



소형 프로판 용기의 화염 노출에 대한 안전성 연구

임상식 · †장갑만 · 이진한 · 박기동 · 김기범*

한국가스안전공사, *충북대학교 기계공학과

(2015년 8월 25일 접수, 2015년 10월 6일 수정, 2015년 10월 7일 채택)

A Study for the Safety on the Flame Exposure of the Propane Cylinder

Sang-Sik Yim · †Kap-Man Jang · Jin-Han Lee · Gi-Dong Park · Ki-Bum Kim*

Korea Gas Safety Corporation

Department of Mechanical Engineering, *Chungbuk National University

(Received August 25, 2015; Revised October 6, 2015; Accepted October 7, 2015)

요약

본 연구에서는 소형(1L 미만) 재충전 가능 프로판 용기의 안전성을 향상시키기 위하여, 화염 노출 시나리오에 대한 실험을 실시하였다. 화염에 노출된 용기는 내부 프로판의 액팽창에 의해 내압이 급격히 상승하게 되어 파열의 가능성이 존재한다. 따라서 내부의 과압을 해소시키기 위한 열 감응식 안전밸브를 부착하여, 용기가 파열되지 않고 내부 프로판을 외부로 분출하도록 유도하였다. 용기를 감싼 화염의 온도는 평균 600℃였으며, 안전밸브를 통해 분출되는 프로판이 2차 연소를 유발하여 최대 700℃까지 상승하였다. 그 결과 용기의 변형은 발생하였지만, 파열은 일어나지 않았다. 프로판용 압력용기의 화염시험 규정이 존재하지 않는 만큼, 화염에 노출 가능성이 존재하는 레저용 용기에 대한 선행연구로써, 본 연구의 결과는 추후 프로판 압력용기의 성능 평가에 있어 중요한 자료 가 될 것으로 기대한다.

Abstract - To evaluate the safety of propane cylinder, the flame test was performed by the flame exposure scenario of propane cylinder. The cylinder which was exposed in a flame was rapidly occurred to increase the internal pressure by liquid expansion, if so it cause of physical explosion. Therefore, the cylinder which was applied with thermal pressure relief device should be not bursted and the propane should be discharged to outside safely. The flame average temperature that was around of cylinder is 600℃, and then it increased 700℃ by discharged propane. The result of flame test, the cylinder was deformed, but it was not bursted. The regulations of flame exposure test for propane cylinder were not restricted, this paper can be applied to restrict the flame test if the cylinder is possible to expose the flame. Also, the results is expected as reference for estimation of the pressure cylinder performance.

Key words : propane cylinder, flame test, thermal pressure relief device

1. 서 론

국내 캠핑 인구는 2014년 기준 300만명으로 추산되며 매년 약 30%의 성장률을 보이고 있다. 이에 따라서 캠핑시장 역시 증가세를 보이고 있으며, 2008

년 기준 700억원에서 2014년 기준 약 6,000억으로 매년 최소 30% 이상의 시장 규모가 증가되고 있다. [1-3]

캠핑 시장의 증가세에 따라 소비자의 캠핑용품에 대한 다양한 편의 용품에 대한 수요가 증가하는 것은 당연하지만, 안전 규제가 없는 캠핑용품의 사각지대는 캠핑용품 제조사와 이를 사용하는 대다수의 국민이 그 책임을 안아야 한다는 단점이 있다.

†Corresponding author: kapman1006@kgs.or.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

캠핑용품의 안전 사각지대로 대두되는 것이 국외에서 수입된 1회용 프로판 용기에 프로판을 충전사업자가 아닌 개인이 불법으로 재충전하여 사용하는 것이다. 국내에서 유통되는 소형 프로판 용기에 이 충전하는 중 가스사고가 빈번하게 발생하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 1회용 프로판 재충전 용기에 적합한 안전장치로 열 감응식 안전 밸브를 부착한 용기를 제작하여 실험하였다. 국내의 다양한 안전밸브 규정을 토대로 안전밸브 방출직경을 설계하였으며, 기존의 대규모 저장탱크에 적용하는 방출식을 적용하여 계산한 직경은 프로판 용기의 과열을 유발하여, 과열이 발생하지 않는 직경에 대한 연구를 화염 시험을 통해 수행하였다.

