



## LPG 용기용 밸브의 체결안전성에 관한 유한요소해석

†김청균 · 오경석

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
(2007년 10월 30일 접수, 2007년 12월 18일 채택)

### FE Analysis on the Screwed Safety of a Valve for a LPG Bombe

†Chung Kyun Kim · Kyong Seok Oh

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea  
(Received October 30, 2007, Accepted December 18, 2007)

#### 요 약

LPG 용기에 장착된 네크링의 암나사와 개폐밸브의 수나사 사이에서 발생하는 접촉법선응력과 von Mises 응력을 유한요소법으로 해석하여 밸브나사의 체결안전성에 관련된 강도 및 가스누출 안전성에 대해 고찰하였다. LPG bombe의 가스충전압력 8~9 kg/cm<sup>2</sup>은 밸브와 LP가스 용기의 체결작용과 밀봉작용을 담당하는 나사부에 가압된다. 나사 선단부에서 발생한 스크래치 마모나 칩핑 손상은 나사의 접촉높이를 실질적으로 낮추게 되어 나선부의 강도를 떨어뜨리고, LP가스의 누설을 조장하게 된다. 체결 나선부의 손상은 밸브 나사부의 이빨 강도를 약화시키고, LP가스의 누출에 영향을 미친다. FEM 해석결과에 의하면, 나사 선단부의 마모 및 칩핑에 의한 높이 손상은 이론적으로 볼 때 LP가스의 누출과 밸브의 강도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 황동밸브 나사 높이의 손상정도가 밸브의 임계강도를 넘어 서게 되면, 나사는 밸브와 LP가스 bombe를 더 이상 체결하지 못하게 되어 압력용기는 갑자기 파손될 수도 있다.

**Abstract** – In this paper, the finite element analysis of a valve screw for a LPG cylinder has been presented on the leakage safety and strength one, which are computed and investigated by a contact normal stress and von Mises stress between a female screw of a valve and a male screw of a neck ring in a LPG bombe. The LP gas charging pressure of a LPG bombe is 8~9 kg/cm<sup>2</sup>, which is pressurized to the screw sealing contact areas between a valve and a LP gas cylinder. The peak failures of the screw tooth height due to a scratch wear and chipping loss of the contact area may decrease screw tooth strength and increase a leakage of a LP gas. These are strongly affect to the contact normal and von Mises stresses of the valve screws. The FEM computed results show that the tooth height loss due to a wear and chipping failure of the screw peak does not affect to the LP gas leak and strength of a valve screw theoretically. But if the tooth wear of the screw height of a brass valve overpasses the critical strength safety of the valve, the valve screw may be failed in fastening the valve and a LP gas bombe suddenly.

**Key words** : LPG bombe, FEM, Strength safety, Leakage safety, Wear, Stress, FEM

#### 1. 서 론

LP가스는 도입 초기에 고급연료로 사용되었으나, 지금은 성장세가 크게 둔화되어 LNG의 보완적 대체연료로 명맥을 유지하고 있다. 가정용 연료로 사용되는 프로판 LP가스는 도시가스 보급망이 전국적으로 구축되면서 소비량이 크게 줄었다. 그러나, 자동차용 연료로

사용되는 부탄가스는 LPG 차량의 꾸준한 증가세와 고유가, 상대적으로 저렴한 연료정책으로 소비량이 많이 증가하는 추세에 있다[1].

LP가스는 강재(steel plate)로 제조한 실린더 형상의 압력용기에 저장해야 안전하게 사용하고, 효과적으로 운반할 수 있다. Fig. 1과 같은 용기에 저장된 LP가스는 상온에서 8~9 kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 충전하면 액상을 유지하게 되어 많은 양을 저장할 수 있고, 운반하기도 편리해진다는 장점 때문에 취사용과 차량용으로 널리

†주저자:chungkyunkim@empal.com

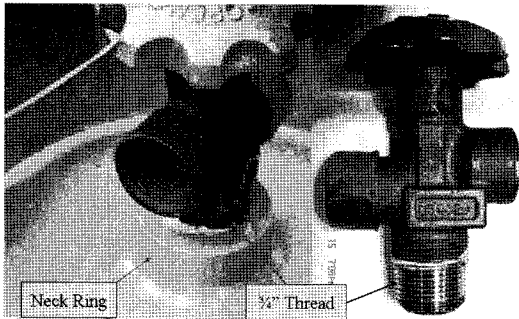


Fig. 1. Neck ring and a valve in a LP gas cylinder.

