

일반논문(Articles)

자체조립 단일막으로 코팅된 실리콘 기판의 표면특성

최성훈 · 강호중[†]

기능성고분자 신소재연구센터, 단국대학교 고분자공학과
(2003년 7월 25일 접수, 2003년 11월 18일 채택)

Surface Characteristics of Silicon Substrates Coated with Self-assembled Mono-layers

Seong-Hun Choi and Ho-Jong Kang[†]

Center for Advanced Functional Polymers,
Department of Polymer Science and Engineering, Dankook University,
#8 Hannam-dong, Yongsan-gu, Seoul 140-714, Korea
[†]e-mail: hjkang@dku.edu

(Received July 25, 2003; accepted November 18, 2003)

초록 : 미세전자기계계 (MEMS)의 윤활 막으로 적용되는 자체조립 단일막 (SAMs) 형성을 위하여 실란 변성 퍼플루오로폴리에테르 (SPFPE)를 합성하고 이를 실리콘 표면에 코팅하여, 형성된 SAMs에 의한 표면 특성 변화를 기존의 퍼플루오로폴리에테르 (PFPE), 옥타데실트리클로로실란 (OTS), 그리고 퍼플루오옥틸트리클로로실란 (FOTS) SAMs와 비교 검토하였다. SPFPE에 의해 형성된 SAMs는 실리콘 표면과의 느린 반응성에 의하여 OTS와 FOTS와 비교하여 상대적으로 낮은 소수성을 가지나 열처리에 의하여 이들과 비슷한 소수성을 보였다. SPFPE에 의하여 형성된 SAMs 표면은 OTS와 FOTS와 유사한 0.3 nm의 표면 거칠기를 가지나 상대적으로 유연한 PFPE 주사슬의 움직임으로 인하여 OTS에 비하여 50% 정도 마찰력이 줄어드는 우수한 마찰 특성을 보였다.

ABSTRACT : Silane modified perfluoropolyethers (SPFPE) was synthesized as a self-assembled mono-layers (SAMs) thin film for micro-electro mechanical system (MEMS). SPFPE was compared to the Perfluoropolyethers (PFPE) as well as octadecyltrichlorosilane (OTS) and perfluorooctyltrichlorosilane (FOTS) with respect to the development of hydrophobicity in the SAMs surface. SPFPE shows less hydrophobicity than those of OTS and FOTS. Thermal annealing of SPFPE SAMs resulted in the enhancement of hydrophobicity as much as those of OTS and FOTS. The SAMs formed from SPFPE were found to be similar as OTS and FOTS SAMs with smooth R_a values of 0.3 nm. However, the flexible chain mobility of SPFPE resulted in 50% reduction as much as the friction force in OTS.

Keywords : self-assembled monolayers, silane modified perfluoropolyether, MEMS, contact angle, silicon substrates.

1. 서론

미세 구동체와 미세 기어와 같이 실리콘 소재로 만들어지는 미세전자-기계계 (MEMS)는¹⁻³ 그 사용 특성상 마찰 및 마모와 같은 tribological 특성이 매우 중요하며 실리콘 표면에 자체조립 단일막 (SAMs)을 형성시켜 표면 특성을 변화시켜 이를 조절할 수 있다. 현재 가장 많이 사용되는 SAMs 소재로는 옥타데실트리클로로실란 (OTS)과^{4,6} 퍼플루오로데실트리클로로실란 (FDTS) 등을^{7,9}

들 수 있으며 이들은 실리콘 표면과 솔-젤 반응을¹⁰⁻¹² 통하여 SAMs를 형성시킨다. 특히 FDTS는 함유되어 있는 불소기에 의하여 OTS에 비하여 상대적으로 낮은 6 mJ/m²의 표면 장력을 가짐으로 MEMS의 윤활 막으로 그 사용 영역이 확대되어지고 있다. 하지만 이러한 클로로실란 화합물은 우수한 표면 특성에도 불구하고 솔-젤 화학에 의한 Si-Cl 결합이 -OH기와의 가수화 반응에 의하여 발생하는 염산으로 인하여 알루미늄으로 만들어진 MEMS 장치의 연결 부위를 부식시키는 문제

점을 야기시킨다. 이의 해결 방안으로는 클로로실란이 함유되어 있지 않는 옥타데실트리메톡시실란 (OTMS)과¹³ 1-옥타데센과 같은 1차 알켄의 자유 라디칼 반응을 이용한 SAMs의 형성에 대한 연구가^{14,15} 진행되어지고 있다. OTMS에 의한 SAMs 형성의 경우 상대적으로 낮은 반응성에 의하여 실리콘 표면에 균일한 SAMs 형성이 어려우며, 1-옥타데센의 경우 180 °C에서 옥타데센에 라디칼을 부여하여 실리콘 표면과 반응시켜 SAMs을 형성함으로써 증착 방법 및 조건이 술-젤 반응에 의한 SAMs 형성에 비하여 상대적으로 어려운 문제점을 갖는다.