본 연구를 통해 제시된 결과는 향후 방출 직경의 상한을 설정하는 연구의 기초 자료가 될 것으로 기대한다.

II. 열 감응식 안전밸브

안전밸브는 크게 과열판식, 스프링식과 열감응식으로 나뉜다. 본 연구에서는 재충전이 가능한 소형 프로판 용기로 이동용으로써 10년의 내구연한을 가져야 하기 때문에 과열판식은 적합하지 않고, 스프링식의 경우 소형용기에 적용하는 것은 작은 스프링으로 고압의 압력을 정밀하게 제어하는 기술적인 문제들이 내제되어 있어, 가용전 타입의 열 감응식 안전밸브를 적용하였다.

Fig. 1 은 본 연구의 화염시험을 위해 제작한 용기의 치수 및 TPRD(Thermally activated Pressure Relief Device)의 개략도를 나타낸다. 기본적으로 안전밸브의 목적은 내압 증가에 의한 용기의 과열을 방지하기 위함에 있다. 열 감응식 안전밸브의 방출 직경설계는 LP Gas Association(Liquefied Petroleum), API(American Petroleum Institute) 과 KGS CODE (Korea Gas Standard) 등에서 규정하고 있다.[4-6]

$$Q = 0.00278PW \quad (1)$$

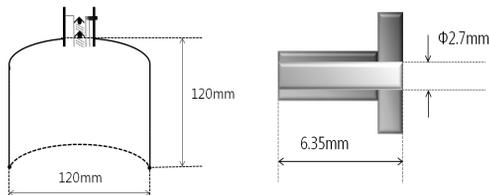


Fig. 1. Schematic of cylinder and TPRD.

식 (1)은 LP Gas Association에서 정한 방출 목표량이며, Q는 방출유량(m³/min), P는 작동절대압력(kg/cm²), W는 용기의 내용적(ℓ)를 의미한다.

$$W = \frac{CA^{0.82}F}{L} \quad (2)$$

식 (2)는 API와 KGS CODE에서 정한 방출 목표량이며, W는 시간당 분출량(kg/h), A는 내부 액화 가스가 접촉하는 있는 압력용기의 면적(m²), F는 환경계수로 단열재를 사용하지 않는 경우 1의 값을 적용하는 무차원 수이고, L은 분출량 결정 압력에서 액화가스 증발잠열(Cal/kg)이다. C는 API와 KGS CODE에서 규정하는 계수로써, API는 345000의 값을 추천하며, KGS CODE는 61000의 값을 추천한다.

방출 목표량은 안전밸브의 분출면적을 계산할 때 사용된다. 음속흐름으로 가정 할 수 있는 경우 분출면적은 다음과 같은 식을 사용 할 수 있다.

$$A = \frac{13160 W \sqrt{TZ}}{CK_d K_b K_c P_1 \sqrt{M}} \quad (3)$$

식 (3)은 분출목표량에 의한 필요 단면적을 계산하는 식으로 KGS CODE 및 API 규정에 의해 제공된다. A는 필요 단면적(mm²), W는 식 (1)과 (2)를 통해 구한 분출유량(kg/h), T는 분출량 결정압력에서 가스의 온도(K), Z는 압축계수로써 이상기체로 합리적 가정이 가능한 경우 1의 값, C는 기체의 비열비에 의해 결정되는 비열용량 계수로써 프로판은 393의 값, K_d는 분출계수로써 안전밸브는 0.975의 값,