사용되고 있다. 또한, LP가스를 안전하게 충전하고 송출하기 위해서는 용기의 상단부 중앙에 있는 네크링(neck ring)에 개폐용 밸브를 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 나사로 체결한다. 용기의 상단부에 밸브를 연결하여 LP가스가 안전하게 충전되고 송출하기 위해서 밸브 몸체의 하단부에는 체결용 수나사를 제작하고, 용기의 상단부 중앙에는 네크링 암나사를 설치하여 용기와 밸브는 필요에 의해 탈착이 가능하도록 제작하였다.

한국가스안전공사(KGS)의 LP가스 용기용 밸브의 재검사 기준에 의하면 용기의 부속물로 규정된 황동밸브는 용기의 재사용 기간에 맞추어 한번 체결한 밸브를 탈거할 경우는 모두 폐기하도록 규정되어 있다. 따라서 밸브의 강도나 가스누출 안전성에 관계없이 한번 체결되었던 것은 다시 사용할 수 없으므로 KGS가 제시하는 최소안전을 충족하는 형태로 제작하면 된다. 따라서 업체는 장수명의 고기밀성을 요구하는 고급밸브를 생산할 필요성을 느끼지 못한다. 따라서 신기술 개발에 의한 해외시장 진출보다는 저가밸브 생산에 힘을 기울이고, 국내시장을 고수하려는 경쟁을 치열하게 하고 있다.

본 연구에서는 밸브의 나선부 손상에 따른 밸브의 재사용 여부를 검증할 수 있는 강도 및 누출안전에 대한 기초연구를 수행하고자 한다. LP가스 용기에 설치된 신품밸브와 LP가스 용기를 일정기간 사용한 후에 용기의 재검사 과정에서 제거한 밸브를 다시 사용할 수 있는 가능성을 검토하기 위해 밸브 몸체의 하단부에 가공된 나사의 체결강도 및 누설안전성을 유한요소법으로 고찰하고자 한다.

## II. 해석모델 및 해석조건

LPG 용기용 개폐밸브의 표준규격은 KS B 6212[2]에 명시되어 있다. LPG 용기에는 액체의 LP가스를 8~9 kg/cm<sup>2</sup>의 고압으로 충전하여 수요자에게 공급한다.

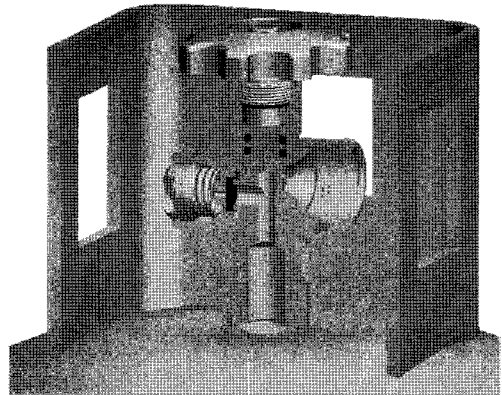


Fig. 2. Screw contact model between a valve and a LPG bombe.

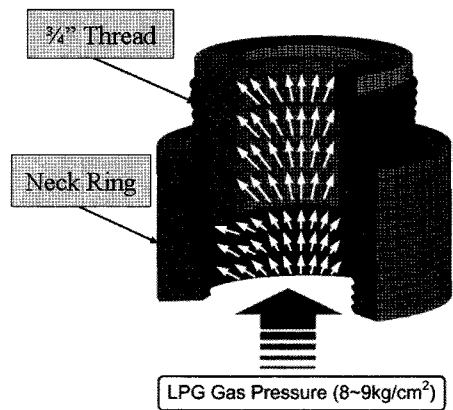


Fig. 3. FE analysis model of the valve screw assembly.

용기에 저장된 고압가스는 연료를 외부로 방출하여 안전하게 사용할 수 있도록 개폐작용을 하는 밸브를 LP가스 용기의 상단 중앙부 네크링에 나사로 체결한다.

Fig. 2는 LP가스 용기에 설치되는 개폐용 밸브의 체결모형을 보여준다. 용기의 상단부를 완벽하게 연결하기 위해 밸브의 몸체 하단부를 가공한 수나사는 LPG 용기의 상단부에 설치된 네크링의 암나사와 체결되어 용기와 밸브의 체결강도를 보장하고, 이 체결부를 통해 LP가스가 외부로 누출되지 못하도록 나사와 나사 사이에는 메탈접촉과 밀봉재(sealant)에 의해 완벽한 기밀성을 유지하도록 제작한다.

