근접장 광학 탐침내의 도파에 관한 연구

A study on light propagation in near-field optical probes

정승태*, 신동재**, 이용희**
*삼성전자 중앙연구소**한국과학기술원 물리학과
s_djshin@cais.kaist.ac.kr

근접장 주사 광학 현미경(Near-field scanning optical microscope)에서 가장 중요한 부분은 바로 근접장 탐침(Near-field optical probe)이다. 가장 널리 사용되는 근접장 탐침은 끝 부분에 매우 작은 구멍만 남기고 나머지 부분은 금속으로 코팅한 뾰족한 광섬유(Metal-clad tapered optical fiber)이다. 탐침의 끝에 형성된 작은 구멍은 진행하지 못하는 근접장(Near-field)을 진행하는 먼장(Far-field)으로 바꾸어줌으로서 회절한계를 뛰어넘는 분해능을 가능하게 한다. 그러나, 이러한 작은 구멍은 매우 작은 투과 효율(Transmission efficiency)을 가지기 때문에 고밀도 광기록(High-density optical recording)등에 이용하는데 큰 어려움이 있었다.[1]-[3] 따라서 금속이 코팅된 뾰족한 광섬유 내에서 빛이 어떻게 진행되는지에 대한 연구를 통해 보다 높은 효율을 가지는 근접장 탐침을 개발하는 것이 중요한 과제가 되고 있다. 본 연구에서는 금속이 코팅된 뾰족한 광섬유 도파로 내에서 구멍의 크기와 빛의 투과 효율의 관계를 보고한다.

근접장 탐침의 투과 효율을 높이기 위해서는 일반적으로 뾰족한 광섬유 부분의 길이를 줄여야 한다고 알려져 있다.[1] 또한 뾰족한 광섬유 부분의 모양도 투과 효율에 큰 영향을 미치는 것도 보고된 바 있다.[2] 그러나, 현재까지의 연구 방법은 구멍의 크기나 도파로의 모양이 다른 여러 개의 근접장 탐침을 제작하여 그 투과 효율을 측정하는 것이었다. 이러한 방법은 각각의 탐침이 가지는 미세한 차이에 의하여 도파로의 효율이 크게 좌우되는 근접장 탐침의 특수성 때문에 정밀한 분석이 힘들었다. 따라서 본 연구에서는 하나의 탐침구조에 대하여 그 구멍 크기를 변화시키면서 투과 효율을 동시에 측정하는 방법을 사용하였다.

측정 방법은 그림 1에 정리되어 있다. 먼저 가열하여 잡아당기기(Heating and pulling)나 화학적 식각(Chemical etching)방법을 통하여 광섬유를 뾰족하게 만든다. 그리고, 때려내기(Sputtering)를 통해 수백 나노미터 두께의 금속을 광섬유에 코팅한다. 코팅된 탐침은 전기도금(Electroplating)을 통해 수백 마이크로미터 두께의 금속막으로 보호한 후, 그 끝을 기계적으로 연마(Lapping)한다. 이 때 연마용 테잎 밑에 광측정기를 설치하여 구멍으로부터 나오는 빛의 세기를 측정한다.

그림 2는 세가지 도파구조에 대하여 측정된 결과를 보여준다. 점선이 보여주는 바와 같이, 투과 효율은 구멍이 매우 작지 않은 영역에 있어서 구멍의 지름의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 이것은 도파로가 매우 가늘지 않은 경우에 대해 기하 광학적인 분석이 가능함을 보여준다. 구멍이 매우 작을 때는 투과 효율이 급격히 감소하는 것이 측정되었는데, 이는 도파로가 매우 가늘어 졌을 때 진행모드가 더 이상 존재하지 않아서 빛이 스러지는 모드(Evanescent mode)로서 진행되는 것이라고 해석된다. 점점 가늘어지는 도파로 내에서 그 직경이 $\lambda/2n$일 때 진행 모드에서 스러지는 모드로의 전이가 일어나는 것은 이론적으로 보고된 바 있다.[4] 그림 3에서 보이는 것과 같이, 전이가 일어나는 직경이 파장에 비례하는 것은 두가지 파장을 이용한 실험에서 측정되었다.

