

## 超高眞空中의 Tribo-Coating 膜의 潤滑特性(II)

金亨賢\* 全泰玉\*\* 加藤康司\*\*\*

\* 부산공업대학교 기계설계학과

\*\* 동아대학교 기계공학과

\*\*\* 동북대학 기계공학과

### 1. 서론(緒論)

宇宙는 無重力, 또한 超高眞空의 世界이다. 宇宙에서 機械가 作動할때, 運動의 抵抗은 摩擦力과 慣性力만이 作用한다. 여기서 慣性力은 加速, 減速 일때만 作用하며 그 힘은 正確하게 計算하여 알을 수 있다. 이것에 대하여 摩擦力은 接觸面에 항상 存在하며, 또한 非定常이다.

超高眞空이라고 하는 環境은 接觸面에 있어서의 摩擦力을 더욱더 複雜하게 變化시킨다.<sup>(1)(2)</sup>

따라서 宇宙機械에 있어서는 長期間 安定한 接觸面의 潤滑法은 決定的으로 重要하고, 이제까지의 宇宙開發過程에 있어서 여러차례의 事故로 그것은 實證되고 있다.

그런데도 불구하고 現在宇宙機械를 위해서 長期間 保證되는 潤滑材와 潤滑法은 確立되어 있지 않다. 現在 널리 使用되고 있는 代表的 潤滑材는 二硫化몰리브덴(MoS<sub>2</sub>)이며, 그 潤滑法은 地球上的의 眞空容器中에서 一定의 두께까지 固體潤滑材를 被膜으로써 摩擦表面에 付着시키두는 것이다.

付着시키는 附着力의 크기는 方法에 따라 여러가지로 다르게되지만 어하간 一定두께의 固體潤滑膜이 摩擦에 의해서 소실되는 때가 宇宙機械의 壽命이 된다.<sup>(3)(4)(5)(6)</sup>

이 課題에 대하여 著者들은 어태까지의 固體潤滑法<sup>(1)(4)</sup>과는 다른 새로운 Tribo-Coating法을 開發하여 그 有效性을 報告한 바 있다.

本 研究에서는 被膜材로서 앞서의 報告<sup>(7)</sup>에서 이미 有效性이 나타난 바 있는 In을 使用하여 摩擦反復數에 따른 摩擦係數變化에 미치는 Pin, disc의 表面거칠기의 變化의 影響을 明確하게 밝히고, 超高眞空中에 있어서 Tribo-Coating법에 의한 In 막의 潤滑기구를 검토하고자 한다.

### 2. 實驗材料 및 實驗方法

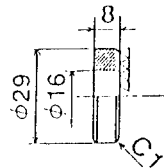
#### 2-1 實驗材料

摩擦試驗用的 Pin 試驗片으로서 Cold press후에 上壓 소결시킨 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 使用했다. 또한 disk試驗片으로서 담금질을 한 SUS 440C를 使用했으며 그 形狀 및 치수들 Fig 1에 나타내었고 試驗片의 特性은 Table 1과 같다.

disk 試驗片의 다듬질임으로서 에메리지 #0/0-#0/5으로 연마하고 나서 酸化 Cr粉末과 물을 利用한 마프연마에 의해 경면 다듬질을 했다. Pin 試驗片 및 disk 試驗片의 세정은 처음에 아세톤에 담근후 꺼내어 드라이기로 乾燥시킨후 아세톤으로 超음파세정을 하였다.



Pin Specimen



Disk Specimen

Fig. 1. Shape and dimension of specimen

Table 1. Properties of pin and disk

	Disk	Pin
Material	Quenched SUS440C	Cold pressed Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Vickers hardness Hv, kgf/mm <sup>2</sup>	800	1652
Surface roughness R <sub>max</sub> , μm	0.02-0.10	0.02
Elastic modulus E, Gpa	204	320
Poisson's ratio ν	0.3	0.27
Density ρ×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	8.00	3.24
Thermal conductivity λ, W/mk	29	28
Thermal diffusivity a, ×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s	12.2	10.1
Fracture toughness K <sub>IC</sub> , MPa·m <sup>1/2</sup>	-	5.2

중직被膜材로서는 純度 99.99% In 을 使用했다. 被膜材의 特性은 Table 2와 같다.

