

〈論 文〉

# 12%-Cr 강 의 CO<sub>2</sub> 레이저 표면경화에서 금속조직과 경도분포

김 재 도\*

(1992년 4월 21일 접수)

## Microstructure and Hardness Distributions of CO<sub>2</sub> Laser Hardened 12%-Cr Steel

Jae-Do Kim

**Key Words :** Laser Beam Hardening(레이저 빔 경화), Vickers Hardness(비이커 경도), Tempered Martensite(템퍼링된 마르텐사이트), Lamellar Martensite(라멜라 마르텐사이트), 12%-Cr steel(12% Cr 강), Carbides(카바이드), Absorptivity(흡수율)

### Abstract

Laser beam hardening of 12%-Cr steel has been evaluated by using a continuous wave 3 kW CO<sub>2</sub> laser with a hardening mirror set. Experiment was performed on the optimum hardening condition with a laser power of 2.85 kW and travel speed of 1.0 and 1.5 m/min. Multi passes have been also tried to find the hardening characteristics of partly overlapped zone. The black paint to use at high temperature was adopted to increase the absorptivity of laser beam energy with the wavelength of 10.6  $\mu\text{m}$  at the surface of base metal. The microstructure of the hardened layers was observed by using a light microscopy, SEM and TEM. A fine lamellar martensite formed in the hardened zones exhibits very high Vickers microhardness of 600 Hv, whereas the tempered martensite distributes in the base metal with Vickers microhardness of 240 Hv. It has been found that laser hardening with multi passes showed no significant drop of the hardness between adjacent passes.

### 1. 서 론

고출력 레이저를 이용한 재료가공 기술은 최근에 급속히 발전되어 왔는데, 고출력 CO<sub>2</sub> 레이저 및 Nd:YAG 레이저 등이 개발되면서부터 종래에 할 수 없었던 가공이 가능해졌고, 생산성이 크게 향상되었다. 레이저 빔(laser beam)은 지향성이 매우 높기 때문에 렌즈(lens)나 미러(mirror)를 통하여

수 십 내지 수 백  $\mu\text{m}$ 의 아주 작은 면적 내에 레이저 빔 에너지를 모을 수 있다. 따라서 대단히 큰 에너지 밀도를 만들어 낼 수 있으므로 용접, 절단, 드릴, 표면경화 등에 이용하고 있다. 레이저 표면경화는 레이저 빔에 노출된 금속표면이 공기 중에서 급냉되는 원리로서, 탄소강, 합금강, 공구강 및 주철 등에 적용되고 있다. 특히 모재에 탄소 함량이 비교적 적어도 높은 표면 경도를 얻을 수 있고, 화염경화법(flame hardening)이나 고주파 유도경화법(induction hardening)과 같이 냉각제를 사용하여 급냉시키는 방법이 아니라 공기 중에서

\*정회원, 인하대학교 기계공학과

급냉시킨다.<sup>(1~8)</sup>

고출력 레이저를 이용한 표면경화 기술은 국부 처리가 가능하고, 제품의 열변형이 없으며, 처리 속도가 종래의 표면경화법에 비해서 매우 빠르기 때문에 선진 각국의 산업체에서 급속히 적용되고 있다. 레이저 표면경화에 대한 연구도 최근에 많이 연구되고 있는데, 특히 탄소강과 주철에 대한 연구가 많았으며, 12%-Cr 강에 대한 연구는 거의 없었다.<sup>(9~13)</sup>

발전소의 터빈 블레이드는 물방울에 의해서 부식이 발생한다는 사실은 널리 알려져 있다. 부식을 방지하기 위해서 보통 12%-Cr 강으로 만들며 표면을 고주파 유도경화법에 의해서 표면을 경화시킨다.<sup>(14,15)</sup> 고주파유도 경화법은 경화층 깊이가 마모 특성을 가장 좋게 하는 깊이보다 훨씬 깊게 경화되며, 열응력이 과대하게 생기고, 처리시간이 많이 걸리며, 표면경화 처리후 기계가공이 필요하다. 12%-Cr 강의 레이저 표면경화를 연속과 3kW CO<sub>2</sub> 레이저로 실험하여 금속조직과 경도분포에 대해서 연구하여 레이저 표면경화 가능성을 고찰하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 레이저 발전장치 및 광학장치

본 연구는 CBL optronics에서 제작한 연속과 3 kW CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였다. 레이저 발전장치는 He, N<sub>2</sub>과 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하고, 고속 축류타입이다. 레이저 발전장치에서 NC 테이블까지는 약 10 m 떨어져 있으며, 초점을 맞추기 전의 레이저 빔 직경은 약 25 mm이다. Fig. 1은 레이저 표면경화 메커니즘을 예시한 것이다.

