

마모수명평가를 위한 TiN 경질박막의 마찰 및 마모특성에 관한 연구

정기훈 · 이영제*

성균관대학교 대학원, 성균관대학교 기계공학부*

A Study on Friction and Wear of TiN Film for the Wear-life Prediction

Ki-Hun Jeong and Young-Ze Lee*

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University
Department of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University*

Abstract—Indentation, scratch and sliding tests were carried out in this paper to predict the critical loads and the failure modes of TiN-coated specimen. The test specimens were S20C steels with three different substrate hardness, roughness and coating thickness. The scratch test shows that the coating thickness has more dominant effect on the critical load of coated disk than the hardness and the roughness. Using the percent contact load, the ratio of sliding load to the critical scratch load, the cycles to failure are measured to predict the wear-life of TiN film. On the wear-life diagram the percent loads and the cycle to failure show the good linear relation on semi-log coordinate. With decreasing loads, the diagram shows the wear-limit at which the coated disk survives more than 4000 cycles.

Key words—TiN film, wear-life diagram, critical scratch load, wear limit.

1. 서 론

TiN코팅은 마모에 대한 저항성 및 고체 윤활 효과가 매우 우수하여 내마모성 및 저마찰이 요구되는 절삭공구나 피스톤 베어링 및 각종 축계의 코팅막으로 사용이 증가되고 있다[1].

일반적으로 재료의 경도와 인성은 서로 상반관계를 갖고 있어 공학적으로 경도와 인성을 모두 요구하는 표면을 얻기 위해 연질 모재 위의 세라믹 코팅은 그 요구를 만족시킬 수 있는 가장 각광받는 표면처리 방법 중의 하나이다. 그러나, TiN 과 같은 경질 박막의 공학적 적용시 가장 요구되는 마모수명[2]은 모재의 표면조도나 경도, 코팅의 증착 방법, 접촉상태, 코팅막의 두께 및 마모의 발생 기구 등에 따라 마찰 및 마모 메커니즘의 현저한 차이[3,4]를 나타내기 때문에

예측이 거의 불가능한 실정이고, 아직까지 이러한 마모수명 비교 평가방법에 대한 기준 설정 및 정량적 정립이 이루어지지 않고 있다.

현재까지 코팅막의 특성 평가방법으로 스크래치시험을 통해 밀착력을 비교 평가하는 방법이 주로 사용되는데[5] 이러한 스크래치 시험으로는 코팅막의 공학적 적용시 가장 중요한 특성인 마모수명평가가 난해하고 직접적인 코팅막의 마모수명특성을 나타내는 미끄럼시험과의 연계성을 파악할 수 없다. 또한 코팅막의 수명 평가를 위한 방법이 일관적으로 정립되지 않아 적용상의 어려움이 존재한다.

본 연구에서는 모재의 경도, 조도, 코팅 두께가 다른 TiN 경질 박막에 압입시험과 스크래치시험시 발생되는 균열 발생 메커니즘과 미끄럼 시험시 발생되는 마찰 및 마모 메커니즘의 연계성을 밝히고 압입 및 스

크래치시험시 코팅막이 손상되는 임계하중과 미끄럼 시험시 접촉하중 변화에 따른 마모수명의 정량적 연관성을 찾아 마모수명선도(Wear-Life Diagram)를 작성하여 코팅막의 수명을 예측하기 위한 그 기준을 설정하고자 한다.

2. 시험 장치 및 방법

2-1. 시편 제작

본 연구에 사용한 시편은 S20C 일반 탄소강(H_{RC} : 10, R_z : 0.4 μm)이며, 열처리를 통해 모재와 경도가 다른 2종(H_{RC} : 35, 60)을, 조도가 다른 2종(R_z : 0.1 μm , R_z : 0.9 μm)을 제작하였으며, 현재 이온화율이 높아 밀착특성이 우수한 물리적 증착법 중 음극아크이온플레이팅[6] (Cathodic Arc Ion Plating)에 의해 코팅 두께를 1 μm , 2.5 μm , 4 μm 로 변화시키며 Table 1과 같이 TiN을 증착시켰다.

2-2. 압입 시험

코팅막의 압입시 균열이 발생하는 메커니즘을 밝히고 스크래치 시험에 대한 연계성 여부와 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[7] 크므로 3~4회의 시험 회수를 통해 통계적 해석 방법을 택하였다.

