

## 윤활마찰시에 윤활피막 혹은 산화막이 초기 마찰특성에 미치는 영향

강 석 춘

(공군사관학교)

(1986년 3월 2일 접수)

### The Effect of the Preformed Oil or Oxide Film on the Lubricated Sliding Surfaces.

Suckchoon Kang

Dept. of Mechanical Engineering Faculty Board

Air Force Academy Seoul, Korea

(Received March 2, 1986)

The methods to prevent or suppress the initial failure of the sliding surfaces by the formation of the protection film during the manufacturing process were studied.

Now it has been known that the surface protection film which was formed during the running-in process is mainly  $Fe_3O_4$  and its film was formed only at the limited oxygen ability during the lubricated sliding. So it was tried to form the same oxide film before the sliding by heat treatment at  $300^\circ C$  with the wetted specimen by oil.

The results show that a thin oxide film ( $Fe_3O_4$ ) was formed on the surface beneath the solid oil film and the specimen with this film has much better friction properties than those prepared with heat treatment at  $500^\circ C$  and  $700^\circ C$  or the original one.

#### 1. 서 론

윤활된 금속면의 길들이기는 크게 표준조도의 변화와 금속표면에 산화 피막의 형성과정으로 이루어지고 있다.

그중에도 산화피막의 형성이 미치는 영향은 매우 중요하여 마찰초기손상에 직접 연관되어 있는 것으로 알려져 있다<sup>(1)</sup>.

따라서 길들이기 과정을 보다 효율적으로 실시하고 초기손상을 가능한 예방하기 위하여 마찰특성이 양호한 금속산화막을 미리 표면에 피복하거나 형성이 빨리 이루어지도록 마찰 조건

을 맞추어 주는 것이 바람직하다<sup>(2)</sup>.

이러한 목적에서 마찰 부분품 제작과정에 철의 금속표면을 적절한 피막으로 덮어주는 방법의 이용 가능성에 관해 실험 연구하여 보았다. 그 방법으로 먼저 새로 제작된 금속면에 윤활유를 문힌 후 적절한 온도에서 응고시켜 고체화된 피막을 형성시키는 경우와 보통 실시하는 열처리 절차를 이용하여 형성되는 피막의 경우를 여러 측면에서 실험적으로 비교분석 및 검토함으로써 실제 부품제조에 이용할 수 있는지 살펴 보았다.

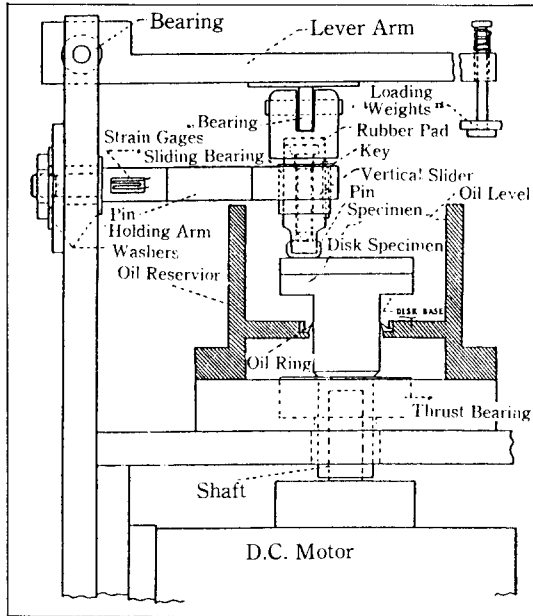


그림 1. 롤러 베어링과 평판을 이용한 마찰 실험 장치

## 2. 실험

### 2-1. 실험준비

표면처리한 금속시편의 윤활마찰 특성을 파악하기 위하여 과거에 사용된 시험기인 Four ball Tester, Falex, Pin on disk, Ball on flat 등의 결점을 보완한 Roller on flat 시험기를 그림 1 과 같이 설계하여 제작 사용하였다.

이 실험장치로는 마찰계수, 마모 및 표면조도 변화를 측정하고 윤활유 내의 마모입자분석 시료를 채취하기가 용이하는 등 매우 효과적인 마찰시험 장치의 역할을 할 수 있다.

