

탄소강 환봉의 레이저 표면변태경화 특성에 관한 연구 (I)

- 가우시안 파워밀도 분포의 레이저 열원을 이용한 표면변태경화 특성 -

김종도* · 강운주**

*한국해양대학교 기관시스템공학부

**한국해양대학교 대학원

Study on Characteristics of Laser Surface Transformation Hardening for Rod-shaped Carbon Steel (I)

- Characteristics of Surface Transformation Hardening by Laser Heat Source with Gaussian Intensity distribution -

Jong-Do Kim* and Woon-Ju Kang**

*Division of Marine Engineering System, Korea Marine University, Busan 606-791, Korea

**Graduated school, Korea Marine University, Busan 606-791, Korea

Abstract

Laser Material Processing has been replaced the conventional machining systems - cutting, drilling, welding and surface modification and so on. Especially, LTH(Laser Transformation Hardening) process is one branch of the laser surface modification process. Conventionally, some techniques like a gas carburizing and nitriding as well as induction and torch heating have been used to harden the carbon steels. But these methods not only request post-machining resulted from a deformation but also have complex processing procedures. Besides, LTH process has some merits as : 1. It is easy to control the case depth because of output(laser power) adjustability. 2. It is able to harden the localized and complicated area and minimize a deformation due to a unique property of a localized heat source. 3. An additional cooling medium is not required due to self quenching. 4. A prominent hardening results can be obtained. This study is related to the surface hardening of the rod-shaped carbon steel applied to the lathe based complex processing mechanism, a basic behavior of surface hardening, hardness distribution and structural characteristics in the hardened zone.

*Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received May 21, 2007)

Key Words : LTH(Laser Transformation Hardening), Self quenching, Gaussian distribution

1. 서 론

금속의 표면을 경화시키는 방법에는 변태온도 이상으로 가열한 후, 급랭시켜 경화시키는 변태경화법(transformation hardening)과 탄소나 질소 등을 침투, 확산시켜 경화시키는 침탄(carburizing) 및 질화법(nitriding) 등이 있다. 특히, 변태경화법으로 주로 많이 이용되고 있는 유도가열법(induction heating)은 요구되는 경

도를 얻을 수는 있지만 많은 에너지가 소모되고 추가적인 냉각수단이 필요할 뿐만 아니라 재료의 표면과 내부의 냉각속도 차이로 인한 초과변형을 유발한다. 또한 유도코일 설계의 제약으로 인해 복잡한 형상을 가진 가공체의 경우에는 균일한 경화처리를 하는 것이 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

필요하지 않으며, 복잡한 형상이나 국소부위 경화처리도 가능할 뿐만 아니라 우수한 경도를 얻을 수 있다^{1,2)}.

기존의 레이저 변태경화 즉, 표면경화에 관한 연구는 대출력 CO₂ 레이저 장치를 이용하여 주로 평판 상에서 많이 행해졌다³⁻⁵⁾. 본 연구에서는 CO₂ 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 시편을 주로 이용하였으며, 열처리에 적합하도록 정형화(beam shaping)한 빔이 아니라 파워밀도가 가우시안 분포인 빔(gaussian beam)을 적용하였다. 또한 시편을 회전시키기 위한 수단으로서 소형 선반을 제작, 가공 시스템에 적용하였다. 본 연구의 목적은 선반 기반의 복합가공 메커니즘을 규명하고 지배변수에 따른 열처리 특성과 경도분포 및 경화부의 현미경 사진을 통한 각 부위별 조직적인 차이를 규명하는데 있다.

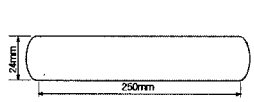

2. 실험재료, 장치 및 방법

2.1 사용재료

실험재료는 기계구조용으로 널리 사용되고 있는 탄소 함량 0.45%의 SM45C강으로 모재경도는 250HV_{0.05}(vickers hardness)이다. 실험에는 평판과 봉상의 두 가지 시편을 적용하였다. Table 1에 SM45C강의 기타 화학조성 및 시편의 규격을 나타낸다.

실험장치는 크게 4kW급 CW Nd:YAG 레이저, 재연 오차(repetition error) ± 0.06mm의 6축 제어로봇 및 회전수 제어범위 2~1100rpm인 소형선반으로 구성된다. Fig. 1에 평판 및 환봉 실험장치 개략도를 나타낸다.

