

주사형 마이크로프로브 현미경과 나노테크놀로지

기술해설

Nanotechnology and Scanning Microprobe Microscopy

장상목*, H. Muramatsu**, 권영수***

(Sang-Mok Jang, H. Muramatsu, Young-Soo Kwon)

Key Words(중요용어) : Scanning Probe Microscopy(주사형 프로우브현미경), Scanning Tunneling Microscopy(주사형 터널현미경), Atomic Force Microscopy(원자력간 현미경), Nanotechnology(나노테크놀로지)

1. 머리말

종래의 대표적 현미경 관찰기술로는 광학현미경과 전자현미경이 있다. 광학현미경은 파장의 회절 한계때문에 해상도가 광파장의 1/2 정도로 제한되고 있으며, 전자현미경은 나노미터정도의 분해능을 얻을 수 있지만, 세포등의 생물시료를 수중에서 보지하면서 관찰하는 것은 극히 곤란하다. 최근 주사형 프로우브현미경(Scanning Probe Microscopy: SPM)이라고 불리는 주사형 터널현미경(Scanning Tunnelling Microscopy: STM)과 원자간력 현미경(Atomic Force Microscopy : AFM)이 개발되어 급속히 보급되고 있다.^{1,2)}

이 STM과 AFM의 기본원리는 첨단외의 뾰족한 탐침을 시료표면에서 부터 일정한 거리를 유지하면서 주사하여 그 궤적으로 부터 표면형상에 대한 정보를 얻는 것이다. 이때 거리제어에는 시료와 탐침간에 작용하는 터널전류와 반데르발스힘을 이용하고 있다. 이 STM과 AFM을 이용함으로써 원자레벨의 분해능을 공기중이나 수중에서 얻을 수 있게 되었다.

SPM은 더욱 발전하여 AFM의 원리를 응용함으로써 시료표면의 마찰, 자기력, 표면전위 등의 정보도 얻을 수 있게 되었다.

이와 같이 표면형상뿐만 아니라, 기능적인 정보를 해상화할 수 있다는 점에서 이들 SPM을 제2세대 SPM이라고 할 수 있다. 특히 새로운 SPM기술로써 주사형 근시야 현미경(Scanning Near-field Optical Microscopy : SNOM)이 고안되어, 광파장의 회절 한계를 초월한 광학상이 얻어질 수 있다는 사실이 보고되었다.³⁾

즉 탐침 첨단에 광파장보다도 더욱 작은 미소한 개구(aperture)를 형성하여, 개구부를 파장보다 더욱 짧은 거리까지 시료표면에 근접시키면 시료표면에서 산란되어 얻어지는 빛은, 개구부가 파장보다 짧게 근접한 시료표면의 굴절률을 강하게 반영

하게 된다.

이 탐침을 2차원적으로 주사함으로써 파장보다 고분해능의 광학상이 얻어지게 된다. 주사형 근시야 현미경은 종래의 광학현미경의 분해능이 광파장의 1/2 정도 밖에 얻을 수 없었는데 비해 광파장의 1/20 정도의 분해능이 얻어질 것으로 기대되어져 미소영역의 광학특성의 평가나 고분해능의 광학상을 얻는데 있어서 가장 적절하다고 생각된다.

이들 주사형 프로브 현미경이 개발되고난 후 관찰에 대한 새로운 표현이 필요하게 되었다. 이는 SPM이 만들어 내는 표면세계가 지금까지 알고 있는 것으로서는 불가능한 표면정보를 제공하고 있기 때문이다. 이들 주사형프로브 현미경은 금속이나 반도체의 표면관측 이외에 유기분자의 흡착상태⁴⁾, LB막⁵⁾, 액정⁶⁾, 및 DNA^{7,8)}, 단백질^{9,10)}, 세포막^{11,12)}, 지질이중막^{13,14)}, 항체^{15,16)} 등 생체관련물질에 걸친 광범위한 응용이 보고 되고 있다.

주사형 프로브 현미경에는 탐침과 시료간의 거리를 유지하는 방법과 측정원리에 따라 몇가지 형태가 제안되고 있으나, 본 총설에서는 필자들이 일본 Seiko 전자와 공동연구하는 동안, Seiko 전자에서 개발한 주사형 근시야 원자간력 현미경(Scanning Near-field Optical Atomic Force Microscopy : SNOAM)을 중심으로 하여 SPM전반에 대하여 간략히 소개하며, 다가오는 21세기 중심기술인 분자·원자의 Nanotechnology로서 응용가능성에 대해서도 기술하고자 한다.

2. 각종 주사형프로브 현미경의 원리

미소전압이 가해지고 있는 상당히 근접한 금속간에 비접촉 전류가 흐르는 현상을 터널효과(tunnelling effect)라고 한다. 이 현상을 이용하여 금속탐침을 도전성 시료표면에서 10 Å이내의 간격으로 접근시켜 터널전류를 측정하는 현미경을

주사형터널 현미경(STM)이라고 한다.

즉 첨단부분이 굉장히 뾰족한 침봉을 시료표면에 접근해 가면서 주사하면, 그 때 터널효과에 의해 시료표면의 요철에 따른 전류변화가 일어나게 된다. 여기서 탐침을 주사하면서 이 터널전류를 검출하면, 3차원의 표면상도 얻을 수 있다.

이 탐침을 압전소자에 의해 시료표면과 접촉하지 않도록 제어하면 원자레벨의 표면형상의 측정이 가능하다. 특히 높이 방향의 분해력이 굉장히 높으며 비접촉, 비파괴로 측정하기 때문에 보통의 전자현미경과는 달리 대기중에서의 측정뿐 아니라 용액중에서의 측정도 가능하다는 특징을 갖는다.

