

마이크로 디바이스용 표면 개질 기술

나종주, 이구현, 남기석 | 한국기계연구원

1. 서론

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)와 같이 전기적 신호나 광학적 특성과 더불어 기계적 운동이 포함되는 micro device의 세계가 점차 확대되어 가고 있다. 여기에서는 표면 분율이 높아지게 되어 bulk재료를 사용할 때에는 고려치 않아도 되었던 중요한 인자가 표면 현상이다. 이 중에서 마찰력은 대표적인 경우이다. 마찰력이 크면 device가 동작을 할 수 없거나 효율이 떨어지게 된다. gyroscope, micro-turbine engine과 micro motor의 rotor, 고밀도 hard disk 등은 마찰력과 마모의 저감이 필수적인 장치들의 대표적인 사례들이다.

여기에서 마찰이란 상대운동을 하는 두 물체가 서로 접촉한 상태에서 수직 하중을 받을 때 상대운동을 하는 반대 방향으로 억제하려는 힘이 발생하는 현상이다. 이때 연속적인 상대운동에 따라 물질의 표면이 닿는 현상을 마모라고 한다. 그리고 마찰력을 줄이기 위하여 접촉하는 면이 용이하게 움직일 수 있도록 마찰력을 낮추어 주는 것이 윤활이다. 윤활은 전통적으로 액체 윤활이 가장 널리 사용되어 왔으나 마이크로 디바이스와 같이 최근의 응용 분야에서는 액체 윤활을 할 수 없는 dry 상태가 요구되는 응용이나 진공에서의 응용에 고체 윤활제 및 air bearing을 사용하고 있다. 그러나 점점 장치의 크기가 작아지고 고효율을 얻기 위하여 회전하는 rotor와 stator 및 상대 운동하는 두 물질의 간격이 좁아지게 되면 air bearing의 마찰력이 급속히 증가하게 되고 직접 접촉이 이루어지게 된다. 직접 접촉이 될 경우에는 고체 윤활제의 사용이 불가피하게 되어 고체 윤활제의 사용 범위가 넓어지고 있으며 그 마찰계수의 저감이 당면한 과제이다.

상대운동을 하는 두 물체가 접촉을 하게 되면 접촉에 미치는 인자는 두 물체의 형상, 탄성계수, Poisson's ratio, 경도, 인가하중, 사용하는 분위기 및 온도, 표면거칠기와 표면의 waveness 등이다. 이러한 인자들은 디바이스의 다른 여러 가지 특성을 만족시키기 위하여 재료가 결정되면 거기에 따라 결정되는 경우가 많다. 따라서 표면의 특성만을 변화시키거나 매우 얇은 박막을 코팅하여 마찰을 낮출 수 있는 방향이 가장 바람직하다.

마찰을 낮추는 문제와 더불어 마모의 억제가 동시에 요구된다. 특히, 하중은 적지만 고속으로 회전하는 마이크로 엔진이나 모터 및 hard disk의 보호막은 수 nm의 두께를 가지므로 이들의 마모는 극히 억제되어야 한다. 마모를 억제하기 위하여 경질 박막이 요구되고 있으며 이는 인가하중에 따라 경도와 두

게 등이 제어되어야 한다.

따라서 극저마모, 극저마찰 특성을 부여하기 위하여 응용분야에 따른 박막의 설계가 이루어져야 하며 다층박막의 활용이 필수적이다.

더불어 MEMS 제조시 패터닝을 위한 에칭 공정이나 세척 공정 등의 wet processing이 수반되는데 이 때, 기관으로부터 떨어져 있어야 하는 cantilever나 구조물들의 sticking을 방지할 필요가 있다. 이러한 응착 문제는 표면의 물에 대한 접촉각이 90°이하일 때 심각하게 발생하며 이는 모세관 현상으로 알려져 있다. 물의 모세관 현상에 의한 응착을 방지하기 위하여 초임계 CO₂ 건조 공정이 사용되고 있지만 이는 디바이스의 사용 중에 외부 충격이나 흔들림 등으로 야기되는 응착의 문제는 해결할 수 없다. 이는 디바이스의 표면에너지가 커서 구조물이 닿게 되면 표면에너지를 낮추기 위한 응착이 발생하게 되는 것이다. 따라서 이러한 문제들을 근본적으로 해결하기 위해서는 표면에너지 자체를 낮추는 방법이 요구된다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 일찍부터 SAM(Self Assembled Monolayers) 코팅을 통한 표면개질 연구가 수행되어 왔다.

마찰을 낮춤으로써 구동력과 에너지의 소모, 진동 및 마찰열 감소를 구현할 수 있으며 고체 윤활박막을 사용하게 되면 device의 설계가 간편해지고 최적화가 용이하다. 특히, 진공 중에서도 MEMS generator, MEMS gear, near contact hard disk 등은 마찰계수가 낮아지지 않으면 동작할 수 없기 때문에 이들의 산업화는 직접 contact 부위에서의 마찰계수 저감기술이 선결되어야 가능하다. 특히, 이들 마이크로 디바이스에 적용하기 위한 tribological 조건은 마찰계수 0.05이하, 마모계수 10⁸(SAM의 경우 10⁹ revolutions의 수명), 접촉각 90°이상이 요구되고 있다. 하지만 현재까지 개발된 기술은 이들 요구조건을 동시에 만족시키지 못하고 있다. 마찰계수를 낮출 때 접촉각은 요구조건에 부합시킬 수 있으나 마모계수는 100배이상 크게 나타나고 있으며 마모계수를 낮출 경우에는 마찰계수가 0.1이상으로 증가하고 있다. 따라서 이들 모두를 동시에 만족시킬 수 있는 박막의 개발이 요구되고 있다.

