

## 코팅된 실리콘웨이퍼의 미소 마찰마멸특성에 관한 연구

차금환 · 김대은\*

연세대학교 대학원 \*연세대학교 기계공학과

### Investigation of Micro-tribological Properties of Coated Silicon Wafer under Light Load

Kum-Hwan Cha and Dae-Eun Kim\*

Graduate School of Yonsei University

\*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Abstract**—In recent years, the tribological behavior of coated ceramic material has been the issue of much interest. Particularly, the understanding of the tribological performance of thin film under light load is important for its potential in applications of MEMS. The friction and wear behavior of ceramic material that occur at light load depends on several factors such as surface roughness, contact area and material properties. In this work, the tribological behavior of coated silicon under light load and low speed was investigated. Particularly, the effects of coated materials, humidity and undulated surface were also studied. The results show that the effect of humidity on friction was influenced by the apparent area of contact between the two surfaces. Also both adhesive and abrasive wear occurred depending on the sliding condition. Finally, undulations on the silicon wafer were found to be effective in trapping wear particles and resulted in the reduction of friction.

**Key words**—micro-tribology, adhesion, abrasion, undulated surface, humidity, meniscus effect

#### 1. 서 론

세라믹 재료들은 내마모성, 저밀도, 고경도, 내온성 및 높은 압축강도 등의 우수한 기계적 특성으로 인해 각종 베어링이나 절삭공구 등에 사용되고 있으며, 특히 실리콘 재료의 경우 화학적인 방법을 통해 정밀한 미세패턴가공이 가능하므로 MEMS(Micro-Electro-Mechanical-Systems) 및 반도체 산업에서 사용이 증가되고 있다[1-2]. 세라믹 재료의 마찰 및 마멸특성은 접촉조건 및 온도, 습도 등의 환경에 크게 영향받는 것으로 보고되었으며[3-4], 특히 실리콘웨이퍼는 미소기기의 기본소재로 많이 사용되므로 이에 대한 미소마찰 특성의 이해가 요구되고 있다.

마이크로 모터나 마이크로 펌프와 같은 초정밀기계는 과학기술적/사회경제적 가치가 인식됨에 따라 서서히 연구가 진행되고 있으나 부품간에 발생하는 마찰마멸현상에 대한 연구는 아직까지 미약한 것이 현실이다. 또한 각종 세라믹재료의 마찰마멸특성에 관한 연구도 모재 및 후막 코팅된 부품이 고하중 및 고속 등의 심각한 마찰 및 마

멸현상을 경험하는 경우에 관한 것이 대부분이었다[5-6]. 그러나 최근 이러한 세라믹재료들을 표면에 코팅하여 MEMS부품을 제작하는데 있어서 희생층이나 구조재로 사용하는 경우, 각 부품들은 저하중에서 고속 및 저속으로 작동하게 되며 이 때의 마찰마멸특성은 거시적인 관점과는 다른 양상을 보인다[7-8]. 그리하여 이 분야에 대한 연구가 현재 활발하게 진행되고 있으나 아직까지 이러한 특수한 작동조건에서의 각종 코팅재료의 마찰특성에 대한 이해가 부족한 실정이다.

마찰마멸을 감소시키기 위해 제안된 여러 방법 중 요철표면(Undulated surface)은 마찰마멸의 기본적인 메커니즘에 대한 고찰을 통해 도출된 기능성 표면으로서 접촉시 발생하는 마멸입자를 표면에 형성된 골에 모아서 마찰 및 마멸을 감소시키도록 제작되었다[9]. 이러한 요철표면은 실험실차원의 검증을 통해[10-11] 캠/태핏사이나 엔진실린더와 피스톤간의 접촉에서처럼 비교적 접촉압력이 크고 고속으로 작동하는 거시적인 기계요소에서는 마찰 및 마멸저감효과가 어느 정도 입증되었으나[12] 미소하중이 작

용하는 경우에는 그 효과가 구체적으로 연구된바 없으므로 미소기기에 대한 적용을 위해 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 MEMS 부품의 제작에 많이 사용되고 있는  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , polysilicon,  $\text{SiO}_2$ 와 같은 재료를 실리콘웨이퍼위에 코팅하여, 저속 및 저하중에서 환경조건의 변화에 따른 기본적인 마찰 및 마멸특성에 대해 고찰하고, 저하중이 작용하는 요철표면에 대하여 마찰마멸 저감효과를 규명하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 실험장치

본 실험에서는 미소하중에서 코팅된 실리콘 재료의 마찰마멸특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같은 왕복식 micro-tribotester를 제작하였다. 핀과 시편간의 접촉운동은 양방향으로 진행되며 핀의 1회 왕복 미끄럼거리는

12 mm이다. 접촉부에 가해지는 수직하중과 이때 발생하는 마찰력은 반도체 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며 이때의 마찰력신호는 앰프를 통해 증폭되고 A/D board를 통하여 컴퓨터로 저장된다. 또한 수직하중은 일정한 변위를 유지하는 방식으로 부가하였으며 하드디스크의 서스펜션위에 볼과 다이아몬드 팁을 부착하여 편차에 의한 하중변동을 최소화하였다.

