

O/W Emulsion의 潤滑特性에 관한 연구

李奉九* · 池昌憲* · 蘇秉殷** · 柳基郁**

*圓光大學校 工科大學

**圓光大學校 大學院

A Study on the Lubricational Characteristics of the Oil-in-Water Emulsions

Bong Goo Rhee, Chang Heon Ji, Byung Un So, Ki Uk Yu

*College of Engineering, Univ. of Won Kwang

**Graduate School of Won Kwang University

Abstract—The Lubricational characteristics of O/W Emulsions of beef tallow and mineral oil based lubricants are studied in a roller on disk apparatus. It is revealed that the coefficients of friction with both emulsion lubricants exhibit essentially similar behavior; that is, they rapidly decrease to 0.1% concentration and after they constants with increasing oil concentration, and that, with oil in water emulsions of a concentrations as low as 5wt% practically forms a elastohydrodynamic film.

One hand, surface temperature effect on lubricants has virtually no severe, and that, the minimum EHL film thickness estimated that it begins to increase at a concentration of several percent; the effect of particle diameter becomes made there after.

1. 서 론

1-1. 연구배경

摩擦의 문제는 접촉면의 상태, 마찰열에 의한 潤滑油의 점도 변화, 사용 潤滑油와 운전조건 등 여러가지 조건에 의한 상태 변화로 인하여 기계의 효율 뿐만 아니라 소요동력의 절감 등 에너지 절약에도 아주 큰 영향을 미치고 있다. 따라서, 이러한 접촉부에서 윤활을 통한 마찰의 문제를 해결하려고 하는 노력이 Frenkenheim[1] 이후 연구되어 오고 있으나 아직도 본질적인 문제가 해결되지 않고 있다. 특히 기계가공에서의 소성 변형열 및 절삭열, 냉간압연에서의 발생열 등 높은 열이 발생하는 과정에서는 순수한 윤활유(neat oil)만으로는 마찰열을 냉각시키기에 부족하므로 냉각과 윤활을 동시에 만족시켜 줄 수 있는 이멀전(Emulsion, 乳化)상의 윤활제를 사용하게 되는데, 여기에 대한 연구는 많지 않다. 이러한 이멀전의 윤활특성을 규명하려면 접촉면에서 潤滑油膜內的 이멀전 입자의 거동, 마찰

계수와 윤활막의 형성상태, 접촉면의 온도변화, 최소유막두께 등이 규명되어야 한다.

이멀전 입자의 거동에 대해서는 명백히 밝혀지지 않고 있으나, 그 기초적 연구로서 彈性油體潤滑에 있어서 이멀전 입자의 거동에 대한 보고가[2] 있다. 마찰계수에 대하여는 그 특성을 일찌기 역학적으로 설명하려는 시도가 Newton 粘性을 전제로한 해석으로부터 시작하여 非線形 Maxwell Model을 이용한 粘彈性體로서의 해석 등 합리적인 이론이 제시되고 있다[3]. 특히 冷間 壓延에 있어서 traction 특성을 통한 연구보고[4]가 있으며, 마찰계수에 미치는 인자들에 관한 연구[5]도 보고된 바 있다. 또한 윤활특성을 연구하는데는 윤활상태를 정확히 판단해야 할 필요성이 있는데 여기에 Beecke[6] 등은 전기저항법을 이용하였고, 이외에 X-선 투과법, 광 간섭법 등을 이용한 연구보고[7]가 있으며, 최근에는 열적효과를 고려한 윤활유의 점성과 압력-온도의 의존성에 관한 해석[8] 등이 발표되고 있다.

한편 구름베어링이나 기어 등에서 나타나는 구름접촉

부를 윤활유의 존재하에서 운전하면, 고체면의 국부적인 彈性變形 때문에 비교적 두꺼운 윤활막이 형성되어 소위 流體潤滑상태가 된다. 그런데 윤활유보다도 粘度가 낮은 W/O(油中水型) Emulsion을 윤활제로 사용하는 경우에도 고체면 사이에는 油相만이引進되어 이 멀전 자체의 성질로부터 예상된 것보다도 두꺼운 윤활막이 생성된다고 알려지고 있다[9, 10]. 또 O/W(水中油型) Emulsion을 사용한 강판의 냉간압연에 있어서도 같은 현상이 나타남을 접촉전지저항의 측정에 의해 定性的으로 나타낸 것도 있다[11, 12].

