

표면의 기하학적 형상에 따른 마찰 특성

Effect of Geometric Surface Structure on Frictional Behavior

이형석(연세대학교 대학원) 김대은(연세대학교 기계 전자 공학부)

Hyung-Suk Lee(Graduate school of Yonsei Univ.), Dae-Eun Kim(Yonsei Univ.)

Abstract

Friction control is highly desirable for optimization of tribological systems. In this work, the effect of geometric structure of the solid surface on friction is investigated using a Scanning Electron Microscope equipped with a tribotester. Silicon and silicon oxide specimens were used and undulations on the surface were fabricated by mechanical and chemical methods. It is shown that the friction coefficient depends on the relative dimensions of the ball and the width of undulation. By optimizing the geometry of the undulation, friction reduction may be achieved.

Key Words : Micro tribotester, in Situ, SEM, undulated surface

1 서 론

상대 운동을 하는 접촉면에서 발생하는 마찰력을 감소시키기 위해서는 윤활제를 사용하거나 표면에 코팅을 하는 방법이 사용되고 있다[1-3]. 그러나 최근 기계 부품이 정밀화, 소형화 됨에 따라 윤활제를 사용하기 힘든 상황이나 표면 코팅의 방법이 제약을 받는 경우, 또는 마멸 특성을 좋게 하기 위하여 표면의 형상을 변화 시키기도 한다[4-6]. 이러한 표면의 미세한 형상의 변화는 상대재간의 접촉 면적, 표면 거칠기, 접촉 각도의 변화를 일으키며 이와 같은 인자

들은 미시적 관점에서 마찰 계수의 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[7-9]. 그러나 두 상대재간의 상호 위치에 따른 마찰 현상에 대한 순간적인 마찰 거동의 변화에 대한 연구는 미흡한 실정으로 표면을 설계하는데 있어 경험적인 방법에 의존하고 있다.

본 연구에서는 정밀 가공기를 통해 인위적 요철 표면을 제작하고 기하학적 형상을 최대한 반영하도록 저속($10\mu\text{m/s}$ 이하)과 저하중(5gf 이하)을 유지할 수 있는 미소한 마찰 시험기를 제작하여 상대재간의 접촉 상태 변화에 따른 마찰 거동을 관찰하였다.

마찰 시험기는 주사 전자 현미경내에 장착하여 마찰 순간의 접촉 상태를 파악하는데 이용하였다. 정확한 접촉 상황과 그 순간에서의 마찰 거동에 관한 연구는 마찰력 제어를 위한 표면의 설계에 응용될 수 있으며 마찰력의 예측에도 응용이 가능할 것이다.

2 실험방법

본 실험은 마찰 계수를 측정함과 동시에 표면의 기하학적인 형상과 두 운동재료간의 접촉 상태에서의 미시적 마찰 거동을 관찰하고자 주사 전자 현미경내에서의 실험 방법을 고안 개발 하였다.

2.1 실험장치

실험 장치는 크게 기존의 주사 전자 현미경과 그 내부에 장착된 미소 마찰 시험기로 이루어져 있다. 주사 전자 현미경은 로터리 펌프와 디퓨전 펌프를 이용하여 10^{-5} torr의 진공을 유지하며 10~20keV의 가속 전압으로 전자선을 시편의 표면에 주사한다. 이때 발생하는 이차 전자를 수집하여 음극선관에 상을 형성하게 되는데 초점이 높은 심도를 갖고 있기 때문에 시편 표면에서의 여러 현상들을 입체적으로 관찰할 수 있다.

Fig. 1에서는 주사 전자 현미경의 전체적인 모습과 함께 내부의 디스크를 구동시키기 위한 모터 구동 장치와 접촉점에서의 마찰 신호를 처리하기 위해 회로와 연결하는 피드스루가 장치된 모습이다.

모터는 DC motor를 사용하였으며 전압 controller를 통해서 제어된다. 피드스루를 통해 전달된 마찰 신호는 앰프로 연결되어 증폭되고 A/D 보드를 통해서 컴퓨터에 저장된다.

