

구름-미끄럼 속도비에 따른 탄성유체윤활영역에서 유막두께와 마찰력 측정연구

장 시 열[†]

국민대학교 기계자동차공학부

Study of the Friction Force Measurements According to the Rolling-Sliding Ratios under the Condition of Elastohydrodynamic Lubrication

Siyoul Jang[†]

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 tribological characteristics of a certain lubricant, it is also important to get the information of traction behaviors as well. In this work, we developed a device for measuring the friction force of ehl contact condition as well as the film thickness. To verify the validity of the measuring system, the friction forces and film thicknesses under ehl condition are simultaneously measured with the variations of additive ratios of viscosity index improvers which cause non-linear tendencies of film thickness to contact velocity.

Key words – elastohydrodynamic lubrication(ehl), friction force, film thickness, non-Newtonian fluid.

1. 서 론

최근의 탄성유체윤활의 이론 연구는 다중차원 다중격자(multilevel multi-grid method)의 수치해석 방법 [1]의 개발로 현실적 접촉 조건을 비교적 잘 반영할 수 있게 되어 비교적 정확한 정량적 결과에 대한 제시가 용이해졌다. 즉, 집중하중에 의한 접촉 고체면의 변형을 Hertz 접촉 이론을 사용하여 그 변형량을 정밀하게 예측하고 있으며, 이에 따른 접촉 틈새에서의 유막 거동에 대한 비선형적 해석[2,6]도 안정적으로 수행되고 있다. 또한 이론적 설명에 바탕을 둔 접촉 형상을 실험에서도 상당히 똑같은 형태로 구현할 수 있게 되었으며, 그 방법은 광학 간섭계[3]를 이용한 탄성윤활의 접촉 유막두께의 측정 방법으로 접촉 영역 전체에 걸쳐서 나노미터 스케일[4]의 유막 두께 영역에서도 정밀하게 측정할 수 있게 되었다.

윤활유의 고기능화를 위한 여러가지 첨가제로 인한 접촉 조건에서 윤활유의 비선형적 거동을 해석하기 위한 안정한 수렴해도 다중격자 다중차원의 수치해법 뿐만 아니라 다양한 유변학적 모델을 개발하여 정확히 규명할 수 있게 되었다. 이러한 윤활유 거동에 대한 기본적 특성을 실험적으로 규명해야 하는데 전단 변형을 속도에 대한 접촉점에서의 전단저항을 측정하는 것이 비교적 용이한 방법이 되고 있다. 접촉 압력, 접촉 속도, 전단 저항 및 접촉 유막 두께를 동시에 측정한다면 고압력(~500 MPa) 및 고전단 변형률 속도(~ 10^6 s⁻¹)에 대한 윤활유의 비선형적 점도 변화를 측정할 수 있다[5]. 이것은 대기압 하에서의 비선형적 점도 변화를 설명하는 윤활유의 일반적 특성에서 비롯되는 틈새 운동에 관한 공학적 현실의 오류를 극소화 할 수 있는 데이터를 제공할 수 있다[6].

탄성유체윤활에 관한 수치 해석연구 결과의 효용성을 입증하기 위하여 탄성유체윤활의 윤활 유막 두께의 측정은 여러 가지 접촉 조건에서 접촉 조건의 실험도

[†]주저자 · 책임저자 : jangs@kookmin.ac.kr

다양한 방법으로 진행되고 있다. 예를 들면, 접촉 속도의 변화 뿐만 아니라 접촉 속도 방향의 변화, 윤활유의 성분 조건 및 하중 조건 등을 다양하게 변화시켜 실험을[7] 하고 있어, 윤활유 제조 및 설계, 문제점 분석에 활발하게 이용되고 있다.