Fig. 3은 LP가스 용기용 밸브가 나사에 의해 체결된 FE 해석모델을 보여주고, 해석의 효율성을 위해 축대칭 해석모델을 사용하였으며, 나사 체결부에 가해지는 LP가스압력은 밸브내부에 균일하게 작용한다고 가정하였다. 본 해석에 사용된 유한요소해석 상용 프로그램은 강도해석에 널리 사용하는 MSC/MARC[3]이다.

**Table 1.** Material properties.

Properties	Brass	AISI 1020 (Sm <sup>2</sup> 0C)
Elasticity modulus [GPa]	97	200
Yield strength [MPa]	124	281
Poisson's ratio	0.31	0.29

Table 1에서 LP가스 용기용 밸브 소재로 사용한 황동과 용기 네크부 소재로 사용한 AISI 1020 탄소강재에 대한 물성치를 제시하였다.

### III. 해석결과 및 고찰

LP가스 용기와 밸브를 나사로 완벽하게 체결하여 밸브 몸체를 용기 구조물과 일체가 되도록 해야 LP가스 압력에 의한 밸브의 이탈을 방지하고, 가스누출을 완벽하게 차단할 수 있다. 밸브의 가스누출은 밸브의 체결부에 작용하는 접촉법선응력(contact normal stress)을 해석하여 가스누출 압력과 비교하면 LP가스의 누출 가능성을 판단할 수 있고, 체결강도는 밸브와 용기 사이에 걸리는 von Mises 응력을 해석하면 밸브의 강도 안전성을 판단할 수 있다.

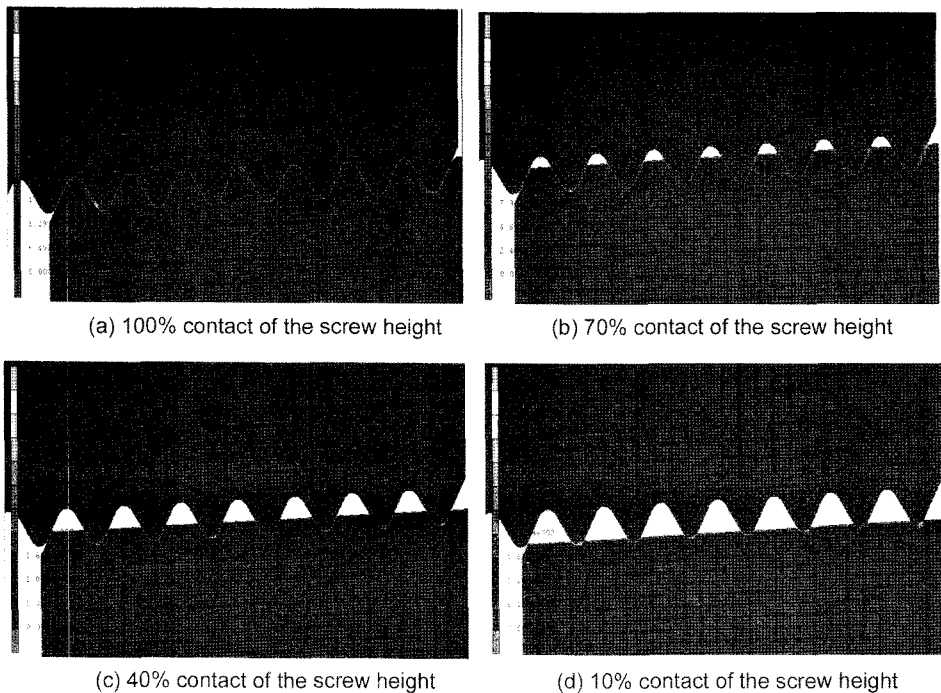
LP가스 용기용 밸브는 공장에서 출하한 신제품과 기존

용기에 장착한 밸브를 용기의 재검사 과정에서 탈거한 것을 재사용하는 두 가지 경우가 있다. 밸브의 신제품과 이미 사용한 밸브 나사부의 체결상태는 나선부의 손상 정도에 따라 다르게 평가할 수 있다. 즉, 신제품의 경우는 나선산이 정확하게 형성되어 체결접촉이 아주 우수하지만, 이미 사용하였던 밸브의 나사부는 다양한 형태의 마모가 발생하거나 나선산이 손상되어 접촉체결이 불완전해질 우려가 많다.

