

AFM을 이용한 MEMS/NEMS 공정용 재료의 트라이볼로지 특성에 관한 연구

허정철[†] · 김광섭 · 김경웅[‡]

한국과학기술원 기계항공시스템학부

A Study on Tribological Characteristics of Materials for MEMS/NEMS Using Chemically Modified AFM tip

Jung-Chul Heo[†], Kwang-Seop Kim and Kyung-Woong Kim[‡]

School of Mechanical, Aerospace & System Engineering, KAIST

Abstract – Friction and adhesion tests were conducted to investigate tribological characteristics of materials for MEMS/NEMS using atomic force microscope (AFM). AFM Si tips were chemically modified with a self-assembled monolayer (SAM) derived from trichlorosilane like octadecyltrichlorosilane (OTS) and (1H,1H,2H,2H-perfluorooctyl) trichlorosilane (FOTS), and various materials, such as Si, Al, Au, Cu, Ti and PMMA films, were prepared for the tests. SAMs were coated on Si wafer by dipping method prior to AFM tip to determine a proper dipping time. The proper dipping time was determined from the measurements of contact angle, surface energy and thickness of the SAMs. AFM tips were then coated with SAMs by using the same coating condition. Friction and adhesion forces between the AFM Si tip modified with SAM and MEMS/NEMS materials were measured. These forces were compared to those when AFM tip was uncoated. According to the results, after coating OTS and FOTS, the friction and adhesion forces on all materials used in the tests decreased; however, the effect of SAM on the reduction of friction and adhesion forces could be changed according to counterpart materials. OTS was the most effective to reduce the friction and adhesion forces when counterpart material was Cu film. In case of FOTS, friction and adhesion forces decreased the most effectively on Au films.

Key words – self-assembled monolayer, MEM/NEMS materials, atomic force microscope, adhesion force, friction force

1. 서 론

마이크로/나노 분야에 대한 연구가 활발해지면서 나노 스케일에서의 마찰과 응착 현상에 관한 관심도 높아지고 있다. 이는 마이크로/나노 스케일의 구조물이 부피에 비해 상대적으로 큰 표면적을 갖는 특성이 있어 마찰력이나 응착력과 같은 표면력이 마이크로/나노 구조물의 성능과 수명을 좌우하는 중요한 요인이 되기 때문이다. micro/nano electromechanical systems (MEMS/NEMS)에서 표면력에 의한 마찰 및 응착 현상은 구조

물의 구동과 구동의 재현성 및 안정성에 문제를 야기시키고 있기 때문에[1,2] 마찰력 및 응착력을 줄이기 위해 많은 노력이 있어 왔다.

마이크로/나노 시스템에서는 매크로 스케일의 기계 시스템에서 사용되는 윤활제의 적용이 힘들기 때문에 표면력에 의한 마찰 및 응착의 감소를 위해 구조물의 표면에 텍스처링(texturing) 혹은 패터닝(patterning)을 하여 표면 형상을 변화시키는 물리적인 방법과, Self-Assembled Monolayer (SAM) 등의 박막을 코팅하여 표면 에너지를 감소시켜 마찰력과 응착력을 줄이는 화학적인 방법[3-5]을 이용하게 된다. 이들 방법 중 SAM은 표면 에너지를 감소시켜 표면을 소수성으로 만들어

[†]주저자 : jungchul@kaist.ac.kr

[‡]책임저자 : taeho@kaist.ac.kr (K.-W. Kim)

마찰력 및 응착력을 감소 시키고, 간단한 코팅, substrate와의 단단한 결합, 3차원의 복잡한 형상도 적용가능 하다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 MEMS/ NEMS 공정에서 분자 단위의 윤활제로 많이 이용되고 있고 MEMS/NEMS에서 SAM의 적용이 늘어날 것이라 예상된다[8,9]. 따라서 MEMS/NEMS에서 효과적으로 마찰력과 응착력을 감소 시키기 위해서는 MEMS/NEMS 공정용 재료와 윤활제로 많이 쓰이는 SAM 사이의 트라이블로지 특성을 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 마이크로/나노 수준의 작은 스케일에서 재료의 트라이블로지 특성을 알아보기 위한 도구로 널리 쓰이는 AFM을 이용하여, 분자 단위의 윤활제로서의 OTS, FOTS와 그에 대해 상대운동을 하는 MEMS/NEMS 공정용 재료 사이의 마찰력과 응착력을 측정하였다. 그리고 측정 결과를 AFM tip에 OTS, FOTS를 코팅하지 않은 경우와 비교하여 여러 가지 MEMS/NEMS 공정용 재료에 대해 OTS, FOTS의 마찰 및 점착 감소 효과를 알아 보았다.

2. 실험

AFM tip에 SAM을 코팅하기에 앞서 먼저 Si wafer에 SAM을 코팅하여 SAM이 충분히 코팅되는 조건을 결정한 후 그렇게 결정된 조건으로 AFM tip에 SAM을 코팅하였다. SAM이 충분히 코팅이 되었는지 판단하기 위하여 SAM의 접촉각, 표면에너지, 두께가 측정 되었으며 이를 통해 표면 특성을 평가하여 SAM이 충분히 코팅 되었는지 판단하였다.

2-1. 접촉각 측정 및 표면 에너지 계산

접촉각은 DSA100 (Krüss GmbH)을 이용하여 측정하였다. 접촉각 측정 방법은 고체 표면 위에 액체를 떨어뜨려 그 각도를 측정하는 sessile drop 방법을 사용하였다. 접촉각은 액체를 떨어뜨린 후 10초 동안 약 40번의 접촉각을 측정을 하여 그 평균값을 사용하였다. 접촉각 측정을 위하여 DI water (deionized water, H₂O), 디아이오도메탄 (diiodomethane, CH₂I₂), 에틸렌 글리콜 (ethylene glycol, C₂H₆O₂)의 세가지 액체가 이용되었고, 측정된 세가지 용액의 접촉각 측정 결과를 바탕으로 Acid-Base method[10]를 이용하여 재료의 표면 에너지를 계산하였다.

2-2. 두께 측정

SAM의 두께를 측정하기 위하여 L116s (Gaernter Scientific) ellipsometry를 이용하였다. 두께 측정에 사용된 L116s ellipsometry는 He-Ne laser ($\lambda=6328 \text{ \AA}$)를 사용하며 70°의 각도로 laser가 조사된다. SAM의 refractive index는 1.46이라 가정을 하였고 Si substrate 상수는 bare silicon substrate의 10군데 이상의 각각 다른 지점에서 측정하여 평균한 값을 사용하였다. SAM의 두께는 10개의 지점에서 두께를 측정하여 평균한 값을 사용하였다.