### 2-2. 실험시편 및 조건

본 실험에 사용한 핀은 3종류로서 하드디스크의 슬라이더, 1/16 inch인 bearing ball(STB2)과 5  $\mu\text{m}$ 의 끝단 반경을 가진 다이아몬드 팁을 이용하였다. 또한 디스크시편은(100) 실리콘웨이퍼위에 MEMS 부품제작시에 구조재 및 회생층으로 많이 사용되고 있는  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 와 polysilicon을 CVD방법으로 증착시킨 시편과  $\text{SiO}_2$ 막을 형성시킨 시편 및 (100) bare silicon, 50  $\mu\text{m}$ 의 요철이 있는  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 사용하였다. 핀 시편과 디스크 시편에 대한 사양을 정리

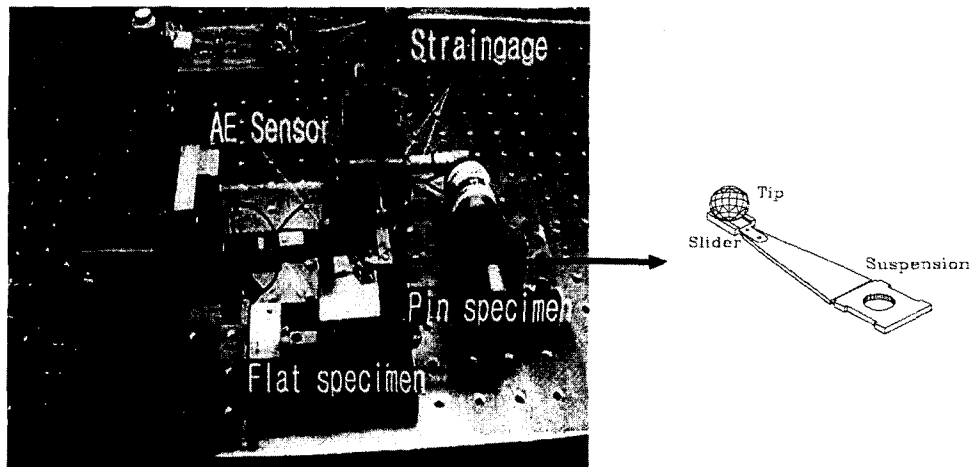


Fig. 1. Experimental setup.

Table 1. Specification of pin and disk specimens

Pin specimen	Diamond	Slider	Steel ball
Hardness (Hv)	8000	2100	700
Roughness (Ra)		3~5 nm	50~60 nm
Dimension	5 mm radius	2 × 1.6 mm	≈ 1.6 mm radius

Disk specimen	Bare Si	$\text{SiO}_2$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	Poly Si
Roughness (Ra)	3-5 nm	3~5 nm	3~5 nm	10 nm
Coating thickness	-	80 nm	300 nm	1 mm
Hardness (Hv)	800	500~600	1900	600~700

하면 Table 1과 같다[13].

디스크 시편의 미끄럼 속도는 1 mm/sec였으며 작용하중은 1, 3.5, 5 gf로 변화시켰다. 습도의 영향을 파악하기 위해 상온( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ )상태에서 습도를 35, 50, 80%의 3단계로 변화시키면서 실험을 진행하였다. 시험 전에 디스크 및 핀 시편을 아세톤 액에 담가 초음파 세척하여 표면에 흡착된 불순물들을 제거하였으며 전체적인 실험은 외란의 영향을 줄이기 위해 방진테이블을 갖춘 Class 100의 청정환경에서 수행되었다. 또한 실험후 접촉면과 마멸입자의 화학적 성분을 AES(Auger Electron Spectroscopy)분석을 이용하여 수행하였고, 이를 통해 미소하중이 작용하는 경우의 마멸기구에 대하여 고찰하였다.

실험내용은 첫째, 실험조건에 따른 마찰특성을 관찰하기 위해 미끄럼 거리를 0.6 m로 설정하였는데 이는 다이아몬드를 핀으로 사용했을 경우 가시적인 마멸트래크와 마멸입자가 관찰되지 않는 미끄럼거리이다. 또한 마멸특성을 파악하기 위해 미끄럼 거리를 2 m로 하여 마멸트래크를 관찰하였다. 둘째, 실험조건에 따른 요철표면의 마찰마멸특성에 대해 연구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 코팅된 실리콘웨이퍼의 마찰마멸특성

