



## LPG 강제용기의 응력강도 안전성에 미치는 코너반경의 영향

†김청균

홍익대학교 트리보메카·에너지기술 연구센터  
(2015년 1월 4일 접수, 2015년 2월 9일 수정, 2015년 2월 10일 채택)

## Effects of Corner Radius on the Stress Strength Safety of LPG Steel Cylinder

†Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology  
Hongik University, Seoul 121-791, Korea  
(Received January 4, 2015; Revised February 9, 2015; Accepted February 10, 2015)

### 요약

본 연구는 LPG 강제용기에서 상단반구와 하단반구의 코너반경이 응력강도 안전성에 미치는 영향을 FEM으로 해석한 것이다. FEM 해석결과에 의하면, 응력강도 안전성에 큰 영향을 미치는 요소는 용기의 두께보다 상단반구 및 하단반구의 코너반경이다. 그러나 강제용기의 두께는 경량화에 직결되기 때문에 간과해서는 안 되는 중요한 설계요소이다. LPG 강제용기의 강도안전성 검사에서 최고시험압력이 3.04MPa임을 감안할 때, 20kg용 LPG 강제용기의 두께는 2.3~2.6mm, 상단반구와 하단반구의 코너반경은 157mm 이상으로 최적화 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

**Abstract** - This paper presents the stress strength safety of LPG steel cylinder for various corner radiuses of upper round end plate and lower round end plate by using a finite element method. The FEM analyzed results indicate that the most influential elements is a corner radius of upper round end plate and lower round end plate rather than a thickness of LPG cylinder. But, the thickness of a steel cylinder is an important design element considering for a weight reduction of a cylinder. Thus, this paper recommends that the LPG steel cylinder thickness is 2.3~2.6mm and the corner radius of upper round end plate and lower round end plate is over 157mm as an optimum design for the maximum testing pressure of 3.04MPa.

**Key words** : liquefied petroleum gas, lpg cylinder, stress strength safety, lower round end plate, FEM

### 1. 서론

액화석유가스(LPG)를 안전하게 저장하고, 운반하기 위해서는 원통형상의 용기(cylinder)를 사용한다. LPG 용기에는 강재로 제작한 강제용기, 복합소재로 제조한 콤포지트 용기, 알루미늄 소재로 제조한 알루미늄 용기, 스테인리스 소재로 제작한 스테

인리스 용기 등이 있다.

LPG 연료를 운반하는데 많이 사용하는 용기로는 강관을 성형하여 용접한 3피스 용기와 2피스 용기의 두 가지가 있다. 3피스 용기는 용접 길이가 길어서 용접불량 가능성이 높지만, 용기의 두께를 얇게 할 수 있어 경량화와 원가절감 측면에서 유리하다. 반면에 2피스 용기는 용접 길이가 짧아 용접불량 가능성이 줄어들고 생산성이 향상되는 장점은 있지만, 딥 드로잉(deep drawing) 성형가공에 따른 두께의 불균일성과 중량이 상대적으로 많이 나가는 문제,

†Corresponding author:ckkim\_hongik@naver.com  
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

용접선이 몸통의 중간부에 위치하므로 용기의 운반 과정에 용기와 용기가 부딪히면서 용접부의 페인트가 벗겨져 부식축진에 따른 핀홀 발생과 미관상의 문제, 수명단축 등이 예상된다.

LPG 강제용기의 상단반구의 중심부에는 밸브를 안전하게 체결하기 위한 네크링(neck ring)을 용접으로 접합하고, 네크링에 체결되는 밸브를 외부에서 가해지는 각종 하중으로부터 보호하기 위해 밸브 보호대(valve protector)를 용접으로 붙인다. 또한, 강제용기의 하단부에는 용기를 이동할 때, 그리고 LPG 운반차량에 올리거나 내릴 때 용기의 안전성을 보장받기 위해 스커트(skirt)를 몸통부와 용접으로 접합한다.

LPG 용기의 저장용량은 3kg~50kg로 다양하게 제작된다. 한국을 비롯한 일본에서는 LPG 용기를 처음 도입할 때 사용한 20kg용 강제용기가 가장 많이 유통되고 있다. 그러나 중국을 비롯한 많은 나라들이 10kg~15kg 용기를 더 많이 사용하고 있다. 또한, 최근에는 LPG 연료공급에 따른 물류비용 절감과 안전성 강화를 위해 1~3톤의 저장용량을 갖는 소형저장탱크가 많이 보급되고 있다. 이제 20kg용 LPG 강제용기로 가스를 공급하는 방식은 유통비용 상승과 안전성 측면에서 낡아질 것으로 예상된다. LPG 연료를 용기에 저장하여 안전하게 사용하기 위해서는 가스압력에 적합한 강도안전성을 확보하는 것이 중요하다. 그렇다고 용기의 두께를 두껍게 제작하면 안전성은 확보되지만, 중량과 제조원가 측면에서 불리하므로 최적설계를 통해 강제의 두께를 얇게 하면서 안전성을 확보한 용기의 제작은 LPG 업계의 최대 관심사이다[1].

