



레이저 소재 가공의 기초 및 응용에 관한 리뷰

김규빈¹, 정창벽¹, 장희윤¹, 천민철¹, 장성규² , 이승기¹ 

¹ 부산대학교 재료공학부

² 한국전자기술연구원 융복합전자소재연구센터

A Review of Fundamentals and Applications in Laser Material Processing

Gyu Been Kim¹, Chang Byeok Jeong¹, Hee Yoon Jang¹, Min Cheol Cheon¹, Sung Kyu Jang², and Seoung-Ki Lee¹

¹ Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

² Electronic Convergence Material and Device Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 13509, Korea

(Received November 1, 2024; Revised November 12, 2024; Accepted November 18, 2024)

Abstract: The laser (LASER), originating from the principle of stimulated emission proposed by Albert Einstein, has been a catalyst for substantial advancements across numerous industrial and scientific domains. Initially confined to research and laboratory applications, the scope of laser technology has expanded rapidly over time. This expansion is primarily due to the laser's unique characteristics, such as high-density energy output and precise beam control, which have facilitated its widespread integration into contemporary industrial practices. Specifically, laser materials processing technology enables the machining of diverse materials, including metals, ceramics, and polymers, in a non-contact manner, thereby achieving high precision without the risk of wear or contamination. As a result, laser processing has become indispensable in fields such as advanced electronics manufacturing, medical device production, aerospace, and the automotive industry. Furthermore, laser materials processing exhibits significant potential for high-precision applications that demand minimal thermal deformation of materials, such as microfabrication and the production of complex geometries. This paper provides a comprehensive examination of the development and necessity of laser processing technology, explores various laser types and their possible applications, and elucidates why laser technology has emerged as a fundamental component of modern manufacturing, alongside its trajectory for future development.

Keywords: Laser, Laser materials processing, Non-contact manufacturing, Microfabrication, Functional materials

1. 서론

레이저 가공 기술은 1960년대 레이저의 발명 이후 급격히 발전해온 첨단 제조 공정으로, 과학과 산업 전반에 걸쳐

✉ Seoung-Ki Lee; ifriend@pusan.ac.kr

Sung Kyu Jang; skjang@keti.re.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

혁신적인 변화를 이끌며 그 중요성이 점점 확장되고 있다 [1,2]. 레이저(light amplification by the stimulated emission of radiation, LASER)는 '자극 방출에 의한 빛 증폭'이라는 원리를 통해 고도로 집중된 빛 에너지로서, 이러한 특성 덕분에 매우 정밀하고 효율적인 가공을 가능하게 한다. 즉 레이저 가공 기술은 비접촉 방식으로 작동하여 마모나 오염의 위험이 없어 금속, 세라믹, 폴리머 등 다양한 재료를 높은 정밀도로 절단, 드릴링, 표면 처리, 성형 분야에 적용되어 왔고, 최근에는 첨단 의료, 고정밀 분석, 그

리고 기능성 나노소재의 [3,4] 개발까지 보고되고 있어 적용 범위가 무궁한 것이 특징이다.

뿐만 아니라 레이저 가공은 재료에 가해지는 열 영향을 최소화하여 변형을 줄일 수 있어 미세 가공 및 복잡한 형상 제작이 요구되는 응용 분야에서도 중추적인 역할을 하고 있다. 이러한 이점으로 인해 레이저 가공 기술은 현재 반도체 공정, 의료 기기, 우주 항공 및 자동차 산업 등에서 광범위하게 활용되고 있으며, 지속적인 기술 발전을 통해 그 응용 범위가 더욱 확장되고 있는 추세이다.

본 리뷰 논문에서는 레이저 가공 기술의 기초와 적용 분야에 대한 동향을 파악하기 위하여 레이저 기술의 기본 원리, 레이저의 유형, 그리고 이들의 여러 가지 응용 분야를 종합적으로 정리하였다. 먼저, 제2장 ‘레이저의 기본 원리’에서는 레이저의 작동 메커니즘을 이해하기 위해 필수적인 기초 이론을 설명한다. 레이저 빛의 생성 원리를 역사의 흐름순으로 정리하였고 이러한 기본 원리를 이해하는 것은 레이저 기술의 다양한 응용을 이해하는 데 필수적이다. 다음으로, 제3장 ‘레이저의 종류’에서는 레이저 발진 원리에 따라 분류되는 다양한 레이저 유형을 소개하였다. 각 레이저 유형은 고유한 특이점과 파장 특성을 가지기 때문에 특정 응용 분야에 적합한 레이저의 선택에서 기준점을 제공한다. 이어서, 제4장 ‘기본적인 레이저 광학’에서는 레이저의 물리적 특성과 광학적 속성에 대해 논의하였다. 여기에는 빔의 초점 조절, 편광, 파장 특성 등이 포함되며, 이러한 특성들이 재료 표면 처리, 가공, 비파괴 검사와 같은 다양한 산업 공정에서 어떻게 활용되고 최적화되었는지에 기초를 다룬다. 제5장 ‘레이저 공정의 응용’에서는 레이저 기술의 실제 산업적 응용 사례를 정리하였다. 이 장에서는 레이저 절단, 드릴링, 표면 처리, 성형, 신속 프로토타이핑, 의료 및 나노 기술 응용 등 다양한 공정을 설명하고, 각 공정에서 요구되는 레이저의 특성과 설정이 어떻게 다른지, 그리고 이를 통해 어떻게 효율적으로 공정을 수행할 수 있는지에 대해 논의하였다. 마지막으로 레이저 기술의 현재와 미래를 전망함으로써 레이저 기술이 현대 과학과 산업에 미치는 깊은 영향을 이해하고, 미래의 혁신을 위한 중요한 지침을 제공하고자 한다.

2. 레이저의 기본 원리

레이저(LASER)는 ‘자극 방출에 의한 빛 증폭(light amplification by stimulated emission of radiation)’의 약어로, 아서 쇼로(Arthur Schawlow)와 찰스 타운스(Charles Townes)에 의해 처음 발명되었다 [5]. 가장 단

순한 형태의 레이저 광선은 원자 내의 전자가 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 전이할 때 방출되는 에너지로 설명 가능하다. 레이저 생성의 기본 원리를 이해하기 위해서는 자극 방출 현상에 대한 이해가 필요하므로, 본 장에서는 이러한 자극 방출 현상을 바탕으로 레이저 기본 원리에 대해 소개한다.

2.1 자극 방출 현상

1916년과 1917년, 아인슈타인은 자극 방출 현상에 관한 이론적 예측을 발표하였다 [5]. 고온 물체의 열 평형에 기반하여, 물체로부터의 방사선 I 는 여기된 N_2 의 수와 방사선의 재흡수로 인한 여기되지 않은 상태의 N_1 의 손실에 비례하며, 각각 확률적 요인 A 와 B 에 의존한다. 이는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$AN_2 - BIN_1 = I \quad (1)$$

식 (1)을 정리하면:

$$I = \frac{AN_2}{1 + BN_1} \approx \frac{AN_2}{BN_1} \quad (2)$$

추가적으로, N_2/N_1 는 볼츠만 분포에 따라 다음과 같이 표현된다 [6].

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{hc}{\lambda kT}\right] \quad (3)$$

또한 플랑크의 법칙은 다음과 같이 표현된다.

$$I(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left[\frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \right] \quad (4)$$

여기서 볼츠만 상수 k_B 는 1.38×10^{-23} J/K, 플랑크 상수 h 는 6.625×10^{-34} J·S이며, c 는 항상 진공에서의 빛의 속도로 $c = 2.99 \times 10^8$ m/s, T 는 절대 온도(K), λ 는 해당하는 빛의 파장이다.

