

펨토초 레이저를 이용하여 제작된 회절광학 소자의 광학적 평가

Optical Testing of Diffractive Optical Elements in Fused Silica Fabricated by Using a Femtosecond Laser

유진창, 김진태, 손익부*

조선대학교 광기술공학과 레이저응용연구실, *광주과학기술원 고등광기술연구소 미세광학연구실
kimjt@chosun.ac.kr, ibson@gist.ac.kr

펨토초 레이저 초미세 가공 기술을 이용하여 실리카(fused silica)에 격자간격이 $2 \mu\text{m}$ 와 $5 \mu\text{m}$ 인 회절 격자를 제작하여 회절 각과 회절 효율을 측정하고 전산모사 결과와 비교분석 하였다. 또한, 초점거리가 25 mm , 50 mm 인 FZP (Fresnel Zone Plate)를 제작하고, 광학적 특성 결과를 측정하여 전산모사 결과와 비교 하였다. 펨토초 레이저를 이용하여 제작한 회절 격자와 FZP의 실험 측정 결과들과 전산모사 결과들이 서로 잘 일치함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 회절 광학 소자들 중 기본이 되는 소자인 회절 격자와 FZP를 광학 부품 재료로 널리 사용되는 실리카에 미세가공이 가능한 펨토초 레이저를 사용하여 표면에 화학적 공정과정 없이 직접 제작하였다. 회절 격자의 회절 각과 회절 효율은 제작된 회절 격자의 선폭과 주기 등의 인자(factor)들을 이용하여 얻은 전산모사 결과와 He-Ne(파장 632.8 nm)레이저를 이용하여 얻은 실험 결과와 비교 하였다. 또한 FZP의 특성은 집속되는 빔의 초점 거리를 실험적으로 측정하여 특성을 확인 하였다.

회절 격자와 FZP는 실리카의 표면에 펨토초 레이저 펄스들이 중첩될 정도로 천천히 이동하는 스캐닝 방법을 적용하여 제작되었다. 회절 격자 제작을 위하여 고등광기술연구소에서 보유하고 있는 펨토초 레이저 가공 시스템을 이용하였다. 펨토초 레이저 가공은 극도의 높은 첨두출력($>10 \text{ GW}$)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) 성질에 의해서 정밀 미세가공이 가능하다.⁽¹⁾ 펨토초 레이저의 사양은 785 nm 의 파장과 184 fs 의 펄스폭 1 kHz 의 반복률을 가지며 최대 출력은 1 W 이다. 실험에 사용된 Stage는 X, Y 축은 Linear motor stage, $300 \times 300 \text{ mm}^2$ 의 가공 범위와 $20 \mu\text{m}$ 의 분해능, 20 mm/s 의 최대 속력을 가지며, Z축은 Ballscrew stage, 200 mm 의 범위 $0.5 \mu\text{m}$ 의 분해능, 20 mm/s 의 최대 속력을 가지고 각각 다르게 구동이 된다. 가공에 사용된 대물렌즈는 배율이 $50(\text{NA}=0.42)$ 이다. 회절 격자는 0.1 mm/s 가공속도, $2.12 \mu\text{J}$ 펄스 세기, $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 의 크기로 실리카 표면에 제작 하였다. 각각 $2 \mu\text{m}$ 와 $3 \mu\text{m}$ 의 주기로 제작된 회절 격자는 광학 현미경과 AFM을 사용하여 선폭이 $200 \sim 300 \text{ nm}$ 정도이고 깊이가 $300 \sim 400 \text{ nm}$ 정도 되는 것을 확인 하였다. 제작된 회절 격자의 효율을 측정하기 위해 가공 형상으로부터 얻은 가공된 깊이와 주기를 회절 격자의 푸리에 변환에 의해 효율을 전산모사 하는 방법을 적용하였다.⁽²⁾ 회절 패턴을 측정하기 위해 He-Ne 레이저를 사용하였다. He-Ne 레이저에서 나온 빔을 편광기를 사용하여 감쇄시킨 후, 빔 확대기로 빔을 키우고 제작된 회절 격자로 입사 시켰다. 회절 격자 샘플과 스크린 사이의 거리는 100 mm 이고, 레일 위에 PD를 사용하여 측정된 차수에 따른 회절 강도를 측정하여 회절 효율을, 각 패턴들 사이의 거리를 측정하여 회절 각을 구하였다.

