

YAG LASER에 의한 공구강의 표면개질에 관한 연구

옥철호*, 강형식**, 박흥식***, 전태옥***

A Study on the Surfaces Modification of Tool Steel by YAG LASER

Chul-Ho Ok*, Hyung-Sik Kang**, Heung-Sik Park***, Tae-Ok Jun***

Abstract

Laser induced surface hardening of Tool steel(STC5) can be achieved either with or without surface melting. In transformation hardening, as the surface is heated to a temperature below its melting point and is rapidly cooled, solidified microstructures are usually much finer and stronger than those of the base metals. For this reason, surface modification of tool steel by YAG laser irradiation has been studied as a function of processing parameters such as, power density, pulse width, defocusing distance, and molten depth. The high energy density changes and refines the microstructure of the near surface layer. In the case of beam passes, martensite formed in the melt zone exhibited very high vickers hardness values. Molten depth and width depend on defocusing distance, and energy of black color painting is more absorptive than other color painting.

Key Words : Surface Modification(표면개질), Irradiation(조사), Defocusing Distance(디포커스 거리), Power Density(에너지 밀도), Pulse Width(펄스 폭), Molten Depth(용융깊이)

1. 서론

표면개질은 그 자체로는 그다지 새로운 것은 아니지만, 이 기술이 최근 화제가 되는 것은 diamond 막 또는 CBN 막 등의 초경질 재료의 합성 및 coating 기술과 같은 새로운 방법과 레이저, 전자 및 이온 빔 등의 열원이 계속 개발되기 때문이다. 표면개질을 위한 새로운 열원으로서 레이저는 종래의 실현 불가능한 가공기술 표면을 얻을 수 있고, 내마멸성을 필요로 하는 국부적인 요소에만 매우 높은

에너지 밀도를 유발시킬 수 있다. 이로 인하여 피가공 재료 전체를 가열시켜야 하는 일반의 표면경화 방법보다 처리시간의 단축과 담금질 균열을 발생시키지 않고 열처리가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 특히 가공재료가 중량에 비해 면적이 작은 경우에는 고주파 유도가열법 및 화염경화법 등의 표면경화 방법보다 비용이 적게 드는 이점이 있으며, 순간적으로 표면층을 가열할 수 있고, 또한 자기담금질(self-quenching) 효과로 인하여 부가의 냉각제가 필요치 않기 때문에, 공정이 깨끗하고 후가공이 거의 필요치

* 동아대학교 대학원 기계공학과
** LG전자
*** 동아대학교 기계공학과

않으며 자동화도 용이하다는 특징을 가지고 있다.¹⁾⁻³⁾

이처럼 레이저에 의한 표면개질은 근래 생산기술의 하나로서 이용되고 있고, 여기에 사용되는 레이저는 연속발진 CO₂ 레이저가 일반적이지만 CO₂ 레이저는 금속표면에서 대부분 반사되므로, 흡수제의 도포 등의 전처리가 필요하여 공정을 복잡하게 하는 단점을 가지고 있다.⁴⁾ 이에 비하여 YAG 레이저는 높은 출력을 전달할 수 있는 광파이버를 이용하므로 자유자재성이 풍부하여 이를 표면개질에 적용할 수 있다면, 그 응용범위는 넓을 것으로 생각된다. 현재 일반적인 표면경화 처리는 소위 변태 경화이므로, 연속 발진 YAG 레이저는 아직 출력면에서 부족하지만 펄스 발진 YAG 레이저는 충분한 출력을 얻을 수 있다. 그러나 발진시간이 짧고, 충분한 변태경화 영역을 얻기는 힘들지만 어느 정도의 출력밀도 이상이면 용융층을 형성하기는 쉽다고 알려져 있다.¹⁵⁾⁻⁹⁾

