

# CW Nd:YAG레이저를 이용한 금형 재료의 표면열처리

유영태\*, 신호준+, 장우양\*\*

(논문접수일 2003. 12. 19, 심사완료일 2004. 5. 6)

## Surface Heat treatment of Die material by means of CW Nd:YAG Laser

Young-Tae Yoo\*, Ho-Jun Shin+, Woo-Yang Jang\*\*

### Abstract

Laser heat treatment 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 CO<sub>2</sub> 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 action to occur and the formation of martensitic structure. In this investigation, the microstructural features occurring in Nd:YAG laser hardening SM45C and STD<sub>11</sub> steel are discussed with the use of optical microscopic and scanning electron microscopic analysis. Moreover, This paper describes the optimisation of the processing parameters for maximum hardened depth of SM45C and STD<sub>11</sub> steel specimens of 10mm thickness by using CW:YAG laser.

**Key Words :** Nd:YAG laser, Laser treatment, STD<sub>11</sub> steel, SM45C steel

## 1. 서론

최근 몇 년 동안 표면개질에 사용되는 열원과 방법이 다양하게 연구되고 있는데, 현재는 주로 레이저 표면개질에 대한 관심이 집중되고 있다. 레이저를 이용한 표면개질방법으로는 레이저 합금화 및 레이저 표면경화법이 있다. 기존의 표면경화법인 고주파경화법이나 화염경화법에 비해 제품의 모양이나 국소적인 한계를 해소할 수 있어 그 응용

범위가 확대되고 있다<sup>(1-6)</sup>. 그 이유는 레이저로 표면을 경화시키면 부품의 변형이 매우 작고, 선택적인 부분을 정확하게 표면처리할 수 있기 때문이다.

고밀도 에너지 열원으로 재료 표면을 급속히 가열하는 레이저표면경화는 내부로 열이 전도되면서 급속하게 냉각하는 자기 냉각 효과를 이용한다<sup>(7-11)</sup>. 특히 레이저빔의 에너지밀도가 충분히 높으면 열이 재료내부로 전도되어 손실되는 것보다 더 빠른 속도로 표면에 축적되기 때문에 표

\* 조선대학교 기전공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지  
+ 조선대 대학원  
++ 조선대 신금속소재공학과

면층의 온도가 순식간에 상승한다. 이와 같이 되면 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 변형 발생이 최소한으로 억제된다. 이와 같이 급속하게 가열된 뒤 냉각되기 때문에 다른 표면경화법보다 부품의 변형이 적으면서 높은 경도값을 가질 수 있는 특징이 있다<sup>(12)</sup>.

고체 레이저인 Nd:YAG(파장:1.06 $\mu$ m)레이저가 기존의 CO<sub>2</sub>(파장:10.6 $\mu$ m)레이저의 출력과 비슷한 수준으로 개발됨에 따라 재질에 대한 레이저빔의 흡수율이나 설치공간 및 운영 면에서 장점이 많아 이를 대처하고 있다. 그 장점으로 는 Nd:YAG 레이저가 CO<sub>2</sub>레이저와 비교해 볼 때, 높은 빔질(beam quality), 안정적인 출력, 규격화된 디자인, 출력분배 등이 쉬울 뿐만 아니라, CO<sub>2</sub>레이저보다 입열이 작아서 열비틀림이 작기 때문이다<sup>(13)</sup>. 연속파(continuous wave : CW) Nd:YAG레이저(파장:1.06 $\mu$ m)는 CW CO<sub>2</sub>레이저(파장:10.6 $\mu$ m)보다 급속에 대한 흡수율이 높아서, CW CO<sub>2</sub>레이저보다 표면경화시 경화층이 깊게 나타난다. 특히 광섬유를 이용해서 원거리 표면경화나 복잡한 형상을 표면경화할 수 있는 장점도 있다. 하지만 현재 저출력 Nd:YAG레이저를 이용한 표면경화 연구는 있으나, 고출력 CW Nd:YAG레이저를 이용한 연구발표는 많지 않다.

레이저 표면경화는 최적의 공정변수를 이용하여 생산성 향상에 기여하는 것이 중요한 요인이기 때문에 보다 세심한 연구가 필요하다. 본 실험에 사용된 시편은 프레스금형의 다이(die)와 펀치(punch) 등에 사용하는 STD<sub>11</sub>과 기계구조용 중탄소강인 SM45C를 사용하였으며, 일반적으로 STD<sub>11</sub> 열처리에서는 탈탄을 방지하기 위해 염욕(salt bath)이나 가스분위기에서 열처리한다.

그러나 본 연구에서는 기계구조용 중탄소강인 SM45C와 냉간용 공구강인 STD<sub>11</sub>을 Nd:YAG 레이저를 사용하여 표면경화 특성을 연구하고자한다.

