

OTS SAM의 미소 응착 특성에 관한 실험적 연구

윤의성[†] · 박지현 · 양승호 · 한흥구 · 공호성

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

An Experimental Study on the Nano-adhesion of Octadecyltrichlorosilane SAM on the Si Surface

Eui-Sung Yoon[†], Ji Hyun Park, Seung Ho Yang, Hung-Gu Han and Hosung Kong

Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

Abstract – Nano adhesion between SPM (scanning probe microscope) tips and OTS (octadecyltrichlorosilane) SAM (self-assembled monolayer) was experimentally studied. Tests were performed to measure the nano adhesion and friction in both AFM(atomic force microscope) and LFM(lateral force microscope) modes in various conditions of relative humidity. OTS SAM was formed on Si-wafer (100) surfaces, and Si_3N_4 tips of different radius of curvature were used. When the surface was hydrophobic, the adhesion and friction forces were found lower than those of bare Si-wafer. Results also showed that micro-adhesion force increased as the relative humidity and the tip radius of curvature increased. The main parameter for affecting the micro-adhesion was found absorbed humidity on the contact surface. These results were discussed with the JKR model and a capillary force caused by absorbed water.

Keywords – octadecyltrichlorosilane, SAM, self-assembled monolayer, SPM, micro, nano, friction, adhesion.

1. 서 론

최근 미세가공(micromachining) 기술에 힘입어 태동된 MEMS 기술은 기존의 기계요소에 비하여 그 크기가 작고 정밀한 작동을 하는 기계요소의 개발을 가능하게 하였으며, 이를 통하여 정밀센서, 의료용기기 및 정보저장기기의 혁신적 발전을 이룩할 수 있었다. 특히, 이 기술은 기존의 기계가공과는 달리 반도체 산업에서 주로 사용하였던 표면미세가공(surface micro-machining)과 몸체미세가공(bulk micro-machining) 기술을 사용하기 때문에, 단일처리공정(batch process)에 의하여 대량의 미소기기를 전자회로와 함께 기판 상에 집적화 할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 이러한 미소기계요소들은 반도체 제작공정을 사용하기 때문에, 주로 실리콘(silicon)과 같은 반도체 재료들을 사용하여 복잡한 공정을 통하여 제작되게 되는데, 마지막 공정인 릴리

즈 에칭(release etching), 세정(rinsing) 및 건조(drying) 과정 중 제작된 대상물이 기판과 접촉되어 분리되지 않는 현상이 종종 발생하게 된다. 공정 중 발생하는 응착(release-related adhesion) 현상은 잔유물 점착(solid bridging), 반데르 발스력(van der Waals force) 및 흡착습기의 모세관력 등과 같은 원인에 의하여 발생되는데, 특히 실리콘의 경우 H_2O_2 등을 사용하여 건조 할 때에 발생하는 산화층인 SiO_2 는 그 수분 접촉각이 30° 이하가 될 정도로 친수성을 나타내므로, 표면에 흡착습기층이 존재하는 경우 이로 인한 응착현상의 발생 가능성이 항상 존재하고 있다. 거시적인 기계요소에서는 관성력에 의해 지배되기 때문에 표면력에 의해 지배되는 이러한 힘들이 작아서 무시될 수 있었으나, 미소 기계요소에서는 이와 같이 두 재료 표면이 상호작용력에 의하여 점착되는 응착 현상이 중요시 되어지고 있다 [1,2]. 미소기계요소의 작동중에 나타나는 응착(in-use adhesion)은 미소 표면력에 의하여 점착된 두 표면간의 응착력이 기계요소의 구동력보다 큰 경우에 나타나며,

[†]주저자 · 책임저자 : esyoon@kist.re.kr

주로 정전기력(electro-static force), 습기에 의한 모세관력 등에 의해 발생되어, 미소 기계요소를 고착(freeze out)시킬 뿐만 아니라 미소 표면 파손의 원인으로 작용하기도 한다[3-6].