본 연구는 가혹한 접촉 조건들 중의 하나인 탄성유체윤활 영역에서 윤활유의 전단 저항 특성을 규명하고자 윤활유막과 접촉점에서 발생하는 마찰력을 동시에 측정하는 측정장비를 개발하였다. 개발된 장비를 이용하여 윤활유 첨가제(점도지수 향상제, viscosity index improvers, VII)의 첨가에 따라 탄성유체윤활영역에서

미세한 마찰력의 변화와 유막 두께의 변화를 동시에 감지하여 첨가제의 역할에 정확한 진단을 할 수 있도록 하고자 한다. 이러한 실험은 고부하 조건에서 점도지수 향상제의 첨가에 따른 윤활유의 비정상 전단저항성에 대한 정보를 얻을 수 있으리라 예상한다.

2. 유막 두께 및 마찰력 측정 장치

광학간섭계에 의한 탄성유체 윤활 측정 방법은 많은 연구가 수행되어 왔다. 투명한 유리 또는 Quartz에 고정도로 표면 가공된 금속구를 접촉시켜 투시광선과 유

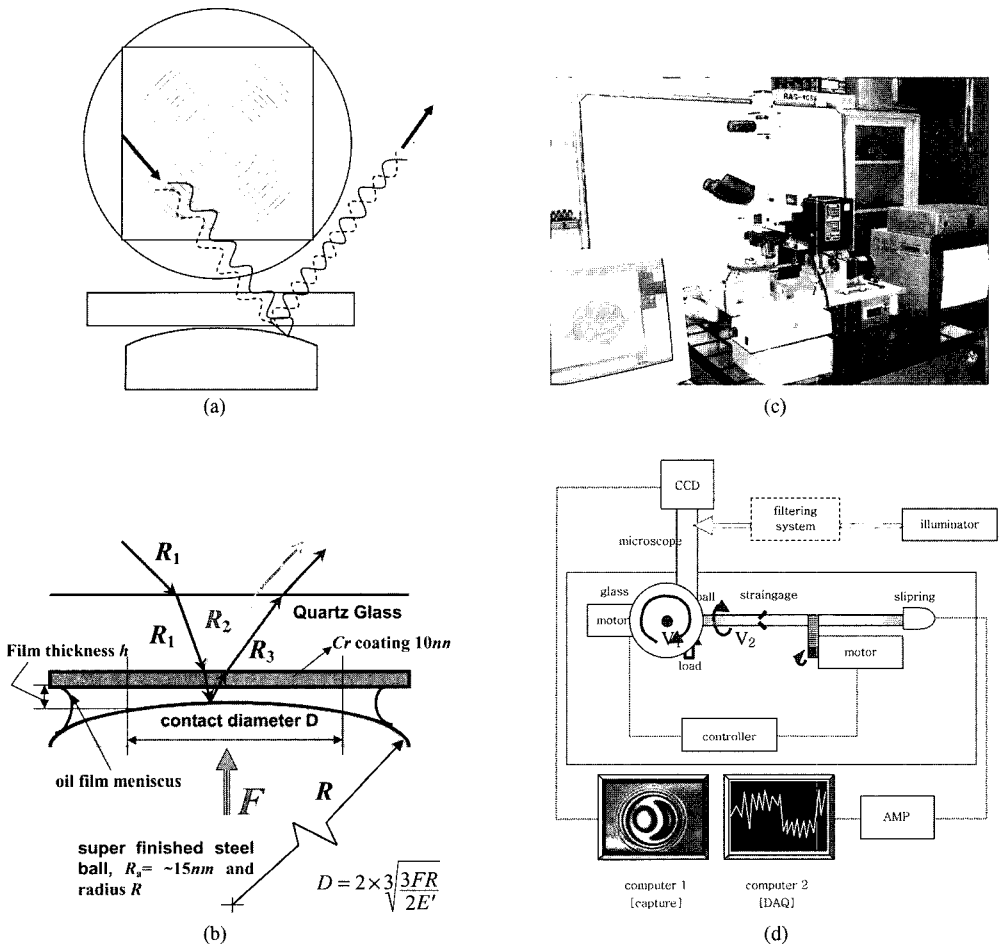


Fig. 1. Apparatus of EHD film measurement and signal processing for digital image and friction force. (a) Fringe pattern of Newton ring by the interferometer with non-conformal geometrical contact, (b) Film thicknesses by the interferometric path differences of incident and reflected lights over the contact area, (c) Developed measurement system for both elastohydrodynamic lubrication film thickness and friction forces with various rolling-sliding ratios and (d) Schematic diagram of signal processing for measured inbterferometric image and frictional torque with the developed apparatus.

리면과 금속구면에서 반사되는 광선의 경로차에 의한 간섭무늬 이미지를 색상 및 병압의 변화를 분석하여 얻는다[4,9].