따라서 공장에서 출고한 신제품 밸브의 나사부에는 어떠한 마모나 손상 등이 없는 것으로 하고, 이 상태의 체결을 100%라고 가정한다. 그리고 밸브가 사용됨에 따라 발생하는 나선부의 스크래치 마모나 칩핑 손상, 크랙 등에 의해 나선산의 높이가 낮아지면서 줄어드는 실제접촉면적을 용이하게 표현하기 위해 나선산의 높이를 70%, 40%, 10% 줄여든 해석모델로 각각 정의하였다.

#### 3.1. 접촉법선응력

LP가스 용기의 네크링에 체결된 밸브나사의 체결부는 서로 메탈과 메탈의 상호접촉 미끄럼 마찰력에 의해 강한 체결력이 작용하는데, 여기서 접촉법선 체결력은 LP가스의 누출을 차단하는 성분으로 접촉표면에 대해 직각방향으로 작용한다. 따라서 LP가스 용기에 부



**Fig. 4.** Contact normal stress distributions as a function of the failure loss of the screw height.

착된 네크링의 암나사와 밸브의 몸체 하단부에 가공된 수나사 사이에 작용하는 접촉법선응력(contact normal stress)을 해석하여 밸브의 누설안전성을 고찰하고자 한다. 개폐밸브의 나사 체결부는 밸브와 용기를 하나의 몸체로 체결하여 LP가스 용기에 작용하는 어떠한 가스 압력에도 분리되지 말아야 하고, 동시에 LP가스의 누출을 완벽하게 차단해야 LP용기는 안전하게 사용될 수 있다.

밸브의 나사산은 체결 또는 탈거과정에서 스크래치 마모, 칩핑 파손, 마이크로 크랙 등 다양한 손상이 발생되면서 나사의 체결강도를 떨어뜨리고, LP가스의 누출 가능성을 제기할 수 있다[4]. FEM 해석에 사용된 밸브 나사산의 손상정도를 정확하게 반영한다는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 FEM 해석의 편의성을 위해 나사산 높이가 전혀 손상되지 않은 경우의 나사산 높이를 100%로 하고, 나사산의 일부가 손상되어 높이가 줄어드는 정도에 따라 70%, 40%, 10% 등으로 각각 정의하여 LP가스의 누출 및 강도안전성을 해석하였다.

Fig. 4는 LP가스 용기의 네크링과 밸브 몸체의 나사부가 서로 체결하는 정도에 따라 발생하는 접촉법선응력을 해석한 결과이다. 여기서 제시한 법선응력은 LP가스의 누출과 밀접한 관련이 있는 해석 데이터라 할 수 있다.

LP가스 용기용 밸브의 수나사는 Fig. 1에서 보여준 것처럼 보통 14개의 나사산이 만들어져 있는데, 봄베의 네크링에 형성된 암나사와 체결하는 과정에서 보통 7개의 나사산만이 체결된 것으로 조사되었다[4]. 따라서 본 연구에서는 나사산의 접촉면적은 전체 나사산 14에서 7개만 체결된 것으로 가정하고 LP가스용 밸브에 가스압력 1.8 MPa를 적용한 상태에서 나사 체결 접촉부에서 발생하는 법선응력분포 해석결과를 Fig. 4에서 제시하였다.

FEM 해석결과에 의하면 최대접촉 법선응력은 Fig. 4에서 보여준 것처럼 밸브와 네크링의 나사부가 서로 체결된 왼쪽과 오른쪽에서 높게 발생하고, 나사체결의 중간부는 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이것은 나사 체결력의 불균형과 체결력에 영향을 미치는 가스작동 압력이 나사 체결부의 양 끝단에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 실제로 나사산의 손상정도를 조사하면, 이곳에서 보다 많은 마모나 파손이 많이 발견되고 있는 것과 유관함을 알 수 있다[4].