본 연구에서는 압입 하중에 대한 미세 균열의 관찰을 용이하게 하기 위해 마이크로비커스 경도계를 이용해 피라미드형 다이아몬드 압자에 의해 압입시험을 수행하였다.

스크래치시험과 미끄럼시험시 임계하중을 고려하여 압입하중을 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 kgf의 7단계로 변

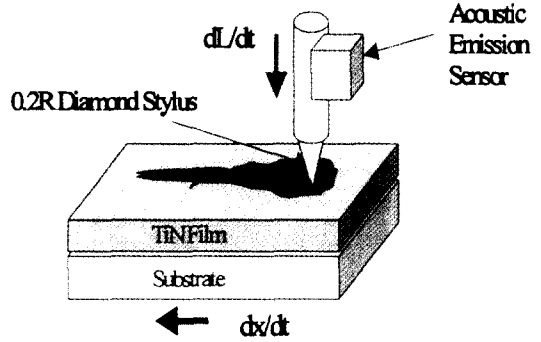


Fig. 1. Principle of scratch test.

화시켜가며 각 시편에 대해 압입시험을 수행한 후 광학 현미경을 통해 균열이 발생하는 모드를 관찰하였고 균열의 변화가 심할 때의 하중을 압입임계하중(Indentation Critical Load)으로 정의하였다.

2-3. 스크래치 시험

스크래치 시험은 코팅막의 밀착력을 측정하기 위해 현재까지 가장 일반적으로 사용되는 방법으로 Fig. 1과 같이 0.2R의 다이아몬드콘 압자를 이용해 하중을 증가시키며 코팅막을 이동시켜 코팅막의 손상을 마찰계수의 증가나 현미경, 또는 음향방출신호를 이용하여 구할 수 있다. 이때 코팅막이 손상되는 최소하중을 스크래치임계하중(Scratch Critical Load)[5]이라 정의한다.

본 연구의 스크래치시험기는 LSRH-REVETEST Scratch Tester의 시험 조건(8)에 의하여 직접 제작하였고 가중속도 및 스크래치 속도는 $dL/dt=100 \text{ N/min}$, $dx/dt=10 \text{ mm/min}$ 로 하여 하중이 75 N될 때까지 측정하였다. 또한, 마찰계수의 증가를 기준으로 스크래치 임계하중을 결정하였고 음향방출신호와 현미경 관찰을 통하여 임계값을 검증하였다.

2-4. 미끄럼 시험

TiN에 의한 미끄럼 시험시 발생하는 마모메카니즘의 주요인은 응착 마모 및 연삭 마모인데[9,10] 본 연구에서는 상대재의 응착마모의 영향을 최소화하고 연삭마모에 의한 코팅막의 마모수명을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 반경이 0.2 mm인 다이아몬드 콘 아래 코팅 디스크를 회전시켜 마찰 및 마모 시험을 할 수 있도록 Cone on Disk 및 Multi-Type (Ball on Disk &

Table 1. Specification of TiN coated specimens

Substrate		0.1	0.4	0.9
Roughness		(μm)	(μm)	(μm)
Substrate Hardness	Coating	TiN	TiN	TiN
H_{RC} 10	1 μm		●	
	2.5 μm	●	●	●
	4 μm			
H_{RC} 35	2.5 μm		●	
H_{RC} 60	2.5 μm		●	

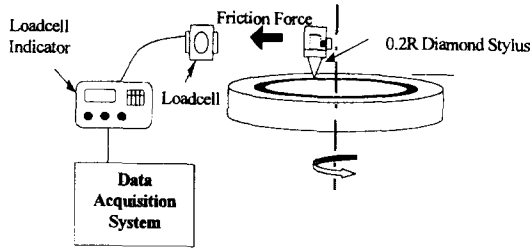


Fig. 2. Schematic diagram of sliding test.

Pin on Disk)의 마모 시험기를 제작하였다. 분동을 사용하여 하중을 가하였고 시험시 발생하는 마찰력은 로드셀과 연결하여 자료획득장치(Data Acquisition System)를 이용해 컴퓨터에서 데이터를 온라인 처리할 수 있도록 하였다. 또한, 마찰력으로 인한 회전 속도의 감소를 방지하기 위해 0.5HP의 DC 모터를 감속하여 사용하였다.