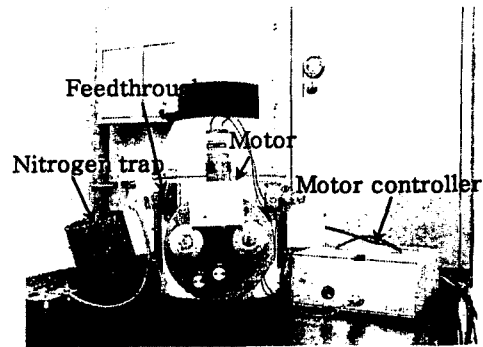


Fig. 1 Photograph of SEM with tribotester

Fig. 2는 주사 전자 현미경 내부에 장착된 마찰 시험기의 모습으로 Pin-on-disk를 응용하였으나 기존의 것과는 달리 시편이 놓여 있는 디스크가 공간상에서 자유롭게 움직임에 따라 시편과 핀과의 각도를 일정하게 유지하도록 제작하였다.

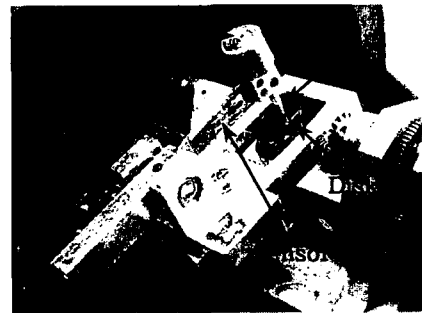


Fig. 2 Photograph of tribotester inside SEM

핀에 가해지는 수직하중은 dead weight 방식으로 1~5gf의 하중을 가할 수 있으며 디스크는 Fig. 1의 모터와 모터 controller에 의해 회전하게 되는데 최대한 저속을 유지하여 표면의 기하학적인 형상을 그대로 반영하고자 하였다. 접촉부에서 발생하는 마찰력은 센서를 통해 감지하게 되는데 이 신호는 피드스루로 연결되어 외부로 출력된다.

2.2 실험시편 및 방법

본 실험에서는 일반적인 요철 크기의 형상을 제작하여 실험 시편으로 사용하였으며 기하학적 형상에 따른 마찰 계수의 변화를 알아 보기 위해 접촉 위치와 마찰 계수의 변화를 알아 보고자 저속을 유지하였다.

핀에 부착된 볼 시편은 $500\mu\text{m}$ 지름의 STB-2 베어링 볼을 사용하였으며 볼의 경도는 HV700이다. 디스크에 놓이는 상대재로는 단일 요철과 주기적 요철 시편을 사용하였다. 단일 요철의 경우 SiO_2 위에 다양한 폭의 골을 제작하여 형상변화에 따른 마찰 계수의 변화를 알아 보고자 하였으며 주기적 요철의 경우 P-type의 Si(100) 위의 일부분에 $5\mu\text{m}$ 와 $10\mu\text{m}$ 폭의 요철을 가진 undulated surface를 사용하여 주기적 요철의 영향을 알아보고자 하였다.

단일 요철 표면의 경우 본 연구실이 보유하고 있는 마이크로 미세 가공 기술을 이용하여 기계적 가공과 화학적 가공 과정을 거쳐 원하는 형상을 구현 하였다[10]. Fig. 3은 개략적인 공정의 순서를 나타낸 것이다.



Fig. 3 Fabrication process of undulation

에칭 되어 생기게 되는 골 부분의 폭의 길이는 기계적 가공시에 실리콘 위의 리지스트 제거폭을 조절하여 3, 5, 7, 11, $16\mu\text{m}$ 5 종류로 제작하였으며 폭의 깊이는 화학적 가공시 에칭 시간을 조절 하여 $1.5\mu\text{m}$ 가 되도록 에칭 하였다.

주기적인 요철의 배열은 Si 표면의 일부분에 폭의 너비와 간격이 각각 $5\mu\text{m}$ 인 undulated surface와 각각 $10\mu\text{m}$ 인 undulated surface를 반도체 공정을 통하여

제작하여 요철이 있는 표면과 요철이 없는 표면에 대한 실험을 동시에 할 수 있도록 하였다. Fig. 4는 $7\mu\text{m}$ 폭의 단일 요철의 표면과 $5\mu\text{m}$ 폭의 주기적 요철 표면을 AFM으로 측정한 모습이다.

