

PECVD 에 의한 TiN 코팅의 마모특성 연구

송 건 , 안효석

한국과학기술연구원 Tribology 연구실

Wear Characteristics of TiN Coating by Plasma Enhanced CVD

Gun-Song , Hyo-Sok Ahn

Korea Institute of Science and Technology, Tribology Lab.

Abstract – An experimental programme was established to determine the wear behaviour of TiN coatings of thickness 1 μm and 3 μm by PECVD with the variation of applied load, sliding velocity and sliding distance. It was shown that oxidation of transferred metal as sliding speed increased formed oxide film so that it contributed in decreasing the wear rate. With the roller-on-disc tribometer employed, the wear rate of the roller specimen was decreased with the increase in sliding distance due to the reduction in effective contact pressure.

Finally, the severe cracks concentrated at the trailing edge of contact surface were explained in terms of high tensile stress prevailing at the trailing edge of the contact and were identified as a dominant wear mechanism as well as the strong local welding between coating layer and the counter surface, leading to the debonding of the coating layer.

1. 서 론

항공기 및 자동차를 위시한 기계공업 전반의 급속한 발달과 더불어 각종 기계들이 전문, 특수화됨에 따라 이들의 작업조건 역시 고속, 고하중화 되어가며 모든 기계요소의 접촉조건을 이겨낼 수 있는 해결책이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 현재 선진공업국에서는 재래식 금속재료의 표면에 목적하는 효과를 발휘할 수 있는 물질을 코팅 (coating) 하여 그 표면의 특성을 향상시키기 위해 노력하고 있다. 일반 기계요소에서 발생하는 파괴는 원천적으로 접촉표면 및 부표면(subsurface)에서 시작되며 이는 표면층(surface layer)이 마모, 부식, 피로 등의 표면 관련 제 현상에 대한 대응능력이 결핍되거나 부족하게 되는 것과 관련지을 수 있다. 일반 금속재료로써는 표면층을 최적의 Tribology 的 성질 (내마모성, 내부식성, 고강도 등)을 갖도록 하기에는 미흡하다. 이러한

문제점을 해결하기 위한 수단으로 bulk material에 그것이 가지지 못하는 Tribology 的으로 우수한 성질을 그 표면층에 부여하는 기술로써 여러가지 방법이 개발되어 왔으나 그중 대표적인 것이 바로 표면 코팅기술이다.

코팅기술 중에서 가장 발전된 것으로서 화학증착 (CVD : Chemical Vapour Deposition)과 물리증착 (PVD : Physical Vapour Deposition)을 들 수 있으며 근간에 들어 절삭공구, 성형공구, 드릴, 기어 및 볼베어링, 의료기구 등에 응용이 되고 있다. 특히, 취약한 환경 즉 nuclear industry, 우주산업 등과 같이 근래의 윤활기술이 제대로 적용될 수 없는 분야에 코팅기술의 응용이 절대적으로 필요하다.

현재 단편적으로나마 세라믹 코팅이 응용되고 있는 분야는 절삭가공용 공구 (cutting and forming tools), 드릴 (high speed steel drills), 기어 및 볼베어링과 기타 기계요소들이 있으나 보다 폭넓은 응용을 위해서는 세라믹 코팅에 관련된 마모 및 마찰에 대한 연구가 필요하

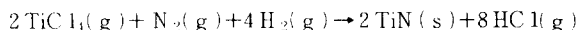
다.

이에 즈음하여 1차적으로 비교적 광범위하게 응용이 되고 있는 TiN 코팅을 연구대상으로 하여 이의 마모특성을 알아보았다.

2. PECVD법(플라즈마를 이용한 화학증착법)에 의한 TiN 코팅 및 코팅층의 특성

2-1. PECVD 법의 의한 TiN의 코팅

TiN을 피복할 모재는 AISI 52100 steel을 사용하였으며 증착온도는 510℃에서 행하였다. 반응에 사용한 gas는 Ar, TiCl₄, H₂, N₂이고 이들의 화학반응식은 아래와 같으며 코팅에 사용한 reaction chamber의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.



↑
열 Energy
+
Plasma Energy

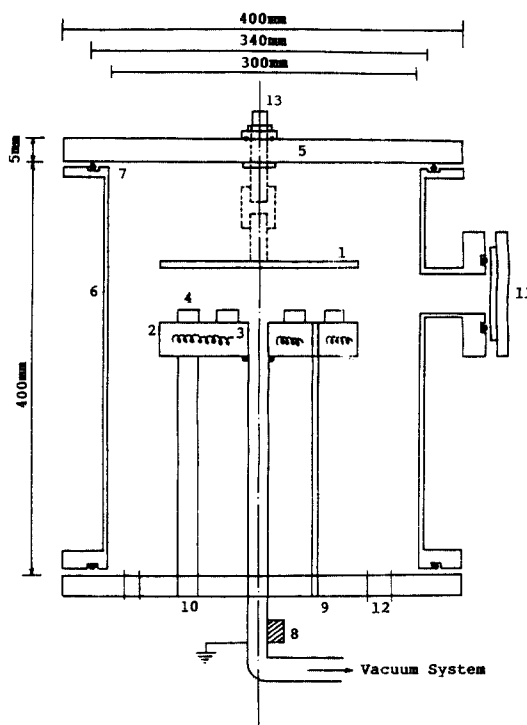


Fig. 1. Schematic diagram of Reaction Chamber.

