



LPG 용기의 강도 안전성에 관한 유한요소해석

†김청균 · 정남인

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2007년 5월 18일 접수, 2007년 6월 18일 채택)

FEM Analysis on the Strength Safety of a LPG Cylinder

†Chung Kyun Kim · Nam In Jeong

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University,
72-1 Sangsu-dong Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea
(Received 18 May 2007, Accepted 18 June 2007)

요 약

본 논문은 평판강재를 소성적으로 가공하고, 이것을 용접으로 연결하여 제작한 LPG 용기에 대한 강도 안전성을 고찰하고자 한다. 용기의 강도 안전성은 유한요소해석법을 사용하여 LPG 용기 구조물에서 발생하는 응력분포를 해석함으로써 안전성에 대한 결과를 얻을 수 있다. FEM 해석결과에 의하면, 내압시험을 위한 가스압력 31 kg/cm²은 LPG 용기의 상부경판의 프레스 가공 부근에서 국부적인 집중응력이 발생하고, 여기서 발생한 최대응력은 용기 소재의 항복강도를 넘어서는 것으로 나타났다. 따라서 현재의 내압시험 검사방법은 압력용기의 피로손상을 증가시키고 수명을 단축하는 원인으로 작용할 수 있다는 결과를 보여주기 때문에 재검토되어야 하고, 빠른 시일에 개정되어야 할 것이다. 반면에 충전압력 9 kg/cm²와 기밀시험 압력 18.6 kg/cm²에 의한 용기의 충전과 검사기준에 대한 해석은 LPG 강재용기의 안전성이 비교적 높다는 결과를 제시하고 있다.

Abstract – This paper presents the strength safety of a LPG cylinder, which is fabricated by a steel sheet forming and a welding technology. The strength safety of a cylinder is guaranteed by analyzing a stress distribution of a LPG cylinder structure using a finite element method. The FEM computed results indicate that the hydraulic test gas pressure of 31 kg/cm² generates a concentrated local stress near the upper round end plate, which exceeds the yield strength of a LPG cylinder. Thus, the current hydraulic test pressure may be rechecked and revised because this pressure increases the fatigue failure and decreases the life of the pressure vessel. The normal operation and sealing gas pressures such as 9 kg/cm² and 18.6 kg/cm² are relatively safe for a steel LPG cylinder.

Key words : LPG cylinder, Strength safety, LPG, FEM, Yield strength, Hydraulic test pressure

I. 서 론

LPG 가스용기(gas cylinder)는 두께가 얇고 긴 원통형의 실린더 형상을 하고 있다. LPG 용기는 강재(steel plate)를 용접하여 제작한 것을 가장 많이 사용하고 있으나, 최근에는 폴리머 소재로 제조한 LPG 복합소재 압력용기에 대한 관심이 높아지고 있다.

강재로 제작된 LPG 용기는 한국가스안전공사의 LPG 용기에 대한 검사기준에서 요구하는 조건을 모두 만족해야 사용할 수 있기 때문에 안전하다 할 수 있

다. 하지만 강재 용기는 그 자체가 무겁기 때문에 운반하기가 어렵고, LPG를 사용하고 남은 잔량을 확인하기가 어렵기 때문에 LPG 판매자와 소비자 사이의 다툼은 발생하지만 가격이 저렴하다는 큰 장점을 갖고 있다. 그러나 가벼운 복합소재를 사용하여 제조한 LPG 용기는 안전하고, 용기가 투명하기 때문에 잔량에 대한 논란은 없지만 용기 가격이 비싸고 폐용기의 재활용도가 떨어지는 문제점이 있다.

청정한 LP 가스는 상온에서 완전연소가 가능하기 때문에 열효율이 높고 오염물질 발생량이 낮으며, 사용이 편리하고 이동성이 우수하기 때문에 취사 및 난방용으로 많이 사용되고 있다. 그러나 우리나라는 1990년대

†주저자:chungkyunkim@empal.com

이후로 도시가스 보급률이 높아지면서 LPG 산업의 성장에 한계를 느끼고 있다. 1980년대 이전까지만 해도 급성장하던 LPG 연료는 1986년에 LNG 도시가스가 서울을 중심으로 보급되면서 소비율은 크게 둔화되었다. 그러나 최근 LPG 연료사용 차량의 보급이 늘어나면서 부탄가스 계열의 LPG 사용량은 꾸준히 증가하고 있다. LPG 연료를 안전하게 저장하고 운반하기 위한 용기는 안전성, 제작성, 특히 저렴한 가격 때문에 강재용기를 사용하고 있다.

