

# 나노스케일 표면돌기 간의 미세접촉에 대한 해석

안효석\*, 장동영<sup>+</sup>

(논문접수일 2009. 2. 25, 심사완료일 2009. 7. 9)

## Analysis of Nano-contact Between Nano-asperities Using Atomic Force Microscopy

Hyo-Sok Ahn\*, Dong-Young Jang<sup>+</sup>

### Abstract

In micro/nano-scale contacts in MEMS and NEMS, capillary and van der Waals forces generated around contacting micro-asperities significantly influence the performance of concerning device as they are closely related to adhesion and stiction of interacting surfaces. In this regard, it is of prime importance to accurately estimate the magnitude of surface forces so that an optimal solution for reducing friction and adhesion of micro/nano-surfaces may be obtained. We introduced an effective method to calculate these surface forces based on topography information obtained from an atomic force microscope. This method was used to calculate surface forces generated in the contact interface formed between diamond-like carbon coating and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball. This method is shown to effectively demonstrate the influence of capillary force in the contact area, especially in humid atmosphere.

**Key Words** : micro/nano-scale contact(마이크로/나노접촉), rough surfaces(거친 표면), surface forces(표면력), capillary force(모세관력), van der Waals force(반데르발스힘), atomic force microscopy(원자현미경학)

## 1. 서론

MEMS(Microelectromechanical Systems)와 NEMS(Nano-electromechanical Systems)와 같은 미세기계시스템에서 두 표면간의 접촉이 발생하거나 미끄럼 운동을 하는 접동부가 있을 경우 두 표면에 있는 미소돌기(Micro-asperity)들이 서

로 접촉하며 미소돌기에 가해진 하중에 따라 미소접촉면의 탄성 및 소성변형, 마찰과 점착(Stiction)이 발생하여 접촉조건을 더욱 가혹하게 하며 심 할 경우 이로 인해 전체 시스템의 기능이 저하되거나 파손이 발생할 수 있다<sup>(1-3)</sup>. 한편 미세기계시스템의 접촉부에는 매크로 기계시스템에서는 고려되지 않았던 두 표면 사이에 작용하는 표면력(Surface force)

\* 서울산업대학교 NID융합기술대학원 나노IT융합프로그램 (hsahn@snut.ac.kr)  
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

+ 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

이 중요한 역할을 차지하며 미세기계시스템의 신뢰성과 수명 향상을 위해서는 반데르발스힘과 모세관력과 같은 표면력을 고려한 마이크로 스케일의 접촉을 정확히 규명할 필요가 있다.

이러한 마이크로 스케일의 접촉현상을 정확히 예측하기 위해서는 접촉표면에 대한 기하학적 정보 즉 미소표면돌기의 3차원적 분포에 대한 정보가 필수적인데 이를 위해 최근 나노기술 분야에서 널리 사용되고 있는 원자력현미경(AFM)의 표면조도 정보를 활용하는 것이 매우 효율적이다. 표면력에는 모세관력, 정전기력(Electrostatic force) 그리고 반데르발스힘이 있다<sup>(4,5)</sup>. 정전기적 하전(Electrostatic charging)에 의해 발생하는 정전기력은 다른 힘에 비해 상대적으로 쉽게 제거될 수 있으므로 미소돌기들의 접촉과 관련해서 발생하는 표면력은 표면 에너지에 의한 반데르발스힘과 상대습도에 의해서 발생하는 모세관 응축(Capillary condensation)에 의한 모세관력이 주가 된다. 본 연구에서는 두 표면의 미세돌기 사이의 접촉에 의한 실질적 면적(Real area of contact)에 발생하는 기계적 하중, 표면돌기의 변형과 표면력의 분포를 원자력현미경으로 측정해 구한 두 표면에 대한 정보와 표면력을 고려한 한 개의 구형 면과 평면과의 접촉 현상을 해석한 고전적 이론인 JKR이론<sup>(6)</sup>과 DMT 이론<sup>(7)</sup>을 확장하여 다수의 구형 표면돌기들이 접촉하는 경우를 고려한 개선된 해석 방법을 이용해 알아보려고 한다.