연구방법으로는 레이저의 출력과 레이저 빔의 이동속도를 변화시키면서 경화깊이와 경화폭, 미세조직을 실험적으로 관찰하였다. 레이저광의 강도분포가 균일하지 못하면 경화층이 불 균일해질 뿐만 아니라 표면용융을 일으키는 원인이 된다. 레이저빔을 이용해서 표면경화처리할 경우 레이저빔의 입열량이 일정하게 유지하도록 레이저 빔의 강도가 균일하게 전달되는 열처리용 광학계를 구성하여 열처리하고 있다. 그러나 본 연구에서는 열처리용 광학계로 열처리

하기 전에 레이저빔을 디포커싱(defocusing)하여 열처리 한 후 경화분포도, 경화깊이, 경도크기 및 금속조직 상태를 분석하기 위해 실험적으로 고찰하였다. 레이저빔으로 표면을 경화 시킬 때 단순히 디포커싱하는 것으로만 열처리 했을 경우, 레이저빔과 상호 작용하는 시편의 표면에서 레이저빔의 강도가 중앙부와 변두리 부분이 달라 균일하지 않은 경화깊이가 된다. 이와 같은 현상을 해소하기 위해 열처리용 광학계를 구성하여 열처리하는데, 디포커싱(defocusing)으로 열처리한 결과와 열처리용 광학계를 제작하여 열처리 특성을 비교하기 위한 선행연구이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06 $\mu$ m이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600 $\mu$ m인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔발산각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다. 레이저 가공헤드는 젠트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000×500×400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 $\mu$ m, z축에 대한 위치정밀도는 1 $\mu$ m, 반복정밀도는 8 $\mu$ m이다. 레이저 가공헤드의 렌즈초점거리는 200mm, 초점크기(Spot size)는 0.6mm이다. 시편을 표면경화 시킬 때 표면과 대기중의 오염물질과 상호작용을 방지하기 위해서 질소가스를 45°각도, 압력을 3bar 정도로 분사시킨다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도(Schematic)는 Fig. 1과 같다.

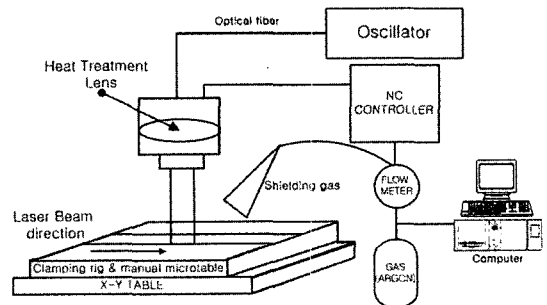


Fig. 1 Schematic of a laser Heat treatment

## 2.2 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 앞서 언급했듯이 일반공작기계나 금형에서 많이 사용되는 SM45C와 STD<sub>11</sub>을 사용하였다. 시편의 화학 조성분은 Table 1과 같다.

실험에 사용한 시편의 크기는 시편 자체에서 자기 쿨칭(self-quenching)을 시켜야 하기 때문에 어느 정도의 임계질량과 두께를 가지고 있어야 한다. 그래서 시편크기를 100×80×10mm로 가공하였고, 레이저 표면경화시키기 전에 시편의 표면을 연마기와 Sand Paper로 연마하고 아세톤 세척 후 레이저 빔을 조사시켰다.

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

본 연구에서는 Nd:YAG레이저를 사용하기 때문에 레이저 파장은 결정되어 있으므로 레이저빔의 출력, 빔의 이송속도와 초점거리를 변화시켜 경화깊이, 경도의 크기, 경화폭 등을 측정하여 비교하고자 한다. 레이저빔을 이용해서 시편 표면을 경화시킬 때 입열량을 산출하는 식은 다음과 같다.

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

여기에서 P는 레이저출력, W는 시편표면에서 레이저빔을 흡수한 폭, V는 레이저빔 이동속도이다.

디포커싱(defocusing)에 따른 입열량을 비교하기 위해 레이저 출력은 1.6kW로 고정하였고, 빔 이동속도는 각각 0.6~1.5m/min 범위 내에서 속도를 각각 0.1m/min씩 증가시켰다. 표면으로부터 초점위치를 각각 +45mm, +46mm, +47mm 위치에서 레이저빔을 조사시켰다. 표면경화 처리된 시편은 Sand Paper로 연마하기 때문에 그에 따른 표면용기를 관찰하여 표면처리후 표면용기의 변화를 관찰하였다. 경화깊이와 경화깊이변화에 따른 경도측정을 위해 열영향을 주지 않는 저속절단기를 이용하여 시편의 단면을 절단한 다음 연마

한 후 비커스 경도분포를 관찰하였다.

