

2012年 2月
碩士學位論文

펨토초 레이저로 제작된 회절격자의
CO₂ 레이저 표면 연마 특성 연구

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

崔 熏 局

펨토초 레이저로 제작된 회절격자의
CO₂ 레이저 표면 연마 특성 연구

Study on CO₂ laser surface treatment of diffraction
grating fabricated by using a femtosecond laser

2012年 02月

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

崔 熏 局

펨토초 레이저로 제작된 회절격자의
CO₂ 레이저 표면 연마 특성 연구

指導教授 金 珍 泰

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함

2011年 10月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

光 技 術 工 學 科

崔 熏 局

崔熏局의 碩士學位論文을 認准함

심사위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

심 사 위 원 고등광기술연구소 박사 손 익 부 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 김 진 태 인

2011年 11月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

목 차

ABSTRACT

제 1장 서 론	1
제 1절 연구 배경	1
제 2절 연구 목적	3
제 2장 이 론	5
제 1절 레이저 가공	5
1. 펨토초 레이저	5
제 2절 회절격자	7
제 3절 필라멘트 현상	9
제 4절 위상 홀로그램	10
1. 키노폼	10
2. 반복 푸리에 변환방법을 적용한 위상추출 방법	10
제 3장 실험장치 및 방법	12
제 1절 실험 장치	12
1. 펨토초 레이저	12
2. CO ₂ 레이저	14
3. 공간광변조기 (SLM)	15
4. 레이저 가공 시스템	17

5. 키노폼 점 배열 재생 시스템	24
제 4장 실험 결과	26
제 1절 회절격자 효율 향상	26
1. 회절격자 제작	26
2. CO ₂ 레이저 연마	28
3. 연마 전·후 회절격자 특성 비교	30
제 2절 다중 회절격자	36
1. 다중 회절격자 제작 (격자주기 6 μm)	36
2. 제작된 다중 회절격자 (격자주기 6 μm) 측정 및 비교	39
3. 다중 회절격자 제작 (격자주기 2 μm)	44
4. 제작된 다중 회절격자 (격자주기 2 μm) 측정 및 비교	47
제 3절 필라멘트 현상	51
1. 가공 및 깊이 비교	51
제 4절 키노폼 점 배열 재생	56
1. 키노폼 점 배열 제작	56
2. 키노폼 점 배열 재생	57
제 5장 결 론	63
【참고 문헌】	65
【감사의 글】	68

그림 목 차

그림 1. 미세가공에 사용되는 레이저 펄스 비교	6
그림 2. 회절격자	7
그림 3. 필라멘트 현상	9
그림 4. 반복 푸리에 변환 알고리즘 흐름도	10
그림 5. 공간광변조기 (SLM) 원리	16
그림 6. 반복률 1 kHz 를 가지는 펨토초 레이저 가공 시스템 모식도	18
그림 7. 반복률 1 kHz 를 가지는 펨토초 레이저 가공 시스템 모습	19
그림 8. 실험에 사용된 100 kHz 반복률을 가지는 펨토초 레이저 모식도 ..	20
그림 9. 100 kHz 반복률을 가지는 펨토초 레이저 가공 시스템 모습	21
그림 10. 회절격자 표면 연마에 사용된 CO ₂ 레이저 연마 시스템 모식도 ..	22
그림 11. CO ₂ 레이저 연마 시스템 모습	23
그림 12. 키노폼 점 배열 재생 시스템 모식도	24
그림 13. 키노폼 점 배열 재생 시스템 모습	25
그림 14. 연마 전 20 μm 격자 주기를 가지는 회절격자의 광학 현미경, 전자주사현미경 (SEM)과 알파스텝 측정 결과	26
그림 15. 연마 반복수에 따른 회절격자의 광학 현미경 표면 및 전자주사현미경의 단면 이미지 측정 결과	29
그림 16. 회절격자 세기 및 효율 측정 방법 모식도	30
그림 17. 연마 전 회절격자의 회절패턴 (격자 주기 : 20 μm)	31
그림 18. 연마 후 반복수에 따른 회절격자패턴 측정	32
그림 19. 연마 전·후 연마 반복수 변화에 따른 회절 차수의 세기 및 효율 비교	

.....	34
그림 20. 회절격자의 깊이 변화에 따른 회절 특성 비교	35
그림 21. 연마 전과 각각의 연마 단계에 따른 차수에 대한 세기 및 효율 비교	35
그림 22. 두 층을 가지는 회절격자의 모식도 (격자 간격 : $6 \mu m$)	36
그림 23. 단일 층을 가지는 $6 \mu m$ 와 $3 \mu m$ 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정	37
그림 24. 회절패턴 측정방법 모식도	39
그림 25. $6 \mu m$ 의 격자 주기를 가지고 두 층의 간격이 $5 \mu m$ 로 제작된 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정	40
그림 26. 두 층으로 구성된 회절격자 (격자 주기 : $6 \mu m$)의 층 간격변화에 따른 회절패턴 측정	42
그림 27. 두 층간의 깊이 간격 변화에 따른 1차 강도 변화	42
그림 28. 두 층을 가지는 회절격자의 모식도 (격자 간격 : $2 \mu m$)	44
그림 29. 단일 층을 가지는 $2 \mu m$ 와 $1 \mu m$ 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정	45
그림 30. 제작된 회절격자 측정 방법 모식도	47
그림 31. $2 \mu m$ 의 격자 주기를 가지고 두 층의 간격이 $10 \mu m$ 로 제작된 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정	48
그림 32. 두 층으로 구성된 회절격자 (격자 주기 : $2 \mu m$)의 층 간격변화에 따른 회절패턴 측정	50
그림 33. 가공 속도 변화에 따른 단면 측정 (20배율 렌즈 [NA = 0.4])	52
그림 34. 가공 속도 변화에 따른 단면 측정 (50배율 렌즈 [NA = 0.42])	53
그림 35. 가공 속도 변화에 따른 단면 측정 (100배율 렌즈 [NA = 0.5])	54

그림 36. 가공 속도와 렌즈배율 변화에 따른 가공 깊이 변화	55
그림 37. 자체 설계된 프로그램인 MATLAB을 이용하여 점 배열 생성	56
그림 38. 참조표적으로 사용된 1951 USAF 타겟	58
그림 39. 그룹 4 요소 1의 공간주파수	59
그림 40. 초점길이 100 mm 를 가지는 렌즈에 의한 재생이미지 측정	60
그림 41. 10배율을 가지는 대물렌즈에 의한 재생이미지 측정	60
그림 42. 20배율을 가지는 대물렌즈에 의한 재생이미지 측정	61
그림 43. 40배율을 가지는 대물렌즈에 의한 재생이미지 측정	61

표 목 차

표 1. 실험에 사용된 1 kHz 펄스 레이저 사양	12
표 2. 실험에 사용된 100 kHz 펄스 레이저 사양	13
표 3. 실험에 사용된 CO ₂ 레이저 사양	14
표 4. 실험에 사용된 공간광변조기 (SLM) 사양	15
표 5. 실험에 사용된 1 kHz 반복률을 가지는 펄스 레이저 가공 시스템 사양	17
표 6. 실험에 사용된 100 kHz 반복률을 가지는 펄스 레이저 가공 시스템 사 양	17
표 7. 실험에 사용된 CO ₂ 레이저 연마 시스템 사양	18
표 8. 실험에 사용된 CCD 카메라 사양	25
표 9. 참조 표적으로 사용된 1951 USAF 타겟 데이터	58
표 10. 렌즈에 따른 점 크기 측정	62

ABSTRACT

Study on CO₂ laser surface treatment of diffraction grating fabricated by using a femtosecond laser

Hun-Kook Choi

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

Department of Photonic Engineering,

Graduate School of Chosun University

We fabricated a two-layer diffraction grating inside fused silica glass by using a femtosecond laser direct writing method. The femtosecond laser with a wavelength of 515 *nm*, a pulse width of 250 *fs*, a repetition rate of 100 *kHz*, and an average output power of 6 *W* was used. Two layer diffraction grating with a grating period of 6 μm was successfully fabricated with the layer gap of 0.5, 1, 2, 3, and 5 μm , respectively. Also, we investigated the diffraction pattern by illuminating a He-Ne laser beam. Finally, we demonstrated the diffraction grating with a grating period of 3 μm by adjusting the gap of each layer with a grating period of 6 μm . Femtosecond laser direct writing technology of multi-layer has a potential to fabricate the diffraction grating with a grating period of below 1.5 μm .

When writing grating inside fused silica using femtosecond laser, we found filament phenomenon which engraved toward Z-axis direction. To reduce this phenomenon, we use objective lenses which have 20 \times (NA = .4), 50 \times (NA = 0.42), and 100 \times (NA=0.5) magnification. We do experiment with 4.3 μJ fixed pulse energy and changing of processing speed from 1 to 10 *mm/s*. As lens magnification and processing speed were increased, filament phenomenon is decreased and its length is 4 ~ 5 μm with 100 magnification of objective lens.

After fabrication of diffraction grating on the surface of fused silica by using

a femtosecond laser, its surface with CO₂ laser was polished. We measured a surface and cross-section with optical microscope and SEM by changing polishing repetition rate of CO₂ laser, respectively. We found that the efficiency of the diffraction grating with surface treatment less than 1 ~ 3 steps of the surface treatment by using a CO₂ laser is increased by 7%.

A laser beam array is generated by using a phase hologram (Kinoform) and spatial light modulation (SLM). The beam size was 2.78 μm for the objective lens of $\times 40$ magnification. This method will be applied to make complex 3D shapes by using a femtosecond laser beam.

제 1장 서 론

제 1절 연구 배경

1960년 메이만이 루비 결정 매질을 사용한 레이저를 최초로 개발하였으며, 자반은 헬륨네온 혼합가스를 이용한 기체 레이저를 개발 하였다. 이 후 반도체 레이저, 유기액체 레이저, 색소 레이저 등과 같은 다양한 매질을 사용하여 레이저들이 개발 되어왔다. 최근 들어 개발된 고출력, 극초단, 자외선 영역의 첨단 레이저들을 이용한 초정밀가공 연구 분야에 대한 관심이 높아지고 있다. 레이저를 이용한 정밀가공은 가공물체에 외력을 가하지 않고, 마이크로 미터 이하의 크기로 정밀 부품을 가공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 칩두 출력이 높은 펨토초 레이저 가공기술은 나노초 레이저 가공 현상에서 나타나는 열 영향이 없어, 재래식 가공 방법으로 불가능한 초정밀 가공이 가능하게 되었다^(1,2). 펨토초 레이저를 이용한 가공은 실리콘 기판에 레이저 파장 크기 이하의 광 도파로 제작, 홀 가공, 박막 제거 등 여러 분야에서 사용되고 있으며, 기존에 가공이 불가능하였던 다양한 물질들을 가공할 수 있는 장점이 있다⁽³⁻⁶⁾. 이러한 장점들로 인해 펨토초 레이저를 사용한 가공 기술들을 적용하여 실리콘이나 사파이어, SUS 등의 다양한 물질에 제작된 FZP, 회절격자, 마이크로 렌즈 어레이, 홀로그램 등과 같은 광학소자의 특성변화나 현상들을 분석하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서 연구하고자 하는 회절격자 제작은 식각, 금형, 레이저 가공 등의 방법들이 사용되고 있다⁽⁷⁻⁹⁾. 레이저 파장에 비해 매우 짧은 전자빔을 사용하는 경우 레이저 가공보다 좀 더 정밀하게 표면에 가공할 수 있는 장점은 있으나, 내부 가공은 불가능하며 가공 비용이 많이 들고 전자빔을 자유롭게 조절하는 것이 힘들다. 또한, 새로운 물질들에 대한 펨토초 레이저 빔 가공 원리를 규명할 필요가 있다. 회절격자의 펨토초 레이저 가공을 위하여 회절격자 간격의 최소화, 회절 효율의 증대, 제작 시간을 최소화할 필요가 있다. 펨토초 레이저를 사용하여 회절격자를 제작할 경우 회절한계 등으로 인해 약 $1.5 \mu m$ 이하의 격자 주기를 가지는 회절격자의 제작이 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 실리콘 내부에 격자들이 깊이 방향으로 일치하지 않는 다층으로 제작하여 $1.5 \mu m$ 이하의 회절격자 제작에 대한 연구를 하였다.

회절격자의 효율을 증대하기 위한 기존 연구는 반사필름을 사용하여 노광량과 입사각을 변화⁽¹⁰⁾시키거나 실리카 내부에 볼륨 브래그 격자를 제작⁽¹¹⁾ 또는 회절격자 표면에 Al, Au, Ag 등의 물질을 코팅하여 코팅 두께에 따른 회절효율 변화⁽¹²⁾에 대한 연구들이 이루지고 있다. 본 연구에서는 이러한 과정들을 사용하지 않고, 펄스 레이저를 사용하여 제작된 회절격자 표면에 CO₂ 레이저를 조사하여 회절격자의 거친 표면을 연마함으로써 회절효율을 증대하는 연구를 하였다.

레이저를 주사하지 않고, 레이저 빔과 회절 광학 소자를 적용하여 마스크가 필요 없는 레이저 가공 기술은 제작 시간과 레이저 빔의 손실을 최소화하는 기술로서 2차원 및 3차원 형상 가공에 다양하게 적용되고 있다⁽¹³⁾. 이러한 기술은 현재 키노폼 렌즈를 다이아몬드에 직접 가공하여 X-선을 적용하여 나노미터 스케일로 X-선 빔을 줄일 수 있게 되었다⁽¹⁴⁾. 본 연구에서는 광 소자 제작 시간을 줄이기 위하여 위상 홀로그램인 키노폼을 공간광변조기에 인가하고, 균일한 레이저 빔을 광변조기에 조사하여 생성된 물체 빔을 사용하여 레이저를 주사하지 않고 물체를 가공하는 기술을 연구 하였다.

제 2절 연구 목적

실리카는 단일 산화물 유리로 무정형, 비결정의 규소와 산소로 이루어져 있으며, 넓은 파장 범위에 걸쳐 우수한 투과율을 가지는 특징이 있다. 또한, 매우 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 열 충격에 강하고 실리카를 녹일 수 있는 물화수소산을 제외한 화학물질들과 상호작용하지 않는 화학적으로 불활성 성질을 가지고 있다. 이러한 특성으로 높은 에너지 밀도를 가지는 레이저용 광학 소자 등으로 유용하게 사용되고 있다. 이러한 실리카에 제작된 회절격자 등과 같은 광학 소자 들은 정밀 거리 측정 및 분광기를 이용한 스펙트럼 측정 등의 많은 분야에서 사용되고 있다.

실리카 표면에 레이저를 이용하여 회절격자를 가공하는 기술들이 많이 연구되고 있지만 레이저를 사용 시 레이저 빔의 회절한계로 파장 크기 이하의 격자 간격을 가지는 회절격자를 가공하기가 어렵다. NA가 0.4인 대물렌즈와 레이저의 파장 크기가 약 $1 \mu m$ 인 레이저를 사용 시 제작할 수 있는 회절격자의 최소 격자 간격은 약 $2 \mu m$ 의 격자 간격을 가진다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 실리카 표면이 아닌 내부에 두 개의 층을 가지고 깊이 방향으로 어긋나게 회절격자를 제작하는 연구 목적을 가진다. 또한, 펨토초 레이저를 사용하여 투명물질의 내부에 가공 시 레이저 빔 조사 방향으로 길게 가공되는 필라멘트 현상특성을 규명하여, 회절격자 층들의 간격을 줄여 회절격자 성능을 향상 시키는데 연구 목적을 두었다.

레이저를 이용하여 실리카 표면에 광학소자를 제작할 경우 가공 부분이나 주위에 미세한 손상이나 부스러기 등이 존재한다. 이러한 부스러기 들은 세척의 과정을 거쳐도 완전하게 제거되지 않기 때문에 회절패턴, 스펙트럼, 거리측정과 같은 측정 및 계측 시스템에서의 효율을 저하시키는 원인이 된다. 이러한 회절효율을 저하시키는 부스러기를 제거하기 위해 CO₂ 레이저를 사용하여 펨토초 레이저로 제작된 회절격자의 표면에 조사하여 연마반복에 따른 효율특성 변화를 연구 하였다.

앞서 연구한 주제들은 펨토초 레이저를 이용하여 마스크 제작 없이 원하는 물질의 표면이나 내부에 가공할 수 있으며, 기존의 연구보다 시간이 많이 단축되는 장점이 있지만 원하는 모양이나 형상을 얻기 위해서는 레이저 빔을 장시간 동안 주사 (scan)하여야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 공간광 변조기에 인가된 위상 홀로그램인 정밀 키노폼에 균일한 레이저 빔을 조사 시 생기는 재생된 물체 형상을 레이저 주사 없이 물체를 가공할 수 있는 가공 시스템

개발을 하고자 한다. 이러한 가공 시스템의 기초 연구로 하나의 레이저 빔을 다중 어레이 형태로 레이저 빔을 형성하는 연구를 통해 향후 좀 더 복잡한 삼차원 형태의 물체 가공에 적용하고자 한다.

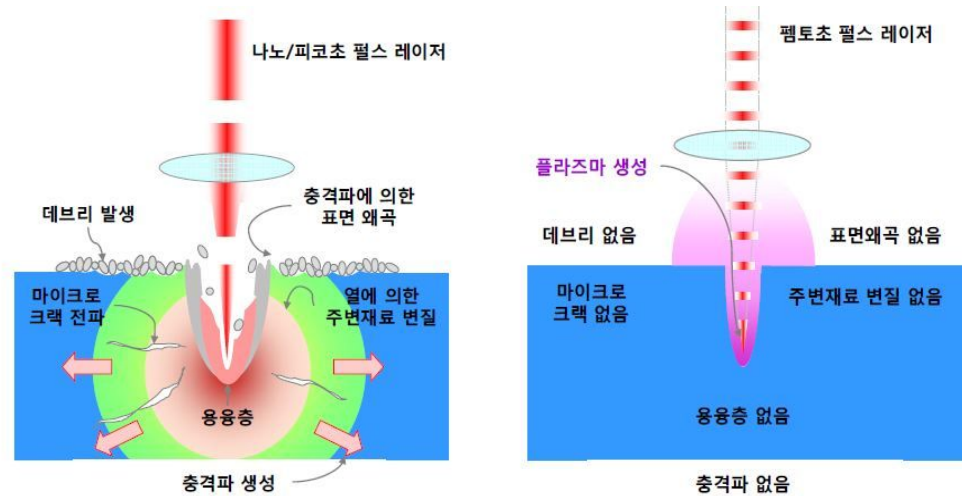
제 2장 이 론

제 1절 레이저 가공

1. 펨토초 레이저

극초단 펨토초 레이저 가공기술은 기존 레이저 기반 마이크로 가공 시, 레이저와 재료의 상호 반응 시 발생하는 열로 인한 정밀도의 한계를 극복하기 위해 1990년 이후 본격적으로 개발되기 시작하였다. 펨토초 레이저의 높은 첨두 출력에 의한 비선형 광학효과와 이득매질의 손상을 방지할 수 있는 처프 펄스증폭 (CPA)기술의 개발로 고출력 펨토초 레이저 펄스의 생성이 가능해졌으며, 1990년대 후반부터는 선진국을 중심으로 펨토초 레이저 펄스를 이용한 재료가공에 관한 연구가 시작되었다. 이러한 펨토초 레이저의 발전에 의해 비선형 광학현상을 이용한 여러 분야에 펨토초 레이저 가공기술이 사용되고 있다.

펨토초 레이저 가공은 가공물을 플라즈마 상태로 직접 변화시켜 가공하므로, 열로써 가공물을 제거하는 기존 레이저 가공에 비해 열 영향영역 (HAZ : Heat Affected Zone) 및 크랙 (crack) 등을 최소화 할 수 있는 미세가공 기술이다. 또한, 높은 첨두 출력에 의한 비선형 광학현상인 다 광자 (multi-photon absorption) 흡수로 가공이 이루어지므로, 재료의 광 흡수 대역이 광원의 파장대역 내에 존재하지 않는 경우에도 가공이 가능하다⁽¹⁵⁻¹⁷⁾.