## 2. 표면력 해석

### 2.1 접촉부의 표면력

두 표면의 표면돌기 들 간의 접촉에 대한 해석을 위해 접촉하는 돌기들의 기하학적 형상을 그대로 적용하는 것은 효율적이지 못하다. 따라서 Fig. 1과 같이 실제의 두 표면에 대한 등가 표면을 구하여 변형이 없는 평면인 상대 표면과의 접촉으로 전환하여 해석하는 것이 바람직하다<sup>(8)</sup>.

이 경우 접촉에 의한 기계적 하중(Repulsive force)을 계산하기 위해 Fig. 1에 제시한 Winklerian foundation모델<sup>(9)</sup>를 적용하였다. 한쪽 표면은 변형이 없는 강체로 가정하고

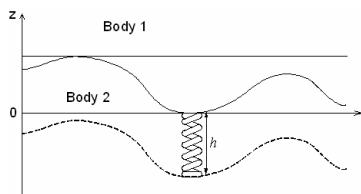


Fig. 1 Winklerian foundation model for contact between two surfaces

다른 쪽 표면을 일정한 스프링상수를 가진 스프링으로 가정하면 한 돌기의 접촉에 의한 스프링의 변형량  $\delta_i$ 와 접촉하중  $F_{ri}$ 는 다음과 같은 관계를 가진다<sup>(10)</sup>.

$$F_{ri} = \frac{E^*}{kh} (\delta_i) A_c \quad (1)$$

여기에서  $E^*$ 는 두 물체의 등가탄성률(Equivalent elastic modulus),  $h$ 는 스프링의 길이,  $A_c$ 는 단위스프링 면적,  $k$ 는 다음과 같이 두 표면의 포와송 비(Poisson's ratio)  $\nu_1$ 와  $\nu_2$ 로부터 계산된다.

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

접촉영역 밖의 표면에서 작용하는 반데르발스 힘  $F_v$ 는 표면 사이에 작용하는 Lennard-Johnse 포텐셜에 의해 발생하며 다음과 같이 표면 사이의 거리의 함수로 표현된다<sup>(4,5)</sup>.

$$F_v = \left\{ \frac{8}{3} \frac{\Delta\gamma}{\varepsilon} \left( \frac{\varepsilon}{l} \right)^3 - \left( \frac{\varepsilon}{l} \right)^9 \right\} A_c \quad (3)$$

여기에서  $\Delta\gamma$ 는 두 표면의 인터페이스 에너지이고  $\varepsilon$ 는 분자간 거리(Atomic length),  $l$ 는 표면 간 거리를 의미한다.

Fig. 2와 같은 나노스케일의 미소돌기들 간에 접촉이 발생하

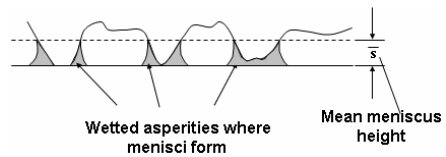


Fig. 2 Formation of menisci around rough asperity contacts

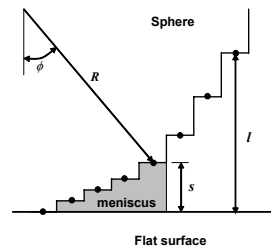


Fig. 3 Discrete model for the adhesive contact at nanoscale

면 접촉부 주변에 메니스커스가 형성되며 이에 의한 모세관력을 Fig. 3과 같은 이산모델(Discrete model)로 가정하며 메니스커스의 내부에는 라플라스 압력  $P_L$ 이 작용하게 된다. 이때 메니스커스의 투영면적을  $A_m$ 이라 하면 모세관력은 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$f_c = A_m \cdot P_L \quad (3)$$