이러한 측정결과들을 바탕으로, 근접장 탐침에서 일어나는 광손실(light loss)을 줄임으로써 보다 높은 투과 효율을 가지는 구조를 제안할 수 있다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 도파로의 구조를 전이 직경의 좌우에서 최적화 함으로써 현재의 투과 효율을 현저히 증가시킬수 있을 것으로 기대된다.

1. T. Saiki, S. Mononobe, M. Ohtsu, N. Saito, and J. Kusano, Appl. Phys. Lett. 68, 2612 (1996).

2. G. Valaskovic, M. Holton, and G. Morrison, Appl. Opt. 34, 1215 (1995).

3. S. Madsen, N. Holme, P. Ramanujam, S. Hvilsted, J. Hvam, and S. Smith, Ultramicrosc. 71, 65 (1998)

4. L. Novotny and C. Hafner, Phys. Rev. E 50, 4094 (1994).

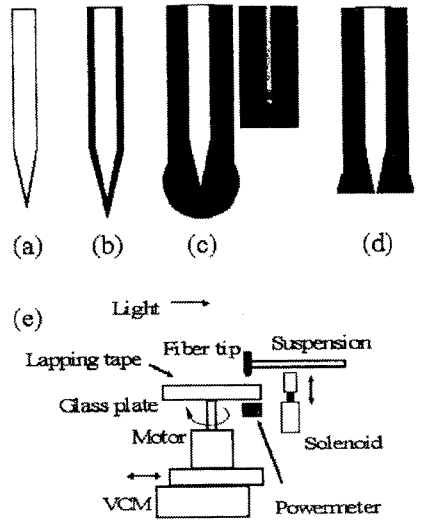

그림 1

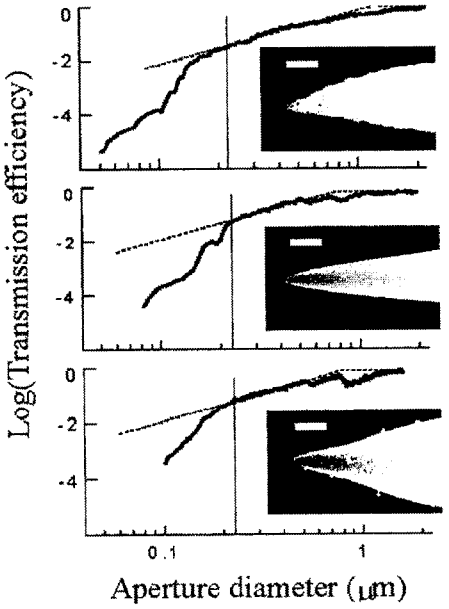

그림 2

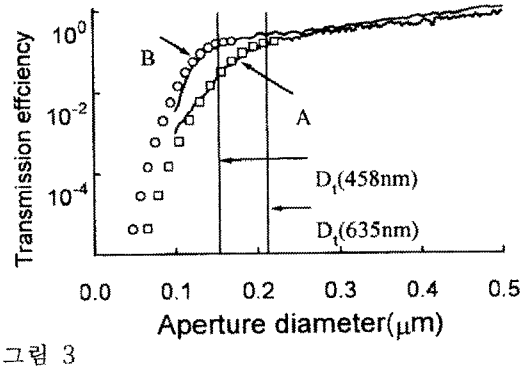

그림 3

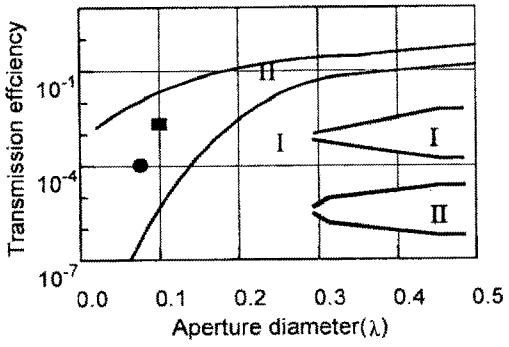

그림 4