dCollection @ chosun

creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000238499

Collection @ chosun

2009年 8月

碩士學位論文

펨토초 레이저를 이용한 회절광학 소자 제작 및 광특성 평가

朝鮮大學校 大學院

光 技 術 工 學 科

柳 鎭 昌

Collection @ chosun

Collection @ chosun

펨토초 레이저를 이용한 회절광학 소자 제작 및 광특성 평가

指導敎授 金 珍 泰

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함

2009年 8月

朝鮮大學校 大學院

光 技 術 工 學 科

柳 鎭 昌

dCollection @ chosun

柳 鎭 昌의 碩士學位 論文을 認准함

위원장 : 김 현 수 (인)

위 원 : 김 진 태 (인)

위 원 : 손 익 부 (인)

2009年 8 月

朝鮮大學校 大學院

Collection @ chosun

목 차

ABSTRACT

제 1장 서 론 ····· 1
제 1절 연구배경 ····· 1
제 2절 연구목적 ····· 3

제 2장 이 론 ····· 4
제 1절 펨토초 레이저 가공 ····· 4
1 펨토초 레이저 가공 ····· 4
2 레이저 출력 ····· 8
제 2절 회절격자의 원리 ····· 9
제 3절 FZP(Fresnel zone plate) 원리 ····· 12
제 4절 홀로그래피 원리 ····· 14

제 3장 실험장치 및 방법 ····· 18
제 1절 실험장치 ····· 18
1 펨토초 레이저 가공 ····· 18
가 Q-스위칭 ····· 19
나 모드 잠금(mode locking) ····· 20
다 타이타늄 사파이어 매질과 쳐프 펄스 증폭(Chirped Pulse Amplification, CPA) 기술 ····· 21

Collection @ chosun

2 레이저 가공 시스템 ····· 23
3 가공 재료로 사용한 용융 실리카(Fused silica, SiO_2) 특성 ····· 26

제 4장 실험결과 및 고찰 ····· 27
제 1절 회절격자 ····· 27
1 회절격자의 제작 ····· 27
2 제작된 회절격자의 특성 측정 ····· 30
제 2절 FZP ····· 34
1 FZP의 제작 ····· 35
2 제작된 FZP의 특성 평가 ····· 36
제 3절 홀로그램 ····· 41
1 홀로그램 제작 ····· 41
2 홀로그램 재생 ····· 46

제 5장 결론 ····· 48

【참고문헌】 ····· 49

Collection @ chosun

그 림 목 차

그림 1. 나노초 펄스 레이저와 펨토초 펄스 레이저 가공 비교 ····· 4
그림 2. 레이저 펄스 시간에 따른 물리현상 변화 모식도 ····· 6
그림 3. 레이저 가공 공정 모식도 ····· 8
그림 4. 회절격자에 의한 프라운호퍼 회절 개략도 ····· 9
그림 5. FZP에서 레이저빔의 전파 개략도 ····· 12
그림 6. 홀로그램 생성 과정 ····· 14
그림 7. 물체의 회절 모식도 ····· 15
그림 8. 모드동기 개략도 ····· 20
그림 9. 처프 펄스 증폭기술 개략도 ····· 22
그림 10. 레이저 가공기 개략도 ····· 23
그림 11. 펨토초 레이저로 실리카 표면에 회절격자 가공 개략도 ····· 24
그림 12. 가공시스템 사진 ····· 25
그림 13. 2 μm 격자 간격을 가지는 회절격자의 현미경 측정결과 및 AFM (Atomic Force Microscope) 측정 결과 ····· 27
그림 14. 5 μm 격자 간격을 가지는 회절격자의 AFM 측정결과 및 회절 무늬 ····· 28
그림 15. 회절격자 특성 측정 장치 모식도 ····· 30
그림 16. 회절격자의 회절 무늬 측정 이미지 ····· 31
그림 17. 2 μm 간격을 가지는 회절격자의 (a) 회절 각 과 (b) 회절 효율의 전산모사 결과와 실험값 ····· 32
그림 18. 5 μm 간격을 가지는 회절격자의 (a) 회절 각 과 (b)회절 효율의 전산모사 결과와 실험값 ····· 32
그림 19. 제작된 25 mm의 초점거리를 갖는 FZP의 (a) 광학 현미경 사진 (X 60배율) (b) 3차원 측정결과 ····· 34

Collection @ chosun

그림 20. 제작된 50 *mm*의 초점거리를 갖는 FZP의 (a) 광학 현미경 사진 (X 60배율) (b) 3차원 측정결과 ····· 35
그림 21. 핀홀 기법 측정 모식도 ····· 36
그림 22. 핀홀 방법으로 측정한 FZP의 거리에 따른 빔의 세기 분포 ····· 37
그림 23. 제작된 25 *mm*의 초점거리를 갖는 FZP의 (a) 거리에 따른 빔 형상 측정결과 ····· 38
그림 24. 제작된 50 *mm*의 초점거리를 갖는 FZP의 (a) 거리에 따른 빔 형상 측정 결과 ····· 38
그림 25. 제작된 FZP의 거리에 따른 세기 그래프 ····· 39
그림 26. 'Chosun' 이미지의 (a) 홀로그램 패턴 변환 전 모습, (b) OptiXplorer를 사용하여 변환한 홀로그램 패턴과 (c) 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 *μm*에 제작한 홀로그램 광학 현미경(X 500 배율) 측정 이미지 ····· 42
그림 27. 'APRI' 이미지의 (a) 홀로그램 패턴 변환 전 모습, (b) OptiXplorer를 사용하여 변환한 홀로그램 패턴과 (c) 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 *μm*에 제작한 홀로그램 광학 현미경(X 500 배율) 측정 이미지 ····· 43
그림 28. 'Cho' 이미지의 (a) 홀로그램 패턴 변환 전 이미지, (b) MatLab 사용하여 변환한 홀로그램 패턴과 (c) 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 *μm*에 제작한 모습을 광학 현미경(X 200 배율) 측정 이미지 ····· 44
그림 29. OptiXplorer를 사용하여 제작한 2차원 홀로그램을 He-Ne (파장: 543 *nm*) 레이저를 사용하여 얻은 재생모양 ····· 46
그림 30. MatLab을 사용하여 제작한 2차원 홀로그램을 He-Ne(파장: 543 *nm*) 레이저를 사용하여 얻은 재생 모양 ····· 47

Collection @ chosun

표 목 차

표 1. 실험에 사용된 레이저 사양 ····· 18
표 2. 가공 스테이지 사양 ····· 23

Collection @ chosun

ABSTRACT

Fabrication and optical testing of diffractive optical elements in fused silica glass by using a femtosecond laser

Jin-Chang Ryu

Advisor : Prof. Jin-Tae Kim, Ph.D.

Department of Photonic Engineering,

Graduate School of Chosun University

Diffraction gratings with spatial periods of 2 μm and 5 μm have been fabricated by using a femtosecond laser which does not have limits in materials of micromachining and small thermal effects due to high peak power. We used a slowly moving scanning method with laser pulse synchronization with a stage moving speed. 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, FZPs (Fresnel Zone Plate) 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. Holograms were also fabricated and reconstructed by illuminating a reference beam with a wavelength of 543 nm, which reconstructed

Collection @ chosun

well designed characters in two dimension. These two dimensional characters in same plane will be extended to three dimensional plane and fabricated in the future.

Collection @ chosun

제 1장 서 론

제 1절 연구배경

레이저의 발명 이후 레이저는 많은 산업분야에서 응용이 되어왔으며, 레이저 미세 가공 기술은 레이저를 이용하기 때문에 가공 시 물체에 직접 접촉하지 않아 가공물체에 외력을 가하지 않고, 수 마이크로미터 이하의 크기를 가지는 부품을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 각 물체마다 갖는 고유한 흡수 스펙트럼에 따라 레이저 파장과 세기를 변화하며 반도체, 전자, 자동차, 메카트로닉스, 섬유가공, 통신 등 첨단산업 분야의 고품질 부품의 국부적인 가공이 가능하다.

산업의 첨단화와 고밀도, 고집적화 되어가는 산업 동향에 의해 초미세 가공이 더욱 필요하여 지고 있으나, 레이저 가공 현상에서 나타나는 열적 영향 및 가공 광학계 분해능의 한계 때문에 기존의 나노초 레이저 가공 기술보다 더욱 정밀한 새로운 레이저 가공 기술의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 수 마이크로 급 가공 형상의 가공이 용이하고 열적 영향이 거의 없으며, 투명한 재질 내부가공과 3차원 형상 가공까지 가능한 펨토초 레이저가 주목받고 있다[1,2].

펨토초 레이저를 이용한 레이저 가공의 특징은 물체의 격자 속으로 열 에너지가 전달되는 시간인 1 피코초(10^{-12}s) 보다 짧은 펄스폭을 지니고 있어서 가공 시 발생한 열이 가공재료로 전달되지 않아 열 확산부위(Heat Affected Zone, HAZ)가 다른 레이저에 비해 작다. 이에 따라 재료의 열적 손상이나 구조변화가 없는 장점을 가지고 있다. 또한, 극초단 펄스 레이저의 초강도 세기와 다광자흡수(Multiphoton absorption)로 가공물질에 제한이 없으며 금속, 유리, 세라믹 등 다양한 재질의 초정밀 가공이 가능하다[3].

특히 다른 레이저 가공시 투명한 물질의 내부가공은 빛이 투과하기 때문에 물질의 내부 가공이 되지 않으나 극초단 펄스 레이저인 펨토초 레이저를 이용하면, 투명한 물질의 내부에 집광을 하여 최소 임계점 이상의 가공을 하게 되면 물질 내부에서 비선형 효과로 인해 빛이 흡수되고 재료에 굴절률의 변화, 밀도의 변화 등

dCollection @ chosun

의 구조적인 변화가 발생된다. 이러한 원리로 유리 표면 혹은 내부에 펨토초 레이저를 사용하여 3차원 형상의 가공을 할 수 있다. 펨토초 레이저의 투명재료에 대한 우수한 가공 특성은 3차원 광 정보 저장장치(Three-dimensional data storage), 직접제작 방법에 의한 광도파로(Optical waveguides), 광도파로 분배기(Waveguide splitter) 등의 광소자 개발에 적용하기 위한 연구가 진행 중이다[4].

Collection @ chosun

제 2절 연구목적

펨토초 레이저는 마스크를 사용하지 않고 직접 삼차원 광학 소자를 제작할 수 있는 장점이 있어 최근 많은 연구가 이루어지고 있다[5-6]. Watanabe[7] 등은 기포를 펨토초 레이저로 실리카에 새겨 넣는 방식을 사용하여 FZP를 직접 제작하여 광학적 특성 조사를 하였고, Srisungsitthisnti[8] 등은 효율이 증대된 체적(Volume) FZP, VFZP와 광도파로 회로를 결합한 광소자[9], 정보 저장용 홀로그램[10], 회절 광학 소자[11] 등이 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 DOE를 동일한 기록 매질에 기록할 수 있다는 장점을 가지고 있다[12]. 기본적인 DOE 소자인 회절격자는 분광계의 핵심적인 소자이며, FZP는 레이저 프린터, 광 데이터 프로세서, 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 위 연구들에서 수행한 회절격자들 보다 좋은 분해능을 가지는 2 μm 와 5 μm 의 격자 주기의 미세한 회절 격자 와 25 mm 와 50 mm 의 초점거리를 가지는 FZP를 펨토초 레이저를 이용하여 화학적 공정 없이 실리카 표면에 직접 제작 하였다. 제작된 회절격자의 회절 각과 회절 효율을 실험적으로 측정하여 회절격자의 선폭과 주기 등의 인자들을 이용하여 얻은 전산모사 결과와 비교 분석하고, FZP의 빔 형상을 분석하여 초점 부근에서의 빔 형상을 측정하여 초점거리를 실험을 통해 확인하였다. 또한, 위 실험들을 바탕으로 투명 유리 내부에 HOLOEYE 사의 DOE 컴퓨터 생성 프로그램인 OptiXplorer 프로그램과 자체 코딩된 MatLab 프로그램을 사용하여 얻은 2차원 회절패턴을 펨토초 레이저로 제작하였으며, 회절패턴에 참조광을 조사하여 물체를 재생하였다.

Collection @ chosun

제 2장 이 론

제 1절 펨토초 레이저 가공

1. 펨토초 레이저가공

그림 1 은 (a) 나노초 레이저와 (b) 펨토초 레이저와의 가공 차이를 보여주고 있다.

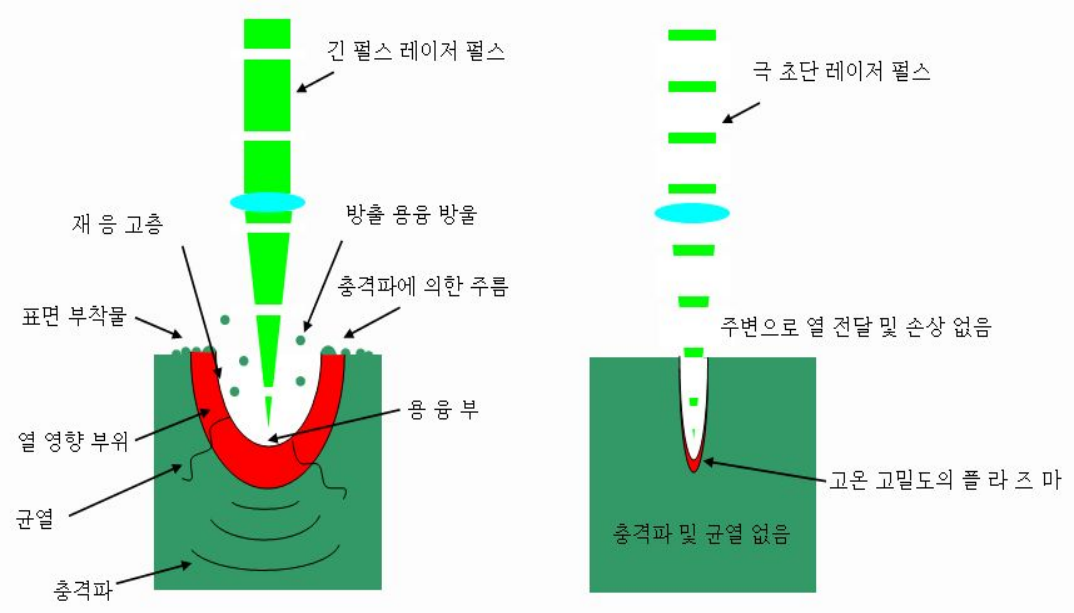


그림 1. 나노초 펄스 레이저 와 펨토초 펄스 레이저 가공 비교

그림 1 에서 보여주는 것과 같이 긴 펄스의 레이저를 사용하여 가공을 하게 되면 가공영역 주변에 열 영향 구역이 발생하고 이로 인해 격자들이 파괴되어 가공의 영향 부위가 커지며, 정밀한 가공이 어렵다. 그러나 극초단 펄스 레이저를 사용하여 가공을 하게 되면 에너지 전달이 격자까지 이루어지지 않고 광자들이 전자에 흡수되는 상태에서 가공이 이루어진다. 이 때문에 가공영역이 격자까지 전달되지

dCollection @ chosun

않으므로 열 발생이 극미하고, 가공 부위만 분해되어 사라지게 된다. 이로 인해 가공부위가 보다 정밀하게 가공 될 수 있으며, 가공부위 이외의 부분의 영향을 최소로 할 수 있다. 실리카 물질을 손상시키는데 필요한 강도에 영향을 주는 실험적으로 얻은 인자들을 살펴보면[5] 아래와 같다.

$$I \propto E \frac{NA^2}{\tau\lambda^2(1-NA^2)} \qquad (1-1.1)$$

위 식에서 E 는 펄스 에너지, τ 는 펄스 지속시간, NA는 개구수로 렌즈가 얼마나 빔을 잘 집속 시켜 주는지 나타내주는 지표이고, λ 는 사용한 파장이다. 레이저 가공에서 펄스 에너지, 개구수와 파장이 고정되면 레이저 가공은 레이저 펄스 지속시간 중 일어나는 물리적인 특성 변화에 기인한다. 펄스 지속 시간이 매우 짧은 극초단 레이저를 이용하여 가공을 하게 되면, 짧은 시간(펨토초) 동안 레이저와 매질의 상호작용으로 물체에 있는 전자에 에너지가 전달이 되며 이 전자는 격자(Lattice)에 에너지가 전달되어 원자격자가 붕괴된다. 전자에 의해 격자에 열 에너지가 전달되는 되는 시간은 1 피코초 정도로 극초단 레이저에 의한 펄스 지속 시간인 10^{-15}초 보다 길기 때문에 극초단 레이저에 의한 가공은 열에 의해 물체가 녹아 내리는 현상이 아닌 원자가 광자를 흡수 하는 약 1펨토초(10^{-15}s) 동안에 물체를 분해해서 순간적으로 분출되는 현상으로 가공이 일어나게 되며 이러한 가공현상을 어블레이션(Ablation) 이라고 부른다. 레이저 빛이 가공 물체의 표면에 조사되면 일부는 반사되고 일부는 물체에 흡수되게 된다. 입사되는 에너지 강도를 I_0 라고 할 때, 소재의 반사율을 R 이라고 하면 반사되는 에너지 양은 $R \cdot I_0$ 가 되며 나머지 에너지는 물체에 흡수된다. 물체의 표면에 조사된 에너지의 강도는 표면에서 지속적으로 감소하게 되며, 이를 표현하면 아래와 같다.

