한국정밀공학회지 제 27권 3호 pp. 18-26 March 2010 / 18
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 27, No. 3, pp. 18-26

펨토초 레이저를 이용한 회절격자와 Fresnel Zone Plate 제작 및 광학적 분석

Optical Analysis of Diffraction Grating and Fresnel Zone Plate Fabricated on Fused Silica Glass by a Femtosecond Laser

유진창[1], 김진태[1,✉], 손익부[2]
Jin-Chang Ryu[1], Jin-Tae Kim[1,✉] and Ik-Bu Sohn[2]

1 조선대학교 공과대학 광기술공학과 레이저응용연구실 (Department of Photonic Engineering, Chosun Univ.)
2 광주과학기술원 고등광기술연구소 미세광학연구실 (Precision Optics Lab., Advanced Photonics Research Institute, GIST)
✉ Corresponding author: kimjt@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7019

Manuscript received: 2009.7.23 / Revised: 2009.11.16 / Accepted: 2009.12.28

Diffraction gratings with precise spatial periods of 2 μm and 5 μm have been fabricated by using a femtosecond laser which does not have limits on materials of micromachining and small thermal effects due to high peak power. Diffraction angle and diffraction efficiency of those were measured. Simulation results of diffraction angle and diffraction efficiency of the diffraction grating calculated with the parameters such as line width, depth, and spatial period of the fabricated gratings were compared with experimental results measured with a He-Ne laser. Besides these, Fresnel Zone Plates (FZPs) with focal distances of 50 mm and 25 mm were fabricated and focal distances of fabricated FZP were measured. Those experimental results for diffraction gratings and FZPs match well with experimental results.

Key Words: Femtosecond Laser (펨토초 레이저), Direct Fabrication (직접 가공), Micropatterning (미세패턴), Diffraction Grating (회절격자), Fresnel Zone Plate (프레넬 존 플레이트)

1. 서론

펨토초 레이저는 마스크를 사용하지 않고 직접 삼차원 광학 소자를 제작할 수 있는 장점이 있어 최근 많은 연구가 이루어지고 있다.[1-3] 펨토초 레이저를 이용한 기존의 연구결과는 W. Watanabe[4] 가 펨토초 레이저를 이용하여 유리 내부에 200mm 정도의 반지름으로 3mm 의 초점거리, 초점에서 빔크기가 7mm 정도인 2% 효율을 가지는 FZP 제작을 보고하였다. 또한, P. Srisungsitthisunti 등 [5,6] 은 펨토초 레이저로 1mm 정도의 크기를 가지는 20mm 의 초점거리를 가지며 20 개의 윤대(zone)를 가지는 FZP 를 100mm 가 서로 떨어진 불륨 FZP 를 제작하여 약 15%의 효율로 실리카 내부에 제작한 결과를 보고하였다. 그러나 그들의 연구 결과들은 FZP 의 윤대 수가 작으며 FZP 의 해상도를 결정하는 최외곽 윤대들의 크기가 커서 정밀한 FZP 제작이 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 실리카 표면에 펨토초 레이저 가공 기술을 이용하여 150 개 이상의 많은 수의 윤대를 가지며 최외곽 윤대의 크기가 3mm 정도로 매우 미세하고 정밀한 FZP 를 제작하였다. 4mm 의 크기를 가지며 초점거리가 각각 25mm 와 50mm 두가지 종류의 FZP 를 제작하였다. 초점거리에서 70mm 의 초점 크기를

가지는 것을 거리에 따른 빔 세기 및 빔 형상 변화를 통하여 확인하였다.

펨토초 레이저를 사용하여 회절격자(Diffraction grating)의 제작과 회절 효율에 측정에 대한 연구 및 재료의 성질변화, 온도, 도핑물질의 변화와 투명재질의 내부 가공특성에 관한 연구가 [7-9] 활발하게 이루어지고 있다. 그 외에도 정보 저장용 홀로그램,[10] 회절 광학 소자 등 [11] 이 펨토초 레이저로 직접 제작되어 왔다. 이 중에서 회절 광학 소자(Diffraction Optical Elements, DOE)는 빛의 굴절률을 이용하는 재래식 광학 소자와 달리 빛의 회절 현상을 이용하는 소자로 제품의 소형화, 경량화, 대량생산 등의 이점과 여러 종류의 DOE 를 동일한 기록 매질에 기록할 수 있다는 장점을 가지고 있다.[12] 기본적인 DOE 소자인 회절 격자는 분광계의 핵심적인 소자이며, FZP 는 레이저 프린터, 헤드업 디스플레이 시스템, 야간 시야 시스템 등에 중요한 광학 소자로 응용되고 있다.[13,14]

실리카는 단일 산화물 유리로 무정형, 비결정의 실리카로 이루어져 있으며, 넓은 파장 범위에 걸쳐 우수한 투과율을 갖는 특징이 있다. 또한, 매우 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 열 충격에 강하고 실리카를 녹이는 불화수소산을 제외하면 화학적으로 불활성인 성질을 갖고 있다. 이러한 특성으로 높은 출력의 에너지 밀도를 갖는 레이저용 광학계로 유용하게 사용되고 있다.

