Journal of the KSTLE Vol. 18, No. 4, August 2002, pp. 249~254
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

토러스형 돌기의 흡착접촉 유한요소해석

조성산† · 양승민*

홍익대학교 기계 시스템디자인공학과, *홍익대학교 대학원 기계공학과

Finite Element Analysis of Adhesive Contact of Torus-Shaped Bumps

Sung-San Cho† and Seung Min Yang*

Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University
**Graduate School, Hongik University*

Abstract – Adhesive contact characteristics of torus-shaped bumps were analyzed using the finite element technique considering the adhesive force. Analyses focused on the effect of rim and bump radii on the adhesive contact behavior such as the jump-to-contact behavior, adhesion hysteresis, pull-off forces, contact region and pressure, and surface and subsurface stresses. Analysis results in the absence of adhesive force were also included to examine the effect of adhesive force. The applicability of torus-shaped bumps to the MEMS structure for reduction of friction is discussed.

Key words – torus-shaped bump, adhesive contact, finite element analysis.

1. 서 론

고체표면 사이에는 분자간력, 정전기력, 모세관력 등에 의해 발생하는 흡착력(adhesive force)이 작용한다. 미세전자기계시스템(MEMS)과 같은 초소형 장치에서는 흡착력에 의해 큰 마찰력이 발생하고 마멸도 빨리 진행되어 초소형 장치의 성능 및 내구성이 저하된다[1]. 접촉상태의 두 고체표면 사이에서 작용하는 흡착력은 접촉면적이 적을수록 감소한다. 이 사실에 착안하여 마이크로 모터에서 표면에 접촉면적을 감소시키는 구형돌기(spherical bump)를 만들면 마찰력을 줄이고 stiction도 방지할 수 있다는 연구결과가 보고되었다[2]. 마찰 및 stiction의 관점에서 MEMS와 근본적으로 큰 차이가 없는 하드디스크의 경우 landing zone에 인위적으로 토러스형 돌기(torus-shaped bump)를 만들어 마찰과 stiction 문제를 해결하고 있다[3]. 토러스형 돌기는 구형돌기에 비해 강성 및 하중지지능력이 우수하므로 비교적 큰 접촉하중이 작용하는 MEMS 구조물에서 마찰을 줄이는데 구형돌기와 상호보완적으로 사용될 수 있을 것으로 예견된다.

토러스형 돌기를 이용하여 저마찰 표면형상을 구현하기 위해서는 토러스형 돌기의 흡착접촉특성을 이해하고 이를 근간으로 돌기의 치수를 최적화해야 한다. 대표적인 JKR 또는 DMT 흡착접촉모델[4]은 구형돌기를 대상으로 개발되었으므로 토러스형 돌기에 적용할 수 없다. 한편, 토러스형 돌기를 대상으로 개발된 모델들은 토러스 접촉을 직선 Hertz 접촉으로 근사화하여 해석하므로[5-7] 해석결과의 적용에 한계가 있으며 또한 하중지지능력을 결정하는 돌기 내의 응력변화에 관한 정보도 제공하지 못한다. 따라서, 본 논문에서는 저마찰 표면형상 설계기술을 위한 기초자료를 얻기 위해 토러스형 돌기의 치수가 흡착접촉특성과 돌기 내 응력변화에 끼치는 영향을 고찰하였다. 해석은 본 연구진에 의해 개발된 흡착접촉 유한요소해석기법으로 수행하였다.

†주저자 · 책임저자 : sscho@wow.hongik.ac.kr

2. 흡착접촉 유한요소모델

반무한체를 구성하는 원자 하나와 돌기를 구성하는 원자 하나의 상호작용이 Lennard-Jones 12-6 potential,

$$w(r) = \varepsilon\left[\left(\frac{r_o}{r}\right)^{12} - \left(\frac{r_o}{r}\right)^{6}\right] \quad (1)$$

에 의해 지배될 때, 반무한체가 반무한체 표면에서 간격 D 떨어진 위치에 있는 단위체적 내의 원자들에 작용하는 힘의 합력은 식 (2)로 표현된다[8].

$$B(D) = \frac{\pi\varepsilon\rho_a^2 r_o^2}{5}\left[\left(\frac{r_o}{D+D_o}\right)^{10} - 5\left(\frac{r_o}{D+D_o}\right)^{4}\right] \quad (2)$$

여기서, ε은 에너지 매개변수, r은 두 원자사이 거리, r_o는 두 원자의 평형상태 거리, ρ_a는 원자밀도, D_o는 $B(0)=0$를 만족시키기 위해 도입된 간격상수이다. 합력 $B(D)$는 단위체적당 작용하는 힘이므로 유한요소 지배방정식에서 체적력 하중벡터로 처리하면 흡착력을 고려한 유한요소해석이 가능해진다. 이 방법을 적용하면 반무한체 평면과 흡착접촉하는 모든 형상의 돌기 거동을 해석할 수 있다.

