



고압가스 압력용기의 강도안전성에 관한 수치해석적 연구

*김청균 · 김승철

홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과
(2010년 2월 4일 접수, 2010년 3월 31일 수정, 2010년 3월 31일 채택)

Numerical Study on the Strength Safety of High Pressure Gas Cylinder

*Chung Kyun Kim · Seung Chul Kim

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

(Received 4. February. 2010, Revised 31. March. 2010, Accepted 31. March. 2010)

요 약

고압가스 압력용기의 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. 본 연구에서 고려한 강제용기의 내압은 서비스 충전압력 9kg/cm^2 , 가스충전 최고압력 18.6kg/cm^2 , 안전변 작동 최고압력 24.5kg/cm^2 , 수압시험압력 34.5kg/cm^2 이다. FEM 해석결과에 의하면, 서비스 충전압력 9kg/cm^2 와 충전최고압력 18.6kg/cm^2 에 대한 강도안전성은 가스용기에 걸리는 응력이 강재의 항복강도 이내에 있기 때문에 안전한 것으로 나타났다. 그러나 수압시험압력 34.5kg/cm^2 을 가하였을 때에 발생하는 응력은 항복강도를 충분히 넘어서기 때문에 불안전하지만, 인장강도 이내에 존재하기 때문에 아직은 안전하다. 수압시험압력을 용기에 자주 공급하면 용기는 소성변형에 의한 피로잔류응력이 특히 하단반구부에 축적되므로 파손될 수 있다. 계산결과에 의하면, 스커트 지역에 작용하는 집중하중은 하단반구부에 영향을 미치지 않지만, 용기에서 가장 취약한 부분은 용기의 몸체와 스커트 사이에 위치한 하단반구부의 중간부분임을 알 수 있다. 따라서 하단반구부의 형상은 고압가스 저장용기 설계에서 중요한 요소라는 것을 보여주는 FEM 해석결과를 제공하고 있다.

Abstract - The strength safety of high pressure gas cylinder has been analyzed by using a finite element method. In this study, the internal gas pressures of a steel bombe include a service charging pressure of 9kg/cm^2 , high limit charging pressure of 18.6kg/cm^2 , high limit of safety valve operation pressure 24.5kg/cm^2 , and hydraulic testing pressure of 34.5kg/cm^2 . The computed FEM results indicate that the strength safety for a service charging pressure of 9kg/cm^2 and high limit charging pressure of 18.6kg/cm^2 is safe because the stress of a gas cylinder is within yield strength of steel. But the stress for a hydraulic testing pressure of 34.5kg/cm^2 sufficiently exceeds the yield strength and remains under the tensile strength. If the hydraulic testing pressures frequently apply to the gas cylinder, the bombe may be fractured because a fatigue residual stress is accumulated on the lower round end plate due to a plastic deformation. The computed results show that the concentrated force in which is applied on a skirt zone does not affect to the lower round end plate, and the most weak zone of a bombe is a middle part of a lower round end plate between a bombe body and a skirt for a gas pressure. Thus, the FEM results show that the profile of a lower round end plate is an important design parameter of a high pressure gas cylinder.

Key words : liquefied petroleum gas, pressure cylinder, bombe, skirt, lower round end plate, FEM

*주저자: cckim_hongik@nate.com

1. 서 론

액화석유가스(LPG)와 같은 가스연료를 안전하게 저장하고 운반하기 위해서는 특별하게 제작한 압력 용기(pressure vessel)를 사용한다. 용기는 저장하는 가스의 압축정도에 따라 강재로 제작하거나, 또는 강재나 알루미늄으로 제작한 원통용기의 외부에 카본/에폭시와 같은 복합소재를 감아서 사용하기도 한다.

LP가스 용기로 가장 많이 사용하는 것은 원통형상의 20kg 강재용기이지만, 도시가스가 많이 보급되면서 LG가스용 용기 생산량이 크게 줄어든 실정이다. 그러나 LPG 자동차가 많이 늘어나면서 차량용 압력용기는 점차 증가하는 추세이다[1].

