

NBR and FFKM O-링시일의 접촉거동 해석에 관한 연구

고영배* · 황준태* · 조승현 · 김청균
*트리보가스텍
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

On the Contact Behavior Analysis of an O-ring Seal using NBR and FFKM

Young Bae Ko* · Jun Tae Whang* · Seung Hyun Cho · Chung Kyun Kim
*TriboGasTech
Hongik University tribology research center

Abstract - The sealing performance of an elastomeric O-ring seal using NBR and FFKM has been analyzed for the contact stress behaviors that develop between the O-ring seal and the surfaces with which it comes into contact. The leakage of an O-ring seal will occur when the pressure differential across the seal just exceeds the initial (or static) peak contact stress. The contact stress behaviors that develop in compressed O-rings, in common case of restrained geometry(grooved), are investigated using the finite element method. The analysis includes material hyperelasticity and axisymmetry. The computed FEM results show that the contact stress behaviors are related to materials of NBR and FFKM and temperature of vacuum chamber.

Key Words : O-ring, NBR, FFKM, temperature, contact stress, finite element analysis

1. 서 론

탄성 중합체로 제작된 O-링 시일(O-ring seal)은 정적 또는 동적인 접촉상태에서 기계장치를 간편하게 밀봉하기 위하여 널리 사용하고 있다. O-링 시일은 밀봉된 유체의 누설을 방지하고, 외부의 이물질 침입을 차단

하기 위한 기계요소 핵심부품으로 사용되며, 진공장치, 압력용기, 액츄에이터, 밸브 등에서 다양하게 응용되고 있다.

일반적으로 O-링은 복잡한 형상의 그루브에 갇혀서 항상 압축된 상태로 외력 또는 온도하중 등의 각종 하중조건에 대한 탄성 반발력을 적절히 유지해야 밀봉성능을 안정되

게 확보할 수 있다. 즉, O-링 시일은 압축력이 가해진 상태에서 소재의 대변형 성질에 의해 밀봉성능을 확보하게 된다.

O-링시일에서 사용된 소재는 비선형의 초탄성체인 관계로 실험적 데이터를 얻기가 대단히 까다롭다. 그래서, 최근에는 비선형 유한요소해석 프로그램의 혁신적인 발전으로 O-링에 대한 수치적 연구가 많이 활성화되었다[1].

George et al.[2]은 유한요소해석 프로그램을 이용하여 Lindley의 이론해석 모델[3]과 비교한 결과 잘 일치하고 있음을 보여주었다. 또한, Dragoni와 Strozzi[4]가 그루브안에 있는 O-링의 접촉응력에 대해 수행한 유한요소해석 결과도 이들과 유사한 결론을 얻었다. 그러나, 이들의 연구는 주로 그루브에 설치된 O-링에 기계적 하중을 가하고, 그것으로 인해 발생한 접촉응력에 관한 것으로 기하학적 파라미터 만을 고려한 제한적 결과를 제시하였다.

그래서, 본 연구에서는 O-링을 둘러싸고 있는 그루브의 온도와 압축력을 동시에 고려할 경우, O-링에서 발생한 온도분포, 열응력 분포, 접촉거동에 관한 문제를 보다 실제적인 밀봉문제로 접근하기 위하여, 신뢰성이 확보된 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC [5]로 해석하였다.

2. 모델링 및 해석 데이터

2-1. 접촉 열저항

상이한 재료로 구성된 두 물체가 접촉하는 모델에서 내부 열발생이 없는 열전달 해석은

1차원 정상상태 열전도를 고려하여야만 한다. 전기저항이 전기의 전도에 관계가 있는 것과 같이 열저항은 열의 전도에 관계가 있는 것처럼 저항을 구동 포텐셜(driving potential)의 해당하는 전달율에 대한 비로 정의한다면, 전도에 대한 열저항(thermal resistance for conduction)은 다음과 같다.

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (1)$$

또한 복합 시스템의 1차원 열전달율은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\sum R_t} \quad (2)$$

본 연구에서 해석 대상인 모델과 같이 al, FFKM, NBR 등 상이한 재료로 구성된 접촉 시스템에서는 열전달 해석을 위하여 뉴턴의 냉각법칙과 유사한 식으로 다음과 같이 정의되는 총합열전달계수(overall heat transfer coefficient) U를 사용한다.

$$q_x = UA\Delta T \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \quad (4)$$

$$\frac{1}{\left[\left(-\frac{1}{h_1}\right) + \left(-\frac{L_A}{k_A}\right) + \left(-\frac{L_B}{k_B}\right) + \left(-\frac{1}{h_2}\right) \right]}$$

윗 식에서 L_A 와 L_B 는 각각 열전달 방향에 수직인 접촉 재료의 길이를 나타내지만 본 해석에서 사용한 O-ring은 단면이 원형이어서 알루미늄 하우징과 수직으로 접하는 단면의 지름 길이를 사용하여 계산하였다. 식 (4)를 이용하여 계산된 하우징과 O-ring 사이의 접촉 열전달 계수는 $59.2\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이다.