$$I(z) = (1-R)I_0 \exp(-az) \qquad (1-1.2)$$

식 (1-2)에서 a 는 흡수계수 이며, $1/a$ 를 침투 깊이라 한다. 흡수계수 $a = 4\pi\kappa/\lambda$ 로 표현되며 여기서 κ 는 흡광계수, λ 는 레이저 파장을 나타낸다. 극초단 펄스 레이저와 같이 펄스폭이 짧아 열 확산의 영향이 무시될 정도로 작으면, 펄스당 어블

Collection @ chosun

레이션 깊이는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$D = a^{-1} In(\frac{F}{F_{th}}) \qquad (1-1.3)$$

위 식에서 F 는 플루언스, F_{th} 는 임계 플루언스이다. 이렇게 펄스당 어블레이션 깊이에 따라 펄스의 개수를 조정하여 깊이가 다른 가공이 가능하다. 또한, 극초단 펄스 레이저는 높은 출력 밀도에 의한 다광자 흡수를 통해서 밴드갭이 존재하는 투명 재질 내부의 가공이 가능하다. 물체는 각각 고유의 빛의 파장을 흡수한다. 투명 재질은 우리 눈에 보이는 가시광 영역의 빛을 투과시키기 때문에 투명하게 보이며, 이런 물질은 빛을 투과시키기 때문에 레이저 가공이 어렵다. 그러나 극초단 펄스 레이저를 사용하면, 투명재질 내부에 다광자 흡수 과정을 통해서 빛이 흡수되고, 이로 인해 굴절률과 밀도의 변화 균열의 생성 등의 가공이 일어나게 된다[15]. 아래 그림은 레이저 가공 시 펄스 지속 시간에 따라 투명 재료에서 일어나는 물리적 현상을 나타내었다.

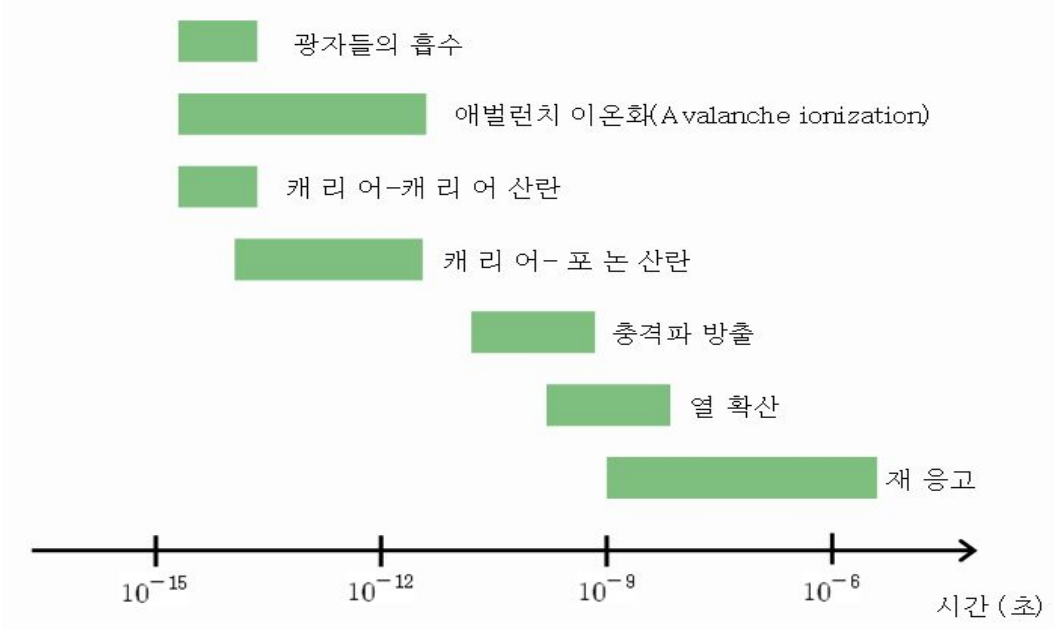


그림 2. 레이저 펄스 시간에 따른 물리현상 변화 모식도

dCollection @ chosun

그림 2 에서 보여주는 것처럼 펨토초 레이저 펄스를 사용 할 때는 광자들이 전자들로 흡수되며 이와 동시에 전자에서 전자로 에너지가 전달된다. 펄스 지속 시간이 길어질수록 격자로 열 형태의 에너지가 전달됨으로서 열 에너지 발생으로 일어나는 현상이 나타나는 것을 보여준다. 극초단 레이저를 사용한 투명매질에서 광학적 구조붕괴(Optical breakdown)는 전도대의 전자로 에너지 흡수, 전자의 진동에 의한 전자에서 전자로의 에너지 전달, 포논(phonon) 산란으로 인한 에너지 이동에 따른 현상과 애벌런치 이온화 현상으로 이해할 수 있다. 전자 운동에너지(ϵ)에 따른 전자의 가열속도 $H(\epsilon,t)$ 식은 아래와 같다.

$$H(\epsilon,t) = \frac{2\delta(\epsilon)}{3} E^2(t) \qquad (1-1.4)$$

여기에서, $E(t)$ 는 주파수 ω 에서 진동하는 레이저 전기장의 크기, $\delta(\epsilon)$ 는 전자의 전도율로 아래와 같다.

$$\delta(\epsilon) = \frac{e^2 \tau_m(\epsilon)}{m^*} [1 + w^2 \tau_m^2(\epsilon)]^{-1} \qquad (1-1.5)$$

여기서 m^*은 전자의 유효질량, ω는 레이저 각주파수이며 $1/\tau_m$은 전자-포논의 산란율이다.

애벌런치 이혼화란 전자가 밴드갭에 상응하는 에너지를 얻게 되면, 충격이온화에 의해 가전자대(Valence band) 전자를 전도대로 이동 시키는 것을 말한다. 애벌런치 이온화는 전자의 세기에 비례하여 커지며 애벌런치 이온화가 발생하면 재료의 구조가 변화 되며, 전자밀도의 시간 변화율은 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dn_e}{dt} = \beta n_e + P(I) \qquad (1-1.6)$$

βn_e 는 애벌런치 이온화 항이며, $P(I)$ 는 광이온화 항이다[5,16].

dCollection @ chosun

2. 레이저 출력

그림 3 은 레이저에서 빔이 나와서 물체에 이르기 까지를 간단하게 보여주고 있다.

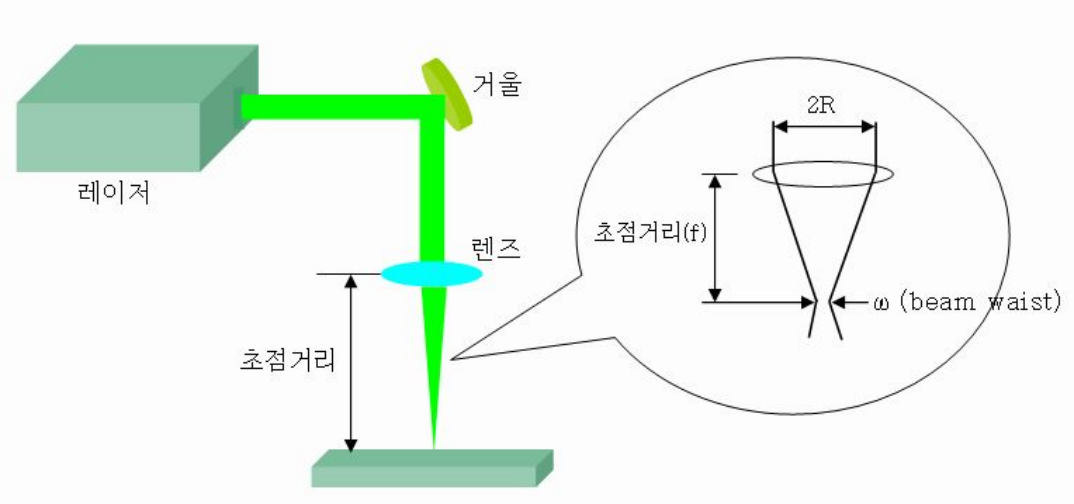


그림 3. 레이저 가공 공정 모식도

레이저 출력(Power)은 레이저에서 나오는 레이저 에너지를 의미하며 [*W*] 단위로 표현한다. 펄스 레이저 들은 1초에 몇 개의 펄스가 나오는지에 따라 반복율이 결정되며, 단위 시간당 펄스의 개수로 [*Hz*] 단위로 표현된다. 한 개의 펄스가 가지는 에너지양을 펄스 에너지라고 하며, [*J*] 단위로 표현한다. 에너지는 파워 [*W*]를 반복률[*Hz*]로 나누어서 구한다. 펄스폭이 짧은 레이저의 파워는 봉우리 출력(peak power)로 평가 하며 봉우리 출력[*W*]은 펄스에너지[*J*]/펄스폭으로 구한다. 에너지 밀도인 플루언스(Fluence)[J/m^2]는 펄스 에너지를 초점에서의 스팟 크기(ω) 에서 단위 면적당 입사되는 에너지로 표현하며 단위 면적당 입사되는 파워는 강도(Intensity)[W/m^2] 으로 표현된다.

dCollection @ chosun

제 2절 회절격자의 원리

회절격자는 많은 수의 일정한 간격을 가진 슬릿들로 구성된 광학소자로 투과형과 반사형이 있으며, 분광계에 사용되어 파장을 분석하는 중요한 소자로 사용이 증가하고 있다. 본 논문에서 제작한 투과형 회절격자는 각각의 격자들이 빛을 투과하므로 분리된 슬릿처럼 생각할 수 있다. 시준된 광원을 사용하여 매우 멀리 떨어진 곳에서 회절격자로 부터 회절된 형태를 관찰하면 프라운호퍼 회절이라고 한다. 아래 그림은 이때 회절격자로 입사한 평행광이 회절격자에 의해 회절되어 스크린 상의 한 점 P 에서의 회절 형태 측정을 위한 개략도이다.

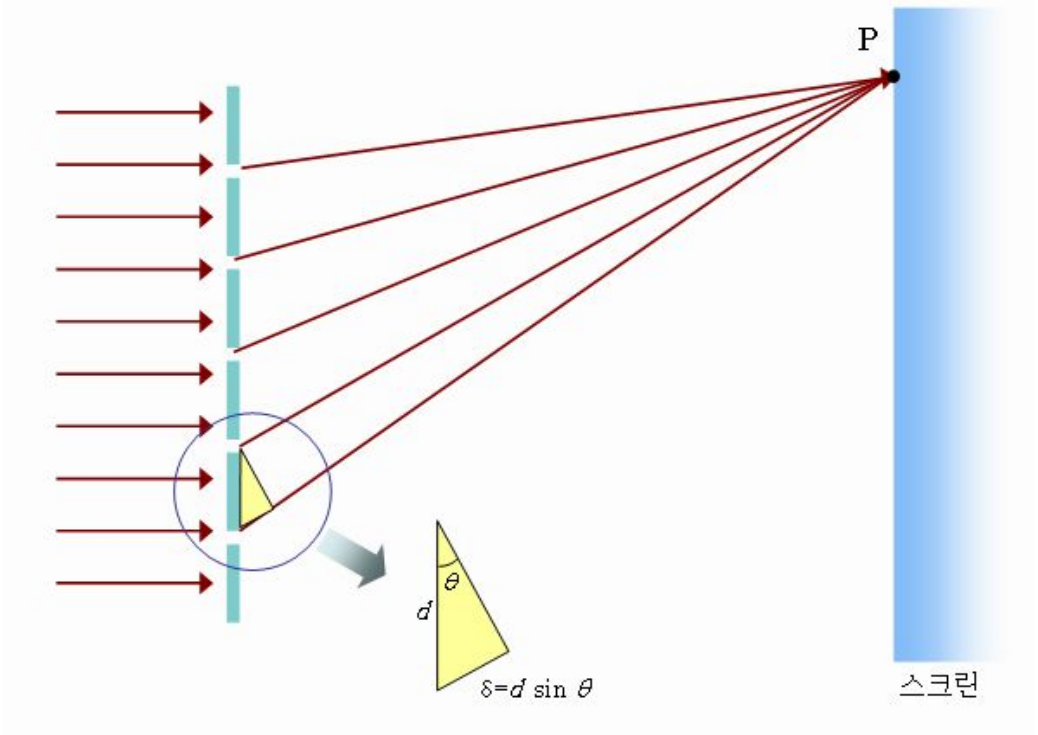


그림 4. 회절격자에 의한 프라운호퍼 회절 개략도

그림 4 는 회절격자에 의한 프라운호퍼 회절 개략도로 d 는 회절격자 간격, θ 는 회절각을 나타낸다. 시준된 평면파가 일정한 간격을 가지는 회절격자에 입사하

dCollection @ chosun

여 스크린의 한 점 P 에 각각 다른 광 경로를 가지고 도달하여 회절패턴이 생성되어 스크린에 보여주게 된다. 이때, 처음 출발점에서 파동들은 같은 위상을 가지고 있지만 그림 에서 보여지는 바와 같이 빛이 θ 방향으로 진행한다고 가정하면 이웃하는 격자와 $d\sin\theta$ 만큼의 광 경로 차이가 생기게 된다. 이 광 경로 차이에 의해서 스크린의 한 지점 점 P 에 도달할 때 각 회절격자 에서 출발한 파동들은 서로 다른 위상을 가지게 된다. 그러므로 생성된 회절 무늬는 위상의 차이에 의해서 상쇄 간섭과 보강 간섭이 위상차에 따라 일어난다. 시준빔이 회절격자에 의해 회절될때 P점에서 보강간섭 조건은 다음과 같다.

$$d\sin\theta = m\lambda \quad (m = 0,1,2,3\cdots) \qquad (2-1.1)$$

식(2-1.1)은 회절격자 방정식으로 불리우며, θ 는 회절 각도, λ 는 사용된 레이저 파장, d 는 회절격자간격이다[17].

본 논문의 실험에서 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 $\Delta n \sim 0.003$)[18] 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[19] 회절격자의 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.

$$h(x) = h_{avg} + \sum_{p=1}^{\infty} h_{\mathrm{mod},p}\cos(pKx) \qquad (2-1.2)$$

여기에서,

dCollection @ chosun

$$h_{\mathrm{mod},p} = \frac{K}{\pi}\int_{-\pi/K}^{\pi/K} h(x)\cos(pKx)dx,\quad h_{avg} = \frac{K}{\pi}\int_{-\pi/K}^{\pi/K} h(x)dx \qquad (2-1.3)$$

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

$$\exp[j\phi(x)] = \exp(jkh_0 + jk\Delta n_{ga}h_{avg})\exp[jk\sum_{p=1}^{\infty}\Delta n_{ga}h_{\mathrm{mod},p}\cos(pKx)] \qquad (2-1.4)$$

기호 J_q 는 q번째 차수 Bessel 함수, Δn_{ga}는 유리와 공기간의 굴절률 차이, 그리고 k 는 입사 매질에서 파수이다. 비 정현적 으로 변조된 구조에 대해, 그 m^{th} 차수의 회절 세기는 몇 개의 베셀 함수들의 결합에 의해 묘사되어져야 한다. 처음 세번째 조화들만으로 위에서 기술한 푸리에 함수를 고려하면, m^{th} 차수의 회절 세기는 위 식으로 부터 얻은 정현 함수의 계수들로부터 얻어진 다음 식으로 주어진다.

$$\eta_m \propto \left| \sum_{q3=-\infty}^{\infty}\sum_{q2=-\infty}^{\infty}\sum_{q1=-\infty}^{\infty} j^{q_1+q_2+q_3} J_{q3}(k\Delta n_{ga}h_{\mathrm{mod},3})\, J_{q2}(k\Delta n_{ga}h_{\mathrm{mod},2}) \times J_{q1}(k\Delta n_{ga}h_{\mathrm{mod},1}) \right|^2_{q_1+2q_2+3q_3=m} \qquad (2-1.5)$$

식 (2-1.5)을 바탕으로 MatLab 전산모사를 통하여 제작된 회절격자의 회절 효율을 구하였다.