Table 1 Chemical composition and dimension of specimen

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
Dimension of specimen					
 <p>(a) Rod type</p>			 <p>(b) Plate type</p>		

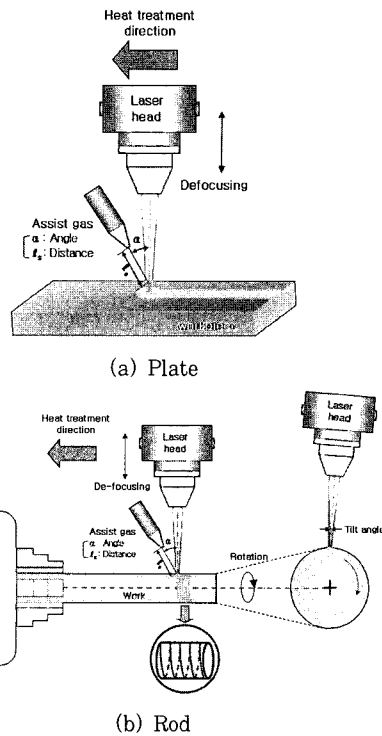


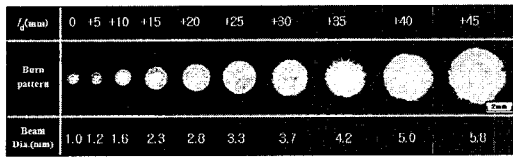
Fig. 1 Experimental arrangement

또한, 집광 광학계는 가우시안 분포의 원형빔 광학헤드(optical head of circular gaussian beam)를 사용하였다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 비초점 거리(defocusing distance)의 증가에 따라 스폿의 직경(spot diameter)이 거의 선형적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 실험에는 비초점 거리(defocusing distance) 20, 40, 60mm에서 얻어진 각각 2.8, 5.0, 7.0mm 직경의 빔을 적용하였다.

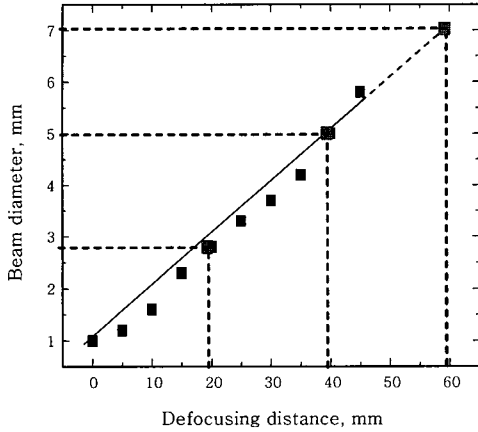
2.2 실험방법

실험은 평판과 환봉실험으로 나누어 수행하였다. 우선, 평판실험을 통해 시편의 움직임과 같은 외부 조건을 배제한 기본적인 빔 자체만의 경화 특성을 파악하고 출력 및 빔 이송속도 조건을 개략적으로 선정한 뒤, 환봉실험에 적용하여 그 경향을 파악, 분석하고자 하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 모든 실험에서 빔의 진행방향으로부터 특정 각도(alpha)로 질소가스(N₂)를 이용하여 경화 표면을 실드(shield)하였다.

환봉실험의 경우에 있어서는 환봉이 회전하는 상태에서 빔이 진행하므로 열처리 속도는 평판실험과는 달리 원주속도(v_{circ} : circumferential speed)의 개념을, 조건에 따라 중첩이 이뤄지는 경우에는 이론 중첩률(R_t : theoretical overlap rate)의 개념을 도입하였다. 원주속도와 중첩률의 개념을 Fig. 3에 나타낸다. 도출된



(a) Burn pattern



(b) Spot diameter as a defocusing distance

Fig. 2 Defocusing characteristics of optic head

식에 의하면 원주속도는 회전수와 빔 이송속도의 함수이며, 이론 중첩률은 빔 사이즈와 회전수가 관계함을 알 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지배변수에 따른 표면경화 특성

