

## 미끄럼운동 시 TiN 코팅에 형성되는 산화막이 마찰 및 마멸 특성에 미치는 영향

조정우<sup>†</sup> · 이영제<sup>‡</sup>

성균관대학교 기계공학부 대학원, \*성균관대학교 기계공학부

### Effects of Oxide Layer Formed on TiN Coated Silicon Wafer on the Friction and Wear Characteristics in Sliding

Chung-Woo Cho<sup>†</sup> and Young-Ze Lee<sup>‡</sup>

Graduate School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

\*School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

**Abstract** – In this study, the effects of oxide layer formed on the wear tracks of TiN coated silicon wafer on friction and wear characteristics were investigated. Silicon wafer was used for the substrate of coated disk specimens, which were prepared by depositing TiN coating with 1  $\mu\text{m}$  in coating thickness. AISI 52100 steel ball was used for the counterpart. The tests were performed both in air for forming oxide layer on the wear track and in nitrogen to avoid oxidation. This paper reports characterization of the oxide layer effects on friction and wear characteristics using X-ray diffraction(XRD), Auger electron spectroscopy(AES), scanning electron microscopy (SEM) and multi-mode atomic force microscope(AFM).

**Key words** – oxide layer; TiN coated silicon wafer; sliding test; x-ray diffraction analysis; auger electron analysis; frictional force image.

#### 1. 서 론

산화에 의한 마멸은 공기중에서 건마찰상태에 있는 두 재료의 상대운동 시 겪게 되는 주요 마멸메커니즘이다. 이러한 산화에 의한 마멸은 두 재료 사이의 마찰계수와 마멸율에 많은 영향을 주게 된다[1]. 산화에 의한 마멸은 두 재료의 접촉하중과 운동속도에 따라 다양하게 나타나는데[2,3], 이러한 접촉변수에 의한 두 재료의 접촉면의 순간적인 온도는 수백 도까지 상승하게 된다. 이 순간적인 접촉 온도가 두 재료의 마멸메커니즘을 지배한다[1].

현재까지 산화에 의한 마멸에 대한 연구는 주로 스틸-스틸의 접촉 시 두 재료의 접촉면에 형성되는 산화막에 의해 두 재료 사이의 마찰 및 마멸메커니즘이 결

정된다는 연구[1,4,5]가 주를 이루고 있다. 이러한 연구에 의하면 접촉면에 형성되는 산화막은 접촉하는 재료를 마멸로부터 보호하여 마멸율을 낮아지게 하는 역할을 하고, 산화막은 접촉하는 두 재료 보다 상대적으로 연하기 때문에 두 재료 사이의 마찰계수를 낮아지게 하는 역할을 한다고 하였다.

상대재와의 접촉운동 시 모재를 마멸로부터 보호하고 두 재료 사이의 마찰을 줄이기 위한 표면처리 수단으로 그 사용이 급증하고 있는 세라믹코팅이 적용된 기계요소들은 대부분 공기중에서 건마찰상태에서 사용되는데, 이때 위와 같이 산화에 의한 마멸을 겪게 된다[6,7]. 그러나 세라믹코팅 중 TiN(titanium nitride), CrN(chromium nitride) 그리고 TiAlN(titanium aluminum nitride) 등과 같은 경질코팅은 그들이 갖고 있는 고유한 저마찰특성 때문에 산화에 의한 마멸이 발생할 경우 스틸-스틸의 접촉에서와는 다른 마멸 및 마찰특성을 갖게 될 것이라 생각한다.