Collection @ chosun

제 3절 FZP의 원리

FZP는 프레넬이 고안한 원형 윤대판 으로 빔을 집속 시켜주는 효과를 가지고 있다. 렌즈와 다르게 한 평면에 제작 할 수 있으며, 이 때문에 차지하는 공간이 렌즈보다 작아서 여러 가지 광학계에 널리 응용되고 있다. FZP의 각 윤대들은 $\lambda/2$의 위상차를 가지고 빔을 통과 시키고 다음 윤대는 빔을 차단 시키는 것이 반복 된다. 각 윤대들의 면적은 같으며, 그래서 처음 윤대의 폭이 가장 크며, 차수가 많아질수록 윤대의 폭은 줄어들게 된다. 레이저 빔이 통과하는 윤대부분의 위상차이가 파장의 정수배를 이루며, 이 때문에 보강간섭이 일어나서 초점에 빛이 집속하게 된다. 그림은 FZP가 빔을 집속 시키는 개략도를 보여주고 있다.

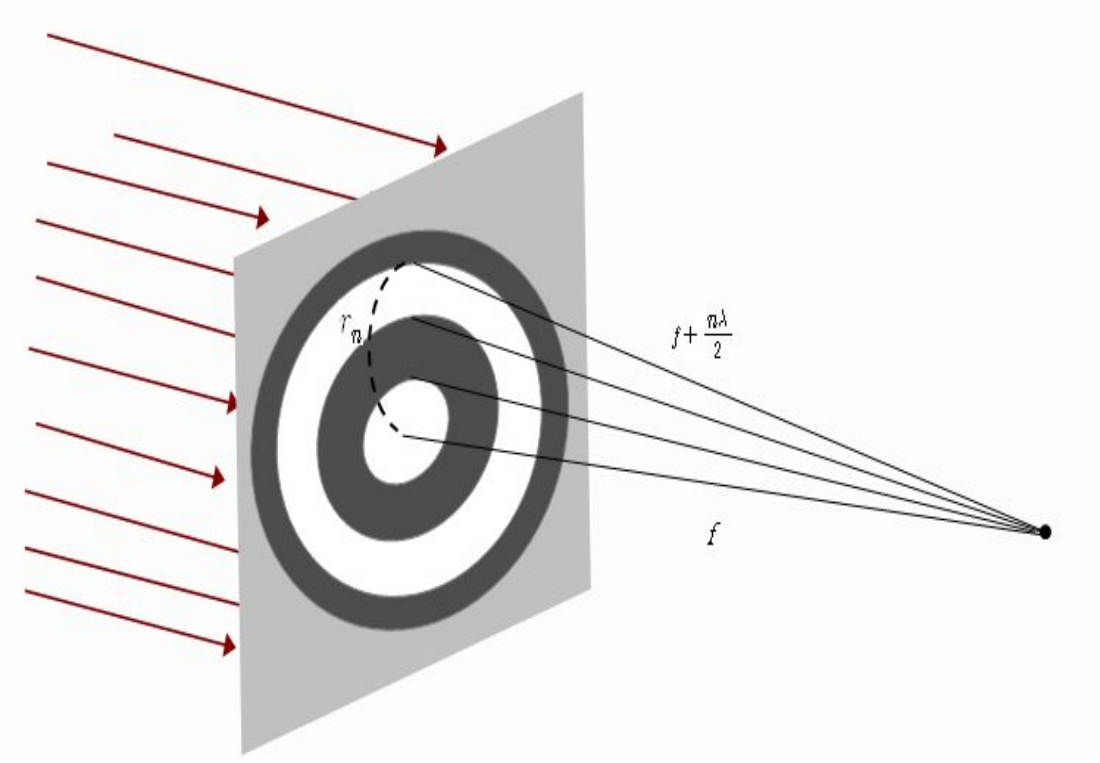


그림 5. FZP에서 레이저빔의 전파 개략도

Collection @ chosun

그림 5 는 FZP에서 레이저빔의 집속 원리를 보여준다. FZP의 중심에서 초점까지의 거리를 f 라고 하면, N 번째 환의 반경은 r_N 이고, 빗면은 $f+\frac{n\lambda}{2}$ 로 아래 식 (3-1) 에 나타내었다.

$$f^2+r_n^2=(f+\frac{n\lambda}{2})^2 \qquad (3-1)$$

식 (3-1)은 삼각함수 공식을 사용해서 각 변의 길이를 나타낸 것이며 식(3-1)을 이용하여 윤대의 반지름은 아래 식으로 표현된다.

$$r_N \simeq \sqrt{N\lambda f} \qquad (3-2)$$

(3-1) 과 (3-2) 에서 f, λ, N 는 각각 윤대판의 초점거리, 파장, N 번째 환을 나타낸다. 식 (3-2) 을 사용하여 일정한 초점 거리를 가지는 FZP의 윤대들의 길이를 차수에 따라 Mathcad 프로그램을 이용하여 얻었다. 초점거리에서 빔 크기는 제작된 윤대의 최 외각 윤대의 크기와 관계가 있으며 아래와 같이 구하여 진다.

$$2w=1.2\Delta r \qquad (3-3)$$

식 (3-3) 에서 2ω 는 초점거리에서 빔 크기이며 Δr은 제작된 FZP의 최 외각 윤대의 크기 이다. FZP의 효율은 FZP에 들어온 빔 중 초점에 집속되는 빔의 세기이며 일반적으로 20% 의 효율을 넘지 않는다.

Collection @ chosun

제 4절 홀로그래피의 원리

홀로그래피는 참조파와 물체파의 간섭 현상을 통해서 기록된 홀로그램에 홀로그램 생성을 위해 사용된 참조광을 조사하여 물체를 삼차원으로 재생하는 것이다. 홀로그램과 사진의 가장 큰 차이는 사진은 물체의 밝고 어두운 강도 분포를 필름에 기록하여 2차원 상만을 기록하고, 홀로그램은 기록된 위상과 강도정보를 사용하여 물체의 삼차원 위치정보를 재현 할 수 있다는 것이다. 이러한 홀로그래피기술은 가간섭성을 가진 레이저를 사용하여 1948년 데니스 게이버에 의해 구현된 홀로그램에 비해 매우 향상된 삼차원 영상을 얻을 수 있게 되었다. 또한 굿만(Goodman)에 제안된 디지털 홀로그라피 기술은 CCD(charge coupled device)와 컴퓨터 기술의 발달로 매우 쉽게 컴퓨터를 사용하여 디지털 홀로그램을 생성할 수 있게 되었다.

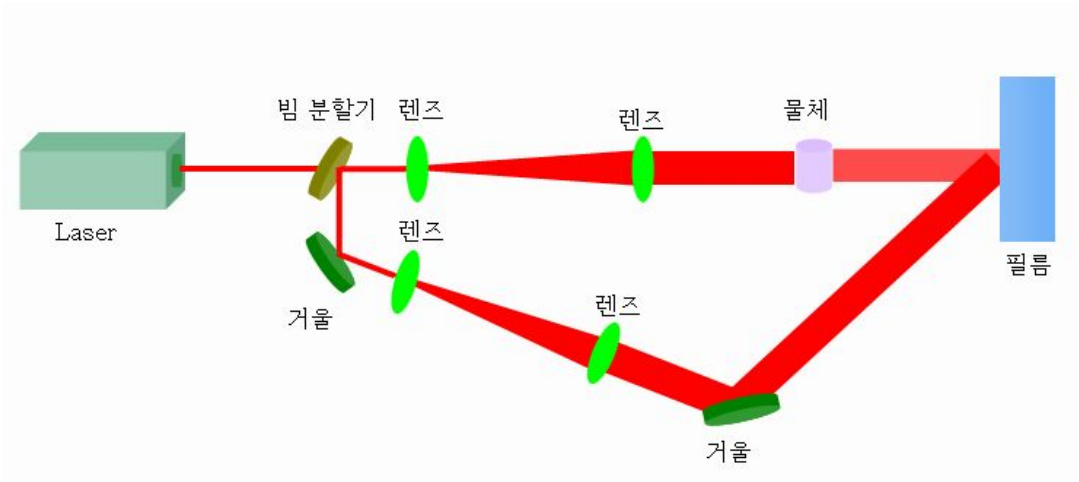


그림 6. 홀로그램 생성 과정

그림 6 은 홀로그램을 생성하는 방법을 보여주고 있다. 레이저에서 나온 빔은 빔 분할기에서 2개의 빔으로 분할되고, 그 중 한 빔은 물체로 투사 된다. 이때 물체의 수많은 점들에서 산란된 물체파는 기준빔과 간섭하여 물체의 각 점들이 존재

Collection @ chosun

하는 위치에 따른 위상과 진폭 정보를 가지는 홀로그램을 형성한다. 특정 물체의 정보를 담고 있는 홀로그램에 처음 홀로그램을 만들 때 사용하였던 레이저 빔을 홀로그램을 만들 때와 똑같은 각도로 입사 시키면, 홀로그램 패턴이 재생되어 삼차원 물체의 상을 형성해 준다. 이러한 홀로그램은 물체의 상태변화를 측정, 정보기록 등의 여러 가지 영역에 응용되고 있다. 펨토초 레이저를 사용하여 제작된 홀로그램은 물체를 아래 주어진 이차원 푸리에 변환을 통하여 얻어진다.

$$F(\nu_x,\nu_y) = \Im|f(x,y)|(\nu_x,\nu_y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)e^{-2\pi i(\nu_x x+\nu_y y)}dxdy \qquad (4-1)$$

여기에서 $\Im$ 는 푸리에 변환을 표시하며, (ν_x,ν_y)는 공간주파수를 나타낸다 $f(x,y)$는 제작하고자 하는 홀로그램의 2차원 물체 형상이고 (ν_x,ν_y)는 각 각 x,y 에 대한 공간주파수이다.

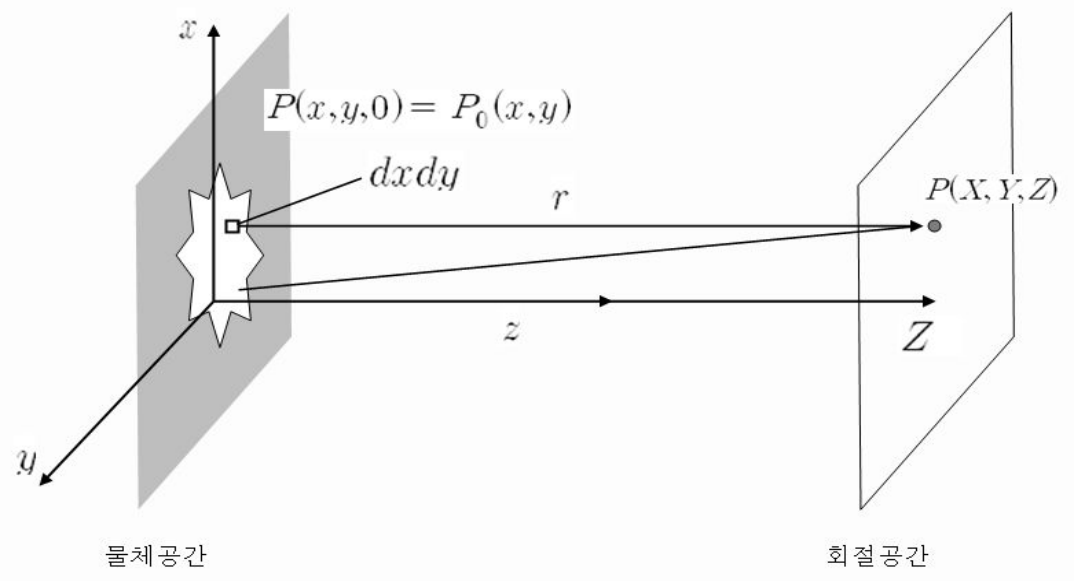


그림 7. 물체의 회절 모식도

dCollection @ chosun

그림 7 은 물체공간 $(x,y,z=0)$에 있는 물체가 회절되어 회절공간 $(x',y',z'=z)$으로 회절되는 경우의 모식도 이다. 식 (4-1) 을 그림에서와 같이 물체공간에 있는 물체가 회절되어 회절공간으로 회절되는 경우를 각 점들에서 고려하면, 회절체 영역에서 전기장 진폭 $E_0(x,y,0)$을 가지는 회절체 $dxdy$는 호이겐스 원리에 의해 각 점들에서 이차구면파조각을 형성한다. 그러므로 $dxdy$에 기인한 점 P 에서 시간 종속을 고려하지 않은 전기장은 아래와 같이 표현된다.

$$E_p = \int E_0(x,y,0)\frac{e^{-ikr}}{r}dxdy \qquad (4-2)$$

여기서 $r=[(x-x')^2+(y-y')^2+z^2]^{1/2}$ 이며, $-z$ 방향으로의 전기장의 영향은 고려하지 않는다.

$$r \cong z+\frac{(x'-x)^2}{2z}+\frac{(y'-y)^2}{2z} \qquad (4-3)$$

본문의 r 이 근사적으로 $r \approx z$ 라고 가정하면

$$\begin{aligned} E_p(x',y',z) &= \int E_0(x,y,0)\frac{1}{z}e^{-ik[z+\frac{(x-x')^2}{2z}+\frac{(y-y')^2}{2z}]}dxdy \\ &= \frac{e^{-ikz}}{z}\int E_0(x,y,0)e^{\frac{-ik}{2z}[(x-x')^2+(y-y')^2]}dxdy \end{aligned} \qquad (4-4)$$

가 된다. 그러므로 이 식은 컨벌루션의 성질을 사용하여 다시 정리하면 다음식과 같이 된다.

$$\Im(E_P)|_{\nu_x,\nu_y} = \Im[E(x,y,0)]_{\nu_x,\nu_y} \bullet \Im[e^{-\frac{ik}{2z}(x^2+y^2)}] \qquad (4-5)$$

dCollection @ chosun

여기에서 $\mathfrak{I}$ 는 푸리에 변환을 표시하며, (ν_x,ν_y)는 공간주파수를 나타낸다.
그러므로 P 점에서 전기장은 위 식의 역 푸리에 변환을 통해 구할 수 있다. 즉, 물체의 변환과 주파수공간에서 푸리에 변환을 곱한 후에 역변환을 수행함에 의해 전기장 세기를 구할 수 있다. $(x^2+y^2)\frac{\pi}{\lambda} \ll z$ 인 조건에서는 프라운호퍼 범위에서 P 점에서의 전기장이 표현 가능하며 그 전기장은 아래와 같다.

$$E_p(x',y',z) = A(x',y',z)\,\mathfrak{I}[E_0(x,y,0)] \qquad (4-6)$$

이렇게 얻어진 전기장은 복소수를 가지며 진폭과 위상으로 표현가능하며 일정한 진폭을 가정한 위상에 의해 표현된 물체의 홀로그램을 생성할 수 있다. 그러므로 물체의 푸리에 변환으로 회절형태(홀로그램)를 구할 수 있다.

Collection @ chosun

제 3장 실험장치 및 방법

제1절 실험장치

1. 펨토초 레이저 (femtosecond laser)

레이저 미세 가공을 위하여 고등광기술연구소가 보유하고 있는 (Cyber laser사, IFRIT모델) 펨토초 레이저 가공 시스템을 이용하였다. 펨토초 레이저의 사양은 785 *nm* 의 파장, 184 *fs* 의 펄스폭, 1 *kHz*의 반복률을 가지며 최대 출력이 1 *W* 이다. 아래 표에 레이저의 자세한 사양을 나타내었다.

제 품 명	IFRIT(Cyber laser, 일본)
파 장	785 *nm*
평 균 출 력	1.0 *W*
반 복 률	1 *kHz*
펄 스 폭	184 *fs*
펄 스 에 너 지	1 *mJ*
펄스 간 안정성	1.5% *rms*
평균출력안정성	1 % *rms* for 100 hours
빔 경	6 *mm*
빔 질	$M^2 < 1.364$
퍼 짐 각	< 1 *m*rad

표 1. 실험에 사용된 펨토초 레이저 사양

펨토초 레이저는 연속적으로 방출되는 레이저와 달리 짧은 시간동안 순간적으로 방출되는 펄스레이저에서는 펄스폭을 줄임으로서 1 *TW* 이상의 봉우리 파워를 가질 수 있으며, 펄스폭이 1 *ps* 이하의 레이저를 극초단 혹은 펨토초 레이저라 한다. 펨토초 레이저의 개발 단계를 살펴보면 다음과 같다. 1962년 Q-스위칭 방법이

dCollection @ chosun

개발되어 나노초 레이저 펄스를 생성하여 메가와트(*MW*)급의 출력을 얻었으며, 1970년대에는 모드 잠금법을 사용하여 피코초 레이저 펄스를 생성하여 기가와트(*GW*)급 출력을 얻게 되었다. 그 후 80년대 후반에 펨토초 레이저 개발을 통하여 테라와트(*TW*)급 레이저 개발을 통해 90년대 이를 고출력 레이저로 개발하여 산업용 가공기로 사용되고 있다.