2-2. 코팅층의 두께 및 미세구조 관찰

코팅층의 표면형태는 막의 결정성, 결정입경, 표면조도등의 구조를 반영하는 것으로써 코팅층의 기계적 성질에 매우 중요한 인자가 된다. 따라서 코팅층의 두께 표면형상 표면조도등을 살피기 위하여 SEM 및 표면조도시험기를 이용하여 시험한 결과 코팅층의 두께는 각각 목표 두께인 1.3μm로 나타났으며 표면의 형상은 Photo. 1에 나타낸 바와 같이 증착층의 두께가 증가할 수록 거친 표면으로 나타나고 있다. 이같은 사실은 사실을 표면조도 측정기로서 확인하기 위해 Talysurf-6 model의 roughness tester로 시험한 결과를 Table. 1에 나타내었다. 이같은 경향은 뒤에 수록한 X-ray 회절실험 결과로서 알 수 있듯이 증착층의 두께가 증가함에 따라 우선성장 방위가 뚜렷하게 나타나고 결정화가 촉진되는 것과 관련지을 수 있는 것으로 생각된다.

2-3. X-ray 회절시험

Vapor Phase로부터의 film growth는 preferred orientation을 갖는것이 일반적이기 때문에 코팅층의 preferred orientation과 결정성(crystallinity)을 확인하기 위하여 X-ray 회절시험을 실시하여 Fig. 2과 같은 결

1. Cathode(150 φ Stainless Steel)
2. Anode(Brass)
3. Heating Element(Kantal, 1.2KW)
4. Specimen
5. Glass Plate
6. Reactor Wall
7. Viton O-ring
8. Pirani Gauge
9. Thermocouple
10. Heating Element Power Line
11. Viewing Window
12. Gas Feeding Port
13. R.F. Power Connector

과를 얻었다. (a)와 (b), (c)를 비교하여 보면 동일하게 f. c. c structure의 (200) peak가 강하게 나타나고 있어 PECVD된 TiN은 (200) preferred orientation을 갖고 있음을 알 수 있으며 (b)와 (c)를 비교하여 보면 (200) peak의 intensity가 증가하고 있으므로 코팅시간을 길게하여 코팅층을 두껍게 할수록 결정성이 향상되고 있음을 알 수 있다.



TiN 1µm



TiN 3µm

a)



TiN 1µm



TiN 3µm

b)

Photo. 1. Scanning electron micrographs for the determination of coating film thickness(a), and surface morphology(b).

Table. 1 Surface Roughness of each Specimen

Specimen	roller(모재)	TiN 1µm	TiN 3µm	disc
Roughness Ra (µm)	0.023	0.035	0.062	0.38

Table. 2 Mechanical Properties of each Specimen

Specimen	TiN 1µm	TiN 3µm
Hardness Hv (Kg/mm ²)	1,372	1,970
Adhesion Force (N)	21.93	48.01

2-4. 코팅층의 기계적 성질

마모특성의 향상을 위한 코팅은 일반적으로 hard 해야 하며 코팅층과 모재와의 결합력이 우수해야 한다. 따라서 코팅층의 경도 및 adhesion force를 측정하는 것은 매우 중요한 일이다. Adhesion force의 측정을 위해서는 acoustic emission scratch tester를 이용하였으며 경도의 측정에는 박막인 경우 하중에 따라 substrate의 영향을 받게 되므로²⁾ 본 연구에 사용한 두께의 경도값을 측정하기 위해 micro vicker's hardness tester로 비교적 적은 하중인 10g의 하중을 가하여 경도값을 측정하였다.

이들의 결과를 Table. 2에 나타내었다.