재료가공에서 레이저 빔의 에너지분포는 TEM<sub>00</sub>, TEM<sub>01</sub>\* 및 멀티(multi) 모드드의 빔을 사용한다. 보통 레이저 표면경화에서는 멀티(multi) 모드를 사용하여 TEM<sub>00</sub> 모드드에 비해서 비교적 넓은 면적이 경화되게끔 한다. 열처리용으로 사용하는 광학계는 렌즈와 미러로 구성된 cylindrical lens system, beam integrated method, beam oscillating method, rotating polygon method<sup>(16)</sup> 등을 사용하는데 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 열처리용 광학장치(hardening mirror set)를 사용하여 거의 직사각형에 가까운 에너지 분포가 되는 방법을 사용하였다. 열처리용 광학장치는 6×4.5×50 mm로서 내

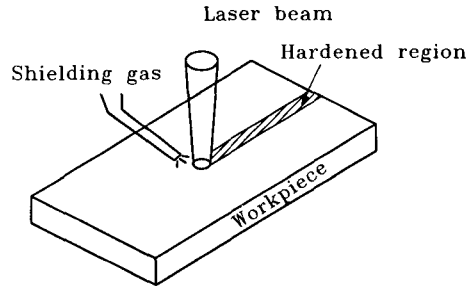
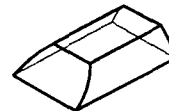
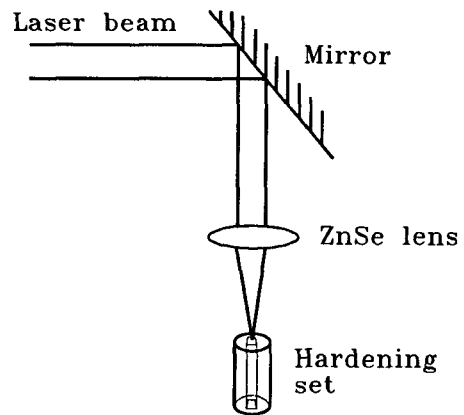


Fig. 1 Schematic illustration of CO<sub>2</sub> laser beam hardening



Rectangular beam

Fig. 2 Hardening mirror set for rectangular energy distribution in laser beam hardening

부에 미러(mirror)가 있으며, 반사에 의해서 직사각형 에너지분포가 되게 하는 광학부품이다. 이 방법은 앞서의 방법들에 비해서 훨씬 사용하기 편리하고 에너지분포가 더욱 균일하게 된다. 이같은 열처리용 광학장치로 아크릴 판에 약 4초 정도 레이저 빔으로 처리한 연소 패턴(burn patterns)으로 레이저 빔의 에너지분포가 거의 직사각형에 가까움을 확인할 수 있었다.

### 2.2 실험재료

실험재료는 DIN 규격으로 X22CrMoV121 인 12%-Cr 강으로서 화학성분은 Table 1에 표시하였

**Table 1** The chemical compositions of 12%-Cr steel(DIN, X22CrMoV121) (wt%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.21	0.25	0.40	0.009	0.007	12.2	0.6	0.9	0.31

다. 표면경화를 하기 위해서 튜브인 재료를 20×100×10 mm로 기계 가공하였으며, 레이저 빔의 에너지 흡수를 높이기 위해서 경화처리할 표면은 약 20 μm 두께로 흑색 고온 도료로 표면처리를 하였다.

**2.3 실험순서**

실험은 레이저 표면경화의 가공 가능 변수범위에서 이루어졌다. 레이저 출력은 2.85 kW로 멀티 모드 우드이었고, 빔 스캐닝 속도는 1.0 m/min와 1.5 m/min이었다. 열처리용 광학장치로부터 5 mm와 8 mm 아래에 경화할 재료를 두고 처리하였다. 레이저 경화도중에 표면의 산화를 방지하기 위해서 일반적으로 아르곤이나 질소를 보호가스로 사용하는데, 본 실험에서는 아르곤가스를 측면에서 수평면과 60° 경사지게 15 l/min으로 공급하여 경화층을 보호하였다.