불확정성 원리 ($\Delta\nu\Delta t = 1$)에 의하면 펄스폭을 줄이기 위해 발진 파장 선폭을 줄여야 하기 때문에, 넓은 이득 분포를 가진 레이저 매질이 필요하다. 이를 위해 사용되는 레이저 매질로 타이타늄 사파이어가 많이 사용되고 660 *nm* ~ 1180*nm* 범위의 넓은 발진 파장 범위를 가진다. 이러한 넓은 영역의 레이저 발진 주파수에 극초단 선폭을 가지는 레이저를 제작하기 위해서는 종모드의 모드 동기가 선행되어야 한다. 이를 위하여 공진기 내에 변조기나 수동 변조 소자등을 사용하여 레이저 빔의 강도 변조 주파수를 종모드간의 주파수 간격과 일치 시킴으로서 모드를 동기화 시킬 수 있다. 그러므로 이렇게 모드 동기된 종모드들은 시간 영역에서 종모드 간격 주파수의 역수에 해당하는 극초단 펄스 레이저의 펄스를 생성 시킬 수 있다. 이러한 펄스 증폭 기술을 Q-스위칭, 모드 잠금, 쳐프 펄스증폭에 대해 아래에 좀 더 상세히 소개한다.

가. Q-스위칭

펄스 레이저들은 레이저 공진기에서 자발적으로 일어나는 자유발진에 의해 $\mu s(10^{-6}$초) 정도의 펄스폭을 가지는 펄스 레이저들이 초기에 제작되었다. 이 후 인위적인 방법으로 레이저 공진기에 변화를 주어 더 짧은 펄스들이 만들어 지게 되었다. 처음 나노초(10^{-9}초)의 펄스폭을 갖는 펄스 레이저는 1962년에 개발된 Q-스위칭 방법에 의해 가능 하게 되었다. 여기에서 Q는 광 공진기 내에 축적되는 광 에너지를 단위 시간당 공진기 내의 손실로 나눈 값으로 정의된다. Q-스위칭을 하는 방법은 레이저 공진기 내에 빛의 진행을 막는 셔터를 삽입 후, 셔터를 막고 에너지를 주입한다. 이때는 공진기가 제 역활을 하지 못하므로 레이저의 발진이 이루어지지 않으며, 주입된 에너지는 매질내에 저장되게 된다. 발진이 이루어지지 않은 상태에서 레이저 매질에 에너지가 계속 주입되면 여기가 더 많이 일어나 상위 준

Collection @ chosun

위를 가지는 전자가 늘어나게 된다. 여기를 통해서 상위 준위의 전자가 늘어난 상태에서 셔터를 열게 되면 공진기가 정상적으로 동작하며 레이저 매질에 저장 되었던 에너지가 짧은 시간동안 빛 에너지로 방출되게 되는 방법이 Q-스위칭 방법이다. 이 방법을 사용하여 나노초의 펄스 레이저가 만들어 졌으며, Q 값이 높은 값에서 낮은 값으로 갑자기 변화하게 되므로 Q-스위칭 이라는 이름으로 명명하게 되었다. 현재 기계적인 스위칭 방법에 비교하여 안정적인 전기광학 소자들이 사용되고 있다.

나. 모드 잠금(Mode Locking)

1970년에 펄스간의 간격을 일정하게 만드는 획기적인 방법으로 모드잠금 방법이 제안 되었다. 페브리-페로(Fabry-Perot) 공진기를 구성하는 레이저 공진기 안에는 다수의 모드(주파수)가 존재한다. 이 모드들은 서로 독립적으로 발진을 하며, 각 모드간의 간섭 때문에 시간에 따른 발진 파형이 불규칙 하게 된다. 이 불규칙한 발진 파형으로 인해 모드 잠금이 이루어지지 않는 펄스들은 간격이 불균등하게 된다. 모드 잠금은 레이저에서 각 모드 사이의 위상 관계가 시간적으로 일정하게 되도록 만드는 것으로, 레이저 공진기 내에 존재하는 여러 개의 모드들이 시간에 따라 일정한 위상을 가지게 되면 매우 짧은 펄스들이 일정한 시간에 나오게 만드는 것이다.

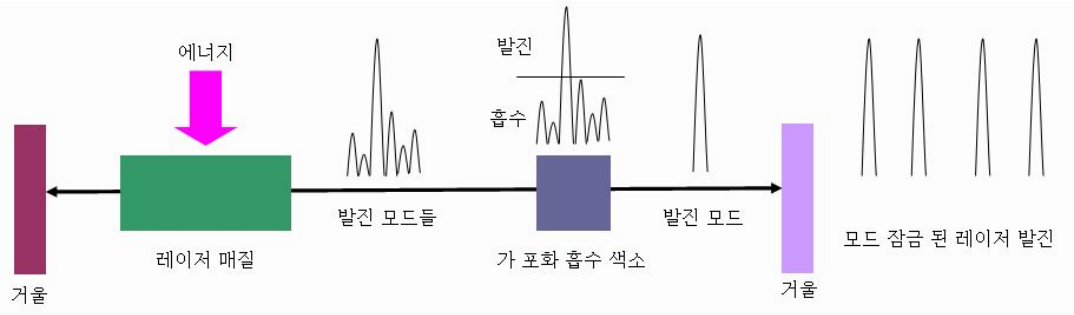


그림 8. 모드 잠금 개략도

Collection @ chosun

그림 8 에서 보여주는 것처럼 모드 잠금은 공진기 내부에 빛을 흡수하는 가포화 흡수체를 넣어주는 것이다. 가포화 흡수체(입사강도가 증가하면 흡수율이 낮아지는 색소)는 약한 빛 일수록 흡수가 잘 일어나며 강한 세기의 빛에는 큰 영향을 주지 않는다. 일반적으로 공진기 내의 모드들은 여러 개가 존재하며 서로 간섭을 통해서 모드들의 파형이 불규칙하게 변하므로 일정한 간격을 가진 모드들이 발진하지 않는다. 가포화 흡수 색소에 을 삽입하는 모드동기를 사용하게 되면 공진기 내에 존재하는 여러 개의 모드들 중에서 약한 세기를 가지는 모드들은 흡수되어 제거되고 세기가 큰 모드들은 공진기를 왕복하며 세기가 커져 펄스로 성장 한 뒤 레이저로 출력 된다. 이렇게 출력되는 모드들은 위상이 정립되어 일정한 간격을 가지는 모드들이 만들어 지게 된다.

다. 타이타늄 사파이어 매질과 쳐프 펄스 증폭(Chirped Pulse Amplification, CPA) 기술

1990 년대 위에서 기술한 두 가지 문제가 개선되면서 펨토초 레이저의 개발이 현저히 발달되게 되었다. 한가지는 타이타늄 사파이어 매질이다. 타이타늄 사파이어 매질은 비선형 현상의 일종인 커 효과에 의해 펨토초 펄스를 만들 수 있다. 또한 펄스폭이 작아지면 작아질수록 불확정성 원리에 의해 그 펄스가 포함하는 파장 성분의 범위가 넓어지게 되어 넓은 파장 범위에서 레이저 발진이 일어날 수 있는 매질이 필요하다. 대부분의 고체 레이저는 정해진 특정 파장에서만 레이저가 발진하는 특징이 있으나, 타이타늄 사파이어 레이저의 발진파장 범위는 660 nm~1180 nm로 매우 넓은 범위를 가지고 있어 초단펄스의 개발에 많이 이용되고 있다. 이러한 특징 때문에 파장가변 고체 레이저 중 현재 가장 널리 쓰이는 레이저는 타이타늄 사파이어로 색소 레이저의 영역을 급속하게 대신하고 있다.

두 번째로 쳐프 펄스 증폭기술 방식의 개발로 본격적인 펨토초 레이저의 시대가 열렸다. 펨토초의 펄스는 매우 좁은 펄스폭을 가지기 때문에 매우 높은 봉우리 출력을 가지며 이는 한 개의 펄스 당 가지는 파워가 높다는 것을 의미한다. 단순한 예로 똑같은 1 J 의 에너지가 1 펨토초인 펄스에 담겨 있다면 10^{15} W=1 PW(petawatts) 와 같다. 그러므로 한 개의 펨토초 레이저 펄스에 1 J 의 에너지만

dCollection @ chosun

저장되어도 너무나 큰 파워를 가지게 되어 증폭기 시스템을 파괴하게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해서 증폭과정에서 봉우리 파워를 작게 하고, 에너지를 증폭 시킨 후에 펄스폭을 줄이는 방법인 쳐프 펄스 증폭이 필요하다.

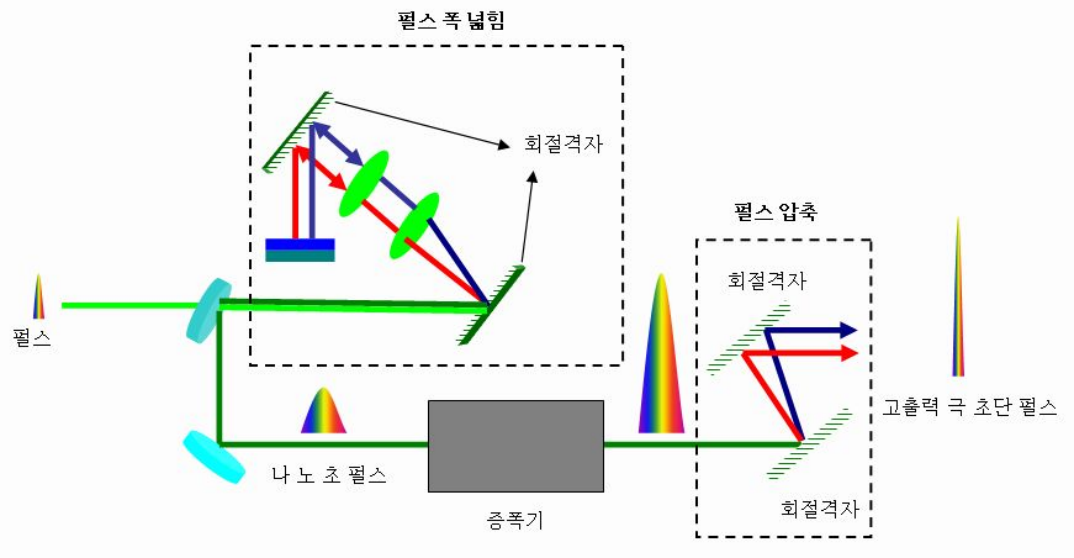


그림 9. 쳐프펄스 증폭기술 개략도

그림 9 에서 보여주는 것과 같이 모드동기를 통해서 얻어진 펄스을 회절격자(또는 광섬유)의 분산 효과를 통해서 장파장의 광은 그대로 진행 시키고 반대로, 단파장인 광을 지연시키게 하여 펄스의 폭을 넓힌다. 펄스의 폭이 넓어지면 봉우리 출력이 낮아지게 되어 펄스가 증폭 되더라고 광학계에 손상을 주지 않게 된다. 이렇게 넓어진 펄스를 증폭기를 통해서 증폭을 시켜주고, 증폭된 광을 펄스를 넓혔던 회절격자와 반대되는 특징을 가지는 단파장의 광은 진행 시키고 장파장의 광을 지연시키는 회절격자에 입사 시켜 펄스폭을 다시 펨토초로 줄이게 된다. 그러므로 최종적으로 얻어지는 것은 증폭된 펨토초 레이저 펄스생성기술이 쳐프 펄스 증폭기술이다[20].

Collection @ chosun

2. 레이저 가공 시스템

표 2 는 실험에 사용된 가공기의 기본 사양을 보여준다. 실험에 사용된 스테이지의 x, y 축은 선형 모터 스테이지, 300 *mm* × 300 *mm* 의 가공 범위, 20 *nm* 의 정밀도, 20 *mm/s* 의 최대 속력은 가지고 있으며, z 축은 ballscrew 스테이지로 200 *mm* 의 범위 0.5 *μm*의 정밀도, 20 *mm/s* 의 최대 속력을 가지고 각각 독립적으로 구동된다.

	x-y 스테이지	z 스테이지
스테이지	선형 모터 스테이지	Ballscrew 스테이지
범위	300 x 300 (㎜)	200 (㎜)
분해능	20 nm/count	0.5 mm/count
최고 속도	20 (㎜/s)	20 (㎜/s)

표 2. 가공 스테이지 사양

아래 그림 10 은 실험에 사용된 가공시스템의 개략도이다. 사용된 레이저 가공 시스템은 펨토초 레이저와 빔 전송을 위한 광학계, x-y 스테이지, z 축 슬라이드로 구성된다.

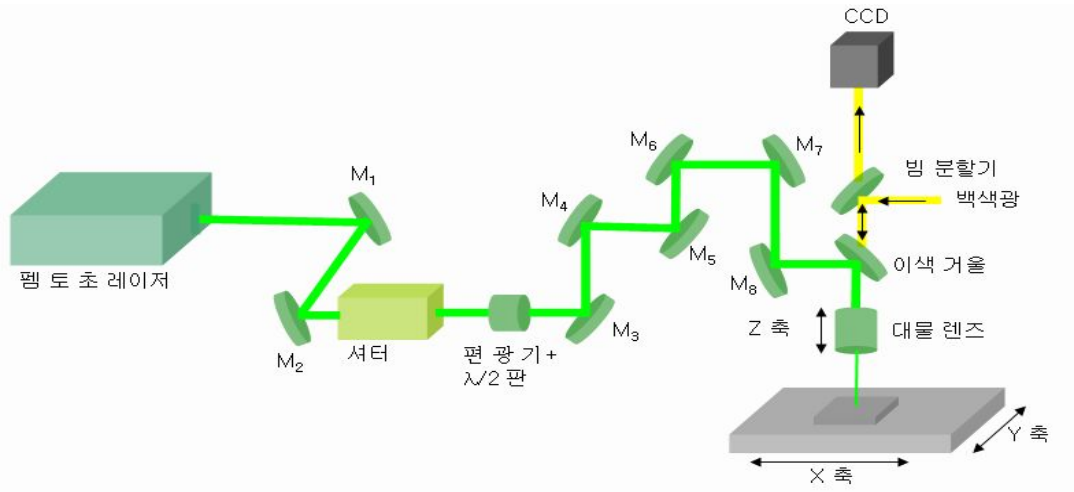


그림 10. 레이저 가공기 개략도

Collection @ chosun

x-y 스테이지는 설계된 가공경로를 표현하고 z 축 슬라이드를 통해 가공 초점을 결정한다. 그 외에 레이저빔을 가공물까지 전달하기 위한 거울과 출력 조절을 위한 감쇄기(attenuator)가 중간에 위치하고 있다. 레이저는 1 kHz의 펄스 형태로 출력되므로 가공을 위해서는 레이저 On/Off 셔터가 사용되며 스테이지와 함께 PMAC 모션 컨트롤러를 통해 구동하도록 되어있다.

