creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학전문석사 학위논문

# 편광된 레이저 빔의 편광 필름 가공에 대한 연구

Study on polarizing film processing by a polarized laser beam

2021년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과

우 정 훈

# 편광된 레이저 빔의 편광 필름 가공에 대한 연구

지도 교수 정 윤 찬

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2021년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과
우 정 훈

우정훈의 공학석사 학위논문을 인준함
2021년 2월

위 원 장 _____ 안 성 훈 _____ (인)

부위원장 _____ 정 윤 찬 _____ (인)

위 원 _____ 박 창 우 _____ (인)

# 초 록

최근 제조 공정에서는 레이저가 많은 분야에 적용되고 있다. 특히 초단파 레이저를 사용한 레이저 어블레이션 현상을 이용하여 레이저 마킹, 에칭, 드릴링, 커팅 등 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 그 중에서 재료 형상의 다양화, 복합화의 추세에 따라 레이저 커팅의 활용성이 크게 증가하고 있다. 레이저 커팅에서 레이저 특성에 따른 특정한 재료의 가공성을 이해하고 사용하는 것이 효율을 올릴 수 있기 때문에 가공을 최적화 하는 방안을 제시하였다. 레이저의 종류에 따라 레이저 빔은 다양한 편광 상태를 가지는데, 편광된 상태의 세부적인 특성을 파악하는 것이 가공 품질을 더욱 향상시킬 수 있기 때문에 편광된 상태의 레이저 빔을 이용했다. 레이저 가공은 레이저의 특성뿐 아니라 재료의 특성에 따라서 그 특징이 변화하게 되는데 이 논문에서는 편광 필름에 대한 가공성에 대해서 다루어 보았다. 많은 재료 중 특별히 편광 필름을 다룬 이유는 디스플레이 분야에서는 패널을 생산할 때 시인성을 향상시키기 위한 목적으로 거의 모든 패널에 편광 특성을 지닌 레이어가 존재하기 때문에 해당 재료와 레이저 가공의 특성을 파악하면 산업의 공정에 적용하는데 유리하기 때문이다. 실험은 대표적인 편광 상태인 P-polarizatioin, S-porarization, C-porarization의 레이저 빔을 이용하여 편광 필름의 각도를 변화해가며 Shot 상태의 가공으로 가공의 기초 특성을 파악하고, 실제 커팅 공정을 진행하여 각각의 조건에 따른 가공성과 품질의 변화를 측정하였다. 레이저와 재료 특성에 따라 가공성 측면에서는 5% 수준, 품질 측면에서는 30% 수준의 차이를 확인하였고, 주요 인자를 파악하여 최적화 방안을 제시하였다.

**주요어 : 레이저 가공, 편광, 편광필름, 고분자, 최적화**

**학 번 :** 2019-28078

# 목 차

초 록 ..... i
목 차 ..... ii
표 목차 ..... iv
그림 목차 ..... v
명명법 목차 ..... vii

제 1 장 서 론 ..... 01
제 1 절 연구의 배경 ..... 01
제 2 절 연구의 내용 및 목표 ..... 02

제 2 장 선행 연구와 이론적 배경 ..... 04
제 1 절 선행 연구 ..... 04
제 2 절 이론적 배경 ..... 05
2.1 빛의 편광 ..... 05
2.2 편광 필름의 원리 ..... 09
2.3 UV 레이저 어블레이션 ..... 11
2.4 IR 레이저 어블레이션 ..... 14

제 3 장 실험 목적 및 방법 ..... 16
제 1 절 실험 목적 ..... 16
제 2 절 실험 방법 ..... 16
2.1 실험 세팅 및 재료 ..... 16
2.2 변수 기준 제시 ..... 17
2.3 가공 방법 및 측정 방법 ..... 18

제 4 장 실험 결과 ..... 20
제 1 절 IR 레이저 실험 결과 ..... 20

1.1 Shot 가공으로 확인한 가공 효과 .....20
1.2 Cutting 가공으로 확인한 가공 효과.....23
제 2 절 UV 레이저 실험 결과.....26
2.1 Shot 가공으로 확인한 가공 효과 .....26
2.2 Cutting 가공으로 확인한 가공 효과.....27
제 3 절 결과의 상관 분석.....31

제 5 장 결 론 .....34
제 1 절 연구 요약과 시사점 .....34
제 2 절 향후 연구 과제.....38

참고문헌.....39

Abstract .....42

# 표 목차

[표 2.1] 모델링에 의한 가공 깊이 시뮬레이션.....13
[표 4.1] IR 레이저 가공 실험 데이터 .....25
[표 4.2] UV 레이저 가공 실험 데이터.....29
[표 4.3] 가공 결과의 변수에 따른 상관분석 결과.....33
[표 5.1] 가공 방향, 레이저 편광 방향, 편광 필름 방향의 조합이 가공에 미치는 영향 .....36

# 그림 목차

[그림 1.1] 레이저 펄스 폭에 의한 레이저 가공의 차이 .....1
[그림 1.2] 레이저 가공의 매개변수들 .....3
[그림 2.1] 전자기파의 진행과 편광의 방향.....6
[그림 2.2] 편광되지 않은 빛의 전기장 성분과 편광 필터의 효과 .....6
[그림 2.3] 빛을 편광시키는 두 개의 편광 필터를 회전시키는 효과....8
[그림 2.4] 편광의 종류.....9
[그림 2.5] 편광필름의 축에 수직으로 정렬된 분자구조 .....10
[그림 2.6] 분자와 평행하게 진동하는 긴 분자의 전자 다이어그램....10
[그림 2.7] 레이저 가공 모델링 모식도 .....13
[그림 2.8] 나노초 및 펨토초 에너지 흡수 및 레이저 제거의 시간 척도와 레이저 펄스가 제공되는 동안 및 이후에 발생하는 다양한 프로세스 .....14
[그림 3.1] 레이저 가공 실험 세팅 .....17
[그림 3.2] 가공 방법 및 변수 기준 제시 .....18
[그림 3.3] 레이저 가공 후 측정 요소 .....19
[그림 4.1] 가공 가능한 최소 에너지에서의 IR 레이저 가공 표면.....20
[그림 4.2] 가공된 편광필름의 단면 .....21
[그림 4.3] 레이저의 편광 변화와 편광 필름 각도에 따른 샷 형상 ..22
[그림 4.4] IR 레이저로 가공 된 편광 필름의 상단과 옆면.....23
[그림 4.5] 편광된 광원으로 확인한 HAZ .....24
[그림 4.6] IR 가공의 가공 폭과 가공 깊이 .....25
[그림 4.7] 편광 형태 별 UV 레이저 shot 가공 형상 .....27
[그림 4.8] UV 레이저로 가공된 편광 필름의 상단과 옆면 .....28
[그림 4.9] UV 레이저 가공 후 편광된 광원으로 확인한 HAZ .....28
[그림 4.10] UV 가공의 가공 폭(a)과 가공 깊이(b) .....30

[그림 4.11] 상관 계수에 따른 해석 .....32
[그림 5.1] Etching depth per pulse의 시뮬레이션과 실험값의 비교 .....35

# 명명법 목차

| | |
|---|---|
| S−polarization | parallel polarization |
| P−polarization | perpendicular polarization |
| C−polarization | circular polarization |
| $\lambda$ | wavelength |
| IR | InfreRed |
| UV | UltraViolet |
| HAZ | Heat Affect Zone |
| Ns | Nano second ($10^{-9}$ s) |
| Ps | Pico second ($10^{-12}$ s) |
| Fs | Femto second ($10^{-15}$ s) |
| LIPSS | Laser induced periodic surface structures |
| LIBS | Laser Induced Breakdown Spectroscopy |

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구의 배경

최근 제품들이 소형화, 복잡화 됨에 따라 공정에서는 불량을 유발할 수 있는 접촉식 공정보다는 레이저를 이용한 비접촉식 가공 공정이 각광을 받고 있다. 레이저 가공 공법에는 그림 1.1에서 (a)와 같이 레이저 광이 가공물의 표면에 흡수되어, 그 열에너지로 가공물을 응용시키는 열 가공분야로 멜팅, 웰딩, 어닐링, 솔더링 등 이 있고, (b)와 같이 레이저 광을 흡수한 부분이 순식간에 녹아 증발, 비산하는 것을 이용한 제거 가공 즉, 레이저 어블레이션 가공으로 마킹, 에칭, 스크라이빙, 커팅 등이 있다. 레이저 어블레이션 가공은 짧은 펄스 폭의 레이저를 이용해 순간적으로 원하는 노출 부위를 승화시켜 열이 재료에 광범위하게 열이 전달되지 않기 때문에 비열 가공이라고도 한다.

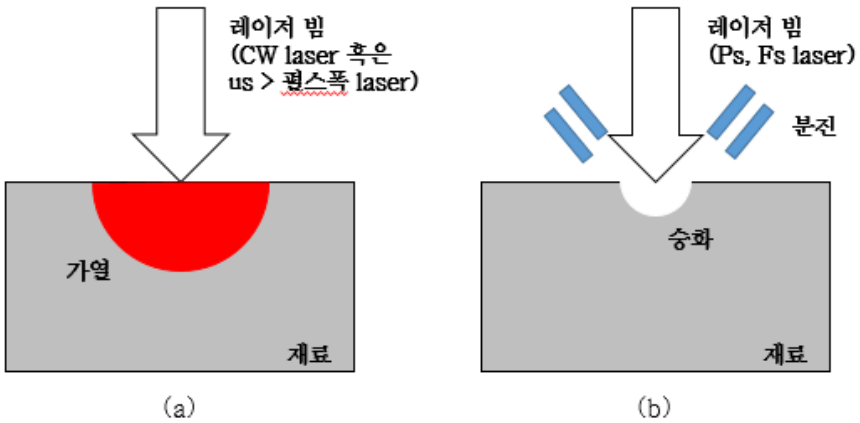



그림 1.1 레이저 펄스 폭에 의한 레이저 가공의 차이

이러한 특성에 의해서 초단파 레이저 어블레이션은 미세가공의 다양한 분야에 많이 적용되어 왔는데, 최근에는 레이저 제작 기술이 발달하면서 고출력, 짧은 펄스 폭의 레이저들이 생산되고 있는

추세[1]와 맞물려 레이저 어블레이션 공법을 이용하여 두꺼운 재료의 커팅에 까지 적용이 되고 있다. 비접촉, 비열처리라는 굉장한 장점을 가진 공법에 레이저 가공에 대한 이해를 토대로 생산성까지 확보를 한다면 제조업체의 입장에서 굉장한 이점을 가질 수 있다. 레이저 어블레이션을 이용해 재료를 가공할 때 레이저의 특성도 중요하지만, 재료의 특성에 따라서 가공 특성이 변화하게 되기 때문에 레이저와 재료의 매칭에 따른 특성을 파악하는 것이 필요하다[2,3,4]. 본 논문에서 많은 재료 중 특별히 편광 필름의 가공에 대한 최적화를 다룬 이유는 디스플레이 분야에서는 패널을 생산할 때 광원을 조절하기 위한 용도, 혹은 시인성을 향상시키기 위한 목적으로 거의 모든 패널에 편광 특성을 지닌 레이어가 존재하기 때문에 해당 재료와 레이저 가공의 특성을 파악하는 것이 디스플레이 산업에 레이저 커팅을 적용할 때 활용도가 높을 것으로 예상되기 때문이다.

## 제 2 절 연구의 내용 및 목표

레이저 가공에서 고려해야 할 매개변수로 그림 1.2 와 같이 다양한 것들이 있는데 Intensity, Divergence, Pulse width 등의 매개 변수는 가공성에 기존의 연구들을 통해서 가공에 유리한 방향이 제시되어 있고, 그것을 만족시키기 위한 방법으로는 레이저의 스펙 상승이 주로 필요한 경우가 많다. 이번 연구는 레이저 편광에 의한 가공성의 변화를 확인하는 것을 목적으로 하고 매개변수의 변화를 제한 하였다. 레이저 빔 변수에서는 편광을 변경시키고 재료의 측면에서는 편광필름 자체가 레이저 빔의 편광 변화에 따라서 Laser Reflectivity가 다르게 반응할 것으로, 편광 필름의 각도를 변화 시켜서 가공할 때에는 Laser Reflectivity뿐 아니라 재료의 Density 변화를 일으키는 것으로 생각하였다. 이 외에 다른 조건들은 고정시키고 진행하였다.

