



소형프로판용기 내압시험을 통한 용기의 형상변화 분석

이종상 · †장갑만 · 이운형 · 임상식 · 이진한

한국가스안전공사 안전연구실 장치연구부

(2014년 11월 25일 접수, 2014년 12월 26일 수정, 2014년 12월 27일 채택)

Shape Change Analysis of a Small Propane Container by Pressure Test

Jong-Sang Lee · †Kap-Man Jang · Yoon Hyung Lee · Sang-Sik Yim · Jin-Han Lee

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

(Received November 25, 2014; Revised December 26, 2014; Accepted December 27, 2014)

요 약

본 연구에서는 STS304로 만든 소형프로판용기의 내압증가에 따른 형상변화를 분석하였다. 소형 프로판용기는 내압이 증가하면 하부 경판이 아래쪽으로 볼록하게 형상이 변한다. 이러한 형상변화에 따른 소형 프로판용기의 내압의 변화를 분석하고자 기존의 내압시험과는 다른 방법인 수조식 내압 시험방법을 이용하였다. 수조식 내압시험 방법은 가압에 따른 용기의 체적변화량을 실시간으로 측정해 용기의 내압과 체적과의 관계를 분석 가능하다. 분석결과 하부 경판부의 형상변화에 따른 용기변형구간이 존재하고 용기의 하부 경판부의 변형이 시작되면 가압에 따른 부피증가량이 비례하지 않고 더 많이 증가되어 내압이 감소하는 경향을 나타낸다는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과는 소형 프로판용기 뿐만 아니라 다양한 압력용기의 안전성 향상에 기여할 것을 기대한다.

Abstract - In this study, it is analyzed that a change in the shape of small propane containers made of STS304 when increasing of internal pressure. When internal pressure of a small propane container increased, bottom of end plate is convexly changed. This test is applied to a water bath pressure test to analyze the characteristics of the container. Water bath is able to analyze relationship between internal pressure and volume. In result, shape change section is confirmed because bottom of end plate is convexly changed. In addition, this section tend to decrease internal pressure because a volume increment increase out of proportion to pressure. The results of this study are expected to contribute to improving the safety of the pressure vessel, as well as various small propane container.

Key words : Internal Pressure, Small Propane Containers, STS304, Water Bath, Pressure Test

1. 서 론

소형 프로판 용기의 보급 목적은 휴대성을 증가시켜 캠핑 및 레저활동을 하는데 사용자가 장소의 제약 없이 사용하도록 하는 것이다. 규정된 장소가 없어 사용환경이 불특정한 만큼 용기의 안전성이 중요한 설

계요소로 작용한다.

소형프로판용기의 경판 및 동판은 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304로 만든다. STS304는 뛰어난 내부식성 특성을 가지고 있어 재충전용기의 필요조건인 좋은 내구성을 충족하는 재료이다. 또한 STS304는 높은 인장강도 및 연신율을 가지고 있어 고압가스용기에 적합하다. 이와같은 재료의 적합성은 오스테나이트계 스테인리스강과 관련된 많은 연구사례를 통해 입증되었지만 용기형상에 관한 실험적 연구사례는 부

†Corresponding author: kapman1006@kgs.or.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

족하다.

본 연구에서는 STS304로 만든 소형프로판용기의 내압 증가에 따른 용기형상의 변화를 분석하고자 수조식 내압시험장치를 제작하였다. 이 장치를 이용하여 내압증가에 따른 부피 팽창량을 측정하였으며, 실험 결과를 토대로 압력-부피선도로 나타내고 분석하였다.

II. 시험장치

2.1. 수조식 내압시험 장치

일반적인 용기의 내압시험방법으로는 수압가압장치를 이용한 파열시험이 대표적이다. 용기를 안전한 곳에 두고 수압을 가해 용기를 파열시켜 파열압력을 측정하는 것이다.

