

LPG 용기용 밸브의 가스 누설 안전성에 대한 실험적 연구

이병관, 김태환, 김청균
홍익대학교 기계공학과

An Experimental Study on Leakage Safety for the Valve of LPG Gas Cylinder

Byung Kwan Lee, Tae Hwan Kim, Chung Kyun Kim
Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

1. 서론

LPG는 공해 물질이 거의 없고 열량이 우수한 청정 연료로써 가정용 산업용으로 널리 쓰이며 오늘 날에는 차량용 연료로 그 쓰임이 다양하다. 하지만 프로판과 부탄이 주성분으로써 분자 구조상 공기보다 높은 밀도를 가지고 있기 때문에 LPG가 누설될 경우 화재와 폭발위험 등이 가중되며 이로 인해 매년 많은 사상자와 재산 피해가 발생되고 있다. 특히 일반 가정이나 식당 등에서 쓰이는 LPG 용기는 전문 지식이 없는 일반인들이 취급하는 사례가 빈번하며 이로 인해 안전 사고가 특히 많이 발생하고 있다. 따라서 LPG 용기의 가스누설 방지대책에 대한 연구가 절실히 요구된다.

본 논문에서는 LPG 용기용 밸브의 사용에 따른 LPG 밸브의 체결부 및 밀봉시스템의 마멸, 마모의 형태를 관찰하고 그 원인에 대하여 실험적 고찰 및 유한요소 해석 프로그램을 이용한 결과들을 토대로 LPG 용기용 밸브의 누설 안전성에 대한 평가를 수행하였다. 본 논문에서의 실험은 시중에서 사용되고 있는 각 밸브 제조사들의, 일정기간 사용한 밸브들을 표본으로 하여 가스 실린더와 체결되는 체결 나사부, 안전변의 밀봉시트, 오링의 마멸과 결합 여부를 관찰 하였으며 각 표본의 가스 누설 시험을 실시하였다. 또한 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 LPG 용기용 밸브의 각 요소들에 대한 해석을 수행하여 가스 누설 안전성에 대한 해석의 결과와 실험을 통한 결과들을 비교 분석 하였다.

2. 밸브의 구조 및 시험 장치

2-1 LPG 용기용 밸브의 구조 및 역할

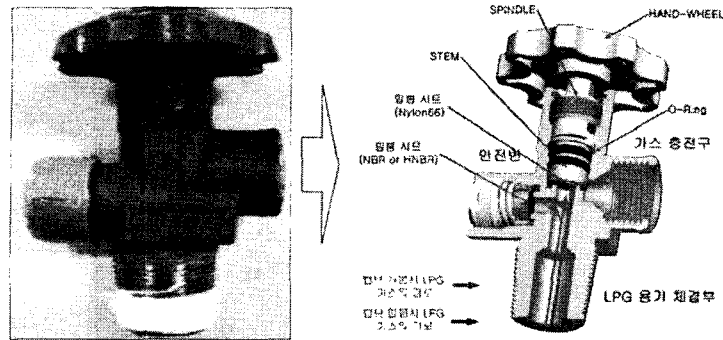


Fig1. The Valve of LPG Gas Cylinder

LPG용기용 밸브의 구조는 크게 LPG Gas용기와 체결되는 체결부와 밸브의 개방 시에 가스를 점화용기로 이송시켜주는 충전구, 밸브의 밀봉시 가스의 누설을 차단하는 밀봉시트(Nylon66)와 O-Ring(NBR) 그리고 충격이나 가열등으로 인하여 용기 내부의 가스압이 기준치를 넘어서게 되면 폭발을 방지하기 위하여 작동하는 안전장치로 이루어져있다

2-2 LPG 용기용 밸브의 작동원리

LPG 용기용 밸브의 작동은 기본적으로 hand-wheel을 돌림으로써 이와 연결된 spindle과 stem의 상하 이동을 통하여 LPG Gas의 밀봉 및 유량을 조절한다. LPG 용기 내부의 Gas의 압력은 18.6kgf/cm^2 이며 밸브의 밀봉시 압력이 24.8kgf/cm^2 에 이르면 밸브의 안전면에서 안전장치의 작동으로 Gas가 서서히 외부로 누출이 되도록 설계되어있다. 안전장치의 작동은 스프링의 압축력에 의해 조절되며 24.8kgf/cm^2 Gas압이 이하로 낮아지면 스프링에 의해 복원되어 다시 밀봉작용을 하도록 되어있다. 이처럼 LPG 용기용 밸브는 적정 수준의 Gas압 유지와 완벽한 밀봉이 가장 중요한 요소로 제품의 설계와 제작 시 엄밀한 기준이 요구되며 제작후의 안전관리도 철저히 요구된다.

