

오염된 윤활유가 마멸특성에 미치는  
영향에 관한 실험적 연구

김 해원,\* 홍 재학\*\*

An Experimental Study on the Effect of Contaminated  
Lubricants on Wear Characteristics

H. W. Kim\*, J. H. Hong\*\*

Abstract

To study deleterious effects of contaminants contained in lubricating systems, the effects of fine alumina particle concentration and size on the critical failure load, friction and wear characteristic were examined on boundary lubrication condition using the four ball machine.

The following conclusions are deduced : The abrasive is found to cause a transition from mild wear to severe wear at less severe conditions than with clean oil.

In mild wear region the friction and wear increase with particle size and concentration, but in severe wear region do not exhibit any definite trend. In relation to film thickness there is a threshold of particle size beyond which the failure load no longer decreases with particle size.

Key words

- Abrasive wear(연마마멸)
- Boundary lubrication(경계윤활)
- Mild wear(경마멸)
- Severe wear(가혹마멸)
- Scuffing(소부)
- Load-carrying capacity(내부하능)

\*공군사관학교 기계공학과

\*\*단국대학교 공과대학 기계공학과

### 1. 서론

연마마멸은 단단한 면의 돌기나 단단한 입자의 절삭작용에 의한 마멸로서 건설기계, 수송기계, 광업기계, 농업기계 등 그들이 취급하는 암석, 광석, 석탄, 흙등과 금속재의 입자가 직접접촉하는 것과 같이 수많은 기계의 특징이다. 특히 윤활계통이 미세한 연마입자로 오염되는 경우 기계의 수명을 감소시키고 성능의 저하를 가져온다. 연마입자가 금속표면보다 더 단단하면 표면에 파분혀서 고정입자마멸상태(tow-body wear)가 되며 연마입자가 특정의 힘에 의하여 구속 당하지 않고 금속표면에 대해서 자유로운 자세를 갖는 경우에는 자유입자 마멸상태(three-body wear)가 된다.

오염된 윤활분야의 연구에서 Perrot등<sup>(1)</sup>은 연마입자크기 및 농도에 따라 볼베어링의 %접촉상태를 측정하여 베어링성능을 검토하였고 Loewenthal등<sup>(2)</sup>은 오염윤활유에서 볼베어링의 피로수명은 미세한 여과로 개선됨을 제안하였으며 Tallian<sup>(3)</sup>은 오염된 윤활유에서 수명예측 모델을 입자분포를 고려하여 제안하였고 Beckstrom<sup>(4)</sup>은 페러그래피법을 이용하여 오염에 의한 볼베어링 피로수명을 연구하였다. Fitzimmons등<sup>(5)</sup>은 로울러베어링에서 오염상태의 Contact Fatigue를 연구하였다. Fodor<sup>(6)</sup>은 디젤엔진의 오염윤활유에서 품질좋은 윤활유를 사용하는 것보다 여과효과를 개선하는 것이 윤활유사용시간을 연장할 수 있고 더 경제적임을 밝혔다. Tao등<sup>(7)</sup>은 베인펌프에서 오염에 의한 마멸량과 체적효율의 변화를 연구했다.

이와같은 논문들은 모두 구름접촉에서 접촉면의 손상과 피로수명의 경우에만 해석하였고 미끄럼접촉의 내부가능해석은 하지 않았다.

본 논문에서는 미끄럼 접촉상태에서 내부가능을 검토하기 위하여 얇은 유막 윤활상태 및 경계윤활상태에서 연마입자크기 및 농도가 윤활면의 마찰 및 마멸에 미치는 영향을 연구하였다.

### 2. 윤활영역과 소부

Fig. 1은 Stribeck curve로서 윤활유의 점도 $\eta$ , 속

도 $v$ , 하중 $p$ 의 함수로서 마찰계수와와의 관계를 나타내며 다음과 같은 윤활영역으로 구분된다.<sup>(8)</sup>

- (1) 유체윤활(Hydrodynamic lubrication)
- (2) 탄성유체윤활(Elastohydrodynamic lubrication)
- (3) 혼합윤활(Partial EHD 혹은 Mixed lubrication)
- (4) 경계윤활(Boundary lubrication)

소부 한계에 대해서 경험적인 기준으로서 가장 오래전부터 있었던 것은 하중 $p$ 와 속도 $v$ 의 곱으로써 그 한계를 제공하려고 하였다. 하중과 속도와의 관계가 Stribeck선도의 횡축과 달리 곱의 형태로 되어 있지만 이것은 하나의 열적인 기준이다.