본 광학장치로 경화 폭 5 mm정도까지 처리할 수 있으므로 부분적으로 겹치는 표면경화를 하였다. 부분적으로 겹치는 위치에서의 경도와 금속조직의 변화를 고찰하였다. 표면경화 처리된 시편은 폴리싱하여 Villela's agent(1 gr picric acid+5% HCl in alcohol)에 15초 담가 처리하였다. 금속 조직검사는 금속광학현미경, 주사전자현미경(scanning electron microscopy)과 투과 전자현미경(transmission electron microscopy)를 사용하였고, 경도시험은 비커스 경도시험기를 사용하였으며 하중은 4.9 N(0.5 kgf)을 적용하였다.

**3. 실험결과 및 고찰**

본 실험에 의해서 얻은 경화깊이와 경화폭의 결과는 Table 2에 제시하였다.

레이저출력, 빔 스캐닝 속도, 빔 에너지 분포 등의 레이저 경화변수에 따라서 경도분포도 달라진다. Fig. 3는 몇 가지 경화조건에 따라 경화깊이 방향으로 측정된 경도분포를 보여주고 있다. 모재

**Table 2** Experimentally obtained case depth and width

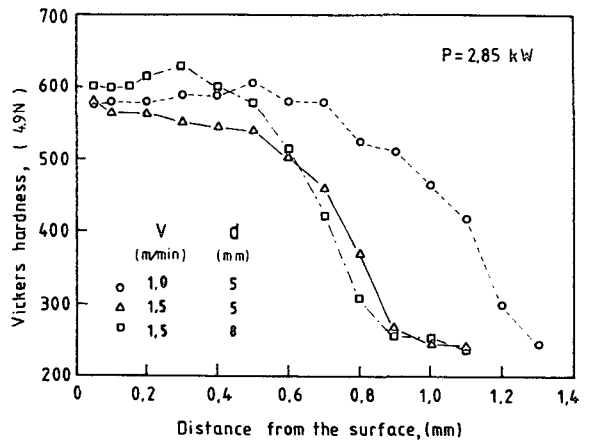
Specimen	Hardening Condition	Depth(mm)	Width(mm)
1	P=2.85 kW V=1.5 m/min d=8 mm	0.6	6.2
2	P=2.85 kW V=1.5 m/min d=5 mm	0.8	5.1
3	P=2.85 kW V=1.0 m/min d=5 mm	1.1	5.6
4	P=2.85 kW V=1.5 m/min d=5 mm	multi passes	

P=레이저출력

V=빔 스캐닝속도

d=열처리용 광학장치와 경화 재료표면 사이의 거리

의 경도치는 240 Hv인데 레이저 경화처리 후의 경도는 580에서 600 Hv로 약 2.5배 증가함을 알 수 있다. 중탄소강의 경우 3배 내지 4배까지 증가하는 것에 비해서 다소 낮음을 알 수 있다. Fig. 3과 Table 2를 참고하면 경화처리 가능 범위에서 스캐닝속도가 감소할수록 경화가 일어나는 깊이는 증가함을 볼 수 있고, 열처리용 광학장치와 재료표면



**Fig. 3** Vickers microhardness distributions of laser hardened 12%-Cr steel  
V=Travel speed,  
d=Distance between surface and mirror set

사이의 거리 (d)가 클수록 경화깊이는 감소하면서 경화폭은 약간 증가함을 알 수 있다. 이것은 d 값이 증가할수록 단위 면적당 에너지밀도가 감소되기 때문이다. 한번 스캐닝한 방법에 의해서 경화 깊이는 1.1 mm까지 가능하고 경화폭은 6 mm 정도까지 가능함을 보여주고 있다.

