



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2017年 8月  
博士學位論文

초정밀 레이저 하이브리드 가공  
기술을 이용한 미세 광학 소자 제작  
및 특성 연구

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科 (光技術工學專攻)

崔熏局

초정밀 레이저 하이브리드 가공  
기술을 이용한 미세 광학 소자 제작  
및 특성 연구

Study on characterization and fabrication of precise  
optical elements using a hybrid laser processing

2017年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科 (光技術工學專攻)

崔 熏 局

초정밀 레이저 하이브리드 가공  
기술을 이용한 미세 광학 소자 제작  
및 특성 연구

指導教授 金 珍 泰

이 論文을 工學博士學位申請 論文으로 提出함

2017年 6月

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科 (光技術工學專攻)

崔 熏 局

## 崔熏局의 博士學位論文을 認准함

심사위원장 조선대학교 교수 김 현 수 印

심 사 위 원 조선대학교 교수 안 태 정 印

심 사 위 원 조선대학교 교수 권 민 기 印

심 사 위 원 고등광기술연구소 박사 손 익 부 印

심 사 위 원 조선대학교 교수 김 진 태 印

2017年 6月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

## ABSTRACT

<b>제 1장 서 론</b> .....	1
제 1절 연구 배경 .....	1
제 2절 연구 목적 .....	5
<b>제 2장 이 론</b> .....	10
제 1절 초정밀 레이저 가공 기술 .....	10
1. 극초단 펄스 레이저 .....	10
2. CO <sub>2</sub> 레이저 .....	13
제 2절 광학소자 가공 .....	15
1. Fresnel Zone Plate (FZP) .....	15
2. 회절격자 .....	18
3. 마이크로 렌즈 어레이 (MLA) .....	21
<b>제 3장 실험장치 및 방법</b> .....	24
제 1절 실험 장치 .....	24
1. 펨토초 레이저 가공 시스템 .....	24
2. CO <sub>2</sub> 레이저 가공 시스템 .....	31
<b>제 4장 실험 결과</b> .....	34

제 1절 펨토초 레이저 가공기술을 이용한 Fresnel Zone Plate (FZP) 제작 및 특성 연구 .....	34
1. 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 이용한 실리카 표면 FZP 가공	34
2. 펨토초 레이저 어블레이션 공정을 이용한 실리카 표면 FZP 가공	43
제 2절 펨토초와 CO <sub>2</sub> 레이저를 이용한 회절격자 효율 향상 연구 ·	49
제 3절 레이저를 이용한 MLA 제작 및 특성 연구 .....	56
1. 실리카 표면 선 가공을 통한 MLA 제작 및 특성 분석 .....	56
2. 실리카 표면 렌즈 형상 가공을 통한 MLA 제작 및 특성 분석 .....	67
제 5장 결    론 .....	81
【참고 문헌】 .....	85
【연구 실적】 .....	93
【감사의 글】 .....	98

# 그림 목 차

그림 1. 나노초와 펨토초 레이저 펄스 가공 특성 비교 모식도 .....	11
그림 2. 레이저 펄스 시간에 따른 현상 변화 .....	12
그림 3. CO <sub>2</sub> 레이저 공진 구조 및 발진 원리 .....	13
그림 4. Fresnel Zone Plate (FZP) 개념도 .....	15
그림 5. 회절격자를 통해 회절 된 백색광 .....	18
그림 6. 실린더와 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이의 종류 .....	21
그림 7. 마이크로 렌즈 어레이 쌍을 이용한 빔 형상 변화 .....	22
그림 8. 마이크로 렌즈 어레이 곡률 측정 방법 .....	22
그림 9. 1 kHz 펨토초 레이저 가공 시스템 모식도 .....	26
그림 10. 레이저 초점 크기 계산 공식 .....	27
그림 11. 1 kHz 펨토초 레이저의 가공 시스템 모습 .....	28
그림 12. 실험에 사용된 200 kHz 펨토초 레이저 모식도 .....	28
그림 13. 200 kHz 펨토초 레이저의 가공 시스템 모습 .....	29
그림 14. CO <sub>2</sub> 레이저 연마 시스템 모식도 .....	32
그림 15. CO <sub>2</sub> 레이저 연마 시스템 모습 .....	33
그림 16. 기존의 리소그래피 공정을 이용한 FZP 제작 과정 개념도 .....	34
그림 17. 펨토초 레이저를 이용한 FZP 가공 개념도 .....	35
그림 18. 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 가공한 FZP 측정 결과 .....	38
그림 19. 제작된 FZP 초점 크기 및 세기 측정 개념도 .....	38
그림 20. 초점거리에 따른 FZP 초점 크기 변화 .....	39



그림 21. 펨토초 레이저 가공 기술을 리소그래피 공정에 적용하여 제작된 FZP의 거리에 따른 초점 크기 및 세기 변화 ..... 40

그림 22. 펨토초 레이저를 이용하여 제작한 FZP의 효율 측정 개념도 ..... 41

그림 23. 공초점 현미경을 이용한 FZP 가공 깊이 측정 ..... 42

그림 24. 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 제작된 실리카 표면 FZP 광학 현미경 측정 결과 ..... 43

그림 25. 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 제작된 실리카 표면 FZP의 거리 변화에 따른 초점 크기 변화 ..... 44

그림 26. 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 실리카 표면에 제작된 FZP의 거리 따른 초점 크기 및 세기 변화 ..... 45

그림 27. 공초점 현미경을 이용한 실리카 표면에 제작된 FZP 가공 깊이 측정 ..... 46

그림 28. 레이저로 제작된 FZP를 사용한 물체 이미지 측정 개념도 ..... 46

그림 29. 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 FZP의 이미지 재생 측정 결과 47

그림 30. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 가공 거칠기 개선 및 클리닝 효과 선행 연구 ..... 50

그림 31. 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 회절격자의 광학 현미경 및 공초점 현미경 측정결과 ..... 51

그림 32. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수에 따른 광학 현미경, 공초점 현미경 측정 결과 ..... 53

그림 33. 회절격자 연마 전·후 효율 비교 그래프 ..... 53

그림 34. 펨토초 레이저를 이용한 실리카 표면 주기적인 형상 제작 개념도 56

그림 35. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실리카 표면 연마 개념도 ..... 57

그림 36. 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 가공 개념도 ..... 58

그림 37. 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 광학 현미경 측정 결과 ..... 59

그림 38. 레이저를 이용하여 제작된 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 연마 전·후 공초점 현미경 측정 결과 ..... 60

그림 39. 40 μm의 주기를 가지는 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과 ..... 61

그림 40. 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 가공 개념도 ..... 62

그림 41. 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 광학 현미경 측정 결과 ..... 63

그림 42. 레이저를 이용하여 제작된 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 연마 전·후 공초점 현미경 측정 결과 ..... 64

그림 43. 50 μm × 50 μm의 주기를 가지는 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과 ..... 65

그림 44. 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실린더와 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 가공 개념도 ..... 67

그림 45. 가공 깊이 변화에 따른 곡률 제어 개념도 ..... 68

그림 46. 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 실린더 모양 형상 측정 결과 .. 69

그림 47. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 후 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과 ..... 70

그림 48. 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 돔 모양 형상 측정 결과 ..... 72

그림 49. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 후 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과 ... 73

그림 50. 초점 거리에서의 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 패턴 측정 .. 74

그림 51. 초점 거리에서의 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 패턴 측정 ..... 74

그림 52. 레이저를 이용하여 제작된 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 초점 크기

측정 및 시뮬레이션 결과 .....	75
그림 53. 마이크로 렌즈 어레이 금형과정 .....	76
그림 54. 마이크로 렌즈 어레이 금형 전·후 측정 결과 .....	77
그림 55. 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 플랫 탑 빔 웨이핑 구성 및 측정 결과 .....	78
그림 56. ITO 박막 가공 광학 현미경 측정 결과 .....	79

# 표 목 차

표 1. 펨토초 레이저 리소그래피 공정 .....	6
표 2. 펨토초와 CO <sub>2</sub> 레이저를 이용한 회절격자 효율 향상 .....	7
표 3. 펨토초와 CO <sub>2</sub> 레이저를 이용한 MLA 제작 .....	8
표 4. 기존의 가공 방식과 레이저 가공 방식 비교 .....	9
표 5. 실험에 사용된 1 kHz 펨토초 레이저 사양 .....	24
표 6. 실험에 사용된 200 kHz 펨토초 레이저 사양 .....	25
표 7. 실험에 사용된 1 kHz 펨토초 레이저 가공 시스템 사양 .....	25
표 8. 실험에 사용된 200 kHz 펨토초 레이저 가공 시스템 사양 .....	26
표 9. 실험에 사용된 CO <sub>2</sub> 레이저 사양 .....	31
표 10. 실험에 사용된 CO <sub>2</sub> 레이저 연마 시스템 사양 .....	32
표 11. FZP 제작 크기 및 환의 개수 설정 .....	37
표 12. 회절격자 연마 전·후 각 차수 별 세기 및 효율 비교 .....	54

## ABSTRACT

Study on characterization and fabrication of precise optical elements using a hybrid laser processing

Hun-Kook Choi

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

Department of Photonic Engineering,  
Graduate School of Chosun University

This research is focused on optical characterizations of optical elements such as diffraction grating, Fresnel zone plate (FZP), and microlens array (MLA) fabricated directly using a femtosecond laser.

First, FZP has been fabricated using a femtosecond laser and characterized optically. Lithography processing with a femtosecond laser which can be replaceable with phase mask has been applied to fabricate a FZP on silica surface and optical characteristics of the FZP are compared to those of FZP on the silica surface fabricated conventional femtosecond technology using laser ablation processes. Without phase mask used in the conventional lithography processing to generate pattern, a femtosecond laser can be used to generate patterns from direct illumination of a femtosecond laser beam on photoresist (PR). Diffraction efficiencies of those FZPs fabricated using two different methods have been measured and compared. The diffraction efficiency of the FZP from the femtosecond lithography processing is around 12.1% and above around 3.4% than that of the FZP fabricated using the femtosecond ablation method.

Secondly, diffraction gratings have been fabricated on the surface of silica surface using a femtosecond laser. To enhance diffraction efficiency of the diffraction gratings, CO<sub>2</sub> laser surface treatment processing is used. A femtosecond laser focused on the surface with an objective lens and precise moving stage is used to fabricate the diffraction grating, Due to surface

roughness of fabricated diffraction grating diffraction efficiency is limited to around 17.6%, but number of the surface treatments make it possible to have enhance diffraction efficiency to around 32.7% until 4th treatments. However, more treatments make profiles of the diffraction grating changed due to melting of the diffraction grating so that the diffraction efficiency is reduced. Such CO<sub>2</sub> laser surface treatment technology together with a femtosecond fabrication technology will provide high quality optical elements with high diffraction efficiency on various transparent materials surface.

Third, MLA on silica surface has been fabricated using a femtosecond and CO<sub>2</sub> lasers and optical characterizations have been compared with MLA fabricated with different methods. Line profiles on the silica surface using a femtosecond laser have been used to generate profiles of the MLA and to generate radius of curvatures of lens CO<sub>2</sub> laser surface treatment processing is used. Dome and cylinder types of initial profiles of the lens array have been fabricated using a femtosecond and CO<sub>2</sub> lasers and the profiles fabricated are measured through optical profile measurements. Initial deep profiles of the MLA to control the radius curvatures of the lens array makes it difficult to remove surface roughness inside fabricated valleys of the MLA. To overcome the problem, instead of line profiles lens profiles of the MLA have been fabricated varying the depths of the profiles using a femtosecond laser. Also CO<sub>2</sub> laser surface treatments make it possible to remove the surface roughness. In addition to these methods described above to overcome lack of large yields of fabrication outputs using a laser micromachining MLA basic mold patterns generated on the base have been applied. The characteristics of the fabricated MLA have been compared with commercial MLA. A femtosecond laser with beam shaping with the fabricated MLA makes it possible to have similar laser fabrication results of ITO coated with the thickness of 1800 Å to those from laser fabrication using a commercial MLA, which are confirmed from optical microscope measurements of the fabricated profiles.

# 제 1장 서 론

## 제 1절 연구 배경

레이저 가공 기술은 기존의 공구에 물체를 접촉시켜 가공하는 재래식 가공 방식과 달리 레이저 빔을 렌즈를 이용하여 물체의 표면에 집속시켜 가공하기 때문에 기존 가공 방식과 달리 가공 물체에 외력을 가하지 않고, 마이크로미터 이하의 크기로 정밀하게 가공이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 디스플레이 분야에서는 컬러 필터 리포어, 강화유리 절단, 투명물질 내부 가공이 가능한 장점을 이용하여 광 통신 분야의 내부 도파로 가공, 의료분야에서는 라식 수술이나, 스텐트 제작, 자동차 전장 부품 가공 등의 다양한 산업 분야에 레이저들이 사용되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 일반적으로 많이 사용되고 있는 CO<sub>2</sub>나 나노초 레이저와 달리 레이저의 펄스폭을 매우 짧게 만들어 침투 출력이 높은 피코초나 펨토초와 같은 극초단 레이저 개발로 다양하고 많은 레이저 가공 연구 개발이 이루어지고 있다.

레이저 빔 펄스의 지속시간에 따라 레이저는 펄스와 연속발진 레이저로 구분이 가능하며, 펄스 레이저는 나노초 ( $10^{-9}$  s), 피코초 ( $10^{-12}$  s), 펨토초 ( $10^{-15}$  s) 레이저 등으로 구분할 수 있다. 펨토초 레이저는 한 개의 레이저 펄스가 매우 짧은  $1 \times 10^{-15}$  초의 펨토초 시간동안에서 발진하는 것이며, 이는 1974년 Bell lab의 Shank와 Ippen이 처음으로 펨토초 영역의 펄스폭을 갖는 펄스를 생성해 내면서 개발이 시작 되었다<sup>(4)</sup>. 1981년엔 처음으로 액체상태의 매질을 이용한 100 fs 미만의 펨토초 레이저가 등장하였으며<sup>(5)</sup>, 1985년에는 27 fs의 펄스를 생성하는데 성공하였다<sup>(6-7)</sup>. 액체 상태의 색소를 이용한 레이저는 안정성이 떨어지는 단점을 보완하여 고체상태의 매질인 다이오드 레이저 기술의 발전을 통해 티타늄사파이어 (Ti:sapphire)를 사용하여 넓은 발진 스펙트럼을 가지는<sup>(8)</sup> 펨토초 고체레이저 개발이 가능하였다. 고체레이저 개발을 위해 이득매질이 가장 중요한데, 1991년에 Spence가 티타늄사파이어를 사용하여 안정적인 60 fs 레이저 펄스를 발생시켰으며<sup>(9)</sup>, 이를 통해 색소 레이저에서 고체 펨토초 레이저로 전환되는 계기가 되었다. 펨토초 레이저 펄스폭이 짧아 침투 출력이 높은 극초단 레이저는 기존의 나노초와 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 열 영향이 매우 적으며, 투명물질 내부에 가공이 가능한 장점이 있다. 이러한 특징으로 인해 광통신등 정밀 광학소자를 사용하는 가공 분야에서도 많이 사용되고 있

다<sup>(10-12)</sup>.

본 연구에서는 여러 다양한 광학소자 중 고출력 레이저에 사용가능한 Fresnel Zone Plate (FZP), 회절격자, 마이크로 렌즈 어레이를 펄초 레이저로 가공하여 특성 평가 연구를 진행하였다. 기존의 미세 광학소자 제작에는 리소그래피 공정, 금형, 다이아몬드 팁 스크라이빙, 나노 임프린트 공정, 홀로그래픽 가공 방식 등의 다양한 가공 방식을 사용하였다. 이러한 다양한 가공 방식 중 현재 광학 부품 산업 분야에서는 금형 가공 방식을 많이 사용하고 있다. 금형 가공 방식을 이용하여 동일한 조건의 소자를 동일한 형상으로 대량 생산이 가능한 장점이 있기 때문이다. 이러한 금형 가공 방식을 사용하여 마이크로 렌즈 어레이, 렌즈, LED, 윈도우, 회절격자, 디스플레이용 광학 모듈 등의 다양한 광소자 제작이 이루어지고 있다. 하지만 기존의 가공 방식은 복잡한 공정 과정을 통해 가공 시간이 많이 소요되며, 가공 패턴의 주기나 모양, 선폭 등의 가공 조건을 손쉽게 조절이 어렵다. 이러한 기존의 가공 공정에서의 공정을 개선하고 다양한 가공 분야에 적용이 가능한 가공 기술이 요구되고 있으며, 이런 문제를 보완하기 위하여 레이저 가공 기술을 적용하였다.

첫째, Fresnel Zone Plate (FZP)는 기존의 오목이나 볼록 형태의 구형의 렌즈와는 달리 평판에 여러 크기의 환 띠가 오목, 볼록렌즈 특성을 갖도록 금형 및 리소그래피 공정 기술을 사용하여 제작되고 있다. 기존의 가공 방식 중 펄초 레이저를 이용하여 실리카 내부에 굴절을 변화 및 데미지를 발생 시켜 FZP를 제작하였으며, 초점거리에서 약 7  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가지며, 효율이 2%의 FZP를 제작하였다. 또한, 다이아몬드 기반의 물질에 플라즈마 에칭을 이용하여 FZP를 제작하였으며, 효율 향상을 위하여 제작된 FZP의 표면에 이리듐 증착 연구가 진행 되었으며, 이 연구를 통해 7.5%의 효율을 가지는 FZP를 약 13.2%로 효율을 향상 시켰다<sup>(13-18)</sup>. 기존의 리소그래피 공정을 통해 제작된 FZP의 환 띠는 약 100 nm의 최소 선폭을 갖으며, 이렇게 제작된 FZP는 초점에서 약 35 nm의 빔 크기로 제작할 수 있다<sup>(19)</sup>. 하지만 이러한 기존의 리소그래피 공정 기술은 많은 과정이 필요하며, 원하는 가공 형상 제작을 위한 마스크 제작 등으로 인해 많은 제작비용이 요구된다. 가공 형상 변경을 위해서는 새로운 마스크를 다시 제작하여야 하며, 이로 인한 가공 유연성이 많이 떨어지는 단점이 있다. 기존의 마스크를 사용하는 리소그래피 공정의 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 마스크를 사용하는 방법대신 펄초 레이저를 직접 이용하여 FZP를 제작 하였다. 펄초 레이저 빔을 감광물질에 직접 조사하는



방식을 사용하여, 마스크 제작 공정을 줄였다. 이러한 레이저 리소그래피 공정 방식으로 제작된 FZP와 기존의 펄초 레이저 가공으로 제작할 수 있었던 실리카 표면에 제작된 FZP와 비교하였으며, 각각의 효율 측정을 통해 가공 방법에 따른 FZP의 효율을 비교하는 연구를 진행하였다. 펄초 레이저를 리소그래피 공정에 적용하여 마스크 없이 다양한 형상 가공의 가능성을 확인 하였다.

두 번째로 회절격자는 현재 리소그래피 공정, 금형, 레이저 가공 등 다양한 방법을 사용하여 제작되고 있다. 리소그래피 공정 방식은 정밀 마스크를 제작하여 물질의 표면에 UV를 노광하여 제작하고 금형은 몰드를 이용하여 동일한 조건의 회절격자를 제작하는 방식을 사용한다. 이러한 방식들이 회절격자 제작에 많이 사용되고 있다. 레이저를 이용하는 방식은 대량 제작에 취약하여 특성이나 기초 연구에 많이 사용되고 있다. 레이저 가공 방식에는 레이저의 편광 방향을 변화시켜 제작된 회절격자의 특성을 분석하거나<sup>(20)</sup>, 격자뿐만 아니라 선 가공을 통해 발생하는 나노리플의 방향 및 제작 특성에 대한 연구<sup>(21)</sup>가 많이 진행되고 있다. 회절격자의 회절 효율 향상을 위한 연구들에는 회절격자 표면에 미세한 반사필름이나, 코팅을 통한 효율 향상<sup>(22-25)</sup> 연구가 이루어졌으며, 이러한 연구를 통해 기존의 약 78%의 회절격자의 효율을 10% 향상 시킬 수 있었다. 이 연구는 반사형 회절격자의 효율 향상을 위한 연구로 본 연구의 투과형 회절격자와 종류가 달라 회절효율의 직접적으로 비교가 어렵지만, 회절격자의 효율향상을 위한 다양한 연구가 진행되고 있음을 보여주는 연구라 생각된다. 기존의 회절격자 제작을 위한 다양한 과정들로 인해 가공 공정이 늘어나, 가공 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이러한 과정들을 줄이고 레이저 연마를 통해 회절 효율이 증대된 회절격자를 제작하기 위하여 펄초와 CO<sub>2</sub> 레이저인 두 종류의 레이저만을 사용하여 회절격자의 효율을 향상 연구를 진행 하였다.

세 번째로 마이크로 렌즈는 일반적으로 직경이 1 mm 이하의 크기가 매우 작은 렌즈를 말한다. 이러한 마이크로 렌즈로 구성된 마이크로 렌즈 어레이는 광전자 산업의 성장으로 초소형 광학장비의 개발로 인해 중요성이 대두되고 있다. 또한, 광통신 분야, 디스플레이, 광학저장 장치, 스캐닝 기술 등의 폭넓은 분야에서 적용되어 사용되고 있다<sup>(26-37)</sup>. 기존의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 방법에는 리플로우 현상<sup>(38)</sup>이나 표면장력<sup>(39)</sup>을 이용하여 형성하기도 하며, 마스크를 이용한 리소그래피<sup>(40)</sup> 방식을 적용하여 제작되고 있다. 또한, 감광성 물질이 도핑된 유리에 펄초 레이저를 이용하여 마이크로 렌즈 배열을 이루는 부분만을 남기고 나머지 부분

은 제거한 다음, 고온의 열을 이용하여 렌즈 형상을 제작하였다<sup>(41)</sup>. 하지만 이러한 제작 방식으로 제작된 마이크로 렌즈 어레이는 적은 열에도 렌즈 형상이 변형되거나 충격에 의해 렌즈가 손상될 수 있으며, 외부 환경변화에 취약하다는 단점이 있다. 각각의 방식에 따라 재료의 한계와 제작 시간이 많이 소요되며, 레이저를 이용하여 제작한 기존의 방식은 가공 거칠기 발생하는 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 펄초 레이저와 표면 가공 거칠기 연마가 가능한 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 마이크로 렌즈 어레이를 제작하였다.

본 연구에서는 실리카 표면위에 제작하는 격자의 크기를 변경하여 렌즈의 곡률을 조절하는 방식을 사용하여 펄초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 실리카 표면위에 마이크로 렌즈 어레이를 제작하였다. 펄초 레이저를 이용하여 다양한 크기로 실리카 표면에 제작된 마이크로 렌즈 어레이 기본 틀 형상에 CO<sub>2</sub> 레이저를 조사하여 곡률 형성 및 가공 거칠기 제거를 통해 마이크로 렌즈 어레이를 제작하였다. 공초점 현미경을 사용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 3차원 형상을 확인 하였으며, 빔 프로파일러를 통해 상용에서 판매하는 마이크로 렌즈 어레이와 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 사용하여 펄초 레이저 빔을 웨이핑하여 ITO 가공 특성을 분석하였다.

## 제 2절 연구 목적

본 연구는 펄토초 레이저로 직접 가공된 광학소자인 회절격자, FZP, MLA의 특성 평가에 연구 목적을 두고 있다. 기존의 회절격자는 금형이나 리소그래피 공정 등의 다양한 방법을 사용하여 많이 제작되고 있다<sup>(42-45)</sup>. 몰드에 미세한 틈을 이용하여 일정한 격자 패턴을 가공하여 찍어내는 금형 가공방식을 이용하거나 감광재가 도포된 물질표면에 정밀하게 패턴이 제작된 마스크에 UV영역의 빛의 노광을 통해 가공부위를 감응시킨 다음, 화학약품을 사용하여 미세 패턴을 제작하는 방식을 적용하고 있다. 이러한 제작방법은 회절격자 제작을 위한 가장 보편적이며, 많이 사용되는 가공 방식이다. 또한, 이러한 방식은 가공 정밀도와 대량 생산에 유리한 장점이 있다. 하지만 기존의 가공은 몰딩이나 마스크 제작이 이루어져야 하며, 패턴의 주기와 모양, 선폭 등을 손쉽게 조절하기 어려우며, 회절격자의 다양한 패턴 제작을 위해서는 각각의 조건에 대한 몰드와 마스크가 필요하다.

FZP는 평판에 여러 크기의 환으로 구성된 회절광학소자로 평판 렌즈의 역할을 하는 소자이다. 기존에는 금형, 리소그래피 공정, 레이저 가공을 사용하여 다양하게 제작되고 있으며, 여러 분야에서 적용되고 있다<sup>(46-50)</sup>. 금형가공을 통해 동일한 FZP의 대량 생산 및 리소그래피 공정을 이용한 매우 미세하고 정밀한 FZP 제작이 가능하다. 하지만 기존의 FZP 가공방법은 많은 가공 공정이 요구되는 단점이 있어 이러한 단점을 보완하기 위하여 레이저 가공 기술을 이용한 FZP 제작방식이 개발되었다. 레이저를 이용한 기존의 FZP 제작방식은 투명한 물질 내부에 미세한 점이나 선<sup>(51)</sup>으로 이루어진 환띠로 구성하여 FZP를 제작하거나, 단백질 물질의 표면에 레이저를 이용하여 FZP를 제작하여 구부리거나 외부적으로 스트레스를 가한 다음, 처음 제작한 조건의 FZP의 특성이 나타나는지에 대한 연구<sup>(52)</sup>, 투명물질 내부에 가공 깊이가 다른 여러 개의 FZP를 제작하여 동일한 초점거리에서 초점이 맺힐 수 있도록 하여 초점거리에서 여러 개의 초점이 맺히는 FZP 제작 연구를 통해 FZP의 효율을 15%로 향상시켰다<sup>(50, 53)</sup>. 광섬유에 FZP를 제작하여 모드에 따른 특성을 비교하는 연구<sup>(54)</sup>가 진행되었다. 또한, 3D 프린팅 기술을 이용하여 FZP를 제작<sup>(55)</sup>하거나 레이저로 가공 시 환 띠에 위상의 변화를 주도록 가공하여 제작된 FZP의 효율을 향상시키는 연구<sup>(56)</sup>가 이루어 졌으며, 인듐과 텅스텐으로 코팅된 물질에 FZP를 제작하여 효율 및 특성을 비교하는 연구<sup>(57-58)</sup>들이 있다. 하지만 이러한 레이저 방법

들은 금형이나 리소그래피 공정에 비해 효율이 많이 떨어져 산업분야에서 사용되지 않고 있다.

기존의 FZP의 가공 방식인 리소그래피 공정에서의 제작 시간과 공정 단순화를 위해 펨토초 레이저 가공 기술을 접목하였다. 펨토초 레이저 리소그래피 공정 순서로 스핀 코터를 사용하여 실리카 표면에 포토레지스트를 얇게 코팅을 하였으며, 펨토초 레이저를 조사하여 포토레지스트에 FZP 형상을 가공하였다. 그 후, 기존의 리소그래피 공정 과정을 통해 실리카 표면에 FZP를 제작하였다. 펨토초 레이저를 이용한 FZP를 통해 기존의 리소그래피 공정에서 필요로 하는 마스크 제작 공정을 생략할 수 있었으며, 손쉽게 다양한 형상 가공이 가능하였다. 또한, 마스크 제작에 필요한 많은 비용을 줄일 수 있었다. 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 이용한 FZP를 제작하였으며, 동일한 조건으로 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 실리카 표면에 FZP를 제작하여 특성을 비교하는 연구를 진행하였다.

펨토초 레이저 리소그래피 공정을 이용한 FZP 제작 연구
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기존 가공 방식에 비해 가공 형상 제작에 대한 가공 자유도가 높음.</li> <li>■ 마스크 없이 PR 표면에 직접 패턴 가공이 가능함.</li> <li>■ 마스크 제작 과정이 없으며, 손쉽게 가공이 가능함.</li> <li>■ 레이저 스테이지를 이용한 형상 가공 방식으로 다양한 형상 제작이 가능함.</li> <li>■ 마스크 제작 방식을 생략하여 가공 비용 낮음.</li> </ul>

표 1. 펨토초 레이저 리소그래피 공정

레이저를 이용하여 회절격자를 제작할 경우, 기존의 금형이나 리소그래피 공정 방식에 비해 자유롭게 형상의 크기나 회절격자의 조건을 변경할 수 있는 장점이 있지만, 대량 제작이 힘들고, 효율이 낮은 단점이 있다. 레이저를 이용하여 물질의 표면에 회절격자를 새기는 방식을 사용하여 물체의 변형이나 손상이 적지만, 가공 거칠기와 표면 부산물에 의해 효율이 많이 떨어진다.

본 연구에서는 기존의 가공 방식에서 부족했던 회절격자 제작에 대한 가공 유연성을 보완하고 소자 제작에 대한 공정 단순화를 위해 초정밀 레이저 가공 기술

을 적용하였으며, 레이저를 이용한 회절격자 제작의 효율이 낮은 한계를 극복하기 위하여 CO<sub>2</sub> 레이저를 적용하였다. 펄스초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 회절격자를 제작한 다음, CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 실리카 표면의 가공 거칠기 및 표면 클리닝을 통해 회절격자의 효율을 향상하는 연구를 진행하였다. 펄스초 레이저를 이용하여, 회절격자의 가공 형상과 주기를 손쉽게 조절할 수 있었으며, CO<sub>2</sub> 레이저 연마기술을 사용하여 레이저를 사용하여 제작된 회절격자의 표면 연마를 통해 회절격자의 효율을 향상 시키며, 연마 조건 변화에 따른 회절격자의 효율을 비교하는 연구를 진행하였다.

펄스초와 CO <sub>2</sub> 레이저를 이용한 회절격자 효율 향상 연구
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 효율 향상을 위한 반사필름이나 코팅 등의 공정이 필요하지 않음.</li> <li>■ 고출력 레이저에 적용이 가능한 회절격자 제작이 가능함.</li> <li>■ CO<sub>2</sub> 레이저 제어를 통해 연마 정도 조절이 가능함.</li> <li>■ 공정이 단순하여 손쉽게 제작이 가능함.</li> <li>■ 회절격자 조건 및 형상을 다양하게 변경할 수 있음.</li> </ul>

표 2. 펄스초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 회절격자 효율 향상

마이크로 렌즈 어레이는 매우 미세한 크기를 가지는 렌즈들의 주기적 배열을 가지는 광학소자이며, 집적화된 회로 및 소자에서 렌즈 및 광 부품으로 사용가능하다. 현재 마이크로 렌즈 어레이는 금형가공 방식이 많이 사용되고 있는데, 금형 가공을 통해 동일한 형상의 마이크로 렌즈 어레이를 손쉽게 대량으로 제작하는 장점이 있기 때문이다. 금형이외에 다양한 방법으로도 많이 제작되어 사용되고 있다.

레이저를 이용하여 마이크로 렌즈 어레이 제작 방식에는 SLM을 이용하여 제작하는 방식이 있다. SLM을 이용하여 제작하려는 마이크로 렌즈 어레이의 홀로그램을 대물렌즈에 입사시켜 물질의 표면에 제작하는 방식<sup>(59)</sup>이다. 이때 제작에 사용되는 물질은 실리콘 재질을 사용한다. 약 5 μm ~ 7.5 μm 크기로 제작이 가능하지만, 열에 약한 물질의 사용으로 고출력이나 외부환경요인에 의해 변형을 일으키거나 손상이 될 수 있는 문제가 있다. 다른 방법으로는 물질의 표면에 레이저를 이용

하여 마이크로 렌즈 어레이를 제작할 부분에 미세한 원형 홈을 가공한 다음, 리소 그래피 공정에서의 에칭 방식을 이용하여 오목한 모양의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 방식<sup>(60-61)</sup>이 있다. 이러한 방식으로 정밀한 마이크로 렌즈 어레이를 제작할 수 있지만, 약품사용에 의한 후 처리 및 제작 과정이 매우 복잡하다.

