

복합소재 O-링의 압축변형 특성에 관한 연구

김청균* · 김도현

홍익대학교 트라이볼로지연구센터

A Study on the Compression Characteristics of Bi-polymer O-rings

Chung Kyun Kim* and Dohyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – O-ring seal is an essential component in various mechanical apparatuses for a sealing of oil container and pressure vessels. This paper presents the sealing pressure and compressive contact behaviors of bi-polymer O-rings, which is made by an outer shell of FFKM material and an inner solid ring of FKM one. The contact normal pressure and its ratios are measured by experimental method with an automatic control system of the working temperature and analyzed numerically by using the non-linear Marc FEM program. The results show reasonably good agreements between the computed FEM results and measured ones when the operating temperature is from normal temperature of 18°C and a high temperature of 300°C. But the compared values between the computed and tested results show a little difference because of the increased temperature, which is related to the non-linear parameter of the O-ring material. Bi-polymer O-ring shows a good contact normal stress and compression behavior for a given operation temperature and compression ratio.

Key words – O-ring, bi-polymer, temperature, contact force, compression rate, FEM.

1. 서 론

기계 구조물의 정지부나 상대 운동량이 작은 접촉부위를 따라서 가스나 액체와 같은 작동유체의 누설을 차단하기 위해 등근 형상의 O-링을 사각으로 가공된 홈(rectangular groove)에 설치한다. O-링은 절단면이 항상 원형(circular shape)을 유지하는 축대칭 형상을 하고 있어 설치하기가 대단히 간편하고, 설치공간이 아주 작아 밀봉기구에서 형상이 가장 단순하고 저렴한 밀봉제품이다.

더욱이 O-링은 탄성 거동성이 대단히 우수한 대표적인 탄성중합체 NBR, PTFE, FKM, FFKM 등을 사용하여 등근형상의 O-링을 프레스나 몰딩기에 의해 제조된다. 이들 O-링 소재는 작동온도, 작동유체의 화학적 특성, 밀봉력 등을 고려하여 선정하고, 특히 탄성 압축율(compression rate)과 접촉면압을 O-링의 밀봉성능과

연계된 설계조건으로 다루는 것이 대단히 중요하다.

여기서 O-링의 밀봉 압축력은 밀봉유체의 누설과 내구성에 직접적으로 연관되기 때문에 O-링의 초기 간섭량과 작동중의 간섭량 조건을 모두 고려하여 설계하는 것이 중요하다. 이러한 밀봉 간섭량(sealing interference)은 결국 O-링이 기계장치에서 밀봉을 필요로 하는 부위에 압축된 상태를 유지하면서 운전하는 압축율(compression rate)을 의미하는 것으로, 탄성소재에 따라 압축률은 약간씩 다르게 설정된다. O-링 소재의 압축률은 밀봉유체의 누설 문제를 설계에 우선적으로 반영하고, 그 다음으로 마찰접촉에 따른 O-링과 회전축의 마찰량 발생과 마찰손실을 작게 유지하는 방향으로 결정해야 O-링은 밀봉 안전성과 내구성을 동시에 달성할 수 있다.

O-링 소재를 선정할 때 탄성 복원력을 중요하게 고려하지만, 작동온도가 높지 않은 경우는 저렴한 NBR을 사용하지만, 내열성과 내화학성을 어느 정도 필요로 하는 경우는 FKM, 특히 높은 수준의 내열성이나 내화학성, 내프라스마 특성을 필요로 하는 경우는 FFKM을

*주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

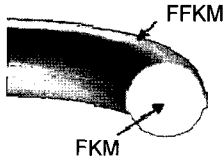


Fig. 1. Cross section of bi-polymer O-rings.

사용하는 것이 일반적이다. 그러나 이들 탄성 폴리머 소재는 가격에서 큰 차이를 보이는데, 가장 저렴하기로는 NBR이 으뜸이고, 우수한 내화학 특성을 갖고면서 고가로 알려진 FFKM은 반도체나 부식성, 독성 등과 같은 특별한 사용 환경을 제외하고는 O-링 소재로 사용하지 않는다.

FFKM 소재는 체적 팽창률이 작고 안정적이고, 비교적 탄성계수가 높으며, 아세톤이나 벤젠, 메탄올과 같은 유체에 대한 내화학성, 내부식성, 내열성이 대단히 우수하기 때문에 화학물질을 취급하는 특별한 밀봉 장치에 사용한다[1].

