

이중 O링의 접촉거동 해석에 관한 수치적 연구

김청균[†] · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

A Numerical Study on the Contact Behavior Analysis of Double Layer O-rings

Chung Kyun Kim[†] and Seung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – The sealing performance of an elastomeric O-ring using the double layered material 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 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 dovetail grooved geometry, are investigated using the finite element method. The FE analysis includes material hyperelasticity and axisymmetry. The computed FEM results show that the contact stress behaviors are related to the ratio of diameter between the inner ring and the outer ring, and the temperature of vacuum chamber.

Key words – double layer O-ring, dovetail groove, NBR, FFKM, contact stress, finite element analysis.

1. 서 론

탄성체 성질이 대단히 우수한 폴리머 소재로 제작된 O링은 유체의 누설을 방지하고, 외부의 이물질 침입을 차단하기 위하여 산업용 용기나 미끄럼 마찰부에 설치하여 널리 사용되고 있다. O링은 일반적으로 사각 그루브에 설치되지만, 완벽한 밀봉을 요하는 경우는 도브테일 그루브(dovetail groove)와 같은 특수한 형상에 압축상태로 압입되어 압축하중이나 온도하중에 탄성 반발력을 적절히 유지하도록 설계하여 밀봉성능을 안정되게 확보한다.

O링 소재는 비선형의 초탄성체인 관계로 배합성에 따라서 기계적, 화학적 특성이 크게 달라지므로 일관된 데이터를 확보하기가 대단히 어렵다. 따라서, 시간과 개발비 측면에서 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용하여 O링의 거동특성을 수치적으로 해석하려는 연구가 활성화되고 있다[1-4].

O링에 대한 기존의 연구는 사각 그루브에 설치된 O

링에 기계적 하중을 가하고, 그것으로 인해 발생된 접촉응력에 관한 것으로 기하학적 영향을 고려한 제한적 결과를 제시하였다. 그러나, 본 연구에서는 O링의 형상이 이중소재를 사용한 복합재이고, O링을 둘러싸고 있는 그루브에 온도하중과 압축하중이 동시에 작용하는 이중의 O링 형상에 대한 해석으로 차이점이 많다. 이러한 이중 O링에 대한 온도분포, 열응력 분포, 접촉거동에 관한 문제를 보다 실제적인 밀봉문제로 접근하기 위하여 비선형 신뢰성이 확보된 MARC[5]를 사용하였다.

2. O링설계 및 해석 모델

2-1. 소재설계 특성

내열성과 내케미컬 성능이 대단히 우수한 FFKM 소재와 내구성과 탄성 거동성이 우수한 NBR 소재를 사용하여 이중형상의 복합소재 O링이라는 새로운 시일의 변형거동 특성에 대하여 고찰하고자 한다. 사용된 소재의 물리적 특성과 열전달 특성이 서로 다르기 때문에 열전도 측면에서 소재의 두께와 접촉 및 접합성 등에 대한 해석이 세심하게 진행되어야 한다.

[†]주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

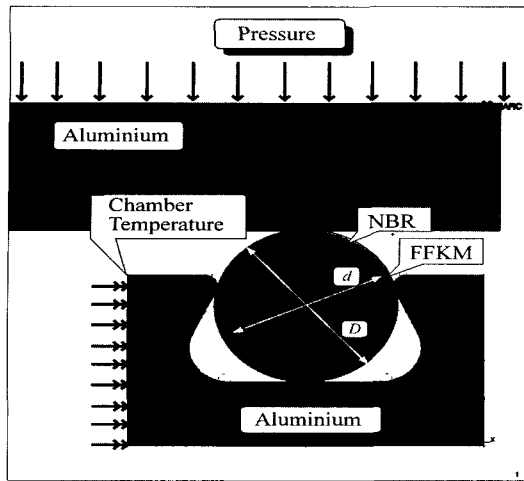


Fig. 1. Mesh generation and boundary conditions of an O-ring with a dovetail groove.

