

## Photoresist 용융법을 이용한 미세렌즈 행렬 제작\*

주영구 · 송현우 · 이용희

한국과학원 물리학과

송 석 호

한국전자통신연구소

(1994년 3월 28일 받음)

두꺼운 Photoresist(PR)로 원기둥 모양을 만들고 이를 용융함으로써 미세렌즈 행렬을 제작하였다. 이 방법으로 직경 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ 의 렌즈를 만들고 전자주사현미경(SEM)과 탐침형 표면측정기( $\alpha$ -step)를 통해 그 모양을 확인하였다. 그리고 렌즈의 광학적 성능을 측정하기 위해 위상변이 간섭법을 사용하여 평행광의 렌즈 통과 후 파면을 구하였다. 여기서 기준 구면과의 파면오차를 구하여 렌즈 초점거리나 초점 광도분포 등을 얻었다. 그 결과 직경 100  $\mu\text{m}$ , 초점거리 164  $\mu\text{m}$ 의 미세렌즈는 초점의 spot 직경이 5  $\mu\text{m}$ 보다 작은 것으로 측정되었다.

### I. 서 론

본 연구에서 시도한 미세렌즈 배열의 제작은 광섬유나 LED 배열간의 다중 연결 소재<sup>[1]</sup>로서의 이용을 목적으로 하고 있다. 그러나 미세렌즈는 이 밖에도 광검출기의 감도 증대, image processing 등에도 그 응용이 확장되고 있어 미세렌즈 제작과 측정에 관한 중요성은 증가하고 있다.

미세렌즈의 제조 방법으로서 여러가지 방법들이 제안되고 연구되어 왔다. 이온 교환법<sup>[2]</sup>을 이용한 평판형 미세렌즈, Fresnel 윤대판(zone plate)을 이용한 방법,<sup>[3]</sup> 홀로그래프를 이용한 방법 등이 여기에 속한다. 그러나 가장 눈길을 끄는 방법중의 하나는 Popovic, Sprague, Neville Connell이 소개하고 있는 photoresist(PR) 용융법이다.<sup>[4]</sup> 이 방법은 매우 간단한 방법으로 성능 좋은 구면 렌즈를 제작할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이 PR 용융법을 사용하여 구면 렌즈를 제작하고 이 방법으로 조절 가능한 렌즈 인수의 범위, 그리고 렌즈의 성능 측정을 다루었다.

PR 용융법은 광리소그라피(photolithography)를 이용하여 원기둥 모양의 PR 구조를 형성하고 140~160°C에서 용융시킬 때, 액체로 변한 PR이 표면 장력에 의하여

구면을 형성하게 되는 원리를 이용한다. 제작된 렌즈는 위상변이 간섭법(phase shifting interferometry)<sup>[6]</sup>을 통해 얻어진 파면 정보에서 초점의 광도분포, 주파수 전달 특성과 같은 광학적 특성이 측정되었다.

### II. 미세렌즈 제작

#### I. 미세렌즈의 제작 변수<sup>[5]</sup>

렌즈의 제작에 있어 주어진 초점거리의 렌즈를 만들기 위해서는 PR의 필요한 두께를 알아야 한다. 여기서 렌즈의 모양은 구형이라고 가정하고 용융된 뒤의 PR의 체적은 일정하다고 본다. 렌즈의 근축 초점거리는 그림 1에서 보이는 것처럼 하나의 구면에 의해 형성된다고 생각한다. 곡률 반경  $R$ , 구경  $2r$ 인 렌즈의 표면 높이  $h$ 는 다음 식에 의해 주어진다.

$$h = R - (R^2 - r^2)^{1/2} \quad (1)$$

용융전의 PR 원기둥의 체적은  $T_{sph} \pi r^2$ 이고, 여기서  $T_{sph}$ 는 구면 렌즈를 만드는 데 필요한 두께이다. 용융후의 PR 두께는  $(1/3)\pi h^2(3R - h)$ 이다. 따라서 필요한 PR의 두께는 다음과 같이 주어진다.

$$T_{sph} = \frac{h}{6} \left( 3 + \frac{h^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

\* 본 연구는 한국과학재단 "미세광학소자연구"의 한 부분으로 진행되었습니다.

