

## 고출력 다이오드 레이저(HPDL)를 이용한 탄소강 환봉의 표면변태경화

김종도† · 길병래\* · 강운주\*\*

(원고접수일 : 2007년 9월 6일, 심사완료일 : 2007년 11월 7일)

### Surface Transformation Hardening for Rod-shaped Carbon Steels by High Power Diode Laser

Jong-Do Kim† · Byung-Lea Kil\* · Woon-Ju Kang\*\*

**Abstract** : The laser material processing has replaced a conventional material processing such as a welding, cutting, drilling and surface modification and so on. LTH(Laser Transformation Hardening) is one branch of the laser surface modification process. A lot of energy is needed for the LTH process to elevate workpiece surface to temperature of the austenite transformation( $A_3$ ), which results from utilizing a beam with a larger size and lower power intensity comparatively. The absorptivity of the laser energy with respect to material depends on the wave length of a beam. This study is related to the surface hardening for the rod-shaped carbon steel by the high power diode laser(HPDL) whose beam absorptivity is better than conventional types of lasers such as  $CO_2$  or Nd:YAG laser. Because a beam proceeds on the rotating specimen, the pretreated hardened-phase can be tempered and softened by the overlapping between hardened tracks. Accordingly, the longitudinal hardness measurement and observation of the micro structure was carried out for an assessment of the hardening characteristics. In addition, a hardening characteristics as a hardenability of materials was compared in the point of view of the hardness distribution and hardening depth and width.

**Key words** : Laser Transformation Hardening(레이저표면변태경화), Austenite transformation (오스테나이트 변태), Power intensity(파워밀도), Absorptivity(흡수율), Hardenability (경화능)

#### 1. 서 론

레이저 열원을 이용한 표면변태경화법(LTH, Laser Transformation Hardening)은 가공 특

성 상, 비교적 파워밀도가 낮고 조사면적이 넓은 빔을 사용하기 때문에 비교적 많은 에너지가 소모 되는 가공법이다<sup>(1),(2)</sup>. 일반적으로 재료에 대한 빔 흡수율은 빔의 파장에 의존한다. 재료의 종류, 표

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail: jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253

\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\* 한국해양대학교 대학원

면상태, 레이저 출력 및 조사각도 등의 다른 외부 조건이 동일하다고 가정했을 때, 일반적으로 파장이 짧을수록 흡수율은 증가한다. 다이오드 레이저는 빔의 파장이 CO<sub>2</sub> 레이저나 Nd:YAG 레이저에 비해 짧기 때문에 재료에 대한 흡수율이 높다<sup>[3]</sup>. 흡수율이 높다는 것은 동일 결과를 얻는데 더 낮은 출력으로도 가능하다는 것이며, 이는 곧 에너지 소모를 줄일 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 최대출력 1.0kW의 고출력 다이오드 레이저를 도입하여 실험하였는데, 다이오드 레이저는 기존 레이저에 비해 발진 메커니즘과 구조가 간단하고 전기-광학 변환효율이 높아 최근 각광받고 있는 레이저 소스이다. 발진 메커니즘 및 구조 특성으로 인하여 기존의 레이저에 비해 비교적 빔 품질이 낮아 일부 가공법으로의 적용이 제한되긴 하지만 꾸준한 광학 기술 개발과 대출력화로 그 범위를 넓혀가고 있는 실정이다<sup>(3)-(5)</sup>. 본 연구는 고출력 다이오드 레이저를 이용한 탄소강 환봉의 열처리에 관한 것이며 경화부의 증방향 및 깊이방향 경도분포와 경화부위별 조직적인 차이를 그 검토사항으로 하였다. 특히, SM45C 탄소강 외에 비교재료써 경화능이 우수하다고 알려진 SNCM8 강을 열처리한 결과를 비교함으로써 경화능 차이에 따른 특성을 분석하고자 하였다.

