



레벨게이지용 컬럼을 설치한 LPG 미니탱크의 강도안전성에 관한 해석적 연구

†김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2018년 8월 16일 접수, 2019년 6월 24일 수정, 2019년 6월 25일 채택)

Analytical Study on Strength Safety of LPG Mini Tank with Column for Level Gauge

†Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received August 16, 2018; Revised June 24, 2019; Accepted June 25, 2019)

요약

본 연구에서는 250kg 정도의 저장용량을 갖는 LPG 미니탱크에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. FEM 해석결과에 의하면, 250kg의 저장용량을 갖는 LPG 미니탱크의 코너 반경은 175~205mm로 설계하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 일반적으로 가스저장탱크의 상하단부를 형성하는 경판의 코너 반경을 크게 설계할수록 강도 안전성은 높아지지만, 탱크의 내용적이 줄어들기 때문에 최적의 설계 데이터를 도출하는 것이 중요하다. 또한, 가스탱크의 강도를 안전하게 설계하기 위해 탱크의 두께를 두껍게 설계하려고 하지만, 두꺼운 강판을 사용하면 소재비와 운반비가 상승하므로 강판의 최적두께를 4.5~5.5mm에서 선정하는 것이 바람직하다. LPG 가스탱크의 액위를 측정하기 위해 사용하는 레벨게이지를 탱크의 측벽면에 구멍을 뚫어서 조립하는 기존의 방식보다 가스탱크의 중심축에 컬럼을 설치하는 레벨게이지 타입을 일체형으로 설계하는 것이 2배의 강도안전성을 높여주는 효과가 있다.

Abstract - In this study, the strength stability of an LPG mini tank with a storage capacity of about 250 kg was analyzed by FEM. According to the results of the FEM analysis, it is preferable that the corner radius of the LPG mini tank having a storage capacity of 250 kg is designed to be 175 to 205 mm. Generally, the larger the corner radius of the end plate of the gas storage tank, the higher the safety of the strength, but the volume or capacity of the tank is reduced. Therefore, it is important to derive the optimum design data. Further, in order to securely design the strength of the gas tank, the thickness of the tank is designed to be thick. However, when the thick steel sheet is used, the material and the transportation costs are increased. The result shows that it is preferable to select the optimum thickness of the steel sheet from 4.5 to 5.5 mm. Using the level gauge type of column on the central axis of the gas tank, the safety strength of the LPG tank can be enhanced as much as twice, compared with the tank of the existing level gauge to measure the liquid level by piercing the side wall of the tank.

Key words : LPG mini tank, strength safety, gas storage tank, level gauge column, stress, FEM

†Corresponding author: cckim_hongik@naver.com
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

가스버너나 가스레인지와 같은 연소기에 LPG 연료를 안전하게 저장하였다가 공급하기 위해서는 100kg 미만의 저장용량을 갖는 실린더 형상의 용기나, 100kg 이상 3,000kg 미만의 소형저장탱크가 필요하다.

이들 LPG 용기나 탱크는 모두 고압가스 용기용 강재를 사용하여 동체의 상하부에 돔 형상의 경판을 맞대고 용접하여 제작한다.

가스탱크가 가스내압에 충분히 안전하도록 제작하기 위해서는 탱크의 동체는 판재를 원기둥 형상으로 롤링 성형한 후 맞대기 용접을 하고, 이 원기둥의 상단부와 하단부에는 돔 형상으로 성형한 경판을 용접하여 고압가스 저장탱크를 완성한다. 가스탱크는 고압가스 용기용 강재 SG 316[1]처럼 강도가 높은 소재를 사용한다.

본 연구에서 강도안전성을 해석하고자 하는 해석모델은 LPG 미니탱크 급으로, 기존의 LPG 소형저장탱크에서 정의하는 3톤 미만의 저장용량 중 100kg 이상 500kg 미만의 탱크를 지칭한다. 따라서 FEM 해석모델은 250kg의 저장용량을 갖고, 탱크의 직경이 750~760mm인 것을 대상으로 한다.

