TiN 박막 처리된 베어링 볼의 마모 수명 및 메커니즘에 관한 연구

한지훈, 조정우, 이영제*
성균관대학교 기계공학부 대학원, *성균관대학교 기계공학부

A Study on Wear Life and Mechanisms of TiN Coated Bearing Balls against Steel Disks

Ji-Hoon Han, Chung-Woo Cho, Young-Ze Lee*
Graduate School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University
*School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

Abstract : This paper presents the results of the repeated sliding tests to determine the wear-life of TiN coated AISI 52100 bearing balls deposited by PVD method and to show the wear mechanisms of those. The sliding tests were carried out using a ball-on-disk tribometer under ambient conditions. The coefficient of friction, wear volume and the cycles to failures of TiN coated bearing balls were measured with different normal loads and roughness of lower specimens. On the wear-life diagram, the normal loads and the cycles to failure showed the good linear relation on log-log coordinate. With a decreasing normal load, the diagram showed that the wear-limits, at which the coated bearing balls survived more than 4000cycles were under 0.1N of the normal load.

Keywords : coating, wear-life diagram, sliding test, TiN, bearing ball

1. 서론

TiN(Titanium Nitride) 박막은 마모에 대한 저항성 및 고체윤활효과가 매우 우수하여 내마모성 및 저마찰이 요구되는 절삭공구나 기어, 피스톤, 베어링 및 고속정밀 회전성을 요구하는 회전기계요소에 사용이 급증하고 있다[1].

회전하는 기계요소에는 반드시 베어링이 필요하다. 최근 산업화의 고속화 정밀화의 추세로 볼 베어링을 대체할 동압 베어링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 여전히 볼 베어링을 사용해야만 하는 회전기기 요소들이 있어 볼 베어링의 마찰 및 마모 특성개선에 관한 연구가 진행중이다 [2,3].

Wiklund등은 다중 막으로 박막처리된 시편의 슬라이딩 접촉 평가에 관한 연구를 하였다[4]. 그들은 볼과 디스크형 시편에 박막처리된 시편을 슬라이딩 실험하여 슬라이딩

시에는 기계적 물성보다는 트라이볼로지적 물성이 더 중요하다고 하였다. 또한, 슬라이딩 초기에 나타나는 낮은 마찰계수는 접촉면적이 초기에 작기 때문에 나타나는 결과라고 설명하였다.

Ahmed와 Hadfield는 WC(Tungsten Carbide) 박막 처리된 시편의 구름 접촉 피로특성에 대해 연구하였다[5]. 그들은 두꺼운 박막이 얇은 박막보다 좋은 성능을 나타낸다고 하였는데, 이는 얇은 박막의 경계면에서의 빠른 크랙의 생성과 성장때문이라고 하였다. 또한, 파손 형태로는 박막 마모와 박막의 판상 박리의 2가지 파손 형태가 나타난다고 하였다.

Wilson과 Alpas는 온도와 미끄럼 속도가 TiN박막의 마찰 및 마모에 미치는 영향에 대해 연구하였다[6]. 그들은 저온, 저속에서 TiN박막 위에는 보호막 역할을 하는 Fe_2O_3 천이층이 형성되어 손상을 최소화 한다고 하였다. 또한 200~450℃범위에서는 온도의 영향보다 미끄럼 속도가 빨라짐에 따라 더 많은 마모가 발생한다고 하였다.

이와 같이 박막에 대한 연구들이 진행되고 있는데, 박막평가방법에 있어서 실제사용환경과는 다른 다이아몬드를 이용한 평가법이 많아 박막의 적용상의 어려움이 존재한다.

본 연구에서는 TiN박막이 처리된 베어링 볼의 미끄럼시험을 수행하여 TiN박막의 마찰 및 마모 특성을 평가하고 마모수명선도를 작성하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

본 실험을 위해 제작된 ball-on-disk형 미끄럼시험기는 Fig.1과 같다.

수직하중은 분동을 올려 압자와 디스크에 직접 가하였다. 마찰력은 로드셀을 이용하여 측정하고, 측정된 마찰력신호는 인디케이터를 통하여 아날로그/디지털 컨버터로 변환한 후 컴퓨터로 저장하였다. 저장된 마찰력신호는 신호처리프로그램에 의해 마찰계수로 계산하였다.