그러나 YAG 레이저에 의한 표면개질은 금속의 용접이나 절단과는 달리 레이저 빔의 에너지 밀도를 비교적 낮게 하여야 하고, 또한 그 에너지 분포를 균일하게 함으로서 안정된 경화층을 고농도로 얻을 필요성이 있다. 이를 위하여는 레이저 조사조건인 레이저 빔의 에너지 밀도(power density), 가공재료의 용융깊이(molten depth) 및 디포커스 거리(defocusing distance)에 따른 경화깊이 등에 관한 연구는 그다지 진행되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 YAG 레이저를 이용하여 공구강의 표면개질을 위한 최적 레이저 조사조건을 제시하기 위하여, 레이저 빔의 에너지밀도, 용융깊이, 디포커스 거리, 경도치 및 칼라 페인팅에 대한 열영향부의 표면상태를 검토하고, 국부적인 레이저 열처리가 모재의 표면에 미치는 영향을 규명하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1 실험재료 및 실험장치

본 실험에 사용한 재료는 현재 시판되고 있는 공구강(STC5)을 사용하였으며, 그 크기는 50mm×20mm×5mm인 평판이고, 이의 경도치(Hv)는 220이다. 그리고 STC5의 화학 성분은 Table 1과 같다.

레이저 종류는 Pulsed YAG 레이저로서 파장이 1.063μm인 멀티모드 방식으로 최대출력은 400W이며, 이의 개요도는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 YAG 레이저 시스템의 구성은 레이저 발진장치, 광섬유(optical fibre) 및 포커스 헤드(focus head)로 이루어져 있다.

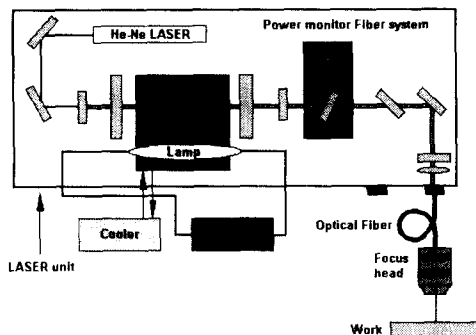


Fig. 1 Schematic diagram of YAG laser unit

Table 1 Chemical compositions of STC5 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.87	0.29	0.40	0.012	0.013	0.02

2.2 실험방법

Fig. 2는 레이저 빔 조사에 대한 개요도로서, 시험편에 레이저 빔을 연속적으로 조사하기 위하여 시험편을 X-Y 테이블 구동로봇을 이용하여 일정한 속도로 이동시켰으며, 시험편의 표면이 급속 가열 및 냉각되는 구조로 되어 있다. 레이저 빔의 조사는 광섬유를 이용하여 레이저 빔을 포커스 헤드에 집중시켜 디포커스 거리의 변화에 따라 길이 방향으로 조사시키기 위하여 최적 스폿(spot) 위치(디포커스 거리 0mm)를 정하고, 그 위치를 기준으로 렌즈에서 멀어지는 방향으로 시료를 이동시켰다. 한편 포커스 헤드 안에 있는 실드 글라스(shield glass)를 보호하기 위해서 노즐의 측면에서 Ar가스를 15 l/min를 분사하였으며, 테이블의 이동속도는 10m/s로, 주파수는 40Hz로 하였다. 여기서 테이블의 이송속도를 10m/s로 일정하게 한 것은 이송속도 10m/s 이하의 속도에서는 비드의 겹침(overlap)이 일어나 표면에 열축적에 의한 용융 현상이 일어나게 되며, 이 이상의 속도에서는 비드와 비드사이의 공간이 커져 일정한 경화깊이를 얻을 수 없기 때문이었다. Table 2에는 본 연구에 사용된 레이저 조사조건을 나타낸 것이며, 레이

Table 2 Laser irradiating condition

Laser power(J/s)	1, 3, 5, 7
Pulse width(ms)	3, 5, 7
Defocusing distance(mm)	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14