흡착 습기에 의해 발생하는 응착력이 반데르 발스력 및 정전기력보다 크다는 사실 때문에, 이러한 미소 응착 현상을 감소시키려는 시도가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있는데, 대표적으로 표면의 형상을 개선하여 접촉면적을 줄이는 표면 텍스처링(surface texturing) 방법과[7,8] 표면의 물리-화학적 특성을 개선하는 DLC(diamond-like carbon) 코팅, 불화탄소(fluorocarbon) 코팅 및 SAM(self-assembled monolayer) 방법이 연구되어지고 있다[9]. 이러한 기술들은 표면을 소수성(hydrophobic)으로 변화시키며 또 낮은 표면에너지가 지게 한다. 이 중 SAM 코팅은 모재와의 결합이 화학적인 반응에 의해 형성되므로 모재와의 결합력이 우수하고 표면 에너지가 낮으며, 그 표면이 소수성을 나타내므로 수분에 의한 모세관력이 매우 작다는 장점으로 인해 MEMS 부품의 응착 저감을 위한 해결책으로 제시되고 있으며 다양한 분야에서 응용이 확대 되고 있다.

최근 MEMS 적용을 위한 SAM 코팅에 관한 연구는 Maboudian[3]에 의하여 많이 수행되어졌는데, Maboudian[10], Carraro[11] 등은 AFM을 이용하여 산화된 Si위에 형성되는 OTS(octadecyltrichlorosilane) SAM의 성장 패턴을 관찰하여, 성장 기구가 온도에 따라 3종류로 구별되어 나타난다고 발표하였다. 또한 Si 표면 위에 alkylsiloxane, octadecylsiloxane, Alkyl SAM 코팅[12-14], Au 표면 위에 alkanethiol SAM 코팅[15] 및 Si₃N₄ 표면 위에 alkylsiloxane SAM 코팅[16] 등의 각종 SAM 코팅이 가능한 용액에 대하여 많은 연구들이 행하여졌다. 현재까지 SAM에 관한 연구는 형성 과정 및 단순 적용에 관한 연구였으며, 상대 운동을 하는 미소 기계요소에 적용하기 위한 트라이볼로지적 관점에서의 연구는 많이 행하여지지 못하였다.

본 연구에서는 우수한 소수성 표면을 가지며, 단일 분자층 만을 표면에 생성시키기 때문에 피막 형성 시 MEMS 요소의 크기(dimension)를 크게 변화시키지 않고 원하는 표면 특성을 얻을 수 있다는 장점을 가진 OTS-SAM 코팅을 Si-wafer (100) 위에 행하고, OTS SAM 코팅이 응착력 및 마찰력 변화에 미치는 영향에 대하여 트라이볼로지적 관점에서 고찰하였다. 응착력 시험은 상용 SPM을 이용하였으며, SPM tip의 반경 변화와 습도 변화에 따른 응착력 특성 변화가 미소 표

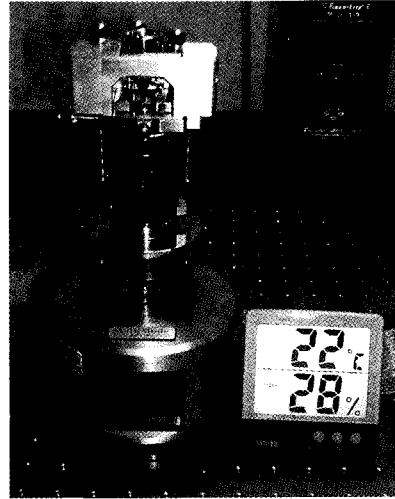


Fig. 1. Scanning probe microscope.

면간의 응착력에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다.

