



접촉식 밀봉 링의 변형거동 안정성에 관한 유한요소해석

†김청균 · 김도현

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2012년 7월 21일 투고, 2012년 10월 26일 수정, 2012년 10월 26일 채택)

Finite Element Analysis on the Deformation Behavior Stability of Contact Sealing Rings

†Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received July 21, 2012; Revised October 26, 2012; Accepted October 26, 2012)

요약

본 연구에서는 3가지의 서로 다른 단면형상을 갖는 밀봉 링의 변형거동 안정성을 FEM으로 해석하였다. NBR 소재로 제조한 밀봉 링의 변형거동 안정성을 고찰하기 위해 초기 압축률로 25%를 적용하였다. 작동유체의 압력을 최대 25kgf/cm²까지 올렸을 때 발생한 최대변형률, 최대응력, 최대접촉법선응력을 해석하였다. FEM 결과에 의하면, 밀봉 링의 중심부에 빈 공간을 확보한 중공오링과 중공사각링의 최대 변형률은 기존 오링에 비해 높아졌지만, 최대응력과 최대접촉법선응력은 떨어지는 것으로 나타났다. 결국, 밀봉 링이 장수명의 내구 안정성을 확보하기 위해서는 중심부에 빈 공간을 확보하는 것이 권장된다. 그렇지만, 접촉식 밀봉 링의 밀봉 안전성을 확보하기 위해서는 밀봉 링을 하나의 몸체로 설계하는 것이 바람직하다.

Abstract - In this study, the deformation behavior stability of sealing rings with three different cross sectional areas has been presented using a FEM technique. To investigate the deformation behavior stability, the initial compression rate of 25% has been applied to the sealing ring, which is molded with a nitrile butadiene rubber. The maximum strain, maximum stress, and maximum contact normal stress have been analyzed for the working fluid pressure of 25kgf/cm². The FEM results show that the maximum strain of a hollow o-ring and a hollow rectangular ring with a hollow space in the center of a sealing ring is higher than that of a conventional o-ring, but the maximum stress and the maximum contact normal stress are low. In these results, the sealing rings with a hollow space in the center of the cross sectional area is recommended to increase an extended endurance stability of sealing rings. But, the solid sealing ring is designed to guarantee the sealing safety of a contact sealing ring.

Key words : sealing ring, o-ring, deformation behavior stability, stress and strain

†교신저자:ckkim_hongik@nate.com

I. 서론

배관과 같은 유체시스템에서 널리 사용하는 체크밸브(check valve)는 작동유체(기체나 액체)의 이송, 차단, 유동량과 같은 유체의 유동제어를 위해 사용하는 핵심부품이다. 체크밸브에서 유체의 유동을 제어할 경우 밸브의 내부에서는 순간적으로 발생하는 유체압력이 급상승하기 때문에 내부유체는 연결부나 작동부를 통해 외부로 누설하려 한다.

체크밸브는 배관라인의 중간에 연결하여 사용하기 때문에, 이들 연결부나 체크밸브 내부의 작동부를 통한 유체의 누설은 불가피하게 발생한다. 따라서 이들 연결부나 작동부에는 접촉식의 밀봉 링(sealing ring)을 설치하여 외부로의 누설을 차단한다. 접촉식 밀봉 링은 메탈과 메탈을 연결하는 부분에 삽입되어 탄성 반발력에 의해 누설을 차단하기 때문에 탄성거동성이 우수한 탄성중합체 소재를 사용하여 제조하고, 오링(o-ring)처럼 대칭형의 원형단면을 갖는 단순구조로 설계하는 것이 밀봉 안정성이 우수하다.

오링은 밀봉유체의 누설을 차단하기 위해 배관이나 밸브의 오링 홈(o-ring groove)에 조립되어 밀봉 작용을 한다. 기존의 오링은 가스누출 차단성을 고무소재의 탄성거동성에 의존하기 때문에 오링을 조립 상태로 오랫동안 사용하면 약화된 탄성성질에 의해 배관이나 체크밸브를 통과하는 유체의 압력변동에 신속하게 응답하지 못하면서 누설은 서서히 발생하게 된다. 기존 오링의 밀봉 내구성은 제조에 사용된 탄성중합체 고무소재의 탄성에만 의존하였기 때문에 고급소재를 적용하는 것이 밀봉품질의 중요한 변수가 되었다. 이처럼 오링을 제조하기 위한 중합체 고무소재의 혼합기술과 성형기술은 영세한 국내업체보다는 외국의 다국적 업체가 원천기술을 확보하고 있으므로 이들 외국 업체가 제조한 오링제품의 밀봉성과 내구 안전성이 우수하다는 것은 잘 알려져 있다.