따라서 본 연구에서는 이들 소재로 단일체 O-링(solid O-ring)을 제작하기 보다는 Fig. 1에서 보여준 것처럼 두 가지 이상의 소재를 사용하여 복합소재 O-링을 제조한 다음 압축변형 거동특성을 고찰하여 밀봉성과 가격 경쟁력을 갖춘 새로운 O-링을 개발할 필요가 있다. 특성이 다른 두개의 소재를 복합하여 하나의 단일체 O-링을 제조하기 때문에 O-링의 실제 사용에는 아무런 문제점이 없으며, 오히려 변형거동 특성이나 내구성, 제조단가 측면에서 우수한 성능을 예상할 수 있다.

복합소재 O-링에 대해 수치해석 연구는 본 저자를 포함하여 다수 진행되었으나, 실험적 연구는 복합소재의 제조와 압축력을 측정할 수 있는 실험장치 등이 있어야 하므로 이에 대한 연구는 아직까지도 활발하게 진행되지 못하였다. 본 연구에서는 복합소재 O-링의 변형거동 특성을 유한요소해석과 실험적인 방법으로 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

O-링 시일의 누설특성을 고찰하기 위해서는 O-링의 탄성 압축률과 이에 따른 압축압력을 엄밀하게 해석하는 것이 중요하다. 소재의 탄성 에너지 변형특성에 크게 의존하는 것으로 알려진 O-링의 누설 차단 특성은 O-링 접촉부에서 발생하는 탄성 반발력, 즉 접촉 밀봉 압력에 의해 결정된다. 따라서 압축변형 거동량에 따

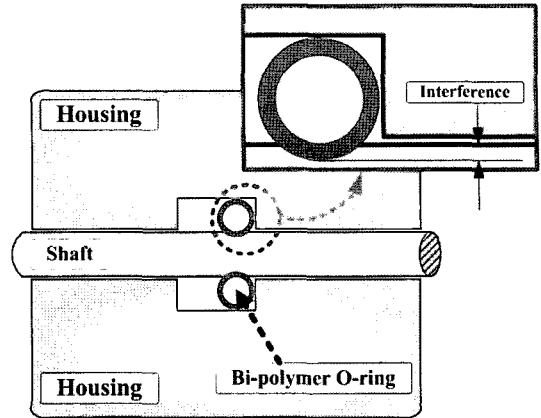


Fig. 2. Initial interference of O-ring seals.

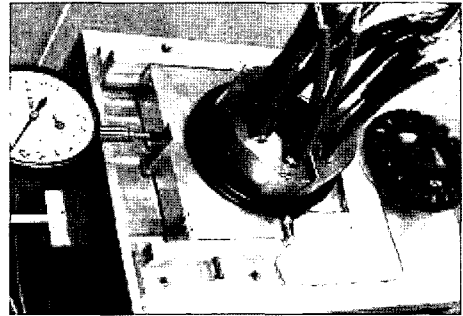


Fig. 3. Sealing tester of O-rings with a heater.

른 밀봉압력을 고찰하기 위해서 설치된 O-링을 중심으로 좌우측에 걸리는 밀봉압력을 측정하고, 이 결과를 유한요소해석 데이터와 비교하고자 한다.

Fig. 2에서 O-링은 두개의 탄성소재를 사용하여 제작한 복합소재 O-링을 구형홈(rectangular groove)에 설치하고 일정한 압축률, 즉 밀봉 간섭량을 갖는 설계모형을 보여주고 있다. Fig. 3은 O-링의 압축 간섭량과 밀봉 접촉력을 측정하기 위한 실험장치이다. O-링과 접촉하는 축은 알루미늄으로 제작하여 축의 원주방향을 따라서 설치한 가열장치에 의해 전달되는 온도가 O-링의 변형거동 특성과 밀봉압력에 잘 반영되도록 하였다.

O-링에 가해지는 반경방향의 접촉면압과 밀봉 간섭량의 탄성거동을 정확하게 구현하기 위해 O-링의 밀봉 간섭량은 반경방향으로 균일하게 걸리도록 축 직경의 크기가 변하게 설계하였다. 즉, 압축변형 거동량의 변동을 주는 효과와 작업조건에 적합한 온도를 균일하게 임의로 설정하면서 압축량과 온도에 의해 O-링에 걸리는 접촉면압을 측정하였다.

