

## CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 SM45C 강의 표면경화

박진석·이오연·송기홍\*·한유희\*\*

전북대학교 공과대학 금속공학과

\*전주공업대학 금형설계과

\*\*한국기계연구원 레이저가공실

### Surface Hardening of SM45C Steel by CO<sub>2</sub> Laser

J. S. Park, O. Y. Lee, K. H. Song and Y. H. Han

Dept. of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University

\*Dept. of Die & Mold Design, Chunju Technical College

\*\*Korea Institute of Machinery & Metals, Laser Application Lab.

### ABSTRACT

The specimen for laser hardening have been carried out using SM45C which is coated with black paint or graphite for better absorption. Segmented mirror was used in order to produce a square beam (10×10 mm) at the surface with a homogeneous intensity distribution across the beam. CO<sub>2</sub>-Laser power was changed from 2kW to 4kW and transfer velocity was varied from 0.1m/min to 2.0m/min. The maximum hardness and case depth of SM45C steel are 790Hv and 1.5mm by laser hardening. When the surface of specimens was melted during laser hardening, the surface hardness of SM45C steel was decreased. The surface hardness of 2 layer coated specimen(black paint : 15.4μm, graphite coating : 9.5μm) was increased than that of 1 layer coated specimen. It is desirable to prepare 2 or more coating layer on the steel surface in order to sufficient case depth and hardness in laser hardening. The graphite coating on the specimen surface was obtained more uniform temperature distribution than black paint coating in laser hardening process.

### 1. 서 론

레이저를 이용한 재료가공기술은 고출력 레이저 빔을 열원으로 이용하여 재료를 가공하는 방법으로 크게 용접, 절단, 표면처리로 나눌 수 있다. 위의 세가지 분야 중 생산현장에서 널리 응용되고 있는

분야는 용접 및 절단이며, 기타 소형부품의 정밀용접, 천공, 마킹(marking)등에 이용되고 있다<sup>1-6)</sup>. 최근에 레이저 표면경화는 발전기의 고출력화, compact화 및 가격의 저렴화 등 기술개발에 힘입어 실린더 라이너, 크랭크 샤프트, 피스톤링 등 자동차 부품에서 항공기 부품에 이르기까지 각종 산업분야

의 기계부품의 열처리에 적용되어 품질향상과 생산성향상에 크게 기여하고 있다<sup>7, 9)</sup>.

레이저 빔을 이용한 철강재의 열처리는 가공하려는 부위만 레이저 빔을 집중시켜 순간적인 가열과 냉각에 의한 자기 담금질(self quenching) 효과로 철강재를 경화 시킴으로서 그 열영향부가 매우 작아서 빔이 집중되는 부분 이외의 다른 부분은 거의 영향을 주지 않는다. 레이저 표면경화처리는 금속 조직의 고상변태를 이용한 것으로서 경화효과는 조직내에 존재하는 탄소함량과 첨가 원소량에 의존한다. 즉 경화될 구역을 가열하여 탄소가 오스테나이트 조직내로 고용되도록 한 후 급속히 냉각시키면 페라이트와 세멘타이트로 구성되는 평형상인 퍼일라이트를 생성하지 못하고 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하여 경화된다<sup>9, 10)</sup>. 이러한 급속화학적 특징은 일반 표면경화열처리와 동일하지만 열처리하고자 하는 부분에만 에너지를 집중시킬 수 있어서 종래의 열처리 방법보다 가공처리속도가 빠르고 조직이 미세화 되는 특징을 가지고 있으며, 복잡한 형상을 갖는 부품의 열처리도 가능하다.

이상과 같은 장점때문에 부품의 뒤틀림을 극소화해야 하는 부품, 정확한 모양의 부분적인 경화가 요구되는 부품, 경화될 구역으로 열을 제한하도록 하는 것이 힘들어 과도한 뒤틀림을 주는 경우, 경화구역이 전체에 비하여 작은 부품 등의 열처리에 매우 적합하다<sup>2)</sup>.

