

## 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 SCM4강의 표면경화에 관한 연구

나기대\*, 유영태<sup>+</sup>, 신병현<sup>++</sup>, 신호준<sup>++</sup>  
(논문접수일 2007. 1. 9, 심사완료일 2007. 6. 15)

### A Study on the Surface Hardening of SCM4 Steel Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser

Gi-Dae Na\*, Young-Tae Yoo<sup>+</sup>, Byung-Heon Shin<sup>++</sup>, Ho-Jun Shin<sup>++</sup>

#### Abstract

Laser surface hardening is beneficially used for surface treatment of structural steel. Due to very rapid heating and cooling rates, structural low-alloy steel(SCM4) can be hardened as self quenching. The aim of this research project is to improve the influence of the process laser parameters: laser power, spot size, surface roughness, and traverse speed. The laser beam is allowed to scan on the surface of the workpiece at the constant power(1095W), varying the traverse speed at 0.3m/min, 0.5m/min and 0.8m/min. The optical lens with the elliptical profile is designed to obtain a wide surface hardening area with uniform hardness. From the results of the experiment, it has been shown that the stable hardness is about 600~700Hv, when the laser power, focal position and the traverse speed are P=1095W, z=0mm and v=0.3m/min.

**Key Words** : CW Nd:YAG laser(연속파형 Nd:YAG 레이저), Surface Hardening(표면경화), Structural Low-alloy Steel(구조용 저합금강), Surface Roughness(표면조도)

## 1. 서론

레이저를 이용한 표면경화는 내구성과 내마모성이 요구

되는 자동차산업, 전자산업, 가전산업 등의 부품정밀도가 요구되는 산업에서 첨단기술로 각광을 받고 있다. 부품을 생산하는 금형이나 각종 공작기계 등의 표면경도 향상은 부품의

\* 조선대학교 기계설계공학과  
+ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375  
++ 조선대학교 일반대학원 정밀기계공학과

신뢰성과 내구성에 관련이 있기 때문이다<sup>(1,2)</sup>.

레이저를 이용한 표면 경화법은 기존의 표면 열처리와는 다르게 냉각이나 장시간의 가공시간이 필요치 않는 특징을 가지고 있다. 표면에 투입된 열이 재료내부로 투입되면서 급격한 자체냉각(self-quenching)효과로 별도의 냉각방법 없이 짧은 시간에 표면을 경화시킬 수 있기 때문이다<sup>(3)</sup>.

본 연구에 사용된 구조용 합금강인 SCM4는 기계적으로 뛰어난 성질과 표면의 큰 경도 값을 요구하는 기어, 너트, 크랭크축과 같은 부품에 널리 사용되고 있다<sup>(4,5)</sup>.

기계적인 강도는 합금 자체의 물리·화학적 조성분배에 의해 결정되지만 표면의 경도나 부품내부의 내충격 등은 표면 열처리하여 성질을 개선시킨다<sup>(6)</sup>. 산업현장에서 사용되던 질화법, 침탄법, 고주파열처리와 같은 기존의 표면 경화법은 작업시간이 길며 표면의 열처리로 재료의 기계적 성질이 변하여 강한 충격과 오랜 피로로 부품이 파괴되는 경우가 있다. 특히 부품의 부분적인 표면 경화가 어렵고 많은 비용과 시간이 소요된다는 단점이 있다.

레이저를 이용해 표면경화를 하면, 표면경도값은 매우 큰 반면에 재료내부는 본래의 기계적 성질을 가지고 있어서 오랜 시간 충격이나 하중이 가해져도 쉽게 파괴되지 않는다. 이는 치밀하고 균일한 조직의 경화층이 재료 표면에 형성되어 내마모성, 내부식성, 내충격피로강도 등이 향상되기 때문이다.

짧은 시간에 표면 경화가 진행되어 생산성이 높고 작은 부품이나 부품의 일부분만을 집중적으로 표면열처리가 가능하여 선진 산업분야에서 레이저를 이용한 표면경화법이 각광을 받고 있다<sup>(7,8)</sup>. 특히, 장시간 반복 작업을 하는 금형은 표면의 높은 경도 값과 균일한 치수 값을 요구하는 생산을 위해서 레이저를 이용한 표면경화법이 유리하다<sup>(9)</sup>.

본 연구에서는 SCM4에 레이저빔의 출력, 레이저빔 이송 속도 등을 변화시키면서 레이저빔을 시편에 조사하여 표면을 경화시켰다. 표면을 경화시킨 시편의 경도를 모재의 경도와 비교하기 위해 표면경도 분포, 경화깊이, 경화 폭 및 경화된 시편의 조직을 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 Nd:YAG 레이저의 파장은 1.06 $\mu$ m이고, 최대 출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔 발산각은 25mrad이며 광섬유를 통해 전달된다. 광케이블에 연결된 동작대는 LASMA 1054이고 x축, y축 및 z축의 위치정밀도는 각각

5 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 및 1 $\mu$ m이며 반복정밀도는 8 $\mu$ m이다. 레이저 표면 경화 시 시편의 표면과 공기중의 오염물질사이의 접촉을 방지하기 위해 Ar가스를 45°각도에서 1.5bar의 압력으로 분사시킨다.

열처리를 위해 구성된 광학계는 반원통형이며, 렌즈의 재질은 UV grade F.S.이고 초점거리는 195mm, 렌즈의 크기(W×L)는40mm×40mm이다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었고, SCM4의 화학적 특성은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 실험방법

실험에 사용한 시편의 크기는 가로 100mm, 세로 50mm, 높이 10mm로 제작하여 열처리 실험하였다. 이는 시편 자체에서 자기 담금질(self-quenching)을 시켜야 하기 때문에 임계 질량과 두께를 고려한 시편이다.