2-3. Self-Assembled Monolayer의 형성

실험에서 octadecyltrichlorosilane (OTS, C₁₈H₃₇Cl₃Si, Aldrich 90%), (1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctyl) trichloro-silane (FOTS, C₈H₄Cl₃F₁₃Si, Aldrich 97%) 두 종류의 SAM이 사용되었다. SAM을 AFM tip에 코팅하기 위하여 일정 시간 동안 용액에 담겨 코팅을 하는 dipping 방법이 이용되었다. AFM tip에 SAM을 코팅하기에 앞서 tip과 동일한 재료인 Si wafer에 코팅하여 SAM이 충분히 코팅되는 dipping time을 결정한 후 AFM tip을 Si wafer와 동일한 방법과 조건으로 코팅을 하였다. OTS와 FOTS를 Si에 형성시키기 위해서는 Si 표면에 -OH기가 형성되어 있어야 한다 [11]. 따라서 -OH기를 Si 표면에 형성시키기 위하여 piranha 용액 (H₂O₂:H₂SO₄=1(v):2(v))에 Si wafer를

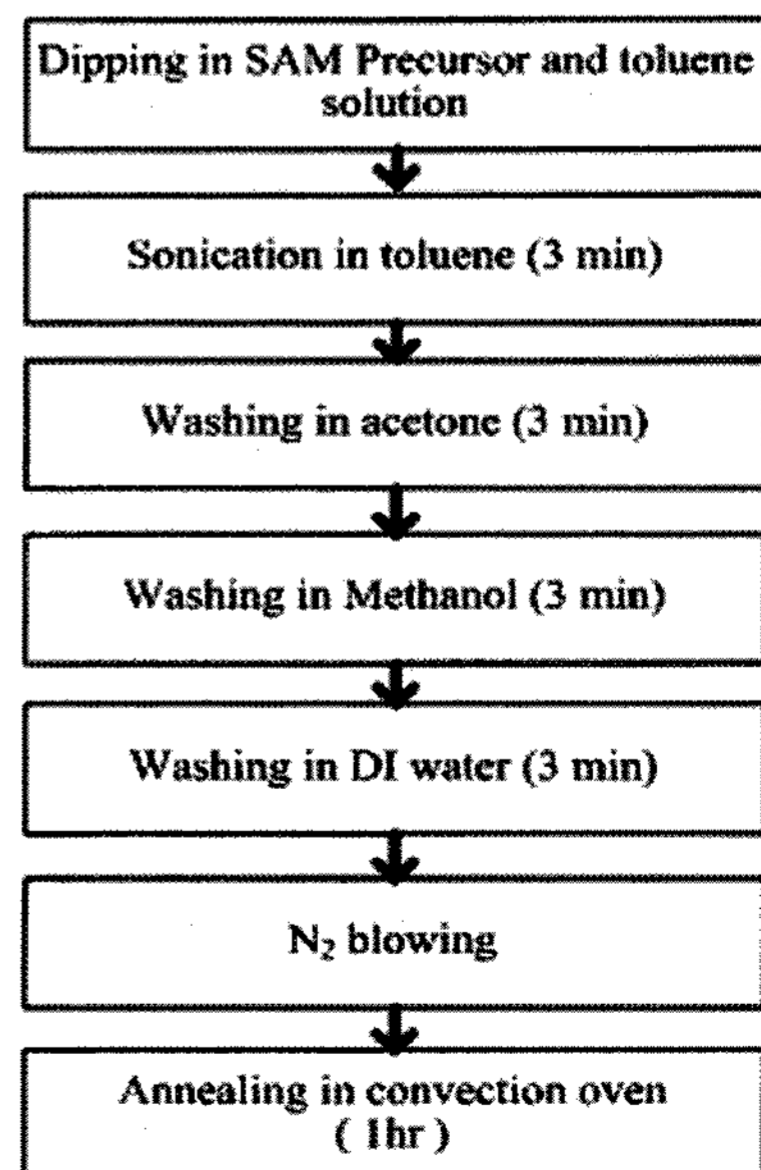


Fig. 1. Procedure of dipping method for SAM coating.

10분간 반응을 시키고 DI water (specific resistance $\approx 18.4 \text{ M}\Omega$)에 3번 행굼을 한 후 N_2 가스로 불어주어 건조하였다. AFM tip의 경우는 piranha 용액을 사용하기 곤란하기 때문에 O_2 plasma Asher를 이용하여 tip표면에 -OH기를 형성시켰다. 이후 SAM 코팅 과정은 Fig. 1과 같다. OTS, FOTS를 용해시키기 위하여 톨루엔 (Aldrich, anhydrous, 99%)을 사용하였다[12]. 톨루엔과 2.5mM 농도의 SAM precursor를 혼합한 용액에 시편을 일정시간 담그고, 용액의 온도를 OTS의 경우 상온, FOTS의 경우 $1^\circ\text{C}\sim 3^\circ\text{C}$ 를 유지시켰다[13]. 일정 시간 경과 후 시편을 꺼내 톨루엔에 담궈 초음파로 세척하여 물리적으로 흡착된 OTS, FOTS 분자를 제거하였다. 이후 시편을 아세톤과 메탄올에 순차적으로 3분간 담궈 세척한 다음, DI water로 세척 후 N_2 로 불어주어 건조시켰다. 그리고 마지막으로 실리콘 원자와 산소 원자 사이의 결합을 견고하게 해주기 위하여 OTS의 경우 70°C , FOTS의 경우 120°C 온도의 대류오븐에서 1시간 동안 어닐링을 실시하였다.

2-4. MEMS/NEMS 공정용 재료의 준비

AFM tip과 상대운동을 하는 MEMS/NEMS 공정용 재료는 Si, Al, Au, Cu, Ti, PMMA75k, PMMA540k이며 Si를 제외한 재료는 모두 piranha cleaning 된 Si wafer 위에 마찰력, 응착력에 영향을 주지 않는 범위내에서 두께를 달리하여 증착 또는 코팅된다. Al, Cu, Au는 Si wafer 위에 sputter를 이용하여 각각 1000 \AA , 1000 \AA , 500 \AA 의 두께로 증착을 하였고 Ti는 e-beam evaporator를 이용하여 3000 \AA 의 두께로 증착하였다. PMMA75k와 PMMA540k (Poly (methyl methacrylate), $M_w=75\text{k}$, 540k , $(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)_x$, Scientific Polymer Products, INC.)는 piranha cleaning된 Si wafer에 anisole과의 질량비가 1:10인 혼합 용액을 3000 rpm으로 35초간 spin coating한 후 140°C 의 hot plate에서 2분간 baking 하였고 이때 두께는 측정 결과 5000 \AA , 1000 \AA 였다.

2-5. AFM을 이용한 마찰 및 응착 실험

마찰력 및 응착력 측정을 위해 상용화된 AFM 시스템(XE-100, PSIA Inc.)을 사용하였고 측정에 사용된 AFM tip과 캔틸레버의 재료는 Si이다. 캔틸레버에 가해진 정확한 하중이나 재료 사이의 응착력을 측정하기 위하여, 실험에 사용되는 캔틸레버는 Scanning Electron Microscope (SEM)를 이용하여 형상을 측정하고

측정된 형상을 바탕으로 FEM 해석을 통해 캔틸레버의 강성을 구하였다. 하나의 MEMS/NEMS 공정용 재료에 대해서 OTS나 FOTS의 코팅 전/후의 마찰력 측정은 같은 캔틸레버가 사용이 되었지만 각각의 MEMS/NEMS 공정용 재료에 대해서는 모두 다른 캔틸레버를 사용하였다. 따라서 voltage로 나타낸 각각의 MEMS/NEMS 공정용 재료에 대한 마찰력은 비교하기는 힘들다. 마찰, 응착 실험은 $20\sim 22^\circ\text{C}$, 35% 상대습도의 환경에서 실시하였다.