Polishing시켜 Vilella's 시약으로 부식처리 한 시편을 광학현미경을 이용하여 경화깊이와 미세 조직을 측정하였다. 레이저빔으로 표면을 열처리한 후 열 때문에 발생할 수 있는 표면용기를 관찰하기 위해서 JAPAN KOSAKA에서 제작한 DSF를 사용하여 부풀림 정도도 측정하였다. 최대하중은 70kg이며, X축(100mm/0.1μm)를 사용하였다. 경도시험은 마이크로 비커스(Micro vickers) 경도시험기를 사용하여 SM45C는 0.5kg, STD<sub>11</sub>는 1.0kg의 하중을 적용시켰다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 입열량과 경화깊이

레이저 빔의 조사속도에 따른 금속표면에서의 입열량 변화는 식 (1)로 나타내며 금속내부의 경화깊이와 매우 밀접한 관계가 있다. Fig. 2는 레이저빔의 출력은 1.6kW, 두께가 10mm인 SM45C와 STD<sub>11</sub> 시편을 디포커싱위치와 빔 이동속도를 변화시켜 경화깊이를 나타냈다.

STD<sub>11</sub>의 경우 시편으로부터 디포커싱거리가 45mm, 46mm와 47mm를 비교하면 경도 깊이가 45mm일 때 약간씩 크게 나타났다. 그러나 전체적으로는 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 경도 깊이가 감소하였다. SM45C의 경우에는 시편으로부터 디포커싱위치에 관계없이 레이저빔의 이송속도가 저속(0.6~0.9m/min)일 때는 경화깊이가 비슷했다. 그러나 레이저빔의 이송속도가 1m/min 이상 증가하면 디포커싱한 위치가 클수록 경화깊이는 작아졌다.

레이저빔의 이송속도가 증가하면 에너지밀도가 높은 레이저빔을 표면에 조사할지라도, 기저조직 내부로의 급속한 냉각효과 때문에 금속내부로 침투하지 못하고 표면 열원으로 남아있기 때문이다. 그러나 시편재질에 따라 경화깊이의 변화는 각기 다른 형태로 나타나고 있다. 즉, 레이저빔의 이송속도가 0.6~0.8m/min까지는 STD<sub>11</sub>의 경도깊이가 SM45C보다 약간 크지만 0.8~1.3m/min까지는 SM45C의 경도깊이가 크게 나타났다. 전체적으로 레이저빔의 조사속도가 빠를수록 경화깊이가 작아지고 경화폭이 증가되는 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 입열량과 관계 있으므로 빔 이동속도에 따른 입열량 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 입열량은 금속의 고상변태의 중요한 변수이고, 레이저출력과 빔 이동속도와 같은 공정변수에 따라 달라진다.

본 연구에 이용한 입열량은 실험결과를 이용해서 식 (1)로 계산하였다. Fig. 3에 나타낸 것 처럼 시편에 따라 입열

Table 1 Chemical compositions of spicmens(%)

	C	Si	Mn	P	S	
SM45C	0.42~0.48	0.15~0.35	0.60~0.90	≤0.30	≤0.035	
	C	Si	Mn	P	S	Cr
STD <sub>11</sub>	1.40~1.60	/0.40	/0.60	≤0.03	≤0.03	11.0~13.0

량의 분포가 각기 다른 형태로 나타나는 것을 알 수 있다.

STD<sub>11</sub>은 레이저빔의 이송속도가 0.6m/min일 때 본 실험 조건에서 Z값과 관계없이 입열량이 4.7×10<sup>3</sup>J/cm<sup>2</sup>로 같은 값을 나타내지만, 레이저빔의 이송속도가 증가하면 Z값이 클수록 입열량이 급속히 감소하였다. 그러나 중탄소강인 SM45C는 STS<sub>11</sub>과 정성적인 특성이 다르게 나타나고 있다. Fig 3 (b)에 나타난 것처럼 레이저빔의 이송속도가 낮은 0.6m/min일 때는 Z값의 위치에 따라 입열량이 각기 다르게 나타나지만, 레이저빔의 이송속도가 증가할수록 Z값의 변화 관계없이 입열량이 같게 나타났다. 특히 STD<sub>11</sub>의 실험결과를 나타낸 Fig. 3 (a)에서는 빔 이송속도가 0.7m/min일 때까지 초점거리가 달라도 입열량의 변화가 같지만 레이저빔의 이송속도가 더 증가하면 디포커싱된 위치가 증가할수록 입열량의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