연구에 사용된 시편의 표면조도에 따른 표면열처리의 영향을 파악하기 위해 레이저 빔을 조사하기 전 시편의 표면을 폴리싱 장치(R&B : RB 204 Metpol- I 1wheel polisher)를 이용하여 사포(sand paper)로 연마하고 아세톤으로 세척 후

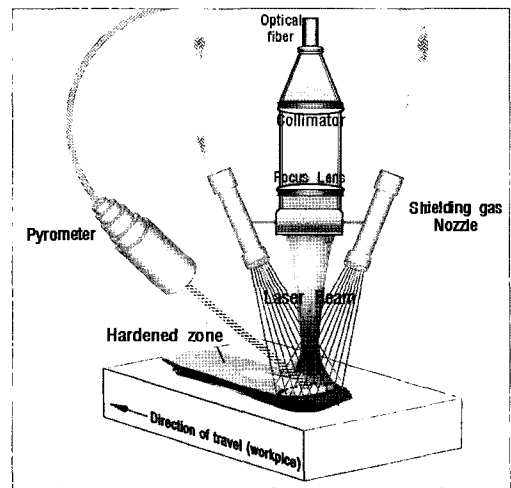


Fig. 1 Schematic of the laser heat treatment

Table 1 Chemical composition of specimen(wt.-%)

	C	Si	Mn	P
SCM4	0.83-0.43	0.15-0.35	0.6-0.85	≥0.03
	Ni	S	Cr	Mo
	-	≥0.03	0.09-1.2	0.15-0.35

실험하였다<sup>(10)</sup>.

조직변화는 경화깊이 변화에 따른 경도 측정을 위해 시편에 열 영향을 주지 않는 정밀 절단기(BUEHLER : isomet 4000 precision saw)를 이용하여 시편 단면을 절단하여 경도분포를 관찰하였다. 이 때 사용된 경도 시험기는 마이크로 버커스 경도시험기(SHIMADZU: HmV-2model)를 사용하여 0.5kgf의 하중을 적용하여 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 초점위치에 따른 초점변화

열처리용 광학계를 이용하여 출력(P)을 1095W로 고정하고 초점위치별 시편표면에 흡수되는 초점면의 변화를 분석하였다. 이때 레이저 빔은 180ms의 단펄스를 조사하여 Fig. 2에 나타내었다. 초점거리가 195mm인 렌즈를 통과해 조사된 레이저 빔이 시편 표면에 조사되어 초점위치별 흡수된 초점면의 변화를 나타내고 있다.

레이저 빔이 시편 표면에 조사되어 가장 초점 면적이 큰 위치를  $z=0$ ( $f=195\text{mm}$ )으로 하고 윗 방향(+)과 아랫방향(-)으로 1mm씩 이송하여 조사하였다. 초점면적의 변화가  $z=0$ 을 중심으로 포물선 형태로 변화하고 있지만 초점거리  $-2\text{mm} \leq z \leq +2\text{mm}$  범위에서는 초점면적의 변화가 크지 않았다. 이와 같은 현상은 초점거리부근에서는 큰 출력밀도가 작용하여 초점면적이 크고, 초점거리  $z$ 가 0으로부터 벗어나면서 출력밀도가 감소하여 초점면적이 작아지고 있다<sup>(11)</sup>. 이런 현상은 일반 가우시안빔을 다포커싱했을 때와는 다른 형태를 하고 있다. 실험결과를 정리하여 초점면적(A)과 출력밀도( $E_p$ )로 나타내면  $z=-2\text{mm}$ 에서  $A=27.691\text{mm}^2$ ,  $E_p=39.54\text{W/mm}^2$ 이고,  $z=0$ 에서  $A=29.529\text{mm}^2$ ,  $E_p=37.08\text{W/mm}^2$ 이며,  $z=+2\text{mm}$ 에서  $A=26.916\text{mm}^2$ ,  $E_p=40.68\text{W/mm}^2$ 로 나타났다. 초점면적(A)은

타원형의 공식으로 계산하였으며 출력밀도  $E_p$ 는 아래 식으로 계산한 값이다.

$$E_p = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$z=+1\text{mm}$  위치에서  $z=-1\text{mm}$ 과 비교했을 때 +1위치가 면적은 줄어들고 출력밀도는 증가하였다. 초점거리  $-2\text{mm} \leq z \leq +2\text{mm}$ 를 벗어나면 출력밀도와 초점 면적이 급격히 감소하였다. 초점거리  $-2\text{mm} \leq z \leq +2\text{mm}$  내에서 초점 면적을 비교하면  $z=+2\text{mm}$ 에 비하여  $z=-2\text{mm}$  위치에서 초점면적의 장축은 작고 단축은 약간 크게 시편표면에 흡수되었고 전체적으로 초점면적이 약간 크게 형성 되었다.  $z=-2\text{mm}$ 로 하면 초점위치인  $z=0$ 인 지점이 시편표면 아래에 있어 깊이 방향으로 열이 전달되지만  $z=+2\text{mm}$ 인 위치에서는 표면 열전달의 영향이 크기 때문이다.

#### 3.2 표면 거칠기에 따른 초점크기 변화

레이저 빔을 이용한 금속의 표면 열처리에서 시편의 표면 거칠기에 따른 빔의 흡수정도와 그에 따른 영향을 분석하였다. 표면 거칠기가 다른 세 개의 시편에 각각 출력(P)을 1095W, 빔 조사시간 180ms로 하여 초점위치를 1mm씩 이동하면서 단 펄스로 조사하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 (a)와 (b)의 시편은 시편 제작 시 밀링공정 후 아세톤으로 세척하여 표면에 레이저 빔을 조사하였고, (c)시편은 사포(sand paper)로 #220, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500, #2000으로 각 2분씩 폴리싱한 후 서스펜션  $6\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ 로 각 3분씩 폴리싱한 후 레이저 빔을 조사하였다.