고압가스 용기는 모든 가스압에 견디면서 가볍게 제작해야 하므로 강도안전성이 우수한 실린더형상으로 설계하는 것이 일반적이다. LP가스 용기를 강재로 제작하면 고압가스에 대한 안전성이 높고, 제작이 용이하며, 단가는 낮아지지만, 용기는 무거워져 운반하기가 어렵고, LPG를 사용하고 남은 잔량을 확인할 수 없다. 반면에 복합소재 용기는 가볍고, LG가스 잔량확인이 쉽다는 장점은 있지만 제작단가가 높고, 재활용이 어렵다는 문제점이 있다. 그러나 복합소재로 제작한 용기는 강도를 크게 높일 수 있고 연비와 직결된 경량화가 가능하므로 판매량이 늘어날 것으로 예상된다.

아무리 안전한 가스용기도 높은 온도나 충격에 의해 내압이 급격하게 상승하면 가스폭발이라는 위험한 상황에 도달할 수 있다. 용기는 안전하게 제작되지만, 사용자의 부주의와 부실한 안전관리에 의해 가스폭발 사고가 발생하는 것이 일반적이다. 실제로 용기폭발에 의한 인명피해의 대부분은 부주의한 취급에서 발생하지만, 고의적인 용기훼손에 의한 폭발사고가 발생하기도 한다[2,3].

LPG 용기가 폭발한다는 것은 안전하게 충전된 LPG가 외부와의 온도차, 압력차 등에 의해 액상의 LPG가 기상으로 상변환을 일으키면서 급격하게 팽창한 가스의 체적증가로 인해 용기의 강성도가 더 이상 견디지 못하고 터지는 현상이다.

따라서 본 연구에서는 LP가스 용기에 작용하는 가스압력, 즉 서비스 충전압력, 최고충전압력, 안전변 작동 최고압력, 수압시험압력 등을 고려하여 LPG 용기에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하고자 한다.

II. 해석조건 및 해석모델

2.1. LPG 용기와 물성치

LP가스 용기의 저장용량은 보통 10kg이하, 13kg,

20kg, 50kg 등 다양하다. LPG 용기의 대부분은 강판(steel plate)을 프레스로 성형한 다음 용접으로 제작한다. 강판의 성형가공과 용접과정에서 발생한 잔류응력을 제거하기 위해 열처리를 실시하여 용기의 안전성을 확보한다.

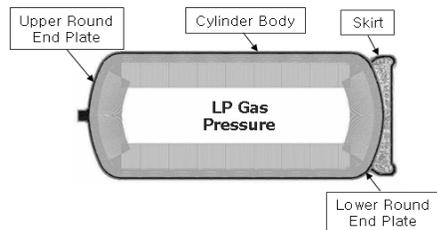
LP가스 용기는 몸통부(body bombe), 상단반구부(upper round end plate), 하단반구부(lower round end plate), 네크링(neck ring), 스커트(skirt) 등으로 구성되며, 이들 부품을 용접하여 일체형의 원통형 용기로 제작한다. LPG 용기로 많이 사용하는 20kg의 강재용기는 2008년도 기준 1,060만개가 유통되고, 최근 5년간 7만개/yr 이하가 제작되었다[4].

용기의 취약부는 몸체와 반구용기부, 그리고 스커트 연결부로 알려져 있다. 이들 세 가지 구성부품을 연결하는 용접지역은 용기를 운반하는 과정에 떨어뜨리거나 넘어져 스커트 부분이 지면과 충돌하면서 반구형상부나 스커트에서 발생하는 응력은 다른 지역보다 높게 나타날 수 있다.

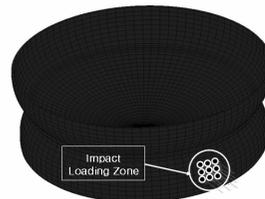
따라서 본 연구에서는 용기의 반구형상부와 스커트가 연결되는 용접지역을 중심으로 FEM 해석모

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

Density (g/cc)	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	Young's Modulus (kg/cm ²)	Poisson's ratio
7.82	415~495	230	2.1×10 ⁶	0.33



(a) Boundary condition of LPG cylinder



(b) FE mesh at lower parts of LP gas cylinder

Fig. 1. Boundary condition and finite element mesh of LPG gas cylinder.

