치로 부탄의 공급을 저해하는 요소가 된다[2]. 이러한 사용상의 불편은 사용자의 부주의 및 과실을 유발하게 되고 결국 인명피해 등 사고로까지 이어진다. 이와 같은 인재의 원인을 미연에 방지하고자, 부탄에 비해 낮은 기화점을 갖는 프로판(-42.1°C) 연료 보급의 필요성이 대두되었다. 하지만 상온(20°C)에서 부탄의 증기압은 3.1bar인 반면, 프로판의 증기압은 8.35bar로 약 2.5배 가량 높다[3]. 결국 프로판용 소형 압력용기는 우수한 내압 성능을 가져야 하며, 변형 및 파열에 대한 안전성이 충분히 규명되어야 한다[4-5]. 따라서 본 논문에서는 프로판 용기로써 사용되기 위한 소형 압력 용기의 역학적 특성에 대해 규명 하였으며, 수압을 이용한 변형 및 파열 실험 결과와 이론적인 값을 비교하여 그 개선 방향을 제안하였다. 소형 프로판 용기의 공급을 위해 전 세계적으로 연구가 활발히 진행되는 만큼, 본 논문을 통해 제시된 결과는 향후 프로판용 용기 개발과 소형 압력용기 개발에 있어 중요한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

2. 응력해석

소형 압력용기 설계의 초기 기준은 KGS CODE AC111에 의거하여 이뤄졌으며, 용기는 상부 실린더와 하부 경판을 각각 소성 가공하여 불활성 기체 용접법을 선택하였다. 그림 1은 본 연구의 소형 압력용기 개략도이다. 소형 압력용기는 실린더 몸통(밸브 포함)과 하부 경판으로 이루어져 있으며, 내압 성능을 결정하는 가장 중요한 요소는 하부 경판이다. 따라서 실린더 몸통의 밸브와 그에 포함된 부분을 강체로 가정하여 이론적인 응력 해석이 이뤄지며, 하부 경판은 그 형상의 변화 가능한 요소를 고려하여 응력 해석을 수행하였다.

표 1은 소형 압력용기의 재료 및 치수를 나타내며, 본 연구에서는 내압 성능을 결정하는 중요한 요소인 하부 경판의 두께와 곡률반경 변화에 따른 변형 및

파열 양상을 관찰하였다[6].

$$\sigma_{v,cylinder} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Pr}{t} \tag{1}$$

$$\sigma_{v,plate} = \frac{Pr'}{2t'} \tag{2}$$

식 (1)과 (2)는 실린더 몸통과 하부 경판의 응력을 계산하기 위한 식이며, 실린더와 하부 경판의 축방향과 원주방향 이론 응력식을 토대로 연성재료의 항복 기준인 최대전단변형에너지이론(Von Mises Theory)을 적용하였다. 식 (1)과 (2)에서 P, r, t, r', t'은 각각 내압, 실린더 몸통의 반경, 실린더 몸통의 두께, 하부 경판의 곡률반경, 하부경판의 두께를 나타낸다.

그림 2는 식(1)과 표 1을 토대로 내압 변화에 따른

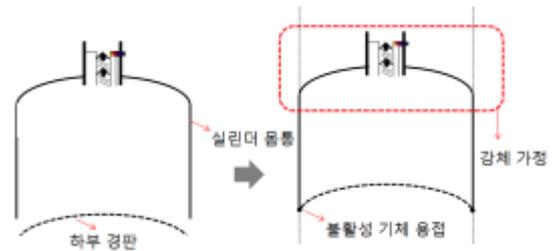


Fig. 1. 소형 압력용기 구성 개략도

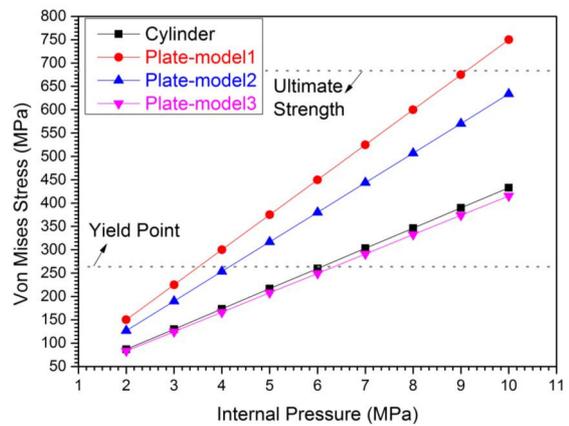


Fig. 2. 내압 변화에 따른 요소의 Von Mises 응력

Table 1. 용기의 재료 및 치수

재질	STS 304 (항복강도 : 253MPa, 극한강도 : 695MPa)		
	형상 특성	두께(mm)	반경(mm)
상부 실린더		1.2	60
하부 경판	모델 1	1.2	180
	모델 2	1.42	180
	모델 3	1.42	118

