

접촉 면적에 따른 나노/마이크로 마찰 특성

윤의성[†] · R. Arvind Singh · 공호성

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

Nano/Micro Friction with the Contact Area

Eui-Sung Yoon[†], R. Arvind Singh and Hosung Kong

Tribology Research Center, KIST

Abstract – Nano/micro friction with the contact area was studied on Si-wafer (100) and diamond-like carbon (DLC) film. Borosilicate balls of radii 0.32 μm , 0.5 μm , 1.25 μm and 2.5 μm mounted on the top of AFM tip (NPS) were used for nano-scale contact and Soda Lime glass balls of radii 0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm were used for micro-scale contact. At nano-scale, the friction between ball and surface was measured with the applied normal load using an atomic force microscope (AFM), and at micro scale it was measured using ball-on flat type micro-tribotester. All the experiments were conducted at controlled conditions of temperature ($24\pm 1^\circ\text{C}$) and humidity ($45\pm 5\%$). Friction was measured as a function of applied normal load in the range of 0-160 nN at nano scale and in the range of 1000 μN , 1500 μN , 3000 μN and 4800 μN at micro scale. Results showed that the friction at nano scale increased with the applied normal load and ball size for both kinds of samples. Similar behavior of friction with the applied normal load and ball size was observed for Si-wafer at micro scale. However, for DLC friction decreased with the ball size. This difference of in behavior of friction in DLC nano- and micro-scale was attribute to the difference in the operating mechanisms. The evidence of the operating mechanisms at micro-scale were observed using scanning electron microscope (SEM). At micro-scale, solid-solid adhesion was dominant in Silicon-wafer, while plowing in DLC. Contrary to the nano scale that shows almost a wear-less situation, wear was prominent at micro-scale. At nano- and micro-scale, effect of contact area on the friction was discussed with the different applied normal load and ball size.

Key words – nano, micro, friction, tribology, contact area, AFM.

1. 서 론

마이크로/나노 스케일의 트라이볼로지는 극미세 전자 기계 시스템 (MEMS)이나 고밀도 마그네틱 저장 장치 (HDD)와 같은 새로운 기술 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 장치는 수 마이크로미터크기의 작은 부품들로 구성되어 있으며, 미소한 하중 하에서 작동한다. 미소 단위에서는 부피에 대한 표면적의 비율이 높기 때문에, 응축이나 마찰에 영향을 미치는 표면력은 마이크로/나노 트라이볼로지를 정의하는데 중요한 요소라 할 수 있다. 이러한 표면력이 클 경우에는 응착력과 마찰력을 증가시켜서 시스템의 성능을 저감시킬 뿐만

아니라, 마이크로/나노 스케일 장치들의 수명을 감소시킨다[1-3]. 따라서 마이크로/나노 스케일의 트라이볼로지적 특성을 연구하는 동안 이러한 표면력의 영향을 고찰하는 것은 중요하다.

MEMS 분야에서 실리콘은 가격 및 성능의 우수성으로 인하여 광범위하게 사용되고 있으며, 이에 따라 마이크로/나노 트라이볼로지 연구의 대부분은 실리콘 웨이퍼 표면의 트라이볼로지적인 특성을 이해하는 데 중점을 두고 있다[1]. 지금까지는 실리콘 표면의 형태를 물리적으로 변화시키거나[3], 표면을 화학적인 방법으로 변화시켜[4,5] 표면 에너지를 감소시킴으로써 나노 응착, 마찰 및 마모를 줄이려는 방법으로 다양한 연구가 이루어졌다.

고밀도 마그네틱 저장 장치에서의 트라이볼로지 특성

[†]주저자 · 책임저자 : esyoon@kist.re.kr

항상 기술로는, 일반적으로 DLC(Diamond-like Carbon) 코팅과 같은 무정형의 탄소 코팅 방법을 사용하고 있다[6,7]. DLC 코팅은 높은 경도(Hardness)를 가지며, 우수한 내마모성을 가지고 있기 때문에 많은 응용 분야에서 사용되고 있다. 이러한 우수한 트라이볼로지적 특성으로 인하여 DLC 코팅은 모든 컴퓨터 시스템에 사용되고 있는 하드 디스크 드라이브의 슬라이더와 디스크 표면 사이에서 발생하는 트라이볼로지적 문제점을 해결하는데 사용되고 있다[8]. Ando 및 Bhushan 등은 실리콘 웨이퍼에 코팅된 DLC를 이용하여 마찰을 감소시키려는 연구를 수행 하였으며, 또한 DLC 코팅면에 접촉 면적이나 주변 환경과 같이 표면력에 영향을 미치는 요소들을 변화시킴으로써 마찰을 감소시키는 연구도 이루어져 왔다[9-12].