Table 2. Properties of film material

Film material	In
Vickers hardness Hv, kgf/mm <sup>2</sup>	1.0
Melting point T <sub>m</sub> , K	430
Bolling point T <sub>b</sub> , K	2286
Elastic modulus E, Gpa	11
Density ρ×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	7.31
Thermal conductivity λ, W/mK	25
Thermal diffusivity a,×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	14.3
Saturated vapor pressure at 300K P <sub>300</sub> , Pa	7.3×10 <sup>32</sup>

2-2 實驗方法

Fig.2에 Tribo-Coating용 초고진공장치의 概略을 나타내고 있으며, Pin-on-disk型 摩擦裝置가 이 超高眞空 裝置내에 設置되어 있다.

眞空容器內는 10<sup>-6</sup>Pa의 超高眞空이 얻어진다. 眞空容器內의 排氣는 로타리펌프에 의해서 10<sup>-1</sup>-10<sup>-2</sup>Pa로 1次 眞空시킨후 터보분자펌프로서 10<sup>-4</sup>-10<sup>-6</sup>Pa까지 排氣를 시킨다. 그후에 眞空容器를 加熱하여 베이킹을 함으로서 10<sup>-6</sup>Pa의 超高眞空이 얻어진다.

眞空度의 測定은 B-A型 電離眞空計로서 測定했다. 摩擦方式은 Pin-on-disk형의 미끄럼 摩擦裝置를 利用했으며 回轉은 자기결합형 回轉 도입기를 使用하여 超高眞空用器內에 傳送되도록 하였고, 回轉速度를 變化시킴으로써서 1.2mm/sec-72.0mm/sec의 範圍까지 임의로 變化시킬 수가 있다.

垂直荷重은 眞空容器밖에 있는 중추에 의해서 가해지고 垂直荷重 및 摩擦力은 판스프링에 부착된 스트레인 게이지에 의해서 測定하였다.

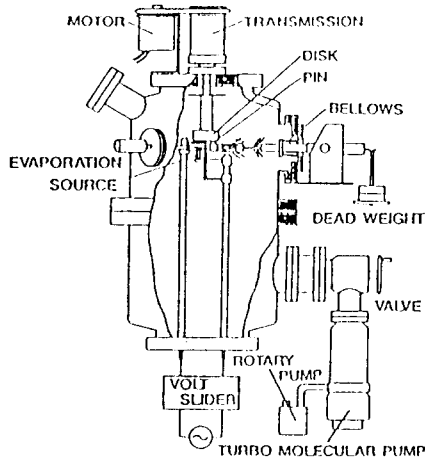


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>노에는 被膜材料를 내장해 두고 있고, Mo heater의 通電가열에 의해 Disc 摩擦面에 被膜材料를 증착시켜 Tribo-Coating을 形成시킬 수가 있다.

垂直荷重 W 및 摩擦速度 V는 각각 10N, 24mm/s로 一定하게 했다.

Pin 試驗片, Disc 試驗片 및 被膜材料는 진회의 보고<sup>(6)-(7)</sup>에서 좋은 結果가 얻어진 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/pin, SUS 440C/Disc 와 In을 使用했다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1 被膜供給量이 摩擦係數 및 被膜壽命에 미치는 影響

Fig.3에 被膜供給量에 대한 摩擦係數 및 被膜壽命의 影響을 나타내고 있다. 진회에 報告<sup>(7)</sup>된 바와 같이 대체로 被膜이 長壽命으로 도입하는 境界인 Disc의 初期表面거칠기가 R<sub>max</sub>=0.025μm일때에 被膜供給率을 變化시켜 摩擦反復回數에 의한 摩擦係數의 變化過程과 被膜壽命에 대한 影響을 나타낸 것이다.

그림에 나타나 있는 것과 같이 被膜供給率이 약 h=16nm/min, h=120nm/min일때 보다도 h=35nm/min일때가 가장 長壽命을 나타내고 있다.