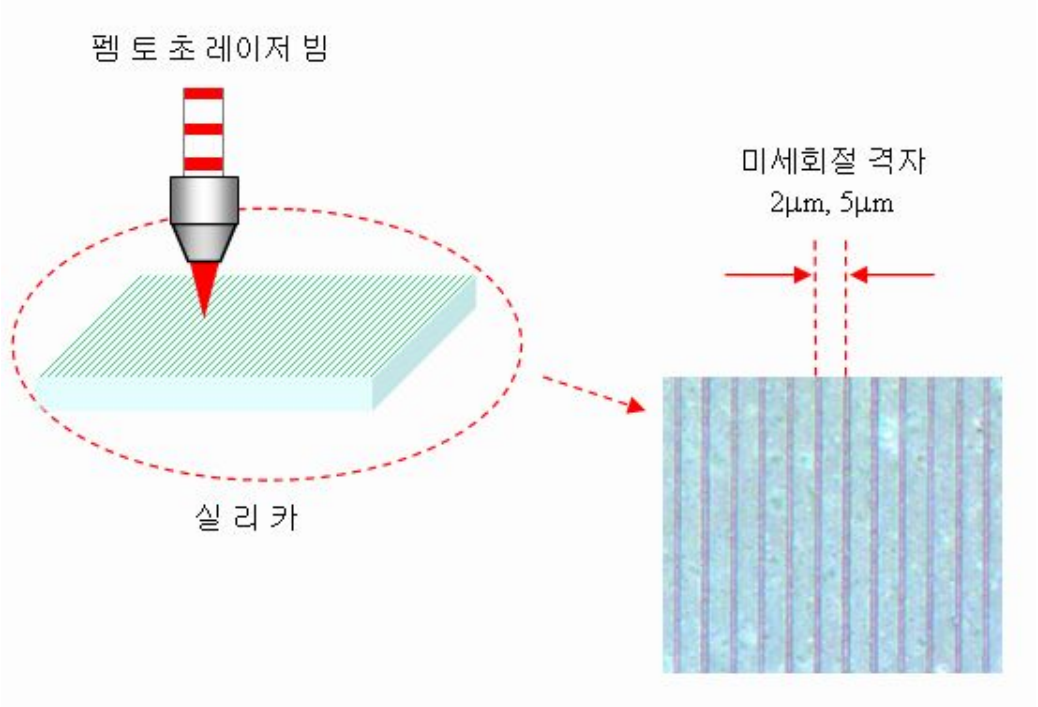


그림 11. 펨토초 레이저로 실리카 표면에 가공된 회절격자

그림 11 은 펨토초 레이저를 사용하여 실리카 표면에 회절격자를 가공하는 개략도를 보여주고 있다. 펨토초 레이저 가공기를 사용하여 실리카 표면 또는 내부에 레이저 빔을 대물렌즈로 집속하여 샘플을 제작 하였다.

가공 경로는 소프트웨어에 의해 입력된 설계된 모양을 PMAC 코드로 변환하여 가공되는 구조로 되어있다. 가공용 대물렌즈와 동일한 축에 설치된 아날로그 CCD 를 통해 가공초점을 결정하고 가공 상태를 모니터링 할 수 있도록 되어있다. 실험에 사용된 실제 가공 시스템의 사진은 아래에 나타내었다.

Collection @ chosun

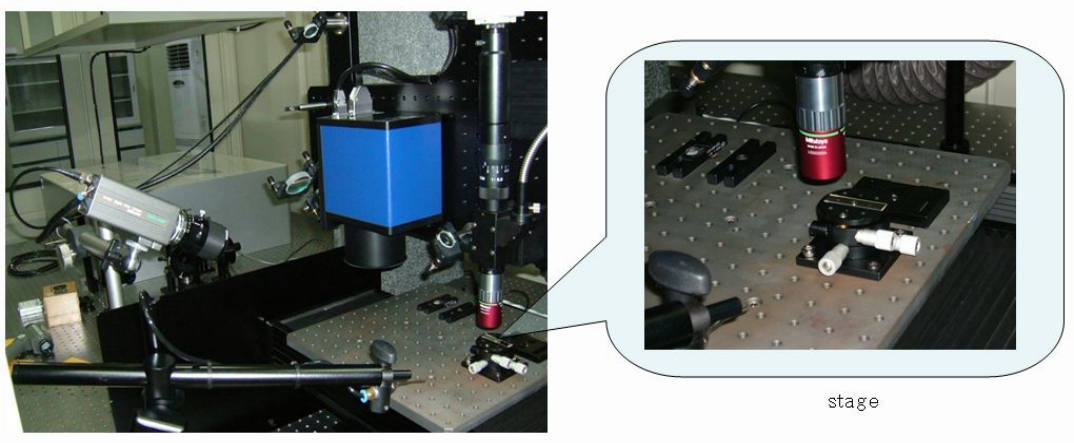


그림 12. 가공시스템 사진

그림 12 의 가공 시스템 사진에서 확대된 부분이 스테이지 가공 시 사용되는 부분이며 전송된 펨토초 빔을 대물렌즈를 사용하여 집속된 빔으로 가공을 한다. 스테이지 옆 부분에 위치한 스케너는 고속 가공 시 사용되며 본 실험에서는 스테이지만을 사용하여 샘플을 제작 하였다. CCD의 뒷편에 보이는 펨토초 레이저에서 나온 빔은 광학계를 지나서 셔터를 통과한 후 선반에 통해 위쪽으로 전송된다. 이는 z축으로 움직이기 위해서 필요한 과정이며, 실험제작에 사용된 가공은 전송된 빔은 대물렌즈로 집속되어 셔터의 열림과 닫힘에 따라 동작을 한다. 샘플의 제작위치 변경과 이동은 스테이지가 이동하며 이루어 졌으며, z축은 처음 물체에 초점을 잡고 나서 움직이지 않고 스테이지가 움직이며 샘플을 제작 하였다.

dCollection @ chosun

3. 가공재료로 사용한 용융 실리카(Fused silica, SiO_2)특성

용융실리카 (Fused Silica Glass, SiO_2)는 처음 GE(General Electric)에 의해 고성능 램프용으로 개발되었으나 화학적 성분과 초고순도, 고내열성 등의 뛰어난 특성으로 인하여 램프외에도 반도체,광섬유 등 초고순도의 재질적 특성을 원하는 다양한 분야에 다양한 형태로 사용된다. 용융실리카의 분자식은 SiO_2, 분자량은 60.08g 백색투명 또는 불투명한 비정질 망목(무규칙 그물)구조를 가지고 있으며, 공업재료중에서 열팽창계수가 가장 작다. 일반적으로 천연광물 형태로 존재하는 순수한 규산 광물을 석영(quartz)이라 하고, 이들 중 투명한 결정을 수정이라고 하는데 인위적으로 제조하고 있는 석영유리와 구분된다. 용융실리카는 정제공정을 통하여 불순물을 제거한 규사를 용융시켜 제조한 것을 말한다. 순수한 규산(SiO_2)로 이루어진 유리로 불순물이 수백 *ppm* 이하인 고순도의 규산을 고온(약 2,000℃ 이상)에서 용융하여 제조한 유리로 아래의 특징을 가진다.

_ ▷ 99.9999% 이상의 고순도
_ ▷ 내열성이 우수함 : 연화점 온도 1683℃
_ ▷ 적은 열팽창
_ ▷ 화학적 안정성
_ ▷ 빛 투광성 우수
_ ▷ 전기 절연성 우수

단점으로는 1000℃ 이상에서는 강도가 현저히 저하하는 결점이 있다. 그러나, 넓은 파장 범위에 걸쳐 우수한 투과율을 갖는 특징과 또한 매유 낮은 열팽창 계수를 갖고 있어 열 충격에 강하고 실리카를 녹이는 불화수소산을 제외하면 화학적으로 불활성인 성질을 이용하여 높은 출력의 에너지 밀도를 갖는 레이저용 광학계로 유용하게 사용된다.

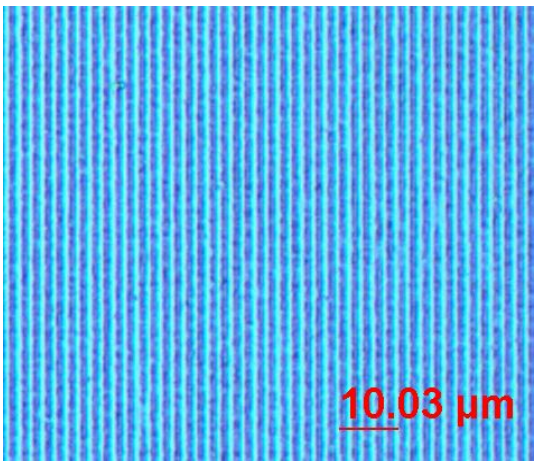
Collection @ chosun

제 4장 실험결과 및 고찰

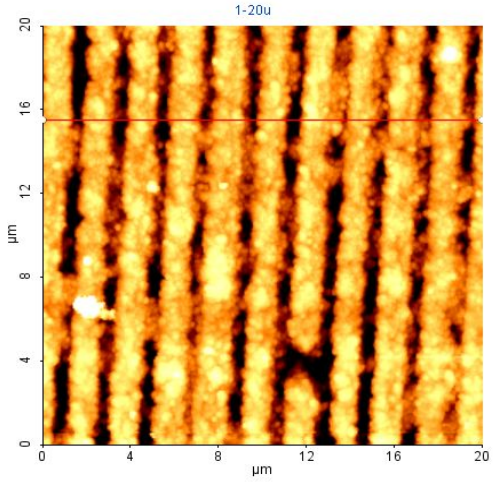
제 1절 회절격자

1. 회절격자의 제작

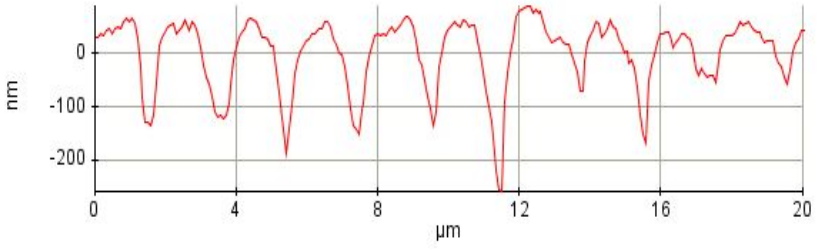
회절격자들의 가공에 사용된 대물렌즈는 50배율(NA=0.42)이다. 레이저 빔을 50배율 대물렌즈를 사용하여 실리카 표면에 집광하여 0.1 mm/s 가공속도, 2.12 μJ 펄스 에너지, 3 mm × 3 mm 의 크기로 제작 되었다. CCD(Charge-Coupled Device) 카메라로 실시간 모니터링 하여 실리카 샘플의 수평을 잡고 샘플이 장착된 스테이지를 펄스들이 충분히 중첩 될 만큼 천천히 일정한 속도로 이동하며 일정한 간격으로 회절격자를 제작하였다.



(a) x500 배율 광학 현미경 측정이미지



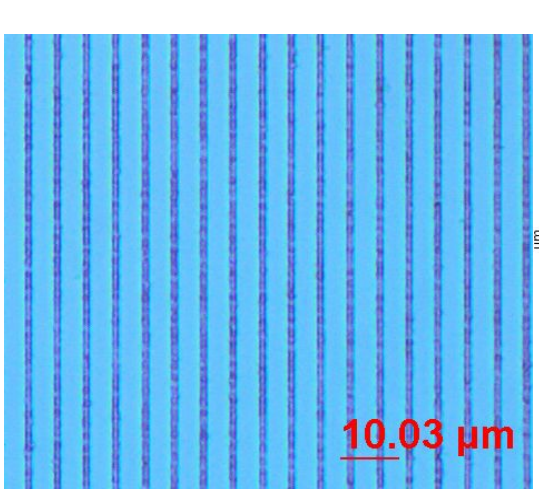
(b) AFM 측정 회절격자 표면 이미지



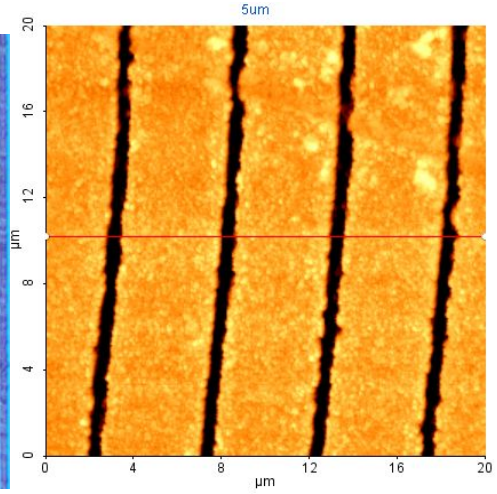
dCollection @ chosun

(c) AFM 측정 회절격자 간격 및 깊이

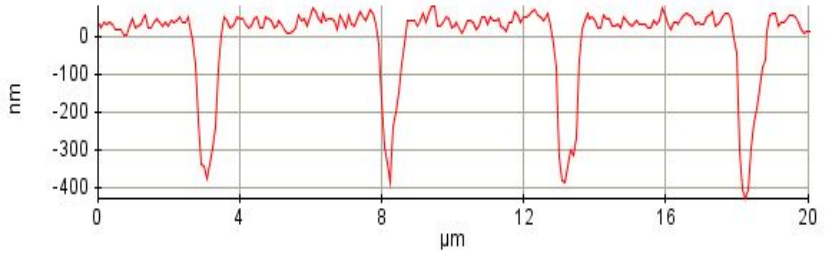
그림 13. 2 μm 격자 간격을 가지는 회절격자의 현미경 측정결과 및 AFM (Atomic Force Microscope) 측정 결과



(a) X 500 배율 광학 현미경 측정이미지



(b) AFM 측정 회절격자 표면 이미지



(c) AFM 측정 회절격자 간격 및 깊이

그림 14. 5 μm 격자 간격을 가지는 회절격자의 AFM 측정결과 및 회절 무늬

그림 13 과 14 는 각각 2 μm 와 5 μm 격자 간격을 가지는 회절격자의 AFM 표면 측정 결과와 회절 무늬 측정 결과이다. 그림 13 과 14 의 제작된 회절격자는 가공된 폭이 800 nm~1000 nm 정도 이고 깊이가 400 nm 정도로 일정하게 제작된 것을 측정 결과를 통해서 확인할 수 있다. 그림 12 (b) 와 그림 13 (b) 에 측정된 회절격자의 간격과 깊이 결과는 2절의 식 (2-1.4) 에서 표면제거형상의 전산 모사

Collection @ chosun

입력 값으로 사용하여 회절 효율의 전산모사 값을 계산하기 위해 사용 하였다. 그림 13 (b)의 AFM 측정 결과는 부스러기(debris)에 의해 그림 14 (b) 에서 나타난 측정 결과 보다 균일하지 않은 간격과 깊이를 보여주고 있다.

Collection @ chosun

2. 제작된 회절격자의 특성 측정

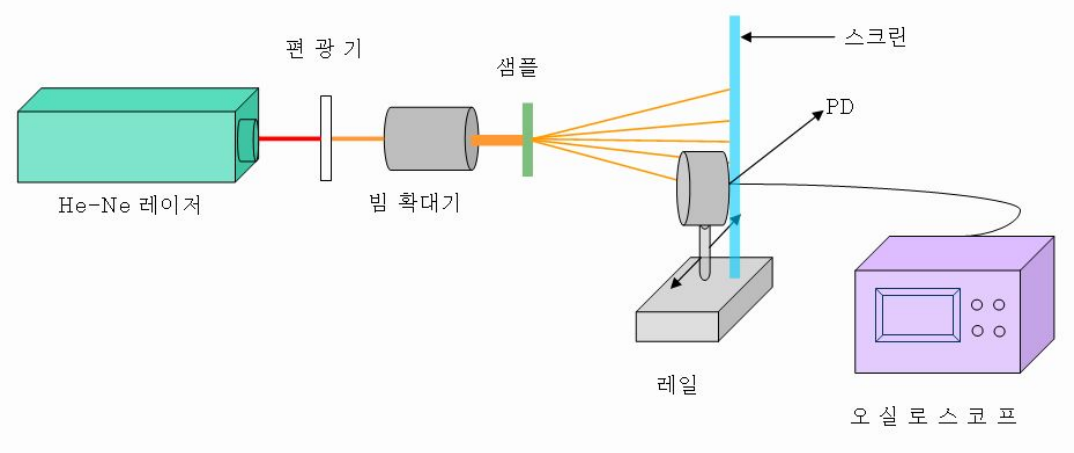
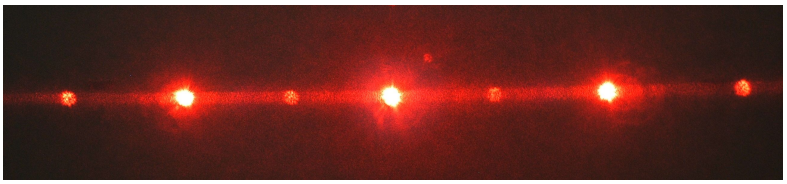


그림 15. 회절격자 특성 측정 장치 모식도

그림 15 는 제작된 회절격자의 회절패턴, 회절각과 회절 효율을 측정하기 위한 장치 모식도이다. 회절 측정을 측정 하는데 사용된 광원은 He-Ne 레이저 (632.8 *nm* 파장)를 사용 하였다. He-Ne 레이저에서 나온 빔의 감쇄를 위한 편광기를 지난 후 빔 확대기를 통해서 레이저 빔을 2.5 *mm* 정도의 크기로 확대한 후 제작된 회절격자에 조사하게 된다. 3 *mm* × 3 *mm* 정도의 크기로 제작된 회절격자에 들어간 빔은 회절 효광에 의하여 회절 무늬가 스크린에 나타나게 된다. 회절격자 샘플과 스크린 사이의 거리는 100 *mm* 이고, 회절 각 측정을 위해 버니어캘리퍼스로 회절 파수들의 출력 값을 측정 하였으며, 같은 거리에서 스크린 대신 레일 위에 PD(Photo Diode)를 설치하여 오실로스코프로 회절 모양들의 세기를 측정하여 회절 효율을 구하였다.