2-2. 모델링

Hertz의 탄성이론에 기초한 Lindley의 이론해석 모델[3]은 O-링이 15% 정도 압축한 경우에 대하여 성립하지만, Green과 English [1]에 의해 수행된 압축력과 스퀴즈 레벨에 따른 강성도(stiffness) 연구결과에 의하면 압축율을 32%까지 적용하여도 된다고 보고하였다. 그러나, 본 연구에서는 O-링의 압축율을 18%로 일정하게 유지하여 O-링 시일의 접촉거동 특성 문제를 해석하였다.

또한, 탄성 중합체는 대표적인 비선형 재료로 탄성특성을 사용하여 변형거동을 나타내는 것이 소재의 대변형 특성을 정확하게 표현할 수 있는 것은 아니나, 폴리머와 같은 소재에 대한 변형거동 현상을 엄밀하게 나타내기 위해서는 Mooney-Revlin 상수와 Odgen 상수 등을 고려한 해석도 효과적일 수 있다[6]. Fig. 1은 진공 챔버(vacuum chamber)를 밀봉하기

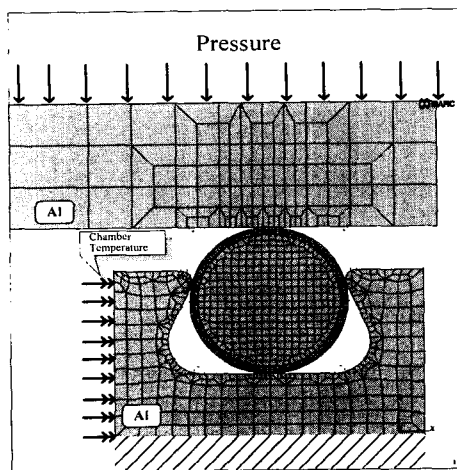


Fig. 1 Mesh generation and boundary conditions of an O-ring seal

위하여 사용된 O-링시일이 상부의 덮개에 의하여 삼각형상의 그루브에 압축·조립되기 이전의 유한요소 그리드 형상을 보여주고 있다. 외부의 공기가 진공 챔버 내부로 침입하는 것을 완벽하게 차단하기 위하여 일정한 압축율로 가한 상태에서 진공 챔버내에 있는 열원에 의하여 O-링은 온도의 영향을 받게 된다. 일반적으로 O-링은 챔버로부터 유입되는 열원에 의하여 열변형 거동에 의한 손상이 발생한다. 따라서 허용 온도가 낮은 NBR은 300℃가 넘는 챔버의 온도에서 정상적인 기능을 수행하기가 매우 어려우나 고온에도 우수한 동적특성을 가지는 FFKM은 열변형 거동으로 발생하는 손상을 줄일 수 있다. 또한, O-링을 항상 압착하고 있는 상부의 덮개판은 진공 챔버내의 이물질 침입을 방지하는 역할을 수행한다. O-링의 손상 방지와 내구성 확보를 위하여 상부 덮개에는 냉각수 챔버가 있어서 진공 챔버로부터 전도되는 열원과 특히 O-링에서 오는 열원을 연속적으로 방열시켜 O-링의 밀봉성능을 보호한다.

Fig. 1과 같은 O-링 시일 모델의 해석에 사용된 유한요소 데이터로 4-node isoparametric quadrilateral ring과 4-node heat transfer axisymmetric ring을 동시에 사용하였고, 2차원 축대칭 요소(axisymmetric element)와 평판응력 요소(plane stress)를 함께 사용하여 모델링 하였다. O-링 시일에서 축대칭 요소의 경우, O-링의 중심축으로부터 거리 또한 중요한 해석 변수중의 하나이고, 단면 지름 D 와 중심축과의 거리비가 O-링의 변형거동에 미치는 영향에 대해 많은 연구[4]

가 있었지만, 본 논문에서는 형상의 치수를 고정하였기 때문에 이러한 효과를 고려하지 않았다. O-링의 상부 덮개판에 하중을 주어 O-링이 압축되도록 하였고, 진공 챔버의 안쪽에는 고온부로 300℃의 온도를 적용하였고, 이곳을 제외한 나머지 부분은 상온 25℃가 작용하는 것으로 설계되었다.