각 코팅재료에 대하여 미끄럼거리가 0.6 m일 때 하중

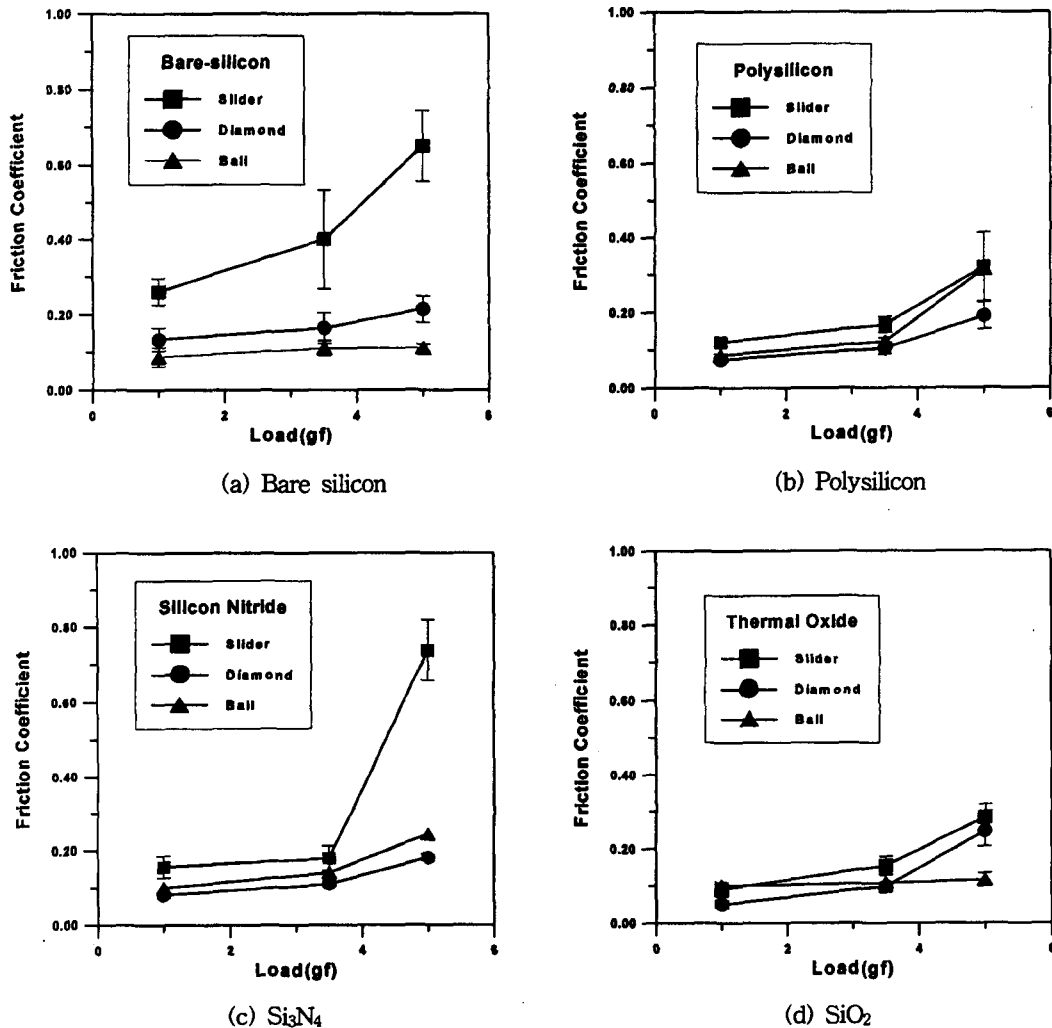


Fig. 2. Friction coefficient of various coated materials w. r. t normal load.

에 따른 마찰계수를 Fig. 2에 나타내었다. 마찰계수의 전체적인 경향을 살펴보면 하중이 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보인다. 핀 시편으로 불과 다이아몬드드를 사용했을 때와 슬라이더를 사용했을 경우를 비교하면, 전자의 경우 마찰계수가 비교적 안정되고 하중에 따른 영향도 그리 크지 않았으나 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우 접촉면적이 증가하여 상대적으로 표면요철간의 상호작용이 커지므로 마찰계수의 편차도 크고 급격한 증가를 보인다.

각 코팅재료에 따른 마찰계수의 변화를 보면 bare silicon과  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 로 코팅된 디스크시편에 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우 Fig. 2(a), (c)와 같이 하중이 증가함에 따라 마찰계수가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 특히 bare silicon은 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우 하중이 증가함에 따라 접촉면의 stiction이 크게 증가하여 운동이

매우 불안정하였고 5 gf의 경우 마찰계수가 0.7~0.8에 근접하는 것을 알 수 있었다.

Polysilicon과  $\text{SiO}_2$ 코팅시편의 경우에도 Fig. 2(b), (d)에 보이는 것처럼 슬라이더를 핀으로 사용한 경우 마찰계수가 가장 큰 값을 갖는 것으로 보아 미소하중에서는 표면거칠기가 매우 작아서 실제 접촉면적이 큰 경우, 접촉면에서의 응착력을 증가시키므로 마찰계수가 증가하는 것이라고 판단된다.

다음은 각 코팅시편의 마멸특성을 알아보기 위해 볼을 핀으로 이용하여 4가지 디스크 시편에 대하여 거시적인 마멸흔적의 관찰이 가능하도록 미끄럼 거리를 2 m로 설정하여 실험하였다. 이때의 작용하중은 5 gf였으며 35%의 상대습도조건에 대하여 실험하였다. 실험후 트랙의 형상을 Fig. 3에 나타내었고 마멸입자와 마멸트랙에 대하여 AES분석을 통해 마멸기구를 파악하였다.

