한국윤활학회지(1996), 제12권 제1호
Journal of KSTLE(1996) Vol. 12, No. 1, pp.42~46

고무재 오일시일의 응답특성에 관한 해석적 연구

김 청 균
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Analytical Study on the Dynamic Response of Rubber Oil Seals

Chung Kyun Kim
Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—This paper deals with a numerical study of the dynamic response of rubber oil seals for rotating shaft when interference as well as static and dynamic eccentricities are present. In loss of contact conditions the dynamic curve of oil seals is numerically simulated using the FEM package MSC/NASTRAN. The direct integration method is selected to analyze the time domain response of the seal lip-shaft contact. The computed results based on the experimental data indicate that the increased rotating speed may produce the gap separation between lip edge of rubber seals and shaft. These results will be very useful in predicting the dynamic leakage due to contact behaviors of rubber oil seals under dynamic conditions.

1. 서 론

회전축계에서 발생되는 누설을 방지하거나 또는 외부로부터 침입하는 미세물질을 차단하여 시스템의 안정성을 확보해주는 트라이볼로지 기소(Tribological elements)로 오일시일(Oil seals)이 널리 사용되고 있다. 오일시일은 고무재질로 제작되었기 때문에 특히 립 선단부(Lip edge)에서의 유연성(Flexibility)이 대단히 우수하다는 성질은 운동축의 다양한 접촉운동(회전운동, 요동운동, 왕복운동 등)에 대하여 잘 적응한다는 것을 의미한다. 그러나 작동유체의 압력이 높거나 운동축의 거동이 클 경우에는 사용상 제약을 받게 된다.

회전체는 접촉면의 가공 및 조립상태 또는 베어링 시스템의 동적 강성도 문제로 인하여 항상 편심량을 갖고 있으므로 미시적 측면에서 보면 시일 시스템의 불안정한 동적거동 문제는 시일의 누설성능에 많은 영향을 주게된다. 여기에 시일의 소재로 사용되는 고무재질의 특성상 탄성계수가 대단히 작기 때문에 동적상태에서의 응답거동이 문제가 될 수도 있고, 또한 시일의 사용조건에 따라서 다르기는 하지만 시일의 고속화, 극한조건, 접촉유체의 성질 등에 따라서는 미시적 관점에서 시일의 응답특성을 해석해야만 누설현상을 이해할 수가 있다.

오일시일의 동적거동에 의한 누설 특성에 관한 연구는 여러 과학자에 의하여 수행되었으나 아직도 해결되어야 할 문제가 많이 있다. Gawlinski[1]는 고무재질의 선형성질만을 고려하여 시일 선단부와 정지축 사이의 접촉거동 문제를 유한요소기법으로 해석하였고, Ishiwata[2]와 Prati[3,4]는 실험적인 방법으로 점탄성 동적거동(Visco-elastic behaviors) 문제를 해석하였으며, Stakenborg 등[5,6]은 밀봉간극에 얇은 유막이 개입된 모델에 대한 누설해석에서 점탄성 윤활문제 개념을 도입함으로써 보다 실제적인 동적거동 문제를 해석하였다.

산업체에서 시일소재로 널리 사용하는 고무재질은 비선형 성질을 갖고 있으나 시일로써 정적인 상태나 또는 저속에서의 응답특성은 별다른 문제점을 제기하

지는 않는다. 그러나 동적하중에서는 특수한 작동상태, 즉 회전축의 편심량이 있는 고속회전의 경우에는 립 선단부의 동적거동에 의한 회전축과 시일 립 선단부 사이에서 발생되는 간극이 시일의 누설에 직접적인 원인이 될 수 있다는 사실을 실험적으로 보여주었다[3,4,7].

그래서 본 연구에서는 고무제 오일시일의 선단부가 회전축의 편심량, 즉 간섭량의 영향에 의하여 거동변형을 받게되면 고무소재의 비선형 특성상 순간적으로 미세 틈새가 발생하기 때문에 이 간극을 통하여 누설이 발생될 것이라는 해석적 모델을 수치해석적으로 규명하고자 한다.

2. 수치적 해석

본 연구에서 사용한 오일시일의 재질은 등방성의 균질한 니트릴 고무(NBR)이고, 동적 거동상태를 해석하기 위하여 사용된 유한요소해석용 프로그램은 MSC/NASTRAN[8]이다. 시일 립 선단부가 회전축의 편심거동에 의하여 반경방향으로 변형이 발생될 때 립 선단부와 회전축 사이의 접촉문제를 해석하기 위하여 간극 엘리먼트(Gap elements)를 사용하였다.