(a) 나노초 레이저 펄스 가공

(b) 펨토초 레이저 펄스 가공

그림 1. 미세가공에 사용되는 레이저 펄스 비교⁽¹⁸⁾

그림 1 에서 보여주는 것과 같이 나노초 레이저는 펨토초 레이저에 비해 긴 펄스의 레이저를 사용하여 가공을 하게 되면 가공영역 주변에 열 영향 부분이 넓게 생기기 때문에 가공 영향부위가 커지며, 정밀한 가공이 어렵게 된다. 그러나 극 초 단 펄스 레이저를 사용하여 가공을 하게 되면, 에너지 전달이 레이저 빔 주위에서 광자들이 전자에 흡수되는 상태로 가공이 이루어진다. 이 때문에 가공 영역에 열 발생이 극미하고, 가공 부위만 분해되어 사라지기 때문에 정밀하게 가공이 가능하며, 가공부위 이외의 부분으로 열 영향을 최소화 할 수 있다.

또한, 극 초단 펄스 레이저는 높은 출력 밀도에 의한 다 광자 흡수를 통해서 밴드 갭이 존재하는 투명 재질 내부의 가공이 가능하다. 물체는 각각 고유의 빛의 파장을 흡수하는데, 투명재질은 우리 눈에 보이는 가시 광 영역의 빛을 투과시키기 때문에 투명하게 보이며, 이런 물질은 빛을 투과시키기 때문에 레이저 가공이 어렵다. 그러나 극 초단 펄스 레이저를 사용하면, 투명 재질 내부에 다 광자 흡수 과정을 통해서 빛이 흡수되고, 이로 인해 굴절률과 밀도의 변화 균열의 생성 등의 가공이 일어나게 된다⁽¹⁹⁾.

제 2절 회절격자

많은 수의 일정한 간격을 가진 슬릿 혹은 홈 모양의 격자 구조를 가지는 광학 소자를 회절격자 또는 그레이팅 (grating)이라 한다. 회절격자의 종류에는 반사형과 투과형이 있으며, 입사빔을 분산시켜 스펙트럼 측정 등과 같은 계측 시스템에 많이 쓰이고 있다. 회절격자에 백색광을 입사시키면 그림 2와 같이 격자 간격과 회절면에서 빛의 반사각에 의해 백색광에 포함되어 있는 모든 파장의 색을 가지는 빛으로 나누어져 보이게 된다. 이러한 회절격자의 특성으로 인해 주로 광의 분광과 특정 파장의 반사 또는 파장가변형의 반사를 유도하는 소자로 사용된다⁽²⁰⁾. 투과형 회절격자와 달리 반사형 회절격자는 각 각의 격자들이 빛을 반사하므로 서로 분리된 슬릿처럼 생각할 수 있다. 각각의 슬릿이나 홈에서 나온 각 파장들의 반사각에 의해 투과형과 같이 동일한 광축에서 서로 회절현상이 일어난다.

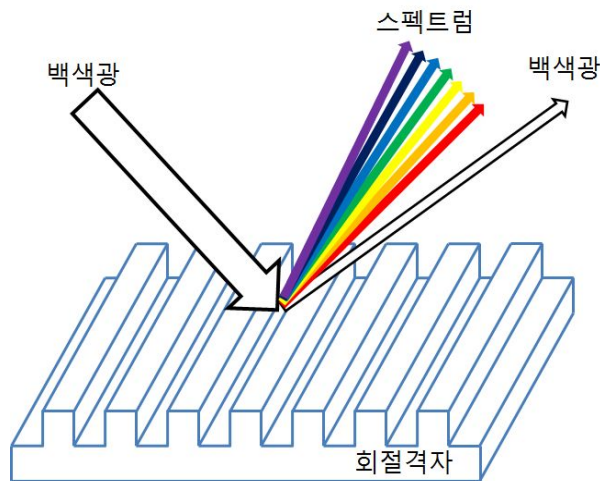


그림 2. 회절격자

본 논문에서는 이러한 슬릿을 펄초 레이저를 이용하여 실리카 표면과 내부에 제작 하였다. 격자 주기가 $20 \mu\text{m}$ 를 가지는 회절격자를 실리카 표면에 제작 하였으며, CO_2 레이저를 사용하여 실리카 표면에 제작된 회절격자를 연마 하였다. 연마 반복 정도에 따라 회절격자의 효율 특성과 연마에 의한 격자 표면의 변화를 확인

할 수 있었다. 회절한계에 의해 약 $1.5 \mu m$ 이하의 회절격자를 제작하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 투명 물질 내부에 다층으로 구성된 회절격자를 제작하여 최소 격자 간격 (약 $1.5 \mu m$)이하의 회절격자를 제작하는 연구를 진행하였다.

제 3절 필라멘트 현상

필라멘트 현상은 레이저를 이용하여 투명한 물질 내부를 가공할 때 나타나며, 가공 시 사용하는 대물렌즈의 초점심도보다 깊이방향으로 더 영향을 받아 레이저 빔이 더 깊게 가공 물질로 파고 들어가는 현상이다.

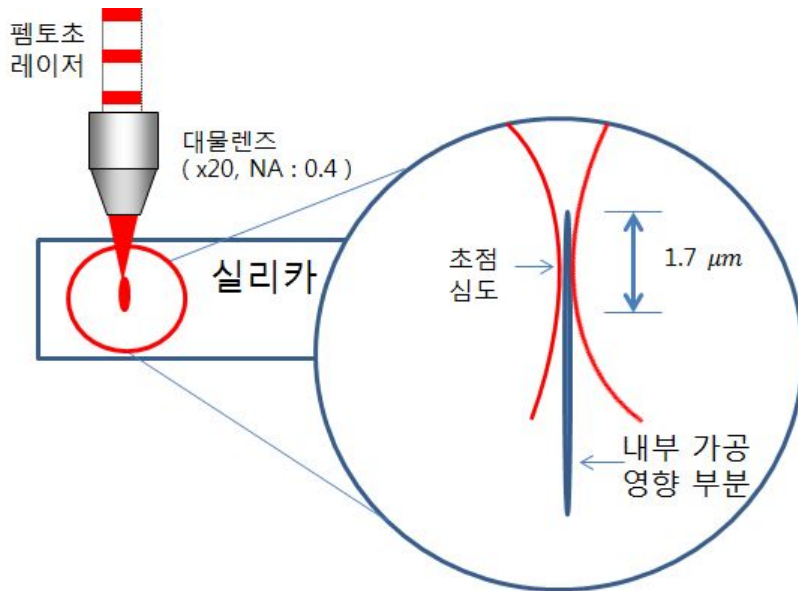


그림 3. 필라멘트 현상

그림 3에서와 같이 펨토초 레이저를 사용하여 실리카 내부에 20 배율 (NA = 0.4)을 가지는 대물렌즈를 이용하여 가공을 할 때, 대물렌즈의 초점 심도는 약 1.7 μm 이지만, 실리카의 가공되는 부분은 초점깊이보다 더 깊게 가공이 된다. 다른 대물렌즈를 사용하여도 이와 같은 현상이 나타나며, 투명 물질 내부에 광학소자를 제작 할 경우 필라멘트 현상에 기인해 광학소자를 손상 혹은 갈라짐 현상을 일으키는 원인이 된다. 이러한 필라멘트 현상을 일으키는 원인들은 가공 속도와 초점 심도라 생각되며, 본 논문에서는 레이저 파워를 고정하고 대물렌즈의 배율과 가공 속도를 변화시켜 실리카 내부 가공 시 레이저 조사 방향으로 파고들어가는 필라멘트 현상을 확인하였다.

제 4절 위상 홀로그램

1. 키노폼

컴퓨터 생성 홀로그램은 물체의 삼차원 형상 정보를 컴퓨터를 이용하여 간섭무늬로 저장한다. 이 홀로그램을 가간섭이 높은 레이저를 사용하여 공간상에서 물체의 정보를 재생하고 기록하는 기술을 홀로그래피라 한다. 1948년 데니스 게이버에 의해 처음으로 홀로그래피 기술이 개발되었고, 이 후 레이저와 CCD 카메라의 발전으로 인해 더욱 선명하고 뚜렷한 3차원 이미지의 재생과 기록을 디지털 형태로 만드는 것이 가능해 졌다.

물체의 정보를 가지는 홀로그램 제작 방법에는 여러 가지 방식들이 고안되었는데 Lohmann, off-axis, 키노폼, 간섭호형, Lee형 등의 다양한 방식으로 홀로그램을 제작할 수 있다. 키노폼은 일반 홀로그램과는 달리 진폭이 일정하고 위상 값만 가지는 특징이 있으며, 다른 방법들에 비해 이론적으로 100%의 광 회절효율을 구현할 수 있는 고효율의 위상 홀로그램 생성 방법이다⁽²¹⁻²²⁾.

2. 반복 푸리에 변환방법을 적용한 위상추출 방법

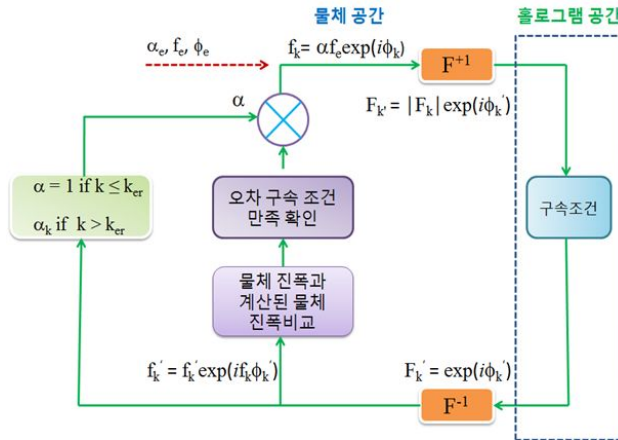


그림 4. 반복 푸리에 변환 알고리즘 흐름도⁽²¹⁾

그림 4 는 반복 푸리에 변환 알고리즘 흐름도를 보여주고 있다. 그림 4는 물체

각 점에서 진폭값(f_e)에 임의의 위상값(ϕ_e)을 결합시켜 물체 공간에서 물체 정보 $f_{k=0}$ 을 생성한다. 그 정보를 푸리에 변환을 통해 홀로그램 공간에서 진폭(F_k)과 위상(ϕ_k')을 가진 물체 정보로 변환하여 준다. 이렇게 생성된 진폭 값은 일정하게 “1”로 만들어주고, 다시 역 푸리에 변환을 하게 되면 다시 물체 공간에서 진폭(f_k')과 위상(ϕ_k')을 얻게 된다. 얻어진 진폭(f_k')과 실제 물체의 진폭(f_e)을 비교하여 그 차이가 설정된 범위 내에 있을 때까지 위의 반복 과정을 계속한다. 그 차이가 설정된 오차 범위 내에 있을 때의 위상 값들이 구하고자 하는 물체의 위상 값들이 되며 이 위상 값들을 물체의 위상 홀로그램인 키노폼이라 한다.

제 3장 실험장치 및 방법

제 1절 실험장치

1. 펨토초 레이저

본 연구에서는 회절격자를 가공하기 위하여 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 보유하고 있는 펨토초 레이저 가공시스템을 사용하였다. 펄스 반복률과 파장, 평균 출력 등이 다른 두 종류의 펨토초 레이저 가공 시스템을 사용하였으며, 첫 번째로 소개할 펨토초 레이저는 CyberLaser사의 Ti:Sapphire 펨토초 레이저 시스템 (모델명 : IFRIT)으로 레이저의 사양 (이하 1 kHz 펨토초 레이저)은 785 nm 의 중심파장을 가지며, 185 fs 의 펄스폭과 1 kHz 의 반복률을 가지고, 최대 출력은 1 W 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	184 fs
펄 스 에 너 지	1 mJ
펄 스 간 안정성	1.5% rms
평균출력안정성	1% rms for 100 hours
빔 경	6 mm
빔 질	$M^2 < 1.364$
퍼 집 각	$< 1 \text{ mrad}$
레이저 등급	Class 4

표 1. 실험에 사용된 1 kHz 펨토초 레이저 사양

두 번째로 소개할 펨토초 레이저는 LightConversion사의 Yb:KGW 다이오드 펨핑 펨토초 레이저 시스템 (모델명: Pharos)이다. 이 펨토초 레이저 (이하 100 kHz

펨토초 레이저)는 1030 nm 의 중심파장을 가지며, 250 fs의 펄스폭, 100 kHz 의 반복률과 평균 출력 6 W 를 가진다. 재생 증폭기 (regeneration amplifier)에서 방출된 레이저 빔의 공간모드 형태는 가우시안 형태를 가지며 출력 빔은 선편광을 가진다.

제 품 명	Pharos (LightConversion)
파 장	1030 / 515 / 257 nm
평 균 출 력	6 W
반 복 률	100 kHz
펄 스 폭	250 fs
펄 스 에 너 지	60 μJ
펄스 간 안정성	1% rms
평균출력안정성	1% rms for 100 hours
빔 경	6 mm
빔 질	$M^2 < 1.2$
퍼 집 각	$< 1.2 \text{ mrad}$
레이저 등급	Class 4

표 2. 실험에 사용된 100 kHz 펨토초 레이저 사양

2. CO₂ 레이저

펨토초 레이저를 사용하여 제작한 회절격자의 표면을 연마하기 위하여 CO₂ 레이저 연마 시스템을 사용하였다. Universal 사의 CO₂ 레이저 (모델명 : ULR-30)를 사용하였으며, 10.6 μm 의 중심파장과 5 kHz 의 반복률을 가지고, 최대 출력은 30 W를 가진다. 아래 표 3에서 레이저의 자세한 사양을 보여준다.

제 품 명	ULR-30 (Universal)
파 장	10.6 μm
평 균 출 력	30 W
반 복 률	5 kHz
펄 스 폭	120 fs
펄 스 에 너 지	6 mJ
펄 스 간 안정성	5%
빔 경	4 mm
빔 질	$M^2 < 1.3$
퍼 집 각	5 mrad
신 호 형 태	TTL

표 3. 실험에 사용된 CO₂ 레이저 사양

CO₂ 레이저는 펨토초 레이저와 달리 CO₂ 가스를 사용하는 기체 레이저이며, 다른 레이저들에 비해 효율이 매우 높다. 그리고 펨토초 레이저보다 열이 많이 발생하는 레이저로 열에 약하거나 민감한 물질의 미세가공에는 사용하지 않지만, 유리 같은 투명 재료의 가공 후 표면 연마나 후 처리에 사용되고 있으며, 고 출력의 CO₂ 레이저의 개발로 인해 많은 산업 분야에서 레이저용접, 천공, 절단, 마킹 및 의료분야에서도 다양하게 사용되고 있다.

3. 공간광변조기 (SLM)

다음 표 4는 홀로그래프 재생에 사용된 반사형 공간광변조기의 사양이다. HOLOEYE사 PLUTO 위상 변조 공간광변조기를 사용하였다. 공간광변조기를 컴퓨터에 연결하여 자체 제작된 프로그램인 MATLAB을 사용하여 생성된 키노폼의 이미지를 공간광변조기에 전사하여 변조된 공간광변조기 표면에서 회절된 레이저 빔이 생성한 물체를 재생하였다.

제 품 명	PLUTO (HOLOEYE)
SLM 형 태	반사형
위 상 수 준	256 (8 Bit) gray levels
활 성 영 역	15.36 mm × 8.64 mm
해 상 도	1920 × 1080 pixels
화 소 크 기	8.0 μ m
표시영역비율	87%

표 4. 실험에 사용된 공간광변조기 (SLM) 사양

그림 5는 공간광변조기의 화소에 가해진 전압에 따라 변조된 반사 파면의 위치를 보여주고 있다 그레이 레벨에 대응하는 전압을 컴퓨터를 통해 키노폼의 공간광변조기에 전기신호를 주면 공간광변조기에 입력된 레이저 파면이 이 신호에 따라 변조되게 된다. 각 화소에 입력된 다른 전기 신호가 거울 앞에 위치한 액정의 배열 구조를 변화시켜 파면 변조를 일으킨다. 키노폼의 밝은 부분에는 전기 신호가 많이 주어 액정의 배열이 빔의 수평방향을 띄게 되지만 어두운 부분은 전기 신호가 주어지지 않거나 매우 적어 액정의 배열이 변화되지 않는다. 레이저 빔의 진행 방향과 액정 배열방향이 수직을 이루어 빔의 진행을 방해하여 수직방향의 배열에서의 레이저 빔의 진행 속도가 상대적으로 늦게 진행하게 되어 위상변조를 하게 된다.

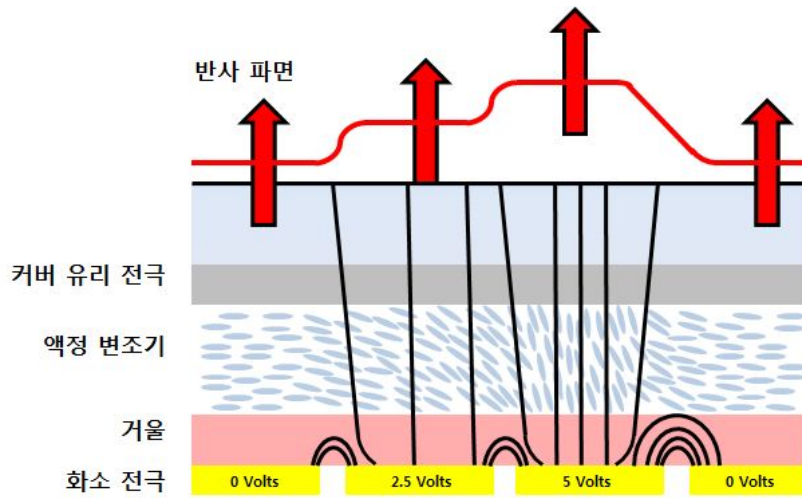


그림 5. 공간광변조기 (SLM) 원리⁽²³⁾

4. 레이저 가공 시스템

표 5, 6, 7 은 실험에 사용된 가공기의 사양을 보여주고 있다. 1 kHz 반복률을 가지는 펨토초 레이저 가공 시스템의 스테이지 사양은 X, Y 축은 선형 모터 스테이지, 300 mm × 300 mm 의 가공 범위, 20 nm 의 정밀도, 20 mm/s 의 최대속도를 가지고 있으며, Z 축은 Ballscrew 스테이지로 200 mm 의 이동 범위, 0.5 μm 의 정밀도, 20 mm/s 의 최대속도를 가지고 각각 독립적으로 구동된다.

	X-Y 스테이지	Z 스테이지
스테이지	선형 모터 스테이지	Ballscrew 스테이지
이동거리	300 × 300 (mm)	200 (mm)
분해능	20 nm / count	0.5 μm / count
최대속도	20 (mm/s)	20 (mm/s)

표 5. 실험에 사용된 1 kHz 반복률을 가지는 펨토초 레이저 가공 시스템 사양

표 6 은 100 kHz 반복률을 가지는 펨토초 레이저 가공 시스템의 스테이지 사양을 보여주고 있다. X, Y 축은 선형 모터 스테이지, 300 mm × 300 mm 의 가공 범위, 20 nm 의 정밀도, 300 mm/s 의 최대속도를 가지고 있으며, Z 축은 Ballscrew 스테이지로 100 mm 의 이동 범위, 0.5 μm 의 정밀도, 20 mm/s 의 최대속도를 가지고 각각 독립적으로 구동된다.

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

표 6. 실험에 사용된 100 kHz 반복률을 가지는 펨토초 레이저 가공 시스템 사양

표 7 은 실험에 사용된 CO₂ 레이저 연마 시스템의 스테이지 사양을 보여주고 있다. X, Y 축은 선형 모터 스테이지, 300 mm × 300 mm 의 가공 범위, 1 μm 의 정밀도, 100 mm/s 의 최대속도를 가지고 있으며, Z 축은 Ballscrew 스테이지로 50 mm 의 이동 범위를 가지고 각각 독립적으로 구동된다.

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

표 7. 실험에 사용된 CO₂ 레이저 연마 시스템 사양

실험에 사용된 레이저는 두 종류의 펄스 레이저와 CO₂ 레이저를 사용하였다.

