

## 실험 및 유한요소해석에 의한 SU-8 박막의 Tribological 특성 연구<sup>§</sup>

양우열\* · 신명근\* · 김형만\* · 한상철\* · 성인하\*<sup>†</sup>

\* 한남대학교 기계공학과

### Experimental and Finite Element Study of Tribological Characteristics of SU-8 Thin Film

Woo Yul Yang\*, Myounggeun Shin\*, Hyung Man Kim\*, Sangchul Han\* and In-Ha Sung\*<sup>†</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received July 17, 2012 ; Revised November 26, 2012 ; Accepted December 2, 2012)

**Key Words:** SU-8 Photoresist(SU-8 포토레지스트), Friction(마찰), Adhesion(점착), Finite Element Analysis(유한요소해석), Atomic Force Microscope(원자간 힘 현미경), Critical Load(임계하중)

**초록:** 본 연구에서는 SU-8 박막의 마이크로시스템으로의 트라이볼로지적 응용을 목적으로 하여, 원자간 힘 현미경(AFM) 과 콜로이드 프로브를 이용한 실험 및 유한요소해석 기법을 이용하여 SU-8 코팅층의 두께에 따른 트라이볼로지적 특성을 고찰하였다. SU-8 시편은 스핀 코팅기법을 이용하여 두께를 다르게 하여 제작하였다. 실험결과 코팅두께가 증가함에 따라 마찰력과 점착력이 감소하여 박막두께에 따른 차이가 존재함을 알 수 있었고, SU-8 표면이 Si 표면에서보다 더 낮은 점착력과 마찰력을 보여주었다. 또한, 시뮬레이션을 통해 두께별로 박막 파손을 유발시키는 임계하중(압력)이 존재하며, 본 연구에서의 200~800 nm 두께범위에서는 1.2~1.8 GPa 로 측정되었다.

**Abstract:** In this study, two-dimensional finite element models were developed and experiments were conducted using an atomic force microscope to investigate the tribological characteristics of an SU-8 layer coated on a patterned wafer for microsystem applications. The results revealed that both the adhesion and the friction forces measured by the atomic force microscope were lower for the SU-8 coated surface than for the bare silicon surface. This is attributed to the hydrophobicity of SU-8. Another important result derived from the finite element analysis was the critical load required to fracture the SU-8 film with respect to the thickness. The critical loads for thicknesses of 200, 400, and 800 nm were approximately 13, 22, and 28 mN, respectively, which corresponded to a Hertzian contact pressure of 1.2~1.8 GPa. These results will aid in the design of a suitable SU-8 thickness for microsystem components that are in contact with one another.

#### 1. 서 론

마이크로시스템 또는 미세기전시스템(MEMS, Micro-Electro-Mechanical Systems) 의 기관 재료로 폭넓게 사용되는 실리콘은 경도, 강성, 피로 등의 물성에 있어서 또 반도체 제조기술에 의한 대량제조 용이성 등 많은 장점을 가지고 있으나, 마찰·마모와 같은 트라이볼로지적 성능에 있어서는 매우 취약한 것이 사실이다.<sup>(1)</sup> 실리콘-실리콘간 또는

다른 유사한 재료와의 접촉시에 매우 높은 점착력(stiction, adhesion)과 마찰력, 심한 마모를 보인다. 그러므로, 마이크로시스템의 점착력 및 마찰력을 저감시키고 수명을 향상시키기 위하여 표면개질(surface modification)이 중요하다. 실제로, 점착력, 마찰 및 마모는 마이크로시스템의 공통적인 파손기구(failure mechanism)이다. 점착력과 마찰 및 마모를 줄이기 위하여 표면의 화학적 상태변화 뿐만 아니라 micro-dimple/bump, micro-texturing 등 표면의 접촉면적을 감소시키는 기하학적 형상변화도 도입되고 있다.<sup>(2,3)</sup>

마이크로시스템 부품의 신뢰성 및 수명향상을 위한 또 다른 노력으로서, 최근들어 SU-8 과 같은 폴리머재료가 차세대 마이크로시스템의 구조 재료

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 춘청학회 춘계학술대회(2012. 5. 10., 한국원자력연구원) 발표논문임

† Corresponding Author, isung@hnu.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

로서 빠른 속도로 실리콘을 대체하고 있다. 실리콘과는 달리 SU-8 은 소수성(hydrophobic)과 생체 적합성(bio-compatibility) 을 갖는다.<sup>(4,5)</sup> SU-8 은 또한 마이크로/나노 구조물로도 제작될 수 있는 장점이 있다.