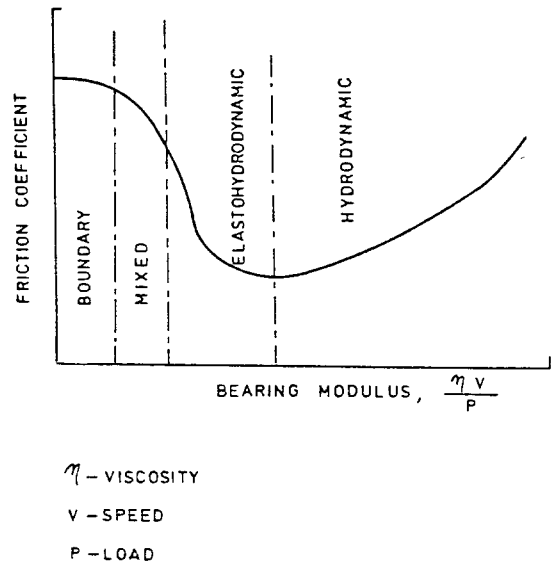
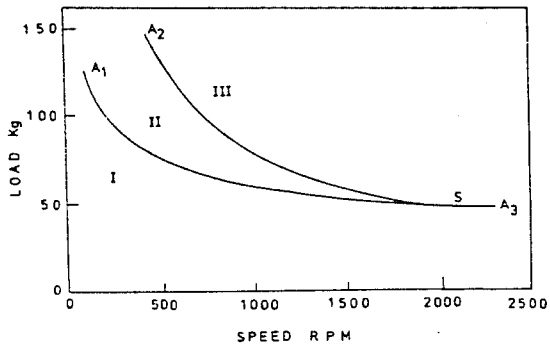


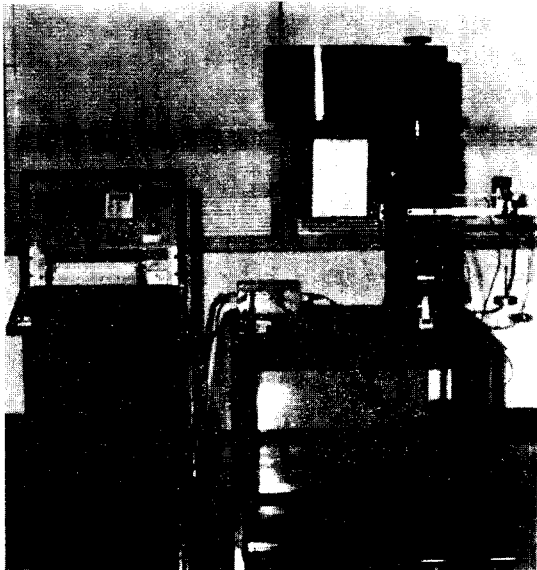
Fig. 1 Lubrication region

Fig. 2는 극압제를 함유하지 않은 윤활유를 사용하여 베어링용강의 점접촉의 윤활에 관하여 Salomon 및 Begelinger등이 발표한 실험결과이다.<sup>(9)</sup>

이것은 미끄럼 속도와 하중을 양축에 취한 평면위에 윤활상태의 구분을 나타낸 것이며 영역 I 이 탄성유체윤활상태, II가 경계윤활상태, 그리고 III이 소부(scuffing) 상태이다. 속도가 낮은 경우에는 먼저 I로부터 II를 거쳐 소부에 이르지만 고속에 있어서는 I로부터 갑자기 III으로 뛰어 오른다고 하였다.



**Fig. 2 Transition curves:**  
 I EHD lubrication  
 II Boundary lubrication  
 III Scuffing (NO lubrication)



**Photo. 1 Four-ball machine**

### 3. 실험

#### 3-1 실험장치 및 재료

본 실험에 사용한 시험기는 영국 Cameron사의 4-ball 시험기로서 3개의 고정강구 위에 1개의 회전강구가 회전하면서 마찰 및 마멸 특성을 측정할 수 있는 것으로 윤활유나 그리이스의 성능시험을 목적으로 사용되는 장비이다. ASTM이나 I.P 규격에 맞게

설계되어 있어 세계적으로 널리 이용되고 있으며 기본구조는 Photo. 1 같다.

강구는 직경 12.7mm이고 재질이 AISI 52100 강인 SKF사의 제품이며 윤활유는 SAE10 (극동웰)를 사용하였으며 그 특성이 Table. 1에 나타나 있다.

연마제는 knoop 경도 2200kg/mm<sup>2</sup> 밀도 4×10kg/m<sup>3</sup>인 알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 사용하였다. 농도는 10, 100, 200mg/l의 3종류로 하고 연마제 입자크기는 10μm이하, 10-20μm, 20-30μm의 3종류로 하였다.

**Table 1 Physical properties of SAE 10 oil (SAE 10)**

Viscosity (cst)	0°C	229
	40°C	26.5
Viscosity index		100
Density at 15°C		0.87
Pour point (°C)		-12
Flash point (°C)		210