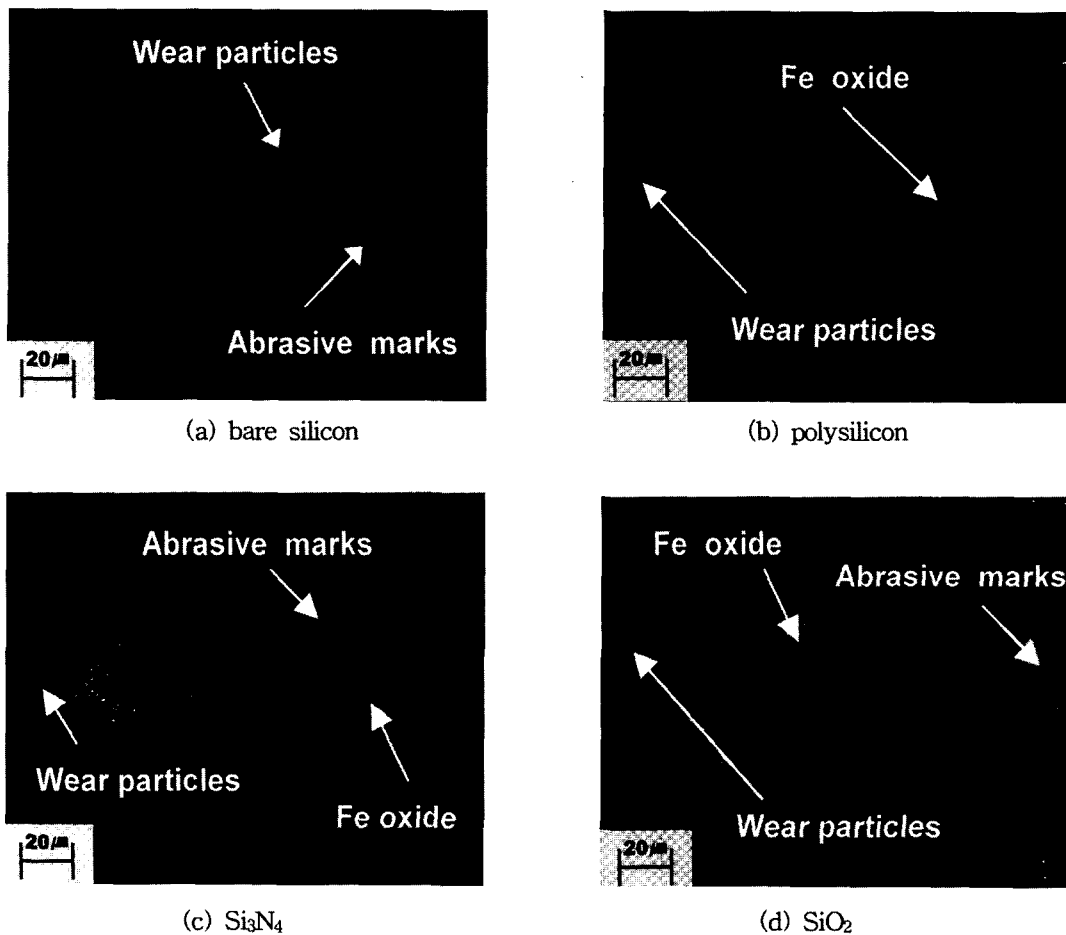


Fig. 3. Wear track of disk specimens (5 gf, 35% RH).

Fig. 3(a)에서 보면 bare silicon의 경우 마멸트랙 양 옆부분에서 소성변형이 관찰되었으며 접촉면에 연삭마멸 흔적과 이로 인한 마멸입자가 나타났으나 응착마멸 흔적은 보이지 않았다. Fig. 3(b), (c), (d)에서 나타난 것처럼 SiO<sub>2</sub>, polysilicon 및 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 마멸트랙에서는 bare silicon에서 발생된 마멸입자와 연삭마멸 이외에 표면에 응착된 물질이 다수 관찰되었는데 이는 Fig. 4와 같이 SiO<sub>2</sub> 시편표면에 생성된 산화 막을 제거한 후의 AES분석결과 위치 1, 3과 같이 볼과의 접촉으로 인해 볼에서 전이된 Fe 및 Si 산화물이 주종을 이루는 것으로 밝혀졌다. 일반적으로 실리콘의 마멸기구는 취성파괴(brittle fracture)로 알려져 있지만, 박막코팅된 실리콘웨이퍼의 마멸은 박막이 파괴되어 모재부분이 드러나기 전까지는 연삭마멸과 이로 인한 마멸입자가 접촉표면에 응착하는 응착마멸이 주된 영향을 받는다고 사료된다.

또한 앞서 언급한 것처럼 접촉면적의 영향은 습도가 높은 경우에 더 크게 나타날 것으로 예상되므로 각 편

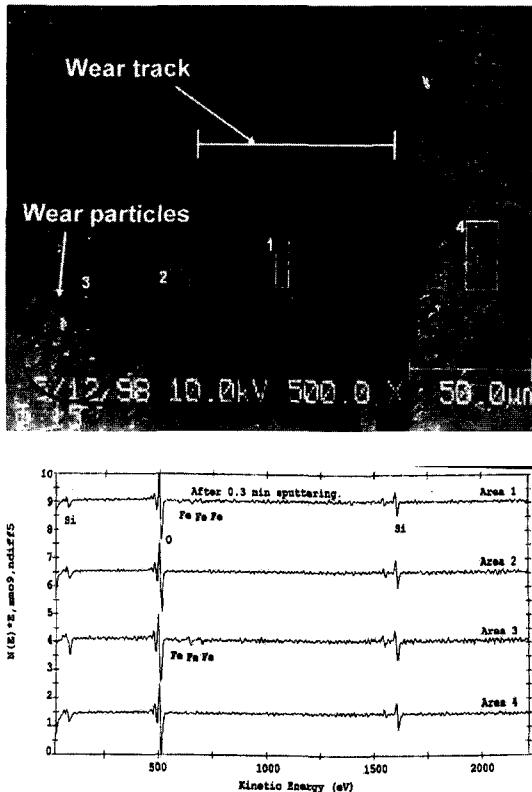


Fig. 4. AES analysis of SiO<sub>2</sub> wear track (5 gf load, 35% RH).

