

나노 사이즈 광프로브에 의한 에버네스트파의 측정

論文

53C-1-6

Measurements of Evanescent Wave using a Nano-size Optical Probe

崔 泳 圭*
(Young-Kyu Choi)

Abstract - We have carried out a basic experiment in order to develop a super high-resolution optical microscope which transcends the limitation of diffraction and the wavelength of lightwave. The image of this scope is composed by measuring the evanescent wave which is localized on the surface of the testing materials. A detecting probe was fabricated with a single mode optical fiber to be sharpened by the chemical etching, and driven by PZT. The standing wave of $0.33\mu\text{m}$ wavelength evanescent wave which was generated from the $0.78\mu\text{m}$ -wavelength semiconductor laser was detected by the $0.5\mu\text{m}$ -thickness optical fiber probe.

Key Words : PSTM, evanescent wave, photon microscope, near-field scanning

1. 서 론

최근 미세 가공기술의 발달로 서브 마이크로 또는 나노미터 영역에서도 인공적인 구조물의 제작이 가능하게 되었다. 이와 더불어 메조스코픽계(mesoscopic system)의 현상을 이용한 디바이스 등이 여러 종류 제안되어 실용화를 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 이처럼 나노 사이즈(nano-size)의 기술을 필요로 하는 여러 가지 연구영역에 있어서 우수한 공간 분해능을 가지는 미세관찰, 분광기술의 필요성은 날로 증대되고 있다. 재료과학의 분야에서 결정의 결함, 왜곡, 조성 분포와 광학특성과의 상관관계를 규명하거나, 나노 구조체 하나하나를 연구대상으로 하여 집단관찰에서는 나타나지 않는 개개의 본래의 기능을 밝히기 위해서도 공간분해 분광기술의 고도화가 절실히 필요하다. 한편, 생체물리학의 분야에서는 현재 형광분자를 표식으로 하여 생명활동의 현상을 분자레벨에서 확인할 수 있는 단계까지 이르고 있으므로 한 차원 더 높은 기술 개발을 위해서는 고도의 분해능이 요구된다. 이러한 미세영역의 연구에 있어서는 전자선, X선 등의 파장이 아주 짧은 단파장 광원이 프로브로서 유용한 것으로 생각되고 있다. 그러나 단파장 광원을 이용할 경우 원자의 구조나 생체 분자에 영향을 미치게 되어 자연 그대로의 상태 관측이 불가능 하게 된다. 따라서 에버네스트파(evanescent wave)를 측정하는 주사형 광현미경의 원리를 이용하면 가시광 영역의 광원으로도 광파장 이하의 고분해능으로 측정이 가능하게 되므로 일반적인 주사형 프로브로는 얻을 수 없는 정보를 가시화 할 수 있게 된다[1-3]. 또한, 가시광이 다른 광원에 비해서 시료에 미치는 영향이 작다는 사실을 활용하면 외계의 영향을 받기 쉬운 뿐 아니라, 미세한 구조 및 기능을 갖는 생체계를 활동하고 있는 상태로 관측, 조작하는 것도 기대할 수 있는 등[4], 이러한 형태의 측정기술의 활용 범위와 이용가치

는 매우 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 측정 시스템 개발의 예비 단계로서 파장 $0.78\mu\text{m}$ 의 반도체 레이저를 이용하여 시료 표면에 정재파를 발생시키고, 생성된 정재파 파장 이하의 크기(선단 폭 $0.3\mu\text{m}$ 이하)로 가공된 주사 광프로브를 이용하여 정재파의 측정을 시도하였다.