SU-8 에 대한 트라이볼로지적 특성에 대한 연구는 최근들어 외국의 몇몇 소수 그룹에 의해 시작되고 있는데, 주로 매크로 스케일에서 마찰시험기를 통해 SU-8 코팅이 내마모성을 크게 향상시키고 마찰계수도 약 2.5~3.5 배 감소시킨다는 기본적인 수준의 연구결과만이 알려져 있다.<sup>(6-9)</sup>

국내에서는 SU-8 의 소수성 특성을 활용한 포토 레지스트로서의 마이크로시스템, 연료전지 등에서의 마이크로 채널 등 미세 구조물 제작으로의 연구가 주로 이루어져 왔고,<sup>(10,11)</sup> 마찰 및 마모 특성에 대해 연구가 수행된 적이 없으며 아직 본격적으로 시작되고 있지 않다.

이러한 배경으로부터, 본 연구에서는 SU-8 코팅층의 두께에 따른 소수성, 마찰 특성, 박막 파손 특성 등을 고찰하고 그 트라이볼로지적 응용가능성을 처음으로 파악해 보고자 하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 실험

실험에 사용한 SU-8 박막은 SU-8 2000.5 (Microchem Co., USA) 용액을 사용하여 Fig. 1 에 제시한 spin coating 방법을 이용하여 실리콘 기판위에 제조하였다. 코팅하고자 하는 실리콘 기판을 진공척(vacuum chuck) 위에 고정시킨후 프로그래밍한 속도와 시간으로 회전시키면서 코팅용액을 떨어뜨려 기판 표면에 일정한 두께로 코팅이 되도록 하였다.

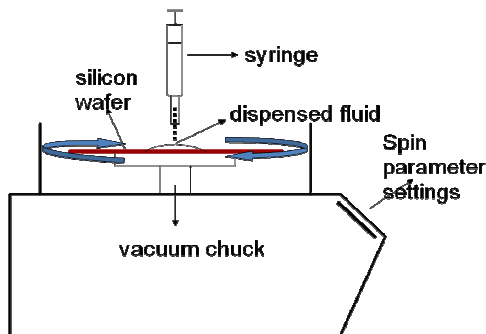


Fig. 1 A schematic of spin coating for the specimen preparation

코팅층의 두께는 이론적으로 다음의 식에 의해 예측될 수 있다.<sup>(12)</sup>

$$h(t) = h_0 \left( 1 + \frac{4\rho\omega^2 h_0^2}{3\eta_0} t \right)^{-1/2}$$

여기서,  $t$ 는 회전시간,  $h_0$ 는 SU-8 의 최초 두께,  $\omega$ 는 회전각속도,  $\rho$ 는 용액의 밀도,  $\eta$ 는 용액의 점도이다. 이로부터 원하는 두께를 얻기위한 시간, 속도 등의 공정조건을 예측한 뒤 실제 코팅을 실시하여 정확한 공정조건을 획득하였다. SU-8 두께에 따른 특성을 고찰하기 위하여 spin time 10~30 초, 회전속도 1000~3000 rpm 의 범위에서 조건을 설정하여 200, 400, 800 nm 의 두께로 박막을 제조하였다. Spin coating 후에 95°C 의 오븐에서 soft-baking 을 약 2 분간 실시하였고, 이후 UV-lamp (UVItec, 312nm, 2200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) 를 이용하여 약 30 초간 UV-expose 를 실시하였다. 최종적으로 200°C 에서 약 30 분간 hard-baking 을 통해 SU-8 박막을 경화시켜 코팅공정을 완료하였다. 코팅의 두께는 이론적 예측뿐만 아니라 실제 원자현미경(atomic force microscope) 또는 표면거칠기 측정기(surface profiler)로 직접 측정하여 예측값이 유사함을 확인하였다.