#### 3-2 실험방법

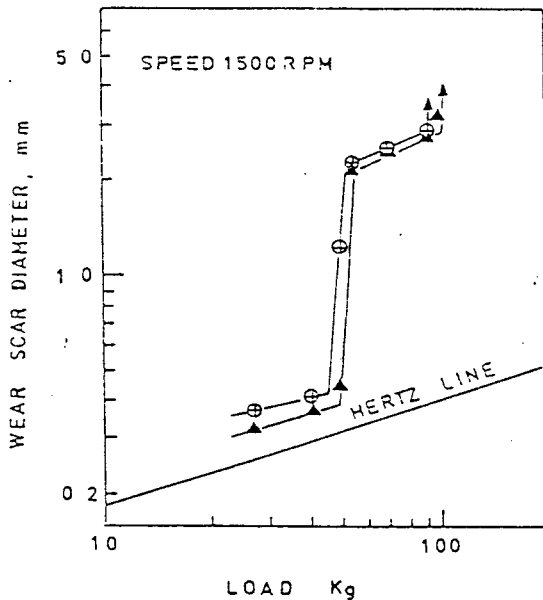
마멸시험방법은 IP239 규격에 준하여 실시하였으며 우선 8ml 윤활유에 주어진 연마입자의 크기와 양을 혼합하여 oil pot에 넣고 각 시험마다 하중을 가하고 60초간 마멸시험을 실시하였다. 경마멸(mild wear)에서 가혹마멸(severe wear)로 천이되는 썸이저(seizure)는 마찰력의 갑작스런 변화로 결정하였다.

**Table 2 Test condition**

load (kg)	Speed (rpm)	Region of lubrication
20	500	I
40	500	I
70	1000	II
70	1500	III

Fig. 2의 윤활영역(I, II, III)에 맞은 시험조건은 Table 2와 같으며 탄성 유체윤활 (I)은 주어진 하중, 속도에서 씨이저(seizure)가 발생치 않은 경우이고, 경계윤활(II)은 주어진 하중, 속도에서 씨이저(seizure)가 발생하고 마찰력이 회복되는 경우로 하였으며, 소부는 그 하중 속도에서 씨이저가 발생되면서 회복되지 않고 계속 진행되는 경우로 하였다.

임계하중(failure load)은 주어진 속도에서 하중을 점차적으로 증가시켜 씨이저(seizure)의 발생으로 결정하였으며 임계속도(failure speed)는 주어진 하중에서 속도를 점차적으로 증가하여 소부가 발생할 때까지 증가시켰다. 실험은 상온(25°C)에서 실시하였고 강구는 매 시험마다 헤파탄으로 세척하고 마멸 직경은 3개의 고정강구의 평균치로 하고 광학현미경으로 측정하였다. 또한 마찰면 및 페로그람에 의한 마멸입자도 관찰하였다.



**Fig. 3** Wear-load curve  
 ▲ clean oil  
 ⊕ oil with 20-30µm, 200mg/l particles

## 4. 결과 및 검토

### 4-1 마찰 및 마멸

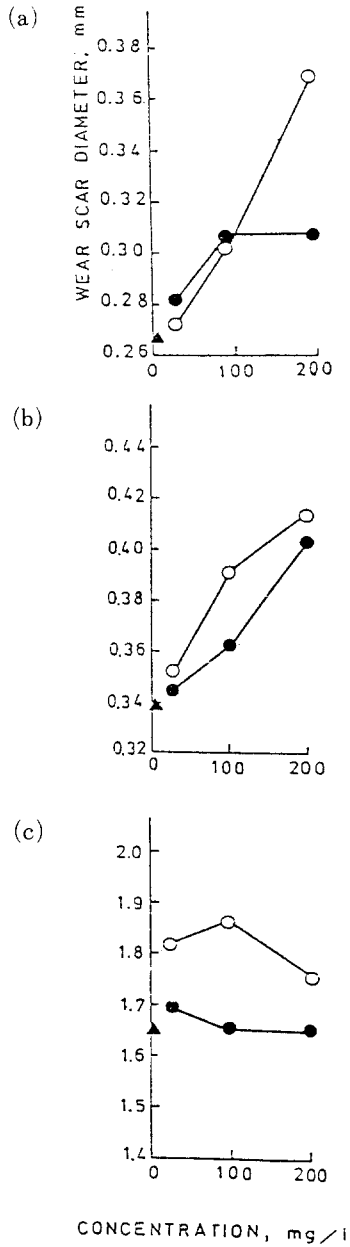
Fig. 3은 마모-하중곡선에 연마입자의 영향을 보여준다. 윤활유가 연마입자로 오염되면 초기 씨이저 하중 (initial seizure load : ISL) 및 용착하중 (weld load : WL)의 감소와 마멸직경의 증가를 알 수 있다. 오염된 경우 마멸직경의 증가원인은 연마입자가 접촉면에 들어가면 연마작용(abrasion)에 의하여 깨끗한 윤활유의 경우보다 더욱 마멸이 촉진되었기 때문이며, 더욱 높은 하중에서는 연마입자가 접촉면에 들어가기 어렵기 때문에 그 연마작용의 영향은 감소된다고 생각된다.

씨이저(seizure)가 발생하면 마멸 직경이 증가되고 따라서 접촉압력은 감소될 것이며 금속적 직접마찰에서 윤활유가 공급되어 경계 윤활 또는 탄성 유체 윤활 상태로 되어 경마멸 상태로 회복되었다. 접촉면에 있는 연마입자는 부가적 마찰열을 발생시키고 깨끗한 윤활유(clean oil)보다 더 작은 하중에서 소부(scuffing)를 일으킨다.