이 시험장치와 부속측정 장치를 연결 배열한 것이 사진 1 과 2 에 있다. 여기에 관련된 것으로는 윤활유 가열히터와 항온조절기가 있고 마찰력 측정에 이용되는 Wheatstone bridge, Amplifier, Recorder를 포함하며 D. C. Motor의 속도조절 Box가 있다. 또 시편분석에 사용되는 표면조도측정 장치로 필터, 확대장치 및 Recorder가 갖추어져 있으며 기타 금속현미경을 이용할 수 있고 마모입자 및 성분 분석에는 SO-AP(Spectra Oil Analysis Procedure)를 이용

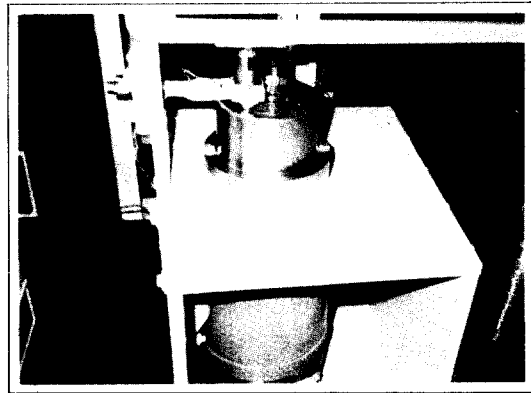


사진 1. 실험장치의 주요부분

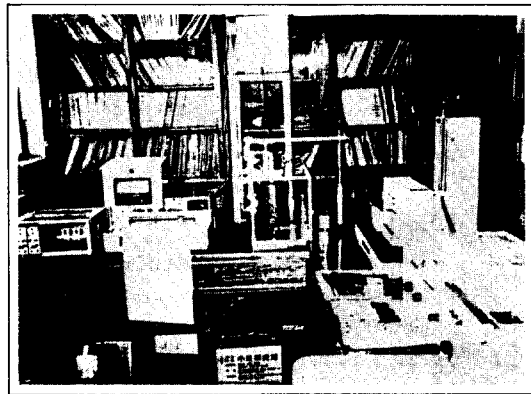


사진 2. 실험장치와 주요 측정장치의 배열  
(마찰력 측정장치, 조도측정, 항온장치)

하였다. 또 피막두께 측정에는 Ferrography에 부착된 Ferroscope에 의해  $\mu\text{m}$  정도까지 가능한 측정할 수 있었다.

사용된 시편에는 평면시편과 Roller시편으로 구분한다. 평면시편으로는 열간 압연강판으로 저탄소강인 AISI 1080과 비슷한 성분을 갖고 있다. 또 Roller시편은 Roller bearing을 표준 시편으로 사용하였고 성분은 AISI 52100으로서 경도가 64Rc 정도이다. 이 베어링의 크기는 지름이 7.5 mm, 길이 9.5 mm이고 모서리 원형부분을 제외하면 평면 시편과 접촉 길이는 9 mm 이다.

윤활유로 사용된 것은 광유(mineral oil) 로써 기유로 사용되는 첨가제 없는 순수 오일이고 점도는 30°C에서 20 Centipoises 이다.

### 2-2. 시편 준비

두께 6 mm의 평면판을 크기 50×50 mm로 자

른후 수동식 평면연삭기로 연삭하였다. 몇 개의 시편을 유리판 위에 나란히 놓고 시편들을 90° 방향으로 방향을 바꾸면서 Emery cloth로 연마하였다. 이때에 180, 240, 400 grit 순을 거치면서 연마한 경우 약 0.1 정도의 표면조도를 유지하였고 이것을 표준시편으로 사용한 후 필요한 처리를 다음과 같이 실시하였다.

표면처리하기 전에 각 시편은 에탄올과 아세톤으로 잘 세척하여 연마부스러기나 오염을 완전히 제거하고 이때 초음파 세척기를 이용하였다.

#### 표면처리방법

##### 1. 표준시편

연삭 및 연마후에 세척만 실시

2. 표준시편을 깨끗한 광유로 얇게 바른 후 300°C의 온도에 30분간 가열한다. 그러면 광유의 액체성분은 증발하고 표면에 고형윤활유 피막이 형성된다. (오일+300)

3. 같은 처리방법이지만 온도를 500°C에서 30분간 가열한다. 가열후 냉각된 경우 표면에는 얇은 산화피막이 윤활유피막과 작용하여 형성된다. (오일+500)

4. 윤활유를 바르지 않고 보통 유냉처리와 같은 담금질을 500°C에서 30분간 가열한 후 실시한다. 금속표면에는 얇은 산화피막이 형성된다. (500+오일)

5. 3번과 같은 처리이지만 온도를 700°C까지 올려준 후 표면처리를 실시한다. (오일+700) 이때 금속표면은 두꺼운 산화피막이 형성된다.