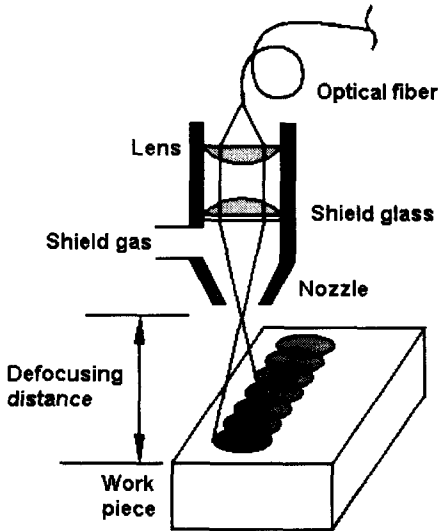


Fig. 2 Schematic view of laser irradiation

지의 표면 조사부는 시험편 가공시의 가공경화와 불순물 및 개재물을 제거하기 위하여 표면을 polishing 하였다.

레이저 빔을 조사한 후 조사부의 표면개질 특성을 알기 위하여 광학현미경을 사용하여 레이저 조사조건에 따른 기지조직을 관찰하였다. 그리고 빔 조사부 표면 아래의 경도측정을 위해 diamond 전단기로 절단하여 emery paper 로 polishing 한 후, 비커스 경도시험기를 사용하여 경화부 최외각 표면층으로부터 기지조직과의 경계부 0.24mm까지는 20 μ m 간격으로, 기지조직은 125 μ m 간격으로 경도치(Hv)를 측정하였다. 한편 유효 경화깊이는 경도 분포곡선에서 변곡점까지의 깊이 즉, 경도치가 표면의 경도와 비교하여 경도가 급격히 감소하는 표면 아래의 깊이까지를 유효경화 깊이로 하였다.

2.3 표면열처리 사이클

Fig. 3은 표면개질을 위한 열처리 사이클을 나타낸 것으로서, $t_0 \sim t_1$ 은 가열구간, $t_1 \sim t_2$ 는 온도유지 구간으로써 표면 경화 깊이를 결정하는 영역이며, $t_2 \sim t_3$ 는 냉각구간이다. 즉 가공물의 표면은 빔조사에 의해 t_1 에서 t_2 사이의 오스테나이트(austenite) 변태개시점(A_{c1})까지 급속 가열되고, 빔조사를 계속하는 시간인 $t_1 \sim t_2$ 사이의 A_{c1} 점 이상, 용융점 이하에서 유지되고, 빔의 조사가 정지되면 시간 t_2 부터 냉각되어 시간 t_3 에서 Ms점에 도달하여 마르텐사이트(martensite) 조직으로 변태한다.⁽¹⁰⁾

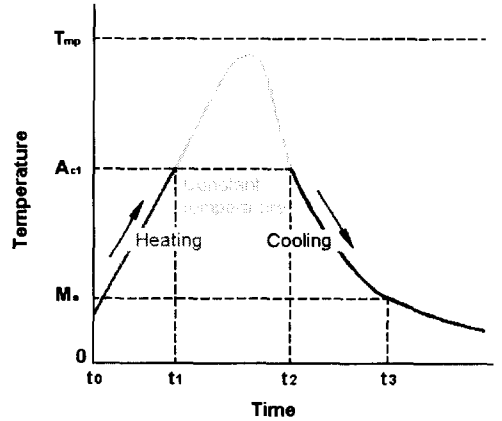


Fig. 3 Temperature curve of surface hardening process

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저 조사부의 현미경 조직

Fig. 4는 레이저 빔 조사에 의한 시험편의 현미경 조직 사진을 나타낸 것으로서, (a)는 모재로서 퍼얼라이트(pearlite) 조직을, (b)는 경화부로서 레이저 빔 조사에 의하여 표면이 급냉(자기 담금질)으로 인한 마르텐사이트 조직으로 변태한 것을 보여 주고 있다. 그리고 (c)의 모재와 경화부의 경계인 본드부는 그 표면은 마르텐사이트 조직을, 내부는 모재의 기지조직인 퍼얼라이트 조직으로 형성되어 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 레이저 빔의 조사로 인해 시험편의 표면은 가열되었으나, 냉각과정에서 시험

