

## 원자 단위에서의 마찰\*

### Friction in Atomic Scale

Jacqueline Krim 씀

고려대학교 문탁진, 최일중 교수 번역

나는 12월의 첫째주를 두려워 했다. 그것은 나를 우울하게 하는 보스톤의 진눈깨비 섞인 이슬비나 어둠, 그리고 봄비는 휴일의 쇼핑몰의 주차전쟁같은 것은 아니었다. 그 주가 응축 물질 연구 물리학자들의 모임인 미국물리학회 3월 총회에 제출할 논문 초록의 마감 시한이기 때문이다.

1986년에 나는 나의 대학 동료 Allan Widom과 함께 고체 평면을 따라서 미끄러지는 한 원자 두께 필름의 마찰력을 측정할 수 있는 실험 기술을 개발했다. 문제는 나의 원자단위의 마찰 초록을 3월 총회의 수많은 논문들 중 어디에 분류해야 할지 알 수 없다는 것이었다.

마찰에 대한 연구가 없었던 것은 아니었다. 나는 항상 거시적 마찰이나 나노미터 단위의 마찰에 대한 회의인 다중성향의 미국진공학회로부터 환영을 받았다. 그러나 주류의 물리학자들은 그 주제에 아무 관심이 없었다. 거의 대부분의 사람들은 마찰이란 단순히 표면의 울퉁불퉁함에 관계된다고 생각했다. 마찰이 경제에 미치는 영향 또는 일상생활에서 느끼는 마찰의 친숙함을 생각한다면 사람들은 더욱 마찰에 대한 관심을 가졌었을 것이다(선진국의 경우 마찰과 마모에 대해 신경을 쓴다면 국민 총생산의 1.6%를 절약할 수 있다고 추측할 수 있다. 1995년 미국의 경우 \$1160억에 해당된다.).

사실 나의 연구분야에서 나만이 연구한 것은 아니다. 1980년대 후반에 결정성 기관위에 원자를 미끄러지게 하는 실험에서, 그리고 이론적으로 컴퓨터 모델을 써서 마찰력을 연구할 수 있는 많은 기술들이 나의 실험을 포함해서 발전되었다. 나는 처음으로 1991년 1월호에서 나노트라이볼로지, 즉 나노마찰학(나노미

터 단위에서 연구되는 마찰이나 마모학)분야에 관여했으며 다른 사람들도 나의 개념을 인용하기 시작했다. 한때 몇몇 안되는 연구자들의 모임이었던 것이 점차 그 나름대로의 과학 분야로 인정을 받기 시작했다. 그 이후로 나노마찰학을 연구하는 과학자들은 원자단위 마찰이 미시적 표면 거칠기(roughness)과는 거의 관계가 없고, 어떤 경우에는 마른 표면이 젖은 표면보다 실제로 더 미끄럽기도 하다는 것을 발견했다. 우리가 미끄럼 계면을 완벽하게 특성화하더라도 힘이 복잡해서 실제로 그 면에서 일어나는 마찰을 정확히 예측할 수 없다. 만일 미시적 접촉과 거시적 물질 사이의 정확한 성질을 알 수 있다면 마찰을 더 잘 이해하므로써 윤활제나 내마모성 기계 부품을 향상시켜 산업 혁신에 기여할 수 있을 것이다.

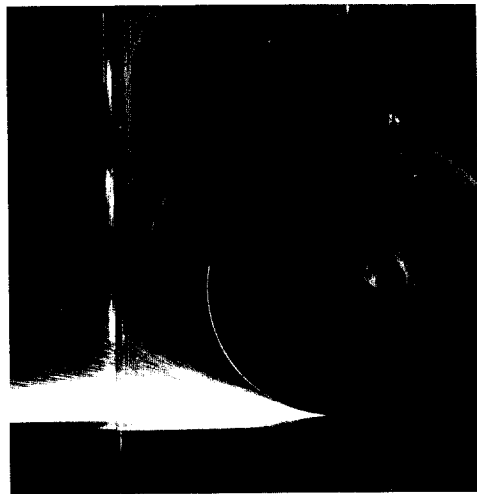


그림 1. 연마할 때 미끄럼 표면이 마모된다. 이러한 마찰의 보기는 표면을 완전히 망치는 경우가 있다. 그러나 마모나 손상 없이도 마찰을 높은 수준까지 유지시킬 수 있는 새로운 연구가 나왔다.

