

다이오드 레이저를 이용한 탄소강 환봉의 표면변태 경화특성

김종도*, 강운주**, 이수진†, 윤희종†, 이재훈‡

*한국해양대학교 기관시스템공학부, **대우조선해양 산업기술연구소, †한국해양대학교 대학원,

‡한국기계연구원 광응용생산기계연구실

Characteristics of Surface Transformation Hardening for Rod-shaped Carbon Steels by Diode Laser

Jong-Do Kim*, Woon-Ju Kang**, Su-Jin Lee†, Hee-Jong Yoon†, Jae-Hoon Lee‡

Abstract

Laser Transformation Hardening(LTH) is one branch of the laser surface modification processes. 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 density comparatively. This study is related to the surface hardening for the rod-shaped carbon steel by the high power diode laser whose beam absorptivity is better than conventional types of lasers such as CO₂ 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: Surface transformation hardening(표면변태경화), diode laser(다이오드레이저), austenite transformation(오스테나이트 변태), power density(파워밀도), hardenability(경화능)

1. 서 론

최근 레이저를 이용한 가공법이 자동차, 항공·우주, 조선, 전자·통신 분야 등 산업전반에 걸쳐 이용이 급속히 확대되어가고 있다. 본 연구는 레이저를 이용한 표면변태경화(Surface Transformation Hardening)공정에 관하여 고출력 다이오드레이저를 이용하여 실험하였다. 금속의 표면을 경화시키는 방법에는 재료를 변태온도 이상으로 가열한 후, 임계냉각속도 이내로 급랭·경화시키는 변태경화법과 탄소나 질소 등을 침투, 확산시켜 경화시키는 침탄(carburizing) 및 질화법(nitriding) 등이 있다. 특히, 주로 이용되는 유도가열법은 요구되는 경도를 얻을 수는 있지만 많은 에너지가 소모되고 추가적인 냉각수단이 요구된다. 또한, 재료 표면과 내부의 냉각속도 차에 의한 재료의 초과변형 유발 및 유도코일 설계의 제약으로 인해 복잡한 형상을

균일한 경화처리 하는 것이 어렵다^{1,2}. 반면, 레이저를 이용한 표면변태경화법은 고밀도로 집속되는 레이저 빔의 특성 때문에 재료 체적 대비 입열량이 작아 변형이 적고 복잡한 형상이나 국소부의 경화처리도 가능하다. 따라서 레이저를 이용한 변태경화법은 높은 치수정밀도가 요구되거나 복잡한 형상을 가지는 재료의 선택적인 경화처리에 있어서 필요 부위만 국부적으로 경화처리함으로써 에너지를 절감할 수 있다^{3,4}. 표면변태경화법은 비교적 파워밀도가 낮고 조사면적이 넓은 빔을 사용하기 때문에 비교적 많은 에너지가 소모되는 가공법이다^{4,5}. 재료에 대한 빔 흡수율은 재료의 종류 및 다른 외부 조건이 동일하다고 가정했을 때, 일반적으로 파장이 짧을수록 증가한다. 다이오드 레이저는 빔의 파장이 CO₂ 레이저나 Nd:YAG 레이저에 비해 짧기 때문에 재료에 대한 흡수율이 높다⁶. 다이오드 레이저는 기존의 다른 레이저에 비해 발진

메커니즘과 구조가 간단하고 전기-광학 변환효율이 높아 최근에 각광받고 있으나 기존의 레이저에 비해 비교적 빔 품질이 낮아 일부 가공법으로의 적용이 제한된다. 하지만 꾸준한 광학 기술 개발과 대출력화로 최근 그 적용범위를 넓혀가고 있다⁶⁻⁸. 본 연구는 고효율 다이오드 레이저를 이용한 환봉형의 탄소강 열처리에 관한 것이며 경화부의 경도 분포와 경화부위별 조직변화를 검토하였다.

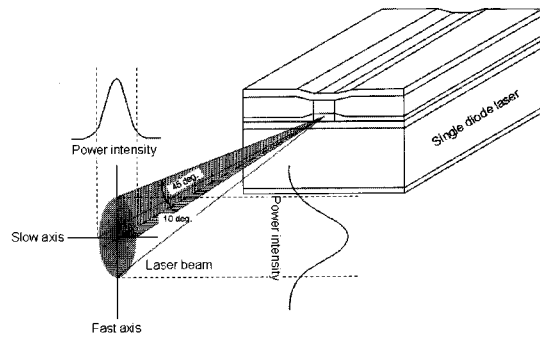


Fig. 1 Beam divergence of single diode laser.

