

## 공 초점 광학 현미경에서의 Side-lobe 감소방안에 대한 연구

김억봉, 김두철

제주대학교 자연과학대학 물리학과

### A Study on the Side-lobe in confocal microscopy

Ouk Bong Kim, Doo Chul Kim

#### 요 약

렌즈의 왜곡과 광 경로에 의한 위상 에러로 인해 광축상과 평면상에 Side-lobe가 발생한다. 광축상의 Side-lobe의 원인은 위상 에러 때문에 경로차가 발생하기 때문이다. 이러한 경로차를 최소화하기 위한 방법으로 광 경로를 조절하였다. 그리고 Side-lobe의 영향을 알아보기 위하여 경로차에 따른 빛의세기 변화를 전산기 시뮬을 통하여 알아보았다. 이 결과를 실험결과와 비교 분석하여 Side-lobe의 크기가 최소가 되는 지점을 찾았다. 그리고 광 경로를 조절하기 전과 후의 Side-lobe가 영상을 얻는데 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 광 경로를 조절하여 Side-lobe를 최소화함으로써 광축 방향의 분해능을 향상시킬 수 있었다.

#### I. 서 론

공 초점 광학 현미경은 광원에서 나온 빛을 집적 렌즈에 의해 시료 표면을 조사하고 시료 표면에서 반사되어 나오는 빛의 변화를 검출기로 검출하여 영상을 구현하는 주사형 현미경이다. 이러한 공 초점 광학 현미경은 기존의 일반 광학 현미경에 비해서 해상도를 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 Sectioning 기능을 이용하여 3차원 관측이 가능하다[1]. 공 초점 광학 현미경은 STM 이나 SEM, AFM에 비해서 해상도는 떨어지나 주사 속도가 빠르고 살아있는 세포를 실시간으로 관측 할 수 있는 장점이 있기 때문에 현재 생물 분야에서 많이 사용되고 있다.

공 초점 현미경에서 반사나 형광된 신호는 시료 표면에 초점이 위치할 경우 최대 값을 가지며 초점에서 벗어날 경우 거리 제곱의 형태로 감소하게 된다[2]. 이를 이용하여 시료의 표면과 3차원 영상을 얻을 수 있다. 일반적인 공 초점 광학 현미경에서는 주로 시료에서 반사되거나 형광된 빛의 신호 변화를 이용하여 영상을 얻는다. 이와 같이 공 초점 광학 현미경에서는 해상도가 주로 반사된 신호나 형광된 신호의 반치 폭에 의해서 결정되고, 반치 폭은 광원의 파장과 집적 렌즈의 Numerical Aperture에 의해서 결정된다[3]. 그러나 입사한 레이저 빛이 렌즈에 의해 물체에 초점이 형성될 경우에 렌즈의 왜곡과 광 경로에 의한 위상 에러로 때문에 광축상과 평면상에 Side lobe가 발생하게 되고 이것은 Later 방향에 대해서는 평면 해상도를 저하시

키고 Axial 방향에 대해서는 3차원 상을 얻는데 잡음으로 작용하여 해상도를 떨어뜨린다. 이러한 Side-lobe를 제거하여 공 초점 현미경의 해상도를 높이려는 연구가 많이 진행되고 있다[4~12]. 본 연구에서는 렌즈의 왜곡과 위상 에러로 인해 발생하는 광축상의 Side-lobe효과를 감소시키기 위한 방법을 조사하였다. 광 경로에 의한 위상 에러의 원인으로 경로차가 발생하므로 이 경로차를 최소화하는 것이 Side-lobe를 최소화시키는 방법중 하나이다. 이를 위하여 입사한 빛이 렌즈에 의해 초점이 맺히는 광축 방향의 거리 즉 대물렌즈와 시료 사이의 거리와 대물렌즈와 상까지의 거리를 변화시켜 위상 에러가 최소화되게 함으로써 Side-lobe의 크기가 가장 적은 지점을 찾았다. 결과적으로 3차원 이미지를 얻는데 잡음으로 작용하는 Side-lobe를 최소화함으로써 광축 방향의 분해능을 향상시켰다.

## II. 이론

### 1. 일반적 이론

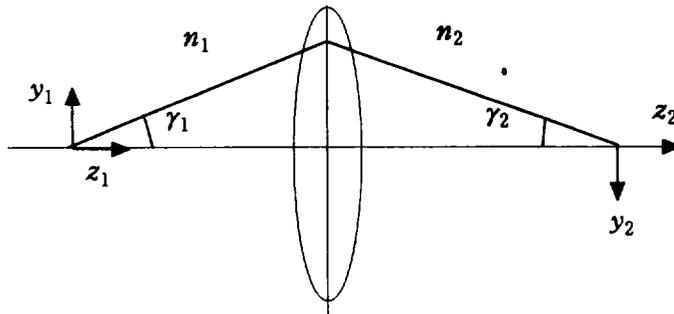


그림 1. 렌즈의 왜곡이 없는 경우의 sine 조건

실제 광학계에서는 렌즈를 통과한 빛이 렌즈의 왜곡 때문에 한 초점에 맺히지 않는다. 렌즈의 왜곡이 없다면 그림 1과 같이 sine 조건을 만족해야한다.

$$n_1 y_1 \sin \gamma_1 = n_2 y_2 \sin \gamma_2 \quad (1)$$

그러나 sine 조건을 만족시키지 못하면 렌즈를 통과한 빛이 한 초점에 형성되지 못하고 퍼지게 된다. 마찬가지로 완전한 영상을 형성하기 위해서는 (2)식과 같은 Herschel 조건을 만족해야한다.

$$n_1 z_1 \sin^2 \left( \frac{\gamma_1}{2} \right) = n_2 z_2 \sin^2 \left( \frac{\gamma_2}{2} \right) \quad (2)$$

(2)식의 조건을 만족시키지 못할 경우 정확한 영상을 얻을 수 없다.

