

오일시일의 마찰특성에 관한 실험적 연구

나운환 · 류병진 · 김청균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

· 삼성중공업(주) 건기연구소

Experimental Study on Friction Characteristics in Lip-Type Oil Seals

Yun Hwan Na · Jin-Byung Ryu · Chung Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

· R & D Center, Samsung Heavy Industry

Abstract - This paper presents the experimental results of the friction characteristics of double lip-type oil seals which show an improvement in sealing performance over single lip-type oil seals. The major differences between two oil seals are the number of contact lip and seal materials; Nitrile Butadine Rubber(NBR) and urethane rubber. The measured results show that the friction torque of double lip seals shows 12~17% increases compared with those of single lip-type seals. But the sealing performance and service life of double lip oil seals have been increased and stabilized due to an optimized design of the seal lip and material properties.

Key Words : oil seal, lip seal, sealing interference, friction characteristic, base oil.

1. 서론

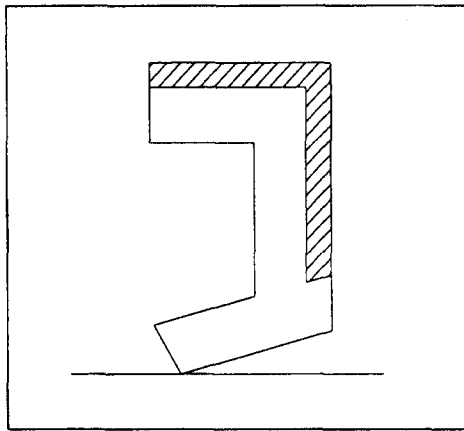
접성을 갖는 작동유체의 누설을 방지하거나 외부 이물질(먼지, 습증기, 미세한 모래입자, 흙)의 침입을 차단하기 위하여 오일시일(Oil Seal)을 널리 사용한다. 접촉식 시일은 회전축과 접촉하는 밀봉 간극에서 선단부의 형상이 선접촉인 립 모양을 하고 있으므로 립시일(Lip Seal)이라고도 하며, 감속기, CV 조인트, 더스트 핀, 압축기, 엔진 등 대부분의 산업용 기계나 운반기계에서 매우 다양하게 사용되고 있다.

오일시일은 회전축과의 요동운동이나 병진운동에 유연하게 미끄럼 마찰접촉을 하고, 구조가 간단하면서도 설치공간이 작으

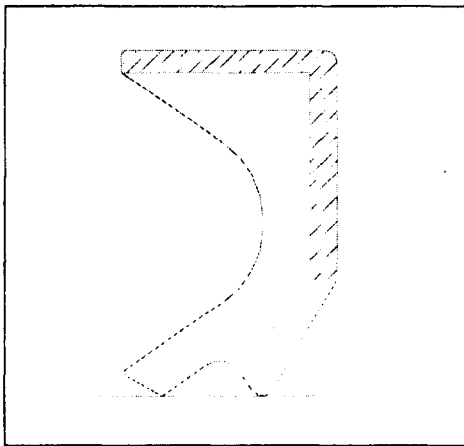
며, 가격이 저렴하다는 강점을 갖고 있다. 오일시일에서 실제로 밀봉기능을 담당해야 할 립 선단부는 회전축과 대변형 탄성접촉을 하면서 밀봉간극에 형성된 미세한 유막에 의하여 립 선단부가 보호되고, 또한 금속재 보강테와 시일 몸체에 의하여 지지된다. 시일의 밀봉성능이나 내구수명은 립 선단부와 미끄럼 마찰접촉하는 회전축 표면의 가공상태, 조립공차, 회전축을 지지하는 베어링 시스템의 동적 강성도, 시일의 사용조건 등에 의하여 결정된다.

립타입 오일시일은 정적 또는 동적인 상태에서 회전체와 항상 편심량(Eccentricity)을 갖고 미끄럼 마찰운동을 하기 때문에

시일의 밀봉성능이나 마찰특성에 영향을 주게 된다[1,2]. 오일시일은 대변형성이 우수한 탄성고무(Elastomer Rubber) 재질을 사용하기 때문에 시일의 마찰특성은 비교적 양호하지만, 시일의 사용조건이나 립 선단부의 설계조건에 따라서 커다란 차이를 보여주고 있다. 오일시일 재질로는 NBR, Silicone, Polyacrylate, Fluoro-Elastomer 등이 널리 사용되고[3,4], 립 선단부는 접촉형태에 따라서 단일립 또는 복수립으로 다양하게 설계되고 있다.



(a) Single lip type



(b) Double lip type

Fig. 1 Typical oil seals.

