

초고진공중에 있어서 Tribo-Coating 윤활기구의 기초연구

金亨實* 加藤 廉司** 全泰玉*** 박흥식***

* 부산공업대학 1공학부 기계설계학과
** 동북대학공학부 기계전자공학과
*** 동아대학교 공과대학 기계공학과

1. 서론

우주공간의 기계, 기구에 있어서는 무계에 기인하는 운동의 저항이 없기 때문에 마찰저항의 제어가 결정적으로 중요하게 된다. 이과제에 대하여 저자들은 여태까지의 고체윤활법(1)-(4)와는 다른 새로운 Tribo-Coating 법을 개발하여 그 유효성을 나타내어 왔다. (5)-(7)

본 연구에서는 피막재로서 전회의 보고에서 이미 유효성이 나타난 바 있는 In 을 사용하여 마찰반복수에 따른 마찰계수변화에 미치는 Pin, disc 의 표면거칠기의 변화의 영향을 명확하게 밝히고, 초고진공중에 있어서 Tribo-Coating 법에 의한 In 막의 윤활기구를 검토하고자 한다.

2. 실험방법

Fig.1 에 Tribo-Coating 장치 및 Pin-on-disc 형 마찰장치의 개략을 나타내고 있다. 이 장치는 10^{-6} Pa 의 초고진공 장치내에 설치되어 있다.

Al_2O_3 노에는 피막재료를 내장해 두고 있고, Mo Heater 의 통전기열에 의해 Disc 마찰면에 피막재료를 증착시켜 Tribo-Coating 을 형성 시킬 수가 있다.

수직하중 W 및 마찰속도 V 는 각각 10 N, 24 mm/s 로 일정하게 했다.

Pin 시험편, Disc 시험편 및 피막재료를 전회의 보고(5)-(6)에 있어서 좋은 결과가 얻어진 질화규소(Si_3N_4) 구, SUS440C Disc 및 In 을 사용했다. 질화규소, SUS440C 시험편 및 In 의 제특성을 각각 표1, 표2에 나타내었다.

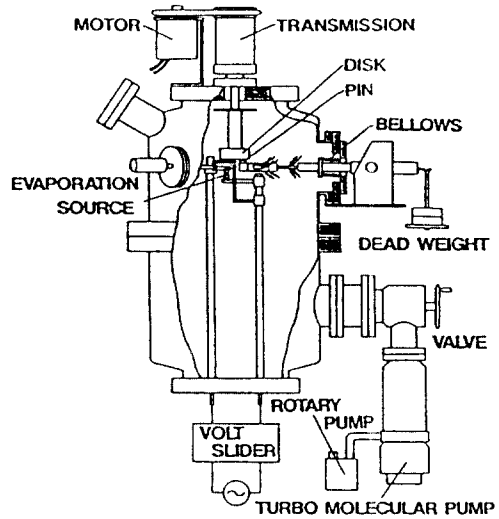


Fig.1 실험장치 개략도

표1. Pin 및 Disc 의 제특성

	Disk	Pin
Material	Quenched SUS440C	Cold pressed SbN ₄
Vickers hardness Hv, kgf/mm ²	800	1652
Surface roughness R _{max} , μm	0.02 - 0.10	0.02
Elastic modulus E, GPa	204	320
Poisson's ratio ν	0.3	0.27
Density ρ, X 10 ³ kg/m ³	8.00	3.24
Thermal conductivity λ, W/mK	29	28
Thermal diffusivity a, X 10 ⁶ m ² /s	12.2	10.1
Fracture toughness K _{IC} , MPa·m ^{1/2}	—	5.2

표2. 피막재료의 제특성

Film material	In
Vickers hardness Hv, kgf/mm ²	1.0
Melting point T _M , K	430
Boiling point T _b , K	2286
Elastic modulus E, GPa	11
Density ρ, X 10 ³ kg/m ³	7.31
Thermal conductivity λ, W/mK	25
Thermal diffusivity a, X 10 ⁶ m ² /s	14.3
Saturated vapor pressure at 300K P _{f300} , Pa	7.3 X 10 ⁻³²

