

연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 열간금형 공구강의 표면경화 특성

신호준*, 유명태#, 신병현*

Characteristics of Surface Hardening for Hot Work Tool Steel using Continuous Wave Nd:YAG Laser

Ho Jun Shin*, Young Tae Yoo# and Byung Heon Shin*

ABSTRACT

Laser surface hardening technologies have been used to improve characteristics of wear and to enhance the fatigue resistance for mold parts. The objective of this research work is to investigate the influence of the process parameters, such as power of laser and defocused spot position, on the characteristics of laser surface hardening for the case of SKD61 steel. CW Nd:YAG laser is selected as the heat source. The optical lens with the elliptical profile is designed to obtain a wide surface hardening area with a uniform hardness. From the results of the experiments, it has been shown that the maximum average hardness is approximately 780 Hv when the power, focal position and the travel of laser are 1,095 W, 0mm and 0.3 m/min, respectively. In samples treated with lower scanning speeds, some small carbide particles appear in the interdendritic regions. This region contains fine martensite and carbide in proportions which depend on the local thermal cycle.

Key Words : Laser Surface Hardening (레이저표면경화), Hot Work Tool Steel (열간금형 공구강), Elliptical Lens (타원형렌즈), Infrared Pyrometer (적외선온도측정기), XRD (X-ray 회절분석), SEM (전자현미경)

1. 서론

레이저를 이용한 표면경화기술은 산업적으로 매우 효율적이고 능률적인 기술이기 때문에 많은 연구가 진행 되어 왔다. 특히 1980 년대 중·후반에 CO₂ 레이저를 이용한 표면열처리에 관한 연구가 진행되었다. CO₂ 레이저를 이용한 연구가 발표된 뒤 Nd:YAG 레이저를 이용한 표면열처리 연구가 진행

되었다. CO₂ 레이저나 Nd:YAG 레이저를 이용한 연구의 대부분이 펄스형 레이저에 관한 내용이 었다. 최근 산업용 레이저 중 고출력 연속파(Continuous Wave: CW) Nd:YAG 레이저는 CW CO₂ 레이저와 비교해, 높은 beam quality, 안정적인 출력, 규격화된 디자인, 쉬운 출력분배 등의 장점 때문에 레이저 표면열처리에 관한 연구가 최근까지 활발히 진행 되고 있다.¹⁻⁶

접수일: 2006 년 6 월 27 일; 게재승인일: 2007 년 2 월 11 일

* 조선대학교 정밀기계공학과

교신저자: 조선대학교 메카트로닉스공학과

E-mail: ytyou@chosun.ac.kr Tel. (062) 230-7016

레이저빔을 이용하는 표면경화처리는 일반적인 표면경화처리와는 다르게 급가열 후 냉각수를 사용하지 않고 재료내부로 급냉각하는 자체 냉각 (self-quenching) 특성을 이용한다. 재료표면을 경화시키면 표면조직이 치밀하고 균일한 조직이 형성되어 마모성, 내부식성, 내충격피로강도 등이 증가된다.^{7,8}

최근 산업동향에서는 기계부품의 가공속도의 고속화, 고성능화, 고강도화를 필요로 한다. 그래서 기계가공에 필요한 제품은 높은 강도뿐만 아니라 강한 인성, 내마모성, 내부식성 등을 가져야 한다. 특히 표면경도가 중요한 금형은 동일 품질의 부품을 능률적으로 대량생산하기 위한 것으로 자동차 부품, 전기전자부품, 사무용품 등 거의 모든 산업에 적용되며 부품의 품질 및 생산성에 필수적인 요소이다. 그러나 종래의 금형 재료만으로는 그 특성을 충분히 만족시킬 수 없어, 표면경도를 증가시켜 사용하고 있다.

산업현장의 일반적인 경화법은 질화법, 침탄법, 고주파열처리법과 같은 다양한 열원을 가지고 금형재료의 표면을 경화시키고 있다. 그러나 최근에는 열처리속도와 부품형상이 다양해지면서 레이저빔을 이용한 표면경화기술이 선진국에서 연구되어 산업전반에 적용한 사례가 발표되고 있고, 레이저빔의 종류에 따라 다양한 연구개발이 이루어지고 있다.

본 연구에서 사용한 열간금형 공구강인 SKD61은 열 충격 및 열 피로에 강하며, 내마모성과 내열성에 강점이 있어 가공용 공구나 각종 다이스 다 이블로 제조하여 정밀금형에 쓰인다. 그러나 치수 변화량이 크고, 열처리할 때 재료 자체가 뒤틀리는 특성을 지니고 있다. 치수 변화 폭도 크기 때문에 황삭가공을 하고, 열처리 한 후 방전작업을 하는 것이 보편적이다. 열처리한 후 치수 차는 0.1mm ~ 0.5mm 정도 차이가 발생하는 단점을 가지고 있다.

위와 같이 단점을 극복하기 위해 레이저빔을 이용하면 매우 효율적인 작업공정이 이루어질 수 있다. 레이저 표면경화의 특징은 다음과 같다.

레이저빔의 에너지 밀도가 충분히 높으면 열이 재료내부로 전도되어 손실되는 것보다 더 빠른 속도로 표면에 축적되기 때문에 표면층의 온도가 순식간에 상승한다. 동시에 매우 짧은 시간 내에 표면의 얇은 층은 오스테나이트화 온도에 도달한다. 반면 부품의 중심부는 온도가 상승하지 않고 자연

냉각된 상태에 있게 된다. 이는 높은 열응집 작용으로 재료표면에서 급냉각되어 내부열 확산 속도가 억제된다. 이런 냉각효과 때문에 다른 표면경화처리 기술보다 부품의 변형이 적고 높은 경도값을 가진다. 선행 연구결과를 살펴보면 대부분 공구강의 연구경향은 디포커싱방법과 CO₂ 레이저 표면경화법을 사용되고 있다.⁹

R. Vilar¹⁰는 레이저표면처리 후 시편의 표면상태 topography(지세도) 특성을 관찰하여 표면이 주기적으로 잔 물결의 파동현상이 발생할 때 특성과 표면거칠기값을 관찰하였다. 그리고 레이저표면처리시 잔류오스테나이트 분포 및 양, 응고되는 입자크기에 따라 공구강의 표면처리 특성을 분석하여 발표하였다. 그리고 잔류오스테나이트를 조절하면 표면처리특성이 매우 효율적으로 향상된다는 것을 증명하였다. B. Narendar¹¹는 W2 공구강을 레이저열처리 전후의 미세조직에 따라 경도값을 비교하였고, 경화층의 내부에 발생하는 기공과 liquid drop(액체방울)의 형성빈도수를 두 지역 즉 고온부와 저온부에 대해 고찰하였다. S.-L. Chen¹²은 Taguchi 방법론을 이용하여 장펄스 Nd:YAG 레이저 표면경화 공정의 최적화와 개선에 대해 연구하였다. 레이저빔을 단일 조사와 멀티조사 시켰을 때, 최적공정조건에서 경도는 H_RC 52.5 ~ 63.9, 경화폭은 0.43 ~ 0.89mm 으로 향상되었다. 그리고 퍼지평가법(Fuzzy evaluation method)과 타꾸지법은 펄스 Nd:YAG 레이저표면경화시 최적의 공정변수를 얻는데 적용할수 있는 효과적인 방법으로 결론지었다. Larocca. A. V.¹³는 얇은 판재강의 표면처리에 대해 레이저빔 가열에 의한 열과도현상의 수학적 모델을 적용시켜 연구하였다.