미끄럼 시험을 회전수 35 RPM으로 고정하여 상온에서 수행하였다. 본 시험에서는 코팅막의 내구성을 측정하기 위해서 스크래치 시험을 통하여 구한 각 시편에 대한 스크래치 임계하중에 대한 접촉하중비를 백분율접촉하중(Percent Contact Load)이라 정의하고 이러한 하중하에 코팅막이 파손되기 시작하는 접촉회전수를 마모수명(Wear-life)으로 정의한다. 이러한 백분율 임계접촉하중 변화에 대한 마모수명의 변화를 알아보고 압입 및 스크래치 임계 하중과의 연계성을 찾아 본다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 압입시험

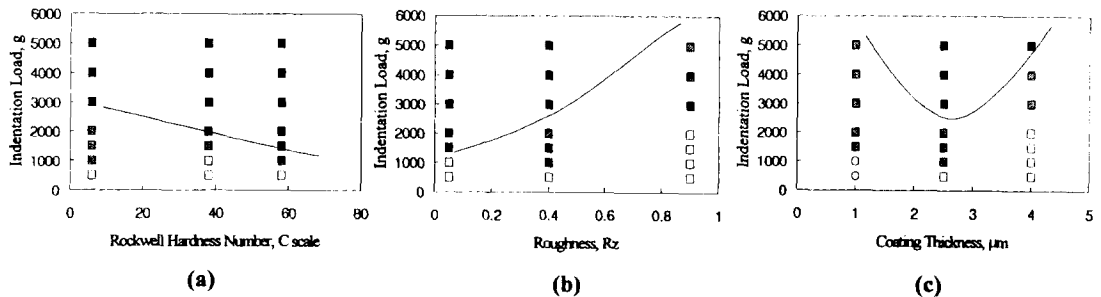


Fig. 4. The results of indentation test. (a) the variation of crack with substrate hardness on indentation (b) the variation of crack with substrate roughness on indentation (c) the variation of crack with coating thickness on indentation.

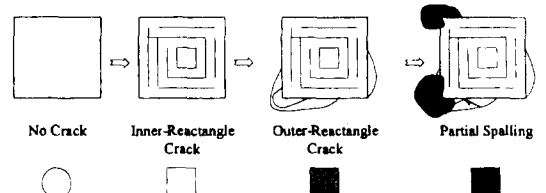


Fig. 3. Propagation and notation of crack initiation mode in indentation.

압입 하중시 발생하는 균열 모드의 변화는 4단계로 구분되며 각각의 균열 모드는 서로 중첩되며 발생하기 시작한다. Fig. 3과 같이 작은 하중이 작용할 때 압자의 기하학적 형상으로 인해 사각형의 압입자국 안쪽면에서 내부 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 부분적으로 완전히 떨어져나가는 스펠링(spalling)이 발생하는데 이러한 스펠링이 발생하는 하중을 압입임계하중(Indentation Critical Load)이라 정의한다. Fig. 4와 같이 경도가 높고 표면 조도가 작을수록 균열발생속도가 빨리 나타났으며 Kato의 연구[11]에서와 같이 코팅두께의 변화에 따른 균열발생 최저 하중이 존재함을 알 수 있었다.

3-2. 스크래치시험

TiN막을 스크래치 시험을 할 때 하중이 증가함에 따라 스크래치 자국 주변에서 압입시험시 발생하는 스펠링과 외부균열에 의해 Fig. 5와 같이 코팅막이 파손된다. 스크래치 임계하중은 Fig. 6과 같이 코팅의 두

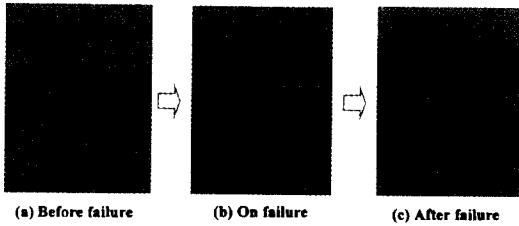


Fig. 5. The fractograph of scratched TiN film ($H_{RC}:6$, $R_z:0.4$, coating thickness: 1 μm , 30x magnification).

계와 모재의 경도가 증가할수록, 모재의 표면조도가 작을수록 증가하는 경향을 나타낸다.