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼 (Si-wafer)와 DLC 코팅 시편 표면에서 여러 종류 크기의 볼 팁을 사용하여 볼의 크기(접촉 면적)가 마이크로/나노 스케일의 응착 및 마찰 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 하였다. 나노 스케일에서는 여러 종류의 AFM 팁들에 대하여 의사-단일 돌기접촉(Pseudo-single Asperity contact)을 가정하여 해석하고 실험을 하였으며, 마이크로 스케일에서는 볼-온-플랫(Ball-on-flat) 타입의 마이크로 마찰시험 장치를 이용하여 실리콘 웨이퍼와 DLC 코팅 필름에 대하여 다양한 크기의 볼을 이용하여 마찰 특성을 실험하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 시편

본 연구에서는 접촉면적의 변화가 마찰력에 미치는 영향을 연구하기 위하여, 나노 스케일에서는 접촉 모드 AFM 팁 (Veeco, NPS)의 끝단에 반지름이 각각 0.32 μm , 0.5 μm , 1.25 μm 와 2.5 μm 인 유리볼(Borosilicate glass ball)을 붙인 팁 시편을 사용하였다. Fig. 1은 반

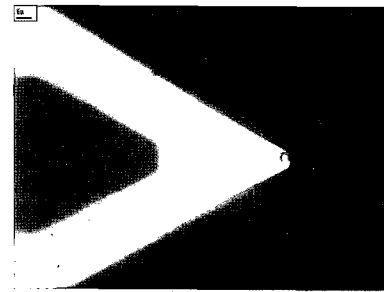


Fig. 1. Optical micrograph of borosilicate ball with radius 1.25 μm used as AFM tip, mounted on the tip of commercial triangular cantilever.

경이 1.25 μm 인 볼이 AFM 팁 끝단에 붙어 있는 시편의 광학현미경 사진을 보여주고 있다. 또한 나노 스케일에서와 마찬가지로 마이크로 스케일 마찰에서도 접촉면적의 변화에 따른 영향을 연구하기 위하여, 반지름이 각각 0.25 mm, 0.5 mm와 1 mm인 유리 볼(Soda lime glass ball)을 사용하였다.

측정 시편으로는 순수한 실리콘 웨이퍼(Si (100))와 실리콘 웨이퍼위에 코팅된 DLC 박막을 사용하였다. DLC 박막은 벤젠(C_6H_6)을 사용하여 r.f. PACVD 방식에 의해 실리콘 웨이퍼 위에 증착하였다[13]. 박막의 두께는 Alpha-step으로 측정하였으며, DLC 박막의 기계적인 성질과 구조에 대하여는 이미 발표되었다[13]. Table 1은 본 연구에서 사용된 실리콘 웨이퍼(Si(100)), DLC 박막 시편과 마찰 실험에 사용된 볼의 물성을 나타내고 있다.

2-2. 실험 장치와 방법

2-2-1. 나노 스케일에서의 마찰 측정

나노스케일의 마찰은 Veeco Instrument사의 멀티모드 SPM(Scanning Probe Microscope)을 사용하여 측정하였다. 나노 마찰력은 LFM(Lateral Force Microscope) 모드에서 측정하였으며, 측정방법은 수직하중을 부가하

Table 1. Properties of the ball materials and the test specimens.

Material	Youngs modulus (GPa)	Poisson's ratio	Water contact angle (Degrees)	Interfacial energy (mN/m)
Borosilicate Glass	63	0.2	-	-
Soda Lime Glass	68	0.16	-	-
Si(100)	165	0.28	22	72
DLC	120	0.26	66	41.3

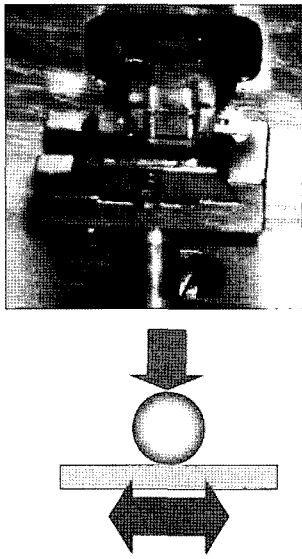


Fig. 2. A close-up view of the ball-on-flat type micro-tribotester.