본 연구에서 설계된 장치의 특징은 접촉 금속구와 글라스 디스크 사이의 접촉속도가 같은 구름 운동 조건인 경우에만 유막 측정이 가능하였던 기존의 장치에서[7] 미끄럼운동 성능과 구름-미끄럼 운동비(Sliding-rolling ratio, SR ratio)를 조절할 수 있는 향상된 기능 구현할 수 있도록 개발하였다. 또한 각각의 운동 특성에 대하여 점접촉 면에서의 마찰력을 회전 토크의 변화량을 감지하여 측정할 수 있도록 설계하였다(Fig. 1). 고하중의 조건에서 윤활유의 특징을 규명할 수 있으려면 구름-미끄럼 운동 속도비에 따른 유막 두께와 형태를 관찰 함으로써 가능하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기능을 갖춘 실험장비를 설계하였다. 점접촉에서의 구름-미끄럼 운동 비의크기를 조절하면서 유막 두께를 광학 간섭계를 이용하여 측정한다.

3. 측정된 유막 두께와 마찰력

유막 두께의 측정은 광학 간섭이 효과를 이용하여 측정한다. 윤활유의 기유(Base oil)에 첨가제(고분자량 폴리머계 점도지수 향상, VII)의 구성 비율을 변화시키며 점접촉에서의 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) 전단저항(점도)가 작아지는 비선형 성질을 갖고 있다. 이러한 속도 영역은 일반적으로 탄성유체윤활영역에 속하는데, 이러한 현상을 규명하기 위해서는 유막 두께와 마찰력을 동시에 측정하여야 한다.

유막두께의 변화에 대한 색상정보 데이터는 Fig. 2와 같이 구할 수 있다[7]. 이러한 유막두께-색상정보 데이터는 측정 될 유막두께에 대한 간섭이미지에서 각 픽셀의 색상정보와 비교하여 유막두께를 계산한다.

4. 결 과

점접촉에서 글라스 디스크의 속도는 0.016 m/s에서 0.048 m/s까지 변화시킨다. 또한 금속구의 속도는 반대 방향으로 0.016 m/s에서 0.048 m/s까지 속도변화를 일으켜 점접촉에서의 유막두께 및 접촉저항 값을 측정한다. 구름-미끄럼비(Rolling-sliding ratio) 값의 정의는

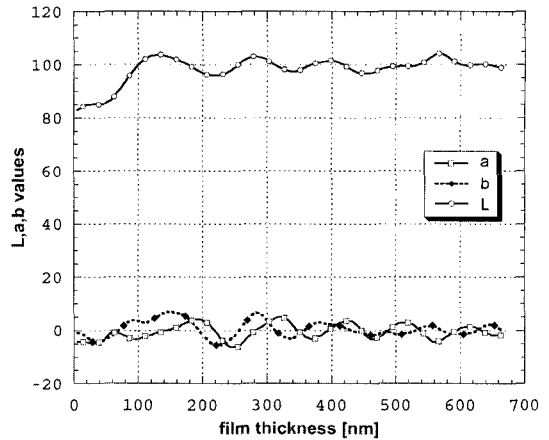


Fig. 2. Lab values for the mapping of measured interferometric image into film thickness for each pixel over the contact area.