SM45C의 경우 레이저빔의 이송속도를 증가시키면 시편 표면과 디포커싱거리에 관계없이 입열량의 변화가 같아짐을 나타내고 있어 효율적으로 표면에서 레이저빔 에너지가 흡수되기보다는 반사되는 양이 많아짐을 나타내고 있다. 그리고 레이저의 초점점이 표면위치에 가까워 디포커싱된 정도가 작으면 레이저빔의 강도 분포가 가우시안빔과 비슷하기 때문에 레이저빔의 출력밀도가 큰 중앙부 부근에서는 금속조직 변태온도보다 높아 표면을 용융 시켰다. 일반적으로 저출력·저속도의 조건보다도 고출력·고속도의 공경변수의 조합으로 시편을 경화시켰을 때 표면용융이 발생하기 쉬워 엄격하게 입열량을 조절해야함을 나타내고 있다. 레이저는 빠른 가공속도가 가장 중요한 특징이므로 본 실험에서는 고출력 고속도의 실험으로 실시하였다. 그러나 고출력·고속도에서 표면 결함이 많이 발생하는 이유는 표면에서부터

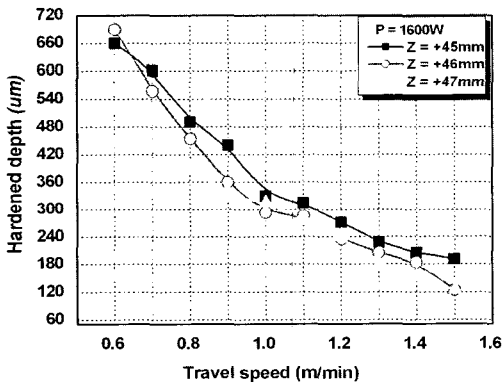


Fig. 2 (a) Hardened depth according to laser beam speed of STD<sub>11</sub>

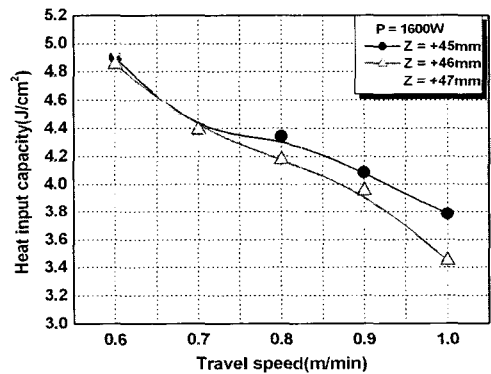


Fig. 3 (a) The relation between Heat input Capacity and beam travel speed(STD11)

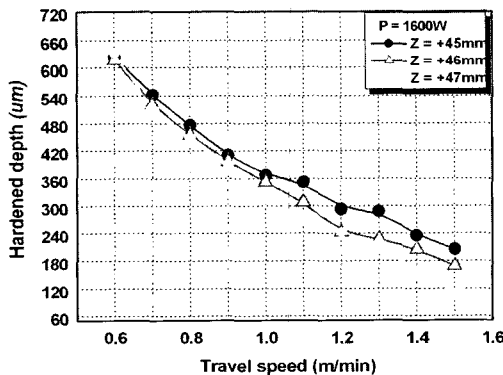


Fig. 2 (b) Hardened depth according to laser beam speed of SM45C

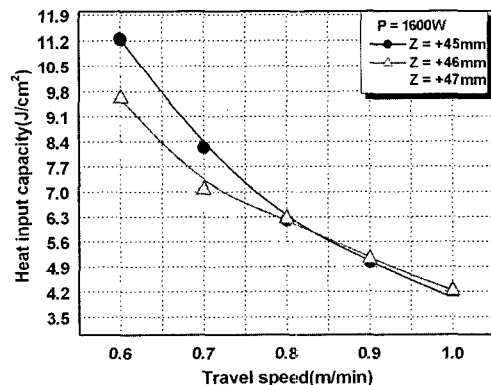


Fig. 3 (b) The relation between Heat input Capacity and beam travel speed(SM45C)

금속의 온도변화가 급속하게 발생하기 때문에 냉각속도 조절, 재질에 따른 입열량변화 등에 관한 분석이 필요함을 나타내고 있다.