안전하게 제작한 LPG 강제용기라도 복사열을 포함하여 고온이나 충격하중에 노출되면 급격한 내압 상승으로 가스폭발이라는 위험 상황에 도달할 수 있다. 따라서 용기 사용자의 부주의와 부실한 안전관리가 가스폭발 사고로 연결된 사고사례를 흔하게 찾아볼 수 있다. 실제로 LPG 용기폭발에 의한 인명피해의 대부분은 취급 부주의에서 발생하지만, 고의적인 용기훼손에 의한 가스화재나 폭발사고가 발생하기도 한다[2,3].

본 연구에서는 LPG 강제용기에 작용하는 가스압력의 변화와, 용기 코너부의 반경 변화에 따라 발생하는 용기 구조물의 응력강도 안전성을 FEM으로 해석하고자 한다. 이 때 LPG 강제용기의 응력강도 안전성 해석을 위해 설계한 용기의 상단부와 하단부의 코너반경은 67.4~157.4mm의 5가지를 고려하였다.

## II. FEM 해석조건 및 해석모델

### 2.1. 강제용기의 물성치

LPG 강제용기는 몸통(body), 상단반구(upper round end plate), 하단반구(lower round end plate), 네크링(neck ring), 밸브 보호대(valve protector), 스커트(skirt)로 구성되고, 이들 부품은 모두 3피스 또는 2피스 용접에 의해 하나의 원통형 강제용기로 제작된다.

그러나 본 연구에서는 FEM 강도해석을 간편하게 수행하기 위해 여러 개의 부품을 용접으로 연결한 강제용기가 아니고, 하나의 몸체처럼 균일한 두께를 갖도록 제작한 용기를 고려하였다.

Fig. 1에서 보여준 LPG 강제용기에서 상단부의 밸브 보호대와 하단부의 스커트 부분을 제외한 일체형 강제용기에 대한 응력강도 안전성을 유한요소법으로 해석하였다.

LPG 강제용기에 공급한 가스압력에 의해 작용하는 균일분포 내압은 Fig. 1과 같이 설정하였다. LPG 강제용기에 대한 강도안전성 해석에 사용된 20kg용 강제용기의 소재는 ASTM A283 steel, Grade D를 사용하였고, 강제용기 소재에 대한 물성치는 Table 1에서 주어진다.

Table 1. Material properties of ASTM A283 steel, grade D

Density (g/cc)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	Young's Modulus (kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
7.82	415~495	230	$2.1 \times 10^6$	0.33



Fig. 1. LPG cylinder and boundary conditions.

**2.2. 용기의 강도 안전성**

LPG 강제용기는 외부에서 가해지는 온도나 충격 압력 등의 예상치 못한 요인에 의해 가스폭발이나 화재가 발생한다. 따라서 LPG 용기에 대한 안전성을 확보하기 위해 각국에서는 고압가스 압력용기의 안전성을 실효적으로 확보할 수 있도록 법으로 강제한다. 우리나라에서도 고압가스안전관리법에 의거 LPG 용기의 생산, 판매, 충전, 재검사에 이르기까지 전주기를 엄격하게 규정하고 있다.

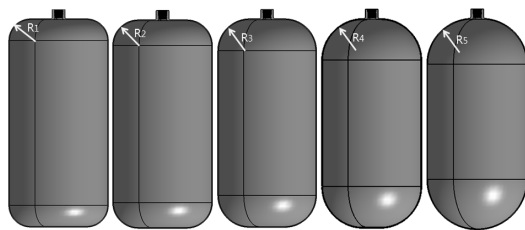
LPG 용기는 고압으로 충전하여 사용하기 때문에 강도안전성(strength safety)과 팽창 변형률을 중요하게 관리하고 있다. 여기서 강도안전성은 LPG 강제용기의 응력강도를 안전하게 설계하고, 제작하는 것으로 소재의 결함, 용접에 따른 연결부의 결함, 제조과정에서 발생할 수 있는 열처리 및 제조불량, 부주의한 사용이나 운반 과정에 발생할 수 있는 손상 등에 연계된다.