Fig. 1은 실리콘의 경우, 즉 ρ_a=49.94 atoms/nm^3, ε=5.191×10^{-19}J, r_o=0.229505 nm일 때[9], 간격 D와 체적력으로 모델링된 흡착력 $B(D)$의 관계를 보여준다. 흡착력은 반무한체 표면에 매우 근접했을 때에만 중요한 의미를 갖는 힘임을 알 수 있다.

Fig. 2는 반무한체의 편평한 표면에 형성된 토러스형 돌기가 다른 반무한체의 편평한 표면과 흡착접촉한 모습을 보여준다. 문제를 단순화하기 위해 기존의 접

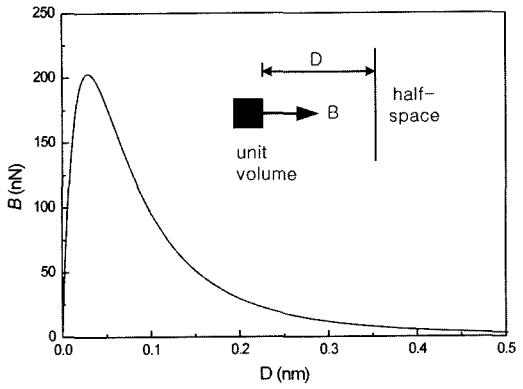

Fig. 1. Attractive forces acting on Si atoms in unit volume by a Si half-space.

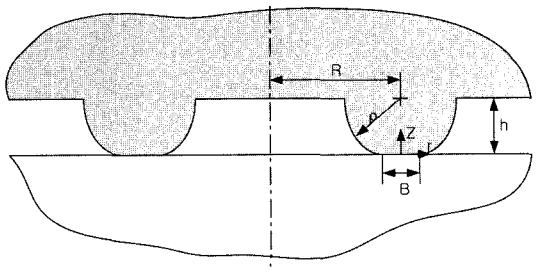

Fig. 2. Section view of contacting torus bump.

촉 모델에서처럼 돌기와 접촉하는 반무한체를 강체로 가정하여 모든 변형은 돌기에서 발생하는 것으로 가정한다. 다수의 돌기가 있을 때 인접한 돌기 사이의 간격이 매우 커서 상호 영향을 끼치지 않는 경우를 고려한다. 돌기에 의해 분리되어 있는 두 반무한체의 상호작용은 미미하므로(Fig. 1 참조) 무시한다.

유한요소격자는 4절점 등매개변수 축대칭 요소로 구성된 돌기와 강체평면인 무한평면으로 구성하였다. 무한평면과 인접한 부근에서 인력의 급격한 변화를 감안하여 돌기 표면 부근은 매우 작은 유한요소(0.025 nm ×0.025 nm)로 구성하였다. 대표적인 MEMS 구조물 재료는 실리콘이므로 실리콘 돌기를 가정하고 탄성계수 190 GPa, 포와송비 0.28을 사용하였다[9]. 돌기반경(bump radius) ρ=10, 20 nm에 대해 각각 테 반경(rim radius) R=10, 20, 30, 50 nm와 R=20, 30, 40, 60, 100 nm의 경우를 고려하였다.

흡착력이 없는 상태를 기준으로 무한평면과 간격 3 nm 떨어져 있던 돌기가 접촉간섭깊이 2 nm 될 때까지 접근한 후 초기 위치로 되돌아가는 과정을 해석하였다. 돌기가 이동하는 동안 돌기는 준평형상태를 유지하는 것으로 가정하고 증분방식으로 해석하였다. 돌기 변형에 따른 흡착접촉특성의 변화를 고려하기 위해 대변형 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)는 토러스형 돌기가 반무한체 표면에 접근하여 접촉한 후 다시 초기 위치로 돌아가는 과정에서 반무한체가 돌기에 작용하는 힘 F의 변화를 보여준다. 돌기위치는 돌기반경 ρ에서 두 반무한체 간격 h를 뺀 값 $\delta(\equiv\rho-h)$로 표시하였다(Fig. 2 참조). 흡착력이 작용하지 않을 때, 음의 δ는 돌기와 평면이 떨어져 있는 상태를, 그리고 양의 δ는 돌기와 평면이 접촉해