## 2. 고출력 다이오드 레이저

### 2.1 발진 메커니즘

다이오드 레이저의 가장 일반적 형태는 P형과 N형 반도체를 결합한 P-N 접합 다이오드이다. P-N 접합의 N형 측에 (-)극을, P형 측에 (+)극을 접촉시키면(순방향 바이어스) (+)극으로 끌리는 전자는 접합영역으로 들어오게 되며 그곳에서 전자는 (-)극 방향으로 끌리는 정공과 재결합한다. 전도대의 전자가 가전자대의 정공과 결합할 때 두 상태 간 에너지 차에 해당하는 에너지를 가진 광자가 방출되는데, 이러한 방사를 재결합 방사(recombination radiation)라고 부른다<sup>[5]</sup>. 대부분의 반도체 레이저에서 이 에너지 차이는 가시광 또는 근적외광의 파장에 해당한다. 만약, 접합영역에서 충분한 반전분

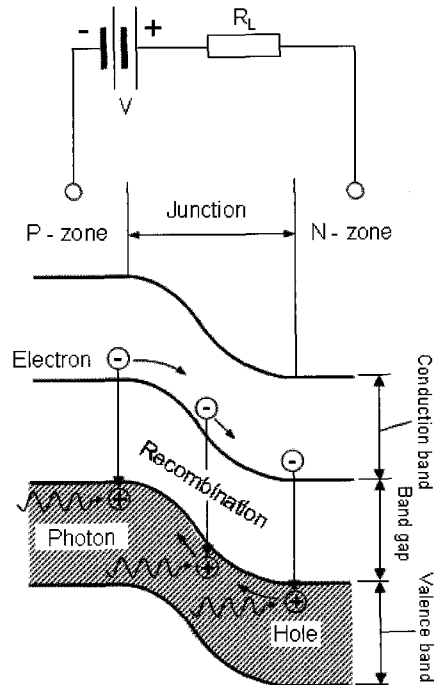


Fig. 1 Lasing mechanism of HPDL

포(가전자대 중의 정공보다 전도대 중의 전자의 쪽이 많은 경우)가 얻어지면 레이저 발진이 가능하게 된다. Fig. 1에 다이오드 레이저의 발진 메커니즘에 관한 개략도를 나타낸다.

### 2.2 다이오드 레이저의 구성

다이오드 레이저를 발진시키기 위해서는 몇 가지 필요조건을 만족하지 않으면 안 된다. 즉, 활성 매질과 여기원 그리고 공진 미러가 레이저 발진을 위해 필수적인데, 다이오드 레이저에 있어서 활성 매질은 접합부위의 일부 영역, 여기원은 순방향 바이어스이며 공진은 서로 마주보고 있는 반도체 재료의 접합면에서 자연스럽게 형성되는 페브리-페로(Febry-Perot) 미러 사이에서 이뤄진다. 다이오드 레이저 한 개의 크기는 약 수백 마이크로미터( $\mu\text{m}$ ), 출력은 일반적으로 수 밀리와트(mW) 정도이다. 다이오드 레이저 빔의 방사는 좁은 접합부 대략  $1\mu\text{m}$  정도로 제한되어 있기 때문에 광은 광축으로부터 수직 방향(fast axis)으로는 45도 반각(half angle)까지, 광축에 평행한 방향(slow axis)으로

는 10도 반각까지 발산한다. 이렇듯 다이오드 레이저 출력빔의 확산정도가 기존의 레이저 장치에 비해 비교적 커서 빔 품질이 낮아지므로 높은 파워밀도를 요구하는 용접공정으로의 적용은 제한되는 반면, 오히려 LTH 공정으로의 적용에 있어서는 최적인 특성을 갖는다<sup>[3], [4]</sup>. 싱글 다이오드 레이저의 빔 확산에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타낸다.

그렇기 때문에 패스트 축 방향으로 크게 발산하는 광을 평행하게 만들기 위해 원통 모양의 마이크로렌즈가 사용된다. 싱글 다이오드 레이저의 출력은

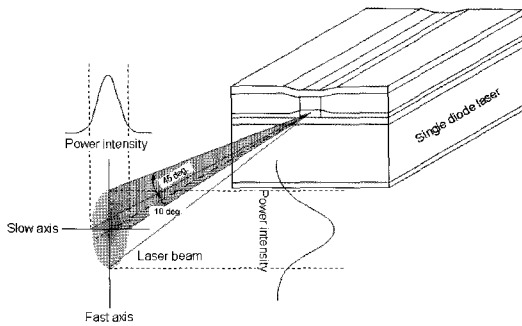


Fig. 2 Beam divergence of single diode laser

실험적으로 200W 이상 얻어질 수 있지만, 일반적으로 30-50W 범위 이내이므로 출력을 증가시키기 위해서 각각의 다이오드 레이저를 대략 10mm 길이로 직선 배열하여 다이오드 바(bar)를 형성시킨다. 레이저 발진 과정에서 막대한 열이 발생하므로 탈이온수(deionized water)와 같은 유효 냉각매체를 이용하여 열을 배출하게 되는데, 그 냉각매체는 다이오드 레이저 바 상에 미세하게 가공된 냉각채널을 통해 흐른다. 이러한 다이오드 바들을 쌓아 하나의 유닛으로 하여 스택(stack)을 구성하면 1kW 가량의 대출력을 얻을 수 있다. 두 개 혹은 그 이상의 다이오드 스택은 출력이나 파장특성의 요구에 따라 결합될 수 있다. 본 연구에 적용한 다이오드 레이저의 실제 구성을 Fig. 3에 나타낸다.

