LPG 재충전 소형 용기의 내압성능에 관한 실험적 연구

임상식 · [†]장갑만 · 이진한

장치연구부, 안전연구실, 한국가스안전공사
(2014년 3월 5일 접수, 2014년 4월 9일 수정, 2014년 4월 9일 채택)

An Experimental Study on Pressure-resistant Performance of a Re-fillable LPG Cylinder

Sang-Sik Yim · [†]Kap-Man Jang · Jin-Han Lee

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
(Received March 5, 2014; Revised April 9, 2014; Accepted April 9, 2014)

요 약

본 논문에서는 현재 캠핑 문화의 확산에 따라 수요가 증가하는 LPG 재충전 용기에 관한 내압성능을 실험적으로 검증하였다. 겨울철에 부탄가스는 높은 비점의 영향으로 기화가 쉽게 일어나지 않는 물적 특성을 지니고 있다. 하지만 프로판의 경우 비점이 낮아 겨울철에도 기화가 쉽게 일어나 연료로써 공급 필요성이 증가되고 있다. 하지만 프로판은 높은 증기압으로 인해 많은 안전상의 문제가 존재하며, 이를 극복하고 연료로써 유통되기 위해서는 안전한 용기의 공급이 우선시 되어야 한다. 국내외적으로 고압용 소형 재충전 용기의 보급을 시도하고 있으나, 프로판의 높은 증기압으로 인한 안전상의 문제로 제제가 되고 있다. 본 논문은 재충전 용기의 내압성능을 검증하기 위해 수압장치를 이용하여 용기의 가압 및 파열 실험을 수행하였다. 또한 고온에서 프로판의 증기압과 용기 파열 시 수압과 비교하여 그 특성을 제시하였다. 수압가압 실험 및 파열 실험을 통해 토출된 본 논문의 결과는 향후 소형 재충전 용기 개발 연구의 기초가 될 것으로 기대하며, 재충전 용기의 보급에 있어 기준 자료로 활용 될 것으로 사료된다.

Abstract - In this paper, the performance of pressure-resistance is validated by experiment on LPG re-fillable cylinder which has increased demands for spreading of camp culture. Propane has increased suppliable requirements as fuel because of easily vaporizing effect of low boiling point. However, propane can be occurring safety problems inevitably by high vapor pressure. So, the priority is that safe cylinder should furnish in order to be circulated as safe fuel. LPG re-fillable cylinder for high pressure is tried to furnish internationally, that is restricted by safe issues. For these reasons, the pressurization and rupture are performed by using pressurizing device that is operated by hydraulic system. Also, this paper will offer rupturable characteristics comparing with vapor pressure of propane. This paper is expected as basis research for developing re-fillable cylinder and using standard for supplying them.

Key words : pressure-resistance, LPG re-fillable cylinder, rupture

[†]Corresponding author: kapman1006@kgs.or.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

최근 언론의 영향 및 개인 여가의 유용한 활용을 위해 캠핑 문화가 급격히 확산되고 있으며, 그에 상응하여 캠핑을 위한 다양한 용품이 출시되어 판매되고 있다[1].

사계가 뚜렷한 국내의 경우 캠핑 중 취사 및 난방을 위한 연료로 부탄가스를 주로 이용한다. 하지만 고산지대 또는 겨울철 부탄가스는 대기압에서 높은 비점(-11.7℃)과 높은 기화열(87.6kcal/kg)에 의해 연료 분사 불능 등 많은 제약이 따른다. 이를 대체하기 위해 현재 프로판 가스가 주목 받고 있다. 프로판 가스는 대기압에서 낮은 비점(-42.1℃)과 높은 증기압(8.35barA)의 물적 특성으로 인해 사용상 제약이 적다는 장점을 가지고 있다[2].

하지만, 프로판은 부탄에 비해 약 2.7배의 증기압 특성을 가지므로, 기존의 부탄용기를 대체 할 프로판 전용 용기가 필요하다. 더불어 비용 및 환경의 문제를 반영하기 위해 일회성이 아닌 재충전이 가능한 프로판 용기의 보급이 필요하다. 하지만, 현재 국내외적으로 프로판의 열역학적 특성 또는 대형 저장 시설에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 소형 저장 용기에 대한 연구는 전무한 실정이다[3-5].

프로판의 재충전 용기로서 적합성을 검토하기 위한 기준을 마련하기 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다. 첫 번째, 프로판의 증기압을 충분히 견딜 수 있는 용기의 설계. 두 번째, 고온(100℃ 이상)에 노출되었을 때, 프로판의 안전한 토출을 유도할 장치를 갖춘 설계. 마지막으로 재충전이 이뤄질 때, 용기의 안정성이 충분히 확보된 설계여야 한다.