원래 O-링은 탄성변형 거동 에너지가 높기 때문에 작은 하중을 받아도 미세한 변화를 잘 일으키므로, 작동조건에 따라 탄성거동이 완벽하게 멈추는 시간의 거동특성을 측정하기 위해 O-링을 축에 설치한 이후로 충분한 시간이 경과된 상태에서 탄성변형 거동량, 접촉력 등을 측정하는 것이 O-링의 실제 탄성거동에 의한 밀봉력 특성을 보다 엄밀하게 고찰할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 복합소재 O-링의 탄성거동 특성 상 초기의 압축조건과 온도조건에 접합한 밀봉력을 측정하기 위해 상온에서 20시간 이상을 유지한 후에 밀봉 간섭량, 접촉면압, 온도를 측정하였기 때문에 가장 안정된 실험 데이터를 얻을 수 있었다.

O-링에 가해지는 온도를 엄격하게 제어하기 위해 설치된 자동온도 가열장치에는 온도보정을 위한 온도 자동튜닝 기능을 갖고 있어 O-링의 온도를 일정하게 유지시킨 상태에서 변형거동 특성을 측정하였다. 실험결과와의 신뢰도를 높이기 위해 온도증가에 따른 변형거동이 불안정한 초기 10분까지는 1분에 한번, 30분까지는 5분에 한번, 60분까지는 10에 한번, 그리고 60분이 경과된 경우는 30분에 한번씩 변형량, 압축력, 온도 데이터를 측정하여 이들의 변동추이를 관찰하였다.

실험에 사용된 O-링의 작동온도는 FFKM 소재의 사용온도가 300°C를 넘어서고, 복합소재 O-링의 중심소재로 FKM 소재(-24~204°C)를 사용한다는 특성을 고려하여, 상온 18°C를 포함한 120°C, 170°C, 220°C, 270°C의 5가지 온도조건에 대한 실험을 수행하였다. 산업용으로 사용하는 FFKM O-링의 작동온도는 보통 250°C 이하에서 작동하므로 본 실험에서 선정된 복합소재 O-링의 작동온도 조건은 기존의 단일체 O-링에 비해 탄성 변형거동성과 가격 측면에서 경쟁력을 확보할 것으로 예상된다.

3. 수치해석조건 및 해석모델

본 연구에 사용된 O-링의 내부에는 FKM을, 그리고 O-링의 겉에는 튜브형의 FFKM을 접합하여 복합소재 O-링을 제조하였다. 이들 소재의 기계적 특성은 KS M 6518 가황고무 물리시험 방법에 의거 시험편을 제작하고, 동일한 작동조건에서 3회의 인장시험을 수행하여 응력-변형을 곡선을 구하였다[2].

Fig. 4는 복합소재 O-링의 유한요소해석 모델을 보여준 그림으로 복합소재 O-링 시일과 접촉하는 축과 바닥판은 전기히터로부터 공급되는 열에 의해 18°C(상

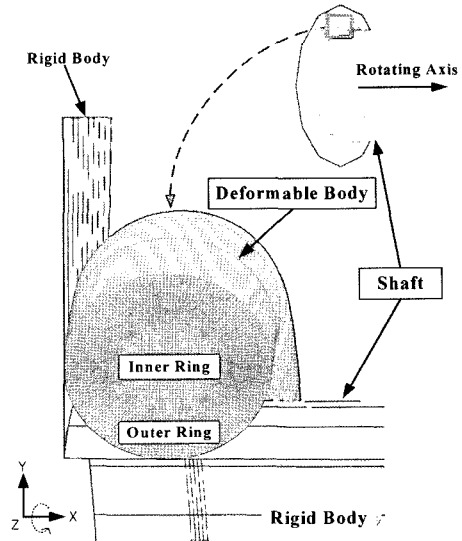


Fig. 4. FEM contact model of bi-polymer O-rings.

온), 120°C, 170°C, 220°C, 270°C를 유지하도록 고정하고 복합소재 O-링의 변형 거동량 및 접촉 면압에 대하여 해석하였다. 이때 축과 바닥판을 타고 유입되는 열에 의한 열전도 문제는 고려하였지만, 상대적으로 작게 나타난 O-링 주변의 대류 열전달 문제는 고려하지 않았다[3].

