

LPG 용기용 밸브 스템부 O-링의 밀봉거동 특성에 관한 연구

김도현, 김청균

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

A study on the sealing behavior characteristic of the stem O-ring of LPG gas cylinder

Do Hyun Kim, Chung Kyun Kim

Department of Mechanical System Design and Engineering, HongIk University

1. 서론

LPG 용기용 밸브는 LPG 용기에서 가스의 유입, 및 배출을 제어하고, 사용하지 않을 때에는 가스가 새지 않도록 막는 기능을 하고 있다. LPG는 공기보다 비중이 높기 때문에 누설이 되면 자칫 대형사고로 이어질 가능성이 매우 높아 가스를 제어함에 있어 신중해야 한다.

LPG 스템부의 O-링은 밸브의 2차 시일로서 나일론 소재로 된 시트에 어떤 결합이 발생하여 가스의 누설이 발생하면 누설된 가스를 막는 역할을 담당하고 있으며, 또한 가스의 사용 시 시트의 열린 틈으로 새어나오는 가스를 막는 역할을 하고 있다. 따라서 O-링의 밀봉 성능은 LPG 밸브의 안전한 사용에 있어 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

밀봉장치는 밀봉요소 또는 시일(seal)이라 불리며, 서로 접촉한 부분 사이에서 유체의 누설방지 및 이물질의 침입 방지에 이용되고 있다. 밀봉 요소는 접촉면에 거시적인 상대 운동의 유무에 따라 동적 요소와 정적 요소로 구분되고 동적 요소를 운동용 시일 또는 패키징이라 하며 이는 다시 접촉형과 비접촉형 시일로 구분된다.

O-링은 가장 기본적인 시일(Seal)로써, 그루브(groove)에 조립되어 접촉면과의 압착에 의해 생기는 반발탄성에 의하여 밀폐력을 가진다. 이 원리로 밀봉된 유체의 누설을 방지하거나, 외부의 이물질 침입을 차단할 수 있어 진공장치, 압력용기, 액츄에이터, 밸브 등에서 다양하게 응용되고 있다.

O-링의 기능을 안정적으로 유지하기 위해서는 외부의 여러 조건에 대해 적정 수준 이상의 반발탄성을 가져야 한다. 즉 압축력이 가해진 상태에서 소재의 대변형 성질에 의해 밀봉 성능을 확보하게 되는 것이다. 그래서 적절한 압축률을 가져야 하고, 돌출과 같은 O-링에 손상을 줄 수 있는 현상을 방지해야 한다.

따라서 본 연구에서는 LPG 용기용 밸브에서 가해지는 가스의 압력에 대해 안정적인 밀봉 성능을 위해 유한요소해석 프로그램을 이용한 수치적 연구를 통해 O-링의 접촉거동을 관찰하고, 보다 O-링의 기능성을 향상하기 위한 O-링의 단면에 대한 설계를 수행하였다.

2. LPG 용기용 밸브의 O-링의 거동 파악을 위한 유한요소해석

2-1. 설계 조건

LPG 용기용 밸브의 관련 규격은 KS B 6212에 명시되어 있다. 이 규격을 참고하여 LPG 용기용 밸브에서 LPG 가스에 의해 발생하는 압력은 $8 \sim 24.8\text{kgf/cm}^2$ 로 증가시키면서 O-링의 거동을 관찰하였다. LPG 가스의 일반 사용 압력은 8kgf/cm^2 이고, 누설 테스트 압력은 18.6kgf/cm^2 이다. 또한 24.8kgf/cm^2 는 LPG 용기용 밸브에 장착된 안전밸브가 작동하는 가스의 압력이다. 따라서 최소 8kgf/cm^2 에서 24.8kgf/cm^2 까지 가스압을 2kgf/cm^2 의 단위로 변화시키면서 O-링이 충분한 밀봉성능을 갖는지 확인하였다.

