

IBAD 방법으로 코팅된 PTFE 박막의 마이크로/나노 응착 및 마찰 특성

오현진 · 윤의성[†] · 한흥구 · 공호성 · 장경영*

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터, *한양대학교 기계공학부

Micro/Nano Adhesion and Friction Characteristics of PTFE Coating Film Deposited by IBAD Method

Hyun-Jin Oh, Eui-Sung Yoon[†], Hung-Gu Han, Hosung Kong and Kyung Young Jhang*

Tribology Research Center, KIST

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract – Micro/nano tribological characteristics of PTFE coating films were experimentally studied. PTFE (polytetrafluoroethylene) modified polyethylene and low molecular weight PTFE were used as a coating materials. These films were deposited on Si-wafer (100) by IBAD (ion beam assisted deposition) method. The Ar ion beam sputtering was performed to change the surface topography of films using a hollow cathode ion gun under different Ar ion dose conditions in a vacuum chamber. Micro/nano tribological characteristics, water wetting angles and roughness were measured with a micro tribotester, SPM (scanning probe microscope), contact angle-meter and profilometer, respectively. The durability of the films were measured with macro tribotester. Results showed that the PTFE coating surfaces were converted to hydrophobic. The water contact angle of coated surfaces and surface roughness increased with the coating thickness. Adhesion and friction in micro and nano scale were governed by magnitude of normal load in soft material such as PTFE films. As the increase of sputtering time on low molecular weight PTFE films, the surface roughness was increased and nano adhesion and friction were decreased. The nano tribological characteristics of surfaces are mainly improved by chemical modification such as PTFE coating and given a synergy effect by the physical modification such as topographic modification.

Key words – nano, micro, adhesion, friction, hydrophobic film, IBAD, PTFE

1. 서 론

최근 기계요소들이 소형화되고 의료용, 산업용으로 초소형 기계들이 제작되면서 MEMS 기술에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 미소기계들은 일반적인 기계에 비하여 구동력이 작으며, 부피에 비해 높은 표면적을 가지고 있기 때문에 마찰, 마모 문제가 발생하는 동시에 두 표면의 고착문제까지 발생하게 된다. 부품의 소형화, 고집적화를 이루기 위해서는 마이크로 드라이브(micro-drive)에서의 고착(stiction)[1], 마이크로 엔진(micro-engine)의 고착 및 마모[2] 등

과 같이 미세 기계부품에서 많이 발생하는 마찰, 마모 및 고착 문제를 해결해야만 한다. 일반적인 기계에서는 유체 윤활제가 실용적이지만 미소기계에서는 일반적인 유체 윤활제의 적용이 불가능하기 때문에 이를 해결하기 위한 연구가 많이 요구되고 있다. 높은 표면 장력에 의해 두 표면이 고착되는 것을 방지하기 위해서는 표면 처리를 통하여 낮은 표면 에너지를 갖게 하여야 하며, 동시에 마찰력을 감소시켜 내구성을 증가 시켜야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 나노 스케일에서의 트라이볼로지적 문제들을 여러 시각에서 연구하려는 시도들이 세계적으로 진행되고 있다.

나노 스케일에서 트라이볼로지적 문제를 해결하기

[†]주저자 · 책임저자 : esyoon@kist.re.kr

위해서 현재 화학적으로 표면을 변화시키는 방법과 물리적으로 접촉 표면의 형상을 변화시키는 방법의 두 분야로 연구되어지고 있다. 첫 번째 방법으로는 표면을 화학적인 방법에 의해 변화시킴으로써 표면에너지를 감소시켜 나노 응착, 마찰 및 마모를 줄이려는 방법으로 SAM(Self-assembled monolayer)[3-8], DLC(Diamond-like carbon)[9] 및 폴리머 코팅(Polymer coating)[10] 등의 박막이 연구되어지고 있다. 두 번째 방법으로는 접촉표면 형상을 마이크로/나노 크기로 변화시키는 방법으로 표면 텍스처링(texturing) 방법[11-13], 미소 돌기 형성(micro dimple formation) 방법[14,15]과 같은 방법들이 연구되어지고 있으며, 이러한 연구들은 표면 미세 가공을 통하여 실제 접촉 면적(real contact area)을 줄이므로 미소 접촉부의 표면 상호 작용력(surface interaction force)을 감소시킴으로써 나노 응착력과 마찰력을 감소시킨다는 원리에 그 기반을 두고 연구되어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 높은 소수성 특성을 나타내는 PTFE 변성 폴리에틸렌과 저분자량 PTFE 파우더를 IBAD 방식으로 웨이퍼 위에 가열 증착 코팅하여 화학적으로 표면 특성을 변화시켜 마이크로/나노 트라이볼로지적 특성을 향상시키고자 하였다. 또한, Ar 이온 주사법을 사용하여 화학적으로 변화된 표면에 대해 물리적으로 미소 표면 거칠기를 증가시킴으로써 화학적, 물리적 두 방법에 의한 극소수성 표면을 구현하고자 하였다. 미소기기 및 MEMS에 의 적용 가능성을 타진하기 위하여 나노/마이크로/마크로 스케일(Nano-/micro-/macro-scale)에서의 트라이볼로지적 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2-1. 시편