LPG 용기에 대한 연구는 일부[2,3] 있지만, LPG 소형저장탱크에 대한 연구를 수행한 사례는 없고, 일본 등에서 개발한 탱크제품을 모방·생산하고 있다. LPG 가스탱크는 강판을 맞대기 용접으로 제작한 단순한 고압가스 저장탱크이지만, 만약 2톤 정도의

가스탱크가 폭발할 경우는 최대 72m 반경 내에서 인적·물적 피해가 발생하는 것으로 알려졌다[4,5].

LPG 미니탱크의 강도안전성에 가장 큰 영향을 미치는 설계요소는 돔 형상을 갖는 경판의 코너 반경과 탱크의 두께이다. 따라서 탱크의 강도안전성을 높이기 위해서는 가스내압에 따른 경판의 코너 반경 최적치수를 찾아야 한다.

또한, LPG 미니탱크의 액위(liquid level)를 측정하는 레벨게이지를 탱크에 설치하는 방식에 따라 가스탱크의 강도안전성에 영향을 미칠 수 있어, 본 연구에서는 레벨게이지의 장축 컬럼을 설치한 경우와, 설치하지 않은 두 가지의 탱크 설계모델에 대한 응력강도를 상대적으로 비교·고찰하고자 한다.

II. LPG용 미니탱크 모델

본 연구에서 고려한 LPG용 가스저장탱크는 상하단부에 돔 형상의 경판을 용접으로 동체에 연결한 일체형 구조물을 Fig. 1(a)에서 보여주고 있다. Fig. 1(a)와 같은 기존의 가스저장탱크에서는 액위를 측정하기 위해 탱크의 중간부 아래쪽에 구멍을 뚫어서 뜨개식의 레벨게이지를 설치하기 때문에 가스탱크의 강도가 떨어지는 것으로 알려져 있다.

반면에 Fig. 1(b)에서 보여준 것처럼 가스저장탱크의 상하단부에 설치된 경판 사이에 장축의 컬럼을 일체형으로 고정된 경우는 가스탱크의 강도를 높이는 설계구조가 될 수 있다. 상기 컬럼은 가스탱크의 액위를 측정하는 뜨개의 상하이동을 안내하는 구조물이다.

III. 사용소재 및 해석조건

본 연구에서는 고압가스 용기나 탱크 제작에 사용되는 저탄소 계열의 SG 365 강판 소재로 강도안전성을 유한요소법으로 해석하였다. SG 365는 강도와 팽창률이 우수한 것으로 알려져 있으며, 이 소재는 기계적 특성치는 Table 1에서 제시한다.

제조사에서 통상적으로 3톤 미만의 가스저장탱

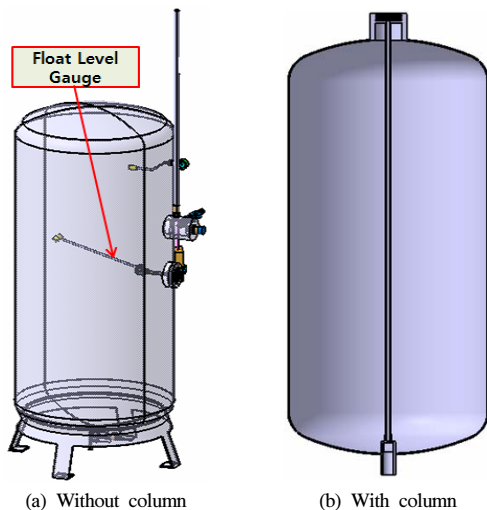


Fig. 1. LPG mini tank design models.