이때 사용된 각각 시편의 표면 거칠기를 표면조도 측정기(DSF1000: KOSAKA/Japan)를 이용하여 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. (a)시편의 평균 거칠기 Ra는  $0.9378\mu\text{m}$ , (b)

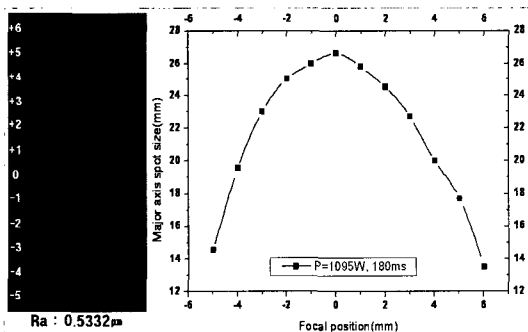


Fig. 2 Spot size of focal position

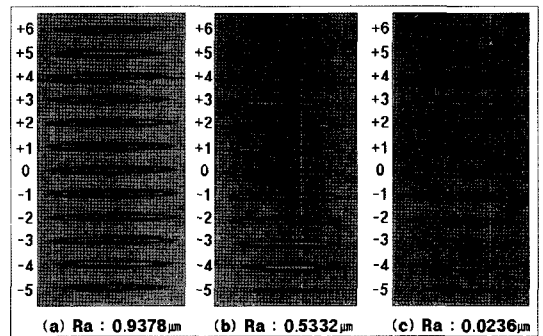


Fig. 3 Spot shape according to the surface roughness

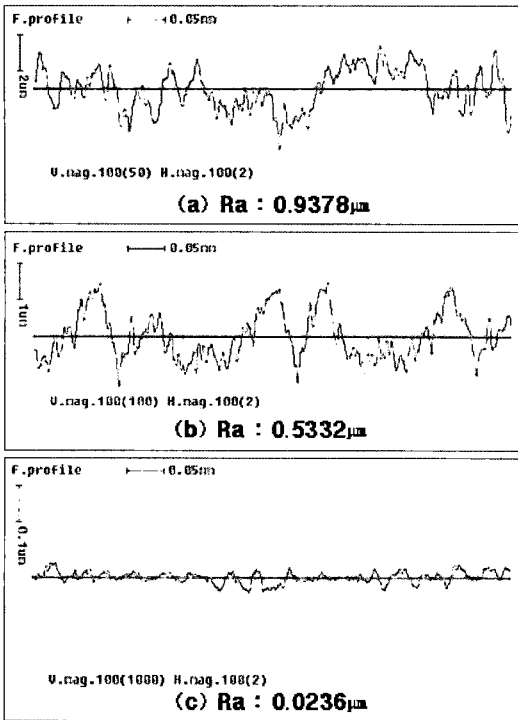


Fig. 4 Grape of surface roughness values

시편의 Ra는 0.5332 $\mu\text{m}$ , (c)시편의 Ra는 0.0236 $\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 3의 시편을 Ra에 따른 초점면적을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. Ra(평균 거칠기)가 가장 나쁜 (a)가 전체적으로 가장 큰 초점면적을 나타내고 Ra가 가장 좋았던 (c)의 초점면적이 가장 작게 나타났다. 표면 거칠기가 거칠 경우 레이저빔이 시편표면에 조사될 때 표면에서 난반사되어 레이저빔의 흡수율을 높이기 때문에 초점면적이 크게 형성되었다.  $z=0$ 을 기준으로 Ra값이 0.9378 $\mu\text{m}$ 일 때 초점면적은 34.16 $\text{mm}^2$ 이고, 0.5332 $\mu\text{m}$ 일 때는 25.53 $\text{mm}^2$  그리고 0.0236 $\mu\text{m}$ 일 때는 23.91 $\text{mm}^2$ 이었다.

평균 거칠기(Ra)가 0.0236 $\mu\text{m}$ 인 (c)시편에 조사된 초점면을 기준으로 표면 거칠기 변화에 대한 시편표면에서의 레이저빔 흡수변화를 비교하기 위해 Fig. 6에 나타내었다. 초점위치에 따라 시편에 조사된 레이저빔의 흡수에 따라 형성된 초점면적의 변화비를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 위쪽의 실험값은 시편(c)의 표면 거칠기에 대한 시편(a)의 표면 평균 거칠기의 비  $\frac{Ra(a)}{Ra(c)}$  로 약 39.74이다. Fig. 6은 그림에서 아래 실험값은 시편 표면을 경면 처리한 시편(c)에 대한 시편(b)의 표면 평균거칠기의 비로 22.6이다. 거칠기의 비가 39.74

