

# SPM을 이용한 접촉조건 변화에 따른 미소응착 특성 연구

윤의성, 박지현, 양승호, 공호성  
한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

## Effect of Contact Conditions on the Micro-adhesion Characteristics using SPM

Eui-Sung Yoon\*, Ji Hyun Park, Seung Ho Yang, Hosung Kong  
Tribology Research Center, KIST

**Abstract**-An experimental study was carried out to investigate the effect of nano-contact condition on the nano-adhesion phenomena. SPM(scanning probe microscope) tips with different radius of curvature were fabricated by a series of masking and etching processes. DLC(diamond-like carbon) and W-DLC (tungsten-incorporated diamond-like carbon) were coated on (100) silicon wafer by PACVD(plasma assisted chemical vapor deposition). Pull-off forces of pure Si-wafer, DLC and W-DLC were measured with SPM(scanning probe microscope). Also, the same series of tests were carried out with the tips with different radius of curvature. Results showed that DLC and W-DLC showed much lower pull-off force than Si-wafer and Pull-off force increased with the tip radius.

**Key Words;** adhesion, tip radius, SPM, friction

### 1. 서론

MEMS를 구성하는 미소기계요소들은 작동 시 요소 자체의 크기가 작기 때문에 부피 일이나 관성력이 무시될 수 있으며, 따라서 작은 고체 표면 사이의 상호작용력에 의해서도 심각한 영향을 받을 수 있다. 특히, 미소응착력으로 대표되는 이러한 미소표면간의 상호작용력은 MEMS기계요소의 실제 제작 공정부터 사용시 까지 광범위하게 나타나기 때문에 이에 대한 근본적인 이해 없이는 MEMS 기계요소의 적절한 가공 및 사용은 많은 문제점을 가지고 있다고 할 수 있다.

최근, 여러 연구자들이 이러한 미소 표면간의 상호작용력에 관하여 연구되기 시작하

었는데, Israelachvili와 Tabor는 van der Waals force acting과 cleavage 평면과의 attraction action을 측정하였고[1], Johnson [2]과 Derjaguin[3]은 Hertzian 접촉에서 구형표면의 이론적 접촉면적을 계산하였다. 후에 Skinner 와 Gane[4]과 Ando[5]는 미소수직력 조건에서 표면간의 연속적인 마찰력과 응착력을 측정하고 이들간의 상호관계를 연구하였다.

최근, Ando[6]는 미소응착력이 전기적 charge와 관련이 없다면 주로 Van der Waals force에 의해 발생된다는 점에 착안하여 인위적으로 표면 형상을 바꾸어서 그때의 마찰과 미소 응착력을 측정하였으며 Si-wafer와 AFM의 scanning probe 사이의 미

소 응착력의 측정에 의해, 응착력과 마찰력 및 응착력과 표면요철 형상 사이의 관계를 modelling 하였다.

그러나 Ando의 model은 단순히 순수한 Si wafer에 대한 하나의 지표를 제시한 것이며 DLC등의 다른 물질에 대한 연구는 아직 수행된 바 없다. 따라서 본 논문에서는 SPM tip의 끝단부 반경을 변경하여 Nano-flat 평면인 Si-wafer, DLC 및 W-DLC와 tip간의 pull-off force를 측정함으로써 실제 미소하중 단일 요철(asperity)접촉에서의 응착력을 실험적으로 측정하여 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 시편

실험장치는 DI사(Digital Instrument Co.)의 Multimode SPM을 사용하였다. 실험에 사용된 SPM을 Fig. 1에 나타내었다. 실험은 일정습도(RH 27-33 %) 및 온도(20-24 °C) 조건에서 실시하였다. 실험시 사용된 SPM용 tip은 접촉부 반경이 15 nm, 22 nm, 50 nm인 3가지를 사용하였다. 이때, 접촉부 반경 15 nm(NPS, DI) 및 22 nm인(NP, DI) tip은 상용 제품을 사용하였으며, 접촉부 반

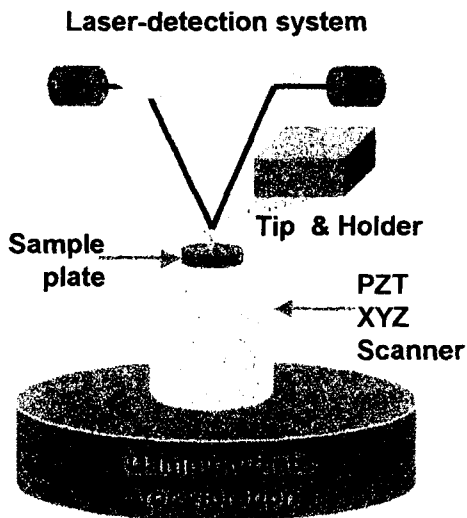
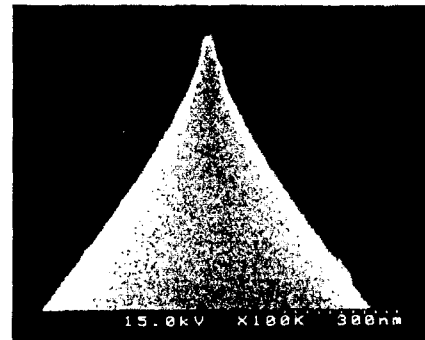
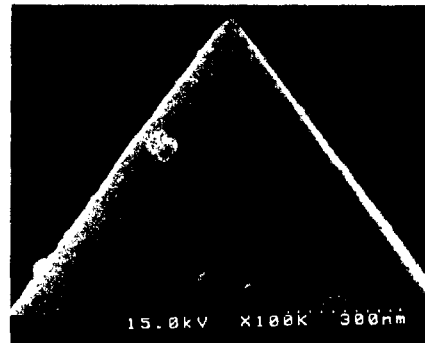