2. 다이오드 레이저의 특징과 구성

2.1 다이오드 레이저의 특징

다이오드 레이저는 전류가 직접 레이저광으로 변환되는 발진 메커니즘으로 인해 전기-광 변환효율은 약 20-30%에 이르며 CO₂ 레이저(10-15%)나 Nd:YAG 레이저(1-5%)에 비해 높다.

다이오드 레이저 빔 파장은 기본적으로 반도체 재료의 차이에 따라 다르고, 온도 및 입력전류에 따라 미세하게 변화한다. 따라서 기존의 레이저에 비해 비교적 넓은 파장밴드(wavelength band)를 갖는다. 실제로 대부분의 다이오드 레이저로부터 나오는 레이저 광의 파장은 800-940nm 범위 사이에 있으며 파장이 짧아 10.6 μ m 파장의 CO₂ 레이저나 1.06 μ m 파장의 Nd:YAG 레이저보다 재료에 대한 흡수율이 높다.

빔의 확산이 광축으로부터 수직 방향(fast axis)으로는 45° 반각까지, 광축에 평행한 방향(slow axis)으로는 10° 반각까지 발산한다. 이렇듯 출력 빔의 발산각이 기존의 레이저에 비해 비교적 커서 빔 품질이 낮아 높은 파워밀도를 요구하는 용접공정으로의 적용은 제한되는 반면, 표면변태경화공정의 적용에 있어서는 최적의 특성을 갖는다^{6,7}. 싱글 다이오드 레이저의 빔 확산에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타낸다.

2.2 다이오드 레이저의 구성

다이오드 레이저의 가장 일반적 형태는 P형과 N형 반도체를 결합한 P-N 접합 다이오드이다. 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 방사라고 부른다⁸.

다이오드레이저빔을 효율적으로 집광하기 위해서는 패스트 축 방향으로 크게 발산하는 광을 평행하게 만들어야 하므로 이를 위하여 원통 모양의 마이크로 렌즈가 사용된다. 싱글 다이오드 레이저의 출력은 일반적으로 30-50W 범위 이내이므로 출력을 증가시키기 위해서 각각의 다이오드 레이저를 직선 배열하여 다이오드 바(bar)를 형성시킨다. 레이저 발진 과정에서 막대한 열이 발생하므로 탈이온수와 같은 유효 냉각매체를 이용하여 열을 배출하게 되는데, 그 냉각매체는 다이오드 레이저 바 상에 미세하게 가공된 냉각 채널을 통해 흐른다. 이러한 다이오드 바들을 쌓아 하나의 유닛으로 하여 스택(stack)을 구성하면 1 kW 가량의 대출력을 얻을 수 있다. 본 연구에 적용한 다이오드 레이저의 실제 구성을 Fig. 2에 나타낸다.

3. 사용재료 및 실험방법

3.1 실험재료

본 연구에는 기계구조용 탄소강재료 널리 사용되고 있는 탄소함량 0.45%의 SM45C 탄소강을 주로 사용하였으며, 경화능이 우수하다고 알려진 니켈·크롬·몰리브덴강인 SNCM8을 비교재료로 선정하였다. 이 두 강을 사용하여 동일한 조건에서 경화능 차이에 따른 표면경화특성을 비교하였다. SNCM8과 SM45C의 화학조성 비교표를 Table 1에 나타낸다. SNCM8은 SM45C강과 비슷한 탄소함량을 가지며 니켈, 크롬, 몰리브덴의 양은 SNCM8강이 SM45C강에 비해 현저하게 많이 함유되어 있음을 확인할 수 있다.

