KIGAS Vol. 11, No. 1, March, 2007
(Journal of the Korean Institute of Gas)

LPG 용기용 밸브패킹의 누설안전에 관한 수치적 연구

†김청균 · 김태환
홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과
(2007년 2월 18일 접수 2007년 3월 23일 채택)

Numerical Study on the Sealing Safety of a Valve Packing in a LPG Cylinder

†Chung Kyun Kim · Tae Hwan Kim
Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 18 February 2007, Accepted 23 March 2007)

요 약

본 본문에서는 LPG 용기용 밸브의 개폐과정에서 발생하는 밸브패킹과 밸브시트의 상대접촉 마찰작용에 따른 밀봉성에 대한 FEM 해석결과를 제시하고 있다. 개폐용 밸브의 밀봉작용은 나일론-66으로 제조한 디스크 형상의 밸브패킹이 원형 파이프의 밸브시트 단면을 막아 LP 가스의 외부 송출을 차단하면서 완료된다. 밸브패킹은 밸브시트에 대하여 평면으로 접촉밀봉을 하는 경우와 원형홈의 둥근접촉 형상에 대한 밀봉 압착력을 확보하는 두 가지가 있다. FEM 해석 및 실험적 연구결과에 의하면, 밸브패킹을 사용하기 이전의 평면접촉 밀봉 작용력은 4.9 MPa로 높지만, 밸브를 사용한 이후의 원형홈 접촉 밀봉력은 4.4 MPa로 약간 낮게 나타났다. 그러나 이들 최대응력은 나일론 소재의 항복응력 83 MPa에 비하여 대단히 낮은 값이기 때문에 현재의 개폐밸브용 패킹은 과도하게 설계되었다 할 수 있다.

Abstract – In this paper, the FEM result has been presented for a sealing safety between a valve packing and a valve seat during a open and close operation in a LPG cylinder. The sealing operation of a LPG valve is completed when the valve packing in which is made by a nylon-66 polymer is to stop a LP gas flow, which flows out from the outlet of a brass pipe in a LPG cylinder. The contact sealing mechanism of the valve may be classified by a flat contact of an unused valve packing and a circular groove contact of an used valve packing in a current LPG valve. Based on the FEM and experimental investigations, the sealing force, 4.9 MPa for a flat contact mode of the unused valve packing is a little high compared to that of the used valve packing, which shows a circular groove contact geometry against a valve seat. But these sealing pressures for two contact modes are very low compared to the ultimate strength 83 MPa of the nylon-66 and this may be designed with a excess strength of the valve.

Key words : Valve packing, Valve seat, Nylon-66, Contact closing pressure, Flat contact, Circular groove contact, LPG cylinder

I. 서 론

1964년에 국내에서 액화석유가스(LPG)를 처음 생산하면서 그동안 취사용 연료로 많이 사용하던 석탄과 석유를 서서히 대체하기 시작하였다. 가스연료인 LPG는 완전연소에 가깝도록 태우기 때문에 청정에너지로 잘 알려져 있고, LNG를 도입하기 이전에는 고급연료로 귀한 대접을 받았으나 지금은 서민들이 많이 애용하는 연료로 바뀌었고, 같은 가스연료인 LNG의 보조 에너지원으로 자리를 잡아가고 있다. 이러한 차이점은 LPG와 LNG의 공급가격과 소비자 가격을 보면 확연하게 알 수 있다. 현재 LNG의 국내 공급가격은 585.20원/m^3, 프로판은 680원/kg으로 16.2%의 차이가 나지만, 최종 소비자 가격은 LNG의 경우 634.23원/m^3, LPG는 1,223원/kg으로 92.8%로 격차가 크게 벌어진다[1]. 결국 LPG와 LNG의 도입가격은 약간의 차이가 있지만 소비단계에서는 유통망, 관리비용 등의 차이로 5.7배나 격차가 크게 벌어진다. LPG는 도시가스를 공급받지 못하는 서

†주저자:chungkyunkim@empal.com

민층에서 많이 사용하고 있다는데 문제점을 제기하는 것이다.