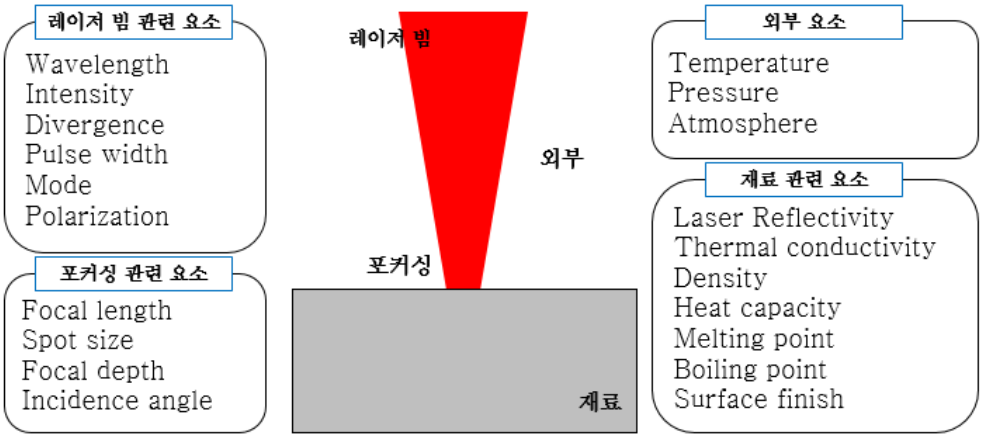



그림 1.2 레이저 가공의 매개변수들

레이저의 편광은 대표적인 상태인 P-polarization, S-polarization, C-polarization 상태를 이용하였으며, 가공 시 레이저의 가공 방향 라인을 기준으로 하여 편광필름 방향을 0, 45, 90, 135도 회전시켜 가공하였다. 가공된 시료는 현미경을 이용하여 Shot 가공 형상, 가공 폭과 가공 깊이를 관찰, 측정하였으며, 커팅 가공 후에는 편광된 광원을 이용하여 가공 부위를 관찰하여 HAZ의 크기를 파악하였다. 최적화 시 가공 깊이는 가공성에 대한 지표로 사용하고, 가공 폭과 HAZ의 크기는 품질에 대한 지표로 사용하였다.

실험을 통해서 레이저 가공 시에 매개변수들을 어떤 식으로 조합을 했을 때 가장 가공성이 좋은지, 그리고 품질을 확보할 수 있는지를 파악하여 최적화 방안을 제시하는 것을 연구의 목표로 삼았다.

# 제 2 장 선행 연구와 이론적 배경

## 제 1 절 선행 연구

레이저 어블레이션에 대한 연구는 다양하게 이루어져 왔으며, 1980년대 이래로 다양한 레이저의 특성에 대한 연구와 함께 다양한 재료에 대한 연구가 문헌에 보고 되었다.

Srinivasan, R 과 Braren, Bodil[5]는 1989년에 UV레이저의 Polymer 가공에 대한 연구를 진행했으며 UV 레이저 어블레이션의 특징과 작용 원리에 대해서 설명하였다. 그 이후 2003년에 N. bityurin, B. S. Luk'yanchuk, M. H. Hong, and T. C. Chong[6]은 폴리머에 대한 레이저 어블레이션 모델을 발표하였다. 이 논문에서는 광화학적 어블레이션, 광열적 어블레이션 그리고 그 복합 어블레이션까지 다루고 있는데, 현재까지도 다수 인용될 정도로 체계적으로 연구가 수행되었다. 그 이후로 초단파의 레이저에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 고출력, 초단파의 레이저가 등장함에 따라[7] 레이저 어블레이션 분야에서 다양한 재료에 대한 펄스 폭이 Fs인 레이저의 특성 및 가공성에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있는 상태이다. 연구가 이루어진 재료로는 Nickel-based superalloy C263[2], Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)[8], polymer-derived SiAlCN ceramics[9], nanometer-sized ceramic films[10] 등 다양하게 있으며, 특히 Esther Rebollar[11, 12]의 연구에서는 폴리머의 표면을 가공할 때 LIPSS가 레이저의 편광 방향에 따라서 생성되는 것을 확인하였다. 이와 같이 다양한 재료에 대한 가공실험이 이루어졌으나, 편광필름에 대한 가공성에 대한 연구는 찾아볼 수 없었다. 편광필름이라는 것이 단일 물질이 아닌 폴리머 복합 물질이기도 하고 광학적 특성을 가지고 있기 때문에 결과를 예측하고, 그것에 대하여 명확히 설명하는 것이 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 앞서 말했듯이 명확히 특성을 파악하는 데에는 어려움이 있으나, 현재

산업에서 레이저 어블레이션의 활용 범위가 점차 더 넓어지고 특정 산업영역에서는 편광필름이 필수적으로 사용되고 있기 때문에 가공의 원리를 명확히 전부 설명해내지 못하더라도 가공 특성에 대하여 파악할 필요가 있다고 생각되어 연구를 진행하였다. 편광필름은 하나의 단일 폴리머로 생각하고, 광학적 특성만을 고려하여 가공의 결과에 대해 예측해보고 실험을 통하여 확인하고 효율적인 가공 방법에 대하여 생각해보았다.

## 제 2 절 이론적 배경

### 2.1 빛의 편광

빛은 전자기파의 한 유형이다. 전자기파는 그림 2.1과 같이 전파 방향에 수직으로 진동하는 다양한 전기장과 자기장으로 구성된 횡파이다. 일반적으로 자연의 빛이나 레이저는 전기장과 자기장의 진동에 대한 구체적인 방향은 없고, 다양한 임의의 방향으로 진동한다. 편광된 빛은 파동의 진동이 파동의 전파 방향에 상대적으로 명확한 방향을 가지고 있다는 속성입니다. 전자기파의 경우 편광 방향을 전기장에 평행 한 방향으로 정의합니다. 따라서 전기장 화살표는 그림 2.1과 같이 편광 방향을 나타내는 것으로 생각할 수 있다.

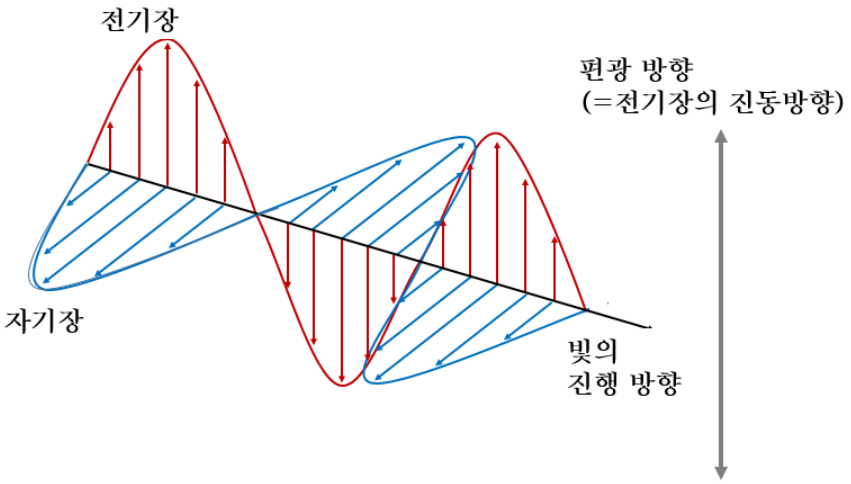



그림 2.1 전자기파의 진행과 편광의 방향

태양과 같은 다른 많은 광원은 그림 2.2와 같이 임의의 방향으로 전기장이 있는 파동을 생성한다. 이러한 빛의 상태는 가능한 모든 편광 방향을 가진 많은 파동으로 구성되어 있기 때문에 편광 되지 않았다고 표현한다. 편광 필터는 빛의 편광 슬릿 역할을 하여 한 방향의 편광만 통과시키는데, 그림 2.2에서처럼 편광 되지 않은 빛이 편광 필터를 통과하면 한 방향의 전기장만 통과하여 편광된 빔이 되는 것이다.

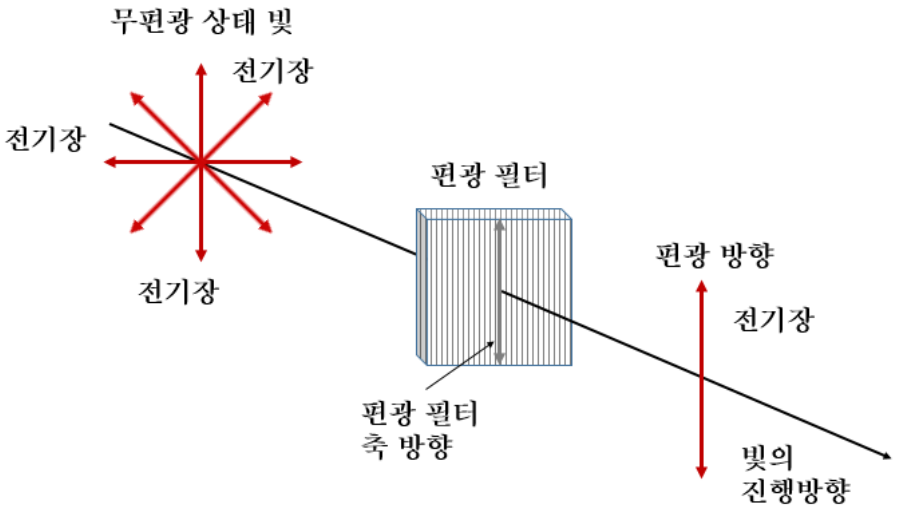



그림 2.2 편광되지 않은 빛의 전기장 성분과 편광 필터의 효과

x축의 방향으로 편광된 빛을 파장 $\lambda$ 및 주파수 f로 Cartesian space의 z 축을 따라 이동하는 평면파로 수학적 표현의 관점에서 표현 한다면 [13]

$$\mathrm{E}(z,t) = \mathrm{E}_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t) \qquad \text{식 (2.1)}$$

위 식을 각도 θ에 대한 Rotated coordinate 시스템으로 표현하게 되면

$$\mathrm{E}'(\mathrm{z},\mathrm{t}) = E_0 \cos\theta \cos(kz - \omega t)\, \hat{x}' - E_0 \sin\theta \cos(kz - \omega t)\, \hat{y}' \qquad \text{식 (2.2)}$$

그림 2.3과 같이 이제 우리가 두개의 편광판을 겹쳐 놓는데, 첫 번째와 직각으로 두 번째 선형 편광판을 겹쳐서 빛이 y^에 평행 한 E로만 전송된다고 가정합니다. 첫 번째 출력이 두 번째 출력에 의해 완전히 감쇠되기 때문에 둘의 공동 전송은 0이 된다. 이 상태에서 편광판을 회전시켜 두 번째 편광자의 편광 방향이 첫 번째와 각도 $\theta$로 설정되어 있다고 가정한다. 두 번째 편광판에서 전기장은 식(2.2)로 알 수 있다. $\hat{x}'$ 에 평행 한 성분 만이 두 번째 편광판에 의해 통과되므로 편광판 쌍을 통한 진폭은 cos에 비례하게 된다. 이상적인 편광기의 경우 빛의 강도는 진폭의 제곱에 비례하므로 편광기 각도와 빛의 강도의 의존성은 다음과 같다.

$$\mathrm{I}(\theta) = I_0 cos^2\theta \qquad \text{식 (2.3)}$$

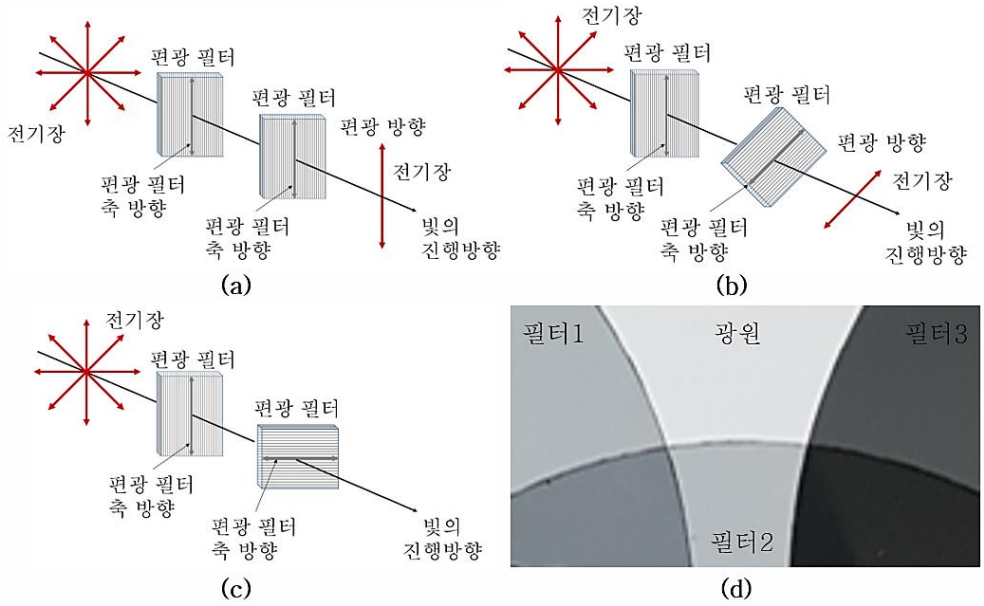



그림 2.3 빛을 편광시키는 두 개의 편광 필터를 회전시키는 효과

그림 2.3은 이해를 돕기 위해 (a) 첫 번째와 두번째 편광 필터가 평행하기 때문에 모든 빛이 통과 (b) 두 번째 필터가 회전함에 따라 빛의 일부만 통과 (c) 두 번째 필터가 첫 번째 필터에 수직이면 모든 빛이 차단 (d) 각도가 다른 3개의 편광 필터의 조합에 의한 빛의 투과도 변화의 4가지 경우를 표현한 그림이다.

편광의 종류에는 선편광, 원편광, 타원편광이 존재하는데, 그림 2.4에 그 형태들을 표현하였다. 선편광은 공간에서 평면파 형태로 진행하며, 빛의 전, 자기파 두가지가 동일한 진폭으로 진행할 때를 말하고 빛의 두 평면파가 동일한 진폭으로 90° 위상차 차이가 나는 경우는 원편광이라고 한다. 직선편광과 원편광이 아닌 다른 모든 경우. 두 평면파의 크기가 다르거나, 위상차가 90° 의 배수가 아닌 경우를 타원편광이라고 하는데, 사실 직선편광이나 원편광은 타원편광의 특수한 형태라 할 수 있으며, 타원편광이 편광현상의 가장 일반적인 형태이다.