Fig.3으로부터 알수 있듯이 Tribo-Coating중, 즉 摩擦初期의 摩擦反復回數 1 cycle부터 20 cycle사이의 摩擦係數 變化에 의해 被膜壽命의 長短이 좌우된다고 하는것은 대단히 중요한 것이라고 생각된다.

이것은 Tribo Coating中에 最適의 被膜供給量에 의해서 Tribo-Coating潤滑의 장점을 충분히 실현할 수가 있다는 점을 의미하므로 被膜供給率이 약 h=35nm/min의 경우와 같은 摩擦初期의 摩擦係數變化曲線을 얻는 것이 Tribo-Coating潤滑에 있어서 가장 중요한 因子中의 하나이다.

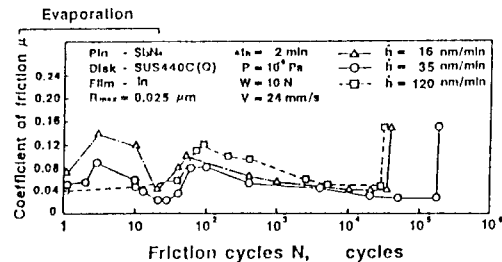


Fig. 3. Effect of friction coefficient and film life depending on rate of film supply

3-2 摩擦反復回數에 따른 摩擦係數의 變化

Fig.4에 摩擦反復回數에 따른 摩擦係數變化의 1 에를 나타내고 있다. 그림중의 Δth는 In의 蒸發時間, h는 蒸發速度이다. 이 그림에서 摩擦係數는 摩擦初

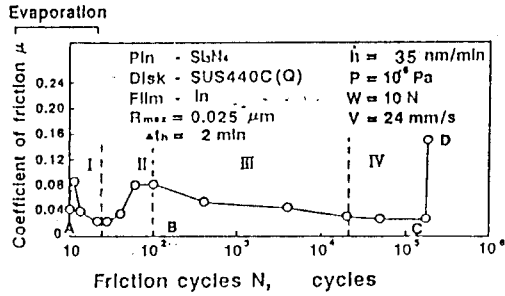


Fig. 4. Effect of friction coefficient depending on friction cycles

期的 Tribo-Coating 과정 중에는 먼저 감소하고 (I), Tribo-Coating 종료 후에는 일단  $\mu=0.08 - 0.1$  정도까지 상승한다(II), 그후 재차감소하여(III), 안정된 낮은 값으로 진정되어 대단히 오래동안 유지되며(IV), 어떤 摩擦反復數 후에는 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

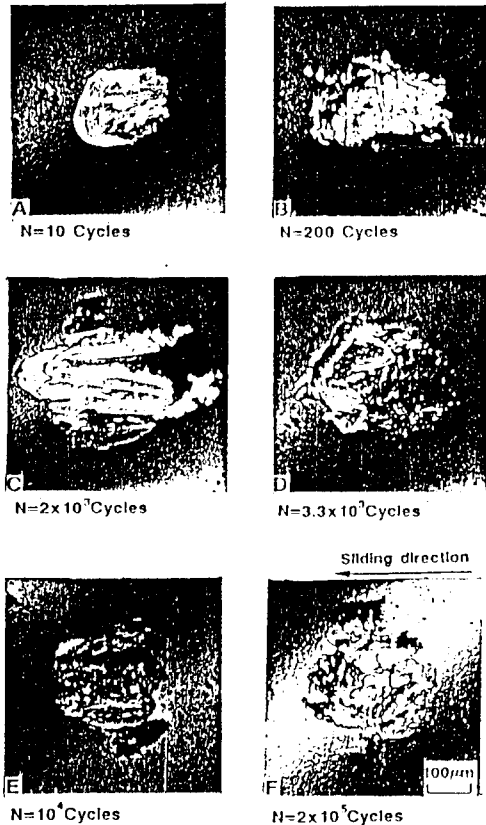


Fig. 5. Photographs of friction surface of pin

이것은 著者들의 이제까지의 研究에 公同되는 전형적인 摩擦係數의 變化過程이다.

