

원자세계 탐사하는 슈퍼현미경

玄源福

〈과학저널리스트〉

IBM 취리히연구소의 게르트 비니히와 하인리히 로러가 주사형(走査型) 터널현미경(STM)을 발명하여 「전자현미경의 아버지」인 예른스트 루스카와 함께 1986년도 노벨물리학상을 수상한 이래 과학자와 엔지니어들은 원자의 영역을 직접 캐내기 시작했다. 오늘날 과학자들은 주사형 프로브현미경(SPM)이라고 불리는 새로운 종류의 「슈퍼현미경」을 사용하여 물질의 원자구조에 대한 3차원영상을 만들 수 있고 원자를 날개로 하나씩 끄집어내어 이동시킬 수도 있다.

이런 방법을 통해 물질표면의 원자 하나하나의 특성과 형태를 보다 잘 이해할 수 있게 되면 금속이 부식하는 이유와 2개의 표면이 유착하는 이유 또는 생물학적 반응이 어떻게 일어나게 되는지도 밝힐 수 있을 것이다. 「슈퍼현미경」들은 또 모든 제품에 영향을 줄 차세대의 이른바 「나노사이언스(nanoscience)」의 기본적인 연장으로 등장했다. 엔지니어들은 SPM으로 원자를 조작하여 반도체칩의 회로를 오늘날의 사람머리털의 약 4백분의 1 두께에서 1천분의 1 두께로 축소함으로써 칩의 가동속도를 여러 곱절 빠르게 만들 수 있게 된다.



넓은 응용의 영역

실제로 이 새로운 연장을 이용하여 포드자동차회사의 엔지니어들은 오늘날 컴퓨터 스크린을 보면서 자동차의 클러치, 브레이크 그리고 페인트에서 물질을 닦아내는 힘을 눈으로 파악할 수 있게 되었다. 그래서 원자수준에서 물질에 어떤 일이 발생하는가를 잘 진단할 수 있다면 보다 효과적으로 개선하는 방법을 찾게 될 것이다.

「슈퍼현미경」들은 또 공장현장으로 진출하기 시작했다. IBM, NEC, 마쓰시다전기사와 같은 전기공업의 「거인」들은 실리콘 웨이퍼, 레코딩 헤드 그리고 디스크 드라이브 플래터를 생산하는 과정에서

검사용으로 맞춤SPM을 사용하고 있다. 과학자들은 이미 최초의 SPM칩을 만들기도 했다. 머지않아 수백개의 SPM을 가진 칩들이 사람의 시력을 능가하는 강력한 센서로 등장하여 사람의 유전자를 조작하거나 또는 초대용량의 정보저장시스템의 「프로브(탐침)」로 사용될 것이다.

「슈퍼현미경」의 수요는 벌써부터 치솟기 시작했다. 1986년 이래 5개의 SPM메이커들이 탄생했는데 그중에서 가장 큰 디지털 인스트루먼트사(미 캘리포니아주 산타바바라 소재)는 1992년 매출고가 2천1백만달러에 이르렀다. 대당 6만~50만달러인 SPM의 세계수요는 1994년에는 올해의 5천만달러에서 1억달러로 뛰어오를 것으로 보고 있다.

불꽃 튀는 경쟁

SPM의 활용기술개발경쟁은 날로 치열해지고 있다. 이 장비의 잠재력을 처음 파악한 일본의 전자메이커들은 이미 다른 나라의 메이커들보다 훨씬 앞을 달리고 있다고 STM 발명자의 한사람인 IBM 물리학자 로러는 평가하고 있다.

실상 일본정부는 SPM이 매우 중요한 역할을 한다고 생각하고 1993년 1월 2억5

천만달러를 투자하는 「원자조작 프로젝트」를 발족시켰다. 이 사업은 새로운 SPM과 그밖의 장비를 개발하기 위해 모토롤라와 텍사스 인스트루먼트사를 포함하여 30개 전자 및 재료메이커들의 과학두뇌들을 공동이용하고 있다.