### 3.2 레이저빔 조사속도에 따른 표면용기 비교

금속표면을 열처리할 때 발생하는 표면용기현상은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태하면서 발생하는 팽창과 열응력에 의한 소성변형에 의해 발생된다. 일반적으로 레이저의 출력이 증가하면 입열량이 증가하므로 표면용기의 크기가 커지고, 열처리 속도가 감소해도 입열량이 증가하므로 불규칙한 표면용기의 발생빈도가 높아진다. Fig. 4 (a)는 시편이 SM45C일 때 출력이 1.6kW, 표면으로부터 디포커싱(defocusing)거리가 +47mm일 때 표면용기 형상이다. Fig 4 (a)의 실험결과에 표시한 것처럼 SM45C의 경우 표면용기높이는 평균 10

$\mu\text{m}$  정도였다. Fig. 4 (b)는 시편이 STD<sub>11</sub>일 때 Fig. 4 (a)와 같은 공정변수를 사용하여 표면용기의 변화를 관찰한 것이다. 측정결과에 나타난 바와 같이 SM45C와 STD<sub>11</sub>은 표면경화후 표면 거칠기 모양이 다르게 나타났다. SM45C의 표면경화처리된 폭은 3.1mm이고 깊이는 1.2mm였다. 레이저빔에 의한 표면열처리시 들출된 부분을 제외하고 부풀어 오른 부분의 높이를 측정해 본 결과 10 $\mu\text{m}$  정도였다. STD<sub>11</sub>의 경화폭은 3.3mm이고, 경화깊이는 1.1mm였다. 이 경우에는 SM45C와는 다르게 열처리된 표면의 중심부는 10 $\mu\text{m}$  정도 움푹 파였고, 양 옆면은 30 $\mu\text{m}$  정도 부풀어 올랐다. 이것은 STD<sub>11</sub>이 SM45C에 비해 탄소의 함량이 많아 탄소가 급속히 탈리되는 탈탄현상이 나타나는 것으로 생각되어진다. STD<sub>11</sub>은 SM45C와 다르게 육안으로 표면용기부분과 경화부, 열영향부, 모재의 형상을 뚜렷히 구분할수 있다.

### 3.2 경도특성 및 미세조직 변화 비교

SM45C와 STD<sub>11</sub>의 경도분포를 각각 공정변수를 Z=+45mm, Z=+47mm일 때 레이저 빔 이송속도를 1.0m/min, 0.6m/min로 했을 때 실험한 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

이 실험에서 레이저빔의 이송속도가 0.6m/min일 경우에는 SM45C와 STD<sub>11</sub>은 디포커싱(defocusing)된 위치에 따라 경도값은 다르지만 비슷한 형태의 분포를 나타내고 있다. Fig. 5에서 (a)와 (c)는 SM45C에 대한 실험결과이고 (b)와 (d)는 STD<sub>11</sub>의 실험결과이다. SM45C의 경우 시편표면으로부터 거리를 45mm로 디포커싱 시키고 레이저빔의 이송속도를 0.6m/min으로 하면 레이저빔의 중앙부에 해당하는 부분으로 조사된 부분은 최고의 경도값을 나타내지 못하고 있다. 즉 Fig. 5 (a)에 나타난 것처럼 최고 경도값은 표면으로부터 0.6mm 지점이 가장 큰 값으로 모재보다 약 3.2 배 정도 컸다. 그러나 표면부는 모재에 비해 경도값이 약 2.3 배 정도였다. SM45C의 경우 레이저빔의 이송속도를 1m/min으로 했을 때 표면부의 경도값이 가장 크고 경화된 깊이는 0.6mm 정도였다. 이것은 레이저빔 이송속도가 감소할수록 즉, 입열량이 큰 경우 표면에서 용융이 일어나 경도가 저하되는데 이는 표면온도가 액상선까지 올라가 냉각시에 오스테나이트가 일부 마르텐사이트로 변태되나 대부분 조대한 퍼얼라이트로 변태되어 연화되기 때문이다. 또한 시편 표면에서 작용하는 열응력과 냉각속도의 변화에 의해 조직이 시편 표면 방향으로 수직상조직형태로 나타나 경도값이 감소하였다.

Fig. 5 (a)의 실험결과로는 표면경화층이 균일하고 안정화

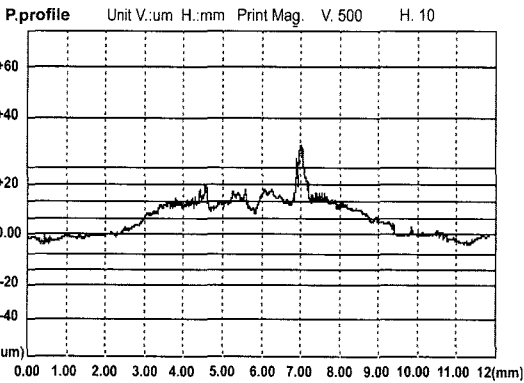


Fig. 4 (a) Surface roughness after laser hardening(SM45C)