2. 원 리

광프로브에 의한 에버네스트파의 측정 원리는 주사형 터널 현미경(STM)[5-7]의 광학적인 원리와 동일하다. STM은 시료 표면과 프로브 사이에 흐르는 터널전류를 이용하여 시료 표면의 형상을 측정하지만, 주사형 광현미경은 시료 표면에 광을 전반사시켜 발생한 에버네스트파의 강도 변화를 측정함으로써 시료 표면의 형상에 대한 2차원 영상을 구성하거나 관측하고자 하는 위치에서의 분광 계측을 수행할 수 있다. STM의 터널전류처럼, 광프로브로 감지되는 에버네스트파도 그 강도는 시료 표면에서 프로브까지의 거리에 대하여 지수함수적으로 감소한다. 따라서, 어떠한 경우라도 측정된 전류, 에버네스트파의 강도를 일정하게 유지하기 위하여 프로브를 상하로 이동하면서 표면을 주사함으로써 시료 표면의 형상이

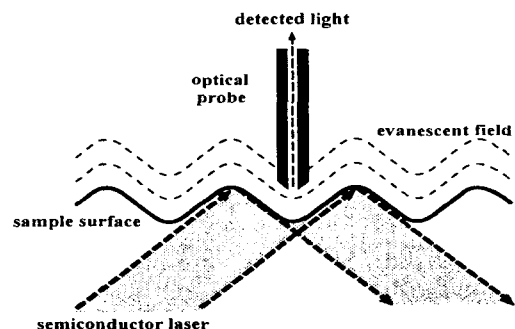


그림 1 주사형 광현미경의 원리도

Fig. 1 Schematic diagram of photon scanning tunneling microscope

* 正 會 員 : 新 羅 大 學 校 光 電 子 工 學 科 教 授

接 受 日 字 : 2002年 12月 16日

最 終 完 了 : 2003年 12月 4日

측정되는 것이다. 이러한 원리도를 그림 1에 보였다. 광학적 현미경의 분해능은 회절 한계에 의해 제한되어 광의 파장의 1/2이 한계이다. 관찰 대상의 주변에 특수한 기름을 칠하거나 고체 렌즈를 침투시켜서 개구수를 증대시키는 방법도 시험되고 있으나, 파장의 1/3 정도의 분해능이 가시광 영역에서의 한계치로 알려져 있다. 그러나 주사형 광프로브 시스템에서는 비교적 파장이 긴 가시광을 이용함에도 불구하고 그 파장 이하의 분해능으로 시료를 관측하는 것이 가능하다. 즉, 이러한 시스템에서는 에버네스트파를 광프로브로 검출하기 위하여 수평방향의 분해능은 프로브 선단을 광파장 이하로 가공함으로써 회절 한계를 넘는 광파장 이하의 분해능을 얻을 수가 있다. 한편, 수직방향의 분해능은 에버네스트파의 수직파수에 의해 결정된다.[8]

3. 장치의 구성

주사형 에버네스트파 측정 시스템의 개략도를 그림 2에 보였다. 에버네스트파를 발생시키기 위한 광원으로는 출력이 크고, 출력의 편광면이나 출력의 시간적 변동이 작으며 소형인 것이 적당하다. 본 실험에서 사용한 시스템에서는 광원으로 파장 780nm의 반도체 레이저 광을 이용하였다. 시료를 프리즘의 표면 위에 올려놓고 반도체 레이저 광을 프리즘에 전 반사각으로 입사시켜서 프리즘의 표면에 시료의 형상에 대응하는 에버네스트파를 발생시킨 후 시료의 형상을 주사한다. 실험에 이용한 시스템에서는 로크인 앰프에 의한 동기검파를 이용하여 에버네스트파의 측정 감도의 향상을 도모하였다. 이를 위하여 반도체 레이저는 500Hz(변경가능)의 펄스 전류를 이용하였다. 또한, 출력 펄스광을 모니터하여 구동계로 피드백시켜서 출력 펄스광의 진폭이 듀티비에 관계없이 일정하도록 조정하였다. 한편, 에버네스트파를 검출하는 광프로브는 그림 3처럼 싱글모드 광파이버를 선택적 화학 에칭법으로 제작하였다. 고농도 이산화제르마늄 도핑 광파이버의 끝을 불화 암모니아, HF산, 물로 된 완충 HF용액(BHF)에 담겨서 가공하였다. 평탄한 단면을 갖고 있는 파이버를 BHF용액에 담그면, 코어와 클래드의 용해 속도에 차이가 있기 때문에 코