2. 이론적 배경

2.1 마찰 이론

마찰이란 접촉해 있는 두 물체의 미끄럼(sliding)이나 구름(rolling)에서 움직임에 저항하는 것이다. 일반적으로 마찰력은 그림 1과 같이 접촉해 있는 두 물체 중 하나가 접선 방향으로 움직이려 할 때 정지해 있는 판의 기울기를 증가시키면 따라 움직이기 시작하는 기울기를 이용하여 식 (1)과 같이 표현한다.

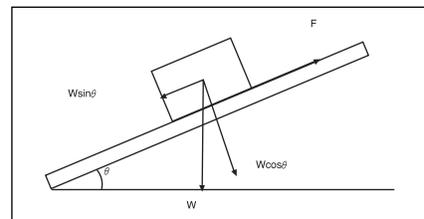


그림 1. 경사면 위에 놓여진 물체에 대한 힘의 균형 모식도

$$F = W \sin \theta \quad (1)$$

이때 마찰계수는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\mu = F/W \cos \theta = W \sin \theta / W \cos \theta = \tan \theta \quad (2)$$

무윤활 sliding에서 발생하는 마찰을 기술하는 세 가지 경험적인 법칙이 있다. 첫째와 둘째는 1699년에 Amontons^[1]에 의해 제안된 것으로 '마찰계수는 인가하중에 무관하다'와 '마찰계수는 걸보기 접촉면적에 무관하다'이다. 따라서 마찰력은 일반적으로 식 (3)으로 표현한다.

$$F = \mu W \quad (3)$$

마찰계수 μ 를 얻기 위하여 인가한 하중을 알고 있는 상태에서 마찰력을 측정해야 한다. 모든 tribometer는 이러한 원리에 입각하여 마찰력을 측정할 수 있도록 고안되어 있다. 그리고 1785년에 Coulomb^[2]에 의해 제안된 것으로 '마찰계수는 sliding 속도에 무관하다'이다. 여기에 현대적인 관점인 '마찰계수는 표면거칠기에 무관하다'라는 것을 네 번째 법칙으로 삼기도 한다. 하지만 이들 법칙은 접촉면에 있는 재료와 표면 오염도에 따른 마찰계수의 의존성을 전혀 설명하지 못하고 있다. 따라서 마찰 기구에 대한 재료적인 관점에서의 연구가 필요하다.

트라이볼로지는 기원전 1880년경에 그려진 이집트 피라미드 안의 벽화에 거대한 석상을 옮기기 위하여 석상을 여러 개의 둥근 나무로 받치고 그 나무와 석상 사이에 기름칠을 하여 석상을 당길 때 석상을 받치고 있는 둥근 나무가 잘 굴러갈 수 있도록 하는 모습을 새겨 놓은 것을 통해서도 알 수 있듯이 인류역사와 더불어 오랫동안 인간 생활에 밀접한 관계를 맺어 왔으며 적용 분야의 범위가 매일의 일상생활에서부터 최첨단 과학기술이 적용되는 분야까지 그 역사만큼이나 넓고 광범위하다. 즉, 우리가 물건을 잡고, 걷고 하는 것도 마찰이 있기 때문에 가능한 것이고 목욕을 하여 깨끗하게 하는 것도 마모 현상으로 볼 수 있다. 때로는 마찰이나 마모가 적어야 할 때가 있고 경우에 따라서는 그 반대가 요구되기도 한다. 예를 들어 자동차 브레이크는 마찰력이 높아야 제동거리를 줄일 수 있으나 베어링은 마찰이 작을수록 뛰어난 성능을 발휘하게 된다. 현대적 의미로서의 tribology 개념은 1966에 영국 교육과학부에 보고된 Jost report에서 볼 수 있다. "The Science and Technology of Interacting Surfaces in Relative Motion and Partices Related Thereto", 즉, 트라이볼로지란 상대운동을 하는 표면 및 거기에 관련된 입자에 작용하는 과학과 기술로 정의하고 있다. 이 트라이볼로지 분야를 크게 세가지로 분류한다면 마찰, 마모, 윤활로 나눌 수 있으나 이 세 현상은 항상 함께 동시에 발생한다. 다만, 어떤 현상에 좀 더 초점을 맞추느냐에 따라 구분을 하게 되는 것이다.

표 1은 윤활 상태에 따른 마찰계수의 범위를 보여준다. 보통 금속과 금속이 윤활유 없이 서로 상대운동을 할 때 0.2~1.0 범위의 마찰계수를 나타내고 윤활유를 주입하였을 때 0.01~0.1의 범위를 나타내게 된다. 고체 윤활을 통해 얻을 수 있는 마찰계수의 최저값은 0.02에 해당하고 있으며, 이는 윤활유를 주입하였을 경우에 해당한다. 윤활유를 주입하였을 경우 상대운동하는 재료가 윤활유에 의해 완전히 분리되지 못하고 직접 닿는 부분이 생기게 되는데 이러한 경우를 'boundary lubrication'이라고 한다. 반면에 액

체 윤활유에 의해 상대운동하는 두 재료가 완전히 분리되는 경우에 얻을 수 있는 마찰계수의 범위는 hydrodynamic lubrication의 경우 0.001, hydrostatic lubrication의 경우 0.0001에 해당한다.