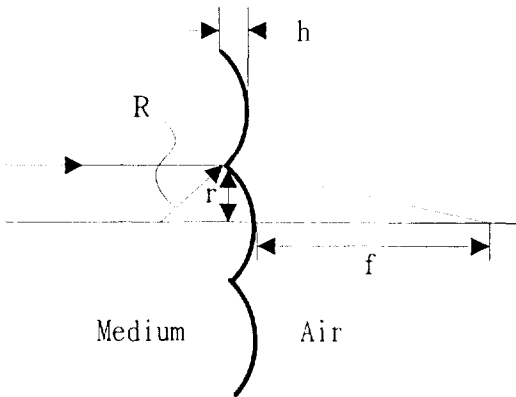


그림 1. 미세 렌즈를 기술하는 인수들.

이 수식을 이용하여 계산한 결과, 100  $\mu\text{m}$  직경의 미세 렌즈는 초점거리가 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ 일 경우 각각 13.7  $\mu\text{m}$ , 5.3  $\mu\text{m}$ 의 PR 두께가 필요함을 알 수 있다.

결국, PR 용융법에서 렌즈의 직경과 초점거리를 조절하는 변수는 리소그래피(lithography)에서 얻어지는 PR 원기둥의 직경과 높이를 통해서이다. 원기둥 직경은 사용하는 마스크 패턴의 직경과 같고 높이는 PR의 종류와 회전 코팅시의 회전 속도를 변화시켜 조절이 가능하다. 실험에서 사용된 PR(Hoechst사) AZ4562 경우 회전 속도 1000~6000 rpm의 범위에서 PR의 두께는 약 20~4  $\mu\text{m}$  사이에 있는 것으로 알려져 있다.

원기둥 모양을 용융하고 난 후에 그 직경의 증가를 고려할 수 있는데 실제로 측정된 결과, PR 두께 7.2  $\mu\text{m}$ 에서 직경 100  $\mu\text{m}$  렌즈는 약 0.5% 감소하였고, 직경 50  $\mu\text{m}$  렌즈는 약 0.5% 증가에 그쳤다. 이것으로부터 용융에서 일어나는 직경 변화는 제작에 있어 거의 영향을 주지 않음을 확인하였다.

위의 식 (2)는 thin lens를 가정하고 PR의 두께를 계산한 것으로 실제로 제작된 렌즈의 인수들을 대입하여 얻은 결과와 차이를 보인다. 직경이 100  $\mu\text{m}$ 와 50  $\mu\text{m}$ 이면서 초점거리가 각각 165  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ 인 렌즈를 만드는 데 필요한 PR 두께의 계산값은 각각 7.0  $\mu\text{m}$ 와 5.3  $\mu\text{m}$ 이지만, 실제로 측정된 두께는 두 경우 모두 7.2  $\mu\text{m}$ 였다. 이것은  $f/\#$ 가 작을수록 식 (2)의 사용에 주의를 기울여야함을 알려주고 있다. 그리고 변수 조절에 영향을 주는 요인으로 용융 전후에 일어나는 PR 체적 감소를 들 수 있으나, 이 영향은 수 % 이내로서 큰 영향을 주지는 않는다. 결국 정확한 렌즈 제작 조건을 얻는 방법은 반복된 렌즈 제작과 렌즈 인수의 측정을 통해서이고, 위 식들의 사용은 제작에 있어 대략적인 방향 설정에만

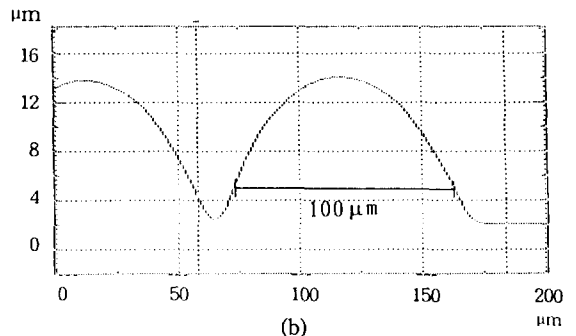
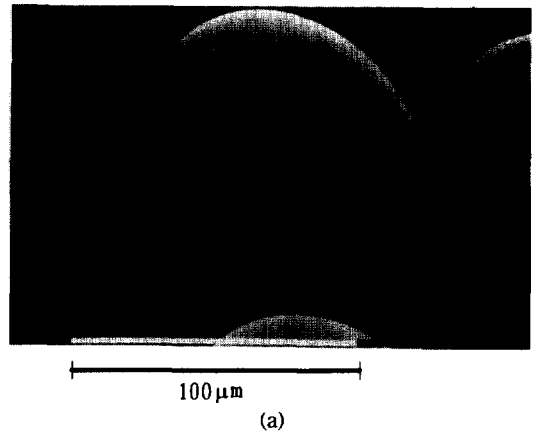


그림 2. (a) SEM으로 본 미세렌즈, 렌즈 직경=100  $\mu\text{m}$   
(b)  $\alpha$ -step으로 본 미세렌즈 단면, 렌즈 직경=100  $\mu\text{m}$ .