델을 설정하였다. 이때 용기에는 LP가스가 채워져 있고, 스커트에는 집중하중을 가한상태에서 용기의 강도안전성을 FEM으로 해석한 것이다. 용기에 공급한 LP가스 압력과 스커트 지역에 적용한 집중하중을 Fig. 1과 같다.

FEM 강도해석에 사용한 20kg 용기의 소재는 ASTM A283 steel, Grade D를 사용하였고, 이 소재에 대한 물성치는 Table 1에서 주어진다.

2.2. LPG 용기의 검사기준

LPG 용기는 LPG를 9kg/cm² 이하로 충전하므로 안전하지만, 용기에 가해지는 온도차, 충격압력 등에 의한 가스폭발이나 화재 위험성은 항상 존재한다. 따라서 용기는 고압가스의 안전한 사용을 위해 일반적인 법에 의해 규제되고 있다.

LPG 용기는 고압으로 충전하여 사용하기 때문에 강도안전성(strength safety)은 용기에 대한 안전한 설계와 제작에 의해 결정된다. 즉, 소재결함, 용접결함, 제조불량, 부주의한 사용이나 운반과정에 발생할 수 있는 손상과 많이 연계되어 있다[4].

용기의 안전성은 용기에 작용하는 다양한 외부하중과 용기에 충전하는 가스압력, 용기를 바닥면에 떨어뜨려 스커트 지역에 가해지는 충격하중 등에 의해 결정된다. 본 연구에서 이들 하중조건을 모두 고려하기는 어렵다. 따라서 용기가 넘어지거나 떨어지기 때문에 스커트에 작용하는 64.58g의 충격력에 의해 용기에 걸리는 응력을 유한요소법으로 해석하고자 한다.

LPG 용기의 제작에서 가장 중요한 용접규격, 재료의 선정, 재충전용 용접 강재용기에 대한 정기검사, 시험평가 등에 관련된 규격은 KS B 6211[5], KS D 3533[6] 등에 명시되어 있다. 이들 규격에 의거 LPG 용기의 강도안전성을 평가하기 위한 FEM 해석을 수행하였다.

2.3. FEM 강도해석 모델

LP가스 용기의 강도 안전성을 고찰하기 위해 범용의 FEM 프로그램 MARC[7]를 사용하였다. 본 연구에서는 용기의 하단부 스커트와 용접으로 연결되는 하단반구부를 FEM 해석모델로 설정하고, 용기에 공급되는 LP가스 충전압력과 스커트에 작용하는 국부적인 하중을 Fig. 1(b)과 같이 적용하였다. 용기는 가스충전을 위해 사용처와 충전소 사이를 자주 이동하기 때문에 낙하나 전도 등에 의해 스커트에 충격하중이 가해진다고 가정한다.

FEM 강도해석에서 고려한 용기는 내경에 비해 두께가 얇은 박판의 용기이지만, 하단반구부와 스커

트를 연결되는 용접부에서는 응력이 집중되는 점을 고려하여 셸요소(shell element) 대신에 QUAD4 요소를 사용하였고, 국부적으로 집중하중이 작용할 때는 3D요소인 HEX8을 사용하여 해석하였다.

III. 강도안전성 해석결과

3.1. 가스압력에 대한 안전성 해석

외부하중이 용기에는 작용하지 않지만, 서비스 충전압력부터 수압시험압력에 이르는 안전에 관련된 가스압력이 작용할 경우에 대한 용기의 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. 해석에서 고려한 내압은 서비스 충전압력인 9kg/cm², 가스를 최대로 충전할 때의 최고충전압력 18.6kg/cm², 가스압 상승에 의해 안전변이 작동하는 최고압력 24.5kg/cm², 안전성을 체크하기 위해 수행하는 수압시험압력 34.5kg/cm²이다.