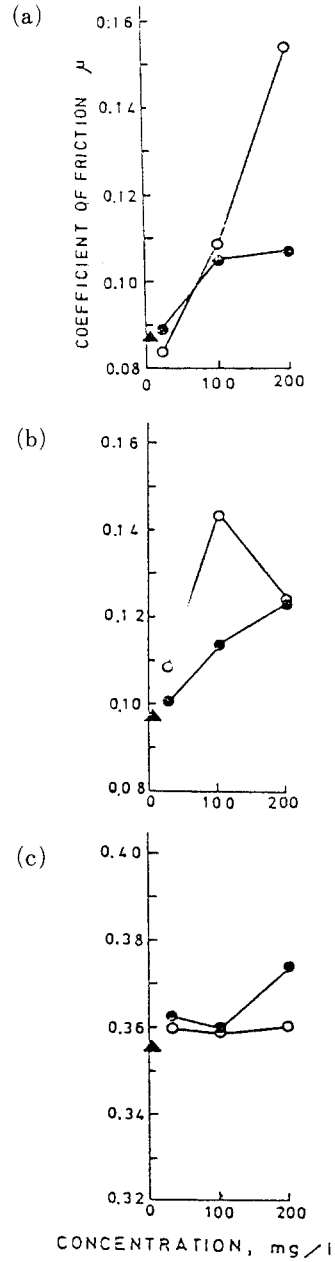
Fig. 4 및 5는 입자농도 및 크기에 따른 마찰 및 마멸특성을 보여 주며 각 실험치는 3회 실험결과의 평균치를 나타낸다. Fig. 4(a)(b)에서 보는 바와같이 탄성유체윤활 연마입자의 크기 및 농도의 증가에 따라 마멸은 증가하고 있으나 그 증가현상은 가혹성의 정도에 따라 달라지고 있으며 하중이 낮을 때 및 입자크기가 작을 때는 농도 증가의 영향이 작다.

그러나 Fig. 4 (c)의 경계윤활 상태에서는 입자의 크기 및 농도의 영향이 거의 나타나지 않았다. 이것은 연마입자에 의한 연마마멸보다는 용착마멸(adhesive wear)의 영향 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 마찰계수를 보여주며, 마멸특성과 비슷하게 나타낸다. 낮은 하중, 속도(탄성유체윤활)에서 마찰계수는 농도에 따라 증가한다. 이것은 Fig. 4(a)(b)의 마멸특성과 일치한다. 보다 높은 하중, 속도(경계윤활)에서는 연마입자의 영향이 거의 나타나지 않는다. Fig. 6은 탄성유체 윤활에서 경계윤활상태로의 천이마찰을 보여주며 입자농도, 입자크기 및 속도증

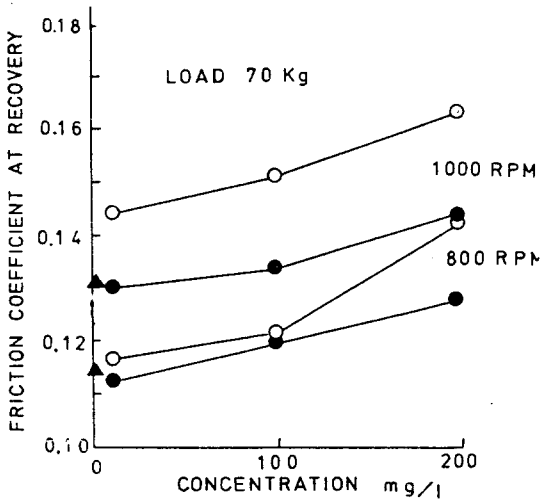


**Fig. 4** Wear scar diameter vs contaminated concentration  
 (a) 20kg, 500rpm (b) 40kg, 500rpm  
 (c) 70kg, 1000rpm, partile size: ● ≤10μm;  
 ○ 10-20μm; ▲ clean oil



**Fig. 5** Coefficient of friction vs contaminant concentration  
 (a) 20kg, 500rpm (b) 40kg, 500rpm  
 (c) 70kg, 1000rpm partile size: ● ≤10μm;  
 ○ 10-20μm; ▲ clean oil

가에 따라 회복마찰계수  $\mu_r$ 이 증가함을 알 수 있다.  $\mu_r$ 는 정상적 경마멸 마찰계수  $\mu$ 보다 크다.



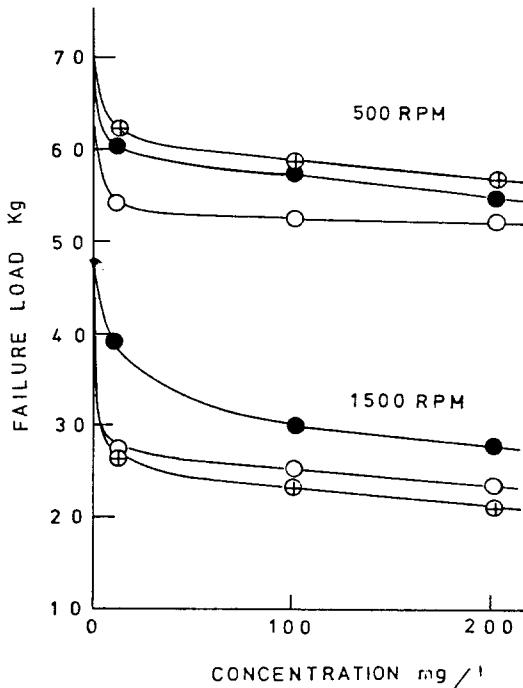
**Fig. 6** Friction coefficient at recovery vs concentration  
 particle size: ●  $\leq 10\mu\text{m}$ ; ○  $10-20\mu\text{m}$ ; ▲ clean oil

