

거친 표면간의 미세 접촉에서의 표면력 해석

김두인* · 안효석† · 최동훈**

(2002년 3월 27일 접수, 2002년 7월 23일 심사완료)

Analysis of Surface Forces in Micro Contacts between Rough Surfaces

Doo-In Kim, Hyo-Sok Ahn and Dong-Hoon Choi

Key Words : Rough Surface(거친 표면), Micro Contact(미세 접촉), Van Der Waals Force(반데르발스 힘), Capillary Force(모세관력), Surface Energy(표면 에너지)

Abstract

In a micro-scale contact, capillary force and van der Waals interaction significantly influence the contact between asperities of rough surfaces. Little is, however, known about the variation of these surface forces as a function of chemical property of the surface (wet angle), relative humidity and deformation of asperities in the real area of contact. A better understanding of these surface forces is of great necessity in order to find a solution for reducing friction and adhesion of micro surfaces. The objective of this study is to investigate the surface forces in micro-scale rough surface contact. We proposed an effective method to analyze capillary and van der Waals forces in micro-scale contact. In this method, Winkler spring model was employed to analyze the contact of rough surfaces that were obtained from atomic force microscopy (AFM) height images. Self-mated contact of DLC(diamond like carbon) coatings was analyzed, as an example, by the proposed model. It was shown that the capillary force was significantly influenced by relative humidity and wet angle of the DLC surface. The deformation of asperities to a critical magnitude by external loading led to a considerable increase of both capillary and van der Waals forces.

————— 기호설명 —————	
$\Delta\gamma$: 인터페이스 에너지
ϵ	: 분자간 거리
l_i	: 표면간 거리
r_K	: 켈빈 반경
P_L	: 모세관 압력
p/p_s	: 상대증기압
θ	: 젖음각
η	: 물의 표면 장력
S	: 매니스커스 형성 높이

z_{eq}	: 상당 표면
f_v	: 반데르발스 힘
f_c	: 모세관력
f_r	: 접촉력

1. 서론

미세가공(micromachining)을 이용한 마이크로 스케일의 센서, 구동기, 모터, 펌프 등과 같은 다양한 분야의 장치에 대한 MEMS(micro-electro-mechanical system) 요소들의 제조 공정 개발과 상용화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MEMS 요소가 두 표면간의 접촉이 발생하는 접촉부 또는 미끄럼 운동부를 가지고 있을 경우 이러한 접촉부에서 전체 시스템의 기능을 저하 또는 정지시키는 오작동이나 파손이 발생하고 있는 것으로 보고된 바 있다.⁽¹⁻³⁾ 마이크로 시스템의 접촉부에는 재래의 기계시스템에 사용되고 있는 유체윤활제를

* 한양대학교 대학원 기계설계학과/한국과학기술 연구원 학생연구원
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지 연구센터
 E-mail : hsahn@kist.re.kr
 TEL : (02) 958-5653 FAX : (02)958-5659
 ** 회원, 한양대학교 기계공학부

활용한 윤활기술을 적용하기 어려우며 매크로 시스템에서는 고려되지 않았던 두 표면 사이에 작용하는 표면력(surface force)이 작용하여 스틱션(stiction)과 같은 현상이 일으키거나 접촉조건을 더욱 가혹하게 한다.⁽⁴⁾ 시스템의 크기가 마이크로 스케일로 줄어들면 체적에 대한 표면의 비가 1000 배로 증가하게 되어 표면력의 영향을 고려하여야만 하며 표면의 기계적 물성뿐 아니라 표면의 화학적 특성인 표면에너지(surface energy)와 대기의 상대습도와 같은 환경적 요소에 의해 표면 사이에 작용하는 반데르발스힘(van der Waals force), 모세관력(capillary force)와 같은 표면력이 시스템 전체에 큰 영향을 미치게 된다.^(4,5) 따라서 마이크로 시스템의 신뢰성과 수명 향상을 위해서는 반데르발스힘과 모세관력과 같은 표면력을 고려한 마이크로 스케일에서의 접촉을 정확히 규명할 필요가 있다.

