

토러스 형상 돌기의 흡착특성 유한요소해석

조성산 · 양승민*

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과, 홍익대학교 대학원 기계공학과*

Abstract — Adhesive contact characteristics of torus-shaped bumps, which are commonly used to reduce friction and stiction in hard disks, are analyzed to examine the applicability to the MEMS structure. The analysis is conducted with the finite element technique considering the adhesive force. Torus-shaped bumps of various rim and bump radii are analyzed. The jump-to-contact behavior, adhesion hysteresis, pull-off forces, contact region and pressure, and surface and subsurface stresses are presented and discussed. Analysis results in the absence of adhesive force are also presented to identify the effect of adhesive force.

Key words — Torus-shaped bump, Adhesive contact, Finite element analysis

1. 서론

물체의 크기가 작아지면 체적 대비 표면적의 비가 증가하므로 체적력(body force)보다 표면력(surface force)의 영향이 상대적으로 커진다. 미세전자기계시스템(MEMS)과 같은 초소형 장치에서는 표면력의 일종인 흡착력(adhesive force)에 의해 큰 마찰력이 발생하고 마멸도 빨리 진행되어 초소형 장치의 성능 및 내구성이 저하된다[1]. MEMS 구조물에서 마찰력을 줄이고 stiction을 방지하기 위한 방법의 하나로 구조물 표면에 미세한 구형 돌기(spherical bump)를 만들어 흡착력이 작용하는 접촉면적을 감소시키는 방법이 보고되었다.

정보저장기기의 일종인 하드 디스크에서는 landing zone에서 마찰과 stiction의 문제를 해결하기 위해 표면에 인위적으로 돌기를 만드는 기술이 보편화되어 있다[2]. 하드 디스크에서 보편적으로 활용되는 돌기는 특성상 구형 돌기와 유사한 sombrero 유형과 토러스 형상에 해당되는 W-유형이

있다. 실제 하드 디스크에서는 두가지 유형 중에서 제작시 형상 재현성이 우수한 W-유형이 주로 활용되고 있다. 하드 디스크에서 발생하는 마찰 및 stiction은 MEMS에서의 마찰 및 stiction과 기본적으로 큰 차이가 없으므로, 하드 디스크에서 보편적으로 활용되는 토러스형 돌기는 MEMS 구조물에서도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 예견된다.

토러스형 돌기(torus-shaped bump)의 흡착특성을 이해하고 돌기의 형상 및 치수를 최적화하기 위해서는 흡착접촉해석이 필요하다. 대표적인 JKR 또는 DMT 흡착접촉모델[3]은 구형돌기를 대상으로 개발되었으므로 토러스형 돌기에 적용할 수 없다. 토러스형 돌기를 대상으로 개발된 모델들은 토러스 접촉을 직선 Hertz 접촉의 경우로 근사화하여 해석하고 있다[4-6]. 최근 조성산 등은 흡착접촉해석을 수행할 수 있는 유한요소기법을 발표하였다[7]. 이 방법은 돌기형상에 대한 제약조건이 없으므로 토

러스형 돌기의 흡착접촉해석이 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 토러스형 돌기의 MEMS 적용을 위해 흡착접촉 유한요소해석을 기법을 이용하여 흡착접촉해석을 수행하고 특성을 고찰하였다.

2. 흡착접촉 유한요소모델

Fig. 1은 반무한체의 편평한 표면에 형성된 토러스형 돌기가 다른 반무한체의 편평한 표면과 흡착접촉한 모습을 보여준다. 두 표면 사이의 간격이 넓으면 반무한체 상호간 작용력은 미미하다. 따라서, 문제를 단순화하기 위해 기존의 접촉 모델에서 처럼 모든 변형은 돌기에서 발생하는 것으로 가정한다.

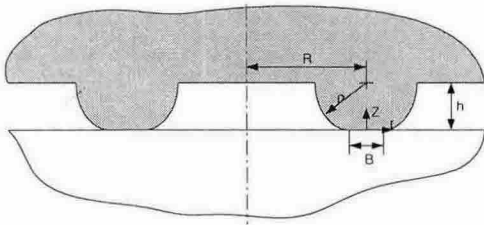


Fig. 1 Section view of contacting bump.