4-2 소부특성

하중, 속도 및 온도에 의한 윤활상태에 가혹성(severity)을 증가시키면 씨이저(seizure) 형태의 탄성 유체윤활피막의 파손을 일으킨다. 만약 마찰면이 씨이저(seizurer)로부터 회복되면 경계윤활상태가 나타나며 더욱 가혹성을 증가시키면 경계윤활피막의 파손을 일으키고 소부(scuffing) 및 용착(weld) 현상까지 도달한다.

Fig. 7은 탄성유체윤활의 파손하중에 입자농도 및 크기의 영향을 보여준다. 낮은 농도( $10\text{mg}/\ell$ )에서는 농도에 대단히 민감하다.  $200\text{mg}/\ell$ 의 농도일 때 500rpm에서는 깨끗한 윤활유보다 약 20%감소하였고 1500rpm에서는 50%이상 감소하였다. 농도증가에 따라 임계하중(failure load)은 어느 일정치까지만 감소한다. 일반적으로 임계하중은 입자크기가 증가함에 따라 감소하며 높은 속도(1500rpm)에서 큰 입자( $20-30\mu\text{m}$ )가 임계하중이 가장 낮고 내부하능이 작다. 그러나 느린 속도(500rpm)에서는 큰 입자( $20-30\mu\text{m}$ )

가 임계하중이 가장 낮고 내부하능이 크다. 이것은 저속에서 얇은 유막두께 때문에 입자가 접촉면에 도달치 못하고 입구를 차단하여 입자크기가 증가하여도 더 이상 내부하능의 손실이 없게되기 때문이라고 생각된다.



**Fig. 7** Effect of abrasive particle size and concentration on the critical failure load.  
 particle size: ●  $\leq 10\mu\text{m}$ ; ○  $10-20\mu\text{m}$ ; ⊕  $20-30\mu\text{m}$

즉, 저속에서 얇은 두께와 연마입자 크기를 비교하기 위하여 점 접촉에서 최소 유막두께  $h_0$ 의 계산은 다음과 같다.<sup>(10)</sup>

$$h_0 = R \left\{ -0.255 \left( \frac{W}{E_r R^2} \right)^{\frac{2}{3}} + \sqrt{0.0652 \left( \frac{W}{E_r R^2} \right)^{\frac{4}{3}} + 1.27 \left( \frac{W}{E_r R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\alpha \eta_0 u}{R} \right)} \right\}$$

여기서, R : 등가 곡률 반경  $\approx 6.35\text{mm}$

$$W : \text{강구 1개에 작용하는 하중} = \frac{P}{\sqrt{6}}$$

$$P = 60\text{kg}$$

$$E_r : \text{종탄성 계수} = 2.3 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$$

$\alpha$  : 윤활유의 압력 점도계수

$$\alpha = (0.6 + 0.965 \log \eta_0) \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg}$$

$$\eta_0 : \text{윤활유의 절대점도} = \nu_0 \rho = 25 \times 0.870 = 21.775 \text{centipoise}$$

$$\nu_0 : \text{윤활유의 동점도} = 25 \text{centistokes}$$

$$\rho : \text{윤활유의 밀도} = 0.871$$

$$u : \text{표면속도} = \frac{\pi a n}{30\sqrt{3}}$$

$$a : \text{강구의 반경} = 6.35\text{mm}$$

$$n : \text{회전속도} = 500\text{rpm}$$

계산에 의하여 최소 유막두께  $h_0 = 0.02\mu\text{m}$  속으로

큰 연마입자( $20\text{--}30\mu\text{m}$ )가 들어가지 못할 것이며 그러나 강구가  $8\text{ml}$ 의 윤활유속에 잠겨있는 상태이므로 유막두께가 얇지만 윤활작용에는 지장없는 정도의 두께라고 생각된다. 따라서 저속( $500\text{rpm}$ )에서 얼마 이상의 크기의 입자는 들어갈 수 없는 문턱(threshold)이 있다고 생각되며 입자크기의 상한계가 있다고 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 7에 대한 임계파손평면이다. 각 평면 아래 부분에서는 주어진 속도, 입자크기 및 농도에서 만족하게 작동될 것이다. 이것은 연마입자오염으로 윤활면의 부하능력이 얼마나 민감하며, 씨이저(seizure)의 발생, 각종베어링, 기어, 캠등의 수명을 얼마나 감소시킬 수 있는지를 나타낸다.