### 2.2 구형 표면돌기의 접촉에 의한 표면력

표면에 존재하는 수많은 돌기들의 형상은 구형(Sphere)으로 모델화하는 것이 일반적이다. 제안된 해석 기법을 이용하

여 구 형태의 표면돌기 한 개가 이상화 된 평면과 형성한 접촉부에 작용하는 표면력을 해석하였다. 고체의 물성은 미소 기계시스템에 주로 사용되는 실리콘의 기계적 물성을 적용하였으며 구의 반경은 50nm로 하여 표면의 접촉각과 상대습도에 따라 작용하는 반데르발스힘과 모세관력을 해석하였다. 이때 표면력에 의해 발생하는 변형은 없는 것으로 가정하였고 두 표면의 접촉으로 인한 변형량이 없는 경우로 하였다.

Fig. 4는 표면사이에 작용하는 표면력을 도시한 것으로 (a)는 반데르발스힘, (b)는 모세관력 그리고 (c)는 두 힘의 합력을 나타낸 것이다. 접촉각이 작은 경우, 즉 표면이 친수성인 경우 반데르발스힘은 아주 작음을 알 수 있으며 접촉각이 증가함에 따라 반데르발스힘은 습도에 반비례함을 보여주고 있다. 접촉각이 90° 이상인 소수성의 표면에서는 습도의 영향을 받지 않으며 일정한 힘이 작용함을 확인할 수 있다.

반데르발스힘과 달리 모세관력은 친수성의 표면에서 습도의 영향을 크게 받으며 습도에 비례하여 증가하고 소수성의 표면에서는 습도의 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 두 표면사이에 작용하는 표면력은 친수성의 표면에서는 친수성 정도와 습도에 따른 모세관력이 지배적으로 작용하며 소수성의 표면에서는 습도와 무관하게 표면에너지에 의한 반데르발스힘이 일정하게 작용한다.

이와 같은 경향은 Fig. 5에 도시한 바와 같이 45°의 표면에서 습도에 따른 표면력의 변화에서도 확인할 수 있으며 모세관력이 작은 저습 영역에서는 반데르발스힘이 크게 작용하며 습도가 증가함에 따라 모세관력이 증가하게 되고 반데르발스힘은 급격히 감소하게 된다.

Fig. 6은 표면의 젖음각이 5, 25, 45, 65°일 때의 표면력의

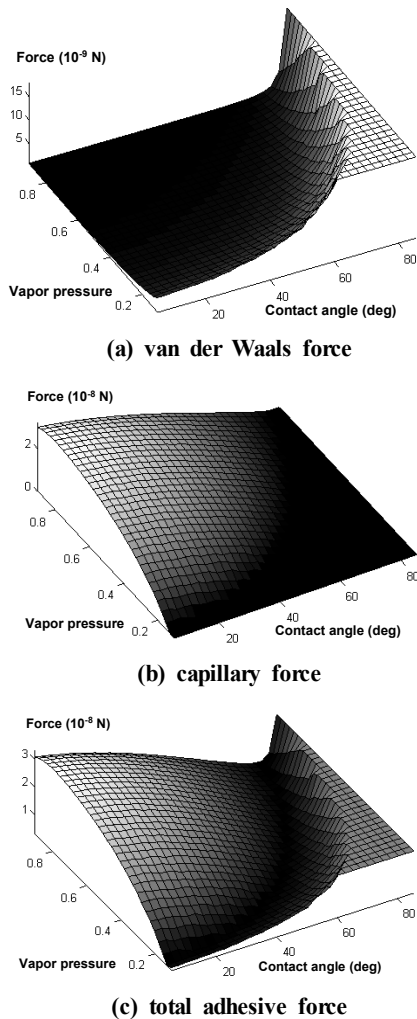


Fig. 4 Surface forces acting on the contacting spherical asperity

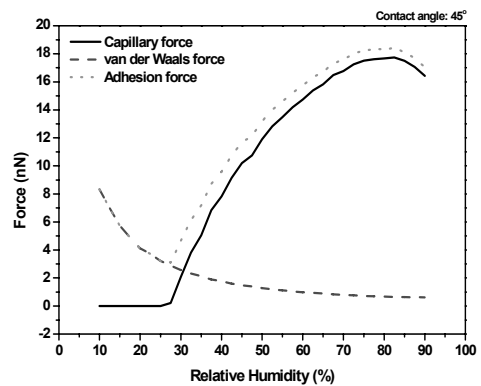


Fig. 5 Surface force in asperity contacts as a function of relative humidity at 45° contact angle

