

윤활연구

점접촉 탄성유체 윤활에서의 유막 두께 측정



한국과학기술연구원
선임연구원 안 영 재

1. 서론

기계 요소들의 윤활은 상대 운동시 접촉하고 있는 두 표면을 적절히 떼어 놓아 표면들의 접촉을 방지함으로써 가능하다. 즉, 윤활은 상대 운동하는 표면 사이에 윤활제에 의한 막(film)을 형성함으로써 이루어지며, 이 윤활막이 하중을 지지하며 동시에 전단력을 견디어 나간다. 따라서, 윤활막의 형성과 윤활막 두께는 윤활 시스템에서 윤활 성능을 나타내는 중요한 결과가 된다.

액체 윤활제의 경우는 유막의 형성과 유막 두께에 관련되는 중요한 물성치는 점도이다. 점도가 높을수록 두꺼운 유막이 그리고 점도가 낮으면 얇은 유막이 형성되는 일상 생활의 경험에서 잘 알고 있는 사실이다. 점도를 좀더 깊이 들여다 보면, 점도는 또한 여러가지 외부의 환경조건에 크게 영향을 받고 있는 물성치임을 알수 있다. 윤활유의 점도에 영향을 미치는 변수는 온도(temperature), 압력(pressure)뿐 아니라 전단율(shear rate) 또한 크게 관련한다. 점도가 전단율에 좌우되는 것은 윤활유의 Non-Newtonian 유체 특성에 기인한다. 대부분의 윤활유는 전단율이 증가할수록 점도가 떨어지는 shear-thinning 특성을 갖는다. 실제로 윤활유의 점도측정은 Capillary tube에 의한 측정으로 낮은 전단율하에서 행하여 지므로 실제 윤활 상태에서의 점도를 나타내지 못하고 있다. 같은 점도를 갖

는 윤활유라도 첨가제의 종류에 따라 점접촉 탄성 유체 윤활에서의 윤활 성능의 차이가 있음을 이를 뒷받침한다.¹⁾

기계요소 부품중 기어, 캠, 그리고 구름 베어링등은 Non-conformal 형상을 가지고 있어 접촉시 하중이 극히 적은 접촉면적에 집중하는 탄성 유체 윤활 영역에서 운전이 되고 있다. 집중 하중은 접촉면에 고압을 발생시켜 접촉면에 탄성 변형을 가져올뿐만 아니라 매우 얇은 유막을 가지게 한다. 특히 볼베어링과 같은 점접촉(point contact)의 경우는 1000기압 이상의 Hertz 접촉 압력이 발생되며 윤활유는 또한 10^6 이상의 심한 전단율을 받게 된다. 이 탄성 유체 윤활 상태에서의 점도는 측정하기가 매우 어려우며 따라서 직접 유막 두께를 측정하여 윤활유의 성능을 나타내고 있다.

점접촉 탄성 유체 윤활에서의 유막두께는 $1\mu\text{m}$ 이하의 적은 양으로 매우 측정하기가 어려운 것으로 알려져 있다. 현재 사용되는 측정방법은 X선측정, 가시광선측정, Capacitance측정, 그리고 Conductance측정이다. 본 기고에서는 광간섭(optical interference)를 이용한 Cameron식의 비접촉 유막두께 측정에 관하여 논하며 이론에 의한 탄성 유체 윤활 해석을 실험으로 확인 보완함을 나타낸다. 나아가 가시 광선 측정을 통한 optics의 이해와 기계 system으로의 실제 적용의 예를 또한 보이고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 탄성 유체 윤활(EHL)

탄성 유체 윤활은 매우 작은 접촉면에 고하중이 걸리는 기계 요소의 윤활로 접촉 하중이 접촉 표면에 탄성 변형을 유발하고 탄성변형은 유막 형성에 변화를 주어 압력 발생에 큰 영향을 미친다. 또한 접촉면에서의 고압은 윤활유의 물리적 성질을 변화시켜 엄청난 점도의 증가를 가져온다. 따라서, 탄성 유체 윤활은 유체방정식 Hertz탄성 방정식 및 윤활유의 압력-점도 관계식을 이용하여 이론적으로 해석한다.²⁾