시편에 대해 습도를 달리했을 경우의 마찰계수를 측정하였다. Fig. 5에서는 수직하중이 5 gf일 경우 핀과 디스

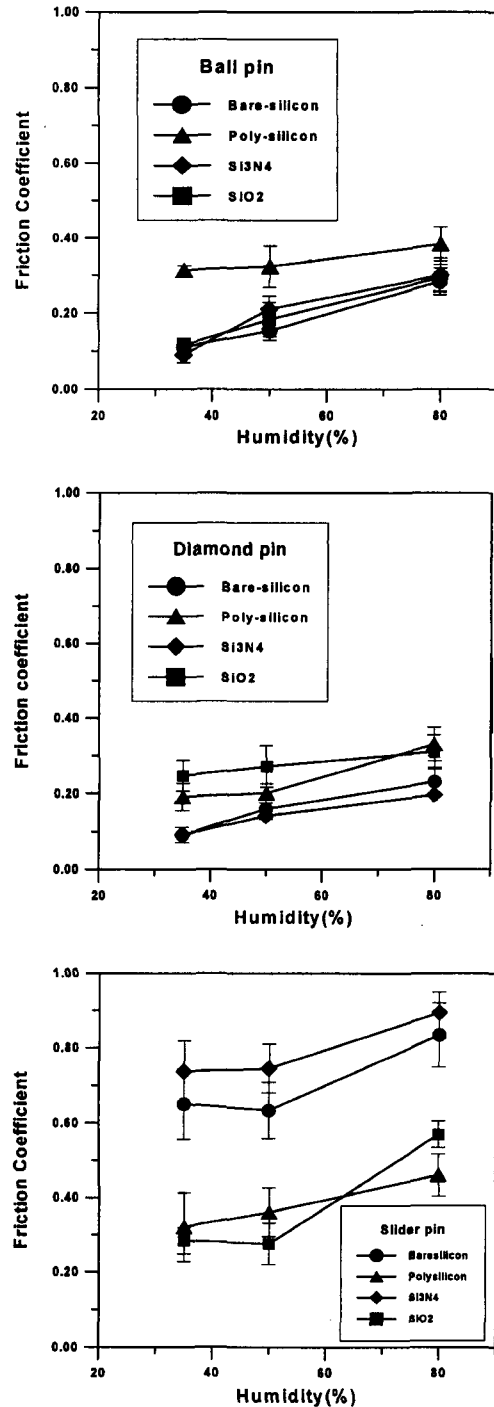


Fig. 5. Effect of humidity on friction w. r. t type of pin.

크간의 각 조합에서 습도의 영향을 나타내었다.

전체적으로 보면 습도에 따라 전체 디스크시편의 마찰 계수가 증가하는 것으로 보인다. Fig. 5(a), (b)는 핀 시편으로 불과 다이아몬드를 사용한 경우로서 습도증가에 따른 영향은 그리 크지 않았으나 Fig. 5(c)와 같이 접촉면이 큰 슬라이더를 핀으로 사용한 경우에는 앞의 두 경우와 비교했을 때, 저습에서의 초기 마찰계수도 크고 그 변동도 심한 것으로 나타났다.

접촉면적과 마찰계수와의 관계를 정확히 하기 위해 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 디스크에 대하여 작용하중이 5 gf이고 습도 35%와 80%인 경우에 대하여 접촉면적에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 6과 같이 나타내었다. 접촉면적이 증가함에 따라 마찰계수가 급격히 증가하는 것으로 보아 수 gf이하의 하중이 작용하는 미시적 수준에서는 접촉면적의 영향이 지배적인 것을 알 수 있다.

일반적으로 높은 습도는 접촉면의 표면거칠기가 작고 미소하중이 작용하는 경우에 접촉면에 수분을 응축시켜 액체막을 형성시키는 meniscus 효과를 일으키게 된다. 이처럼 접촉면에 형성된 액체막은 표면장력을 증가시키므로 마찰계수를 증가시키게 된다[14]. 접촉면적이 넓어질수록 이러한 효과는 증가되므로 슬라이더를 핀으로 사용했을 경우는 이러한 효과가 더 크기 때문에 마찰계수가 증가한 것으로 판단된다. 한편 슬라이더 시편에 대해 3.5 gf의 하중이 가해진 경우, 즉 35% 습도에서 실험도중 접촉부분에 수분을 첨가하여 습도 100%로 만든 경우의 마찰계수 변화를 관찰한 결과, Fig. 7과 같이 수분

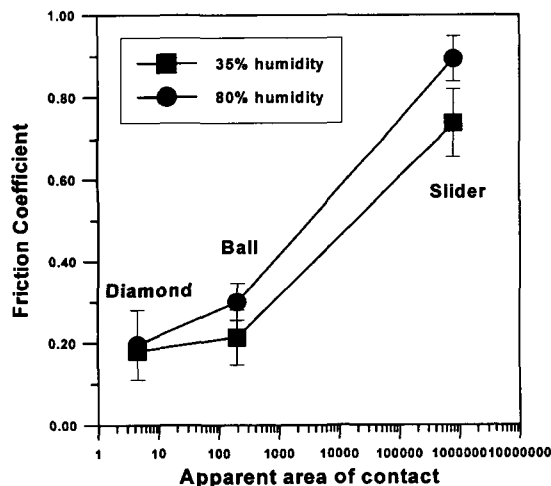


Fig. 6. Relationship between apparent contact area and friction coefficient.

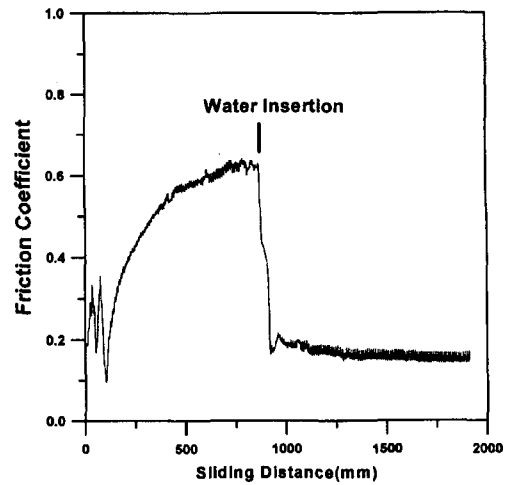


Fig. 7. The effect of water insertion between slider and SiO<sub>2</sub>.

이 윤활유 역할을 하여 마찰계수가 급격히 감소하였으며 이러한 meniscus 효과는 나타나지 않았다.

### 3-2. 요철표면의 마찰특성

마찰마멸저감을 위한 기능성 표면인 요철표면은 산부 분이 접촉하중을 지탱할 수 있을 정도로 견고해야 하며, 마멸입자를 모을 수 있도록 골 부분의 깊이가 충분해야 한다. 이를 위해 간격이 50 μm이고 깊이가 25 μm인 실리콘 요철표면위에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 코팅한 시편을 이용하여 습도 및 하중변화에 따른 마찰마멸실험을 수행하였다.

습도 35%, 상온(25±2°C)에서 핀 시편으로 슬라이더와 볼을 사용했을 경우, 하중변화에 따른 마찰계수를 Fig. 8에 나타내었다.

