

탄성유체윤활 영역에서 점도지수 향상제의 첨가량에 따른 마찰력 측정연구 Friction Force Measurement of Elastohydrodynamic Lubrication with Viscosity Index Improvers

공 현 상, 장 시 열, 박 경 근

Hyunsang Kong, Siyoul Jang, Kyoung Kuhn Park
School of Mechanical and Automotive Engineering
Kookmin University

ABSTRACT

Most studies of elastohydrodynamic lubrication are oriented only to the measurement of film thickness itself with optical interferometer. In order to exactly investigate the characteristics of a certain lubricant, it is also important to get the information of traction force as well. In this work, we developed the device for measuring friction force of ehl contact condition together with the film thickness. To verify the validity of the measuring system, the friction force and film thickness under ehl condition are measured with the variation of additive ratios of viscosity index improvers.

Key Words : elastohydrodynamic lubrication, friction force, film thickness, non-Newtonian fluid

1. 서 론

탄성유체윤활의 이론 연구는 비교적 잘 정립 되어왔다. 즉, 집중하중에 의한 접촉 고체면의 변형을 Hertz 접촉 이론을 사용하여 그 변형량을 정밀하게 예측하고 있다. 틈새에서의 윤활유 거동도 유체의 여러 가지 비선형적 특성을 고려하여 레이놀즈 방정식으로 서술하고 있다. 또한 이론적 설명에 바탕을 둔 접촉 형상을 실험에서도 상당히 똑같은 형태로 구현할 수 있으며, 유막 두께도 광학 간섭계를 이용하여 접촉 영역 전체에 걸쳐서 비교적 정밀하게 측정할 수 있다.

연속체 역학 입장에서 보면 틈새내의 유막 압력과 유막 두께를 정량적으로 예측할 수 있는 정립된 이론과 유막 두께를 정밀하게 측정할 수 있는 실험 방법과 이때의 마찰력을 정밀하게 측정할 수 있는 방법이 존재한다면 틈새 내에서 윤활유 거동의 비선형 특성을 정확하게 얻을 수 있다.

본 연구에서는 탄성유체윤활영역에서 윤활유막과 이 때의 마찰력을 동시에 측정하는 측정장비를 개발하였으며, 윤활유 첨가제(점도지수 향상제, viscosity index improvers, VII)의 첨가에 따른 마찰력의 변화와 유막 두께의 변화를 동시에 감지하여 첨가제의 역할에 정확한 진단을 할 수 있도록 하고자 한다.

