

레이저를 이용한 마이크로렌즈 제조에 관한 연구

윤경구*, 이성국, 김재구(한국기계연구원), 김철세(인하대 대학원), 김재도(인하대)

Microlens fabricated by laser irradiation

K. K. Yoon*, S. K. Lee, J. G. Kim(KIMM)

C. S. Kim(Mech. Eng. Dept. INHA Univ.) J. D. Kim(INHA. Univ)

ABSTRACT

Microlens made by laser radiation method have advantages in the easiness of their fabrication. The process is based on the projection of a chromium-on-quartz reticle on to the Polymer using a pulsed 248nm KrF excimer laser. Fabrication process is a fluence-dependent rate and density. The lens shape is defined by a rotationally symmetric fluence distribution with smooth radial variation in the image plane of the reticle. A typical lens of 50 μ m diameter was fabricated by irradiating 2000 laser pulses within 40 seconds. The experimental results show microlens fabrication by UV laser is possible and well worth studying further.

Key Words : Microlens(마이크로 렌즈), Chromium-on-quartz(크롬박막유리), Polymer(폴리머), Excimer laser(엑사이머 레이저)

1. 서론

현재 활용되는 마이크로 머시닝 기술은 화학적 선택적 식각기술을 이용한 bulk micromachining과 표면 가공법(surface micromachining) 그리고 구조적인 다양성과 3차원적 구조를 실현하기 위해 개발된 실리콘 접합법(silicon fusion bonding)과 LIGA 등으로 나눌 수 있다. 이 기술들에 의하여 압력센서, 유량센서, 가속도계등의 센서들과 기계요소들이 제작되어 사용되고 있다. 미세 가공기술을 이용하여 광학요소를 제작할 경우 레이저 다이오드와 같은 optoelectronics 요소들과 일체형으로 할 수 있어 크기를 작게 할 수 있음은 물론 생산비용도 줄일 수 있는 장점을 갖게 된다.

최근에는 VLSI 집적도 증가, 광학 소자 집적화의 발전과 더불어 마이크로렌즈 제작에 대한 관심이 점점 더해지고 있다. 마이크로렌즈는 Lippmann⁽¹⁾에 의해 제안된 Integral Photography에서 중요한 역할을 할뿐만 아니라 detector array⁽²⁾의 효율을 높이는데 쓰인다. 그리고 digital optical processing이나 광학 컴퓨터의 분야⁽³⁾에서는 array illuminator, interconnect로 이용되고 있다. 광섬유분야에서는 반도체 레이저와 광

섬유의 연결에서 레이저광의 퍼짐을 막는데 사용되며 광섬유와 연결 소자의 정렬 문제 해결을 위해 미세 렌즈 배열이 이용되기도 한다.

마이크로렌즈의 제작방법은 불순물 확산과 다양한 재료의 첨가에 의한 액상격자의 성장과정의 불포화 정도를 변화시켜 제작하는 액상식각 방법⁽⁴⁾, proton을 이용하여 적절한 온도와 압력에 따른 etching에 의한 방법인 광이온빔 리소그래피⁽⁵⁾, X선을 광원으로 하여 원기둥 모양의 photo-resist를 형성하여 표면장력에 의해 제작하는 X-ray 리소그래피 방법⁽⁶⁻⁷⁾과 레이저 pulse 따라 gas의 반응에 의한 etching에 의해 제작하는 레이저 건식 유도 에칭법⁽⁸⁾이 있다.

본 실험에서는 마스크상의 패턴을 이미징렌즈를 이용하여 시편의 표면에 축소 투영하는 방법과 엑사이머 레이저에 대한 가공성이 뛰어난 PMMA를 재료로 하여 가공공정이 간단하고 대기 중에서도 실험이 가능한 레이저 리소그래피 공정을 사용하였다.

본 연구에서 레이저 리소그래피를 이용한 마이크로렌즈를 제작하기 위하여 마스크를 설계 및 제작하였다. 원형 다중슬릿 형태로 제작한 마스크의 슬릿의 폭과 간격은 프라운 호퍼의 회절과 간섭에 따른 에너지 밀도 분포와 슬릿을 통과하는 에너지에 따라

설정하였다. 이 마스크를 이용하여 1/20으로 축소 투영시켜 마이크로렌즈를 제작하였다.