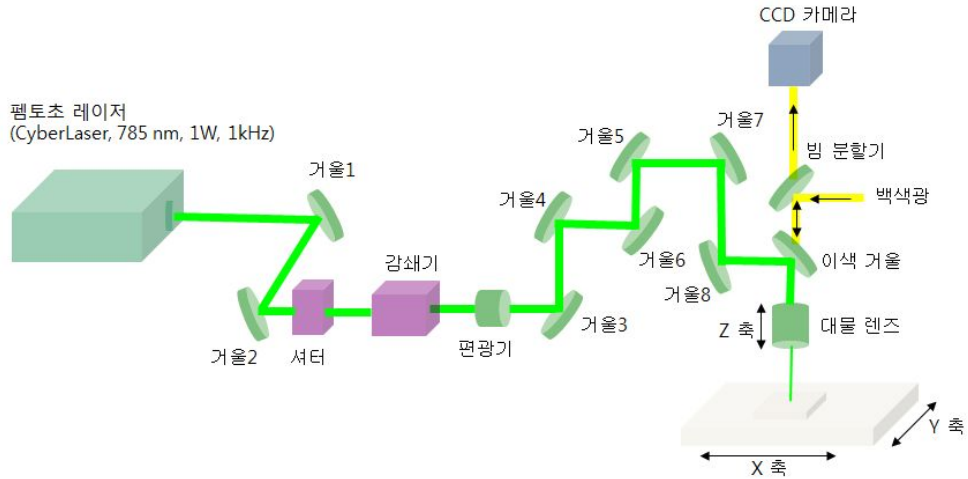


그림 6. 반복률 1 kHz 를 가지는 펄스 레이저 가공 시스템 모식도

그림 6 은 반복률이 1 kHz 를 가지는 펄스 레이저 가공 시스템의 모식도로 빔 전송을 위한 광학계, X, Y 스테이지, Z축 슬라이드로 구성됨을 알 수 있다. X,

Y 스테이지는 설계된 가공경로를 표현하고, Z 축 슬라이드를 통해 가공 초점을 결정한다.

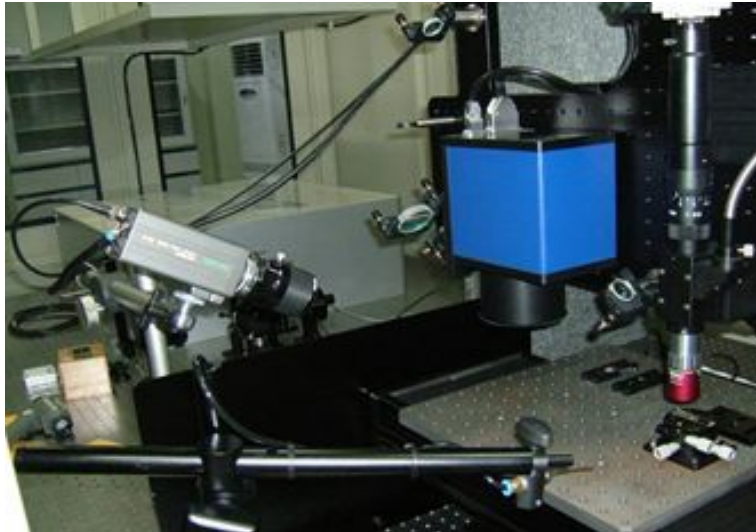


그림 7. 반복률 1 kHz 를 가지는 펨토초 레이저의 가공 시스템 모습

그림 7 은 실제 가공에 사용된 시스템의 모습이다. 전송된 펨토초 레이저 빔을 대물렌즈를 사용하여 집속시켜 가공한다. 스테이지 옆에 위치한 스캐너는 고속 가공 시 사용되며 본 연구에서는 사용되지 않았다. 샘플의 제작 위치 변경과 이동은 스테이지를 이동하여 조절하였으며, Z 축은 동축 으로 위치한 CCD 를 이용하여 처음 물체에 초점을 맞추고 X , Y 스테이지를 이동하여 샘플을 제작하였다.

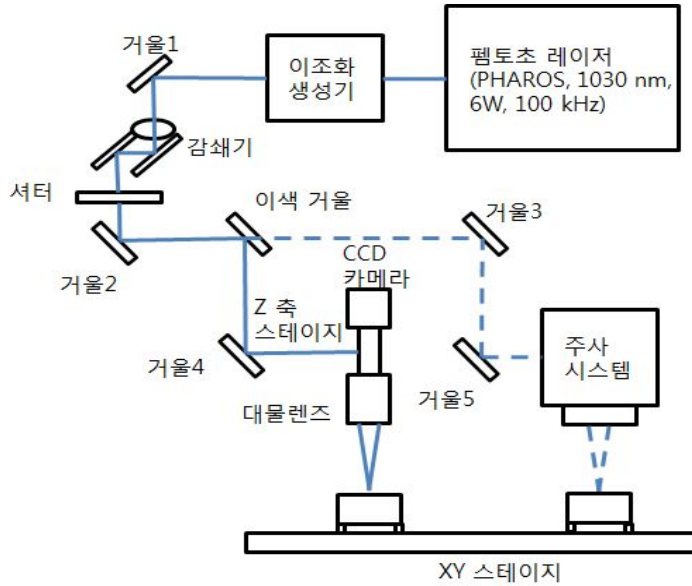


그림 8. 실험에 사용된 100 kHz 반복률을 가지는 펄스 레이저 모식도

그림 8 은 실험에 사용된 두 종류의 펄스 레이저 중 하나인 반복률이 100 kHz 를 가지는 펄스 레이저의 모식도 이다. 모식도에서와 같이 1030 nm 의 파장을 가지는 레이저 빔이 조사되어 이조화생성기를 통해 원하는 파장으로 생성 시킬 수 있으며, 본 연구에서는 이조화생성기를 이용하여 515 nm 의 파장으로 변경 하였다. 거울을 지나 감쇄기를 통과하는데 이는 레이저의 출력을 미세하게 조절이 가능하도록 설치된 것이다. 레이저 펄스제어 및 조절을 위해 레이저 On/Off 셔터가 사용되며 이를 통과한 레이저 빔은 이색성 거울을 통해 가공방법에 따라 선택적으로 각각의 렌즈에 입사되게 한다.

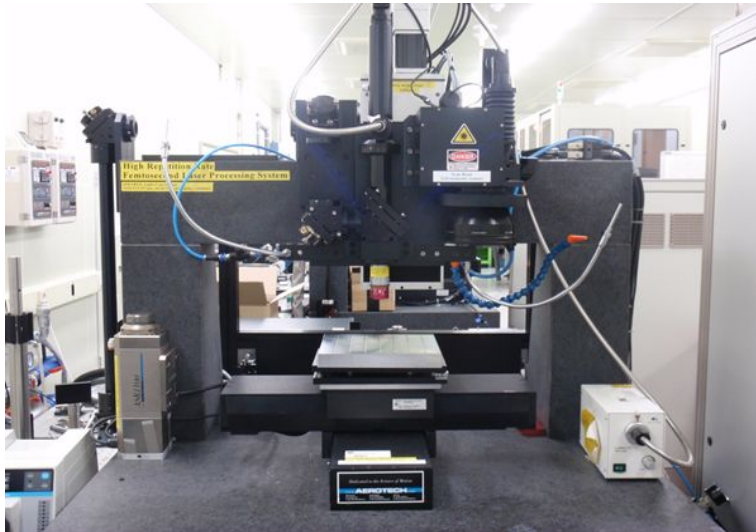


그림 9. 100 kHz 반복률을 가지는 펨토초 레이저의 가공 시스템 모습

그림 9 는 반복률 100 kHz 를 가지는 펨토초 레이저의 가공 시스템의 모습이
다. 앞서 1 kHz 펨토초 레이저 가공 시스템과 같이 전송된 레이저 빔을 대물렌즈
에 집속시켜 가공하였고, 옆의 스캐너 가공 방법은 사용하지 않았다. 샘플의 이동
과 위치변화는 X, Y 스테이지를 이동 시켰으며, Z 축은 동축 으로 위치한 CCD
를 이용하여 처음 물체에 초점을 잡고 나서 X, Y 스테이지만 이동하여 샘플을 제
작하였다.

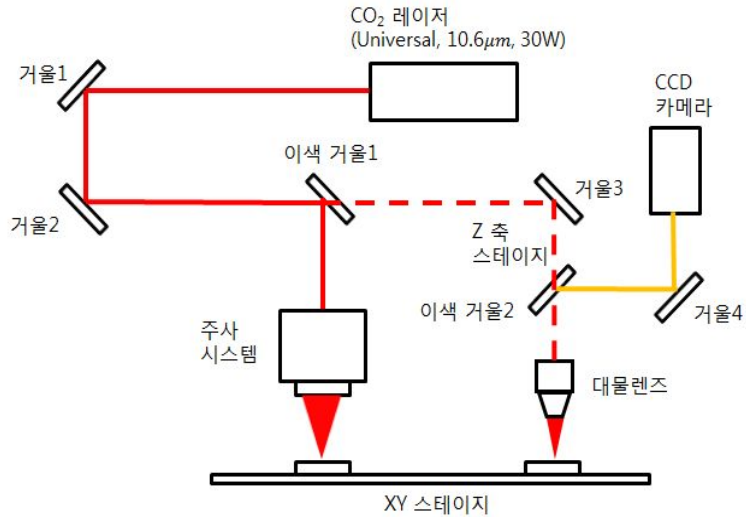


그림 10. 회절격자 표면 연마에 사용된 CO₂ 레이저 연마 시스템 모식도

다음 그림 10은 실리카 표면에 제작된 회절격자에 대해 표면 연마를 위해 사용된 CO₂ 레이저의 시스템 모식도 이다. 회절격자 표면연마에는 앞서 펄스 레이저 시스템과 달리 스캐너 가공 방식을 사용하였다. CO₂ 레이저 광원에서 나온 레이저 빔은 거울을 거쳐 이색성 거울에 의해 레이저 빔의 경로를 변화시켜 가공 방법을 변경하였다.



그림 11. CO₂ 레이저 연마 시스템 모습

그림 11 은 펄초 레이저를 이용하여 실리카 표면에 제작한 회절격자를 연마하기 위해 사용된 CO₂ 연마 시스템의 모습이다. 펄초 레이저 가공 방법과 달리 스캐너 가공방법을 사용하였으며 연마에 사용된 렌즈는 $f = 180 \text{ mm}$ (f-theta)이다. X, Y 스테이지에 샘플을 고정하여 대물렌즈와 동축으로 설치되어 있는 CCD를 이용하여 초점을 잡은 후 기존에 알고 있는 상대 좌표 값을 스테이지 통제 프로그램에 입력하여 스테이지를 스캐너 아래로 위치시켜 연마를 진행하였다.

5. 키노폼 점 배열 재생 시스템

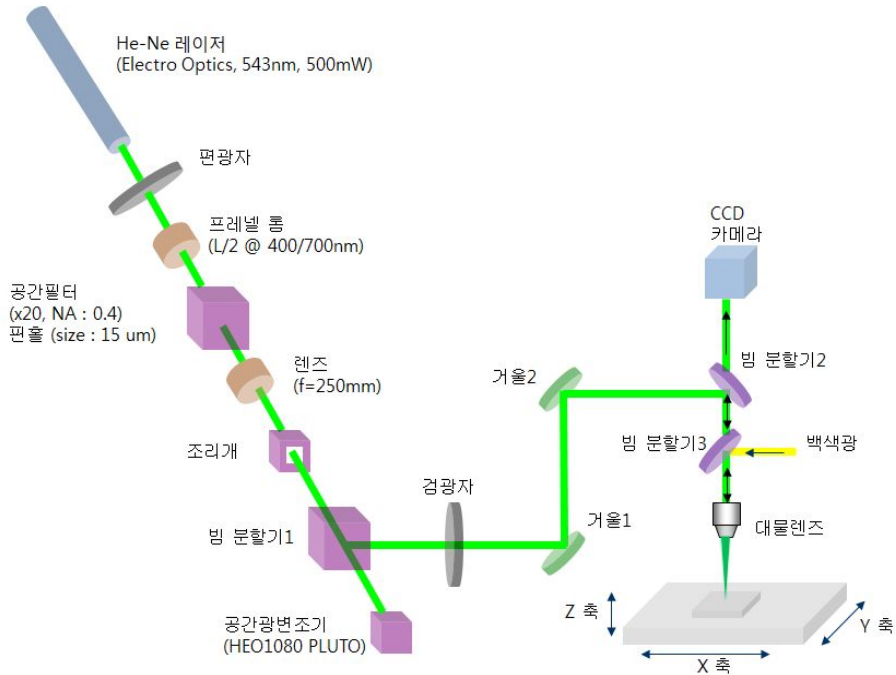


그림 12. 키노폼 점 배열 재생 시스템 모식도

그림 12는 생성된 키노폼을 재생하여 이미지를 얻기 위해 구성된 실험 시스템 모식도이다. 자체 설계된 프로그램인 MATLAB을 사용하여 생성된 점 배열에 대한 키노폼을 생성 후, 생성된 키노폼을 컴퓨터를 통해 공간광변조기로 입력된다. 물체 재생 시스템에서 543 nm 의 파장을 가지는 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 그림 12에 보여진 레이저에서 나온 빔은 선형 편광기와 프레넬 림을 지나 공간 필터를 지나게 된다. 공간 필터는 대물렌즈와 $15\ \mu\text{m}$ 의 크기의 핀 홀로 구성되어 있으며, 대물렌즈로 집광된 빔을 만들어 $15\ \mu\text{m}$ 의 크기의 핀 홀을 통과 시켜 레이저 빔을 공간적으로 균일하게 만들어 준다. 핀 홀을 통과한 빔을 렌즈 ($f = 250\text{ mm}$)를 사용하여 평행 광을 만들어주고 조리개를 사용하여 SLM에 전사되는 키노폼과 똑같은 크기의 빔을 만들어준다.

SLM의 표면에서 반사된 레이저 빔은 빔 분할기를 지난 후 거울 등을 이용하여

경로를 변화시켜 재생 시스템에 설치된 대물렌즈에 집광시켜주고 동일한 축에 위치한 CCD를 사용하여 대물렌즈에 의해 축소된 상을 확인한다. 대물렌즈에 의해 재생된 이미지는 이미지 보드와 상용프로그램인 LabVIEW를 이용하여 직접 프로그램을 만들어 CCD에서 측정된 이미지를 컴퓨터로 저장하였다.

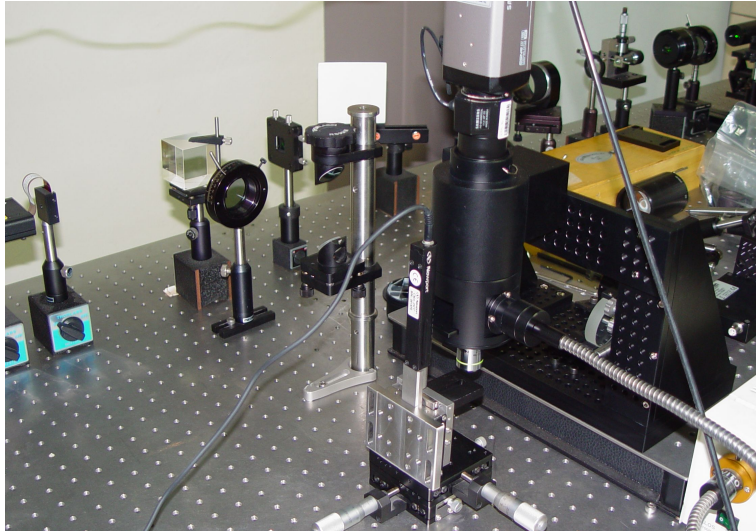


그림 13. 키노폼 점 배열 재생 시스템 모습

그림 13 과 같이 재생 시스템을 구성하였으며, X, Y 축의 이동은 마이크로미터를 사용하여 위치를 이동하였으며, Z 축은 모터로 이동하며 속도 조절이 가능한 스테이지를 사용하여 재생 이미지의 초점을 잡아 실험을 하였다.

모 델 명	Samsung SDC-435ND
이 미 지	1/3" Super HAD CCD
화소 개수	811(H) × 508(V)
주 파 수	H : 15.734 kHz, V : 59.94 kHz
CCD 크기(W × H × D)	58 × 52 × 121 mm (2.28" × 2.05" × 4.76")

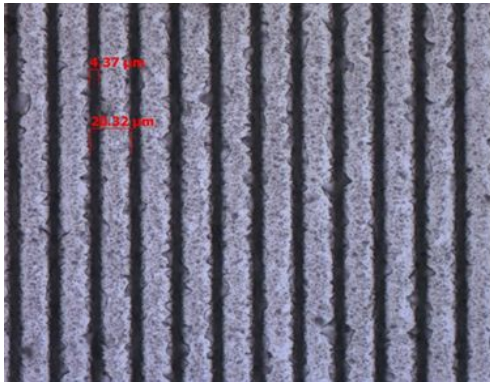
표 8. 실험에 사용된 CCD 카메라 사양⁽²⁴⁾

제 4장 실험결과

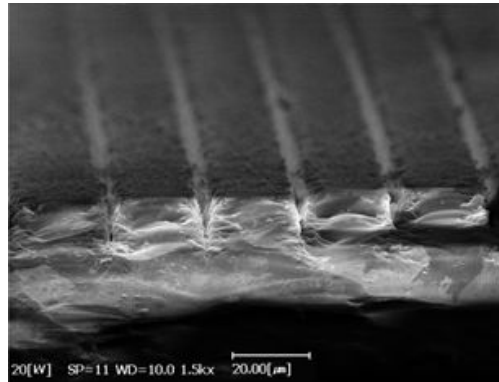
제 1절 회절격자 효율 향상

1. 회절격자의 제작

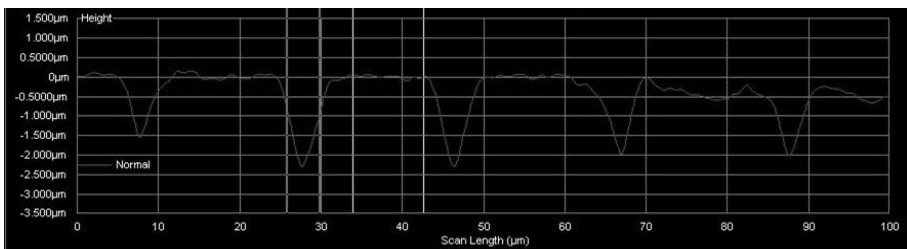
본 연구에서는 반복률이 1 kHz 를 가지는 펄스 레이저를 사용하여 실리카 표면에 격자주기가 20 μm 를 가지는 회절격자를 제작 하였다. 회절격자 제작을 위하여 펄스 에너지 4.15 μJ , 200 $\mu\text{m}/\text{s}$ 의 스테이지 속도로 10 배율을 가지는 대물렌즈 (NA = 0.25)를 사용하여 실리카 표면에 제작 하였다.



