

근접장 광학계의 광학적 및 기계적 특성 분석과 근접장 간격제어

○ 오형렬, 이준희, 권대갑, 김수경

Optical and Mechanical Characteristics of NF System and NF Gap Control

Hyeongryeol Oh, Junhee Lee, Daegab Gweon, Sookyung Kim

ABSTRACT

The conventional optics and near field optics are compared numerically in the view points of the spot size and propagation characteristics. The decaying characteristics of near field light require the optics to access the object within several tens of nanometers. Therefore the gap control is one of the main issues in the near field optics area.

In this paper the gap control is done by using the shear force of the NF(Near Field) probe and the characteristics are examined. The probe is modeled as a 2nd order mass-spring-damper system driven by a harmonic force. The primary cause of the decrease in vibration amplitude is due to the damping force - shear force - between the surface and the probe. Using the model, damping constant and resonance frequency of the probe is calculated as a function of probe-sample distance. Detecting the amplitude and phase shift of the NF probe attached to the high Q-factor piezoelectric tuning fork, we can control the position of the NF probe about 0 to 50nm above the sample. The feedback signal to regulate the probe-sample distance can be used independently for surface topography imaging. 3-D view of the shear force image of a testing sample with the period of 1 μ m will be shown.

Key Word : NSOM, SNOM, Shear Force, Piezoelectric Tuning Fork, topography imaging

1. 서론

보다 작은 광 스팟의 구현은 측정 기술에서는 높은 분해능, 광 기록 분야에서는 높은 기록밀도를 위해 핵심적인 기술이나, 스팟의 직경은 광의 회절한계에 의한 최소치를 갖는다. 최근에 기존 광학계의 이러한 한계를 극복하기 위하여 근접장 광(Near Field Optics)¹ 활용 기술이 부각되고 있다.

근접장 광의 활용은 파장 이하의 개구(aperture)나 고굴절율 매질을 활용하여 스팟 크기를 줄이고, 광학계와 샘플면을 수십 나노메타로 근접시켜 고분해능을 구현하는 것이다. 작은 개구를 이용하는 방식에서는 주로 50 내지 200nm 정도 크기의 개구를 갖는 광 파이버 탐침을 활용하며, 고굴절율 매질을 이용하는 방식은 SIL(Solid Immersion Lens)이 주류를 이

룬다.

본 논문에서는 광파이버 탐침을 활용한 근접장의 특성과 기계적인 특성에 대하여 다룬다. 근접장 광학의 경우 개구나 이용되는 물질의 재질에 따라 광학적 특성이 크게 변화하며, 기존의 광학계와 달리 직감에 의한 광학 특성의 유추가 불가능하므로 실험 초기에 기본적인 광학적 특성이 분석되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 광 파이버를 단순하게 모델링하여 광학적 특성을 수치해석적으로 분석하였다.

이러한 근접장 광학의 특성에 따르면 탐침과 샘플표면 사이의 거리를 수십 나노메타로 유지하는 간격 제어는 매우 중요하며, 이를 위해서 가장 널리 쓰이는 방식이 물체에 접근할 때 광파이버에 작용하는 전단력(shear force)의 변화를 이용하는 것이다.^{2,3} 본 논문에서는 광파이버가 물체에 근접할 때의 공진 특성 및

전단력의 특성을 수치해석과 실험을 통하여 분석하였다.

2. 근접장 광학 특성의 수치해석

광파이버를 활용한 분해능의 향상은 기본적으로 파장 이하의 개구를 이용하여 스팟의 직경을 줄이는 것이므로, 광파이버를 파장이하의 pin-hole 로 간단히 모델링하여 분석할 수 있다.

이 분석은 Maxwell 방정식을 유한 차분법으로 해석하는 FDTD(Finite Difference Time Domain) 기법을 활용하여 실시되었다.

Fig.1 은 FDTD 기법을 이용하여 개구수 (numerical aperture)가 0.5 인 기존의 광학계와 직경 240nm 의 pin-hole 을 가지는 근접 광학계의 초점면에서의 필드 분포를 비교하여 나타낸 것이다.