metallic compound인 TiN은 f. c. c (B1) structure

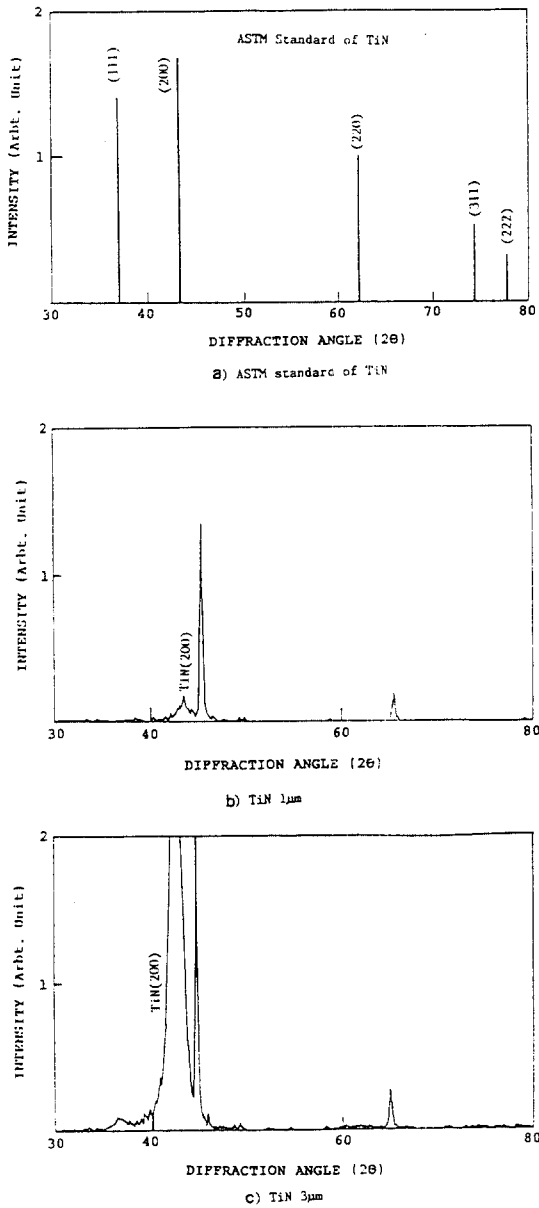


Fig. 2. X-ray diffraction results of the TiN deposited on AISI 53100 steel.

를 가지며, Ti와 결합하는 N의 양에 따라 경도값이 변하게 되어 stoichiometric compound를 형성할 때 최고의 경도값을 가지며 overstoichiometric 과 understoichiometric으로 변함에 따라 경도 값이 감소하게 된다¹⁾. Table.2의 결과를 보면 bulk material의 경도값 (2100 Kg/mm²)보다 약간씩 낮게 나타나고 있는데 이는

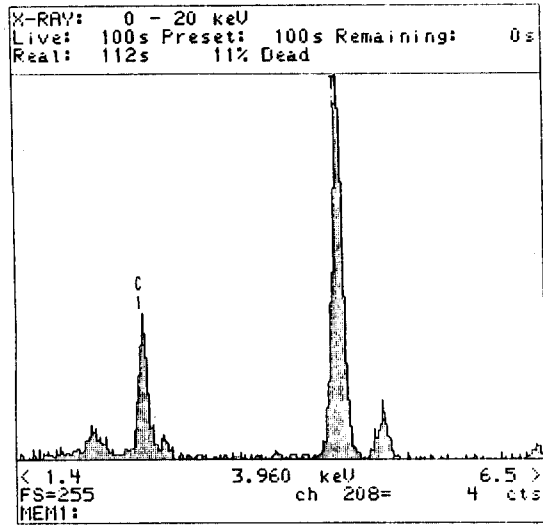


Fig. 3. EDAX result of 1 μ m TiN coating.

fig. 3에 나타난 바와 같이 코팅층에 염소가 잔류하는 것에 의해 경도값의 저하가 생긴 것으로 사려되며 1 μ m의 경우는 증착층의 두께가 너무 얇아 모재의 영향을 받는 것이 복합적으로 작용하여 경도값의 매우 낮게 나타나는 것으로 생각된다.

또한 adhesion force는 코팅층이 두꺼워 질 수록 더 커지는 것으로 나타났다.

3. 마모 특성시험

일반적으로 기계요소제 세라믹을 증착시켜 내마모성을 증진시키기 위해서는^{3,4)}

- 1) Coating 층이 hard하여 hard한 coating 층과 tough한 모재의 성질을 복합적으로 이용할 수 있어야 한다.
- 2) Coating 층과 substrate 사이의 adhesion이 좋고 열팽창 계수의 차이가 적어 운전시 박리되는 현상이 없어야 한다.
- 3) Coating 층이 화학적으로 안정해야 한다.
- 4) 마찰계수가 적어야 한다.

이상과 같은 조건을 만족하는 coating material로서는 TiN, TiC, Ti(C, N), Al₂O₃, Si₃N₄, SiC 등이 있으며 이들의 단층 피복만으로 요구되는 성질을 얻지 못하는 경우에는 이들의 다층피복 (multi-layer coating)도 사용되고 있다. 여기서는 PECVD를 이용하여 증착시킨 TiN의 내마모성을 검토하였다.

3-1. 마모시험 장치

Pin-on-disc type (CYGNUS -2)의 tribotester를 이용하여 시편 holder를 개조해 roller가 disc에 line contact

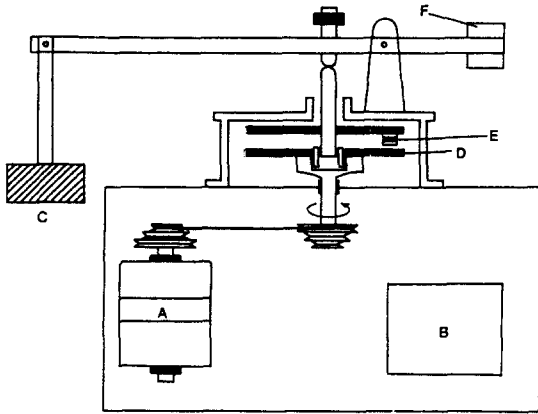


Fig. 4. Schematic diagram of roller-on-disc type tribotester.

