

LPG 용기용 밸브시트의 변형 거동과 내부 응력변화에 따른 밀봉 안전성에 관한 연구

김태환, 김청균

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

A Study on sealing safety with internal stress variation and deformation behavior of a Valve seat for a LPG gas cylinder

Tae Hwan Kim, Chung Kyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

1. 서론

LPG(액화 석유 가스)는 공해 물질이 거의 없고 열량이 우수한 청정 연료로써 가정용 산업용으로 오늘 날에는 차량용 연료로도 그 쓰임이 다양하다. LPG는 STEEL소재의 전용 용기에 담겨 운반, 보관이 되며 황동 소재의 LPG용기용 밸브의 조작을 통하여 사용하게 된다. 프로판과 부탄이 주성분으로 분자 구조상 공기보다 높은 밀도를 가지고 있는 LPG는 누설될 경우 화재와 폭발의 위험이 매우 크므로 LPG의 취급과 사용에는 많은 주의와 장비의 안전성이 요구 된다.

LPG의 안전한 저장과 공급을 위해 용기의 상단부에 1개의 LPG 차단 및 조정기능을 갖는 밸브를 설치하며 이 밸브는 LPG 사용에 따른 LPG의 공급유량 조절과 긴급 상황에서 LPG의 공급을 차단하는 기능을 담당 하고 있다. LPG의 밀봉은 밸브의 시트와 노즐의 애지 부와의 압착을 통해 내부 LP가스압 이상의 접촉압력을 발생시킴으로써 LPG의 누설을 차단한다. 이러한 밸브 시트의 작동 메커니즘 때문에 밸브의 사용에 따라 폴리아미드 계열의 나일론을 사용하는 밸브 시트에는 초기의 시트 형상과 달리 노즐의 끝단부와 접촉하는 면에 소성 변형이 일어나 영구한 형상의 변화를 가져오게 된다. 이러한 이유로 LPG용기용 밸브를 사용함에 있어서 일정 시간과 사용량을 초과하게 되면 초기의 설계형상과 달라지기 때문에 초기 시트의 설계 시와 누설특성이 달라지므로 가스 누설에 대한 밀봉 안전성을 확보하기 어려워진다.

최근 국내의 LPG밸브의 사용 기간이 다른 여러 나라들의 사용 기간에 비하여 매우 짧은 것은 조사 결과와 더불어 LPG밸브의 주 소재인 황동의 국제적 가격 상승으로 인하여 LPG밸브의 내구 안전성과 밀봉성능의 지속적인 확보에 관한 관심이 대두되고 있으며 이에 관련한 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 논문에서는 LPG가스의 누설을 방지하는 유일한 장치인 LPG밸브 시트의 밀봉시의 변형 거동과 작용하는 응력, 변형률 변형에너지 그리고 접촉 수직응력 등을 FEM해석과 UTM(Universal Testing Machine)실험을 통하여 그 결과를 관찰하고, 시트의 형상을 변형하여 밀봉성능은 유지하며 시트 내부의 응력의 완화의 방법을 찾고자 하였으며 이를 통하여 시트의 영구한 변형을 억제하여 LPG밸브 시트의 사용에도 안정적인 밀봉 안전성을 확보하고자 하였다.

