

## 마이크로 표면돌기의 응착력과 마찰력

조성선<sup>†</sup> · 임제성<sup>\*</sup> · 박승호<sup>\*\*</sup> · 이승섭<sup>\*\*\*</sup>

(2003년 7월 22일 접수, 2004년 6월 16일 심사완료)

### Adhesion and Friction Forces of Micro Surface Bumps

Sung-San Cho, Je-Sung Lim, Seungho Park and Seungseop Lee

**Key Words:** Hemispherical Bump(반구형 돌기), Torus Bump(환상고리형 돌기), Adhesion(응착), Friction(마찰), MEMS(미세전자기계시스템)

#### Abstract

Adhesion and friction forces influence adversely on performance and durability of MEMS. It has been reported that the adhesion and friction forces can be reduced with the introduction of micro surface bumps into the contacting interfaces. In this study experiments were conducted to investigate comparatively the effect of hemispherical and torus micro bumps on the adhesion and friction forces. It is confirmed that micro bumps reduce the adhesion and friction forces, and their effect is more pronounced with the bumps of smaller outer boundary radius. Moreover, the results shows that the torus bumps exhibit more rapid decrease of the adhesion and friction forces with the decrease in the outer boundary radius of bump than the hemispherical bumps. When the magnitude of adhesion force is same, the torus bumps generate smaller friction force than the hemispherical bumps. The usage of hemispherical and torus bumps to reduce the adhesion and friction forces in MEMS is discussed.

#### 1. 서 론

미세전자기계시스템(MEMS)의 구조물은 부피에 비해 표면적이 상대적으로 매우 크기 때문에 구조물 사이에 강한 응착력이 작용한다. 그 결과 구조물들이 서로 달라붙거나 또는 미끄럼 운동을 할 때 큰 마찰력이 발생되어 미세시스템의 성능 및 내구성을 저하시킨다. 응착력을 감소시키기 위해 개발된 방법에는 접촉면에 미세돌기를 만들어 응착력이 작용하는 접촉면적을 감소시키는 방법과 접촉면의 표면화학적 특성을 개선하여 접촉

면에 작용하는 응착력의 크기를 감소시키는 방법 등이 있다.<sup>(1~3)</sup>

Fan 등<sup>(4)</sup>은 마이크로 모터의 접촉면에 미세돌기를 만들어 응착력 및 마찰력을 감소시켰다고 보고하였다. 자기정보저장기의 경우 헤드와 디스크 사이에 환상고리형(torus) 돌기를 만들어 응착을 방지하는 기술은 이미 보편화되어 있다.<sup>(5)</sup> Ando 등<sup>(6~8)</sup>이 수행한 반구형 돌기의 응착력 및 마찰력에 대한 연구에 의하면, 반구형 돌기의 높이를 낮추거나 곡률반경을 증가시키면 응착력과 마찰력이 증가하며, 이때 응착력과 마찰력은 선형적 비례관계를 나타낸다. 한편 상대습도가 증가하면 마찰력은 비례적으로 증가하지만 응착력은 거의 변화가 없다.

기존의 연구에 의하면 반구 및 환상고리형 돌기 모두 응착력 및 마찰력을 감소시키는 효과가 있다. 그러나 두 종류 돌기의 응착 및 마찰 특성의 차이에 대한 비교 연구는 거의 발표되지 않았

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

E-mail : sscho@wow.hongik.ac.kr

TEL : (02)320-1674 FAX : (02)322-7003

\* 홍익대학교 대학원

\*\* 회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

\*\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

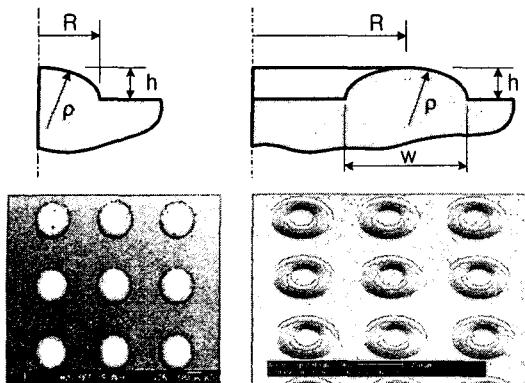


Fig. 1 Hemispherical and torus bumps

다. 따라서 본 연구에서는 반구 및 환상고리형 마이크로 돌기를 대상으로 돌기의 높이가 동일할 때 돌기의 최외곽 반경 및 환상고리형 돌기의 폭 변화에 따른 응착력 및 마찰력의 변화를 측정하고, 두 돌기의 응착력 및 마찰력 저감특성을 비교 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시편