(2)식을 이용하여 sine 조건을 다시 쓰면

$$n_1 z_1 \sin^2 \gamma_1 = n_2 z_2 \sin^2 \gamma_2 \quad (3)$$

가된다. 일반적인 경우 (1)식과 (2)식을 동시에 만족시킬 수 없기 때문에 광학 현미경에서는 두 값의 차가 최소가 되도록 광학계를 설계한다. 즉 일반적인 광학현미경에서는 먼저 sine 조건을 만족하도록 계를 설계하여 영상이 conjugate 면들 사이에 들어오게 함으로써 (1)식 과 (2)식의 차이가 최소가 되게 한다. 이러한 이유로 최적의 영상을 얻기 위하여 광학계의 광 경로를 조절하는 것이다. 그러나 공 초점 광학현미경에서는

sine 조건을 고려할 필요가 없고 Herschel 조건만 만족하면 된다[4]. 즉 대물렌즈에서 시료까지의 거리와 대물렌즈에서 검출기까지의 거리를 적절히 조절해 주면 Herschel 조건을 만족시킬 수 있다.

2. 렌즈왜곡에 의한 경로차

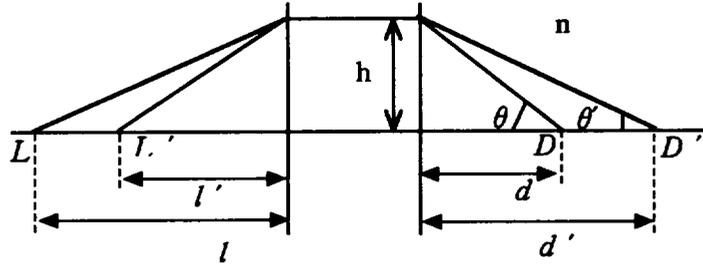


그림 2. 입사한 빛이 렌즈를 통과하여 초점이 형성될 때의 구성도  
 (  $d, d'$  : 초점거리,  $l, l'$  : 렌즈에서 L, L'까지의 거리,  
 $h$  : 광축으로부터의 렌즈높이,  $D, D'$  : 초점이 맺히는 점,  
 $n$  : 렌즈와 시료사이의 굴절률)

광축의 L점과 L'점이 각각 두꺼운 렌즈를 통과하여 광축의 D점과 D'에 초점이 형성된다고 하자(그림2). 광축으로부터 렌즈의 높이가  $h$ , L점에서 렌즈까지의 거리  $l$ , 렌즈에서 D점까지의 거리  $d$ , 렌즈와 시료 사이의 굴절률  $n$ ,  $k (k = \frac{2\pi}{\lambda})$ 는 파수이다.

이때 Herschel 조건을 만족시키지 못할 경우 위상 에러는 다음과 같다[4].

$$\phi = k(l - \sqrt{l^2 + h^2} + nd - n\sqrt{d^2 + h^2}) \tag{4}$$

만약  $\frac{1}{l}$  과  $d$ 의 값의 변화에 따라서 경로차가 발생한다면

$$\Delta\phi = -k[l^2 \Delta(\frac{1}{l}) - \frac{l^3}{\sqrt{h^2 + l^2}} \Delta(\frac{1}{l}) - n\Delta d + \frac{nd\Delta d}{\sqrt{d^2 + h^2}}] \tag{5}$$

(5)식에서  $h = d \tan \theta$ , 그리고 배율은  $l = Md$  이므로

$$\phi = -k[(M^2 d^2 - \frac{M^3 d^3}{\sqrt{h^2 + M^2 d^2}}) \Delta(\frac{1}{l}) - n\Delta d(1 - \cos \theta)] \tag{6}$$

(6)식에서 M 값이 매우 크다면 Binomial theorem을 이용하여 다시 정리하면

$$\phi = -\frac{1}{2} k d^2 \Delta(\frac{1}{l}) \tan^2 \theta + kn\Delta d(1 - \cos \theta) \tag{7}$$

(7)식의 마지막 부분은 defocus을 나타내고 위상이 일정한 부분이므로 무시할 수 있다[5,6].

$$\phi \approx -\frac{1}{2} k d^2 \Delta \left(\frac{1}{l}\right) \tan^2 \theta = B \tan^2 \theta \quad \left( B = -\frac{1}{2} k d^2 \Delta \left(\frac{1}{l}\right) \right) \quad (8)$$

(8)식에서 보면 위상 에러가 입사하는 빛의 넓이와 렌즈의 초점거리에 의존함을 알 수 있다.

즉  $\theta$  값이 작을수록 그리고  $\Delta \left(\frac{1}{l}\right)$ 이 작을수록 위상 에러가 작아지게 된다.

그리고 공 초점 현미경에서 시료에서 반사되어 검출기에 도달하는 빛의 세기는 다음과 같이 주어진다[7].

$$I(z) = \left| \int_0^\alpha \text{Exp}[2i(\phi + kz \cos \theta)] \sin \theta \cos \theta d\theta \right|^2 \quad (9)$$

여기서  $z$  는 초점으로부터 멀어지는 거리,  $\alpha$  는 광축과 렌즈를 통해 들어오는 빛 사이의 각,  $\phi$  는 렌즈에 의한 위상 에러이고,  $k$  는 파수를 의미한다. 그리고  $\lambda$  는 광원의 파장이다.

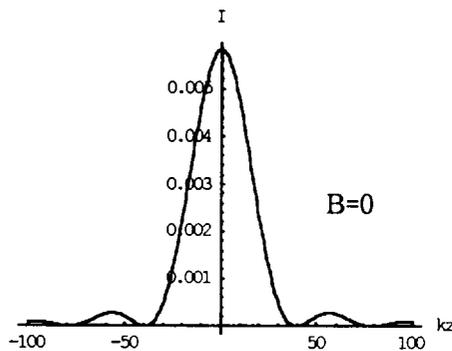
(9)식에서 보면 시료의 위치에 따라 검출기의 빛의 세기가 민감하게 반응함을 알 수 있다.