STM에서는 도전성 시료의 표면관측만 가능하다는 한계점을 가지고 있었으나, 새로운 수법의 AFM은 원자 상호간의 작용하는 원자간력을 이용하여 측정하기 때문에 STM과 달리 절연물의 표면 형상도 관측할 수 있게 되었다.

STM과 AFM이 개발된 이래, 주사형 프로브 현미경 (SPM)이라고 하는 전혀 새로운 체계의 현미경이 급속히 보급되고 있다. 이는 종래의 전자파나 전자선 등을 이용하여 관찰하는 것에 비하여 SPM에서는 원자사이에 존재하는 척력과 인력, 자기력 등, 시료와 탐침간에 작용하는 여러가지 물리적인 상호작용을 이용하여 관측한다고 하는 획기적인 방법을 확립했기 때문이다.(Fig. 1)

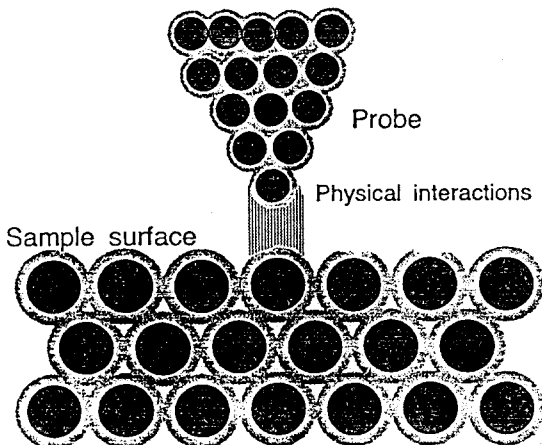


그림 1. 탐침과 시료표면 사이의 물리적 상호작용의 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of physical interactions between probe and sample surface. (Physical Interactions ; Tunneling current, Atomic force, Friction force, Electromagnetic force)

이와 같이 탐침이나 캔틸레버와 시료표면간에 작용하는 여러가지 물리적 상호작용을 검출하여 표면 정보를 얻는 주사형 프로브현미경의 기본원리는 Fig. 2와 같으며 각각의 특성을 간략히 소개하면 다음과 같다. Fig.3에 SPM의 측정개념을 나타내었다.

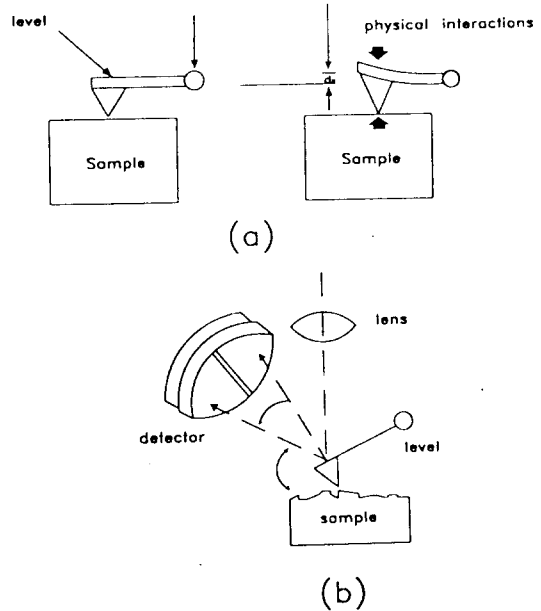


그림 2. 주사형 현미경의 측정원리 (a) 일반적 방식 (b) 광학적 방식

Fig. 2. Principle of SPM detector (a) general mode (b) with optical mode.

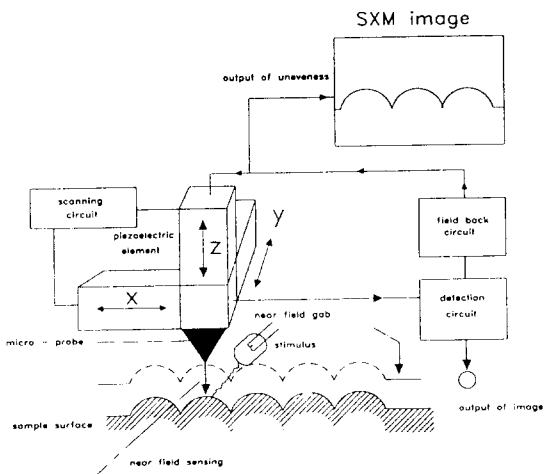


그림 3. 주사형 현미경의 개념도

Fig. 3. Schematic diagram of SPM.

- 원자간력현미경 (Atomic Force Microscope)
 시료 표면과 캔틸레버(Cantilever) 사이에 가해지는 원자간력(척력)을 레이저변위 검출기로 캔틸레버의 상하방향의 휘는 정도를 측정하여 표면형상을 측정하는 방법으로, 시료표면의 도전성과 무관하여 광범위하게 응용범위를 넓힐 수 있다.
- 마찰력현미경 (Friction Force Microscope)
 시료표면과 캔틸레버사이 에 가해지는 마찰력 변화를 캔틸레버의 횡방향으로 휘는 정도를 검출함으로써 측정하는 전혀 새로운 방법으로 단순한 표면형상측정으로는 알 수 없는 재질의 변화와 표면상태를 관찰하는 수단으로써 기대되고 있다.
- 자기력현미경 (Magnetic Force Microscope)
 자기화된 침봉과 캔틸레버를 공진시키는 AC검출법에 의해서 자기력을 검출하여 고분해능으로 미소부의 자력분포를 알 수 있다.
- 비접촉원자간력현미경 (Noncontact-AFM)
 캔틸레버를 공진시키는 AC검출법에 의해 원자간력(인력)을 검출하여, 표면형상을 측정하는 방법으로, 생체시료와 수지 등의 부드러운 시료표면의