이상에서 살펴본 대부분의 선행연구는 표면에서 레이저빔의 흡수율을 높이기 위해 코팅처리가 필요한 CO₂ 레이저나¹³ 순간출력이 높은 펄스형 Nd:YAG 레이저^{2,4,5}를 사용하였다.

본 연구에서는 대부분 금속표면에서 반사하는 CO₂ 레이저보다 파장이 짧은 1.06 μm의 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하였다. CO₂ 레이저보다 파장이 짧기 때문에 금속표면에서 흡수율이 7 배정도로^{7,8} 커서 흡수체를 금속표면에 코팅할 필요가 없는 장점이 있다. 또한 레이저 열처리 광학계를 제작하여 대면적 표면경화와 내마모성 증가에 대한 연구를 하고자 한다. 표면을 경화시키기 위해 SKD61의 표면에 Nd:YAG 레이저빔을 조사한 후 경

도크기, 경화깊이, 경도분포, 레이저빔 이송속도에 따른 표면온도, 경화조직 특성 등을 실험적으로 연구하여 최적의 공정변수를 제시하였다.

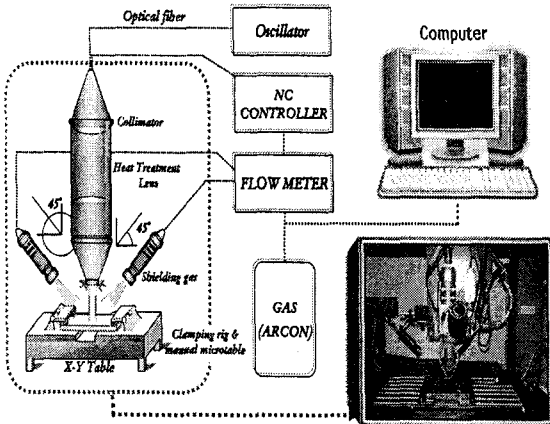


Fig. 1(a) Experimental Set-up

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용되어진 Nd:YAG 레이저는 파장이 $1.06 \mu\text{m}$ 이고, 최대출력은 2.8kW 이다. 평균유효출력은 2kW 인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔 발산각은 25mrad, $600 \mu\text{m}$ 인 광섬유를 통해서 전달된다. 광케이블에 연결되어 가공하는 CNC 공작대는 LASMA 1054 이다. 시편을 표면경화 시킬 때 표면과 대기중의 오염물질 사이의 상호작용을 방지하기 위해서 아르곤(Ar)가스를 보호가스로 사용하였다. 조사 각도는 45° , 가스압력은 1.5bar 로 분사시켰다. Fig. 1(a)는 실험장치의 계략도이다.

표면 경화처리를 위해 제작한 광학계는 Fig. 1(b)에서와 같이 열처리용 렌즈는 반원통형으로 제작하여 실험하였다. 렌즈의 재질은 UV grade F.S.이고, 초점거리(f)는 195mm 이며, 렌즈 크기(W×L)는 $40 \times 40\text{mm}$ 이다.

레이저빔이 시편표면에 조사되어 빔이 진행될 때 적외선 온도계를 이용하여 실시간으로 표면온도를 측정하였다. 레이저 표면경화 실험할 때 스패터(splatter)가 발생하여 온도계(pyrometer) 손상을 가져올 수 있기 때문에 광학헤드를 이용하여 필터를 체결시켜 실험하였다. 적외선 온도계의 사양은 Table 1 와 같다.

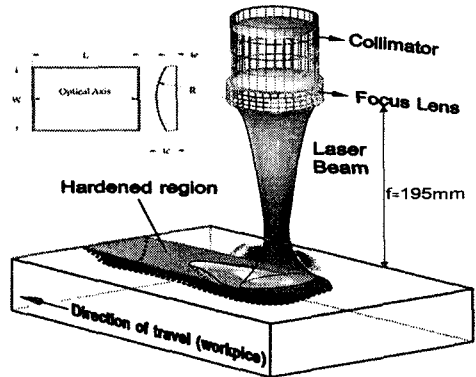


Fig. 1(b) Schematic diagram of laser surface hardening optical system

Table 1 Specifications of Infrared pyrometer

Model	IGAR 12-LO
Temperature ranges	500 ~ 2200℃
Spectral ranges	$\lambda = 1.64 \mu\text{m}$
Resolution	Display: 1℃, Interface : 0.1℃

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 금형에서 많이 사용되는 열간금형 공구강으로 SKD61 를 사용하였다. 시편의 화학 조성은 Table 2 과 같다.

Table 2 Chemical compositions of Specimens(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Fe
SKD61	0.41	1.12	0.41	0.02	0.01	5.2	1.23	1.10	0.70 ~1.3	Bal.

실험에 사용한 시편의 크기는 시편 자체에서 자기 담금질(self-quenching)을 시켜야 하기 때문에 어느 정도의 임계질량과 두께를 가지고 있어야 한다. 그러므로 시편의 크기를 $100 \times 50 \times 10\text{mm}$ 로 고정하여 열처리실험 하였다.

레이저표면경화시 레이저빔이 시편에 조사되면 고밀도 빛 에너지가 열에너지로 변하게 된다. 이때 고밀도 빛 에너지가 열에너지로 환원되는 것을 시편에 조사되는 입열량으로 표현된다. 그러므로 입열량^{1,3,4,9,14,16} 값을 아래식으로 계산했다.

