

미끄럼운동시 TiN코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼접촉면에 형성되는 산화막의 영향을 고려한 마찰전이선도 작성에 대한 연구

조정우*, 박동신*, 이영제†

(2001년 9월 14일 접수, 2003년 2월 4일 심사완료)

Friction Transition Diagram Considering the Effects of Oxide Layer Formed on Contact Parts of TiN Coated Ball and Steel Disk in Sliding

Chung-Woo Cho, Dong-Shin Park and Young-Ze Lee

Key Words : Oxide Layer (산화막), TiN Coated Ball (TiN 코팅볼), Adhesive Wear (응착마멸), Real Contact Area (실 접촉면적), Friction Transition Diagram (마찰전이선도)

Abstract

In this study, the effects of oxide layer formed on the contact parts of TiN coated ball and steel disk in sliding are investigated. Also wear mechanism to form the oxide layer and the characteristics of the oxide layer formation are investigated. AISI 52100 steel ball is used for the substrate of coated ball specimens. Two types of coated ball specimens were prepared by depositing TiN coating with 1 and 4 μm in coating thickness. AISI 1045 steel is used for the disk type counter-body. To investigate the effect of oxide layer on the contact parts of the two materials, the tests were performed both in air for forming oxide layer on the contact parts and in nitrogen environment to avoid oxidation. And to study the effects of surface roughness of counter-body, TiN coating thickness and contact load of sliding test on the characteristics of oxide layer formation on counter-body, various tests were carried out. From the results, the friction characteristics between the two materials was predominated by iron oxide layer that formed on wear track on counter-body and this layer caused the high friction. And the formation rate of the oxide layer on wear track increased as the real contact area between the two materials increased as the contact load increased, the TiN coating thickness decreased and the surface of counter-body smoothed.

1. 서론

세라믹코팅은 저마찰특성과 내마멸성이 뛰어나 기계부품에 적용하면 그 수명을 향상시킬 수 있다.⁽¹⁾ 이러한 코팅은 주로 TiN(titanium nitride), CrN(chromium nitride), DLC(diamond like carbon)와 같이 공구, 베어링이나 회전축, 그리고 많은 기계 부품에 적용이 되고 있다.^(1,2) 이렇게 세라믹코팅을 다른 재료와 상대운동을 하는 기계부품에 적용할 때 발생하는 문제 중 하나는 주로 강재(steel)와의

접촉에서 형성되는 전이층(transfer layer)과 그로 인한 산화막(oxide layer)의 특성에 따라 코팅의 마찰 및 마멸 특성이 달라진다는 것이다.⁽³⁾

많은 연구 결과들이 산화막은 상대재료와의 접촉에서 코팅재료를 마멸로부터 보호한다고 보고하였다.⁽⁴⁻⁷⁾ 세라믹코팅과 강재와의 접촉에서 운동 초기에는 세라믹코팅이 저마찰과 내마멸의 우수한 특성을 나타내지만, 운동이 지속됨에 따라 강재로부터 전이층과 산화막이 코팅층과 강재의 미끄럼접촉면 위에 형성된다. 이 경우 코팅은 상대재료와의 접촉으로 인한 마멸로부터 보호를 받지만^(4,6-7) 접촉상태가 강재와 세라믹코팅 표면에 형성된 산화막, 강재 표면에 형성된 산화막과 세라믹코팅 또는 산화막과 산화막의 접촉상태로 바뀌게 되어 코팅의 우수한 저마찰특성은 감주어지고, 두 재료 사이의 마찰력이 증가하고 그로 인

* 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yzlee@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7444 FAX : (031)290-5276

한 강재의 마멸이 촉진된다.

본 연구에서는 TiN코팅의 마멸메커니즘을 설명하기 위한 기본 연구로서 코팅두께, 상대재의 표면조도 그리고 두 재료 사이에 작용되는 접촉하중을 다르게 하여 산화막 형성에 미치는 실접촉면적(real contact area)의 영향을 관찰하고자 하였다. 이를 위하여 각기 다른 조건에서 미끄럼실험을 수행한 후 두 재료의 미끄럼접촉면에 형성되는 산화막의 특성과 그에 따른 마찰신호의 변화를 살펴 보았다. 그리고 이를 토대로 서로 다른 시편에서 접촉하중을 증가시켜 코팅과 산화막 사이의 마찰신호의 변화를 측정하여 마찰전이선도(friction transition diagram)를 작성하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 미끄럼실험장치

본 연구에서는 범용의 ball-on-disk형 미끄럼실험기를 사용하였으며, 개략도는 Fig. 1과 같다. 접촉하중은 분동(deadweight)을 올려 볼시편과 디스크 시편에 직접 가하여 결정하였다. 마찰력은 로드셀을 사용하여 측정하였는데, 측정된 마찰력신호는 인디케이터를 통하여 아날로그/디지털 컨버터로 변환 후 5Hz로 샘플링하여 컴퓨터에 저장되었다. 저장된 마찰력신호는 신호처리프로그램을 사용하여 마찰계수로 변환하였다.