3. 실험결과 및 고찰

3-1 피막공급량이 마찰계수 및 피막수명에 미치는 영향

Fig.2 에 피막공급량에 대한 마찰계수 및 피막수명의 영향을 나타내고 있다. 전회에 보고된 바와 같이 대체로 피막이 장수명으로 돌입하는 경계인 Disc 의 초기표면거칠기가 R_{max} = 0.025 μm 일때에 피막공급율을 변화시켜 마찰반복횟수에 의한 마찰계수의 변화과정과 피막수명에 대한 영향을 나타낸 것이다.

그림에 나타나 있는 것과 같이 피막공급율이 약 h = 16 nm/min, h = 120 nm/min 일때보다도 h = 35 nm/min 일때가 가장 장수명을 나타내고 있다.

Fig.2 로부터 알수 있듯이 Tribo-Coating 중, 즉 마찰초기의 마찰반복횟수 1 cycle 부터 20 cycle 사이의 마찰계수 변화에 의해 피막수명의 장·단이 좌우된다고 하는것은 대단히 중요한 것이라고 생각된다.

이것은 Tribo-Coating 중에 최적의 피막공급량에 의해서 Tribo-Coating 운할의 장점을 충분히 살릴수가 있다는 점을 의미하므로 피막공급율이 h = 35 nm/min 의 경우와 같은 마찰초기의 마찰계수변화곡선을 얻는 것이 Tribo-Coating 운할에 있어서 가장 중요한 인자중의 하나이다.

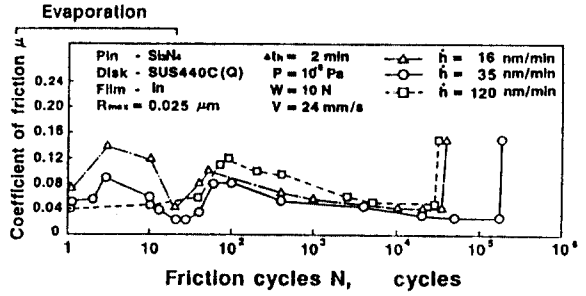


Fig.2 피막공급량에 따른 마찰계수와 피막수명의 영향

3-2 마찰반복수에 따른 마찰계수의 변화

Fig.3 에 마찰반복수에 따른 마찰계수변화의 1 예를 나타내고 있다.

그림중 Δth는 In 의 증발시간 h 는 증발 속도이다. 이그림에서 마찰계수는 마찰초기의 Tribo-Coating 중에 있어서 처음에는 감소하고 (I), Tribo-Coating 종료후, 일단 μ = 0.08 ~ 0.1 정도까지 상승한다(II). 그후 재차감소하여(III), 안정된 낮은 값으로 진정되고 (IV), 어떤 마찰반복수 후에는 급격하게 증가하는 것을 알수 있다.

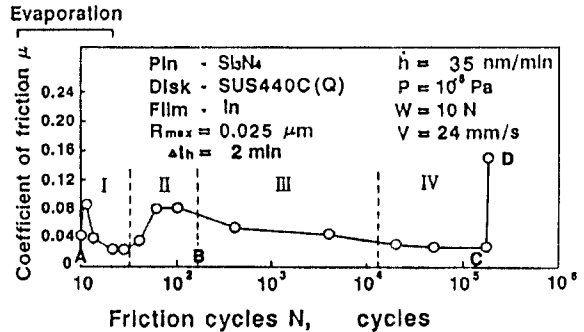


Fig.3 마찰반복수에 따른 마찰계수의 변화

이것은 저자들의 이제까지의 연구에 공통되는 전형적인 마찰계수의 변화과정이다. 이후 이마찰계수의 변화과정에 미치는 마찰면거칠기의 영향을 Pin 및 Disc 의 표면관찰을 중심으로 검토한다.