스크래치 임계하중은 코팅막과 모재와의 밀착력에 밀접한 관계를 갖고 있으므로 본 연구의 시험변수로 사용된 모재의 경도나 조도, 코팅 두께의 변화에 대한 스크래치 임계하중의 변화율을 알아보기 위해 각 시험 변수의 값을 최소값에 대한 비로 무차원화시켜 스크래치 임계하중비에 대한 시험 변수비로 도식하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 코팅두께의 변화에 대한 임계하중의 변화율이 가장 크게 나타났고 모재의 경

도, 조도순으로 나타남을 알 수 있었다.

3-3. 미끄럼시험

TiN 코팅막은 표면의 경도가 높아 Fig. 8과 같이 상대재료의 응착마모를 빠르게 일으키고 이러한 응착된 막은 마찰특성을 크게 변화시키므로, TiN코팅막 자체의 수명만 고려하기 위해서는 접촉하고 있는 상대재의 변화를 최소화할 수 있는 방법이 필요하다.

TiN코팅막이 손상되면서 발생하는 마찰력의 천이 과정은 응착마모에 의한 영향과 상대표면의 변화가 적은 다이아몬드 콘을 사용하여 Fig.9과 같이 얻을 수 있었다. TiN과 다이아몬드 콘의 마찰특성은 모재와 다이아몬드 콘과의 마찰계수와 비교하였을 때 2배 정도의 저마찰 효과를 얻을 수 있었다. 그러나, 코팅막이 손상되면서 마찰력이 불안정해지고 코팅막이 완전히 손상된 후 일반 모재와 비슷한 마찰계수를 나타내는 것으로 관찰할 수 있었다.

본 연구에서는 앞서 언급한 백분율접촉하중과 마모 수명에 대한 코팅막의 마모수명선도(Wear-Life Di-

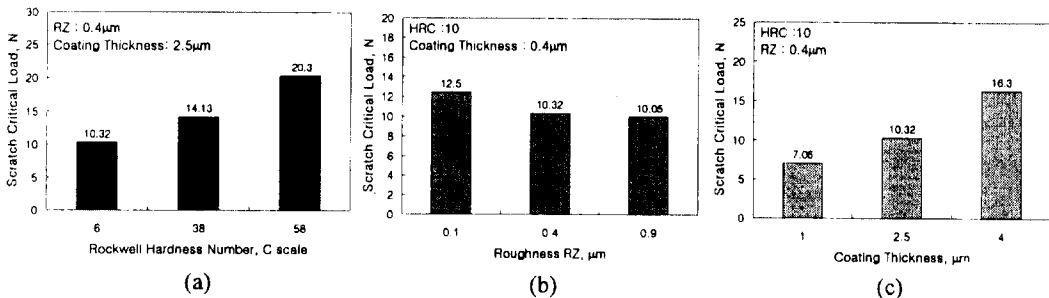


Fig. 6. The results of scratch test. (a) scratch critical load on substrate hardness (b) scratch critical load on substrate roughness (c) scratch critical load on coating thickness.

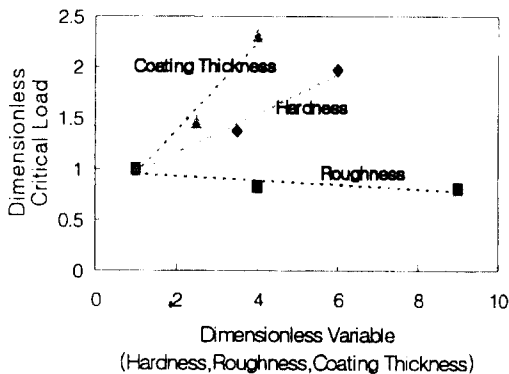


Fig. 7. The effects of variables on critical loads.

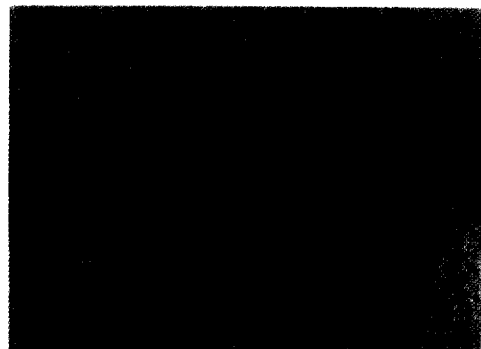


Fig. 8. Adhesion of Al_2O_3 on TiN film.