기존의 가공 방법으로는 동일한 크기, 한가지의 조건에서 대량생산이 유리하지만, 다른 크기 및 곡률을 조절을 위해서는 복잡한 공정을 거쳐야 한다. 또한, 광섬유 끝단이나 렌즈의 표면 같은 다양한 물질의 표면에 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는데 제한적이며, 레이저 가공 방식에서의 문제를 개선하기 위해서 본 연구에서는 펄스초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 실리카 표면위에 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 가공기술을 연구하였다. 펄스초 레이저를 이용하여 먼저 실리카 표면위에 마이크로 렌즈 어레이의 형상이 될 격자를 제작하였으며, 가공되는 격자의 크기를 변경하여 렌즈의 곡률을 조절하는데 사용하였다. 다양한 크기로 제작된 격자에 CO<sub>2</sub> 레이저를 조사하여 곡률을 형성하였다. 제작된 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 공초점 현미경과 빔 프로파일러 측정을 통해 특성을 확인하였다. 상용에서 판매하고 있는 마이크로 렌즈 어레이와의 레이저 가공 특성 비교를 위해 마이크로 렌즈 어레이를 사용하여 웨이핑된 펄스초 레이저빔을 이용하여 플라스틱 기판위에 증착된 ITO를 제거하는 실험을 진행하였으며, 웨이핑 되지 않은 펄스초 레이저 빔, 직접 제작된 마이크로 렌즈 어레이에 의해 웨이핑된 펄스초 레이저 빔 가공 결과들을 비교하는 연구를 진행 하였다.

펄스초와 CO <sub>2</sub> 레이저를 이용한 MLA 제작 및 특성 연구
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 다양한 형상 가공이 손쉬우며, 적용이 빠름.</li> <li>■ 기존 가공 방식에 비해 공정이 단순함.</li> <li>■ 고출력에 사용이 가능한 MLA 제작이 가능함.</li> <li>■ 펄스초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 MLA의 곡률 조절이 가능함.</li> <li>■ 상용 MLA 가공 비교 시 유사한 결과를 보임.</li> </ul>

표 3. 펄스초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 MLA 제작

	가공 정밀도	가공 공정	가공 패턴	가공 자유도	생산성	유지 보수 비용	가공 면적
금형 가공	1 mm 이상	단순	동일 패턴	낮음	대량생산 가능	보통	대면적
리소그 래피 공정	수 nm	복잡	동일 패턴	낮음	다량생산 가능	높음	국소부위
나노 임프린팅 가공	수 nm	복잡	동일 패턴	낮음	제한적	높음	국소부위
선반 가공	수십 mm 이상	보통	다양함	높음	보통	보통	대면적
레이저 가공	0.5 $\mu$ m	단순	다양함	높음	제한적	낮음	국소부위

표 4. 기존의 가공 방식과 레이저 가공 방식 비교

## 제 2장 이 론

### 제 1절 초정밀 레이저 가공 기술

#### 1. 극초단 펄스 레이저

레이저는 유도방출에 의해 발생된 빛으로 가간섭성이 매우 우수한 단일 파장과 직진성 및 높은 에너지를 가지는 특징이 있다. 레이저 펄스를 생성하는 다양한 방법이 존재하지만, 펨토초 레이저 펄스를 얻기 위해서 일반적으로 모드 잠금 (Mode-locking) 방법을 많이 사용한다. 모드 잠금 방법은 레이저 발진 시 매질에서 발생하는 종모드 사이의 위상을 일정하게 유지할 수 있어 높은 세기를 가지는 펄스를 발생시킬 수 있다. 현재 나노초 레이저는 펄스폭이 수 nm 정도로, Q-스위칭 방법으로 레이저의 펄스를 생성하고 있다. 극초단 펄스 레이저는 나노초 레이저 생성 방식인 Q-스위칭 방식으로 생성이 어려우며, 모드 잠금 원리를 사용하여 레이저를 생성 한다. 극초단 레이저에서 수많은 공진 모드가 발생하는데, 이 수많은 공진 모드의 위상이 일치되어 서로 보강 간섭을 통해 극초단 레이저를 발생시킨다. 이렇게 생성된 극초단 레이저는 다양한 비선형 현상에 의해 침투 출력의 향상이 어려웠으며, 이러한 문제를 극복하기 위해 처프 펄스 증폭 기법이 개발 되었다. 모드 잠금을 통해 생성된 극초단 레이저 펄스를 시간영역에서 펄스폭을 늘려 침투 출력을 낮춘 다음, 증폭 매질을 사용하여 레이저의 세기를 향상 시킨 다음, 증폭된 레이저의 펄스를 압축시켜 침투 출력을 향상 시킬 수 있다. 펨토초 레이저 펄스는 처프 펄스 증폭 (Chirped pulse amplification) 기술 개발로 고출력의 펄스 생성이 가능해졌다. 높은 침투 출력의 비선형 광학효과에 의한 다중광자흡수 (Multiphoton absorption)를 통해 재료의 광 흡수 파장과 광원의 파장대역이 일치하지 않아도 가공이 가능한 장점이 있다<sup>(62)</sup>. 펨토초 레이저는 가공물을 플라즈마 상태로 변화시켜 가공하며, 기존의 열을 이용하여 가공 하는 CO<sub>2</sub>나 나노초 레이저에 비해 가공부위의 열 영향 영역 (Heat Affected Zone) 및 미세 손상 등을 최소화 할 수 있는 정밀 가공 방식으로 기존에 가공이 불가능한 재질들도 가공이 가능하게 되었다<sup>(63-64)</sup>.

그림 1은 나노초와 펨토초 레이저 펄스를 이용하여 재료를 가공하였을 때의 가공 원인 및 특성을 비교해 놓은 것이다<sup>(65)</sup>. 나노초 레이저로 물질을 가공하였을 때



의 큰 특징은 펨토초 레이저에 비해 펄스폭이 넓어 물질가공 시 충격파에 의한 표면 왜곡 및 열에 의한 물질의 변형을 야기한다. 또한, 가공 시 레이저의 펄스 에너지에 의해 변형이 발생하는 열 영향 영역 (Heat affected zone)이 크며, 충격파에 의해 균열이 발생하기도 한다. 이외에도 물질의 녹은 물질에 의해 가공 부위에 깔쭉깔쭉한 문턱 형상이 생겨 가공부위가 매끄럽지 않다.

펨토초 레이저를 이용하여 가공하게 되면 그림에 보인바와 같이 나노초 가공에 의해 생기는 매끄럽지 않는 표면 변형 없이 깨끗하게 가공됨을 확인할 수 있다. 그 이유는 매우 좁은 펄스폭과 짧은 펄스 시간으로 인해 열 발생이 극미하고, 가공 부위의 물질만이 용융되어 사라지기 때문에 가공부위 이외의 부분은 열 영향이 없기 때문에 정밀하게 가공이 가능하다<sup>(66)</sup>.

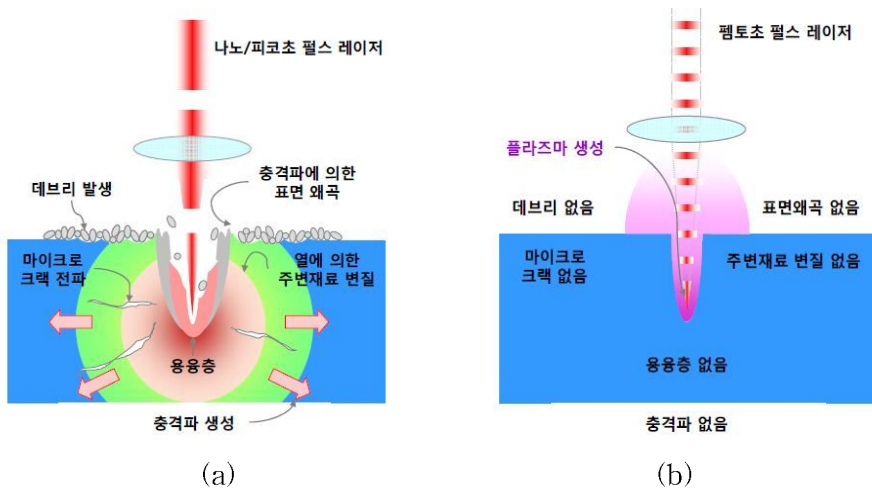


그림 1. 나노초와 펨토초 레이저 펄스 가공 특성 비교 모식도<sup>(65)</sup>, (a) 나노초 레이저 펄스, (b) 펨토초 레이저 펄스

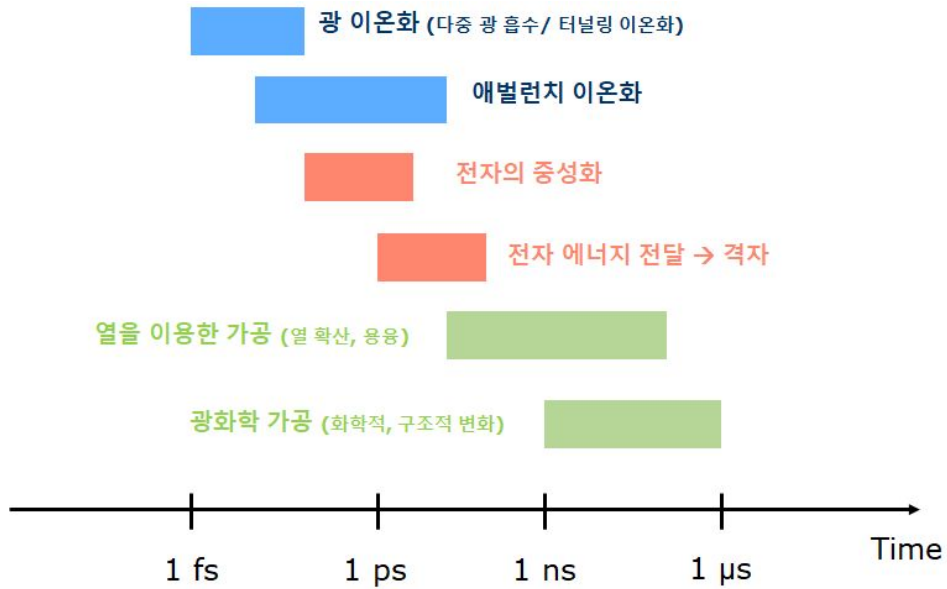


그림 2. 레이저 펄스 시간에 따른 현상 변화

그림 2는 레이저 펄스 시간에 따른 현상 변화를 보여주고 있다. 펨토초 레이저를 사용하면 광자들이 전자들로 흡수되면서 에너지가 전달된다. 펄스폭이 길어지게 되면, 격자로 열 형태의 에너지가 전달되어 열이 발생하게 된다. 펄스폭이 긴 레이저를 사용하게 되면 열을 이용한 가공이 진행되게 된다.

극초단 레이저 가공 기술은 기존의 레이저 가공 기술의 한계를 극복할 수 있는 레이저 가공 기술이며, 반도체, 디스플레이, LED 및 태양 전지 등 다양한 분야에 적용이 가능하며, 각 분야에서 핵심적인 역할을 담당하여 사용 될 수 있을 것이다.

## 2. CO<sub>2</sub> 레이저

CO<sub>2</sub> 레이저는 다른 매질의 레이저에 비해 효율이 높아 고출력의 레이저를 발생하기 쉽다. CO<sub>2</sub> 레이저는 높은 출력에 의해 레이저 발진 시 많은 열이 발생하며, 이러한 강한 열작용을 이용하여 용융점이 높은 금속의 용접이나 절단 등의 많은 산업 분야에서 사용되고 있다. CO<sub>2</sub> 레이저는 1964년 미국의 패텔에 의해 처음으로 연속발진에 성공하였으며, 현재에는 100 kW 이상의 출력을 가지는 CO<sub>2</sub> 레이저가 개발되어 있다. 또한, 다양한 종류의 CO<sub>2</sub> 레이저 개발로 기존의 물질 절단, 용접, 마킹, 천공, 표면 열처리뿐만 아니라 수술, 치료 등의 의료용 목적으로도 사용되고 있다.

레이저 빛을 발생시키는 매질의 상태나 빛의 파장, 연속발진, 펄스형태에 따라 분류가 가능하며, 레이저의 매질에 따라 기체 레이저, 액체 레이저, 고체 레이저로 분류할 수 있다. 레이저의 파장은 사용되는 매질의 종류에 따라 결정되며, CO<sub>2</sub> 레이저는 이산화탄소가 매질이 되어 CO<sub>2</sub> 분자들의 진동으로 인해 10.6 μm 파장의 적외선이 발진된다.

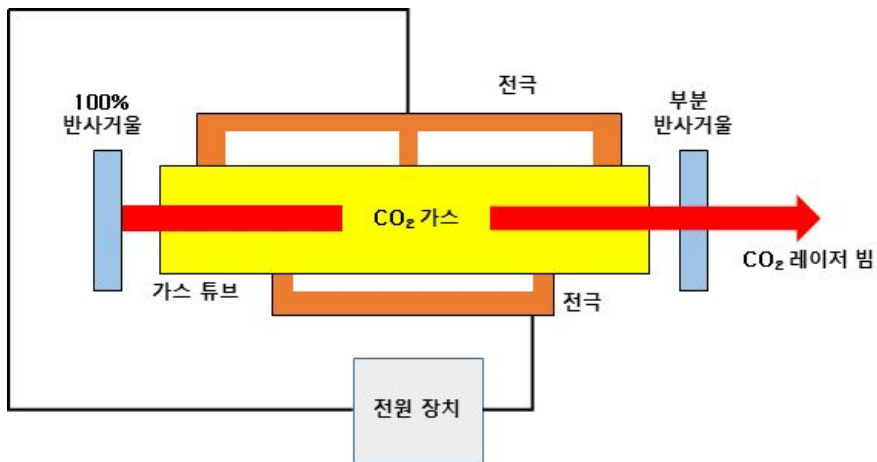


그림 3. CO<sub>2</sub> 레이저 공진 구조 및 발진 원리

CO<sub>2</sub> 레이저의 발진을 위한 공진기는 반사경 및 출력경, 전극과 전원장치로 구성된다. CO<sub>2</sub> 가스가 채워져 있는 관에 있는 레이저 매질을 구성하는 원소들이 들

뜰 수 있는 전기 에너지를 공급하여 주면, 원소들이 여기 되고 레이저 준위들 사이에 밀도반전이 일어나게 되면 가간섭이 우수한 유도 방출된 빛이 발생하게 된다. 이때 발생된 빛들이 한 방향으로 집속될 수 있도록 관의 양 끝에 공진기로 100% 반사가 되는 반사경과 부분적으로 반사하고 투과가 되는 출력경을 사용하며, 출력경을 통해 증폭된 레이저 빔이 발생한다.

이렇게 생성된 CO<sub>2</sub> 레이저 빔은 다양한 산업 분야에 적용되어 사용되고 있다. 다른 레이저에 비해 고출력 레이저 생성이 쉬워 다양한 용도로 활용되고 있다. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 물질의 절단이나 용접, 마킹, 표면 클리닝, 연마, 천공 등 다양하게 사용되고 있다. 고출력의 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 대면적의 물질을 원하는 형상으로 절단하는데 사용되거나 기존의 아크 용접 방식인 아닌 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 물질의 표면을 녹여 집합하는 경우에도 사용되고 있다. 또한, 다양한 물질의 표면에 특정 형상을 새겨 넣는 마킹에도 사용되고 있으며, 유리나 금속 등의 물질을 CO<sub>2</sub> 레이저의 특징인 열을 이용하여 물질을 녹여 형상을 만들거나 표면을 깨끗이 만드는 클리닝이나 연마 가공에 적용되고 있다. CO<sub>2</sub> 레이저 개발로 다양한 산업분야에 적용되어 사용되고 있으며, 다양한 가공 기술의 개발로 더욱 다양한 분야에 적용되어 활용될 수 있다.

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 레이저 절단이나, 용접 등과 같은 고출력이 요구되는 가공에 사용하지 않고, 펄토초 레이저 가공을 통해 가공 시 발생한 표면 거칠기 및 클리닝을 위해 사용하였다. 또한, 펄토초 레이저를 사용하여 미세 격자나 형상을 제작 시 표면의 거칠기가 발생하게 되면 광학소자의 효율이 떨어지는 큰 요소이므로 표면 부산물 제거를 위하여 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였으며, 유리재질의 물질을 녹여 렌즈 곡률 형상을 만드는데 사용하였다.

## 제 2절 광학소자 가공

### 1. Fresnel Zone Plate (FZP)

렌즈를 사용하여 빛을 한 지점으로 모으거나 퍼지게 만들 수 있으며, 여러 형태의 렌즈의 조합을 사용하여 다양한 용도에 활용이 가능한 광학기기를 만들 수 있었다. 또한, 렌즈 설계의 기술의 발전으로 다양한 수차를 보정하는 비구면 렌즈가 제작될 수 있게 되었다. 과학기술의 발전으로 많은 광소자들의 연구가 진행되었으며, 다양하고 복합적인 기능들의 구현이 가능한 집적회로 소자들이 개발 되어졌다. 집적화된 소자들에 다양한 기능들을 배치하기 위해서는 소자들의 소형화가 필수적이어서, 렌즈의 크기도 줄이는 연구가 진행되었으며, 기존의 렌즈를 평판으로 대체할 수 있는 프레넬 존 플레이트가 개발되어졌다. 프레넬 존 플레이트는 구면의 렌즈의 형상을 평면에 환대를 제작하여 회절현상에 의해 렌즈와 동일한 특성을 가지도록 제작된 것이다.

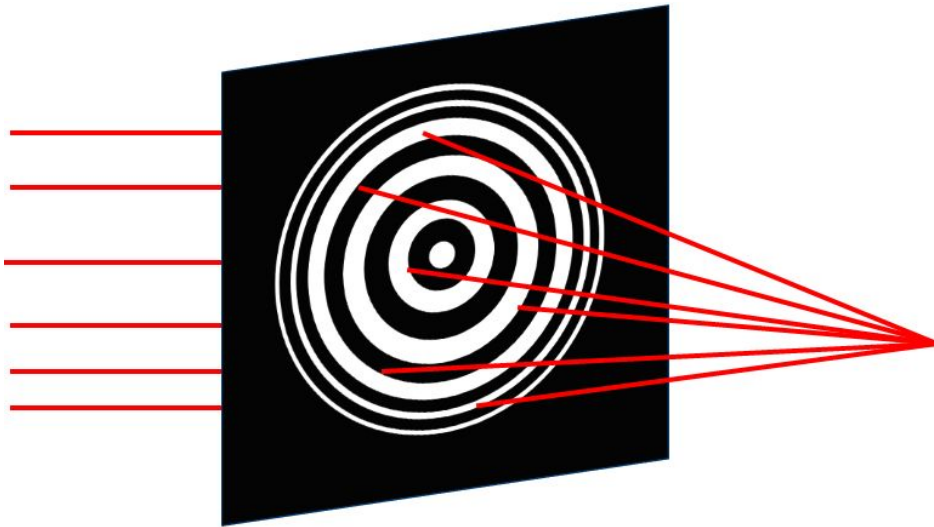


그림 4. Fresnel Zone Plate (FZP) 개념도

그림 4는 구면의 렌즈로부터 평면의 프레넬 존 플레이트로 제작되는 원리를 보여주고 있다. 구면을 수직접선 중심으로부터 회절에 의한 렌즈효과를 주도록 환대

를 나눈 다음, 같은 높이를 가지는 각 환대에 해당하는 곡률을 가지는 얇은 환대 조각 형상들을 평면 기관위에 형상화하여, 그 각 조각들로부터 회절을 통해 입사 빔을 모으는 렌즈 기능을 갖도록 설계되어진다.

프레넬 존 플레이트를 구성하는 환대는 다음 (2-1-1)식에 의해 결정되어진다.

$$f^2 + r_n^2 = \left(f + \frac{n\lambda}{2}\right)^2 \quad (2-1-1)$$

위 식 (2-1-1)을 삼각함수 공식을 사용하여 각 환대의 반지름을 계산할 수 있다.

$$r_N = \sqrt{N\lambda f} \quad (2-1-2)$$

위 식에서  $f$ 는 제작하는 프레넬 존 플레이트의 초점거리,  $\lambda$ 는 집속에 사용하는 레이저의 파장,  $N$ 은 제작한 프레넬 존 플레이트  $N$ 번째 환을 나타낸다. 프레넬 존 플레이트의 회절효율은 입사 빔의 일부만 집속시킬 수 있는 선형 격자와 유사하며, 키르히호프 적분으로 계산될 수 있다. 키르히호프 적분을 사용하여 프레넬 존 플레이트를 투과하고 집속된 빔의 세기는 다음 공식으로 결정될 수 있다.

$$I = |E|^2 \quad (2-1-3)$$

여기서 전자기장  $E$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$E = \int C \times \exp(ikx \sin\theta) dx \quad (2-1-4)$$

적분은 격자의 한 주기에서 이루어지고,  $\frac{2\pi}{k} = \lambda = d \sin\theta$  이다. 상수  $C$ 는 투명한 영역에서는 1이며, 어두운 영역에서는 0이 된다. 1차 회절에서

$$E = \int \exp\left(\frac{2\pi i}{d}\right) dx \quad (2-1-5)$$

입사 빔의 세기를  $(2\pi)^2$ 으로 표준화하면,

$$I = \frac{4}{(2\pi)^2} = \frac{1}{\pi^2} \quad (2-1-6)$$

N번째 차수의 회절효율은

$$I = \frac{1}{(N\pi)^2} \quad (2-1-7)$$

으로 계산할 수 있다<sup>(67)</sup>.

위 식 (2-1-1)을 사용하여 50 mm 초점을 가지는 FZP의 환대의 각 차수에 대한 반지름을 계산하였다. FZP의 회절효율은 펨토초 레이저 리소그래피 공정과 펨토초 레이저 어블레이션 공정을 사용하여 제작된 FZP를 사용하여 파워미터를 사용하여 직접 측정하여 비교하는 방법을 사용하였다.

프레넬 존 플레이트는 투명한 유리판 혹은, 필름에 다수의 환대로 이루어져 있으며, 각기 다른 크기로 제작된 환대에 의한 회절현상을 이용하여 조사된 빛을 한 곳으로 모으는 역할을 한다. FZP는 곡률을 이루는 렌즈를 평면의 형태로 만든 것이며, 중심에서 멀어질수록 환의 선평도 줄어들며, 환대수가 많을수록 회절효율이 증대된다. FZP를 제작하는 방식은 리소그래피 공정 등 다양한 정밀 가공 방법들이 개발되고 연구되었다. 본 연구에서는 리소그래피 공정에서 사용하는 방법 중 FZP의 형상을 결정하는 마스크 제작공정을 펨토초 레이저 정밀 가공 방법을 적용하여 FZP를 제작하였으며, 레이저 가공 공정을 통해 다양한 형상을 손쉽게 제작할 수 있음을 보였다.

## 2. 회절격자

회절격자는 물질의 표면에 일정한 주기를 가지는 많은 슬릿으로 구성된 광학소자이다. 회절격자는 반사형과 투과형의 두 가지 종류가 있으며, 반사형은 회절격자의 표면에 조사된 빛이 다시 표면으로부터 반사될 수 있도록 금속코팅을 하고, 투과형은 투명한 물질의 표면에 회절격자를 제작하여 조사된 빛이 회절격자를 투과하는 물질을 사용하여 제작한다. 그림 5와 같이 회절격자에 빛을 조사시키면 표면의 격자에 의해 입사된 빛이 회절되어, 입사된 빛을 파장대별로 분산시킬 수 있다. 이러한 회절격자의 특징을 사용하여 물질의 스펙트럼 측정 등과 같은 분광 계측 시스템에 많이 사용되고 있다. 회절격자를 구성하는 여러 격자들에 의해 회절되어 진행하게 되는데, 이때 각각 다른 격자를 통과한 빛들 사이의 광 경로 차이가 발생하게 된다. 이 광 경로 차이가 파장의 정수배가 되는 조건이면 보강간섭이 일어나 빛의 세기가 강해지나, 광 경로 차이가 파장의 반 정수배일 때에는 소멸 간섭이 일어나게 된다.

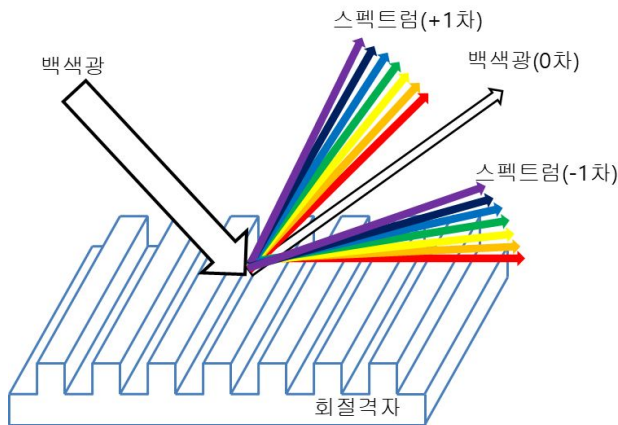


그림 5. 회절격자를 통해 회절 된 백색광

회절격자에 의해 회절 된 빛의 패턴이 반대편의 스크린에 맺히게 되는데, 이렇게 맺혀진 회절 패턴 중 한 점에 대한 보강간섭은 다음 식으로 표현 된다.



$$d \sin \theta = m \lambda \quad (2-2-1)$$

회절격자의 각 격자에 의해 회절 된 빛은 각기 다른 광 경로를 가지게 되는데, 다른 광 경로 차이에 의해 보강과 상쇄 간섭이 이루어지게 되며, 회절 패턴의 차수에 대한 보강간섭 조건은 식 (2-2-1)과 같다.  $\theta$ 는 회절각도이며,  $\lambda$ 는 회절격자에 입사된 빛의 파장이다.  $d$ 는 회절격자의 격자 간격이다.

회절격자의 형상 변화에 대한 회절효율 계산을 위해 푸리에 변환을 이용하여 각 차수의 진폭을 계산하여 회절효율을 확인 할 수 있다.

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

$$h_{mod,p} = \frac{K}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{K}}^{\frac{\pi}{K}} h(x) \cos(pKx) dx, h_{avg} = \frac{K}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{K}}^{\frac{\pi}{K}} h(x) dx \quad (2-2-3)$$

다음 식에서  $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$ 는 공간 주파수이며,  $h_{avg}$ 는 회절격자의 높이,  $h_{mod,p}$ 는  $pK$  조화 성분 변조 진폭이다. 입사된 빛이 회절격자의 표면에 수직으로 입사 할 경우, 위상 변화는 다음 식으로 표현된다.

$$\exp[j\phi(x)] = \exp(jkh_0 + jk\Delta n_{ga}h_{avg}) \exp\left[jk \sum_{p=1}^{\infty} \Delta n_{ga}h_{mod,p} \cos(pKx)\right] \quad (2-2-4)$$

다음 식에서  $J_q$ 는  $q$ 번째 차수 Bessel 함수이며,  $\Delta n_{ga}$ 는 회절격자 물질과 공기와의 굴절률 차이이다.  $m$ 번째 차수의 회절 세기는 위 (2-2-4)의 식으로 계산된 계수들을 이용하여 다음 (2-2-5)식으로 표현된다<sup>(67)</sup>.

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

본 연구에서는 기존의 회절격자 제작 방식인 금형가공 기술을 사용하지 않고

초정밀 레이저 가공 기술을 사용하여 제작하였다. 실리카 표면에 펨토초 레이저를 사용하여 미세 격자를 주기적으로 제작한 후, CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 펨토초 레이저 가공에 의해 발생한 가공 표면의 거칠기 및 부산물을 제거하였다.

CO<sub>2</sub> 레이저 연마 기술을 이용한 이유는 회절격자의 표면 거칠기를 개선을 통해 격자의 표면이 깨끗해지는 클리닝 효과를 이용하여 회절격자에 투과되는 빛의 양을 늘리고, 거칠기에 의한 산란으로 효율이 감소되는 현상을 방지하기 위하여 사용하였다.

기존의 회절격자 제작에 널리 사용되고 있는 금형기술은 동일한 조건의 소자를 빠른 시간에 대량으로 생산할 수 있는 장점이 있지만, 소자의 조건이 변경되었을 때, 준비공정이 복잡하고 많이 시간이 소요되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 정밀하고 자유로운 형상들의 가공이 가능한 레이저 가공 기술을 적용하여 회절격자를 제작하였다.

### 3. 마이크로 렌즈 어레이 (MLA)

마이크로 렌즈는 크기가 매우 작은 렌즈로 일반적으로 직경이 1 mm 이하의 렌즈를 말한다. 광학 소자의 집적화에 의해 광학 부품의 소형화가 이루어졌으며, 그에 따라 렌즈의 크기가 작아지게 되었다. 마이크로 렌즈는 17세기 로버트 후크에 의해 개발되었으며, 현미경에 사용하기 위한 작은 유리 렌즈를 제작하였다. 이러한 마이크로 렌즈들의 주기적인 배열을 통해 마이크로 렌즈 어레이를 형성할 수 있다.

마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 방법에는 여러 가지 다양한 가공 방법이 있는데, 현재에는 금형 방법을 많이 사용하고 있다. 금속이나 단단한 물질에 실린더나 돔 모양을 제작한 틀을 몰드로 이용하여 마이크로 렌즈 어레이를 찍어내는 방식을 많이 사용하고 있다. 이러한 방식은 짧은 시간에 대량 생산이 가능하다는 장점이 있지만, 정밀하고 매우 작은 크기의 마이크로 렌즈 어레이 제작이 어렵다. 이런 단점을 보완하기 위해 리소그래피 공정 등의 다양한 제작 방법이 개발되었다. 리소그래피 공정의 방식을 사용하여 매우 정밀하고 미세한 마이크로 렌즈 어레이 제작이 가능하다. 리소그래피 공정은 마이크로 렌즈 어레이를 제작할 물질 위에 감광재 물질을 얇게 도포한 다음, 정밀하게 가공 형상이 제작된 마스크를 이용하여 원하는 부분에만 UV 빛이 노광되도록 하며, UV 빛에 감응된 부분의 감광재를 남기거나 제거한 다음, 물질이 반응하는 용액을 사용하여 형상을 가공하는 방식이다 (68-72)

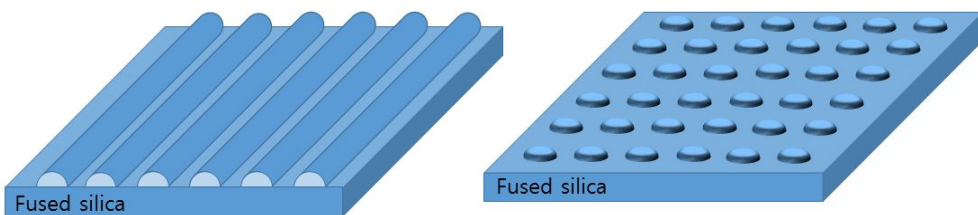


그림 6. 실린더와 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이의 종류

그림 6은 마이크로 렌즈 어레이에서 실린더와 돔 모양의 두 종류를 보여주고 있다. 두 종류의 마이크로 렌즈 어레이는 위에서 언급한 다양한 가공 방식을 사용하여 제작할 수 있으며, 이외의 다양한 형상의 마이크로 렌즈 어레이도 존재한다.

펨토초 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이로 가우시안 형태의 레이저 빔을 셰이핑을 통해 플랫폼 빔으로 변환이 가능하다.

빔 셰이핑을 위해 동일한 조건을 가지는 두 개의 마이크로 렌즈 어레이가 필요하다.

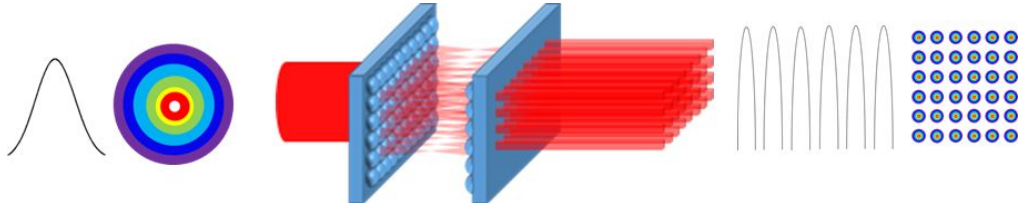


그림 7. 마이크로 렌즈 어레이 쌍을 이용한 빔 형상 변화

그림 7은 가우시안 형태를 가지는 레이저 빔을 동일한 조건을 가지는 마이크로 렌즈 어레이 쌍에 입사시켰을 때, 레이저 빔 형상을 나타낸 것이다. 동일한 조건의 마이크로 렌즈 어레이 쌍의 각각의 초점거리만큼 떨어뜨려, 투과된 빔의 형상은 각각의 렌즈에 의해 점 배열의 어레이 형태로 빔의 형상이 변화하게 된다. 어레이의 형상의 빔을 렌즈를 통해 한 점으로 집속 시킬 경우, 원형의 플랫폼 빔이 생성되게 된다.