Collection @ chosun



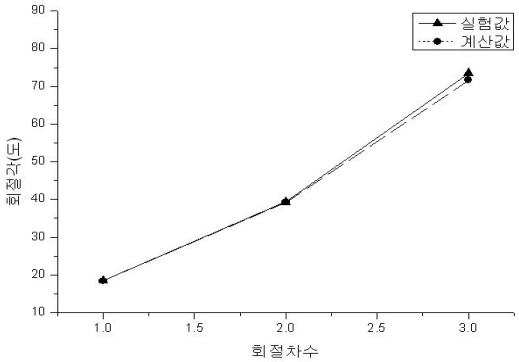
(a) 2 μm 격자 간격을 가지는 회절패턴

(b) 5 μm 격자 간격을 가지는 회절패턴

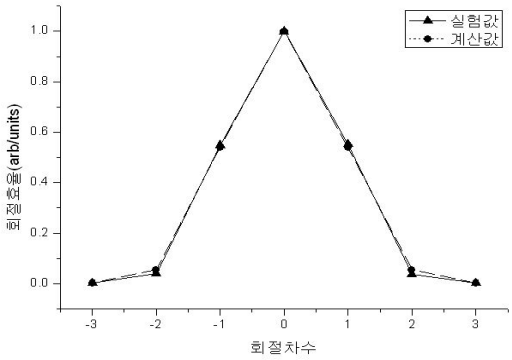
그림 16. 회절격자의 회절 무늬 측정 이미지

그림 16 은 각각 (a) 2 μm 와 (b) 5 μm 격자 간격을 가지는 회절격자의 회절 무늬 측정 결과이다. 그림 18 의 회절패턴 측정 사진은 제작된 회절격자와 스크린 사이의 거리가 100 mm 일 때 디지털카메라로 촬영 하였다. 제작된 회절격자의 회절 무늬는 0차 에서 가장 강한 회절 효율을 가지고 차수가 높아질수록 세기가 약해지며, 회절 무늬들 사이의 간격은 차수가 높아질수록 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 16의 (a)와 (b)를 비교하여 회절격자의 간격이 좁을수록 회절 무늬들 사이의 거리는 더 많이 나는 것을 확인 하였다.

dCollection @ chosun

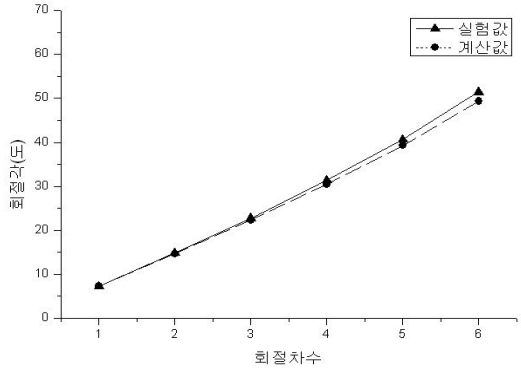


(a) 회절 각 그래프

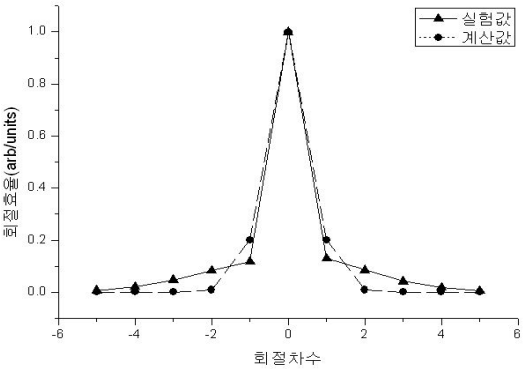


(b) 회절 효율 그래프

그림 17. 2 μm 간격을 가지는 회절격자의 (a) 회절 각 과 (b) 회절 효율의 전산모사 결과와 실험값



(a) 회절 각 그래프



(b) 회절 효율 그래프

그림 18. 5 μm 간격을 가지는 회절격자의 (a) 회절 각 과 (b)회절 효율의 전산모사 결과와 실험값

그림 17 은 제작된 2 μm 간격을 갖는 회절격자의 회절 각과 회절 효율을 MatLab으로 전산 모사하여 얻은 계산 값과 실험적으로 측정한 실험값을 보여주는 그래프 이다. 실험적으로 측정한 회절 무늬에서 0차 부터 3차의 회절 각과 회절 효율을 얻을 수 있었다. 원으로 표시된 실선으로 연결된 값들이 전산모사 결과이며, 삼각형에 점선으로 연결된 값이 실험결과 값이다. 회절 각 과 회절 효율 모두 실험

dCollection @ chosun

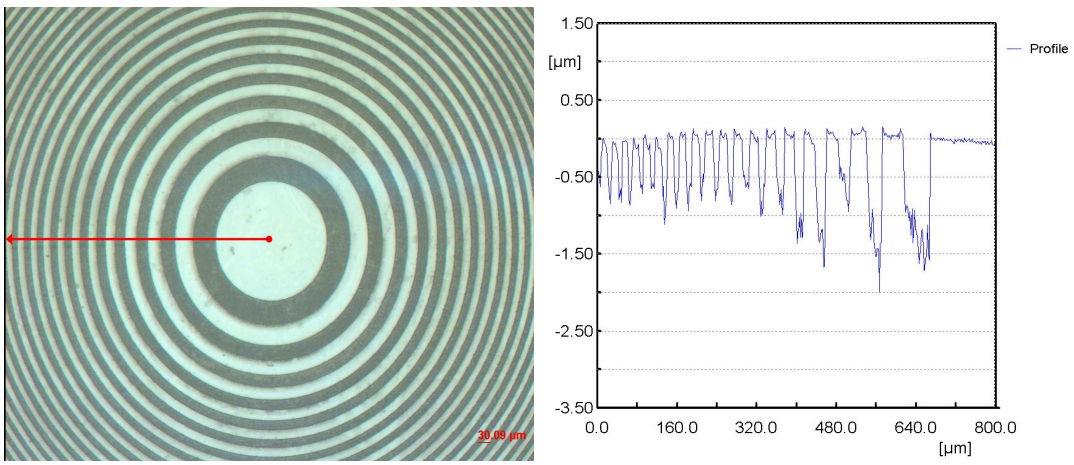
값과 이론값이 회절 차수에 따라 거의 동일한 값을 가지며 변화 하는 것을 보여주고 있다. 그림 18 은 제작된 5 μm 간격을 가지는 회절격자의 회절 각 과 회절 효율의 실험값과 계산 값을 표시한 그래프이다. 5 μm 격자 간격을 가지는 회절격자의 회절 무늬는 0차부터 6차 까지 회절 각 과 0차부터 5차까지의 회절 효율을 측정 하였다. 그림 18 에서 보여주는 회절 각은 실험값과 계산 값이 회절 차수에 따라 거의 동일한 값을 가지며 변화 하고 회절 효율은 회절격자의 차수가 낮을 때는 거의 유사한 경향성을 나타내지만, 차수가 3차가 넘어갈 때부터 전사모사 결과가 실험 결과 값 보다 크게 나타났다. 그 이유는 전사모사에 사용된 회절격자의 가공 깊이와 주기를 AFM 측정 결과로부터 피팅(ftting) 하는 과정에서 생긴 오차와 회절격자의 불완전성 등으로 생기는 오차로 생각된다. 이 실험 결과들로 펨토초 레이저로 실리카표면에 직접 가공을 통해서 회절 소자를 구현 할 수 있다는 것을 보였다.

dCollection @ chosun

제 2절 FZP(Fresnel zone plate)

1. FZP의 제작

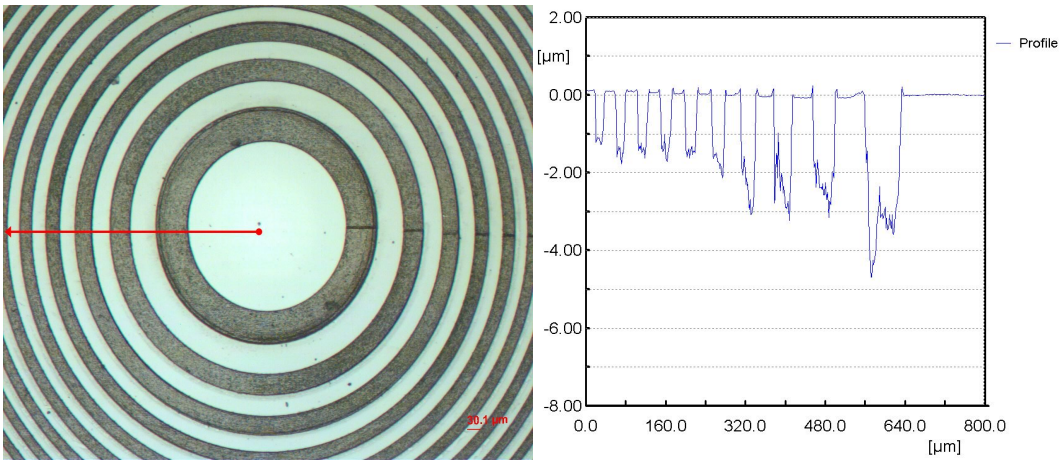
1절의 회절격자 제작 실험 결과를 바탕으로 광학계에서 기본이 되면서 여러 가지 폭넓은 응용 분야를 가지고 있는 FZP를 제작 하였다. He-Ne(파장 632.8 *nm*)를 사용 하였을 때 각각 25 *mm*, 50 *mm* 의 초점거리를 가지는 두 가지 FZP를 제작 하였다. FZP의 제작은 회절격자의 제작과 동일하게 펄스들이 중첩될 정도로 천천히 이동하는 방법으로 실리카 표면에 20 배율(NA= 0.4) 대물렌즈를 사용하여, 0.1 *mm/s* 의 속도, 4.98 *μJ* 의 펄스 에너지로 제작 하였고, 제작된 FZP들은 각각 3 *mm* 정도의 직경을 가지고 있다.



(a) 광학 현미경 사진(X 100 배율) (b) FZP의 3차원 측정 결과

그림 19. 제작된 25 *mm*의 초점거리를 갖는 FZP의 (a) 광학 현미경 사진(X 100배율) (b) 3차원 측정결과

dCollection @ chosun



(a) 광학 현미경 사진(X 100 배율) (b) FZP의 3차원 측정 결과

그림 20. 제작된 50 *mm* 의 초점거리를 갖는 FZP의 (a) 광학 현미경 사진(X 100 배율) (b) 3차원 측정결과

그림 19 와 20 은 각각 25 *mm* 와 50 *mm* 의 초점 거리를 가지는 FZP의 현미경 (X 100 배율)과 3차원 측정기로 측정한 표면 이미지와 거리에 따른 빔 형상 측정기 측정 결과이다. 그림 19 와 그림 20 (a)의 현미경 사진에서 보는 바와 같이 FZP는 각 초점거리에 따라 환들은 똑같은 면적을 가지고 있어서 중심에서 멀어질수록 환의 반지름이 커지기 때문에 환들 사이의 간격은 좁아지는 특성이 나타나는 것을 보여준다. 그림 19 와 20 의 (b) 는 3차원 측정기(Nano Focus, X 20 배율 대물렌즈 (NA = 0.4)로 제작된 FZP들의 측정결과를 보여준다. 펨토초 레이저를 이용하여 제작한 FZP들은 3차원 측정결과 가공된 깊이가 1 ~ 2 *μm* 정도 되는 것을 확인 하였다. 가공된 환들 간의 깊이 가 일정하지 않은 것은 측정 오차로 생각된다.

Collection @ chosun

2. 제작된 FZP의 특성 평가

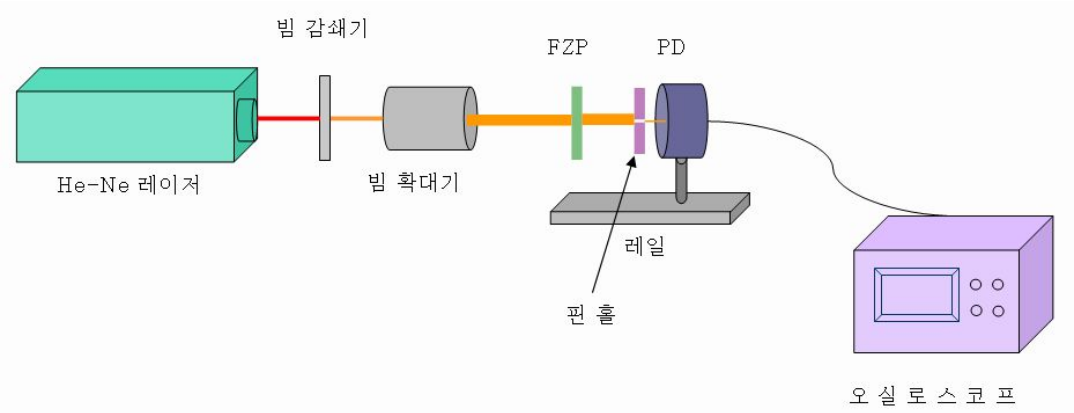
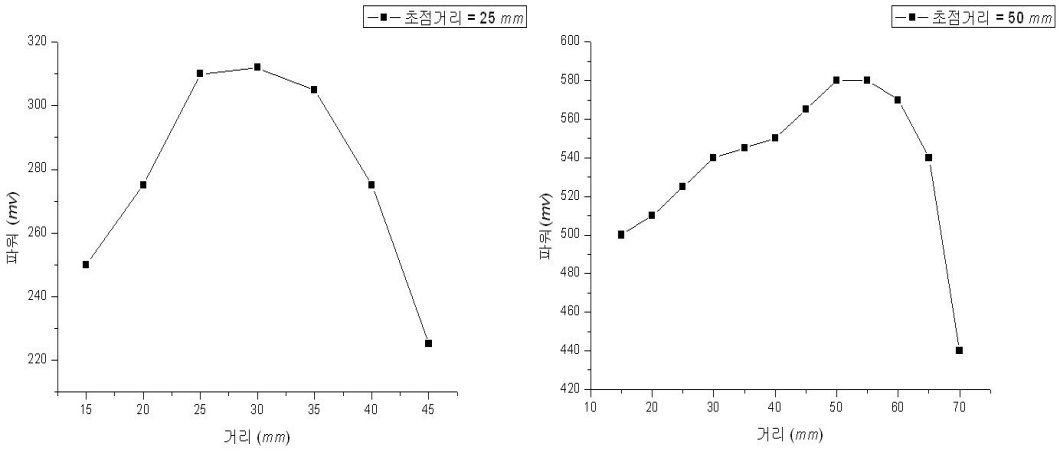


그림 21. 핀홀 기법 측정 모식도

그림 21 은 거리에 따라서 FZP의 빔 강도를 측정하기 위해 설치한 실험 모식도이다. 빔이 PD을 지나기 바로 전에 핀홀을 설치해서 중앙 부분만 통과 하게 하였다. He-Ne(파장 632.8 *nm*) 레이저에서 나온 레이저 빔은 감쇄기를 지나면서 PD에 손상이 되지 않는 세기로 빔을 감쇄시켜 주고 빔 확대기로 빔의 직경을 키운 후 제작된 FZP로 빔을 입사 시킨다. PD에서 빔의 세기를 측정하는 부분의 면적이 빔의 면적보다 훨신 크기 때문에 핀홀을 놓지 않을 때의 세기는 FZP을 레일로 움직여 초점거리를 바꾸더라도 동일한 파워 값을 얻게 된다. 때문에 PD앞에 핀홀을 설치하여 중앙 부분의 일부 빔만 통과 시키고 주변의 빔은 차단을 하여 중앙의 일정 부분 빔의 세기만을 측정하도록 장치를 꾸몄다. 핀홀의 크기는 1 *mm* 정도이며 펨토초 레이저로 He-Ne레이저를 투과 시키지 않는 SUS에 홀을 가공하여 사용 하였다. 이 핀홀은 PD앞에 고정되어 빔의 중앙 부분의 세기만을 PD가 측정 하게끔 해주었다. 초점거리에 따라 빔이 퍼지기 때문에 빔의 초점거리에 가까울수록 파워가 올라갈 것이라고 예상하였다.

dCollection @ chosun



(a) 초점거리 25 *mm* 인 FZP (b) 초점거리 50 *mm* 인 FZP

그림 22. 핀홀 방법으로 측정한 FZP의 거리에 따른 빔의 세기 분포

그림 22 는 핀홀 방법으로 측정한 초점거리가 각 각 (a) 25 *mm*, (b) 50 *mm* 일 때의 FZP의 빔 세기를 거리에 따라 보여주는 그래프 이다. 빔의 세기는 초점거리 부근까지 비교적 완만한 곡선을 그리며 증가하고 초점거리를 10 *mm* 정도 지난 뒤 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 실험 결과로 각 FZP의 초점 거리에서 중앙의 핀홀을 통과한 빔이 가장 큰 파워를 보여줌을 알 수 있다. 이로써 만들어진 FZP가 원하는 초점거리에서 빔을 포커씽 시켜 준다는 것을 알았다. 하지만 이 방법은 핀홀의 크기와 핀홀에서 PD 사이의 거리등 오차 변수가 있기 때문에 좀 더 정확한 측정을 위하여 빔 형상 측정기로 FZP와 빔 형상 측정기 간의 거리를 변화 시키며 FZP의 빔 형상을 다시 측정하여 보았다.

