

## 표면 구조 변화에 따른 응착과 마찰 특성에 관한 연구

양지철\*, 김대은\*\*

### A Study on the Characteristics of Stiction and Friction of Textured Surface

Ji-Chul Yang\*, Dae-Eun Kim\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, the characteristics of silicon wafer surface which is textured by KOH anisotropic etching method and mechanical polishing are investigated from the viewpoint of stiction and friction. It was found that the characteristics of stiction and friction of each textured surface are dependent on the contact area characterized by surface parameters such as bearing length ratio and peak count. To find the mechanism of the variation of stiction and friction in textured surface, OTS SAM coated wafer was used. In this case, the variation of stiction and friction was diminished. Therefore, it is concluded that the reason of variation of stiction and friction on textured surface is mainly caused by capillary which in turn is affected by the surface topography

**Key Words** : Capillary force(모세관력), Friction(마찰), KOH etching(수산화칼륨 에칭), Stiction(응착), Textured surface(구조화 표면)

#### 1. 서론

최근 실리콘을 기반으로 한 마이크로 모터, 마이크로 액추에이터 등과 같은 미세 기계 요소의 제작에 관심이 증가하고 있다. 그러나, 이러한 미세 기계요소(MEMS)들은 부피 대 표면적의 비율이 매우 크기 때문에 마찰 마멸로 인하여 제품이 정상적으로 작동하게 되지 못하는 문제가 발생하게 되므로 마이크로 시스템의 기술이 한단계 발전하기 위해서는 작동 부위의 표면력과 관계되는 근본적인 현상이 고려되어야 한다. 즉, 미세 기계요소가 신뢰성과 고성능을 달성하기 위해서는 마찰 마멸 문제가 반드시 해결 되어져야 한다는 것을

나타낸다. 특히, 미시적 접촉이 발생하는 부분에서의 응착, 접촉부에서 발생하는 마멸입자와 표면간의 상호작용으로 인한 표면 오염 및 표면력은 반드시 해결해야 할 문제로 떠오르고 있다<sup>[1]</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위해 마이크로 액추에이터나 마이크로 가속도계 등의 상용 MEMS 부품에서는 부품간의 직접적인 미끄럼 접촉이 일어나지 않도록 설계하고 탄성적으로 변형하는 요소만으로 구성하고 있다<sup>[2]</sup>. 그러나, 이러한 접근만으로는 마이크로 기계요소기술에 상당한 제한을 주게 되므로 접촉이 일어나는 기계요소의 마찰 마멸을 저감할 수 있는 기술의 개발이 요구 되어지고 있다.

☞ 2001년 10월 29일 접수  
\* 연세대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 연세대학교 기계공학부

실리콘 표면에서의 마찰 마멸 저감을 위한 방법 중의 사용되는 방법이 접촉 표면을 기계적/화학적으로 변형시킴에 따른 구조화된 표면이다. 이러한 방법은 실제로 마이크로 모터나 액츄에이터에 부싱(bushing)이나 딥플 등을 사용하여 접촉 면적을 줄이는 방법에 사용되어 응착력을 감소시키는데 효과적으로 적용됨이 알려져 있다<sup>[3]</sup>. 한편 Matsumoto<sup>[4]</sup> 등은 표면을 양극 산화 시키면 표면 거칠기가 증가하게 되어 응착력의 척도가 되는 표면에너지가 낮아지고 접촉각이 증가하므로 응착력을 감소할 수 있다고 주장하였다.

본 연구에서는 이러한 구조화 표면의 마찰 마멸 특성을 연구하기 위해, 미세 기계요소의 기본 재료로 광범위하게 사용되고 있는 실리콘 웨이퍼에 KOH 에칭 방식과 기계적 연마 방식을 통하여 다양한 구조화 표면을 얻고, 각각의 구조화 표면이 응착 및 마찰에 미치는 영향을 고찰 하였다.