LPG 연료용기에 의한 사고는 크게 두 가지로 나누어 설명할 수 있다. LPG 용기에 충전된 연료는 항상 안전하지만, LPG 용기를 관리하는 사용자의 부주의나 고의적 훼손에 의한 사고는 가스폭발로 이어져 대형사고가 될 수 있다. 그렇기 때문에 LPG 연료사용은 항상 위험성을 수반한다. LPG 용기에 안전하게 충전된 LPG는 외부와의 온도 및 압력차에 의해 액상의 LPG가 기상으로 상변환을 하면서 급격하게 체적팽창을 하기 때문에 LPG 용기가 폭발하는 최악의 상황을 맞이할 수 있다. 따라서 LPG 용기는 최고의 강도 안전성을 확보해야 폭발이나 화재를 유발하지 않고 안전하게 사용할 수 있다.

본 연구에서는 LPG 용기에 작용하는 가스압력, 즉 충전압력, 기밀시험압력, 안전변 작동압력, 내압시험 등과 같은 특징적인 압력이 작용할 경우 강재로 제작한 LPG 용기에 대한 강도 안전성을 고찰하고, 문제점이 발생하였을 때 안전성 검사기준을 개정할 수 있는 기초 데이터를 제공하고자 한다.

량은 10 kg 이하, 13 kg, 20 kg, 50 kg 등 다양하게 개발되었다. LPG 용기는 보통 강재를 용접한 실린더 형상의 원통용기를 사용하지만, 최근에 유리섬유와 비닐에스터를 이용해 제조한 FRP 복합소재 용기를 개발하여 극히 일부에서 사용하고 있다. Fig. 1은 최근 5년간 한국가스안전공사에서 공식적으로 집계한 LPG 용기의 생산실적이다. 13 kg 이하의 용기는 20 kg 이상의 중대형 용기에 비해 생산량이 급격하게 줄었지만, LPG 연료 사용량의 전반적인 하락세에서 소형은 중대형보다 용기의 생산량을 나름대로 유지하고 있다.

LPG 용기는 몸체에 해당하는 동판(body plate), 상부경판(upper end plate), 하부경판(lower end plate), 밸브 보호대(Valve protector), 네크링(neck ring), 스커트(skirt), 밸브(valve) 등으로 구성되고, 이들 부품은 용접에 의해 하나의 일체형 압력용기로 제작된다. 대표적인 LPG 용기로 많이 사용되고 있는 20 kg 용량의 강재용기는 안전하고 다루기가 용이하므로 널리 보급되었다. 용기의 취약부는 동판과 하부경판, 그리고 스커트 부위가 서로 만나는 연결부인 것으로 알려져 있다. 즉, 이들 세 가지 구성부품을 연결하는 용접지역은 자중을 받고, 용기를 운반하는 과정에 스커트 지역이 지면과 충돌하면서 발생하는 충격하중도 항상 받는 지역으로 구조적으로 가장 취약하다. 그러나 LPG 용기를 정상적으로 사용할 경우는 용기의 내부에 작용하는 가스압력에 의해 안전성이 결정된다.

본 연구에서는 LPG 용기의 강도 안전성을 FEM으로 해석하였다. 결국 원통형의 동판용기, 상부와 하부의

II. 해석조건 및 해석모델

2.1. LPG 용기와 물성치

LPG 연료를 안전하게 저장하기 위한 고압용기의 용

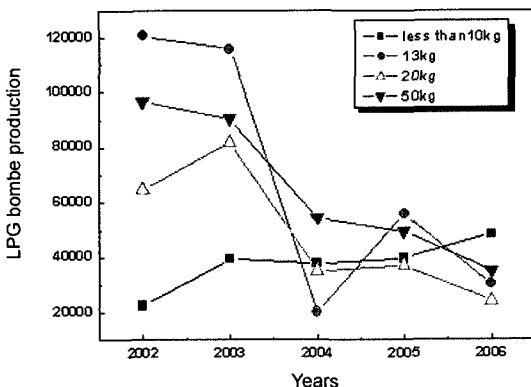


Fig. 1. LPG cylinder production volume for five years.