외부에서 오염되지 않은 경우에도 작동중 여러번 씨이저(seizure) 및 회복이 발생하여  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와 같은 경한 마모 연마마멸입자가 윤활시스템에 발생하는 경우에도 더욱 중요하다.

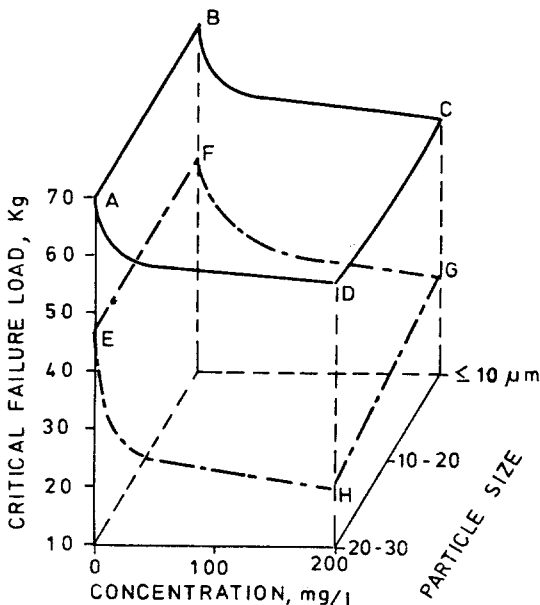


Fig. 8 The critical failure surface.  
Surface ABCE, 500rpm  
Surface EFGH, 1500rpm

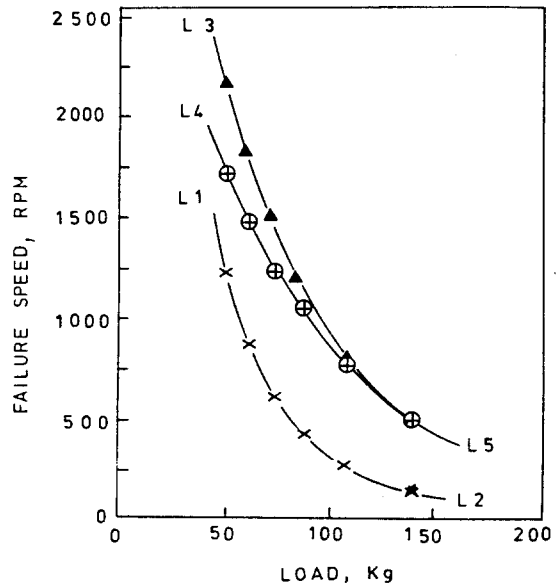


Fig. 9 Failure speed vs load in boundary lubrication.

L1-L2 Seizure line

L3-L5 Scuffing line of clean oil.

L4-L5 Scuffing line of oil with  $20\text{--}30\mu\text{m}$ ,  $200\text{mg/l}$  particles

Fig. 9는 씨이저(seizure)를 지나 회복하여 경계윤활상태에서 임계속도(failure speed)에 연마입자의 영향을 보여준다. L1-L2는 깨끗한 윤활유에 의한 하중에 따른 씨이저(seizure)속도를 나타내고 이 곡선 아래 구역은 탄성유체윤활이 우세하고 곡선위에는 경계윤활상태이다. L3-L5 및 L4-L5는 깨끗한 윤활유 및 연마입자포함 윤활유의 임계속도를 나타낸다. 여기서도 높은 하중에서는 연마입자의 영향은 작아지고, 깨끗한 윤활유로 손상없이 작동되도록 설계된 것이라도 오염된 윤활유로 운전되면 소부될 수 있다는 것을 의미한다.

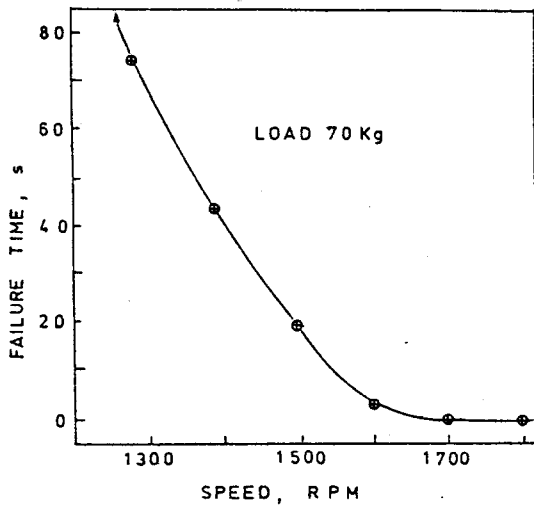


Fig. 10 Failure time vs speed for oil with contaminants(20-30 $\mu$ m, 200mg/l) in boundary lubrication.

Fig. 10은 경계 윤활상태의 일정한 하중(70kg)에서 여러가지 속도에서 소부가 발생하는 시간을 나타낸다. 즉 가혹한 운전상태일수록 급속히 소부가 발생함을 알 수 있다. 어떤 속도이하에서는 마찰열이 효과적으로 소산되기 때문에 소부가 일어나지 않는다.

