

Solid Immersion Lens 현미경에서의 각 스펙트럼 필터가 점퍼짐함수에 미치는 효과에 대한 연구

최윤정, 이은성*, 이재용*

충남대학교 물리학과, *한국표준과학연구원 나노바이오 융합연구단

eslee@kriss.re.kr

나노 포토닉스 및 의료, 바이오 분야의 고분해능 정밀계측을 위해서는 기존의 원격장만을 이용한 광학 현미경 방식을 넘어서 시료 주위에 발생하는 높은 공간주파수의 근접장까지도 이미지면으로 유도하여 공간 분해능을 더욱 향상시키는 현미경 기술이 요구된다. 이를 위해 물체 근처에 고굴절률의 고체물질을 놓고 그 내부로 근접장을 효율적으로 결합시켜 빛의 위상과 진폭이 잘 유지된 원격장으로 변환시키는 Solid Immersion Lens (SIL) 가 도입되었다. SIL은 높은 굴절률을 가진 구형 렌즈를 적절히 절단한 형태로서, 빛을 발하는 물체(광원)가 높은 굴절률을 가진 SIL의 절단된 표면 근처에 있으면 빛의 소멸파 성분이 물질 내부로 유도되어 진행파로 변환하게 된다. 소멸파가 진행파로 변화되었어도 빛은 서로 다른 굴절률의 경계에서 파형의 변형이 일어나 수차가 발생하게 되는데, 점광원에서 발생한 구면파형이 파면왜곡을 겪지 않으며 렌즈를 빠져나가기 위해서는 점광원을 중심으로 반구 형태로 물질의 출구면을 가공하는 것이다. 이렇게 반구의 형태로 가공된 렌즈를 Hemisphere Solid immersion lens라 한다. 반구 형태 외에도, 구형 렌즈에서 두께가 $(1+1/n)r$ 이 되도록 절단한 초반구 형태의 렌즈도 파면왜곡을 일으키지 않는 것으로 알려져 있는데, 이를 Weierstrass SIL이라고 부른다. SIL에 의해 유도된 소멸파에 의해 반구형태의 SIL은 굴절률 n 배만큼, 초반구형태의 SIL은 n^2 배만큼 수치구경의 향상을 가져온다. 그런데 초반구형 SIL의 경우 진행파가 물질 내에서 공기중으로 빠져나오면서 파장 별로 굴절각의 정도가 다르기 때문에 종색수차가 발생한다.[1]

본 연구에서는 재질 LaSFN9($n=1.85$)의 구 렌즈를 Weierstrass형태로 가공하였다. 이때 가공된 SIL의 공차는 $10\mu\text{m}$ 로 유효공차 $42\mu\text{m}$ 보다 작으므로 허용된 범위를 만족한다.[2] 현미경의 대물렌즈는 Carl Zeiss사의 LD EC Epiplan-neofluar(배율 50배, 수치구경 0.55, working distance 9mm)를 사용하였다. 그리고 SIL에 의한 수치구경 증대효과를 확인하기 위해 100nm 의 크기를 갖는 형광 색소구(fluorescent dye bead)를 사용하여 점광원의 역할을 하게 하였다. 실험에서 형광 색소구 용액을 물에 희석시키고 그 일부를 SIL의 절단면에 묻혀 물을 증발시킴으로써 형광 색소구들이 SIL의 표면에서 뭉치지 않는 상태로 분포하도록 한 후, 532nm Nd:YAG 레이저로 충분히 밝게 조명하여 빛을 발하게 하였다. 시료면에서 나오는 빛은 대물렌즈를 통해 평행광이 되어 경통렌즈(tube lens)에 의해 CCD면에 상을 형성하게 된다. 형광 색소구의 이미지를 SIL이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 그림 1에서 나타냈고, 두 가지 경우를 비교하기 위해 점퍼짐 함수(point spread function) 측정을 시도하였다. 그림 1의 (b) 이미지는 SIL렌즈가 갖는 굴절률의 제곱, 3.4배가 확대된 것이므로 SIL이 있는 경우의 이미지를 3.4배 축소되는 것을 고려하여 SIL이 있는 경우와 비교하여야 한다. 이렇게 CCD로 얻어진 이미지중 하나의 색소구 이미지를 선택하여 각각의 점퍼짐 함수를 구하여 반치폭(Full Width at Half Maximum: FWHM)을 측정한 결과 SIL이 없는 경우의 반치폭은 1029nm 를 얻었고, SIL이 있는 경우는 615nm 를 얻을 수 있었다. 반치폭은 수치구경의 역수에 비례하므로 우리는 SIL을 통해 1.67배 향상된 수치구경을 얻은 것이다. 즉, 대물렌즈 수치구경 0.55의 1.67배인 0.92의 수치구경을 얻을 수 있었다. 이 값은 이론적으로 가능한 수치구경