아인슈타인은 식 (4)를 만족시키기 위해 식 (3)은 매우 작으므로 평형 유지를 위해서 CIN_1 형태의 추가 항이 필요하다고 주장하였다. 여기서 C 는 자극 방출을 나타내는 확률인자로 아인슈타인은 방사된 광자가 여기된 원자에 부딪혀 에너지를 방출하는 것을 자극 방출이라 하였다. 이러한 이

론은 1928년 라덴부르크에 의해 음의 흡수를 관찰함으로써 간접적으로 확인되었다 [5].

2.2 레이저 빛 발생의 물리적 배경

원자, 이온, 분자는 각기 고유한 에너지를 가지는 특정 상태로 존재한다. 만약 낮은 에너지 준위를 나타내는 바닥 상태 ' E_1 '와 높은 에너지 준위를 나타내는 ' E_2 '의 두 가지 특정 에너지 준위를 가지는 단일 진동수로 가정한다면 E_1 과 E_2 사이의 에너지 전이로 인해 광자의 방출 및 흡수가 발생한다 [7]. 이때 발생하는 진동수 ν_{12} 는 다음과 같이 표현되며, 여기서 h 는 플랑크 상수 6.625×10^{-34} 이고, E 는 각 준위별 해당하는 에너지이다.

$$h\nu_{12} = |E_1 - E_2| \quad (5)$$

식 (5)는 바닥 상태의 에너지 준위에서 특정 진동수를 가지는 광자를 흡수하게 되면 높은 에너지를 가지는 에너지 준위로 상승하는 것을 의미한다. 이러한 원자와 전자기장 사이의 상호작용을 아인슈타인은 흡수, 자발 방출, 자극 방출의 3가지로 구분했다 [8].

2.2.1 흡수와 방출

E_1 상태에 있는 원자가 외부 방사선이나 광자에 노출되면 에너지를 흡수하여 E_2 로 전이된다. 이 과정에서 레이저는 파동의 진폭이 감소하고, 흡수되지 않은 파동은 계속해서 경로를 따라 이동한다. 식 (6)은 원자가 에너지를 흡수하는 속도(n_{abs})가 낮은 에너지 준위의 원자 수(N_1)와 입사 복사 에너지 밀도에 비례하는 것을 나타낸다.

$$n_{abs} = B_{12}N_1e(\nu) \quad (6)$$

여기서 $e(\nu)$ 는 진동수 ν 에서 에너지 밀도($J \cdot m^{-3} \cdot Hz$)이며, B_{12} 는 흡수에 대한 아인슈타인 계수이다. 원자가 더 높은 에너지 준위로 여기되면, 낮은 에너지 준위로 전이가 발생할 수 있고 이때 전자기 복사의 방출이 동반된다. 이러한 방출은 자발 방출과 유도 방출의 두 가지 유형으로 나눌 수 있다.

자발 방출은 자극이 없는 상태에서 E_2 의 원자가 자발적으로 E_1 으로 이동할 때 발생한다. 이때 광자들은 무작위 방향으로 방출되며 N_2 의 증가 속도와 N_2 의 감소 속도는 동일해야 한다. 그림 1(b)는 자발 방출 후 파장 변화를 나타낸

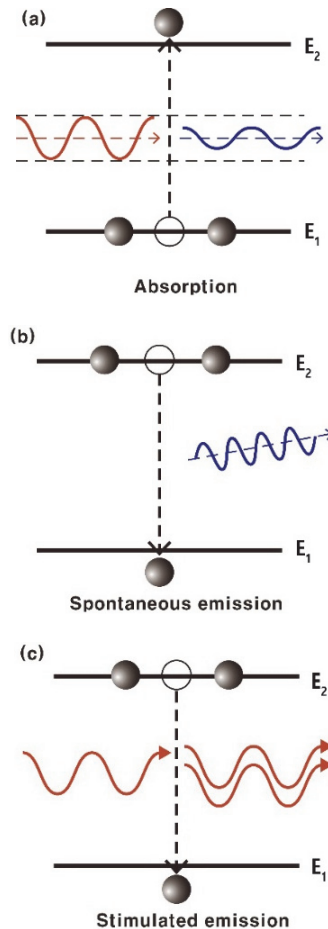


Fig. 1. (a) Absorption, (b) spontaneous emission, and (c) stimulated emission.

다. 여기된 원자는 자발적으로 바닥 상태로 돌아가려고 하기 때문에 자발 방출이 일어나며, 여기된 상태가 안정하다면 자발 방출은 발생하지 않는다.

이와 다르게 유도 방출은 E_2 에 있는 원자가 E_1 과의 에너지 차이에 해당하는 에너지로 자극을 받았을 때 발생하며, 이때 에너지는 광자 또는 전자기파의 형태로 방출된다. 그림 1(c)와 같이 방출된 광자는 자극한 광자와 동일하게 중첩되므로 방출되는 빛을 증가시킨다. 방출된 광자는 동일한 진동수, 동일한 위상, 동일한 편광을 가지며 동일한 방향으로 전파된다. 이러한 동일한 특성을 갖는 에너지와 광자가 방출되기 때문에 빛의 증폭이 가능해지며, 일관된 레이저 빛이 생성될 수 있다. 하지만 유도 방출이 일어나기 위해서는, 여기 상태의 원자 수가 더 낮은 에너지 상태의 원자 수보다 많아야 한다. 이를 밀도 반전 상태라고 한다 [9].

3. 레이저의 종류

레이저의 파장은 광자가 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 자극될 때 발생하는 에너지 차이에 의해 결정된다. 레이저 소재 가공 기술에 대표적으로 사용되고 있는 레이저는 CO₂와 Nd:YAG 레이저가 사용되고 있으며 일반적으로 각각 10.6 μm , 1.064 μm 의 파장을 가지고 있다. 파장 이외의 변수로, 레이저 공정은 전력밀도와 노출시간을 정밀하게 제어할 수 있어 다양한 응용 분야에서 활용된다. 이번 장에서는 활성 매질을 기준으로 한 주요 레이저의 종류와 최신 기술 동향에 대해 소개한다.

3.1 가스 레이저

산업에서 가장 널리 쓰이는 가스 레이저는 연속 모드와 펄스 모드의 두 가지 작동 방식이 모두 가능하고, 출력은 수 킬로와트(CO₂ 레이저)에서 밀리와트(He-Ne 레이저)까지 다양한 범위를 가지며, 출력 주파수는 자외선부터 적외선까지 매우 넓은 범위를 구현할 수 있다. 이러한 폭넓은 레이저의 발전이 가능한 이유는 가스 활성 매질 종류에 따라 다양한 레이저의 구현 및 제어가 가능하기 때문이며, 대표적으로 중성 원자 레이저, 이온 레이저, 분자 레이저로 분류될 수 있다.

3.1.1 중성 원자 레이저

중성 원자 레이저는 비활성 가스를 활성 매질로 사용하며, 대표적인 예로 헬륨-네온(He-Ne) 레이저가 있다. 헬륨과 네온의 공명 충돌로 인해 네온의 높은 에너지 준위의 밀도가 낮은 에너지 준위의 밀도보다 많아지는 밀도 반전이 일어나며, 네온 원자의 에너지 준위 사이에서 레이저 작용이 일어나는 원리이다. 이러한 헬륨-네온 레이저는 적외선에서부터 적색 가시광선에 해당하는 0.633 μm , 1.15 μm , 3.39 μm 의 파장을 가진다 [10]. 출력은 수 밀리와트 급이며, 이를 작동하는 데 필요 전력은 5~10 W 정도이다. 주요 응용 분야는 바코드 판독, 정렬, 홀로그래피, 비디오 디스크 메모리 등이다.