석탄이나 석유는 불완전 연소물질 배출에 따른 환경오염, 운반과 사용상의 어려움, 연탄가스 중독사고 등의 문제로 대도시에서 LPG 사용량이 급속하게 팽창하였지만, 1986년에 LNG가 도입되고 특히 도시가스 전국배관망이 확충되면서 LPG 사용량은 정체로 이어졌다. 최근에는 신재생 에너지 산업의 집중육성으로 LPG 산업의 어려움은 더욱 가중되고 있다. 특히 2000년대에 들어서 취사용 LPG 소비량은 눈에 띠게 정체되었고, 2001년도의 LPG 가격 자유화가 시행되면서 LPG 업계의 가격경쟁은 더욱 심해졌고, 정부의 안전강화 정책은 LPG 산업의 설비투자나 기술개발을 어렵게 하였다. 다만 LPG 차량의 지속적인 증가와 차량용 휘발유, 경유, LPG의 가격비율을 100:85:50으로 조정한 정부정책이 시행되면서 부탄가스 판매량은 지속적으로 증가하는 현상으로 나타나 그나마 다행이다[2].

LPG 연료를 안전하게 저장하고 간편하게 운반하기 위해서는 LPG 고압용기가 필요하다. 압력용기에 액상의 LP 가스를 충전하고 저장된 LPG를 외부로 방출하여 가스연료로 사용하기 위해서는 개폐용 안전밸브가 필요하다. 나사식의 스핀들 축에 연결된 밸브패킹을 상하로 이동시켜 밸브몸체의 일부에 가공된 밸브시트에 압착하면서 LP 가스의 외부방출을 차단하고, LPG를 용기에 안전하게 저장한다. 반면에 LP 가스를 사용하고자 할 경우는 밸브를 열어서 LP 가스의 안전한 방출과 방출량 조절을 나일론-66으로 제조한 디스크 형상의 밸브패킹에 의해 이루어진다.

따라서 본 연구에서는 사용하기 이전의 평면접촉 형상을 유지하는 밸브패킹과 일정기간 사용하기 때문에 발생하는 영구변형 원형홈 자국을 갖는 밸브패킹에 대하여 밀봉압력과 변형거동을 중심으로 밀봉특성을 고찰하고자 한다.

II. 개폐밸브의 작동원리

2.1. 밸브구조

Fig. 1의 LPG 용기용 개폐밸브는 용기와 체결하기 위한 3/4" 나사부, LPG를 외부로 송출하기 위한 호스 연결 LP 가스 방출구, LPG 용기의 이상압력을 방출하기 위한 안전변, LP 가스의 저장과 방출을 개폐·조절하기 위한 밸브패킹, 스핀들 축을 따라서 누출하려는 가스를 차단하기 위한 O-링, 밸브패킹에 개폐 및 조절작동을 원활하게 제공하기 위한 핸드휠 등으로 구성된다.

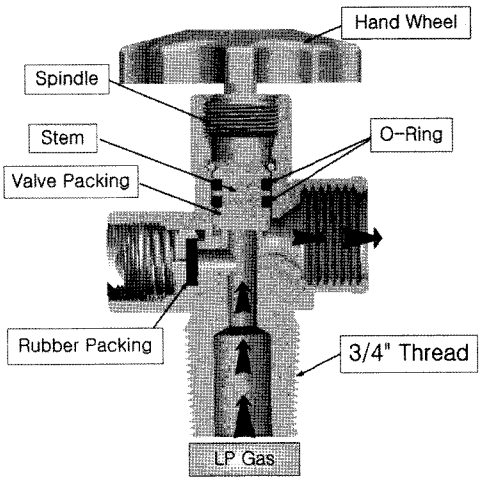


Fig. 1. Valve sealing units for a LPG cylinder.

LPG 용기의 상단부에 장착된 개폐밸브는 압력용기와 3/4" 나사에 의해 완벽하게 체결되고, 상부의 핸드휠을 돌려서 디스크 형상의 밸브패킹을 밸브몸체의 선단부, 즉 파이프 형상의 밸브시트에 압착시켜 저장 LP 가스의 임의누출을 차단하는 역할을 담당한다.