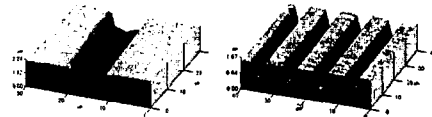


Fig. 4 Single and multiple undulations

실험은 10^{-5} torr의 진공 상태에서 이루어지며 볼에 가해지는 하중은 dead weight 방식에 의해 가해진다. 속도는 $5\sim 6\mu\text{m/s}$ 를 유지하여서 표면의 기하학적인 형상을 반영하도록 하였다. 단일 요철과 주기적 요철에 대한 실험에서는 하중과 속도를 일정하게 유지하였다.

3 결과 및 고찰

3.1 단일 요철에서의 마찰 계수 변화

요철의 표면 형상에 따른 마찰 계수의 변화를 관찰하고자 일정한 하중(2.2gf)과 일정한 속도($5\sim 6\mu\text{m/s}$)에서 SiO_2 위의 골의 너비만을 변화 시키면서 마찰 계수의 변화를 측정 하였다. Fig. 5는 골의 너비가 $3\mu\text{m}$ 와 $5\mu\text{m}$ 일때의 마찰 계수의 변화 그래프이다.

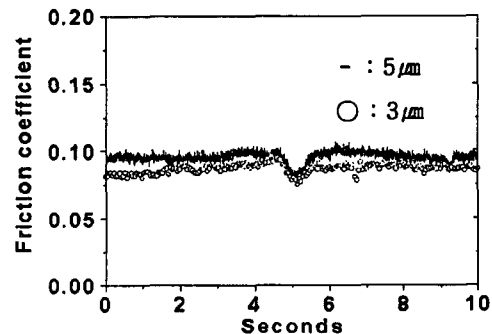


Fig. 5 Friction coefficient for $3\mu\text{m}$ and $5\mu\text{m}$ undulation

두 경우 모두 골 부분을 지나갈 때의 마찰 계수가 감소하는 경향을 나타냈으나 $3\mu\text{m}$ 의 폭에서는 마찰 계수의 변화가 거의 없는데 반해 $5\mu\text{m}$ 폭의 골을 지날 때에는 마찰 계수가 약 0.02정도 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 골의 너비를 넓게 제작하였을 때의 마찰 계수의 변화 그래프이다.

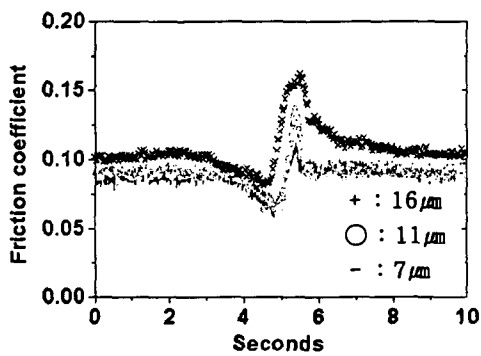


Fig. 6 Friction coefficient for $7\mu\text{m}$, $11\mu\text{m}$, and $16\mu\text{m}$ undulation

Fig. 5에서 나타난 마찰 계수의 변화와는 달리 골 부분을 지나가면서 마찰 계수의 변화가 골이 없는 부분에서의 값과 비교하여 높아지는 부분이 생기는 것을 알 수 있으며 폭의 너비가 커짐에 따라서 마찰 계수의 변화의 폭도 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 볼과 표면의 형상에 기인한 것으로 골의 너비와 볼의 형상의 기하학적인 비율이 어느 정도 이상이 되면 마찰 계수의 변화는 다른 양상을 보인다는 것을 알 수 있다. 본 실험 결과 2.2gf 와 $6\mu\text{m/s}$ 의 일정한 하중과 속도에서 볼의 지름과 폭의 너비의 비가 약 100 : 1이상이 되면서 마찰 계수의 변화가 다른 양상을 보인다는 것을 알 수 있다.