(a) $\times 500$ 배율 광학 현미경 측정 이미지



(b) $\times 1500$ 배율 SEM 단면 이미지



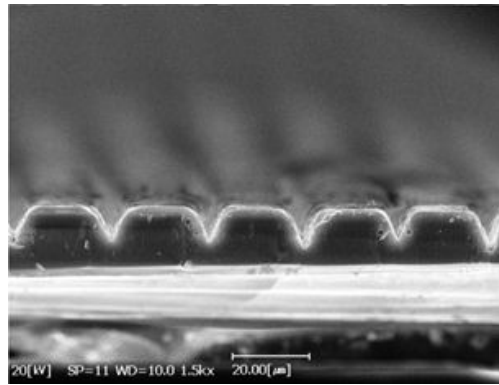
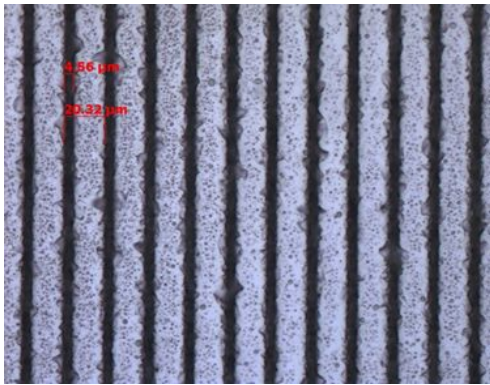
(c) 알파스텝 격자 주기 및 깊이 측정

그림 14. 연마 전 20 μm 격자 주기를 가지는 회절격자의 광학 현미경, 전자주사현미경 (SEM)과 알파스텝 측정 결과

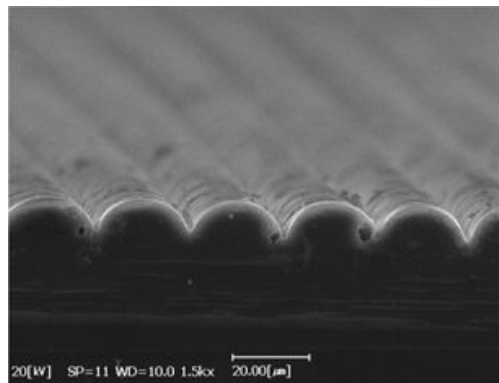
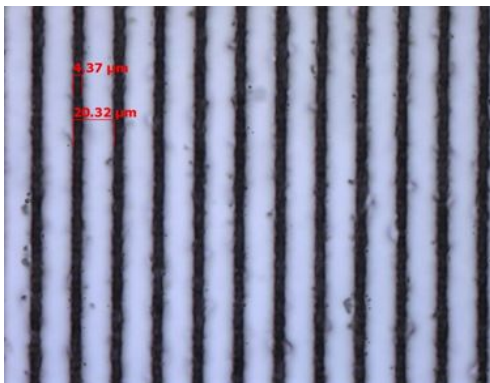
그림 14 는 CO₂ 레이저를 사용하여 연마하기 전, 반복률이 1 kHz 를 가지는 펄스 레이저를 사용하여 실리카 표면에 제작한 회절격자를 측정 한 것이다. 그림 14 는 광학현미경, 전자주사현미경 (SEM), 알파스텝을 이용하여 측정 한 표면 및 단면 제작된 회절격자의 격자 주기 및 깊이를 측정 한 사진이다. 그림 18(a)에서 보는 것 과 같이 약 4 μm 의 선폭과 20 μm 의 격자 주기를 가지는 회절격자가 제작된 것 을 확인 할 수 있었다. 제작된 회절격자의 깊이는 약 2 ~ 2.5 μm 의 깊이로 제작 된 것을 확인할 수 있었으며, 연마가 이루어지지 않은 회절격자의 표면은 가공 후 부스러기 등으로 인해 제작된 회절격자의 표면이 깨끗하지 않음을 알 수 있었다.

2. CO₂ 레이저 연마

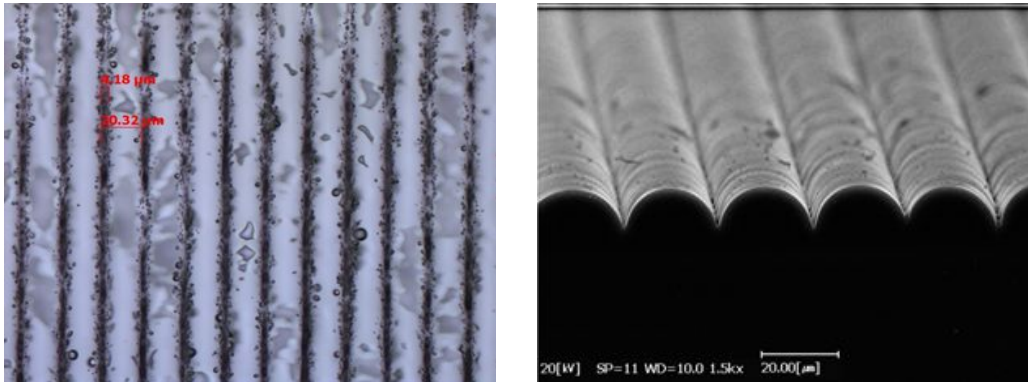
펄스 레이저로 제작된 회절격자의 표면 연마를 위해 CO₂ 레이저의 출력을 5.51 W 와 가공속도 100 mm/s 로 고정하고 연마 반복수를 변화시켜 가면서 실험 진행하였다. 연마 반복수는 1 ~ 20회 까지 1회씩 증가하면서 연마 하였으며, 연마에 사용된 렌즈는 $f = 170 \text{ mm}$ (f-theta)이다.



(a) 연마 1단계 (연마 반복수:1 ~ 3회)



(b) 연마 2단계 (연마 반복수:6 ~ 9회)



(c) 연마 3단계 (연마 반복수: 16 ~ 20회)

그림 15. 연마 반복수에 따른 회절격자의 광학 현미경 표면 및 전자주사현미경의 단면 이미지 측정 결과

그림 15 는 CO₂ 레이저를 이용하여 회절격자의 표면에 대해 연마 반복수에 따른 회절격자 표면과 단면을 광학현미경과 전자주사현미경을 이용하여 측정한 사진이다. 연마 반복수가 증가 할수록 회절격자의 표면이 깨끗해지다가 반복수가 점점 많아질수록 표면과 가공 골 사이의 부스러기와 함께 회절격자도 같이 연마가 되어 반복수가 증가 할수록 회절격자의 모양이 변형되는 것을 알 수 있었다.

3. 연마 전·후 회절격자 특성 비교

연마 전·후의 회절격자의 특성을 비교하기 위하여 그림 16 과 같이 제작된 회절격자의 회절패턴 및 각 차수의 세기를 측정하였다.

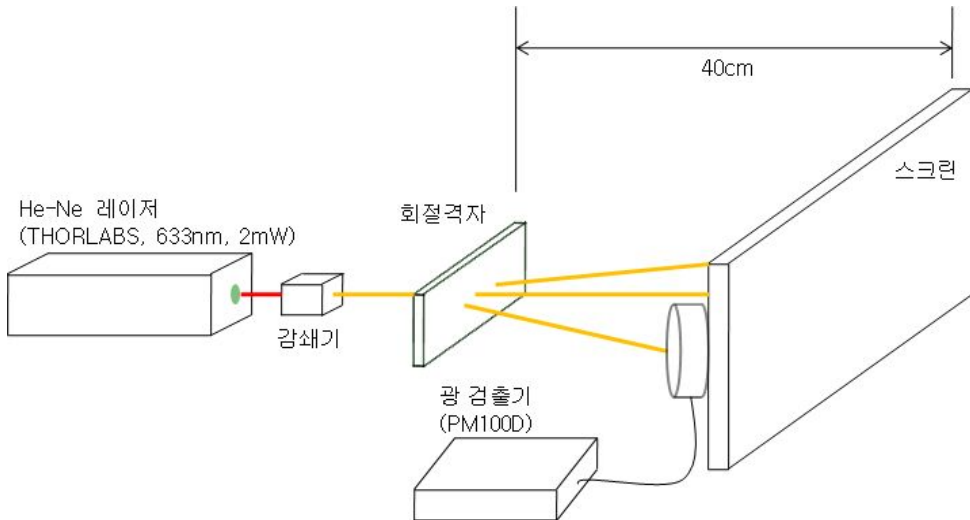


그림 16. 회절격자 세기 및 효율 측정 방법 모식도

회절격자의 측정에 사용된 광원은 He-Ne 레이저 (파장 : 633 mm)를 사용 하였다. He-Ne 레이저에서 나온 빔의 감쇄를 위한 편광기를 지난 후 제작된 회절격자에 들어간 빔은 회절 효과에 의하여 회절 무늬가 스크린에 나타나게 된다. 회절격자 샘플과 스크린과의 거리는 40 cm 이고, 회절격자 가장 앞단에 투과된 레이저 세기를 측정하고 스크린과 회절격자 샘플과 동일한 거리에 광검출기 (모델명 : PM100D)를 위치시켜 각 차수의 세기를 측정하여 회절효율을 구하였다.

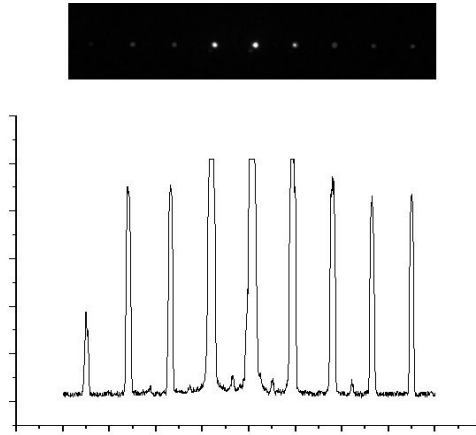
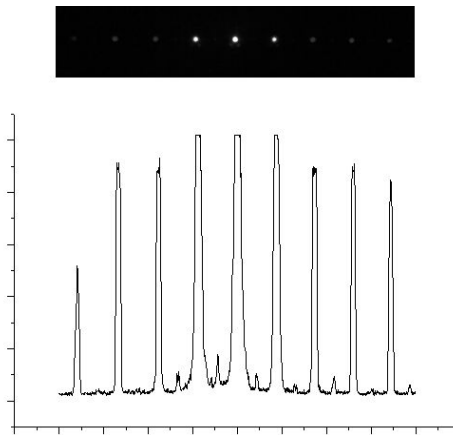
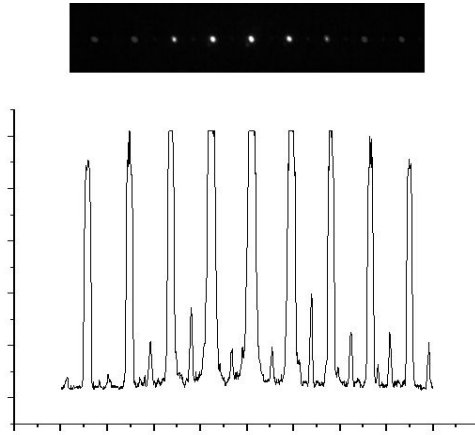


그림 17. 연마 전 회절격자의 회절패턴 (격자 주기 : $20 \mu\text{m}$)

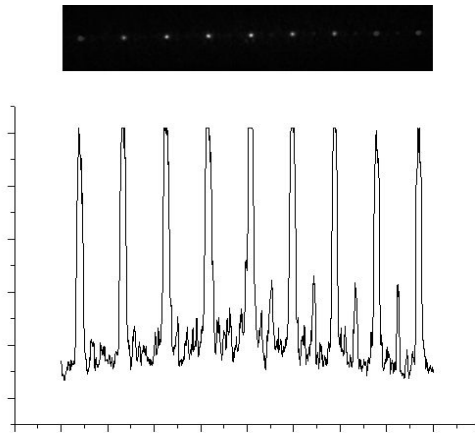
그림 17 은 반복률이 1 kHz 인 펄스 레이저를 사용하여 제작된 회절격자에 대한 회절 패턴을 측정한 사진이다. CO_2 레이저를 사용하여 연마하기 전에 측정한 것이다.



(a) 연마 1단계 (연마 반복수 : 1 ~ 3회) 후 회절패턴



(b) 연마 2단계 (연마 반복수 : 6 ~ 9회) 후 회절패턴

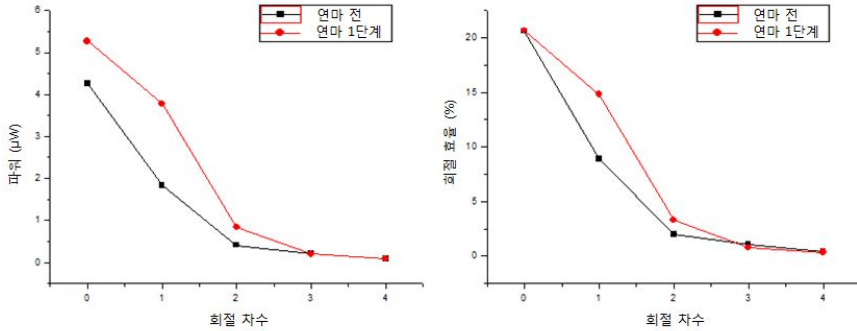


(c) 연마 3단계 (연마 반복수 : 16 ~ 20회) 후 회절패턴

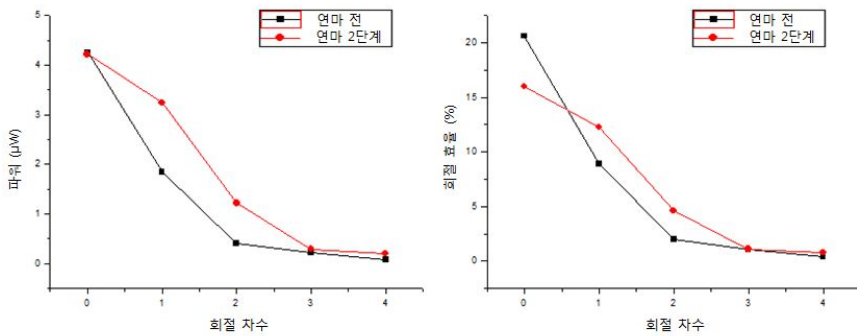
그림 18. 연마 후 반복수에 따른 회절격자 패턴 측정

그림 18 은 CO₂ 레이저를 사용하여 회절격자의 표면을 연마 후 회절격자의 패턴을 디지털 카메라를 사용하여 측정한 사진이다. 연마 반복수는 1 ~ 20회로 반복

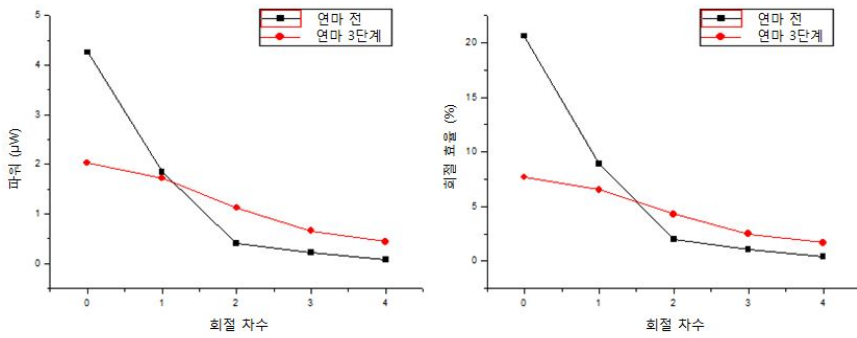
수는 1씩 증가하면서 연마를 하였다. 연마 반복수가 많아짐에 따라 그림 18(c)의 연마 3단계처럼 회절 패턴의 각 차수 주위로 레이저가 퍼지는 것을 확인할 수 있었으며, 레이저 빔이 퍼짐으로 회절효율도 많이 떨어졌을 것이라 생각된다. 그래서 광검출기를 사용하여 각 차수의 세기를 측정하고 다음 각 차수에 대한 회절 효율을 구하여 보았다.



(a) 연마 1단계에 대한 각 차수별 세기 및 효율 비교



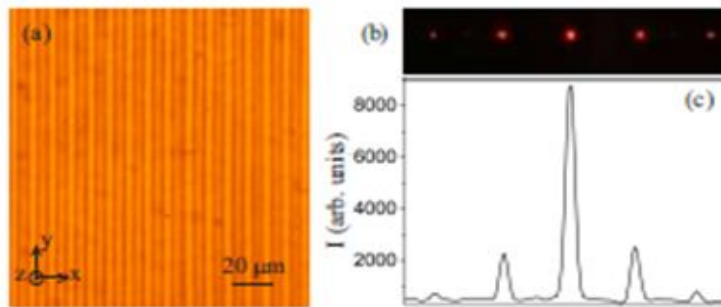
(b) 연마 2단계에 대한 각 차수별 세기 및 효율 비교



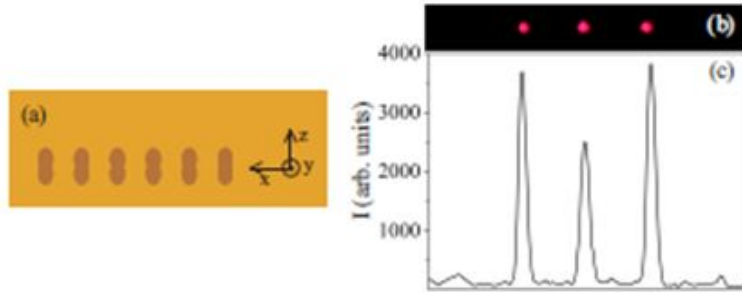
(c) 연마 3단계에 대한 각 차수별 세기 및 효율 비교

그림 19. 연마 전·후 연마 반복수 변화에 따른 회절 차수의 세기 및 효율 비교

연마 1단계에서는 연마에 의해 실리카 표면의 거친 부분과 부스러기들이 제거가 되면서 연마 전보다 각 차수의 세기와 효율이 증가된 것이라 생각된다. 연마 2 단계에서는 세기와 효율이 증가됨 반면에 0차의 세기가 줄어들었음을 알 수 있는데 그 이유는 다음의 그림 20 과 같이 회절격자의 깊이가 깊어질수록 0차의 세기가 줄어들고 1차의 세기가 증가함을 확인 하였다.



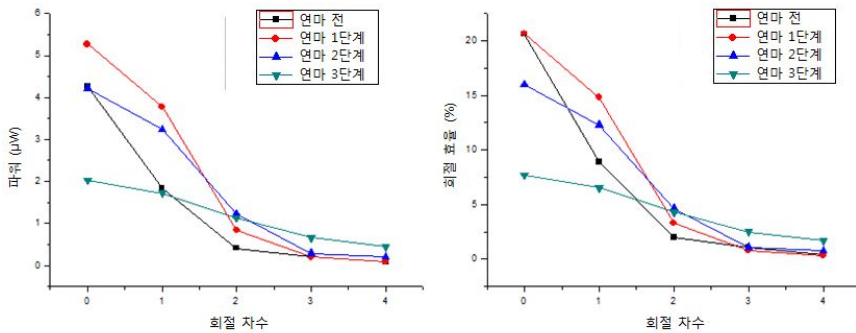
(a) 격자주기 10 μm를 가지는 단일 회절격자



(b) 격자주기 $10 \mu m$ 를 가지는 이중 회절격자

그림 20. 회절격자의 깊이 변화에 따른 회절 특성 비교⁽²⁵⁾

연마 반복수의 증가로 인해 연마 2단계에서는 실리카 표면의 거친 부분과 부스러기가 연마 되고 연마 된 격자 골 사이의 부스러기들도 제거가 되면서 회절격자의 깊이가 깊어지는 효과를 보여 그림 20(b)에서와 같이 0차의 세기가 줄어드는 반면에 나머지 각 차수의 세기 및 효율이 증가한 것이라 생각된다⁽²⁵⁾. 연마 3단계에서는 많은 연마 반복수에 의해 부스러기와 함께 회절격자도 연마가 되어 격자 모양이 심한 변형을 가져와 전체적인 세기 및 효율이 감소된 것이라 생각된다.



(a) 각각의 연마 단계에 따른 세기 비교 (b) 각각의 연마 단계에 따른 효율 비교

그림 21. 연마 전과 각각의 연마 단계에 따른 차수에 대한 세기 및 효율 비교

제 2절 다중 회절격자

1. 다중 회절격자 제작 (격자주기 $6 \mu\text{m}$)

본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용하여 실리카 내부에 격자 주기가 $6 \mu\text{m}$ 인 두 개의 회절격자 층을 깊이 방향으로 인접하게 가공하였으며, 이를 $3 \mu\text{m}$ 격자 주기를 가지는 하나의 층으로 제작된 회절격자와 비교 하여 회절 패턴을 측정 하였다. 실험에 사용된 레이저는 반복률이 100 kHz 인 펨토초 레이저를 사용 하였으며 이조화 생성기를 사용하여 펨토초 레이저 파장을 515 nm 로 변환하여 실험에 사용 하였다.