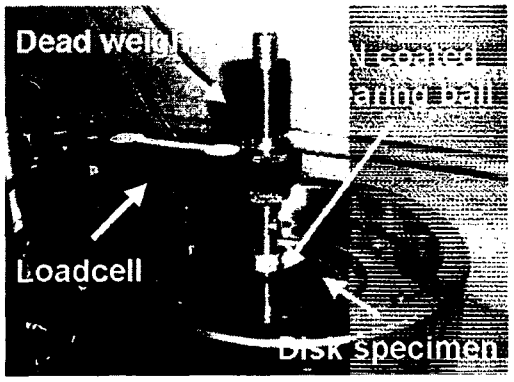


Fig.1 Photograph of the ball-on-disk tribometer.

2.2 실험시편 및 조건

본 실험에 사용한 시편은 지름이 10mm인 AISI 52100 베어링 볼(*NTN corp.: NJ2319*)을 사용하였다. 박막 증착은 PVD(Physical Vapour Deposition)법에 의해 TiN을 증착하여 시편을 만들었으며, 시편정보는 Table 1과 같다. 상대재는 반경이 60mm, 두께 10mm인 AISI1045 디스크형 시편을 사용하였고, 시편은 폴리싱하여 조도를 Ra=0.07㎛, 0.20㎛ 두 가지로 하였다. 미끄럼 속도는 60rpm으로 고정하여 실험하였다. 이는 회전속도에 의한 마찰열의 발생을 최소화 하고 리프트현상이 일어나지 않도록 하기 위해서, 선속도

를 0.1m/sec이하로 되게 하였다.

미끄럼시험의 최소수직하중을 0.1N으로 결정하고, 0.1N씩 증가시켜 실험하고, 0.5N부터는 0.5N씩 증가시켜 실험하여 마찰계수와 마모량을 측정하였다. 각각의 하중조건에서 3번 반복하여 실험하였으며, 매 실험 후 볼과 디스크는 아세톤으로 초음파 세척하였다.

실험 후 베어링볼의 마모량을 측정하기 위해 모든 미끄럼시험은 접촉회전수 4000회로 실험을 하였고, 광학현미경으로 마모자국의 지름을 측정하여 다음 식[7]을 사용하여 마모량을 측정하였다.

$$V = \frac{\pi d^4}{64R}$$

여기서, d는 광학 현미경으로 측정된 마모자국의 지름이고, R은 볼의 반지름이다.

Table 1

Material characteristics

Material	Thickness (㎛)	Hardness (Hv)	Roughness Ra(㎛)
TiN	4.0±0.5	2300±300	
Uncoated ball		850±50	
Uncoated disk		350±50	0.07 0.20

3. 실험결과 및 고찰

Fig.2는 본 연구에서 수행된 TiN 박막 처리된 베어링볼과 디스크와의 마찰특성을 나타낸 자료이다. 베어링볼이 디스크 위에서 반복 미끄럼할 때 손상 전 마찰계수는 TiN 박막의 고체 윤활효과에 의해 작고 안정적으로 나타나다가 접촉하는 회전수가 증가하면서 박막이 모재로부터 제거됨에 따라 수백회의 접촉 회전수를 거쳐 마찰계수가 불안정해지고 급증하게 된다. 박막이 완전히 손상된 후 비교적 안정적인 신호가 나타나는데, TiN 박막이 파손되어도 TiN 박막 처리가 되지 않은 두 금속이 접촉할 때와 비교하면 마모와 마찰이 낮다. 이는 TiN 박막의 윤활작용과 마모생성물의 응착 방지작용이 여전히 남아있기 때문이라고 사료된다.

Fig.3은 박막처리되지 않은 베어링 볼과 스틸 디스크와의 마찰거동을 나타낸 것이다.

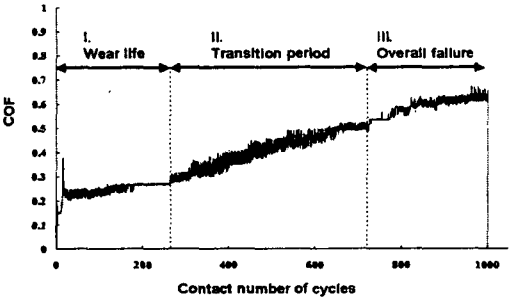


Fig.2 Friction characteristic of TiN coated bearing ball and steel disk.