### 3. 실험 재료, 장치 및 방법

#### 3.1 실험재료

실험재료로는 탄소함량 0.45%의 SM45C 탄소강과 니켈·크롬·몰리브덴강인 SNCM8을 선정하

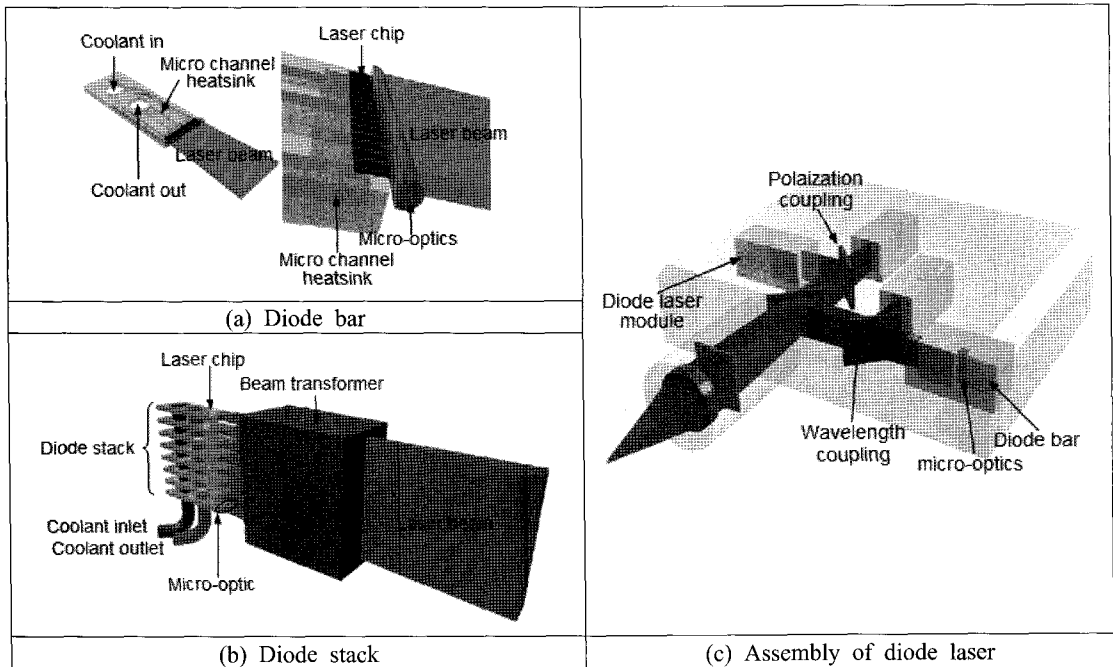


Fig. 3 Composition of high power diode laser

였으며 동일한 조건에서 경화능(hardenability) 차이에 따른 표면경화특성을 비교하고 최적의 공정 변수를 도출하였다. SNCM8과 SM45C의 화학조성 비교표를 Table 1에 나타낸다. SM45C 강에 비해 탄소함량은 비슷하며 니켈, 크롬, 몰리브덴이 현저하게 많이 함유되어 있음을 확인할 수 있다.

Table 1 Chemical compositions of materials

Element Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SM45C	0.43	0.3	0.75	0.018	0.007	-	0.05	0.1	0.01
SNCM8	0.4	0.19	0.75	0.02	0.01	0.12	0.173	0.63	0.16

3.2 실험 장치 및 방법

실험 장치는 크게 1kW급 고출력 다이오드 레이저와 광학헤드 및 시편의 고정과 회전을 위한 소형 선반으로 구성된다. 다이오드 레이저는 940 ~ 980(± 10) nm 파장의 레이저 광을 발진하며 냉각용 칠러(chiller)를 부속장치로 가지고 있다. 광학헤드는 바디(body)에 다양한 광학계를 설치하여 필요에 따라 회전·전환할 수 있도록 설계된 리볼버형 광학모듈(revolver type optic module)을 사용하였다. 실험은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 환봉이 회전하는 상태에서 빔이 그 위를 이동하는 방식으로 진행하였다.