- A) Drive Motor
- B) Control Box
- C) Load
- D) Disc
- E) Roller and Roller holder
- F) counter Load

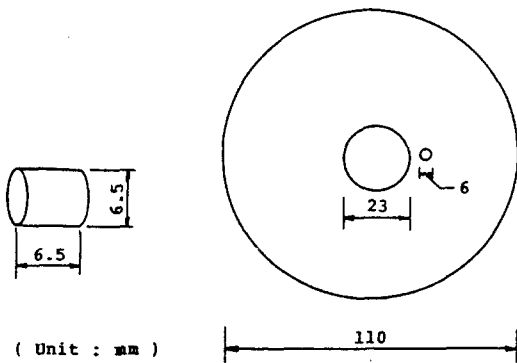


Fig. 5. Schematic diagrams of roller and disc.

Table. 3 Chemical Compositions of Roller and Disc

Compoition Specimen	C	Mn	P	Si	S	Cr	Fe
Roller	0.98 -1.10	0.25 -0.45	0.035	0.02 -0.35	0.025	1.30 -1.60	bal
Disc	0.95 -1.10	0.5	0.025	0.15 -0.35	0.025	1.30 -1.60	bal

할 수 있게 하였으며 P/C를 이용하여 마모시험 동안의 torque의 변화를 연속적으로 측정, 저장하였다. Fig. 4에 마모시험기의 개략도를 나타내었다.

또한 본 실험에 사용된 roller와 disc의 형상은 Fig. 5와 같다. Roller는 AISI 52100 steel이며, disc는 SUJ2 bearing steel이고 이들의 조성을 Table. 3에 수록하였다.

3-2. 마모시험 조건

Ceramics의 극한조건하에서의 마모에 관한 시험을 하기 위하여 dry contact의 조건을 택하였다. 변수로는 피복층의 두께, 선속도 (linear velocity or rpm), 하중 등을 택하였으며 시험조건은 Table. 4에 나타낸 바와 같다.

Table 4. wear test condition.

Film Thickness	1, 3 μ m
Linear Velocity	0.1m/sec~2.0m/sec
Applied load	2.0Kgf~4.0Kgf
Environment	Air, room temp.

4. 마모시험 결과

Fig. 6에 하중의 변화에 따른 마모량의 변화를 나타냈다. 여기서 마모량은 wear scar width를 0.5 μ m 단위까지 측정된 결과로써 나타냈으며 그림에서 알 수 있듯이 증착층의 두께에 상관없이 하중의 증가에 따라 마모량이 증가하는 양상으로 나타났으며 모든 하중의 조건에서 3 μ m을 증착시킨 것이 1 μ m를 증착시킨 것보다

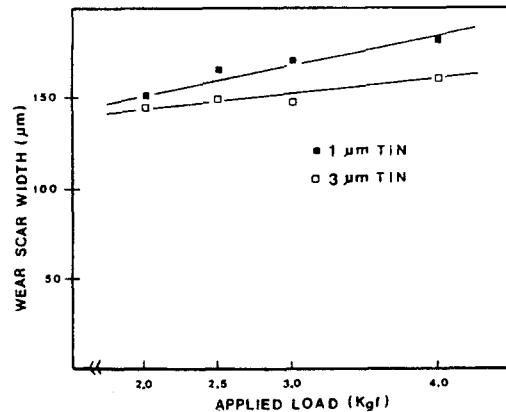


Fig. 6. The variation of wear scar width as a function of applied load. (1m/sec, 125.7m)

마모량이 다소 낮게 나타났다. 그 주된 이유로는 Table . 2에서 본 바와 같이 3 μm 코팅의 adhesion force 가 1 μm 의 경우에 비해 매우 크기 때문인 것을 들 수 있다. 또한 하중의 증가에 따른 마모량의 증가 정도는 그리 크지 않게 나타나 2Kgf에서 4Kgf로 가한 하중을 2배로 증가시킨 경우에도 마모량은 그리 크게 증가하지 않고 있는 것으로 나타나고 있는데 이같은 결과가 나타나는 이유는 선접촉시 접촉면에 걸리는 응력을 계산해 보면 알 수 있다.