6. 4번과 같은 처리를 700°C에서 실시한다. 금속표면은 매우 두꺼운 산화 및 윤활피막이 형성된다. (오일+700) 굴음 베어링은 grinder의 모서리로 중간부분을 약간 평면으로 갈아준 후 평면시편과 같은 방법으로 세척한다. 이것을 시편고정핀으로 고정시키면 베어링은 균형을 유지할 수 있지만 회전은 억제되어 완전 미끄럼 접촉마찰이 가능해진다.

#### 2-3. 실험방법

윤활마찰에서 인위적으로 만들어준 고온 산화 혹은 윤활유피막의 영향을 조사하기 위하여 이용한 실험분석 방법은 마찰계수의 변화, 마모량의 차이, 표준조도의 변화, 마모면의 길이 변화와 마찰평면의 조사가 있다.

마찰하중을 가하는 방법은 일정한 크기 (500 gr)의 추를 더해주는 방법으로 실시함으로써 가능한 충격이나 진동유발을 억제하였다. 이때 하중 가하는 시간 간격이 매우 짧고 (15초) 일정한 하중을 가한 후 마찰을 계속하는 일정하중 방법과 시간 간격을 비교적 길게하여 (2분) 마찰 및 하중변화가 단계적으로 이루어지는 계단 하중 방법으로 분류 실시하였다. 시험기의 최대용량은 지렛대 영향이 고려된 경우 50까지 가능하고 단계하중은 38분의 최대 마찰시간을 갖는다.

윤활유의 온도는 항온가열 장치로 항상 30°C ± 3으로 유지함으로써 정도를 일정하게 하여 마찰열의 영향을 최소화할 수 있었다. 윤활유는 마찰할 때에도 시편을 완전히 덮을 정도로 채운 다음 마찰력을 충격이 생기지 않는 방법으로 지렛대를 천천히 접촉시켜준다.

한번의 실험후에는 아세톤으로 시편과 실험장치의 주요부분을 깨끗이 씻어준다.

### 3. 실험결과와 고찰

#### 3-1. 마찰계수의 변화

마찰면의 표면특성은 마찰계수에 의해 종합적으로 나타난다. 앞서 준비한 시편의 마찰계수 특성은 그림 2와 같이 나타난다. 그림 3에서도 비슷한 특성을 가지므로 함께 살펴보면 다음과 같다.

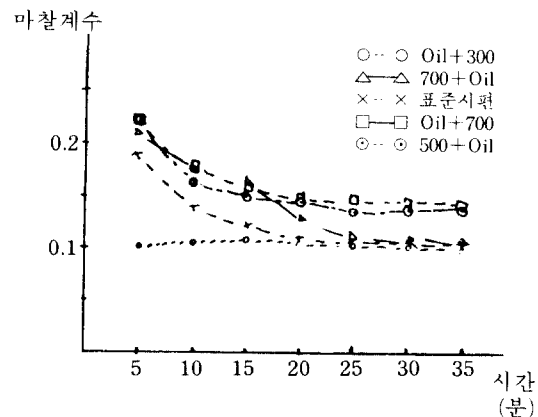


그림 2. 일정하중 방식의 실험에서 마찰계수 변화

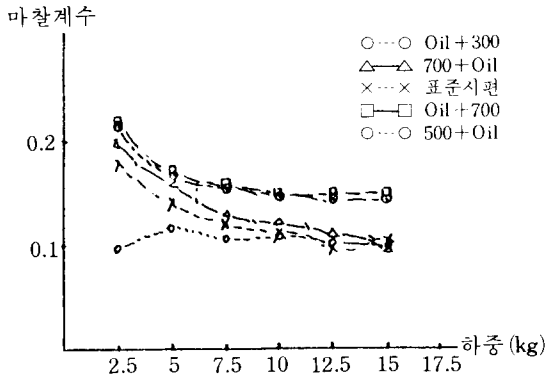


그림 3. 계단하중 방식에서 마찰계수 변화

보통 상온에서 공기중에 형성된 산화물이나 고온에서 산화된 철의 산화물은  $Fe_2O_3$ 로써 높은 마찰계수를 갖는다는 것이 잘 알려져 있다.