본 연구에서는 우레탄 소재로 제작한 단일립 오일시일과 NBR 소재로 제작한 더블립 오일시일 두가지 모델에 대한 마찰특성 문제를 실험적으로 해석하고자 한다. 여기서 획득한 자료는 오일시일의 밀봉간극이나 접촉 간섭량 변화에 따른 접촉력 해석과 립 선단부의 최적화 설계에 이용될 수 있다.

2. 실험

2-1. 정적실험

정지된 상태에서 회전축에 대한 오일시일의 접촉력을 측정하기 위하여 두 개로 분할된 투명한 원통을 오일시일의 내경부에 회전축처럼 설치하고, 반경방향으로 밀봉 간섭량(Sealing Interference)을 증가시켜 가면서 실험하였다. 접촉식의 오일시일에서 접촉력은 시일의 밀봉성능과 수명에 직접적인 영향을 주는 파라미터로 작용하기 때문에 대단히 중요하다.

실험에 사용된 오일시일 소재가 대변형성이 우수한 탄성체(Elastomer)라는 것을 고려하여 다이얼 게이지로 립 선단부에 가한 변위량에 대해 변형이 충분히 발생되도록 약 12시간 동안 접촉력 변화 추이를 측정하였다. 이러한 반복적인 실험을 수행하여 오일시일에 대한 정적 접촉력을 해석하였다.

2-2. 동적실험

저속의 회전축에 대한 오일시일의 마찰특성을 해석하기 위한 실험장치를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 오일시일의 성능특성을 종합적으로 해석할 수 있는 Fig. 2의 오일시일 실험장치는 회전속도를 제어할 수 있

는 서보모터와 실험장치 본체, 그리고 실험장치 내부의 오일온도를 항상 일정하게 유지시켜 줄 수 있는 오일탱크, 오일펌프 등을 갖춘 오일 순환 시스템으로 구성되어 있다.

회전축의 속도를 일정하게 조절할 수 있도록 타코 제너레이터가 부착된 직류 서보모터를 사용하였고, 회전속도는 모터 제어 박스에 설치된 수동 다이얼로 조절하였다. 서보모터에는 동력 전달효과가 우수한 타이밍 벨트를 사용하였고, 회전 토크 센서 축과 실험장치의 회전축은 두랄루민 재질의 유연 커플링으로 연결하여 회전축 중심의 불일치로 인한 문제점을 보완하였다. 회전체의 동적 런아웃을 최소로 유지시키기 위하여 정밀도를 $10\mu\text{m}$ 이내로 제작하였고, 회전축의 정밀도를 확보하기 위하여 정밀급 앵글러 콘택트 블베어링으로 지지하였다.

오일시일의 마찰특성을 해석하기 위한 밀봉유체는 유동성이 우수한 기유를 사용하였고, 기유의 윤활 특성은 Table 1에서 제시하고 있다. 오일탱크에 저장된 윤활유의 순환온도는 30°C , 50°C , 70°C 로 각각 설

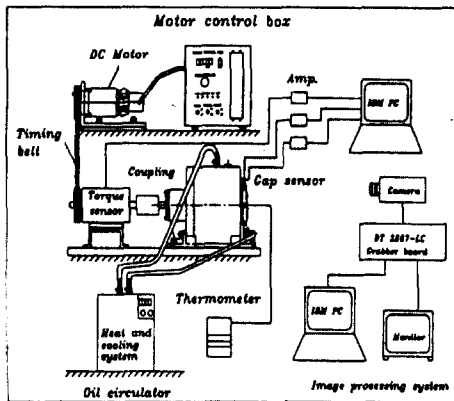


Fig. 2 General view of oil seal performance tester.

정하고, 간섭량 변화에 따른 오일시일의 마찰특성에 대하여 실험하였다. 실험에서 작동유체의 순환온도를 30°C 로 일정하게 유지한다면 립 선단부에서의 온도도 30°C 정도로 유지된다고 가정하였다.

정상상태에 도달된 상황에서 오일시일의 마찰 토크를 측정하기 위하여 립 선단부의 온도를 측정한 결과는 저속에서 운전하는 경우는 약 5분, $1,000\text{rpm}$ 이상에서는 15분 정도가 걸리는 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구에서는 오일시일의 마찰특성에 대한 실험적 데이터를 획득하기 위하여 약 20분 정도 운전시킨 후에 마찰 토크를 측정하였고, 시일 립 선단부와 회전축 사이의 밀봉간극 발생 여부나 편심량 등을 비전 시스템과 갭센서로 측정하였다.

Table 1. Properties of base oil.