Fig. 2는 용기의 폭발 가능성을 염두에 두고 평가하는 수압시험에 대한 강도안전성 해석결과를 제시한 것이다. 수압시험압력 34.5kg/cm²의 내압을 용기에 30초간 유지한 상태에서 Fig. 1(a)와 같은 강제용기에 걸리는 von Mises 최대응력은 377MPa로 상단반구부에서 발생하였고, 하단반구부에서는 상대적으로 낮은 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2의 FEM 강도해석 결과에 의하면, LP가스 용기에서 반구형상은 강도안전성에 영향을 미치는 핵심요소로 작용하지만, 스커트 부근에 작용하는 하중은 상대적으로 낮으며, 스커트와 떨어져 반구지역을 벗어나면 강도안전성에 별다른 영향을 미치지 않는다는 사실이다. 따라서 용기의 상단부나 하단부의 반구형상을 어떻게 설계하느냐가 응력을 분산시키는 중요한 설계요소임을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 용기에 작용하는 주요한 가스압력 안전기준에 대한 FEM 강도안전성 해석결과를 용기의 각 노드(node)에 대해 제시하고 있다. 용기에 LP가

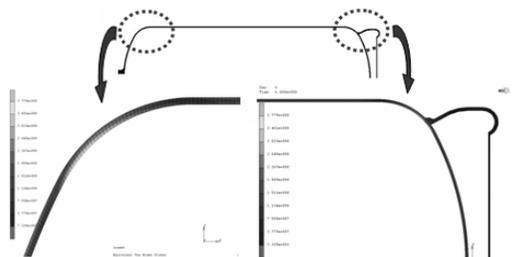


Fig. 2. von Mises stress distribution for hydraulic test pressure near round end plates and a skirt zone.

스를 9kg/cm^2 정도로 충전하면 용기에 걸리는 von Mises 최대응력은 95.8MPa 로 상단반구형상부에서 나타나며, 강재의 항복응력(yield strength) 230MPa 의 41.6%에 해당하는 탄성변형 구역으로 대단히 안전하다. 또한, 용기에 LP가스를 18.6kg/cm^2 의 최고충전압력으로 상충하면 용기에 걸리는 von Mises 최대응력은 204.1MPa 로 상단반구부에서 나타나지만, 강재의 항복응력(yield strength) 230MPa 이하의 탄성구역에 존재하므로 아직은 안전하다. 반면에 용기에 형성된 고압으로 인해 안전변이 작동하는 최고압력 안전기준인 24.5kg/cm^2 에 도달하면, 강재의 상단반구부에는 von Mises 최대응력 268.3MPa 이 걸리는 것으로 나타났다. 이 응력값은 강재용기의 항복응력을 이미 넘은 응력상태로 용기의 상단반구부는 소성변형 구역에 진입하였으므로 안전성을 위협하는 응력조건이지만 아직도 인장강도 이내에 있기 때문에 강도안전에는 문제가 없다. 그렇지만, 용기에 작용하는 가스압력이 안전변을 작동시킬 정도의 24.5kg/cm^2 에 자주 도달하면 용기의 강도안전성을 보장하기가 어려워진다.

LP가스 용기의 안전성을 보장하는 가장 높은 설계 기준은 수압시험압력인 34.5kg/cm^2 이다. 용기에 작용하는 최악의 안전성을 평가하기 위해 34.5kg/cm^2 의 내압을 30초간 유지할 때 강재용기에 작용하는 von Mises 최대응력은 377MPa 로 계산되었다. 이 값은 Table 1에서 제시한 인장강도의 평균값 455MPa 을 고려하면 83% 정도로 아직은 안전하다. 즉, 인장강도의 최소기준인 415MPa 을 고려하면 91%에 해당하는 것으로 위험한 수준이지만, 최고기준 495MPa 을 고려하면 76% 수준으로 아직은 안전하다.

Fig. 3의 FEM 강도해석 결과에 의하면, Fig. 1에서

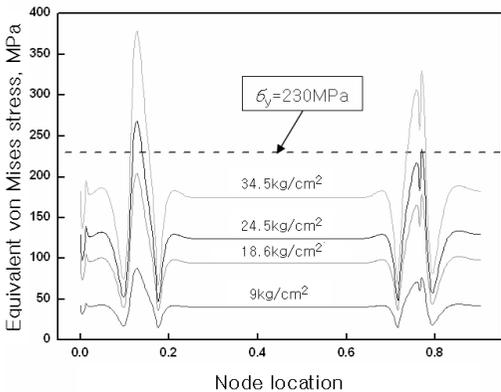


Fig. 3. Equivalent von Mises stress for various gas pressures along the bombe length.

