

TiN 경질박막의 마모 수명 예측에 관한 연구

Presumption on Wear life of TiN Film

정기훈 · 이영제*

성균관대학교 대학원 · 성균관대학교 기계공학부*

1. 서론

TiN 코팅은 마모에 대한 저항성 및 고체 윤활 효과가 매우 우수하여 내마모성 및 저마찰이 요구되는 절삭공구나 피스톤 베어링 및 각종 축계의 코팅막으로 사용이 증가되고 있다.

일반적으로 재료의 경도와 인성은 서로 상반 관계를 갖고 있어 공학적으로 경도와 인성을 모두 요구하는 표면을 얻기 위해 연질 모재 위의 세라믹 코팅은 그 요구를 만족시킬 수 있는 가장 각광받는 표면처리 방법중의 하나이다. 그러나, TiN 과 같은 경질 박막의 공학적 적용시 가장 요구되는 마모수명은 모재의 조도나 경도, 증착 방법, 접촉 상태, 코팅막의 두께 및 마모의 발생 기구 등에 따라 마찰 및 마모 메커니즘의 현저한 차이⁽¹⁾를 나타내기 때문에 예측이 거의 불가능한 실정이고, 아직까지 이러한 마모수명 비교 평가방법에 대한 기준 설정 및 정량적 정립이 이루어 지지 않고 있다.

본 연구에서는 모재의 경도, 조도, 코팅 두께가 다른 TiN 경질 박막에 압입시험과 스크래치시험시 발생되는 균열 발생 메커니즘과 미끄럼 시험시 발생되는 마모 메커니즘의 연계성을 밝히고 압입 및 스크래치 시험시 코팅막이 손상되는 임계하중과 미끄럼 시험시 접촉하중 변

화에 따른 마모수명의 정량적 연관성을 찾아 보고자 한다.

2. 시험 장치 및 방법

2.1 시편 제작

본 연구에 사용한 시편은 S20C 탄소강 ($H_{RC}: 10, R_z=0.4 \mu m$)이며, 열처리를 통해 모재와 경도가 다른 2종($H_{RC}: 35, 60$)을, 조도가 다른 2종 ($R_z=0.1 \mu m, R_z=0.9 \mu m$)을 제작하여 음극 아크 이온 플레이팅(cathodic arc ion plating)에 의해 코팅 두께를 $1 \mu m, 2.5 \mu m, 4 \mu m$ 로 변화시키며 Table 1 과 같이 TiN 을 증착시켰다.

Table 1 Specification of TiN Coating specimens

	Substrate Roughness	0.1 (μm)	0.4 (μm)	0.9 (μm)
	Coating Thickness	TiN	TiN	TiN
$H_{RC} 10$	$1 \mu m$		⊙	
	$2.5 \mu m$	⊙	⊙	⊙
	$4 \mu m$		⊙	
$H_{RC} 35$	$2.5 \mu m$		⊙	
$H_{RC} 60$	$2.5 \mu m$		⊙	

2.2 압입 시험

코팅막의 압입시 균열이 발생하는 메커니즘을 밝히고 스크래치 시험에 대한 신뢰성 부여와 미끄럼 시험에 대한 초기하중설정의 기준 자료를 확보하기 위해 압입시험을 수행하였다. 코팅막의 밀착력을 평가하기 위해 스크래치 시험과 압입시험을 주로 사용하는 데 압입 시험의 경우 점접촉으로 인한 결과의 편차가 스크래치 시험보다⁽²⁾ 크므로 3-4 회의 시험 회수를 통해 통계적 해석 방법을 택했다.

본 연구에서는 압입 하중에 대한 미세 균열의 관찰을 용이하게 하기 위해 마이크로 비커스 경도계를 이용해 마이크로 비커스압자로 하중을 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5kgf로 변화 시키가며 각 시편에 대해 압입 시험을 수행하여 광학 현미경을 통해 균열이 발생하는 모드를 관찰하였고 부분적으로 코팅막이 떨어져 나가는 스펠링(spalling)이 발생하기 시작하는 하중을 압입임계하중으로 정하였다.

2.3 스크래치 시험

스크래치 시험은 코팅막의 밀착력을 측정하기 위해 현재까지 가장 일반적으로 사용되는 방법으로 Fig.1 과 같이 0.2R의 다이아몬드 압자를 이용해 하중을 증가시키며 코팅막을 이동시켜 코팅막의 손상을 마찰계수의 증가나 현미경, 또는 음향 방출 신호를 이용하여 구할 수 있다. 이때 코팅막이 손상되는 최소 하중을 스크래치 임계 하중⁽³⁾이라 정의 한다. 본 연구의 스크래치 시험은 LSRH-REVETEST Scratch Tester의 시험 조건에 준거하여 직접 제작하였고 가중속도 및 스크래치 속도는 $dL/dt=75$

N/min, $dx/dt=100$ mm/min 로 하여 1분동안 측정하였다. 또한 마찰계수의 증가를 기준으로 음향방출신호와 현미경 관찰을 참고하여 스크래치 임계하중을 결정하였다.