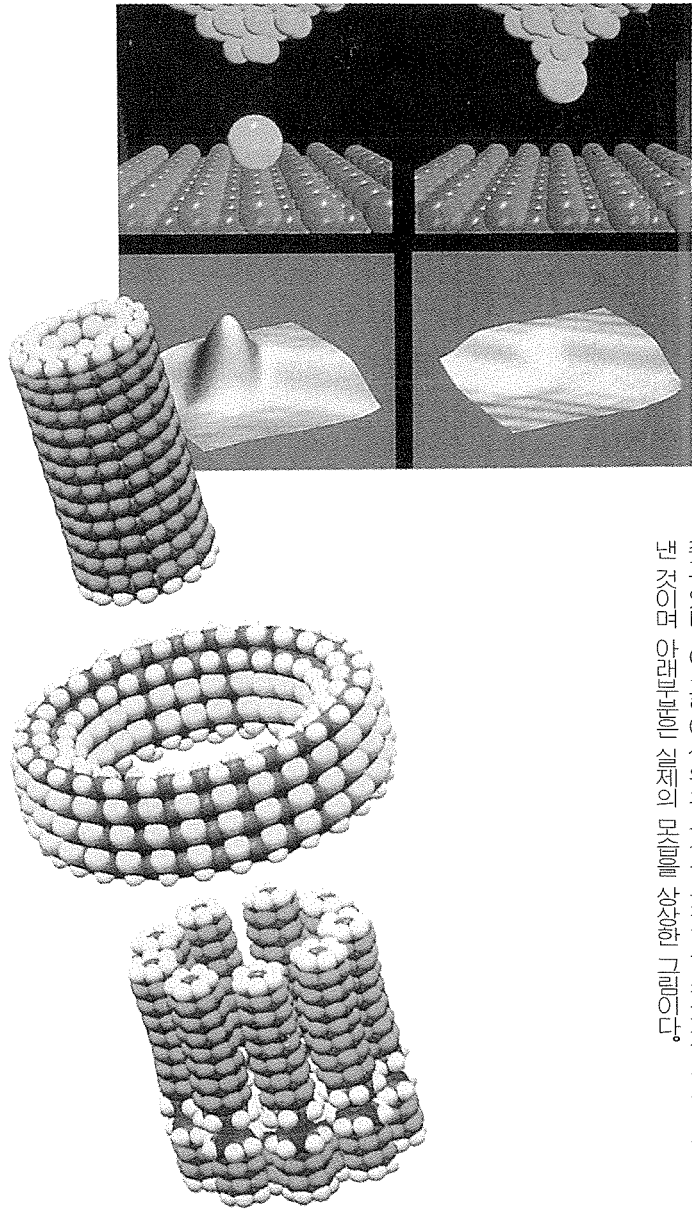
그런데 1981년 로리와 비니히가 발명한 STM은 「터널효과」에 바탕을 두고 있다. 물질은 원자나 분자 또는 소립자 수준에서는 탐침과 샘플간에 공기와 같은 절연물의 벽이 있어도 그 간격이 너무나 작아 전자는 이런 벽을 통과할 수 있다. 이런 터널효과가 작동할 수 있는 거리로 탐침을 샘플에게 근접시키면 터널속에서 2개의 물질사이를 미소한 전자의 흐름이 뛰어넘는다. 이 거리가 짧아지거나 길어지는데 따라 전류는 더 강하거나 약해진다.

STM에서는 터널을 흐르는 전류가 작은 전축바늘을 닮은 금속조각과 표적이 되는 샘플사이로 퍼진다. 지름이 몇개의 원자크기밖에 안되는 금속조각은 샘플 바로 위를 들락날락한다. 전류가 변동할 때마다 컴퓨터는 이 변화를 측정하여 스크린의 영상으로 나타낸다.

원자간력현미경

문제는 STM이 금속과 같은 도체의 표면에서만 작동한다는 것이다. 그래서 1985년 IBM의 비니히와 2명의 그의 동료들은 생물의 샘플을 관측할 수 있는 원자간력현미경(AFM)을 발명했다.

