

열응력을 고려한 고무 오일시일 해석

김청균 · 전인기

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Coupled Thermal-Mechanical Analysis of Rubber Oil Seals

Chung Kyun Kim, In Ki Jun

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—This paper deals with the distributions of the contact stress in oil seals. The distributions of the contact stress due to the temperature effects are analyzed for various values of the interference for a nitrile rubber seal.

The calculated FEM results show that the relative maximum stresses occur at the contacting area against the shaft, the flex zone, and the contacting area of the garter spring grooves. Using the coupled temperature-stress FEM analysis, the contact force of a radial lip seal with and without the garter spring are studied as a function of shaft diameter. The calculated results of mechanical analysis show good correspondence with those of the coupled thermal-mechanical analysis method except small values of the interference. And the calculated results indicated that the thermal stresses only have a very minor influence on the deformed shape of the lip seal as the interference increases. But the coupled temperature-stress analysis will be very useful tool to predict the contact behaviors of rubber lip seals for small values of the interference.

1. 서 론

오일시일(Oil Seals)은 산업체에서 회전축계의 누설을 방지하기 위하여 가장 많이 사용하고 있는 중요한 기계요소이다. 일반적으로 오일시일은 회전기계에서 가장 많은 문제점을 제기하고 있으며, 시일의 사용처는 대부분 밀폐된 곳에 위치해 있기 때문에 유지·보수비가 높다. 이러한 관점에서 오일시일에 대한 관심은 매우 높으나 불행하게도 아직까지 만족할 만한 시일 개발은 안되었고, 최근에 고정밀 기계에 대한 요구가 크게 증가하면서 수명연장이나 고성능화된 시일개발의 필요성이 크게 증대하고 있다.

최근 산업체에서는 기계 시스템의 고속화, 고하중화, 장수명화가 요구되면서 오일시일 설계를 더욱 어렵게 만들고 있다. 오일시일은 특성상 실제로 밀봉을 담당하는 접촉면적이 대단히 작기 때문에 국부적인 마찰열의 발생과 이로인한 문제점과 시일 자체의 기계적 강도 등을 동시에 고려하여 설계하기는 대단히 어려웠으나 최근 이러한 문제를 해석할 수 있는 ABAQUS[1], MARC[2]와 같은 비선형 프로그램 개발은

오일시일과 같이 복잡한 접촉문제(Contact Problems)를 비교적 용이하게 해석할 수 있게 되었다.

시일 구조물에 대한 초창기의 응력해석은 선형성에 [3-5] 집중되었으나 최근에는 비선형성을 고려할 수 있는 범용 프로그램을 사용하여 시일 재질인 고무의 비선형 특성을 [6-9] 해석하고 있다. 본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 상대 접촉운동에 관련된 문제도 해석할 수 있는 MARC 최근판을 사용하여 시일 접촉부에서 발생된 마찰열과 시일 구조물의 대변형성(Large Deformation)에 의한 고무재질의 특성을 동시에 고려한 접촉면에서의 열-응력 해석(Coupled Thermal-Mechanical Analysis)을 오일시일의 간섭량(Interference)에 대하여 해석하였다.

2. 수치적 해석

고무재질은 비선형성이고, 오일시일은 축대칭성 변형을 하며, 사용되는 오일시일은 30°C의 등온 상태에서 해석된 것이다. 또한 시일의 작동조건 변화에 따른 영향은 시일의 금속 지지부에는 영향을 주지

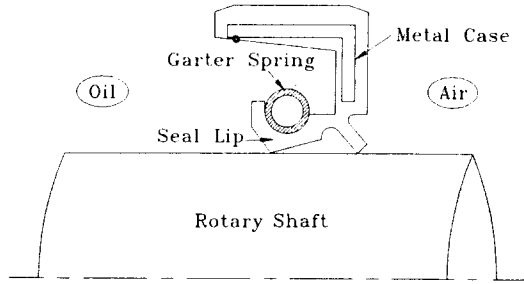


Fig. 1. Radial lip seal

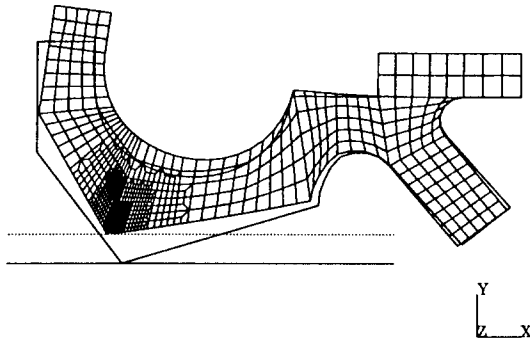


Fig. 2. Mesh and deformation used in the FEM calculations

얇고 단지 유연한 고무재질에만 미친다고 가정한다. 시일 접촉 선단부(Lip Contacting Edge)는 회전축이 구동함에 따라서 축방향으로 미세한 미끄럼이 발생하나 본 연구에서는 이와 같은 마찰조건을 배제하였다.

