

# SM45C의 레이저 표면경화특성

신호준\*, 유영태<sup>+</sup>, 안동규<sup>++</sup>, 임기건<sup>+++</sup>

## Laser surface hardening characterization of SM45C

Ho-Jun Shin\*, Young-Tae Yoo<sup>+</sup>, Dong-Gyu Ahn<sup>++</sup>, Kiegon Im<sup>+++</sup>

### 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 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 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 Surface hardening(레이저 표면경화), SM45C(중탄소강), hardening depth/width(경화깊이/폭)

## 1. 서론

레이저빔을 이용한 표면경화기술은 레이저 출력이 커지고 안정화되어 감에 따라 그 응용범위가 확대되고 있다. 종래의 화염경화법이나 침탄법등과 같은 방법보다 처리시간이 빠르고 독특한 조직을 얻을 수 있기 때문이다 뿐만 아니라 내부열 때문에 발생하는 응력, 변형, 균열등을 최소화할 수 있기 할 수도 있다. 부품이 복잡하거나 국소적인 부

분도 열처리가 가능하고 정지질량이 없는 열원으로 부품을 오염시키지 않고 가공할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그래서 레이저에 의한 표면경화처리 방법은 공작기계의 마찰이 많은 부분이나 금형표면의 경도향상에 대한 연구의 중요성이 높아가고 있다. 이와 같은 이유로 품질 향상과 내구성 증대를 위하여 다양한 열원을 이용한 표면경화 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 그 중에서 현재에 자주이용하고 있는 고주파 열처리하는 유도전류를 열원을 사용

\* 신호준, 조선대학교 정밀기계공학과 (sbn66@hanmail.net)

주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

+ 조선대 기계공학과

++ 조선대 기계공학과

+++ 전남대 물리학과

하는 방법으로 유도전류가 부품의 표면에서 상당한 거리까지 침투면서 발생하는 열을 이용한다. 유도코일 이동시에는 코일을 잘조절하여야 하고, 부품 표면과 거리에 따라 열처리특성이 비균일하게 분포한다. 그리고 작업자의 숙련도에 따라 열처리 특성이 다르게 나타난다.

이와 같은 단점을 보완하기 위한 한가지 방법으로 레이저를 이용하여 표면을 경화시키는 연구 필요성이 증가하고 있다. 금형 재료로서 성능을 충분히 발휘하기 위해서는 표면의 적절한 경도 및 내마멸성이 요구되고, 내부에는 인성이 있어야 한다. 이런 특성을 가지는 금형재료를 만들기 위해 레이저를 이용할 경우 국부표면경화가 가능하기 때문에 표면의 국부적인 경화에 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

고밀도 에너지 열원으로서 재료 표면을 급속히 가열하는 레이저표면경화는 내부로 열이 전도되면서 급속하게 냉각하는 자기 냉각 효과를 이용한다. 특히 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 어려운 부품 등의 열처리에 매우 적합하다.

그 예로 레이저를 이용하면 탄소강과 AISI 1045강의 마모성과 피로수명이 증가<sup>(2)</sup>되고, SAE1015의 경우 레이저로 표면경화했을 때 표면경화처리를 하지 않았을 때보다 피로 인장력이 높게 나타났다.<sup>(3)</sup> Janez는 주철 500-7재질을 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 레이저표면용융시 발생하는 잔류응력과 변형량을 실시간으로 측정하는 기술을 연구<sup>(4)</sup>하였다. 그러나 대부분 연구가 CO<sub>2</sub>레이저를 이용하고 있으며, 열처리광학계를 구성하지 않고 디포커싱에 의한 레이저열처리를 하고 있다.

디포커싱된 레이저빔을 이용할 경우에는 레이저빔의 중심

부에서 반지름 방향으로 레이저빔의 강도가 급격하게 떨어진다. 이 때문에 중심부에는 국부적으로 용융이 발생하고 경도값을 하락시키기도 하고 경화폭의 횡단면 방향으로 경도값이 균일하지 못한 분포를 갖는다. 그래서 레이저빔을 이용해서 표면경화처리할 경우 레이저빔의 입열량이 재료와 상호작용하는 면적을 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 이를 위하여 레이저 빔의 강도가 균일하게 재료표면에 전달되는 열처리전용 광학계를 구성하여 열처리하고 있다.

