

# 레이저 열원을 이용한 탄소강 환봉의 표면변태경화

김종도\* · 강운주\*\*

\*한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, \*\*한국해양대학교 대학원

## Phase Transformation Induced Surface Hardening of Carbon Steel Rod by Laser Heat Source

J. D. Kim\* · W. J. Kang\*\*

\*Division of Maritime System Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Graduate school of National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약 :** 레이저 재료 가공법은 탁월한 열원 특성으로 인해 용접이나 절단, 천공 및 표면개질법과 같은 기존의 공정법들을 대체해왔다. 특히, 레이저 표면변태경화 공정은 레이저 표면 개질법의 한 분야이다. 본 연구는 레이저 복합가공 메커니즘을 적용하여 탄소강 환봉 표면을 변태경화시키는 공정에 관한 것이며, 지배 공정변수에 따른 기본적인 경화 거동, 경화부의 경도분포 및 상변태 특성에 관한 내용을 담고 있다.

**핵심용어 :** 레이저 변태경화, 가우시안 분포, 원주속도, 이론중첩률, 상변태

**ABSTRACT :** Laser material Processing has replaced conventional machining processes like welding, cutting, drilling and surface modification due to an unique property of laser heat source. Especially, LTH(Laser Transformation Hardening) process is one branch of the surface modification process. This study is related to surface hardening of rod-shaped carbon steel that applied to the lathe based complex processing mechanism and contains a basic behavior of surface hardening with dominant process parameters change, hardness distribution and phase transformation of treated sections.

**KEY WORDS :** LTH(Laser Transformation Hardening), Gaussian distribution, Circumferential speed, Theoretical overlap rate Phase transformation

### 1. 서 론

금속의 표면을 경화시키는 방법에는 변태온

도 이상으로 가열한 후, 급랭시켜 경화시키는 변태경화법(transformation hardening)과 탄소나 질소 등을 침투, 확산시켜 경화시키는

\* jdkim@hhu.ac.kr

\*\* kmukwj@hanmail.net 051)410-4676

침탄(carburizing) 및 질화법(nitriding) 등이 있다. 특히, 변태경화법으로 주로 많이 이용되고 있는 유도가열법(induction heating)은 요구되는 경도를 얻을 수는 있지만 많은 에너지가 소모되고 추가적인 냉각수단이 필요할 뿐만 아니라 재료의 표면과 내부의 냉각 속도 차이로 인해 재료의 초과변형을 유발한다. 또한 유도코일 설계의 제약으로 인해 복잡한 형상을 가진 가공재의 경우에는 균일한 경화처리를 하는것이 불가능하다. 반면, 레이저를 이용한 표면 변태경화법(LTH : Laser Transformation Hardening)은 국소의 고밀도 열원이라는 특성 때문에 변형이 적고 자기 냉각(self quenching)에 의해 경화되므로 추가적인 냉각수단이 불요하며, 복잡한 형상이나 국소부위 경화처리도 가능할 뿐만 아니라 우수한 경도를 얻을 수 있다는 장점을 가진다[1]. 기존의 레이저 변태경화 즉, 표면 경화에 관한 연구는 대출력 CO<sub>2</sub> 레이저 장치를 이용하여 주로 평판 상에서 많이 행해졌다[2]~[4]. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 레이저보다 재료에 대한 빔 흡수율이 양호한 CW(continuous wave) Nd:YAG 레이저를 열원으로 도입하였으며, 시험편으로는 기계구조용으로 많이 사용되는 SM45C강을 채택하였다. 기존의 여러 연구와는 달리 평판(plate)보다는 봉상(rod-shaped)의 시험편을 주로 이용하였으며, 열처리에 적합하도록 정형화(beam shaping)한 빔이 아니라 파워밀도가 가우스 분포인 원형빔(circular gaussian beam)을 적용하였다. 또한 시험편을 회전시키기 위한 수단으로서 소형 선반을 제작, 가공 시스템에 적용하였다. 본 연구의 목적은 선반기반의 복합가공 메커니즘을 규명하고 지배변수에 따른 표면경화 특성과 온도 분포 및 경화부의 현미경 사진을 통한 각 부위별 조직적인 차이를 규명함과 아울러 표면 경화공정에 있어서 가우시안 빔의 적용 가능성을 검토하는데 있다.