AFM은 종래의 STM이 전류의 변화를 측정하여 영상을 만드는 것과는 달리 현미경의 금속조각의 원자와 샘플표면의 원자사이의 척력(반발하는 힘)의 변화를 측정한다. 정교한 샘플의 준비가 필요하고 진공에서만 가동하는 전자현미경과는 달리 AFM은 공기나 또는 물속에서도 기능을 발휘하고 생체재료를 살아있는



▲ IBM에서 제작한 한개의 원자로 된 스위치의 2가지 영상을 보여주고 있다. 이 그림에서 위의 부분은 동작하는 스위치를 컴퓨터로 나타낸 것이며 아래부분은 실제의 모습을 상상한 그림이다.

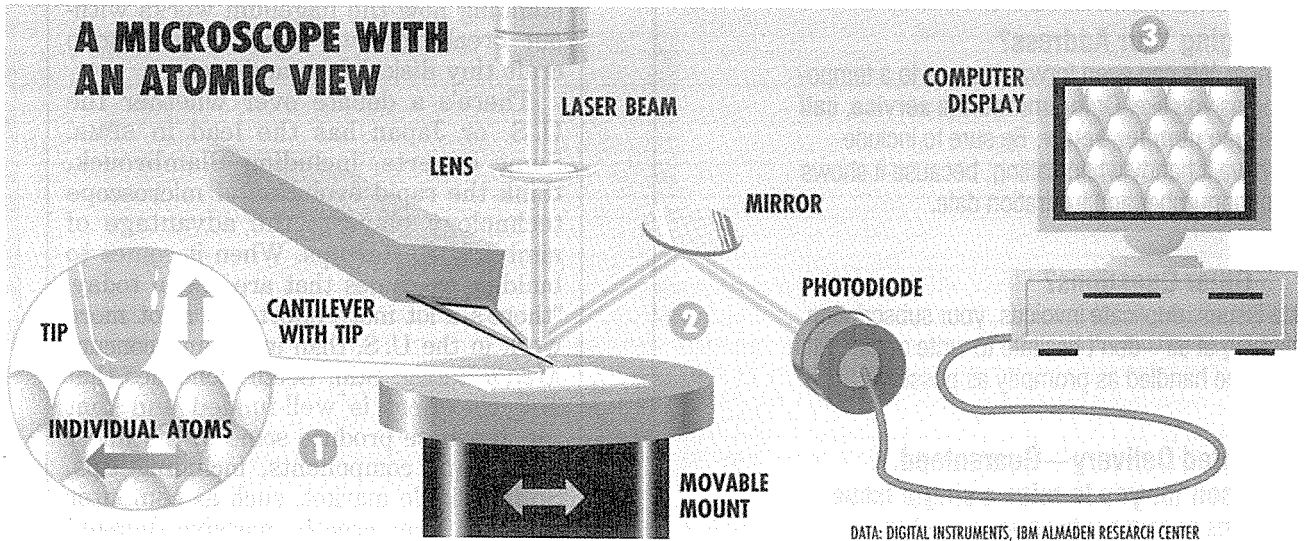
▲차레로 탄소, 수소 및 산소원자 3천5백57개로 만든 유성기어의 컴퓨터영상.

상태로 관측할 수 있다.

더욱이 지난 2년간 과학자들은 자기, 온도 및 전기화학적 특성에 매우 민감한 여러 종류의 AFM을 설계했다. AT&T사 벨연구소의 물리학자 에릭 베치그는 현재 주사형 근접시야 광학현미경을 완성하는 단계에 있다. 빛을 발산하는 섬유-광 와이어 탐침을 이용하여 샘플과는

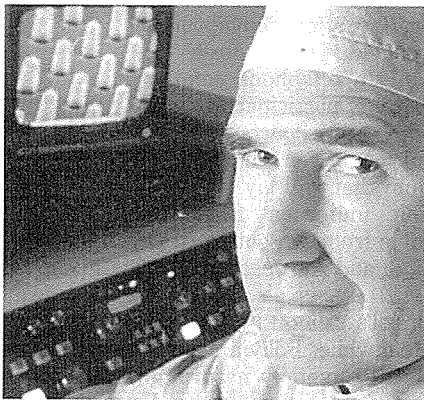
접촉하지 않아도 거의 AFM만큼의 깨끗한 분해능으로 광학적인 상을 얻을 수 있다. 이런 방법을 통하면 샘플의 마모를 제거하고 금속조각과의 접촉으로 발생하는 일그러짐을 피할 수 있다.