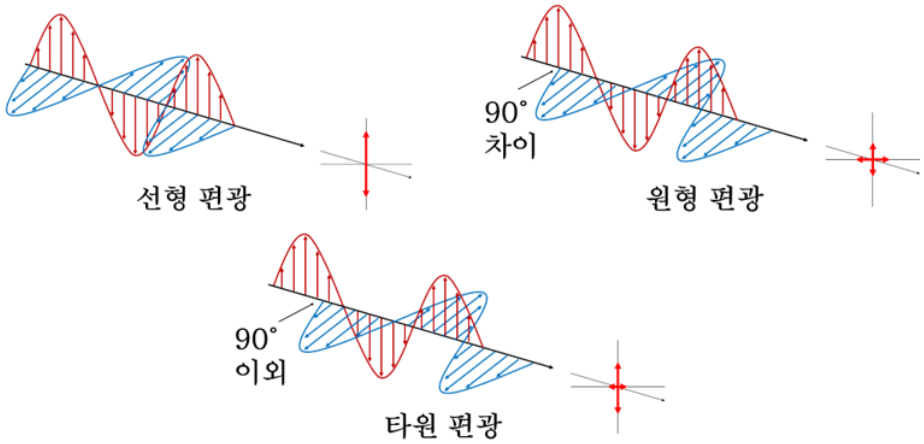



그림 2.4 편광의 종류

이러한 특수한 편광 상태는 선편광 상태(P-polarization)에서 waveplate를 이용하여 얻어낼 수 있으며, λ/2 waveplate를 이용하여 기본 선평광 상태에 수직한 선편광 (S-polarization), λ/4 waveplate를 이용하여 원 편광 상태를 얻어낼 수 있다[14].

## 2.2 편광 필름의 원리

무 편광 상태의 빛을 편광시켜주는 방법으로는 투과에 의한 편광, 반사에 의한 편광, 산란에 의한 편광, 굴절에 의한 편광 등이 있는데, 우리가 사용할 편광 필름은 그 중에 투과에 의한 편광필터라고 할 수 있다. 편광 필름에는 슬릿 역할을 하는 편광 축이 있다. 이 슬릿은 축에 평행 한 전기장을 갖는 전자기파를 통과시키고, 수직한 전기장을 가지는 전자기파를 흡수한다. 이는 그림 2.5 에서와 같이 축에 수직으로 정렬된 긴 분자가 그 역할을 수행한다..

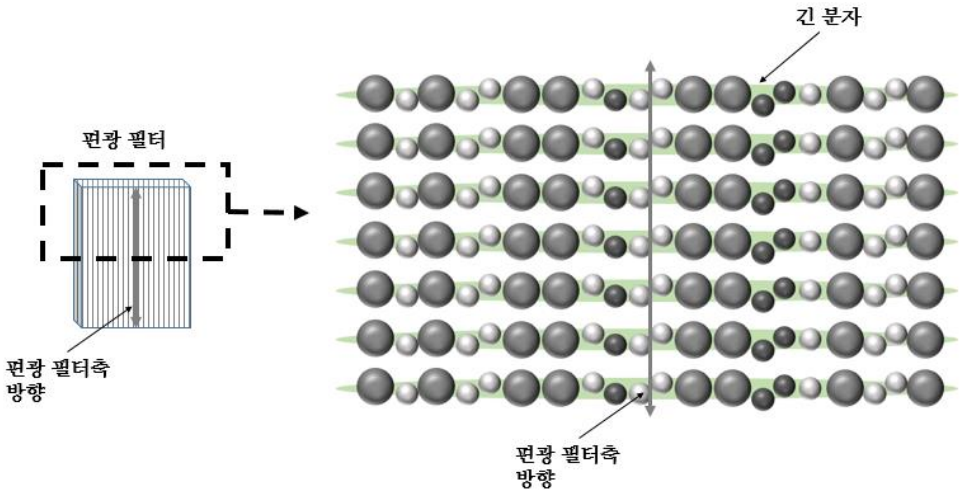



그림 2.5 편광필름의 축에 수직으로 정렬된 분자구조

전자기파에서 긴 분자에 수직 인 전기장의 구성 요소는 편광필름을 통과하는 반면 분자에 평행 한 구성 요소는 흡수된다.

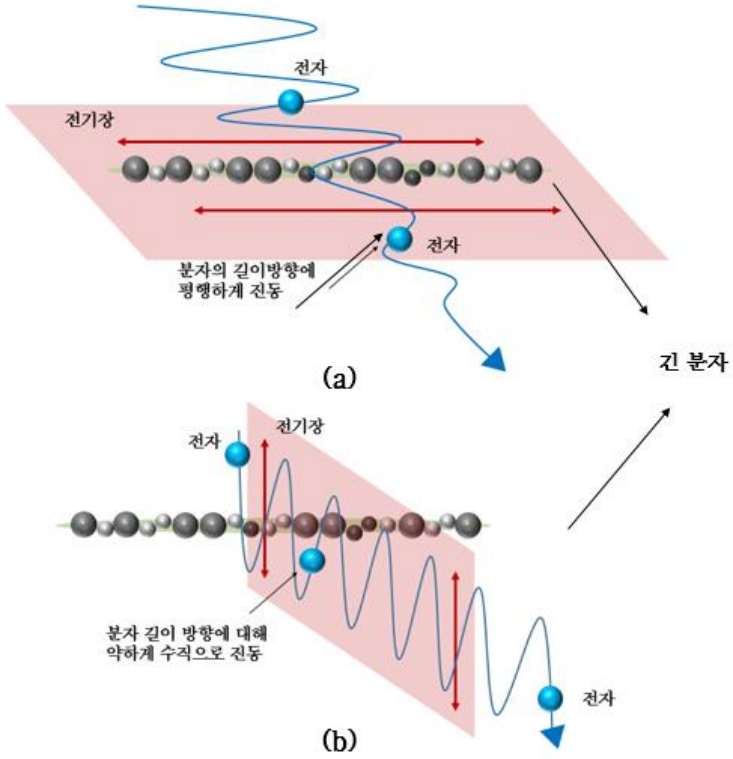



그림 2.6 분자와 평행하게 진동하는 긴 분자의 전자 다이어그램

그림 2.6은 긴 분자에 평행 한 전기장의 성분이 어떻게 흡수되는지를 보여준다. 전자기파는 진동하는 전기장과 자기장으로 구성되는데, 전기장은 자기장에 비해 강하며 분자의 전하에 힘을 가하는 데 더 효과적이다. 전자의 질량이 작기 때문에 가장 영향을 많이 받게 되고, 전자가 강제로 진동하면서 전자기파의 에너지를 흡수하게 된다. 이렇게 파동의 진폭이 줄어들며 빛의 강도가 감소하게 된다. 긴 분자에서 전자는 수직 방향보다 평행한 방향으로 더 쉽게 진동 할 수 있고, 분자에 결합되어 있으므로 수직방향의 움직임이 더 제한된다. 따라서 전자는 분자에 평행한 전기장의 구성 요소를 갖는 전자기파를 흡수 할 수 있다. 전자는 분자에 수직인 전기장에 훨씬 덜 반응하며 이러한 전자기파를 통과시키게 된다. 이렇게 편광 필터로서 작용하게 되는 것이다.

## 2.3 UV 레이저 어블레이션 이론

본 논문에서는 특수한 편광 상태와 레이저 파장의 차이에 따라서 편광 필름과의 상호작용이 어떻게 달라지는지, 어떤 경우에 가공을 최적화 할 수 있는지 확인하고자 한다. 이를 위해서는 먼저 UV 파장 대역의 레이저 어블레이션 가공이 어떤 식으로 일어나는 지 알아보고자 한다. 레이저 어블레이션은 Pulse Energy, beam intensity 분포, 빔 Quality factor, 초점의 위치 등 빔 특성에 큰 영향을 받으나 기존의 모델링의 경우를 살펴보고 편광이 미칠 영향에 대해서 유추해보고 실험을 진행하였다. 편광 필름은 복잡한 레이어로 구성되어 있어 각각의 물성치를 계산하여 적용을 하기에는 어려움이 있으므로 하나의 폴리머로 취급하여 해당 모델을 적용하기로 한다. 해당 조건하에 광화학적인 에칭효과만을 고려한 레이저 어블레이션 가공을 연구한 R. Srinivasan과 방세윤[5,15,16]의 연구를 참고하여 나타내 보았다. 두 가지 기본 가정이 필요한데, 첫 번째는 재료의 열전달효과는 무시하고, 빔 흡수계수 β(/cm) 및 임계 레이저 조사량 $H_{TR}(J/cm^2)$에 의해 나타낼 수 있는 광화학적 가공과정만을 고려한

다는 것이고, 두 번째로는 레이저 빔 조사에 의해 제거되는 소재의 에칭 깊이는 레이저 조사량 $H$의 log값에 비례하는 형태로 나타낼 수 있다. 즉 광자의 침투 깊이에 대해 Beer의 법칙 형태를 가정해 에칭 깊이를 구하여보면 펄스당 에칭 깊이, 즉 $l_{f,photo}(\mu m)$는 식 (2.4) 과 같이 표현 할 수 있다.

$$l_{f,photo} = \frac{1}{\beta}\ln(\frac{H}{H_{TR}}) \qquad \text{식 (2.4)}$$

여기서 $H$: laser fluence($J/cm^2$)

$H_{TR}$: threshold laser incident amount($J/cm^2$)

β: the absorption coefficient(/cm)

$l_{f,photo}$: $Eching\ \ depth\ \ per\ \ pulse$

실험에 사용하는 편광 필름의 가공 결과에 대해서 자연로그의 형태로 표시되는 식 (2.1)의 모델을 적용하여 계산을 진행하여 보았다. 편광 필름의 레이저 파장 355 $nm$ 에서의 투과도는 2%로 확인할 수 있으므로 투과되지 않는 레이저의 fluence는 편광에 상관없이 에칭에 사용이 되고, 투과된 레이저 빔이 편광 특성에 따라서 추가로 가공에 관여하는 형태로 계산을 진행하고자 하였다. 하지만 투과된 빔은 laser fluence값이 현저히 낮아져 threshold laser incident amount 값보다 낮은 수치가 되기 때문에 해당 모델링 식에 적용이 어려운 것으로 판단되어 투과된 레이저 빔이 입사되는 laser fluence의 총량에 영향을 미치는 것으로 가정하여 입사되는 $H$ 에 변화를 일으키는 것으로 변수를 조절하였다.

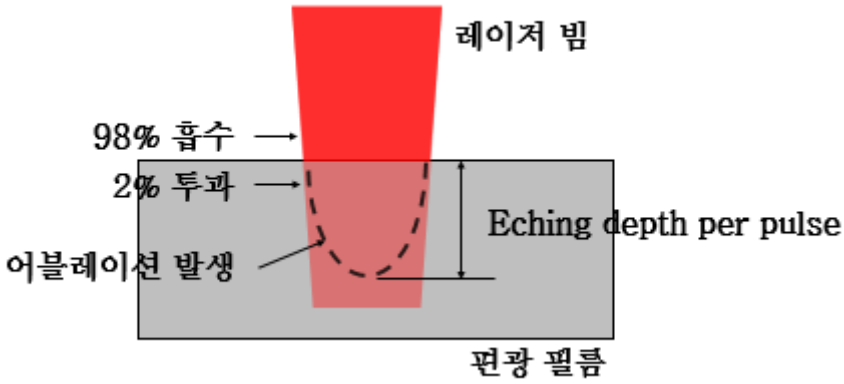



그림 2.7 레이저 가공 모델링 모식도

사용하는 UV 레이저의 출력은 8 W 기준으로 $H : 2.82 J/cm^2$이고 355 $nm$ 에서 PI의 $H_{TR}$ 는 $0.1 J/cm^2$ [17], 해당 편광필름의 투과율은 2%이다. 해당 수치를 사용하여 계산을 진행한 표는 다음과 같다.

표 2.1 모델링에 의한 가공 깊이 시뮬레이션

| 투과율(%) | 투과 된 빛의 편광에 의한 투과율(%) | Etching depth per pulse($\mu m$) |
|---|---|---|
| 2 | 10 | 1.9662 |
| 2 | 20 | 1.9651 |
| 2 | 30 | 1.9639 |
| 2 | 40 | 1.9627 |
| 2 | 50 | 1.9615 |
| 2 | 60 | 1.9603 |
| 2 | 70 | 1.9591 |
| 2 | 80 | 1.9579 |
| 2 | 90 | 1.9567 |

결과를 확인해보면 투과된 빛이 편광에 따라 투과율이 높아질수록 전체 에칭량은 작아지는 것을 알 수 있으나, 양이 조사되는 빛의 총량에 비해 적기 때문에 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 이 내용을 실제 실험의 결과와 비교하여 편광의 영향성이 편광이 크게 고려되지 않은 모델링과 비교하여 얼마나 차이가 나는지 확인해보도록 하겠다.

## 2.4 IR 레이저 어블레이션 이론

UV 대역의 레이저 뿐 아니라 IR 대역의 레이저를 사용하여 파장에 따라 재료와의 상호작용의 차이에 의해 가공성이 달라지는 레이저의 특성에[18] 편광에 의한 가공성 차이도 어떻게 반응하는지 확인하고자 했다. IR 대역의 레이저는 현재는 대부분 열 가공의 용도로 사용하고 있는 곳이 많으나 펨토초 레이저의 경우 기존의 펄스 폭이 긴 레이저와 에너지 흡수 및 타겟 제거로 이어지는 메커니즘이 완전히 다르다. 예를 들어, 나노초 및 펨토초 에너지 흡수 및 레이저 제거의 대략적인 시간 척도는 레이저 펄스 도중 및 이후에 발생하는 다양한 프로세스와 함께 그림 2.8 과 같이 나와있다.