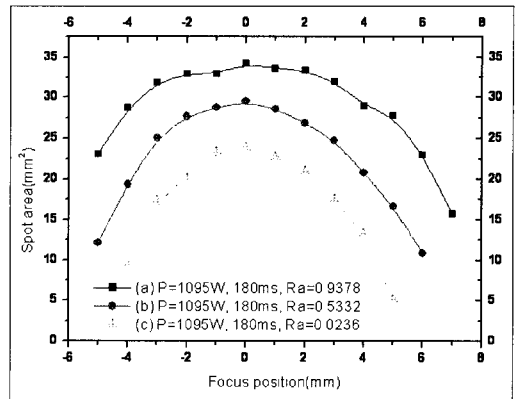


Fig. 5 Spot area according to the surface roughness

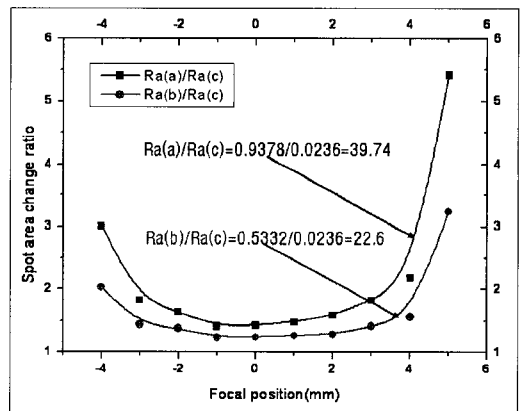


Fig. 6 Spot area change ratio according to the focal position

일 때와 22.6일 때 모두 초점위치가  $-2\text{mm} \leq z \leq +2\text{mm}$ 인 곳에서는 표면에서의 레이저빔 흡수에 따른 타원형의 초점면적 변화비가 거의 일정하였다. 이것은 레이저빔의 출력이 클 경우에는  $-2\text{mm} \leq z \leq +2\text{mm}$  이내에서는 표면 거칠기가 0.9378 $\mu\text{m}$ 에서 0.0236 $\mu\text{m}$ 범위내의 시편표면에서 레이저빔 흡수율이 일정함을 의미한다. 그러나  $z$ 가  $\pm 3\text{mm}$ 이상 초점위치로부터 벗어나면 레이저빔이 흡수되는 레이저빔보다 반사되는 비율이 시편표면에서 많이 발생하여 레이저빔의 흡수에 따른 초점면적의 비가 커진다. 시편의 거칠기 비가 22.6에 비해 39.74일 때 초점면적의 크기가 큰것은 표면이 경면 처리돼 있지 않을 경우, 표면의 난반사 때문에 표면에서의 레이저빔의 흡수율이 커지기 때문이다. 거칠기비가 39.74일 때,  $z=+4\text{mm}$ 일 때와  $z=-4\text{mm}$ 일 때 초점면적의 변화를 비교했다. 초점위치  $z=-4\text{mm}$ 는 출력밀도가 큰 초점위치가 시편표면보다 아래

방향이지만  $z=0$ 로부터 멀어지면 레이저빔의 출력이 감소하면서 표면거칠기와 레이저빔의 흡수율이 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 초점위치를  $z=+4\text{mm}$ 로 하면 출력밀도가 가장 큰 위치가 시편과 직접적으로 접촉되지 않아  $z=-4\text{mm}$ 일 때보다 상대적으로 레이저빔을 반사하는 비율이 커져 경면 처리한 시편과 거의 비슷한 모양으로 레이저빔이 흡수되는 에너지양의 차이가 있음을 의미한다.

표면 거칠기 비가 22.6로 상대적으로 거칠기의 차이가 작을 경우에도  $-2\text{mm} \leq z \leq +2\text{mm}$ 를 벗어나면 출력밀도가 작을 경우 반사율이 증가하여 초점면의 변화비가 달라진다.

이상과 같은 실험결과로부터 본 실험에 사용하고 있는 광학계의 경우 빔 흡수율이 높은 초점위치 근방,  $-2\text{mm} \leq z \leq +2\text{mm}$ 에서는 평균 표면 거칠기가 22~40배정도 차이가 있을 지라도 초점면적의 변화비가 변화하는 범위가 1.4에서 1.6사이로 크지 않았다. 그러나  $z=+4\text{mm}$ 이상 레이저빔의 초점위치가 시편표면으로부터 떨어져 레이저빔의 출력이 감소하면 빔 흡수율이 낮아 표면 거칠기에 따라 레이저 빔의 흡수를 차이가 크게 나타난다. 이것은 저출력으로 표면 경화할 경우에는 표면에서 레이저 빔 흡수율을 높일 수 있는 다양한 방법이 선행되어야 함을 의미한다. 레이저빔의 출력밀도가 클 경우에는 표면 거칠기가  $0.9378\mu\text{m} \sim 0.0236\mu\text{m}$ 내에서 거칠기 비가 22~40배 일지라도 레이저빔의 흡수율의 차이는 0.9~1.1%사이로 거칠기 비의 0.1%에 미치지 못하였다.

### 3.3 경도분포

본 실험에서 제작하여 사용한 열처리 광학계로 열처리한 결과와 디포커싱으로 열처리하여 표면경화한 경화폭과 경도 분포를 비교하기 위해 Fig. 7에 나타냈다. 열처리용 렌즈의 초

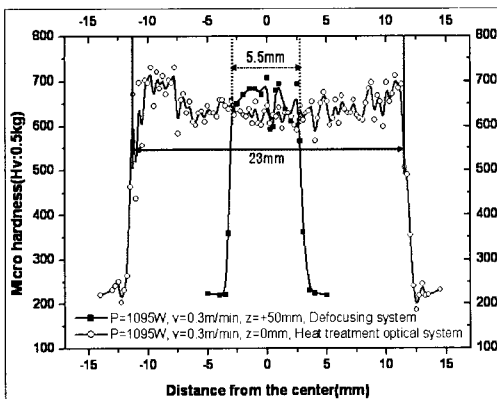


Fig. 7 Microvickers hardness profile of laser hardened zone for focus position

점거리는 195mm로 초점위치를  $z=0$ 으로 하고, 레이저 출력  $P=1095\text{W}$ , 빔 이송속도  $v=0.3\text{m/min}$ 로 하여 표면경화하였다. 반면, 디포커싱을 이용한 표면경화는 초점거리 200mm 렌즈를 초점위치  $z=0$ 보다  $+50\text{mm}$ 인  $z=+50\text{mm}$ , 시편표면에서 레이저 출력  $P=1095\text{W}$ , 빔 이송속도  $v=0.3\text{m/min}$ 로 하여 표면경화하였다.