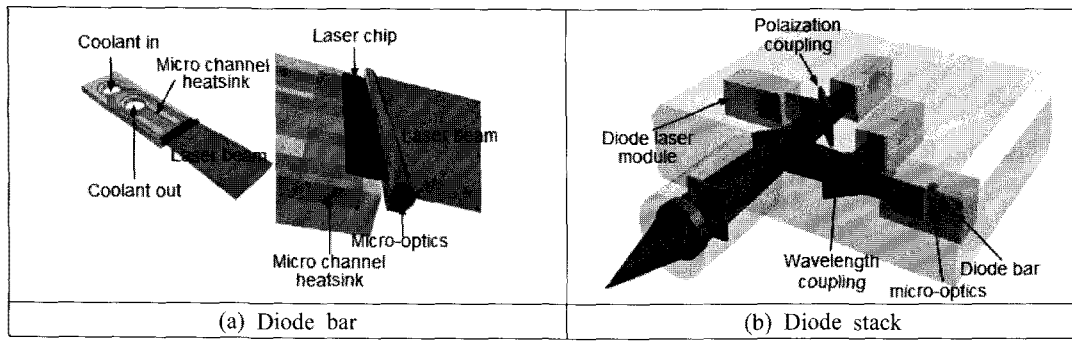


Fig. 2 Composition of high power diode laser.

Table 1 Chemical compositions of materials.

Element	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

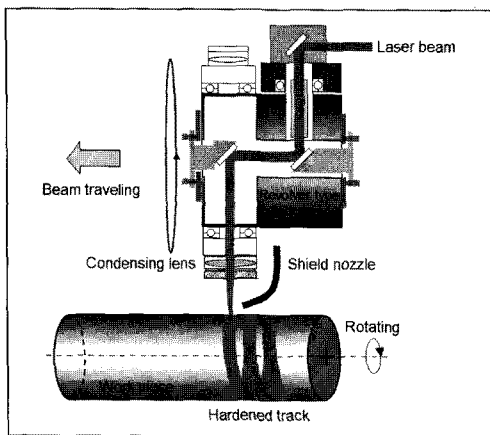


Fig. 3 Schematic illustration and arrangement of experiment.

3.2 실험 장치 및 방법

실험 장치는 1kW급 고출력 다이오드 레이저와 광학헤드 및 시편의 고정과 회전을 위한 소형선반으로 구성하였다. 다이오드 레이저는 940 - 980(± 10) nm 파장의 레이저 광을 발진하며 냉각용 칠러

(chiller)를 부속장치로 가지고 있다. 광학헤드는 다양한 광학계를 바디(body)에 설치하여 필요에 따라 회전·전환할 수 있도록 설계된 리볼버형 광학 모듈을 사용하였다. Fig. 3에 실험방법의 모식도를 나타내었다. 그림과 같이 환봉형 시편을 회전시킨 상태에서 빔이 그 위를 이동하는 방식으로 진행하였다.

본 실험에서는 균일한 파워밀도 분포를 가지는 원형빔 광학계를 적용하였으며, 초점에서의 빔 직경(D_b)과 초점거리(f)는 각각 3.0/200mm이었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 다이오드 레이저의 빔 경화특성

빔 자체의 경화특성을 파악하기 위해 평판 상에서 1회 스캔한 단면사진과 경도분포 및 빔 프로파일을 Fig. 4에 제시하였다. 빔 프로파일에서 나타내듯이 빔의 형상은 원형이며, 파워밀도는 중앙부로 갈수록 약간 증가하지만 비교적 균일한 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 빔 사이즈는 3.0mm임에도 불구하고 실제 유효 경화폭은 2.84mm로 예측되었으며 경도 700Hv이상 영역이 표면으로부터 비교적 얇게 분포하고 있었다.

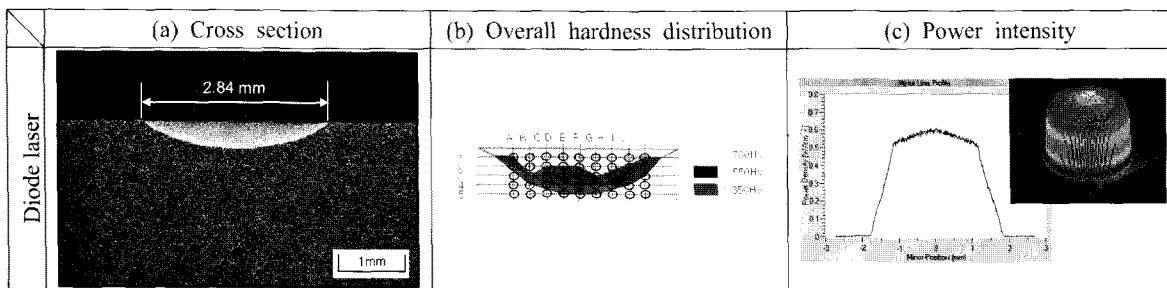


Fig. 4 Hardness profile.

