

## 超高眞空中의 Tribo-Coating 膜의 潤滑特性(II)

金亨資\* · 全泰玉\*\* · 加藤康司\*\*\*

\*부산공업대학교 기계설계학과

\*\*동아대학교 기계공학과

\*\*\*동북대학교 기계공학과

### Lubricating Properties of Tribo-Coating Film 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**—The space world under zero gravity and super vacuum where the space machine works has only friction and inertia. Inertia of acceleration and deceleration is accurately obtained by computing while friction is always in contact surface and unsteady. The surface soundings under super vacuum make surface friction more complicate.[1,2]. Therefore, method to lubricate the contact surface for long term in space machine is very important and friction for space machine proves to be true by several accident of space projects. In spite of that accident, method of lubrication and lubricants to keep stability for long term in space machine have not been established so far. Lubrication for space machine is very important and under developings over the world. In this study we suggest a new lubricating technology, which improves powerful for space machine.

## 1. 서 론

宇宙는 無重力, 또한 超高眞空의 世界이다. 宇宙에서 機械가 作動할 때, 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일 때만 作用하며 그 힘은 正確하게 計算하여 얻을 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 [1,2] 따라서 宇宙機械에 있어서의 長期間 安定한 摩擦面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 있지않다. 現在 널리 使用되고 있는 代表的 潤滑材는 二硫化몰리브덴 ( $MoS_2$ )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으로하여 摩擦表

面에 附着시켜두는 것이다.

附着시키는 附着力의 크기는 方法에 따라 여러 가지로 다르게 되지만 여하간 一定두께의 固體潤滑膜이 摩擦에 의해서 소실되는 때가 宇宙機械의 壽命이 된다 [3-6].

이 課題에 대하여 著者들은 여태까지의 固體潤滑法 [1-4]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[7]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, disk의 表面거칠기의 變化의 影響을 明確하게 밝히고, 超高眞空中에 있어서 tribo-coating법에 의한 In막의 윤활기구를 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

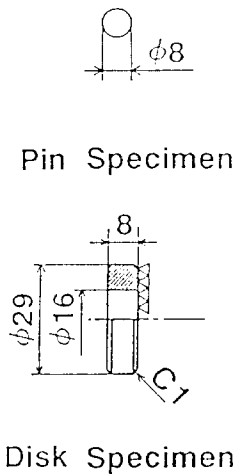


Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

Table 1. Properties of pin and disk

	Disk	Pin
Material	Quenched SUS400C	Cold pressed Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Vickers hardness Hv, kgf/mm <sup>2</sup>	800	1,652
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>K</sub> , MPa m <sup>1/2</sup>	—	5.2

상압 소결시킨 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 사용했다. 또한 disk 시험片으로서는 담금질을 한 SUS 440C를 사용했으며 그 形状 및 치수를 Fig. 1에 나타내었고 시험片의 제특성은 Table 1과 같다.

disk 시험片의 다듬질법으로서는 emery paper \$0/0~\$0/5으로 연마하고 나서 酸化 Cr粉末과 물을

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
Boiling poing 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 Pf <sub>300</sub> , Pa	7.3×10 <sup>-32</sup>

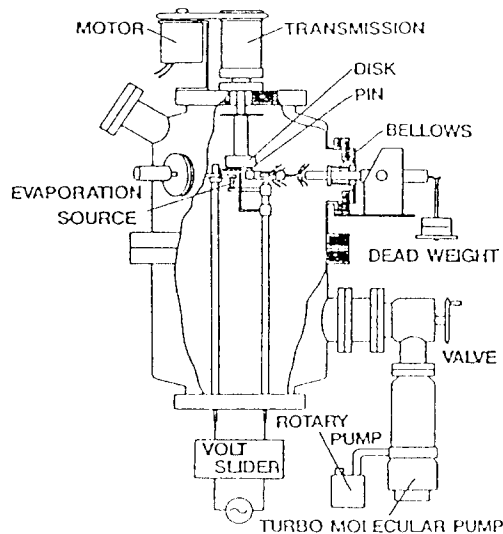


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

利用한 바프연마에 의해 경면 다듬질을 했다. Pin 시험片 및 disk 시험片의 세정은 처음에 아세톤에 담근후 꺼내어 드라이기로 乾燥시킨후 아세톤으로 초음파세정을 하였다.