본 연구에서는 현재 하드디스크 윤활제로 널리 사용되고 있는 PFPE를¹⁶ 디메틸클로로메톡시실란 (DMCMS)을 사용하여 변형시켜 SPFPE를 제조하고 실리콘 표면에 SAMs로 형성시켜 이들의 표면 및 마찰 특성을 접촉각과 AFM을 통하여 확인하여 기존의 OTS, FOTS 및 PFPE SAMs와 상대 비교하였다.

2. 실험

재료 및 시료 제조. 본 연구에서 사용한 실리콘 기판은 (주)동진 세미켄의 실리콘 (100) 웨이퍼를 사용하였으며 SAMs 형성 재료와의 술-젤 반응을 촉진하기 위하여 기판 표면을 SPM용액으로 산화시켜 사용하였다. SPM용액은 Aldrich Chemical Co.에서 구입된 황산과 과산화수소를 85/15의 vol%로 혼합하여 제조하였으며 상온에서 10분간 침적시켜 친수성을 갖는 실리콘 기판을 제조하였다. SPFPE 합성에 사용한 PFPE와 DMCMS는 각각 미국 Ausimont사의 Fomblin Z-DOL 2000과 Fluka사로부터 공급받아 사용하였다. 합성시 반응 촉매로는 TCI사의 트리에틸아민 (TEA)을 사용하였다. 기존의 윤활제인 OTS와 OTMS는 Aldrich Chemical Co.사로부터 그리고 FOTS는 Fluoro Chemical Co.사 제품을 그대로 사용하였다. SAMs 형성을 위한 코팅 용액은 3M사의 프레온에 합성 SPFPE, PFPE, OTS, OTMS, FOTS를 각각 0.25 wt%첨가하여 제조하였다.

SPFPE의 합성 및 분석. SPFPE의 합성은 Figure 1에서와 같이 PFPE와 DMCMS를 1:1 몰 비로 프레온 용매에 녹인 후 0.1 wt%의 TEA를 첨가하여 100 mL 플라스크 반응기를 이용하여 15 °C에서 4시간 동안 질소 기류 하에서 반응시켰다. 이때 PFPE의 -OH말단기와 DMCMS의 -Cl기에 의하여 발생하는 염산은 감압 하에서 제거하였다. Varian사 200 MHz ¹H NMR (Gemini 2000)을 사용하여 PFPE의 -OH기의 감소와 DMCMS로부터의 메톡시기의 발현을 확인함으로써 SPFPE의 합성 유무를 확인하였다.

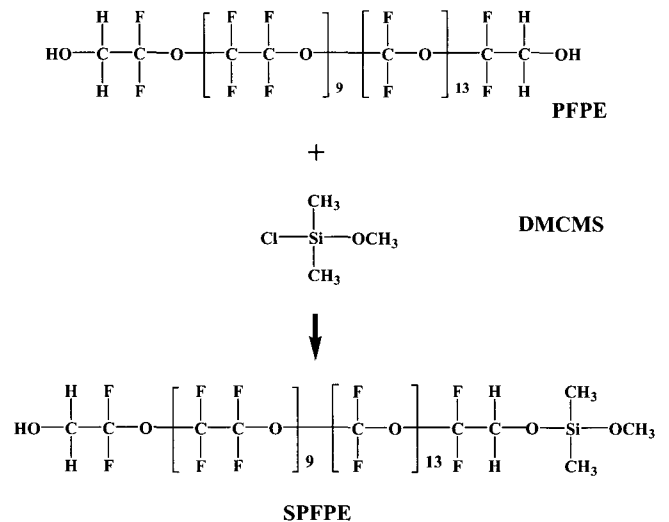


Figure 1. Modification scheme of silane modified PFPE.

SAMs의 형성. 실리콘에 친수성을 부여하기 위하여 기판을 0.5% 플로로화수소산 (HF) 수용액에 1분간 침적시켜 자연 산화막을 제거한 후 탈 이온수로 2분간 세척하였다. 세척된 기판은 80 °C에서 SPM 용액에 30분간 침적시킨 후 탈 이온수로 2분간 세척하였다. SPM으로 처리하여 -OH기가 발현된 실리콘 기판을 25 °C에서 제조된 SPFPE, PFPE, OTS, OTMS, FOTS 코팅 용액에 30분 동안 침적시켜 술-젤 반응을 진행시켰다. 반응 후 질소 기류 하에 건조한 후 진공오븐에서 60-160 °C로 10~70분간 열처리하여 형성된 SAMs 표면 변화를 살펴 보았다.