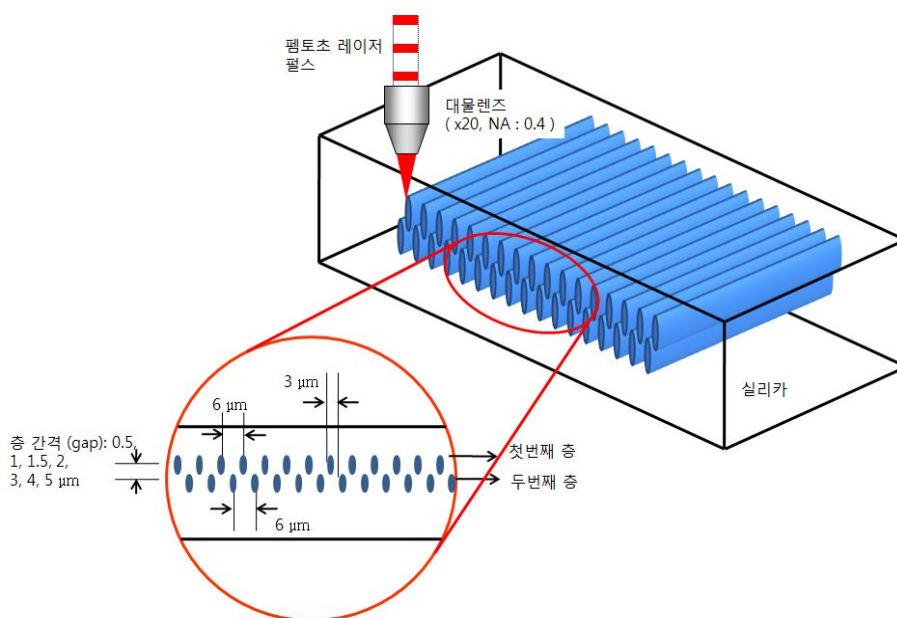
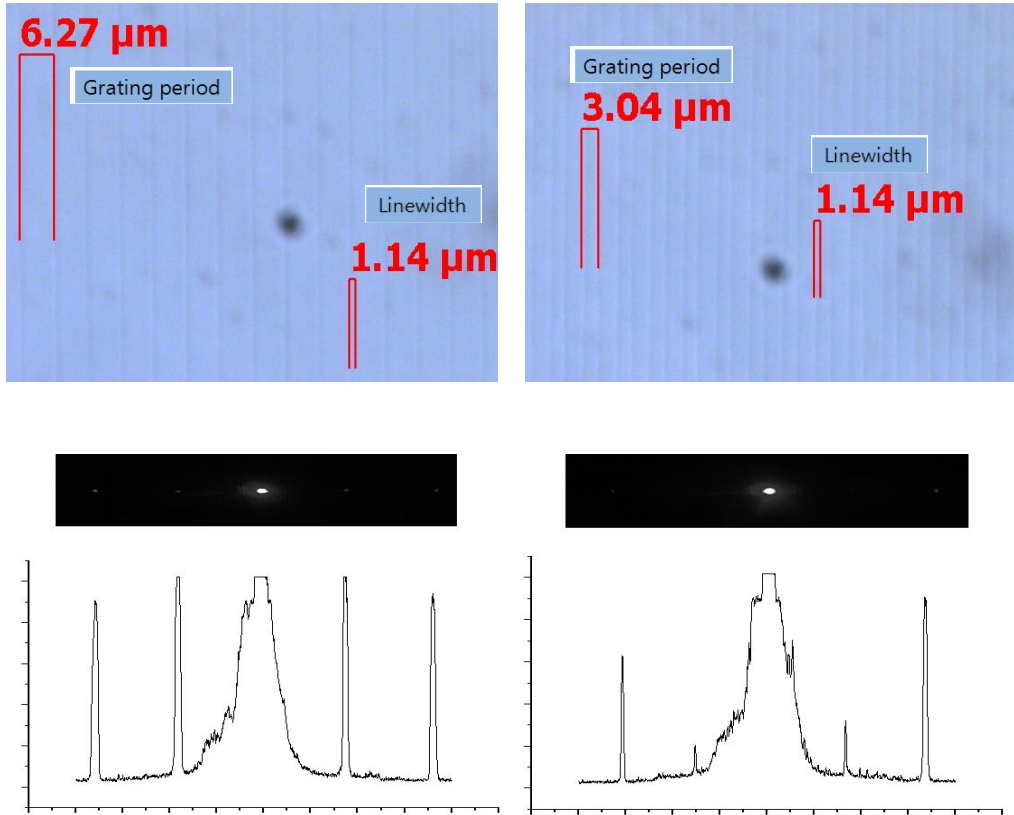


그림 22. 두 층을 가지는 회절격자의 모식도 (격자 간격 : $6 \mu\text{m}$)

$6 \mu\text{m}$ 의 격자 간격을 가지는 회절격자 층을 깊이 방향으로 인접하게 각각 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 3 , $5 \mu\text{m}$ 의 간격으로 회절격자들을 가공 하였다. 그림 22 와 같이 두 개의 층을 가진 격자는 깊이 방향으로 서로 일치하지 않고 어긋나게 하여 격자 간격이 좁아지는 효과가 나타나도록 하였다. 회절격자의 가공을 위하여 레이저 빔을 20 배율 대물렌즈 ($\text{NA} = 0.4$)를 사용하여 실리카 표면에서 $70 \mu\text{m}$ 내부에 3 mm/s

가공속도, $1.7 \mu\text{J}$ 펄스 에너지를 사용하여 $4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 의 크기로 제작 하였다.

그리고 격자 주기가 $6 \mu\text{m}$ 를 가지는 두 층의 회절격자의 결과와 비교하기 위해 단일 층을 가지는 $6 \mu\text{m}$ 와 $3 \mu\text{m}$ 의 회절격자를 제작하여 두 결과를 비교 하였다.



(a) 격자 주기 $6 \mu\text{m}$ 의 회절격자

(b) 격자 주기 $3 \mu\text{m}$ 의 회절격자

그림 23. 단일 층을 가지는 $6 \mu\text{m}$ 와 $3 \mu\text{m}$ 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정

그림 23 은 격자 간격이 $6 \mu\text{m}$ 의 단일 층을 가지는 회절격자에 대한 광학현미경 이미지와 He-Ne 레이저를 조사하여 측정한 회절 패턴이다. 제작된 회절격자의 선폭은 $1.14 \mu\text{m}$ 이며, 격자 간격은 각각 $6 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$ 를 가짐을 확인할 수 있었

다. 또한, He-Ne 레이저를 조사하여 측정된 회절 패턴에서는 $6\ \mu\text{m}$ 의 회절격자의 회절 패턴보다 상대적으로 두 배 정도 회절 패턴 간격이 더 멀어지는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 $6\ \mu\text{m}$ 와 $3\ \mu\text{m}$ 의 회절격자를 가지는 단일 층 회절격자를 제작하여 회절 패턴이 격자 간격에 반비례함을 실험적으로 확인하였다.

2. 제작된 다중 회절격자 (격자주기 $6 \mu m$) 측정 및 비교

펨토초 레이저를 사용하여 제작된 회절격자의 회절패턴 측정은 그림 28 과 같이 633 nm 의 파장을 가지는 He-Ne 레이저를 사용 하였으며, 제작된 회절격자와 회절패턴 측정은 스크린과의 거리를 20 cm 로 고정하여 회절모양을 확인하였고 디지털 카메라를 사용하여 그 모양을 기록 하였다. 또한, 각 차수에 따른 강도 측정은 광검출기 (모델명 : PM100D)를 사용하여 측정 하였다.

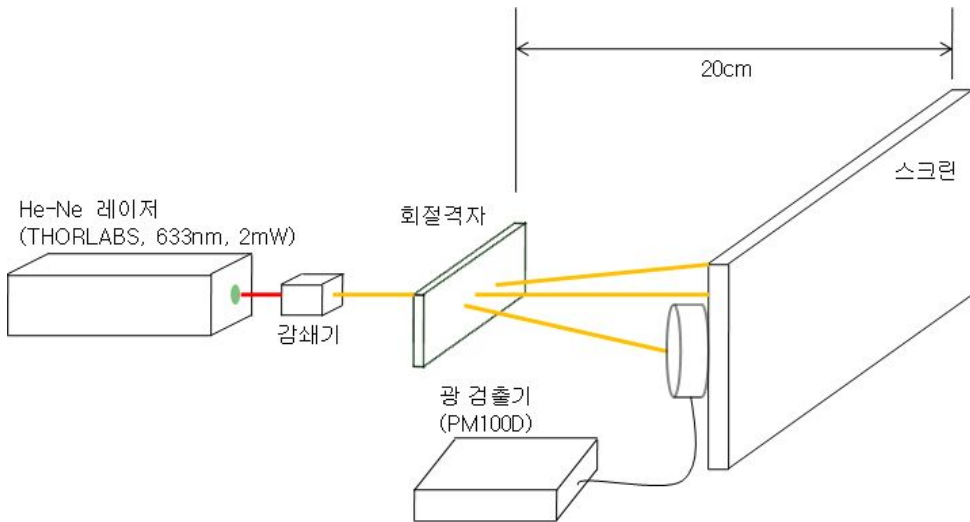
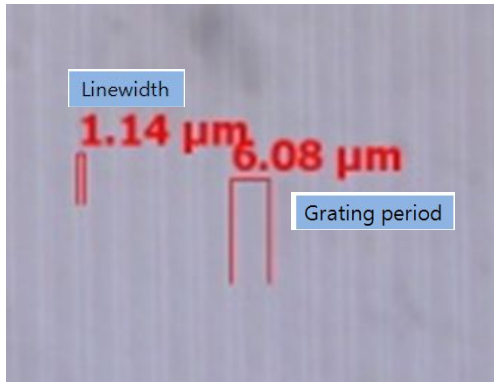
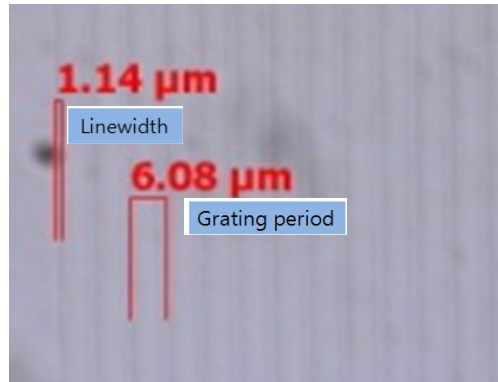


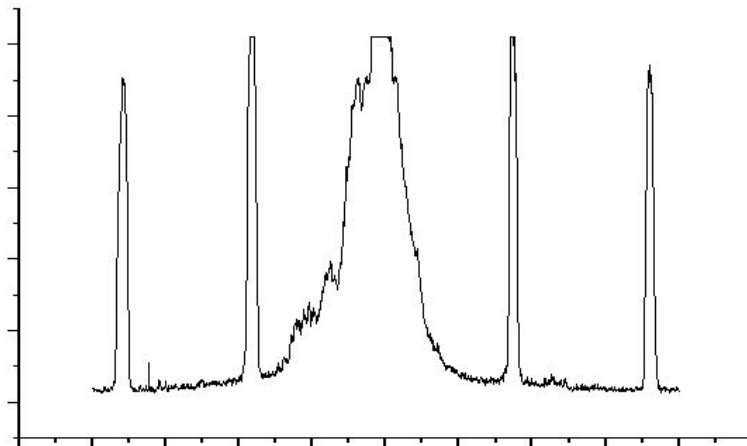
그림 24. 회절패턴 측정방법 모식도



(a) 첫 번째 층



(b) 두 번째 층



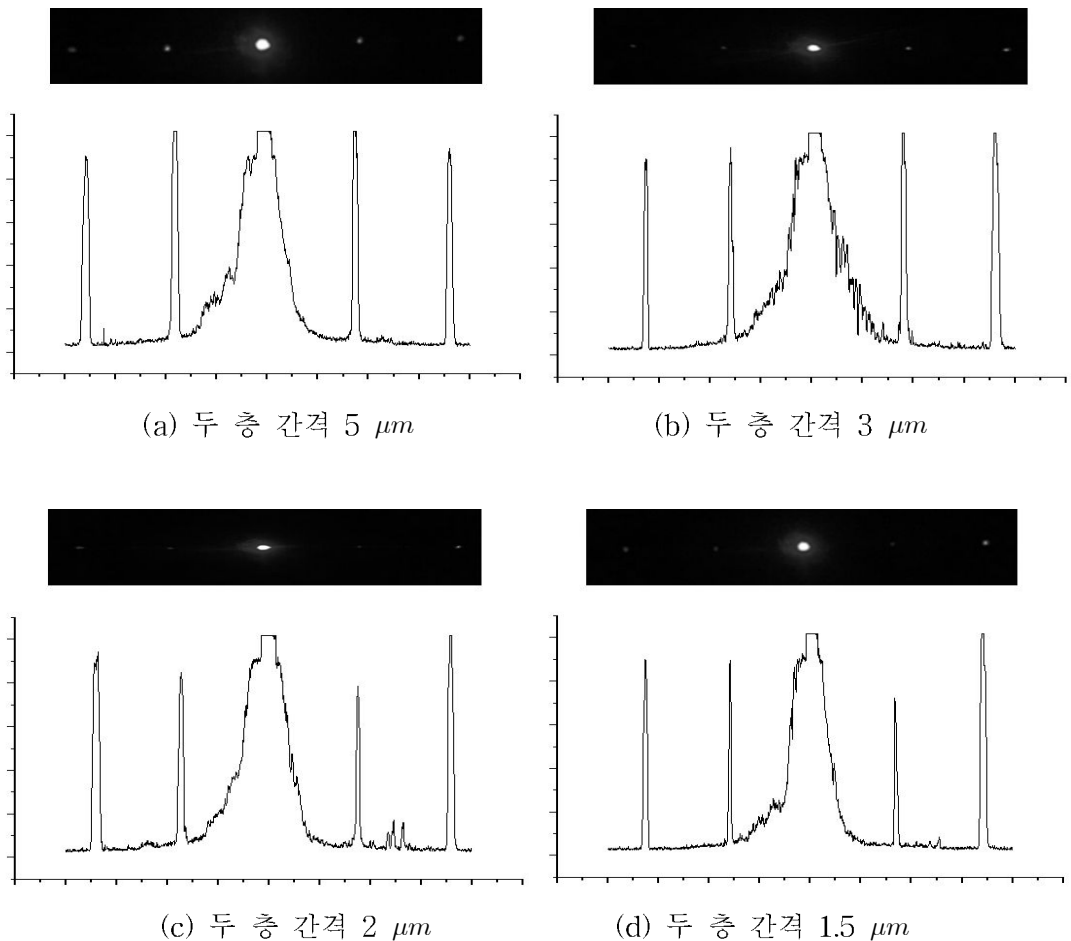
(c) 두 층으로 구성된 회절격자의 회절패턴 (두 층 간격 $5 \mu\text{m}$)

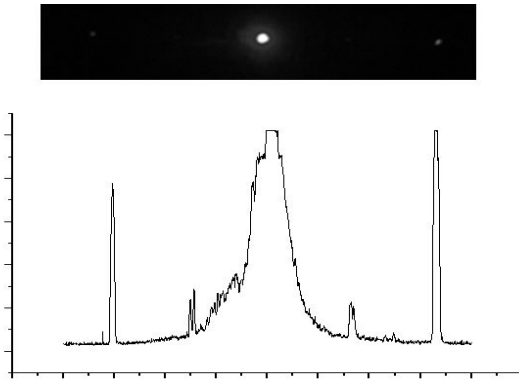
그림 25. $6 \mu\text{m}$ 의 격자 주기를 가지고 두 층의 간격이 $5 \mu\text{m}$ 로 제작된 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정

그림 25 는 두 층으로 구성되고 층간의 간격이 $5 \mu\text{m}$ 로 제작된 회절격자에 대한 광학현미경 및 회절패턴을 측정한 사진이다. 선폭은 $1.14 \mu\text{m}$, 격자 주기는 $6.08 \mu\text{m}$ 로 제작된 것을 알 수 있다. 위의 실험 조건과 동일하게 두 층으로 구성되고

격자 간격이 $6\ \mu\text{m}$ 인 회절격자에 대해 층간의 간격을 변화 시켜 회절격자를 제작하였고, 각각 제작된 회절격자를 He-Ne 레이저를 사용하여 회절패턴을 측정 하였다.

그림 26 은 각 각 $6\ \mu\text{m}$ 의 격자 간격을 가지는 두 개의 층의 간격에 따른 회절 패턴으로 He-Ne 레이저를 이용하여, 회절격자와 스크린 사이의 거리를 $20\ \text{cm}$ 로 하여 스크린에 나타난 회절패턴을 디지털 카메라를 이용하여 측정하였다. 두 층 사이의 간격이 $5\ \mu\text{m}$ 나 $2\ \mu\text{m}$ 일 때의 회절패턴은 $6\ \mu\text{m}$ 의 단일 층을 가지는 회절격자의 회절패턴과 유사하지만, 두 층의 간격이 $0.5\ \mu\text{m}$ [그림 26(e)]인 경우 회절패턴 간격이 두 배로 늘어 났음을 알 수 있으며, 그림 23(b)와 같은 $3\ \mu\text{m}$ 의 회절격자에 매우 유사한 회절패턴을 얻을 수 있었다.





(e) 두 층 간격 $0.5 \mu m$

그림 26. 두 층으로 구성된 회절격자 (격자 주기 $6 \mu m$)의 층 간격변화에 따른 회절패턴 측정

두 층을 가진 $6 \mu m$ 회절격자들 간의 깊이 간격이 증가함에 따라 회절패턴이 층간의 깊이 간격에 기인하여 $6 \mu m$ 회절격자의 단일 층 회절무늬와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

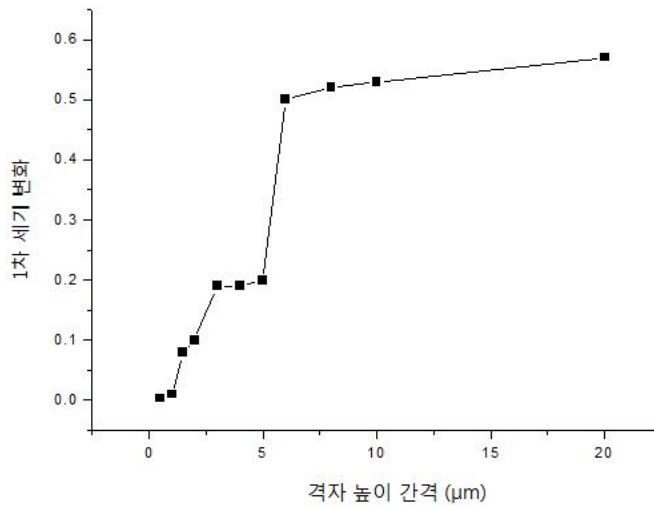


그림 27. 두 층간의 깊이 간격 변화에 따른 1차 강도 변화

그림 27 은 각 각 $6 \mu m$ 의 격자 간격을 가지는 두 개의 층의 간격에 따른 회절패턴의 1차에 대한 강도를 측정한 값이며 광검출기를 사용하였다. 그림 27 에서 보는 것과 같이 두 개의 층간의 간격이 조금씩 가까워짐에 따라 1차의 세기가 점점 줄어드는 것을 알 수 있으며 두 개 층의 간격이 $0.5 \mu m$ 일 때 1차 강도가 확연하게 감소된 것을 확인하였다.

이와 같이 $6 \mu m$ 격자 주기를 가지는 두 개의 회절격자 층을 서로 어긋나게 깊이 방향으로 인접하게 가공함으로써 $3 \mu m$ 의 회절 간격을 가지는 회절격자와 매우 유사한 회절 특성을 얻을 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

실리카 내부에 펄스 레이저를 사용하여 격자 주기가 $6 \mu m$ 인 두 개의 층으로 가공 하였을 때, $3 \mu m$ 격자 주기로 하나의 층으로 제작된 회절격자와 회절패턴이 매우 유사함을 확인하였다. 이러한 다층 가공 기술을 이용하면 $1.5 \mu m$ 이하의 격자주기를 가지는 회절격자 제작이 가능할 것이라 생각된다.

3. 다중회절격자 제작 (격자주기 2 μm)

앞서 격자 주기가 6 μm 인 다중회절격자의 격자 깊이 간격에 의해 3 μm 의 회절격자의 효과를 보임을 실험적으로 확인하였다. 그래서 이번 실험에는 격자 주기를 2 μm 로 줄여 1 μm 의 회절격자와 유사한 특성을 갖는지에 대해 실험하였다. 실험방법은 앞의 실험방법과 동일하게 실리카 내부에 격자 주기가 2 μm 인 두 개의 회절격자 층을 깊이 방향으로 인접하게 가공하였으며, 이를 1 μm 격자 주기를 가지는 하나의 층으로 제작된 회절격자와 비교 하여 회절패턴을 측정 하였다. 실험에 사용된 레이저는 반복률이 1 kHz 인 펄스 레이저를 사용 하였으며 레이저의 파장은 785 nm 이다.