## 2. 실험재료, 장치 및 방법

### 2.1 실험재료 및 장치

실험재료는 기계구조용으로 널리 사용되고 있는 탄소 함량 0.43%, 모재 경도 250H<sub>v</sub>(vickers hardness)의 SM45C강이며, 봉 형상의 시험편을 실험에 적용하였다.

Table 1 Chemical composition of specimens

Chemical composition of SM45C (%)					
C	Si	Mn	P	S	Co
0.43	0.3	0.75	0.18	0.07	0.14
Ni	Cr	Mo	Al	V	Ti
0.05	0.1	0.01	0.019	0.001	0.004

실험장치는 크게 4kW급 CW Nd:YAG 레이저, 재연오차(repetition error)  $\pm 0.06\text{mm}$ 의 6축 제어로봇 및 회전수 제어범위 2~1100rpm인 소형선반으로 구성된다. Table 1과 Fig.1에 각각 SM45C강의 화학조성과 실험 개략도 또한, 집광 광학계는 가우시안 분포의 원형빔

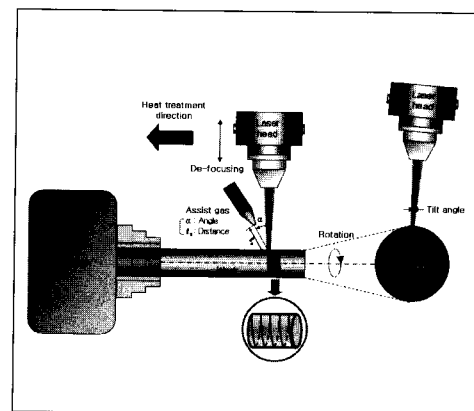


Fig.1 Experimental arrangements

광학헤드(optical head of circular gaussian beam)를 사용하였다. 광학계는 비초점거리(defocusing distance)의 증가에 따라 스폿 직경(spot diameter)이 거의 선형적으로 증가하는 특성을 보였으며 실험에는 비초점거리 20, 40, 60mm에서 얻어진 각각 2.8, 5.0, 7.0mm 직경의 빔을 적용하였다.

### 2.2 실험방법

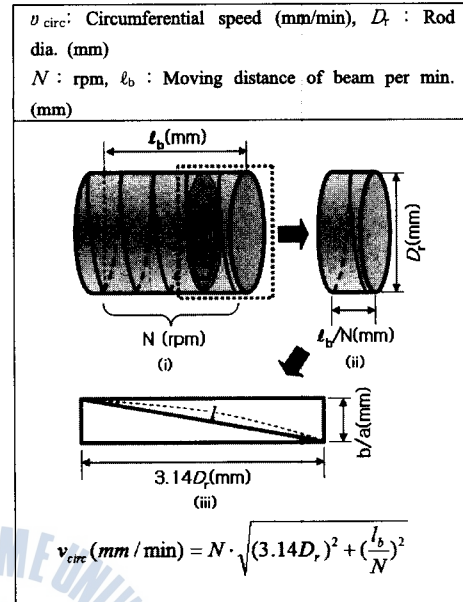
실험은 Fig.1에 나타난 바와 같이, 시편이 회전하는 상태에서 빔이 그 위를 진행하는 방식으로 수행하였으며 레이저 조사중에는 산화를 방지하기 위해 질소가스(N<sub>2</sub>)를 이용하여 빔의 진행방향으로부터 특정 각도( $\alpha$ )로 처리부 표면을 실드(shield)하였다. 특히, 시편이 회전하는 상태에서 빔이 진행하므로 처리 속도는 원주속도( $v_{circ}$  : circumferential speed)의 개념을, 공정조건에 따라 겹침이 발생하는 경우에 있어서는 이론중첩률( $R_t$  : theoretical overlap rate)의 개념을 수식화하여 적용하였다. 원주속도와 이론중첩률의 개념을 Fig.2에 나타낸다.

