

## 미끄럼조건에 따라 TiN 코팅볼과 스틸디스크에 형성되는 산화막이 마찰특성에 미치는 영향

조정우 · 이영제\*†

성균관대학교 기계공학부 대학원, \*성균관대학교 기계공학부\*

### The Effects of Oxide Layer Formed on TiN Coated Ball and Steel Disk on Friction Characteristics in Various Sliding Conditions

Chung-Woo Cho and Young-Ze Lee\*†

Graduate School of Mechanical Eng., Sungkyunkwan University

\*School of Mechanical Eng., Sungkyunkwan University

**Abstract** – In this study, the effects of oxide layer formed on the contact parts of TiN coated ball and steel disk on friction characteristics in various sliding conditions were investigated. AISI52100 steel ball was used for the substrate of coated ball specimens, which were prepared by depositing TiN coating with 1 $\mu$ m in coating thickness. AISI1045 steel was used for the disk type counter-body. To investigate the effect of oxide layer on the contact parts of two materials, the tests were performed both in air for forming oxide layer on the contact parts and in nitrogen environment to avoid oxidation. From the test results, the frictional characteristic between the two materials was predominated by iron oxide layer that formed on wear tract of counter-body and this layer caused friction transition and high friction. And the adhesive wear occurred from steel disk to TiN coated ball caused the formation of oxide layer on counter parts between the two materials.

**Keywords** – oxide layer; TiN coated ball; steel disk; sliding test; adhesive wear; low friction region; friction transition region; high friction region.

#### 1. 서 론

세라믹코팅 처리된 표면이 상대운동을 할 때 상대면과의 접촉에 의해 전이층(transfer layer)과 그로 인한 산화막(oxide layer)이 형성되는데, 이에 따라 코팅의 마찰 및 마멸 특성이 달라진다[1-3]. 특히 강재(Steel)와 상대운동을 하는 경우 세라믹코팅의 마찰 및 마멸 특성을 연구하기 위해서는 산화막의 형성과 특성에 관한 연구가 선행되어야 한다[4]. TiN(titanium nitride)코팅의 경우 미끄럼운동을 할 때 접촉하중과 운동속도 및 주위의 온도에 대하여 마멸메커니즘은 매우 다양하게 나타나지만 기본적으로 미끄럼면의 산화막 형성에 의해

영향을 받는다[5-6]. DLC(diamond like carbon)로 코팅된 스틸디스크와 상대재인 불시편이 미끄럼운동을 할 경우에는 불시편에 산화막이 형성되어 마멸로부터 재료를 보호한다[3]. 대부분의 관련 연구는 세라믹코팅이 상대운동하는 경우 미끄럼면에 형성되는 전이층 및 산화막의 영향으로 세라믹코팅과 모재가 마멸로부터 보호된다는 관점에서 수행되었다. 그러나 상대운동이 지속됨에 따라 강재로부터 응착된 전이층과 그로 인한 산화막이 코팅의 미끄럼면 위에 형성되며, 이 경우 코팅재는 상대재와의 접촉으로부터 보호를 받지만, 접촉상태가 상대재와 산화막의 상대접촉 상태로 바뀌게 되어 코팅의 우수한 특성이 감추어지고, 상대재와 그 산화막의 접촉에 의해 마찰력이 증가하고 상대재의 마멸이 촉진된다.

†주저자 · 책임저자 : yzlee@yurim.skku.ac.kr

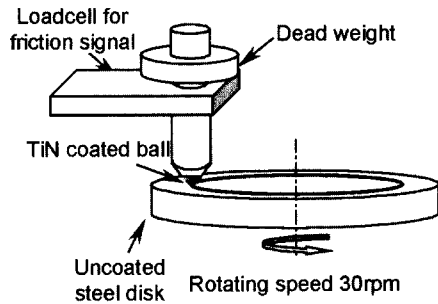


Fig. 1. Schematic diagram of sliding tester.