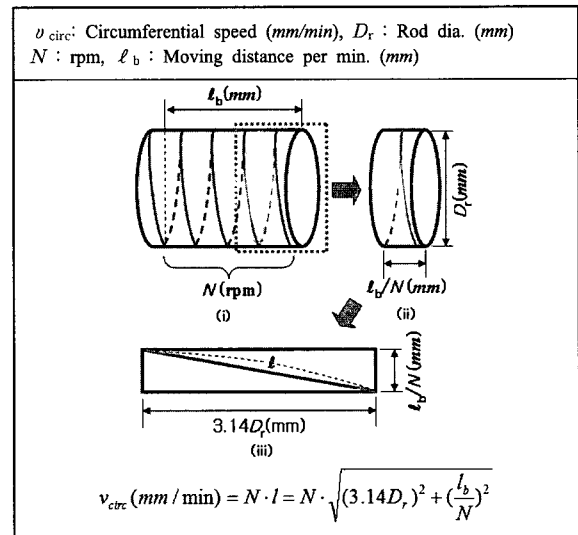
3.1.1 레이저 출력

레이저 출력은 레이저 프로세스에 있어서 가장 기본이 되는 변수이며 출력의 증가에 따라 재료에 가해지는 입열량(heat input)이 증가하게 된다. Fig. 4에 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 20 l/min로 고정하고 출력을 1.0~2.0kW까지 200W 간격으로 실험하였다. 이때, 원주속도(v_{circ})와 이론중첩률(R_t)은 Fig. 3의 계산식에 따라 각각 1.5m/min, 46%로 계산되었다. Fig. 4를 통해서 알 수 있듯이, 출력의 증가에 따라 입열량이 증가하므로 경화 깊이는 점차적으로 깊어진다. 1.0kW의 비교적 낮은 출력에서는 거의 경화되지 않았으며 표면의 연삭 무늬도 그대로 남아있는 반면, 상대적으로 높은 2.0kW 출력에서는 표면의 일부가 용융하여 심하게 왜곡된 것을 확인할 수 있다.

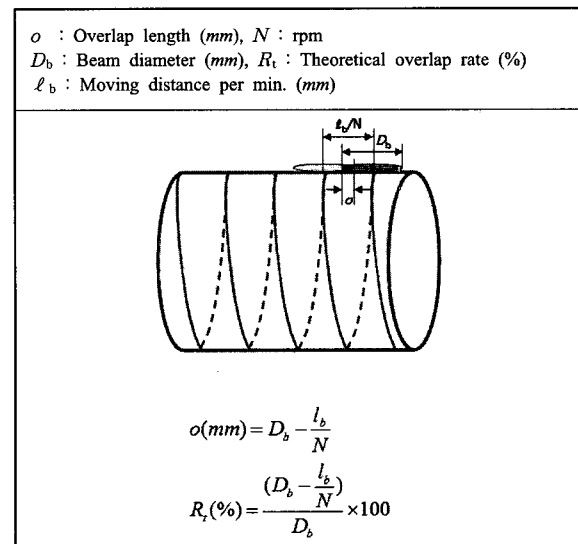
3.1.2 시편 회전수

Fig. 3(a) 식과 같이 원주속도(v_{circ}) 즉, 열처리 속도는 시편 회전수(N)에 따라 달라진다. 열처리 속도는 단위 시간당 재료에 가해지는 입열량과 관련이 있다. Fig. 5에 시편 회전수에 따른 경화부 표면 및 단면사진을 나타낸다.

회전수는 10~30rpm까지 10rpm 간격으로 나누어 실험하였으며 이 때, 각 회전수에 해당하는 원주속도는 각각 0.75, 1.5, 2.25m/min, 이론 중첩률(R_t)은 각각 0, 46, 64%로 계산되었다. 시편 회전수가 낮을수록 단위시간동안 재료에 가해지는 입열량이 증가하므로 경화 깊이 역시 증가하지만 표면이 심하게 용융한 것을 확인할 수 있다. 또한, 회전수의 증가에 따라 표면 용



(a) Circumferential speed



(b) Theoretical overlap rate

Fig. 3 Concepts of the circumferential speed and theoretical overlap rate

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

Fig. 4 Hardening characteristic as laser power

용현상은 사라졌지만 입열량의 저하로 인하여 경화 깊이는 점차 얕아진다.