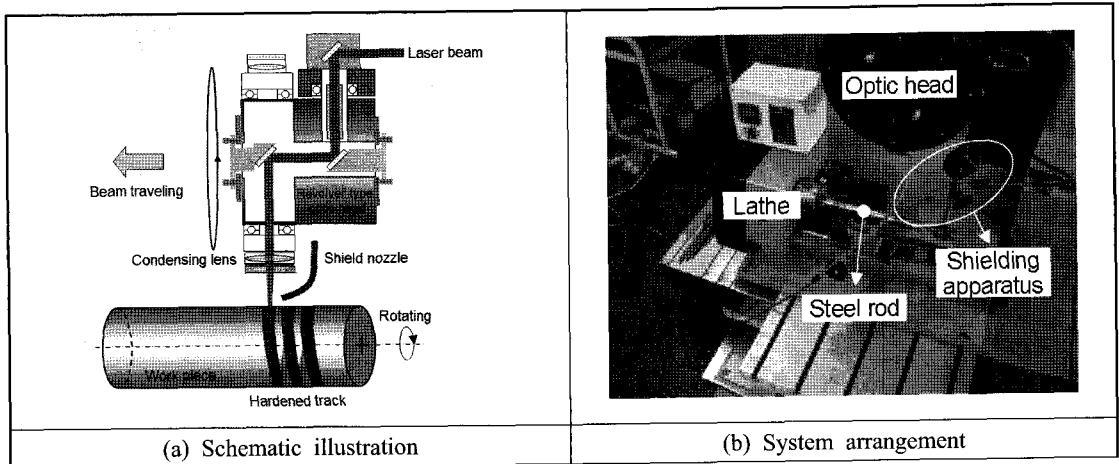


Fig. 4 Schematic illustration and arrangement of experiment

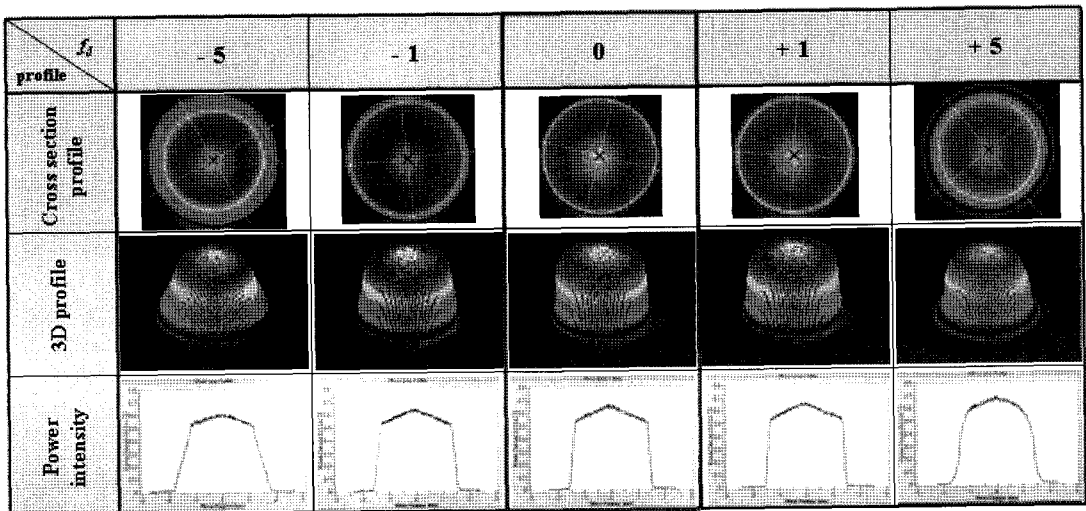


Fig. 5 Beam profiles [Db : 3 mm, f : 200mm]

본 실험에서는 균일한 파워밀도 분포를 가지는 원형빔 광학계를 적용하였으며, 초점에서의 빔 직경 ( $D_b$ )과 초점거리( $f$ )는 각각 3.0/200mm이었다. Fig. 5에 빔 프로파일미터(beam profilemeter)로 측정한 비초점 거리( $f_d$ )에 따른 빔 프로파일을 제시한다. 프로파일을 통해서 확인할 수 있듯이, 빔의 형상은 원형을 띠고 있으며 파워밀도분포는 엄밀하게 평탄하지는 않고 빔의 중앙부로 갈수록 약간 증가하지만 비교적 균일한 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 실험에는 비교적 파워밀도 분포가 안정된 비초점 거리 0에서의 빔을 적용하였다. 빔 자체의 경화특성을 파악하기 위해 평판 상에서 1회 스캔한 단면사진 및 경도분포를 Fig. 6에 제시하였다. 빔 사이즈가 3.0mm임에도 불구하고 실제 유효 경화폭은 2.84mm로 측정되었으며 경화단면 전체에 걸친 경도분포를 색으로 구분하여 보았는데, 경도 700Hv 이상인 영역은 표면으로부터 비교적 얇게 분포하고 있었다.