AFM을 이용한 마찰 실험에서 tip이 각 재료와 접촉하여 상대운동을 할 때 tip과 재료 사이의 마찰력으로 인하여 캔틸레버가 뒤틀리게 된다. Position Sensitive Photo Detector (PSPD)에서 캔틸레버에 반사된 레이저의 수평 변위를 측정하여 캔틸레버의 뒤틀린 정도를 알 수 있고 캔틸레버의 뒤틀린 정도를 통해 마찰력의 크기를 알 수 있다. XY stage가 x 방향으로 왕복운동을 할 때 갈 때를 trace, 되돌아 올 때를 retrace라고 하며 왕복운동을 통해 측정되는 lateral force signal loop를 friction loop라 하고, Fig. 2와 같이 나타나게 된다. 그리고 마찰력의 크기는 trace 방향으로 이동할 때 측정된 voltage와 retrace 방향으로 이동할 때 측정된 voltage의 차이의 반으로 나타낼 수 있고 여기서 마찰력의 크기는 voltage 단위로 나타내었다.

$$\text{Friction force (voltage)} = (V_{\text{trace}} - V_{\text{retrace}}) / 2$$

마찰 실험은 모든 재료에 대해서 하중이 40 nN, scan rate는 1 Hz로 동일하며, 실험에서는 정해진 범위를 256번 스캔을 하고 임의의 지점의 friction loop 10개를 선택하여 각각의 loop에서의 마찰력을 구하고 평균값을 재료에 대한 마찰력이라고 하였다.

응착력은 Fig. 3(a), (b)와 같은 방법으로 측정 된다.

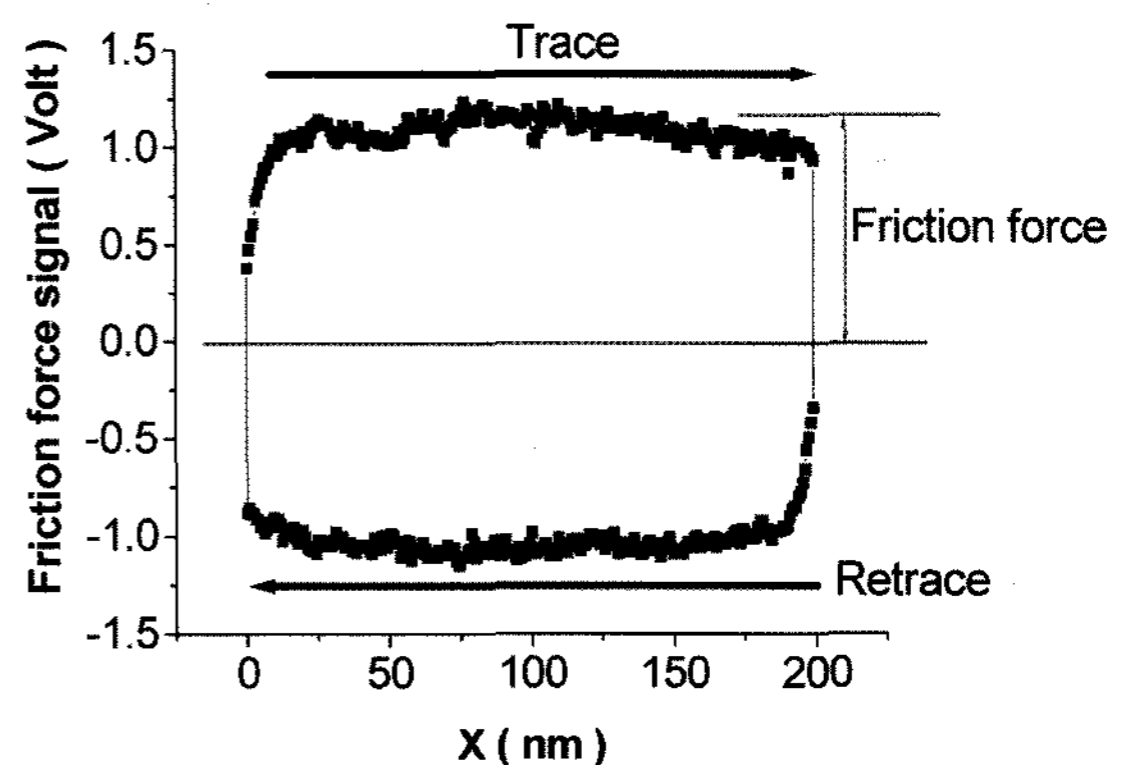


Fig. 2. Friction loop curve.

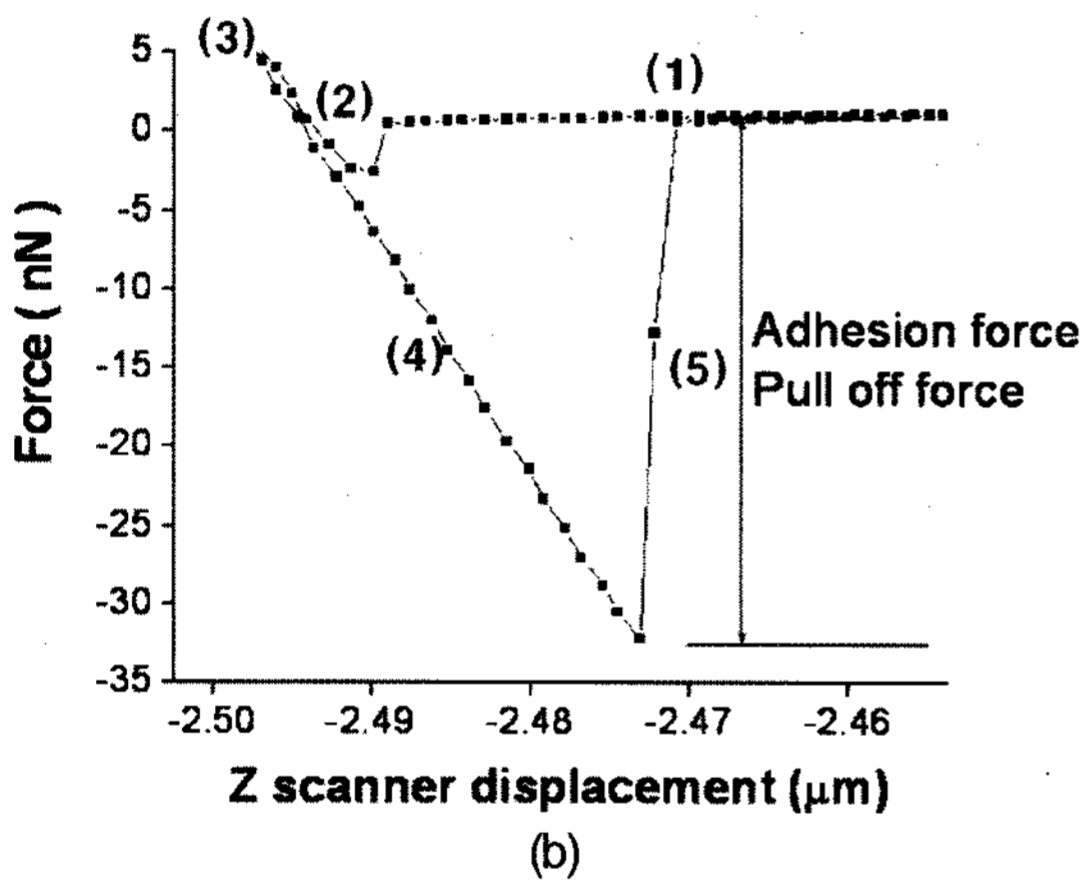
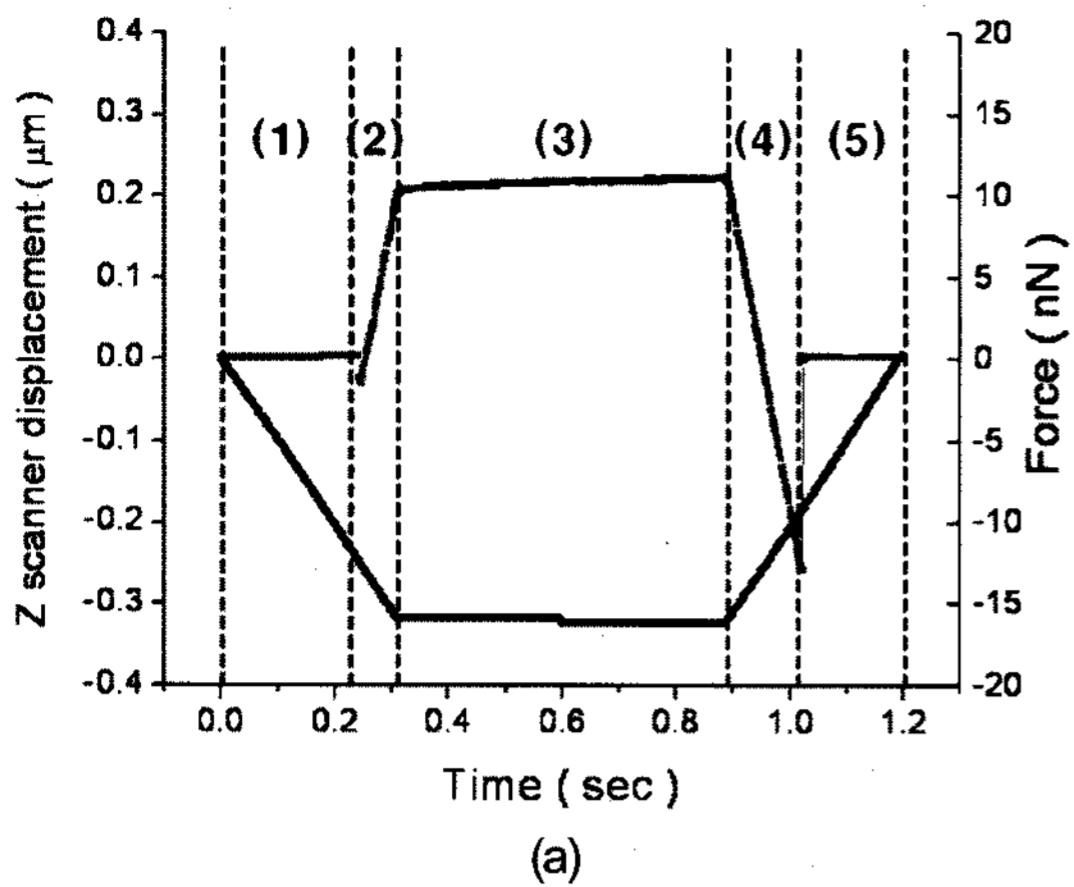


