

고온조건에서 NBR O-링 밀봉력에 관한 실험적 연구

김도현¹, 강현준¹, 김청균¹ (홍익대학교 트라이볼로지 연구센터),
고영배² (한국생산기술연구원 부천디지털센터)

Experimental study on the Sealing Force of NBR O-Ring with high Temperature

¹Dohyun Kim(Tribology Research Center, Hongik Univ.), sumtwo@hanmail.net
¹Hyunjoon Kang(Tribology Research Center, Hongik Univ.), jjoon13@hanmail.net
¹Chungkyun Kim(Tribology Research Center, Hongik Univ.), ckkim@wow.hongik.ac.kr
²Youngbae Ko(Bucheon Digital Center, Korea Institute of Industrial Technology),
Kaiser1999@hanmail.net

ABSTRACT

The O-ring seal is a usual component part in various mechanical apparatuses for sealing that makes efficient performance of the equipments. The sealing performance of O-ring is effected in environments of the O-ring seal, like that applied pressures, working temperatures, interferences and materials. In this paper, an pressurized, NBR O-ring is calculated by experimental methods and analysed numerically using the MARC finite element program. The calculated experimental and FEM results showed that the Contact force O-ring decreases as a function of temperature.

Keywords : O-ring, NBR, temperature, Contact force, FEM

1. 서론

O-링은 가장 기본적인 시일(Seal)로써, 그 루브(groove)에 조립되어 접촉면과의 압착에 의해 생기는 반발탄성에 의하여 밀폐력을 가진다. 그래서 밀봉된 유체의 누설을 방지하거나, 외부의 이물질 침입을 차단할 수 있어 진공장치, 압력용기, 액츄에이터, 밸브 등에서 다양하게 응용되고 있다.

O-링이 특수한 조건에서 사용되지 않는다면 일반적으로 기계적 특성은 다소 떨어지지만 가격면에서 경쟁력이 있는 NBR소재가 보편적으로 사용된다.

NBR(Acrylonitrile-Butadiene Rubber)은 가솔린, 팜유, 연료유, 에탈린 글리콜 등에 대한 우수한 저항력으로 O-링 시일의 제조에서 대단히 폭넓게 사용되고 있는 소재이다. 그러나 에스테르 계열의 유체에서 안정적으로 사용하기에는 적합하지 않다. NBR의 허용 작동 온도는 $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 이다[1].

O-링의 기능을 안정적으로 유지하기 위해서는 외부의 여러 조건에 대해 적정 수준

이상의 반발탄성을 가져야 한다. 즉 압축력이 가해진 상태에서 소재의 대변형 성질에 의해 밀봉성능을 확보하게 되는 것이다.

그러나 O-링의 소재가 비선형의 탄성중합체이기 때문에 여러 조건들 중에서도 특히 온도에 대한 영향을 매우 크게 받는다. 즉 온도가 증가하면 탄성력이 저하하여 결과적으로 밀봉력의 감소를 가져오기 때문이다. 그러므로 O-링의 온도에 대한 거동을 해석하여 사용온도에 대한 최적의 소재를 선택하는 연구가 활발히 진행되어 왔다[2].

탄성중합체에 대한 실험적 연구는 매우 까다로워 지금까지 유한요소해석 프로그램을 이용한 수치적 연구가 많이 활성화된 상황이다. 그동안 수행되었던 연구에서 유한요소해석에 사용된 응력-변형률 특성곡선의 한계로 인해 정확한 데이터의 비교가 이루어지지 않은 경우는 해석결과의 신뢰성에 한계가 있었다. 하지만 본 연구에서는 적절한 실험장치를 고안하여 실험적 연구를 수행하고, 이를 수치해석 결과와 비교, 분석함

으로써 수치해석의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

축과 O-링 시일간의 간섭량을 구현하기 위해서 실린더가 반경방향으로 일정 거리만큼 이동되도록 실린더를 2 개로 분할하였고, 반원축을 이동시키면서 반경방향 하중을 측정하였다. 이 때 다이얼 게이지의 스프링 힘과 연결 봉의 하중 등을 보상하기 위하여 인디케이터를 0 점으로 보정하였다. 또한 다이얼 게이지의 지침도 0 으로 조절한다. 탄성체의 시간에 따른 하중변화의 특성이 충분히 나타나도록 24 시간동안 하중을 관찰하였다[3].