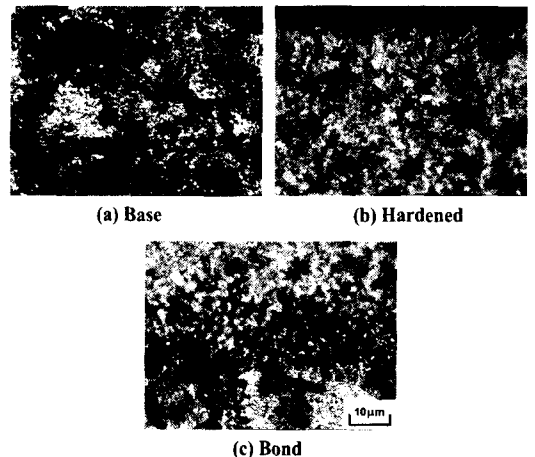


Fig. 4 Microstructures of specimen

편의 표면으로부터 내부로 들어갈수록 냉각속도가 저하됨에 따라 완전한 자기 담금질이 되지 않았기 때문으로 생각된다.

3.2 레이저 빔조사부의 형상

Fig. 5에는 에너지 밀도를 3J/s, 펄스 폭을 3ms로 일정하게 하고 디포커스 거리 D 의 변화에 따른 레이저 빔 조사부의 용융깊이와 용융 폭을 나타낸 것으로서, D 가 증가함에 따라 대체로 용융깊이는 감소하지만 용융 폭은 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 D 가 6mm 이상이 되면 용융깊이와 용융 폭은 대체로 일정하다는 것을 알 수 있다. 이것은 D 가 증가함에 따라 레이저 빔이 조사위치에서 멀어지게 되어 빔의 강도저하에 따른 조사부의 입열량 감소로 인한 결과라고 생각된다. 따라서 레이저 빔 조사시에 D 가

