

潤滑考察



境界潤滑 小考

高麗大學校 教授 文 卓 珍

『潤滑의 기초지식에서 빼 수 없는 것이 境界潤滑이며 微視的 현상에서 볼 때 매우 중요한 潤滑현상이기 때문에 잠시 생각을 해서 潤滑지식을 넓히는 것도 의의있는 일이라 하겠다. 여기서는 우선 1950~1960 년대에 이에 관한 연구추세가 어떠한지를 고찰하고 앞으로의 연구가 어떻게 전개할 것인가를 예측할 수 있도록 설명하기로 하겠다.』

序 言

境界潤滑이란 潤滑膜이 單一~數分子의 層으로 된 얇은 膜으로 되어 곳에 따라서는 全層과 全層의 接觸이 생길 수 있는 潤滑을 말한다. 운동에 대한 마찰저항은 金屬표면과 潤滑유체막으로 생기는 shear 및 金屬표면의 微視的인 凸凹부분의 shear에 의하여 생기며 金屬표면과 潤滑劑의 화학적 성질은 이 얇은 膜의 성질과 접촉범위를 결정하는 데 중요하다. 따라서 境界潤滑은 마찰과 마모방지에 있어서 혼돈하기 쉽고 또한 복잡한 문제를 제기시키는 것이다.

境界潤滑에서 표면은 靜的마찰의 성질을 가지며 또한 潤滑劑의 粘性에 관계되며 마모를 감소시키는 潤滑劑의 성능, 즉 油性은 중요한 뜻을 갖는다. 流体潤滑과 境界潤滑의 관계는 그림 1에서 볼 수 있고 마찰과 流膜두께, 혹은 마찰과 油粘度와의 관계를 알 수 있다<sup>(1),(2),(3)</sup>. 그림에서 보인 境界潤滑영역은 복잡한 것으로서 混濁영역, 準流体영역, 半流体영역, 部分流体영역 등이라고 命名하기도 한다. 마찰속도연구에 의하면 마찰계수는 荷重에 무관하고 미끄럼속도에 무관하다고 하지만 초기속도가 0.5cm/sec 부터는 속도에 관계된다는 실험<sup>(4)</sup>도 있다.

境界潤滑영역을 流体潤滑영역으로 생각할 수도 있는데 流膜에서 油粘度가 高压에서 증가되는 것을 Reynold방정식을 풀 때 삽입하면 解에서 이를 알 수 있다.

粘彈流体潤滑 (Elastohydrodynamic Lubrication) 이론은 미끄럼점과 線接觸에 대해 실험적으로 뒷받침된 바 있는데<sup>(5),(6)</sup> 荷重이 수kg, 속도가 1cm/sec 이하에서도 金屬接觸이 없이 미끄럼이 일어난다는 것이다 또 기어(齒車)와 같이 굴림-미끄럼 표면에서도 境界潤滑이라고 생각되는 영역이지만 膜두께가  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  inch 가 됨을 볼 수 있다. 실로 이러한 영역에서는 凸凹接觸이 일어나 마모입자가 생기며 seizure가 일어난다. 따라서 粘彈流体潤滑과 境界潤滑의 区分도 모호한 것이다.