2.2 시편 및 실험조건

본 연구에서 사용한 세라믹코팅시편은 지름이 10mm인 AISI 52100 강 볼시편을 아크이온플레이팅법(arc ion plating method)으로 코팅두께 1, 4 μ m로 TiN코팅을 증착하여 제작되었다. 상대재는 AISI 1045 강을 지름 60mm, 두께 7mm인 디스크형태로 제작하여 표면경도를 HV_{1N}300으로 가공하였다. 이렇게 가공된 시편을 최종적으로 표면조도가 각각 Ra 0.06, 0.1, 0.2 μ m인 세 종류의 시편으로 제작하였다. 이상과 같이 TiN코팅볼의 코팅두께를 변화시키고, 스틸디스크의 표면조도를 변화시켜 시편을 제작한 이유는 TiN코팅볼의 코팅두께와 스틸디스크의 표면조도에 따른 두 재료 사이의 실접촉면적의 변화에 의해 산화막이 형성되는 특성을 알아보기 위한 것이다.

미끄럼실험 시 속도는 30rpm(0.04m/s)으로 고정하고, 접촉하중은 최소하중을 0.3N으로 결정하고 0.1N씩 증가시켜 실험하였다. 이는 예비실험을 통하여 산화막은 고속도와 고하중에서 매우 급격히 형성된다는 결과를 얻었기 때문이다. 따라서 저속도와 저하중에서 두 시편의 미끄럼접촉면에 점진

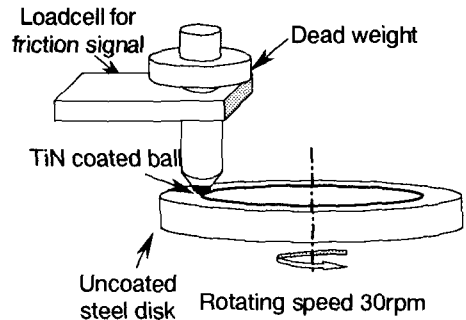


Fig. 1 Schematic diagram of sliding tester

적으로 산화막을 형성시켜 산화막이 형성되는 특성을 관찰하기 위하여 위와 같은 실험조건을 선택하였다. 그리고 산화막이 두 재료의 마찰특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공기와 질소분위기에서 각각 실험하였다. 모든 시편은 실험 전 아세톤으로 초음파세척을 하여 사용하였다.

실험은 우선 질소와 공기분위기에서 각각 실험하여 마찰계수를 측정하였으며, 이를 통하여 두 재료의 미끄럼접촉면에 형성되는 산화막이 마찰특성에 미치는 영향을 관찰하였다. 그리고 마찰신호의 유형에 따라 산화막이 형성되는 특성을 알아보았다. 이를 통하여 산화막이 형성되는 시점을 마찰신호 분석을 통하여 알 수 있게 하였다. 마지막으로 세라믹코팅의 두께, 상대재의 표면조도 그리고 미끄럼 접촉하중에 따라 달라지는 두 재료 사이의 실접촉면적의 차이가 산화막 형성에 미치는 영향을 마찰신호 분석을 통하여 관찰하였고, 이것을 이용하여 산화막의 영향을 고려한 마찰전이선도를 작성하였다.

3. 실험결과 및 결과

3.1 공기중에서 미끄럼실험 시 TiN코팅볼과 스틸디스크의 마찰특성

TiN코팅의 마찰특성을 알아보기 위해 코팅된 볼과 코팅을 하지 않은 볼을 스틸디스크에 미끄럼운동을 시켜 마찰계수의 변화를 측정하였다. Fig. 2(a)에서 보듯이 코팅하지 않은 볼의 경우 건마찰(dry friction)의 일반적인 경향, 즉 접촉회전수의 증가에 따라 높은 마찰계수와 심한 변동을 나타내고 있다. 코팅된 볼의 경우 마찰계수는 Fig. 2(b)와 같이 회전수에 따라 천이현상을 나타낸다. 이러한 마찰신호는 세 부분 즉, 일반적인 세라믹코팅의 마찰특성이라 할 수 있는 저마찰구간, 마찰천이구

간 그리고 마찰관점에서 세라믹코팅의 특성이 없어진 고마찰구간으로 구분할 수 있다. TiN코팅의 우수한 저마찰특성은 상대재료와 미끄럼실험 조건 등에 따라 차이를 보이지만⁽¹⁾ 일정한 시간 동안 나타나는 현상이며, 미끄럼운동이 진행됨에 따라 저마찰특성이 사라진다.

지금까지 세라믹코팅과 강재의 미끄럼운동 시 나타나는 저마찰구간에서 고마찰구간으로의 전이는 세라믹코팅의 파손에 의한 것이다 라는 연구⁽⁷⁻¹¹⁾가 지배적이었다. 그러나 TiN코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼운동에서는 다른 현상, 즉 코팅이 파손되지 않은 상태에서 미끄럼접촉면의 산화막 형성에 의해서도 고마찰이 유도된다. 이를 증명하기 위해 다음과 같이 산화막이 형성되는 조건 그리고

형성되지 않는 조건에서 미끄럼실험을 수행하였다.

