

오일시일의 동적거동에 관한 실험적 연구

김청균 · 심우전*

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터
*국방과학연구소

Experimental Study on the Dynamic Behaviour of Oil Seals

Chung Kyun Kim and Woo-Jeon Shim*

Tribology Research Center, Hongik University,
*Agency for Defense Development

Abstract—This paper deals with an experimental study on the dynamic behaviour of rubber oil seals when the interferences between the shaft and the seal lip as well as the dynamic eccentricities are present. The micro-separation of the sealing gap was observed with the aid of an image processing apparatus. The temperature of the seal lip edge, friction torque and the dynamic sealing gap profile are experimentally investigated for the initial interference and the shaft eccentricity. The data was simultaneously measured under the operation conditions. Experimental results show that, as the shaft speed is increased, the leakage of sealed fluids is increasing for a certain range of shaft speeds. The test data indicates that the shaft eccentricity clearly produces the gap separation between the shaft and the seal lip which is unable to follow the radial displacement of shaft as the shaft speed increases.

1. 서 론

펌프, 액츄에이터, 베어링 등의 회전축계를 갖는 기계장치에서 윤활유나 작동유를 밀봉하기 위하여 널리 사용하는 요소부품을 오일시일(Oil seal)이라 한다. 오일시일은 립 선단부가 고무재질로 제작되어 있고, 설치공간이 여타 시일장치에 비하여 작다는 장점에 회전축, 요동 운동축, 행정이 짧은 왕복 운동축을 밀봉하기 위하여 다양하게 사용되고 있다.

시일은 그 자체만으로는 어떠한 기능도 발휘할 수 없고, 반드시 기계장치에 부착됨으로써 비로소 밀봉 기능을 담당하게 된다. 오일시일은 작동유체의 밀봉이라는 단순한 역할을 수행하지만 오일시일 장치에 어떠한 이상이 발생되면 기계장치의 전체 성능에 직접적인 영향을 주게되므로 기계의 설계 단계에서부터 오일시일의 특성을 충분히 고려해야 한다.

회전축과 시일 립 선단부 사이에서 발생된 마찰열은 특히 시일 립 선단부의 온도를 국부적으로 상승시

키기 때문에 고무제 립 선단부의 기계적 특성을 크게 변화시키게 된다. 그 결과 시일 립 플렉스부의 강도나 립 선단부의 응답 성능은 크게 약화되어 궁극적으로는 밀봉유체의 누설이 발생되고 회전축에는 마멸현상이 진행된다.

고무재질은 변형거동이 큰 비선형 성질을 갖고 있기 때문에 거동 해석이 어려웠으나, 최근에 유한요소 해석기법과 화상처리 기술의 급속한 발달로 오일시일의 성능해석이 비교적 용이해졌다. 그동안 이와 같은 기법을 응용한 연구는 주로 정적인 해석에 치중하였고, 동적인 상태에 대한 성능해석은 고무제 자체의 특성 해석 데이터 부족으로 극히 부진한 상황이다. 부분적으로나 Ishiwata[1], Prati[2,3] 등에 의하여 연구가 되었고, Nakamura[4]는 투명한 회전축 내에 카메라를 설치하고 접촉상태를 관찰하여 미세 접촉점(Microasperity contact) 분포도에 따른 누설특성을 관찰하였다.

본 연구에서는 회전축과 시일 립 선단부 사이의 간극, 즉 간섭량(Interference)변화에 따른 립 선단부의

온도를 측정하여 고무제 오일시일의 비선형 특성을 해석하고, 회전축의 편심량에 따른 동적거동 문제를 고무소재의 분리(Separation)현상 개념으로 관찰하여 누설의 원인을 또 다른 측면에서 해석하고자 하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

오일시일의 동적거동 문제를 해석하기 위한 실험장치의 전체도는 Fig. 1에서 보여준다. 회전축의 속도를 임의로 가변시키기 위하여 DC서보 모터를 사용하였고, 회전축의 동적 편심도 측정은 비접촉식 갭센서를 사용하여 10 μm TIR 이내로 유지하였다. 시일 립 선단부의 온도를 측정하기 위하여 사용된 열전대는 K 타입으로 가능한 시일 립 끝단부에 위치하도록 깊게 삽입하였다.

