

복합소재 O-링 접합계면의 단열특성에 관한 컴퓨터 시뮬레이션

김청균 · 김성원 · 조승현
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Computer Simulation on Insulation Characteristics of Composite Material O-rings

Chung Kyun Kim · Sung Won Kim · Seung Hyun Cho
Tribology Research Center, Hongik University

Abstracts

O-ring seal is usual component part in various mechanical apparatus for sealing that makes efficient performance of the equipments. The sealing performance of O-ring is affected in environments of the O-rings, like that applied pressure, working temperature, pre-compressed ratio and materials. In this paper, a pressurized, compressed elastomeric bi-polymer O-ring inserted into a rectangular groove is analyzed numerically using the MARC finite element program. The calculated FEM results showed that bi-polymer O-ring that is manufactured by NBR for an inner and FFKM for an outer ring shows a low temperature distribution among various bi-polymer O-ring models. But, the normal contact stress between the flange and upper part of the O-ring is small compared to other bi-polymer model.

Key Words: O-ring, NBR, PTFE, FFKM, Composite O-ring, Contact Stress, FEM

1. 서론

원형의 단면을 갖는 코드(cord)가 도우넛 형상(doughnut shape)으로 제작된 것을 O-링이라 한다. O-링은 기계장치 내부의 유체가 외부로 누설되는 것을 차단하거나 외부의 이물질이 밀폐된 용기 내부로 침입하는 것을 차단하기 위해서 사용한다. O-링은 압력용기와 같은 구조물에 설치되어 밀봉을 해야 하는 정적 O-링과 기계평면시일 유니트나 유공압의 액츄에이터와 같이 상대 접촉 운동면에 설치되어 밀봉작용을 해야 하는 동적 O-링의 두가지가 있다.

따라서, O-링은 같은 형상을 하고 있지만 사용하는 환경조건에 따라서 그 특성을 달리하고 있다. 사용유체에 직접 접촉해야 하는 O-링의 경우는 매체(medium)의 특성에 적합한 소재를 선정하고 설계를 해야 한다. 즉,

- 사용온도 조건
- 작용압력 조건
- 사용유체의 종류와 특성

- O-링과 접촉면의 마찰조건

- 소재의 특성

여기에 적합한 O-링의 설계조건은 O-링의 내구성과 밀봉성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 해석과 최적설계를 수행해야 한다. O-링에서 널리 사용하는 탄성체 폴리머 소재는 컴파운드의 종류와 첨가되는 필러의 특성에 따라서 기계적 특성과 화학적 성질에 큰 영향을 받으므로 문헌상에서 제시된 표준 물성치 데이터와는 항상 차이가 있다.

그러나, 대부분의 연구에서는 실제의 해석 데이터를 실험적으로 구하기가 대단히 어렵기 때문에 표준 폴리머 소재에 대한 데이터를 사용하여 모델링하고, 설계치를 예측하는 것이 일반적이다. 따라서, 본 연구에서도 복합소재 O-링의 접합계면에서 발생하는 응력과 온도분포 등에 관련된 단열체의 역할에 따른 설계 데이터를 유한요소해석으로 고찰하고자 한다.

2. 복합소재 O-링

O-링에는 하나의 소재로 제조된 기존의 단일체 O-링과 두가지 소재를 사용하거나 특수 컴파운드를 국부적으로 혼합한 복합소재 O-링의 두가지가 있다. 여기서 기존의 단일체 O-링은 제조하기가 용이하지만, 복합소재 O-링은 제조공정이 대단히 까다롭기 때문에 일반적으로 특수한 사용조건에서 활용되고 있다. O-링의 이러한 설계기술이나 제조 공법은 대부분 특허에 의해 규제되고 있다.

Fig. 1은 기존의 단일체 O-링을 보여주고 있으며, O-링은 프레스 금형을 이용한 제조가 대부분이지만, 압출이나 사출에 의해 제조하기도 한다. 또한, 복합소재 O-링은 프레스 금형에 의한 제조하기는 곤란하고, 대부분 압출에 의해 제작된다.