3.2 주기적 요철에서의 마찰 계수 변화

주기적인 요철 표면에서의 실험은 단일 요철의 주기적인 배열이 있는 표면과 요철 표면이 없는 표면간의 마찰 계수의 차이를 관찰하고 실제 앞서 예측한 기하학적인 형상비가 재질이 달라진 경우에도 적용 가능한 것인지 알아보기 위한 것이다. Fig. 7은 P-type의 Si 표면의 일부분에 $5\mu\text{m}$ 너비의 골을 가진 표면에 대한 실험 결과로 골이 없는 부분의 마찰 계수의 값과 비교한 그래프이다.

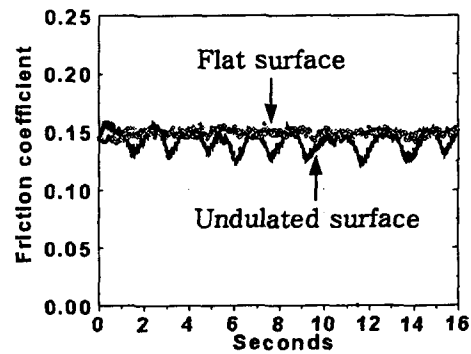


Fig. 7 Comparison of friction coefficient for surface with $5\mu\text{m}$ and without undulation

단일 요철에 대한 실험 결과에서 예상한 바와 같이 주기적인 요철의 배열이 있는 표면의 경우 요철이 없는 표면의 마찰 계수와 비교하여 약 0.02~0.03의 마찰 계수의 차이를 보이면서 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있으며 요철이 없는 부분의 마찰 계수의 값 보다 상대적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 8은 P-type의 Si 표면의 일부분에 $10\mu\text{m}$ 너비의 골을 가진 표면에 대한 실험 결과로서 골이 없는 부분의 마찰 계수의 값과 비교한 그래프이다.

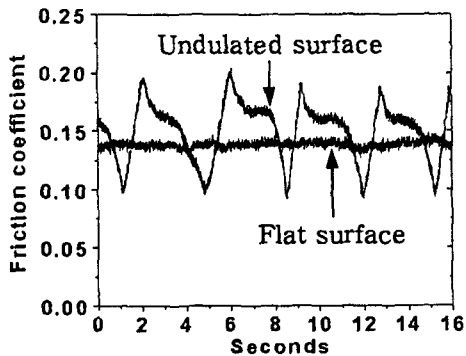


Fig. 8 Comparison of friction coefficient for surface with $10\mu\text{m}$ and without undulation

Fig. 7에서의 마찰 계수의 변화와는 달리 요철의 골 부분을 지나면서 마찰 계수의 값이 감소하는 구간 뿐 아니라 증가하는 구간이 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 $7\mu\text{m}$ 이상의 단일 요철을 지날 경우에 대한 마찰 계수의 변화 양상과 동일한 것이다. 이는 기하학적 형상에 의한 마찰 계수의 변화로서 마찰 메커니즘이 변화하여 마찰력이 커지는 구간을 기하학적 형상에 따른 접촉 각도로서 예상할 수 있다는 근거라 할 수 있겠다. 주기적 요철에서의 마찰 계수의 변화는 단일 요철의 마찰 계수의 변화의 연속으로 해석가능하며 주기성은 크게 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 $10\mu\text{m}$ 폭의 undulated surface와 볼이 접촉하고 있는 모습으로 기하학적 형상의 비가 매우 큰 것을 알 수 있다.

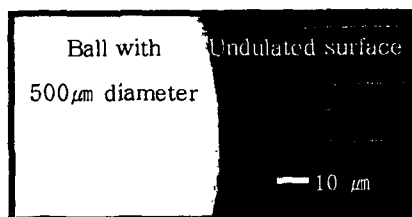


Fig. 9 SEM image of contact between ball and undulated surface

3.3 접촉 상대 변화에 따른 Modeling

볼이 골 부분을 지나가면서 상하의 미세한 움직임이 생기게 되고 이로 인해 야기되는 접촉 각도의 변화가 생기게 되는데 골의 너비에 따라 볼의 수직 방향 움직임과 각도의 변화가 달라진다. Fig. 10는 볼이 골 부분을 지나가면서 순간적으로 볼이 하강함에 따른 접촉 각도의 변화를 도식화한 것이다.