(9)식에서  $c = \cos \theta$ 라 하자. 그래서 (9)식을 다시 정리하면

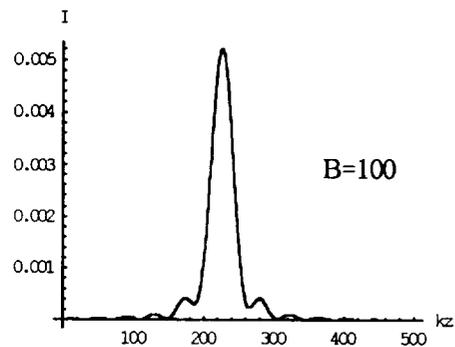
$$I(z) = \left| \int_{\cos \alpha}^1 \text{Exp}\left[2iB \left(\frac{1}{c^2} - 1\right) + 2ikz\right] c dc \right|^2 \quad (10)$$

여기서  $B = -\frac{1}{2} k d^2 \Delta \left(\frac{1}{l}\right)$ 이다. 식(10)은 위상 에러에 의해 경로차가 발생할 경우, 초점에서 점점 멀어지는 거리  $z$  값 따른 빛의 세기를 나타낸 것이다.

$$B = -\frac{1}{2} k d^2 \Delta \left(\frac{1}{l}\right)$$



(a)



(b)

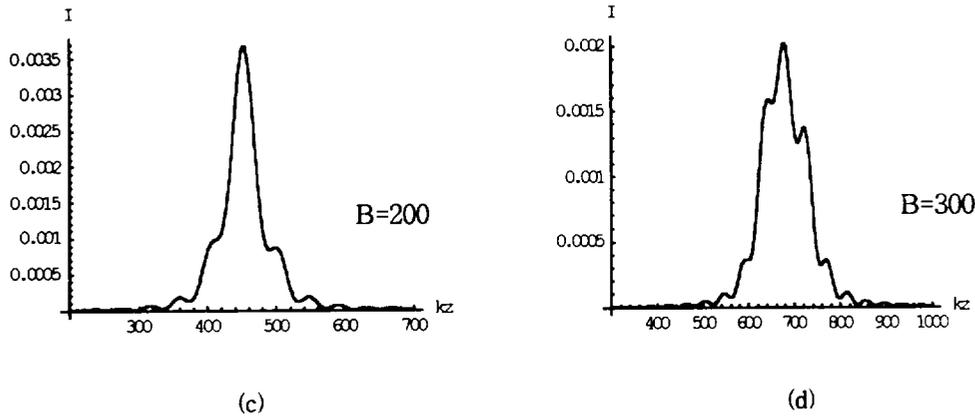
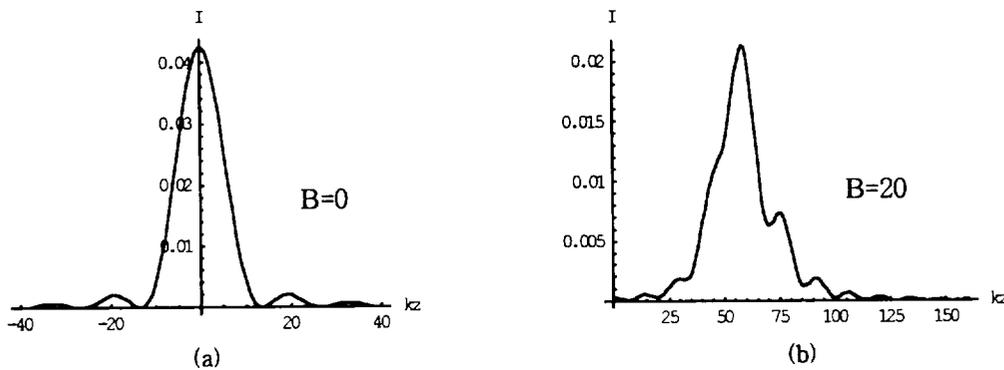


그림 3. 20배 렌즈를 사용했을 때 경로차(B=0, 100, 200, 300)에 따른 Intensity의 변화

그림 3은 식(10)을 이용하여 위상 에러에 의해 경로차가 커짐에 따라 빛의 세기가 변화하는 모습을 전산 기 시뮬 통해 분석한 데이터이다. 광원의 파장은 633 nm 이며, 대물렌즈는 20배( $\alpha = 23^\circ$ , N.A.-0.4)렌즈를 사용했을 경우이다. X축은 렌즈의 초점거리에서 벗어난 길이를 파장으로 규격화한 값으로 무 차원이다. Y축은 거리 변화에 따른 빛의 세기이다. 그림 3(a)는  $B = -\frac{1}{2}ka^2\Delta\left(\frac{1}{l}\right) = 0$  인 경우이다. 다시 말해 위상 에러에 의해 발생하는 경로차가 없는 경우에 거리 변화에 따른 빛 세기 그림이다. 그림 3(b)는 B=100인 경우로 B=0인 경우와 비교해 볼 때 최대 빛의 세기의 분포가 원점에서 오른쪽으로 이동하였고, Side-lobe의 크기가 커지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 B의 값이 그림 3(b)에 비해 2배정도 증가한 것으로 그림 3(a)에 비해 최대 빛의 세기의 분포가 오른쪽으로 약 450 정도 이동했으며, 반치 폭도 넓어지고 있다. 또한 최대 빛의 세기도 0.0035로 작아지고 있다.