철강재의 표면경화 처리는 표면층의 온도상승과 급속한 냉각으로 인해 상변태에 의하여 경화층이 형성되므로, 공정인자중 재료표면의 온도분포가 표면경도 및 경화층제어에 중요한 정보가 된다. 따라서 레이저처리시 재료의 표면 온도가 경화층 깊이를 제어할 수 있는 중요한 공정인자가 되므로 on-line상에서 표면온도를 제어한다면 경화층의 질을 개선하고 일정하게 유지할 수 있을 것으로 생각된다<sup>11)</sup>. 본 연구에서는 SM45C 강재의 레이저 경화처리시 적정 조건을 도출하기 위하여 비임모드, 비임직경을 일정하게 하고 출력밀도와 조사속도 등의

레이저처리 조건을 변화시키면서 적외선 온도센서를 이용하여 표면온도를 측정하고, 경도와 미세조직의 변화를 상호 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험시편

본 연구에 사용된 시편은 일반 기계류에 많이 쓰이는 SM45C로써, 그 화학조성은 Table 1과 같다.

시편은 자기담금질효과가 충분하도록 300×50×9mm의 크기로 준비하였다. 레이저 열처리공정은 시편의 표면조건에 따라서 그 영향이 크게 나타나므로 표면조건을 일정하게 하기 위하여 기계가공(밀링)한 다음 이물질질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척하였다. 그리고 시편 표면의 코팅 조건에 따른 레이저 빔 흡수율의 변화가 재료의 경도 및 표면온도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시편 표면에 다음과 같이 코팅하였다. i) 흑색페인트의 코팅횟수를 단계별로 1회~3회까지 코팅. ii) 흑연분말의 코팅횟수를 단계별로 1회~3회까지 코팅. iii) Sand blasting한 후 흑연분말을 1회 코팅. 흑색페인트와 흑연분말의 코팅층 두께는 영국 Elcometer사의 모델 257FN T2를 사용하여 표면

Table 1. Chemical composition of SM45C steel (wt %).

	C	Si	Mn	P	S	Fe
SM45C	0.47	0.24	0.68	0.017	0.008	bal.

Table 2. The average thickness and standard deviation of black paint coated layer on the surface of SM45C.

Layer	1	2	3
Thickness( $\mu\text{m}$ )			
Average thickness( $\mu\text{m}$ )	6.8	15.4	35.5
Standard deviation( $\mu\text{m}$ )	2.7	3.0	3.5

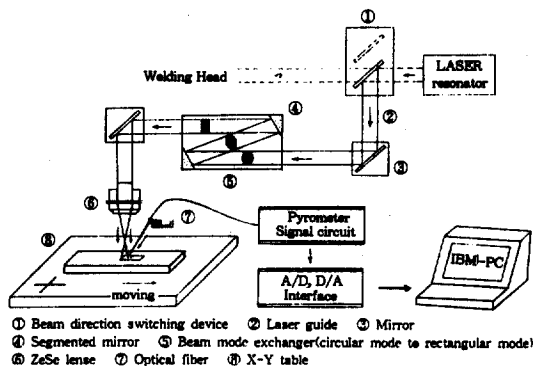
**Table 3.** The average thickness and standard deviation of graphite coated layer on the surface of SM45C.

Layer	1	2	3
Thickness( $\mu\text{m}$ )			
Average thickness( $\mu\text{m}$ )	2.7	9.5	15.0
Standard deviation( $\mu\text{m}$ )	0.9	3.0	2.0

코팅부위중 20곳을 측정하여 각 코팅층의 평균값과 측정값의 표준편차를 Table 2와 Table 3에 정리하였다.