\*SCIENTIFIC AMERICAN, OCT. 1996 (p.48)

그러한 기술적인 생각때문에 선사시대 이래로 인간들이 마찰에 대해 이해를 하게 되었다. 40만년 전에 알제리, 중국, 자바의 원시인들은 석기를 깎을 때 마찰을 이용했다. 기원전 20만년 전까지 네안데르탈인(Neanderthales)들은 나무에 나무를 문지르거나 부싯돌을 쳐서 불을 지필 때 마찰을 이용했다. 5000년전 이집트에서 피라미드의 건설을 위해 돌상이나 돌덩이를 운반하는 데 윤활형식으로 나무를 이용하는 과정에서 마찰학이 분명히 발전된 것이다.

### 고전 법칙을 쓰면서...

현대 마찰학은 아마도 레오나르도 다빈치가 평평한 표면위에서 직사각형 형태의 벽돌의 미끄럼운동을 규정하는 법칙을 유도했을 때인 500년 전부터 시작되었을 것이다(다빈치의 이론은 거의 수백년 동안 출판되지 않았기 때문에 어떤 역사적인 영향은 없었다). 17세기 초에 프랑스 물리학자 Guillaume Amontons가 두 개의 평평한 표면 사이의 건마찰(dry sliding)을 연구한 이후에 마찰법칙이 재발견되었다.

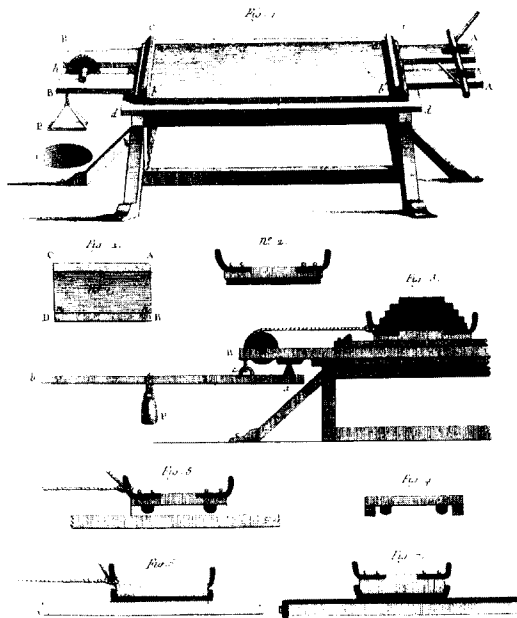


그림 2. 초기의 마찰 연구: 18세기 프랑스의 물리학자 Charles-Augustin de Coulomb은 고전 마찰법칙을 정의하고, 힘을 표면 거칠기와 관련하여 설명하였다. 이것은 현재 중요한 자료로 쓰이고 있다.

Amontons의 결론은 마찰의 고전 법칙을 세우는 데 도움이 되었다. 첫째, 표면에서 미끄러짐에 저항하는 마찰력은 수직 하중, 즉 표면을 함께 압박하는 힘에 비례한다. 둘째, 마찰력의 양은 의외로 접촉면의 넓이에 무관하다. 표면에서 미끄러지는 작은 벽돌은 동일 하중 하에서 큰 벽돌만큼의 마찰을 갖는다. 이 법칙 외에 때로는 18세기 초 프랑스 물리학자인 Charles-Augustin de Coulomb에 의해 유도된 3번째 법칙이 있다. 마찰력은 일단 운동이 시작되면 속도에 무관하다. 아무리 빨리 벽돌을 밀더라도 거의 동일한 양의 저항을 갖는다.

Amontons와 Coulomb의 고전 마찰 법칙은 표면 거칠기와 분자 접촉(반대 표면에서의 입자들간의 인력)으로 기본 원리를 설명하는데 있어 여러 가지로 도움을 주었다. 1950년대 중반까지 표면 거칠기는 일상의 마찰에 대한 메카니즘에서 배제되었다. 그러나 자동차 제작자들은 놀랍게도 만일 한 면이 다른 면보다 더 거칠 경우 두 표면사이의 마찰이 때때로 더 적다는 것을 발견했다[참조 "Friction" by Frederic Palmer; Scientific American, 1951년 2월호].

더욱이 두 면이 더 매끈할 때 마찰이 증가할 수 있다. 예를 들면 냉간 용접에서 연마된 금속이 더 잘 붙는다.

그러나 분자 접촉이 가능하다는 것이 캠브리지 대학의 F. P. Bowden, David Tabor 및 이들의 공동 연구자들의 정교한 실험을 통해서 알게 되었다. 그들은 또한 Amontons가 말했듯이 마찰이 걸보기 거시적 접촉면에 무관함에도 불구하고 실제로는 실제 접촉넓이에 비례한다는 것을 발견했다. 즉 표면의 미시적 거칠기가 접촉하면서 서로 밀어낸다는 것이다. 모든 이러한 접촉점들의 합이 실제 접촉면을 이룬다. 마찰과 접촉에는 밀접한 관계가 있음을 안 후에 캠브리지 연구진들은 마찰은 주로 매우 강한 실제 접촉점의 접촉 결합에 의해 생겨나고 따라서 조그만 조각들이 끊임없이 닳아 없어진다고 하였다.