본 연구에서는 TiN으로 코팅된 볼시편과 스틸디스크의 미끄럼실험 시 형성되는 산화막이 두 표면의 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 공기와 질소분위기, 즉 서로 산화막을 형성하는 정도가 다른 두 분위기에서 미끄럼운동에 따라 형성되는 산화막의 특성과 이 산화막이 세라믹코팅의 마찰특성에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험조건

### 2-1. 미끄럼실험장치

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

### 2-2. 시편 및 실험조건

본 연구에서 사용한 세라믹코팅시편은 지름이 10 mm인 AISI52100강 볼을 아크이온플레이팅법(arc ion plating method)을 이용하여 코팅두께 1  $\mu\text{m}$ 로 TiN 코팅을 증착하여 제작되었다. 상대재는 AISI1045강을 지름 60 mm, 두께 7 mm인 디스크형태로 제작하여 표면 경도와 표면조도를 각각  $HV_{IN}300$ ,  $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$ 로 가공하였다. 미끄럼실험 시 속도와 접촉하중은 30 rpm (0.04 m/s), 0.5 N으로 고정하여 실험하였다. 이는 예비 실험을 통하여 산화막은 고속도와 고하중에서 매우 급격히 형성된다는 결과를 얻었기 때문이다. 따라서 저속도와 저하중에서 두 시편의 미끄럼면에 점진적으로

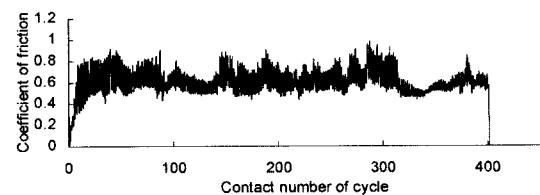
산화막을 형성시켜 산화막이 형성되는 특성을 알아보기 위하여 위와 같은 실험조건을 선택하였다. 그리고 산화막이 두 재료의 마찰특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공기와 질소분위기에서 각각 실험하였다. 모든 시편은 실험 전 아세톤으로 초음파세척을 하여 사용하였다.

실험은 우선 질소와 공기분위기에서 각각 실험하여 마찰력을 측정하였으며, 마찰력이 변화하는 구간을 결정하였다. 또한 이미 공기중에서 산화막이 형성된 TiN 코팅볼과 스틸디스크를 질소분위기에서 각각 사용하지 않은 새로운 상대재와 미끄럼운동을 시켰을 때 산화막의 영향을 나타내는지, 아니면 산화막의 영향이 없이 코팅의 저마찰특성을 나타내는지 살펴보았다. 마지막으로 공기중에서 하중에 따른 산화막의 형성 정도를 알아보기 위해 위와 동일한 시편에 하중을 0.3 N에서 0.6 N까지 증가시키며 마찰신호의 변화를 측정하였다.

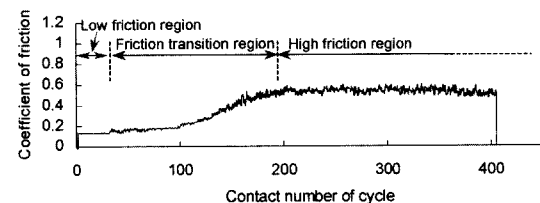
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 공기중에서 미끄럼실험 시 TiN 코팅볼과 스틸디스크의 마찰특성

TiN 코팅의 마찰특성을 알아보기 위해 코팅된 볼과 코팅을 하지 않은 볼을 스틸디스크에 미끄럼운동을 시켜 마찰계수의 변화를 측정하였다. Fig. 2(a)에서 보듯이 코팅하지 않은 시편의 경우 건마찰(dry friction)의 일반적인 경향, 즉 접촉회전수의 증가에 따라 높은 마찰계수와 심한 변동을 나타내고 있다. 코팅된 볼시편



(a) Uncoated ball on steel disk



(b) TiN coating ball on steel disk

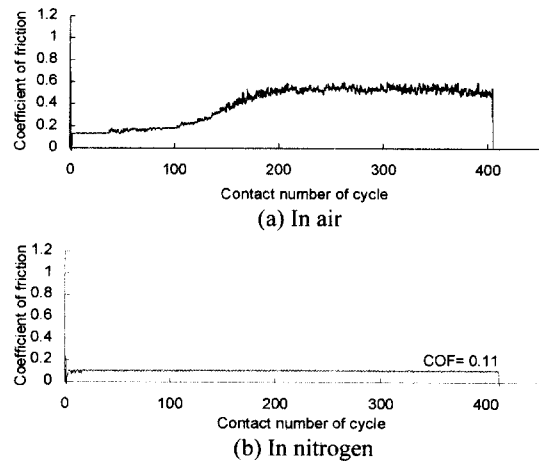
Fig. 2. COF signal from the sliding tests in air.

