

고무립시일의 접촉거동에 관한 유한요소해석

김 청 균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Finite Element Analysis of Contact Behaviors of Rubber Lip Seals

Chung-Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—This paper deals with a FEM computation as well as measurement of the contact force and distribution of the temperature in rubber lip seals when the sealing interference between the rotating shaft and the lip edge is present. The study of the contact forces and distributions of the temperature and the sealing contact stress has always been one of the basic steps in the process of designing a lip seal.

The calculated FEM results indicate that as the sealing interference increases, the contact force moderately increases compared with decreased sealing interference at the seal lip edge and radically increases the contacting width. And the FEM computation of contact forces including nonlinear problems has been compared with experimental measurements with good agreement. The frictional heat does not dissipate promptly in the rubber seal lip and tends to accumulate at the contacting lip edge especially.

1. 서 론

작동유체의 누설이나 외부에서 침입하는 이물질은 효과적으로 차단하기 위하여 사용하는 고무 립시일(rubber lip seals)은 베어링, 오일펌프, 액츄에이터 등에서 널리 사용되고 있는 기계의 핵심부품이다. 립시일에서 립선단부(lip edge)는 회전축과 직접 접촉운동을 하면서 1차적인 밀봉기능을 담당하고, 가터스프링(garter spring)은 시일립의 접촉력을 균일하게 강화시켜주며, 보강테와 고정부는 시일의 강도와 정밀도를 유지할 수 있도록 하우징에 지지해주는 기능을 갖고 있다. 또한 작업환경에 따라서 사용되는 더스트시일립(dust seal lip)은 외부에서 이물질의 침입을 차단하는 2차 밀봉기능을 갖고 있다. 립시일의 구조는 이와같이 복잡하므로 정적 또는 동적상태에 대한 변형거동을 정확하게 해석한다는 것이 대단히 어렵기 때문에 시일의 플렉스(flex) 부분을 지지 중심으로 시일을 간략한 캔틸레버보로 치환하여 해석하기도 한다.

밀봉기구의 구조상 회전체는 정적 또는 동적인 상

태에서 항상 편심량을 갖고 운전을 하기 때문에 시일의 운전상 많은 문제점이 제기되고는 있으나, 립시일의 소재로 사용되는 고무재질의 탄성계수가 대단히 작기 때문에 거시적인 측면에서 보면 문제가 없다. 그러나 시일의 사용조건에 따라서 다르기는 하지만 시일의 고속화, 극한조건이나 접촉유체의 성질에 따라서는 미시적 관점에서 립시일의 간섭량에 의한 접촉거동 해석의 필요성이 제기되었다.

회전축과 시일립 사이의 상대접촉 운동면에서 발생하는 마찰열(frictional heat)은 시일립과 회전축간의 접촉면에 온도를 상승시켜 시일립의 열적불안정성(thermal instability)[1,2]을 일으키고, 궁극적으로는 밀봉된 유체의 누설(leakage of sealed fluids)과 접촉면에서의 마멸(wear)을 일으킨다. 특히 고무재질은 온도나 시간, 주파수에 따른 변형거동이 큰 비선형 재질이기 때문에 해석하기가 대단히 어려웠으나, 최근 유한요소해석(finite element analysis) 기법, 화상처리(image processing) 기술의 비약적인 발달로 립시일의 비선형 접촉문제나 윤활유가 개입된 실제문제를 해석할 수 있게 되었다. 립시일은 구조특성상 밀봉을

담당해야 하는 접촉면적이 대단히 작기 때문에 국부적인 마찰열의 발생과 이로인한 거동문제와 시일 자체의 기계적 강도를 동시에 고려해야 한다는 문제점 때문에 해석하기가 대단히 어려웠다. 그래서 립시일에 대한 기존의 연구가 주로 시일의 선형성에 기초한 특성해석[5-7], 건조마찰[6,7] 상태에서의 접촉거동 또는 접촉응력에 관한 것이었으나, 최근 비선형 유한요소해석 프로그램[8]의 발달은 시일립에 대한 비선형성을 고려한 연구가 가능하게 되었다.