그림 3(d)는 B=300인 경우로 빛의 세기 분포가 그림 3(a)~3(c)에 비해 오른쪽으로 많이 이동하였고, 최대 빛의 세기 값을 B=0 과 비교해 볼 때 반 이상 낮아 졌으며, Side-lobe의 크기도 급격하게 증가하고 있다. (그림 3(a)가 최대 빛의 세기가 있는 부분을 중심으로 대칭인데 비해 그림 3(d)는 비대칭의 형태를 보이고 있음도 확인 할 수 있다.) 이와 같은 결과는 Side-lobe의 크기와 반치 폭의 넓이가 광경로에 의존하고 있음을 보여주고 있으며, 경로차가 클수록 해상도가 떨어진다는 것을 알 수 있다.



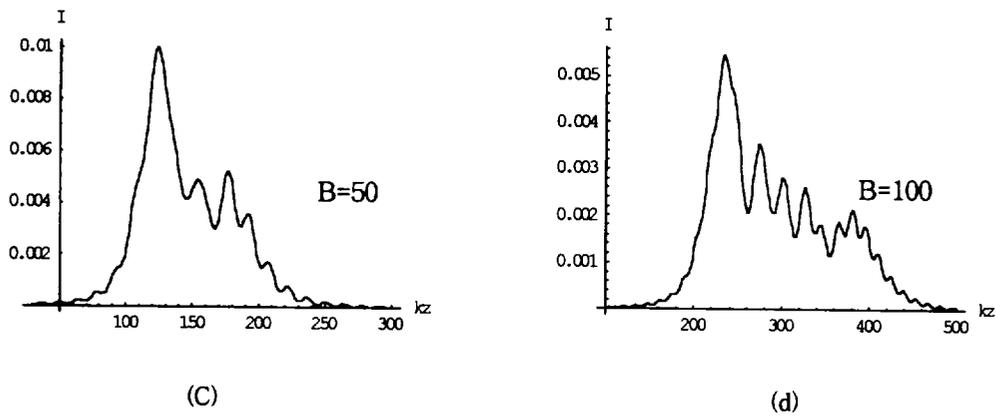


그림 4. 40배 렌즈를 사용했을 때 경로차( $B=0, 100, 200, 300$ )에 따른 Intensity의 변화

마찬가지로 그림 4는 40배 ( $\alpha = 40^\circ$ , N.A.-0.65) 대물렌즈를 사용하였을 경우에 전산기 시능 결과이다. 그림 4(a)는 위상 에러가 없는 경우에 Side-lobe의 크기가 매우 적음 나타내고 있다. 그림 4(b)는 빛의 세기 분포가 4(a)에 비해 오른쪽으로 이동하였고, 빛의 세기도 반정도 낮아졌음을 볼 수 있다. 그림 4(c)에서는 Side-lobe의 크기가 급격하게 증가하였으며 반치 폭의 넓이도 상당히 증가하였다. 그림 4(d)는 B의 값이 그림 4(c)에 비해 2배정도 증가 한 것으로 Side-lobe의 크기를 최대 빛의 세기와 비교해볼 때 거의 차이가 없으며, 반치 폭의 크기도 그림 4(a)에 비해 약 6배정도 넓어졌다. 이 상태에서는 광축 방향으로 시료를 측정할 경우 시료의 형태를 거의 구분할 수 없다.

그림 3,4에서 보듯이 렌즈의 왜곡과 위상 에러에 의해 발생하는 Side-lobe의 영향의 커질수록 반치 폭의 크기는 점점 증가하며, 빛의 세기 또한 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 빛의 세기가 가장 큰 부분을 중심으로 대칭 형태에서 비대칭 형태로 바뀌었다. 또한 Numerical Aperture값이 클수록 경로차의 변화에 민감하게 반응함을 알 수 있다. 이러한 Side-lobe는 정확한 영상을 얻는데 막대한 지장을 주게 된다.

