



LPG 용기 밸브용 O-링의 누설안전성에 관한 해석적 연구

†김청균 · 김도현

홍익대학교 기계시스템디자인공학과
(2007년 5월 18일 접수, 2007년 6월 8일 채택)

Numerical Study on the Leakage Safety of O-rings for a LPG Cylinder Valve

†Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 18 May 2007, Accepted 8 June 2007)

요 약

본 논문에서는 밸브몸체와 밸브스템 사이의 사각그루브에 설치한 두 개의 O-링에 대한 누설 안전성을 해석한 결과를 제시하고 있다. O-링시일의 누설 안전성에 대한 해석은 압축률과 LPG 가스압력의 변동에 따라 발생하는 누설 안전성을 유한요소해석 프로그램 MARC로 계산하였다. FEM 해석결과에 따르면, LP 가스 충전압력 8 kg/cm²에서 안전면의 안전한 작동압력 상한치 24.8 kg/cm²에 이르기까지 압력하중을 압력용기 안전기준에 의거 계산한 결과는 안전한 것으로 나타났다. 다만, 두 개의 O-링의 안전성을 충분히 확보하기 위해서는 O-링소재의 시효경화 효과를 고려하는 것이 바람직하다.

Abstract – This paper presents the leakage safety of two O-rings, which are located at the rectangular groove between a valve body and a valve stem. The leakage safety analysis of O-ring seals has been computed as functions of a compression set and a liquefied petroleum gas pressure of a LPG cylinder using a FEM program, MARC. The FEM computed results indicate that the loads from the filling pressure of 8 kg/cm² to the upper limit of the safety valve, 24.8 kg/cm² work safely according to the pressure vessel code. But two O-rings should consider the aging effects for an increased safety of the o-ring.

Key words : O-ring, Leakage safety, LPG, LPG cylinder, LPG valve, FEM1

I. 서 론

액화석유가스(liquefied petroleum gas: LPG)는 휘발성이 높은 탄화수소 계열의 프로펜, 프로판, 부텐, 부탄 등으로 구성된 액상 혼합물로 1960년에 휴대용 고급연료를 시작으로 취사용 연료로 널리 사용되고 있다. 1970년대의 두 차례 석유파동을 거치면서 LPG는 가정이나 사업장의 주요가스 연료로 보급되면서 대도시의 대기환경 개선에 큰 기여를 하였다. 우리나라는 1980년대 후반에 LNG 도시가스 공급배관망이 전국을 커버하면서 대부분의 도시에는 도시가스를 사용한 취사와 난방이 본격화되었고, 그 결과로 LPG 사용량은 서서히 줄어들었다. 현재 취사용 LPG는 LNG 배관망이 깔리지 않은 지역을 중심으로 LPG 용기(13 kg 이하, 13 kg,

20 kg, 50 kg 등)에 담아서 수요자에게 공급하는 서민연료로 전락한지 오래되었다.

배관망으로 안정되게 공급하는 LNG에 비해 LPG는 연료를 안전하게 저장하고 이동시킬 수 있는 강재원통(steel cylinder)을 제작한 LPG 용기(Fig. 1 참조)는 일종의 고압가스 안전용기이다. LPG 용기에는 액체의 LP 가스를 8~9 kg/cm²의 고압으로 충전하여 공급한다. 용기에 저장된 고압가스 LPG는 연료를 외부로 방출하여 연료를 안전하게 태우는 개폐작용을 할 수 있도록 밸브를 용기의 네크링(neck ring)에 설치한다. Fig. 1은 LPG를 안전하게 저장하고 운송하기 위한 용기와 이 용기의 상단부에 개폐밸브를 설치하여 밸브패킹(valve packing)과 밸브시트에 의해 연료의 방출을 차단하거나, 또는 연료를 외부로 안전하게 공급하기 위해 개방하는 개폐밸브를 보여주고 있다.

