

테이퍼 광 가이드를 이용한 근거리 회절에 관한 연구

김기현^o 이 혁

서울대학교

A study on the Near-field diffraction using taper wave guide

Ki-hyun Kim Hyuk Lee

Seoul National University

Abstract

The properties of near-field diffraction by small aperture are investigated and using of optical fiber taper as a small aperture are proposed. Near-field diffracted by aperture smaller than one wave length can overcome the resolution of conventional microscopy and optical component. In this paper production methods of sub-wave length optical fiber taper using solenoid are also proposed.

1. 서론

현미경이나 기타 광학기구에서는 주로 가시영역의 빛을 사용한다. 이 중에서 물체를 식별하는데 사용하는 현미경의 경우에는 렌즈나 기타 광학기구의 성능이 아무리 좋더라도 빛이 가지는 특성때문에 성능의 한계가 존재한다. 그것은 빛의 회절현상 때문이다. 이때문에 광학현미경은 배율을 아무리 높여도 실용적으로 파장이상의 분해능을 가질수 없다.[1]

따라서 최근에는 가시영역의 빛을 이용하여 파장의 한계를 극복하려는 연구가 진행되었다. 이것은 현미경뿐만 아니라 빛을 이용하여 높은 분해능을 얻어야 하는 여러가지 경우에 적용할수 있는 것인데, 그 방법은 빛을 파장보다 구멍으로 통과시켜 이때 나오는 빛의 near field를 이용하는 것이다. 이것을 이용하면 빛의 분해능은 작은 구멍의 물리적인 크기에 의해 결정된다.[2]

이제까지 small aperture를 만드는 방법은 금속막에 구멍을 만들거나[3] 피펫을 이용하는 방법[4] 등이 사용되었는데 본 논문에서는 그림 1과 같이 optical fiber를 이용하는 방법을 제시하였다.

Optical fiber는 wave guide가 가능하기 때문에 원하는 형태로 굽혀서 사용할수 있고 빛의 집속이 가능하여

near field를 이용할경우 intensity를 높일수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는 일반적인 aperture diffraction의 경우에 near field를 이용하여 빛의 한계를 극복할수 있는 이론적 근거를 보였고 실제 optical fiber를 가늘게 만들어 small aperture로써 이용할수 있는 테이퍼의 제작 방법을 제시하였다.

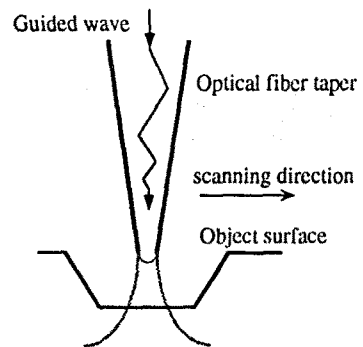


그림 1. 테이퍼를 이용한 Near field

2. Near-field의 특성

2.1 small aperture에 의한 회절

작은 구멍을 빛이 통과할때 생기는 회절효과는 주로 Kirchoff의 방법을 이용하여 해석한다. 그러나 이 방법은 구멍의 크기가 빛의 파장보다 크고 관측평면이 최소한 구멍의 직경보다 떨어져 있을때 가능하다. 따라서 여기서는 Bethe의 이론을 이용하여 해석하였다.[5][6]

파장보다 작은 크기의 구멍이 $z=0$ 인 도체 스크린 상에 존재한다고 할때 여기에 빛이 입사된다고 하면 Bethe의 이론에 의해 magnetic current K 와 magnetic charge η 가 구멍 내에 존재하게 된다. 이것으로부터 스크린의 오른쪽($z>0$)에서의 한점 r 에서 electric

field와 magnetic field는 아래식과 같이 표시된다.

$$E(r) = \int_s [K(r') \times \nabla \phi] dx dy \quad (1)$$

$$H(r) = \int_s [jk K(r') - \eta \nabla \phi] dx dy \quad (2)$$

여기서 면적 s 는 구멍의 면적을 나타내고 위의 식은 구멍의 영역에 대한 적분이 된다.

2.2 회절에 의한 Near-field 의 분포 계산

스크린의 오른쪽($z > 0$)에서 $E(r)$ 과 $H(r)$ 은 앞의 (1)식과 (2)식의 적분으로 부터알수있고 이값으로 부터 회절에 의한 intensity 분포를 계산할수 있다.