Fig. 3. (a) Z scanner displacement and measured force during adhesion test, (b) force-Z scanner displacement curve.

Fig. 3(a)는 시간에 따른 Z scanner의 변위와 측정된 힘을 나타내며, Fig. 3(b)는 Z scanner의 변위에 대해 측정된 힘을 나타낸다. AFM의 Z scanner가 내려오며 따라 tip과 재료 사이의 거리가 가까워지게 되고(1), 어느 순간에 jump to contact이 일어나 재료 표면에 tip이 달라 붙게 된다. Z scanner는 가하고자 하는 하중이 될 때까지 내려가게 되고(2), 일정 시간 동안 하중을 가하고 나서(3), Z scanner는 올라가게 된다. 그러나 하중이 완전히 제거 되더라도 tip과 재료 사이의 응착력으로 인해 tip이 재료에서 떨어지지 않고 어느 정도 붙어 있다(4), 한 순간 떨어지게 되는데(5), 이때 떨어지는 순간에 힘의 차이를 pull-off force 혹은 응착력이라고 한다. 응착력 실험에서 모든 재료에서 하중은 20 nN, Z scanner의 이동 속도는 1 μm/s로 일정

하게 하였다. 각각 다른 9개의 위치에서 측정된 응착력을 평균하여 그 재료에 대한 응착력이라고 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. SAM의 표면 특성 평가

AFM tip에 OTS와 FOTS를 코팅하기 위한 적절한 시간을 결정하기 위해 AFM tip에 SAM을 코팅하기에 앞서 SAM precursor와 톨루엔의 혼합 용액에 Si wafer를 담그고, 담궈 놓은 시간을 10초, 30초, 60초, 2분, 5분, 10분, 15분으로 달리하고 동일한 조건에서 코팅하여 각각의 시간에 대한 SAM의 두께와 접촉각을 측정하고 측정된 접촉각을 이용하여 표면에너지를 계산하였다. OTS의 경우 접촉각 측정 결과와 표면에너지 계산 결과는 Fig. 4(a), (b)에 나타내었다. Fig. 5(a), (b)는 FOTS의 시간에 따른 접촉각 측정 결과와 표면에너지 계산 결과를 나타낸다. 접촉각은 앞서 언급한 3가지 액체를 이용하여 각각의 dipping time에

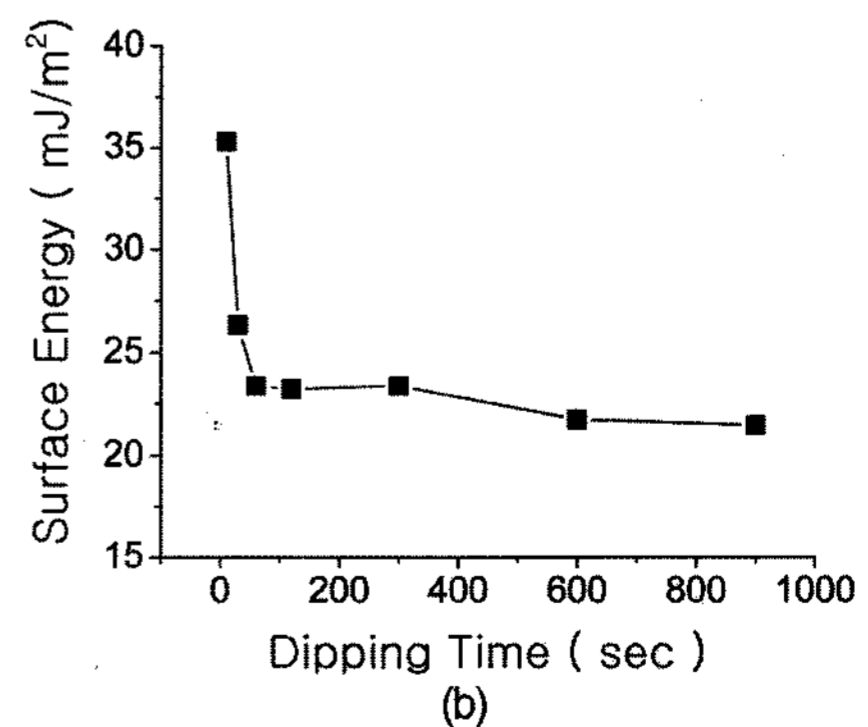
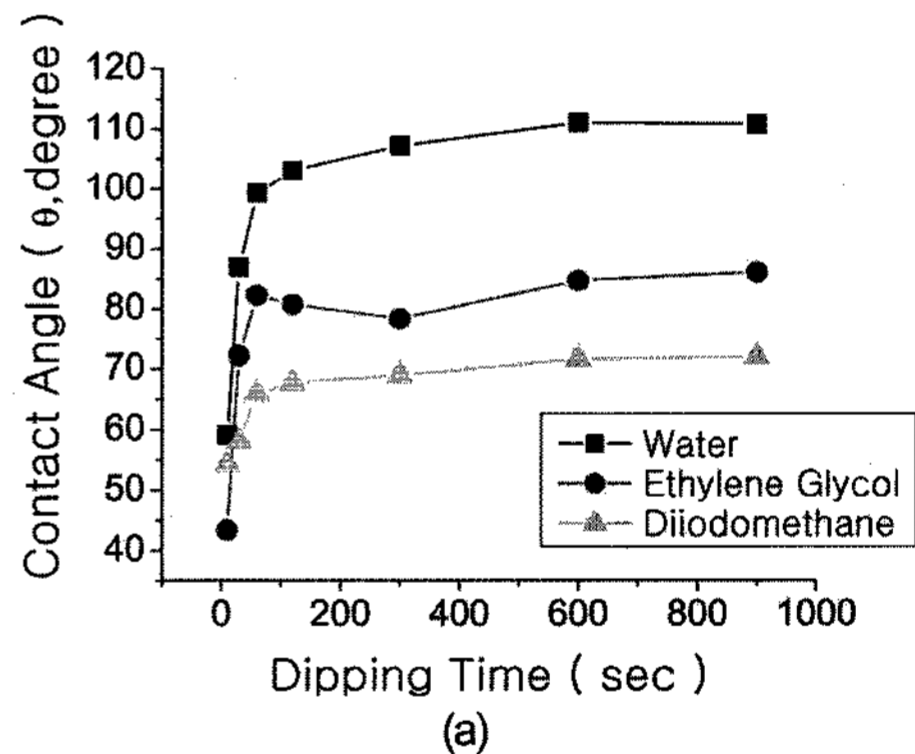