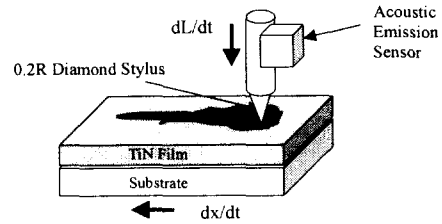


Fig. 1 Principle of Scratch Test Method

2.4 미끄럼 시험

TiN에 의한 미끄럼 시험시 발생하는 마멸현상은 응착 마모 및 연삭 마모가 주요인데⁽⁴⁾ 본 연구에서는 응착마멸과 연삭마멸의 영향을 최소화하기 위해 Fig 2와 같이 0.2R 다이아몬드 콘 아래 코팅 디스크를 회전시켜 마찰 및 마모 시험을 할 수 있도록 Cone on Disk 및 Multi-Type (BOD & POD)의 마모 시험기를 제작하였다. 분동을 사용하여 하중을 가하였고 시험시 발생하는 마찰력은 로드셀과 연결하여 자료획득장치(Data Acquisition System)를 이용해 컴퓨터와 연결해 데이터를 온라인 상태에서 처리할 수 있도록 하였다. 마찰력으로 인한 회전속도의 감소를 방지하기 위해 0.5HP의 DC 모터를 사용하였다.

본 시험에서는 코팅막의 내구성을 측정하기 위해서 압입 시험과 스크래치 시험시 얻어진 각 시편에 대한 압입 및 스크래치 임계하중을

바탕으로 미끄럼 시험의 초기하중을 결정한 후 코팅막이 파손되기 시작하는 접촉 회전수를 마모수명으로 결정한다. 이러한 마모수명과 하중의 변화를 알아보고 무한 회전수를 갖는 하중을 임계접촉하중(Critical Contact Load)이라 정의하고 압입 임계하중과 스크래치 임계 하중과의 연계성을 찾아 본다.

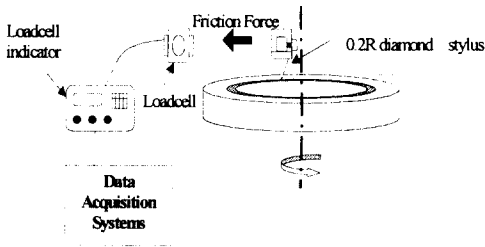
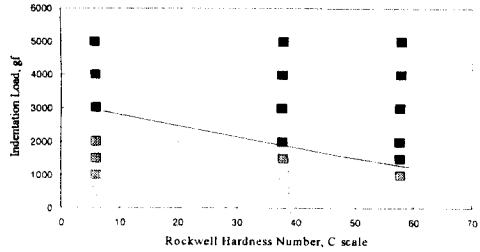
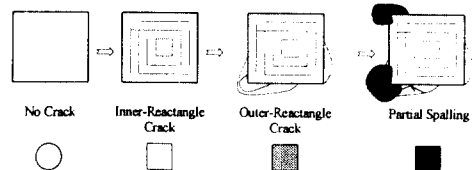


Fig. 2 Schematic Diagram of Sliding Test

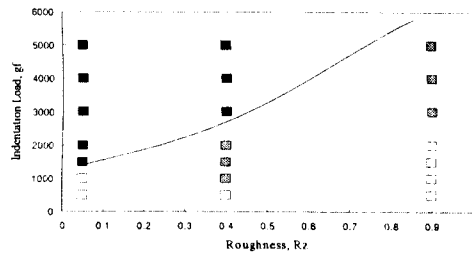
3. 결과 및 고찰

3.1 압입시험

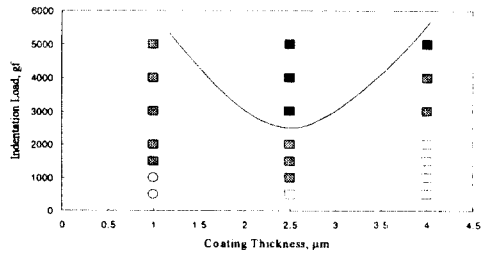
압입 하중시 발생하는 균열 모드의 변화는 4 단계로 구분되며 각각의 균열 모드는 서로 중첩되며 발생하기 시작한다. Fig.3 과 같이 작은 하중이 작용할 때 압자의 기하학적 형상으로 인해 사각형의 압입자국 안쪽면에서 직사각형의 균열이 발생하고 하중이 크게 작용함에 따라 이러한 내부 직사각형 균열이 외부로 진전하며 외부 직사각형 균열 및 코팅막의 함몰이 발생하기 시작한다. 하중증가에 따른 외부직사각형 균열이 심해지며 코팅막이 모재의 표면에서 완전히 떨어져나가는 스펠링(spalling)이 발생하는데 이러한 스펠링이 발생하는 하중을 압입 임계하중이라 정의한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Indentation Test Results