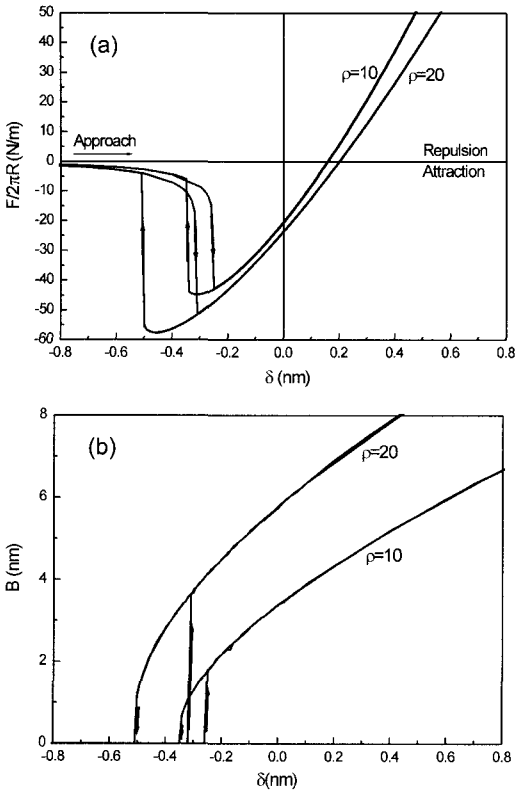

Fig. 3. Variation of (a) force acting on torus bump, and (b) width of annular contact region during approach and recession.

있는 상태를 나타내며, 각각의 절대값은 간격과 접촉 간섭깊이를 나타낸다. 돌기작용력 F가 음수이면 돌기를 반무한체로 끌어당기는 인력(attractive force)이 작용하는 경우이고, 양수이면 돌기를 반무한체 표면으로부터 밀쳐내는 척력(repulsive force)이 작용하는 경우이다. 돌기반경 ρ=10 nm와 20 nm 각각의 경우에 대해 토러스 테 반경 R을 변화시켜가면서 해석한 결과에 의하면 토러스 테의 원주길이($2\pi R$)가 증가하면 돌기작용력 F가 선형적으로 비례해서 증가한다. 따라서, Fig. 3(a)에서 돌기작용력 F 대신 토러스 테의 단위 원주길이당 돌기작용력 $F/2\pi R$을 사용하여 테 반경에 무관하게 돌기반경별로 하나의 선도를 얻었다.

토러스형 돌기는 반무한체 표면에 접촉할 때 원형띠 형상의 접촉영역이 발생한다. Fig. 3(b)는 돌기가 반무한체 표면에 접촉했다가 분리되는 동안에 형성되는 원형띠 형상의 접촉영역의 폭 B(Fig. 2 참조)의 변화를 돌기위치의 함수로 보여준다. 돌기반경이 동일한 돌기들은 테 반경의 크기에 무관하게 모두 동일한 돌기위치에서 접촉폭이 동일한 접촉영역을 형성했기 때문에 돌기반경별로 하나의 선도만이 표시되어 있다.

돌기반경 ρ=20 nm의 경우를 보면, 돌기가 반무한체에서 먼 거리에 떨어져 있을 때 돌기에는 미미한 인력이 작용한다. 돌기가 반무한체에 접근하면 인력의 크기는 조금씩 증가하다가 δ=–0.31 nm 부근에서 돌기가 순간적으로 평면에 흡착되면서 돌기에 작용하는 인력이 순간적으로 증가하고 원형띠 형상의 접촉영역이 형성된다. 돌기가 흡착된 상태에서 돌기를 더 접근시키면 접촉영역은 증가하지만 인력상태인 돌기작용력의 크기는 감소한다. 인력상태의 돌기작용력이 약해지는 이유는 돌기와 반무한체의 접촉영역 내에서 돌기를 밀쳐내는 척력이 발생하기 때문이다. 돌기를 계속 접근시키면 돌기와 반무한체의 상호간섭이 증가하므로 척력이 지속적으로 증가하며, δ=0.2 nm 부근에 이르러 인력과 균형을 이루면서 돌기작용력은 0이 된다. 이 경우는 외력이 없는 상태에서 돌기가 반무한 평면에 스스로 흡착되는 경우이다. 돌기를 더 접근시키면 돌기작용력은 척력상태로 되고 그 크기도 지속적으로 증가한다.