본 연구에서는 2μm 와 5μm 의 격자 주기의 미세한 회절 격자와 25mm 와 50mm 의 초점거리를 가지는 FZP 를 펨토초 레이저를 이용하여 화학적 공정없이 실리카 표면에 직접 제작하였다. 또한, 제작된 회절 격자의 회절 각과 회절 효율을 실험적으로 측정하여 회절 격자의 선폭과 주기 등의 인자들을 이용하여 얻은 전산모사 결과와 비교 분석하고, FZP 의 빔 형상을 분석하여 초점 부근에서의 레이저 빔의 크기를 구하였고 초점거리를 실험을 통해 확인하였다.

2. 이론

회절 격자는 광학계의 발전과 더불어 발전하여 빛의 파장을 분석하기 위한 장치인 분광계의 핵심적인 소자로 사용되고 있다. 실리카에 제작된 회절격자에 레이저 빔이 조사될 때, 원격장에서 회절 무늬와 효율은 레이저에 의해 변형된 굴절률 변화와 제거된 형상에 기인한다. 레이저에 의한 굴절률 변화를 무시하면(문헌에 의하면 $\Delta n \sim 0.003$)[15] 표면 제거된 형상에 의해 주로 종속하게 된다. 이러한 형상 변화에 의한 회절격자의 효율을 계산하기 위하여 위상 변화의 푸리에 변환을 수행하여 각 차수의 진폭을 계산함으로서 원격장에서 회절 효율을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 이전에 보고된 논문에서 사용한 방법으로 [7] 회절 격자의 선폭과 주기 등의 인자들을 이용하는 분석 방법을 사용하였다. 표면 제거 형상은 공간 주기 함수(K)로서 다음과 같이 푸리에 급수로 나타낼 수 있다. 정현 함수의 조화로 주기적인 표면 제거 형상 분포를 표현하면 다음과 같다.

$$h(x) = h_{avg} + \sum_{p=1}^{\infty} h_{\mathrm{mod},p} \cos(pKx) \quad (1)$$

여기에서,

$$h_{\mathrm{mod},p} = \frac{K}{\pi} \int_{-\pi/K}^{\pi/K} h(x)\cos(pKx)dx \quad (2)$$

$$h_{avg} = \frac{K}{\pi} \int_{-\pi/K}^{\pi/K} h(x)dx \quad (3)$$

위 식에서 각각 $K=2\pi/\Lambda$(Λ=격자 주기)는 공간 주파수, h_{avg} 는 가공된 평균 높이, $h_{mod,p}$ 는 표면에서 가공된 조화 성분 변조 진폭이다. 빛이 변조된 표면에 수직으로 입사 한다고 가정하면, 격자의 위상 변화는 아래와 같이 주어진다.

$$\exp[j\phi(x)] = \exp(jkh_0 + jk\Delta n_{ga} h_{avg}) \times \exp[jk\sum_{p=1}^{\infty} \Delta n_{ga} h_{\mathrm{mod},p} \cos(pKx)] \quad (4)$$

기호 Δn_{ga} 는 유리와 공기간의 굴절률 차이, 그리고 k 는 입사 매질에서 파수이다. 비 정현적으로 변조된 구조에 대해, 그 m 번째 차수의 회절 세기는 몇 개의 베셀 함수들의 결합으로 묘사되어져야 한다. 처음 세번째 조화들 만으로 위에서 기술한 푸리에 함수를 고려하면, m 번째 차수의 회절 세기는 위 식으로부터 얻은 정현 함수의 계수들로부터 얻어진 다음 식으로 주어진다.

$$\eta_m \propto [\sum_{q_3=-\infty}^{\infty}\sum_{q_2=-\infty}^{\infty}\sum_{q_1=-\infty}^{\infty} j^{q_1+q_2+q_3} J_{q_3}(k\Delta n_{ga} h_{\mathrm{mod},3}) \times J_{q_2}(k\Delta n_{ga} h_{\mathrm{mod},2}) J_{q_1}(k\Delta n_{ga} h_{\mathrm{mod},1})]^2_{q_1+2q_2+3q_3=m} \quad (5)$$

기호 J_q 는 q 번째 차수 Bessel 함수이다.