이와 비슷한 특성이 표준시편이나  $500^\circ C$  이상의 온도에서 처리한 경우에 나타나지만  $300^\circ C$ 에서 처리한 경우는 처음이나 마찰이 계속된 경우와 크게 변화가 없이 낮은 값을 갖는다. 또 표준시편의 경우 오일속에서 장기간 마찰하면  $Fe_3O_4$ 의 산화막이 형성함으로써 마찰계수가 낮아지는 현상에서 갖는 마찰값과 비슷한 값을 갖기 때문에  $Fe_3O_4$ 와 상응하는 역할을 해주고 이미 길들이기를 한 경우와 같은 특징을 갖는 것은 매우 특기할만한 사실이다.  $500+oil$  이나  $Oil+700$ 의 경우는 마찰계수의 변화가 매우 적으면서 높은 값을 갖는것 역시 표면산화막 구성이 서로 비슷한 것으로 볼 수 있고 가장 경계하여야할 표면처리에 해당하는 것으로 간주된다. 왜냐하면 마찰계수가 상대적으로 큰 경우에 마모나 손상이 작은 경우보다 항상 용이해지고 에너지 소비나 기타 진동등의 가능성을 내포하기 때문이다.

### 3 - 2. 마모량의 변화

마모량은 마찰면의 마찰특성에 대한 매우 중요한 사실을 나타낸다. 즉 심한 마모는 마찰면의 정밀도를 낮추고 윤활유를 오염시키며 궁극적으로는 부품이나 기계를 손상시킨다. 따라서 정확한 마모량을 측정하는 것은 마찰 실험에서 중요시된다. 이번 실험에서 실시한 분석방법은 분광식오일 분석방법(SOAP: Spectra Oil An-

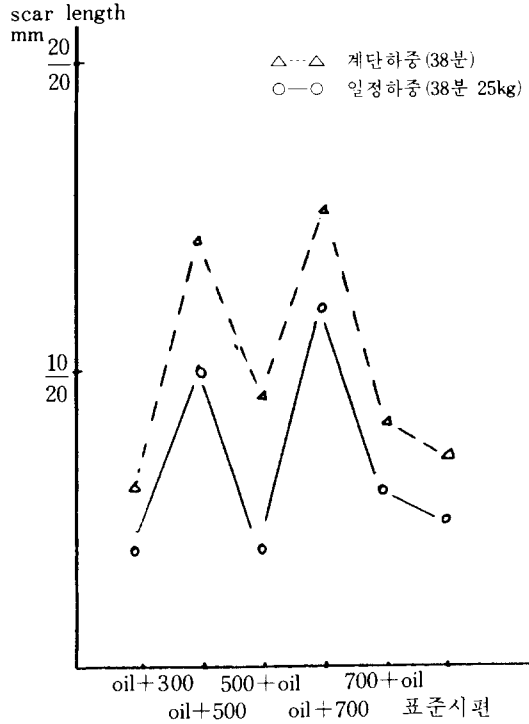


그림 4. 롤러 베어링의 마모길이

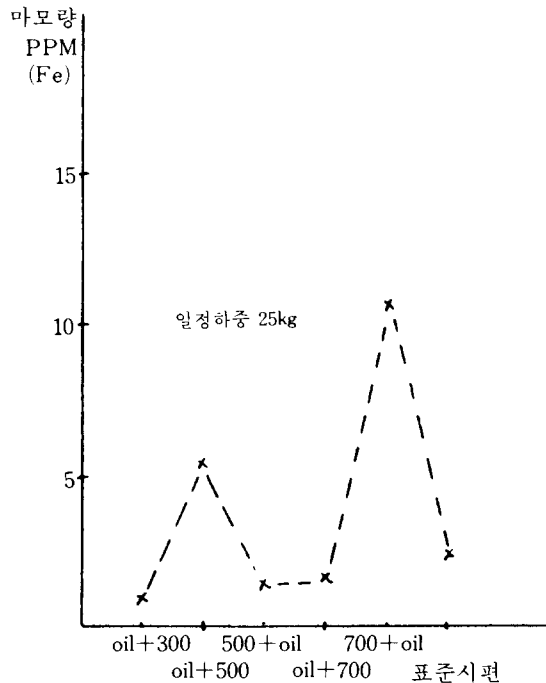


그림 5. 일정하중에서 마모량 (15분 마찰)

alysis Procedure)이다. 이 방법은 마모 금속 성분을 0.5 ppm까지 성분별로 측정할 수 있고 그 종류가 최대 20개까지 가능하다.