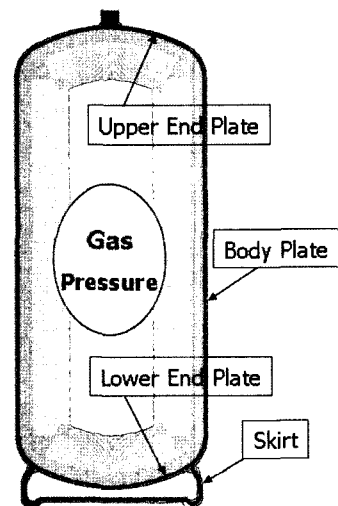


Fig. 2. Finite element mesh and boundary conditions of LPG gas cylinder.

Table 1. Material properties of A 283 steel, grade D.

Density g/cc	σ_u MPa	σ_y MPa	Elastic modulus kg/cm ²	Poisson's ratio
7.82	415~495	230	2.1×10^6	0.33

경관용기, 용기를 받치고 있는 스커트 구조물을 연결한 압력용기에 대해 FEM 해석을 하였고, 이 때 용기에 공급한 LP가스 압력은 Fig. 2에서 제시한 것처럼 충전압력, 기밀시험압력, 안전변 작동압력, 내압시험 압력 등을 고려하였다. 20 kg 용기의 소재는 SS400 계열의 ASTM A283 steel, Grade D를 사용하였고, 이 소재에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

2.2. LPG 용기의 검사기준

LPG 용기에는 LPG 연료를 1.0~1.3 MPa로 충전하고, LP 가스는 항상 대기압보다 높은 압력에서 외부로 방출한다. LPG 용기에 가해지는 온도나 충격압력에 의한 가스폭발 가능성은 항상 존재하고, 또한 화재에 쉽게 노출되어 있다. 따라서 모든 나라들은 고압가스 압력용기에 대한 관리근거를 법으로 정하여 관리하고 있다. 우리나라에서는 고압가스안전관리법에 의거 한국가스안전공사가 가스용기 안전관리를 담당하도록 명시하고, LPG 용기는 생산부터 사용인 용기의 재검사에 이르기까지 엄격하게 관리하고 있다.

LPG 용기는 고압에서 충전하고 사용하기 때문에 강도 안전성(strength safety)과 누설 안전성(leakage safety)의 두 가지 모두를 중요하게 다루고 있다. 여기서 강도 안전성은 LPG 용기 자체의 내구성을 검사하는 것으로 소재의 결함, 용접에 따른 결함, 제조과정에서 발생될 수 있는 잔류응력, 사용이나 운반과정에 발생될 수 있는 결함 등과 연계하여 검토한다. 반면에 누설 안전성은 기공에 의한 소재 자체의 결함, 용접부의 불완전한 용접, 특히 밸브의 연결나사부와 패킹(밸브패킹, O-링, 안전변 고무패킹)에 의한 LP가스 누출 등이 여기에 해당된다. 본 연구에서 관심을 갖고 있는 부분은 용기에 다양한 형태의 외부하중과 가스내압이 용기 구조물에 작용하면서 용기의 안전성에 대한 엄격한 평가와 용기의 최적설계의 기준을 제시하는 것이다. LPG 용기는 제작 시 용접에 관련된 규격, 재료의 선정, 재충전용 용접 강재, LPG 용기의 정기검사, 성능시험 등에 관련된 규격을 KS B 6211[1], KS D 3533[2], KS B ISO 10464[3], KS B ISO 4706[4] 등에서 명시하고 있다. 이들 규격에 의거하여 LPG 용기의 강도 안전성을 검토하고, LPG 용기에 대한 FEM 해석결과를 기초로 강도 안전성에 대해 고찰하고자 한다.

2.3. 유한요소 해석모델

LPG 용기의 강도 안전성을 고찰하기 위해 유한요소 해석 프로그램 MARC[5]를 사용하였다. 본 연구에서는 LPG 용기의 강도 취약부를 찾아내기 위해 용기에는 LP가스 압력을 Fig. 2와 같이 공급하였다. LPG 용기는 원통형의 실린더이므로 용기의 강도 안전성을 고찰하기 위한 유한요소 해석모델은 축대칭성을 고려해 용기의 1/4만을 해석대상으로 선정하였다.

LPG 용기 구조물에 대한 유한요소해석에서 용기의 두께는 내경에 비해 대단히 얇은 박판용기이고 축대칭 모델이기 때문에 2D 요소인 QUAD4[5]를 사용하였다. 용기에 내압만이 작용할 때 FEM 해석모델의 절점(node)은 2330개, 요소(element)는 1562개를 각각 사용하였다.