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

기계적·금속학적 특성을 고찰하기 위해 경화 깊이가 변화에 따른 경도측정 하였다. 열영향을 주지 않는 저속절 단기[isomet 4000 precision saw]를 이용하여 시편의 단면을 절단해서 시편을 폴리싱한 후 피크린시약으로 부식처리한 다음 광학현미경[Nikon: ECLIPSE L150]을 이용하여 경화깊이와 경도값을 측정하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기[Simadzu: HMV-2series]를 사용하여 0.5 kg의 하중을 적용시켰다. 그리고 XRD(Rigaku Co., RIX-2000: Japan) 분석 및 SEM(JEOL JSM840-A:Japan), EDS (ANISIS310:England)분석을 통해 경화된 조직의 입자분석 및 성분 분석을 통해 경화층 특성을 관찰 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열처리광학계의 초점위치별 경화특성

레이저빔의 조사위치 즉 초점위치(z)에 대한 시편표면에 흡수되는 양을 분석하기 위해 초점위치(z)변화에 대한 초점면적의 변화 실험을 하였다. 이때 사용된 공정변수는 레이저빔 출력(P)을 1095W, 180ms 의 단펄스(Single pulse)로 각각의 초점위치에서 시편표면으로 조사시켜 Fig. 2 에 나타냈다.

열처리 광학계에 사용된 렌즈 초점거리(f)가 195mm 인 렌즈의 표면에서 초점위치(z)를 0mm 로 하고, 윗 방향은 (+), 아래방향은 (-)로 하였다.

Fig. 2 에 나타낸 초점형상은 레이저빔이 시편 표면에 조사된 형태이며, 타원형으로 각각 장축크기는 최대 26.18mm, 단축 크기는 최대 1.591mm 을 형성하고 있다. 이때, 타원형에서 장축의 크기는 초점위치(z)가 0mm 인 위치에서 가장 크고, 아래(-) 방향으로 이동했을 때 보다 윗(+)방향으로 이동했을 때 크게 형성되었다.

이것은 초점위치(f=195mm, z=0mm)를 시편표면 보다 낮게 위치시켜 레이저빔을 조사하면 표면으로 전도되는 에너지보다 깊이방향으로 전도되는 양이 많기 때문이다. 그리고 표면경화처리를 위해 제작한 렌즈가 반원통형 렌즈를 사용했기 때문에 초점위치가 바뀌면서 표면에 조사되어 열을 흡수한 면적이 장축방향으로 크기변화가 크게 나타났다.

단축크기의 경우는 초점위치(z)가 변할지라도 표면에 조사되는 레이저빔을 흡수하는 면적변화는

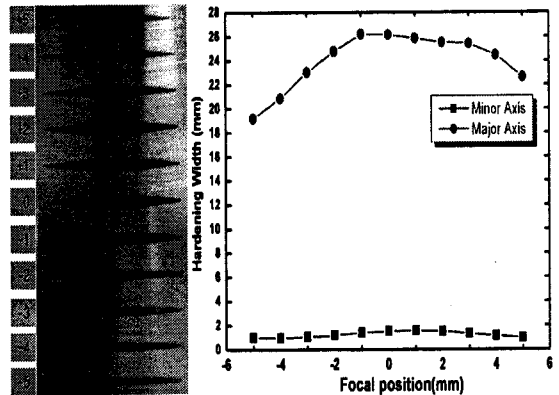


Fig. 2 Variations hardened width according to focal positions

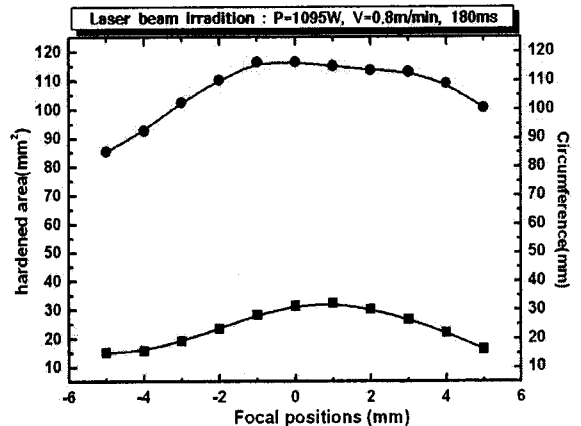


Fig. 3 Variations of hardened area & circumference according to focal positions

거의 없다. 이와 같은 특성은 레이저빔이 밀도가 높은 렌즈중앙의 슬릿부위로 집중되기 때문이다. Fig. 3 은 초점위치 변화에 따른 초점면의 면적과 원주를 나타냈다. 초점면의 면적이나 타원형 원주 모두가 렌즈 초점거리에서 (+)방향으로 이동할 때 가 (-)방향으로 이동했을 때보다 컸다. 이것은 렌즈 초점거리를 (+)로 이동시켜 레이저빔을 조사했을 때가 (-)일 때보다 표면에 전도되는 에너지가 크기 때문이다.

3.2 입열량과 경화표면온도 특성

레이저빔이 시편표면에 조사된 후 급가열 현상이 진행되면서 시편내부로 열에너지가 침투하게

된다. 이런 현상을 정량화시키기 위하여 레이저공정변수에 대한 입열량을 계산한 후 경화폭과 경화깊이관계를 비교하게 된다. 본 연구에서 각각의 공정변수에 대한 입열량분포를 분석 및 고찰하였다. 실험에 사용된 공정변수는 아래 Table 3 와 같다.

Table 3 Parameter of Laser surface hardening

Laser power	1095W
Travel speed(V_{ts})	0.3, 0.5, 0.8m/min
Focal position(z)	+3mm~-3mm
Shielding gas	Ar : 1.5bar : 3l/min

레이저 빔의 초점거리(f)를 기준으로 초점위치(z)가 0mm 지점에서 빔 이송속도(V_{ts})가 0.3m/min, 0.5m/min 일 때는 각각의 입열량이 $1.038 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, $0.738 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이 얻어졌다. 이때 빔 이송속도가 느린 경우 즉, 0.3m/min 일 때 0.5m/min 보다 300 J/cm^2 정도 크게 나타났다.

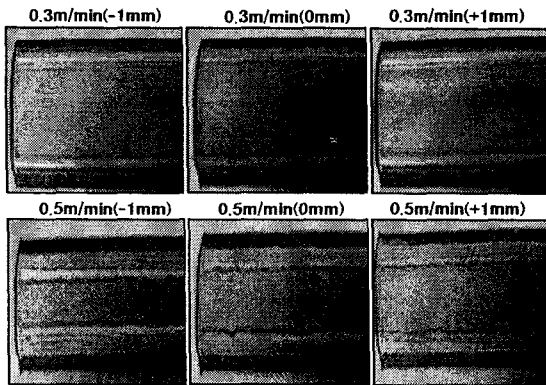


Fig. 4 Surface bead shape according to Laser travel speeds(V_{ts})

이런 현상은 레이저빔이 재료표면에 조사되면 레이저빔 일부가 재료내부의 자유전자와 반응하여 자유전자의 열에너지를 증가시키고, 증가된 자유전자 사이의 일부가 짧은 시간인 $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ sec}$ 에 격자로 전이된다. 그 후 10^{-9} sec 에 고에너지를 가진 전자로부터 격자에너지가 전달하여 격자에너지가 증가하고, 전자에너지와 비슷하게 된다.