<sup>†</sup>주저자 : ccwbros2@nature.skku.ac.kr

<sup>‡</sup>책임저자 : yzlee@yurim.skku.ac.kr

최근의 관련연구에서 TiN과 CrN과 같은 경질코팅의 접촉면에 각각 형성되는  $TiO_2$ 와  $Cr_2O_3$ 는 두 재료 사이에 낮은 마찰계수를 유도하고, 마멸을 줄여주는 역할을 한다[8-10]고 하였다. 그들은 TiN이 상대재와 접촉운동 할 때 형성되는  $TiO_2$ 는 TiN 코팅을 더욱 경하게 하여 더 낮은 마찰계수를 갖게 한다고 하였다. 그러나 선행연구[11]에서 TiN으로 코팅된 스틸볼과 코팅되지 않은 스틸디스크의 미끄럼운동 시 두 재료의 접촉면에 형성되는 산화막에 의해 TiN 코팅이 갖고 있는 고유한 마찰계수 보다 높은 값을 갖게 한다는 실험 결과를 얻었다. 이것은 경질코팅의 접촉면에 형성되는 산화막에 대한 관련연구와 다른 실험결과이므로 이에 대한 더 많은 연구가 있어야 한다는 필요성에 의해 다음과 같은 연구를 수행하게 되었다.

## 2. 실험장치 및 실험조건

### 2-1. 미끄럼시험장치

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

### 2-2. 시편 및 실험조건

본 연구에서 사용한 세라믹코팅 시편은 두께 750  $\mu\text{m}$ 인 실리콘웨이퍼를 아카이온플레이팅법(arc ion plating method)을 이용하여 코팅두께 1  $\mu\text{m}$ 로 TiN 코팅을 증착하여 제작되었다. 실리콘웨이퍼를 코팅시편

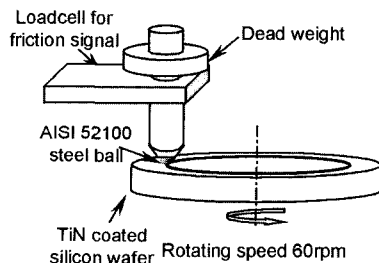


Fig. 1. Schematic diagram of sliding tester.

의 모재로 사용한 이유는 미끄럼 접촉면에 산화막이 형성되는 특성이 두 재료의 실접촉면적(real contact area)에 따라 산화막이 형성되는 속도 그리고 형성 특성 등이 많이 달라진다는 선행연구[11] 결과에 의해 기계적인 폴리싱에 의한 표면 가공법은 동일한 조도값을 갖는 시편을 가공하기에 많은 어려움이 있기 때문이다. 일반적으로 공업용 실리콘웨이퍼는 CMP(chemical mechanical planarization) 공정에 의해 정밀 표면 가공이 이루어진다. 본 연구에서 사용된 실리콘웨이퍼에 TiN 코팅을 증착한 후 시편의 표면조도는 AFM(atomic force microscopy)의 토포그래피이미지(topographic image)를 이용하여 측정하였는데, 20회 측정 후 그 평균값을 측정한 결과 표면조도는 Ra 0.0002  $\mu\text{m}$ 이고, 오차범위는  $\pm 0.00001 \mu\text{m}$ 이었다. 상대재는 지름이 10 mm인 AISI 52100 베어링강 볼을 사용하였다. 미끄럼시험 시 속도와 접촉하중은 60 rpm (0.03 m/s), 1.0 N으로 고정하여 실험하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 코팅되지 않은 시편과 TiN으로 코팅된 시편의 공기중 그리고 질소분위기에서의 미끄럼시험

Fig. 2는 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼와 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼를 상대재인 스틸볼을 이용하여 공기중에서 그리고 질소분위기에서 미끄럼시험 시 나타나는 마찰신호이다. 모든 조건에서 초기 마찰신호의 상승과 더불어 미끄럼접촉회전수 400 이후 일정한 마찰계수값을 갖는 것을 볼 수 있다.

위의 네 가지 실험 조건에서 각각 미끄럼시험을 5회 수행 후 미끄럼접촉회전수 400 이후 마찰계수의 평균

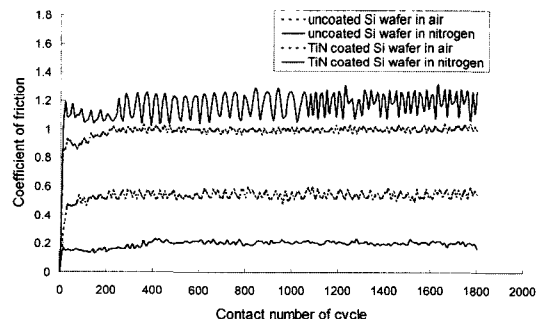


Fig. 2. Coefficient of friction signal from the sliding tests in various test conditions.