밸브패킹에 연결된 밸브스템(valve stem)의 원주면에

†주저자:chungkyunkim@empal.com

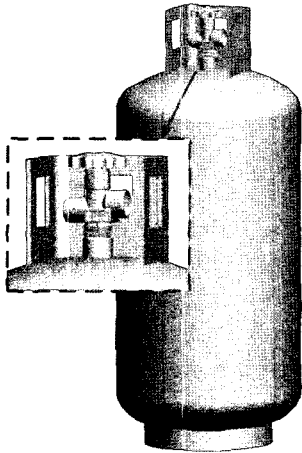


Fig. 1. LPG cylinder and valve assembly.

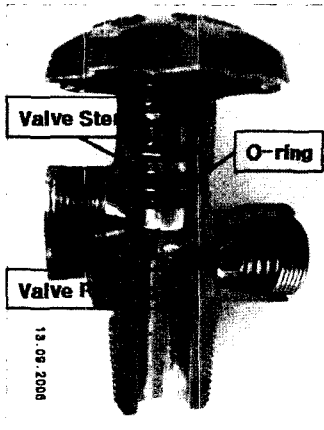


Fig. 2. Two O-rings for a LPG valve.

는 밸브시스템의 상하이동에 따른 밸브몸체와 밸브스템 사이의 간극을 따라서 누출되는 LP 가스를 완벽하게 차단하기 위해 Fig. 2에서 보여준 것처럼 두개의 O-링을 축방향으로 설치한다. LPG 밸브는 축방향의 가스누출을 차단하기 위해 신축성이 우수하고 저렴한 NBR (acrylonitrile butadiene rubber) 고무소재로 제조한 O-링을 사용한다.

본 연구에서는 LPG 용기 밸브용 LP 가스 누출을 차단하기 위해 사용하는 NBR 계열의 고무시일에 대한 응력거동 및 누설안전성을 비선형 유한요소법으로 해석하고자 한다. 여기서 LPG 용기에 작용하는 가스압력과 O-링의 간섭량의 변동조건은 중요한 해석변수이다.

II. 해석조건 및 데이터

LPG 용기용 밸브의 가스누설 안전성은 O-링의 간섭

량 설계조건에 의해 크게 영향을 받는 것은 물론이고, NBR 소재의 내구수명과의 밀접한 관계가 있다. 용기에는 8-9 kg/cm²의 LPG가 충전되지만, LPG 용기는 화염이나 복사열에 의해 용기의 온도가 상승하거나 용기의 낙하에 의한 충격, 고의적인 용기 훼손에 의한 LP 가스의 급격한 팽창이 발생한다. 이러한 위험상황에서 안전밸브(safety valve)의 안전한 작동은 문제가 없지만, 그렇지 못할 경우는 O-링의 파손 등에 의해 LPG 용기의 폭발 가능성을 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 밸브의 안전밸브가 안전하게 작동하기 전까지 밀봉 안전성을 확보할 수 있는 O-링의 작동성을 고찰하고자 한다. O-링의 누설 안전성을 담보할 수 있는 밀봉소재, 설계조건 및 해석조건에 대해 기술하기로 한다.

2.1. 밀봉소재 NBR

LPG 용기용 밸브의 O-링 소재는 LPG와의 적합성이 우수하고 상온에서 탄성변형 거동성이 뛰어난 NBR을 사용한다. NBR 소재는 탄성변형 거동성이 우수하므로 압축조건에 대한 내구 안전성이 좋고, 소재의 작동온도는 -40°C~120°C로 비교적 저온부터 고온에 이르기까지 안전하게 사용할 수 있다[1,2].

NBR은 아크릴로니트릴과 부타디엔의 유화공중합에 의해 제조된 탄성 중합체 소재로 휘발유, 광유, 연료유, 에탈렌글리콜 등에 대한 우수한 저항력으로 나타내므로 밸브용 O-링을 제조하는데 많이 사용하고 있다. NBR은 아크릴로니트릴(acrylonitrile)의 함유량에 따라 고·중·저 니트릴로 분류하는데, 아크릴로니트릴의 함유량이 많으면 인장강도가 높아지고, 연료나 기름에 대한 저항력은 향상된다. 반면에 아크릴로니트릴의 함유량이 적으면 탄성이 증가하고 낮은 온도에서 유연성이 높아지는 특성을 갖는다. 탄성 중합체에서 NBR은 가격이 대단히 저렴하면서도 저온이나 상온에서 우수한 탄성을 유지하므로 LP 가스 제품에 널리 사용한다.