의 경우 마찰계수는 Fig. 2(b)와 같이 회전수에 따라 천이현상을 나타낸다. 이러한 마찰신호는 세 부분 즉, 일반적인 세라믹코팅의 마찰특성이라 할 수 있는 저마찰구간, 마찰천이구간 그리고 마찰관점에서 세라믹코팅의 특성이 없어진 고마찰구간으로 구분할 수 있다. 따라서 TiN의 우수한 저마찰특성은 상대재에 따라 차이를 보이지만 일정한 시간 동안 나타나는 현상이며, 마찰이 진행됨 따라 저마찰특성이 사라진다.

지금까지 세라믹코팅과 강재의 미끄럼실험 시 나타나는 저마찰구간에서 고마찰구간으로의 천이는 세라믹코팅의 파손에 의한 것이다 라는 연구[7-11]가 지배적이었다. 그러나 TiN으로 코팅된 볼과 스틸디스크의 미끄럼운동에서는 다른 현상, 즉 코팅이 파손되지 않은 상태에서 미끄럼면의 산화막 형성에 의한 고마찰이 유도된다. 이를 증명하기 위해 산화막 형성을 달리하여 다음과 같은 미끄럼실험을 수행하였다.

**3-2. 두 재료의 미끄럼면에 형성된 산화막이 마찰특성에 미치는 영향**

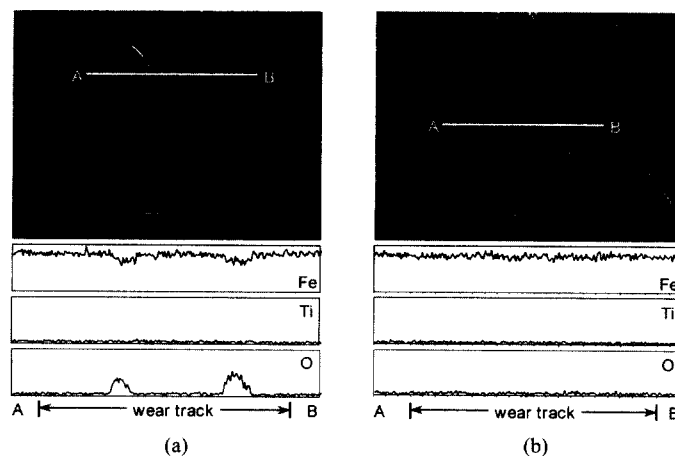
TiN 코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼면에 형성되는 산화막이 두 재료 사이의 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 공기중에서 수행한 실험과 질소분위기에서 수행한 실험을 비교하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. Fig. 3(b)는 질소분위기에서 실험한 결과인데, 공기중에서 실험한 Fig. 3(a)와 달리 세라믹코팅의 저마찰구간이 실험 중 지속되는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3(a)와 같이 공기중에서 미끄럼실험 시 나타나는 마찰천



**Fig. 3. COF signal from the sliding tests of TiN coating ball on steel disk in various environments.**

이구간 및 고마찰구간은 두 재료의 미끄럼면이 산화되어 나타나는 것임을 증명하고 있다.

이상과 같이 공기와 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. 4의 (a), (b)와 같이 나타내었다. Fig. 4(a)와 (b)에서 모두 스틸디스크의 주요 원소인 Fe가 라인프로파일 AB선을 따라 분포하고 있는 것을 볼 수 있으며, TiN 코팅의 Ti 원소는 노이즈 수준에서 검출되고 있는데, 이는 TiN 코팅볼에서 스틸디스크



**Fig. 4. The SEM photographs and EDS line profiles of the wear tracks on steel disk generated during sliding tests, which its results are presented in Fig. 3(a) Wear track generated in air; (b) wear track generated in nitrogen.**

