

CW Nd:YAG 레이저를 이용한 중탄소강의 열처리특성

신호준(조선대 대학원 정밀기계공학과), 유영태(조선대 기전공학과), 안동규(조선대 기계공학과), 임기건(전남대 물리학과)

Heat treatment characteristics of medium carbon steel by CW Nd:YAG Laser

H. J. Shin(Precision Mechanical. Eng. Dept., CHU), Y. T. Yoo(Mechatronics. Eng. Dept., CHU),
D. G. Ahn(Mech. Eng. Dept., CHU), K. Im(Physics. Dept., CNU)

ABSTRACT

Laser surface hardening is an effective technique used to improve the tribological properties and also to increase the service life of automobile components such as camshafts, crankshafts, lorry brake drums and gears. High power CO₂ lasers and Nd:YAG lasers are employed for localized hardening of materials and hence are of potential application in the automobile industries. The heat is conducted rapidly into the bulk of the specimen causing self-quenching to occur and the formation of martensitic structure. In this investigation, the microstructure features occurring in Nd:YAG laser hardening SM45C steel are discussed with the use of optical microscopic and scanning electron microscopic analysis. Moreover, This paper describes the optimum of the processing parameters for maximum hardened depth of SM45C steel specimens of 3mm thickness by using CW Nd:YAG laser. Travel speed was varied from 0.6m/min to 1.0m/min. The maximum hardness and case depth fo SM45C steel are 780Hv and 0.4mm by laser hardening.

Key Words : Laser heat treatment(레이저 열처리), Medium Carbon steel(중탄소강), heat treatment optical system(열처리광학계), Micro hardness profile(경도분포), Heat Input capacity(입열량)

1. 서론

레이저빔을 이용한 표면경화기술은 레이저 출력이 커지고 안정화되어 감에 따라 그 응용범위가 확대되고 있다. 종래의 화염경화법이나 침탄법 등과 같은 방법보다 처리시간이 빠르고 독특한 조적을 얻을 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 레이저빔을 이용하는 표면열처리는 내부열 때문에 발생하는 응력, 변형, 균열 등을 최소화 할 수 있다. 레이저빔을 이용할 경우 부품이 복잡하거나 국소적인 부분도 열처리가 가능하고, 정지질량이 없는 열원을 사용하기 때문에 부품을 오염시키지 않고 가공할 수 있는 특징을 가지고 있다. 레이저를 이용하면 국부적인 표면경화가 가능하다.

고밀도 에너지 열원으로서 재료 표면을 급속히 가열하는 레이저표면경화는 내부로 열이 전도되면서 급속하게 냉각하는 자기 냉각 효과를 이용한다. 특

히 레이저빔의 에너지밀도가 충분히 높으면 열이 재료내부로 전도되어 손실되는 것보다 더 빠른 속도로 표면에 축적되기 때문에 표면층의 온도가 순식간에 상승한다. 동시에 매우 짧은 시간 내에 표면의 얇은 층은 오스테나이트화 온도에 도달하는 반면 부품의 중심부는 온도가 오르지 않고 냉각된 상태에 있게 된다. 이는 기존의 고주파열처리에 비해서 급열도가 높아 내부로의 열 확산이 억제되기 때문에 표면경화시 구조물이나 부품의 변형을 최소한으로 억제시킨다. 그리고 급속하게 가열된 뒤 빠르게 냉각되기 때문에 다른 표면경화법보다 부품의 변형이 적으면서 높은 경도값을 가질 수 있는 특징이 있다. 이와 같은 장점 때문에 부품의 뒤틀림을 극소화해야 하는 부품, 정확한 모양을 유지하면서 부분적인 경화가 요구되는 부품, 경화될 구역으로 열을 제한하도록 하는 것이 힘들어 과도한 뒤틀림을 주는 경우, 경화구역이 전체에 비하여 작고 열처리 열원을 접근시키기 어려

운 부품 등의 열처리에 매우 적합하다.