이와같은 현상이 발생하는 기구로써 木村 등은 고체의 표면간에 끼어있는 油滴이 그 곳에 trap되어 간극의 감소에 따라 물만이 배제된 결과 이멀전의 농도가 증가된다는 가설을 세워 기름의 連續相이 형성된 점을 압력경계로하는 일종의 Starved lubrication의 문제로서 이것을 해석하려고 하였다[12]. 이 가설은 牧野 등의 光學的 관찰결과[13]와도 의외로 일치하였다. 또한 李奉九 등은 이 가설을 기초로해서 X線透溫法에 의해 O/W Emulsion의 유막두께를[14] 측정하여 위의 결과와 비교를 시도하였다.

이상과 같은 연구배경을 통하여 볼 때 O/W Emulsion 윤활특성에 대한 연구가 있었으나 거의 단편적이며, 특히 이론을 뒷받침할 실험적 결과가 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 EHL을 Model化한 roller on disk 형 선접촉마찰 실험장치를 제작 이용하고 대표적인 윤활제인 鐵油와 牛脂를 사용하여 O/W 이멀전을 조정하고, 이멀전의 농도변화에 따른 마찰계수, 접촉전지저항, 마찰전후의 온도변화 등을 측정하고 starved lubrication 이론에 의한 最小油膜 두께를 계산하여 전반적인 윤활특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험

본 연구를 하기 위하여 실제제작된 실험장치는 壓延潤滑을 Model化한 roller on disk 형 시험기로서, Fig.1에 본 실험장치의 개략도, Fig.2는 실험장치의 외관사진이다.

실험장치의 중요부분으로서는 試驗部, 測定部, 給油部, 動力傳達裝置로 되어 있다.

동력전달장치는 100V-400W의 직류 motor(0~4,000 r.p.m.까지 가변)를 이용하여 驅動力을 발생시켰으며, timing belt를 통하여 동력이 disk에 전달된다.

시험부는 disk와 roller로 구성되어 있으며 disk와

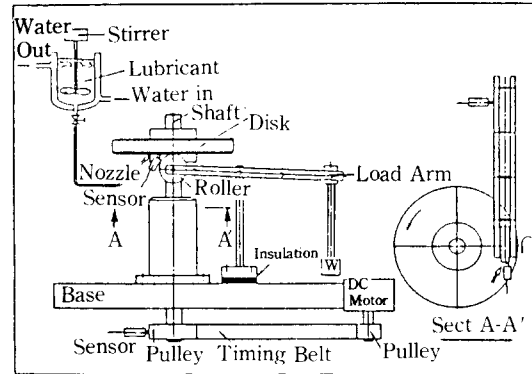


Fig. 1. Schematic diagram of roller on disk apparatus.

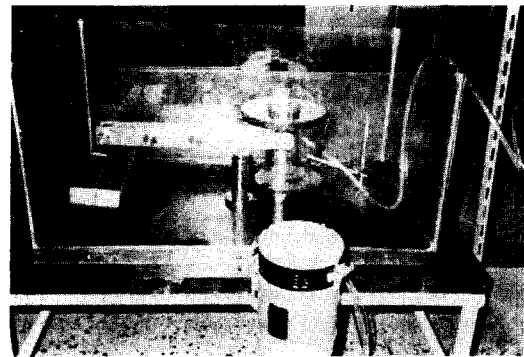


Fig. 2. Photograph of experimental apparatus.

roller의 재질은 S45C, 表面硬度는 Rc 60, 表面粗度는 Ra 0.1~0.15 μm 이다. Disk의 직경은 200 mm, 두께 15 mm이며 roller의 직경은 50 mm, 폭은 20 mm이다.

roller는 하중 lever에 의하여 지지되고 있으며 load cell을 부착시켜 roller와 disk 사이의 마찰력을 측정하였고 여기서 나온 strain 값을 amplifier에서 증폭시킨 후 pen recorder와 multimeter에 연결하여 기록 측정하였다.