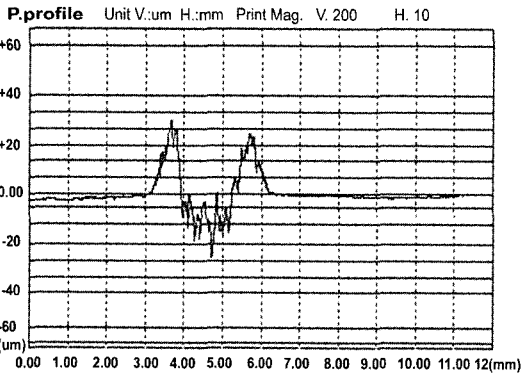


Fig. 4 (b) Surface roughness after laser hardening(STD<sub>11</sub>)

된 경화층을 얻을 수 없었는데 표면으로부터 거리를 46mm로 디포커싱했을 경우에는 (c)의 결과처럼 0.5mm까지 균일한 경화층 깊이를 얻을 수 있다. STD<sub>11</sub>을 레이저빔으로 열처리할 때 출력과 레이저빔의 이송속도를 같게 하고 시편표면으로부터 디포커싱한 거리를 47mm와 46mm한 결과를 Fig. 5 (b)와 (d)에 비교하였다.

STD<sub>11</sub>을 레이저빔으로 열처리 할 경우 Fig. 5 (b)와 (d)처럼 레이저빔의 강도가 가장 큰 중앙부에서는 열 흡수량이 많아 레이저빔의 이송속도가 0.6m/min일 때 용융되어 경도값이 모재에 비해 1.5배 정도 증가하였다. STD<sub>11</sub>의 경우 대부분 레이저빔으로 열처리 할 경우 Fig. 5 (b)와 (d)에 나타난 것처럼 중앙부의 경도값이 대부분 작는데 여러번 실험한 결과 중 가장 양호한 결과값만을 도시했다.

실험결과에 의하면 최고경도값을 나타내는 위치는 표면

으로부터 0.6mm인 부근에서 가장 컸다. 그러나 레이저빔의 이송속도를 1m/min으로 증가시키면 최고 경도값이 급격히 줄어들고 가장 크게 경도값을 나타내는 위치도 바뀌었다. STD<sub>11</sub>의 경우는 표면부로부터 안정된 경도분포값을 얻는데는 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도, 디포커싱을 조절해서는 어려운 문제로 대두된다. 따라서 표면부로부터 안정된 경도분포값을 얻기 위해서는 냉각속도 조절과 같은 다른 방법이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 다음 Fig. 6 (a)~(f)는 SM45C와 STD<sub>11</sub>의 경도분포의 미세조직을 나타냈다. 레이저 빔 출력을 1.6kW, 빔이동속도를 V=0.6m/min로 고정했을 때 SM45C는 디포커싱된 위치를 +45mm일 때 STD<sub>11</sub>는 +47mm로 해서 레이저빔을 조사시켰을 때의 미세조직을 나타낸 것이다. SM45C는 Fig. 6 (a) 조대한 마르텐사이트를 형성하고 있지만, 마르텐사이트의 Grain size가

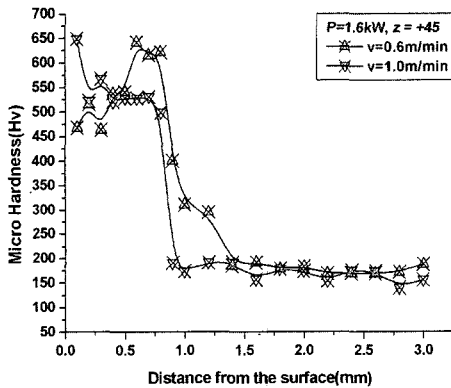


Fig. 5 (a) Micro hardness profile of laser hardened zone for various scanning speed(SM45C)

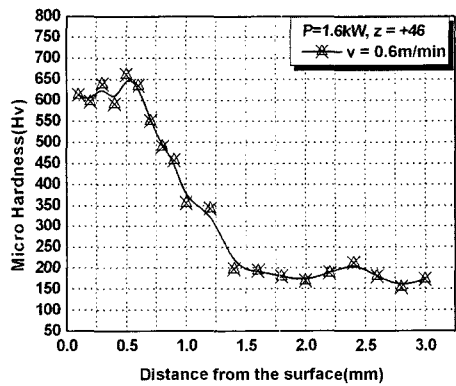


Fig. 5 (c) Micro hardness profile of laser hardened zone for various scanning speed(SM45C)