표 1. 윤활 상태에 따른 마찰계수의 범위

| 윤활 상태 | 마찰계수 |
|---|----------------|
| Dry | 1 |
| Boundary Lubrication or Solid lubrication | 0.1 |
| Mixed Lubrication | 0.01 |
| Hydrodynamic Lubrication | 0.001 |
| Hydrostatic Lubrication | 0.0001 or less |

한편, 마찰계수가 낮아지게 되면 마모도 줄어들게 된다. 이는 마찰계수를 낮추려고 하는 이유 중에서 매우 중요한 것이다. 마모에 대해서 일반적으로 알려져 있는 경험적인 사실은 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 마모량은 인가하중에 직접적으로 비례한다. 둘째, 마모량은 sliding 거리에 직접적으로 비례한다. 셋째, 마모량이 경도에 반비례한다. 이들을 종합하여 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V = kWS/H \tag{4}$$

여기에서 $V = \text{wear volume [m}^3\text{]}$

$W = \text{applied load [N]}$

$S = \text{sliding distance [m]}$

$H = \text{hardness [N/m}^2\text{]}$

$k = \text{constant (wear coefficient)}$

표 2는 여러 범위의 마찰계수에 해당하는 마모계수(wear coefficient)를 나타낸 것이다. 대략적으로 마모계수는 마찰계수와 다음과 같은 관계를 만족시킨다.

$$K \sim \mu^{-2.4} \tag{5}$$

표 2. 마찰계수에 따른 마모계수의 크기

| 윤활 상태 | 마찰 계수 | 마모 계수 |
|---|----------------|------------|
| Dry | 1 | 10^{-2} |
| Boundary Lubrication or Solid lubrication | 0.1 | 10^{-4} |
| Mixed Lubrication | 0.01 | 10^{-6} |
| Hydrodynamic Lubrication | 0.001 | 10^{-8} |
| Hydrostatic Lubrication | 0.0001 or less | 10^{-10} |

표 2에 인용된 관계는 희생박막을 사용하여 마찰계수를 줄이려는 방법에서 발생하는 마찰계수와 마모계수의 관계와는 구별되어야 한다. 고체 윤활제의 경우 대부분 이같은 희생박막을 사용하게 되는데, 매우 낮은 전단 강도를 가지는 재료를 상대운동하는 두 표면 사이에 코팅하거나 분말 형태로 도포함으로써

써 이들 재료의 전단에 의해 마찰을 낮추게 된다. 이 경우 고체 윤활제는 쉽게 마모되어 표 2에 인용된 마모계수 값보다 훨씬 높은 값을 보이게 된다. 따라서 고체 윤활제로서의 수명은 윤활박막의 마모계수에 의해 결정된다. 또한 이같이 낮은 전단강도를 가지는 재료를 이용한 윤활은 마찰계수가 0.02를 나타내는 것이 도달할 수 있는 최소값으로 보여진다.

2.2 접촉기구 (Contact Mechanism)

2.2.1 Hertzian contact

상대운동하는 두 재료의 표면이 매우 smooth하여 서로 접촉할 때 돌기의 영향이 없다면 Hertzian contact을 가정할 수 있다. 그림 2는 이러한 Hertzian contact을 매우 얇은 박막이 코팅되었을 경우에 적용한 모식도를 보이고 있다. 편평한 기관위에 박막을 코팅한 다음 slider로 반경 R인 볼을 사용하였다. 인가한 하중을 W라고 하면 접촉면의 면적과 기관 내부에 작용하는 최대응력을 해석적으로 구하면 다음 식들과 같다.^[3]

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \tag{6}$$

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \tag{7}$$

$$a = \left(\frac{3WR}{4E^*} \right)^{1/3} \tag{8}$$

: 접촉면 반경

$$P_o = \left(\frac{3W}{2\pi a^2} \right) = \left(\frac{6WE^*}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \tag{9}$$

: 접촉면에 인가되는 최대 압축 응력

$$\tau_1 P_o = 0.31 P_o \tag{10}$$

: $r = 0, z = 0.48a$ 의 위치에 인가되는 최대 전단 응력

$$\sigma_r = \frac{(1-2\nu)}{3} P_o \tag{11}$$

: $r = a, z = 0$ 에 인가되는 최대 인장 응력

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9}{16} \frac{W^2}{RE^*} \right) \tag{12}$$

: 탄성접촉에 의한 두 지점의 접근 거리

$$\frac{\delta_r}{P_o} \sim \sim \frac{\delta\theta}{P_o} \sim \sim - (1+\nu)(1-z/a) \tan^{-1}(a/z) + \frac{1}{2}(1+z^2/a^2)^{-1} \tag{13}$$

$$\frac{\delta a}{P_0} \sim \sim - (1+z^2/a^2)^{-1} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} T_i \sim & \sim \frac{1}{2} | \delta_z - \delta_r | \\ & = \sim \frac{P_0}{2} | \frac{3}{2} + z^2/a^2 |^{-1} (1+\nu)(1-(z/a)\tan^{-1}(a/z)) | \end{aligned} \quad (15)$$

: 접촉면 아래에 작용하는 전단응력 분포

여기에서 아래첨자는 상대운동을 하는 두 물체를 나타낸다. 그림 2에서 보는 바와 같이 접촉면에 인가되는 압축응력은 둘레를 따라서는 0이지만 중심에서는 P_0 에 이르는 분포를 가지고 있다. 반면에 기관에 작용하는 최대 전단 응력은 표면에 있지 않고 접촉반경의 절반에 해당하는 깊이만큼 아래쪽에 작용한다. 이 최대 전단 응력이 재료의 전단강도를 능가하게 되면 재료의 내부에서 소성변형이 일어나게 되고 균열이 발생하게 된다. 그리고 접촉면의 둘레를 따라서는 최대인장응력이 작용하게 된다.