Fig. 4. (a) Contact angles for three test liquids (DI water, diiodomethane and ethylene glycol) on OTS coated on Si wafer vs. dipping time (b) surface energy of OTS coated on Si wafer vs. dipping time.

대해서 5회씩 측정하였고, 접촉각은 $\pm 2^\circ$ 이내의 오차를 보였다.

OTS의 경우 dipping time이 늘어남에 따라 각각의 용액의 접촉각이 증가하였다. Dipping time이 1분을 넘어서면 Si wafer 표면에 OTS가 형성되어 표면 특성이 소수성으로 바뀌는 것을 알 수 있고 dipping time이 10분 이후에서는 OTS가 완전히 형성이 되어 이후 시간에서의 접촉각은 큰 차이를 보이지 않았다. 이때 물의 접촉각이 110° 정도가 되었다. 또한 각각의 dipping time에 대해서 측정된 접촉각을 이용하여 Acid-base method로 계산된 OTS의 표면 에너지는 dipping time이 증가함에 따라 감소하여 dipping time이 10분과 15분일 때는 표면 에너지는 각각 21.7 mJ/m^2 와 21.4 mJ/m^2 로 거의 일정한 값을 보였다. 측정된 접촉각과 계산된 표면에너지의 결과는 선행 연구의 결과 [12,14-18]와도 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

OTS의 경우와 마찬가지로 FOTS의 경우에도 dipping time의 경과에 따라 각 용액의 접촉각이 증가

하였고 10분 이후가 되면 FOTS가 완전히 형성되어 Si의 표면이 소수성으로 변한 것을 알 수 있다. Piranha cleaning 후 Si에서 물의 접촉각은 5° 가 되지 않는데 반해 FOTS를 코팅한 후 물의 접촉각은 115° 정도로 크게 증가 하였다. 10분 이후의 시간에 대해서는 각각의 용액의 접촉각이 OTS의 경우와 마찬가지로 일정한 값을 보였다. Acid-base 방법을 이용한 FOTS의 표면에너지는 Fig. 5(b)에서도 알 수 있듯이 dipping time이 경과함에 따라 감소 하였고 10분과 15분인 경우 표면에너지 계산 결과는 각각 12.1 mJ/m^2 , 11.9 mJ/m^2 로 표면에너지는 거의 일정한 값이 되었다. 이는 [18,19]에서의 FOTS 표면 에너지와 잘 일치하였다.

Table 1에는 ellipsometry로 측정된 OTS, FOTS 두께 측정 결과를 각각 나타내었다. 결과에서도 알 수 있듯이 dipping time에 따라 OTS, FOTS의 두께는 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 SAM이 형성되기 시작할 때는 Si wafer 표면에 대해 작은 각도로 기울어져 누워 있다가 dipping time이 증가함에 따라 SAM이 차츰 형성되어 밀도가 증가하고, 이로 인해 기울어진 각도가 커지며 서서히 일어나는 현상을 보이기 때문이다. 체인 길이가 FOTS에 비해 상대적으로 긴 OTS의 경우 두께가 크게 측정이 되었다. Dipping time이 15분인 경우 OTS, FOTS의 두께는 각각 2.5 nm, 1.0 nm였고, 체인 길이를 고려 하였을 때 OTS, FOTS가 충분히 형성되었다고 판단된다 [13,14,16,18,20-22].

Dipping time에 따라 측정된 접촉각과 두께의 결과와 표면에너지의 결과로 판단할 때 OTS와 FOTS의 경우 모두 주어진 코팅 조건에서 dipping time이 15분이면 SAM이 충분히 형성이 되는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 마찰력 및 응착력 측정 결과

SAM의 표면 특성 결과로부터 결정된 SAM 코팅 조건을 이용하여 AFM tip에 OTS와 FOTS를 코팅하여 SAM 코팅 전/후의 MEMS/NEMS 공정용 재료와의 마찰력과 응착력을 측정하여 비교하였다. Table 2에는 OTS와 FOTS의 경우 각각의 SAM이 AFM tip에 코팅이 되기 전과 후의 응착력과 마찰력 측정에서 사용된 공정용 재료의 표면 거칠기를 나타내었다. 일반적으로 표면 거칠기는 마찰력에 영향을 주는 인자 중 하나이다. 하지만 실험에서 같은 재료의 경우 동일한 방법으로 증착되었기 때문에 SAM 코팅 전과 후의