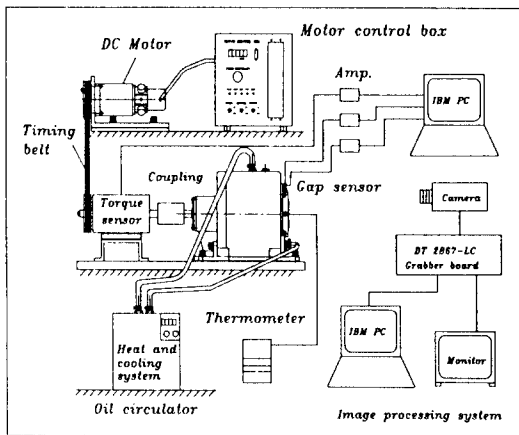


Fig. 1. Schematic representation for seal lip contact behaviour.

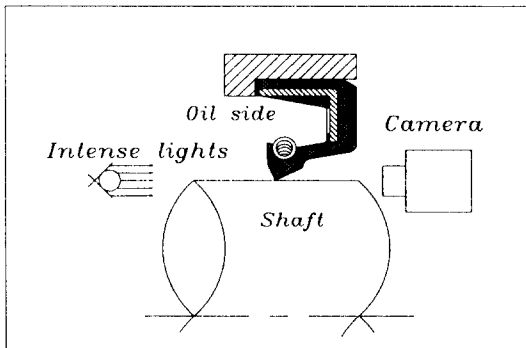


Fig. 2. Light passing under the seal lip.

또한 오일시일의 회전 마찰력을 측정하기 위하여 토크 센서를 사용하였고, 시일 립의 탄성변형거동에 따른 립 선단부의 회전축 접촉면에 대한 분리(Separation)현상을 관찰하기 위하여 Fig. 2와 같은 화상처리 기법을 응용하였다.

2-2. 실험용 시일

본 실험을 위하여 제작된 오일시일은 쇼어 경도계로 72를 나타내는 NBR 계통의 고무로 립 선단부의 직경은 70 mm, 외경은 95 mm, 폭은 12 mm의 표준형이다. 시일과 접촉하는 회전축 표면은 연마처리를 한 강재로 로크웰 C로 32~38의 경도를 갖고, 회전축의 진원도는 5 μm이내가 되도록 가공하였다.

회전축의 편심량 변화에 따른 오일시일의 동적거동 문제를 해석하기 위하여 준비된 기준 회전축 시험편 3종류(φ69, 69.5, 70 mm)에 대하여 동적 편심량이 $e_d = 0 \sim 0.8$ mm인 9종류를 합하면 총 27종류의 시험편을 제작하였다.

실험에서 사용된 오일시일의 밀봉유체는 NBR계 시일 소재와의 적합성 문제를 만족하고, 시일 접촉면에 윤활유 공급과 오일의 순환이 원활하도록 하기 위하여 점도(40°C에서 20 cSt)가 낮은 기유(Base oil)를 사용하였다.

3. 실험결과 및 토의

3-1. 립 선단부의 온도

회전축과 직접 접촉운동을 해야하는 오일시일의 립 선단부는 접촉폭이 대단히 작으면서도 확실한 밀봉작용을 해야 하기 때문에 적당한 접촉력을 가져야 하는데, 이것이 과도할 경우는 선단부에 특히 발생된 마찰열의 집중화가 심하게 일어난다. 미끄럼 마찰열에 의하여 발생된 에너지는 소재내부로 전도되거나 또는 밀봉된 오일이나 대기중의 공기에 의하여 대류 열전달이 기대되나 실제적인 측면에서 열소산 효과는 대단히 작다[5].