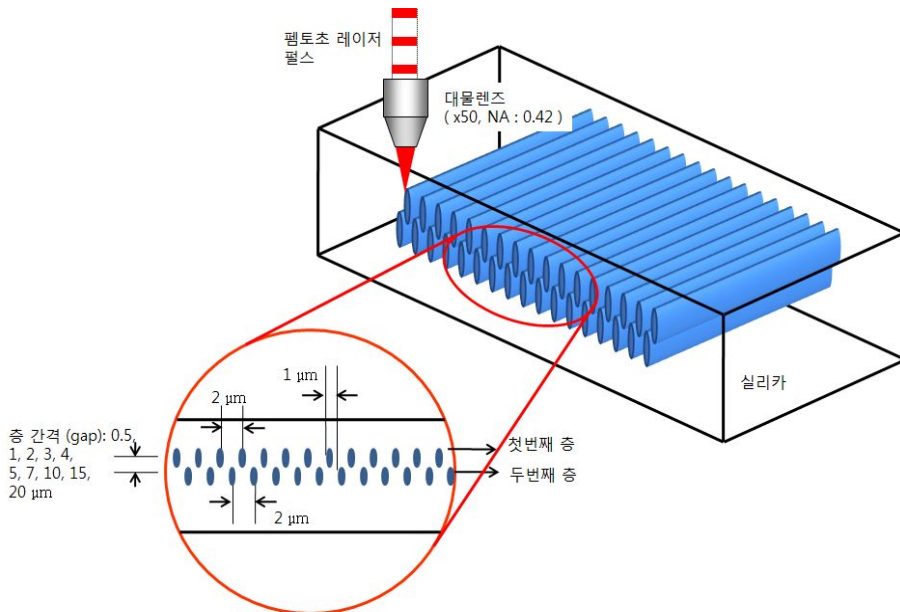


그림 28. 두 층을 가지는 회절격자의 모식도 (격자 간격 : 2 μm)

그림 28 과 같이 두 개의 층을 가진 격자는 깊이 방향으로 서로 일치하지 않고 어긋나게 하여 격자 간격이 좁아지는 효과가 나타나도록 하였다. 회절격자의 가공을 위하여 레이저 빔을 50 배율 대물렌즈 (NA = 0.42)를 사용하여 실리카 표면에 70 μm 내부에 제작 하였으며, 1 mm/s 의 가공속도, 7.3 μJ 의 펄스에너지를

사용하여 제작 하였다.

Z 축과 함께 동축으로 위치해 있는 CCD 카메라를 이용하여 실리카표면에 초점을 맞춘 후 Z축을 $70\ \mu\text{m}$ 내려 실리카 내부에 격자주기가 $2\ \mu\text{m}$ 인 회절격자를 제작한 다음, X 축으로 $1\ \mu\text{m}$ 어긋나게 하여 각 층간의 높이 간격을 변화시켜 또 하나의 $2\ \mu\text{m}$ 격자주기를 가지는 회절격자를 제작하였다. 그리고 결과를 비교하기 위해서 단일 층으로 구성되어있고 격자주기가 $2\ \mu\text{m}$ 와 $1\ \mu\text{m}$ 가지는 회절격자를 제작한 후 He-Ne 레이저를 조사하여 회절패턴을 측정 하였다.

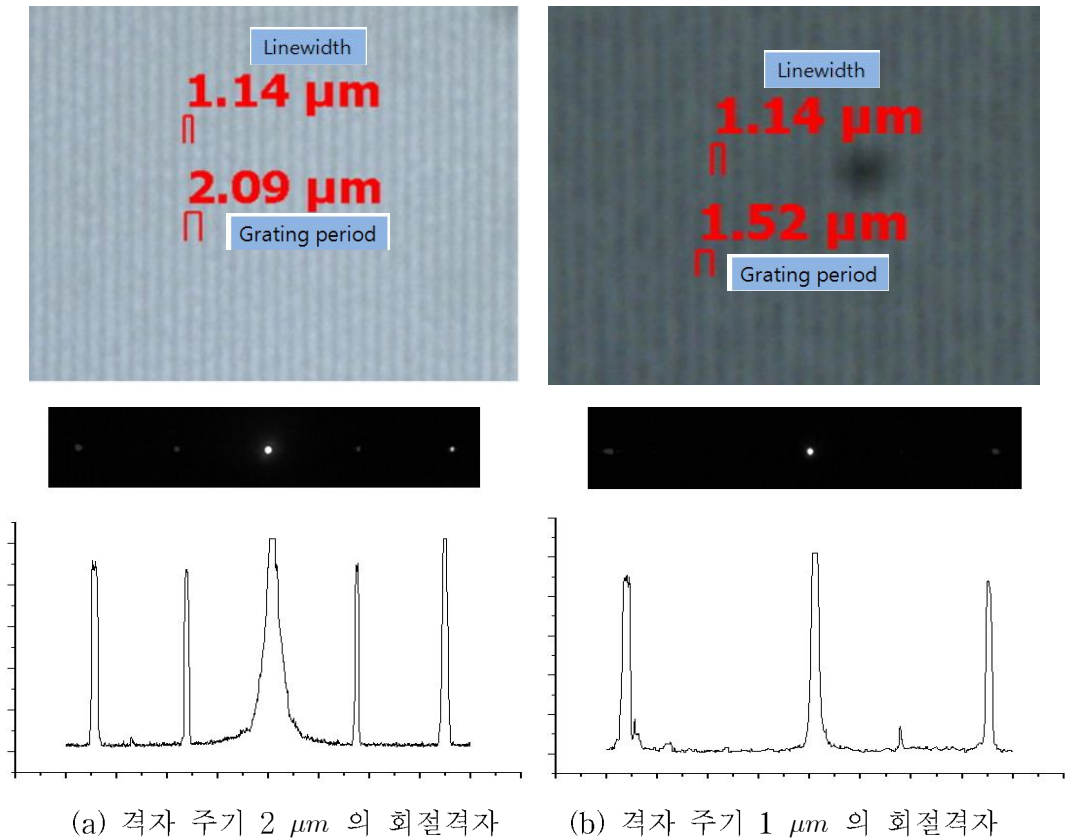


그림 29. 단일 층을 가지는 $2\ \mu\text{m}$ 와 $1\ \mu\text{m}$ 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정

그림 29 는 단일 층으로 구성되어 있는 $2\ \mu\text{m}$ 와 $1\ \mu\text{m}$ 의 격자주기를 가지는 회절격자에 대해 광학현미경 및 회절패턴을 측정한 것이다. 회절패턴에서 보는 것

과 같이 $1 \mu m$ 의 격자 주기를 가지는 회절격자의 패턴이 $2 \mu m$ 의 격자 주기를 가지는 회절격자 보다 상대적으로 두 배정도 간격이 먼 것을 알 수 있었다.

레이저를 사용하여 회절격자의 주기 $2 \mu m$ 이하로 줄이는 데는 한계가 있는데 그 이유는 레이저 빔의 선폭의 크기와 격자 주기가 많이 차이가 나지 않아 $1 \mu m$ 의 회절격자를 제작할 경우 레이저 빔의 선폭에 의해 격자가 겹쳐지거나 선폭과 선폭 사이의 부분이 너무 적게 된다. 그래서 $1 \mu m$ 의 격자 주기를 가지는 회절격자가 제작을 하더라도 이러한 문제들로 인해 회절효율이나 회절패턴의 모양이 나빠지게 된다. 그림 29(b)는 격자주기가 $1 \mu m$ 를 가지는 회절격자를 제작하여 표면과 회절패턴을 측정 한 것이다. 회절패턴 측정 사진을 확인한 결과 1차의 모양이 고르지 않고 옆으로 퍼져 길쭉한 모습을 확인할 수 있었다. 하지만 두 개의 층으로 제작할 경우 이러한 현상이 없는 $1 \mu m$ 의 회절격자를 제작할 수 있을 것을 생각 된다.

4. 제작된 다중 회절격자 (격자주기 $2\ \mu\text{m}$) 측정 및 비교

펨토초 레이저를 사용하여 제작된 회절격자의 회절패턴 측정은 그림 34 와 같이 $633\ \text{nm}$ 의 파장을 가지는 He-Ne 레이저를 사용 하였으며, 제작된 회절격자와 회절패턴 측정은 스크린과의 거리를 $20\ \text{cm}$ 로 고정하여 회절모양을 확인하였고 디지털 카메라를 사용하여 그 모양을 기록 하였다.

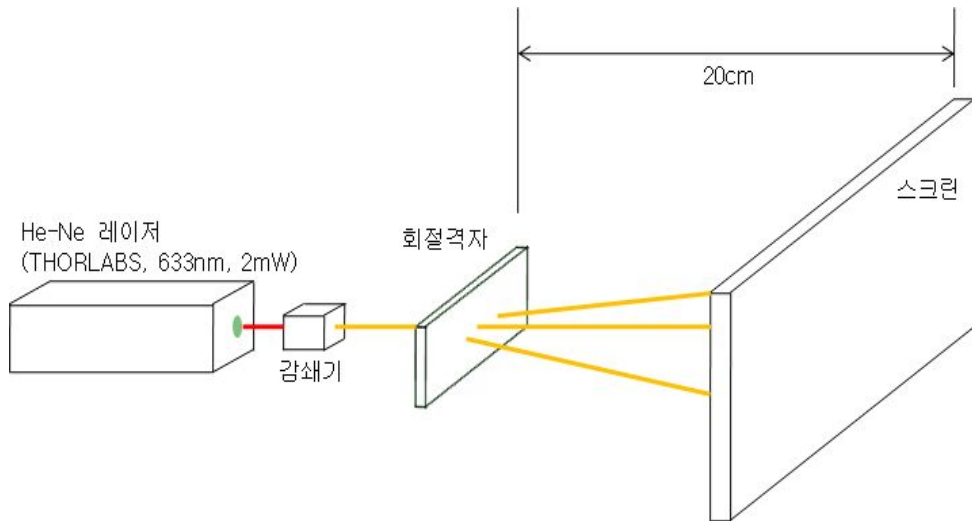
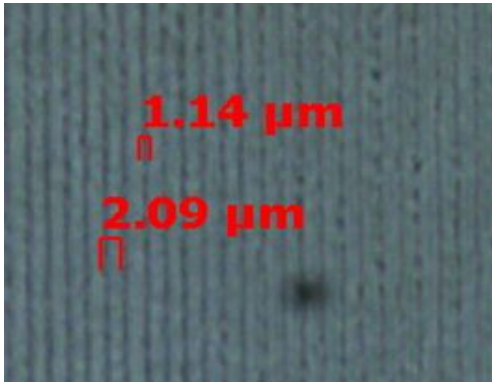
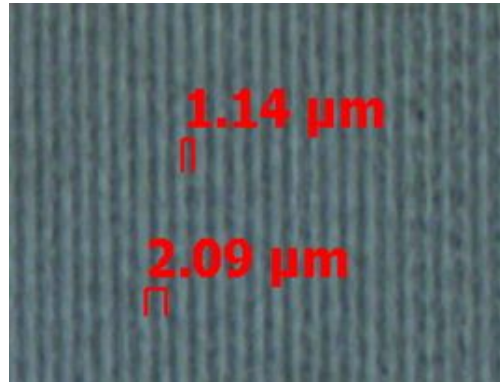


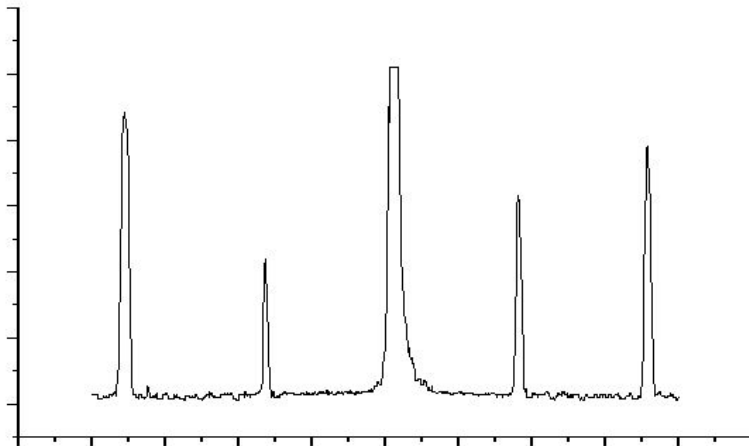
그림 30. 제작된 회절격자 측정 방법 모식도



(a) 첫 번째 층



(b) 두 번째 층



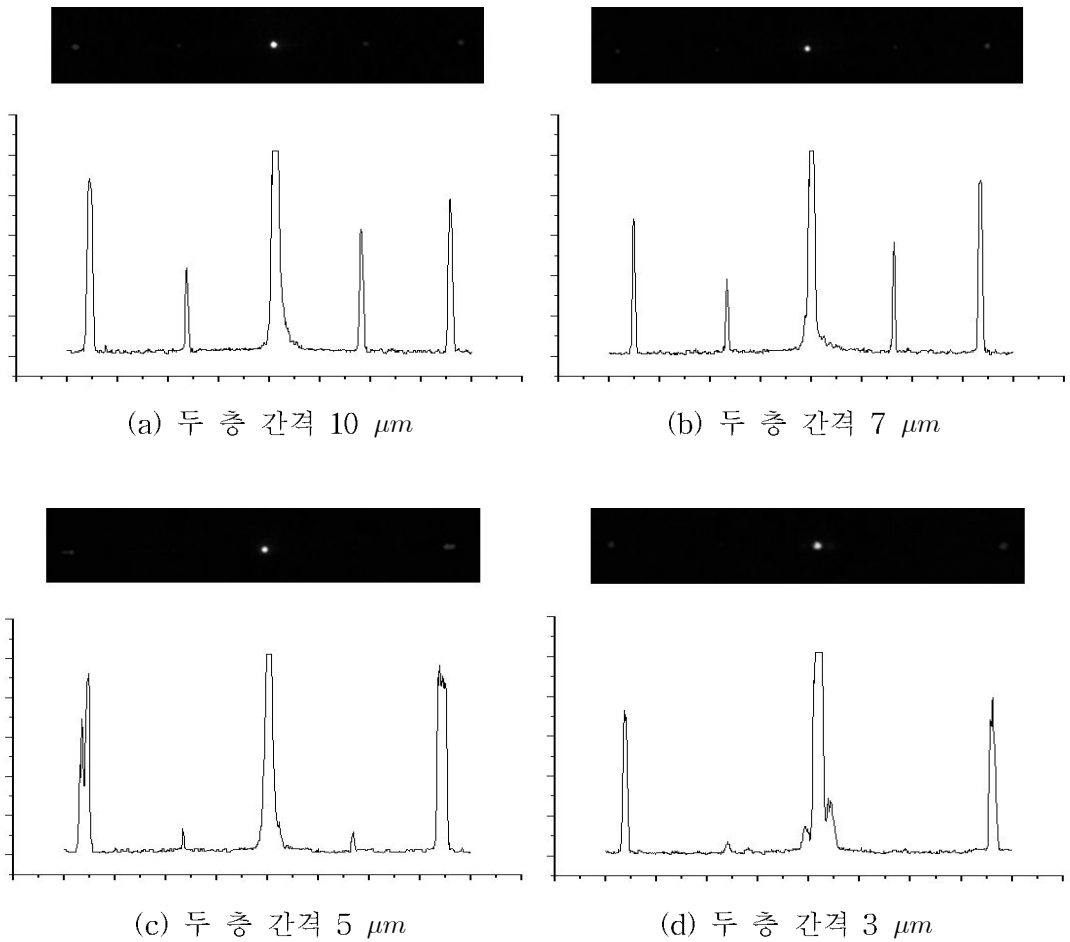
(c) 두 층으로 구성된 회절격자의 회절패턴 (두 층 간격 $10 \mu\text{m}$)

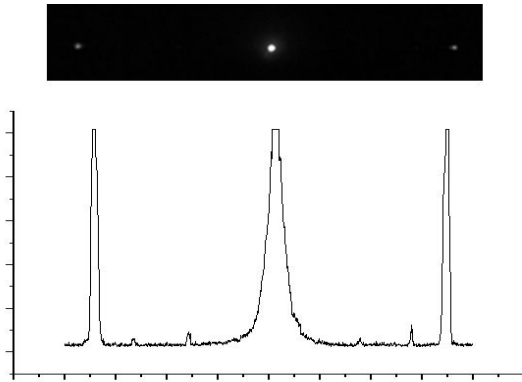
그림 31. $2 \mu\text{m}$ 의 격자 주기를 가지고 두 층의 간격이 $10 \mu\text{m}$ 로 제작된 회절격자의 광학현미경 및 회절패턴 측정

그림 31 은 격자주기가 $2 \mu\text{m}$ 를 가지는 두 개의 층으로 구성된 회절격자에 대해 광학현미경과 회절패턴을 측정한 사진이다. 현미경 측정 사진에서처럼 선폭은

1.14 μm 이며, 격자주기는 각각 2.09 μm 임을 알 수 있다. 그림 31(c)을 보면 두 층으로 구성된 회절격자 이지만 회절패턴은 1 μm 회절격자의 패턴이 아닌 2 μm 의 회절패턴과 유사함을 확인 하였다.

그림 32 는 격자주기가 2 μm 를 가지며 격자간격 변화에 따른 회절패턴에 대해 측정한 것이다. 측정에는 633 nm 의 파장을 가지는 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 제작된 회절격자와 스크린과의 사이는 20 cm 로 고정하여 디지털 카메라를 이용하여 기록하였다. 그림 32(a), (b)에서처럼 2 μm 의 회절격자의 유사한 모습을 보이던 회절패턴들이 두 층 간격이 점점 줄어들수록 1차의 세기가 줄어들어 그림 32(c), (d), (e)에서는 단일 층을 이루는 1 μm 의 회절패턴과 유사함을 확인 하였다.





(e) 두 층 간격 $0.5 \mu m$

그림 32. 두 층으로 구성된 회절격자 (격자 주기 $2 \mu m$)의 층 간격변화에 따른 회절패턴 측정

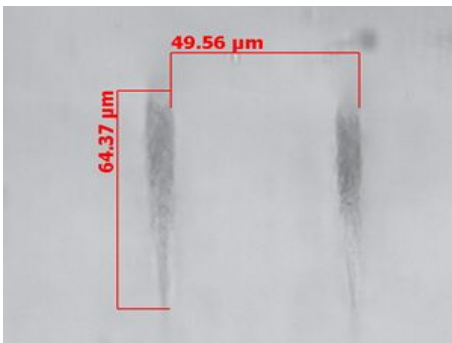
그림 32 (d), (e)는 두 층의 간격을 $3 \sim 0.5 \mu m$ 로 제작한 회절격자에 대한 회절패턴을 측정한 것이다. 격자간격이 $3 \sim 0.5 \mu m$ 에서는 1차의 세기가 확연히 줄어들어 회절패턴의 간격이 두 배로 늘어났음을 확인하였고, 단일 층을 이루는 $1 \mu m$ 의 회절패턴과는 유사함을 알 수 있었다. 하지만, 격자주기가 $1 \mu m$ 를 가지는 회절격자의 회절패턴에서는 1차의 모양이 옆으로 길쭉하게 찌그러진 모습을 하고 있는 반면에 두 층으로 구성되고 격자간격이 $3 \sim 0.5 \mu m$ 에서는 찌그러진 모양이 아닌 원형을 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 회절격자 가공 기술을 이용하면 최소격자 주기 ($1.5 \mu m$) 이하의 회절격자 제작도 가능함을 실험적으로 확인 하였다.