로 재료의 전이(Transfer)가 발생하지 않았음을 증명하고 있다. 그리고 공기중에서 미끄럼실험을 수행한 Fig. 4(a)의 마멸트랙에서 O 원소가 다량 검출되는 것을 볼 수 있는데, O 원소의 피크(Peak)에서 Fe 원소의 라인 프로파일을 관찰해 보면 주변 보다 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 O 원소와 결합한 Fe 원소 때문이다. 따라서 공기중에서 미끄럼실험 시 두 재료의 마찰특성은 미끄럼면에 형성되는 Fe 계열의 산화막에 의해 결정되며, 이러한 산화막에 의해 TiN의 저마찰특성 대신 고마찰이 유도된다는 것을 알 수 있다.

이미 공기중에서 미끄럼실험을 통해 산화막이 형성된 TiN 코팅볼과 스틸디스크를 질소분위기, 즉 산화막의 형성이 어려운 환경에서 각각 사용하지 않은 새로운 상대재와 미끄럼운동을 시켰을 때 산화막의 영향을 나타내는지, 아니면 산화막의 영향이 없이 코팅의 우수한 저마찰특성을 나타내는지 살펴보았다.

첫 번째로, 추가적인 산화가 발생하지 않는 질소분위기에서 스틸디스크의 마멸트랙에 존재하는 산화막이 두 재료의 마찰특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 이를 위하여 공기중에서 TiN 코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼실험을 수행하여 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막을 형성시키고, 이 마멸트랙과 TiN 코팅볼의 새로운 미끄럼면을 질소분위기에서 미끄럼실험을 수행하여 Fig. 5와 같은 마찰신호를 얻을 수 있었다. 그림에서 살펴보면 실험의 시작과 동시에 고마찰구간이 나타나는 것을 볼 수 있으며, TiN 코팅볼과 스틸디스크의 새로운 미끄럼면을 질소분위기에서 실험한 Fig. 3(b)와 같은 저마찰구간이 존재하지 않는 것을 관찰할 수 있다.

두 번째로, 추가적인 산화가 발생하지 않는 질소분위기에서 TiN 코팅볼의 미끄럼면에 존재하는 산화막이 두 재료의 마찰특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 이를 위하여 공기중에서 TiN 코팅볼과 스틸디스크의 미끄럼실험을 수

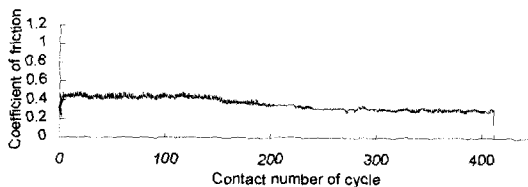


Fig. 5. COF signal from the sliding test, which applied the new contact part of TiN coating ball on the pre-formed oxide layer in nitrogen.

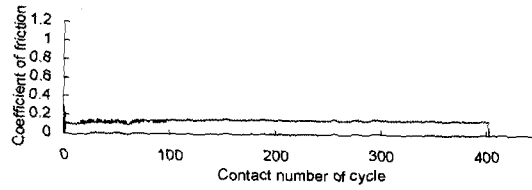


Fig. 6. COF signal from the sliding test, which applied the pre-formed oxide layer of TiN coated ball on the new contact part of steel disk in nitrogen.

행하여 TiN 코팅볼의 미끄럼면에 산화막을 형성시키고, 이 미끄럼면과 스틸디스크의 새로운 미끄럼면을 질소분위기에서 미끄럼실험을 수행하여 Fig. 6와 같은 마찰신호를 얻을 수 있었다. 그림에서 살펴보면 Fig. 3(b)와 같이 저마찰구간이 실험 중 지속되는 것을 볼 수 있다.

이상의 실험에서 두 재료의 미끄럼실험 시 TiN 코팅볼의 미끄럼면에 존재하는 산화막은 마찰신호의 천이 및 고마찰을 유도하지 않는다는 것을 관찰하였다. 그러나 스틸디스크의 마멸트랙에 존재하는 산화막은 두 재료의 미끄럼실험 시 고마찰을 유도하여 마찰특성을 지배하는 것을 볼 수 있다.

