

금속 표면경화용 고출력 다이오드 레이저 개발 프로세스

장동환*.#

*인하공업전문대학 기계설계과

Development Process for High Power Diode Laser for Metal Surface Hardening

Dong-Hwan Jang*.#

*Dept. of Mechanical Design, INHA TECHNICAL COLLEGE

(Received 29 November 2021; received in revised form 11 December 2021; accepted 15 December 2021)

ABSTRACT

This paper presents the development process for a high-power diode laser for metal surface hardening. To combine the emissions from several laser bars, it is necessary to collimate the emitted light using an optical lens. Thus, to achieve a suitable power density and uniform beam profile, several optical layouts were proposed. To estimate the laser beam for a flat-top distribution, a numerical analysis was performed using the ZEMAX software, and the results were compared with the experimental results. With a focal lens assembled in a serial diode stack source, the design can utilize the advantage of compacting the overall beam size. Experimental results for a robotic system demonstrated the processing ability of this diode laser module in industrial laser hardening.

Keywords : Diode Laser(다이오드 레이저), Surface Hardening(표면경화), Diode Stack(다이오드 스택), Optical Lens(광학렌즈), Beam Profile(빔 형상)

1. 서 론

레이저는 고유의 물리적인 특성에 의해 자동차, 항공 등의 다양한 산업분야에서 고정밀도를 요구하는 용접, 접합, 절단, 경화 등의 작업공정에 폭넓게 사용되어져 왔다^[1]. 특히 고출력을 이용한 레이저 빔은 금속의 표면에서 국부적인 열처리와 함께 전도에 의한 열 전달에 의해서 자체적으로 냉각되는 효과가 있다^[2].

이러한 레이저를 이용한 열처리 공정분야에서 다이오드 레이저는 Nd:YAG와 CO₂ 레이저와 비교하여 상대적으로 발진장치에 대한 우수한 효율성, 금속 표면의 높은 흡수율, 낮은 원가 등과 같은 장점이 있다^[3,4]. 또한 다이오드 레이저에 의해 집광된 가우시안 형태의 빔 형상은 금속재료 표면에 대한 열처리 경화에 매우 적합한 것으로 알려져 있다^[5]. 그러나 이러한 다이오드 레이저는 빔을 고밀도로 집광하여 사용하기 때문에 일정한 수명시간을 초과하는 경우 열처리 특성이 급격하게 불량해지는 근본적인 취약점을 갖고 있다^[6]. 그러나 이와 같은 단점에도 불구하고 특히 고

Corresponding Author : dhjang@inhac.ac.kr

Tel: +82-32-870-2156, Fax: +82-32-870-2557

출력 다이오드 레이저를 이용한 표면 경화는 높은 열전도율로 인하여 상대적으로 작은 열변형이 발생하고 유연한 제어가 가능하기 때문에 표면처리 분야에서 중요한 역할을 담당하고 있다^[7-9].

이러한 고출력 다이오드 레이저에 대한 기계적 특성에 따라 현재까지 금속표면에 대한 레이저 열처리와 관련된 기술에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. Zhu^[2] 등은 광섬유와 연계된 다이오드 레이저에 대해 광학계를 이용한 가우시안 형태의 레이저 빔의 균일화 특성에 관한 연구를 진행하였다. Alikhani^[1] 등은 $10^3 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 범위의 출력강도를 갖는 다이오드 레이저에 대한 광학계(optic system) 레이아웃을 제안하고 표면경화용 로봇 시스템에 적용하였다. 이를 통하여 결상면(focal plane)으로부터 거리에 따른 빔의 형상과 강도를 모의실험하고 실험결과와 비교하였다. 국내에서는 Park^[10] 등이 다이오드 레이저에서 가우시안 빔의 회절현상에 의한 발산을 방지하고 시준(collimation)함으로써 최적화된 빔의 형상을 얻기 위해 적용된 마이크로렌즈 설계변수에 대해 연구하였다. 이외에도 국내에서는 주로 레이저 열처리를 이용한 표면경화에 대해 다양한 공정변수와 소재의 특성을 중심으로 연구가 진행되어 왔다^[9,11,12].

본 논문에서는 금속의 표면경화를 위한 고출력 다이오드 레이저 스택에 대해 최적화된 빔의 결상을 위한 다양한 광학계를 제안하였다. 결상된 빔에 대한 적합성을 판단하기 위하여 수치해석적 방법에 의한 모의실험을 하고 실험결과와 비교하였다. 또한 최종적으로 설계된 다이오드 레이저 광학계에 의한 헤드모듈을 제작하고 산업용 로봇시스템에 적용하여 자동차 금형에 대한 표면경화 실험을 통해 열처리 효율을 평가하였다.

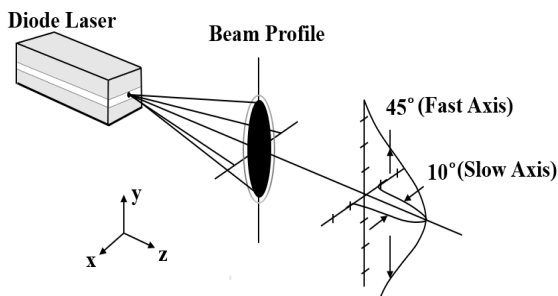


Fig. 1 Output of a typical diode laser^[14]

2. 다이오드 레이저 시스템 개요

다이오드 레이저는 Fig. 1과 같은 p-n 접합 다이오드에 전류를 인가하여 전자와 정공이 재결합하는 공핍영역(depletion region)에서 레이저가 발진하는 원리를 이용한 것이다. 그림에서 이러한 단일 다이오드 레이저에서의 방사는 보통 $1\mu\text{m}$ 정도의 협소한 발광부를 통해 이루어지며 타원형 빔의 형상으로 결상이 된다. 이때 광축에 대해 수직인 y축을 fast-axis라고 하며 반각 기준으로 45° 범위까지 발산각을 가지고 있으며 근사적인 가우시안 빔의 형태를 나타낸다. 이에 반하여 광축에 평행한 x축을 slow-axis라고 하며 반각 기준으로 최대 10° 범위까지의 발산각을 나타낸다^[13,14]. 일반적으로 y축(fast-axis)은 빔에 대한 발산각을 감소시켜서 회절에 의한 빔의 품질을 향상시킨다. 그리고 x축(slow-axis)은 다중 무늬구조로 되어 있는 중절모(top-hat-like) 형상에 대한 폭이 빔의 품질에 영향을 준다^[13].