디포커싱에 의하지 않고 열처리 광학계를 구성하여 CO<sub>2</sub>레이저빔을 전달할 경우 빔폭을 크게함과 동시에 균일한 빔강도를 만들기 위해 빔스캐너방식, 인테그레이션방식, 폴리곤미러방식을 이용하고 있다. 그러나 Nd:YAG 레이저빔은 CO<sub>2</sub>레이저빔과는 다르게 용융석영계통의 렌즈를 투과하고 광섬유를 이용해서 레이저빔을 전달할 수 있기 때문에, CO<sub>2</sub> 레이저빔을 이용하는 경우보다 많은 장점이 있다.

그래서 본 연구에서는 SM45C를 디포커싱으로 열처리한 다음 열처리광학계를 구성하여 경도깊이, 경화폭, 경도크기를 비교하였다. 경화폭과 경화깊이가 균일하게 열처리 되도록 구성된 열처리 광학계의 특성<sup>(5)</sup>을 분석하였다. 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 있기에 레이저빔의 출력, 빔 이송속도, 레이저빔의 초점거리 및 보호가스 분사유량의 변화에 대한 경화깊이, 경화폭, 표면거칠기, 표면경도값, 미세조직의 변화를 분석하였다. 그리고 디포커싱으로 실험한 결과와 비교하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험방법

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

실험에 사용한 시편의 크기는 시편 자체에서 자기 켄칭(self-quenching)을 시켜야 하기 때문에 어느 정도의 임계질량과 두께를 가지고 있어야 한다. 먼저 시편크기를 100×50×3mm로 고정하여 열처리실험 하였고, 임계질량에

따라 달라지는 열처리특성을 알아보기 위해 시편크기를 100 × 100 × 10 mm로 실험하여 비교분석하였다. 레이저 표면경화 시키전에 시편의 표면을 연마기를 이용하여 Sand Paper로 연마하고 아세톤 세척후 레이저 빔을 조사시켰다.

CO<sub>2</sub>레이저로 표면경화 시킬 경우 파장이 10.6 $\mu$ m이기 때문에 반사되는 레이저빔의 양이 많아 일반적으로 코팅을 하여 흡수율을 높인다. 그러나 레이저로 열처리하는 과정에서 코팅의 증발, 용융등으로 광학계에 문제를 발생할 수 있다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 파장이 1.06 $\mu$ m인 Nd:YAG 레이저를 사용하면 CO<sub>2</sub>레이저보다 금속표면에서 침투깊이가 크기 때문에 코팅을 하지 않았다.

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

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

그리고 Nd:YAG레이저를 사용하기 때문에 레이저 파장은 결정되어 있으므로 레이저빔의 출력, 빔의 이동속도를 변화시켜 경화깊이, 경도의 크기, 경화폭 등을 측정하여 비교하고자 한다.

디포커싱으로 레이저 표면경화처리한 결과와 비교하기 위해 열처리용 광학계를 구성하였다. 열처리를 위해 구성된 광학계는 Lambda Research Optics Inc.에 의뢰하여 제작한 것으로 반원통형이다. 렌즈의 재질은 UV garde F.S.이고, 초점거리는 195mm이며, W×L (40×40mm), 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.

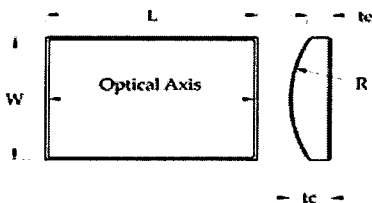


Fig. 1 Configuration of heat treatment lens

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

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

여기에서 P는 레이저출력,  $\delta$ 는 침투깊이, a는 초점면의 단축, b는 초점면의 장축, V는 레이저빔 이동속도이다.

표면경화 처리전 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 절단해서 연마한 후 비커스 경도분포를 관찰하였다.

시편을 Polishing시켜 Vilella's시약으로 부식처리 한 다음 광학현미경을 이용하여 경화깊이와 미세조직을 측정하였고, 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하여 0.5 kg의 하중을 적용시켰다.