그러나 이 설명은 잘못된 것이다. 마모를 무시할 수 있는 곳에서조차 비교적 많은 마찰이 존재한다는 사실을 설명할 수 없었던 것이다. 1970년대에 Tabor의 지도아래 있던 박사과정의 Jacob N. Israelachvili는 원자 단위의 표면 측정 장치를 만들어 마모없는 마찰이 분명히 있음을 알았다. 그 측정으로 Tabor는 그 마찰이 어디에서 생겼는지 궁금하였다.

Israelachvili는 일정한 운모 표면 사이의 윤활 접촉을 기기로 연구하였다. 운모는 원자적으로 매끈하다는 장점이 있다. 한 조각의 운모를 쪼개보면 표면의 넓이가 원자 단위의 평면으로 볼 때  $1\text{ cm}^2$ 까지도 넓으며 이것은 1000만개 이상의 원자의 거리에 해당한다(전형적인 표면은 20개의 원자 거리에 해당되는 것에 비해 매끈한 금속은 300개의 원자 거리에 해당한다). 두 운모 표면이 접촉할 때 원자 뒀부분이나 뒀부분이 없는 접촉면이 형성된다.

이 기기를 보면 운모의 뒷면을 일반적으로 수평면에서 두 방향으로 움직일 수 있는 교차된 반원통에 접촉하였다. 접촉넓이와 간격을 알기 위해 틈 사이로 응집광선을 비추어 주어 소위 간섭무늬라고 하는 광학적 효과를 보는 것이며 일련의 광암따가 형성되는 것이다.

반원통에 연결된 스프링의 굴절이 마찰력을 나타낸다. 초기의 표면-인력 측정 기기는 마찰이 실제 접촉 면적에 비례한다는 사실을 원자 단위에서 증명하여 거시적인 측면에서 다룬 것이다. 그러나 지금은 Santa Barbara에 있는 캘리포니아 대학의 정교수가 된 Israelachvili가 그의 동료들과 함께 마찰과 접촉사이의 이해하기 어려운 관계를 정립한 것은 20년 후의 일이었다. 그는 마찰이 접촉력 그 자체와도 무관하다는 것을 발견하였다. 오히려 마찰은 접촉과는 비가역의 관계에 있으며, 또는 표면이 서로 분리되는 과정에 비해 접촉할 때는 어떻게 달리 행동하는지를 알았다. 그러나 그들이 만세를 불렀다고 하지만 측정할 마찰이 어떻게 생기는 지의 정확한 메카니즘은 규명하지 못했다.

거친 표면사이의 마찰접촉분야의 세계적 권위자인 캠브리지 대학의 James A. Greenwood는 1992년에 그 상황을 다음과 같이 요약했다. 만일 어떤 현명한 사람이 왜 마찰이 존재하며 [참]접촉면에 비례하는지를 설명한다면 문제는 해결될 것이다.

## 양질의 진동

이 분야를 이끄는 사람 중의 하나는 IBM Almaden 연구소의 Gary M. McClelland이다. 1980년대에 그는 원자 격자의 진동에 기본을 둔 마모없는 마찰에 대한 매우 간단한 모델을 유도했다. McClelland는 몰랐지만 그 모델은 1929년에 영국 국립물리연구소의 G. A.

Tomlinson에 의해 출판되었고, 1978년에는 Northeastern대학에서 Jeffery B. Sokoloff와 그의 동료들에 의해 훨씬 심화된 방법이 발표되었으나 거의 주목을 받지 못했다.

원자 격자 진동에서 생기는 마찰은 어느 한쪽면에 가까운 원자들이 반대면 원자의 미끄러짐 작용에 의해서 운동하게 될 때 일어난다(진동은 실제로는 음파이며 음파자(phonon)이라 부른다). 이런 식으로 다른 면에 대해 한 표면을 미끄러지게 하는 데 필요한 기계적 에너지의 일부는 음파로 변환되고 결과적으로 열로 변환된다. 미끄러짐을 유지하기 위해서는 더 많은 기계적 에너지가 필요하게 되고 따라서 더 강하게 밀어야 한다.

음파로 변환된 기계적 에너지의 양은 미끄러지는 물체의 특성에 달려 있다. 고체들은 어떤 분명한 진동수에서 진동할 수 있다는 점에서 악기같다. 그래서 소모된 기계 에너지의 양은 실제 일어나는 진동수에 관계된다. 만일 반대 표면에 있는 원자들이 뜯겨나가는 작용이 다른면의 진동수의 원자와 공명을 하면 그때 마찰이 생긴다.