2-3 시험 및 관찰 장비

Fig2.는 LPG 용기용 밸브의 밀봉성과 안전장치의 정상작동 유무를 판단하기 위한 시험 장치로 시편의 안전장치를 제외한 다른 부분의 밀봉을 실시한 후 시험 장치의 하단부에 위치한 산소탱크와 관으로 연결, 압력조절 밸브의 조절을 통해 Gas압을 18.6kgf/cm^2 에서 24.8kgf/cm^2 이상의 압력 까지 가하여 설계 기준치의

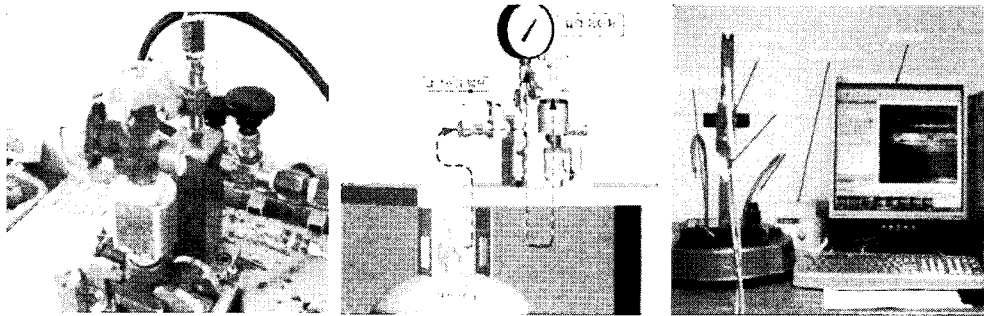


Fig2. Sealing Test Machine and Video Microscope

압력에서 안전장치가 밀봉작용을 하는지 여부와 24.8kgf/cm²이상의 압력에서 안전장치에서 Gas가 누설되는지의 여부를 관찰하였다. 또한 이 시험을 통하여 안전장치의 작동유무를 확인한 후 같은 방법으로 밸브의 조절을 통해 압력을 다시 24.8kgf/cm²이하로 낮추어 용기 내부의 Gas의 압력이 설계기준치 이하로 내려갔을 경우 안전장치가 다시 원래의 위치로 복원되어 밀봉 기능을 수행하는지 여부를 관찰하였다.

Gas의 누설여부는 LPG용기용 밸브의 각부에 비눗물을 칠함으로써 확인하였으며 모든 시편들에 대하여 같은 방법으로 시험을 수행하였다.

LPG 용기용 밸브의 O-Ring, 밀봉시트, LPG 용기 체결부등 각 부의 마멸의 형태를 관찰한 장비로 Camera Probe에 Lense를 장착하여 관찰하고자 하는 피사체에 직접 접촉하여 100배~최대 800배까지의 배율로 관찰하였다.

2-4. 관찰대상

LPG용기용 밸브의 마멸에 대한 관찰 및 안전장치의 작동 시험은 시중에서 사용되고 있는 LPG용기용 밸브들을 제조사 별로 분류하여 각 제조사별 최대 50개의 밸브에 대하여 관찰 하였으며 모든 시편에 대하여 밸브의 용기 체결부에 대한 마멸의 형태 및 제조사, 나사산의 위치별로 마멸의 개수를 관찰하였다. Stem

Table1. Specimen Sampling of each Manufacturer

	A사 밸브	B사 밸브	C사 밸브
LPG용기 체결부 마멸	50	50	50
밀봉시트	20	20	20
O-Ring(primary,secindary)	20	20	20
안전면 성능시험	6	6	6

(개수)

과 연결되어 상하 이동을 통해 밸브의 Gas 밀봉 및 유량의 조절을 담당하는 밀봉시트(Nylon66)와 O-ring (primary, secondary)은 제조사별로 20개씩 무작위로 선별하여 관찰하였으며 안전장치의 정상작동 여부는 제조사별 10개씩의 시편에 대하여 시험하였다.