3.1.2 이온 레이저

이온화된 비활성 가스를 활성 매질로 사용하는 이온 레이저는 일반적으로 가스 종류와 관계없이 동일한 구조를 가지며, 가스 종류에 따라 아르곤, 크립톤, 제논, 수은 이온

레이저로 나뉜다. 인가된 전압에 의해 방전이 일어나면 가속된 전자가 원자와 충돌하여 원자가 이온화된다. 이온화된 원자가 전자 충돌에 의해 여기되면 이 과정에서 밀도 반전이 발생하고, 레이저가 작동한다. 아르곤 이온 레이저의 작동 파장은 0.488 μm (파랑)과 0.515 μm (초록)에서 가장 강하고 [11], 출력은 1~20 CW급이다.

3.1.3 분자 가스 레이저

활성 매질로 분자 가스를 사용하는 분자 가스 레이저는 양자화되는 상태에 따라 종류가 나뉘는데, 가장 대표적인 분자 가스 레이저로는 CO₂ 레이저와 엑시머 레이저(excimer laser)가 있다. CO₂ 레이저의 경우, 진동-회전 레이저로 바닥 상태의 진동 준위 사이에서 전이가 이뤄진다. 전기 에너지를 효율적으로 레이저 광으로 변환하는 능력으로 인해 10~30%의 상대적으로 높은 효율을 가지며 주로 두꺼운 금속 소재의 가공 [12], 통신, 의료수술과 같은 분야에 사용된다.

엑시머 레이저는 여기된 이원자 분자가 광자를 방출한 후 더 낮은 에너지, 비결합 상태에서 구성 원자로 해리되는 전이를 활용한다. 이러한 레이저는 사용되는 가스 혼합물에 따라 다양한 파장에 걸쳐 조정이 가능하다는 장점이 있다. 이는 동위원소 분리, 레이저 보조 화학기상증착법(laser assisted chemical vapor deposition, LA-CVD) 및 광화학 반응과 같은 제거 공정에 매우 효과적이며 최근에는 소재 가공 분야에 적용되고 있다.

3.2 고체 레이저

고체 레이저는 절연 성질을 가지는 결정체나 유리에 전기 금속이나 희토류 원소를 불순물로 첨가하여 사용한다. 구체적으로는 희토류 원소를 YAG (Y₃Al₅O₁₂), YAP (YAlO₃), YVO₄ 또는 인산염(phosphate) 및 실리카 유리 등에 도핑한 형태이다. 이러한 고체 레이저는 다른 레이저 종류들보다 높은 에너지 수준에서 긴 수명을 유지할 수 있어, 높은 에너지의 저장이 가능하고, 짧은 펄스로 매우 높은 강도의 출력을 생성할 수 있다. 아래는 대표적인 고체 레이저들의 설명이다.

3.2.1 Nd:YAG 레이저

Nd:YAG는 YAG (이트륨 알루미늄 가넷, Y₃Al₅O₁₂) 결정에 네오디뮴(Nd) 원소를 불순물로 1% 정도 첨가한 재료

이다. 순수한 YAG는 알루미늄에 이트륨(Y)이 합성된 형태로, 색깔이 없고 모든 방향에서 동일한 광학적 성질을 가진다. Nd:YAG 레이저에 적합한 펄핑 파장은 $0.809 \mu\text{m}$ 이고, 방출 파장은 $1.06 \mu\text{m}$ 이다. 전자가 광자로 변환되는 효율인 양자 효율(quantum efficiency)은 40%이며, 전기적 파워가 광학적 파워로 변환되는 효율인 wall plug 효율은 4%이다. 이때, 다이오드 레이저를 이용하여 펄핑할 경우 효율은 8~10%로 증가하며, 플래시 램프를 통해 펄핑할 경우보다 수명이 10배 늘어난다.

3.2.2 Nd:Glass 레이저

Nd:Glass와 Nd:YAG는 Nd를 불순물로 첨가하기 때문에 동일한 에너지 밴드 다이어그램을 가지지만, 에너지 변환과 출력은 Nd:Glass가 훨씬 우수하다. 그러나 유리 재료는 열 전도성이 낮으므로 냉각이 수월하지 않아, 레이저 펄스를 방출하는 속도가 제한된다. 또한 Nd:YAG 레이저에 비해 출력이 안정적이지 않으며, 짧은 시간에 매우 빠른 속도로 여러 번의 레이저 펄스를 방출하는 것이 어렵다.

3.2.3 다이오드 펄핑 고체 레이저

고체 레이저는 일반적으로 플래시 램프를 통해 펄핑된다. 이때 램프 전력의 몇 퍼센트 정도만 레이저의 동작에 기여하며, 나머지 에너지는 활성 매질을 가열하여 왜곡을 일으키며 굴절률을 변화시킬 수 있다는 문제가 있다. 이로 인해 레이저 펄스 간 파워의 일관성과 빔의 품질이 낮아질 수 있으며, 구동하기 위해 큰 전력을 필요로 한다. 이러한 문제들은 다이오드 레이저 펄핑으로 해결할 수 있다. 다이오드 레이저의 wall plug 효율은 30~40%로, 매우 높은 출력을 달성할 수 있다. 다만 고출력 다이오드는 값비싸다는 문제가 있는데, 레이저 다이오드 시장이 성장함에 따라 가격이 하락하고 있는 추세이며, 이에 따라 램프 펄핑 방식은 지속적으로 축소되고 있다.

다이오드 펄핑 고체 레이저로는 디스크 레이저와 섬유 레이저가 대표적이다. 디스크 레이저의 매질로는 이터븀(Yb)을 첨가한 코인 모양의 YAG 결정이 사용된다. 디스크 레이저는 $1.03 \mu\text{m}$ 파장에서 500 W급 이상의 고품질의 빔을 생성할 수 있다. 섬유 레이저의 매질은 주로 도핑된 플라스틱이나 유리 섬유이며, 이 매질의 끝부분을 다이오드 레이저를 통해 펄핑한다.

3.3 색소 레이저

색소 레이저는 물, 에틸 알코올, 메틸 알코올 등 용매에 고체의 유기 색소를 첨가한 것을 활성 매질로 사용하는 액체 레이저이다. 색소 레이저는 공진기를 튜닝하고, 색소의 농도를 바꾸거나, 압력을 조절함으로써 레이저의 방출 파장을 다양하게 조절할 수 있다는 장점을 가진다. 넓은 범위의 파장을 발산할 수 있는 것은 색소의 커다란 분자들이 다수의 진동·회전 상태를 가지기 때문이다. 이러한 파장의 조정 가능성으로 인해 색소 레이저는 분광학, 동위원소 분리, 빛을 사용하여 거리를 측정하는 기술인 라이다(light detection and ranging, LIDAR) [13], 레이저 냉각 등에 사용된다.

3.4 다이오드 레이저

반도체 레이저라고도 알려져 있는 다이오드 레이저는 전도대의 전자가 가전자대의 정공과 재결합할 때 광자가 발생하는 것을 이용한다. 다이오드 레이저의 wall plug 효율은 최대 50%로, 현재 전기를 빛으로 변환할 수 있는 가장 효율적인 장치이다 [14]. 최초의 다이오드 레이저는 1962년 General Electric (GE)사와 International Business Machines (IBM)사에 의해 발명된 GaAs 레이저로, 높은 전류 밀도를 가지며 극저온에서도 작동한다 [15]. 초기 GaAs 다이오드 레이저는 높은 전류 밀도로 인해 작동 시 발열 문제가 심각했으나 1970년 노벨 물리학상이 수여된 이종 이종접합 구조가 등장하며 이러한 문제가 해결되었다. 현재 가장 최신의 다이오드 레이저 재료는 750~870 nm의 빛을 발산하는 GaAs와 GaAlAs, 그리고 900~1,000 nm의 빛을 발산하는 InGaAs이다. 다이오드 레이저는 주로 고체 레이저 펄핑과 표면 가열 및 용접에 사용된다. 또한, CD 및 DVD 플레이어, 바코드 리더기, 레이저 프린터, 레이저 포인터 등의 수 밀리วัต 수준에 저전력 시스템에도 사용되고 있다.