소형프로판용기는 내압이 증가함에 따라 Fig. 1과 같이 하부 경판이 아래쪽으로 볼록하게 용기의 변형이 일어난다. 이러한 소형프로판용기의 내압측정시험은 선행연구에서 이미 시행하였다[1]. 하지만 선행연구 사례에서는 용기의 파열압력만 측정가능할 뿐 용기의 내압증가에 따른 용기형상의 변화를 분석하지는 못 하였다.

따라서 본 연구에서는 내압증가에 따른 용기변형을 분석하고자 기존의 내압시험과는 다른 수조식 내압 시험방법으로 소형프로판용기의 내압성능 테스트를 시행하였다.

수조식 내압시험 방법이란 용기변형으로 인해 변하는 용기의 내부체적을 측정할 수 있는 방법이다.

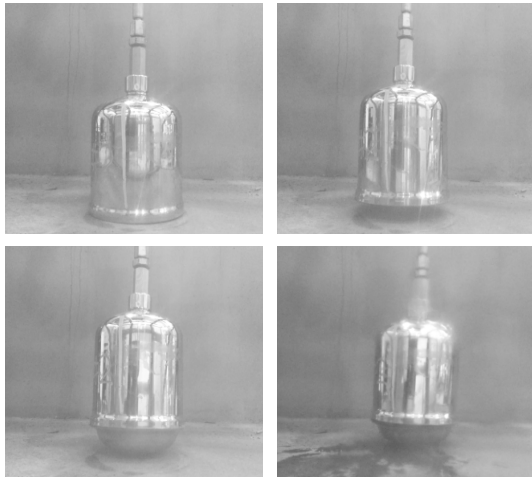


Fig. 1. Shape change of a container by pressure test.

Fig. 2에서와 같이 기존의 내압시험방법과는 다르게 시험하고자하는 용기를 완전히 물속에 담근후 물속에서 용기의 내압시험을 한다. 이 방법을 이용하면 용기의 내부체적이 팽창하여 변형을 하는 부피만큼 물이 밖으로 빠져나오게 된다. 물은 비중이 1이고 비압축성 유체이므로 질량측정장비를 통해 빠져나오는 물의 무게를 측정하면 용기형상의 변화에 따른 체적변화량을 실시간으로 측정할 수 있다. 따라서 내압증가에 따른 용기의 체적변화량을 측정하여 용기변형에 따른 내압의 변화가 분석 가능하다.

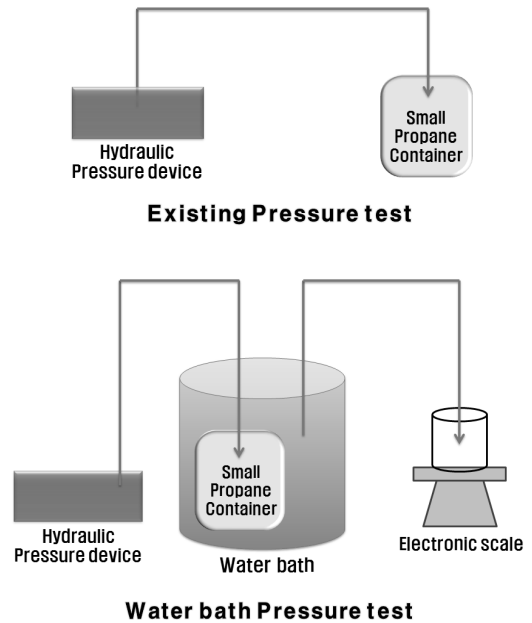


Fig. 2. Schematic diagram of pressure test method.



Fig. 3. A small propane container.



Fig. 4. A water bath.

2.2. 시험방법

시험하고자 하는 소형프로판용기의 형상은 Fig. 3 과 같다. 구조는 몸통부인 동체와 하부 결합부인 경판으로 나눌 수 있다. 동체의 직경 및 두께는 각각 120mm, 1.2mm 이고 하부 경판의 곡률반경 및 두께는 각각 114mm, 1.2mm 이다.