일반적으로 EHL 접촉면은 그림 1과 같이 세 영역으로 나누며 각 영역은 특별한 기능을 행한다. 유입영역(Inlet Region)은 윤활유가 접촉면으로 유입되는 영역으로 유막을 pumping하는 기능을 갖는다. 유입영역을 지나 접촉영역(Hertzian Region)으로 들어간 윤활유는 급격히 증가하는 압력에 따라서 점도가 증가되며 반고체 상태로 접촉영역을 통과한다. 매우 작은 유막과 높은 점도에 의해서 마찰력(Traction)은 접촉영역에서 발생한다. 유출영역(Outlet Region)은 윤활유를 내보내는 영역으로 EHL의 독특한 형상과 압력 분포가 나타난다. 접촉면 형상의 국부적인 감소로 압력의 정점이 생긴다.

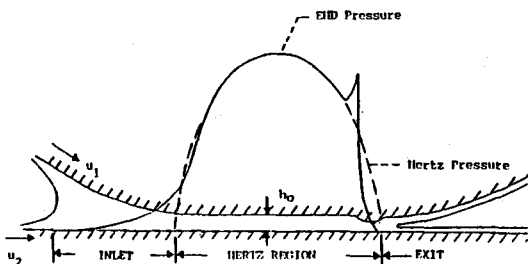


그림 1. Three General Regions of EHD Conjunction

EHL 상태에서의 유막 두께는 다음과 같이 무차원된 계수로 나타낸다.

- 1) 유막계수(Film Thickness Parameter)

$$H = h/R$$

- 2) 하중계수(Load Parameter) $W = W/E'R$

- 3) 속도계수(Speed Parameter) $U = \eta u/E'R$

- 4) 물성계수(Material Parameter) $G = \alpha E'$

여기서

R =접촉표면의 등가 변경 ($1/R=1/R_1+1/R_2$)

E' =접촉표면의 등가 탄성계수

$$\left(1/E = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right)$$

$$u = \text{등가속도} \left(\frac{u_1+u_2}{2} \right)$$

η =대기압에서의 윤활유 점도

α =윤활제의 압력-점도 계수

h =유막두께

w =하중

점접촉에 관해서는 다음과 같은 잘 알려진 해석 결과들이 있다.

$$\text{Hamrock-Dowson}^3) H = 3.63 (1 - e^{-0.68k}) G^{0.49} U^{0.68} W^{-0.73}$$

여기서 k =ellipticity parameter이다.

$$\text{Cheng}^4) H = c (GU)^{m_1} W^{m_2}$$

여기서 c, m_1, m_2 는 접촉면의 ellipticity ratio, a/b (b : 운동 방향축, a : 운동에 수직 방향축)에 의해 결정된다. 예를 들어, $a/b=1$ 인 경우 $c=1.415, m_1=0.725$ 그리고 $m_2=-0.174$ 이다.

이론적 해석 결과에서 보는 바와 같이, 유입영역에서의 물성치, 즉 점도가 접촉면을 통과할때의 유막두께에 매우 중요한 영향을 미친다. 일단, 재질과 작동조건이 정해지면, EHL 유막 두께는 윤활유의 물성치에 관계된다. 그러므로, 윤활시스템의 성능 향상을 위하여 윤활유의 물성치에 관한 연구의 필요성이 강조된다.

2-2 광간섭

탄성 유체 윤활 상태하의 유막 두께 측정을 위하여 광간섭(optical interference) 현상을 이용한다. 이 측정방식은 Cameron등이 사용한 것과 유사한 방식이다.⁵⁾ EHL 접촉은 인조 사파이어 원도우와 베어링용 볼로 구성되며 그 사이의 간격을 윤활유가 떼어놓아 유막을 형성한다.(그림2)

유막두께 h 를 측정하기 위해서는 두 반사하는 빛 I_1, I_2 를 간섭시킨다. 이때 간섭 무늬의 Intensity 분포는 다음과 같이 표시한다.