## 3. 실험결과

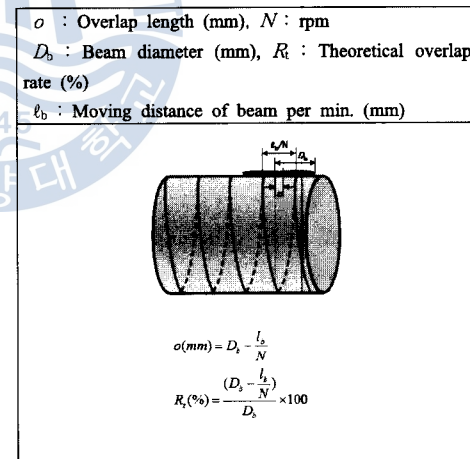
### 3.1 지배변수에 따른 표면경화 특성

#### 3.1.1 레이저 출력

레이저 출력은 레이저 프로세스에 있어서 가장 기본이 되는 변수이며 출력의 증가에 따라 재료에 가해지는 입열량(heat input)은 증가하게 된다. Fig.3에 출력 변화에 따른 표면 및 단면사진을 나타낸다. 빔 직경( $D_b$ ) 5.0mm, 회전수( $N$ ) 20rpm, 빔 이송속도( $v_b$ ) 54mm/min 및 실드가스 유량( $G_s$ )을 20ℓ/min로 고정하고 출력을 1.0~2.0kW까지 200W 간격으로 실험하였다.



(a) Circumferential speed



(b) Theoretical overlap rate

Fig. 2 Concepts of the circumferential speed and theoretical overlap rate

이때, 원주속도( $v_{circ}$ )와 이론중첩률( $R_t$ )은 Fig. 2의 계산식에 따라 각각 1.5m/min,

$D_b : 5.0\text{mm}, N : 20\text{rpm}, v_b : 54\text{mm/min}, G_s : 20\ell/\text{min}$			
$v_{\text{circ}} : 1.5 \text{ m/min}, R_i : 46\%$			
Power ( $P_L$ )	1.0kW	1.2kW	1.4kW
Obs. pos.			
Surface			
Cross section			
Power ( $P_L$ )	1.6kW	1.8kW	2.0kW
Obs. pos.			
Surface			
Cross section			

Fig.3 Characteristics of LTH as a laser power

46%로 계산되었다. Fig. 3을 통해서 알 수 있듯이, 1.0kW 정도로 출력이 증가함에 따라 입열량의 증가로 열처리 깊이가 점차적으로 깊어졌다. 비교적 낮은 출력에서는 거의 열처리 되지 않은 반면, 상대적으로 높은 2.0kW 출력에서는 표면의 일부가 용융하여 심하게 왜곡된 것을 확인할 수 있다.

### 3.1.2 시편 회전수

Fig.2(a) 식과 같이 원주속도( $v_{\text{circ.}}$ ) 즉, 열처리 속도는 시편 회전수( $N$ )에 따라 달라진다. 열처리 속도는 단위 시간에 재료에 가해지는 입열량과 관련이 있다. Fig.4에 시편 회전수에 따른 표면 및 단면사진을 나타낸다. 회전수는 10~30rpm까지 10rpm 간격으로 나누어 실험하였으며 이 때, 관각 회전수에 해당하는 원주속도( $v_{\text{circ.}}$ )는 각각 0.75, 1.5, 2.25m/min, 이론중첩률( $R_i$ )은 각