## 2.2 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.

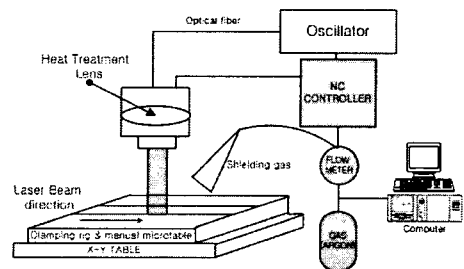


Fig. 2(a) Schematic of a laser Heat treatment

레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이동거리는 1000×500×400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 $\mu$ m, z축에 대한 위치정밀도는 1 $\mu$ m, 반복정밀도는 8 $\mu$ m이다. 레이저열처리용 가공헤드의 렌즈초점거리는 195mm에

서, 초점크기(Spot size)는 최대 28mm크기의 타원형이고 Size는 1.6×1.6"이다. 시편을 표면경화 시킬 때 표면과 대기 중의 오염물질사이의 상호작용을 방지하기 위해서 질소가스를 45°각도, 압력을 1 ~ 3bar 정도로 분사시킨다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도 및 레이저열처리 광학계의 계략도를 각각 Fig. 2(a), (b)와 같다.

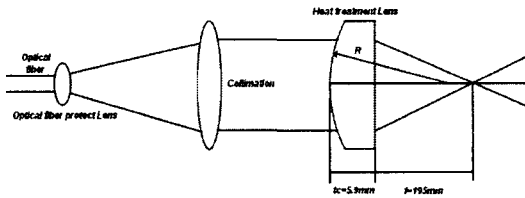


Fig. 2(b) Schematic diagram of laser heat treatment optical system

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열처리광학계의 에너지밀도

본 실험에 이용한 렌즈는 초점위치에서 가우시안 빔 분포를 갖는 렌즈가 아니다. 그래서 실험에 사용하고 있는 레이저 발전기에서 출력값과 본실험을 위해 구성한 렌즈를 통과한 후 출력은 크기가 다를 것으로 판단하여 열처리를 위해 구성한 렌즈를 통과한 후의 출력값을 파워미터로 측정하여 발전기에서의 출력값과 비교하기 위해 Fig. 3에 나타냈다.

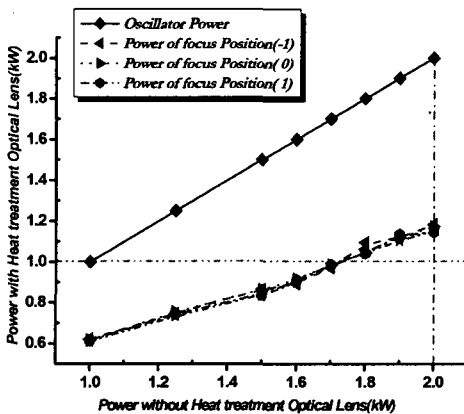


Fig. 3 The capacity efficiency of focal positions

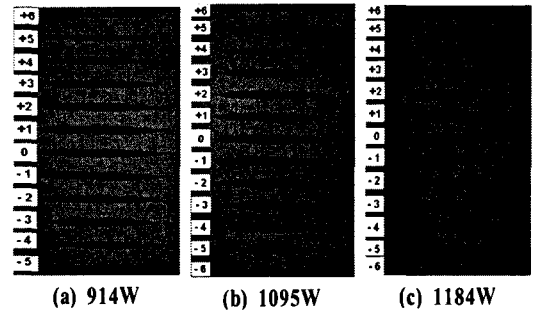


Fig. 4 The surface bead configuration of focus positions

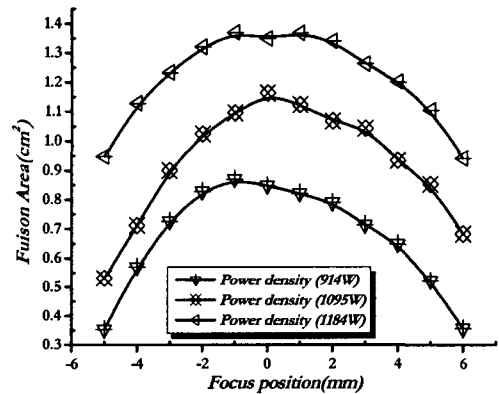


Fig. 5 A variety of Fusion area according to power density

Fig. 3에서 위쪽에 있는 실험값은 초점위치에서 레이저출력밀도값이고 아래에 있는 실험값은 초점위치를 포함하여 시편표면에서의 거리변화에 따른 열처리렌즈를 통과한 후의 출력밀도값이다.

Fig. 5는 출력변화에 따른 초점위치별 시편에 흡수되는 초점면의 변화를 분석하기 위해 각 위치에서 레이저빔을 180ms동안 조사한 실험한 결과이다. 출력변화에 따라 초점거리가 변하면 반 타원형에서 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 0이하로 작아질수록 용융면적이 커지고 출력값이 크면 z=-2 ~ +2 사이가 용융면적이 일정하게 분포되는 것을 알 수 있다.