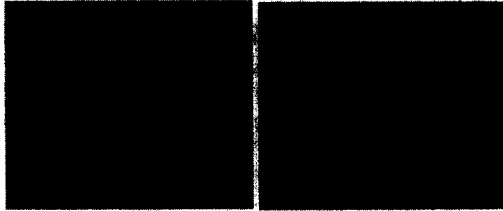


Fig.1 (Left) Focused spot of conventional optics, (Right) Spot size reduction by pin-hole

Fig.2 의 좌측 그림은 이 두 경우의 필드 분포 단면으로 회절한계에 의한 스팟(점선) 보다 작은 스팟을 구현할 수 있음을 볼 수 있다. 즉 기존 광학계의 경우 개구수가 0.5 이므로 스팟 직경이 파장과 같은 order 인 600nm 정도의 회절한계 패턴을 갖는다. 그러나 근접장 광학계의 경우 pin-hole 직경과 같은 order 의 스팟 직경을 갖는다.

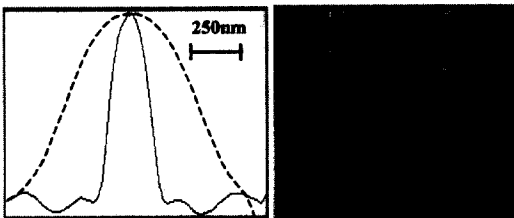


Fig.2 (Left) Intensity decay from the pin-hole, (Right) Comparison of spot size (dashed : conventional, solid : by pin-hole)

그러나 근접장을 이용할 경우 Fig.2 의 우측 그림과 같이 광이 광학계의 근방에서만 존재할 뿐 전파되지 못하므로, 근접장을 이용하기 위해서는 광학계를 대상물체에 근접장 광이 존재하는 영역 내로 근접시켜야 한다. 즉 광파이버 탐침과 피측정면은 수십 나노메타 정도의 간격을 유지하여야 한다.

3. Shear Force 에 의한 간격 제어 방식

광파이버 탐침을 물체에 근접시키기 위해 일반적으로 사용되는 방식은 근접 시 탐침의 끝에 가해지는 물체의 반력을 측정하는 것이다. 광파이버의 경우 전단(shear) 방향이 외력에 가장 민감하게 반응하므로 횡 방향 반력인 전단력을 이용하며, 파이버를 특정 진폭 및 주파수로 진동 시키며 물체에 근접시켜, 물체의 반력에 의한 진폭의 감소를 측정하여 간격제어를 구현한다.

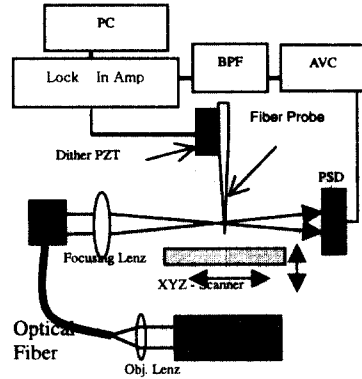


Fig.3 Schematic of beam deflection method

이러한 탐침의 진동량을 재는 방식은 몇 가지가 소개되어 있다.² 가장 널리 쓰이는 것은 Fig.3 과 같이 광을 이용하는 방법으로, 탐침의 끝에 초점을 맞춘 레이저를 PD 로 감지하여 빔의 세기(intensity)의 변화를 이용하는 것이다. 이 때 광파이버는 가진(dither) PZT 를 이용하여 파이버 자체의 공진 주파수로 진동 시킨다.

그러나, 이 방식은 레이저 광원의 불안정성에 의한 간격제어 정밀도 제약과, 낮은 파이버 공진점에 의한 scanning 속도의 제약이 발생하므로, 탐침의 특성분석에만 이 방법을 이용하고 표면의 측정은 Fig.4 같이 tuning fork 를 이용한 방법을 이용하였다.

Tuning fork 를 이용한 이 방법은 공진점이

높고, 매우 큰 Q^4 (Q factor)를 갖는 세라믹 튜닝포크(tuning fork)를 이용한 것으로, 이것을 가진 PZT에 부착하여 공진 주파수로 진동시킨다. 탐침이 샘플 표면에 근접하면 표면에 의한 전단력으로 공진점이 변화하고, 이에 따라 진폭 급격히 변하므로 레이저 방식에 비하여 매우 민감한 신호를 얻을 수 있다.