일반적으로 하나의 단일 다이오드 레이저에 대한 출력은 mW 단위에 불과하다. 따라서 출력을 증가시키기 위하여 다수의 개별적인 이미터를 약 10 mm 길이정도 선형적으로 배열한 레이저 바 형태로 사용된다. 또한 이러한 레이저 바에 특수한 형태의 냉각채널을 적용하고 Fig. 2와 같이 높이 방향으로 적층된 다이오드 스택을 이용하여 방사되는 빔의 크기와 출력을 동시에 증가시킬 수 있다. 이때 연속적인 출력기준으로 수십 와트이상에서 수

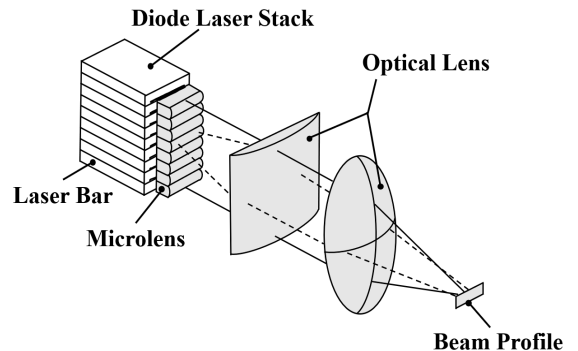


Fig. 2 Schematic of focusing of light from a diode laser stack^[13]

Table 1 The optical characteristics of the diode laser stack

Parameter	Characteristic
Maximum output power (W)	2,550
Maximum output power per bar (W)	150
Number of bars	17
Wavelength (nm)	975±5
Spectral width (FWHM) (nm)	< 6
Fast axis FWHM divergence (deg)	< 75
Slow axis FWHM divergence (deg)	8

십 킬로와트 범위를 일반적으로 고출력 다이오드 레이저로 분류한다^[14].

본 논문에서는 독일 D사의 다이오드 레이저 스택을 적용하였으며 광학적인 특성은 Table 1과 같다. 앞서 언급했듯이 전형적인 p-n 접합부의 수직 한 방향으로 방사되는 y축 방향의 빔에 대한 발산각은 극단적으로 거의 100°에 가깝다. 따라서 이러한 y축 방향에 대한 빔을 시준하기 위한 방안이 필요하고 광학적인 방법으로 가장 일반적으로 많

이 사용되는 것이 실린더형 마이크로 렌즈를 사용하는 것이다^[13]. 본 논문에 적용된 다이오드 레이저 스택은 이러한 빔의 특성을 고려하여 y축 방향에 마이크로 렌즈가 사용되었다. 그러나 x축 방향에 대해서는 발산각이 작고 이미터 구조특성상 y축 방향과 비교하여 시준 효율성이 상대적으로 작기 때문에 마이크로 렌즈가 적용되지 않는 구조로 되어있다.

3. 다이오드 레이저 광학계 설계

3.1 병렬형 다이오드 스택

다수의 레이저 바에서 방사되는 타원형의 빔을 집광하고 이러한 집광된 레이저 빔이 서로 다른 위치에서 적층된 레이저 스택에 의해 빔을 결합하여 적절한 형상으로 성장시키기 위해서는 렌즈 구조물과 같은 광학계가 필요하다^[13]. Li^[7] 등은 CO₂ 레이저와 고출력 다이오드 레이저에 대해 AISI 1045 소재에 대한 다른 공정조건에 따라 빔에 대한 에너지 강도분포를 실험하였다. 이때 이러한 실험결과 금속의 표면경화 열처리에 대한 가장 효율적이고 적합한 빔의 형상은 사각형 형상임을 보

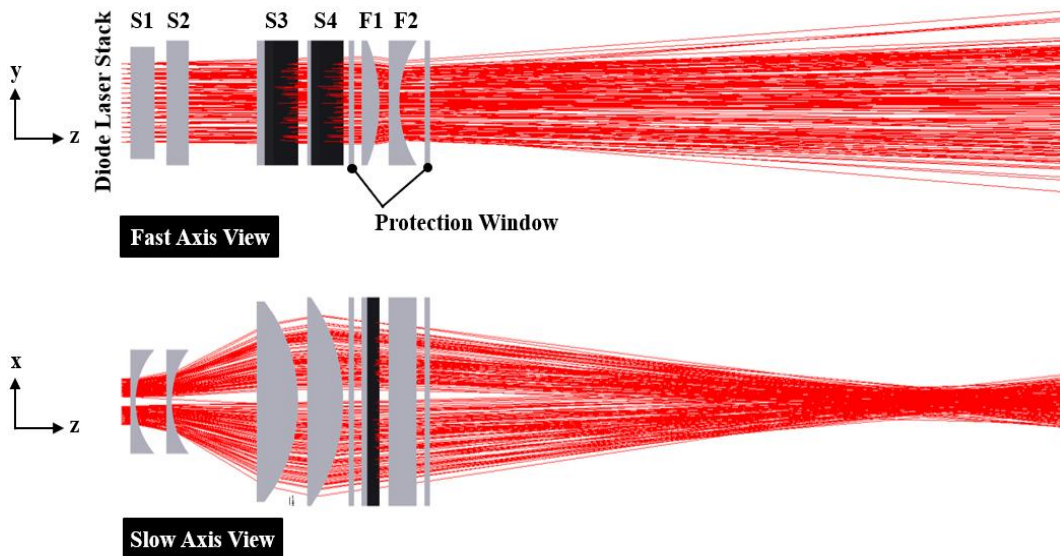


Fig. 3 Optical layout for the parallel diode laser stack

Table 2 Lens data for the parallel diode laser stack

Parameter	S1	S2	S3	S4	F1	F2
Cylinder lens shape	Positive	Positive	Negative	Negative	Negative	Positive
Radius of curvature(mm)	35.00	38.00	71.10	78.66	70.00	52.00
Distance from diode stack(mm)	4.94	25.00	75.00	103.00	133.00	148.00

여주었다.

Fig. 3은 병렬형 다이오드 스택에 적용된 광학계에 대한 레이아웃을 x축과 y축에 대해 각각 나타낸 것이다. 적용된 다이오드 스택은 2개를 병렬 구조로 연결하여 전체적인 레이저에 대한 총 출력이 5.1kW가 되도록 구성하였다. 그림에서 알 수 있듯이 x축에 대해서는 4개의 실린더 광학렌즈를 이용하여 빔의 집광을 제어하였으며 y축에 대해서는

2개를 사용하였다. 또한 레이저 헤드와 다이오드가 외부의 먼지나 이물질에 의해 혼입되어 오류가 발생하는 것을 방지하기 위하여 그림과 같이 2개의 보호유리(protection window)를 적용하였다.

