

〈論 文〉

립실의 접촉력 및 온도분포 해석에 관한 연구

김청균* · 전인기** · 심우진* · 김종억*

(1993년 9월 3일 접수)

A Study on the Contact Force and Temperature Distribution of Lip Seals

Chung Kyun Kim, In Ki Jun, Woo Jeon Shim and Chong-Eok Kim

Key Words : 립실(Lip Seal), 접촉력(Contact Force), 가터스프링(Garter Spring), 더스트 실립(Dust Seal Lip), 밀봉유체(Sealed Fluid), 마찰열(Frictional Heat)

Abstract

Using the finite element method, the contact force, contact band width and temperature distribution of lip seals analyzed for the interference including some nonlinearities such as material nonlinearity, geometrical nonlinearity and nonlinear contact boundary condition. The calculated results showed that the contact stress concentrated on the contact zone between the garter spring and the rubber toward the flex side, the contact edge of lip and the flex for the increased interference. The maximum contact force occurs on the lip edge of seals. The high contact forces due to the increased interference separate the sealing gap between the lip edge and the rotating shaft. This may lead to leak the sealed oil.

1. 서 론

회전축과 실의 접촉계면을 통하여 밀봉유체(sealed fluid)의 누설(leakage)을 방지하거나 또는 외부로부터 침입하는 이물질들을 차단하기 위하여 사용하는 립실(lip seal)은 작은 설치공간, 간편한 조립방법, 저렴한 가격 등의 장점때문에 산업체에서 많이 사용하고 있다. 펌프나 베어링 등에서 상대접촉 운동면을 보호하기 위하여 널리 사용하는 립실은 회전 운동축과 직접 접촉하여 1차적인 밀봉기능을 수행하는 립선단(lip edge), 실의 접촉력을 균일하게 강화시켜 주는 가터스프링(garter spring), 실의 강도를 유지시켜 주는 보강테(metal case), 실하우징에 고정시켜야 하는 고정부, 2차 밀봉기능을 수행하는 더

스트 실립(dust seal lip)으로 구성된다.

밀봉기능을 충분히 수행하면서 긴 수명을 갖는 립선단부 설계는 립실개발에서 가장 중요한 연구과제이다. 립실의 밀봉효율과 수명에 가장 큰 영향을 주고 있는 요소중의 하나인 실 접촉면에서의 압력분포, 즉 실의 원주방향 긴박력에 관련된 해석은 실의 최적설계 측면에서 대단히 중요하다.

립실의 상대접촉 운동면에서 발생하는 마찰열(frictional heat)은 실립과 회전축 표면의 온도를 상승시켜 실립의 열적 불안정성(thermal-instability)에 커다란 영향을 준다. 이와 같은 마찰열에 의한 실의 안정성을 확보하기 위해서는 발생된 마찰열이 회전축, 하우징, 밀봉유체 및 공기를 통하여 잘 소산될 수 있도록 설계되어야 하는데, 이때 실내부의 온도분포 해석은 대단히 중요한 설계자료를 제공하게 된다.⁽¹⁾ 실 접촉계면에서 발생하는 마찰열에 의한 실재질의 열변형거동문제는 실의 성능에 직접적인 영향을 주기 때문에 실내의

*정회원, 홍익대학교 기계공학과

**홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

온도분포를 해석하는 것은 중요한 의미를 갖는다.

고무재질의 접촉력 문제는 해석적인 방법과 유한 차분법, (2) 유한요소법(3~5) 등의 수치적인 방법으로 해석되고 있다. 고무재질의 특성은 변형이 크게 나타나고, 시간에 따른 거동의 변화(creep 현상 등)를 나타내며 Stick-slip 마찰성질을 갖는 비선형 재질(6)이므로 해석하기가 매우 어렵기 때문에 최근에는 고무의 거동해석시 유한요소방법을 많이 사용하고 있다. 실 구조물에 대한 응력해석은 초창기의 선형적 해석(7,8)으로부터 실의 비선형성을 고려한 연구(9,10)가 일부 진행되었다. 고무재질의 비선형성을 고려한 거동해석을 할 수 있는 프로그램은 범용 코드인 ABAQUS, (11) MARC(12)와 고무재료 전용 해석코드인 B-RUBBER(13)가 있다.