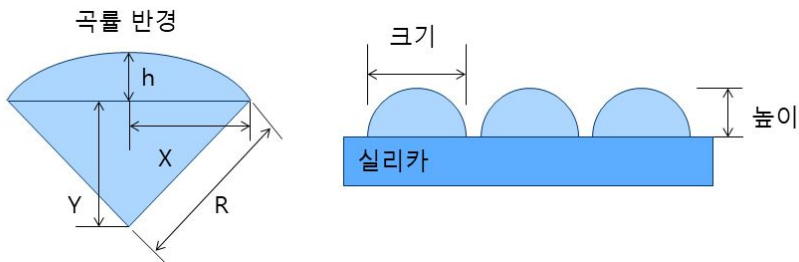


그림 8. 마이크로 렌즈 어레이 곡률 측정 방법

렌즈의 곡률반경을 확인하기 위해서는 그림 8과 같은 방법을 사용하였다. 레이저를 사용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 공초점 현미경을 사용하여 렌즈의

프로파일을 측정하였으며, 측정된 결과를 이용하여 다음 식 (2-3-1)에 대입하여 계산하였다. 식 (2-3-1)에서 렌즈의 반지름은  $x$ 이며,  $h$  는 렌즈의 높이이다.

$$R = \frac{h^2 + x^2}{2 \times h} \quad (2-3-1)$$

본 연구에서는 기존의 금형과 리소그래피 공정에서 부족하였던 가공 유연성을 보완하기 위하여 펄소초와 CO<sub>2</sub> 레이저 가공 기술을 적용하였으며, 다양한 가공 방식을 적용하여 마이크로 렌즈 어레이의 곡률을 조절하였다. 또한, 레이저 가공 기술로 제작한 마이크로 렌즈 어레이의 특성을 확인하고 기존의 방식으로 제작된 마이크로 렌즈 어레이와의 ITO 가공 비교를 통해 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 특성을 평가하였다.

## 제 3장 실험장치 및 방법

### 제 1절 실험장치

#### 1. 펨토초 레이저 가공 시스템

본 연구에서는 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 보유하고 있는 펨토초 레이저 가공시스템을 사용하였다. 사양이 다른 두 종류의 펨토초 레이저 가공 시스템을 사용하였다. 첫 번째 펨토초 레이저는 CyberLaser사의 Ti:Sapphire 펨토초 레이저 시스템 (모델명 : IFRIT)을 사용하였으며, 레이저의 사양 (이하 1 kHz 펨토초 레이저)은 185 fs 의 펄스폭과 1 kHz 의 반복률, 785 nm의 중심파장을 가지고, 1 W의 최대 출력을 가지는 펨토초 레이저 이다.

제 품 명	IFRIT (Cyber laser)
파 장	785 nm
평 균 출 력	1.0 W
반 복 률	1 kHz
펄 스 폭	185 fs
펄 스 에 너 지	1 mJ
빔 경	6 mm
빔 질	$M^2 < 1.3$
퍼 짐 각	$< 1 \text{ mrad}$
레이저 등급	Class 4

표 5. 실험에 사용된 1 kHz 펨토초 레이저 사양

실험에 사용하였던 두 번째 펨토초 레이저는 LightConversion사의 Yb:KGW 다이오드 펌핑 펨토초 레이저 시스템 (모델명: Pharos)이다. 이 펨토초 레이저 (이하 200 kHz 펨토초 레이저)는 250 fs 의 펄스폭, 200 kHz 의 반복률, 1030 nm 의 중심파장, 6 W 출력을 가지는 레이저 이다. 또한, 방출된 레이저 빔은 가우시안 형태이며, 선편광을 가진다. 본 연구에서는 회절격자를 제작하는데 사용되었다. 그 이유

는 펄스 반복률이 낮아 실리콘 가공 시 표면의 깨짐이나 치핑 현상이 적기 때문이다.

제 품 명	Pharos (LightConversion)
파 장	1030 nm
평 균 출 력	6 W
반 복 률	200 kHz
펄 스 폭	250 fs
펄 스 에 너 지	60 $\mu$ J
빔 경	6 mm
빔 질	$M^2 < 1.2$
퍼 짐 각	$< 1.2$ mrad
레이저 등급	Class 4

표 6. 실험에 사용된 200 kHz 펄스 레이저 사양

표 7은 1 kHz 펄스 레이저 가공 시스템의 스테이지 사양을 보여주고 있다. 1 kHz 펄스 레이저 가공 시스템의 스테이지 사양은 X, Y 축은 선형 모터 스테이지로 구성되어 있으며, 300 mm  $\times$  300 mm의 가공 범위를 가진다. 또한, 이 스테이지는 20 nm의 정밀도와 20 mm/s의 최대속도를 가지고 있다. Z 축은 X, Y 스테이지와 달리 Ballscrew방식이며, 200 mm의 이동 범위, 0.5  $\mu$ m의 정밀도, 20 mm/s의 최대속도를 가진다. 본 연구에서는 FZP와 MLA 제작에 사용하였다. 고반복률을 가지는 레이저 사양으로 비교적 빠른 가공에 적합하며, 빠른 가공 속도로 가공이 가능하여 반복 가공에 유리하여 사용하게 되었다.

	X-Y 스테이지	Z 스테이지
스테이지	선형 모터 스테이지	Ballscrew 스테이지
이동거리	300 (mm) $\times$ 300 (mm)	200 (mm)
분 해 능	20 nm / count	0.5 $\mu$ m / count
최대속도	20 (mm/s)	20 (mm/s)

표 7. 실험에 사용된 1 kHz 펄스 레이저 가공 시스템 사양

표 8은 200 kHz 펄스 레이저 가공 시스템의 스테이지 사양을 보여주고 있다. X, Y 축은 선형 모터 스테이지로 되어 있으며, 300 mm × 300 mm의 가공 범위와 20 nm의 정밀도, 300 mm/s의 최대속도를 가지는 스테이지이다. Z 축은 Ballscrew 방식의 스테이지로 100 mm의 이동 범위를 가진다. 0.5 μm 의 정밀도, 20 mm/s 의 최대속도를 가지고 각각 독립적으로 구동되는 특징이 있다.

	X-Y 스테이지	Z 스테이지
스테이지	선형 모터 스테이지	Ballscrew 스테이지
이동거리	300 (mm) × 300 (mm)	100 (mm)
분해능	20 nm / count	0.5 μm / count
최대속도	300 (mm/s)	20 (mm/s)

표 8. 실험에 사용된 200 kHz 펄스 레이저 가공 시스템 사양

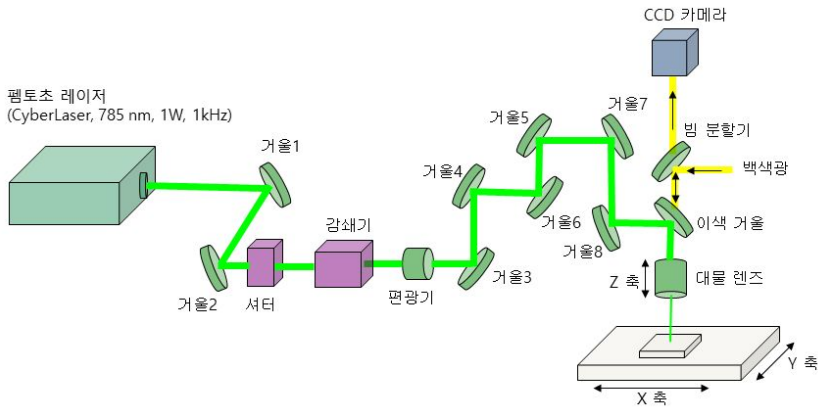


그림 9. 1 kHz 펄스 레이저 가공 시스템 모식도

그림 9는 1 kHz 펄스 레이저 가공 시스템의 모식도로 빔 전송을 위한 광학계, X, Y, Z축 스테이지로 구성되어 있다. X, Y 스테이지를 정밀 이동시켜 설계된 가공 물체 표면을 가공하고, Z축 스테이지를 통해 가공 초점을 조절하여 물체를 가공한다.



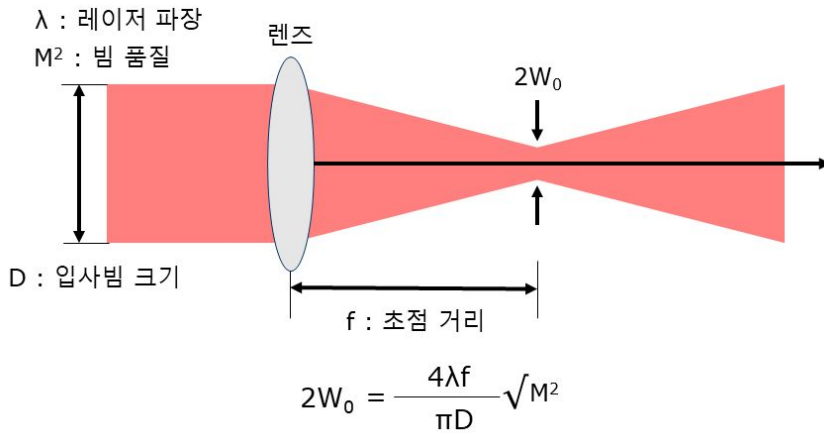


그림 10. 레이저 초점 크기 계산 공식

가공에 사용한 펄스 레이저의 초점의 크기는 그림 9의 공식을 사용하여 계산하였다. 초점 크기를 계산하기 위하여 레이저의 파장, 초점거리, 빔 질, 입사 빔 크기 등이 고려된다. 가공에 사용된 펄스 레이저는 반복률이 1 kHz와 200 kHz를 가지는 레이저를 사용하였으며, 각각의 레이저의 중심파장은 785, 1030 nm이다. 또한, 입사되는 빔의 크기는 두 레이저 모두 6 mm이며, 빔 질은 1.3과 1.2이다. 가공에 사용된 대물렌즈는 20배율을 가지며, 렌즈의 초점거리는 10 mm이다. 주어진 값을 가지고 가공에 사용된 펄스 레이저의 초점의 크기를 계산하였으며, 1 kHz의 반복률을 가지는 펄스 레이저의 초점 크기는 약 2.16 μm이며, 1 kHz의 반복률을 가지는 펄스 레이저의 초점 크기는 약 2.62 μm으로 계산되었다.

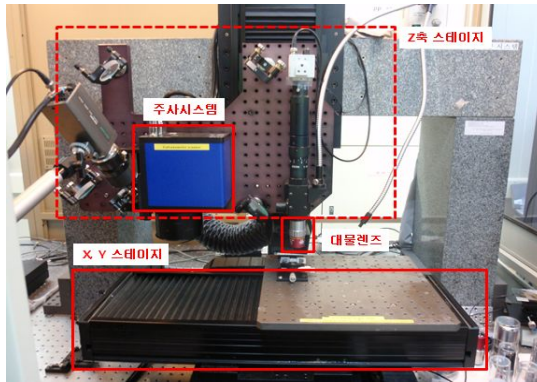


그림 11. 1 kHz 펄스 레이저의 가공 시스템 모습

그림 11은 실제 가공에 사용된 시스템의 모습이다. 펄스 레이저 빔을 대물렌즈로 집속시켜 가공하는 방식이다. 스테이지 옆에 위치한 스캐너는 대물렌즈와 달리 아래쪽에 위치한 X, Y 스테이지를 고정된 다음, 스캐너에 장착된 두 개의 거울을 움직여 고정된 물체에 레이저를 주사하여 가공하는 방식이다. 샘플의 제작 위치 변경과 이동은 아래쪽에 위치한 X, Y 스테이지를 이동하여 조절하였으며, Z축은 동일한 축에 위치한 CCD를 이용하여 가공하고자 하는 물체의 위치에 초점을 맞추는 역할을 하였다.

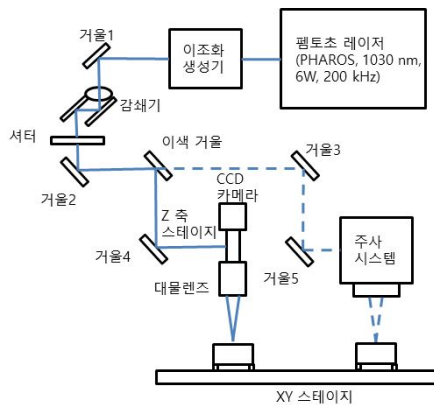


그림 12. 실험에 사용된 200 kHz 펄스 레이저 모식도

그림 12는 실험에 사용된 다른 펄스 레이저 중 하나인 200 kHz의 반복률을 가지는 펄스 레이저 가공기이다. 모식도에서와 같이 1030 nm의 파장을 가지는 레이저이며, 이조화생성기를 이용하여 파장을 변경할 수 있다. 펄스 레이저를 통해 출력된 레이저를 거울을 사용하여 대물렌즈에 입사될 수 있도록 경로를 구성하였다. 레이저의 출력을 조절하기 위하여 감쇄기를 사용하였으며, 레이저 제어를 위하여 On/Off 서터가 사용하였다. 또한, 이색 거울로 대물렌즈나 주사시스템으로의 광경로를 변경하는데 사용하였다. 가공방법에 따라 선택적으로 각각의 렌즈에 입사된다.

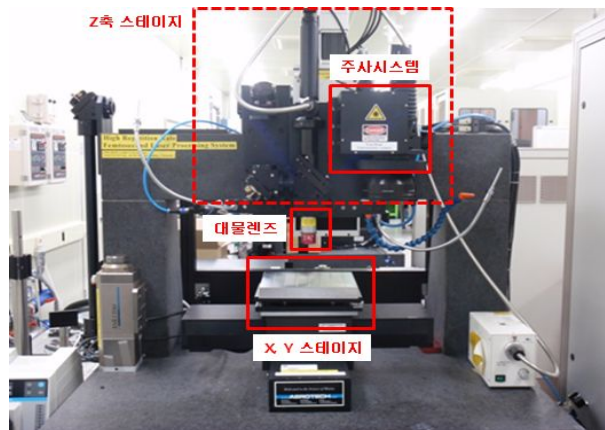


그림 13. 200 kHz 펄스 레이저의 가공 시스템 모습

그림 13은 200 kHz 펄스 레이저의 가공 시스템의 모습이다. 앞서 1 kHz 펄스 레이저 가공 시스템과 비슷한 구조를 가지고 있으며, 본 연구에서는 대물렌즈에 레이저 빔을 입사시켜 가공하는 방식을 사용하였다. 샘플의 이동과 위치변화는 X, Y 스테이지를 사용하여 조절하였으며, Z 축은 동일한 축에 위치한 CCD를 이용하여 가공하고자 하는 물체의 위치에 가공 레이저 빔의 초점이 맺히도록 하는데 사용하였다.

평균 파워 밀도

$$\text{평균 파워 밀도} = \frac{\text{평균 파워}}{\pi r^2} \quad (3-1-1-1)$$

$r$  = 입사 빔 크기의 반지름

침투 파워 밀도

$$\text{펄스 에너지} = \frac{\text{평균 파워}}{\text{반복률}}$$

$$\text{침투 파워} = \frac{\text{펄스 에너지}}{\text{펄스 지속 시간}}$$

$$\text{침투 파워 밀도} = \frac{\text{침투 파워}}{\pi r^2} \quad (3-1-1-2)$$

$r$  = 입사 빔 크기의 반지름

가공에 사용된 평균 레이저 출력을 이용하여 위 (3-1-1-1)의 식을 이용하여 면적당 레이저의 평균 파워 밀도를 계산하였다. 또한, 평균 출력과 가공 반복률을 이용하여 펄스 에너지를 계산하였으며, 레이저 펄스 지속 시간을 이용하여 침투 파워를 확인하였다. 위 식 (3-1-1-2)을 사용하여 면적당 레이저 침투 파워 밀도를 계산하여 적용하였다.

## 2. CO<sub>2</sub> 레이저 가공 시스템

펄토초 레이저를 사용하여 제작한 광학소자의 표면을 연마하기 위하여 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 시스템을 사용하였다. 실험에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저는 Coherent 사의 C-55L를 사용하였으며, 10.6 μm의 중심파장을 가진다.

제 품 명	C-55L (Coherent)
파 장	10.6 μm
평 균 출 력	55 W
반 복 륜	5 kHz
펄스 간 안정성	5 %
빔 질	$M^2 < 1.3$
퍼 짐 각	5 mrad
신 호 형 태	TTL

표 9. 실험에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저 사양

CO<sub>2</sub> 레이저는 다른 고체레이저와 달리 레이저를 발진 시키는 물질에 가스를 사용하는 기체 레이저이며, 효율이 매우 높은 특징이 있다. 그리고 CO<sub>2</sub> 레이저는 열이 많이 발생하는 특징을 가지며, 그로인해 열에 약하거나 민감한 물질의 미세가공에는 사용하지 않지만, 표면 연마나 표면 열처리에 많이 사용되는 레이저이다. 현재 많은 산업 분야에서 사용되고 있으며, 레이저용접, 천공, 절단, 마킹 및 의료분야 등에 광범위하게 활용되고 있다.

표 10은 실험에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 시스템의 스테이지 사양을 보여주고 있다. X, Y 축은 선형 모터 스테이지로 구동되고 있으며, 300 mm × 300 mm의 가공 범위와 1 μm의 정밀도, 100 mm/s의 최대속도의 사양을 가지고 있다. Z 축은 Ballscrew 스테이지로 구동되며, 50 mm의 이동 범위를 가지고 X, Y축 스테이지와 독립적으로 구동된다.

	X-Y 스테이지	Z 스테이지
스테이지	선형 모터 스테이지	Ballscrew 스테이지
이동거리	300 (mm) × 300 (mm)	50 (mm)
분해능	1 μm / count	1 μm / count
최대속도	100 (mm/s)	

표 10. 실험에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 시스템 사양

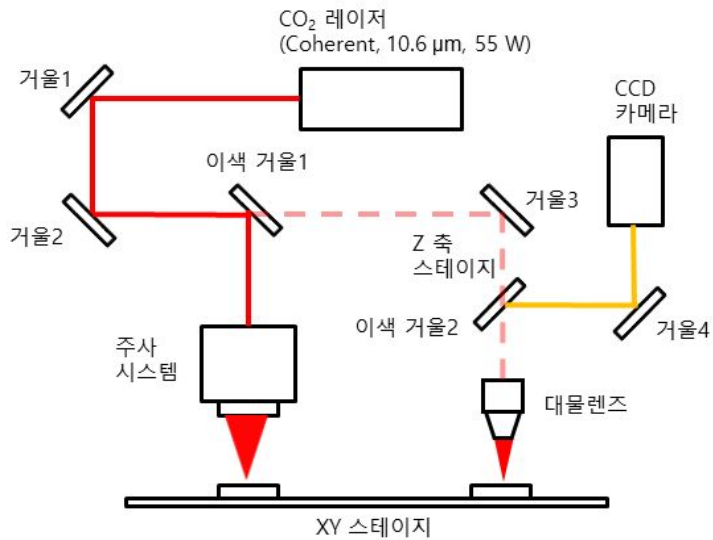


그림 14. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 시스템 모식도

다음 그림 14는 실험에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저의 시스템 모식도를 보여주고 있다. CO<sub>2</sub> 레이저는 앞서 사용된 펄스 레이저 시스템과 달리 스캐너 가공 방식을 사용하였다. CO<sub>2</sub> 레이저 광원에서 조사된 레이저를 거울을 이용하여 스캐너나 대물렌즈에 입사될 수 있도록 광 경로를 조절하였다. 이색 거울을 이용하여 레이저 빔의 경로를 선택하는데 사용하였다.

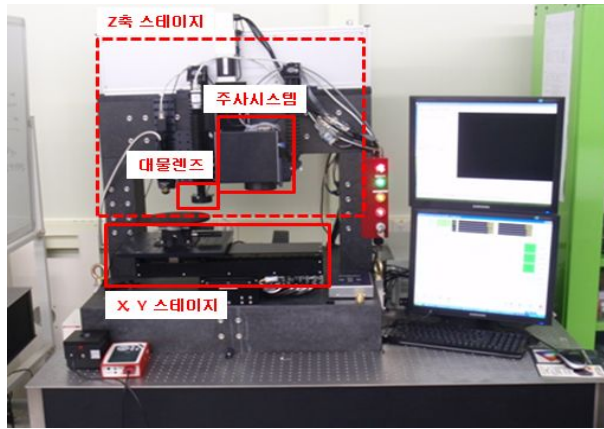


그림 15. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 시스템 모습

그림 15는 펄초 레이저를 이용하여 제작된 광소자의 표면연마를 위하여 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 시스템의 모습이다. 펄초 레이저에서 X, Y축 스테이지를 이용하여 가공하는 방식이 아닌 가공 물질을 고정된 상태에서 레이저 빔이 이동하는 스캐너 가공방법을 사용하였다. 스캐너 가공 방식을 이용한 CO<sub>2</sub> 레이저 연마에 초점거리가 180 mm (f-theta)를 가지는 렌즈를 사용하였다. 물질 표면 연마를 위하여 X, Y 스테이지에 샘플을 고정하여 대물렌즈와 동일한 축에 설치되어 있는 CCD를 이용하여 원하는 위치에 초점을 맞춘 후, 기존에 알고 있는 상대 좌표 값을 스테이지 통제 프로그램에 입력하여 X, Y축 스테이지를 스캐너 아래로 위치시켜 연마를 진행하는 방식을 사용하였다.

## 제 4장 실험결과

### 제 1절 펨토초 레이저 가공기술을 이용한 Fresnel Zone Plate (FZP) 제작 및 특성 연구

#### 1. 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 이용한 실리카 표면 FZP 가공

기존의 FZP 제작 방식에는 리소그래피 공정을 사용하여 많이 제작하였다. 리소그래피 공정을 이용하여 매우 정밀한 FZP를 제작할 수 있는 장점으로 많이 사용되지만 다양한 형상이나 모양을 가지는 패턴 및 소자 제작을 위한 시간이 많이 소요된다. 특히, 리소그래피 공정에서 필요한 마스크를 제작하는 시간이 오래 걸리며, 높은 비용이 요구된다. 이러한 이유로 다양한 분야에서의 리소그래피 공정 적용에 제한적인 요소가 되었다. 리소그래피 공정에서 높은 비용과 많은 시간이 요구되는 마스크 제작 과정을 대체하기 위하여 펨토초 레이저 가공을 리소그래피 공정에 적용하였다. 그림 16은 기존의 리소그래피 공정을 이용하여 FZP를 제작하는 과정의 개념도이다. 기존에는 원하는 형상을 가공하기 위해서는 매우 정밀하게 제작된 위상마스크가 필요하였으며, UV 빛을 노광하여 위상마스크를 통과한 부분만 Photoresist (PR)을 반응시켜 형상을 제작하였다.

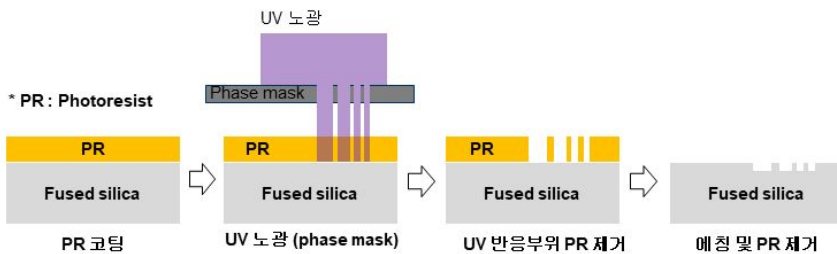


그림 16. 기존의 리소그래피 공정을 이용한 FZP 제작 과정 개념도

이러한 기존의 리소그래피 공정의 방식에서 위상마스크를 이용한 형상 제작 방



식을 펨토초 레이저를 가공 기술을 적용하여 PR에 직접 가공하여 다양한 가공 형상을 손쉽게 제작 가능하며, 위상 마스크 제작 시간 및 비용을 단축할 수 있다. 또한, 기존의 펨토초 레이저 가공 기술과 비교하여 펨토초 리소그래피 공정을 적용한 가공 방식은 레이저 가공에 의해 발생하는 표면 부산물이나 거칠기에 의한 광소자의 효율 감소를 방지할 수 있으며, 정밀한 가공이 가능하다.

FZP는 1030 nm의 중심파장을 가지는 Yb:KGW 펨토초 레이저(모델명 : PHAROS)를 사용하여 제작하였다. 실험에 사용한 펨토초 레이저는 200 kHz의 펄스 반복률을 가지며, 250 fs의 펄스간격으로 극초단 레이저 펄스를 방출한다. 또한, FZP 제작을 위해 가시광선 파장부근에서 90% 이상의 투과율을 가지는 실리카를 사용하였다. 레이저를 집속시키기 위해 20 배율을 (NA = 0.4) 가지는 대물렌즈를 사용하였다. 리소그래피 공정을 위해 사용된 PR물질은 UV파장의 빛을 노광시켰을 때, 빛에 노출된 부분이 화학적인 분해로 인해 노광 후 현상액에 씻겨나가는 PR을 사용하였다. 본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면과 펨토초 레이저 리소그래피 공정으로 FZP를 제작하였으며, 그 특성을 확인하여 비교하였다.



그림 17. 펨토초 레이저를 이용한 FZP 가공 개념도, (a) 펨토초 레이저 리소그래피 공정, (b) 펨토초 레이저 어블레이션 공정

그림 17은 펨토초 레이저를 이용하여 FZP 제작 개념도이다. 그림 17(a)는 펨토초 레이저 가공 기술을 리소그래피 공정에 적용하여 실리카 표면에 FZP를 제작한 것이며, 그림 17(b)는 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 실리카 표면에 FZP 가공 방식을 개념도로 표현한 것이다. 그림에서처럼 펨토초 레이저 가공 방식을 리소그래피 공정에 적용하여 FZP 제작하였으며, 펨토초 레이저 가공 기술을 이용하여 실리카 표면에 직접 가공하여 FZP를 제작하는 실험을 진행하였다. 펨토초 레이저

가공 기술을 리소그래피 공정에 적용하기 전에 여러 단계의 공정 과정을 거쳤다. 처음에는, 실리카 물질의 먼지 및 이물질 제거를 위해 초음파 세척을 진행하였으며, 그 다음 스핀코터 장비에 실리카를 고정된 후, 2500 rpm의 회전속도로 10초간 회전시켜 표면에 헥사메틸디실라젠 (HMDS)를 증착시켰다. PR (AZ GXR 601) 박막 증착을 위해서, HMDS가 증착된 실리카 위에 PR물질을 도포하였으며, 처음에는 500 rpm의 속도로 1초간 회전 시킨 후, 회전속도를 올려 4500 rpm에서 40초간 회전시켜 증착하였다. 실험에 사용된 PR은 310 ~ 440 nm의 파장에서 민감하게 반응하는 종류를 사용하였다.

스핀 코터를 사용하여 증착된 액체상태의 PR을 고체 상태로 만들기 위하여 체임버를 사용하여 90°C 온도에서 1분간 가열한 후, 핫플레이트를 사용하여 120°C의 온도에서 2분간 열로 굽는 과정을 진행하였다. 그런 다음, 펄스 레이저를 이용하여 PR 표면에 원하는 FZP의 패턴 모양으로 레이저 빔을 조사하여 레이저 빔이 지나간 부분의 PR만을 제거하였다. 이때의 펄스 레이저의 펄스에너지는 110 nJ로 면적당 출력은 78 mW/cm<sup>2</sup>, 면적당 피크 출력은 1.5 MW/cm<sup>2</sup>로 설정하였다. 1 mm/s의 일정한 속도로 스테이지를 이동시켰으며, 초점거리가 50 mm를 가지는 FZP 환 패턴을 이용하여 가공하였다.

FZP의 미세 패턴이 가공된 실리카를 에칭 액에 6분 동안 담가두어 PR이 제거된 부분의 실리카만 반응하게 하였다. 그러한 과정 다음, 실리카 위에 증착된 PR을 제거하는 과정을 거쳤으며, PR제거 용액 (EKC 830)에 10분 동안 담가두어 PR 및 HDMS층을 완전히 제거하였다.

FZP 형상 제작을 위하여 식 (2-1-2)를 이용하여 50 mm의 초점거리를 가질 때의 FZP의 각 차수의 환의 반지름 길이를 계산하였으며, 계산을 통해 구해진 환의 반지름으로 가공된 FZP를 사용하여 초점거리 측정 하였다. 초점거리 측정을 통해 계산 값에서 설정한 50 mm의 초점거리를 가지는 FZP가 제작되었음을 확인 할 수 있었다.

FZP 환 개수 : 40개			FZP 초점길이 : 50 mm			단위 : mm		
1번	시작	0	2번	시작	0.2516	3번	시작	0.3558
	끝	0.1779		끝	0.3081		끝	0.3977
4번	시작	0.4357	5번	시작	0.5031	6번	시작	0.5625
	끝	0.4706		끝	0.5336		끝	0.5899
7번	시작	0.6162	8번	시작	0.6656	9번	시작	0.7115
	끝	0.6413		끝	0.6889		끝	0.7334
10번	시작	0.7547	11번	시작	0.7955	12번	시작	0.8343
	끝	0.7753		끝	0.8151		끝	0.8531
13번	시작	0.8714	14번	시작	0.907	15번	시작	0.9412
	끝	0.8894		끝	0.9243		끝	0.9579
16번	시작	0.9743	17번	시작	1.006	18번	시작	1.037
	끝	0.9904		끝	1.022		끝	1.052
19번	시작	1.067	20번	시작	1.097	21번	시작	1.125
	끝	1.082		끝	1.111		끝	1.139
22번	시작	1.153	23번	시작	1.18	24번	시작	1.206
	끝	1.166		끝	1.193		끝	1.219
25번	시작	1.232	26번	시작	1.258	27번	시작	1.283
	끝	1.245		끝	1.27		끝	1.295
28번	시작	1.307	29번	시작	1.331	30번	시작	1.355
	끝	1.319		끝	1.343		끝	1.366
31번	시작	1.378	32번	시작	1.401	33번	시작	1.423
	끝	1.389		끝	1.412		끝	1.434
34번	시작	1.445	35번	시작	1.467	36번	시작	1.488
	끝	1.456		끝	1.478		끝	1.499
37번	시작	1.509	38번	시작	1.53	39번	시작	1.551
	끝	1.52		끝	1.54		끝	1.561
40번	시작	1.571						
	끝	1.581						

표 11. FZP 제작 크기 및 환의 개수 설정

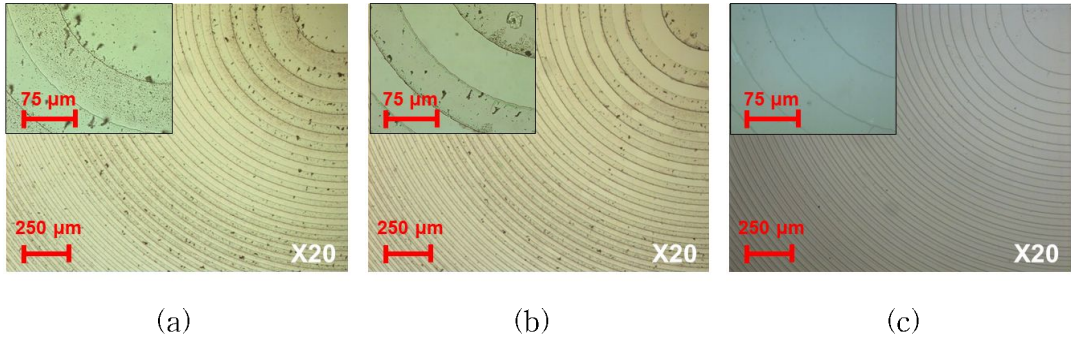


그림 18. 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 가공한 FZP 측정 결과, (a) PR 표면 레이저 가공, (b) 식각 후 FZP, (c) 전체 PR 제거 후 FZP

그림 18은 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 가공한 FZP 제작 단계를 광학 현미경을 이용하여 측정한 사진이다. 광학 현미경 측정 사진을 통해 제작된 FZP의 형상 및 표면 상태를 확인할 수 있었으며, 그림 18(c)에서 확인할 수 있듯이 깨끗하고 정밀한 FZP가 제작 되었다.

펨토초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 제작된 FZP의 특성을 확인하기 위하여 중심파장이 633 nm를 가지는 He-Ne 레이저 (THORLABS, HRP020)를 사용하였으며, 32  $\mu$ W의 레이저 출력을 사용하여 제작된 FZP에 입사시켰으며, 투과된 레이저 빔은 DUMA OPTRONICS사의 빔 프로파일러 (모델명 : Beam On HR)를 사용하여 측정하였다.