Table 2는 이러한 병렬형 다이오드 스택에 대해 광학계 설계를 위해서 적용된 렌즈에 대한 설계 데이터를 나타낸 것이며 소재는 용융 실리카(fused silica)이다. 표에서 각각의 실린더 광학렌즈에 대

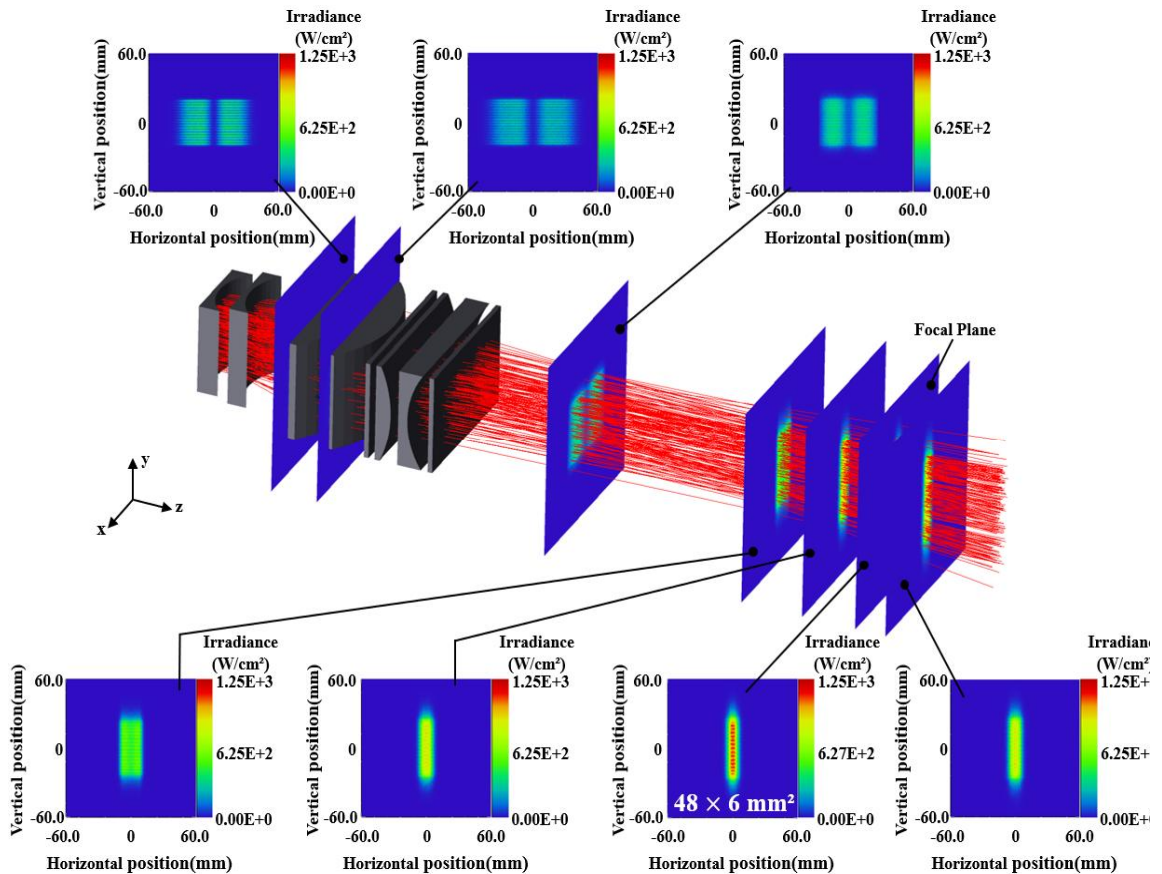


Fig. 4 Beam line and profile onto a plane in different propagation distances

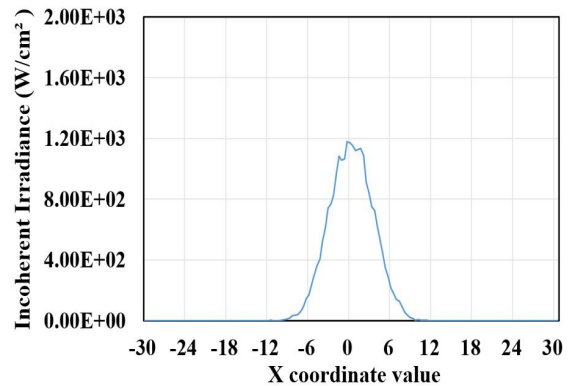
해 초점이 렌즈 전방에 위치할 경우에는 부호를 양으로 표시하였고 반대인 경우에는 음으로 나타내었다.

다이오드 레이저에 의해 방사된 빔이 초점렌즈를 통하여 집광될 때 빔의 품질을 평가하는 방법은 여러 가지가 있다. 그러나 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법은 요구되는 영역에 대한 빔의 출력양상을 측정하는 것이다^[13]. 따라서 본 논문에서는 설계된 광학계의 타당성을 검토하기 위해서 빔에 대한 광선 추적을 기반으로 결상상태를 표현하는 ZEMAX 프로그램을 이용하여 모의실험을 수행하였다. Fig. 4는 병렬형 다이오드 스택을 적용하여 광학렌즈에 의해 투상면에 결상된 빔의 형상변화를 순차적으로 나타낸 것이다. 그림에서 초점평면(focal plane)은 광학렌즈를 통하여 최종적으로 레이저 빔이 결상되는 영역으로 표면경화가 진행되는 거리를 의미한다. 본 논문에서는 열처리 적용대상인 자동차 금형의 일반적인 깊이를 고려하여 레이저 헤드의 정면부 끝단으로부터 280mm 위치를 기준으로 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 x축 방향으로 설계된 광학계에 의해 빔의 크기가 변하면서 집광도도 함께 달라지는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 y축에 대해서는 광학렌즈에 의한 빔의 크기가 일정한 경향을 보이고 있다. 이러한 이유는 y축 방향에만 적용된 마이크로 렌즈에 의해 이미터에서 방사되는 빔이 일정하게 시준되어 상대적으로 발산각에 대한 영향이 적은 것으로 판단된다. 그림에서 초점평면 위치에서 결상된 유효한 빔의 형상에 대한 크기는 $48 \times 6 \text{ mm}^2$ 으로 나타났으며 y축 방향으로 결상된 빔의 강도가 불균일하게 나타났다.