시험부에 작용하는 하중은 지레대의 원리를 이용하여 하중 lever에 50 kg의 하중을 가하면 시험부에 150 kg의 하중이 작용하도록 하였다. 그리고 disk와 roller간의 마찰 전후 시험부 표면의 온도변화상태를 측정하기 위하여 oil 공급 nozzle 직후의 disk 표면과 disk와 roller의 마찰면 직후의 disk의 표면에 disk와 0.02 mm의 gap을 두고 비접촉 temperature probe를 설치하였다.

또한 disk와 roller의 마찰면 사이에서 형성되는 유막의 형성상태에 따라 판단하는 윤활영역을 이멀전의

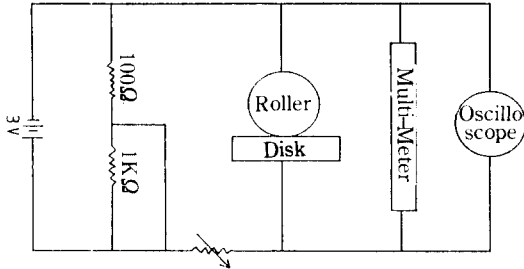


Fig. 3. Schematic diagram of resistance circuit.

농도 변화에 따라 확인하기 위하여 Fig.3의 接觸電氣抵抗回路를 roller와 disk 사이에 설치하였으며, 이때 나오는 출력 전압의 변화값을 oscilloscope와 pen recorder에 기록하므로써 潤滑영역을 판단하였다.

試驗油의 공급은 실험장치의 2m 상부에 설치된 항온조 tank에서 하며 homogenizer에 의해 교반된 시험유가 일정 온도를 유지하도록 한 뒤 位置水頭를 이용하여 disk 밑면에 설치된 nozzle에 의해 disk와 roller 사이의 마찰면에 공급되도록 하였다. 이때 공급되는 시험유의 양은 약 200 cc/min이다. 그리고 disk의 회전수 측정에는 tacometer와 stroboscope를 이용 측정하였다. 실험은 일정한 작용하중과 disk의 원주속도하에서 이물질의 농도 변화에 의한 disk 사이의 마찰력 측정, roller와 disk 사이의 전기접촉저항측정, roller와 disk 사이의 마찰 전후의 표면 온도를 측정하였다.

3. 潤滑劑

供試油로서는 鑛油 M₀와 精製牛脂인 T₀를 사용하였으며 鑛油는 paraffin系市販用이며, 精製牛脂는 수입품으로서 脂肪酸組成은 palmitin acid 26.7%, stearic

Table 1. 供試油의 性狀

略號	T ₀	M ₀	
組成, wt%	精製牛脂	95	-
	鑛油	-	95
	界面活性劑	5	5
性狀	流動點 °C	30.0	-20.0
	動粘度, 10 ⁻⁶ m ² /S@40°C	47.8	30.1
		@ 100°C	8.49
	粘度指數	157	97
	全酸價, mgKOH/g	0.03	<0.01
	鹽化價, mgKOH/g	192	0
E. S. I (5%Emulsion)	0.90	0.88	
平均粒子徑 (40°C)	2.88	2.85	

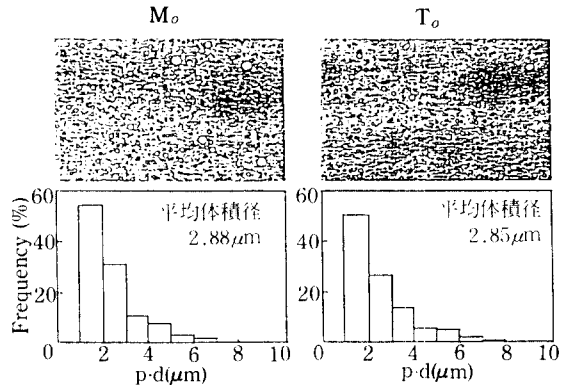


Fig. 4. Photomicrograph of the emulsion and its particle size distribution.

acid 21.5%, oleic acid 48.5%, 기타 3.3%로 되어 있다. 그의 性狀은 Table 1과 같다.

界面活性劑는 5wt% POE nonylphenyl ether로써 H.L.B值 13.3을 사용해서 O/W 이물질의 안정성을 갖추었다. 농도 5t% 이물질의 E.S.I 측정결과는 0.88~0.90 정도였다.

