

초고진공중에서 연질금속의 Tribo-Coating에 관한 윤활특성

金亨賛* · 全泰玉** · 加藤廉司***

*부산공업대학교 기계설계학과

**동아대학교 기계공학

***동북대학교 기계공학과

Lubricating Properties on Tribo-Coating of Soft Metals in Ultra High Vacuum

Hyung-Ja Kim*, Tae-Ok Jun** and Ko-Ji Kato***

*Pusan National University of Technology Department of Mechanical Engineering

**Dong-A University Department of Mechanical Engineering

***Tohoku University Department of Mechanical Engineering

Abstract— Sliding friction between a spherical pin of 8mm in diameter and flat (disk) substrates coated with vacuum-deposited thin film was measured under ultra high vacuum pressure for various materials, various rates of film supply (8~210 nm/min), various sliding velocities (1.5~67.0 mm/s). It was found that the most effective lubrication was obtained when the adhesion between Si_3N_4 pin and SUS440C disk was high and that between Si_3N_4 pin and Si_3N_4 disk was low. When In film was used as a lubricant between Si_3N_4 pin and stainless steel disk, the friction coefficient had a value as low as 0.04. In this case, the normal load W and the sliding speed V were expressed as 10N and 24 mm/s for 10^{-6} Pa. The dependence of μ on the thickness h of the Ag film, which was used as a lubricant between Si_3N_4 pin and SUS440C (Q) disk was expressed as $\mu=0.12$ for $W=10\text{N}$ and $V=24\text{ mm/s}$ when the film was thicker than 100 nm. A brief discussion on these relations is presented from the viewpoint of the real contact area.

1. 서 론

근년, 통신, 방송, 기상관측 등에 인공위성이, 빈번하게 이용되고 space shuttle 등에 의한 진공무중력 하에서의 신재료의 개발이 이루어지는 등, 우주공학은 눈부신 발전을 계속 하고 있다. 그리하여 특수환경중, 특히 초고진공중에서의 기계, 기기의 섭동면의 윤활이 중요한 문제로 대두되었다. 우주공간 즉, 진공중에서는 지상에서 유용했던 그리스나 윤활유는 높은 중기압 때문에 용이하게 증발해 버려 윤활성능을 유지할 수 없으며 동시에 중기가 주위의 정밀기기나 기계부품에 부착하여 그 성능을 현저하게 저하시키고 고장의 원인이 된다. 현재 고진공용의 고분자계 그리스는 중기압 10^{-6} Pa라고 하는 뛰어난 것도 있다. 그러나 어떠한 우수한 그리스라도 고하중, 고미끄럼 마찰속도 조건하에서의 사용은 곤란하다.

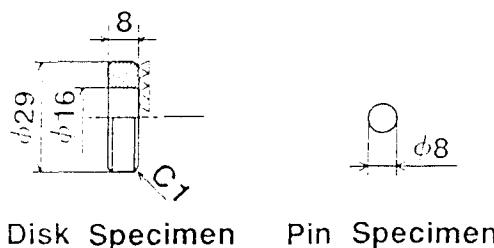
이와 같은 배경에서 중기압이 낮은 고체윤활제가 각광을 받아 여러 가지로 연구가 이루어져서 실용화에 이르고 있다. 고체윤활제의 종류로서는 MoS_2 , WS_2 , graphite 등의 층상구조를 가진 것, Ag, Au, Pb, In 등의 연금속, PTFE, polyamide, polyimide 등의 유기물 또는 이들의 복합재가 있다. 최근에는 이황화 몰리브덴을 주성분으로 하여 금이나 은 등과 복합을 꾀하여 그 윤활성능의 향상을 도모하고 있다. 또한 고체윤활재는 일반적으로 그 기계적 강도가 약하기 때문에 모재 금속(대부분의 경우 stainless steel을 하부재로 한다.)에 부착시켜 얇은 피막을 형성시켜서 사용하고 있다. 그 피막의 형성법으로서는 진공증착법, Sputtering법, Ion-plating법, CVD법, 전기도금법, tribo-coating법[1-6] 등이 다양하게 개발되어 왔다. 그 개발의 지침의 하나로써 부착강도가 높으면 장수명이 얻어진다는 생각에 근거하여 하부재와의 부착

강도의 향상을 도모하고 있다. 이와 같이 고체윤활막에 의한 윤활법이 연구되고 있지만 어느 방법에 있어서도 문제점을 가지고 있다. 그것은 수명과 마찰계수이다. 먼저 마찰계수의 면에서 보면 MoS₂에서는 0.04, 연금속 최고의 것에서도 0.04이므로 충분히 좋다고는 말할수 없다. 또한 수명의 면에서 보면 고체윤활피막에 있어서는 윤활유나 그리스와 같이 자기보수작용이 없기 때문에 막이 마모해 버리면 윤활불능이 되어 수명이 다 해 버린다. 그러므로 이와 같은 수명을 극복하기 위해서는 어떠한 방법으로서던지 막을 공급해야 한다. 근년에 피막재료를 압부하여 금속간의 응착을 이용한 tribo-coating의 연구가 이루어져[1-5] 그 간편함이 유망하다고 생각되었다. 그러나 피막두께가 2~3 μm로 뚜껑고 피막 재료를 압부하는 여분력이 작용하기 때문에 최량의 방법이라고 생각할 수 없다. 이상과 같은 점으로부터 초고진공중에서의 고체윤활피막의 수명극복과 보다 낮은 마찰계수의 탐구가 필요하다고 본다.

2. 실험재료 및 실험방법

2-1. 실험재료

마찰실험용의 pin시험편으로서는 cold press 후에



Disk Specimen Pin Specimen

Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

상압소결시킨 Si₃N₄를 사용했다. 또한 disk 시험편으로서는 담금질한 SUS440C를 사용하였으며 그 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었고 시험편의 제특성은 Table 1과 같다. Disk 시험편의 다듬질법으로서는 에메리지 #0/0~#0/5으로 연마하고 나서 산화 Cr 분말과 물을 이용한 buff 연마에 의해 경면 다듬질하였다.

Pin 시험편 및 disk 시험편의 세정은 처음에 아세톤에 담근 후 꺼내어 드라이기로 건조시킨 후 아세톤으로 초음파 세정을 하였다. 증착피막재료로서는 순도 99.99% Ag, Au, In, 순도 99.9%의 Bi, Pb, Sb, Sn을 사용했다.

각각의 피막재료의 제특성은 Table 2와 같다.