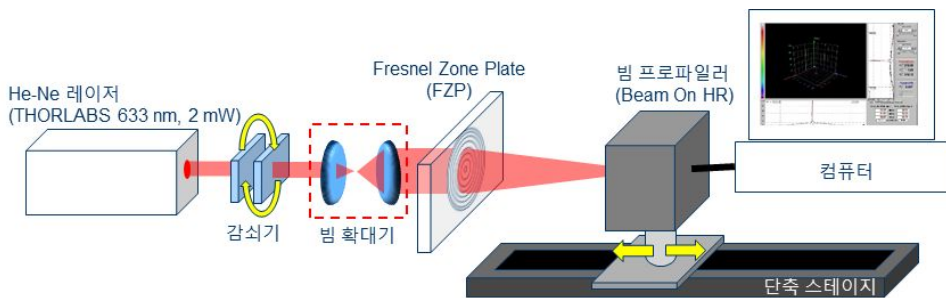


그림 19. 제작된 FZP 초점 크기 및 세기 측정 개념도

위의 그림 19는 레이저를 이용하여 제작된 FZP의 거리별 초점 크기 및 세기를 측정하기 위한 개념도 이다. He-Ne 레이저에서 나온 빔은 두 개의 편광기로 이루어진 감쇠기를 통해 레이저의 세기를 조절하였으며, FZP의 크기에 맞도록 빔확대기를 사용하여 레이저 빔을 크기를 변경하였다. 크기가 변경된 레이저 빔을 펄스초 레이저를 이용하여 제작된 FZP에 투과 시켰으며, 맞은편에 빔 프로파일러를 설치하여 투과된 레이저 빔을 측정하였다. 단축 스테이지를 이동시켜 거리별 FZP의 초점크기와 세기 변화를 측정하였다.

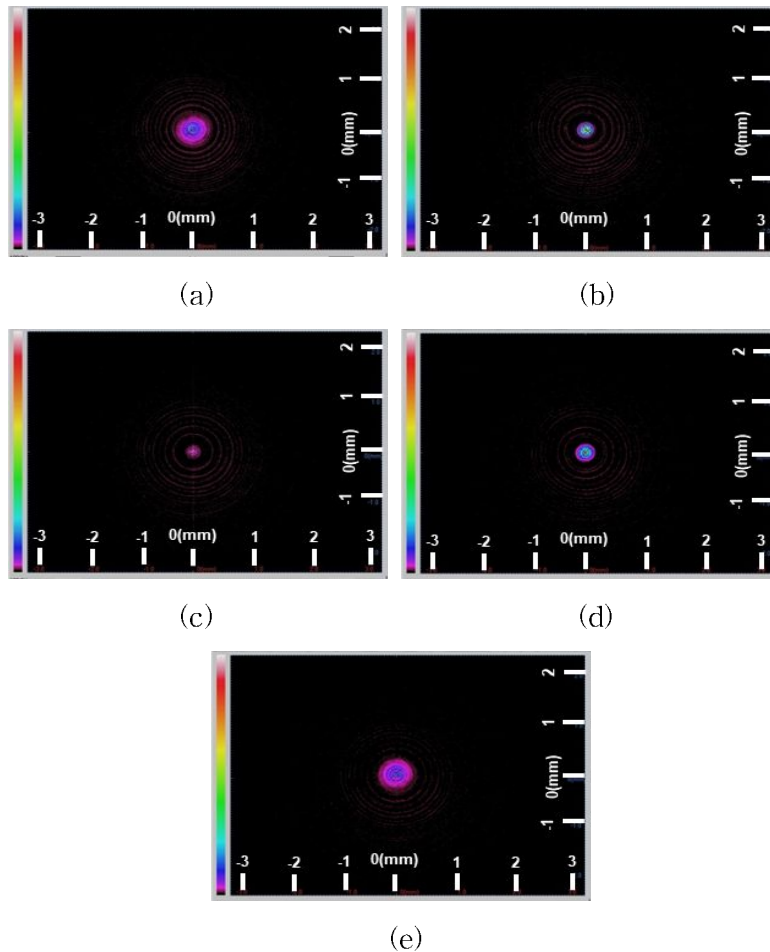


그림 20. 초점거리에 따른 FZP 초점 크기 변화, (a) 초점거리 40 mm, (b) 초점거리 45 mm, (c) 초점거리 50 mm, (d) 초점거리 55 mm, (e) 초점거리 60 mm

빔 프로파일러를 사용하여 FZP를 통과한 후의 레이저 빔의 프로파일을 측정하였다. 또한, 사용된 He-Ne 레이저의 입력과 FZP를 통과후의 출력을 측정하여 회절효율을 계산하였다. 회절효율 계산을 위하여 파워미터 (PM100D)를 사용하여 입력파워는 FZP에 입사하기 전의 바로 앞에서 측정하였으며, 출력파워는 FZP의 초점위치에서 측정하였다.

그림 20은 펄스초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 가공된 초점거리가 50 mm를 가지는 FZP의 거리 변화에 따른 초점 크기를 확인 하였다. FZP를 통과하여 집속된 레이저를 빔 프로파일러를 사용하여 측정하였다. FZP에서 빔프로파일의 거리를 40, 45, 50, 55, 60 mm로 변화하였으며, 집속된 빔 형상 측정 결과 FZP와 빔 프로파일러의 간격이 50 mm일 때, 초점의 크기가 매우 작게 측정되었다.

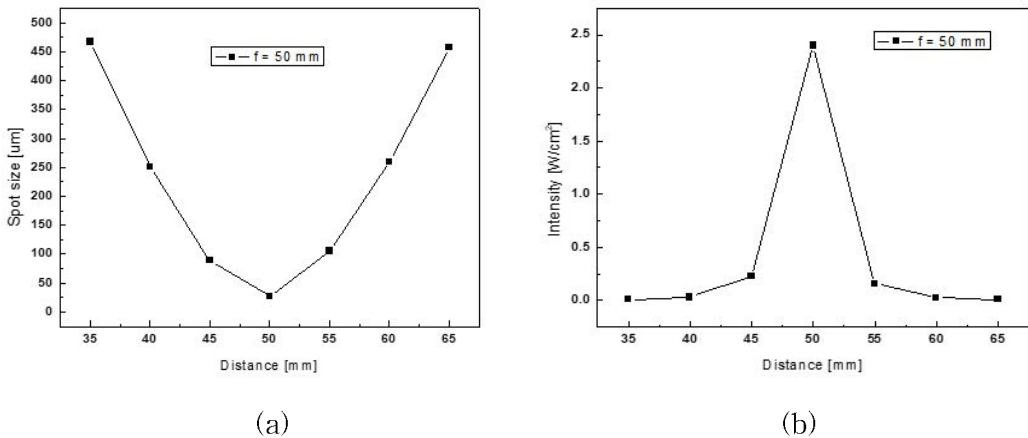


그림 21. 펄스초 레이저 가공 기술을 리소그래피 공정에 적용하여 제작된 FZP의 거리에 따른 초점 크기 및 세기 변화, (a) 거리에 따른 초점크기 변화, (b) 거리에 따른 세기변화

그림 21은 위의 빔 프로파일러를 이용하여 측정한 거리별 초점 크기와 세기를 그래프로 정리한 것이다. 그림 21(a)는 거리 변화에 따른 초점 크기를 나타낸 것으로 측정 결과에서 확인할 수 있듯이 초점위치인 50 mm에 가까워질수록 초점의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있었으며, 초점의 크기가 가장 작았을 때의 크기는

25  $\mu\text{m}$ 로 측정 되었다. 그림 21(b)는 거리 변화에 따른 레이저의 세기를 측정하는 것으로 초점크기가 줄어들어 따라 레이저의 세기가 초점거리인 50 mm에서 가장 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

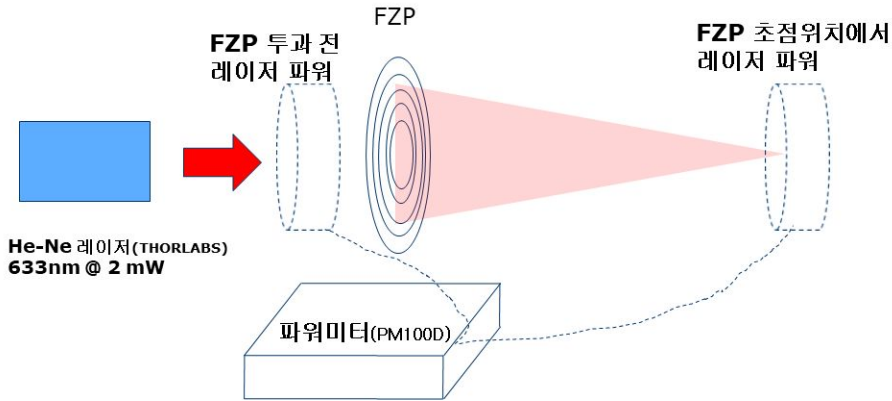


그림 22. 펨토초 레이저를 이용하여 제작한 FZP의 효율 측정 개념도

또한, 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 제작된 FZP의 효율 측정을 위하여 파워미터 (PM100D)를 사용하여 입력과 출력 위치에서의 레이저 파워를 측정하였다. 그림 21은 펨토초 레이저 리소그래피 공정으로 제작된 FZP의 입력 레이저 파워와 초점 거리에서 레이저 파워를 측정한 개념도이다. 입력단의 레이저 파워는 FZP로 입사되기 바로 앞에서 확인 하였으며, 출력단의 레이저 파워는 FZP를 투과한 후, 집속되는 초점거리 위치에서 측정하였다. 먼저, 펨토초 레이저 리소그래피 공정으로 제작된 FZP의 효율을 측정하였다. FZP에 투과하기 전 He-Ne 레이저의 파워는 26.4  $\mu\text{W}$ 이었으며, FZP 투과 후의 초점 위치에서 약 3.2  $\mu\text{W}$ 로 측정되었다. 측정된 결과를 바탕으로 FZP의 효율을 계산한 결과, 약 12.1%의 효율을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

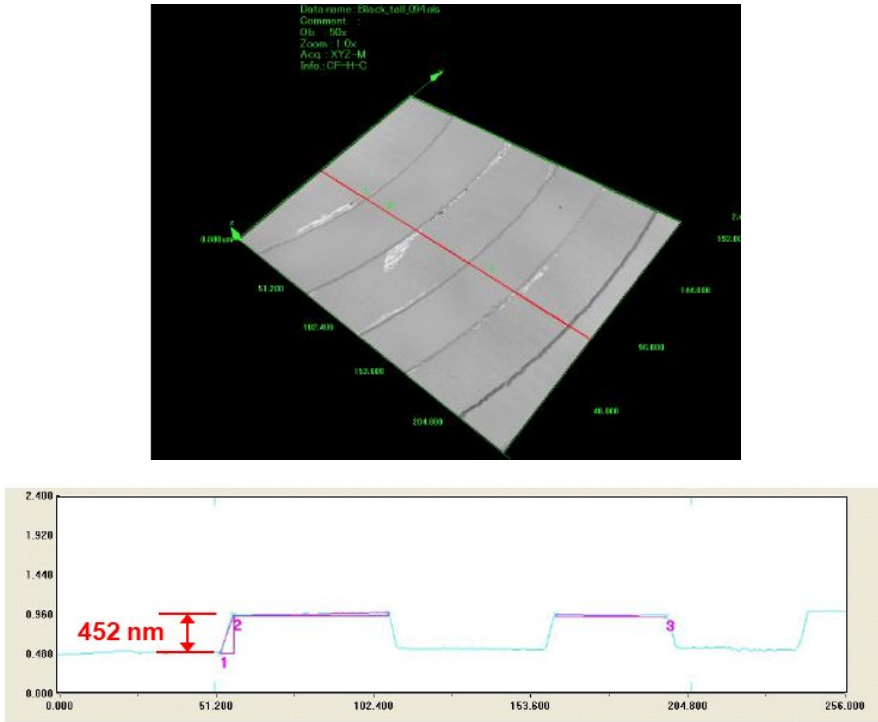


그림 23. 공초점 현미경을 이용한 FZP 가공 깊이 측정

그림 23은 공초점 현미경을 사용하여 펨토초 레이저 리소그래피 공정으로 제작된 FZP의 가공 깊이를 측정하였다. 공초점 현미경 측정을 위해 50 배율을 가지는 대물렌즈를 사용하였다. 측정결과 제작된 FZP의 가공 깊이가 약 452 nm로 측정되었다.



## 2. 펨토초 레이저 어블레이션 공정을 이용한 실리카 표면 FZP 가공

앞서, 펨토초 레이저 리소그래피 공정으로 FZP를 제작하였으며, 그 특성을 확인하였다. 펨토초 레이저 어블레이션 공정을 이용하여 실리카 표면에 FZP를 제작하였다. 실리카 표면에 FZP를 제작하기 위하여 위 실험과 동일한 펨토초 레이저 (모델명 : PHAROS)를 사용하였다. 펨토초 레이저를 사용하여 실리카 표면 FZP 제작을 위하여 20배율을 가지는 대물렌즈 (NA = 0.4)를 사용하여 레이저를 집속시켰으며, 이때의 펨토초 레이저의 펄스에너지는 3.5  $\mu\text{J}$ 로 평균 파워 밀도는 2.4  $\text{W}/\text{cm}^2$ , 첨두 파워 밀도 49  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 로 설정하여 FZP를 가공 하였다. FZP의 환의 개수와 초점거리는 앞선 표 11의 조건과 동일하게 적용하였다. 가공 방식은 레이저 빔은 고정하고, 정밀스테이지에 가공 물질인 실리카를 고정하여 스테이지를 원하는 형상으로 이동시켜 가공 하는 방식을 적용하였으며, 스테이지의 이송 속도는 1 mm/s로 일정하게 이동이 가능하게 설정하였다.

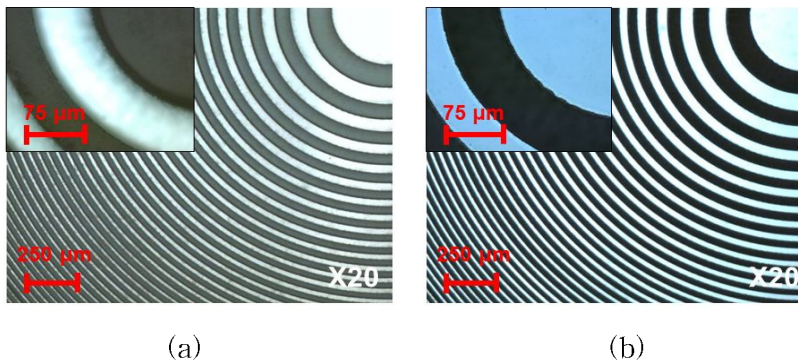


그림 24. 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 제작된 실리카 표면 FZP 광학 현미경 측정 결과, (a) 펨토초 레이저 가공 후, (b) 세척 후 FZP

그림 24는 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 실리카 표면에 제작된 FZP를 광학 현미경을 사용하여 측정한 결과이다. 그림 24(a)는 펨토초 레이저를 이용하여 FZP를 제작한 다음이며, 환과 환 사이에 미세 유리 가루 부산물이 채워져 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 미세 가공 부산물 제거를 위하여 초음파 세척과정을

을 진행하였으며, 세척을 통해 환과 환 사이의 미세 유리 가루는 깨끗하게 제거됨을 그림 24(b)를 통해 확인할 수 있었다. 또한, 광학 현미경 측정 결과를 통해 실리콘 표면에 초점거리 50 mm를 가지는 FZP가 제작이 가능함을 확인할 수 있었다.

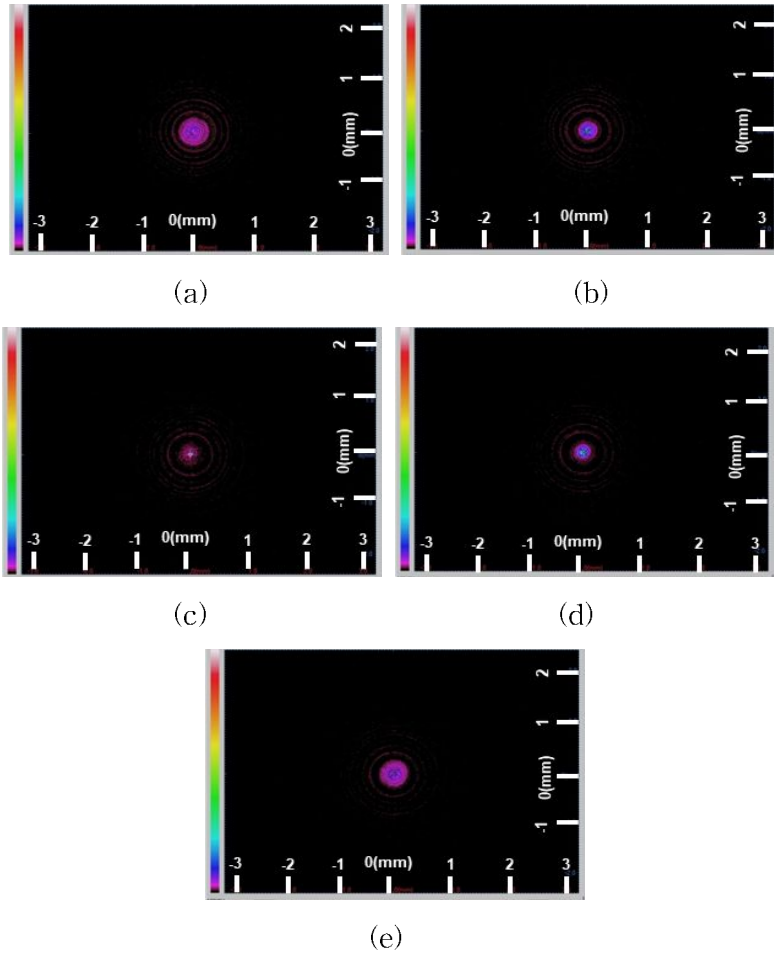


그림 25. 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 제작된 실리콘 표면 FZP의 거리변화에 따른 초점 크기 변화, (a) 초점거리 40 mm, (b) 초점거리 45 mm, (c) 초점거리 50 mm, (d) 초점거리 55 mm, (e) 초점거리 60 mm

펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 실리콘 표면에 제작된 FZP의 특성을 확인하기 위하여 He-Ne 레이저를 조사하였다. FZP를 투과하여 나온 He-Ne 레이저를

빔 프로파일러를 사용하여 거리변화에 대한 빔 형상 변화를 확인 하였다. FZP를 투과하여 집속되는 부근에 빔 프로파일러를 위치시켜 측정하였다. FZP와 빔 프로파일러와의 거리는 40, 45, 50, 55, 60 mm로 변화시켰다. FZP와 빔 프로파일러의 거리가 초점거리보다 가까울 때의 He-Ne 레이저 빔이 집속하지 않았으며, 초점거리에 점차 가까워질수록 집속된 빔의 크기가 줄어들음을 확인할 수 있었다. 초점거리인 50 mm에서 초점의 크기가 매우 작았으며, 초점 범위를 벗어나 멀어질수록 레이저의 크기가 커지는 것을 알 수 있었다. 빔 프로파일러를 사용하여 측정한 자료를 바탕으로 거리에 따른 초점크기와 세기에 대한 그래프를 작성하였다.

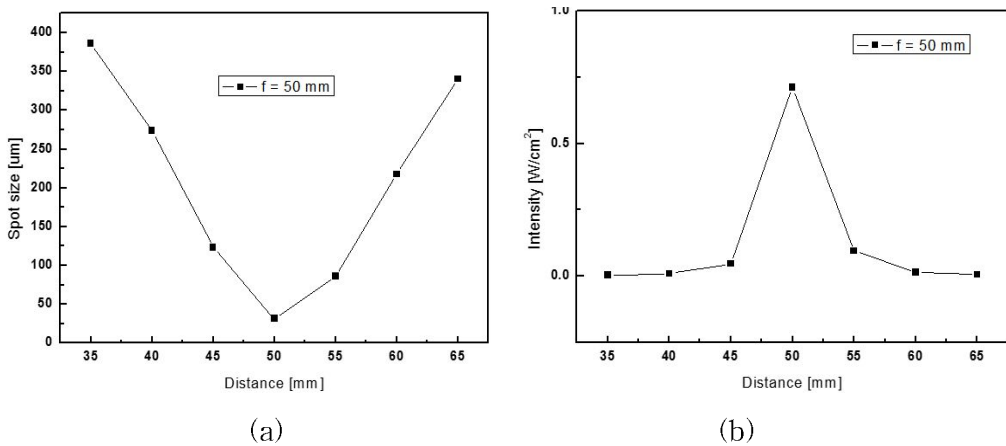


그림 26. 펄초 레이저 어블레이션 공정으로 실리카 표면에 제작된 FZP의 거리에 따른 초점 크기 및 세기 변화, (a) 거리에 따른 초점크기 변화, (b) 거리에 따른 세기 변화

FZP는 고정시키고, 빔 프로파일러의 거리를 변화함에 따라 FZP에 의해 집속되는 빔의 크기가 변화함을 확인할 수 있었으며, 초점거리 위치인 50 mm에서 초점의 크기가 매우 작아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 50 mm에서 초점의 크기는 약 25 μm이었다.

또한, 레이저의 효율을 측정하기 위하여 FZP의 입력과 출력 값을 파워미터 (PM100D)를 사용하여 측정하였다. 입력파워 측정 위치는 He-Ne 레이저가 FZP로 들어가기 전에 파워미터를 위치시켜 측정하였으며, 출력 파워는 FZP의 초점부근에

서 측정하였다. FZP로 입사하기 전의 He-Ne 레이저 파워는 26.3  $\mu\text{W}$ 이었으며, FZP를 통과 후 초점 부근에서는 2.3  $\mu\text{W}$ 로 측정되었다. 입력과 출력의 레이저 파워를 이용하여 효율을 계산하였으며, 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 FZP를 제작 하였을 때, 약 8.7%의 효율을 가지는 것을 알 수 있었다.

또한, 공초점 현미경을 사용하여 표면에 가공된 FZP의 가공 깊이를 측정하였다. 측정을 위하여 50배율을 가지는 대물렌즈를 사용하였으며, Z축 높이를 변화시켜 가공 깊이를 측정하였다. 공초점 현미경을 통해 실리카 표면에 가공된 FZP의 가공 깊이는 약 7.4  $\mu\text{m}$ 로 확인 되었다.

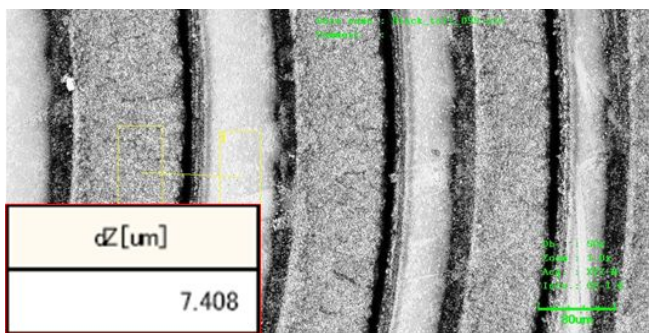


그림 27. 공초점 현미경을 이용한 실리카 표면에 제작된 FZP 가공 깊이 측정

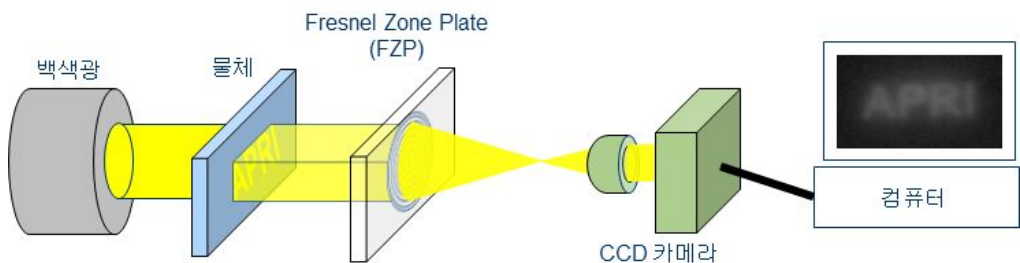


그림 28. 레이저로 제작된 FZP를 사용한 물체 이미지 측정 개념도

펨토초 레이저 어블레이션 공정과 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 사용하여 실리카 표면에 FZP를 제작하였다. 각 방식에 대해 제작과정의 차이는 있지만, 실리카 물질에 초점거리 50 mm를 가지는 FZP를 제작할 수 있었다. 이렇게 두 가지 방식으로 제작된 FZP의 렌즈 특성을 확인하기 위하여 물체의 이미지를 조사시켜 이

미지 재생 실험을 진행하였다. 그림 28은 각 각의 조건별로 제작된 FZP를 사용하여 물체의 이미지를 측정하는 방법을 개념도로 표현한 것이다.

이미지 측정에 사용된 이미지는 직접 제작하였으며, 플라스틱 기판에 알루미늄으로 얇게 코팅된 물질을 사용하였다. 펨토초 레이저를 이용하여 얇게 코팅된 알루미늄만 제거하였으며, 투명한 플라스틱 기판으로 인해 반대편에서 백색광을 조사하였을 때, 알루미늄이 제거된 부분에서만 빛이 투과하도록 제작하였다.

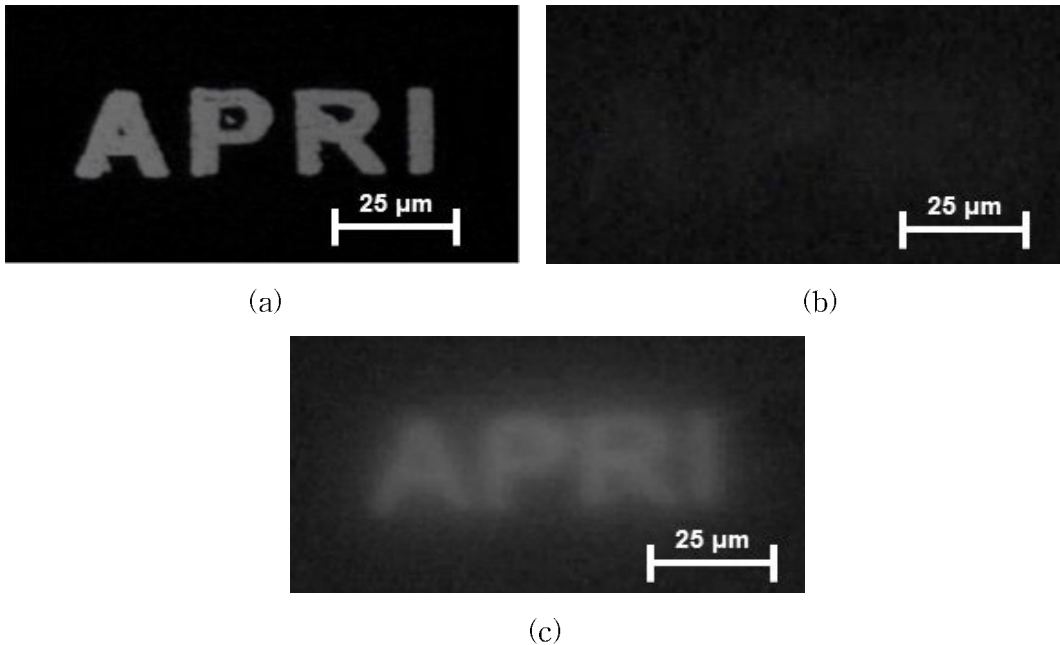


그림 29. 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 FZP의 이미지 재생 측정 결과, (a) 물체, (b) 펨토초 레이저 어블레이션 공정으로 실리카 표면에 제작된 FZP, (c) 펨토초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 제작된 FZP

그림 29는 레이저를 이용하여 제작된 FZP를 이용하여 물체의 이미지를 측정한 결과이다. 그림 29(a)는 FZP를 이용하여 측정하기 위해 제작된 물체이며, 그림 29(b), (c)는 각각의 펨토초 레이저 가공 방식을 적용하여 제작된 FZP를 이용하여 물체를 재생한 결과이다. 그림 29(b)는 펨토초 레이저 어블레이션 공정을 사용하여 실리카 표면 제작한 FZP이며, 레이저 가공 부위의 거칠기에 의해 투과된 빛의 양

의 너무 적어 이미지가 선명하게 확인 되지 않았다. 그림 29(c)는 펄토초 레이저 리소그래피 공정을 적용하여 제작한 FZP를 사용하였으며, 펄토초 레이저 어블레이션 공정으로 실리카 표면에 제작한 방식의 FZP보다 이미지 품질이 향상되었음을 확인 할 수 있었다. 하지만, 원래의 물체보다는 이미지가 선명하지 않은 것으로 보아 제작된 FZP의 두께가 너무 얇기 때문일 것이라 생각된다. 펄토초 레이저를 사용하여 제작된 FZP의 선명한 재생 이미지를 얻기 위해서는 각각의 가공 방식에서 효율 향상을 위한 가공 개선이 필요할 것이라 생각된다.

펄토초 레이저 어블레이션 공정을 이용한 실리카 표면 FZP 가공에서는 이미지 및 효율 감소에 영향을 주는 가공 거칠기 제거를 위해 불산 세척 및 CO<sub>2</sub> 레이저 표면 연마의 과정이 추가 될 경우, 더 나은 특성을 보일 것이며, 펄토초 레이저 리소그래피 공정을 적용한 FZP 가공에서는 가공 되는 형상의 깊이나 환의 개수 증가를 통해 효율을 향상 시킬 수 있을 것이라 생각된다.

## 제 2절 펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 회절격자 효율 향상 연구

회절격자 제작을 위하여 실리카 표면위에 반복률이 1 kHz를 가지는 펄토초 레이저를 이용하여 회절격자를 가공 하였다. 실리카 표면에 가공된 회절격자의 선폭이 20  $\mu\text{m}$ 를 가지며, 40  $\mu\text{m}$ 의 주기를 이루도록 격자를 제작하였다. 이때의 펄토초 레이저의 펄스에너지는 7.2  $\mu\text{J}$ 로 면적당 출력은 25  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 면적당 피크 출력은 136  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 로 설정하여 회절격자를 가공 하였으며, 20배율 (NA = 0.4)을 가지는 대물렌즈를 사용하여 펄토초 레이저의 빔을 집광시켜, 실리카 표면에 가공이 가능하도록 초점을 위치 시켰다. 가공 방식은 레이저 빔은 고정된 상태에서 정밀 고속 스테이지에 물질을 고정시켜 이동하는 방식을 적용하였으며, 이번 실험에서는 정밀 고속 스테이지를 1 mm/s의 속도로 일정하게 이동시켜 격자를 제작 하였다.

그림 30은 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면위에 제작한 회절격자 형상을 측정한 결과이다. 제작된 회절격자 형상 측정을 위하여 광학 현미경과 공초점 현미경을 사용하여 가공 형상을 측정하였다. 광학 현미경을 이용하여 측정한 결과 원하는 사양으로 가공이 이루어 졌음을 확인할 수 있었다. 공초점 현미경을 이용하여 가공된 회절격자에 대해 3차원으로 측정하여 자세한 형상을 확인 하였으며, 펄토초 레이저 가공으로 인해 가공 끝 단면에서 물질이 미세하게 떨어져나가는 현상으로 가공된 회절격자의 표면이 깨끗하지 않음을 측정을 통해 확인할 수 있었다. 또한, He-Ne 레이저 (THORLABS, HRP020)를 사용하여 가공된 회절격자의 회절패턴을 확인한 결과, 회절패턴 무늬가 깨끗하지 않고 산란된 빔과 함께 섞여 측정 되었다. 회절패턴에서 회절 패턴 외에 산란된 빔이 함께 보이는 이유가 가공 표면의 거칠기로 인해 발생한 것이라 생각된다.

펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 가공된 회절격자의 효율을 향상시키기 위해 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 거칠기 제거를 위한 연마가공을 진행하였다. 실리카 표면 가공 거칠기를 제거를 위해 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용한 이유는 광주과학기술원 고등광기술연구소의 손익부 박사와 김영섭 박사가 진행한 기존의 연구 중에서 실리카 표면 가공 거칠기 개선 및 클리닝 효과를 위해 CO<sub>2</sub> 레이저 가공 기술을 사용한 연구 결과를 참고하여 사용하게 되었다. 가공 거칠기 개선 및 클리닝 효과를 위해서 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 가공 거칠기를 생성하였으며, AFM

측정을 통해 표면의 거칠기 정도를 측정하였다. 그 후, CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 가공 거칠기가 생성된 실리카 표면에 연마 반복수를 조절하여 연마 반복에 따라 실리카 표면을 관찰 하였다. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수가 증가할수록 실리카 표면의 가공 거칠기가 제거됨을 확인 하였으며, 실리카의 투과율도 개선되었다.