2. 해석모델

2-1. LPG 용기용 밸브의 구조

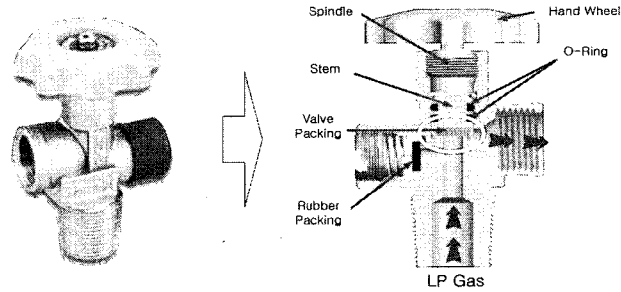


Fig. 1 Valve sealing units for a LPG cylinder

LPG 용기용 개폐밸브는 고압용기와 체결하기 위한 나사부, LPG를 외부로 송출하기 위한 호스연결 LP가스 방출구, LPG 용기의 이상 압력을 즉시 방출하기 위한 안전변, LP가스의 저장과 방출을 개폐하는 밸브패킹, 스피들 축을 따라서 누출하는 가스를 차단하기 위한 O-링, 밸브패킹에 개폐 및 조절작동을 원활하게 제공하기 위한 핸드휠 등으로 구성된다. LP가스의 개폐는 밸브 상단의 핸드 휠을 돌려서 조절하게 되는데, 스크류 나사에 의해 스피들이 상하 이동을 하게 되며 그에 따라 스피들의 축방향으로 스템이 이동되어 밸브 시트와 가스 이송 노즐의 끝단부와의 간극과 접촉 여부에 의해 LPG의 밀봉과 유량의 조절을 하게 된다.

2-2. 유한요소 모델

Fig.2는 실제로 사용되었던 밸브 시트와 한번도 사용되지 않은 신품 밸브 시트의 사진과 각 경우에 대한 유한요소 모델에 대한 그림이다. 사진에서도 알 수 있듯이 밸브의 사용에 따라 시트부에는 LP가스의 송출 노즐 끝단부의 형상으로 원형의 소성 변형의 흔적이 남게 되며 이에 따른 누설 특성을 살펴보고자 유한요소 모델 또한 황동의 예지부와 접촉하는 시트의 형상을 초기 설계 형상을 따른 평판의 원형 디스크와 변형으로 인해 원형의 홈이 파인 모델로 각각 나누어 해석 하였다. 모델링은 밸브시트와 황동으로 제작된 송출 노즐 끝단부로 단순화하여 해석을 수행하였으며 해석은 2차원 축대칭(Axial Symmetric) 4각요소 모델로 정의하였다. 모델링과 해석은 각각 상용프로그램 MSC/MENTAT과 MSC/MARC를 사용하였다.

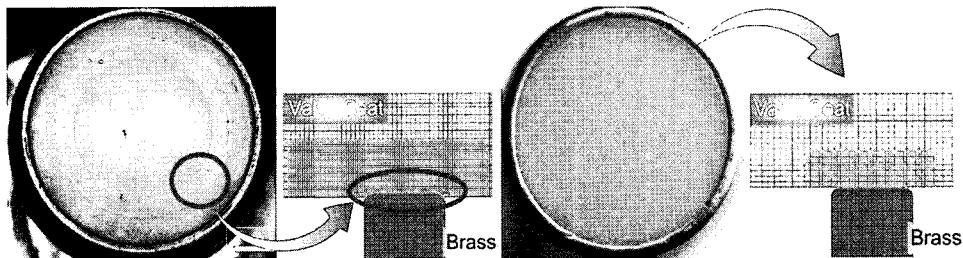


Fig. 2 Contact geometry of a valve packing and FEM model

2-3. 해석조건 및 소재의 물성

LPG용기용 밸브의 시트의 소재는 플라스틱 계열로 내열성, 내화학성, 부식 등에 강해 밀봉 시트의 소재로 널리 사용되고 있는 nylon66 을 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며 시트와 접촉하는 예지부에서의 마찰계수는 황동과 나일론의 마찰계수 0.3을 적용하였다.