탄성중합체 오링의 변형거동 안정성에 영향을 미치는 주요인자로는 소재의 탄성변형 거동특성과 밀봉 절단면의 형상이다. 소재특성과 오링의 형상변화에 따른 변형거동 밀봉성이 달라지는 것은 당연하지만, 동일한 탄성체 고무소재를 사용해도 밀봉 링의 접촉 단면 형상과 빈 공간을 어떻게 설계하느냐에 따라 변형거동 안전성은 크게 달라진다[1-3].

밀봉소재의 물리적 특성과 절단면 형상의 변화는 밀봉 링의 변형거동 안정성 및 밀봉성에 직접적으로 영향을 미치는 요소이다. 특히 밀봉 링의 형상변화는 밀봉 구조물과의 접촉조건이 달라지기 때문에 밀봉 링에 작용하는 변형률, 압축응력, 접촉법선응력이 변하게 된다. 따라서 밀봉 링을 사각형상의 홈에 조립

하는 과정에 가해지는 초기 압축률과 작동유체의 유동제어 과정에 발생하는 내부압력의 변동에 따라 달라지는 변형거동 안정성과 밀봉성을 밀봉접촉 단면 형상의 설계변수로 설정하여 유한요소법으로 해석하고자 한다.

II. 해석모델 및 해석조건

2.1 해석모델

Fig. 1은 사각 홈(rectangular groove)에 여러 가지 절단면 형상을 갖는 접촉식의 밀봉 링을 조립한 형태를 보여주고 있다. Fig. 1(a)에서는 작동유체의 외부 누설을 완벽하게 차단하기 위해 원형단면을 갖는 단순형상의 오링을 보여주는 것으로 배관이나 밸브의 밀봉을 위해 가장 많이 사용되고 있다.

또한, Fig. 1(b)은 밀봉접촉을 하는 절단면 형상을 중공오링으로 바꾸어 변형거동 안정성을 향상시킨 오링형상의 구조로, 원형단면을 갖는 기존의 오링보다는 압축소재를 줄일 수 있지만, 제조공정이 상대적으로 까다롭다.

또한, Fig. 1(c)은 밀봉접촉을 하는 절단면 형상을 중공형상의 중간부에 보강용 바를 추가로 설치한 중공 사각링으로 바꾸어 변형거동 안정성과 강도안전성을 함께 확보할 수 있도록 설계하였다.

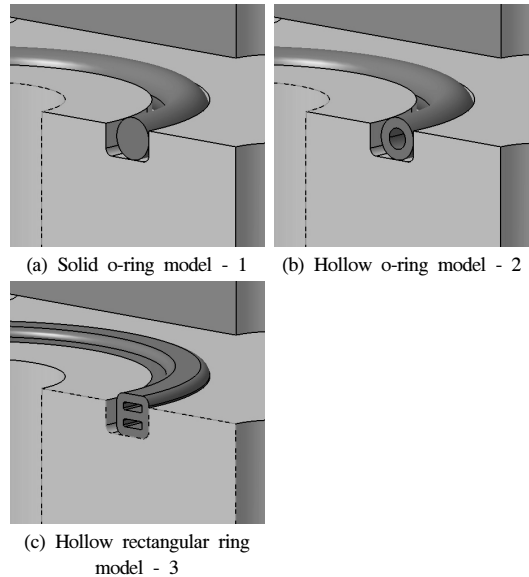


Fig. 1. Elastomeric rubber sealing rings with various cross sectional areas.

Table 1. Material properties of NBR sealing rings.