그 예로 레이저를 이용하면 탄소강과 AISI 1045 강의 마모성과 피로수명이 증가⁽²⁾되고, SAE1015를 레이저로 표면경화했을 때 표면경화처리를 하지 않았을 때보다 피로인장력이 높게 나타났다.⁽³⁾ Janez는 주철 500-7재질을 CO₂레이저를 이용하여 레이저표면용융시 발생하는 잔류응력과 변형량을 실시간으로 측정하는 기술을 연구⁽⁴⁾하였다. 그러나 대부분 연구가 CO₂레이저를 이용하고 있으며, 열처리광학계를 구성하지 않고 디포커싱에 의한 레이저열처리를 하고 있다.

그래서 본 연구에서는 SM45C를 디포커싱으로 열처리한 다음 열처리광학계를 제작하여 경도깊이, 경화폭, 경도크기를 비교하고자 한다. 경화폭과 경화깊이가 균일하게 열처리 되도록 구성된 열처리 광학계의 특성을 분석하여 제작한 열처리용렌즈특성을 규명하였다. 레이저빔으로 열처리할 때 공정변수로는 레이저빔 출력, 레이저빔 이송속도, 보호가스 분사압력, 초점거리, 재료의 성분, 레이저빔 흡수율 및 반사율, 레이저 파장등 많은 변수가 있다. 그러나 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저를 사용하고 시편은 SM45C를 사용하기 때문에 이 두 변수는 고정되어 있어 레이저빔의 출력, 빔 이송속도, 레이저빔의 초점거리 및 보호가스 분사유량의 변화에 대한 경화깊이, 경화폭, 표면거칠기, 표면경도값, 미세조직의 변화를 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

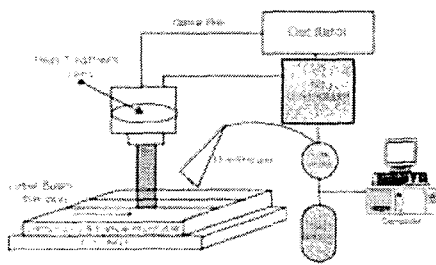


Fig. 1(a) Schematic of a laser Heat treatment

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06 μm 이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저빔은 직경이 600 μm 인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔 발산각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다. 레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y,

z축의 이송거리는 1000? 00? 00mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 μm , z축에 대한 위치정밀도는 1 μm , 반복정밀도는 8 μm 이다. 본 실험을 위해 제작한 레이저열처리용 가공헤드의 렌즈초점거리는 195mm이고, Size는 1.6? .6"이다. 시편을 표면경화 시킬 때 표면과 대기중의 오염물질사이의 상호작용을 방지하기 위해서 Ar가스를 45?각도 압력을 1 ~ 3bar 정도로 분사시킨다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도 및 레이저열처리 광학계의 개략도를 각각 Fig. 1(a), (b)와 같다.

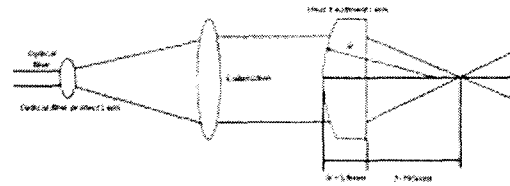


Fig. 1(b) Schematic diagram of laser heat treatment optical system:-

2.2. 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 일반공작기계나 금형에서 많이 사용되는 SM45C를 사용하였다. 시편의 화학 조성분은 Table.1과 같다.

실험에 사용한 시편의 크기는 시편 자체에서 자기 퀴칭(self-quenching)을 시켜야 하기 때문에 어느 정도의 임계질량과 두께를 가지고 있어야 한다. 먼저 시편크기를 100? 0? mm로 고정하여 열처리실험하였다. 레이저 표면경화 시키전에 시편의 표면을 연마기를 이용하여 Sand Paper로 연마하고 아세톤 세척후 레이저 빔을 조사시켰다.

Table 1 Chemical compositions of spicmens(%)

	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.42 ~ 0.48	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	≤ 30	≤ 0.35

레이저 열처리에 관련된 실험변수로는 레이저 출력, 레이저 파장, 레이저빔 이송속도, 레이저빔의 초점위치, 보호가스 종류 및 유량, 재료의 빔 흡수율 등이 있다.

그러나 본 연구에서는 Nd:YAG레이저를 사용하기 때문에 레이저 파장은 결정되어 있으므로 레이저빔의 출력, 빔의 이송속도를 변화시켜 경화깊이, 경도의 크기, 경화폭 등을 측정하여 비교하고자 한다.