3.2 두 재료의 미끄럼접촉면에 형성된 산화막이 마찰특성에 미치는 영향

TiN코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼접촉면에 형성되는 산화막이 두 재료 사이의 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 코팅두께가 1 μm 인 TiN코팅볼과 표면조도가 각각 Ra 0.06, 0.1, 0.2 μm 인 스틸디스크를 접촉하중 0.5N으로 공기중에서 미끄럼 실험을 수행한 결과와 질소분위기에서 수행한 실험 결과를 비교하여 Fig. 3~5와 같이 나타내었다. Fig. 3(b), Fig. 4(b), Fig. 5(b)는 질소분위기에서

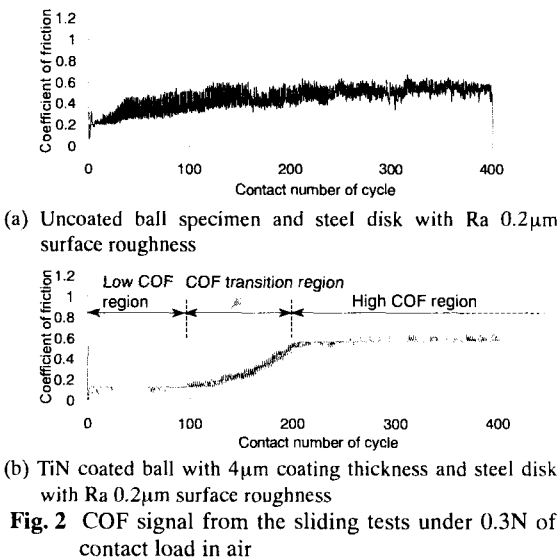


Fig. 2 COF signal from the sliding tests under 0.3N of contact load in air

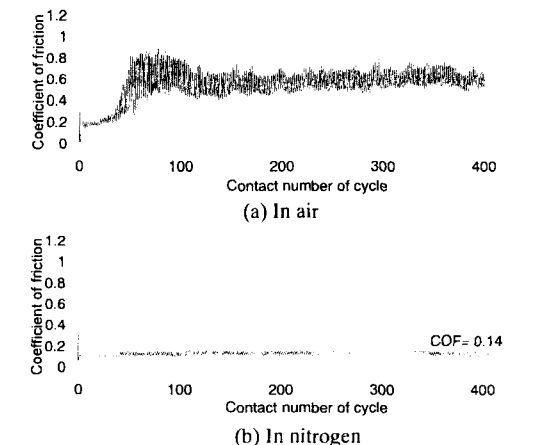


Fig. 3 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 1 μm coating thickness and steel disk with Ra 0.06 μm surface roughness in various environments under 0.5N of contact load

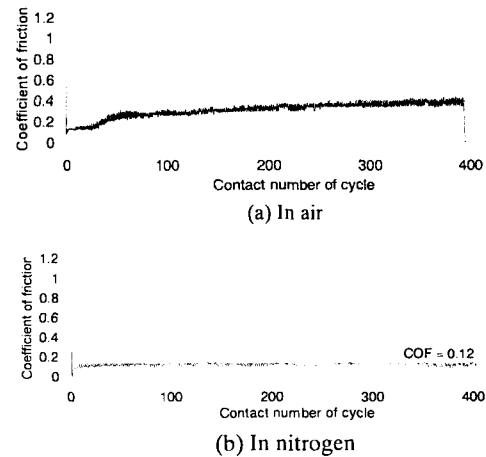


Fig. 4 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 1 μm coating thickness and steel disk with Ra 0.1 μm surface roughness in various environments under 0.5N of contact load

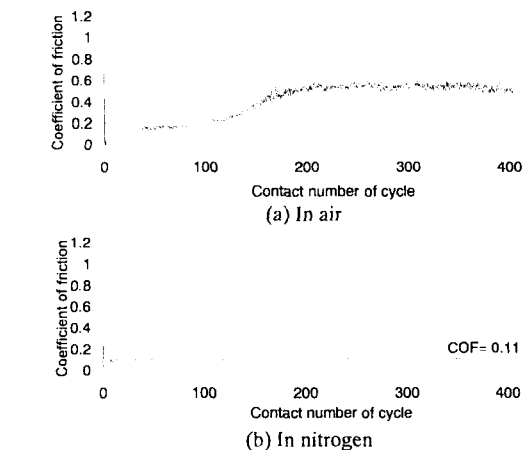


Fig. 5 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 1 μm coating thickness and steel disk with Ra 0.2 μm surface roughness in various environments under 0.5N of contact load

실험한 결과인데, 공기중에서 실험한 Fig. 3(a), Fig. 4(a), Fig. 5(a)와 달리 세라믹코팅의 저마찰구간이 실험 중 지속되는 것을 볼 수 있다. 이는 공기중에서의 미끄럼실험 시 나타나는 마찰전이구간 및 고마찰구간은 두 재료의 미끄럼접촉면이 산화되어 나타나는 것임을 증명하고 있다.