III. 해석결과 및 고찰

LPG 용기에 어떠한 외부하중도 가해지지 않은 상태에서 LP 가스 압력이 9, 18.6, 24.5, 31 kg/cm² 작용한다고 가정한다. 이 경우에 용기 구조물에서 응력이 가장 높게 발생하는 부분, 즉 취약부에 대한 강도 안전성을 고찰하기 위해 유한요소법을 사용하였다. 용기의 내압으로 작용하는 9 kg/cm²은 LPG 충전소에서 용기에 공급한 충전압력, 18.6 kg/cm²은 용기의 기밀시험을 검사하는 기준압력, 24.5 kg/cm²은 안전변의 고무패킹이 작동할 때의 상한치 압력, 31 kg/cm²은 용기의 안전성을 검증하기 위한 내압시험 기준압력을 각각 의미한다.

LPG 용기의 강도 안전성을 검토하기 위해 4가지의 가스압력을 용기에 공급하였을 때 용기 구조물에 걸리는 von Mises 등가응력 위치와 응력을 Fig. 3에서 보여 주고 있다. Fig. 3(a)의 LPG 용기 형상에서 밸브가 장착되는 네크링 ①을 시작으로 용기몸체의 중간부근 ②를 지나, 하단경판의 중앙지점 ③까지를 연결하는 응력 작용선을 따라 von Mises 등가응력을 계산하였다. 용기에 걸리는 등가응력을 용기의 걸 표면선(①→②→③)을 따라서 측정한 FEM 해석결과에 의하면 응력이 가장 높게 걸리는 부분, 즉 취약부는 용기의 상부경판용기 ④와 하부경판용기 ⑤ 지역으로 각각 나타났다. 용기에서 이들 취약부는 프레스 가공에 의해 평판소재를 둥근 형상으로 밴딩가공을 하고 용접으로 연결한 다음 열처리에 의해 잔류응력을 제거하지만 취약부는 상대적으로 응력이 걸릴 가능성이 높다. Fig. 3(b)에서 제시한 해석결과처럼 내압시험을 위해 공급한 압력 31 kg/cm²이 용기에 작용할 경우는 상부경판의 ④ 지역에서 가장 높은 von Mises 등가응력 339.5 MPa이 발생하였

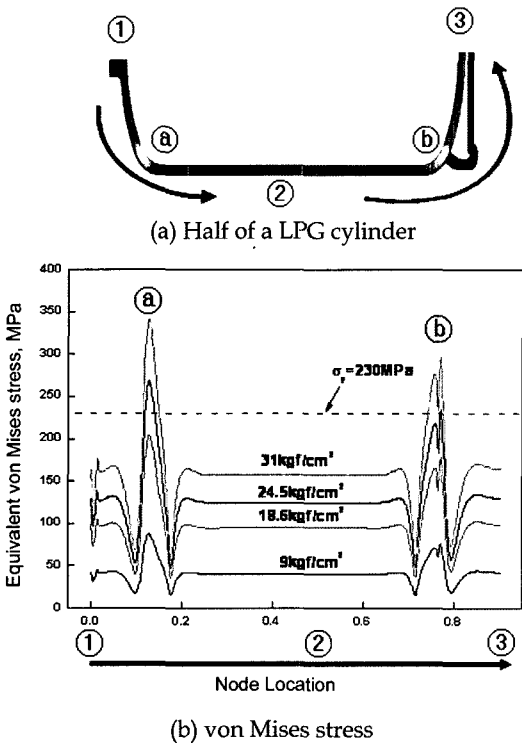


Fig. 3. Distribution of equivalent von Mises stress along a surface line of a LPG cylinder for various gas pressures.

고, 하부경판의 ① 지역에서는 약간 낮은 296.4 MPa이 각각 발생하였다. 이들 최대응력은 용기의 소재로 사용한 ASTM A 283steel, Grade D의 항복강도 230 MPa을 넘어서는 수치로 소재의 소성변형에 의한 위험성이 상존한다. 그러나 강재의 극한강도 415~495 MPa보다는 아직 낮기 때문에 용기의 절대적 강도 안전성에는 문제가 없을 듯하다.