$D_b : 5.0\text{mm}, P_L : 1.4\text{kW}, v_b : 54\text{mm/min}, G_s : 20 \ell/\text{min}$			
$v_{\text{circ}}$	0.75m/min	1.5m/min	2.25m/min
$R_i$	-	46%	64%
rpm ( $N$ )	10rpm	20rpm	30rpm
Obs. pos.			
Surface			
Cross section			

Fig.4 Characteristics of LTH as a rpm

각 0, 46, 64%로 계산되었다. 시편 회전수가 낮을수록 단위시간동안 재료에 가해지는 입열량이 증가하므로 열처리 깊이는 증가하지만 표면이 심하게 용융한 것을 확인할 수 있었다. 반면, 회전수의 증가에 따라 표면 용융현상은 사라졌지만 입열량의 저하로 열처리 깊이는 점차 얕아졌다.

$D_b : 2.8\text{mm}, P_L : 0.5\text{kW}, N : 20\text{rpm}, G_s : 20\ell/\text{min}$			
$v_{\text{circ}}$	abt. 1.5m/min		
$R_i$	70%	40%	10%
Beam traveling speed ( $v_b$ )	18mm/min	36mm/min	54mm/min
Obs. pos.			
Surface			
Cross section			

Fig. 5 Characteristics of LTH as a beam traveling speed

### 3.1.3 빔 이송속도

빔 이송속도 역시 시편 회전수와 마찬가지로 원주속도에 관여하는 변수 중의 하나이다. 빔 이송속도 역시 시편 회전수와 마

찬가지로 그러나 빔 이송속도( $u_b$ )는 원주 속도 변화에 크게 영향을 미치지 못하였다. 빔 이송속도에 따른 열처리 표면 및 단면사진을 Fig. 5에 나타낸다. 빔 이송속도 변화에 따른 원주속도의 변화가 거의 없기 때문에 입열량 변화가 적어 열처리 깊이가 변화는 그다지 뚜렷하지 않다. 그러나 빔 이송속도의 증가에 따라 중첩률은 점차적으로 감소한다. 또한 이론중첩률이 40%임에도 불구하고 실제 중첩은 거의 이뤄지지 않는 현상을 보이는데, 이는 빔의 파워밀도가 가우시안 분포를 가지기 때문에 가장자리 부분은 충분히 가열되지 못하는데 기인한다.

### 3.2 경화부 경도분포

경도는 빔의 진행방향인 종방향(longitudinal)과 깊이방향(depth-directional)으로 나누어서 측정하였다. 종방향 경도는 표면에서 깊이  $100\mu\text{m}$  지점을  $300\mu\text{m}$ 간격으로 측정하였으며, 깊이방향 경도는 종방향 경도 분포 중 최고 및 최저점에서 깊이방향  $150\mu\text{m}$ 간격으로 측정하였다. Fig.6에 경도분포 측정 결과를 나타낸다. 종방향 경도분포는 주기를 가지고 증감을 반복하는 양상을 나타내었다. 이는 중첩에 의해 발생하는 불가피한 결과인데, 중첩부 부근에서 직전에 경화된 조직은 빔의 중첩에 의해 재가열되어 템퍼링(tempering)되기 때문이다. 또한 중첩 경계에 가까울수록 더 높은 온도로 템퍼링 되므로 경도 최고점에서 중첩경계로 갈수록 경도가 점차 저하하는 것도 확인할 수 있다. 템퍼링된 조직의 경도는 대략  $350\text{H}_v$  정도로 모재의 경도( $250\text{H}_v$ )보다 높은 값을 나타내었다. 깊이방향 경도분포는 최고점 및 최저점에서 약간 다른 양상을 보였는데, 최고점에서는 특정 깊이까지

높은 경도를 유지하다가 점차적으로 감소하여 모재의 경도로 수렴하는 전형적인 분포양상을 보였으나, 최저점에서의 경도분포는 약간 상승하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 이는 경도의 최저점이 중첩경계 부근에 있기 때문인데, 최저점에서는 깊이방향으로 내려갈수록 경도 측정 포인트가 중첩경계로부터 멀어져 열 영향을 상대적으로 덜 받기 때문이다.