그리고 스틸디스크의 표면조도가 TiN코팅볼의 마찰특성에 미치는 영향은 질소분위기에서 미끄럼 실험을 수행한 Fig. 3(b), Fig. 4(b), Fig. 5(b)에서 관찰할 수 있는데, 표면조도가 거칠수록 낮은 마찰계수를 보이고 있다. 이는 스틸디스크의 표면이 거칠수록 두 재료 사이의 실접촉면적이 감소하기 때문이다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 연구에서 사용한 스틸디스크의 표면조도 범위에서 두 재료 사이의 마멸 및 마찰은 돌기맞물림(asperity interlocking)에 의한 연

삭마멸의 영향 보다 실접촉면적의 차이에 의한 응착마멸에 의해 더 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. 그러므로 두 재료 사이에 발생하는 주요 마멸메커니즘은 응착마멸이라고 판단할 수 있다.

Fig. 3의(a), (b)와 같이 공기과 질소분위기에서 실험한 후 스틸디스크의 마멸트랙을 SEM(scanning electron microscopy)으로 관찰하고, EDS(energy-dispersive X-ray spectroscopy)분석의 라인프로파일(line profile)을 수행한 것을 각각 Fig. 6의 (a), (b)와 같이 나타내었다. Fig. 6(a)와 (b)에서 모두 스틸디스크의 주요 원소인 Fe가 라인프로파일 AB선을 따라 분포하는 것을 볼 수 있으며, TiN코팅의 Ti원소는 노이즈 수준에서 검출되고 있는데, 이는 TiN 코팅볼에서 스틸디스크로 재료의 전이(transfer)가 발생하지 않았음을 나타내고 있다. 그리고 공기중에서 미끄럼실험을 수행한 Fig. 6(a)의 마멸트랙에서 O원소가 다량 검출되는 것을 볼 수 있는데, O원소의 피크(peak)에서 Fe원소의 라인프로파일을 관찰해 보면 주변 보다 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 O원소와 결합한 Fe원소 때문이다. 따라서 공기중에서 미끄럼실험 시 두 재료의 마찰 특성은 미끄럼접촉면에 형성되는 Fe계열의 산화막에 의해 결정되며, 이러한 산화막에 의해 접촉상태가 바뀌게 되어 TiN의 저마찰특성 대신 고마찰이 유도된다는 것을 알 수 있다.

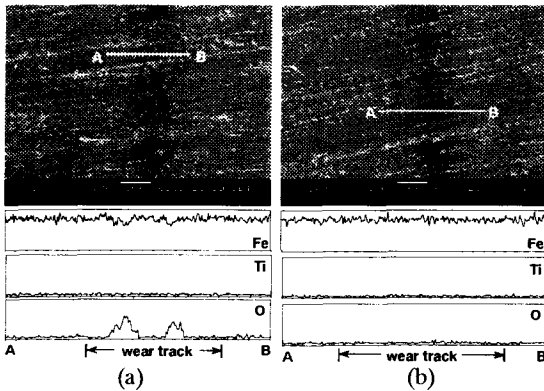


Fig. 6 The SEM photographs and EDS line profiles of the wear tracks used in the test presented in Fig. 3: (a) Wear track tested in air (b) Wear track tested in nitrogen

3.3 마찰신호의 유형에 따른 산화막 형성의 특성

마찰신호의 유형에 따라 산화막이 형성되는 특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을

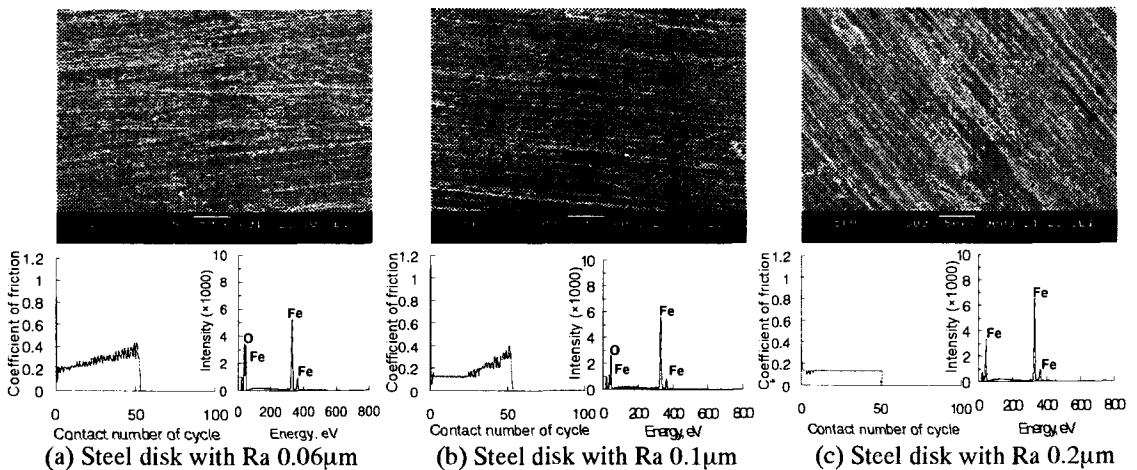


Fig. 7 COF signal, SEM photographs and EDS analysis of the wear tracks on steel disks after the sliding tests using TiN coated ball with 1µm coating thickness for various disk's surface roughness until 50 contact numbers of cycles under 0.3N of contact load