3.1.3 빔 이송속도

빔 이송속도 역시 시편 회전수와 마찬가지로 원주속도에 관여하는 변수 중의 하나이다. 그러나 본 실험에 적용한 조건 범위 내의 빔 이송속도(v_b)는 원주속도 변화에 크게 영향을 미치지 못하였다.

빔 이송속도에 따른 경화부 표면 및 단면사진을 Fig. 6에 나타낸다. 빔 이송속도의 변화에 따라 원주속도의 변화가 거의 없기 때문에 입열량 변화가 적어 경화 깊이 변화는 그다지 뚜렷하지 않다. 그러나 빔 이송속도의 증가에 따라 이론 중첩률은 70%에서부터 10%까지 감소한다. 표면 및 단면사진을 통해서도 알 수 있듯이

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

Fig. 5 Hardening characteristic as rpm

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

Fig. 6 Hardening characteristic as beam traveling speed

빔 이송속도의 증가에 따라 실제 중첩률 현저하게 감소하고 있다. 또한 이론 중첩률이 40%임에도 불구하고 중첩은 거의 이뤄지지 않는 현상을 보이는데, 이는 번패턴(burn pattern)에 의해 실측된 스폿과 재료의 열처리에 유효한 스폿 직경에 차이가 있음을 시사한다.

3.2 열축적이 경화부에 미치는 영향

환봉은 선반의 척(chuck)에 고정되어 회전하는 상태에서 레이저 광이 조사되므로 열이 배출될 수 있는 경로는 시편의 종방향(longitudinal)으로 제한된다. 그러므로 시간이 지남에 따라 점차적으로 열이 재료 내부에 축적되어 경화 깊이, 폭 및 중첩률에 영향을 미치게 된다. Fig. 7에 특정 조건으로 경화처리한 시편의 단면사진과 경화부 위치별 깊이, 폭 및 중첩률의 변화를 나타낸다. 나중에 경화된 부분일수록 열처리 깊이, 폭 및 실제 중첩률(R_p : practical overlap rate)이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 실험조건이 달라지더라도 동일하게 나타나는 현상이다. 단, 입열량에 따른 깊이나 폭 및 중첩률의 평균적인 변화만 있을 뿐이며 측정 포인트에 따른 증가 추이에는 변함이 없다. 즉, 출력이 증가하거나 시편회전수가 감소하면 입열량이 증가하므로 열처리 깊이, 폭 및 중첩률의 평균값이 증가하더라도 시편 내 위치별 변화 양상은 동일하다.

한편, 빔 이송속도의 변화에 따른 원주속도의 변화가 거의 없기 때문에 입열량 역시 거의 변화가 없지만 중첩률은 비교적 크게 변한다는 것은 이미 앞에서 언급하였다. 그러나 입열량이 비슷하다 하더라도 중첩률의 증가에 따라 열축적은 더욱 심해질 것으로 판단하였다. Fig. 8은 열축적에 있어서 중첩률이 미치는 영향을 파악하기 위해서 평판 상에서 이론 중첩률(R_t)만을 변수로 하여 실험한 결과이다. 이론 중첩률이 증가할수록