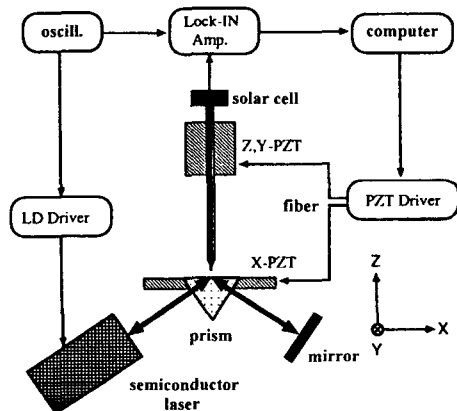


그림 2 주사형 광현미경 시스템의 실험도
 Fig. 2 Experimental setup of photon scanning tunneling microscope system

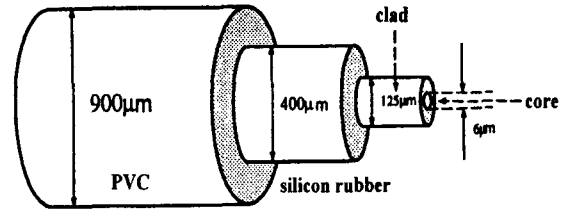
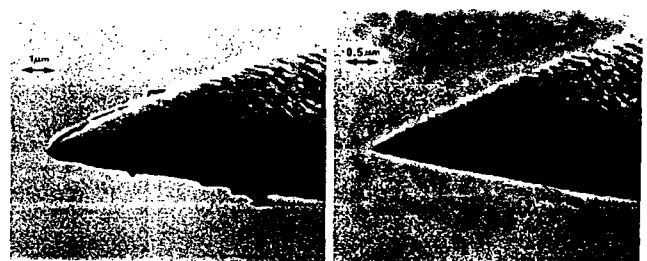


그림 3 프로브로 가공한 싱글모드 광파이버
 Fig. 3 Single mode optical fiber which was used as a probe

어와 클래드에 단차가 생기게 된다. 더욱 에칭이 진행되면 코어 영역이 원추형으로 테이퍼(taper)화 되고 이 이후의 코어 영역은 테이퍼 형상을 유지하게 된다. 비굴절률 차 2.5%, 코어 직경 2µm의 광파이버를 이용한 경우, 선단의 직경이 10 nm 이하의 테이퍼화 프로브가 100%에 가까운 재현성으로 제작이 가능하다는 보고[9]도 있으나, 본 연구에서 수행한 실제의 실험에서는 일정한 크기의 직경을 갖는 프로브 제작의 재현성은 매우 낮았다. 제작한 프로브 중 상태가 좋아서 실험에 사용한 광프로브의 전자현미경 사진을 그림 4에 보였다. 그림 4에서 보는 것처럼 프로브의 선단은 파장 레벨(0.78µm) 이하로 파장 레벨 이하의 분해능이 얻어지는 광프로브의 제작이 가능하였다. 또한, 고도의 제작법에 의해 수평 분해능이 높은 광프로브를 제작하는 것도 가능하나, 여기서는 원리실험의 단계이므로 가장 간단한 방법으로 프로브를 제작하였다. 광프로브로 검출한 에버네스트파는 태양전지를 이용하여 전기신호로 변환한 후, 반도체 레이저광을 변조한 신호를 이용하여 로크인 앰프로 동기검파를 실시하였다. 프로브에 감지된 에버네스트파의 강도는 GPIB 버스를 경유하여 컴퓨터로 처리하였다. 시료의 주사에 관해서는 종래의 STM 등과 같은 방법을 이용하였다. 단, 이번에 이용한 시스템에서는 상하(z) 방향 및 y 방향의 주사에 관해서는 광프로브를 PZT로 구동하고, x 방향에 관해서는 프리즘을 PZT로 구동하였다. 이상의 3축의 PZT에 의한 주사는 D/A 변환기를 이용하여 컴퓨터로 제어하였다.