Viscosity, cs		Viscosity Index	Pour Point, $^\circ\text{C}$	Flash Point, $^\circ\text{C}$
40°C	100°C			
20.07	4.10	104	-15	212

2-3. 시험편

실험에서 사용한 오일시일은 공칭 축직경 69mm , 외경 85mm , 폭 7.5mm 의 NBR 소재로 제작한 더블립 타입과 우레탄으로 제작한 단일립 타입의 두가지 오일시일이 있다.

회전축과 시일축 중심 사이의 간섭량 변화에 따른 마찰특성을 해석하기 위하여, 회전축의 외경이 서로 다른 3가지를 제작하여 초기 간섭량(Initial Interference)이 0.8 , 1.0 , 1.2mm 의 세가지 경우에 대한 오일시일의 접촉력과 마찰 토크를 실험하였다.

3. 실험결과 및 토의

3-1. 접촉력

정적인 상태에서 세가지의 초기 간섭량 (0.8, 1.0, 1.2mm)을 갖는 오일시일에 대한 접촉력을 반경방향으로 측정한 결과를 Fig. 3에서 제시하고 있다. 립 선단부의 간섭량이 증가하면 시일의 접촉력은 선형적으로 증가하는데, 이것은 사용된 시일소재가 대변형 탄성성질이 강한 더블립 형상의 NBR이기 때문이다. 또한 초기 간섭량이 0.8mm인 단일립의 우레탄 오일시일보다는 더블립 형상의 NBR 시일 접촉력이 높게 나타났고, 더블립 시일에서 밀봉간극이 1.0mm인 경우를 보면 단일립 시일에 비하여 접촉력은 43% 이상 증가되고 있음을 알 수 있다.

정적인 상태에서 접촉력에 대한 실험결과에 의하면 밀봉 간섭량이 0.2mm 정도에서는 초기 간섭량 변화에 대하여 별다른 차이가 없으나, 간섭량이 0.4mm 이상으로 증가하면 접촉력의 크기는 차이를 나타낸다. 여기서 반경방향의 간섭량이 변해도 접촉력의 증가추세가 탄성 범위내에서는 안정적이라는 사실을 알 수 있다. 그러나 초기 간섭량이 1.2mm인 경우에 대한 실험결과에서 보여주는 것처럼 초기 간섭량이 임계값 이상으로 되면, 소재의 대변형 한계치를 넘어서게 되어 접촉력은 보다 크게 증가하고, 접촉력의 급상승에 따른 수명단축이나 유막파손과 마멸에 의한 밀봉성능 저하가 문제점으로 제기된다. 즉, 오일시일에서 접촉력이 작으면 밀봉된 오일의 외부누설이나 외부로부터의 이물질 침입이 촉진되고, 너무 크면 회전 마찰력의 증가에 따른 마찰온도 증가는 물론 시일 회전축의

마멸량 증가로 시일의 밀봉성능 저하와 수명단축이라는 문제점을 제기하게 된다.

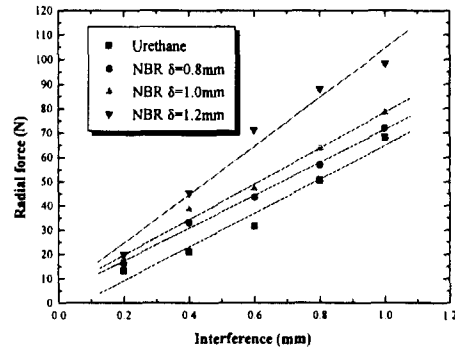


Fig. 3 Contact forces of single lip seal and double lip seal.

3-2. 마찰 토오크

오일시일에서 발생하는 마찰 토오크를 측정하기 위한 회전속도는 0~230rpm로 저속에서 실험하였고, 마찰온도가 정상상태에 도달하였다고 확인된 경우에 마찰 토오크를 측정하였다.

실험에서 사용한 회전축의 직경은 69mm 이고, 회전축의 초기 편심량은 0.1mm이며, 오일의 온도변화에 따른 시일 립 선단부의 초기 간섭량은 0.8, 1.0, 1.2mm의 세가지로 제작되어 각각의 경우에 대한 마찰 토오크를 측정하였다.