Table1. Mechanical properties of Nylon66 and Brass

Properties	Nylon66	Brass
Elasticity module, GPa	3.1	97
Poisson's ratio	0.41	0.311
Yield stress, MPa	83	124

LP가스의 누설을 막기 위해 발생시키는 접촉력은 밸브 시트가 황동의 에지부에 의해 0.07mm 강제로 압축된 것으로 해석하였는데 이는 시중에서 사용이 되었던 밸브 시트들에서 일어난 원형 홈의 평균 깊이를 측정된 것을 기준으로 하였다. 밸브 시트와 황동의 에지부 모두 변형체로써 강제적인 압착을 하였을 경우 양쪽 모두에서 압축에 의한 변형이 일어나지만 나일론66으로 제작된 시트에서 약 97%로 대부분의 변형이 일어나기 때문에 FEM해석 시에는 나일론 시트는 변형체로, 황동의 에지부는 강체로 가정하여 해석하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3-1. 접촉력 및 내부응력

접촉력과 내부응력은 LPG밸브의 누설 특성과 구조 안전성에 대한 판단을 할 수 있는 중요한 요소이다. LPG 용기 내부의 안정적인 작동 압력은 18.6kgf/cm^2 이며 LPG용기에 가해지는 충격 등으로 인한 LPG 용기 내부의 압력의 상승으로 이상 압력이 발생시 안전변의 작동을 통해 LP가스를 외부로 서서히 누출하게 되는데 이때의 안전변이 작동하게 되는 작동 압력은 24.5kgf/cm^2 이다. 그러므로 밸브시트의 밸브 잠금 시에는 항상 24.5kgf/cm^2 이상의 접촉압력이 발생하여야 한다.

Fig.3은 밸브 시트의 압입 깊이에 따른 접촉 수직응력과 von Mises Stress를 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면 신품 밸브 시트와 사용이 되었던 밸브 시트 모두 우수한 밀봉성능을 보이고 있으나 시중에서 사용되었던 밸브 시트의 접촉 수직응력이 조금 더 높게 나타났다. 또한 신품 밸브 시트의 경우 $0.4\mu\text{m}$ 사용이 되었던 밸브 시트의 경우 $0.55\mu\text{m}$ 이상 압입 시 발생하는 접촉 수직응력은 2.4MPa로 안전변이 작동하게 되는 LP가스의 압력인 24.5kgf/cm^2 를 넘기게 되어 LP가스의 누설을 차단 한다. von Mises Stress 그래프를 보게 되면 von Mises Stress는 사용하지 않았던 밸브 시트의 최고 von Mises stress값이 87.1MPa로 사용했던 밸브의 85.6MPa보다 조금 높게 나타났다. 하지만 사용했던 밸브 시트는 압입이 시작 되면서부터 높은 stress가 발생하기 시작하여, 사용하지 않은 신품 밸브 시트와 같은 압입 깊이에 대하여 보다 높은 von Mises stress가 나타남을 알 수 있다.

이처럼 두 그래프를 살펴본 바에 의하면 사용되지 않은 밸브 시트와 사용되었던 밸브 시트 모두 압입이 시작되는 초기부터 기준치 이상의 높은 접촉 수직 압력과, 내부 응력이 발생

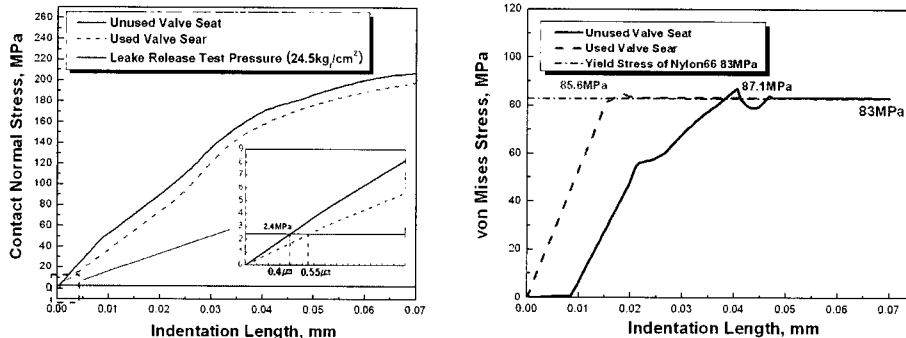


Fig.3 The distribution of contact normal stress and von Mises stress as functions of indentation length

하는 것으로 보아 시중의 사용이 되었던 밸브들에서 나타나는 소성 변형이 일어나기 위해서 매우 높은 하중이 지속적으로 밸브 시트에 가해졌음을 알 수 있다.

