

PECVD 에 의한 TiN 코팅의 마모특성 연구

송 건 , 안효석

한국과학기술연구원 Tribology 연구실

1. 서 론

항공기 및 자동차를 위시한 기계공업 전반의 급속한 발달과 더불어 각종 기계들이 전문, 특수화됨에 따라 이들의 작업조건 역시 고속, 고하중화 되어가며 모든 기계요소들의 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 금속재료로서는 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 운환기술이 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 필요하다.

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

Table. 1 Mechanical Properties of each Specimen

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

2. 마모 특성시험

일반적으로 기계요소에 세라믹을 증착시켜 내마모성을 증진시키기 위해서는

1) Coating 층이 hard 하여 hard 한 coating 층과 tough 한 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 material 로써는 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 PECVD 를 이용하여 증착시킨 TiN 의 내마모성을 검토하였다.

2-1. 마모시험 장치

Pin-on-disc type (CYGNUS-2)의 tribotester 를 이용하여 시험 holder 를 개조해 roller 가 disc 에 line contact 할 수 있게 하였으며 P/C 를 이용하여 마모시험 동안의 torque 의 변화를 연속적으로 측정, 저장하였다. Fig. 1 에 마모시험기의 개략도를 나타내었다.

또한 본 실험에 사용된 roller 와 disc 의 형상은 Fig. 2 와 같다. Roller 는 AISI 52100 steel 이며, disc 는 SUJ2 bearing steel 이고 이들의 조성을 Table. 2 에 수록하였다.

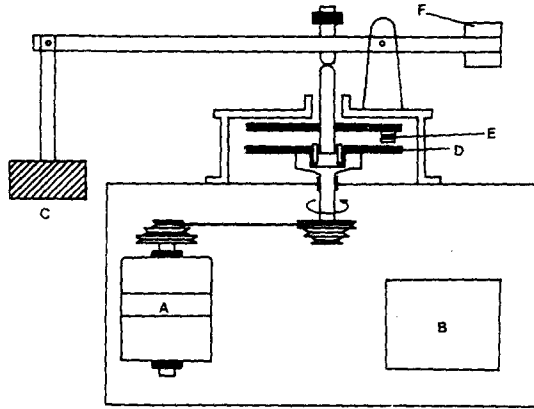


Fig. 1. Schematic diagram of roller-on-disc type tribotester.

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

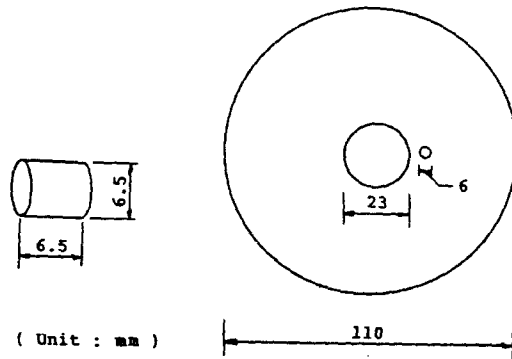


Fig. 2. Schematic diagrams of roller and disc.

Table 2 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

2-2. 마모시험 조건

Ceramics의 극한조건하에서의 마모에 관한 시험을 하기 위하여 dry contact의 조건을 택하였다. 변수

로는 피복층의 두께, 선속도 (linear velocity or rpm), 하중 등을 택하였으며 시험조건은 Table. 3에 나타낸 바와 같다.

Table 3. wear test condition.

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

3. 마모시험 결과

Fig. 3에 하중의 변화에 따른 마모량의 변화를 나타냈다. 여기서 마모량은 wear scar width를 $0.5\mu\text{m}$ 단위까지 측정된 결과로써 나타냈으며 그림에서 알 수 있듯이 증착층의 두께에 상관없이 하중의 증가에 따라 마모량이 증가하는 양상으로 나타났으며 모든 하중의 조건에서 $3\mu\text{m}$ 을 증착시킨 것이 $1\mu\text{m}$ 를 증착시킨 것보다

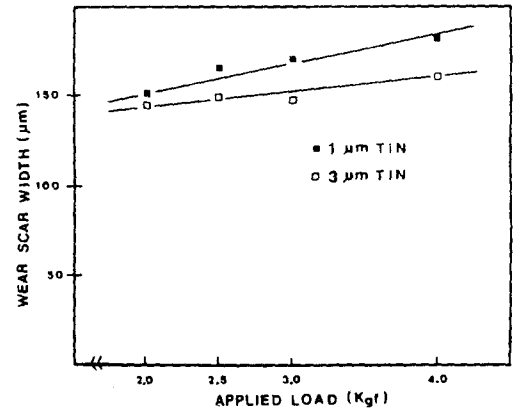


Fig. 3. The variation of wear scar width as a function of applied load.