단일체 O-링에서도 폴리머 컴파운드의 동질성과 이질성의 결합특성에 따라서 밀봉성능에 중요한 영향을 미치지만, 복합소재 O-링에서는 기계적 특성에 더욱 중요한 영향을 주기 때문에 컴파운드 선정에서 필러의 물리적 특성, 화학적 특성 등이 엄격하게 제한되어야 필요한 특성을 갖는 복합소재 O-링이 개발될 수 있다.

복합소재 O-링의 특성은 소재의 가격과 물리·화학적 특성을 서로 퓨전(fusion)하여 최상의 사용조건을 제작하는 것이다. 즉, O-링이 사용할 조건 중에서 내화학성, 내마멸성, 저마찰성, 내플라즈마성, 고온성, 저온성, 내부식성, 고탄성, 저탄성, 고강도, 저강도, 내방사성 등을 적절히 고려되어야 하는 관계로 제조과정에서 이질성에 의한 문제점이 많이 제기될 수 있다.

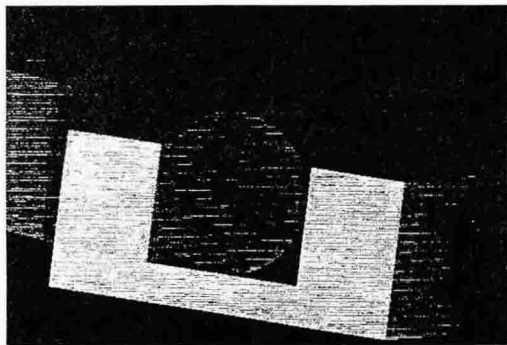


Fig. 1 Typical O-ring and groove.

3. 해석조건 및 모델

본 해석에서 사용된 소재로는 내케미컬 특성이 높은 내열재로 널리 알려진 Perfluoro가 있고, 내

마열성과 저마찰 특성을 갖는 PTFE 소재로 보통은 Viton으로 널리 알려져 있으며, 기계장치 구조물의 밀봉을 위해 가장 널리 사용하는 높은 비중의 NBR 소재를 사용하였다.

이들 소재는 대표적으로 고온성, 저마찰성, 저가의 고탄성 특성을 갖고 있다고 하며, 이들 소재를 조합하여 복합소재로 사용하는 경우에 단일소재라는 또 다른 특성을 개입시켜서 새로운 O-링 소재에 대한 해석을 수행하고자 한다. 즉, 모델 I은 내측링 소재로 PTFE 소재를 사용하고, 외측링 소재로는 FFKM을, 그리고 이들 링 사이에는 단일소재를 사용하여 열적특성을 향상시키고자 한다. 또한, 모델 II와 III는 내측링에 NBR 소재를 사용하고, 외측링에는 FFKM과 PTFE 소재를 각각 사용하여 이들의 수직응력과 열거동 특성을 비교 분석하였다.

복합소재 O-링이 설치된 구조물의 상판 플랜지에는 100℃가, 그루브에는 150℃가 작용한다. O-링은 비교적 높은 온도에 노출된 상태이기 때문에 O-링이 외부로부터 유입되는 열원에 의해 손상을 받을 우려가 높다. 사각 그루브에 설치된 O-링의 좌우측에 걸리는 압력차는 특별한 언급이 없으면 1MPa이라 한다.

이러한 온도작용 환경에 잘 견딜 수 있도록 제작된 복합소재 O-링을 해석하기 위해 사용된 소재의 물리적 특성은 Table 1[1]에서 제시하고 있다. 또한, 본 연구에서 사용한 비선형 유한요소해석 프로그램은 MARC[2]이다.