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(ASTM) | ASTM D 1500 | L1.5 | L0.5 |
| Kin. Vis @ 40°C(cSt) | ASTM D 445 | 95.09 | - |
| Kin. Vis@ 100°C(cSt) | 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 | - | - |

$\Sigma = 2 \times (u_d - u_b) / (u_d + u_b)$ 로 한다. 글라스 디스크와 금속구의 접촉운동 속도의 크기 범위에서 얻을 수 있는 구름-미끄럼비 Σ 는 대략 -1에서 +1 사이이다.

윤활유의 특성은 Table 1에 나타난 것과 같이 기본유(Base oil)와 기본유에 점도지수 향상제를 5%와 15%를 첨가된 상태의 혼합유에 대하여 실험하였다. 점도지수 향상제가 첨가된 상태에서 점접촉에서 유막두께와 마찰저항을 동시에 측정한다면 첨가제의 영향에 따른 윤활유의 고압력 접촉 조건에서 점도변화 특성을 규명할 수 있기 위함이다.

측정된 유막두께에 대한 간섭이미지는 Figs. 3-7에 나타내었다. 작용하중은 20 N이며, 금속구의 지름은 25.4 mm, 금속구의 탄성계수 및 포아송비는 각각 E_b

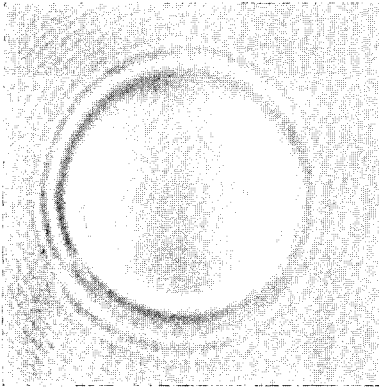


Fig. 3. Image from optical interferometer with $SR=1.0$, $U_d=0.048$ m/s, $U_b=0.016$ m/s, $F=20$ N.

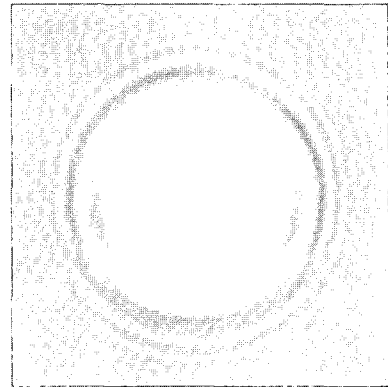


Fig. 6. Image from optical interferometer with $SR=-0.5$, $U_d=0.016$ m/s, $U_b=0.027$ m/s, $F=20$ N.

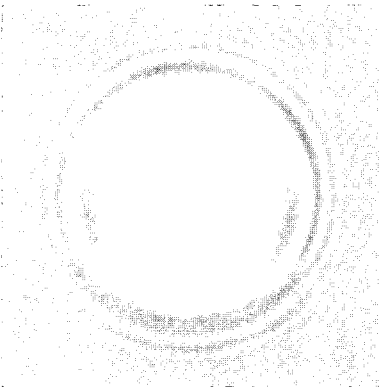


Fig. 4. Image from optical interferometer with $SR=0.5$, $U_d=0.027$ m/s, $U_b=0.016$ m/s, $F=20$ N.

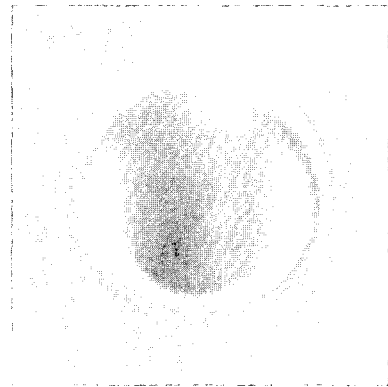


Fig. 7. Image from optical interferometer with $SR=-1.0$, $U_d=0.016$ m/s, $U_b=0.048$ m/s, $F=20$ N.