Fig. 1은 실험에서 사용된 웨이퍼 상에 성형된 반구(좌측) 및 환상고리형(우측) 돌기의 모습과 돌기의 크기를 정의하는데 사용된 기호를 보여준다. 반구형 돌기는 웨이퍼 상에서 돌기가 차지하는 원형 영역의 반경  $R$ 이 다른 4종류( $R=20, 40, 80, 120\mu\text{m}$ ), 그리고 환상고리형 돌기는 고리 반경  $R$ 이  $100\mu\text{m}$ 로 동일하면서 돌기의 폭  $w$ 가 다른 4종류( $w=20, 40, 60, 80\mu\text{m}$ )를 제작하였다. 돌기의 높이  $h$ 는 모두  $18-20\mu\text{m}$  범위로 유지하였다. 돌기의 곡률반경  $\rho$ 는 제작과정에서 인위적으로 일정하게 유지하는 것이 매우 어렵다. 그러나 돌기의 높이  $h$ 가 일정할 때, 반구형 돌기의  $R$ 이 증가하거나 환상고리형 돌기의  $w$ 가 증가하면  $\rho$ 도 전반적으로 증가한다. 응착 및 마찰실험에서 접촉의 안정성을 확보하고 동시에 실험결과의 신뢰성을 향상시키기 위해 하나의 시편에 100개의 돌기를 정사각형( $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ ) 영역에 등간격으로 배치하였다.

돌기는 마이크로 렌즈 제작기법으로 제작하였고<sup>(9)</sup> 실리콘 웨이퍼 위에 PMMA를 코팅한 후 돌

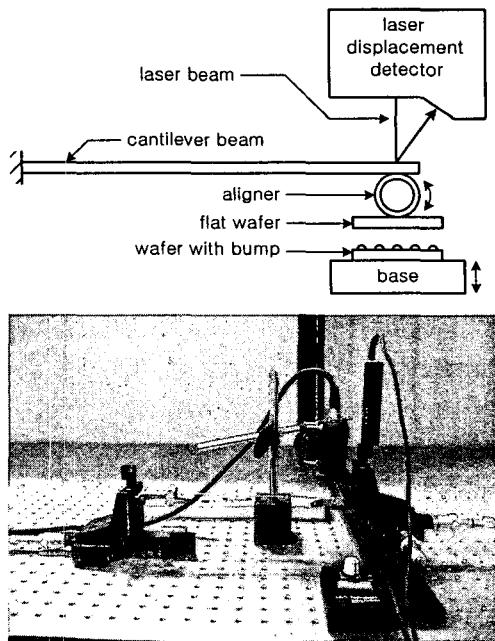


Fig. 2 Adhesion force measuring rig

기를 제작할 부위에 deep X-ray를 투사하고 열처리를 하면 X-ray가 투사된 부분이 부풀어 오른다. X-ray 투사부위를 원형으로 하면 반구형 돌기가 되고, 환상으로 하면 환상고리형 돌기가 된다. 제작된 돌기의 표면거칠기는  $1\text{nm}$  이하이다. 돌기의 강성을 증가시키기 위해 돌기 표면에 티타늄을 두께  $100\text{nm}$  내외로 증착하였다.

### 2.2 응착력 측정장치 및 방법

Fig. 2는 응착력 측정장치의 개념도와 사진을 보여준다. 돌기가 성형된 웨이퍼(아래쪽)를 base 위에 고정하고 돌기가 없는 편평한 웨이퍼(위쪽)는 외팔보 끝단에 설치된 aligner에 부착한다. Aligner는 두 웨이퍼를 평행하게 유지하는 기능을 수행한다. 아래쪽 웨이퍼를 위쪽으로 이동하여 위쪽 웨이퍼와 접촉시킨 후 아래쪽 웨이퍼를 아래쪽으로 이동시키면 두 웨이퍼 사이에 작용하는 응착력에 의해 외팔보의 끝단은 평형위치보다 아래로 따라 내려오다가 외팔보의 탄성복원력이 응착력보다 커지면 두 웨이퍼가 분리되면서 외팔보는 평형위치로 돌아간다. 두 웨이퍼가 분리될 때 외팔보 끝단의 최대 수직변위는 두 웨이퍼 사이에 작용하는 응착력에 의해 발생한다. 따라서, 분