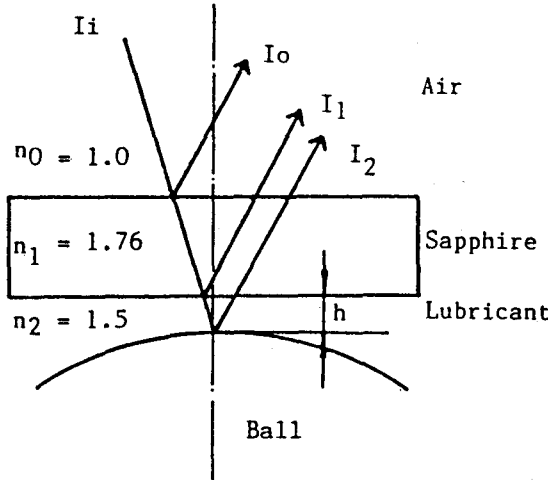


그림 2. Optical System for Film Thickness Measurement

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

간섭 무늬를 선명하게 볼 수 있는 정도를 나타내는 콘트라스트 V는

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = 2(I_2/I_1)^{1/2} / (1 + I_2/I_1)$$

여기서 각각의 기호들은 다음과 같이 정의된다.

I_1 = Intensity reflected from the bottom of a Sapphire Window

I_2 = Intensity reflected from the top of a steel ball

λ = Wave length of incident light

h = Path difference (film thickness)

n = Index of refraction

100%의 콘트라스트를 위해서는 두빛의 Intensity가 같아야 한다. 두표면 사이의 반사율은 다음과 같이 표시된다.

$$R = \left\{ \frac{(n_1 - n_0)}{(n_1 + n_0)} \right\}^2$$

여기서 n_1, n_0 는 두표면 각각의 굴절률을 나타낸다.

기름과 인조 사파이어는 유사한 굴절률을 가지고 있기 때문에 기름과 인조 사파이어에서 반사하는 I_1 은 매우 적다. 반면에 베어링용 볼의 반사율은 60% 정도로 I_2 가 매우 크므로 콘트라스트가 매우 작아서 간섭 무늬의 관찰이 불가능해

진다. 이와 같은 어려움을 극복하기 위하여, 20% 정도의 반사율을 갖는 크로미움을 사파이어 윈도우 밑면에 100Å 정도 코오팅하여 I_1 과 I_2 의 비를 50 : 50으로 만들어 준다. 크로미움은 Vaporization을 통해 사파이어 윈도우 밑면에 증착시킨다. 또한 사파이어 윈도우 윗면에서 반사하는 빛 I_0 의 영향을 없애기 위하여 무반사 (anti-reflection) 코오팅을 사파이어 윈도우 윗면에 행한다.

결과적으로, 간섭무늬의 명암은 I_1 과 I_2 의 위상차에 의하여 결정된다.

Bright Fringe

$$h = \frac{\lambda}{2n_2} \left(k + \frac{\Delta\phi}{2\pi} \right) : k=0, 1, 2, \dots \dots \dots \text{정수}$$

Dark Fringe

$$h = \frac{\lambda}{2n_2} \left(K + \frac{\Delta\phi}{2\pi} - \frac{1}{2} \right) : k=0, 1, 2, \dots \dots \text{정수}$$

$\Delta\phi$ 는 그림 2에서 빛 1과 2의 반사에 의한 위상 전이량을 나타내며 이론적으로 크로미움 코오팅이 없을 경우 π 와 같다. 실제로는 $\Delta\phi$ 값은 크로미움 코오팅에 의한 위상 전이와 반사 표면의 non-flatness에 의하여 영향을 받으므로 정적으로 캘리브레이션되어야 한다. 유체 역학에서는 표면들의 상대 운동이 없는 경우, 유막의 두께를 영(zero)으로 정의함으로 $\Delta\phi = 5\pi/4$ 로 주어진다. 많은 경우, 유막 두께는 간섭 무늬의 가운데 무늬(center fringe)의 명암 변화를 관찰하여 측정한다. 즉, 명암의 변화는 위상차 π 를 의미하고 π 의 위상차는 유막두께 $h = \frac{\lambda}{4n_2}$ 의 변화로 나타난다.