## 2. 실험

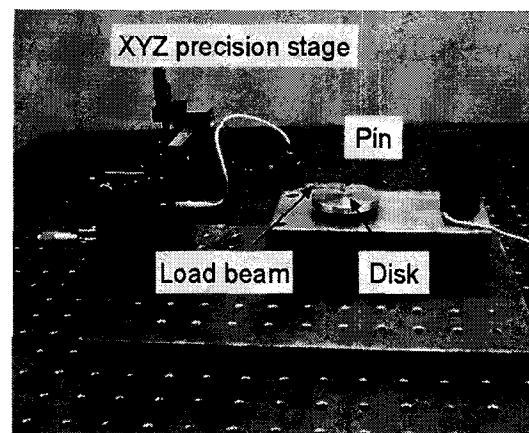
### 2.1 실험 장치

본 실험에서는 구조화 표면의 형성에 따른 저속 및 저 하중에서의 마찰 마멸 특성을 파악하기 위해 Fig. 1(a)와 같은 pin-on-disk 방식의 micro tribo-tester를 사용하였다. 실험 장치는 hard disk의 friction 측정에 사용되는 CETR CSS 장치를 사용한 것으로, 반도체 스트레인 게이지를 이용하여 마찰력을 측정하고, 이 때의 마찰력 신호는 amplifier를 통해 증폭되고 A/D board를 통하여 컴퓨터로 저장 되도록 하였다<sup>[5-6]</sup>. 수직 하중은 Y축 변위를 조정하여 이에 따라 suspension에 가해지는 힘을 미세 저울로 측정한 후 그 변위를 기록하여 원하고자 하는 하중을 Y축 변위를 통해 유지하는 방식으로 사용하였다.

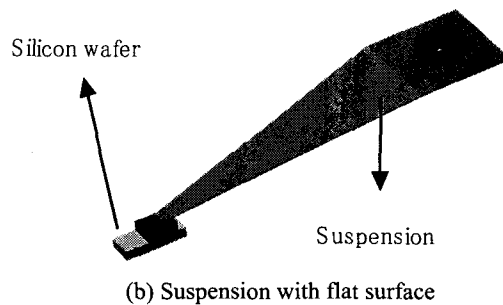
Fig. 1(b)와 같이 하드디스크의 서스펜션 밑에 4x4mm의 연마된 silicon wafer를 부착하여 평평한 표면 간의 접촉 운동으로 설정하였으며, 디스크 부분의 수평오차에 대한 수직하중의 변동을 5% 내로 최소화 하였다.

평행한 시편과 구조화된 시편간의 미끄럼 접촉 운동은 구조화된 시편의 원운동에 의해 진행되며, 1회전시의 미끄럼 거리는 평행한 시편의 중심을 기준으로 25mm이다. 회전 속도는 회전 속도를 이용하여 측정하였으며, 디스크 시편의 미끄

럼 속도는 회전 속도로 인한 관성력의 영향을 배제하기 위하여 약 2mm/sec의 저속으로 설정하였으며, 하중은 3gf로 설정하였다. 마찰계수의 평가를 위해 미끄럼 거리는 2m로 설정하였다. 응착 계수의 평가는 하중을 가한 후 정지 상태에서 순간적인 속도를 발생 시킬 때의 접촉면 사이에 발생하는 힘을 측정하였다.



(a) Pin-on-disk tribotester

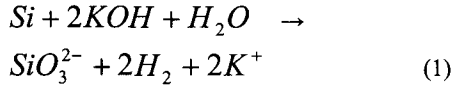


(b) Suspension with flat surface

Fig. 1 Experimental setups for friction and stiction measurement

### 2.2 실험 시편

다양한 구조화 표면을 얻기 위하여 KOH 에칭액을 이용한 화학적 에칭 방식과 silica 입자를 이용한 기계적 연마의 2가지 방법을 사용하였다. 먼저 구조화된 silicon wafer 표면을 얻기 위해서, 결정면이 (100)인 p-type silicon wafer와 silicon wafer의 이방성 에칭액으로 KOH 용액을 이용하였다<sup>[7]</sup>. KOH 용액을 사용할 경우에 silicon wafer에 일어나는 화학반응은 식(1)과 같다.