실선단부와 회전축 제면에서의 접촉응력문제는 실립의 대변형성, 고무재질의 비선형거동, 경계조건 비선형성때문에 이론적으로는 해결하기가 매우 복잡하므로 유한요소법을 이용하여 실의 변형거동문제를 해석하고자 한다.

본 연구에서는 실의 수명 연장을 설계·유지·보수의 측면에서 립선단 접촉점에서의 간섭량 변화에 따른 접촉력(contact force), 접촉폭(contact width) 크기, 마찰열과 오일측 온도 및 공기의 온도에 따른 실의 온도분포 관계를 비선형 유한요소법 프로그램인 MARC를 사용하여 해석하였다.

2. 실의 정적거동 해석

회전축을 밀봉하기 위한 립실의 기하학적인 형태와 변형은 축대칭이고, (14) 접촉력 해석시 실립의 온도는 등온상태($T=30^{\circ}\text{C}$)를 유지하며, 실의 작동조건 변화에 따른 영향은 금속제 보강테 이하의 고무에만 미친다고 가정한다. 실의 회전축이 구동함에 따라서 실선단부가 축방향으로 미세한 미끄럼이 발생하나 본 연구에서는 제면에서의 원주방향 접촉력만을 해석하므로 축방향의 마찰영향을 배제하였다. 실의 동적 거동상태를 해석하기 위하여 고무의 비선형성(비선형 재질, 기하학적 비선형성, 비선형 경계조건)을 고려하여 해석할 수 있는 비선형 유한요소 코드인 MARC를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 실모델은 Fig. 1에서 보여주고 있으며, 실재질은 등방성의 균질한 니트릴고무(NBR)로서 Mooney-Rivlin모델(15)을 사용하였다. Fig. 2는 립실의 유한요소해석을 위한 메쉬를 보여

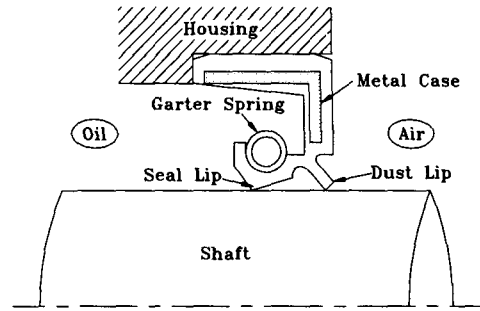


Fig. 1 Rotary lip seal

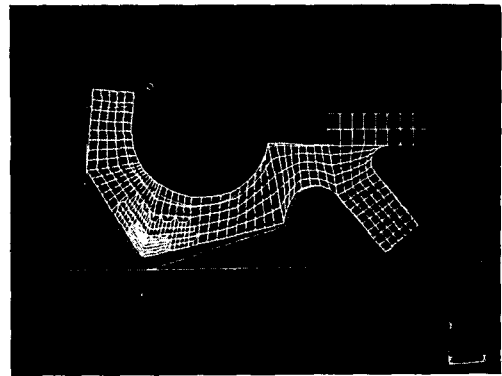


Fig. 2 Mesh generation for lip seals

Table 1 Thermo-physical properties of Nitrile rubber and boundary conditions

· Temperature of seal lip edge, $^{\circ}\text{C}$	100
· Oil temperature, $^{\circ}\text{C}$	40
· Air temperature, $^{\circ}\text{C}$	20
· Coefficient of thermal conductivity, $\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.43
· Specific heat, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	2000
· Coefficient of thermal expansion, $1/\text{K}$	9.44×10^{-5}
· Density, kg/m^3	1460
· Garter spring force in circumferential direction, N	1,827
· Mooney-Rivlin constant C_1 , MPa	-2,746
· Mooney-Rivlin constant C_2 , MPa	4,597

주고 있는 데 751개의 축대칭 4각형 요소와 1584개의 요소절점으로 구성되어 있으며, 특히 회전축과 접촉하는 립선단부는 그림에서 보여주는 것처럼 보다 미세한 요소로 구성하였다.