제작된 SU-8 박막표면의 접촉 및 마찰 특성을 살펴보기 위하여 AFM 을 이용하였다. SU-8 코팅층이 박막이고 Table 1 에 제시된 SU-8 의 기계적 물성에서 보이듯이 인장 및 파괴강도가 60~70 MPa 정도로 매우 작은 반면, 일반적인 직경 10 nm 의 AFM 팁이 사용될 경우 10 nN 정도의 극미세 하중만 팁에 가해도 약 130 MPa 의 압력이 표면에 작용하여 표면파손이 일어나므로 이러한 일반적인 AFM 팁을 사용하게 되면 표면의 접촉력 및 마찰 특성 분석을 위한 실험이 제대로 이루어질수 없게 된다.

따라서, 본 연구에서는 표면에 작용하는 압력을 낮추기 위해 AFM 의 첨예한 팁 대신에 Fig. 2 와 같이 약 5  $\mu\text{m}$  직경의 실리콘 미세입자를 붙인 콜

Table 1 Material properties of SU-8

Viscosity (cSt)	Young's modulus (Gpa)	Poisson's ratio	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Tensile (fracture) strength(MPa)
2.49	2.0~4.0	0.22	1.19	60~70

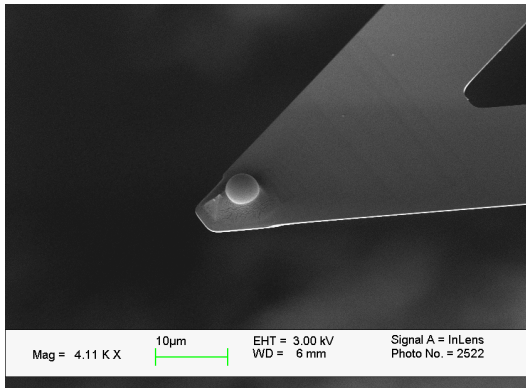


Fig. 2 SEM micrograph of an colloidal probe used in the AFM experiment

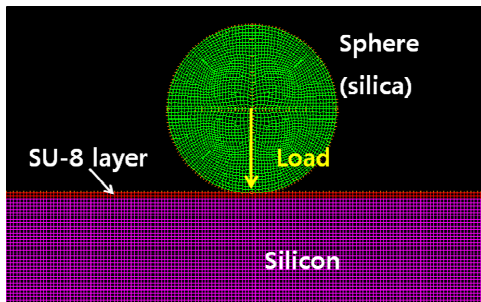


Fig. 3 A finite element model used in this study

로이드 프로브(colloidal probe)를 제작하여 사용하였다. 제작된 콜로이드 프로브의 스프링 상수는 기존의 잘 알려진 방법에 의해 측정되었고,<sup>(13-15)</sup> 0.22~0.35 N/m 의 범위를 보였다.

2.2 유한 요소 해석

마이크로시스템으로의 적용을 위해 SU-8 코팅층의 표면특성 뿐만 아니라 코팅층의 파손특성 및 내구성을 파악하는 것이 중요하다. 이를 위하여, 코팅층의 두께에 따른 박막 파손특성을 유한요소 해석을 통하여 살펴보았다. 실제 AFM 실험에서의 데이터와 비교하기 위하여 Fig. 3 와 같이 직경 5 µm 의 구가 SU-8 표면과 접촉한 상황에서 하중이 가해질 때의 상황을 모델링하였고, 두께에 따른 박막 파손의 임계하중(압력)을 해석을 통해 얻고자 하였다.

해석은 상용 소프트웨어인 ADINA 를 이용하여 수행하였다.<sup>(16)</sup> 모든 재료는 등방성 완전 탄소성 재료로 모델링 하였으며, 해석방법은 Dynamics-Implicit 로 해석을 진행하였다. 요소는 모두 2 차원 솔리드의 9 절점 요소를 사용하였으며, 정격자 메쉬가 짜여지도록 요소를 구성하였다.