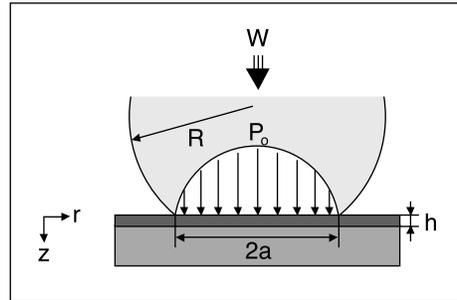


그림 2. 탄성접촉의 모식도

2.2.2 Plastic contact

재료의 표면은 전술한 바와 같이 이상적으로 smooth하지 않고 표면이 거칠기 때문에 두 물체가 접촉을 하게 되면 그림 3과 같이 돌기들의 접촉이 일어나게 된다. 표면에 돌기가 있을 경우 두 물체를 천천히 접촉시킨다고 가정해 보자. 가장 뾰족한 돌기가 먼저 닿게 될 것이다. 돌기는 처음에 Hertzian contact(Elastic contact)을 할 것이다. 그러나 인가하중이 낮을 지라도 돌기는 매우 뾰족하기 때문에 그 끝에 걸리는 응력은 매우 높게 되어 경도치에 이를 수 있다. 따라서 돌기 끝은 소성변형을 시작하게 된다. 더욱 두 물체를 가까이 하게 되면 다음 높이의 돌기가 닿게 되고 이 돌기도 탄성변형 후 소성변형을 하게 되는 과정을 겪게 된다. 결국 돌기들의 소성변형으로 인하여 형성된 접촉 면적이 인가한 하중을 지지할 수 있을 때까지 이러한 과정이 반복된다. 따라서 이 경우 형성되는 접촉면적은 소성변형에 입각하여 다음 식(16)으로 나타낼 수 있다.

$$A_p = W/H \quad (16)$$

그림 3에 이같이 돌기들의 소성변형에 의해 형성된 접촉을 도식도로 나타내었다. 이 경우 실제 접촉 면적 A_r 은 소성변형에 의한 접촉면적 A_p 와 같게 된다. 이 경우 실제 접촉 면적은 겉보기 접촉면적에 비해 매우 낮은 값을 가진다^[4]. 대개 겉보기 면적은 Hertzian contact에 의한 접촉면적으로 가정할 수 있다.

재료의 표면 거칠기가 R_q (root mean square)값으로 수십 nm이하로 smooth할 경우 돌기들만의 소성변형에 의해 인가하중을 지지하기 어렵게 된다. 몇몇 돌기 들이 소성변형을 일으키지만 워낙 돌기의 높이

가 낮아서 결국은 전체 볼이 닿게 되어 볼의 탄성변형에 의해 상당부분 하중을 지지하게 된다. 이 경우에 실제 접촉 면적은 소성에 의한 접촉면적보다 크게 되지만 탄성에 의한 접촉면적보다는 작게 된다. 따라서 실제 접촉 면적은 항상 소성에 의한 접촉 면적보다는 같거나 커야 한다. 반면에 실제 접촉 면적의 최대값은 Hertzian 접촉면적이 되지는 않는다. 이는 두 물체가 서로 닿게 되면 형성되는 adhesion force가 있기 때문이다.

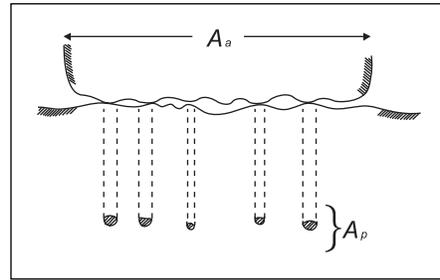


그림 3. 소성접촉에 의한 접촉면과 겹보기 접촉면의 모식도

2.2.3 응착에 의한 접촉

고체나 액체의 표면은 에너지를 가지고 있다. 두 물질의 표면이 가지는 표면 에너지를 각각 γ_1 , γ_2 라고 하자. 이때 두 물질을 접촉시키게 되면 접촉면의 에너지는 변하게 되고 이를 γ_{12} 라고 하자. 이때 work of adhesion은 식 (17)과 같이 정의된다.