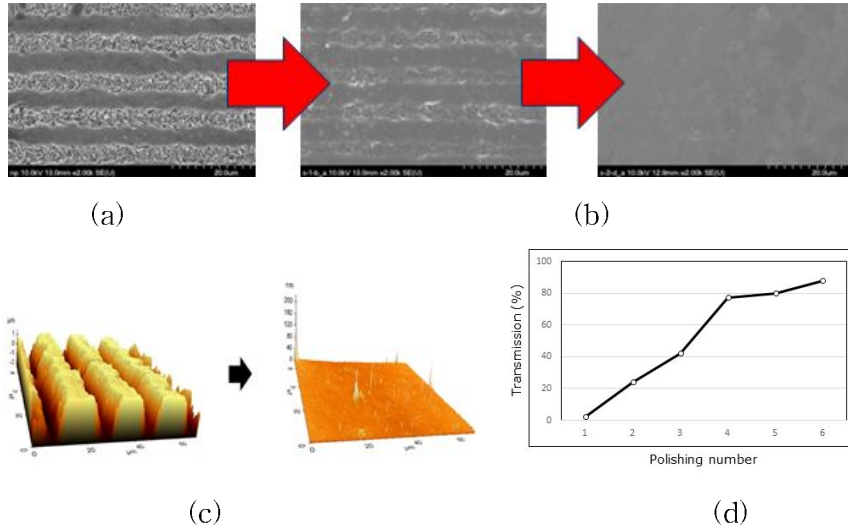
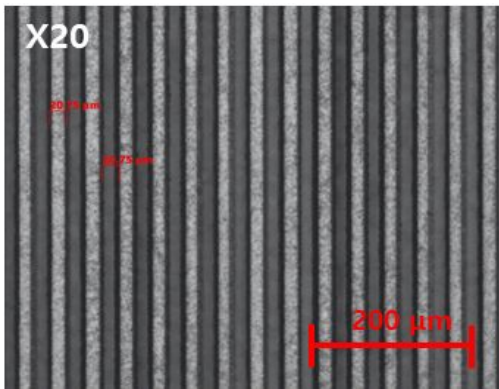


그림 30. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 가공 거칠기 개선 및 클리닝 효과 선행 연구, (a) 펄토초 레이저 가공 (b) CO<sub>2</sub> 레이저 연마, (c) AFM 측정 결과, (d) CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수에 따른 투과율 변화

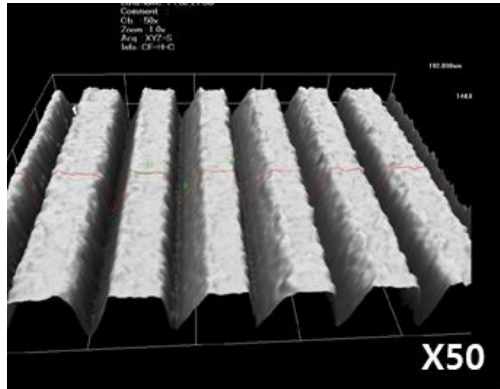
이러한 연구결과를 바탕으로 펄토초 레이저로 가공된 회절격자의 거칠기 제거를 통한 효율 향상을 위하여 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 기술을 적용하였다. 펄토초 레이저를 사용하여 동일한 조건으로 가공된 회절격자에 CO<sub>2</sub> 레이저의 연마 반복수를 조절한 결과를 비교하였으며, 회절패턴 측정을 통해 최적의 연마조건을 확인 하였다.

연마에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저의 파장은 10.6 μm이며, 연마물질은 정밀 스테이지에 고정된 상태에서 레이저의 빔을 이동하는 스캐너 가공 방식을 적용하였다. 초점거리가 170 mm를 가지는 렌즈를 사용하였으며, 4.4 W의 레이저 출력과 100 mm/s의 스캔 속도를 이용하여 실험을 진행하였다. 연마 반복수는 1, 2, 3, 4, 5, 6회로 변화시켰다.

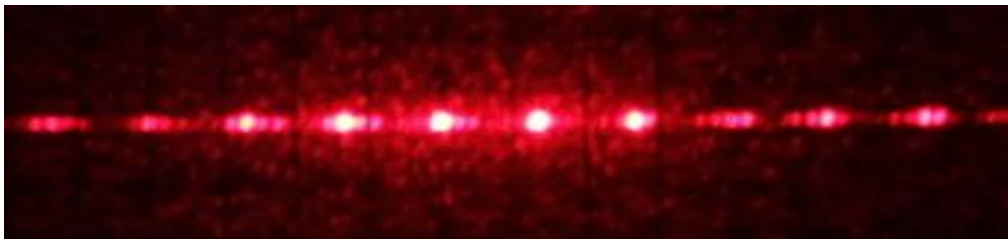




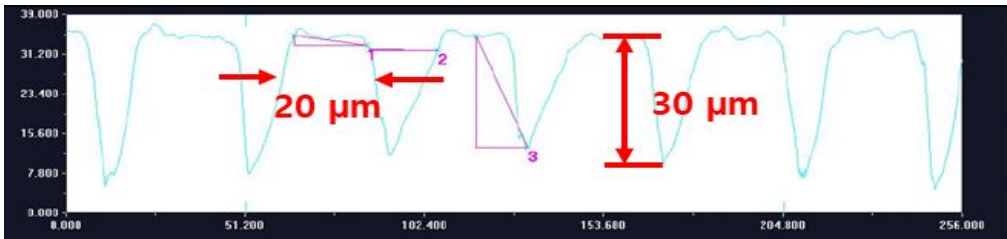
(a)



(b)

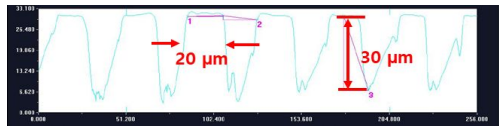
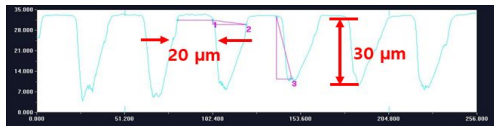
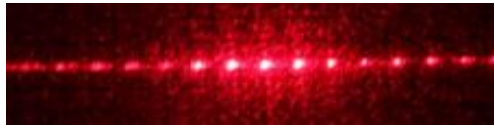
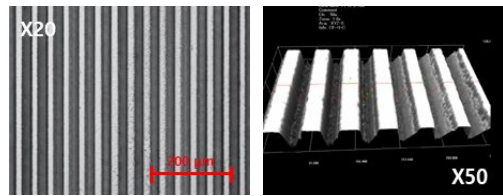
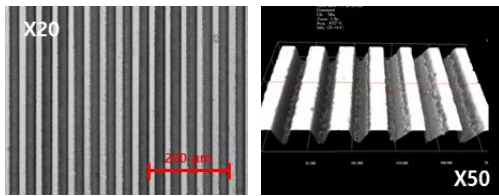


(c)



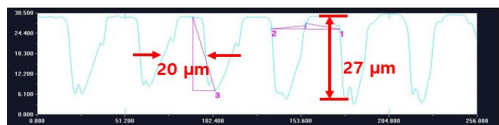
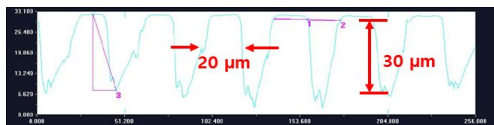
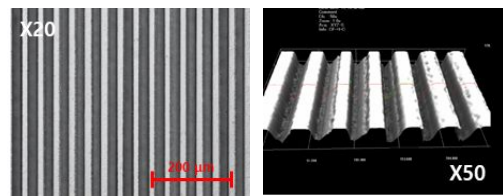
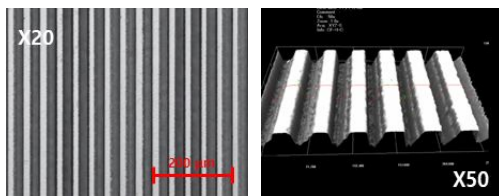
(d)

그림 31. 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 회절격자의 광학 현미경 및 공초점 현미경 측정결과, (a)  $\times 20$  배율 광학 현미경 측정 이미지, (b)  $\times 50$  배율 공초점현미경 측정 이미지, (c) 회절 패턴 측정 이미지, (d) 회절격자 공초점 현미경 프로파일



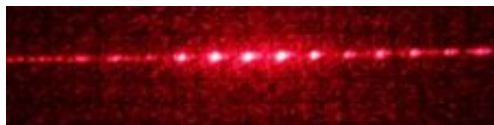
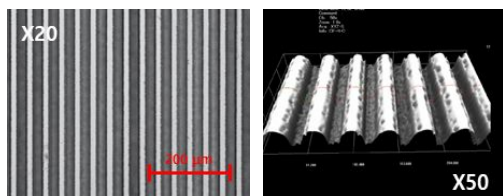
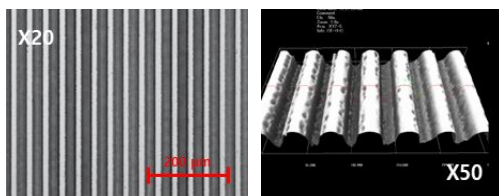
(a)

(b)



(c)

(d)



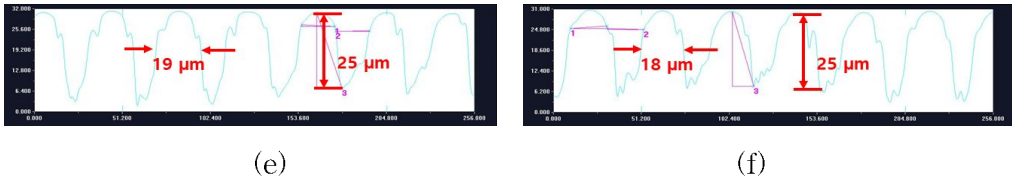


그림 32. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수에 따른 광학 현미경, 공초점 현미경 측정 결과, (a) 연마 반복 1회, (b) 연마 반복 2회, (c) 연마 반복 3회, (d) 연마 반복 4회, (e) 연마 반복 5회, (f) 연마 반복 6회

그림 32는 펄스 레이저를 이용하여 제작한 회절격자의 표면을 CO<sub>2</sub> 레이저로 연마 반복수를 변화시키면서 표면 거칠기를 제거한 결과를 광학 현미경과 공초점 현미경을 사용하여 측정한 사진이다. 연마 반복수가 증가함에 따라 제작된 회절격자의 표면이 깨끗해짐을 확인할 수 있었지만 연마 반복수가 더 증가하게 되면, 회절격자의 표면이 CO<sub>2</sub> 레이저의 의해 변형이 됨을 알 수 있었다. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 연마를 진행함에 따라 표면의 가공 거칠기가 사라짐을 그림 32(a), (b), (c), (d)의 측정 결과를 통해 알 수 있었으며, 연마 반복수가 5회 이상이 되면 CO<sub>2</sub> 레이저에 의해 회절격자의 표면에 변형이 됨을 그림 32(e), (f)로 확인할 수 있었다.

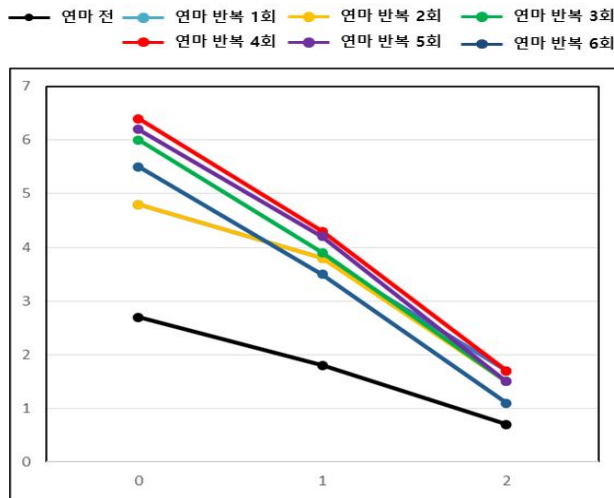


그림 33. 회절격자 연마 전·후 효율 비교 그래프

그림 33은 펄스 레이저로 가공된 회절격자에 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 연마 반복수를 변화시킨 회절격자에 대한 각 차수에 따른 연마 전·후의 효율을 비교한 결과이다. 그래프의 결과에서 알 수 있듯이 연마 전에 비해 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수가 증가 할수록 회절효율이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수가 4회 일 때, 효율이 가장 높은 것을 알 수 있으며, 반복수가 5회 이상일 때부터 효율이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

He-Ne 레이저 출력 890 μW								
연마 반복 수	회절격자 투과 후 출력(μW)	회절 차수의 출력(μW)			회절격자 투과 후 효율(%)	회절 차수의 효율(%)		
		0차	1차	2차		0차	1차	2차
<b>연마 전</b>	<b>157</b>	<b>24.2</b>	<b>15.7</b>	<b>6.4</b>	<b>17.6</b>	<b>2.7</b>	<b>1.8</b>	<b>0.7</b>
연마 반복 1회	264	43.1	33.6	14.8	29.7	4.8	3.8	1.7
연마 반복 2회	264	43.0	33.8	13.1	29.7	4.8	3.8	1.5
연마 반복 3회	270	53.2	35.1	13.3	30.3	6.0	3.9	1.5
<b>연마 반복 4회</b>	<b>291</b>	<b>57</b>	<b>38.3</b>	<b>15.1</b>	<b>32.7</b>	<b>6.4</b>	<b>4.3</b>	<b>1.7</b>
연마 반복 5회	276	54.9	37.8	13.7	31.0	6.2	4.2	1.5
연마 반복 6회	265	49.3	31.2	9.8	29.8	5.5	3.5	1.1

표 12. 회절격자 연마 전·후 각 차수 별 세기 및 효율 비교

표 12는 회절격자 연마 전·후의 각 차수별 세기와 효율을 측정하여 계산한 것이다. 연마를 진행한 회절격자의 각 차수의 세기가 연마 전에 비해 모두 증가한 것을 확인 할 수 있으며, 연마 반복수에 따라 효율이 달라짐을 알 수 있었다.

CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 회절격자 표면연마를 통해 회절효율이 약 15.1% 향상됨을 확인 할 수 있었는데, 회절효율이 향상된 이유는 펨토초 레이저로 제작한 회절격자의 표면 거칠기 클리닝 효과로 효율이 향상된 것으로 생각된다. 측정을 통해 펨토초 레이저를 이용하여 제작 시 발생하는 가공 골 사이의 거칠기 제거는 매우 적었으며, 연마를 통해 회절격자의 표면이 깨끗해져 표면 거칠기에 의해 빛의 산란이 줄어들어 투과 량이 증가하여 향상된 것으로 보인다.

### 제 3 절 레이저를 이용한 MLA 제작 및 특성 연구

#### 1. 실리카 표면 선 가공을 통한 MLA 제작 및 특성 분석

마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 방법 중에 보편적으로 사용되고 있는 방식은 금형기술이다. 금형기술은 동일한 형상을 가지는 물체에 대해 대량 생산이 가능하다는 장점이 있지만, 형상을 실시간으로 다양한 주기 및 크기로 변경하여 제작하기에는 거의 불가능하다. 또한, 다양한 물질의 표면에 제작하는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 손쉽게 다양한 형상을 가지는 마이크로 렌즈 어레이를 제작하고 형상의 주기와 크기를 변경하여 특성 분석평가를 하였다.

실리카 표면에 주기적인 직사각형의 형상을 제작하기 위하여 중심파장이 1030 nm를 가지는 Yb:KGW 펨토초 레이저 (모델명 : PHAROS)를 사용하였다. 펨토초 레이저의 펄스폭은 250 fs, 펄스 반복률은 200 kHz를 가진다. 본 연구는 가시광 영역에서 투과율이 90% 이상을 가지는 실리카 (굴절률 : 588 nm에서 1.458, 두께 : 1 mm)를 사용하였다.

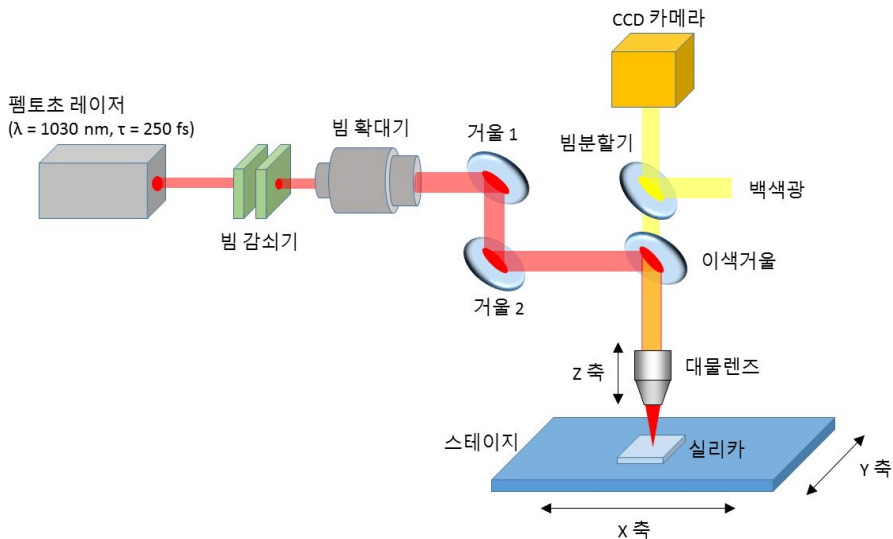


그림 34. 펨토초 레이저를 이용한 실리카 표면 주기적인 형상 제작 개념도

그림 34는 펨토초 레이저를 이용한 실리카 표면 주기적인 형상 제작 개념도이다. 실리카 표면 선 가공을 통한 미세격자를 제작하기 위한 레이저의 출력은 빔 감쇠기를 사용하였으며, 빔 확대기를 통해 빔의 크기를 증가 시켰다. 레이저 빔 경로는 거울을 사용하여 조절하였다. 빔 경로에 설치된 거울을 통해 레이저 빔이 가공에 사용되는 대물렌즈에 입사되게 하였으며, 동일한 축에 CCD 카메라를 설치하여 실시간으로 가공되는 형상을 확인할 수 있게 레이저 가공 시스템을 구성하였다. 실리카 표면 마이크로 격자 제작을 위해 20 배율 (NA = 0.4)을 가지는 대물렌즈를 사용하였으며, 대물렌즈에 의해 맺어진 초점을 실리카의 표면에 위치 시켜 가공 하였다. 실리카 표면 직사각형의 형상 제작을 위해 스테이지 가공 방식을 적용 하였으며, 이 가공 방식은 레이저 빔은 고정된 채, 아래쪽에 위치한 정밀 가공 스테이지를 형상에 맞게 이동하여 가공하는 방식이다.

펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 직사각형의 주기적인 패턴을 가공한 다음, 가공 거칠기 제거 및 렌즈 형상으로 가공하기 위하여 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 표면 연마 가공을 진행하였다. 연마를 위해 사용한 CO<sub>2</sub> 레이저는 Coherent사 (모델명 : C-55L)의 레이저를 사용하였으며, 10.6 μm의 중심파장, 55 W의 최대출력을 가진다.

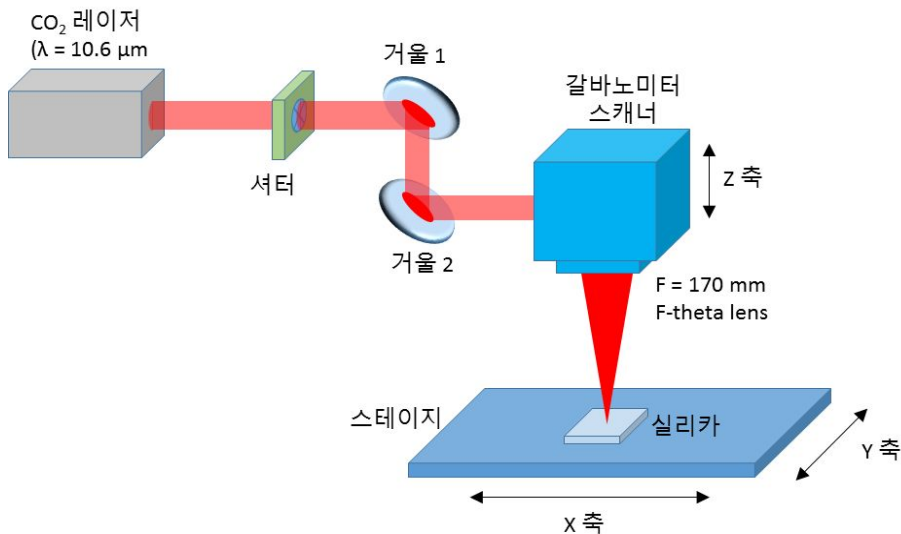


그림 35. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실리카 표면 연마 개념도

CO<sub>2</sub> 레이저 연마를 위하여 스캐너 가공 방식을 적용하였으며, 이 방식은 주기적인 직사각형의 패턴이 가공된 실리카를 스테이지에 고정된 채, 갈바노미터 스캐너를 사용하여 레이저 빔을 움직여 연마하는 방법이다. 갈바노미터 스캐너에 초점 길이가 170 mm를 가지는 F-theta 렌즈를 사용하여 레이저를 실리카 표면에 집속시켰으며, 20 mm/s의 속도를 사용하여 연마를 진행하였다.

펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 실린더 모양의 직사각형을 주기적으로 가공하였다. 패턴의 주기는 40 μm로 가공하였으며, 이때의 펨토초 레이저의 펄스 에너지는 3.57 μJ로 면적당 출력은 2.5 W/cm<sup>2</sup>, 면적당 피크 출력은 50 MW/cm<sup>2</sup>로 설정하였다.

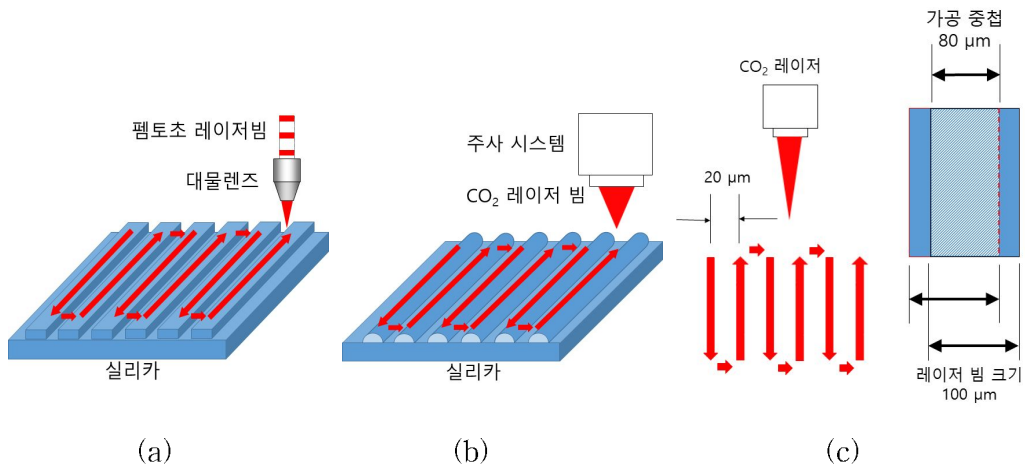


그림 36. 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 가공 개념도, (a) 펨토초 레이저가공, (b) CO<sub>2</sub> 레이저 연마, (c) CO<sub>2</sub> 레이저 연마 빔 중첩

그림 36은 펨토초 레이저와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 가공 개념도이다. 정밀 가공 스테이지를 이용하여 40 μm의 주기로 일정하게 가공하였으며, 가공된 표면을 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 연마를 진행하였다. 초점 거리가 170 mm를 가지는 렌즈를 이용하여 레이저를 집속시켰을 때, 초점의 크기는 약 100 μm임을 알 수 있었다. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 간격은 20 μm로 설정하였으며,



초점크기에 의해 약 80  $\mu\text{m}$  겹쳐서 연마가 진행 되었다. 또한, 연마를 위해서 4.55 W의 레이저 출력을 사용하였으며, 20 mm/s의 스캔 속도로 3번 반복을 하였다.

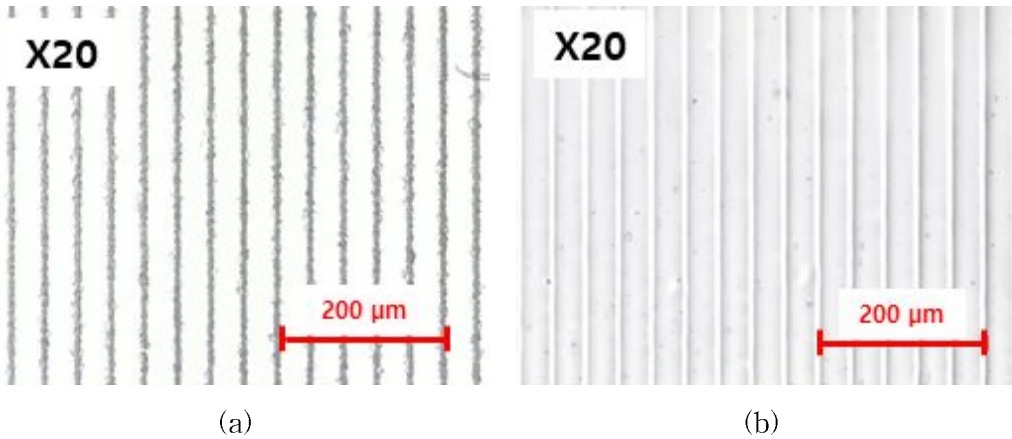


그림 37. 펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 광학 현미경 측정 결과, (a) 연마 전, (b) 연마 후

그림 37(a)는 펄토초 레이저를 이용하여 가공한 실리카 표면을 광학 현미경으로 측정한 것이다. 20배율로 측정을 하였으며, 레이저 가공으로 인해 가공 부위에 거칠기가 존재함을 확인할 수 있었다. 그림 37(b)는 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 표면 연마를 진행한 결과이며, 연마를 통해 가공 거칠기가 제거되었음을 확인할 수 있었으며, 연마를 통해 형상을 조절 할 수 있었다.

레이저를 이용하여 가공된 형상을 확인하기 위하여 공초점 현미경을 사용하여 3차원 이미지로 가공 형상을 측정하였다. 공초점 현미경을 사용하여 측정한 결과 펄토초 레이저와 CO<sub>2</sub> 레이저 가공 전·후의 가공 형상의 차이가 많이 생기는 것을 확인할 수 있었다. 그림 38(a), (b)는 펄토초 레이저 가공 결과와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 연마를 진행 한 후의 실린더 모양의 형상을 공초점 현미경으로 확인한 것이다. 프로파일 형상에서도 알 수 있듯이 연마 전·후의 형상에서 많은 차이가 있는 것을 확인할 수 있으며, 연마를 통해 렌즈 형상을 보이는 것을 알 수 있었다.

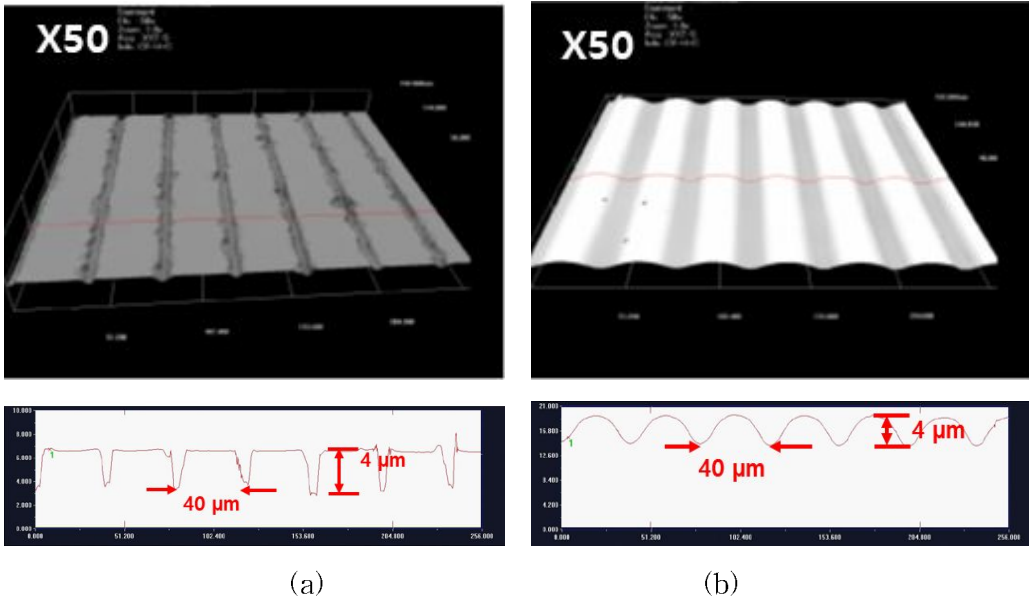
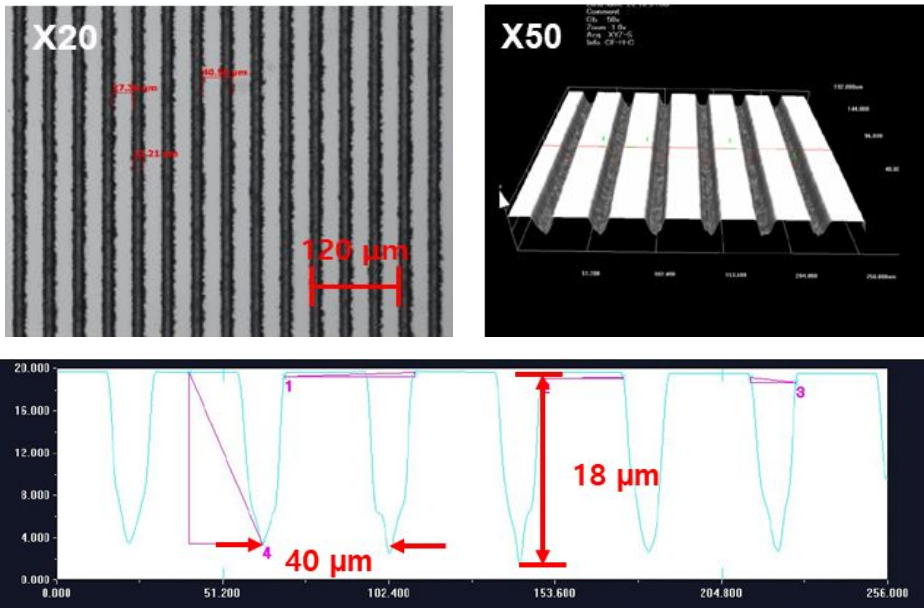


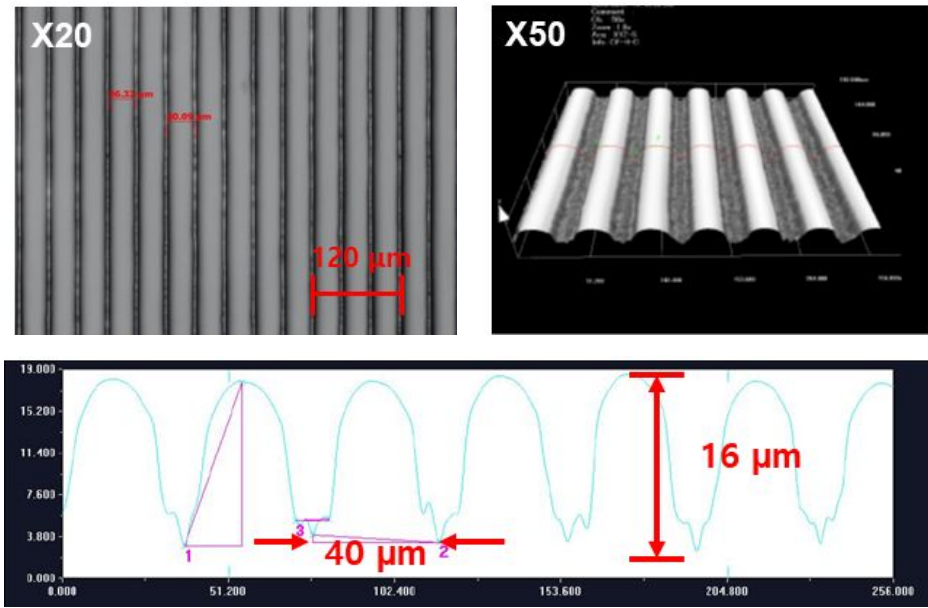
그림 38. 레이저를 이용하여 제작된 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 연마 전·후 공초점 현미경 측정 결과, (a) 연마 전, (b) 연마 후

동일한 레이저 가공방식을 적용하여 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이의 곡률 조절 실험을 진행하였다. 곡률 조절을 위하여 펨토초 레이저를 이용하여 가공하는 깊이를 변화 시켰다. 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이의 깊이 조절을 위하여 펨토초 레이저로 출력과 반복수를 변화시켰다. 렌즈는 40 μm의 크기를 가질 수 있도록 크기 설정하여 가공을 진행하였다. 이때의 펨토초 레이저 펄스에너지는 4.5 μJ로 면적당 출력은 3.1 W/cm<sup>2</sup>, 면적당 피크 출력은 63 MW/cm<sup>2</sup>로 설정하였다.