3. 실험장치 및 결과

3.1 미세 회절격자

기본적인 광학 소자인 회절 격자를 실리카 표면에 펨토초 레이저를 사용하여 2 μm, 5 μm 격자 간격으로 제작하였다. Fig. 1 은 실험에 사용한 펨토초 레이저 가공 모식도를 보여준다. 펨토초 레이저 가공은 극도의 높은 봉우리 출력(>10 GW)에 의한 비선형 현상인 다광자 흡수(Multi-photon absorption) 과정에 의해 가공물질에 제한적이지 않고 유리, 금속, 유전체, 세라믹 등 다양한 재질의 정밀 가공이 가능하며 비열적(Non-thermal) 성질 때문에 정밀 미세가공이 가능하다.[16]

회절 격자 제작을 위하여 고등광기술연구소가 보유하고 있는 펨토초 레이저 가공 시스템을 이용하였다. 펨토초 레이저의 사양은 785nm 의 중심파장, 184fs 의 펄스폭, 1kHz 의 반복률을 가지며 최대 출력이 1W 이다. 실험에 사용된 스테이지의 x, y 축은 선형 모터 스테이지, 300mm×300mm 의 가공범위, 20nm 의 정밀도, 20mm/s 의 최대 속도를 가지고 있으며, z 축은 ballscrew 스테이지로 200mm 의 범위 0.5 μm 의 정밀도, 20mm/s 의 최대 속도를 가지고 각각 독립적으로 구동된다.

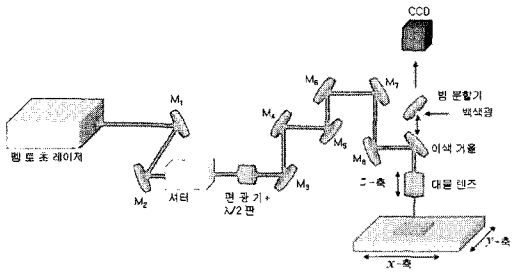


Fig. 1 Experimental setup for femtosecond laser micromachining process

회절 격자들의 가공을 위하여 레이저 빔을 50 배율 대물렌즈(NA=0.42)를 사용하여 실리카 표면에 집광하여 0.1mm/s 가공속도, 2.12 μJ 펄스 에너지, 3mm×3mm 의 크기로 제작되었다. CCD(Charge-Coupled Device) 카메라로 실시간 모니터링 하여 실리카 샘플의 수평을 잡고 샘플이 장착된 스테이지를 펄스들이 충분히 중첩될 만큼 천천히 일정한 속도로 이동하여 일정한 간격으로 회절 격자를 제작한다.

Fig. 2 는 제작된 회절 격자의 회절 무늬, 회절각과 회절 효율을 측정하기 위한 장치 모식도이다. 회절 효율 측정을 위해 He-Ne 레이저(632.8nm 파장)를 광원으로 사용하였다. He-Ne 레이저 출력을 감쇄하고 2.5mm 정도의 크기로 확대한 후 제작된 회절 격자에 조사하게 된다. 3mm×3mm 정도의 크기로 제작된 회절 격자에 들어간 빔은 회절 효과에 의하여 회절 무늬가 스크린에 나타나게 된다. 회절 격자 샘플과 스크린 사이의 거리는 100mm 이고, 회절 각 측정을 위해 버니어캘리퍼스로 회절 차수들의 거리 값을 측정하였으며, 같은 거리에서 스크린 대신 레일 위에 PD(Photo Diode)를 설치하여 오실로스코프로 회절 무늬들의 세기를 측정하여 회절 효율을 구하였다.

Fig. 3 과 4 는 각각 2μm 와 5μm 격자 간격을 가지는 회절 격자의 AFM 표면 측정 결과와 회절 무늬 측정 결과이다. Fig. 3 과 4 의 제작된 회절 격자는 가공된 폭이 800nm~1000nm 정도 이고 깊이가 400nm 정도로 일정하게 제작된 것을 측정 결과를 통해서 확인할 수 있다. Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)에 측정된 회절 격자의 간격과 깊이 결과는 식 (1)의 표면 제거 형상의 전산 모사 입력 값으로 사용하여 회절 효율의 전산모사 값을 계산하기 위해 사용하였다. Fig. 3(b)의 AFM 측정 결과는 부스러기(debris)에 의해 Fig. 4(b)에서 나타난 측정 결과보다 균일하지 않은 간격과 깊이를 보여주고 있다. Fig. 3 과 4(c)의 회절 무늬 측정 사진은 제작된 회절 격자와 스크린 사이의 거리가 100mm 일 때 디지털 카메라로 촬영하였다. 제작된 회절 격자의 회절