SAMs의 표면 특성 측정. SAMs가 형성된 실리콘 기판의 표면 특성은 SEO Co.의 접촉각 측정기를 사용하여 증류수 10 μL를 표면에 떨어뜨려 free standing drop method에 의하여 접촉각을 측정하였다. 표면의 특징적인 형태와 마찰력을 측정하기 위하여 Digital Instrument사의 Nanoscope IIIa 원자현미경 (AFM)을 사용하였다. Cantilever는 스프링 상수가 0.12 N/m이고 193 μm의 길이와 5-10 nm의 tip 반경을 갖는 triangular type microcantilever를 사용하였으며 cantilever의 수직 방향으로 1 Hz 스캐닝 속도로 5×5 μm의 scan box 범위에서 표면상태 이미지를 얻어 이로부터 R_a 값을 구하여 표면의 변화를 확인하였다. 이와 함께 lateral force mode (LFM)로 40 nN의 normal load를 가하여 SAMs의 마찰력을 측정하여 각 SAMs의 윤활 특성을 상대 비교하였다.

3. 결과 및 토론

SPFPE의 합성. Figure 2에 DMCMS와 PFPE 그리고 Figure 1의 scheme에 따라 합성된 SPFPE의 NMR 스펙트럼을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 DMCMS의 경우, -OCH₃와 -CH₃에 기인된 ¹H 피크가 3.9와 0.9 ppm에서 각각 발현되며 PFPE의 경우, -OH와 주사슬의 CH₂에 기인된 ¹H 피크가 5.2와 3.8 ppm에서 각각 발현됨을 알 수 있다. 합성된 SPFPE의 -OH에 기인된 ¹H는 5.2에서 4.5 ppm으로 이동되며 그 크기가 현저히 감소함을 알 수 있으며 -OCH₃에 기인된 ¹H 피크는 4.1 ppm에서 3.8 ppm로, -CH₃에 기인된 피크는 0.9에서 0.4 ppm으로 변화됨을 알 수 있다. 이러한 변화는 Figure 1에서 보인 바와 같이 DMCMS의 -Cl기가 PFPE의 -OH와의 반응에 의하여 말단에 -O-Si(CH₃)₂-OCH₃를 형성함을 의미한다. 합성 SPFPE에 -OH에 기인된 피크가 존재하는 것으로 보아 -O-Si(CH₃)₂-OCH₃가 PFPE의 양 말단에 모두 치환되지 못함을 알 수 있다. -OH과 CH₂의 면적 비를 계산하여 본 결과, 합성 전 PFPE의 1:2 비에서 합성 후 1:4로 변하는 것으로 보아 합성 SPFPE에 50% 정도의 PFPE의 -OH가 DMCMS의 -Cl기와 반응하여 -O-Si(CH₃)₂-OCH₃의 말단기를 가짐을 알 수 있다. 따라서 합성 시 1:1의 몰 비로 가해진 DMCMS의 -Cl기가 모두 -OH기와 반응이 이루어진 것으로 사료된다. 하지만 SPFPE의 말단기가 한쪽 혹은 양쪽으로 어떠한 비에 의하여 -O-Si(CH₃)₂-OCH₃로 치환되었는지는 확인할 수 없었다.

SAMs가 코팅된 실리콘 표면 특성. Figure 3에 다양한 종류의 윤활제에 의하여 SAMs가 형성된 실리콘의 표면 특성을 접촉각으로서 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 SPM으로 처리되기 전의 실리콘 기판은 대기 접촉에 의한 자연 산화막을 형성하여 60도 정도의 접촉각을 가지는 반면 SPM 처리에 의하여 실리콘 표면에

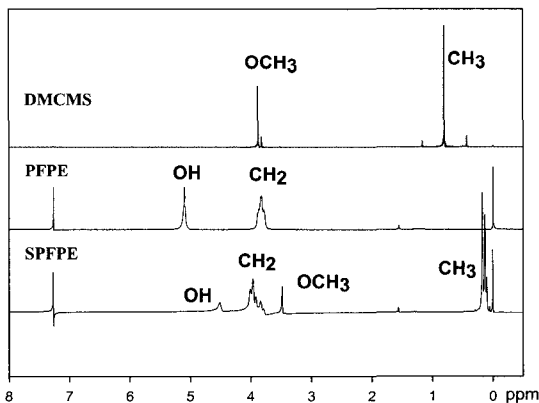


Figure 2. ¹H NMR spectra of DMCMS, PFPE, and SPFPE.