4. 기본적인 레이저 광학

4.1 전자기 복사

전자기 복사(electromagnetic radiation)는 진동하는 전기장과 자기장으로 구성된 파동으로 공간을 통해 이동하는 에너지이며, 감마선부터 긴 라디오파까지를 포함하

Table 1. Types of laser.

Laser type	Active medium	Wavelength (μm)	Characteristic	Application	
Gas	Neutral atom	Inert gas (e.g., He-Ne)	0.633, 1.15, 3.39	The first gas laser, excellent coherency	Barcode reading, holography, video discs, memory
	Ion	Ionized inert gas (e.g., Ar ⁺)	0.488~0.514	High power consumption	Laser printing, dye lasers pumping
	Molecular	Molecular gas (e.g., CO ₂ , excimer)	0.125~0.351 (excimer laser)	Wide wavelength ranges (excimer laser)	Material processing, optical communication
Solid-state	Nd: YAG	YAG (with Nd 1%)	1.06 532 nm 355 nm	Optically colorless and isotropic	Metal processing, welding, medical applications
	Nd: Glass	Glass (with Nd 1%)	1.05	Pulse emission rate limited by low thermal conductivity	High-energy laser-based research
	Disk	YAG (with Yb)	1.03	Uses diode laser pumping	Marking, optical communication, medical applications
	Fiber	Glass, plastic fibers	400~800 nm (high controllability)		Short-range telecommunication, medical applications
Dye	Organic dye + solvent (alcohol-based)	400~800 nm (high controllability)	Wide wavelength ranges	Spectroscopy, LIDAR, laser cooling	
Diode	GaAs, InGaAs	0.750~0.870, 0.900~1.00	50% wall-plug efficiency, high current density	CD and DVD players, barcode reading, laser printing	

나 레이저는 일반적으로 가시광선, 자외선 또는 적외선 파장 범위 내에서 고도로 집중된 단색의 광파를 일컫는다. 통상적으로, 라디오파에서 청색광까지의 긴 파장대에서는 파동 이론을 적용하며 X선, 감마선과 같이 높은 에너지를 가지는 짧은 파장대에 대해서는 입자 이론이 적용되고 있다. 이는 닐스 보어가 주장한 다음의 식을 통해 이해할 수 있다.

$$h = ET = p\lambda \quad (7)$$

h 는 플랑크 상수 $6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 이고, E 는 입자의 에너지, T 는 주기, p 는 운동량, λ 는 파장이다. 식 (7)은 플랑크 상수가 파동의 특성과 입자의 특성을 나타내는 두 변수의 곱임을 의미한다. 이로 인해 전자기 복사에서 입자의 성질이 강하면 파동의 성질은 약해지고, 그 반대의 경우도 마찬가지라는 것을 나타낸다. 또한 광자는 일반적인 입자처럼 그 속도가 변하지 않는다는 점을 유의하는 것도 중요하다. 빛의 굴절은 흔히 매질에 따른 속도 변화로 설명된다. 그러

나 보다 정확히는 광자가 매질을 통과할 때 매질의 분자와 상호작용하여 흡수 및 재방출의 과정이 반복되고, 이로 인해 빛의 파면이 느리게 진행되는 것이다. 광자의 속도는 항상 진공에서의 빛의 속도에 해당하는 $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ 로, 불변하는 값이다.

4.2 반사와 흡수

4.2절에서는 재료가 레이저와 상호작용할 때 레이저의 반사 또는 흡수에 영향을 미치는 요소에 대해 설명한다.

4.2.1 입사각이 미치는 영향

1902년 Drude는 원자론적 관점에서 반사율에 대한 이론적 분석을 수행하여 입사면과 편광면 사이의 각도에 따라 반사율이 변한다는 것을 입증했다 [16]. 빛이 표면과 상호작용할 때, 편광은 두 가지 구성 요소로 분류될 수 있다. 편광면이 입사면에 포함될 때의 광선을 p-편광 빛, 편광면이 입사면에 수직일 때의 광선을 s-편광 빛이라 한다 [그

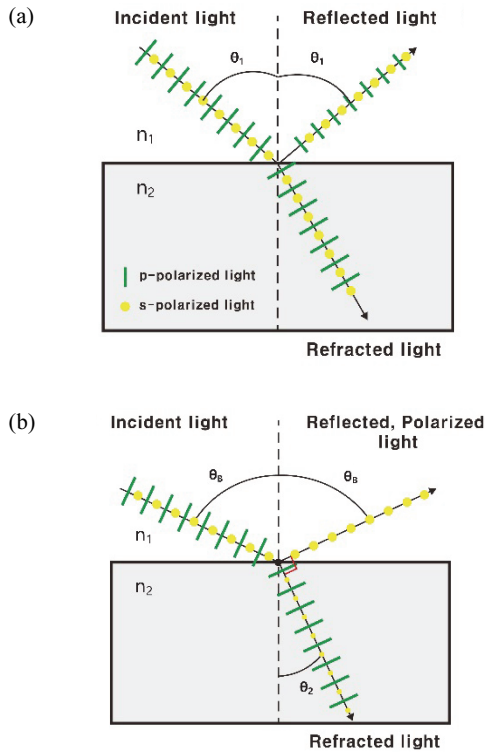


Fig. 2. Reflection and refraction at (a) an arbitrary angle and (b) the Brewster angle.

림 2(a)]. 이때 그림 2(b)와 같이 반사각과 굴절각이 수직이 되게 하는 특정 입사각인 브루스터 각에서는, 입사면 내 포함된 전기장 벡터는 자신과 수직인 성분이 없기 때문에 반사될 수 없고, 결과적으로 반사된 광선은 주로 입사면에 수직인 s-편광으로 구성된다 [17]. 이처럼 전기장 벡터가 하나의 평면을 가지는 광선을 편광된 광선이라고 하며 실제 레이저에서는 공진기 내 증폭을 통해 편광된 광선을 생성한다.

4.2.2 파장의 영향

$$v=c/\lambda \tag{8}$$

파장 v 와 진동수 λ 의 관계식인 식 (8)에 의하여, 레이저의 파장이 짧을수록 광자는 더 높은 에너지를 가지고, 조사되는 물질의 원자 내 전자에게 더 많이 흡수되어 반사율이 감소하고 재료의 표면에 대한 흡수율이 증가한다. 그림 3은 파장에 따른 금속의 흡수 경향성을 보여주는 그래프로서, 파장이 짧아질수록 금속에 대한 흡수율이 증가한 것을 볼 수 있다. 반대로 절연체의 경우 레이저의 파장이 증가하

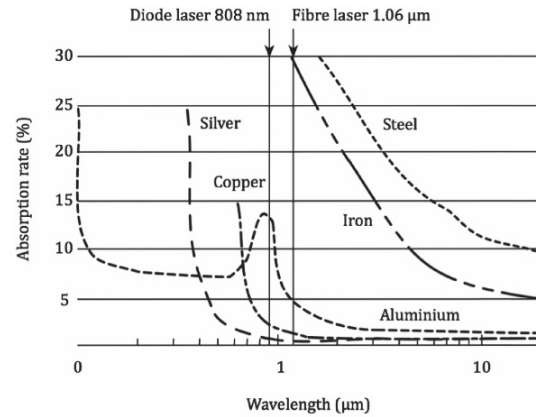


Fig. 3. Theoretical absorption as a function of wavelength for a range of common metals, used under Creative Commons License.

면 흡수율은 증가하는 경향을 보이는데 이러한 차이를 통해 다양한 재료의 가공 시 적합한 레이저 파장의 선택이 중요함을 알 수 있다. 고체에서는 광선이 침투 깊이(skin depth)에서 흡수되고 이후에 전도를 통해서 내부로 전달된다. 따라서 녹는점 이하의 온도에서 금속은 CO₂ 레이저 (10.6 μm)보다 파장이 짧은 Nd:YAG 레이저(1.06 μm)에서 흡수가 잘 된다.