앞에서 언급한 대로 오일시일의 립 선단부 두께는 대단히 작으므로 고무소재에 구멍을 만들어서 열전대를 정밀하게 삽입하기가 어렵기 때문에 이 부분에 대한 온도측정 데이터가 대단히 작은편이다. 본 연구에서는 오일시일을 오일탱크에 반정도 함침시켜서 립 선단부의 온도를 측정하였는데, 회전축의 속도가 1,

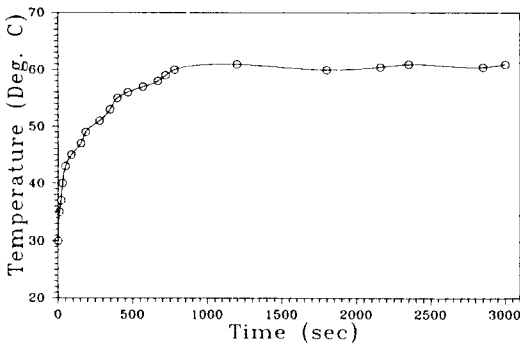


Fig. 3. Steady-state lip temperature at shaft speed 1,800 rpm.

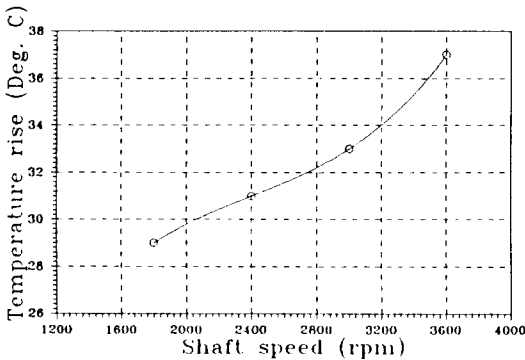


Fig. 4. Seal lip temperature rise as a function of shaft speed.

800 rpm의 경우는 900초 정도 경과하게 되면 Fig. 3에서 제시하는 것처럼 정상상태(Steady-state)에 도달하였다. 이들의 결과를 여러가지 회전수에 대하여 실험한 결과 데이터는 Fig. 4에서 제시하고 있다. 이들의 결과에 의하면 회전수가 증가할 수록 고무소재의 비선형 특성은 잘 나타나고 있는데, 이것은 Horve[6]가 제시한 립시일의 온도 측정결과와 유사하다.

시일 립의 접촉 조건에 따른 온도변화 특성을 알아보기 위하여 립 선단부에 오일을 모두 배제한 건조마찰 조건에 대하여 실험을 수행하였다. 시일 립 선단부를 건조마찰 상태로 유지하고, 회전축의 속도를 1,800 rpm로 유지하면 200초 정도에서 스틱슬립 현상이 발생되고, 400초 정도가 경과되면 140°C(일반적으로 NBR소재의 최대 사용온도는 120°C 정도임)로 상승하여 시일 립 소재는 회전축에 대한 접촉력을 완전히 상실하게 되어 회전축과의 상대 접촉운동을 하지 못하게 됨으로 누설이 발생하게 된다.

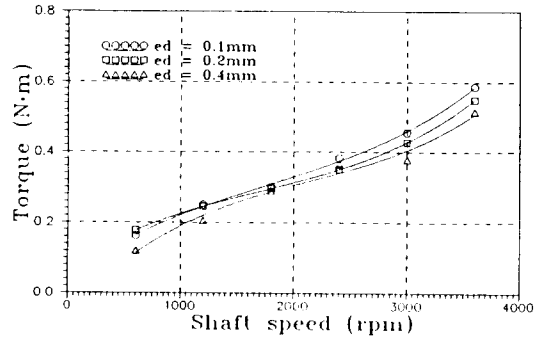


Fig. 5. Friction torque as a function of shaft speed for various dynamic eccentricity.

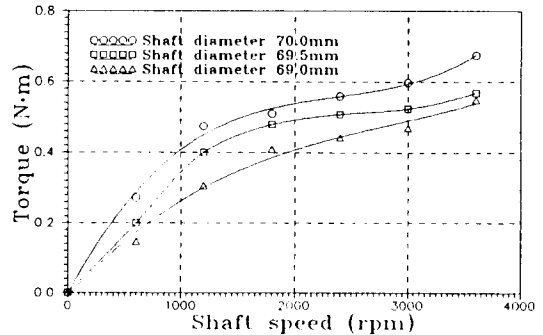


Fig. 6. Friction torque as a function of shaft speed for various shaft diameter.