3-3 Pin 표면의 미시적 관찰

마찰반복수에 따르는 Pin 표면의 변화과정의 광학현미경사진을 Fig.4 (a)-(f)에 나타

내고 있다. Fig.4 및 EDX 분석에 의해 Pin 전연부에 In이 부착해 있는것을 알수 있다.

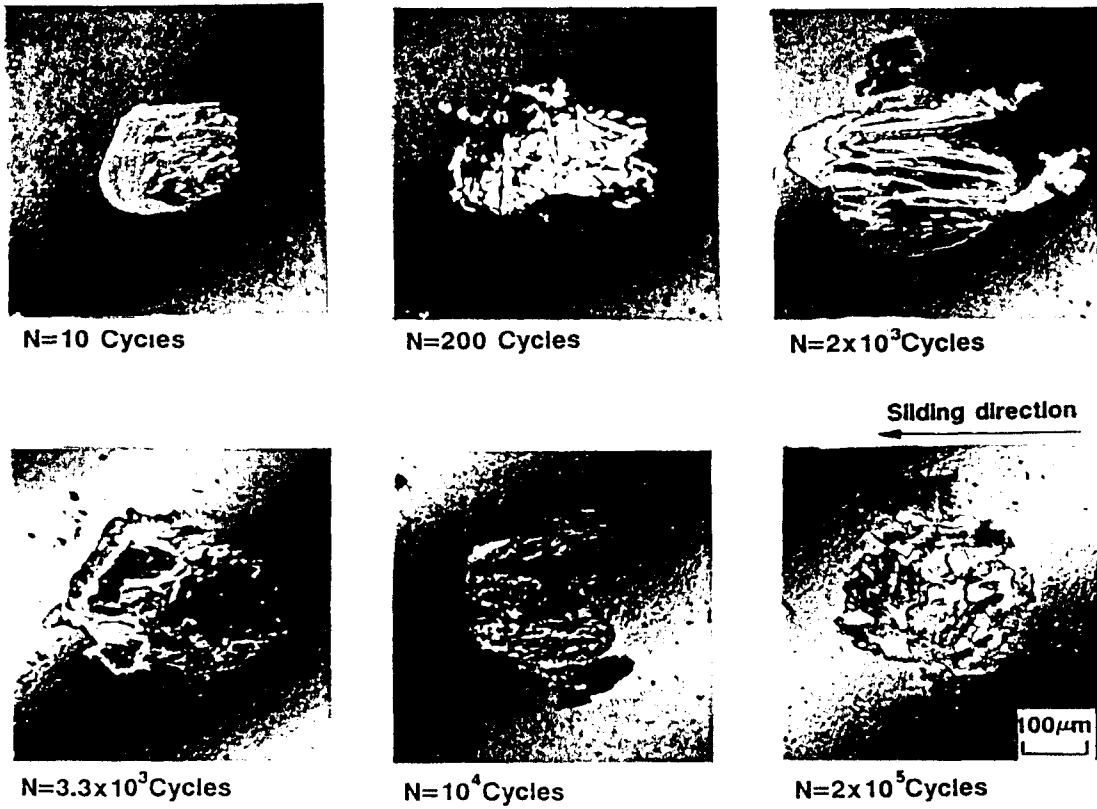


Fig.4 Pin의 마찰면의 광학현미경사진

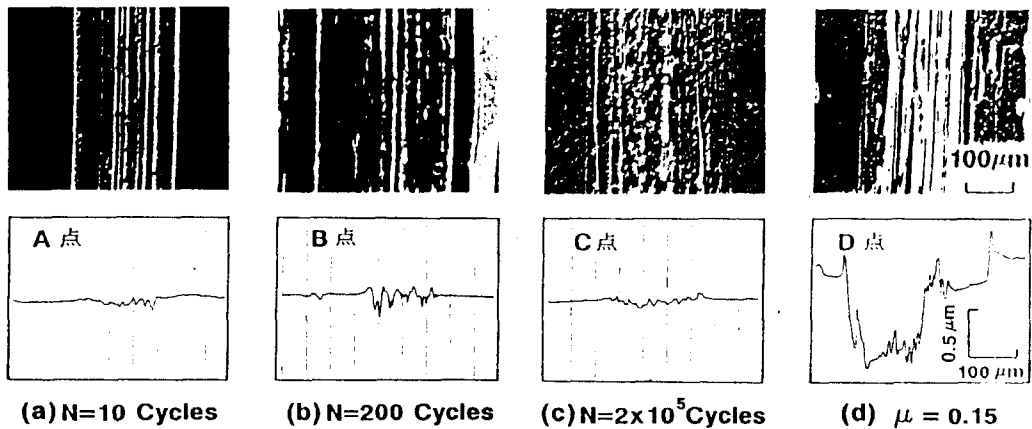


Fig.5 Disc마찰면의 광학현미경사진과 Disc의 마모흔의 단면곡선

더욱이 마찰반복수에 따라 이 In 양이 감소하고, 이 In 이 없어져 버릴때(Fig.4(f)), Fig.3 에 나타난 것과 같이 마찰계수가 급증하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 Pin 에 부착한 In 에 의해서 윤활효과가 발휘되고 있다고 생각할 수가 있다.

3-4 Disc 표면의 미시적관찰