이 실험을 통하여 마스크의 크기와 슬릿의 폭과 간격에 따라 렌즈의 모양과 크기를 조절할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 이론

2.1 마스크 설계 원리

레이저 에너지 분포를 변화시키기 위해 마스크 모양을 일련의 circular 모양으로 제작하는데 각 원의 나열을 $i = 1, 2, \dots, n$ 까지라고 하자. 각각의 원은 레이저 빛이 통과하는 석영유리부분과 크롬으로 덮혀진 반사되는 부분으로 되어 있다. 이들의 각 폭은 d_i 와 $w-d_i$ 의 거리로 폭을 유지하고 있다. 이때 크롬으로 이루어진 부분과 빛이 통과하는 부분을 합한 폭은 항상 w 로 일정하다. 레이저 리소그래피에 의한 재료 가공 과정 중에 열적 특성에 의해 이론상의 가공범위와 실제 가공범위가 달라지게 된다. 이때 차이가 나는 거리를 열확산거리라고 한다. 3차원 복합 곡면으로 이루어져 있는 마이크로렌즈 제작 시 열확산거리에 따른 공간분해능을 고려하여야 한다. 따라서 본 실험은 예비 실험을 통해 PMMA를 $1\mu\text{m}$ 의 선 폭을 1/20로 축소하여 가공 시 열확산 거리를 고려할 때 공간 분해능이 $R_{\text{etch}}=0.6\mu\text{m}$ 임을 알 수 있었다. 따라서

$$w = R_{\text{etch}}/m = 12\mu\text{m} \text{ 이다.} \quad (1)$$

m 은 축소율로 본 실험에서는 1/20으로 결정하였다.

가공 후 렌즈의 형상이 convex한 모양으로 이루어지게 하기 위해 레이저의 에너지 양은 외곽부분으로 갈수록 증가하고 내부로 갈수록 감소한다. 레이저 빛이 통과하는 양을 알아보면 식 (2)와 같다.⁽¹⁰⁾

$$t_i(r_i) = \frac{(r_i + w/2)^2 - (r_i + w/2 - d_i)^2}{(r_i + w/2)^2 - (r_i - w/2)^2} \quad (2)$$

여기서 r_i 는 중심에서 w 중심까지의 거리를 나타내고 w 의 간격 중에 빛이 통과하는 부분의 거리를 d_i 라 표시하였다. $t_i(r_i)$ 는 빛이 마스크를 통과하는 비율이다. 레이저 에너지 밀도를 반경에 대한 축소율에 대한 에너지 밀도 ϕ_i 는 식 (3)과 같고 ϕ_0 는 마스크에 도달하는 광 에너지 밀도이고 ϕ_i 는

$$\phi_i (r_i = r_i/m) = \phi_0 t_i(r_i)/m^2 \text{ 이다.} \quad (3)$$

다중슬릿에 의한 회절과 간섭에 따라 에너지 밀도 분포를 프라운 호퍼의 다중 슬릿 공식⁽⁷⁾을 변형 적용하여 반복적인 수치해석법으로 마스크의 폭과 간격을 결정하였다.

2.2 마스크의 제작

마스크의 제작 원리에 따라 다양한 크기의 마스크를 설계하였다. 재료의 특성과 렌즈의 직경을 $50\mu\text{m}$ 를 대상으로 하여 w 가 각각 $9\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 일 때의 마스크를 설계하고 에너지 분포상태에 따라 $9\mu\text{m}$ 과 $12\mu\text{m}$ 는 각각 3가지 종류를 설계하였고 $15\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 는 2가지 종류로 분류하여 제작하였다. 마스크는 엑사이머 레이저의 빛을 통과할 수 있는 석영(quartz)유리 위에 크롬박막을 증착시킨 후 전자빔 direct writing에 의해 제작하였다.

Fig. 1은 w 가 $30\mu\text{m}$ 일 때 마스크 모양이고 최소 크롬 간격은 $1\mu\text{m}$ 이다. w 가 각각의 마스크에 따라 다르기 때문에 슬릿의 수도 달라진다.

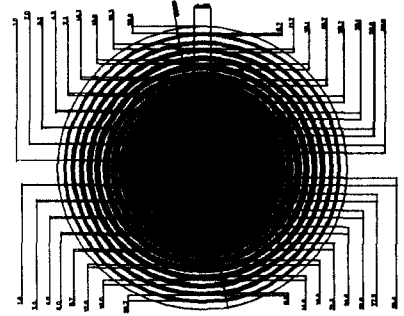


Fig. 1 design of mask

3. 실험

3.1 실험장치



Fig. 2 Experimental setup for laser lithography

엑사이머 레이저를 이용한 마이크로렌즈 제작을 위한 시스템은 Fig. 2과 같이 KrF 엑사이머 발전기, 축소투영 광학계 및 시편제어 기구부로 이루어져 있다.