SPM은 IBM에서 그 진가를 발휘하고 있다. 약 2년전 IBM은 예섹스 정선의 버링턴 공장에서 반도체 웨이퍼에 식각된



▲원자의 시력을 가진 현미경

- (1)현미경의 작은 탐침끝이 마운트에서 앞뒤로 움직이는 샘플표면과 접촉한다. 주시할 때 이 탐침은 탐침의 원자와 샘플표면의 원자 사이의 힘의 작용으로 아래위로 움직인다.
- (2)한편 레이저빔은 탐침을 잡은 팔모양의 장치에 반사된다. 광다이오드(감광성 반도체)가 움직이는 이 장치에 부딪쳐 굴절된 빛을 측정한다.
- (3)이 측정치로 샘플에 대한 원자규모의 위상도를 만들어 디스플레이에 비춰준다.



◀코넬대학의 맥도널드가 칩의 작동속도를 끌어올리기 위해 칩위에 현미경을 올려놓고 있다.

정보저장의 혁명

한편 생체조직분자의 영상을 만들 수 있는 AFM의 능력을 이용하여 매우 재미있는 발견을 하고 있다. 시카고대학의 모던 안스도프는 AFM을 이용하여 살아있는 세포에서 세포막층을 벗겨내는 데 성공했다. 그는 이런 방법으로 1993년 이 옷세포를 연결하는 작은 구멍모양의 커뮤니케이션 채널 그림을 처음으로 만들었다. 그런데 이 채널이 고장나면 심박(心拍)의 혼란과 그밖의 질병을 가져올 수 있다. 의사들은 이 구조의 영상을 이용하여 이런 질병을 치료하는 좋은 약을 개발하는 실마리를 얻게 되기를 기대하고 있다.

원자를 이동할 수 있는 SPM의 능력은 정보저장의 혁명을 가져올 수 있다. 우리가 책받침을 머리털 위에 놓으면 머

리털이 일어서는 현상처럼 높은 전압을 걸어주면 정전기의 힘으로 샘플표면에서 원자를 날개로 벗길 수 있다. 이렇게 원자를 연속적으로 벗기면 원자로 글자를 쓸 수 있게 된다. 결국 글자를 쓸 수 있다는 것은 기억소자가 될 수 있다는 뜻이다. IBM과학자들은 1990년 4월 STM을 이용하여 하나하나의 키세논원자를 배열하여 IBM의 로고를 만들었을 때 이미 그 가능성을 보여주었다.

돈 아이글러 등 IBM과학자들은 35개의 키세논원자를 배열하여 「IBM」이라는 불과 3개의 글자를 그리는데 약 20시간이나 걸렸다. 이런 방법으로 대규모집적 회로(LSI)의 회로패턴을 그리자면 수십년이나 수백년의 세월이 걸린다. 그러나 원자들을 조작하여 그 존재여부를 디지털언어로 읽을 수 있다면 원자수준으로 데이터를 저장할 수 있다는 것이 된다. 그래서 이런 방법을 이용하면 이론적으로는 미의회 도서관의 모든 도서와 문헌을 20cm 크기의 실리콘 웨이퍼에 저장할

회로선의 폭과 깊이를 검사하는 데 특별히 설계한 AFM을 사용하기 시작했다. SXM 원크스테이션이라고 불리는 이 장치는 이런 목적으로 IBM이 종전에 사용하던 전자현미경보다 50배나 더 큰 해상능을 보유하고 있다. 더욱이 1백18개의 칩을 내포하고 있는 20cm의 이 웨이퍼는 검사하기 위해 분해할 필요가 없게 되었다. 버링턴공장당국의 주장은 이로써 16 메가비트디램(DRAM)을 생산하는 1개 라인에서 연간 1백만달러를 절약할 수 있다는 것이다.

수 있다는 계산이 나온다.