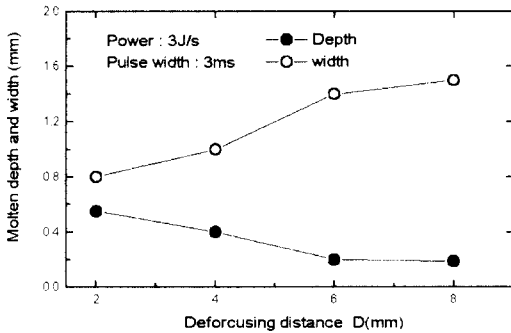


Fig. 5 Influence of defocusing distance on molten width and depth

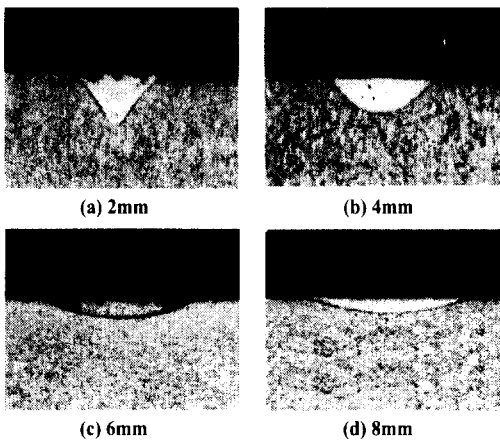


Fig. 6 Photos of molten and width and depth on defocusing distance

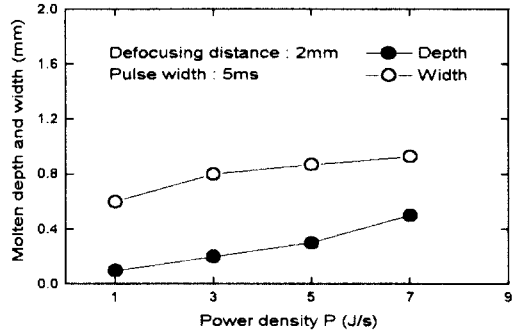


Fig. 7 Influence of power density on molten depth and width

6mm 이상이 되면 용융깊이와 용융 폭은 거의 변화가 없다는 것을 나타내 주고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 레이저 조사조건에서 빔 조사부의 단면형상을 나타낸 것으로서 D 가 증가할수록 표면 용융부의 깊이는 대체로 감소하며, 용융 폭은 넓어진다는 것을 볼 수 있다. 용융부의 응고에 의하여 생성된 경화부의 형상은 레이저의 조사위치가 시험편 표면 위에서 수직으로 조사되므로 조사부 표면은 큰 직경을 형성하고, 시험편 내부로 들어갈수록 약간의 테이퍼를 가진 원추형이 형성된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 디포커스 거리 D 를 2mm, 펄스 폭을 5ms로 일정하게 하고, 레이저 빔의 에너지 밀도 P 를 단계적으로 증가시켰을 때 용융깊이와 용융 폭을 동시에 나타낸 것으로 P 가 증가함에 따라 경화층이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 사용목적에 적합한 표면개질 강도의 경화깊이와 경화 폭을 결정하기 위한 최적의 에너지 밀도의 선택이 중요한 표면개질의 인자라고 생각된다.

3.3 레이저 조사부의 경도분포

Fig. 8은 디포커스 거리 D 를 2mm로 한 경우, 펄스 폭 3ms와 5ms에서의 에너지 밀도 P 에 따른 경도값(Hv)을 나타낸 것으로서, P 의 증가에 따른 경도는 미소하게 감소하지만 펄스 폭에 관계없이 대체로 일정하다는 것을 알 수 있다. 이것은 레이저 빔의 에너지는 에너지 밀도에 관계없이 공석변태 온도(A_{c1}) 이상에서 형성되는 고온조직인 오스테나이트 구역까지 급속 가열될 수 있는 입열량을 가지기 때문으로 생각된다. 따라서 레이저 빔의 에너지 밀도에 따른 경도값은 거의 영향을 받지 않는다는 것을 나타내 주고 있다.

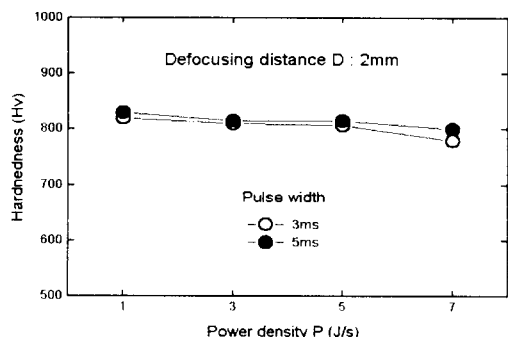


Fig. 8 Influence of power density on hardness

Fig. 9는 에너지 밀도 5J/s, 펄스 폭을 5ms로 일정하게 하였을 때 디포커스 거리 D 의 변화에 따른 경도값을 나타낸 것으로서, D 가 8mm까지는 경도값이 800 이상으로 거의 일정하게 유지되지만 이 이상의 D 에서는 경도가 급격히 감소하고 있다. D 가 8mm까지는 경도값이 800 이상을 나타내는 것은 D 가 이 거리까지는 레이저 조사에 의한 용융부의 자기 담금질⁽¹¹⁾에 의하여 기지조직이 마르텐사이트로 구성되기 때문으로 생각된다. 그러나 D 가 8mm에서 12mm까지는 D 의 증가에 따른 에너지 밀도 저하로 인하여 기지조직은 본드부의 중간조직과 같은 기지조직을 나타내기 때문이라 생각된다. 그러나 D 가 14mm의 경우에는 모재의 경도값과 유사한 값을 가지는 것에서 이 이상의 D 에서는 레이저 빔 에너지의 영향은 거의 받지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 디포커스 거리 D 를 2mm, 펄스 폭을 5ms 그리고, 에너지 밀도를 3J/s로 일정하게 한 경우 레이저 조사부 표면에서 경화깊이 d 에 따른 경도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 d 가 0.25mm 부근까지는 경화부로서 750