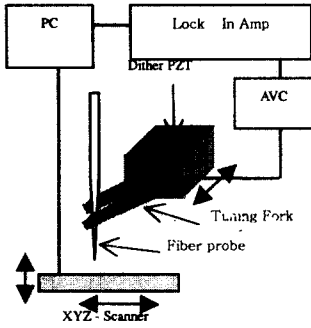


Fig.4 Schematic of piezoelectric tuning fork method

4. 실험과 결과

4.1 NSOM 탐침의 전단력 특성

전단력 특성을 분석하기 위한 시스템의 구성은 Fig. 3과 같이 하였으며, 가진 PZT에 의하여 진동하는 탐침은 정현파 구동력에 의해서 진동하는 질량-스프링-감쇠 시스템으로 Fig. 5와 같이 모델링하였다.

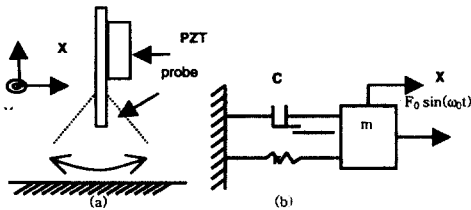


Fig.5. (a) Actual motion of NSOM probe
(b) Simple model of NSOM probe

이 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x} + c\dot{x} + \omega_n^2 x = \alpha_0 \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

여기서 $c (= \gamma/m)$ 는 감쇠상수, $\omega_n (= \sqrt{k/m})$ 은 시스템의 공진주파수, $\alpha_0 (= F_0/m)$ 는 단위질량에 대한 구동력의 진폭이다. 여기서 탐침과 샘플

표면의 거리에 따른 탐침 끝 전단력의 변화를 ω_n 과 c 의 변화로 모델링하면 식 (1)은

$$\ddot{x} + c(z)\dot{x} + \omega_n^2(z)x = \alpha_0 \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

로 표현되며, 그 해를 다음과 같이 가정한다.

$$x_p = X(z) \sin(\omega_0 t + \theta(z)) \quad (3)$$

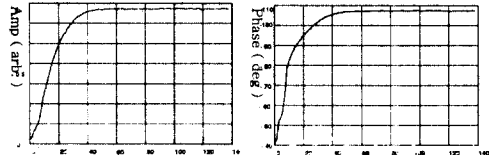


Fig.6. Amplitude & Phase shift as fiber probe approach sample surface

Fig.3과 같은 시스템 구성에서 광 섬유 탐침의 진폭과 위상의 변화를 탐침과 샘플 표면과의 거리의 함수로 나타낼 수 있으며, Fig.6의 실험에 의한 결과를 나타낸다.

Fig.6의 정보와 식 (2), (3)을 이용하면 ω_n 과 c 를 탐침과 샘플 표면의 거리의 함수로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_n(z) = \sqrt{\frac{\alpha_0 \cos(\theta(z))}{X(z)} + \omega_0^2} \quad (4)$$

$$c(z) = -\frac{\alpha_0}{\omega_0 X(z)} \sin(\theta(z)) \quad (5)$$

위 두 식의 계산 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

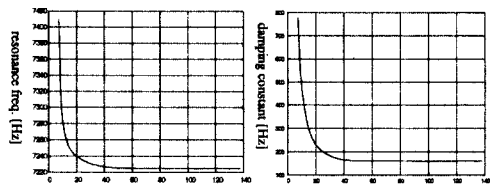


Fig.7 Resonance freq. & Damping constant shift as fiber probe approach a sample surface

이 결과에서 샘플표면과 탐침의 거리가 가까워지면 ω_n 과 c 가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 탐침의 끝에 작용하는 전단력에 의해서 탐침의 스프링 상수와 감쇠가 증가한다는 것을 의미한다. 스프링 상수와 감쇠의 변화는 탐침과 샘플 표면의 거리 증가에 따른 탐침의 진동량 변화와 위상변화를 초래한다.

4.2 튜닝포크 간격제어에 의한 샘플표면 측정

광섬유 탐침이 샘플표면에 접근할 때 전단력 특성을 이용하여, 탐침과 샘플표면의 거리를 5nm 정도의 정밀도로 제어할 수 있다. Fig. 4 에서 보듯이 광 섬유 탐침은 튜닝포크의 한 쪽 가지(prong)의 면에 부착된다. 탐침을 튜닝포크에 붙이면 Fig. 8 처럼 공진주파수가 변하게 된다.

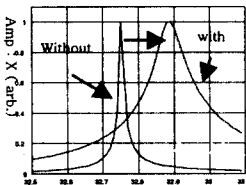


Fig.8 Amplitude resonance curves of the tuning fork with and without the fiber probe

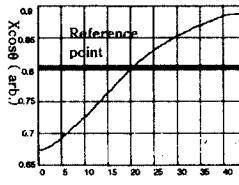


Fig.9 Xcos θ signal of the tuning fork+fiber probe as the fiber probe approaches the sample surface.