3. 실험장치

탄성 유체 윤활(EHL) 실험장치는 그림 3에 나타나 있다. 이 장치는 기본적으로 EHL 접촉 Simulation 장치, 구동 및 속도조절장치, 마찰력 측정장치 및 간섭 무늬 측정장치로 구성되어 있다. EHL 접촉은 그림 3과 같이 인조 사파이어 윈도우(직경 28.6mm, 두께 12.7mm)와 SKF 베어링용 볼(직경 28.6mm)이 점접촉을 이루고 있다. 볼은 두개의 미니에이취 베어링에 의해서 지지되어 있고 윤활유가 담겨져 있는 컵 안에 1/3 정

도 잠겨져 있다. 점접촉에 여러 가지 최대 Hertz 압력을 주기 위하여 평판의 한쪽 끝에서 dead weight로 하중을 가한다. 볼은 모터로 구동되며 볼의 회전에 의해 윤활유가 점접촉에 의해서 EHL 점접촉부에 끌려들어가며 유막을 형성한다. EHL 점접촉에 사용된 재료의 물성치는 Table 1 과 같다.

Table 1. Mechanical Properties

	Compressive strength (N/m ²)	Young's modulus (N/m ²)	Poisson's ratio
Sapphire window	2.07×10 ⁸	465×10 ⁹	0.047
Steel ball	1.38×10 ⁹	207×10 ⁹	0.030

볼의 구동장치는 1HP 가변속 전기모터와 3 : 1 과 1 : 2의 비를 갖는 pulley에 의한다. 볼의 속도 측정은 구동축에 부착된 톱니 60개의 마그네틱 트랜스듀서가 하며 속도가 디지털 카운터에 나타난다.

간섭무늬는 금속 현미경을 사용하여 관찰한다.

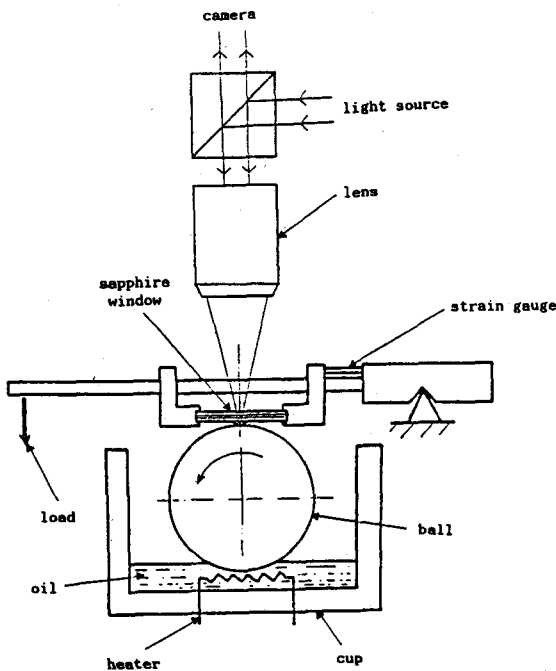


그림 3. Ball/Plate Contact

금속 현미경은 배율 X65의 텔레마이크로 스코우프와 더블 프리즘형의 Beam Splitter, 그리고

side illuminator로 구성 되어 있다. 금속 현미경은 인조 사파이어 윈도우 위에 위치하며, side illuminator에서 나온 입사 광선은 Beam Splitter에 의하여 EHL 점접촉부로 낙사되어 간섭무늬를 만든다. 텔레 마이크로 스코우프의 Working Distance는 약 6 cm 정도이며 CCTV와 연결이 가능하게 만들어졌다.

유막두께 측정시 중요한 물성치는 윤활유의 굴절률이며, 이는 밀도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 윤활유의 굴절률은 EHL 점접촉면 내에서의 Hertz 압력분포, 압력-밀도의 관계, 그리고 밀도와 굴절률의 관계에 의해서 구해진다. 대표적인 밀도와 굴절률의 관계는 Lorenz-Lorenz 식이며 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \cdot \frac{1}{\rho} = \text{Constant}$$

여기서 구한 값의 오차는 200,000psi이상의 고압에서 따라 관계 기름은 1% 이하 정도라고 알려져 있으며, 상수는 대기중에서의 굴절률 n과 밀도 ρ의 값으로 결정된다. EHL 윤활시 Hertz 압력에 의한 굴절률의 변화는 심하지 않다. 다시 말해, 100,000psi의 압력에서 50% 정도의 압력 계산 오차는 4% 미만의 밀도차이를 가져오고 결국 2% 미만의 굴절율과 유막 두께의 차이를 가져온다. 파라핀계 윤활유 (Specific gravity : 0.8-0.9)는 굴절률의 측정이 어려운 경우, n=1.5로 가정할 수 있다.