그러나 만일 다른 면의 진동수와 공명하지 않는다면 그때 음파는 효과적으로 생성되지 않는다. 이러한 특징은 상대적으로 거의 공명진동수가 없는 매우 작은 고체가 거의 마찰 없는 미끄럼 운동을 가질 수 있다는 가능성을 보여준다.

아무튼 마모없고 거의 마찰없는 미끄럼 운동이 이론적으로 가능하다는 사실에 흥분해서 McClelland는 그의 동료 C. Mathew Mate, 그리고 다른 사람들과 공동연구를 계속했다. 나노미터 단위의 마찰을 측정하기 위해 그들은 새롭게 고안된 장치인 원자력 현미경을 채택했다. 그것으로 그들은 1987년의 획기적인 논문인 원자 대 원자로 측정된 첫번째 마찰에 관한 관찰 결과를 발표했다.

원자력 현미경은 compliant cantilever의 끝에 날카로운 바늘이 장착되어 있다. 바늘이 시핀 위를 주사할 때 바늘에 작용하는 힘이 cantilever를 편향시킨다. 여러가지 전기적, 광학적 방법(예를 들어 전기용량, 광간섭)으로 수평 및 수직 편향을 정량할 수 있다. 그 현미경은 피코뉴우톤 즉,  $10^{-12}\text{ N}$  정도의 마찰, 흡착, 외부 하중을 정량할 수 있다(대충 뉴우톤이란 평균 인간의 무게에 비해 파리의 무게에 해당하는 무게이다). 1990년대 초에 IBM의 연구원들은 초진공하에서 쓸

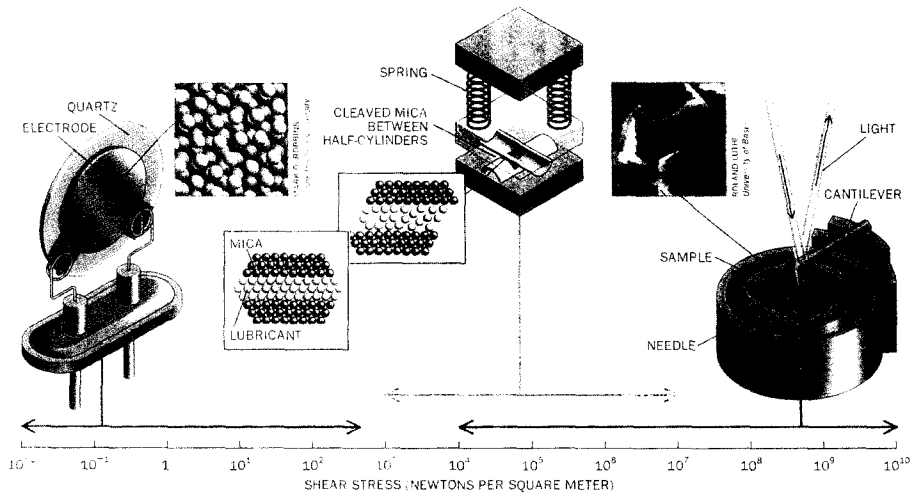
수 있는 마찰-힘 현미경을 설치하여 다이아몬드 바늘이 약 20원자보다 작은 넓이를 갖는 결정성 다이아몬드 표면 위로 미끄러지는 운동에 대해 연구하였다. McClelland와 그의 동료들은 마찰력이 수직하중에는 무관하다는 것을 보였다. 고전 마찰 법칙에 따라 이는 마찰이 0임을 의미한다. 그러나, 마찰이 분명히 있을 뿐만 아니라 미끄럼을 유지하는데 필요한 단위 면적당 전단 응력과 힘은 거대했다.  $m^2$ 당 10억 뉴우톤 또는  $in^2$ 당 15만 파운드로 양질의 강을 깨뜨리기에 충분한 힘이다. 미끄럼 접촉의 원자 특성이 완전히 알려져 있다 하더라도 접촉순간에 일어나는 마찰력을 예측할 수 있는 우리의 능력은 실제 존재하지 않는다는 것은 확실하다.

현재까지 나노단위 마찰학자들은  $m^2$ 당 0.01뉴우톤에서 1000억 뉴우톤에 이르는 엄청난 범위의 전단응력을 총괄적으로 관찰하였다.