Fig. 1. Scanning probe microscope.

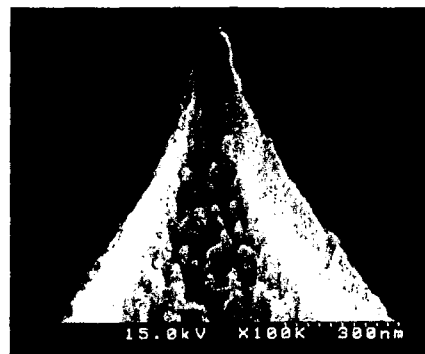
경 50 nm인 tip은 NPS tip을 PR(photo resist)코팅 후 Positive Development에 의하여 tip 끝부분이 노출되게 한 후 불산(HF)을 사용하여 etching하여 제작하였다. 본 실험에 사용된 tip의 SEM(scanning electron microscope)사진을 Fig. 2에 나타내었다.



(a) R=15 nm



(b) R=22 nm



(c) R=50 nm

Fig. 2. SEM photographs of tips showing different tip radius.

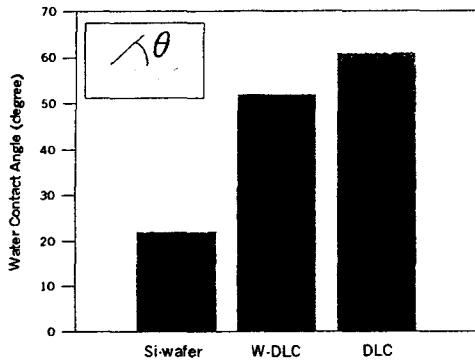
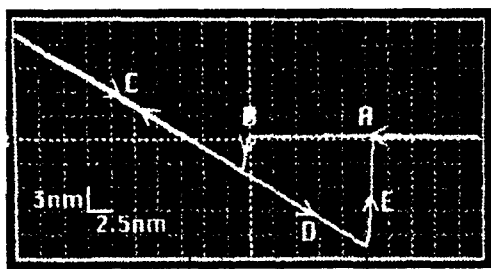


Fig. 3. Water contact angles of Si-wafer, W-DLC and DLC surfaces.

실험에 사용된 plate는 Si wafer (100) 및 DLC, W-DLC를 사용하였다. DLC 및 W-DLC는 rf-PACVD(radio frequency PACVD)방법으로 1  $\mu\text{m}$ 의 두께로 코팅한 것을 사용하였다. 이때 각각의 젖음각(water contact angle)은 Contact Anglemeter (ERMA, Goniometer type)을 사용하여 측정하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

실험용 tip 및 plate는 실험전 에탄올로 세척 후 질소가스로 잔여 입자를 제거한 후 실험



where, A  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  C : Extending  
C  $\rightarrow$  D  $\rightarrow$  E : Retracting

Fig. 4. Force vs. displacement plot showing the normal adhesion distance.

하였다. 미소 응착력 실험은 수직하중 50-100 nm을 가하여 실험하였으며 응착력은 Fig. 4와 같이 수직방향의 cantilever 변위인 h값을 수직력으로 환산한 pull-off force를 사용하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

서로 다른 3종류의 tip들과 Si-Wafer (100)간의 응착력 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5로부터 응착력은 재료의 종류에 관계없이 tip 선단 반경에 비례하여 증가함을 알 수 있었다. JKR model(1)에 의하면, 응착력( $P_{\text{pull-off}}$ )은 plate와 접촉하는 tip 선단의 곡률반경에 비례하게 되는데 Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 실험 결과에서도 tip선단의 곡률반경을 15 nm, 22 nm, 50 nm로 증가시킨 경우 tip과 Si-wafer간의 응착력은 이와 비례하여 증가한 것을 알 수 있었다. 따라서, 이는 식(1)에 나타낸 JKR 모델[2]을 만족하는 결과라고 할 수 있다.

$$P_{\text{pull-off}} = -\frac{3}{2} \gamma \pi R \quad (1)$$

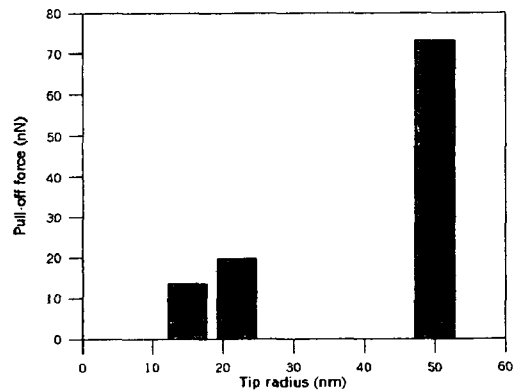


Fig. 5. Pull-off force between tip and Si-wafer.