한편 이물질의 조성은 40°C의 증류수에 일정량의 供試油를 넣고 homogenizer에 의해 회전속도 8000 r.p.m으로 1분간 교반하여 乳化된 것을 사용하였다. 여기에 5wt% 이물질의 사진 및 粒經分布를 Fig.4에 표시하며, 이 상태에서의 油滴平均徑은 鑛油가 약 2.85 μm, 牛脂가 2.88 μm 정도였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 摩擦係數

Fig.5는 Neat油와 Emulsion을 사용해서 실험한 disk의 회전속도와 마찰계수의 관계를 나타낸 기록지의 일부이며, (a)는 Neat油의 경우, (b)는 5wt% Emulsion의 경우이다. 여기에서 보면 Neat油와 Emulsion이 전반적으로 유사한 양상을 나타내고 있으나, neat油는 disk의 회전속도가 감소함에 따라 증가하는 마찰계수의 증가폭이 속도변화에 따라 큰 변동을 나타내지 않지만, Emulsion의 경우에는 그 폭이 크게 나타난다. 그러나 disk의 회전속도가 어느 일정 속도에 이르면 그 이상의 속도에서는 Emulsion의 경우가 오히려 안정된 마찰계수를 나타낸다. Fig.6는 Emulsion 농도변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 이때 시험부에 가해지는 하중은 150 kg/cm², roller의 회전속도는 1500 r.p.m이다. 그림에서, E_u

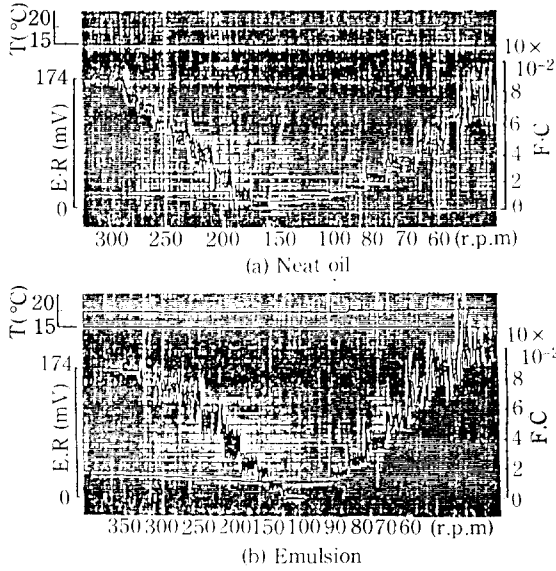


Fig. 5. Photographs of frictional characteristics.

Emulsion 농도 0에서 0.1 wt%까지는 마찰계수가 급격히 감소하는데, 이 현상은 농도 0 wt%에서는 윤활작용이 전혀 이루어지지 않는 고체 마찰상태로써 마찰계수가 크게 나타났으나 Emulsion 농도가 증가함에 따라 부분적인 윤활상태가 이루어지기 때문에 급격히 감소하는 것으로 판단되며, Emulsion 농도 약 0.1~0.9% 사이에서는 T_0 와 M_0 모두 마찰계수의 변화가 없음을 알 수 있다. 그리고 농도가 1%에서 10%로 증가함에 따라 T_0 의 경우는 吸着力이 우수하기 때문에 마찰계수의 감소폭이 크나 M_0 의 경우는 T_0 에 비하여 吸着力이 떨어지기 때문에 마찰계수의 감소폭이 작은 것으로 판단된다. 또한, Emulsion 농도가 10% 이상으로 증가하여 농도 100% 상태 즉, Neat oil에 이르는 농도 구간에서는 disk와 roller 사이에 완전유체윤활이 이루어지기 때문에 T_0 와 M_0 의 吸着力 차이에 마찰계수의 차이가 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

4-2. 接觸電氣抵抗

윤활상태를 판단하는 것은 윤활특성을 연구하는데 매우 중요한 요소중의 하나이며, 그 방법에는 여러가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 Fig.3에 표시한 전기 저항회로를 이용하여 판단하였다. O/W형 Emulsion은 base가 물이므로 물은 체적저항률이 $10^7 \Omega \text{ cm}$ 정도이고, 윤활유에 비하면 10^{-9} 배 정도밖에 되지 않으므로 完全流體 윤활상태와 固體摩擦상태를 쉽게 판단할 수 있으며 그 결과를 Fig.7과 8에 나타냈다.