(1m/sec, 125.7m)

마모량이 다소 낮게 나타났다. 그 주된 이유로는 Table .1에서 본 바와 같이 $3\mu\text{m}$ 코팅의 adhesion force가 $1\mu\text{m}$ 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 P_{max} 는 아래와 같다.

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

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

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

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 steel의 $E = 200\text{GPa}$ $\nu = 1/3$ TiN의 $E = 400\text{GPa}$ $\nu = 1/3$ 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

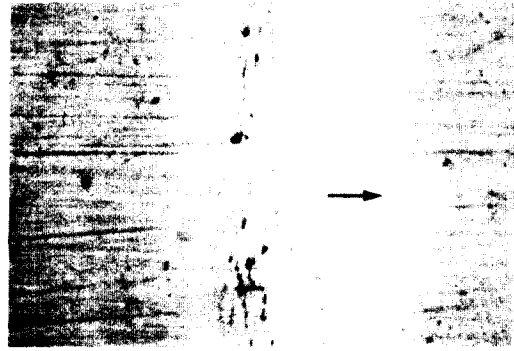
$$a = 0.0129(\text{mm})$$

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

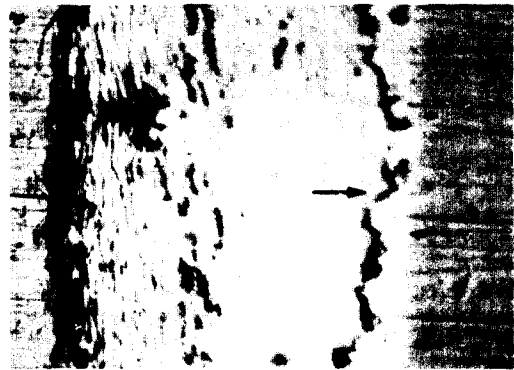
이상에서와 같이 하중을 2배로 증가시켰을 때 시편이 받는 maximum normal stress는 약 41% 만이 증가할 뿐이다. 더우기 TiN의 높은 경도값 및 E 값과 비교해 볼 때 이의 증가분은 미미하기 때문에 하중의 변화가 마모량의 변화에 미치는 영향은 그리 크지 않게 나타난 것으로 생각된다.

또한 하중의 증가에 따라 TiN $1\mu\text{m}$ 를 증착시킨 시편과 TiN $3\mu\text{m}$ 를 증착시킨 시편의 마모량의 차이가 점차 커지는 것으로 나타나고 있는데 이같은 이유는 마모가 진행되어감에 따라 TiN $1\mu\text{m}$ 를 증착시킨 경우 모재가 빨리 노출되게 되고 이에따라 마모가 가속되기 때문인 것으로 생각된다. Photo. 1에 TiN $1\mu\text{m}$ 를 증착시킨 시편에 대해 하중을 2.0Kgf, 4Kgf로 하여 시험하였을 경우의 wear scar를 나타내었다.

Fig. 4에 속도의 변화에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 $1\mu\text{m}$ TiN coating 보다 $3\mu\text{m}$ TiN coating의 경우가 모든 속도조건에서 마모량이 약간 작게 나타나고 있으며 두조건 모두가 속도의 증가에 따라 마모량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Photo. 2에 나타나 바와 같이 속도의 증가와 함께 마찰열(frictional heat)의 발생으로 인하여 TiN surface에



a)



b)

photo. 1. Variation of wear scars in accordance with applied load.

(TiN $1\mu\text{m}$, Arrows indicate sliding direction)

a) 2.0Kgf, 1m/sec $125.7\text{m} \times 300$

b) 4.0Kgf, 1m/sec, $123.7\text{m} \times 300$

transferred 되는 steel이 산화하게 되고 이 산화된 transferred film이 wear protective film의 역할을 수행함으로써 TiN의 마모를 저지시키기 때문인 것으로 생각된다.

또한 $1\mu\text{m}$ TiN과 $3\mu\text{m}$ 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.