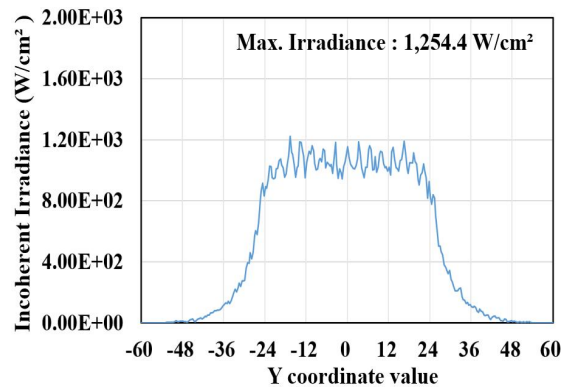
Fig. 5는 초점평면에서 결상된 빔의 강도분포를 x축과 y축 방향에 대해 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 x축 방향에 대해서는 근사적인 가우시안 빔의 형상을 나타내지만 강도의 중첩효과에 의한 중절모 형상은 보이지 않았다. 이에 반하여 y축 방향에 대해서는 중절모 형상에 대한 불균일성이 크게 나타났다. 이러한 이유는 y축 방향으로 다이오드 레이저 바가 적층되어 스택을 구성하더라도 각각의 레이저 바에 대해 방사되는 빔의 발산각이 서로 상이하여 빔의 집광에 의한 중첩이

일정하지 않은 것으로 판단된다. 또한 x축과 y축 방향에 대한 빔이 방사되는 시작점의 차이로 인한 결상되는 초점이 서로 달라지는 비점수차(astigmatism)의 영향도 있는 것으로 보인다.

본 논문에서는 모의실험에 대한 타당성을 검토하기 위하여 제안된 광학계를 이용하여 레이저 헤드 모듈을 제작하고 실험하였다. Fig. 6은 각각 제작된 레이저 헤드 모듈 시제품과 표면경화 열처리한 시편의 결과에 대한 것이다. 실험에 사용된 시편은 크기 $150 \times 150 \times 20 \text{ mm}$ 의 SKD 11이며 이송속도는 등속 스테이지를 이용하여 3mm/sec로 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 시편에 대한 열처리된 표면형상이 모의실험에 의한 빔의 강도분포와 유사하게 나타났다. 모의실험에서 y축 방향으로 빔의

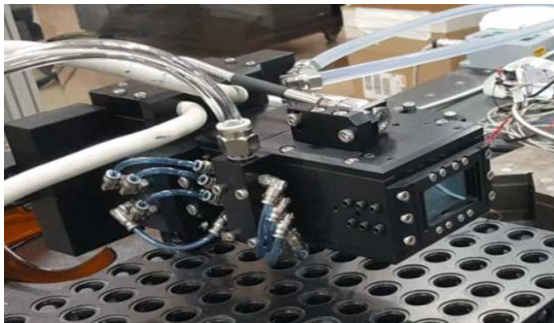


(a) slow-axis intensity distribution



(b) fast-axis intensity distribution

Fig. 5 The modeling results at the focal plane(parrel diode laser stack)



(a) diode laser head module



(b) laser hardening on SKD 11

Fig. 6 Experimental prototype and specimen

강도분포가 불균일하게 나타났지만 시편의 전도에 의한 자체적인 냉각효과로 소실될 것으로 예상하였다. 그러나 결과적으로 층상형태로 나타나는 빔의 강도가 열전도 효과를 초과할 만큼 크게 나타나서 개선하기 위한 새로운 방법의 광학계를 설계하게 되었다.

3.2 직렬형 다이오드 스택

고출력 다이오드 레이저를 용접이나 금속의 표면의 열처리에 사용하기 위해서 일반적으로 가장 이상적인 빔의 형상은 중절모 형상으로 구성된 균일한 강도분포를 갖는 것이다. 앞에서 언급했듯이 y축에 대해서는 빔의 중앙이 협소하고 좌우 끝단이 길게 나타나는 근사적인 가우시안 빔의 형상을 나타낸다. x축에 대해서는 공궤영역에서 멀어짐에 따라 빔의 크기가 증가하고 이와 함께 빔의 강도가 넓어지면서 빔의 중첩이 발생하여 슈퍼 가우시안 형태의 빔 형상을 나타낸다^[13].

앞서 설계된 다이오드 스택을 병렬로 연결하는 경우에는 y축 보다 상대적으로 고차원의 빔 형상 모드를 갖고 있는 x축에 대한 제어가 더욱 영향을

많이 받고 어려움이 있는 것으로 판단되었다. 따라서 상대적으로 집광제어에 대한 난이도가 낮고 마이크로 렌즈에 의해 이미 시준되어 있는 y축 방향에 대해 광학계를 이용한 집광방안을 고려하게 되었다. Fig. 7은 본 논문에서 제안한 직렬형 다이오드 스택에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 그림과 같이 2개의 다이오드 레이저 스택을 대각선 방향에 대해 대칭형태로 배치하였다. 이때 다이오드 레이저 스택에서 각각 방사된 빔을 프리즘 거울(prism mirror)을 이용하여 굴절하면 직렬로 연결한 방법과 동일하게 집광되는 효과가 있다. 이러한 구조는 직접적으로 다이오드 스택을 y축 방향에 대해 직렬로 배열하는 방사하는 방법과 비교하여 다이오드 스택의 냉각채널 등과 같은 구조물에 의한 빔의 간섭차이를 방지할 수 있다. 적용된 다이오드 레이저 스택은 광출력 범위에 대한 유연성을 확보하고 표면처리 이외에 다양한 공정에 적용하기 위한 목적으로 200W 레이저 바가 20개 적층된 4kW 출력의 다이오드 스택을 적용하였다. 그 이외에 광학적 특성은 앞서 사용된 다이오드 레이저 스택과 동일하며 2개의 스택 사용으로 전체적인 총 출력은 8kW이다.