2.2. O-링의 설계조건

LPG 용기용 개폐밸브의 표준규격은 KS B 6212[3]에 명시되어 있다. 밸브에 작용하는 LP 가스압력은 KS 규격에서 제시한 LP 가스의 압력 상승으로 인해 안전밸브가 터지는 최대압력조건까지 고려하여 밸브용 O-링의 안전성을 체크하였다. 즉, LPG 용기에는 8-9 kg/cm²의 가스압력으로 충전하고, LPG 용기에 작용한 급격한 온도상승으로 발생될 수 있는 안전밸브의 최대작동압력 24.8 kg/cm²까지 안전성을 담보할 수 있도록 O-링의 밀봉안전성을 비선형 유한요소 해석기법으로 고찰하였다.

LPG 충전소에서 용기에 충전하는 압력은 보통 8~9

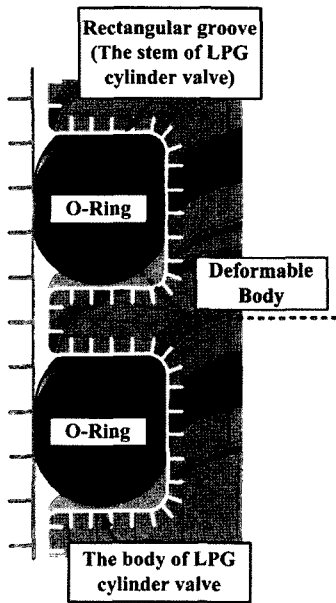


Fig. 3. Assembled two O-rings.

kg/cm²의 고압을 유지하지만, KS기준에 의거 LPG 용기용 밸브의 누설가스 압력시험은 18.6 kg/cm²에서 기밀 안전성을 검사한다. 따라서 본 연구에서는 LPG 용기용 밸브의 O-링에 대한 밀봉 안전성을 해석하기 위해서 사용한 LP 가스 압력은 최저충전압력 8 kg/cm²에서 가스폭발을 안전하게 제어하는 안전변의 최고작동 압력 24.8 kg/cm²까지를 고려해 가스누출 안전성을 FEM으로 해석하여 고찰하였다.

2.3. 유한요소 해석조건

Fig. 3은 LPG 용기용 밸브 O-링에 대한 유한요소해석 모델을 나타낸 그림이다. FEM 해석을 위한 모델링은 O-링과 밸브스텝의 사각그루브, 그리고 LPG 용기용 밸브의 몸체에 대하여 간략하게 수행하였다. 탄성변형 거동특성이 대단히 우수한 NBR로 제조된 O-링을 제외한 다른 부분은 황동소재로 제작되었다. 따라서 O-링은 황동소재에 비해 유연한 변형체로, 황동으로 제작된 밸브몸체는 강체로 각각 가정하고 O-링의 접촉변형 거동특성을 고찰하였다.

FEM 해석의 신속성과 편의성을 위해 O-링을 2차원 축대칭 모델로 정의하였고, 모든 요소들은 축대칭 4각요소를 사용하였다. FEM 모델링과 강도해석은 상용프로그램 MSC/MENTAT과 MSC/MARC[4]를 사용하였다.

Fig. 4는 FEM 해석을 위한 LP 가스 하중의 경계조건 적용단계를 나타낸 것이다. 먼저 밸브스텝의 사각그

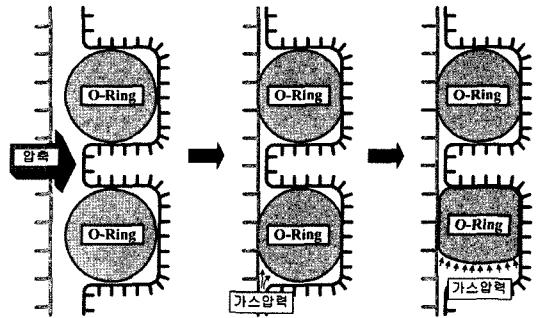


Fig. 4. Boundary conditions for a compression set and a LP gas pressure application process.