본 연구에서는 기존의 컴퓨터 해석에서 가장 문제가 되었던 고무재질의 물리적 특성값을 실험적으로 구하였고, 비선형 유한요소해석용 프로그램인 MARC [9]에 이 데이터를 사용하여 밀봉 간섭량(sealing interference)에 따른 립시일의 비선형 특성값을 고려한 립시일의 접촉력, 접촉응력, 립시일 전체에 대한 온도분포를 수치적으로 해석하였고, 이들의 결과를 실험치와 비교하였다.

2. 고무재료 해석

고무재질의 변형거동 특성을 정확하게 해석한다는 것은 고무재질의 비선형 특성상 불가능하나 현재까지 제안된 여러가지 모델(Neo-Hookean 모델, Mooney-Rivlin 모델, Ogden 모델 등) 중에서 한가지를 선정하여 설계에 응용해야 한다. 공학적으로 고무는 비압축성이고, 등방성 재질이므로 고무가 내부에너지 변화없이 변형된다고 가정하게 되면[10], 15%~150%의 변형률에는 Mooney-Rivlin 모델[11]을 사용하는 것이 일반적이다.

2-1. Mooney-Rivlin 방정식

고무와 같은 초탄성재료(hyperelastic materials)에 대한 접촉응력을 해석하기 위해서는 재료의 비선형성을 고려해야 한다. 립시일 재료로 널리 사용되는 고무는 비선형 응력-변형률 특성을 나타내기 때문에 이것을 잘 대변해 줄 수 있는 탄성 변형률 에너지 함수(elastic strain energy function) 이론을 도입한다. 일반적으로 고무재질의 물리적 특성값은 온도, 주파수, 주기적인 동변형률(cyclic dynamic strain), 노화(aging), 기름(oil) 등에 의하여 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서 해석하려는 모델이 립시일인 관계로 변형률이 15% 내외로 작은 경우에 대한 해석을 하였다.

립시일과 같이 변형률이 작은 경우에 많이 사용되는

고무재질의 비선형 특성은 탄성 변형률 에너지 함수를 간단하게 제시한 Mooney-Rivlin 방정식에 의하여 대변되고 있다. 즉,

$$\sigma = 2 \left(C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \right) \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

여기서 σ 는 소재내의 법선응력, λ 는 변형률 계수(=1 + ϵ), ϵ 은 소재의 변형률, C_1 과 C_2 는 고무재질의 변형특성을 의미하는 Mooney-Rivlin 상수를 각각 나타낸다.

2-2. 실험방법 및 결과

사용된 고무재질의 비선형 특성을 해석하기 위하여 니트릴계 고무재료를 KS-M-6518 가황고무 물리 시험법에 따라서 3회 반복하여 실험한 후 평균값을 취하였다. 고무의 특성상 변형률이 작은 경우는 실험 중에 발생될 수 있는 측정오차가 비교적 크기 때문에 이에 대한 세심한 실험이 필요하다[12].

본 연구에서 사용된 시일소재는 NBR이고, 변형률의 크기는 3% 단위로 18%까지 증가시키면서 실험을 수행하였다. 특히 고무의 응력이완 현상을 고려하기 위하여 각각의 변형률이 3% 증가할 때마다 30°C의 항온조에서 1시간씩 유지시킨 후에 변형률을 증가시켰다. 이렇게 하여 측정된 데이터는 Fig. 1에서 제시되고 있으며, 이들 데이터를 기초로 해석을 통하여 구해진 Mooney-Rivlin 상수값은 $C_1 = -2.746$ MPa, $C_2 = 4.597$ MPa이다. 여기서 구한 Mooney-Rivlin 상수값은 실험조건이 같아 해도 고무소재의 배합특성에 따라서 다르게 나타나기 때문에 실험에 의하여 데이터를 구하지 않고서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기란 대단히 어려운 문제이다.