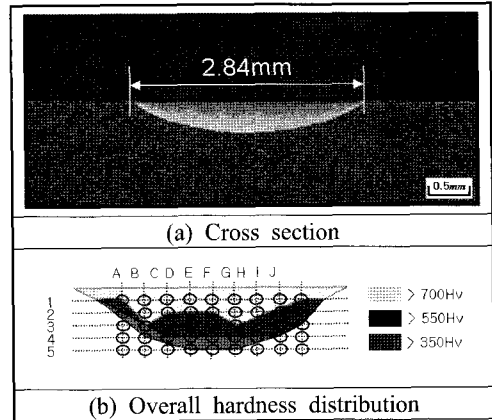


Fig. 6 Hardness profile

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 환봉 경화부의 단면형상 및 경도분포

다이오드 레이저를 이용한 환봉 표면을 경화시킨 대표적인 시편(SM45C)의 단면형상 및 경도분포를

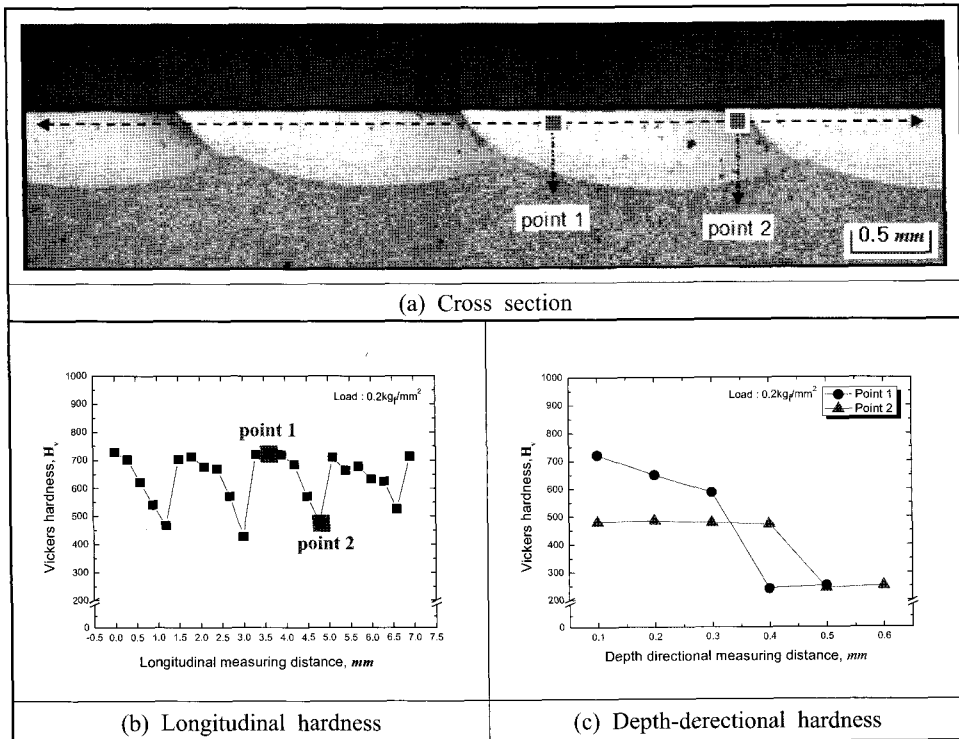


Fig. 7 Hardness distribution in hardened zone

Fig. 7에 나타낸다. 단면형상은 경화폭 대비 깊이가 깊은 불룩한 형상임을 확인할 수 있다. 경도분포는 종방향과 깊이방향으로 나누어 측정하였다. 종방향 경도분포는 주기적으로 증감을 반복하였는데, 이는 증첩경계 근방에서 이전의 경화조직이 템퍼링되어 연화되는 데에서 기인한다. 깊이방향 경도분포는 종방향 분포에서 높고 낮은 두 지점에서 깊이에 따라 특정 간격으로 측정하였다. 높은 지점(point1)에서의 경도분포는 전형적인 열처리부의 경화조직과 마찬가지로 깊이에 따라 점차 감소하는

경향을 보인 반면, 경도가 상대적으로 낮은 지점(point2)에서는 특정깊이까지는 일정한 값을 유지하다가 모재의 경도로 감소하는 경향을 보였다. 이는 깊이에 따라 증첩경계로 부터의 거리가 멀어지더라도 열 영향의 정도에는 거의 차이가 없다는 것을 의미한다.