Fig. 4는 CO<sub>2</sub> 레이저의 경우 단위 면적당 레이저 에너지밀도와 재료와 상호작용과의 함수로서 레이저 재료가공 범위를 보여주고 있다. 레이저 빔의 파장이 길수록 표면 반사율은 증가하고, 에너지 밀도가 10<sup>10</sup> W/m<sup>2</sup> 이하에서는 반사율이 매우 높다. CO<sub>2</sub> 레이저는 10.6 μm의 파장을 갖고 있으며, 적외선 범위이므로 사람 눈에 보이지 않는다. 재료표면에서 레이저 에너지 흡수율을 증가시키는 방법으로 표면에 인산염, 그라파이트 및 고온 도료를 피막한다.<sup>(17-19)</sup> 본 연구에서는 용융온도가 400°C인 고온도료를 약 20 μm 두께로 피막하여 표면처리하였는데 높은 정도의 경화층을 얻을 수 있었다.

레이저 빔 표면경화는 빔 크기의 특성때문에 국부적인 표면경화만 가능한데 멀티패스경화처리 (multi passes hardening)을 시도하였다. Fig. 5는 이 경우의 경도분포를 보여주고 있고 경화변수는 Table 2에 제시되어 있다. 중첩된 부분에서는 경도가 약 500 Hv로서 최대치인 580에는 못미치고 있으며, 경화깊이도 작음을 알 수 있다. 이는 둘째 패스의 템퍼링 효과에 의해서 초기의 최대 경도치보다 낮아짐을 Fig. 5에서 □와 △를 비교함으로써 알 수 있다. 이로써 부분적으로 중첩되게 레이저 표면경화처리를 하여도 중첩된 부분의 경도가 크게 떨어지지 않음을(약 15%정도 감소함) 알 수 있다.

Fig. 6는 12%-Cr 강의 경화처리된 부분의 단면 사진이고, Fig. 7은 부분적으로 중첩 경화처리한 부분의 단면 사진이다. Fig. 8에는 모재와 경화층의 금속조직사진인데 모재에는 템퍼링된 마르텐사이트(tempered martensite) 조직을 볼 수 있다. 특히 모재에서는 카바이드(carbides)가 많이 분포되어 있음을 볼 수 있으나 경화층에서는 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 9은 모재 및 경화층의 투과 전자현미경 사진이다. 모재에는 템퍼링된 마르텐사이트 조직인 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 형의 타원형 모양의 카바이드가 많이 분포되어 있고, 경화층에는 매우 극소수 카바이드가 분포되어 있음을 볼 수 있다. 이것으로부터 경화층의 높은 경도는 매우 높은 전위밀도(dislocation density)와 미세한 라멜라 마르텐사이

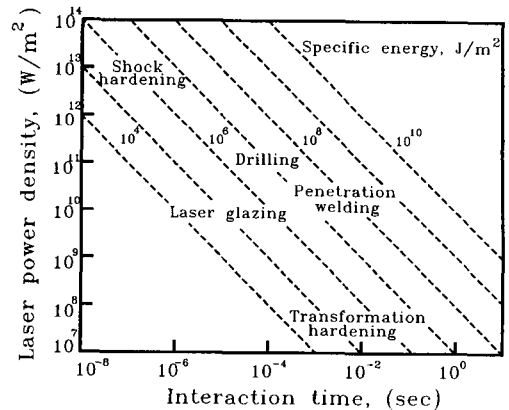


Fig. 4 Operational regime for various laser materials processing techniques<sup>(4)</sup>

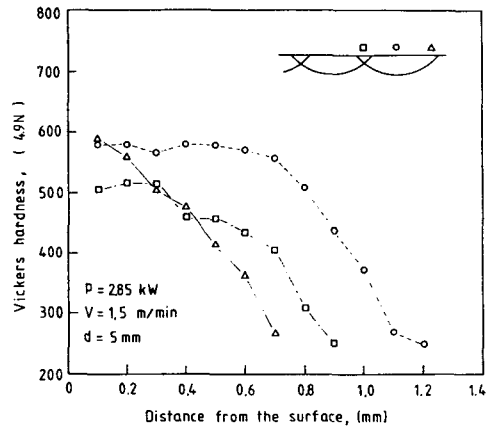
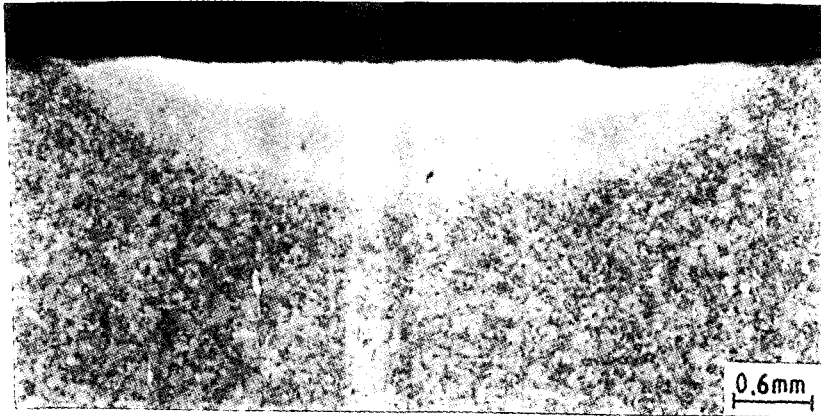