본 연구에서는 흡착력을 체적력으로 모델링하여 기존의 유한요소기법에 첨부시키는 방법으로 흡착접촉 유한요소모델을 작성하였다[7]. 즉, 반무한체 원자와 돌기 원자의 상호작용을 Lennard-Jones potential,

$$w(r) = \epsilon \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right] \quad (1)$$

로 표현하면, 반무한체 표면에서 간격 D 떨어진 위치에 있는 돌기 내부의 단위체적에 반무한체가 작용하는 힘, 즉 일종의 체적력인 $B(D)$ 는 식 (2)로 표현된다.

$$B(D) = \frac{\pi \epsilon \rho_a^2 r_0^2}{5} \left[\left(\frac{r_0}{D+D_0} \right)^{10} - 5 \left(\frac{r_0}{D+D_0} \right)^4 \right] \quad (2)$$

여기서, ϵ 은 에너지 매개변수, r 은 원자간 간격, r_0 는 평형간격, ρ_a 는 원자밀도, D_0 는 $B(D_0)=0$ 를 만족시키기 위해 도입된 간격상수이다.

유한요소격자는 4 절점 등매개변수 축대칭 요소로 구성된 돌기와 강체 평면인 무한평면으로 구성하였다. 무한평면과 인접한 부근에서 인력의 급격한 변화를 감안하여 돌기 표면 부근은 매우 작은 유한요소 ($0.025\text{nm} \times 0.025\text{nm}$)로 구성하였다. 실리콘 돌기를 가정하고 탄성계수 190GPa, 포와송비 0.28, $\rho_a = 49.94\text{atoms/nm}^3$, $\epsilon = 5.191 \times 10^{19}\text{J}$, $r_0 = 0.229505\text{nm}$ 를 사용하였다[8]. 돌기반경 $\rho = 10, 20\text{nm}$ 에 대해 각각 테 반경(rim radius) $R = 10, 20, 30, 50\text{nm}$ 와 20, 30, 40, 60, 100nm의 경우를 고려하였다.

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

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 $\rho = 20\text{nm}$ 이고 테 반경은 다른 돌기들이 반무한체에 접근하여 접촉한 후 다시 초기 위치로 돌아가는 과정에서 돌기에 작용하는 힘의 변화를 보여준다. 돌기 위치를 나타내기 위해 도입된 변수

$\delta(\equiv \rho - h)$ 는 돌기반경 ρ 에서 두 반무한체 간격 h 를 뺀 값으로 흡착력이 없을 때 돌기와 평면의 간섭깊이를 나타낸다. 즉 음의 δ 는 돌기와 평면의 떨어진 간격을 나타내며, 양의 δ 는 돌기와 평면이 접촉했을 때의 간섭량을 나타낸다. 돌기작용력 F 는 돌기를 임의의 위치에 유지시키는데 필요한 힘을 나타낸다. 음의 F 는 돌기에 작용하는 인력을 나타내고, 양의 F 는 척력을 나타낸다.

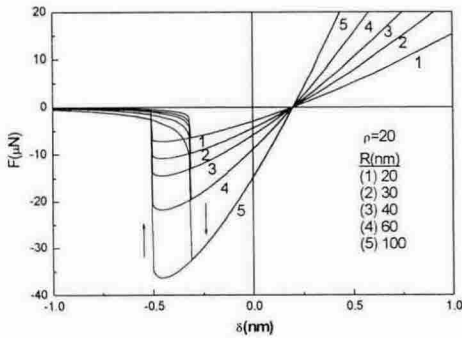


Fig. 2 Variation of adhesive contact force during approach and recession.