2-2. 모델링

Lindley가 O링에 대하여 수행한 이론해석 모델[1]은 Hertz의 탄성이론에 기초한 것으로 O링의 압축성은 15% 정도까지 유효하다. 그러나, Green과 English[2]에 의해 수행된 압축력과 스퀴즈 레벨에 따른 강성도 (stiffness) 연구결과는 압축율이 32%까지 적용하여도 된다고 보고하였다. 이러한 해석결과는 O링 소재의 특성이 서로 다르기 때문에 발생된다. 따라서, 본 연구에서는 이들의 연구결과를 기초로 압축율을 18% 이내로 제한된 O링의 접촉거동 특성 문제를 해석하였다.

Fig. 1은 진공챔버를 밀봉하기 위하여 사용된 O링이 상부의 덮개에 의하여 도브테일 형상의 그루브에 압축·조립되기 이전의 유한요소 그리드를 보여주고 있다. 이 그림에서 보여주는 O링의 내부링은 NBR을 외부링은 FFKM을 각각 사용하였다. 외부의 공기가 진공챔버 내부로 침입하는 것을 완벽하게 차단하기 위하여 일정한 압축율로 가한 상태에서 진공 챔버내에 있는 열원에 의하여 O링은 온도의 영향을 받게 된다. 일반적으로 O링은 진공챔버로부터 유입되는 열원에 의하여 열변형 거동에 의한 손상이 발생한다. 따라서 허용온도가 낮은 NBR은 300°C가 넘는 챔버의 온도에서 정상적인 기능을 수행하기가 매우 어려우나, 고온에서 우수한 동특성을 가지는 FFKM은 열변형 거동으로 발생하는 손상을 크게 줄일 수 있다. 또한, O링을 항상 압착하고 있는 상부의 덮개판은 진공챔버내의 이물질 침입을 방지하는 역할을 수행한다. O링의 손상 방지와 내구성 확보를 위하여 상부 덮개에는 냉각수 챔버가

있어서 진공챔버에서 유입되는 열원과 특히 O링에서 오는 열원을 연속적으로 방열시켜 O링의 밀봉성능을 보호한다.

Fig. 1과 같은 O링 모델의 해석에 사용된 유한요소 데이터로 4-node isoparametric quadrilateral ring과 4-node heat transfer axisymmetric ring을 동시에 사용하였고, 2차원 축대칭 요소와 평판응력 요소(plane stress)를 함께 사용하여 모델링을 하였다. O링에서 축대칭 요소의 경우, O링의 중심축으로부터 거리 또한 중요한 해석 변수중의 하나이고, 단면 지름 D 와 중심축과의 거리 d 가 O링의 변형거동에 미치는 영향에 대해 많은 연구[4]가 있었지만, 본 논문에서는 형상의 치수를 고정하였기 때문에 이러한 효과를 고려하지 않았다. O링의 상부 덮개판에 하중을 주어 O링이 압축되도록 하였고, 진공챔버의 안쪽에는 고온부로 300°C의 온도를 적용하였고, 이곳을 제외한 나머지 부분은 상온 25°C가 작용하는 것으로 설계되었다.

한편, O링에서 FFKM 소재의 효과를 관찰하기 위하여 순수 NBR과 FFKM만을 사용하였을 경우와 O링의 외곽링의 직경 D 에서 내부링이 차지하는 지름 d 의 비 즉, d/D 가 0.9, 0.8, 0.6인 5가지 경우에 대하여 해석을 수행하였고, 해석에 사용된 NBR과 FFKM에 대한 물리적, 열적 특성을 Table 1에서 제시하고 있다.

3. 해석결과 및 토의

3-1. 온도분포

Figs. 2와 3은 O링을 18%로 압축하고, 두께비 $d/D = 0.8$ 이며, 진공챔버의 온도가 300°C일 때 O링에서 발생한 온도분포와 최고온도를 각각 보여주고 있다. 진공챔버와 O링이 접촉할 때 두 물체 사이에서 발생하는 열전달 계수는 이론적 열저항 개념을 도입하여 계산한 값으로 59.2 W/m²·K이다.