Fig. 8은 제안된 직렬형 다이오드 스택에 대해 광학계의 레이아웃과 빔 광선을 각각의 축에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 다이오드 레이저 스택과 프리즘 거울과의 거리는 20mm이며 x축과 y축에 대해 각각 2개와 3개의 실린더 광학 렌즈를 이용하여 빔에 대한 집광을 제어하였다. 고출력 다이오드 레이저를 이용하여 금속표면을 열처리 또는 가공하는 경우에는 표면에 대한 레이저의 반사광

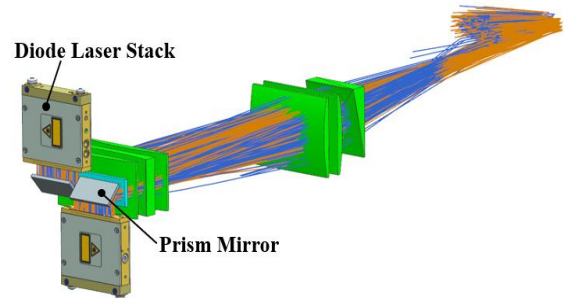


Fig. 7 Schematic diagram for the serial diode stack

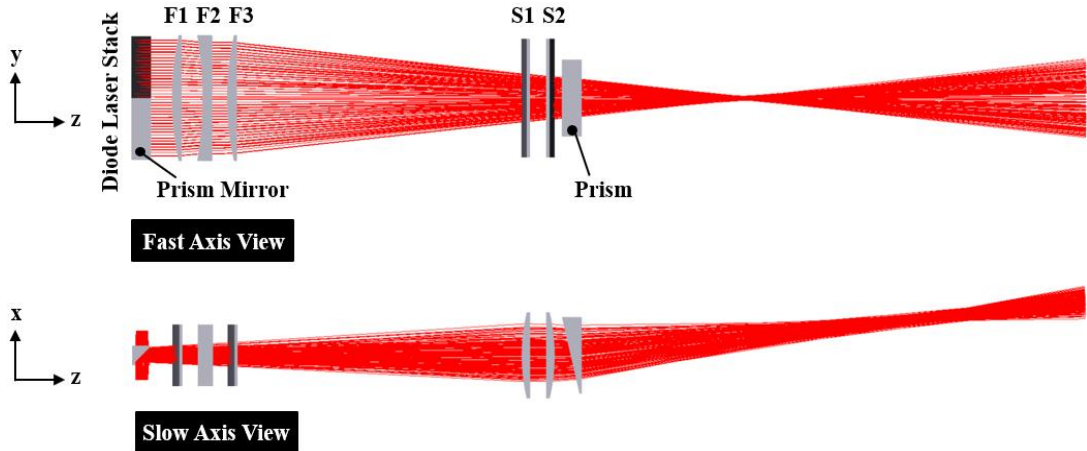


Fig. 8 Optical layout for the serial diode laser stack

으로 인하여 헤드모듈의 열적 파손이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 회피하기 위하여 앞서 설계된 병렬형 다이오드 레이저 스택을 적용한 경우에는 표면처리 영역에 대한 헤드모듈의 경사각 (tilting angle) 적용을 고려하였다. 그러나 이러한 방법은 상대적으로 다관절 로봇을 이용하여 형상이 복잡한 대상부품에 적용하는 경우에는 표면처리 경로 추출에 대한 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 그림과 같이 광학계의 마지막 단계에서 프리즘을 이용하여 레이저 빔에 대한 광선을 일정한 각도로 굴절 시키는 방법을 적용하였다.

Table 3은 이러한 직렬형 다이오드 스택에 대해 광학계 설계를 위해서 적용된 렌즈와 프리즘에 대한 데이터를 나타낸 것이며 광학계 소재는 앞서 사용했던 렌즈의 소재와 동일하다. 표에서 알 수 있듯이 레이저 빔의 굴절을 위해 사용된 프리즘은 직각 삼각형 형상으로 굴절각이 6°가 되도록 구성

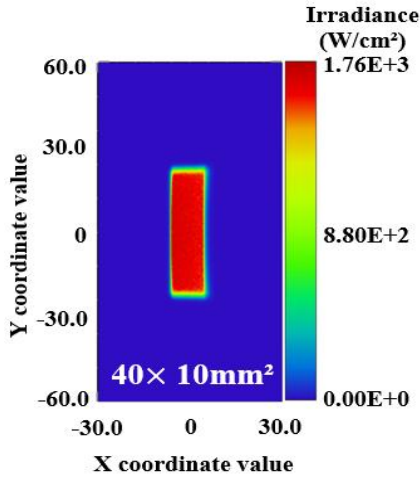
하였다.

Fig. 9는 광선추적 모의실험 결과에 의해 초점 평면에 결상된 빔의 형상과 강도분포를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 초점평면에 결상된 빔의 유효영역은 $40 \times 10 \text{mm}^2$ 으로 나타났으며 병렬 다이오드 스택을 사용했을 경우와 비교하여 상대적으로 빔의 집광도가 높게 나타났다. 또한 강도분포에 대한 결과에서도 x축과 y축 모두 강도의 중점으로 발생한 중절모 형상에 대해 균일도가 개선되었음을 알 수 있다. 특히 x축에 슈퍼 가우시안 빔의 형상을 나타내는 빔의 폭에 대한 품질이 향상되어 x축에 대한 제어 효과가 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 제안된 광학렌즈에 대한 구성이 적합한 것으로 판단되어 시제품을 제작하고 시험을 수행하였다.

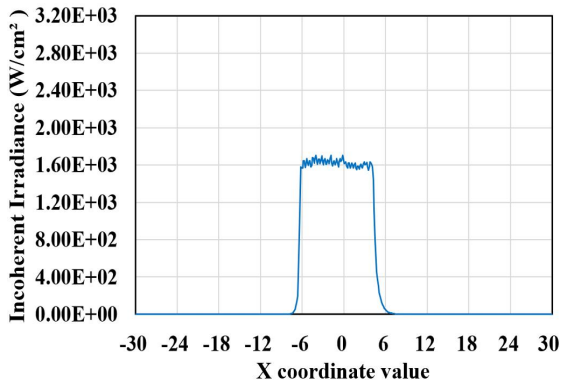
Fig. 10은 제작된 레이저 헤드모듈에 의해 초점 영역에 나타난 빔의 형상에 대한 것이다. 사용된 시편은 일반적인 금속재료 대신에 문헌^[13]을 참조

Table 3 Lens data for the serial diode laser stack

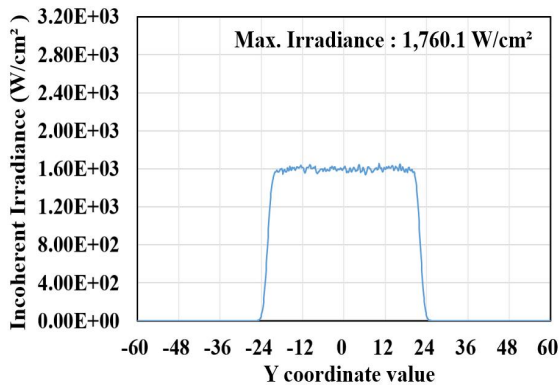
Parameter	F1	F2	F3	S1	S2	Prism
Cylinder lens shape	Positive	Negative	Positive	Positive	Negative	Trigonal $\omega=6 \text{ deg}$
Radius of curvature(mm)	235.00	300.00	235.00	150.00	150.00	
Distance from prism mirror(mm)	25.00	50.00	70.00	310.00	330.00	350.00