본 연구에서 사용한 시일 재질은 등방성의 균질한 니트릴계 고무(NBR)로 이 재질의 비선형성은 Mooney-Rivlin[10] 모델을 사용하였다. 시일립 선단부와 회전축 사이의 접촉문제에 대한 유한요소 해석은 특성상 절점이 하중을 받게되면 최초의 접촉점으로 부터 변형을 하게 되어 절점(Nodal Point)이 서로 떨어지는 현상이 발생한다. 그래서 변형된 이후에 다시 접촉이 일어났다고 생각되는 절점간의 거리를 1.1×10^{-3} mm로 설정하여 해석하였다. 해석된 시일 모델은 Fig. 1에서, 오일시일의 유한요소해석을 위한 메쉬는 Fig. 2에서 각각 보여주고 있다. 오일시일이 정상상태에 도달하였을 때 열 및 기계적 응력을 해석하기 위한 시일 소재의 물리적 특성, 경계조건 및 해석조건은 Table 1과 2에서 각각 제시하고 있다.

3. 해석결과 및 토의

Table 1. Material parameters used in finite element analysis

| Material parameters | Values |
|---|----------------------------------|
| Mass of garter spring, kg | 2.75×10^{-3} |
| Garter spring stiffness, N/m | 0.108 |
| Initial circumferential force of garter spring, kg/mm | 4.46×10^{-3} |
| Density of nitrile rubber, kg/m ³ | 1460 |
| Specific heat, J/kgK | 2000 |
| Heat conductivity, W/mK | 0.43 |
| Thermal expansion coefficient, 1/K | 9.44×10^{-5} |
| Mooney-Rivlin constants of nitrile rubber, Mpa | $C_1 = -2.746$ $C_2 = -4.597$ |

Table 2. Simulation data

| Conditions | Values |
|--|--------|
| Shaft diameter, mm | 70 |
| Seal lip edge temperature, °C | 100 |
| Oil temperature, °C | 40 |
| Air temperature, °C | 20 |
| Housing temperature, °C | 30 |
| Heat transfer coefficient of oil, W/m ² K | 200 |
| Heat transfer coefficient of air, W/m ² K | 10 |

니트릴 고무재질의 비선형 특성은 Mooney-Rivlin 모델을 이용하여 오일시일의 접촉응력 상태를 해석하였다. 이 때 오일시일에 가해진 하중은 가터 스프링(Garter Spring)의 장력과 편심량 또는 시일립의 긴박력(Contact Force)에 의한 반경방향의 변위량, 즉 간섭량에 의하여 결정된다.

Figs. 3과 4는 가터 스프링의 장력이 오일시일에 가해진 상태에서, 그리고 Figs. 5와 6은 가터 스프링이 제거된 상태에서 간섭량을 1.0mm 주었을 경우 오일시일의 수직응력 분포도를 각각 보여주고 있다. 이들 결과에 의하면 스프링이 없을 경우의 응력분포 상태는 특히 시일의 플렉스(Flex) 부분에 보다 큰 굽힘 모멘트 영향이 집중되고, 스프링이 있는 경우의 오일시일은 특히 오일시일 립 선단부에 응력을 집중시키나 전체적으로 응력 분포도를 10% 정도 낮추면서도 비교적 균일하게 분포시켜 수명을 연장시켜 주고 밀봉기능을 강화시켜 준다. 일반적으로 시일에서의 응력집중은 시일립-회전축 사이의 접촉 부분, 가터 스프링이 직접 접촉하는 시일의 안쪽부분, 시일의 플렉스 부분에 집중되고 있다. 이것은 최근에 발표한 Gabelli[11]의 연구결과와 유사하다.