Table 2 Material properties used in the finite element analysis

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Yield or Tensile strength(MPa)
SiO <sub>2</sub>	70	0.2	2.0	8400
Si	112	0.28	2.33	5000-9000

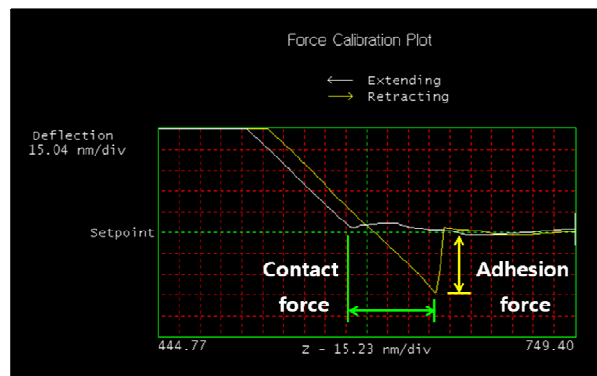


Fig. 4 A force-distance curve obtained by the contact between a colloidal probe and a SU-8 layer with a thickness of 200 nm

Table 1, 2 에 시뮬레이션에 사용된 각 재료의 물성치를 제시하였다.

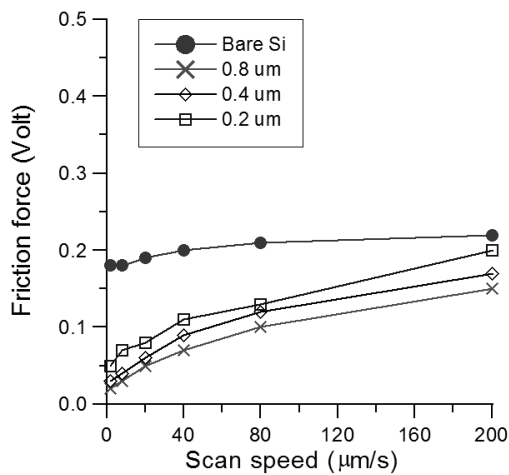
3. 결과 및 토의

3.1 AFM 실험 결과

Fig. 4 는 AFM 과 콜로이드 프로브를 이용하여 200 nm SU-8 박막 표면에 대해서 측정하여 얻은 힘-변위 곡선(force-distance curve)의 예시이다. AFM 의 탐침은 매우 작은 수직방향 강성(stiffness)과 수십 나노미터 수준의 반경을 가지므로, 대상표면과의 점착력 측정을 가능하게 하며, 힘-변위곡선은 AFM 에서 표면의 점착력 및 접촉력을 측정하는 일반적인 방법으로서,<sup>(17,18)</sup> AFM 팁과 시료표면과의 거리에 따른 상호작용력의 변화를 나타낸다. 측정 데이터로부터 각 시편별로 콜로이드 프로브와 시편표면간 접촉력(contact force)를 계산해보면 Table 3 에 제시한 바와 같고, 이것을 이용해 Hertzian 응력이론에 의해 접촉압력을 계산해보면, bare Si 의 경우 약 64 MPa 이며 SU-8 박막의 경우 약 12~15 MPa 로 표면의 파손은 전혀 발생하지 않을 것임을 알 수 있다.

**Table 3** Contact and adhesion forces of each sample used in this study

Material	Contact force (nN)	Adhesion force (nN)
Bare Si(100)	12.8	14.0
SU-8 200nm	19.2	14.3
SU-8 400nm	13.0	11.7
SU-8 800nm	13.7	10.9

**Fig. 5** Frictional forces of the bare silicon and SU-8 coating layers with various thickness slid against a colloidal probe with respect to scan speed

이와 같이 표면의 특성이 유지되는 상태에서 측정된 각 시편간 접촉력을 비교해보면, 실리콘 표면에서보다 SU-8 표면에서 더 낮은 접촉력을 보이는데, 이는 SU-8의 소수성 특성이 나타나는 것으로 유추할 수 있다. 또한, 측정데이터는 SU-8 두께가 증가함에 따라 접촉력이 다소 감소함을 보이는데, 이는 박막의 두께가 증가함에 따라 SU-8 막의 특성이 좀 더 안정적으로 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 각 시편에 대해 하중 100 nN, 총 미끄럼 거리 20 mm의 조건하에서 콜로이드 프로브와 AFM을 이용하여 시험한 미끄럼 속도에 따른 마찰력의 변화를 보여주고 있다.