(a) 굵기 1µm이하(프로브1) (b) 굵기 0.5µm이하(프로브2)

그림 4 광프로브의 전자현미경 사진
 Fig. 4 Microscope photograph of the fabricated probe

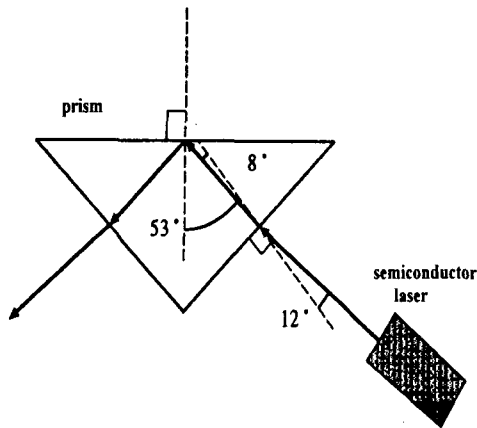


그림 5 레이저광의 프리즘 입사
Fig. 5 laser light insertion to the prism

4. 실험

4.1 에버네스트파의 검출

프리즘 위에 시료를 올려놓지 않은 상태에서 그림 5에 나타난 각도로 레이저광을 입사시킨 경우에 관측된 에버네스트파의 강도와 z축 PZT의 인가전압의 관계를 그림 6에 보였다. 이 경우 로크인 앰프에 의한 동기검파의 측정 시정수는 300msec 였다. z축 방향의 주사는 z축의 PZT에 0.1 V/sec의 변화율로 0V에서 35V까지 전압을 증가시킨 후, 그와 반대로 0V 까지 같은 비율로 전압을 감소시키며 측정을 실시하였다. z축 방향의 구동을 하는 PZT는 인가전압 100V로 약 5μm의 위치 변동을 나타냈다. 그림 6 중의 실선은 광프로브를 프리즘 표면에 접근시키는 과정(PZT의 인가전압 증가 과정)의 결과이고, 점선은 역으로 프리즘의 표면에서 광프로브를 멀리하는 과정 (PZT의 인가전압 감소과정)의 측정결과이다. 두 과정에서 에버네스트파의 강도가 급격하게 증가하기 시작하는 전압이 다른 것은 PZT에 히스테리시스 존재하기 때문이다. 또한, 두 곡선은 모두 태양전지의 측정전압이 1.3V로 되는 지점에서 곡선의 기울기가 작아지기 시작하였다. 이것은 이 근방에서 광프로브의 선단이 프리즘의 표면에 접촉한 결과이기 때문으로 생각된다. 따라서, 에버네스트파의 z축 방향의 관측 범위는 PZT에의 인가전압으로 환산하면 약 8V, 광프로브의 변위량으로서는 약 400nm 이다. 이 거리는 사용한 레이저광의 파장 780nm의 절반 정도로서 주사형 광프로브의 수직 분해능이 충분히 광파장의 이하로 되는 것을 잘 나타내고 있다. 그림 7은 같은 결과를 편대수 그래프에 플롯하여 나타낸 것이다. 이 그림에서는 앞에서 설명한 곡선의 기울기의 변화를 보다 더 명확하게 파악할 수 있다. 에버네스트파의 강도는 시료 표면에서의 거리에 대해서 지수함수적으로 감쇠하고 그 감쇠정수 a는 z축 방향의 파수 k_z에 비례한다. 즉 감쇠정수 a는

$$a=2|k_z|=2n_1 \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\sin^2\theta_1 - \sin^2\theta_c} \tag{1}$$

로 된다[10]. 단, n₁은 코어의 굴절률, λ는 레이저의 파장, θ₁은 입사각, θ_c는 임계각으로, θ_c=41.8°이다. 그림 7의 실험조건, n₁=1.5, λ=780nm, θ₁=53°를 식(1)에 적용하면, a=1.05×10⁷m⁻¹이 된다. 한편, 그림 7의 데이터에 최소자승법칙을 적용하여 얻은 곡선의 기울기는 PZT에의 인가전압 증가, 감소과정에 대한 결과를 평균하여 계산하면 a=0.9×10⁷m⁻¹이 된다. 단, PZT의 인가전압은 1V=50nm로 계산하였다. 이러한 이론적인 계산치와 측정치의 차이는 약 10% 정도로 현재의 예비 실험적 단계의 결과로서는 비교적 두 값이 잘 일치하는 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 결과로 광프로브로 검출하고 있는 광이 에버네스트파라는 것을 확인할 수가 있었다.