오일시일의 기하학적인 형태와 변형은 축대칭이고[9,10], 동적거동 상태에서 시일립의 온도는 T=30°C인 등온상태를 유지하며, 오일시일의 운동조건 변화에 따른 영향은 금속 보강테(Metal case) 아래의 고무부분에만 미친다고 가정하였다. 또한 시일축이 회전함에 따라서 시일 선단부가 축방향으로 미세한 미끄럼이 발생되나 본 연구에서는 립 선단부와 회전축 계면 사이에서 발생되는 원주방향의 접촉력만을 해석하므로 축방향의 마찰영향을 배제하고 해석하였다. 즉, 원주방향의 솔리드 엘리먼트 절점은 구속하고, 반경방향의 변위는 허용한다는 의미이다.

Fig. 1은 오일시일의 응답특성을 해석하기 위하여 제안된 유한요소해석 솔리드 모델을 보여준다. 메쉬는 0.2°를 갖는 원통좌표 266개의 8-절점 솔리드 엘리먼트로 구성되어 있고, 특히 회전축과 접촉하는 립 선단부는 그림에서 보여주는 것 처럼 보다 미세한 메쉬로 구성하였다. 여기서 가터 스프링은 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 한개의 스프링이 한쪽 끝에 지지되고, 다른쪽은 7개의 엘리먼트로 시일 몸체에 균일하게 연결되어 있다.

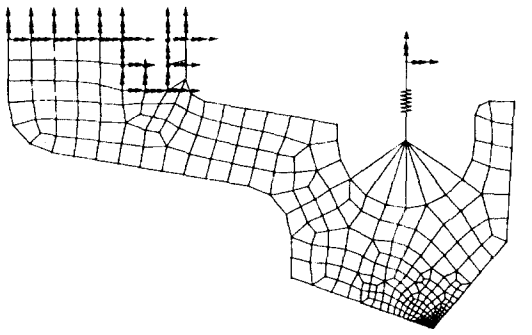

Fig. 1. FEM solid model of the seal dynamic response for cylindrical coordinate with 0.2 degree.

Table 1. Material parameters used in finite element analysis

Parameters	Values
• Inner diameter of oil seal (mm)	
– With garter spring	67.6
– Without garter spring	68.3
• Shaft diameter (mm)	70.0
• Shaft interference (mm)	1.2
• Garter spring	
– Mass (g)	5.54
– Initial length (m)	232
– Initial spring force (Nm)	37.02
• Spring constant with 0.2° (N/m)	3.31
• Specific mass of nitrile rubber (kg/m^3)	1.22×10^3

동적상태에서의 접촉거동 문제를 해석하기 위한 시일의 치수와 간섭량, 오일시일 소재에 대한 물성치는 Table 1에서 주어진다.

Fig. 1과 같이 시일의 질량과 가터 스프링의 질량을 고려한 모델에 대하여 시일의 동적거동 방정식을 표현하면 다음과 같다. 즉,

$$M\ddot{x}+C\dot{x}+Kx=P(t) \tag{1}$$

여기서 M은 시일의 질량, C는 댐핑계수, K는 가터 스프링의 강성계수, P는 시일의 접촉력, x는 시일의 변위량을 각각 나타낸다.

시일에서의 변형문제는 회전축의 초기 간섭량 정도에 따른 정적변위 x_s와 회전속도에 따른 주기적인 동적변위 x_d에 의하여 결정된다. 즉, 회전축의 반경방향 변위량은 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$x(t)=x_s+x_d(t) \tag{2}$$

시일의 동적 변위량을 해석하기 위하여 시일 내경

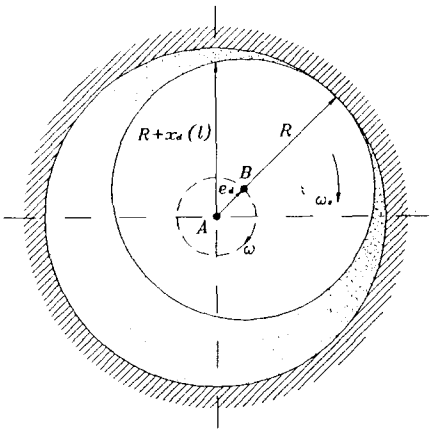

Fig. 2. Radial displacement of the lip seal in contact with the rotating shaft.

과 회전축경 사이의 접촉형태는 Fig. 2에서 주어지는데, 여기서 A점은 시일이 회전축에 삽입하기 전의 시일 립 중심점을 나타내고, B점은 각속도 ω로 회전하는 축의 중심을 각각 나타낸 것이다. 이 그림에서 동적 변위량 e_d는 회전축 반경 R에 비하여 대단히 작기 때문에 시일 립 선단부의 동적 변위량은 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다. 즉,

$$x_d(t)=e_d \cos \omega t \tag{3}$$

여기서 시일 립 선단부의 절점이 상대 접촉면과는 항상 접촉한다고 가정하고, 접촉시일의 응답 특성식 (2)를 이용하여 NASTRAN 프로그램에서 Newmark-Beta 직접 적분법으로 해석하면, 반경방향의 변위량 $x(t)$ 문제는 해결된다.