2. 유막 두께 및 마찰력 측정 원리

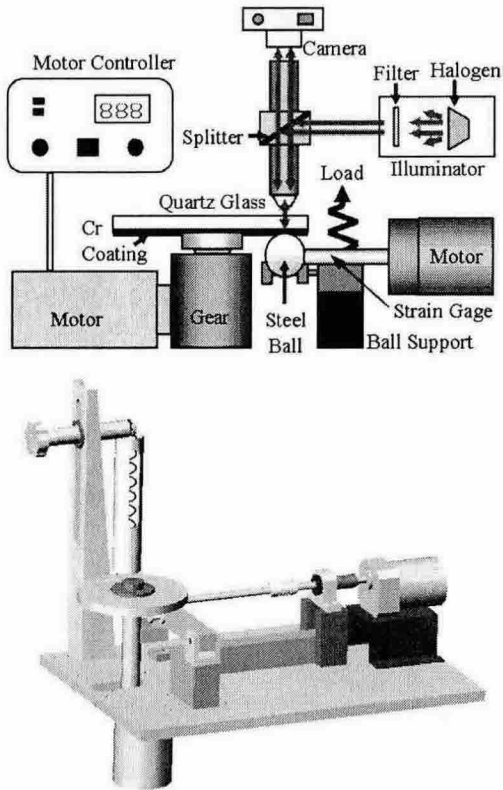


Figure 1 Schematic diagram of EHD film measurement

본 연구에서 설계된 장치의 특징은 구름 운동 조건의 경우에만 유막 측정이 가능하였던 기존의 장치에는 없는 미끄럼운동 성능과 구름-미끄럼 운동비 (sliding-rolling ratio, *SR* ratio)를 조절할 수 있는 향상된 기능을 구현할 수 있도록 한 것이다. 또한 각각의 운동 특성에 대하여 점접촉면에서의 마찰력을 회전 토크의 변화량을 감지하여 측정할 수 있도록 설계하였다. 고하중의 조건에서 윤활유의 특성을 규명할 수 있으려면 구름-미끄럼 운동 속도비에 따른 유막 두께와 형태를 관찰 함으로써 가능한데, 본 연구에서는 이러한 기능을 갖춘 실험장비를 설계하였다. 접촉점

에서의 구름-미끄럼 운동의 크기를 조절하면서 유막 두께를 광학 간섭계를 이용하여 측정한다.

Table 1 윤활유 기본 오일 (base oil) 및 윤활유 첨가제

test items	method	윤활기유	점도지수 향상제
Density 15°C	ASTM D 1298	0.8897	0.8943
Color(AS TM)	ASTM D 1500	L1.5	L0.5
Kin. Vis 40°C	ASTM D 445	95.09	-
Kin. Vis 100°C	ASTM D 445	10.85	534.0
VI	ASTM D 2270	98	-
Pour Point °C	ASTM D 97	-15.0	-
Flash Point °C	ASTM D 92	242	-
TBN, mgKOH/g	ASTM D 2896	-	-

3. 측정된 유막 두께와 마찰력

유막 두께의 측정은 광학 간섭이 효과를 이용하여 측정한다. 윤활유의 기유 (base oil)에 첨가제 (점도지수 향상제)의 구성 비율을 변화시키며 접촉점에서의 구름과 미끄럼 속도 비율에 따라 유막 두께와 마찰력을 측정한다.

일반적으로 점도지수 향상제는 폴리머 분자의 특징으로 인하여 전단 변형률 속도 (shear strain rate)가 클수록($10^5 s^{-1}$ 이상) 전단 저항(점도)가 작아지는 비선형 성질을 갖고 있다. 이러한 속도 영역은 일반적으로 탄성유체윤활영역에 속하는데, 이러한 현상을 규명하기 위해서는 유막 두께와 마찰력을 동시에 측정하여야 한다.

4. 결과

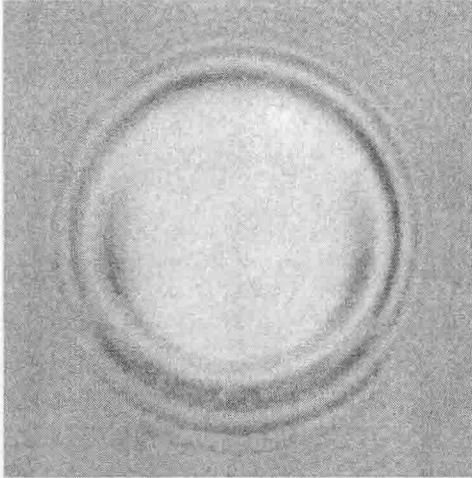


Figure 2 Image from optical interferometer with $SR=1.0$, $U_d=0.048m/s$, $U_b=0.016m/s$, $F=20N$

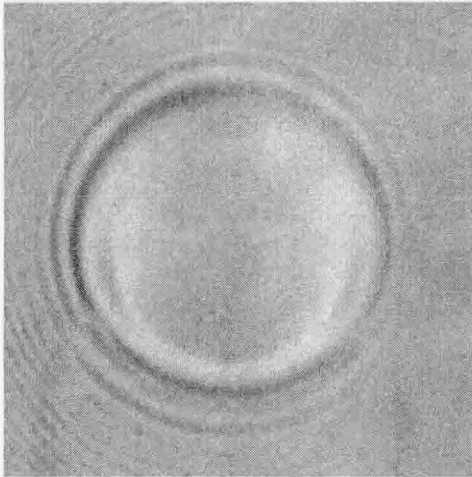


Figure 3 Image from optical interferometer with $SR=0.5$, $U_d=0.027m/s$, $U_b=0.016m/s$, $F=20N$