윗식을 He-Ne 레이저의 파장에 해당하는 633nm의 빛이 작은 구멍이 있는 도체에 입사한 경우에 대해 계산해 보았다. 구멍의 직경은 파장의 1/6인 100nm 라고 하였다.

수직입사의 경우에는 electric field가 도체표면에 평행한 E_0 의 값은 0 이된다. 그림 2 는 관측평면이 구멍의 직경 만큼 떨어져 있을때($z = 100nm$)의 intensity 분포를 나타낸것이다. x 축 상에서 FWHM(full width half maximum)은 130nm 이고 y 축 상에서는 180nm 이다.

입사되는 빛이 스크린과 θ 의 각을 갖고 입사하는 경우에는 구멍내에서 magnetic field와 electric field 가 모두 존재하게 된다. 그림 3 은 θ 가 45° 인 경우를 나타낸 것인데 관측평면은 구멍의 직경인 100nm 만큼 떨어져 있다. FWHM은 x 축상에서 84nm이고 y 축상에서 120nm 이다.

위의 계산 결과로 부터 빛이 도체 표면에 수직으로 입사한 경우와 기울어져 입사한 경우 모두 관측평면이 구멍과 매우 가까울때에는 spot size가 구멍의 크기와 비슷한것을 알수있다.

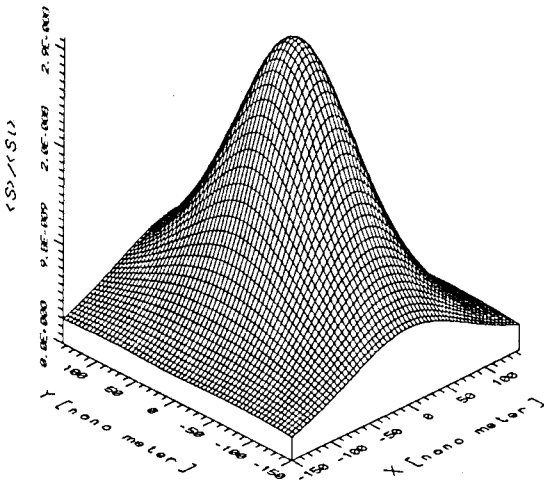


그림 2. 수직 입사시의 intensity 분포

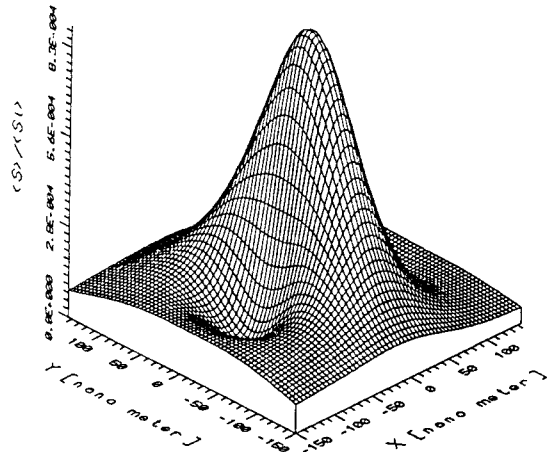


그림 3. 입사각 45도 일때의 intensity 분포

3. 테이퍼 제작

광섬유를 가늘게 늘이기 위해 광섬유가 어느정도 점성을 갖도록 가열하면서 양쪽에서 잡아당기는 방법을 사용하였다. 제작시 가열은 마이크로 버너를 이용하여 약 $1000^\circ C$ 의 온도로 가열하였고 가열부분을 당겨주는 기구로는 솔레노이드를 이용하였다. 이때 광섬유의 가열부위 조절은 원통형 세라믹을 사용하였고 솔레노이드에 둘러주는 전류의 조절은 PC interface를 이용하여 프로그램이 가능하게 하였다. 전체 구조는 그림 4 와 같다. 가열을 시작하면 광섬유가 늘어나기 시작하고 이때문에 plunger 가 솔레노이드쪽으로 끌려오기 시작한다. 이러한 plunger 의 움직임은 슬라이드 저항에 의해 측정되어 전압변화로 나타난다. 이때의 전압은 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력되며 이값으로 출력할 전류의 범위를 결정하게 된다. 출력 전류는 컴퓨터에서 나오는 디지털 신호를 D/A 변환기를 통하여 아날로그 신호로 바꾼뒤 이것을 전류증폭기를 통하여 증폭시켜 솔레노이드에 연결시켰다.