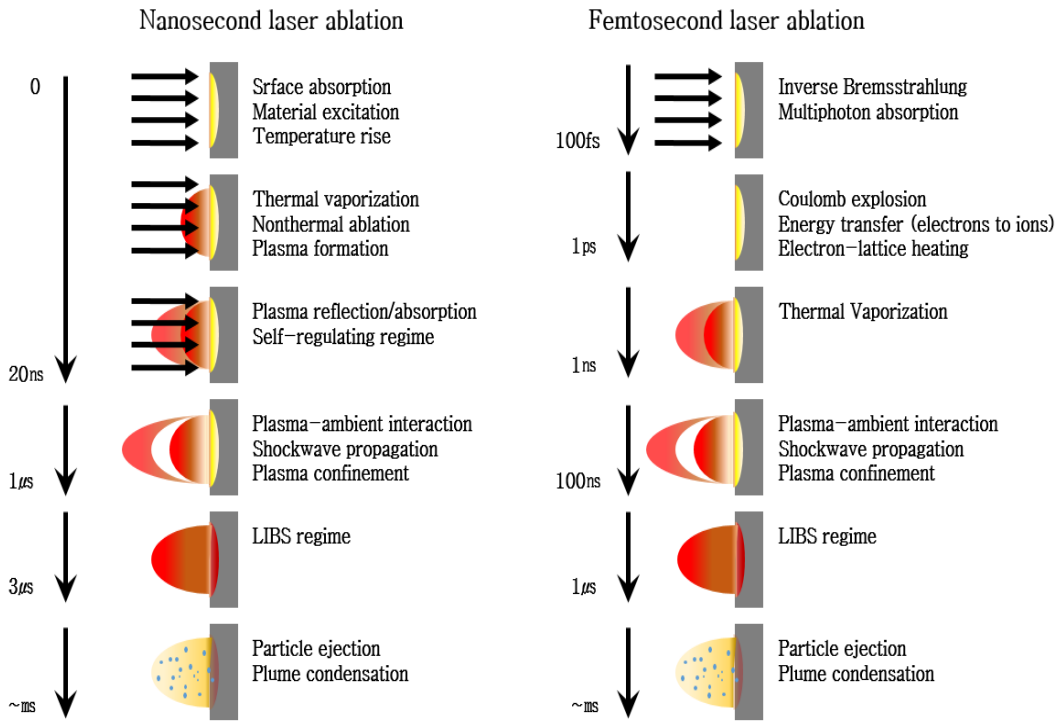



그림 2.8 나노초 및 펨토초 에너지 흡수 및 레이저 제거의 시간척도와 레이저 펄스가 제공되는 동안 및 이후에 발생하는 다양한 프로세스

*ns* 와 fs 레이저 어블레이션 메커니즘의 차이는 레이저 펄스 길이의 상당한 차이로 인해 아주 큰 차이를 보인다. 이온화, 샘플 가열 및 기화가 모두 *ns* 레이저 어블레이션에서 레이저 펄스 동안 발생하는 반면, fs 레이저 펄스는 너무 짧아 이러한 현상이 레이저 펄스가 끝날 때까지 또는 이후에 발생하지 않는다. 펨토초 펄스 지속 시간은 전자 대 이온 에너지 전달 시간, 전자 열 전도 시간, 따라서 유체 역학 또는 팽창 시간과 같은 특성 완화 시간보다 짧다. 이들 현상 모두는 일반적으로 레이저 흡수 후 수 피코초 정도에서 발생하게 된다. 이전 연구에 따르면 레이저 파장은 레이저 타겟 (질량 제거율, 침투 깊이) 및 레이저 플라즈마 (흡수, 반사) 결합 효율뿐만 아니라 플라즈마의 광학적 특성 (불투명도)에 영향을 미친다[19,20]. 현재 레이저 어블레이션에서 fs 레이저의 파장의 역할은 많이 연구되고 있으며, fs 파장은 전자 대 이온 에너지 전달 시간 및 열 전도 시간에 비해 레이저 펄스의 지속 시간이 상당히 짧고, 정확히 이해되지 않았기 때문에 편광 필름 가공에 적용하여 가공의 특성을 볼 필요가 있다.

# 제 3 장 실험 목적 및 방법

## 제 1 절 실험 목적

각각 파장의 레이저 별로 실험을 진행하고, 먼저 레이저 어블레이션 가공이 되었을 때 재료가 어떤 변화를 일으키는지에 대하여 가장 기초적인 현상을 확인하기 위해 Threshold 에너지 근처에서의 레이저 shot에 대한 형상을 확인한다. 그 후 기초적인 현상에 더불어 가공성의 변화를 확인하기 위하여 커팅 가공을 진행해보고 레이저의 편광과 편광 필름의 상태에 따라 어떠한 효과가 발생하는지 확인한다. 실험의 결과를 토대로 UV 레이저의 경우 시뮬레이션 데이터와 비교하고, 어떠한 변수 요소가 가공에 긍정적인 영향을 주는지 파악한다.

## 제 2 절 실험 방법

### 2.1 실험 세팅 및 재료

레이저 가공 평가를 위해 그림 3.1와 같이 레이저 소스, 스캐너, 집광렌즈, 스테이지로 이루어져 있는 레이저 가공 설비를 사용하였다. 사용하는 레이저 소스는 파장 1064 nm, 펄스 폭 150 fs의 레이저이며 레이저의 가공 형상을 얻기 위해 스캐너를 사용하고, 집광 렌즈를 사용하여 가공 단에서 레이저의 빔 사이즈를 직경 30 $\mu m$로 만들었다. 편광 렌즈 및 Wave plate $\lambda/2$, Wave plate $\lambda/4$를 사용하여 S-polarization, P-polarization, C-polarization까지 총 3가지의 편광 상태를 만들어낸다. 가공에 쓰일 편광 필름은 Edmond社의 Visible Linear Polarizing Film 편광 필름으로 사용하였다. 해당 편광 필름은 기능은 Poly Vinyl Alcohol(PVA) Film을 연신시켜, 특정 염료 용액에 담구어 분자를 연신 방향으로 나란하게 배열시킴으로써 얻어지는 것으로

투과형 편광 유닛의 역할을 하게 된다. 총 두께는 600 $\mu m$ 이고, 추가적인 정보는 https://www.edmundoptics.co.kr/f/visible-linear-polarizing-film/12504/ 에서 확인할 수 있는데, 일반적으로 정확한 구성 및 성분이나 특성들은 기업보안으로 공개되어 있지 않고 파장 대별 Transmission은 확인할 수 있다.

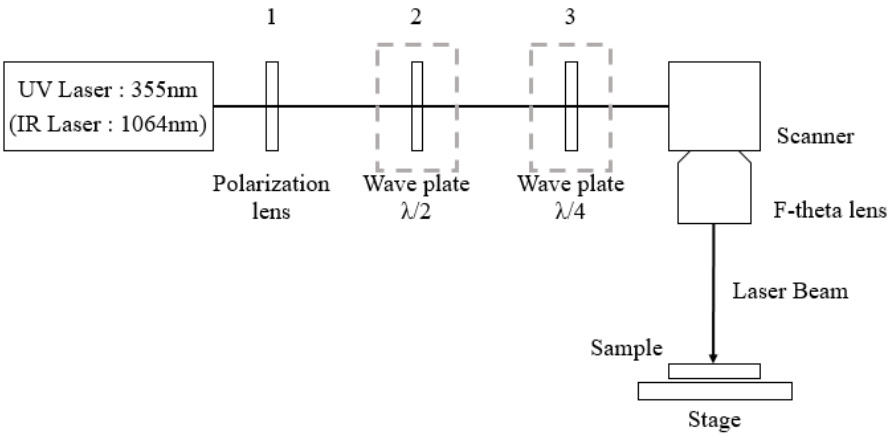



그림 3.1 레이저 가공 실험 세팅

## 2.2 변수 기준 제시

앞으로 논문에서 다룰 레이저의 가공 방향, 레이저 편광 방향, 편광필름의 편광 방향을 매개변수로 하여 실험을 진행할 것이기 때문에 표현의 이해 하기 위해서는 그림 3.2 을 참고하길 바란다. 레이저의 가공 방향은 재료를 위에서 보았을 때 y축 방향으로 빔을 이동하며 가공 했으며, 레이저의 편광 상태는 P-polarization이 y축방향으로 진동하는 상태이며, 편광필름의 각도는 0° 일때가 P-polarization된 빔을 투과하는 상태를 기본 상태로 지정하고 실험을 진행하며 변경점을 주었다. 그에 대한 예시로 (a)레이저 가공 방향 : y축 고정, 레이저 편광 방향 : P-polarization, 편광필름 편광 방향 : 0° (P-polarization 투과 상태) (b) 레이저 가공 방향 : y축 고정, 레이저 편광 방향 변경 :S-polarization, 편광필름 편광 방향 :45° (c) 레이저 가공 방향 : y축

고정, 레이저 편광 방향 변경 : C-polarization, 편광필름 방향 변경 : 90° (S-polarization 투과 상태) 상태가 되겠다.

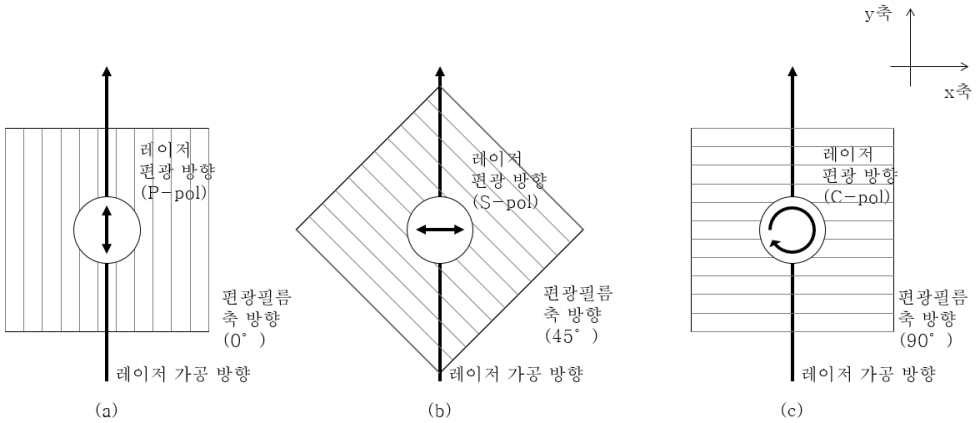



그림 3.2 가공 형태 와 변수 기준 제시

### 2.3 가공 방법 및 측정 방법

먼저 Shot 가공의 경우, 레이저의 샷 모양을 보기 위해서 스캐너의 속도를 10 $m/s$ 로 설정하여 샷 간 거리가 25 $\mu m$ 가 나오도록 조절하였다. 레이저의 파워는 1 W에서부터 점차 낮춰서 재료에 가공이 이루어지는 최소한의 파워를 선정하였고, 레이저의 편광 상태와 재료의 편광 방향에 따라 어떠한 영향이 생기는지 확인하기 위하여 레이저의 편광 상태와 편광 필름의 방향을 변경해가며 가공을 진행하였다.

그 후 Cutting 가공에서는 그림 3.1 과 같이 동일한 세팅에서 Laser Pulse Energy는 20 $\mu J$, Scan speed는 3 $m/s$, Shot 간 중첩률 75%로 가공을 진행하였다. 가공 방법은 그림 3.2 와 같이 P-polarization, S-polarization, C-polarization 편광 상태로 편광 필름의 각도를 가공방향에서 0, 45, 90, 135도로 변경하며 진행하였고, 각각의 조건의 가공성 차이를 확인하기 위해서 Full Cut이 되지 않는 Half Cut 수준의 가공이 되는 조건으로 IR 레이저의 경우에는 200회 Line 가공을 진행하였고, UV 레이저의 경우에는 100회 Line 가공을 진행하였다.

측정은 그림 3.3 과 같이 가공 깊이, 가공 폭, HAZ를 측정하였는데, 하나의 재료에 대해서 가공 후 후면에 편광 된 광원을 조사하여 편광 필름의 성능으로 HAZ 정도를 측정하고, 상단에서 가공 폭을 측정, 그리고 재료를 절단하여 옆면에서 가공 깊이를 측정하였다. 가공 폭과 HAZ는 가공의 품질을 가공 깊이는 가공성을 판단하는 요소로 지정하였다.