Fig.3 중의 A-D 점의 마찰반복수에 대응하는 Disc 표면의 광학현미경사진, 단면곡선을 Fig.5 (a)-(d) 에 나타내고 있다. 이그림으로부터 A 점에서 B 점에 걸쳐서 깊고 폭넓은 條痕의 수가 증가하고 있고 그이후 B 점에서 C 점에 있어서는 條痕의 깊이가 감소하고 있는것을 알수있다.

더욱이 D 점에 있어서는 접촉폭전역에 걸쳐서 폭넓은 條痕이 발생하고 있는것을 알 수있다. 이와같은 마찰흔의 최대높이 R_{max} 를 구하면 Fig.6의 관계가 얻어진다.

Fig.3 과 Fig.6 를 비교하면 마찰계수 μ 와 최대높이 R_{max} 의 변화는 거의 대응하고 있는것을 알수있다.

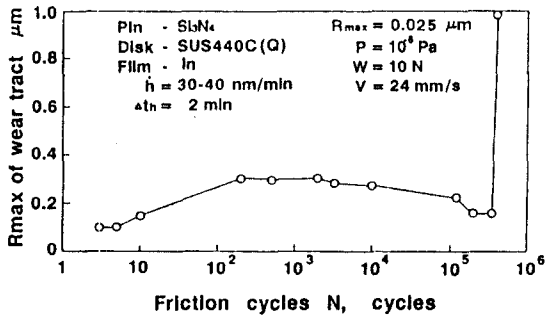


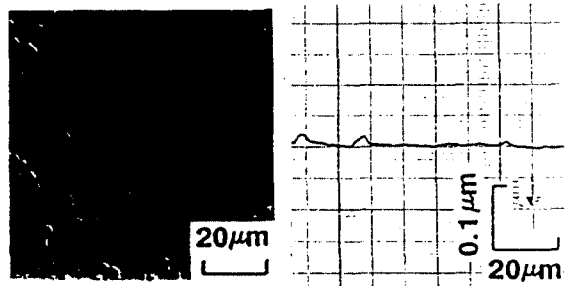
Fig.6 마찰 반복수에 따른 마찰흔의 최대높이 변화

3-5 Disc의 마찰표면거칠기의 형성기구

Fig.5 (a)-(c) 로부터 마찰면거칠기의 증감 원인은 條痕의 형성, 소실에 있는 것을 알 수 있다. 여기서 이 條痕의 형성, 소실기구에 대하여 다시한번 관찰하여 보면 Fig.7 은 초기 Disc 표면의 상세한 관찰결과(단면곡선, SEM 사진, 경도, EDX 분석) 이다.