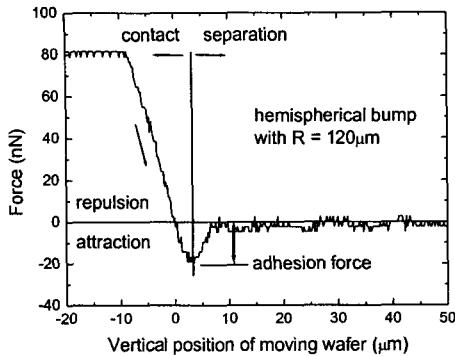


Fig. 3 Force-position curve in adhesion test

리과정에서 외팔보 끝단의 변위를 레이저로 측정하면 응착력을 산출할 수 있다. 실험은 상대습도를 50% 내외로 유지한 상태에서 돌기 하나에 작용하는 접촉력이 80nN이 되도록 두 웨이퍼를 밀착시킨 후, 아래쪽 웨이퍼를  $50\mu\text{m}/\text{s}$ 의 속도로 이동하여 두 웨이퍼를 분리시키면서 외팔보 끝단의 수직변위를 레이저 변위측정기로 측정하여 응착력을 산출하는 방법으로 수행하였다. 각 돌기별로 동일한 실험을 6회 이상 반복하였다.

Fig. 3은 응착력 측정실험에서 두 웨이퍼를 밀착시킨 후 아래쪽 웨이퍼를 움직여 두 웨이퍼를 분리시킬 때 위쪽 웨이퍼에 작용하는 힘의 변화를 보여준다. 두 웨이퍼가 밀착된 상태에서 아래쪽 웨이퍼가 움직이기 시작하면 위쪽 웨이퍼에 작용하는 척력(repulsive force)이 감소한다. 아래쪽 웨이퍼가 외팔보 끝단의 평형위치를 통과하면서 위쪽 웨이퍼에 작용하는 힘은 척력에서 인력(attractive force)으로 바뀌며, 이후 인력은 크기가 증가하다가 두 웨이퍼가 분리되면 크기가 감소하면서 사라진다. 웨이퍼가 분리된 이후에도 일정 기간 인력이 존재하는 이유는 힘의 측정을 외팔보 끝단의 변위로부터 환산하였기 때문에 두 웨이퍼가 분리된 후 외팔보의 끝단이 평형위치로 돌아가는 과정의 변위가 힘으로 환산되었기 때문이다. 두 웨이퍼 사이에 작용하는 응착력은 두 웨이퍼가 분리되는 과정에서 발생하는 최대 인력, 일명 분리력(pull-off force)으로 불리우는 힘에 해당한다.

### 2.3 마찰력 측정장치 및 방법

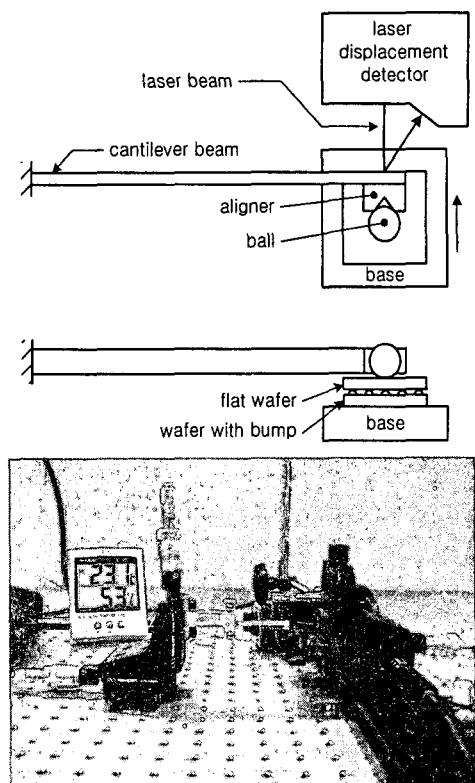


Fig. 4 Friction measuring rig

Fig. 4는 마찰력 측정 장치의 개념도와 사진을 보여준다. 돌기가 성형된 웨이퍼(아래쪽)를 base 위에 고정시키고, 그 위에 볼이 부착된 돌기없는 웨이퍼(위쪽)를 올려놓는다. 수직접촉하중은 볼의 무게를 변화시켜 조정한다. 아래쪽 웨이퍼를 외팔보에 수직한 방향으로 수평이동시킬 때 위쪽 웨이퍼의 볼이 외팔보의 끝단과 접촉해 있으므로 두 웨이퍼 사이에 작용하는 마찰력이 외팔보의 끝단에 전달되어 외팔보의 굽힘변형이 발생한다. 외팔보 끝단의 굽힘변위를 레이저로 측정하여 두 웨이퍼 사이에 작용하는 마찰력을 산출한다. 실험은 수직접촉하중  $27\mu\text{N}$ , 미끄럼 속도  $77\mu\text{m}/\text{s}$ , 그리고 상대습도 50% 내외로 유지한 상태에서 수행하였다. 각 돌기별로 동일한 실험을 6회 이상 반복하였다.