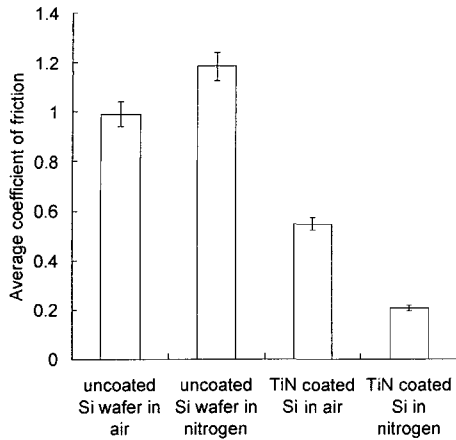


Fig. 3. Average values of the steady state coefficient of friction in various test conditions.

값을 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼와 스틸볼의 마찰계수는 관련연구[1-5]에서와 같이 미끄럼 접촉면에 산화막이 형성되는 공기중에서의 실험 시 산화막이 형성되지 않는 질소분위기의 실험과 비교하여 마찰계수 값이 약 0.2 정도 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 관련연구[4,5]에서와 같이 두 재료의 접촉상태가 스틸볼-실리콘웨이퍼에서 스틸볼-산화막, 산화막-실리콘웨이퍼 혹은 산화막-산화막으로 바뀌게 됨에 따라 이러한 산화막이 두 재료의 상대운동 시 마찰계수를 낮추는 역할을 하는 것으로 볼 수 있다. TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 스틸볼과의 미끄럼운동 시 마찰계수는 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼와 비교하여 공기중에서 그리고 질소분위기에서 모두 낮은 마찰계수를 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 TiN 코팅 즉, 경질코팅의 마찰특성이라 할 수 있다.

위의 각각의 실험 후 실리콘웨이퍼의 마멸량을 측정하고 미끄럼운동에 사용된 일(work)을 Fig. 4와 같이 표시하여 실리콘웨이퍼의 마멸계수  $K$ 를 산출한 결과는 다음과 같다. 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼의 공기중에서의 미끄럼시험 시 마멸트랙에 형성된 산화막의 영향으로 마멸량이 질소분위기에서 보다 적은 것을 볼 수 있다. TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 경우도 공기중에서의 미끄럼시험 시 마멸트랙에 형성된 산화막의 영향으로 마멸량이 질소분위기에서 보다 적은 것을 볼 수 있다. 그리고 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 마멸계수는 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼 보다 1/6~1/11까지 작은 것을 관찰할 수 있다. 이는 TiN으로 코팅된

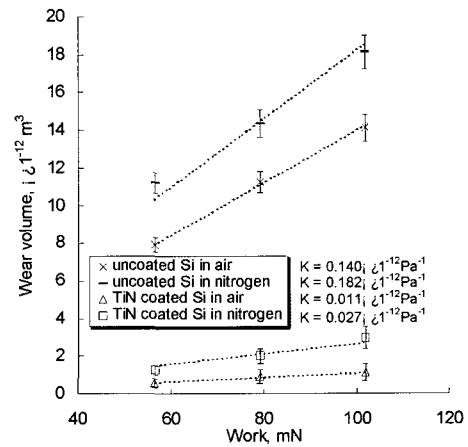


Fig. 4. Wear volume as a function of work in various test conditions.

실리콘웨이퍼의 마멸저항성이 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼 보다 뛰어나다는 것을 나타내는 것이다.

### 3-2. 미끄럼접촉면의 주요마멸메커니즘

3-1절에서 수행한 각 조건에서의 미끄럼시험 후 실리콘웨이퍼의 미끄럼접촉면을 SEM으로 관찰하여 접촉면에서 발생한 주요 마멸메커니즘을 분석하였다.