원자 스위치

IBM은 컴퓨터분야에서 현미경을 이용하는 작업을 계속 밀고 있다. 예컨대 알마덴연구센터의 과학자들은 레이저로 AFM의 탐침조각을 대위 플라스틱 디스크표면에 0과 1을 표시하는 얇은 구멍을 만들고 있다. 이것은 현재의 CD-롬 구멍의 10분의 1 크기밖에 안된다. 그래서 디스크의 매 평방cm당 종래 CD롬의 저장능력의 50배나 되는 46억5천만비트의 데이터를 저장할 수 있다. 또 아이글러는 니켈기판위에서 키세논원자가 내왕하는 「원자 스위치」의 개발을 모색하고 있다. 그러나 분자머신이나 분자장치의 개발과 실용화단계에 이르면 아직도 해결해야 할 과제들이 얼마든지 있다.

오늘날의 AFM은 아직도 종래의 장치의 3분의 1인 초당 1백만비트밖에 읽을 수 없어 정보저장용으로 사용하면 이보다 훨씬 속도가 빨라야 한다. 그 열쇠는 여러 개의 금속조각이 병렬로 가동하는 칩을 만드는 것이라고 코넬대학의 노엘 맥도널드는 말하고 있다. 그의 목표는 손톱크기의 실리콘칩에 1천개의 SPM탐침조각을 올려놓는 것이다. 이렇게 하여 여러 개의 칩을 배열하면 1백만분의 1초 내에 수천개의 원자를 움직일 수 있게 되어 사람의 시력이나 청력과 맞먹는 센서를 만들 수 있을 것이다. 이런 기술은 10년뒤의 전자공학의 미래상을 내다볼 수 있는 선구적 역할을 하고 있다.

유전자의 조각

일본의 올림퍼스 광학회사의 오카다 다카오도 병렬식 배열을 이용하여 보다 민감한 SPM을 만들고 있다. 오카다는 AFM의 공동발명자인 미국 스탠포드대학의 명예 물리학교수 칼빈 쿠에이트와

함께 작업하면서 20nm 크기의 웨이퍼 한 개 위에 5백개를 올려놓을 수 있는 크기로 AFM탐침을 축소하는 데 성공했다. 이런 민감한 소자는 유전자를 만드는 아미노산 시퀀스를 밝히고 조작하여 질병의 원인과 치료법의 실마리를 찾는 데 이용할 수 있다.

한편 일본전신전화회사의 과학자인 가네코 레이조의 연구실에서는 과학자들이 SPM을 이용하여 극소형장치를 만드는 데 도움이 될 수 있는 교훈을 자연으로부터 배우고 있다. 최근 한 과학자는 박테리아의 프로펠러역할을 하는 편모를 찾아냈다. 꼬리와 세포를 연결하는 이 분자의 구조는 실리콘칩에 식각(蝕刻)할 수 있는 가장 작은 소자보다도 훨씬 더 작는데 분당 1만회를 회전할 수 있다. 가네코는 이 편모가 부서지지 않고 작동하는 방법을 알게 되면 미니 디스크 드라이브와 모터를 만들 수 있는 실마리를 찾게 될 것이라고 기대를 걸고 있다.

미국과 일본중 어느 쪽이 SPM분야에 앞섰는가에 대한 논란이 있기는 하지만 오늘날 쓸모있는 기계를 만드는 데 미국은 일본보다 훨씬 많은 노력을 기울이고 있고 또 실적을 올리고 있는 것도 사실이다. 한편 일본은 넉넉한 자금을 제공하는 노력을 기울이는 한편 금속조각을 포함하여 최상급의 현미경부품을 생산하고 있다.

그러나 SPM기술을 터득하는 경쟁에서 누가 앞서건 관계없이 이 장치는 과학과 산업의 모습을 바꿔놓고 있다. 원자의 세계를 컴퓨터 스크린에 옮겨놓음으로써 이 슈퍼현미경들은 눈에 보이지 않던 힘의 영역과 나노테크놀로지의 문을 활짝 열어젖혔다. 이런 기술이 당장에 칩으로 된 도서관을 실현시키지는 못한다고 해도 SPM이 제공하는 시각의 지표는 과학발견의 새로운 영역을 넓혀줄 것

주사형 터널현미경은 CD플레이어보다 크기 않고 현미경을 구성하는 전자부품도 2백~3백달러의 가치밖에 나가지 않는다. 고등학생이라면 조립하는데 두어달밖에 걸리지 않는다. 이 장치는 축음기와 매우 닮았는데 실상 축음기보다 더 복잡하지도 않다. 그러나 그 성능은 물질표면을 하나하나의 원자까지 쉽게 들여다볼 수 있어 종전의 어떤 현미경도 감히 따라올 수 없다.