### 3-3. TiN 코팅볼의 미끄럼면에 형성되는 산화막의 영향

이상의 실험에서 TiN 코팅볼에 형성되는 산화막은 두 재료의 마찰특성에 직접적인 영향을 미치지 않는다는 결과를 얻었지만, 이러한 산화막이 스틸디스크의 마멸트랙에 형성되는 산화막에 마찰 및 마멸 관점에서 어떠한 영향을 미칠 것이라는 판단 아래 다음과 같은 실험을 수행하였다. 이를 위하여 Fig. 7과 같이 처음 실험에 사용한 TiN 코팅볼의 미끄럼면을 반복하여 새로운 스틸디스크의 미끄럼면에 사용하였다. Fig. 7(a), Fig. 7(b), Fig. 7(c)는 각각 코팅볼을 첫 번째, 두 번째, 세 번째 사용한 경우이다. 다시 말하면, Fig. 7(b)와 (c)는 각각 Fig. 7(a)와 (b)에서 사용한 TiN 코팅볼의 미끄럼면을 다시 사용하고, 스틸디스크의 새로운 미끄럼면에 미끄럼실험을 수행한 결과이다.

Fig. 7의 (a), (b), (c)에서 나타난 바와 같이 마찰천이 구간 및 고마찰구간은 TiN 코팅이 파손되어 나타나는 신호가 아닌 것을 확인할 수 있다. 만약 Fig. 7(a)에서 나타난 고마찰구간이 TiN 코팅의 파손에 의해 나타난 신호라면, Fig. 7(b)와 (c)에서 TiN 코팅볼의 저마찰구간이 존재하지 않았을 것이다. Fig. 7의 세 번

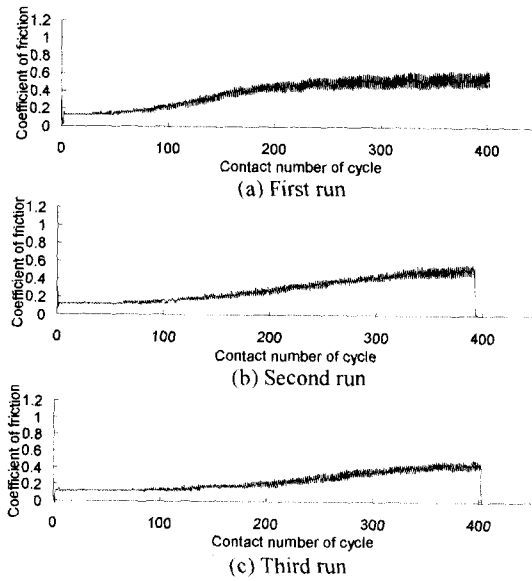


Fig. 7. COF signal from the sliding tests, which applied the same contact part of TiN coating ball on the new contact part of steel disk for each run in air.

의 실험 후 Fig. 8과 같이 각각의 TiN 코팅볼의 미끄럼면을 SEM으로 관찰하고 EDS 분석을 수행하였다. EDS 분석 결과 Fig. 8의 (a)에서 (c)로 갈수록 TiN 코팅볼의 미끄럼면에 산화물의 양이 증가함에 따라 Fig. 7의 (a)에서 (c)로 갈수록 두 재료의 미끄럼실험

시 저마찰구간이 접촉회전수 34, 64, 82로 길어지는 것을 볼 수 있다. 즉, 코팅볼의 미끄럼면에 산화물의 양이 증가할수록 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막 형성이 늦춰진다는 것이다. TiN 코팅볼에 형성되는 Fe 계열 산화막의 표면경도는 TiN 코팅의 표면경도와 비교하여 상대적으로 낮다[12]. 따라서 TiN 코팅볼의 미끄럼면에 형성되는 산화물의 양이 증가할수록 코팅볼의 표면경도는 낮아지게 되고, 이로 인하여 스틸디스크로부터 TiN 코팅볼로의 응착마멸이 쉽게 일어나지 않기 때문에 스틸디스크에 산화막 형성은 더디게 된다. 그러므로 TiN 코팅볼에 형성된 산화물의 양이 증가할수록 Fig. 7과 같이 저마찰구간이 증가하는 것이다.