Fig. 7에 나타난 것처럼 열처리 렌즈를 이용할 경우 표면 폭은 23mm로 디포커싱으로 표면 경화한 경화 폭 5.5mm보다 4배 이상 넓은 경화 폭을 얻었다. 표면경화구간 내의 평균 경도 값은 모두 660Hv로 나타났다. 이는 같은 공정조건인 레이저 출력  $P=1095\text{W}$ , 빔 이송속도  $v=0.3\text{m/min}$ 의 공정조건에서 열처리광학계를 이용하여 표면경화를 하면 경화 층의 경도 값 저하 없이 4배 이상 넓은 경화 폭을 가진 표면경화가 가능함을 의미한다.

레이저 출력  $P=1095\text{W}$ , 초점위치  $z=0$ , 빔 이송속도  $v=0.3\text{m/min}$ ,  $0.5\text{m/min}$ ,  $0.8\text{m/min}$ 로 변화시키고, 빔 조사길이(L)는 80mm로 하여 레이저 빔을 조사하였다.

레이저빔의 이송속도를 증가시키면서 시편표면에 대한 입열량을 변화시켜 표면 경도값은 Fig. 8에 나타났다. 시편표면에 대한 입열량은 레이저빔이 조사될 때 레이저빔을 흡수한 부분의 시편 폭을 W, 레이저빔의 이송속도를 v로 하여 다음 식으로 계산했다.

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

레이저빔의 이송속도를 0.3m/min로 하여 입열량을 증가시키면 경화폭은 23mm였고, 이송속도를 0.8m/min로 입열량을 감소시키면 경화폭은 17mm로 감소하였다. 레이저빔의

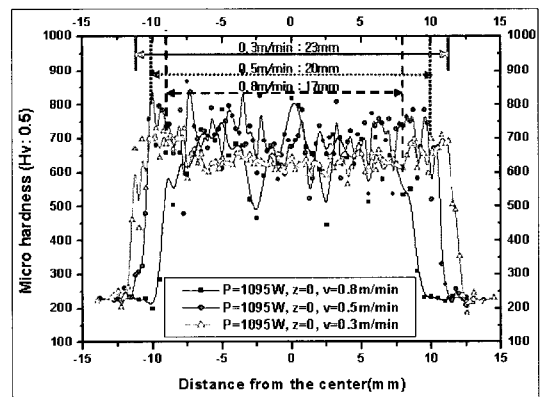


Fig. 8 Microvickers hardness profile of laser hardened zone for travel speed

이송속도를 2.6배 증가시키면 경화폭은 0.7배 감소하였다. 레이저빔의 이송속도가 0.3m/min로 입열량이  $9.521 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 일 때는 입열량이 지나치게 많아 평균 경도값이 660Hv 정도였다. 본 실험조건에서 평균 경도값이 가장 큰 공정조건은 레이저빔 이송속도가 0.5m/min일 때로 입열량  $E=6.596 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다. 이 때 평균경도값은 750Hv이었다. 레이저빔의 이송속도가 0.8m/min로 입열량  $E=4.843 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 일 때는 레이저빔 이송속도가 0.3m/min일 때보다 평균경도값이 710Hv로 오히려 크게 나타났다. 평균경도값에 비해 측정된 경도값이 약 1%정도 요동치는 것은 측정된 위치가 입계내와 입계의 경계층에서 측정되었기 때문이다.

Fig. 8에 나타낸 공정조건에서 경도값은 700Hv 정도로 모재의 경도 200Hv보다 3.5배 정도 경도값이 향상되었다. 레이저빔의 이송속도가 0.3m/min로 입열량을  $E=9.521 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 로 했을 때 다른 공정조건 보다 경도값이 작은 이유는 표면경화시킬 때 경도를 증가시키는 성분은 C와 Mn인데 C의 용점은  $3550^\circ\text{C}$ 이고 Mn은  $1244^\circ\text{C}$ 이기 때문에 Mn등 일부성분이 조대해지거나 기화로 손실되었기 때문이다.

또 한가지 고려할 수 있는 점은 레이저빔에 의한 표면경화는 급가열 급냉각에 의한 침상조직의 마르텐사이트 조직으로의 변화하는 특성을 이용하는 것인데, 레이저 빔의 이송속도가 느릴 경우 레이저 빔과 시편이 상호작용하는 시간이 상대적으로 길어져 냉각시간이 지연되면서 조직이 조대해지기 때문이다. 레이저빔의 광자가 재료입자에 충돌하면 운동에너지가 증가하게 되는데 이 운동하는 방향에 저항하는 힘이 열로 바뀌게 되는 시간이  $10^{-13}$ 초정도이다. 레이저빔에 의한 열의 시상수가  $10^3$ 초 정도인 것을 고려하면 레이저 빔의 이송속도 차이가 0.3m/min는 0.8m/min에 비해 시편의 입자 관점에서 충분히 긴 시간이기 때문에 조직이 조대해져 경도값이 상대적으로 작아진 것이다. 레이저출력 P=1095W, 빔 이송속도  $v=0.3\text{m/min}$ , 초점위치  $z=-1, 0, +1$  위치에서 레이저빔을 시편표면에 조사한 후 경도분포를 측정하여 Fig. 9에 나타냈다. 초점위치의 변화에 따른 경화부(hardened zone)의 폭은 거의 변화가 없다. 레이저빔의 초점위치  $z=0$ 으로 했을 때 평균 경도값은 637Hv이고  $z=-1\text{mm}$ 일 때는 656Hv,  $z=+1\text{mm}$ 일 때는 경도값이 655Hv이었다. 출력과 레이저빔 이송속도가 동일하고 초점거리 위치만 다를 때  $z=-1\text{mm}$ 일 때가 과 입열량 때문에 평균경도값이 상대적으로 작다. 레이저빔에 의한 표면경화 처리가 급가열 급냉각에 의한 자기 냉각법 특성을 활용하는 경화법이기 때문에  $z=+1\text{mm}$ 로 실험했을 경우 모재와 경화부 경계면에 특히 경도값이 크게 측정되었다. 모재와의 경계부에서 특히 경도값이 큰 이유는

레이저빔과 상호작용하는 경화부의 경계선에서 모재로의 열 전달에 의한 급냉각효과로 조직의 성장이 급격히 마무리되었기 때문이다.