반데르발스힘을 고려한 접촉현상에 대한 해석은 표면에너지에 의한 점착(adhesion)을 고려한 JKR 이론⁽⁶⁾에 의해 소개되었다. JKR 이론에서 점착력은 두 물체의 접촉 영역내의 표면에서만 존재하며 이러한 점착력에 의한 표면 변형을 가정하고 해석하여 점착력을 고려하지 않은 헤르쯔(Hertz) 접촉 이론의 결과와 비교하였으며 JKR 이론에 의한 해석결과와 연한 재료에 대한 실험결과가 일치하고 있음을 보였다. 이와 달리 DMT 이론⁽⁷⁾은 점착력이 접촉영역 외부에서만 작용하며 점착력에 의한 변형은 고려하지 않고 헤르쯔 이론에서와 같은 변형을 한다고 가정하였다. Muller⁽⁸⁾ 등과 Marguis⁽⁹⁾는 상기한 두 이론이 정의된 변수에 의해 하나의 식으로 표현될 수 있음을 보였으며 JKR 이론은 연한 재료에 대한 접촉, DMT 이론은 경한 재료의 접촉에 더욱 근사함을 밝혔다.^(8,9) 이러한 연구의 결과들은 하나의 표면 돌기를 근사화한 구의 점착력 해석에는 적용가능하나 거친 표면의 접촉 해석에는 불가능하다.

접촉부에 발생하는 마찰, 마멸과 윤활의 메커니즘을 정확히 이해하기 위해 거친 표면 사이의 접촉 현상에 대한 해석이 요구된다. 따라서 많은 연구자들에 의해 접촉이론은 발전되어 왔다. Greenwood 등⁽¹⁰⁾은 표면의 돌기를 일정 반경을 가지는 구로 가정하여 접촉 압력을 계산하였으며, Whitehouse 등⁽¹¹⁾은 표면의 거칠기(roughness)와 상관 길이(correlation length)와 같은 통계적 변수를 이용하여 해석을 실시하였다. 그러나 이러한 해석들은 실제 표면의 접촉압력과 실접촉 면적(real contact area)을 계산하는 데에 한계가 있다. Lee 등⁽¹²⁾은 돌기들의 탄성변형을 고려한 3 차원 해석방

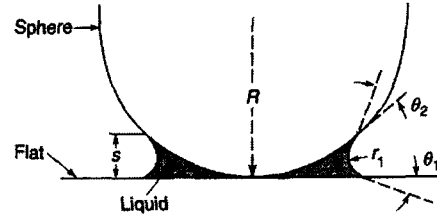


Fig. 1 Meniscus formation at the interface for a sphere in contact with a plane surface

법을 발표하였으며 Tian 등⁽¹³⁾은 변분법을 이용하여 거친 표면의 접촉을 수치적으로 해석하였다. Chizhik 등⁽¹⁴⁾은 반데르발스힘을 고려하여 분자 스케일의 표면 거칠기의 영향에 대해 관찰하였다. Maboudian 등⁽⁴⁾에 의하면 메니스커스에 의한 모세관력이 표면에서 가장 크게 작용하며 Tian 등⁽¹⁵⁾은 이러한 모세관력으로 인해 HDD(hard disk drive) 저장 매체의 헤드와 디스크 사이에 발생하는 스틱션에 대해 관찰하였다. 본 연구에서는 표면 에너지에 의한 반데르발스힘과 상대습도에 의해 형성되는 모세관력을 고려한 거친 표면에 대한 접촉 해석 기법을 제안하였으며 마이크로 시스템의 접동부 표면의 마찰 특성을 개선하기 위한 주요한 수단으로 주목 받고 있는 DLC(diamond like carbon) 박막 코팅의 표면을 AFM(atomic force microscopy)으로 측정된 표면 데이터를 이용하여 상대습도와 표면의 젖음각(contact angle)의 영향을 관찰하였다.