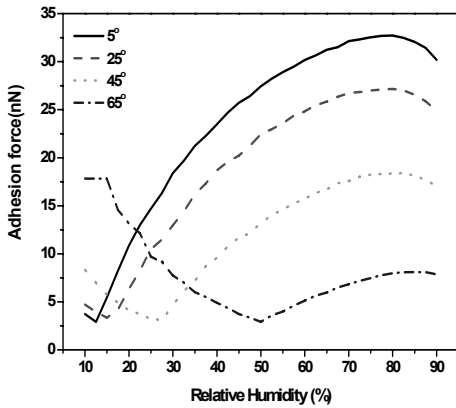


Fig. 6 Adhesion force as a function of relative humidity for different contact angle

변화를 나타낸 것이다. 젖음각이 작은 친수성의 표면에서는 저습에서도 반데르발스힘의 영향이 거의 없으며 표면의 젖음각이 증가하여 소수성의 표면에서는 반데르발스힘이 작용하는 저습도 영역이 증가하게 된다.

이상의 결과를 볼 때 표면력은 습도에 의한 영향을 많이 받을 수 있는 친수성의 표면에서는 미세관력이 전체 표면력에서 지배적이며 표면이 소수성일수록 이러한 특성은 감소함을 알 수 있다.

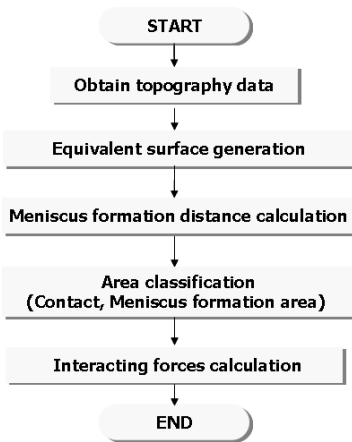
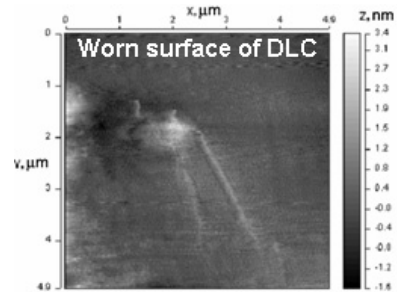


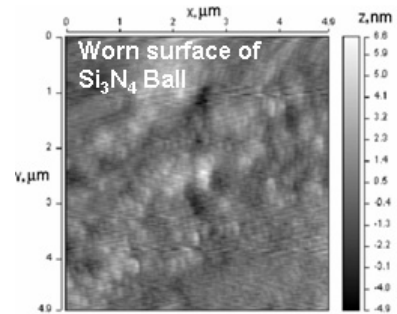
Fig. 7 Procedure for calculating surface forces between two surfaces with nanoscale roughness using topographical data obtained by AFM

### 3. 실 접촉면의 표면력 해석

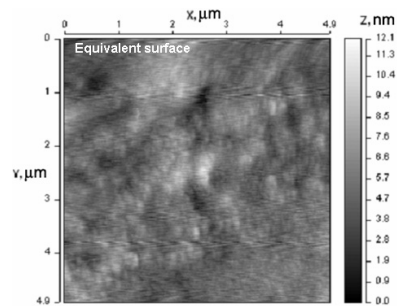
나노스케일 거칠기를 가진 두 표면 사이의 접촉에 의한 접촉부 표면력을 제안된 해석 방법을 이용하여 계산하기 위해서 필수적으로 요구되는 것이 두 표면의 정확한 실제 형상 (Micro/nano surface feature)에 대한 정보이다. 본 연구에서는 AFM을 이용해 측정된 두 표면에 대한 형상 데이터를 직접 사용하는 방법을 고안하였으며 그 과정을 Fig. 7에 소



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Image of the equivalent surface (c) generated from AFM height data of DLC coating (a) and contacting Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball (b)

개하였다.