3-2. 변형 에너지 밀도

재료가 변형하면서 재료 내부에 에너지가 저장되는데 이때의 에너지를 변형 에너지라 하며 이때의 단위 체적당의 변형에너지를 변형 에너지 밀도라 한다. 변형 에너지 밀도는 식 1.1과 같이 부피의 변화를 가져오는 팽창 에너지 밀도(U_{ov})와 모양의 변화를 가져오는 비틀림 에너지 밀도(U_{od})의 합으로 나타내어진다.

$$U_o = U_{ov} + U_{od} \quad (\text{식 1.1})$$

여기서 팽창 에너지 밀도(U_{ov})는 식 1.2 와 같이 X, Y, Z방향의 주응력과 체적 탄성계수K (bulk modulus)의 값으로 표시 할 수 있다.

$$\begin{aligned} U_{ov} &= \frac{3}{2} \sigma_m \epsilon_m \\ &= \frac{1}{18K} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 \end{aligned} \quad (\text{식 1.2})$$

$$K = \frac{E}{3*(1-2\nu)} \quad (\text{식 1.3})$$

또한 비틀림 에너지 밀도(U_{od})는 식 1.4와 같으며 8면체 전단응력 식 1.5과 전단계수 G 식 1.6의 관계로 나타낼 수 있다.

$$U_{od} = \frac{3}{4G} \tau_{oct}^2 \quad (\text{식 1.4})$$

$$\begin{aligned} \tau_{oct} &= \frac{1}{3} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right]^{1/2} \\ &= \frac{1}{3} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{식 1.5})$$

$$G = \frac{E}{1+\nu} \quad \text{식 1.6}$$

von Mises stress는 최대 비틀림 에너지 이론으로도 알려진 von Mises 이론으로 알 수 있으며 관계식은 식 1.7과 같다.

$$\begin{aligned} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) &= 2\sigma_{yp}^2 \\ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 &= 2\sigma_{yp}^2 \end{aligned} \quad (\text{식 1.7})$$

이때의 von Mises stress를 식 1.4에 대입하면, 비틀림 에너지 밀도(U_{od})는 식 1.8과 같은 von Mises stress와의 관계식으로 나타나게 된다.

$$U_{od} = \frac{\sigma_{yp}^2}{2G} \quad \text{식 1.8}$$

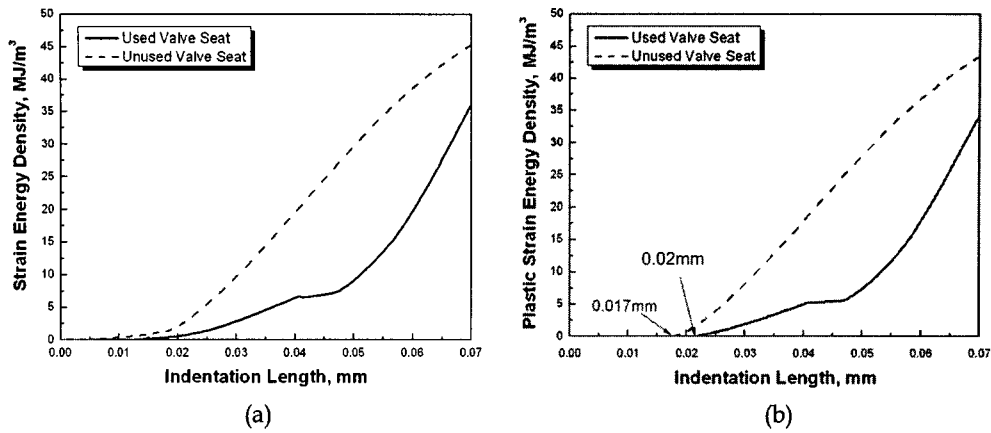


Fig.4 The distribution of strain energy density and plastic strain energy density as functions of indentation length