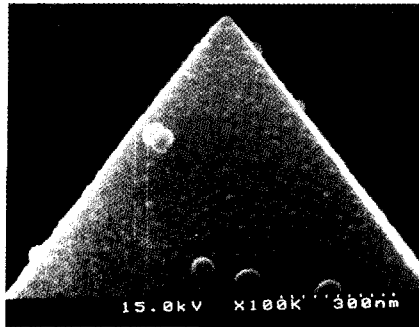
2. 실험

2-1. 실험장치 및 시편

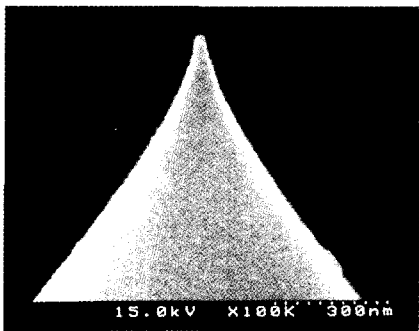
본 연구에서는 MEMS 요소의 접촉부 미소표면들간의 상호작용을 모사하기 위하여 DI(Digital Instrument)사의 Multimode SPM을 실험장치로 사용하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 SPM을 보여주고 있으며, 접촉모드(contact mode)에서 AFM(atomic force microscope)을 이용하여 표면 형상을 측정하였고, SPM tip 과 시편 plate간의 힘-변위(force-displacement) 선도로부터 미소응착력을 측정하였으며[17], LFM(lateral force microscope)을 이용하여 미소마찰력을 측정하였다.

실험에 사용된 SPM용 tip은 재질이 Si₃N₄이고, 접촉부 반경이 15 nm (NPS, DI) 및 22 nm (NP, DI)인 2종류의 상용 제품 tip을 사용하였다. Fig. 2는 사용된 tip의 SEM(scanning electron microscope) 모습을 보여주고 있다.

실험에 사용된 plate 시편은 Si-wafer (100) 및 Si-wafer 위에 OTS SAM을 코팅한 것을 사용하였다. OTS-SAM의 코팅은 Fig. 3에서와 같이 Si-wafer를 DI water로 세척한 후, HF로 에칭하여 Si-wafer 표면의 불순물 및 산화층을 제거하였으며, 다시 세척 후 피라나 용액(H₂SO₄:H₂O₂=7:3)을 이용하여 순수 Si oxide 층을 형성시켰다. 2 mM로 희석한 OTS 용액을



(a) unsharpened tip



(b) sharpened tip

Fig. 2. SPM tips (Si_3N_4).

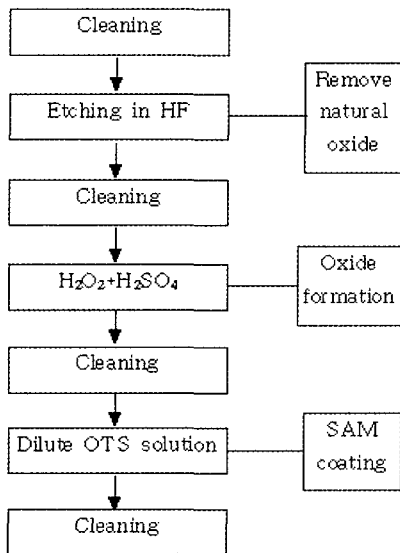


Fig. 3. OTS coating process.

이용하여 OTS-SAM 코팅을 하였다. 이러한 코팅 과정을 통해 형성된 SAM 코팅층의 형성 기구는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 이때 각 표면의 수분 접촉각

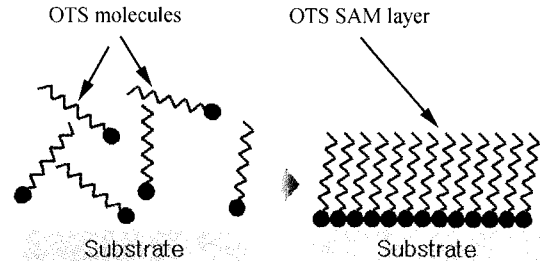


Fig. 4. A schematic view of SAM layer formation.

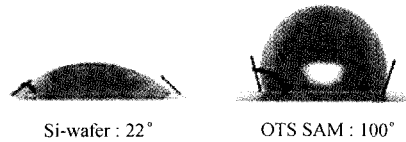
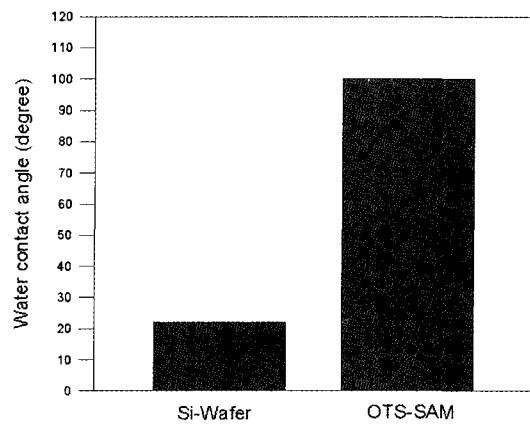


Fig. 5. Water contact angles of Si-wafer and OTS-coated Si-wafer.