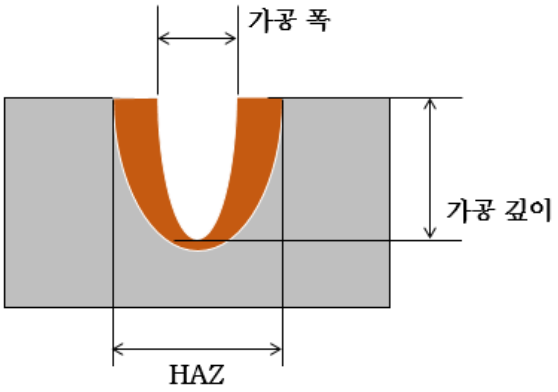



그림 3.3 레이저 가공 후 측정 요소

# 제 4 장 실험 결과

## 제 1 절 IR 레이저 실험 결과

### 1.1 Shot 가공으로 확인한 가공 효과

먼저, 그림 4.1 에서와 같이 IR 레이저의 경우 Pulse Energy 2.5 $\mu J$ 에서 편광 필름 표면에 가공이 이루어졌고, 2.0 $\mu J$에서는 희미한 자국을 발견할 수 있으나 그 이하의 파워에서는 흔적을 확인할 수 없었다. 먼저, 여기에서 확인할 수 있는 것은 레이저의 편광 방향 및 편광 필름의 각도를 변경한 각각의 조건에 따른 가공이 된 흔적을 비교해 봤을 때, 기존의 논문[21]에서 가공 시 편광에 의해 가공 형태가 달라지는 것에 비해 표면의 가공된 부분에서는 편광에 의한 가공성의 차이를 확인 할 수 없었고, 모두 빔 형태와 같은 원형으로 가공된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 재료의 차이에 의한 Threshold의 차이 때문에 발생했을 수 있을 것으로 생각한다.

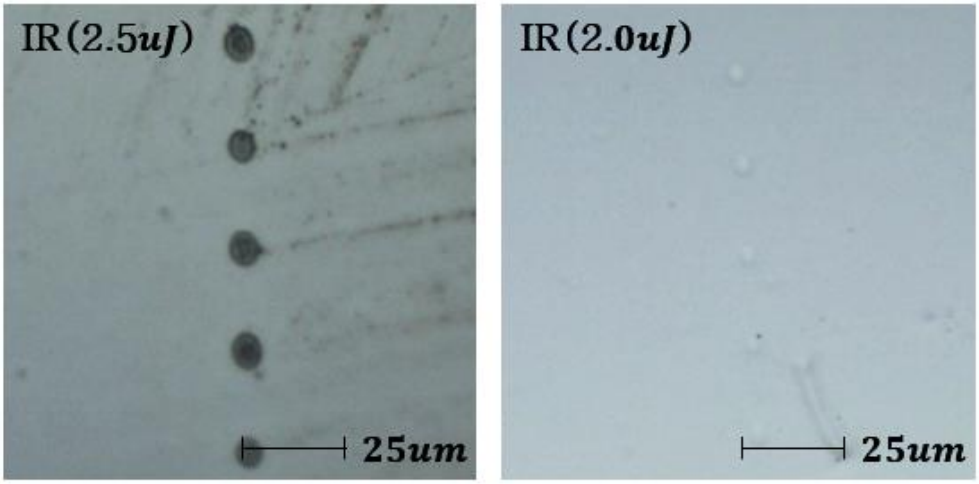



그림 4.1 가공 가능한 최소 에너지에서의 IR 레이저 가공 표면

편광필름은 다층의 재질로 구성되어 있기 때문에 추가로 현미경으로 그림 4.2 와 같은 편광필름 단면에서 중간층의 재료 상태 변화를 확인해보았다. IR 레이저의 경우에는 표면에서 투과된 빔이 중간층에 도달하여 중간층의 형태를 변경시킨 것을 확인할 수 있었다.

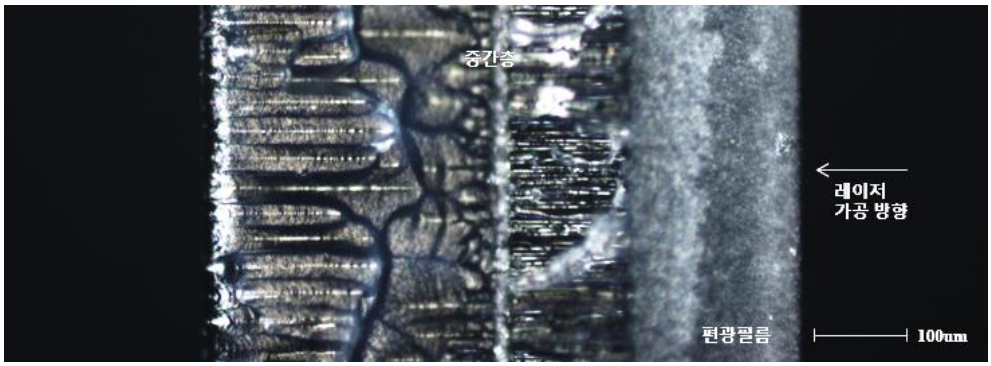



그림 4.2 가공된 편광필름의 단면

중간층의 변화를 정리하여 확인해보면 두가지 특이사항을 발견할 수 있었다. 첫번째는 가공 형상이 남은 것이 레이저의 편광 방향과는 무관하고, 편광 필름의 방향성에만 유의하게 변화하는 것을 확인할 수 있다는 것이다. Shot 형상의 방향은 각도와 수직한 방향으로 형성이 되는 것을 확인 할 수 있었는데, 이 것은 레이저 빔이 투과, 흡수하면서 열적인 영향이 일어난 것으로 그림 2.5와 같이 긴 분자의 방향으로 빔이 흡수되면서 같은 방향으로 중간층에서의 형태 변형을 야기시킨 것으로 보인다. 이를 통해 IR 레이저 가공에서 재료의 형태 변화는 레이저의 편광보다 재료의 특성이 더 우선시 된다는 것을 알 수 있었다. 두번째는 그림 4.3 을 보면 가공 형상의 방향은 일치하지만 편광에 따라서 가공된 정도가 차이가 있는 것을 확인할 수 있는데, 0° 에서는 S-polarization이 상대적으로 P-polarization 보다 강하게 가공되었고 90° 에서는 P-polarization이 상대적으로 S-polarization 보다 강하게 가공되어 있다. 이 것은 레이저 빔이 조사되었을 때 편광에 의한 투과도에 따라서 투과가 많이 되는 조건에서는 레이저 빔이 깊이

방향으로 전진하고 그렇지 않은 경우 흡수되어 상대적으로 더 큰 변화가 일어난 것으로 볼 수 있다. 또한 전체적으로 C-polarization 은 P-polarization 과 S-polarization 의 평균적인 가공 정도를 나타내는 것으로 보이는데, 이것은 C-polarization 이 S-polarization 과 P-polarization 의 중간 형태의 편광 요소를 가지고 있기 때문이다.

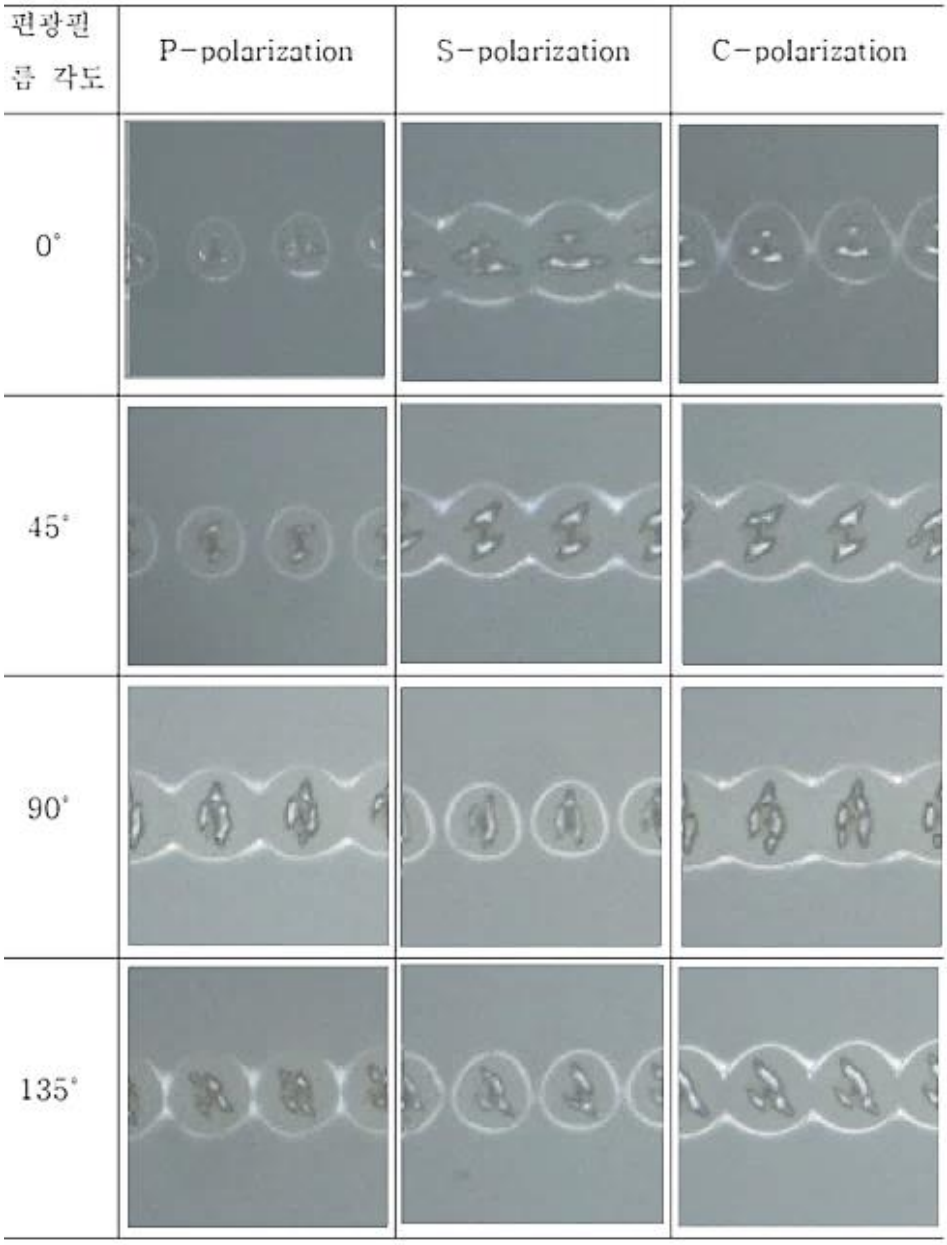



그림 4.3 레이저의 편광 변화와 편광 필름 각도에 따른 샷 형상

### 1.2 Cutting 가공으로 확인한 가공 효과

측정 시 확인한 특이사항으로 재료의 옆면에서 확인해보았을 때 그림 4.4 와 같이 레이저 어블레이션이 일어난 상단부까지만 가공이 이루어진 것이 아니라 그 이후로도 내부에 빗살무늬로 변화가 일어난 것을 볼 수 있었다. 이것은 Shot 가공을 통해 확인해 봤듯이 상단부에서부터 차례로 레이저 어블레이션 현상이 발생한 것이 아니고 레이저의 투과로 인해서 내부도 같이 가공된 것으로 보인다.

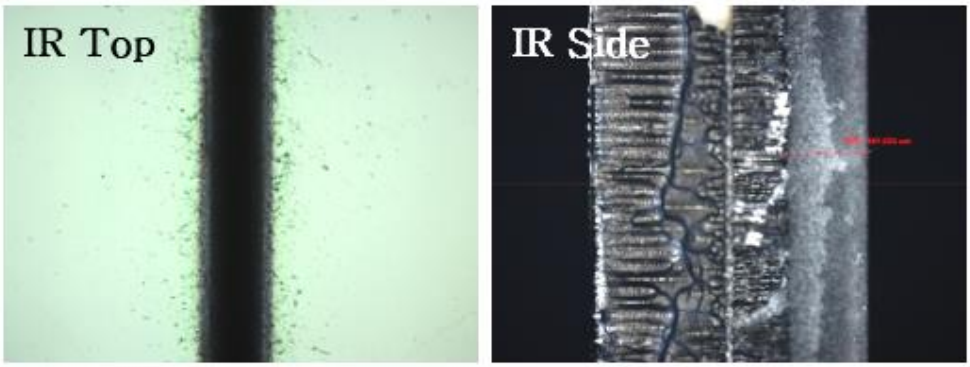



그림 4.4 IR 레이저로 가공 된 편광 필름의 상단과 옆면

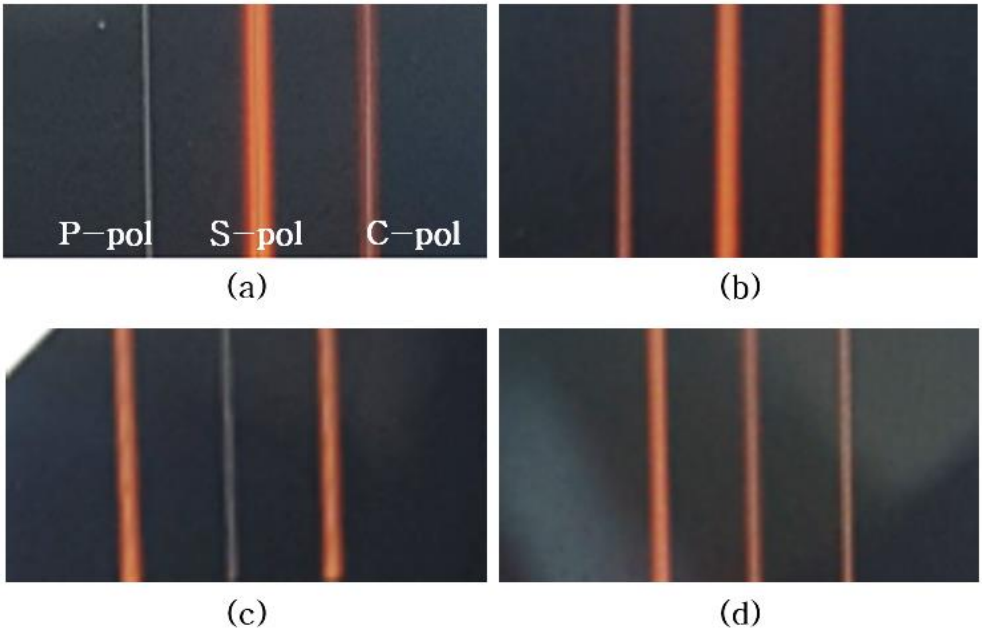
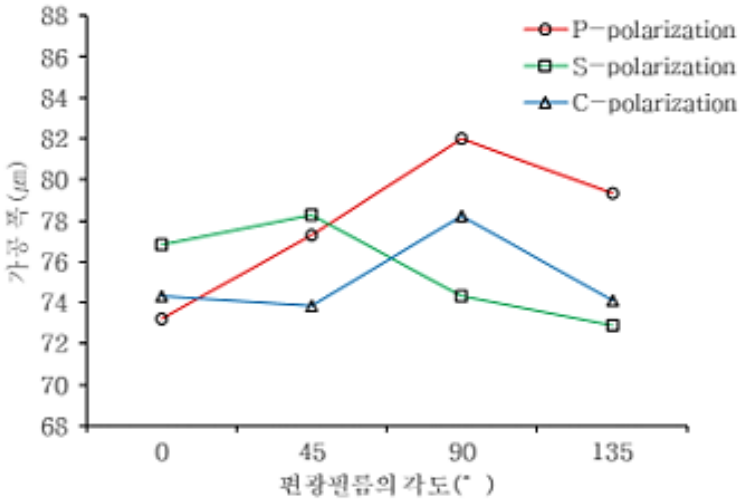