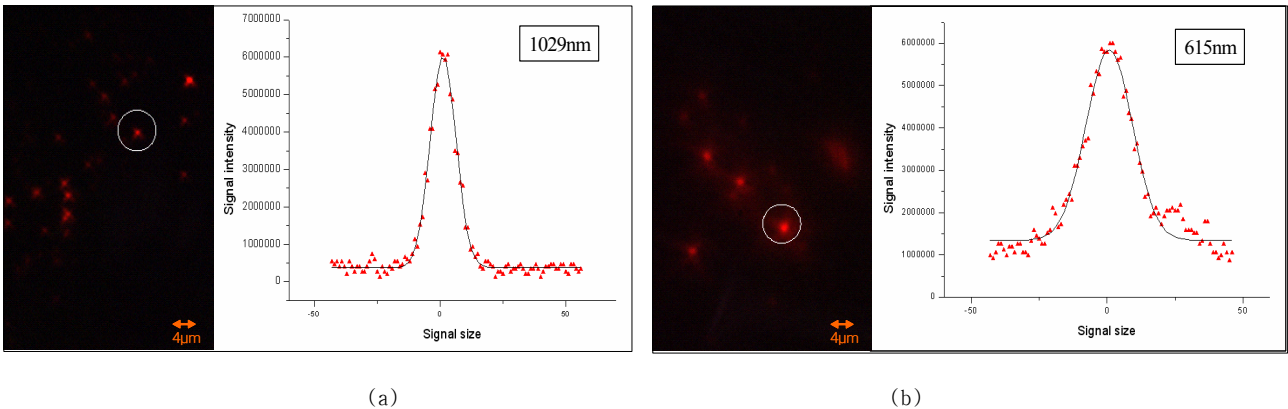


그림 1. 형광 색소구 CCD 이미지와 PSF (a) without SIL (b) with SIL

에는 미치지 못한다. 그 요인은 SIL 내부로 유도된 소멸파 성분들 중 광축에 큰 각도로 진행하는 높은 공간주파수 성분은 SIL에서 공기 중으로 빠져나갈 때 내부 반사에 의해 많은 손실이 생기고, 또한 색소구의 중심이 SIL 표면에서 50 nm 이상 떨어져 존재하므로 진행거리가 짧은 높은 공간주파수의 소멸파 성분은 대부분 SIL 표면에 닿지 못해 내부로 유도되지 못하기 때문으로 추정된다. 이런 상황에서 현미

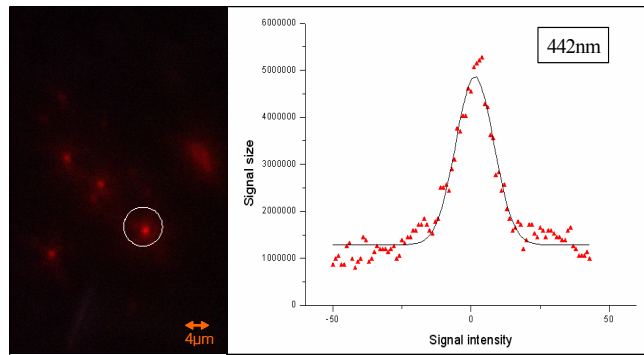


그림 2. Angular spectrum filter를 장착하여 관찰한 형광색소구의 이미지와 PSF

경의 유효 수치구경을 높이기 위해 각 스펙트럼 필터(angular spectrum filter) 방법을 이용하여 낮은 공간주파수 성분의 빛을 적당히 줄여줘 점퍼짐의 정도를 줄일 수 있도록 시도해 보았다. 각 스펙트럼 필터는 빛이 통과하는 유리판의 중심부에 코팅을 하여 광축 중심부로 들어가는 낮은 공간 주파수의 빛을 어느 정도 차단시켜준다.[3] 각 스펙트럼 필터는 pupil 위치에 놓인다. 그림2에서 보듯이 반치폭은 442nm 으로 측정되었고, 점퍼짐의 정도가 1.39배 줄었음을 확인하였다. SIL과 필터를 놓지 않은 경우에 비해 2.33배가 향상되어 수치구경을 1.28 까지 향상시킬 수 있었다. 정량적 해석을 위해 각 스펙트럼 필터 효과에 대한 이론적 계산과 이를 바탕으로 한 효과적인 필터 디자인을 계획 중이다.

[1] T. Sasaki, M. Baba, M. Yoshita, H. Akiyama, J. Appl. Phys. **36**,926 (1997).
 [2] M. Baba, T. Sasaki, M. Yoshita, H. Akiyama, J. Appl. Phys. **85**,6923 (1999).
 [3] Y. Lu, J. Xie, J. Zhang, H. Ming, P. Wang, Opt. Comm. **203**,87 (2002)