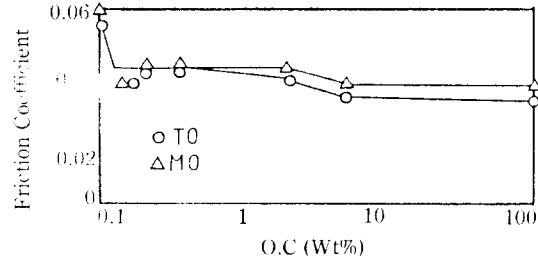


Fig. 6. Coefficient of friction for oil concentration.

Fig.7은 T_0 를 사용한 Emulsion의 경우로서 저농도 Emulsion의 경우 약 1%까지는 접촉전기 저항이 매우 적은 것으로 보아 流體潤滑이 미세한 부분에 국한되어 이루어지는 것으로 판단되며, 농도 1~4% 사이에서는 混合潤滑상태를 나타내고 있다. 그리고 4% 이상에서는 접촉전기 저항회로의 총력 저항이 30Ω 이상으로 완전한 油體潤滑상태를 나타내고 있다.

Fig.8는 M_0 를 사용한 Emulsion의 경우이다. T_0 의 경우와 비슷한 양상을 보이고 있으나, 혼합윤활 영역이 T_0 에 비하여 Emulsion 농도가 약 1~5%구간으로 넓어진 것을 알 수 있다.

Fig.7과 8를 비교해 보았을 때 가장 특징적인 것은 牛脂를 사용한 Emulsion T_0 의 경우 disk와 roller 표면에 吸着狀態가 좋기 때문에 鑛油를 사용한 Emulsion M_0 에 비하여 혼합윤활 영역이 좁아짐을 알 수 있다.

4-3. 表面溫度 변화

disk와 roller의 마찰에 의해 발생하는 마찰열에 의한 표면온도의 측정결과를 Fig.9에 나타냈다.

그림에서 전반적인 온도분포는 牛脂를 사용한 Emulsion T_0 의 경우가 鑛油를 사용한 Emulsion M_0 의 경우보다 표면온도가 높게 나타나고 있다. 이 현상은 牛脂의 경우 吸着性이 좋으므로 disk와 roller 표면에 흡착된 脂肪酸의 열분해로 인한 발열작용 때문에 M_0 의 경우보다 표면온도가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, Emulsion의 농도가 증가함에 따라 disk와 roller의 마찰 표면온도가 증가하는 양상을 보이는데, 이는 농도가 증가하여 점차 流體潤滑이 이루어지기 때문에 점성에 의한 온도 상승으로 해석되며, T_0 와 M_0 의 온도차는 Emulsion 농도가 증가할수록 T_0 와 M_0 의 온도차가 커지는 것을 알 수 있다.

그러나 전반적으로 볼 때 그렇게 큰 차이를 나타내지는 않고 있다.

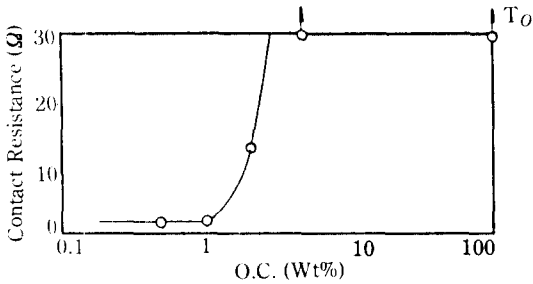


Fig. 7. Contact resistance for oil concentration.

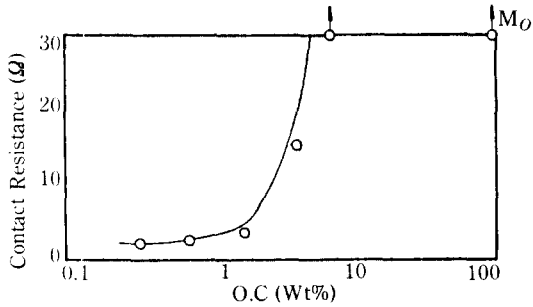


Fig. 8. Contact resistance for oil concentration.