Fig. 2에서 O링의 온도는 좌·우 대칭적으로 분포

Table 1. Physical and thermal properties of O-rings

Material type	NBR	FFKM
Young's modulus [MPa]	3	7.2
Poisson's ratio	0.49	0.49
Mass density [kg/m ³]	1460	1950
Thermal expansion coefficient [m/m·K]	94.4	229
Thermal conductivity [W/m·K]	0.43	0.19
Specific heat [J/kg·K]	2000	945

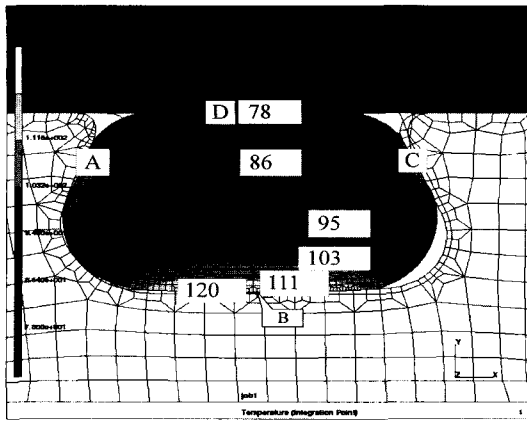


Fig. 2. Temperature distribution of an O-ring when the compression rate is 18% and the ratio of diameter d/D is 0.9.

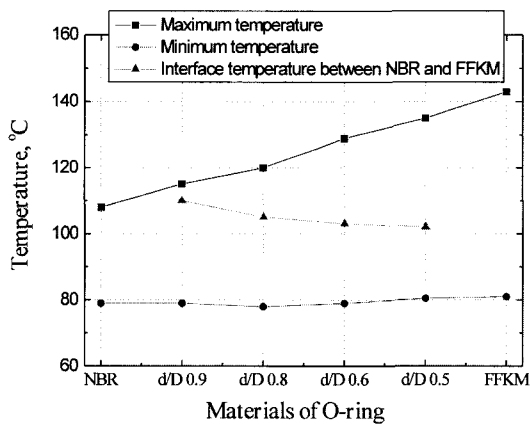


Fig. 3. Maximum and minimum temperatures of an O-ring as a function of the ratio of diameter d/D .

하는데, 압축에 의해 열원의 유입길이가 넓은 O 링의 하단부인 B에서 가장 높은 120°C가 발생하고, 그 다음으로 접촉부 A에서 112°C, 접촉부 C에서 109°C가 각각 발생하였다. 그리고, 접촉부 D에서는 가장 낮은 온도 78°C로 예측되었다. 이와 같은 온도분포는 Fig. 1에서 표시한 것과 같이 챔버의 왼쪽에서부터 유입된 300°C의 온도가 열전도가 높은 알루미늄 소재로 제작된 하우징 전체로 빠르게 전도되어 하우징과 접촉하는 O 링으로 거의 같은 양의 열량이 전달되기 때문이며, 접촉부 위치에 따른 발생 온도가 약간씩 차이가 나는 것은 O 링이 압축될 때 O 링과 진공챔버 사이의 실제적인 접촉길이가 달라지면서 하우징으로부터 온도 전달 정도가 달라졌기 때문이다. 여기에 냉각챔버가 설치된

상부의 알루미늄 덮개판에서는 O 링에 전도된 열원을 외부로 계속 방열시키므로 O 링에는 온도분포가 달라진다.

한편, 소재의 최대 허용온도는 NBR이 100~120°C 이고, FFKM이 316°C임을 감안하면 O 링 내부에서 발생한 온도분포는 FFKM의 위치에서 120°C가 발생하므로 FFKM에서는 온도 측면에서 안정적이거나, NBR 소재에서는 103°C 정도 발생하였기 때문에 불안정하다고 할 수 있다.