Fig. 5는 두 웨이퍼가 접촉된 상태에서 아래쪽 웨이퍼를 수평이동시킬 때 두 웨이퍼의 접촉면에서 마찰력이 형성되는 과정의 전형적인 예를 보여준다. 아래쪽 웨이퍼의 변위가 약  $14\mu\text{m}$ 가 된

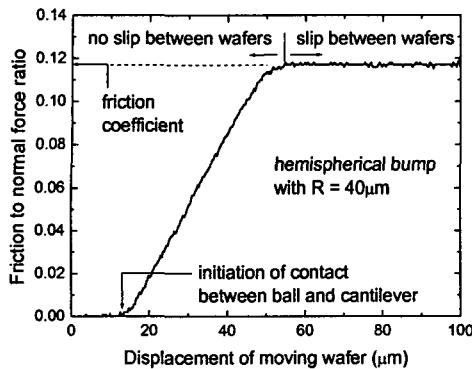


Fig. 5 Evolution of friction force

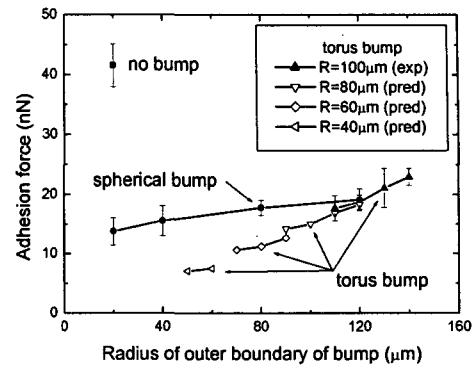


Fig. 6 Effect of bump on adhesion force

이후에 마찰력이 발생하는 이유는 초기에 외팔보와 분리되어 있던 위쪽 웨이퍼에 부착된 볼이 아래쪽 웨이퍼가 약  $14\mu\text{m}$  이동한 후에 외팔보와 접촉하면서 외팔보가 굽힘변형되기 시작하며 마찰력은 외팔보의 굽힘변위로부터 산출하였기 때문이다. 볼과 외팔보가 접촉한 이후 아래쪽 웨이퍼의 변위가 약  $54\mu\text{m}$ 가 될 때까지 두 웨이퍼의 접촉면에서 상대운동이 거의 발생하지 않으면서 마찰력이 증가한다. 아래쪽 웨이퍼의 변위  $54\mu\text{m}$  이후에는 두 웨이퍼 접촉면에서 미끄럼이 발생하면서 일정한 마찰력이 작용한다. 본 실험에서 사용된 마찰조건에서는 정지마찰계수와 운동마찰계수의 차이가 관측되지 않으며, stick-slip도 발생하지 않는다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 응착력

Fig. 6은 돌기의 최외곽 반경과 응착력의 관계를 보여준다. 여기서 돌기의 최외곽 반경은 반구형 돌기의 경우에는  $R$ , 그리고 환상고리형 돌기의 경우에는  $R+w/2$ 를 의미한다(Fig. 1 참조). Fig. 6은 돌기가 없는 평면 사이에 작용하는 응착력도 보여주며, 이 경우 돌기의 최외곽 반경을 나타내는 수평좌표값은 무의미하다. 응착력은 돌기 하나에 작용하는 힘이며, 돌기가 없는 경우는 돌기가 있는 웨이퍼에서 돌기 하나가 지지하는 면적( $4\text{mm} \times 4\text{mm}/100개 = 0.16\text{mm}^2$ )에 작용하는 응착력을 나타낸다.

돌기가 있는 경우와 없는 경우를 비교하면 돌기에 의해 응착력이 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 돌기에 의해 접촉면적이 감소하였기 때문이다.