먼저 두 표면에 대한 AFM 형상이미지를 구하고 이를 이용해 등가표면을 계산한다. 다음으로 계산된 등가표면과 변형이 없는 강제 평면과의 접촉현상에 대해 2장에 서술한 해석이론을 이용해 전체 표면에 대해 실제 접촉면의 면적과 모세관이 형성되는 분포, 그 둘레에 형성되는 모세관력과 반데르발스힘을 계산한다.

본 연구에 사용된 두 표면으로는 직경 3mm인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 구(ball)과 DLC 코팅된 실리콘 웨이퍼 사이의 마찰접촉 후의 마멸면을 채택하였다. 시험조건은 4.43mm/s의 미끄럼 속도와 3mm의 왕복동 거리에 하중은 1.8 N으로 일정하게 하여 20,000 싸이클 시험하였다. Fig. 8은 측정된 DLC 코팅과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 구의 마멸면에 대한 AFM 표면 정보와 이로부터 생성된 등가 표면을 나타낸 것으로 등가표면에서도 DLC박막 증착과정에 형성된 구형의 돌기들을 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 제안된 방법을 이용하여 구한 등가표면의 변형량 분포와 표면에 작용하는 표면력의 분포를 나타낸 것이다. 변형정도가 큰 부분일수록 그 변형을 야기시키는 데에 필요한 힘의 크기가 클 것으로 예측되는데 본 해석 결과도 이를 잘

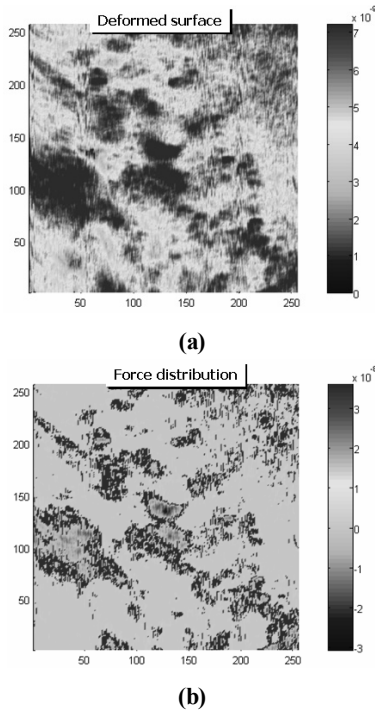


Fig. 9 Deformation of asperities and force distribution

나타내고 있다.

Fig. 10은 Fig. 8에 나타난 등가 표면에 대해 접촉반력, 모세관력과 반데르발스힘을 해석하여 각각 나타낸 것이다.