디포커싱으로 레이저 표면경화처리한 결과와 비교하기 위해 열처리용 광학계를 구성하였다. 열처리를 위해 구성한 광학계는 Lambda Research Optics Inc.에 의뢰하여 제작한 것으로 원통형이다. 렌즈의 재질은 UV garde F.S.이고, 초점거리는 195mm이며, W?

(40? 0mm), tc(5.9mm), R(101.7mm)렌즈를 통과한 빔의 모양은 반타원형이다. 레이저표면경화 목적으로 구성된 광학계의 입열량을 분석하기 위해 초점거리 변화에 따른 시편표면에서의 초점면적의 변화를 실험하였다.

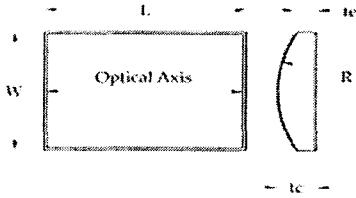


Fig. 2 Configuration of heat treatment lens

레이저빔을 이용해서 시편표면을 경화시킬 때 입열량에 따른 재료의 특성변화를 관찰하기 위해서 다음식을 사용하여 입열량을 산출하였다.

$$E = \frac{P}{\delta(a/b)} \cdot V (J/cm^2) \quad (1)$$

여기에서 P는 레이저출력, δ 는 침투깊이, a는 초점면의 단축, b는 초점면의 장축, V는 레이저빔 이동 속도이다.

표면경화 처리전 시편은 Sand Paper로 연마하기 때문에 그에 따른 표면용기를 관찰하여 표면처리후 표면용기의 변화를 관찰하였다. 경화깊이와 경화깊이 변화에 따른 경도측정을 위해 열영향을 주지 않는 저속절단기를 이용하여 시편의 단면을 절단해서 연마한 후 비커스 경도분포를 관찰하였다. 시편을 Polishing시켜 Vilella's시약으로 부식처리 한 다음 광학현미경을 이용하여 경화깊이와 미세조직을 측정하였고, 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기를 사용하여 0.5kg의 하중을 적용시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열처리광학계 에너지 밀도 특성

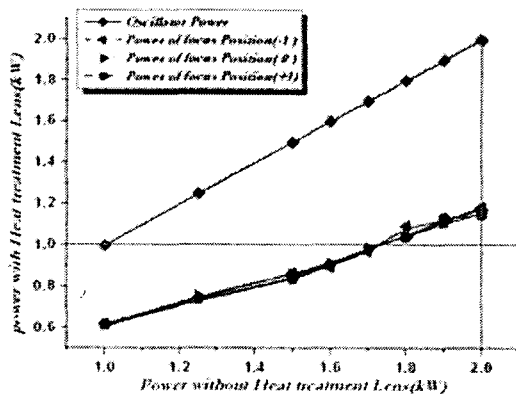


Fig. 3 The capacity efficiency for focal positions

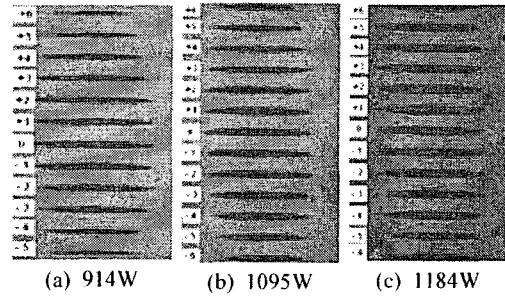


Fig. 4 The surface bead configuration of focus positions

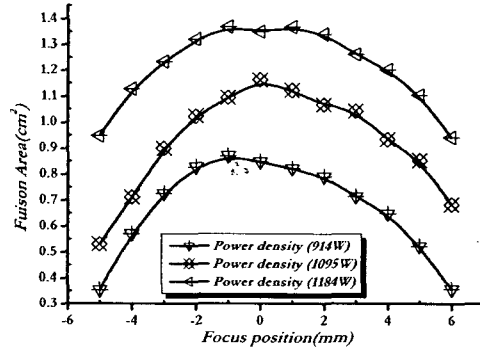


Fig. 5 A variety of Fusion area according to power density

본 실험에 이용한 렌즈는 초점위치에서 가우시안 빔 분포를 갖는 렌즈가 아니다. 그래서 실험에 사용하고 있는 레이저 발전기에서 출력값과 본실험을 위해 구성된 렌즈를 통과한 후 출력은 크기가 다를 것으로 판단하여, 열처리를 위해 구성된 렌즈를 통과한 후의 출력값을 파워미터로 측정된 출력값을 비교하기 위해 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에서 위쪽에 있는 실험값은 초점위치에서 레이저 출력밀도값이고, 아래에 있는 실험값은 초점위치를 포함하여 시편표면에서의 거리변화에 따른 열처리렌즈를 통과한 후의 출력밀도값이다.