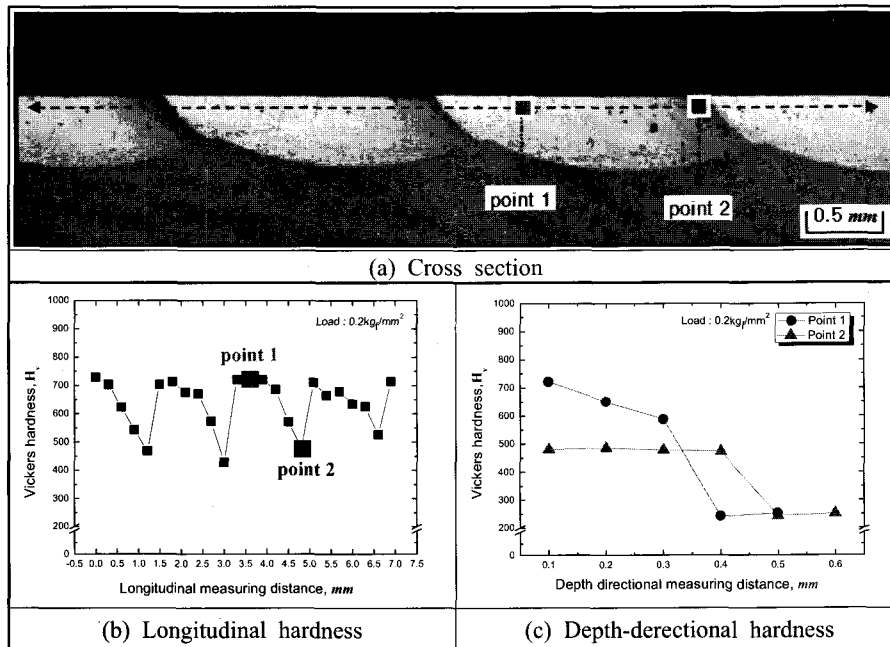


Fig. 5 Hardness distribution in hardened zone.

4.2 변태경화부의 단면형상 및 경도분포

다이오드 레이저를 이용하여 환봉 표면을 경화시킨 SM45C시편의 단면형상 및 경도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 중첩경계 근방에서 이전의 경화조직이 템퍼링되어 연화되기 때문에 종방향 경도분포는 주기적으로 증감을 반복한다. 깊이방향 경도분포는 종방향 분포에서 높고 낮은 두 지점에서 깊이에 대해 특정 간격으로 측정하였다. point 1에서의 경도분포는 전형적인 열처리부의 경화조직처럼 깊이에 따라 점차 감소하는 경향을 보인 반면, point2에서는 특정 깊이까지는 일정한 값을 유지하다가 모재의 경도로 감소하는 경향을 보였다. 이는 중첩경계로부터 깊이 방향으로 거리가 멀어지더라도 열영향 정도에는 거의 차이가 없다는 것을 의미한다.

따라서 최적화를 위해서는 표면용융을 유발하지 않고 충분한 경화깊이를 얻으면서, 중첩이 진행될수록 경화폭이나 깊이 및 중첩길이의 변화가 적어야 한다. 또한 중첩으로 인한 경도 저하폭이 최소가 되도록 해야 한다.

4.3 SM45C와 SNCM8 강의 경화특성 비교

경화능이 서로 다른 SM45C와 SNCM8 강을 열처리하여 그 경화특성을 비교하였다. 각 시편을 이용하여 1.0kW의 레이저 출력으로 빔 이송속도 44mm/min, 회전수 26rpm의 조건으로 열처리 하여 그 종방향 경도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 경화부 경도 분포는 두 경우 모두 400-800Hv의 범위 내에서 증감을 반복하였고 중첩 경계 부근에서 템퍼링³에 의한 최저 경