미끄럼-구름 운동 속도 비율을 변화시키며 관찰한 간섭효과에 의한 유막 두께 변화는 Figure 2-6 에 나타나 있다. 관찰된 이미지는 관찰자의 육안으로는 차이를 거의 감지할 수 없으나 image processing 을 통한 유막 두께 분석을 한 후의 결과는

Figure 7-8 에 나타나 있다. 각각 구름운동 방향과 이에 직각인 방향으로 표시되는 유막 두께이다.

Figure 5 의 이미지를 접촉 영역 전체에 걸쳐 유막 두께를 구하면 Figure 9 과 같이 얻을 수 있다. 본 실험에서 얻어진 결과에 의하면 점도지수 향상제가 첨가된 경우 접촉 속도가 커질수록 유막 두께의 크기는 작아지는 것을 발견할 수 있다.

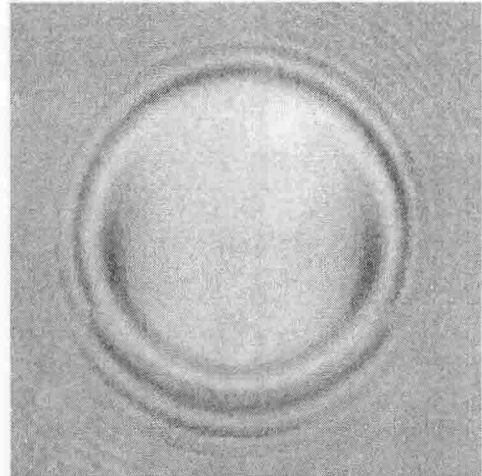


Figure 4 Image from optical interferometer with $SR=0.0$, $U_d=0.016m/s$, $U_b=0.016m/s$, $F=20N$

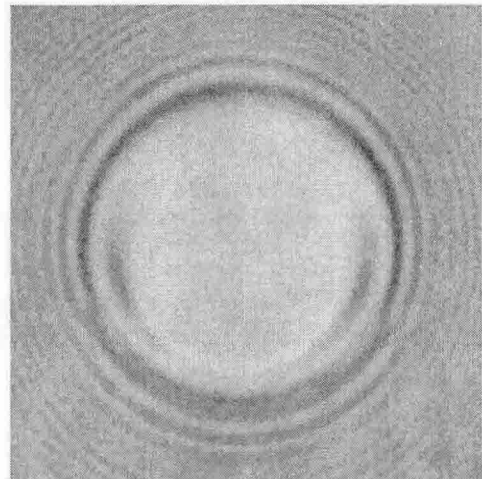


Figure 5 Image from optical interferometer with $SR=-0.5$, $U_d=0.016m/s$, $U_b=0.027m/s$, $F=20N$

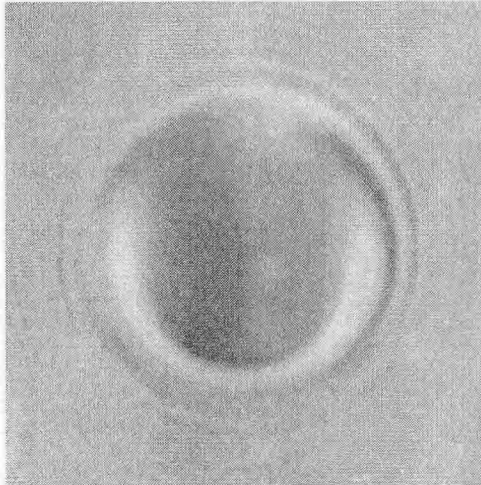


Figure 6 Image from optical interferometer with $SR=-1.0$, $U_d=0.016m/s$, $U_b=0.048m/s$, $F=20N$