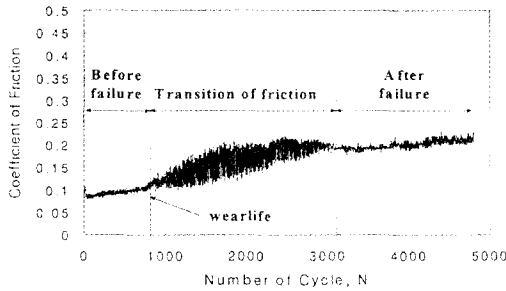


Fig. 9. Typical friction-transition of TiN film.

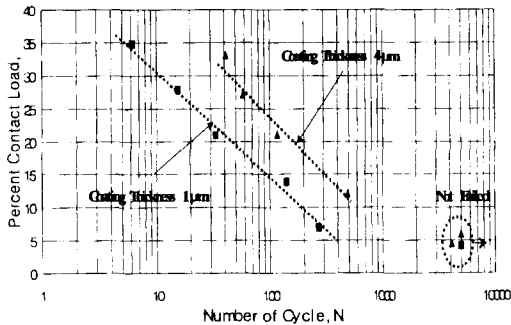


Fig. 10. The relation between percent contact load and contact number of cycle with coating thickness.

agram)를 Fig. 10과 같이 제시하였고 백분율접촉하중과 접촉회전수사이에는 로그선형관계가 존재함을 알 수 있었다. 또한 저하중에서는 코팅막의 파괴가 관찰되지 않았는데, 이는 일반적인 피로선도상의 내구한도와 같은 마모한도(Wear-Limit)가 존재함을 알 수 있었다.

4. 결 론

TiN 경질 박막의 수명예측을 위해 다이아몬드 압자를 사용하여 압입 및 스크래치 시험을 거쳐 미끄럼시험을 수행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압입시 균열발생은 모재의 경도가 높고, 조도가 작을수록 일찍 관찰되었으나, 스크래치시험에서는 경도가 높고 조도가 작을수록 임계하중이 증가하였다.

2. 스크래치 임계하중의 변화율은 코팅두께의 변화율이 모재의 경도나 표면 조도의 변화율에 비해 가장 크게 나타나므로 코팅두께의 결정이 코팅막과 모재와의 밀착특성에 매우 중요하다.

3. 미끄럼시험시 백분율접촉하중과 코팅막이 파손

될 때까지의 접촉 회전수사이에 로그선형적 관계가 존재하며 저하중에서 코팅막이 파손되지 않는 마모한도(Wear-Limit)가 존재한다. 이러한 마모수명선도(Wear-Life Diagram)를 이용하여 미끄럼운동시 코팅막의 수명을 평가할 수 있다.

후 기

이 연구는 96년 한국과학재단 연구비지원(과제번호:961-1010-080-2)에 의한 결과입니다.

참 고 문 헌

1. Y.G. Yeong, F.L. Jen and C.F. Ai, "The tribological characteristics of titanium nitride coatings," *Wear*, vol.194, pp.12-21, 1996.
2. B.W. Buchholtz and F.M. Kustas, "Effects of surface pretreatment of Ti-6Al-4V on the adhesion and wear lifetimes of sputtered MoS₂ coatings," *Tribology Trans.*, vol.39, pp.330-337, 1996.
3. F.E. Kennedy and L.Tang, "Factor affecting the sliding performance of titanium nitride coatings," *Mechanics of Coatings*, Elsevier, pp.409-416, 1990.
4. K. Holmberg and A. Matthews, *Coating Tribology*, Elsevier, pp.172-189, 1994.
5. A.G. Tangena and J. Franse, "Scratch tests on hard layers," *Mechanics of Coatings*, Elsevier, pp.169-174, 1990.
6. B. Bhushan and B.K. Gupta, *Handbook of tribology*, McGraw-Hill, pp.9.43-9.45, 1991.
7. 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.
8. CSEM, LSRH-REVETEST Scratch Tester Manual, pp. 13-17.
9. 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.
10. 임대순 외, "스퍼터링 증착조건이 TiN막의 마모특성에 미치는 영향," *한국윤활학회지*, 제11권, 제1호, pp.37-43, 1995.
11. D.F. Diao, K. Kato and K. Hokkirigawa, "Fracture mechanisms of ceramic coatings in indentation," *ASME Jour. of Tribology*, vol.116, pp.860-869, 1994.