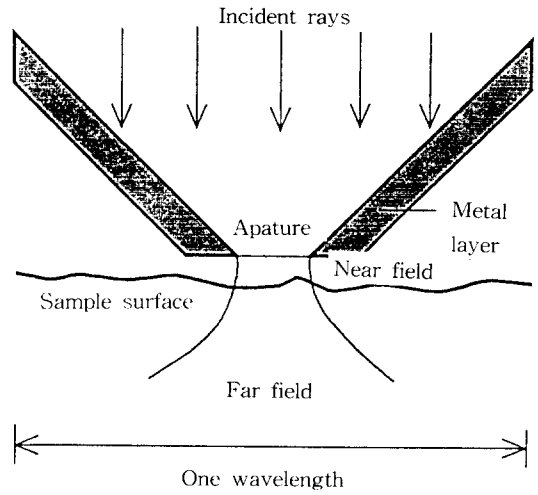


그림 4. 주사형 근시야 현미경의 미소 탐침의 개념도

Fig. 4. Schematic diagram of microprobe of SNOAM.

극미소 집속도 허용하지 않는 측정에 기대되고 있다.

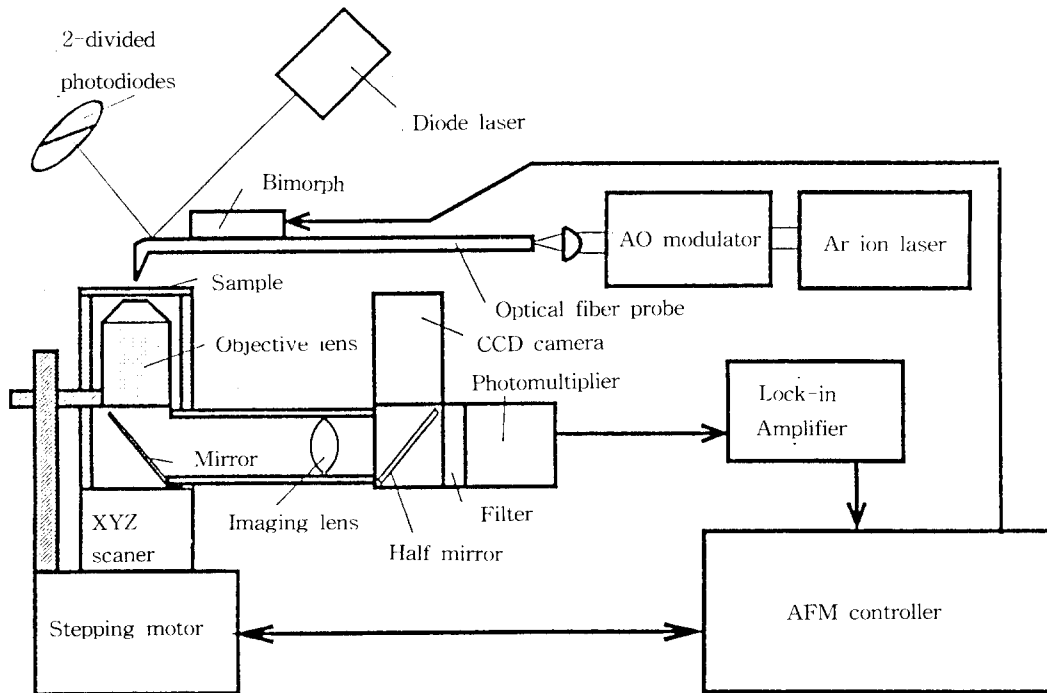


그림 5. 원자간력 방식 주사형 근시야 현미경의 개념도
 Fig. 5. Schematic diagram of the SNOM-AFM system.

· 주사형터널현미경 (Scanning Tunneling Microscope)

시료표면과 상당히 근접한 탐침간에 전압을 인가시켜 그 사이에 흐르는 터널전류를 제어, 검출하여 표면형상을 측정하는 것으로, 대기중에서 원자상관찰이나 미소 표면형상 측정을 일반화한 SPM의 최초 형태이다.

· 전기화학-원자간력현미경(Electrochemical-AFM)

용액중 셀과 포텐시오스탯트를 사용하여 액중에서 전기화학반응을 일으켜가면서 전극표면의 구조변화를 AFM으로 관찰하는 방법으로, 전해공업, 부식 방지공업, 도금공업, 그리고 반도체공업에의 응용이 기대된다.

3. 용액중 관찰 가능한 주사형 근시야 현미경 (Scanning Near-field AFM optical Microscopy)

3-1. SNOAM의 기본특성

기본적인 SNOAM의 탐침의 측정원리와 장치구성을 각각 Fig.4 와 5에 나타내었다. SNOAM에서는 광파이버 탐침을 깎아굽힘으로써 AFM 탐침으로서도 사용가능하게 한 것이다.

Fig.5에서와 같이 캔틸레버형(cantilever)으로 가공한 광파이버 탐침을 bimorph위에 세트하여 시료면에 대하여 종방향으로 진동시킴으로써 다이내믹 모드 AFM의 원리에 의해, 시료와 탐침간의 거리를 제어할 수 있도록 되어 있다 여기에는 원리적으로 non-contact AFM과 cycling contact AFM의 2개의 모드가 있다.