위 두 그림에 의하면 열처리를 위한 렌즈를 레이저빔이 통과했을 경우에는 가우시안형태의 빔강도분포를 하고 있지 않기 때문에 레이저 발전기에서의 출력값의 55.4 ~ 62.1% 정도 였다.

### 3.2 입열량에 따라 시편에 미치는 경도특성비교

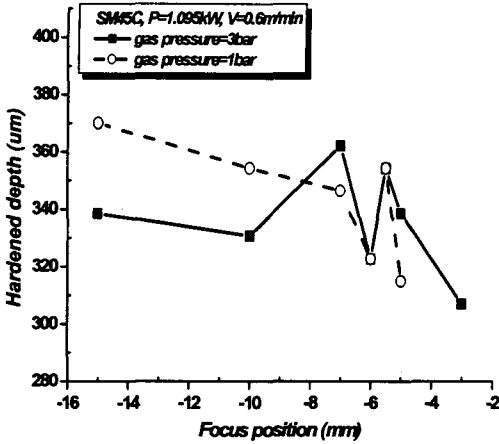


Fig. 6 The capacity efficiency of focal positions

레이저로 표면경화할 때 보호가스의 영향을 분석하기 위해 공급하는 유량변화에 대한 경도깊이를 비교 실험하였다. 열처리렌즈를 통과한 레이저출력이 1.095kW이고, 레이저 빔 이송속도를 0.6m/min로 했을 때 초점거리별 보호가스유량변화에 대한 경도깊이를 Fig. 6에 나타냈다.

보호가스는 Ar를 사용하고 있는데 레이저의 열처리특성은 급가열 급냉각에 의한 자체냉각효과를 이용하고 있다. 그림에 나타난 것처럼 공급압력이 3bar로 보호가스의 유량이 많을 경우 레이저빔에 의한 급가열에 방해가 되어 열침투깊이가 작게 나타나고 있다. 공급압력이 절대압력으로 3bar일 경우 시편표면으로부터 초점거리가 멀어지면 보호가스의 영향이 줄어들어 침투깊이가 일시적으로 증가하고 있다. 그러나 레이저빔의 초점거리가 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.

레이저빔의 조사시간을 180ms로 하여 초점거리를 변화시켜 레이저빔이 시편에 흡수된 초점면적의 변화를 분석하기 위해 중간을 절단하여 각 초점거리별 용입폭과 용입깊이의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 본 실험에 사용한 열처리렌즈의 초점거리는 195mm인데, 이 초점위치를 z=0으로 하였을 때 단축의 초점폭은 600μm이고, 열침투깊이는 300μm였다. 특이한 현상은 디포커싱하였을 때는 초점위치에서 폭은 좁지만 열 침투깊이는 깊어진다. 그러나 본 실험에 사용한 열처

리렌즈의 특성은 초점위치에서 상대적으로 크게 벗어나도 열침투깊이가 300μm 정도로 일정하게 나타나고 있다. 디포커싱으로 열처리하였을 경우 초점면의 중심부에서는 일부용융될 수도 있기 때문에 초점거리를 주의깊게 조절해야 하지만 본 실험에서 사용한 열처리렌즈는 이와 같은 문제가 심각하지 않음을 의미한다.