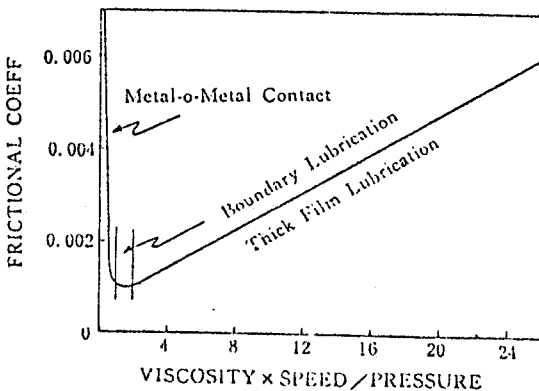


Fig. 1. Stribeck's Data

境界潤滑의 研究方法

境界潤滑현상은 복잡하고 또 특정한 변수를 끄집어 내기란 어렵기 때문에 이를 研究하기란 쉽지가 않다. 그러나 靜的마찰에서 이론을 유 발할 수 있고 그림 2와 같이 半球型의 rider가 Hertz 荷重하에서 平面에 놓여 있는 경우와 같다. 실례로 표 1<sup>(7)</sup>에 52100鋼/工具鋼에서 粘性을 이미 알고 있는 流体들의 靜的마찰계수 ( $f_s$ )를 살펴 보면 粘性和  $f_s$ 와는 일반적인 관계가 없다. 또 다른 실험에서 rider를 低速에서 움직일 때 rider는 彈性的 성질을 가지며 油性이 낮을 때 미끄럼거리에 따라 마찰은 주기적으로 변함을 볼 수 있다.<sup>(8)</sup>

流体潤滑효과를 제거하기 위한 것도 생각할 수 있으며 이 때는 流膜을 數분자층으로 하는

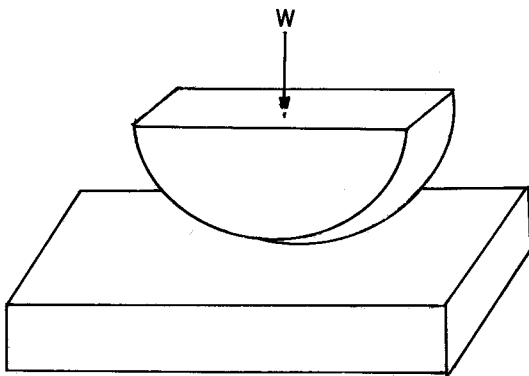


Fig. 2. Spherical Rider on Flat Solid Apparatus

TABLE 1. COEFFICIENT OF STATIC FRICTION OF VARIOUS LUBRICANTS FOR STEEL-STEEL

Lubricant	$f_s$	Viscosity at 20°C Poises
None	0.78	
Decane	0.70	
Butyl alcohol	0.60	
Oleic acid	0.12	
Spindle oil	0.25	0.33
Heavy engine oil	0.22	8.92
Spindle oil and 2% oleic acid	0.17	0.34
Castor oil	0.15	4.73
Lard oil	0.11	0.73

방법이 있다. 효과적인 극성 윤활제를 써서  $f_s$ 의 값이 流膜이 單一층일 때나 다층일 때나 같음을 보여준 실험도 있다.<sup>(9)</sup> 또한  $f_s$ 와 流膜의 忍久性과의 관계로 境界潤滑을 연구할 수 있다. 이러한 실험을 할 때 주의해야 할 것은 流膜형 성전에 윤활되는 표면이 깨끗해야 한다는 것이다. 표면이 오염되었을 때  $f_s$ 의 값이 잘 못 측정되기 때문이다. 주위환경이나 습도의 조절도 오염문제와 연관되며  $f_s$ 측정에 크게 영향을 준다.<sup>(10)</sup> 그러나 현장에서 일어나는 문제에서는 이러한 실험이 맞지 않고 내마모첨가제같은 첨가제를 넣어 極圧시험을 하는 것도 대표적인 실험이 못되는 경우가 많다. 따라서 현장에서는 기기를 움직일 때의 제반 조건, 즉 荷重, 速度, 設計, 材料, 始動頻度등을 잘 파악해서 操業결과가 좋지 않더라도 境界潤滑의 資料를 누적시킬 필요가 있는 것이다.