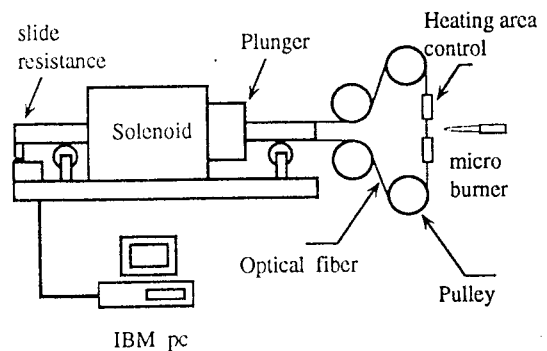


그림 4. 테이퍼 제작장치 개략도

도로 가늘게 늘리기 위해 광섬유가 늘어나는 길이에 따라 당기는 힘을 단계적으로 변화시켰다. 첫번째 단계에서는 직경 125 μm 되는 광섬유를 2mm정도 늘렸고 이때 가운데 부분의 직경은 약 30 μm 이다. 두번째 단계에서 솔레노이드에 가해지는 전류를 약간 줄여주어 광섬유가 충분히 가열되도록 하였고 마지막 세번째 단계에서 솔레노이드에 흘려주는 전류를 첫번째와 두번째보다 매우 큰 값으로 증가시켜 광섬유가 순간적으로 늘어나며 끊어지게 하였다. 이 방법은 생물학에서 쓰이는 마이크로 피펫을 만드는데도 사용될수 있다.[7]

광섬유를 늘이는 과정에서 또다른 중요한 요소는 가열범위이다. 가열범위는 그림 4에 나타나있는 원통형 세라믹의 위치를 바꿔줌으로써 조절이 가능하다.

위의 방법을 사용하여 테이퍼를 만든결과 사진(1)과 같이 tip size가 약 0.1 μm 되는 테이퍼를 얻었다. 같은 조건으로 반복 제작을 하였을때 약 0.1 - 0.3 μm 의 테이퍼가 얻어졌다.

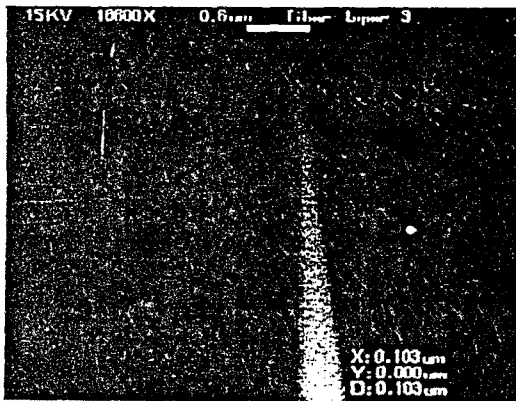


사진 1. 제작된 테이퍼의 전자현미경 사진

4. 결론

지금까지 빛의 회절에 의한 한계를 극복하기 위해 파장보다 작은 구멍을 만들어 여기서 나오는 near field를 이용하는 방법을 소개하였다. 도체스크린 상에 파장보다 작은 크기의 구멍을 내었을때 near field의 분포가 파장의 크기보다 작게 됨을 보였고, 이를 광섬유로 구현하기 위하여 테이퍼를 제작하는 방법을 보였다. 이것을 이용하여 실제 응용하기 위해 테이퍼에 의해 빛이 손실되는 것을 막는 방법과 테이퍼내에서의 빛의 전파에 대한 엄밀한 해석이 필요할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [2]. E.Betzig, A.Harootunian " Near field diffraction by a slit: implications for super resolution microscopy ", Applied optics. vol 25 No. 12, P 1890-1900 , 1986.
- [3]. U. Ch. Fischer, " Optical characteristics of 0.1 μm circular apertures in a metal film as light sources for scanning ultra microscopy", J.vac.sci.Technol.B 3.P 386 Jan/Feb, 1985.
- [4]. E.Betzig, A.Lewis, " Near field scanning optical microscopy ", Biophysical society,vol.49, P269-279, January 1986.
- [5]. H.A.Bethe, "Theory of Diffraction by small holes " Physical review, Vol 66, P 163, 1944.
- [6]. Takashi Nakano and Satoshi kawata, "Numerical analysis of the near field diffraction pattern of a small aperture", J.of Modern optics, Vol 39, No 3, P 645-661, 1992.
- [7]. Geoffrey, A.R. Mealing and J.L.schwartz, " A modified Horizontal capillary puller for fabrication of patch-clamp pipettes", Brain research bulletin, Vol 22, P 913-915, 1989.