실험에서는 사용된 평판 시편으로는 PTFE 변성 폴리에틸렌 파우더(LANCO-WAX TF 1778)와 저분자량 PTFE 파우더 (LANCO-WAX TF 1790)를 실리콘 웨이퍼 (100) 위에 IBAD(Ion beam assisted deposition) 방법으로 증착 코팅한 시편을 사용하였다. Fig. 1은 중공 캐소드형(Hollow cathode type)의 이온 건(Ion gun)이 장착된 IBAD 진공 가열증착(Thermal evaporation) 코팅기의 모습과 IBAD의 원리를 보여주고 있다.

웨이퍼에 존재하는 불순물 및 산화층을 제거하기 위해서 10^{-4} torr의 진공 하에서 아르곤(Ar) 이온을 이용하

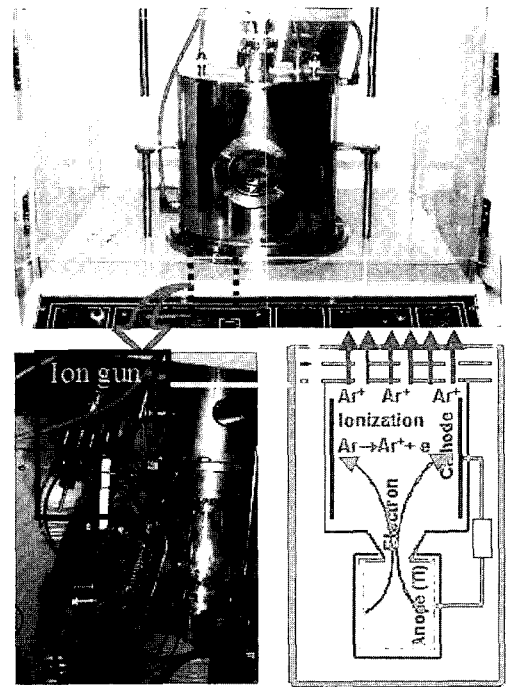


Fig. 1. A View of IBAD thermal evaporator.

여 표면을 클리닝 하였다. 최적의 코팅 조건을 찾기 위하여 파우더의 증량과 이온빔 전압을 일정하게 하고 보트(Boat)의 가열 온도를 400°C 에서 1400°C 까지 200°C 씩 증가시키며 코팅하였으며, 수분 접촉각(Water contact angle) 및 SPM을 이용한 표면 거칠기를 측정된 결과 수분 접촉각이 가장 큰 800°C 가 최적 가열 온도 조건이었다(Table 1 참조). 또한 파우더의 증량과 코팅 온도를 800°C 로 일정하게 한 상태에서 이온 빔 전압을 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.5 keV로 변화시키며 코팅하였으며, 수분 접촉각과 마크로 시험기를 이용한 피막의 내구 수명(Durability) 측정 결과 이온 빔 전압 0.2 keV가 최적 코팅 조건이었다(Table 2 참조). 즉, 보트의 가열 온도가 800°C 이고 이온 빔 전압이 0.2 keV일 때가 코팅 조건이 최적의 상태였으며, 이러한 조건으로 실험 시편들을 제작하였다.

표면 코팅 두께의 변화를 위해 PTFE 변성 폴리에틸렌 시료를 0.005 g, 0.01 g, 0.05 g, 0.1 g로 변화시키며 코팅하였다.

표면의 코팅 효과 외에 표면 형상 변화 효과를 얻기 위하여, 앞에서 제작한 코팅 시편에 대하여 이온 빔 전압을 0.2 keV로 가하면서 Ar 스퍼터링(Sputtering)을 2초, 5초, 30초하여 표면의 형상을 변화시켰다.

Table 1. Water contact angle and surface roughness (R_a) with the evaporating temperature

Temp. (°C)	400	600	800	1000	1200	1400
Water contact angle (°)	128.3	134.4	144.0	124.3	117.3	102.3
R_a (nm)	2.73	3.23	4.14	2.64	2.61	1.97

Table 2. Water contact angle and durability with the ion-beam voltage

Ion-beam voltage (keV)	0.2	0.4	0.6	1	1.5
Water contact angle (°)	108	113	114	105	95
Durability (cycle)	200	6.7	4.7	3.3	53.3

2.2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 MEMS 요소의 접촉 시 발생하는 나노 스케일 표면 요철간의 응착 및 마찰 현상을 모사하여 실험하고자, DI(Digital Instrument)사의 멀티모드 SPM(multimode SPM, NanoScope IIIa)을 사용하였으며, Fig. 2(a)에 그 모습을 나타내었다. 표면 형상은 탭핑모드(Tapping mode) AFM을 이용하여 측정하였으며, 나노 스케일의 응착력과 마찰력을 측정하기 위해서 접촉모드(Contact mode) AFM을 사용하였다. 표면 형상 측정에 사용된 팁은 300 kHz의 공진주파수를 갖는 팁 반경이 10 nm미만인 Si팁(Veeco, OTESPA)을 사용하였고, 응착력과 마찰력을 측정하기 위해 스프링 상수가 0.58 N/m이고 팁 반경이 평균 15 nm인 oxide sharpened Si_3N_4 팁(Veeco, NP-S20)을 사용하였다.