밸브 측면부에는 스프링-NBR 접촉면 방식의 안전변이 설치되어 LPG 용기의 정상압력이 20.8~24.8 kg/cm^{2}의 이상압력으로 상승하면 LPG 용기의 강도는 위험해지기 때문에 LP 가스를 즉시 방출한다. 안전변은 어떠한 상황에서도 위험성을 나타내는 설정압력에 도달하면 LP 가스를 즉시 방출하는 반복성을 확보하고 있어야 한다.

또한 LP 가스를 사용하기 위해 밸브패킹을 개방하여 저장연료를 정상적으로 방출하는 과정에서 밸브패킹에 연결된 스템과 스핀들 축을 타고 외부로 누출하려는 LP 가스를 밀봉하기 위해 NBR로 제조한 두개의 O-링을 설치한다.

2.2. LP 가스의 충전과 방출

LP 가스를 외부로 안전하게 방출하기 위해서는 개폐밸브의 상단부에 장착된 핸드휠을 돌려서 스핀들과 스템의 연결 하단부에 부착된 밸브패킹을 위로 올리면 밸브시트에 대하여 압착하고 있던 접촉이 떨어지면서 시트의 가스 방출구는 열린다. 따라서 LP 가스는 방출구를 통해 외부로 빠져나가고, LP 가스의 일부는 스템부를 따라 누출하려 하기 때문에 이것을 두개의 O-링에 의해 차단한다. 동시에 안전변을 통해 외부로 방출하려는 LP 가스는 NBR 고무패킹에 의해 차단되므로 가스는 오로지 방출구만을 통해 안전한 송출한다. 반면에

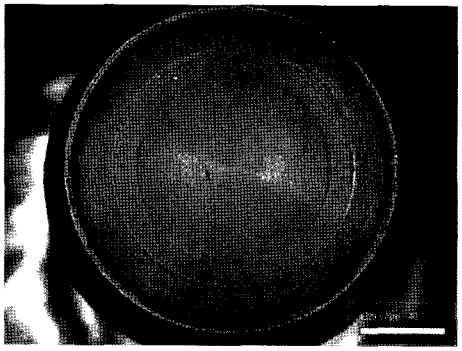


Fig. 2. Grooved contact geometry of an used valve packing.

송출하고 있는 LP 가스를 차단하기 위해 핸드휠을 닫으면 위로 올라가 있던 밸브패킹은 아래로 내려와 밸브시트와 압착되면서 LP 가스의 송출은 중단된다.

LP 가스의 송출과 차단이라는 가스밸브의 반복적인 개폐작용은 나일론-66으로 제조된 초기의 디스크 평면은 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 밸브시트의 송출구 형상처럼 원형홈의 소성변형을 일으켜 영구자국으로 남게된다. 밸브패킹의 초기 접촉면 형상은 평면(flat surface)인 것에 비해 밸브패킹을 어느 정도 사용하게 되면 접촉형상이 원형자국으로 변형되기 때문에 이에 대한 LP 가스의 누설안전성에 대한 관심을 갖게 된다.

III. FEM 수치해석

3.1. 해석모델

Fig. 3은 개폐밸브에서 밸브패킹과 밸브시트의 접촉형상을 보여준다. 즉, LP 가스를 방출하는데 필요한 밸브패킹을 원형개구의 시트에 대하여 축대칭으로 평면접촉 형상을 나타내고 있다. 밸브패킹과 밸브시트에 가해진 밀봉압력에 의해 발생하는 접촉응력 및 변형률 특성을 간편하게 해석하기 위해 2차원 축대칭의 4각요소 모델로 정의하였고, FEM 해석을 위해 사용한 프로그램은 MSC/MENTAT과 MSC/MARC이다[3].