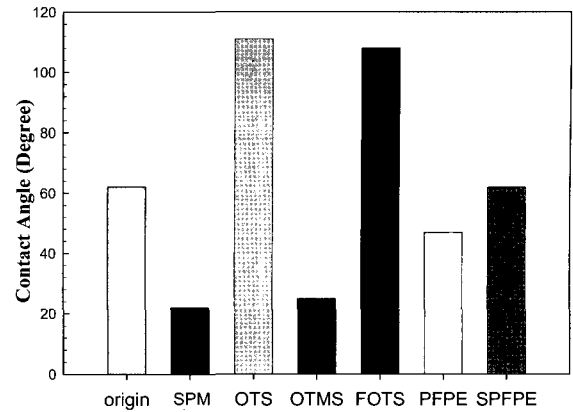


Figure 3. Water contact angle of various SAMs coated silicon surface.

-OH기가 발현되면 20도의 접촉각을 가지는 것으로 보아 기판이 친수성으로 변화되었음을 알 수 있으며 이는 실리콘 표면이 솔-젤 반응에 의하여 윤활제와 SAMs를 형성할 수 있는 표면으로 변화되었음을 의미한다.

그림에서 보는 바와 같이 OTS와 FOTS에 의하여 형성된 SAMs는 실리콘 표면의 -OH기와 이들 윤활제의 -Cl기의 솔-젤 반응에 의하여 표면에 Si-O 화학결합을 형성하여 소수성을 갖게 되어 접촉각이 현저히 증가됨을 알 수 있다. FOTS의 경우, FOTS에 포함되어 있는 불소에 의한 소수성 증가도 예측되나 OTS에 비하여 접촉각이 크지 않은 것으로 보아 FOTS에 의한 접촉각 변화는 Si-O 결합에 의한 SAMs 표면 형성에 더 의존적임을 확인할 수 있었다. 이에 반하여 -Cl기가 아닌 메톡시기에 의하여 솔-젤 반응이 일어나는 OTMS의 경우, SPM이 처리된 실리콘 기판과 유사한 접촉각을 가짐을 보인다. 이는 OTMS에 의하여 실리콘 표면에 Si-O 결합을 갖는 SAMs의 형성이 잘 발현되지 않음을 의미한다. 일반적으로 솔-젤 반응은 약 산성 및 약 염기성에서 발현하게 된다.¹⁰ OTS와 FOTS의 경우 -Cl기가 기판의 -OH와 반응하여 생성되는 HCl에 의하여 코팅 용액이 약 산성을 띄는 반면 OTMS는 메톡시기와 -OH기와 반응함에 따라 솔-젤 반응 조건에 맞는 pH를 갖지 못하며 그 결과, SAMs의 형성이 잘 이루어지지 않아 소수성의 발현이 낮음을 알 수 있다. 또 다른 요인으로는 -Cl기에 비하여 메톡시기가 상대적으로 -OH기와 반응성이 낮아 SAMs 형성이 완전하지 못함에도 기인될 것으로 사료된다.

그림에서 보는 바와 같이 PFPE 또한 OTS와 FOTS에 비하여 상대적으로 낮은 접촉각을 보인다. 이는 OTMS와 마찬가지로 PFPE의 -OH기가 기판의 -OH와 반응에 의하여 SAMs를 형성함에 따라 솔-젤 반응에 적합한 pH를

유지하지 못하며, 또한 OTS와 FOTS에 비하여 반응성 또한 떨어져 SAMs 형성이 상대적으로 쉽지 않아 낮은 소수성을 가짐을 알 수 있다. 하지만 불소 함유 PFPE의 우수한 표면 장력에 의하여 OTMS 보다는 높은 소수성을 가진다. 이에 비하여 말단에 메톡시기를 갖는 합성 SPFPS는 PFPE보다 기관의 표면의 -OH와 반응성이 우수하며 동시에 불소를 함유하고 있어 PFPE 보다 SAMs의 형성이 용이하며 그 결과 PFPE 보다 높은 소수성을 가짐을 알 수 있다. 하지만 OTS나 FOTS 보다는 소수성의 정도가 낮음을 알 수 있고 이는 SPFPS의 기관과의 반응성이 이들에 비하여 상대적으로 낮음에 기인한다.