또 하나의 설계 조건은 O-링의 압축률이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 LPG 용기용 밸

브에서 스템부에서 발생하는 간극은 0.25mm이고, O-링의 단면의 직경은 $\phi 2.7$ mm이다. 따라서 기본적인 간섭량은 0.2mm로 O-링의 압축률은 7.407%이다.

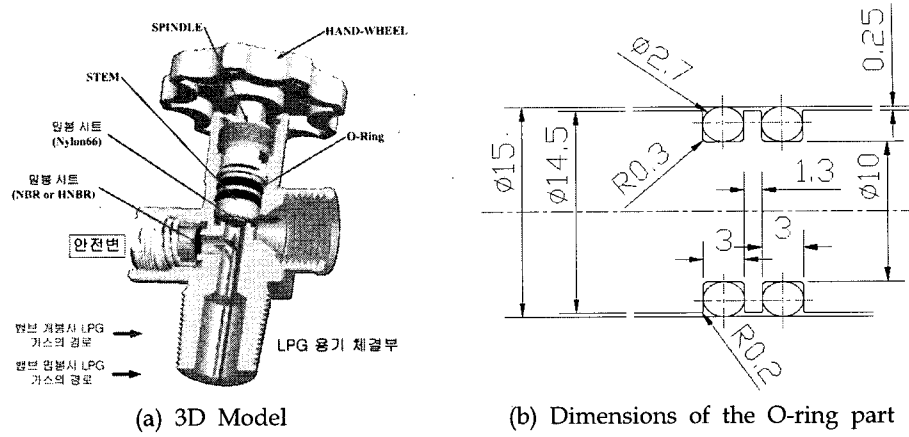


Fig. 1 The stem O-ring of LPG gas cylinder

2-2. O-링의 소재

LPG 용기용 밸브의 O-링의 소재는 NBR이 사용되고 있다. NBR(acrylonitrile butadien rubber)은 보편적으로 쓰이는 소재로 아크릴로니트릴과 부타디엔의 유화공중합에 의해 제조된다. 가솔린, 광유, 연료유, 에탈린 글리콜 등에 대한 우수한 저항력으로 O-링 실의 제조에서 대단히 폭넓게 사용되고 있는 소재이다. 그러나 에스테르 계열의 유체에서 안정적으로 사용하기에는 적합하지 않다. 아크릴로니트릴(acrylonitrile)의 함유량에 따라 고, 중, 저 니트릴로 분류하는데 아크릴로니트릴의 함유량이 많으면 인장강도가 높아지고 연료나 기름에 대한 저항력이 향상되고, 아크릴로니트릴의 함유량이 적으면 탄성이 증가하고 낮은 온도에서의 유연성이 높아진다. 그리고 가격이 매우 저렴한 편이다. 니트릴 고무의 허용 작동 온도는 $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 이다.

2-3. 유한요소해석

Fig. 2는 유한요소해석 모델을 나타낸 그림이다. 모델링은 O-링과 스템의 그루브, 그리고 LPG 용기용 밸브의 Body로 간략화하였다. O-링을 제외한 다른 부분은 황동으로 이루어져 있기 때문에 고무소재인 O-링과 비교하여 변형이 거의 없으므로, O-링은 변형체로 정의하고, 다른 부분은 강체로 정의하였다. 해석의 신속성과 편의성을 위해 2차원 축대칭모델로 정의하였으며, 모든 요소들은 축대칭 4각요소를 사용하였다. 모델링과 해석은 상용프로그램 MSC/MENTAT과 MSC/MARC를 사용하였다.

해석 단계는 먼저 Body 쪽의 커브가 일정거리를 내려오면서 O-링이 압축이 된 후 LPG 가스에 의한 압력이 O-링의 측면에 작용하도록 하여 O-링의 표면에 발생하는 접촉면압을 측정하였다. 또한 O-링의 안정성을 파악하기 위해 O-링에 발생하는 응력과 변형률을 관찰하였다. LPG 가스는 O-링의 표면에 수직방향으로 작용하며, O-링에 대한 투과율은 무시하였다. 그리고 각 소재 사이의 마찰계수는 0.4로 일정하다고 가정하였다.