수조식 내압시험방법은 Fig. 4와 같이 강체로 이루어진 수조에 물을 완충시켜 진행한다. 이 수조에 물이 가득찬 소형프로판용기를 넣고 압력계이지가 부착된 수압가압장치를 연결한다. 수압가압장치를 통해 내압을 증가시키다가 용기의 변형이 발생하게 되면 변형에 따른 용기의 체적변화량 만큼의 물이 수조 밖으로 빠져나오게 된다. 이 물의양은 질량측정장비를 이용해 측정하고 동시에 압력계이지의 압력도 같이 측정한다.

III. 실험결과

Fig. 5는 수조식 내압시험방법을 이용해 가압에 따른 소형프로판용기의 체적증가량과 내압을 측정 한 그래프이다.

소형프로판용기를 가압하면 Fig. 6과 같이 용기의 형상이 변화된다. Fig. 5와 Fig. 6을 서로 대응하게 A, B, C 구간으로 매치하였다.

A구간은 가압에 따른 용기의 내압이 증가하는 구간으로 A구간의 최고 압력에 도달한 후 하부 경판부의 변형을 일으킨다. B구간은 체적이 증가하는데 비해 압력은 조금 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 하부 경판부의 형상이 밖으로 볼록하게 변함으로 인해 생기는

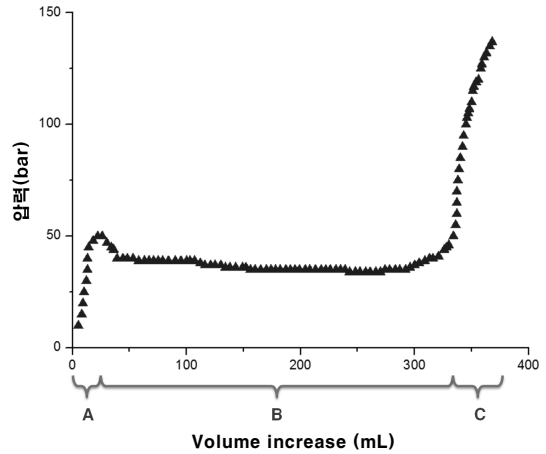


Fig. 5. The measurement of small propane container's internal pressure and volume by pressure test.

변형구간이다. 이 구간에서는 물이 가압되는 양이 내압의 증가에는 영향을 미치지 않고 용기의 형상변화에만 기여함을 알 수 있다. 하부 경판부가 볼록하게 다 돌출되어 더 이상 형상변화를 못하게 되면 C구간과 같이 내압이 급격히 증가하게 된다. 이 구간에서도 용기의 체적이 약 50mL 증가하는 것으로 보아 용기가 전체적으로 팽창하였음을 알 수 있다.

용기는 A구간의 최고압력에 도달한 후 변형을 일으키므로 A구간의 최고압력을 변형압력이라 하고, C구간의 최고압력에서 파열하였으므로 이를 파열압력이라 한다.

3.1. 압력측정값을 이용한 소형프로판용기의 응력계산

원통이나 구의 벽면에서 반경방향으로 작용하는 응력을 반경방향의 응력이라 한다. 두께가 얇은 용기의 경우 반경방향의 응력의 값은 매우 작아 2축응력으로 간주된다. 실험하고자하는 소형프로판용기는 $r/t \geq 10$ 이므로 두께가 얇은 압력용기에 해당한다. 또한, 용기 형상에 의해 동체부는 원통형 압력용기의 두께 계산식을 사용하고, 하부 경판부는 구형 압력용기의 두께 계산식을 사용하여 아래 계산식에 의해 계산한다[2].