2. 표면력

마이크로 스케일의 표면의 점착을 일으키는 주원인으로 모세관력, 정전기력(electrostatic force) 그리고 반데르발스힘 등과 같은 표면력에 의한 것으로 알려져 있다. 정전기적 하전(electrostatic charging)에 의해 발생하는 정전기력은 다른 힘에 비해 상대적으로 쉽게 제거될 수 있으므로 본 연구에서는 고려하지 않고 표면 에너지에 의한 반데르발스힘과 상대습도에 의해서 발생하는 모세관 응축(capillary condensation)에 의한 모세관력에 대해 고려하겠다.

표면 사이에 작용하는 Lennard-Johnse 포텐셜에 의한 반데르발스힘을 f_v 라 하면 다음과 같이 표면 사이의 거리의 함수로 표현된다.

$$f_v = \frac{8}{3} \frac{\Delta\gamma}{\epsilon} \left(\frac{\epsilon}{l_i} \right)^3 - \left(\frac{\epsilon}{l_i} \right)^9 \quad (1)$$

여기에서 $\Delta\gamma$ 는 두표면의 인터페이스 에너지이

고 ϵ 는 분자간 거리(atomic length)를 나타낸다. 이 때 반데르발스힘은 두 물체 사이에 존재하는 물체의 영향을 많이 받게 되는데 두 물체가 물속에 존재하는 경우 반데르발스힘은 무시할 수 있을 만큼 작아지고 두 표면 사이의 거리가 증가하면 급격히 감소한다.

물체의 표면이 대기와 접하게 되면 대기중의 물 분자가 표면의 돌기 사이의 틈에 수분이 응축되는 모세관 응축현상이 발생하게 된다.^(16,17) 이러한 응축현상은 두 물체가 접촉할 때 형성되는 돌기의 접촉부 주위에 메니스커스(meniscus)를 형성하게 되며 메니스커스의 켈빈 반경, r_K 는 다음과 같은 켈빈(Kelvin) 방정식에 의해 구해질 수 있다.

$$r_K = \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)^{-1} = \frac{\gamma_l V}{RT \ln(P/p_s)} \quad (2)$$

여기서 r_1 과 r_2 는 서로 수직한 평면에 대한 메니스커스의 반경이며 V 는 물의 분자 체적, γ 는 공기에 대한 물의 표면 장력, R 은 기체 상수, T 는 절대 온도이다. 여기서 약 20°C 의 물에 대해 $\gamma V/RT$ 는 약 0.54 nm 로 계산된다. 따라서 위의 식에서 켈빈 반경은 일정온도에서는 상대습도(p/p_s)에 의해 결정된다. 메니스커스가 형성되기 위해서는 $r_K < 0$ 이어야 하고 이는 오목한 형태의 메니스커스가 형성됨을 의미하며 젖음각(contact angle)이 90° 이하인 경우에 해당한다. 이때 메니스커스 내부에 작용하는 압력을 모세관 압력(capillary pressure) 또는 라플라스 압력(Laplace pressure)이라고 하며 다음과 같이 계산된다.

$$P_L = \frac{\gamma_l}{r_K} \quad (3)$$

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 접촉부 주변에 메니스커스가 형성될 때 $r_2 \gg r_1$ 이라 하면 켈빈 반경 r_K 는 r_1 이 되고 구의 반경에 비해 메니스커스 형성 높이가 충분히 작다고 가정하면 메니스커스가 형성되는 높이 S 는 아래 식으로 표시된다.

$$S = r_K (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (4)$$

여기서 θ_1 과 θ_2 는 두 물체의 접촉각이다. 따라서 두 접촉하는 표면이 일정 습도의 대기에 노출되면 두 표면의 접촉부에서 접촉부 주위의 높이 s 까지 메니스커스를 형성하게 되며 메니스커스의 내부에는 라플라스 압력 P_L 이 작용하게 된다. 메니스커스에 의해 표면의 수직방향으로 작용하는 힘은 메니스커스의 투영면적을 A_m 이라 하면 다음과 같이 계산된다.