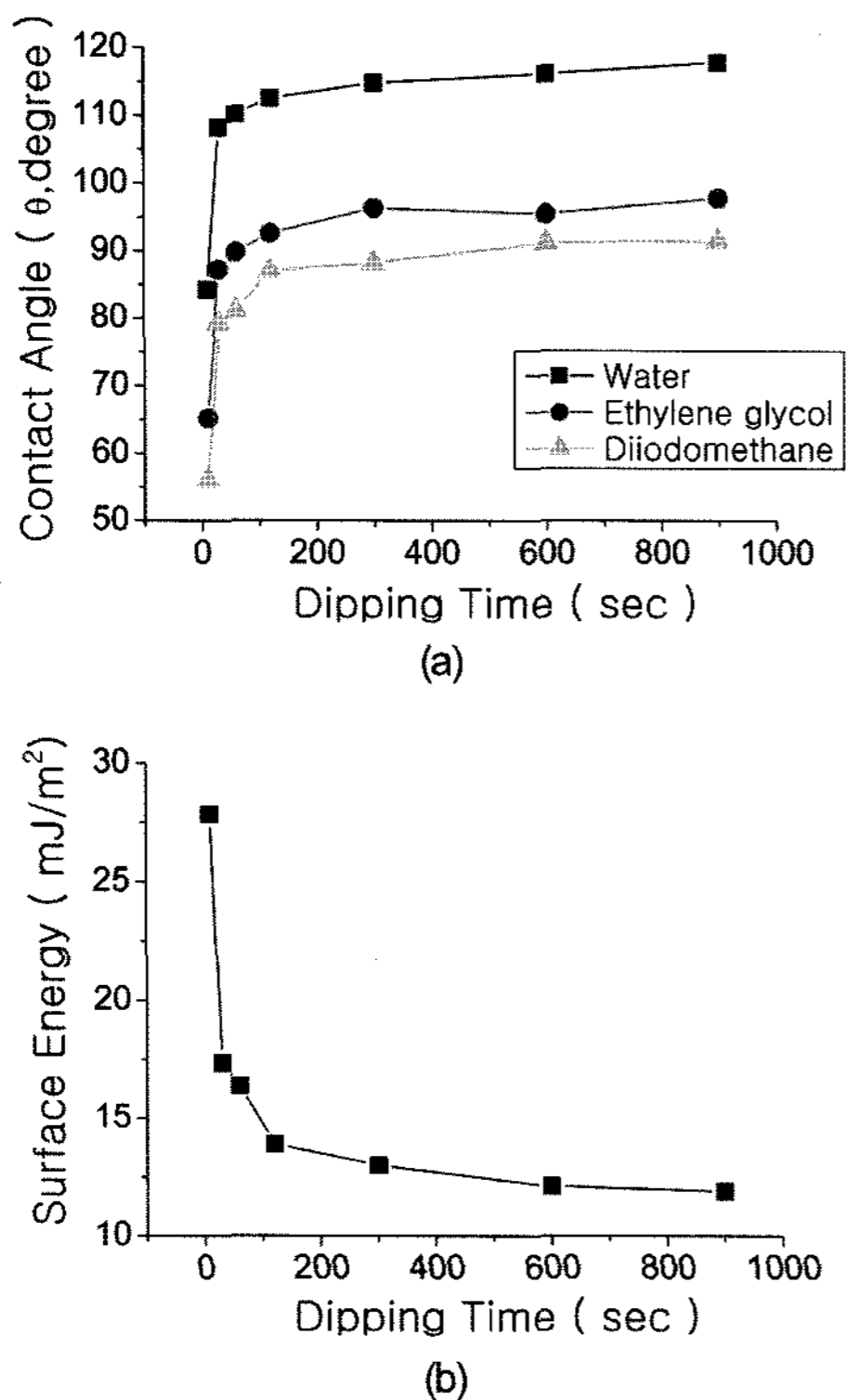


Fig. 5. (a) Contact angles for test three liquids (DI water, diiodomethane and ethylene glycol) on FOTS coated on Si wafer vs. dipping time (b) surface energy of FOTS coated on Si wafer vs. dipping time.

Table 1. Thickness of OTS coated on Si wafer and FOTS coated on Si wafer measured by ellipsometry depending on dipping time

Dipping time	10 sec	30 sec	60 sec	2 min	5 min	10 min	15 min
OTS	9.5 Å	9.7 Å	15.8 Å	17.1 Å	22.3 Å	25.7 Å	24.4 Å
FOTS	4.8 Å	4.5 Å	7.6 Å	10.1 Å	9.2 Å	11.8 Å	10.5 Å

Table 2. RMS roughness values of MEMS/NEMS materials used in the friction experiments (a) RMS roughness of materials used in friction measurement when AFM tip was not coated with SAM RMS roughness of materials used in friction measurement when AFM tip was coated with SAM

		Si	Al	Au	Cu	Ti	PMMA75k	PMMA540k
OTS	(a)	0.70 nm	1.47 nm	0.38 nm	2.09 nm	2.74 nm	0.16 nm	0.19 nm
	(b)	0.69 nm	2.24 nm	0.29 nm	2.03 nm	2.85 nm	0.14 nm	0.18 nm
FOTS	(a)	0.70 nm	1.42 nm	0.37 nm	0.89 nm	2.90 nm	0.10 nm	0.19 nm
	(b)	0.81 nm	2.40 nm	0.54 nm	1.30 nm	3.13 nm	0.11 nm	0.28 nm

마찰력 실험에서 사용된 시편은 Table 2에 나타낸 것처럼 표면 거칠기에는 큰 차이를 보이지 않았다. Fig. 6(a), (b)에는 OTS를 코팅한 전,후의 응착력과 마찰력 측정 결과를 Fig. 7(a), (b)에는 FOTS를 코팅한 전,후

의 응착력과 마찰력 측정 결과를 재료에 따라 각각 나타내었다. 또한 그래프에서는 SAM 코팅 후 마찰력과 응착력의 감소율이 큰 순서로 차례대로 나타내었다. 실험 결과에 따르면 모든 공정용 재료에 대해서 OTS,

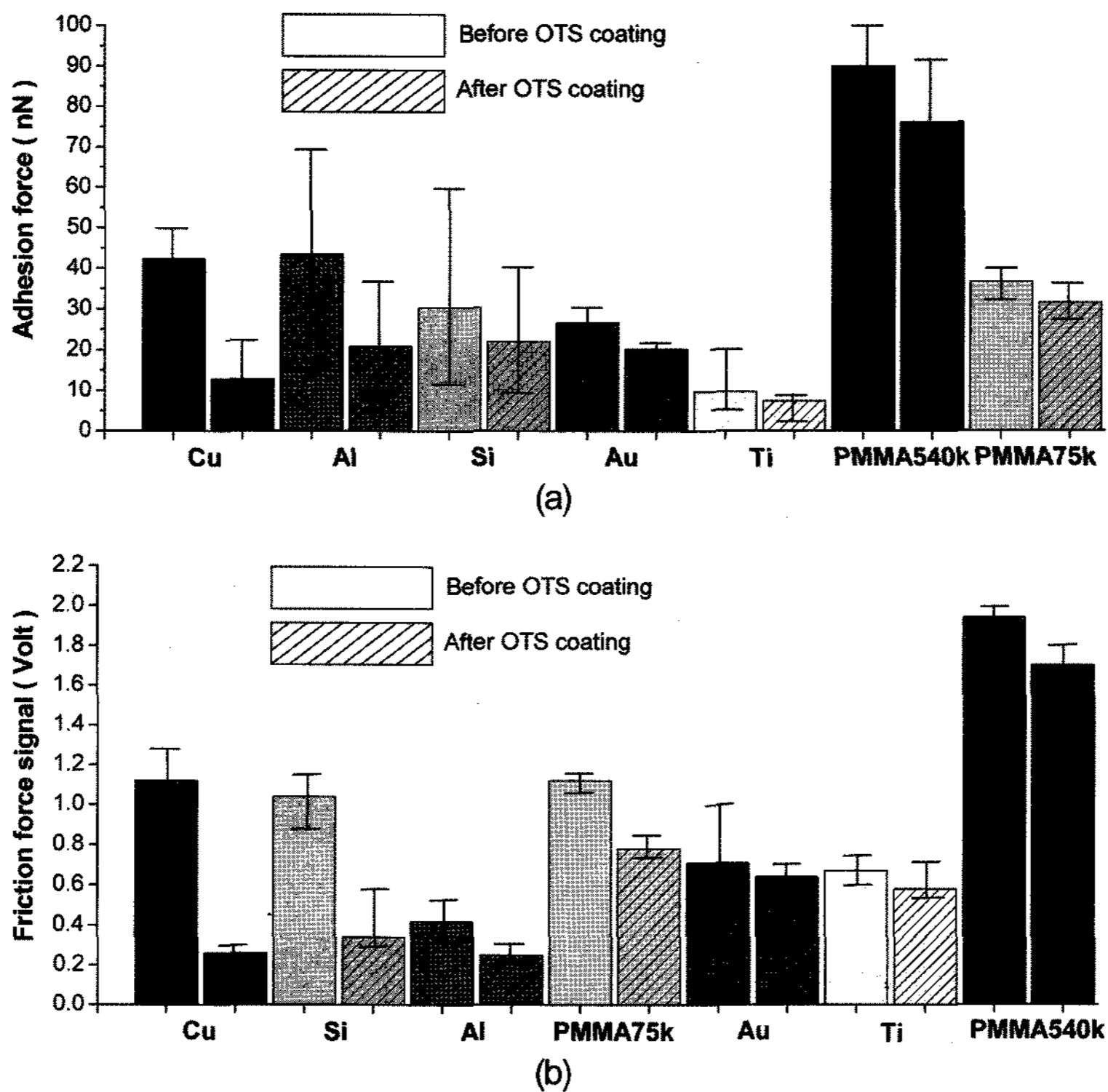


Fig. 6. (a) Adhesion force between AFM tip and MEMS/NEMS materials before and after OTS coating on AFM tip (b) Friction force between AFM tip and MEMS/NEMS materials before and after OTS coating on AFM tip.