반구 및 환상고리형 돌기의 실험결과를 비교하면 두 종류의 돌기 모두 돌기의 최외곽 반경이 증가하면 응착력이 증가한다. 반구형 돌기의 경우 돌기의 높이  $h$ 가 일정할 때 최외곽 반경  $R$ 이 증가하면 돌기의 곡률반경  $\rho$ 가 증가하며, 환상고리형 돌기의 경우 고리반경  $R$ 과 돌기 높이  $h$ 가 일정할 때 돌기의 폭  $w$ 가 증가하면 돌기의 곡률반경  $\rho$ 가 증가한다. 접촉하중이 동일할 때 곡률반경이 클수록 접촉면적이 증가하므로, Fig. 6에서 돌기의 최외곽 반경의 증가는 접촉면적의 증가를 의미한다. 즉, 응착력의 증가는 접촉면적의 증가에서 기인한 것임을 알 수 있고, 따라서 응착력을 줄이기 위해서는 가능한 최외곽 반경이 작은 돌기를 선택하는 것이 바람직하다. 이 결과는 반구형 돌기에 대한 기존의 연구결과와 일치한다.<sup>(7,10,11)</sup>

한편, 돌기의 최외곽 반경이 감소할수록 반구형 돌기보다 환상고리형 돌기의 응착력이 빠르게 감소한다. 대략적으로 돌기의 최외곽 반경이  $120\mu\text{m}$ 보다 작을 때는 환상고리형 돌기에게 더 작은 응착력이 작용하고,  $120\mu\text{m}$ 보다 클 때는 반구형 돌기에게 더 작은 응착력이 작용한다.

환상고리형 돌기의 응착력에 대한 유한요소해석<sup>(10)</sup>에 의하면 돌기의 곡률반경  $\rho$ 가 일정할 때 응착력은 고리의 원주길이  $2\pi R$ 에 선형적으로 비

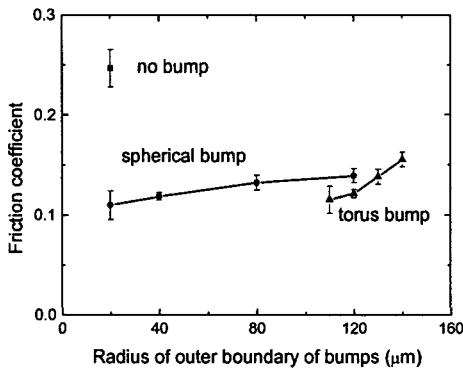


Fig. 7 Effect of bump on friction coefficient

례한다. 유한요소해석결과에 근거하여 실험으로 얻은 환상고리형 돌기( $R=100\mu\text{m}$ )의 응착력으로부터 고리반경이 작은 환상고리형 돌기( $R=40, 60, 80\mu\text{m}$ )의 응착력을 추정한 값(표준편차가 없는 데 이터)을 Fig. 6에 표시하였다. 이론적으로 추정된 환상고리형 돌기와 반구형 돌기의 응착력을 비교하면 돌기의 최외곽 반경이 동일할 때 반구형 돌기보다 환상고리형 돌기의 응착력이 현저하게 작다. 따라서, 돌기의 최외곽 반경이 작을 때는 환상고리형 돌기가 응착력을 감소시키는데 효과적이고, 반대로 돌기의 최외곽 반경이 클 경우에는 반구형 돌기가 효과적이다. 이 결과는 환상고리형 돌기의 고리반경이 작은 경우에 대한 검증 실험이 필요할 것으로 판단된다.

상기의 결과를 종합하면 최외곽 반경이 작은 환상고리형 돌기가 MEMS에서 응착력을 감소시키는데 효과적인 것으로 판단된다. 한편 환상고리형 돌기는 최외곽 반경을 줄이는데 한계가 있으므로, 공간적 제약에 의해 환상고리형 돌기를 사용할 수 없을 때 반구형 돌기를 차선책으로 선택하는 것이 바람직하다.

### 3.2 마찰력

Fig. 7은 돌기의 최외곽 반경과 마찰계수의 관계를 보여준다. 비교를 위해 돌기가 없는 경우도 보여준다. 마찰계수도 응착력과 유사한 경향을 나타낸다. 즉, 돌기는 마찰계수를 현저하게 감소시킨다. 그리고 반구 및 환상고리형 돌기 모두 돌기의 최외곽 반경이 감소하면 마찰계수가 감소

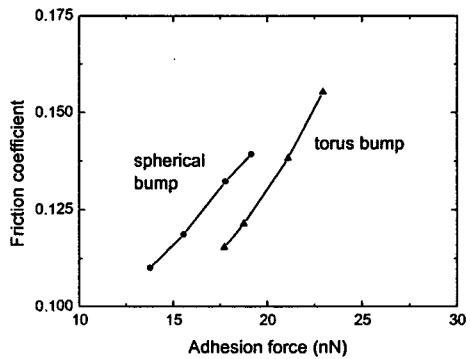


Fig. 8 Dependence of friction coefficient on adhesion force

하며, 이때 반구형 돌기보다 환상고리형 돌기의 마찰계수가 더 빠른 비율로 감소한다. 따라서 환상고리형 돌기는 돌기의 최외곽 반경이 작을 때, 그리고 반구형 돌기는 돌기의 최외곽 반경이 클 때 마찰력을 줄이는데 유리하다.