증착被膜材로서는 純度 99.99% In을 사용했다. 被膜材料의 제특성은 Table 2와 같다.

## 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. 眞空容器内는 10<sup>-6</sup>Pa의 超高眞空이 얻어진다. 眞空容器内의 排氣는 로타리펌프에 의해서 10<sup>-1</sup>~10<sup>-3</sup>Pa로 1次 眞空시킨 후 터보분자펌프로서 10<sup>-4</sup>~10<sup>-5</sup>Pa까지 排氣를 시킨다. 그후에 眞空容器를 加熱하여 베이킹을 함으로서 10<sup>-6</sup>Pa의

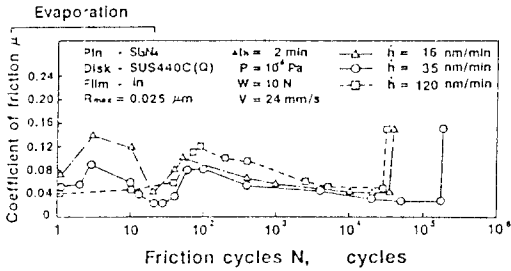


Fig. 3. Effect of friction coefficient and film life depending on rate of film supply.

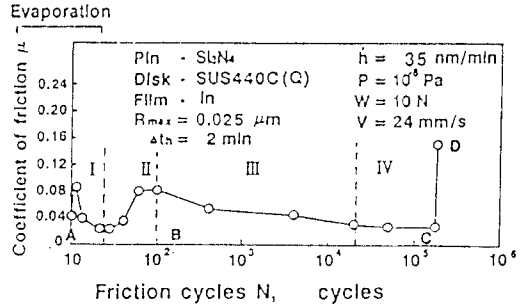


Fig. 4. Effect of friction coefficient depending on friction cycles.

超高眞空이 얻어진다.

眞空度の測定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 超高眞空容器內에 傳達되도록 하였고, 回轉速度를 變化시킴으로서 1.2 mm/sec~72.0 mm/sec의 範圍까지 임의로 變化시킬 수가 있다.

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

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, 24 mm/s로 一定하게 했다.

Pin 試驗片, disk 試驗片 및 被膜材料는 전회의 보고 [5-7]에서 좋은 結果가 얻어진 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/pin, SUS 440 C/disk와 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. 윤활학회에 報告[7]된 바와 같이 대체로 被膜이 長壽命으로 돌입하는 境界인 disk의 初期表面거칠기가 R<sub>max</sub>=0.025 μm일 때에 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=16 nm/min, h=120 nm/min일 때보다도 h=35 nm/min일 때가 가장 長壽命을 나타내고 있다.

Fig. 3으로부터 알 수 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 살릴수가 있다는 점을 의미하므로 被膜供給率이 약 h=35 nm/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 因子中の 하나이다.

#### 3-2. 摩擦反復數에 따른 摩擦係數의 變化

Fig. 4에 摩擦反復數에 따른 摩擦係數變化의 1예를 나타내고 있다. 그림중의 th는 In의 蒸發時間, h는 蒸發速度이다. 이 그림에서 摩擦係數는 摩擦初期의 tribo-coating 과정 중에는 먼저 감소하고(I), tribo-coating 종료후에는 일단 μ=0.08~0.1 정도까지上昇한다(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.

이것은 著者들의 이제까지의 研究에 공통되는 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 disk의 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 전면부에 In이 부착해 있는 것을 알 수 있다[7].

더욱이 摩擦反復數에 따라 이 In量이 減少하고(Fig. 5(a)-(f)), 이 In이 없어져 버린 때(Fig. 5(f) 이후)가 Fig.