Fig.4는 밸브 시트의 압입 깊이에 따른 변형 에너지 밀도와 소성 변형 에너지 밀도를 나타낸 그래프이다. (b)의 그래프를 보면 사용이 되어서 변형이 이미 일어난 밸브를 다시 압축하였을 때 0.017mm의 압입 깊이에서 이미 소성 변형이 일어나는 것을 알 수 있었으며, 사용되지 않은 신품 밸브 시트는 그 보다 조금 높은 0.02mm에서 소성 변형이 일어나는 것을 알 수 있었다. 또한 (a)그래프와 (b)그래프 모두에서 사용되었던 밸브 시트의 energy density값이 높게 나타났는데 이는 사용되었던 밸브 시트의 변형이 많이 일어났으며 특히 소성변형에 쓰인 에너지가 많다, 즉 소성 변형이 신품 밸브 시트에 비해 많이 일어났음을 의미한다.

이러한 결과로 비취 볼 때 신품 밸브 시트는 충전 노즐의 황동 에지부와와의 높은 접촉 압력에 의해 지속적인 사용에 따라 소성 변형이 일어나게 되고 이렇게 발생한 시트의 변형이 더욱 높은 내부 응력의 발생을 유발하고 변형에너지를 크게 하여 소성 변형을 더욱 가속화시키는 것을 알 수 있다.

Fig.5는 사용한 밸브와 사용하지 않은 신품 밸브의 내부의 응력의 분포를 나타낸 유한 요소 모델이다. (a), (b) 두 모델 모두 충전 노즐의 에지부와 접촉하는 접촉면의 가장 자리에서 가장 높은 응력이 발생하였다. 하지만 접촉면을 확대한 그림을 보면 알 수 있듯이 충전 노즐의 에지부 형상의 그루브(groove)가 생긴, 기존에 사용한 밸브를 형상화한 모델의 접촉부에 보다 많은 응력이 발생하며 그 발생 면적도 신품 밸브 모델에 비해 넓은 것으로 나타났다.