원통형 압력용기 두께 계산식

$$\text{원주방향응력 } \sigma_t = \frac{Pr}{t}, \text{ 축방향응력 } \sigma_a = \frac{Pr}{2t} \quad (1)$$

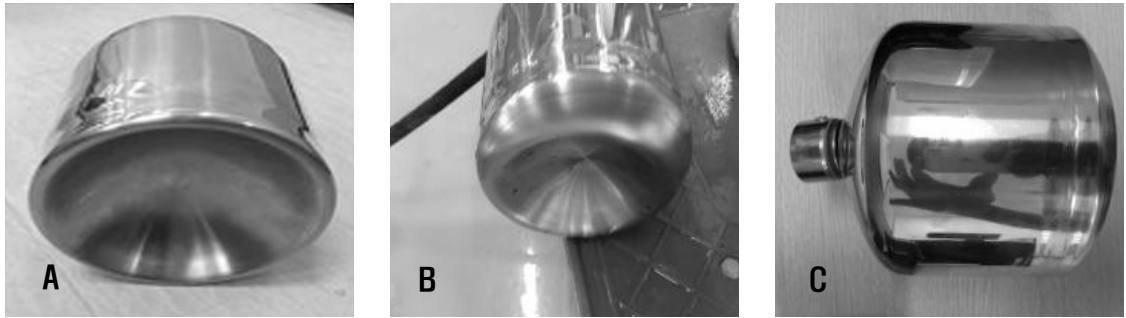


Fig. 6. Shape change of a small propane container by pressure test(A-B-C).

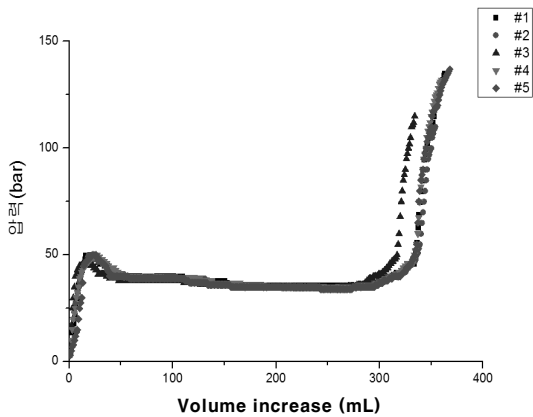


Fig. 7. Pressure test data of small propane container.

구형 압력용기 두께 계산식

$$\text{원주방향응력 } \sigma = \frac{Pr}{2t} \quad (2)$$

여기서 P, r 과 t는 각각 용기의 내부압력, 내부반경, 벽 두께이다.

원통형 압력용기의 원주방향 응력과 축방향 응력은 주응력의 크기와 같으므로 $\sigma_1 = \frac{Pr}{t}, \sigma_2 = \frac{Pr}{2t}$ 이고, 구형 압력용기는 $\sigma_{1,2} = \frac{Pr}{2t}$ 이다. 다축응력 구조에서 재료의 항복 및 파열응력을 비교하기 위해 Von Mises 이론을 이용하여 등가응력을 적용하였다.

$$\text{원통형 압력용기 Von Mises 응력 } \sigma_{vm} = \frac{\sqrt{3} Pr}{2t} \quad (3)$$

$$\text{구형 압력용기 Von Mises 응력 } \sigma_{vm} = \frac{Pr}{2t} \quad (4)$$

Table 1. Comparisons of strength in test data and STS304's property

Division	Deformation pressure, Deformation stress	Rupture pressure, Rupture stress
#1	50 bar, 237.5 MPa	135 bar, 584.55 MPa (Neck weld rupture)
#2	50 bar, 237.5 MPa	110 bar, 476.3 MPa (End plate weld rupture)
#3	47 bar, 223.25 MPa	115 bar, 497.95 MPa (End plate weld rupture)
#4	50 bar, 237.5 MPa	132 bar, 571.56 MPa (Neck weld rupture)
#5	50 bar, 237.5 MPa	137 bar, 593.21 MPa (Neck weld rupture)
AVG	49.4 bar, 234.65 MPa	125.8 bar, 544.71 MPa
	Yield stress	Fracture stress
STS 304	253.31 MPa	694.97 MPa

여기서 P, r 과 t는 각각 용기의 내부압력, 내부반경, 벽 두께이다.