제시한 반구형상을 갖는 용기에서는 완전한 곡률형상을 보여준 상단반구형상에서 더 높은 응력이 걸리고, 낮은 곡률반경을 갖는 하단반구형상에서는 상대적으로 안전한 강도를 보여주고 있다.

3.2. 집중하중에 대한 안전성 평가

용기가 낙하 또는 전도하기 때문에 발생하는 충격하중을 모사하기 위해 Fig. 1(b)에서 보여준 것처럼, 스커트 부분에 집중하중이 작용한다고 가정하고 강도안전성을 유한요소법으로 해석하였다. 용기의 하단반구부와 스커트에 가해지는 집중하중은 Fig. 4에서 표시한 4개 지역이고, 여기에 용기에 가해지는 내압은 서비스 충전압력, 가스충전 최고압력, 안전변 작동 최고압력, 수압시험 기준압력이다.

Figs. 5~7의 강도해석 결과에 의하면, Fig. 4와 같은 해석모델에 대해 가스압력이 작용할 때는 특히 반구형상의 곡면부분에 응력이 집중된다. 용기의 원통몸체와 반구형상을 연결하는 용접부, 하단반구부와 스커트를 연결하는 용접부는 용접상태에 따라 강도안전성이 달라지기 때문에 본 해석에서는 이들 용접부의 접합상태가 완벽하여 동일한 소재로 제작된다고 가정하고 FEM 강도해석을 수행하였다.

Fig. 5는 용기의 하단부 반구형상과 스커트 부근에 발생하는 von Mises 등가응력 분포도를 보여준 것이다. Fig. 5(a)는 가스를 충전하지 않은 상태에서 용기가 낙하할 때 발생한 634N 의 집중하중이 하단반구부의 일부에 가해졌다고 가정할 경우에 대한 강도안전성 해석결과이다. 반구형상부에서 상대적으로 높은 6.8MPa 의 von Mises 최대등가응력이 발생하였지만 다른 곳에서는 집중하중의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 강도측면에서 충분히 안전하다는 것을 보여주고 있다. 반면에 수압시험에 의한 강도안전성 평가를 위해 최고압력 34.5kg/cm^2 을 내압으로 공급하면, 반구형상 부근에서 290MPa 이

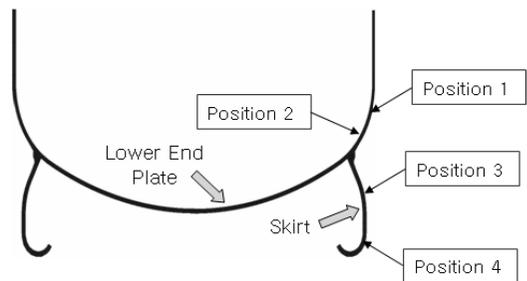
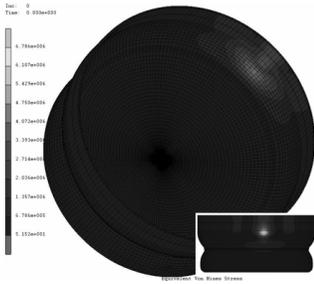
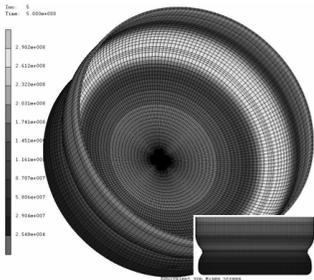


Fig. 4. Positions of concentrated forces at the lower round end plate and a skirt zone.



(a) For the deadweight of gas cylinder, 634N



(b) For the hydraulic test pressure, 34.5kg/cm²

Fig. 5. von Mises distribution at the lower round end plate and the skirt zone for the given concentrated force and gas pressures of LP gas bombe.

