

# 바이폴리머 O-링 시일의 밀봉특성 해석 및 설계

고영배 · 김청균 · 이일권\*

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

\*대림대학교 자동차과

## On the Sealing Characteristics Analysis and Design of Bi-Polymer O-ring seals

Young Bae Ko · Chung Kyun Kim · Kwon Il Lee\*

*Hongik University tribology research center*

*\*Department of Automotive Engineering, Dealim College*

---

**Abstract** - The sealing performance of an elastomeric O-ring seal using bi-materials 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 a ratio of length between NBR and FFKM and temperature of vacuum chamber.

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

### 1. 서론

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 차단하기 위한 기계요소 핵심부품으로 사용되

며, 진공장치, 압력용기, 액츄에이터, 밸브 등에서 다양하게 응용되고 있다.

일반적으로 O-링은 복잡한 형상의 그루브에 갖혀서 항상 압축된 상태로 외력 또는 온도하중 등의 각종 하중조건에 대한 탄성 반발력을 적절히 유지해야 밀봉성능을 안정되게 확보할 수 있다. 즉, O-링 시일은 압축력이 가해진 상태에서 소재의 대변형 성질에

의해 밀봉성능을 확보하게 된다.

O-링 시일에서 사용된 소재는 비선형의 초탄성체인 관계로 실험적 데이터를 얻기가 대단히 까다롭다. 그래서, 최근에는 비선형 유한요소해석 프로그램의 혁신적인 발전으로 O-링에 대한 수치적 연구가 많이 활성화 되었다[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 발생된 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 발생된 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. 소재

O-링 시일이 반도체 장비, 항공기 부품 등 대단히 높은 정밀도를 필요로 하는 곳에 사용되는 경우에는 특수 가공을 한 제품을 사용하지, 일반적으로는 기계적 특성은 다

소 떨어지지만 가격면에서 경쟁력이 있는 NBR이 보편적으로 사용된다. 그러나 최근에는 장비의 정밀도가 갈수록 높아지고 운행 조건은 고온·고속과 같이 가혹해지는 경향이어서 O-링과 같은 기계 부품의 성능이 월등히 향상되어야만 하지만, 소재의 가격이나 제조비용이 높고 대부분 수입에 의존하는 현실이다. 따라서 본 논문에서는 기계적 특성의 우수성과 가격 측면을 고려하여 대부분 NBR 소재를 사용하고 FFKM을 얇게 코팅한 모델을 사용하여 소재 비용은 절감하는 대신 기계적 특성은 기존의 NBR 제품에 비해 향상된 모델을 해석하였다.

니트릴부다디엔 고무(NBR)은 가솔린, 광유, 연료유, 에탈린 글리콜 등에 대한 우수한 저항력으로 O-링 시일의 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. 니트릴 고무의 허용 작동 온도는  $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$ 이나 수소를 첨가한 소재는 최대온도  $150^{\circ}\text{C}$ 까지 성능을 유지하는 것도 있다[7].

해석에 사용된 4079 FFKM 과불화 탄성체(Perfluoroelastomer)는 DuPont Dow Elastomers에서 제조되었는데 O-링, diaphragms, seals, 또는 항공산업에서 널리 사용하기 위하여 낮

은 압축으로 합성된 것으로서 뜨거운 공기에서 노화가 되지만 우수한 기계적 특성과 화학적 저항력을 가진 carbon black-filled 혼합물이다. 또한 그것은 유기질과 비유기질 산, 알데히드에서 약간의 팽창을 하고 반복적인 가열과 방열(temperature cycling effects) 효과에 잘 반응한다. 높은 온도에서 짧은 진폭(short excursion)을 갖는데 최대 작업 온도는 316 °C이다. 뜨거운 물/수증기가 있는 장치나 뜨거운 지방성 아민(aliphatic amines)과 에틸렌 산화물, 프로필렌 산화물 등이 접촉하는 곳에서 사용하는 것은 바람직 하지 않다. 해석에 사용된 NBR과 FFKM에 대한 물리적, 열적 특성을 표 1에 나타내었다.