반무한체 표면에 흡착접촉한 돌기를 분리시키기 위해 돌기를 후퇴시킬 때 돌기위치, 돌기작용력 및 접촉영역의 관계는 돌기가 접근할 때 반무한체 표면에 흡착접촉한 이후($\delta \geq$–0.31 nm)의 관계와 동일하다. 그러나 δ=–0.31 nm 보다 더 후퇴시켜도 접촉면적이 줄어들 뿐 돌기는 반무한체 표면에서 떨어지지 않는다. 이때 돌기를 끌어당기는 힘은 계속 증가하여 δ=–0.46 nm 부근에서 최대가 된 후 감소한다. δ=–0.5 nm 부근에서 돌기는 반무한체 표면으로부터 순간적으로 분리되며, 이때 돌기를 끌어당기는 힘도 순간적으로 감소한다.

흡착된 물체를 분리시키는데 필요한 힘, 즉 Fig. 3(a)에서 돌기작용력 F의 인력상태에서의 최대값을 분리력(pull-off force)이라고 부른다. 돌기반경이 증가하면 분리력이 증가한다. 한편, 테 반경이 증가하면 접촉원형띠의 원주길이가 증가하여 분리력은 테 반경에 선형적으로 비례하면서 증가한다.

돌기가 반무한체 표면에 흡착했다 분리되는 과정에서 흡착위치와 분리위치의 차이에 의해 에너지가 소산되며, 이를 흡착 히스테리시스라 한다. 테 반경이 증가할 때 흡착 및 분리위치의 변화는 없지만 분리력의 증가로 흡착 히스테리시스에 의한 에너지 소산량이 증가

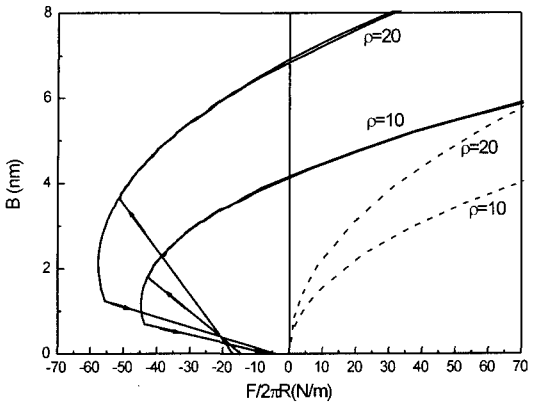

Fig. 4. Relation between force acting on the bump and the contact width for adhesive (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

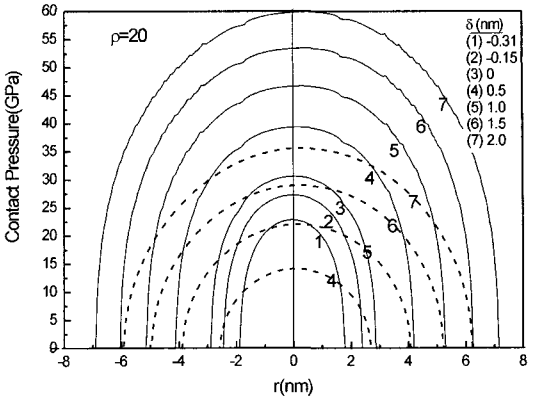

Fig. 5. Contact pressure for adhesive (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

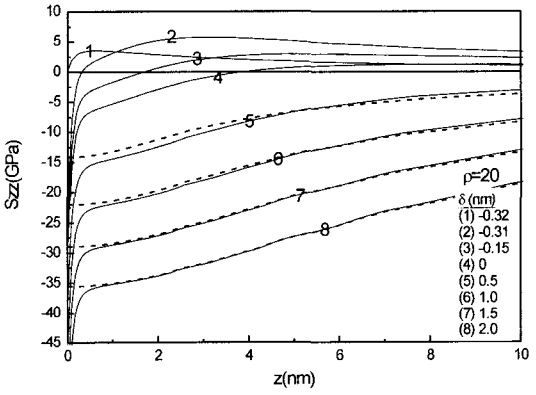

Fig. 6. Subsurface normal stress for adhesive (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