Figs. 4~6에서는 회전축의 속도변화에 따른 더블립 타입의 오일시일에 대한 마찰 토오크를 각각 보여주고 있다. Fig. 4는 회전속도가 230rpm 이하이고, 밀봉된 윤활유의 작동온도가 30℃인 경우에 대한 실험결과이다. 이 결과에 의하면 마찰 토오크는 초기 간섭량이 가장 큰 1.2mm에서 최대 0.135N·m까지 선형적으로 증가되나, 100rpm 이하의 저속에서는 각각의 초기 간섭량 δ

에 대하여 마찰 토크가 0.103~0.115N·m로 마찰 토크가 균일하게 유지됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 사용된 오일시일의 접촉 형태가 더블립 형상이고, 초기 간섭량이 0.8~1.2mm로 비교적 크다는 사실을 고려하면, 저속에서의 마찰 토크는 낮으면서도 안정적이라는 사실이다. 비록 시일의 회전속도가 100rpm 이하이고, 윤활유의 작동온도가 30℃로 낮게 유지된 작동조건에서 실험을 수행하였다 해도 Table 1에서 제시한 윤활유의 유동점이나 점도지수를 고려할 때 오일은 원활하게 더스트 립 선단부를 포함한 1차 밀봉 선단부에 공급되어 초박막을 형성하고 있기 때문에 양호한 실험적 결과를 얻을 수 있다고 생각된다.

Figs. 4~6에서 회전축 속도를 증가시키면 마찰 토크는 선형적으로 증가하고, 사용오일의 온도를 증가시키면(30℃ → 50℃ → 70℃) 마찰 토크는 감소하는 경향을 보이거나 그리 큰 변화는 아닌 것으로 보아 밀봉 간극에서의 윤활막이 비교적 잘 형성되고 있다는 사실을 알 수 있다. Fig. 6에서 오일의 순환온도를 70℃로 높게 유지한 상태에서 회전속도를 증가시키면 마찰 토크의 기울기 증가율은 Fig. 4의 0℃나 Fig. 5의 50℃에 비하여 낮음을 알 수 있다.

이들의 실험결과에 의하면 시일 립 선단부의 초기 간섭량이 0.8mm, 1.0mm, 1.2mm로 증가할수록 시일에 걸리는 마찰 토크는 완만하게 증가하고, 온도가 증가할수록 마찰 토크와 기울기는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그렇지만 초기 간섭량이 1.2mm인 경우와 같이 그 소재의 대변형 탄성 한계치에 접근하게 되면 마찰 토크

기울기가 증가하는 경향을 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 우레탄 소재의 단일립 오일시일에 대한 마찰 토크를 회전속도의 향으로 실험한 결과이다. 이 결과에 의하면 단일립 시일에서 작동온도가 30℃인 경우에 대한 마찰 토크는 0.093~0.12, 작동온도가 50℃인 경우는 0.091~0.113, 특히 작동온도가 70℃인 경우는 0.077~0.098로 크게 낮아지고 경향을 나타내고 있다.

NBR로 제작된 더블립 오일시일에 대한 마찰 토크를 보여준 Fig. 8에 의하면 오일의 순환온도가 50℃ 이하인 경우에 대한 마찰 토크는 속도를 증가시켜도 0.109~0.135로 대단히 유사한 결과를 보여준다. 그러나 오일의 온도가 70℃로 크게 높아지면 오일의 점도 저하로 인한 유동성이 높아지면서 립 선단부로의 오일이동이 원활해지므로 마찰 토크는 0.09~0.11로 크게 떨어지고 있다.

우레탄 소재를 사용한 단일립 오일시일(Fig. 7)에 비하여 NBR 소재를 사용한 더블립 오일시일(Fig. 8)의 마찰 토크를 사용조건에 따라서 비교한 결과에 의하면 12~17%로 약간 높게 나타나는 정도이다. 즉, 더블립 오일시일의 접촉면적이 단일립에 비하여 두배 정도로 크다는 사실을 고려하면 마찰 토크는 큰 변화가 아니라 생각된다. 그러나 더블립 오일시일이 더스트 립 선단부를 포함하므로 접촉면적이 크다 할지라도 립 선단부에 오일 공급이 원활하게 이루어질 수 있도록 립의 각도설계를 최적화 한다면 밀봉효과는 증대하고 마찰 토크는 유사한 성능을 갖는 우수한 오일시일을 설계할 수 있다는 사실을 확인한 결과이다.

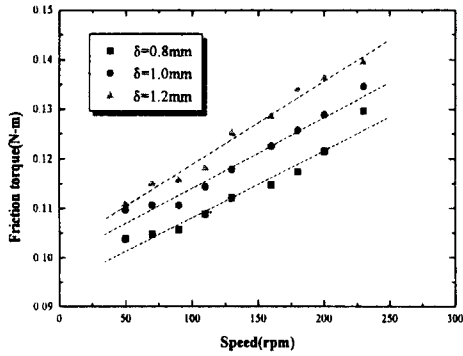


Fig. 4 Friction torque of a double lip type oil seal at 30°C.