해석의 경계조건으로는 $8 \sim 24.8\text{kgf/cm}^2$ 의 범위로 2kgf/cm^2 로 증가시키며 적용하였고, 압축률에 따른 접촉면압 및 O-링의 거동도 파악하기 위해 압축률을 또 하나의 경계조건으로 사용하였다.

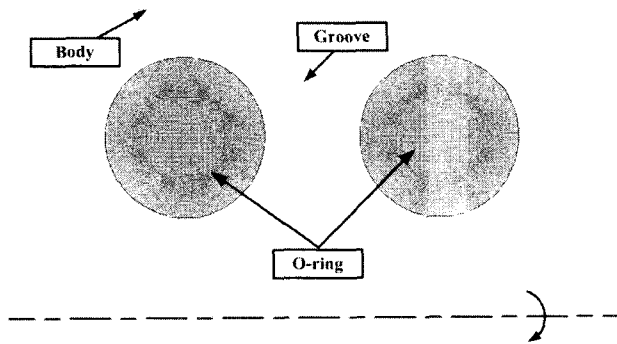
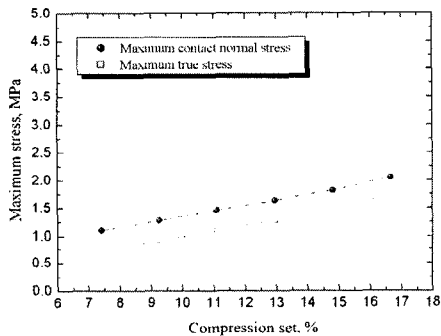


Fig. 2 The finite element model of a stem O-ring

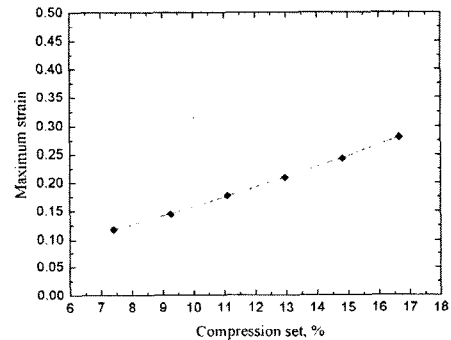
간섭량에 따른 압축률 변화	
간섭량	압축률(%)
0.2	7.407
0.25	9.259
0.3	11.111
0.35	12.963
0.4	14.815
0.45	16.667

Table. 1 Compression ratio

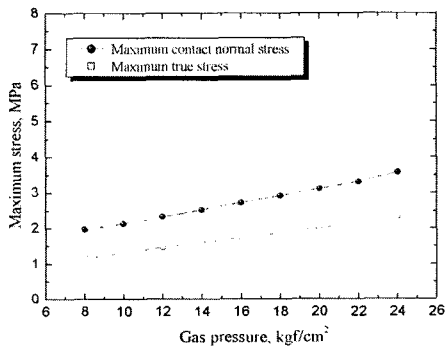
2-4. 해석 결과 및 고찰



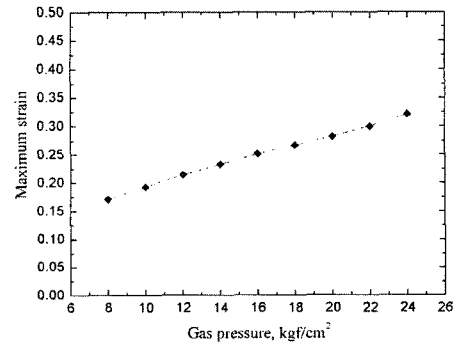
(a) Distribution of maximum stress



(b) Distribution of maximum strain



(c) Distribution of maximum stress



(d) Distribution of maximum strain

Fig. 3 The Results of Finite Element Analysis(original model)