국한되었다.

### 2. 렌즈 제작

원기둥 모양의 PR 구조 형성을 위해서 내부가 채워진 원모양의 마스크 패턴을 필요로한다. 실험은 일정한 두께의 PR에서 다양한 크기와 다양한  $f/\#$  렌즈 제작 가능성을 시험하기 위해 최대 400  $\mu\text{m}$ 에서 최소 15  $\mu\text{m}$ 까지의 크기로 만들었다.

실험에서 사용된 PR은 Hoechst사의 AZ4562이고, 회전 코팅(spin coating)은 회전 속도 3000 rpm에서 30초간 하였다. 코팅 후 90°C 에서 5분동안 건조시켰으며, 노출은 10  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 에서 13초, 현상은 AZ500MIF 원액에서 3분 10초 동안 진행하였다. 이렇게 현상된 PR 원기둥 구조는 160°C 에서 10분간 오븐에 두어 렌즈 모양을 형성시켰다.

### 3. 렌즈 외형 검사

그림 2-(a)는 전자주사현미경(SEM)을 통하여 본 미세 렌즈의 표면이다. 그림에서 볼 수 있듯이 외형이 매끄

러운 곡면을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 실제로 제작시에는 광학 현미경을 통해 렌즈의 완성도를 쉽게 파악할 수 있다.

렌즈 단면에 관한 정보를 얻기위해 Tencor사의  $\alpha$ -step을 이용하였다.  $\alpha$ -step은 다이아몬드 끝(tip)을 이용해 높이의 굴곡을 얻어내는 기계로서 100 Å이내의 오차로 렌즈의 단면을 구할 수 있다.  $\alpha$ -step에 의한 렌즈의 단면 모양이 그림 2-(b)에 나타나 있다. 이 그림에서 렌즈 중심은 부드러운 곡면을 이루지만 가장자리 부근은 서로 구분된 렌즈 경계가 확실하지 않음을 볼 수 있다. 이것은 SEM 사진이 보여주는 렌즈 행렬과 다른 점으로  $\alpha$ -step 자체의 측정 한계이다.  $\alpha$ -step 끝이 유한 크기의 각도를 가지기 때문에 경사가 급한 렌즈 가장자리 부분에서는 단면을 그대로 따라가지 못한다. 이것은 원통형 렌즈를 만들어 그 단면을 SEM을 통해 봄으로써 가장자리가 예리한 것을 확인할 수 있었다.

직경 200  $\mu\text{m}$  이상일 경우, 원형이 아닌 가운데가 들어간 형태로 응용됨을 볼 수 있었다. 실험 결과 PR 응용법으로 만들 수 있는 미세 렌즈의  $f/\#$ 의 범위는 1~2 정도로 확인되었다. 이 범위는 PR 응용법과 여러가지 다른 방법<sup>[5]</sup>과의 결합을 통해 확장이 가능하다.

**4. 초점거리 측정**

He-Ne( $\lambda=543\text{ nm}$ ) 레이저를 렌즈에 비추고 렌즈가 고정된 마이크로미터(micrometer)를 앞뒤로 움직인다. CCD 카메라에 렌즈의 표면과 렌즈의 초점이 번갈아 상을 맺게 하고, 이 두 지점 사이의 마이크로미터 눈금 간격을 읽어 초점거리를 구하였다. 측정 결과, 직경 100  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ 의 렌즈는 각각 165  $\mu\text{m}$ 와 60  $\mu\text{m}$ 의 초점거리를 가지고 있었다. 단 이 값들은 마이크로미터의 눈금 간격에 해당하는  $\pm 5\ \mu\text{m}$ 의 오차를 가지고 있다.