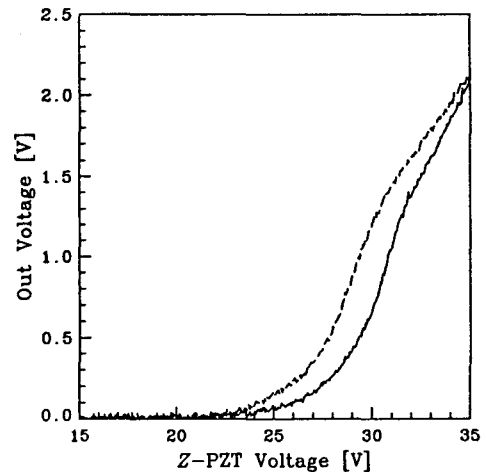


그림 6 z축의 PZT의 인가전압과 에버네스트파의 강도관계
Fig. 6 PZT voltage of z-axis vs evanescent wave power

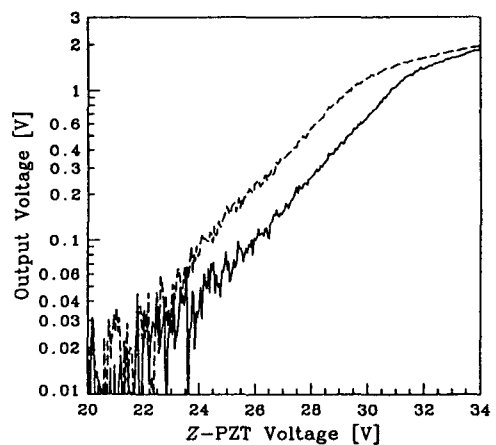


그림 7 z축의 PZT 인가전압과 에버네스트파의 강도관계 (편대수)
Fig. 7 PZT voltage of z-axis vs. evanescent wave power (logarithm scale)

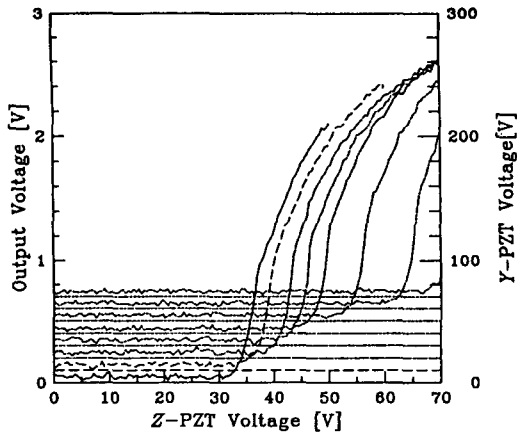


그림 8 y축 PZT의 인가전압과 에버네스트파의 강도 (인가전압증가과정)

Fig. 8 PZT voltage of y-axis vs evanescent wave power (for increasing voltage)

4. 2 수평주사 (y축 방향)

에버네스트파의 검출과 같은 실험계로 광프로브를 y축 방향으로 주사하면서 수직방향으로도 프로브의 주사를 실행하여 에버네스트파의 변화에 대한 측정된 결과를 그림 8과 9에 나타냈다. 그림 8은 인가전압 증가과정, 그림 9는 인가전압 감소과정의 결과이다. 이 두 그림에서는 y축 PZT에의 인가전압에 비례해서 그래프의 x축을 이동시켜서 표시하였다. 측정은 동기검파의 측정 시정수 300msec, y축 PZT에의 인가전압을 0V, z축의 PZT는 1V/sec의 변화율로 0V에서 70V까지 전압을 증가시킨 후, 다시 0V까지 같은 비율로 감소시키면서

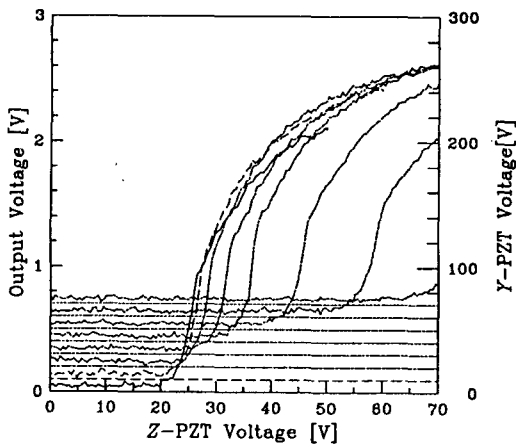


그림 9 y축 PZT의 인가전압과 에버네스트파의 강도 (인가전압감소과정)