Fig. 5는 나사산이 전혀 손상되지 않은 100% 나사산 높이를 갖는 해석모델(Fig. 4(a)의 경우)과 나사산이 손상을 받아 그 높이가 점차로 줄어들어 10%의 나사산 높이가 남아 있는 경우(Fig. 4(d)) 등 나사산의 높이가

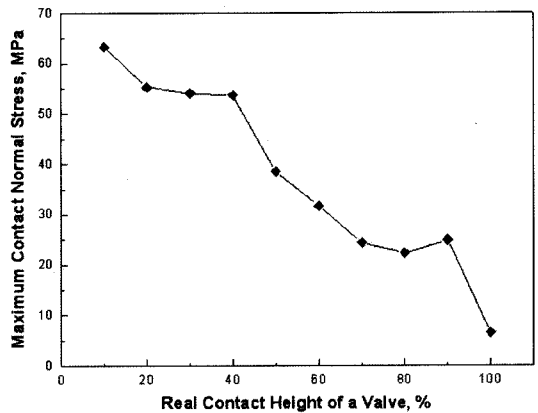


Fig. 5. Maximum contact normal stress as a function of the failure loss of the screw height.

10%씩 줄어든 10가지 해석모델에 대한 최대접촉 법선응력 해석결과를 제시하였다. 여기서 나사의 체결부에 적용된 LP가스 압력의 최대허용 충전압력은 KGS의 가스안전기준에 의거 1.8 MPa인 것으로 가정하였다.

구조안전 해석결과에 의하면, 나사산의 높이가 100% 온전한 신품 밸브의 경우는 6.4 MPa 정도로 LP가스 압력 1.8 MPa를 충분히 차단할 수 있는 가스누출 차단성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 나사산의 높이가 10% 정도 손상을 받을 경우, 즉 90%의 나사산 높이가 온전한 경우로 최대접촉 법선응력 25 MPa 정도로 급격하게 증가한다. 또한, 90% 정도의 손상을 받아 실제로 남아 있는 나사산의 높이가 초기 나사산 높이의 10%일 경우 최대접촉 법선응력은 64 MPa 정도로 크게 높아 나사산의 강도가 위험해질 수 있다. 나사산의 손상은 최대접촉 법선응력을 증가시켜 어느 정도의 LP가스 누출을 차단하는 효과를 기대할 수 있으나, 너무 높아지면 가스누출보다는 나사부의 강도를 크게 떨어뜨려 나사산이 파손될 우려가 높으므로 손상된 나사산을 그대로 사용할 수는 없다. 즉, 나사산의 손상은 어느 정도 허용할 수 있지만, 임계값을 넘어서면 가스누출 및 강도 안전 측면에서 문제가 될 수 있다.

### 3.2. Von Mises 응력

밸브의 나사 체결부에 작용하는 LP가스 압력에 의해 발생된 인장응력의 크기가 황동소재의 항복강도를 넘어서면 소성발생은 물론이고 반복적인 충전작업에 의해 밸브 나사부의 피로손상을 예상할 수 있다. 따라서 나사의 체결강도 저하로 인해 나사 선단부의 파손은 LP가스 누출의 원인으로 작용하고, 최악의 경우는 충전이나 이상압력 상승에 의해 압력용기로부터 밸브의

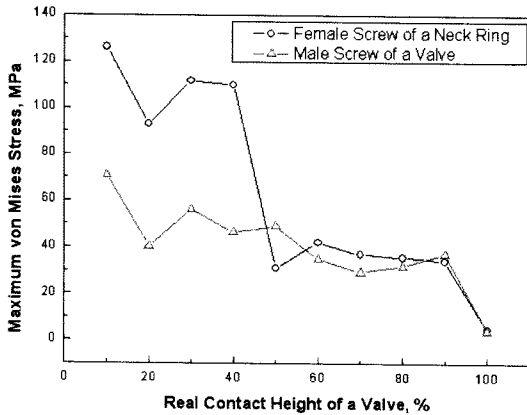


Fig. 6. Maximum von Mises stress as a function of the failure loss of the screw height.

갑작스런 이탈로 가스폭발을 예상할 수 있다.