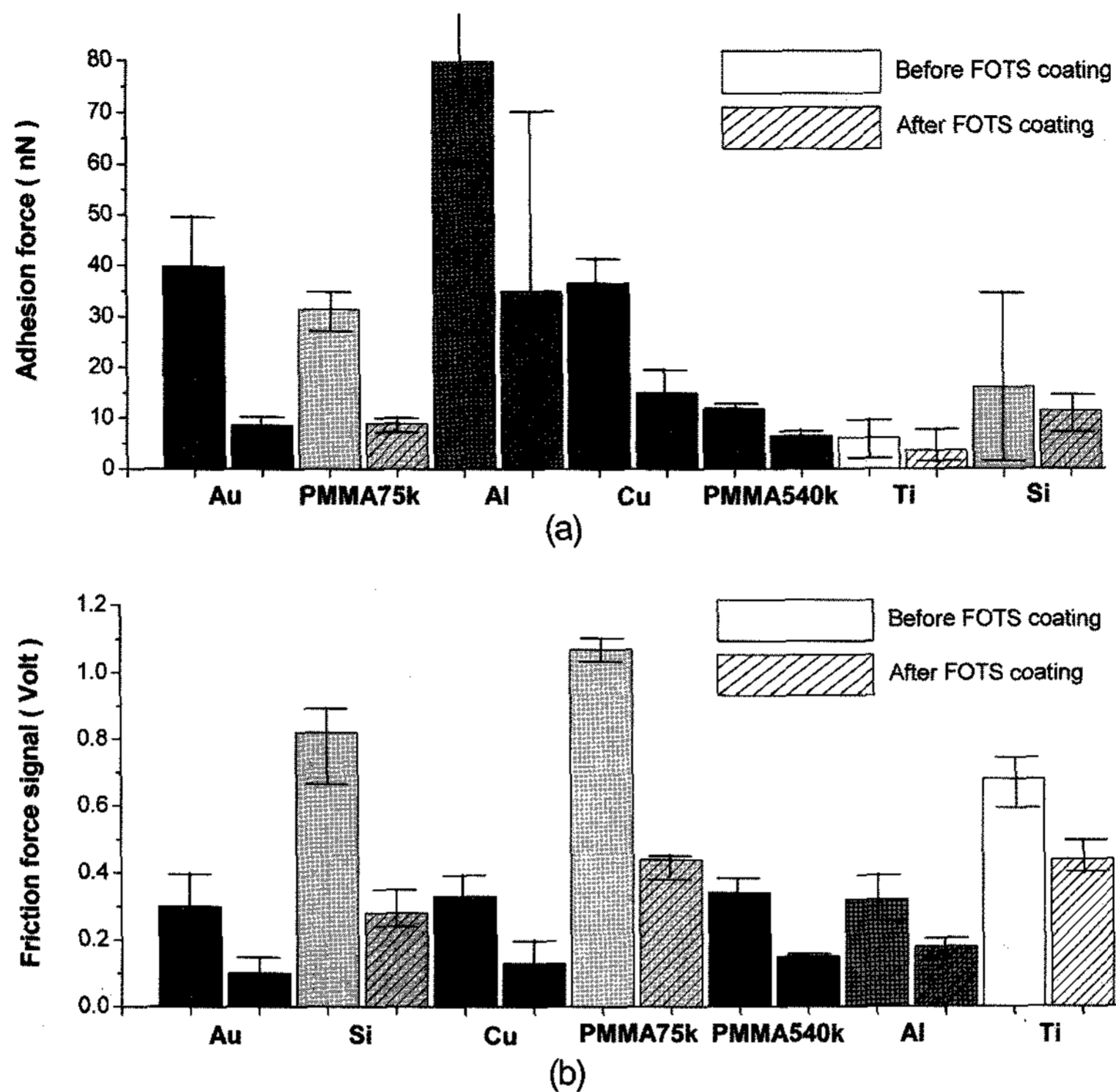


Fig. 7. (a) Adhesion force between AFM tip and MEMS/NEMS materials before and after FOTS coating on AFM tip (b) Friction force between AFM tip and MEMS/NEMS materials before and after FOTS coating on AFM tip.

FOTS는 마찰력과 응착력을 줄이는 데 효과가 있었으며, 재료에 따라서 각각의 SAM의 마찰력과 응착력 감소 효과는 다르게 나타났다.

OTS를 코팅했을 때 응착력은 Cu의 경우 69%로 가장 큰 감소를 보였으며, PMMA75k의 경우 14%로 가장 작은 감소를 보였다. Al, Si, Au, Ti, PMMA 540k의 경우 각각 52%, 28%, 25%, 23%, 15%의 응착력 감소를 보였다. 그리고 OTS가 AFM tip에 코팅이 되었을 때 마찰력의 경우에는 응착력에서 가장 큰 감소를 보였던 Cu의 경우 마찰력 역시 76%의 가장 큰 감소를 보였다. 그리고 OTS 코팅 후 작은 응착력 감소를 보였던 PMMA540k의 경우에 OTS 코팅 후에 마찰력의 감소 또한 12%로 가장 작은 감소를 보였다. 그리고 Si, Al, PMMA75k, Au, Ti는 각각 67%, 40%, 30%, 19%, 15%의 마찰력 감소를 나타내었다.

FOTS를 코팅한 경우 Fig. 7(a), (b)에서도 알 수 있듯이 AFM tip과의 응착력은 Au의 경우에 78%로 가장 큰 감소를 보였으며, Si의 경우 29%로 가장 작

은 감소를 보였다. 그리고 PMMA75k, Al, Cu, PMMA540k, Ti의 경우에는 각각 71%, 69%, 59%, 46%, 40%의 감소율을 나타내었다. AFM tip과 공정용 재료 사이의 마찰력의 경우 응착력에서 가장 큰 감소를 보였던 Au의 경우 마찰력에서도 66%의 가장 큰 감소를 보였고, Ti의 경우 34%의 가장 작은 감소율을 나타내었다. 그리고 Si, Cu, PMMA75k, PMMA540k, Al의 경우에는 각각 65%, 60%, 59%, 57%, 44%의 감소율을 보였다.