이상의 실험에서 TiN 코팅볼에 형성되는 산화막은 두 재료 사이의 응착마멸을 쉽게 일어나지 않게 하기 때문에 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막 형성을 더디게 하여 저마찰구간을 증가시키는 역할을 한다고 볼 수 있다.

### 3-4. 미끄럼실험 시 접촉하중에 따른 산화막의 형성 정도

공기중에서 미끄럼실험 시 접촉하중에 따른 산화막의 형성 정도를 알아보기 위해 위와 동일한 시편에 하중을 0.3N에서 0.6N까지 증가시키며 마찰신호의 변화를 Fig. 9와 같이 측정하였다. 본 연구에서 산화막의 형성 정도는 산화막이 형성되는 빠르기로 정의하였으

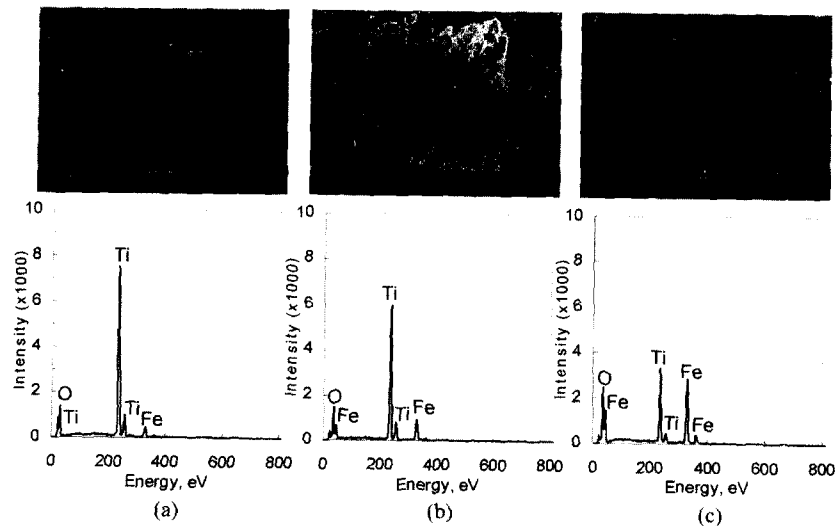


Fig. 8. The SEM photographs and EDS analysis results of the sliding contact part on TiN coating ball used in the tests presented in Fig. 7(a) First run; (b) second run; (c) third run.

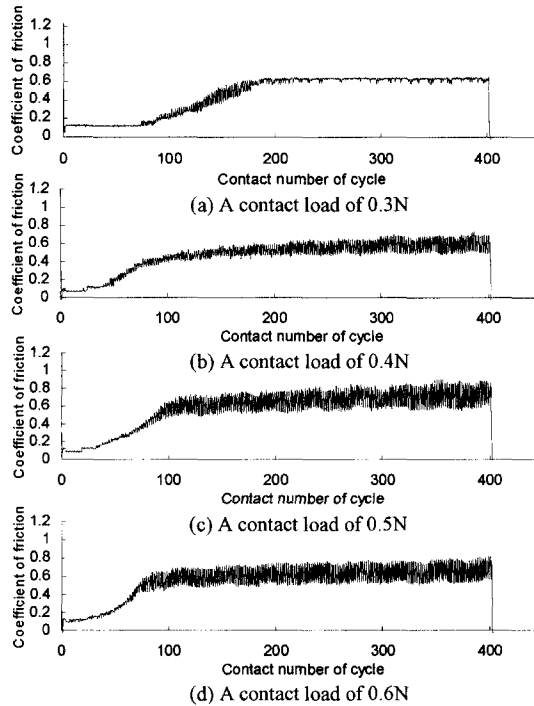


Fig. 9. COF signal from the sliding tests, which applied the TiN coating ball with  $1\ \mu\text{m}$  coating thickness on the steel disk with  $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$  under various contact loads in air.