2-2. 실험방법

Table 1. Properties of pin and disk

	Disk	Pin
Material	Quenched SUS440C	Cold pressed Si ₃ N ₄
Vickers hardness Hv, kgf/mm ²	800	1652
Surface roughness R _{max} , μm	0.02~0.07	0.02
Elastic modulus E, GPa	204	320
Poisson's ratio ν	0.3	0.27
Density ρ, ×10 ³ kg/m ³	8.00	3.24
Thermal conductivity λ, W/mK	29	28
Thermal diffusivity a, ×10 ⁻⁶ m ² /s	12.2	10.1
Fracture toughness K _{Ic} , MPa·m ^{1/2}	—	5.2

Table 2. Properties of film materials

Film material	Ag	Au	Bi	In	Pb	Sb	Sn
Vickers hardness Hv, kgf/mm ²	59.0	69.0	13.6	1.0	6.5	8.5	8.4
Melting point T _M , K	1234	1336	545	430	601	904	505
Boiling point T _B , K	2423	2983	1833	2286	2028	4150	2753
Elastic modulus E, GPa	73	79	32	11	14	79	44
Density ρ, ×10 ³ kg/m ³	10.49	19.32	9.80	7.31	11.36	6.62	7.30
Thermal conductivity λ, W/mK	428	300	8.4	25	35	19	63
Thermal diffusivity a, ×10 ⁻⁶ m ² /s	165.6	117.6	6.9	14.3	23.7	13.9	38.1
Saturated vapor pressure at 300 K P _{f300} , Pa	5.2×10 ⁻³⁷	5.4×10 ⁻⁵³	4.9×10 ⁻²⁴	7.3×10 ⁻³²	1.2×10 ⁻²³	7.2×10 ⁻²¹	4.9×10 ⁻⁴²

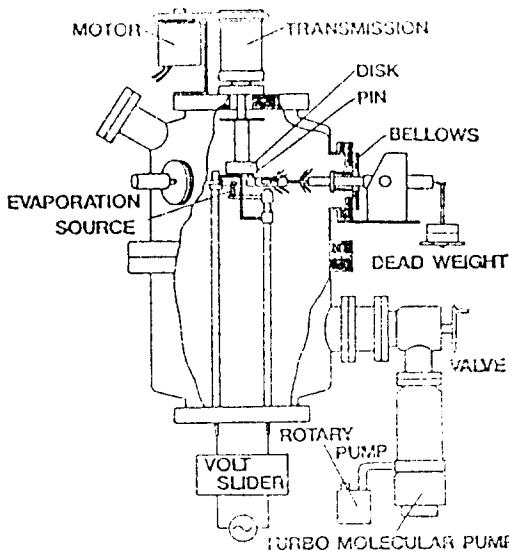


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

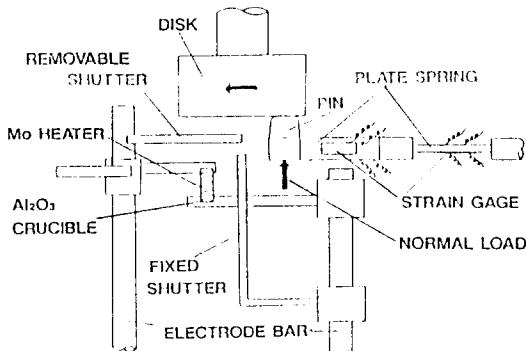


Fig. 3. Schematic diagram of the frictional apparatus.

실험장치의 전체도는 Fig. 2에 또한 마찰부의 상세 부분은 Fig. 3에 나타내었다. 진공용기내에는 10^{-6} Pa의 초고진공이 얻어진다. 진공용기내의 배기는 로타리 펌프에 의해서 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa로 1차진공시킨 후 turbo 분자펌프로서 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa까지 배기시킨다. 그 후에 진공용기를 가열하여 베이킹을 함으로써 10^{-6} Pa의 초고진공이 얻어진다.

진공도의 측정은 B-A형 전리 진공계로써 측정했다. 마찰방식은 pin-on-disk 형의 미끄럼 마찰장치를 이용했으며 회전은 자기결합형 회전 도입기를 사용하여 초고진공용기내에 전달되도록 하였고, 회전속도를 변화시킴으로서 1.2 mm/sec~72.0 mm/sec의 범위까지 임의로 변화시킬 수가 있다.

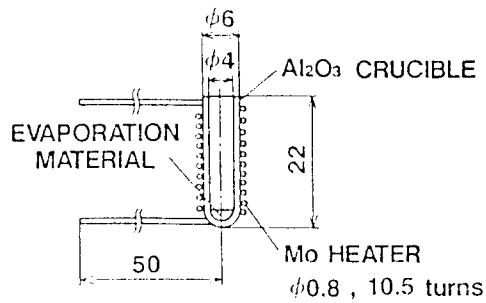


Fig. 4. Shape of evaporation sources.

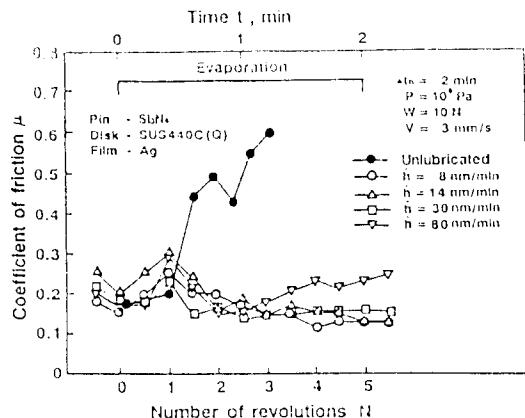


Fig. 5. Frictional properties of Ag trib-coating for various film supply rates.

수직하중은 진공용기밖에 있는 중추에 의해서 가해지고 수직하중 및 마찰력은 판스프링에 부착된 strain gauge에 의해서 측정하였다. 수직하중은 10N으로 일정하게 하였다.

2-3. 증착막 공급법

본 실험에 사용한 증착원의 형상 및 재질을 Fig. 4에 나타내었다. 이 증착원은 우주에서 사용하는 경우 주위의 기기를 더럽히지 않고 수용에 용이하도록 방향성이 좋게 소형으로서 피막의 양적, 질적제어가 가능하도록 설계되었다. 이 증착원은 초고진공용기내에 2개가 설치되어 있고 각각 진공용기밖의 볼트슬라이드에 의해 전류를 조정함으로서 2개가 동시에 개별적으로도 증착피막을 공급할 수가 있다. 피막의 형성법으로서는 피막재료를 마찰중에 증발시킴으로서 이루어진다. 초고진공중에서 마찰중에 피막재료를 공급 함으로써 피막재료는 마찰에 의해 활성화된 신생

면에 충착되고 pin에 의해 압접됨으로서 강고한 tribo-coating막을 형성한다.

공급막 두께는 전류치와 막공급 시간에 의해서 제어된다. 한편 막공급시간내에서 막공급속도를 일정하게 하기위해서 다음과 같은 방법으로 피막을 공급하였다. 통전개시시에는 disk는 가동 shutter로서 막아 차단시키고 전류치가 소정의 값으로 일정하게 유지되게 하여 1분이 경과한 후에 가동 shutter를 제거하여 개방함으로서 피막의 공급을 시작하였다. 그후에 소정의 시간동안 피막을 공급하고 가동 shutter를 닫는다. 통전을 정지 시킴으로서 피막공급이 정지된다.