강제용기의 강도안전성은 용기에 작용하는 외부 하중과 용기에 충전하는 가스압력, 용기를 바닥면에 떨어뜨려 스커트 지역에 가해지만 충격하중 등 많은 요소에 의해 영향을 받는다. LPG 용기를 제작할 때 용기의 내외부에서 작용하는 하중조건을 모두 고려하기는 어렵기 때문에 LPG 용기의 제작에서 고려해야 할 용접규격, 재료의 선정, 재충전용 용접용기에 대한 정기검사, 시험평가 등을 규정한 KS B 6211[4], KS B ISO 4706[5], KS B ISO 10464[6], KGS AC211 [7]에 명시된 것을 참고하는 것이 바람직하다.

**2.3. FEM 응력강도 해석모델**

LPG 강제용기의 응력강도 안전성을 해석하기 위해 Fig. 2에서 보여준 것처럼 용기의 몸통부와 상단 반구 및 하단반구를 연결하는 코너부의 반경을 변화시켜가면서 용기에 걸리는 응력강도를 상대적으로 비교하였다.

본 연구에서는 LPG 강제용기의 응력강도 안전성



(a) R<sub>1</sub>=67.4 (b) R<sub>2</sub>=80 (c) R<sub>3</sub>=100 (d) R<sub>4</sub>=130 (e) R<sub>5</sub>=157.4

**Fig. 2.** FEM analysis models for LPG cylinder with various corner radius.

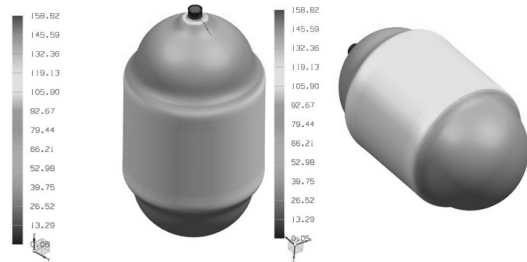
을 해석하기 위해 유한요소해석 프로그램을 사용하였다. LPG 용기에 작용하는 내압은 용기의 내측벽면에 균일하게 작용한다고 가정하고, FEM 해석모델에 작용하는 경계조건은 Fig. 1과 같다.

**III. 해석결과 및 고찰**

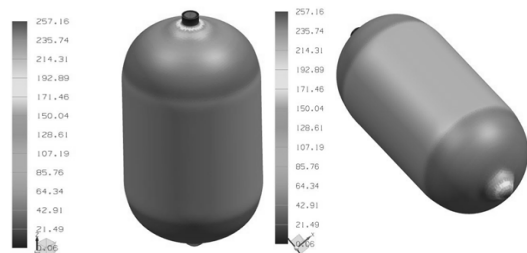
LPG 강제용기의 두께가 2.4mm이고, 상단반구와 하단반구의 코너반경이 157.4mm로 제작된 용기에 1.82MPa의 가스내압이 작용할 때 LPG 용기에 걸리는 von Mises 응력분포를 Fig. 3(a)에서 보여주고 있다.

Fig. 3(a)의 응력강도 안전성 해석결과에 의하면, 용이용 밸브를 체결하기 위해 설치한 네크링과 상단 반구가 연결되는 부위에서 von Mises 최대응력 158.8 MPa이 작용하는 취약부로 나타났지만, 강제용기의 항복응력이 230MPa라는 점을 고려하면 충분히 안전한 설계라 할 수 있다. 또한, 강제용기의 몸통부에서 두 번째로 높은 응력분포가 나타났지만, 강도측면에서 아직은 문제가 없는 해석 데이터이다. LPG 강제용기의 하단반구와 상단반구의 코너반경 157.4mm에 대한 FEM 해석결과를 제시한 Fig. 3(a)에서는 용기에 작용하는 응력하중이 용기전체에 고르게 분산되었기 때문에 안전하게 설계한 용기라 할 수 있다.

또한, Fig. 3(b)는 LPG 용기의 두께를 2.6mm로 두껍게 설계하고, 상단반구와 하단반구의 코너반경



(a) For t=2.4mm and corner radius R=157.4mm



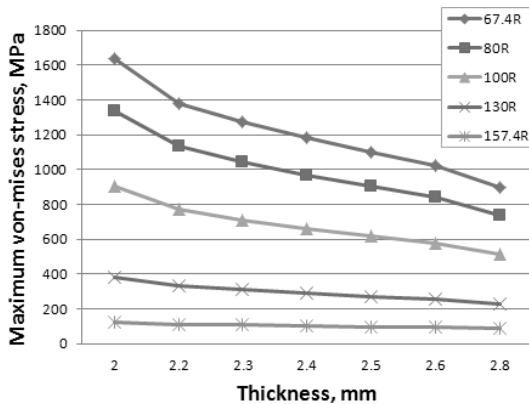
(b) For t=2.6mm and corner radius R=130mm