Fig. 4는 출력변화에 따른 초점위치별 시편에 흡수되는 초점면의 변화를 분석하기 위해 각 위치에서 레이저빔을 180ms동안 조사한 실험한 결과이다. 출력변화에 따라 초점거리가 변하면 타원형모양의 초점면적에서 단축을 a, 장축을 b라고 했을 때 단축a의 변화보다 장축b의 변화율이 훨씬 크게 나타나고 있다. Fig. 5는 출력밀도별 초점위치에 따른 용융 면적을 나타내고 있다. 출력값이 작으면 초점위치가 0을 중심으로 초점거리가 바뀌면 용융면적이 작아지고, 초점면적이 가장 큰 초점 거리는 z=-2 ~ +2 사이였다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5의 그림에 의하면 열처리를 위한 렌즈를 레이저빔이 통과 했을 경우에는 가우시안 형태의 빔강도분포를 하고 있지 않고 있다. 열처리용 렌즈를 통과한 레이저빔의 출력은 레이저 발전기에서의 출력값의 55.4 ~ 62.1 % 정도였다. 이런 현상은 초점면이 작은 한점에 모이지 않고 타원형 형태로 되기 때문이다.

3.2 시편에 미치는 입열량과 경도특성

레이저로 표면경화할 때 보호가스의 영향을 분석하기 위해 공급하는 유량변화에 대한 경도깊이를 비교 실험하였다. 보호가스를 공급하는 노즐의 직경은 3mm 이고 보호가스를 공급하는 노즐은 레이저 중심을 기준으로 양쪽에서 45°각도로 공급하고 있다 시편에 공급되는 유량은 다음 식으로 계산된다.

$$Q = A Q = CA \sqrt{\left(\frac{P}{\rho_s}\right)} \quad \text{----- (2)}$$

위 식에서 A는 노즐의 단면적, C는 노즐속도계수, P는 압력, ρ_s 는 보호가스의 밀도이다.

열처리렌즈를 통과한 레이저출력이 1.095kW이고, 레이저빔 이송속도를 0.6m/min로 했을 때 초점거리별 보호가스유량변화에 대한 경도깊이를 Fig. 6에 나타냈다.

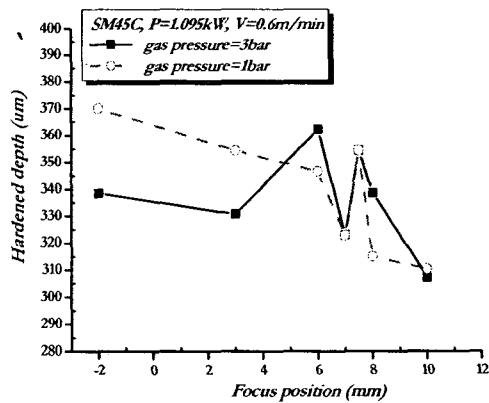


Fig. 6 The hardened depth according to focus positions

보호가스는 Ar을 사용하고 있는데 레이저의 열처리 특성은 급가열 급냉각에 의한 자체냉각효과를 이용하고 있다. 그림에 나타난 것처럼 공급압력이 3bar(절대압력)로 보호가스의 유량이 많을 경우 레이저빔에 의한 급가열하는 열량을 감소시켜 열침투깊이가 작게 나타나고 있다. 공급압력이 3bar일 경우 시편표면으로부터 초점거리가 멀어지면 보호가스의 영향이 줄어들어 침투깊이가 일시적으로 증가하고 있다. 그러나 레이저빔의 초점거리가