따라서 본 연구에서는 수압을 이용하여 시제품용 프로판 재충전 용기에 내압 실험 및 파괴 실험을 수행하였다. 위에 제시한 사항들을 고려하기 위해 두 단계에 거쳐 수압가압 실험을 수행하였으며, 그 결과를 토대로 향후 합리적인 재충전 용기의 설계 방안을 모색해야 할 것이다.

프로판용 재충전 용기는 전 세계적으로 상용화가 크게 이뤄지지 않은 만큼, 본 연구 결과는 국내뿐만 아니라 국외에서도 재충전 용기 개발 사업에 있어 중요한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

II. 시험 방법

2.1. 재충전 용접 용기의 구조

재충전 용접용기는 서론에서 언급했던 바와 같이 안전장치와 높은 내압에 대해 견디도록 설계되어야 한다. 고온에서 프로판 내압 증가로 인한 용기의 폭발

Fig. 1. Schematic of the PRD system.

을 방지하기 위해 Pressure Relief Device(이하 PRD)가 사용된다.

Fig. 1에서와 같이 PRD는 용기 상단부에 토출구와 병렬로 위치한다. 프로판 용기가 100℃ 이상의 고온에 노출 되었을 경우, PRD가 열에 의해 용해되어 새로운 토출구가 생성된다. 이와 같은 메커니즘에 의해 높은 온도에 노출 되어도 최악의 상황인 용기의 폭발을 방지 할 수 있다.

2.2. 시험조건 설정

시험조건 of 설계로 적합한 연구사례는 전무하므로, 시험조건 of 설계는 기본적으로 고압가스안전관리법을 기준으로 구성하였다. 고압가스안전관리법에 의한 내압시험은 용기의 탄성 및 항복점을 복합적으로 검사하기 위한 것이다. 기성 소형 압력용기(10kg, 15kg, 20kg)의 내압시험 방법은 수조식과 비 수조식이 있으며, 본 연구에서는 파열시 충격흡수의 목적으로 간단한 수조식 내압시험을 수행하였다.

또한 고압가스안전관리법에 의하면, 내용적이 500L 이상인 경우 25barG의 내압시험압력을 규정하고 있다. 하지만, 본 연구에서 수행하고자하는 실험은 500L 미만의 소형용기로 29barG의 내압시험압력을 적용하여 실험하였다. 상용 충전소에서는 내압시험압력의 1/4의 압력으로 충전하도록 규정되어 있으므로, 내압시험압력을 견디는 용기는 안전율 4가 적용되어 사용상 안전의 문제는 적다고 판단 할 수 있다. 또한 내압시험압력을 30초 이상 유지하여, 추가적인 내압특성을 확인한다.

다음 고려사항은 파열에 견딜 수 있는 압력을 구성하는 것이다. 현재 프로판은 연료 또는 냉매로써 훌륭한 열역학적 물성치를 가지고 있어, 다양한 분야에서 연구가 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 ASHRAE의 Handbook에

제시된 증기압 데이터를 이용하여, 고온에서 프로판의 증기압을 이용하여 파열압력과 비교한다.

프로판의 최고 증기압은 90℃에서 41barG이며, 그 이상의 온도에서는 임계상태로 변하므로 추후 프로판에 대한 지속적인 연구를 통해 규명해야 한다.

2.3. 시험장치

시험은 수압가압 장치를 이용하여 진행하였으며, 수압의 최고가압 압력은 3,000barG이다. 일반적인 가압기의 경우 왕복동 실린더를 이용하여 반응성이 좋은 유압 또는 수압을 이용한다. 하지만, 본 연구에 사용된 가압 장치는 가스용기 및 가스가 존재 가능한 장소에서 이뤄지므로 공압을 이용하여 수압 형성하여 가압하는 방법을 선택하였다.

Fig. 2. Vapor pressure of propane.

Fig. 3. schematic of pressurizing mechanism.

Fig. 3은 본 실험의 중요한 수압가압 과정을 묘사하기 위해 표현된 것이다. 용기 파열 실험은 파열 범위 및 파열 시기를 예측하는 것이 어려움으로 Lab-View를 이용해 각 시스템을 제어한다. 용기의 변형 및 파열을 관찰하기 위해 특수하게 제작된 공동에 카메라를 설치하여 각 과정을 실시간으로 모니터링하였다.