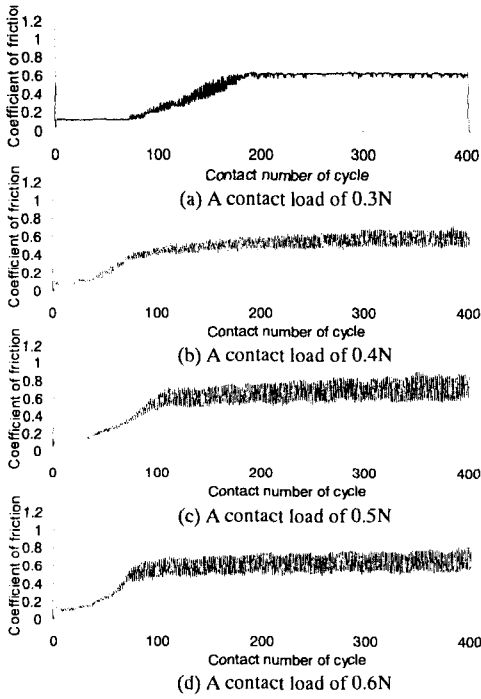


Fig. 8 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 1 μ m coating thickness and steel disk with Ra 0.2 μ m surface roughness under various contact loads in air

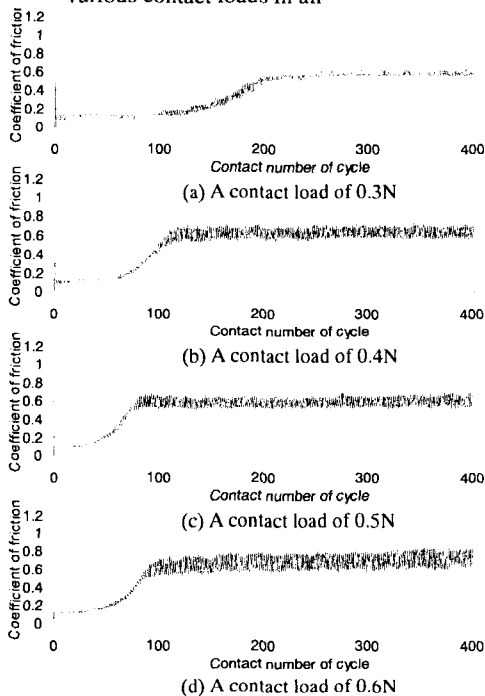


Fig. 9 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 4 μ m coating thickness and steel disk with Ra 0.2 μ m surface roughness under various contact loads in air

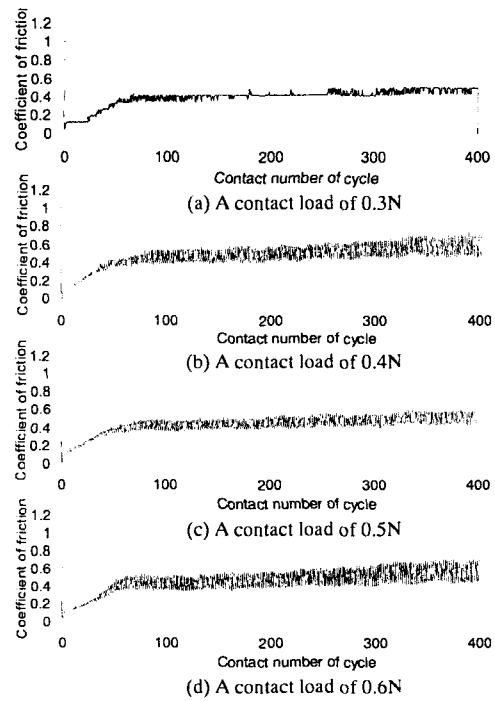


Fig. 10 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 1 μ m coating thickness and steel disk with Ra 0.1 μ m surface roughness under various contact loads in air

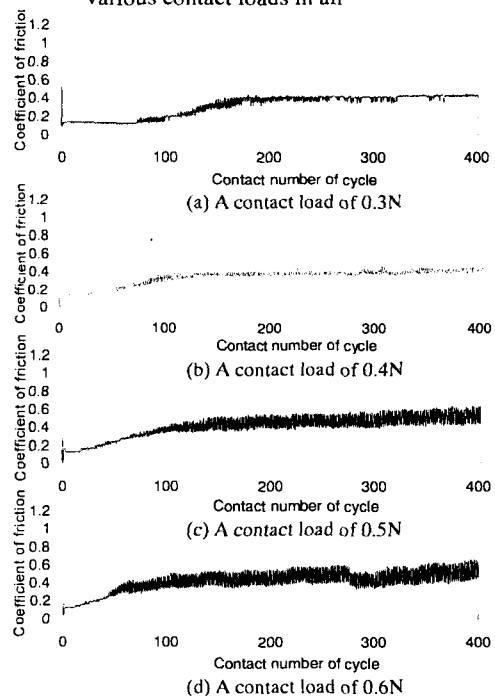


Fig. 11 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 4 μ m coating thickness and steel disk with Ra 0.1 μ m surface roughness under various contact loads in air