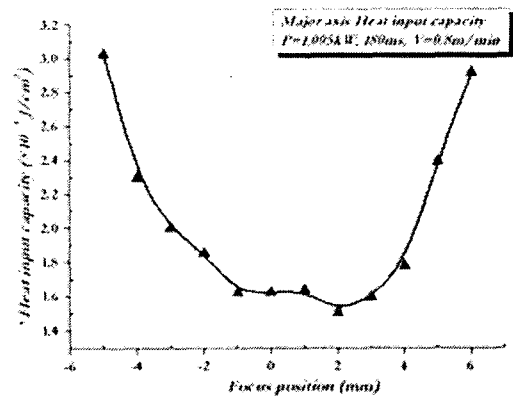


Fig. 7(a) Heat input capacity according to focus positions

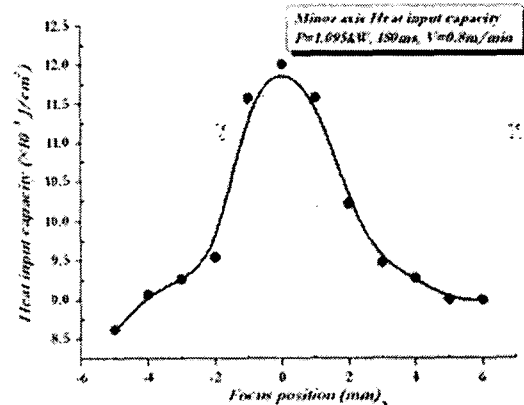


Fig. 7(b) Heat input capacity according to focus positions

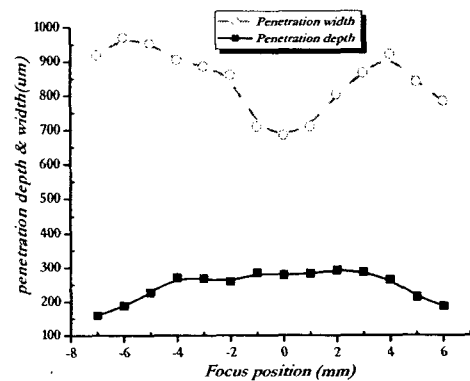


Fig. 8 The relation of penetration depth and width according to focus positions

멀어지면 입열량이 작아져 경도깊이가 감소하였다.

이 실험으로부터 레이저빔으로 열처리할 경우에는 대기중에 있는 산소로부터 산화되지 않을 정도로 대기압보다 약간 높은 압력으로 보호가스를 공급하는 것이 레이저열처리에 효율적이라고 판단한다.

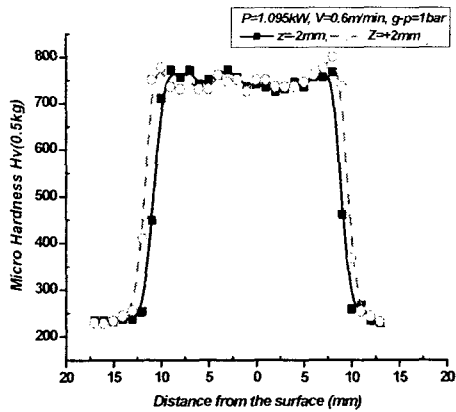


Fig. 9(a) Micro hardness profile of laser hardened zone for focus positions

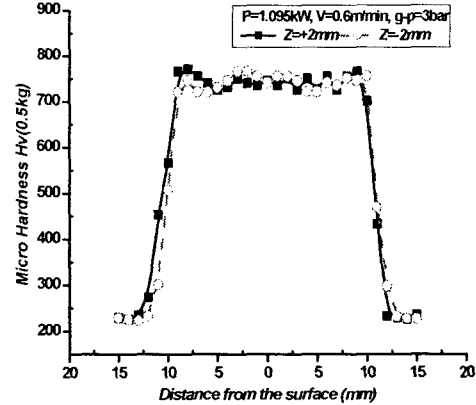


Fig. 9(b) Micro hardness profile of laser hardened zone for focus positions

레이저빔의 조사시간을 180ms로 하여 초점거리를 변화시켜 레이저빔이 시편에 흡수된 초점면적의 변화를 분석하기 위해 타원형 형태로 된 초점면적의 중심선을 절단하여 각 초점거리별 용입폭과 용입깊이의 변화를 Fig. 7에 나타냈다.