Fig. 8은 응착력과 마찰계수의 관계를 보여준다. 응착력과 마찰계수 사이에는 비례관계가 존재하며, 이 결과는 기존의 결과와 일치한다.<sup>(7)</sup> 한편 응착력이 동일할 때 환상고리형 돌기의 마찰계수가 반구형 돌기의 마찰계수보다 낮다. 이 결과는 응착력 외에도 돌기의 형상에서 기인하는 다른 요인에 의해 마찰력의 차이가 발생함을 암시한다. 그러나 본 연구의 결과만으로 다른 요인을 파악하는 것은 불가능하므로, 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

돌기의 높이가 동일한 상태에서 최외곽 반경이 다른 반구 및 환상고리형 마이크로 돌기의 응착력 및 마찰력을 실험적으로 측정하여 다음의 사실을 확인하였다. 접촉면에 존재하는 돌기는 응착력 및 마찰력을 현저하게 감소시킨다. 반구 및 환상고리형 돌기 모두 돌기의 최외곽 반경이 작아질수록 응착력 및 마찰력이 감소하지만, 감소율은 반구형 돌기보다 환상고리형 돌기에서 더 크다. 응착력이 동일할 때 반구형 돌기보다 환상고리형 돌기가 더 작은 마찰력을 발생시킨다.

## 후기

본 연구는 정보통신부 정보통신연구진흥원에서 지원하고 있는 정보통신기초연구지원사업의 연구 결과입니다. 또한 공동저자 박승호는 본 연구를 위해 부분적으로 마이크로 열시스템 연구센터의 지원을 받았습니다.

## 참고문헌

- (1) Tas, N., Sonnenberg, T., Jansen, H., Legtenberg, R., and Elwenspoek, M., 1996, "Stiction in Surface Micromachining," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 6, pp. 385~397.
- (2) Komvopoulos, K., 1996, "Surface Engineering and Microtribology for Microelectromechanical systems," *Wear*, Vol. 200, pp. 305~327.
- (3) Maboudian, R., 1998, "Surface Processes in MEMS Technology," *Surface Science Reports*, Vol. 30, pp. 207~269.
- (4) Fan, L.-S., Tai, Y.-C., and Muller, R. S., 1989, "IC-processed electrostatic micromotors," *Sensors and Actuators*, Vol. 20, pp. 41~47.
- (5) Yufeng, L. and Menon, A. K., 1995, "The Developement and Implementation of Discrete Texture for the Improvement of Tribological Performance," *Trans. ASME. J. Tribology*, Vol. 117, pp. 279~284.
- (6) Ando, Y., and Ino, J., 1996, "Friction and Pull-off Force on Silicon Surface Modified by FIB," *Sensors and Actuators A*, Vol. 57, pp.83~89.
- (7) Ando, Y., and Ino, J., 1998, "Friction and Pull-off Forces on Submicron-size Asperities," *Wear*, Vol. 216, pp. 115~122.
- (8) Ando, Y., 2000, "The Effect of Relative Humidity on Friction and Pull-off Forces Measured on Submicron-size Asperity Arrays," *Wear*, Vol. 238, pp. 12~19.
- (9) Lee, S. K., Lee, K. C., and Lee, S. S., 2002, "Microlens Fabrication Method by the Modified LIGA Process," *Trans. of KSME A*, Vol. 26, No. 11, pp. 2450~2456.
- (10) Cho, S.-S., and Yang, S. M., 2002, "Finite Element Analysis of Adhesive Contact of Torus-Shaped Bumps," *Journal of the KSTLE*, Vol. 18, No. 4, pp. 249~254.
- (11) Cho, S.-S., and Park, S., 2002, "Finite Element Modeling of a Hemispherical Asperity Adhesively Contacting the Plane Surface of Semi-Infinite Rigid Body," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 26, No. 11, pp. 2436~2441.