CW Nd:YAG 레이저를 이용한 금형열처리

신호준†(조선대원)· 유영태*(조선대 기전공학과)· 오용석**(조선대원)· 노경보**(조선대원)

Metallic pattern Heat treatment by means of CW Nd:YAG Laser

Ho-Jun Shin†, Young-Tae Yoo*, Yong-Seak Oh**, Kyoung-Bo Ro**

Key Words: Nd:YAG Laser(Nd:YAG레이저), STD_{11}, SM45C, Laser heat treatment(레이저 열처리)

Abstract

Laser heat treatment is an effective technique used to improve the tribological properties and also to increase the service life of automobile components such as camshafts, crankshatfs, lorry brake drums and gears. High power CO_2 lasers and Nd:YAG lasers are employed for localized hardening of materials and hence are of potential application in the automobile industries. The heat is conducted rapidly into the bulk of the specimen causing self-quenching to occur and the formation of matrensitic structure.

In this investigation, the microstructrual features occurring in Nd:YAG laser hardening SM45C and STD_{11} steel are discussed with the use of optical microscopic and scanning electron microscopic analysis. Moreover, This paper describes the optimisation of the processing parameters for maximum hardened depth of SM45C and STD_{11} steel specimens of 10mm thickness by using CW Nd:YAG laser.

1. 서 론

최근 몇 년 동안 표면개질에 사용되는 열원 및 방법이 다각도로 응용되고 있으며, 현재는 주로 레이저 표면개질에 대한 관심이 집중되고 있다. 레이저를 이용한 표면개질방법으로는 레이저 합금화 및 레이저 표면경화법이 있다. 기존의 표면경화법인 고주파경화법이나 화염경화법에 비해 제품의 모양이나 국소적인 한계를 해소할 수 있어 그 응용범위가 확대되고 있다.[5,6,9,10,11] 그 이유는 레이저로 표면을 경화시킬 때 부품의 변형이 매우적고, 선택적인 부분을 정확하게 표면처리할수 있기 때문이다. 레이저 표면경화는 고밀도 에너지 열원에 의해 재료 표면을 급속가열하여 내부로의 열이 전도 되면서 자기 냉각 작용 때문에 발생하는 급냉효과를 이용한다.[7]특히 레이저빔의 에너지밀도가 충분히 높으면 열이 재료 내부로 전도되어 없어지는 것보다 더 빠른 속도로 표면에 축적되어 표면층에 온도가 빨리 상승한다. 이와 같이 되면 매우 짧은 시간내에 표면의 얕은 층은 오스테나이트화 온도에 도달하는 반면 부품의 중심부는 온도가 오르지 않고 냉각된 상태에 있게 된다. 이는 기존의 고주파열처리에 비해서 급열도가 높아 내부로의 열 확산이 억제 되기 때문에 표면경화시 구조물이나 부품의 변형 발생을 최소한으로 억제된다. 이와같이 급

† 조선대원
E-mail : skysbn66@hotmail.com
TEL : (062)230-7942 FAX : (062)227-6329
* 조선대학교 기전공학과

속가열· 냉각하므로 다른 표면경화법보다 부품의 변형이 적으면서 높은 경도값을 가질 수 있다.[8] 고체 레이저인 Nd:YAG(μ:1.06㎛)레이저가 기존의 CO_2(μ 10.6㎛)레이저의 출력과 비슷한 수준으로 개발됨에 따라 재질에 대한 레이저빔의 흡수율이나 설치공간 및 운영면에서 장점이 많아 이를 대처하고 있다. 그 장점으로는 Nd:YAG 레이저가 CO_2레이저와 비교해, 높은 beam quality, 안정적인 출력, 규격화된 디자인, 출력분배 등이 쉬울 뿐만 아니라, CO_2레이저보다 입열이 작아서 열비틀림이 작기 때문이다. Nd:YAG레이저(μ:1.06㎛)는 CW CO_2레이저(μ:10.6㎛)보다 금속에 대한 흡수율인 높아서, CW CO_2레이저보다 표면경화시 경화층이 깊게 나타난다. 광섬유를 이용한 원거리 표면경화나 복잡한 형상을 표면경화할 수 있는 장점도 있다.[9] 하지만 현재 저출력 Nd:YAG레이저를 이용한 표면경화 연구가 있으나, 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 연구발표가 거의 없는 실정이다. 레이저 표면경화는 최적의 공정변수를 이용하여 생산성향상에 기여하는 것이 중요한 요인이기 때문에 보다 많은 연구가 필요하다.