요철이 있는 디스크 시편 위에 슬라이더 및 볼을 핀으로 사용했을 경우는 모두 요철이 없는 경우보다 마찰 계수가 낮은 것으로 나타났으며 Fig. 8(a)와 같이 높은 마찰특성을 나타내는 슬라이더 핀일 경우 그 정도가 심하였고 비교적 낮은 마찰특성의 볼 핀의 경우는 그 효과가 뚜렷하지 않았다. 하중이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 것은 실제 접촉면적이 커짐에 따라 접촉면에서 표면요철간의 상호작용이 증가하기 때문이라고 판단된다. 요철이 있는 시편의 경우 이러한 실제 접촉면적을 줄여주는 효과가 있기 때문에 마찰계수가 낮은 것으로 사료된다. 그러나 볼 시편의 경우 상대면이 요철표면이라도 그 접촉면이 매우 작기 때문에 마찰감소효과는 뚜렷하지 않았다.

Fig. 9는 요철표면에 대한 습도의 영향을 알아보기 위

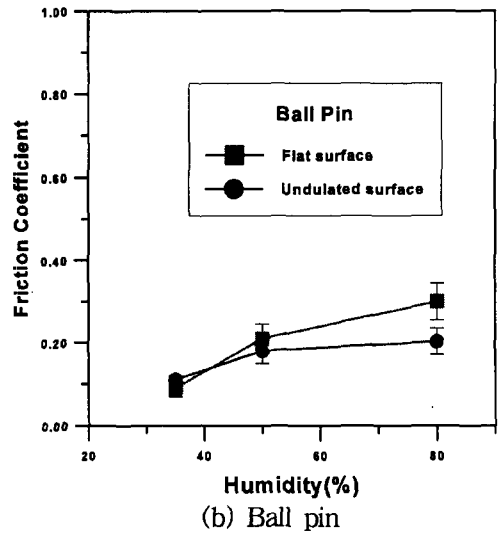
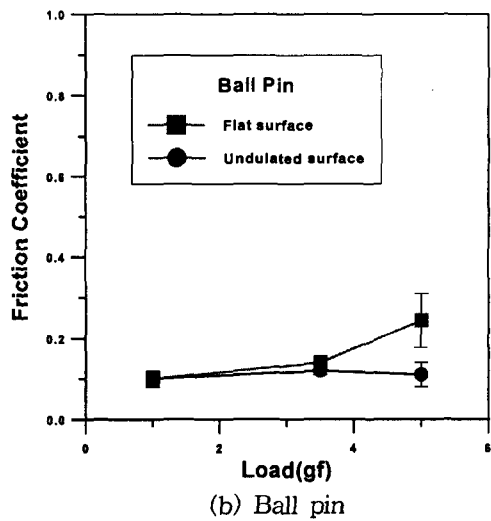
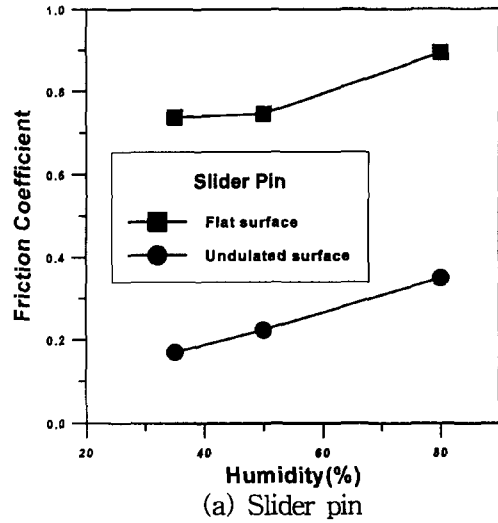
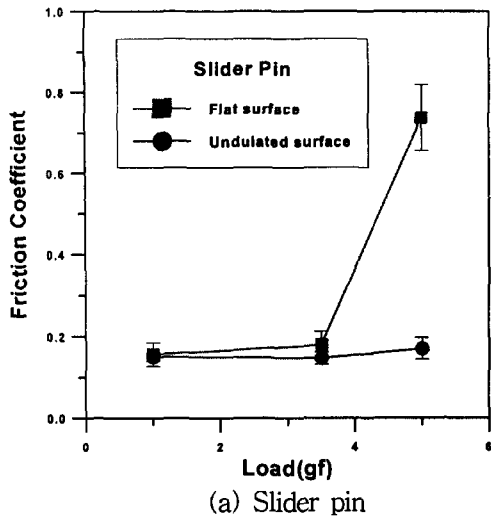
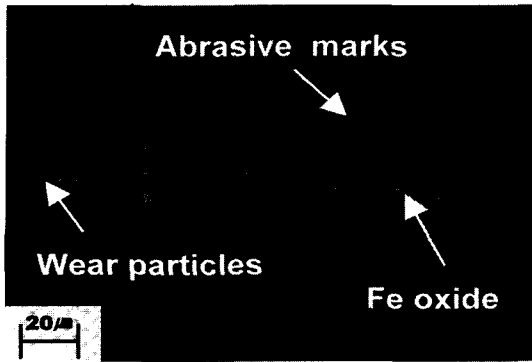


Fig. 8. Comparison of friction coefficient between flat and undulated surface w. r. t load.

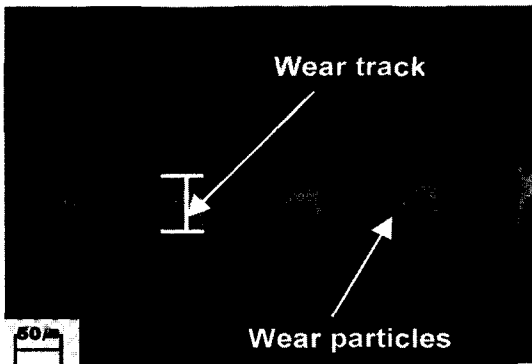
Fig. 9. Comparison of friction coefficient between flat and undulated surface w. r. t humidity.