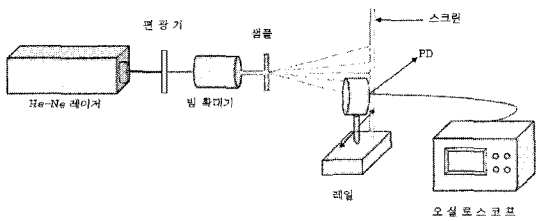
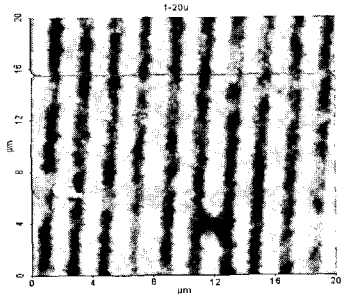
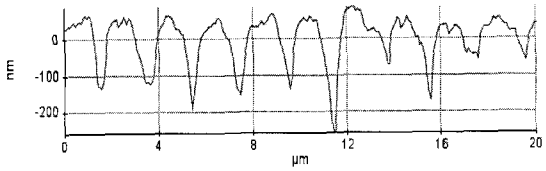


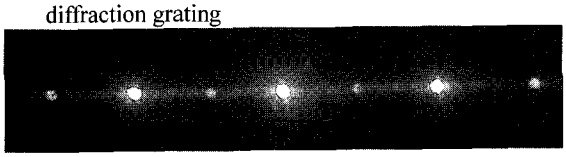
Fig. 2 Experimental setup for measuring the characteristics of fabricated diffraction grating



(a) AFM surface image of the fabricated diffraction grating

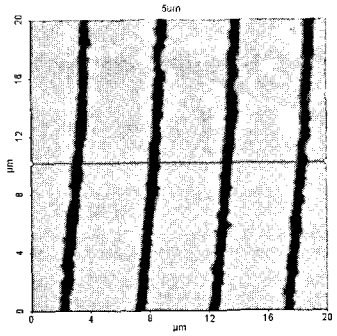


(b) Cross-section measurement of AFM image of the diffraction grating

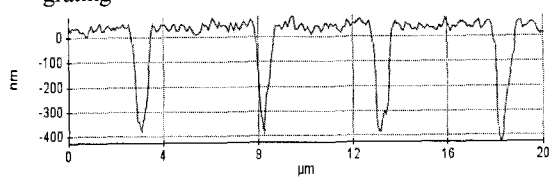


(c) Diffraction pattern

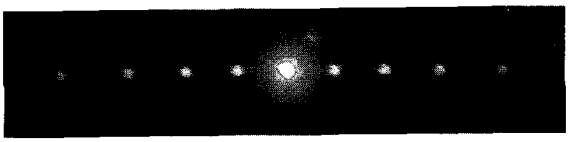
Fig. 3 AFM (Atomic Force Microscope) image and diffraction pattern of the fabricated diffraction grating with 2μm period



(a) AFM surface image of the fabricated diffraction grating



(b) Cross-section measurement of AFM image of the diffraction grating

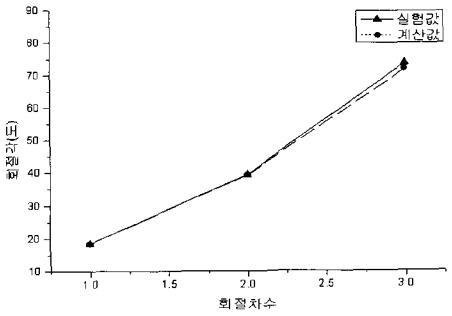


(c) Diffraction pattern

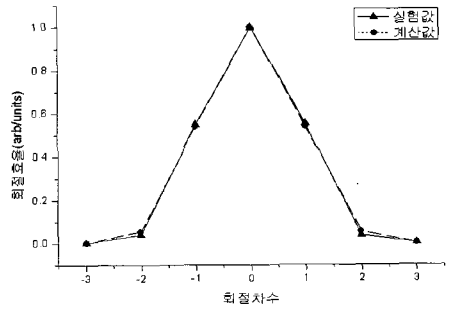
Fig. 4 AFM image and diffraction pattern of the fabricated diffraction grating with 5 μm period

무늬는 0 차 에서 가장 강한 회절 효율을 가지고 차수가 높아질수록 세기가 약해지며, 회절 무늬들 사이의 간격은 차수가 높아질수록 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 3 과 4 를 비교하여 회절 격자의 간격이 좁을수록 회절 무늬들 사이의 거리가 더 멀어짐을 확인하였다.

Fig. 5 는 제작된 2 μm 간격을 갖는 회절 격자의 회절 각과 회절 효율을 MatLab 으로 전산모사하여 얻은 계산 값과 실험적으로 측정한 실험값을 보여주는 그래프이다. 실험적으로 측정한 회절 무늬에서 0 차 부터 3 차의 회절 각과 회절 효율을 얻을 수 있었다. 원으로 표시되고 실선으로 연결된 값들이 전산모사 결과이며, 삼각형에 점선으로