Fig. 9 PZT voltage of y-axis vs. evanescent wave power (for decreasing voltage)

측정하였다. 또, 같은 측정을 수동으로 y축의 인가전압을 수동으로 0~70V까지 10V 간격으로 증가시키면서 각각의 위치에서 실행하였다. 단, 여기서 y축의 PZT는 100V에서 약 10nm 이동하였다. 인가전압 증가, 감소과정 모두 다 y축 PZT의 인가전압이 증가함에 따라서 에버네스트파가 검출되기 시작하는 z축 PZT의 인가전압이 증가하고 있다. 이것은 광프로브가 y축 방향의 이동에 따라서 프리즘의 표면에서 멀어지고 있는 것을 나타내고 있다. 이것을 확인하기 위하여 에버네스트파가 검출될 때까지 수동으로 z축 PZT에 전압을 인가하고, y축의 PZT 인가전압을 1V/sec의 변화율로 0V에서 20V까지 증가시킨 후, 다시 0V까지 같은 비율로 감소시키면서 측정한 결과를 그림 10에 보였다. z축 주사의 경우와 마찬가지로 전압의 증가, 감소에 대하여 검출된 에버네스트파의 강도는 변화하였고, 또 PZT의 히스테리시스를 고려하면 y축 PZT의 인가전압에 대해서 검출되는 에버네스트파의 강도는 재현성을 나타내고 있다. 즉, 프로브의 이동방향에 대해서 프리즘의 표면이 기울어져 있는 것을 이 그래프를 통하여 알 수가 있다. 곡선의 기울기가 거의 일정한 부분을 이용하여 앞서서와 같은 방법으로 에버네스트파의 감쇠정수를 계산하면 $\alpha=4.2 \times 10^5 m^{-1}$ 이 된다. 이것을 기울기로 환산하면 2.7°가 되어 프리즘의 표면이 y축의 정방향에 대해서 -2.7° 기울어져 있다는 것을 알 수 있다.

4. 3 수평주사 (x축 방향)에 의한 정재파 측정

프리즘에서 나오는 광을 거울을 이용하여 같은 방향으로 되돌려서 프리즘의 표면에 정재파를 발생시켜 그림 11과 같이 y축 방향으로 일정하고 x축 방향으로 주기성이 있는 에버네스트파의 관측을 시도하였다. 광프로브의 z축, y축 방향의 위치는 고정하고 x축 방향만을 주사하여 측정된 에버네스트

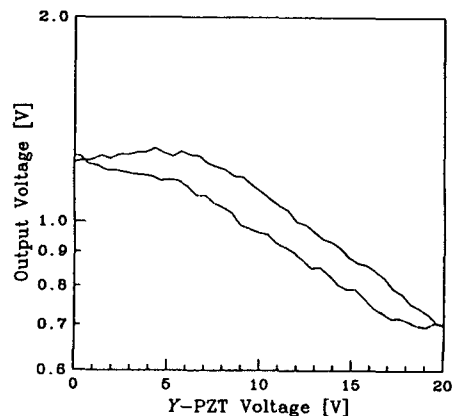


그림 10 y축 PZT의 인가전압과 에버네스트파의 강도관계
Fig. 10 PZT voltage of y-axis vs. evanescent wave power