Fig. 5는 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼를 질소분위기에서 미끄럼접촉회전수 10과 1800까지 미끄럼시험을 수행한 후 관찰한 미끄럼접촉면의 SEM 이미지이다. 미끄럼시험 시 초기에는 Fig. 5(a)와 같이 미세한 칩핑(chipping)현상이 발생하였으며, 미끄럼접촉회전수가 증가함에 따라 Fig. 5(b)와 같이 칩핑현상에 의해 발생한 실리콘웨이퍼의 부스러기들이 스틸볼에 의해 다시 실리콘웨이퍼의 미끄럼접촉면에 달라붙는 응착마멸이 심하게 발생한 것을 관찰할 수 있다. Fig. 6은 코팅되지 않은 실리콘웨이퍼를 공기중에서 미끄럼접촉회전수 400과 1800까지 미끄럼시험을 수행한 후 관찰한 미끄럼접촉면의 SEM 이미지이다. 미끄럼접촉회전수 400까지는 Fig. 6(a)와 같이 실리콘웨이퍼 표면에 심한 응착마멸이 발생한 것을 볼 수 있다. 이러한 응착마멸에 의해 미끄럼접촉회전수가 증가함에 따라 Fig. 6(b)에서와 같이 실리콘웨이퍼 표면에 산화막이 형성된 것을 관찰할 수 있다. Fig. 6(b)의 마멸트랙을 EDX(energy dispersive X-ray microanalysis)로 분석한 결과 Si, Fe 그리고 O원소가 검출되었는데, 이는 실리콘웨이퍼의 마멸트랙에 Fe 계열의 산화막이 형성된다는 것을 의미

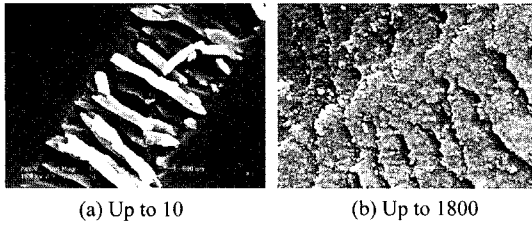


Fig. 5. SEM micrographs of the wear tracks on uncoated silicon wafer generated during the sliding tests in nitrogen up to various contact number of cycles.

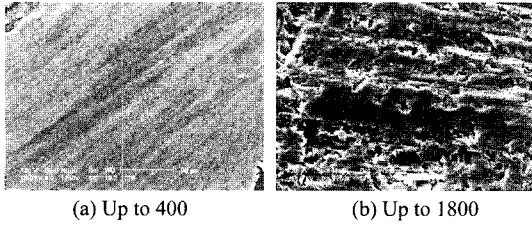


Fig. 6. SEM micrographs of the wear tracks on uncoated silicon wafer generated during the sliding tests in air up to various contact number of cycles.

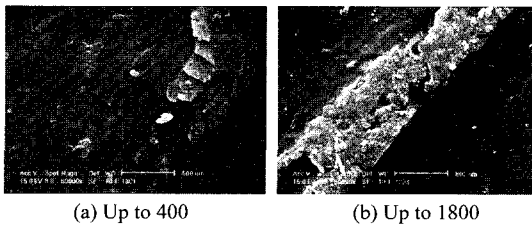


Fig. 7. SEM micrographs of the wear tracks on TiN coated silicon wafer generated during the sliding tests in nitrogen up to various contact number of cycles.

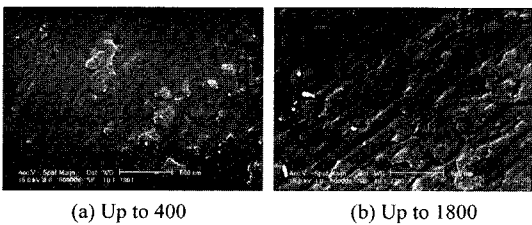


Fig. 8. SEM micrographs of the wear tracks on TiN coated silicon wafer generated during the sliding tests in air up to various contact number of cycles.