## 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

Table 1. Physical and thermal properties of O-ring seals

Material type	NBR	FFKM
Young's modulus, MPa	3	7.2
Possion's ratio	0.49	0.49
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	1460	1950
Thermal expansion coefficient, $\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$	94.4	229
Thermal conductivity, W/m · K	0.43	0.19
Specific heat, J/kg · K	2000	945

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-Revin, Odgen 상수 등을 고려한 해석도 효과적일 수 있다[6].

Fig. 1은 진공 챔버(vacuum chamber)를 밀봉하기 위하여 사용된 O-링 시일이 상부의 덮개에 의하여 삼각형상의 그루브에 압축·조립되기 이전의 유한요소 그리드 형상을 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 O-링 시일의 내부는 NBR소재를 사용하였고, 외부에는 FFKM소재를 사용하였다.

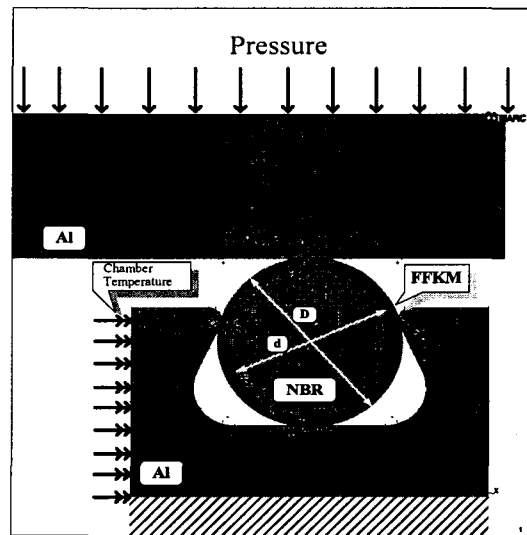


Fig. 1 Mesh generation and boundary conditions of an O-ring seal

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°C가 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

서 O-링이 압축되도록 하였고, 진공 챔버의 안쪽에는 고온부로 300°C의 온도를 적용하였고, 이곳을 제외한 나머지 부분은 상온 25°C가 작용하는 것으로 설계되었다.

한편 O-링에서 FFKM 소재의 효과를 관찰하기 위하여 순수 NBR과 FFKM만을 사용하였을 경우와 O-링 전체지름  $D$ 에서 내부 NBR이 차지하는 지름  $d$ 의 비 즉,  $d/D$ 가 0.9, 0.8, 0.6인 5가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

### 3. 해석 결과 및 토의

#### 3-1. 온도 분포

Fig. 2는 O-링을 18%로 압축하고 O-링 시일에 사용된 Fig. 1에서  $d/D$ 가 0.8이며 진공 챔버의 온도가 300°C일 때 O-링에서 발생한 온도 분포를 보여 주고 있다.

그림에서 보여주는 바와 같이 O-링의 온

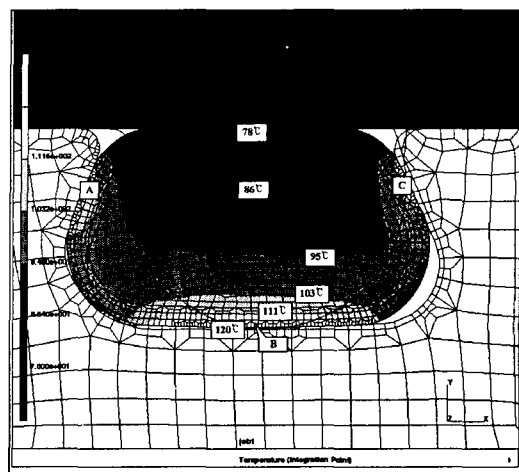


Fig. 2 Temperature distribution of O-ring when compression is 18% and ratio of diameter  $d/D$  is 0.9

도는 거의 좌·우 대칭적으로 분포하는데 압축에 의해 열원 유입 길이가 넓은 접촉부 위치 B에서 가장 높은 온도 120°C가 발생하고, 다음으로 접촉부 위치 A에서 112°C가 발생하였으며, 접촉부 위치 C에서 109°C가 발생하였으며, 접촉부 위치 D에서 가장 낮은 온도 78°C가 발생하였다. 이와 같은 온도 분포 결과는 그림 1에서 표시한 것과 같이 챔버의 왼쪽에서부터 유입된 300°C의 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 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.