四球極圧시험은 윤활제실험에서 가장 흔히 쓰이는 방법이며 高荷重에서 여러 速度로 一球를 회전시켜 固定球에 생기는 마찰마모흔을 측정하는 방법이다. 이 방법은 순수한 境界潤滑조건에 접합하며 粘度증가나 접촉부분에서의 高壓으로 인해 생기는 彈性的變形을 무시하는 이론적인 연구에도 도움이 되었다.<sup>(11)</sup>

放射性tracer의 활용도 境界潤滑연구에 도움이 되었는데 마찰되어지는 두 물질중의 하나에 放射性tracer를 tag 시켜 실험한 후 放射性을 측정하므로써 어느 부분이 마모가 되었는지 그 마찰마모기구를 알아내는 방법이다.<sup>(12, 13)</sup> 이 방법은 潤滑劑-固体간의 반응연구에도 도움이 되었으며 미끄럼표면에서 윤활제작용에 관한 반응속도에 기여한 바가 컸다.

표면상태, 즉 硬度, 粗度, 結晶구조, 오염상태, 操業前后的 상태, 접촉범위등도 마찰마모 메카니즘에 중요한 因子가 된다. 이러한 여러 물성은 profile를 측정하는 기기, X선회절, 전자회절, 현미경, 광학적 방법등으로 측정가능하며 境界潤滑연구에 큰 도움이 된다. 순간적인 금속접촉의 접촉저항을 측정하여 금속접촉의 넓이를 또한 流膜상태를 알아내는 방법<sup>(14)</sup>도 있으며 이 때 주의해야 할 것은 流膜사이의 電壓이 0.02볼트만큼이라도 떨어지면 수축에 의한 열효과가 생겨 소위 B-fritting이라고 하는 流膜파괴가 생긴다. 境界潤滑膜이 약 10Å 정도로 얇을 때 소위 electron tunneling에 의해 전기전도가 일어나므로 금속접촉으로 생기는 전기저항값과 구별하기 어렵다는 단점도 있음을 부연해 둔다.

境界潤滑에 영향을 주는 因子

이 문제에 관해서는 아직까지 멋있는 이론이나 설명은 없고 면밀한 실험등을 통해 표면의 화학적인 변화등을 설명하는 것으로 그치고 있다. 또한 마찰과 마모간의 관계도 간단하게 설명되는 관계식은 없다. 마찰이 작다고 해서 반드시 마모가 작다는 것은 아니며 그 동안 마모에 의한 금속입자손실을 계속적으로 측정하기 어려워 마찰과 마모의 문제를 개별적으로 취급했었던 것이다. 금속접촉을 방지하는 流膜의 특성도 X선형광기술등 새로운 방법에 의해 알게 되므로써 流膜과 모체고체간의 상호작용에 대해 많은 연구가 이루어졌으며 境界潤滑과 관계되는 변수를 크게 나누어 두가지로 구분할 수 있다. 그 하나는 操業因子이며, 또 다른 하나는 流体와 固体간의 引力관계이다. 后者의 경우 윤활제의 모체고체에의 물리적 吸着, 그리고 이로 인해 생긴 流膜의 강도 및 流膜의 두께등이 境界潤滑에 영향을 미친다. 이러한 문제는 너무 범위가 넓기 때문에 여기서는 설명을 피하겠다. 前者의 경우 操業時의 제반 조건이 마찰이나 마모에 끼치는 영향을 말하며 操業 분위기, 즉 주위환경의 氣体の 영향, 그리고 溫度의 영향등을 뜻한다. 따라서 여기서는 紙面이 허락되는 범위에서 여러 조건에 관한 것을 설명하기로 한다.

(1) 마찰에 미치는 荷重의 영향

荷重의 영향은 그림 1에서 곧 알수 있듯이 25psi~25,000psi의 넓은 荷重범위에서 Amontons의 법칙을 따른다. 즉 ·

$$F = A_c \cdot \bar{S} = \frac{W}{\bar{P}} \cdot \bar{S}$$

$$f = \frac{F}{W} = \frac{\bar{S}}{\bar{P}}$$

여기서 F는 마찰력, W는 荷重,  $A_c$ 는 접촉면적,  $\bar{S}$ 는 shear stress,  $\bar{P}$ 는 yield stress 그리고 f는 마찰계수를 나타낸다.