예를 들어 Basel대학 물리학과와 Roland LÜthi, Ernst Meyer 및 이들의 공동 연구자들은 1분자 두께의 소위 buckminsterfullerene(검은 공 또는  $C^{60}$ 을 뜻함)의

섬을, 이들이 개량한 원자력 현미경의 끝바늘을 1원자 단위 만큼 움직여도 결정성 소금 표면 위로 움직일 수 있다는 것이다. 그들은 흑연 가루와 같은 전형적인 거시적 단위의 고체 윤활제와 관련이 되는 힘보다 차수가 하나 낮은 힘, 즉  $10,000-100,000 N/cm^2$ 의 전단응력을 찾아 냈다(전단응력은 걸보기 접촉넓이가 아닌 참된 접촉 넓이 때보다는 낮은 차수의 크기가 된다. 예를 들어 흑연을 꽉 막힌 실린더를 윤활하기 위해 사용한다고 하면 걸보기 접촉 넓이가 아주 작다고 할지라도 실제로 나타나는 마찰은 보다 작은 마찰이 될 수 있다). 이들은 또한 바늘 끝이 검은공의 섬 위를 미끄러지게 하는 데 필요한 힘을 측정하였고 소금보다 "끈적"하다는 것을 알았다.

나의 실험실에서 석영결정 미세천평으로 크기의 치수가 낮은 전단응력을 측정하였으며 이 장치는 수십년 동안 나노그램 정도의 가벼운 시료를 측정하는 데 쓰여졌었다. 이 장치는 높은 진동수에서 안전하게 진동하는 석영의 단결정으로 되어있다(초당 500만-1000만번). 금속막 전극이 표면에 붙어 있어 여러 가



**그림 3.** 석영-결정 미세천평으로 1원자나 2원자 두께로 전극에 부착한 물질층과 전극사이의 마찰을 측정 할 수 있다. 석영의 진동을 변화시키면 부착층이 얼마나 밀면 위로 미끄러지는지를 알 수 있다. 크립톤의 액체층(사각형 내의 흰색)이 금(청색)위로 미끄러지는 컴퓨터 simulation연구를 할 때 미세천평의 역할이 크다.

표면-인력 기기는 가장 매끈한 표면을 가진 것으로 알려진 2개의 쪼개진 운모 표면을 이용한다. 수 분자 정도의 얇은 윤활막을 운모 표면 사이에 놓고 미끄럼 운동을 시키면 막이 미끄럼에 미치는 영향을 알 수 있다(사각형).

측면력 현미경은 원자-인력 현미경을 개조한 것이다. 미세한 바늘이 cantilever에 붙어 있고 시료 표면 위를 끌게 될 때 바늘이 벗어난다. 바늘에서 반사되어지는 빛으로 얼마나 벗어난는 가를 알 수 있고 따라서 바늘과 표면 사이의 마찰을 측정할 수 있다. 이 현미경으로  $C^{60}$ 의 "섬"(사각형 내의 녹색결정)이 소금 결정위를 움직이는 것을 관찰할 수 있다.

전단 응력: 두 물질을 서로 반대 방향으로 미는데 필요한 실제 접촉면의 단위 면적당의 힘이며 여러가지 기기로 연구한 마찰의 척도가 된다. 총괄적으로 응력의 범위가 12차수의 크기까지 기록되어 있고 모두가 무마모, 표면 손상, 그리고 거침이라는 실험 구조에서 측정되는 것이다.

지 물질의 단일 원자 층의 막이 전극에 응축되도록 되어 있다. 미세 천평에 응축이 일어나면 진동수가 작아지며 막의 입자들이 밑에 깔린 석영을 얼마나 잘 흔들 수 있는지를 측정할 수 있게 된다. 생긴 진동의 진폭이 작으면 작을 수록 석영위를 미끄러짐으로써 생기는 막의 "문지름"에 의한 마찰은 커진다.

석영 천평은 원자 단위의 마찰이 어떻게 속도에 의존하는가를 가장 짧은 시간에 보여줄 수 있는 유일한 실험기구이다. 마찰의 제3법칙에서 마찰이 속도에 무관하다고 했지만 후에 이 법칙이 사실이 아님을 알아냈다. (Coulomb 자신도 많은 의심을 했지만 그것을 증명할 수는 없었다.) 예를 들면, 자동차를 일정하게 감속시키고 급동작없이 멈추기 위해 운전자는 마지막 단계에서 브레이크로 속도를 줄여야 하며 마찰이 느린 속도에서 증가한다는 것을 보여준다. 그러한 거시적 속도 의존성은 거의 항상 미세적인 접촉점에서의 변화에 기인한다. (이 접촉점은 높은 미끄러짐 속도에서 녹을 수 있고 낮은 속도에서 넓이가 커져서 더욱 느리게 찢겨 나가므로 결합을 이루는 데는 더 많은 시간이 걸린다.) 석영 미세 천평에서와 같이 접촉 넓이가 고정되는 공간에서는 마찰은 실로 정반대의 성질을 나타내며 미끄럼 속도에 정비례하여 증가하는 것이다. 이러한 사실은 1원자 두께의 고체 면을 결정성 은과 금 표면위로 미끄러지게 하는 실험에서 우리는 확인하였다.