4-4. 最小油膜 두께

Emulsion 을 사용한 경우의 油膜 두께는, 아래의 가정하에서 “Starved Condition”의 식을 적용하여 구하였다[12]. 그의 model 을 Fig.10에 표시하였다. Fig. 10(a)에 있어서 Xd 점은, 기름의 粒徑 d와 막두께 h가 같게 되는 점이다. 이 점에서 기름의 입자가 roller의 표면에 trap 된다고 생각하면, 그 후의 이동에 따라, 두 면간의 間隙이 서서히 작아지므로 물의 相이 배제된다. 따라서 기름만의 連續相이 EHL 막을 만든다. 이 영역에서의 기름의 농도는, 초기치를 C₀로 하면

$$C = C_0 \cdot d/h(X) \quad (1)$$

에 따라서 상승하여, Fig.10(b)에 표시한 바와 같이 X=X_s에서 1.0이 된다. 한편 Fig.10(c)에 표시한 압력관계는 X_s에서 압력이 발생되어 증가하여 Hertz 접촉부의 중앙부에서 최고가 된다. 이 X_s를 압력의 경계로 보아, 다음식[15]을 적용한다.

$$h_{cs} = h_{cf} \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left\{ 1.37 \left[\frac{b^{1/3}(X_s - b)}{(2Rh_{cf})^{2/3}} + \frac{1}{2} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

여기서 h_{cf}는 “fully flooded condition”에서의 중앙부의 유막두께로 Dowson의 修正式을 사용하였으며 R는 roller의 reduced radius, 2b는 Hertzian line contact half width이다.

또, h_c를 평행부의 유막두께로 할 때의 식 (1)에 있

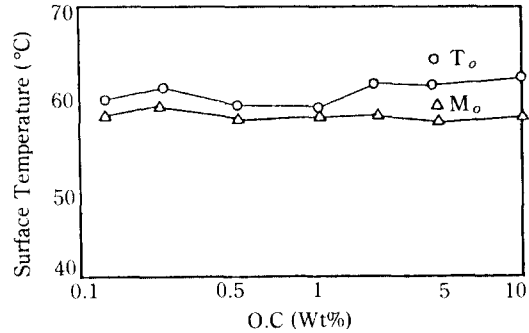


Fig. 9. Surface temperature for oil concentration.

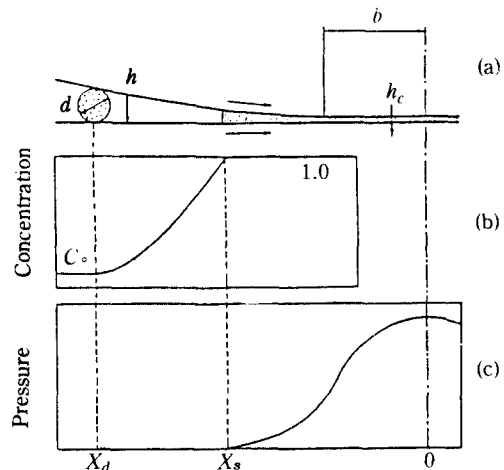


Fig. 10. Hypothetical model of inlet region.

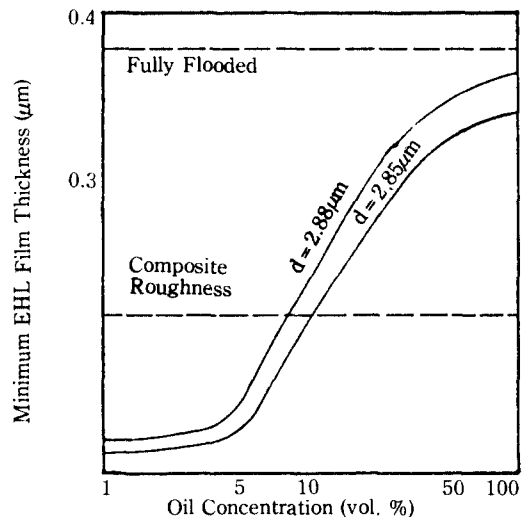


Fig. 11. Predicted minimum film thickness.