경화된 시편의 횡방향 경도분포값을 측정한 Fig. 9에서 활용한 시편의 깊이방향 경도값을 측정하여 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10에 있는 각 실험 결과 값은 깊이방향으로 3번씩 측정된 값을 평균하여 정리하였다. 초점위치가  $-1\text{mm} \leq z \leq +1\text{mm}$ 인 곳에서의 경도깊이는 약  $450\mu\text{m}$ 까지 모재 경도보다 약 3.5배정도 큰 값을 나타내고 있다. 시편표면으로부터 약  $550\mu\text{m}$ 부터는 모재의 경도값을 가지고 있다.  $z=+1\text{mm}$ 일 때 경도값이 약간 큰 이유는 급가열 급냉각 효과에 적절한 정도의 입열량을 가지기 때문에  $z=0$ 이나  $z=-1\text{mm}$ 로 출력 밀도가 큰 빔과 접촉하여 상호작용하지 않았기 때문이다.

초점거리  $z=-1\text{mm}$ ,  $z=0$ 에서는 깊이방향으로 들어가도 경

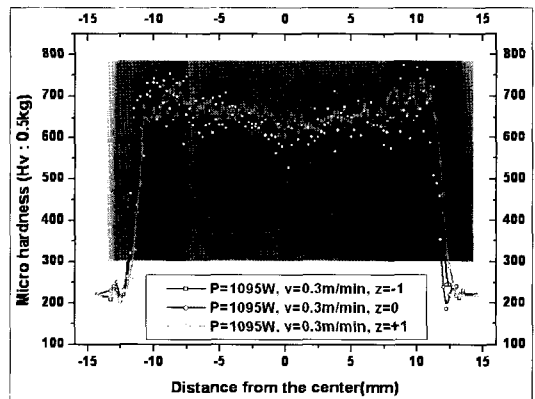


Fig. 9 Microvickers hardness profile of laser hardened zone for focal position

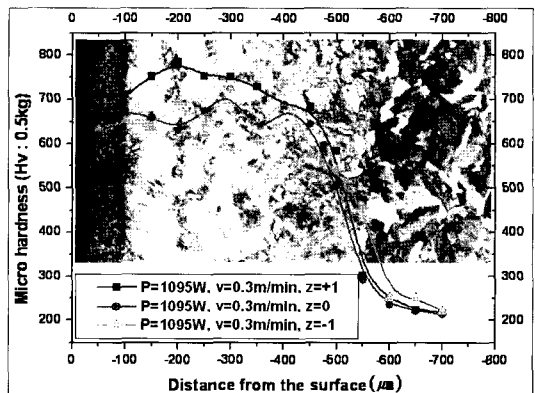


Fig. 10 Microvickers hardness profile of laser hardened zone for focal position

도의 변화가 크지 않고 일정한 값이 나오는 반면  $z=+1\text{mm}$ 에서는 표면에서  $200\mu\text{m}$ 의 깊이까지 경도가 커지며 가장 큰 경도값을 가지다가 다시 작아지는 경향이 나타난다. 이와 같은 현상은 표면부와 비교해서 조직성장에 대한 압축응력이 가장 크게 작용하여 조밀한 조직이 되었기 때문이다.

### 3.4 표면온도 측정 및 미세조직 관찰

레이저출력은  $1095\text{W}$ , 초점위치를  $z=0\text{mm}$ , 빔 조사 길이  $80\text{mm}$ 로 고정하고, 빔 이송속도를 각각  $0.8\text{m/min}$ ,  $0.5\text{m/min}$ ,  $0.3\text{m/min}$ 으로 변화시켜 표면온도를 측정하였다. 레이저빔이 시편의 표면에 조사될 때 적외선 온도계(infrared pyrometer)로 표면온도를 측정하였으며 측정각도는  $45^\circ$ 로 하고 측정위치는 표면경화 중심선으로부터  $1/e$ 위치에서 측정하여 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 나타난 것처럼 표면경화온도는  $1400^\circ\text{C}$  정도였다.

레이저빔 이송속도를 변화시키는 방법으로 입열량을 변화시켜 레이저빔을 시편표면에 조사하면 초기에는 과도현상의 온도분포가 나타났다. 레이저빔의 이송속도가  $0.8\text{m/min}$ , 입열량을  $E=4.84^2 \times 103\text{J/cm}^2$ 로 하여 조사하면 레이저빔이 piercing 후 빔의 이송속도가 빨라 내부로 열이 전달되는 양 때문에 순간적으로 온도가 약  $1100^\circ\text{C}$ 까지 하강한 뒤 레이저표면 경화 온도인  $1400^\circ\text{C}$ 로 되었다. 레이저빔의 이송속도를  $0.5\text{m/min}$ 로 할 경우 초기 약 2초 동안  $1500^\circ\text{C}$ 인 구간이 있는데, 이 현상은 여러 번 반복해서 실험한 결과 같은 현상이 나타났다.