## 2.2 실험장치

본 연구에 사용한 레이저는 4kW급, 파장 10.6  $\mu\text{m}$ 의 CO<sub>2</sub>레이저(미국, Rofin-Sinar 840)이며 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다 이 장치는 빔 스위칭에 의해 빔이 용접헤드로 가면 용접 및 절단을 하기 위한 원형빔을 사용할 수 있고, 열처리 헤드로 가면 표면처리를 할 수 있도록 되어 있다. 열처리 헤드로 가는 원형빔은 segmented mirror에 의해 사각빔으로 바뀌면서 일정한 에너지 밀도를 갖게 되고 이렇게 사각빔으로 바뀌어진 레이저빔은 다시 렌즈를 통하여 재료를 열처리할 수 있도록 집광된다. 이 열처리 헤드 아래에 경화처리될 시편을 고정시키고, 이동시키기 위한 X-Y 테이블이 있다.



**Fig. 1** Experimental setup for temperature monitoring in laser surface hardening process using IR-sensor.

## 2.3 레이저 열처리

레이저 표면경화처리시 주경화인자는 레이저비입모드, 비입직경, 조사속도 및 표면조건 등인데, 본 연구에서는 레이저 비입모드와 비입직경을 일정하게 하고 출력밀도 2kW, 3kW, 4kW에서 빔이송속도를 0.1m/min에서 2.0m/min까지 변화시키면서 실험하였다.

## 2.4 표면온도 측정

표면온도를 측정하기 위해 사용한 적외선 온도센서는 독일 IMPAC사의 모델 IS-2-LO의 제품을 사용하였으며 내부센서는 빛의 응답파장범위가 0.6 $\mu\text{m}$ ~1.1 $\mu\text{m}$ 인 Si-cell을 사용하였으며 측정온도 범위는 약 750 $^{\circ}\text{C}$ ~1,500 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 레이저 경화 공정에서는 높은 온도로 가열되는 표면으로 부터 전도에 의해 온도가 상승되어 재료 내부에 경화층이 형성되므로, 공정중 온도 측정점은 온도가 가장 높은 점으로 선정하였다. 레이저가 조사되는 부분의 빔크기를 10mm $\times$ 10mm가 되도록 고정하고 그 아래 X-Y 테이블 위에 시편을 위치시켜 일정 속도로 이송시키면서 실험하였다. 시편에 레이저가 조사되면 표면의 페인트가 강한 빔에너지에 의해 급속히 타면서 가스 또는 가루의 형태로 위로 상승하는데 이것에 의해 레이저의 집속 렌즈와 센서의 렌즈가 손상되는 것을 방지하고 페인트의 불꽃이 적외선 온도센서의 측정부분을 가로막는 것을 방지하기 위하여 각각 공기를 불어주어 기화된 페인트를 제거하고 빔의 앞쪽에 발생하는 불꽃이 적외선 센서의 측정점과 반대 방향을 향하도록 하였다.

## 2.5 단면경도 측정 및 조직관찰

레이저 표면처리된 시편은 조사방향에 수직으로 절단하여 1 $\mu\text{m}$  알루미늄 분말로 정마한후 micro-Vickers hardness tester(미국, Buehler사 Micro-mat3)을 사용하여 하중 300g으로 경화층 최외표면으로부터 100 $\mu\text{m}$ 간격으로 2mm 깊이까지 측정하였다. 경화부의 미세조직은 단면경도를 측정한 시

편을 0.3 $\mu$ m 알루미나 분말로 정마한후 3% Nital 로 부식시켜 광학현미경으로 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 표면코팅 조건에 따른 경도 및 온도변화

레이저 열처리시 레이저빔의 흡수정도는 시편의 표면상태나 코팅제에 따라 현저한 차이를 나타내므로, 처리시편의 열처리 경화특성 또한 큰 영향을 받게 된다. Fig. 2는 표면 코팅제로서 흑색 페인트를 사용하여 코팅 횟수를 1~3회까지 중복 코팅한 SM45C 시편을 레이저 출력 3kW와 이송속도 0.4 m/min의 조건으로 레이저 열처리 하였을 때, 표면으로 부터 모재 중심으로의 단면경도의 변화를 나타낸 것이다. 코팅횟수가 1회(평균두께 : 6.8 $\mu$ m)와 2회(15.4 $\mu$ m)에서 최대 경도는 700Hv 정도로서 비슷하지만, 기지의 경도를 230Hv으로 취하면, 1회 코팅한 시편은 경화깊이가 0.7mm로서 작지만 2회 및 3회 코팅한 시편은 2.0mm로서 3배의 경화깊이를 나타내었다. 이러한 결과로 부터 페인트의 두께가 두꺼울수록 레이저빔의 흡수율이 증가하여 경화깊이가 증가함을 알 수 있으며 코팅횟수가 2회