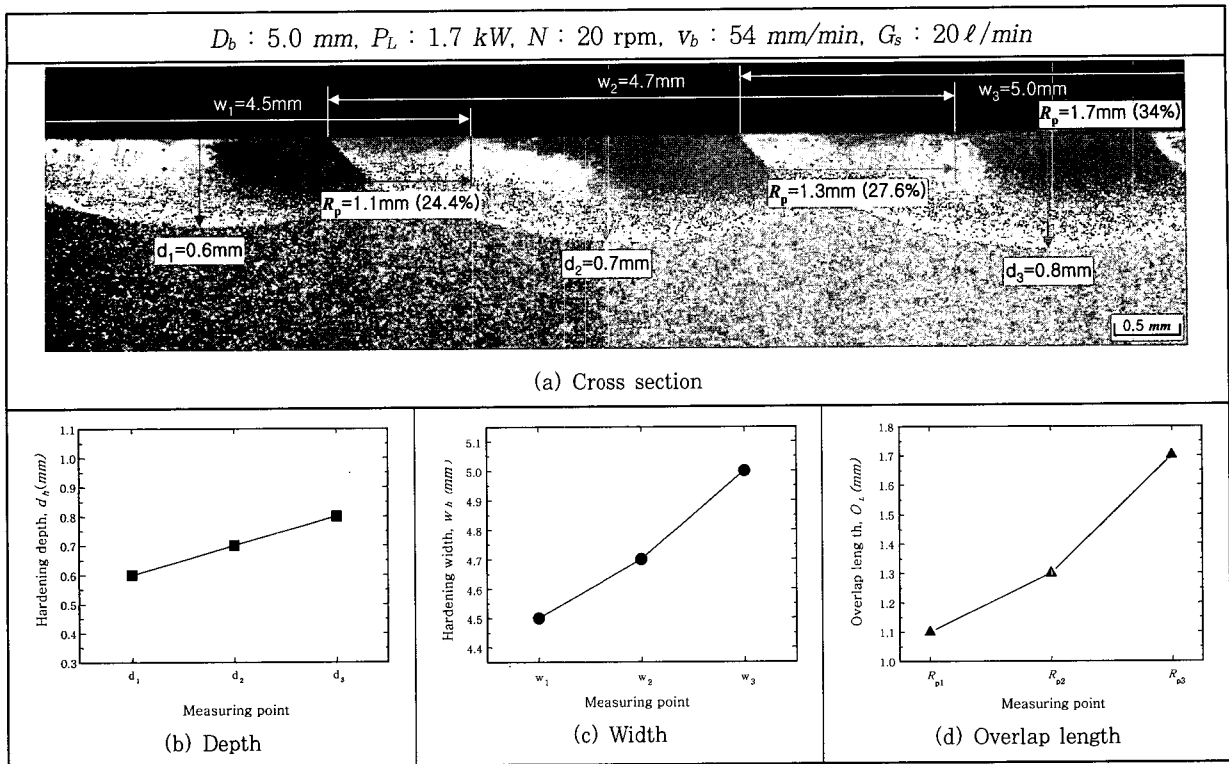


Fig. 7 Change of depth, width and overlap rate(R_p) by heat deposition

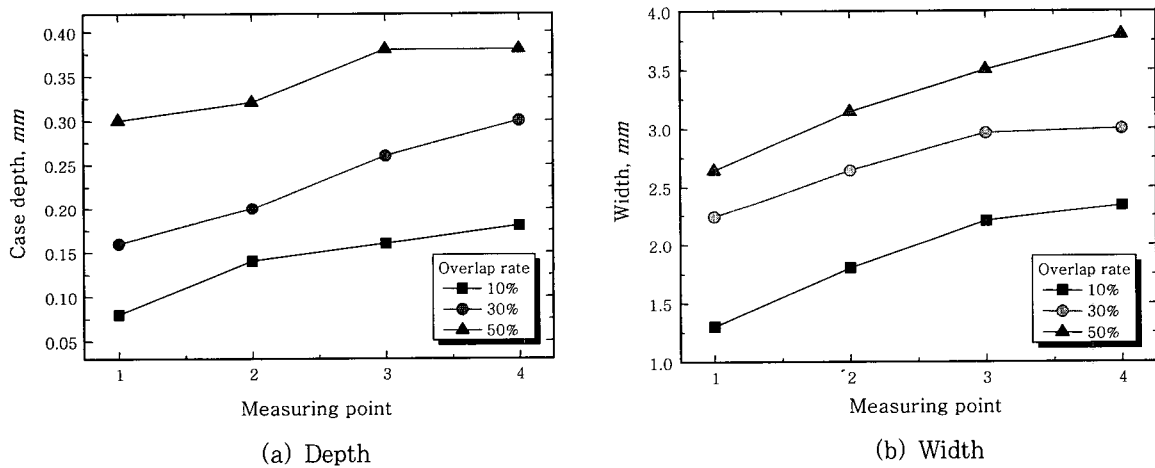


Fig. 8 Effect of heat deposition as theoretical overlap rate (on-plate)

[$D_b : 5.0\text{mm}$, $P_L : 1.4\text{kW}$, $v_b : 54\text{mm/min}$, $G_s : 20\ell/\text{min}$]

열처리 깊이와 폭의 평균값이 증가할 뿐만 아니라 나중에 처리된 부분일수록(측정점 1→4) 깊어지는 양상을 보이고 있는데, 이는 중첩률의 증가에 따라 열축적이 더욱 증가하는 것으로부터 기인한다.