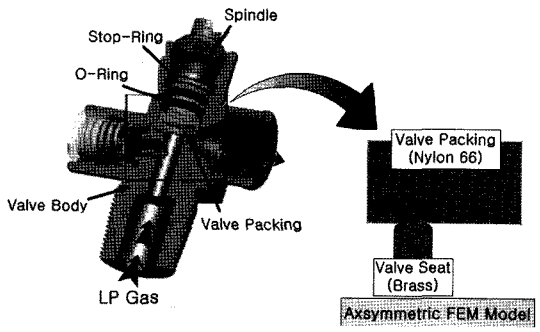


Fig. 3. LPG valve and contact sealing mode of a valve packing against a valve seat for a FEM analysis.

3.2 해석조건 및 소재특성

밸브시트의 개구부를 막아 LP 가스의 안전한 저장을 위해 나일론-66으로 제조한 밸브패킹의 접촉면에 110 N의 밀봉력을 핸드휠로 가하여 LP 가스의 누출을 차단한다. 밸브패킹과 황동시트의 접촉면 형상에 따른 접촉응력 및 변형률을 해석하기 위해 사용한 마찰계수는 0.3으로 고체마찰 접촉조건을 유지토록 하였다[4].

LPG 용기의 안전압력은 18.6 kg/cm이지만, 주변의 복사열이나 화재 또는 외부의 충격력에 의해 내부압력이 상승하여 20.8~24.8 kg/cm^{2}에 도달하면 안전변의 작동으로 LP 가스는 외부로 즉시 방출되면서 고압용기는 안전해진다. 따라서 정상적인 밸브패킹-밸브시트의 접촉면에 가해지는 LP 가스의 최대압력 24.8 kg/cm까지도 작용할 수 있다. 추가하여 압력용기의 수압시험 안전조건에 육박하는 32 kg/cm의 높은 압력에 대해서도 밀봉안전성을 해석하였다.

밸브패킹의 소재는 거동특성, 내마모성이 우수하고 강도 높은 나일론-66을 사용하고, 밸브시트는 밸브몸체의 황동소재를 그대로 사용하여 LP 가스 개구부와의 밀착성과 내마모성을 확보토록 하였다[5]. 나일론-66의 항복강도는 83 MPa로 황동 124 MPa의 67% 수준이지만 폴리머 소재로는 대단히 높은 강도이다. LPG 용기용 밸브패킹은 강도와 인성이 높은 폴리머를 사용해야 가스차단 및 내구성을 확보할 수 있다.

IV. 해석결과 및 고찰

4.1. 접촉 압착력 실험결과

밸브패킹에 가해지는 압착력을 측정하기 위해 Fig. 4에서 제시한 밸브패킹의 원형홈 깊이의 평균 측정치 0.1 mm를 기준으로 만능시험기(UTM)에서 압축강도를

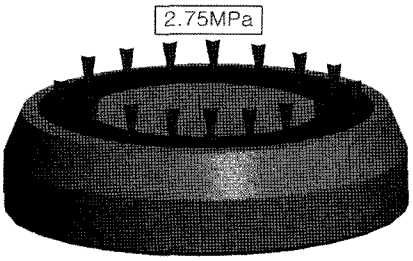


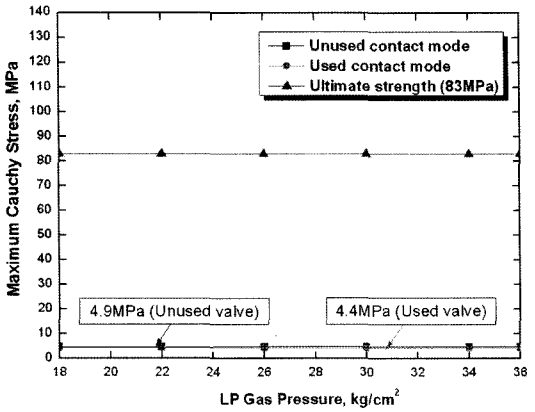
Fig. 4. Contact closing pressure 2.75 MPa for the given sealing depth 0.1 mm, which is measured from the circular groove for an used valve packing.