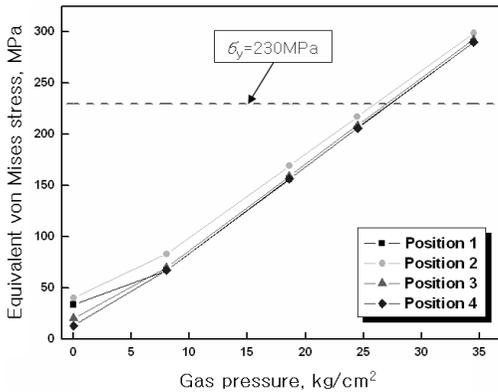
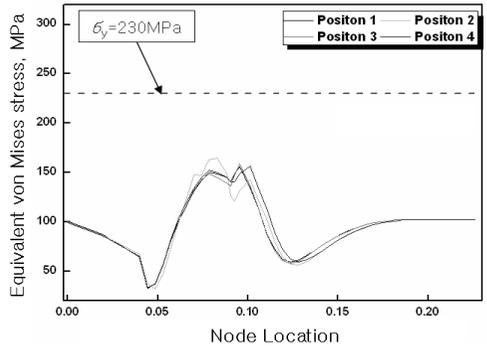
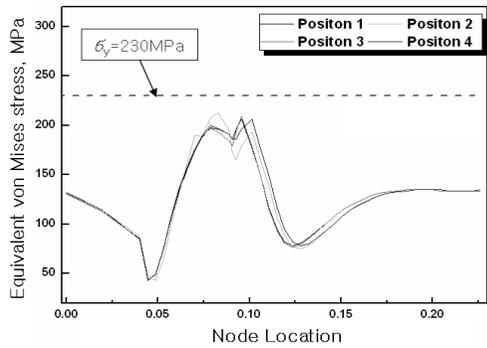


Fig. 6. Equivalent von Mises stress at the position of a lower round end plate and a skirt zone for gas pressures.

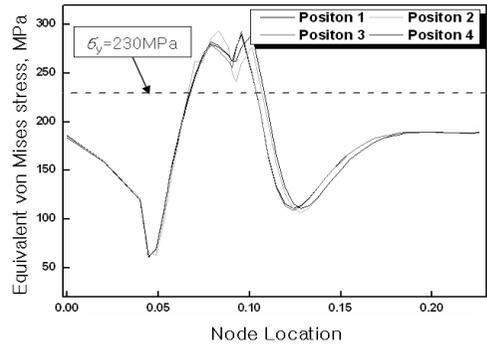
상의 높은 von Mises 최대응가응력이 작용한다. 이 응력값은 소재의 항복강도인 230MPa를 26%나 넘어서는 응력으로 강재는 이미 소성영역으로 진입하여



(a) High limit of service charging pressure, 18.6kg/cm²



(b) High limit of safety valve operation pressure, 24.5kg/cm²



(c) Hydraulic testing pressure, 34.5kg/cm²

Fig. 7. Equivalent von Mises stress at four positions between a lower round end plate and a skirt zone for gas pressures.

잔류응력 증가에 의한 피로강도가 떨어진 위험한 상태에 접어들었다 할 수 있다.