4.2.3 온도의 영향

특정 파장의 레이저가 재료에 조사되면 일반적으로 재료의 온도가 증가하고 이에 따라 반사율은 감소하고 흡수율은 증가하는 경향이 나타난다 [18]. 이는 재료 내 격자 구조 온도가 증가하면서 전자와 격자 내 원자들 간의 에너지 교환이 늘어나면서 진동을 하게 되는데 이때 그 에너지를 재방출하는 반사가 일어나기보다는 격자 구조와 상호작용하여 흡수를 일으키기 쉬워지기 때문이다. 이후, 고온에서 재료가 용융되면 흡수율은 급격히 증가하다가 파장에 관계없이 일정해지는 경향이 나타난다. 따라서 레이저를 통해 용융 또는 절단과 같이 재료의 증발을 일으키는 공정에 반사율이 높은 재료를 사용하더라도 초기에는 전력이 다소 크게 투입될 수 있지만 재료가 용융되면 빛의 흡수율이 증가하기 때문에 상대적으로 낮은 전력이 요구된다. 그러나 재료의 용융을 포함하지 않는 공정인 경우, 반사율이 높은 재료를 사용하면 전력이 크게 필요할 수 있다.

4.2.4 표면 특성에 따른 영향

$$d_i = (2n+1)/4\lambda \tag{9}$$

반사는 표면에서 일어나는 현상이므로 표면 특성에 따라 큰 영향을 받는다. 식 (9)는 표면이 필름으로 덮인 경우, 조사되는 복사선이 간섭 효과를 일으키는 필름의 최소 두께 d 를 나타낸다. 여기서 표면 필름은 고체 형태 외에도 열적으로 접촉한 플라즈마의 형태가 될 수도 있다. 또한, 표면 거칠기가 입사선의 파장 크기보다 큰 경우 물결 모양의 다중 반사가 발생하는데, 이는 흡수에 큰 영향을 미친다. 이 외에도 측면 반사된 광선과의 간섭으로 유도 흡수가 생길 수도 있으며 이로 인해 입사선이 표면에서 반사된 후 무작위 방향으로 산란될 수 있다 [19].

4.3 레이저 광선의 특징

4.3.1 광선의 모드

그림 4와 같은 구조를 가지는 공진기가 발진하면 공진기 내부에 다양한 정재파가 공진기 모양에 따라 발생한다. 공진기 축을 따르는 정재파들의 간섭으로 인해 횡방향 정재파가 형성된다. 정재파가 x축, y축, z축을 따라 가지는 마디 수를 각각 양의 정수 p, m, n 이라 할 때, m 과 n 이 동일하고 p 만 다른 경우를 종방향 모드, p 는 동일하고 m, n 이 다른 경우를 횡방향 모드라 한다.

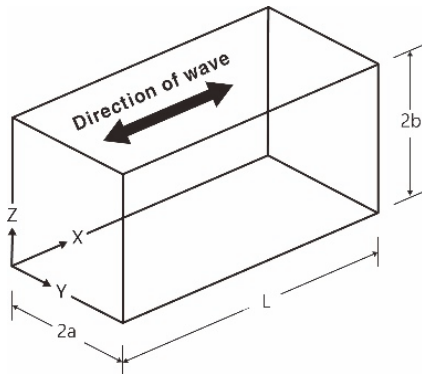


Fig. 4. Rectangular cavity containing a dielectric medium.

4.3.1.1 종방향(축 방향) 모드

종방향 모드는 공진기의 축(x축)을 따라 형성되는 정재파를 나타낸다. p 가 서로 다른 종방향 모드가 각각 존재한다면 두 모드는 종방향(x축)을 따라 다른 전자기장 분포를 가진다. 이로 인해 스펙트럼 영역에서 살펴보면 다양한 주파수를 가지지만 출력되는 레이저에서는 단일점으로 나타난다.

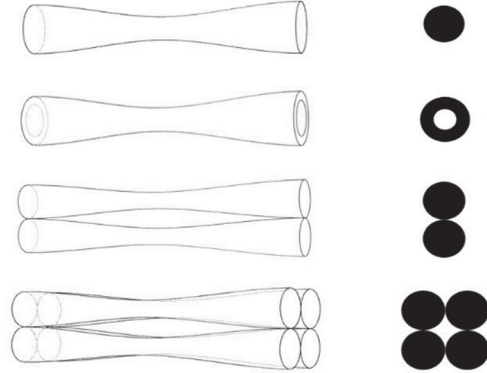


Fig. 5. Various mode patterns.

4.3.1.2 횡방향 모드

p 는 동일하고 m, n 이 서로 다른 모드들이 있을 경우 전자기장 분포는 횡방향으로 변한다. 횡방향 모드는 광선 단면 내 강도 분포를 나타내며 점 패턴을 보인다. 또한 TEM (transverse electro-magnetic) 모드 [20]라고도 불리며 TEM_{mn} 과 같은 형식으로 표현한다. m 과 n 에 따른 광선 패턴을 그림 5를 통해 나타내었다. TEM_{00} 은 0차 모드라고 하며 이상적인 가우시안 분포를 나타낸다. 이 모드는 레이저의 이론적 최소 반경으로 초점을 맞출 수 있어 레이저를 활용한 재료 커팅에 유용하다. 대조적으로 다중 모드 광선은 단일 모드에 비해서 단면 전체에 걸쳐 에너지가 균일하게 분포하며 회절로 인한 손실과 스팟의 크기가 크다. 따라서 주로 정밀한 분야보다 맞대기 용접과 같은 넓은 영역이 필요한 분야에 활용된다.

4.3.2 편광

유도 방출로 인한 파동은 전기장 벡터가 모두 한 방향으로 정렬되어 광선이 편광 된다. 편광은 정렬된 방향에 따라서 선형 편광과 원형 편광으로 나뉜다 [21]. 선형 편광의 경우 전기장 벡터 방향이 평행하고 단일방향으로 나뉜다. 이와 다르게 전기장 벡터의 방향이 수직이면서 세기가 동일할 경우 원형 편광, 세기가 다를 경우 타원형 편광이라 한다. 이때 광선이 시계방향으로 회전하면서 진행되는 경우 오른쪽 원형(타원형) 편광이라 한다. 앞서 4.2.1에서 언급한 바와 같이 편광 광선은 반사로 인해 방향성을 가지므로, 재료 절단과 같은 분야에 적합하다.

4.3.3 파장

레이저를 공정에 활용하기 시작한 이후, 다양한 파장을 갖는 여러 유형의 레이저가 개발되었다. 레이저의 파장은 유도 방출에 따른 전이상태를 조절함으로써 제어할 수 있다. 또한, 방출 분자의 운동에 따른 도플러 효과나 CO 레이저에서 보이는 더 높은 양자화 관련 전이를 이용하면 더 넓은 영역의 파장으로 확장할 수 있다.

4.3.4 가간섭성

간섭성(coherence)이란 서로 다른 두 파장 사이 혹은 같은 파장의 두 점 사이에서 존재하는 위상 차가 일정하게 유지되는 정도를 말한다. 간섭성에는 공간 간섭성과 시간 간섭성이 있다 [21].

그림 6(a)와 같이 공간 간섭성은 파장의 두 지점 간의 위상 차가 시간에 따라 일정하게 유지되는 정도를 나타내며 시간 간섭성은 특정 지점 P와 주어진 시간 t에서 위상과 일정 시간이 지난 후(t+t₀) 위상 차가 시간에 따라 일정하게 유지되는 정도를 말한다. 그림 6(b)와 같이 높은 간섭성은 연속 파형이 긴 것을 의미하며 큰 광학 경로 차이에서도 간섭 무늬 생성이 가능하다. 오늘날 사용되는 레이저는 저차모드 광선(low-order mode beam)으로 연속적인 파형을 생성하여 높은 일관성을 달성한다. 이러한 일관성 특성은 길이 측정, 스펙클 간섭계(speckle interferometry, SI), 홀로그래피, 도플러 속도 측정과 같은 응용 분야에 필수적이다.