Table 1. Material properties of O-rings

	NBR	PTFE	FFKM
Poisson's ratio	0.49	0.46	0.46
Specific heat, J/kg · K	2,000	1,500	1,200
Maximum temperature, °C	120	260	260

4. 해석결과 및 고찰

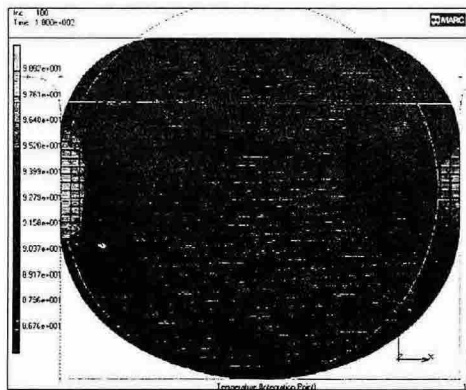
본 연구에서 사용한 단일체는 펄라이트(perlite) 소재로 열팽창 계수가 $1.6 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$ 이고, 열전도 계수는 $0.038\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 이다. 모재로 사용한 NBR, PTFE, FFKM의 소재에 비하여 이들 열적 특성치가 대단히 낮고, 포아송비는 약 1/2 수준에 달한

다. 이러한 단열성은 O-링이 높은 온도에 노출되면서 소재 내부로 유입되는 열량을 효과적으로 차단하여 O-링의 내구성을 향상시킬 수 있다.

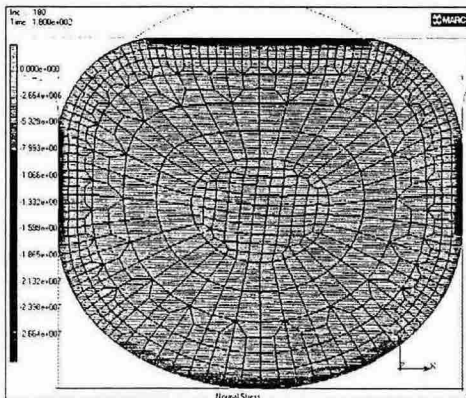
Fig. 2는 내측링에 PTFE, 외측링에 FFKM을 사용한 모델 I의 경우로 복합소재 O-링에 분포하는 온도와 수직응력을 보여주고 있다. 온도분포를 보여준 Fig. 2(a)에 의하면, 최고온도는 그루브의 좌측 접촉면에서 99°C가 발생하지만, 소재 내부에는 87°C의 온도가 나타났다. 이러한 온도는 PTFE나 FFKM이 충분히 견딜 수 있는 온도조건으로 양호한 설계 데이터이다. 또한, O-링의 밀봉력에 직접 연계된 수직응력과 탄성 변형률 에너지는 21.8 MPa와 4.3MN/m²로 높게 나타났다. 이것은 상부의 플랜지와 O-링 사이에 걸리는 접촉면압이 높다는 것을 의미하기 때문에 밀봉된 유체의 누설을 적극적으로 차단하는 효과가 있다는 측면에서 대단

히 긍정적인 데이터이다. 그러나, 이러한 데이터는 O-링의 압축율과 변형율이 연계되어 설계되기 때문에 수직응력과 변형률 에너지를 단독으로 O-링의 성능을 판단하기에는 문제가 있다.

Fig. 3은 내측링에 NBR, 외측링에 FFKM을 사용한 모델 II의 경우로 복합소재 O-링에 분포하는 온도와 수직응력을 보여주고 있다. 온도분포를 보여준 Fig. 3(a)에 의하면, 최고온도는 플랜지와 접촉하는 O-링의 상단부에서 79°C가 발생하였지만 소재 내부에서는 73°C에 도달하였다. 이들 온도는 NBR이나 FFKM 소재가 충분히 견딜 수 있는 온도조건이고, 동시에 모델 I보다 효과적인 복합소재 설계조건이 된다. 또한, 수직응력과 탄성 변형률 에너지는 11MPa과 1.4MN/m²로 모델 I보다는 많이 떨어지는 계산치이다. 따라서 모델 II는 수직응력이 상대적으로 크게 줄어들었기 때문에 밀봉력을