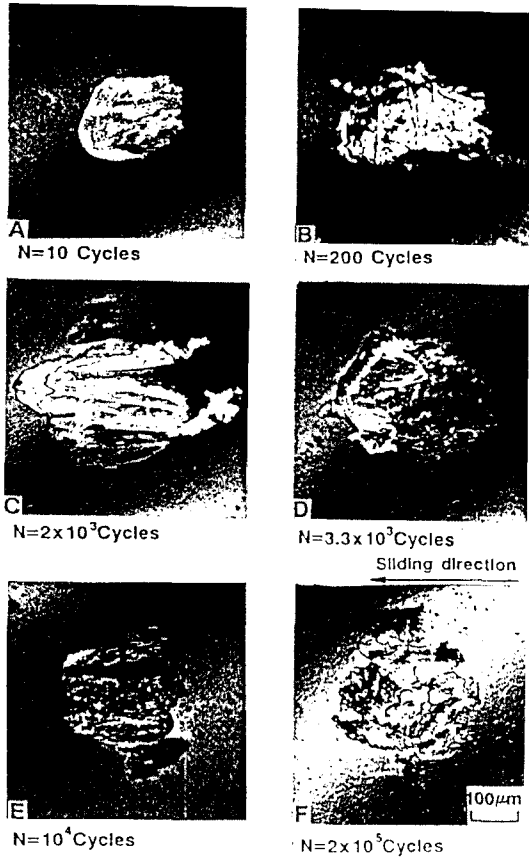


Fig. 5. Photographs of pin surfaces at different cycles.

4D에 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.

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 disk表面의 光學顯微鏡寫眞과 斷面曲線을 Fig.6(a)-(d)에 나타내고 있다. 이 그림으로부터 A점에서 B점에 걸쳐서 깊고 폭넓은 條痕의 數가 增加하고 있고 그 이후 B점부터 C점에 있어서는 條痕의 깊이가 減少하고 있는 것을 알 수 있다.

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

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

Fig. 4와 Fig. 7을 비교하면 摩擦係數와 摩擦痕의

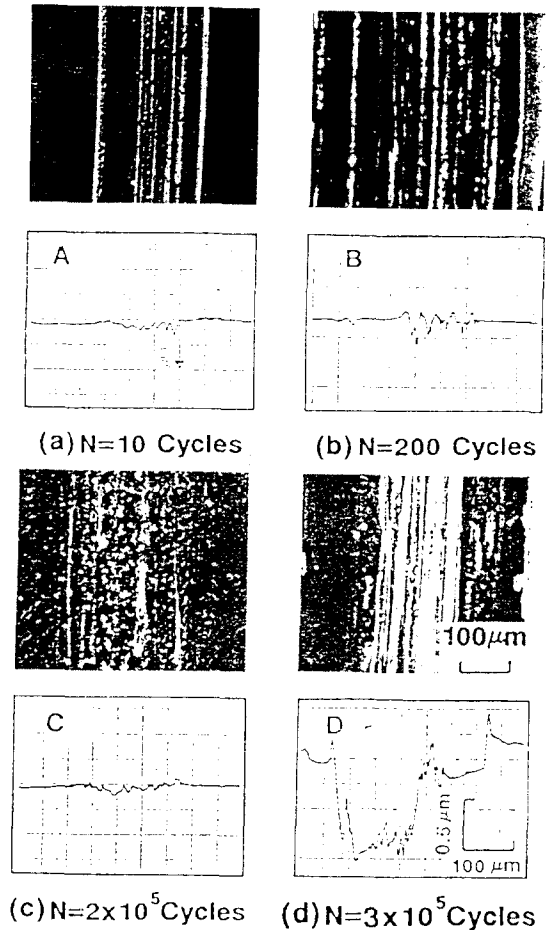


Fig. 6. Photographs of friction surface of disk and section curve of wear track.