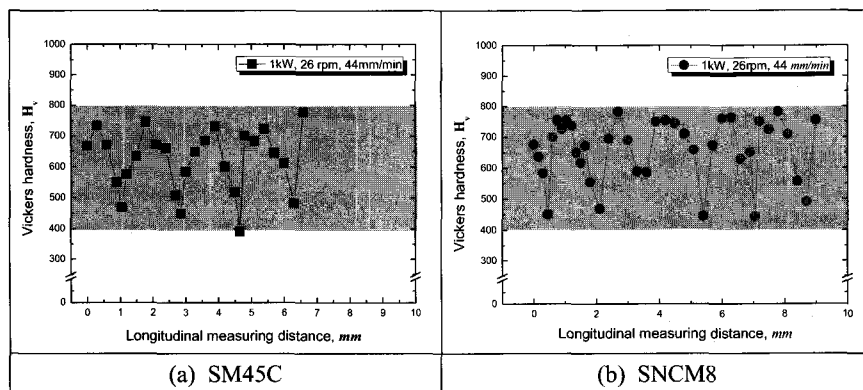


Fig. 6 Comparison of longitudinal hardness distribution.

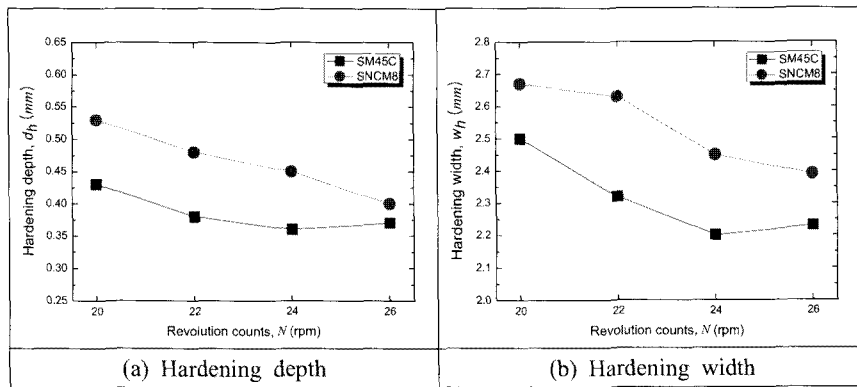


Fig. 7 Comparison of hardening depth and width.

도값은 대략 450Hv 정도로 측정되었다. 경화능에 크게 영향을 미치는 탄소함량이 서로 비슷하기 때문에 경도값이나 분포가 비슷하게 나타나는 것으로 판단된다.

경화능의 효과를 규명하기 위해서 동일한 조건으로 열처리한 각 시편의 경화깊이와 폭의 변화 비교해 보았다. 공정변수에 따른 경화깊이 및 폭의 측정 결과를 Fig. 7에 나타낸다. SM45C 강보다 SNCM8 강의 측정값이 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 의미한다.

4.4 SM45C강 경화부의 미세조직

레이저 표면경화법은 열원이 고정되지 않고 계속 이동하면서 조사되기 때문에 매 순간 레이저가 조사되는 부분에서 가열과 냉각을 반복하게 되므로 열전도에 의해 연속되는 그 다음 부분에서의 열 사이클에 영향을 미치게 된다. 특히, 환봉의 열처리 경우에는 중첩부가 생기는 부위에서는 또 다른 양상의 열 사이클을 형성하게 된다.

Fig. 8은 조직의 변화가 관찰되는 부위를 각각 광학현미경을 이용하여 1000배의 배율로 관찰한 사진이다. ④는 기지(matrix) 조직의 사진으로 SM45C 강의 전형적 조직인 페라이트와 펄라이트의 혼합조직으로 구성되어 있다. 경화조직은 상부(①, upper hardened zone)와 하부(②, lower hardened zone)로 나눌 수 있다. 표면에 가까운 최상부에는 미세한 마르텐사이트(lath martensite)가 밀도 높게 분포하고 있고 하부로 내려갈수록 미세한 마르텐사이트 조직 중에 백색의 조직이 분포하는 이상 조직이 형성되어 있는