Figure 4에 100 °C에서 10~70분간 열처리된 SPFPS에 의하여 발현된 SAMs의 접촉각 변화를 OTS와 PFPE에 의한 SAMs와 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 OTS SAMs의 경우 열처리 전에 비하여 접촉각의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 열처리에 의하여 발현될 수 있는 표면의 변화는 미반응 유효제에 의한 SAMs의 추가적인 형성과 Figure 5 (a)에서 보는 바와 같은 표면에 부착된 OTS 주사슬의 고분자화에 의한 Si-O-Si 결합 형성을 들 수 있다. Figure 4에서 보는 바와 같이 접촉각의 변화가 없는 것으로 보아 OTS의 우수한 반응성에 의하여 열처리 전에 위에서 언급된 SAMs 형성을 위한 솔-젤 반응이 완료되었음을 의미한다. 반면 SPFPS와 PFPE의 경우, 열처리에 의하여 접촉각이 증가되며 SPFPS의 경우 40분간의 열처리에서 OTS와 유사한 접촉각을 보임을 알 수 있다. 이는 PFPE와 SPFPS가 OTS에 비하여 실리콘 표면과의 반응성이 낮아 존재하는 미반응 PFPE와 SPFPS의 실리콘 표면과의 반응이 열처리 과정에서 발현되기 때문이다. 이들의 경우 OTS와는 달리 화학구조상 Figure 5(b)와 5(c)에서 보는 바와 같이 고분자화에 의한 SAMs 사이의 Si-O 결합 형성이 가능하지 않음으

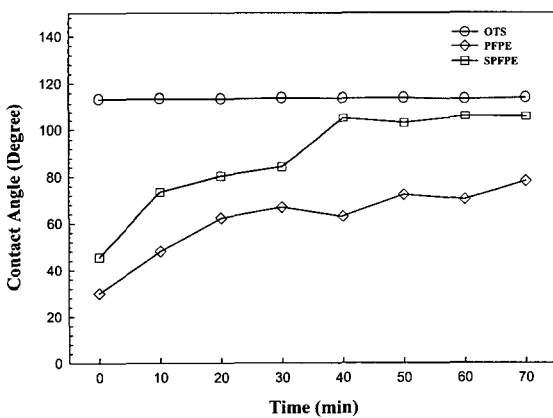
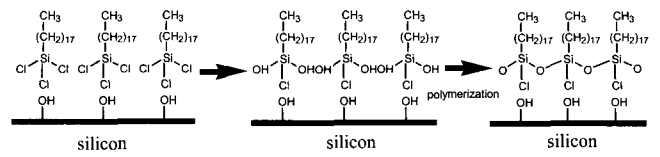
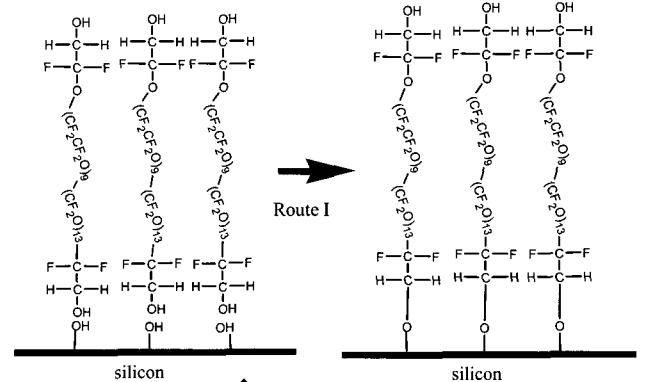


Figure 4. Effect of thermal annealing time on the surface characteristics of silane modified PFPE.

로 열처리에 의한 접촉각의 증가는 상대적으로 낮은 반응성에 의하여 존재하는 미반응 유효제의 반응에 의한 결과로만 해석할 수 있다. Figure 4에서 보는 바와 같

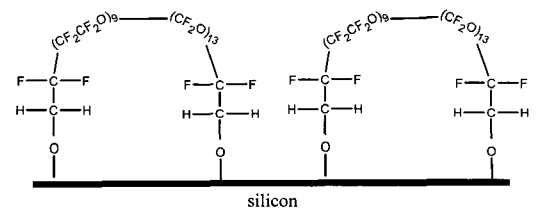


(a)

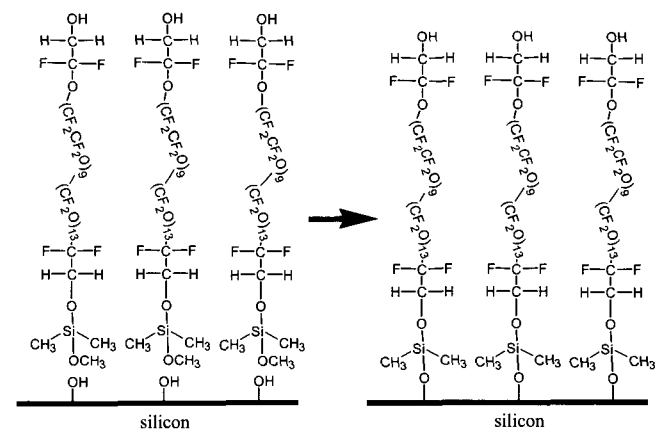


Route I

Route II



(b)



(c)

Figure 5. Scheme of formed SAMs on silicon substrate. (a) OTS, (b) PFPE, and (c) SPFPS.