$$W_{ad} = \Delta \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (17)$$

이때 접촉면의 에너지에 변화가 없으면 완전히 incompatible 하다고 하며 γ_{12} 는 γ_1 과 γ_2 의 합과 같아서 W_{ad} 는 0이 된다. 반면에 접촉면이 완전히 compatible 하면 계면이 사라지게 되고 γ_{12} 의 값이 0이되어 W_{ad} 는 최대값인 γ_1 과 γ_2 의 합으로 나타난다. 즉, 두 재료가 서로 compatible하면 work of adhesion이 크게 되어 접촉면은 마치 용접을 한 것처럼 강한 결합을 하게 되어 마찰력이 커진다. 반면에 완전히 incompatible하면 계면에서 서로 약한 결합을 하게 되어 마찰력이 낮아진다. 이를 통하여 재료의 표면이 깨끗할 경우 마찰력이 높아지는 반면에 표면이 오염되어 있으면 마찰력이 낮아지는 현상을 설명할 수 있게 된다. 이러한 사실을 통하여 저마찰 재료를 개발하기 위해서는 접촉하는 두 재료가 서로 접촉면에서 약한 결합을 할 수 있도록 설계되어야 하며 boundary lubrication이나 SAM 등이 이런 원리를 이용한 것으로 볼 수 있다. 나아가 HCP 구조를 가지는 재료가 낮은 마찰계수를 보이는 것도 기저면에 있는 원자들 사이에는 강한 결합을 하지만 면간 결합은 비교적 약한 결합을 하기 때문으로 해석할 수도 있다.

한편, adhesion force와 tip의 반경 및 work of adhesion 사이에는 식 (18)과 (19)로 표현되는 관계식이 있다.

$$F_s \sim \sim \frac{3}{2} \pi R \Delta \gamma \quad (18)$$

$$F_s \sim \sim 2 \pi R \Delta \gamma \quad (19)$$

식 (18)은 JKR모델로 알려진 식이며, 탄성계수가 낮은 경우에 적용되고 있다. 반면에 식 (19)는 DMT 모델로 알려져 있으며, 경도와 탄성계수가 높은 재료에 적용된다. Adhesion force는 접촉한 두 물체를 분

리하는데 필요한 힘이며, 인가하중에 무관한 것으로 알려져 있다. 이 식이 의미하는 바는 인가하중이 없을 경우에도 접촉시 일정한 접촉면적을 가지게 되며 friction force가 작용할 수 있음을 의미한다.

2.3 마찰력의 원인

2.3.1 돌기들의 변형에 의한 마찰력

앞 절에서 설명한 바와 같이 표면에 있는 돌기들은 초기 접촉시 소성변형을 하게 된다. 이같은 돌기들의 변형은 재료 표면이 원자적으로 smooth하지 않는 한 피할 수 없는 문제이다. 돌기들의 변형 자체가 마찰력에 크게 영향을 미치지 못하는 못하지만 금속의 경우, 노출된 표면은 오염되기 때문에 work of adhesion이 작지만 돌기들이 소성변형을 일으키게 되면 새로운 표면이나 계면이 형성되는데 이들은 깨끗한 표면이므로 work of adhesion이 커서 마찰력을 높이게 된다.

한편 Suh 등^[5]은 돌기의 변형에 의한 마찰력을 slip-line field를 사용하여 계산하였으며 그림 4에 모식도를 나타내었다.

마찰계수는 식 (18)로 주어진다.

$$\mu_d = \frac{1 + \pi/2 + 2\alpha - 2\theta - 2\theta'}{\sin + \cos(2\alpha - \theta)} \quad (20)$$

그림 5에 돌기의 기울기 α 에 따라 마찰계수를 도시하였다. 이 결과의 의미는 돌기의 기울기가 낮을수록 마찰계수가 낮아질 수 있음을 보여주고 있다.

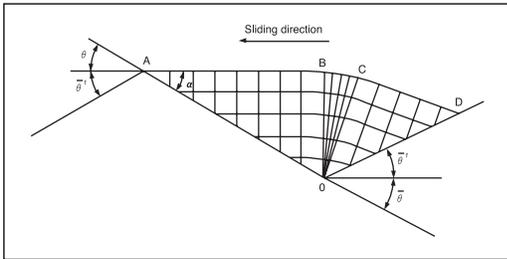


그림 4. 돌기들의 변형을 나타내기 위해 $\theta > \theta'$ and $\alpha = \alpha'$ 인 조건에서 도시된 기하학적인 slip-line field. ^[5, 6]

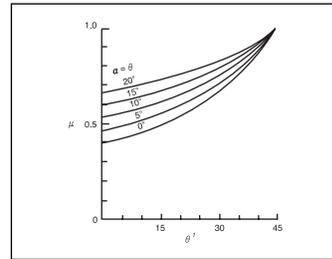


그림 5. 돌기들의 기울기 및 반각에 따라 slip-line field로 구한 마찰계수의 결과. ^[5, 6]

2.3.2 Adhesion에 의한 마찰력

인가 하중 W로 두 표면이 눌러진 상태에서 미끄럼 운동이 일어날 경우 마찰력이 F라고 하자. 이때, 마찰력 F는 식 (21)로 주어진다.

$$F = \tau_{av} A_r \quad (21)$$

여기에서 τ_{av} 는 접촉면에 작용하는 평균 전단 응력을, A_r 은 실제 접촉 면적을 나타낸다. 마찰계수의 정의에 의하여 마찰계수는 다음과 같다.