**Fig. 3.** von Mises stress distribution of LPG cylinder.

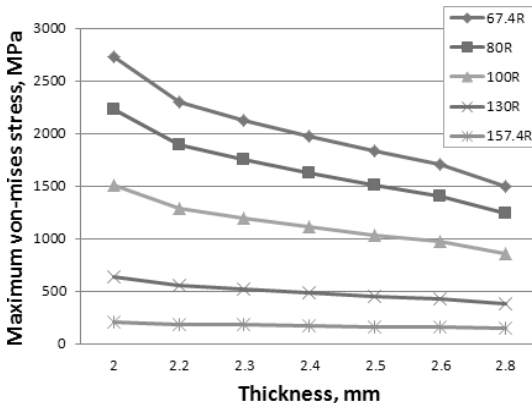
을 130mm로 약간 줄여서 제작한 LPG 강제용기에 3.04MPa의 최고시험압력을 작용할 때 용기에 걸리는 von Mises 응력분포를 보여준 결과이다.

Fig. 3(b)의 해석결과에 의하면, 하단반구의 중심부에서 von Mises 최대응력 257.2MPa이 작용하는 취약부로 나타났지만, 강제용기의 항복응력이 230MPa라는 점을 고려하면 약간의 소성변형이 예상되어도 아직은 안전한 설계라 할 수 있다. 또한, 용기용 펄브를 체결하기 위해 설치한 네크링과 상단반구가 연결되는 부위에서 두 번째의 취약부로 관찰되었고, 반면에 몸통부에서는 안정된 강도안전성을 나타내었다.

Fig. 3의 해석결과를 요약하면, 상단반구와 하단반구를 형성하는 코너반경과 용기의 두께, 네크링 주변은 응력강도 안정성 측면에서 상호간에 밀접하게 영향을 주는 설계인자라 할 수 있다.



(a) For gas pressure of 1.82MPa

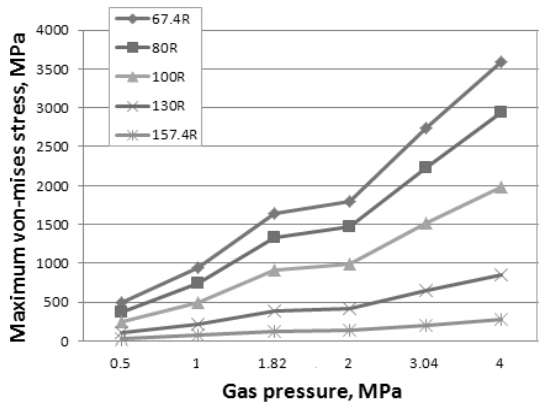


(b) For gas pressure of 3.04MPa

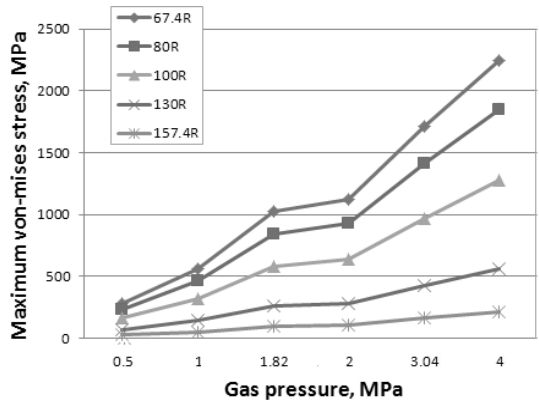
Fig. 4. Maximum von Mises stress for various corner radius and cylinder thickness.

Fig. 4는 LPG 강제용기의 상단반구와 하단반구의 코너반경을 67.4~157.4mm로 설계하였을 때 동일한 가스압력에 대하여 LPG 용기에 작용하는 von Mises 최대응력을 제시한 해석결과이다. 예측된 것처럼 용기의 두께가 두꺼워지면 최대응력은 감소하고, 코너반경이 커지면 응력이 줄어드는 것으로 나타났다. 특히, 코너반경이 작을 때는 용기의 두께가 두꺼워질수록 응력이 급격하게 줄어들지만, 코너반경이 클 때는 두께가 증가해도 응력은 완만하게 작아지는 것으로 나타났다. 이것은 용기의 코너반경이 응력강도 안전성에 민감하게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

LPG 강제용기에 작용하는 가스압력이 1.82MPa 일 때의 응력강도 해석결과를 제시한 Fig. 4(a)에 의하면, 상단 및 하단 반구의 코너반경을 157.4mm로 설계할 때는 문제가 없으나, 코너반경을 130mm로



(a) For cylinder thickness of 2mm



(b) For cylinder thickness of 2.6mm

Fig. 5. Maximum von Mises stress for various corner radius and gas pressure.