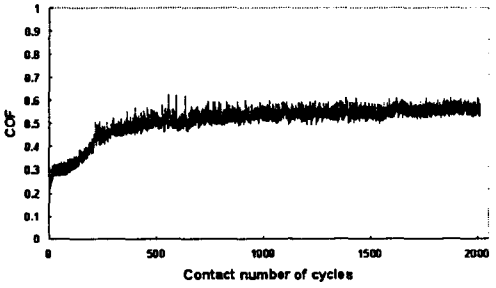
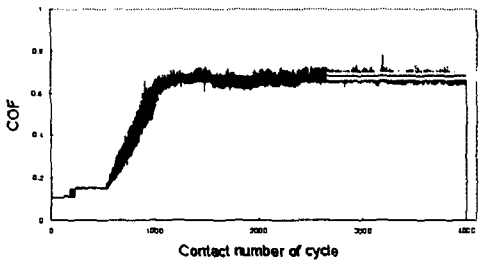
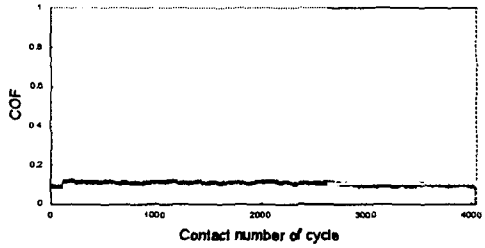


Fig.3 Friction characteristic of bearing ball and steel disk.

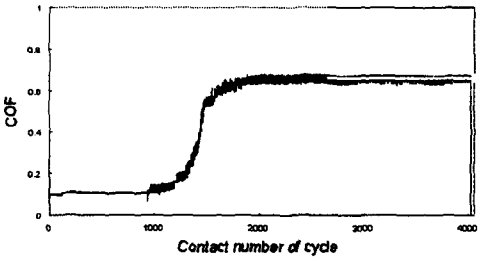


(a) 0.3N normal load, Ra=0.07㎛

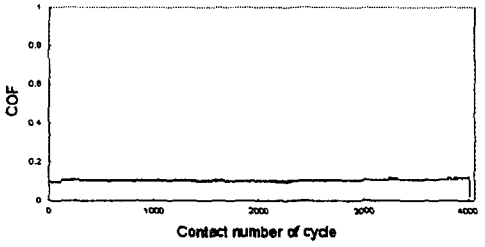


(b) 0.2N normal load, Ra=0.07㎛

Fig.4 Coefficient of friction signal of TiN coated bearing ball at each load.



(a) 0.2N normal load, Ra=0.20㎛



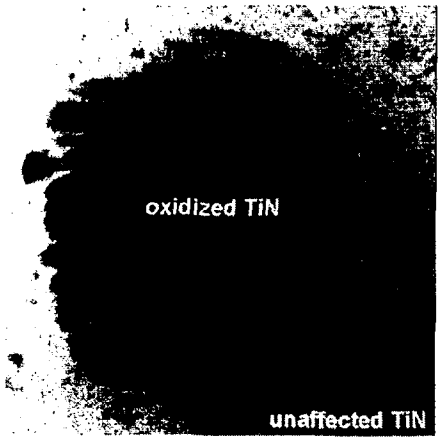
(b) 0.1N normal load, Ra=0.20㎛

***Fig.5* Coefficient of friction signal of TiN coated bearing ball at each load.**

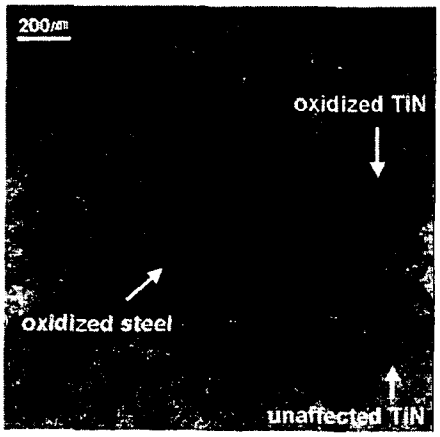
Fig.4는 TiN박막 처리된 베어링 볼을 두 가지 조도의 모재에 각 수직하중에 따라 미끄럼 시험을 수행한 결과이다. Fig.4(a)와 (b)는 모재의 조도는 Ra=0.07㎛이고, 각각의 수직하중이 0.2N, 0.3N일 때의 실험 결과이다. 먼저 Fig.4(a)는 마찰계수가 접촉회전 수 600까지 0.15로 변화가 없었으나, 그 이후 박막파손에 의한 마찰계수의 급격한 증가가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig.4(b)는 마찰계수가 접촉회전 수 4000까지 0.1 로 일정한 것을 볼 수 있다. 따라서 수직하중 0.2N의 미끄럼시험에서는 박막이 완전히 파손되지 않았다고 할 수 있다.