한다. 공기중에서 마멸트랙에 형성된 이러한 산화막에 의해 Fig. 4에서 보인 바와 같이 실리콘웨이퍼 표면은 마멸로부터 보호 받는다는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 7는 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼를 질소분위기에서 미끄럼접촉회전수 400과 1800까지 미끄럼시험을 수행한 후 관찰한 미끄럼접촉면의 SEM 이미지이다. 미끄럼접촉회전수 400까지는 Fig. 7(a)와 같이 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 마멸트랙은 연삭마멸과 응착마멸이 동시에 발생한다는 것을 볼 수 있다. 미끄럼접촉회전수가 증가함에 따라 연삭마멸과 응착마멸이 더욱 심해지는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 8은 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼를 공기중에서 미끄럼접촉회전수 400과 1800까지 미끄럼시험을 수행한 후 관찰한 미끄럼접촉면의 SEM 이미지이다. 미끄럼접촉회전수 400까지 Fig. 8(a)와 같이 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 마멸트랙은 연삭마멸과 응착마멸이 동시에 발생한다는 것을 볼 수 있는데, 질소분위기에서 실험한 Fig. 7(a)와 비교하여 연삭마멸이 적게 발생한다는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 미끄럼접촉회전수가 증가함에 따라 질소분위기에서 실험한 Fig. 7(b)와 비교하여 공기중에서는 응착마멸이 더욱 심하게 발생한 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)의 마멸트랙을 EDX로 분석한 결과 스틸볼의 주요성분인 Fe 원소가 질소분위기에서 실험한 Fig. 7(b)의 마멸트랙에서는 거의 검출되지 않은 반면, 공기중에서 실험한 Fig. 8(b)의 마멸트랙에서는 다량의 Fe 원소가 검출되었다. 따라서 Fig. 8(b)에서 관찰된 응착마멸은 스틸볼에서 표면경도가 상대적으로 경한 TiN 코팅 표면으로 발생한 것이며, 이러한 마멸메커니즘에 의해 Fig. 4에서와 같이 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 경우 질소분위기에서의 마멸계수가 공기중에서 마멸계수 보다 약 두 배 크게 나타났다는 것을 알 수 있다.

### 3-3. 산화막의 결정상 분석을 위한 XRD 분석

TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 마멸트랙의 성분 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)와 같은 두 가지 분위기 실험 후의 마멸트랙을 XRD 분석으로 결정상을 Fig. 9와 같이 분석하였다. Fig. 9의 XRD 분석 결과를 살펴보면 실리콘웨이퍼에 증착된 TiN 코팅의 결정상이 TiN(111)과 (200)인 것을 관찰할 수 있다. Fig. 9(a)에서  $Fe_2O_3$  피크가 작게 관찰되나, 이는 질소분위기 실험 후 마멸트랙에 형성된 화학적반응층(chemically reacted layer)에 의한 영향으로 보이는

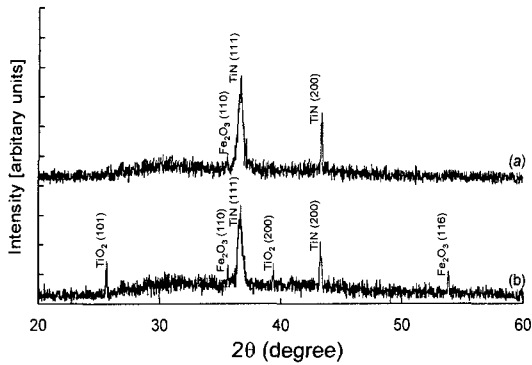


Fig. 9. XRD spectra of the wear tracks of TiN coated silicon wafers tested in various test environments; (a) in nitrogen; (b) in air.

데, 이를 제외한 마멸트랙에 어떠한 결정상도 관찰되지 않는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 Fig. 7(b)의 SEM 이미지에서 관찰되었듯이 질소분위기에서 미끄럼시험 시 주요 마멸메커니즘은 연삭마멸이며, 산화막과 같은 결정상을 형성시키는 응착마멸은 상대적으로 적게 발생한 것을 알 수 있다. 공기중에서 실험 후 마멸트랙에 형성되는 결정상은 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이  $TiO_2(101)$ 과  $(200)$  그리고  $Fe_2O_3(110)$ 과  $(116)$ 이 주요 피크로 관찰되는 것을 관찰할 수 있다. 이전의 관련연구들[8-10]은 이러한  $Fe_2O_3$ 와  $TiO_2$ 와 같은 산화막에 의해 두 재료의 접촉면에 저마찰특성이 나타난다고 보고하였다. 그러나 본 연구와 같이 TiN과 같은 경질코팅의 접촉면에 이러한 산화막이 형성될 때는 산화막이 형성되지 않는 접촉면 보다 상대적으로 고마찰을 유도하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 경질코팅 고유의 저마찰특성 보다 이러한 산화막은 상대적으로 고마찰특성을 갖기 때문이다. 이러한 사실은 본 연구의 마지막 부분의 FFM(friction force microscope)에 의한 마찰력 측정에서도 증명되고 있다.