$$f_m = A_m \cdot P_L \quad (5)$$

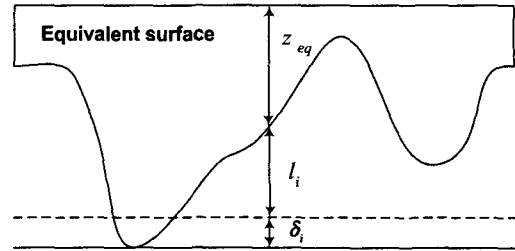


Fig. 2 Equivalent surface contact with plane surface

3. 접촉 해석

본 논문에서는 거친 표면의 미세 탄성 접촉 해석을 위해 Winkler 스프링 모델^(14,18)을 이용하여 미세 접촉 모델을 제안하였으며 두 표면 사이에 작용하는 표면력에 의한 표면의 변형은 무시하였으며 반데르발스힘은 접촉영역 밖에서만 작용한다고 가정하였다. Fig. 2 에 보인 바와 같이 두 표면의 접촉을 하나의 등가표면(equivalent surface) z_{eq} 와 강체인 반무한 평면(semi-infinite plane)과의 접촉으로 가정하고 등가표면은 두 표면의 합으로 계산하였다. 표면을 일정 스프링 상수의 Winkler 스프링으로 가정하면 접촉에 의한 변형량과 접촉 압력은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$P_i(\delta_i) = \frac{E^*}{kh} \delta_i \quad (6)$$

여기서 E^* 는 두 물체의 등가탄성률 (equivalent elastic modulus),⁽¹⁸⁾ h 는 스프링의 길이, δ_i 는 스프링의 변형량을 나타내며 k 는 다음과 같이 두 표면의 포와송 비(Poisson's ratio), ν_1 과 ν_2 로부터 계산된다.

$$k = \frac{(1 + 2\sqrt{\nu_1\nu_2})(1 - 2\sqrt{\nu_1\nu_2})}{1 - \sqrt{\nu_1\nu_2}} \quad (7)$$

따라서 표면의 데이터 간격을 $\Delta x, \Delta y$ 라 하면 단위 스프링 면적 $A_c(\Delta x \times \Delta y)$ 에 작용하는 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{ri} = \frac{E^*}{kh} \delta_i A_c \quad (8)$$

따라서 접촉에 의해 발생하는 하중은 다음과 같이 접촉이 발생하는 스프링에 작용하는 힘의 합이 된다.

$$F_r = \sum F_{ri} \quad (9)$$

접촉영역 밖의 표면에서 작용하는 반데르발스 상

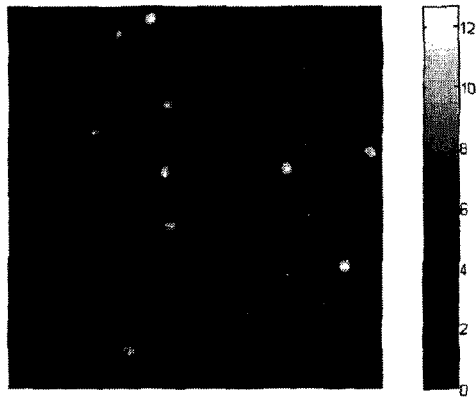


Fig. 3 Image of the equivalent surface generated from atomic force microscopy height data of DLC coatings (scan area: $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}^2$, nm in scalebar)

Table 1 Surface parameter of equivalent DLC coating

Area	R_g	R_q	R_{ku}	Max. peak
$54.76 \mu\text{m}^2$	1.1 nm	4.03 nm	6.17	12.63 nm

호작용에 의해 표면에 작용하는 힘은 식 (1)에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$F_v = \sum F_{vi} = \sum \left\{ \frac{8}{3} \frac{\Delta\gamma}{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{l_i} \right)^3 - \left(\frac{\varepsilon}{l_i} \right)^9 \right\} A_c \quad (10)$$