Material Properties	Values
Elastic modulus, MPa	3
Poisson's ratio	0.49
Density, kgf/cm ³	1,460

절단면 형상이 서로 다른 3가지의 밀봉 링을 사각 홈에 안전하게 설치할 수 있도록 제작된 홈은 KS규격[4]에 의한 고정용(평면) 오링 홈 치수(P계열)-P22를 따랐으며, 밀봉 링의 밀봉성을 확보하기 위해 적용한 초기 압축률은 25%이다.

본 연구에서는 밀봉 링의 변형률, 압축응력, 접촉법선응력 등과 같은 변형거동 안정성과 밀봉성을 해석하기 위해 FEM 프로그램 MARC[5]를 사용하였고, FEM 해석에 사용된 해석모델은 4절점 축대칭 솔리드 요소이다.

2.2 밀봉 링 소재

본 연구에서 사용한 밀봉 링의 소재는 NBR이다. 이 밀봉소재는 상온에서 탄성거동 안정성이 대단히 우수하고, 가격이 저렴하기 때문에 배관이나 밸브 등의 밀봉재로 널리 사용되고 있다. Table 1은 변형거동 안정성과 밀봉성 해석을 위해 사용한 NBR 소재의 물성치를 제시하고 있다.

III. 해석결과 및 고찰

체크밸브에 설치된 접촉식 오링의 변형거동 안정성과 밀봉성을 고찰하기 위해 Fig. 1에서 제시한 접촉단면적 형상이 다른 3가지 해석모델에 작동유체의 유동압력 5kgf/cm²~25kgf/cm²을 적용하였을 때 각각의 밀봉 링에서 발생한 변형률, 압축응력, 접촉법선응력을 상대적으로 비교하고, 그 결과를 고찰하였다.

3.1 변형거동 안정성 해석

Fig. 2에서는 접촉식 밀봉 링을 사각 홈에 조립할 때의 초기 압축률 25%를 가한 상태에서 3가지의 밀봉 링 해석모델에 대한 변형률 거동특성을 FEM으로 해석하였다.

Fig. 2(a)에서는 원형의 절단면 형상을 갖는 오링을 사각 홈에 조립한 압축오링의 일 측에 유체압력 5kgf/cm²을 가했을 때 발생한 최대 변형률은 0.34를 나타내고 있다. 이 오링에 유체압력을 점차적으로 높여감에 따라 NBR 소재가 이동하려는 변형거동을 보면, 밀봉간극의 좌상측을 향해 빠져나가려는 돌출현상이

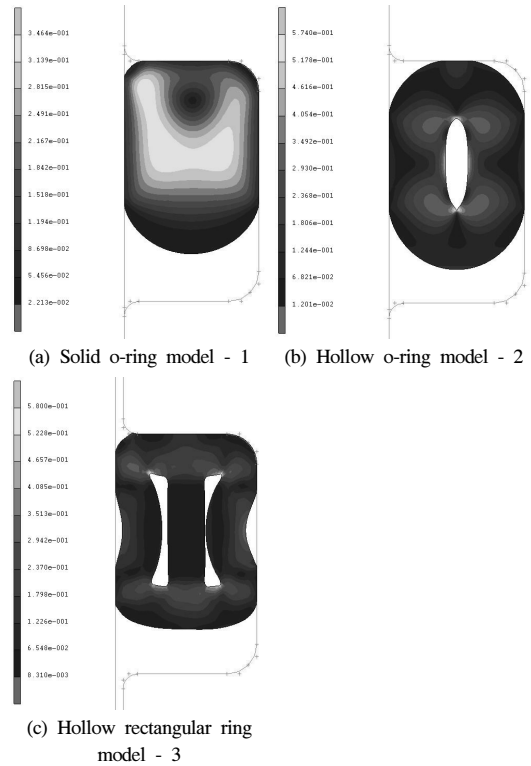


Fig. 2. Strain distributions of contact sealing rings.

발생하는 전 단계를 보여주고 있다. 오링과 같은 기존의 해석모델을 보면, 체크밸브에 공급된 작동유체의 압력을 지속적으로 상승할 경우 사각 홈에 연결되는 밀봉간극을 따라 오링소재가 밀봉간극을 통해 빠져나가려는 압출현상 때문에 궁극적으로 오링은 밀봉간극에 끼면서 손상을 받아 파손되므로 밀봉 링의 변형거동 내구 안전성은 크게 떨어진다.