Collection @ chosun

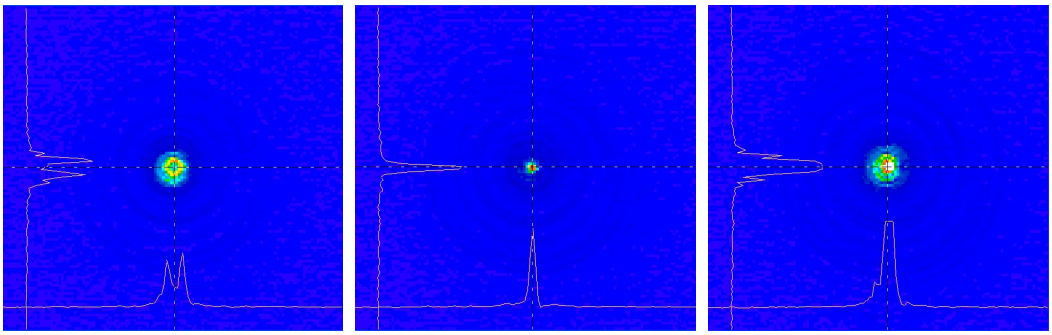


그림 23. 제작된 25 *mm*의 초점거리를 갖는 FZP의 거리에 따른 빔 형상 측정결과 (오른쪽 부터 22 *mm*, 24 *mm*, 26 *mm* 측정거리)

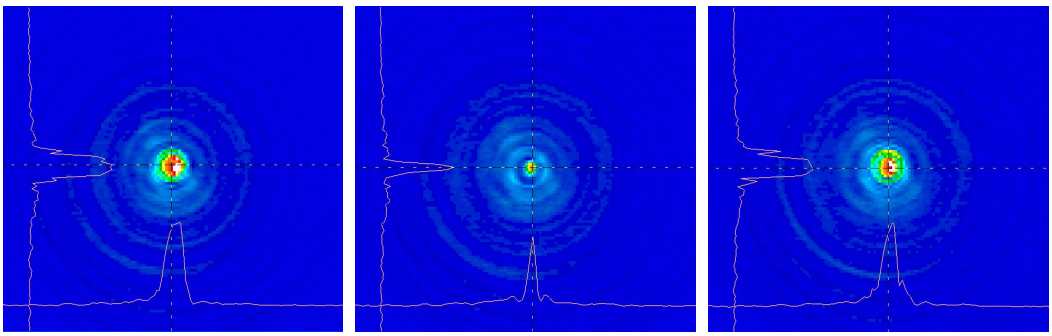


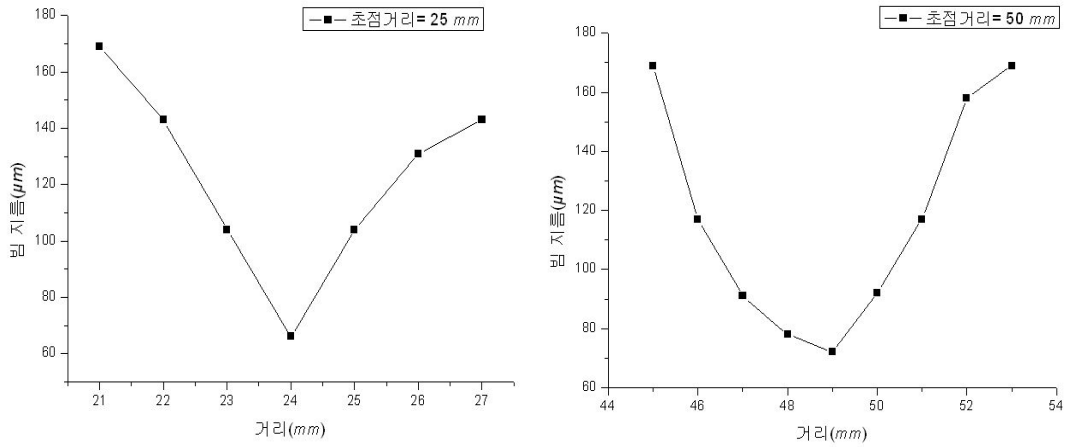
그림 24. 제작된 50 *mm*의 초점거리를 갖는 FZP의 거리에 따른 빔 형상 측정결과 (오른쪽 부터 45 *mm*, 49 *mm*, 53 *mm* 측정거리)

그림 23 과 24 는 제작된 FZP의 거리에 따른 빔 형상을 측정하기 위하여 빔 형상 측정기로 FZP와 빔 형상 측정기 사이의 거리를 변화 시키며 FZP의 빔 형상을 측정한 결과이다. 빔 형상 측정기에 사용된 CCD는 Pulnix TM-745E 를 사용 하였으며, 13 *μm* 의 화소 크기를 표현 한다. 그러므로 측정된 이미지의 오차 범위는 약 13 *μm* 정도 이다. 그림 23 은 초점거리가 25 *mm* 인 FZP의 빔 형상을 초점거리보다 작을 때의 측정 값(22 *mm*), 초점거리에서의 측정 값(24 *mm*), 초점거리보다 클 때의 측정 값(26 *mm*)을 각각 나타낸 것이고, 그림 24 는 초점거리가 50 *mm* 인 FZP의 빔 형상을 초점거리보다 작을 때의 측정 값(45 *mm*), 초점거리에서의 측정 값(49 *mm*), 초점거리보다 클 때의 측정 값(53 *mm*)을 각각 나타낸 것이다.

그림 23 과 24 에서 보여주는 것처럼 거리에 따라 빔이 특정 지점에서 집속 되

dCollection @ chosun

는 것을 확인 할 수 있었다. 만들어진 FZP가 원하는 초점거리에서 거의 정확하게 빔을 모아주는 역할을 하는 것을 실험적으로 확인 하였다. 실험에 사용된 빔 형상 측정기가 매우 민감해서 측정 시 He-Ne (파장 632.8 *nm*) 레이저 에서 나온 빔의 세기를 3.5 *mW* 까지 줄여서 빔 형상을 측정 하였다. 빔의 세기는 500:1로 편광된 He-Ne 레이저의 특성을 이용하여 편광기와 빔 감쇄기를 사용하여 감소시켰다. 빔의 초점거리의 특성 측정은 마이크로미터를 사용하여 FZP의 초점거리가 25 *mm* 인 경우는 17 *mm* 부터 36 *mm* 까지, FZP의 초점거리가 50 *mm* 인 경우는 38 *mm* 부터 63 *mm* 까지 1 *mm* 씩 움직이면서 측정 하였다.



(a) 초점거리 25 *mm* (b) 초점거리 50 *mm*

그림 25. 제작된 FZP의 거리에 따른 세기 그래프

그림 9의 (a) 와 (b)는 빔 형상 측정기를 사용하여 초점거리 근처에서 환 모양이 아닌 가우시안 분포를 가지는 빔의 모양만 거리에 따라 측정한 빔 형상의 크기 변화를 보여주고 있다. 초점거리 25 *mm* FZP의 빔 세기는 24 *mm* 에서 가장 높게 나왔고, 초점거리 50 *mm* FZP의 빔 세기는 49 *mm* 에서 가장 높게 나왔다. 이러한 1 *mm* 의 오차는 측정 장치 위치 변환에 사용된 마이크로미터의 이동시 생기는 측정 오차로 생각된다. 초점거리에서의 빔 크기는 초점거리 25 *mm* FZP는 16.8 *μm* 의 계산값을 가지며 실험 측정값은 66 *μm*, 초점거리 50 *mm* FZP는 31.2 *μm* 의 계산값을 가지며 실험 측정값은 72 *μm* 으로 측정되었으며 일반적인 렌즈와 비슷하게 짧은 초점 거리를 갖는 FZP 소자가 빔을 더 잘 집광 시켜 주는 것을 알 수 있었

Collection @ chosun

다. 또한, 제작된 FZP에 3.92 V 의 He-Ne 빔을 조사 하였을 때 초점거리 25 mm FZP의 초점에서의 세기는 252 mV, 초점거리 50 mm FZP의 초점에서의 세기는 224 mV 로 각 각 6.4% 와 5.2% 의 효율을 얻었다.

Collection @ chosun

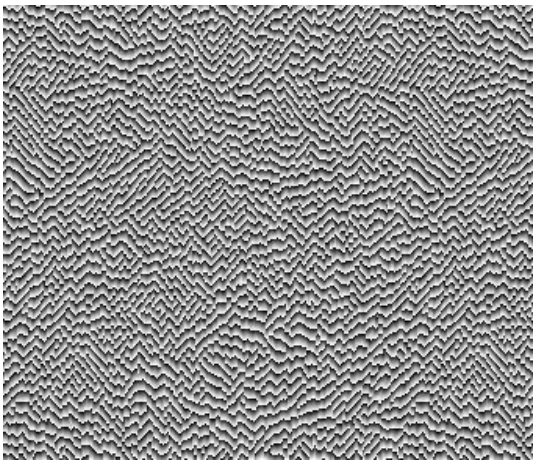
제 3절 홀로그램

1. 홀로그램의 제작

레이저로 응용 가능한 분야 중에서 여러 가지 폭넓은 응용 분야를 가지고 있는 홀로그램를 제작 하였다. 홀로그램을 제작하기 위한 홀로그램 패턴은 HOLOEYE사의 DOE 제작 프로그램인 OptiXplorer라는 변환 프로그램을 사용하여 얻었다. OptiXplorer 프로그램 사용하여 화소 크기가 200 X 200 미만인 이미지를 입력하게 되면 이미지 모양에 대한 위상 회절패턴 모양을 얻을 수 있다. HOLOEYE 사의 DOE 제작 프로그램인 OptiXplorer를 사용하여 제작된 홀로그램을 모듈레이터에 전송 키신 후 레이저 빔을 넣어 물체의 상이 재생되는 것을 확인 하였다. 이렇게 확인된 홀로그램 패턴을 사용하여 펨토초 레이저로 실리카 내부에 제작된 회절 무늬를 제작할 계획을 세웠다. 홀로그램의 패턴의 화소 간격을 1 μm 로 설정하여 약 2500 X 2500 정도 화소의 회절패턴 이미지를 실리카 내부 30 μm 에 50 배율(NA= 0.42) 대물렌즈를 사용하여, 1 mm/s 의 속도, 9.82 μJ 의 펄스 에너지로 제작 하였으며, 제작된 홀로그램 패턴들은 각각 2.5 mm 정도의 크기을 가지고 있다. 아래 그림은 물체 이미지와 OptiXplorer를 사용하여 얻은 회절패턴 모양과 펨토초 레이저로 제작된 홀로그램 패턴의 광학 현미경 측정 모습을 보여준다.

dCollection @ chosun

(a) 홀로그램 패턴 변환 전 이미지



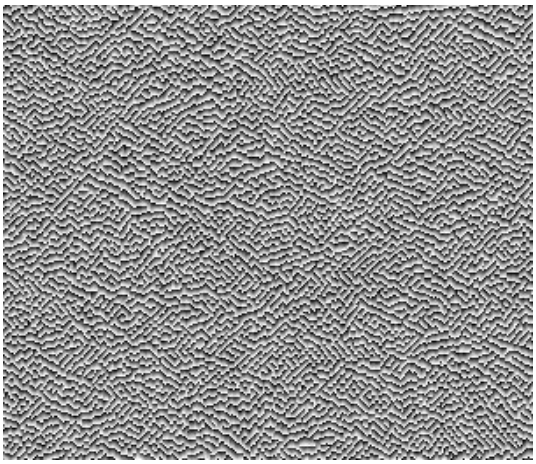
(b) 홀로그램 패턴

(c) 제작된 홀로그램 패턴

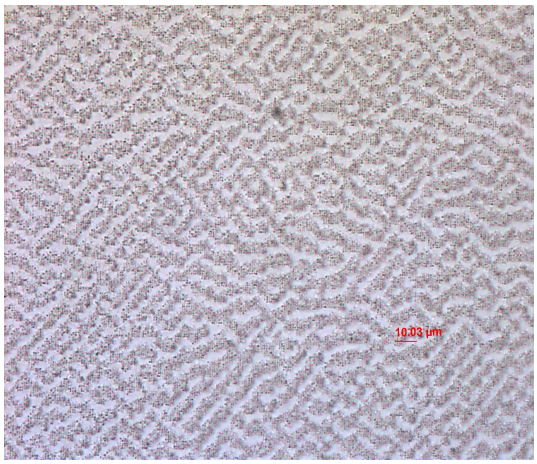
그림 26. 'Chosun' 이미지의 (a) 홀로그램 패턴 변환 전 모습, (b) OptiXplorer를 사용하여 변환한 홀로그램 패턴과 (c) 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 μm에 제작한 홀로그램 광학 현미경(X 500 배율) 측정 이미지

Collection @ chosun

(a) 홀로그램 패턴 변환 전 이미지



(b) 홀로그램 패턴



(c) 제작된 홀로그램 패턴

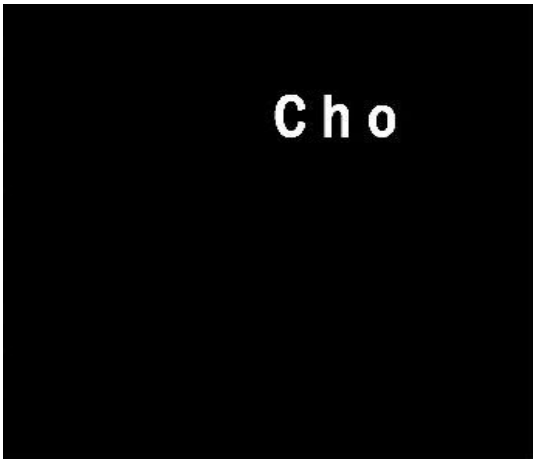
그림 27. 'APRI' 이미지의 (a) 홀로그램 패턴 변환 전 이미지, (b) OptiXplorer를사용하여 변환한 홀로그램 패턴과 (c) 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 μm에 제작한 홀로그램 광학 현미경(X 500 배율)측정 이미지

그림 26 와 27 은 'Chosun' 이라는 이미지와 'APRI'라는 이차원 이미지를 각각 (a) 홀로그램 변환전의 모습, (b) OptiXplorer 프로그램을 사용하여 얻은 홀로그

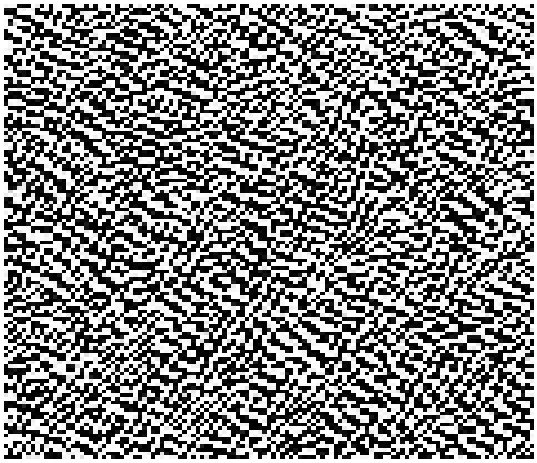
dCollection @ chosun

램 패턴 모양과 (c) 얻어진 홀로그램 패턴을 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 *um* 에 제작한 것을 광학 현미경으로 측정한 이미지를 보여주고 있다.