본 실험에서는 프레스금형의 다이(die)와 펀치(punch)등에 사용하는 STD_{11}와 SM45C를 비교하였다.

STD_{11}는 프레스금형의 Blanking Forming-die, 사출금형등에 사용한다. 일반적인 열처리에서는 탈탄을 방지하기 위해 염욕(salt bath)이나 가스분위기에서 열처리는 한다. 레이저 표면경화는 일반 열처리와 같은 분위기 속에서 표면경화처리하기 어려워 가공표면에 탈탄 혹은 경도저하층이 발생하기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. 그래서 본 연구에서는 기계구조용 중탄소강인 SM45C와 냉간용 공구강인 STD_{11}을 Nd:YAG 레이저를 사용하여 표면경화 특성을 연구하고자한다. 연구방법으로는 레이저의 출력과 이동속도를 변화시키면서 경화깊이와 경화폭, 미세조직을 실험적으로 관찰하였다.

레이저광의 강도분포가 불 균일하면 경화층이 불 균일해질 뿐만 아니라 표면용융을 일으키는 원인이 된다. 그래서 레이저빔을 이용해서 표면경화처리할 경우 레이저빔의 입열량을 일정하게 유지하기 위해 레이저 빔의 강도가 균일하게 전달되도록 열처리전용 광학계를 구성하여 열처리하고 있다. 그러나 본 연구에서는 열처리용 광학계를 구성하여 열처리하기전에 레이저빔을 디포커싱하여 열처리 경화분포도, 경화깊이, 경도크기 및 금속조직 상태를 분석하기 위해 실험적으로 고찰하였다. 이번 실험연구결과와 비교하기 위해 열처리전용 광학계를 구성하여 표면열처리 했을 경우 경화특성들을 비교 분석하기 위한 선행 연구자료이다.

2. 2 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06㎛이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600㎛인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔발산각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다. 레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000×500×400mm이며, x축, y축에 대한 위치정밀도는 5㎛, z축에 대한 위치정밀도는 1㎛, 반복정밀도는 8㎛이다. 레이저 가공헤드의 렌즈초점거리는 200mm, 초점크기(Spot size)는 0.6mm이다. 시편을 표면경화 시킬 때 표면과 대기중의 오염물질사이의 상호작용을 방지하기 위해서 질소가스를 45°각도, 압력을 3bar 정도로 분사시킨다. 또한 표면경화시 시편의 표면 상태를 모니터링 할 수 있는 CCD 카메라를 레이저 가공헤드에 부착하였다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig.1과 같다

.

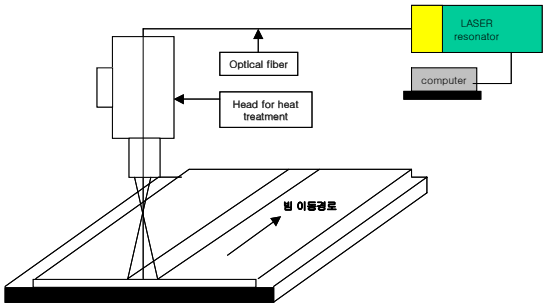

Fig.1 Schematic of a laser surface hardening

2.2.1 시편 및 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 앞서 언급했듯이 일반공작기계나 금형에서 많이 사용되는 SM45C와 STD_{11}을 사용하였다. 시편의 화학 조성분은 Table.1 과 Table.2와 같다.

실험에 사용한 시편의 크기는 시편 자체에서 자기 퀜칭(self-quenching)을 시켜야 하기 때문에 어느 정도의 임계질량과 두께를 가지고 있어야 한다. 그래서 시편크기를 100×80×10mm로 가공하였고, 레이저 표면경화시키전에 시편의 표면을 연마기를 이용하여 Sand Paper로 연마하고 아세톤세척후 레이저 빔을 조사시켰다.

Table 1 Chemical compositions of SM45C(%)

	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.42～0.48	0.15～0.35	0.60～0.90	≦0.30	≦0.035

Table 2 Chemical compositions of STD_{11}(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
STD_{11}	1.40～1.60	/0.40	/0.60	≦0.03	≦0.03	11.0～13.0

레이저 열처리에 관련된 실험변수로는 레이저 출력, 레이저 파장, 레이저빔 이송속도, 레이저빔의 초점위치, 보호가스 종류 및 유량, 재질의 빔 흡수율 등이 있다.