이 SPFPE가 PFPE에 비하여 열처리에 의한 수소성의 증가가 두드러지는 이유는 SPFPE의 말단기에 존재하는 -OCH₃의 반응성이 PFPE의 -OH보다 큼에 기인한다. Figure 6에 열처리 온도에 따른 수소성의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 열처리 온도가 증가됨에 따라 PFPE와 SPFPE에 의하여 형성된 SAMs의 접촉각이 증가됨을 알 수 있으며 160 °C에서 두 경우 모두 OTS와 유사한 접촉각을 가짐을 알 수 있다. 이는 고온에서 PFPE와 SPFPE에 존재하는 OH-기와 실리콘 표면의 반응하여 화학 결합을¹⁷ 하거나 미반응 -OCH₃기의 반응에 의하여 SAMs의 형성을 상대적으로 빠르게 함을 의미한다.

Figure 7과 Figure 8(a)에 열처리 전 SAMs 표면 AFM 사진과 이들의 R_a 값의 변화를 나타내었다. SPM 처리가 된 실리콘 표면과 각각의 SAMs 표면의 R_a 값을 보면, 그림에서 보는 바와 같이 SPM 처리에 의한 SiO₂가 산화된 실리콘 표면은 SPM처리 전에 비하여 거친 표면을 보이나 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다. Si-O 결합에 의하여 SAMs가 형성되는 OTS, FOTS 그리고 SPFPE의 경우 형성된 SAMs에 의하여 표면 거칠기는 다소 증가되어 0.3 nm의 거칠기를 가지나 그 증가가 크지 않음을 알 수 있다. 이에 반하여 PFPE의 경우 이들 윤활제

에 비하여 상대적으로 낮은 거칠기를 보임을 알 수 있다. 이는 PFPE에 의하여 형성된 SAMs가 OTS, FOTS 그리고 SPFPE와는 달리 Figure 5(b)에서 보는 바와 같이 -OH와 -OH의 결합에 의하여 발현되기 때문인 것으로 사료된다. Figure 8(b)에 열처리된 후의 SAMs 표면 거칠기를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 열처리는 표면의 거칠기에는 커다란 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

SAMs가 코팅된 실리콘 표면의 마찰 특성. Figure 9(a)에 LFM에 의하여 측정된 열처리 전의 각 SAMs의 마찰력 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 SAMs가 형성되기 전 실리콘 기판이 가장 높은 마찰력을 보임을 알 수 있다. OTS와 FOTS에 의하여 SAMs가 형성되면 마찰력이 현저히 감소함을 알 수 있다. 즉 Figure 5에서 보는 바와 같이 SAMs 형성에 의하여 실리콘 표면의 형태가 현저히 달라지며 이러한 표면 형태의 변화는 microcantilever를 일정 하중 하에 스캐닝할 때 마찰력을

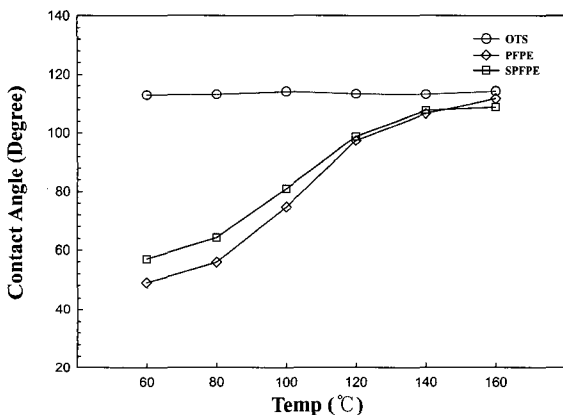


Figure 6. Effect of thermal annealing temperature on the surface characteristics of silane modified PFPE.