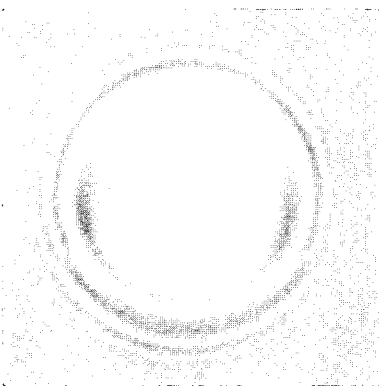


Fig. 5. Image from optical interferometer with $SR=0.0$, $U_d=0.016$ m/s, $U_b=0.016$ m/s, $F=20$ N.

$= 207 \times 10^9$ N/m², $\nu_b = 0.30$ 이다. 글라스 디스크의 탄성계수와 포아송비는 각각 $E_d = 76 \times 10^9$ N/m², $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$ 이다. 윤활유의 조건은 모두 15%의 점

도지수 항상제가 함유된 윤활유 접촉에서의 간섭이미지이다.

관찰된 이미지는 관찰자의 육안으로는 차이를 감지하기가 매우 어렵다. 또한 접촉 영역 전체에 대하여 유막형성 형태를 구분하기는 더욱 어렵다. 이러한 한계를 Fig. 2에서 계산된 색상-유막두께 데이터 베이스를 이용하여 접촉 영역 전체에서의 유막 두께를 측정할 수 있다. 디지털 이미지 프로세싱에 의한(Digital image processing)을 통한 유막 두께 분석을 한 후의 결과는 Figs. 8-11에 나타나 있다. 각각의 그래프는 측정 데이터의 미세한 차이를 표기하기 위하여 접촉운동 방향(Fig. 8)과 이에 직각인 방향(Fig. 9)으로의 유막 두께를 나타낸 것이다. 이러한 유막두께를 접촉면 전체에 대해서도 영상처리 할 수 있으며, Fig. 3과 Fig. 7의 영상이미지를 Fig. 10, Fig. 11과 같은 유막두께로 계산할 수 있다.

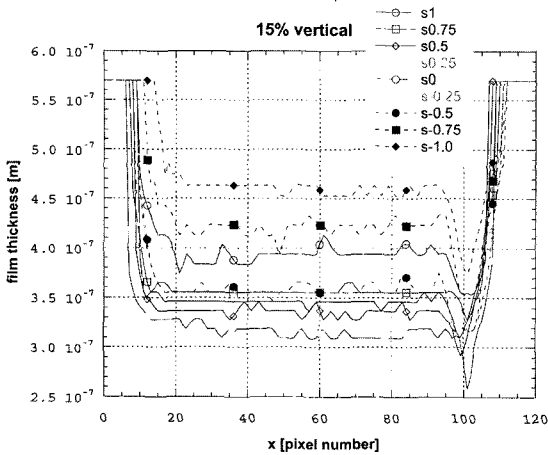


Fig. 8. Film thickness variation along the rolling direction according to the sling-rolling ratio under the condition of viscosity index improvers.

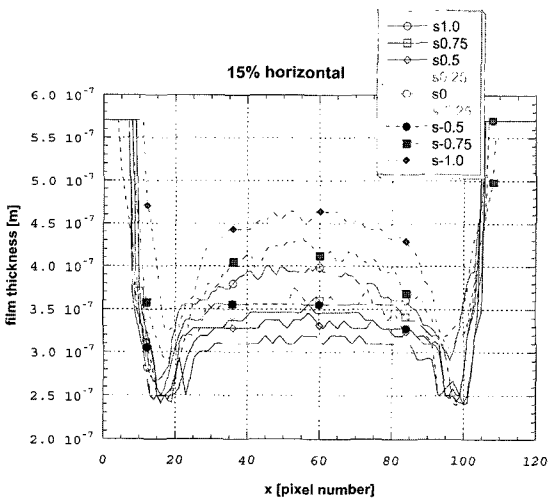


Fig. 9. Film thickness variation perpendicular to the rolling direction according to the sling-rolling ratio under the condition of viscosity index improvers.