이렇게 단순한 주사형 터널현미경(STM)이 개발된 것은 불과 12년밖에 되지 않았다는 것은 놀라운 일이 아닐 수 없다. 그 이유의 일부는 STM이 종래의 현미경설계와는 근본적으로 출발점이 다르다는 데서 찾을 수 있다. 그래서 현미경전문가들이 보통 생각하는 개념을 뛰어넘는 지적인 도약이 필요했던 것이다. 또 하나의 중요한 사실은 이런 접근방법이 STM과 같은 탁월한 제품을 탄생시키리라고는 누구도 생각하지 못했다는 것이다. 이론을 통해서만 STM의 탁월한 능력을 실현할 수 없었고 경험을 통해서만 가능했던 것이다.

성공의 힌트

19세기에 현미경은 조금씩 개선되어 나가면서 빛이 가진 여러 가지 사실과 마주치게 되었다. 그런데 광현미경은 약 1백만분의 1m인 가시광선의 파장보다 훨씬 짧은 파장의 물체는 관찰할 수 없다. 완전한 렌즈를 가지고도 이런 물체보다 작은 점에 대해서는 초점을 맞출 수 없어 거꾸로 이보다 작은 곳에서 나오는 빛은

초점을 만들 수 없다.

그런데 원자 하나하나를 식별하자면 이보다 1천분의 1이나 작은, 「나노미터」라고 불리는 10억분의 1m의 파장이 필요하다. 이런 파장은 X선과 고에너지전자빔으로서 존재한다. 그러나 이런 광선은 단점이 있다. 예컨대 전자는 진공속에 가둬둘 필요가 있고 X선은 초점 맞추기가 어려울 뿐 아니라 이 두가지형의 방사선은 물질속으로 깊숙히 침투한다. 이런 특성과는 상관없이 할 수 있는 작업도 있으나 문제는 표면의 영상을 쉽게 제공할 수 없다는 점이다. 그런데 물질이 다른 세계와 서로 작용하는 것은 그 표면인데 물질의 표면은 물리학자와 화학자들에게는 풍부한 정보를 제공한다.

1950년대로 들어와서 미국 펜실베이니아대학의 에드윈 물러가 원자의 영상을 만드는 최초의 장치인 장(場)이온현미경을 개발했다. 이 현미경은 매우 높은 플러스 전압을 예리한 금속팁에 적용한다. 이때 장은 가까이 있는 헬륨가스의 원자로부터 전자를 받아서 팁으로부터 멀리 내던지면 형광스크린에 잡힌다. 헬륨은 원자들이 팁표면으로부터 튕겨어나는 곳에서 가장 강력하게 영향을 받기 때문에 이런 들출부는 스크린에서 밝은 점을 만든다.

장이온현미경은 뚝뚝하기는 했으나 용도가 다양하지는 못했다. 극단적으로 높은 전기장에 견딜 수 있는 소재로 만든 팁만 볼 수 있다. 그래서 금속학자들에게는 쓸만한 장비였으나 화학자와 생물학자들에게는 성가신 존재였다. 1972년에 개발된 「토포그래하이너」는 날카로운 팁으로 더 많은 일을 찾아나섰다. 미국 워싱턴DC 소재 국립표준국의 러

셀 영과 그의 동료들은 팁과 금속표면 사이에 전압을 걸었다. 자극을 받은 전자들은 팁에서 샘플로 흘러갔다. 영박사는 팁을 표면 바로 위에서 앞뒤로 움직였을 때 팁을 통해 흐르는 전류의 변화를 모니터함으로써 지름이 2백~3백나노미터 크기의 것은 탐지할 수 있게 되었다.

토포그래하이너는 장이온현미경만큼 날카로운 눈을 가지지 못했으나 민첩성이라는 장점을 갖고 있었다. 영박사가 전기장을 걸었을 때 모습을 바꾸는 압

의 반지름 거리까지 바짝 다가서야 한다.