Fig. 11 (c)의 레이저빔 이송속도를  $0.3\text{m/min}$ 로 했을 경우 초기 레이저빔의 흡수율을 증가시키기 위해 피어싱(piercing)하는 기간 동안 온도가 급상승한 후 레이저 빔이 이동하면서 시편내부로 열이 전달되어 일정한 온도를 나타내고 있다. 레이저빔의 이송속도가 빠른 경우 레이저빔 초기 조사할 때 시편내부로의 열전달에 의한 냉각현상을 나타낸 (a)나 이송속도가 느려 높은 입열량 때문에 초기 높은 온도가 나타나는 현상은 설명이 되지만, 레이저빔의 이송속도가  $0.5\text{m/min}$ 일 때 나타나는 온도분포 현상은 더욱 연구해야 할 과제이다.

본 연구에서 잠정적인 고찰내용은 열처리 입열량  $E=6.596 \times 10^3\text{J/cm}^2$ 으로 SCM4의 체적  $50\text{cm}^3$ 인 시편에 레이저빔을 조사시켰을 때 열전달질량과 관계있는 것으로 판단된다.

Fig. 11에서 경도값이 가장 크게 나타나는 (a)의 공정결과와 조직사진을 Fig. 12에 나타냈다.

A와 B는 경화된 영역이고 C와 D는 경계부와 모재이다. A는 레이저빔과 직접 접촉하여 상호 작용하는 부분으로 압축응력을 크게 받는 B의 경우보다 마르텐사이트 조직이 약