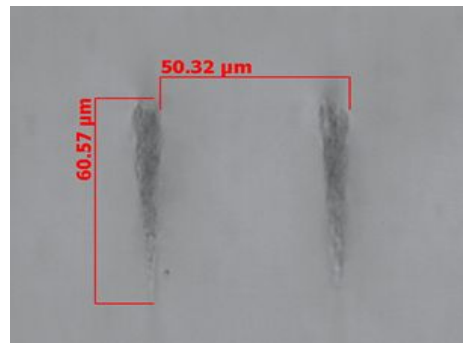
제 3절 필라멘트 현상

1. 가공 및 깊이 비교

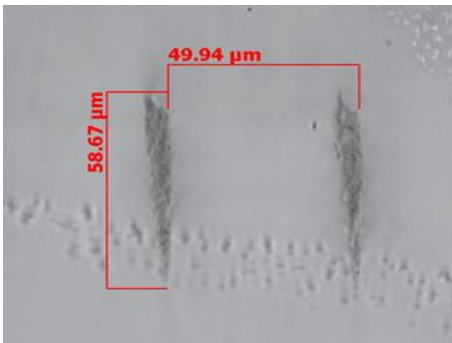
실리카 내부에 그레이팅을 가공한 후 단면을 잘라 광학현미경으로 측정한 결과 레이저 조사방향으로 가공부분이 초점심도보다 더 길게 가공되었음을 확인 하였다. 레이저 파워와 가공속도에 기인한 필라멘트 현상을 변화를 확인하기 위해 레이저 펄스 에너지를 고정하고 가공 속도와 렌즈의 배율을 변화하면서 실험을 하였다. 반복률이 100 kHz 를 가는 펨토초 레이저를 사용하였으며, 1030 nm 의 중심파장을 가지며 실리카 표면에 초점을 맞춘 후 내부 가공을 위하여 Z축을 표면으로부터 70 μm 내려서 가공하였다. 가공에 사용된 렌즈는 20 (NA = 0.4), 50 (NA = 0.42), 100 (NA = 0.5) 배율을 가지는 대물렌즈를 사용하였으며, 레이저 펄스 에너지는 4.3 μJ 로 고정하고, 가공속도를 1 ~ 10 mm/s 로 변화하였다.



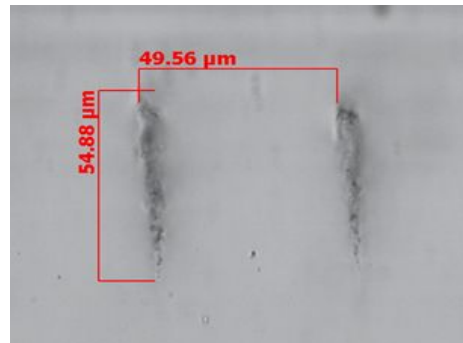
(a) 가공 속도 1 mm/s



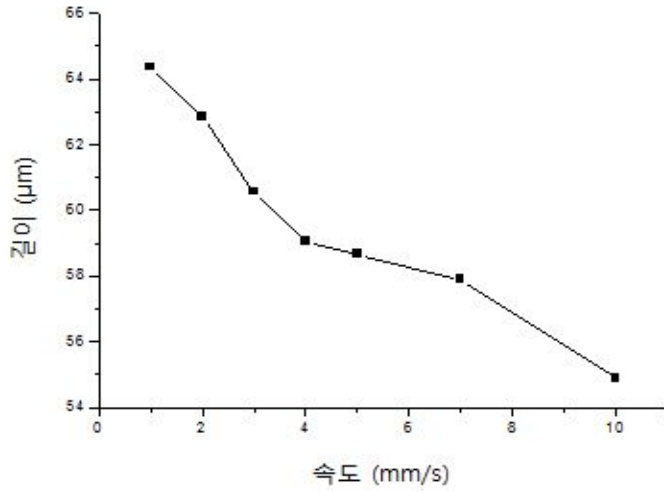
(b) 가공 속도 3 mm/s



(c) 가공 속도 5 mm/s

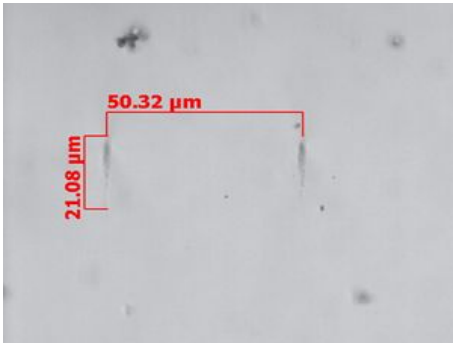


(d) 가공 속도 10 mm/s

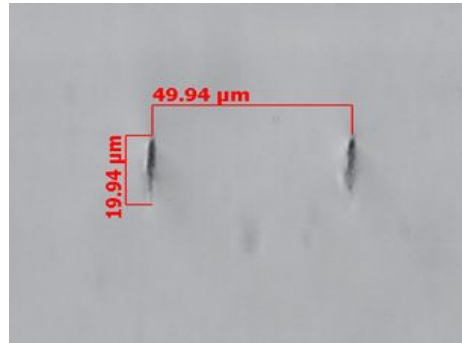


(e) 속도 변화에 따른 측정 그래프

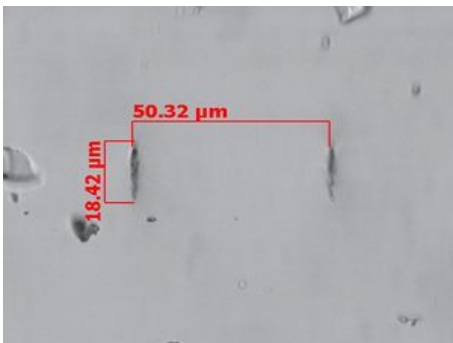
그림 33. 가공 속도 변화에 따른 단면 측정 (20 배율 렌즈 [NA = 0.4])



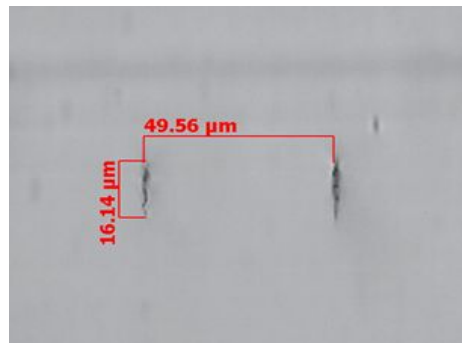
(a) 가공 속도 1 mm/s



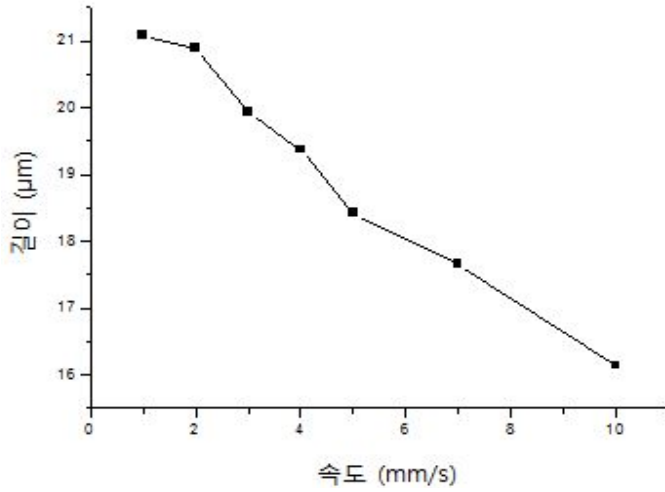
(b) 가공 속도 3 mm/s



(c) 가공 속도 5 mm/s

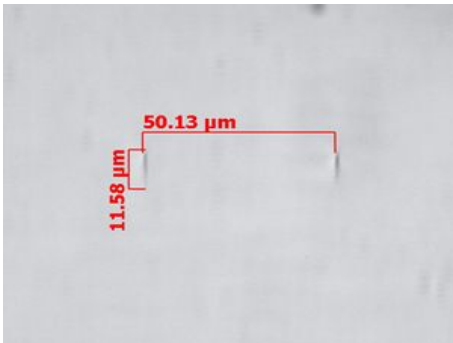


(d) 가공 속도 10 mm/s

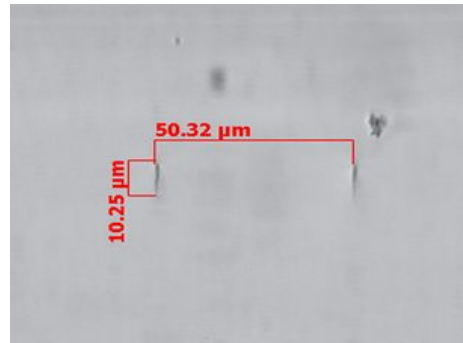


(e) 속도 변화에 따른 측정 그래프

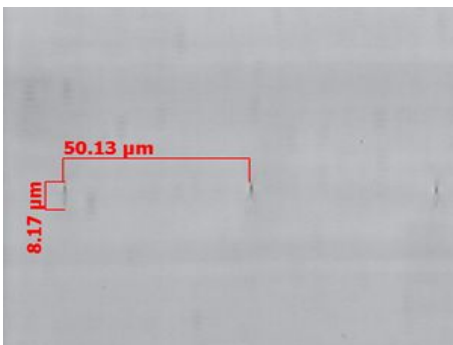
그림 34. 가공 속도 변화에 따른 단면 측정 (50 배율 렌즈 [NA = 0.42])



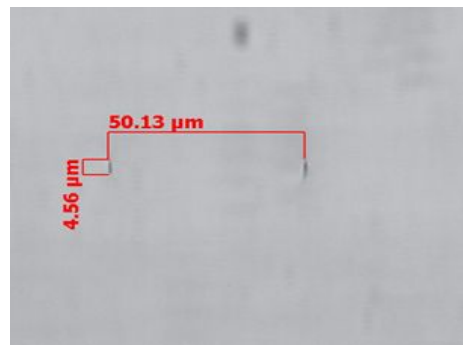
(a) 가공 속도 1 mm/s



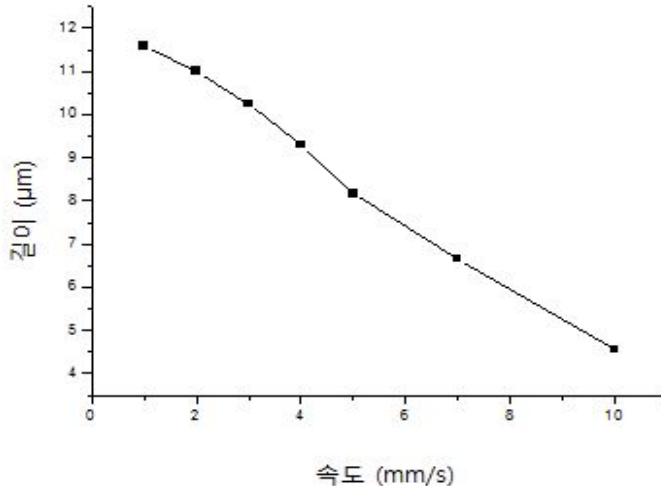
(b) 가공 속도 3 mm/s



(c) 가공 속도 5 mm/s



(d) 가공 속도 7 mm/s



(e) 속도 변화에 따른 측정 그래프

그림 35. 가공 속도 변화에 따른 단면 측정 (100 배율 렌즈 [NA = 0.5])

위 그림 33, 34, 35 는 펄스 에너지를 고정하고 렌즈 배율과 가공 속도를 변화시켜 제작한 선 배열의 단면을 측정한 사진으로 렌즈 배율과 가공 속도에 따라 레이저 조사 방향으로 영향을 받는 정도가 달라지며 배율과 속도가 증가 할수록 레이저 조사 방향으로 파고들어가는 필라멘트 현상이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 가공에 사용된 20, 50, 100 배율의 대물렌즈의 초점깊이인 1.7, 1.6, 1.1 μm 보다 더 깊게 가공이 된 것을 확인하였다.

이러한 현상을 더 줄이기 위해서 NA 값이 더 큰 렌즈를 사용하면 초점깊이 보다 깊게 가공되는 필라멘트 현상을 더 줄일 수 있을 것이라 생각된다.

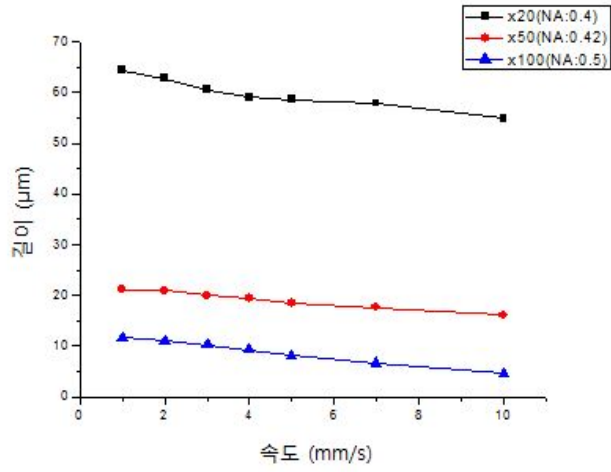
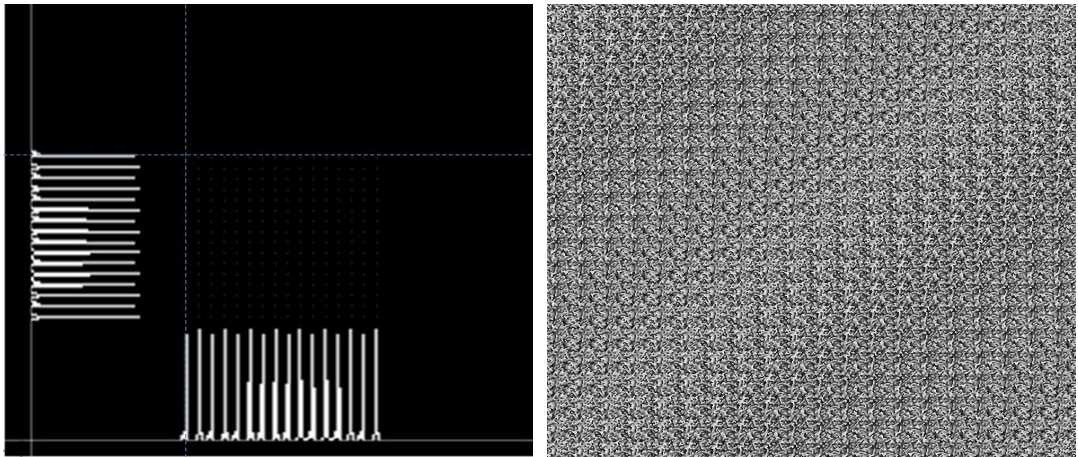


그림 36. 가공 속도와 렌즈배율 변화에 따른 가공 깊이 변화

제 4절 키노폼 점 배열 재생

1. 키노폼 점 배열 제작

먼저 레이저 빔 배열을 얻기 위하여 자체 설계된 MATLAB 소프트웨어를 사용하여 그림 37 (a)와 같은 점으로 구성되어 있는 16×16 의 점 배열의 이미지를 만든다. 이미지의 전체 크기는 1000×1000 화소 개수를 가지며, 레이저 빔 배열은 이미지의 400 화소 위치에서 20 화소 의 간격으로 701 화소 까지 하나의 점을 생성하게 프로그램 하였다. MATLAB을 사용하여 제작된 점 배열에 대해 반복 푸리에 변환 알고리즘을 적용하여 그림 37 (b)의 점 배열에 대한 키노폼 패턴 무늬를 얻었다.



(a) 16×16 배열의 점 이미지

(b) 점 배열 이미지의 홀로그램패턴

그림 37. 자체 설계된 프로그램인 MATLAB을 이용하여 점 배열 생성

이렇게 생성된 키노폼 패턴의 이미지를 공간광변조기와 연결된 컴퓨터를 이용하여 키노폼 패턴의 전압 신호를 주사해 주었고, 543 nm 파장의 He-Ne 레이저를 조사 하였다. 공간 필터를 사용하여 레이저 빔을 공간적으로 균일하게 만들어 조사 하였다. 공간광변조기에서 변조된 레이저 빔에 대해 빔 분할기를 사용하여 반사된 레이저 빔의 경로를 변경하여 재생 시스템에 위치한 대물렌즈에 집광시켜 주었다.

렌즈 배율에 따라 축소된 재생된 상을 얻었으며, 동일한 축에 위치한 CCD를 사용하여 이미지를 확인 하였고 상용프로그램인 LabVIEW를 사용하여 측정된 재생 이미지를 640×480 의 크기로 저장 하였다.

2. 키노폼 점 배열 재생

키노폼 점 배열 재생에 사용된 렌즈는 각 각 10× (NA = 0.25), 20× (NA = 0.4), 40× (NA = 0.65)의 대물렌즈를 사용하였으며, 초점 길이가 100 mm 를 가지는 렌즈도 사용 하였다. 그리고 참조 표적으로서는 1951 USAF 표적을 사용 하였다.

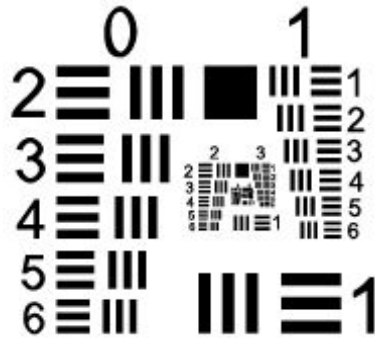


그림 38. 참조 표적으로 사용된 1951 USAF 타겟

그룹	요소	공간주파수	선폭 (μm)	그룹	요소	공간주파수	선폭 (μm)
2	1	4	125	6	1	64	7.81
	2	4.49	111		2	71.84	6.96
	3	5.04	99.2		3	80.63	6.2
	4	5.657	88.4		4	90.51	5.52
	5	6.35	78.7		5	101.6	4.92
	6	7.127	70.2		6	114	4.38
4	1	16	31.3	7	1	128	3.91
	2	17.96	27.8		2	143.7	3.48
	3	20.16	24.8		3	161.3	3.1
	4	22.63	22.1		4	181	2.76
	5	25.4	19.7		5	203.2	2.46
	6	28.51	17.5		6	228.1	2.19

표 9. 참조 표적으로 사용된 1951 USAF 타겟 데이터

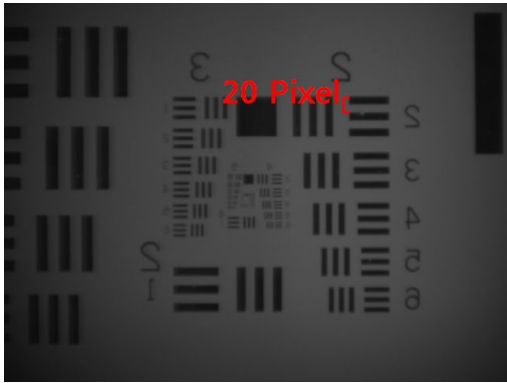


그림 39. 그룹 4 요소 1의 공간주파수

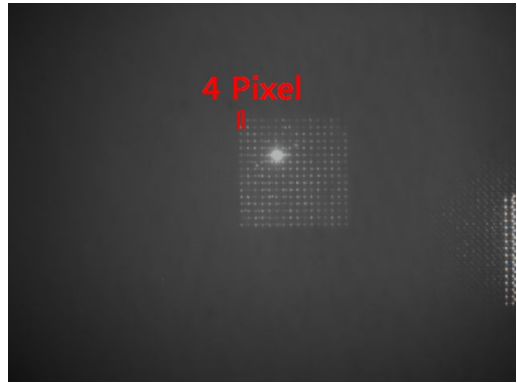
그림 39는 그룹 4 요소 1의 표준 타겟을 보여주고 있다. 표준 타겟 데이터를 이용하여 검은 막대하나의 절대크기를 구하기 위해서 공간주파수를 사용한다. 타겟에서 공간주파수는 검은 막대와 다음 검은 막대까지이다. 표 9에서 알려진 공간주파수 16 (*line/mm*)를 사용하여 주기 ($\lambda = 62.5 \mu\text{m}$)를 구할 수 있으며, 이를 사용하여 검은 막대 하나의 선폭 ($\lambda/2 = 31.3 \mu\text{m}$)을 알 수 있다.

40 배율을 가지는 렌즈를 이용하여 1951 USAF 타겟의 그룹 6 요소 2의 한 주기의 화소 개수를 세어보니 20개이며, 검은 막대의 화소 개수는 10 개임을 알 수 있었다. 검은 막대 하나의 선폭은 $6.96 \mu\text{m}$ 이며, 40 배율을 가지는 렌즈를 사용하여 검은 막대의 화소 개수가 10개 이므로 사용한 렌즈에 대해 CCD카메라의 상대적인 화소의 크기는 $0.696 \mu\text{m}$ 임을 확인 할 수 있었다. 그룹 6의 요소 2번의 공간주파수는 71.84 (line/mm) 이며 공간 주파수를 이용하여 주기의 크기가 $13.92 \mu\text{m}$ 임을 구할 수 있으며, 이를 이용하여 검은 막대의 하나의 선폭은 $6.96 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

40 배율을 가지는 렌즈를 사용하여 점 배열의 키노품을 재생하여 측정하였다. 점 배열중 하나의 점에 대해 화소 개수는 4개 이다. 40 배율을 가지는 렌즈를 사용하였을 때 CCD카메라의 상대적인 화소 크기가 $0.696 \mu\text{m}$ 이므로, 재생한 홀로그램의 점 하나당 약 $2.78 \mu\text{m}$ 의 크기를 가짐을 확인하였다.