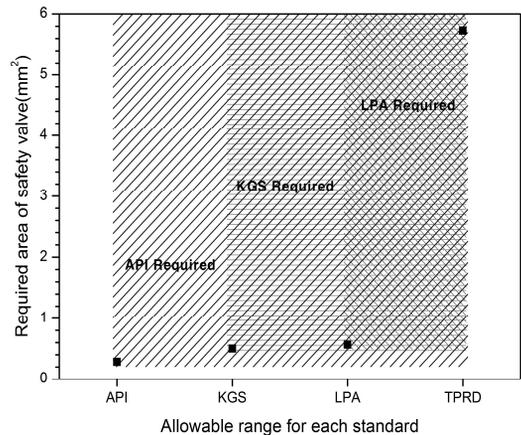


Fig. 2. Comparison to required area between each standard.

K_b 는 배압보정계수로서 대기압으로 분출되는 경우 1의 값, K_c 는 안전밸브의 종류 및 개수에 의해 정해지는 상수로써 안전밸브만 설치한 경우 1의 값, P_1 은 분출량 결정압력(kPaA), M 은 기체의 분자량(g/mol)을 나타낸다.

Fig. 2는 식 (3)의 결과 및 본 연구에 사용된 TPRD의 면적을 비교한 것이다. API에 비해 KGS CODE의 기준이 보수적이며, TPRD의 분출면적은 모든 기준을 만족 시킬 수 있다. 더불어 TPRD의 분출면적은 각 기준의 약 9배 큰 값을 갖는다.

파열을 방지하기 위해 규정하는 분출 목표량은 내압증가량을 분출량으로 상쇄시켜 파열을 지연시키는 것에 있다. 분출 목표량의 설계를 따를 경우 화염에 노출 이후 2~5분의 파열 지연효과가 있지만, 사용자에게 직접 노출되는 소형 프로판 용기의 경우 더 긴 시간의 지연과 완전 분출로 인한 폭발 방지의 효과를 얻고자 약 9배의 분출 면적을 확보하도록 적용하였다.

III. 화염 노출 시나리오 및 실험 방법

프로판이 화염에 노출되어 액팽창이 일어날 경우, 프로판의 최대 증기압인 4.15MPa의 값을 크게 상회하는 내압이 형성된다. 액팽창은 용기의 내압성능에 의존하기 어려운 물리적 성질이며, 체적의 증가를 통해 내압의 감소 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 프로판 용기가 화염에 완전히 휩싸인 경우를 가정하였으며, 용기는 화염에 수평과 수직방향 모두 노출이 가능하다고 가정하였다.

화염원으로로부터 형성된 화염의 온도는 균일하지 않으므로, 용기의 위치에 따라 TPRD가 노출되는 온도 및 유입 열량에 차이가 발생한다. 이 차이는 TPRD의 용융 시기에 차이를 발생 시킬 수 있으며, 결과적으로 최종 분출 시점의 차이를 유발한다.

수소자동차용 복합재의 화염시험 기준은 용기를 고정하도록 되어있지만, 본 연구에서 진행하는 소형 프로판 용기는 실제 사용자 고정되지 않고 바닥에 놓고 사용하기 때문에 사용상태를 고려하여 Fig. 3과 같이 고정하지 않은 자유 상태로 실험을 진행하였다.

Fig. 3은 화염원에 수평방향과 수직방향으로 위치한 용기의 모습을 나타낸 것으로써, 두 위치에 따른 파열 여부를 관찰하기 위함이다. Fig. 4의 (a)사진은 온도 측정을 위한 열전대(thermocouple)의 위치를 나타낸다.

열전대는 총 8개를 부착하였으며, 화염원에 수직인 용기는 용기 하단부(화염원 위), 용기 표면, TPRD

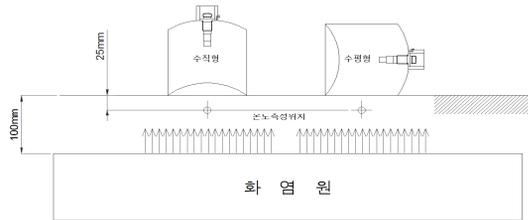


Fig. 3. Experimental design for flame exposure test.