그림 39은 40 μm의 주기를 가지는 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 제작하여 광학 현미경, 공초점 현미경을 이용하여 측정한 결과이다. 레이저 출력을 높여 가공되는 깊이를 증가하였으며, 가공 깊이를 통해 렌즈의 곡률을 조절하였다. 공초점 현미경 측정을 통해 기존의 가공결과에 비해 더 깊이 가공이 되었음을 확인할 수 있었으며, CO<sub>2</sub> 레이저 연마를 통해 표면이 녹아 연마 전과 깊이가 조금 달라짐을 알 수 있었다. 하지만 앞선 실험과 달리 가공 깊이가 깊어짐에 따라 가공 골 사이의 크기가 좁아 CO<sub>2</sub> 레이저로 거칠기가 제거 되지 않고 표면이 먼저 영향을 받아 렌즈 형상을 보임을 알 수 있었다.



(a)



(b)

그림 39. 40 μm의 주기를 가지는 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과, (a) CO<sub>2</sub> 레이저 연마 전 광학 현미경과 공초점 현미경 측정 결과, (b) CO<sub>2</sub> 레이저 연마 후 광학 현미경과 공초점 현미경 측정 결과

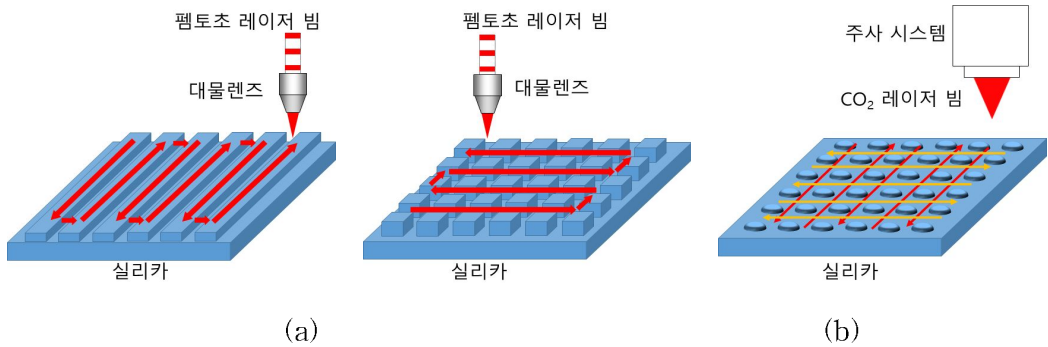


그림 40. 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 가공 개념도, (a) 펨토초 레이저가공, (b) CO<sub>2</sub> 레이저 연마

돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 제작을 위하여 펨토초 레이저를 이용한 가로, 세로의 격자 가공을 통해 정사각형의 주기적인 패턴을 가공 하였다. 사각형의 주기적인 패턴 가공을 위하여 20배율 (NA = 0.4)을 가지는 대물렌즈를 이용하여 가공 하였다. 그림 40(a), (b)에서와 같이 Y축 방향으로 선 가공을 진행한 다음, 가공 축을 변경하여 X축 방향 가공을 통해 실리카 표면에 정사각형의 패턴을 가공 하였다. 이때의 펨토초 레이저의 펄스에너지는 4.5  $\mu\text{J}$ 로 면적당 출력은 3.1  $\text{W}/\text{cm}^2$ , 면적당 피크 출력은 63  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 로 설정하였다.

정사각형 패턴의 크기는 40  $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 의 크기로 가공을 진행하였으며, 가공 형상 측정은 광학 현미경과 공초점 현미경을 사용하여 확인 하였다. 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 정사각형의 패턴을 가공 한 다음, 가공 거칠기 및 렌즈 형상 제작을 위하여 CO<sub>2</sub> 레이저 연마를 진행하였다. 연마 방법은 앞선 실험과 동일하게 스캐너 가공방식을 적용하였으며, 초점거리가 170 mm인 렌즈를 사용하였다. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 정사각형 패턴 연마를 위하여 7.2 W의 레이저 출력을 사용하여 X축과 Y축 방향으로 연마를 진행하였다.

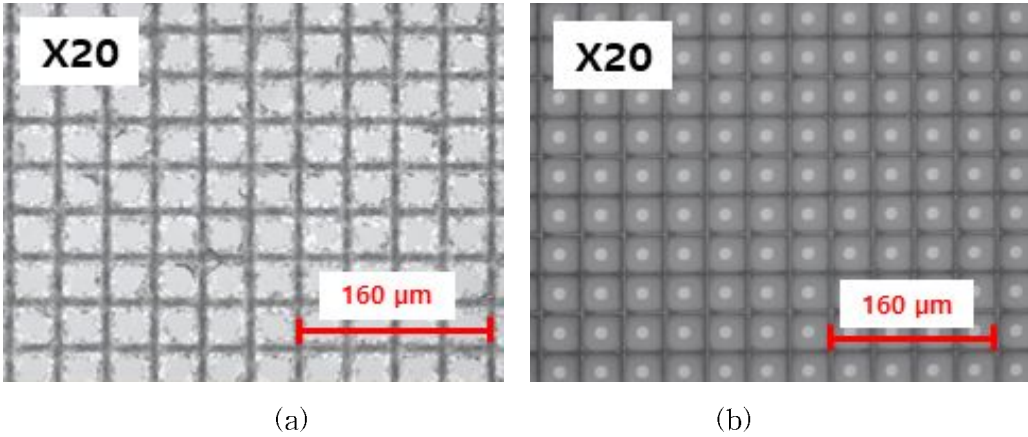


그림 41. 펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 광학 현미경 측정 결과, (a) 연마 전, (b) 연마 후

그림 41(a)는 펄토초 레이저를 이용하여 가공한 실리카 표면을 광학 현미경으로 측정한 것이다. 20배율로 측정을 하였다. 레이저 가공으로 인해 정사각형 패턴의 크기가  $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ 임을 확인할 수 있었으며, 고 반복률의 레이저 펄스에 의해 가공 부위의 일부가 떨어져 나간 형상과 거칠기가 존재함을 확인할 수 있었다. 그림 41(b)는 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 표면 연마를 진행한 결과이며, 연마를 통해 가공 거칠기가 제거되었음을 확인할 수 있었으며, 연마를 통해 형상이 변화되었음을 알 수 있었다.

돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이의 연마 전·후의 가공 형상을 확인하기 위하여 공초점 현미경을 이용하여 3차원 이미지를 확인 하였다. 공초점 현미경에서 50배율을 가지는 대물렌즈를 사용하여 측정하였으며, Z축을 변화시켜 측정한 결과를 합산하여 3차원으로 표현하였다.

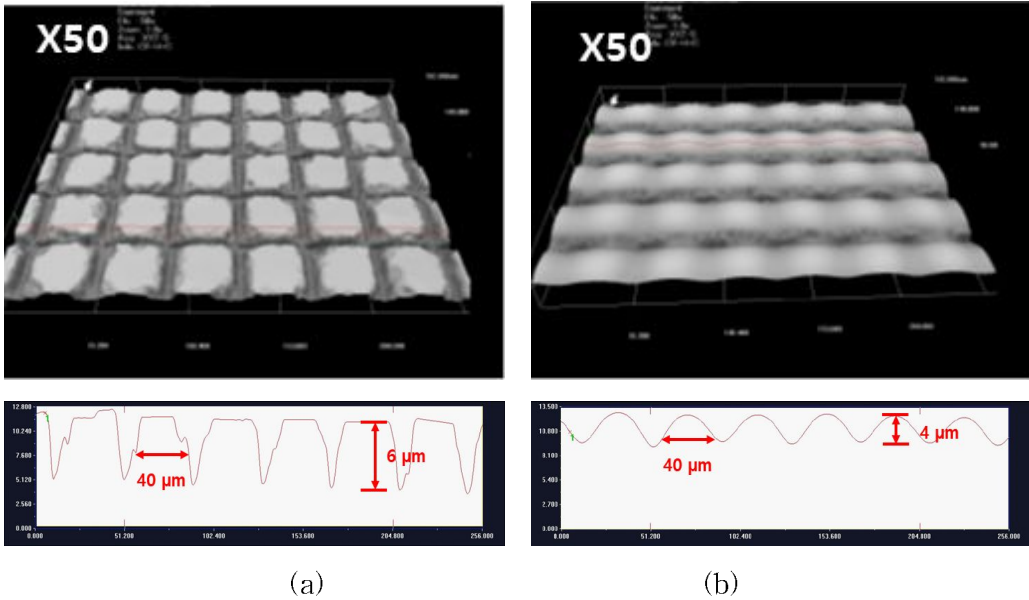
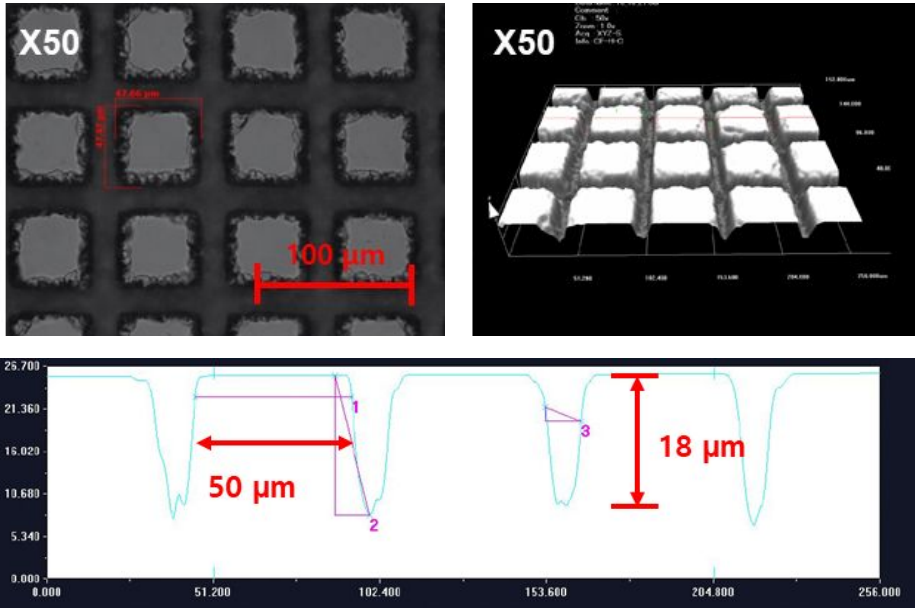


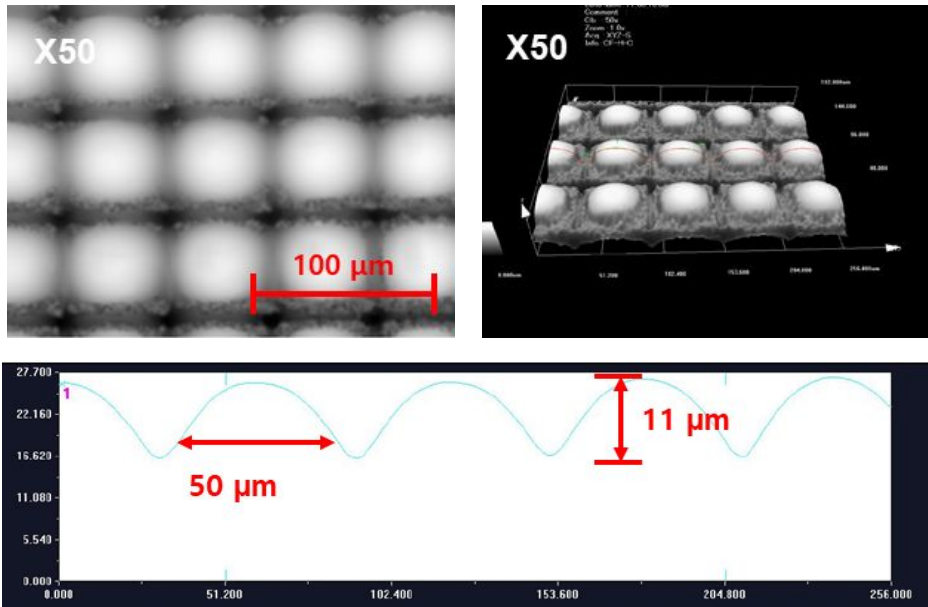
그림 42. 레이저를 이용하여 제작된 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 연마 전·후 공초점 현미경 측정 결과, (a) 연마 전, (b) 연마 후

그림 42(a)는 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 100 μm 주기로 X, Y 방향 가공을 통해 정사각형의 주기적인 패턴을 측정한 결과이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 40 μm × 40 μm의 정사각형의 일정한 크기를 갖지만, 레이저로 가공된 부분에 표면의 깨짐 현상과 거칠기가 존재함을 확인할 수 있었다. 이러한 펄토초 레이저 가공 거칠기를 제거하고, 렌즈의 형상 제작을 위하여 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 가공을 진행하였다. 그림 42(b)는 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 표면 연마를 진행한 결과를 공초점 현미경을 사용하여 측정한 것이다. 연마 전에 비해 가공 거칠기가 없어지고, 렌즈의 형상을 띄는 것을 확인할 수 있었다.

다양한 크기와 곡률 제어를 위하여 펄토초 레이저 가공 조건을 변경하였다. 렌즈의 크기와 곡률은 레이저 가공 주기와 깊이를 변경하여 조절하였다. 먼저, 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 정사각형의 주기적인 패턴을 가공하였으며, CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 표면 연마를 진행하였다. 표면 연마를 위해 레이저의 출력은 7.2 W를 사용하였다. 이때의 펄토초 레이저의 펄스에너지는 6 μJ로 면적당 출력은 4.2 W/cm<sup>2</sup>, 면적당 피크 출력은 84 MW/cm<sup>2</sup>로 설정하였다.



(a)



(b)

그림 43. 50 μm × 50 μm의 크기를 가지는 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과, (a) 펨토초 레이저 가공 결과, (b) CO<sub>2</sub> 레이저 연마 결과

그림 43은 펨토초 레이저를 이용하여 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이를 제작한 다음, 광학 현미경, 공초점 현미경을 사용하여 측정한 결과이다. 곡률을 조절하기 위하여 가공을 깊게 한 결과 정사각형 패턴의 측면 부분이 많이 뜯겨져 나가는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 연마를 진행할 경우 측면 부위가 많이 녹아내려서 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는데 많은 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 하지만 레이저를 이용하여 가공을 깊게 할 경우, 가공 선폭에 비해 깊이가 깊어 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 시 가공 골 사이 깊숙한 부분까지 제대로 연마가 진행되지 않아 거칠기가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 펨토초 레이저 가공을 통한 가공 골 사이의 거칠기가 제거된 마이크로 렌즈 어레이 제작을 위하여 펨토초 레이저를 이용한 선 가공이 아닌 형상 가공을 통해 가공 선폭을 늘렸으며, CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 연마를 진행하여 마이크로 렌즈 어레이를 형성하였다.



## 2. 실리카 표면 렌즈 형상 가공을 통한 MLA 제작 및 특성 분석

펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실리카 표면 선 가공 방법으로는 실린더와 돔 모양 마이크로 렌즈의 크기와 곡률 조절이 제한적이다. 곡률 조절을 위해 가공을 깊게 할 경우, 깊숙한 부분의 거칠기는 제거가 되지 않아 렌즈의 효율이 떨어지는 단점이 있었다. 이러한 한계와 단점을 보완하기 위하여 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 렌즈의 기초 형상을 가공한 다음, CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 표면을 연마하는 방법을 사용하였다. 그림 44는 다양한 곡률을 가지는 마이크로 렌즈 어레이를 제작하기 위하여 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 렌즈 형상을 가공하는 방법의 개념도이다.

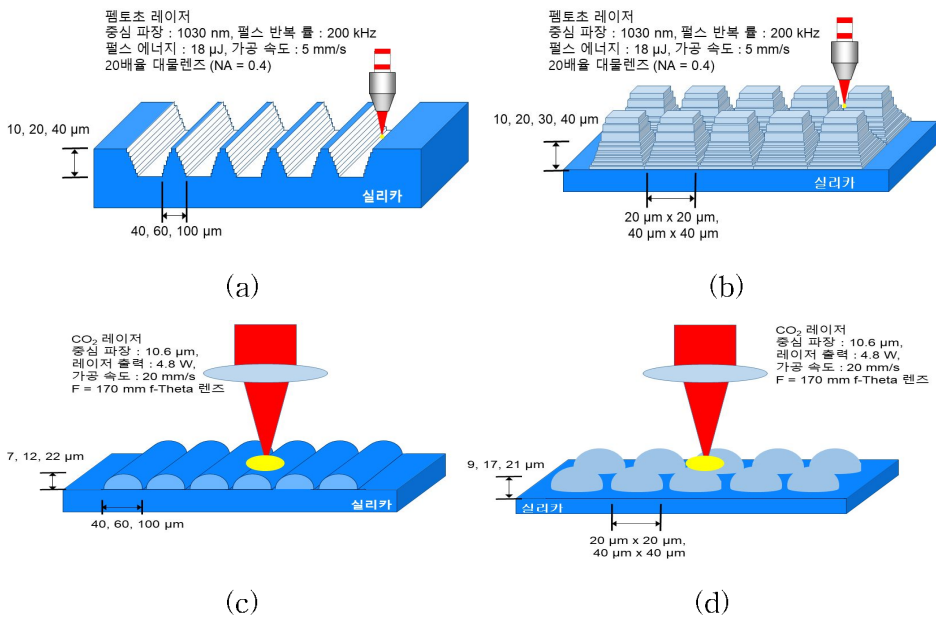


그림 44. 펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실린더와 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 가공 개념도, (a) 실린더 모양 펄토초 레이저 가공, (b) 돔 모양 펄토초 레이저 가공, (c) 실린더 모양 CO<sub>2</sub> 레이저 가공, (d) 돔 모양 CO<sub>2</sub> 레이저 가공

실리카 표면에 펄토초 레이저 빔을 조사하였으며, 렌즈의 크기와 형상에 따라

깊이를 조절하여 가공하였다. 실린더와 돔 모양 두 가지 형상으로 제작하였다. 렌즈의 크기는 20  $\mu\text{m}$ 와 40  $\mu\text{m}$  두 크기로 제작하였으며, 렌즈 크기에 따라 깊이를 변화시켜 가공하였다. 원하는 깊이 가공을 위해서 표면 가공이 끝나면, 반복적으로 Z축 높이를 일정하게 내려가면서 가공하였다. 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 형상 가공을 위해 20배율 ( $\text{NA} = 0.4$ )을 가지는 대물렌즈를 사용하였다. 가공 샘플이 고정된 스테이지가 이동하여 가공하는 방식을 이용하였다. 이때의 펄토초 레이저의 펄스에너지는 9  $\mu\text{J}$ 로 면적당 출력은 6.3  $\text{W}/\text{cm}^2$ , 면적당 피크 출력은 127  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 로 설정하였다. 가공속도는 5  $\text{mm}/\text{s}$ 를 사용하여 제작하였다. 펄토초 레이저를 이용하여 제작된 격자 표면에  $\text{CO}_2$  레이저를 사용하여 빔을 조사하였다.  $\text{CO}_2$  레이저 빔 조사는 펄토초 레이저를 이용하여 격자를 가공한 스테이지를 이동하는 방식인 아닌 샘플이 위치한 스테이지는 고정된 상태에서 레이저 빔이 이동하여 스캔하는 방식을 적용하였다. 실리카에 형성된 격자를 연마하기 위하여 초점거리가 170  $\text{mm}$ 를 가지는 F-theta 스캐너 가공 렌즈를 사용하였으며, 4.8 W의 출력을 사용하여 20  $\text{mm}/\text{s}$ 의 스캔속도로 연마하였다. 그림 44(c), (d)는 펄토초 레이저를 이용하여 제작한 실리카 표면의 격자에 대해  $\text{CO}_2$  레이저를 이용하여 표면 연마를 통해 마이크로 렌즈의 곡률을 형성하는 개념도 이다. 이렇게 펄토초와  $\text{CO}_2$  레이저를 사용하여 실린더와 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하였다.

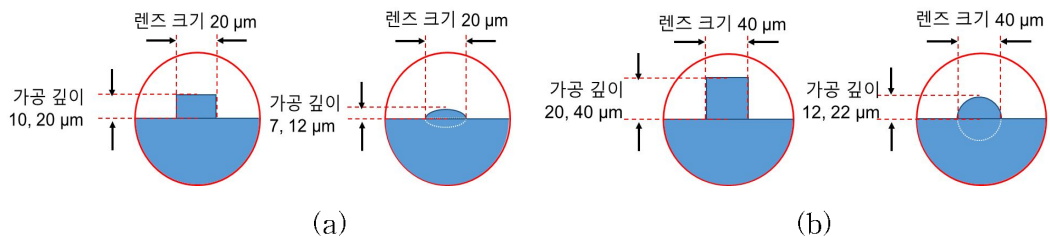
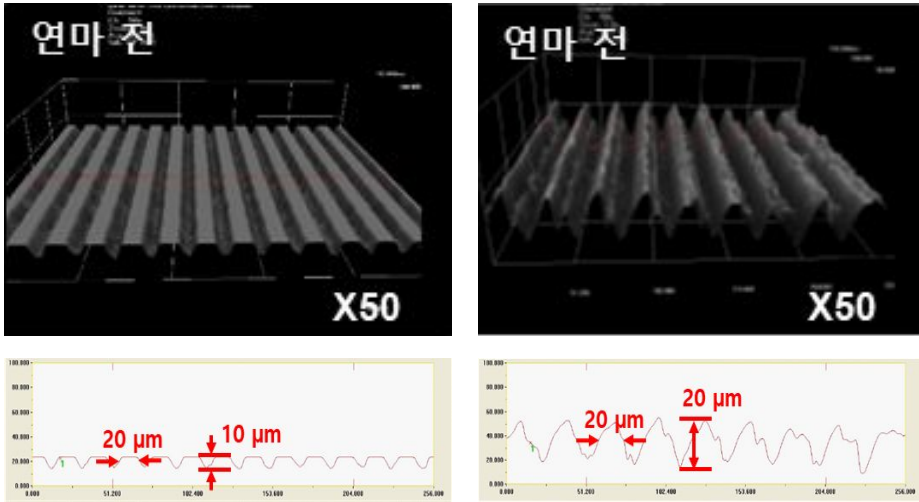
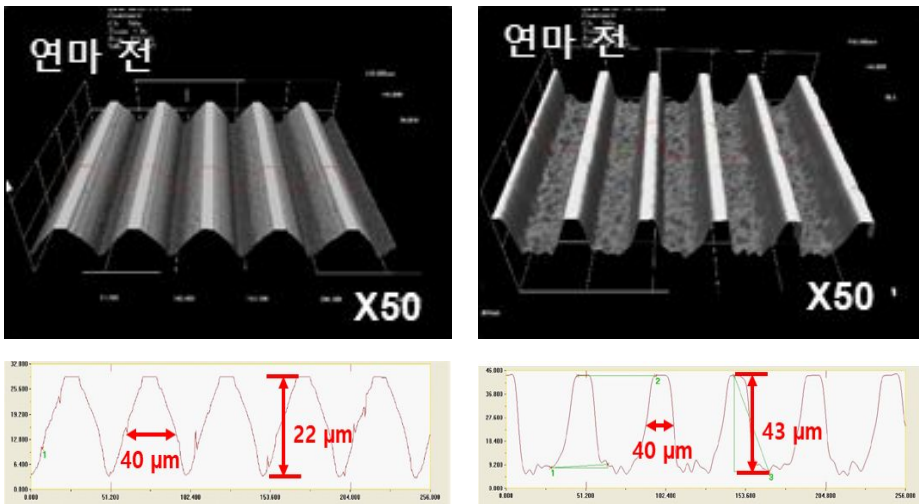


그림 45. 가공 깊이 변화에 따른 곡률 제어 개념도, (a) 렌즈 크기 20  $\mu\text{m}$ , (b) 렌즈 크기 40  $\mu\text{m}$

그림 45는 가공 깊이 변화에 따른 렌즈의 곡률 제어를 나타낸 개념도이다. 펄토초 레이저를 이용하여 제작하는 렌즈의 형상 높이에 따라 곡률이 달라짐을 알 수 있으며, 가공 깊이 변화를 통해 렌즈의 곡률을 손쉽게 제어 할 수 있었다.



(a)

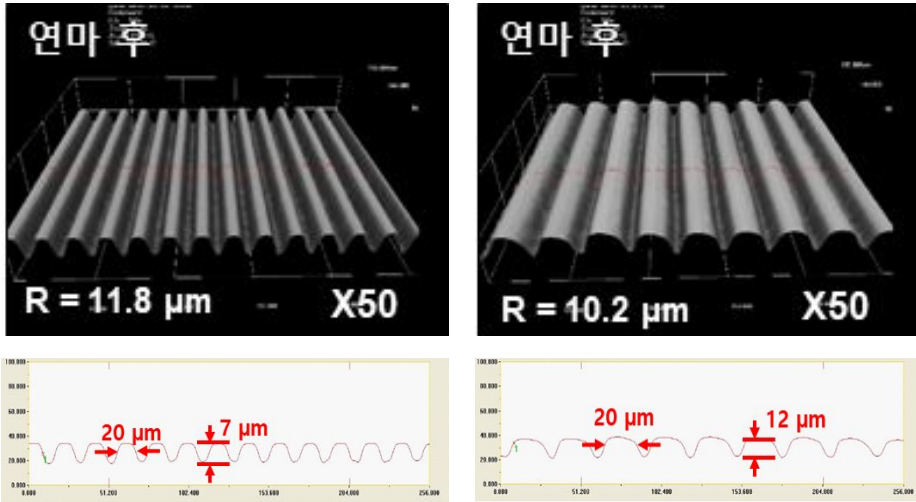


(b)

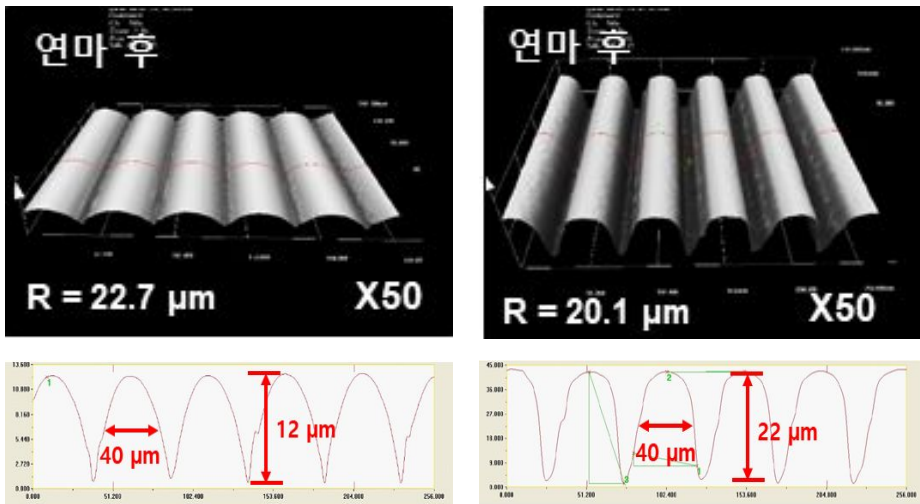
그림 46. 펄소초 레이저를 이용하여 제작된 실린더 모양 형상 측정 결과, (a) 크기 20  $\mu\text{m}$ , 깊이 10, 20  $\mu\text{m}$ , (b) 크기 40  $\mu\text{m}$ , 깊이 22, 43  $\mu\text{m}$

그림 46은 펄소초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 실린더 모양의 가공 형상을 제작한 것을 공초점 현미경을 사용하여 측정한 것이다. 펄소초 레이저 가공 시 격자의 간격을 조절하여 형상의 크기를 조절하였다. 가공된 형상은 20, 40  $\mu\text{m}$  크기

로 제작하였으며, 가공 깊이는 10, 20, 40  $\mu\text{m}$ 로 가공 설정을 하였으며, 실제 가공 결과도 설정 값과 비슷하게 제작되었음을 확인할 수 있었다. 실제 펄토초 레이저로 가공한 형상의 크기는 20  $\mu\text{m}$ 에 가공 깊이 10, 20  $\mu\text{m}$ 를 가지며, 또 다른 하나의 형상 크기는 40  $\mu\text{m}$ 에 가공 깊이 22, 43  $\mu\text{m}$ 임을 측정을 통해 확인할 수 있었다.



(a)

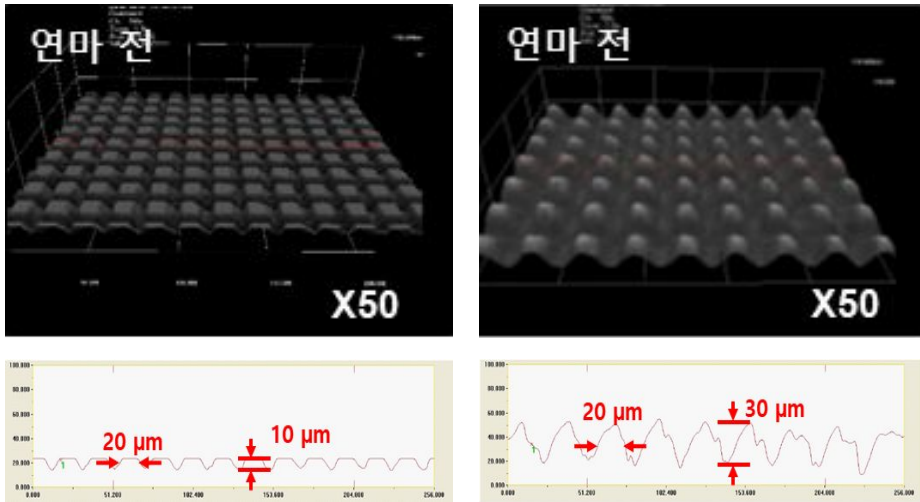


(b)

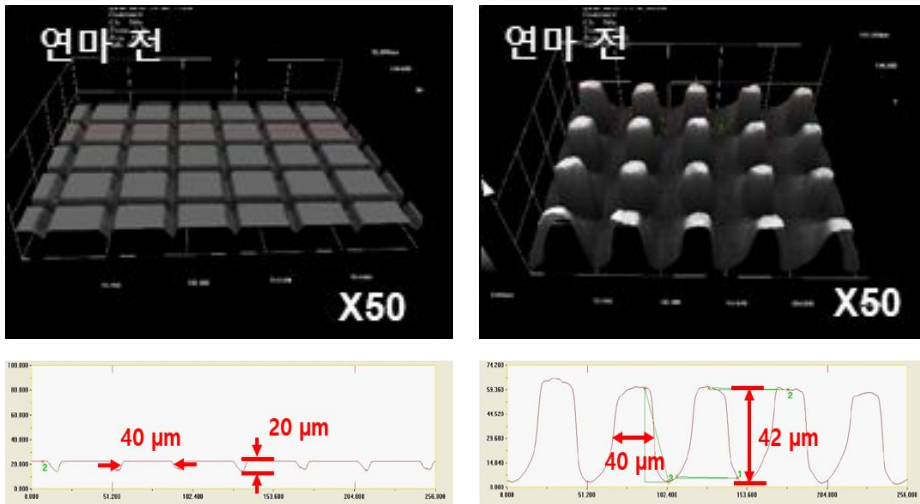
그림 47. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 후 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과, (a) 크기 20  $\mu\text{m}$ , 깊이 7, 12  $\mu\text{m}$ , (b) 크기 40  $\mu\text{m}$ , 깊이 12, 22  $\mu\text{m}$

그림 47은 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 형상의 크기와 가공 깊이 별로 제작한 실린더 모양의 형상을 CO<sub>2</sub> 레이저로 연마를 진행하였으며, 그 가공 결과를 공초점 현미경을 사용하여 측정된 결과이다. 측정 결과를 통해 연마가공에 의해 실린더 모양 형상이 렌즈의 형태를 보임을 알 수 있었으며, 형상의 높이가 줄어들었음을 알 수 있었다. 형상의 높이는 가공 전에 비해 약 1/2로 줄어들었다. 레이저를 사용하여 제작된 실린더 모양의 마이크로 렌즈 어레이의 곡률을 확인하기 위하여 공초점 현미경을 사용하여 측정된 값을 바탕으로 계산을 하였다. 렌즈의 곡률을 계산하기 위하여 곡률반경 공식을 적용하였다.