표면 형상은 2 μ m/s의 팁속도로 1 μ m \times 1 μ m 및 10 μ m \times 10 μ m의 영역을 측정하였으며, 각각의 시편에 대해 3번 이상 측정하여 표면 거칠기(R_a)값을 구하였다. 나노 스케일 응착력은 힘-거리 곡선(Force-displacement curve)을 이용하여 SPM팁과 시편간의 pull-off force를

측정하였으며, 20번 이상의 측정 결과를 평균하였다. 나노 스케일 마찰력은 LFM Mode에서 캔탈레버와 수직인 방향으로 스캔하면서 정방향과 역방향의 변화량(TMR)을 20번 이상 측정하여 평균하여 구하였다. 또한 각 표면의 수분 접촉각은 contact anglemeter (ERMA, goniometer type)를 사용하여 측정하였다.

또한 실제 MEMS 요소간의 응착 및 마찰 현상을 모사 실험하기 위하여 자체 제작한 왕복동 형식의 마이크로 마찰 실험 장치를 사용하였다. 실험 장치는 Fig. 2(b)에 그 모습을 보여주고 있다. 실험에 사용된 볼은 직경이 2 mm인 Si_3N_4 볼로 SPM팁과 같은 재질을 사용하였다. 실험 조건은 하중이 1 mN, 왕복 행정이 2 mm, 속도가 2 mm/s이었으며, 3회 이상 실험하여 그 결과를 평균하였다.

내구 수명(Durability)을 시험하기 위하여 일방향 마이크로 마찰 시험 장치를 사용하였다. 볼 시편으로는 12.7 mm 스틸볼을 사용하였으며, 100 g의 하중과 10 mm/s (8 rpm)의 속도 조건으로 일방향으로 회전시키면서 마찰시험을 하였다. 코팅층의 파손은 마찰계수가 초기의 값보다 2배 이상으로 증가하거나, 갑작스런 마찰 계수의 증가가 발생할 때까지로 정의하고, 이때까지의 시간을 내구 수명으로 정하였다(Fig. 3 참조).

모든 실험은 실내 온도 25 \pm 1°C, 상대 습도 45 \pm 2%의 항온 항습실에서 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. IBAD 방법으로 코팅된 PTFE 변성 폴리에틸렌 피막

순수 PTFE는 용융점이 340°C로 알려져 있으나 진공 가열 증착기를 이용하여 코팅하는 것이 불가능하므로, PTFE 변성 폴리에틸렌을 진공 가열 증착기를 이

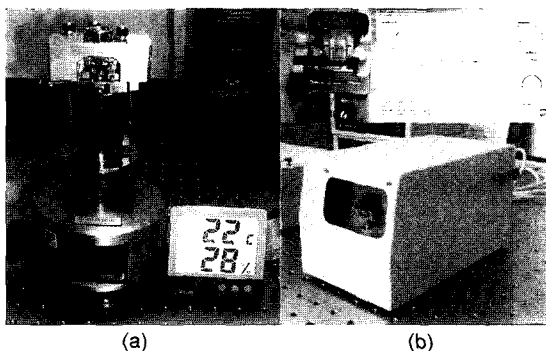


Fig. 2. Nano tribotester (SPM) and micro tribotester. (a) nano tribotester and (b) micro tribotester.

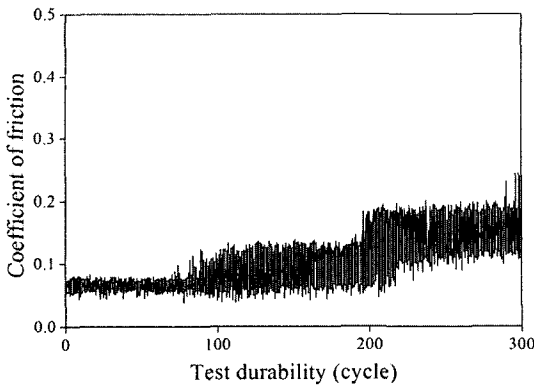


Fig. 3. Durability test result of PTFE modified polyethylene using macro tribotester.

용하여 코팅함으로써 PTFE의 특성을 갖는 피막을 얻고자 하였다.

Fig. 4는 코팅 시료 중량 변화에 따라 코팅된 시편의 표면 형상을 AFM으로 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 크기로 측정된 3D 표면 이미지를 보여주고 있다. 코팅 시료의 중량이 많아질수록 표면의 형상이 거칠어졌으며, 표면 거칠기가 2.9 nm, 4.1 nm, 29.6 nm, 52.3 nm로 증가하는 현상을 볼 수 있었다. 가장 거친 표면은 입자들이 붙어 있는 듯한 모습을 보여주기도 하였다. 코팅층의 두께를 측정하여본 결과(Fig. 5 참조), 두께가 40 nm, 80 nm, 400 nm, 800 nm로 증가하였음을 알 수 있었다.