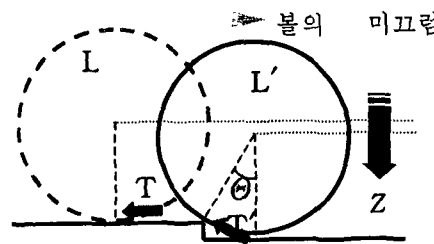


Fig. 10 Geometric relationship between ball and undulation

Fig. 10에서와 같이 골 부분을 내려가면서 마찰력 T는 그 일부분이 수직 하중의 배분력에 의해 감소되어 T'가 되며 동시에 수직하중 L이 미소하게 변화하여 L'가 된다. 이 때, 수직하중의 변화 L'는 접촉각의 변화가 작기 때문에 L과 같다.

Fig. 11은 본 실험에서 사용된 $5\mu\text{m}$ 와 $10\mu\text{m}$ 너비의 골 부분에서의 접촉각의 변화에 따른 볼의 수직 방향의 움직임과 접촉 각도를 시뮬레이션 한 것이다.

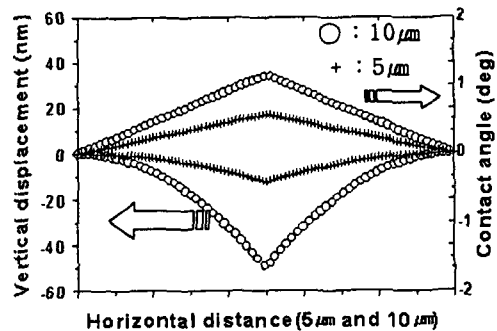


Fig. 11 Contact angle and vertical displacement of ball

각 시편의 경우 볼의 Z 방향의 최대 움직임은 각각 13nm, 50nm이며 접촉각도 변화 θ 의 최대값은 각각 0.57° , 1.15° 로 아주 미세한 움직임이라 할 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11에서의 접촉각도의 변화를 토대로 이론적인 마찰 계수식은 아래의 식(1)과 같이 표현되는데 이 때에 접선 방향의 힘 T' 는 볼이 하강할 경우에는 식(2)와 같이 표현되며 볼이 상승할 경우에는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\text{마찰 계수} = \frac{T'}{L'} \quad \Delta \quad \text{식(1)}$$

$$L' = L \cos \theta = L$$

$$T' = \mu L' - L \sin \theta = \mu L \cos \theta - L \sin \theta \quad \Delta \quad \text{식(2)}$$

$$T' = \mu L' + L \sin \theta = \mu L \cos \theta + L \sin \theta \quad \Delta \quad \text{식(3)}$$

Fig. 12는 유도된 마찰 계수식을 적용하여 $5\mu\text{m}$ 폭의 골을 지나갈 경우, 예상되는 마찰 계수와 실제 마찰 계수간의 차이를 보여주는 그래프이다.

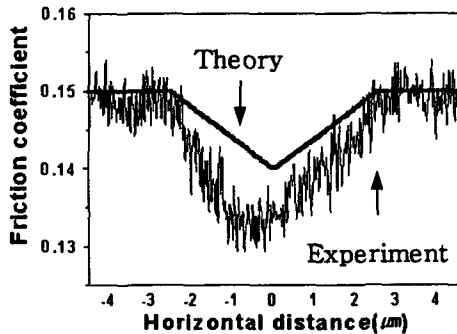


Fig. 12 Theoretical and experimental friction coefficient

마찰 계수 변화는 실제의 데이터와 큰 차이를 보이지 않았으며 마찰 계수의 변화가 Fig. 11에서의 볼의 미소한 움직임과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이론적인 값은 골 부분을 지나가면서 약 0.01정도의 마찰 계수 차이를 보이는데 반해 실험 데이터의

경우 약 0.02정도의 차이를 보임을 알 수 있다. 약간의 편차가 생기는 것은 이론적 해석이 기하학적인 형상에 의한 접촉 각도 변화만을 해석한 것으로 실제로 발생하는 접촉점에서의 접촉 면적의 변화와 접촉 상태를 고려하지 않았기 때문으로 판단되며 실험에 의한 오차에 기인하는 것으로 판단된다. $10\mu\text{m}$ 너비의 경우는 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 이론적 마찰 계수의 변화 추이와는 완전히 다른 변화 양상을 보이는 것으로 보아 기하학적 형상비가 어느 정도 이상이 되면 마찰 메커니즘의 변화가 생기게 된다는 것을 알 수 있다.