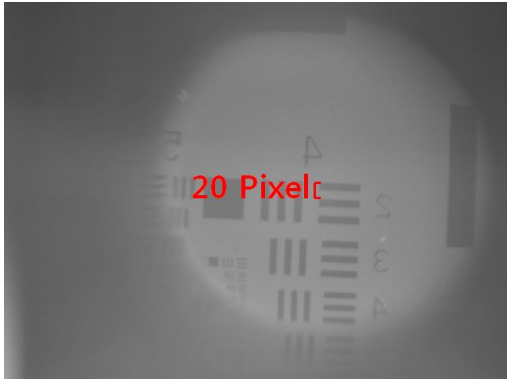


(a) 그룹 2의 요소 2 픽셀 개수 측정

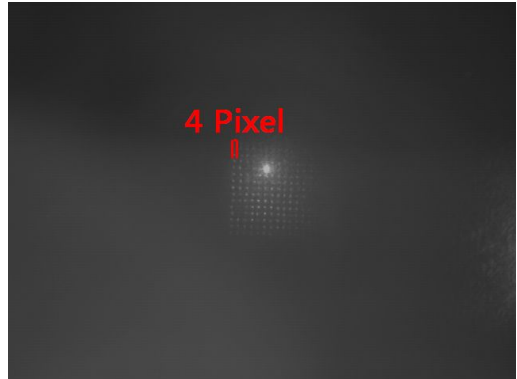


(b) 점 배열 재생 이미지

그림 40. 초점 길이 100 mm 를 가지는 렌즈에 의한 재생이미지 측정

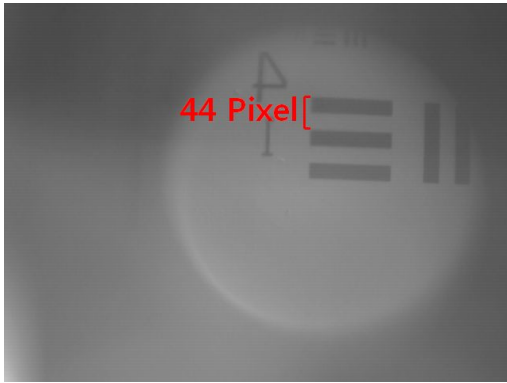


(a) 그룹 4의 요소 2 픽셀 개수 측정

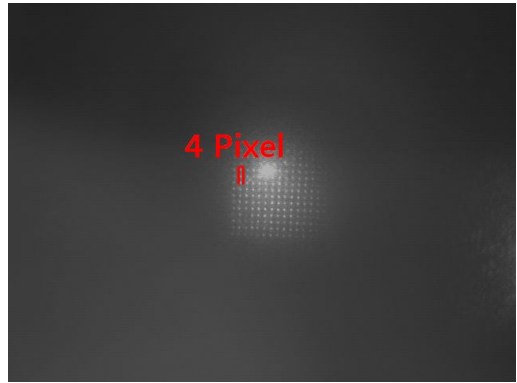


(b) 점 배열 재생 이미지

그림 41. 10배율을 가지는 대물렌즈에 의한 재생이미지 측정

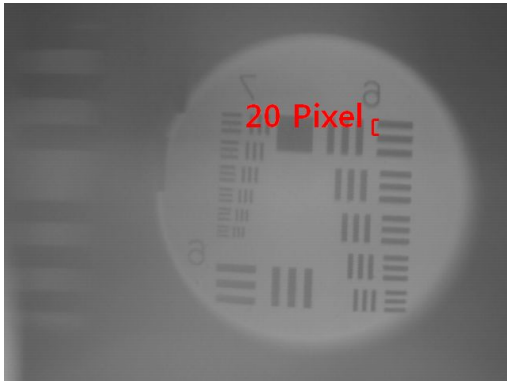


(a) 그룹 4의 요소 1 픽셀 개수 측정

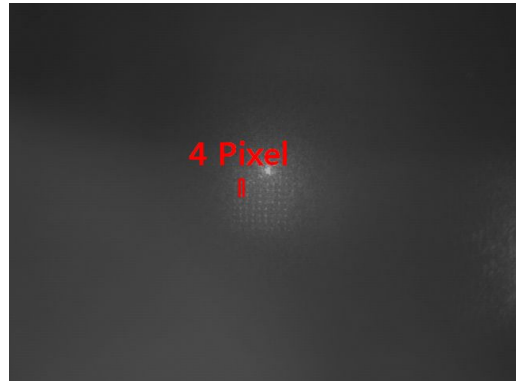


(b) 점 배열 재생 이미지

그림 42. 20배율을 가지는 대물렌즈에 의한 재생이미지 측정



(a) 그룹 6 요소2 의 픽셀 개수 측정



(b) 점 배열 재생 이미지

그림 43. 40배율을 가지는 대물렌즈에 의한 재생이미지 측정

사용 렌즈	참조 타겟 위치	공간 주파수 (line/mm)	검은 막대 선폭 (μm)	검은 막대 화소 개수 (개)	상대적 화소 크기 (μm)	점 배열 화소 개수 (개)	점 크기 (μm)
$f = 10$ mm	그룹2 요소2	4.49	111	10	11.1	4	44.4
10×	그룹4 요소2	17.96	27.8	10	2.78	4	11.12
20×	그룹4 요소1	16	31.3	22	1.42	4	5.68
40×	그룹6 요소2	71.84	6.96	10	0.696	4	2.784

표 10. 렌즈에 따른 점 크기 측정

제 5장 결 론

펨토초 레이저를 이용하여 실리카 내부에 격자 주기가 $6\ \mu\text{m}$ 인 두 개의 회절 격자 층을 깊이 방향으로 인접하게 가공 하였으며, 이를 $3\ \mu\text{m}$ 격자 주기를 가지는 하나의 층으로 제작된 회절격자와 비교하여 회절패턴을 측정 하였다. $6\ \mu\text{m}$ 격자 주기를 가지는 두 층 사이의 간격이 $0.5\ \mu\text{m}$ 에서는 $3\ \mu\text{m}$ 회절주기를 가지는 회절 격자와 회절 특성이 매우 유사한 경향을 가지는 것을 실험적으로 확인 하였다. 또한, 최소 격자 주기 ($1.5\ \mu\text{m}$ 정도)의 회절격자를 제작하기 위하여 격자 주기가 $2\ \mu\text{m}$ 인 두 개의 회절 격자 층을 위의 실험 방법과 동일하게 진행 하였으며, $2\ \mu\text{m}$ 격자 주기를 가지는 하나의 층으로 제작된 회절격자와 비교 해 보았다. $2\ \mu\text{m}$ 격자 주기를 가지는 두 층 사이의 간격이 약 $0.5 \sim 5\ \mu\text{m}$ 에서 $2\ \mu\text{m}$ 회절주기를 가지는 회절격자의 회절패턴 보다 배로 증가함을 확인하였다.

격자 주기가 $1\ \mu\text{m}$ 를 가지는 단일 층으로 구성된 회절격자를 제작한 결과, 선 폭과 선폭이 겹쳐지는 현상이 생겨, 회절패턴 측정 시 대체적으로 약간 길쭉한 모습을 보였지만, $2\ \mu\text{m}$ 격자 주기를 가지는 두 층 사이의 간격이 약 $0.5 \sim 5\ \mu\text{m}$ 의 회절패턴의 각 차수의 간격과 모양이 동일함을 확인하였다. 이러한 3차원 격자 다층 가공 기술을 이용하면 광학소자 제작 등 다양한 분야에 응용이 가능할 것이라 생각된다. 또한, 투명 매질 내부에 가공되는 광학소자에 영향을 주는 필라멘트 현상은 가공에 사용되는 속도와 렌즈 배율에 따라 영향을 받는 깊이 정도가 줄어드는 것을 확인 하였지만, 사용된 렌즈의 초점깊이 보다는 더 깊게 가공되었다. 이러한 현상을 줄이기 위해서 더 높은 배율이나 NA 값이 큰 렌즈를 사용하면 초점 깊이가 줄어들어 영향을 받는 깊이가 감소하여 레이저 조사 방향으로 영향을 주는 필라멘트 현상이 줄어들 것이라 생각된다.

회절격자 효율 향상 실험에서는 펨토초 레이저를 사용하여 회절격자를 가공 하고 제작된 격자 표면에 CO_2 레이저를 사용하여 연마 반복수 변화에 따른 광학특성 변화를 연구 하였다. 연마가 이루어지지 않았을 때는 회절격자의 표면이 거칠고 가공한 격자 사이 골에 부스러기 등으로 인해 회절 패턴과 회절효율이 좋지 않음을 확인 하였다. 연마 1단계(연마 반복수 1 ~ 3회)에서는 회절격자의 표면의 거친 부분이 연마에 의해 녹으면서 각 차수의 세기 및 효율이 증가하였고, 연마 2단계(연마 반복수 : 6 ~ 9회) 에는 연마 전보다 0차 회절패턴의 세기가 줄어드는 반면에

각 차수의 세기가 증가함을 확인하였는데, 그러한 이유는 CO₂ 레이저 연마 반복수가 증가함에 따라 격자 표면뿐만 아니라 가공한 격자 사이 골의 부스러기 까지 녹으면서 격자 깊이가 깊어지면서 0차의 세기가 줄어드는 반면에 각 차수의 세기 및 효율은 증가한 것으로 생각된다. 연마 3단계 (연마 반복수 : 16 ~ 20회)에서는 너무 많은 CO₂ 레이저 연마 반복수에 의해 회절격자의 모양이 변형되어 전체적인 세기 및 효율이 감소된 것이라 생각된다. 이러한 CO₂ 레이저 연마기술을 이용하여 여러 광학소자의 효율 향상 및 특성 변화에 대한 연구가 가능할 것이라 기대된다.

키노폼 점 배열 재생 실험에서는 위상 홀로그램인 키노폼 설계 방법 중 가중치 적용 반복 푸리에 변환방법 설계에 의해 제작된 키노폼 홀로그램을 공간광변조기를 사용하여 재생 하였다. 재생된 물체는 CCD 카메라를 사용하여 측정 및 기록되었으며, 원하는 물체를 키노폼을 사용하여 정밀 구현이 가능함을 확인하였다.

향후, 회절격자 효율 향상을 위해 격자 가공 부위의 크기를 CO₂ 레이저의 초점 크기보다 크게 가공하여 주변에 영향을 적게 주면서 펨토초 레이저로 가공된 격자의 거친 부분만 연마가 되게 실험을 하며, 다중회절격자 제작 시 높은 배율과 NA 값이 큰 대물렌즈를 사용하여 필라멘트 현상을 줄이고, 현재 제작한 1 μm 회절격자 보다 더 작은 간격을 가지는 회절격자를 제작하여 특성을 비교할 것이다.

또한, 펨토초 레이저와 공간광변조기를 사용하여, 가공 정밀도를 높이고 다양한 모양을 가지는 물체에 대해 마스크를 사용하지 않고, 레이저 빔을 주사하는 것 없이 한 번의 레이저 조사로 원하는 물체를 제작할 수 있는 가공기술 개발연구를 진행할 예정이다.

【참고문헌】

- [1] K. H. Leong, A. A. Said, and R. L. Maynard, "Femtosecond micromachining Applications for electro-optic components," IEEE Electronic Components and Technology Conference, pp. 210-214, 2001.
- [2] M. Xia and Y. Tu, "An investigation of femtosecond laser micromachining," IEEE International Conference on MEMS, Nano and Smart Systems, pp. 296-300, 2005.
- [3] G. J. Lee, Y. H. Jeong, C. H. Oh, E. K. Kim, and Y. P. Lee, "Femtosecond laser fabrication of surface-relief grating and internal diffraction grating in glass," J. Kor. Phys. Soc. Vol. 46, No. 96, pp. 175-180, 2005.
- [4] Zang, Q. Z., Qiu, J. R., Jiang, X. W., Zhao, C. J., and Zhu, C. S., "Fabrication of internal diffraction gratings in calcium fluoride crystals by a focused femtosecond laser," Opt. Exp. Vol. 12, No. 5, pp. 742-746, 2005.
- [5] Y. Cheng, K. Sugioka, M. Masuda, K. Shihoyama, K. Toyoda, and , K. Midorikawa, "Optical gratings embedded in photosensitive glass by photochemical reaction using a femtosecond laser," Opt. Exp. Vol. 11, No. 15, pp. 1809-1816, 2003.
- [6] K. Kawamura, M. Hirano, T. Kamiya, and H. Hosono, "Holographic writing of volume-type microgratings in silica glass by a single chirped laser pulse," Appl. Phys. Lett. Vol. 81, No. 6, pp. 1137-1139, 2002.
- [7] W. Mckinney, "Diffraction gratings: manufacture, specialization, and application," SPIE 28th Annual Intern. Techn. Symp., Tutorial 25, San Diego, 1984.
- [8] E. W. Palmer, "Diffraction gratings," Rep. Progr. Phys. 38, pp. 975-1048, 1975.
- [9] G. W. Stroke, "Diffraction grating," in handbook of physics, Vol. 29, pp. 1256-1259, 1967.
- [10] 최윤선, 윤병호, 김 남., "Photopolymer를 이용한 반사형 회절격자의 효율 및 동적특성 분석," 한국광학회지, Vol. 9, No. 5, pp. 315-319, 1998.
- [11] D. Paipulas, V. Kudriaov, K. Kurselis, M. Malinauskas, Simone Ost, and V. Sirutkaitis, "Volume bragg grating formation in fused silica with high repetition

rate femtosecond Yb:KGW laser pulse”, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 5, No. 3, pp. 218-222, 2010.

[12] A. Hans, “Efficiency of blazed holographic diffraction grating coated with different surface materials,” Opt. Comm., Vol.13, No. 4, pp. 426-430, 1975.

[13] J. J. Nathan, T. H. Ryan, H. Angus, C. Ashutosh and L. C. Robert, “A versatile diffractive maskless lithography for single-shot and serial microfabrication,” Opt. Exp., Vol. 18, No. 11, pp. 11754-11762, 2010.

[14] A. F. Isakovic, A. Stein, J. B. Warren, S. Narayanan, M. Sprung, A. R. Sandy, and K. Evans-Lutterodt, “Diamond kinoform hard X-ray refractive lenses: design, nanofabrication and testing,” J. Synch. Rad., 16, pp. 8, 2009.

[15] M. E. Fermann, A. Galvanauskas, and G. Sucha, “Ultrafast lasers: technology and applications,” Marcel Dekker, Inc., pp. 61-88, 2003.

[16] 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. McCord-Maughon, J. Qin, H. Rkel, M. Rumi, X.-L. Wu, S. R. Marder, and J. W. Perry, “Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication,” Nature, Vol. 398, pp. 51-54, 1999.

[17] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, “Fundamentals of photonics,” Wiley, pp. 522-525, 1997.

[18] Y. J. Kim, Y. S. Kim, S. M. Kim and S. W. Kim, “Ultrafast femtosecond laser : fundamentals and applications,” Journal of KSPE., Vol.27, No.6, pp.7-16, 2010.

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

[20] 김병태, “레이저 공학”, 상학당, pp. 320-321, 2006.

[21] J. T. Kim, “Phase hologram : kinoform,” 방송공학회지, 16권, 2호, pp. 129-135, 2011.

[22] 최현준, 서영호, 김동욱, “디지털 홀로그래픽 디스플레이 연구개발 동향,” 주간 기술동향, 정보통신 연구진흥원, 제 1406호, pp. 14-24, 2009.

[23] Spatial light modulation manual, Boulder nonlinear systems, Inc., pp. 4, 2010.

[24] General catalogue 2010/2011, Samsung Techwin, pp. 11.

[25] R. Martinez-Vazquez, R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi, and O. Svelto, "Fabrication of photonic devices in nanostructured glasses by femtosecond laser pulse," *Opt. Exp*, Vol. 15, No. 20, pp. 12628-12635, 2007.

[감사의 글]

어느덧 2년이라는 시간이 빨리 지나갔습니다. 그 동안 이런 일, 저런 일.....참 많은 일이 있었는데, 이제는 저와 함께 했던 모든 사람들과 공유하며 추억할 수 있는 한편의 소중한 시간들이 되었습니다. 항상 부족하고 또 부족하고 또 부족한 저를 항상 아껴주시고 지도해 주신 김진태 지도 교수님과 광주과학기술원 고등광기술연구소 손익부 박사님 정말 감사드립니다. 두 분이 이끌어주시지 않으셨다면 여기까지 오지 못했을 거라 생각합니다. 정말 감사드립니다. 또한, 부족한 부분을 채워주시기 위해 언제나 노력하시는 든든한 저희 학과 교수님들이신 김현수 교수님, 박종락 교수님, 안태정 교수님, 권민기 교수님, 주기남 교수님 정말 감사드립니다.

많이 모자라지만 이 논문을 쓰기 위해 많이 도와주신 분들 감사드립니다. 고등광기술연구소 미세광학 연구실의 든든한 버팀목이신 저희 실장님이신 노영철 박사님, 지금은 다른 곳으로 가셨지만 처음 연구소 위촉으로 들어와서 적응이 안되어 힘들어하는 저를 많이 챙겨주신 김영섭 박사님, 항상 짓궂게 장난을 해도 녀석 좋게 웃어주는 후배였지만 이제는 전남대가서 석사과정 중인 우리 덕이, 삼성이 야구 우승할 때 소리 지르며 좋아하던 대구 아저씨 상욱씨, 모두 모두 감사드립니다.

연구소 생활로 인해 학교생활 중 무심코 지나친 일이나 중요한 일들에 대해 연락해주고 많이 챙겨준 학교 동기와 선·후배님들 미안하고 고맙습니다. 낯선 타지에 와서 연구에 매진하는 우리 실험실 아드난과 하폐즈 아저씨들, 몸이 많이 좋지 않지만 항상 도와주고 노력하고 연구할 때 멋있는 우리 건국이 형님, 많이 도와주셔서 감사드립니다.

이번에 함께 졸업하는 언제나 차분하고 화난 모습을 한 번도 본적이 없어서 한번 화나게 만들고 싶은 동준이 형님, 우리 과 대학원 회장이었지만 별달리 한 것이 없었던 것 같았던 우리 동석이 형님, 많은 밤을 함께 지새우고 항상 큰 목소리로 주위를 즐겁게 해주는 나의 동기 회석이, 여자 친구랑 재밌게 놀기도 하고 일도 척척 잘해내는 우리 기찬이, 2년 동안 수고한 동기들 다들 고생 했고, 좋은 직장 가서 잘 먹고 잘살기를 바랍니다.

이 밖에도 학교가면 놀아주고 항상 반갑게 맞아 주던 호형, 일신이, 찬영이, 훈이, 차기 학과 대학원 회장 명진이, 철용이, 광우 다들 고마웠어요. 다들 열심히 해서 만족할 만한 결과 얻길 바랍니다. 일일이 다 적을 수는 없지만, 저를 응원해주

시고 격려해 주신 많은 모든 분들께 감사의 인사를 드리고 싶습니다.

항상 걱정해주고 응원해준 아버지, 누나, 형이 있어 힘이 되었고 의지가 되었으며, 용기가 되었습니다. 정말로 감사드립니다.

그리고 언제나 항상 잘해주고 싶지만 너무나 턱없이 부족한 저를 좋아해주고 응원해주며 사랑해준 여자 친구 나의 영원한 토끼냥 희선이, 고맙고 감사해요.

저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학번	20107131	과정	석사
성 명	한글 최 훈 국	한문	崔 熏 局	영문	Hun Kook, Choi
주 소	광주광역시 동구 소태동 540-51 번지				
연락처	E-mail : chksshe@hanmail.net				
논문제목	한글 펄토초 레이저로 제작된 회절격자의 CO ₂ 레이저 표면 연마 특성 연구				
	영문 Study on CO ₂ laser surface treatment of diffraction grating fabricated by using a femtosecond laser				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(0) 반대()

2011년 02월

저작자: 최 훈 국 (인)

조선대학교 총장 귀하