O-링 시일의 온도에 대한 접촉력의 변화를 관찰하기 위해 각각의 반원축에 등간격으로 4 개의 전기히터를 설치하고, 전기히터의 온도 컨트롤 시스템의 오토 튜닝(Auto tuning)기능을 사용하여 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위 내에서 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였으며, 실제 측정을 통해 이를 직접 확인하였다. 더불어 O-링의 표면온도도 측정하였다. 전기히터의 온도가 가열초기에 급격히 상승한다는 점과 시간이 갈수록 O-링 시일에서 발생하는 하중의 변화가 완만하다는 점을 고려하여 하중을 다음과 같은 시간 간격으로 획득하였다. 이 때 온도의 영향을 알아보기 위하여 30°C , 60°C , 90°C 의 3 가지 조건으로 실험을 수행하였다.

Fig. 1 은 온도에 의한 O-링 시일의 접촉력 변화를 측정하기 위한 장치를 보여주는 사진으로써 실험장치는 O-링이 설치되는 장치, 온도조절을 위한 컨트롤러와 접촉력 변화를 측정하기 위한 인디케이터로 구성된다.

본 논문에서 O-링 시일의 접촉력을 계산하기 위해 제작한 2 분할된 반원축에 O-링 시일을 설치하였다. 이 때 O-링 시일에 발생한 접촉력은 Fig. 2 과 같이 분리축 원리에 의해 계산될 수 있다.

Fig. 2 와 같이 힘 F 는 축 표면에 수직이고 실험장치에서 측정되어진 힘 F_1 (Clamping Force)와 균형을 이루게 된다. 이와 같은 F 와 F_1 의 관계는

$$F_1 = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} F \cdot R \cdot \sin \alpha d\alpha = 2FR = FD. \quad (1)$$

$$F = F_1 / D \quad (2)$$

$$F_r = 2\pi RF = \pi FD = \pi F_1 \quad (3)$$

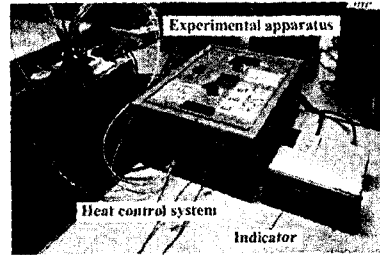


Fig. 1 Photographic view of experimental apparatus.

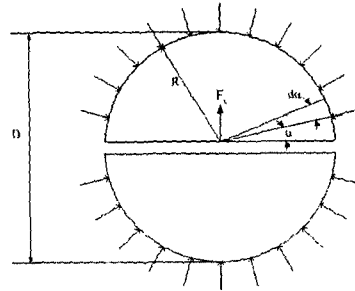


Fig. 2 The principle of a separate axle.

과 같다. 여기서 F 는 단위 원주당 힘, F_1 는 반경방향 측정 하중값, F_r 은 반경방향 접촉력이다.

3. 해석 조건 및 모델

본 논문에서 사용된 소재는 매우 일반적으로 사용되는 NBR이다.

O-링의 접촉력 계산을 위한 유한요소해석의 적용에서 본 논문은 30°C , 90°C 조건은 Ogdem 3차 모델로 정의하고 60°C 조건은 Mooney-revlin 3차모델로 NBR을 정의하여 curve-fitting함으로써 해석의 정확성을 높였다.

Fig. 3 은 O-링시일의 유한요소 해석 모델을 나타낸 그림이다. O-링 소재는 상대 소재에 비해 매우 무르기 때문에 시일이 설치되는 2 분할 축과 아래판은 모두 강체로 가정하였으며, 전기히터에 의해 가열되는 2 분할된 반원축(SUS304)의 온도를 각각 획득된 응력-변형률 특성곡선에 따라 30°C , 60°C , 90°C 로 고정하여 해석을 수행하였다. 그리고 반원축을 이동시키는 것으로 간섭량을 구현하였다. 이때 반원축으로부터 O-링으로 전달되는 열은 접촉열전달계수를 고려하여 계산할 수 있다.[3] 또한 실험장치가 대칭을 이루고 있으므로, 축대칭 모델로 해석하였다. 반원축과 O-링 사이에는 전도 및 대류에 의한 열전달이 일어나지만 본 논문에서는 대류에 의한 항은 무시하였다. O-링의 내경은 66.24mm 이고, 단면지름은 3.53mm 이다.