앞선 식 (2-3-1)을 이용하여 실린더 모양의 마이크로 렌즈 어레이의 곡률을 계산한 결과 렌즈 크기가 20  $\mu\text{m}$ 에서는 11.8, 10.2  $\mu\text{m}$ 의 곡률을 가지는 것을 알 수 있었으며, 40  $\mu\text{m}$ 의 크기에서는 22.7, 20.1  $\mu\text{m}$ 의 곡률을 가지는 것을 확인 하였다. 또한, 같은 렌즈 크기에서 가공 깊이에 따라 곡률이 달라짐을 알 수 있었다.



(a)

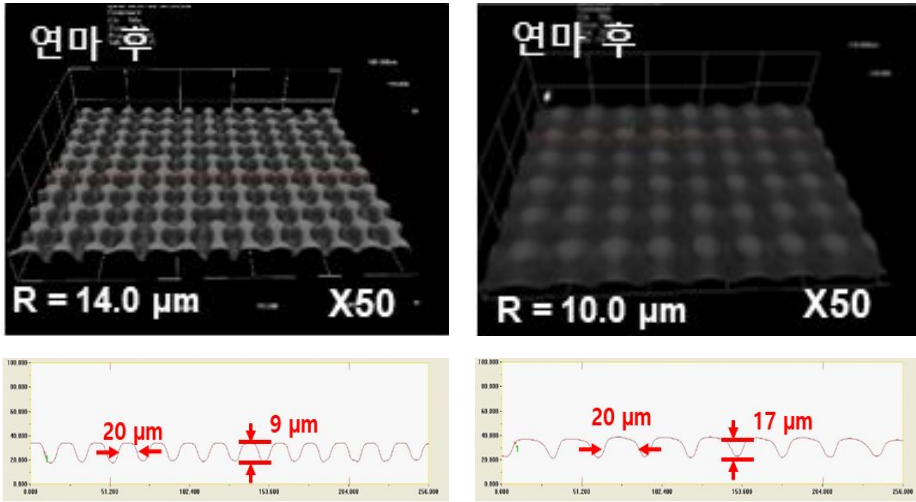


(b)

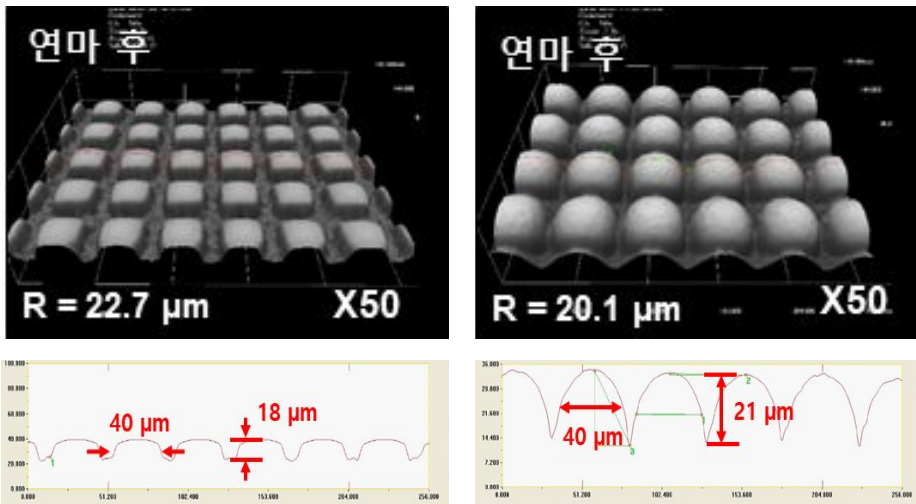
그림 48. 펄초 레이저를 이용하여 제작된 돔 모양 형상 측정 결과, (a) 크기 20 μm, 깊이 10, 30 μm, (b) 크기 40 μm, 깊이 20, 42 μm

그림 48은 펄초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 돔 모양의 가공 형상을 제작한 것을 공초점 현미경을 사용하여 측정한 것이다. 펄초 레이저 가공 시 격자의 간격을 조절하여 형상의 크기를 조절하였다. 가공된 형상은 20 μm × 20 μm, 40 μm × 40 μm 크기로 제작하였으며, 가공 깊이는 10, 20, 30, 40 μm로 가공 설정을

하였으며, 실제 가공 결과도 설정 값과 비슷하게 제작되었음을 확인할 수 있었다. 실제 펄스초 레이저로 가공한 형상의 크기는  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 에 가공 깊이 10, 30  $\mu\text{m}$ 를 가지며, 또 다른 하나의 형상 크기는  $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ 에 가공 깊이 20, 42  $\mu\text{m}$ 임을 측정을 통해 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 49. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 후 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 측정 결과, (a) 크기 20  $\mu\text{m}$ , 깊이 9, 17  $\mu\text{m}$ , (b) 크기 40  $\mu\text{m}$ , 깊이 18, 21  $\mu\text{m}$

그림 49는 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 형상의 크기와 가공 깊이 별로 제작한 돔 모양의 형상을 CO<sub>2</sub> 레이저로 연마를 진행하였으며, 그 가공 결과를 공초점 현미경을 사용하여 측정된 결과이다. 측정 결과를 통해 연마가공에 의해 돔 모양 형상이 렌즈의 형태를 보임을 알 수 있었다. 레이저를 사용하여 제작된 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이의 곡률을 확인하기 위하여 공초점 현미경을 사용하여 측정된 값을 바탕으로 계산을 하였으며, 앞선 실험에서 적용하였던 곡률 반경 공식을 사용하였다. 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이의 곡률을 계산한 결과 렌즈 크기가 20  $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 에서는 14.0, 10.0  $\mu\text{m}$ 의 곡률을 가지며, 40  $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 의 크기에서는 22.7, 20.1  $\mu\text{m}$ 의 곡률을 가지는 것을 알 수 있었다.

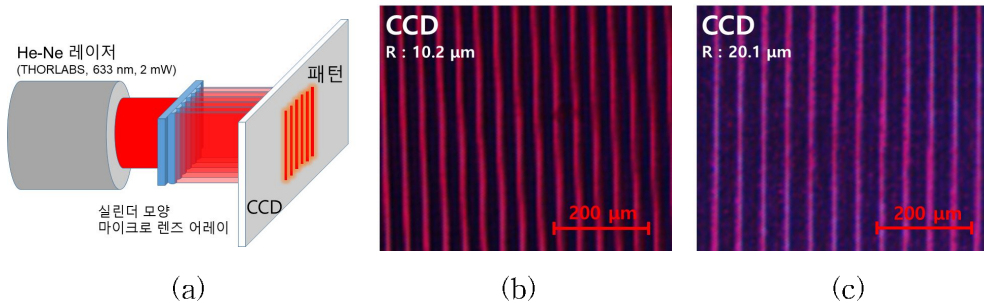


그림 50. 초점 거리에서의 실린더 모양 마이크로 렌즈 어레이 패턴 측정, (a) 측정 개념도, (b) 렌즈크기 20  $\mu\text{m}$ , (c) 렌즈크기 40  $\mu\text{m}$

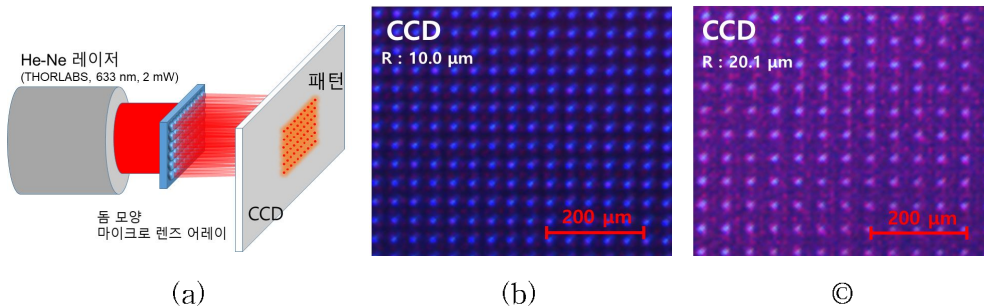


그림 51. 초점 거리에서의 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 패턴 측정, (a) 측정 개념도, (b) 렌즈크기 20  $\mu\text{m}$ , (c) 렌즈크기 40  $\mu\text{m}$



레이저를 이용하여 제작된 실린더와 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이의 특성을 확인 하였다. 특성 확인을 위해 He-Ne 레이저 (THORLABS, HRP020)를 이용하여 빔을 투과 시켜 제작된 마이크로 렌즈의 초점거리에 CCD를 위치하여 빔의 형상을 측정하였다. 측정을 위해 20  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가지며, 곡률반경이 10.2, 10.0  $\mu\text{m}$ 와 40  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가지며, 곡률 반경이 20.1  $\mu\text{m}$ 로 제작된 실린더와 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이를 이용하였다. He-Ne 레이저는 633 nm의 파장을 가지는 레이저를 사용하였으며, He-Ne 레이저 앞단에 2개의 편광기를 설치하여 측정용 레이저의 세기를 조절하였다. 실린더와 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이를 투과한 레이저 빔을 초점거리에 위치 시켜놓은 CCD를 통해 측정 하였으며, 마이크로 렌즈 어레이의 형상에 대한 집속된 빔을 측정 할 수 있었다.

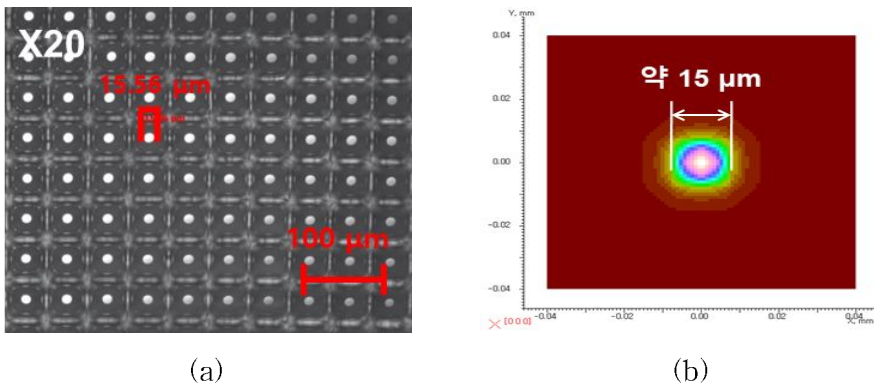


그림 52. 레이저를 이용하여 제작된 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이 초점 크기 측정 및 시뮬레이션 결과, (a) 광학 현미경 측정 결과, (b) LightTools 시뮬레이션

그림 52는 레이저를 이용하여 제작된 돔 모양 마이크로 렌즈의 초점 크기를 측정하였으며, 그 결과를 상용 프로그램인 LightTools을 사용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 렌즈의 초점 크기 측정을 위하여 광학 현미경을 사용하였으며, 돔 모양 마이크로 렌즈 어레이의 초점 위치에 Z축을 이동시켜 측정하였다. 광학 현미경을 통해 초점의 크기를 측정한 결과, 약 15.56  $\mu\text{m}$  크기임을 확인할 수 있었다. LightTools 시뮬레이션은 초점 크기 비교에 사용된 돔 모양의 마이크로 렌즈를 공 초점 현미경을 사용하여 3차원 형상을 측정한 다음, 렌즈의 크기와 높이, 곡률을

확인한 후, 시뮬레이션을 위한 렌즈 설계에 적용하였다. 시뮬레이션에서는 렌즈 어레이로 제작하지 않고 하나의 렌즈만 설계하였다. LightTools 시뮬레이션 결과 렌즈의 초점 거리에서 초점 크기는 약 15  $\mu\text{m}$ 의 크기임을 확인할 수 있었으며, 실제 제작한 마이크로 렌즈의 측정 결과와 유사함을 알 수 있었다.

펄소초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 실리카 표면에 다양한 크기와 곡률을 가지는 마이크로 렌즈 어레이 제작이 가능함을 보였다. 펄소초 레이저를 이용한 격자 가공 방법에 따라 실린더와 돔 모양의 마이크로 렌즈 어레이를 손쉽게 제작 할 수 있었다. 하지만 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 대량 생산을 위해서는 레이저 가공 방법에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 금형과정을 통한 몰드 제작 방식을 적용하여 보았다.

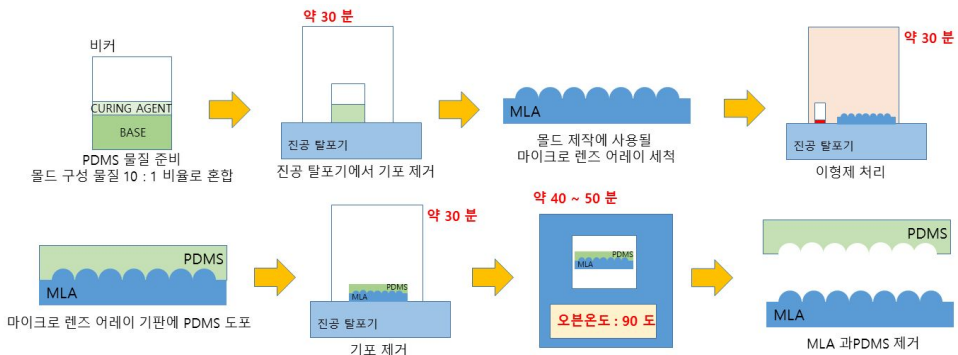
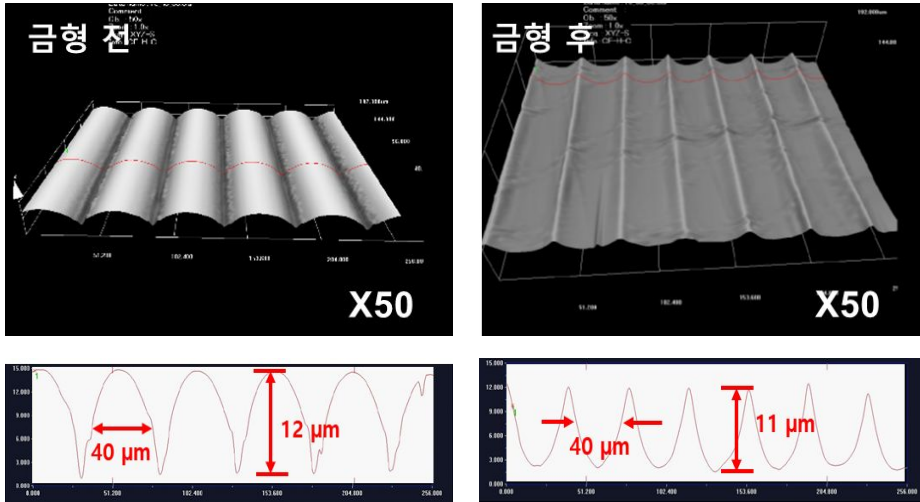


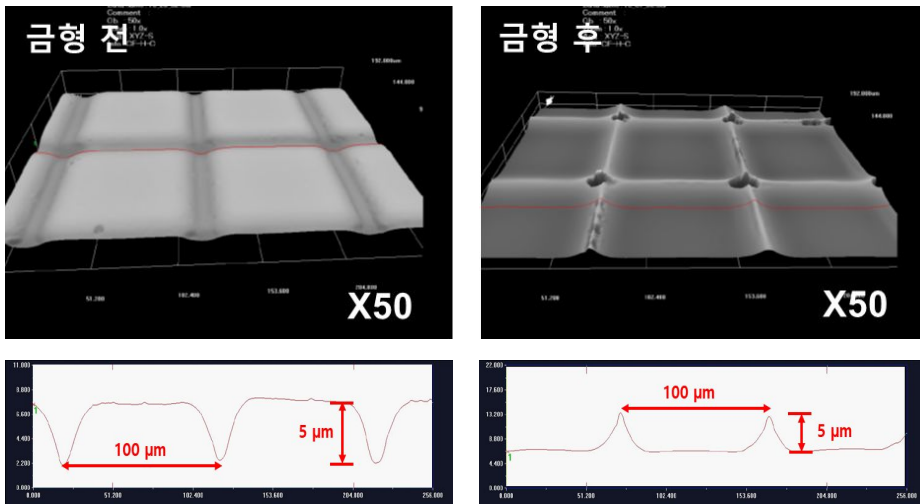
그림 53. 마이크로 렌즈 어레이 금형과정

그림 53은 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 금형 과정을 나타낸 것이다. 먼저 몰드를 구성할 물질인 실리콘 엘라스토머 베이스와 실리콘 엘라스토머 경화제를 10 : 1 비율로 혼합을 하여준다. 두 물질의 혼합으로 발생한 기포를 제거하기 위하여 진공 탈포기를 사용하여 기포를 제거하며, 약 30 분간 기포 제거를 과정을 거친다. 그 다음, 몰드에 사용될 마이크로 렌즈 어레이를 세척을 통해 표면에 먼지 및 표면 부산물을 제거한 다음, 이형제 처리를 하였다. 이형제는 금형 작업 후, 마이크로 렌즈 어레이와 몰드가 잘 분리될 수 있는 역할을 한다. 이형제 처리가 끝난 마이크로 렌즈 어레이에 PDMS를 고르게 도포하여 주며, 진공 탈포기를 사용하여 도포중에 발생한 기포를 제거해 준다. 진공 탈포기를 사용

한 기포 제거 과정은 혼합이나 도포 과정 중에 발생한 기포에 의해 몰드의 형상이 변형되는 것을 막기 위해 진행하는 것이다. 도포 후 기포제거 작업이 완료된 후 오븐에 넣어 90도의 온도로 30 ~ 50분간 PDMS를 굳혀주며, 다 굳어진 PDMS를 마이크로 렌즈 어레이와 분리시켜 주었다.



(a)

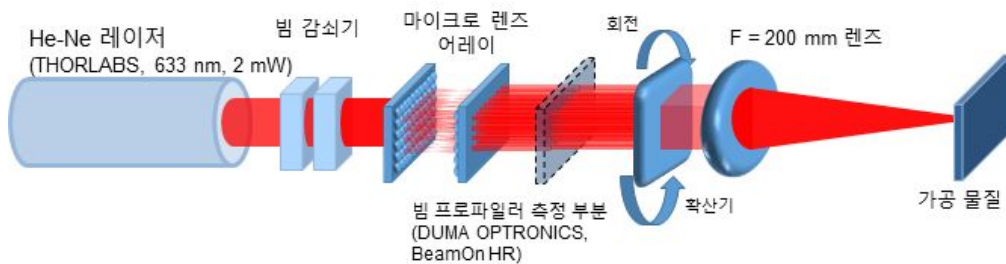


(b)

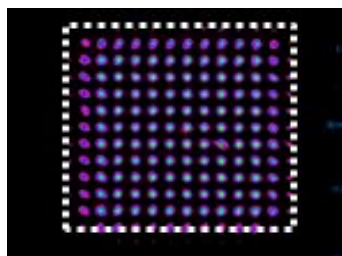
그림 54. 마이크로 렌즈 어레이 금형 전·후 측정 결과, (a) 실린더 모양 금형 전·후, (b) 돔 모양 금형 전·후

그림 54는 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이에 금형과정을 통해 제작된 몰드를 공초점 현미경을 사용하여 3차원 형상을 측정한 결과이다. 금형과정을 통해 제작된 몰드의 형상이 레이저를 이용하여 제작한 형상과 동일하게 제작됨을 확인할 수 있었다.

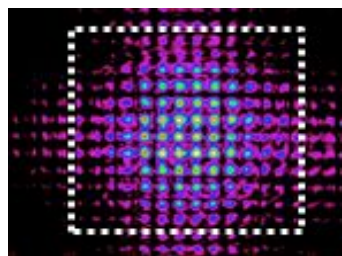
또한, 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 사용하여 레이저 빔 모양을 플랫폼 탑으로 만들기 위해 빔 셰이핑에 적용하여 보았다. 마이크로 렌즈 어레이를 사용한 플랫폼 탑 가공 결과를 비교하기 위하여 상용 마이크로 렌즈 어레이를 사용한 결과와 비교하였다. SUSS MicroOptics사의 500  $\mu\text{m}$  크기의 마이크로 렌즈 어레이를 사용하였으며, 플랫폼 탑 구성을 위하여 동일한 크기의 마이크로 렌즈 어레이 두 개를 사용하였다. 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이도 동일한 크기로 제작하였으며, 플랫폼 탑 구성을 위하여 두 개를 제작하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 55. 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 플랫폼 탑 빔 셰이핑 구성 및 측정 결과, (a) 상용 MLA, (b) 레이저로 제작한 MLA

그림 55는 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 플랫폼 탑 빔 셰이핑 구성 및 상용 마이크로 렌즈 어레이와 레이저로 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 빔 형상을 측정 한 결과이다. 두 개의 동일한 크기를 가지는 마이크로 렌즈 어레이에 He-Ne 레이저가 투과되면 빔 형상이 사각형상으로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 상용품의 경우 사각형상이 깨끗하게 나오는 반면에 레이저로 제작한 마이크로 렌즈 어레이의 빔 형상은 회절현상으로 인해 사각 형상 이외의 부분에서도 He-Ne 레이저 빔이 측정 된 것을 확인할 수 있었다. 레이저로 제작한 마이크로 렌즈 어레이에서 회절현상이 보이는 이유는 레이저를 이용하여 격자를 가공 한 다음, 격자를 녹이는 과정에서 가공 골 사이가 덜 녹아 거칠기가 제거되지 않아 가공 거칠기에 의해 회절 현상이 발생한 것이라 생각된다. 실제 펄스초 레이저를 조사하여 1800 Å 두께로 코팅되어 있는 ITO 박막가공에 적용하였다. 가공 비교를 위하여 상용 마이크로 렌즈 어레이와 레이저로 제작한 마이크로 렌즈 어레이를 사용한 플랫폼 탑 형상을 사용하여 특성들을 비교하였다.

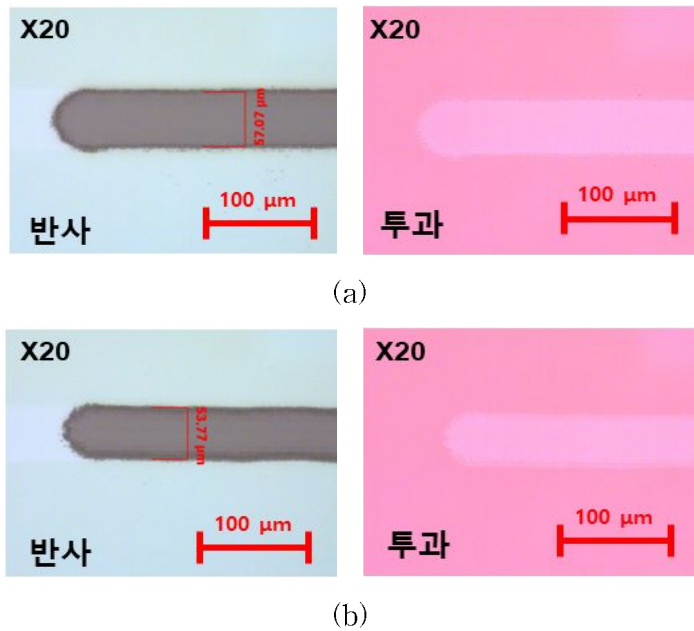


그림 56. ITO 박막 가공 광학 현미경 측정 결과 (a) 상용 MLA, (b) 레이저로 제작한 MLA

그림 56은 마이크로 렌즈 어레이를 적용한 플랫 탑 가공 결과를 비교한 것이다. ITO 기판 가공을 위하여 집속 렌즈 다음에 확산기를 위치시킨 다음, 확산기를 회전시켜 어레이 형태의 빔의 형상의 위상을 섞어 주어 플랫탑 형상을 만들었다. 그런 빔의 형상을 대물렌즈에 입사 시켜 ITO 기판을 가공 하였다. 입사된 플랫탑의 빔이 대물렌즈에 의해 집속이 되어 가공 면에서의 빔 형상은 원형으로 나타남을 확인 할 수 있었다. 가공된 ITO기판 측정을 위하여 광학 현미경을 사용 하였으며, 반사와 투과 모드로 측정하여 비교 하였다. 마이크로 렌즈 어레이를 사용하여 플랫탑을 적용한 ITO 가공 결과에서는 기판에 손상을 주지 않고 ITO만 가공됨을 확인 할 수 있었다. 레이저로 제작한 마이크로 렌즈 어레이로 가공한 결과와 상용 마이크로 렌즈 어레이로 가공한 결과가 유사함을 알 수 있었다.

## 제 5장 결 론

펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저 가공 기술을 이용하여 광학소자 제작 및 특성 평가에 대한 연구를 진행하였다. 펄토초 레이저의 국소부위 초정밀 가공 기술과 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 연마 기술을 적용하여 FZP 가공 방법 및 특성 비교, 회절광학소자의 효율 향상, 다양한 종류의 마이크로 렌즈 어레이 형상 제어 및 가공 비교 등의 연구를 진행하였다.

현재 FZP는 리소그래피 공정을 통해 매우 정밀하고 다양하게 제작되어지고 있지만 많은 시간과 비용이 소요되는 단점이 있다. 리소그래피 공정을 이용한 가공을 위해서는 마스크가 필요 하는데, 이 마스크 제작이 쉽지 않으며, 제작에 많이 비용이 요구된다. 이러한 이유로 다양한 분야에 리소그래피 공정의 적용이 제한적이며, 손쉽게 여러 다양한 형상을 제작하기에 어려움이 있다. 정밀가공이 가능한 리소그래피 공정의 다양한 분야 적용 및 활용을 위하여 가공 공정의 개선이 필요하다. 이러한 공정 개선을 위하여 다양한 형상을 손쉽게 가공이 가능한 펄토초 레이저 가공 기술을 적용하였다. 기존의 리소그래피 공정에서 마스크를 이용하는 형상을 가공하는 과정을 펄토초 레이저로 대체하였으며, 펄토초 레이저를 PR에 직접 노출하는 방법을 사용하여 형상을 가공 하였다. 펄토초 레이저 리소그래피 공정 기술을 통해 실리카 유리 표면에 FZP 렌즈를 제작 하였다. 펄토초 레이저 리소그래피 공정은 펄토초 레이저 조사와 화학 에칭 및 스트리핑을 포함한 여러 공정으로 구성된다. 펄토초 레이저 리소그래피 공정을 사용하여 50 mm의 초점 거리를 가지는 FZP를 제작 하였으며, 초점거리에 초점 크기는 약 25 μm의 크기를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 효율은 약 12.1%을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 이렇게 제작된 FZP를 기존의 펄토초 레이저 가공방식으로 제작이 가능한 FZP와 비교하였다. 펄토초 레이저 어블레이션 공정을 이용하여 실리카 표면에 FZP를 제작하였으며, 측정결과 및 특성을 비교하였다. 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 FZP를 제작 하였을 때, 약 8.7%의 효율을 가지는 것을 알 수 있었다. 이런 측정 결과를 토대로 펄토초 레이저 리소그래피 공정으로 제작된 FZP의 효율이 펄토초 레이저 어블레이션 공정에 비해 회절 효율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 펄토초 레이저 리소그래피 공정에 비해 펄토초 레이저 어블레이션 공정에서 회절 효율이 낮은 이유는 펄토초 레이저 가공으로 발생하는 표면 거칠기에 의해 입사되는 레이저 빛

이 산란되거나 가로막혀 투과되는 빛의 양이 줄어 효율이 낮아진 것이라 생각된다. 하지만 펨토초 레이저 어블레이션 공정에서 회절효율을 떨어뜨리는 가공 거칠기를 개선한다면 회절효율이 많이 향상될 것이며, 이러한 가공 거칠기 제거를 위해 CO<sub>2</sub> 레이저 연마나 퍼니스를 이용하는 가공 기술을 적용하여, 펨토초 레이저에 의해 생성된 가공 거칠기를 제거할 수 있을 것이라 생각된다. 이러한 펨토초 레이저 가공 기술의 적용으로 리소그래피 공정에서 마스크 제작방식의 가공 한계를 극복할 수 있을 것이며, 리소그래피 공정의 적용 및 활용 분야를 확대할 수 있을 것이라 생각된다.

회절격자 제작을 위해 기존에 다양한 가공 방식들을 적용하여 정밀도 향상 및 제작 최적화가 진행되었다. 하지만 기존 방식들은 가공 조건 변화에 대한 대처가 느리며, 가공 유연성이 많이 떨어지는 단점이 있다. 가공 중 격자의 주기나 크기 등과 같은 세부적인 형상 변화가 불가능하여 이러한 단점을 보완할 수 있는 레이저 가공 기술을 적용하였다. 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 회절격자를 제작하였으며, 레이저 가공에 의해 발생한 가공 거칠기 제거를 위해 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 기술을 적용하였다. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 기술을 이용한 이유는 회절격자의 표면 거칠기를 개선을 통해 격자의 표면이 깨끗해지는 클리닝 효과를 이용하여 회절격자에 투과되는 빛의 양을 늘리고, 거칠기에 의한 산란으로 효율이 감소되는 현상을 방지하기 위하여 사용하였다. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수의 증가로 인해 회절격자의 표면이 둥근 형태로 회절격자가 변형되었다. 또한, CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 표면 연마로 수식에 의해 구해진 회절 모양과 차이가 생겨 기술한 이론으로는 형상을 직접 비교는 어려울 것이라 생각된다. 하지만 회절격자의 표면 거칠기 개선으로 연마 전에 비해 투과량의 증가로 각 차수의 효율이 증가함을 보였지만, 연마 반복수 증가에 의해 표면 형상의 변화를 확인 할 수 있었다. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 반복수가 증가될수록 회절 효율이 향상됨을 확인할 수 있었다. CO<sub>2</sub> 레이저의 연마 반복수가 4회일 때, 효율이 가장 높았으며, 연마 반복수가 더 증가하면 회절격자의 형상이 변형되어 회절효율이 감소함을 확인 하였다. 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 회절격자의 효율에 비해 펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저 가공 기술을 이용하여 제작한 회절격자의 회절효율이 약 15.1%정도 향상되는 것을 확인 할 수 있었다. 연마 전 회절격자의 효율이 낮은 이유는 펨토초 레이저에 의해 회절격자의 표면에 가공 거칠기에 의한 것이라 생각된다. CO<sub>2</sub> 레이저 연마 기술을 이용하여 연마 반복수에 따라 표면의 가공 거칠기가 제거되어 회절격자에 투과되는 빛의 양 증가로 효율이 향상된 것이



라 생각된다. 하지만, 펄토초 레이저 가공 골 사이의 거칠기 제거는 되지 않았으며, 그 이유는 가공 선평이 좁아 CO<sub>2</sub> 레이저 빔이 가공 골 사이의 깊이까지 도달하지 못한 것이라 생각된다. 또한, 과도한 연마 반복 수 증가로 격자의 형상이 변화하는 것을 알 수 있었으며, 이물질이 격자에 녹아 들어가 오히려 회절격자의 효율을 감소시키는 것을 확인 할 수 있었다. 수식의 회절 모양의 회절격자 제작을 위해서는 CO<sub>2</sub> 레이저 표면 연마 조건의 최적화를 통해 형상 변형이 없이 표면 가공 거칠기만 제거하면 유사한 모양의 회절격자의 제작이 가능할 것이다. 본 연구에서 펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 회절격자를 제작 할 수 있었으며, 연마 조건에 따라 회절격자의 효율을 증가 시킬 수 있었다.