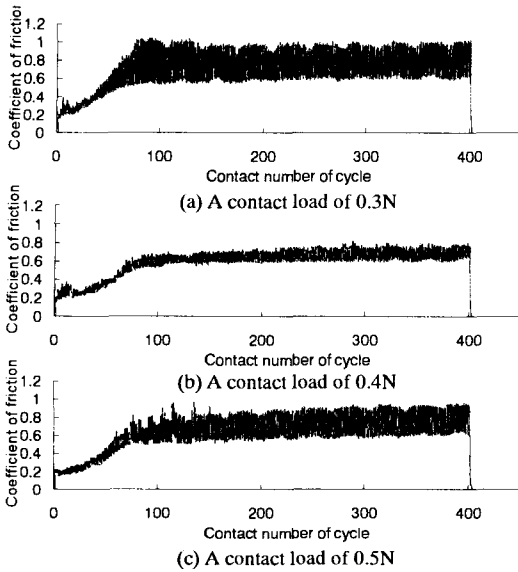


Fig. 12 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 1 μ m coating thickness and steel disk with Ra 0.06 μ m surface roughness under various contact loads in air

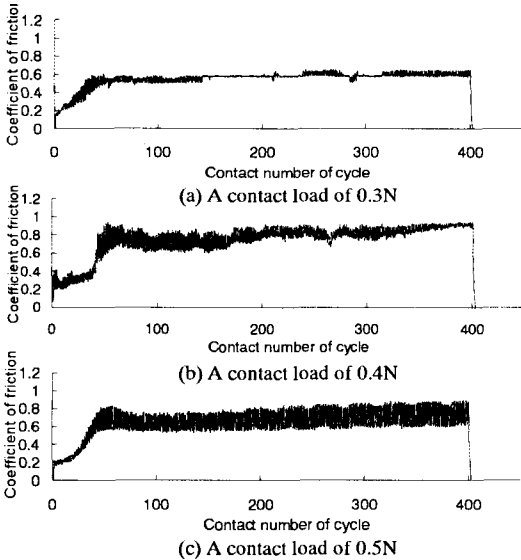


Fig. 13 COF signal from the sliding tests with TiN coated ball with 4 μ m coating thickness and steel disk with Ra 0.06 μ m surface roughness under various contact loads in air

수행하였다. 코팅두께가 1 μ m인 TiN코팅볼을 접촉 하중 0.3N에서 표면조도가 각각 Ra 0.06, 0.1, 0.2 μ m인 스틸디스크와 접촉회전수 50까지 미끄럼실험을 수행한 후 스틸디스크의 마멸트랙을 SEM으로 관찰하고, EDS분석을 수행한 결과를 Fig. 7과 같이 나타내었다.

Fig. 7 (a), (b), (c)와 같이 스틸디스크의 표면이 거

칠어짐에 따라 접촉회전수 50까지 세 가지 유형의 마찰신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(a) 즉 스틸디스크의 표면조도가 Ra 0.06 μ m인 경우 접촉회전수 50까지 고마찰구간이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 미끄럼실험 후 스틸디스크의 마멸트랙을 EDS로 분석한 결과 다량의 O원소가 검출되었다. Fig. 7(b) 즉 스틸디스크의 표면조도가 Ra 0.1 μ m인 경우 접촉회전수 50까지 마찰천이구간이 나타나는 것을 볼 수 있는데, EDS분석 결과 마멸트랙에서 O원소의 양은 Fig. 7(a)에서 보다 줄어든 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7(c)와 같이 스틸디스크의 표면조도가 Ra 0.2 μ m인 경우 접촉회전수 50까지 저마찰구간이 지속되는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 7(a), (b)에서와 달리 스틸디스크의 마멸트랙의 EDS분석 결과에서는 O원소가 검출되지 않아 산화막이 형성되지 않은 것을 관찰할 수 있다. 그리고 Fig. 7(c)의 마멸트랙에서 상대재의 표면조도의 영향으로 초기 연삭마멸이 진행된 것으로 관찰되었으나, O원소가 검출되지 않은 것으로 보아 TiN 코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼실험 시 산화막을 형성시키는 주요 마멸메커니즘은 응착마멸이라고 말할 수 있다.

이상의 실험결과에서와 같이 두 재료 미끄럼접촉면에 형성되는 산화막은 마찰신호가 저마찰에서 고마찰로 천이되기 시작하는 시점에서 형성된다는 것을 알 수 있다. 또 상대재의 표면조도에 따라 산화막이 형성되는 특성은 달라지며, 표면조도가 거칠수록 산화막 형성은 늦어지는 것을 알 수 있으며, 이로 인하여 마찰신호의 천이 또한 늦어지는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 미끄럼실험 시 마찰신호를 관찰함으로써 산화막이 형성되는 시기를 예측할 수 있다. 따라서 다음과 같이 마찰신호의 천이를 관찰함으로써 TiN코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼실험 시 실접촉면적에 따라 산화막이 형성되는 특성을 관찰할 수 있다.