Fig. 2(b)에서 보여준 중공오링은 오링의 중심부를 원형의 빈 공간으로 성형한 중공단면의 밀봉 링이다. 단순구조의 중공오링을 사각 홈에 넣고 NBR 소재로 제조한 중공오링의 탄성력에 형상변수를 설계에 반영한 해석모델, 즉 탄성거동 내구 안전성을 추가로 확보한 모델이다. 중공오링을 Fig. 2(a)와 동일한 크기의 사각 홈에 조립하고, 이 중공오링의 일 측에 유체압력 5kgf/cm²을 가했을 때 발생한 최대 변형률은 0.57을 나타내고 있다. 이것은 Fig. 2(a)의 기존 오링에 비해 1.68배나 높아진 변형거동 안정성을 보여주고 있다. 또한, 중공오링의 변형거동에 따른 압출 파손 현상은 관찰되지 않아 탄성거동 내구 안전성은 크게 향상된 것으로 판단된다. 이것은 중공오링의

중심부에 형성된 빈 공간에 의한 변형거동성이 대단히 크기 때문인 것으로 판단되며, 중공오링의 압축변형은 내경측의 중공부가 비대칭적으로 압축되면서 국부적인 압축응력 증가가 예상된다.

Fig. 2(c)에서 보여준 중공사각링은 중심부에 형성된 중공형상과 보강용 바를 함께 갖도록 구성하였다. 이 모델은 설계에 의한 탄성거동 내구성과 압축강도 안정성을 함께 확보한 해석모델이라 할 수 있다. 중공사각링의 변형거동 안정성을 해석하기 위해 Fig. 2(a)와 동일한 크기와 형상을 갖는 사각 홈에 조립된 상태에서 초기 압축률 25%를 가하였을 때 변형거동 안정성은 확보되었다. Fig. 2(c)의 FEM 해석결과에 의하면, 중공사각링의 일 측에 유체압력 5kgf/cm²을 가했을 때 발생한 최대 변형률은 0.58을 나타내고 있다. 이것은 Fig. 2(a)의 오링에 비해 1.71배나 높지만, Fig. 2(b)의 중공오링과는 거의 유사한 탄성거동 안정성을 보여주고 있으며, 작동유체의 압력이 상승할수록 탄성변형은 더 크게 진행되는 것으로 나타났다.

3.2 응력거동특성 해석

Fig. 3은 3가지 밀봉 링의 해석모델에 작동유체 압력을 최대 25kgf/cm²까지 공급하였을 때 밀봉 링에 작용하는 최대변형률, 최대응력, 최대접촉법선응력 해석결과를 제시하고 있다.

밀봉 링에 작용하는 최대변형률 거동특성을 보여준 Fig. 3(a)의 FEM 해석결과에 의하면, 기존의 오링보다는 밀봉 링의 중심부에 빈 공간을 확보한 중공오링이나 중공사각링에서 변형이 잘 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한, 작동유체의 압력을 5kgf/cm² 이상으로 높이면, 중공오링이나 중공사각링의 중심부에 형성된 빈 공간의 일부에서 변형이 국지적으로 진행되어 변형거동 내구성이 불안정해지는 것으로 예측되었다. 반면에 원형단면을 갖는 기존의 오링에서는 유체압력을 25kgf/cm² 이상으로 높여도 변형거동성은 비례적으로 줄어들고, 압축강도는 거의 포화상태에 도달하는 것으로 나타났다. 이것은 오링의 압축강도가 증가하면서 탄성거동성은 상대적으로 떨어져 오링의 밀봉 내구성은 약화되고, 오링을 장기간 사용하면 시효경화 현상도 함께 진행되어 정상적인 밀봉작용을 하지 못하는 원인으로 작용하게 된다.