선접촉시 접촉면에 걸리는 maximum normal stress Pmax 는 아래와 같다⁶⁾.

$$P_{\max} = \frac{2W}{\pi a} \quad \text{where } W : \text{applied load/unit length}$$

$$a : \text{semi-contact width}$$

$$\text{또, } a = \left(\frac{2W\Delta}{\pi} \right)^{1/2}$$

where

$$\Delta = \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$$

본 실험에서는 cylinder-on-plate 이므로 $R_1 \rightarrow \infty, R_2 = 3\text{mm}$ 또 steel 의 $E = 200\text{GPa}$ $\nu = 1/3$ TiN 의 $E = 400\text{GPa}$ $\nu = 1/3$ 로 가정하면,

i) $W = 2/6\text{Kgf}$ 일때

$$a = 0.0091(\text{mm})$$

$$\therefore P_{\max} = 23.32\text{Kg/mm}^2$$

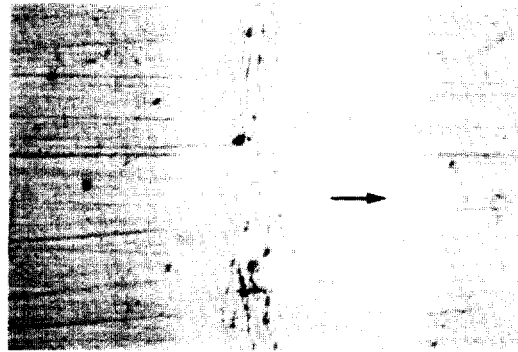
ii) $W = 4/6\text{Kgf}$ 일때

$$a = 0.0129(\text{mm})$$

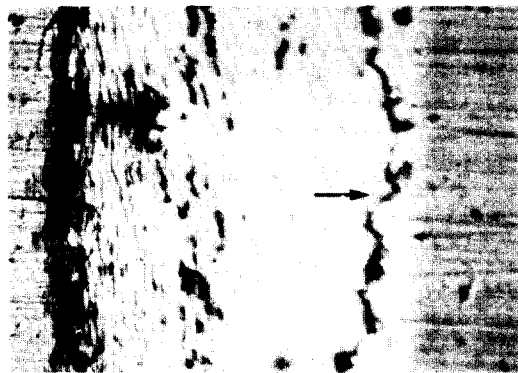
$$\therefore P_{\max} = 32.90\text{Kg/mm}^2 \text{가 된다.}$$

이상에서와 같이 하중을 2배로 증가시켰을 때 시편이 받는 maximum normal stress 는 약 41% 만이 증가할 뿐이다. 더우기 TiN 의 높은 경도값 및 E 값과 비교해 볼 때 이의 증가분은 미미하기 때문에 하중의 변화가 마모량의 변화에 미치는 영향은 그리 크지 않게 나타난 것으로 생각된다.

또한 하중의 증가에 따라 TiN 1 μm 를 증착시킨 시편과 TiN 3 μm 를 증착시킨 시편의 마모량의 차이가 점차 커지는 것으로 나타나고 있는데 이같은 이유는 마모가 진행되어감에 따라 TiN 1 μm 를 증착시킨 경우 모재가 빨리 노출되게 되고 이에따라 마모가 가속되기 때문인 것으로 생각된다. Photo. 2에 TiN 1 μm 를 증



a)



b)

photo. 2. Variation of wear scars in accordance with applied load.

(TiN 1 μm , Arrows indicate sliding direction)

a) 2.0Kgf, 1m/sec 125.7m \times 300

b) 4.0Kgf, 1m/sec, 123.7m \times 300

착시킨 시편에 대해 하중을 2.0Kgf, 4Kgf로 하여 시험하였을 경우의 wear scar를 나타내었다.

Fig. 7에 속도의 변화에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 1 μm TiN coating 보다 3 μm TiN coating의 경우가 모든 속도조건에서 마모량이 약간 작게 나타나고 있으며 두조건 모두가 속도의 증가에 따라 마모량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Photo. 3에 타나낸 바와 같이 속도의 증가와 함께 마찰열 (frictional heat)의 발생으로 인하여 TiN surface에 transferred 되는 steel이 산화하게 되고 이 산화된 transferred film이 wear protective film의 역할을 수행함으로써 TiN의 마모를 저지시키기 때문인 것으로 생각된다.

또한 1 μ m TiN과 3 μ m TiN의 마모량의 차이가 마찰 속도가 증가할수록 감소하고 있는 것으로 나타나고 있는데 이는 처음에는 steel-TiN의 마모가 증가되고 있으나 transferred metallic film이 산화함에 따라 steel-oxidized transferred metallic film 간의 마모가 증가되기 때문에 TiN 자체에 의한 영향이 감소되기 때문에 TiN의 두께에 따른 마모량의 차이가 줄어들고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 8에 마찰거리에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 마찰거리가 길어질수록 마모량은 증가하고 있으나