측정하였다. 즉, 밸브패킹 소재로 사용하는 나일론-66 소재에 변위량 0.1 mm이 발생하도록 공급된 압축하중을 측정하였다.

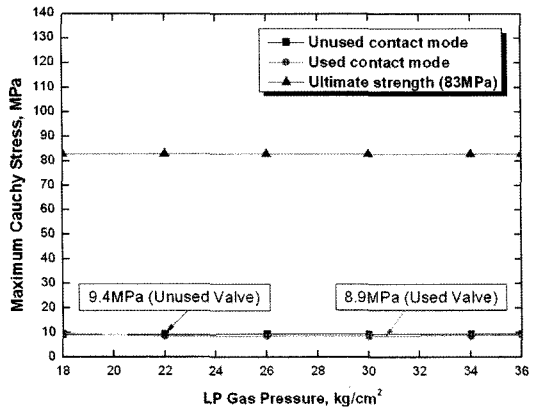
나일론 소재에 0.1 mm의 변형량을 발생시키기 위해서는 초기에 220 N의 높은 하중을 가해야 하지만, 일정시간 경과하여 소재의 탄소성 변형이 안정적으로 진행되면 110 N의 하중, 즉 2.75 MPa(Fig. 4에서 40.1 mm^2의 밀봉접촉면적)의 압착압력에서 안정화를 이룬다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 밀봉압착을 위해 접촉하중 110 N을 가한 작동조건에 대하여 해석하고, 밀봉특성을 고찰하였다.

Fig. 5는 밸브패킹의 밀봉 접촉면(평면 및 원형홈의 두 가지)에 가해지는 초기하중을 110 N과 220 N의 두 가지 경우에 대해 해석한 Cauchy 최대응력을 제시하고 있다. Fig. 5(a)는 패킹밸브에 110 N의 밀봉 압착력을 가할 경우 밸브를 사용하기 전의 밸브패킹 평면접촉에서는 평균 4.9 MPa의 Cauchy 최대응력이 발생하지만, 사용한 후의 밸브패킹 원형홈 접촉을 하는 경우는 평균 4.4 MPa의 최대응력으로 평면접촉 밀봉의 경우보다는 약간 낮게 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 패킹밸브에 220 N의 밀봉 압착력을 가할 경우, 밸브패킹을 사용하기 이전의 평면접촉에서는 평균 9.4 MPa의 Cauchy 최대응력이 발생하지만, 원형홈 접촉밀봉을 하는 경우는 평균 8.9 MPa의 최대응력으로 평면접촉의 경우보다 약간 낮게 발생하고 있다. 이처럼 해석결과에서 큰 차이를 보여주지 않는 것은 밸브패킹으로 사용된 나일론-66의 압축강도가 높기 때문이다. Fig. 5(b)는 변형거동이 안정화를 이루기 이전의 초기밀봉 압착하중 220 N으로 110 N보다 2배나 증가하였음에도 불구하고 나일론-66의 높은 항복강도는 충분한 안전성을 유지할 것이라는 결과로 귀결된다. 즉, LPG 용기의 작동압력을 최대 36 kg/cm^2까지 공급하여도 사용한 밸브패킹의 원형홈에 작용하는 Cauchy 최대응력은 8.9 MPa로 소재의 항복강도 83 MPa에 비해 9.3% 정도의 안전한 접촉응력이 발생하는 것으로 나타났다.



(a) Contact load of 110N



(b) Contact load of 220N

Fig. 5. Cauchy stress of LPG valve packings as functions of LP gas pressures.