본 연구에서는 Nd:YAG레이저를 사용하기 때문에 레이저 파장은 결정되 있으므로 레이저빔의 출력, 빔의 이송속도, 초점거리를 변화시켜 경화깊이, 경도, 경화폭 등을 측정하여 비교하고자 한다. 레이저빔을 이용해서 시편표면을 경화시킬 때 입열량에 따른 재료의 특성변화를 관찰하기 위해서 다음과 같은 식을 사용하여 입열량을 산출하였다.

$$E=\frac{P}{W\cdot V}(J/cm^2) \quad \text{----------} \quad (1)$$

여기에서 P는 레이저출력, W는 시편표면에서 레이저빔을 흡수한 폭, V는 레이저빔 이동속도이다.

디포커싱에 따른 입열량을 비교하기 위해 레이저 출력은 1.6kW로 고정하였고, 빔 이동속도는 각각 0.6～1.5m/min범위내에서 속도를 각각 0.1씩 증가시켰다. 표면으로부터 초점위치를 +45mm, +46mm, +47mm 위치에서 레이저빔을 조사시켰다. 표면경화 처리전 시편은 Sand Paper로 연마하기 때문에 그에 따른 표면융기를 관찰하여 표면처리후 표면융기의 변화를 관찰하였다. 경화깊이와 경화깊이변화에 따른 경도측정을 위해 열영향을 주지 않는 저속절단기를 이용하여 시편의 단면을 절단한 후 연마한 후 비커스 경도분포를 관찰 하였다.

시편을 Polishing시켜 SM45C는 nital(5%), STD_{11}는 nital(2%)으로 부식처리 한 다음 광학현미경을 이용하여 경화깊이를 측정하였고, 레이저 표면처리후 열 때문에 발생할 수 있는 표면융기를 관찰하기 위해서 JAPAN KOSAKA에서 제작한 DSF을 사용하여 부풀림정도를 측정하였다. 이때 최대하중은 70㎏이며, X축(100mm/0.1㎛)를 사용하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기를 사용하여 SM45C는 0.5㎏, STD11는 1.0㎏의 하중을 적용시켰다.

3. 3 결과 및 고찰

3.1 빔 이동속도와 경화깊이

레이저 빔의 조사속도에 따른 금속표면에서의 식(1)로 나타낸 입열량의 변화는 금속내부의 경화깊이와 관계가 있으므로 아주 중요한 변수이다.

Fig. 2은 레이저빔의 출력을 1.6kW, 두께를 10mm으로 SM45C 과 STD_{11} 판재로 고정하고 초점위치와 빔 이동속도를 변화시켜 경화깊이를 나타냈다. 실험결과는 에너지밀도가 높은 레이저빔을 표면에 조사하였을 경우 온도구배가 높은 표면열원이 기지조직 내부로의 급속한 냉각효과 때문에 금속내부로 침투하지 못하고 표면 열원으로 남아있는 표면의 폭에 비하여 열침투깊이 비가 작아지기 때문이다. 그러나 시편재질에 따라 경화깊이의 변화는 각기 다른 형태로 나타나고 있다. SM45C는 이동속도가 0.9m/min정도까지 선형적으로 감소하다가 그 이상으로 증가할 때 디포커싱된 위치에 따라 경화깊이의 차이가 나타났다. 이와 다르게 STD_{11}는 이동속도가 0.6m/min ～ 0.9m/min 까지 불규칙적으로 경화깊이가 일어났고, 그 이후부터는 선형적으로 경화깊이가 나타났다. 또한 Fig. 2에서는 레이저빔의 조사속도가 빠를수록 경화깊이가 작아지고 경화폭이 증가되는 현상이 나타는 것을 알수 있다. 이 관계를 알

아보기 위해서 빔 이동속도에 따른 입열량 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 입열량은 금속의 고상변태의 중요한 변수이고, 레이저출력과 빔 이동속도와 같은 공정변수에 따라 달라진다.