한편 허용 온도가 NBR이 최대 100°C이고, FFKM이 최대 316°C임을 감안한다면 O-링의 내부에서 발생한 온도 분포가 FFKM 소재의 위치에서 120°C가 발생하여 FFKM에서는 온도 측면에서 안정적이거나, NBR 소재의 위치에서 103°C 이내로 발생하였기 때문에 온도 측면에서 불안정적이라고 할 수 있다.

Fig. 3은 18%로 압축하고 진공 챔버의 온도가 300°C일 때 O-링 시일에 사용된 NBR과 FFKM의 구성비에 따른 O-링에서 발생한 최대 온도와 최소 온도 분포를 보여 주고 있다. 순수 NBR을 사용한 경우에는 최고 온도와 최소 온도가 각각 108, 79°C이고, 길이비 d/D가 0.9일 때 최고 온도와 최소 온도가

각각 115, 79°C이고, 길이비 d/D가 0.8일 때 최고 온도와 최소 온도가 각각 120, 78°C이며, 길이비 d/D가 0.6일 때 최고 온도와 최소 온도가 각각 129, 79°C이며, 순수 FFKM을 사용한 경우에 발생한 최고 온도와 최소 온도는 각각 143, 81°C이다. 또한 NBR과 FFKM의 접촉면에서 온도는 길이비 d/D가 0.9, 0.8, 0.6 일 때 각각 110°C, 105°C, 103°C로 낮아진다.

이와 같이 O-링 내부의 온도 분포는 FFKM의 사용량이 많을수록 최대 온도가 증가하고, NBR과 FFKM의 경계면에서 발생하는 온도가 감소하는 것은 FFKM의 열확산율(Thermal diffusivity)이  $0.103 \mu\text{m}^2/\text{s}$ 로서 NBR의  $0.147 \mu\text{m}^2/\text{s}$ 에 비하여 약 30%가 낮기 때문에 진공 챔버에서 유입되는 온도가 O-링의 외부에 있는 FFKM에서 잘 전이가 되지 않기 때문이다. 위에서 설명한 바와 같이 FFKM은 온도 측면에서 안정적이거나 NBR의 안정성을 해석하기 위해서는 NBR과 FFKM의

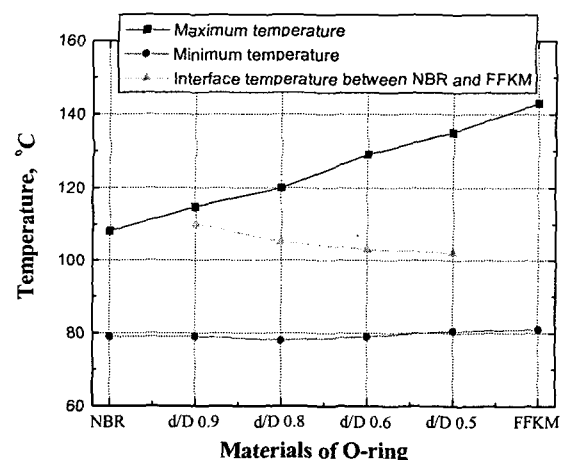


Fig. 3 Temperature of O-ring as ratio of diameter d/D

접촉면에서 온도가 100℃ 이하로 낮아져야 하기 때문에 낮아지는 경향으로 볼 때 길이 비를 더 줄여서 FFKM의 사용량을 더 늘려야 하만 한다.