고 캔틸레버의 길이 방향과 수직인 방향으로 스캔하면서 발생하는 캔틸레버의 변화량인 TMR(Trace minus retrace)의 값을 이용하여 측정하였다[14]. 마찰력은 왕복 행정을 5 μm , 속도를 5 $\mu\text{m/s}$ 로 하여 측정하였으며, 수직 하중을 0-160 nN의 범위에서 변화시키며 실험을 수행하였다. 각 테스트는 15번 이상 반복하였고, 그 평균값을 사용하였다.

2-2-2. 마이크로 스케일에서의 마찰 측정

마이크로 스케일의 마찰은 볼-온-플랫(Ball-on-flat) 타입의 왕복동 마이크로 마찰시험 장치를 이용하여 측정하였으며, Fig. 2에 그 모습을 보여주고 있다. 수직 하중을 1000 μN , 1500 μN , 3000 μN 과 4800 μN 으로 증가시키며 마찰력을 측정하였다. 미끄럼 속도와 왕복동 거리는 각각 1 mm/sec와 3 mm로 하였다. 실험은 15분 동안 수행하였으며, 3번 이상 반복 수행하여 그 평균값을 사용하였다. 모든 실험은 $24 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 온도와 $45 \pm 5\%$ 의 상대습도 상태로 제어되는 항온항습실에서 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 나노 스케일에서의 마찰

Fig. 3과 Fig. 4는 실리콘 웨이퍼와 DLC 코팅에 대하여 수직 하중의 변화에 따른 마찰 특성을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 가해진 수직 하중이 없는

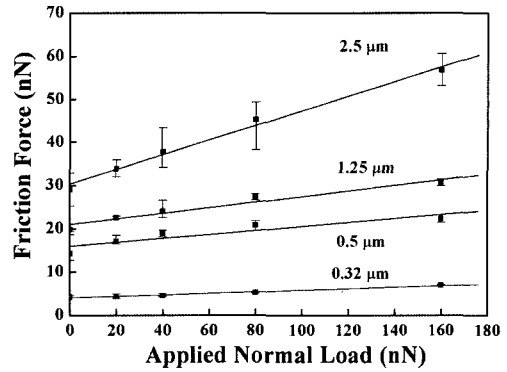


Fig. 3. Friction force measured using AFM in Si-wafer with the applied normal load (Tip radii - 0.32 μm , 0.5 μm , 1.25 μm and 2.5 μm).

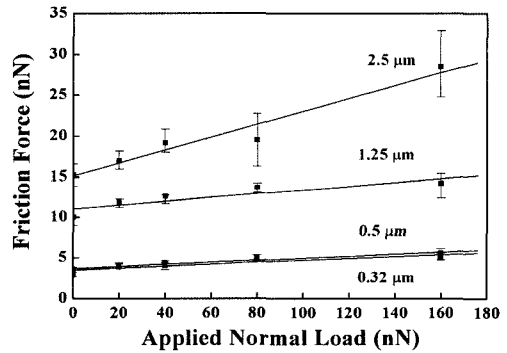


Fig. 4. Friction force measured using AFM in DLC with the applied normal load (Tip radii - 0.32 μm , 0.5 μm , 1.25 μm and 2.5 μm).

경우에도 마찰력이 존재하는데, 이는 마찰력을 발생시키는 여러 원인 중에서 내부 응착력(Adhesive Force)의 영향으로 알려져 있다[15]. 응착력은 대표적으로 표면의 모세관력, 정전기력, 반데르발스력 등의 인력에 의해 영향을 받는다고 알려져 있으며[4], 실리콘 웨이퍼의 경우 친수성[11,16]으로 인하여 모세관력[12]의 증가가 내부 응착력을 증가시키는데 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 실리콘 웨이퍼와는 대조적으로 DLC 필름은 소수성(Table 1)으로 인해 모세관력이 크게 감소됨을 알 수 있다. 식 (1)과 (2)는 메니스커스(meniscus)의 형성과 반데르발스력에 의해 발생된 응착력을 나타내고 있다.

$$F_m = 4\pi R\gamma \cos \theta \tag{1}$$

여기서 R 는 팁의 반경, γ 는 수분의 표면장력, θ 는 실

접촉면에 대한 수분의 접촉각을 나타낸다.

$$F_{adh} = AR/6D^2 \tag{2}$$

여기서 A 는 Hamaker 상수, R 은 팁의 반경, D 는 두 면간의 분리된 거리를 나타낸다.