한편 O-링에서 FFKM 소재의 효과를 관찰하기 위하여 순수 NBR과 FFKM만을 사용하였다.

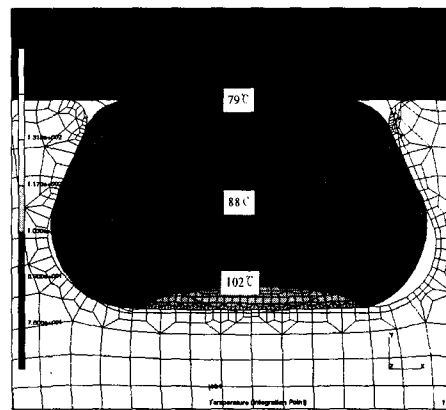
3. 해석 결과 및 토의

3-1. 온도 분포

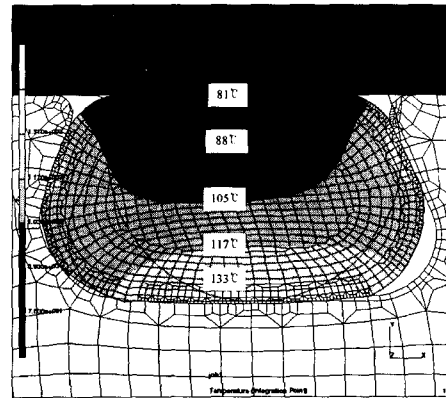
Fig. 2는 O-링을 18%로 압축하고 진공 챔버의 온도가 300℃일 때 O-링에서 발생한 온도 분포를 보여 주고 있다. 진공 챔버와 O-링이 접촉할 때 두 물체 사이에서 발생하는 열전달 계수는 앞서 설명한 바와 같이 열저항 개념을 도입하여 계산한 값 $59.2\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이다.

Fig. 2(a)에서 보여주는 바와 같이 NBR을 사용한 O-링의 온도는 거의 좌·우 대칭적으로 분포하는데 압축에 의해 열원 유입 길이가 넓은 아래면에서 가장 높은 온도 102℃가 발생하고, 알루미늄 냉각판과 접촉하는 윗면에서 가장 낮은 온도 79℃가 발생하였다. 또한 Fig. 2(b)는 FFKM만을 사용한 O-링에서 온도 분포를 보여주는 그림으로서 NBR만을 사용한 O-링과 같이 좌·우 대칭적으로 분포하지만 온도가 불균일하고 즉, 온도경계층이 많고 최고 온도와 최소 온도가 각각 133℃, 81℃로서 NBR에 비하여 높게

발생하였다. 이와 같은 온도 분포 결과는 Fig. 1에서 표시한 것과 같이 챔버의 왼쪽에서부터 유입된 300℃의 온도가 열전도가 높은 알루미늄 소재로 된 하우징 전체로 상당히 빠른 시간내에 전도되어 하우징과 접촉하는 O-링으로 거의 같은 양의 열량이 전이되기 때문이며, 접촉부 위치에 따른 발생 온도가



(a) NBR



(b) FFKM

Fig. 2 Temperature distribution of O-ring when compression is 18%

약간씩 차이가 나는 것은 O-링이 압축이 될 때 O-링과 진공 챔버 사이의 접촉 길이가 달라지면서 하우징으로부터 온도의 전이가 달라졌기 때문이고, 상부 덮개에서 O-링에서 전도된 열원을 연속적으로 방열시켰기 때문이다.

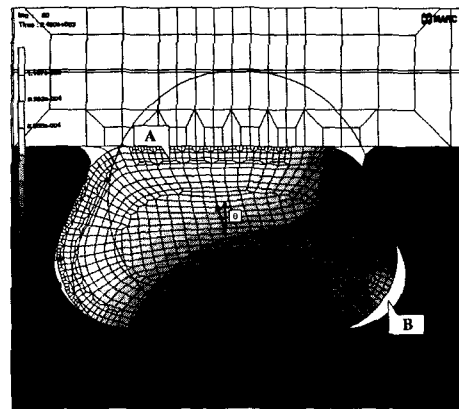
이와 같이 NBR만으로 된 O-링에 비하여 FFKM만으로 된 O-링이 온도가 높게 발생하고, 온도분포도 불균일하지만 작동 환경이 300℃ 이상의 고온이고, NBR소재의 허용 작동 온도가 100℃내·외임을 감안한다면 FFKM을 사용하는 것이 적합하다. 그러나 하우징에서 유입되는 열을 단열시켜서 100℃ 이내로 온도를 낮춘다면 NBR이 온도 측면에서 우수한 성능을 발휘할 수 있다.