Fig.5의 구성을 보면 광 파이버 탐침의 침단에 서 시료표면에 빛을 비추어 시료기판을 투과한 광 강도를 검출하도록 되어 있다. 시료를 압전스캐너 (piezoelectric scanner)에 의해 XYZ방향으로 이동 함으로써, AFM상과 광학상의 동시관찰이 가능하다. Fig.5에서 기본적인 AFM 제어부분은 시판되고 있는 AFM장치 (SPI 3700)를 사용하여 AFM의 기능을 그대로 이용하고 있다. 얻어진 영상정보는 SPI 3700의 화상처리기능에 의한 2차원 FFT나 각종 필터에 의한 처리가 가능하고 3차원적 표시도 가능하다. 미소개구를 가지는 광 파이버 탐침을 이용함으로써 투과측정 모드 이외에 Fig.6과 같이 PSTM(Photon STM)모드, 반사측정 모드에 의한 시료관찰도 가능하다.¹⁷⁾ PSTM 모드의 경우는 시료를 세트한 프리즘의 표면에, 빛이 시료면에서 전

반사하는 각도로 비출으로써 표면의 evanescent 광강도의 변화를 조사할 수 있다.

반사측정 모드는 주로 빛을 투과하지 않는 시료에 적용되는 것으로 시료위의 표면으로 부터 산란광을 대물렌즈로 집광하는 것이다.

3-2 광 파이버 탐침

광 파이버 탐침은 탄산가스 레이저로 인장시킨 다음 예칭하여 침단을 더욱 뾰족하게 하였다. 깎아어 굽은 침단의 형상은 CO₂ 레이저로 가열함으로써 형성되고 광레버용의 거울면은 기계연마로 형성된다.(Fig.7)

탐침은 진공증착으로 알루미늄을 코팅하고 침단 부분에는 50 100nm정도의 개구를 형성한다.

3-3. 형상도

(1) 기본특성

125 μ m직경의 광파이버 탐침을 2-4mm의 길이로 세트했을 때, 캔틸레버로서의 바렐정수(spring constant)의 계산치는 2-20 N/m 정도이고 실측한 공진주파수와 Q값은 각각 15-40kHz 및 100-800 정도였다. 탐침의 종방향의 진폭은 bimorph에 인가한 전압에 의존하지만 20-200nm의 범위로 제어가 가능하다.

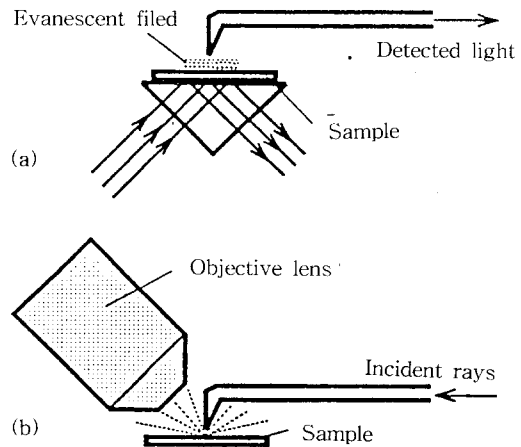


그림 6. 원자간력 주사형 근시야 현미경의 대표적인 광학적 측정방식의 개념도

Fig. 6. Schematics of typical optic mode for SNOAM. (a) PSTM mode (b)reflection mode

투과 모드로 석영기판 위에 형성된 크롬 박막의 표준시료를 5 \times 5 μ m²의 범위에 관찰한 결과를

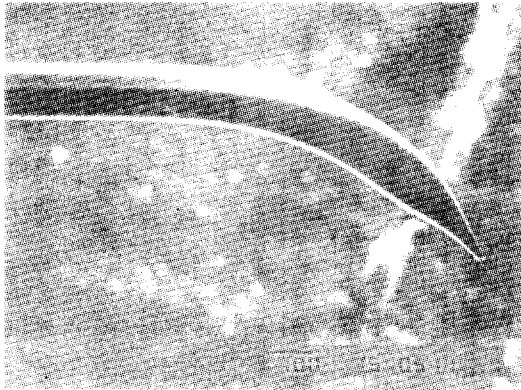


그림 7. 광 파이버 탐침의 사진
 Fig. 7. A representative scanning electron microscope image of the probe mode from an optical fiber coated with aluminum.

Fig. 8에 나타내었다. Fig.8(a)의 AFM상은 3차원적으로 표시한 것으로 그림에서 높게 나타나 있는 박막 부분과 Fig. 8(b)의 광학상 중의 어둡게 나타나 있는 부분이 잘 대응되는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 결과로 부터 AFM상의 해상도는 약 10nm 이하이며 광학상의 해상도는 약 100nm이하임을 알 수 있다.

(2) 용액중 관찰

AFM제어 근시야 현미경의 특징은 용액중의 측정에도 적용할 수 있다는 점이다. 광 파이버 탐침의 단면이 원통형이기 때문에 용액중에서 진동시킬 경우 액체의 점성저항이 일반적인 AFM에서 사용되고 있는 평판형의 마이크로 캔틸레버에 비해서 훨씬 작다는 특별한 장점이 있다.

액중에서 측정한 경우는 액중 측정용 셀을 사용한다. 액중 측정용 셀은 Fig. 9에 나타난 것처럼 시료를 액중에 침적하기 위해 시료대 부분에 모세관 현상 등에 의해 용액이 고이도록 하였고 탐침 전체가 액중에 침적되도록 탐침 상면에 창을 설치하여 액의 표면장력에 의해 액이 보지되도록 구성하였다.