4.2. 밀봉 접촉응력 해석

Fig. 6은 황동 밸브시트와 접촉하면서 밀봉작용을 하는 나일론-66 밸브패킹의 평면접촉(flat contact)과 원형접촉(circular groove contact)의 두 가지 밀봉모드에 대하여 접촉법선응력을 접촉닫힘압력(contact closing pressure)에 대하여 해석한 결과이다. 여기서 계산된 접촉법선응력을 LPG 용기의 충전가스 안전압력, 안전변 작동압력, 수압시험 압력과 비교하여 사용 전의 밸브패

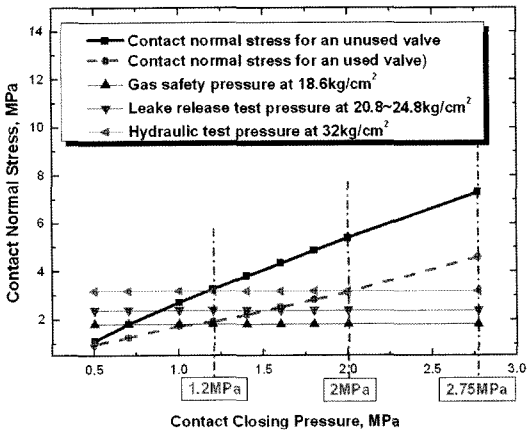


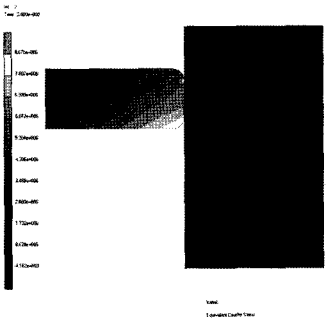
Fig. 6. Contact normal stress for flat contact and circular groove contact modes as functions of closing contact pressures.

킹과 사용 후의 밸브패킹 접촉모드에 대한 밀봉안전성을 고찰하였다.

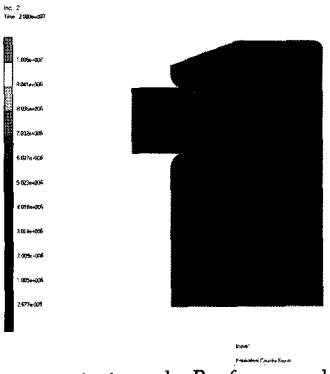
LPG 용기용 개폐밸브에 작용하는 밀봉접촉 법선응력을 해석한 Fig. 6의 결과에 의하면, 평면접촉을 하는 사용 전의 밸브패킹은 선형적으로 변하지만, 사용 후의 밸브패킹은 1.2~2 MPa 구간에서 약간의 비선형적 변화를 한다. 나일론-66 소재에 작용하는 밸브닫힘 접촉하중 110 N(접촉면에 가해지는 닫힘압력으로 환산하면 2.75 MPa)은 소재의 탄성변형 구간에서 작동하고 있다는 것을 의미하고, 원형홈과 접촉하면서 밀봉작용을 하는 사용 후의 밸브패킹은 원형접촉 부근에서 약간의 비선형성을 예상할 수 있다. 해석에서 제시한 결과에 의하면 LP 가스의 누출을 차단하기 위해 너무 큰 밸브닫힘 접촉하중, 즉 접촉닫힘압력을 가하고 있음을 알 수 있다. LPG 용기용 밸브에 작용하는 가장 높은 압력조건이라 할 수 있는 수압시험조건 32 kg/cm^{2}의 경우, 밸브패킹에 걸리는 압착압력은 1.2 MPa이지만 실제로 밸브패킹에 가한 접촉닫힘압력은 2.75 MPa(압착 밀봉력 110 N)으로 2.3배나 높게 가하고 있다는 것이다. 이것은 밸브패킹을 과도하게 압착밀봉한다는 것으로 해석될 수 있다.