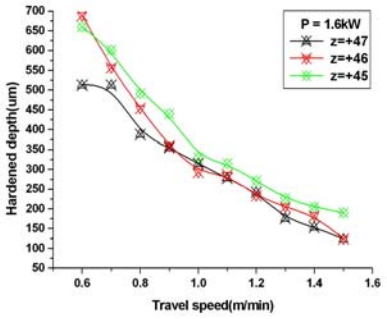

Fig. 2(a) Hardness depth according to laser beam speed of STD_{11}

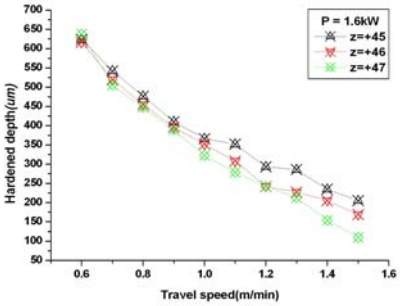

Fig. 2(b) Hardness depth according to lase beam speed of SM45C

본 연구에 이용한 입열량은 식(1)로 계산하였다. Fig. 3에 알수 있듯이 시편의 성분에 따라 입열량의 분포가 각기 다른 형태로 나타나는 것을 알수 있다. STD_{11}은 입열량이 최대 5×103 J/cm^{2}을 가지고, SM45C는 최대 11×103 J/cm^{2}을 가진다. 특히 Fig. 3(a)에서는 빔 이동속도가 0.7m/min일 때까지 입열량이 일정하였다가 그 이상으로 증가하였을 때 디포커싱된 위치가 증가할 수록 입열량의 크기가 증가하는 것을 알수 있다. 이와 반대로 SM45C는 빔 이동속도가 감소할 수록 입열량의 크기가 초점위치에 따라 크게 달라지는 것을 볼수 있다. 그리고 레이저의 초점면이 표면의 치에 가까워 디포커싱된 정도가 작으면 레이저출력밀도가 높아 금속조직 변태온도보다 높아 표면을 용융 시켰다. 일반적으로 저출력· 저속도의 조건보다도 고출력· 고속도의 공정변수의 조합으로 시편을 경화시켰을 때 표면용융이 발생하기 쉬워 엄격하게 입열량을 조절해야한다. 레이저는 빠른 가공속도가 가장중요한 특징이므로 본 실험에서는 고출력 고속도의 실험으로 실시하였다. 그러나 고출력· 고속도에서 표면 결함이 많이 발생하는 이유는 표면에서부터 금속의 온도변화가 급속하게 발생하기 때문에 이런 현상을 억제하는 방법이 가장 중요하겠다.

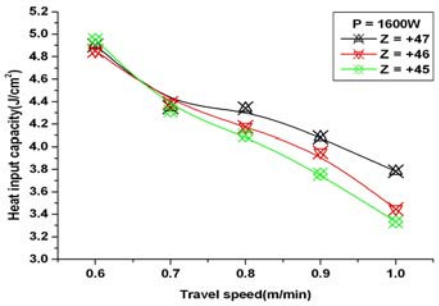

Fig. 3(a) The relation between Heat input Capacity and beam travel speed[STD_{11}]

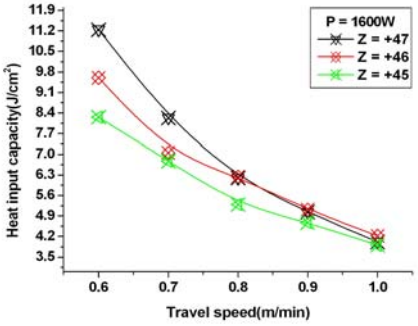

Fig. 3(b) The relation between Heat inp Capacity and beam travel speed[SM45C]

3.2 빔 이동속도에 따른 표면융기상태

금속의 열처리시 발생되는 표면융기현상은 크게 두가지로 분류할 수 있다 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태하면서 발생되는 마르텐사이트 변태에 의한 팽창과 열응력에 의한 소성변형에 의해 발생된다. Fig.4(a)는 시편이 SM45C일 때 출력이1.6kW, +47mm일 때 표면융기형상이다. 측정결과에서 알수 있듯이 일반적으로 레이저의 출력이 증가하면 입열량이 증가하므로 표면융기의 크기가 커지고, 열처리 속도가 감소

해도 입열량이 증가하므로 불규칙한 표면융기의 발생빈도가 높아진다. Fig.4(b)는 시편이 STD_{11} 일 때 Fig.4(a)와 같은 공정변수를 사용하여 표면융기의 변화를 관찰하것이다.