(water contact angle)은 Contact Anglemeter(ERMA, goniometer type)를 사용하여 측정하였으며, Fig. 5에 나타난 바와 같이 Si-wafer는 수분 접촉각이 22°이었으며, OTS SAM 코팅층은 100°이었다.

2-2. 실험 방법

실험은 flat 시편인 Si-wafer 및 OTS SAM 코팅층에 대하여 2종류의 선단 곡률반경을 갖는 SPM tip 시편을 이용하여 수직하중 50-100 nN 하에서 응착력과 마찰력을 측정하였다. 실험용 tip 및 plate는 실험전에 탄올로 세척 후 질소가스로 잔여 오염 입자를 제거한 후 사용하였으며, 일정온도(20-24°C)조건하에서 실험하였다.

표면의 흡착 수분이 젖음 특성이 다른 표면의 응착 및 마찰 특성에 미치는 영향을 고려하기 위해, 상대

습도를 30%, 50% 및 70%로 변화시키며 실험하였다. 표면형상은 임의로 선택된 5개 이상의 $2.5\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$ 표면에서 측정하였고, 미소응착력은 서로 다른 25개 이상의 지점에서 측정한 후 평균하였으며, 미소 마찰력은 서로 다른 5개 이상의 $2.5\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$ 표면에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 AFM으로 측정한 Si-wafer와 OTS SAM 코팅층 표면의 형상을 보여주고 있다. 그림에서 OTS SAM 코팅층의 분포가 불균일하게 나타났는데 이는 코팅 과정 중 전처리 과정에서 표면의 불순물 및 산화층 제거와 SiO_2 층의 형성과정 중에 나타난 결과로 사료된다.

접촉부 반경이 각각 15 nm, 22 nm인 두가지 tip을 사용하여 질화 실리콘(silicon nitride) tip과 Si-wafer (100) 및 OTS SAM을 코팅한 Si-wafer간의 응착력을 측정한 결과를 Fig. 7에 보여주고 있다. 이로부터 표면의 특성이 소수성(hydrophobic characteristic)을 나타낸

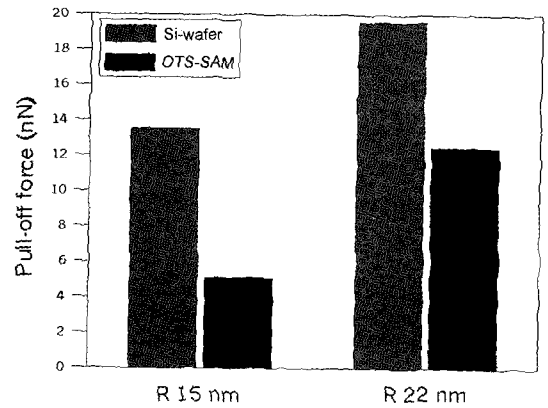


Fig. 7. Pull-off force of Si-wafer and OTS SAM surfaces with the SPM tip radius.

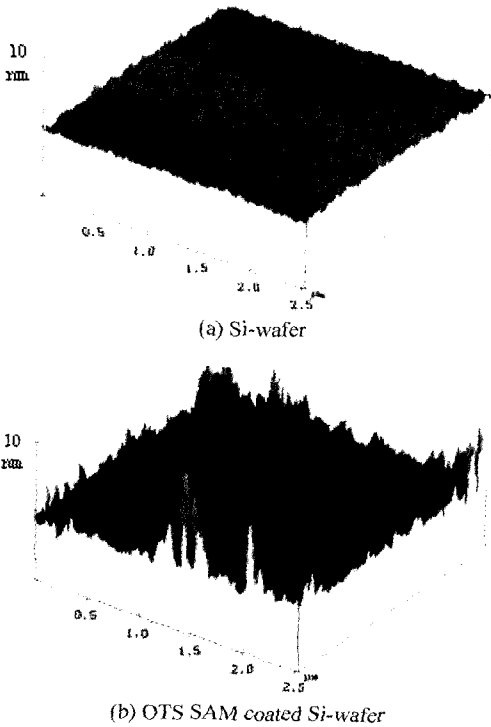


Fig. 6. 3-D Surface of Si-wafer and OTS SAM surfaces measured by AFM.