해 하중 5 gf에서 습도를 35, 50, 80%로 변화시킨 경우의 마찰계수 변화를 나타내었다. Fig. 9(a)에서 보던 슬라이더 핀을 요철이 없는 디스크시편과 접촉시켰을 때는 마찰계수의 증가가 뚜렷하였으나 요철이 있는 경우는 증가하는 정도가 크지 않았다. Fig. 9(b)와 같이 볼 핀을 사용한 경우는 요철의 유무에 관계없이 습도증가에 따른 마찰계수의 변화가 미미하였다. 이는 접촉면적이 작으므로 접촉면에 표면장력을 일으킬 수 있는 액체막이 형성되는 부분이 작기 때문이라고 사료된다. 이로서 습도가 높은 경우 접촉면적이 클수록 meniscus효과는 크게

나타남을 알 수 있다. 한편 슬라이더 핀으로 사용했을 경우 미끄럼 거리 2 m 후에도 실험전과 비교했을 때 현저한 마멸입자나 표면파손이 관찰되지 않았으나 볼 핀으로 사용했을 경우는 접촉압력이 370 MPa로서 슬라이더 핀으로 사용했을 경우의 0.02 MPa에 비해 접촉압력이 매우 크기 때문에 Fig. 10과 같은 표면파손을 관찰할 수 있었다. 이것은 작용하중이 5 gf와 35%의 습도에서 2 m를 미끄럼 운동했을 때의 결과이다. Fig. 10(a)에서 보던 볼의 진행방향으로 굽힘 흔적과



(a) Wear track of flat surface of  $\text{Si}_3\text{N}_4$



(b) Wear track of undulated surface of  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Fig. 10. Comparison of wear track between flat and undulated surface (ball pin).

접촉면에 응착된 물질이 다수 관찰되는 것으로 보아 연삭마멸 및 응착마멸이 동시에 일어나는 것을 알 수 있었다. 그러나 요철표면의 마멸트랙을 나타낸 Fig. 10(b)에서 보면 돌출부분은 접촉흔적이 관찰되었지만 Fig. 10(a)와 같은 심각한 응착이나 연삭마멸흔적은 보이지 않았으며, 미끄럼 운동이 진행됨에 따라 접촉부위에서 생긴 마멸입자가 골 부분으로 빠져있는 것을 알 수 있었다. 이처럼 요철표면은 접촉면적을 줄여주므로 표면에 응착되는 물질이 적고, 발생된 마멸입자가 Fig. 11과 같이 골 부분에 모아지므로 마찰 및 마멸이 감소되는 효과가 나타난다고 판단된다.

미끄럼 운동이 진행되는 동안 접촉면은 다양한 마멸을 경험하게 되는데 요철표면에서 이러한 마멸메커니즘을 파악하기 위해 마멸입자 및 접촉표면에 응착된 물질의 성분을 AES분석을 실시하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)에서는 요철이 없는 표면과 볼과의 접촉으로 인해 응착된 물질이 있는 부분(위치 1)과 없는 부분(위치 2)

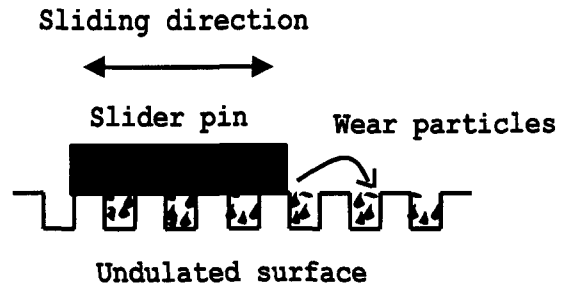


Fig. 11. Friction and wear reduction due to trapping of wear particles and decreasing apparent contact area.

의 SEM 영상과 화학성분을 나타내었다. 위치 1에서는 볼과의 접촉이 없었던 부분이므로  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 N 성분과 Si 성분만이 나타났지만 위치 2에서는 볼과의 반복적인 접촉으로 인해 위치 1의 두 성분 이외에 볼에서 전이된 Fe 성분이 검출되었다. Fig. 12(b)에서는 보편 요철이 있는 표면에서 마멸트랙(위치 1)과 마멸입자(위치 2)의 화학적 성분을 분석한 결과, 두 곳 모두 볼에서 전이된 Fe 성분이 검출되었다. 이러한 물질전이는 볼과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  코팅된 실리콘웨이퍼사이의 표면요철간의 상호작용으로 인해 연삭마멸이 발생하고 이렇게 발생된 마멸입자가 접촉면에 응착하여 발생된 것이라고 판단된다.

#### 4. 결 론

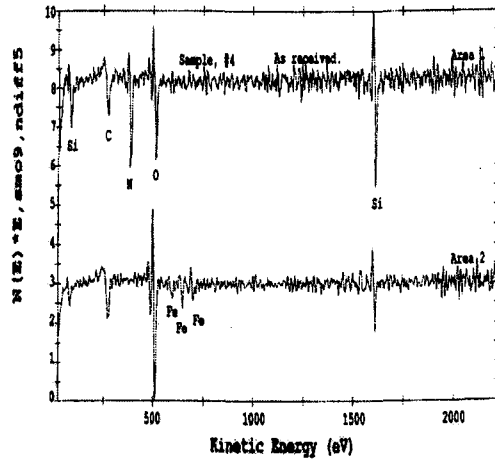
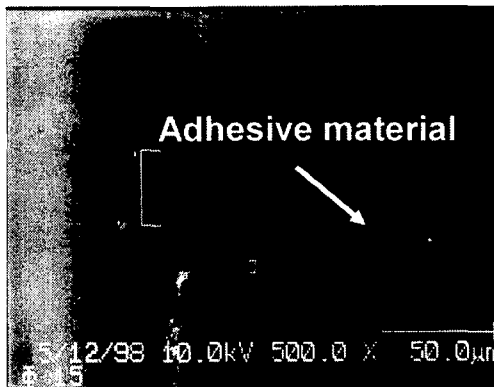
$\text{Si}_3\text{N}_4$ , polysilicon 및  $\text{SiO}_2$ 를 CVD방법으로 증착시킨 실리콘웨이퍼와 bare silicon,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  요철표면위에 베어링 볼과 반경  $5 \mu\text{m}$  다이아몬드 및 슬라이더를 핀으로 이용하여 미소하중에서 마찰마멸실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  코팅시편 및 bare silicon의 경우 슬라이더를 핀으로 사용했을 때, 마찰계수가 큰 값을 갖고 변동이 심하였지만 요철이 있는 표면의 경우 비교적 작은 마찰계수를 나타내었다. 이러한 요철표면은 실접촉면적을 작게 하고 마멸입자를 골 부분에 모을 수 있으므로 저하중에서도 역시 마찰 및 마멸을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