3.4 미끄럼접촉면의 실접촉면적에 따른 산화막의 형성 정도

다음은 TiN코팅볼의 코팅두께, 스틸디스크의 표면조도 그리고 미끄럼실험 시 접촉하중에 따라 변하는 두 재료 사이의 실접촉면적이 산화막 형성에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험이다. 본 연구에서 산화막의 형성 정도는 산화막이 형성되는 빠르기로 정의하였으며, 이것은 마멸트랙에 산화막이 형성되기 시작하는 접촉회전수, 즉 저마찰구간까지의 접촉회전수를 측정함으로써 결정된다.

표면조도가 Ra 0.2 μ m인 스틸디스크와 코팅두께가 각각 1, 4 μ m인 TiN코팅볼의 미끄럼실험을 접촉하중 0.3N ~ 0.6N의 범위에서 0.1N씩 증가시켜 수행한 결과를 각각 Fig. 8, 9와 같이 나타내었다. 그림에서와 같이 접촉하중이 증가할수록 스틸디스크

Table 1 Contact number of cycle up to the time to be formed oxide layer on wear track on steel disk

Coating thickness	Surface roughness of the steel disks					
	Ra 0.2 μ m		Ra 0.1 μ m		Ra 0.06 μ m	
	1 μ m	4 μ m	1 μ m	4 μ m	1 μ m	4 μ m
Normal Load						
0.3N	73	98	23	75	0	0
0.4N	40	60	12	29	0	0
0.5N	34	40	9	20	0	0
0.6N	26	36	5	12	0	0

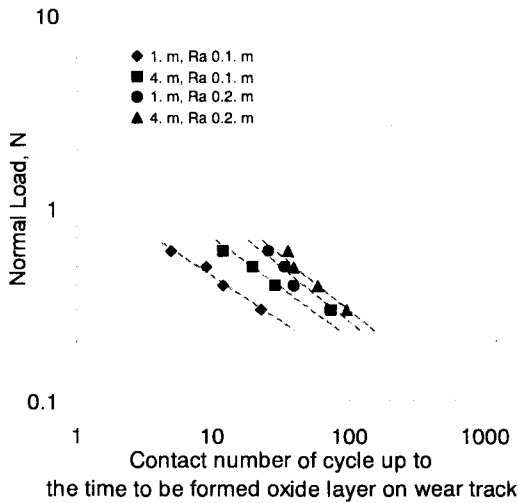


Fig. 14 Friction transition diagram; contact number of cycle up to the time to be formed oxide layer on wear track on steel disk as a function of normal load

의 마멸트랙에 산화막의 형성이 빨라져 저마찰구간이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 TiN코팅볼의 코팅두께가 4 μ m인 시편이 1 μ m인 것 보다 동일한 접촉하중에서 저마찰구간이 길어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 코팅이 두꺼운 시편이 표면경도가 얇은 것 보다 더 크기 때문에 동일한 접촉하중에서 그리고 동일한 표면조도를 갖는 스틸디스크와의 미끄럼실험 시 두 재료 사이의 실접촉면적은 코팅두께가 얇은 것 보다 더 작아지기 때문이다. 즉, 실접촉면적이 크면 두 재료 사이에 응착마멸이 쉽게 일어나고, 그에 따라 응착된 재료와 공기중의 산소가 반응하여 산화막 형성이 빨라져 저마찰구간이 감소하는 것이다. 이상과 같이 코팅두께가 감소함에 따라 실접촉면적이 증가하여 두 재료의 미끄럼접촉면에 산화막 형성이 빨라져 나타나는 저마찰구간의 감소는 스틸디스크의 표면조도가 0.1, 0.06 μ m인 시편을 사용하여 미끄럼실험을 수행한 실험에서도 잘 나타난다.

표면조도가 Ra 0.1 μ m인 스틸디스크와 코팅두께가 각각 1, 4 μ m인 TiN코팅볼의 미끄럼실험을 수행

한 결과를 각각 Fig. 10, 11과 같이 나타내었다.

Fig. 12, 13은 표면조도가 Ra 0.06 μ m인 스틸디스크와 코팅두께가 각각 1, 4 μ m인 TiN코팅볼의 미끄럼실험을 수행한 결과이다. Fig. 10~13에서도 Fig. 8, 9에서 나타난 바와 같이 접촉하중이 증가할수록 두 재료 사이의 실접촉면적이 증가하여 응착마멸이 쉽게 일어나기 때문에 산화막 형성이 빨라져 저마찰구간이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 비슷하게 TiN코팅볼의 코팅두께가 4 μ m인 시편의 표면경도가 1 μ m인 것 보다 크기 때문에 두 재료 사이의 실접촉면적이 작아져 응착마멸이 쉽게 일어나지 않으므로 미끄럼접촉면에 산화막 형성이 늦어져 저마찰구간이 길어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 8~13에서 스틸디스크의 표면조도 변화에 따른 산화막 형성의 특징을 관찰할 수 있는데, 표면조도가 거칠수록 동일한 접촉하중과 TiN코팅볼의 동일한 코팅두께에서 저마찰구간이 길어지는 것을 볼 수 있다. 이 또한 실접촉면적의 감소에 따른 응착마멸이 쉽게 일어나지 않아 접촉면에 산화막 형성이 늦어지기 때문이다.