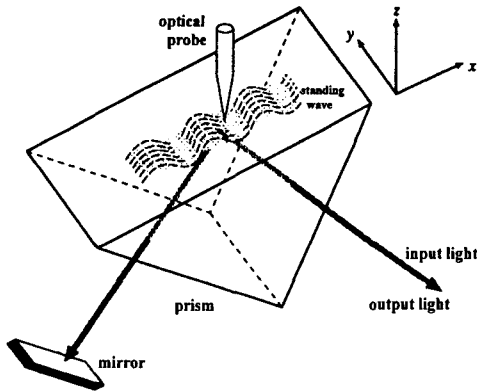


그림 11 정재파의 관측
Fig. 11 Measurements of standing wave

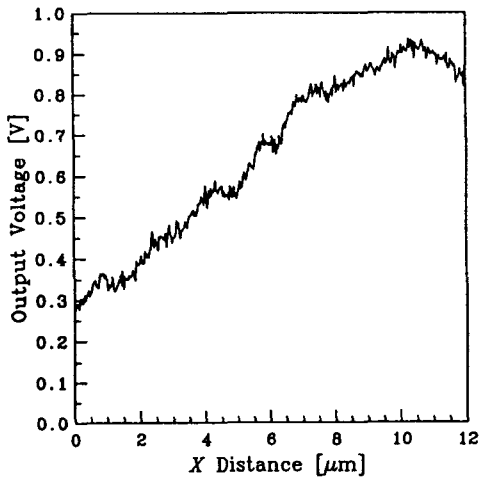


그림 12 x축 PZT의 변위와 에버네스토파 (프로브1)
Fig. 12 x-axis variation of PZT vs. evanescent wave(probe 1)

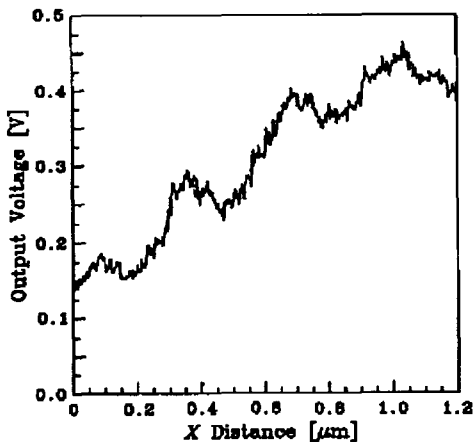


그림 13 x축 PZT의 변위와 에버네스토파 (프로브2)
Fig. 13 x-axis variation of PZT vs. evanescent wave(probe2)

파의 강도와 x 축 PZT의 인가전압과의 관계를 그림 12에 보였다. 실험의 조건은 앞의 y 축 주사의 경우와 동일하나, PZT의 변위속도는 $1.2\mu\text{m}/\text{sec}$, 변위량은 $0\sim 12\mu\text{m}$ 까지의 증가 방향만을 측정하였다. 단, x 축의 주사에 관해서는 프리즘 자체를 PZT에 의해 이동시켰다.

먼저, 선단의 $1\mu\text{m}$ 이하 인 프로브(1)을 이용하여 정재파 측정을 시도하였다. 측정 결과를 그림 12에 보였다. x 축의 변위에 대해서 에버네스토파의 강도가 증가하고 있는 것은 y 축 주사의 경우와 같이 프리즘 표면이 광프로브에 대해서 기울어져 있기 때문으로 생각된다. 여기서 발생하는 에버네스토파의 주기는 $0.33\mu\text{m}$ 이나, 측정된 결과의 그래프에 현저한 주기성은 나타나지 않았다. 그러나 뚜렷한 주기성은 아니지만 어느 정도 정재파 주기성의 경향을 파악할 수 있는 결과는 확인되었다. 프로브(1)에서 $0.33\mu\text{m}$ 정도의 뚜렷한 주기 구조가 관측되지 않은 주요 원인은 그림 4에 나타난 광프로브의 선단이 $0.33\mu\text{m}$ 정도의 주기 구조를 검출할 수 있을 정도로 충분히 미세하게 가공되어 있지 않기 때문이다.