4. 실험 결과

그림 4는 EHL 점접촉 유막 두께 실험을 인조 사파이어 윈도우 위에서 본 형상이다. 점접촉부위 (contact region)는 가운데 위치하고 있으며, 볼의 회전에 따라 윤활유가 점접촉 부위로 끌려 들어간다. 그림 4에서 보는 바와 같이 점접촉 부위 전면에는 윤활유를 끌고 가는 스틸 볼을 볼수 있다. 점접촉 부위의 고압 발생에 따른 저항으로 대부분의 윤활유 (surplus oil)는 점접촉부위의 둘레로 퍼지며 독특한 형상을 나타낸다. 스틸 볼 표면에 존재하는 소량의 윤활유만이 점접촉 부위로 끌려들어가 윤활막을 형성한다.

현미경은 그림 4의 점접촉 부위를 찾아 포커스

하여 간섭 무늬 형상(interference fringe)의 변화 관찰을 가능하게 한다. 속도의 증가에 따라 유막 두께는 증가하며 이에 따라 형상 모양의 변

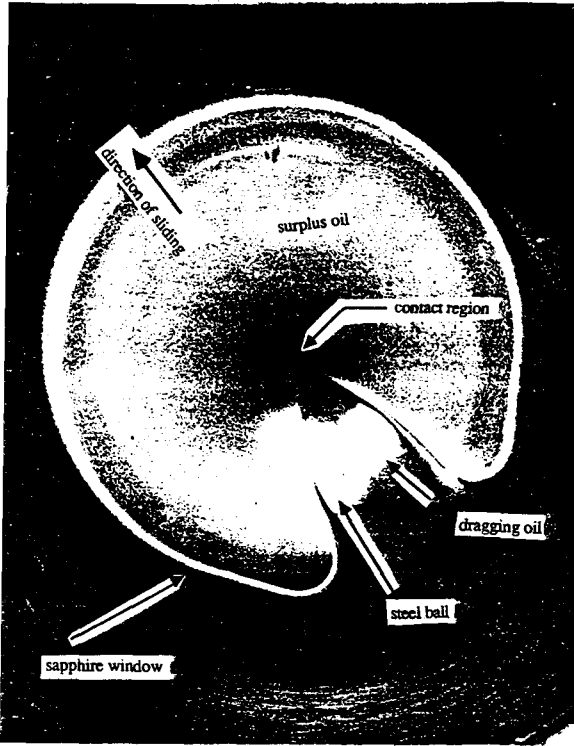
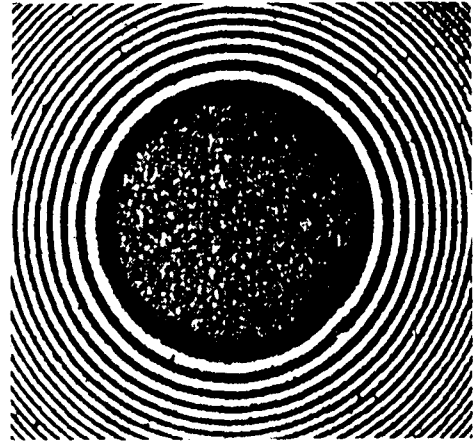
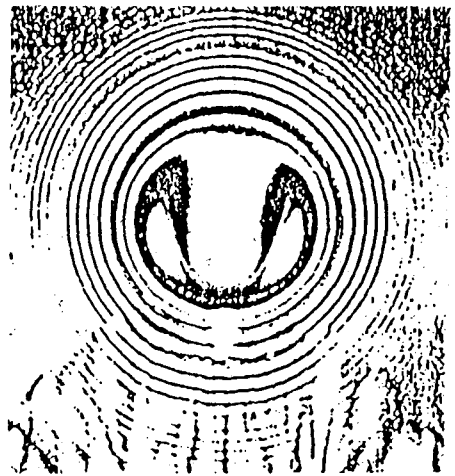