Fig. 3은 O 링 소재로 사용한 NBR과 FFKM의 두께비 d/D 에 따른 최고온도와 최저온도를 보여주고 있다. NBR 소재로 제작된 O 링의 경우 최고온도와 최저온도가 각각 108°C, 79°C이다. 그러나, 복합소재인 O 링 두께비 d/D 가 0.9일 때의 최고온도와 최저온도는 115°C, 79°C이고, $d/D=0.8$ 일 때는 120°C, 78°C이며, $d/D=0.6$ 일 때는 129°C, 79°C로 전달된 온도가 점점 높아지고 있다. 또한, 순수 FFKM으로 제작된 O 링의 경우는 발생한 최고온도와 최저온도가 각각 143°C와 81°C로 더 높게 나타났으나 원소재의 사용온도가 높기 때문에 대단히 안정적이다.

NBR과 FFKM의 접촉면에서 온도는 두께비 $d/D=0.9, 0.8, 0.6$ 일 때, 각각 110°C, 105°C, 103°C로 낮아진다. 이와 같이 O 링 내부의 온도분포는 FFKM의 사용량이 많을수록 최고온도가 높아지고, NBR과 FFKM의 경계면에서 발생하는 온도가 감소하는 것은 FFKM의 열확산율(Thermal diffusivity)이 0.103 m²/s로서 NBR의 0.147 m²/s에 비하여 약 30%가 낮기 때문이고, 진공챔버에서 유입되는 온도가 O 링의 외부에 있는 FFKM에서 전이가 잘 되지 않는 것이 큰 원인이다. 위에서 설명한 바와 같이 FFKM은 온도 측면에서 매우 안정적이다. NBR은 NBR과 FFKM의 접촉면에서 발생된 온도가 100°C 이하로 낮아져야 하기 때문에 계산결과를 보면 두께비를 더 줄여서 FFKM의 사용량을 늘리는 것이 열적 안정성을 확보할 수 있다.

3.2. 변형거동 해석

Fig. 4는 O 링을 18%로 압축하고, Fig. 1에서 $d/D=0.8$ 이며, 진공챔버의 온도가 300°C일 때 O 링에서 발생한 변형 거동량 분포를 보여주고 있다. 진공챔버의 왼쪽에서 챔버 내부로 자유롭게 변형을 일으킬 수 있기 때문에 변위량은 O 링의 왼쪽이 오른쪽에 비하여 크게 발생한다. 또한, O 링에서 순수 NBR에서 FFKM의 사용량이 늘어날수록 즉, 두께비 $d/D=0.9, 0.8, 0.6, 0.5$

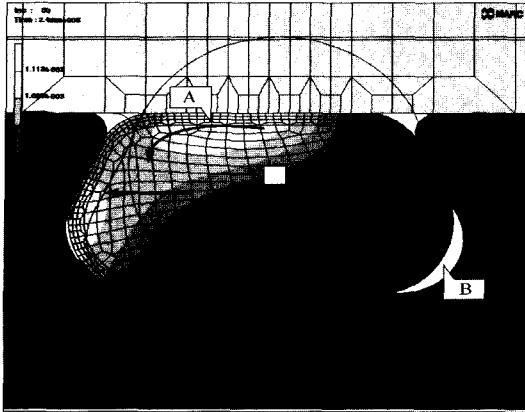


Fig. 4. Deformation distribution of an O-ring when the compression rate is 18% and the ratio of diameter d/D is 0.9.

일 때 최대 변위량은 O링의 상단부인 A주변에서 발생한다. 이 그림에서 화살표로 표시한 바와 같이 그루브의 왼쪽 방향으로 변형 거동량이 증가하지만, 오른쪽 방향으로로는 조금씩 감소한다. 동시에 위치 B로 표시한 하우징과 O링 사이의 공간은 점점 커진다. 이러한 계산결과는 FFKM의 열팽창이 NBR에 비하여 2.4배가 크기 때문에 FFKM의 사용량이 증가할수록 챔버 구조물에서 열변형이 일어나는 방향으로 같이 양의 열변형을 일으키기 때문이다.