Table 1. Mechanical properties of SG 365[1]

Properties	Values @25°C
Elastic modulus, GPa	196
Tensile stress, MPa	560
Yield stress, MPa	386
Poisson's ratio	0.3

크의 내압검사에 사용되는 최고압력은 2.3MPa이다 [5]. 따라서 본 연구에서 탱크의 강도안전성에 관련된 응력강도를 해석하기 위해 사용한 가스내압은 가장 낮은 0.5MPa에서 최고압력 3.5MPa까지 고려하였다.

IV. 해석결과 및 고찰

Fig. 1에서 보여준 250kg의 저장용량을 갖는 LPG 미니탱크에 고정되는 뜨개식 레벨게이지의 설치형태에 따라 달라질 것으로 예상되는 가스탱크의 강도안전성을 가장 낮은 가스내압 0.5MPa부터 탱크 구조물이 최대한 안전하게 견디어야 하는 최고의 가스내압이 3.5MPa일 때까지 올려서 해석하였다.

Fig. 2에서는 가스탱크의 중심축에 컬럼을 설치한 Fig. 1(b)와 같은 설계모델을 해석한 결과에 의하면, 최대응력은 돔 형상을 한 탱크의 상단부 경판에서 발생하는 것으로 나타났다. 탱크에서 최대응력이 형성되는 부분은 가스탱크의 직경과 높이의 상대적인 비율, 돔 형상을 한 경판의 코너 반경과 탱크의 두께에 따라 달라진다. 따라서 가스탱크의 안전한 설계는 탱크에 작용하는 집중응력이 형성되지 않도록 분산시키는 최적설계 데이터를 찾아야 한다.

Fig. 3(a)에서는 250kg의 저장용량을 갖는 LPG 미니탱크의 두께를 4mm로 설계하고, 탱크의 중심축에 컬럼을 설치한 Fig. 1(b)와 같은 설계모델에

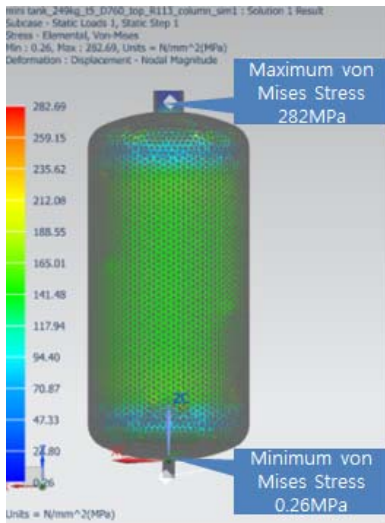
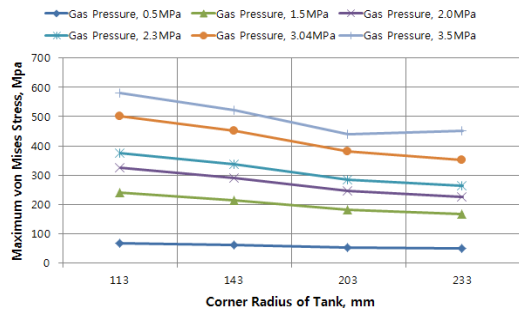
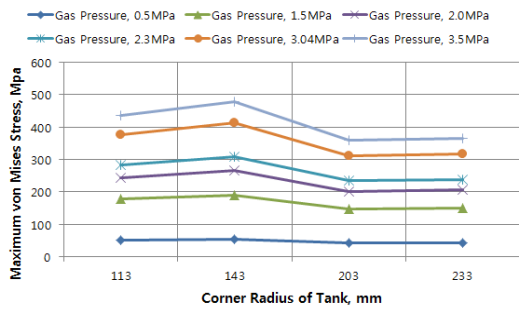


Fig. 2. Stress distribution of LPG mini tank with level gauge column for applied gas pressure of 2.3MPa and tank thickness of 5mm.