## III. 실험

## 1. 실험 구성도

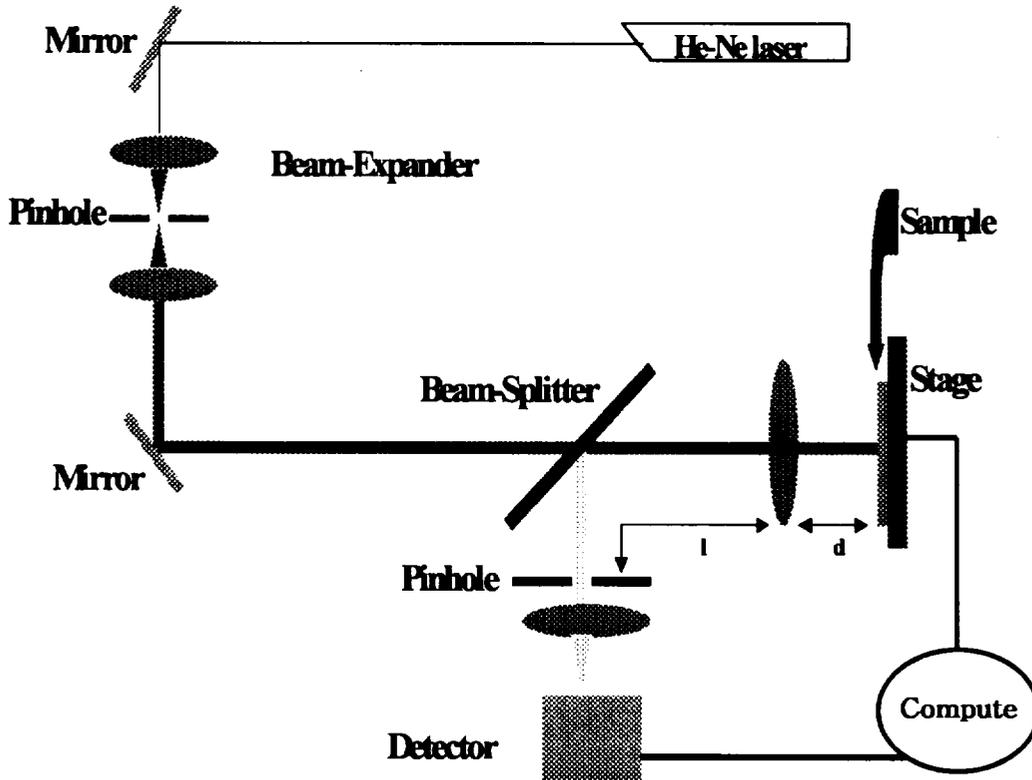


그림 5. 실험 구성도

그림 5는 본 실험의 구성도이다. 광원으로는 He-Ne 레이저( $\lambda = 633 \text{ nm}$ )를 사용하였고, Beam expander를 사용하여 빛의 크기를 확대시켰는데 빛을 확대한 이유는 Rayleigh's criterion( $\theta = \frac{1.22 \lambda}{D}$ )에서 입사한 빛의 크기(D)를 크게 해줌으로서 분해능을 좋게 하기 위함이다[8]. 그리고 Beam expander 사이에 있는 pin-hole은 레이저에서 나온 Gaussian 빛이 완벽한 Gaussian 형태가 아니기 때문에 이것을 수정하기 위하여 사용하였는데 이러한 pin-hole을 사용하는 것을 일반적으로 spatial filter라 한다[9,10]. 대물렌즈는 20배(N.A.-0.4)와 40배(N.A.-0.65) 렌즈를 사용하였고, 시료를 움직이는 stage는 step-motor를 사용하여 광축 방향으로 약  $2.5 \mu\text{m}$ 의 간격으로 움직였다. 검출기 앞에 있는 pin-hole은 초점 외의 상을 제거하기 위하여 사용된 것으로  $20 \mu\text{m}$ 를 사용하였으며, 검출기 앞의 렌즈는 초점거리가 약 3cm인 렌즈를 사용하였다.

2. 실험 결과

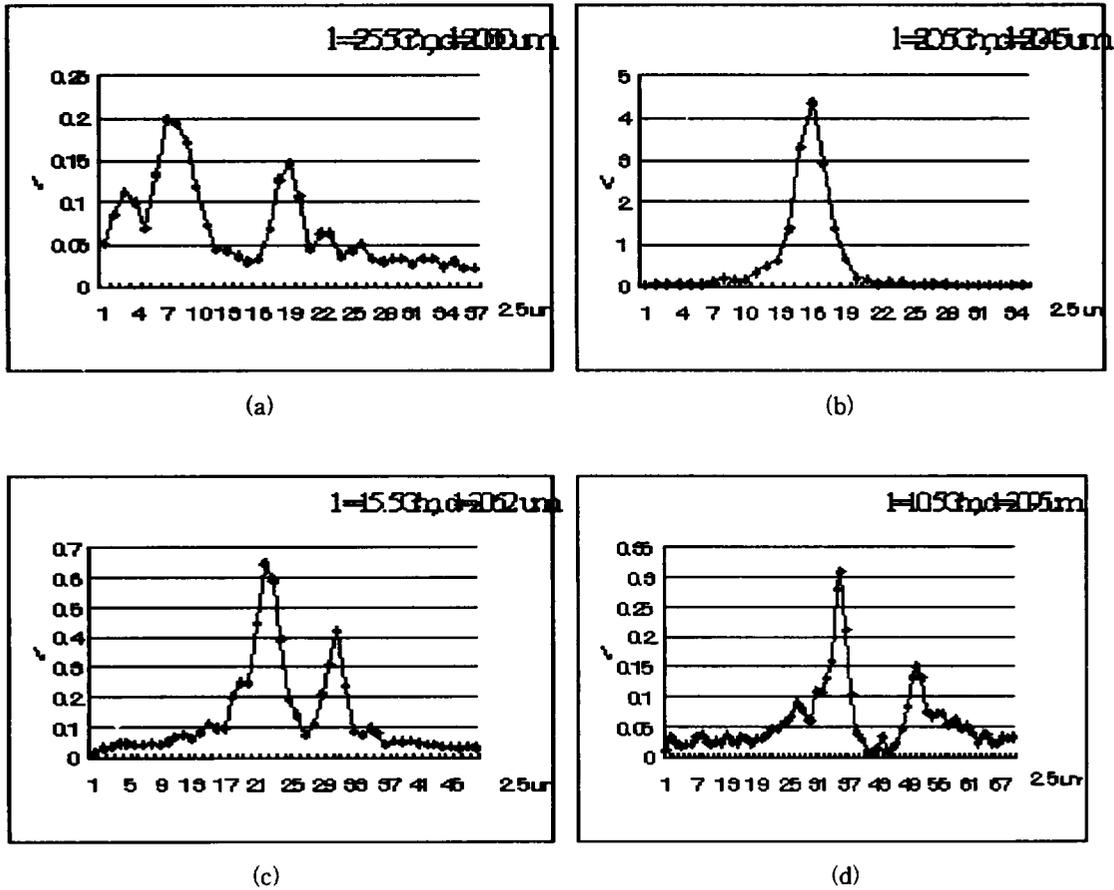


그림 6. 20배 대물렌즈를 사용한 경우에 d(대물 렌즈와 시료 사이의 거리)를 광축 방향으로 2.5 μm씩 변화시키고, l(대물렌즈와 상까지의 거리)를 5cm씩 이동한 실험 데이터.