실험결과는 실리콘에서 보다 SU-8 표면에서 낮은 마찰력을 보이며, SU-8 표면의 경우 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마찰력이 다소 상승하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 sliding speed에

따른 SU-8 박막에 대한 마찰실험 결과는 기존의 연구에서 보고된 적이 없으며, 앞으로 이의 명확하고 근본적인 메커니즘 규명을 위해 많은 분석과 추가 연구가 필요하다. 현 연구단계에서 기존의 다른 폴리머 재료에 대한 연구결과로부터 그 메커니즘을 유추해 보면, 이러한 원인을 유리 전이온도(glass transition temperature)와 관계가 있는 현상으로 파악하고 있는데, 일반적으로 유리 전이온도가 높은 폴리머의 경우 높은 속도에서 표면의 연화효과(softening effect)로 큰 마찰력을 보이는 것으로 알려져 있다.<sup>(19,20)</sup> 보통의 폴리머의 경우 유리 전이온도가 80~120 °C 인 것에 반해, SU-8은 230 °C 정도로 매우 높기 때문에 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서와 같이 AFM을 이용하여 폴리머 박막의 마찰력과 온도와의 관계를 고찰한 연구에서는 박막의 분자간 결합에 연관된 chain confinement에 기인하여 유리전이온도가 bulk polymer에서보다 50~60도 이상 낮아지는 것으로 보고하고 있고, 접촉압력이 클 때 속도가 증가함에 따라 비정상적인 viscous flow가 발생하여 점성을 증가시키고 이에 따라 점성저항이 커져 마찰력이 증가하는 것으로도 보고하고 있다.<sup>(21~23)</sup>

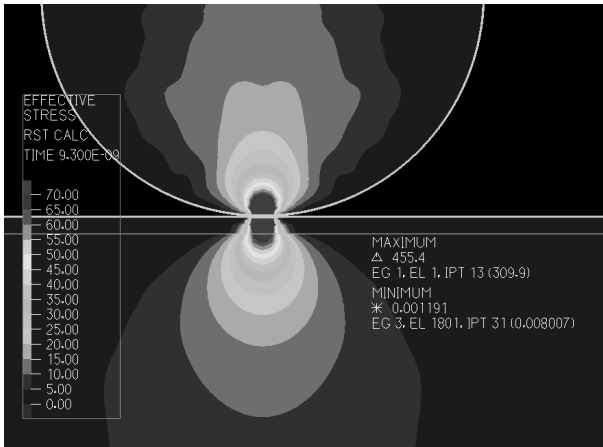
### 3.2 시뮬레이션에 의한 박막 파손시의 임계 압력 고찰

앞서 언급한대로 SU-8 박막의 두께에 따라 박막의 파손을 유발하는 임계하중(압력)을 고찰하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다.

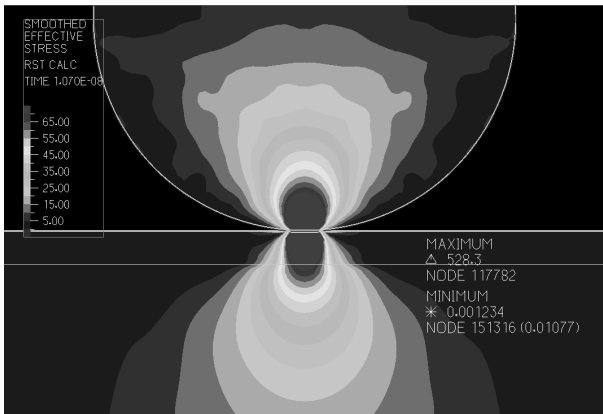
Fig. 6은 실험조건 및 실험시편과 동일하게 모델링된 5 μm 직경의 실리카 입자 및 실리콘위에 코팅된 각 SU-8 박막의 두께별로 해석을 통하여 얻은 임계하중과, 임계하중이 작용될 경우 SU-8 및 실리콘 내부에 발생하는 응력 분포를 보여주고 있다. 본 논문에서 임계하중의 정의는 그 하중에 의해 SU-8의 항복강도 또는 인장강도(약 70 MPa) 이상의 응력이 SU-8 코팅층 전체를 관통하여 발생하게 되어 결국 코팅층의 파손이 발생할 때의 하중을 의미한다.