(a) Setting the Thermocouple (b) Setting the thermo-graphic camera

Fig. 4. Equipment setting for flame exposure test.

부분에 위치한다. 화염원에 수평인 용기는 화염원 위, 용기 옆면, TPRD 부분에 열전대가 위치하며, 두 용기 사이에 2개를 서로 다른 높이에 위치 시켰다.

Fig. 4의 (a)는 Fig. 3을 토대로 설치한 것이다. 온도 센서는 K-Type의 Thermocouple을 이용하였으며, 온도 측정 온도범위는 최대 1200°C까지로 화염에 의한 프로브의 열변형 측정 오차를 최소화 하기 위해서이다. 데이터 리드선은 20m로 보상도선을 사용하여, 측정부 이외의 열에 의한 온도 간섭을 피하였으며, 측정된 값은 NI 9213 module를 이용하여 보정하였다.

더불어 화염의 형성 범위 및 안전밸브의 프로판 방출로 인한 2차 연소 형태를 관찰하기 위하여, 열화상 카메라를 설치하였다.

IV. 시험결과

화염시험을 통해 얻고자 한 것은 용기를 감싼 화염의 온도 및 소화 이후 용기의 파열 또는 변형 형태이다. 온도 측정을 위해 Thermocouple을 이용하였으며, 화염 형성 범위를 관찰하기 위해 열화상 카메라를 이용하였다.

Fig. 5는 화염원에 수직 방향으로 위치한 용기의 Thermocouple 측정 온도를 나타낸다. T0는 화염원의

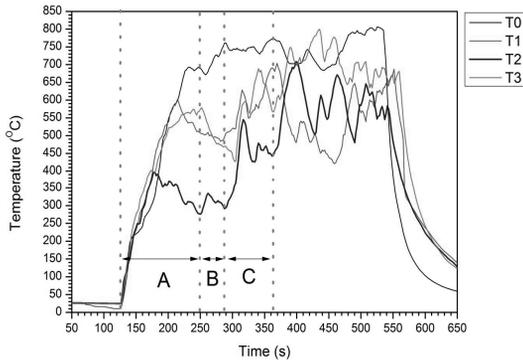


Fig. 5. Temperature of the vertical positioned cylinder.

온도이며, T1은 용기 표면부 온도, T2는 TPRD 부의 온도, T3는 용기 사이의 온도를 나타낸다.

T0에서 측정된 화염원의 온도는 큰 변화 없이 유지되며, 온도 변화 맥동은 바람 등의 영향으로 화염이 고정되지 않기 때문이다. T1과 T3는 구간 C에서 반대 경향의 온도 변화를 보이는데, 이는 안전밸브 방출구에서 액출되는 프로판의 제트화염 영향과 소화를 위한 영향이 복합적으로 표현되기 때문이다.

구간 A, B, C는 T2를 기준으로 분류하였으며, 구간 A는 화염 발생 이후 용기가 가열되는 구간이다. 구간 A는 약 2분 가량 유지되며, 가용전의 합금이 화염에 노출되어 용융되기까지 시간을 의미한다. 구간 B에서 온도 상승이 발생하는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 수직방향으로 위치한 용기의 TPRD 합금이 용융되어 내부 프로판이 기체 상태로 토출되는 것을 의미한다. 구간 B에서 화염원의 온도는 40초 동안 약 750°C로 일정하게 유지되며, 기체 상태로 분출됨과 동시에 지속적인 열량 유입으로 내압이 증가하는 구간이다. 프로판의 임계 온도는 97.5°C이며, 임계 압력은 4.25MPa이다. 구간 C에서 구간 B와 같이 온도 상승이 한번 더 발생하는데, 이는 임계상태의 프로판이 토출되는 것으로 판단 할 수 있다. 고온 고압의 프로판이 토출되어, 연소됨으로 인해 국소적으로 생성되는 열량이 증가하여 온도가 상승하게 된다. 구간 C는 약 1분가량 유지되며, 내부의 액체프로판이 TPRD를 통해서 나오면서 열전대 센서부에 영향을 주어 T2 부분만 일시적으로 온도가 낮아지는 현상이 발생한다. 구간 C 이후는 프로판의 액출로 인해 자유 용기가 운동을 하며, 액출 및 소화의 현상을 표현한다. 용기의 물리적인 폭발이 발생하면 온도경향은 일시적으로 소화된 것처럼 보이는 지점이 전 부분에서 관찰되지만 본 실험에서 측정된