3-2. 마찰 토크

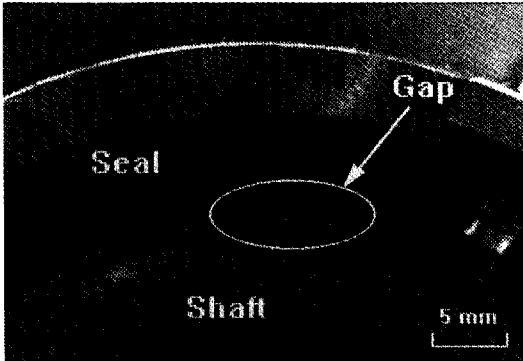
오일시일이 정상상태에 도달하는 시간은 작동조건에 따라서 다르기는 하지만 회전수가 1,800~3,600 rpm인 경우는 최대 900초 이내에서 안정되었다.

Fig. 5는 회전수에 따른 마찰 토크 측정 결과를 보여주는데, 회전수가 증가함에 따라서 마찰 토크가 증가하고, 동적 편심량 e_d 가 작을 수록 마찰 토크가 증가함을 알 수 있다. 이것은 미끄럼 회전부의 마찰 접촉폭이 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

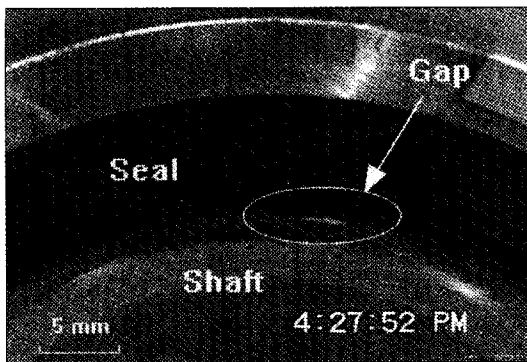
Fig. 6은 세가지의 회전축 직경에 대하여 마찰 토크를 측정된 결과로 회전축 직경이 가장 큰 경우($\phi 70$ mm), 즉 오일시일의 간섭량이 가장 큰 경우는 나머지 두가지에 비하여 마찰 토크가 크고, 회전수가 증가할 수록 고무소재의 비선형 특성이 잘 나타나고 있음을 보여주고 있다.

3-3. 동적거동 해석

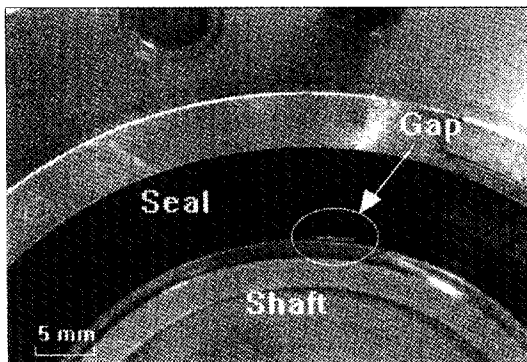
회전축에 대한 오일시일의 정상적인 접촉거동은 작



(a) Eccentricity=0.6 mm; shaft speed=570 rpm; shaft diameter=70 mm



(b) Eccentricity=0.5 mm; shaft speed=1,200 rpm; shaft diameter=69.5 mm



(c) Eccentricity=0.3 mm; shaft speed=520 rpm; shaft diameter=69 mm

Fig. 7. Demonstration of sealing gap separation between the seal lip and the shaft.

동 중에 립 선단부가 회전축에 접촉되어 미끄럼 마찰 운동을 하는 것이다. 이들의 접촉계면에는 미세한 유막이 형성되어 시일 립 선단부를 보호함으로써 밀봉

된 유체의 누설을 방지하게 된다. 그러나 회전축과 시일 립 사이의 간섭량이 변화하거나 또는 회전축의 편심량에 의한 립 선단부가 주기적인 반복하중을 받게 되면 시일 립 소재는 마찰열에 의한 피로현상을 경험하게 되고, 시일소재는 회전축에 대한 응답성질을 크게 상실하게 되어 미세한 분리(Micro-separation)현상이 발생하게 된다.