(a) Crack Initiation at various HARDNESS on indentation

(b) Crack Initiation at various ROUGHNESS on indentation

(c) Crack Initiation at various COATING THICKNESS on indentation

Fig.4 와 같이 경도가 높고 표면조도가 낮을수록 압입 임계하중은 감소하는 경향을 나타냈고 코팅 두께에 따라 감소 증가추세를 나타냈다. 코팅 두께에 의한 영향은 Kato 의 연구⁽⁵⁾에서와 비슷한 결과를 나타내므로 코팅막의 특성을 결정 짓는데 가장 주요인자임을 알 수 있었다.

3.2 스크래치시험

TiN 막을 스크래치 시험을 할 때 압입시험시 발생하는 스펙링과 외부균열에 의해 Fig.5 와 같이 파손된다. 스크래치 임계하중은 코팅의 두께와 모재의 경도가 증가할수록, 모재의 표

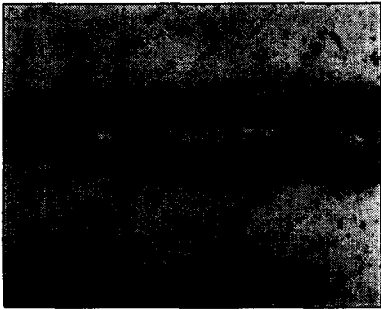


Fig. 5 Scratch Fractography of TiN Film (HRC:6,RZ:0.4,coating thick. 1 μ m, x 200 magnification)

면조도가 작을수록이 증가하는 경향을 나타내고 그 시험 결과는 Fig.6 과 같다.

코팅두께에 의한 스크래치 임계하중의 변화량은 모재의 경도나 조도에 비해 그 변화폭이 더 크게 나타났다.

3.3 미끄럼시험

TiN 코팅막은 표면의 경도가 높아 Fig.7 과 같이 상대재료의 응착마모를 빠르게 일으키므로, TiN 코팅막 자체의 수명만 고려하기위해 접촉

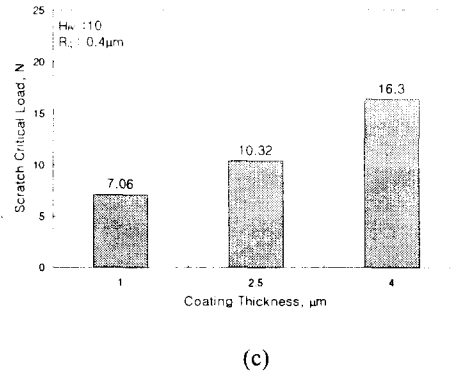
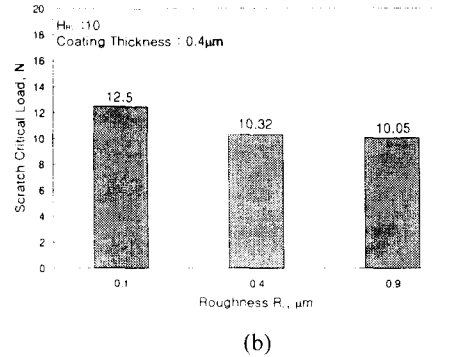
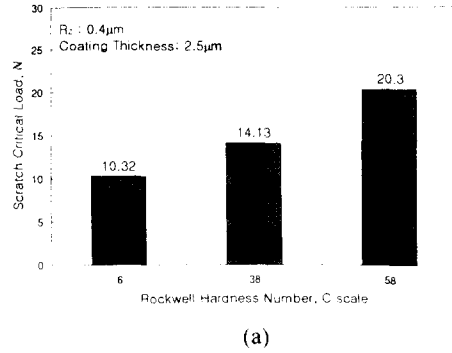


Fig. 6 Scratch Test Results

- (a) Scratch Critical load at various Hardness of substrate
- (b) Scratch Critical load at various Roughness of substrate
- (c) Scratch Critical load at various Coating thickness

하고 있는 상대재의 변화를 최소화할 수 있는 방법이 필요하다 .

TiN 코팅막이 손상되면서 발생하는 마찰력의 천이과정은 응착마모에 의한 영향과 상대표면의 변화가 적은 다이아몬드 콘을 사용하여 Fig.8 과 같이 얻을 수 있었다.