Fig. 7에서 (a)는 타원형 형태를 하고 있는 초점면적이 장축 변화를 기준으로 계산한 것이고, (b)는 단축의 변화를 중심으로 계산하였다. (a)의 결과는 초점거리 195mm(z=0)부근에서 타원형형태의 장축이 가장 크기 때문에 입열량이 작게 나타났다. 그러나 타원형 형태의 초점면의 단축을 기준으로 했을 때는 z=0에서 입열량이 가장 컸다.

초점면의 모양이 단축의 경우 디포커싱으로 초점거리를 조정하는 것처럼 z=0부근을 벗어나면 열영향부의 폭이 급격하게 증가하여 입열량이 빠르게 감소한다. 그러나 초점면의 장축변화는 초점거리가 z=0에서 일정한 거리까지 변화하여도 입열량의 변화가 거의 없이 일정하게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 본 실험에서 사용하는 열처리용 렌즈에 레이저빔이 입사할 때 불룩한 부분으로 크게 굴절되어 집중되는 부분이 슬릿 형태로 되기 때문이다. 이와 같은 이유로 열침투깊이가 일정하게 되는 부분이 Fig. 8과 같이 나타난다. 열처리용렌즈없이 디포커싱했을 때 초점 중심부에서 용융되는 현상이 있지만, 본 실험에 사용한 렌즈의 경우 열침투깊이가 일정하고 경화폭이 넓은 열처리 광학계특성을 나타내고 있다.

본 실험에 사용한 열처리렌즈의 초점거리는 195mm인데, 이 초점위치를 z=0으로 하였을 때 단축의 초점폭은 600 μ m이고, 열침투깊이는 300 μ m 였다. 특이한 현상은 디포커싱하였을 때는 초점위치에서 열에 조직이 변화된 시편폭은 좁지만 열 침투깊이는 깊어진다. 그리고 초점위치에서 벗어나면 열영향을

받은 시편표면적은 증가하지만 열 침투깊이는 급격하게 감소한다. 그러나 본 실험에 사용한 열처리렌즈의 특성은 초점위치에서 상대적으로 크게 벗어나도 열침투깊이가 300 μ m정도로 일정하게 나타나고 있다. 디포커싱으로 열처리하였을 경우 초점면의 중심부에서는 일부용융될 수도 있기 때문에 초점거리를 주의 깊게 조절해야 하지만 본 실험에서 사용한 열처리렌즈는 이와 같은 문제가 심각하지 않음을 의미한다.

이상과 같은 실험을 기초로 하여 경화깊이가 가장 큰 경우 경도값의 크기를 실험한 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 이때 레이저빔의 출력은 1.095kW 이고 레이저빔의 이송속도는 0.6m/min 초점거리 z=-2과 +2를 비교하였다. 초점중심부에서 시편표면에서 약 100 μ m정도 떨어진 위치에서 측정하였다. 디포커싱으로 열처리 했을 경우 최대 경도크기가 660Hv 인것과 비교하면 경도값도 최대 800Hv로 상승했다. 디포커싱했을 때 보다 경도값이 크게 나타나는 이유는 표면에서 용융이 발생하지 않아 탈탄등 원소기화되어 증발하지 않았기 때문이다. 최대경화폭은 22314 μ m이고 평균경도값은 약 780Hv 였다. 디포커싱했을때 경화폭이 310 μ m인것과 비교하면 7배정도 크다. 그럼에 나타난 것처럼 초점거리를 변화시켜도 경도값과 경화폭은 크게 변화하지 않으나 보호가스 유량을 증가시키면 경도값만 약간 감소하였으나 그 차이는 아주 미세하다.

3.3 미세조직변화

Fig. 10은 출력이 1095W일 때 빔이송속도 0.6m/min, 초점위치가 +2mm 실험한 결과이다. 표면으로부터 약 100 μ m 정도까지의 균일한 조직이 형성되는 것을 알 수 있었으며, 그 부분을 100배로 관찰한 결과 이다. 이때 균일한 마르텐사이트가 존재하고

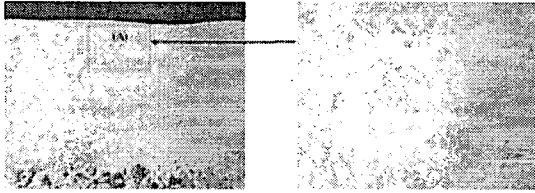


Fig. 10(a) Microstructure of cross sectional area

있으며, 마르텐사이트의 결정립자들이 디포커싱을 했을 때보다 작게 분포되고 있는 것을 알 수 있었다.