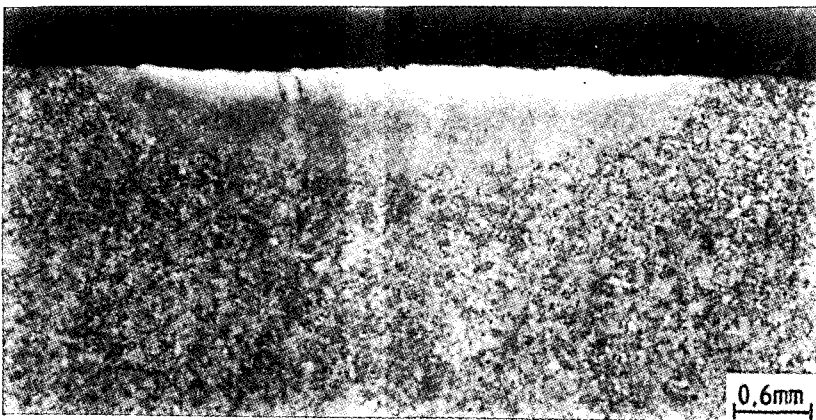
Fig. 5 Vickers microhardness distribution of laser hardened 12%-Cr steel by multi passes with 2.85 kW of laser power and 1.0 m/min of scanning speed

트(lamellar martensite)로부터 기인함을 알 수 있다. 매우 높은 전위밀도는 레이저 빔이 재료표면에 스캐닝된 후 매우 빠른 냉각때문에 발생하는 것으로 열응력에 의해서 일어난다.<sup>(20,21,22)</sup> 레이저 출력, 2.85 kW, 빔 스캐닝속도, 1.5 m/min의 경우 Kim의 모델<sup>(23,24)</sup>에 의해서 계산된  $\Delta t_{0/5}$ 는 10<sup>3</sup>°C/sec 이상의 매우 빠른 값이다.

레이저 표면경화된 표면에서 크랙은 발견되지 않았으며, 표면층의 용융현상은 일어나지 않았다. 단위 면적당 단위 시간당의 에너지가 본 연구에서 사용한 레이저출력과 스캐닝속도가 적절함을 알 수 있었다. 스캐닝속도가 0.7 m/min보다 작은 속도에



(a) Laser power, 2.85kW, scanning speed, 1.0 m/min, d=5 mm



(b) Laser power, 2.85 kW, scanning speed, 1.5 m/min, d=5 mm

Fig. 6 Cross-section of laser hardened 12%-Cr steel

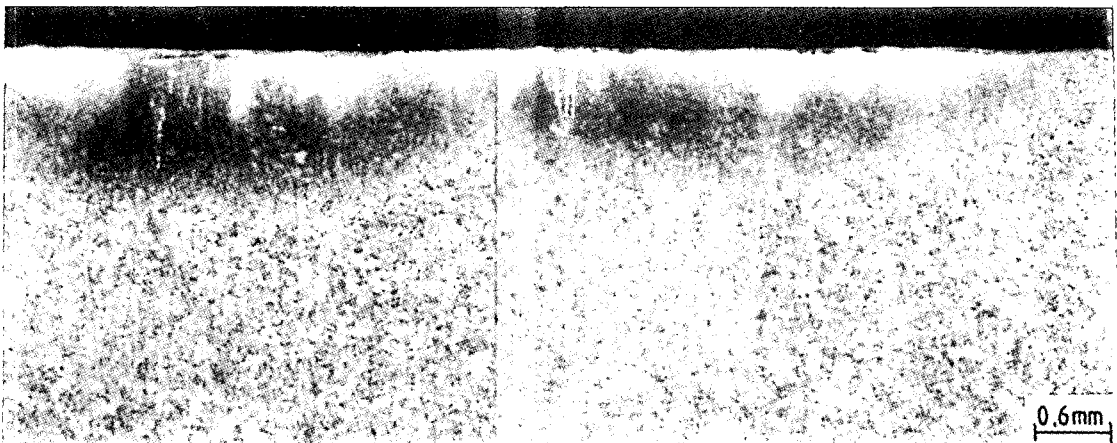


Fig. 7 Cross-section of partly overlapping hardened 12%-Cr steel Laser power, 2.85 kW, scanning speed, 1.5 m/min, d= 5 mm