그림 4.5 IR 편광된 광원으로 확인한 HAZ

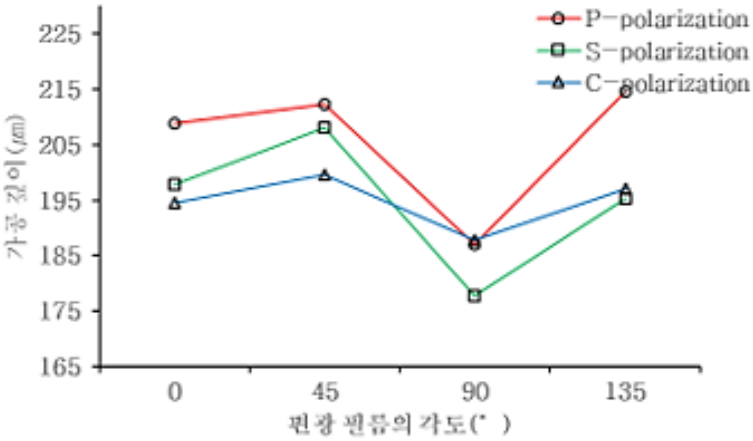
그림 4.5 에서 모두 동일하게 좌측부터 P,S,C polarization 빔을 사용해 가공하였고 (a)편광필름 각도 0°, (b)편광필름 각도 45°, (c)편광필름 각도 90° (d)편광필름 각도 135°로 조건을 변경해주었다. HAZ의 변화가 레이저의 편광 상태와 편광 필름의 각도에 따라서 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. (a) 상태에서의 P-polarization 에서의 HAZ는 거의 확인할 수 없고, S-polarization 에서는 150 $\mu m$ 수준으로 관찰되었다. (a)에서의 P-polarization 과 (c)에서의 S-polarization에서 HAZ가 거의 관찰되지 않는 것이 편광의 역할을 하는 층까지 가공이 되지 않아 확인이 안되는 것일 수 있으므로 수치적인 비교는 큰 의미가 없지만, 편광 필름의 각도가 90도 변경되어 레이저의 편광 방향과 편광 필름의 각도가 스위칭 되는 (a)와(c), (b)와(d)에서 주변부의 영향이 대칭성을 띄는 것을 볼 수 있다.

표 4.1 IR 레이저 가공 실험 데이터

| 비고 | 편광 상태 | 편광 필름의 각도(°) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 45 | 90 | 135 |
| 가공 폭 (μm) | P-polarization | 73.2 | 77.3 | 82.0 | 79.3 |
| | S-polarization | 76.8 | 78.3 | 74.3 | 72.9 |
| | C-polarization | 74.3 | 73.8 | 78.2 | 74.1 |
| 가공 깊이 (μm) | P-polarization | 208.8 | 212.3 | 187.0 | 214.6 |
| | S-polarization | 197.9 | 208.0 | 177.7 | 195.3 |
| | C-polarization | 194.5 | 199.5 | 187.8 | 197.0 |




(a)




(b)

그림 4.6 IR 레이저 가공 폭(a) 및 깊이(b)

가공 폭과 가공 깊이를 측정한 결과는 그림 4.6 과 같다. 레이저 가공에서 가공 폭은 품질과 관련이 있고, 가공 깊이는 생산 시간과 관련이 있기 때문에 가공 폭은 작을수록, 같은 에너지에서 가공 깊이는 깊을수록 좋은 측면이 있다. 실험 결과를 확인해보았을 때 가공 방향과 레이저의 편광, 그리고 편광 필름의 방향이 일치하였을 때 가공 폭이 가장 작고, 가공 깊이가 가장 깊은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 레이저의 편광 방향과 편광 필름의 각도에 따라서 가공 폭의 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다. 편광 필름의 각도가 변함에 따라 P-polarization 과 S-polarization 의 가공 폭의 크기의 경향성이 반대로 진행되고, C-polarization 의 경우에는 중간 정도의 수준을 유지하고 있다. 가공 깊이를 보게 되면 편광 방향과 가공의 진행방향이 일치하는 것, 편광 방향과 필름의 편광 방향이 일치하는 것, 가공의 진행방향과 필름의 편광 방향이 일치하는 것이 가공에 좋은 영향을 끼칠 수 있는데, 이 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 가공의 진행방향과 필름의 편광 방향이 일치하는 것으로 보인다. 각각 레이저 편광 방향과 레이저 가공 방향, 편광필름 각도 매칭의 대한 결과는 3절에서 상관분석을 통해서 결과와의 일치성 여부를 확인하겠다.

## 제 2 절 UV 레이저 실험 결과

### 2.1 Shot 가공으로 확인한 가공 효과

레이저의 샷 모양을 보기 위해서 스캐너의 속도를 10 $m/s$로 설정하여 샷 간 거리가 25 $\mu m$ 가 나오도록 조절하였다. 레이저의 파워는 1 W 에서부터 점차 낮춰서 재료에 가공이 이루어지는 최소한의 파워를 선정하였고, 레이저의 편광 상태와 재료의 편광 방향에 따라 어떠한 영향이 생기는지 확인하기 위하여 레이저의 편광 상태와 편광 필름의 방향을 변경해가며 가공을 진행하였다.

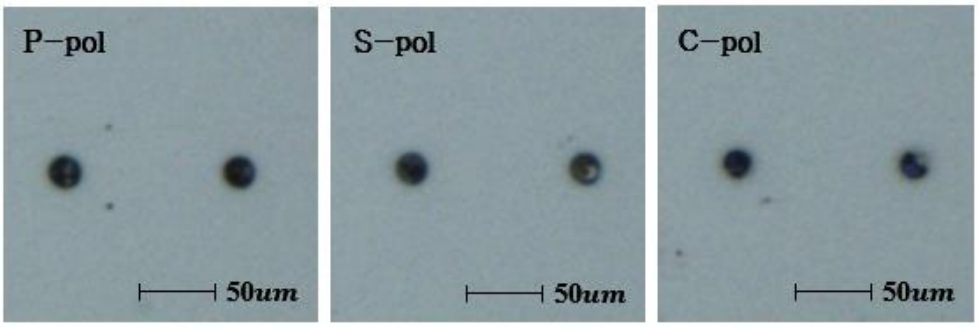



그림 4.7 편광 형태 별 UV 레이저 shot 가공 형상

UV 레이저의 경우 0.025 $\mu J$까지 가공 흔적이 남는 것을 확인했으며 이 수치는 IR 레이저로 Shot 평가를 진행했을 때 Pulse Energy 2.5 $\mu J$에서 표면에 흔적이 생겼었던 것 보다 약 100배 약한 파워에서도 가공이 이루어진 것이다. IR레이저의 펄스 폭이 더 짧은 스펙을 가지고 있는 것을 생각했을 때 레이저의 파장에 의한 투과율의 차이로 인해서 표면 부분에서 레이저 어블레이션에 사용되는 에너지의 차이가 아주 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

UV 레이저 자체의 Shot 가공에 대한 결과를 봤을 때 각각의 편광 형태에 따른 가공 형상의 특이점은 발견할 수 없었다. 또한 IR 레이저의 경우와 같이 표면 아래 쪽의 중간에서의 가공 흔적은 찾아볼 수 없었다.

### 2.2 Cutting 가공으로 확인한 가공 효과

가공 후 측정은 앞서 진행한 IR cutting 실험과 동일하게 편광 광원을 이용한 이미지, 상단 부 가공 폭, 옆면 가공 깊이 측정을 진행하였다. 그림 4.8 는 가공 후 상단과 옆면에서 촬영을 한 것으로 옆면의 형태를 보았을 때 표면부분부터 레이저가 입사한 부분까지는 레이저의 조사와 어블레이션 가공에 의한 빗살무늬를 발견할 수 있지만 레이저가 조사된 이후 부분에서는 변화가 일어나지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 Shot 가공으로 확인한 기초 특성에서 UV 레이저는 투과가 이루어지지 않고

상단에서부터 가공되는 특성이 나온 것으로 볼 수 있다.

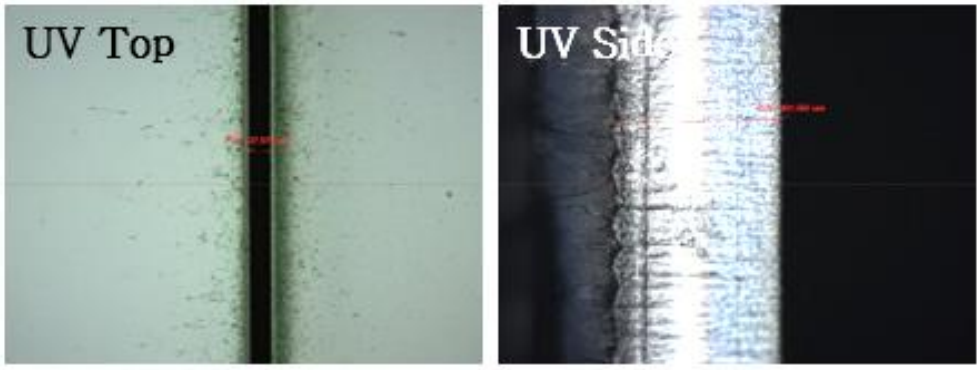



그림 4.8 UV 레이저로 가공된 편광 필름의 상단과 옆면

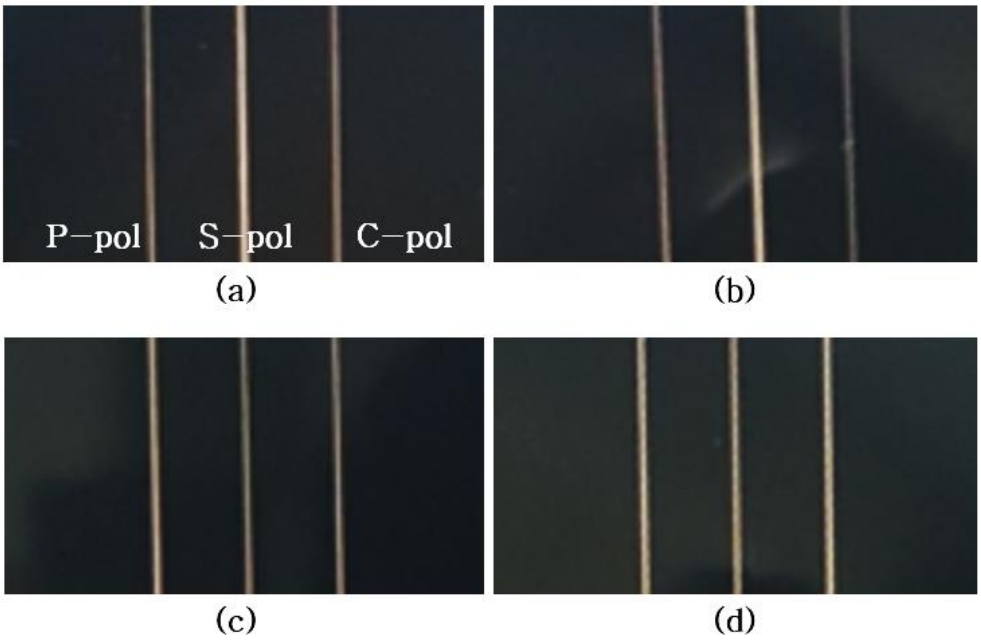


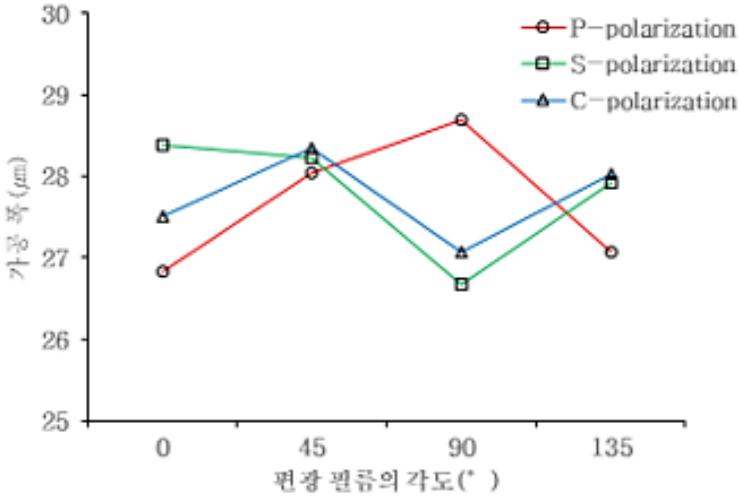

그림 4.9 UV 레이저 가공 후 편광된 광원으로 확인한 주변부 변화

그림 4.9 에서 모두 동일하게 좌측부터 P,S,C polarization 빔을 사용해 가공하였고 (a)편광필름 축 각도 0°, (b)편광필름 축 각도 45°, (c)편광필름 축 각도 90° (d)편광필름 축 각도 135°로 조건을 변경해주었다. (a)의 경우 P-polarization은 HAZ가 40 $\mu m$인데 비해 S-polarization 가공에서는 53 $\mu m$로 약 30%의 차이가 나고, 레이저의