탐침의 공진 특성은 액중에 침적함에 따라 변화하여 공진주파수는 20%정도 저하하고, Q값은 1/7 정도로 저하한다.¹⁸⁾

Fig. 10은 수중에서 측정된 rat의 fibroblast의 AFM상과 광학상을 나타낸 것이다. Fig. 10 (a), (b)는 $100 \times 100 \mu m^2$ 의 영역을 스캔한 것이고

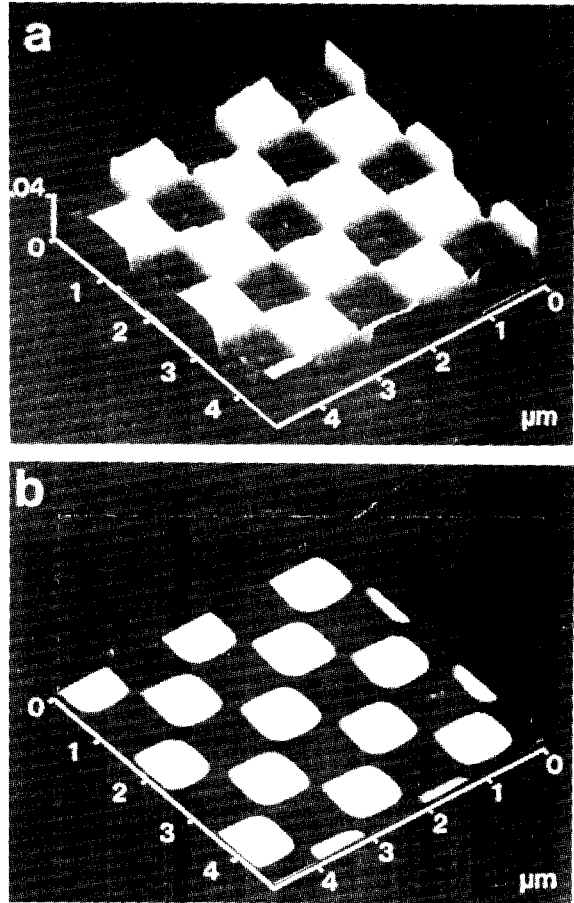


그림 8. 크롬 박막의 표준패턴의 원자간력 현미경의 상 (a)과 광학상 (b)

Fig. 8. Topographic(noncontact mode AFM) (a) and optical transmission (near-field transmission mode) (b) images of a $1 \mu m$ checkered pattern of chromium coating over a quartz plate immersed in water obtained simultaneously.

Fig. 10 (c), (d)는 $50 \times 50 \mu m^2$ 의 영역을 스캔한 것이다. 즉, AFM상에는 액 중에서의 세포의 입체적 형상이 잘 반영되고 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 광학상에서도 섬유상이 보여지고 있지만 이는 세포내의 스트레스 섬유질(stress fiber)이다. 이 스트레스 섬유질은 보통의 광학 현미경의 투과성 관찰으로는 대비를 얻을 수 없기 때문에 일반적으로 형광 염색을 해서 형광 현미경으로 관찰하고 있지만, SNOAM에서는 깨끗한 대비가 얻어진다는 사실이 확인된다.

Fig. 11에 수중에서 측정된 mouse keratinocyte

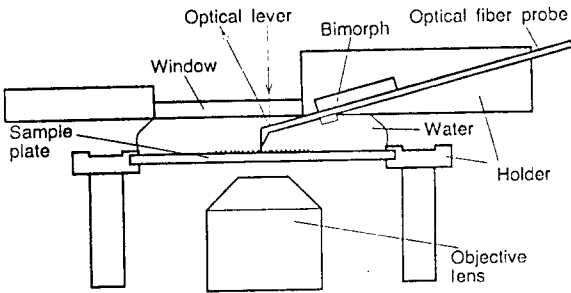


그림 9. 액중 측정용 셀의 개념도

Fig. 9. Schematic diagram of the liquid cell.

의 AFM상과 광학상을 나타내었으며, 각각 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 의 영역과 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 의 영역을 스캔한 것이다. 이 mouse keratinocyte에서도 AFM상에서는

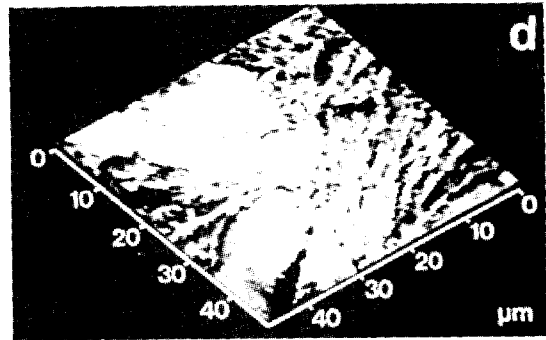
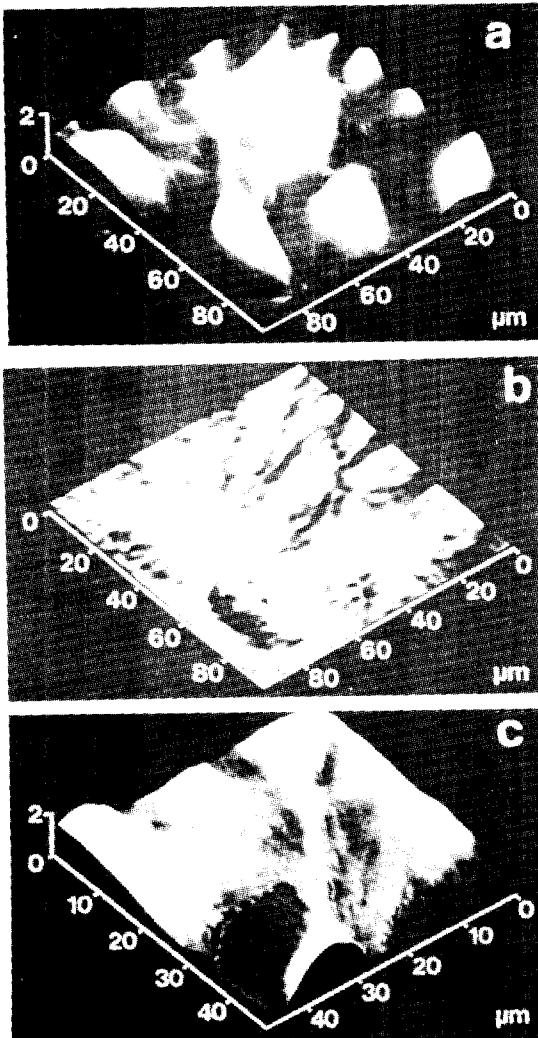