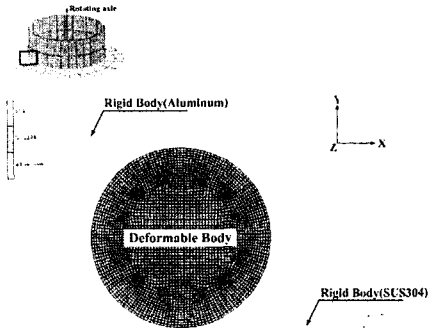


Fig. 3 Contact model of O-ring seal for finite element analysis.

4. 해석결과 및 고찰

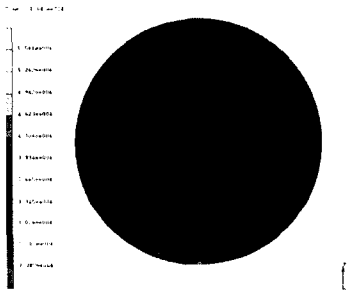
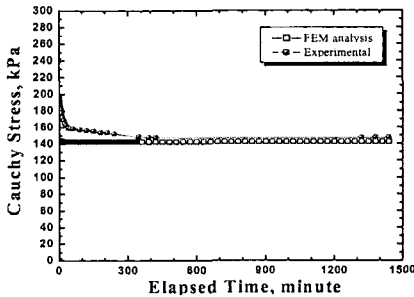
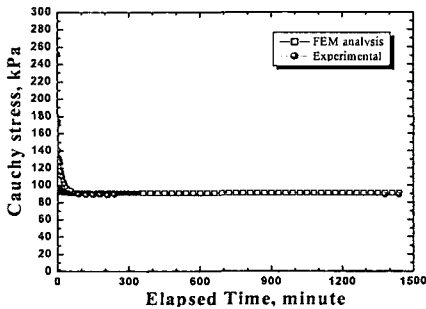


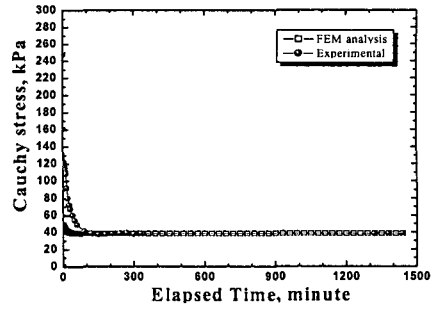
Fig. 4 Cauchy stress distributions of NBR O-ring.



(a) Axle temperature of 30°C



(b) Axle temperature of 60°C



(c) Axle temperature of 90°C

Fig. 5 Comparison between Experimental and FEM results as a function of axle temperature.

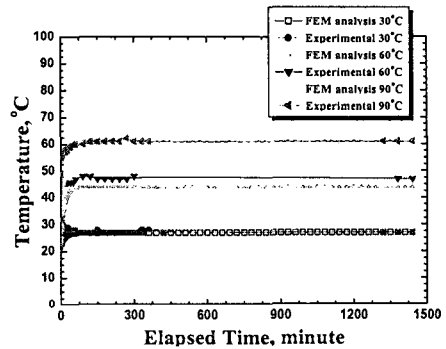


Fig. 6 Comparison between Experimental and FEM results for the surface temperature of NBR.

Fig. 4는 NBR O-링에 나타난 Cauchy 응력 분포를 나타내는 그림이다. 간섭량을 구현하기 위해 강체로 정해진 SUS304판을 이동시켰기 때문에 그 접촉점에 응력이 집중되어 있다. 이에 따라 실험에서도 반원축이 이동함에 따라 O-링과 접한 지점에서 응력이 집중됨을 알 수 있다.