3. 수치적 해석결과 및 토의

본 연구에서 사용된 오일시일의 입력값인 초기 접촉력은 Shim 등[7]이 정적상태에서 회전축의 간섭량 변화에 따라서 측정한 실험적 결과치를 사용하였다.

Fig. 3은 주어진 초기 간섭량 S=0.7, 0.95, 1.2 mm이고, 동적 편심량 e_d=0.3이며, 회전축 속도는 n=600, 1, 200 rpm의 두가지 경우에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과로, 시간이 경과하게 되면 동적응답 곡선이 주기적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 여기서 간섭량이 0.7인 경우에 그리고 회전속도가 빠른 경우에는 명확하게 간극분리(Gap separation) 현상이 발생되고

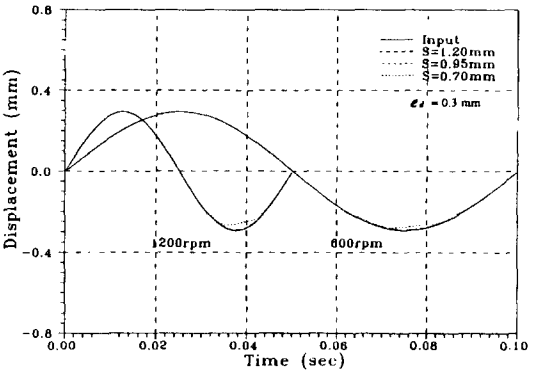

Fig. 3. Dynamic response for various values of the initial interference as a function of the elapsed time.

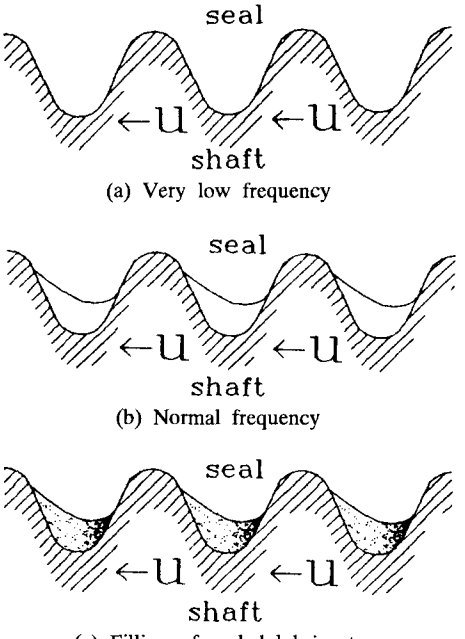

Fig. 4. Proposed dynamic response through a macroscopic sinusoidal indenter in a viscoelastic solid.

있음을 보여주고 있는데, 이것이 고무 립 시일의 동적 거동에 따른 분리현상으로 생각된다. 즉, 시일은 회전축의 초기 간섭에 의하여 접촉거동을 하다가 시간이 경과하면 변형이 발생되어 접촉거동을 하던 고무제 선단부가 다음 접촉 주기까지 미처 원상 복귀하지 못하고 회전축의 동일 지점이 통과하기 때문에 순간적으로 미세간극이 발생한다는 사실을 보여주는 결과이다. 이것은 앞에서 실험적으로 언급하였던 미세간극

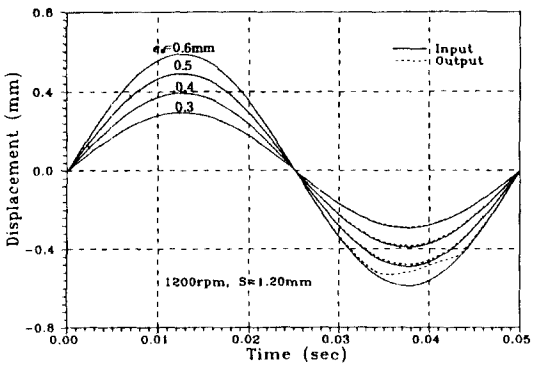

Fig. 5. Dynamic response for various values of the dynamic eccentricity as a function of the elapsed time.