3-2. 거동 해석

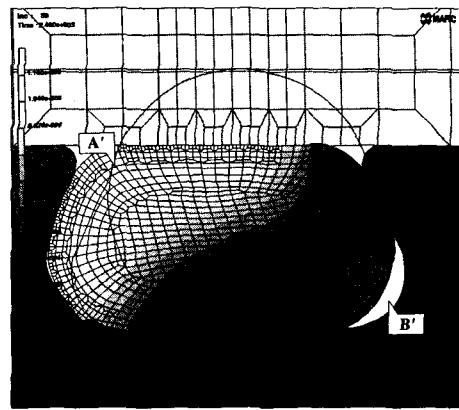
Fig. 3(a),(b)는 O-링을 18%로 압축하고 진공챔버의 온도가 300℃일 때 NBR과 FFKM을 사용한 O-링에서 발생한 거동량 분포를 보여 주고 있다. 진공 챔버의 왼쪽에서 챔버 내부로 자유롭게 변형을 일으키기 때문에 변위량은 O-링의 왼쪽이 오른쪽에 비하여 크게 발생한다. 또한 NBR을 사용한 O-링은 위치 A에서 최대 변위량의 발생하고, FFKM을 사용한 O-링은 최대 변위량의 발생 위치가 위치 A'로서 그루브 내부로 왼쪽 방향으로 거동량이 증가하고, 오른쪽 방향으로는 조금씩 감소한다. 그리고 동시에 위치 B와 B'로 표시한 하우징과 O-링 사이의 공간은 커지는데, 이러한 사실은 FFKM의 열팽창이 NBR과 비교할 때 2.43배가 커서 FFKM의 구성비가 증가할수록 챔

버가 열변형이 일으키는 방향으로 같이 열 변형을 일으키는 양이 증가하기 때문이다.

Fig. 4는 같은 조건에서 y축 방향으로 발생한 변위량을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대 y축 방향 변위량은 O-링의 아랫부분에서 발생하고 최소 y축 방향 변위량은 윗부분에서 발생하는데,



(a) NBR



(b) FFKM

Fig. 3 Deformation distribution of O-ring when compression is 18%

변위 분포와 메쉬 격자모양에서 보여 주는 것과 같이 O-링이 시계 반대 방향으로 비틀림이 발생하고 있다. 또한 O-링의 윗부분에서는 위와 같은 이유로 오른쪽에서 상대적으로 높은 y축 방향 변위량이 발생한다.

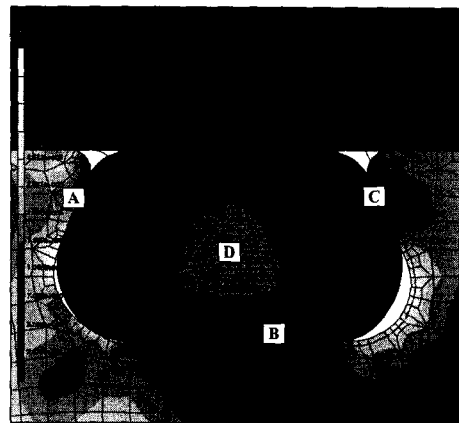
Fig. 3(a)에서 표시한 O-링 내부에서 발생한 비틀림각은 NBR로 된 O-링에서 16° 가 발생하였고, FFKM으로 된 O-링에서 18° 로 증가한다. 이것은 NBR과 FFKM를 사용한 O-링에서 비틀림의 차이는 작지만 NBR을 사용한 O-링이 거동 측면에서 안전하다고 할 수 있다.

3-3. 응력 해석

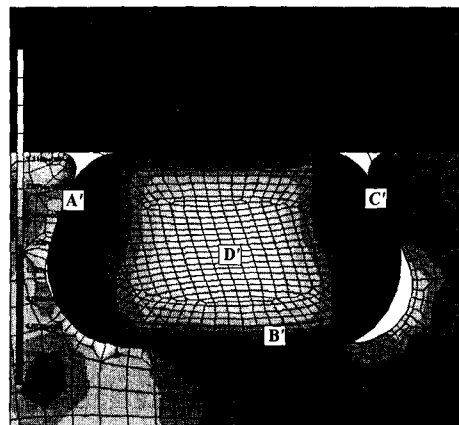
O-링을 18%로 압축하고 진공 챔버의 온도가 300°C 일 때 O-링에서 발생한 응력 분포를 Fig. 5(a)(b)에서 보여 주고 있다. 대변형을 일으키는 O-링의 특성상 O-링의 좌우에서 낮은 응력이 발생하고 가운데에서 높은

응력이 발생한다. 그러나 Fig. 5(a)의 위치 A, B, C와 Fig. 5(b)의 A', B', C'는 진공 챔버로부터 직접적으로 열유입이 되고 그루브와 마찰에 인한 전단력이 작용하여 높은 응력이 발생한다.