### 건조할 때 미끄러움

그러나 1989년 결정성 금 표면에서 미끄러지는 크립톤 필름이 건조할 때 더 잘 미끄러진다는 놀라운 발견을 이론으로 분석할 수 없었다. 액체 필름의 경우 마찰력은 고체 필름에서 보다 대략 5배 정도 크고, 고체 필름의 경우 초당 1센티미터의 속도로 미끄러질 때  $m^2$ 당 대단히 작은 0.5뉴우톤의 전단응력을 갖는다. 이 결과는 내게는 매우 이상했기 때문에 발견 후 일년이 상 나는 발표하지 않았다.

일상 생활에서 대부분의 경우 액체로 두 면을 윤활시킬 때 원자 단위에서의 액체층이 더 많은 마찰을 일으킨다는 이유가 뭘까? 다른 어떤 방법으로든 분자 성질을 규명하지는 못하지만 컴퓨터를 쓰면 이러한 문제들을 해결 할 수 있었다. 몇몇 연구자들은 컴퓨터를 써서 나노 마찰학의 기초를 파헤쳐 나갔다. 그들은

조지아 공과대학의 Uzi Landman(점접촉의 simulation을 개척함), 미국 해군사관학교의 Judith A. Harrison(계면화학 효과의 모델을 설정함), 로렌스 리버머어 국립연구소의 James Belak(가공과 마모를 분석함)들이 다. 존 홉킨스 Mark. O. Robbins와 그의 공동 연구자들은 1원자 두께의 크립톤 막을 결정성 금 표면위로 미끄러지게 하는 simulation에서 액체 마찰에 관한 답을 얻었다. 액체 크립톤 원자가 고체 크립톤 원자보다 유동성이 크지만 고체 금 원자 사이의 틈을 더 쉽게 막히게 한다는 것을 시준하였다. 고체면과 액체면 사이에 전단이 생긴다는 것을 주목해야 하며 거시적인 경우인 액체 윤활과는 입장이 다르다. 이들 예에서 알 수 있듯이 전단은 액체 자체 내에서 생기며(즉 액체-액체 계면에서) 고체-액체 계면에서 보다는 전단에 대한 저항이 작은 것이다.

Robbins의 모델과 우리의 실험결과가 거의 완전히 일치한다는 것은 놀랍고 획기적이다. 왜냐하면 그의

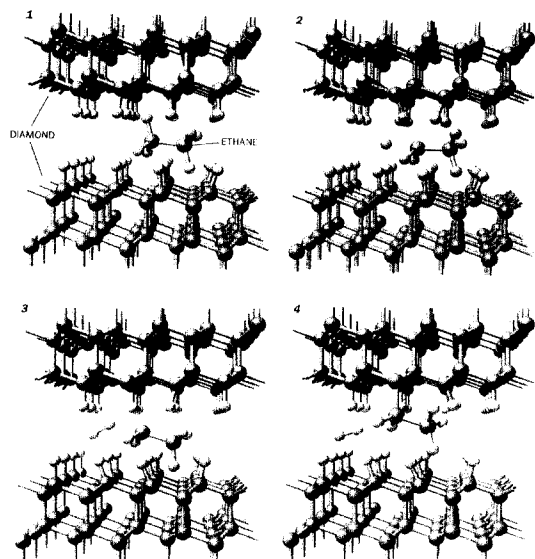


그림 4. 화학 반응이 두 개의 미끄럼 면에서 일어날 수 있다. 이 보기에서는 탄소 원자(녹색)와 6개의 수소 원자(청색)로 구성된 에탄 분자가 2개의 다이아몬드 표면 사이에 끼어 있고 끝은 수소 원자가 배위되고 있다(1). 표면이 미끄러짐에 따라 에탄은 수소 원자를 잃게되고 (2)에 밀기가 된다. 유리된 수소는 다이아몬드에서 수소 원자를 제거시켜서 저회들끼리 결합하여 수소 가스의 분자(3)를 이룬다. 따라서 에틸기는 다이아몬드의 한 면과 화학적으로 결합하게 된다(4). 이 그림은 미국 해군 사관학교의 Judith A. Harrison과 그의 공동 연구자가 컴퓨터 simulation으로 그린 것이다.