또한 비정상적인 가스압력 상승으로 발생되는 용기의 안전성 확보를 위해 설치한 안전변의 상한치 작동압력 24.5 kg/cm²을 공급한 경우 용기의 안전성 해석결과에 의하면, 상단경판용기 ② 지역에서 발생한 von Mises 등가응력은 268.3 MPa로 용기의 항복강도를 약간 넘는 수치를 나타내지만, 하부경판 ① 지역에서는 항복강도와 같은 234.2 MPa 정도로 용기의 소성변형에 의한 강도 안전성은 전반적으로 불안정하다.

용기의 기밀검사 기준압력인 18.6 kg/cm²이나 충전압력 9 kg/cm² 등에서도 상부경판용기나 하부경판용기의 ②, ① 지역에서 발생한 용기의 집중응력도 여타 지역보다 높게 나타났지만, 발생된 응력의 절대치는 항복강도에 비해 크게 낮기 때문에 정상적으로 사용하는

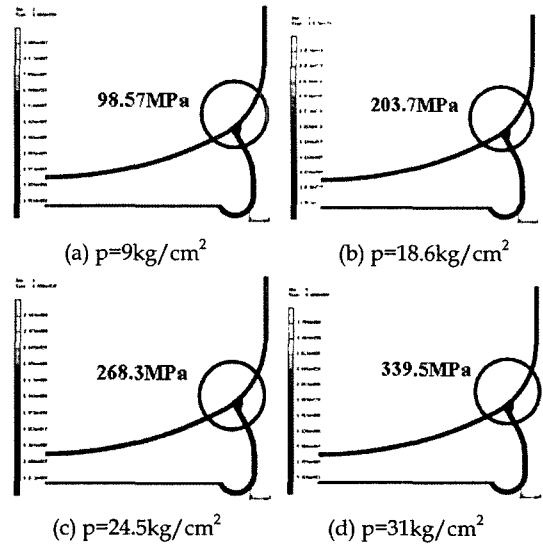


Fig. 4. Maximum von Mises stress at the welding zone between a lower end plate and a skirt plate for a gas pressure.

용기의 안전성은 충분히 확보되었다할 수 있다. 다만 가스용기에 작용하는 압력으로 인해 용기에 걸리는 집중응력이 항복강도 이상으로 반복적으로 발생하면 특히 피로에 의한 내구수명이 많이 떨어지는 문제점이 있다.

Fig. 4는 용기에 9, 18.6, 24.5, 31 kg/cm²의 가스압력이 작용할 경우 용기의 하단부에 걸리는 Von Mises 최대응력을 보여주고 있다. 용기의 하단부에서 최대응력이 발생하는 지역은 몸체의 원통용기, 하부경판용기, 스킵트 소재가 서로 만나 용접으로 접합된 부근이다. 용기의 가스압력이 증가함에 따라 이 지역에서는 응력이 급격하게 높아지는 경향을 나타내고 있다. 이들 부품이 서로 만나는 지역에서 가장 높은 응력이 걸리므로 특히 용기를 운반하는 과정에서 스킵트와 용접된 약간 위쪽에 충격을 가하거나 용기가 넘어지면 위험해질 수 있다. 따라서 이 부위가 충격을 받는 일이 없도록 관리해야 한다. 용기의 충전압력 9 kg/cm²이 작용할 경우는 98.57 MPa의 응력이 걸리고, 이것은 정상적으로 사용하는 충전압력 정도에서는 항복응력 230 MPa의 약 42.8%로 충분히 안전하다. 또한 용기의 기밀성 검사기준인 18.6 kg/cm²의 가스압력이 작용할 때는 용기에 걸리는 응력이 203.7 MPa로 강재의 항복응력의 88.5% 수준으로 아직은 안전하다. 그러나 안전변의 작동압력 높은 구간을 나타내는 24.5 kg/cm²에서는 268.3 MPa의 응력이 발생하는데, 이 값은 이미 강재의 항복응력 230 MPa을 17%나 넘어서는 데이터로 용기를 이