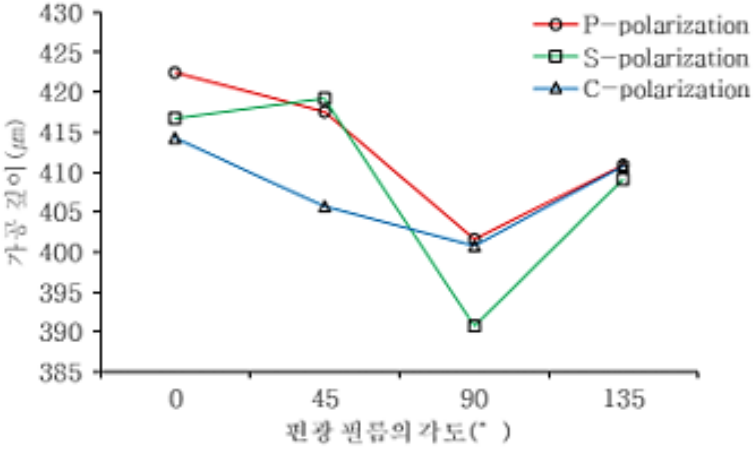
편광 방향과 편광필름의 축 방향이 반대의 (c)의 경우 P-polarization은 HAZ가 45 $\mu m$인데 비해 S-polarization은 35 $\mu m$로 약 20% 정도의 반대의 차이를 보인다. IR레이저에서 HAZ가 발생한 것보다 수치상으로 훨씬 적은 이유는 UV 레이저는 순차적으로 가공해 들어가기 때문에 투과와 반사의 영향을 훨씬 적게 받은 것으로 생각된다. 그렇지만 UV 레이저 가공에서도 레이저의 편광 조건과 편광 필름 축의 각도가 바뀌면서 경향이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

표 4.2 UV 레이저 가공 실험 데이터

| 비고 | 편광 상태 | 편광 필름의 각도(°) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 45 | 90 | 135 |
| 가공 폭 (μm) | P-polarization | 26.8 | 28.0 | 28.7 | 27.1 |
| | S-polarization | 28.4 | 28.2 | 26.7 | 27.9 |
| | C-polarization | 27.5 | 28.3 | 27.1 | 28.0 |
| 가공 깊이 (μm) | P-polarization | 422.4 | 417.5 | 401.6 | 410.9 |
| | S-polarization | 416.7 | 419.2 | 390.7 | 409.1 |
| | C-polarization | 414.3 | 405.8 | 400.8 | 410.8 |




(a)




(b)

그림 4.10 UV 가공의 가공 폭(a)과 가공 깊이(b)

가공 폭과 가공 깊이 결과를 정리해보면 그림 4.10 과 같이 나타난다. 먼저 Shot 가공에서는 편광에 의한 UV 레이저의 가공성의 차이는 확인할 수 없었지만, 가공 폭과 가공 깊이를 확인해보았을 때에는 경향성을 확인할 수 있었다. 가공 폭에서는 가공 방향과 편광 방향, 편광 필름의 축 방향에 따라서 경향성이 어느정도 나타난 것으로 볼 수 있다. 편광 필름의 투과 각도와 레이저의 편광 방향이 일치하는 상태에서 불일치하는 상태로 변경되면서 P-polarization의 폭은

증가하는 추세를 보이고 S-polarization의 폭은 감소하는 추세를 보인다. C-polarization의 빔은 중간 정도의 가공 폭을 나타내고있다. 가공 깊이의 경우에는 세 가지 요소에 의하여 가공 깊이에서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 경우에도 앞서 실험한 IR 레이저 가공과 같이 가공방향, 편광필름의 축 방향, 레이저의 편광 방향이 일치하는 경우 가장 가공성이 좋은 것을 확인할 수 있다.

## 제 3 절 결과의 상관 분석

측정한 실험의 결과 값들의 영향성을 제대로 판단하기 위해서 상관 분석을 실시하였다. 상관 분석은 연속형 변수로 측정된 두 변수 간의 선형적 관계를 분석하는 기법이다. 연속형 변수는 산술 평균을 계산할 수 있는 숫자형의 데이터이며, 선형적 관계라 함은 흔히 비례식이 성립되는 관계를 말한다. 예를 들어 A 변수가 증가함에 따라 B 변수도 증가되는지 혹은 감소하는지를 분석하는 것이다. 상관분석에는 두 변수 사이의 선형적인 관계 정도를 나타내기 위해 상관계수(correlation coefficient)를 사용한다. 상관분석에는 측정 데이터에 따라 피어슨 상관 분석, 스퍼만 상관 분석 등의 여러가지 분석 방법이 있지만, 일반적으로 상관계수라 함은 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 의미한다.

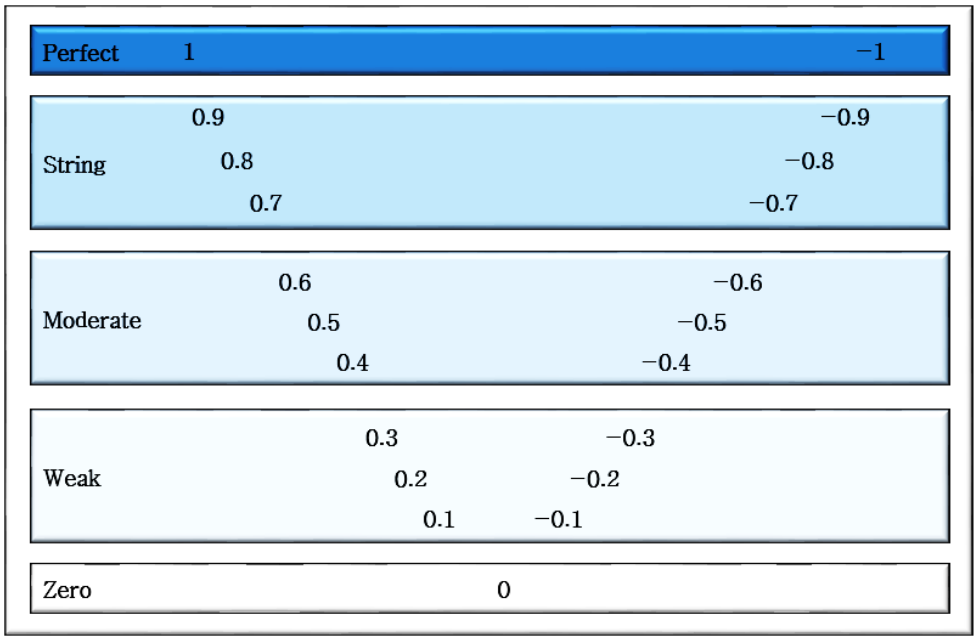



그림 4.11 상관계수(Pearson correlation coefficient)에 따른 해석

그림 4.11 는 상관분석의 결과 값에 따른 상관관계에 대한 해석을 표현한것으로 Zero에서 Perfect에 가까워질수록 강한 상관관계를 가지고 있다는 것을 말한다. 본 실험에서의 변수는 가공 방향과 레이저 편광 방향 각도차이, 레이저 편광 방향과 편광필름 축 방향 각도차이, 가공 방향과 편광필름 축 방향 각도차이로 각각 0도, 45도, 90도로 증가하는 형태이고, 가공 후 결과는 가공 폭, 주변부 변화 넓이, 가공 깊이로 가공 폭, 주변부 변화 넓이는 낮을수록 유리, 가공 깊이는 높을수록 유리한 숫자형이므로 상관분석을 통해서 각 변수와 결과 값들의 관계에 대해서 표현하는 것이 적합하다고 판단하였다.

표 4.3 가공 결과의 변수에 따른 상관 분석 결과

| 결과 | 변수 1 | 변수 2 | 변수 3 |
|---|---|---|---|
| IR 가공 깊이 | −0.306 | 0.075 | −0.843 |
| IR 가공폭 | −0.100 | 0.723 | 0.541 |
| IR 주변부 변화 | 0.490 | 0.779 | −0.098 |
| UV 가공 깊이 | −0.203 | 0.086 | −0.819 |
| UV 가공 폭 | −0.055 | 0.844 | −0.056 |
| UV 주변부 변화 | 0.128 | 0.938 | −0.128 |

표 4.3에서 변수 1은 레이저의 가공 방향과 레이저의 편광 방향 각도 차이, 변수 2는 레이저의 편광 방향과 편광필름 축 방향의 각도 차이, 변수 3은 레이저의 가공 방향과 편광필름 축 방향 각도차이이다. 결과를 확인해보면 각각의 결과에 대해서 IR 가공 깊이는 변수 3, IR 가공 폭은 변수 2, IR 주변부 변화는 변수 2, UV 가공 깊이는 변수 3, UV 가공 폭은 변수 2, UV 주변부 변화는 변수 2가 강한 상관관계를 가지고 있다. 이와 같이 편광 된 레이저의 편광 필름에 대한 가공에서 가공 깊이, 가공 폭, HAZ 크기는 레이저의 종류와 관계없이 같은 변수에 대해서 강한 상관관계를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

# 제 5 장 결론

## 제 1 절 연구 요약과 시사점

레이저를 이용하여 편광 필름을 가공할 때 레이저의 가공성과 품질을 고려해야하는데, 크게 파장에 의해서 발생한 차이와 편광에 의해서 발생한 차이에 대해서 나누어 생각해 볼 수 있겠다.

먼저 파장의 차이에 의한 가공성 변화를 살펴보면, 가공성의 경우에 UV 레이저가 IR 레이저에 비하여 몇배나 가공성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 레이저 출력 7 W, frequency 400 kHz, 가공단 빔 사이즈 30 $\mu m$, 가공속도 3 $m/s$의 같은 조건으로 가공을 했을 때 IR 레이저의 경우 200회 가공 시 평균적으로 약 200 $\mu m$의 가공 깊이를 보여줬고, UV 레이저의 경우 100회 가공 시 평균적으로 400 $\mu m$의 가공 깊이를 보여줬다. 이 가공 깊이는 회당 4배 정도의 차이를 보이는데 이것은 IR 레이저가 펨토 단위의 초단파 레이저이긴 하나 편광필름에서 투과되어 에너지가 표면에서부터 온전히 가공에 사용되지 않았기 때문으로 보인다. 이것은 가공 단면에서 옆면에 빗살무늬로 가공이 되어있는 형태가 나타나 있는 것으로도 확인할 수 있다. 가공 품질의 측면에서 가공을 진행했을 때 가공된 폭이 좁아야 주변에 영향을 미치지 않고 원하는 가공을 진행하기에 좋다. 각각의 레이저로 가공한 경우를 보면 IR레이저는 평균적으로 75 $\mu m$ 정도의 가공 폭이 나왔고, UV레이저의 경우에는 28 $\mu m$ 정도의 폭이 나왔다. 레이저의 빔 사이즈가 30 $\mu m$ 정도의 크기인 것을 감안하면 IR레이저의 경우 투과된 레이저가 편광 필름 내부의 다층 구조에 의해 반사되어 가공이 추가적으로 이루어진 영향과 열 에너지로 인해서 주변부로 확산되며 가공이 이루어진 것으로 보인다. 이것은 가공 후 편광 필름을 육안으로 관찰하였을 때 주변부에 IR 레이저의 경우에 UV 레이저에 비해서 변화가 크게 일어난 것으로도 확인이 가능하다. 이처럼 편광 필름을 가공할 때의 가공성은

이번에 다룬 요소인 편광에 의한 영향성보다는 레이저의 파장에서 가장 크게 나타난 것을 확인할 수 있다.

편광에 의한 가공성 및 품질의 차이도 확인을 할 수 있었는데, 먼저 앞서 기존 UV 레이저 어블레이션 모델을 통해서 예측해본 Etching depth per pulse 와 실험의 결과를 비교해보았다. 실험의 값은 가공 방향과 편광 필름의 방향이 일치할 때의 경우에서 편광의 방향에 따라서 S-pol일때 투과율이 0%, C-pol일때, 투과율 50%, P-pol일 때 투과율 100%로 데이터를 선정하여 비교를 진행해봤을 때. 시뮬레이션에서의 결과 값은 평균 1.96 $\mu m$ 정도이고, 실제 실험의 결과는 평균 2.05 $\mu m$ 정도의 수준으로 약 5%의 차이를 확인할 수 있었다. 시뮬레이션을 진행할 때 재료의 $H_{TR}$ 값을 PI의 경우로 근사하여 진행한 것이므로 편광에 의한 영향성에 대한 차이를 확인하기 위하여 각각의 데이터를 Normalize 하여 비교한 그래프는 아래와 같다.