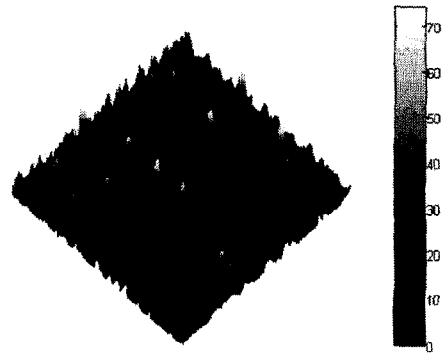
한편 접촉한 표면이 습기를 함유한 대기중에 존재할 경우 두 표면의 접촉부 주위의 공간에 메니스커스가 형성된다. 이때 습도에 의해 메니스커스가 형성되는 되는 높이는 식 (4)에 의해 계산된다. 접촉한 두 표면 사이의 거리가 메니스커스 형성 높이, S 보다 작을 경우 메니스커스가 형성되고 메니스커스 내부에 모세관력이 작용하게 된다. 모세관력에 의해 표면에 작용하는 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$F_c = \sum F_{ci} = \sum \frac{\gamma_l}{S} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) A_c \quad (11)$$

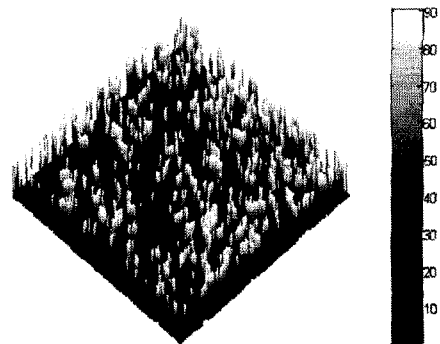
두 표면 사이에 작용하는 힘은 평형을 이루어야 하므로 접촉 하중과 외부에서 가해지는 외부하중 F_{ext} , 반데르발스힘, 모세관력은 다음과 같은 식을 만족하여야 한다.

$$F_r = F_{ex} + F_c + F_v \quad (12)$$

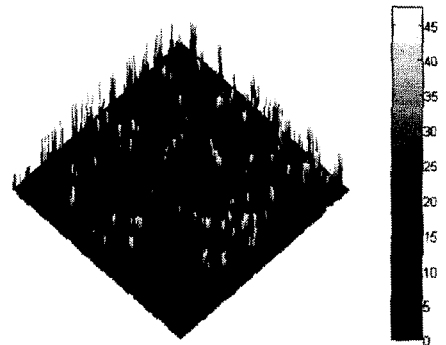
본 논문에서는 표면의 접촉각, 상대습도, 변형량이 표면력에 미치는 영향을 관찰하기 위해 각각의 변수들을 변화시키며 해석을 실시하였다.



(a) Contact force



(b) Capillary force

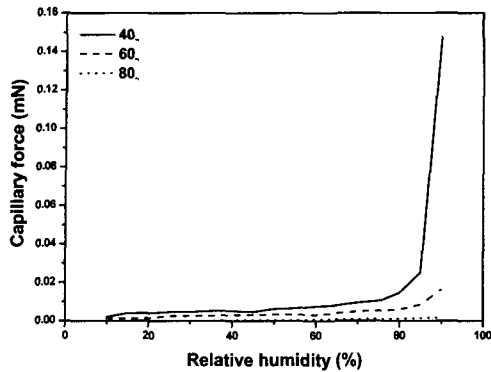


(c) Van der Waals force

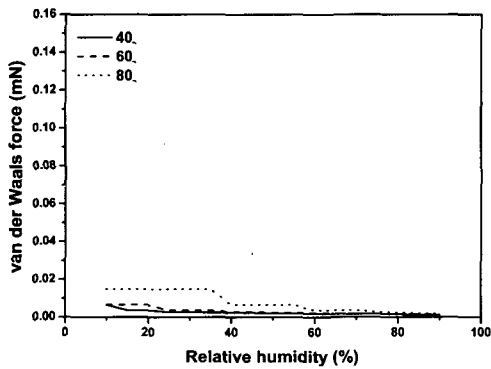
Fig. 4 Force distribution images of micro contact between DLC coatings

4. 해석 및 토론

제안된 해석 방법을 이용하여 구와 평면의 접촉 해석과 마이크로 시스템의 표면에 적용하기 위해 표면의 기계적 특성과 거칠기 특성이 동일한 두개의 DLC 박막 코팅이 서로 접촉하였을 경우에 대하여, 상대습도, 표면의 젖음각 그리고 변형량에 따른 표면력의 변화를 관찰하였다. 본 해석에 사용된 표면은 AFM에서 실제 측정된 것으로 DLC 코팅의 표면 형상은 Kim 등⁽¹⁹⁾에 의해 제안된 방