본 연구에서는 오일시일의 이와같은 접촉거동 문제를 실험적으로 규명하기 위하여 Fig. 2와 같은 화상처리 장치를 사용한다. Fig. 7은 이들의 실험적 결과를 보여주는데, Fig. 7(a)에서 회전축의 직경이 70 mm인 경우는 편심량이 0.6 mm이고 회전수가 570 rpm인 작동조건에서 분리현상이 발생하였다. 또한 Fig. 7(b)에서 회전축이 69.5 mm인 경우는 편심량이 0.5 mm이고 회전수가 1,200 rpm인 조건에서, 그리고 회전축이 69 mm인 Fig. 7(c)에서는 편심량이 0.3 mm이고 회전수가 520 rpm에서 시일 립 선단부의 분리현상이 각각 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 회전축에 편심량이 존재하면 소재의 탄성조건이 약화되면서 분리현상이 발생한다는 사실을 증명해주는 단서가 되는데, 이것은 작동중인 회전축계에서 밀봉된 유체의 누설 원인으로 작용하게 된다.

이들의 실험에서 보여준 미세분리 현상은 모두 상부에서 발생되고 있는데, 이곳의 윤회상태가 여타 부분에 비하여 가장 열악한 곳이라는 점을 고려하면 미세 분리현상에 대한 설명이 용이해진다. 즉, 접촉계면에 미세한 윤회유막의 생성은 시일 립 선단부에 국부적인 온도상승을 억제할 수 있어 열축적을 크게 감소시키게 됨으로 누설을 완화시키거나 또는 차단시킬 수 있다는 점이다.

4. 결 론

회전축에서 밀봉기능을 담당하는 오일시일의 동적 상태에서 립 선단부의 온도와 마찰 토크 및 시일 립 선단부의 응답조건을 편심량의 변화에 따른 밀봉간극의 분리현상 개념으로 고찰하였다.

실험적 연구결과에 의하면 시일 립 선단부의 온도는 주변으로의 방열이 활발하지 못하므로 마찰부에서는 국부적인 열축적 현상이 심화되고, 회전속도가 증가할 수록 고무재질의 비선형 특성은 명확하게 나타나고 있었다. 또한 작동 중의 어떤 조건에서는 시일

립 선단부가 회전축에 대하여 미끄럼 접촉이 일어나지 않는 분리현상이 관찰되는데, 이것은 정적 간섭량과 편심량에 따라서 달라지고 있음을 알 수 있다. 이와같은 분리현상에 의한 밀봉유체의 누설을 방지하기 위해서는 미끄럼 마찰부의 온도를 어떠한 방법으로 소산시키느냐가 대단히 중요한 과제이다. 이것은 시일 립 선단부의 미끄럼 마찰부에 미세한 윤활유막을 누설없이 형성시키는 것이 해결책이라 생각된다.

참 고 문 헌

1. Ishiwata, H. and Hirano, F., "Effect of Shaft Eccentricity on Oil Seal," 2nd Intl. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, pp.H2-17-32, 1964.
2. Prati, E., "Dynamic Behaviour of Radial Lip Seals Under Effect of Shaft Eccentricity," 10th Intl. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, pp.C3-123-138, 1984.
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.263-269, 1985.
4. Nakamura, K. and Kawahara, Y., "An Investigation of Sealing Properties of Lip Seals Through Observations of Sealing Surfaces Under Dynamic Condition," 10th Intl. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, pp.C1-87-105, 1984.
5. Kim, C. K., "Finite Element Analysis of Contact Behaviors of Rubber Lip seals," J. of KSTLE, Vol. 10, No. 4, pp.82-88, 1994.
6. Horve, L., "The Effect of Operating Parameters Upon Radial Lip Seal Performance," SAE 841145, 1984.