### 3-2. 거동 해석

Fig. 4는 O-링을 18%로 압축하고 O-링 시일에 사용된 Fig. 1에서  $d/D$ 가 0.8이며 진공 챔버의 온도가 300℃일 때 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 O-링에서 순수 NBR에서 FFKM의 사용량이 늘어날수록 즉, 지름비  $d/D$ 가 0.9, 0.8, 0.6, 0.5일 때 최대 변위량의 발생 위치는 위치 A주위에서 발생하고 그림에서 화살표로 표시한 바와 같이 그루브 내부로 왼쪽 방향으로 거동량이 증가하고, 오른쪽 방향으로

조금씩 감소한다. 그리고 동시에 위치 B로 표시한 하우징과 O-링 사이의 공간은 점점 커지는데, 이러한 사실은 FFKM의 열팽창이 NBR과 비교할 때 2.43배가 커서 FFKM의 구성비가 증가할수록 챔버가 열변형이 일어난 방향으로 같이 열변형을 일으키는 양이 증가하기 때문이다.

Fig. 5는 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, 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. 6은 O-링의 지름에 대한 NBR의 지름비 즉,  $d/D$ 의 변화에 따른 O-링 내부에서

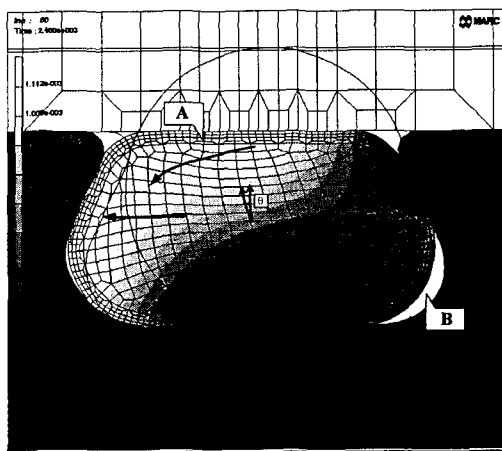


Fig. 4 Deformation distribution of O-ring when compression is 18% and ratio of diameter  $d/D$  is 0.8

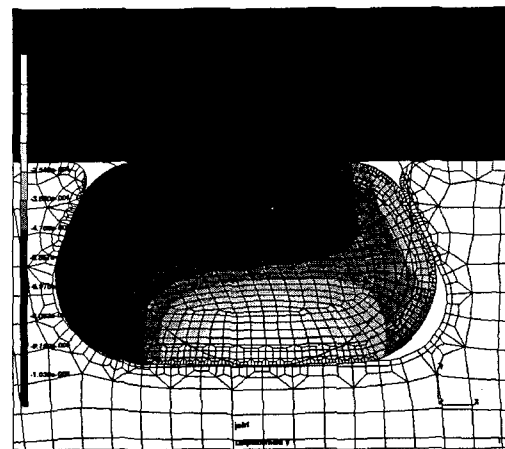


Fig. 5 y-axis Deformation distribution of O-ring when compression is 18% and ratio of diameter  $d/D$  is 0.8

발생한 최대 변위량과 좌·우 방향으로의 변위량, 그리고 시계 반대 방향으로 발생한 비틀림각을 나타내고 있다. 위에서 설명한 바와 같이 최대 변위량은 FFKM 소재가 있는 위치 A에서 발생하는데 순수 NBR로 된 O-링의 경우는 1.107mm에서 FFKM 소재로 된 O-링에서 1.166mm까지 FFKM의 사용량이 증가할수록 완만하게 증가하는 경향을 보여 준다. 또한 왼쪽 방향으로 변위량은  $d/D$ 가 작아질수록 즉, FFKM의 사용량이 증가할수록 증가하고, 오른쪽 방향으로 발생하는 변위량은 감소하는데, 왼쪽 방향으로 발생하는 변위량과 오른쪽 방향으로 발생하는 변위량의 차이가 점점 증가하고 있다. 이것은 NBR에 비해 열팽창이 잘 일어나는 FFKM의 소재의 사용량이 증가할수록 같은 압축율에도 왼쪽으로 변형이 많이 발생한다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 O-링의 내부에서 발생하는 비틀림과도 관련이 있는데 그림의 오른쪽 변에 크기를 표시하였다. Fig. 4에서 표시한 O-링 내부에서 발생한 비틀림각은

순수 NBR로 된 O-링에서  $16^\circ$ 가 발생하였고,  $d/D$ 가 증가할수록 증가하다가 순수 FFKM로 된 O-링에서  $18^\circ$ 로 감소한다. 이것은 NBR과 FFKM의 이종 재료를 사용할 경우 외곽의 FFKM의 비틀림은 작지만 내부의 NBR은 비틀림이 많이 발생하여 장시간 O-링을 사용할 경우 안전에 문제가 발생할 수 있음을 의미한다.