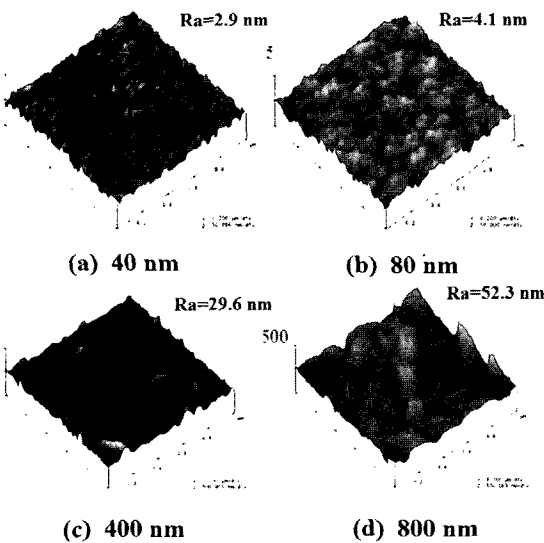


Fig. 4. 3D surface images of PTFE modified polyethylene measured by AFM.

즉, 코팅 시료에 비례하여 코팅층의 두께가 변화하였음을 알 수 있었다. Fig. 5는 코팅 두께 측정을 위한 PTFE 변성 폴리에틸렌 코팅층의 단면 SEM 사진을 보여주고 있다.

Fig. 6은 PTFE 변성 폴리에틸렌을 IBAD 방식으로 두께가 다르게 코팅한 시편들에 대하여, 수분 접촉각 및 SPM으로 측정한 표면 거칠기(R_a)를 보여주고 있다. 코팅 두께가 두꺼워질수록 수분 접촉각이 증가하였으며, 표면 거칠기도 상대적으로 크게 증가하였음을 알 수 있었다. PTFE 변성 폴리에틸렌을 IBAD 방식으로 Si-wafer 위에 코팅함으로써 표면이 수분 접촉각 100도 이상의 소수성화(Hydrophobic) 표면으로 변화되었으며, 코팅 두께 증가에 따라 표면 거칠기(R_a)도 증가하여 표면의 소수성화가 극대화되어 증가하는 현상을

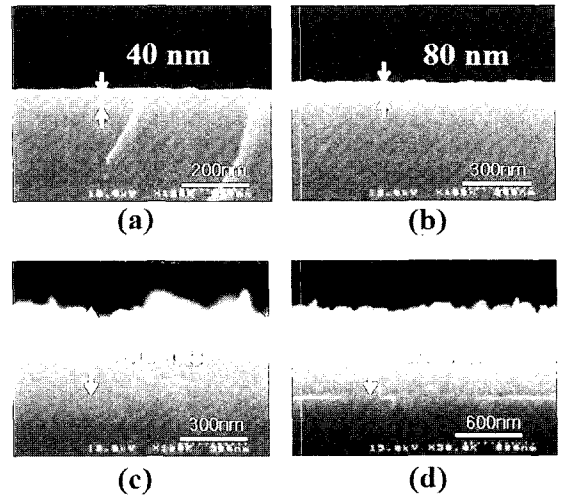


Fig. 5. Section view of PTFE modified polyethylene.

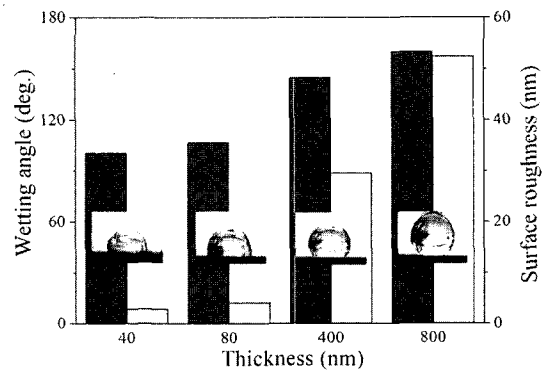


Fig. 6. Water contact angles and Surface roughness (R_a) of PTFE modified polyethylene with the coating thickness.

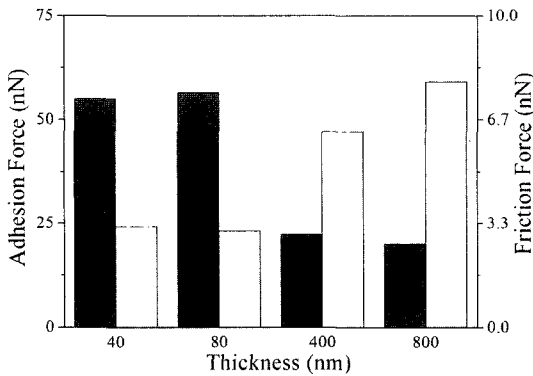


Fig. 7. Nano adhesion and nano friction of PTFE modified polyethylene with the coating thickness.