III. 실험 결과

본 실험은 프로판용 재충전 소형 용기에 대한 안정성을 검토하기 위한 실험이다. 따라서 일정 내압을 유지하는 과정, 압력을 증가시켜 용기를 파열하는 시험을 연속적으로 수행하였다.

Fig. 4는 수압가압으로 인해 용기 내부의 압력 변화를 측정한 것이다. Fig. 4의 1번 구간은 초기 수압가압을 위한 준비 과정이며, 구간 2는 30barG의 내압을 가한 후 30초간 유지하는 과정이다. 구간 3, 4, 5는 파열을 위해 가압하는 과정이며, 각각 구간에서 특이한 내압 특성이 형성되는 것을 관찰 할 수 있다.

구간 3의 초기 내압이 증가된 후 갑작스런 압력 강하는 용기 하단부의 오목한 판이 반대 방향으로 불룩하게 소성변형이 일어나며, 순간적으로 용기의 체적이 증가하여 내부압력이 급격히 감소한 것이다. 이는 액체의 빠른 응답속도에 의해 확실하게 구분되는 형상 변화 특성이다. 3구간에서 68barG까지 압력 증가가 서서히 이뤄지는 것은 용기가 지속적으로 소성 변형을 일으키고 있기 때문이다. 일반적으로 압력용기는 연성재료로 구성되어 연신율이 높은 재료를 사용한다. 따라서 용기 내부 체적 팽창이 지속적으로 일어 날 수 있다. 4구간에서 압력이 감소하는 것은 용기 하단부의 용접을 위해 접힌 부분이 하단의

Fig. 4. Variation of internal pressure of cylinder.

(a)

(b)

Fig. 5. Pressurization to a cylinder.

(a) Initial state.

(b) Plastic deformation of lower concave section.

판과 같은 형상으로 소성변형을 일으키며 발생하는 것이다. 3구간에서 하단 판의 오목한 형상이 볼록하게 소성변형 되어 용기의 체적이 급격히 증가하는 것에 비해, 집현 부분이 소성변형 되어 펼쳐지는 것은 천천히 진행되므로 압력 강하 역시 3구간에 비해 느리게 진행 되는 것을 확인 할 수 있다. 구간 5는 파열 후 내압의 변화이다. 용기 파열로 인해 내압이 더 이상 증가하지 않는 모습이 관찰 된다.

Fig. 5는 용기에 수압을 가한 후 그 과정을 단계 별로 확인한 것이다. Fig. (a)는 초기 압력상태(Fig. 4의 구간 1과 2)를 나타내며, 형상의 변화가 없는 것을 알 수 있다. Fig. (b)는 하단의 오목한 판이 순간적으로 볼록하게 팽창하여 용기가 기울어진 모습이다. Fig. 5는 Fig. 4의 구간 1~3을 정확하게 표현하고 있다.

Fig. 6은 파열까지 이르도록 수압을 가압하는 과정이다. (a)는 하단부가 완전히 소성변형을 일으켜 용기 전체가 상승한 모습을 보여준다. (b)는 용기 하단부가 소성변형 한계에 다다른 후 더 이상의 소성변형이 일어나지 않고 용접부가 파열된 것을 보여준다.

용기가 수압에 의해 소성 변형 후 파열되는 것은

(a)

(b)

Fig. 6. Rupture by hydraulic pressure.

(a) The end of plastic deformation.

(b) Failure of a cylinder.

많은 것을 시사한다. 연성재료는 재료의 물성 특징에 의해 항복점이 극한 강도보다 낮다. 따라서 파괴에 이르기 전에 항복점을 거쳐 소성 변형 과정을 거치게 된다. 고압에서 용접부의 파괴 강도, 용기의 파괴강도보다 하단부의 항복점이 낮아 1차적으로 소성 변형을 일으키는 것이다.

Fig. 6의 (a)에서 하단부는 소성 변형이 일어난 후 극한 강도에 근접하는 모습이다. 하단부의 극한강도가 용접부의 파괴강도보다 낮다면, 용기 하단부가 연성파괴를 일으켰을 것이다. 하지만, 하단부가 소성변형을 일으켜 팽창함과 동시에 용접부도 같이 연신되어 크랙이 발생한다. 따라서 충분한 용접을 적용한 설계라도 하단부의 팽창에 의해 용접부에 크랙이 발생하고, 이는 응력 집중현상으로 이어져 하단부의 연성파괴가 아닌, 용접부 결함에 의한 파괴로 이어진다.