### 3-3. 응력 해석

O-링을 18%로 압축하고 O-링 시일에 사용된 Fig. 1에서  $d/D$ 가 0.8이며 진공 챔버의 온도가  $300^\circ\text{C}$ 일 때 O-링에서 발생한 응력 분포를 Fig. 7에서 보여 주고 있다. 대변형을 일으키는 O-링의 특성상 O-링의 좌·우에서 낮은 응력이 발생하고 가운데에서 높은 응력이 발생한다. 그러나 위치 A, B, C는 진공 챔버로부터 직접적으로 열유입이 되고 그 루브와 마찰에 인한 전단력이 작용하여 높은 응력이 발생한다.

최대 응력은 O-링 내부에서 발생하는데 NBR만을 사용한 경우에는 1.615MPa이 발생하였고, O-링에서 지름비  $d/D$ 가 0.9인 경우에는 1.69MPa,  $d/D$ 가 0.8일 때에는 1.73MPa이 내부 NBR의 중심 주위에서 발생한다. 그러나 지름비  $d/D$ 가 0.6인 경우에는 내부 NBR에서 1.93MPa이 발생하지만 최대 내부 응력은 NBR과 FFKM의 경계에서 2.59MPa이 발생하고,  $d/D$ 가 0.5일 때에는 내부 NBR에서 2.03MPa이 발생하고 NBR과 FFKM의 경계에서 3.02MPa이 발생한다. 그러나 순수 FFKM만을 사용한 경우에는 3.82MPa이 O-링의 중심 주위에서 발생하였다. 이와 같이

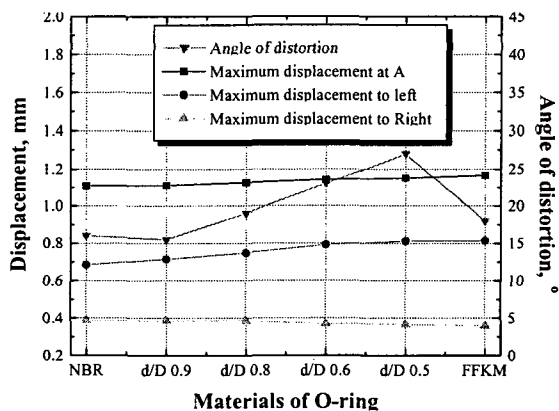


Fig. 6 Displacement of O-ring and angle of distortion as ratio of diameters  $d/D$

FFKM의 사용량이 많을수록 중심에서 발생하는 응력값이 증가하는 것은 위의 거동 해석에서 설명한 바와 같이 FFKM 소재의 사용량이 증가할수록 O-링 내부에서 비틀림의 크기가 증가하고, 그루브 내부로 팽창이 증가하기 때문이다.

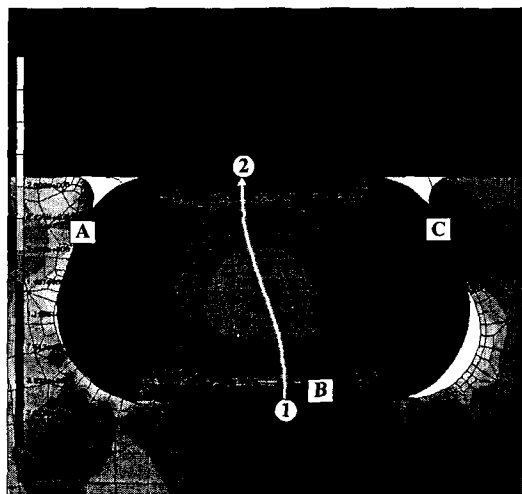


Fig. 7 von Mises stress distribution of O-ring when compression is 18% and ratio of diameter  $d/D$  is 0.8