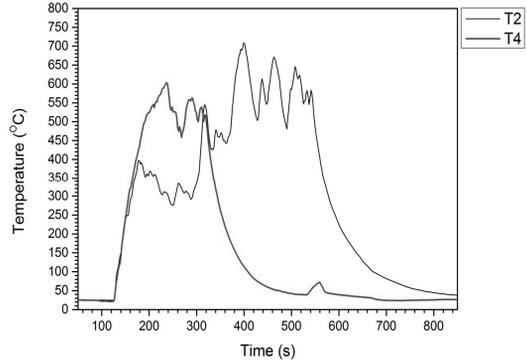


Fig. 6. Temperature comparison to each case around the TPRD.

온도 데이터는 이 경향이 관찰되지 않는다.

Fig. 6은 수직방향과 수평방향으로 위치한 용기 각각의 TPRD 부분의 온도를 측정한 결과이다. T2는 수직방향으로 위치한 용기 TPRD 부분의 온도이며, T4는 수평방향으로 위치한 용기 TPRD 부분의 온도이다.

T4를 통해 관찰되는 프로판 분출 경향은 T2를 통해 관찰되는 경향과 차이가 있다. 수직으로 위치한 프로판 용기의 경우 TPRD가 용융되는 시간 및 기상으로 분출되는 구간이 존재한 반면, 수평으로 위치한 용기의 경우 TPRD를 통해 프로판이 기상으로 분출되는 구간은 정확히 관찰되지 않는다.

이는 수평방향으로 위치한 용기의 TPRD가 용융되며, 액체 프로판이 직접 분출되기 때문이다. 약 150~300초 구간에 T4의 온도 맥동은 T2에 비해 매우 큰 것을 확인 할 수 있다. 이 온도 맥동은 수평방향으로 위치한 용기의 TPRD에서 액체 프로판이 분출됨을 보여주는 자료이다. 즉, 수직방향으로 위치한 용기의 경우 프로판이 기체로 분출되는 구간이 명확히 존재하지만, 수평방향으로 위치한 경우 프로판이 액체로 분출됨을 의미한다. 또한 온도 유지 시간이 차이가 나는 것은 분출 시간이 다르기 때문이다. 즉, 수평방향으로 위치한 프로판 용기가 내부 프로판 토출 속도가 빠름을 의미한다.

Fig. 7은 수직방향의 용기가 기체 상태의 프로판을 토출하는 모습이며, Fig. 9는 기체 상태의 프로판 토출을 열화상 카메라를 통해 확인 한 것이다. 화염의 온도에 의해 토출 부분의 정확한 화염 형태는 관찰이 어렵지만, 토출구의 온도가 화염에 비해 낮은 현상은 관찰이 가능하다. 이는 고압의 기체가 토출되며 토출부에서 연소되지 않고 농도가 연소 하한점에 도달 한 후 에 연소되기 때문이다.