3. LPG 용기의 트라이블로지 사례

3-1 LPG 밸브의 용기 체결부의 나사산 마멸

Fig4.는 LPG용기와 체결되는 밸브 나사부의 대표적인 마멸 사례들에 대한 사진이다. LPG용기용 밸브의 소재는 황동으로 LPG용기의 소재인 탄소강과 직접 금속마찰을 하며 LPG용기와 밸브의 장착시 기계장치(Air-Gun)을 이용하여 강한 토크를 줌으로써 장착이 이루어지기 때문에 LPG용기용 밸브의 제작시 용기 체결

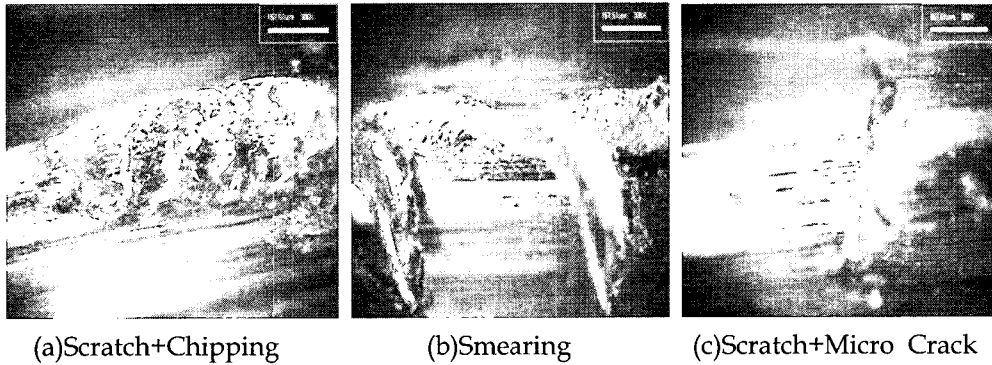
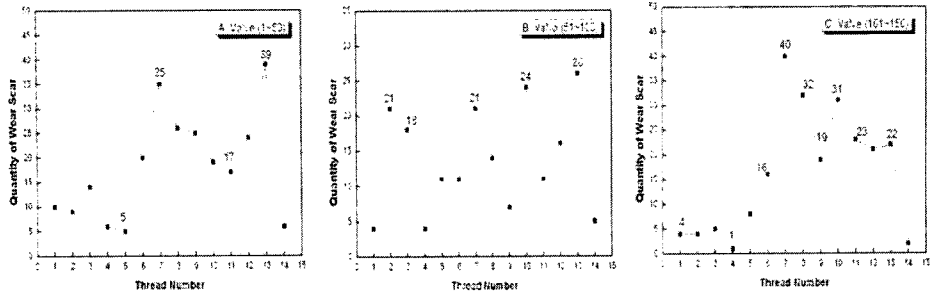


Fig4. Wear of LPG Valve

부의 나사산의 가공이 정밀하지 않았을 경우, 혹은 LPG용기에 밸브를 장착시에 정확한 조립이 이루어지지 않을 경우에 발생하며 대부분의 마멸의 형태는 Fig4.와같이 복합적인 마멸의 형태로 발생한다. Fig4. (a)와 (b)는 LPG용기용 밸브의 모든 제조사들에서 대표적으로 가장 많이 발생한 마멸의 형태로, Fig4.의 (a)는 금속간의 직접마찰로 인한 Scratching과 이로 인해 밸브의 나사산 정상부가 떨어져서 마멸입자가 형성되는 Chipping wear가 동시에 발생한 사진이며 Fig4.의 (b)는 LPG 용기와 밸브의 체결시 체결부의 정확한 체결이 이루어지지 못한 상태에서 강한 힘으로 강제적인 체결을 시행하여 상대적으로 약한 황동소재의 밸브측 나사산 정상부가 찢겨져 나간 형태의 마멸로 (a), (b) 마멸 모두 LPG용기용 밸브의 용기와 체결되는 나사부의 부정확한 제작과, 체결에서 기인하며 두 경우 모두 마멸입자를 생성하여 밸브 나사산의 또 다른 마멸을 유발한다. Fig4.의 (c)는 Scratch와 Micro Crack이 동시에 일어난 마멸의 형태로 비록 일부의 밸브들에서 보여진 마멸의 형태이기는 하나 Micro Crack이 일어난 밸브는 모든 나사산들에서 축 방향으로 일어나기 때문에 LPG Gas의 누설을 초래 할 위험이 매우 높다.