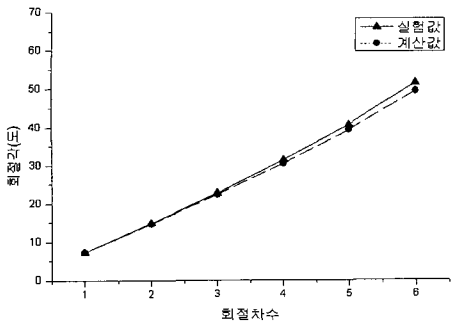


(a) Diffraction angles versus diffraction orders

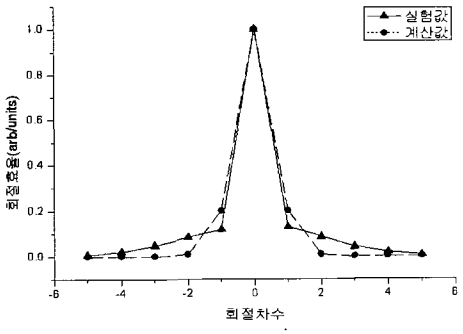


(b) Diffraction efficiency versus diffraction orders

Fig. 5 (a) Diffraction angles and (b) diffraction efficiency of the fabricated diffraction grating with 2μm period



(a) Diffraction angles versus diffraction orders



(b) Diffraction efficiency versus diffraction orders

Fig. 6 (a) Diffraction angles and (b) diffraction efficiency of the fabricated diffraction grating with 5μm period

연결된 값들이 실험결과 값이다. 회절 각과 회절 효율 모두 실험값과 이론 값이 회절 차수에 따라 거의 동일한 값을 가지며 변화하는 것을 보여주고 있다. Fig. 6 은 제작된 5μm 간격을 가지는 회절 격자의 회절 각과 회절 효율의 실험값과 계산 값을 표시한 그래프이다. 5μm 격자 간격을 가지는 회절 격자의 회절 무늬는 0 차부터 6 차까지 회절 각 과 0 차부터 5 차까지의 회절 효율을 측정하였다. Fig. 6 에서 보여주는 회절 각은 실험값과 계산 값이 회절 차수에 따라 거의 동일한 값을 가지고 변화하고 회절 효율은 회절 격자의 차수가 낮을 때는 거의 유사한 경향성을 나타내지만, 차수가 3 차가 넘어갈 때부터 전사모사 결과가 실험 결과 값보다 크게 나타났다. 그 이유는 전사모사에 사용된 회절 격자의 가공 깊이와 주기를 AFM 측정 결과로부터 피팅(ftting)하는 과정에서 생긴 오차와 회절 격자의 불완전성 등으로 생기는 오차로 생각된다. 이 실험 결과들로 펨토초 레이저로 실리카 표면에 직접 가공을 통해서 회절 소자를 구현할 수 있다는 것을 보였다.

3.2 프레넬 존 플레이트

펨토초 레이저를 이용한 회절격자 제작 기술을 이용하여 광학계에서 기본이 되면서 여러 가지 폭넓은 응용 분야를 가지고 있는 FZP 를 제작하였다. Table 1 은 He-Ne(파장 632.8nm)를 사용하였을 때 각각 25mm, 50mm 의 초점거리를 가지는 두 가지

Table 1(a) FZP simulation with ring radii(FZP with 25mm focal length)

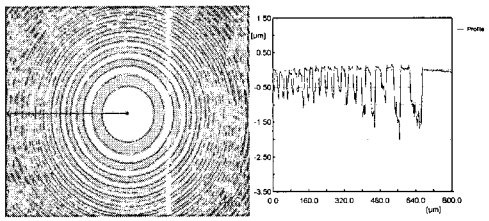
Order	Radius(μm)	Order	Radius(μm)
1	0.126	22	0.590
2	0.178	23	0.603
3	0.218	24	0.616
4	0.252	25	0.629
5	0.281	26	0.641
6	0.308	27	0.654
7	0.333	28	0.666
8	0.356	29	0.677
9	0.377	30	0.689
10	0.398	31	0.700
11	0.417	32	0.712
12	0.436	33	0.723
13	0.453	34	0.733
14	0.471	35	0.744
15	0.487	36	0.755
16	0.503	37	0.765
17	0.519	38	0.775
18	0.534	39	0.785
19	0.548	40	0.795
20	0.562	41	0.805
21	0.576	42	0.815

Table 1(b) FZP simulation with ring radii(FZP with 50mm focal length)

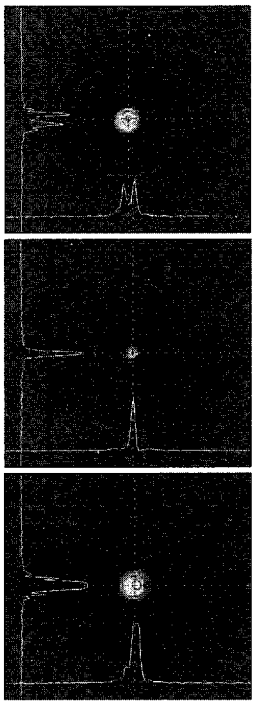
Order	Radius(μm)	Order	Radius(μm)
1	0.178	12	0.616
2	0.252	13	0.641
3	0.308	14	0.666
4	0.356	15	0.689
5	0.398	16	0.712
6	0.436	17	0.733
7	0.471	18	0.755
8	0.503	19	0.775
9	0.534	20	0.795
10	0.562	21	0.815
11	0.590	22	0.834

FZP 환의 반지름들을 Mathcad 프로그램을 사용하여 전산 모사한 결과이다.