본 실험에서 레이저빔이 표면에 조사되어 재료가 상호작용하는 시간은 초점점의 단축직경을 d, 레이저빔 이송속도를 V_{ts} 라 했을 때 레이저빔과 재료와의 상호작용시간은 $t = d/V_{ts}$ 가 된다. 레이저빔 이송속도를 0.3m/min 로 했을 때, 0.32sec 로 열로 변환될 만큼 충분한 시간이다.

그러므로 레이저빔 이송속도가 느리면 표면에 레이저빔이 조사되는 시간이 상대적으로 길어지기 때문에 표면에서 레이저빔이 흡수되는 양이 많아져 입열량(E)이 증가한다. 그리고 레이저빔 이송속도를 고정시키고 초점위치(z)를 윗 방향(+)으로 증가시켰을 때보다 아래방향(-)으로 이동시켰을 때 입열량이 더 크게 나타난다. 이는 Table 3 에서 보는 바와 같이 레이저빔의 초점위치를 시편 아래방향으로 하면 입열량이 가장 큰 초점위치가 시편 아래방향에 있기 때문이다. 이런 현상은 Fig. 4 에서와 같이 표면비드를 보면 쉽게 구분할 수 있다. Fig. 4 와 Table 4 에 표시된 것처럼 초점위치가 -2mm 와 +2mm 에서 입열량은 -2mm 일 때가 +2mm 일 때보다 약 10%정도 크게 나타났다.

레이저 표면처리시 시편 표면근방의 온도는 일반적으로 1100°C 이상으로 상당히 높은 온도를 형성하고 있다. 이와 같은 온도분포는 레이저빔 조사시 재료 표면만 국부적으로 조직이 오스테나이트로 되는 것은 보통 0.01~1.0sec 로 매우 짧고, 곧바로

Table 4 Heat input according to the focal positions

Focal position	Hardened Width(mm)	E(Heat input) (J/cm^2) ($V_{ts}=0.3\text{m/min}$)	Hardened Width(mm)	E(Heat input) (J/cm^2) ($V_{ts}=0.5\text{m/min}$)
-3mm	21.8	1.005×10^3	12.8	1.027×10^3
-2mm	20.3	1.078×10^3	16.3	0.805×10^3
-1mm	20.9	1.048×10^3	17.8	0.738×10^3
0mm	21.1	1.038×10^3	17.8	0.738×10^3
+1mm	21.8	1.004×10^3	18.9	0.695×10^3
+2mm	22.3	0.982×10^3	18.1	0.726×10^3
+3mm	20.5	1.068×10^3	18.5	0.711×10^3

급냉되므로 레이저빔에 의한 오스테나이트화 온도가 높더라도 그 시간이 매우 짧으므로 입자성장이 극소화된다. 그리고 각각 레이저 공정변수에 따라 이런 현상은 현저히 차이가 나타난다.¹⁴ 그래서 본 연구에서 레이저빔 시편에 조사될 때 적외선 온도계(Infrared pyrometer)를 이용하여 입열량과 표면온도의 상관관계를 고찰하였다. 그 결과를 Fig. 5 에 나타냈다.

레이저빔 출력은 1095W, 초점위치(z)를 0mm (Lens focal length: 195mm), 레이저빔 조사길이(L)는 70mm 로 고정하고, 빔 이송속도를 각각 0.3, 0.5, 0.8m/min 으로 변화시켜 표면온도측정하였다. 이때 적외선온도계의 측정각도는 60° 이고, 응답속도는 0.01sec 이다. 레이저빔 중심선과 표면온도측정 거리는 5mm 이다.

Fig. 5 에서 x 축은 표면온도 측정 시간이며, y 축은 표면온도 값이다. 그 결과로 레이저빔 이송속도가 빠를수록 내부로 열을 전도시키는 시간이 부족하여 표면온도가 낮게 분포하였다.

Fig. 5(a)에서 레이저빔 이송속도가 0.8m/min 일 때는 레이저빔과 재료와의 상호작용시간이 0.12sec 이지만 입열량이 충분하지 않아 A₃ 변태점이상으로 상승하지 못하였다. 이때 평균표면 온도가 650℃이다. 이것은 레이저빔의 가열(조사)속도가 너무 빨라 온도가 오스테나이트화 온도로 충분히 높지 않으면 확산에 의한 탄소 재분포가 일어나기 어렵다. 탄화물의 용해가 충분하지 않으면 불균질하고 결정립성장이 억제된 오스테나이트 조직이 되어 냉각시 불균질한 미세조직이 되기 때문에 경도값이 높지 않다. 이때 입열량(E)은 $0.582 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다.

이와 반대로 레이저빔 이송속도가 0.3m/min 일 때는 평균 온도 값이 약 1400℃ 정도로 레이저 빔 이송속도가 2.6 배정도 감소하면 표면온도는 2.15 배 증가하였다. 그리고 레이저빔과 시편과의 상호 작용시간이 0.32sec 로 A₃ 이상의 오스테나이트화 온도로 상승하기에 충분한 시간이 된다. 이때 입열량은 $1.038 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 으로 레이저빔 이송속도가 0.8m/min 보다 2 배 가량 증가하였다.

Fig. 5(a)에서 레이저빔 이송속도가 0.8m/min 일 때 초기에 온도가 높은 것은 레이저빔이 표면에서 효과적으로 흡수되도록 piercing 시간이 주어지기 때문에 빔이송지연으로 인하여 나타나는 현상이다.