(a) Capillary force



(b) Van der Waals force

Fig. 5 Variation of surface forces as a function of relative humidity

법으로 제작된 30 nm의 곡률 반경을 가지는 텅스텐 팁을 이용하여 탭핑모드(tapping mode)로 측정하였다. Fig. 3은 측정된 두 개의 AFM 표면 데이터를 이용하여 만들어진 등가표면이다. 그림에서 보는 바와 같이 박막 형성 과정에서 만들어진 표면 돌기의 영향으로 등가표면에도 많은 표면돌기(micro-asperities)가 존재함을 알 수 있다. Table 1 나타낸 바와 같이 등가표면의 표면거칠기는 $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}^2$ 에서 $1.1 \text{ nm } R_a$ 로 계산되었으며 최고 표면 돌기(asperity)의 높이는 12.63 nm로 측정되었다.

Fig. 4는 제안된 방법을 이용하여 해석한 결과의 예로 젖음각 60°의 DLC 코팅의 등가표면에 대해 습도가 50%일 때 계산된 접촉 압력(Fig. 4(a)), 모세관력(Fig. 4(b))과 반데르발스힘(Fig. 4(c))을 나타낸 것이다. 그림에서 접촉압력은 각각의 돌기가 접촉하여 형성한 접촉면에 분포하고 있으며 실접촉면(real micro-contact area)의 둘레를 따라

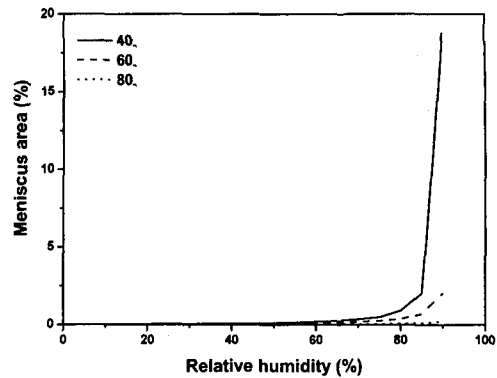


Fig. 6 Variation of meniscus formation area as a function of relative humidity

메니스커스가 형성되어 모세관력이 발생하게 된다 반데르발스힘은 모세관력이 발생하는 면적의 외곽에 작용하고 상대적으로 작은 영역에 분포하고 있는데 이것은 표면간의 거리에 따라 급격히 감소하기 때문으로 보인다.

표면의 화학적 특성인 젖음각 특성과 습도의 변화에 따른 모세관력과 반데르발스힘의 변화를 관찰하기 위해 외부에서 작용하는 수직하중을 부가하지 않은 상태, 즉 변형량을 0으로 하고 10~90%의 습도에서 40, 60 그리고 80°의 젖음각을 갖는 DLC 박막 표면에 대해 해석을 실시하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 상대습도가 증가함에 따라 모세관력은 증가하나 반데르발스힘은 감소하는 경향을 보인다. 모세관력은 동일한 습도에 젖음각이 큰 소수성(hydrophobic)의 표면 보다는 젖음각이 작은 친수성(hydrophilic)인 표면에서 크게 작용하고 있으며 습도가 증가함에 따라 이러한 경향은 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 특히 젖음각이 40°이고 습도가 약 80%이상인 경우 급격히 증가하였다. 이러한 결과는 Tian 등⁽¹³⁾의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 6은 메니스커스의 형성 면적을 도시한 것으로 습도가 약 80%에서 면적비가 증가하기 시작함을 확인할 수 있다. 이것으로 볼 때 거친 표면에서 모세관력은 메니스커스 형성 면적에 비례하는 것으로 보인다.