두 식에서 모두 응착력은 팁의 반경 R 에 직접적으로 의존함을 일수 있으며, 실리콘 웨이퍼와 DLC 박막 모두 팁의 크기가 증가함에 따라 응착력이 증가함을 알 수 있다. 특히 실리콘 웨이퍼에서의 응착력이 DLC 박막에 비해 높은 이유는 표면에너지가 크고 모세관력이 크게 나타나기 때문이다.

실리콘 웨이퍼와 DLC 박막 두 경우에 있어서 나노 마찰력은 수직하중에 따라 선형적으로 증가함을 Fig. 3과 Fig. 4를 통해 확인할 수 있으며, 팁 크기가 증가함에 따라서 마찰력 또한 증가함을 확인할 수 있다. 이는 단일돌기접촉(a single asperity contact)에 있어서 마찰력은 직접적으로 실제 접촉면적과 비례한다는 Bowden and Tabor의 기본적인 마찰 이론으로 설명할 수 있다[17]. 이를 수식화 하면 식 (3)과 같다.

$$F_f = \tau A_s \tag{3}$$

여기서 τ 는 전단강도이고, A_s 은 실제 접촉 면적이다. 실리콘 웨이퍼와 DLC 박막에서의 마찰력은 앞에서 설명된 마찰 이론과 밀접한 관련이 있다. Fig. 5는 수직 하중을 20 nN에서 160 nN까지 변화시키며 각각의 크기가 다른 팁이 실리콘 웨이퍼와 DLC 박막과 접촉하는 면적을 계산한 결과를 보여주고 있다. 접촉면적은 실리콘 웨이퍼의 경우는 친수성 표면이라 응착 효과를 고려하여 JKR 모델을 사용하였으나[18], DLC 박막의 경우 소수성 표면이므로 Hertzian 모델을 사용하였다. Fig. 5로부터 접촉 면적은 가해진 수직 하중과 팁 크

기에 비례하여 증가함을 볼 수 있었다. 이로부터 실리콘 웨이퍼와 DLC 박막에서 가해진 수직 하중과 팁 크기가 커짐에 따라 실제로 접촉하는 면적이 증가하기 때문에 마찰력이 증가한다는 것을 유추하여 알 수 있었다. Bhushan 등이 발표한 논문에서도 상기 시편에 대하여 마찰력과 접촉면적 사이의 연관 관계가 본 연구에서의 결과와 유사함을 보여주었다[11,12].

Fig. 3과 Fig. 4의 그래프에서 실리콘 웨이퍼는 DLC 박막보다 더 큰 마찰력을 보여주었는데, 이는 실리콘 웨이퍼가 DLC 박막보다 더 큰 응착력과 접촉 면적을 가지고 있기 때문임을 알 수 있었다. 실리콘 웨이퍼의 접촉 면적이 DLC 박막에 비하여 큰 이유는 Table 1에서와 같이 높은 표면에너지를 가지고 있기 때문으로 사료된다.

마찰력은 기본적으로 응착력에 영향을 받는다. 특히 마이크로/나노 스케일에서는 가해지는 수직하중이 작기 때문에 응착력의 비중이 커져서, 응착력이 수직하중에 부가적인 하중으로 작용하여 마찰력을 증가시킨다. 따라서 이러한 응착력의 영향을 줄이기 위하여 하중 변화에 따른 마찰력의 변화를 이용하여 마찰계수를 구하고 있다. Fig. 6은 Fig. 3과 Fig. 4의 그래프에서 수직하중 변화에 따른 마찰력의 변화 기울기를 이용하여 구한 실리콘 웨이퍼와 DLC 박막의 팁 크기에 따른 마찰 계수를 보여주고 있다. 실리콘 웨이퍼 시편의 경우 마찰계수가 DLC 박막 보다 더 크게 나타났으며, 팁 크기에 따라 증가하는 마찰 계수의 변화율 또한 DLC 박막의 경우보다 더 크게 나타났다. 앞에서 설명한 바와 같이 실리콘 웨이퍼는 DLC 박막보다 더 큰 표면 에너지를 가지고 있어 넓은 접촉 면적을 갖게 되며, 이로 인하여 더 큰 마찰력의 증가를 야기 시키고,