Fig.5(a)와 (b)는 모재의 조도는 Ra=0.20㎛이고, 각각의 수직하중은 0.1N, 0.2N일 때의 실험 결과이다. 먼저 Fig.5(a)는 마찰계수가 접촉회전수 1000까지 0.1로 변화가 없었으나, 그 이후 박막파손에 의한 마찰계수의 급격한 증가가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig.5(b)는 마찰계수가 접촉회전수 4000까지 0.1로 일정한 것을 볼 수 있다. 따라서 수직하중 0.1N의 미끄럼시험에서는 박막이 완전히 파손되지 않았다고 할 수 있다.

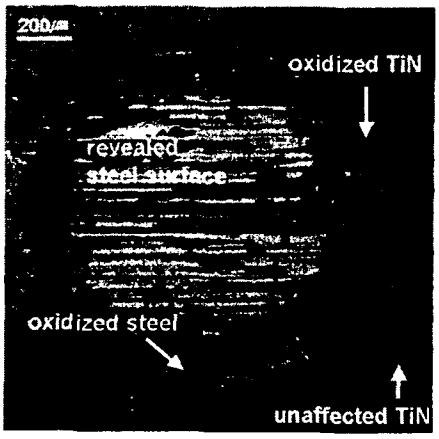
TiN 박막 처리된 베어링볼의 미끄럼 시험 후 마모자국을 Fig.6고 같이 나타내었다. 미끄럼 접촉이 시작되는 초기에는 Fig.6(a)에서 보는 바와 같이 TiN박막이 산화되어 TiN 산화막 층을 형성한다. 이때의 마찰계수는 약간의 변동이 있으나 거의 일정하다. 접촉회전수가 증가함에 따라 Fig.6(b)에서와 같이 회색의 TiN박막과 진한회색의 산화된 TiN, 그리고 검은색의 스틸 디스크에서 전달되어진 스틸 산화막 전달층이 생긴다. 이때 마찰계수는 점차적으로 증가한다. 접촉회전수가 더욱 증가하면 Fig.6(c)와 같이 베 어링 볼의 표면이 드러나게 되며 마모가 증가하



(a) Before failure(0.1N normal load)



(b) Transition period(1N normal load)



(c) Overall failure(2.5N normal load)

Fig.6 Optical micrograph showing surface damage by mild abrasion and oxidation of a TiN coated bearing ball.

고 마찰계수는 박막처리 되지 않은 시편의 슬라이딩 실험의 값과 비슷하게 된다. 박막 손상전과 손상후의 마찰계수는 약 1.5-3배 정도의 증가를 가져오는데 이는 TiN박막의 제거로 인한 고체윤활효과의 저하와 Fig.6(a)-(c)에서 나타낸 것과 같이 두 표면간의 실 접촉면적의 증가와 산화막 생성으로 인한 결과라 할 수 있다. Fig.7은 Fig.6(a)의 TiN 박막 처리된 베어링볼의 마모자국에 대한 EDX분석 결과이다. 산화물 생성에 의한 O요소와 TiN박막의 모재 성분인 Fe가 소량 검출된 것을 볼 수 있다.

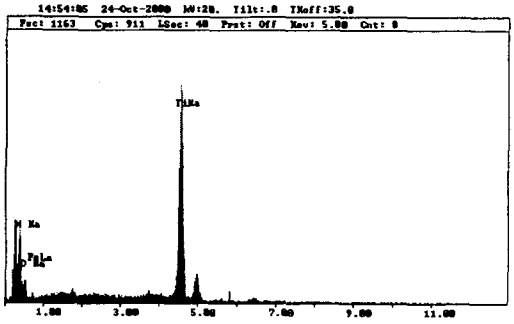


Fig. 7 EDX analysis of TiN coated bearing ball.

위에서 실험한 결과를 바탕으로 박막이 파손되기 시작하는 접촉회전수, 마모수명을 찾아 접촉하중과 마모수명과의 관계를 대수좌표계에 나타내는 마모수명선도(wear-life diagram)[8]를 Fig.8과 같이 작성하였다. 수명선도에서 상대재의 표면조도가 작아질수록 마모수명이 증가하는 추세를 나타낸다. 이는 상대재의 표면조도가 거친 경우, 상대재의 표면 돌기에 의한 미소 플라우잉(micro-ploughing)이 발생[9]함으로 인해 마찰계수가 증가한 것으로 사료된다.