비니히박사는 IBM 취리히연구소의 하인리히 로러에게 그의 접근방법이 시도해볼만한 가치가 있다고 설득했다. 얼마뒤 이들은 크리스토프 거버의 도움으로 로러박사의 연구실에서 터널현미경을 만들기 시작했다. 이들은 진동계거에 많은 시간을 보냈다. 음악가들이 잘 알고 있듯이 물체가 작으면 작을수록 더 높은 주파로 진동한다. 그러나 문제를 일으킨 것은 낮은 주파의 교란이었다.

슈퍼현미경은

전물질을 사용한 덕으로 이것은 매우 정확하게 표면위를 이동했다. 이런 변화는 매우 사소한 것이지만 한개의 원자의 지름만큼씩 팁을 아래위로 움직일 수 있다. 그런데 STM에게는 바로 이런 정확성이 요구되었던 것이다.

터널효과 이용

1978년 프랑크푸르트소재 볼프강 괴테대학의 대학원생이었던 게르트 비니히는 표면을 관찰하는데 「전자터널」이라는 색다른 현상을 사용하려고 했다. 2개의 전도체가 매우 근접해 있을 때 그 사이에 절연층이 있어도 전자들은 한쪽에서 다른 쪽으로 뛰어넘을 수 있어 이를테면 터널을 통과하는 것과 같다. 이런 터널현상이 일어나기 위한 매우 민감한 조건은 전도체간의 거리다. 그래서 터널을 흐르는 전류를 잡는 팁을 통해 표면상의 가장 미세한 변화까지 측정할 수 있다. 그렇게 하자면 토포그래하이너 팁보다 훨씬 더 근접하여 원자 두세계

1981년이 되자 IBM 과학자들은 제법 쓸만한 STM을 만들었다. 이 STM의 팁은 샘플표면을 내왕하면서 주사했고 그 높이는 터널전류를 일정하게 유지하기 위해 끊임없이 조절할 수 있었다. 주사할 때마다 팁의 움직임은 기록되어 한줄씩 그림을 형성하는 데 사용되었다. 비니히박사는 매우 날카로운 팁을 가지면 진동없는 최상의 조건에서 가로 5나노미터의 물체를 탐지할 수 있다고 생각했다. 이것은 매우 인상적인 성과이기는 하지만 표면의 전형적인 원자간 거리보다는 아직도 10배나 큰 것이었다.

원자의 얼굴

이들은 현미경을 조율하는 데 밤낮없는 노력을 계속했으나 이렇다할 성과를 거두지 못했다. 팁이 샘플표면에 닿지 않으면서 충분히 표면에 근접할 수 있게 메커니즘을 조절한다는 것은 매우 어려운 일이었다. 그러던 어느날 뚜렷한 이윽없이 이들은 금조각 표면에서 계단모

양의 깨끗한 영상을 보기 시작했다. 이것은 원자의 층이 표면으로부터 부분적으로 벗겨졌을 때 만들어진 것이다. 과학자들은 계단만 아니라 표면에서 블록 솟은 부분들까지 탐지할 수 있었다. 이 솟은 부분들 사이의 거리는 금의 원자들이 갈라진 틈의 간격과 같았다. 결국 IBM 과학자들은 원자를 보고 있다는 사실을 알게 되었다.

이들 현미경이 기대보다 훨씬 훌륭하게 작동한 이유는 뒷날에야 밝혀졌다. 현미경의 민감도는 팁의 크기와 모

았기 때문이다. 오늘날도 STM팁을 만드는 일은 과학보다 예술에 더 가깝다.