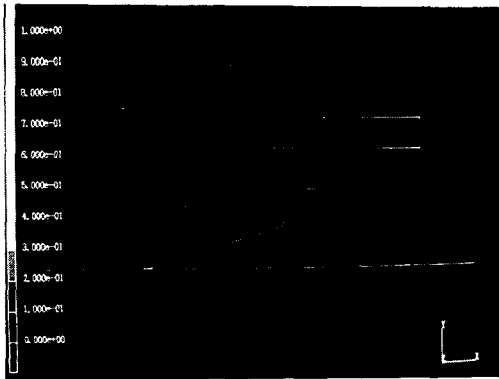
정적상태에서의 접촉력 해석을 위한 실의 경계조건과 정상상태에 도달하였을 때의 온도분포 해석을 위한 경계조건, 실소재인 NBR에 대한 물성치 및 Mooney-Rivlin상수는 Table 1에서 주어진다.

3. 계산결과 및 토의

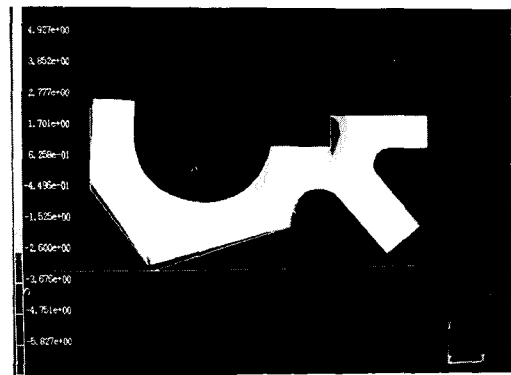
Fig. 3과 Fig. 4는 가터스프링이 설치된 립실의 립선단부가 정적인 상태에서 간섭량이 존재할 경우, 즉 하중을 받게될 경우 립실에 걸리는 응력(단위: KPa) 분포도를 여러가지 간섭량의 변화에 대하여 해석한 FEM 결과를 보여주고 있다. 여기서, Fig. 3(a)는 실립 선단부가 변형되지 않고 단순히 회전축에 접촉하는 형태를 보여주고 있으며, 나머지 그림들은 접촉 간섭량의 변화에 따른 실내의 접촉응력분포 형태를 보여주고 있다. 이들 결과에 의

하면 실립 선단부의 간섭량이 증가하게 되면 실립 선단부, 가터스프링과 접촉하는 Flex쪽의 고무 접촉부분, 실의 Flex 상단부에 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 기존의 연구결과와 일치하는 것으로^(16,17) 립실 설계시 Flex 부분의 중요성을 강조하는 결과이다.

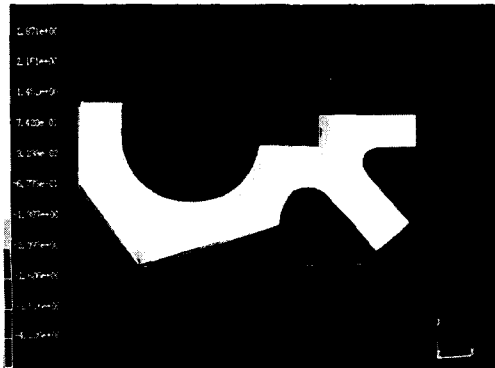
실립 선단부에 걸리는 응력의 크기를 보다 정확하게 해석하기 위하여 Fig. 3의 결과를 확대한 그림이 Fig. 4이다. 이 결과에 의하면 실립 선단부에 걸리는 응력의 크기는 Flex에 비하여 대단히 작지만 미끄럼 접촉면이 미세한 구간에서 일어난다는 사실을 고려하면 중요한 결과를 제시하고 있다. FEM 계산결과에 의하면 간섭량이 증가할수록 실 선단부의 소재 안쪽에는 국부적으로 커다란 압축응력의 집중현상이 발생하고, 립선단부로부터 공기축, 즉 그림의 오른쪽으로 인접한 절점에서는 상대



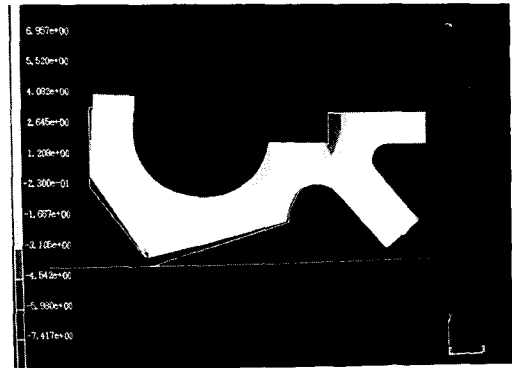
(a) Interference $\delta=0$ mm; contact width $b=0$ mm