3-4. TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 고마찰을 유도하는 산화막의 두께 측정을 위한 Auger 분석

공기중에서 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼와 스틸볼의 미끄럼운동 시 고마찰을 유도하는 산화막의 두께를 측정하기 위하여 다음과 같이 Auger 분석을 수행하였다.

Fig. 10은 미끄럼시험 전의 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼를 Auger 분석의 depth-profile을 수행한 것이다.

본 연구에서 수행한 Auger 분석에 의해 미끄럼시험을 수행하지 않은 TiN 코팅 시편의 표면에 화학적반응층이 형성되어 있는지의 여부는 관찰할 수 없다는 것을 알 수 있다. Fig. 10의 미끄럼시험 전의 TiN 코팅 시편의 depth-profile을 이용하여 Fig. 11과 Fig. 12의 산화막의 두께 측정을 위한 기준으로 사용하였다.

Fig. 11은 Fig. 8(a)의 TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼의 미끄럼시험을 공기중에서 미끄럼접촉회전수 400가

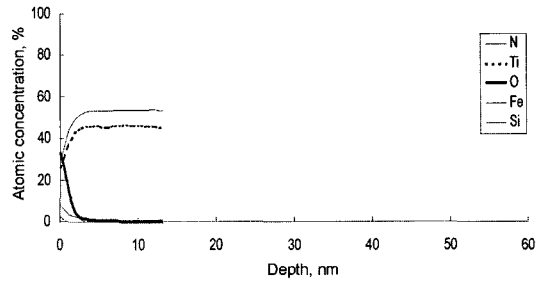


Fig. 10. Auger depth-profile for the TiN coated silicon wafer.

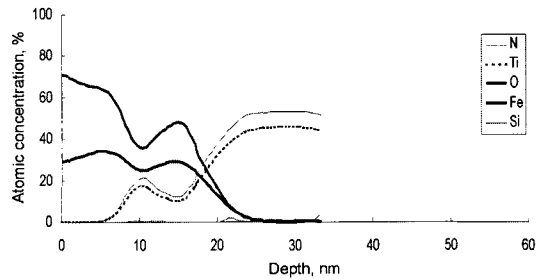


Fig. 11. Auger depth-profile for the wear track of TiN coated silicon wafer tested in air up to 400 of contact number of cycles.

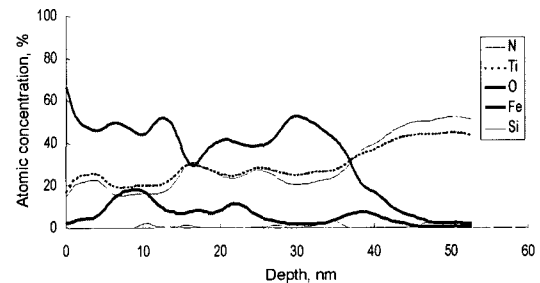


Fig. 12. Auger depth-profile for the wear track of TiN coated silicon wafer tested in air up to 1800 of contact number of cycles.