이후 이 摩擦係數의 變化過程에 미치는 摩擦面 거칠기의 影響을 Pin 및 Disc의 表面觀察을 중심으로 檢討하고자 한다.

### 3-3 Pin 表面의 微視的 觀察

摩擦反復數에 따르는 Pin表面의 變化過程의 光學 顯微鏡寫眞을 Fig.5 (a) - (f)에 나타내고 있다.

Fig.5 및 EDX 分析에 의해 Pin 先端부에 In이 부착해 있는 것을 알 수 있다<sup>(7)</sup>.

더욱이 摩擦反復數에 따라 이 In층이 減少하고 (Fig.5(a)-(f)), 이 In이 없어져 버린때(Fig.5(f)이후)가 Fig.4 D에 나타난 것과 같이 摩擦係數가 急上昇하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 Pin에 부착한 In에 의해서 潤滑效果가 발휘되고 있다고 생각할 수가 있다.

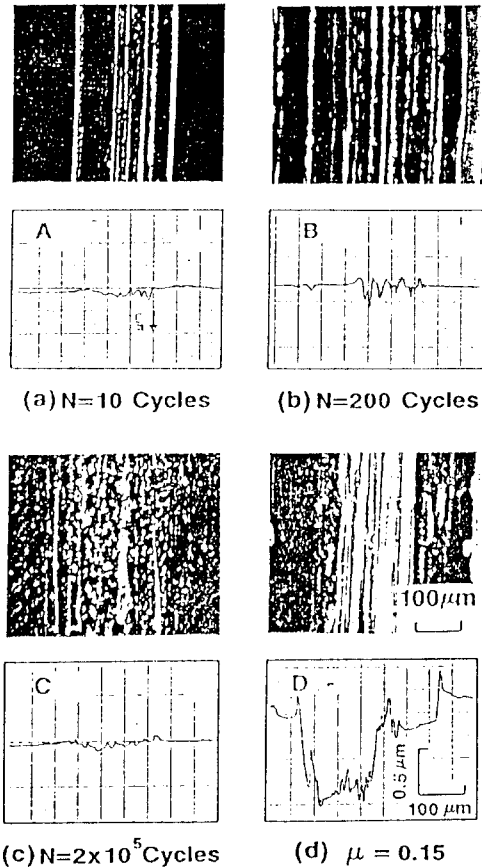


Fig. 6. Photographs of friction surface of disk and section curve of wear track

3-4 Disc表面의 微視的觀察

Fig. 4에 표시되어 있는 A-D점의 摩擦反復數에 對應하는 Disc表面의 光學顯微鏡寫眞과 断面曲線을 Fig. 6(a)-(d)에 나타내고 있다. 이 그림으로부터 A 점에서 B점에 걸쳐서 깊고 폭넓은 條痕의 數가 增加하고 있고 그 이후 B 점부터 C 점에 있어서는 條痕의 깊이가 減少하고 있는것을 알 수 있다.

더욱이 D점에 있어서는 接觸幅전역에 걸쳐서 폭넓은 條痕이 發生하고 있는것을 알 수 있다.

이와같은 摩擦痕의 最大높이  $R_{max}$ 를 마찰초기부터 피막수명이 끝날때 까지의 마찰반복수에 대하여 구하면 Fig. 7의 관계가 얻어진다.

Fig. 4와 Fig. 7을 비교하면 摩擦係數와 摩擦痕의 最大높이  $R_{max}$ 의 變化가 서로간에 거의 대응하고 있는것을 알 수 있다.