Table 1. Compression data as functions of a interference between a valve body and a O-ring.

Interference	Compression set, %
0.2	7.407
0.25	9.259
0.3	11.111
0.35	12.963
0.4	14.815
0.45	16.667

루브에 설치된 O-링이 밀봉간극(sealing gap)을 따라서 일정거리 내려오면 O-링의 접촉면이 압축된 후에 LP 가스에 의한 생성된 가스압력이 O-링의 측면에 동시에 작용하도록 하여 O-링 표면에서 발생하는 접촉면압을 예측하였다. 또한 O-링의 밀봉 안전성을 파악하기 위해 O-링에 발생하는 탄성응력과 변형률을 함께 관찰하였다. LP 가스는 O-링의 표면에 수직방향으로 작용하며, O-링의 밀도는 높다고 가정하여 LP 가스 투과율을 무시하였다. 그리고 각 소재 사이의 마찰계수는 0.4로 일정하다고 가정한다.

거동해석의 경계조건으로 O-링(φ2.7 mm)에 작용되는 LP 가스 압력은 8~24.8 kg/cm²의 범위에 있다고 가정한다. 또한 O-링의 누설 안전성은 O-링을 삽입하여 조립하는 사각그루브와 밸브몸체 사이의 밀봉간극 압축률 정도에 따라 밀봉 접촉면압과 O-링의 거동특성이 크게 달라지므로 압축률을 또 하나의 중요한 설계변수로 사용하였다. Table 1은 밸브에 설치된 O-링의 간섭량에 대한 압축률을 제시한다.

III. 해석결과 및 고찰

LP 가스의 충전압력은 보통 8~9 kg/cm²이고, LPG는

밸브의 차단기능을 담당하는 밸브패킹과 밸브시트 사이에 설치된 나일론-66 소재의 탄성접촉 면압에 의해 밀봉된다. 반면에 밸브를 열어서 LP 가스를 외부로 방출하는 경우는 밸브의 개구부를 따라서 정상적으로 송출되지만, 일부는 밸브의 상단부에 설치된 O-링을 통과하여 대기중으로 누출하려 한다. 이러한 축방향의 가스 누출은 Fig. 3에서 보여준 두 개의 O-링에 의해 완벽하게 차단되어야 한다.

즉, LP 가스가 송출구를 통해 정상적으로 방출하는 과정에서 LP 가스는 O-링을 설치한 미세간극을 타고 대기중으로 누출하려 한다. 또 다른 사례는 용기에 LPG를 저장한 상태에서 O-링의 축방향을 따라 누출하려는 경우로 나일론-66으로 제조한 밸브패킹 표면이 손상되면서 가스의 누설이 발생한다. 이러한 누출을 차단하는 과정에서 O-링에 걸리는 접촉응력 거동특성 결과를 Figs. 4, 5, 6에서 각각 제시하고 있다. 결국 용기에 저장된 LP 가스는 충전압력과 O-링의 간섭량에 정도에 따라 O-링을 거쳐 외부로 누출하게 된다.

안전하게 저장된 LPG 용기의 충전압력 8 kg/cm², 밸브의 기밀압력 18.6 kg/cm², 밸브의 안전변 작동압력 24.8 kg/cm²으로 각각 저장된 상태에서 LP 가스가 외부로 누출하려 할 경우 O-링에 걸리는 접촉응력 분포도를 Fig. 5에서 보여준다. Fig. 5(a)의 해석결과에 의하면, 충전압력에서 누출하려 할 경우에 O-링에 걸리는 Cauchy 집중응력은 충전압력이 작용하는 아래쪽 O-링의 반대쪽으로 작용하고 모든 누출 가스압을 차단하기 때문에 위쪽 O-링은 단지 압축률에 의한 압축거동으로

인해 밀봉거동을 하는 형태로 나타났다.