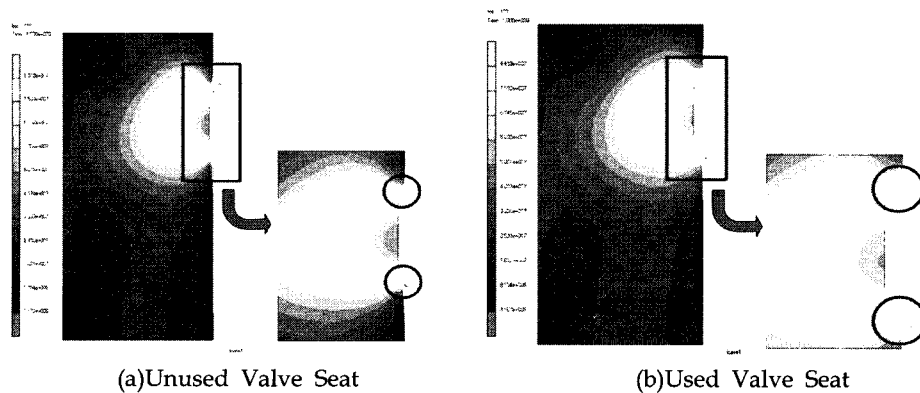


Fig. 5 von Mises stress of LPG valve seat

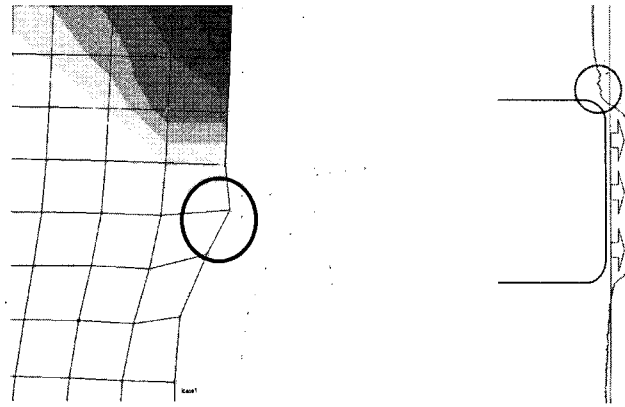


Fig. 6 The comparison of FEM model and measured photograph

Fig.6은 실제 사용된 밸브의 표면의 조도를 찍은 사진과 FEM모형을 비교한 그림이다. 두 그림을 보면 알 수 있듯이 FEM해석과 실제의 변형된 시트 사진 모두 황동으로 제작된 충전 노즐의 바깥 round와 접촉하는 부분에서의 응력과 변형이 가장 큰 것으로 나타났다.

3-3. 밸브 시트의 형상 비교

Fig.7과 Fig.8은 기존의 사용하지 않은 신품 밸브 시트와 초기에 홈을 파서 형상을 변화 시킨 밸브시트들의 내부 응력 분포 그림과 각 모델들의 변형에너지 밀도, 소성 변형에너지 밀도를 나타낸 그래프이다. 결과에서도 볼 수 있듯이 밸브 시트의 초기 형상에 따라 시트에 발생하는 내부 응력의 분포와 그 크기는 매우 큰 차이를 보여준다. Fig.8 (a)의 압입 깊이에 따른 변형에너지 밀도의 그래프를 보면 밸브 시트에 Groove를 파놓은 모델들에서 변형에너지 밀도가 모델(b) $2.77\text{MJ}/\text{cm}^3$, 모델(c) $2.91\text{MJ}/\text{cm}^3$ 으로 기존의 사용하지 않았던 밸브 시트의 변형에너지 밀도 $3.429\text{MJ}/\text{cm}^3$ 보다 작아지는 결과를 보였다. 특히 Fig.8의 그래프(b)를 보면 밸브 시트의 형상들에 따라 소성 변형에너지 밀도가 발생하는 압입 깊이가 다른 것을 볼 수 있다. 압입 깊이에 따른 소성 변형에너지 밀도의 발생은 소성 변형이 그 시기부터 일어남을 의미하므로 압입 깊이에 따라 모델들 별로 소성변형의 시작 시기가 다르다 할 수 있겠다. 소성 변형이 일어나는 시기는 반원의 형태로 Groove를 판 모델이 0.012mm 로 가장 짧았으며 기존의 모델로 디스크에 아무런 홈도 있지 않은 모델이 0.02mm , 0.2mm round를 준 사각 Groove모델이 0.022mm 로 가장 압입량이 많을 때 소성 변형 에너지 밀도가 발생 하는 것으로 나타났다.

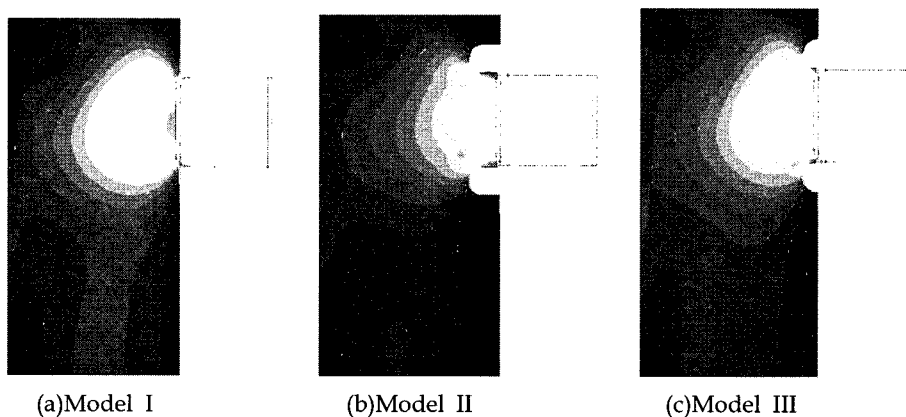


Fig. 7 The contour bands of von Mises stress according to various valve seat models