**III. 위상변이간섭법을 이용한 미세렌즈 광학적 성능 분석**

**1. 위상변이간섭법**

렌즈에 평행광을 입사시켜 얻는 파면은 렌즈가 입사광을 변형시킨 정보를 담고 있다. 이 파면의 측정을 위해 위상변이간섭법을 사용했다. 두 빛이 간섭할 때 간섭계의 기준 광선에 위상변이를 45°에서 시작해서 90°씩 더해 가면 간섭 무늬의 광도 분포 A, B, C를 얻는다.

$$A(x, y) = I_1 + I_2 \cos\left\{\phi_0(x, y) + \frac{\pi}{4}\right\}$$

$$B(x, y) = I_1 + I_2 \cos\left\{\phi_0(x, y) + \frac{3\pi}{4}\right\}$$

$$C(x, y) = I_1 + I_2 \cos\left\{\phi_0(x, y) + \frac{5\pi}{4}\right\} \tag{3}$$

위의 광도 분포에서 렌즈를 통과하고 나오는 위상  $\phi_0$ 는 다음과 같이 구해진다.<sup>[6]</sup>

$$\phi_0(x, y) = \tan^{-1}\left\{\frac{C(x, y) - B(x, y)}{A(x, y) - B(x, y)}\right\} \tag{4}$$

**2. 파면 오차와 impulse response 함수<sup>[7]</sup>**

파면 전달을 표현하는 식은 다음과 같은 선형성을 포함하고 있다.

$$U_i(x_i, y_i) = M \iint_{-\infty}^{\infty} h(x_i, y_i; x_0, y_0) U_0(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \tag{5}$$

여기서,  $U_0, U_i$ 는 물체면과 상면에서의 필드의 크기이고  $M$ 은 시스템의 배율이다.  $h(x_i, y_i; x_0, y_0)$ 는 이 두 필드 사이를 연결시켜 주는 impulse response 함수로서  $(x_0, y_0)$ 에 점광원이 있을 때  $(x_i, y_i)$ 에 생기는 상을 나타낸다. 렌즈 좌표  $(x, y)$ 에서 수차가 없는 파면과 렌즈 통과 후의 파면의 차이를 파면 오차(wavefront error)  $W(x, y)$ 라 할 때 실제 렌즈의 impulse response 함수  $h(x_i, y_i)$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$h(x_i, y_i) = Constant \times \iint_{Aperture} \exp[jk_0 W(x, y)] \exp[-j2\pi(x_i x + y_i y)] dx dy \tag{6}$$

$h(x, y)$ 를 구하면 점광원의 상인 PSF(Point Spread Function)와 주파수 특성인 MTF(Modulation Transfer Function)가 다음 식을 통해 얻어진다.

$$PSF = |h(x, y)|^2 \tag{7}$$

$$H(f_x, f_y) = F\{|h(x, y)|^2\} \tag{8}$$

$$MTF = |H(f_x, f_y)|H(0, 0) \tag{9}$$

여기서  $F\{\}$ 는 푸리에 변환을 나타낸다.

**3. 측정 및 결과**

위상변이간섭법은 그림 3에 나온 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 이루어졌고, 광원으로 633 nm의 He-Ne 레이저를 사용하였다. 여기서 현미경 대물 렌즈는 각 경로에 배치되어 미세렌즈가 없을 때 발산하는 두 구

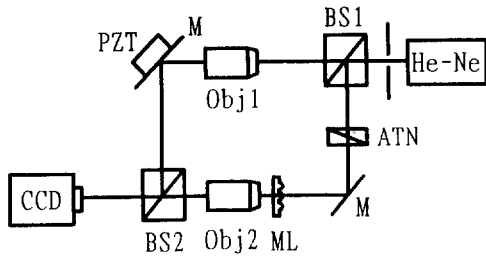
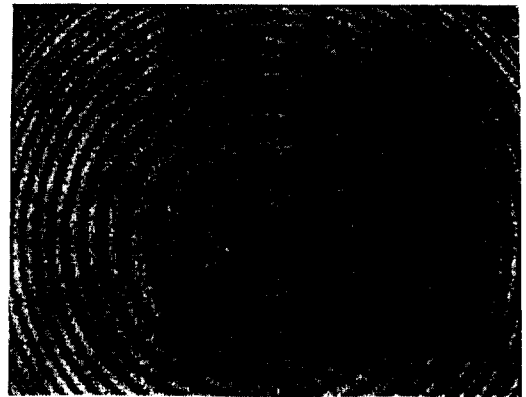


그림 3. 파면 측정에 사용된 Mach-Zehnder 간섭계.