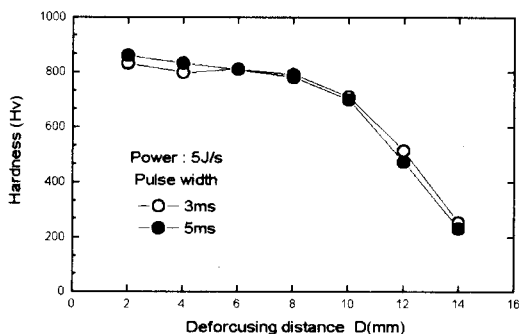


Fig. 9 Influence of defocusing distance on hardness

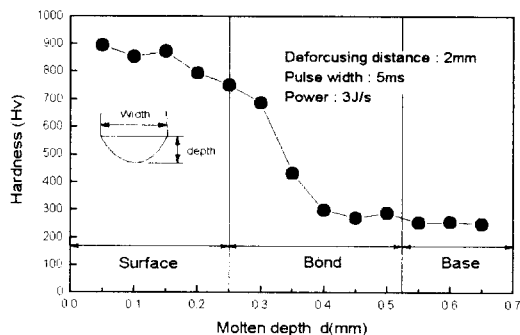


Fig. 10 Relationship between molten depth and hardness

이상의 경도값을 가지나, 이 이상의 d 에서는 경도값이 급격히 감소하여, d 가 0.45mm 부근에서는 모재의 경도값 정도로 거의 일정한 값을 나타내고 있다는 것을 볼 수 있다. d 가 0.25mm에서 0.45mm까지 본드부의 경도치가 급격히 감소하는 것은 이 거리에서는 경화부와 모재와의 경계부로서 레이저 빔에 의한 열영향을 받아 가열되었으나, 빔 조사부의 표면에 대하여 중심으로 갈수록 냉각속도의 저하에 따른 것으로 자기 담금질이 완전히 되지 못하여 담금질의 중간조직인 fine pearlite와 medium pearlite 조직으로 되기 때문인 것으로 생각된다.

3.4 레이저 조사부의 칼라 페인팅의 영향

레이저 빔의 흡수율에 미치는 시험편 표면에 도포한 칼라 페인팅의 영향을 알기 위하여 시험편은 에머리 페이퍼 #1200으로 polishing하여 표면의 초기상태를 동일한 후 실험을 하였다. Fig. 11에는 디포커스 길이 D 를 4mm, 펄스 폭을 5ms의 경우, 다양한 칼라 페인팅을 행한 시험편 표면에 레이저 조사한 후 에너지 밀도 P 를 1J/s와 5J/s에서 칼라 페인팅의 종류에 따른 조사부의 용융깊이와 용융 폭을 나타낸 것으로서, (a) $P=1J/s$ 와 (b) $P=5J/s$ 로 한 경우이다. 여기서 칼라 페인팅을 하지 않는 것도 같이 표시하였다. 그림 (a)의 P 가 1J/s에서 용융깊이와 용융 폭은 흑색으로 페인팅한 경우가 가장 크고, 적색, 녹색 및 청색은 거의 동일한 크기의 경화층을 형성하고 있다. 그리고 노란색으로 페인팅한 것은 페인팅하지 않은 모재의 경화층 크기와 비슷하게 나타났다. 흑색으로 페인팅한 경우가 가장 큰 경화층을 나타내는 것은 흑색의 경우 빛의 파장이 0.7 μ m 이상에서도 빛의 반사율이 5%이내의 범위에서 일정하게 유지되어⁽¹²⁾ 다른 색상보다 반사율이 작기때문으로 생각된다. 또한 (b)의 P 가 5J/s의 경우 용융깊이와 용융 폭의 크