두 표면 사이의 거리는 식 (10)과 (11)에서 보는 바와 같이 반데르발스힘과 모세관력에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 두 표면 사이의 거리의 변화에 따른 표면력의 변화를 관찰하기 위해 50%의 일정한 습도 조건에서 젖음각이 40, 60 그리고 80°인 표면에 대해 표면의 변형량을 0에서 120nm로 변화시키며 표면력의 변화를 관찰하였다. Fig. 7은

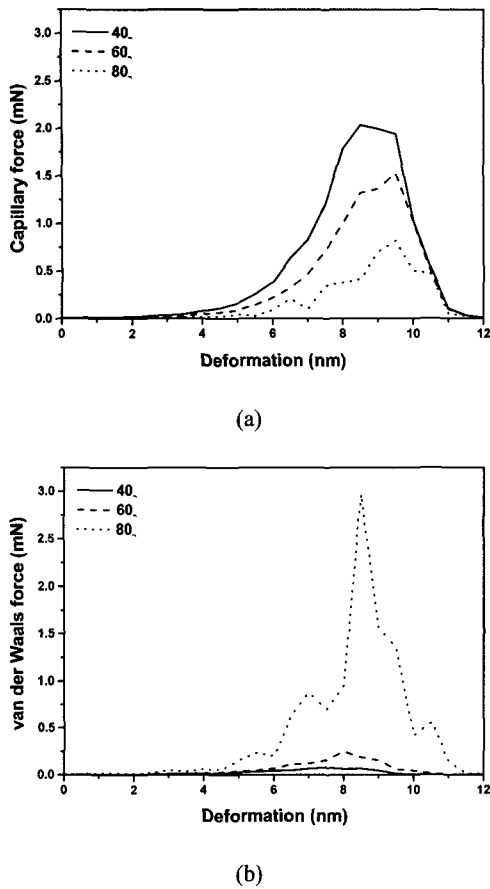


Fig. 7 Variation of meniscus force(a) and capillary force(b) as a function of surface deformation

모세관력(Fig. 7(a))과 반데르발스힘(Fig. 7(b))의 변화를 도시한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 접촉각의 변화와 무관하게 거의 동일한 범위의 변형량에서 표면력이 증가하며 이러한 경향은 친수성의 표면에서 더욱 뚜렷이 관찰되고 있다. 이것은 표면의 변형량이 증가함에 따라 표면 사이의 골의 깊이가 작아지기 때문에 메니스커스 형성 영역이 급격히 증가한 것으로 보인다. 반데르발스힘에서도 유사한 현상을 관찰할 수 있는데 소수성의 표면에서 급격히 증가하고 있다. 이것은 친수성의 표면에서는 메니스커스가 넓은 범위에서 형성되고 메니스커스 내에서는 반데르발스힘이 작용하지 않기 때문으로 보이며 소수성인 표면의 경우 두 표면사이의 거리는 가까우나 메니스커스가 넓은 영역에 형성되지 않음으로 인해 큰 반데르발스힘이 작용하는 것으로 판단된다. 따라서 일정습도에서 표면사이의 거리가 근접할 경우 친수성인 표면에서는 메니스커스의 형성으로 모세관력이 크게 작

용하나 소수성의 표면에서는 반데르발스힘에 의해 점착력이 급격히 증가할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 표면의 젖음각과 대기의 상대습도에 의해 표면에 발생하는 모세관 응축현상에 의한 모세관력과 표면 에너지에 의한 반데르발스힘을 고려한 미세 접촉 해석 방법을 제안하였다. 접촉 해석 모델은 Winkler 스프링 모델을 사용하였으며 제안된 모델을 이용하여 거친 표면의 미세 접촉 해석에 사용될 수 있음을 보였다. 상대습도, 젖음각과 표면의 변형량에 따른 표면력의 변화를 관찰하기 위해, 마이크로 시스템의 접동부 표면에 적용될 수 있는 DLC 박막 코팅의 AFM 표면 데이터를 이용하여 등가표면을 구한 후 모세관력과 반데르발스힘을 고려한 미세 접촉해석을 실시하였다. 두 미세 표면이 하중이 부가되지 않은 상태에서 접촉을 했을 경우, 젖음각이 작은 친수성의 표면은 습도가 높을 때 습도에 의한 모세관력이 반데르발스힘에 비해 월등히 지배적이다. 특히 표면이 친수성이고 습도가 80%인 고습의 조건에서는 메니스커스 형성 면적이 증가하여 모세관력이 급격히 증가하였다. 하중이 부가된 두 미세 표면간의 접촉의 경우에는, 일정한 변형량 범위에서만 모세관력과 반데르발스힘 모두가 증가하는데 특히 소수성인 표면에서는 반데르발스힘이 급격히 증가하였다. 따라서 미세 접촉 해석에서는 접촉 환경, 표면의 거칠기 특성과 젖음각의 정도에 따라 표면력의 크기가 크게 변할 수 있으므로 반드시 이것들을 고려해야 할 것으로 사료된다.