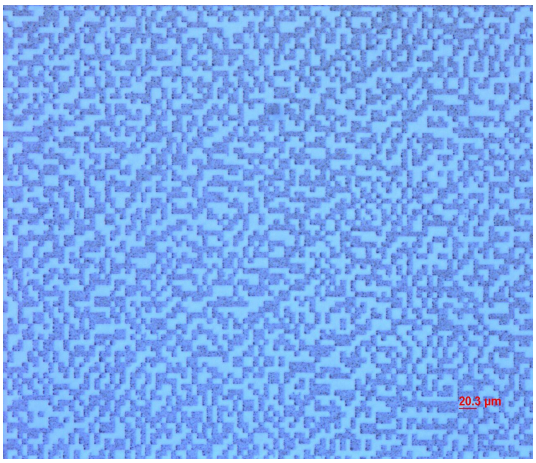
위 실험에서 제작한 홀로그램 패턴은 OptiXplorer의 홀로그램 변환 프로그램을 얻어서 사용한 것이었다. 홀로그램의 이론 부분에 쓰여진 푸리에 변환을 통해 물체에 대한 푸리에 변환으로 얻은 위상을 0.5 보다 큰 값은 1로 작은 값은 0으로 채택하는 2진 위상 홀로그램을 자체 설계하여 MatLab을 통해 전산모사 하였다.



(a) 홀로그램 패턴 변환 전 이미지



(b) 이진 홀로그램 패턴



(c) 제작된 이진 홀로그램 패턴

그림 28. 'Cho' 이미지의 (a) 홀로그램 패턴 변환 전 이미지, (b) MatLab 사용하여

dCollection @ chosun

변환한 홀로그램 패턴과 (c) 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 μm 에 제작한 홀로그램 광학 현미경(X 200 배율)측정 이미지

그림 28 은 (a) 'Cho' 이미지를 (b) MatLab에 의해 전산모사된 이미지의 홀로그램 패턴 과 (c) 펨토초 레이저로 실리카 내부 30 μm 에 제작한 홀로그램 패턴의 광학 현미경(X 200 배율) 측정 이미지를 그림 26 과 27 의 순서와 동일하게 보여준다. 홀로그램 패턴의 화소 수가 제작하기에 너무 작아서 제작을 위해서 같은 모양을 여러번 연결하여 2500 X 2500 화소를 맞추었다. 그림 28 (c) 가 그림 26 과 27 의 (c) 와 비교하여 색이 다른 이유는 제작된 날짜 차이에 의해 광학 현미경으로 측정된 시간이 달라서 광학 현미경의 필터에 의해 걸러지는 빛의 미묘한 차이에 의해 일어났으며, 실험 결과와는 무관하다. 2차원 홀로그램의 제작은 이전 회절격자와 FZP 와는 조금 다르게 실리카 내부 30 μm 에 제작 하였다. 내부에 제작을 하게 되면 먼지나 이물질로 부터 샘플을 보호 할 수 있고, 안전성에서 더 좋은 효과를 볼 수 있다. 홀로그램을 제작한 샘플은 위 두 실험과 동일한 실리카를 사용하였고, 제작 방법은 동기화된 펨토초 레이저 펄스들을 사용 하였다. 펨토초 레이저에서 조사되는 1 kHz 펄스의 출력 동기 신호를 동기화 장치를 이용하여 가공이 이루어지는 스테이지의 PMAC 이동 조절기와 연동이 되게 하고 펄스 스위칭은 포켈스 셀을 통해서 이루어진다. 이와 같이 동기화된 펨토초 레이저 펄스는 주 프로그램에서 편집되는 3차원 패턴을 가공하게 된다. 고등광기술 연구소 미세광학실이 보유하고 있는 이 시스템은 펄스동기화 시스템이라고 명명 하였으며, 현재 논문과 특허 준비중에 있다[3].

dCollection @ chosun

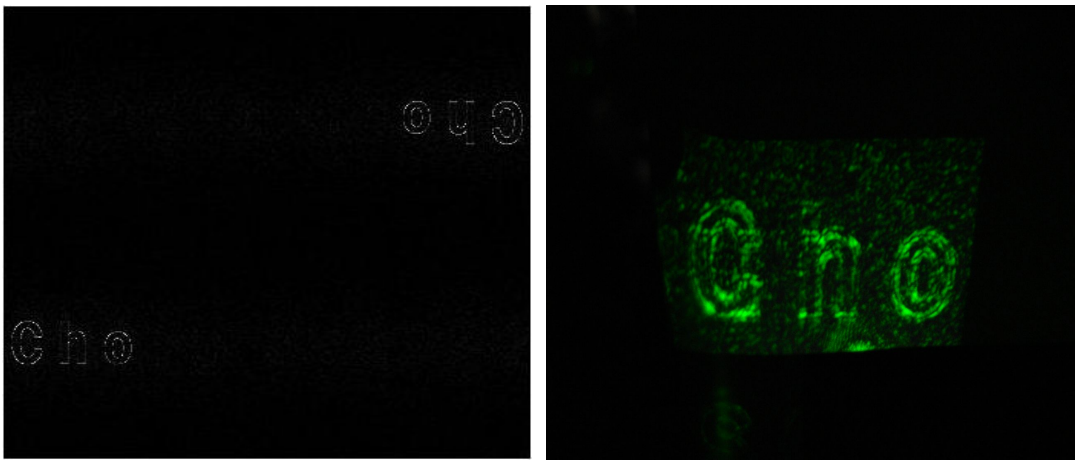
2. 홀로그램의 재생

(a) 'Chosun'의 홀로그램 재생모양 (b) 'APRI'의 홀로그램 재생모양

그림 29. OptiXplorer를 사용하여 제작한 2차원 홀로그램을 He-Ne(파장: 543 *nm*) 레이저를 사용하여 얻은 재생 모양

그림 29 에서 보여지는 것처럼 OptiXplorer로 얻은 2차원 회절 무늬를 사용하여 실리카 내부에 제작된 홀로그램의 재생 모양은 선명한 모양을 가지고 있다. 제작된 홀로그램 패턴과 헬륨-네온(파장:543 *nm*) 레이저 사이의 거리는 23 *cm* 이고 샘플과 스크린 사이의 거리는 60 *cm* 이다. 본 논문에 사용한 그림에는 제거된 쌍둥이 상이 아랫부분에 상의 역 모양으로 동일한 크기로 관측 되었고, 회절이 일어나지 않은 0차 빔이 홀로그램 재생 모양과 트윈 이미지 중간에 위치하고 있다.

dCollection @ chosun



(a) 전산모사된 홀로그램 재생모양 (b) 'Cho'의 홀로그램 재생모양

그림 30. MatLab을 사용하여 제작한 2차원 홀로그램을 He-Ne(파장: 543 *nm*) 레이저를 사용하여 얻은 실상만의 재생모양

그림 30 은 MatLab을 사용하여 얻은 홀로그램으로부터 (a) MatLab 을 사용하여 전산모사한 홀로그램의 재생모습과 (b) 펨토초 레이저로 실리카 내부에 제작한 홀로그램 패턴으로부터 재생 모양을 보여준다. 전산모사된 이미지와 제작된 홀로그램의 재생 이미지는 거의 비슷한 해상도를 가지는 것을 보여준다. 2진 위상 홀로그램의 이미지의 해상도는 OptiXplorer 프로그램을 사용하여 얻은 홀로그램 패턴의 재생모습보다 선명하지 않다. 이는 홀로그램패턴의 위상을 보정함으로서 개선 될 수 있을 것으로 생각된다.

이 실험을 통해서 펨토초 레이저 가공만으로 2차원 홀로그램 패턴을 실리카 내부에 제작 할 수 있었으며, 향후 효율이 향상되고 재생 해상도가 증대된 위상 홀로그램 코드 개발에 이용될 예정이다.

dCollection @ chosun

제5장 결론

본 연구에서, 우리는 광학계에서 널리 쓰이는 실리카 표면에 열적 현상이 적고 미세가공에 장점이 있는 펨토초 레이저를 사용하여 회절 광학 소자들을 직접 제작하였다. 가공 방법은 펄스들이 중첩될 정도로 천천히 이동하는 스캐닝 기법과 펄스 동기화 방법을 사용하였다. 제작된 회절격자의 회절각과 회절효율 특성을 MatLab으로 전산모사 한 결과와 유사하게 일치함을 보였다. 이 결과를 응용하여 회절 광학 소자 중 기본인 FZP를 펨토초 레이저로 실리카표면에 같은 방법으로 직접 제작하여, 빔의 프로파일과 세기를 거리에 따라 측정 하였다. 제작된 FZP가 원하는 초점거리를 가지고 빔을 집속 시켜 준다는 것을 측정된 거리에 따른 세기값으로 확인하였다. 또한, OptiXplorer 와 MatLab 으로 전산모사 하여 얻은 2차원 홀로그램 패턴을 실리카 내부 30 μm 에 제작하여, 표면보다 높은 안정성과 신뢰도를 가지는 홀로그램 패턴을 제작 하였다. 또한 이렇게 제작된 2차원 홀로그램 패턴이 좋은 해상도를 가지고 재생되는 것을 보였다. 재래식 홀로그래픽 광학 소자가 갖는 많은 장점에도 제작 상 화학적 리소그라피 과정 때문에 겪었던 공정의 복잡함, 여러 단계의 공정과정, 비용과 인체의 유해물질 사용 등이 필요 없기 때문에 효율 개선을 위한 방법을 개발하면 좀 더 쉽게 홀로그래픽 소자를 제작 할 수 있는 대안이 될 수 있는 가능성을 보였다. 그리고 앞으로 가공된 실리카의 높은 투과성과 낮은 열팽창 계수를 이용하면, 고출력 빔을 제작된 회절소자에 조명하여 원하는 복잡한 부피를 가지는 3차원 물체 제작을 위한 포토마스크의 제작에 기초 실험으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 향후 목표는 레이저를 이용한 LIGA 과정을 수행하여 제작된 회절소자의 광효율을 높이는 것이다. 또한 기포(Void)나 굴절률 변화를 레이저를 이용하여 제작하여 삼차원으로 광결정 내부에 적용 제작 등에 활용하여 삼차원 광회로를 만들 수 있는 기반을 구축하여 광회로 제작을 원활히 하는 기술을 개발 하는 것에 유용한 기초자료가 될 것이다.

Collection @ chosun

【참고문헌】

[1] K. H. Leong, A. A. Said, and R. L. Maynard, "Femtosecond Micromachining Applications for Electro-Optic Components," IEEE Electronic Components and Technology Confernence, pp. 210-214, 2001.

[2] M. Xia and Y. Tu, "An Investigation of Femtosecond Laser Micromachining ,"IEEE Internation Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, pp. 296 - 300, 2005.

[3] 손익부, 최성철, 노영철, "초미세 레이저 가공 기술," 물리학과 첨단기술 pp. 26 -33, 2007.

[4] 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," Opt. Exp. vol. 13, no. 11, pp. 4224-4229, 2005.

[5] R. R. Gattass and E. Mazur, "Femtosecond laser micromachining in transparent materials," Nature Photonics vol. 2, no. 4, pp. 219 - 225, 2008.

[6] H. Takahashi, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, "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.

[7] W. Watanabe, D. Kuroda, K. Itoh, J. Nishii, "Fabrication of Fresnel zone plate embedded in silica glass by femtosecond laser pulses," Opt. Exp., vol. 10, no 19, pp. 978-983, 2002.

[8] P. Srisungsitthisunti, O. K. Ersoy, and X. Xu, "Volume Fresnel zone plates fabricated by femtosecond laser direct writing," Appl. Phy. Lett., vol 90, no.1, pp. 011104(1-3), 2007

[9] T. Anderson, N. Carlie, J. Hu, L. Petit, A. Agarwal, J. Choi, L. C. Kimerling, K. Richardson, and M. Richardson, "Microstructured Chalcogenide Glasses Using Femtosecond Laser Irradiation or Photolithography," OSA/CLEO/QELS, 2008.

Collection @ chosun

[10] R. S. Taylor, C. Hnatovsky, E. Simova, P. P. Rajeev, D. M. Rayner, and P. B. Corkum, "Femtosecond laser erasing and rewriting of self-organized planar nanocracks in fused silica glass," Opt. Lett. vol. 32, no. 19, pp. 2888-2890, 2007.

[11] K. Kawamura, M. Hirano, T. Kamiya, and H. Hosono, "Holographic writing of volume-type micrograting in silica glass by a single chirped laser pulse," Appl. Phys. Lett. vol. 81, no. 6, pp. 1137-1139, 2002.

[12] 임용석, 이영락 곽종훈, 최옥식, "Dichromated Gelatin 박막을 이용한 홀로그래픽 Zone Plate 제작 및 해석," 한국광학회지 vol. 8, no. 1, pp. 19-25, 1997.

[13] P. C. Mehta, K. S. Sunder Rao, and R. Hradaynath, "Higher order aberrations in holographic lenses," Appl. Opt. vol. 21, no. 24, pp. 4553-4558, 1982.

[14] J. Jahns and S. H. Lee, "Optical Computing Hardware," (Academic Press, Boston), Chap. 4-7. 1994.

[15] D. S. Kim and B. K. Oh, "펨토초 레이저 재료가공 공정의 이론적 해석," 한국정밀 공학회지, 23권, 1호, pp. 48-55, 2006.

[16] B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, "Optical ablation by high-power short-pulse lasers," Opt. Soc. Am. B, vol. 13, no. 2, pp. 459-468, 1996.

[17] R. A. Serway, 기초물리학, second edition, Saunders college publishing, pp. 804~805, 2005.

[18] R. S. Taylor, C. Hnatovsky, and E. Simova, "Ultra-High Resolution Index of Refraction Profiles of Femtosecond Laser Modified Silica Structures," OSA/CLEO, 2003.

[19] 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. vol. 46, no. 96, pp. 175-180, 2005.

[20] Y. Chioye,(공홍진 역) "레이저 과학," Book's-hill pp. 113-146, 1997.

Collection @ chosun

감사의 글

시간은 정말 정직하게 지나서 실험실에 들어 온지 2년이 다 되어 갑니다. 연구소 위촉 생활까지 3년, 처음에는 정말 아무것도 모르고 이것 저것 마냥 신기하기만 했었는데 이제 지금까지의 실험과 결과들을 발표하고 떠난다고 생각하니 섭섭한 생각이 듭니다. 그 동안 부족한 저를 물심양면으로 지도해 주신 김진태 지도 교수님과 고등광기술 연구소 손익부 박사님께 진심으로 감사를 드립니다. 부족하기만 했던 저를 끊임없는 조언으로 안내자 역할을 해주신 두 분이 있으셔서 지금 이렇게 논문을 쓰게 된 것 같습니다.

이 논문을 쓰기까지 고등 광기술 연구소의 여러 박사님 및 실험실 사람들과 같은 실험실에서 학교 후배라고 많이 챙겨 주셨던 김영섭 박사님, 함께 일했던 고명진씨, 연구소의 만물박사 승우형, 저희 실장님 이신 노영철 박사님 이 밖에도 먼저 졸업 했지만 연구소에 적응 하게끔 소나무처럼 든든했던 형규형, 용욱이형, 경인이형 그리고 함께 즐거운 시간을 가졌던 고등 광기술 연구소 축구 모임 사람들인 강인이형, 오명규 박사님 또 열심히 탁구를 가르쳐 주시던 유봉안 박사님 등 3년의 시간동안 제가 만난 연구소 사람들에게 모두 감사드립니다.

연구소 위촉 생활 중 석사를 입학하게 되어 다른 환경에 적응 하느라 힘들었던 학교생활에 같은 실험실 사람들인 도형이형, 한성, 아드난 그리고 막내 훈국이 많은 힘이 되었습니다. 또한 그 누구보다 부족한 저를 가르쳐 주신 학과 교수님들이신 김현수 교수님, 박종락 교수님, 박시현 교수님, 안태정 교수님에게 감사드립니다. 이 밖에도 학교가면 함께 했던 정문이, 호형 비록 실험실은 달랐지만 같은 실험실 사람 보다 더 챙겨주고 이끌어 주셔서 감사 합니다. 그 밖에 내 동기들 학과 1기라서 선배가 없어서 더 잘 뭉쳐서 함께 했기에 이 논문이 나온 것 같습니다.

그리고 무엇보다 옆에서 항상 격려와 응원을 보내주던 여자 친구 미소와 사랑하는 가족들 할머니, 아버니, 어머니, 여동생에게 평소 표현이 서툴고 부끄러워서 자주 표현하지는 못했지만, 너무나 사랑 합니다. 항상 힘이 되어 주셔서 감사드립니다.

이 외에 제가 미쳐 언급하지 못한 저를 응원해 주신 모든 분들 정말 감사드립니다.