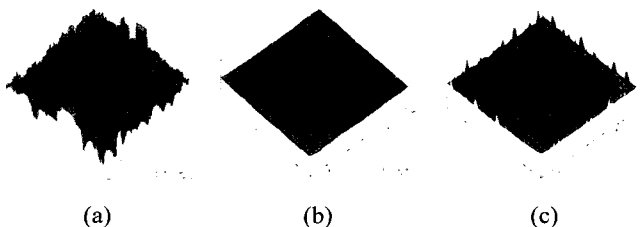
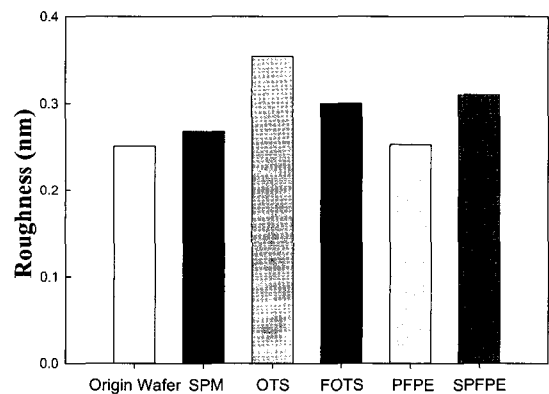
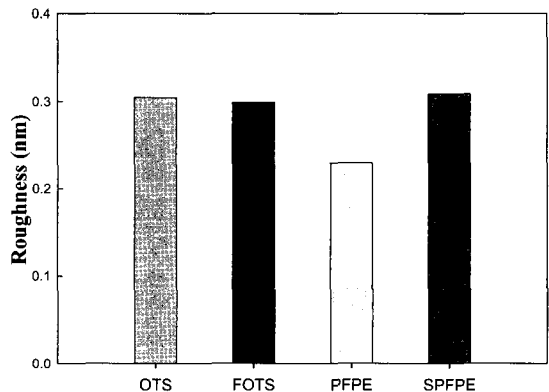


Figure 7. AFM images for (a) OTS, (b) PFPE, and (c) SPFPE.



(a)



(b)

Figure 8. Surface roughness of various SAMs coated on silicon surface. (a) without thermal annealing and (b) with thermal annealing at 100 °C for 70 min.

최소화하여 실리콘 표면의 tribological 특성이 우수해짐을 의미한다. PFPE의 경우 OTS와 FOTS에 비하여 더 낮은 마찰력을 보임을 알 수 있는데 이는 PFPE는 이들 윤활제에 비하여 주사슬의 길이가 길어 상대적으로 유연한 주사슬을 유지하며 Figure 5(b)에서 보는 바와 같이 실리콘 표면과의 결합 또한 Si-O-CH₂- 결합으로 형성되어 있으며 주사슬과 주사슬 간의 Si-O-Si 결합에 의한 고분자화 또한 발현할 수 없어 상대적으로 우수한 마찰력을 가짐을 알 수 있다. SPFPE의 경우 실리콘 표면과의 Si-O-Si- 결합에 의하여 PFPE 보다 다소 높은 마찰력을 가지나 OTS와 FOTS에 비하여 상대적으로 낮은 마찰 특성을 가짐을 알 수 있다. 이는 PFPE와 같은 맥락에서 설명할 수 있다.

Figure 9(b)에 열처리 후의 이들 SAMs 표면의 마찰특성을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 열처리에 의하여 전반적으로 마찰이 감소 즉, tribological 특성이 우

수해짐을 보인다. 이는 열처리에 의하여 SAMs 형성이 보다 완벽하게 발현되어 Figure 6에서 보인 바와 같이 소수성이 증가됨에 기인된다. 하지만 PFPE의 경우 마찰력이 현저히 증가됨을 보인다. 이는 열처리에 의하여 PFPE에 의한 SAMs의 형태가 달라짐을 의미한다. 즉 열처리에 의하여 Figure 5(b)의 route II에서 보는 바와 같이 실리콘 표면과 반응하지 않았던 PFPE의 다른 한쪽에 존재하던 -OH가 실리콘 표면과 반응하여 열처리 전과 다른 SAMs 표면을 가지는 것으로 유추할 수 있다. 이와 아울러 열처리에 의한 PFPE의 분해 역시 마찰력 증가에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구 MEMS에 윤활 코팅 소재로 적용할 수 있는 SPFPE를 합성하고 이를 실리콘 기판에 코팅하여 표면 특성 변화와 이에 따른 윤활 특성을 측정하여 기존의 OTS, FOTS 그리고 PFPE 윤활제와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) NMR 결과로부터 PFPE와 DMCMS의 실란 반응에 의하여 SPFPE가 합성되었음을 확인하였다. 합성된 SPFPE를 실리콘 기판에 코팅시킨 결과, SPFPE의 메톡시와 실리콘 표면의 -OH의 솔-젤 반응에 의하여 염산의 생성 없이 SAMs가 형성됨을 알 수 있었다.

2) 합성된 SPFPE에 의하여 형성된 SAMs 표면은 OTS와 FOTS에 비하여 낮은 소수성을 가지나 PFPE 보다는 높은 소수성을 가짐을 확인할 수 있었으며 열처리에 의하여 OTS와 유사한 소수성을 가짐을 확인하였다.