복합소재 O-링에 걸리는 접촉압력을 계산하기 위한 유한요소해석은 FKM과 FFKM의 변형거동에 대한 오차가 비교적 작은 것으로 알려진 옥덴(Ogden) 3차 모델로 정의된 커브피팅법(curve fitting)을 사용하여 해석결과의 정확도를 높였다[4]. 탄성 중합체로 제조된 O-링의 실제 압축률은 5~30%이지만, 압축률은 밀봉 간섭량에 의해 결정되는 것으로 보통은 기본소재(base material)의 물리적 특성과 열처리 가공특성에 크게 의존한다. 고탄성 O-링은 10% 이내, 저탄성 소재는 20~30%의 압축률에서 각각 사용된다. 본 연구에서 사용한 FFKM 소재는 비교적 강도가 높으므로 실험에 사용한 압축률은 28%로 하였고, 복합소재 O-링에 대하여 밀봉 접촉력을 측정하고 유한요소법으로 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 18°C의 상온과 120°C, 220°C의 가온조건에서 작동하는 복합소재 O-링의 접촉응력을 제시한 유한요소해석 결과이다. 이들 해석결과에 의하면, 축과 접촉하는 O-링에서 발생한 접촉수직응력(contact normal

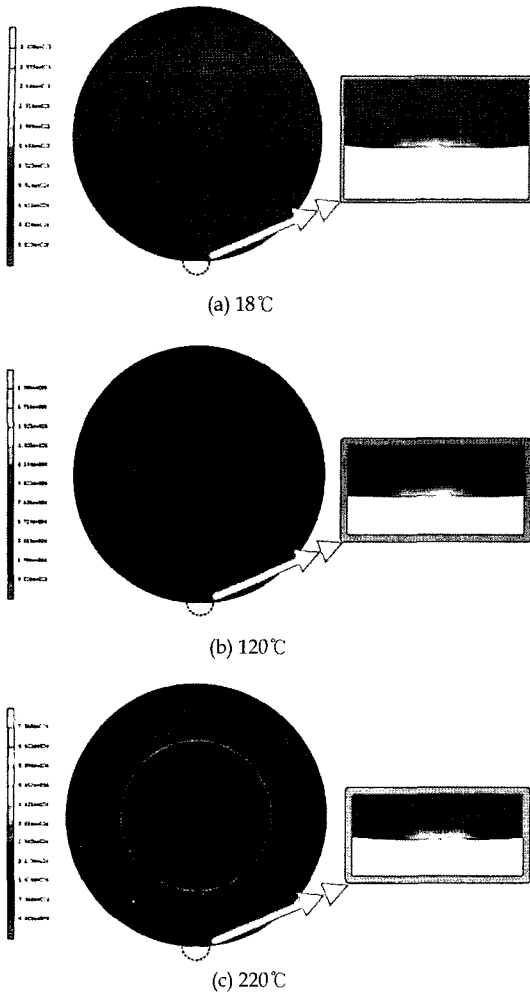


Fig. 5. Contact normal stress distributions of bi-polymer O-rings for a given operation temperature.

stress)은 국부적으로 발생되고, 비교적 강성도가 높은 FFKM에 의한 변형거동이 내부소재인 FKM의 변형거동에 영향을 미치지 않은 것으로 해석되었다. 그러나 이들 O-링의 접촉면압은 약간의 타원형상으로 온도가 낮을수록 접촉응력이 높게 분포하는 경향을 보여준다. 그러나 온도가 높아질수록 접촉응력은 크게 떨어지면서, 중앙에서 높게 나타나는 NBR과 같은 고탄성 소재의 전형적인 변형거동 특성을 보여준다. 이러한 거동현상은 O-링에 가해진 온도가 상승함에 따라 탄성고무 소재의 변형률 에너지가 증가하기 때문으로 밀봉력을 떨어뜨리는 원인으로 작용한다. 따라서 O-링은 탄성체 고무소재의 사용온도 제한범위 이내에서 사용하는 것이 대단히 중요한 설계 제한조건이다.

Fig. 6은 O-링에 작용하는 온도조건에 대해 시간이 경과함에 따라 수렴하는 정상상태의 접촉수직응력(contact normal stress) 실험과 해석에 의해 얻은 결과를 함께 제시하고 있다. 탄성 중합체는 온도에 따른 변형거동 특성이 크게 달라지기 때문에 복합소재 O-링이 안정된 특성을 나타내기 위해 18°C에서는 약 20시간 정도가 경과되어야 하고, 100°C 이상에서 약 3시간 정도 경과하면 O-링의 변형거동이나 접촉응력이 수렴되어 안정된 밀봉특성 결과를 확보할 수 있었다. 이것은 O-링의 밀봉특성을 안정적으로 확보하기 위해서 O-링을 구형홀에 설치한 이후로 하루정도는 지난 다음에 O-링을 사용하는 것이 초기 누설을 차단하는데 효과적이다.