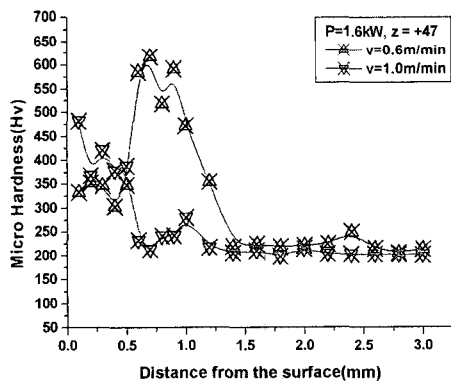


Fig. 5 (b) Micro hardness profile of laser hardened zone for various scanning speed(STD<sub>11</sub>)

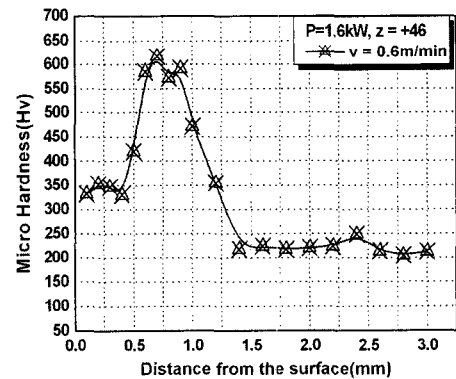


Fig. 5 (d) Micro hardness profile of laser hardened zone for various scanning speed(STD<sub>11</sub>)

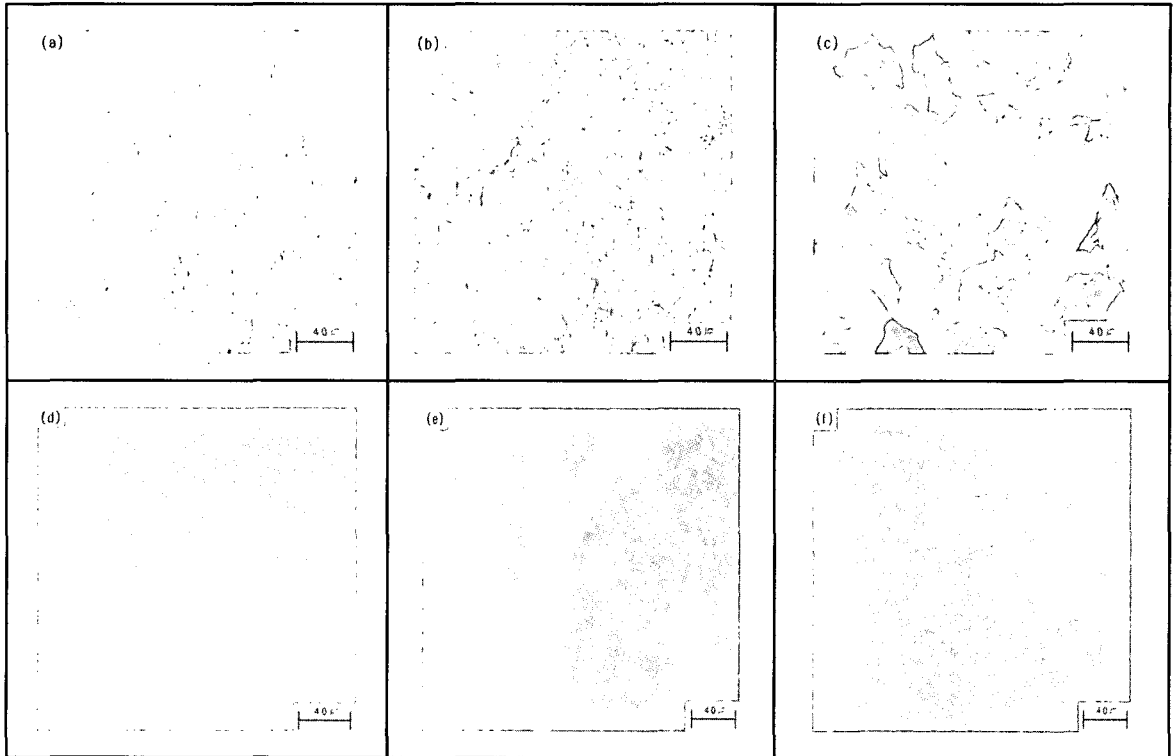


Fig. 6 Optical microstructure of cross sectional area. (a), (b), (c) of SM45C and (d), (e), (f) of STD<sub>11</sub>

기지조직의 펄라이트보다 상당히 크게 형성되어 지고 있어 경도값이 떨어졌다. Fig. 6 (b), (c)는 각각 조대한 판상 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트가 나타났고, 탄소강의 전형적인 조직인 백색의 페라이트와 흑색 및 층상은 펄라이트를 나타내고 있다.