그림 4. Top View of Ball/Plate Contact

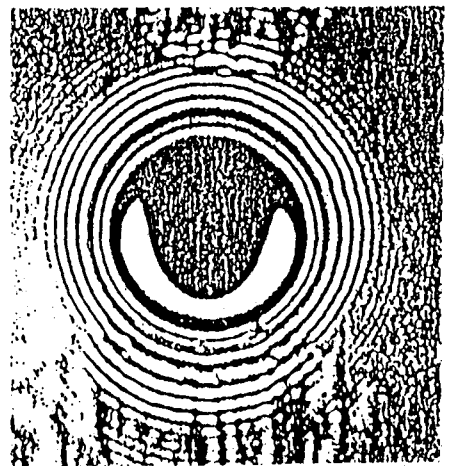
화가 나타난다. 그림 5는 대표적인 EHL 유막 두께 측정을 위한 간섭 무늬 형상의 변화를 나타낸다. 그림 5 (a)는 정지시에 생기는 간섭 무늬로 운전 조건의 변화가 없으므로 거의 완전한 구형의 무늬를 나타낸다. 가운데 검은 부분은 볼의 탄성 변형 부분으로 접촉 부위를 나타내고 있으며 π 의 위상차 때문에 검게 보이고 있다. 옆의 가는 원형의 간섭 무늬도 접촉 부위 밖에서의 볼과 사파이어 윈도우 사이의 거리를 나타내므로 접촉 부위의 형상을 재구성 할수 있다. 속도가 증가함에 따라 유막이 커지며 위상차가 π 가 되면 그림 5 (b)와 같이 가운데 간섭무늬가 희게 변한다. 이때 유막 두께는 위상차에 해당하는 $\lambda/4n_2$ 를 나타낸다. 그리고 속도가 더욱 증가함에 따라 그림 5 (c)와 같이 가운데 간섭무늬는 다시 검게 변하며 π 의 위상차와 이에 따른 유막



(a)



(b)

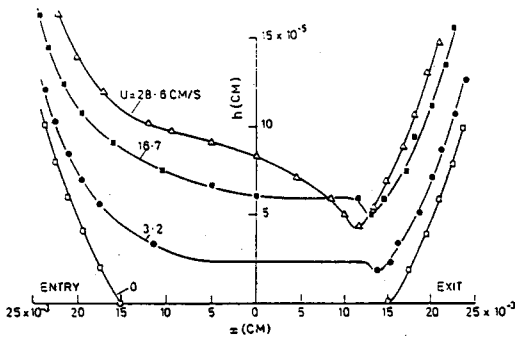


(c)

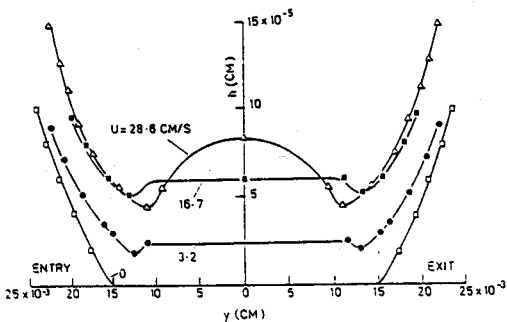
그림 5. Interference Pattern Change due to Film Thickness

두께를 결정한다. 이와 같이, 가운데 무늬의 명암의 반복을 측정하여 최소 유막두께, 즉 탄성 변형 부위의 유막 두께의 증가를 측정할수 있다.