또한 막두께는 실험종료 후에 측침식 표면조도계로 측정하였다. 막공급속도는 막두께를 막공급시간으로 나누어 구하였다. 막두께가 실측되지 않는 경우는 막두께는 증착원의 감소량에 비례한다고 생각하여 그때의 증착원의 감소량으로 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

수명은 지금까지 피막의 성능을 보는데 대단히 중요한 파라미터이지만 Kato[6] 등에 의해 그 수명을 원리적으로는 반무한으로 할 수 있음이 보고 되고 있다. 본 연구에 있어서는 tribo-coating막의 정상상태하에서의 마찰계수에 대하여서만 생각하기로 한다. 오래전부터 박막윤활 이론에 의하면 연질금속의 피막두께가 두꺼울 경우 접촉면적이 크게 됨으로서 마찰계수가 크게 되며, 또한 피막두께가 얇을 때에도 하부재와 직접접촉하기 때문에 마찰계수가 크게 된다.

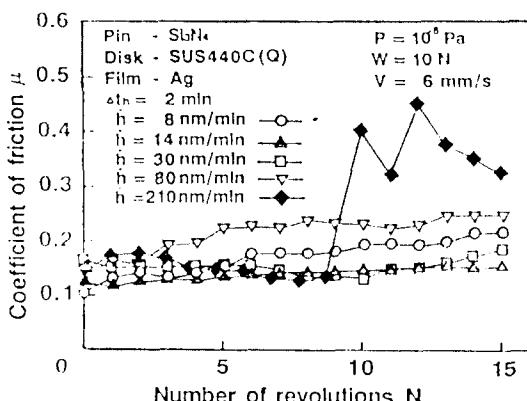


Fig. 6. Relation between rate of film supply and friction coefficient.

이런 사실로부터 최저피막두께가 존재하는 것을 알 수 있으므로 공급피막두께와 마찰특성에 대하여 검토하고자 한다.

3-1. Tribo-Coating 중의 마찰특성

Tribo-coating의 기본 특성을 알기 위해서 공급피막두께의 특성을 검토하였다. 본 실험장치는 마찰실험을 실시해 가면서도 마찰실험 실시전부터 자유로이 막을 공급할 수가 있다. 그러나 여기서는 tribo-coating의 특징인 마찰에 의한 표면의 활성화 및 압접의 효과를 고려하기 위해서 먼저 coating을 하기 전에 무윤활의 상태에서 마찰함으로써 표면의 활성화가 이루어지도록 하였다. 그후 마찰을 반복해 가면서 피막재료를 증착하였다. 무윤활상태 및 공급막두께량에 따른 마찰거동은 Fig. 5에 표시된 바와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 무윤활상태로 마찰시킨 경우는 마찰반복수 $N=1$ 일 때 표면산화막의 영향에 의해서 마찰계수는 0.2로 되었다. 그후 산화막이 제거되어 마찰계수는 서서히 상승하여 마찰반복수 $N=3$ 일 때는 0.7정도의 값을 나타내고 있다. 이것에 대하여 각각의 공급피막두께에 있어서 tribo-coating 중의 마찰계수의 변화는 그림에 나타난 바와 같이 어느 공급피막두께에 있어서나 마찰계수는 표면의 활성화증에는 무윤활의 경우와 마찬가지로 약 0.2정도이다. 그후 증착을 해 가면서 마찰을 반복하면 마찰계수는 서서히 상승하여 약 0.3의 최대값을 가지며 tribo-coating 후에는 피막이 윤활막으로서 작용하기 때문에

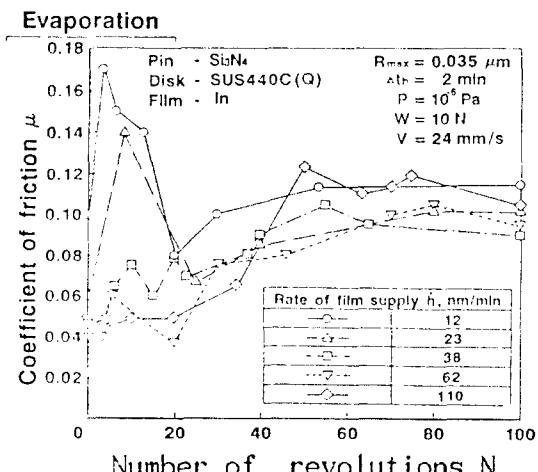


Fig. 7. Relation between rate of film supply and friction coefficient.

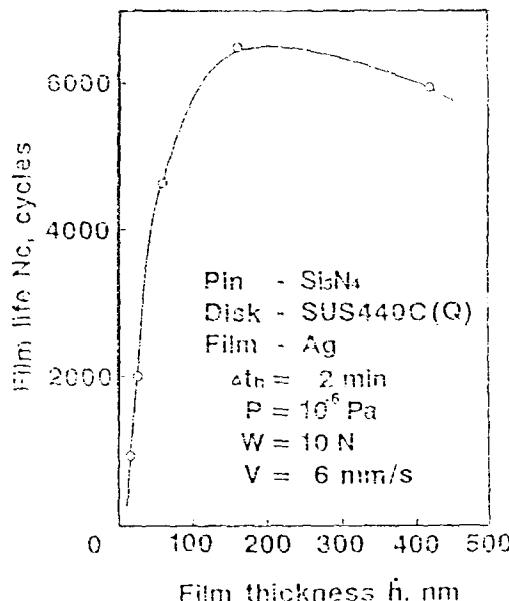


Fig. 8. Relation between friction coefficient and film life depending on rate of film supply.

0.1~0.2를 나타내었다. 이와 같이 tribo-coating에 의해서 양호한 윤활막이 형성된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6, Fig. 8은 Ag피막의 공급피막 두께량에 따른 마찰초기 단계의 마찰거동과 수명을 나타내고 Fig. 7, Fig. 9는 In피막의 공급피막 두께량에 따른 마찰초기 단계의 마찰거동과 수명을 나타내고 있다. Fig. 6에서 공급피막두께가 가장 얕은 경우의 ($h=8 \text{ nm/min}$) 마찰계수는 마찰반복수 $N=0$ 에서 약 0.1이었으나 마찰계수는 점점 상승하여 마찰반복수 $N=15$ 일 때는 약 0.22를 나타내고 있으며 이것에 대하여 가장 두꺼운 경우 ($h=80 \text{ nm/min}$, $h=210 \text{ nm/min}$)에서는 마찰계수가 마찰반복수 $N=0$ 에서 약 0.15로부터 점점 상승하여 마찰반복수 $N=15$ 일 때에는 그림중에서 가장 높은 마찰계수를 보이고 있다.