40 wt.%의 KOH 에칭액으로 채워진 비이커를 80℃의 일정온도로 조절되고 있는 수조 안에 위치시킨 후 교반기를 이용하여 습식 에칭을 실시하였다. 각각의 시편에 대한 에칭 시간은 각각 5분, 10분으로 설정하였다.

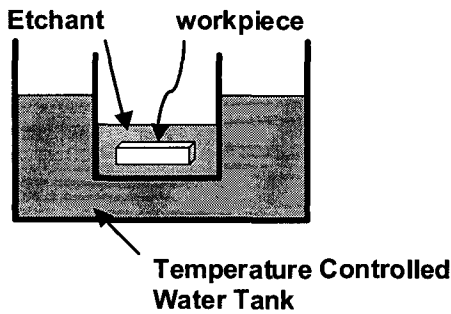


Fig. 2 Schematic of etching system

화학적 에칭된 구조화 표면의 형상을 조절하기 위해, polisher를 이용하여 기계적 연마를 실시하였고, 연마 조건은 하중 15N, RPM 200으로 설정하였다. 사용된 slurry는 silica 입자를 증류수에 희석하여 사용하였다. 연마 시간은 각각 30초, 60초로 설정하였다. 평가된 시편의 각각은 Table 1에 정리 되었다.

Table 1 Process conditions for specimen preparation

Specimen	Wafer surface	KOH etching	Mechanical polishing
1	Front	x	x
2	Back	x	x
3	Back	5 min.	x
4	Back	10 min.	x
5	Back	10 min.	30 sec.
6	Back	10 min.	60 sec.

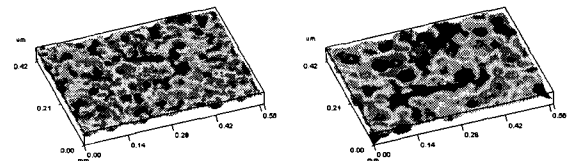
실험 전의 모든 디스크 및 시편은 아세톤 용액에 담구어 초음파 세척함으로써 표면에 응착된 불순물 등을 제거하였으며, 전체적인 실험은 외란의

영향을 줄이기 위해 방진 table이 갖춰진 Class 100, 습도는 45%의 환경 조건에서 수행되었다. 각각의 시편에 대한 관찰은 광학 현미경, 표면 조도 측정기인 SV-600, 그리고, 3차원 표면 조도 측정기(Intek사 Accura 1500F)를 사용하였다.

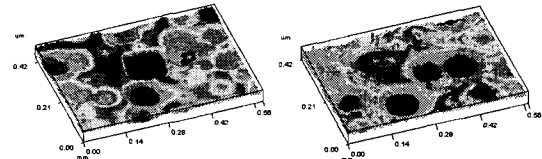
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 시편처리에 따른 표면조도의 변화

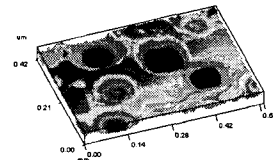
Fig. 3은 KOH 에칭과 polishing에 따른 각각의 표면을 나타낸 것이다. 그림은 3차원 표면 조도기에 의한 측정 결과이며, 측정 영역은 0.25mm X 0.23mm이다.