이그림으로부터 Disc 표면에는 표면거칠기 등급크기의 Cr 을 중심으로 한 경한凸부 존재하고 있는것을 알 수 있다. 한편 Fig.8 (a) 에 條痕의 형성초기 및 (b) 에 초기條痕소실부의 SEM 사진을 나타내고 있다.

이 그림으로부터 Fig.7 에 나타나 있는凸부의 탈락을 핵으로 條痕이 형성되고 (Fig.8 (a)-->(b)), 條痕凸부의 마모와 凹부



Disc표면의 광학현미경사진과 단면곡선

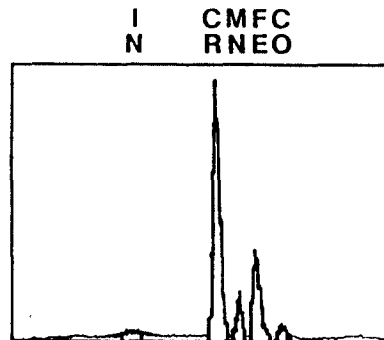
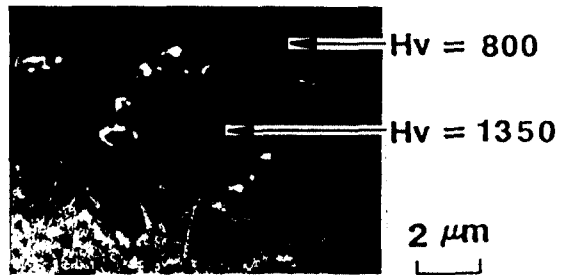


Fig.7 Disc의 마찰면의 SEM사진과 개재물의 EDX분석

가 메꾸어짐에 의해 전체가 평활하게되고 있는(Fig.8(c)) 것을 알 수 있다.

이것은 접촉상태의 가혹한凸부에 있어서 탈락이 일어나고 이 탈락입자에 의해 條痕이 형성되어 표면거칠기가 증가하고 전면에 걸쳐서 條痕이 형성되면 條痕凸부가 마모하여 Pin 으로부터 In 이 공급됨으로서 표면이 평활화하고 안정한 상태로 되는것이라고 생각할 수가 있다.

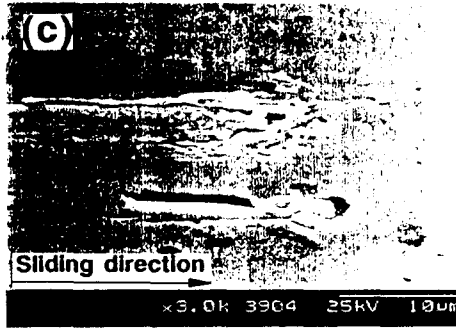
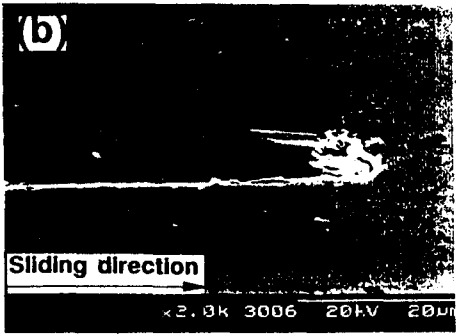
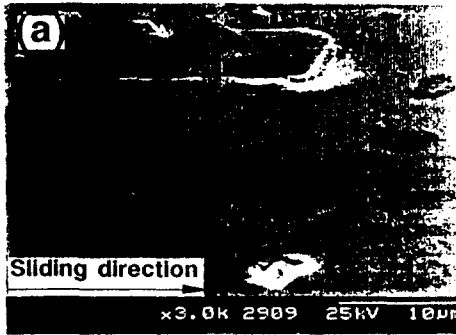


Fig. 8 Disc의 마찰면의 SEM사진

3-6 마찰계수에 미치는 마찰흔표면거칠기의 영향

Fig. 3 및 Fig. 6 에서 마찰계수와 마찰흔표면의 최대높이 R_{max} 의 관계를 Fig. 9 에 나타내고 있다.