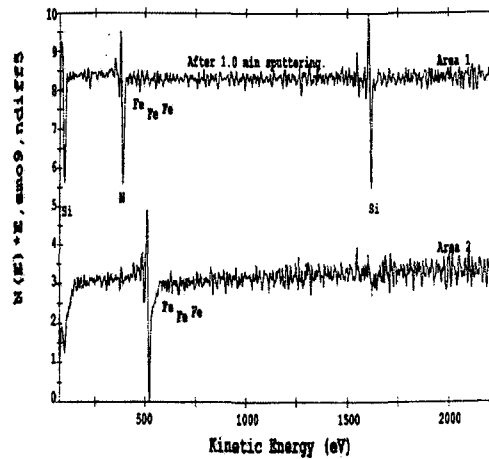
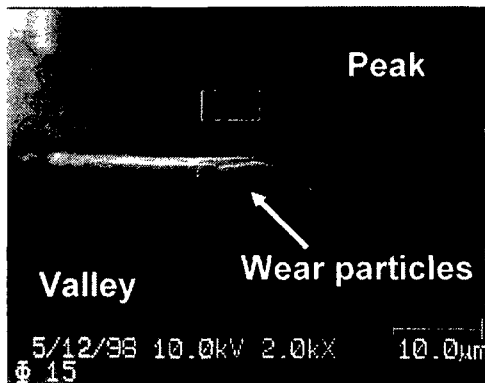
2. 저하중에서 접촉면의 표면거칠기가 매우 작을 경우 마찰계수는 습도가 증가함에 따라 meniscus 효과에 의해 증가되지만, 접촉면적이 작을 경우 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

3. 미소하중이 작용하는 코팅된 실리콘웨이퍼에 대한 마멸기구, 핀의 형상에 따라 차이가 있으며 볼을 핀으로 사용했을 때 연삭마멸에 의해 발생한 마멸입자가 표





(a) SEM image and AES of flat surface



(b) SEM image and AES of undulated surface

Fig. 12. AES analysis of flat and undulated surfaces.

면에 응착하는 응착마멸의 형태를 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원(과제번호 : 97HN-099)과 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(과제번호 : 97K3-0907-02-02-1)의 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Mehregany, M. and Senturia, S. T., "Measurement of

Wear in Polysilicon Micromotors," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 39, No. 5, pp. 1136-1143, 1992.

2. Bhushan, B. and Venkatesan, S., "Friction and Wear Studies of Silicon in Sliding Contact with Thin-film Magnetic Rigid Disks," J. of Material Research, Vol. 8, No. 7, pp. 1611-1628, 1993.

3. Lin, J. F., Liu, M. H. and Wu, J. D., "Analysis of the Friction and Wear Mechanism of Structural Ceramic Coatings," Part2, Wear, Vol. 198, pp. 7-14, 1996.

4. Demizu, K., Ishigaki, H. and Wadabayashi, R., "Dry Friction of Silicon Carbide and Silicon Nitride Against Metals," J. of Tribology, Vol. 111, pp. 401-405, 1989.

5. Xing, W. F. and Haung, L. H., "Study on Tribology of Silicon Nitride Ceramic Tappet," J. of Tribology,

- Vol. 115, pp. 295-298, 1993.
6. Watremez, M., Bricout, J. P. and Marguet, B. "Friction, Temperature and Wear Analysis for Ceramic Coated Brake Disks," J. of Tribology, Vol. 118, pp. 457-465, 1996.
  7. Mehregany, M., Senturia, S. D. and Lang, J. H., "Measurement of Wear in Polysilicon Micromotors," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 39, No. 5, pp. 1136-1143, 1992.
  8. Peterson, K. E., "Silicon as a Mechanical Material," Proc. of the IEEE, Vol. 70, No. 5, pp. 420-457, 1982.
  9. Suh, N. P., Tribophysics, pp. 423-427, Prentice Hall, New Jersey, 1986.
  10. Suh, N. P. and Saka, N., "Surface Engineering," Annals of the CIRP, Vol. 36, pp. 403-408, 1987.
  11. Tian, H., Suh, N. P. and Saka, N., "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces," Tribology trans., Vol. 32, No. 3, pp. 289-296, 1989.
  12. Kim, D. E. and Suh, N. P., "Decoupled Design of Cylinder Liner for IC Engines," SAE Paper, No. 911231, pp. 99-106, 1992.
  13. Bhushan, B., Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, pp. 602-645, Spinger-Verlag, New York, 1990.
  14. Gao, C., Wilsdorf, D. K. and Makel, D. D., "Moisture Effects Including Stiction Resulting from Adsorbed Water Films," J. of Tribology, Vol. 114, pp. 174-180, 1992.