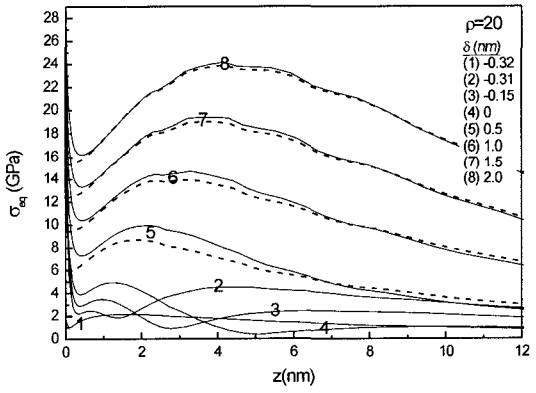

Fig. 7. Subsurface equivalent stress for adhesive(solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

한다. 한편 돌기반경이 증가하면 분리력과 흡착 및 분리위치의 차이가 증가하여 에너지 소산량이 증가한다. 미끄럼 운동시 마찰로 소산되는 에너지의 일부는 흡착 히스테리시스에 의한 에너지 소산에 의해 발생한다[10]. 따라서, 하중지지능력을 증가시키기 위해 토러스형 돌기의 테 반경과 돌기반경을 증가시키면 흡착에 의한 마찰저항도 증가한다.

Fig. 4는 흡착력이 돌기작용력과 접촉폭의 관계에 끼치는 영향을 보여준다. 기계적 접촉(점선)은 흡착력이 배제된 경우를 나타낸다. 돌기작용력이 동일할 때 흡착력에 의해 더 큰 접촉폭이 형성됨을 알 수 있다. 외력이 없는 상태에서 돌기가 흡착될 때 돌기반경이 클수록 큰 접촉폭, 즉 큰 접촉면적이 형성된다.

Fig. 5는 돌기 최하단부에 붙어있는 rz-좌표계(Fig. 2 참조)를 이용하여 ρ=20 nm의 경우에 대해 접촉 띠폭 방향의 접촉압력 분포의 변화를 보여준다. 돌기반경 ρ가 일정하면 테 반경 R이 변화해도 압력분포는 변화하지 않는다. 압력분포는 비대칭이며, 최대 압력은 돌기 최하단점의 바깥쪽에서 발생한다. 흡착접촉과 기계적 접촉의 압력분포는 유사한 형상이지만, 흡착력에 의해 접촉띠의 폭과 접촉압력이 증가한다.

Fig. 6은 돌기가 접근하는 동안 돌기 최하단부에서 깊이방향(Fig. 2에서 Z축)으로 형성되는 수직응력의 변화를 보여준다. 돌기가 반무한체 표면에 흡착하기 직전(δ=–0.32 nm) 돌기 내부에는 인장응력이 작용한다. 그러나 돌기가 반무한체 표면에 흡착된 직후(δ=–0.31 nm) 돌기 표면부에 매우 큰 압축응력이 형성된다. 돌기가 접근할수록 돌기표면 압축응력값과 압축응력이 작용하는 깊이가 증가한다. 돌기위치가 δ>0일 때 돌기

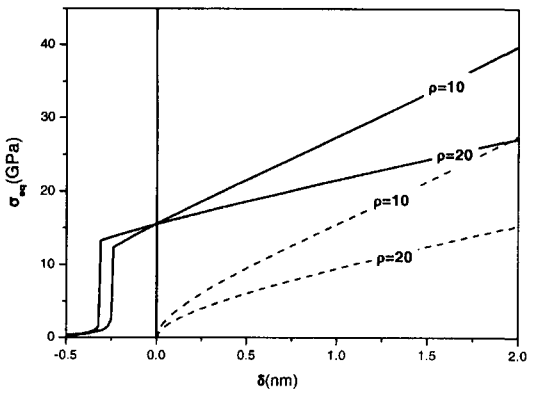

Fig. 8. Variation of maximum equivalent stress (σ_{eq}) at the surface during approach for adhesive (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

전체가 압축응력상태로 된다. 기계적 접촉의 해석결과(점선)와 비교하면 흡착력에 의해 표면에 매우 큰 압축응력이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 상황에서 깊이방향 등가응력(equivalent stress)의 변화를 보여준다. 돌기가 반무한체 표면에 흡착되기 전에는 인장응력에 의해 돌기 내부에 최대값이 존재하는 등가응력분포가 형성된다. 돌기가 흡착된 직후 표면 압축응력에 의해 표면에 큰 등가응력이 발생하며, 돌기가 접근할수록 표면 등가응력값은 지속적으로 증가한다(Fig. 8 참조). 표면 아래 압축응력 작용영역 내에 등가응력의 극대점이 형성되고 그 크기도 지속적으로 증가한다. 한편 인장응력 작용영역 내에 발생했던 등가응력 극대값은 크기가 점차 줄어든다. 돌기위치가 $\delta>0$ 일 때 등가응력의 극대점이 표면과 내부에 각각 발생한다. 흡착력에 의해 발생하는 표면 극대값이 표면 아래쪽 극대값보다 크기가 더 크며, 이는 돌기의 소성변형이 표면에서 먼저 발생함을 의미한다. 돌기의 소성변형은 돌기의 하중지지능력을 저하시키고 접촉면적을 증가시켜 마찰저항을 증가시킨다. 따라서 돌기의 소성변형을 방지하기 위해서는 반드시 흡착력을 고려한 응력해석결과를 이용해야 한다.