지 수행한 후 마멸트랙의 Auger 분석을 수행한 것이다. 미끄럼접촉회전수 400까지 TiN으로 코팅된 실리콘 웨이퍼의 마멸트랙 표면에서 깊이 방향으로 약 17 nm 두께의 산화막이 형성된 것을 볼 수 있다. 이러한 산화막은 표면에서 약 5 nm까지 Fe 계열의 산화막이 형성되어 있으며 표면으로부터 5 nm부터 17 nm까지는 Fe와 Ti 계열의 산화막이 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 미끄럼접촉회전수 400까지 표면에서 Ti 성분이 관찰되지 않은 것은 미끄럼접촉회전수 400에서 관찰한 SEM 이미지에서 나타났듯이 미끄럼 초기에 스틸볼에 의한 연삭마멸에 의해 TiN 코팅이 표면손상 과정을 거친 후 Ti와 Fe 계열의 산화막이 형성되고, 그 이후에 스틸볼에서 TiN 코팅면으로의 응착마멸에 의한 Fe 계열의 산화막이 형성된 것이라 할 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 8(b)의 TiN으로 코팅된 실리콘 웨이퍼의 미끄럼시험을 공기중에서 미끄럼접촉회전수 1800까지 수행한 후 마멸트랙의 Auger 분석을 수행한 것이다. 미끄럼접촉회전수 1800까지 TiN으로 코팅된 실리콘 웨이퍼의 표면에서 깊이 방향으로 약 38 nm 두께의 산화막이 형성된 것을 볼 수 있으며, Fig. 11에서와는 달리 표면에서부터 Ti 성분이 관찰되는 것을 볼 수 있다. 이는 미끄럼접촉회전수가 증가함에 따라 마멸트랙의 넓이가 증가 하고, 이와 함께 깊이 방향으로의 마멸이 증가하였기 때문이다.

이상의 Auger 분석결과 공기중에서 미끄럼시험 시 TiN으로 코팅된 실리콘 웨이퍼의 마멸트랙에 형성되는 산화막은 TiN 코팅의 두께(1  $\mu\text{m}$ )와 비교하여 상당히 얇은 두께(38 nm)로 형성되나, 스틸볼과의 미끄럼시험 시 두 재료의 마찰 및 마멸 특성을 지배하는 것으로 나타났다.

### 3-5. Multi-mode AFM을 이용한 TiN으로 코팅된 실리콘 웨이퍼의 토포그래피이미지 분석과 마이크로스케일 마찰력이미지 분석

본 실험은 Seiko SPA-300HV 시스템을 사용하였고 모든 이미지는 SI-AFO1 팁(silicon tip)을 사용하여 진공 중에서 접촉모드(contact mode)에서 측정되었다. 그리고 마찰력이미지(frictional force image)는 토포그래피이미지와 동시에 측정하였으며, 실리콘 캔틸레버(silicon cantilever) 축과 수직인 방향으로 실리콘 팁의 스캐닝에 의해 측정되었다.

Fig. 13와 14는 각각 질소분위기와 공기중에서 미끄럼접촉회전수 1800까지 미끄럼시험 후 TiN으로 코팅

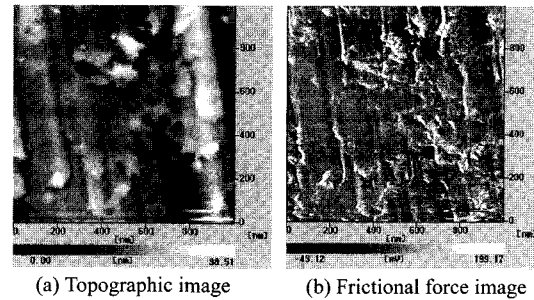


Fig. 13. Topographic images and frictional force image of the wear track of TiN coated silicon wafer tested in nitrogen.

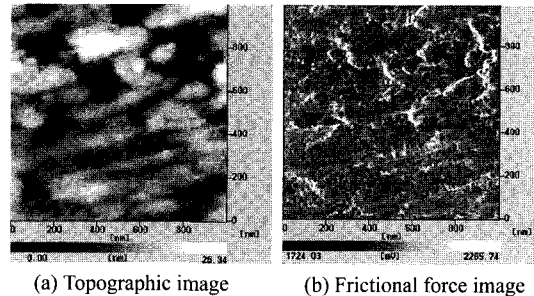


Fig. 14. Topographic images and frictional force image of the wear track of TiN coated silicon wafer tested in air.