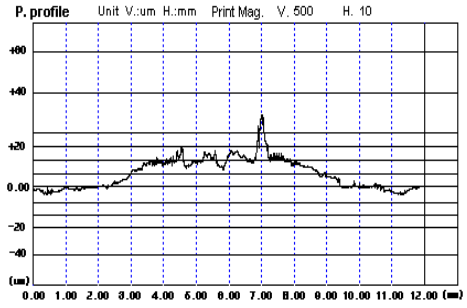

Fig. 4(a) Surface roughness after laser hardening[SM45C]

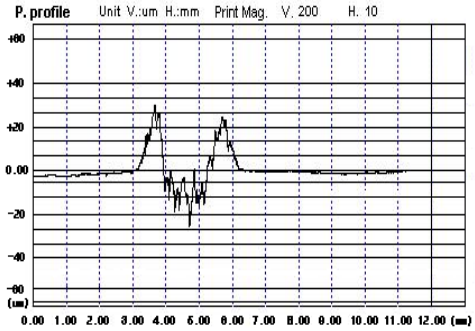

Fig. 4(b) Surface roughness after laser hardening[STD_{11}]

측정결과에 나타낸 바와같이 SM45C와 STD_{11}는 표면경화후 표면 거칠기 모양이 다르게 나타났다. SM45C의 표면경화처리된 폭은 3.1mm이고 깊이는 0.54mm였다. 레이저 빔에 의한 표면열처리시 돌출된 부분을 제외하고 부풀어 오른 부분의 높이를 측정해 본 결과 10㎛정도 였다. STD_{11}의 폭은 3.3mm이고 깊이는 0.69mm였다. 이 경우에는 SM45C와는 다르게 표면경화처리된 표면의 중심부는 10㎛정도 움푹 파였고, 양 옆면은 30㎛정도 부풀어 올랐다. 이것은 STD_{11}이 SM45C에 비해 탄소의 함량이 많이 있어 탄소가 급속히 탈리되는 탈탄현상이 나타나는 것으로 생각되어진다. STD_{11}는 SM45C와 달리 육안으로 표면융기부분과 경화부, 열영향부, 모재의 형상을 뚜렷히 구분할 수 있다.

3.3 경도특성 및 미세조직의 변화

SM45C와 STD_{11}는 디포커싱된 위치에 따라 비슷한 형태로 경도분포가 나타지만, STD_{11}는 탄소량이 많이 분포되어 있고, 레이저빔 조사시 시편 표면에서 탈탄현상이 발생하여 표면으부터 약 0.6mm까지 경도값을 가진다.

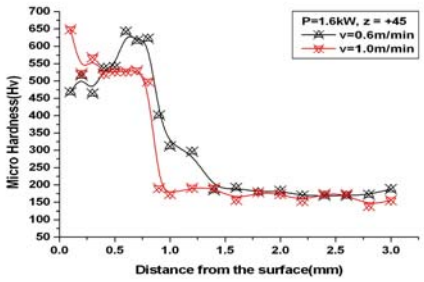

Fig. 5(a) Micro hardness profile of laser hardened zone for various scanning speed[SM45C]

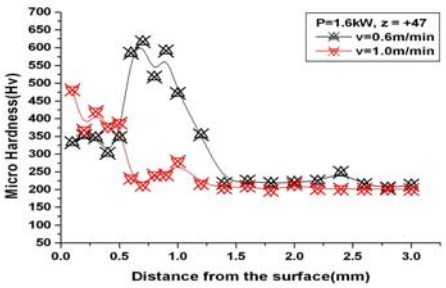

Fig. 5(b) Micro hardness profile of laser hardened zone for various scanning speed[STD_{11}

그리고 SM45C와는 다르게 경도분포의 값이 1/3가량 차이가 나타내졌다. 또한 빔 이동속도가 증가하면 시편의 표면으로부터 경도값이 증가하였다가 급격히 감소하는 것을 알수 있다. 레이저빔 이동속도가 작 입열량이 큰 경우 표면에서 용융이 일어나 경도가 저하되는데 이는 표면온도가 액상선까지 올라가 냉각시에 오스테나이트가 일부 마르텐사이트로 변태되나 대부분 조대한 퍼얼라이트로 변태되어 연화되기 때문이다. 디포커싱된 초점위치가 Z = +45mm일 때 0.7mm의 경화깊이까지는 빔 이동속도의 변화가 있을지라도 기지조직보다 약 3배가량 증가하였다. 일반 열처리 경도값인 700Hv이상보다는 작게 경도분포를 형성하고 있다. 그러나 CO_2레이저를 사용하였을 때 출력을 2kW로 증가시켜 동일한 조건 하에서 실

험을 하였을 때 보다 높은 경도값을 가지는 것을 알수 있다.