이그림으로부터 마찰계수는 R_{max} 의 변화에 대단히 민감하고 R_{max} 의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

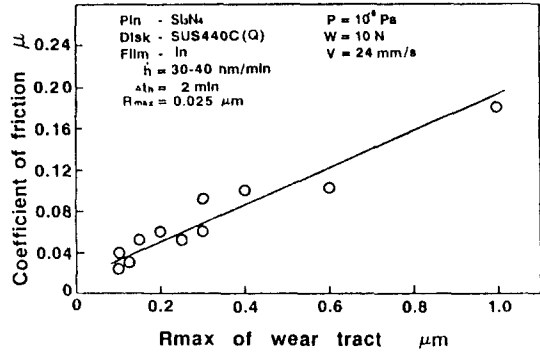


Fig. 9 Disc의 마찰흔의 최대높이 R_{max} 와 마찰계수 μ 의 관계

또한 이결과로부터 Fig. 3 에 있어서 마찰 반복수에 따르는 마찰계수의 변화는 반복수에 따른 마찰흔 표면거칠기의 변화에 의해 생긴다고 생각할 수가 있다. 한편 전보(7)에서 얻어진 정상상태에 있어서의 마찰계수에 미치는 초기표면거칠기의 영향은 초기표면거칠기로부터 정상상태에 있어서의 표면거칠기가 결정되는 것을 의미하고 있다고 생각할 수 있다.

어쨌든간에 In 막에 의한 윤활기구를 생각함에 있어서 이 Fig. 9 의 마찰계수와 마찰흔표면거칠기의 관계는 대단히 유효한 data 라고 생각된다.

4. 결론

초고진공중에 있어서 In 을 사용한 Tribo-Coating 막의 마찰실험을 행한결과 이하의 결론을 얻었다.

(1) 마찰반복수에 따른 마찰계수 μ 의 변화과정은 이하의 4 개의 단계로 나누어진다.

- ① Tribo-Coating 에 따르는 μ 의 감소과정
- ② 條痕의 형성에 따르는 μ 의 증가과정
- ③ 條痕의 소실에 따르는 μ 의 감소과정
- ④ μ 의 정상상태

(2) 마찰반복수에 따른 마찰계수의 변화는 Disc 표면조도의 변화에 대응한다.

(3) Disc 표면거칠기의 증가에 따라 마찰계수는 직선적으로 증가한다.

(4) Pin 에 부착한 In 에 의해 유효한 윤활이 이루어진다.

謝辭

본연구에 협력해주신 日立製作所(株) 에 감사를 드립니다. 특히 직접담당하신 日立製作所(株) 機械研究所 의 水本宗男 氏에 감사를 드립니다. 또한 유효한 토론을 해주신 동북대학의 梅原徳次 氏, 足立幸志 氏에게 감사를 드립니다.

參考文獻

- (1) F. P. Bowden and Tabor, The Friction and Lubrication of Solids, (1954).
- (2) Y. Tsuya and R. Takagi, Wear, 7(1964)131.
- (3) E. Rabinowicz, ASLE Trans., 10(1969)1.
- (4) C. Dayson, ASLE Trans., 14(1970)105.
- (5) K. Kato, H. Furuyama and M. Mizumoto, Proc. Japn. Int. Conf. Nagoya(1990)261.
- (6) 加藤, 今川, 水木, トリビ'ロツ'-會議予稿集, 東京(1991)15.
- (7) 加藤, 金, トリビ'ロツ'-會議予稿集, 福岡(1991)223.