특히 공급피막두께가 $h=210 \text{ nm/min}$ 의 경우는 마찰반복수 $N=8$ 부근에서 급격한 마찰계수의 변동을 나타내고 있는 반면에 공급피막두께가 $h=14 \text{ nm/min}$, $h=30 \text{ nm/min}$ 인 경우의 마찰계수는 마찰반복수 $N=0$ 에서 약 0.12~0.15정도로 낮으며, 마찰반복수 $N=15$ 일 때도 마찰계수는 약 0.13~0.15정도로 거의 상승하지 않는 가장 안정된 마찰계수를 나타내고 있다. Fig. 7에 있어서도 피막공급양 $h=38 \text{ nm/min}$ 및 $h=62 \text{ nm/min}$ 경우의 마찰계수가 마찰반복수 $N=0$

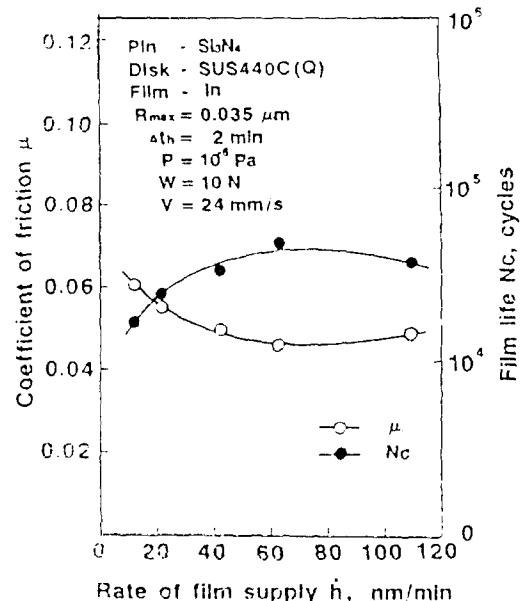


Fig. 9. Relation between friction coefficient and film life depending on rate of film supply.

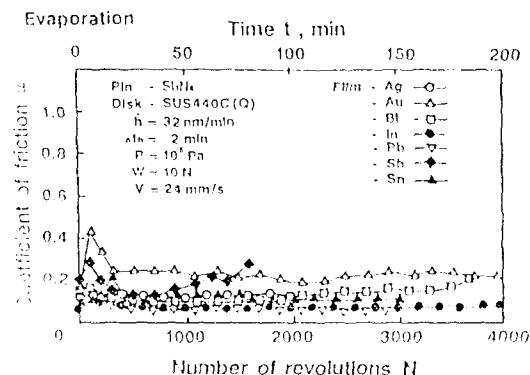


Fig. 10. Effect of film materials depending on lubricating properties.

일 때나 $N=100$ 일 때도 가장 낮은 마찰계수를 보이고 있다. 오히려 Ag피막에 있어서는 마찰초기에 높은 마찰거동을 나타내고 있는 $h=80 \text{ nm/min}$ 의 공급피막두께양 일 때와 In피막의 경우는 마찰초기에 있어서 양호한 마찰거동을 나타내고 있는 공급피막 두께양이 $h=38 \text{ nm/min}$ 경우와 $h=62 \text{ nm/min}$ 일 때가 Fig. 8, Fig. 9에 나타나 있는 바와 같이 양호한 피막 수명을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 피막재료에 따라 공급피막두께량의 최적량에 의해서 낮은 마찰계수와

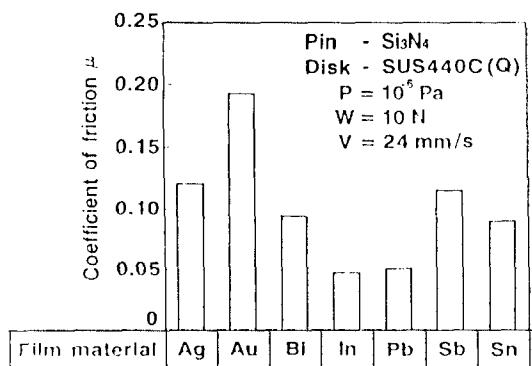


Fig. 11. Property of film materials depending on lubricating properties.

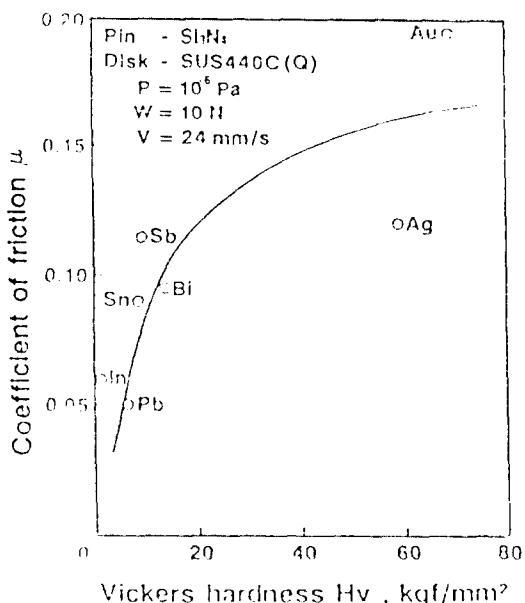


Fig. 13. Relation between Vickers hardness of film materials and friction coefficient.

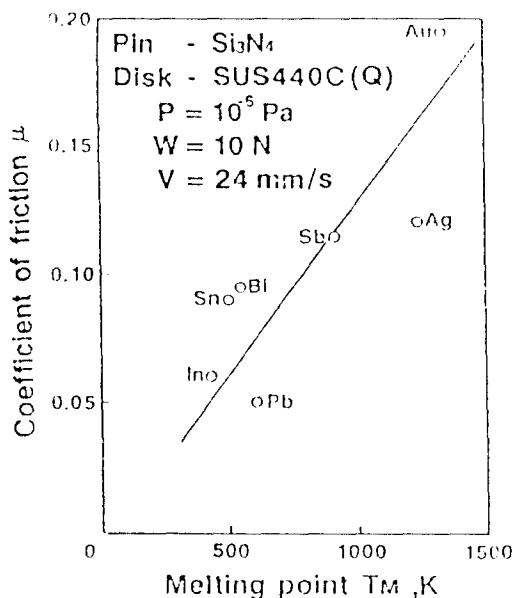


Fig. 12. Relation between melting point of film materials and friction coefficient.

피막수명이 지배되고 있다는 것을 말해주고 있다.

이러한 결과로부터 tribo-coating중의 마찰특성에 미치는 공급막후량에 따른 마찰계수와 수명에 관한 영향이 명확하게 규명되어질 수 있다고 생각된다.