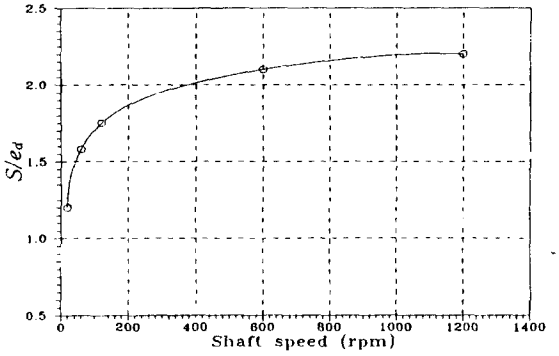

Fig. 6. S/e_d vs. shaft speed for lip-shaft separation contact conditions.

분리현상과 일치하는 결과이다[3,4,7].

Fig. 3은 동적상태에서 미세간극이 발생한다는 사실을 수치해석적으로 처음 규명한 결과이고, van Leeuwen 등[6]이 설명하였던 해석모델과 일치하는 결과이다. 즉, 회전축이 시일 립 선단부에 정적 접촉을 하거나 또는 저속운동을 하게 되면 Fig. 4(a)와 같이 회전축과 시일은 늘 접촉거동을 하게 된다. 그러나 회전축의 속도가 어느 임계값을 넘게되면 Fig. 4(b)와 같이 간극분리 현상이 발생하게 되고, 궁극적으로는 밀봉된 유체가 Fig. 4(c)와 같이 간극을 채워주게 됨으로 인하여 누설이 발생한다는 가정이다.

Fig. 5는 회전축의 초기 간섭량이 1.2 mm이고, 회전속도가 1,200 rpm인 경우에 대한 시일립의 응답곡선으로 동적 변위량이 작은 경우보다는 비교적 큰 0.6 mm인 경우에 시일 립 선단부에서의 간극분리 현상이 비로소 명확하게 진행되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 충분히 예상될 수 있는 결과로, 본 해석 모델에서는 동적 변위량이 0.6을 넘게되면 동적거동으로 인한 누설이 발생될 것이라는 사실이다. 오일시일이 운전중에 이와 같은 미세간극 분리로 인하여 발생되는 누설문제는 시일의 불규칙한 동적 편심량을 줄여줌으로써 크게 완화시킬 수 있다.

Fig. 6은 초기 간섭량과 동적 편위량과의 비(S/e_d)와 회전속도와의 관계를 표시한 결과로 회전속도가 증가함에 따라서 S/e_d는 일정한 값으로 수렴하게 되는데, 본 연구에서는 회전속도가 600 rpm에서 2.2정도로 접근하고 있다.

4. 결 론

고무제 시일 립 선단부는 회전축 속도와 편심량에 따라서 간극분리 현상이 발생됨을 수치적 해석 방법으로 분명히 보여주었다. 이것은 시일 립 선단부가 회전축에 접촉하면서 운동하다가 임계 편심량이나 임계 회전속도를 넘게 되면 고무소재의 응답성이 나빠지면 회전 접촉면에서 간극분리가 발생되고, 이것이 시일의 작동중에 누설을 발생시키는 원인이 된다는 사실을 나타내는 결과이다. 또한 시일의 운전중에 간극비를 나타내는 S/e_d는 회전속도가 증가함에 따라서 일정한 값 2.2로 수렴하였다.

참 고 문 헌

1. Gawlinski, M. J. and Konderla, P., "Dynamic Analysis of Oil Lip Seals", Proc. 10th Int. Conf. on Fluid Sealing, Innsbruck, Paper C4, pp.139-155, 1984.
2. Ishiwata, H. and Hirano, F., "Effect of Shaft Eccentricity on Oil Seal", Proc. 2nd Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Paper H2, pp.17-32, 1964.
3. Prati, E., "Behavior of Elastomeric Lip Seals Subjected to Shaft Radial Vibrations Including Inertial Effects", Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., Vol. 24, No. 2, pp.263-268, 1985.
4. 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.
5. Stakenborg, M. J. L., van Leeuwen, H. J. and ten Hagen, E. A. M., "Viscoelastohydrodynamic(VEHD) Lubrication in Radial Lip Seals: Part 1 - Steady State

Dynamic Viscoelastic Seal Behavior", J. of Tribology, Vol. 112, pp.578-583, Oct. 1990.

6. van Leeuwen, H. J. and Stakenborg, M. J. L., "Visco-Elastohydrodynamic(VEHD) Lubrication in Radial Lip Seals: Part 2-Fluid Film Formation", J. of Tribology, Vol. 112, pp.584-592, Oct. 1990.
7. Shim, W. J. and Kim, C. K., "Experimental Investigation on the Dynamic Response of Lip Seals Due to Interference and Shaft Eccentricity", Proceedings of the International Tribology Conference, Yokohama, Japan, Nov. 1995.
8. "MSC/NASTRAN User's Manual", Version 67, The Macneal-Schwendler Corp., 1991.
9. 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.
10. Gabelli, A., Ponson, F. and Poll, G., "Compution 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.