Fig.3은 압축률과 LPG 가스압에 대해 O-링에서 발생한 접촉면압, 최대진응력, 최대변형률을 관찰한 그래프이다. 먼저 Fig. 3(a), (b)의 압축률에 대한 결과를 보면 압축률이 증가함에 따라 선형적인 증가 형태를 나타내고 있다. Fig. 3(a)에서 약 16.6%의 압축률에서는 약 2.047MPa의 접촉면압이 발생하고, 기본적인 압축률인 7.047%에서는 1.098MPa의 접촉면압이 발생한다. 그리고 모든 압축률에 따라 발생하는 최대진응력과 최대변형률은 NBR의 1.715MPa과 0.281에 불과해 항복응력과 항복변형률에 비해 매우 낮게 발생하고 있다. 따라

서 이 결과로부터 10kgf/cm²이상의 압력이 순간적으로 가해지게 되면 O-링의 누설이 발생할 수도 있다. Fig. 3(c), (d)는 압력이 일정 간격으로 증가함에 따라 발생하는 O-링의 거동을 관찰한 그래프이다. 압력이 증가함에 따라 역시 선형적인 분포를 나타내고 있다. 압력에 따라 발생하는 최대진동력과 최대변형률은 NBR의 항복응력과 항복변형률에 비해 낮게 발생하고 있어 O-링의 안정성에는 큰 문제가 없음을 확인하였다. 그리고 Fig. 3(c)의 접촉면압을 살펴보면 압력이 점진적으로 증가함에 따라 가스압 이상의 접촉면압이 선형적 분포 형태로 증가하고 있다. 그리고 24.8kgf/cm²의 가스압에서 약 3.571MPa의 접촉면압이 발생해 충분한 누설방지 역할을 할 수 있음을 확인하였다. 하지만 이는 Fig. 3(a)에서 확인한 누설 가능성에 대한 보완이 이루어져야 함을 본 결과로부터 찾아낼 수 있었다.

3. 원형이 아닌 O-링의 단면 형상에 대한 설계 및 해석

3-1. 단면 설계

O-링에 발생하는 접촉면압을 크게 하기 위해서는 2개의 변수를 조절할 수 있다. 하나는 압축률 조절을 통한 접촉력의 증가이고, 또 하나는 접촉하는 면적을 줄이는 것이다. 하지만 압축률을 조절하게 되면 그루브(Groove)나 LPG 용기용 밸브의 Body의 설계가 새롭게 되어야 하기 때문에 기존 급형에 대한 변경이 불가피하다. 또한 압축률을 증가시키는 것은 그만큼 O-링에 가하는 외력의 크기가 증가하는 것이기 때문에 동적거동을 반복하는 O-링의 수명을 줄이게 될 수도 있다. 따라서 기존의 형상을 유지하면서 접촉면압을 늘리기 위해서는 O-링의 접촉면적을 조절하는 것이 더욱 유리하다.

그러므로 다음과 같은 단면을 같은 2개의 O-링을 대안으로 하여 같은 조건에서 동일한 방법으로 유한요소해석을 진행하였다.

3-1-1. sunflower O-링

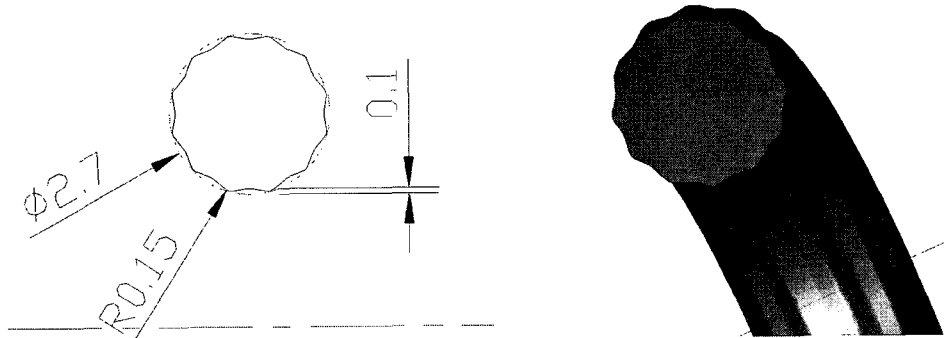


Fig. 4 The cross-section and dimensions of sunflower O-ring

φ2.7mm의 O-링을 그대로 유지하면서 표면에 돌기를 만들어 해바라기 형태의 단면을 가지도록 하였다. 이런 단면의 O-링은 sunflower O-링이라 한다. 돌기의 깊이는 원래의 φ2.7mm의 원에서 0.1mm이고, 꼭지점의 반경은 R0.15이다. 따라서 원주를 따라 넓게 접촉하던 면적을 2개의 좁은 면적으로 줄여 발생하는 접촉면압을 증가시키고자 한다.