3-2. 윤활특성에 미치는 피막재료의 영향

저마찰계수를 얻기 위한 지침을 고려하기 위하여 피막재료의 재특성의 영향을 검토하는 것은 대단히 중요한 일이라 생각되므로 Si_3N_4 -SUS440C(Q)의 조합에 대한 피막재료의 영향을 검토하기 위하여 피막

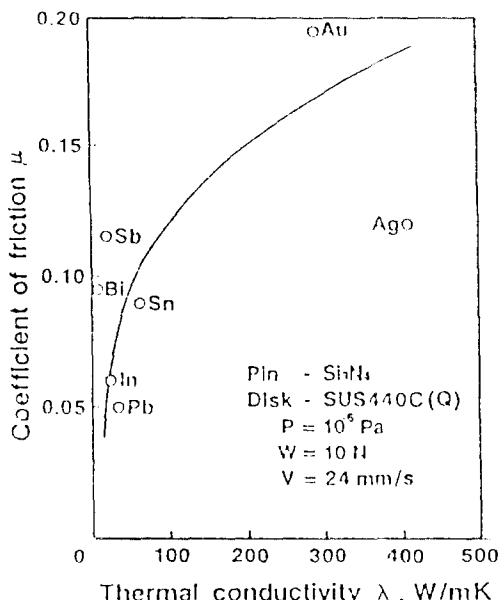


Fig. 14. Relation between thermal conductivity of film materials and friction coefficient.

재료를 7종류로 변화시켜 실험을 실시하였다. 실험 결과는 Fig. 10과 같다. 그림에서 Au피막을 제외하고는 마찰계수는 어떤 최소치에서 비교적 안정되고 있다.

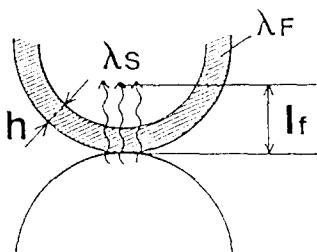


Fig. 15. Model for calculation of effective thermal conductivity.

그러나 그중에서도 Bi, Sb피막에 있어서는 그 낮은 마찰계수의 상태를 오래 유지하지 못했다.

그리고 각 피막에서 얻어진 최저의 마찰계수를 정리하여 Fig. 11에 나타내었다. 마찰계수가 낮은 순으로 In, Pb, Sn, Bi, Sb, Ag, Au이었다.

한편 Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14에 각 피막재료의 융점, 경도 및 열전도율과 최저 마찰계수를 나타내고 있다.

이런한 결과로부터 융점, 경도, 열전도율, 이 모든 것에 관하여 상관관계가 있다고 생각된다. 즉 경도, 융점, 열전도율이 낮으면 마찰계수는 낮게 된다는 점이다.

먼저 피막재료의 경도의 영향에 대해서 고찰하여 보면 경질금속의 하부재에 연질금속의 박막을 부착시키면 마찰을 낮게 할 수 있다고 하는 이전부터의 박막윤활이론에 의하면 박막의 경도가 낮으면 낮을 수록 마찰은 낮게 된다고 한다. 다음으로 열전도율에 대해서 생각하여 보면 고체가 타고체위를 미끄러질 때 마찰력은 그 운동을 방해하는 일. 즉, 그 때 일의 대부분은 접촉면간의 열로 변한다. 만약, 열전도율이 불량한 것이면 마찰열은 그만큼 급격하게 전달되지 않기 때문에 마찰면 온도 및 섭광온도는 그것에 대응하여 높게 된다. 마찰면 온도가 높게 되면 마찰면 피막의 연화 등에 의해 마찰계수는 낮게 된다고 생각된다.

끝으로 융점에 대해서 검토하여 보면 이것은 마찰열에 의한 피막재료의 용해를 용이하게 또는 연화를 쉽게 하고 있다. 융점이 낮으면 용해하기 쉽고 연화하기 쉽게 되어 마찰계수는 낮게 된다. Bowden과 Tabor[7]에 의하면 표면온도가 높게 됨에 따라 마찰계수는 내려가고 융점부근에서 가장 낮게 되고 표면온도가 융점을 초과하면 급격하게 상승한다.

그러나 순금속은 융점이 낮으면 경도도 열전도율도 낮게 되는 경향이 있다. 그 때문에 영향인자를 지적

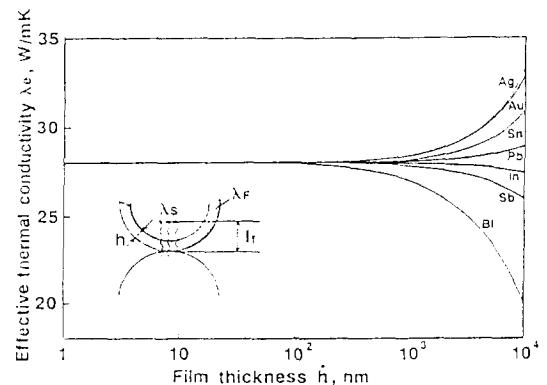


Fig. 16. Relation between film thickness and effective thermal conductivity of film materials.

하는것이 어렵다고 본다. 이런한 상기의 3가지 사항에 대하여 고찰하여 보면 Fig. 14에 나타난 바와 같이 각 피막재료에서 얻어진 마찰계수와 각 피막재료의 열전도율은 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 열전도율이 불량한 것이라면 마찰열에 의한 마찰면 온도 및 섭광온도가 상승하고 피막재료가 연화 또는 용융하여 마찰계수가 내려간다고 생각되므로 피막재료에 대한 열전도율의 영향을 검토하여 보면, Fig. 15와 같이 부표면금속의 SUS440C(Q)상에 피막두께 h (nm)의 피막재료가 존재하고 있는 경우를 생각하고, 그 유효열전도율 λ_e (W/mK)를 산출하여 영향을 조사하였다.

유효열전도율 λ_e (W/mK)는, Lim[8] 등에 의한 다음식을 이용하면

$$\lambda_e = \frac{\lambda_s \cdot \lambda_f}{\{(1-h/l_f)\lambda_f + (h/l_f)\lambda_s\}} \quad (1)$$

단, λ_s : 하부재의 열전도율($=28$ W/mK)

λ_f : 피막의 열전도율(W/mK)

h : 막 두께(nm)

l_f : $6 \cdot 10^4$ (nm)

식 (1)을 사용하여 각 피막재료에 있어서의 피막두께와 유효열전도율 λ_e (W/mK)의 관계를 Fig. 16에 나타내었다. 이것에 의하면 피막두께가 1 nm~104 nm까지 변화하여도 유효열전도율은 그다지 변화하지 않는다. 즉 각 피막재료의 열전도율의 영향은 거의 없다고 생각된다.