FZP 의 제작은 회절 격자의 제작과 동일하게 펄스들이 중첩될 정도로 천천히 이동하는 방법으로 실리카 표면에 20 배율(NA=0.4) 대물렌즈를 사용하여, 0.1mm/s 의 속도, 4.98 μJ 의 펄스 에너지로 제작하였고, 제작된 FZP 들은 각각 3mm 정도의 직경을 가지고 있다. 제작된 FZP 의 최 외곽 윤대들의 간격은 약 3μm 정도이며, 각 250 개가 넘는 zone 을 가공하였다.

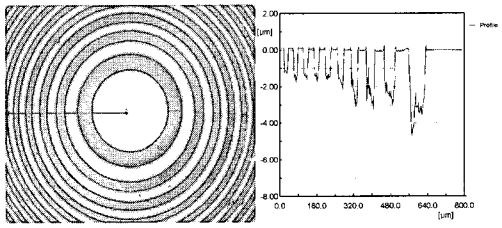


(a) Image of the fabricated FZP and cross-section of the FZP

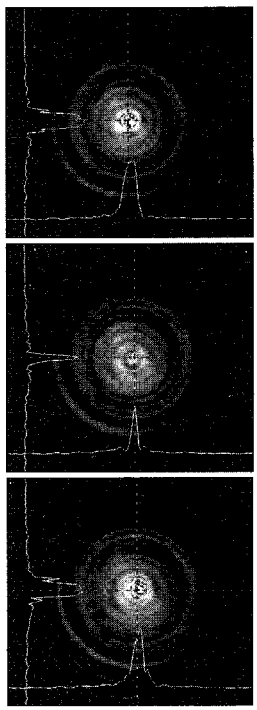


(b) Beam profiles near focal distance (22mm, 24mm, 26mm)

Fig. 7 Fabricated FZP with focal length of 25mm (a) Image of the fabricated FZP and cross-section of the FZP, (b) Beam profiles near focal distance (22mm, 24mm, 26mm)



(a) Image of the fabricated FZP and cross-section of the FZP



(b) Beam profiles near focal distance (45mm, 49mm, 53mm)

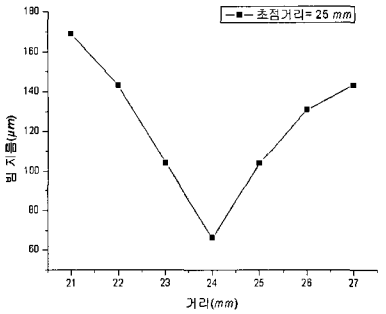
Fig. 8 Fabricated FZP with focal length of 50mm (a) Image of the fabricated FZP and cross-section of the FZP, (b) Beam profiles near focal distance (45mm, 49mm, 53mm)

Fig. 7 과 8 은 각각 25mm 와 50mm 의 초점 거리를 가지는 FZP 의 현미경(배율×100)과 3 차원 측정기로 측정한 표면 이미지와 거리에 따른 빔 형상 측정 결과이다. Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)의 현미경 사진에서 보는 바와 같이 FZP 는 각 초점거리에 따라 환들은 똑같은 면적을 가지고 있어서 중심에서 멀어질수록 환의 반지름이 커지기 때문에 환들 사이의 간격은 좁아지는 특성이 나타나는 것을 보여준다. Fig. 7 과 8 의 (a)는 3 차원 측정기(Nano Focus, X 20 배율 대물렌즈 (NA=0.4)로 제작된 FZP

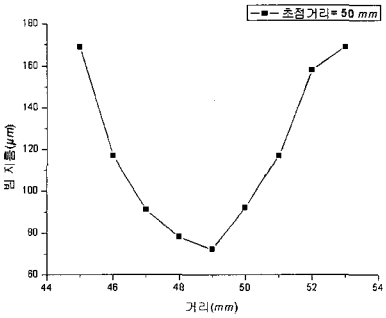
들의 측정결과를 보여준다. Table 1 의 전산모사 결과와 동일한 크기를 가지고 FZP 들이 제작되었다는 것을 알 수 있다. 펨토초 레이저를 이용하여 제작한 FZP 들은 3 차원 측정결과 가공된 깊이가 1~2 μm 정도 되는 것을 확인하였다. 가공된 환들 간의 깊이가 일정하지 않은 것은 측정 오차로 생각된다.