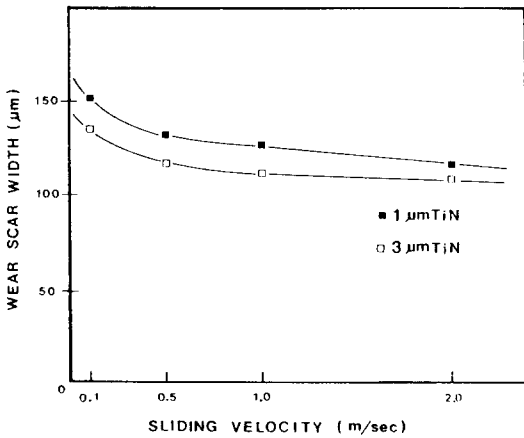


Fig. 7. The variation of wear scar width as a function of sliding velocity. (2.5Kgf, 1m/sec, 62.8m)

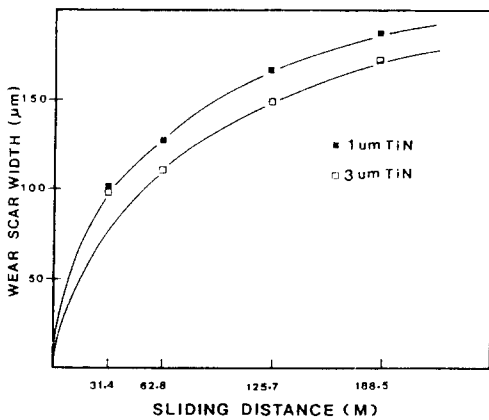
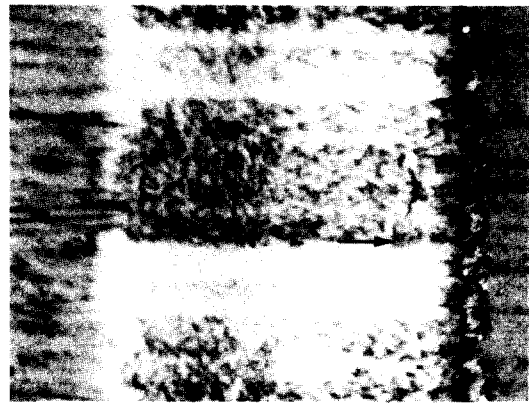
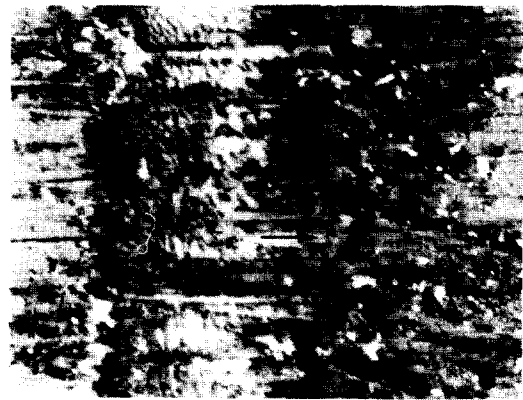


Fig. 8. The variation of wear scar width as a function of sliding distance. (2.5Kgf, 1m/sec)

그 증가율은 둔화되고 있다. 이는 마모가 진행됨에 따라 wear scar width도 커지게 되고 결국 일정한 applied load를 받는다 하여도 시편이 받게되는 effective stress는 감소하기 때문인 것이다. 여기서도 마찬가지로 마찰 거리가 길어짐에 따라 1 μ m TiN과 3 μ m TiN의 마모량의 차이는 약간 커지고 있다. 이같은 이유는 TiN의 마모시에 1 μ m TiN의 경우가 crack initiation이 더 쉬워지고⁸⁾ 일단 crack이 생성된 후에는 steel-TiN의 접촉시에 TiN의 adhesion force가 더 낮은 1 μ m TiN의 경우가 3 μ m TiN의 경우보다도 더욱 쉽게 박리될 수 있다는 것



a)



b)

Photo. 3. Build up of oxidized transferred metallic films in accordance with sliding velocity. (TiN 1 μ m, Arrows indicate sliding direction)

- a) 2.5Kgf, 0.1m/sec, 125.7m \times 300
- b) 2.5Kgf, 2.0m/sec, 125.7m \times 300



Photo. 4. Pictures of wear scars varying with coating film thickness.
(2.5Kgf, 1.0m/sec, 31m, Arrows indicate sliding direction)
a)TiN 1 μm × 300 b) TiN 3 μm × 300

으로써 생각할 수 있겠다. 이를 Photo. 4에 나타나었는데 사진에서 보아 알 수 있듯이 TiN 1 μm의 경우 31m의 마찰거리에서도 crack이 발생한 것을 확인할 수 있었으나 3 μm TiN의 경우에는 단순히 TiN 면이 연마된 상태로만 존재하고 있음을 확인할 수 있다.