Fig. 5(a)에서 표시한 바와 같이 최대 응력은



(a) NBR



(b)FFKM

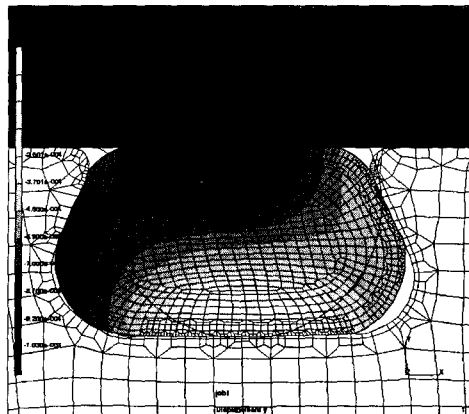


Fig. 4 y-axis Deformation distribution of O-ring when compression is 18%

Fig. 5 von Mises stress distribution of O-ring when compression is 18%

O-링 내부 D에서 발생하는데 NBR만으로 된 O-링은 1.615MPa이 발생하였고, FFKM만을 사용한 O-링은 3.82MPa이 O-링의 내부 D'에서 발생하였다. 이와 같이 FFKM만을 사용한 O-링에서 NBR만을 사용한 O-링보다 중심에서 발생하는 응력값이 증가하는 것은 위의 거동 해석에서 설명한 바와 같이 FFKM만을 사용한 O-링 내부에서 비틀림의 크기가 증가하고, 그루브 내부로 팽창이 증가하기 때문이다.

4. 결 론

그루브에 의해 갖혀 있는 O-링 시일에서 NBR과 FFKM의 두가지 소재를 사용한 경우에 대한 비선형 접촉거동의 해석하였다. O-링에서 발생한 온도분포는 대칭적으로 분포하는데 진공 챔버의 온도가 300℃가 넘는 고온에서는 FFKM과 같은 소재를 사용할 수가 있으나 NBR 소재를 사용한 O-링을 해석한 결과 NBR의 한계 온도인 100℃ 전·후를 넘어서기 때문에 O-링의 안전성에 문제가 발생할 수 있다. 그러나 하우징에서 유입되는 열을 단열시켜서 100℃ 이하로 온도를 낮출수만 있다면 온도 분포 측면에서 NBR이 유리하다고 할 수 있다.

그리고 O-링 그루브의 왼쪽과 오른쪽, 그리고 냉각챔버를 갖고 있는 덮개판 사이의 온도 구배로 O-링의 내부에서 비틀림이 발생하는데 FFKM으로 된 O-링보다 NBR로 된 O-링의 비틀림각이 작았다. 이와 같은 변형 거동 때문에 상부 덮개와 O-링 사이에는 O-링의 오른쪽이 왼쪽에 비하여 상대적

으로 높은 마찰응력이 발생하였다. 이때 발생한 응력은 FFKM으로 된 O-링이 NBR으로 된 O-링과 비교하여 높게 발생하였다.

참고 문헌

1. Green, G. and English, C., "Stress and Deformation of Compressed Elastomeric O-Ring Seals," 14th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, pp.83-95, April 1994.
2. George, A. F., Strozzi, A and Rich., J. I., "Stress Fields in a Compressed Unconstrained Elastomeric O-ring Seal and a Comparison of Computer Predictions and Experimental," *Tribology Int'l.*, Vol. 20, No. 5, pp. 237-247, 1987.
3. Lindley, P. B., "Compression Characteristics of Laterally Unstrained Rubber O-Ring," *J. of IRI*, Vol. 1, pp. 202-213, 1967.
4. Dragoni, E. and Strozzi, A., "Analysis of an Unpressurized, Laterally Restrained, Elastomeric O-Ring Seal," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 110, pp. 193-199, 1998.
5. MARC Analysis Research Corporation, Computer Program *MARC*, California, USA, 1994.
6. Jun, I. K, Kim, C. K. and Choi, I. H., "On the Contact Pressure of Lip Seals for a Ball Bearing," *Proc. of Int'l Symp on Tribology*, Beijing Tsinghua University, Oct. 1993.