(a) Ra=0.63µm, Rp-v=1.32µm (b) Ra=0.57µm, Rp-v=1.20µm



(c) Ra=0.50µm, Rp-v=0.89µm (d) Ra=0.08µm, Rp-v=0.24µm



(e) Ra=0.06µm, Rp-v=0.22µm

- (a) wafer backside surface
- (b) 5min. KOH etching
- (c) 10min. KOH etching
- (d) 30sec. polishing
- (e) 60sec. polishing

Fig. 3 3-D surface profiles of each specimen

Fig. 3,4의 표면 조사 결과를 통해 에칭 시간 증가에 따라 bowl 영역의 폭이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, Ra 값의 감소를 통해 깊이는 감소

함을 확인할 수 있다. 일반적으로 wafer 뒷면의 경우는 에칭 시간의 증가에 따라 Ra 값이 작아지는 것으로 알려져 있는데<sup>[8]</sup>, Fig. 4를 통하여 그 결과와 일치하는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. Fig. 5는 베어링율(bearing length ratio)의 조사 결과를 나타낸다. 베어링율이란 측정 구간 내에서 같은 높이를 가진 영역의 총합을 전체 측정 구간의 길이로 나누어서 얻은 값으로 최고 높이(peak)에서 0%로 시작해서 높이가 낮아짐에 따라 누적되어 최저 높이(valley)에서 100%가 되게 나타나는 표면 거칠기의 정도를 나타내는 값이다. 측정 결과 에칭 시간의 증가에 따라 시편에서 피크의 수가 적어지는 것을 확인할 수 있으며, 연마 시간 증가에 따라 피크의 수가 증가함을 확인할 수 있다.

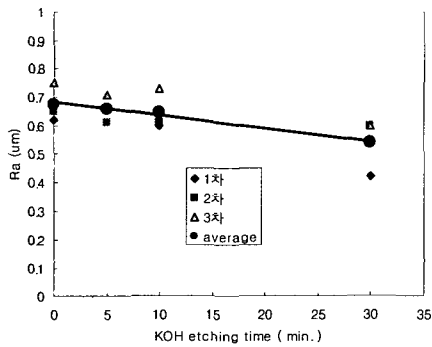


Fig. 4 Ra value change

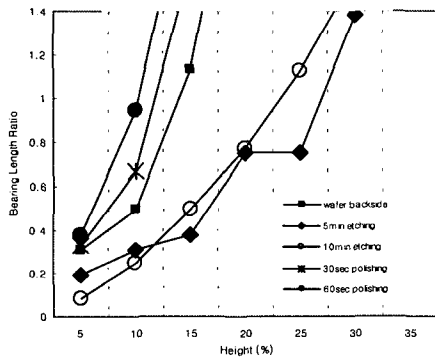


Fig. 5 Bearing length ratio

이러한 현상은 각각의 표면 처리에 따른 평행한 표면과 접촉면의 변화를 확인할 수 있는 것으로서, Fig. 3,4,5와 같은 표면 형상의 변화를 도식적으로 간단히 나타내면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.



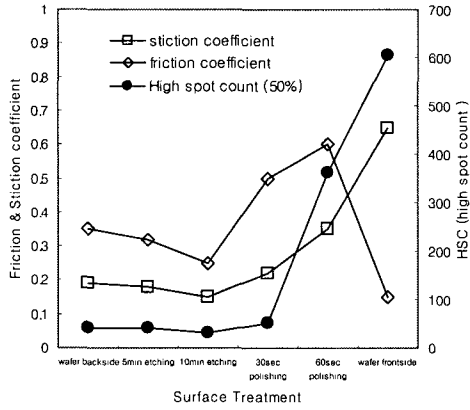
Fig. 6 Schematics of surface topography change according to each treatment

Fig. 6에서 나타난 것처럼 평평한 상대면과의 접촉 상황으로 고려할 때, 에칭 시간의 증가에 의해 형성된 시편은 요철의 개수의 감소에 의해 접촉면이 상대적으로 줄어드는 것으로 판단할 수 있으며, 이러한 표면에서의 polishing 시간의 증가는 요철의 상부를 평평하게 함으로서 접촉 면적을 증가시키는 것으로 생각할 수 있다. 표면 조도 파라미터의 조사를 바탕으로 각 시편에 대한 접촉면적의 변화에 따른 응착 계수와 마찰 계수의 변화를 조사하였다.