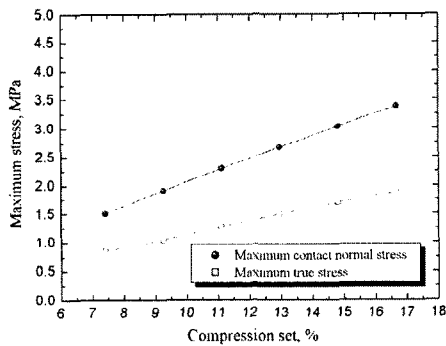
3-1-2. Key home O-링



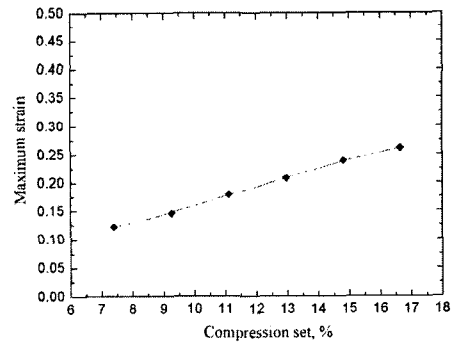
Fig. 5 The cross-section and dimensions of key home O-ring

Ø2.7mm의 O-링에서 LPG 용기용 밸브의 Body 쪽과 O-링이 만나서 형성되는 접촉부에 깊이 0.2mm의 홈을 만들어 접촉면적을 줄이는 O-링 단면을 설계하였다. 이 모델에 대해서는 편의상 key home O-링이라 지칭한다. sunflower O-링과 마찬가지로 접촉부는 2개의 좁은 면적으로 줄어들게 되고, sunflower O-링보다는 보다 큰 접촉면적을 유도하는 모델이다. 이유는 O-링의 단면의 면적이 sunflower O-링보다 조금 더 넓어 그만큼 더 큰 복원력이 작용하기 때문이다.

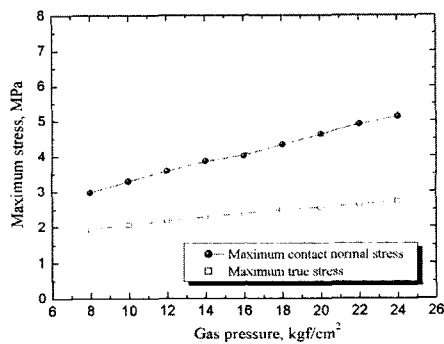
3-2. 해석 결과 및 고찰



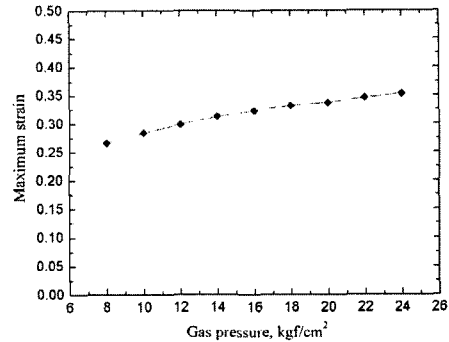
(a) Distribution of maximum stress



(b) Distribution of maximum strain



(c) Distribution of maximum stress



(d) Distribution of maximum strain

Fig. 6 The Results of Finite Element Analysis(sunflower model)