된 실리콘 웨이퍼의 마멸트랙을 토포그래피 이미지와 마찰력 이미지를 관찰한 것이다. Fig. 13(a)와 Fig. 14(a)는 각각 Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)의 SEM 이미지와 유사한 마멸트랙이 관찰되는 것을 볼 수 있다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 질소분위기에 실험한 마멸트랙에서는 연삭마멸에 의한 표면 형상이 관찰되었고, Fig. 14의 공기중에서 실험한 마멸트랙에서는 응착마멸에 의한 표면 형상이 관찰되었다. 그리고 각각의 마찰력 이미지 Fig. 13(b)와 Fig. 14(b)에서 볼 수 있듯이 실리콘 팁을 이용한 마이크로스케일 마찰력은 공기중에서 실험하여 산화막이 형성된 마멸트랙(Fig. 14(b))의 표면이 질소분위기에 실험한 마멸트랙(Fig. 13(b))의 표면보다 수십 배 큰 것으로 관찰되었다.

이상의 실험결과에서와 같이 TiN으로 코팅된 실리콘 웨이퍼의 마멸트랙에 형성되는 산화막은 매크로 스케일과 마이크로 스케일에서 모두 산화막이 형성되지 않은 TiN 코팅 표면보다 상대적으로 큰 마찰력을 유발하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼와 스틸볼의 미끄럼시험 시 TiN 코팅의 마멸트랙에 형성되는 산화막에 의해 두 재료의 마찰 및 마멸특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) TiN으로 코팅된 실리콘웨이퍼는 접촉면에 형성된  $Fe_2O_3$ 와  $TiO_2$  산화막에 의하여 상대적으로 고마찰이 유도된다. 이는 경질코팅 고유의 저마찰특성과는 달리 이렇게 형성된 산화막이 상대적으로 고마찰특성을 갖기 때문이다.

2)  $Fe_2O_3$ 와  $TiO_2$ 와 같은 산화막은 TiN 코팅과 스틸볼의 접촉 시 마멸 저항성을 증가시켜 주어 마멸량을 적게 한다.

3)  $Fe_2O_3$ 와  $TiO_2$ 와 같은 산화막은 TiN코팅 두께와 비교하여 얇은 두께로 형성되지만, 스틸볼과의 미끄럼시험 시 두 재료의 마찰 및 마멸 특성을 지배한다.

#### 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 산업설비안전성평가연구센터의 연구비와 2001년 성균관대학교 삼성학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, "Engineering Tribology," Elsevier, Amsterdam, pp.643-647, 1993.

2. A.R. Riahi and A.T. Alpas, "The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites," *Wear*, Vol.251, pp.1396-1407, 2001.
3. S. Wilson and A.T. Alpas, "Tribo-layer formation during sliding wear of TiN coatings," *Wear*, Vol.245, pp.223-229, 2000.
4. J.F. Archard and W. Hirst, "The wear of metals under unlubricated conditions," *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, Vol.236, pp.397-410, 1956.
5. A. Ohnuki, "Deformation processing," *JSLTE Transactions*, Vol.28, pp.53-56, 1983.
6. K. Holmberg and A. Matthews, "Coatings Tribology," Elsevier, 1994.
7. K. Kato, "Wear in relation to friction-a review," *Wear*, Vol.241, pp.151-157, 2000.
8. M. Woydt, A. Skopp, K.H. Habig, *Wear*, Vol.148, pp.327-332, 1991.
9. J.F. Lin, M.H. Liu and J.D. Wu, "Analysis of the friction and wear mechanism of structural ceramic coatings. Part 2: The effect of operating conditions and substrate material," *Wear*, Vol.198, pp.7-14, 1996.
10. Y.M. Zhou, R. Asaki, K. Higashi, W.H. Soe and R. Yamamoto, "Sliding wear behavior of polycrystalline TiN/CrN multilayers against an alumina ball," *Surface and Coatings Technology*, Vol.130, pp.9-14, 2000.
11. 조정우, 이영제, "미끄럼조건에 따라 TiN 코팅볼과 스틸디스크에 형성되는 산화막이 마찰특성에 미치는 영향," *Journal of the KSTLE*, Vol.17, No.6, pp.459-466, 2001.