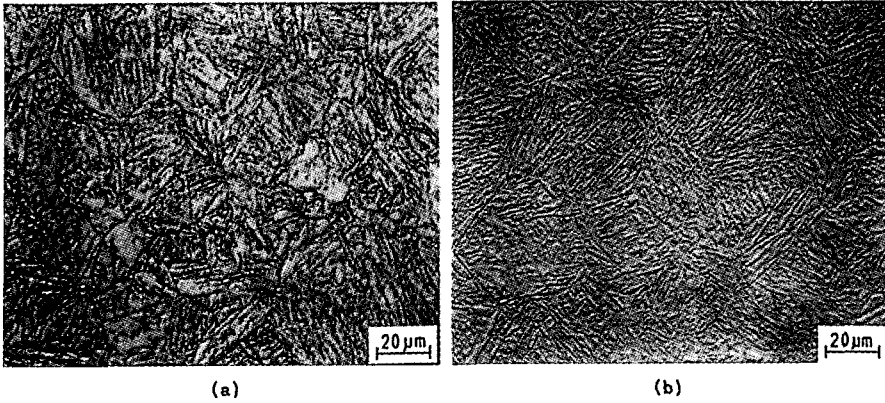


Fig. 8 Microstructure of (a) base metal, (b) hardened zone

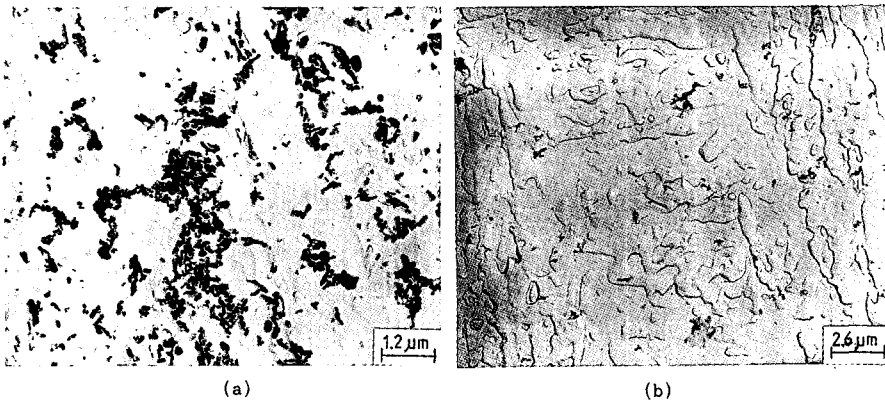


Fig. 9 TEM photograph of (a) base metal, (b) hardened zone

서는 표면에서 용융현상을 발견할 수 있었는데 Fig. 10에 예시하였다. 2.1 m/min보다 높은 속도에서는 충분한 경화층을 얻을 수 없었고 경도도 비교적 낮았다. 높은 스캐닝속도에서는 단위 면적당 단위 시간당의 에너지가 불충분하기 때문이다.

고주파 유도경화법의 경우에 고주파 유도헤드(Induction head)로부터 발생하는 전자기장이 금속과 상호작용하여 불규칙한 형상의 부품에서는 위치에 따라 가열 온도가 달라진다. 그 결과 불규칙한 형상의 부품에서 일정하고 정밀한 표면경화층을 얻기 어렵다. 그러나 레이저 표면경화는 굴곡이 진 부품의 표면경화를 매우 성공적으로 수행할 수 있다. 레이저 빔을 포커싱하는 헤드에 자동 높이 조절장치를 붙여서 부품이 굴곡이 져 있어도 자동으로 헤드 높이가 일정하게 조절되기 때문이다. 12%-Cr 강으로 제작하는 로터의 경우에도 고주파

유도경화법에 의한 표면층의 경도분포가 일정하지 못한 것으로 알려져 있다.