볼 수 있었다. 특히, 800 nm의 코팅두께에서는 표면의 소수성화가 극대화되어 물방울이 표면에 붙지 않으므로, 같은 방법으로는 수분 접촉각을 측정할 수가 없어, 이 경우에는 수분 접촉각을 160도로 표시하였다.

Fig. 7은 PTFE 변성 폴리에틸렌의 두께 변화에 따른 SPM팁과 코팅 표면의 나노 스케일의 응착력과 마찰력을 보여주고 있다. 코팅 두께가 두꺼워짐에 따라 나노 스케일의 응착력은 감소하였으나 나노 스케일의 마찰력은 증가하는 현상을 볼 수 있다. 즉, 나노 스케일의 응착력은 Fig. 6에서와 같이 수분 접촉각과 관계하여 소수성화 정도에 따라 감소된 결과로 사료된다. 반경 15 nm인 SPM팁에 의한 나노 스케일의 마찰력에 있어서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이, 코팅 두께가 증가함에 따라 표면 형상이 거칠어지면서 표면 거칠기 (R_a)가 코팅 두께 800 nm의 경우에는 52.6 nm 정도로 되어, 이들이 팁과 상대 접촉할 때 표면 거칠기 보다는 경사면으로서 마찰력에 작용하였을 것으로 사료된다. 이는 Bhushan 등이 발표한 결과와 같은 결과를 보여주고 있다[16].

Fig. 8은 PTFE 변성 폴리에틸렌의 두께 변화에 따른 마이크로 마찰 특성과 내구 수명을 마이크로 및 마크로 마찰 실험 장치를 이용하여 측정한 실험 결과를 보여주고 있다. 마이크로 마찰 시험 장치에서는 두께 변화에 따른 마찰 계수의 변화는 크게 나타나지 않았으나, 내구 수명은 두께 증가에 따라 크게 증가하였다. 코팅 두께가 가장 두꺼운 두께 800 nm의 시편이 내구 수명이 가장 길었다. 마이크로 및 마크로 마찰 시험에서는 하중이 나노 스케일과는 다르게 크므로, 강도가 무른 재질인 PTFE 변성 폴리에틸렌은 접촉 표면이 소

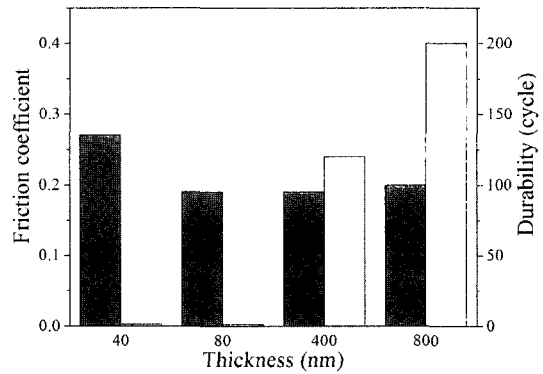


Fig. 8. Micro friction coefficient and durability of PTFE modified polyethylene with the coating thickness.

성 변형되어 나타난 마찰 특성으로 사료된다. 즉, 나노 스케일에서는 하중에 의한 영향보다는 표면력에 의한 영향이 크게 나타남을 알 수 있었다.

3.2. Ar 이온 스퍼터링에 의한 표면 형상 변화의 효과

3.2-1. PTFE 변성 폴리에틸렌 피막

Fig. 9는 최적 코팅 조건하에서 코팅된 PTFE 변성 폴리에틸렌 피막을 Ar 이온을 이용하여 스퍼터링한 시편을 AFM으로 측정한 3D 표면 이미지를 보여주고 있다. 이온 스퍼터링 시간이 증가함에 따라 표면 형상이 거칠어지며 표면거칠기(R_a)가 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 10은 PTFE 변성 폴리에틸렌 코팅 시편의 Ar 이온 스퍼터링 시간에 따른 수분 접촉각과 표면거칠기 (R_a)의 변화를 보여주고 있다. 스퍼터링 시간이 증가함에 따라 표면거칠기(R_a)가 증가하였으나 수분 접촉각은 감소하였다. 표면거칠기가 증가하면 수분 접촉각이 증가한다는 연구 논문 결과들과 상반된 결과를 보여주고 있다[17].

Fig. 11은 스퍼터링 시간에 따른 마이크로 마찰 특성과 내구 수명의 측정 결과를 보여주고 있다. 스퍼터링 시간이 증가함에 따라 마이크로 스케일의 마찰계수는 증가하고, 내구 수명은 급격하게 감소하였음을 알 수 있었다. 따라서 시편들에 대하여 XPS 표면 분석을 한 결과는 Fig. 12와 같다. Ar 이온 스퍼터링을 하지 않은 코팅 시편은 표면에 F가 존재하였으나, 스퍼터링을 한 시편에서는 모두 F가 존재하지 않았다. PTFE 변성 폴리에틸렌 코팅 시편에는 PTFE가 코팅되어 있었으나, Ar 이온 스퍼터링을 함에 따라 PTFE가 떨어져 나가 폴리에틸렌 층만 남아 있음을 알 수 있었다.