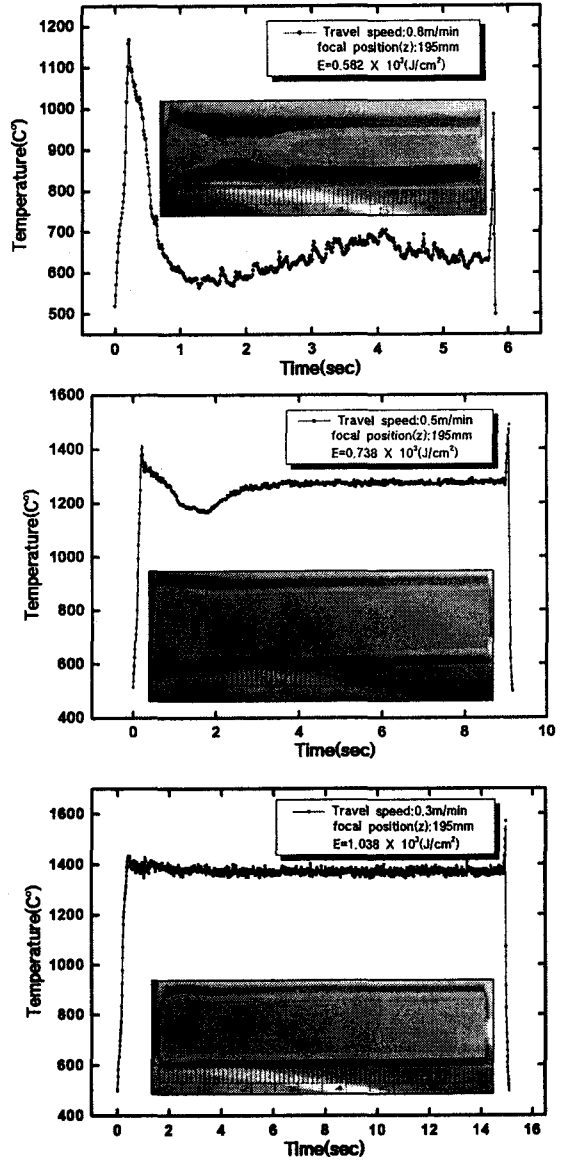


Fig. 5 As the result of surface temperature monitoring by laser beam irradiation

이런 현상은 레이저빔의 물리적특성으로 적외선영역의 레이저빔은 급속표면에서 대부분 반사된다. 표면이 변화되어 반사율이 저하되면 반사율이 급속히 줄어든다. 초기에 표면의 반사율을 감소시키기 위해 레이저빔을 집중하는 것을 piercing 이라 한다. piercing 시간은 1sec 이며, piercing 시간이 지나면 레이저빔이 이송되고, 입열량이 내부로 급격

하게 전달되면서 일시적 과도현상으로 온도가 강한 현상이 Fig. 5(a)와 (b)에 나타났다. 레이저빔의 이송속도가 0.3m/min 으로 입열량이 증가하면 piercing 에 의한 과도현상이 나타나지 않아 균일한 열처리 표면으로 되었다.

이런 결과로 비추어보면 Piercing 시간에 대한 입열량값이 일정할 경우 일시적인 과도현상이 발생하지 않고 균일한 표면경화 비드와 경도분포를 얻을 수 있다.

3.3 경도 및 미세조직 특성

선행연구에서는 대부분 디포커싱방법을 이용하여 레이저 표면경화에 관한 연구가 진행되었다. 그리고 대면적 부분을 표면경화처리 할 때 다중중첩(Multi-pass)을 통해 연구하였다. 이런 방법은 레이저빔이 중첩되는 부분 즉, 오버랩(overlap)의 영향으로 뜨임(Tempering)현상이 발생하여 경도분포가 불 균일하게 된다. 본 실험에서 이런 단점을 극복하기 위해 경화폭이 큰 열처리광학계를 구성하여 실험한 결과를 분석하였다.

각각의 레이저 공정변수에 따라 실험한 후 표면경화층의 경도값을 측정하였다. 표면경도측정시편에 3번, 측정간격은 5mm 로 동일한 조건으로 측정하여 평균경도값을 Fig. 6 으로 나타냈다.

그리고 디포커싱방법(Defocusing Method)을 사용하였을 때 표면경도 분포와 표면비드 형상을 비교하였다.

Fig. 6 에서 경화표면을 3 부분으로 나누어 분석했다. 그림에서 A 부분은 모재, B 부분은 천이부, C 는 경화부이다. 레이저빔 이송속도가 0.3m/min 일 때 경화부(C)의 평균경도값 800Hv 로 모재(A)경도값 200Hv 보다 약 4 배정도 경도값이 상승하였고, 0.5m/min 보다 균일한 경도분포를 형성하고 있다.

레이저빔 이송속도가 0.3m/min 일 때 경도분포값이 균일하게 나타난 것은 0.5m/min 일 때보다 입열량이 충분히 커서 표면의 오스테나이트화가 균일하게 형성된 후 급냉각되었기 때문이다. 금속 표면에 고출력의 레이저빔을 조사하면 페라이트조직이 매우 짧은 시간에 균질의 오스테나이트화 온도에 도달하게 된다. 균질의 오스테나이트 상태에서 탄화물이 용해될 수 있는 충분한 시간이 지난 뒤 급냉각하면 미세한 결정입자가 형성되어 조직이 강해진다. 레이저빔이 조사되는 출력과 초점 위치를 동일하게 하고 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간을 0.32sec 에서 0.19sec 로 빠르게 하면 충분히 탄화물이 오스테나이트조직에 확산되지 못하여 그 경도값이 불균칙하게 나타난다.

디포커싱방법으로 표면경화 했을 때에는 경화폭이 열처리 광학계로 표면경화 했을 때보다 약 2.5 배정도 증가하였다. 또한 평균경도값은 689Hv 로 레이저 표면 경화처리 했을 때보다 경도차가 111Hv 정도로 낮게 분포하였다. 이 결과 디포커싱 방법으로 표면경화 보다 본 연구에서 개발한 열처리 광학계가 디포커싱에 의한 표면경화방법보다 경도값, 경화폭 및 경도분포가 우수하게 나타났다.

Table 4 을 기준으로 시편에 조사되는 입열량에 대한 경도분포를 Fig. 7 에 나타냈다. 그 결과 최대 입열량은 $1.078 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이고, 최소입열량은 $0.982 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 으로 최대와 최소의 입 열량차이는 96 J/cm^2 이다. 경도값이 가장 큰 입열량값은 $1.005 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이고, 경도값이 가장 작은 입열량 $1.048 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다.

Fig. 7(a)에서 입열량이 $1.005 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 일 때 경도값이 가장 큰 이유는 표면온도가 균질의 오스테나이트화된 표면조직이 급냉각되는 최적의 시편 체적조건을 만족하기 때문이다. 경화폭은 입열량이 가장 클 때 20.3mm 이고, 입열량이 최소일 때 는 22.3mm 이었다.