보다 높은 압력으로 장기간 사용할 경우는 소성변형에 의한 피로수명이 급격하게 단축될 우려가 있다. 이 때에 안전변이 작동하지 않을 경우는 문제가 될 수 있지만, 안전변이 정상적으로 작용하는 경우는 가스압력이 24.5 kg/cm^2 로 상승하여도 아무런 문제가 없다. LPG 용기는 최고의 안전성을 유지해야 하기 때문에 31 kg/cm^2 의 높은 압력에서 내압시험을 실시하여 용기의 강도 안전성을 확보해야 한다. 본 연구에서는 LPG 용기에 31 kg/cm^2 의 압력을 30초간 공급하였을 때 용기에 걸리는 최대응력은 339.5 MPa 로 계산되었고, 이것은 강재의 항복응력 230 MPa 보다 1.47배나 높기 때문에 용기의 안전성을 보장할 수는 없다. 따라서 LPG 용기에 내압시험을 위해 31 kg/cm^2 을 지속적으로 유지할 경우는 강재의 소성변형에 의한 잔류응력이 발생하고, 피로에 의한 수명단축이 예상되므로 LPG 용기의 수압시험은 가능한 자제하고 다른 안전성 검사기법으로 안전성과 내구성을 고찰하는 것이 유리하다. 특히 사용중인 용기에 대한 재검사 과정(50리터 이하의 용기는 최초검사 4년, 그 이후로 15년까지는 매 3년, 그 이후로 20년까지는 매 2년, 20년 이상은 매년 검사)에서 반복적인 수압시험은 용기의 수명을 단축시키고, 안전성을 저해하는 지름길이기 때문에 극히 제한적으로 수행하는 것이 바람직하다. LPG 용기의 압력 31 kg/cm^2 정도가 실제로 작용하기 위해서는 외부에서 충격하중, 특히 가열이나 화재에 의한 열응력 하중이 급격하게 가해지는 경우로 이 때는 이미 LPG 용기에 대한 안전을 보장하기 어려운 상황이라 할 수 있다.

Figs. 3과 4에서 제시한 강도상 위험지역은 동체용기와 상부경판용기가 만나는 ㉔ 지역, 그리고 동체용기와 하부경판용기, 스커트 용기가 서로 만나 용접에 의해 용기가 제작되고, 특히 하부경판은 프레스로 밴딩가공을 하는 과정에 소재의 두께는 약간 얇아지고, 동시에 잔류응력이 존재할 수 있는 ㉕ 지역으로 LPG 용기의 최대 취약부라 할 수 있다. 여기에 LPG 용기를 운반하면서 충격하중이 스커트 지역에 작용하면서 연결부에 하중이 집중적으로 가해지는 구조물의 특성상 스커트와 연결되는 지역을 보강할 필요가 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 LPG를 안전하게 저장하고 운반하는데 널리 사용하는 LPG 압력용기에 대한 강도 안전성을 유한요소법으로 해석하였다. 용기에 작용하는 가스압력은 LPG 충전압력, 용기의 기밀시험압력, 용기의 이상압력을 차단하기 위해 설치된 안전변의 상한치 작동압력, 용기의 내압시험 평가압력 등 4가지를 기준으로 다양한 가스압력이 작용할 경우에 대한 안전성을 고찰하였다. FEM 해석결과에 의하면, 용기를 충전하고 사용하는 9 kg/cm^2 정도의 정상 작동압력에서는 충분히 안전하고, 기밀검사압력 18.6 kg/cm^2 정도의 경우도 안전한 것으로 나타났다. 반면에 안전변의 상한치 작용압력 24.5 kg/cm^2 정도는 강재의 항복강도 이상으로 응력이 걸리는 것으로 보아 이론적으로는 불안전하고, 특히 반복적인 안전변 작동은 용기의 피로강도를 악화시킬 우려가 많아 피로강도 내구성에서 불리한 측면이 있다. 또한 용기의 내압시험을 위한 31 kg/cm^2 은 용기에 걸리는 최대응력이 항복강도보다 67%나 더 높게 나타난 결과는 용기의 불안전성을 부각한 결과이다. 용기에 수압시험을 반복적으로 수행할 경우는 미세한 소성변형에 의한 용기의 피로강도를 점점 떨어뜨리는 문제점이 드러났다. 따라서 LPG 용기에 실시하는 내압시험 검사기준 및 재검사 기준을 보완·개정하기 위한 연구가 시급하게 진행되어야 한다.

참고문헌

- [1] KS B 6211, Refillable Welded Steel Gas Cylinders for Liquefied Petroleum Gas
- [2] KS D 3533, Steel Sheets, Plates and Strip for Gas Cylinders
- [3] KS B ISO 10464, Gas Cylinders -- Refillable Welded Steel Cylinders for Liquefied Petroleum Gas (LPG) - Periodic Inspection and Testing
- [4] KS B ISO 4706, Refillable Welded Steel Gas Cylinders
- [5] MARC Analysis Research Corp., California, USA, 1994