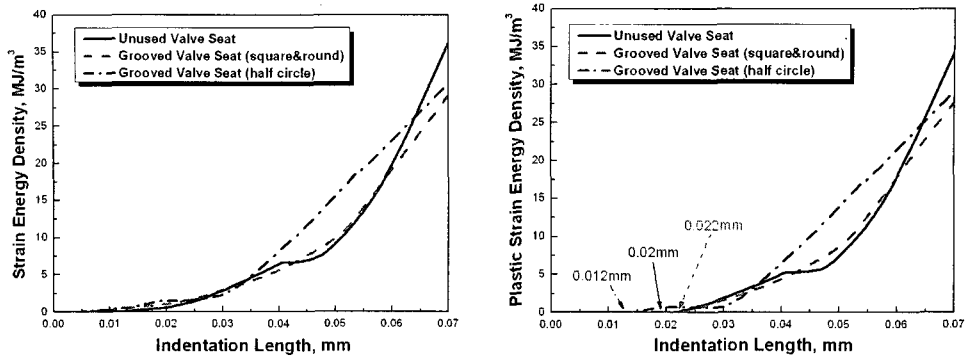


Fig. 8 The distribution of strain energy density and plastic strain energy density as functions of indentation length

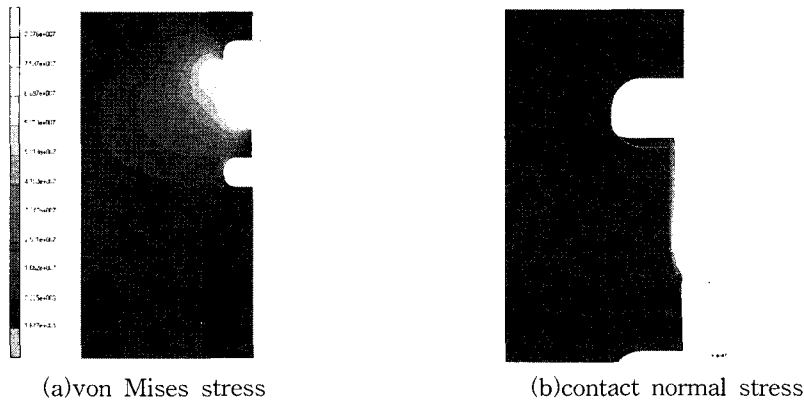


Fig. 9 Stress distribution as misaligned valve contact

Fig.9는 round를 준 사각 Groove모델에 대하여 황동의 에지부와 밸브시트의 접촉면이 정확히 맞지 않았을 경우의 모델에 대한 von Mises stress 와 접촉 수직응력의 그림이다. 평평한 원형 디스크인 기존의 밸브 시트와 달리 Groove가 파여 있는 밸브 시트에 정확한 접촉이 일어나지 않았을 경우 LPG의 누설 여부를 보고자 하였으며 접촉 수직응력은 기존의 모델에 비해 약간 떨어졌으나 충분한 밀봉력을 충분히 안전변 작동 기준치 압력을 넘기 때문에 LP가스의 누설에 대하여 안전한 것으로 판단하였다

4. 결론

LPG는 열량이 우수한 청정의 연료로써 그 쓰임이 매우 유용하지만 LP가스의 누출시 화재나 폭발 등의 대형 사고를 일으킬 수 있기 때문에 LPG의 누설을 안전하게 막는 것은 상당히 중요한 문제이다. 하지만 이러한 이유로 나일론66으로 제작된 밸브 시트는 항상 높은 접촉 압을 받으며 이로 인해 시중에서 사용된 밸브 시트들에서 소성 변형이 일어나 평균적으로 0.07mm의 원형의 홈이 생기는 것을 알 수 있었다. 이때의 접촉력을 구하기 위해 UTM 실험과 FEM 해석을 통해 0.07mm 밸브 시트를 압축 해본 결과 밸브 시트의 압축을 위해 230N의 압축력이 발생했으며 FEM 해석시 접촉면에 발생한 평균 접촉력은 250N이 발생하였다. 이때의 LP가스의 누설을 막기 위해 발생하는 과중한 압축 힘은 시트의 소성 변형을 유발하여 밸브 시트의 누설 특성이 변하게 된다. 그러므로 기존의 밸브 시트와 밸브 시트의 사용에 따라 소성 변형이 일어난 밸브시트를 모델링 하여 접촉 수직응력과 von Mises stress를 관찰한 결과 사용한 밸브 시트의 경우 신품 밸브 시트에 비해 접촉 수직응력이 다소 떨어졌으나 두 모델 모두 안정적인 밀봉 성능을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 von