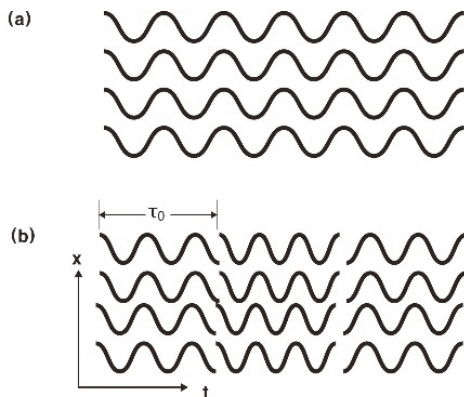


Fig. 6. Coherence: (a) perfect coherence and (b) spatially coherent beam with only partial temporal coherence with coherence time τ_0 .

4.4 단일 렌즈를 통한 초점 조정

4.4.1 초점 스팟 크기

모든 방향에서 균일하게 방사되는 일반적인 빛과 다르게 레이저는 공진기 축과 근접한 축에서 빛을 방출한다. 이로 인해 상대적으로 낮은 발산을 가지며 출력되는 광선이 거의 평행하다. 따라서 출력되는 광선의 파면은 평면에 가까워지고 이때 완벽한 공간 간섭성을 가진다면 광선의 발산은 회절에 의해서만 발생한다. 이 조건은 회절 제한이라고 알려져 있다.

그림 7과 같이 회절 제한된 광선 중 가장 이상적인 경우인 가우시안 분포를 보이는 레이저 광선의 직경은 최대 세기에서 $1/e^2$ 배만큼 떨어진 두 지점 사이의 거리로 정의된다 [22].

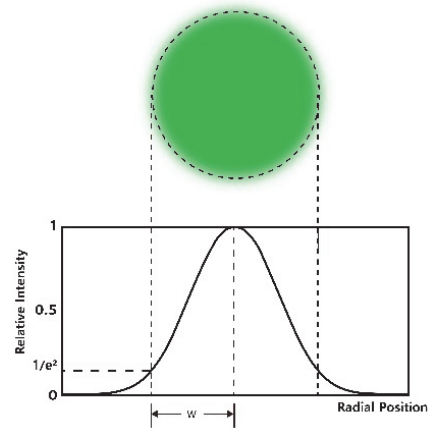


Fig. 7. The waist of a Gaussian beam is defined as the location where the irradiance is $1/e^2$ of its maximum value.

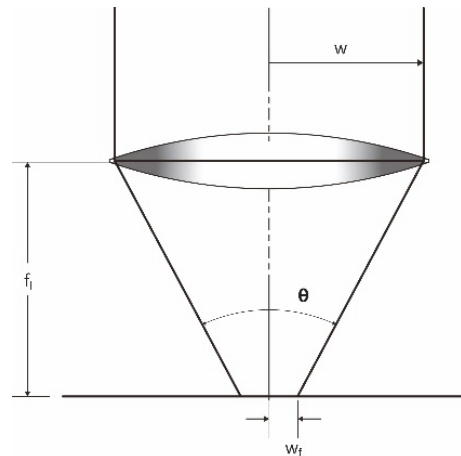


Fig. 8. Beam focusing.

그림 8과 같이 반지름이 w 이면서 특정 파장에 거의 평행하도록 입사하는 광선의 초점 스팟 크기($2w_f$)는 다음과 같다.

$$2w_f = \frac{2\lambda}{\pi\theta} \approx \frac{2f_1\lambda}{\pi w_0} \quad (10)$$

여기서 f_1 은 렌즈의 초점 거리, w 는 입사광선의 반지름, θ 는 초점에서 렌즈와 이루는 각을 나타낸다.

초점에서 얻을 수 있는 가장 작은 스팟의 크기 d_{min} 은 다음과 같다.

$$d_{min} = 2w_{min} = \frac{1.22\lambda}{NA} \quad (11)$$

여기서 NA 는 개구 수($n\sin(\theta/2)$)를 뜻하며 n 은 매질의 굴절률이다 [23]. 이는 레이저 광선의 파장이 작을수록 초점 스팟 크기가 작아질 수 있음 의미하고, 작은 초점 스팟 크기는 레이저 공정의 적용 분야에서 정밀도를 높일 수 있는 중요한 요건이다.

4.4.2 초점 심도

초점 심도(depth of focus, DOF)란 초점을 맞춘 광선이 동일한 강도를 가지는 거리로, 초점 크기가 $\pm 5\%$ 만큼 변하는 거리로 정의할 수 있다. 레이저를 통해서 작업물을 평행한 면으로 절단하는 경우 자를 수 있는 두께는 초점 심도에 따라 결정되며 초점 심도보다 두꺼운 판재의 경우 일반적으로 절단 폭이 깊이에 따라 달라지는 테이퍼 표면을 가진다 [24].

5. 레이저 공정의 응용

레이저를 활용하여 재료를 자르거나 뚫을 수 있고, 이를 통해 레이저를 산업적으로 응용할 수 있다. 레이저를 통해 절단한 재료의 절단면은 정밀하고 깨끗하여 추가적인 공정을 필요로 하지 않는다. 또한 열의 영향을 받는 영역이 매우 좁아 용융되었다가 다시 응고되는 부분이 적고, 따라서 재료의 변형이 거의 없다. 공정적인 측면에서는 절단 속도가 빠르고, 작업물을 고정할 필요가 없다. 절단 공구가 마모될 우려가 없고, 모든 방향에서의 절단이 가능하다. 소음이 적으며, 자동화가 용이하고, 공정의 유연성 또한 크다.

5.1 레이저 드릴링과 커팅

5.1.1 레이저 드릴링

레이저 드릴링은 발전용 터빈 [25], 잉크젯 노즐, 반도체 기술에서의 비아 [26], 암석 드릴링 [27], 항공 우주 산업 [28], 그리고 그 외 공학적인 용도로 구멍을 뚫는 데에 자주 사용된다. 레이저 드릴링의 방식으로는 단일 펄스 드릴링, 충격 드릴링, 트레판닝 [29], 헬리컬 트레판닝 등이 주로 사용된다. 단일 펄스 드릴링은 그 이름에서 쉽게 알 수 있듯 펄스를 한 번만 쬐서 구멍을 뚫는 방식이다. 충격 드릴링에서는 작업물이나 빔을 이동시키지 않고 단일 또는 다중의 펄스로 구멍을 뚫고, 트레판닝에서는 모양을 가지는 구멍의 둘레를 따라 빔을 회전시키며 재료를 절단한다. 헬리컬 트레판닝은 각 회전마다 점차 구멍을 깊게 하여 나선형으로 재료에 구멍을 뚫는 방식이다. 레이저 충격 드릴링 기술은 드릴링의 속도가 가장 빠르지만, 드릴링의 정밀도는 트레판닝 기술이 가장 우수하다.

레이저 드릴링은 기본적으로 레이저를 재료에 조사하면 재료가 기화되는 것을 이용한다. 그런데 증기가 지속적으로 발생하면 증기는 가속되고, 기화되지 않고 용융된 재료에 밀어내는 힘을 가할 수 있다. 또 용융된 재료의 표면에 온도 구배가 발생하면 표면 장력에 있어 변화가 생기고, 이로 인해라도 용융된 재료에 힘이 가해진다. 이렇게 용융물에 힘이 가해지면 용융물은 드릴링 중인 구멍의 바깥쪽으로 밀려나고, 증기와 함께 스프레이와 같은 형태로 재료를 벗어난다. 레이저 펄스가 중단되면 이러한 현상도 중지되고, 용융물은 구멍의 가장자리 주변에 튀거나 드릴링 된 구멍의 안쪽에 재응고되어 남는다. 레이저 드릴링 공정 중 용융물이 많이 발생할수록 드릴링 구멍의 품질은 낮다. 이렇게 부정적인 영향을 주는 용융물은 드릴링 공정 시 추가적으로 가스를 불어준다면 드릴링 구멍에서 배출되도록 할 수 있다 [30]. 펄스를 짧고 강하게 줄수록 더 깨끗한 고품질의 드릴링 구멍을 얻을 수 있다.