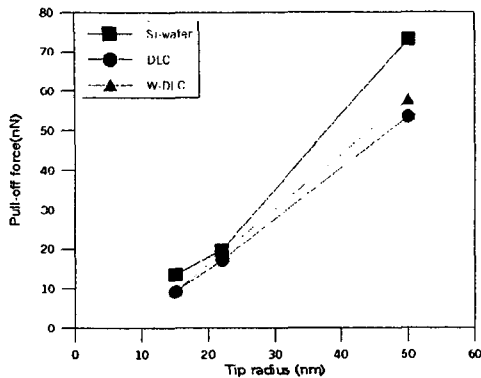


Fig. 6. Pull-off force vs. tip radius of W-DLC and DLC coated Si-wafers.

여기서,  $P_{\text{pull-off}}$ 는 pull-off force,  $\gamma$ 는 응착 일,  $R$ 은 tip의 선단 반경이다. 이때, Fig. 5에서 알 수 있듯이 응착력과 tip선단 곡률이 완전한 선형적 비례관계를 보이지 않은 것은 실험 시 상대습도가 30%이었음에도 불구하고 Si-wafer의 접촉각(water contact angle)이  $22^\circ$ , 즉, 친수성(hydrophilic characteristic)을 보임에 의하여 표면에 응결된 수분의 모세관력이 응착력에 기여하여 나타난 현상으로 판단된다.

Fig. 6에 Si-wafer, W-DLC와 DLC의 응착력 측정 결과를 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, Si-Wafer보다 접촉각이 큰 W-DLC와 DLC 코팅층의 경우에는 Si-wafer의 경우와는 달리 응착력과 tip 선단곡률반경 간의 선형적 비례관계가 나타난 것을 알 수 있다. 이는 JKR모형을 만족하는 결과로서 W-DLC와 DLC의 경우에는, 수분 응결에 의한 모세관력이 응착력의 주된 원인이 아니라는 것을 나타내고 있다. 또한, Si-wafer에서보다 DLC에서의 응착력이 작게 나타난 결과를 볼 수 있는데, 이는 DLC가 silicon보다 표면에너지가 작고, 수분에 의한 영향이 작은 물리적 특성을 가진 결과라고 사료된다.

#### 4. 결론

이상과 같은 연구를 통하여 다음의 결론을 유추해낼 수 있었다.

1. 재료의 응착력은 그 접촉압력이 작을 경우 접촉하는 미세 돌기의 선단 곡률에 비례하는 경향이 있다. 이러한 경향은 시편으로 사용된 DLC 및 W-DLC에서 공통적으로 나타났다.
2. Si-wafer의 경우 선형적인 비례관계가 나타나지 않은 것은 Si-wafer의 표면에 존재하는 natural oxide에 의하여 표면이 친수성화 되어, 작은량의 응착수분에 의해서도 모세관력의 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.
3. Silicon보다는 DLC 및 W-DLC에서의 응착력이 작게 나타났다.

#### 후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 21세기 프론티어연구개발사업 중 지능형마이크로시스템 개발 사업의 지원을 받아 수행하였습니다. 본 연구를 위해 DLC와 W-DLC 코팅에 도움을 주신 KIST 박막기술연구센터의 이광렬 박사님과, SPM tip 가공에 도움을 주신 KIST 마이크로시스템센터의 문성욱 박사님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. J.N. Israelachvili and D. Tabor, "The measurement of Van der Waals dispersion forces in the range 1.5 to 130 nm", Proc. R. Soc. London, A 331, pp. 19-38, 1972.
2. K.L. Johnson, K. Kendall and A.D. Roberts, "Surface energy and the contact of elastic solid", Proc. R. Soc. London, A324, pp. 301-313, 1971.
3. B.V. Derjaguin, V.N. Muller and Yu.P. Toporov, "Effect of contact deformation on the adhesion of particles", J. Colloid Interfaces Sci., 53, pp. 314-325, 1975.

4. J. Skinner and N. Gane, "Sliding friction under negative load", *J. Phys. D*, 5, pp. 2087-2094, 1972.
5. Y. Ando, Y. Ishikawa and T. Kitahara, "Friction characteristics and adhesion force under low normal load", *Trans. ASME J. Tribol.*, 117, pp. 569-574, 1995.
6. Y. Ando and J. Ino, "The effect of asperity array geometry on friction and pull-off force", *Trans. ASME J. Tribol.*, 119, pp. 781-787, 1997.