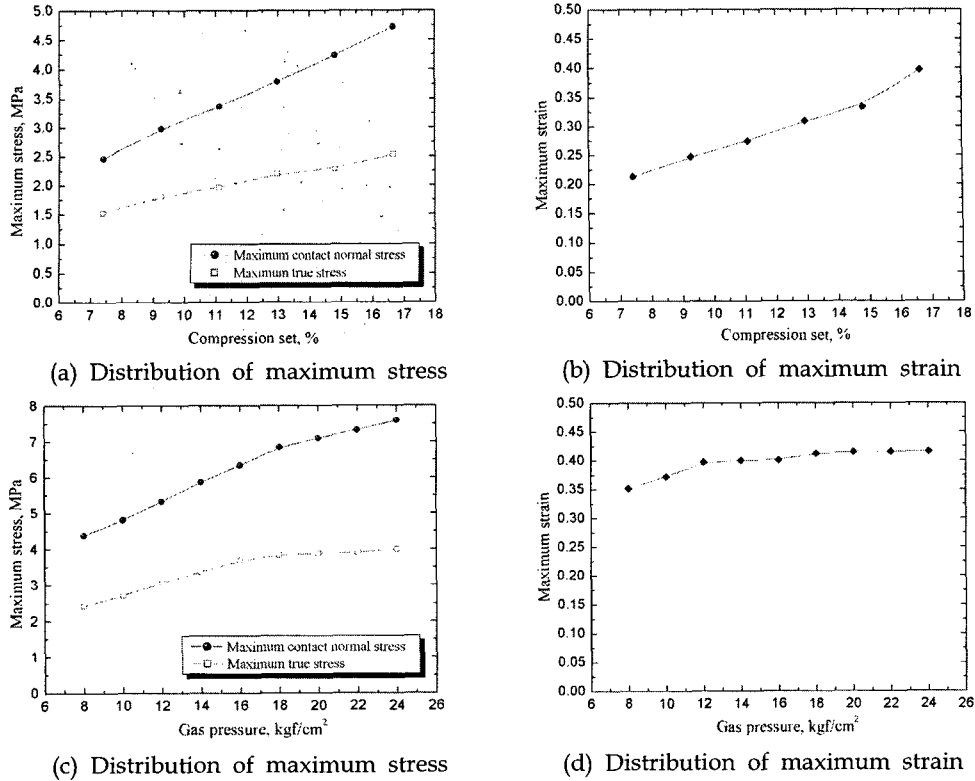


Fig. 7 The Results of Finite Element Analysis(key home model)

Fig. 6은 sunflower O-링에 대한 해석결과이다. Fig. 6(a), (b)의 압축률에 따른 결과를 먼저 살펴보면 압축률이 증가함에 따라 선형적인 증가 형태를 나타내고 있다. 그러나 최대 압축률에서 발생하는 최대진응력과 최대변형률은 마찬가지로 O-링의 항복값에 미치지 못하므로 안정성에는 문제가 없다고 판단할 수 있다. 그리고 기존 모델에서 문제로 제시할 수 있었던 기본압축률에서의 접촉면압은 약 1.507MPa로 37.2%만큼 증가하였다. 따라서 16kgf/cm² 이상의 가스압에서는 역시 누설의 가능성을 제시할 수 있다. 축대칭 형상을 유지하기 위해 O-링의 모든 표면에 대해 돌기를 형성하면서 접촉면적을 줄여 접촉면압을 증가시켰지만, 돌기로 인해 변형이 기존 모델에 비해 크게 작아지면서 변형에너지가 결과적으로 작아져 O-링의 복원력의 저하로 연결되었다. 따라서 24.8kgf/cm²이상의 접촉면압을 획득하지 못하였다. Fig. 6(c), (d)는 압력의 증가에 따른 각 관찰값을 나타낸 그래프이다. 가스압이 점진적으로 가해짐에 따라 접촉면압은 선형적 분포로 크게 증가하고 있고, 최대진응력과 최대변형률은 다소 작은 기울기로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 가스압에 의해 O-링이 그루브와 Body 쪽으로 밀리면서 접촉면압은 크게 증가하지만, NBR의 복원력이 저하로 역할을 하면서 내부에 발생하는 응력과 변형률의 증가폭은 크지 않은 편이다. 또한 최대진응력과 최대변형률은 낮은 수치로 O-링은 안정적인 거동을 보인다.