Fig. 11은 특정 하중 및 속도(70kg, 1500rpm)의 경계윤활상태에서는 연마입자농도의 영향을 보여준다. 깨끗한 윤활유로 40초후, 소부가 발생되며 낮은 농도범위에서는 농도증가에 따라 더 빨리 소부가 발생되나

높은 농도범위에서는 다시 시간이 지연된다. 이것은 낮은 농도범위에서는 입자가 증가할수록 마찰열발생을 일으켜 더 쉽게 소부가 발생하나 높은 농도범위에서는 접촉면에 존재하는 많은 입자가 표면거칠기의 크기보다 작은 크기로 입자가 연마될때 까지 마찰면의 급속간 접촉을 감소시키기 때문에 소부는 지연된다고 생각된다. 높은 농도이상에서는 급속간 접촉을 방지하고 소부를 오랫동안 지연시킨다.

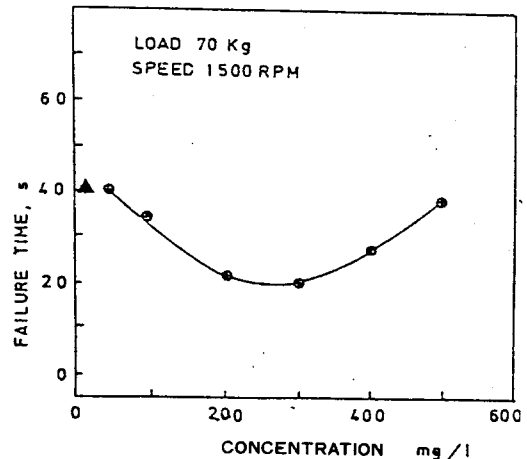


Fig. 11 Failure time vs contaminant concentration in boundary lubrication.

●, clean oil  
⊕, oil with 20-30 $\mu$ m, 200mg/l partiles

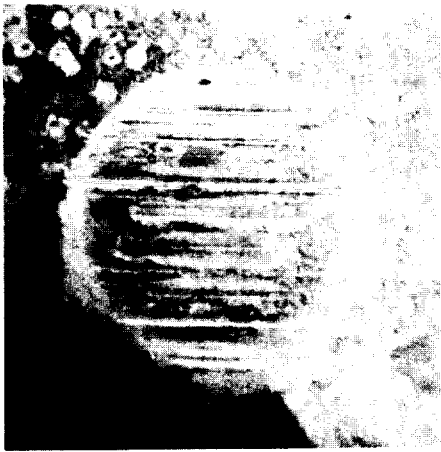
#### 4-3 마멸면 분석

Fig. 12는 경마멸(20kg-500rpm) 및 가혹마멸(70kg-1000rpm) 상태에서 마멸면의 사진이다. 경마멸에서는 깨끗한 윤활유 사용의 경우와 비교하여 연마입자로 인하여 줄무늬 등으로 표면이 상당히 거칠게 나타나지만 가혹마멸상태에서는 연마입자의 영향은 눈에 띄지 않았다. 이것은 용착마멸에 의하여 연마입자의 줄무늬는 사라졌다고 생각된다.

Fig. 13은 용착마멸상태에서의 마멸면의 SEM 사진이다. 마멸면이 대단히 취성하여 파괴형 마멸을 발생했으며 Fig. 14는 마멸입자를 페로그래프로 수집하여 SEM 사진이다.

연마작용에 의하여 절삭마멸입자를 보여준다.

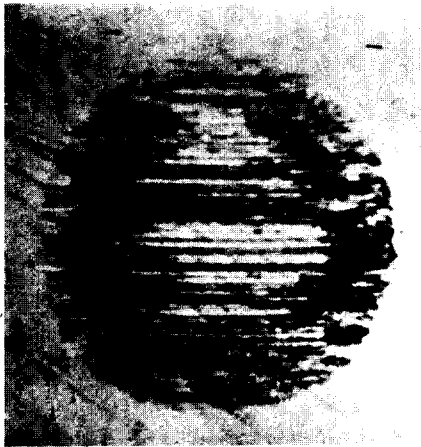




( a )



( d )

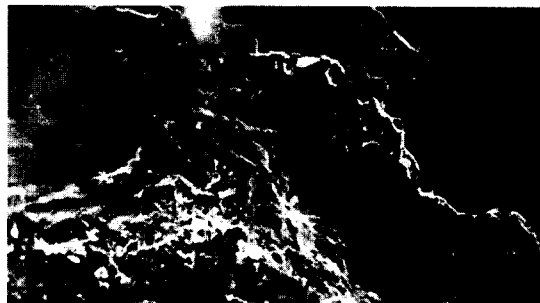


( b )



( c )

**Fig. 12** Photomicrographs of worn surfaces.  
( $\times 100$ )  
(a) mild wear(20kg, 500rpm), clean oil  
(b) mild wear (20kg, 500rpm), contaminated oil  
(c) severe wear (70kg, 1000rpm), clean oil  
(d) severe wear(70kg, 1000rpm), contaminated oil



**Fig. 13** SEM photomicrography of weld surface  
(70kg, 1500rpm,  $\times 270$ )



Fig. 14 SEM photomicrography of cutting wear particle( $\times 350$ )

#### 4-4 가혹마멸상태에서의 연마마멸 메카니즘

연마입자가 미끄럼접촉면에 존재할 때, 한쪽평면에 고착되고 다른 평면위에 미끄러지므로 마찰열을 발생시키며 접촉온도를 증가시킨다. 접촉온도가 윤활유의 천이온도를 초과할 때 표면에 흡착된 윤활유분자가 탈락(desorption)되어 소부로 들어가게 된다.