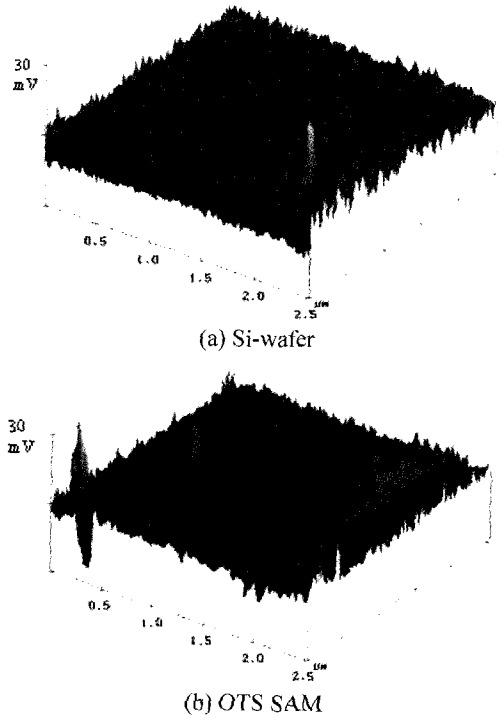


Fig. 8. 3-D Friction image of Si-wafer and OTS SAM surfaces measured by LFM.

OTS SAM 표면의 응착력이 작게 나타났다. 또한, tip의 선단 반경이 증가하면 Si-wafer와 OTS-SAM의 모든 경우에서 응착력이 증가함을 알 수 있었으며, 2종류의 tip 선단반경 모두에서 OTS SAM을 코팅한 표면의 응착력이 작게 나타났다.

Fig. 8은 LFM으로 측정한 Si-wafer와 OTS SAM

코팅층의 마찰력 분포를 보여주고있다. 그림에서 OTS SAM 표면의 마찰력은 부분적으로 균일하지 못한 결과들을 보이기는 하지만 평균적으로 Si-wafer에 비해 상당히 작은 마찰력임을 알 수 있다. 이는 OTS SAM이 형성된 표면이 순수 Si-wafer에 비해 응착력뿐 아니라 마찰력도 감소됨을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

이와 같이 상대적으로 소수성화 특성을 갖는 OTS SAM 표면에서의 응착 및 마찰 특성이 Si-wafer 보다 우수하게 나타난 결과로부터 표면의 젖음 특성이 응착력 및 마찰력에 영향을 미침을 알 수 있었다. 이를 검증하기 위하여 대기중의 상대습도를 30%, 50%, 70%로 변화시키며 젖음 특성이 다른 표면에 흡착된 수분층이 응착력에 미치는 영향에 대하여 실험하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림으로부터 상대습도가 증가됨에 따라 응착력이 점차적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 상대습도의 변화가 SPM tip과 Si-wafer 표면간의 미소 응착력을 변화시킬 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 사실은 단일 요철과 평판간의 응착력이 상대습도에 영향받지 않는다는 기존 연구자의 연구결과[18]와는 달리 미소응착력이 상대습도 변화에 따라 변화될 수 있다는 것을 나타내는 결과라 하겠다.

따라서 이러한 연구 결과는, 미소 표면간의 응착력이 van der Waals력과 같은 단범위 상호작용력, 모세관력과 같은 장범위 상호작용력 및 연속체역학에 근거한 탄성변형 에너지력 등에 복합적으로 영향을 받는다는 Israelachvili[19]의 연구 결과에서 주장한 바와 같이, SPM tip과 Si-wafer 표면간의 응착 현상에는 상기한 3가지 모두가 작용하였다고 말할 수 있다. 이때, 탄성 접촉현상은 Hertz의 접촉 변형 이론을 활용할 수 있으며 단범위 상호작용력의 경우 응착 에너지(Energy of adhesion)로서 단순화 할 수 있다. 1971년에 Johnson, Kendall 및 Roberts에 의해 발표된 응착 에너지를 고려한 탄성접촉 모델인 JKR 모델에 의하면 응착력($P_{pull-off}$)은 접촉하는 두 표면의 곡률반경에 비례하게 되며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, $P_{pull-off}$ 는 pull-off force, γ 는 두 표면간의 응착 에너지, R 은 tip의 선단 반경이다. 식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 미소응착력은 응착 에너지와 접촉표면의 곡률반경, 즉, SPM tip의 반경에 영향을 받음을