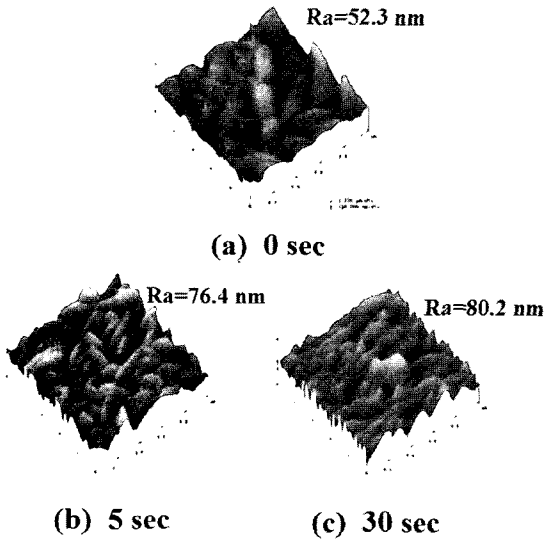


Fig. 9. 3D surface images of PTFE modified polyethylene with Ar ion sputtering time.

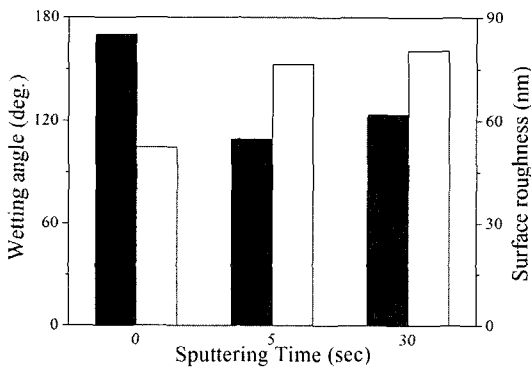


Fig. 10. Water contact angles and surface roughness (R_a) of PTFE modified polyethylene with Ar ion sputtering time.

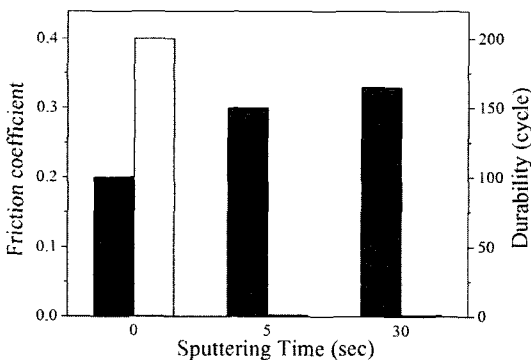


Fig. 11. Micro friction coefficient and durability of PTFE modified polyethylene with Ar ion sputtering time.

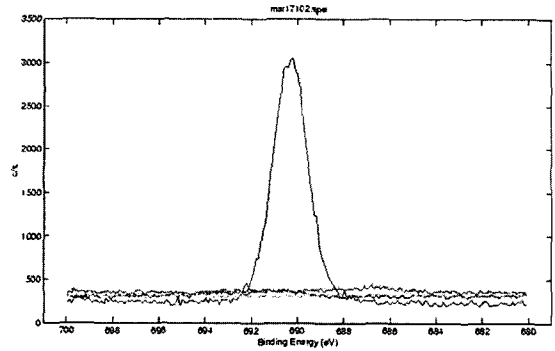


Fig. 12. XPS analysis of PTFE modified polyethylene with Ar ion sputtering time.

즉, 코팅 표면의 최외각에만 PTFE가 약하게 코팅되어 있음을 알 수 있었다. 따라서 PTFE 변성 폴리에틸렌 코팅 시편은 PTFE의 특성에 의해 표면이 소수성화 되어 수분 접촉각이 증가하였으며, 윤활 성능이 향상되어 내구 수명도 증가하였음을 알 수 있었다. 그러나 Ar 이온 스퍼터링을 함에 따라 시편은 PTFE 층이 없어지고 폴리에틸렌층의 특성만이 나타나 수분 접촉각이 감소하고, 윤활 특성이 나빠졌음을 알 수 있었다.

PTFE 변성 폴리에틸렌 코팅 시편에 Ar 이온 스퍼터링을 이용하여 물리적으로 표면을 변화하려 하였으나, 표면이 화학적으로도 변화되었으므로 순수한 표면 형상 변화에 의한 효과를 볼 수 없었다.

3-2-2. 저분자량 PTFE 피막

Fig. 13은 최적 코팅 조건하에서 코팅된 저분자량 PTFE 피막을 Ar 이온을 이용하여 스퍼터링한 시편을 AFM으로 측정된 3D 표면 이미지를 보여주고 있다. 코팅 표면은 스퍼터링을 함에 따라 표면이 거칠어 졌으며, 스퍼터링에 의해 코팅층이 모두 깎여 없어졌을 때는 표면이 매끄러워짐을 알 수 있었다. 코팅층의 단면 모습에서도 이러한 현상을 볼 수 있었다.