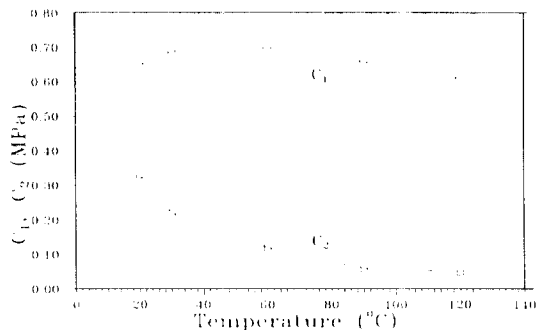


Fig. 1. Mooney-Rivlin constants of nitrile rubber as a function of temperature.

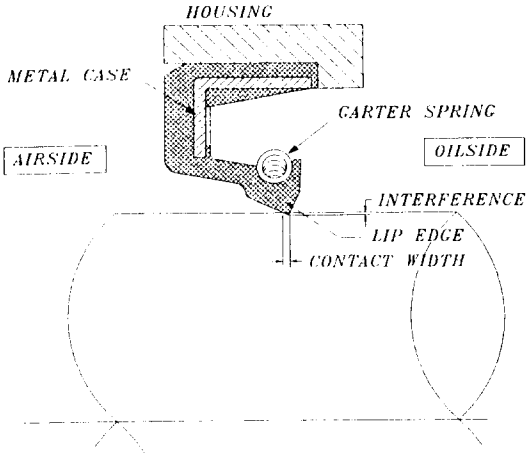


Fig. 2. Rubber lip seal.

3. 수치적 해석

립시일의 기하학적인 형태와 변형은 축대칭이고 [13,14], 변형거동이나 온도분포는 초기의 시일립이 등온상태를 유지한다는 가정하에 해석되었으며, 립시일의 간섭량 조건의 변화에 따른 영향은 금속 보강테 (metal case) 아래의 고무부분에만 미친다고 가정한다. 시일의 회전축이 구동함에 따라서 시일 선단부가 축방향으로 미세한 미끄럼이 발생하나 본 연구에서는 립선단부와 회전축 표면에서의 원주방향 접촉력만을 해석하므로 축방향의 마찰영향을 배제하였다. 시일의 열응력 거동상태를 해석하기 위하여 재료의 비선형 거동, 시일립의 기하학적 비선형, 경계조건의 비선형성을 동시에 고려하여 해석할 수 있는 비선형 유한요소 코드인 MARC를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 립시일 모델은 Fig.2에서 보여주고 있으며, 시일 재료는 등방성의 균질한 니트릴 고무(NBR)로 비선형성을 해석하기 위하여 Mooney-Rivlin 모델[11]을 사용하였다. Fig.3은 립시일에서 접촉력 거동해석을 위한 유한요소 메쉬를 보여주고 있는데, 사용된 요소는 5노드 등파라메타 4각형의 축대칭 모드이고, 요소갯수는 1241이며, 절점갯수는 2590이다. 또한 립선단부에서의 온도분포를 해석하기 위하여 사용된 축대칭 링의 4각형 요소는 596개이고, 요소절점은 688개로 구성되어 있으며, 회전축과 접촉하는 립 선단부와 금속 보강테 부분에서는 그림에서 보여주는 것 처럼 보다 미세한 요소로 구성하였다. 시일립 선단부와 회전축 사이의 접촉문제 해석에서 초기에 접촉되었던 절점이 하중을 받게되면 절점에서

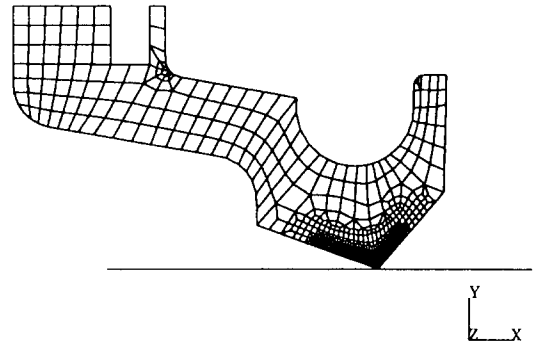


Fig. 3. Mesh generation for lip seals.