Fig.9은 미끄럼시험 후 박막 처리된 베어링 볼의 마모량을 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 하중이 증가함에 따라 마모량

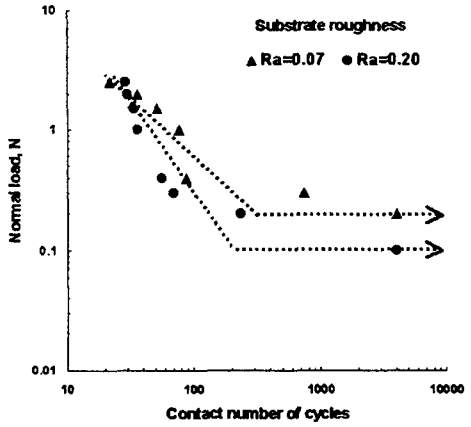


Fig.8 Wear life diagram of TiN coated bearing ball at each roughness.

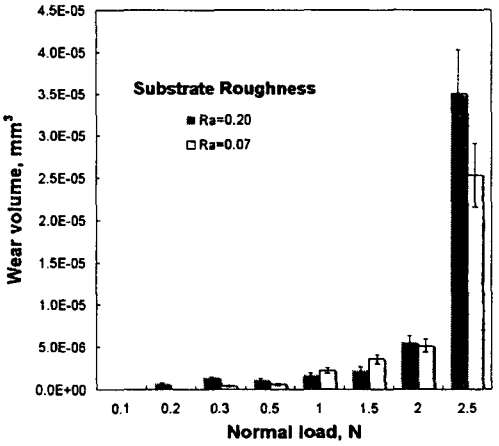


Fig.9 Wear volume of TiN coated bearing ball at each roughness.

역시 증가추세를 나타내는데, 하중이 2.5N을 넘어서면서 마모량이 급격히 상승한다. 이는 하중이 2.5N을 넘어서면서 빠른 시간 동안 박막이 파손되면서, 실접촉면적이 넓어져 베어링 볼의 표면과 상대재의 표면이 직접 접촉하여 심한 응착이 발생하여 나타나는 결과라고 추측된다. 실험결과에서 조도 Ra=0.20㎛, 0.1N과 Ra=0.07㎛, 0.2N에서는 베어링 볼에서 생성되어진 TiN 산화막에 의해 마모량의 데이터를 얻지 못하였다.

4. 결론

TiN박막 처리된 베어링 볼의 마찰마모특성평가를 위한 미끄럼 마모실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) TiN 박막 처리된 베어링볼과 스틸디스크의 미끄럼 시험에서 마찰계수가 0.1인 수명구간이 존재한다.
2) 미끄럼 시험시 TiN 박막 처리된 베어링볼의 마모 및 마찰 특성은 산화 천이층 생성에 의해 지배적으로 결정된다.
3) 미끄럼 시험시 TiN 박막 처리된 베어링볼의 마모수명선도 작성이 가능하다.
4) 상대재의 표면조도가 낮을수록 더 긴 마모수명을 나타내었는데, 이는 표면조도가 높을수록 마이크로 플라우잉 발생으로 인한 마찰계수의 증가에 의한 것이다.

참고문헌

[1] K. Holmberg, A. Matthews, "Coating Tribology", Elservier, pp.172-189, 1994

[2] 이영제, 정광섭, 정성훈, "함유소결베어링과 빗살무늬 유체베어링의 마찰 특성 및 레이저 스캐너 모터에서의 전기적 특성", 한국윤활학회지, vol.15, pp.108-115, 1999

[3] Roger Ku, C. P., "Dynamic Characteristics of Hard Disk Drives Spindle Motors: Comparison

Between Ball Bearings and Hydrodynamics Bearing", Journal of Tribology, vol.118, pp.402-406, 1996

[4] U. Wiklund, O. Wanstrand, "Evaluation of new multilayered physical vapour deposition coating in sliding contact", Wear, vol.236, pp.88-95, 1999

[5] R. Ahmed, M. Hadfield, "Rolling contact fatigue performance of plasma sprayed coatings", Wear, vol.220, pp.80-91, 1998

[6] S. Wilson, A.T. Alpas, "Effect of temperature and sliding velocity on TiN coating wear", Surface and Coating Technology, vol.94-95, pp.53-59, 1997

[7] Peter J. Blau et al., "Friction, Lubrication and Wear Technology", ASM Handbook, vol.18, 362-369, 1995

[8] 조정우, 이영제, "AE 센서를 이용한 CrN 코팅의 마찰특성에 관한 연구", 한국윤활학회지, vol.15, pp.328-334, 1999

[9] P. sainsot et al., "Effect of surface coatings in a rough normally loaded contact", Mechanics of coatings, Tribology series 17, Elservier, pp.151-156, 1990

Vol.15, No.4, pp.328-334