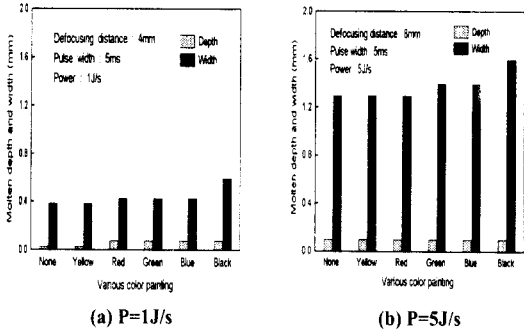


Fig. 11 Effect of various color painting on molten depth and width

기는 (a)에서 보다 약 3배 이상의 경화층을 형성하고 있고, 역시 흑색을 페인팅한 경우가 경화층 크기에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 따라서 레이저 조사부의 경화깊이와 경화 폭을 증가시키기 위해서는 큰 에너지 밀도보다는 표면개질 강의 표면에 흑색의 페인팅을 함으로서 경화층을 보다 크게 할 수 있다는 것을 나타내 주고 있다.

4. 결 론

YAG 레이저를 이용한 공구강(SK5)의 표면개질의 특성을 알기 위해 레이저 조사조건인 에너지 밀도, 디포커스 거리, 펄스 폭과 빔 에너지 흡수율에 따른 다양한 칼라 페인팅을 도포하고 실험한 결과 다음과 결론을 얻었다.

- (1) 레이저 빔의 조사로 인한 표면하부의 경화깊이에 따른 현미경조직은 자기담 금질의 효과로 인하여 마르텐사이트, fine pearlite 및 medium pearlite로 변화한다.
- (2) 디포커스의 거리가 증가함에 따라 용융깊이는 감소하지만 용융 폭은 증가하였고, 에너지 밀도가 증가하면 용융깊이와 용융 폭은 모두 증가한다.
- (3) 에너지 밀도와 펄스 폭의 증가에 따른 경도값은 대체로 일정한 값을 가지지만, 디포커스 거리가 8mm 이상이 되면 경도값은 급격히 감소한다.
- (4) 칼라 페인팅에 따른 경화층의 영향은 흑색 페인팅의 경우가 반사율의 증대로 인하여 경화 폭과 깊이가 가장 크다.

참 고 문 헌

- (1) J.Wilson, J.F.B. Hawkes, "Lasers Principles and Applications", Prentice Hall, pp.1~33, (1987)
- (2) 先端加工技術研究會, "超精密加工技術への挑戦", pp. 146~151, (1984)
- (3) 精密工學會 表面改質に関する調査研究分科會, "表面改質技術", pp.124~130, (1988)
- (4) 片岡義博, 宮崎俊行, "パルスYAGレザによる炭素鋼の溶融硬化特性", 鑄物, 第62卷 第92, pp.720~725, (1990)
- (5) 高橋英明, 温井勝敏, 若林潤, "レザ照射による金屬セラミックスの局部表面處理", Materials, Japan, 第34卷, 第12, pp.1276~1283, (1995)
- (6) 重松一典, 中村 守, "レザによる工業用純タンの表面硬化處理", 表面技術, Vol. 47, No.9, pp.74~75, (1996)
- (7) 吉岡俊朗, 白井靖幸, 金釜憲夫, 宮崎俊行, "電子ビーム加工における溶融層の形成とAEの發生", 精密機械, 51, 8, pp.1534~1539, (1985)
- (8) 水谷嘉之, 志村好男, "レザ表面改質によるトライボロジ-特性の改善", 表面技術, Vol.47, No.2, pp.113~116, (1990)
- (9) M.R.Fisman and J.Zahvi, "Structure and micro-hardness of laser-hardened 1045 Steel", J.MAT. SCI. 23, pp.1547~1552, (1988)
- (10) 宮崎俊行, "表面改質の基礎知識", 機械設計, 第40卷, 第6, pp.58~70, (1996)
- (11) C. H. Chen, C. P. Ju and J. M. Rigsbee, "Lasers Surface Modification of Ductile Iron : Part 1 Microstructure", Material Science and Technology, pp.161~166, (1990)
- (12) 朴度洋, "實用色彩學", 半島出版社, pp. 26~27, (1995)