5.1.2 레이저 커팅

앞서 설명한 기화의 원리를 이용한 드릴링의 방식으로 재료를 절단할 수도 있고, 이 외에도 다양한 레이저 절단 방식이 존재한다. 첫 번째로 용융 절단은 끊는점까지만 재료에 레이저를 조사하고 그 부분에 기체를 강하게 분사하여 용융물을 날려 보내는 방식이다. 이렇게 하면 재료를 기화하는 방식보다 전력을 절반 아낄 수 있다. 두 번째로는

반응 융합 절단이 있다. 레이저 커팅 중 사용되는 기체가 재료와 발열 반응이 일어난다면, 이는 곧 커팅 공정에 있어 추가적인 열원이 제공되는 것이다. 따라서 절단면에 여러 반응이 일어나게 된다. 이 두 방식 모두 레이저 커팅 기술의 가장 큰 산업적 응용 분야인 금속 재료 절단에 주로 사용된다 [31]. 세 번째로는 취성 재료를 절단하는 방법으로, 취성 재료가 열에 의한 균열에 취약한 것을 이용하여 레이저로 특정 부분을 가열하여 균열을 유도하고 절단하는 방법이다. 네 번째로는 스크라이빙 [32]이 있다. 스크라이빙은 실리콘 칩이나 알루미늄 기판에 주로 사용되며, 홈이나 일렬로 된 구멍들을 만들어 구조를 약화시켜 쉽게 기계적으로 절단할 수 있도록 하는 방법이다. 마지막으로 냉각 절단이 있다. 냉각 절단은 고출력 엑시머 레이저와 펄스의 도입으로 발견된 새로운 기술이다. 냉각 절단은 자외선 광자를 이용하는데, 플라스틱에 열을 가하지 않고 깔끔하게 절단할 수 있다. 레이저 커팅 기술은 다이 보드, 석영 관, 의류, 항공 우주 재료, 유리 섬유 등의 절단, 또 수 마이크로미터의 정확도로 프로파일 절단을 하는 데에 쓰인다.

5.2 레이저 표면 처리

레이저 빔이 불투명한 재료의 표면에 조사되면 수 층의 원자층 내에서 흡수된다. 레이저를 통해 에너지를 표면의 원하는 부분에 선택적으로 전달할 수 있다는 측면에서 레이저는 표면 공학에 있어 우수한 도구이다. 레이저 표면 처리는 다른 표면 처리 방법들에 비하여 화학적으로 청결하며, 후처리가 필요하지 않다. 또한 열영향부의 형상과 위치를 제어하기에 용이하다. 레이저 표면 처리는 금속 재료의 열처리를 통해 그 기계적 특성을 변화시키는 데에 사용될 수 있다. 또한 레이저에 의해 표면이 녹아 형성된 액체 영역에 다른 물질을 주입하여 재료의 표면을 합금화할 수도 있다. 레이저를 통해 한 금속의 표면에 다른 금속을 덮어씌우는 클래딩 [33]을 수행할 수도 있고, 표면의 접착력을 향상시키기 위해 표면을 거칠게 만드는 표면 텍스처링 [34]에도 레이저 표면 처리가 사용된다. 이 외에도 레이저 표면 처리는 전기도금, 미세 가공, 비접촉 굽힘, 스키프링, 레이저 물리·화학 기상 증착 [35], 레이저 청소, 재료의 충격 경화, 레이저 마킹 등의 용도를 가진다.

5.3 레이저 클리닝

레이저 세정이란 펄스 레이저를 통해 표면의 미세 입자를 제거하는 기술로, 1969년 베데어가 루비 Q-스위치 레이저를 사용하여 실리콘 오염물을 기판을 손상시키지 않

고 세정함으로써 그 개념이 처음으로 제안되었다 [36]. 레이저 세정은 다양한 메커니즘을 가진다. 첫 번째 레이저 세정 메커니즘으로는 재료의 선택적 증발로, 어두운 색을 가지는 오염물은 그 흡수 계수가 크므로 레이저 조사에 따른 온도의 상승과 증발의 경향성이 큰 것을 이용하는 방법이다. 두 번째로는 레이저가 재료에 조사되면 그 표면이 매우 높은 온도로 가열되고, 재료가 이온화되고 플라즈마화된다. 이때 레이저 펄스가 사라지면 플라즈마 또한 사라지고, 이에 따라 재료의 표면층이 얇게 제거된다. 이러한 메커니즘을 스파레이션 또는 박리라 한다. 세 번째로는 일시적으로 표면을 가열시키는 방법이 있다. 짧은 레이저 펄스가 재료의 표면을 매우 빠르게 가열하고 냉각하면 재료의 표면이 열팽창, 수축을 일으키고, 이로 인해 발생하는 열탄성 응력이 충분히 크다면 표면의 물질을 제거할 수 있다. 이 방법은 재료의 손상을 최소화할 수 있는 레이저 세정 메커니즘으로, 플라즈마의 형성이 불필요하다는 장점을 가진다. 마지막으로 습식 레이저 세정 또한 가능하다. 습식 레이저 세정은 재료에 액체층을 얇게 덮어 레이저를 조사하는 방법으로, 재료가 레이저 에너지를 흡수하면 물이 폭발적으로 증발하여 표면의 불순물 입자를 제거하는 효과가 매우 높다. 이 외에도 많은 메커니즘이 존재하며, 레이저 세정은 녹 [37], 기름, 페인트 [38], 산화물 [39] 등의 제거, 표면의 작은 잔해 입자의 제거 [40], 문화유산의 보존과 복원 [41] 등에 응용된다. 레이저 클리닝은 유해 폐기물을 발생시키고 많은 물을 낭비하는 기계적·화학적 습식 클리닝 방법을 대체할 수 있고, 높은 정밀도와 오염이 없는 특성을 가져 특히 유망한 세정 기술로 평가받고 있다.

6. 전망

본 리뷰에서 정리한 것과 같이, 레이저 재료 가공 기술은 이미 다양한 산업 전반에 걸쳐 큰 영향을 미치고 있으며, 기술 발전이 계속됨에 따라 그 역할은 더욱 커지고 있다. 레이저 소스, 광학 및 제어 방법의 발전으로 보다 정확하고 효율적인 응용이 가능해질 것이며, 레이저를 이용한 재료 제어 범위가 새로운 영역으로 확장될 것이다. 최근 미래 개발의 핵심 영역 중 하나는 초고속 레이저 시스템의 향상이다. 펨토초 및 피코초 레이저와 같은 이러한 레이저는 열 영향을 최소화하면서 재료를 가공할 수 있는 기능을 제공하여 손상 가능성을 줄이고 고정밀 미세 가공을 가능하게 한다. 이러한 시스템의 가용성과 경제성이 증가함에 따라 더 많은 산업에 통합되어 마이크로 전자 공학 및 생체 의학 장치와 같이 복잡한 구조가 필요한 응용 분야에 접근

하기가 쉬워질 것이다. 또 다른 유망한 방향은 실시간 모니터링과 피드백 제어를 활용한 적응형 레이저 가공 기술의 개발이다. 인공 지능과 기계 학습 알고리즘을 통합하면 가공 중에 레이저 매개변수를 동적으로 최적화하여 효율성과 일관성을 향상하는 동시에 결함과 재료 낭비를 최소화할 수 있다. 이러한 발전은 반도체 처리, 적층 제조, 표면 처리 응용 분야에 특히 도움이 될 것으로 전망된다. 마지막으로, 레이저 가공과 3D 프린팅, 나노 제조 등 다른 첨단 소재·제조 기술을 결합하는 것도 유망한 개척 분야로 고려된다. 레이저 기술을 이러한 새로운 재료와 공정에 통합함으로써 기존에 구현하지 못하였던 새로운 기능 또는 trade-off 관계의 극복 등 창의적인 영역의 개척이 기대되는 바이다. 요약하면, 레이저 재료 가공의 미래는 혁신적인 성장을 이룰 잠재력이 있으며 레이저 소스, 광학 및 제어 기술의 지속적인 개발은 기존 응용 분야의 기능을 향상할 뿐만 아니라 새로운 분야의 혁신을 위한 길을 열어 줄 것이다. 기술이 발전함에 따라 레이저 가공은 현대 제조의 최전선에 남아 과학과 산업의 발전을 주도할 것으로 예상된다.