경화층의 깊이는 열전도 법칙에 의해서 결정할 수 있는데, 표면의 온도 증가는 레이저 빔의 정체 시간(dwelling time)에 비례하고 열 용입 깊이는 정체 시간의 입방 근에 비례한다.<sup>(25)</sup> 경도 정도를 결정하는 표면 온도와 경화층 깊이는 레이저출력, 스캐닝속도와 빔의 에너지분포를 조정함으로써 원하는 결과를 얻을 수 있다.

12%-Cr 강의 탄소 함량은 0.21%로 비교적 적으나 레이저 빔에 의해서 높은 표면경도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 탄소 함량이 0.3% 이하일 때는 재래의 열처리법으로는 강의 담금질 효과가 적다. Fig. 11는 12%-Cr 강의 연속냉각변태곡선(continuous cooling transformation curve)이다.<sup>(14,15)</sup> 재래식 표면경화법에서는 Fe-C의 평형

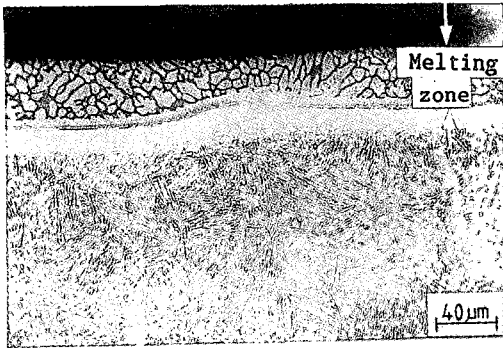


Fig. 10 Illustration of partly melting zone in laser hardening of 12%-Cr steel, Laser power, 2.85 kW, scanning speed, 0.7 m/min

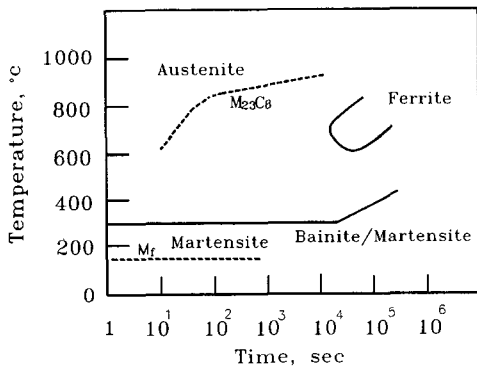


Fig. 11 Continuous cooling transformation diagram for X22CrMoV121 steel<sup>(14,15)</sup>

상태도에서 A<sub>3</sub> 변태온도보다 30 내지 50°C 이상의 온도까지 가열후 급냉시켜 높은 표면 경도를 얻는 반면, 레이저 빔 표면경화는 200 내지 300°C 이상 가열하여 10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup>°C/sec의 냉각율이 되어야 표면경화가 된다.<sup>(25)</sup> 레이저 표면경화는 재래의 경화법에 비해서 매우 높은 핵생성률(nucleation rates)를 갖는 비평형 과정인 것이며, 자체 급냉으로 인해서 비교적 미세한 마르텐사이트 조직을 얻게 되는 것이다.

#### 4. 결 론

연속파 3kW CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 발전소의 로터 재료로 사용하는 12%-Cr 강(DIN, X22CrMoV121)의 표면에 레이저 표면경화를 하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 경화층의 경도는 모재의 표면 경도보다 약 2.5배 높은 경도값을 얻을 수 있었고, 경화깊이는 약 1 mm, 경화 폭은 약 6 mm 얻을 수 있었다.
- (2) 부분적으로 중첩된 위치의 표면 경도는 템퍼링 효과에 의해서 약간 감소함을 알 수 있었으며, 부분적으로 중첩되게 레이저 표면경화 처리하여도 문제가 없음을 확인하였다.
- (3) 재료표면에 흑색 고온도로 처리를 하는 것도 레이저 빔 에너지 흡수율을 증가시키는 방법으로 좋은결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 12%-Cr 강의 모재에는 카바이드가 많이 분포한 반면 레이저로 표면경화된 경화층에는 카바이드가 미소하게 분포됨을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 인하대학교 1992년도 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 대학당국에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Oakley, P. J., 1981, "Laser Heat Treatment and Surfacing Techniques," TWI Research Bulletin, pp. 22.
- (2) Walker, R, 1984, "Applying Multikilowatt CO<sub>2</sub> Lasers in Industry", Lasers & Applications, Apr., pp. 61~69.
- (3) Harth, G. H. et al., 1976, "Laser Heat Treating of Steel," J. of Metals, Apr., pp. 5~11.
- (4) Ready, J. F., 1978, Industrial Applications of Lasers, Academic Press.
- (5) Bendek, J. et al., 1980, "Case Hardening of Steel by a CO<sub>2</sub> Laser Beam," Optics and Laser Technology, Oct., pp. 247~253.
- (6) Mathur, A. K. et al., 1985, "Laser Heat Treatment of Cast Irons-Optimization of Process Variables: Part I," J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, pp. 201~207.
- (7) Mathur, A. K. et al., 1986, "Laser Heat Treatment of Cast Irons-Optimization of Process Variables: Part II," J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 108, pp. 233~239.