그러나 마모입자가 10 $\mu$ m 이상의 크기는 잘 분석이 되지않기 때문에 Scuffing 전후의 마모량 변화나 Severe wear에서 입자가 큰 마모는 분간하지 못하는 단점이 있다.

또 다른 방법은 볼러베어링의 마모 길이를 확대 현미경 (Brinell경도 계용)에 의해 측정하여 평면시편의 특성을 비교 평가하였다.

각각의 시편에 대한 마모량 분석결과는 그림 4와 5에 제시되어 있다. 그림 4는 25 kg의 하중에서 15분간씩 마찰한 경우에 대한 마모된 금속중 철에 대한 결과가 표시되어 있다.

Oil+500이나 700+oil의 경우 가장 많은 마모결과를 나타냈고, 마모길이에 대한 그림 5의 결과도 같은 경향을 갖는다.

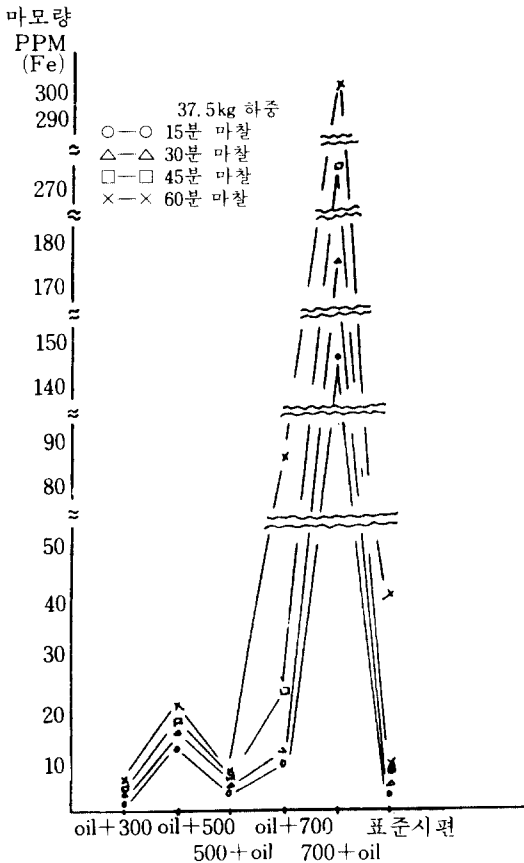


그림 6. 일정하중에서 마모량

마찰계수의 경우와 비교하면 Oil+500이 500+oil보다 마모는 더 많으나 마찰계수는 낮은 값을 가지므로써 마찰과 마모의 결과가 다른 사실을 입증한다. 또 37.5kg의 일정하중에서 60분간 마찰한 결과가 그림 6과 7에 있다. 여기에서도 Oil+500이나 700+oil의 경우 가장 마모가 많지만 마모길이의 경우에는 500+oil의 경우 비교적 마모길이가 길어짐을 알 수 있어 마찰계수에 직접 지배됨을 나타낸다.

이 실험중에 700+oil 시편은 45분 정도에서 그리고 표준시편은 48분 정도에서 Scuffing이 생겨 실험이 중단된 경우이다. 마모량에서 표준시편의 마모값은 30+oil보다는 많지만 매우 작은 값이고 Scuffing후인 마지막 검사에도 많지 않음을 나타내어 비정상 마모의 초기진단에는 도움이 되지 못함을 알 수 있다.

이들의 측정에서도 300+oil의 시편특성은 매우 바람직하지만 700+oil이나 표준시편은 하중부담능력이 매우 나쁜 결과를 잘 나타내준다.