그림 10. 용액중에서의 fibroblast의 AFM상과 광학상

Fig. 10. Topographic (a), (c) and near-field (b), (d) images of fibroblast in an aqueous solution. The areas imaged are $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ (a) and (b) and $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ (c) and (d).

액 중에서의 입체적인 형상이 깨끗하게 포착되고 있지만, 광학상에는 형상을 반영한 외곽 상과 세포막 내측에 있는 필라멘트(filament)로 생각되는 가는 구조만 관찰할 수 있다.

(3) 형광 측정

형광측정을 행할 경우에는 Fig 5에 나타난 장치 중 half mirror 부분을 dichroic mirror로 교환하고, 여기광을 검출기의 앞에서 카트할 필요가 있다. 또 형광은 미약한 광이 되기 때문에 검출기는 포토 카운터가 가능한 것을 사용할 필요가 있다. 여기서는 변이 포토 다이오드 (EG&G NEOPT제)를 사용하였다.

Fig 12는 488nm에서 여기하여, 500-550nm의 범위의 빛을 측정하였을 때의 AFM상과 형광상이다. Fig 12의 AFM상 중의 작은 비드가 형광 비드이고, 큰비드가 비형광 비드이다.

형광상에는 작은 비드에만 대응하는 상이 얻어지지만, AFM상과 형광상을 대비함으로써 지금까지의 형광현미경에는 없는 형상과 물성을 분리한 관측이 가능하게 되리라고 생각된다.

(4) 반사 측정

시료와 시료기판에 광투과성이 없는 경우에도 시료 위 방향에 집광광학계를 배치함으로써 광학상을 관찰할 수 있다.

이 반사광측정으로 IC표면을 관찰한 결과를 Fig 13에 나타내었다. IC 표면의 AFM상에 비하여 광

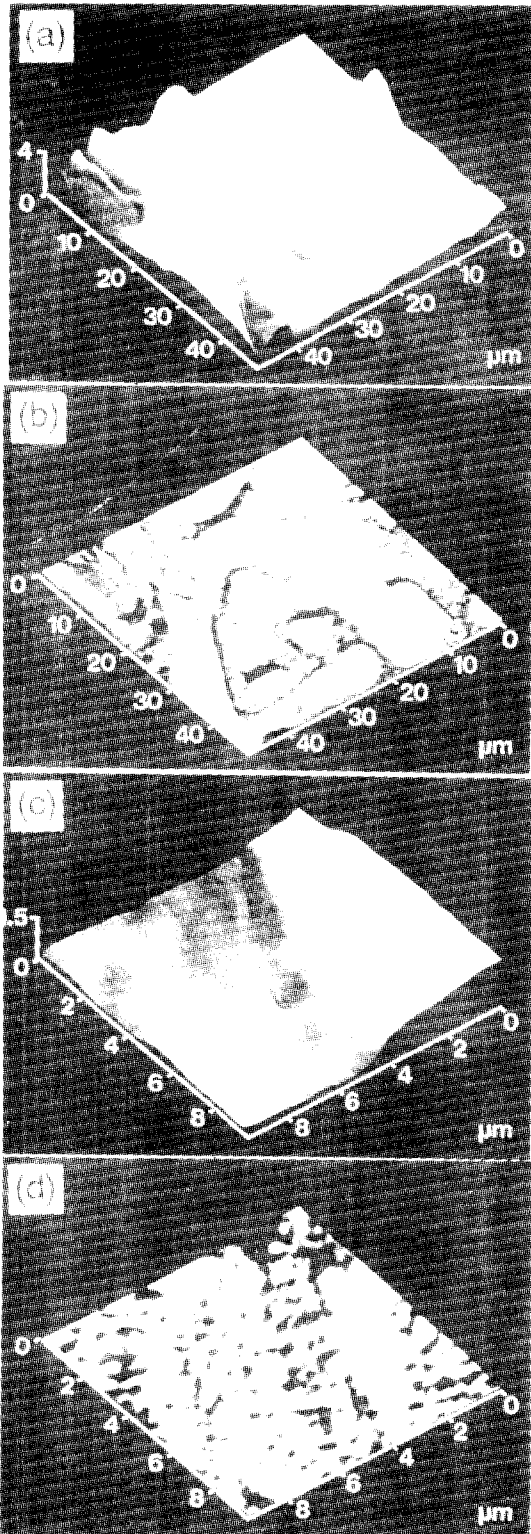


그림 11. 용액중에서의 mouse keratinocytes의 AFM상과 광학상

Fig. 11. Topographic (a), (c) and near-field (b), (d) images of cultured mouse keratinocytes in an aqueous solution. The cells were fixed by crosslinking with 2% paraformaldehyde. The areas imaged are $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$ (a) and (b) and $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ (c) and (d).