며, 이것은 마멸트랙에 산화막이 형성되기 시작하는 접촉회전수, 즉 저마찰구간까지의 접촉회전수를 측정함으로써 결정하였다. Fig. 9에서 보듯이 접촉하중이 증가할수록 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막의 형성이 빨라져 저마찰구간이 접촉회전수 73, 40, 34, 26으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 접촉하중이 증가할수록 동일한 코팅두께를 갖는 코팅볼과 동일한 표면조도를 갖는 스틸디스크와의 미끄럼실험 시 두 재료 사이의 실접촉면적이 커지기 때문이다. 즉, 실접촉면적이 커지면 두 재료 사이에 응착마멸이 쉽게 일어나고, 응착마멸이 빠르게 발생함에 따라 응착된 재료와 공기중의 산소가 반응하여 산화막 형성이 빨라지는 것이다. 이상의 접촉하중 증가에 따른 저마찰구간의 감소를 Fig. 10과 같이 대수좌표계로 나타내면 접촉하중에 따라 변화하는 산화막의 형성 정도를 마찰천이선도 (Friction transition diagram)로 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 산화막의 형성 정도는 접촉하중이 증가함에 따라 선형적으로 빨라지는 것을 볼 수 있다.

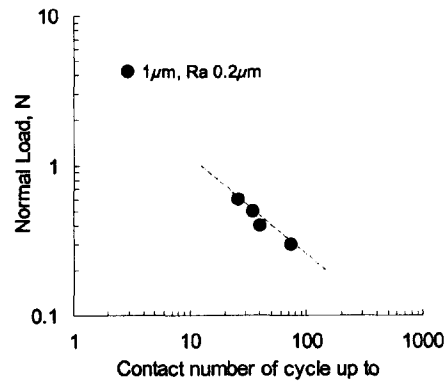


Fig. 10. Friction transition diagram; contact number of cycle at oxide layer formation as a function of contact load.

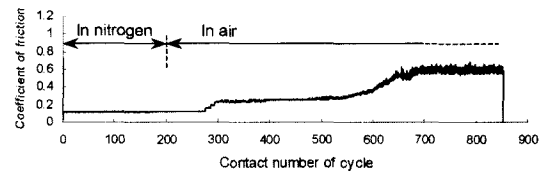


Fig. 11. COF signal from the sliding test, which was conducted in nitrogen up to 200 contact numbers of cycles and then continued in air.

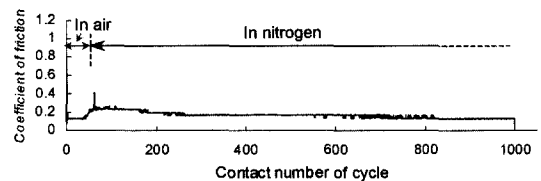


Fig. 12. COF signal from the sliding test, which was conducted in air up to 50 contact numbers of cycles and then continued in nitrogen.

### 3-5. 고찰

스틸디스크의 마멸트랙에 형성되는 산화막이 두 재료의 마찰 및 마멸특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. Fig. 11에서의 실험은 접촉회전수 200까지는 질소분위에서 접촉회전수 200부터는 질소의 공급을 중단하고 공기중에서 미끄럼실험을 수행하였을 때 마찰특성을 나타낸 것이다. 접촉회전수 280 이후에 스틸디스크의 마멸트랙에 형성된 산화막의 영향으로 저마찰구간이 없어지고 마찰천이구간 및 고마찰구간이 나타나는 것을 볼 수 있다.

스틸디스크의 마멸트랙에 형성되는 산화막의 마멸특

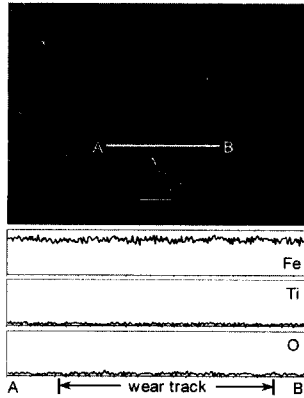


Fig. 13. The SEM photograph and EDS line profile of the wear track tested for Fig. 12.