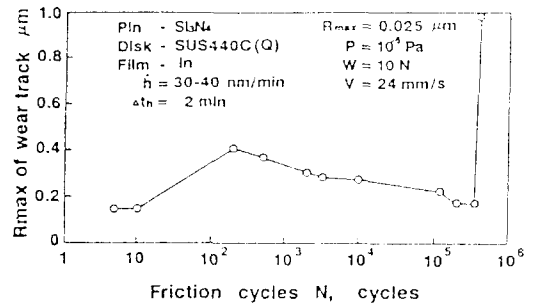
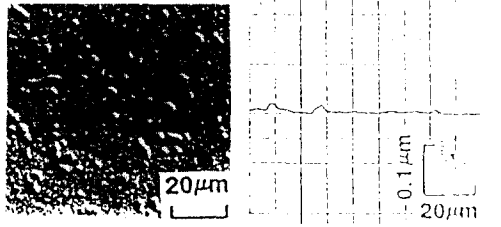
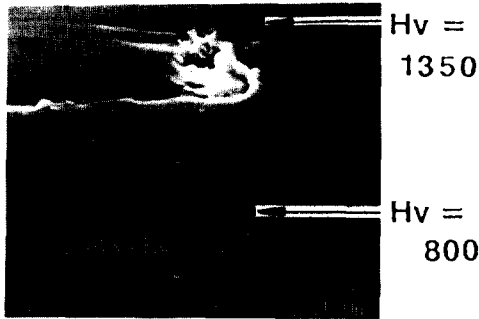


Fig. 7. Variation in the  $R_{max}$  of wear track with friction cycles.

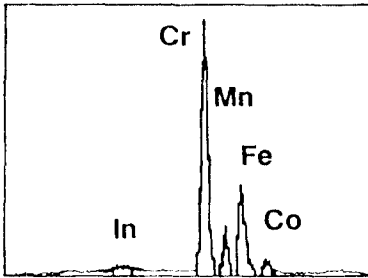
最大 높이  $R_{max}$ 의 變化가 서로간에 거의 대응하고 있는 것을 알 수 있다.



(a) photograph of disk surface and section



(b) SEM photograph of protrusion and hardness



(c) EDX analysis of protrusion

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

3-5. Disc의 摩擦表面거칠기의 形成機構

Fig. 6(a)-(c)로부터 摩擦面거칠기의 增減原因은 條痕의 形成, 消失에 있는 것을 알 수 있다. 여기서 이 條痕의 形成, 消失기구에 대하여 다시한번 觀察하여 보면, Fig. 8은 초기 disk표면의 상세한 觀察結果(마찰전의 disk표면의 광학현미경사진, 斷面曲線, SEM 寫眞, 硬變, EDX分析)이다.

이 그림으로부터 disk表面에는 表面거칠기 등급크기의 Cr을 中心으로 한 경한凸부가 存在하고 있는 것을 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 탈

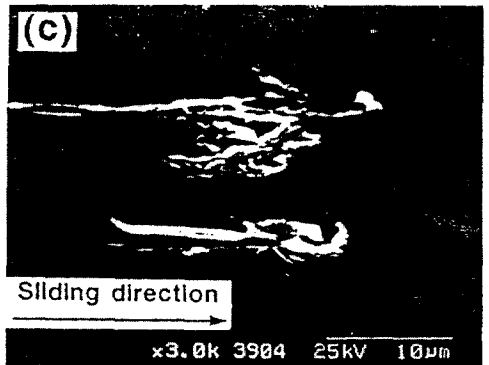
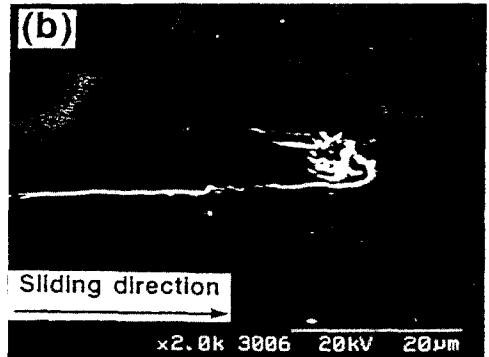
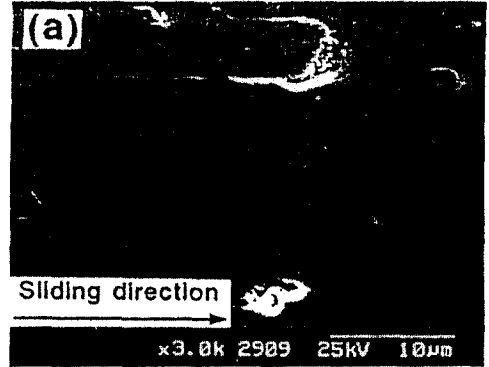


Fig. 9. SEM photographs of friction surface of disk.