사용 후의 밸브패킹은 Fig. 2에서 보여준 것과 같은 원형홈이 생성되고, 여기에 작용하는 접촉법선응력은 사용 전의 평면접촉 법선응력에 비해 전반적으로 낮게 나타났다. 밸브패킹의 가혹한 수압시험 압력조건인 32 kg/cm^{2}의 경우에 공급된 밸브닫힘 접촉하중은 2.0 MPa로 평면접촉의 1.2 MPa에 비해 67%나 증가된 압착압력이다. 그러나 밸브패킹에 가한 실제의 압착압력은 2.75 MPa이므로 아직도 37.5%나 높게 가해지고 있다. 둥근홈에서 접촉밀봉을 하는 경우는 평판접촉 밀봉작용을 하는 경우에 비하여 크게 낮아지기는 하였지만, 밸브패킹을 아직도 과도하게 닫아서 압착하고 있음을 알 수 있다. 즉, 동일한 밸브닫힘 압착하중 2.75 MPa (밀봉 압착력 110 N)을 가할 경우에 개폐밸브를 사용하기 이전의 평면접촉은 접촉법선응력이 7.5 MPa을 발생하는 것에 비해, 사용한 이후의 둥근홈 접촉형상은 4.5 MPa로 60%나 줄어든 밀봉접촉 법선응력이 발생되는 것으로 보아 밀봉성은 떨어지지만 아직도 과도한 밀봉 압착력을 가하기 때문에 패킹밸브를 통한 LP 가스 누출은 발생하지 않을 것으로 생각된다.

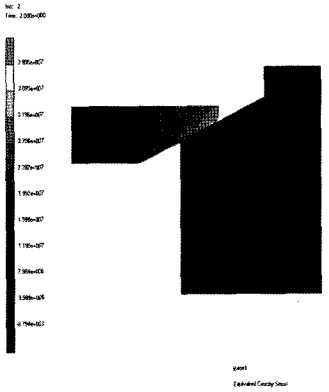
따라서 밸브패킹의 소재는 탄성강도, 변형성, 내마모성이 대단히 우수한 것을 사용해야 과도한 밸브닫힘 압착력을 견딜 수 있다. 해석결과를 종합하면, 이론적으로는 LPG 용기에 실제로 작용하는 LP 가스의 압력에 비해 과도한 설계를 하고 있음을 알 수 있다.



(a) Flat contact mode A of an unused packing



(b) Groove contact mode B of an used packing

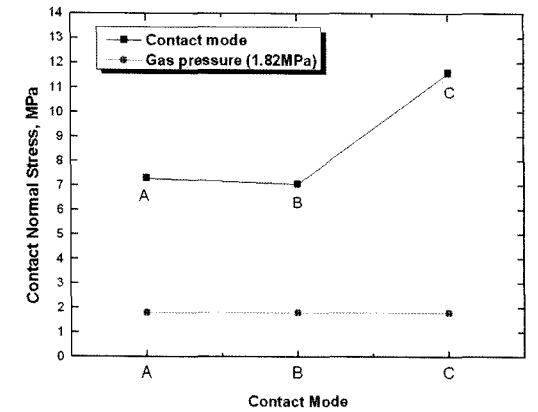


(c) Taper contact mode C of an unused packing

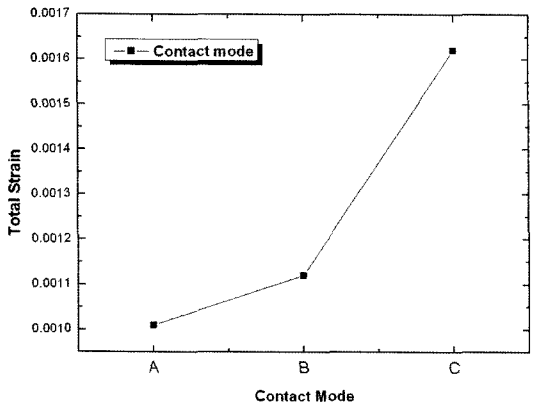
Fig. 7. Contact geometries of valve packings.

4.3. 접촉면 형상에 따른 거동특성 해석

Fig. 7(a)는 밸브패킹의 초기 접촉면 형상을, Fig. 7(b)는 일정기간 사용한 밸브패킹의 변형된 홈 접촉패턴을, 그리고 Fig. 7(c)는 패킹과 시트의 경사접촉면에서 밀봉작용을 하는 경우에 대한 FEM 밀봉특성 결과이다. 이들 3가지의 밀봉접촉 모드에 대한 Fig. 8(a)의 해석결과에 따르면, 평면접촉을 하는 밀봉모드의 접촉법선응력은 7.31 MPa로 밸브시트의 에지부와 접촉하는



(a) Contact normal stress



(b) Total strain

Fig. 8. Contact normal stress and total strain for three contact modes of the valve packings.