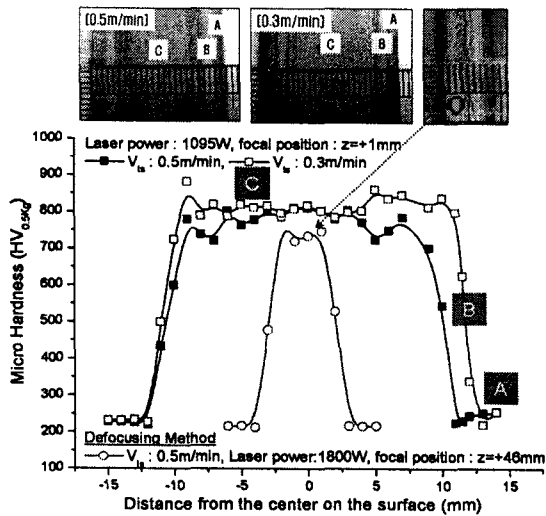
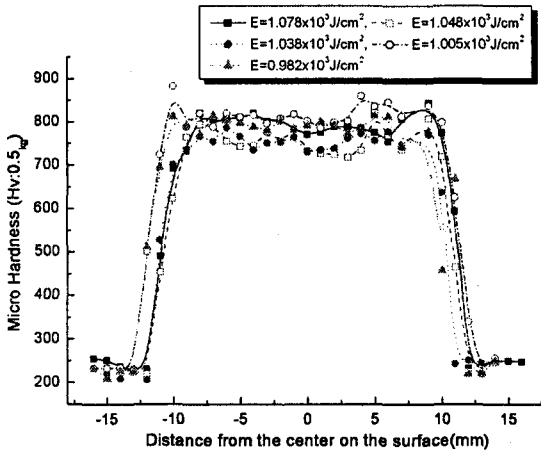
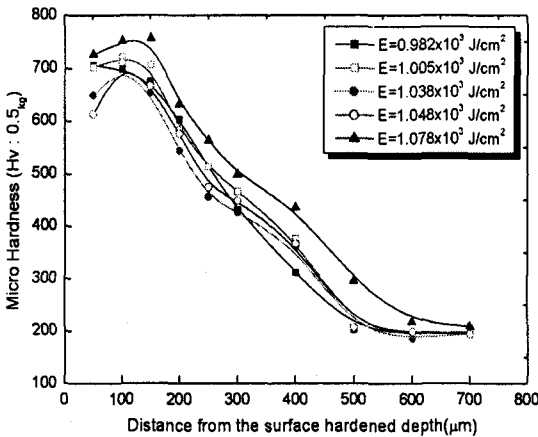


Fig. 6 Compared with hardening distribution of the laser surface hardening optical system and Defocusing method



(A) Hardened Width



(B) Hardened Depth

Fig. 7 Variation of hardened depth and width for heat input

입열량이 클 때 경화폭이 작은 이유는 초점거리(z)가 표면보다 아래 있어 입열량은 크지만 시편 표면에서 전도되는 입열량이 작기 때문이다.

Fig. 7(b)는 레이저 표면처리된 시편의 중앙에서 수직방향으로 경도값을 측정한 결과 650HV 이상의 값을 가지는 경화깊이는 약 150μm 정도로 분포하였다. 이결과는 시편의 중심부에서 높은 입열량으로 인한 용기변화가 가능하기 때문에 이 시편의 표면을 폴리싱한 후 표면의 경도값을 측정하였다. 경화깊이는 레이저빔이 시편표면에 조사되었을 때

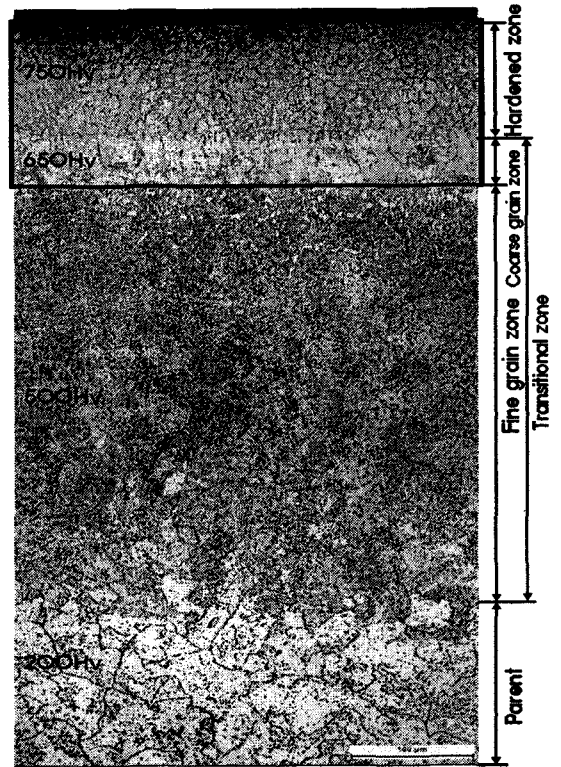


Fig. 8 Microstructure photo of cross-section after laser surface hardening (x 40)

공정은도 A_1 등고선온도(isothermal temperature)가 경화깊이를 진전시킨다. 측정된 시편의 단면을 절단하여 단면의 경도분포를 50μm 지점에서 종방향으로 측정한 결과 경도값의 크기나 분포가 시편내부로 진행하면서 경도값이 작아졌다.

본 연구에서 열간금형 공구강인 SKD61의 레이저 표면경화처리시 최적공정변수를 금속학적으로 분석하였다. 분석방법은 일반광학현미경, X-Ray 회절, 전자현미경(SEM)과 조직성분 분석(EDS)을 실시하였다.

분석시편의 공정변수는 각각 레이저 출력은 1095W, 초점위치(z)는 0mm, 빔 이송속도는 0.3m/min이다.

Fig. 8은 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰한 결과이다. 이때 경화부(Hardened zone), 천이부(Transitional zone), 모재부(Parent)로 분류하였다.

경화부조직이 페라이트처럼 관찰되나 경도값

이 800Hv 으로 아주 높게 측정되었다. 또한 천이부에서 조밀한 마르텐사이트 입자가 볼 수 있었다. 모재부는 레이저빔이 영향 받지 않은 조직으로 경도값은 210Hv 정도로 측정되었다.

일반 광학현미경으로 관찰 했을 때 경화부조직이 페라이트처럼보이나 경도값이 800Hv 이상이기 때문에 보다 정밀한 분석이 필요하기 때문에 X-Ray 회절(XRD) 분석하였다.

XRD 시험편 제작은 10×10×2mm 의 사각단면으로 절단하여 시편 홀더에 고정시킨 후 분석하였다. XRD 실험은 GuKa 특성 X-선을 사용하였으며, 관전압 40kV, 전류밀도 30mA 및 주사속도 1°/min 의 조건으로 0° <2θ<90° 범위에서 X-선 회절시험을 실시하였다.