(a) Valve 1~50 (b) Valve 51~100 (c) Valve 101~150

Fig5. Quantity of Wear Scar with Thread Number

Fig5는 밸브의 용기 체결부 나사산에 마멸이 나타나는 빈도수를 나사산 순서에 따라 나타낸 그래프이다. 밸브 밀단에서 제일 멀리 떨어진 나사산을 1번으로 밀단에 가까워지는 순서로 나사산에 번호를 부여하여 총 1번부터 14번까지 14개의 나사산에서 각 회사별 (1번~150번)로 마멸의 개수를 정리하였다. LPG용기와 밸브의 체결은 조금씩 그 차이는 있으나 대부분 용기 체결부 중간, 즉 7번 나사산까지 체결이 이루어지며 그 결과 용기 체결부 나사산의 마멸도 7번 나사산과 실질적으로 체결이 처음 일어나는 13번 나사산에서 많이 일어남을 알 수 있다. Fig5의 (b)는 다른 두 제조사의 밸브와는 달리 마멸이 특정 나사산에 집중되지 않고 고른 분포를 보이며 마멸의 개수도 다른 두 제조사의 밸브보다 적음을 알 수 있으며 마멸의 형태 또한 단순 Scratching wear가 주로 발생하였다. 이는 LPG용기용 밸브의 용기 체결부의 제작 및 밸브와 용기의 체결이 다른 두 회사보다 정밀히 이루어졌음이라 볼 수 있다.

시중에서 사용된 제조회사들의 나사산 전체에서 발생한 Scratching wear는 LPG용기와 밸브의 체결시 밀봉성을 위해 일정한 압축력을 가지고 금속간의 건조마찰을 하기 때문에 발생한다. 시중에서 사용된 각 밸브 제조사들의 밸브 체결부를 살펴보면 모든 밸브들에서 밀봉성과 금속간의 건조마찰을 막기 위한 Teflon이 전부 혹은 일부 벗겨지거나 찢어져 있음을 관찰 할 수 있었는데 Scratching wear를 방지하기 위해서는 LPG용기용 밸브의 용기 체결부의 정밀한 제작 및 LPG용기와 밸브의 체결시 감는 Teflon의 횡수 등에 대한 정확한 정보가 제공되어야 하겠다.