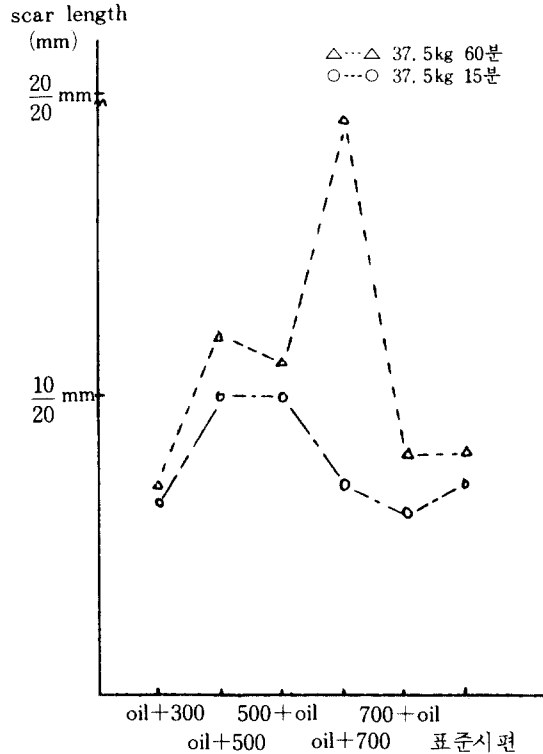


그림 7. 일정하중에서 마모길이

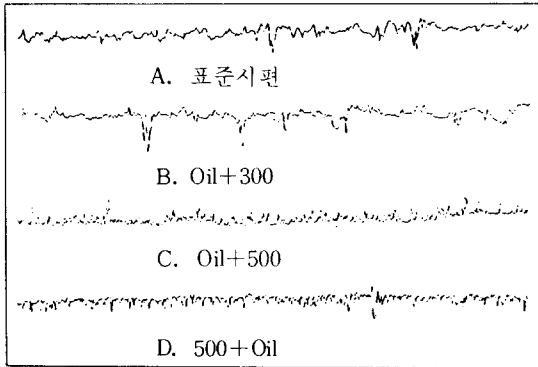


그림 8. 37.5 kg의 일정하중에서 60분간 마찰한 시편의 표면 형상

3 - 3. 표준조도의 변화

모든 조건이 같은 상태에서 마찰운동을 할 경우에 표면피막의 영향을 표면조도의 변화에서 살펴보았다. 표면조도의 변화는 마찰계수와 마찰가지로 마찰의 종합적인 성질에 대한 표현이기 때문에 효과를 정확히 해석하기는 쉽지 않다. 그러나 손상이나 마모 및 마찰과 윤활이 표면조도에 따라 좌우되고 있으므로 표면상태를 진단하기에 충분한 자료를 제공하고 있다. 그림 8은 앞서 실험한 각각의 평균시편에 대한 조도에 대한 것이다.

A의 표준시편이나 B의 Oil+300의 시편은 표면층이 상당히 얇은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 연한 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 산화층으로 형성되어 원래 조도보다 많이 변하지만 손상을 유발할만큼 심한 변형은 별로 나타나지 않는다. 끊임없는 소성흐름이나 변형과 마모를 수반하면서 낮은 마찰계수와 낮은 마모를 가져오기 때문에 조도 역시 원래의 형상은 변해도 상대적인 절대치는 달라지지 않는다. 500℃로 처리한 C, D의 조도는 원래 조도에서 높은 봉우리가 제거된 형태로서 변형되지 않은 형상(Texture)을 보존하고 있다.

이것은 열처리 과정에서 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 단단한 비교적 두꺼운 산화층의 영향으로 간주된다. 이때 롤러베어링은 계속 마모량이 증가하지만 평면시편은 손상이 시작되기 이전까지는 원래 형상을 고수함을 보여준다. 700℃ 처리한 시편은 조도변화가 너무 심하여 같은 축척에서는 의미가

표 1. 평면시편의 피막두께

평면 시편 처리	피막 두께 (μm)
Oil+300	17 (μm)
Oil+500	5 "
500+Oil	6 "
Oil+700	12 "
700+Oil	18 "

없다.

3 - 4. 피막의 두께와 그 성분

오일이나 열처리한 평면시편의 피막 두께를 Ferroscope (Ferrography 용 현미경)로 측정된 결과가 표 1에 제시되어 있다. 두께의 크기는 500℃로 처리한 두 경우의 시편들이 5-6으로 가장 얇고 700℃ 열처리후 오일에 담근 경우가 가장 두꺼운 18 μm 정도의 두께를 갖는다.