Mises stress는 사용했던 밸브시트의 모델에서 매우 크게 나타났으며 항복 응력에 도달하여 소성 변형이 시작하는 압입 깊이가 0.017mm로 신품 밸브 시트의 0.047mm보다 0.03mm 먼저 항복 응력에 도달하는 것으로 나타났다. 또한 이러한 변형은 밸브의 사용에 따라 지속적으로 누적되며 밸브 시트의 변형은 가속화 된다. 이러한 이유로 초기에 밸브의 제작시 밸브 시트의 형상의 변화를 통하여 변형에너지를 최대한 줄이고자 하였으며 밸브 시트에 반원의 Groove를 판 모델과 0.2mm round를 친 사각 Groove 모델을 기존의 원형의 평판 밸브 시트와 비교하여 보았다. 그 결과 사각 Groove 모델의 변형 에너지 밀도 값이 가장 작았으며 소성 변형 에너지 밀도 값 역시 가장 작게 나타났다.

FEM 해석을 통해 밸브시트의 밀봉시 응력의 상태와 누설특성 및 변형에너지를 관찰한 결과 밸브 시트는 LP가스의 밀봉을 위해 높은 하중이 걸리며 과도한 접촉 면압으로 가스의 밀봉을 수행하는 것으로 나타났다. 고압의 Gas를 저장 하는 장치의 특성상 높은 안전계수를 적용하여 설계하는 것이 타당하다 하겠지만 LP가스의 밀봉을 위해 과도한 접촉력을 발생시키는 것은 오히려 시트의 변형을 초래하여 밀봉성을 떨어트리게 되는 결과를 가져온다. 그러므로 본 논문에서는 밸브 시트의 소성 변형을 억제하는 방안으로써 밸브 시트의 형상의 변형을 수행해서 해석해 보았으며 형상 변화에 따른 결과들을 살펴보았다. 이러한 결과들을 토대로 향후에는 밸브 시트의 설계시 소성 변형을 최대한 억제하고 밸브 시트에 적정의 접촉력을 강제 할 수 있는 밸브 시트의 최적 설계에 관한 연구가 더욱 이뤄져야 하겠다.

5. 참고 문헌

1. Ansel C. Ugural, Saul K. Fenster, "Advanced Strength and Applied Elasticity", PTR PH, pp 83-85
2. Gregory J. Gerling, Geb W. Thomas, Jia Lu, "The advantage of von Mises stress versus strain energy density for tactile fingertip simulation", Medical Engineering and Physics
3. 이강용, "응력해석 및 재료거동학", 연세대학교 출판부, 20 August 2003
4. Lu Shen, In Yee Phang, Ling Chen, Tianxi Liu, Kaiyang Zeng, "Nanoindentation and morphological studies on nylon66 nanocomposites. I. Effect of clay loading", 12 March 2004
5. "MARC user's manual," Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
6. Ernest Rabinowicz, "Friction and Wear of Materials", 2nd edition, John Wiley and Sons, 1995, pp. 100
7. 강신영, 김원호, 정경호, "엘라스토머 입문," 청문각, 2005, pp. 124~133
8. 김칭균, 조승현, "SF₆ 가스 안전밸브 디스크 시일의 최적설계에 관한 연구," Journal of the KSTLE, vol. 20, No 5, October 2004, pp. 231~236