밸브의 기밀시험 안전성을 점검하기 위한 Fig. 5(b)의 해석결과에 의하면, 18.6 kg/cm²의 가스누출 압력에서는 충전압력 8 kg/cm²의 경우보다는 아래쪽 O-링에서 높은 집중응력이 발생하지만, 위쪽 O-링은 가스누출에 의한 영향을 받지 않으므로 8 kg/cm²의 경우와 같은 거동패턴을 보여준다.

밸브의 안전변 작동압력 24.8 kg/cm²이 작용하는 경우에 대한 O-링의 응력분포 상태는 18.6 kg/cm²의 경우보다는 아래쪽 O-링에서 보다 높은 집중응력이 발생하지만, 위쪽 O-링은 아래쪽 O-링에서 가스누출을 완벽하게 차단하므로 누출에 의한 영향은 없는 것으로 나타났다.

결국 용기용 밸브의 압축거동은 누출하려는 가스압을 모두 아래쪽 O-링에 의해 차단되므로, 위쪽 O-링은 단지 초기의 압축률에 의해 밀봉력이 발생되고 있음을

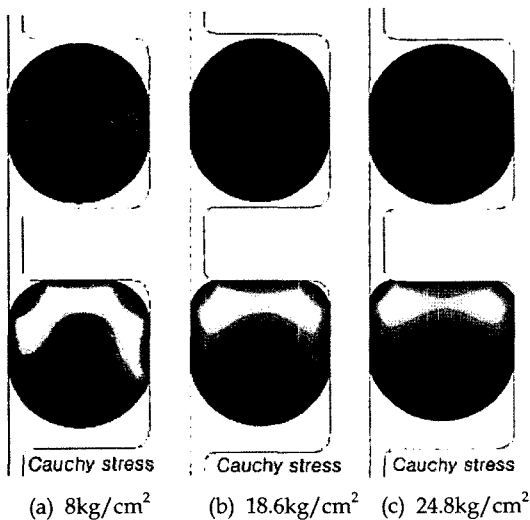


Fig. 5. Cauchy stress distributions as a function of a LP gas pressure.

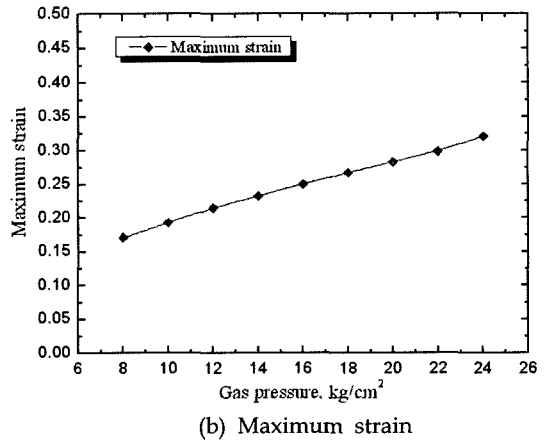
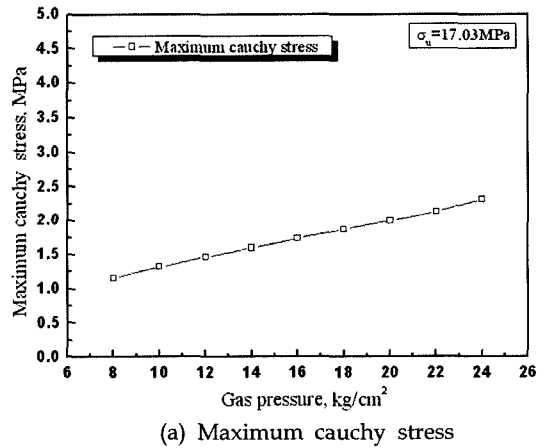


Fig. 6. Maximum stress and strain against a LP gas pressure of a LPG cylinder.

알 수 있다. 즉, 아래쪽 O-링의 가스누출 차단성은 100% 발휘되지만, 위쪽 O-링은 단지 예비적인 밀봉기구로 작동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 O-링의 내구 안전성을 확보하기 위해서는 아래쪽 O-링과 위쪽 O-링의 밀봉거동 안전성을 분담하는 설계기술이 필요하다.