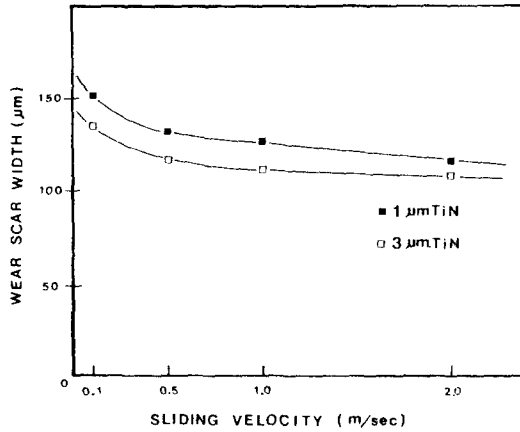


Fig. 4. The variation of wear scar width as a function of sliding velocity. (2.5Kgf, 1m/sec, 62.8m)

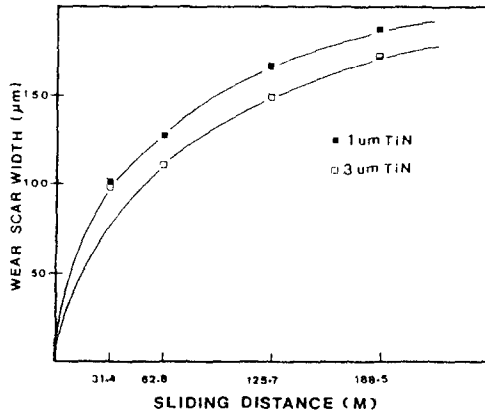
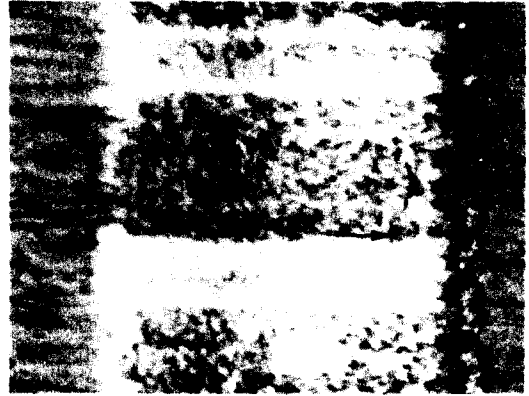


Fig. 5. The variation of wear scar width as a function of sliding distance. (2.5Kgf, 1m/sec)

Fig. 5에 마찰거리에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 마찰거리가 길어질수록 마모량은 증가하고 있으나 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 마찰거리가 길어짐에 따라 1 μm TiN과 3 μm TiN의 마모량의 차이는 약간 커지고 있다. 이같은 이유는 TiN의 마모시에 1 μm TiN의 경우가 crack initiation이 더 쉬워지



a)



b)

Photo. 2. Build up of oxidized transferred metallic films in accordance with sliding velocity. (TiN 1 μm, Arrows indicate sliding direction)

a) 2.5Kgf, 0.1m/sec, 125.7m × 300

b) 2.5Kgf, 2.0m/sec, 125.7m × 300

고 일단 crack이 생성된 후에는 steel-TiN의 접촉시에 TiN의 adhesion force가 더 낮은 1 μm TiN의 경우가 3 μm TiN의 경우보다도 더욱 쉽게 박리될 수 있다는 것으로서 생각할 수 있겠다. 이를 Photo. 3에 나타내었는데 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.

4. 결 론

PECVD 법으로 coating 한 TiN coated roller 에 대한 마모시험을 roll-on-disc 의 tribotester 를 이용하여 하중, 속도 등을 변화시켜가며 실험 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 surface 에 형성된 transferred metal 의 산화때문인 것으로 생각된다.

3) 마찰거리의 증가에 따라 마모량은 증가하지만 그 증가율은 둔화되는 것으로 나타났는데 이는 effective stress 의 감소에 기인한 것으로 생각된다.

4) TiN coated roller 의 마모기구는 trailing edge 에 걸리는 인장응력에 의한 균열생성 및 피로파괴와 마찰열 에 의한 상대면과 피복층간의 응착에 의해 모재와 피복 층 경계면에 작용하는 전단응력에 의한 피복층의 박리가 추가됨이 확인되었다.



Photo. 3. Pictures of wear scars varying with coating film thickness.
(2.5Kgf, 1.0m/sce, 31m, Arrows indicate sliding direction)
a) TiN $1 \mu\text{m} \times 300$ b) TiN $3 \mu\text{m} \times 300$