밸브패킹에서 국부적으로 높게 걸리고, Fig. 8(b)처럼 황동소재 시트와 밀봉작용을 하면서 원형홈의 형상으로 변형된 나일론 패킹과 접촉하는 원형홈 부근에서 높은 응력이 발생하지만, 평판접촉을 하는 경우에 비해 약간 낮은 7.07 MPa로 나타났다. 평면접촉을 하는 Figs. 7(a)와 7(b)의 경우와는 달리 경사측면에서 접촉밀봉작용을 하는 Fig. 7(c)의 경우는 상대적으로 높은 접촉법선응력 11.6 MPa을 발생하는 것으로 나타났다. 여기서 예측한 접촉법선응력은 LP 가스의 안전압력 18.6 kg/cm^2(1.82 MPa)에 비해 3.7~7배나 높게 나타났기 때문에 대단히 안전한 밀봉조건을 유지하고 있다.

또한 3가지의 접촉모드에 대한 변형률을 보면, 평판접촉 밀봉표면에서 가장 낮은 변형이 발생하고, 영구변형을 발생한 원형홈의 밸브패킹 접촉모델에서는 약간 증가된 변형률 결과를 제시한다. 반면에 경사 접촉면 밀봉을 하는 Fig. 7(c)의 경우는 접촉법선응력이 국부적으로 높아져 밀봉력 측면에서는 우수할 수 있지만, 변형률이 급격하게 증가되어 밸브의 지속적 사용에 따른 마모는 발생하고, 그에 따른 가스누출은 불가피하게 발생될 것이므로 그리 좋은 설계모델이라 할 수 없다.

V. 결 론

LPG 용기용 밸브의 개폐작용은 나일론-66으로 제조한 밸브패킹과 황동으로 제작한 밸브시트의 압착밀봉에 의해 이루어진다. 사용 전 밸브패킹의 평면접촉에 의한 밀봉 압착력은 220 N으로 측정되나, 사용 후의 밸브패킹의 압착력은 110 N으로 50%나 줄어들지만, 나일론 소재의 탄성거동에 의해 밀봉작용은 안전하게 달성되고 있다.

본 연구에서는 110 N와 220 N의 밀봉 압착력을 기준으로 해석한 밸브패킹에서 평면접촉을 하는 경우 밸브시트와의 반복적인 압착밀봉작용에 의해 완전한 소성변형을 하기 이전의 밀봉특성을 고찰한 FEM 해석결과는 대단히 안전한 것으로 나타났다. 또한 일정기간 사용한 밸브패킹은 개폐작용을 반복적으로 수행함에 따라 황동재 밸브시트와 압착하는 부분에서 원형의 소성변형이 발생하고, 이러한 변형에서도 충분한 정도의 밀봉 압착력을 보여주고 있다. 다만 원형홈 형상으로 접촉하는 부위에서 발생하는 접촉법선응력은 평면접촉을 하는 초기의 접촉형상보다는 약간 낮지만 LPG 용기의 안전기준인 1.82 MPa에 비하여 아직도 3.7배나 충분한 밀봉안전성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 현재의 개폐용 밸브패킹은 과도하게 압착하여 밀봉 압착력을 높게 유지하고 있으므로 나일론-66 소재와 같은 탄성, 내마모성 등과 같은 우수한 접촉거동 특성을 확보하고 있어야 한다.

참고문헌

[1] 조대인, "LPG 산업, 과연 비전 없나?", 투데이에너지, March 9, (2007)

[2] 강주완, "LPG 산업의 성장동력 - Autogas", 제1회 산학협력 기술세미나, 한국가스학회지, Dec. (1996)

[3] "MARC User's Manual", Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., (1996)

[4] Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials", 2nd Ed., John Wiley & Sons, pp. 100, (1995)

[5] 강신영, 김원호, 정경호, "엘라스토머 입문", 청문각, pp. 124-133, (2005)