Table 1. Thermo-physical properties of nitrile rubber and simulation data for a FEM computation

Mass of garter spring (kg)	2.75×10^{-3}
Stiffness of garter spring (N/m)	0.108
Initial circumferential force of garter spring (N/m)	58.1
Density of nitrile rubber (g/cm^3)	1.1948
Specific heat of nitrile rubber (J/kg-K)	2000
Heat conductivity of nitrile rubber (W/m-K)	0.43
Thermal expansion coef. of nitrile rubber (1/K)	2.0×10^{-4}
Oil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	30
Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20
Housing temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20
Heat transfer coef. of oil ($\text{W/m}^2\text{-K}$)	200
Heat transfer coef. of air ($\text{W/m}^2\text{-K}$)	10
Temperature of lip edge ($^{\circ}\text{C}$)	80

변형이 일어나 초기의 접촉절점이 서로 떨어지는 현상이 발생한다. 유한요소해석상 이들의 절점이 서로 떨어지면 해석을 할 수 없으므로 변형된 이후의 절점간 거리가 1.1×10^{-3} mm이내에 있다면 절점은 서로 접촉이된 것으로 간주하였고, 또한 접촉절점간의 상대속도는 0.5×10^{-3} mm/s일 때에 압착(sticking)이 일어났다고 해석하였다.

립시일에 대한 접촉거동을 해석하고, 시일이 정상 상태에 도달하였을 때의 온도분포 해석을 위한 시일 소재인 니트릴계 고무(NBR)에 대한 물성치와 유한요소해석을 위한 데이터는 Table 1에서 제시하고 있다.

4. 접촉력 실험장치와 실험방법

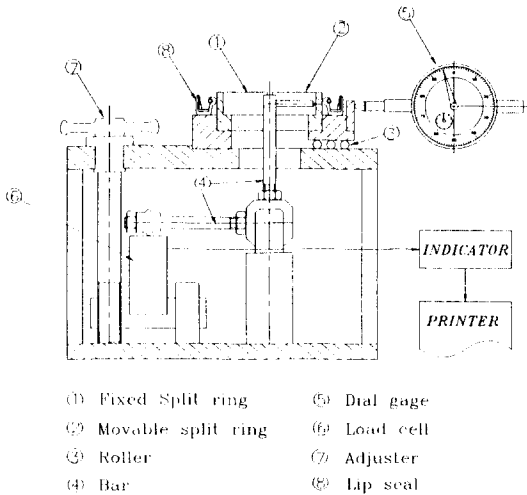


Fig. 4. Schematic of the testing device for the radial contact force.

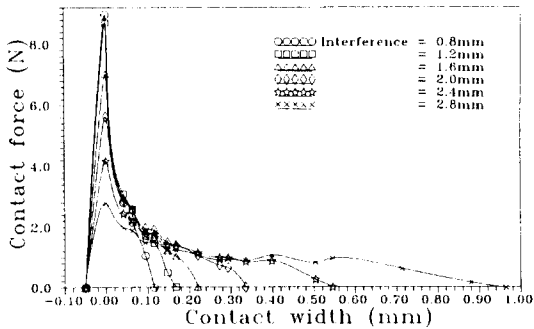


Fig. 5. Contact force as a function of the contact width for the various sealing interference.

정적인 상태에서 립시일의 원주방향으로 걸리는 접촉력(clamping force)을 측정하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 4에서 보여준다. 중공원통을 분할하여 한쪽 반원 ①을 고정하고, 다른 반원 ②를 마찰없이 수평방향으로 자유롭게 이동할 수 있도록 로울러 ③을 설치하였다. 립시일 시험편 ⑧은 중공원통에 삽입되어 이동이 가능한 반원 ②를 다이얼 게이지 ⑤로 정확한 밀봉 간섭량(sealing interference)을 주고, 이에 따른 립시일의 접촉력 크기를 하중계 ⑥으로 측정한다.