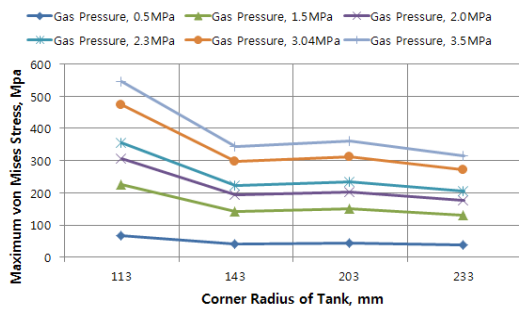
0.5MPa~3.5MPa의 가스내압을 공급하였을 때 가스 탱크에 작용하는 von Mises 최대응력을 해석한 결과이다. 여기서는 가스탱크의 강도안전성을 고려하여 경판 코너부의 반경 설계 데이터를 최적의 조건으로 도출하고자 하였다. 가스탱크의 벽면 두께가 4mm일 경우, 최소한의 강도안전성을 확보하기 위해서는 탱크의 돔 형상을 한 경판의 코너 반경을 230mm 이상으로 설계하고, 가스내압은 최대 3.0MPa를 넘지 않도록 관리하는 것이 중요하다. 또한, 탱크의 안전성을 보증하기 위해서는 안전밸브가 정상



(a) Tank wall thickness, 4mm



(b) Tank wall thickness, 5mm



(c) Tank wall thickness, 6mm

Fig. 3. Maximum von Mises stress of LPG mini tank with level gauge column for corner radius of tank, 113mm~233mm.

적으로 작동하도록 지속적인 점검이 필요하다.

Fig. 3(b)와 3(c)에서 제시한 FEM 해석결과를 Fig. 3(a)의 해석조건과 동일하게 적용하여 얻었다. 다만, 가스탱크의 두께를 5mm와 6mm로 더 두껍게 설계한 것이 다르다. 가스탱크의 코너 반경이 5mm 인 LPG 미니탱크에 걸리는 von Mises 최대응력을 보여준 Fig 3(b)에 따르면, 탱크의 코너 반경을 200mm 이상으로 설계할 경우는 가스내압을 최대 3.5MPa 정도까지 올려도 안전한 것으로 나타났다.

Fig. 3(c)는 가스탱크의 두께를 6mm로 높일 경우에 대한 해석결과이다. 이 경우는 탱크의 코너 반경을 140mm 이상으로 낮추어 설계해도 가스탱크의 안전성은 충분히 확보되는 것으로 나타났다. 그러나 탱크의 두께가 증가할수록 중량과 소재가격, 가공난이도가 높아지는 문제가 있지만, 코너 반경이 줄어들기 때문에 탱크의 저장용량이 상대적으로 늘어나는 장점은 있다.

결국, LPG 미니탱크의 상하단부를 형성하는 경판의 코너 반경을 크게 설계하면 강도안전성 측면에서 유리하지만, 곡률 반경이 증가되면서 가공비가 높아지고, 가스탱크의 내용적이 줄어들기 때문에 해석적 연구에 기반한 최적의 설계 데이터를 도출하는 것이 중요하다. Fig. 3에서 제시한 해결결과를 요약하면, 250kg의 저장용량을 갖는 LPG 미니탱크의 코너 반경은 175~205mm 정도로 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

Fig. 4의 데이터는 Fig. 2(b)에서 제시한 LPG 미니탱크에 공급한 가스내압을 0.5~3.5MPa로 공급하였을 때, 가스탱크가 각각의 두께 변동(4~6mm)에 따라 발생하는 von Mises 최대응력을 FEM으로 해석한 결과이다.

Fig. 4(a)의 해석결과는 가스탱크의 두께가 4mm 일 때, 가스내압이 통상적 기준치인 2.3MPa 정도까지는 안전하다. 그러나 가스탱크의 코너 반경을 145mm 이하로 줄이고, 동시에 가스내압을 3MPa 이상으로 높여도 정상적인 사용조건에서는 안전하지만, 가스내압이 갑자기 높아지거나 안전밸브의 작동이 비정상일 때는 가스탱크의 강도안전성을 담보할 수 없다.