3.3 열처리부의 경도분포

경도는 빔의 진행방향인 종방향(longitudinal)과 깊

이방향(depth-directional)으로 나누어서 측정하였다. 종방향 경도는 표면에서 깊이 100 μm 지점을 300 μm 간격으로 측정하였으며, 깊이방향 경도는 종방향 경도분포 중 상대적으로 높고 낮은 두 지점을 선정하여 150 μm 간격으로 측정하였다. Fig. 9에 경도분포 측정 결과를 나타낸다.

종방향 경도분포는 전반적으로 주기를 가지고 증감을

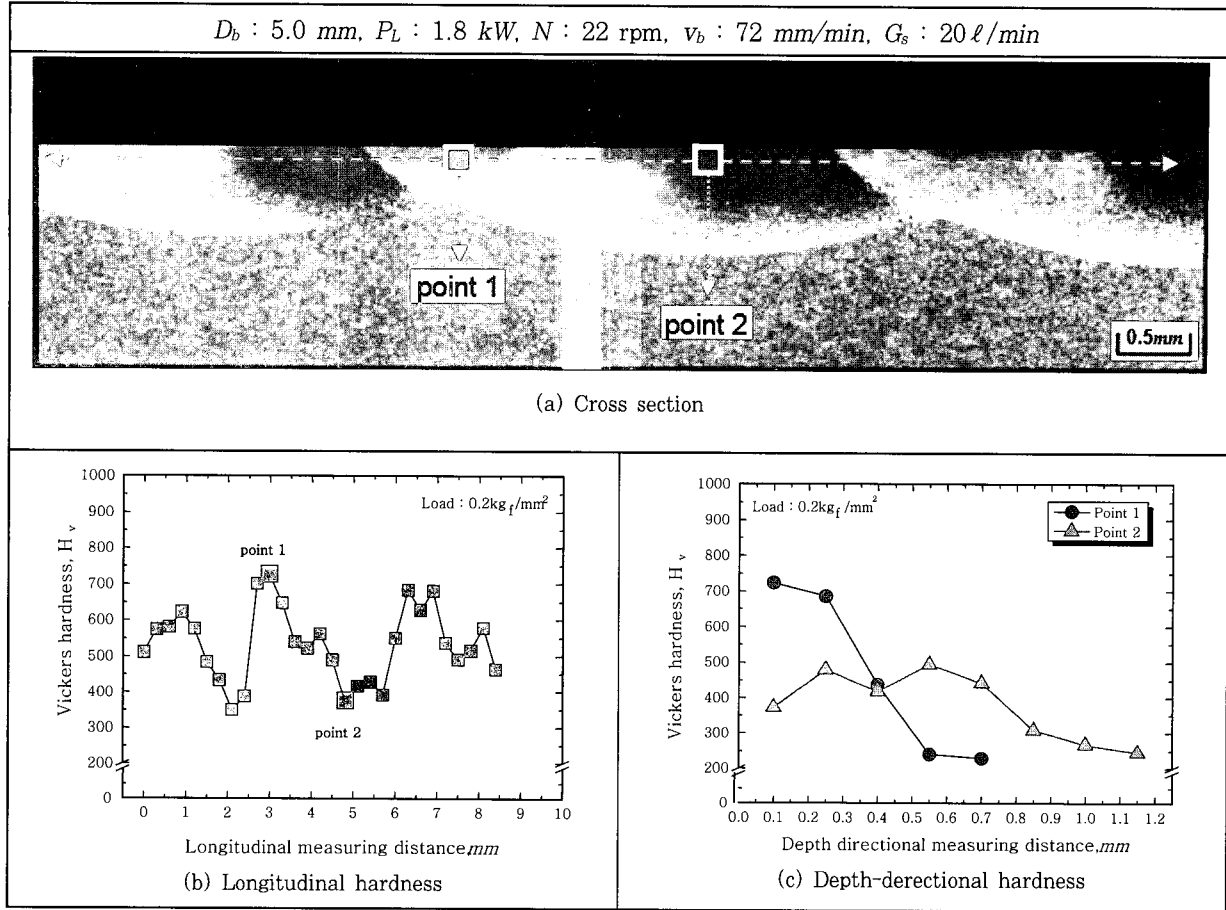


Fig. 9 Hardness distribution of hardened zone

반복하는 양상을 보이고 있다. 조직사진(Fig 9(a))의 비교적 밝게 나타나는 부분에서 높은 값을 보이며 어둡게 표시되는 부분에서 낮은 값을 나타낸다. 특히, 어둡게 나타나는 중첩 경계에 인접하는 부분에서 경도가 저하하는 이유는 그 부분에서 이전 경화 조직이 열영향을 받아 템퍼링(tempering)되어 연화되기 때문이다¹⁾. 또한, 경도가 높은 지점(point1)에서 중첩경계로 근접할수록 경도가 점차 저하하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 경계에 인접할수록 더 높은 온도로 재가열(템퍼링)되어 연화되는 데에서 비롯된다. 그렇다 하더라도 템퍼링 된 조직의 경도는 대략 350Hv 정도로 모재의 경도(250Hv)보다는 높은 값을 나타내고 있다.