### 3.3 경화부 조직

경도분포 특성에 입각하여 조직적인 차이를 규명하기 위해 광학현미경을 통해서 경화부 부위별 조직을 관찰하였다. 부위별 확대사진을 Fig. 7에 나타낸다. 종방향 및 깊이방향으로 총 6부위로 나누어 보았다. 모재 ④는 페라이트와 펄라이트의 혼합조직으로 중탄소강의 전형적인 조직임을 알 수 있다. ①, ②, ③은 경화부인데 하부조직일수록 마르텐사이트(martensite)층에 흰색으로 표시되는 잔류오스테나이트(residual austenite)량이 증가하고 있는데 이 때문에 깊이에 따른 경도가 점차 저하하게 된다[5]. 조직 ⑤는 중첩열영향부로 마르텐사이트가 템퍼링 되어 미세 펄라이트(fine pearlite)조직을 형성하고 있으며 ⑥은 중첩경계부분을 나타낸 것으로 경계를 중심으로 템퍼링 영역과 경화영역이 뚜렷하게 나뉘어 있다. 이 부분은 직전의 경화조직이 다시 변태 온도 이상으로 가열은 되지만 주변에 축적된 열에 의해 냉각속도가 느려지므로 페라이트와 펄라이트 및 오스테나이트가 혼재할 것으로 생각된다.

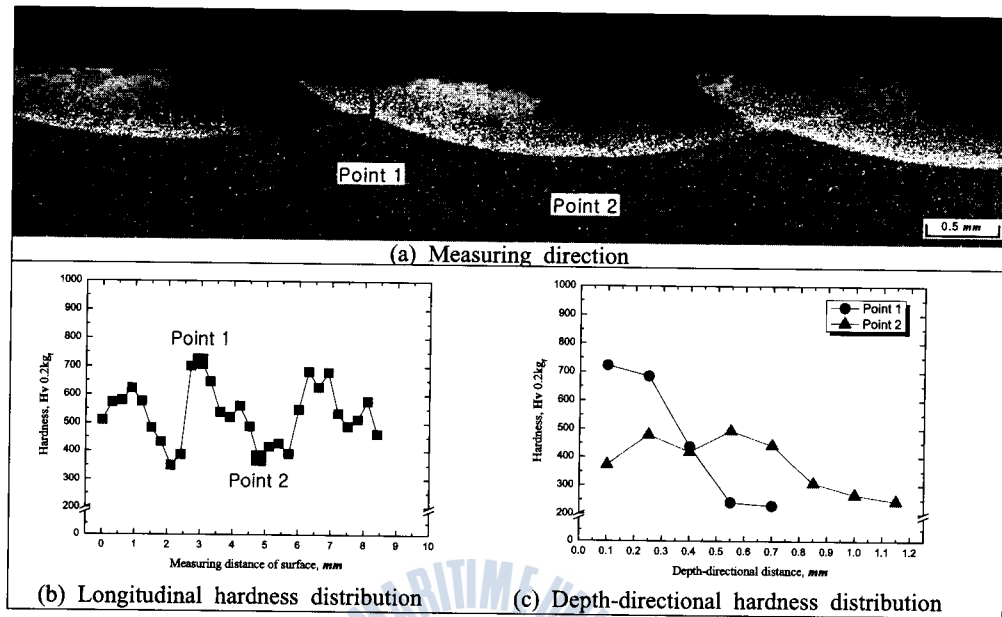


Fig.6 Hardness distribution of the hardened zone  
 $[D_b : 5.0\text{mm}, P_L : 1.8\text{kW}, N : 22\text{rpm}, v_b : 72\text{mm/min}, G_s : 20 \ell/\text{min}]$