계산에서 모든 마찰은 격자 진동(음파)에 의한 것이었기 때문이다. 그의 모델은 전기적 효과에 의한 마찰을 무시하였다. 절연 표면에서는 그런 마찰은 접촉면에서 분리된 양전하와 음전하의 인력에서 생긴다.(풍선을 머리에 문지르거나 면 벽과 천장에 붙는 그런 인력과 유사하다.) 그러나 접촉면의 하나나 양쪽이 모두 금속일 때 전하의 축적은 중요하지 않다. 스웨덴 Götenborg에 있는 Chalmers 공과대학의 Mats Persson에 의해 제외되고 독일의 Jülich 연구소의 Bo N. J. Persson에 의해 광범위하게 이론적으로 연구된 전기적 마찰의 다른 형태가 차라리 일어날지 모른다. 그 마찰은 반대 표면을 따라 끌어당길 때 금속 물질 내에서 유동 전자에 의해 생긴 저항에 관계된다.

물리학자들은 이런 마찰이 존재한다는 것은 알지만 얼마나 중요한지는 모른다(왜 작은 고체들이 완전한 무마찰이 아니라 거의 무마찰에 가까운 가이다). Robbins와 그의 동료들에 의해 계산되었던 모델로 전기적 효과는 마찰에 어떤 중요한 역할도 하지 않는다는 것을 알았다.

이 문제를 더 깊이 연구하기 위해 우리는 최근에 한 원자 두께와 두 원자 두께의 제논(xenon) 고체막이 결정성은 표면을 따라 미끄러지는 데 필요한 힘을 측정하였으며 우리는 두 원자 두께의 제논 막의 경우 약 25%의 마찰증가를 관찰하였다. 이 25% 증가가 전자 효과에서 생겼는가? 아마도 아닐 것이다. Bo Persson, Robbins, 그리고 Sokoloff는 각자 따로 따로 제논-은 시스템에 대해 simulation을 실시하였으며 예비 컴퓨터 결과는 음파와 관련된 마찰이 한 층보다는 두 층에서 훨씬 더 크다는 것을 알았다. 기본적으로 두 층은

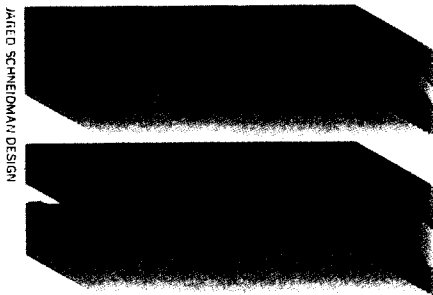


그림 5. 접촉점은 두 개의 거친 표면이 서로 반대 방향으로 미끄러질 때 생기는 마찰이 존재하는 곳이다. (위) 만일 수직 하중, 즉 두 면을 압착하는 힘이 커지면 전체 접촉면적은 증가한다. (아래) 표면의 거침이 아닌 이 증가한 마찰 정도를 지배하는 것이다.

좀 더 정교한 "악기"를 이룬다. 그래서 좀 더 많은 공명 진동수와 마찰이 존재한다. 전기적 마찰은 의심할 것 없이 존재하지만 그 강도는 표면에 바로 인접한 원자들에 의해서 주로 결정된다. simulation에서 금속 표면을 나타내는 변수들을 선택하면 이 강도는 숨겨져 나타나지 않는다. 그러나 이론적으로나 simulation에 의하거나 우리의 노력이 더욱 흥미해 감에 따라 전기 효과와 격자 진동에 관계된 에너지 손실 부분을 예측할 수 있게 되었다.

### 법칙을 다시 쓰며...

나노 마찰학이 최근에 발전함에 따라 거시적인 마찰 법칙을 원자 단위에서 적용할 수 없음을 알았다. 우리는 이제 좀 더 일반적인 방법으로 마찰 법칙을 다시 쓸 수 있다. 첫째, 마찰력은 두 면이 얼마나 쉽게 달라 붙느냐에 달려 있다. 그것은 완전한 힘의 강도보다는 두 면을 함께 압착하는 힘이 얼마나 비가역적으로 되느냐에 달려 있다. 둘째, 마찰력은 겉보기 접촉면이 아니라 실제 접촉면에 비례한다. 끝으로 마찰력은 표면이 가열되지 않도록 하고 미끄럼 속도를 음속보다 훨씬 작게 해 준다면 실제 접촉점에서 표면의 미끄럼 속도에 비례한다. (음속 근처가 되면 격자 진동은 소리의 에너지를 빨리 제거할 수 없기 때문에 음속이 일정하게 된다.)

미시와 거시 마찰 현상의 차이는 만일 거시적 물질 사이의 실제 접촉면이 압착력에 비례한다고 가정하면 크게 감소한다. 더 강하게 압착할 수록 더 많은 면적이 접촉하게 된다. 그래서 마찰은 Amontons가 말했듯이 수직하중에 비례하는 것 같다. 그러면 무엇이 표면 거침은 어떻게 되는가? 이것은 그리 중요하지 않다.