3-2 O-Ring 과 밀봉시트의 마멸

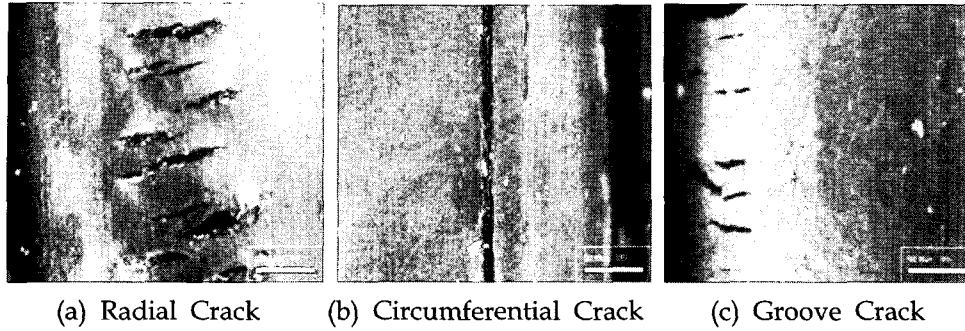


Fig6. Failure Type of O-Ring

Fig6.은 O-Ring의 대표적인 마멸 사례들에 대한 사진이다. 오링은 밀봉시트의 1차적인 밀봉이 이루어지지 않았을 경우 혹은 밸브의 개봉시 가스충전구로 배출되며 Stem의 틈사이로 들어오는 가스의 밀봉을 담당하는 중요 부품으로 밀봉시트와 가까운 쪽의 Primary O-Ring과 밀봉시트와 먼 쪽의 Secondary O-Ring 두 개의 O-Ring이 밸브의 안쪽을 실린더처럼 가공한 내경 측과의 미끄럼 마찰작용을 통해 LPG 가스의 밀봉을 수행한다.

Fig7.은 Primary O-Ring과 Secondary O-Ring에서 Crack이 일어난 O-Ring의 개수와 그때에 발생한 Crack의 종류를 나타낸 그래프이다. Crack은 Secondary O-Ring보다 Primary O-Ring에서 많이 발생했으며 대부분 원주방향의 Crack이 일어났다. Radial Crack은 그 발생의 빈도수는 적었으나 실질적 밀봉을 담당하는 압축부에 반경방향으로 Crack이 일어나 가스 누설의 위험이 가장 많다.

LPG용기용 밸브의 제작시 한번 체결이 이루어지면 밸브의 해체나 O-Ring의 교환이 불가능하기 때문에 O-Ring의 소재 보강에 관한 연구 및 O-Ring과 접촉하는 접촉면의 정밀한 가공이 필요하겠다.

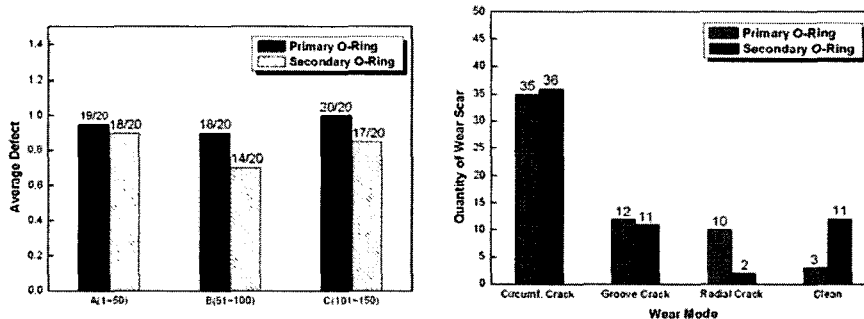


Fig7. Quantity of Wear Scar and Average Defect of O-Ring

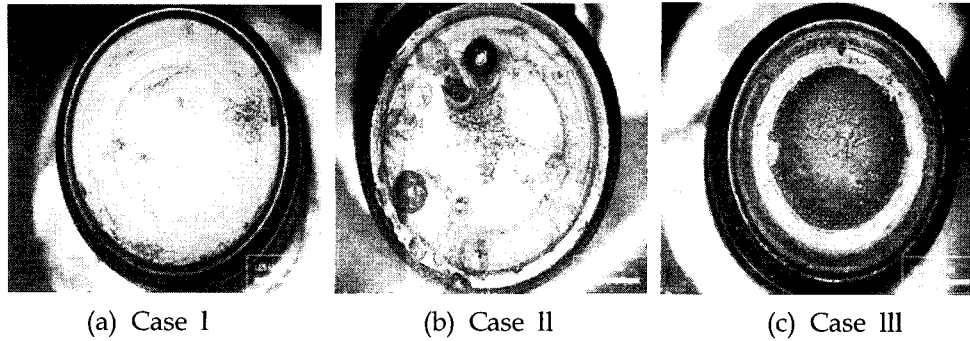


Fig8. Failure Case of Sealing Seat (Nylon66)