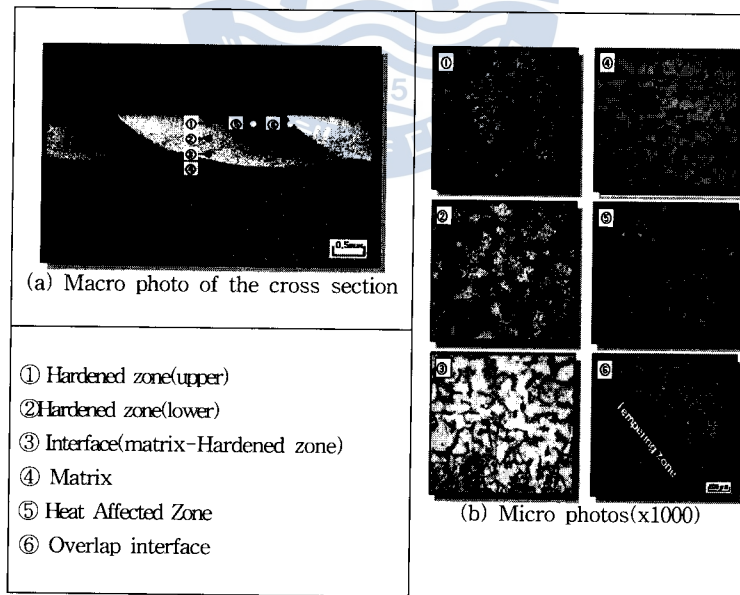


Fig.7 Micro photos as a local part of the hardened zone $[D_b : 5.0\text{mm}, P_L : 1.7\text{kW}, N : 20\text{rpm}, v_b : 54\text{mm/min}, G_s : 20 \ell/\text{min}]$



## 4. 결 론

가우시안 분포의 레이저 열원을 이용하여 SM45C 환봉을 표면경화에 관한 연구를 수행하였으며 그 결과를 다음과 같이 요약한다.

(1) 공정 지배변수에 따른 표면경화 특성 레이저 출력은 증가할수록 시편회전수는 감소할수록 경화 깊이는 증가하였다. 그러나 빔 이송속도에 따라서는 거의 변화가 없었으며 중첩률이 크게 변하는 특성을 보였다.

(2) 경화부 경도분포

종방향 경도분포는 중첩에 의한 경화조직의 템퍼링 효과로 인해 일정 주기로 증감을 반복하는 사이클적인 양상을 보였으며 깊이방향 경도분포는 하부로 내려갈수록 점차 감소하는 양상을 보였다.

(3) 경화부 조직

모재는 중탄소강의 전형적인 조직인 페라이트와 펄라이트로 구성되어 있었으며 경화부는 마르텐사이트와 잔류오스테나이트의 혼재조직, 중첩 열영향부는 템퍼링에 의한 미세 펄라이트 조직이었다. 중첩 경계부는 복잡한 열이력을 가지는 부분으로 페라이트, 펄라이트 및 오스테나이트의 혼재 조직인 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지원 지역산업기술개발사업인 "레이저 복합가공기용 핵심광학모듈 개발 : 10024308" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] John F. Ready, "Lia handbook of laser material processing, Chapter. 7", Laser Institute of America, pp. 223~261, 2001.
- [2] 丸尾 大, 宮本 勇, 石出 孝, 荒全吉明, "レーザ焼入れの研究", 溶接學會誌, 第50卷 第2号, pp. 82~88, 1981.
- [3] 柴田公博, "レーザ焼入れの實際", 溶接學會誌, 第64卷(1995) 第3号, pp. 10~13, 1995.
- [4] 나석주, 김성도, 이건이, 김태균, "SM45C 강 레이저 표면경화처리에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 53~62, 1987.
- [5] Zhiyue Xu, Claude B. Reed, Keng H. Leong, Boyd V. Hunter, "Pulsed Laser Surface Hardening of Ferrous Alloys", ICALOE, pp. 32~38, 1999.

원고접수일 : 2006년 12월 28일

원고채택일 : 2007년 1월 24일