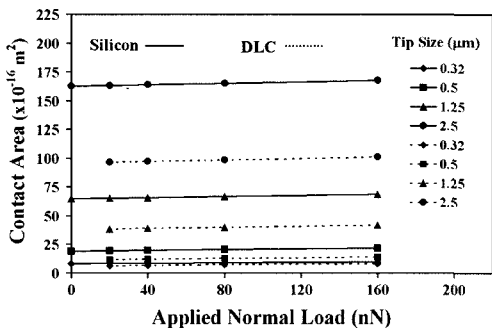


Fig. 5. Estimated contact area for Si-wafer and DLC with the applied normal load for various tip sizes.

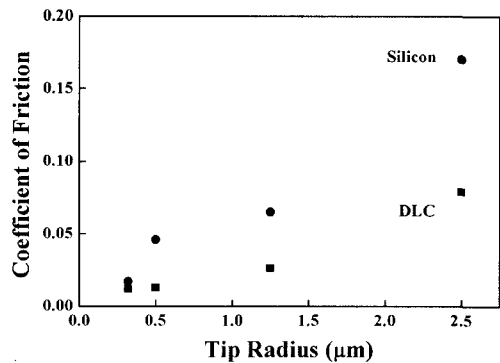


Fig. 6. Coefficient of friction for Si-wafer and DLC with the tip size.

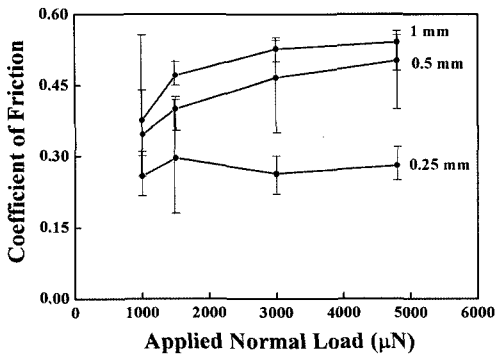


Fig. 7. Coefficient of friction of Si-wafer with the applied normal load, against glass balls of radii 0.25 mm, 0.5 mm and 1 mm.

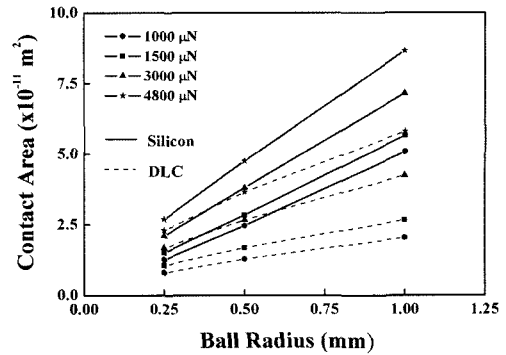


Fig. 9. Estimated contact area for Si-wafer and DLC with the ball size (Applied normal loads - 1000 μN , 1500 μN , 3000 μN and 4800 μN).

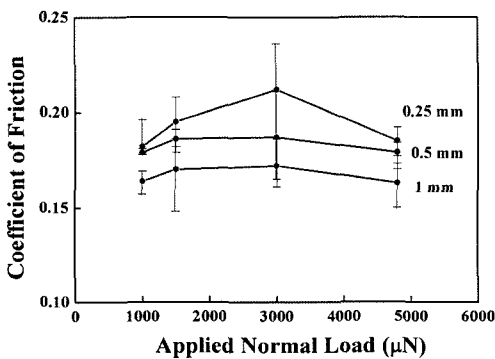


Fig. 8. Coefficient of friction of DLC with the applied normal load, against glass balls of radii 0.25 mm, 0.5 mm and 1 mm.

따라서 실리콘 웨이퍼의 마찰 계수를 증가시키게 된다.