피막의 성분을 조사하기 위한 방법으로 자력 검사법을 실시하였다(표 2). 먼저 피막을 날카로운 칼날로 벗겨낸 입자들의 자성 여부를 조사한 결과 500℃ 처리나 Oil+700의 경우는 강한 자성을 가지므로 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>임이 분명하였다. 그러나 Oil+300의 경우는 전연 자성이 없어 윤활피막인 것이 확인되고 700+oil은 약한 자성에 의해 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 윤활유 피막의 혼합상태인 것으로 추측된다.

위 사실은 마모입자를 윤활유 여과에서 채취한 경우와 같은 결과를 갖고 있어 간접 증명이 가능하다.

특기할 사실은 700℃ 처리한 시편의 마모시 두꺼운 피막이 벗겨지면서 단단하고 날카로운 마모입자 형성으로 표면의 연마(abrasive) 마모를 유발하고 떨어지나간 면은 순간적인 금속과 금

표 2. 피막의 성분

시 편	자성시험	성 분
Oil+300	비자성	윤활유층
500+Oil	강자성	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Oil+500	약자성	윤활유층+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Oil+700	강자성	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

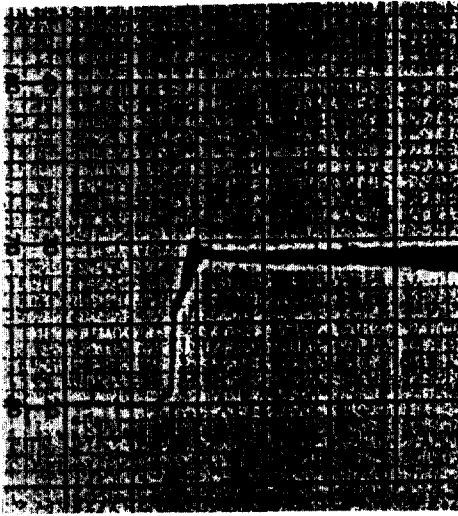


그림 9. Oil+300 시편의 초기마찰력 변화

속 접촉으로 손상이 쉽게 이루어질 수 있는 가능성을 갖는다.

또 실제로 다른 시편보다 훨씬 낮은 하중능력을 갖고 있음이 표준시편과 같이 나타나므로 표면을 악화시키는 것으로 결론지을 수 있다.

Oil+300℃ 시편의 마찰은 서서히 증가하지만 하중이 큰 경우 700℃ 처리 시편은 그림9, 10과 같이 높은 마찰력을 가지며 이때 진동이나 소음이 발생되었다.

### 3-5. 기타의 현상

초기 마찰에서 일어나는 파손현상인 Scuffing이 일어날 경우 마찰력의 변화를 그림11에

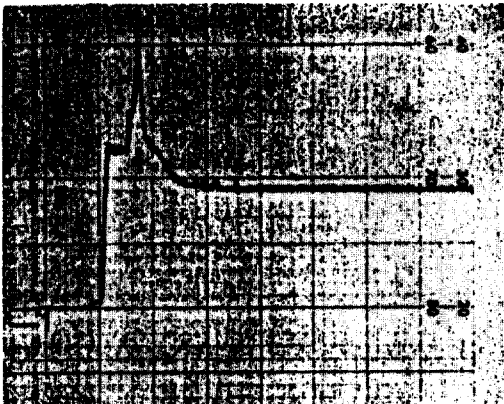


그림 10. 700+Oil 시편의 초기마찰력 변화

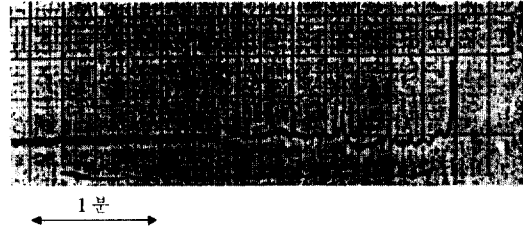


그림 11. Scuffing 발생에서 마찰력의 변화 .