Fig. 6은 SM45C와 STD_{11}를 나타낸 미세조직사진이다. 레이저 빔 출력을 1.6kW,빔 조사속도를 V=0.6m/min로 고정했을 때 SM45C는 디포커싱된 위치를 +45mm일 때 STD_{11}는 +47mm일 때 레이저빔을 조사시켰을 때의 미세조직을 나타낸 것이다. SM45C는 Fig. 6(a) 조대한 마르텐사이트와 흰 기지를 구성하고 있는 잔류오스테나이트가 함께 나타나 경도값이 떨어졌다. Fig. 6(b),(c)는 각각 조대한 판상 마르텐사이트가 나타고, 백색의 페라이트와 흑색 및 층상은 펄라이트를 나타내고 있다. STD_{11}의 일반적인 특성은 깊이 경화되며 경화에서 뒤틀림이 적고 안정성이 높다. 내연화성이 높고 내탈탄성은 보통이다. 쉽게 질화된다. 이와같은 성질 때문에 레이저빔을 조사시켰을 때 Fig. 6(a)는 표면에 입열량이 많아지면서 용융되어 표면 탈탄부로 백색의 페라이트기지에 약간의 조대한 판상 마르텐사이트를 형성하고 있다.

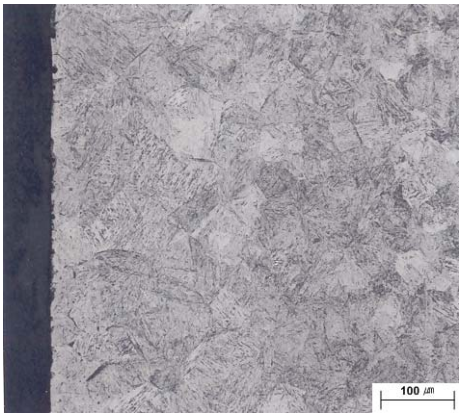

Fig. 6(a) Outside hardened zone

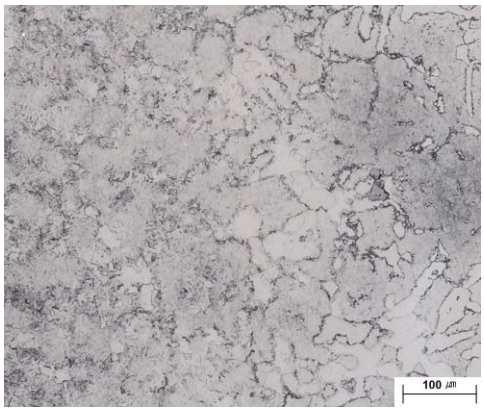

Fig. 6(b) Inside hardened zone

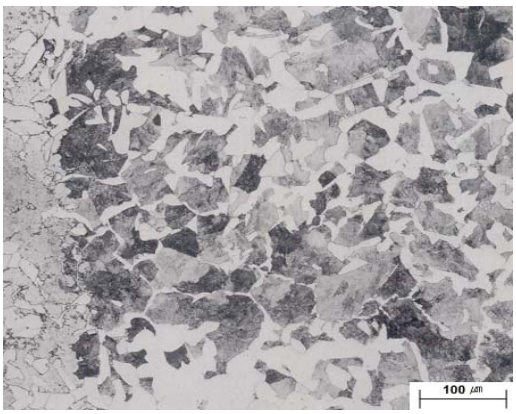

Fig. 6(c) Substrate zone

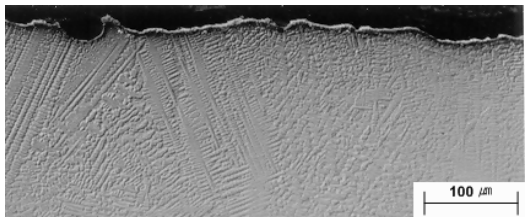

Fig. 6(a)-1 Outside hardened zone

Fig. 6(b)-1 Inside hardened zone

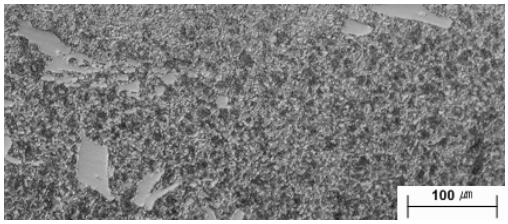

Fig. 6(c)-1 Substrate zone

그러므로써 Fig. 6(a)-1에서 보듯이 응고 조직으로 셀 및 수지상정의 혼합조직으로 되어 있으며, 약 0.7mm까지 경도값이 작아졌다. Fig. 6(b)-1는 STD_{11} 의 경화부로 마르텐사이트 기지에 크롬탄화물입자(흰색)조직이 분포되어 있으며, 경화깊이는 약 0.4mm정도의 크기를 가지고 있다. Fig. 6(c)는 모상을 나타낸 것으로 펄라이트 기지조직

에 크롬 탄화물입자(흰색)조직이 나타내고 있다.

4. 결 론

CW Nd:YAG 레이저를 이용한 SM45C와 STD_{11} 강재의 표면경화처리시 주요 공정인자인 레이저 출력과 빔 이동속도, 디포커싱된 초점위치가 표면경화 특성에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 레이저빔으로 표면경화처리할 경우 시편의 성분에 따라 입열량의 차이가 약 6×10^3 J/cm^{2}정도로 나타났다.

2) STD_{11}의 미세조직은 표면용융부에서 탈탄현상으로 인한 표면으로부터 약 0.7mm까지 경도값이 저하되는 것을 알 수 있다.

3) 빔이송속도와 입열량은 반비례하고, 마르텐사이트가 표면부에 많이 분포하고 있다.

4) STD_{11}는 고온에서 안정한 탄화물들을 다량 함유함으로써 고용 탄소 농도가 크지 않고, 레이저빔을 이용한 표면경화시 급속가열로 인한 입열량의 증가로 탈탄현상이 나타므로 이를 줄일수 있는 방법이 필요하다.

후 기