고무재질은 시간에 따라서 변형특성이 크게 달라지므로 주어진 밀봉 간섭량에 대하여 상온에서 약 12 시간 이상을 유지시켰다가 접촉력의 변화가 없다는 것이 확인되었을 때 접촉력을 측정하였다. 또한 가터 스프링의 영향을 알아보기 위하여 시일에 가터 스프

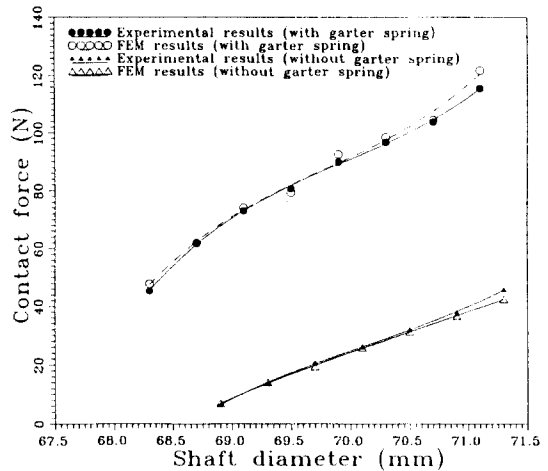


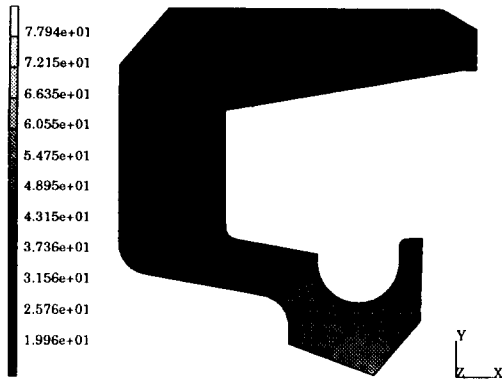
Fig. 6. Comparison between measured and FEM calculated contact force of the lip seal with and without garter spring.

링을 끼웠을 때와 제거하였을 경우에 대한 접촉력을 모두 측정하여 수치적으로 해석한 데이터와 비교하였다.

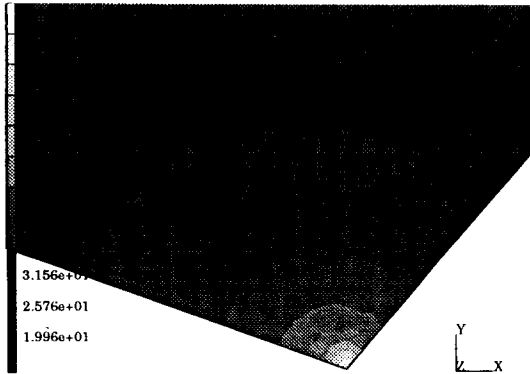
5. 해석결과 및 토의

Fig. 5는 밀봉 간섭량의 변화에 따른 접촉점점에서 반경방향의 접촉력 크기를 나타낸 것으로 밀봉유체 측과 접촉하는 쪽의 립선단부에서 최대의 접촉력이 발생함을 보여주고 있다. 이것은 기존의 연구결과[10]와 유사한 것으로 밀봉 간섭량이 클수록 시일링 선단부에서의 최대 접촉력은 감소하는 반면에 접촉폭은 증가하고, 간섭량이 작을수록 립선단부에서의 접촉력 집중도는 대단히 크나 접촉폭의 크기는 작아진다. 전자의 경우 시일링 선단부에서의 접촉응력 감소로 립선단부가 보호되는 반면에 공기측으로의 접촉폭 증가로 인하여 밀봉효과는 커지므로 좋으나 순식간에 마찰력이 증가되어 손상을 받게 될 것이고, 후자의 경우는 립선단부에서 접촉응력의 증가로 국부적인 마찰열이 집중되며, 그 결과로 립선단부에서는 부분적인 열적손상이 심하게 일어날 것으로 예상된다. 이들 결과에 의하면 립선단부와 회전축간 밀봉 간섭량의 최적화와 윤활유측 내지는 공기측의 경사각도 설계가 대단히 중요함을 설명해주는 결과라 생각된다.