OTS, FOTS를 코팅한 전과 후의 AFM tip과 공정용 재료와의 마찰력, 응착력 측정 결과에서 알 수 있듯이, OTS와 FOTS가 AFM tip에 코팅이 됨으로써 AFM tip과 실험에서 사용된 MEMS/NEMS 공정용 재료 사이의 마찰력, 응착력이 감소하였다. 이는 OTS와 FOTS가 Si로 이루어져 있는 AFM tip에 코팅이 됨으로써 표면에너지를 감소시키기 때문이며, OTS, FOTS의 코팅이 마찰력과 응착력 감소에 있어서 효과적임을 의미한다. 하지만 상대 재료에 따라서 마찰력 및 응착력 감소 효과는 다르게 나타났다. OTS의 경우

Cu에서 69%, 76%로 가장 큰 응착력과 마찰력의 감소를 나타냈으며, FOTS의 경우 Au에서 78%, 66%로 가장 큰 응착력과 마찰력의 감소를 보였다. 그리고 마찰력과 응착력 측정 결과에서 대체적으로 SAM을 코팅한 후 응착력의 감소가 큰 재료의 경우에 마찰력의 감소 역시 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 FOTS를 코팅하였을 경우 FOTS보다 표면에너지가 상대적으로 큰 OTS를 코팅한 경우에 비해 대체적으로 마찰력과 응착력을 줄이는데 더 효과적이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 MEMS/NEMS 재료와 OTS, FOTS가 코팅된 AFM tip 사이의 마찰력과 응착력을 측정하였고 SAM이 코팅이 되지 않은 경우의 마찰력 및 응착력 측정 결과와 비교하였다.

실험 결과 OTS와 FOTS는 실험에서 고려된 MEMS/NEMS 공정용 재료인 Si, Al, Au, Cu, Ti, PMMA에 대해 모두 마찰력 및 응착력을 감소시키는데 효과적이라는 것이 확인 되었다. 하지만 상대 재료에 따라 SAM의 마찰력 및 응착력 감소 효과는 다르게 나타났다. OTS를 코팅하였을 경우 Cu에 대해 마찰력과 응착력이 가장 크게 감소하였으며, FOTS의 경우에는 Au에 대해 그 효과가 가장 크게 나타났다.

또한 마찰력과 응착력의 감소 효과에 있어서 대체적으로 응착력의 감소가 크게 나타난 재료는 마찰력에 있어서도 큰 감소를 나타내었다. 또한 FOTS를 코팅하였을 경우 OTS를 코팅한 경우보다 대체적으로 마찰력과 응착력을 줄이는데 더 효과적이었다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 나노메카트로닉스기술개발사업단(07K1401-00911) 및 Brain Korea 21 프로젝트의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Srinivasan, U., Houston, M.R., Howe, R.T. and Maboudian, R., "Alkyltrichlorosilane-based Self-assembled Monolayer Films for Stiction Reduction in Silicon Micromachines," *J. Microelectromech. Syst.*,

- vol. 7, pp. 252-260, 1998.
2. Ding, J.N., Meng, Y.G. and Wen, S.Z., "Theoretical Study on the Sticking of a Membrane Strip in MEMS under the Casimir effect," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, pp. 202-208, 2001.
3. Alley, R.L., Cuan, G.J., Howe, R.T. and Komvopoulos, K., "The Effect of Release-etch Processing on Surface Microstructure Stiction," in *Proc IEEE Solid-State Sensor and Actuator Wkshp.*, Hilton Head, SC, June, pp. 202-207, 1992.
4. Deng, K., Colins, R.J., Mehregany, M. and Sukenik, C.N., "Performance Impact of Monolayer Coating of Polysilicon Micromotors," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 142, pp. 1278-1285, 1995.
5. Chen, J.K., Ko, F.H., Hsieh, K.F., Chou, C.T. and Chang, F.C., "Effect of Fluoroalkyl Substitutes on the Reactions of Alkylchlorosilanes with Mold Surfaces for Nanoimprint Lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 22, No. 6, pp. 3233-3241, 2004.
6. Ulman, A., "Formation and Structure of Self-Assembled Monolayers," *Chem. Rev.*, Vol. 96, pp. 1533-1554, 1996.
7. Ulman, A., 1991, *An Introduction to Ultrathin Organic Films : From Langmuir-Blodgett to Self-Assembly*; Academic Press : San Diego, CA.
8. Bhushan, B. and Liu, H., "Nanotribological Properties and Mechanisms of Alkylthiol and Biphenyl Thiol Self-assembled Monolayers Studied by AFM," *Phys. Rev. B*, Vol. 63, pp. 245412-, 2001.
9. Liu, H. and Bhushan, B., "Investigation of Nano Tribological Properties of Self-assembled Monolayers With Alkyl and Biphenyl Spacer Chains (Invited)," *Ultramicroscopy*, Vol. 91, pp. 185-202, 2002.
10. van Oss, C.J., "Interfacial Forces in Aqueous Media," Dekker, New York, 1994.
11. Le Grange, J.D. and Marlham, J.L., "Effects of Surface Hydration on the Deposition of Silane Monolayers on Silica," *Langmuir*, Vol. 9, pp. 1749-1753, 1993.
12. McGovern, Mark E., Kallury, Krishna M. and Thompson, Michael, "Role of Solvent on the Silanization of Glass with Octadecyl Trichlorosilane," *Langmuir*, Vol. 10, pp. 3607-3614, 1994.
13. Silberzan, P., Léger, L., Ausserré, D. and Benattar, J.J., "Silanation of Silica Surfaces. A New Method of Constructing Pure or Mixed Monolayers," *Langmuir*, Vol. 7, pp. 1647-1651, 1991.
14. Hjalti Skulason and C.Daniel Frisbie, "Rupture of Hydrophobic Microcontacts in Water: Correlation of Pull-off Force with AFM Tip Radius," *Langmuir*, Vol. 16, pp. 6294-6297, 2000.
15. Hyo-Sok Ahn, Pham Duc Cuong, Sangkwon Park, Yong-Wook Kim and Jong-Choo Lim, "Effect of

- Molecular Structure of Self-assembled Monolayers on their Tribological Behaviors in Nano- and Microscales," *Wear*, Vol. 255, pp. 819-825, 2003.
16. Vladimir V. Tsukrik and Valery N. Bliznyuk, "Adhesive and Friction Forces between Chemically Modified Silicon and Silicon Nitride Surfaces," *Langmuir*, Vol. 14, pp. 446-455, 1998.
 17. Takashi Ito, Madoka Nambe, Philippe Buhlmann and Yoshio Umezawa, "Modification of Silicon Nitride Tips with Trichlorosilane Self-assembled Monolayers(SAMs) for Chemical Force Microscopy," *Langmuir*, Vol. 13, pp. 4323-4332, 1997.
 18. J. Tallal, M. Gordon, K. Berton, A.L. Charley and D. Peyrade, "AFM Characterization of Anti-sticking Layers Used in Nanoimprint," *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 851-854, 2006.
 19. Jeong Ho Cho, Dae Ho Lee, Jung Ah Lim and Kilwon Cho, "Evaluation of the Adhesion Properties of Inorganic Materials with High Surface Energies," *Langmuir*, Vol. 20, pp. 10174-10178, 2004.
 20. Mark.E.McGovern, Krishna M.R.Kallury and Michael Thompson, "Role of Solvent on the Silanization of Glass with Octadecyl Trichlorosilane," *Langmuir*, Vol. 10, pp. 3607-3514, 1994.
 21. J.B.Brozka, I.Ben Azouz and F.Rondelez, "Silanization of Solid Substrates : A Step Toward Reproducibility," *Langmuir*, Vol. 10, pp. 4367-4373, 1994.
 22. Jack E. Houston, Christopher M Doelling, Kyle Vanderlick, Ying Hu, Giacinto Scoles, Irmgard Wenzl and T. Randall Lee, "Comparative Study of the Adhesion, Friction, and Mechanical Properties of CF₃- and CH₃- Terminated Alkanethiol Monolayers," *Langmuir*, Vol. 21, pp. 3926-3932, 2005.