Fig8.은 밀봉시트의 사진으로 시트는 밸브의 밀봉 시 LPG Gas의 누설을 1차적으로 담당하는 부분으로 밀봉을 담당하는 부품들 중 가장 중요한 역할을 담당하는 부분으로 LPG 용기용 밸브의 설계 시 혹은 제작 시에 정밀함을 요구한다. 위의 사진들은 밸브시트에 결함이 발생한 사진들로 대부분의 시트는 표면에 결함이 발생하지 않았으나 결함이 발생한 시트들의 대표적인 유형의 사진이다. 순서대로 Fig8.의 Case I는 시트의 취급 시에 부주의로 표면에 흠집이 발생한 시트의 사진이며 Case II는 밸브의 제작시에 시트에 이물질이 들어간 사진이다. Case II의 경우 이물질로 인해 시트와 맞닿는 노즐의 끝단부의 심각한 변형을 초래하였다. 마지막 Case III는 가장 많은 시트에서 발생한 결함의 유형으로 시트의 표면에 그을음과 같은 이물질이 묻어있는 경우로 시트의 표면이 열기에 닿아서 마치 끓은 듯한 형상을 띈다.

시트들의 결함은 대부분 밸브의 제작 시 혹은 취급시의 부주의에 의한 것으로 가스의 누설과 직접적인 관련이 있는 시트의 취급시에는 보다 각별한 주의가 요구되며 흠집이나 부식이 잘 일어나지 않도록 강도와 내 부식성이 강한 소재에 관한 연구가 필요하겠다.

3-3. 안전장치의 작동성능 및 LPG Gas 누설시험

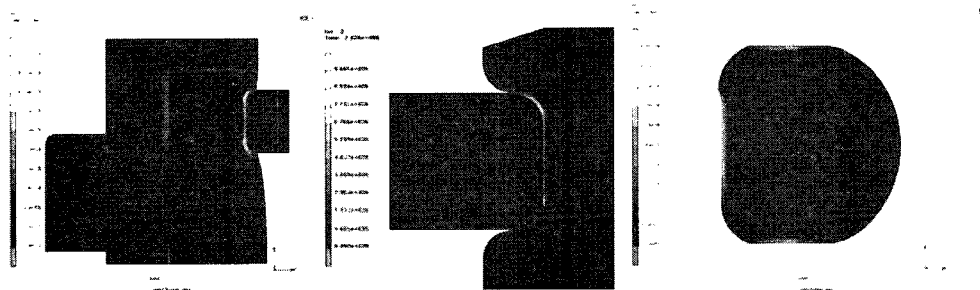
LPG용기용 밸브의 안전장치는 용기내의 가스압이 일정수준 이상 올라가 Gas용기가 폭발하는 것을 방지하기위하여 일정 가스압 이상에서 가스를 누설시켜서 가스압을 낮추고 가스압이 정상수준으로 낮아지면 다시 밀봉작용을 하는 장치로서 가스의 폭발 및 밀봉을 막아주는 중요한 역할을 한다. 그러므로 안전장치의 정확한 작동은 가스안전에 매우 중요한 요소라 할 수있다. 안전장치는 스프링의 힘에 의해 시트(NBR or HNBR)가 압축되면서 밀봉작용을 하고 가스의 압력이 올라가 스프링이 누르는 힘을 넘어서게 되면 스프링이 압축되면서 가스가 새어나오는 구조로 되어있다. LPG Gas누설 및 안전변의 작동성능 시험의 결과 모든 시편의 O-Ring과 나사체결부에서는 LPG Gas의 누설이 일어나지 않았으며 안전

변의 작동성도 대부분 우수한 것으로 나타났다. 하지만 24.8kgf/cm^2 이상에서 안전변이 작동하고 다시 원위치로 돌아온 후에 대부분의 밸브는 안전변이 정상적으로 밀봉 성능을 유지하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 안전변의 작동으로 시트가 노즐의 끝단부에서 떨어진 뒤 다시 제자리로 돌아오면서 원래의 위치로 돌아오지 못하였거나 스프링이 한번 압축을 한 뒤 정상적인 압축력을 유지하지 못함을 의미한다. 그러므로 안전변의 정확한 작동을 위해서는 안전변에 장착하는 스프링과 특히 시트의 이동을 유도하는 안전변의 정확한 설계가 요구된다.

3-4 유한요소해석

앞서 밀봉 성능 시험 및 마멸을 관찰하였던 LPG용기용 밸브의 구성 요소들에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 모든 모델들은 axisymmetric model로 해석하였으며 각 모델들의 Contact Normal Stress, Chauchy Stress, Strain 값들을 관찰하여 용기용 밸브의 구성요소들에 대한 밀봉성능 및 안전성을 수치적으로 알아보았다.