Fig. 6(a)는 LPG 용기에서 발생하는 LP 가스 압력이 누출하려고 아래쪽 O-링에 모두 작용한다고 가정할 경우에 각각의 누출압력에 대해 O-링에 걸리는 최대접촉 응력은 1.5~2배 정도 높게 나타났기 때문에 가스누설 안전성은 확보된 것으로 판단된다. LPG 용기의 충전압력이 8~9 kg/cm²으로 낮을 경우는 누설안전성이 2배 이상으로 높고, 24.8 kg/cm²의 높은 압력이 작용할 경우에 O-링의 Cauchy 접촉면압은 2.3 MPa로 안전하다. 그러나 이것은 낮은 압력이 작용하는 경우에 비해 1.5배 정도로 누설안전성은 상대적으로 떨어지지만 LP 용기의 가스압력이 높을수록 안전변에 의한 외부방출이 작동하므로 LPG 용기의 안전성은 확보된다. Fig. 6(b)는 O-링에 걸리는 최대변형률을 나타낸 결과로 NBR의 항복 변형률에 비해 낮게 발생하고 있어 O-링의 거동안정성에는 문제가 없음을 확인하는 데이터이다.

LPG 용기에 O-링을 설치하기 위해서는 Fig. 4에서 보여준 것처럼 일정한 압축률을 주어야 O-링의 접촉면에서 탄성반발력에 의해 밀봉력이 생성된다. Fig. 7은 O-링을 사각그루브에 설치하기 위해 일정한 압축률로 조립한 상태에서 O-링에 걸리는 접촉응력과 변형거동 분포도를 보여주고 있다. 즉, 밸브의 O-링에 압축률만

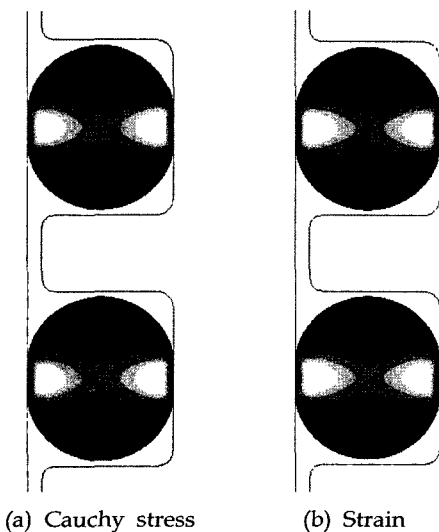
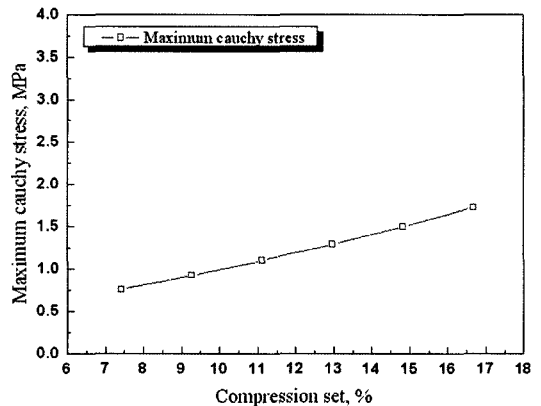


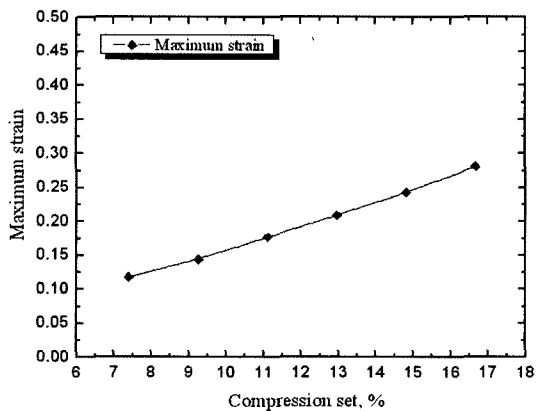
Fig. 7. Stress and strain distributions of two O-rings for a given compression set.

을 제공한 상태에 대해 해석한 Fig. 7의 결과에 의하면 LP 가스 누출압력을 가하지 않았기 때문에 항상 대칭적인 변형거동을 나타낸다.