성은 Fig. 12의 실험에서 잘 나타나 있다. Fig. 12는 Fig. 11와 반대로 접촉회전수 50까지 공기중에서의 미끄럼실험 후 접촉회전수 50부터 질소를 공급하여 실험하였을 때의 마찰신호이다. 공기중에서는 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막이 형성되어 마찰신호의 천이 관찰되었다. 그리고 질소를 공급한 후 마찰신호는 급격히 증가하지 않고 점차적으로 낮아져 접촉회전수 800 이후에는 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막이 형성되지 않았을 때와 같은 저마찰구간이 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 12의 실험 후 Fig. 13과 같이 스틸디스크의 마멸트랙을 SEM으로 관찰하고, EDS 분석을 수행하였다. EDS 분석에서 살펴보면, O 원소가 노이즈 수준에서 검출된 것을 관찰할 수 있다. 이는 두 재료의 미끄럼실험 시 마찰신호의 천이 및 고마찰을 유도하는 스틸디스크의 마멸트랙에 형성된 산화막은 TiN 코팅볼의 미끄럼마멸에 의해 제거될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

TiN으로 코팅된 볼시편과 스틸디스크의 미끄럼실험 시 형성되는 산화막이 두 표면의 마찰특성에 미치는 영향에 대하여 연구하고 다음과 같은 결론을 유도하였다.

1. 두 재료 사이의 마찰특성은 상대재인 스틸디스크의 마멸트랙에 형성되는 Fe 계열의 산화막에 의해 지배되는데, 이는 마찰천이 및 고마찰을 유도한다.
2. 두 재료의 미끄럼면에 형성되는 산화막은 스틸디스크로부터 TiN 코팅볼로 발생하는 응착마멸에 의해 형성된다.

3. TiN 코팅볼에 형성되는 산화막은 스틸디스크의 산화막 형성을 더디게 한다. 따라서 TiN 코팅볼에 형성된 산화물의 양이 증가하면 미끄럼운동의 초기 저마찰구간이 늘어난다. 그러나 두 재료의 미끄럼운동 시 마찰천이 및 고마찰을 유도하지는 않는다.

4. 접촉하중이 증가함에 따라 실질접촉면적이 커지면 두 재료 사이에 응착마멸이 쉽게 일어나는데, 이렇게 응착된 재료와 공기중의 산소가 반응하여 스틸디스크의 마멸트랙에 산화막 형성이 빨라지는 것이다.

5. 공기중에서 스틸디스크에 형성된 산화막은 산화가 일어나지 않는 질소분위기에서 마멸에 의해 제거되며, 이것에 의해 저마찰구간이 지속된다.

#### 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 산업설비안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. K. Holmberg, H. Ronkainen and A. Matthews, "Tribology of thin coatings," *Ceramics International*, Vol. 26, pp. 787-795, 2000.
2. Z.P. Huang, Y. Sun and T. Bell, "Friction behaviour of TiN, CrN and (TiAl) N coatings," *WEAR*, Vol. 173, pp. 13-20, 1994.
3. A. Erdemir, C. Bindal, J. Pagan and P. Wilbur, "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, 1995.
4. 송건, 안효석, "PECVD에 의한 TiN 코팅의 마멸특성 연구," *한국윤활학회지*, 제6권, 제1호, pp. 116-128, 1990.
5. S. Wilson and A.T. Alpas, "Effect of temperature and sliding velocity on TiN coating wear," *Surface & Coatings Technology*, Vol.94-95, pp.53-59, 1997.
6. S. Wilson and A.T. Alpas, "Tribo-layer formation during sliding wear of TiN coatings," *WEAR*, Vol. 245, pp. 223-229, 2000.
7. D. Dowson, C.M. Taylor, T.H.C. Childs, M. Godet and G. Dalmaz, "Thin films in Tribology," *Tribology series 25*, Elsevier, 1993.
8. K. Holmberg, H. Ronkainen and A. Matthews, "Wear mechanisms of coated sliding surfaces," *Tribology series 25*, Elsevier, 1993.
9. H. Sander and D. Peterson, "Friction and wear behavior of PVD-coated tribosystems," *Tribology series*

- 25, Elsevier, 1993.
10. Chung-Woo Cho and Young-Ze Lee, "Wear-life evaluation of CrN-coated steels using acoustic emission signals," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 127, pp. 59-65, 2000.
  11. Y.-Z. Lee and K.-H. Jeong, "Wear-life diagram of TiN-coated steels," *Wear*, Vol. 217, pp. 175-181, 1998.
  12. E. Rabinowicz, "Friction and wear of materials," Wiley, pp. 66-81, 1995.