wilson<sup>(15)</sup>은 그림 2와 같은 stick-slip장치로 (지름이 0.005cm인 半球型 rider) 마찰을 접촉 저항측정으로부터 알아냈다. 0.1gr 이하의 荷重에서 f의 값은 컸으며 荷重을 증가시킴에 따라 저항도 커지면서 f의 값이 감소함을 알았다. 50gr의 荷重일 때 f의 값은 순수 금속일 때의 값과 같아지며 일정한 값으로 감소됨을 알았으며 境界조건에 가까운 流膜을 형성하여 실제 금

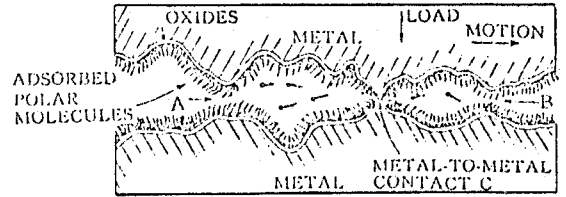


Fig. 3. Boundary Contacts

속-금속접촉이 2%밖에 안됨을 알았다. 이 결과 低荷重일 때 吸着된 流膜은 極性group인 COOH가 금속에 부착되면서 각 표면에 거의 수직으로 배열된다는 것을 알았다. 따라서 slip은 밀접한 流膜의 CH<sub>3</sub>group 사이에서 일어나며 荷重이 증가함에 따라 사슬은 구불어져 거의 표면에 평행으로 배열되어 electron tunneling에 의한 전기전도가 가능해 진다. 긴 사슬의 脂肪酸을 함유하는 윤활제는 이러한 마찰과 荷重의 관계를 갖는다. 二塩基sebacic acid도 같은 경향을 나타낸다. 그러나 脂肪酸에 비해 境界마찰값이 높고 변화가 많아 내마모성은 빈약하다. 그림 3에서와 같이 極性分子的 吸着은 境界潤滑에 좋고 Amontons의 법칙을 잘 설명해 주고 있다. 油性에 관한 실험<sup>(16)</sup>에서 鋼鉄로 구성된 stick-slip 장치로 荷重의 영향을 연구한 바 있는데 荷重을 비롯하여 速度, 溫度, 潤滑油 등 많은 변수와 더불어 마찰에 영향을 준다고 하였으나 그 영향은 극히 미소하였고 油性을 대표할 만한 변수 하나만을 선정하기란 곤란함을 알았다.

(2) 마모에 미치는 荷重의 영향

荷重이 커지면 마모가 많이 생긴다는 것은 일반상식이나 이를 쉽게 나타내는 관계식은 없다. 境界潤滑조건에서 부식膜이 제거되고 또 새로 생기는 과정에서 마모입자를 분리실험하는 일은 어려운 것이다. 기계적인 작용에 의해 마모가 발생하는 것도 여러가지 원인에 의해 생긴다는 것도 명심해야 한다. 금속材料 表面의 粗度, 윤활제, 操業조건등에 따라 결과가 여러가지로 나온다.

粘性이 낮고 無極性인 cetane을 사용해서 粘性효과나 化學吸着효과를 극소화시킨 실험<sup>(17)</sup>에서 다음과 같은 결과가 나왔다.

$$V = K \frac{W \cdot d}{\bar{P}_m}$$

여기서 V는 sliding 거리, d에서 마모되어진 금

속의 파괴,  $W$ 는 荷重,  $\bar{P}_m$ 는 금속의 yield stress,  $k$ 는 상수이다.  $\bar{P}_m$ 이상의 stress에서 seizure는 심하게 일어난다고 하였다. 또한 평형속도는 荷重에 대해 직선함수가 아니라고 하였다.<sup>(18)</sup>