그림 6은 20배 대물렌즈( $\alpha=23^\circ$ , N.A.-0.4)를 사용하였을 때의 실험 데이터이다. x축은 시료가 광축 방향으로 이동한 거리를 나타낸 것이며, Y축은 거리의 변화 따른 빛의 세기를 나타낸 것이다. 시료는 거울을 사용하였고, 시료에서 대물렌즈 까지의 거리(d)를 일정한 범위내에서 광축 방향으로 2.5 μm씩 이동하고, 대물렌즈에서 상까지의 거리(l)를 5cm씩 변화시키면서 빛의 세기가 변화는 것을 측정해 온 것이다. 그림 5(a)는  $l=25.5\text{cm}$ ,  $d=2000\mu\text{m}$ 인 경우로 Side-lobe의 크기가 매우 크고 반치 폭 또한 넓게 분포하고 있다. 그리고 최대 빛의 세기의 값은 작게 나타남을 볼 수 있다. 이에 반해 그림 6(b)는  $l=20.5\text{cm}$ ,  $d=2045\mu\text{m}$  상태로 Side-lobe크기가 최소화되었으며 최대 빛의 세기의 크기도 증가하였다. 또한 빛이 세기가 가장 큰 부분을 중심으로 대칭 형태를 보이고 Side-lobe의 크기도 작다. 이는 경로차가 없는 경우의 전산기 시뮬 데이터인 그림 3(a)와 같은 결과이다. 즉 이 부분이 경로차가 최소화되는 지점으로 볼 수 있다. 그림 5(c)의 경우는 최대 빛의 세기는 그림 6(b)에 비해 크기만 반치 폭의 넓고, Side-lobe의 크기도 최대 빛의 세기 값과 비교

해볼 때 무시 할 수 없을 정도로 크다. 그리고 빛의 세기가 가장 큰 부분을 중심으로 반대칭의 형태를 이루고 있다. 그림 6(d)를 보면 빛의 세기의 분포가 그림 6(b)에 비해 오른쪽으로 이동하였으며 최대 빛의 세기도 감소한 것을 볼 수 있다. 또한 반치 폭도 넓게 분포하고 있다.

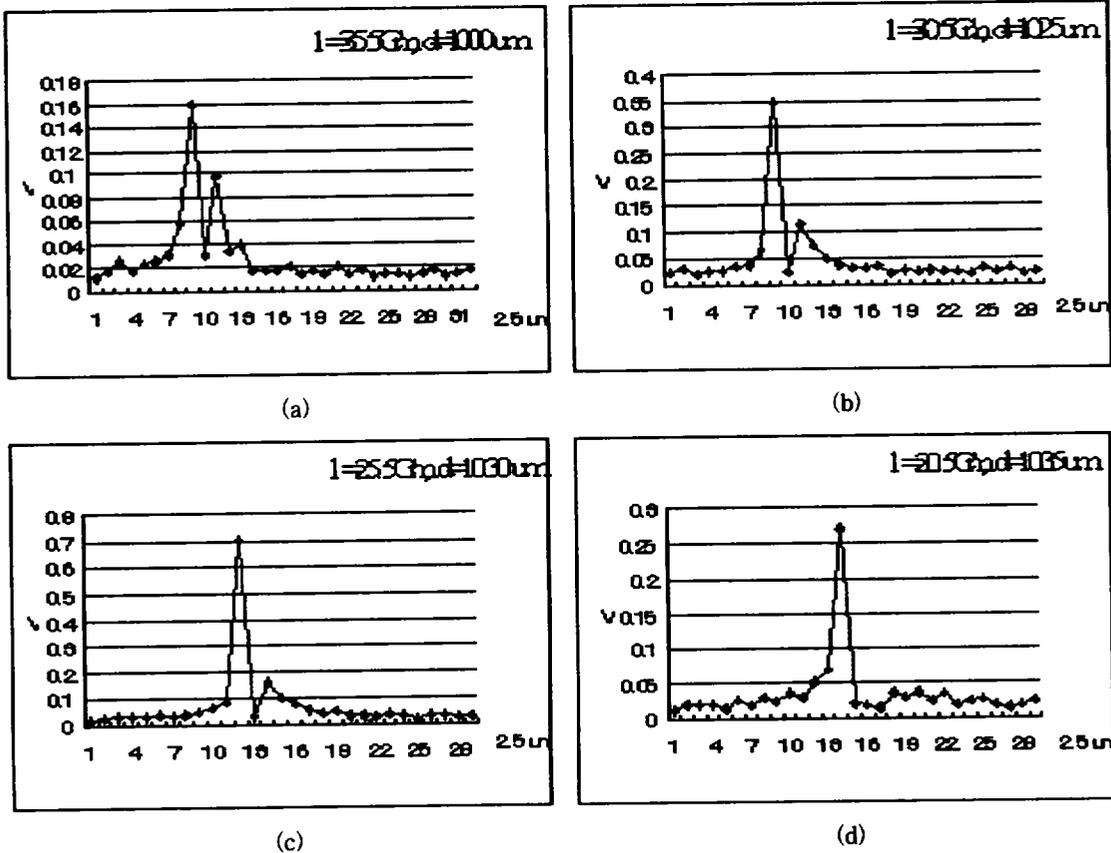


그림 7. 40배 대물렌즈를 사용한 경우에  $d$ (대물렌즈와 시료 사이의 거리)를  $z$ 축 방향으로  $2.5\mu\text{m}$ 씩 변화시키고,  $l$ (대물렌즈와 상까지의 거리)를  $5\text{cm}$ 씩 이동한 실험 데이터.