STD<sub>11</sub>의 일반적인 특징은 깊이 경화되며 경화에서 뒤틀림이 적고 안정성이 높다. 이와 같은 성질이 있지만 레이저 빔을 조사시켰을 때 Fig. 6 (d)에 나타낸 것처럼 표면에 입열량이 많아지면서 용융되어 표면 탈탄부로 수지상의 조직과 응고조직을 형성하고 있다. 이와같은 현상 때문에 Fig. 5 (b)에서 보듯이 약 0.7mm까지 경도값이 작아졌다. Fig. 6 (e)는 STD<sub>11</sub>의 경화부로 최고 경도층은 1차 탄화물이 기지에 고용되어 있었으며, 미세한 탄화물이 망상으로 석출되어 있음을 알 수 있다. 경화깊이는 약 0.4mm 정도의 크기를 가지고 있다. Fig. 6 (f)는 기지조직을 나타낸 것으로 펄라이트 기지조직에 크롬 탄화물입자(흰색)조직이 나타내고 있다.

#### 4. 결론

CW Nd:YAG레이저를 이용한 SM45C와 STD<sub>11</sub> 강재의 표면경화처리시 주요 공정인자인 레이저 출력과 빔 이동속도, 디포커싱된 초점위치가 표면경화 특성에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이저빔으로 표면 열처리할 경우 입열량이 같은 공정조건에서 STD<sub>11</sub>의 경우에는  $5 \times 103J/cm^2$ 이고, SM45C는  $11 \times 103J/cm^2$ 으로 입열량의 차이가 약  $6 \times 103J/cm^2$  정도로 나타났다.
- (2) SM45C의 표면 경화폭은 3.1mm, 경화깊이 0.65mm이며, 표면 용기  $10\mu m$ 가 발생하였다. STD<sub>11</sub>의 경우 표면 경화폭은 3.3mm, 경화깊이는 0.69mm였다.
- (3) STD<sub>11</sub>은 레이저빔의 높은 입열량으로 인한 시편 표면부에서 탄소의 탈리현상이 발생하여 표면 용융부에서 수지상과 세포상의 응고조직이 나타나 경도치가 저하되었다.

- (4) SM45C는 시편 표면부에 미치는 냉각속도가 늦어짐에 따라 마르텐사이트의 Grain size가 상당히 크게 분포하고 있어 경도치가 낮아지는 현상이 나타났다.
- (5) STD<sub>11</sub>의 탈탄현상 방지를 위한 냉각속도를 조절하고 가우시안 유사 빔모드로 실험한 결과를 열처리광학계를 구성한 후 그 특성과 비교할 필요가 있다.

## 후 기

위 논문은 조선대학교 2003년 교비연구비 지원으로 연구 하였습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Woo, H. G., and Cho, H. S., 1998, "Estimation of hardened layer dimensions in laser surface hardening processes with variations of coating thickness," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 102, pp. 205~217.
- (2) Haidemenopoulos, G. N., 2001, "Coupled thermodynamic/kinetic analysis of diffusional transformation during laser hardening and laser welding," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 320, pp. 302~307.
- (3) Gopalakrishnan, P., and Shankar, P., 2001, "Laser Surface Modification of Low Carbon Borided Steels," *Scripta-mater.*, Vol. 44, pp. 707~712.
- (4) Hirogaki, T., Nakagawa, H., Hayamizu, M., and Kita, Y., 2001, "In-situ heat treatment system for die steels using YAG laser with a machining center," *Precision Engineering*, Vol. 25, pp. 212~217.
- (5) Sagaro, R., and Ceballos, J. S., 1999, "Tribological behaviour of line hardening of steel U13A with YAG laser," *Wear*, Vol. 1, pp. 225~229.
- (6) Kim, J. D., Kim, C. J., and Chung, C. M., 2001, "Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG lasers," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 114, pp. 51~56.
- (7) Selvan, J. S., and Subramanian, K., 1999, "Effect of laser surface hardening on En18(AISI-5135)-steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, pp. 29~36.
- (8) Tsay, L. W., Lin, Z. W., and Shiue, R. K., 2000, "Hydrogen embrittlement susceptibility of laser-hardened 4140-steel," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 290, pp. 46~54.
- (9) Pertek, A., and Kulka, M., 2002, "Characterization of single tracks after laser surface modification of borided 41Cr4 steel," *Applied Surface Science*, Vol. 9477, pp. 1~6.
- (10) Pedro, D. C., Magnus, O., and Torsten, E., 1998, "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.
- (11) Katsamas, A. I., 1999, "Surface hardening of low alloy 15CrNi6 steel by CO2 laser beam," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 115, pp. 249~255.
- (12) Ganeev, R. A., 2002, "Low-power laser hardening of steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, pp. 414~419.
- (13) Yoo, Y. T., Oh, Y. S., Ro, K. B., and Lim, K. G., 2003, "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.