Fig. 5는 y축 방향으로 발생한 변위량을 나타낸 결과이다. 이 그림에서 y축의 최대 변위량은 O링의 아랫부분에서 발생하고, 최소 변위량은 윗부분에서 발생한

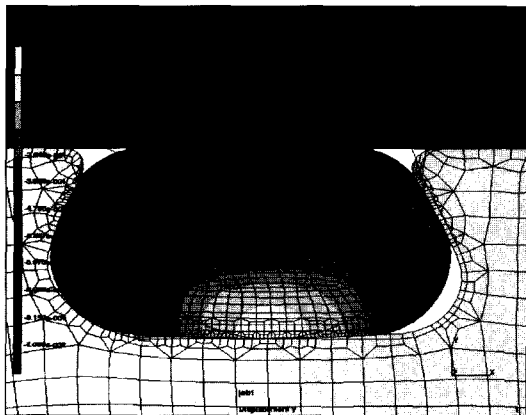


Fig. 5. Deformation distribution of an O-ring in y-direction when the compression rate is 18% and the ratio of diameter d/D is 0.9.

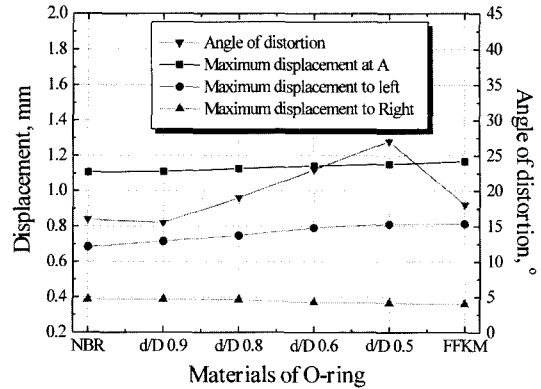


Fig. 6. Displacement of an O-ring and the angle of distortion as a function of the ratio of diameter d/D .

다. 여기서 변위량 분포와 메쉬 격자모양에서 보여 주는 것과 같이 O링이 반시계 방향으로 비틀림이 발생하고 있다. 또한, O링의 윗부분에서는 위와 같은 이유로 오른쪽에서 상대적으로 높은 y축 방향의 변위량이 발생한다.

Fig. 6은 O링 지름에 대한 NBR의 두께비 즉, d/D 의 변화에 따른 O링 내부에서 발생한 최대 변위량과 좌·우 방향으로의 변위량, 그리고 반시계 방향으로 발생한 비틀림각을 각각 나타내고 있다. 해석결과에 의하면 최대 변위량은 FFKM 소재가 있는 위치 A에서 발생하는데, 순수 NBR로 제작된 O링의 경우는 1.107 mm에서 FFKM 소재로 제작된 O링에서 1.166 mm까지 FFKM의 사용량이 증가할수록 완만하게 증가하는 경향을 보여준다. 또한, 왼쪽방향으로 변위량은 d/D 가 작아질수록 즉, FFKM의 사용량이 증가할수록 증가하고, 오른쪽 방향으로 발생하는 변위량은 감소하는데, 왼쪽 방향으로 발생하는 변위량과 오른쪽 방향으로 발생하는 변위량의 차이는 점점 증가하고 있다. 이것은 NBR에 비해 열팽창이 잘 일어나는 FFKM 소재의 사용량이 증가할수록 같은 압축율로 왼쪽으로 변형이 많이 발생하고 있다는 것을 의미한다. 이러한 해석결과는 O링의 내부에서 발생하는 비틀림 변형과도 관련이 있다. 이러한 결과는 Fig. 6의 오른쪽 측변에 표시하였다.