또한 가운데 간섭 무늬를 감싸고 있는 주위의 가는 원형 간섭 무늬 또한 거리의 변화를 나타낸다. 즉 옆 무늬와의 명암의 변화는 π 의 위상차를 나타내므로 가운데 간섭무늬부터의 거리를 측정할수 있다. 그림 6은 이와 같은 방법에 따라서 EHL 접촉 부위의 유막의 형상을 재구성한 것이다. 그림 6(a)는 회전 방향으로의 단면도의 경우이며, 속도가 증가함에 따라 최소 유막 두께가 증가함을 보이고 있다. 특히 유출 영역에서의 돌출부가 관찰된다. 그림 6(b)는 EHL접촉 부위를 앞에서 본 그림으로 좌우 대칭형이며, 윤활유의 압력 발생에 따라 중앙 부분이 크게 변형되어 있음을 알 수 있다. 이같은 형상은 EHL접촉 변형의 대표적인 형상으로 발굽 형태(horse shoe)



(a) Profile in the direction of sliding



(b) Profile across the direction of sliding

그림 6. Film Profile on Steel Ball and Diamond Plate 16 lb load and 40 poise oil viscosity at 22C

를 나타내고 있다. 이와 같이, 광간섭 원리에 의하여 $1\mu\text{m}$ 이하의 최소 유막 두께와 유막 형상을 측정할수 있다. 이는 역으로 고압, 고전단률 상태에서의 윤활제의 유막 발생 능력과 이와 관련된 점도를 역으로 계산할 수 있음을 의미한다.

EHL 윤활 상태에서는 최소 유막 두께가 매우 중요한 성능 결과이다. 그림 7과 그림 8은 윤활유의 일정 하중에서의 속도의 증가에 따른 유막 두께의 변화를 실험적으로 측정한 것이다. 실험에 사용된 두 윤활유의 물성치는 Table 2와 같다. 우선, 하중의 증가에 따라서 유막 두께가 감소하는 일반적인 경향을 보인다. 점도가 높은 HVI-650 오일이 SAE 10 오일보다 큰 두꺼운 유막을 가짐을 알 수 있다. 그러나, SAE 10 오일은 같은 속도에서 HVI-650과 비교해 매우 작은 유막이 형성됨을 발견할수 있다. 즉, $V=0.5\text{m/s}$ 에서 SAE 10 오일의 경우는 $0.08\mu\text{m}$ 이며, 그리고 HVI-650 오일의 경우는 $0.6\mu\text{m}$ 이다. $0.08\mu\text{m}$ 의 유막은 metal to metal 접촉을 의미한다. 이는 점도 자체의 차이에다 윤활유가 심한 접촉하중에서도 접촉부위에 얼마나 들어가느냐 하는 유입 영역의 생성 능력이 또한 유막 두께 형성에

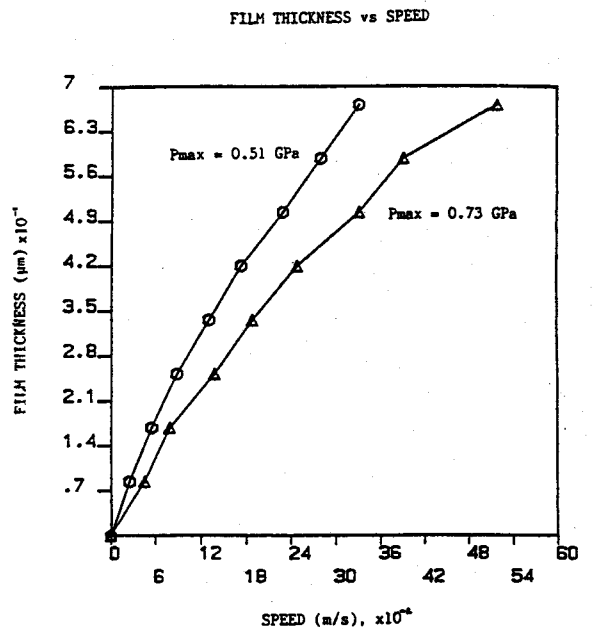


그림 7. EHD Film Thickness of HVI-650 at Various Maximum Hertzian Pressures

큰 차이를 보이는 원인이다. 볼의 회전에 의한 윤활유의 공급의 경우는 윤활유의 능력에 따라 쉽게 fully flooded 조건에서 starved 조건으로 바뀌며 유막의 형성이 어려워 진다.