Fig. 9 의 X-선 회절분석 결과는 (110)α''-(200)α''-(211) α'' X-선 회절 피크의 반가폭이 균일하게 형성되어 마르텐사이트가 조밀하게 분포하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 에서 경도값이 800Hv 정도 나타내는 경화조직을 분석하기 위해 SEM 으로 분석한 결과를 Fig. 10 과 EDS 분석 은 Fig. 11 에 나타냈다. SEM 시험편은 에칭된 시편에 약 30 초간 금코팅을 한 후 소정의 배율로 미세조직을 촬영하였다.

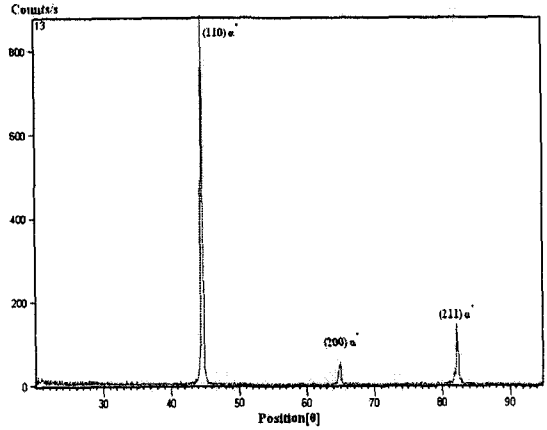


Fig. 9 X-ray diffractograms for laser hardening

Fig. 11 에서는 (A)는 Fig. 10(A)부분으로 모재내에 분포하고 있는 탄화물을 점분석한 결과이다. 또한 Fig. 11(B)와 (C)는 Fig. 10(B)부분으로 조밀하고 미세한 마르텐사이트(Fine Martensite)를 면분석을 통해 분석하였다.

(C)의 경우 경화부에 미세한 마르텐사이트를 감싸고 있는 탄화물을 점분석을 통해 관찰한 결과이다. 이들의 성분은 각각 Table 5 와 같다.

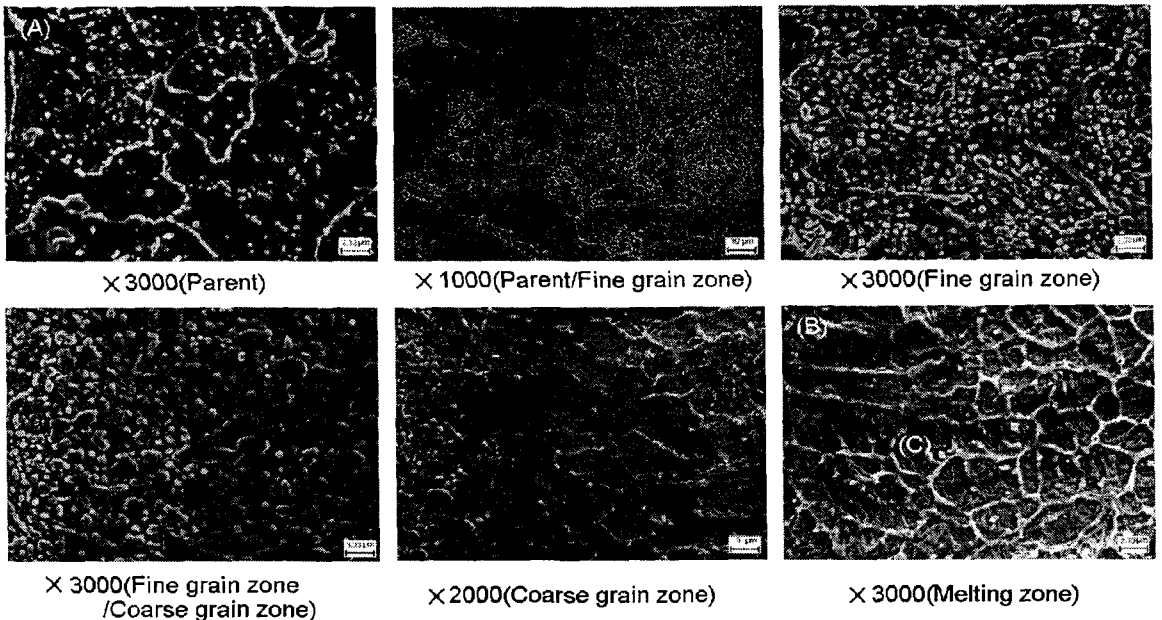


Fig. 10 Microstructure of the heat-affected zone

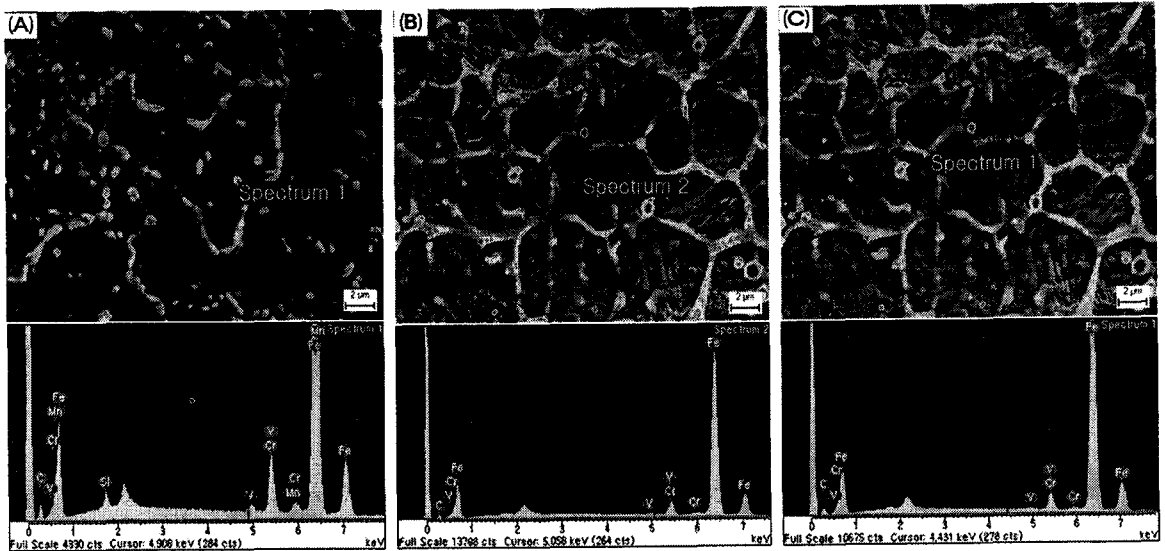


Fig. 11 Energy dispersive X-ray spectrum

Table 5 Chemical compositions of Specimens (%)