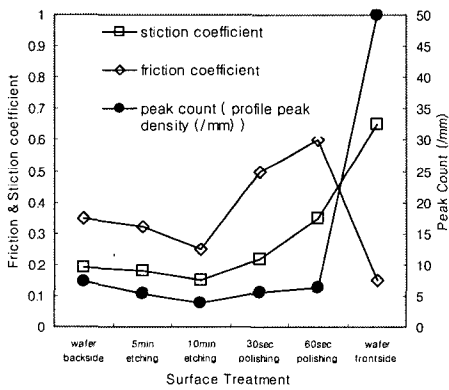
### 3.2 표면 조도 파라미터의 변화에 따른 응착 및 마찰 계수의 변화

표면의 변화에 따른 각각의 표면 조도 파라미터와 응착 계수 및 마찰 계수의 변화는 Fig. 7과 같다. 앞서 예상한 바와 같이 표면은 에칭 시간이 증가할수록 접촉면이라 판단할 수 있는 Pc(peak count) 및 HSC(high spot count)가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 또한 polishing 시간의 증가에 따라 다시 증가하는 경향으로 확인되었다(Fig. 7(a), (b)). 이에 따른 응착 계수와 마찰 계수의 변화 경향을 보면, Pc와 HSC 값의 감소 시에는 응착 및 마찰 계수의 값이 떨어지는 경향을 보이고, Pc와 HSC 증가 시에는 그 값이 다시 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 표면의 피크의 개수의 변화와 응착 및 마찰 계수간에 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

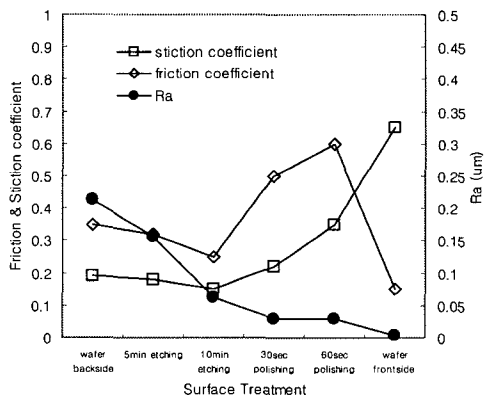
Fig. 7(c)은 Ra 값에 따른 응착 및 마찰 계수를 나타낸 것으로 10 분 에칭된 시편의 표면을 기준으로 Ra 값이 커짐에 따라 응착 및 마찰 계수의 증가 형태를 보이고 있으며, Ra 값이 작아짐에 따라, 응착 및 마찰 계수의 값이 증가함을 보여주고 있다. 위와 같은 현상들을 고려할 때, Ra 값에 상관없이 단위 길이 당 피크의 개수가 많아지면 상대적인 접촉면의 증가로 인해 응착 및 마찰 계수의 증가 현상이 발생하는 것으로 판단된다.



(a) High spot count (50%)



(b) Peak count



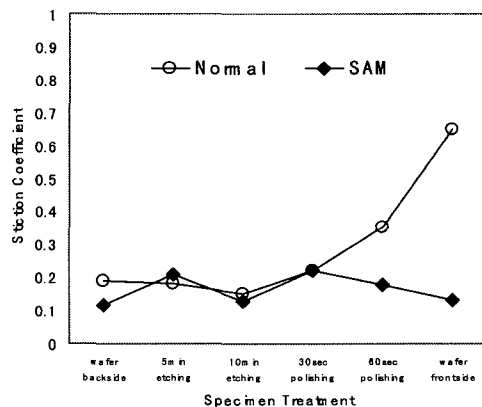
(c) Ra value

Fig. 7 Change of friction and stiction coefficient according to surface parameter