Fig. 6은 용기에 공급된 가스압력이 증가하면 von

Mises 등가응력은 선형적으로 상승하지만, 내압증가로 인해 안전변이 작동하는 최고가스압력 24.5kg/cm^2 을 넘어가도 강재의 항복강도 이내로 안전하다는 것을 보여준다. 반면에 수압시험에 의한 안전성을 평가하기 위해 가스압력 34.5kg/cm^2 을 공급할 경우는 290MPa 이상의 높은 응력이 발생하였기 때문에 강재는 이미 항복강도를 넘어 소성구역에 진입한 것이다. 그러나 아직은 인장강도를 넘어서지 않았으므로 강도안전성은 유지되고 있지만, 가스압력이 불안정하게 상승하여 항복강도를 넘어서는 현상이 자주 발생하면 용기는 대단히 위험해질 수 있다. 따라서 용기에 부착된 안전변이 먼저 작동하여 용기의 안전성을 확보할 수 있어야 한다. 또한, 동일한 내압에 대해 높은 응력이 걸리는 부분은 하단반구형상이 시작되는 부분과 스커트를 연결한 위치의 중간부분으로 나타났다. 이것은 하단부의 반구형상과 스커트를 연결하는 위치를 어떻게 설계하느냐에 따라 LP가스 용기의 강도안전성에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 LP가스 용기에 작용하는 가스압력이 18.6kg/cm^2 , 24.5kg/cm^2 , 34.5kg/cm^2 인 경우에 각각의 노드에서 관찰한 von Mises 최대등가응력을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 용기에 충전한 최고압력이 18.6kg/cm^2 작용할 경우 용기 하단부의 반구형상과 스커트에 걸리는 von Mises 최대등가응력을 나타낸 것으로, 하단반구부의 중간부에서 상대적으로 높은 응력이 발생하였지만 아직은 강재의 항복강도 이하이기 때문에 매우 안전하다. Fig. 7(b)는 안전변이 작동하는 최고방출압력 25.4kg/cm^2 이 작용할 경우 용기의 하단반구부에 걸리는 von Mises 최대등가응력은 최고의 충전압을 걸었을 때와 유사한 응력거동을 나타내지만, 항복강도에 근접하는 위험한 응력상태를 유지하고 있다. 반면에 수압시험에 의한 강도안전성 평가를 위해 가스압력을 34.5kg/cm^2 까지 올리게 되면, Fig. 4에서 표시한 반구부의 위치 1에서는 290.2MPa , 위치 2에서는 298.8MPa , 그리고 스커트의 위치 3에서는 292MPa , 위치 4에서는 290.4MPa 의 von Mises 등가응력이 발생하는 것으로 나타났다. 반구부의 곡률반경 중간부인 위치 2에서 가장 높은 응력이 걸린다는 것은 스커트에 국부적으로 작은 집중하중이 작용한다 해도 이곳의 곡률반경에 의한 영향이 더 크다는 것을 의미한다. 하단반구부나 스커트의 모든 위치에서 예측한 von Mises 등가응력은 강재의 항복강도 $\sigma_y=230\text{MPa}$ 을 충분히 넘어서기 때문에 위험한 것으로 판단되지만, 용기가 파괴될 정도의 높은 응력이 발생한 것이 아니므로 아직은 안전하다.

IV. 결 론

강재로 제작한 LP가스 용기의 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. 해석결과에 의하면, 서비스 충전압력 9kg/cm^2 와 충전최고압력 18.6kg/cm^2 인 경우는 용기소재의 항복강도 이내에 있기 때문에 안전하다. 또한, 수압시험압력 34.5kg/cm^2 을 가압하였을 때는 항복강도를 넘어서지만, 인장강도 이내에 존재하기 때문에 아직은 안전하다 할 수 있다. 그러나 용기의 반구부 지역에서 반복적인 소성변형이 작용하면 강재의 피로강도가 대단히 취약해져 안전성을 위협할 수 있다.

또한, 용기의 스커트에 작용하는 국부적인 하중은 용기의 강도안전성에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났고, 용기에서 가장 취약한 부분은 하단반구형상의 중간부분임을 알 수 있다. 용기의 원통부와 반구부를 용접으로 연결하는 반구부의 곡률반경이 중요하다는 사실은 본 연구에서 제시한 상단 반구부와 하단반구부의 곡률반경 차이에 따라 용기에 걸리는 응력의 크기가 달라진다는 사실로부터 유추할 수 있다.

후 기

이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- [1] 강주완, "LPG 산업의 성장동력 - AutoGas," Proceedings of 1st Joint Technical Symposium of Industry and Academy of KIGAS, (2006)
- [2] 김철현, "고의사고 예방과 수습에 지혜 모아야," 가스신문사, (2008.1.14)
- [3] "고의 가스사고 매면 평균 50여건 발생," 연합뉴스, (2006.4.14)
- [4] 김청균, "LPG 용기 재검사 주기의 합리적인 조정 방안," LPG용기 재검주기 연장 정책자문위원회 (지경부/한국가스안전공사), (2010. 1. 29)
- [5] KS B 6211, Refillable Welded Steel Gas Cylinders for Liquefied Petroleum Gas.
- [6] KS D 3533, Steel Sheets, Plates and Strip for Gas Cylinders.
- [7] MSC/MARC, Element Library, MSC, Inc., (2005)