그림 7은 40배 대물렌즈( $\alpha=40^\circ$ , N.A.=0.65)를 사용하여 그림 6에서와 같은 실험조건으로 대물렌즈와 시료 사이의 거리 그리고 대물렌즈와 상까지의 거리를 변화시켜 빛의 세기를 측정한 실험 데이터이다. 그림 7(a)를 보면 대물렌즈와 상까지의 거리가  $35.5\text{cm}$ , 대물렌즈와 시료사이의 거리가  $1000\mu\text{m}$ 인 경우이다. 위상 에러에 의한 Side-lobe의 영향으로 반치 폭의 넓고, 최대 빛의 세기도 작다. 이에 비해 그림 7(b)는 반치 폭은 좁아졌으며 최대 빛의 세기 크기는 증가하였다. 그리고 빛의 세기 분포도 7(a)에 비해 오른쪽으로 이동하였음을 볼 수 있다. 이것은 그림 7(a)에와 비교해 경로차가 감소하였기 때문에 나타난 현상이다. 그림 7(c)에서는 Side-lobe의 크기가 최대 빛의 세기와 비교해 매우 작아졌으며 반치 폭도 매우 좁다. 또한 빛의 세기가 가장 큰 부분을 중심으로 대칭형태에 근접함을 확인 할 수 있다. 그러므로 이 부분이 Herschel 조건을 가장 잘 만족하는 부분이며, 경로차가 없는 경우에 전산기 시능 데이터인 그림 4(a)에 가장 근접한 것으로 볼

수 있다. 그림 6과 7의 실험 결과에서 보듯이 위상 에러에 의한 경로차를 최소화 할 경우 Side-lobe의 크기는 매우 작고, 빛의 세기는 크게 나타났다. 그리고 빛의 세기가 가장 큰 부분을 중심으로 빛의 세기 분포가 대칭형태를 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 NA가 클수록 반치 폭의 점점 좁아짐으로써 분해능이 좋아진다는 사실도 알 수 있었다. 이는 전산기 시뮬을 통해 알아본 내용과 동일한 결과이다.

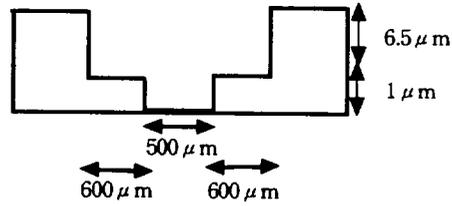


그림 8. 시료의 크기

렌즈의 왜곡과 위상 에러에 의해 발생하는 Side-lobe가 해상도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 8의 시료를 측정하였다.