또한, Fig. 4(b)에서는 탱크의 두께를 5mm로 늘린 상태에서 코너 반경을 120mm 이상으로 설계하고, 가스내압을 3.0MPa 정도로 유지한다면 가스탱크는 안전한 것으로 나타났다. 만약 탱크의 코너 반경을 175mm 이상으로 늘려서 설계한다면, 탱크에 작용하는 가스내압이 3.5MPa 정도로 올라가도 강도안전성을 보장할 수 있다.

가스탱크에서 가장 큰 두께인 6mm로 설계한 LPG 미니탱크에 대한 해석결과를 제시한 Fig. 4(c)에서는

가스내압이 3.5MPa로 가장 높고, 탱크의 코너 반경을 140mm 이상으로 설계해도 가스탱크의 강도안전성을 충분히 보장할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4의 해석결과에서 제시한 것처럼, 탱크의 강도를 안전하게 설계하기 위해서는 탱크의 두께를 두껍게 설계하는 것도 좋지만, 두꺼운 강판을 사용하면은 소재비와 성형 가공비, 그리고 운반비가 상승하므로 강판의 두께를 4.5~5.5mm에서 선정하는 것이 바람직하다.

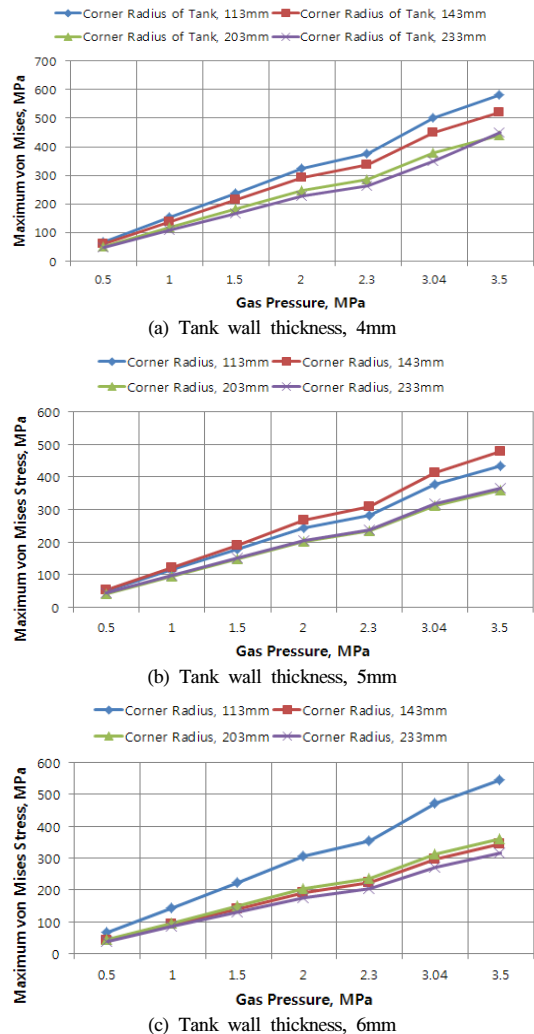


Fig. 4. Maximum von Mises stress of LPG mini tank with level gauge column for applied gas pressures, 0.5MPa~3.5MPa.

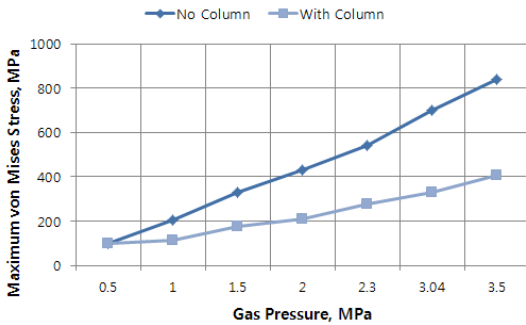


Fig. 5. Maximum von Mises stress of LPG mini tank without and with level gauge column for applied gas pressures, 0.5MPa~3.5MPa.