탐침이 부착된 튜닝포크를 가진 PZT 로 새로운 공진주파수에서 가진한다. 튜닝포크가 가진 되면 튜닝포크의 가지에 굽힘(bending)운동이 정현적으로(sinusoidally) 일어나고, 굽힘의 진폭에 비례하는 진폭을 갖는 전압이 정현적으로 발생하게 된다. 이 전압 신호를 이용하여 탐침과 샘플의 거리를 제어하게 된다. 탐침과 샘플표면의 거리에 대한 접근 곡선은 Fig. 9 에 나타내었다. 간격 제어 피드백 신호는 진폭과 위상을 복합한 Xcos θ 를 사용하여 감도를 증가시켰다. 이 실험에서는 탐침과 표면이 멀리 떨어져 있을 때의 신호 레벨을 기준으로 하여, 이 값에서 80% 정도의 감소가 일어나도록 탐침과 샘플의 간격 제어하였다.

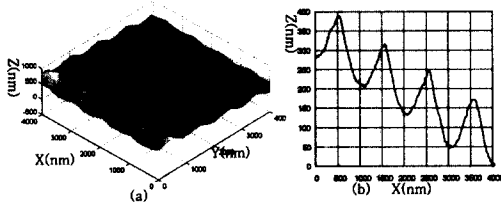


Fig.10. (a) 3-D plot & (b) cross-sectional view of the sample grating with the period of 1 μ m, image size 4x4 μ m

이러한 간격제어 방식으로 샘플표면을 주사 하면서 표면위치 신호를 기록하면 표면의 기하학적 형상을 얻을 수 있다. Fig.10(a)는 이러한 방식으로 높이 100nm, 주기 1 μ m 의 기준 격자(grating)를 측정한 결과이며 (b)는 이 표면형상의 단면이다. 이 결과에서 이 시스템의 분해능은 수평방향 100nm, 수직방향은 10nm 보다 더 좋다는 것을 알 수 있다.

5. CONCLUSIONS

파장 이하의 개구를 갖는 광파이버 탐침을 간단한 pin-hole 광학계로 모델링하여 수치해석으로 초점면에서의 광 분포를 해석하였으며, 근접장 광학계에 의하여 광의 스팟 직경을 현저히 감소시킴을 확인하였다. 그러나 근접장을 이용할 경우 광이 광학계에서 수 십 나노메타 영역에만 존재하므로, 광학계와 피측정 물체와의 간격제어가 근접장의 응용에는 매우 중요하다.

본 논문의 실험에서는 100 나노메타 정도의 개구를 갖는 광파이버 탐침을 근접장 광학계로 이용하였으며, 광학계와 피측정 물체의 간격제어는 표면에 의한 전단력 피드백을 이용하였다. 이 탐침 광학계의 기계적 특성을 감쇄계수 및 고유진동수가 간격의 함수인 간단한 1 차 진동 시스템으로 모델링하여, 실험치와 비교를 통하여 감쇄계수 및 고유진동수 변화를 얻어냈다.

이렇게 분석된 시스템을 이용하여 표준 격자를 측정하여, 수평방향으로 100nm 수직방향으로 10nm 이상의 분해능을 얻어낼 수 있음을 확인하였다.

REFERENCE

- [1] U.Dürig, D.W.Pohl, and F.Rohner, "Near-field optical-scanning microscopy", J.Appl.Phys.59(10) pp.3318-3327, 1986
- [2] E.Betzig, P.L.Finn, and J.S.Weiner, "Combined shear force and near-field scanning optical microscopy", J.Appl.Phys.60(20), pp.2484-2486, 1992
- [3] C.Durkan and I.V.Shvets, "Study of shear force as a distance regulation mechanism for scanning near-field optical microscopy", J.Appl.Phys.79(3), pp.1219-1223, 1996
- [4] Khaled Karrai and Rober D.Grober, "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical

microscopes", *Appl.Phys.Lett.*66(14), pp.1842-1844, 1995

[5] Fred F.Froehlich and Tom D.Milster, "Mechanical resonance behavior of near-field optical microscope probes" *Appl.Phys.Lett.*70(12), pp.1500-1502, 1997