- (8) Weerasinghe, V. M. and Steen, W. M., 1986, "Laser Cladding with Blown Powder," *Metal Construction*, Oct., pp. 581~585.
- (9) 김도훈, 윤영주, 1984, "CO<sub>2</sub> 레이저에 의한 탄소강의 표면경화시 온도구배와 이력현상," *대한금속학회지* 제22권 제4호, pp. 361~369.
- (10) 김도훈, 김경배, 김웅, 1985, "레이저에 의한 Cr 표면합금층 형성에 미치는 Cr 첨가 방법의 영향," *대한금속학회지* 제23권 제8호, pp. 788~793.
- (11) 김도훈, 한운섭, 1986, "CO<sub>2</sub> 레이저에 의한 구조용 합금강의 Cr표면 합금층 형성에 관한 연구," *대한금속학회지* 제24권 제7호, pp. 755~766.
- (12) Wright, J. K., 1987, "Lasers for Materials Processing-Past, Present and Future," *Welding & Metal Fabrication*, Aug., pp. 275~285.
- (13) Branst, L., 1985, "Ring Groove Hardening Enhances Engine Life," *Lasers & Applications*, Oct., pp. 16.
- (14) Alberry, P. J. and Gooch, D. J., 1985, "12 CrMoV-A Status Review, Part I," *Welding and Metal Fabrication*, Nov/Dec, pp. 332~338.
- (15) Alberry, P. J. and Gooch, D. J., 1986, "12 CrMoV-A Status Review, Part II," *Welding and Metal Fabrication*, Jan/Feb, pp. 33~35.
- (16) Kimura, S. et al., 1986, "Laser Heat Treatment with Beam Focusing Optical Systems," *IIW Doc. IV-419~86*.
- (17) Arata Y. et al., 1978, "Application of Laser for Material Processing: Heat Flow in Laser Hardening," *IIW Doc. IV-241-78*.
- (18) Maruo, H. et al., 1981, "Investigation of Laser Hardening," *J. of Japan Welding Society*, Vol. 50, pp. 82~88. (in Japanese)
- (19) Shercliff, H. R. et al., 1991, "The Prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening," *Metall. Trans. A*, Vol. 22A, pp. 2459~2466.
- (20) Hegge, H. J. et al., 1990, "Tempering of Steel During Laser Treatment," *Metall. Trans. A*, Vol. 21A, pp. 987~995.
- (21) Bradley, J. R. et al., 1988, "Laser Transformation Hardening of Iron-Carbon and Iron-Carbon-Chromium Steels," *Metall. Trans. A*, Vol. 19A, pp. 2013~2025.
- (22) Altshlin, S. et al., 1990, "The Interaction between a Pulsed Laser Beam and a Steel Surface," *J. of Materials Science*, Vol. 25, pp. 2259~2263.
- (23) Kim, J. D., 1991, "Parametric Evaluations of CO<sub>2</sub> Laser Beam Welding," *Proc. of ASME WAM, Welding and Joining Processes*, Atlanta, pp. 195~201.
- (24) Kim, J. D., 1990, "Prediction of the Penetration Depth in Laser Beam Welding," *KSME J.*, Vol.4 No.1, pp. 32~39.
- (25) Riabkina, M. et al., 1988, "Structure and Microhardness of Laser-Hardened 1045 Steel," *J. of Materials Science*, Vol. 23, pp. 1547~1552.