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{\tau_{av} A_r}{W} \tag{22}$$

이때 접촉이 소성변형만으로 이루어져 있다면 경도의 정의에 의하여 실제 접촉 면적을 식 (23)과 같이 놓을 수 있다.

$$A_r = \frac{W}{H} \tag{23}$$

따라서 마찰계수는,

$$\mu = \frac{\tau_{av}}{H} \tag{24}$$

이 된다. 한편, 미끄럼 운동이 일어날 때 두 재료 중 연한 재료를 통해서 소성변형이 진행된다면 τ_{av} 가 될 것이다. 여기에서 S는 연한 재료의 전단강도를 나타낸다. 이는 상대재가 무엇이든지 연한 재료가 정해지면 마찰계수는 식 (24)에 의해 결정된다는 것이다. 대략 금속의 전단강도는 경도의 1/6로 놓을 수 있기 때문에 대부분 금속의 마찰계수는 1/6 범위에 놓여 있어야 한다. 하지만 금속의 마찰계수는 0.1에서 1까지 다양한 값을 가지며 더욱이 상대재료에 따라 같은 금속의 마찰계수도 변하는 이유를 설명할 수 없다. 따라서 이러한 경우에는 연한 금속의 소성변형을 통해서 미끄럼 운동이 진행된다고 보기 어렵게 된다. 이렇게 되면 실제 접촉 면적을 알 수 없게 된다. 또한 τ_{av} 도 다른 방법으로 측정할 수 있는 방법이 없기 때문에 adhesion에 의한 마찰계수를 예측하는 것은 정성적일 수밖에 없게 된다.

2.3.3 Plowing에 의한 마찰력

Plowing이란 경한 물질이 연한 물질 표면을 긁는 현상을 말한다. 미끄럼 운동시 여러 가지 요인으로 plowing이 일어날 수 있다. 마찰력을 유발하는 요인 중에 가장 큰 영향을 미치는 것이 이 plowing 현상이다. 상대재료의 경도차가 클 경우에는 경한 재료의 표면 돌기가 연한 재료의 표면을 긁게 된다. 그림 6의 (b)와 유사하다. 하지만 같은 재료를 사용할 때에도 plowing이 일어나며 이때는 더 큰 마찰력을 보인다. 이는 그림 6의 (a)에 해당하는 것이다. 이에 대한 원인으로서는 마모입자가 형성되기 시작하면 이들은 쉽게 뭉칠 수 있게 되고 또한 심한 가공경화를 받아서 접촉면의 두 표면보다 경하게 되어 양쪽으로 침투하게 된다. 따라서 경도차가 많이 나서 한쪽으로만 penetration하는 경우보다 더 마찰력이 크게 나타난다. 또한 경도차가 많이 나는 재료일지라도 연한 재료의 마모입자가 뭉쳐지게 되면 이들은 경한 재료의 돌기들보다 훨씬 크기 때문에 이들 마모입자에 의한 plowing이 진행되게 된다.

Plowing에 의한 마찰계수는 다음 식과 같이 주어질 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_p &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{2r}{w} \right)^2 \left(\sin^{-1} \frac{w}{2r} - \frac{w}{2r} \left[1 - \left(\frac{w}{2r} \right)^2 \right]^{1/2} \right) \\ &= \frac{1}{3} \frac{\tau}{s} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{w}{2r} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \end{aligned}$$

τ =shear stress,

s=shear strength

이다.

이상의 세가지 마찰력의 원인에 대하여 함께 고찰하면 그림 7과 같은 Friction space를 작성할 수 있다. 이 space를 통하여 마찰계수를 낮추기 위한 방향을 설정할 수 있다. 표면은 smooth해야 하며 두 재료간의 adhesion force를 줄여야 하고 plowing을 억제해야 한다.

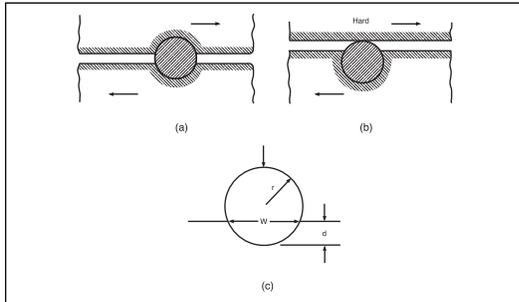


그림 6. 미끄럼 운동면에 게재된 마모입자에 의한 plowing 도식도 : (a) 두 표면이 같은 경도를 가진 경우; (b) 한 면이 다른 면에 비해 높은 경도를 가질 경우; (c) 마모입자의 침투에 따른 기하학적인 조건. [5, 6]

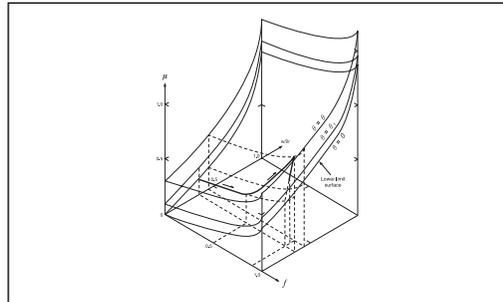


그림 7. 표면거칠기와 마모입자의 침투 깊이 및 응착이 마찰계수에 미치는 영향을 나타낸 friction ; $f = \tau_{av}/s$, 여기에서 τ_{av} 는 접촉면에서의 평균전단 응력이며 는 두 면 중 경도가 낮은 재료의 전단강도 ; θ 는 돌기들의 기울기; $w/2r$ 는 마모입자들의 반경에 대한 침투 깊이의 비를 나타낸다. [5, 6]

3. 고체 윤활박막의 개발 현황

고체 윤활제로는 연한(soft) 금속을 접촉하는 두 물체의 중간에 삽입함으로써 두 물체가 미끄럼 운동을 할 때 연한 금속에서 쉽게 전단이 일어날 수 있도록 하는 방법이다. 이에 대한 원리를 그림 8에 도시하였다. 두 물체가 접촉을 할 때 접촉면적은 두 물체의 표면 거칠기와 인가된 하중에 따라 탄성 변형(Elastic deformation) 또는 소성 변형(Plastic deformation)을 하게 되며, 각각의 경우에 따라 접촉 면적이 틀려지게 된다. 그리고 연한 금속을 두 물체 사이에 코팅을 하였으므로 두 물체가 미끄럼 운동을 할 때 이 연한 금속에서 먼저 전단이 일어나게 된다. 이때 전단 강도 s가 낮은 재료를 사용함으로써 마찰계수를 낮추려고 하는 것이다. 이같이 연한 금속에 속하는 예는 Ag, Au, Pb, In 등으로 코팅층의 두께를 조절함으로써 마찰계수를 0.1이하로 낮출 수 있다.