유한요소 해석 결과, 200, 400, 800 nm 두께의 SU-8 박막의 임계하중은 각각 13, 22, 38 mN으로 나타났다. 이 때의 표면에 작용하는 압력을 Hertz 응력 이론으로 구해보면, 약 1.2~1.8 GPa에 해당한다.

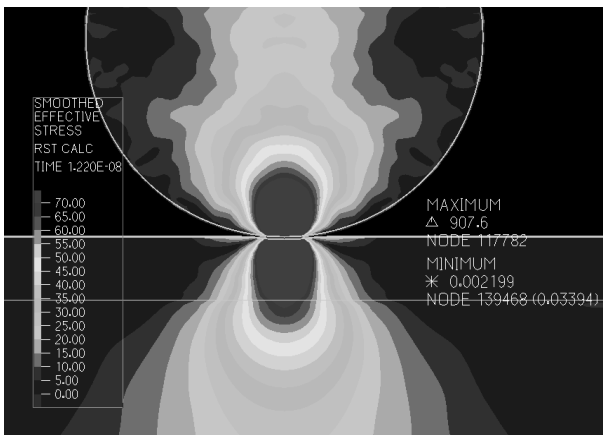
이와 같은 임계압력에 대해 탄성접촉이론으로 계산하여 접촉조건을 고려하여 보면, 약 20 nm 반



(a) 200 nm thickness



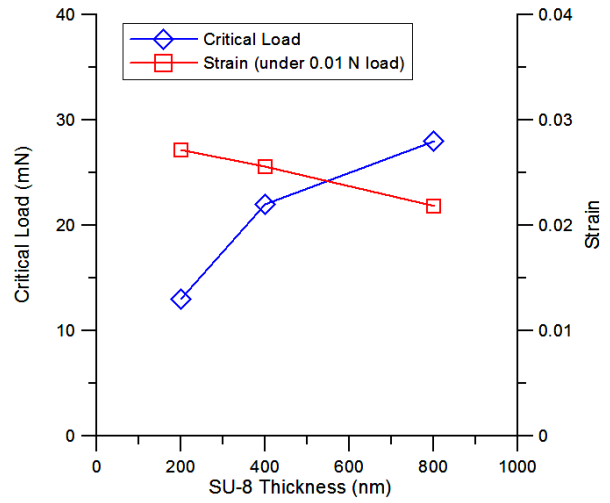
(b) 400 nm thickness



(c) 800 nm thickness

**Fig. 6** FE simulation results that showed the critical loads where the contact stress exceeds over SU-8 yield stress with respect to the thickness

경의 팁에 1  $\mu\text{N}$ 의 하중을 가할 경우 약 1.3 GPa 정도의 접촉압력이 작용하게 되는데, 이러한 접촉 조건은 AFM으로 구현 가능하므로, 실제로 본 해석결과의 타당성을 확인해보기 위하여 약 20nm 반경을 갖는 AFM sharp tip을 이용하여 SU-8 박막



**Fig. 7** FE simulation results that showed the critical loads and strain with respect to the SU-8 thickness

의 scratch에 의한 파손 실험을 수행하였다. 그러나, 단 한번의 스크래치에 의해서는 파손 흔적이 작아 파손부위의 이미징을 위해 팁을 교체하여 측정시에 이미지 획득이 쉽지 않았고 또한 박막 두께 전체의 파손여부를 명료하게 파악하기가 어려웠다. 따라서, 향후 마이크로 스케일에서의 스크래치 실험을 통해 해석결과의 유효성을 고찰하고자 한다.