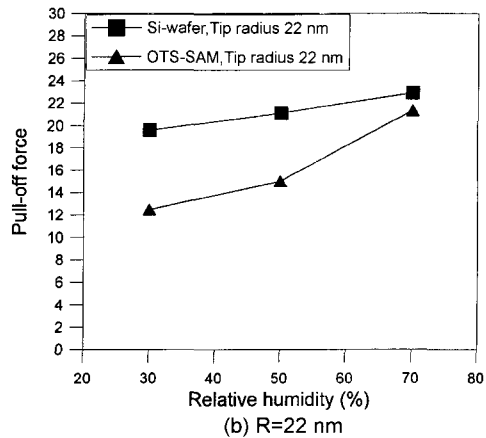
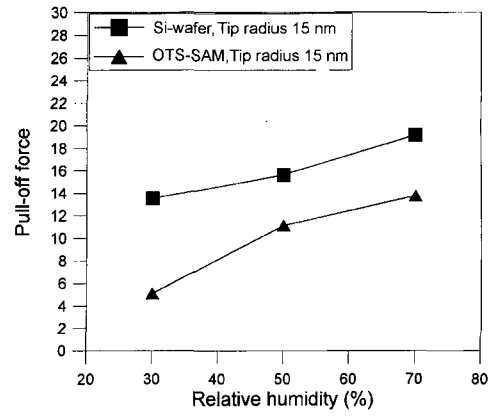


Fig. 9. Pull-off force of Si-wafer and OTS SAM surfaces with the relative humidity.

알 수 있다. 그러나 본 연구의 결과에 의하면 재료의 표면과 SPM tip 반경이 동일한 경우에서도 상대 습도를 증가시킬 경우 응착력이 증가한 것을 알 수 있었다 (Fig. 9 참조). 이는 전술한 바와 같이 장범위 상호작용력이 미소 표면간의 응착력에 영향을 미치고 있음을 보여주는 것으로, 장범위 상호작용력 중 흡착 습기막에 의한 모세관력이 응착력에 부가적으로 작용되어 나타난 것으로 사료되었다. 이때, SPM tip과 Si-wafer간의 접촉부위에 형성된 흡착 습기막을 단순화하여 나타내면 Fig. 10과 같다.

이상의 결과들로부터, 기존의 JKR 모델 [1]을 사용할 경우 van der Waals force와 같은 단범위력만이 고려되며 따라서 흡착 수분의 모세관력의 영향을 추가적으로 고려해야 함을 알 수 있었다. Fig. 10에서 흡착습기막의 곡률반경(r_m)이 SPM tip의 반경(R)에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다면 흡착 습기막의 반경

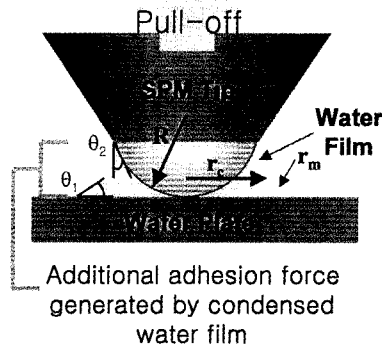


Fig. 10. A schematic view of the adsorbed moisture between SPM tip and plate.