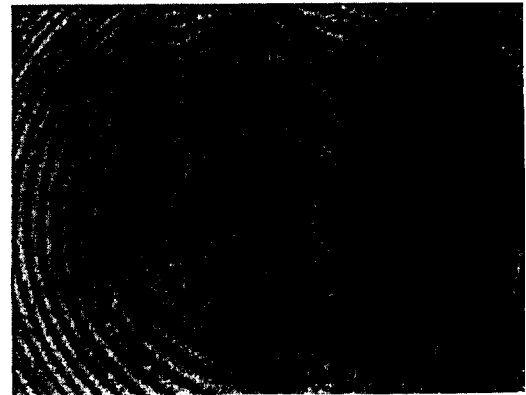
면파가 CCD 카메라까지 같은 거리의 경로를 갖게하여 평탄한 간섭 무늬를 얻었다. 그 다음에 미세렌즈를 한쪽 경로에 끼워 넣어 렌즈 표면이 CCD 카메라에서 보일 때 생기는 간섭 무늬를 Frame-Grabber를 통해 저장하였다. 사용된 Frame-Grabber는 512×512의 데이터 양을 가지고 있고 각 점을 8 bit의 gray level로 표현한다. 기준 광선의 위상변이는 PZT 거울을 이용하여 간섭무늬가 한 주기 변하는 전압을 켜 다음 이 전압의 1/4씩 가함으로써 90°의 위상차를 주었다. 이렇게 하여 그림 4에 나타난 3개의 간섭무늬를 얻었고, 이것은 위상변이간섭법을 이용한 Fringe Analysis 프로그램을 통해 연속적인 파면으로 재생되었다.

얻어진 파면은 근축 광선 부분에서 포물면으로 모델링하여 그 계수를 구하였다. 근축 광선 부분은 포물면 꼭지점을 중심으로 32×32 영역에 한정하였다. 근축 광선 부분을 사용한 이유는 전체 파면을 최소 자승법에 의해 모델링할 경우 전체 오차를 줄이기 위해 중심부의 오차를 허용하기 때문이다. 이 포물면의 계수와 일치하는 구면을 수차가 없는 파면으로 가정하여 파면 오차  $W(x, y)$ 를 구하였다. 구해진 파면 오차는 Zernike 다항식<sup>[8]</sup>의 계수 비교에서 uniform aberration, tilt, defocusing항이 제거되어 최종 파면 오차를 얻을 수 있었다.

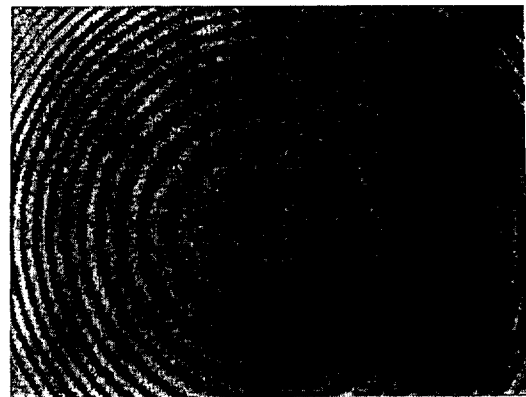
포물면의 모델링으로부터 계산한 초점거리는 직경 100  $\mu\text{m}$  렌즈 경우 164  $\mu\text{m}$ 이고, 이 값은 micrometer로 측정된 165  $\mu\text{m}$ 와 거의 같음을 확인할 수 있었다. 파면 오차에서 식 (6), (7)을 통해 구한 PSF는 그림 5에 나타나 있다. 중심 peak의 광도가 1/10으로 떨어지는 지점을 초점의 spot 직경이라 할 때, 측정된 렌즈의 초점의 spot 직경은 4.5  $\mu\text{m}$ 이다. 같은 그림에서 파면 오차가 없다고 가정하고 푸리에 변환을 통해 구한 PSF는 그 초점의 spot 직경이 2.2  $\mu\text{m}$ 이다. Airy 패턴의 경우 이 직경 내에 80%의 광량이 들어오므로 제작된 미세렌즈 또한 5.0  $\mu\text{m}$ 의 원 안에 대부분의 입사광이 집중된다고 볼 수 있다. 실제로 정확한 Airy 패턴에 상응하는 초점의 spot 직경은



(a)



(b)



(c)

그림 4. 위상변이간섭법에 사용된 세개의 간섭 무늬. (a)  $\phi=0^\circ$  (b)  $\phi=90^\circ$  (c)  $\phi=180^\circ$

1.8  $\mu\text{m}$ 로서 위의 2.2  $\mu\text{m}$ 와 다른데, 이것은 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)에 의한 오차로 보인다.