깊이방향 경도분포는 두 측정 위치에서 서로 다른 경향을 보였다. 경도가 높은 지점(point1)에서는 특정 깊이까지 유지되다가 깊이에 따라 점차 감소하여 모재의 경도로 수렴하는 반면, 낮은 지점(point2)에서의 경도분포는 약간 상승하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 이 역시 경도가 낮은 지점에서는 깊이방향으로 내려갈수록 중첩경계에서 멀어지므로 상대적으로 열영향을 덜 받기 때문이다.

3.4 표면 경화부 조직

표면 경화조직은 모재를 포함하여 서로 다른 몇 가지 부분으로 구분된다⁶⁾. 경화부 부위별 조직확대 사진을 Fig. 10에 나타낸다. 깊이 방향으로는 상, 하부 경화부(upper and lower hardened zone) 및 모재와의 경계부분(interface between hardened zone and matrix)으로, 종방향으로는 중첩에 의한 템퍼링부(tempering zone)와 중첩경계부분(overlap interface)으로 나뉘볼 수 있었다. 조직 ④는 모재 부분으로 아공석강(hypoeutectoid steel) 조직인 펄라이트(pearlite)와 페라이트(ferrite)의 혼합조직인 것을 확인할 수 있다. 상부 경화조직인 ①은 매우 미세한 마르텐사이트 조직이며 하부(조직 ②, ③)로 내려갈수록 마르텐사이트의 양이 줄어들고 있다. 조직 ⑤는 경화조직인 중첩으로 인해 템퍼링된 조직으로 미세 펄라이트(fine pearlite) 조직인 것으로 판단된다. 사진 ⑥은 중첩 경계부분을 나타낸 것으로, 중첩경계를 중심으로 템퍼링부와 2차 경화부로 뚜렷하게 나뉘어져 있는 것을 확인할 수 있다. 중첩경계에서의 조직은 앞서 경화된 조직이