입자효과는 접촉면에서 입자농도와 입자-금속마찰 특성에 의존한다. 입자는 접촉면 사이에서 연마되고, 그들이 표면저칠기보다 적을 때, 입자효과는 정지한다. 이때 발생된 열이 효과적으로 소산되지 않으면 소부가 발생할 것이다. 또한 많은 입자가 존재할 때, 입자-입자 미끄럼이 역시 발생한다. 이것은 마찰을 일으키나 표면 마찰열의 원인이 되지 않으며 용착을 일으키지 않는다. 이것은 Fig. 11에서와 같이 고농도의 영향을 나타낸다.

용착을 일으키는 가혹한 마멸상태에서는 마찰열이 더욱 증가하여 탄화수소로 구성된 윤활유를 탄소와 수소로 분해시켜 수소가 금속면을 Fig. 15에서와 같이 확산침투되어 수소취성<sup>(11)</sup>에 의한 파괴마멸형태를 나타낸다고 생각된다. 이것은 Fig. 13의 취성파괴마멸면과 Fig. 14의 절삭마멸형태가 더욱 설명해 준다.

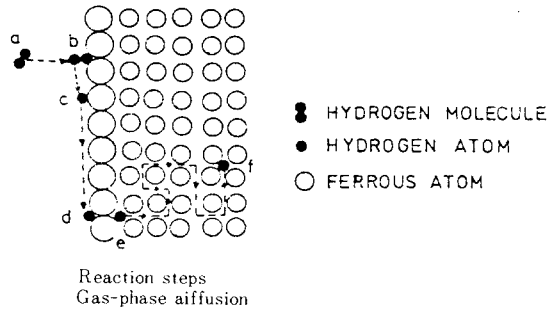


Fig. 15 Schematic of possible transport reactions steps involved in the embrittlement by an external hydrogen environment.

#### 5. 결론

윤활유속에 포함된 연마입자의 크기 및 농도의 영향을 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 연마제가 존재함으로써 경마멸(mild wear)에서 가혹마멸로 천이되는 하중 또는 속도는 연마제 없는 윤활상태보다 낮으며 입자크기 및 농도에 따라 달라진다. 즉 농도증가에 따라 천이되는 임계하중은 낮아지고, 입자크기 증가에 따라서는 일반적으로 임계하중이 낮아지나 특히 저속에서 얇은 유막두께 때문에 큰 연마입자는 반대로 임계하중 증가의 현상을 나타낸다.
- (2) 연마제 입자크기가 일정치 이상 크면 접촉면의 윤활상태에 따라 얇은 피막두께에 들어가지 못하여 내부하중이 감소하지 않는다.
- (3) 연마입자 농도 및 크기증가에 따라 경마멸상태에서는 마찰 및 마멸이 증가하나 가혹마멸상태에서는 명확한 경향이 나타나지 않는다.

### 參 考 文 獻

1. J. A. Perroto, R. R. Riano and S. F. Murray, "Effect of abrasive contamination on ball-bearing performance", *Lubr. Eng.* Vol. 12,

- pp. 698-705, 1979
2. S. H. Loewenthal and D. W. Moyer, "Filtration effects on ball bearing life and condition in a contaminated lubricant", J. Lubr. Technol., Vol. 101, pp. 171-176, 1979
  3. T. E. Tallian, "Prediction of rolling contact fatigue life in contaminated lubricant", J. Lubr. Technol., Vol. 98, pp. 384-392, 1976
  4. J. A. Beckstrom, "A Ferographic wear study-the effect of particulated contaminated lubricant on wear rates", Basic Fluid power Res. J., Vol. 13(4), pp. 371-376, 1980
  5. B. Fitzimmons and B. J. Cove, "Lubricant contaminants and their effects on tapered roller bearing performance", Tribology International, Vol. 10, pp. 93-100, 1977
  6. J. Foder, "Improvement in engine oil filtration," Filtr. Sep., Vol. 19(1), pp. 64-65, 1982
  7. F. F. Tao, J. K. Appeldoorn, "An experimental study of the wear caused by loose abrasive particle in oil", Trans. ASLE, Vol. 13, pp. 169-178, 1970
  8. H. Czichos, Tribology, Elsevier, 1978
  9. 이봉구, Tribology 개론, 동명사, 1987, pp. 185-188
  10. R. Gohar and A. Cameron, "The mapping of elasto-hydrodynamic contacts", ASLE Trans. Vol. 10, P215, 1967
  11. C. L. Vriant and S. K. Banerji, Treatise on materials science and technology-Vol. 25, Embrittlement of engineering alloys, Academic, 1983, pp. 275-355