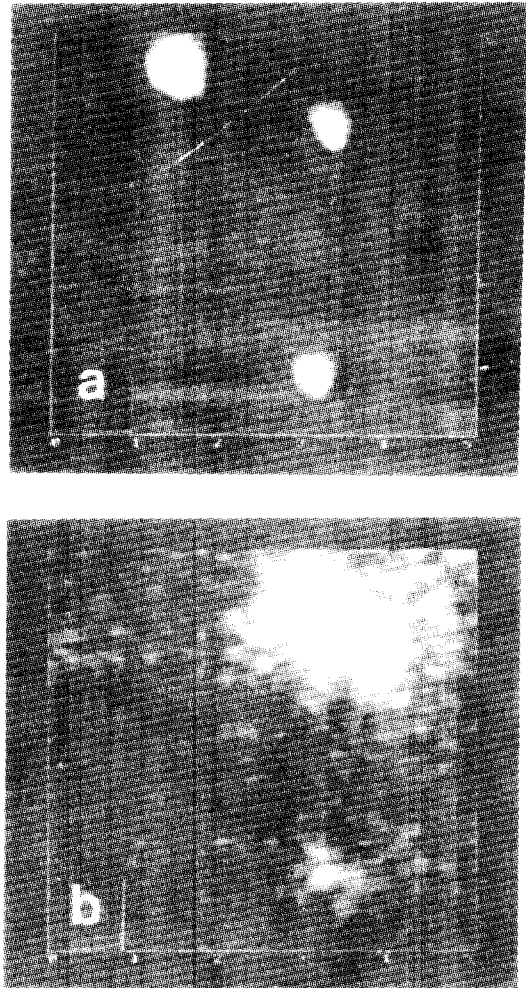


그림 12. 형광 비드와 비형광 비드의 AFM상 (a) 과 형광상 (b)

Fig. 12. Topographic image of AFM (a) and fluorescent image (b) of a fluorescent bead and non-fluorescent bead

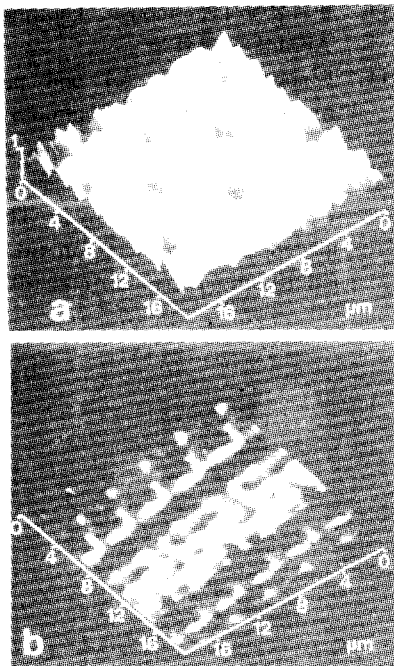


그림 13. IC표면의 AFM상 (a)과 반사광학상 (b)
 Fig. 13. Topographic image of AFM (a) and reflect optical image (b) of the surface of IC

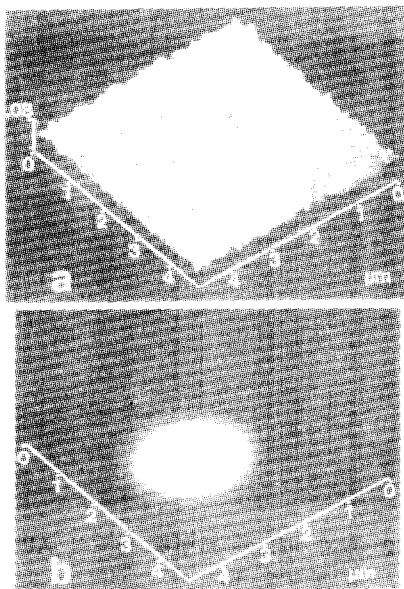


그림 14. 광 파이버 단면의 AFM상 (a)과 광학상 (b)
 Fig. 14. Topographic image of AFM (a) and optical image (b) of the optical fiber end

학상에는 표면의 보호막 아래의 재질의 차이에 의해 반사율의 차이가 반영되어진 상이 얻어짐을 알 수 있다.

(5) 광학소자의 관찰

SNOAM장치의 시료로 수광소자와 발광소자등의 광학소자를 세트함으로 광학소자의 평가에도 이용할 수 있다.

예를 들면 Fig 14는 직경 3.2 μ m의 연마한 광 파이버단면을 관찰한 것이다. 보통 광 파이버의 단면은, 단면의 간섭을 관찰한다든지 출사광의 far-field패턴을 조사한다든지하여 평가하였다. SNOAM에 의한 관찰에는 AFM상으로부터 연마의 상태가 알 수 있고, 광학상에서 파이버단면에서의 빛의 전파특성의 평가도 가능하며, 파이버 상호간의 결합효율 등의 평가에도 이용할 수 있다고 생각된다.

(6) 가공·기록에의 응용

SNOAM의 비소개구에서의 빛을 미세 가공기술과 고밀도 기록기술에 이용하는 것도 가능하다. Fig 15는 네거티브 포토리지스터막을 탐침에서의 빛으로 노출시켜 현상한 결과를 나타낸 것이다. 이때의 노광시간은 0.1sec이며, 탐침으로부터 출사한 빛의 강도는 100 nW정도이다. Fig 15에 나타낸 것과 같이 200nm정도의 패턴을 용이하게 묘사할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 특히, 이러한 방법을 응용한 가공기술에 관하여 현재 활발하게 연구되고 있다.