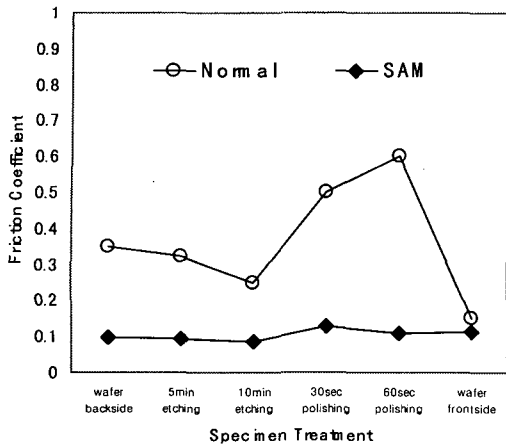
### 3.3 OTS SAM coating 에 따른 응착 계수 및 마찰 계수의 변화

매우 큰 표면적과 아주 작은 간격 사이에 구조물들의 접촉이 발생하게 되면, 구조물이 갖는 탄성 복원력보다 접촉면 간의 응착력이 더 큰 경우가 발생하게 되는데 이러한 응착력 중 일반 대기의 습도에 의해 발생하는 모세관력은 친수성 표면의 경우 meniscus 막이 형성되어 강한 응착을 일으키게 된다<sup>[9,10]</sup>.

이러한 판단에 의해서 위 실험의 결과와 모세관력과의 관계를 확인하기 위해서, OTS SAM(self-assembled monolayer) coated wafer를 이용하였다. OTS(Octadecyltrichlorosilane)는 대표적인 유기 박막의 하나로서, silicon 모재와 화학적 결합을 통해 박막이 형성되고, 표면을 구성하고 있는 분자인 CH<sub>3</sub> 로 인해 표면에너지가 낮아지는 특성을 가지고 있다. 낮아진 표면 에너지로 인해 표면은 소수화(hydrophobic)된 특성으로 인하여 수분에 의한 모세관력이 매우 작은 장점을 가지게 된다. 이러한 특징을 이용하여 부피에 비해 접촉 면적이 크게 되는 미소기계요소의 부품의 제작 및 작동 시에 발생하는 접촉면간의 응착 문제해결을 위해 SAM이 적용되기도 한다<sup>[11]</sup>. SAM의 특성을 이용하여 앞 절의 실험 결과에서 나타난 응착 및 마찰 계수의 변화를 일으키는 주 원인이 접촉 면적에 의한 영향인지와 모세관력에 의한 영향 인지를 판단하기 위해서, 동일한 실험 조건과 Fig. 1(b)의 평행 시편을 OTS SAM으로 coating하여 실험하였는데 결과는 Fig. 8과 같다.



(a) Stiction Coefficient



(b) Friction coefficient

Fig. 8 Comparison of SAM coated flat Si wafer with normal Si wafer

실험 결과 SAM coating 된 평행 시편을 사용한 경우에서 응착 및 마찰 계수의 변화가 적게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 앞선 실험 결과에서 각각의 표면의 변화에 의해 얻은 응착 및 마찰 계수의 변화가 SAM coating된 시편에 의해 제거되는 것으로 나타나는데, 이러한 결과는 구조화 표면에서의 응착 및 마찰 특성은 절대적으로 접촉 면적의 증감에 의한 것 보다는 모세관력 증감에 의한 현상 또한 나타내는 것으로 생각된다.