Fig. 8은 수직방향과 수평방향의 용기에서 액체 프로판이 토출되는 모습이며, Fig. 10은 액체 상태로 토출되는 프로판을 열화상 카메라를 통해 확인한 것이다. 액체로 토출되는 프로판의 질량이 월등히 많은 만큼 연소 형태도 기체 상태로 토출되는 것에 비해 화염이 크게 형성되는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 11은 화염시험 이후 프로판 용기의 형상이 다. 용기 하부 경관에서 형상변형 및 소성변형이 발생하였으며, 용기의 파열은 발생하지 않았다. 화염 시험이 종료된 용기의 내용적은 1300mL로 시험 전 용적에 비해 약 30%가량 증가하였다. 용기의 내용적 및 내압성능 시험 자료를 토대로 보면, 내용적 30%의 증가는 용기 내압이 13MPa까지 형성되었음을 의미하며, 내부 프로판 액체의 온도는 130℃ 이상이 형성되었음을 의미한다.

즉, API와 KGS CODE 기준 안전밸브 방출면적의 9배를 적용한 가용적을 적용한 경우 용기의 파열 없이 내부 프로판이 방출되는데 형성된 내압은 최소 13MPa, 프로판 액체의 최소 온도는 130℃임을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 프로판용 소형 압력용기의 내압성능 및 안전밸브 방출 면적의 안전성을 검토하기 위해 용기를 560℃ 이상의 화염에 노출시키는 화염시험을 수행하였다. 화염원에 대해 수직방향과 수평방향으로 위치한 두 용기 모두 파열은 발생하지 않았으며, 내부 프로판이 안전 밸브를 통해 외부로 방출되었다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- ① 수직방향으로 위치한 용기는 기체상태의 프로판을 토출하는 구간이 약 40초 가량 유지된다.
- ② 수평방향으로 위치한 용기는 기체상태의 프로판을 토출하지 않으며, 액체상태와 임계상태의 프로판을 토출하며, 최대 온도는 750℃까지 형성된다.
- ③ 기존 규정에 비해 9배 큰 분출면적을 적용하였을 경우 용기는 파열되지 않고, 형상의 변형을 동반하며, 안전밸브를 통해 모든 프로판이 방출된다.
- ④ 이때 프로판 용기 내부에 형성되는 압력은 최소 13MPa로 추정되며, 액체 프로판의 온도는 130℃ 이상이 형성된 것으로 추정된다.

본 논문에서 제시한 결과는 프로판 용기가 파열을 발생시키지 않고 프로판의 방출을 유도하는 것을 검증하기 위한 실험으로, 안전밸브 면적이 기준의 9배를 적용하면, 용기의 내압성능은 13MPa 이상이 되어야 용기의 파열 없이 프로판이 방출되는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과는 소형 프로판 용기의 규정을 제정 또는 개발에 중요한 기초자료가 될 것으로 기대한다.

감사의 글

국민안전처 소방안전 및 119구조구급기술 연구개발사업단의 협조에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] K. P. Lee, S. M. Kwan, "Developing a Scale of Competitiveness Focusing on the Selection Attributes of Auto-Camp Ground", The Korea Academic Society of Tourism and Leisure, Vol(25), No(3), pp. 37-52, 2013.
- [2] B. Y. Lee, Y. C. Jung, "A Study on the Relationship Between Auto-camping Experiences, Satisfaction and Behavioral intentions : Focused on the 4Es Theory", The Korea Academic Society of Tourism and Leisure, Vol(24), No(7), pp. 275-294, 2012.
- [3] K. P. Lee, S. M. Kwan, "An Analysis of Structural Relationships between Motivation, Values, Satisfaction, and Loyalty for Auto Camping Participants", Korea Academic Society of Tourism Management, Vol(28), No(5), pp. 45-70, 2013.
- [4] API RP 520 : 2003, Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries : Part 2 - Installation, American Petroleum Institute, 2003
- [5] LP Gas Code of Practice 1, Bulk LPG Storage at Fixed Installations Part 1 : 2004 - Design, Installation and Operation of Vessels Located Above Ground, LP Gas Association, 2004
- [6] Korea Gas Safety Corporation, "Facility/Technical/Inspection/Re-inspection Code for Manufacture of Safety Valves for High-pressure Gases", Republic of Korea, 2015