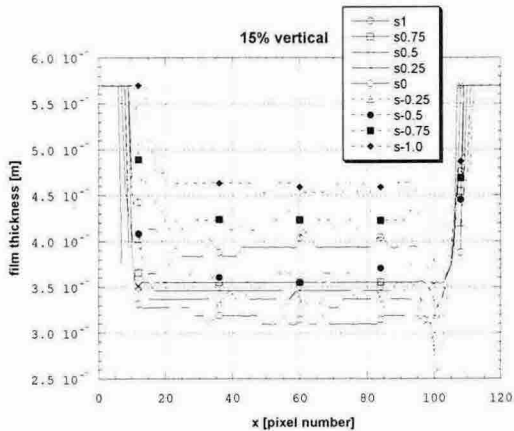


Figure 7 Film thickness variation along the rolling direction according to the sling-rolling ratio under the condition of viscosity index improvers

접촉점에서의 마찰력을 측정하였는데 윤활기유 (base oil) 상태 (Figure 10)에서의 마찰력은 속도가 커질수록 증가한다. 이러한 경향은 5%의 점도지수 향상제의 경우(Figure 11)에도 같은 경향을 보여준다. 그러나 15%의 점도지수 향상제가 첨가된 경우(Figure 12) 구름-미끄럼 속도비가 1.0 이 되면 오히려 마찰력이 줄어드는 것을

발견할 수 있다. 이것은 점도지수 향상제가 고전단 변형을 속도 조건에서 폴리머 분자의 전단운동 특성 때문에 점도가 감소하는 비뉴턴 유체의 특징으로 해석할 수 있다.

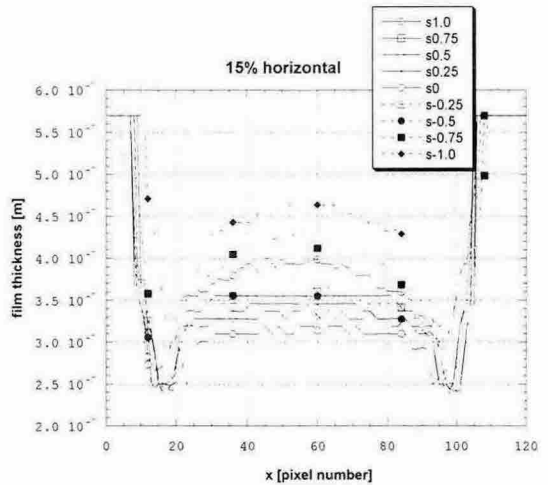


Figure 8 Film thickness variation perpendicular to the rolling direction according to the sling-rolling ratio under the condition of viscosity index improvers

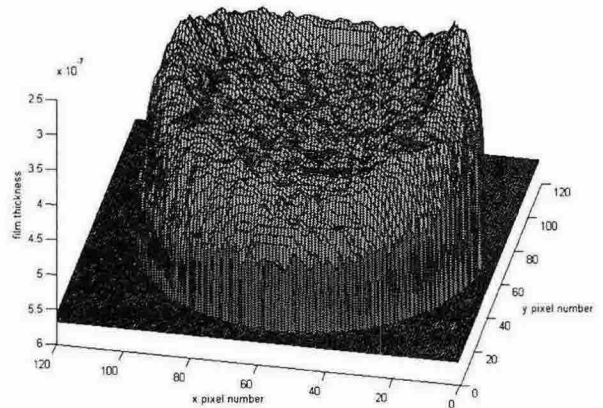


Figure 9 Measured film thickness by image processing under the condition of 15% VII and $SR=1.0$