한국과학재단 연구비(RRC)와 광특화연구센터장비를 이용해서 연구를 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1)J.Senthil.Selvan, K.Subramanian., 1999, "Effect of laser surface hardening on En18(AISI-5135)-steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol .91, pp.29～36.

(2)L.W.Tsay, Z.W.Lin, R.K.Shiue., 2000, "Hydrogen embrittlement susceptibility of laser-hadened 4140-steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 290.

(3)A. Pertek, M. Kulka., 2002, "Characterization of single tracks after laser surface modification of borided 41Cr4 steel", Applied Surface Science, Vol. 947.

(4)Pedro De la Cruz, Magnus Oden and Torsten Ericsson., 1998, "Effect of laser hardening on the fatigue strength and fracture of a B-Mn steel", Int. J. Fatigue, Vol. 20, No.5, pp.389～398.

(5)H.G.Woo, H.S.Cho., 1998, "Estimation of hardened layer dimensions in laser surface hardening processes with variations of coating thickness", Surface and Coatings Technology, Vol. 102

(6)G.N. Haidemenopoulos, 2001, "Coupled thermody-namic/kinetic analysis of diffusional transformation during laser hardening and laser welding", Journal of Alloys and Compounds, Vol.320

(7)A.I.Katsamas, 1999, "Surface hardening of low-alloy 15CrNi6 steel by CO_2laser beam" , Surface and Coatings Technology, Vol. 115.

(8)R.A.Ganeev., 2002, "Low-power laser hardening of steels", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121.

(9)P. Gopalakrishnan., P. Shankar,2001,"LASER SURFACE MODIFICATION OF LOW CARBON BORIDED STEELS", Scripta-mater., Vol. 44.

(10)T.Hirogaki, H.Nakagawa, M.Hayamizu, Y. Kita, 2001, "In-situ heat treatment system for die steels using YAG laser with a machining center", Precision Engineering, Vol. 25.

(11)R.Sagaro, J.S.Ceballos, 1999, "Tribological behaviour of line hardening ofsteel U13A with YAG laser", Wear, Vol. 225～229.