3.4 하중 변화에 따른 마찰 특성.

위의 Fig. 10을 통해 유도된 식(1)과 식(2)는 기하학적 변수만을 고려한 해석으로 하중과 속도와는 독립적으로 마찰 계수가 변화한다. 표 1은 $5\mu\text{m}$ 의 주기적 요철 위에서 하중에 따른 마찰 계수의 변화를 나타낸 것이며 각각 4번의 반복 실험을 통해 평균을 구한 값이다. 평균 마찰 계수는 요철이 없는 표면에서의 마찰 계수의 값을 나타내며 마찰 계수 차이는 평균 마찰 계수와 골 부분을 지날 때의 최저 마찰 계수와의 차이를 나타낸다.

하중(gf)	평균 마찰 계수	마찰 계수 차이
1.6	0.15	0.03
2.2	0.14	0.03
2.6	0.15	0.03
3.2	0.15	0.02
4.5	0.14	0.02

표 1. Friction coefficient and deviation value with respect to load

하중에 따른 마찰 계수의 차이가 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 보아 Fig. 12에 나타난 마찰 계수의 변화 원인은 기하학적 형상에 의한 것임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구의 실험 결과 기하학적인 형상으로 인해 생기는 접촉 상태의 변화에 따라 마찰 계수가 변화하게 되며 이 때의 마찰 계수의 변화는 형상을 반영한다. 또한 두 상대재간의 기하학 형상의 비에 따라 마찰 메커니즘이 변하게 되는데 본 실험 결과로부터 접촉각도가 약 1° 이하인 구간에서는 기하학적 형상에 의한 마찰 계수의 변화가 지배적인 것으로 판단된다. 접촉 상태에 따른 마찰 계수의 분석을 통해 미소한 표면의 형상 변화에 따른 마찰력을 예측할 수 있으며 이는 마찰력을 저감 시키는 표면을 설계하거나 마찰력을 제어하는데 응용 가능하다.

후기

본 연구의 결과물은 "과학 기술부 21세기 프론티어 연구 개발사업 중 지능형 마이크로 시스템 개발 사업(과제번호: 3-3-12)"의 연구지원과 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(과제번호: 2000-G-0201)의 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] R. C. Coy, "Practical applications of lubrication models in engines", *Tribology International*, Vol. 31, No. 10, pp. 563-571, 1998.

[2] D. neerinck, P. Persoone, M. Sercu, A. Goel, C. Venkatraman, D. Kester, C. Halter, P. Swab, D. Bray, "Diamond-like nanocomposite coatings for low-wear and low-friction applications in humid environments", *Thin Solid Films*, Vol. 317, pp. 402-404, 1998.

[3] 차금환, 김대은, "코팅된 실리콘 웨이퍼의 미소 마찰마멸특성에 관한 연구", *윤활학회지*, Vol. 15, No. 1, pp. 29-38, 1999.

[4] E. Dayss, G. Leps, J. Meinhardt, "Surface modification for improved adhesion of a polymer-metal compound", *Surface and Coating Technology*, Vol. 116-119, pp. 986-990, 1999.

[5] Y. Ando, J. Ino, "Friction and pull-off forces on submicron-size asperities", *Wear*, Vol. 216, pp. 115-122, 1998.

[6] Y. Matsumoto, T. Shimada, M. Ishida, "Novel prevention method of stiction using silicon anodization for SOI structure", *Sensor and Actuators A*, Vol. 72, pp. 153-159, 1999.

[7] R. Maboudian, R. T. Howe, "Critical Review : Adhesion in surface micro mechanical structure", *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 15, pp. 1-20, 1997.

[8] B. Bhushan, *Handbook of Micro/Nano Tribology*, CRC press, pp. 706-713, 1999.

[9] E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, John Wiley and Sons, 1995.

[10] J. M. Lee, W. H. Jin, D. E. Kim, "Selective removal of resist on silicon by scribing for micro-fabrication", *Synopses of ITC 2000*, pp. 450, 2000.