Fig. 6에서 제시한 해석결과에 의하면 밸브 몸체의 수나사에 걸리는 von Mises 최대응력은 신제품 밸브(100%의 나사산 높이를 확보한 경우)에서 3.7 MPa 정도가 걸리고, 나사산의 높이 대비 90%가 손상된 밸브(10%의 나사산 높이를 확보한 경우)에서 70.8 MPa 정도로 황동소재의 항복강도 124 MPa 대비 3%~57%의 응력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 강제 용기의 중앙부에 설치된 네크링의 암나사는 황동밸브의 나사부와 체결되면서 네크링의 암나사에 걸리는 von Mises 최대응력을 보면, 신제품(100%로 표시) 암나사의 경우는 4.4 MPa 정도만 걸리고, 나사산의 높이 대비 90%가 손상된 가장 열악한 밸브(10%로 표시)에서 126.5 MPa 정도로 대단히 높다. 이것은 강재의 항복강도 281 MPa 대비 1.6%~45%의 안전한 응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

밸브와 용기가 체결된 나사부에 LPG 가스 압력이 공급되면, 신제품 밸브의 나사부에는 상대적으로 낮은 응력이 걸리므로 대단히 안전하고, 나사부의 손상도가 높아질수록 나사부의 국부적인 체결면에서 발생하는 응력은 높아지는데, 나사부 높이의 손상정도가 50%까지는 균일한 응력이 걸리는 것에 비하여 50% 정도를 넘어서면 손상은 특히 네크링의 암나사에서 응력이 급격하게 증가하여 강도상 위험해질 수 있다는 해석결과를 제시한다.

여기서 제시한 von Mises 최대응력 해석결과는 밸브의 수나사 황동소재와 네크링의 암나사 강재(AISI 1020)에 걸리는 응력을 강도측면에서 보면 나사가 스크래치 마모나 칩핑 파손 등에 의해 국부적으로 손상을 받아도 이론적으로는 모두 안전한 것으로 나타났다.

다. 따라서 밸브의 재사용에 따른 나사산의 손상정도가 낮은 경우, 즉 미세한 마모나 크랙 등은 밸브의 강도에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 LPG 가스 용기용 밸브로 널리 사용하는 황동소재 밸브 나사산의 손상정도에 따라 달라지는 밸브의 체결안전성, 즉 가스누출 및 체결강도 안전성을 유한요소법으로 해석하였다.

밸브 나사에서 발생한 마모나 칩핑 등에 의해 손상된 밸브 나사부의 체결특성을 이론적 해석으로 구현하기는 대단히 어렵기 때문에 FEM 해석의 실효적 유용성을 확보하기 위해 신제품 나사산의 높이를 100% 기준으로 설정하고, 나사산이 손상을 받아 10%의 높이가 낮아졌을 경우는 90%의 나사산 높이가 온전하게 접촉되는 것으로 가정하여 해석하였다.

가스누출 안전성에 대한 해석결과에 의하면, KGS에서 안전기준으로 제시한 LPG 가스 압력 1.8 MPa 대비 최소 3.6배(나사산이 100% 온전한 신제품의 경우)에서 최대 35.6배(나사산이 90% 손상되어 10%의 나사산 높이가 남아서 체결된 경우)의 높은 최대접촉 범선응력이 발생하여 안전하지만, 나사산의 지나친 손상은 강도의 급격한 저하로 나사의 파손을 초래할 수 있다.

강도안전 측면에서 해석한 결과에 의하면, 황동소재로 제작된 밸브의 수나사에 걸리는 von Mises 최대응력은 124 MPa의 항복강도 대비 3%~57%로 대단히 안전하다 할 수 있다. 또한 용기에 부착된 네크링의 암나사에 걸리는 최대응력은 신제품(100%)의 나사산 높이 대비 90%가 손상된 밸브(10%로 표시)에서 126.5 MPa로 강재의 항복강도 281 MPa 대비 1.6%~45%의 응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

본 연구결과에서 제시한 이론적으로 해석결과에 의하면, 밸브의 나사부가 국부적으로 손상을 받아도 모두 안전한 것으로 나타났다. 밸브의 사용에 따라 발생한 나사산의 마모나 크랙 등이 크지 않을 경우는 밸브의 강도와 가스누출 안전성에 미치는 영향은 대단히 작다는 것을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] 강주완, "LPG 산업의 성장동력 - AUTOGAS", 한국가스학회 제1회 산학협력 기술세미나, pp. 1-16, Dec. 8, (2006)
- [2] KS B 6212, 액화석유가스 용기용 밸브, 한국표준협회

- 회, (2006)
- [3] "MARC User's Manual", Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., (1996)
- [4] 이병관, 김태환, 김청균, "LPG 용기용 밸브의 가스 누설 안전성에 대한 실험적 연구", 한국가스학회 춘계학술발표회 논문집, pp.81-89, (2006)