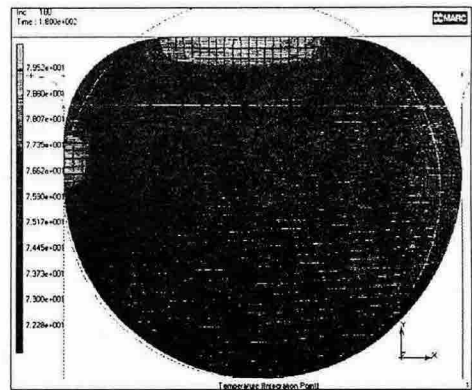


(a) Temperature distribution

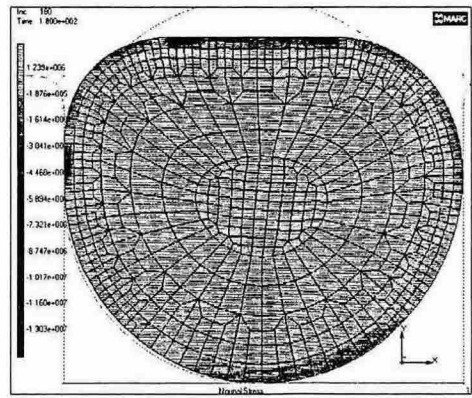


(b) Normal stress distribution

Fig. 2 Temperature and normal stress distributions of bi-polymer O-ring, model I.



(a) Temperature distribution



(b) Normal stress distribution

Fig. 3 Temperature and normal stress distributions of bi-polymer O-ring, model II.

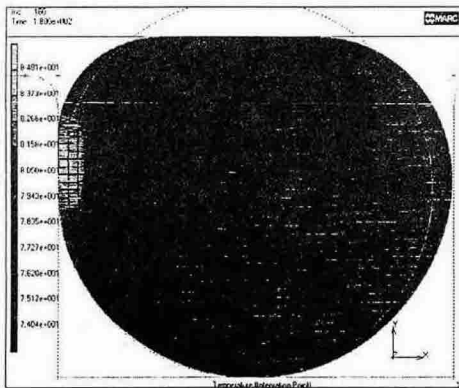
모델 I 정도로 증가시키기 위해서는 압축율을 더 증가시키면 동등한 밀봉효과를 기대할 수 있다.

Fig. 4는 내측링에 NBR, 외측링에 PTFE를 사용한 모델 III의 경우로 복합소재 O-링에 분포하는 온도와 수직응력을 보여주고 있다. 온도분포를 보여준 Fig. 4(a)에 의하면, 최고온도는 그루브의 왼쪽 측면과 접촉하는 O-링에서 85°C가 발생하였지만 소재 내부에서는 76°C에 도달하였다. 이런 온도분포는 복합소재로 사용한 NBR이나 PTFE 소재가 견딜 수 있는 온도조건이다. 이들 데이터는 모델 I보다는 낮은 값이지만, 모델 II보다는 약간 높은 온도분포를 나타내고 있다. 여기에, 수직응력과 탄성 변형을 에너지는 6.6MPa과 1.2MN/m²로 모델 II보다는 많이 떨어지는 계산치이다. 따라서 모델 III에서 밀봉력을 증가시키기 위해서는 압축율을 모델 II보다는 증가시키지만, 모델 I보다는 크게

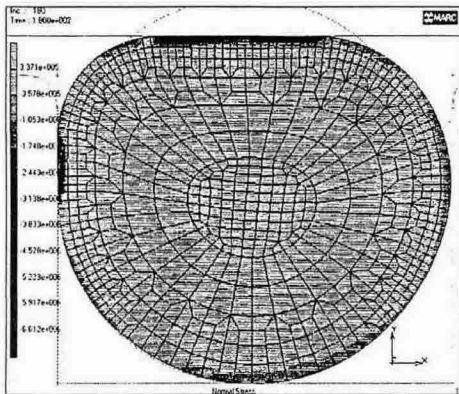
증가시킨다면 밀봉력을 충분히 확보할 수 있다.

Fig. 5는 모델 II의 복합소재 O-링에서 좌우측으로 걸리는 압력차가 4MPa로 주어질 경우에 대한 온도분포와 수직응력의 분포도를 보여준 결과로 압력차가 1MPa인 Fig. 3의 결과와는 다른 특성을 보이고 있다.