(c) Interference $\delta=0.5$ mm; contact width $b=0.11$ mm



(b) Interference $\delta=0.3$ mm; contact width $b=0.071$ mm



(d) Interference $\delta=0.7$ mm; contact width $b=0.163$ mm

Fig. 3 Stress distribution in the radial lip seal of Nitrile rubber

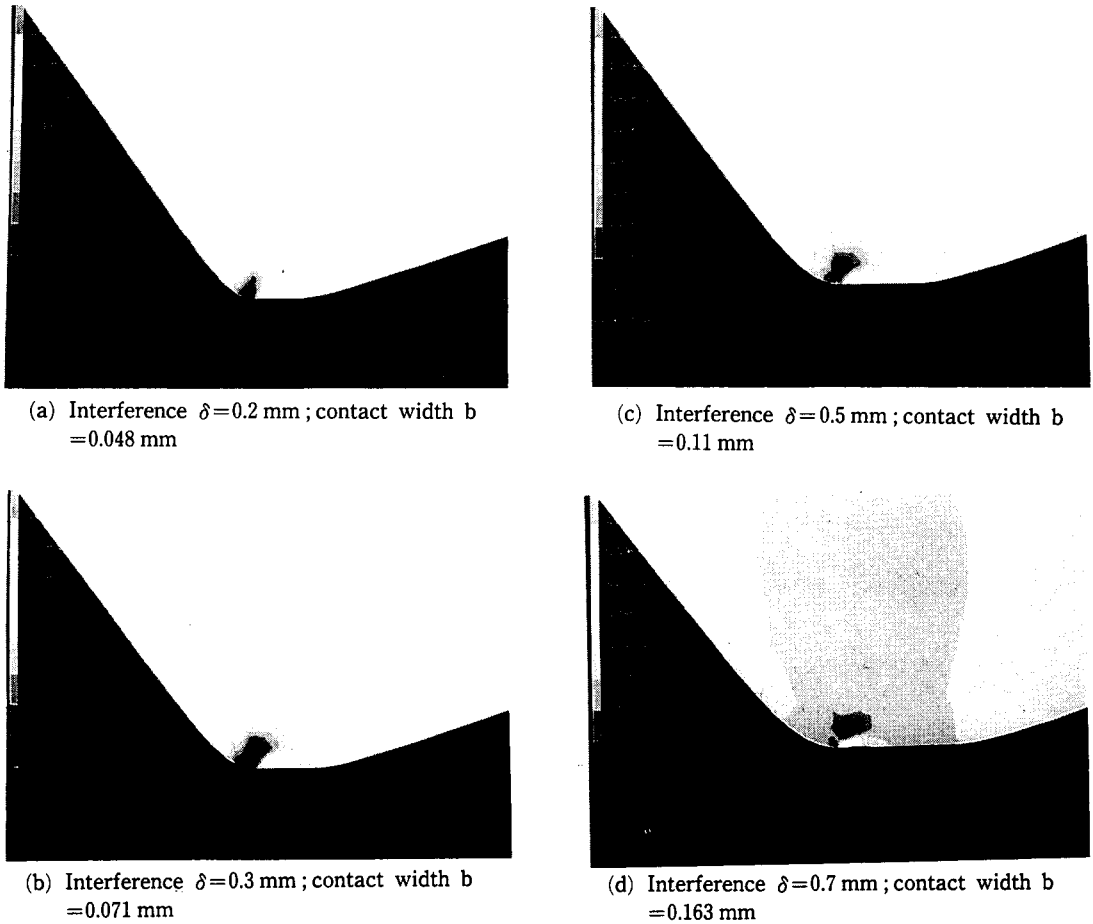


Fig. 4 Stress distribution in contact region of seal lip edge

적으로 인장응력이 발생되어 소재내에서는 압축부와 인장부의 응력 경계면이 발생하게 된다. 이러한 현상은 실의 간섭량이 증가될수록 심화되는데 실소재 내에서 국부적인 응력집중력 차이가 크면 클수록 실의 수명을 급격하게 단축시키는 원인이 된다. 실의 간섭량을 더욱 증가시키면 Fig. 4(d)에서 보여주는 것처럼 실 접촉면의 일부가 실재 내부로 편위되면서 회전접촉면과는 떨어지는 현상이 발생하는데, 이것은 실의 접촉면이 접촉선으로부터 이탈하면서 오일의 누설을 일으키게 원인을 제공한다. 여기서 실의 증가된 간섭량은 립실 설치시의 편심도(eccentricity)나 경사도(misalignment), 회전축의 빠르기 정도, 실립 선단부와 회전축 사이의 끼워맞춤 정도에 따라서 발생된다.