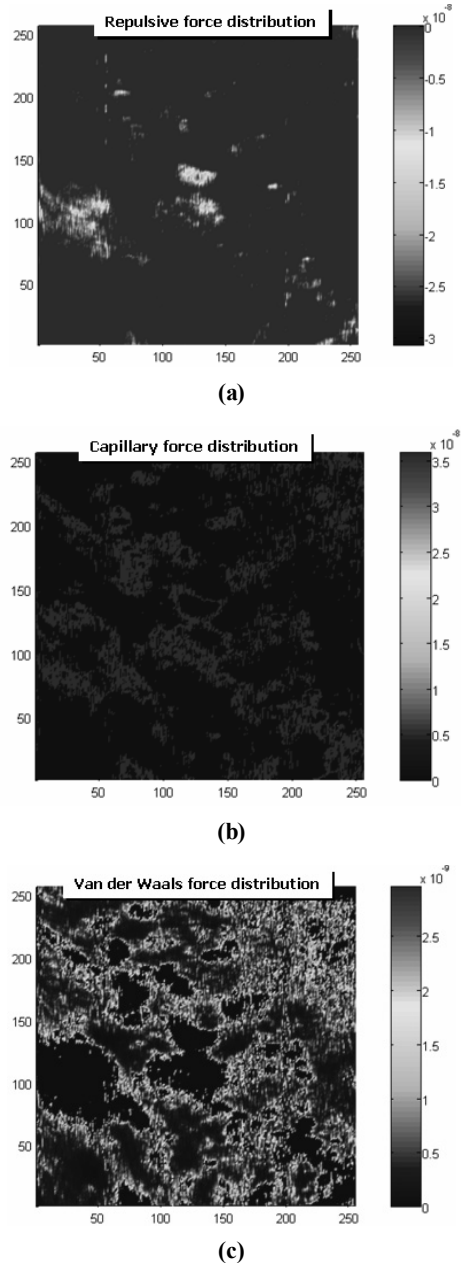


Fig. 10 Distribution of repulsive, capillary and van der Waals forces

접촉반력(Fig. 10(a))은 각각의 돌기가 접촉하여 형성한 접촉부위에만 집중되고 있으며 이를 통해 두 표면 사이에서 실제로 접촉이 일어나 변형하는 돌기들이 차지하는 면적(Real micro-contact area)은 전체접촉면적(Apparent area of contact)의 극히 일부분만을 차지함을 쉽게 확인할 수 있다. 모세관력은 Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 실접촉면적의 둘레를 따라 메니스커스가 형성되어 모세관력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 접촉반력이 큰(변형량이 큰) 부분일수록 Laplace 압력이 커지며 이로 인해 높은 모세관력이 발생하고 모세관력이 영향을 미치는 면적도 증가하고 있다. 반데르발스힘은 Fig. 10(c)에서 볼 수 있듯이 모세관력이 발생하는 메니스커스의 둘레에 작용하고 있고 모세관력에 비해 상대적으로 작은 영역에 분포하고 있다. 반데르발스힘은 표면 간의 거리가 증가함에 따라 급격히 감소하는 성질이 있는데 Fig. 10(c)는 이러한 성질을 잘 보여주고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 마이크로/나노 스케일의 접촉거동을 파악하여 접촉부에 발생하는 표면력의 분포를 계산하는 방법을 제안하였다. 표면력 예측의 신뢰성을 확보하기 위해서는 접촉표면에 대한 정확한 기하학적 정보 즉 미소표면돌기들의 3차원적 분포에 대한 정보가 필요하며 본 연구에서는 AFM을 이용해 이를 획득하고 이를 기반으로 하여 접촉부에 대한 등가표면의 형상을 결정하고 실제 접촉하는 미소표면돌기에 발생하는 돌기의 변형량, 작용하는 접촉반력과 그 주변에 형성되는 표면력인 모세관력과 반데르발스힘의 분포를 예측하는 방법을 소개하였으며 제안된 방법이 마이크로/나노스케일의 거친 표면의 미세 접촉 해석에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

#### 참고 문헌

- (1) Sulouff, R. E. 1998, "MEMS Opportunities in Accelerometers and Gyros and the Microtribology Problems Limiting Commercialization," *Tribology Issues and Opportunities in MEMS*, Ed. Bhushan, B., Kluwer Academic Publishers, pp. 109~120.
- (2) 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.
- (3) Tanner, D. M., 2000, "Reliability of Surface Micromachined Microelectro Mechanical Actuators," *22nd Int. Conf. in Microelectronics*, pp. 97~104.
- (4) Adamson, A. W., 1990, *Physical Chemistry of Surfaces*, 5th ed., Wiley, New York.
- (5) Israelachvili, J. N., 1991, *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd ed., Academic press, London.
- (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) Kim, D. I. and Ahn, H. S., 2002, "Analysis of Surface Forces in Micro Contacts Between Rough Surfaces," *Transactions of the KSME A*, Vol. 26, No. 10, pp. 2180~2186.
- (9) Podra, P. and Andersson, S., 1997, "Wear Simulation with the Winkler Surface Model," *Wear*, Vol. 207, pp. 79~85.
- (10) 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.