4.2 재료의 경화능에 따른 경화특성 비교

경화능이 서로 다른 SM45C와 SNCM8 강을 열

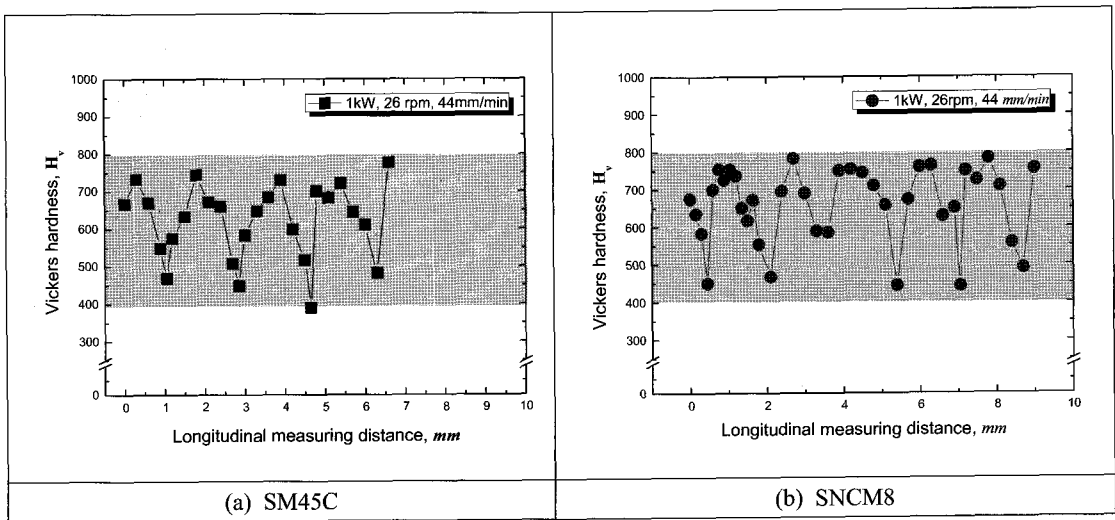


Fig. 8 Comparison of longitudinal hardness distribution

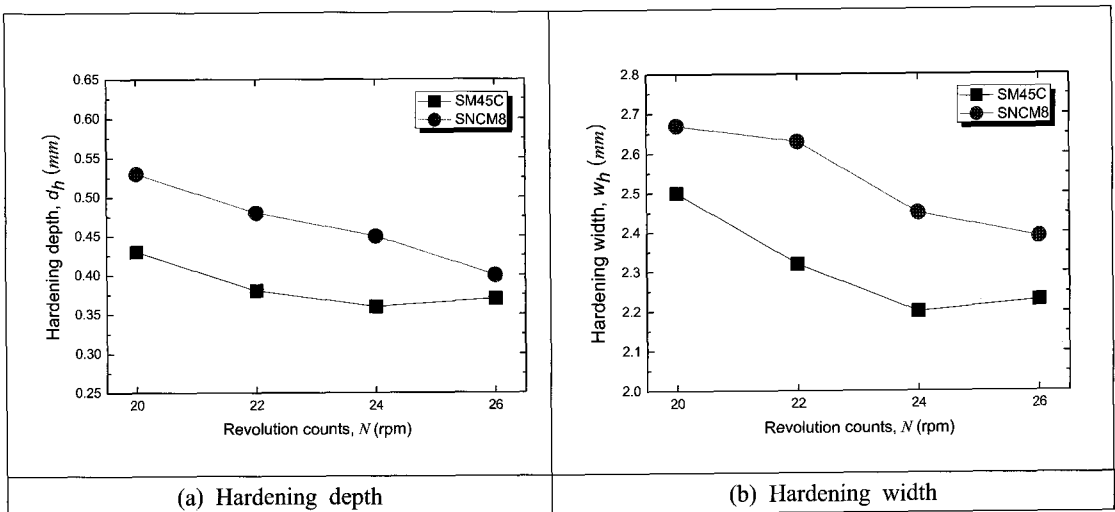


Fig. 9 Comparison of hardening depth and width

처리하여 그 경화특성을 비교하였다. 우선, 각 시편을 이용하여 레이저 출력을 1.0kW로 고정하고 회전수와 빔 이송속도를 변화시키면서 실험하였는데, 두 경우 모두 레이저 출력 1.0kW, 빔 이송속도 44mm/min, 회전수 26rpm의 조건에서 최적 결과를 얻을 수 있었다. 각 최적화 시편의 증방향 경도분포를 Fig. 8에 나타낸다. 경화부 경도분포는 유사한 경향을 나타내었는데, 두 경우 모두 400~800Hv의 범위 내에서 증감을 반복하였고 증첩경계 부근에서 템퍼링<sup>(1)</sup>에 의한 최저 경도값은 대략 450Hv 정도로 계측되었다. 경도값이나 분포가 비슷하게 나타나는 이유는 경화능에 지대하게 영향을 미치는 탄소함량이 서로 비슷하기 때문인 것으로 판단된다.

경화능의 효과를 규명하기 위해서 동일한 조건으로 열처리한 각 시편의 경화깊이와 폭의 변화를 비교해 보았다. 공정변수에 따른 경화깊이 및 폭의 측정 결과를 Fig. 9에 나타낸다. SM45C 강보다 SNCM8 강의 계측값이 깊이 면에서는 대략 평균 0.05mm, 폭의 면에서는 평균 0.1mm 정도의 증가를 보였다. 경화깊이에서의 증가보다는 경화폭의 증가가 비교적 크게 나타났는데, 이는 열축적 정도가 표면에서 더 많음을 의미하는 것이기도 하다.