Fig. 7은 key home O-링에 대한 해석결과이다. Fig. 7(a), (b)의 압축률에 따른 관찰값을 나타낸 그래프이다. 압축률이 증가함에 따라 모든 관찰값이 선형적인 분포형태를 나타내고 있다. 또한 그 동안의 모델에서 문제로 제시됐던 기본압축률에서의 최대접촉면압이 약 2.46MPa로 안전밸브가 열리는 24.8kgf/cm²이상의 접촉면압이 발생해 초기 값이 24.8kgf/cm²인 가스압이 발생했을 때 충분히 누설을 방지할 수 있다. 기존 모델에 비해 약 124%정도 증

가한 수치이다. LPG 용기용 밸브는 24.8kgf/cm^2 의 가스압이 작용하면 안전밸브가 작동하여 가스압을 줄이기 때문에 O-링이 안전 밸브가 열리는 동안 가스를 차단하면 누설이 발생하지 않는 원리인데, 앞선 모델에선 충분한 접촉면압이 발생하지 않아 누설의 가능성이 존재했던 것이다. 하지만 해석 결과로부터 key home O-링에서는 이런 문제점이 발생하지 않을 것이라 예상할 수 있고, 3개의 모델 중에 가장 우수한 모델임을 알 수 있다. 최대진동력과 최대변형률은 모두 항복값보다 낮게 발생하여 O-링의 안정성에는 문제가 없다. Fig. 7(c), (d)는 가스압의 증가에 따른 관찰값을 나타낸 그래프로 수치적으로는 앞선 모델보다 크지만, 증가하는 경향은 비슷한 형태를 나타내고 있고, 모든 압력에서 안정적인 거동을 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 LPG 용기용 밸브의 스템부의 O-링을 대상으로 일정 범위의 가스압이 가해졌을 때의 밀봉거동 특성을 관찰하였다. 유한요소해석 프로그램을 이용한 수치적 연구로 접근하였으며, 기존 모델에 대해 먼저 거동을 관찰하였다. 그 결과 기본압축률을 가질 경우 충분한 접촉면압이 발생하지 않아 자칫 누설의 가능성을 가지고 있는 문제점을 발견하여 이 문제를 해결하기 위해 기존의 설계조건 및 치수 등을 그대로 유지한 상태에서 O-링의 단면을 다르게 설계하여 동일한 해석을 수행하였다. O-링의 단면 모델로는 sunflower 모델과 key home 모델을 적용하였다. 해석 결과 sunflower 모델은 충분한 접촉면압이 발생하지 않았고, key home 모델은 누설을 방지할 수 있는 높은 접촉면압이 발생하여 기존 O-링을 보완할 수 있는 모델로 제시할 수 있다.

그렇지만 해석상으로는 접근할 수 없는 가공 상의 문제점이나 마찰, 마모 등의 문제, 또한 스템부의 이동으로 인한 O-링의 움직임 또는 손상 등의 문제가 있기 때문에 해석데이터를 바탕으로 실제 실험을 통한 검증이 동반되어야 보다 확실한 결론을 얻을 수 있고, 이것이 이 연구가 앞으로 나아가야 할 방향이다.

5. 참고문헌

1. 임재석, 임평, 재료공학과 물성화학, 내하출판사, (2006), pp.381-386
2. 김용석 외 3인 공역, William D. Callister, Jr. "재료공학과 공학", (1999), pp. 598-599, pp.608-609
3. 이강용, 응력해석 및 재료거동학, (2003), pp.169-187
4. KS B 6212, Valves for liquefied petroleum gas cylinder
5. Chung Kyun Kim, Seung Hyun Cho, Young Gyu Kim, "On the Contact Behavior Analysis and New Design of O-ring Seals", Proceedings of The Second Asia international Conference on Tribology, (2002)