실험결과에 의하면, 18°C에서 측정된 접촉면압은 20시간 정도가 지나면 약 325 kPa에서 일정한 응력값에 도달하고, 120°C에서는 약 157 kPa, 170°C에서는 약 111 kPa, 220°C에서는 약 64 kPa, 270°C에서는 약 39 kPa로 각각 수렴하였다. 이들 접촉면압에 대한 측정결과와 유한요소해석 결과들을 서로 비교하면 5 kPa~44 kPa의 차이를 나타낸다. 이것은 실제로 사용된 탄성 중합체는 온도가 상승함에 따라 응력과 변형률의 값이 비선형적으로 떨어지지만, 본 해석에서 사용한 응력-변형률 특성 곡선은 모두 상온에서 측정된 데이터를 사용하였기 때문에 실제로 실험에서 측정된 접촉거동 응력특성과는 차이가 발생하게 된다[4]. 또한 응력-변형률 곡선을 모사하는 과정에서 이 결과들 자체의 오차, 실험 장치를 축대칭으로 작동하도록 설계되었지만 실제로는 마찰에 의해 완전한 축대칭으로 O-링이 작동할 수 없다는 사실, 그리고 주변의 대류 열전달을 무시한 점 등은 실험적 결과와 해석적 결과의 차이가 발생할 수밖에 없다는 점을 설명하고 있다.

Fig. 7은 주어진 압축률과 온도조건에서 안정적으로 수렴한 Fig. 6의 접촉수직응력 결과들을 작동온도와 접촉수직응력 비율로 재구성한 데이터이다. 상온에서는 해석과 실험 데이터의 물리적 신뢰도가 높기 때문에 이것을 기준치 100으로 설정하고, 다른 온도조건에 대하여 상대적인 접촉수직응력의 비율 결과를 제시하였다. O-링에 열이 전달되면서 온도가 상승하면, O-링의 접촉수직응력은 포물선 형상으로 감소하는 특성을 보여주며, 270°C의 높은 사용온도 조건에서도 접촉응력이 높게 유지되고는 있으나 상온의 접촉응력에 비하여 15% 정도로 대단히 낮음을 보여준다. 결국 O-링에 전달되는 열이 많으면 복합소재 O-링의 강도저하로 밀