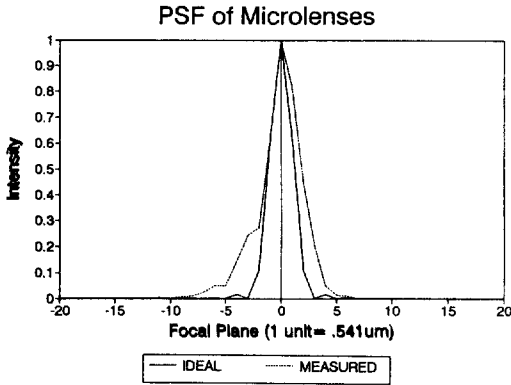


그림 5. 파면 오차로부터 구한 미세렌즈의 PSF(점선)와 수차없는 경우의 PSF(실선), 렌즈 직경=100  $\mu\text{m}$ .

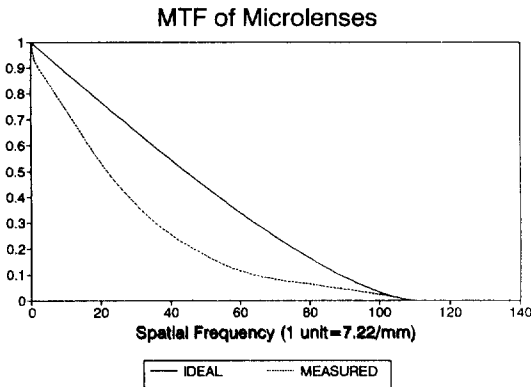


그림 6. 미세렌즈의 MTF, 렌즈 직경=100  $\mu\text{m}$ .

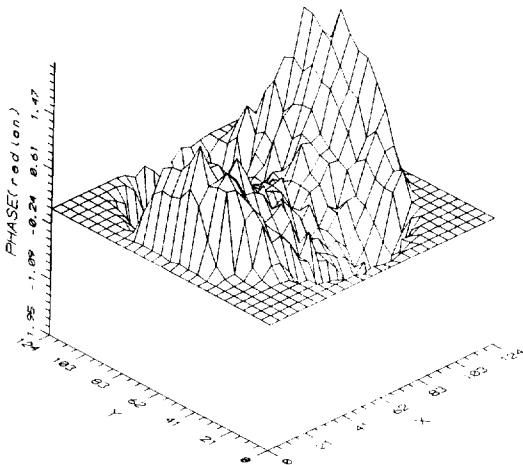


그림 7. 직경 100  $\mu\text{m}$  미세렌즈에서 측정된 파면 오차.

위에서 구한 PSF를 다시 푸리에 변환하게 되면 식 (8), (9)에 의해 MTF를 구할 수 있게 되는데, 이 결과를 그림 6에 나타내었다. MTF 값이 0.5로 감소할 때의 공간 주파수 값은  $160 \text{ mm}^{-1}$  이다. 이것은 수차가 없을 때의 값인  $330 \text{ mm}^{-1}$ 의 절반 정도이지만, 미세렌즈의 크기 자체가 작은 관계로 그 절대치 자체는 분해능이 나쁘지 않는 것을 알려준다. 즉 미세렌즈는 큰 렌즈에 비해 더 큰 공차를 허용하기 때문이다.