### 4.3 경화부 미세조직

레이저 표면경화법은 유도경화법, 화염경화법 등과 같은 기존의 변태경화법과는 달리 국소부위를 가열하여 짧은 시간에 가열하여 냉각시킨다는 특징을 가지고 있다. 즉, 열원이 고정되지 않고 계속 이동하면서 조사되기 때문에 매 순간 레이저가 조사되는 부분에서 가열과 냉각을 반복하게 되므로 레이저 빔 진행방향으로의 열전도에 의해 연속되는 그 다음 부분에서의 열 사이클에 영향을 미치게 된다. 특히, 환봉의 열처리 경우에는 트랙과 트랙이 겹쳐지는 증첩부가 생기게 되며 그 부분에서는 또 다른 양상의 열 사이클을 형성하게 될 것이다.

기본적으로 레이저 빔은 표면에 조사되어 재료의 내부로 전파되기 때문에 깊이에 따라 다른 열 사이클의 영향을 받게 되므로 상이한 조직분포를 나타낸다.

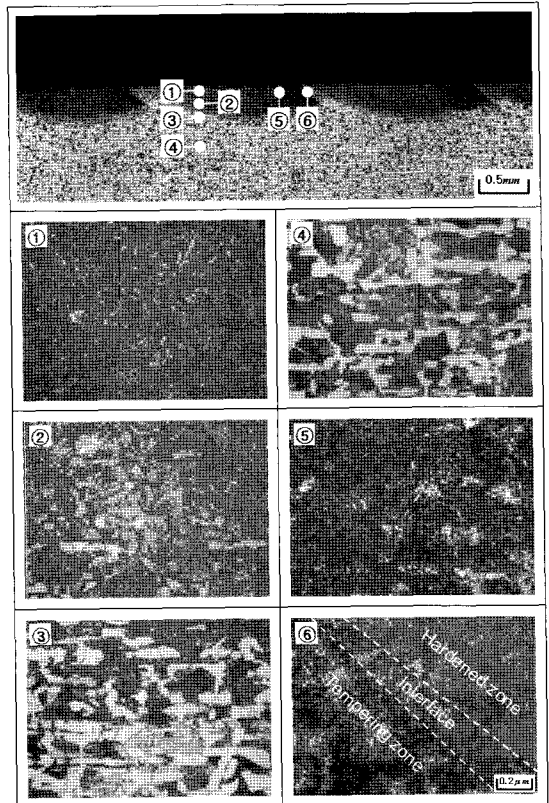


Fig. 10 Micro structure in hardened zone

Fig. 10은 광학현미경을 이용하여 뚜렷하게 구별되는 6개 부위로 나누어 1000배의 배율로 관찰한 사진이다. 우선, ④는 기지(matrix) 조직의 사진으로 SM45C 강의 전형적인 조직인 페라이트와 펄라이트의 혼합조직으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 경화조직은 상부(①, upper hardened zone)와 하부(②, lower hardened zone)로 나뉘볼 수 있었는데, 표면에 가까운 최상부에는 미세한 마르텐사이트(lath martensite)가 밀도 높게 분포하고 있고 하부로 내려갈수록 미세한 마르텐사이트 조직 중에 백색의 조직이 분포하는 이상(二狀) 조직이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

이 백색의 조직은 오스테나이트로 변태한 후, 충분히 빠른 속도로 냉각되지 못해 마르텐사이트로 변태하지 못하고 잔류하게 된 오스테나이트(retained austenite) 조직인 것으로 판단된다.