한편 Fig. 12, Fig. 13에 나타나 있는 바와 같이 각 피막재료의 융점 및 경도와 각 피막재료에서 얻어진 마찰계수와의 상관관계가 나타나 있다. 여기서 융점

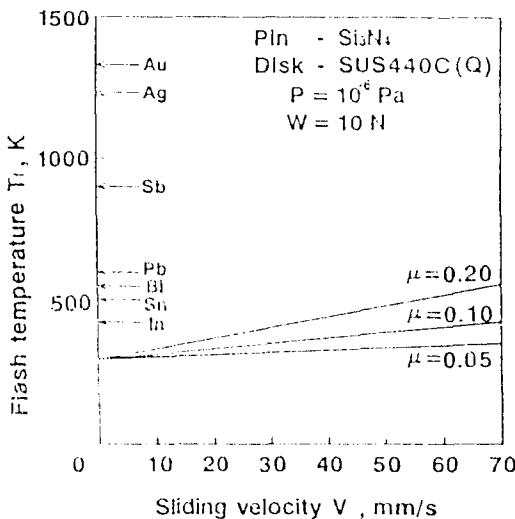
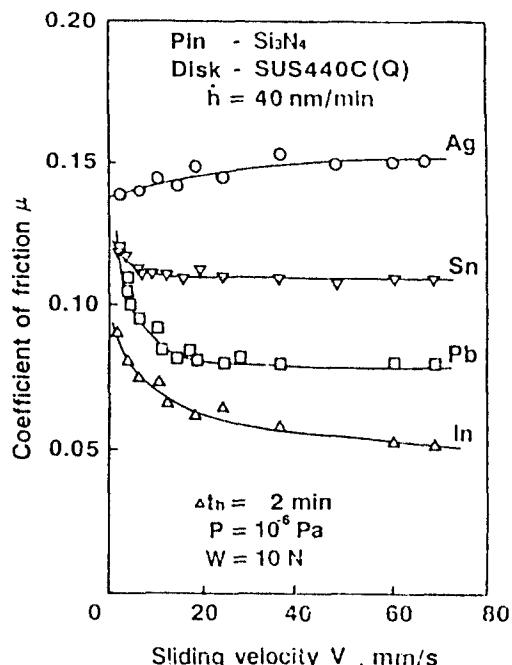


Fig. 17. Relation between sliding velocity and flash temperature.



및 경도의 영향을 생각할 경우. 가장 중요한 것으로서 마찰면 온도 $T_b(K)$ 및 섬광온도 $T_f(K)$ 을 들 수 있다. 그러나 마찰면 온도가 그다지 높아지지 않아도 진실 접촉점에 있어서 섬광온도가 높아지면 진실접촉점에서의 피막재료의 연화 및 용융에 의한 전단력의 저하에 의해 마찰계수는 낮게 된다고 생각된다.

먼저 접촉점에서의 마찰면 온도에 대하여 본 실험의 최적절한 값을 구할 수 있는 유사한 방법으로 적용할 수 있는 것을 생각하여 보면 Jaeger[9]에 의하여 마찰면 온도는 다음식으로 주어진다.

$$T_b - T_o = \frac{\mu V \cdot 10^{-3} \sqrt{WP_m}}{4(\lambda_p + \lambda_d)} \quad (2)$$

단, T_b : 마찰면 온도(K)

T_o : 실온(K)

W : 하중(N)

P_m : 연질재료의 항복응력(Pa)

λ_p, λ_d : pin 및 disk의 열전도율(W/mK)

V : 미끄럼마찰 속도(mm/sec)

평균마찰면 온도는 식(2)로부터 속도, 마찰계수, 하중에 비례하고 열전도율에 반비례함을 알 수 있다. 앞에서 나타낸 바와 같이 피막재료가 접촉점에 존재하여도 열전도율은 그다지 영향받지 않음을 보여 주고 있다. 여기서 본 연구의 실험조건을 대입하면 마찰면 온도는 다음과 같이 된다.

Fig. 18. Relation between sliding velocity and friction coefficient of film materials.

$$[W=10N, P_m=2.7 \text{ GPa}, \lambda_p=28 \text{ W/mK}, \lambda_d=29 \text{ W/mK}] \quad T_b - T_o = 0.7 \mu V \quad (3)$$

또한 In과 Ag에 대하여 계산하여 보면, In에 있어서 $\mu=0.05, V=24(\text{mm/s})$ 의 경우, 마찰면 온도의 상승은 0.9 K이며, Ag에 있어서 $\mu=0.12, V=24(\text{mm/sec})$ 의 경우, 마찰면 온도의 상승은 2.1 K로 되어 그다지 상승하지 않음을 알 수 있다.

그리고 섬광(flash)온도에 관해서는 Lim[8] 등에 의해 구해진 식에서 Lin[10]에 의해 열분배율을 고려하고 수정하여 얻어진 다음 식을 이용하여 산출하였다.

$$T_f = T_b \left[1 - \left(\frac{\bar{P}}{N} \right)^{1/2} \right] + T_0 \left(\frac{\bar{P}}{N} \right)^{1/2} + \left(\frac{2\lambda_p T_b a_d}{\lambda_p + \lambda_d T_d a_p} \right) \frac{u T_d \beta}{2} \left(\frac{\bar{P}}{N} \right)^{1/2} \bar{V} \quad (4)$$

단, T_f : 섬광온도(K)

\bar{P} : $W/A_n \cdot H$ 로써 표시되는 무차원 파라미터(A_n : 외관의 접촉면적(m^2))

H : 강의 경도(Pa)

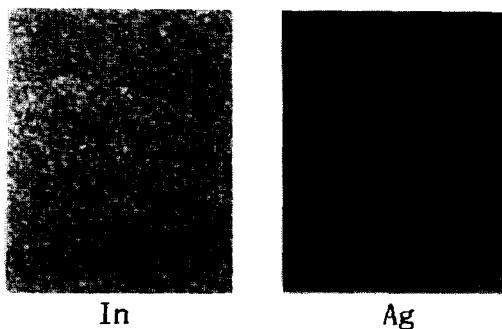


Photo. 1. Evaporation surface of Ag film and In film.

- $\frac{N}{V}$: 진실접촉점의 수
 $V \cdot \gamma_0 \cdot 10^{-3}/a$ 로써 표시되는 무차원 파라미터(γ_0 : 외관의 접촉면 반경(m), a: 열확산율(m^2/s))
 β : Lim에 의해 정해진 정수(=6)
 T_b, T_d : aH/ λ 로써 표시되는 pin 및 disk의 등가온도
 a_p, a_d : pin 및 disk의 열확산율(m^2/s)

여기서 각 조건을 대입하면 섬광온도는

$$P = 0.11, \gamma_0 = 6 \cdot 10^{-5}(m) \text{ hertz의 접촉반경}, N = 5, \lambda d = 29(W/mK), \lambda_p = 28(W/mK), T_d^* = 2167(K), T_p^* = 6173(K), a_d = 12.2 \cdot 10^{-6}(m^2/s), a_p = 10.1 \cdot 10^{-6}(m^2/s)]$$

$$T_f = T_b + 16.0 \mu V \quad (5)$$

여기서 식 (3)을 대입하면

$$T_f = T_b + 16.7 \mu V \quad (6)$$

으로 된다.