초기 돌기위치에서 돌기에는 미미한 인력이 작용한다. 돌기가 반무한체에 접근하면 인력은 미미하나마 증가하다가 $\delta = -0.31\text{nm}$ 부근에서 순간적으로 평면에 흡착된다. 돌기가 흡착된 상태에서 돌기를 더 접근시키면 인력은 감소하다가 $\delta = 0.2\text{nm}$ 부근에서 척력으로 바뀐 후 척력, 즉 압축력이 지속적으로 증가한다. 접촉된 상태의 돌기를 분리시킬 때 작용하는 힘은 $\delta = -0.31\text{nm}$ (접근하던 돌기가 순간적으로 달라붙는 위치)까지는 접근할 때의 돌기작용력과 동일하다. 그러나 $\delta = -0.31\text{nm}$ 보다 더 후퇴시켜도 돌기는 반무한체 표면에 떨어지지 않고 계속 붙어있으며 이때 돌기를

잡아당기는 인력도 계속 증가한다. 증가하던 인력은 $\delta = -0.46\text{nm}$ 부근에서 최대가 된 후 감소하다가 $\delta = -0.5\text{nm}$ 에서 돌기는 무한평면에서 순간적으로 떨어진다. 토러스형 돌기에서도 흡착 히스테리시스가 발생함을 알 수 있다. 테 반경 R 이 달라도 돌기 반경 ρ 가 동일하면 돌기가 달라붙고 떨어지는 위치와 돌기작용력이 인력에서 척력으로 전환되는 위치가 동일하다. 테 반경이 커지면 분리과정에 발생하는 최대 인력, 즉 분리력(pull-off force)이 증가한다.

돌기 반경 $\rho = 10\text{nm}$ 의 경우에서도 정성적으로 동일한 결과를 얻었다. 단지 차이는 돌기반경이 작아질수록 돌기가 순간적으로 붙고 떨어지는 위치가 무한체 표면에 더 가까워지며, 두 위치의 차이가 줄어들어 흡착 히스테리시스에 의한 에너지 손실량이 줄어든다.

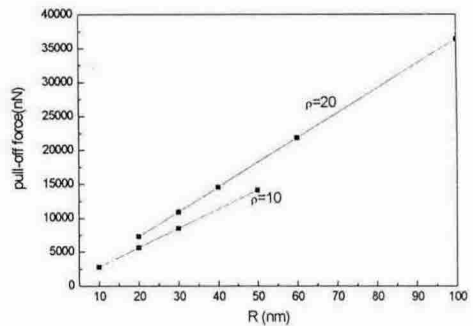


Fig. 3 Variation of pull-off force with rim radius.

Fig. 3는 테 반경과 분리력의 관계를 보여준다. 테 반경이 증가하면 분리력이 선형적으로 증가한다. 그리고 테 반경이 동일할 때 돌기반경이 클 수록 분리력이 증가한다.

토러스형 돌기는 반무한체 표면에 접촉할 때 원형띠 형상의 접촉영역이 발생한다. Fig. 4는 원형띠 형상의 접촉영역 폭의 변화를 돌기 위치의 함수로 보여준다. 돌기반

경이 동일하면 띠 반경에 무관하게 접촉띠의 폭이 동일하다. 이 결과는 띠반경이 증가하면 접촉띠의 반경이 증가하여 흡착력이 증가함을 의미한다. 또한 돌기반경이 증가하면 접촉띠의 폭이 증가하여 테반경이 동일해도 더 큰 접촉면적이 형성되고 그 결과 흡착력이 증가함을 알 수 있다.

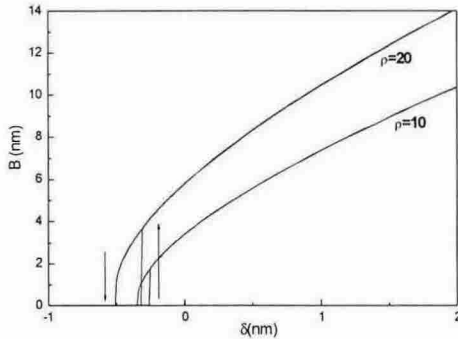


Fig. 4 Variation of contact band width during approach and recession.