5. PECVD 법에 의해 증착된 TiN 박막의 마모거동에 대한 고찰

피복층의 경도가 증가하게 되면 flow strength가 커져 변형에 대한 저항이 커지게 된다. 대부분의 경한 세라믹스는 파괴에 이르는 변형율이 2% 이내라고 보도되고⁹⁾ 있으며, 이같은 성향은 전단균열생성(shear crack nu-

cleation)의 확률을 적게하지만 fracture toughness가 매우 낮아서 피로균열생성(fatigue crack nucleation)이나 피로균열성장(fatigue crack growth) 및 취성파괴(brittle fracture)에 대한 감수성을 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 따라서 본 연구에서 이용한 TiC나 TiN의 매우 높은 경도는 이 세라믹재의 flow strength를 높여주어 코팅층의 delamination wear는 감소시키지만 피로균열생성이나 피로균열성장에 의한 표면균열의 발생과 마찰열에 의해 가속되는 adhesion의 결과로 세라믹층의 모재로부터의 이탈이 가능할 것이다.

Photo. 5에 1 μm 및 3 μm TiN을 피복시킨 시편을 4.0Kgf, 1m/sec로 2분간 마찰시킨 시편의 wear scar를 나타내었다. 사진에서 알 수 있듯이 1 μm의 경우가

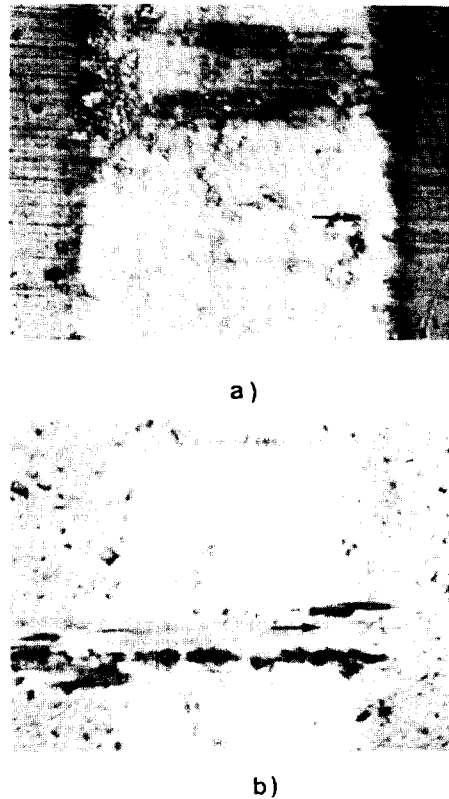


Photo. 5. Pictures of wear scars varying with coating film thickness.
(4.0Kgf, 1.0m/sec, 125.7m, Arrows indicate sliding direction)
a) TiN 1 μm × 300 b) TiN 3 μm × 300

더 많은 균열 및 코팅층의 박리가 일어났다. 이는 adhesion force의 차이가 같은 하중이 가해질 때 film의 두께에 따라 변형률 (strain)이 달라지고 이에 의한 균열생성의 정도에 차이가 생기기 때문이다*. 따라서 두께가 작은 1 μm 의 경우가 더 많은 균열의 발생과 반복되는 응력에 의한 균열의 성장에 기인한 것으로 생각된다.

또한 주목할 것은 Photo. 6에 나타나 있듯이 균열이 trailing edge 부근에만 집중적으로 발생하는 것으로써 이는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 마찰계수가 0.15~0.25 사이의 값을 갖게 되는데 접촉표면에 작용하는 전단력의 크기는 마찰계수에 비례하게 되고 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 disc가 미끄럼 운동을 하게 되면 다음과 같은 응력이 발생하게 되고

$$P(x) = P_0 \left\{ 1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

$$Q(x) = Q_0 \left\{ 1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

P_0 = max. normal stress

Q_0 = max. tangential stress

$Q_0 = \mu P_0$

접촉면에 걸쳐 전단력 $Q(x)$ 가 발생하게 된다. 이같은 응력의 분포를 그림으로 나타내면 Fig. 11에 나타낸 바와 같은 양상의 응력 분포를 보이게 된다. 따라서 trailing edge 부근에는 인장응력이 leading edge 부근에는 압축응력이 걸리게 된다. 그런데 일반적으로 세라믹재는 압축응력에는 매우 강하지만 인장응력에는 매우 취약하기 때문에 leading edge 부분에만 집중적으로 균열이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 이렇게 균열이 발생하게 되고 이와 동시에 피로에 의한 균열의 생성 및 성장, 상대 접촉재인 disc와 피복층간의 adhesion, 마찰열에 의한 표면 및 표면층의 strain energy의 증가에 의한 표면층의 구조적 취약화가 복합적으로 작용해 local welding 된 코팅면과 substrate의 interface에 전단 응력이 걸리는 부분으로 균열이 커져 결과적으로 박리 되는 것으로 생각된다.