TiN 과 다이아몬드 콘의 마찰계수는 모재와 다이아몬드 콘의 마찰계수와 비교하였을 때 2 배 정도의 저마찰 효과를 얻을 수 있었다. 그러나 코팅막이 손상되면서 마찰력이 불안정해지고 코팅막이 완전히 손상된 후 일반 모재와 비슷한 마찰계수를 나타내는 것으로 나타났다.

스크래치 시험에서 얻은 스크래치 임계하중을 이용해 미끄럼시 초기하중을 결정하여 하중을 조금씩 증가시키며 코팅막이 손상될 때까지의 마모수명을 구하고 이를 임계 하중에 대한 미끄럼시 접촉 하중의 백분율비와 코팅막이 손상될 때까지의 회전수에 대한 선도를 Fig.9 와 같이 나타내었다.

4. 결론

TiN 경질 박막의 압입 및 스크래치 시험시 균열 발생 메커니즘은 매우 큰차이를 나타낸다. 모재의 경도 및 조도는 경도가 높고 조도가 낮을수록 압입시험에서는 압입 임계하중이 낮은 반면 스크래치 시험에서는 스크래치 임계하중이 높게 나타난다. 또한 코팅의 두께가 두꺼워질수록 스크래치 시험에서는 임계값이 높으나 압입 시험에서는 최저치가 존재함을 알 수 있었다.

이러한 압입 및 스크래치의 균열 발생 메커니즘과 임계 하중값이 미끄럼시 코팅막이 손상

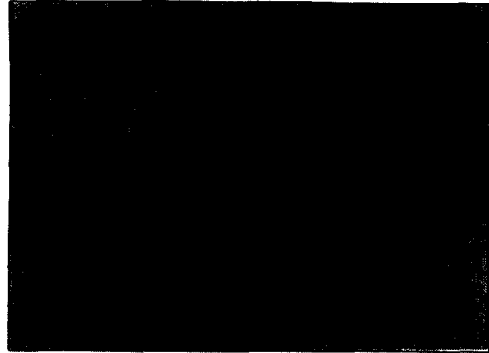


Fig. 7 Adhesion of Al_2O_3 on TiN Film

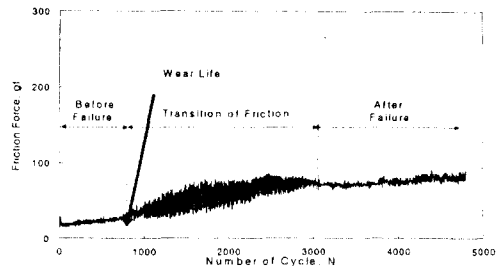


Fig. 8 Typical Frictional Transition of TiN Film

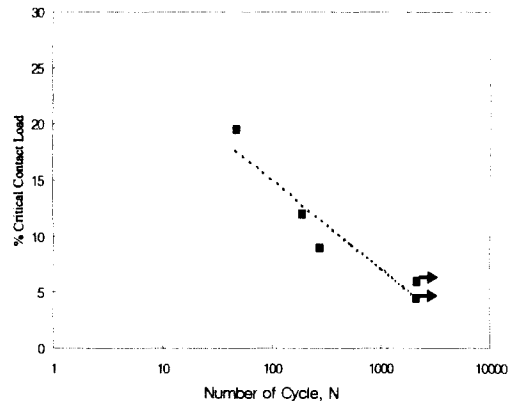


Fig. 9 Percent Critical Contact Load vs Number of cycles for 0.2 R Diamond Cone on TiN Film Disk (HRc10,RZ0.4 μ m, thick 4 μ m)

하기까지의 접촉 회전수와 백분율 입계접촉하중과의 로그 선형 관계가 나타나므로 경도 및 조도 코팅 두께별로 이러한 백분율 접촉하중과 마모수명에 관한 선도를 좀 더 폭 넓게 자료를 확보한다면 코팅막의 형성시 최적조건을 설정할 수 있는 근본적인 방법이라 기대된다.

References

1. Kenneth Holmberg and Allan Matthews, Coating Tribology, *Elsevier*, pp172-189, 1994
2. E.R.Kral, K.Komovopoulos, and D.B.Bogy, Hardness of Thin-Film Media: Scratch Experiments and Finite Element Simulations, *ASME Jour. of Tribology*, , vol.118, pp.1-11, 1996
3. D. Dowson, C.M. Taylor and M. Godet, Mechanics of Coatings, *Elsevier*, pp169-174, 1990
4. F.H.Stott and D.R.G.Mitchell, The influence of load and counterface on the effectiveness of thin Physically Vapour deposited titanium nitride coatings in providing wear resistance at temperatures to 500°C, *Wear*, vol.155, pp.207-223, 1992
5. D.F.Diao, K. Kato, K. Hockirigawa, Fracture Mechanisms of Ceramic Coatings in Indentation, *ASME Jour. of Tribology*, vol.116, 1994