Fig9.는 안전변의 시트(NBR)와 LPG Gas의 개폐를 조절하는 시트(Nylon66), 그리고 O-Ring을 유한요소 해석프로그램을 이용한 결과들이다. 그림은 해석한 각 부품들의 LPG Gas의 밀봉 여부를 알 수 있는 Contact Normal Stress를 나타낸 그림이다. 해석은 2차원 축대칭 모델로 수행하였으며 압력조건은 안전변의 작동 조건인 24.8kgf/cm^2 의 가스압을 적용하였다. 관찰 값은 밸브의 LPG Gas 밀봉 여부를 판단하기 위한 Contact Normal Stress 와 Gas압력에 대하여 밸브의 각 부품들의 안전성의 판단기준이 되는 Chauchy Stress 와 Strain을 관찰하였다



(a) Sealing Seat (NBR) (b) Sealing Seat (Nylon66) (c) O-Ring

Fig9. FEA Results of each Component

해석을 수행해본 결과 Seat(NBR)과 Seat(Nylon66), O-Ring은 24.8kgf/cm^2 의 압력에서 Gas의 누설을 차단하는 것으로 나타났으며 안전변의 Seat는 24.8kgf/cm^2 이상의 압력에서 Gas가 정상적으로 누설이 되는 것을 알 수 있었다. 하지만 안전변 Seat의 Contact Normal Stress값은 스프링에 의한 영향에 매우 민감한 것

로 나타나 스프링의 설계가 정확한 작동의 중요한 요소임을 알 수 있었다. 유한 요소 해석을 수행한 각 부품들의 안전성을 나타내는 Chauchy Stress와 Strain은 각 소재의 제한된 한계치 보다 현저히 낮았으며 매우 안전한 것으로 나타났다. 그러므로 시중에서 사용된 밸브들의 마멸과 결함의 원인은 제작과 조립과정이 정밀하지 못한 것으로 판단이 되며 사용상의 관리가 소홀한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 시중에서 사용된 LPG 용기용 밸브들을 제조사별로 분류하여 각 제조사들에 따른 밸브 구성요소들의 마멸 및 결함의 여부와 그 특성을 관찰함으로써 LPG용기용 밸브의 트라이볼로지 적 특성을 살펴보았으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

LPG용기용 밸브의 1차적인 목적은 완벽한 LPG Gas누설의 차단이며 이를 위해 충분한 안전계수를 적용하여 밸브의 설계가 이루어졌다. 하지만 밸브의 제작과 조립시에 정확한 제작과 조립이 되지 않아서, 상대 마찰 운동을 통해 LPG Gas의 밀봉을 하는 밸브의 각 구성품들에서 마멸과 결함 등이 발생함을 알 수 있었다 또한 과도한 용기 내 가스의 압력으로 인한 가스 폭발을 방지하는 안전변의 작동에서 안전장치의 작동 후 다시 정상적인 Gas의 밀봉을 수행하지 못함을 알 수 있었는데 이는 밸브 안전변 내부의 밀봉 시트와, 시트의 이동을 유도하기 위해 실린더처럼 가공된 내경측과의 정확한 설계 및 제작이 이루어지지 못했기 때문이다. 그러므로 이처럼 LPG 용기용 밸브의 각부의 마멸 및 결함을 줄이기 위해서는 밸브의 제작시 보다 정밀한 가공과 조심스러운 취급, 그리고 정확한 조립이 이루어져야겠다.

5.참고문헌

1. 김청균, "트라이볼로지", 형설출판사, 2006 pp 58~62
2. 조승현, 김청균, "용기용 밸브의 핵심부품인 O-링의 안전성 및 내구수명에 관한 해석적 연구", 에너지, 가스, 기후변화학회 연합 춘계 학술대회, 2006, pp 215
3. "한국 산업규격 KS B6214 고압 가스 용기용 밸브" 한국표준협회, 2005
4. Robert L. Norton, "Machine Design" Prentice Hall, 2002 pp 518~521