Fig. 8은 O-링을 안전하게 설치하는 사각그루브와 밸브몸체 사이의 축방향을 따라서 형성된 밀봉간극에 채워지는 O-링의 최대압축률 변동을 보여준다. 여기서 밀봉소재에 걸리는 밀봉접촉응력과 변형률 거동특성을 제시한 FEM 해석결과에 의하면, O-링에 걸리는 응력과 변형률 선도가 선형적이다. 이것은 O-링 소재의 사용범위가 아직은 탄성변위 이내에 있다는 해석 데이터이다. 본 설계에서 제시한 밀봉 압축률 설계치는 7.05% 이고, 이 압축률에 대해 발생하는 최대접촉응력은 1.1 MPa로 LPG 용기에서 정상적으로 발생하는 LP 가스 압력은 충분히 차단할 수 있음을 보여준다. 또한 16.6%의 최대압축률을 고려한 O-링 설계에서는 2.05 MPa의 최대접촉응력을 발생시키므로 O-링의 탄성변형



(a) Maximum cauchy stress



(b) Maximum strain

Fig. 8. Maximum stress and strain against a compression set of O-rings.

거동범위 이내에서 작동하는 것으로 보아 O-링의 밀봉 안전성은 우수한 것으로 판단된다.

본 연구에서 NBR로 제조된 O-링에 작용하는 LP 가스 압력이 충분한 시간을 갖고 서서히 작용할 경우는 LPG 용기밸브용 O-링의 안전성은 충분히 확보되었다 할 수 있다. 문제는 LP 가스 압력이 갑자기 상승하여 설치된 압축 O-링에 작용하거나 또는 O-링 소재의 시효작용으로 NBR의 탄성거동 특성이 약화되었을 경우는 상기에서 제시한 O-링의 최대접촉응력이나 신축성이 더 이상 보장받을 수 없기 때문에 O-링의 누설안전성은 담보하기가 어렵다. 따라서 O-링은 일정기간 지나면 불가피하게 O-링을 신품으로 교체하여 소재의 탄성변형 거동안전성을 항상 확보하고 있어야 축방향에 설치한 두 개의 O-링에 대한 누설안전성은 확보될 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 LPG 용기 밸브용 NBR 소재 O-링에 대한 LP 가스 누설안전성에 대한 유한요소 수치해석 결과를 제시한다. 밸브에서 O-링은 두개의 사각그루브가 밸브시스템에 설치된 두 개의 O-링으로 LP 가스 누출을 완벽하게 차단한다. 현재의 O-링은 초기의 간섭량 설계조건에 LP 가스의 충전압력, 가스누출에 대한 기밀안전기준, LPG 용기에 갑작스런 압력상승이 발생하면, 모든 시일장치는 안전하게 최대한 견디다가 LPG 용기용 밸브에 설치된 안전변의 긴급작동에 의해 LPG

용기는 안전성을 회복하게 된다.

FEM 해석결과 의하면, 8~24.8 kg/cm²의 LP 가스 누출압력 범위에서는 아래쪽의 O-링은 초기의 압축률이나 LP 가스 압력에 의한 집중응력에 의해 가스누출을 충분히 차단하지만, 위쪽에 설치한 O-링은 단지 초기의 압축률에 의해 가스누출을 차단하는 것으로 나타났다. 따라서 밸브에 설치한 두 개의 O-링은 가스누출을 충분히 차단할 수 있지만, 소재의 시효경화 현상에 의한 내구성은 별도로 검증되어야 O-링의 사용수명 품질인증 제도도입이 가능 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] Bhowmick, A.K. and Stephens, H.L., "Handbook of Elastomers", 2nd edition revised and expanded, M. Dekker, pp.785-790, pp.809-811, (2001)
- [2] R.S. Rivlin, "Large Elastic Deformations in Rheology ; Theory and Application", Academic press, New York, Vol. 1, (1956)
- [3] KS B 6212, 액화석유가스 용기용 밸브, 한국표준협회, (2006)
- [4] MARC Analysis Research Corp., California, USA, (1994)