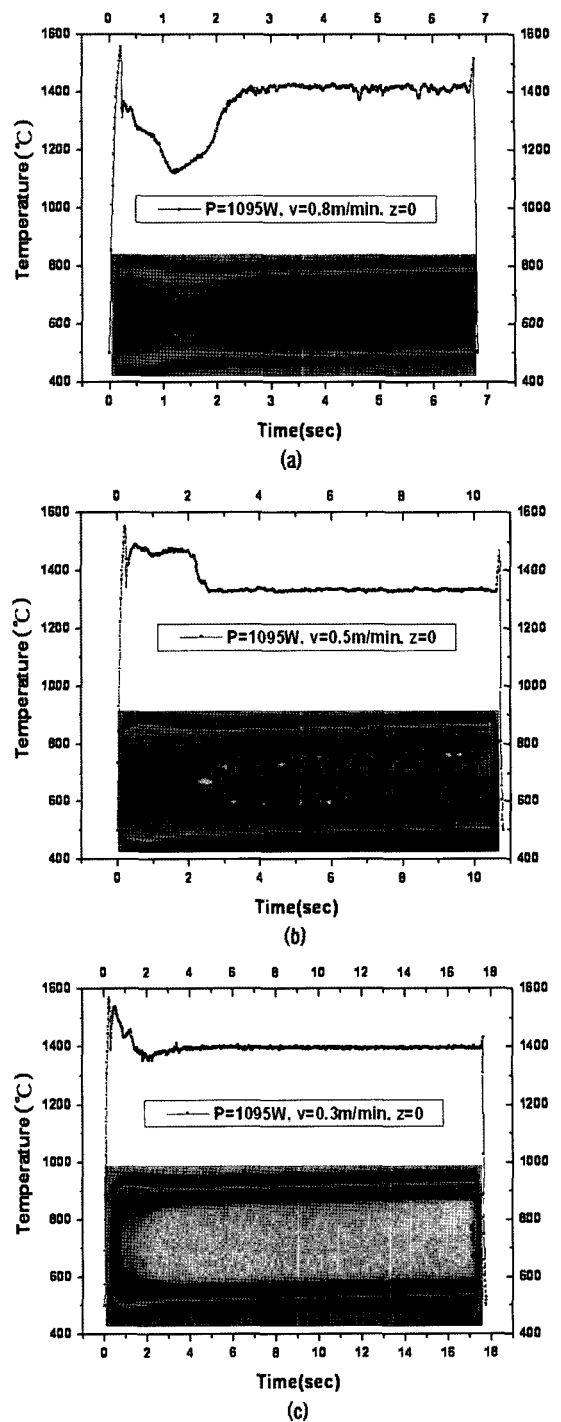


Fig. 11 The results of surface temperature monitoring by laser beam irradiation

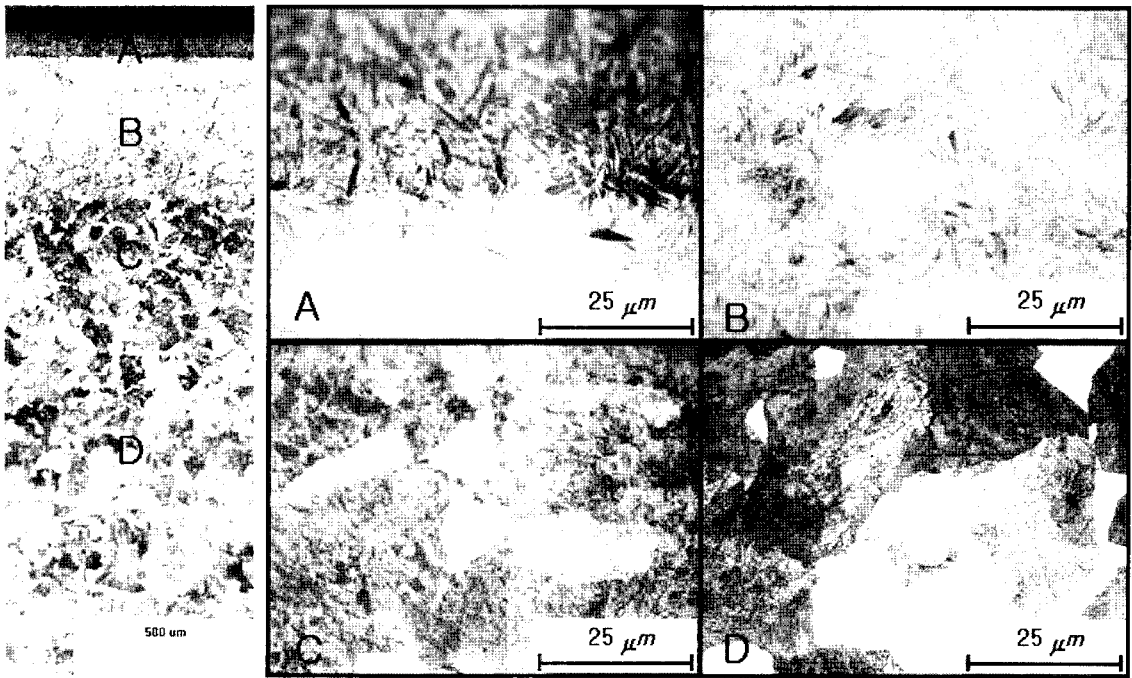


Fig. 12 Microstructures of cross-section after laser surface hardening

간 크게 나타났다. 레이저빔을 시편표면에 조사시키면 기지 조직이 오스테나이트로 되는 것은 보통 0.01~1.0초로 매우 짧고, 레이저빔에 의한 오스테나이트화 온도가 높더라도 그 시간이 매우 짧으므로 입자성장이 극소화 된다. 이와 같은 현상으로 시편의 강도를 높이고 피로저항을 증가시키는 마르텐사이트 조직이 된다. 이와 같은 현상은 Fig. 10에서 설명한 경도분포 크기변화와 일치하고 있다.

모재부분은 페라이트와 펄라이트가 균일하게 분포되었고 경계부분은 모재에 비하여 조직이 작게 분포되었다. 기지조직의 페라이트가 레이저빔이 조사되면 오스테나이트로 고용된다. 페라이트 용해가 끝나면 초석(proeutectoid) 페나이트가 오스테나이트로 변태가 더욱 진행된 다음 레이저 빔이 빠른속도로 진행되면서 급격한 응고 때문에 마르텐사이트 변태동안 커다란 체적 수축이 표면에서 압축 잔류응력으로 된다. 이 응력이 시편의 부식과 마모저항을 증가시킨다. 마르텐사이트의 비체적은 오스테나이트의 비체적보다 크기 때문에 오스테나이트로부터 마르텐사이트로의 상변태과정은 체적이 팽창하게 되고, 모재응력에 영향을 주는 열응력보다 강하게 만든다. 비체적이 다르기 때문에 마르텐사이트가 생성되면 마르텐사이트 영역은 압축을 받게 되어 경도가 증가한다.

#### 4. 결론

연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 구조용합금강을 표면열처리 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면거칠기에 따라 시편 표면에서 레이저 빔의 흡수율이 달라지지만 고출력, 고밀도 열원인 CW Nd:YAG 레이저로 표면을 경화할 때 초점영역 부근에서는 큰 영향을 주지는 않는다.
- (2) 열처리 광학계를 이용해 표면경화를 실시한 후 경도분포, 표면온도와 조직을 관찰하였다니 레이저 출력 P=1095W, 빔이송속도 v=0.3m/min, z=0의 공정조건에서 안정적인 고 균일한 표면경화가 이루어졌다.
- (3) 최적의 공정변수에서 경도 값은 모재에 비해 3.5배 상승하였고, 디포커싱했을 때보다 경화폭이 4배 향상되었다.

#### 후 기

위 논문은 조선대학교 2006년 교내학술연구비지원으로 연구하였습니다.



## 참 고 문 헌

- (1) Kim, J. D., Jung, J. K., Jeon, B. C. and Cho, C. D., 2001, "Wide band laser heat treatment using pyramid polygon mirror," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 35, pp. 285~297.
- (2) John, E. H., Michelle, G. K. and Angela, L. M., 2006, "Property and microstructure evaluation as a function of processing parameters : Large HY-80 steel casting for a US Navy submarine," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, pp. 1397~1409.
- (3) Kulla, M. and Pertek, A., 2004, "Microstructure and properties of borocarbured 15CrNi6 steel after laser surface modification," *Applied Surface Science*, Vol. 236, pp. 98~105.
- (4) Kulla, M. and Pertek, A., 2003, "Microstructure and properties of borided 41Cr4 steel after laser surface modification with re-melting," *Applied Surface Science*, Vol. 214, pp. 278~288.
- (5) Grum, J. and Sturm, R., 1997, "Laser surface melt-hardening of gray and nodular irons," *Applied Surface Science*, Vol. 109/110, pp. 128~132.
- (6) Grum, J. and Slabe, J. M., 2005, "Nonoscale evaluation of laser-based surface treated 12Ni maraging steel," *Applied Surface Science*, Vol. 247, pp. 458~465.
- (7) Hirogaki, T., Nakagawa, H., Hayamizu, M., Kita, Y. and Kakino, Y., 2001, "In-situ heat treatment system for die steels using YAG laser with a machining center," *Precision Engineering*, Vol. 25, pp. 212~217.
- (8) Na, G. D., Yoo, Y. T., Shin, H. J. and Shin, B. H., 2006, "Characteristics Induction and Laser Surface hardening of SM45C Steel," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 39~50.
- (9) Heitkemper, M., Bohne, C., Pyzalla, A. and Fisher, A., 2003, "Fatigue and fracture behaviour of a laser surface heat treated martensitic high-nitrogen tool steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 101~106.
- (10) Mo, Y. W., Yoo, Y. T., Shin, B. H. and Shin, H. J., 2006, "Welding Characteristics on Heat input Changing of Laser Dissimilar Metals Welding," *KSMTE*, Vol. 15, No. 2, pp. 51~58.
- (11) Gutu, I., Petre, C., Mihailescu, I. N., Taca, M., Alexandrescu, E. and Ivanov, I., 2002, "Surface treatment with linearly polarized laser beam at oblique incidence," *Optics & Laser Technology*, Vol. 34, pp. 381~388.