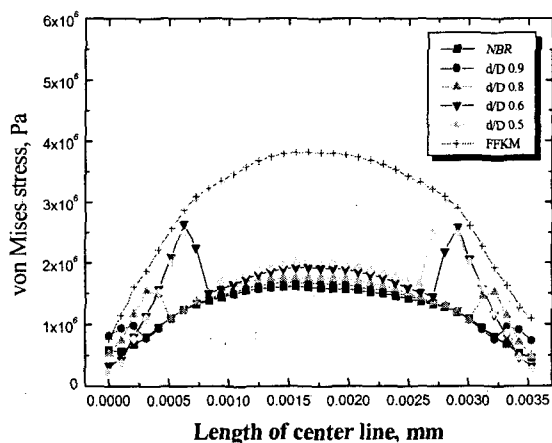


Fig. 8 von Mises stress distribution in center line (Fig. 7 ①→②)

Fig. 8은 O-링의 지름에 대한 NBR의 지름비 즉,  $d/D$ 의 변화에 따른 O-링 내부에서 발생한 응력을 Fig. 7에서 표시한 바와 같이 ①→② 방향으로 관찰한 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 가로축의 왼쪽이 그루브의 밑면과 접촉하는 응력 관찰 위치 ①이고 오른쪽이 상부 알루미늄 냉각판과 접촉하는 ②의 위치이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 변형율이 가장 크게 발생하는 O-링의 내부에서 응력이 가장 크게 발생하는데

FFKM의 사용량이 증가할수록 즉,  $d/D$ 의 비가 작아질수록 응력값은 증가한다. 특히 주목할 점은 지름비  $d/D$ 가 0.9, 0.8, 0.6, 0.5와 같이 NBR과 FFKM의 이중 소재로 된 O-링의 경우에는 NBR과 FFKM의 경계에서 응력이 급격히 증가하여 FFKM만을 사용했을 때와 비슷해지는 것을 알 수 있다. 이것은 FFKM이 NBR에 비하여 열팽창율이 2.43배가 높기 때문에 경계부분에서 FFKM은 많이 팽창하려고 하고 NBR은 상대적으로 작게 팽창하려고 하기 때문이다. 이와 같이 NBR과 FFKM의 경계에서 응력이 급격히 증가하면 O-링이 사용되는 동안 비틀림과 같은 변형에 의해 경계에서 찢어지는 등 내구성에 문제점이 발생할 가능성이 많다.

#### 4. 결론

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 O-링의 내부에 사용하여 해석한 결과 NBR의 한계 온도인 100℃ 전·후를 넘어서기 때문에 O-링의 안전성에 문제가 발생할 수 있어서 FFKM으로부터 NBR로의 열유입을 차단하는 방법이 필요하다.

그리고 O-링 그루브의 왼쪽과 오른쪽, 그리고 냉각챔버를 갖고 있는 덮개판 사이의 온도 구배로 O-링의 내부에서 비틀림이 발생하는데 FFKM의 사용량이 증가할수록 크기가 증가한다. 이와 같은 변형 거동 때문에 상부 덮개와 O-링 사이에는 O-링의 오른쪽이 왼쪽에 비하여 상대적으로 높은 마찰응력이 발생하였다. 이때 발생한 응력은 FFKM만을 사용해서 해석한 경우가 가장 높고 NBR만을 사용한 경우가 가장 낮으며 FFKM의 구성비가 증가할수록 높게 발생하였다. 또한 이중 소재를 사용한 경우에는 FFKM과 NBR의 경계에서 응력이 급격히 증가하는데, 이와 같은 응력의 급격한 상승이 O-링의 안전성에 문제를 일으킬 가능성이 있기 때문에 온도 조건만 충족시킨다면 FFKM의 사용량을 가능한한 줄여서 FFKM과 NBR의 경계에서 응력이 증가하는 정도를 줄여서 O-링의 안전성을 확보해야 한다.

## 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.
7. Rober V. Brink, Daniel E. Czernik, Leslie A. Horve, "Handbook of fluid sealing," Macgraw-hill, pp. 12.8~12.9, 1993.