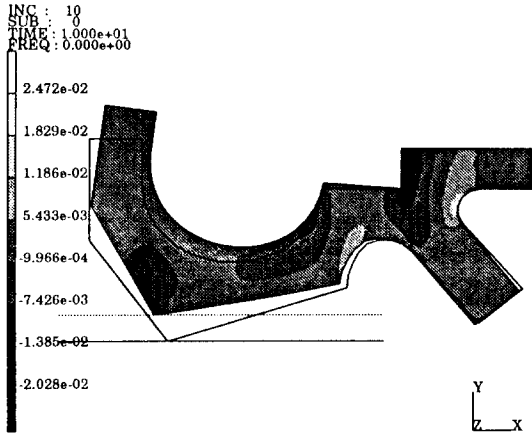


Fig. 3. Normal stress distribution of oil seals with garter spring

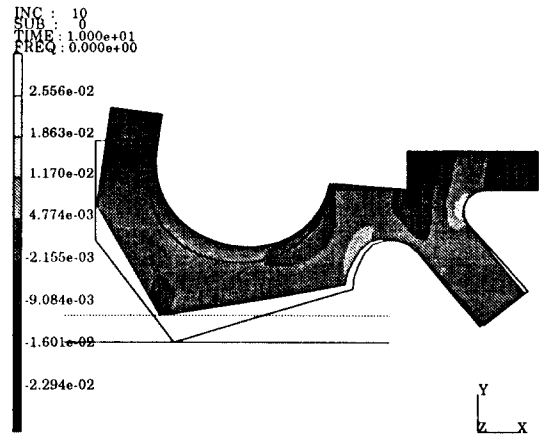


Fig. 6. Normal stress distribution of oil seals without garter spring based on the thermal-mechanical analysis

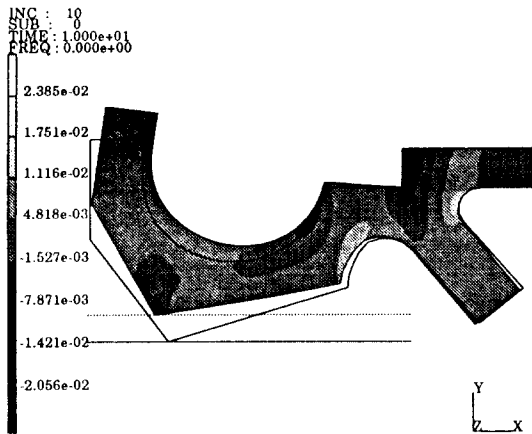


Fig. 4. Normal stress distribution of oil seals with garter spring based on the thermal-mechanical analysis

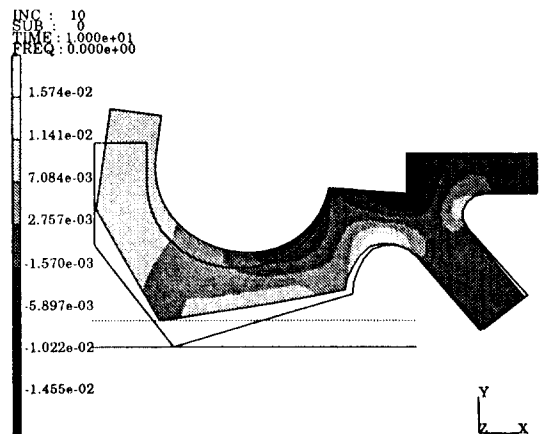


Fig. 7. Tangential stress distribution of oil seals with garter spring based on the thermal-mechanical analysis

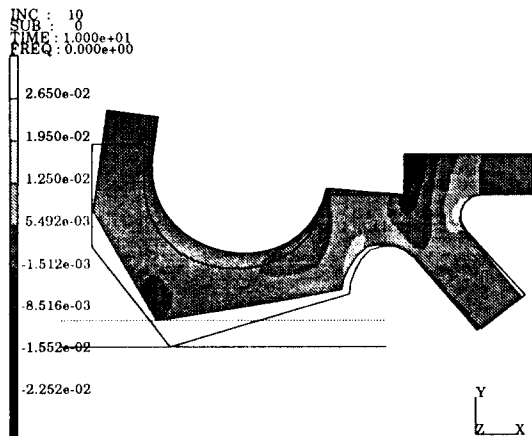


Fig. 5. Normal stress distribution of oil seals without garter spring

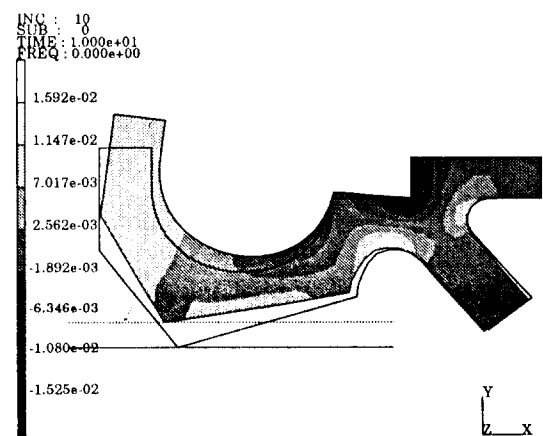


Fig. 8. Tangential stress distribution of oil seals without garter spring based on the thermal-mechanical analysis