한편, 이들과 달리 그림 9에서 보이는 바와 같은 HCP(Hexagonal Close Packed)

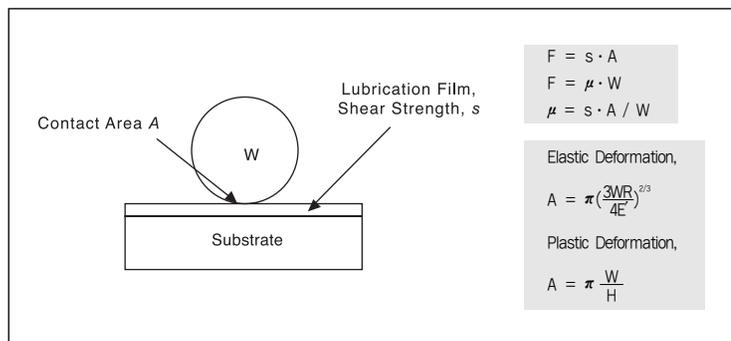


그림 8. 자기희생 박막을 통한 마찰계수 저감에 대한 모식도 및 관계식

구조를 가진 재료들도 기저면(Basal plane)을 따라 쉽게 전단이 일어나기 때문에 사용되고 있다. 이들의 예로는 흑연(Graphite), MoS₂, H₂BO₃ 등이 있다. 이들은 c축에 수직인 면이 slip plane이기 때문에 박막으로 사용할 경우 c축으로 우선 배향되도록 함으로써 마찰계수를 낮출 수 있다. 특히, 기저면에 있는 원자들 간에는 강한 결합을 하는 반면에 c축 방향으로의 기저면간에는 약한 결합을 할수록 저마찰 특성을 발휘한다. 흑연은 사용분위기에서 수분이 있을 때 마찰계수가 저하되지만 MoS₂의 경우에는 오히려 수분이 있을 때 마찰계수가 상승하게 되어 주로 진공에서 사용될 때 뛰어난 특성을 발휘한다. 이는 마찰이 일어날 때 주위의 분위기가 마찰 거동에 영향을 미칠 수 있음을 단적으로 보여주는 것이다. 한편, 이들을 통하여 얻을 수 있는 마찰계수는 0.05범위에 속한다.

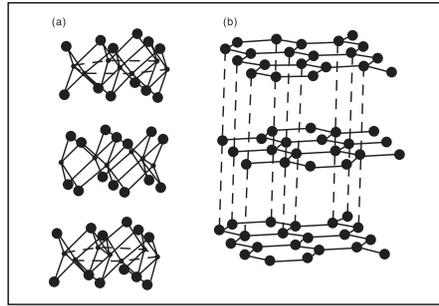


그림 9. 육방정계 구조를 가지는 고체 윤활 박막; (a) molybdenum disulfide; and (b) graphite

최근 들어서 MEMS에 적용하기 위해 boundary lubrication의 원리를 이용한 연구들이 진행되고 있다. Boundary lubrication은 William Hardy에 의해 처음으로 제안되었으며 윤활유의 bulk 특성에 의해 마찰력이 결정되기보다는 표면에 형성된 매우 얇은 윤활막에 의해 결정된다. 특히, 뛰어난 특성을 가지는 boundary additives는 긴 사슬의 분자 구조를 가지되 한쪽 끝은 극성을 가지지만 다른 쪽 끝은 극성을 나타내지 않도록 고안되어 있다. 이들의 예는 CH₃(CH₂)_nOH, CF₃(CF₂)_mCF₃, CF₃(CFCl-CF₂)_mCFCl-CF₃, CH₃(CH₂)_nCOOH 등이 있으며 이외에도 코팅 소재에 따라 functional group이 만들어지고 있다. 그림 10에서 이들 boundary additives가 금속 소재에 코팅된 분자들의 배열을 보여주고 있다. 극성을 가진 끝이 금속에 흡착되어 비교적 강한 결합을 하는 반면에 비극성인 다른 쪽은 마치 카펫에 용들이 솟아 있는 것 같은 배열을 보여주고 있다. 이들은 상대재료의 표면과 약한 결합을 하게 되어 마찰력을 낮추게 된다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 접촉하는 금속 재료의 표면에 돌기들이 있기 때문에 이들 돌기가 접하는 부분에는 이들 첨가제가 금속 표면을 덮고 있지 못하다.