또한, 밀봉 링에 걸리는 압축상태의 최대응력에 대한 FEM 해석결과를 보여준 Fig. 3(b)의 해석결과에 의하면, 중공오링이나 중공사각링에 작용하는 유체압력이 5kgf/cm² 이하일 경우 최대응력은 중공오링에서 가장 높고, 그다음으로는 중공사각링이며, 기존의 원형단면을 갖는 오링은 가장 낮게 나타났다. 그러나, 유체압력을 5kgf/cm² 이상으로 높이면 중공오링

이나 중공사각링의 중심부에 형성된 빈 공간의 일부에서 압축변형이 국지적으로 발생하면서 해석적으로는 최대응력을 예측할 수 없었다. 그러나, 원형단면의 오링에서는 유체압력을 지속적으로 증가시켜도 오링소재의 탄성거동성이 상실되어도 오링은 거의 균일한 최대응력을 보여주고 있다.

또한, 밀봉 링의 최대접촉법선응력에 대한 FEM 해석결과를 제시한 Fig. 3(c)에 의하면, 기존의 오링에서는 유체압력을 5kgf/cm² 정도까지 높여도 완만하게 증가하는 선형패턴을 보여주지만, 중공오링이나 중공사각링의 경우는 유체압력이 5kgf/cm² 이하일 경우에만 상대적으로 크게 낮아진 최대접촉법선응력을 나타내고 있다. Fig. 3(c)의 해석결과에서 보여준 최대접촉법선응력은 밀봉 링의 밀봉력을 나타내는 것으로 접촉식의 밀봉 링 설계에서는 중요한 요소로 간주된다.

FEM 해석결과에 의하면, 중심부가 원형단면의 빈 공간으로 형성된 중공오링에서 가장 낮은 밀봉성을 나타내고, 중심부에 형성된 빈 공간에 보강용 바를 설치한 중공사각링에서는 중공오링보다 높은 밀봉성을 보여주고 있으며, 원형단면을 갖는 오링에서는 밀봉성을 가장 높게 유지하고 있다.

Fig. 1에서 제시한 3가지 형상의 밀봉 링 해석모델에 대한 Fig. 3의 FEM 해석결과에서는 밀봉 링의 절단면 현상변화에 따라 변형거동성과 밀봉성이 크게 달라지고 있음을 보여준다. 즉, Fig. 1에서 제시한 해

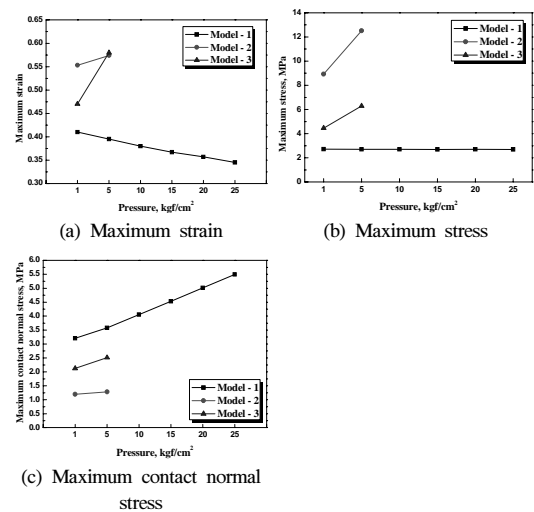


Fig. 3. Strain and stress characteristics for three contact sealing ring models.

석모델 3가지에 대해 변형거동 안정성 측면에서 보면, 유체압력이 5kg/cm^2 이하로 낮아지면 중공오링을 대표하는 해석모델 2의 경우가 가장 유연한 것으로 나타났다. 또한, Fig. 1에서 제시한 3가지의 해석모델에 대한 밀봉성을 상대적으로 비교하면, 기존의 오링으로 표현되는 해석모델 1의 경우에서 가장 우수하고, 그다음으로는 해석모델 3인 중공사각링이고, 밀봉성이 가장 취약한 모델은 중공오링인 것으로 나타났다. 이러한 해석결과는 중공오링이나 중공사각링의 중심부에는 변형거동성을 높이기 위해 빈 공간을 확보하였기 때문이다. 반면에 기존의 오링은 외부의 유체압력이나 초기 압축률에 대한 탄성거동 반발력, 즉 압축응력이 크기 때문에 최대접촉법선응력이 증가하여 탄성반발 밀봉력은 높아지게 된다.