Fig. 8은 돌기가 반무한체 표면에 접근하는 동안에 돌기 표면에 형성되는 최대등가응력값(Fig. 7에서 $z=0$ 일때의 등가응력값)의 변화를 보여준다. 테 반경은 표면 최대 등가응력값에 영향을 끼치지 않으므로 돌기반경별로 하나의 선도가 제시되었다. 등가응력은 흡착과 동시에 순간적으로 증가한 후 돌기가 접근할수록 지속적으로 증가한다. 돌기위치 $\delta<0$ 일 때는 돌기반경이 작을수록 돌기 표면에 더 적은 최대 등가응력이 발생하지만, $\delta>0$ 일 때는 반대로 돌기반경이 클수록 더 적은 등가응력이 발생한다. 즉, 접촉조건에 따라 돌기반경을 선정해야 하지만, 일반적으로 접촉조건은 $\delta>0$ 이므로 돌기반경이 클수록 돌기의 소성변형 가능성이 적어진다. 따라서 돌기의 하중지지능력을 증가시키기 위해서는 돌기반경과 테 반경을 증가시켜야 한다. 흡착력이 없는 경우(점선)와 비교하면 흡착력에 의해 표면 최대 등가응력값이 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

토러스형 돌기의 흡착특성을 유한요소해석하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 돌기의 하중지지능력 및 강성을 증가시키기 위해 테 반경 또는 돌기반경을 증가시키면 접촉면적, 분리력 및 흡착 히스테리시스에 의한 에너지 소산량이 증가하여 마찰저항이 증가한다.

(2) 흡착접촉한 돌기의 표면에 최대 등가응력이 발생하므로 소성변형은 표면에서 먼저 발생한다. 최대 등가응력은 흡착력에 의해 발생하므로 돌기의 소성변형을 예측하기 위해서는 반드시 흡착력을 고려한 응력해석결과를 이용해야 한다.

(3) 흡착접촉한 돌기의 소성변형 가능성을 줄이기 위해서는 돌기반경이 큰 돌기를 이용해야 한다.

후 기

본 연구는 정보통신연구진흥원 대학기초연구지원사업(2001-022-3)에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Komvopoulos, K., "Surface Engineering and Microtribology for Microelectromechanical Systems," Wear, Vol. 200, pp. 305-327, 1996.
2. Fan, L.-S., Tai, Y.-C., and Muller, R. S., "IC-Processed Electrostatic Micromotors," Sensors and Actuators, Vol. 20, pp. 41-47, 1989.
3. Bhushan, B., "Macro- and Microtribology of Information Storage and Retrieval Devices," Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between the Macro- and Micro/Nanoscales, pp. 851-868, Kruwer Academic Publisher, Boston, 2001.

4. Johnson, K. L., "Mechanics of Adhesion," Tribology International, Vol. 31, No. 8, pp. 413-418, 1998.
5. Gui, J., Kou, D., Marchon, B, and Rauch, G. C., "Stiction Model for a Head-Disc Interface: Experimental," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 1, 1997.
6. Chilamakuri, S., and Bhushan, B., "Contact Analysis of Laser Textured Disks in Magnetic Head-Disk Interface," Wear, Vol. 230, pp. 11-23, 1999.
7. Oka, M., "Stiction Problems of Annular-shaped Laser Textured Bump on a Hard Disk," Tribology International, Vol. 33, pp. 353-356, 2000.
8. 조성산, 박승호, "강체평면에 흡착접촉하는 반구형돌기의 유한요소모델링," 대한기계학회논문집 A, 게재승인.
9. Katircioglu, S., and Erkoc, S., "Decomposition of C60 Molecules on Si(111) Surface," Surface Science, Vol. 383, pp. 775-778, 1997.
10. Caroli, C., and Nozieres, Ph., "Hysteresis and Elastic Interactions of Microasperities in Dry Friction," The European Physical Journal B, Vol. 4, pp.233-246, 1998.