Figs. 5(a)-(c)는 간섭량이 0.4mm일 때 반원축의 온도에 따라 24시간 동안 발생한 Cauchy 응력에 대해 실험결과와 유한요소해석결과를 비교한 것이다. Fig. 5(a)는 30°C 조건의 경우로 약 400분 후에 실험에 의한 결과는 약 147kPa로 수렴하게 되고, FEM의 해석 결과와는 약 5kPa정도의 차이를 두고 있다. Fig. 5(b)는 60°C 조건의 경우로 수렴되는 시간이 약 150분으로 줄어들었고, 그 때 실험에 의한 Cauchy 응력은 약 88kPa로 FEM 해석 결과와 3kPa의 차이를 두고 있다. Fig. 5(c)는 90°C의 조건으로 약 100분 후에 수렴되었으며, 실험에 의한 Cauchy 응력은 38kPa로 FEM해석과 1kPa의 차이를 보이고 있다. 이와 같은 해석결과의 차이는 반원축

이 축방향으로 짧은 거리를 움직였지만 완전한 원형으로 O-링을 팽창시킬 수 없어서 축대칭모델로 해석했던 FEM과의 차이, 실험에서 온도 분포의 불균일함과 NBR소재를 Mooney-Revlin 3차모델로 가정할 때 발생하는 오차 등이 원인이다.

그러나 실험결과와 FEM의 해석결과가 온도가 증가함에 따라 차이가 매우 작다는 점에서 FEM해석의 유용성을 확인할 수 있었다. 또한 온도에 따른 정확한 응력-변형률 특성을 획득하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다.

또한, Figs. 5(a)-(c)에서 온도가 증가함에 따라 접착력이 감소하고 최종적으로 접착력이 일정해지는 시간도 짧아지는 것을 알 수 있다. 30°C와 60°C의 경우에는 59kPa의 차이를 보이며 60°C와 90°C의 경우에는 50kPa의 차이를 보여준다. 특히 30°C와 90°C의 경우에 접착력이 매우 크게 감소했는데, 30°C 기준으로 비교하면 60°C의 경우 약 40%, 90°C의 경우에는 70%의 감소율을 나타내고 있다. 그리고 30°C와 60°C의 경우 수렴하는 시간의 차이는 약 250분인 반면 60°C와 90°C의 경우는 약 50분으로 매우 줄어들었음을 알 수 있다. 즉 NBR 소재의 온도에 따른 접착력의 감소는 거의 선형에 가까운 비선형의 형태를 가지고 있음을 예상할 수 있고, 온도가 올라감에 따라 매우 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 60°C 미만의 어떤 일정 온도 이상이 되면 온도에 관계없이 초반 짧은 시간동안 매우 빠르게 접착력의 감소함을 알 수 있다.

그러므로 최대의 밀봉성능을 확보하기 위해서는 냉각장치 등을 이용하여 상온에 가까운 환경을 만들어야 하며, 압착이 가해지는 순간부터 가급적 온도에 대한 영향을 받지 않게 해서 밀봉성능이 떨어지지 않게 해야 한다. 만약 이 점이 확보되지 않는 상황이고, 온도의 영향을 받은 후에 나타나는 밀봉성능이 원하는 수준에 미치지 않는다면 다른 소재를 고려해야 할 것이다.

Fig. 6은 실험과 수치해석에 의해 획득한 O-링의 표면온도를 실험시간에 의한 함수로 나타낸 결과이다. 해석결과에 의하면 수치해석에 의해 계산된 온도가 실험에 의해 관찰된 온도보다 1~3°C의 차이로 다소 낮게 측정되었다. 그러나 실험과 수치해석에 의한 온도분포는 30°C의 경우 약 27°C, 60°C의 경우 약 45°C, 90°C의 경우 약 60°C로 일정하게 발생하였다. 이와 같은 온도분포가 일

정하게 발생하는 것은 온도와 단면적, 열전도율에 비례하는 열전달현상때문으로서 NBR은 열전도율이 낮고, 열원인 반원축에 접촉한 면적이 주변 환경에 노출된 면적과 비교하면 매우 작기 때문에 수렴하는 온도에 도달했을 때 외부로 방출되는 열전달량과 반원축으로부터 받는 열전달량이 같아지면서 열평형을 이루기 때문이다[4].