4. 결 론

이상, 최첨단 주사형 마이크로프로브현미경의 최근 동향에 대해 기술하였다. SNOAM의 관찰분야에의 응용이라는 관점에서 광학소자, 반도체재료, 유기박막 등의 미소영역에의 광학특성의 관찰 이외에 생물분야에서는 형광표식한 시료의 형상상과 형광상의 대비에서 세포나 생체고분자의 기능해명에도 이용 가능하다고 생각된다. 또한 광가공 기술에의 응용이나 기억소자 기술에의 응용도 고려되어져 급후의 응용분야에의 발전이 기대된다.

다가오는 21세기 정보화사회에서는 분자·원자를 제어하는 기술이 중심기술이 될 것으로 확신되고 있다. 그러나 현재 우리 주변 기술로서 분자·원자를 단위로 하는 평가, 분석 기술은 거의 찾을 수 없다. 따라서 앞에서 논의한 주사형 마이크로 프로브 현미경은 Nano-technology로서 장래 정보화사

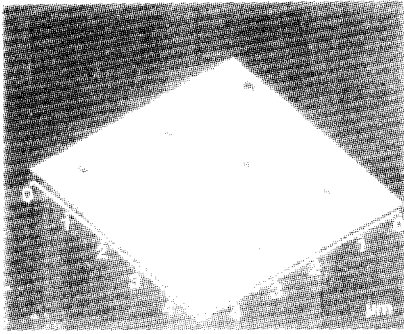


그림 15. SNOAM 빛에 노출된 네거티브 포토레지스터막의 AFM상

Fig. 15. Topographic image of AFM negative photo-resister membrane exposed to SNOAM light.

회에 중요한 평가·분석 기술의 하나로서 정착될 것으로 생각된다.

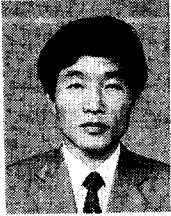
*본 해설의 자료 수집은 동아 대학교 연구비 지원에 의해 수행되었음.

5. 참고문헌

1. G.Binning, H.Rohrer, C.Gerber and E. Weibel, *Phys.Rev.Lett.*, 49,(1982)57.
2. G.Binning, C.F.Quate, C.Gerber, *Phys. Rev. Lett.*, 56,(1986)930.
3. U.T. Dürig, D.W. Pohl, and F.Rohner, *J. Appl.Phys.*, 59,(1988)3318.
4. H. Ohtani, R.J. Wilson, S. Chiang, C.M. Mactec, *Phys.Rev.Lett.*, 60, (1988)2398.
5. D.P.E. Smith, A. Bryant, C.F. Quate, J.P. Rabe, Ch. Gerber, J.D. Swalen, *Proc. Natl.Acad.Sci. USA.* 84,(1987) 969.
6. J.S. Foster, J.E. Frommer, *Nature*, 333, (1988)542.

7. W.M. Heckl, D.P.E. Smith, G. Binnig,H. Klagges, T.W. Hansch, J. Maddocks, *Proc. Natl.Acad.Sci. USA*, 88,(1991)8003.
8. M.J. Allen, M. Balooch, S. Subbiah, R.J. Tench, W. Siekhous, R. Balhorn, *Scanning Microsc.*, 5,(1991)625.
9. S.A.C. Gould, O. Marti, B. Drake, L. Hellemans, C.E. Bracker,P.K. Hansma,N.L. Keder, M.M. Eddy, G.D. Stucky, *Nature*, 332,(1988)332.
10. J. Mou, W. Sun, J. Yan, W.S. Yang, C. Liu, Z. Zhai, Q. Xu,Y. Xie, *J.Vac.Sci. Technol.*, B9,(1991)1556.
11. J.P. Ruppertsberg, J.K.H.Härber, G. Gerber, G. Binnig, *FEBS Lett.*, 257, (1989)460.
12. R. Guckenberger, B. Hacker, T. Hartmann, T. Schubani, Z. Wang, Z., W. Wieggrabe, W. Baumeisyer, *J.Vac.Sci. Technol.*, B9, (1991)1227.
13. J.A.N. Zasadzinski, J. Schneir, J. Gurley, V.B. Elings, P.K. Hansma, *Science*, 239, (1989) 1013.
14. S. Singh, D.J. Keller, *Biophys.J.*, 60,(1991) 1401.
15. J.N. Lin, B. Drake, A.S. Lea, P.K. Hansma, J.D. Andrade, *Langmuir*, 6,(1990)509.
16. C.H. Olk, J. Heremans, P.S. Lee, D. Dziedzic, N.E. Sargent, *J.Vac.Sci.Technol.*, B9,(1991) 1628.
17. H. Muramatsu,N. Chiba, T. Ataka, H. Monobe, H. Fujihara, H.,Proceeding of Second Conference on Near field Optics, Raleigh, NC, 20-22 October 1993/Ultramicroscopy, 57, (1995) 141.
18. H. Muramatsu,N. Chiba, H. Homma, K. Nakazima, S. Ohta, A. Kusumi, H. Fuzihara, *Appl.Phys.Lett.*, 66,(1995)3245.

저자소개



장상목

1959년 4월 16일생. 1982년 서울대학교 화학공학과 졸업. 1984년 한국과학기술원 화학공학과 석사. 1991년 동경공업대학 박사. 현재 동아대학교 화학공학과 교수.



권영수

1950년 1월 17일생. 1973년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1976년 경북대학교 전기공학(석사). 1988년 일본동경공업대학 전자물리(박사). 1983년~1988년 동경공업대학 공학부 연구원. 1990년, 1992년 동경공업대학 연구원. 1996년 현재 동아대학교 전기공학과 교수



Muramatsu Hiroshi

1976-1980년 동경대학교 농공대학 졸업(공학사). 1980-1982년 Tokyo Institute of Technology(공학석사). 1991년 동경대학교 RCAST(공학박사). 1982년-현재 Seiko 전자 기술본부 연구원.