또한 컴퓨터 시뮬레이션결과에 의하면 가터 스프링은 립선단부에 가압력을 제공하여 궁극적으로는

실 Flex부에 걸리는 응력을 완화시켜 주고, 실 전체에 걸리는 응력을 소재내에 고르게 분산시켜 주는 중요한 역할을 수행하고 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 정상상태에서 작동하는 립실의 립선단부에서 발생하는 마찰열이 100°C 로⁽¹⁷⁾ 균일하다고 가정한 경우에 대한 실내의 온도분포이다. 여기서, 사용된 니트릴 고무재질은 Mooney-Rivlin 모델을 사용하여 실의 온도분포를 해석하였다. Fig. 5는 공기의 열전달계수 $h_{air}=10$ W/m²K, 오일의 열전달계수 $h_{oil}=200$ W/m²K인 조건에서 밀봉된 오일의 온도를 변화시켜 가면서 해석하였다. Fig. 5의 해석결과에 의하면 여러가지 온도변화에 대하여 실 내부의 온도분포도는 유사하나 오일의 온도가 높을수록 실립 내부의 전체적인 온도를 크게 상승시켜 실재질의 탄성강도가 약화되므로 많은 문제점을 제기할 것으로 생각된다. 또한 Fig. 6에

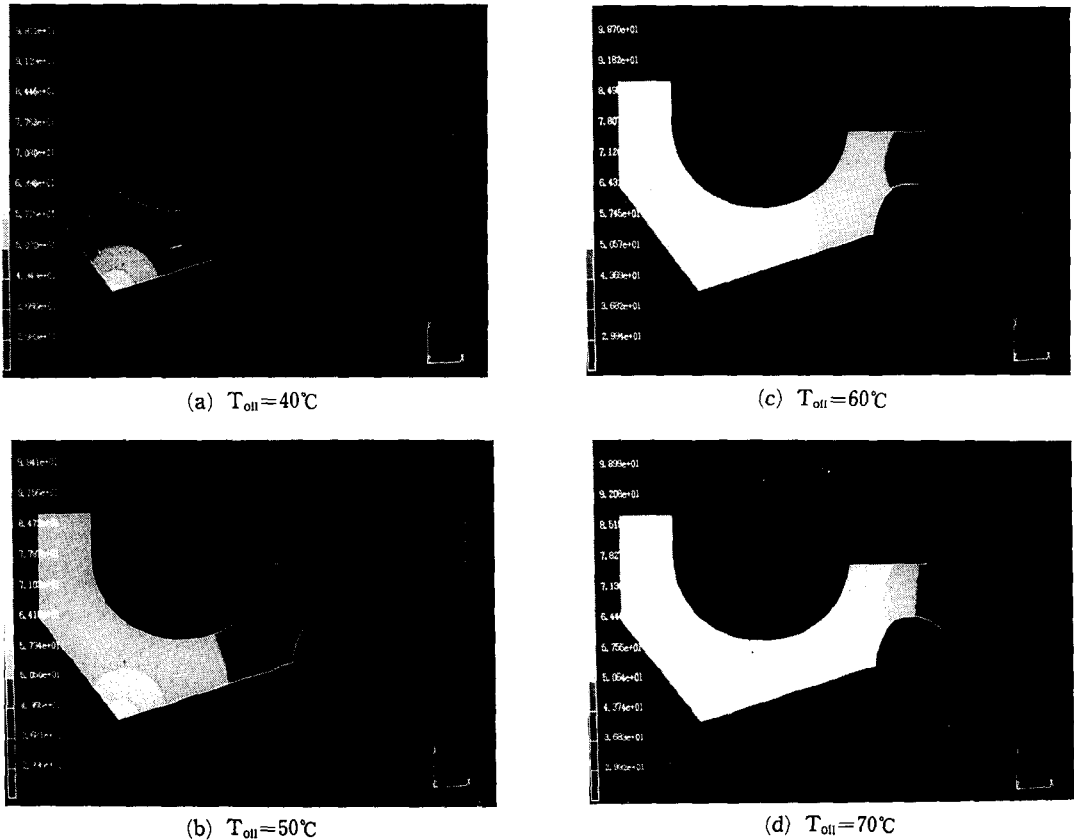


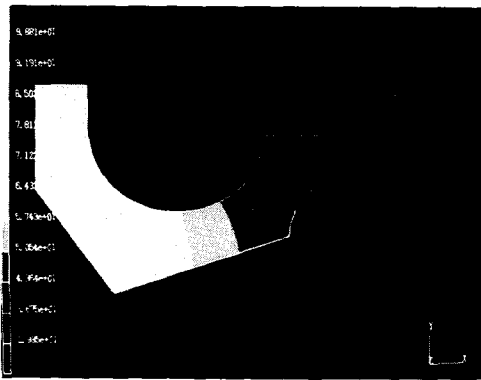
Fig. 5 Steady-state temperature distribution for the various temperatures of sealed oil; $h_{air}=10$ W/m²K, $h_{oil}=200$ W/m²K

서는 $h_{air}=10$ W/m²K이고, 오일의 온도가 40°C인 상태에 대하여 오일의 대류 열전달계수를 변화시켜가면서 실내부의 온도분포를 해석하였다. Fig. 6은 오일의 대류 열전달계수가 클수록 실내부에서 발생하는 열을 잘 소산시켜 주기 때문에 실의 운전상태를 대단히 양호하게 유지시킬 수 있다는 결론을 보여주고 있다.