Fig. 8과 Fig. 9(15%의 점도치수 향상제가 첨가된 윤활유)에서는 접촉 속도($U=(u_d+u_s)/2$)가 커질수록 유막 두께의 크기가 커지는 것을 발견할 수 있다. 이것은 윤활유막이 접촉 속도가 커질수록 두꺼워지는 일반적인 윤활 유막의 현상과 일치한다. 그러나 유막 두께의 증가 현상이 속도에 선형적으로 변화하지는 않는다. 이것은 접촉점에서의 윤활유의 전단 저항성을 측정하면 규명할 수 있다.

접촉점에서의 마찰력 측정 실험에서 윤활기유(bsae oil, VII 0%) 상태(Fig. 12)에서의 마찰력은 속도가 커

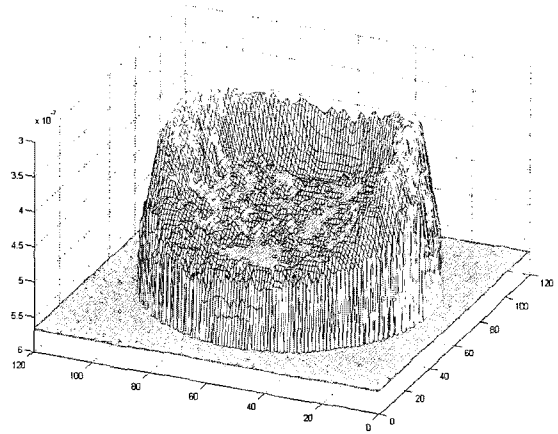


Fig. 10. Measured film thickness by image processing under the condition of 15% VII and $SR=-1.0$.

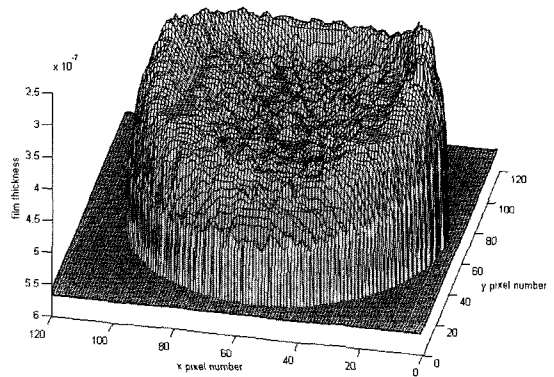


Fig. 11. Measured film thickness by image processing under the condition of 15% VII and $SR=1.0$.

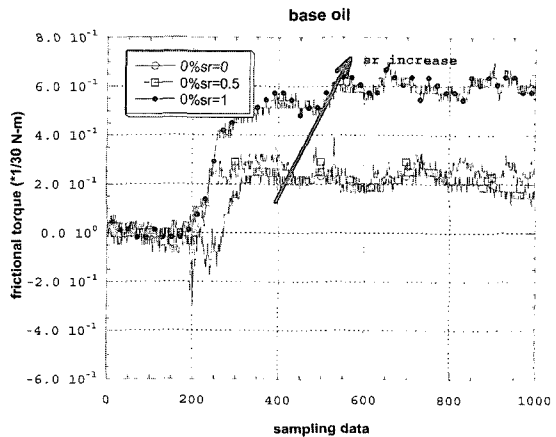


Fig. 12. Friction forces according to sliding-rolling variations with base oil.