Fig. 7은 각 두께별 임계하중과 10 mN의 동일한 하중을 가했을 때 각 박막 단면에서의 변형률 해석 결과이다. 두께가 증가할수록 동일하중에 대해 발생하는 변형률이 미소하게 감소함을 알 수 있다. 그러나, 이러한 결과는 해석시에 SU-8의 탄성계수를 고정된 하나의 값으로 입력하였으나, 기존의 연구에 따르면 SU-8의 탄성계수는 UV노출량, 열처리와 박막 두께 등에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다.<sup>(8,24,25)</sup> 일반적으로, 박막 두께에 따른 탄성계수는 나노인덴테이션 방법으로 측정할 수 있고, 측정된 탄성계수를 유한요소해석에 적용하면 해석으로부터 더욱 정확한 박막 파손 임계압력과 박막 두께의 상관관계 및 이에 따라 넓은 범위의 두께에서의 일반적인 SU-8 박막의 파손 메커니즘을 규명할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 향후 박막 두께에 대한 실제 나노인덴테이션(nano-indentation)에 의한 실험 연구를 통해 보다 명확한 상관관계를 입증하고자 한다.

#### 4. 결론

마이크로시스템으로의 트라이볼로지적 응용을

목적으로 하여, 원자간힘 현미경(AFM) 과 콜로이드 프로브를 이용한 실험 및 유한요소해석 기법을 이용하여 SU-8 코팅층의 두께에 따른 트라이볼로지적 특성을 고찰하였다. SU-8 시편은 스핀 코팅기법을 이용하여 두께를 다르게 하여 제작하였다.

실험결과 코팅두께가 증가함에 따라 마찰력과 점착력이 감소하여 박막두께에 따른 차이가 존재함을 알 수 있었고, SU-8 표면이 Si 표면에서보다 더 낮은 점착력과 마찰력을 보여주었다.

또한, 시뮬레이션을 통해 두께별로 박막 파손을 유발시키는 임계하중(압력)이 존재하며, 본 연구에서의 200~800 nm 두께범위에서는 1.2~1.8 GPa 정도로 측정되었다. 향후 추가적인 연구를 통하여 접촉압력 및 속도에 따른 최적의 두께의 상관성을 파악하면, 마이크로시스템의 작동 수명향상에 크게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0002084).

## 참고문헌

- (1) Williams, J. A. and Le, H. R., 2006, "Tribology and MEMS," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 39, pp. 201~204.
- (2) Kim, D.E., Cha, K. H. and Sung, I. H., 2002, "Design of Surface Micro-Structures for Friction Control in Micro-Systems Applications," *CIRP Annals*, Vol. 51, No. 1, pp. 495~498.
- (3) Baumgart, P., Krajnovich, D. J., Nguyen, T. A. and Tam, A. C., 1995, "A New Laser Texturing Technique for High Performance Magnetic Disk Drives," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, pp. 2946~2951.
- (4) Abgrall, P., Conedera, V., Camon, H., Gue, A. M. and Nguyen, N. T., 2007, "SU-8 as a Structural Material for Labs-on-Chips and Microelectromechanical Systems," *Electrophoresis*, Vol. 28, pp. 4539~4551.
- (5) Foulds, I. G. and Parameswaran, M., 2006, "A Planar Self-Sacrificial Multilayer SU-8-Based MEMS Process Utilizing a UV-Blocking Layer for the Creation of Freely Moving Parts," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp. 2109~2115.
- (6) Tay, N. B., Minn, M. and Sinha, S. K., 2011, "Polymer Jet Printing of SU-8 Micro-Dot Patterns on Si Surface: Optimization of Tribological Properties," *Tribology Letters*, Vol. 42, pp. 215~222.