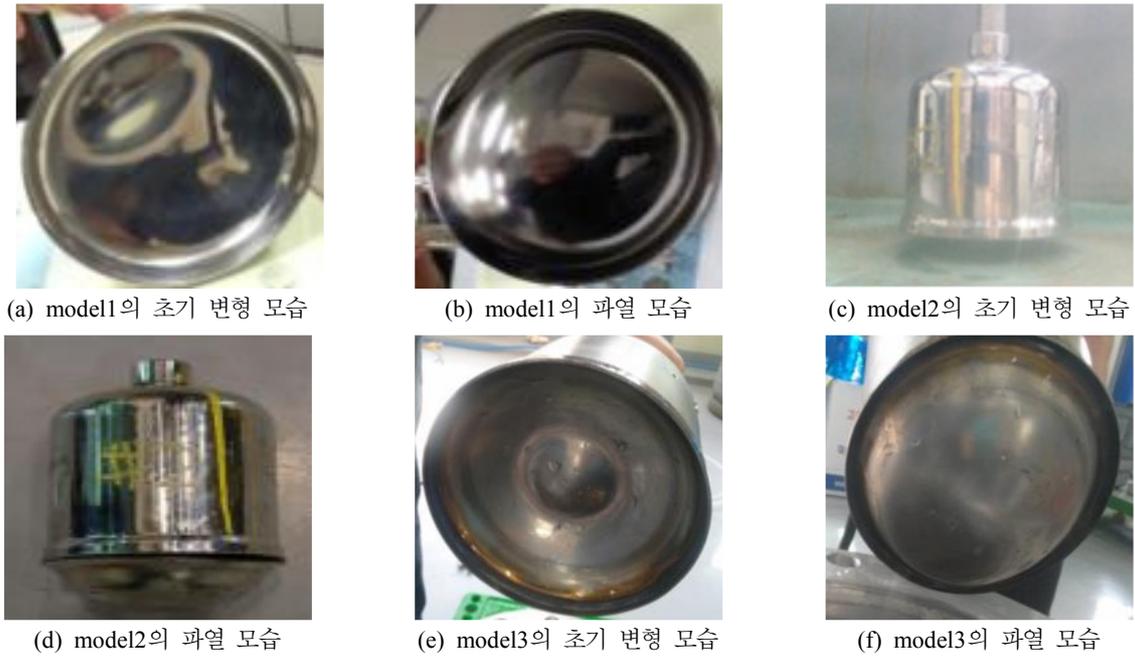


Fig. 3. 내압 변화에 따른 요소의 Von Mises 응력

실린더 몸통과 하부 경판의 Von Mises 응력 변화를 도시한 그래프이다. 사각표시는 실린더 몸통의 응력 변화이며, 원, 삼각각형, 하삼각형은 각각 하부 경판의 model1, model2, model3을 나타낸다. model1은 약 3.5MPa에서 항복점에 도달하며, model2와 model3은 각각 4.3MPa, 6MPa에서 항복점에 도달한다.

3. 변형 및 파열 양상

변형 및 파열 양상을 관찰하기 위해 수압가압 시험을 하였으며, 비 수조식 형태의 수압시험을 수행하였다. 변화 및 파열 양상을 자세히 관찰하기 위하여, 자동 수압가압 장치가 아닌 수동 수압가압 장치(Aqua Booster)를 이용하여 용기를 가압하였다.

그림 3은 하부 경판 조건 변화에 따른 파열 및 변형 양상을 보여준다. (a)와 (b)는 model1의 초기 변형 및 파열의 모습이며, (c), (d)와 (e), (f)는 각각 model2와 model3의 변형 및 파열의 모습을 보여준다. 그림 3의 (a)를 보면 초기 소성 변형이 하부 경판의 중심으로부터 편심되어 시작되는 것을 확인할 수 있다. 초기 편심에 의해 진행되는 소성 변형은 그림 3의 (b)에서 확인할 수 있듯이, 연신이 한 방향으로만 진행되어 응력 집중 현상을 유발하는 요소가 된다. 그에 반해 두께를 늘린 model2와 model3의 경우 초