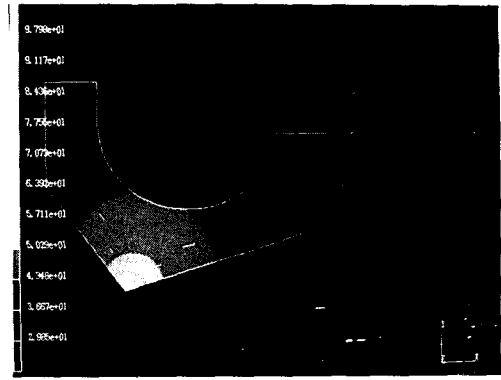
FEM 해석결과에 의하면 Fig. 7은 실립의 접촉계면에서 간섭량이 증가함에 따라서 실립의 반경방향 접촉력이 비교적 선형적으로 증가하고 있으며, 이것은 Stakenborg⁽¹⁷⁾가 수행한 실험결과와 유사하다. Fig. 8은 실의 간섭량이 증가하면서 실의 접촉폭이 거의 직선적으로 증가하고 있다. 그러나 실의 간섭량이 더욱 증가하게 되면 접촉구간 가운데의 매우 작은 영역에서는 실 안쪽방향으로의 인장응력으로 인하여 실이 축으로부터 이탈(separation)하는 현상이 나타나는데 이것은 밀봉된 유체를 누설

시키는 원인이 되고 있다.

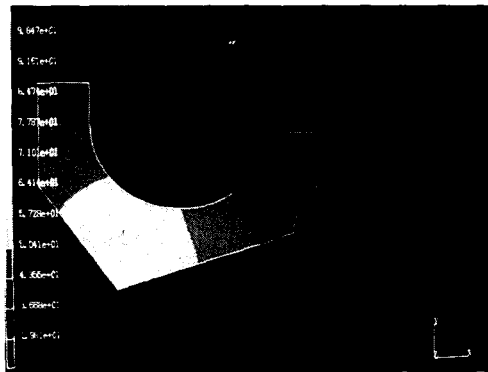
실립 선단부와 회전축 사이의 접촉 간섭량이 변화함에 따라서 실립에 걸리는 접촉력은 큰 영향을 받게 되는데, Fig. 9에서는 각각의 간섭량에 대하여 접촉위치, 즉 접촉절점에 따른 접촉력의 크기를 실립 선단부를 중심으로 보여준다. 이 그림에 의하면 실립에 걸리는 최대 접촉력은 항상 립선단부(2번 절점)에 걸리고, 회전축과 실립간의 접촉은 간섭량이 증가함에 따라서 공기축 경사면(2번 절점이 상)에서만 이루어지나 간섭량이 일정한 값 이상(여기서는 $\delta=0.7$ mm 이상)에서는 오일축 경사면(1번 절점)도 회전축과 접촉하게 된다. FEM 해석결과를 보여준 Fig. 9는 간섭량이 증가할수록 접촉하는 절점수, 즉 실 접촉폭은 증가하고 비교적 선형적으로 감소하나 간섭량이 작을 경우의 접촉력은 실선단부로부터 멀어지면서 쌍곡선적으로 감소하는 경향을 나타낸다.