(a) beam profile



(b) slow-axis intensity distribution



(c) fast-axis intensity distribution

Fig. 9 The modeling results at the focal plane(serial diode laser stack)

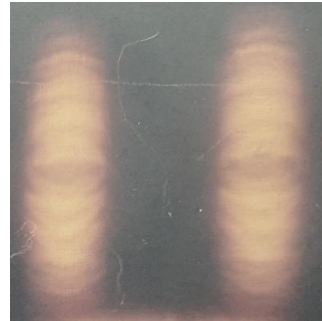


Fig. 10 Experimental result of the beam profile(serial diode laser stack)

하여 빔의 형상 확인에 적합한 흑색 무광으로 아노다이징 처리된 알루미늄 판재를 이용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 모의실험 결과와 다르게 빔이 중앙부를 기준으로 대칭적인 형상을 나타내면서 스마일 효과(smile effect)에 의해 빔의 집광도가 산란되었다. 여기에서 스마일 효과는 y축 방향에 대해 이미터 냉각채널에서의 구조적 편차와 열변형으로 발생하는 위치오차에 의한 빔의 굴곡 각도 오류(angular error)로서 이미터의 양끝단에서 중심방향으로 변형각이 감소하는 형태로 나타난다. 이러한 스마일 효과는 다이오드 레이저 바가 y축에 대해 적층되면서 각각 독립적인 변형 특성을 나타내기 때문에 제조공정으로 완전히 제거하기는 불가능하다. 따라서 이러한 스마일 효과를 효율적으로 제어하여 균일한 빔의 형상으로 얻기 위한 추가적인 광학계 설계가 필요하게 되었다.

3.3 초점렌즈 적용 직렬형 다이오드 스택

Fig. 11은 앞서 적용된 직렬형 다이오드 스택에 대해 개선된 광학계의 레이아웃과 빔 광선을 각각의 축에 대해 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 빔에서 발생한 스마일 효과를 제거하기 위하여 y축 방향에 별도의 초점 렌즈를 적용하였다. 이러한 이유는 레이저 빔이 집광되는 영역에 일정한 곡률의 초점렌즈를 추가함으로써 스마일 효과에 의한 각도 오류를 보정하고 빔의 밀도차이를 균일하게 하기 위한 목적이다.

Table 4는 초점렌즈를 이용한 직렬형 다이오드 스택에 대해 광학계 설계를 위해서 적용된 광학렌

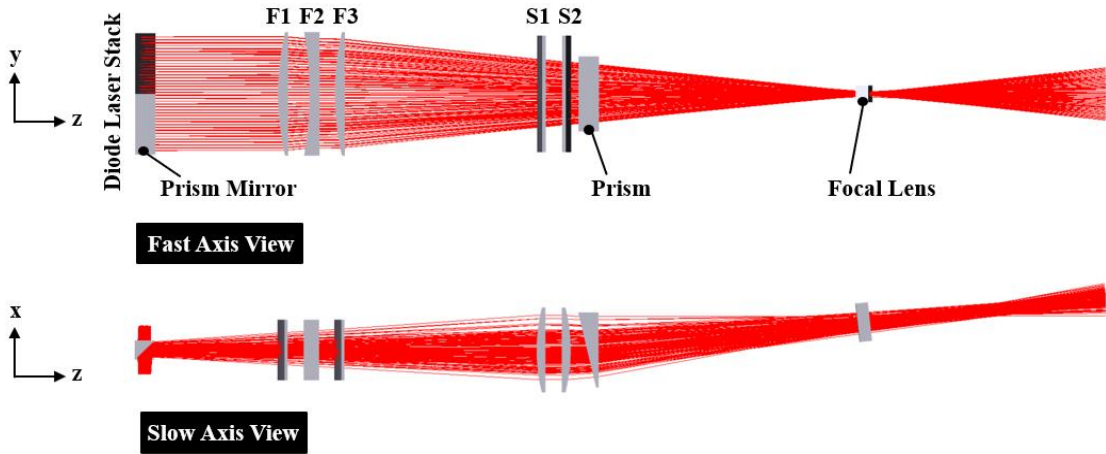


Fig. 11 Modified optical layout for the serial diode laser stack

즈들에 대한 데이터를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 신규로 적용된 초점렌즈를 제외하고 나머지 광학렌즈에 대한 곡률반경은 기존과 동일하다. 이에 반하여 프리즘 거울에서의 거리는 y축 방향으로 빔의 집광도를 제어하는 3개의 광학 렌즈에 대해서만 기존보다 상대적으로 크게 설정하였다.

Fig. 12는 광선추적 모의실험 결과에 의해 초점 평면에 결상된 빔의 형상과 강도분포를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 초점평면에 결상된 빔의 유효영역은 $30 \times 10 \text{mm}^2$ 으로 나타났으며 빔의 면적이 감소함에 따라 초점렌즈를 사용하지 않는 경우와 비교하여 상대적으로 빔의 집광도가 높게 나타났다. 또한 그림에서 y축 방향에 대한 빔의 결상된 높이가 감소함에 따라 y축 방향뿐만 아니라 x축에 대한 빔의 집광도도 함께 증가함을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 빔에 대한 중절모 형상과 균일도 분포는 초점 렌즈를 사용하지 않았을 경우와 유사하게 나타났다.

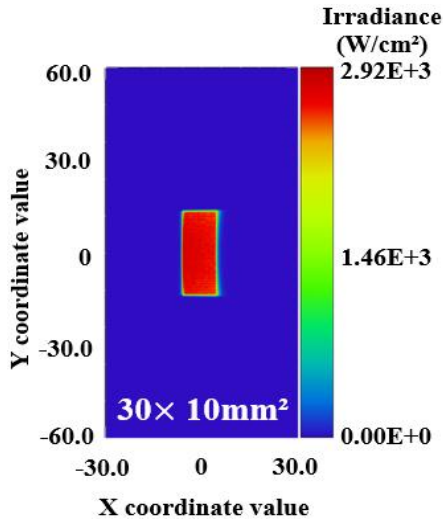
Fig. 13은 흑색 무광 아노다이징 처리된 알루미늄 판재에 대해 제작된 레이저 헤드모듈을 이용하여 빔이 결상된 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 스마일 효과에 의한 빔의 산란이 제거되고 밀도차 이도 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 직렬형 다이오드 스택을 적용하는 경우에는 빔이 집광되는 영역에 y축 방향으로 별도의 초점 렌즈를 적용하는 것이 유효함을 알 수 있다.