이와 반대로 아래 그림(b)은 출력이 1095W일 때 빔이송속도 0.6m/min, 초점위치가 -2mm, 가스압력 3bar 실험한 결과이다.

경도값이 균일하게 분포되지 않았던 부분의 미세 조직을 50배율의 광학현미경으로 관찰한 결과 표면 용융이 형성되었고, 이 부위를 100배율로 관찰한 결과 50um 정도의 미세층이 형성되었다. 그리고 대부분의 표면경화부는 미세한 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 이는 경도값이 가스 압력에 따라 다르게 형성되는 것과 동일한 현상이다.

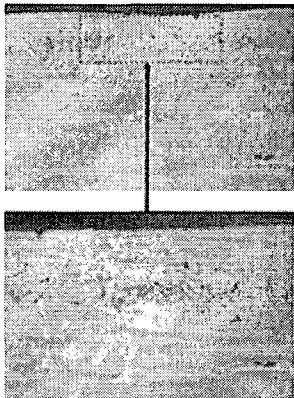


Fig. 10(b) Microstructure of cross sectional area

4. 결론

CW Nd:YAG 레이저를 이용한 SM45C를 표면경화처리시 주요 공정인자인 레이저 출력과 빔 이동속도, 디포커싱된 초점위치가 표면경화 특성에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이저열처리광학계를 통과해서 나오는 출력 효율은 약 55.4-62.1%정도였다.

(2) 레이저빔으로 열처리할 경우에는 대기중에 있는 산소로부터 산화되지 않을 정도로 대기압보다 약간 높은 압력으로 보호가스를 공급하는 것이 레이저열처리에 효율적이라 판단된다.

(3) 레이저빔 출력이 1095W이고, 빔 이동속도가

0.6m/min인 경우 경화폭은 약 22314 μ m이고, 평균경도값은 약 780Hv로 분포되었다.

(4) 열처리광학계를 제작하여 실험한 결과 레이저 열처리를 디포커싱방법과 비교해보면 경화폭은 약 7.2배, 경도값은 약 1.2배 높은 값을 가졌고, 시편 표면에 용융되는 현상은 거의 없었다.

후기

본 연구는 지역협력 연구센터 지원사업인 조선대학교 LRRC(레이저응용 신기술연구센터)에서 지원하는 연구비에 의한 것입니다.

참고문헌

1. K, H, L., F, T, Cheng., and H, C, Man., "Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance", Surface and Coatings Technology, Vol. 173, pp. 96-104, 2003.
2. A, I, Katsamas., and G. N. Haidemenopoulos., "Laser beam carburizing of low-alloy steels", Surface and Coatings Technology, Vol. 139, pp. 183-191, 2001.
3. V, Antonov., I, Jordanova., and S. Gurkovsky., "Investigation of surface oxidation of low carbon sheet steel during its treatment with Nd:glass pulsed laser", Surface and Coatings Technology., Vol. 160, pp. 44-53, 2002.
4. R, Sagaro., J, S, Ceballos., "Tribological behaviour of line hardening of steel U13A with YAG laser", Wear, Vol. 225-229, pp. 575-580, 1999.
5. Y, T, Yoo., H. J. Shin., "Surface Heat treatment of Die material by means of CW Nd:YAG Laser", KSMTE, Vol. 13, pp. 67-74, 2004.
6. J, S, Selvan., K, Subramanian., "Effect of laser surface hardening on En18(AISI-5135)steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 91, pp. 29-36, 1999.
7. P, D, I, Cruz, M, Oden., and T, Ericsson., "Effect of laser hardening on the fatigue strength and fracture of a B-Mn steel", Int.J. Fatigue, Vol. 20, No. 5, pp. 389-398, 1998.
8. Y, T, Yoo., Y, S, Oh., K, B, Ro., and K, Lim., "Comparison of Welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser", KSMTE, Vol. 12, No. 3, pp. 58-67, 2003.