Fig. 14는 저분자량 PTFE 코팅 시편의 스퍼터링 시간에 따른 수분 접촉각과 표면거칠기의 변화를 보여주고 있다. 30초 동안 스퍼터링을 한 경우에는 수분 접촉각이 110도 정도까지 감소하였지만, 다른 시편 모두 표면의 소수성화가 극대화되어 표면에 물방울이 붙지 않아 수분 접촉각을 측정하는 장비로써 측정이 불가능 하였으며, 본 연구에서는 이러한 시편들의 수분 접촉각을 160도로 하였다. Ar 이온 스퍼터링 시간이 증가함에 따라 표면거칠기(R_a)가 증가하였다. 저분자량

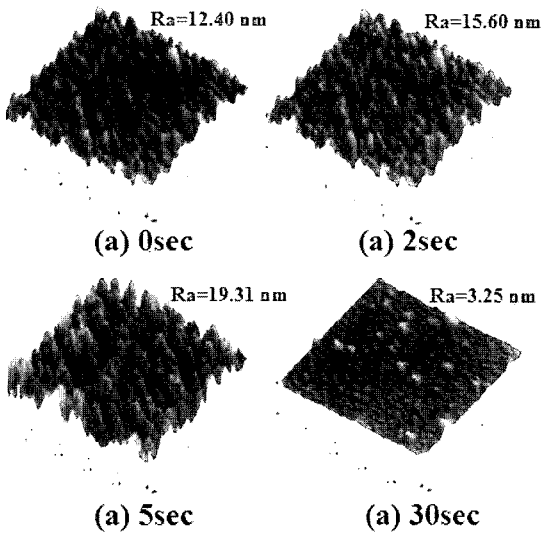


Fig. 13. 3D surface images of low molecular weight PTFE with Ar ion sputtering time.

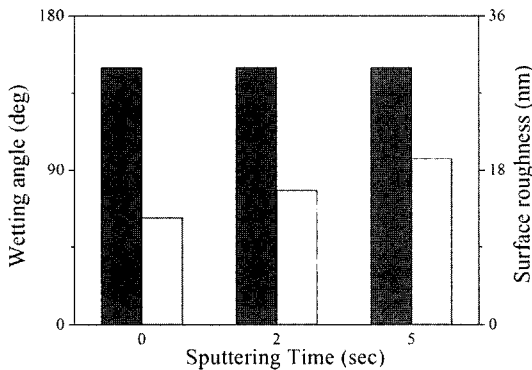


Fig. 14. Water contact angles and surface roughness (R_a) of low molecular weight PTFE with Ar ion sputtering time.

PTFE 코팅 피막은 PTFE변성 폴리에틸렌 코팅 피막과는 다르게 Ar 이온 스퍼터링을 하여도 수분 접촉각이 감소하지 않고, 소수성 특성을 잃지 않음을 알 수 있었다. Fig. 15와 같이 내구 수명이 오래가는 것으로 보아 화학적인 변화는 크게 일어나지 않는 것으로 사료되며 오직 물리적인 변화만 있었음을 알 수 있었다.

Fig. 15는 저분자량 PTFE 코팅 시편의 Ar 이온 스퍼터링 시간에 따른 마이크로 스케일의 마찰 계수와 내구 수명을 보여주고 있다. 마이크로 스케일의 마찰 계수는 큰 변화가 없었으며, 내구 수명 또한 모두 8000 cycle 이상이었다. PTFE 변성 폴리에틸렌 코팅 시편보다 약 40배 이상의 내구 수명을 나타내었다. 따

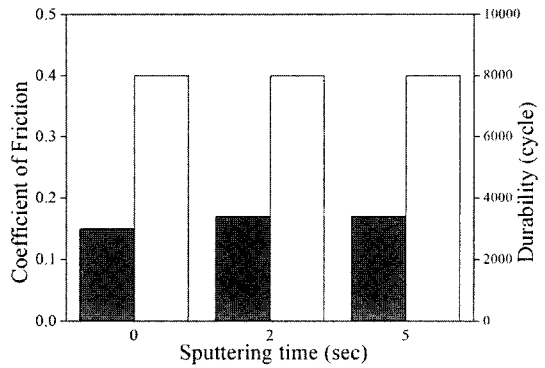


Fig. 15. Micro friction coefficient and durability of low molecular weight PTFE with Ar ion sputtering time.

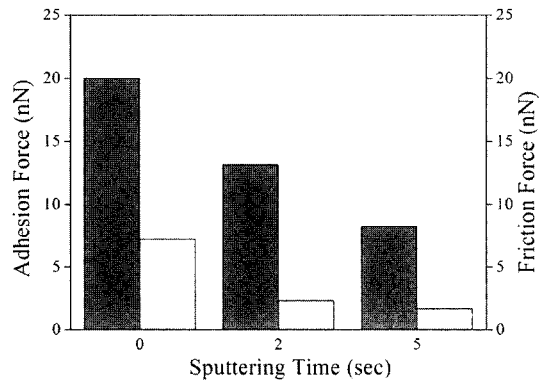


Fig. 16. Nano adhesion and nano friction of low molecular weight PTFE with the coating thickness.