Fig. 7 과 8(b)는 제작된 FZP 의 거리에 따른 빔 형상을 측정하기 위하여 빔 형상 측정기로 FZP 와 빔 형상 측정기 사이의 거리를 변화시키며 FZP 의 빔 형상을 측정한 결과이다. FZP 에 의해 집속된 레이저 빔의 공간 프로파일은 가우시안 빔의 형태를 가지지 않아 투과 평면에서 광세기 분포에 의한 강도의 $1/e^2$ 위치에서 빔 크기를 결정하는 Knife edge 방법을 적용할 수 없었다. 그러므로 빔 크기를 결정하기 위해 FZP 에 의해 생성된 초점 크기 변화를 진행거리에 따라 관측하여 빔의 크기가 제일 작은 위치를 측정하는 방법을 통해 집속된 빔의 초점 위치와 빔 크기를 결정하였다. 빔 형상 측정기에 사용된 CCD 는 Pulnix TM-745E 를 사용하였으며, 13 μm 의 화소 크기를 가지기 때문에 빔 크기 측정 오차는 약 13 μm 정도 이다. Fig. 7 의 (b)는 초점거리가 25mm 인 FZP 의 빔 형상을 초점거리보다 작을 때의 측정 값(22mm), 초점거리에서의 측정 값(24mm)과 초점거리보다 클 때의 측정 값(26mm)을 각각 나타낸 것이고, Fig. 8 의 (b)는 초점거리가 50mm 인 FZP 의 빔 형상을 초점거리보다 작을 때의 측정 값(45mm)과 초점거리에서의 측정 값(49mm), 초점거리보다 클 때의 측정 값(53mm)을 각각 나타낸 것이다.

Fig. 7 과 8 의 (b)에서 보여주는 것처럼 거리에 따라 빔이 특정 지점에서 모이게 되는 것을 빔 형상의 측정으로 확인할 수 있었다. 만들어진 FZP 가 고안된 초점거리에서 거의 정확하게 빔을 모아주는 역할을 하는 것을 실험적으로 확인하였다. 실험에 사용된 빔 형상 측정기가 매우 민감해서 측정 시 He-Ne(파장 632.8nm) 레이저에서 나온 빔의 세기를 3.5mW 까지 줄여서 빔 형상을 측정하였다. 빔의 세기는 500:1 로 편광된 He-Ne 레이저의 특성을 이용하여 편광기와 빔 감쇄기를 사용하여 감소시켰다. 빔의 초점거리의 특성 측정은 마이크로미터를 사용하여 FZP 의 초점거리가 25mm 경우는 17mm 부터 36mm 까지, FZP 의 초점거리가 50mm 인 경우는 38mm 부터 63mm 까지 1mm 씩 움직이면서 측정하였다.



(a) Beam size of focal length 25mm FZP



(b) Beam size of focal length 50mm FZP

Fig. 9 Beam size changes of FZP with (a) 25 mm focal length and (b) 50 mm focal length

Fig. 9 의 (a)와 (b)는 빔 형상 측정기를 사용하여 초점거리 근처에서 거리에 따라 측정한 빔 크기의 변화를 보여주고 있다. 초점거리 25mm FZP 의 빔 세기는 24mm 에서 가장 높게 나왔고, 초점거리 50mm FZP 의 빔 세기는 49mm 에서 가장 높게 나왔다. 이러한 1mm 의 오차는 FZP 의 가공오차 및 광학실험 조건 등의 요인에 기인한 측정 오차로 생각된다.

초점거리에서의 빔 크기는 초점거리 25mm FZP 은 66 μm 이고, 초점거리 50mm FZP 은 72 μm 으로 측정되었으며 일반적인 렌즈와 비슷하게 짧은 초점 거리를 갖는 FZP 소자가 빔을 더 잘 집광시켜주는 것을 알 수 있었다. 또한, 제작된 FZP 에 2.1mW 의 He-Ne 빔을 조사 하였을 때 초점거리 25mm FZP 의 초점에서의 세기는 0.14mW, 초점거리 50mm FZP 의 초점에서의 세기는 0.12mW 로 각각 6.4 %와 5.2 %의 효율을 얻었다.