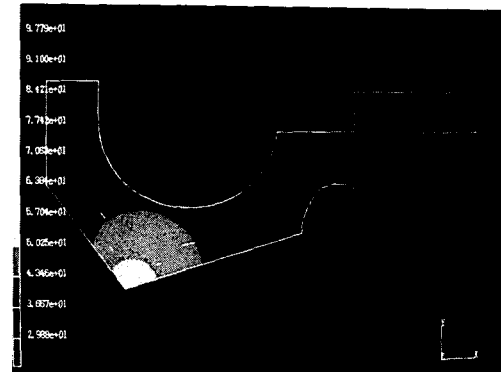
(a) $h_{oil}=10$



(c) $h_{oil}=300$



(b) $h_{oil}=50$



(d) $h_{oil}=500$

Fig. 6 Steady-state temperature distribution for the various values of convection coefficient of sealed oil

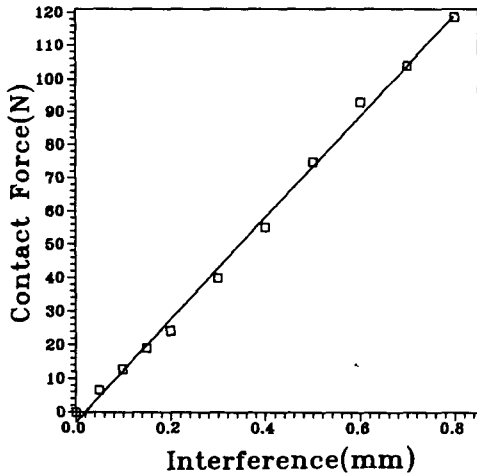


Fig. 7 Contact force as a function of interference between lip edge and shaft

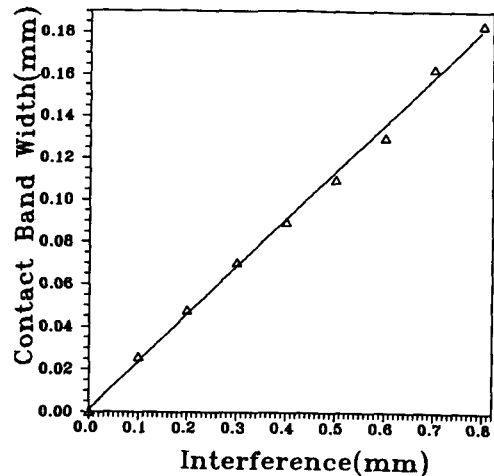


Fig. 8 Contact width as a function of interference between lip edge and shaft

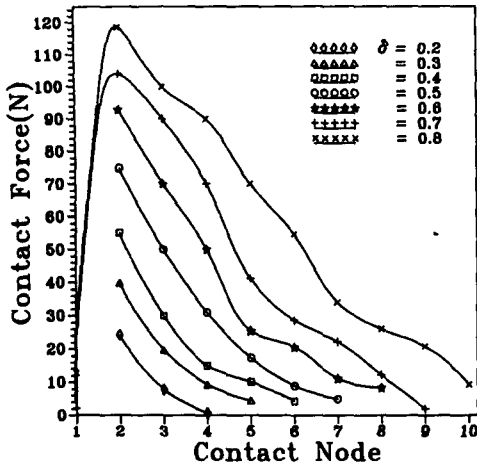


Fig. 9 Contact force as a function of the contact node for the various values of the interference

5. 결 론

정적인 상태에서 립선단부와 회전축 사이의 간섭량 변화에 따른 접촉력과 정상상태로 운전하는 립실에서 밀봉유체의 상태량 변화에 따르는 온도분포를 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하여 해석하였다.