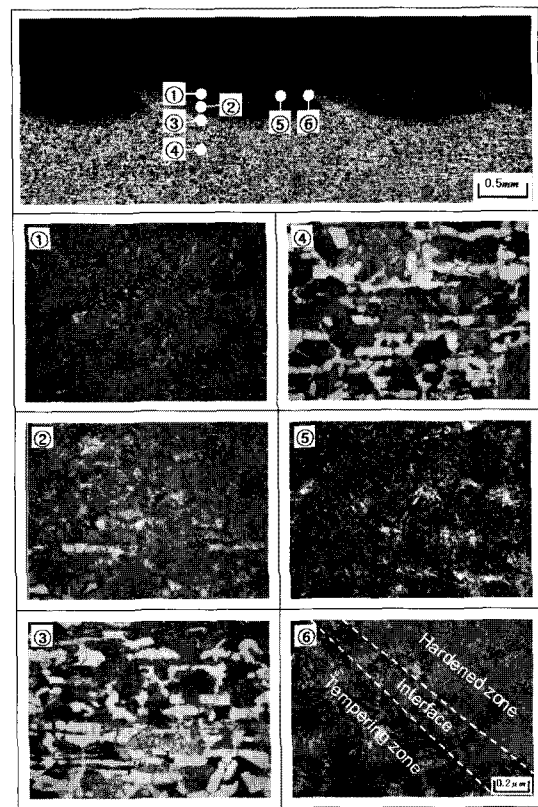


Fig. 8 Micro structure in hardened zone.

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. ③ 영역은 기지와 경화조직과의 경계부로 모재의 상층에 있던 펄라이트만 선택적으로 오스테나이트화된 후 냉각에 의해 변태된 마르텐사이트 조직과 가열 온도가 낮아서 미처 오스테나이트로 변태되지 못한 페라이트의 혼합조직이 관찰된다⁹. 이러한 조직분포를 오스테노 마르텐사이트(austeno-martensite) 혹은

마르테노 페라이트(marteno-ferrite)라고 부르는 경우도 있다¹⁰. ⑤는 기존의 경화된 조직이 다음 트랙에 의해 증첩됨으로써 그 주변이 템퍼링되어 생성된 조직으로 마르텐사이트가 미세 펄라이트(fine pearlite) 조직으로 변태되었다. ⑥은 증첩된 경계부분으로 템퍼링 영역과 경화 영역이 경계를 중심으로 나누어져 있는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

고출력 다이오드 레이저를 이용하여 SM45C와 SNCM8 재료의 표면경화공정에 관한 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 다이오드 레이저를 사용한 경도분포는 경도 700Hv 이상인 영역이 표면으로부터 비교적 얇고 고르게 분포하는 경향이 있다.
- 2) 종방향 경도분포는 경화능에 차이가 있음에도 불구하고 두 재료 모두 400-800Hv 범위 내에서 증감하는 경향을 나타내었으며, 증첩부 근방의 템퍼링 연화부 경도 역시 450Hv로 동일하게 나타났다. 이는 경화부 경도는 탄소함량에 지배되기 때문이다.
- 3) 경화깊이나 폭의 면에서는 SNCM8이 SM45C 탄소강보다 크며, 경화폭의 증가가 더 현저하였다. 이로써 경화깊이와 폭은 니켈, 크롬 및 몰리브덴과 같은 경화능 향상 원소의 첨가량과 관련성이 있다는 것을 알 수 있었다.
- 4) 경화부는 6부분의 조직으로 나뉘 살펴볼 수 있었는데, 이러한 조직 차이가 발생하는 이유는 부위별 열 사이클의 차이에서 기인한다.
- 5) 탄소강에 함유된 성분 및 함량에 따른 경화 차이와 최적의 열처리 조건을 위한 실험의 필요성을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지원 지역산업기술개발사업인 “레이저 복합가공기용 핵심 광학모듈 개발 : 10024308” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 홍영환, 박정웅, 이대웅, 이병엽 공역, “탄소강 열처리”, 원창출판사.
- 2) 한준희 외 4명 공역, “KRAUSS 철강 열처리의 기본원리”, 반도출판사.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) John F. Ready LIA HANDBOOK OF LASER, MATERIAL PROCESSING, Laser Institute of America, 223-261, 2001.
- 6) 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.
- 7) B. Ehlers, H. Herfurth, S. Heinemann, “Surface Hardening with High Power Diode Lasers”, ICALEO Section-G, pp. 75-84, 1998.
- 8) 望月 仁, 姫野俊一, レーザの基礎と應用, 丸善株式會社
- 9) 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.
- 10) 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.