Fig. 6은 립시일에 가터 스프링이 있는 경우와 없는 경우에 대한 반경방향의 접촉력 크기를 회전축의 간



(a) Temperature distribution for lip seals



(b) Detailed temperature distribution for lip seals

Fig. 7. Steady-state temperature

섭량에 대하여 측정한 실험적 결과와 유한요소해석 결과를 비교한 것으로 이들 결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 예상한 대로 가터 스프링이 있는 경우의 접촉력은 크게 나타났고, 스프링이 없는 경우는 회전축 간섭량의 변화에 대해서 비교적 선형성을 보여주고 있으나, 스프링이 있는 립시일에서는 가터 스프링, 고무재질 등에 의한 비선형 특성을 잘 보여주고 있다. 특히 간섭량이 작을 경우와 아주 클 경우 시일립 선단부에서 접촉력의 비선형 특성이 잘 나타나고 있다. 가터 스프링이 없는 경우에 대한 접촉력의 선형 특성은 Stakenborg[10]나 Sponagel[15] 등이 수행하였던 연구결과와 유사하다.

정상상태에서 작동하는 립시일의 전체에 대한 온도분포도를 유한요소법으로 해석하기 위하여 시일내의 보강테와 가터 스프링의 열전도계수는 고무재질에 비하여 대단히 크므로 더이상 저항체로 작용하지 않는다고 가정한다. 시일의 온도분포를 해석하기 위한

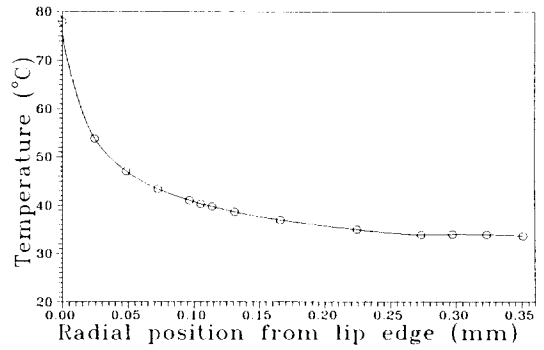
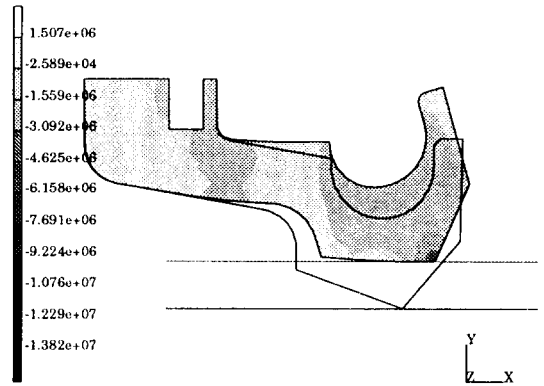
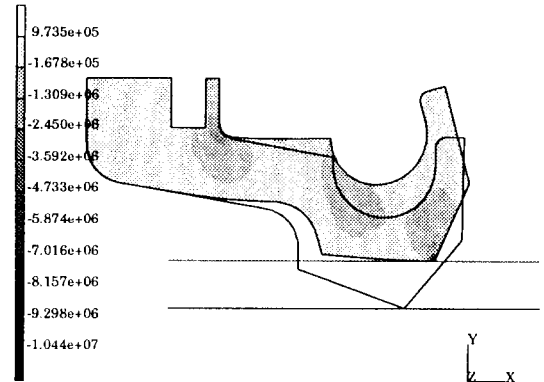


Fig. 8. Steady-state temperature from the lip edge toward the radial position lip seal.



(a) With garter spring



(b) Without garter spring

Fig. 9. Cauchy stress distribution, σ_{rr} in the radial direction.