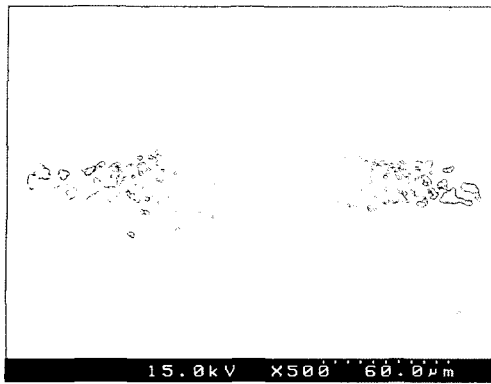
3-2. 마이크로 스케일의 마찰

Fig. 7과 Fig. 8은 여러 종류 크기의 볼에 대하여 실리콘 웨이퍼와 DLC 박막의 하중 변화에 따른 마이크로 스케일의 마찰 계수 변화를 보여주고 있다. Fig. 7에서 하중이 증가함에 따라 실리콘 웨이퍼의 마찰 계수가 증가함을 알 수 있었으며, 또한 볼의 크기가 증가함에 따라라도 증가한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 접촉면의 크기가 직접적으로 응착력에 영향을 미치므로 마찰력이 증가되며 마찰계수도 증가된다는 것을 알 수 있었다. 이러한 접촉면적은 나노 스케일의 경우에서와 같이 실리콘 웨이퍼는 JKR 모델을, DLC 박막은 Hertzian 모델을 사용하여 구하였으며(Fig. 9 참조), 접촉 면적이 볼 크기의 증가에 따라 증가하며 가해진 하중의 증가에 따라라도 증가한다는 것을 Fig. 9로 부

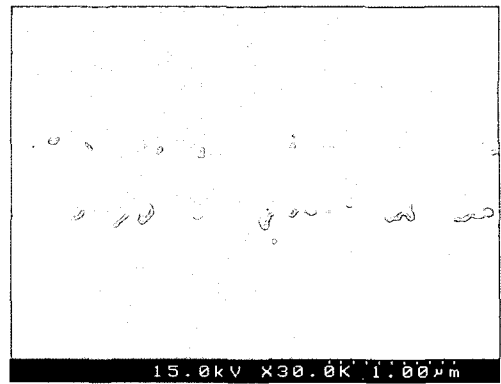
터 알 수 있었다. 반면에 DLC 박막의 경우 마찰 계수는 Fig. 8에서와 같이 볼의 크기가 증가함에 따라 감소하였다. 즉, DLC 박막의 마찰 메커니즘이 다르게 나타남을 알 수 있었다.

실리콘 웨이퍼에서는 표면에너지가 커서 응착에 크게 영향을 미치며, 이로 인하여 고체간 응착(solid-solid-adhesion)에 의해 마찰 특성이 크게 지배를 받는다. Gardos[19]는 실리콘 웨이퍼가 슬라이딩 접촉시 전단에 의해 유도된 마이크로 크랙킹(shear-induced microcracking)에 의해 응착 마찰이 크게 나타난다고 하였다. Fig. 10은 3000 μN 하중 하에서 실험한 반지름 0.5 mm 볼 표면과 실리콘 웨이퍼의 마모 트랙을 보여주고 있다. 마모에 의한 입자(wear debris)들이 이들 마모 트랙에서 뚜렷이 볼 수 있으며 구슬 표면에도 둘러붙어 있는 모습을 볼 수 있다. 이러한 결과들로부터 실리콘 웨이퍼의 마찰 메커니즘의 주된 요소가 응착임을 알 수 있었다.

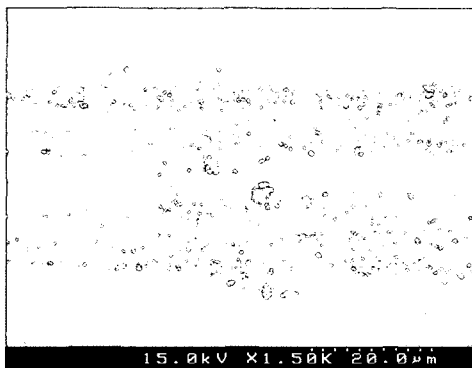
Fig. 11(a)는 수직 하중 3000 μN 하에서 반지름 0.25 mm의 볼을 이용하여 실험한 DLC 박막의 마모 트랙을 보여주고 있다. 마모 트랙은 전형적인 쟁기질 마찰의 형상과 볼에 의해 소성 변형된 모습을 보여주고 있으며, 마모 트랙에는 마모 입자들이 전혀 존재하지 않았다. Fig. 11(b)는 Fig. 11(a)에서 보여주는 DLC 박막의 마모 트랙 높이를 측정하기 위하여 AFM으로 측정된 단면 형상(surface profile)을 보여주고 있다. 단면 형상은 마모 트랙을 따라서 두 개의 피크가 형성되어 있었으며, 쟁기질 마찰에 의해 형성되었음을 알 수 있었다. 일반적으로 DLC 박막의 마찰은 상대재료인 볼 표면에 DLC가 물질 전이되며, 말려진 형태의 마모