4. 결론

광학계에서 널리 쓰이는 실리카 표면에 열적 현상이 적고 미세가공에 장점이 있는 펨토초 레이

저를 사용하여 2μm 와 5μm 의 격자 주기를 가지는 미세한 회절 격자와 25mm 와 50mm 의 초점거리를 가지는 FZP 를 펨토초 레이저를 사용하여 실리카 표면에 직접 제작하였다. 가공 방법은 펄스들이 중첩될 정도로 천천히 이동하는 스캐닝 기법을 사용하였다. 제작된 회절격자의 회절각과 회절 효율 특성을 MatLab 으로 전산모사 한 결과와 유사하게 일치함을 보였다. 이 결과를 응용하여 회절 광학 소자 중 기본인 FZP 를 펨토초 레이저로 실리카 표면에 같은 방법으로 직접 제작하여, 빔 형상을 거리에 따라 측정하였다. 초점거리가 25mm 인 FZP 는 24mm 의 초점거리, 66μm 의 빔 크기 와 6.4% 효율을 가지며 초점거리가 50mm 인 FZP 는 49mm 의 초점거리, 72μm 의 빔 크기와 5.7% 효율을 가지고 있는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한, 가공된 실리카의 높은 투과성과 낮은 열팽창 계수를 이용하면, 고출력 빔을 제작된 회절소자에 조명하여 원하는 복잡한 체적 부피를 가지는 3 차원 물체 제작을 위한 포토마스크로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009 년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었다.

참고문헌

1. Gattass, R. R. and Mazur, E., "Femtosecond laser micromachining in transparent materials," Nature Photonics, Vol. 2, No. 4, pp. 219-225, 2008.
2. Takahashi, H., Hasegawa, S. and Hayasaki, Y., "Holographic femtosecond laser processing using optimal-rotation-angle method with compensation of spatial frequency response of liquid crystal spatial light modulator," Appl. Opt., Vol. 46, No. 23, pp. 5917-5923, 2007.
3. Sohn, I.-K., Ko, M.-J., Kim, Y. S. and Noh, Y.-C., "Femtoseond laser lithography for maskless PR patterning," J. of Kor. Soc. Prec. Eng., Vol. 26, No. 6, pp. 36-41, 2009.
4. Watanabe, W., Kuroda, D., Itoh, K. and Nishii, J., "Fabrication of Fresnel zone plate embedded in silica glass by femtosecond laser pulses," Opt. Exp., Vol. 10, No. 19, pp. 978-983, 2002.
5. Srisungsitthisunti, P., Ersoy, O. K. and Xu, X., "Volume Fresnel zone plates fabricated by femtosecond laser direct writing," Appl. Phys. Lett., Vol. 90, No. 1, pp. 011104-011108, 2007.
6. Anderson, T., Carlie, N., Hu, J., Petit, L., Agarwal, A., Choi, J., Kimerling, L. C., Richardson, K. and Richardson, M., "Microstructured chalcogenide Glasses using femtosecond laser irradiation or photolithography," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2008.
7. Lee, G. J., Jeong, Y. H., Oh, C. H., Kim, E. K. and Lee, Y. P., "Femtosecond laser fabrication of surface-relief grating and internal diffraction grating in glass," J. of Kor. Phys. Soc., Vol. 46, No. 96, pp. 175-180, 2005.
8. Zang, Q. Z., Qiu, J. R., Jiang, X. W., Zhao, C. J. and Zhu, C. S., "Fabrication of internal diffraction gratings in calcium fluoride crystals by a focused femtosecond laser," Opt. Exp., Vol. 12, No. 5, pp. 742-746, 2005.
9. Cheng, Y., Sugioka, K., Masuda, M., Shihoyama, K., Toyoda, K. and Midorikawa, K., "Optical gratings embedded in photosensitive glass by photochemical reaction using a femtosecond laser," Opt. Exp., Vol. 11, No. 15, pp. 1809-1816, 2003.
10. Taylor, R. S., Hnatovsky, C., Simova, E., Rajeev, P. P., Rayner, D. M. and Corkum, P. B., "Femtosecond laser erasing and rewriting of self-organized planar nanocrackks in fused silica glass," Opt. Lett., Vol. 32, No. 19, pp. 2888-2890, 2007.
11. Kawamura, K., Hirano, M., Kamiya, T. and Hosono, H., "Holographic writing of volume-type microgratings in silica glass by a single chirped laser pulse," Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 6, pp. 1137-1139, 2002.
12. Im, Y. S., Lee, Y. L., Kwak, C. H. and Choe, O. S., "Fabrication of holographic zone plate using dichromated gelatin hologram," Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 8, No. 1, pp. 19-25, 1997.
13. Mehta, P. C., Syam, K., Rao, S. and Hradaynath, R., "Higher order aberrations in holographic lenses," Appl. Opt., Vol. 21, No. 24, pp. 4553-4558, 1982.
14. Jahns, J. and Lee, S. H., "Optical computing hardware," Academic Press, pp. 125-270, 1994.
15. Taylor, R. S., Hnatovsky, C. and Simova, E., "Ultra-

high resolution index of refraction profiles of femtosecond laser modified silica structures," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2003.

16. Sohn, I.-B., Lee, M.-S., Woo, J.-S., Lee, S.-M. and Chung, J.-Y., "Fabrication of photonic devices directly written within glass using a femtosecond laser," Opt. Exp., Vol. 13, No. 11, pp. 4224-4229, 2005.