즉, 밀봉력은 11MPa에서 13MPa로 증가되어 밀봉된 유체의 누설을 줄여주지만, 모델 II의 외측링의 온도가 104°C로 증가하여도 FFKM 소재는 충분히 견딜 수 있다. 그러나, 내측 소재인 NBR은 73°C에서 90°C로 증가하기 때문에 NBR 소재의 온도특성에서 문제가 제기될 우려가 매우 높다. 이것은 O-링에 가해진 좌우측면의 압력차가 증가하면서 Fig. 5(a)에서 보여주는 것처럼 그루브의 측면 접촉면적이 크게 증가하여 전열면적 증가로 인해 열전달이 잘되기 때문에 소재 내부의 온도가

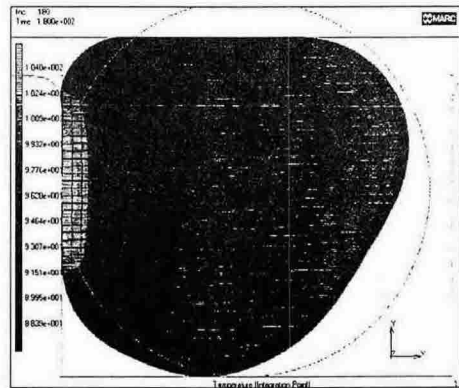


(a) Temperature distribution

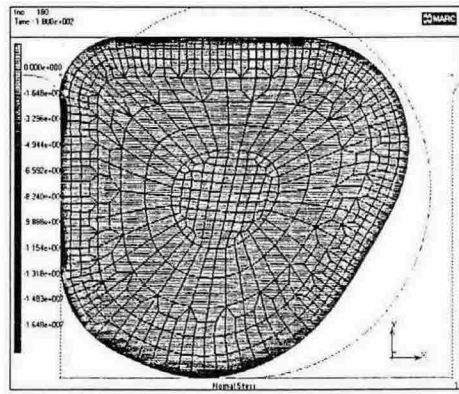


(b) Normal stress distribution

Fig. 4 Temperature and normal stress distributions of bi-polymer O-ring, model III.



(a) Temperature distribution



(b) Normal stress distribution

Fig. 5 Temperature and normal stress distributions of bi-polymer O-ring, model II.

크게 증가한 결과 때문이다. 따라서, O-링에서 단열재를 적절하게 설계하면 소재 내부로 전달되는 온도는 크게 줄여줄 수 있지만, 폴리머 소재의 특성상 한계를 갖고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 여러 가지 복합소재의 O-링에 대하여 온도특성과 수직응력, 즉 단열재 특성을 고려하여 밀봉력에 대한 수치적 해석을 해석하였다.

계산결과에 의하면 복합소재의 내측링에는 열용량이 높고 탄성계수가 낮은 NBR 소재를 사용하고, 외측링에는 내열성과 탄성계수가 높은 소재를 사용하면 소재로 전달되는 전열효과가 낮은 이상적인 단열효과를 기대할 수 있다. 그러나, 수직응력이 낮아지기 때문에 밀봉력의 저하를 예상할 수 있으나, 탄성 에너지 값이 작기 때문에 O-링의 압축율을 증가시켜서 플랜지와 O-링 사이의 수직응력을 충분히 증가하면 밀봉력은 문제가 안되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Chung Kyun Kim, etc., "Introduction To Tribology," CMG Publishing Co., 1997.
2. MARC Analysis, Ver. 7.0, 1999.
3. Reddy, D. and Nau, B. S., "The Static and Dynamic Extrusion of Elastomer Seals into Large Clearances," Proc. of 10th Int'l. Conf. on Fluid Sealing, Pickford, F., ED., BHRA Fluid Engineering Centre, Granfield, UK, pp.190-196, 1984.
4. George, A. F. Strozzi, A. and Rich. J. L., "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, Oct. 1987.
5. Itzhak Green and Capel English, "Analysis of Elastomeric O-ring Seals in Compression Using the Finite Element Method", Tribology. Trans., Vol.35, pp.83-88, 1992.