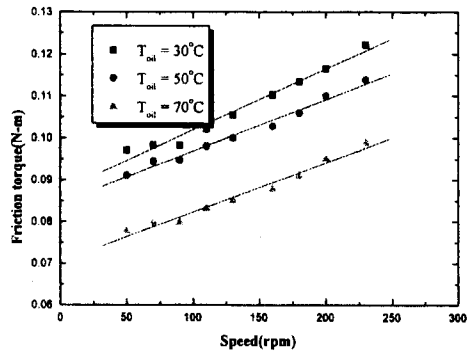


Fig. 7 Friction torque as a function of a speed of oil seals with urethane for various oil temperatures at the sealing interference, 1.0mm.

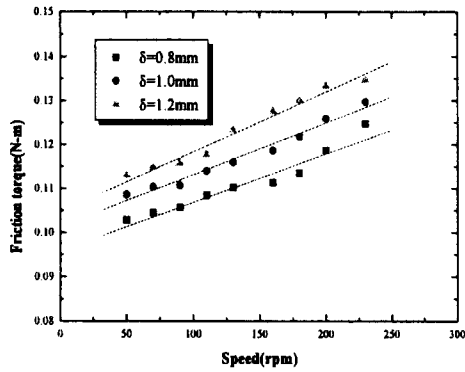


Fig. 5 Friction torque of a double lip type oil seal at 50°C.

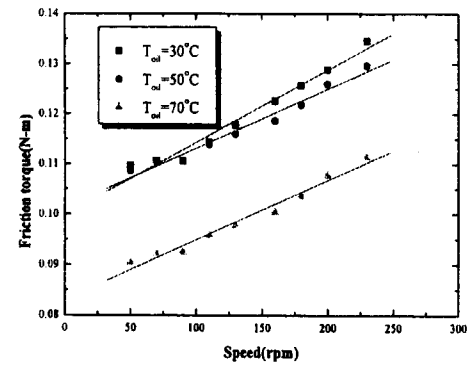


Fig. 8 Friction torque as a function of a speed of oil seals with NBR materials for various oil temperatures at the sealing interference, 1.0mm.

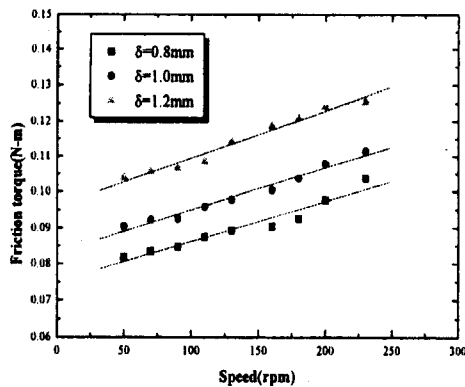


Fig. 6 Friction torque of a double lip type oil seal at 70°C.

5. 결론

회전축을 통한 오일의 누설을 차단하기 위하여 사용한 오일시일에 대한 마찰특성 실험에서 더블립 오일시일의 마찰 토오크는 단일립 오일시일에 비하여 단지 12~17% 증가하지만, 오일의 밀봉성능이나 내구성 측면을 종합적으로 고려하면 더블립 오일시일이 보다 우수한 설계라는 사실을 알 수 있다. 그러나 오일시일의 초기 간섭

량을 임계값 이상으로 과대하게 설정하면 대변형 효과가 우수한 탄성체 시일소재라 할지라도 마찰특성이 크게 변화됨을 보여 주고 있다.

더블립 오일시일에서 1차 밀봉을 담당하는 오일측의 립 선단부와 공기측의 더스트 립 선단부에서도 윤활박막이 비교적 잘 형성되면서 누설방지와 마찰력 감소에 긍정적인 효과를 제공하기 때문에 밀봉성능을 강조하는 오일시일에서는 최적화 된 더블 립 오일시일로 설계하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. Ishiwata, H. and Hirano, F., "Effect of Shaft Eccentricity on Oil Seal," 2nd Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, pp.H2-17~H2-32, Cranfield, ENGLAND, April 1964.
2. Rusch, K. C. and Sanderson, R. W., "Frictional Losses of Dual-Material Lip-Type Shaft Seals," 26th ASLE Annual Meeting, Boston Massachusetts, pp.213~220, May 1971.
3. Chiba, K., Shimomura, T. and Hirabayashi, H., "Sealing Phenomena of a Lip-Type Seal for an Automotive Air Conditioning Compressor," SAE 910532, pp.628~635, 1991.
4. Kim, C. K., Choi, I. H., Huyn, J. S., "Research Trends of Lip-Type Seals for a Bearing," J. of KSTLE, Vol. 8, No. 1, pp.7~16, 1992.