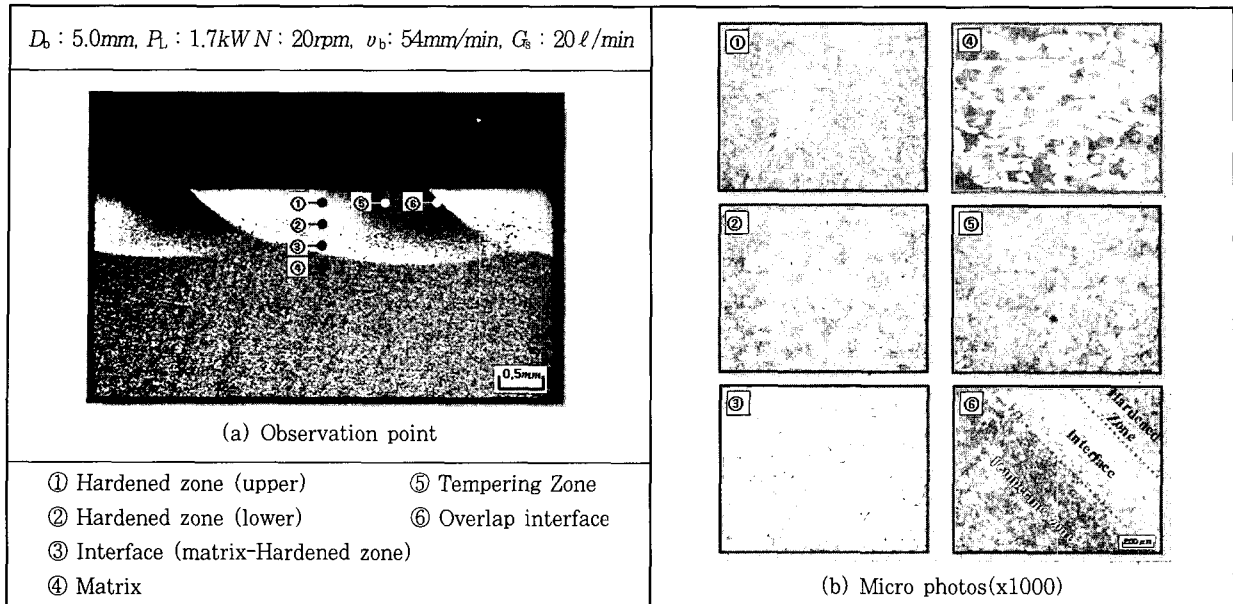


Fig. 10 Microstructure in hardened zone

다시 한번 변태온도 이상으로 가열되어 서냉된 조직으로 조직 중에 페라이트가 포함되어 있을 것으로 예상되며, 이는 중첩경계에서의 경도가 가장 낮다는 사실로 뒷받침 될 수 있다.

4. 결 론

가우시안 빔을 이용한 환봉의 레이저 표면 변태경화에 관한 연구를 수행하였으며, 그 결과를 다음과 같이 요약한다.

1) 환봉의 표면경화공정 특성상, 원주속도와 중첩률의 개념을 도입하였으며, 시편 회전수와 빔 이송속도의 함수관계로 정의되었다.

2) 지배적인 공정변수는 레이저 출력, 시편 회전수, 빔 이송속도로 나뉘볼 수 있었다. 출력이 증가할수록, 원주속도는 느릴수록 입열량의 증가로 인하여 경화깊이가 깊어지는 양상을 보인 반면, 빔 이송속도의 변화에 따라서는 입열량의 변화가 거의 없기 때문에 경화깊이에 뚜렷한 변화가 확인되지 않았다.

3) 나중에 경화된 부분일수록 시편 내의 열축적에 의해 경화깊이, 폭 및 중첩깊이가 점차적으로 증가하였으며 중첩률이 증가할수록 열축적의 영향은 더 커지는 것으로 나타났다.

4) 경화부 경도분포는 종방향 및 깊이방향으로 나뉘서 측정하였다. 종방향 경도는 어느 정도의 주기를 가지고 증감을 반복하는 경향을 보였다. 깊이방향 경도분포의 경우에는 두 부분으로 나뉘서 측정하였는데, 중첩 경계에서 멀리 떨어진 경화부에서는 깊이에 따라 일정

구간 유지되다가 감소하여 모재의 경도로 수렴하는 전형적인 양상을 나타낸 반면, 중첩경계에 가까운 부분에서는 약간 증가하다가 감소하는 경향을 보였다.

5) 경화부는 모재를 포함하여 상부 및 하부 경화조직, 모재와 경화부의 경계부, 중첩 열영향부 그리고 중첩 경계부분으로 나뉘서 살펴볼 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 한유희 : 레이저 가공 기술(I), 대한용접학회, 8-3, (1990), 13~23
2. John F. Ready : LIA HANDBOOK OF LASER MATERIAL PROCESSING, Laser Institute of America, (2001) 223~261
3. 나석주, 김성도, 이건이, 김태균 : SM45C 강의 레이저 표면 경화처리에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 11-1, (1987), 53~62
4. 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 50-2, (1981), 82~88
5. 柴田公博 : レーザ焼入の實際, 溶接學會誌 64-3, (1995), 10~13
6. Zhiyue Xu, Claude B. Reed, Keng H. Leong, Boyd V. Hunter : Pulsed Laser Surface Hardening of Ferrous Alloys, ICALEO, (1999), 32~38