Fig. 6에서 O링 내부에서 발생한 비틀림각 결과에 의하면, NBR로만 제작된 O링에서는 16°가 발생하였고, 두께비 d/D 가 커질수록 증가하다가 순수 FFKM으로 제작된 O링에서 18°로 감소한다. 이것은 NBR과 FFKM의 이중 재료를 사용할 경우 외곽링 소재인 FFKM의 비틀림은 작지만 내부링인 NBR은 비틀림이

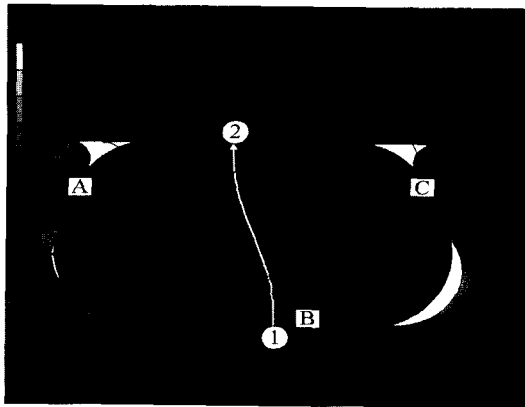


Fig. 7. von Mises stress distribution of an O-ring when the compression rate is 18% and the ratio of diameter d/D is 0.9.

많이 발생하기 때문에 장시간 O링을 사용할 경우 밀봉성에 문제가 발생할 수 있음을 의미한다.

3-3. 응력해석

Fig. 7은 O링을 18%로 압축하고, 두께비가 $d/D=0.8$ 이며, 챔버의 온도가 300°C 일 때 O링에서 발생한 응력분포를 보여주고 있다. O링은 일반적으로 대변형 특성을 갖기 때문에 O링의 좌·우에서는 낮게, 가운데에서 높은 응력이 발생한다. 그러나, A, B, C 지역은 구조물과 O링이 접촉하는 관계로 진공챔버로부터 열유입 통로가 되므로 그루브와 마찰에 의한 전단력이 동시에 작용하여 비교적 높은 응력이 발생한다.

최고응력은 O링 내부에서 발생하는데 NBR만으로 제작된 O링의 경우는 1.6 MPa 이 발생하고, 두께비 $d/D=0.9$ 인 경우는 1.69 MPa , $d/D=0.8$ 일 때는 1.73 MPa 이 내부 NBR의 중심 주위에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나, $d/D=0.6$ 인 경우는 NBR 내부에서 1.93 MPa 이 발생하지만, 최고 내부응력은 NBR과 FFKM의 경계면에서 2.59 MPa , $d/D=0.5$ 일 때는 NBR 내부에서 2.03 MPa , NBR과 FFKM의 경계면에서 3.02 MPa 이 각각 발생한다. 또한, FFKM만을 사용한 이중소재의 경우는 3.82 MPa 이 O링의 중심 주위에서 발생하였다.

이들 해석결과에서 보여준 것처럼 FFKM의 사용량이 많을수록 중심에서 발생하는 응력값이 증가한다. 이것은 위의 거동해석에서 설명한 바와 같이 FFKM 소재의 사용량이 증가할수록 O링 내부에서 비틀림의 크기가 증가하고, 그루브 내부로 팽창량이 증가하기 때문이다.

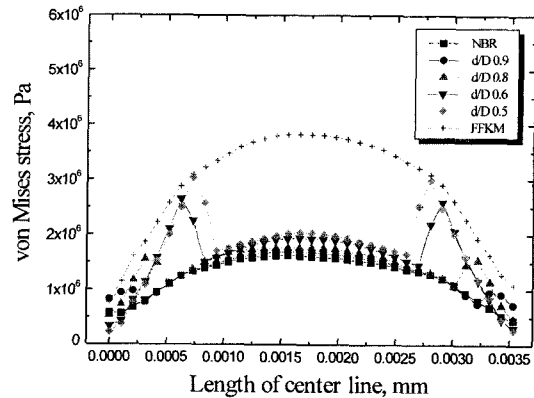


Fig. 8. von Mises stress distribution along the center line ①→② of Fig. 7.