비선형 유한요소해석 결과에 의하면 실의 간섭량이 증가할수록 접촉응력은 실립 선단부로부터 실립 내부로 이동하면서 발생하는 커다란 압축응력 지역과 공기축으로 인접한 절점에서는 국부적으로 인장응력 구역이 생성되면서 커다란 응력 경계선이 발달하게 되어 실립은 취약하게 되고, 궁극적으로는 립선단부와 회전축의 계면에 간극이 발생하게 되어 누설이 일어난다. 또한 반경방향의 접촉력은 실립 선단부에서 항상 최대로 걸리고, 간섭량을 일정한 값 이상으로 증가시키면 실립 선단부의 공기축 뿐만 아니라 오일축의 경사면에도 회전축과 국부적인 마찰접촉을 하게 되어 특히 립선단부는 쉽게 파손하게 된다. 오일의 온도가 높을수록 그리고 오일의 대류 열전달계수가 작을수록 실립 선단부에 미치는 영향은 대단히 크다. 고무실의 접촉응력과 열적해석에 유한요소법을 적용하여 설계데이터를 용이하게 얻을 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥제

단의 대학부설연구소 과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (1) Upper, G., 1969, "Temperature of Sealing Lips," 4th Int. Conf. on Fluid Sealing, Organized by ASLE, B·H·R·A and ASME, Philadelphia.
- (2) Ozisik, M. N., 1985, *Heat Transfer, A Basic Approach*, McGraw-Hill.
- (3) Gawlinski, M. and Konderla, P., 1984, "Dynamic Analysis of Oil Lip Seals," 10th Int. Conf. on Fluid Sealing, Innsbruck.
- (4) Gawlinski, M., Konderla, P. and Kupper, G., 1988, "Optimization of Crankshaft Seals," SAE Paper 8 80309, pp. 503~512.
- (5) Chang, H. H., 1988, "On the Numerical Study for Rubber Seals," SAE Paper 880255, pp. 261~267.
- (6) Morman, K. N. Jr., 1984, June, "Rubber Viscoelasticity-A Review of Current Understanding," Ford Motor Company, Dearborn, MI.
- (7) Miyashita, Y., et al., 1987, "Study on Stern-Tube Sealing System," Bulletin of the JSME, Vol. 5, No. 1.
- (8) Winn, L. and Lee, C. C., 1980, "Lip Seals, Stress and Deformation Studies," ASME, 80-CZ/LUB-11.
- (9) Medri, G., Molari, P. G. and Strozzi, A., 1978, "Numerical and Experimental Analysis of Rubber-Like Seals in Large Elastic Deformations Under Unilateral Contacts," B. H. R. A., 8th Conference on Fluid Sealing, Paper F8, Durham.
- (10) Medri, G., Strozzi, A., Brasi, J. and Gabelli, A., 1984, "Mechanical Behaviour of Two Elastomeric Seals for Rolling Element Bearing Units," B. H. R. A., 10th Int. Conf. on Fluid Sealing, Paper K1, Innsbruck.
- (11) ABAQUS User's Manual, 1984, June, Version 4.5(a), Providence, RI.
- (12) MARC User's Manual, 1993, Version K.5, MARC Analysis Research Co.
- (13) Symposium on Analysis and Design of Rub

- ber Parts*, 1984, BMI, Columbus, OH.
- (14) Morman, K. N. Jr. and Nagtegal, J. C., 1983, "Finite Element Analysis of Sinusoidal Small Amplitude Vibrations in Deformed Viscoelastic Solids," *Int. J. Num. Mech. Eng.*, Vol. 19, pp. 1079~1103.
- (15) Treolar, L. R. G., 1975, *The Physics of Rubber Elasticity*, Clarendon Press, Oxford.
- (16) Sahiouni, J., 1990, "Finite Element Analysis as a Design Tool in the Radial Lip Seal Industry," *SAE Paper* 900341.
- (17) Stakenborg, M. J. L., 1988, *On the Sealing and Lubrication Mechanism of Radial Lip Seals*, Ph. D. Thesis.