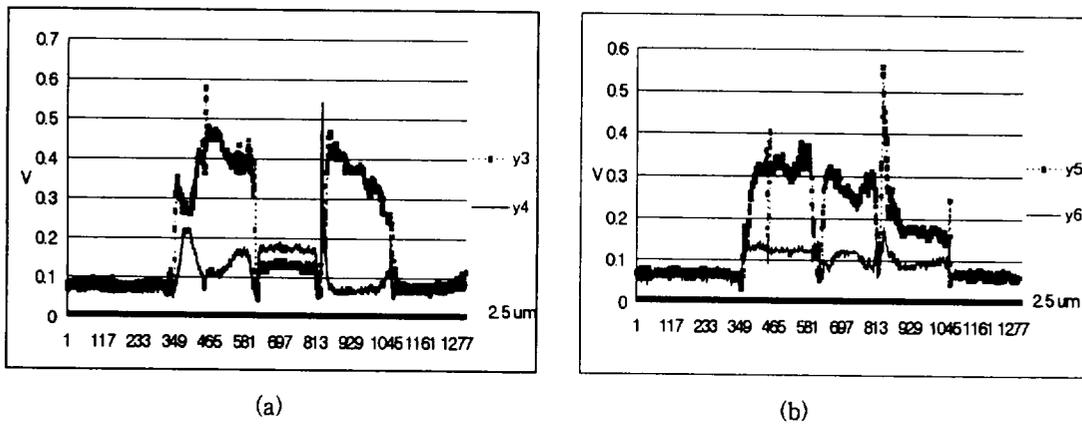


그림 9. 렌즈 왜곡에 의한 Side-lobe의 영향

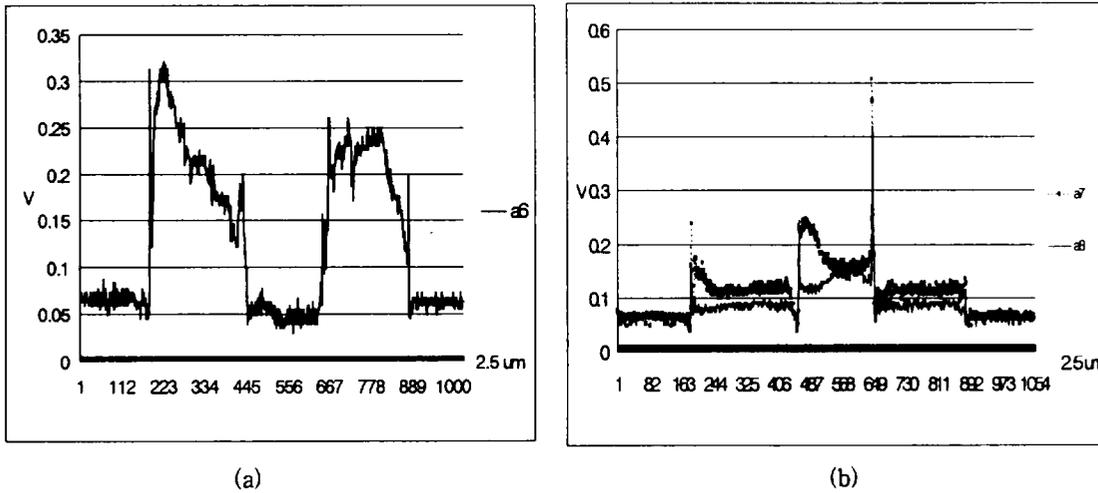


그림 10. 렌즈왜곡에 의한 Side-lobe를 최소화

그림 9는 그림 8의 시료를 측정할 실험 데이터이다. 검출기 앞의 pin-hole을 20  $\mu\text{m}$ 로 사용했을 경우 초점 심도가 2.5  $\mu\text{m}$  인 40배 대물렌즈를 사용하였다. X축은 x 방향으로 시료를 2.5  $\mu\text{m}$ 씩 이동한 거리를 나타내며, Y축은 이동거리에 따른 빛의 세기를 나타낸다. 우변의 y는 광축 방향으로 시료를 1.25  $\mu\text{m}$ 씩 이동한 거리를 표시한 것이다. 그림 9(a)는 시료를 광축 방향으로 이동시켜 시료의 중간 부분에 초점이 형성되도록 하여 측정한 데이터이다. y3 부분에서 빛이 세기가 가장 크게 측정되었다. 이것은 시료 표면에서 시료중간까지의 깊이가 3.75  $\mu\text{m}$ 임을 뜻한다. 하지만 실제 시료의 깊이는 6.5  $\mu\text{m}$ 로 측정결과와 다르게 나타났다. 그림 9(b)는 시료의 가장 밑 부분에 초점이 형성되었을 때에 빛의 세기를 표시한 것으로 시료의 위치가 광축 방향에 대해 y4, y5, y6로 변화하면서 빛의 세기가 밑 부분의 중간 영역을 제외하고는 계속하여 감소 하여야 하지만 y8에서 볼 수 있듯이 빛의 세기가 감소하지 않고 증가함을 관찰 할 수 있었다. 이로 인해 시료의 정확한 형태를 알 수 없으며 또한 시료의 깊이에 대한 정보도 정확히 알 수 없었다. 그림 9(a)와 9(b)결과는 시료에 대한 정보가 렌즈 왜곡과 위상 에러에 의해 발생하는 Side-lobe로 인해 부정확하게 측정되고 있음을 보여주고 있다.

그림 10은 Herschel 조건을 만족하도록 광 경로를 조절한 후에 그림 9를 측정할 때와 같은 실험 조건하에서 그림 8의 시료를 측정할 데이터이다. 그림 10(a)와(b)는 각각 초점이 시료의 중간부분 과 가장 밑 부분에 형성되도록 시료를 광축 방향으로 이동하여 빛의 세기를 측정한 것이다. 그림 10(a)에서 보듯이 y6일 경우에 빛이 세기가 가장 크게 나타났다. 이는 시료의 중간 깊이가 약 6.25  $\mu\text{m}$ 임을 나타내는 것으로 실제 시료의 깊이와 거의 일치한다. 또한 그림 9(a)에서 Side-lobe의 영향으로 시료에 대한 정보가 부정확했던 것을 광 경로의 조절을 통해 수정 되었음을 확인 할 수 있다. 그림 10(b)을 그림 9(b)와 비교하여 보면 9(b)에서는 구분할 수 없었던 시료의 가장 밑 부분의 형태를 10(c)에서는 빛의 세기 차이를 이용하여 구별 할 수 있음을 볼 수 있다. 그림 9 와 그림 10의 결과는 렌즈에 의한 위상 왜곡을 광 경로의 조절을 통해 Side-lobe를 최소화함으로써 광축 방향의 분해능을 향상시

킬 수 있음을 말해준다.

#### IV. 결 론

공 초점 광학 현미경에서 시료의 정확한 영상을 얻기 위해서는 Herschel 조건을 만족해야한다. 하지만 렌즈의 왜곡과 광경로에 의한 위상 에러 때문에 이 조건을 만족시키지 못하다. 공 초점 현미경에서는 이를 해결하기 위한 방법으로 광 경로 즉 대물렌즈와 시료사이의 거리 그리고 대물렌즈와 상까지의 거리를 적절히 조절하여 경로차를 최소화 함으로써 Herschel 조건을 만족 시킬 수 있는 조건을 전산기 시뮬레이션으로 찾아내고, 이를 실험으로 확인하였다.

렌즈의 왜곡과 위상에러에 의해 발생하는 경로차의 변화에 따른 빛의 세기의 변화양상을 전산기 시뮬레이션을 통해 조사하여 보았다. 이것으로 경로차는 광 경로 변화에 의존한다는 것을 알 수 있었고, 경로차가 클수록 최대 빛의 세기의 크기는 작아지고 Side-lobe의 크기는 증가하여 반치 폭이 넓어짐을 확인할 수 있었다. 실제 실험에서는 20배와 40배의 대물렌즈를 사용하여 광 경로 변화에 따라 Side-lobe가 감소하고 증가하는 것을 확인할 수 있었으며,  $f=20.5$  Cm,  $d=2045 \mu\text{m}$ (20배)와  $f=25.5$  Cm,  $d=1030 \mu\text{m}$ (40배)인 지점이 경로차가 없는 경우의 전산기 시뮬레이션 데이터와 가장 유사한 지점임을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T.R. Corle and G.S. Kino, Confocal scanning optical microscopy and related imaging system(Academic press, New York 1996) Chap.1
- [2] B.E.A. saleh and M.C. Teich ,Photonics , 83-87 (1994)
- [3] P.C.Cheng, T.H.Lin, W.L Wu, and J.L Wu , Multidimensional Microscopy, 1-5 (1993)
- [4] C.J.R. Sheppard and C.J. Cogswell, Optik 87, 34-38 (1991)
- [5] C.J.R. Sheppard and Min gu, Appl.Opt, 30, 3563-3568(1991)
- [6] C.J.R. Sheppard , Appl.Opt, 27, 4782-4786 (1988)
- [7] C.J.R. Sheppard and T.Wilson, Appl.Phys.Lett, 38, 858-859 (1981)
- [8] G.Boone, Signal processing using optics(Oxford press, New York 1998),106-111
- [9] Steffen Lindek, Christoph Cremer, and Ernst H.K.Stelzer, Appl.Opt, 35,126-130(1996)
- [10] C.J.R. Sheppard, Min Gu, Keith Brain and Hao Zhou, Appl.Opt, 33, 616-624(1994)
- [11] Christian K. Sieracki, Christopher G.Levy, and Eric Whansen, Opt.lett, 20,1213(1995)
- [12] C.J.R. Sheppard and Min Gu, Opt. Commun. 88, 180-190 (1992)