(r_c)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_c = \sqrt{2R\gamma_m(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad (2)$$

이때 흡착 습기층 내에서는 Laplace 압력이 형성되어 그 압력은 대기압보다 γ/r_m 만큼 작아지게 된다. 이때, γ 는 흡착 습기층의 표면에너지이다. 이때 형성되는 Laplace 압력이 πr_c^2 의 면적에 작용하게 되며 이를 정리하면 무한평판과 접촉한 반구면 사이에 형성된 수분층에 의한 모세관력(F)[19]은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{pull-off} = 2\pi R\gamma_L(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (3)$$

따라서, 실질적인 응착력은 탄성 변형 에너지 및 단범위 상호작용력이 식(3)에 추가된 형태로 나타나게 될 것이며, 이를 단순화하면 식(4)와 같이 식(1)과 식(3)의 합의 형태로 나타나며, 응착력을 tip 반경으로 normalizing하면 식(5)와 같이 된다.

$$P_{pull-off} = 2\pi R\gamma_L(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) + \frac{3}{2}\gamma\pi R \quad (4)$$

$$\frac{P_{pull-off}}{R} = 2\pi\gamma_L\cos\theta_1 + \left(2\pi\gamma_L\cos\theta_2 + \frac{3}{2}\gamma\pi\right) \quad (5)$$

식(5)로부터 단일 흡착 습기의 영향이 전체 응착력 중에서 지배적이라면, $\frac{P_{pull-off}}{R}$ 는 평판 시편과 흡착습기층간의 접촉각(θ)의 cosine성분의 선형 함수로 나타나야하며, 접촉각 $\cos\theta$ 의 값이 0(zero)일 때는 그 값이 $2\pi\gamma_L\cos\theta_2 + \frac{3}{2}\gamma\pi$ 가 되어야 한다. 접촉각 $\cos\theta$ 에 대한 normalizing된 응착력의 변화에 대해, 이전의 연구결과 [17]에서 도출된 DLC($\cos\theta=0.50$)에 대한 실험결과와

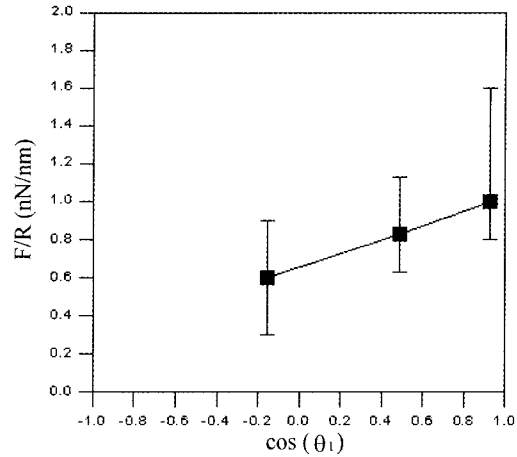


Fig. 11. Normalized pull-off force of various surfaces with the water contact angle (F: pull-off force, theta: water contact angle between plate and moisture layer).

본 실험의 결과인 Si-wafer($\cos\theta_1=0.93$) 및 OTS SAM ($\cos\theta_1=-0.17$)의 실험결과를 종합하여 보면 Fig. 11과 같다. 그림에서 tip 반경으로 normalizing하여 나타낸 미소 응착력은 식(5)에서와 같이 $\cos\theta$ 에 따라 선형적 관계를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 수분 접촉각이 큰 재료 표면일수록 $\cos\theta_1$ 이 작아지므로 응착력이 작아짐을 알 수 있다.

Tip의 재료인 Si_3N_4 의 수분 접촉각(water contact angle)은 27° [18]이며, γ 는 85 erg/cm^2 정도의 값을 가지므로, 식(5)에서의 두 번째 항인 $2\pi\gamma\cos\theta_2$ 의 값은 각 값을 대입하면 대략 0.50 nN/nm 정도로 된다. 또한 Fig. 11의 선형 함수 관계로부터 $\cos\theta_1$ 값이 0 (zero)일 때의 $\frac{P_{pull-off}}{R}$ 값은 약 0.65 nN/nm 정도임을 알 수 있다. 즉, 이때의 $\frac{P_{pull-off}}{R}$ 값은 식(5)의 두 번째 항과 세 번째 항의 합이므로, 세 번째 항인 탄성 변형 에너지 및 단범위 상호작용력의 합인 $\frac{3}{2}\gamma\pi$ 의 값이 상대적으로 작은 값을 가짐을 유추할 수 있다. 따라서 상대 습도가 높은 조건하에서 미소 응착력에 크게 영향을 미치는 인자는 흡착 습기층에 의해 발생되는 모세관력이라는 사실을 실험적으로 알 수 있었다.