Fig. 5에서는 뜨개식 레벨게이지를 탱크의 벽면에 구멍을 뚫어 설치한 Fig. 1(a)와, 컬럼형의 레벨게이지를 가스탱크의 중심축에 설치한 Fig. 1(b)와 같은 두 가지의 탱크모델에 대한 강도안전성 해석 결과를 보여주고 있다. 가스탱크에 작용하는 가스내압이 0.5MPa로 낮은 경우의 응력강도 차이는 거의 없으나, 탱크에 걸리는 가스내압이 증가될수록 큰 차이를 나타내고 있다. LPG 미니탱크에 작용하는 가스내압 2.3MPa에서는 가스탱크의 중심축에 컬럼을 설치하지 않은 Fig. 1(a)와 같은 기존의 탱크 모델은 컬럼을 설치한 Fig. 1(b)와 같은 해석모델에 비해 von Mises 최대응력이 1.9배나 높게 나타났다. 또한, 가스내압을 3.5MPa로 올렸을 때는 2.1배로 위험성이 더 높아지는 해석결과를 보여주고 있다.

따라서 Fig. 1에서 제시한 두 가지의 해석모델을 기반으로 FEM 강도안전 해석결과를 제시한 Fig. 5의 데이터에 의하면, LPG 가스탱크에 설치하는 레벨게이지를 탱크의 벽면에 구멍을 뚫어서 고정하는 기존의 방식보다 가스탱크의 중심축에 컬럼형의 레벨게이지를 일체형으로 설치하여 가스탱크의 강도 안전성을 높이는 방향으로 설계를 하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 250kg 정도의 저장용량을 갖는 LPG 미니탱크에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하였다.

LPG 미니탱크의 상하단부를 형성하는 경판의 코너 반경을 크게 설계할수록 강도안전성 측면에서 유리하지만, 가공비는 높아지고 탱크의 내용적은

줄어들기 때문에 최적의 설계 데이터를 도출하는 것이 중요하다. FEM 해석결과에 의하면, 250kg의 저장용량을 갖는 LPG 미니탱크의 코너 반경은 175~205mm로 설계하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

또한, 가스탱크의 강도안전을 충분히 담보하기 위해서는 탱크의 두께를 두껍게 설계하는 것이 좋지만, 두꺼운 강판을 사용하면 소재비와 물류비용이 상승하므로 강판의 두께를 4.5~5.5mm에서 선정하는 것이 바람직하다.

LPG 가스탱크의 액위를 측정하는 레벨게이지는 탱크의 측면면에 구멍을 뚫어서 고정하는 기존의 방식보다 가스탱크의 중심축에 컬럼을 설치하는 레벨게이지 타입을 일체형으로 설계하는 것이 강도안전성을 2배 이상 높여주는 효과를 기대할 수 있다.

후 기

이 논문은 2018학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

REFERENCES

- [1] Man-Bae Lim, "Analysis on the Fatigue Fracture Surface of Gas Piping Material using the X-Ray Fractography", J. of the KIIS, Vol. 17, No. 1, pp.18~24, (2002)
- [2] C.K. Kim and S.C. Kim, "Numerical Study on the Strength Safety of High Pressure Gas Cylinder", J. of the KIGAS, Vol 14, No. 12, pp.1~6, (2010)
- [3] C.K. Kim, "Effect of Corner Radius on the Stress Strength Safety of LPG Steel Cylinder", J. of the KIGAS, Vol 18, No. 12, pp.27~31, (2014)
- [4] ksw64@newsis.com, "Jecheon Fire and Disaster Joint Investigation Commission Announces Expected Damage Within 72m", Newsis (Jan. 11, 2018)
- [5] C.K. Kim, "Risk and Safety Plan of LPG Tank Projected in Jecheon Fire Accident", Green Energy and Environment Times, (May 10, 2018)
- [6] LPG Brochure for LPG Cylinder and LPG Tank by Wintech Co, (2017)