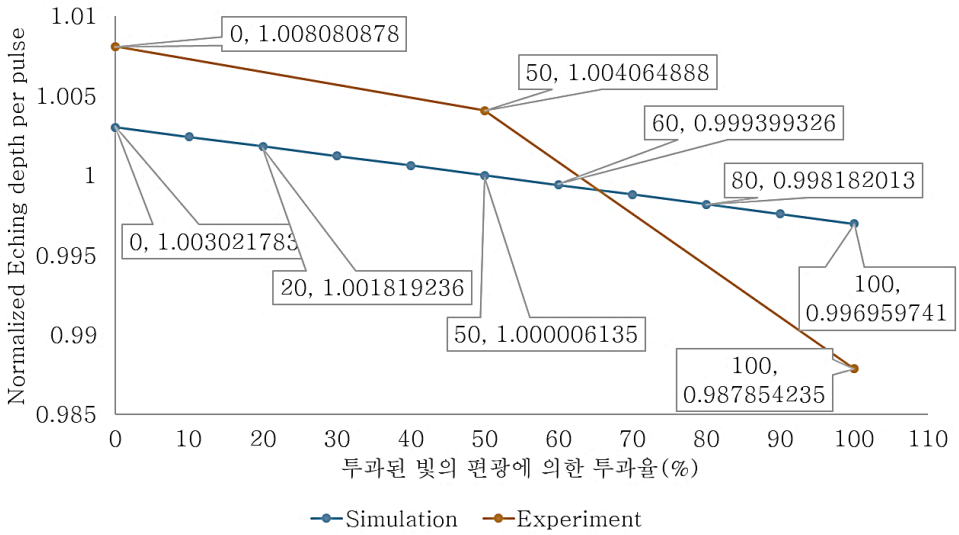



그림 5.1 Etching depth per pulse 시뮬레이션과 실험값의 비교

비교 그래프에서 편광의 영향성이 포함되어 있지 않은 시뮬레이션의 데이터 보다 실제 실험의 결과가 투과율에 따라서 더 큰 가공성의 변화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이 것을 통해서 편광 요소도

레이저 어블레이션 가공 시 고려해야할 요소라고 생각할 수 있을 것이다.

레이저의 파장, 편광요소 뿐 아니라 편광 방향과 가공의 방향, 그리고 편광 필름의 축 방향의 일치성에 따라서 가공성의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 이것을 그림 4.11 상관 계수에 따른 해석을 통해 정리하면 표 5.1 과 같이 표현할 수 있다.

표 5.1 가공 방향, 레이저 편광 방향, 편광 필름 방향의 조합이 가공에 미치는 영향

| 결과 | 가공 방향과 레이저 편광 방향 | 레이저 편광 방향과 편광필름 축 방향 | 가공 방향과 편광필름 축 방향 |
|---|---|---|---|
| IR 가공 깊이 | X | X | O |
| IR 가공 폭 | X | O | Δ |
| IR 주변부 변화 | Δ | O | X |
| UV 가공 깊이 | X | X | O |
| UV 가공 폭 | X | O | X |
| UV 주변부 변화 | X | O | X |

O : 강한 상관관계 Δ : 보통의 상관관계 X : 약한 상관관계

표3.1을 참고하여 가공성 관련해서 확인을 해보면 먼저 IR레이저 가공과 UV레이저 가공에서 동일하게 가공 깊이에 관한 가공성은 가공 방향과 편광 필름의 방향의 매칭이 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 가공성의 측면에서는 레이저의 편광 상태가 미치는 영향보다 가공되는 재료의 구조적인 특성이 더 크게 영향을 미치는 것으로 보인다. 가공 품질의 측면에서 가공 폭과 주변부 변화를 확인해보면 가장 크게 영향을 미치는 요소는 레이저 편광 방향과 편광필름 방향이다. 이것은 편광 필름의 특성에 따라 레이저 빔을 투과 시킬 때와 차단/반사 시킬 때의 차이가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 그 차이를 가장 크게 확인할 수 있는 것이 그림 4.5 에서 편광 필름의 방향을 90도 회전 이동시키고

가공했을 때의 레이저 편광 방향과 편광 필름의 일치, 불일치 여부에 따라서 HAZ 변화가 나타나는 것이다 좌측의 그림에서는 P-polarization일 때 주변부에 변화가 거의 생기지 않았고, S-polarization일 때 주변부의 변화가 가장 크게 일어났다. 우측의 그림에서는 편광 필름이 90도 회전함에 따라 P-polarization과 S-polarization의 편광 편광필름과의 각도가 대칭적으로 변하였는데, 주변부 변화 형태도 그와 같이 변하는 것을 볼 수 있다. 추가적으로 IR 레이저는 가공 폭에서는 가공 방향과 레이저의 편광과의 방향성, 주변부의 변화에서는 가공 방향과 편광필름 방향이 보통의 상관관계를 나타내고 있으나 UV 레이저는 그렇지 않은데, 이것은 UV레이저는 재료의 내부에서 반사가 일어나지 않기 때문으로 보인다.

최적화된 가공을 하기 위해서는 가장 중요한 것은 재료의 특성에 맞추어 흡수율이 높은 파장대의 레이저를 사용하는 것이다. 이것은 가공성의 영역이나, 품질 측면에서 굉장히 큰 차이를 보여준다. 또한 가공성을 높이기 위해서는 레이저 가공 방향을 재료의 구조적 특성에 맞추어주는 것이 좋다. 본 연구에서는 편광 필름을 다루었는데, 편광 필름의 투과 방향에 맞추어 레이저 가공을 해주는 것이 가공성을 높이는 방법이다. 이것은 평균적으로 5%정도의 가공성 향상을 가져오는 것을 확인했다. 레이저의 매개변수 중 편광을 변경시키는 것은 편광 가공 품질에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 확인 됐는데, 편광 방향을 편광 필름의 방향과 일치시켰을 때보다 일치시키지 않았을 때, 주변부의 변화가 IR레이저는 3배 이상, UV레이저의 경우 20% 정도의 주변부 변화를 발생시켰다. 이를 토대로 편광 필름의 레이저 가공에서 가공성과 품질의 측면을 모두 만족시키는 최적의 가공을 하기 위해서는 레이저 가공 방향과 레이저 편광 방향, 편광 필름의 방향을 모두 만족시켜야 한다.

## 제 2 절 향후연구과제

현재의 연구 진행사항에서 추가적으로 UV fs 레이저를 이용하여 가공 실험을 진행해보면 최적화에 대한 신뢰성을 더해줄 수 있을 것으로 예상된다. 레이저의 펄스 폭이 짧아짐에 따라 빔 자체의 특성이 재료와의 상호작용에서 드러나기 어렵기 때문에 만약 UV fs 레이저를 이용하여 실험을 진행했을 때, 가공 폭이나 HAZ 측면에서 편광에 의한 특성이 더 적게 나타나서 가공 간 고려사항이 될 정도가 아니게 된다면 레이저 가공 시 고려해야할 사항을 더 줄이고 좋은 품질의 제품을 얻는 것이 가능할 것이기 때문이다.

# 참고 문헌

[1] Guo Baoshan, Sun Jingya, Hua Yanhong, Zhan Ningwei, Jia Jingang, Chu Kunpeng, “Femtosecond Laser Micro/Nano-manufacturing: Theories, Measurements, Methods, and Applications” Nanomanufacturing and Metrology 3:26–67, 2020

[2] N. G. Semaltianos, W. Perrie, P. French, M. Sharp, G. Dearden, S. Logothetidis & K. G. Watkins “Femtosecond laser ablation characteristics of nickel-based superalloy C263” Applied Physics A volume 94, Article number: 999, 2009

[3] Th. Lippert, J. Stebani, J. Ihlemann,s O. Nuyken, A. Wokaun “Excimer Laser Ablation of Novel Triazene Polymers: Influence of Structural Parameters on the Ablation Characteristics”, J. Phys. Chem. 97, 12296-12301, 1993

[4] Muhammad Zakria Butt “Laser ablation characteristics of metallic materials: Role of Debye-Waller thermal parameter” IOP Conference Series Materials Science and Engineering 60(1):012068, June 2014

[5] R. SRINIVASAN, BODIL BRAREN “Ultraviolet Laser Ablation of Organic Polymers” Chem. Rev. 89, 6, 1303–1316, 1989

[6] N. Bityurin, B. S. Luk’yanchuk, M. H. Hong, T. C. Chong “Models for Laser Ablation of Polymers” Chem. Rev. 103, 2, 519–552, 2003

[7] Bülend Ortaç, Martin Baumgartl, Jens Limpert, and Andreas Tünnermann “Approaching microjoule-level pulse energy with mode-locked femtosecond fiber lasers” Optics Letters Vol. 34, Issue 10, pp. 1585-1587, 2009

[8] Tian Long See; Zhu Liu, Lin Li, Xiang Li Zhong, “A comparison of the characteristics of excimer and femtosecond laser ablation of acrylonitrile butadiene styrene (ABS)” Applied surface science, Vol.364, p.467-476, 2016-02-28

[9] Chen Yigao, Cao Yejie, Wang Yiguang, Zhang Ligong, Shao Gang, Zi Jinfeng

“Femtosecond laser pulse ablation characteristics of polymer-derived SiAlCN ceramics” Ceramics international, Vol.46 (7), p.9741-9750, 2020-05

[10] Yu-Hsiang Tsai, Bor-Chyuan Chen, Ching-Yen Ho, Yu-Jia Chiou, Kuen-Hau Chen, Cheng-Sao Chen, Mao-Y Wen, “Ablation characteristics of femtosecond laser processing for nanometer-sized ceramic films” Optics and lasers in engineering, Vol.64, p.71-78, 2015-01

[11] Esther Rebollar, Javier R Vázquez de Aldana, Ignacio Martín-Fabiani, Margarita Hernández, Daniel R Rueda, Tiberio A Ezquerra, Concepción Domingo, Pablo Moreno, Marta Castillejo, “Assessment of femtosecond laser induced periodic surface structures on polymer films” Physical chemistry chemical physics : PCCP, Vol.15 (27), p.11287-11298, 2013

[12] Esther Rebollar, Javier R Vázquez de Aldana, José A Pérez-Hernández, Tiberio A Ezquerra, Pablo Moreno, Marta Castillejo, “Ultraviolet and infrared femtosecond laser induced periodic surface structures on thin polymer films” Applied physics letters, Vol.100 (4), p.041106-041106-4, 2012-01-23

[13] Samuel J. Ling, Jeff Sanny, and William Moebs “University Physics Volume 3 : openstax” chapter 8, July 23, 2019

[14] “Classification of Polarization” http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html

[15] Sivanandan S. Harilal “Femtosecond Laser Ablation: Fundamentals and Applications” Laser-Induced Breakdown Spectroscopy pp 143-166, 2014

[16] Se yoon Bang, “Effects of Beam parameters on Excimer laser ablation”Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 22, No.7 July, 2005

[17] Jae Tong Oh, “A study on Laser Ablation of Copper Thing Foil by 355nm UV Laser Processing” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No.2, February 2007

[18] Alexander Wolynski, Thomas Herrmann, Patrick Mucha, Hatim Haloui, Johannes L’huillier “Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR” Physics Procedia, Volume 12, Part B, pp. 292-301, 2011

[19] J.R. Freeman, S.S. Harilal, B. Verhoff, A. Hassanein, “Laser wavelength dependence on angular emission dynamics of Nd : YAG laser-produced Sn plasmas” Plasma Sour Sci Technol 21, 055003, 2012

[20] S.S. Harilal, G.V. Miloshevsky, T. Sizyuk, A. Hassanein, “Effects of excitation laser wavelength on Ly-α and He-α line emission from nitrogen plasmas” Phys. Plasmas 20, 13105 2013

[21] John LOPEZ, Rainer KLING, Rémi TORRES, Anne LIDOLFF, Martin DELAIGUE, Sandrine RICAUD, Clemens HÖNNINGER and Eric MOTTAY “Comparison of picosecond and femtosecond laser ablation for surface engraving of metals and semiconductors” The International Society for Optical Engineering · February 2012

Abstract

# Study on polarizing film processing by a polarized laser beams

Jeonghoon WOO
Department of Applied Engineering
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

In recent manufacturing processes, lasers are applied to many fields. the use of laser cutting is increasing significantly according to the trend of diversification and complexing of material shapes. Therefore, we tried to propose a method to check and optimize the processability of the laser according to the laser characteristics. Laser processing changes its characteristics depending on the characteristics of the material as well as the characteristics of the laser. In this paper, the workability of the polarizing film was dealt with. The reason why polarizing film was especially selected among many materials is that in the display field, almost all panels have a layer with polarization properties for the purpose of improving visibility when producing panels. The experiment was conducted by varying the angle of the polarizing film by using laser beams of P-polarizatioin, S-porarization, and C-porarization, which are representative polarization states, to measure the change in

processability and quality according to each condition. Based on the measured data, the characteristics and main factors in the processing of the polarized laser beam and polarizing film were identified, and an optimization method was suggested.

Keywords : Laser processing, Laser ablation, Polymer, Polarization, Polarizing film
Student Number : 2019-28078