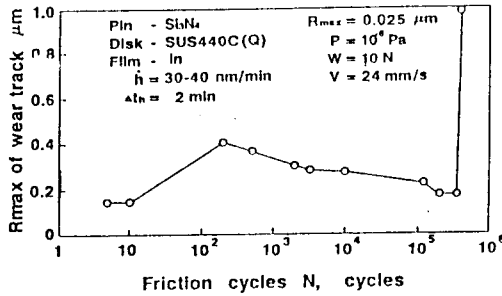


Fig. 7. Variation in the  $R_{max}$  of wear track with friction cycles

3-5 Disc의 摩擦表面기칠기의 形成機構

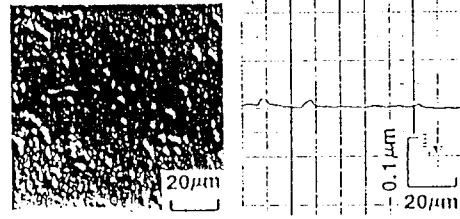
Fig. 6(a)-(c)로부터 摩擦表面기칠기의 増減原因은 條痕의 形成, 消失에 있는 것을 알 수 있다. 여기서 條痕의 形成, 消失기구에 대하여 다시한번 觀察하여 보면, Fig. 8은 초기Disc표면의 상세한 觀察結果(마찰전의 Disc표면의 光학현미경사진, 断面曲線, SEM寫眞, 硬度, EDX分析)이다.

이 그림으로부터 Disc 表面에는 表面기칠기 등급 크기의 Cr을 中心으로 한 경한 凸부가 存在하고 있는것을 알 수 있다.

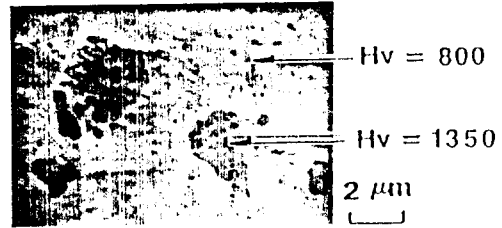
한편 Fig. 9(a)에 條痕의 形成初期 및 (b)에 初期 條痕소실부의 SEM 寫眞을 나타내고 있다.

이 그림으로부터 Fig. 9에 나타나 있는 凸부의 달라울 緣으로 條痕이 形成되고(Fig. 9 (a)-->(b)), 條痕凸부의 摩擦과 더불어 凹부가 매꾸어짐에 따라 平滑하게 되고 있는(Fig. 9(c)) 것들을 알 수 있다.

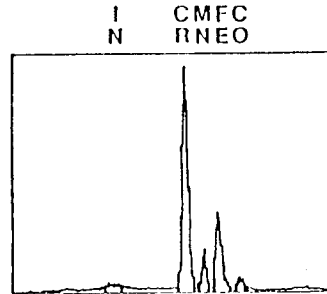
이것은 接觸狀態가 가혹한 凸에 있어서 달라이 일어나고 이 달라입지에 의해 條痕이 形成되어 表面기칠기가 增加하고 마찰부 전면에 걸쳐서 條痕이 形成되면 條痕凸부가 摩擦하여 가면서 Pin으로부터 In이



(a) photograph of disk surface and section curve



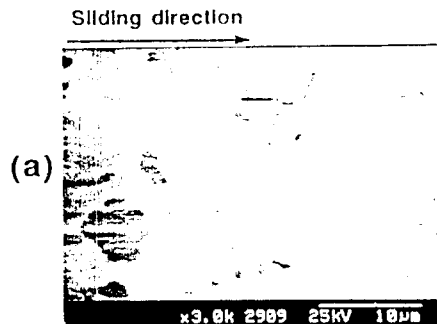
(b) SEM photograph of protrusion and hardness



(c) EDX analysis of protrusion

Fig. 8. SEM photograph of friction surface of disk and EDX analysis of protrusion

供給됨으로서 表面이 平滑하고 安定한 狀態로 되는것이라고 생각할 수가 있다.