Fig. 8은 O링의 지름에 대한 NBR의 지름비, 즉 두께비 d/D 의 변화에 따른 O링 내부에서 발생한 응력을 계산한 결과로 Fig. 7에서 표시한 ① ② 방향을 따라서 관찰한 것이다. 이 그림에서 가로축의 왼쪽이 그루브의 밀면과 접촉하는 응력 관찰 위치 ①이고, 오른쪽이 상부 알루미늄 냉각판과 접촉하는 ②의 위치이다. 이 결과에서 변형율이 가장 크게 발생하는 O링 내부에서 응력이 가장 크게 발생하는데, 이것은 FFKM의 사용량이 증가할수록 즉, d/D 가 작아질수록 응력값은 증가한다. 특히 주목할 점은 두께비 $d/D=0.9, 0.8, 0.6, 0.5$ 와 같이 NBR과 FFKM의 이중소재 O링의 경우는 NBR과 FFKM의 경계면에서 응력이 급격히 증가하여 FFKM만을 사용했을 때와 비슷해지는 것을 알 수 있다. 이것은 FFKM이 NBR에 비하여 열팽창율이 2.4배가 높기 때문에 경계지역에서 FFKM은 많이 팽창하려하고 NBR은 상대적으로 작게 팽창하려 하기 때문이다. 이와 같이 NBR과 FFKM의 경계면에서 응력이 급격히 증가하면 O링이 사용되는 동안 비틀림과 같은 변형에 의해 경계에서 찢어지는 등 내구성에서 문제점이 많이 발생할 가능성이 높다.

4. 결 론

NBR과 FFKM을 사용한 이중소재 O링에 대한 접촉 거동 특성을 비선형 유한요소법을 사용하여 해석하였다. NBR 소재를 O링 내부에 사용하여 해석한 결과에 의하면 NBR의 한계온도인 100°C 전·후를 넘어서기 때문에 O링의 안전성에 문제가 발생할 수 있어서 FFKM으로부터 NBR로의 열유입을 차단할 수 있도록

하기 위해서 단열성을 갖는 신소재 개발이 필요하다.

O링 그루브의 왼쪽과 오른쪽, 그리고 냉각챔버를 갖고 있는 덮개판 사이의 온도 구배로 O링의 내부에서 비틀림이 발생하는데, 그 크기는 FFKM의 사용량이 증가할수록 증가한다. 이와 같은 비틀림 변형거동 때문에 상부 덮개와 O링 사이에는 O링의 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, 이중소재를 사용한 경우에는 FFKM과 NBR의 경계에서 응력이 급격히 증가하는데, 이와 같은 응력의 급격한 상승이 O링의 안전성에 문제를 일으킬 가능성이 있기 때문에 온도 조건만 충족시킨다면 FFKM 사용량을 가능한 줄여서 FFKM과 NBR의 경계면에서 응력 증가량을 줄여서 O링의 안전성을 확보해야 한다.

참고문헌

1. Lindley, P. B., "Compression Characteristics of Laterally Unstrained Rubber O-Ring," J. of IRI, Vol. 1, pp. 202-213, 1967.
2. Green, G. and English, C., "Stress and Deformation of Compressed Elastomeric O-Ring Seals," 14th Int. Conference on Fluid Sealing, BHRA, pp.83-95, April 1994.
3. 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 International, Vol. 20, No. 5, pp. 237-247, 1987.
4. Dragoni, E. and Strozzi, A., "Analysis of an Unpressurized, Laterally Restrained, Elastomeric O-Ring Seal," J. of Tribology, Vol. 110, pp. 193-199, 1998.
5. MARC Analysis Research Corporation, Computer Program MARC, California, USA, 1994.