그림 7의 파면 오차를 보면 네 귀퉁이 부근에 회전 대칭성이 없는 약  $\lambda/2$ ( $\sim 2$  radian) 크기의 파면 오차가 있는데, 이 오차가 PSF와 MTF같은 렌즈 특성을 실제보다 나쁘게 추정하게 한 것으로 생각된다. 이 오차의 주요 원인은 정렬에 있어 광선들의 기울어짐과 두 대물 렌즈의 수차가 서로 정확히 일치하지 않는 점에 있으리라 예상된다. 또한 입사광이 렌즈 배열을 통과할 때 렌즈끼리 서로 간섭하는 현상이 있는데 이것은 특히 작은 렌즈이면서 배열 간격이 좁아질 때 심하게 나타난다. 그 밖에도 speckle noise, 위상 변이가 정확히  $90^\circ$ 가 아닌 데서 일어나는 오차 등이 파면 오차에 섞여 있을 것으로 본다. 위에서 분석한 값들은 이러한 간섭계 및 측정 자체의 오차들이 모두 렌즈의 수차라고 보고 해석된 것이기 때문에 실제 렌즈 분해능은 위에서 얻은 값보다 좋을 것으로 생각된다. 그리고 정확한 간섭 무늬 측정을 통해 파면 오차를 계산한다면 좀더 자세한 분해능에 관한 정보 및 수차 분석도 가능하리라 본다.

#### IV. 결 론

두꺼운 PR을 이용하여 원기둥 모양을 형성시키고 이를 용융함으로써 미세렌즈 행렬을 제작하였다. 이 방법을 통해 직경 25~100  $\mu\text{m}$ 의 렌즈를 만들었고 제작 가능한  $f/\#$ 의 범위가 1~2 사이에 있음을 볼 수 있었다. 제작된 렌즈는 전자주사현미경(SEM)과 탐침형표면측정기( $\alpha$ -step)를 이용하여 그 외형을 검사하였다. 렌즈의 광학적 성능을 측정하기 위해 위상변이간섭법을 사용하여 평행광의 렌즈 통과 후 파면을 구하였다. 여기서 기준 구면과의 파면오차를 구하여 렌즈 초점거리나 초점 광도분포 등을 얻었다. 그 결과 직경 100  $\mu\text{m}$ , 초점거리 164  $\mu\text{m}$ 의 미세렌즈는 직경 5  $\mu\text{m}$  이내에 80% 이상의 입사광이 집중되는 것으로 측정되었다. 또한 파면 오차에서 렌즈의 공간 주파수 특성값을 얻을 수 있는데 MTF가 0.5인 지점의 공간 주파수는  $160 \text{ mm}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. 그러나 위의 값들은 간섭계 자체의 오차를 상당히 포함하고 있어서 실제 미세렌즈의 특성은 더 좋을 것으로

생각된다. 이렇게 PR 용융법으로 제작된 미세렌즈는 공정이 매우 간단하고 그 특성이 상대적으로 우수하다. 그리고 렌즈의 직경과 초점거리를 변화시킬 수 있으며 embossing이나 casting을 통해 다른 물질로 이루어진 렌즈 제작이 가능하기 때문에 앞으로 많은 응용이 기대된다.

감사의 글

간섭 무늬 해석에 있어 Fringe Analysis 프로그램을 제공해 주신 인하대학교 이승걸 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] K. Iga, M. Oikawa, S. Misawa, J. Banno and Y.

Kokubun, *Appl. Opt.*, **21**, 19, 3456(1982).  
[2] M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto and K. Nishizama, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 4, L294(1981).  
[3] A. H. Firester, *Appl. Opt.*, **12**, 1698(1973).  
[4] Z. D. Popovic, Sprague and G. A. Neville Connell, *Appl. Opt.*, **27**, 1281(1988).  
[5] D. Daly, R. F. Stevens and M. C. Hutley, N. Davies, *IOP Short Meetings Series No. 30*, 23(1991).  
[6] J. C. Wyant, *Laser Focus*, **18**, 65, May 1982.  
[7] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*(McGraw-Hill, New York, 1968).  
[8] V. N. Mahajan, *Aberration Theory Made Simple* (SPIE Optical Engineering Press, 1991).

The Fabrication of Microlenses by Photoresist Melting Method

Young Gu Ju, Hyun Woo Song and Yong Hee Lee  
*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea*

Seok Ho Song  
*Basic Research Department, Electronic and Telecommunication Research Institute, Taejon 305-606, Korea*

(Received: March 28, 1994)

Microlens arrays are fabricated by melting "islands" of thick photoresist on a glass substrate. Microlenses with diameters 25 μm, 50 μm, 100 μm are made. Their surface profiles are obtained by a scanning electron microscope and a mechanical surface profilometer. The wavefront of the microlenses is measured by phase-shifting techniques using a Mach-Zehnder-like configuration. Thereby wavefront errors, focal lengths, point spread functions are obtained. The microlens with the diameter of 100 μm has focal length of 164 μm and spot diameter is less than 5 μm.