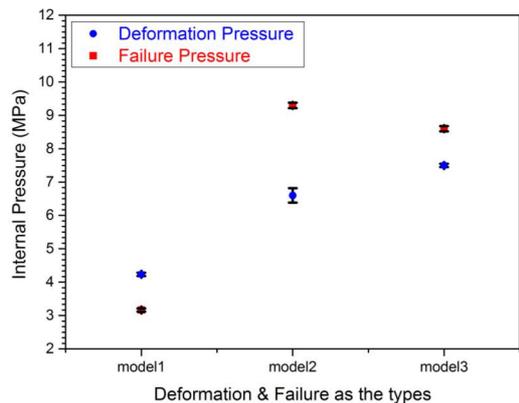


Fig. 4. 내압 변화에 따른 요소의 Von Mises 응력

기 변형이 중심에서 시작되어 전체적으로 균일하게 연신됨을 확인할 수 있다. STS 304는 항복점이 비교적 낮고, 연신률이 큰 것에 반해 극한강도가 높아 하부 경판이 파열되지 않고, 지속적으로 팽창된다. 결국 이 연신에 의한 소성변형은 하부 경판이나 실린더 몸통의 파열을 유발하지 않고, 용접부에 결함을 발생시켜 파열되는 결과를 보여준다.

그림 4는 하부 경판의 두께 및 곡률반경 변화에 따른 변형 및 파열 압력의 차이를 보여준다. model1의 경우 파열 압력이 변형 압력에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 3의 (a)와 (b)에서 하부 경판의 전체적인 변형이 편심되어, 용접부에 결함을 발생시

킵과 동시에 응력 집중 현상이 중첩되어 낮은 내압에서 파열이 일어난 것이다. model2와 model3을 비교하면, 초기 소성 변형 압력은 model3이 높은 반면, 파열 압력은 오히려 model2가 높다. 하부 경판이 초기 소성변형을 일으킬 때, 곡률반경이 크면 용접부에 전달되는 충격량이 증가하여 발생하는 현상이다. 또한 항복점 이후에 압력용기가 변형되는 것은 하부 경판이 항복점에 다다른 것보다, 탄성 및 소성 변형에 의한 판의 변형량과 관계가 크다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 하부 경판의 곡률반경 및 두께 변화에 따른 프로판용 소형 압력용기의 변형 및 파열 양상을 관찰 하였다. 이론적인 응력해석 결과와 실험결과를 비교하여 그 경향성을 확인하고자 하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 하부 경판의 두께가 0.25mm 증가하면, 내압이 0.8MPa 증가 하였을 때 항복점에 도달하며, 실험결과 2.5MPa의 내압성능이 향상되었다.
- (2) 하부 경판의 곡률반경이 62mm 감소하면, 내압이 1.7MPa 증가 하였을 때 항복점에 도달하며, 실험결과 1.5MPa의 내압성능이 향상되었다.
- (3) 두께가 얇을 경우 연신량에 의한 저항력이 감소하여, 이론값에 비해 큰 내압성능 변화를 보였으며, 이는 하부 경판의 두께가 얇은 용기는 초기 변형이 편심되어 용접부의 결함이 균일하게 일어나지 않기 때문이다.
- (4) 응력이 파괴 기준에 도달하지 않는 내압 조건에서 파열이 일어나는 것은 용접부에 결함이 발생하였기 때문이다.

결국 실린더 몸통과 하부 경판의 두께가 같은 경우 하부 경판의 변형이 편심되어 발생하고, 내압성능을 크게 떨어트리는 주요한 원인이 된다. 또한 곡률반경을 줄이면, 변형에 대한 내압 성능은 향상되지만, 파열에 대한 저항력은 감소하므로 소형 압력용기의 내압설계에서 하부 경판의 두께가 중요 요소가 된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 에너지자원융합원천기

술개발(20132020500050)의 연구비 지원을 받아 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. 김홍일; 고종보, 오토캠핑 마니아의 동기에 관한 연구, 한국관광학회, 2012, Vol(36), No(5), 199-219
2. 하동명; 유현식; 이명호, 부탄의 연소위험성 평가, 한국가스학회 춘계학술대회, 2011, 165-173
3. 하동명, 프로판가스의 화재 및 폭발 특성치에 관한 연구, 한국가스학회, 2006, Vol(10), No(2), 33-39
4. 김준환; 신광복; 황태경, 복합재 압력용기의 스킵트 치수 최적화 설계 연구, 대한기계학회, 2013, Vol(37), No(1), 31-37
5. 김민식; 윤성호, 내압을 받는 탄소섬유 복합재 압력용기의 기계적 거동, 한국추진공학회 추계 학술대회, 2013, 80-80
6. 임상식; 장갑만; 이진한, LPG 재충전 소형 용기의 내압성능에 관한 실험적 연구, 한국가스학회, 2014, Vol(18), No(2), 16-20