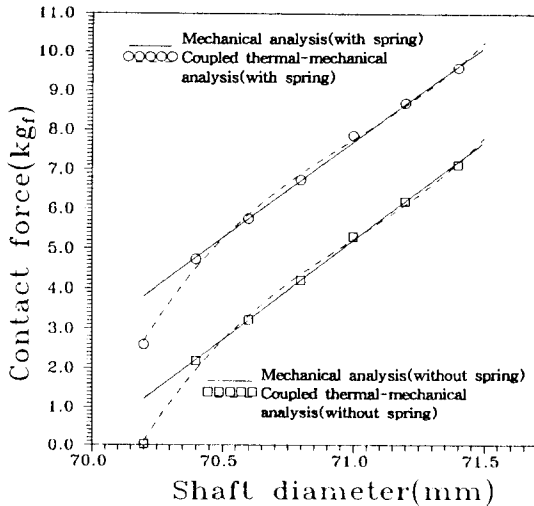


Fig. 9. Comparison between mechanical analysis and coupled thermal-mechanical analysis on the contact force

주어진 간섭량이 1.0 mm인 상태에서 계산된 결과를 나타내는 Figs. 3과 4 또는 Figs. 5와 6을 비교하면 열응력을 고려한 응력해석 결과나 고려하지 않은 경우나 시일의 반경방향 수직응력 분포도 해석에서는 별 다른 차이점이 없다는 것을 알 수 있다.

Figs. 7과 8은 유한요소 해석시 열응력을 고려한 경우로 시일의 접선방향 전단응력 분포도를 나타내는 결과이다. 가터 스프링이 설치된 경우의 응력 분포도 및 응력 집중도는 스프링이 설치되지 않은 경우에 비하여 크게 향상되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 가터 스프링의 설치 유·무에 따라서 회전축의 직경에 따른 접촉력의 크기를 나타내고 있다. 수치적 해석결과에 의하면 간섭량이 작을 경우는 열응력을 고려한 유한요소 해석의 중요성을 보여주고 있다. 시일 선단부에서의 접촉력은 간섭량이 작을수록 마찰열에 의한 영향을 크게 받고, 간섭량이 클수록 (0.5 mm 이상) 시일립의 기계적 강도가 보다 큰 지배요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 실제 사용 중인 오일시일의 간섭량이 이와 같이 작은 범위에서 작동되고 있다는 사실을 고려하면 본 연구결과는 열응력을 고려한 유한요소 해석의 중요성을 강조하는 계산결과이다.

4. 결 론

오일시일의 접촉 선단부에서 발생하는 마찰열에 의한 영향을 알아보기 위하여 열응력-기계적 강도해석을 동시에 수행하여 기존의 연구결과와 비교하였다.

오일시일에서 가터 스프링은 시일 플렉스 부분의 응력 집중도를 분산시켜주면서 립 선단부의 접촉상태를 좋게하고, 전체적으로는 약 10% 정도의 응력 집중도를 감소시켜주는 긍정적인 기능을 수행하고 있음을 알 수 있다. 또한 오일시일의 간섭량이 큰 경우는 시일 구조물의 기계적인 강도가 지배적인 영향을 주고는 있으나 작은 경우에 대한 접촉력 해석은 접촉면에서 발생하는 열적인 문제를 고려하여야 한다는 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

1. "ABAQUS User's Manual," Version 4.5(a), Providence, RI, June 1984.
2. "MARC User's Manual," Version K.5, MARC Analysis Research Co., 1993.
3. Miyashita, Y., *et al.*, "Study on Stern-Tube Sealing System," Bulletin of the JSME, Vol. 5, No. 1, 1987.
4. Winn, L. and Lee, C.C., "Lip Seals, Stress and Deformation Studies," ASME, 80-CZ/LUB-11, 1980.
5. 김청균, 전인기, 최인혁, "볼 베어링용 고무시일의 접촉력 해석에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제 16권, 제 12호, pp. 2261~2267, 1992.
6. Morman, K.N. Jr., "Rubber Viscoelasticity-A Review of Current Understanding," Ford Motor Co., Dearborn, MI, June 1984.
7. Medri, G., Molari, P. G. and Strozzi, A., "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, 1978.
8. Medri, G., Strozzi, A., Brasi, J., Gabelli, A., "Mechanical Behaviour of Two Elastomeric Seals for Rolling Element Bearing Units," B.H.R.A., 10th Int. Conf. on Fluid Sealing, Paper K1, Innsbruck, 1984.
9. Kim, C.K., Jun, I.K. and Choi, I.H., "On the Contact Pressure of Lip Seals for a Ball Bearing", Proc. of International Symposium on Tribology, Beijing Tsinghua Univ., Oct. 1993.
10. Treolar, L.R.G., "The Physics of Rubber Elasticity," Clarendon Press, Oxford, 1975.
11. Gabelli, A., Ponson, F., and Poll, G., "Computation and Measurement of the Sealing Contact Stress and its Role in Rotary Lip Seal Design," 13th International Conference on Fluid Sealing, BHR, Belgium, 1992.