4. 로봇 시스템 적용 및 열처리 실험

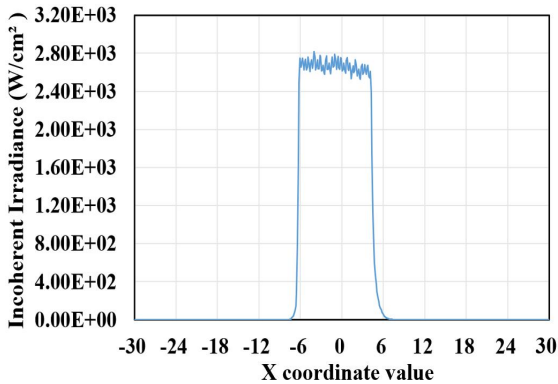
산업체 현장에서 위치결정, 자동화된 공작물 공급, 자동 측정 등을 제공하는 열처리 공정용 로봇 시스템은 활용도가 높다는 것이 증명되고 있다. 또한 이러한 로봇 공정은 복잡한 작업경로에 대한 기술적 해결방안 뿐만 아니라 레이저 강도에 대한 공정변수를 실시간으로 분석하여 데이터를 제공하는 기능도 가질 수 있다^[15]. 이때 상대적으로 형상이 복잡한 자동차 차체 금형에 대해 열처리 작업을 산업용 다관절 로봇을 이용하여 적용하기 위해

Table 4 Modified lens data for the serial diode laser stack

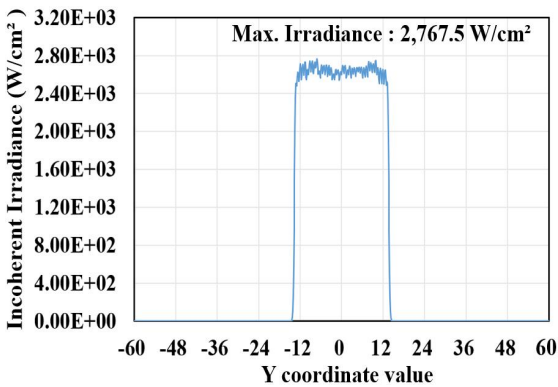
Parameter	F1	F2	F3	S1	S2	Prism	Focal lens
Cylinder lens shape	Positive	Negative	Positive	Positive	Negative	Trigonal $\omega=6 \text{ deg}$	Negative
Radius of curvature(mm)	235.00	300.00	235.00	150.00	150.00		70.00
Distance from prism mirror(mm)	105.00	130.00	150.00	310.00	330.00	350.00	565.00



(a) beam profile



(b) slow-axis intensity distribution



(c) fast-axis intensity distribution

Fig. 12 The modeling results at the focal plane (modified serial diode laser stack)

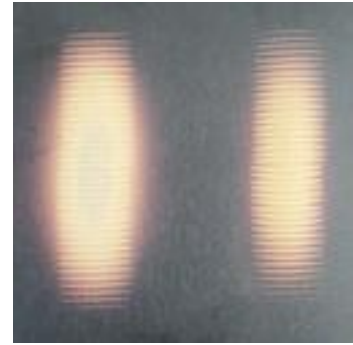


Fig. 13 Experimental result of the beam profile(modified serial diode laser stack)

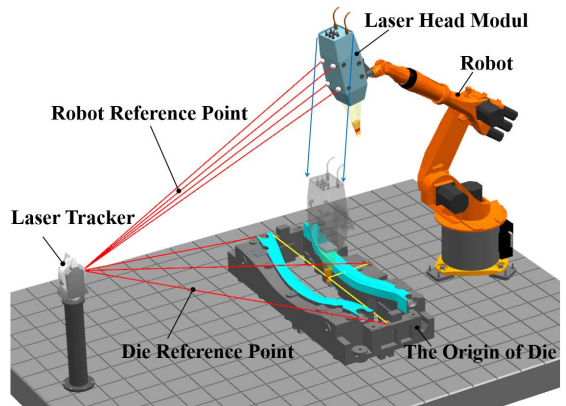


Fig. 14 Schematic diagram of robot system

서는 적절한 방법의 자동화된 공정이 필요하다^[16].

본 논문에서는 앞서 최종적으로 제작된 레이저 헤드 모듈을 산업용 다관절 로봇에 적용하였다. 이때 일반적인 학습(teaching)을 이용한 로봇의 운용 방식대신에 금형의 형상코드(G code)와 이동식 레이저 트래커(portable laser tracker)을 이용한 무학습(non-teaching) 방식을 이용하였다. Fig. 14는 산업용 다관절 로봇과 이동식 레이저 트래커를 이용한 레이저 열처리 장치에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 그림과 같이 먼저 레이저 트래커를 이용하여 표면 경화 대상인 금형에 대해 수치제어 가공 원점 데이터를 인식한다. 다음으로 동일한 방법으로 레이저 헤드 모듈에 대해서도 로봇의 구동에 필요한 기계원점 데이터를 추출한다. 이때 이러한 로봇의 기계원점에 대한 데이터를 레이저 트