Table 1은 Fig. 8~13에서 나타난 접촉하중, 코팅두께, 스틸디스크의 표면조도에 따라 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막이 형성되기 시작하는 접촉회전수를 정리한 것이다. 이것을 대수좌표계에 표시하면 Fig. 14와 같이 마찰천이선도로 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 산화막이 형성되기 시작하는 접촉회전수는 접촉하중이 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 동일한 접촉하중에서 산화막이 형성되기 시작하는 접촉회전수는 코팅두께-스�틸디스크 표면조도가 각각 1 μ m-Ra 0.1 μ m, 4 μ m-Ra 0.1 μ m, 1 μ m-Ra 0.2 μ m, 4 μ m-Ra 0.2 μ m 순서로 증가하는 것을 알 수 있다. 이 순서는 두 재료의 미끄럼접촉면의 실접촉면적이 커지는 순서라고 판단되며, 본 실험에서는 스틸디스크의 표면조도가 실접촉면적의 크기에 미치는 영향이 코팅두께의 영향 보다 더 큰 것으로 나타났다.

4. 결론

TiN코팅의 마멸메커니즘을 설명하기 위해서 코

팅두께와 상대재의 표면조도를 다르게 하여 산화막 형성에 미치는 실접촉면적의 영향에 대하여 연구하고 다음과 같은 결론을 유도하였다.

(1) 두 재료 사이의 마찰특성은 상대재인 스틸 디스크의 마멸트랙에 형성되는 Fe계열의 산화막에 의해 지배되는데, 이는 마찰천이 및 고마찰을 유도한다.

(2) 본 연구에서 사용한 스틸디스크의 표면조도 범위에서 두 재료 사이의 마찰은 돌기맞물림보다 실접촉면적의 차이에 의해 더 큰 영향을 받는다.

(3) 상대재의 표면이 거친 경우 TiN코팅볼과의 초기 마멸메커니즘은 연삭마멸에 의한 것이며, 이러한 연삭마멸에 의해서는 산화막이 형성되지 않는다.

(4) 두 재료 미끄럼접촉면에서 산화막은 마찰신호가 저마찰에서 고마찰로 천이되는 시점에서 형성되기 시작한다.

(5) 두 재료의 미끄럼접촉면에 형성되는 산화막에 의한 저마찰에서 고마찰로 천이될때의 접촉회전수를 대수좌표계에 표시하면 산화막의 영향을 고려한 마찰천이선도를 작성할 수 있다.

(6) 상대재의 산화막 형성은 접촉하중이 커질수록, 상대재의 표면이 고울수록 그리고 TiN코팅두께가 작을수록 즉, 두 재료 사이의 실접촉면적이 커질수록 증가한다.

(7) (2)와 (6)의 이유로 볼 때, 산화막이 형성되는 주요 마멸메커니즘은 응착마멸이다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Holmberg, K. and Matthews, A., 1994, *Coatings Tribology*, Elsevier, pp. 172~189.
- (2) Bhushan, B. and Gupta, B.K., 1991, *Handbook of Tribology*, McGraw-Hill, pp. 9.1~9.121.
- (3) Holmberg, K., Ronkainen, H. and Matthews, A., 2000, "Tribology of Thin Coatings," *Ceramics International*, Vol. 26, pp. 787~795.
- (4) Wilson, S. and Alpas, A.T., 1997, "Effect of Temperature and Sliding Velocity on TiN Coating Wear," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 94~95, pp. 53~59.
- (5) Wilson, S. and Alpas, A.T., "Tribo-Layer Formation During Sliding Wear of TiN Coatings," *Wear*, Vol. 245, pp. 223~229.
- (6) Huang, Z.P., Sun, Y. and Bell, T., 1994, "Friction Behaviour of TiN, CrN and TiAlN Coatings," *WEAR*, Vol. 173, pp. 13~20.
- (7) Erdemir, A., Bindal, C., Pagan, J. and Wilbur, P., 1995, "Characterization of Transfer Layers on Steel Surfaces Sliding against Diamond-Like Hydrocarbon Films in Dry Nitrogen," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 76~77, pp. 559~563.
- (8) Dowson, D., Taylor, C.M., Childs, T.H.C., Godet, M. and Dalmaz, G., 1993, "Thin Films in Tribology," *Tribology series 25*, Elsevier.
- (9) Holmberg, K., Ronkainen, H. and Matthews, A., 1993, "Wear Mechanisms of Coated Sliding Surfaces," *Tribology series 25*, Elsevier.
- (10) Sander, H. and Petersohn, D., 1993, "Friction and Wear Behavior of PVD-Coated Tribosystems," *Tribology series 25*, Elsevier.
- (11) Cho, C.W and Lee, Y.Z., 2000, "Wear-Life Evaluation of CrN-Coated Steels Using Acoustic Emission Signals," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 127, pp. 59~65.
- (12) Lee, Y.Z. and Jeong, K.H., 1998, "Wear-Life Diagram of TiN-Coated Steels," *Wear*, Vol. 217, pp. 175~181.
- (13) Rabinowicz, E., 1995, *Friction and Wear of Materials*, Wiley, pp. 66~81.