후기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 국가지정연구실사업으로 지원되어 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Tanner, D. M. 2000, "Reliability of Surface Micromachined Microelectromechanical Actuators," *22nd Int. Conf. In Microelectronics*, pp. 97~104.
- (2) Hornbeck, L. J. 1996, "Digital Light ProcessingTM and MEMS: Reflecting the Digital Display Needs of the Networked Society," *Proc. of SPIE*, Vol. 2783, pp. 2~13.

- (3) Miller, S. L., Rodgers, M. S., Vigne, G. La, Sniegowski, J. J., Clews, P., Tanner, D. M. and Peterson, K. A., 1999, "Failure Modes in Surface Micromachined Micro-Electromechanical Actuation System," *Microelectronics Reliability*, Vol. 39, pp. 1229~1237.
- (4) Maboudian, R. and Howe, R. T., 1997, "Critical Review: Adhesion in Surface Micromechanical Structure," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 15, pp. 1~20.
- (5) Komvopoulos, K., 1996, "Surface engineering and Microtribology for Microelectro Mechanical System," *Wear*, Vol. 200, pp. 305~327.
- (6) Johnson, K. L., Kendall, K. and Roberts, A. D., 1971, "Surface Energy and the Contact of Elastic Solids," *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 324, pp. 301~313.
- (7) Derjaguin, B. V., Muller, V. M. and Toporov, Y. P., 1975, "Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 53, pp. 314~326.
- (8) Muller, V. M., Yushchenko, V. S. and Derjaguin, B. V. 1980, "On the Influence of Molecular Forces on the Deformation of an Elastic Sphere and its Sticking to a Rigid Plane," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 77, pp. 91~101.
- (9) Maugis, D., 1992, "Adhesion of Spheres: The JKR-DMT Transition using a Dugdale Model," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 150, pp. 243~268.
- (10) Greenwood, J. A. and Williamson, J. B. P., 1966, "Contact of Nominally Flat Surfaces," *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 295, pp. 300~329.
- (11) Whitehouse, D. J. and Archard, J. F., 1970, "The Properties of Random Surfaces of Significance in Their Contact," *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 316, pp. 97~121.
- (12) Lee, S. C. and Cheng, H. S., 1992, "On the Relation of Load to Average Gap in the Contact between Surfaces with Longitudinal Roughness," *STLE Tribology Trans.*, Vol. 35, pp. 523~529.
- (13) Tian, X. and Bhushan, B., 1996, "A Numerical Three-Dimensional Model for the Contact of Rough Surfaces by Variational Principle," *ASME J. of Tribology*, Vol. 118, pp. 33~42.
- (14) Chizhik, S. A., Gorbunov, V. V. and Myshkin, N. K., 1995, "Analysis of Molecular Scale Roughness Effect on Contact of Solids based on Computer Modeling," *Precision Engineering*, Vol. 17, pp. 186~191.
- (15) Tian, H. and Matsudaira, T., 1993, "The Role of Relative Humidity, Surface Roughness and Liquid Build-up on Static Friction Behavior of the Head/Disk Interface," *ASME J. of Tribology*, Vol. 115, pp. 28~35.
- (16) Adamson, A. W., 1990, *Physical Chemistry of surfaces*, 5th ed. Wiley.
- (17) Israelachvili, J. N., 1991, *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd ed. Academic press, London.
- (18) Johnson, K. L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press.
- (19) Kim, D. -I. and Ahn, H. -S., 2002, "Etching Voltage Control Technique for Electrochemical Fabrication of Scanning Probe Microscope Tips," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 73, No. 3, pp. 1337~1339.