鋼鉄-鋼鉄材料를 써서 平板위에 円錐型的의 끝으로 되어 있는 pin을 실험기로 사용하여 流膜형성이 충분히 될수 있도록 최저速度를 51cm/sec로 유지한 실험에서 荷重의 영향을 측정한 것이 있다.<sup>(19),(20)</sup> 70,000~150,000psi의 높은 stress에서 마모-時間의 곡선을 보면 모두 첫 부분동안은 마모속도가 빠름을 볼 수 있다. 속도는 그후 감소하며 거의 직선형의 마모속도를 보여준다. 그러나 주어진 시간에서의 전체마모는 SAE 20의 광유에 대해서 작으나 앞 式에 잘 맞는 것은 極壓첨가제가 들어간 무색의 광유였다. 이와 유사한 기기와 실험방법을 써서 Robertson<sup>(21)</sup>은 stress 증가에 따라 마모가 증가하나 직선적인 증가속도보다 더 빨리 마모가 일어난다고 하였다. 보다 구체적인 계속적인 실험으로 일정한 stress에서는 첨가제가 들어있는 광유는 마모가 무시할 정도로 작았음을 보여주고 있다. 광유인 경우 금속접촉이 粘彈潤滑膜에 의해 생기며 첨가제가 있는 광유인 경우 粘彈潤滑膜이 境界潤滑膜으로 되면서 금속접촉이 일어난다고 하였지만 이의 결과도 좀더 연구해서 명확히 되어져야 할 것으로 본다.

速度가 마찰에 미치는 영향

일반으로 粘度의 영향이 무시될 때 0.005~1 cm/sec의 속도범위에서는 마찰변화가 작다. 다른 조건들을 생각할 때 마찰은 속도증가에 따라 감소하는데 油性, sliding모양에 연관된다. 速度와 境界마찰과의 관계를 油性이 나쁜 윤활유(무색광유)와 油性이 좋은 윤활유(오래인산 함유)에 대해 실험한 것<sup>(22)</sup>을 소개하기로 하자.

鋼鉄平面에 銅pin이 slide하는 기기를 사용하여 銅입자의 이동을 放射性방법으로 측정된 것이다. 鋼鉄표면은 粗度가 다른 두가지(하나는 c.l.a가 10~30u, 다른 하나는 c.l.a가 1~3u)를 사용하였고 표 2와 표 3에 그 결과를 보였다. 빈약한 윤활제에 대해서 速度가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 취세가 보이며 粗度가 가장 높을 때 가장 마찰이 큼을 볼 수 있다. 좋은 윤활제에 대해서는 速度증가에 따라 마찰계수가 감소하는 취세는 덜 뚜렷했고 표면이 고울 때 마찰이 없음을 볼 수 있다. 즉 粗度가 클 때 마찰력에 의해 질질 끌리는 현상 또는 찢리우는 현상이 일어남을 암시하는 것이고 금속입자가 윤활제에 이동되는 것으로도 알 수 있다. 油性이 좋은 윤활제는 미끄럼速度가 낮을 때 마찰이 커지는 경향, 또는 일정한 마찰을 갖는 경향은 실제 응용에 있어서는 매우 중요하다. 그림 4에 두 종류의 윤활제의 거동을

TABLE 2. EFFECT OF SLIDING VELOCITY AND SURFACE ROUGHNESS ON COEFFICIENT OF FRICTION AND METAL TRANSFER FROM Cu TO STEEL. LUBRICANT : WHITE OIL

Sliding Velocity cm./sec.	Surface Roughness c.l.a. u in.	Load lb.	Metal Transfer 10 <sup>-10</sup> g. Cu/mm.	f
.001	24	4	34,000	.68
.010			31,500	.63
.100			13,600	.50
.300			10,400	.31
.001	10.5	4	17,700	.70
.010			8,560	.61
.100			4,450	.46
.001	1.3	8	175	.15
.010			5.7	.12
.100			3.0	.10
.300			10.0	.10

TABLE 3. EFFECT OF SLIDING VELOCITY AND SURFACE ROUGHNESS ON COEFFICIENT OF FRICTION AND METAL TRANSFER FROM Cu TO STEEL. LUBRICANT : OLEIC ACID