시뮬레이션 데이터는 Table 1에서 주어진 것을 이용하고, 또한 작동중인 립시일이 정상상태에 도달하여 초기의 립선단부 온도가 80°C로 균일하다는 가정하에 해석하면 시일내부로의 온도분포 결과는 Fig. 7과 같

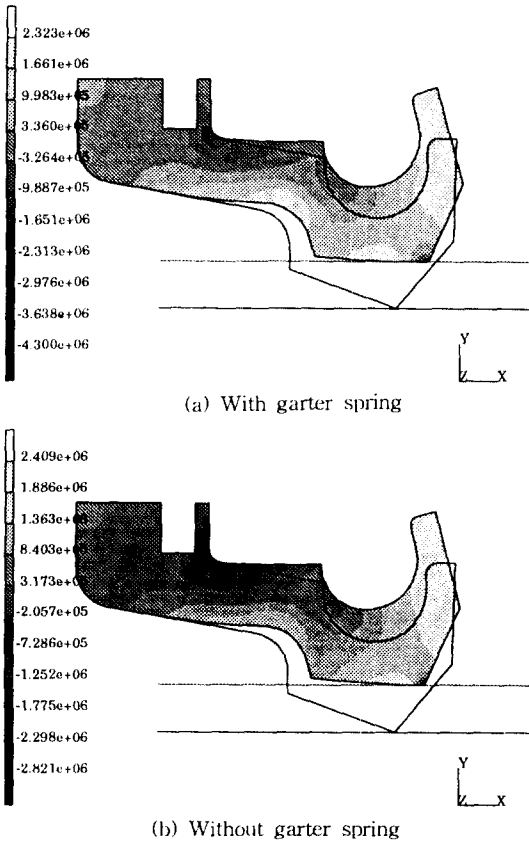


Fig. 10. Hoop stress distribution, $\sigma_{\theta\theta}$ in the tangential direction (a) With garter spring, (b) Without garter spring.

이 주어진다. 계산된 결과에 의하면 립선단부에서의 온도분포는 온도의 영향을 별로 안받는 시일 지지부나 보강테 부근에 비하여 3~4배 높은 온도 집중도를 보여주고 있다. 이 결과는 립선단부의 간섭량에 의한 열적 영향이 최소한 금속 보강테에는 미치지 않는다는 가정을 뒷받침해주는 결과라 생각된다. 립선단부로부터 반경방향에 따라서 온도분포를 나타내면 Fig. 8의 결과로 표시할 수 있다. 즉, 립선단부로부터 전달되는 온도를 보면, 선단부에서 립 내부로 갈수록 온도는 급격하게 감소하다가 립선단부로부터 약 0.25 mm 이상에서는 35°C로 수렴하는 현상을 보여준다. 이것은 밀봉된 유체에 의한 냉각을 효과적으로 유지할 수만 있다면 마찰열에 의하여 립선단부에서만 가혹해지고 나머지 고무부분에 대한 온도의 영향은 무시할 수 있다는 결과이다.

Figs. 9~10은 회전축과 립선단부 사이의 밀봉 간

섭량을 1.4 mm 가하였을 때 가터 스프링과 금속제 보강테가 고무재 립시일의 응력에 미치는 영향을 알아보기 위한 유한요소해석 결과이다. 이들의 결과에 의하면 반경방향으로의 수직응력은 Fig. 9에서 보여주는 것처럼 가터 스프링이 있는 경우 접촉응력이나 보강테 부근에서의 압축응력은 증가되고, 시일내부의 응력은 비교적 고르게 분포하는 현상을 나타낸다. 그러나 접선방향의 후프응력을 보면 접촉응력은 가터 스프링이 있을 경우 오히려 감소하고, 보강테와 접하는 플렉스 벡크 부근에서 발생하는 압축응력은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 오일층 경사각도에 비하여 공기층의 경사각도를 큰 비율로 작게 설계함으로써 가터 스프링에 의한 굽힘 모멘트가 금속 보강테 부근에 크게 작용했기 때문이고, 그 결과는 오일에 의한 시일립부에서의 펌핑작용을 기대하여 시일의 누설을 방지할 수 있게 된다.