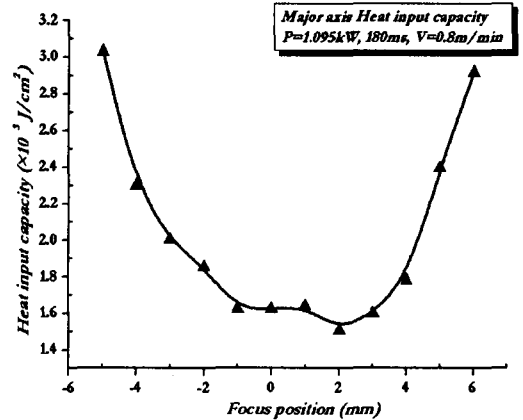


Fig. 7(a) Heat input capacity according to focus positions

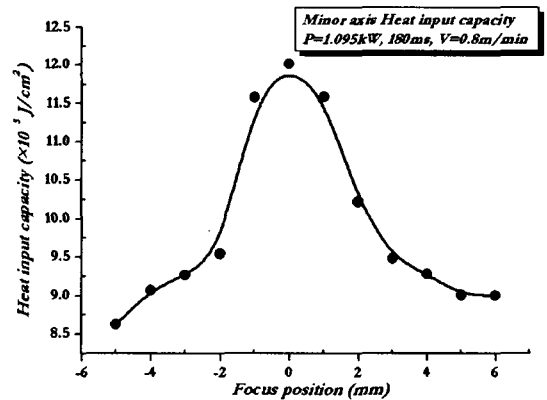


Fig. 7(b) Heat input capacity according to focus positions

이상과 같은 실험을 기초로 하여 경화깊이가 가장 큰 경우 경도값의 크기를 실험한 결과를 Fig. 000에 나타냈다. 이때 레이저빔의 출력은 1.095kW 이고 레이저빔의 이송속도는 0.6m/min 초점거리 z=0과 2를 비교하였다. 경화폭은 22314 μm이고 평균경도값은 약 780Hv였다. 디포커싱했을 때 경화폭이 310μm인것과 비교하면 7배정도 크다. 측정위치는 시편 표면에서 약 100μm정도 떨어진 위치에서 측정하였으며, 디포커싱으로 열처리 했을 경우 최대 경도크기가 660Hv 인것

과 비교하면 경도값도 상승했다. 디포커싱했을 때 보다 경도값이 크게 나타나는 이유는 용융이 발생하지 않아 탈탄이 되지 않았기 때문이다. 그림에 나타낸 것처럼 초점거리가 변화시켜도 경도값과 경화폭은 크게 변화하지 않으나 보호가스 유량을 증가시키면 경도값만 약간 감소하였으나 그 차이는 아주 미세하다.

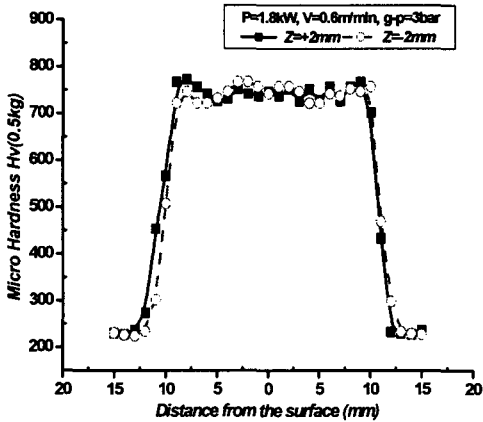


Fig. 8(b) Micro hardness profile of laser hardened zone for focus positions

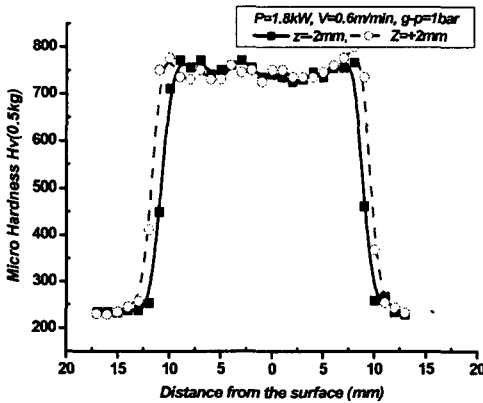


Fig. 8(a) Micro hardness profile of laser hardened zone for focus positions

#### 4. 결론

CW Nd:YAG 레이저를 이용한 SM45C를 표면경화처리 시 주요 공정인자인 레이저 출력과 빔 이동속도, 디포커싱된

초점위치가 표면경화 특성에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이저열처리광학계를 통과해서 나오는 출력효율은 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 이송속도가 0.6m/min인 경우 경화폭은 약 22314 $\mu$ m이고, 평균경도값은 약 780Hv로 분포되었다.

#### 후기

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

#### 참고 문헌

- (1) K. H. L, F. T. Cheng, H. C. Man., 2003, "Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance", Surface and Coatings Technology, Vol. 173, pp. 96~104.
- (2) A. I. Katsamas, G. N. Haidemenopoulos., 2001, "Laser-beam carburizing of low-alloy steels", Surface and Coatings Technology, Vol. 139, pp. 183~191.
- (3) V. Antonov., I. Iordanova., S. Gurkovsky., 2002, "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.
- (4) R.Sagaro, J.S.Ceballos, 1999, "Tribological behaviour of line hardening of steel U13A with YAG laser", Wear, Vol. 225-229, pp. 575~580.
- (5) Y. T. Yoo., H. J. Shin., 2004, "Surface Heat treatment of Die material by means of CW Nd:YAG Laser", KSMTE, Vol. 13, pp. 67~74.