Sliding Velocity cm. /sec.	Surface Roughness c.l. a. u. in.	Load lb.	Metal Transfer $10^{-10}$ g. cu/mm.	f
.001	27	4	18,000	.43
.010			15,000	.37
.100			13,100	.36
.300			7,800	.25
.001	9.4	8	5,000	.23
.001			8,000	.14
.010			3,000	.13
.100			10,000	.23
.001	1.4	8	2.2	.054
.010			2.8	.049
.100			2.1	.060
.300			2.0	.063

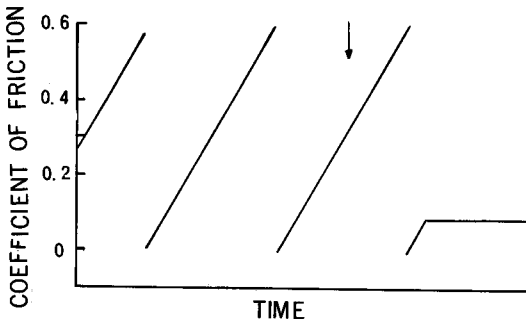


Fig. 4. Friction Variation with Time for cadmium Sliding on Cadmium. Lubricant to Point A White Oil Lubricant Beyond A White Oil and Lauric Acid.

비교하였는데 stick-slip 기기를 써서 Ca平面 위에서 낮은 速度로 sliding할 때의 f의 값과 시간에 대한 그림이다. A점까지는 윤활제는 아주精製된 無極性の 무색광유로서 마찰-속도곡선이 떨어짐을 볼 수 있다. 소위 stick-slip 현상이 현저하며 f의 값은 靜的 값인 0.28에서부터 0.6까지 stick하는 동안 증가했다가 그림에서 표시되어 있지 않지만 낮은 값으로 떨어진다. A점에서는 매우 효과적인 境界윤활제가 표면에 가해져 마찰-속도곡선이 일정, 또는 증가하는 특성을 갖게되며 순식간에 마찰은 0.07에서 감

소하여 일정한 값을 유지하게 된다.

高速에서는 流体潤滑의 기여가 언제나 있다. 流体潤滑과 境界潤滑의 混合潤滑범위에서 마찰은 작아지는 경향이 있으나 高速에서는 증가할 수도 있다. 高速과 高荷重에서 鋼鉄-鋼鉄윤활은 境界潤滑이 지배적이다. 순수한 cetane은 f의 값이 속도가 5~1000cm/sec일 때 비교적 일정하며 1000cm/sec 이상에서는 f의 값은 0.4에서 1.0으로 급승한다. SAE 10광유와 오레인 酸을 쓰면 속도가 5~6000cm/sec일 때 f의 값은 0.10에서 0.06으로 감소한다. 初期 Hertz stress 범위가 126,000~194,000이기 때문에 표면온도는 높고 따라서 약하게 吸着되어 있는 cetane은 이탈되는 것이다. 동시에 高速에서 f의 값을 저하시키는 酸化膜이 표면에 생성되는 작용이 潤滑膜에 의해 음폐되어 둔해진다. 그러나 첨가제가 들어간 境界윤활제는 마찰온도에 의해 粘度가 감소하여 流体潤滑의 기여가 최소가 되지만 境界潤滑膜은 분해되지 않는다.

### 其他 영향

속도가 마모율에 미치는 영향은 표 2와 3에서 잠시 볼 수 있으나 마찰과 마모간의 관계를 특정 system에 대해 간단히 응용될 수 있는 식은 없으며 보통 境界潤滑에서는 마모율은 속도에 무관하다고 한다.<sup>25)</sup>

주위 환경의 영향은 수증기, 산소, 또한 질소 등의 영향이 있으며 Godfrey<sup>(24)</sup>는 특히 산소의 영향, Kislik<sup>(25)</sup>은 질소의 영향을 연구한 바 있다.