그러나 IBM그룹이 실리콘결정에서 분명한 원자패턴을 관찰함으로써 STM의 돌파구는 마련되었다. 반도체 업계에서는 실리콘이 차지하는 비중이 매우 중요하기 때문에 결정 여러 면의 원자구조에 관해 많은 연구를 해왔다. 한면은 매우 복잡한 구조를 가졌는데 거의 20년간이나 논쟁의 대상이 되었다. IBM 과학자들은 여러 이론중에서 오직 한 이론과 적합한 영상을 만들어

법을 가르치던 비니히박사는 1985년 이 문제해결에 마음을 돌리기로 했다. 그는 방바닥에 누워서 천장을 쳐다보면서 STM이 만든 그림은 어떻게 보일까 생각하고 있었다. 그러나 천장은 절연 물질로 되어있었다. 그는 다른 물리적 효과를 이용하되 STM과 같은 정교한 공법을 가진 새로운 장치를 이런 표면에 대해 사용할 수 없을까 하는 생각에 이르렀다. 비니히박사는 이 순간 원자간의 거리로 좌우되는 원자간의 화학의 힘이 이런 일을 할 수 있을 것 같다는 생각이 번쩍 떠올랐다. 이런 힘은 팁을 이루는 수십억개의 원자의 무게에 비하면 너무나 작아 측정하기 어렵다는 점도 있었다. 그러나 비니히박사는 스텐포드대학의 거버박사와 그의 아이디어를 논의한 결과 이런 일을 할 팁을 만들 수 있다는 계산을 하게 되었다.

얇은 금속조각은 깜짝 놀랄 정도로 유연성이 있고 원자간의 힘은 이 조각을 휘게 할 수 있을 정도의 힘을 충분히 갖고 있다는 사실을 안 거버박사는 공작실로 달려가서 마침내 최초의 원자간력현미경(AFM)을 제작했던 것이다.

1986년 비니히박사와 로러박사는 이런 업적으로 노벨상을 수상했다. 오늘날 주사형 현미경은 더욱 발전하여 자력과 심지어는 온도차와 같은 다른 현상을 이용하여 영상을 만들 수 있게 되었다. 한편 STM의 상업화로 새로운 산업이 태동하여 그중에서 캘리포니아주 소재의 모험기업인 디지털 인스트루먼트사는 수백만달러 규모의 큰 기업으로 성장했다.

어떻게 개발됐나

양으로 제한을 받게 된다. 비니히박사는 팁의 끝은 둥그렇다고 가상했는데 측정된 결과 가장 예리한 끝도 지름이 약 1백나노미터나 되었다. 그러나 그는 팁의 끝이 미세한 피라미드를 형성할 가능성이 있다는 것은 생각하지 못했다. 이렇게 될 때 한개의 원자가 다른 모든 원자들보다 더 튀어나오게 된다. 터널을 흐르는 전류는 팁과 샘플간의 간격에 따라 민감하게 좌우되기 때문에 결국 거의 모든 전류는 팁의 끝에 있는 이 원자를 통해 흐른다. 그래서 현미경의 해상도는 팁의 지름의 1천분의 1밖에 안되는 단 한개의 원자의 지름으로 제한을 받는다.

이들은 놀라운 성공을 거두기는 했으나 그 결과를 과학계에 납득시키는 어려운 작업이 아직도 남아 있었다. 과학계가 이 결과를 회의적으로 본 이유 중의 하나는 최고의 해상도를 얻기 위해서는 원자수준의 예리한 팁을 만들어야 하는데 신뢰할만한 제작방법이 없

념으로써 이 논쟁에 중지부를 찍었다.

다양한 기능

당초부터 과학자들은 STM 그림이 단순한 기폭을 가진 표면지도가 아니라는 사실은 알고 있었다. 이 현미경은 표면물질의 원자의 전자특성은 물론 이 원자와 팁간의 거리 그리고 전류를 측정한다. 따라서 전류를 영상으로 옮기는 일은 예상보다 훨씬 어려운 일이라는 하지만 훈련된 눈으로 볼 때 이런 영상은 보이는 것 이상의 것을 드러낸다. 예컨대 고속 트랜지스터에 사용되는 반도체인 갈륨비소 결정표면의 갈륨원자와 비소원자는 쉽게 분별할 수 있다 갈륨원자는 여분의 전자를 요구하는데 반해 비소는 전자를 방출한다. 그래서 전류는 갈륨원자쪽으로 선택적으로 흘러 영상에서 밝게 보인다.

그러나 전기절연체 표면은 전류가 통과할 수 없어 STM에는 보이지 않는다. 미국 캘리포니아에서 STM의 제작