물리학자들은 표면의 불규칙성이 점착-미끄러짐 마찰에서 중요 역할을 하며 한 면이 다른면을 미끄러지거나 갈 때 잠시 서로 붙었다가 떨어진다라는 것이다. 두 드리진 예들은 기차 브레이크가 굉음을 내는 것과 칠판에 손톱 긁는 소리 등이 있다. 표면의 거침에 의해 제멋대로 붙었다 떨어졌다 하는 성질이 생긴다고 생각된다.

Illinois 대학의 Steve Granick와 그의 동료들은 최근에 명목상 완전한 운모 표면 사이에서 윤회된 접촉면의 점착-미끄러짐 마찰을 관찰했다. 그들은 마모없이 한정된 액체에 수백만번 사인 형태의 힘의 사이클을

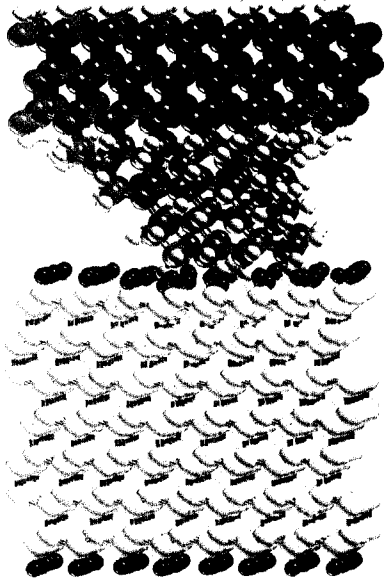


그림 6. 탄소(청색)와 수소(황색)로 되어 있는 다이아몬드 양상의 바늘이 탄소(청색)와 같이 수소원자(황색)가 위치한 다이아몬드로 된 면 위를 미끄러지는 모습이다. 이러한 컴퓨터 simulation은 마찰 화학, 또는 마찰-유발 반응의 연구에 도움이 된다. 특히, 여기에서 바늘과 표면은 변형하지만 화학 반응은 일어나지 않는다.

반복해서 보냈고 무질서가 점착-미끄러짐 마찰 그 자체의 본질일 거라는 결과를 관찰했다(소위  $1/f$  noise).

매우 작은 치수의 기계 부품을 제작하는 현재의 추세를 고려하면 오늘 원자 단위에서 기초 연구라고 생각되는 것이 내일에는 직접적인 적용이 될 수 있다. 예를 들면 우리는 지금 왜 덩어리 형태의 가공 사슬 분자들이, 좀 더 점성이 있지만, 이들 물질이 끝은 사슬 분자들보다 더 좋은 윤활제라는 것을 안다.(그것들은 끝은 사슬 분자들보다 더 큰 힘 하에서 액체로서 존재하고 따라서 두 고체면을 더 잘 분리할 수 있다.)

접촉 공간 구조를 알고 나노 마찰학을 연구하는 사람은 언젠가는 화학자들에게 표면에서 마찰에 의해 생기는 반응들을 이해시킬 것이며, 재료과학자들에게

는 내마모성 물질을 설계하는데 도움을 줄 것이다. 에너지와 원료 둘 다 절약해야 할 필요성이 좀 더 시급해지면서 기본적인 마찰 과정을 이해하려는 물리학자들이 급속히 많아지리라 예상된다.

## The Author

JACQUELINE KRIM, a professor of physics at Northeastern University and a member of its Center for Interdisciplinary Research on Complex Systems, received her B. A. from the University of Montana and her Ph.D. from the University of Washington. She received a National Science Foundation Presidential Young Investigator Award in 1987 and a creativity award in materials research in 1992. She has chaired the national board of trustees of the American Vacuum Society and currently serves on the executive board of its surface science division. She thanks the NSF for its continued research support.

## 참 고 문 헌

1. HISTORY OF TRIBOLOGY. D. Dowson. Longman, London, 1979.
2. FUNDAMENTALS OF FRICTION: MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC PROCESS. Edited by I. L. Singer and H. M. Pollock. Kluwer, 1992.
3. HANDBOOK OF MICRO/NANOTRIBOLOGY. Edited by B. Bhushan. CRC Press, 1995.
4. NANOTRIBOLOGY: FRICTION, WEAR AND LUBRICATION AT THE ATOMIC SCALE. B. Bhushan, J. N. Israelachvili and U. Landman in Nature, Vol. 374, pages 607-616; April 13, 1995.
5. PHYSICS OF SLIDING FRICTION. Edited by B.N.J. Persson and E. Tosatti. Kluwer, 1996.