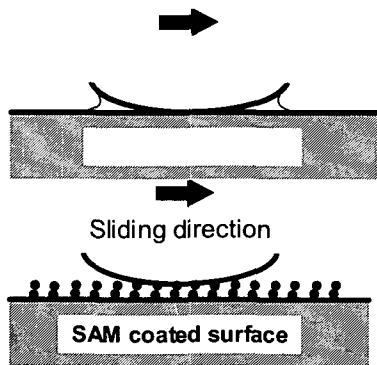


Fig. 9 Schematics of capillary force reduction

표면 형상의 변화에 따른 각각의 표면에서의 단일 요철의 변화는 Fig. 10과 같다. Fig. 10의 단일

요철은 각각의 시편에서 가장 높은 높이를 가진 요철 중 10개를 추출해서 얻은 평균값이다. 에칭 시간의 증가에 따른 요철의 반경의 변화는 20 $\mu$ m 정도의 변화를 가지는데 비해 polishing된 표면의 경우는 2000 $\mu$ m로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

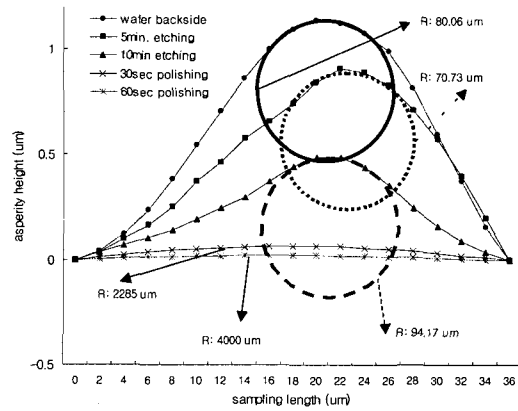


Fig. 10 Asperity of each specimen

일반적으로 구와 평판 사이에 작용하는 모세관력은 Fig. 11의 형상처럼 표현할 수 있는데, 접촉면의 모세관력이므로  $D$ 를 0이라 하면 식(2)로 표현 할 수 있다<sup>[12]</sup>.

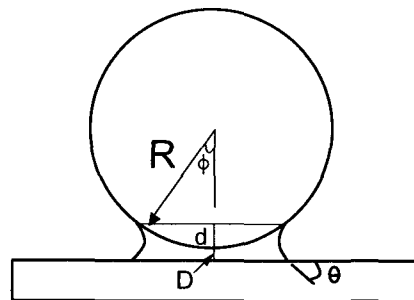


Fig. 11 Meniscus film formation between sphere on flat surface

$$F_{cap} = 4\pi R\gamma_1 \cos \theta \quad (2)$$

$$(\gamma_1 = \text{surface energy of water } 0.07\text{N/m}^2)$$

식(2)에서 나타난 것처럼  $F_{cap}$ (모세관력)에 가장 지배적인 인자는 단일 요철의 반경인 것으로 나타난다. 위 식을 Fig. 10의 데이터로 비교해보면

에칭 시간의 변화에 의한 단일 요철의  $F_{cab}$ 의 변화는  $10^5 N$  order에서 변화하는데 비해, polishing 시간의 증가에 따른 변화는  $10^3 N$  order에서 변화하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 시편의 처리 방식에 따른 log-scale에서의  $F_{cab}$ 의 변화를 나타낸 것이다.

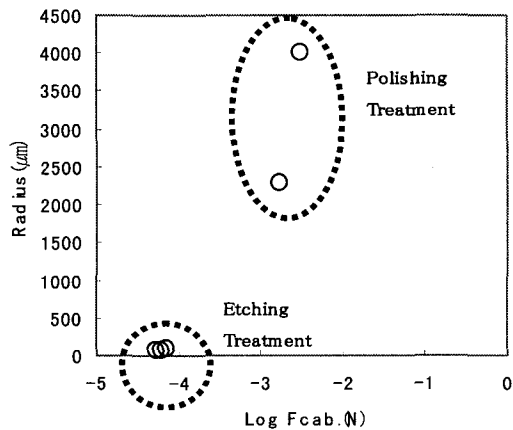


Fig. 12 Capillary force variation according to asperity radius (log-scale)