(a)

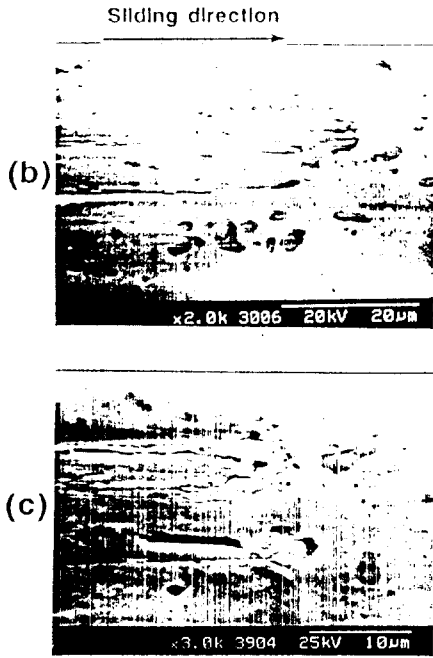


Fig. 9. SEM photographs of friction surface of disk

3-6 摩擦係數에 미치는 摩擦痕표면기칠기의 影響  
 Fig.4 및 Fig.7에서 摩擦係數와 마찰흔표면의 最大높이  $R_{max}$ 의 關係를 Fig.10에 나타내고 있다.  
 이 그림으로부터 摩擦係數는 마찰흔 표면조도의 最大높이  $R_{max}$ 의 變化에 대단히 민감하고  $R_{max}$ 의 增加에 따라 直線의 增加하는 것을 알 수 있다.

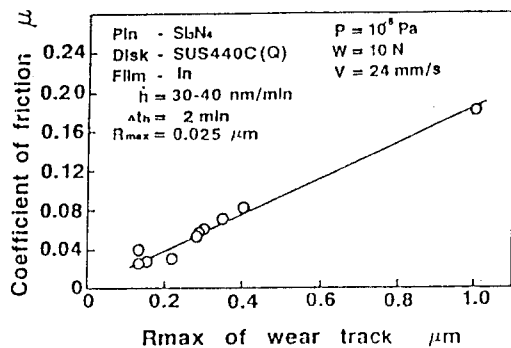


Fig. 10. Relation between  $R_{max}$  of friction track and friction coefficient

또한 이 結果로부터 Fig.4에 있어서 摩擦反復數에 따른 摩擦係數의 變化는 마찰反復數에 따른 摩擦痕 表面기칠기의 變化에 의해 생긴다고 생각할 수가

있다. 한편 前報<sup>(7)</sup>에서 얻어진 正常狀態에 있어서의 摩擦係數에 미치는 Disc의 初期表面기칠기의 影響은 初期表面기칠기로부터 定常狀態에 있어서의 friction track의 表面기칠기가 決定되는 것을 意味하고 있다고 생각할 수 있다.

이제 本報에 In膜에 의한 潤滑기구를 생각함에 있어서 이 Fig.10의 摩擦係數와 마찰흔표면기칠기의 關係는 대단히 有效한 data라고 생각된다.

#### 4. 結論

超高眞空中에 있어서 In을 使用하여 Tribo-Coating 膜을 형성시켜 摩擦實驗을 행한 結果, 이하의 結論을 얻었다.

- (1) 摩擦反復數에 따른 摩擦係數  $\mu$ 의 變化過程은 이하의 4개의 段階로 나누어진다.
  - ① Tribo-Coating에 의한  $\mu$ 의 減少過程
  - ② 條痕의 形成에 의한  $\mu$ 의 增加過程
  - ③ 條痕의 消失에 의한  $\mu$ 의 減少過程
  - ④  $\mu$ 의 定常狀態
- (2) 摩擦反復數에 따른 摩擦係數의 變化는 Disc의 friction track의 表面조도의 變化에 對應한다.
- (3) Disc의 friction track의 表面기칠기의 增加에 따라 摩擦係數는 直線의 增加한다.
- (4) Pin에 부착한 In에 의해 有效한 潤滑이 이루어진다.

#### 謝辭

本 研究에 協力해주신 日立製作所(株)에 感謝를 드립니다. 특히 직접담당하신 日立製作所(株) 機械研究所의 水木宗男氏에 感謝를 드립니다. 또한 有效한 討論을 해주신 東北大學의 梅原繁次氏, 足立幸志氏에게 感謝를 드립니다.

#### 참고문헌

- (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. JapanInt. Conf. Nagoya (1990) 261.
- (6) 加藤, 今田, 水木, トライボ로지-會議豫稿集, 京 (1991) 15
- (7) 加藤, 金, トライボ로지-會議豫稿集, 福岡 (1991) 223