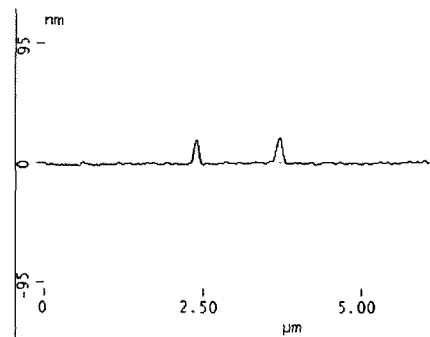
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 10. SEM images of (a) ball surface and (b) wear tracks in Si-wafer tested with glass ball of 0.5 mm radius at 3000 N normal load.

Fig. 11. (a) SEM images of the wear track in DLC against the glass ball of 0.25 mm radius at 3000 N normal load and (b) cross-sectional view of the depth profile of the wear track by AFM.

입자들이 마모 트랙 표면에 형성된다고 알려져 있다 [20,21]. 그러나 Fig. 11(a)의 마모 트랙에서 마모 입자들이 존재하지 않고 볼에 형성된 물질 전이 층이 없다는 결과로부터, DLC 박막의 주된 작동 메커니즘이 쟁기질(plowing) 마찰임을 알 수 있었다. 쟁기질 마찰에 의해 발생하는 마찰력(F_p)은 식 (4)에서 보는 바와 같이 볼의 크기에 반비례 한다고 알려져 있다[22]. 이것은 Fig. 8에서 DLC 박막의 마찰계수가 볼 크기의 증가에 따라 감소한다는 결과가 쟁기질 마찰에 의해 발생되었음을 설명하여 준다.

$$F_p = d^2 p / 12R \tag{4}$$

여기서 D 는 트랙의 폭이고, P 는 표면에서 재료를 옮기는데 필요한 평균 압력이며, R 은 슬라이더의 곡률반경이다. 따라서 이러한 결과들로부터 본 실험에 사용된 DLC 박막의 주된 마찰 메커니즘이 쟁기질 마찰임

을 알 수 있었다.

4. 결 론

다양한 크기의 볼 팁을 이용하여 실리콘 웨이퍼와 DLC 박막에 대하여 접촉 면적이 마이크로/나노 스케일의 마찰에 미치는 영향에 대하여 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나노 스케일에서 마찰력은 수직 하중과 볼 팁 크기가 증가함에 따라 증가하였으며, 이는 수직 하중과 볼 팁 크기가 증가함에 따라 접촉면적이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.
2. 나노/마이크로 스케일에서 DLC 박막의 마찰 특성이 실리콘 웨이퍼에 비해 좋은 것은 코팅에 의한 낮은 표면에너지의 영향으로 접촉 면적이 작아지고 응착력 작아졌기 때문이다.

3. 마이크로 스케일에서 볼의 크기가 증가함에 따라 실리콘 웨이퍼의 마찰 계수는 증가하였으나, DLC 박막의 경우 감소하였다. 즉, 표면에서의 마찰 메커니즘이 다르게 나타났으며, 본 연구로부터 실리콘 웨이퍼의 마이크로 스케일 마찰 메커니즘은 고체간의 응착 마찰이며, DLC 박막의 경우는 쟁기질 마찰이었음을 알 수 있었다.

4. 나노 스테일에서의 마찰 특성은 주로 재료 표면의 응착 특성에 의해 지배되었지만, 마이크로 스케일에서의 마찰 특성은 마모 거동에 의해 영향을 받았다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 나노메카트로닉스기술개발사업(05K1401-00930)의 연구비 지원을 받아 수행되었음. DLC 코팅 시편을 제작해 주신 한국과학기술연구원의 이광열 박사님께 감사함을 드립니다.