4. 결 론

SPM을 이용하여 OTS SAM 코팅층의 미소 응착 특성에 대하여 이상과 같은 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. OTS SAM을 Si-wafer에 코팅한 결과 표면 특성

을 소수성화 할 수 있었으며, OTS SAM 코팅면은 Si-wafer 보다 낮은 응착력과 마찰력을 나타내었다.

2. 접촉 조건 중 tip의 접촉 반경이 작을수록, 수분 접촉각이 큰 표면일수록 미소 응착력이 감소함을 알 수 있었다.

3. 상대 습도 증가에 따라 미소 응착력이 증가하였으며, 미소 응착력에 지배적으로 영향을 미치는 인자는 표면에 흡착된 습기층임을 알 수 있었다. JKR 모델과 수분층에 의한 모세관력을 고려한 normalizing 된 미소 응착력을 이용하여 확인하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 21세기 프론티어 연구개발사업 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. Johnson, K.L., Kendall, K. and Roberts, A.D. , "Surface energy and contact of elastic solids," Proc. R. Soc. Lond. A, Vol 324, pp.301-313, 1971.
2. Bhushan, B., Handbook of Micro/ Nano Tribology, 2nd edition, CRC press, 1999.
3. Maboudian, R. and Roger, T. Howe, "Critical Review: Adhesion in surface micromechanical structures," J. Vac. Sci. Technol. B 15 (1), pp.1-20, 1997.
4. Komvopoulos, K., "Surface engineering and microtribology for microelectro-mechanical systems," Wear, Vol. 200, pp.305-327, 1996.
5. Bhushan, B., "Nanoscale tribophysics and tribomechanics," Wear, Vol.225-229, pp.465-492, 1999.
6. Johnson, K.L., "Mechanics of adhesion," Tribology International, Vol.31, No.8, pp.413-418, 1998.
7. Ando, Y. and Ino, J., "Friction and pull-off force on silicon surface modified by FIB," Sensors and Actuators, A, Vol 57, pp83-89, 1996.
8. Ando, Y. and Ino, J., "Friction and pull-off forces on submicron-size asperities," Wear, Vol.216, pp.115-122, 1998.
9. Maboudian, R., Ashurst, W.R. and Carraro, C., "Self-assembled monolayers as anti-stiction coatings for MEMS," Sensors and Actuators A: Physical, 82, 219-223, 2000.
10. Maboudian, R., "Surface processes in MEMS technology," Surface science reports, Vol.30, pp207-269, 1998.
11. Carraro, C., Yauw, O.W., Sung, M.M., and Maboudian, R., "Observation of three growth mechanics in self-assembled monolayers," The Journal of Physical Chemistry B, Vol.102, No.23, 1998.
12. Kluth, G.J., Sander, M., Sung, M.M. and Maboudian, R., "Study of the desorption mechanism of alkylsiloxane self-assembled monolayers through isotopic labeling and high resolution electron energy-loss spectroscopy experiments," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol.16, No.3, pp.932-936, 1998.
13. Kluth, G. J., Sung, M.M. and Maboudian, R., "Interaction of H(D) atoms with octadecylsiloxane self-assembled monolayers on the Si(100) surface," Langmuir, Vol.13, pp. 6491-6496, 1997.
14. Sung, M.M., Kluth, G.J., Yauw, O.W. and Maboudian, R., "Thermal Behavior of Alkyl-Monolayers on Silicon Surfaces," Langmuir, Vol.13, pp. 6164 -6168, 1997.
15. Kluth, G.J., Carraro, C. and Maboudian, R., "Direct observation of sulfur dimers in alkanethiol self-assembled monolayers on Au(111)," Physical Review B, Vol.59, No.16, pp.10449-10452, 1999.
16. Sung, M.M., Kluth, G.J. and Maboudian, R. , "Formation of alkyl-siloxane self-assembled monolayers on Si₃N₄," J. Vac. Sci. Technol. A Vol.17, No.2, pp.4540-544, 1999.
17. 윤의성, 박지현, 양승호, 공호성, "SPM을 이용한 접촉조건 변화에 따른 미소응착 및 마찰 특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, Vol. 17, No. 3, pp. 191-197, 2001.
18. 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.
19. Israelachvili, J.N, Intermolecular and surface forces, Academic Press, 1985.