이미지 축소 투영 방식은 최대 25배까지 축소 투영 할 수 있도록 구성되어있고 모든 실험 장치는 무진동 광학 테이블 위에 설치하여 진행하였다. 마스크의 중심과 시편에 형성되는 이미지의 영상 정보를 얻기 위해 CCD를 설치하였고 축소 투영방식을 이용하여 마스크의 크롬박막의 손상을 방지하고 빔의 효율을 높이는 방법을 택하였다.

3.2 실험방법

엑사이머 레이저를 이용한 마이크로렌즈 제작 공정은 비리소그라피 공정으로 마스크를 통과하는 빔을 이용하여 PMMA를 직접 제거 가공하게 된다. 렌즈제작 공정은 Fig. 3에 나타내었다.

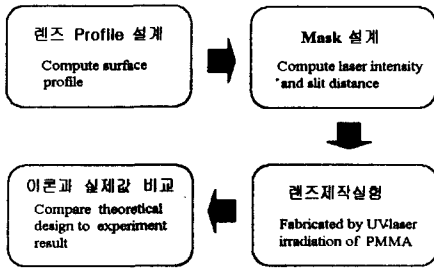


Fig. 3 렌즈설계 및 실험방법

먼저 원하는 렌즈의 형상을 광학적으로 설계를 하고, 형상에 따른 마스크를 통과하는 에너지 밀도 및 분포량을 계산하고 동시에 회절과 간섭에 따른 에너지 증감의 영향을 고려해야 한다. UV레이저 대해 가공성이 좋은 PMMA를 레이저 에너지, 레이저 펄스수 등의 가공변수를 설정하여 가공변수를 설정하여 레이저빔을 조사하여 형상을 가공한다.

실험 결과를 이론상의 렌즈형상과 비교하여 그 결과를 고찰하고 가공 최적조건을 설정한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 PMMA의 가공특성

다중원형 마스크를 이용하여 마이크로렌즈 제작을 위한 기초실험으로 PMMA의 가공성을 평가하였는데 에너지 밀도가 200mJ/cm²이하의 조건에서는 펄스당 제거깊이가 매우 작고 또한 가공 상태가 좋지 않았다.

따라서 실험은 200mJ/cm², 50Hz이상의 에너지를

최저 에너지로 설정하고 펄스 수와 에너지를 조절하여 최적의 가공범위를 설정하였다. 단펄스에서는 마스크를 통한 회절 변화가 보이지 않고 가공성이 좋지 않아 펄스 수를 200pulse, 50Hz 이상으로 가공하였다. 아래의 Fig. 4는 펄스 수와 에너지에 따른 PMMA의 가공깊이를 나타내는 그림이다. 일반적으로 높은 에너지 밀도영역에서 펄스 당 제거 깊이가 증가하고 PMMA의 가공이 깨끗이 됨을 광학현미경으로 관찰할 수 있었다. 그러나 에너지가 300mJ/cm²이상의 에너지가 조사될 경우 가공깊이는 증가하지만 렌즈의 형상이 열에 의해 찌그러짐을 알 수 있었다.

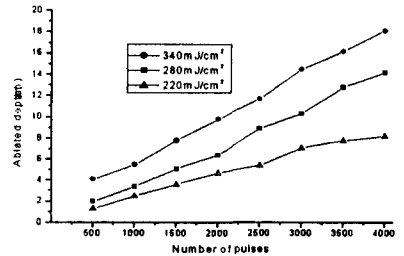


Fig. 4 Plot of etch depth versus number of pulses (PMMA)

4.2 마이크로렌즈 제작

다중 원형 마스크의 폭과 간격에 따라 에너지 분포가 달라지게 되므로 형상이 변화하고 노출시간에 따라 렌즈의 형상모양도 바뀌게 됨을 알 수 있었다.