- (7) Tay, N. B., Minn, M. and Sinha, S. K., 2011, "A Tribological Study of SU-8 Micro-Dot Patterns Printed on Si Surface in a Flat-on-Flat Reciprocating Sliding Test," *Tribology Letters*, Vol. 44, pp. 167~176.
- (8) Jiguet, S., Judelewicz, M., Mischler, S., Hofmann, H., Bertsch, A. and Renaud, P., 2006, "SU-8 Nanocomposite Coatings with Improved Tribological Performance for MEMS," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, No. 6, pp. 2289~2295.
- (9) Singh, R. A., Satyanarayana, N., Kustandi, T. S. and Sinha, S. K., 2011, "Tribo-Functionalizing Si and SU8 Materials by Surface Modification for Application in MEMS/NEMS Actuator-Based Devices," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, 015301.
- (10) Son, Y., Lim, T. W., Yang, D. Y., Yi, S. W., Kong, H. J. and Park, S. H., 2008, "Study on Process Parameters of a SU-8 Resin in Two-Photon Stereolithography for the Fabrication of Robust Three-dimensional Microstructures," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 130~137.
- (11) Choi, I., Wang, H., Choi, K. S. and Kim, H. M., 2010, "Numerical Analysis-Based Design of PEMFC Channel, Fabrication of Channels, and Performance Test Using SU-8," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No. 4, pp. 349~354.
- (12) Lawrence, C. J., 1988, "The Mechanics of Spin Coating of Polymer Films," *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 10, pp. 2786~2795.
- (13) Sader, J. E., Chon, J. W. M. and Mulvaney, P., 1999, "Calibration of Rectangular Atomic Force Microscope Cantilevers," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 70, pp. 3967~3969.
- (14) Green, C. P., Lioe, H., Cleveland, J. P., Proksch, R., Mulvaney, P. and Sader, J. E., 1995, "Normal and Torsional Spring Constants of Atomic Force Microscope Cantilevers," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, pp. 1988~1996.
- (15) Ogletree, D. F., Carpick, R. W. and Salmeron, M., 1996, "Calibration of Frictional Forces in Atomic Force Microscopy," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 67, pp. 3298~3306.
- (16) De, S., Hong, J. and Bathe, K., 2003, "On the Method of Finite Spheres in Applications: Towards the use with ADINA and in a Surgical Simulator," *Computational Mechanics*, Vol. 31, No. 1, pp. 27~37.
- (17) Cappella, B. and Dietler, G., 1999, Force-Distance Curves by Atomic Force Microscopy, *Surface Science Reports*, Vol. 34, No. 1-3, pp. 5~104.
- (18) Waltman, R. J. and Guo, X.-C., 2012, "AFM Force-Distance Curves for Perfluoropolyether Boundary Lubricant Films as a Function of Molecular Polarity," *Tribology Letters*, Vol. 45, No. 2, pp. 275~289.
- (19) Rymuza, Z., 2007, "Tribology of Polymers,"

- Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VII, No. 4, pp.177~184.
- (20) Yamaguchi, Y., 1990, *Tribology of Plastic Materials*, Tribology Series, Vol. 16, Elsevier, New York.
- (21) Imperial College Press ed., *Polymer Tribology*, Chapter 1, World Scientific Publishing, 2009.
- (22) Hammerschmidt, J. A., Gladfelter, W. L. and Haugstad, G., 1999, "Probing Polymer Viscoelastic Relaxations with Temperature-Controlled Friction Force Microscopy," *Macromolecules*, Vol. 32, pp. 3360~3367.
- (23) Forrest, J. A., Dalnoki-Veress, K. and Dutcher, J. R., 1997, "Interface and Chain Confinement Effects on the Glass Transition Temperature of Thin Polymer Films," *Physical Review E*, Vol. 56, pp. 5705~5716.
- (24) Yu, H., Balogun, O., Li, B., Murray, T. W., and Zhang, X., 2006, "Fabrication of Three-Dimensional Microstructures Based on Singled-Layered SU-8 for Lab-on-Chip Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 127, No. 2, pp. 228~234.
- (25) Yu, H., Balogun, O., Li, B., Murray, T. W., and Zhang, X., 2004, "Building Embedded Microchannels Using a Single Layered SU-8 and Determining Young's Modulus Using a Laser Acoustic Technique," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 1576~1584.