온도의 영향은 보통 상식으로 우리가 쉽게 짐작할 수 있으나 메카니즘을 생각한다면 의심나는 점이 많다. 일반적으로 전이온도는 荷重/速度比의 함수로 표시된다.<sup>(26)</sup>

$$W/V = Ae^{E/RT}$$

여기서 W는 荷重, V는 速度, Tt는 전이온도, R은 기체상수, A와 E는 상수이다. E는 Arrhenius 식의 활성화에너지와 같은 뜻을 갖는다.

### 結 言

끝으로 쓰고 싶은 것은 앞서 말한 流体-固体간의 인력작용뿐만 아니라 화학적 작용에 대해서도 고찰할 필요가 있다는 것이다. 즉 첨가제로 첨가는 有機物質과의 반응이나 酸素 수증기 등의 化學反應은 境界潤滑연구에 큰 영향을 주는 것이다. 또한 金屬表面에 관한 固体-固体간의 인력관계도 粗度, 材料등을 중심으로 고찰할 필요가 있으며 위의 化學的인 작용과 機械的인 작용을 모두 취급한 소위 Mechano-chemical reaction도 review 할 기회가 닿기 바란다.

마찰과 마모의 연구로 많은 새로운 理論이 제창되었고 마찰의 기계적, 화학적, 물리적 작용에 관한 연구분야로 새로이 Tribology의 학문이 활발해 진 추세에 본稿가 조금이나마 생각의 여지를 남길 수 있기를 바란다.

### 참 고 문 헌

- 1) Beeck, P., Givens, J. W., and Smith, A. E., Proc. Roy. Soc., A177, 90 (1940)
- 2) Rowe, G. W., Introductory Survey of Lubrication and Wear, Elsevier Publ. Co., Chapt 1 (1967)
- 3) Hersey, M. D., Trans. ASME, 37, 167 (1915)
- 4) Forrester, P. G., J. Inst. Metals, 73, 573 (1947)
- 5) Archard, J. F. and Kirk, M. T., Proc. Roy. Soc., A261, 532 (1961)
- 6) Crook, A. W., Phil. Trans. Roy. Soc., A250, 387 (1958)
- 7) Campbell, W. E. and Thurber, E. A., Trans. ASME, 70, 401 (1948)
- 8) Fein, R. S. and Kreuz, K. L., Lubrication, Texaco Inc., 51, No. 6, 61 (1965)
- 9) Blodgett, K. B., JACS, 57, 1007 (1935)
- 10) Akamatu, H. A., Bull. Chem. Soc., Japan, 13, 127 (1939)
- 11) Klaus, E. E. and Fenske, M. R., Preprint, symp. Div. Pet. Chem., ACS, 1, 58 (1956)
- 12) Liubarski, M. et al, ASME Trans., 12, 285 (1960)
- 13) Furey, M. J, ASLE Trans., 2, 91 (1959)
- 14) Furey, M. J., *ibid.*, 4, 1 (1961)
- 15) Wilson, R. W., Proc. Phys. Soc., B68 625 (1955)
- 16) Barwell, F. T. and Milne, A. A., J. Inst. Pet., 35, 455 (1949)
- 17) Burwell, J. T., and Strang, C. D., J. Appl. Phys., 23, 18 (1952)
- 18) Hirst, W. and Lancaster, J. K., *ibid.*, 27, 1057 (1956)
- 19) Dorinson, A. and Broman, V. E., Trans. ASLE, 3, 176 (1960)
- 20) *Ibid.*, 4, 93 (1961)
- 21) Robertson, W. G., *ibid.*, 8, 91 (1965)
- 22) Grunberg, L. and Campbell, R. B., Proc. I. Mech. E. Conf. Lubn. and Wear, 291 (1957)
- 23) Rabinowicz, E., Proc. phys. Soc., 68, 603 (1955)
- 24) Godfrey, D., ASLE Trans., 5, 57 (1962)
- 25) Kislik, V. A., Trans. ASME, 15, 153 (1964)
- 26) Fein, R. S., Rowe, C. N., and Kreuz, K. L., ASLE Trans., 3, 34 (1960)