락을 核으로 條痕이 形成되고(Fig. 9(a)→(b)), 條痕凸부의 摩擦과 더불어[ ]부가 메꾸어짐에 따라 平滑하게 되고 있는(Fig. 9(c)) 것을 알 수 있다.

이것은 接觸狀態가 가혹한凸에 있어서 탈락이 일어나고 이 탈락입자에 의해 條痕이 形成되어 表面거칠기가 增加하고 마찰부 전면에 걸쳐서 條痕이 形成되면 條痕凸부가 摩擦하여 가면서 pin으로부터 In이 供給됨으로서 表面이 平滑화하고 安定한 狀態로 되는 것이라고 생각할 수가 있다.

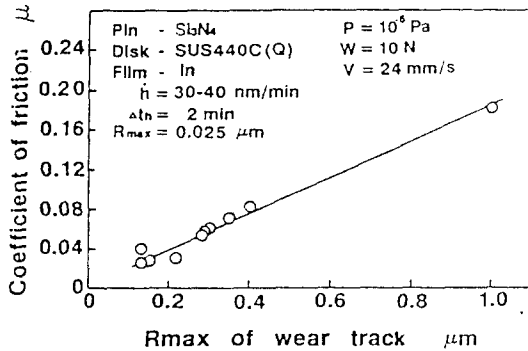


Fig. 10. Relation between Rmax of friction track and friction coefficient.

### 3-6. 摩擦係數에 미치는 摩擦痕 표면거칠기의 影響

Fig. 4 및 Fig. 7에서 摩擦係數와 마찰흔표면의 最大높이 Rmax의 關係를 Fig. 10에 나타내고 있다.

이 그림으로부터 摩擦係數는 摩擦痕 표면조도의 最大높이 Rmax의 變化에 대단히 민감하고 Rmax의 增加에 따라 直線의으로 增加하는 것을 알 수 있다.

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 표면거칠기의 變化에 의해 생긴다고 생각할 수가 있다. 한편 일본 TRIBOLOGY 학회에 발표된 논문[7]에서 일어난 正常狀態에 있어서의 摩擦係數에 미치는 disk의 初期表面거칠기의 影響은 初期表面거칠기로부터 定常狀態에 있어서의 friction track의 表面거칠기가 決定되는 것을 意味하고 있다고 생각할 수 있다.

In 膜에 의한 潤滑기구를 생각함에 있어서 Fig. 10의 摩擦係數와 摩擦痕 표면거칠기의 關係는 대단히 有效한 data라고 생각된다.

## 4. 結 論

超高眞空中에 있어서 In을 使用하여 Tribo-Coa-

ting膜을 형성시켜 摩擦實驗을 行한 結果, 이하의 結論을 얻었다.

(1) 摩擦反復數에 따른 摩擦係數 마찰계수의 變化過程은 이를 4개의 段階로 나누어진다.

- ① Tribo-coating에 의한 마찰계수의 減少過程
- ② 條痕의 形成에 의한 마찰계수의 增加過程
- ③ 條痕의 消失에 의한 마찰계수의 減少過程
- ④ 마찰계수의 定常狀態

(2) 摩擦反復數에 따른 摩擦係數의 變化는 disk의 friction track의 表面조도의 變化에 對應한다.

(3) disk의 friction track의 表面거칠기의 增加에 따라 摩擦係數는 直線의으로 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 水本宗男氏에 感謝를 드립니다. 또한 有效한 討論을 해주신 東北大學의 梅原德次 氏, 足立幸志氏에게 感謝를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. F. P. Bowden and Tabor, The Friction and Lubrication of Solids.(1954).
2. Y. Tsuya and R. Takagi, Wear, 7, 131 (1964).
3. E. Rabinowicz, ASLE Trans., 10, (1969).
4. C. Dayson, ASLE Trans., 14, 105 (1970).
5. K. Kato, H. Furuyama and M. Mizumoto, Proc. JapanInt. Conf. Nagoya 261 (1990).
6. 加藤, 今田, 水本, トライボロジ- 會議豫稿集, 東京 15 (1991).
7. 加藤, 金, トライボロジ- 會議豫稿集, 福岡 223 (1991).