Table 1은 동일한 실험을 3차례 시행 후 결과를 정리한 것이다. 3개의 시편은 동일한 제조 공정을 거쳤으며, 동일한 재료로 구성되어 있다. 3번 실험은 앞선 2개의 실험보다 높은 압력에서 파괴가 일어난다. 이는 파괴부의 용접 깊이가 앞선 2개의 경우보다

Table 1. Deformation and failure as pressure

	Test1	Test2	Test3
변형압력	68.8barG	63.8barG	
파괴압력	92.2barG	93.5barG	140barG

조금 더 깊기 때문이다. 동일한 제조 공정을 거친 용기라도 미세한 차이는 파열 압력에 변화를 가져온다.

1번과 2번 실험의 결과는 흥미로운 사실을 시사한다. 낮은 압력에서 하단부의 소성변형이 일어나면, 파열 압력이 높아진다. 즉, 높은 압력에서 하단부의 소성변형이 일어나면, 파열 압력은 낮아진다. 이는 용접부에서 파열이 일어나기 때문이다. 낮은 압력에서 소성변형이 일어나면, 높은 압력일 때보다 용접부에 가해지는 충격량이 적다. 따라서 용접부에 작은 충격량이 가해짐으로 인해, 용접의 손상이 적어 더 높은 압력에서 파열이 일어나게 되는 것이다.

지금까지 실험 결과 재충전시 내압(30barG)에서는 용기에 어떠한 손상도 발견되지 않았으며, 30초간 유지해도 동일한 결과를 얻었다. 이는 안전율이 4인점을 고려했을 때, 재충전 측면에서는 적당한 안전성이 확보됨을 의미한다.

하지만, 파열 실험의 경우 3가지 실험에 대해 동일한 경향성을 갖지 않아, 용접에 의해 파열 압력이 달라지는 구조적 특성을 개선해야 한다. 또한 PRD의 가용 범위는 $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 으로써, 고온에 프로판 용기가 노출 되었을 경우 프로판의 최고 증기압은 42barG까지 상승된다. 용기는 대략 90barG에서 파열되므로, 적용되는 안전율은 약 2.14가 된다.

IV. 결 론

본 실험은 프로판용 재충전 소형 용기의 파열 특성에 관한 실험으로써, 수조식 내압시험 방법을 채택하여 용기의 재충전 가능 여부와 안전성에 대해 실험을 수행하였다. 현재 10kg미만의 소형 압력용기의 성능시험은 국내외적으로 수행되지 않은 연구로, 선행 연구의 성격을 지니며, 실험 조건에 대한 것은 고압가스안전관리법과 이론적 근거에 의해 구

성되었다. 실험적 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 30barG에서 30초간 수압을 가하여 재충전에 대한 안전성 실험 결과, 7barG 미만의 재충전에서 안전성이 양호하다.

(2) 파열과정은 하단부의 1단계 소성변형과 2단계 용접부의 파열, 두 단계에 걸쳐 용기의 파열이 일어난다.

(3) 파열양상은 제작 방법인 용접효율의 차이로도 큰 변화 양상을 보이며, 최저 92.2barG이다.

(4) 120°C 에서 프로판의 증기압은 56.5barG 이며, 파열시 적용되는 안전율은 1.6이다.

본 논문을 통해 제시된 결과는 향후 소형 재충전 용기 개발에 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] B. Y. Lee, Y. C. Jung, "A Study on The Relationship Between Auto-camping Experiences, Satisfaction and Behavioral Intentions : Focused on The 4Es Theory", KASTLE, 24(7), 275-294, (2012)
- [2] J. H. Cho., K. S. Cho., D. H. Kim., Y. C. Lee., S. H. Hong., "Estimation of Physical Properties of Natural Gas Using Cubic Equations of State", KIGAS, 10(4), 6-10, (2006)
- [3] Y. D. Jo., S. D. Chang., J. Y. Kim., "A Study on the Natural Evaporation Capacity of LPG Container", KIGAS, 4, 72-77, (2000)
- [4] J. M. Cho., Y. J. Kim., M. S. Kim., "Experimental Studies on the Evaporative Heat Transfer Characteristics of CO_2 /Propane Refrigerant Mixtures in Horizontal Smooth and Micro-fin Tubes", KSME, 32(4), 290-299, (2008)
- [5] C. S. Lee., J. W. Lee., S. H. Kim., "An Experimental Study on Safety of LPG Bombe Exposed to Flame", Proc. of KIGAS, 2, 363-374, (1998)
- [6] ASHRAE, 2009 ASHRAE HANDBOOK, Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, (2009)