제시하였다. Scuffing 발생 이전에는 마찰력 변화가 전연 없다가 순간적으로 증가되는 경향(1차 손상)을 보이고 얼마간 계속되다가 Seizure 현상에 의한 마찰력의 더 큰 증가와 장치의 운동이 정지되든지 또는 시켜야만 하였다(2차 손상). 일반적으로 표면손상은 종종 회복되는 경향이 있음은 2차 손상 발생이전에 변수의

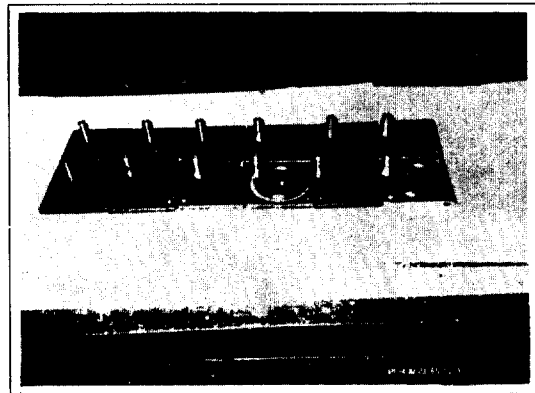


사진 3. 실험에 사용된 시편(롤러베어링, 평면시편)

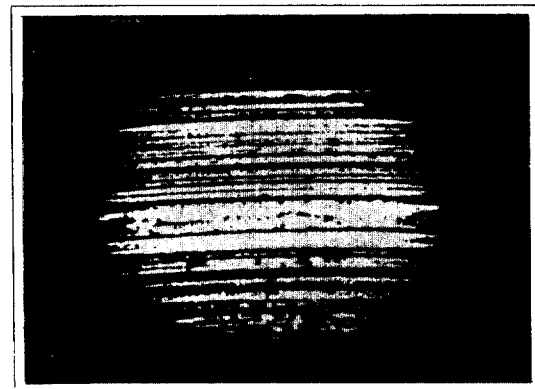


사진 4. Scuffing 손상된 평면시편(200×)

변화(하중감소등)에 의해서 파손면을 소성 변형으로 치료하기 때문인 것이나 2차 손상 이후에는 거의 회복 불가능해진다. 이때 진동 및 소음이 격렬해지고 몇백  $\mu\text{m}$  이상의 마모입자나 고열이 발생된다. 그러나 scuffing 발생은 마찰 계수나 마모입자(SOAP)에 의해 예방 진단은 쉽지 않음이 분명하다. 만약에 Ferrography에 의한 입자 모양을 분석하는 것은 가능할런지 모르지만 이번 시험에는 포함되지 않았다.

사진 4는 scuffing이 일어난 시편의 200 배 사진이다. 많은 마모나 긁힌 또는 adhesive 마모의 현상을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

마찰면의 길들이기 과정을 실제 제작과정에 포함시킬 수 있는 가능성을 살펴보고 그 방법에 관한 실험 연구에 의한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 길들이기와 준한 산화피막을 철의 표면에 형성하는 가장 효과적인 방법은 윤활유를 마찰면에 바르고 300°C 전후로 응고시키는 방법이다. 이때 모든 마찰특성이 향상되고 표면에는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  피막이 형성되었다.

2. 기타 500°C나 700°C의 처리한 시편은  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  산화물이 표면에 형성되어 오히려 나쁜 경향을 보여준다. 특히 700°C 처리한 시편은 초

기 손상이 쉽게 일어나고 마모역시 매우 심하며 일반적인 열처리에서 특히 주의하여야 함이 입증되었다.

3. 마찰 계수와 마모량은 하중이 작고 짧은 마찰 시간에는 서로 일치하지 않지만 마찰시간이나 하중이 증가되면 일치하여진다.

4. Scuffing의 예측은 Atomic Amission 방법인 SOAP나 마찰계수로는 불가능하고 Ferrography에 의해 가능할 것으로 보고 앞으로 계속 연구의 필요성이 대두된다.

#### REFERENCES

1. D. Summers Smith, "An Introduction to Tribology in Industry," Machinery Publishing Company, London, 1969.
2. Dyson, A., "Scuffing-A Review" Part I, April, 1975.
3. D. Godfrey, "Chemical Changes in steel Surfaces During Extreme Pressure Lubrication." "ASLE Trans. Vol. 5, No. 1, 1962.
4. J.C. Gregory, "Chemical Changes in steel Surfaces During Extreme Pressure Lubrication." "ASLE Trans. Vol. 5, No. 2, 1962.
5. S.C. Kang, "The Chemical and Physical Changes on Lubricated Surgaces," a Ph.D. Thesis, University of Michigan. 1984.