여기서 마찰계수를 파라미터로 하여 미끄럼마찰속도 V (mm/sec)와 섬광온도 $T_f(K)$ 의 관계를 나타낸 것이 Fig. 17이다.(여기서 $T_0 = 300 K$ 로 가정한다.) 그리고 그림으로 알 수 있드시 섬광온도는 본 실험에서 사용한 속도범위에서는 그다지 상승하지 않음을 알수 있다.

즉, 섬광온도에 있어서도 진실접촉점에서의 용융은 기대할수 없다. 그러나 In, Sn, Bi, Pb에 있어서는 진실접촉점에서의 연화가 일어날 가능성은 있다. 즉, Fig. 18에 나타난 바와 같이 미끄럼마찰속도의 상승에 따라 마찰계수가 저하한 것이라고 생각된다.

그러나 식 (2), (4)를 적용하여 구한 섬광온도의 값이 낮게 나타난것은 식 적용에 따른 오차에 의해

정확한온도 산출이 되지못한 것인지는 알 수 없으나 본 실험에서의 섬광온도의 경향에 대해서는 파악할 수 있었다.

3-3. 피막재료의 속도특성

여기서는 $Si_3N_4-SUS440C(Q)$ 조합에 대하여 Ag, In, Pb, Sn의 4종류의 피막재료에 있어서 미끄럼마찰 속도의 영향을 조사했다.

실험방법으로서는 마찰속도(V)를 24 mm/sec로서 마찰을 시작하고 난 후 마찰계수가 낮게 안정된 곳에서 속도를 1.2~67.0 mm/sec의 범위로 변화시켜 그 특성을 검토하였고 그 실험결과는 Fig. 18과 같다. 그럼에서 알수 있듯이 Ag에 관해서는 속도의 변화에 영향이 없이 마찰계수는 거의 일정하였으나 In, Pb, Sn 등은 속도가 낮아짐에 따라 마찰계수는 크게되는 경향을 갖고 있으며 이들은 미끄럼마찰속도 약 20 mm/sec 이상에서는 마찰계수의 변화가 거의 없는 일정한 낮은 마찰계수를 보이고 있다.

3-4. 막형태의 영향

7종류의 피막에 대하여 disk에 증착시킨 증착막의 광학현미경 사진을 살펴보면 막의 형태는 크게 2가지로 나눌수가 있다. 막의 형태가 입상으로 나타나는 In, Pb, Sn과 막의 모양이 입상형태가 아닌 Ag, Au로 나누어진다. 그러나 Bi, Sb막의 형태는 사진으로서는 판단하기 힘들다. 여기서 입상형태의 것을 In형, 그렇지 않은 것을 Ag형으로 하여 각각의 대표적인 In, Ag증착막의 광학현미경 사진을 사진 1에 나타내었다. 그리고 이 2가지의 윤활기구에 대하여 고찰하였다.

3-4-1. 피막재료의 제특성에서 본 분류

In형: 경도, 용접, 열전도율이 낮고, 마찰계수도 비교적 낮다.

Ag형: 경도, 용접, 열전도율이 높고, 마찰계수도 비교적 높다.

3-4-2. 속도특성에서의 분류

In형: 미끄럼마찰 속도의 감소에 의해 마찰계수는 크게 된다.

Ag형: 마찰계수는 미끄럼마찰 속도에 의해 변하지 않는다.

이와 같이 막의 형태로서 구분이 가능하므로 윤활특성도 마찬가지로 구분될 수가 있다. 그리고 In, Ag에 관하여 마모트랙의 X선분석을 하여 그 결과를 Fig. 19, 20에 나타내었다. 여기서 pin시험편의 X선분석을 위하여 표면에 금 coating을 하였다.

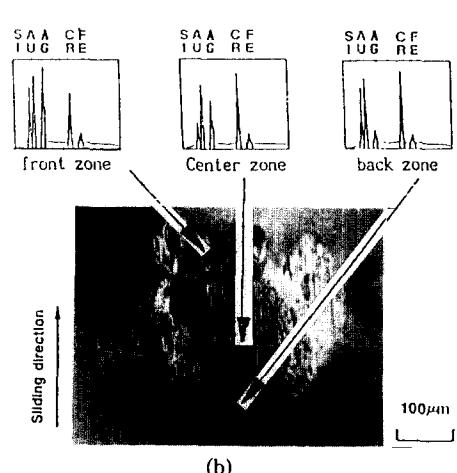
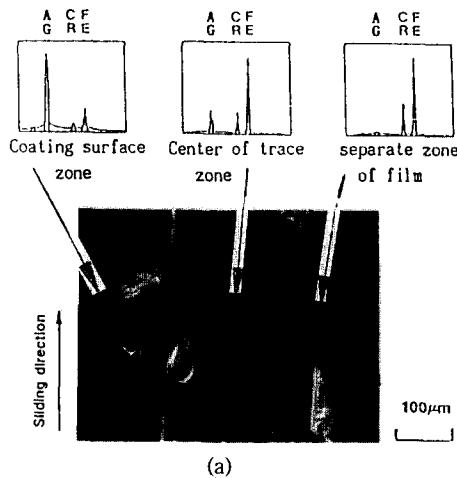


Fig. 19. EDX analysis of friction surfaces coated with Ag film.
(a) disk; (b) pin

In형: pin의 이착물에는 피막재료가 존재하고 있으나 disk의 마모트랙 중앙에는 피막재료는 거의 존재하지 않는다.

Ag형: pin의 이착물 전부분과 disk의 마찰트랙 중앙에도 피막재료가 존재한다.

이상의 사실로부터 윤활기구는 In형과 Ag형으로 구분할 수가 있다. 따라서 이 2가지의 윤활기구에 대하여 고찰하고자 한다.

• In형의 윤활기구

In형의 윤활기구는 pin에 형성된 이착물이 중요한 역할을 한다고 생각된다. 즉, X선분석으로부터 알 수 있듯이 disk표면에는 피막재료가 거의 존재하지 않기