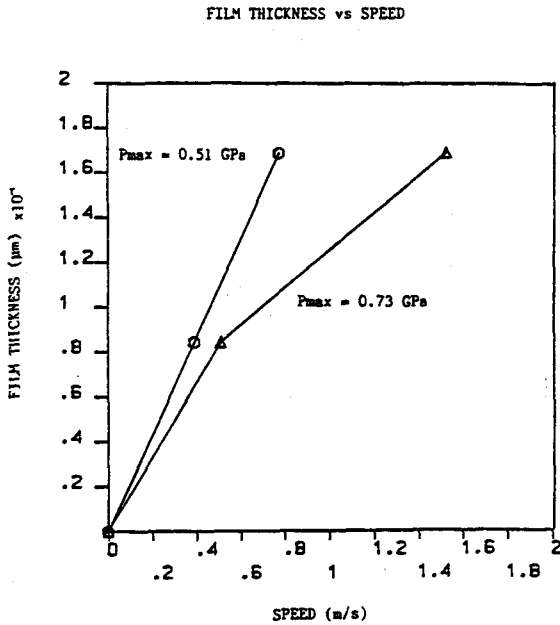


그림 8. EHD Film Thickness of SAE 10 Engine Oil at Various Maximum Hertzian Pressures

Table 2. Properties of Tested Lubricants

sample	base	kinematic viscosity (cSt)		viscosity index	specific gravity	flash point (C)	pour point (C)
		40C	100C				
HVI-650	mineral	418.2	32.0	96.5	0.92	322	-10
SAE 10	mineral	26.5	5.0	100	0.87	210	-12.5

이상과 같이 광간섭에 의한 유막 두께 측정은 윤활유의 성능뿐만 아니라 윤활유의 공급 조건 그리고 이에 따르는 최적 윤활유 설계 및 선정에 도움을 준다. 마찰력 측정을 같이 병행함으로써 또한 윤활유의 Fuel Economy를 측정할 수 있다. 유막 발생 능력과 마찰력을 동시에 측정할 수 있는 것이 이 광간섭 점접촉 EHL 측정 장치의 최대 장점이다.

5. 결 론

캠, 기어 및 구름 베어링등과 같은 기계 요소들은 탄성 유체 윤활 영역에서 작동된다. 탄성 유체 윤활은 상대 운동 표면들이 집중하중을 받으므로 매우 조건이 심한 윤활 상태이며 윤활이 제대로 되지 않으면 쉽게 기계 요소들이 마모되어 제 기능을 발휘하기 어려울 뿐만 아니라 파손으로 까지 이어진다. 기계 요소들의 성능 신뢰도의 향상과 마모 및 파손 감소를 위해서는 윤활의 최적화를 피해야 하며, 이를 위해 기계 요소들의 윤활 성능을 정밀하게 측정할 필요성이 증대된다. 탄성 유체 윤활에서의 윤활 성능은 유막두께, 마찰 손실, 온도상승 및 상대운동 표면의 손상으로 대변된다.

본 기고에서는 점접촉 EHL에서의 유막두께를 측정 할수 있는 광간섭 측정 장치에 관하여 설명하였다. 광간섭 장치는 유막 두께 뿐만 아니라 같은 원리로 많은 sub-micron에서의 측정을 수행하고 있다. 최근 LASER의 발전에 따라서 간섭 능력이 뛰어나고 파워가 좋아져 정밀 두께의 측정에 optics가 이용되고 있다.

Michelson interferometer나 Laser Doppler Velocitimeter 등은 대표적인 예이다. 앞으로 정밀 기계 산업의 발전에 따라서 sub-micron 이하의 측정은 그 수요가 크게 증가할 것이며 따라서 optics의 이해와 이의 기계 system의 적용이 앞으로 큰 연구 과제이다.

참 고 문 헌

1. J. L. Lauer and Y. J. Ahn, STLE Trans., 31, 1, pp 120 - 127 (1989)
2. D. Dowson and S. R. Higginson, Elastohydrodynamic Lubrication, Pergamon Press, Oxford, 1966
3. B. J. Hamrock and D. Dowson, Trans. ASME, J. Lub. Tech., 99, pp 264 - 276 (1977)
4. H. S. Cheng, Trans. ASME, J. Lub. Tech., 92, pp 155 - 162 (1970)
5. R. Gohar and A. Cameron, Trans. ASLE, 10, pp 215 - 225 (1967)
6. M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford, 1980