3.3 압축률에 따른 밀봉특성 해석

Fig. 4는 밀봉 링에 가해지는 초기 압축률이 16% 이하로 낮아질 경우 밀봉 링에서 발생하는 최대접촉법선응력 해석결과를 제시하고 있다. Fig. 4의 FEM 해석결과에서 초기 압축률이 증가될수록 최대접촉법선응력은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 여기서, 변형거동성이 상대적으로 우수한 중공오링을 나타낸 해석모델 2에서 가장 낮은 밀봉력 해석결과를 제시하였다. 또한, 탄성변형 거동성이 상대적으로 낮은 오링, 즉 해석모델 1의 경우는 초기 압축률이 8% 이상으로 증가되면서 더 큰 밀봉력을 보여주고 있다.

결국, 밀봉 링의 밀봉성을 높이기 위해서는 초기 압축률을 높이는 것이 바람직하고, 중공오링이나 중공사각링처럼 중심부에 빈 공간을 설치한 밀봉 링은 바람직하지 않은 것으로 나타났다. 다만, 밀봉 링에 가해지는 유체압력이 낮을 경우 밀봉 링의 변형거동 안정성을 높여 내구 밀봉성을 확보하기 위해서는 밀봉용 소재의 고탄성에 밀봉 링의 내부에 변형거동이 가능한 빈 공간을 확보해주는 설계기술이 중요하다. 즉, 작동유체의 사용압력이 낮아 초기 압축률을 낮게 유지해도 되는 경우는 밀봉 링에 걸리는 밀봉력을 낮게 유지하면서 변형거동 안전성을 높게 설계함으로써 내구 안전성으로 표현되는 밀봉수명을 더 높일 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 접촉 절단면을 갖는 밀봉 링 해석모델 3가지에 대한 변형거동 안정성 및 밀봉성을 FEM으로 해석하였다.

낮은 밀봉력을 유지해도 되는 경우는 밀봉 링의

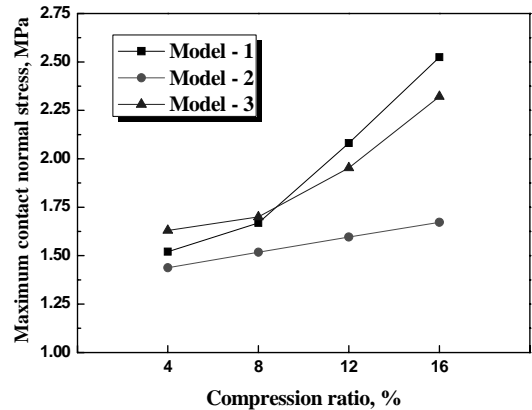


Fig. 4. Maximum contact normal stress for three contact sealing ring models as a function of a compression rate with the inner pressure of 5kg/cm^2 .

변형거동성을 높여 밀봉수명을 더 길게 확보할 수 있도록 중심부에 빈 공간을 확보하는 것이 중요하다. 그렇지만, 유체압력에 대해 밀봉성을 높이기 위해서는 밀봉 링에 빈 공간을 넣어서는 안 되고, 하나의 몸체로 채워지게 설계하는 것이 좋다.

따라서 접촉식 밀봉 링에서 높은 밀봉성과 장수명을 원하는 경우는 탄성거동이 우수한 밀봉소재를 사용하여 설계하는 것이 유리함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Kim, C. K., Cho, S. H., and Kim, Y. G., "On the Contact Behavior Analysis and New Design of O-ring Seals", Proceedings of the Second Asia International Conference on Tribology, Oct. 21-24, Jeju Korea, pp.121-122, (2002)
- [2] 김청균, "LPG 충전노즐용 O-링과 패킹의 응력 거동해석에 관한 연구", 한국윤활학회, Vol. 22, No. 1, pp.23-28, (2006)
- [3] 김청균, "LPG 용기 밸브용 O-링의 누설안전성에 관한 해석적 연구, 한국가스학회지, Vol. 11, No. 2, pp.37-42, (2007)
- [4] KS B 6212, Valves for liquefied petroleum gas cylinder.
- [5] MARC, MARC User's Manual Ver. 7.3, MARC Analysis Research Corp., California USA, (1999)