5. 결론

본 논문에서는 NBR O-링의 온도에 따른 접착력 특성을 실험과 유한요소해석을 통해 비교하였다. 실험과 수치해석 결과에 의하면 NBR O-링의 온도가 증가함에 따라 크게 감소하였으며, 수렴하는 시간도 짧아지는 경향을 나타내었다. 한편, 본 논문에서는 각 온도에 따른 접착력을 계산하기 위해서 온도에 따라 각각 인장실험으로 획득한 NBR의 응력-변형률 특성곡선을 수치해석에 적용시킴으로써 실험에 의한 결과와 수치해석에 의한 결과가 매우 유사함을 확인하였다. 따라서 수치해석의 신뢰성을 높임으로써 향후 적은 비용과 시간으로 정확한 NBR과 같은 탄성체의 거동특성을 파악할 수 있게 되었다.

참고문헌

1. Anil K. Bhowmick and Howard L. Stephens, "Handbook of elastomers", second edition, revised and expanded, M. Dekker, pp. 785-790, 809-811, 2001.
2. J. E. Mark, B Erman, Frederick R. Eirch 원저, 유기탄성체학회역, "RUBBER 고무과학과 기술", 도서출판 MRC 미래컴, pp. 6-10, 2000.
3. 김도현, 조승현, 김청균, "Perfluoro elastomer O-링 시일의 밀봉력에 대한 온도의 영향", 제 38 회 춘계학술대회, pp.250-255, 2004.
4. Yunus A. Çengel, "Heat transfer", Vol. II, McGraw Hill, pp. 376-383, 707-709, 2001.

논문 발표

Session IV

1. $\Sigma = 5(210)$ 결정립계를 포함한 구리 bicrystal 모재상 스크래칭에 관한 분자역학모사	215
2. 직렬 미소채널 기체유장의 수치해석	221
3. 초소형 터보 제너레이터에 적용되는 공기 포일 베어링의 성능 및 동적 안정성에 관한 연구	232
4. 경유가 혼합된 엔진오일의 특성에 관한 실험적 연구	233
5. 다구찌법을 이용한 SF ₆ 가스안전밸브용 디스크 시일 형상의 설계	237
6. 디스크 브레이크의 제동특성에 관한 실험적 연구	241
7. 마찰을 고려한 플라스틱 시트의 절단특성에 관한 연구	245
8. Anticorit prelube oils for sheet metal forming	249
9. 사판식 유압 피스톤 펌프의 실린더블록과 밸브 플레이트의 응력해석	255
10. 탄성유체윤활 및 접선하중 상태에서 캠-롤러 접촉 표면의 내부 응력장	261
11. 멀티그레이드 윤활유의 탄성유체윤활 유막 측정 연구	269
12. 탄성변형을 고려한 엔진베어링의 동적 거동에 대한 연구	275
13. A Study on the Measurement for the Nano Scale Film Formation of Ultra Low Aspect Ratio	283
14. 자동차용 마찰재에서 철산화물이 마찰특성에 미치는 영향에 관한 연구	289
15. 미끄럼 접촉시 이중 세라믹 간의 트라이볼로지적 특성	296
16. Effects of Plasma Immersion Ion Implanted and Deposited Layer on Adhesion Strength of DLC Film	301
17. 크레인용 시브 강재의 마멸특성 평가	306
18. 지능이론을 이용한 자동차 트랜스미션 소재의 마찰조건 판정	312
19. 실험계획법을 이용한 기계구조용 특수강의 손상상태 예측	316
20. Electrical and Rheological Behavior of the Anhydrous ER Fluids Based on Chitosan Chitosan Derivatives as the Dispersion Phases	323
21. 연마입자 크기가 CMP 공정변수에 따라 연마균일도에 미치는 영향	330
22. 화학적 기계 연마를 위한 탄성변형을 고려한 평균유동모델	331
23. 응력 기반 볼 베어링의 접촉피로수명 예측	339
24. 치아 충전용 복합레진의 광중합 광원 종류에 따른 마멸 비교	350
25. 인공고관절 골두용 세라믹 복합재료에 대한 세라믹-세라믹 접촉 마멸 특성 분석	355
26. 연골세포 부착력 평가	362
27. Tribology 관점에서 생분해성 유압작동유 실적용 평가에 관한 연구	367
28. Lithium base grease에 있어서 산화방지제에 따른 노화과정 연구	372