참고 문헌

- Bhushan, B., "Tribology on the macroscale to nanoscale of microelectromechanical system materials," *Proc Instn Engrs, ImechE Part J*, Vol. 215, pp. 1-18, 2001.
- Komvopoulos, K., "Head-disk interface contact mechanics for Ultrahigh density magnetic recording," *Wear*, Vol. 238, pp. 1-11, 2000.
- Komvopoulos, K., "Surface engineering and microtribology for microelectromechanical systems," *Wear*, Vol. 200, pp. 305-327, 1996.
- Maboudian, R. and Howe, R. T., "Critical review: Adhesion in surface micromechanical structure," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 15, No.1, pp. 1-20, 1997.
- Bhushan, B., Kulkarni, A.V., Koinkar, V. N., "Microtribological characterization of self-assembled and langmuir-blodgett monolayers by atomic and friction force microscopy," *Langmuir*, Vol. 11, pp. 3189-3198, 1995.
- Memming, R., Tolle, H.J. and Wierenga, P.E., "Properties of polymeric layers of hydrogenated amorphous carbon produced by a plasma-activated chemical vapour deposition process II: Tribological and mechanical properties," *Thin Solid Films*, Vol. 143, pp. 31-41, 1986.
- Grill, A., "Review of the tribology of diamond-like carbon," *Wear*, Vol. 168, pp. 143-153, 1993.
- Zhao, Z. and Bhushan, B., "Tribological performance of PFPE and X-1P lubricants at head-disk interface. Part I. Experimental results," *Tribology Letters*, Vol. 6, pp. 129-139, 1999.
- Ando, Y. and Ino, J., "Friction and pull-off forces on submicron-size asperities," *Wear*, Vol. 216, pp. 115-122, 1998.
- Ando, Y., "The effect of relative humidity on friction and pull-off forces measured on submicron-size asperity arrays," *Wear*, Vol. 238, pp. 12-19, 2000.
- Bhushan, B. and Sundararajan, S., "Micro/Nanoscale Friction and Wear mechanisms of thin films using atomic force and friction force microscopy," *Acta mater.*, Vol. 46, No. 11, pp. 3793-3804, 1998.
- Bhushan, B. and Dandavate, C., "Thin-film friction and adhesion studies using atomic force microscopy," *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, No. 3, pp. 1201-1210, 2000.
- Lee, K.-R., Eun, K. Y. and Rhee, J. S., "Structure and mechanical properties of nitrogen incorporated diamond-like carbon films," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 356, pp. 233-238, 1995.
- Ruan, J. and Bhushan, B., "Atomic scale friction measurements using friction force microscopy : part II," *ASME J. Tribol.*, Vol. 116, pp. 378-388, 1994.
- Bhushan, B. and Kulkarni, A. V., "Effect of normal load on microscale friction measurements," *Thin Solid Films*, Vol. 278, pp. 49-56, 1996.
- Liu, H., Ahmed, I.-U. and Scherge, M., "Microtribological properties of silicon and silicon coated with diamond like carbon, octadecyltrichlorosilane and steric acid cadmium salt films: A comparative study," *Thin Solid Films*, Vol. 381, pp. 135-142, 2001.
- Bowden, F. P., Tabor, D., *Friction and Lubrication*, London, Methuen, 1956.
- Johnson, K. L., Kendall, K. and Roberts, A. D., "Surface energy and contact of elastic solid," *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 324, pp. 301-313, 1971.
- Gardos, M. N., "Surface chemistry-controlled tribological behaviour of Si and Diamond," *Tribology Letters*, Vol. 2, pp. 173, 1996.
- Bhushan, B., *Modern Tribology Handbook*, Vol 2, CRC Press, pp. 871-908, 2001.
- Kim, D. S., Fischer, T. E. and Gallois, B., "The effects of oxygen and humidity on friction and wear of diamond-like carbon films," *Surf. Coatings Technol.*, Vol. 49, pp. 537-542, 1991.
- Bowden, F. P. and Tabor, D., *The friction and lubrication of solids*, Clarendon Press, Oxford, pp. 90-121, 1950.