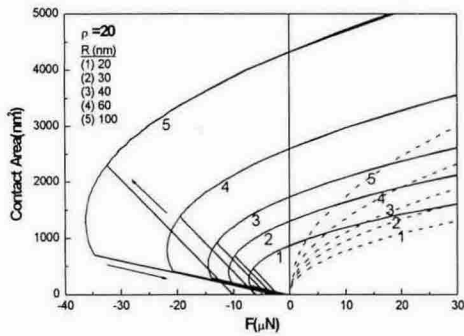


Fig. 5 Load-contact area curve for adhesive (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

Fig. 5는 접촉면적과 흡착력의 관계를 보여준다. 돌기가 접근하는 동안 돌기작용력이 인력에서 척력으로 바뀌지만 접촉면적은 지속적으로 넓어진다. 흡착력의 영향을 고찰하기 위해 흡착력이 작용하지 않는 경우 (이하 기계적 접촉으로 칭함)의 해석결

과도 함께 보여준다. 돌기작용력이 동일할 때 흡착력의 작용에 의해 더 큰 접촉면적이 형성됨을 알 수 있다.

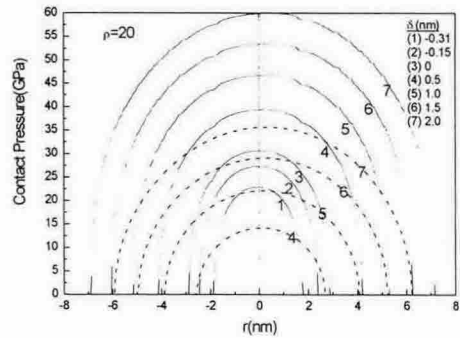


Fig. 6 Contact pressure for adhesive (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

Fig. 6은 중심이 돌기 하단부에 있는 rz-좌표계를 이용하여 $\rho=20\text{nm}$ 의 경우에 대해 접촉 띠 폭 방향의 접촉압력 분포의 변화를 보여준다. 돌기반경 ρ 가 일정하면 테반경 R 이 변화해도 압력분포는 변화하지 않는다. 압력분포를 정밀하게 검토하면 비대칭임을 알 수 있다. 최대 압력은 돌기 최하단점에서 발생하지 않고 더 바깥쪽에서 발생한다. 비대칭 압력분포는 기존의 토러스형 돌기의 접촉해석모델에서는 얻을 수 없는 결과이다. 차이가 발생하는 이유는 기존의 모델에서 문제의 단순화를 위해 대칭 압력을 가정하였기 때문이다. 흡착접촉과 기계적 접촉의 압력분포는 유사한 형상이지만, 흡착력에 의해 접촉띠의 폭과 접촉압력이 증가한다.

Fig. 7은 돌기가 접근하는 동안 돌기 최하단부에서 깊이방향(Fig. 1에서 Z축)으로 형성되는 수직응력의 변화를 보여준다. 돌기가 반무한체 표면과 접촉하기 전 ($\delta=-0.32\text{nm}$) 돌기 내부에는 인력에 의해 인장응력이 작용한다. 돌기가 최초로 접촉한 직

후($\delta = -0.31\text{nm}$)에 돌기 표면에는 매우 큰 압축응력이 발생하고 이 압축응력은 표면 아래쪽으로 들어가면서 급격히 감소하여 인장응력이 된다. 돌기가 더 접근할수록 표면에 형성되는 최대 압축응력값과 압축응력이 작용하는 깊이가 증가하며, 인장응력값은 감소한다. 돌기가 $\delta > 0$ 인 영역에 들어서면 인장응력은 사라지고 모두 압축응력상태로 된다. 기계적 접촉의 해석결과(점선)와 비교하면 흡착력에 의해 발생하는 가장 큰 변화는 표면에 형성되는 매우 큰 압축응력임을 알 수 있다.