Fig. 7은 다섯번의 소형프로판용기 수조식내압시험 결과를 그래프로 나타내었고 Table 1은 각각의 시험결과에 따른 변형응력과 파열응력을 식(3),(4)에 의해 계산하고 STS304의 인장시험결과와 비교하였다[3].

Fig. 7에서 변형이 시작되는 압력인 변형압력은 49.4 bar이다. 하부경관부의 응력은 구형 압력용기의 Von Mises 응력 계산식을 적용하여 계산하면 평균 변형응력 237.5MPa로 소재인 STS304의 항복강도 253.31MPa보다 조금 낮게 나타난다. 이는 이론과 실험에서 발생하는 오차 및 용기 형상 측정에서 야기되는 오차로 인한 것으로 판단된다.

용기변형이 완료된 후에는 용기의 내압이 급격히 증가한다. 용기의 몸통부분의 경우에는 원통형 압력 용기의 원주방향 응력계산식을 적용하면 원주방향응력이 평균 파열강도 544.71MPa까지 도달하게 된다. STS304의 인장시험결과와 비교해 보았을 때 용기의 내압시험결과에따른 파열강도가 150MPa 이상 낮은 이유는 용기의 목부 및 하부 경판부의 용접부에서 파열되었기 때문이다. 용접부의 경우 용접열영향에 의해 금속조직이 모재에 비해 불균질하므로 취약하다 [4-5]. 따라서, 더 낮은 압력에서 파열이 일어난 것으로 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 소형 프로판용기의 파열전 용기변형에 따른 내압의 변화를 분석하고자 수조식 내압시험장치를 제작하였다. 일반적인 내압시험으로는 용기의 파열압력만 측정가능할뿐 파열전 용기의 상태변화는 측정하지 못하였다. 따라서 수조식 내압시험방법을 통해 가압에 따른 용기의 내압과 체적을 측정하여 용기변형의 경향성을 분석할 수 있었다.

(1) 소형프로판용기가 파열이 일어나기까지는 하부경판부 변형 전 내압증가구간, 용기변형구간, 파열 전 내압증가구간, 총세개의 구간으로 나눌 수 있다.

(2) 용기의 하부 경판부의 변형이 시작되면 용기의 내압은 변형이 시작되는 압력보다 더 감소하는 경향을 나타낸다.

(3) 용기의 체적이 한계치가 되었을 때 용기의 내압은 급격히 증가한다. 용기의 파열압력이 재료의 극한

강도보다 낮은이유는 용기의 용접부에서 파열이 일어나기 때문이다.

본 연구는 STS304로 만들어진 소형프로판용기가 파열되기까지의 용기변형의 경향성을 수조식내압시험 방법을 통해 분석하였다. 본 시험을 통해 주목할만한것은 용기의 변형이 시작되면 가압에 따른 부피증가량이 비례하지 않고 더 많이 증가되어 용기변형구간에서 내압이 감소하는 경향을 나타낸다는 것이다. 이를통해 소형압력용기 설계시 용기변형을 통한 부피팽창이 안전성향상에 기여함을 알 수 있다.

본 연구의 결과는 소형프로판용기뿐만 아니라 다양한 압력용기의 안전성향상에 기여할 것을 기대한다.

REFERENCES

- [1] S. S. Yim., K. M. Jang., J. H. Lee., "An Experimental Study on Pressure-resistant Performance of a Re-fillable LPG Cylinder", *KIGAS*, 18(2), 16-20, (2014)
- [2] Ansel C. Ugural, *Mechanics of Materials*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc (2007)
- [3] T. S. Kim, *Mechanical Properties and Characteristics According to Stainless Steel Microstructure*, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, (2012)
- [4] H. S. Kwon, *Understanding of Stainless Steel*, *Korea Metal Journal*, (2007)
- [5] J. C. Eun, *Working in Stainless Steel*, Daishin Technology, (2000)