6. 결 론

PECVD 법으로 coating 한 TiN coated roller에 대한 마모시험을 roll-on-disc의 tribotester를 이용하여 하중, 속도 등을 변화시켜가며 실험

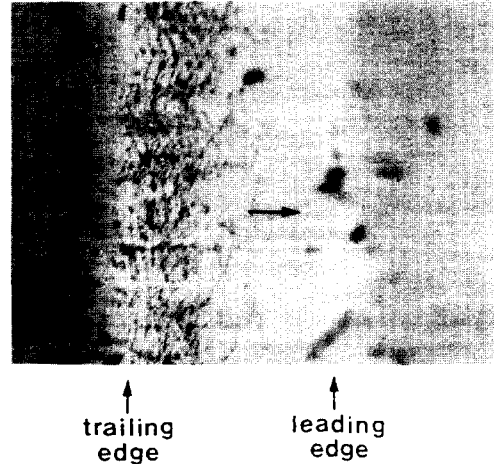


Photo. 6. Pictures of cracks initiated at the trailing edge.
(TiN 3 μm , 2.5Kgf, 1m/sec, 125.7m, Arrow indicates sliding direction $\cdot \times 300$)

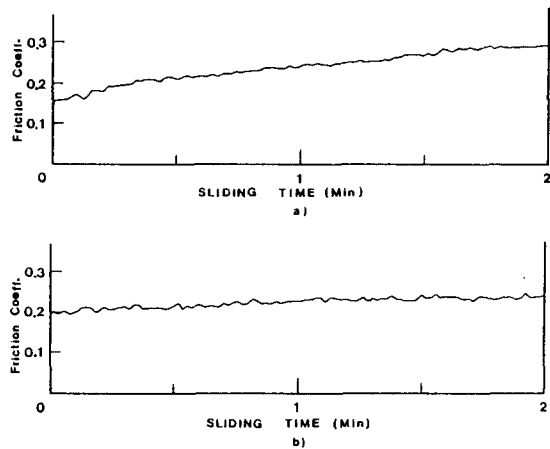


Fig. 9. Friction coefficient as a function of sliding time.
a) TiN 1 μm , 2.5Kgf, 1.0m/sec
b) TiN 3 μm , 2.5Kgf, 1.0m/sec

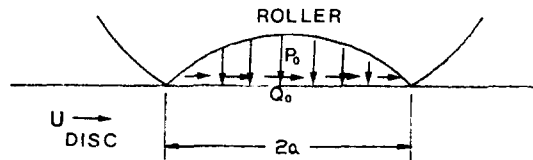


Fig10 Pressure distribution for the contact of roller on sliding disc.

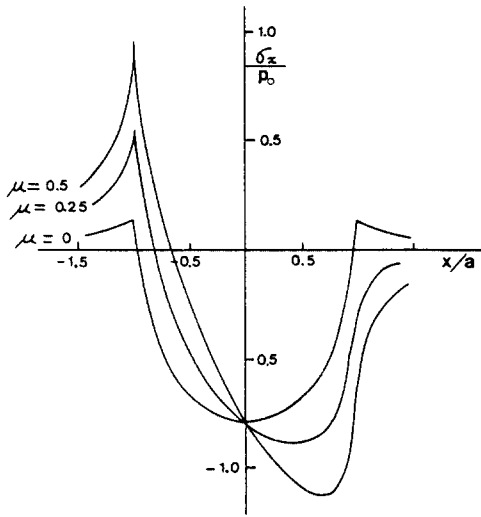


Fig. 11. The distribution of the stress σ in the surface for a range of coefficients of friction in case of the circular contact.

한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중의 증가에 따라 마모량은 증가하지만 2분간의 실험에 있어서는 그 증가폭은 크게 나타나지 않았다.
- 2) 속도의 증가에 따라 마모량은 점차 감소하는 것으로 나타났으며 이는 TiN surface에 형성된 transferred metal의 산화때문인 것으로 생각된다.
- 3) 마찰거리의 증가에 따라 마모량은 증가하지만 그 증가율은 둔화되는 것으로 나타났는데 이는 effective stress의 감소에 기인한 것으로 생각된다.
- 4) TiN coated roller의 마모기구는 trailing edge에 결

리는 인장응력에 의한 균열생성 및 피로파괴와 마찰열에 의한 상대면과 피복층간의 응착에 의해 모재와 피복층 경계면에 작용하는 전단응력에 의한 피복층의 박리가 추가됨이 확인되었다.

참 고 문 헌

1. J.E. Sundgran, Thin Solid Films, 128 (1989) 21-44.
2. V. Valvoda, R. Cerny and R. Kuzel, Jr. Thin Solid Films, 158 (1988) 225-232.
3. W.E. Jamison, Thin Solid Films, 73 (1980) 227-233.
4. J. Halling, Thin Solid Films, 108 (1983) 103-115.
5. H.E. Hintermann Wear, 100 (1984) 381-397.
6. J. Halling, "Principles of Tribology" The MacMillan Press. Ltd. 1983.
7. G.W. Stachowiak and G.B. Stachowiak, Wear, 132 (1989) 361-389.
8. G. Gille and K. Wetzig, Thin Solid Films, 110 (1983) 37-54.
9. H.E. Hintermann, Thin Solid Films, 84 (1981) 215-243.
10. B.M. Kramer, Thin Solid Films 108 (1983) 117-125.
11. G.M. Hamilton, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol.197C (1983) 5358.