기존에 마이크로 렌즈 어레이에 대한 다양한 제작방법이 개발되어 왔으며, 현재 여러 광 부품 업체에 의해 대량 생산이 이루어지고 있으며, 다양한 분야에서 사용되고 있다. 하지만 기존의 방식으로는 다양한 물체 및 형상의 표면에 제작이 어려우며, 제작 조건을 손쉽게 조절하기 불가능하다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용한 초정밀 레이저 가공 기술을 적용하여 마이크로 렌즈 어레이를 제작하였으며, 다양한 곡률 제어 및 가공 특성을 비교하는 연구를 진행하였다. 펄토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 마이크로 렌즈 어레이를 실리카 표면에 제작하였으며, 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 특성을 확인 하였다. 또한, 상용 제품의 마이크로 렌즈와 가공 특성을 비교하는 연구를 진행하였다. 펄토초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 제작하고자 하는 렌즈의 크기에 맞는 격자를 가공한 후, CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 표면을 연마하여 렌즈의 형상을 형성하였다. 실리카 표면 격자 가공을 위해 Z축 방향으로 내려가면서 가공 하였으며, 렌즈의 곡률에 따라 가공 깊이를 변화시켜 제작하였다. CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 가공된 격자에 레이저 빔을 스캔하여 표면 연마를 진행하였다. 가공된 격자의 깊이에 따라 다양한 곡률을 가지는 마이크로 렌즈 어레이를 제작할 수 있었으며, 공초점 현미경을 이용하여 형상을 측정하였다. 제작된 마이크로 렌즈의 곡률은 곡률반경 공식을 이용하여 측정된 값을 대입하여 계산하였다. 레이저로 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 실린더와 돔 모양의 렌즈를 이용하여 초점거리에서의 빔 형상을 CCD를 이용하여 측정하였다. 측정결과 각각의 렌즈 종류별 패턴을 확인할 수 있었다. 레이저를 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 어레이와 상용 마이크로 렌즈 어레이 (SUSS MicroOptics사)의 빔 셰이핑을 통한 플랫폼 가공 특성을 비교하는 실험을 진행하였다. 동일한 크기를 가지는 두 개의 마이크로 렌즈 어레이를 정렬하여 빔 프로파일러를 통해 빔

형상을 측정하였다. 그 결과 입사된 레이저의 가우시안 빔 형상이 마이크로 렌즈 어레이를 지나 사각의 점 어레이 패턴으로 변화하였으며, 초점 위치에서는 원형의 플랫폼 형상의 레이저 빔을 확인할 수 있었다. 하지만 레이저를 이용하여 제작한 마이크로 렌즈 어레이에서는 회절현상으로 인해 사각이외의 부분에서도 He-Ne 레이저 빔이 측정이 되었는데, CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 회절격자 연마를 진행할 때, 연마가 덜 된 부분으로 인해 회절현상이 생겨난 것이라 생각된다. 마이크로 렌즈 어레이를 사용하여 플랫폼 빔 형상을 확인한 다음, 실제 펄스 레이저를 조사하여 1800 Å 두께로 코팅되어 있는 ITO 박막가공에 적용하였다. 가공 결과 마이크로 렌즈 어레이를 사용하여 플랫폼 적용한 ITO 가공 결과에서 기판에 손상을 주지 않고 ITO만 가공됨을 확인할 수 있었다. 상용 마이크로 렌즈 어레이와 레이저로 제작한 마이크로 렌즈 어레이를 적용한 결과 유사한 가공결과를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 레이저를 이용한 마이크로 렌즈 어레이 제작 방식으로 손쉽게 다양한 크기와 형상의 마이크로 렌즈 어레이를 제작할 수 있을 것이며, 더 나아가 마이크로 미터 크기 이하의 렌즈 어레이 제작도 가능할 것이라 기대한다. 또한, 이러한 레이저 가공 방식은 광학소자 제작뿐만 아니라 더욱 다양한 분야에 적용이 가능할 것이라 생각된다.

## 【참고문헌】

- [1] H. W. Choi, “Ultrashort Laser Material Interaction and Its Biomedical and Joining Applications,” *Journal of Korean Welding and Joining Society* **26**(4), pp. 337-343, 2008.
- [2] J. H. Choi, H. K. Sohn, “Ultrafast Laser Micro-machining Technology,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* **27**(2), pp. 7-12, 2010.
- [3] M. Beresna, M. Gecevicius, and P. G. Kazansky, “Ultrafast laser direct writing and nanostructuring in transparent materials,” *Advances in Optics and Photonics* **6**, pp. 293-339, 2014.
- [4] C. V. Shank and E. P. Ippen, “Subpicosecond kilowatt pulses from a mode locked cw dye laser,” *Applied Physics Letters* **24**, pp. 373, 1974.
- [5] R. L. Fork, B. I. Greene, and C. V. Shank, “Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking,” *Applied Physics Letters* **38**, pp. 671, 1981.
- [6] J. A. Valdmanis, R. L. Fork, and J. P. Gordon, “Generation of optical pulses as short as 27 femtoseconds directly from a laser balancing self-phase modulation, group-velocity dispersion, saturable absorption, and saturable gain,” *Optics Letters* **10**(3), pp. 131-133, 1985.
- [7] R. L. Fork, C. H. B. Cruz, and C. V. Shank, “Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation,” *Optics Letters* **12**(7), pp. 483-485, 1987.
- [8] P. Moulton, “Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,” *Journal of the Optical Society of America B* **3**(1), pp. 125-133, 1985.
- [9] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, “60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser,” *Optics Letters* **16**(1), pp. 42-44, 1991.
- [10] R. R. Gattass, E. Mazur, “Femtosecond laser micromachining in transparent materials,” *Nature Photonics* **2**, pp. 219-225. 2008.
- [11] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. Alvensleben, A. Tinnermann, “Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids,” *Applied*

Physics A **63**(2), pp. 109–115, 1996.

[12] J. Bonse, R. Koter, M. Hartelt, D. Spaltmann, S. Pentzien, S. Hohm, A. Rosenfeld, J. Kruger, “Femtosecond laser-induced periodic surface structures on steel and titanium alloy for tribological applications,” *Applied Physics A* **117**(1), pp. 103–110, 2014.

[13] V. Gâté, G. Bernaud, C. Veillas, A. Cazier, F. Vocanson, Y. Jourlin, M. Langlet, “Fast dynamic interferometric lithography for large submicrometric period diffraction gratings production,” *Optical Engineering* **52**(9), pp. 091712:1–7, 2013.

[14] W. Watanabe, D. Kuroda, K. Itoh, J. Nishii, “Fabrication of Fresnel zone plate embedded in silica glass by femtosecond laser pulses,” *Optics Express* **10**(19), pp. 978–983, 2002.

[15] E. Bricchi, J. D. Mills, P. G. Kazansky, B. G. Klappauf, J. J. Baumberg, “Birefringent Fresnel zone plates in silica fabricated by femtosecond laser machining,” *Optics Letters* **27**(24), pp. 2200–2202, 2002.

[16] L. G. Niu, D. Wang, T. Jiang, S. Z. Wu, A. W. Li, J. F. Song, “High fill-factor multilevel Fresnel zone plate arrays by femtosecond laser direct writing,” *Optics Communications* **284**(3), pp. 777–781, 2011.

[17] C. David, S. Gorelick, S. Rutishauser, J. Krzywinski, J. V. Comamala, V. A. Guzenko, O. Bunk, E. Farm, M. Ritala, M. Cammarata, D. M. Fritz, R. Barrett, L. Samoylova, J. Grunert, H. Sinn, “Nanofocusing of hard X-ray free electron laser pulses using diamond based Fresnel zone plates,” *Scientific Reports* **1**(57), pp. 1–5, 2011.

[18] T. Weichelt, L. Stuerzebecher, U. D. Zeitner, “Mask Aligner Lithography for TSV-Structures using a Double-Sided (structured) Photomask,” *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VIII*, **9374**, pp. 1–6, 2015.

[19] Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takenaka, and I. Okada, “Fabrication and Performance Test of Fresnel Zone Plate with 35 nm Outermost Zone Width in Hard X-Ray Region,” *X-Ray Optics and Instrumentation*, pp. 1–6, 2010.

[20] M. Beresna, and P. G. Kazansky, “Polarization diffraction grating produced

by femtosecond laser nanostructuring in glass,” *Optics letters* **35**(10), pp. 1662-1664, 2010.

[21] A. A. Ionin, S. I. Kudryashov, S. V. Makarov, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, E. V. Golosov, O. A. Golosova, Y. R. Kolobov, A. E. Ligachev, “Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces,” *Applied physics A* **107**, pp. 301-305, 2012.

[22] Y. S. Choi, B. H. Yoon, N. Kim, “Dynamic characteristics and diffraction efficiency of reflection grating in photopolymer,” *Journal of the Optical Society of Korea* **9**(5), pp. 315-319, 1998.

[23] A. Hans, “Efficiency of blazed holographic diffraction grating coated with different surface materials,” *Optics Communications* **13**(4), pp. 426-430, 1975.

[24] C. K. Chung, S. L. Lim, H. Y. Wang, T. K. Tan, K. Z. Tu, H. F. Lung, “Fabrication and simulation of glass micromachining using CO<sub>2</sub> laser processing with PDMS protection,” *Applied Physics. A* **113**(2), pp. 501 - 507, 2013.

[25] C. Vass, K. Oavay, B. Hopp, Z. Bor, “104 nm period grating fabrication in fused silica by immersion two-beam interferometric laser induced backside wet etching technique,” *Applied Physics A* **87**(4), pp. 611 - 613, 2007.

[26] Y. M. Song, Y. Xie, V. Malyarchuk, J. I. Xiao, I. H. Jung, K. J. Choi, Z. j. Liu, H. S. Park, C. F. Lu, R. H. Kim, R. Li, K. B. Crozier, Y. G. Huang, J. A. Rogers, “Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye,” *Nature* **497**, pp. 95-99, 2013.

[27] H. N. Kwon, Y. Kizu, Y. Kizaki, M. Ito, M. Kobayashi, R. Ueno, K. Suzuki, H. Funaki, “A Gradient Index Liquid Crystal Microlens Array for Light-Field Camera Applications,” *IEEE photonics technology letters* **27**(8), pp. 836-839, 2015.

[28] W. X. Yu, X. C. Yuan, “Fabrication of refractive micro lens in hybrid SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> sol-gel glass by electron beam lithography,” *Optics Express* **11**(8), pp. 899 - 903, 2003.

[29] S. W. Luo, T. L. Chang, H. Y. Tsai, “Fabrication of diffractive micro-lens array by femtosecond laser-assisted etching process,” *Microelectron Engineering* **98**, pp. 448 - 452, 2012.

- [30] C. K. Chung, S. L. Lin, H. Y. Wang, T. K. Tan, K. Z. Tu, H. F. Lung. "Fabrication and simulation of glass micro machining using CO<sub>2</sub> laser processing with PDMS protection," *Applied Physics A* **113**(2), pp, 501 - 507, 2013.
- [31] H. K. Choi, D. Y. Yoo, I. B. Sohn, Y. C. Noh, J. H. Sung, S. K. Lee, T. M. Jeong, M. S. Ahsan, J. T. Kim, "CO<sub>2</sub> Laser Assisted Fabrication of Micro-lensed Single-mode Optical Fiber," *Journal of the Optical Society of Korea* **19**(4), pp. 327-33, 2015.
- [32] C. H. Lin, L. Jiang, Y. H. Chai, H. Xiao, S. J. Chen, H. L. Tsai. "Fabrication of microlens arrays in photo sensitive glass by femtosecond laser direct writing," *Applied Physics A* **97**(751), pp. 751 - 757, 2009.
- [33] H. K. Choi, M. S. Ahsan, D. Y. Yoo, I. B. Sohn, Y. C. Noh, J. T. Kim, D. Jung, J. H. Kim, H. M. Kang, "Formation of cylindrical micro-lens array on fused silica glass surface using CO<sub>2</sub> laser assisted reshaping technique," *Optics and Laser Technology* **75**, pp. 63-70, 2015.
- [34] I. B. Sohn, H. K. Choi, D. Y. Yoo, Y. C. Noh, M. S. Ahsan, J. H. Sung, S. K. Lee, "Formation of plano-convex micro-lens array in fused silica glass using CO<sub>2</sub> laser assisted reshaping technique," *Journal of the Korean Physical Society* **69**(3), pp. 335-343, 2016.
- [35] H. K. Choi, J. C. Ryu, C. J. Kim, Y. C. Noh, I. B. Sohn, J. T. Kim, "Formation of micro-lens array using femtosecond laser and CO<sub>2</sub> lasers," *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* **11**(3), pp. 341-345, 2016.
- [36] J. Yong, F. Chen, Q. Yang, G. Du, H. Bian, D. Zhang, J. Si, F. Yun, X. Hou, "Rapid Fabrication of Large-Area Concave Microlens Arrays on PDMS by a Femtosecond Laser," *Applied Materials Interfaces* **5**(19), pp. 9382-9385, 2013.
- [37] S. K. Lee, H. S. Park, G. R. Yi, J. H. Moon, and S. M. Yang, "Holographic fabrication of microstructures with internal nanopatterns using microprism array," *Angewandte Chemie* **48**(38) pp. 7000 - 7005, 2009.
- [38] K. K. Ryoo, Y. G. Kim, K. G. Jeon, "Polymer Microlens Fabrication", *Clean technology* **11**(4), pp. 205-211, 2005.
- [39] S. Mihailov, and S. Lazare, "Fabrication of refractive microlens array by

excimer laser ablation of amorphous Teflon”, *Applied Optics* **32**(31), pp. 6211-6218. 1993.

[40] K. H. Liu, M. F. Chen, C. T. Pan, M. Y. Chang, W. Y. Huang, “Fabrication of various dimensions of high fill-factor micro-lens arrays for OLED package,” *Sensors and Actuators A* **159**(1), pp. 126-134, 2010.

[41] C. H. Lin, L. Jiang, Y. H. Chai, H. Xiao, S. J. Chen, H. L. Tsai, “Fabrication of microlens arrays in photosensitive glass by femtosecond laser direct writing,” *Applied Physics A* **97**, pp. 751-757, 2009.

[42] C. H. Lin, Y. M. Li, C. C. Liang, Y. Y. Lee, H. S. Fung, B. Y. Shew, S. H. Chen, “Extreme UV diffraction grating fabricated by nano imprint lithography,” *Microelectronic Engineering* **98**, pp. 194 - 197, 2012.

[43] H. K. Choi, D. Jung, I. B. Sohn, Y. C. Noh, Y. T. Lee, J. T. Kim, and M. S. Ahsan, “Diffraction Efficiency Enhancement of Femtosecond Laser Engraved Diffraction Gratings Using CO<sub>2</sub> Laser Polishing,” *Journal of the Korean Physical Society* **65**(10), pp. 1559-1565, 2014.

[44] H. K. Choi, M. S. Ahsan, I. B. Sohn, Y. C. Noh, Y. T. Lee, and J. T. Kim, “Femtosecond Laser Assisted Fabrication of Double-layer Diffraction Gratings inside Fused Silica Glass,” *Journal of the Korean Physical Society* **66**(1), pp. 55-60, 2015.

[45] M. S. Ahsan, F. Dewanda, M. S. Lee, H. Sekita, T. Sumiyoshi, “Formation of superhydrophobic soda-lime glass surface using femtosecond laser pulses,” *Applied Surface Science* **265**(15) pp. 784 - 789, 2013.

[46] K. Keskinbora, C. Grevent, M. Bechtel, M. Weigand, E. Goering, A. Nadzeyka, L. Peto, S. Rehbein, G. Schneider, R. Follath, J. V. Comamala, H. Yan, G. Schutz, “Ion beam lithography for Fresnel zone plates in X-ray microscopy,” *Optics Express* **21**(10), pp. 11747-11756, 2013.

[47] I. B. Sohn, M. S. Ahsan, Y. C. Noh, H. K. Choi, J. T. Kim, M. J. Ko, “Fabrication of Fresnel zone plate lens in fused silica glass using femtosecond laser lithography technology,” *Optical Engineering* **53**(5), pp. 055107:1-10, 2014.

[48] N. E. Kurland, T. Dey, S. C. Kundu, V. K. Yadavalli, “Precise patterning of silk microstructures using photo lithography,” *Advanced Materials* **25**(43), pp.

6207 - 6212, 2013.

[49] J. K. Kim, J. K. Kim, K. H. Oh, I. B. Sohn, W. J. Shin, H. Y. Choi, B. H. Lee, "Fabrication of Micro Fresnel Zone Plate Lens on a Mode-Expanded Hybrid Optical Fiber Using a Femtosecond Laser Ablation System," *IEEE photonics technology letters* **21**(1), pp. 21-23, 2009.

[50] P. Srisungsitthisunti, O. K. Ersoy, X. Xu, "Femtosecond Laser Direct Writing of Volume Fresnel Zone Plates," *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing* **7584**, pp. 1-10, 2010.

[51] J. C. Ryu, J. T. Kim, and I. B. Sohn, "Optical Analysis of Diffraction Grating and Fresnel Zone Plate Fabricated on Fused Silica Glass by a Femtosecond Laser," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* **27**(3), pp. 18-26, 2010.

[52] Y. L. Sun, W. F. Dong, L. G. Niu, T. Jiang, D. X. Liu, L. Zhang, Y. S. Wang, Q. D. Chen, D. P. Kim, and H. B. Sun, "Protein-based soft micro-optics fabricated by femtosecond laser direct writing," *Light: Science & Applications* **3**, pp. 1-7, 2014.

[53] J. Y. Choi, M. Ramme, and M. Richardson, "Multiple beam splitter using volumetric multiplexed Fresnel zone plates fabricated by ultrafast laser-writing," *Optics letters* **37**(16), pp. 3375-3377, 2012.

[54] J. K. Kim, W. S. Ha, J. Y. Park, J. K. Kim, I. B. Sohn, W. J. Shin, and K. H. Oh, "Micro Fresnel Zone Plate Lens Inscribed on a Hard Polymer Clad Fiber Using Femtosecond Pulsed Laser," *IEEE photonics technology letters* **25**(8), pp. 761-763, 2013.

[55] Y. Hao, Z. N. Tian, T. Jiang, L. G. Niu, B. R. Gao, "Fabrication of large-scale multilevel phase type Fresnel zone plate arrays by femtosecond laser direct writing," *Optics communications* **362**, pp. 69-72, 2016.

[56] S. Zhang, "Design and fabrication of 3D-printed planar Fresnel zone plate lens," *Electronics letters* **52**(10), pp. 833-835, 2016.

[57] V. R. M. Rodrigues, J. Thomas, C. Santhosh, H. Ramachandran, and D. Mathur, "Microfabrication of Fresnel zone plates by laser induced solid ablation," *Journal of optics* **18**, pp. 1-7, 2016.



- [58] V. R. M. Rodrigues, D. Praveen, B. Surekha, C. Santhosh, R. Hema, M. Deepak, “Zone plate fabrication using a low power femtosecond laser,” *Advanced science letters* **23**(3), pp. 1745-1748, 2017.
- [59] Y. Hu, Y. Chen, J. Ma, J. Li, W. Huang, and J. Chu, “High-efficiency fabrication of aspheric microlens arrays by holographic femtosecond laser-induced photopolymerization,” *Applied physics letters* **103**, pp. 141112:1-4, 2013.
- [60] Z. Deng, Q. Yang, F. Chen, X. Meng, H. Bian, J. Yong, C. Shan, and X. Hou, “Fabrication of large-area concave microlens array on silicon by femtosecond laser micromachining,” *Optics letters* **40**(9), pp. 1928-1931, 2015.
- [61] H. Liu, F. Chen, Q. Yang, Y. Hu, C. Shan, S. He, J. Si, and X. Hou, “Facile and flexible fabrication of gapless microlens arrays using a femtosecond laser microfabrication and replication process,” *Laser applications in microelectronic and optoelectronic manufacturing* **8243**, pp. 82430Z:1-6, 2012.
- [62] B. H. Cumpston, S. P. Ananthavel, S. Barlo, D. L. Dyer, J. E. Ehrlich, L. L. Erskine, A. A. Heikal, S. M. Kuebler, I. Y. S. Lee, D. M. Maughon, J. Q. H. Rkel, M. Rumi, X. L. Wu, S. R. Marder, J. W. Perry, “Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication,” *Nature* **398**, pp. 51-54, 1999.
- [63] M. Xia and Y. Tu, “An Investigation of Femtosecond Laser Micromachining,” *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems*, pp. 1-5, 2005.
- [64] K. H. Leong, A. A. Said, and R. L. Maynard, “Femtosecond Micromachining Applications for Electro-Optic Components,” *Electronic Components and Technology Conference* pp. 1-5, 2001.
- [65] Y. J. Kim, Y. S. Kim, S. M. Kim S. W. Kim, “Ultrafast femtosecond laser fundamentals and applications,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* **27**(6), pp. 7-16, 2010.
- [66] T. J. Yu, C. H. Nam, J. M. Lee, “Progress of Ultrashort Pulse Lasers,” *Physics & High Technology*, pp. 2-7, 2010.
- [67] J. C. Ryu, “Fabrication and optical testing of diffractive optical elements in

fused silica glass by using a femtosecond laser,” Master’s Thesis, 2009.

[68] Z. D. Popovic, R. A. Sprague, G. A. Neville Connell, “Techniques for monolithic fabrication of microlens arrays,” *Applied Optics* **27**(7), pp. 1281 - 1284, 1988.

[69] D. Daly, R. F. Stevens, M. C. Hutley, N. Davies, “The manufacture of microlenses by melting photoresist”. *Measurement Science and Technology* **1**(8), pp. 759-766, 1990.

[70] S. Grilli, L. Miccio, V. Vespini, A. Finizio, S. De Nicola, P. Ferraro, “Liquid micro-lens array activated by selective electrowetting on lithium niobate substrates,” *Optics Express* **16**(11), pp. 8084-8093, 2008.

[71] F. Chen, H. Liu, Q. Yang, X. Wang, C. Hou, H. Bian, W. Liang, J. Si, X. Hou, “Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method,” *Optics Express* **18**(19), pp. 20334-20343, 2010.

[72] C. S. Lim, M. H. Hong, A. Senthil Kumar, M. Rahman, X. D. Liu, “Fabrication of concave micro lens array using laser patterning and isotropic etching,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **46**, pp. 552 - 558, 2006.

## 【연구실적】

- 발표 -

- [1] 최훈국, 김진태, 손익부, 노영철, “레이저 연마를 이용한 회절격자 회절효율 향상 연구”, 한국 물리학회 P3-I056, pp. 411, 2012.
- [2] 최훈국, 김진태, 최판주, 손익부, 노영철, “이층구조 회절격자 특성연구”, photonics conference TP-II7, pp. 22, 2012.
- [3] 최훈국, 김진태, 손익부, 노영철, “레이저를 이용한 초미세 격자 연마 기술”, COOC TP-VI14, pp. 309-310, 2013.
- [4] 최훈국, 김진태, 손익부, “회절광학소자를 이용한 레이저 미세가공,” 한국광학회 하계학술발표회 FP-IV12, pp. 436-437, 2013.
- [5] 손익부, 최훈국, 노영철, 김진태, “레이저를 이용한 초정밀 회절광학소자 가공 기술,” 한국생산제조시스템학회 추계학술대회, pp. 115, 2013.
- [6] 최훈국, 손익부, 정덕, 노영철, 김진태, “레이저를 이용한 초미세 마이크로 렌즈 가공 기술,” 한국레이저가공학회 추계학술발표대회, pp. 61, 2013.
- [7] 최훈국, 김진태, 손익부, 노영철, “레이저를 이용한 마이크로 렌즈 제작 및 특성 연구,” 한국물리학회 P1-I023, pp. 425, 2014.
- [8] 최훈국, 손익부, 노영철, 김창환, 이호, 김진태, “레이저와 금형기술을 이용한 마이크로 렌즈 가공 기술,” 제 17회 한국 MEMS 학술대회(KMEMS), FP-1-71, pp. 181-182, 2015.
- [9] 임기동, 최훈국, 손익부, 노영철, 성재희, 이성구, 정태문, 김진태, “펨토초와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 광섬유 절단 및 형상제어 연구,” 제 22회 광전자 및 광통신 학술회의 (COOC2015), WP-II13, pp. 64, 2015.
- [9] 정영준, 최훈국, 손익부, 노영철, Md. Shamim Ahsan, 김진태, “펨토초 레이저를 이용한 다층 회절광학소자 제작 연구,” 제 22회 광전자 및 광통신 학술회의 (COOC2015), TP-VI17, pp. 217, 2015.
- [10] 최훈국, 정영준, 손익부, 노영철, 김진태, “레이저를 이용한 마이크로 렌즈 형상 제어 연구,” 제 22회 광전자 및 광통신 학술회의 (COOC2015), F1D-VI3, pp. 258, 2015.
- [11] 최훈국, 임기동, 이준기, 유동윤, 노영철, 손익부, “레이저를 이용한 광섬유 소

- 차 가공 기술,” 2015년도 추계레이저가공학회, pp. 35-36, 2015.
- [13] 최훈국, 최운혁, 임기동, 김진태, 손익부, “레이저를 이용한 초정밀 가공 기술 및 광학 소자 응용 연구,” 한국물리학회 P1-op.022, pp. 157, 2016.
- [14] Joong Wook Lee, Jin-Kyu Yang, Jeong Eun Kim, Ik-Bu Sohn, **Hun-Kook Choi**, Chul Kang, Chul-Sik Kee, “Polarization-independent terahertz three-dimensional sub wavelength confinement in coupled slot structures,” Proc. of SPIE 8496, 849610-849611, 2012.
- [15] Md. Shamim Ahsan, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, **Hun-Kook Choi**, Jin-Tae Kim, “Selective Patterning of Indium-Tin-Oxide Thin Film on Flexible Polymer Using Femtosecond Laser,” The 9th Asian-European International Conference On Plasma Surface Engineering P2-8, pp. 313, 2013.
- [16] **Hun-Kook Choi**, Md. Shamim Ahsan, Dongyoon Yoo, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, Jin-Tae Kim, “Formation of cylindrical micro-lens array in fused silica glass using laser irradiations,” SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications 8923, pp. 89234T:1-7, 2013.
- [17] Ik-Bu Sohn, Md. Shamim Ahsan, Young-Chul Noh, **Hun-Kook Choi**, Jin-Tae Kim, Myeong Jin Ko, “Fabrication of Fresnel zone plate lens in fused silica glass using femtosecond laser lithography technology,” SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications 8923, pp. 89233Y:1-8, 2013.
- [18] Ik-Bu Sohn, **Hun-Kook Choi**, Md Shamim Ahsan, Deok-Jung, Young-Chul Noh, Jin-Tae Kim, “Efficiency Enhancement of Femtosecond Laser Engraved Diffraction Gratings Using CO<sub>2</sub> Laser Polishing,” International Conference on Advanced Materials and Devices THU-PH-P29, 2013,
- [19] **Hun-Kook Choi**, Md Shamim Ahsan, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, Jin-Tae Kim, “Femtosecond Laser Assisted Fabrication of Double-layer Diffraction Gratings inside Fused Silica Glass,” International Conference on Advanced Materials and Devices FRI-PH-P03, 2013.
- [20] Md. Shamim Ahsan, Ragib Shakil Rafi, Ik-Bu Sohn, **Hun-Kook Choi** and Man Seop Lee, “Characterization of Femtosecond Laser Filamentation in Soda-lime Glass,” 2nd Int’l Conf. on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), 2015.

- [21] **Hun-Kook Choi**, Young-Jun Jeong, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, Jae-Hee Sung, Seong-Ku Lee, Tae-Moon Jeong and Jin-Tae Kim, “Laser fabrication of micro-lens array on fused silica,” CLEO-Pacific Rim 26P-90, 2015.
- [22] **Hun-Kook Choi**, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, and Jin-Tae Kim, “Formation of micro-lens array on fused silica glass using femtosecond and CO<sub>2</sub> laser,” The 9th International Conference on Advanced Materials and Devices(ICAMD2015) Po-De15-022, 2015.
- [23] Woon-Hyuk Choi, **Hun-Kook Choi**, Ik-Bu Sohn, and Jin-Tae Kim, “Fabrication of multi-layer fresnel zone plate inside fused silica plate using a femtosecond laser,” The 9th International Conference on Advanced Materials and Devices(ICAMD2015) Po-De15-024, 2015.
- [24] Dongyoon Yoo, **Hun-Kook Choi**, Ik-Bu Sohn, Young-Han Kim, Ho-Min Kang, Md. Shamim Ahsan, “UV nanosecond laser patterning of polypropylene film with multi focused beam for breathable film,” The 17th International Symposium on Laser Precision Microfabrication P-53, 2016.
- [25] **Hun-Kook Choi**, Young-Jun Jeong, Ik-Bu Sohn, and Jin-Tae Kim, “Formation of micro-lens array using femtosecond and CO<sub>2</sub> laser,” The 17th International Symposium on Laser Precision Microfabrication P-4, 2016.
- [26] Dongyoon Yoo, **Hun-Kook Choi**, Ik-Bu Sohn, Youngsic Kim, Suyoung Kim, Wan chun Kim, and Jinbong Kim, “Laser micro-structuring of trench for variable optical attenuator with high performance,” The 17th International Symposium on Laser Precision Microfabrication P-54, 2016.

-논문-

- [1] 최훈국, 유동윤, 손익부, 노영철, 김영식, 김수용, 김완춘, 김진봉, “레이저를 이용한 트렌치 제작 및 응용연구,” 한국레이저가공학회지 **18**(1), pp. 7-11, 2015.
- [2] 유동윤, 최훈국, 손익부, 노영철, 정덕, 김영섭, 이호, 김창환, “CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 음각 원뿔 구조 광섬유 팁 가공 최적화 연구,” 한국레이저가공학회지 **18**(3), pp. 14-19, 2015.
- [3] Joong Wook Lee, Jin-Kyu Yang, Ik-Bu Sohn, **Hun-Kook Choi**, Chul Kang, and Chul-Sik Kee, “Relationship between the order of rotation symmetry in

perforated apertures and terahertz transmission characteristics,” *Optical Engineering* **51**(11), pp. 119002:1-5, 2012.

[4] Ik-Bu Sohn, Md. Shamim Ahsan, Young-Chul Noh, **Hun-Kook Choi**, Jin-Tae Kim, Myeong Jin Ko, “Fabrication of Fresnel zone plate lens in fused silica glass using femtosecond laser lithography technology,” *Optical Engineering* **53**(5), pp. 055107:1-10, 2014.

[5] **Hun-Kook Choi**, Deok-Jung, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, Yong-Tak Lee, Jin-Tae Kim, and Md.Shamim Ahsan, “Diffraction Efficiency Enhancement of Femtosecond Laser Engraved Diffraction Gratings Using CO<sub>2</sub> Laser Polishing,” *Journal of the Korean Physical Society* **65**(10), pp. 1559-1565, 2014.

[6] **Hun-Kook Choi**, Md.Shamim Ahsan, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, Yong-Tak Lee, and Jin-Tae Kim, “Femtosecond Laser Assisted Fabrication of Double-layer Diffraction Gratings inside Fused Silica Glass,” *Journal of the Korean Physical Society* **66**(1), pp. 55-60, 2015.

[7] **Hun-Kook Choi**, Dongyoon Yoo, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, Jae-Hee Sung, Seong-Ku Lee, Tae-Moon Jeong, Md.Shamim Ahsan and Jin-Tae Kim, “CO<sub>2</sub> Laser Assisted Fabrication of Micro-lensed Single-mode Optical Fiber,” *Journal of the Optical Society of Korea* **19**(4), pp. 327-333, 2015.

[8] **Hun-Kook Choi**, Md. Shamim Ahsan, Dongyoon Yoo, Ik-Bu Sohn, Young-Chul Noh, Jin-Tae Kim, Deok Jung, Jin-Hyeok Kim, Ho-Min Kang, “Formation of cylindrical micro-lens array in fused silica glass using CO<sub>2</sub> laser polishing,” *Optics and Laser Technology* **75**, pp. 63-70, 2015.

[9] Ik-Bu Sohn, Md. Shamim Ahsan, Dongyoon Yoo, Young-Chul Noh, Yong-Tak Lee, **Hun-Kook Choi**, Jin-Tae Kim, Ho-Min Kang, “Femtosecond Laser Assisted Selective Patterning of indium-tin-oxide thin film deposited on flexible polymer,” *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* **126**(23), pp. 4285-4291, 2015.

[10] Ik-Bu Sohn, **Hun-Kook Choi**, Dongyoon Yoo, Young-Chul Noh, Md. Shamim Ahsan, Jae-Hee Sung, and Seong-Ku Lee, “Formation of plano-convex micro-lens array in fused silica glass using CO<sub>2</sub> laser assisted reshaping technique,” *Journal of the Korean Physical Society* **69**(3), pp. 335-343, 2016.

- [11] **Hun-Kook Choi**, Jinchang Ryu, Chanju Kim, Young-Chul Noh, Ik-Bu Sohn, and Jin-Tae Kim, "Formation of micro-lens array using femtosecond laser and CO<sub>2</sub> laser," *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* **11**(3), pp. 341-345, 2016.
- [12] Ik-Bu Sohn, **Hun-Kook Choi**, Young-Chul Noh, Man-Seop Lee, Jin-Kyoung Oh, Seong-min Kim, Md. Shamim Ahsan, "Performance analysis of CO<sub>2</sub> laser polished angled ribbon fiber," *Optical Fiber Technology* **33**, pp. 77-82, 2017.
- [13] Ik-Bu Sohn, **Hun-Kook Choi**, Dongyoon Yoo, Young-Chul Noh, Jae-Hee Sung, Seong-Ku Lee, Md. Shamim Ahsan, Ho Lee, "Synchronized femtosecond laser pulse switching system based nanopatterning technology," *Optical Materials* **69**, pp. 295-302, 2017.