3) SPFPE에 의하여 형성된 SAMs는 다른 윤활제에 의하여 형성된 SAMs와 유사한 0.3 nm 정도의 거칠기를 가지며 열처리에 의한 조밀한 SAMs 형성에 의하여 표면 거칠기의 다소 감소함을 알 수 있었다.

4) 마찰력 측정결과, SPFPE에 의하여 형성된 SAMs는 실리콘 기판의 마찰력을 현저히 감소시키며 이는 SAMs의 소수성과 함께 SAMs을 구성하고 있는 고분자 주사슬의 유연성과 이들의 형태와도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

감사의 글 : 이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

References

1. B. Bhushan, Handbook of Micro/Nano Technology, CRS Press, Boca Raton, Florida, USA, 1995.

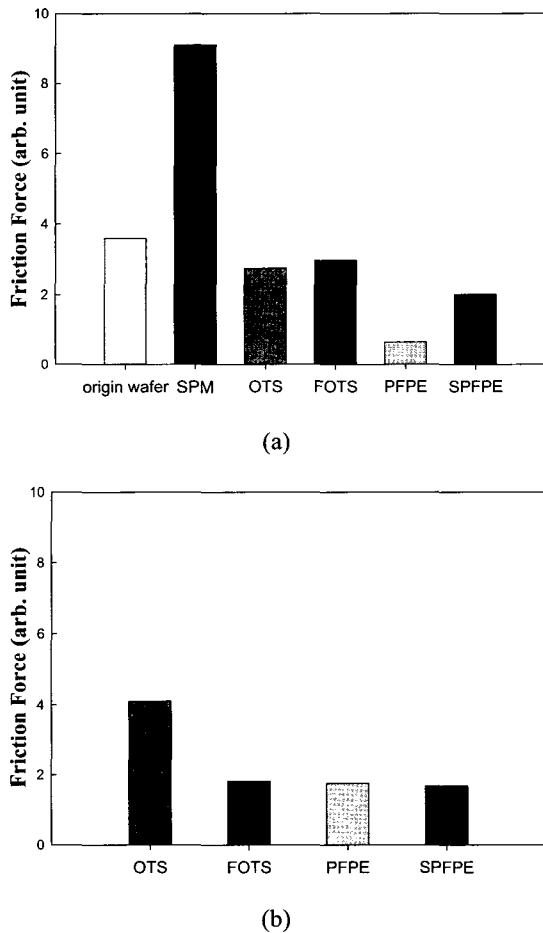


Figure 9. Friction of various SAMs coated on silicon surface. (a) without thermal annealing and (b) with thermal annealing at 100 °C for 70 min.

2. K. Komvopoulos, *Wear*, **200**, 305 (1996).
3. C. H. Mastrangleo, *Tribol. Lett.*, **3**, 223 (1997).
4. H. Liu, I. Ahmed, and M. Scherge, *Thin Solid Film*, **381**, 135 (2001).
5. K. Deng, R. J. Collins, M. Mehregany, and C. N. Sukenik, *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 1278 (1995).
6. K. H. Cha and D. E. Kim, *Wear*, **251**, 1169 (2001).
7. R. Banga, J. Yarwood, A. M. Morgan, and B. Evans, *Langmuir*, **11**, 4393 (1995).
8. J. Choi, M. Kawaguchi, and T. Kato, *J. Appl. Phys.*, **91**, 7574 (2002).
9. U. Srinivasan, M. R. Houston, R. T. Howe, and R. Maboudian, *J. MEMS*, **7**, 252 (1998).
10. H. Schmidt, *J. Non-Cryst. Solids*, **178**, 302 (1994).
11. J. D. Le Grange, J. L. Markham, and C. R. Kurkjian, *Langmuir*, **9**, 1749 (1993).
12. M. L. Hair and C. P. Tripp, *Colloid. Surface. A*, **105**, 95 (1995).
13. S. Singh, D. Y. Sasaki, J. Cearano III, and A. J. Hurd, *Thin Solid Films*, **339**, 209 (1999).
14. W. R. Ashurst, C. Yau, C. Carraro, C. Lee, G. J. Kluth, R. T. Howe, and R. Maboudian *Sensor Actuator A*, **91**, 239 (2001).
15. M. R. Sung, G. J. Kluth, O. W. Yauw, and R. Maboudian, *Langmuir*, **13**, 6164 (1997).
16. S. H. Park, S. W. Chun, D. J. Perettie, F. E. Talke, H. J. Kang, *Polymer(Korea)*, **23**, 73 (1999).
17. X. Zhao and B. Bhushan, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, **214**, 535 (2000).