ORCID

Seoung-Ki Lee
Sung Kyu Jang

<https://orcid.org/0000-0002-8786-0251>
<https://orcid.org/0000-0003-0610-0662>

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] M. Malinauskas, A. Žukauskas, S. Hasegawa, Y. Hayasaki, V. Mizeikis, R. Buividas, and S. Juodkasis, *Light: Sci. Appl.*, **5**, e16133 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/lssa.2016.133>
- [2] K. Sugioka, *Nanophotonics*, **6**, 393 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2016-0004>
- [3] S. K. Hyeong, M. Park, S. I. Kim, S. Park, K. H. Choi, M. J. Im, N. D. Kim, T. W. Kim, S. H. Lee, J. W. Park, S. Bae, J. H. Lee, and S. K. Lee, *Adv. Mater. Technol.*, **7**, 2101105 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202101105>
- [4] S. Park, A. Lee, K. H. Choi, S. K. Hyeong, S. Bae, J. M. Hong, T. W. Kim, B. H. Hong, and S. K. Lee, *ACS Nano*, **14**, 8485 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c02745>
- [5] J. Hecht, *Opt. Eng.*, **49**, 091002 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1117/1.3483597>
- [6] E. I. Kozliak, *J. Chem. Educ.*, **84**, 493 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1021/ed084p493>
- [7] A. J. Gross and T. R. Herrmann, *World J. Urol.*, **25**, 217 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00345-007-0173-8>
- [8] R. Höppner, E. Roldán, and G. J. de Valcárcel, *Am. J. Phys.*, **80**, 882 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1119/1.4740247>
- [9] I. B. Allemann and J. Kaufman, *Basics in Dermatological Laser Applications* (2011) p. 7.
doi: <https://doi.org/10.1159/000328236>
- [10] H. Sasada and O. Kubota, *Appl. Phys. B*, **55**, 186 (1992).
doi: <https://doi.org/10.1007/BF00324074>
- [11] M. A. Mainster, *Ophthalmology*, **93**, 952 (1986).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0161-6420\(86\)33637-6](https://doi.org/10.1016/S0161-6420(86)33637-6)
- [12] Naresh and P. Khatak, *Mater. Today: Proc.*, **56**, 2484 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.250>
- [13] Y. Chen, Q. Liu, S. Hu, and J. Huang, *Proc. AOPC 2017: Optical Sensing and Imaging Technology and Applications* (SPIE, Beijing, China, 2017), p. 989.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.2285262>
- [14] W. M. Steen and J. Mazumder, *Laser Material Processing* (Springer Science & Business Media, 2010).
doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
- [15] H. Nasim and Y. Jamil, *Opt. Laser Technol.*, **56**, 211 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.08.012>
- [16] G. Norman and I. Saitov, *Phys. Rev. E*, **94**, 043202 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.043202>
- [17] P. J. Ouseph, K. Driver, and J. Conklin, *Am. J. Phys.*, **69**, 1166 (2001).
doi: <https://doi.org/10.1119/1.1397457>
- [18] R. Indhu, V. Vivek, L. Sarathkumar, A. Bharatish, and S. Soundarapandian, *Lasers Manuf. Mater. Process.*, **5**, 458 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-018-0075-1>
- [19] P. H. Siegel, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **3**, 506 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2013.2272656>
- [20] Y. F. Chen, C. C. Lee, C. H. Wang, and M. X. Hsieh, *Chin. Opt. Lett.*, **18**, 091404 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3788/COL202018.091404>
- [21] S. Sun and M. Brandt, *Nontraditional Machining Processes* (Springer, London, 2013), p. 35.
doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5179-1_2
- [22] J. Alda, *Encyclopedia of Optical Engineering* (Marcel Decker Inc., New York, 2003), p. 1013.
- [23] T. Grosjean and D. Courjon, *Opt. Commun.*, **272**, 314 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.11.043>
- [24] C. Wandera and V. Kujanpää, *Proc. Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* (2011) p.

641.
doi: <https://doi.org/10.1177/2041297510394078>
- [25] T. Beck (Wiley Online Library, 2011), p. 40.
- [26] R. Landgraf, R. Rieske, A. N. Danilewsky, and K. J. Wolter, *Proc. 2008 2nd Electronics System-Integration Technology Conference* (IEEE, Greenwich, UK, 2008), p. 1023.
doi: <https://doi.org/10.1109/estc.2008.4684492>
- [27] F. Buckstegge, T. Michel, M. Zimmermann, S. Roth, and M. Schmidt, *Phys. Procedia*, **83**, 336 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.035>
- [28] C. Y. Yeo, S. C. Tam, S. Jana, and M.W.S. Lau, *J. Mater. Process. Technol.*, **42**, 15 (1994).
doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90073-6)
- [29] D. Ashkenasi, T. Kaszemeikat, N. Mueller, R. Dietrich, H. J. Eichler, and G. Illing, *Phys. Procedia*, **12**, 323 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.140>
- [30] W. Schulz, U. Eppelt, and R. Poprawe, *J. Laser Appl.*, **25**, 012006 (2013).
doi: <https://doi.org/10.2351/1.4773837>
- [31] A. Riveiro, F. Quintero, M. Boutinguiza, J. Del Val, R. Comesaña, F. Lusquiños, and J. Pou, *Materials*, **12**, 157 (2019).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma12010157>
- [32] P. Gečys and G. Račiukaitis, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **51**, 33209 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2010110>
- [33] R. Vilar, *J. Laser Appl.*, **11**, 64 (1999).
doi: <https://doi.org/10.2351/1.521888>
- [34] I. Etsion, *J. Tribol.*, **127**, 248 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1115/1.1828070>
- [35] S. D. Allen, *J. Appl. Phys.*, **52**, 6501 (1981).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.328600>
- [36] S. M. Bedair and H. P. Smith Jr, *J. Appl. Phys.*, **40**, 4776 (1969).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1657288>
- [37] V. Narayanan, R. K. Singh, and D. Marla, *Proc. 2018 3rd International Conference on Design and Manufacturing Engineering (ICDME 2018)* (EDP Sciences, 2018), p. 01007.
doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822101007>
- [38] X. Li, T. Huang, A. W. Chong, R. Zhou, Y. S. Choo, and M. Hong, *Opto-Electron. Eng.*, **44**, 340 (2017).
doi: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.009>
- [39] G. Zhang, X. Hua, Y. Huang, Y. Zhang, F. Li, C. Shen, and J. Cheng, *Appl. Surf. Sci.*, **506**, 144666 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144666>
- [40] A. C. Tam, W. P. Leung, W. Zapka, and W. Ziemlich, *J. Appl. Phys.*, **71**, 3515 (1992).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.350906>
- [41] H. Garbacz, A. Koss, J. Marczak, J. Mróz, T. Onyszczyk, A. Rycyk, A. Sarzyński, W. Skrzeczanowski, M. Strzelec, and A. Zatorska, *Phys. Procedia*, **5**, 457 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.168>