따라서, 본 실험의 결과의 분석을 통하여 볼 때, 에칭 시간에 따른 마찰 및 응착 계수의 변화는 운동면 간에 접촉하고 있는 요철의 개수에 따라 변화하는 것이며, polishing 시간의 변화에 따른 각각의 요철의 반경의 증감에 의해 마찰 및 응착 계수의 변화를 지배하는 것으로 판단된다. 또한, 이러한 각각의 단일 요철과 상대면 간의 작용력의 주된 원인은 모세관력인 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

(1) KOH 에칭 시간의 증가로 인한 표면 형상의 변화는 요철의 감소에 따른 상대면인 평행 표면과의 접촉면적의 감소 형태로 나타난다. 또한, 에칭 후의 polishing 시간의 증가로 인한 표면 형상의 변화는 요철의 정상부의 선택적인 polishing 효과로 인하여 상대적인 접촉면적이 증가하는 형태로 나타난다.

(2) 표면 조도 파라미터 중  $P_c$ (peak count), HSC(high spot count)의 증가는 응착 및 마찰 계수의 증가 형태로 나타나는데, 이는 상대적인 접촉

요철의 개수가 많아지는 것이 응착 및 마찰 계수와 직접적인 관계가 있는 것으로 판단된다.

(3) 모세관력의 영향을 제거하여 실험한 결과, 구조화 표면(texturing surface)의 종류의 상관 없이 응착 및 마찰 계수는 변화가 미비하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 micro order에서의 마찰 현상이 구조화 표면의 형상(요철의 반경과 개수)이 모세관력에 의해 좌우되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 내용은 과학기술부 21 세기 프론티어개발사업 중 "지능형마이크로시스템개발사업단"과 "한국과학기술연구원(과제번호: 00HN-196)"의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. B. Bhushan, Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, Springer-Verlag New York Inc, 1991.
2. Y. Lee, K. Chun, J. Lee, "Polysilicon Surface Modification Technique to Reduce Sticking of Microstructure," The 8<sup>th</sup> International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, pp. 206-209, 1995.
3. K. Deng, W. H. Ko, "Static Friction Coefficient of DLC Films in MEMS," Sensors and Actuators, Vol. 35, pp. 45-50, 1992.
4. Y. Matsumoto, T. Shimada, M. Ishida, "Novel Prevention Method of Stiction Using Silicon Anodization for SOI Structure," Sensors and Actuators, Vol. 72, pp. 153-159, 1999.
5. 한동국, 김대은, "대기압 저감에 따른 헤드/디스크 인터페이스의 트라이볼로지 특성 분석," 추계윤활학회논문집, pp. 303-309, 1999.
6. 차금환, 김대은, "코팅된 실리콘웨이퍼의 미소마찰마멸특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, Vol. 15, pp. 29-38, 1999.
7. W. Wang, X. Liu, "Investigation of KOH Anisotropic Etching of Si<100> Wafers for Improving Etched Surface Quality," IEEE, pp. 127-130, 1998.
8. R. Divan, H. Camon, "Limiting Roughness in

- Anisotropic Etching," IEEE, pp. 553-556, 1997.
9. C. J. Kim, J. Y. Kim, B. Sridharan, "Comparative Evaluation of Drying Techniques for Surface Micromachining," Sensors and Actuators A, Vol.64, pp. 17-26, 1998.
  10. N.Tas, T. Sonnenberg, H. Jansen, R. Legetnberg and M. Elwenspoek, "Stiction in Surface Micromaching," Journal of MEMS, Vol. 6, pp. 385-397, 1996.
  11. U. Sirinivasan, M. R. Houston and R. T. Howe, "Alkyltrichlorosilane-Based Self-Assembled Monolayer Films for Stiction Reduction in Silicon Micromachines," Journal of MEMS, Vol. 7, pp. 252-260, 1998.
  12. G. Gao, X. Tian, B. Bhushan, "A meniscus Model for Optimization of Texturing and Liquid Lubrication of Magnetic Thin-Film Rigid Disks," Tribology Transactions, Vol. 38, No. 2, pp. 201-212, 1995.