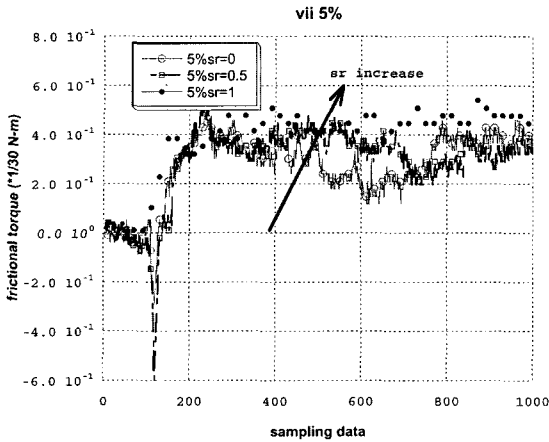


Fig. 13. Friction forces according to sliding-rolling variations with 5% VII addition.

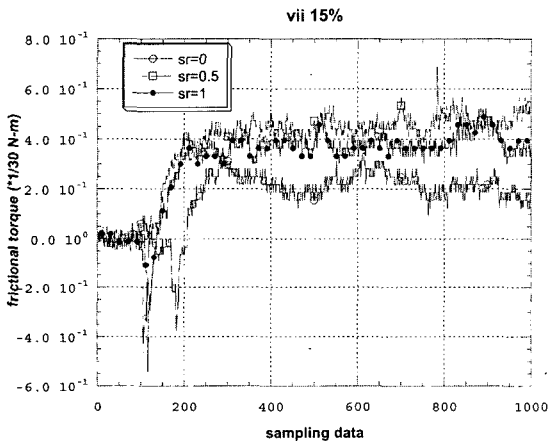


Fig. 14. Friction forces according to sliding-rolling variations with 15% VII addition.

질수록 증가한다. 이러한 경향은 5%의 점도지수 향상제의 경우(Fig. 13)에도 같은 경향을 보여준다. 그러나 15%의 점도지수 향상제가 첨가된 경우(Fig. 14) 구름-미끄럼 속도비가 1.0이 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.

5. 결 론

탄성유체윤활 영역에서의 광학 간섭계로부터 관찰된 이미지를 이미지 분석 기법을 이용하여 미세한 유막

두께의 차이를 최소 ~200 nm의 크기 영역까지 측정할 수 있었으며 그 해상도도 6-7 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 Fig. 7의 경우 $\sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 이상의 전단 변형률 영역에서 윤활유의 비뉴턴 유체 특징을 실험을 통하여 발견할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자사업(KRF-2003-041-D00097)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Venner, C.H., "Multilevel Solution of the EHL Line and Point Contact Problems," PhD. Thesis, University of Twente, Enschede, 1991.
2. Chang, L., Cusano, C. and Conry, T.F., "Effects of Lubricant Rheology and Kinematic Conditions on Micro-Elastohydrodynamic Lubrication," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 111, pp. 344-351, 1989.
3. Foord, C.A., Wedeven, L.D., Westlake, F.J. and Cameron, A., "Optical Elastohydrodynamics," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 184, Part 1, No. 28, pp. 487-505, 1976.
4. Krupka, M. et al., "Elastohydrodynamic Lubrication Film Shape-Comparison between Experimental and Theoretical Results," *Tribology for Energy Conservation*, Elsevier, Amsterdam, 1997.
5. Gustafsson, L., Hoguland, E. and Marklund, O., "Measuring Lubricant Film Thickness with Image Analysis," *Proc. Instn. Mech. Engrs. J.*, 208, pp. 199-205, 1994.
6. Bair, S., "The Shear Rheology of Thin Compressed Liquid Films," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 216, Part J, pp. 1-17, 2002.
7. Jang, S., "Experimental Study on the Shear Thinning Effects of Viscosity Index Improver Added Lubricant by In-Situ Optical Viscometer," *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 117-124, 2003.
8. Lord, J., Jolkin, A., Larsson, R. and Marklund, 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.