어서 h(x)를, 다음의 Hertz equation 식으로 얻어진 다.

$$h = hc + 2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) p_{max} b \left\{ \frac{X}{b} \left(\frac{X^2}{b^2} - 1 \right)^{1/2} - \ln \left[\frac{X}{b} + \left(\frac{X^2}{b^2} - 1 \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (3)$$

여기서 ν 는 Poisson ratio, E는 young modulus, P_{max} 은 maximum Hertzian pressure 이다.

계산은 먼저 식 (3)의 hc에 적당한 값을 주고 $h(x)$ 를 산출한다. 다음에 식 (1)에 의해, 주어진 $C_{o,d}$ 에 대하여 $C=1.0$ 이 되도록 Xs의 위치를 결정하여, 식 (2)에 의해서 hcs을 구한다. 이렇게 하여 구해진 hcs를 새로운 hc로 하여 식 (3)에 대입하여 반복계산을 행한다. 이렇게 구한 결과를 plot 한 것이 Fig.11이다.

여기에서 roller와 disk의 表面粗度の 합을 약 $0.25 \mu m$, 그리고 完全油膜이 형성될 수 있는 충분한 기름의 공급이 되는 경우 최소 유막두께를 $0.4 \mu m$ 정도로 보았을 때 이물질의 농도가 5wt% 정도까지는 거의 일정한 유막을 형성하나 그 이후에는 농도의 증가에 따라 큰 폭으로 유막두께가 증가됨을 알 수 있다. 또한 이물질 입자경에 따라서는 粒徑이 큰 것이 유막의 두께가 커진다는 이론에 적합하다는 결과를 나타낸다.

5. 결 론

이상과 같이 roller에 disk형 선 접촉마찰 실험장치를 이용하여 牛脂와 鑛油를 사용한 O/W型 Emulsion의 윤활특성을 실험분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 농도 0.1wt%까지 마찰계수는 급감소한 후 일정하며, 그 이후에는 牛脂가 鑛油보다 낮아진다.
2. 牛脂가 鑛油보다 吸着力이 좋기 때문에 혼합윤활 영역 폭이 좁으며, 유막의 형성 Emulsion 농도는 어느 경우든 5wt% 이상이다.
3. 마찰 표면온도는 농도에 거의 무관하며, 吸着力이 좋은 牛脂의 경우가 鑛油보다 높다.
4. EHL의 최소 유막두께는 Starved Condition의

식에 얻어질 수 있으며, 이는 이물질의 농도와 particle diameter에 의해 결정되어진다.

후 기

이 논문은 1987년도 문교부 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. S. Frenkenheim "Ann. Physik u. Chem (Leipzig)" III. 9 (1860) 1.
2. 中原外 "日本潤滑學會 北陸學術大會豫稿集" (1984) 121-124.
3. S. Bair & W. O. Winer "Trans. ASME" F. 101, 3 (1979) 258.
4. 木村外 "潤滑" 28, 1(1983) 67.
5. J. M. Thorp "Proc. Inter Mech. Engrs" Vol. 175, No. 11 (1961) 593
6. O. Beecke, J. W. Givens & A. E. Smith "Proc Roy. Soc", A 177 (1940) 90
7. 相原外 "潤滑" 24, 12(1979), 775-780.
8. 松下外 "31回 塑性加工講演論文" (1980) 475.
9. H. Hamaguchi, et al. "Wear" 43, 1 (1977) 17.
10. G. Dalmaz and M. Godet "Trans. ASME" F. 100, 2 (1978) 304.
11. 木村外 "潤滑" 30, 4(1985) 274.
12. Y. Kimura and K. Okada "Proc. JSLE Intern. Tribology Conf." (1985) 393.
13. 牧野外 "日本潤滑學會創立 30周年 記念 全國大會豫稿集" (1985) 393.
14. 李奉九外 "日本潤滑學會 31周年 記念大會 豫稿集" (1986) 245.
15. D. G. Wymer and A. Cameron "Proc. IME" Vol. 188 (1974) 221.
16. O. Dowson "Proc. IME" 182 (1967) 151.
17. 鄭善謨 "潤滑工學" 東明社(1980).
18. 李奉九 "Tribology 概論" 東明社(1987).