6. 결 론

고무재 립시일의 소재특성에 대한 실험적 연구와 이 데이터를 이용하여 접착거동 문제를 주로 유한요소 기법으로 해석하였고, 이들의 결과를 기존의 연구와 비교하였다. 고무시일이 정상상태에서 작동하는 경우 립선단부와 회전축간의 간섭량 변화에 따른 시일립에서의 온도분포, 접촉력 및 변형거동에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 립시일의 변형특성 해석에서 늘 필요로 했던 물성치 데이터중의 하나인 Mooney-Rivlin 상수값 C_1 , C_2 를 실험적으로 구하였고, 이 결과를 이용하여 접촉력에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 간섭량이 증가할수록 접촉력은 작아지는 반면에 공기층으로의 접촉폭은 크게 증가하고, 간섭량이 줄어들면 립선단부에서 접촉력이 급격하게 증대되어 마찰온도가 국부적으로 집중하게 된다. 이렇게 집중된 마찰열은 시일립으로부터 멀리 소산되지 못하고 시일립 선단 부근에서 수렴되면서 마찰열이 축적되는 경향을 보여주고 있으며, 이것은 공기층의 경사각도가 많은 영향을 주고 있다는 것을 의미한다.

또한 회전축의 간섭량 변화에 따른 접촉력 특성을 알아보기 위하여 해석된 결과에 의하면 시일에 스프링이 설치된 경우가 없는 경우에 비하여 접촉력이 훨씬 크고, 전형적인 비선형 특성을 나타내고 있다. 이들의 결과는 실험치와도 잘 일치하는 것으로 보아 고무 립시일 해석에서 가터 스프링과 소재의 비선형

특성을 고려한 유한요소해석의 중요성을 보여주는 결과이다.

접촉응력의 측면에서 가터 스프링은 시일의 립선단부와 보강테 부근에서 접촉응력을 약간 증가시키나 전반적으로 시일내의 응력분포가 균일하게 하는 기능을 갖고 있다. 이것은 시일의 접촉 선단각과 밀봉 유체의 누설에 관련된 펌핑작용을 연계시켜 동시에 해석해야만 최적의 립시일 설계가 가능하리라 예상된다.

후 기

이 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Upper, G., "Temperature of Sealing Lips", 4th Int. Conf. on Fluid Sealing, Organized by ASLE, BHRA and ASME, Philadelphia, 1969.
2. Kim, C. K. and Jun, I. K., "Coupled Thermal-Mechanical Analysis of Rubber Oil Seals", J. of KS-TLE, Vol. 10, No. 2, pp.39-42, 1994.
3. Miyashita, Y., "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. Kim, C. K., *et al.* "A Study on the Contact Force and Temperature Distribution of Lip Seals", J. of KSME, Vol. 16, No. 12, pp.2261-2267, 1992.
6. Prati, E., "Behavior of Elastomeric Lip Seals Subjected to Shaft Radial Vibrations Including Inertial Effects", Ind. Eng. Chem. Res. Dev., Vol. 24, No. 2, pp.263-268, 1985.
7. Prati, E., "Dynamic Behaviour of Radial Lip Seals Under Effect of Shaft Eccentricity", Proc. 10th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Innsbruck, Paper C3, pp.123-138, 1984.
8. "ABAQUS User's Manual", Version 4.5(a), Providence, RI, June 1984.
9. "MARC User's Manual", Version K.5, MARC Analysis Research Co., 1993.
10. Stakenborg, M. J. L., "On the Sealing and Lubrication Mechanism of Radial Lip Seals", Ph.D. Thesis, 1988.
11. Treolar, L. R. G., "The Physics of Rubber Elasticity", Clarendon Press, Oxford, 1975.
12. Aklonis, J. J. and MacKnight, W. J., "Introduction to Polymer Viscoelasticity", pp.123-126, 1982.
13. Morman, K. N. Jr. and Nagtegal, J. C., "Finite Element Analysis of Sinusoidal Small Amplitude Vibrations in Deformed Viscoelastic Solids", Int. J. Num. Mech. Eng., Vol. 19, pp.1079-1103, 1983.
14. Gabelli, A., Ponson, F. and Poll, G., "Computation and Measurement of the Sealing Contact Stress and its Role in Rotary Lip Seal Design", 13th Int. Conf. on Fluid Sealing, Brugge, Belgium, pp.21-39, 1992.
15. Sponagel, S., Kiltbau, G., Spies, K. H., "Sealing Mechanisms of Lip Seals", Proc. 11th Int. Conf. on Fluid Sealing, Cannes, Paper K4, pp.748-772, 1987.