5. 결론

탄성유체윤활 영역에서의 광학 간섭계로부터 관찰된 이미지를 이미지 분석 기법을 이용하여 미세한 유막 두께의 차이를 $\sim 200\text{nm}$ 의 크기 영역까지 측정할 수 있었으며 그 해상도도 $6\text{-}7\text{nm}$ 이내로 하여 측정할 수 있었다. 또한 기존의 탄성유체윤활의 유막 두께 측정장치에서 접촉점의 저항 토크를 측정할 수 있는 부가 장치를 설치하여 탄성유체윤활 영역의 접촉점에서 마찰계수를 구할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 측정 장비를 이용하여 점도지수 향상제가 첨가된 경우 윤활유의 성질이 미세하게 나타나기 시작하는 10^5 s^{-1} 이상의 전단 변형률 영역에서 윤활유의 비뉴턴 유체 특징을 실험을 통하여 발견할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-005-3)지원으로 수행되었음

참고문헌

- (1) Gustafsson, L., Hoguland, E. and marklund, O., "Measuring Lubricant Film Thickness with Image Analysis," Proc. Instn Mech. Engrs J, 208, pp199-205, 1994
- (2) Lord, J., Jolkin, A., Larsson, R. and Marklind, O., "A Hybrid Film Thickness Evaluation Scheme on Multi-Channel Interferometry and Contact Mechanics," Trns. Of the ASME, J. of Tribology, Vol. 122, pp.16-22, 2000

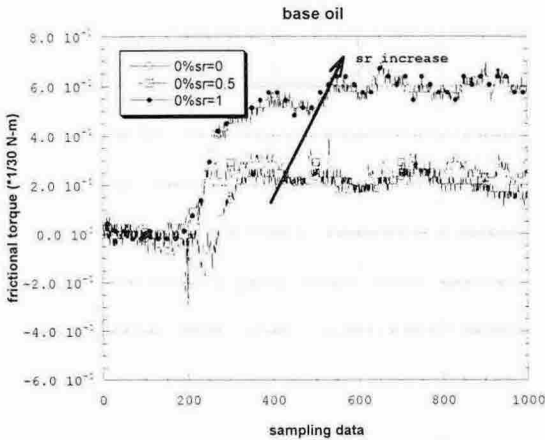


Figure 10 Friction forces according to sliding-rolling variations with base oil

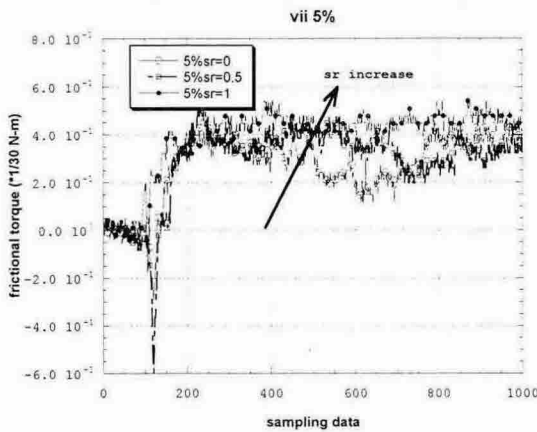


Figure 11 Friction forces according to sliding-rolling variations with 5% VII addition

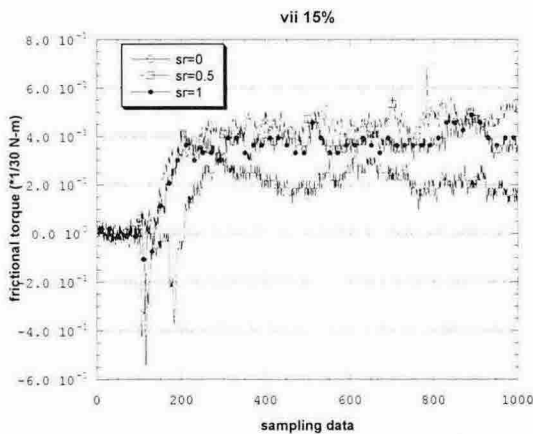


Figure 12 Friction forces according to sliding-rolling variations with 15% VII addition