	C	Si	V	Cr	Mn	Fe
(A)	6.63	0.97	0.78	6.41	0.57	84.64
(B)	3.92	-	0.48	4.32	-	91.28
(C)	6.34	-	0.24	3.77	-	89.65

높은 입열량으로 시편(SKD61)에 조사하면 순식간에 표면온도가 오스테나이트화 온도로 상승한다. 탄소가 오스테나이트 조직내로 고용된 뒤 급속히 냉각되어 페라이트와 시멘타이트로 구성되는 평형상인 펄라이트를 생성하지 못하고 오스테나이트가 조밀한 침상의 마르텐사이트로 변태된 결과가 Fig. 11(c)에 나타나 있다. 레이저열처리의 특징인 자기냉각효과로 오스테나이트화 온도로부터 급속 내부로의 급속한 냉각온도구배 때문에 조밀한 침상의 마르텐사이트생성을 촉진시키게되어 압축응력 증가로 표면경도값이 800Hv에 이른 것이다. 오스테나이트조직이 마르텐사이트로 변태되는 경우 체적 증가가 발생한다.

이 경우에는 표면층의 잔류응력이 압축응력으로 되고, 이것이 재료의 경도를 증가시켜 피로수명을 증가시키는데 Fig. 10과 Fig. 11를 고찰해보면 조밀한 마르텐사이트가 탄화물로 둘러싸여 있는 것이 관찰된다. 150um 지점에서는 용융부에 비해 탄화물

이 형성되지 않고 조대(coarse)한 마르텐사이트가 분포하고 있다.

미세입자(Fine grain) 부는 미세한 마르텐사이트와 잔류오스테나이트, 탄화물들이 형성되어 약 600~650Hv의 경도값을 가지고 있다.

4. 결론

CW Nd:YAG 레이저를 이용하여 SKD61의 표면경화처리하는 경우 주요 공정 인자인 레이저 출력과 레이저빔 이동속도, 디포커싱된 초점위치가 표면경화 특성에 미치는 영향을 고찰한 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 출력과 빔 이송속도, 보호가스가 동일할 때 레이저 표면경화 처리시 입열량은 레이저 빔 조사위치(z) 즉, -방향일 때 +방향 일 때보다 약 10%정도 크게 작용한다.
2. 본 연구결과 레이저 표면경화처리 Piercing 시간에 대한 입열량값이 일정할 경우 일시적인 과도현상이 발생하지 않고 균일한 표면경화 비드와 경도분포를 얻을 수 있다.
3. 본 연구에서 제작한 열처리 광학계에 의한 표면경화방법은 디포커싱 표면경화방법보다 경도값, 경화폭 및 경도분포가 우수하다.
4. 레이저빔 출력은 1095W, 빔 이송속도가

0.3m/min 일 때 레이저빔 조사위치(z)가 -2mm~+2mm 즉, $1.078 \times 10^3 \text{J/cm}^2 \sim 0.982 \times 10^3 \text{J/cm}^2$ 에서는 경도값 및 미세조직분포가 균일하게 형성시킬 수 있다.

후 기

위 논문은 조선대학교 2006 년 교내학술연구비 지원으로 연구하였습니다.

참고문헌

1. Dikova, T., Horiuchi, R., Yamaguchi, S. and Seto, S., "Influence of Overlapping Passes on Microstructure of Hot-Work Tool Steels Treated by Continuous CO₂ Laser," Proceeding of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 2006.
2. Yue, T. M., Yan, L. J. and Chan, C. P., "Stress corrosion cracking behavior of Nd:YAG laser-treated aluminum alloy 7075," Applied Surface Science, Vol. 252, No. 14, pp. 5026-5034, 2006.
3. Wang, Q. B., Chao, M. J., Yang, K., Yuan, B. and Liang, E. J., "Laser Surface Hardening for 38CrMoAl steel," Heat Treatment of Metals(China), Vol. 30, No. 2, pp. 81-83, 2005.
4. Tian, Y. S., Chen, C. Z., Wang, D. Y. and Lei, T. Q., "Research Progress of Laser Surface Treatment on Titanium Alloys," Heat Treatment of Metals(China), Vol. 30, No. 8, pp. 29-34, 2005.
5. Geetha, M., Kamachi, M. U. and Asokamani, R., "Microstructural and corrosion evaluation of laser surface nitrided Ti-13%Nb-13%Zr alloy," Surface Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 68-74, 2004.
6. Wang, X. Y., Liu, Z. and Chong, P. H., "Effect of overlaps on phase composition and crystalline orientation of laser-melted surfaces of 321 austenitic stainless steel," Thin Solid Films, Vol. 453-454, pp. 72-75, 2004.
7. John, F. R., "LIA Handbook of Laser Materials processing," LIA. Magnolia Publishing Inc., pp. 223-262, 2001.
8. John, F. R., "Industrial Applications of Lasers," Academic Press, pp. 316, 1997.
9. Yoo, Y. T., Shin, H. J. and Ahn, D. G., "Characteristics of laser surface hardening for SM45C medium carbon steel using continuous wave Nd:YAG laser," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 11, pp. 51-58, 2005.
10. Vilar, R., Colaco, R. and Almeida, A., "Laser surface treatment of tool steels," Optical and Quantum Electronics, Vol. 27, No. 12, pp. 1273-1289, 1995.
11. Narendar, B. D. and Ann, K. M., "Laser surface melting of W2 tool steel : effects of prior heat treatment," Journal of Materials Science, Vol. 22, No. 2, pp. 403-406, 1987.
12. Chen, S. L. and Shen, D., "Optimisation and Quantitative Evaluation of the Qualities for Nd:YAG Laser Transformation Hardening," Int. J. Adv. Manuf. Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 70 - 78, 1999.
13. Larocca, A. V., Ramous, E. and Cantello, M., "Laser Surface Hardening of Thin Steel Slabs," Journal of Materials Science, Vol. 22, No. 5, pp. 1737-1742, 1987.
14. Na, D. G., Yoo, Y. T., Shin, H. J. and Shin, B. H., "Characteristics of Induction and Laser Surface Hardening of SM45C Steel," J. of the KSPE, Vol. 23, No. 7, pp. 39-50, 2006.
15. Kim, H. T., "Lasers Manufacturing Engineering," Kyungmoon Publishers, pp.187-210, 2002.
16. Kanaoka, M., "Laser Manufacturing Technology," Korea Industrial Information Center, pp. 216, 2000.