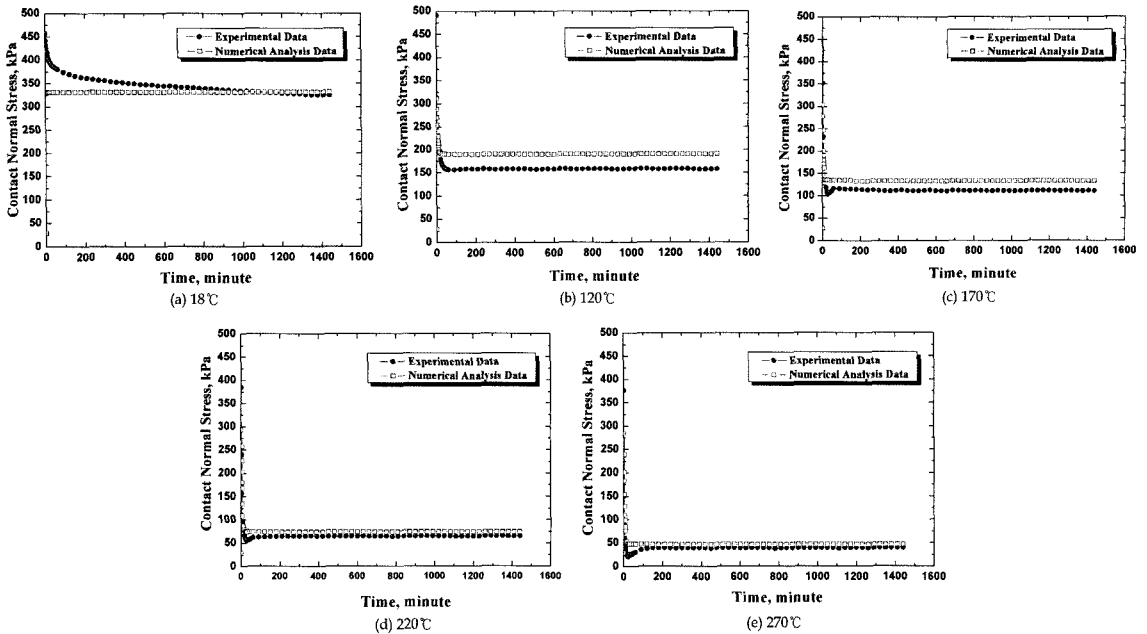


Fig. 6. Comparisons of contact normal stresses between experimental and numerical results for a given operation temperature.

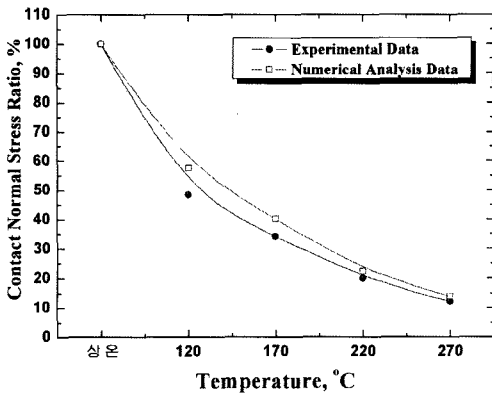


Fig. 7. Comparisons of contact normal stress ratios between experimental and numerical results for a given operation temperature.

용성이 떨어지기 때문에 O-링의 사용온도에 적합한 간섭량과 밀봉압력을 유지하는 설계조건이 필요하다.

Fig. 7에서 O-링의 사용온도가 120°C인 경우는 약 50%로 가파르게 떨어지다가, 270°C에서는 약 15%로 다소 완만하게 진행되는 접촉응력 감소현상을 보여준다. 즉, O-링의 접촉면압은 낮은 작동온도에서는 빠르게 떨어지다가 120°C를 기점으로 다소 완만하게 떨어지는 비선형의 거동특성을 보여준다. 270°C의 높은 온

도에서 접촉응력의 크기는 많이 떨어졌지만 복합소재 O-링은 아직도 39 kPa의 접촉력을 유지하는 것으로 보아 복합소재 O-링의 사용성은 우수한 것으로 판단된다. 이것은 기존의 일체형 O-링(solid O-ring)의 접촉면압과 유사한 데이터로 고가소재의 절감, 변형거동 특성의 유연성 등의 측면에서 복합소재 O-링은 상대적으로 우수한 결과를 제시하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 FKM과 FFKM의 폴리머 소재로 제조된 복합소재 O-링의 압축변형 거동특성 및 접촉수직하중을 사용온도에 대해 실험적으로, 그리고 해석적으로 비교·고찰하였다.

고온특성이 대단히 우수한 FFKM 소재는 온도 증가에 따른 강성도가 우수하기 때문에 복합소재 O-링으로 제작되어 사용해도 단일체 O-링과 같은 변형거동특성을 유사하게 나타낸다는 것이다. 이것은 상온에서 300°C 정도에 이르는 높은 온도와 28% 정도의 높은 압축률 작동조건에 대하여 안전하고 접촉수직응력이나 변형 거동율의 변화정도가 내부소재로 사용한 FKM에 거동특성에 별다른 영향을 미치지 않았다는 사실을 나타낸다.

따라서 본 연구에서 사용한 복합소재 O-링에서 FFKM의 고온특성이나 변형 거동성을 거의 그대로 유지하면서 고가소재를 절약할 수 있다는 측면에서 우수한 연구결과라 할 수 있다.

후 기

본 논문은 2004학년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. Bernhard Richter, "Perfluoroelastomer O-rings Reduce Risk of Failure," *World Pumps*, pp.34-36, July 1995.
2. 김청균, 조승현, "온도를 고려한 FFKM O-링의 밀봉력에 관한 연구," *한국윤활학회*, 제20권, 제5호, pp.278-283, 2004.
3. Yunus A. çngel, "Heat Transfer," Vol. II, McGraw Hill, pp.376-383, pp.707-709, 2001.
4. 김도현, 강현준, 김청균, 고영배, "고온조건에서 NBR O-링의 밀봉력에 관한 실험적 연구," *한국윤활학회 제39회 추계학술대회*, pp.209-212, 2004.