설계할 때는 강제용기의 두께를 최소한 2.6mm 이상으로 제작하는 것이 안전함을 알 수 있다.

반면에 LPG 강제용기에 작용하는 가스압력을 3.04MPa로 최고시험압력까지 높여서 코너반경을 157.4mm로 설계할 때는 Fig. 4(a)에서 제시한 해석 결과처럼 안전성 문제는 없으나, 코너반경을 줄여서 130mm로 설계할 때는 용기의 두께를 2.8mm 이상으로 두껍게 제작해야 안전한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 상단반구와 하단반구의 코너반경을 67.4~157.4mm로 설계하였을 때 동일한 두께를 갖는 LPG 강제용기에 대하여 용기에 작용하는 von Mises 최대응력을 제시한 해석결과이다. FEM 해석결과에 의하면 LPG 강제용기에 작용하는 가스압력이 높아지면 용기에 걸리는 최대응력은 상승하고, 코너반경이 줄어들수록 최대응력은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 코너반경이 작을 때는 용기에 작용하는 가스압력이 증가할수록 최대응력은 급격하게 상승하지만, 코너반경이 클 때는 가스압력이 높아져도 응력은 완만하게 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 LPG 강제용기의 코너반경이 응력강도 안전성에 더 큰 영향을 미친다는 것이다.

강제용기의 두께가 2mm일 때 von Mises 최대응력 해석결과를 제시한 Fig. 5(a)에 의하면, 강재의 항복강도 230MPa를 고려할 때 코너반경 157.4mm로 설계하면 문제가 없으나, 코너반경을 130mm 정도로 설계할 때는 강제용기에 공급한 가스압력을 1.5MPa 이하로 제한하는 것이 안전상 문제가 없어 보인다.

반면에 LPG 강제용기의 두께를 2.6mm로 높일 때의 응력강도를 제시한 Fig. 5(b)에 의하면, 코너반경을 157.4mm로 설계할 때는 문제가 없으나, 코너반경을 130mm 이하로 설계할 때는 용기에 공급한 가스압력을 2MPa 이하에서 사용하는 것이 안전하다.

LPG 강제용기의 상단반구와 하단반구를 등글게 성형하는 것은 강도안전성을 확보하기 위한 일종의 설계기술이다. 따라서 Figs. 4와 5에서 코너반경을 설계변수로 해석한 응력강도 안전성 결과로 용기의 두께보다는 코너반경이 더 중요함을 알 수 있다. 본 연구에서 고려한 20kg의 LPG 용기에서 안전기준

최고시험압력 3.04MPa를 감안하면 강제용기의 두께는 2.3~2.6mm, 상단반구 및 하단반구의 코너반경은 157mm 이상으로 설계하는 것이 응력강도 안전성 측면에서 바람직한 설계 데이터이다.

#### IV. 결론

LPG 강제용기에서 상단반구와 하단반구의 코너반경이 응력강도 안전성에 미치는 영향을 FEM으로 해석하였다. FEM 해석결과에 의하면, 응력강도 안전성에 큰 영향을 미치는 요소는 용기의 두께보다 상단반구 및 하단반구의 코너반경이다. 그러나 강제용기의 두께는 경량화에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 간과해서는 안 되는 중요한 설계요소이다.

LPG 용기의 강도안전성 평가는 최고시험압력 3.04MPa에서 수행됨을 감안할 때 20kg용 강제용기의 두께는 2.3~2.6mm, 상단반구와 하단반구의 코너반경은 157mm 이상으로 최적화 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] C.K. Kim and S.C. Kim, "Numerical Study on the Strength Safety of High Pressure Gas Cylinder", J. of KIGAS, Vol. 16, pp.1-6, (2010)
- [2] H.C. Kim, "Intended Gas Explosion Prevent and Appropriate Measures", Gas Daily News Co., (2008.1.14)
- [3] Yunhap News, "Annual Average Gas Explosion of 50 Cases, Annually", (2006.4.14.)
- [4] KS B 6211, Refillable Welded Steel Gas Cylinders for Liquefied Petroleum Gas.
- [5] KS B ISO 4706, Refillable Welded Steel Gas Cylinders.
- [6] KS B ISO 10464, Gas Cylinders-Refillable Welded Steel Cylinders for Liquefied Petroleum Gas(LPG) - Periodic Inspection and Testing.
- [7] KGS AC211, (2014)