광학적 성능 평가 이전에 렌즈의 외형을 파악하는 것이 가공변수를 결정하는 데 절대적으로 필요하다. 가장 간단한 방법으로 반사형 광학현미경을 이용하여 관찰하면서 고배율로 높여 가며 대략적인 외형을 파악할 수 있었다. 가공공정에 의한 보다 세밀한 외형을 보기 위해 전자현미경(SEM)을 이용하여 사진을 촬영하였다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 레이저 lithography에 의한 마이크로렌즈의 외형을 SEM으로 촬영한 것이다.



(a)



(b)

Fig. 5 Scanning electron micrograph of a microlens by laser lithography (280mJ/cm², 2000pulse)

Fig.5는 레이저 밀도가 280mJ/cm², 2000pulse,의 조건에서 가공된 마이크로렌즈의 SEM사진이다. 마이크로렌즈의 크기는 직경 50 μ m이다. 정교한 마이크로렌즈가 제작되기 위해서는 마스크의 보다 세밀한 폭과 간격조정이 필요하다. 또한 배열 시 마스크 각각의 간섭에 대한 영향도 고려해야 한다. 본 실험에서는 마스크의 폭과 간격, 마스크간의 배열의 misalign으로 형상이 완전한 렌즈 모양으로 되지 못한 것을 볼 수 있다. 마스크의 폭과 간격이 광학계의 결상한계 능력을 벗어나 반경 25 μ m내에서는 이미지 결상이 생기지 않아 렌즈의 상부가 평평한 형상이 나타난 것으로 보인다.

한편 본 실험에서 laser lithography를 통하여 Fig. 5와 같이 완벽한 마이크로렌즈를 제작하진 않았지만 다양한 크기와 형태의 3차원 미소구조물을 제작하여 보았다. 이 실험을 통해 구형의 마이크로렌즈 이외에 실린더형 렌즈, 비구면렌즈 등도 제작 가능성을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 laser lithography로 마이크로렌즈를 제조하는 방법을 제안하였으며 그 결과는

(1) PMMA를 이용한 마이크로렌즈 가공실험에서 280mJ/cm², 2000pulse일 때 어블레이션이 깨끗하게 일어나고 형상이 좀더 정확히 나타났다.

(2) 다중원형 마스크의 회절과 간섭에 의한 방법과 이미지 축소투영 방식을 적용하여 3차원 형상의 마이크로 렌즈를 제조할 수 있었다.

(3) 이 미소 구조물을 이용한 Excimer laser LIGA like process의 가능성을 확인하였다.

6. 후기

본 실험에서는 마스크 설계 시 광학계의 결상한계에 대한 점을 고려치 않아 완전한 렌즈의 profile을 구현하지 못하였지만 차후 광학계의 결상한계를 고

려한 마스크의 재설계와 보완실험을 하여 내년 춘계 학술대회 때 다시 발표하겠다.

본 논문은 산업자원부와 과학기술부가 주관하는 초소형 정밀기계 선도기술개발사업의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. Lippman, Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief, C R Acad Sci, Paris, pp146, pp446-451, 19081. Font: Times New Roman 9pt.
2. Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517-521, 1990.
3. E. J. Gratrix, SPIE 1992, pp266, 1993.
4. P. Savander, Optics and Lasers in Engineering 20, pp97, 1994.
5. Maria Kufner, Stefan Kufner, Michael Frank, Jorg Moisel and Markus Testorf, Pure Appl. Opt, 9-19, 2. 1993.
6. 함성호, 권영세, "광소자용 미소렌즈 제작을 위한 GaAs/AlGaAs계 액상식각 및 에피택시", "대한전자공학회, Vol.34, No. 9, pp. 64-71, 1997.
7. J. O. choi, J. A. Moore, J. C. Corelli, J. P. Silverman, and HBakhru, "Degradation of PMMA by deep ultraviolet, x-ray, electron beam and proton beam irradiation," J.Vac. Sci. Technol. B6(6), 2286-2289(1988).
8. 주영구, "Photoresist 용융법을 이용한 미세 렌즈 제작과 phase-shifting interferometry를 이용한 미세 렌즈의 특성 측정", pp1-4, 한국과학기술원, 1994.
9. R. Matz, H. Weber, G. Weimann, "Laser-induced dry etching of integrated InP microlenses", Appl. Phys., A65, pp349-353
10. J. . Jahns and S. J. Walker, "Two-dimensional array of diffractive microlenses fabricated by thin film deposition," Appl. Opt. 29, 931-936(1988)
11. R. Matz, H. Weber, G. Weimann, "Laser-induced dry etching of integrated InP microlenses", Appl. Phys. A65, 349-353(1997)