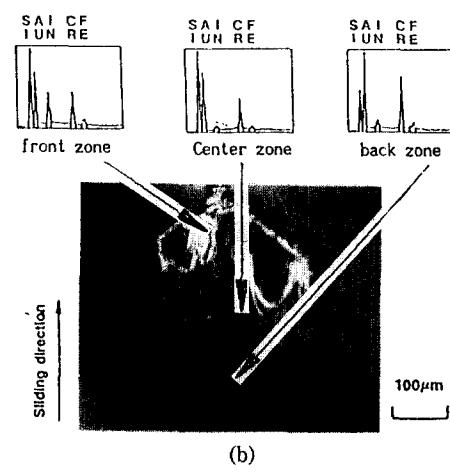
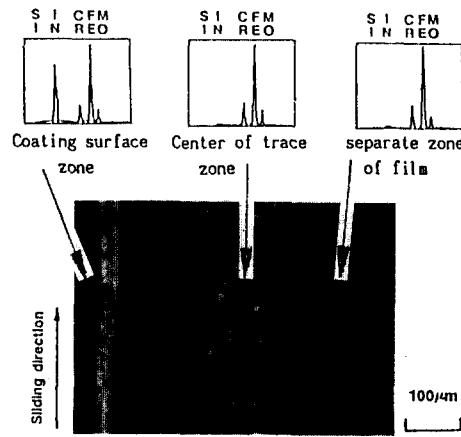
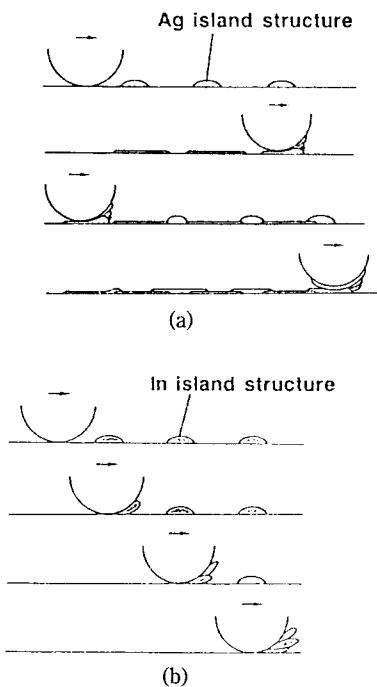


Fig. 20. EDX analysis of friction surfaces coated with In film.
(a) disk; (b) pin

때문에 pin에 형성된 이착물과 disk표면 사이에서 윤활이 이루어진다고 생각된다. 또한 pin에 이착한 피막재료의 융점은 비교적 낮기 때문에 이 윤활막은 마찰속도의 상승에 따라 온도가 상승한다. 즉, 섬광온도가 상승함에 따라 진실접촉점에서의 연화가 일어나 전단강도가 저하하여 마찰계수는 낮게 된다고 생각된다.

• Ag형의 윤활기구

Ag형 윤활기구에 관해서는 X선분석으로부터 pin, disk의 마모트랙 양편 모두 피막재료가 존재하고 있다. pin의 이착물 및 disk의 마모트랙상의 피막재료는 뒤아내는 정도로서는 벗겨지지 않을 만큼 강하게 부착하고 있다. 윤활막의 부착기구에 관해서는 Fig. 21에

**Fig. 21. Lubrication mechanism of film.**

(a) Lubrication mechanism of Ag; (b) Lubrication mechanism of In.

나타낸 바와 같이 disk, pin의 양면에 피막을 형성하고 있다.

이것은 宮川[11-13]이 보고한 바와 같이 종래와 같은 박막윤활이며 막내전단이기 때문에 마찰계수는 비교적 높아진다고 생각된다.

4. 결 론

Si_3N_4 -SUS440C(Q) 조합의 마찰에 대하여 초고진 공중에서 tribo-coating을 실시하여 윤활특성에 관한 피막재료의 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Tribo-coating Ag막의 최적공급피막두께는 약 $h=30 \text{ nm}$, In막은 약 $h=50 \text{ nm}$ 정도이다.

(2) 하중 10N, 미끄럼마찰속도 24 mm/sec의 조건 하에서 마찰계수가 낮은것 부터는 In, Pb, Sn, Bi, Sb, Ag, Au순이었다. 저마찰계수치로서는 Pb가 약 0.05, In은 0.04이었다.

(3) 미끄럼마찰 속도의 상승으로 마찰면 온도의 상승은 보이지 않았다. 그러나 섬광온도는 약간의 상승을 보여 이 섬광온도의 상승으로 In형 윤활기구에

영향을 미쳤다. 즉, 미끄럼마찰 속도의 상승과 함께 마찰계수는 감소했다.

(4) 윤활기구는 In형과 Ag형의 2가지로 나누어진다. pin에 형성된 prow와 disk 사이에서 윤활이 이루어지는 In형 윤활기구는 미끄럼마찰 속도의 영향을 받으며, 마찰계수는 비교적 낮고 경도, 융점, 열전도율이 낮다. 막내전단을 일으키는 Ag형 윤활기구는 미끄럼마찰 속도에 영향을 받지 않으며, 마찰계수는 비교적 높고, 경도, 융점, 열전도율도 높다.

참 고 문 헌

1. Takao Kayaba, Kohji Kato, Hiroyuki Ohsaki, "The lubricating properties of friction coating films of Pb-Sn alloys in high vacuum", JSLE, pp. 209-214, 1985.
2. K. Kato, H. Osaki, T. kayaba, "超高真空中のセラミクスに對する 50Pb-50Sn 合金のトライボコ-ティン膜の潤滑特性", Tribology Trans., Vol. 32-1, pp. 42-46, 1988.
3. 加藤康司, 中島透 →トライボコ-ティングにおける SUS440C 上への 50Pb-50Sn 合金の移着メカニズム~, 日本潤滑學會 第33期 全國大會(岡山)豫稿集A·3, pp. 9-12, 1988.
4. 加藤康司, 中島透, "トライボコ-ティングにおける SUS440C 上への 50Pb-50Sn 合金の移着メカニズム", 日本潤滑學會第33期全國 大會(岡山)豫 C·30, pp. 517-520, 1988.
5. 加藤康司, 中島透, 萩場孝雄, "トライボコ-ティングにおける SUS440C 上への 50Pb-50Sn 合金の移着メカニズム", 日本潤滑學會 第33期全國大會(岡山)豫稿集 C·31, pp. 521-524, 1988.
6. K. Kato, H. Furuyama, M. Mizumoto, "真空中における金属被膜の潤滑特性", Proc. Japan Int. Trib. Conf. Nagoya, pp. 261-266, 1990.
7. F.P. Bowden and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids", Clarendon Press, Oxford, 1954.
8. S.C. Lim and M.F. Ashby, Acta Metall., Vol. 35, 1, 1987.
9. J.C. Jaeger Jour. & Proc. Roy. Soc. N.S.W., Vol. 76, pp. 203, 1942.
10. 林慎之, 東北大學平成元年度 卒業研 修前刷, 1990.
11. 宮川行雄, 西村允, 野坂正陸, 宮脇雄三, "イオンプレーティング金銀膜の摩擦・摩耗特性に関する研究", 潤滑, Vol. 22-12, pp. 803-810, 1977.
12. 宮川行雄, 西村允, 野坂正陸, 宮脇雄三, "イオンプレーティング金銀膜の摩擦・摩耗特性に関する研究", 潤滑, Vol. 23-1, pp. 51-66, 1978.
13. 宮川行雄, 西村允, 野坂正陸, 宮脇雄三, "イオンプレーティング金銀膜の摩擦・摩耗特性に関する研究", 潤滑, Vol. 23-2, pp. 136-159, 1978.