기지와 경화조직과의 경계를 이루는 부분(interface between hardened zone and matrix)인 ③ 영역에서는 모재 상층 펄라이트만 선택적으로 오스테나이트화되어 냉각에 의해 변태된 마르텐사이트 조직과 가열온도가 낮아서 미처 오스테나이트로 변태되지 못한 페라이트의 혼합조직이 관찰된다<sup>[6]</sup>. 일본의 어느 학자는 이러한 조직분포를 오스테노 마르텐사이트(austeno- martensite) 혹은 마르테노 페라이트(marteno-ferrite)라고 부르고 있다<sup>[7]</sup>. ⑤는 기존의 경화된 조직이 다음 트랙에 의해 중첩됨으로써 그 주변이 열영향을 받아 생성된 조직으로 마르텐사이트가 템퍼링된 미세 펄라이트(fine pearlite) 조직으로 알려져 있다. 마지막으로 ⑥은 중첩된 경계부분으로 경계를 중심으로 템퍼링 영역과 다음 경화 영역이 나뉘어져 있는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

최근 콤팩트한 구조와 출력 안정성 등으로 인하여 각광받고 있는 고풍력 다이오드 레이저(HPDL) 가공 장치를 이용하여 SM45C와 SNCM8 재료에 대한 표면경화공정에 관한 연구를 수행하였으며 그 결과를 다음과 같이 요약한다.

1) 종방향 경도분포는 경화능에 차이가 있음에도 불구하고 두 재료 모두 400~800Hv 범위 내에서 증감하는 경향을 나타내었으며, 중첩부 근방의 템퍼링 연화부 경도 역시 450Hv로 동일하게 나타났다.

2) 경화깊이나 폭의 면에서는 SNCM8이 SM45C 탄소강에 비해 크게 계측되었는데, 경화깊이 보다는 경화폭의 증가가 더 현저하였다.

3) 경화부 경도는 탄소함량에 지배되며 경화깊이와 폭은 니켈, 크롬 및 몰리브덴과 같은 경화능 향상 원소의 첨가량과 관련성이 있다는 것을 알 수 있었다.

4) 경화부는 뚜렷하게 구분되는 6부분의 조직으로 나뉘어 살펴볼 수 있었는데, 이러한 조직차이가 발생하는 이유는 부위별 온도 사이클의 차이에서 기인한다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] John F. Ready LIA HANDBOOK OF LASER, MATERIAL PROCESSING, Laser Institute of America, 223~261, 2001.
- [2] 柴田公博 "レーザ焼入の實際", 容接學會誌 第64卷, 第3号, pp. 10~13, 1995.
- [3] E. Kennedy, G. Byrne, D.N. Collins, "A Review of Use of High Power Diode Laser in Surface Hardening", Journal of Materials Processing Technology, Vol.155, 156, pp. 1855~1860, 2004.
- [4] B. Ehlers, H. Herfurth, S. Heinemann, "Surface Hardening with High Power Diode Lasers", ICALEO Section-G, pp. 75~84, 1998.
- [5] 望月 仁, 姫野俊一, レーザの基礎と應用, 丸善株式会社
- [6] G.N. Haidemenopoulos "Coupled thermodynamic / kinetic analysis of diffusional transformations during laser hardening and laser welding. Journal of alloy sand compounds, Vol. 320, pp.302~307, 2001.
- [7] 丸尾 大, 宮本 勇, 石出 孝, 荒全吉明, "レーザ焼入れの研究", 容接學會誌, 第50卷, 第2号, pp. 82~88, 1981.



## 저 자 소 개



### 김종도(金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학 코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 사업이사겸 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집이사, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



### 길병래(吉炳來)

1957년 11월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 2000년 부경대학교 음향 진동공학과(공학석사), 1996년~현재, 한국 해양대학교 기관시스템공학부 교수, 관심분야 : 음향진동



### 강운주(姜云柱)

1978년 9월생, 2001년 한국해양대학교 운항시스템공학부 졸업, 2007년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 2007년~현재, 대우조선해양 산업기술연구소 연구원, 관심분야 : 레이저용접, 레이저용접시의 가공현상 해석 및 분석