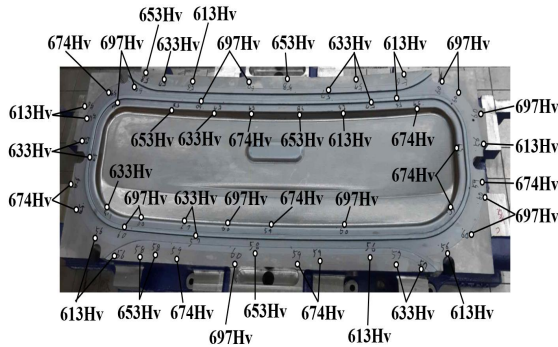


Fig. 15 Hardness distribution after laser hardening

래커에 내장된 좌표변환 행렬 프로그램을 이용하여 금형의 가공원점을 기준으로 정렬한다. 따라서 표면가공을 위한 로봇의 구동 경로는 금형의 가공을 위해서 이미 저장된 형상코드를 이용함으로써 상대적으로 로봇의 수동학습에 필요한 시간을 절감할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 15는 자동차용 차체 판넬을 성형하기 위한 금형에 대해 제안된 다이오드 레이저 로봇시스템을 이용하여 열처리한 결과이다. 사용된 금형에 대한 소재는 저합금 냉간 금형용강인 HMD1이며 이송속도는 3mm/sec이고 열처리 온도는 1,070°C로 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 열처리가 완료된 후에 경도값은 최소 577Hv에서 최대 697Hv까지의 범위를 나타내었다. 일반적으로 HMD1 소재에 대한 열처리 전의 경도값이 160Hv~190Hv 범위임을 고려할 때 열처리 효율은 최대 3배 이상으로 나타났다. 또한 금형의 비드부와 라운드부에 대해서도 균일한 경도분포를 나타내어 적용된 표면경화가 적절한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문은 금속재료의 표면경화 열처리에 사용되는 고출력 다이오드 레이저 헤드 장치의 개발 프로세스에 관한 것이다. 이를 위하여 다양한 형태의 다이오드 스택 배열에 따른 광학설계 방법을 제안하였으며 모의실험을 통해 검증하고 시제품을 제작하여 실험하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 병렬형 다이오드 스택을 적용하여 광학계를 설계한 결과 x축과 y축에 의한 비점수차에 의한 영향으로 빔의 결상품질이 저하되었다.
- (2) 프리즘 거울의 굴절을 이용한 직렬형 다이오드 스택을 적용하는 경우 레이저 바의 구조적인 특성에 의해 경계면에서 발생하는 변형에 의한 스마일 효과가 발생하였다.
- (3) 스마일 효과는 레이저 빔의 집광도를 산란시키며 제안된 초점렌즈 광학계 설계를 적용하여 제거할 수 있었다.
- (4) 직렬형 다이오드 스택을 적용한 광학계가 병렬형 다이오드 스택과 비교하여 상대적으로 레이저 빔에 대한 강도분포가 균일하고 이상적으로 나타났다.
- (5) 제안된 레이저 열처리 헤드 모듈을 무학습 방식의 산업용 로봇 시스템에 적용한 결과 공정 준비시간을 단축하고 표면경화 효율이 적절한 것으로 판단되었다.

후 기

“이 논문은 중소벤처기업부 중소기업기술개발 사업에 의해 수행된 결과를 활용하여 2020년도 인하공업전문대학 학술연구사업 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Alikhani, S. T., Zahabi, M. K., Torkamany, M. J., & Nabavi, S. H., “Time-Dependent 3D Modeling of the Thermal Analysis of the High-power Diode Laser Hardening Process,” *Optics and Laser Technology*, Vol. 128, pp. 1-10, 2020.
2. Hongbo, Z., Xihong, F., Shengli, F., Lei, L., Xingchen, L., and Yongqing, N., “The Conversion from a Gaussian-like Beam to a Flat-Top Beam in the Laser Hardening Processing Using a Fiber Coupled Diode Laser Source,” *Optics and Laser Technology*, Vol. 125, pp. 1-5, 2020.
3. Witte, U., Schneider, F., Traub, M., Hoffmann, D., Drovs, S., Brand, T., & Unger, A., “kW-Class

- Direct Diode Laser for Sheet Metal Cutting Based on DWDM of Pump Modules by Use of Ultra-steep Dielectric Filters,” *Optics Express*, Vol. 24, No. 20, pp. 22917-22929, 2016.
4. Santhanakrishnan, S., Kong, F., & Kovacevic, R., “An Experimentally Based Thermo-Kinetic Hardening Model for High Power Direct Diode Laser Cladding,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 7, pp. 1247-1259, 2011.
 5. Zhu, H., Hao, M., Zhang, J., Ji, W., Lin, X., Zhang, J., & Ning, Y., “Development and Thermal Management of 10kW CW, Direct Diode Laser Source,” *Optics and Laser Technology*, Vol. 76, pp. 101-105, 2016.
 6. Monjardin, J. F., Nowak, K. M., Baker, H. J. and Hall, D. R., “Correction of Beam Errors in High Power Laser Diode Bars and Stacks,” *Optics Express*, Vol. 14, No. 18, pp. 8178-8183, 2006.
 7. Li, R., Jin, Y., Li, Z. and Qi, K., “A Comparative Study of High-Power Diode Laser and CO₂ Laser Surface Hardening of AISI 1045 Steel,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 9, pp. 3085-3091, 2014.
 8. Merklein, M., Johannes, M., Lechner, M. and Kuppert, A., “A Review on Tailored Blanks Production, Applications and Evaluation,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, pp. 151-164, 2014.
 9. Choi, S. H., Cheong, S. D., Kim, G. M., Yang, S. C. and Kim, J. G., “Characteristics of Metal Surface Heat Treatment by Diode Laser,” *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, No. 3, pp. 16-23, 2007.
 10. Park, S. S., Hwang, Y., Lee, K. Y. and Won, J. H., “Design and Development of Asymmetry Glass Array Lens,” *Journal of the Korean Society for Precision Eng.*, Vol. 25, No. 12, pp. 39-46, 2008.
 11. Lee, T. Y., Lim, B. C. and Park, S. H., “A Study on the Hard Surfacing Characteristics of STS420J2 by Using Diode Laser,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 15, No. 9, pp. 5460-5466, 2014.
 12. Lee, K. R., Yang, Y. S., Hwang, C. Y., Park, E. K. and Yoo, Y. T., “Characteristics of Surface Hardening of Nd:YAG Laser According to the Diameter Variation of SM45C Cylindrical Bar,” *Journal of the Korean Society for Precision Eng.*, Vol. 30, No. 5, pp. 499-506, 2013.
 13. Bachmann, F., Loosen, P. and Poprawe, R., *High Power Diode Lasers*, Springer, pp. 37-175, 2007.
 14. Kennedy, E., Byrne, G. and Collins, D. N., “A Review of the Use of High Power Diode Lasers in Surface Hardening,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 155, No. 156, pp. 1855-1860, 2004.
 15. Babic, M., Lesiuk, G., Marinkovic, D. and Cali, M., “Evaluation of Microstructural Complex Geometry of Robot Laser Hardened Materials Through a Genetic Programming Model,” *Procedia Manufacturing*, Vol. 55, pp. 253-259, 2021.
 16. Park, K. J. and Youn, S. H., “Development of the Diode Laser Heat Treatment Robot System Based on OLP Simulator,” *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 5, pp. 8-14, 2015.