라서 표면이 화학적으로 변화되지 않았음을 알 수 있었으며, 저분자량 PTFE 코팅 피막의 표면 형상이 Ar 이온 스퍼터링을 이용하여 물리적으로 변화되었음을 알 수 있었다.

Fig. 16은 저분자량 PTFE 코팅 시편의 Ar 이온 스퍼터링 시간에 따른 나노 스케일의 응착 특성과 나노 스케일의 마찰 특성을 보여주고 있다. 나노 스케일의 응착력과 나노 스케일의 마찰력 모두 Ar 이온 스퍼터링 시간이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다. 수분 젖음 특성 이외에도 표면거칠기의 효과에 의해 감소되었음을 알 수 있었다.

따라서 표면을 PTFE 박막 코팅을 통해 화학적으로 변화시킴으로써 표면을 소수성화 시키며, 응착 및 마찰 특성을 향상시킬 수 있었으며, Ar 이온 스퍼터링을 이용하여 표면 형상을 물리적으로 변화시킴으로써 응착 및 마찰 특성을 더욱 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

위와 같은 실험 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PTFE 변성 폴리에틸렌과 저분자량 PTFE를 실리콘 웨이퍼에 코팅함으로써 표면을 소수성화 할 수 있었으며, 응착 및 마찰 특성을 향상시킬 수 있었다.
2. PTFE와 같은 강도가 낮은 재질의 마이크로 및 마크로 마찰 특성은 접촉 표면에서 소성 변형을 일으키므로 하중에 의해 영향을 받지만, 나노 스케일의 마찰 특성은 표면력에 의해 영향을 받음을 알 수 있었다.
3. PTFE 변성 폴리에틸렌 코팅 시편은 Ar 이온 스퍼터링에 의해 코팅층 외곽에 코팅되어 있던 PTFE층이 없어지는 화학적 변화가 발생하였으며, 응착 및 마찰 특성이 저하되었다.
4. 코팅에 의해 화학적으로 변화된 저분자량 PTFE 코팅 시편은 Ar 이온 스퍼터링을 이용하여 표면 형상을 물리적으로 변화시킴으로써 응착 및 마찰 특성을 더욱 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 나노메카트로닉스기술개발사업(<http://www.nanomecca.re.kr>)과 기초기술이사회 정책연구사업의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

1. Tai, Y.C., Fan, L.S. and Muller, R.S., 'IC-Processed Micro-Motors: Design, Technology and Testing.'
2. Deng, K., Collins, R.J., Mehregany, M. and Sukenik, C.N., "Performance Impact of Monolayer Coatings of Polysilicon Micromotors," *Proc. MEMS 95*, Amsterdam, Netherlands, Jan-Feb.
3. 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.
4. Carraro, C., Yauw, O.W., Sung, M.M. and Maboudian, R., "Observation of Three Growth Mechanisms in Self-Assembled Monolayers," *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 102, No. 23, 1998.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Houston, M.R., Howe, R.T., Komvopoulos, K. and Maboudian, M., "Diamond-Like Carbon Films for Silicon Passivation in Microelectromechanical Drives," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 383, 391, 1995.
10. Eui-Sung Yoon, Seung Ho Yang, Hung-Gu Han, Hyun-Jin Oh and Hosung Kong, "Micro/Nano Tribological Characteristics of Thin Fluorocarbon Based Hydrophobic Polymeric Coatings Deposited by IBAD Method," *14th International Conference of Wear of Materials*, Washington DC, USA, March 30- April 3, 2003, pp. 28.
11. Ando, Y. and Ino, J., "Friction and Pull-Off Force on Silicon Surface Modified by FIB," *Sensors and Actuators A*, Vol. 57, pp. 83-89, 1996.
12. Ando, Y., Ishikawa, Y. and Kitahara, T., "Friction Characteristics and Adhesion Force under Low Normal Load," *Trans. ASME J. Tribol.*, 117, pp. 569-574, 1995.
13. Alley, R.L., Mai, P., Komvopoulos, K. and Howe, R.T., "Surface Roughness Modification of Interfacial Contacts in Polysilicon Microstructures," *Proc. 7th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, Transducers '93, Yokohama, Japan, 288-291, 7-10 June 1993.
14. Ando, Y. and Ino, J., "The Effect of Asperity Array Geometry on Friction and Pull-Off Force," *Trans. ASME J. Tribol.*, 119, pp. 781-787, 1997.
15. Komvopoulos, K., "Surface Engineering and Microtribology for Microelectro-Mechanical Systems," *Wear*, Vol. 200, pp. 305-327, 1996.
16. Bhushan, B., "Nanoscale Tribo-Physics and Tribo-mechanics," *Wear*, Vol. 225-229, pp. 465-492, 1999.
17. 윤의성, 박지현, 양승호, 공호성, 장경영, "IBAD로 표면개질된 실리콘 표면의 나노 트라이볼로지적 특성," *한국윤활학회지*, 제18권 제1호, pp. 1-8, 2002.