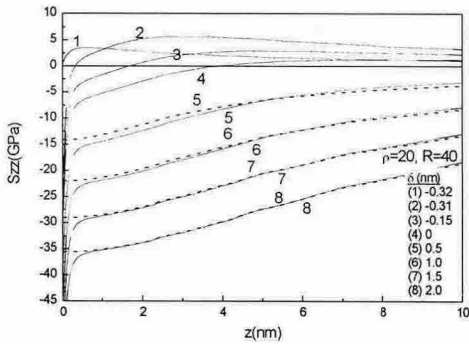


Fig. 7 Subsurface normal stresses for adhesion (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

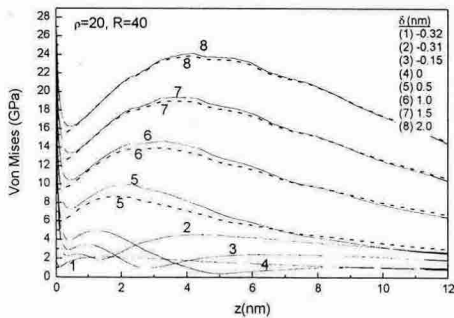


Fig. 8 Subsurface von Mises stresses for adhesion (solid lines) and mechanical (dash lines) contacts.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 상황에서 깊이 방향 von Mises 응력의 변화를 보여준다. 돌기가 반무한체 표면과 접촉하기 전에 돌기 내부에 형성되는 인장응력에 의해 표면 아래쪽에 최대값이 존재하는 Mises 응력분포가 형성된다. 돌기가 최초로 접촉한 직후에 표면 부근의 큰 압축응력에 의해 표면에 큰 Mises 응력이 발생한다. 돌기가 더 접근하면 표면 Mises 응력값은 지속적으로 증가하며, 동시에 표면 아래쪽 압축응력 작용영역 내에서 Mises 응력의 극대점이 형성되고 그 크기도 지속적으로 증가한다. 한편 인장응력에 의해 발생했던 Mises 응력의 극대값은 크기가 점차 줄어든다. 돌기가 $\delta > 0$ 인 영역에 들어서면 인장응력에 의해 발생했던 Mises 응력 극대점은 사라지고 압축응력에 의해 표면과 표면 아래에 각각 Mises 응력의 극대점이 존재한다. 표면응력의 극대점이 표면 아래쪽 극대점보다 크기가 더 크다. 기계적 접촉의 해석결과(점선)와 비교하면 흡착력에 의해 표면에 큰 Mises 응력이 발생함을 알 수 있고, 따라서 표면 아래쪽보다 표면에서 먼저 소성 변형이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

토러스형 돌기의 흡착특성을 유한요소기법으로 해석하여 다음의 결론을 얻었다. 토러스형 돌기에서 발생하는 흡착 히스테리시스에 의한 에너지 소산은 토러스 테 반경과 돌기 반경이 증가할수록 증가한다. 테 반경이 증가하면 분리력이 선형적으로 증가한다. 그러나 흡착되는 위치와 떨어지는 위치, 그리고 접촉띠의 폭은 테 반경과 무관하게 항상 일정하다. 한편 돌기반경의 증가는 흡착 및 분리가 더 큰 간격에서 발생하게 하고, 히스테리시스에 의한 에너지 소산량, 분리력 및 접촉띠의 폭 모두를 증가시킨다. 접촉영역에는 비대칭 접촉압력이

형성된다. 흡착력에 의해 표면에 최대 압축 응력이 형성되며, 그 결과 표면에서 소성변형의 가능성이 증가한다.

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. 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, 2001.
3. Johnson, K. L., "Mechanics of Adhesion," *Tribology International*, Vol. 31, No. 8, pp. 413-418, 1998.
4. Gui, J., Kou, D., Marchon, B, and Rauch, G. C., "Stiction Model for a Head-Disk Interface: Experimental," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 1, 1997.
5. Chilamakuri, S., and Bhushan, B., "Contact Analysis of Laser Textured Disks in Magnetic Head-Disk Interface," *Wear*, Vol. 230, pp. 11-23, 1999.
6. Oka, M., "Stiction Problems of Annular-shaped Laser Textured Bump on a Hard Disk," *Tribology International*, Vol. 33, pp. 353-356, 2000.
7. 조성산, 박승호, "강체평면에 흡착접촉하는 반구형돌기의 유한요소모델링," *대한기계학회지*, 심사중.
8. Katircioglu, S., and Erkoc, S., "Decomposition of C60 Molecules on Si(111) Surface," *Surface Science*, Vol. 383, pp. 775-778, 1997.