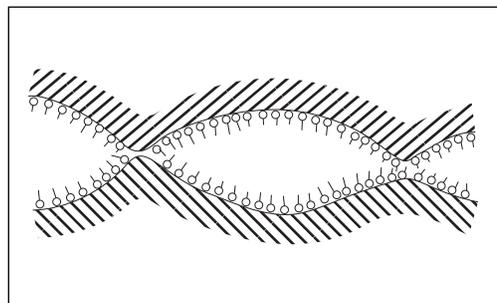


그림 10. 경계윤활(boundary lubrication) 상태에서 고체 표면에 흡착된 첨가제 분자들의 모식도

이들은 특성상 monolayer로 코팅이 되기 때문에 SAM(Self Assembled Mono-layer)라고도 불린다. 이들 SAM은 액체 윤활유와 같이 쓰일 때는 지속적인 효과를 나타낼 수 있지만 고체 윤활제로써 사용될 경우 쉽게 마모가 일어나기 때문에 적용분야가 매우 제한적이다. 하지만 최근 OTS(Octadecyltrichlorosilane, C₁₈H₃₇SiCl₃)계열 SAM을 MEMS 분야에 적용하여 adhesion force를 낮추었다는 보고가 있다.^[7]

또 다른 보고에 의하면 다이아몬드를 매우 smooth한 표면을 가지도록 제조하여 마찰계수를 측정하였을 경우 마찰계수가 0.04까지 낮아질 수 있음을 보고하였으며^[8], DLC(Diamond Like Carbon) 박막에 수소의 함량을 42 at%까지 증가시켰을 때 질소 분위기에서 마찰계수가 0.005까지 낮아질 수 있음을 보고하고 있다^[9-11]. 또 MoS₂박막을 sputtering 방법으로 증착하여 c축으로 우선배향한 시편을 초고진공(진공도

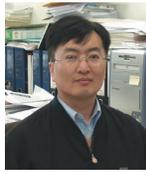
10^9 torr 이하)에서 측정할 경우 마찰계수가 0.007까지 낮아짐을 보고하고 있으나^[12] 아직 이들 그룹 외에 다른 그룹에서 재현하였다는 보고는 없는 상황이다.

4. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 마이크로 디바이스에서 신뢰성 있는 보호막으로 활용하기 위해서는 마찰계수 0.05 이하 및 마모계수 10^{-8} 이하를 가지며 접촉각 90° 이상을 가져야 한다. 또한, 마이크로 디바이스에 서와 같이 인가하중이 낮을 경우에는 소성접촉보다는 탄성접촉을 하려는 경향이 강하므로 표면에너지의 영향이 증대된다. 그리고 탄성접촉을 할 경우에는 마모가 매우 작아지기 때문에 마모문제보다는 접촉면적 증가에 따른 마찰계수 증가를 억제할 수 있어야 한다. 그리고 돌기들의 변형이나 plowing 현상을 최소화시키기 위해 표면거칠기가 매우 낮아야 한다.

참고 문헌

- [1] Amonton, G., "De la resistance causee dans les machines," Memoires de l'Academie Royale A, 1699, pp. 275-282.
- [2] Coulomb, C.A., "Theorie des Machines Simples, en ayant regard au Frottement de leurs Parties, et a la Roideur des Cordages," Memoires de Mathematique et de Physics de l'Academie Royale, 1785, pp 161-342.
- [3] Johnson, K.L., "Contact Mechanics," Cambridge University Press, 1985, pp. 427-428.
- [4] Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials," 2nd Ed, Wiley, 1995.
- [5] Suh, N.P., Sin, H.-C., "The genesis of Friction," Wear, Vol. 69, 1981, pp. 91-114.
- [6] Suh, N.P., "Tribophysics," Prentice-Hall, 1986, pp. 63-102.
- [7] Maboudian, R., Howe, R.T., "Critical Review: Adhesion in Surface Micromechanical Structures," J. Vac. Sci. Technol. B 15(1), 1997, pp. 1-20.
- [8] Gruen, D.M., Krauss, A.R., Erdemir, A., Bindal, C., and Zuiker C.D., "Smooth Diamond Films As Low Friction, Low Wear Surface," United States Patent, US005989511A, 1999.
- [9] Erdemir, A., Eryilmaz, O.L., and Fenske, G., "Synthesis of Diamondlike Carbon Films with Superlow Friction and Wear Properties," J. Vac. Sci. Technol. A, 18(4), 2000, pp. 1987-1992.
- [10] Erdemir, A., Eryilmaz, O.L., Nilufer, I.B., and Fenske, G.R., "Synthesis of Superlow-friction Carbon Films from Highly Hydrogenated Methane Plasma," Surf. & Coat. Technol., 133-143, 2000, pp. 448-454.
- [11] Heimberg, J.A., Wahl, K.J., and Singer, I.L. and Erdemir, A., "Superlow Friction Behavior of Diamond-like Carbon Coatings: Time and Speed Effects," Appl. Phys. Lett., 78(17), 2001, pp. 2449-2451.
- [12] Martin, J.M., Donnet, C., and Le Mogne, Th., "Superlubricity of Molybdenum Disulphide," Phys. Rev. B, 48(14), 1993, pp. 10583-10586.



나 종 주

- 한국기계연구원 표면연구부 선임연구원
- 관심분야 : 마이크로 트라이볼로지, 나노박막합성
- E-mail : jjha@kmail.kimm.re.kr



이 구 현

- 한국기계연구원 표면연구부
- 관심분야 : 열처리 기술, 플라즈마 용사 코팅기술
- E-mail : lgh1162@kmail.kimm.re.kr



남 기 석

- 한국기계연구원 표면연구부 책임연구원
- 관심분야 : 대기압 플라즈마, 내마모박막
- E-mail : ksnam@@kmail.kimm.re.kr