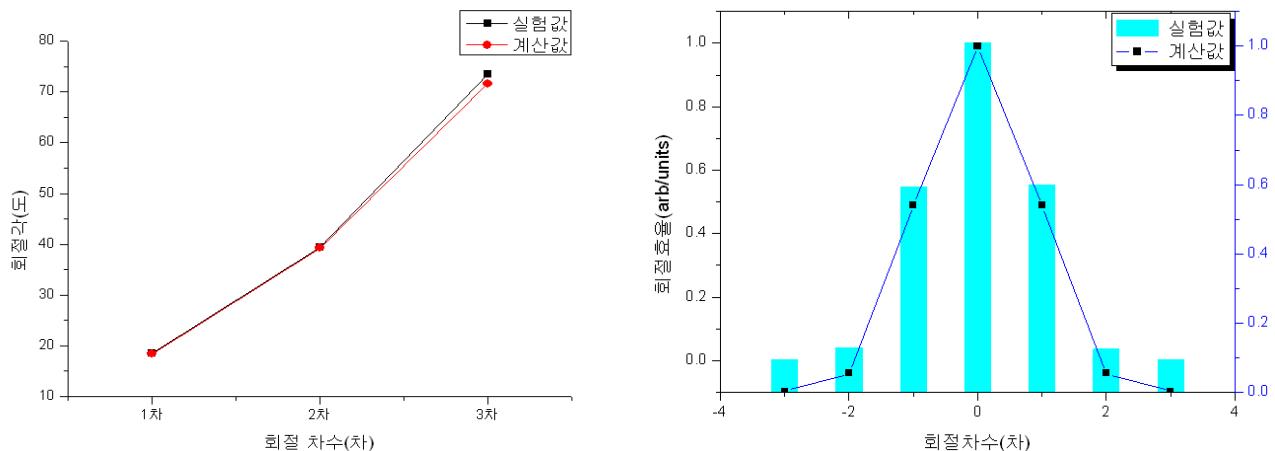


그림 1. 주기가 $2 \mu\text{m}$ 인 회절 격자의 회절 각과 회절 효율의 시뮬레이션 결과와 실험결과 비교

그림 1 은 제작된 $2 \mu\text{m}$ 간격 회절 격자의 회절 각과 회절 효율의 비교를 위해 전산모사(막대그래프) 결과와 실험한 결과를 비교해 보여 주는 그래프이다. 회절 각은 실험값과 이론값이 회절 차수에 따라 거의 동일한 값을 가지며 변화 하는 것을 보여주고 있다. 회절 효율은 회절격자의 차수가 낮을 때는 거의 유사한 경향성을 나타내지만, 차수가 3차가 넘어갈 때부터 전산모사 결과가 실험 결과 값보다 크게 나타났다. 그 이유는 전산모사에 사용된 회절 격자의 가공 깊이와 주기를 AFM 측정 결과로 부터 피팅(fitting) 하는 과정에서 생긴 오차와 제작 시 생기는 리플(ripple) 등에 의한 회절 격자의 불완전성 등으로 인하여 생기는 오차로 생각된다.

끝으로, He-Ne (파장 632.8 nm)를 사용 하였을 때 각각 25 mm , 50 mm 의 초점거리를 가지는 회절소자인 FZP의 회절 패턴은 MatLab을 사용하여 얻었다. 이렇게 얻은 FZP 회절 패턴을 펜토초 레이저를 이용하여 제작 하였으며, 가공 조건은 배율이 20($\text{NA}=0.4$)인 대물렌즈를 사용하여, 0.1 mm/s 의 속도, $4.98 \mu\text{J}$ 의 펄스 세기로 가공 하였다. FZP의 크기는 3 mm 정도의 직경을 가진다. 제작된 FZP의 성능 측정을 위해서 빔 프로파일러를 사용하여 FZP와 빔 프로파일러 간의 거리를 마이크로로미터와 레일을 사용하여 1mm 크기로 변화 시키며 FZP의 빔의 크기를 측정하여 거리에 따른 빔의 세기(Intensity, J/cm^2) 값으로 초점거리를 측정하였다.⁽³⁾ 측정된 FZP에 의한 초점거리는 1 mm 범위 내에서 예측된 초점거리와 잘 일치함을 알 수 있었다. 이와 같이 펜토초 레이저를 이용하여 실리카에 제작된 회절 소자들은 실리카의 높은 손상 문턱 값 때문에 고출력 빔으로 제작된 회절소자에 조명하여 원하는 복잡한 부피를 가지는 물체 제작에 쉽게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- I. -B. Sohn, M. -S. Lee, J. -S. Woo, S. -M. Lee, and J. -Y. Chung, "Fabrication of photonic devices directly written within glass using a femtosecond laser", Optics Express **13**, 4224-4229 (2005).
- G. J. Lee, Y. H. Jeong, C. H. Oh, E. K. Kim, and Y. P. Lee, "Femtosecond laser fabrication of surface-relief grating and internal diffraction grating in glass" J. Kor. Phys. Soc. **46**, s175-s180 (2005).
- 임용석, 이영락, 곽종훈, 최옥식 "Dichromated Gelatin 박막을 이용한 홀로그래픽 Zone Plate 제작 및 해석", 한국광학회지 **8**, 19-25 (1997).