따라서 이를 확인하기 위하여 선단이 프로브(1)에 비하여 좀더 날카롭게 가공된 $0.5\mu\text{m}$ 이하의 프로브(2)를 이용하여 같은 실험을 실시하였다. 그 결과를 그림 13에 보였다. 프로브(1)의 실험과 비교하여 보면, 같은 x 의 위치에서 검출되는 출력 전압이 $1\mu\text{m}$ 프로브(1)의 절반 정도로 줄었음을 알 수 있다. 그러나 출력의 파형은 예상한 대로 파장 $0.33\mu\text{m}$ 정도의 뚜렷한 주기성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 주사형 광현미경의 실현을 위한 예비적 실험으로서 선단의 크기가 사용되는 광 파장 이하 크기의 프로브를 제작하고, 이것을 이용하여 에버네스토파가 검출되는 과정의 실험을 실시하였다. 또, x 축, y 축 방향의 수평주사를 실시하여 프리즘 표면의 기울기가 허용되는 것을 살펴 보았다. 이번 실험에서는 선단의 크기가 $1\mu\text{m}$ 이하, $0.5\mu\text{m}$ 이하의 두 가지 프로브를 이용하여 측정하였다. $1\mu\text{m}$ 의 프로브(1)은 정재파에 의한 $0.33\mu\text{m}$ 정도의 뚜렷한 주기 구조는 검출되지 않았으나 어느 정도 주기 구조의 경향을 파악할 수 있는 결과를 얻었다. 또, $0.5\mu\text{m}$ 이하의 프로브(2)로는 뚜렷한 정재파의 형상을 파악할 수 있는 에버네스토파가 관측되었다. 그 결과 이러한 광계측 시스템이 광파장 이하의 여러 가지 미세 구조 측정 분야에 간편하게 응용할 수 있다는 가능성을 확인하였다. 향후 보다 더 고도한 제작법을 이용하여 더욱 예리한 광프로브를 제작한다면, 가시광 영역의 비교적 다루기 쉬운 광원을 사용하면서도 파장 이하의 미세 구조의 측정 가능한 주사형 광현미경 시스템의 실현이 가능하다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] S. Jiang, N. Tomita, H. Ohsawa, and M. Ohtsu, "A Photon Scanning Tunneling Microscope Using an AlGaAs Laser, Jpn., J. Appl. Phys., Vol. 30, pp. 2107, 1991.

- [2] S. Okazaki, H. Sasatani, H. Hatano, and T. Nagamura, "Development of high-resolution optical fluorescence microscopy", *Mikrochim. Acta.*, Vol. III, pp. 87, 1988.
- [3] P. J. Moyer, C. L. Jahncke, M. A. Paesler, R. C. Reddick, and R. J. Warmack, "Spectroscopy in the evanescent field with an analytical photon scanning tunneling microscope", *Phys. Lett., A*, Vol., 145, pp. 343, 1990.
- [4] S. Jiang, H. Osawa, K. Yamada, T. Pangaribuan, and A. Ikai, "Nanometric scale biosample observation using a photon scanning tunneling microscope", *Jan. J. Apl. Phys.*, Vol. 31, pp. 2282, 1992.
- [5] U. Durig, D. W. Phol, and F. Rohner, "Near Field Optical Scanning Microscope", *J. Appl. Phys*, Vol, 59, pp. 3318, 1986.
- [6] M. Isaacson, E. Betzig, H. Barashatzky, and A. Lewis, "Near Field Optical Microscopy", *Plenaries Invit. Pap., Compact Intell. Syst. IMECO*, 59, 1989.
- [7] U. Durig, D. Pohl, and F. Rohner, "Near-field Optical scanning microscopy with tunnel-distance regulation", *IBM J. Res. Dev.* Vol. 30, pp. 478, 1986.
- [8] Y. Hori, "Photon scanning tunneling microscope and its theoretical analysis", *J. Appl. Phys.*, Vol. 61, pp. 612, 1992.
- [9] M. Ohtsu : *Near-Field Nano/Atom Optics an Technology* (Springer Tokyo), 1998.
- [10] M. Born and E. Wolf : *Principles of Optics*, 6th ed(Pergamon press), 1989.

저 자 소 개



최영규(崔泳圭)

1955년 8월 26일생. 1988년 교토대학(일본)대학원 전자공학과 졸업(석사), 1992년 동 대학원 공학박사, 1992년~1995년 국립 후쿠이대학 (일본) 전자공학과 전임강사, 1998년~현재 신라 대학교 공과대학 광전자공학과 교수

Tel : 051-309-5622

E-mail : ykchoi@silla.ac.kr