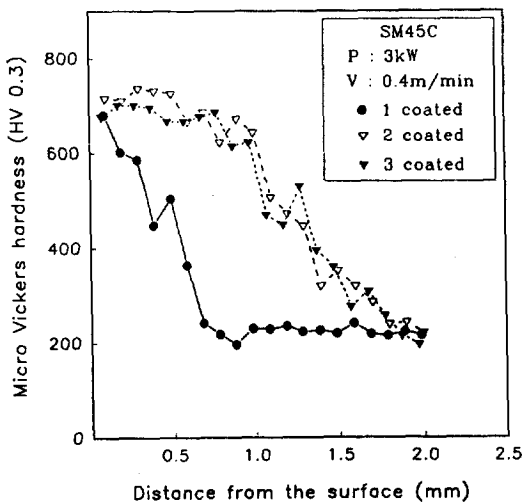


Fig. 2 Effect of black paint coating thickness on the hardness profile in laser hardening(3kW, 0.4m/min).

(15.4 $\mu$ m)이상이면 경화깊이는 그다지 증가하지 않았다.

Fig. 3은 흑연분말을 1회~3회 단계별로 중복 코팅한 시편을 레이저출력 3kW, 이송속도 0.4m/min로 레이저 열처리 하였을 때의 표면온도 및 단면경도를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)를 보면 코팅횟수가 1회 코팅(2.7 $\mu$ m)에서 2회 코팅(9.5 $\mu$ m)으로 증가할 때 표면온도가 1,050 $^{\circ}$ C에서 1,150 $^{\circ}$ C로 약 100 $^{\circ}$ C정도 증가하고, 2회 코팅에서 3회 코팅(15.0 $\mu$ m)으로 변하는 지점에서는 표면온도가 약간 증가하지만 비슷한 온도를 나타내었다. Fig. 3(b)를 보면, 1회 코팅은 최대경도 650Hv와 경화깊이 1.2mm정도 이었고, 2회코팅 이상은 최대경도 700Hv와 경화깊이 1.4mm로서 1회 코팅한 시편이 2회 이상 코팅한것 보다 경도 및 경화깊이에서 약간 낮게 나타났다. 따라서 코팅 두께가 두꺼울수록 레이저빔의 흡수 정도가 증가하여 표면온도, 경도 및 경화깊이가 증가하지만, 2회이상 코팅(9.5 $\mu$ m)하면 경도 및 표면온도의 증가가 거의 없었다.

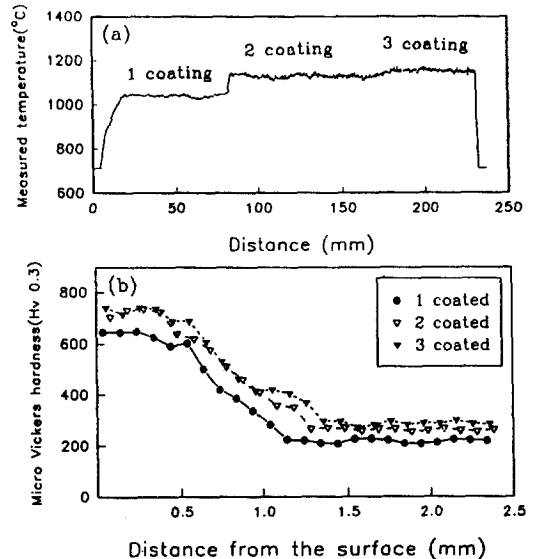
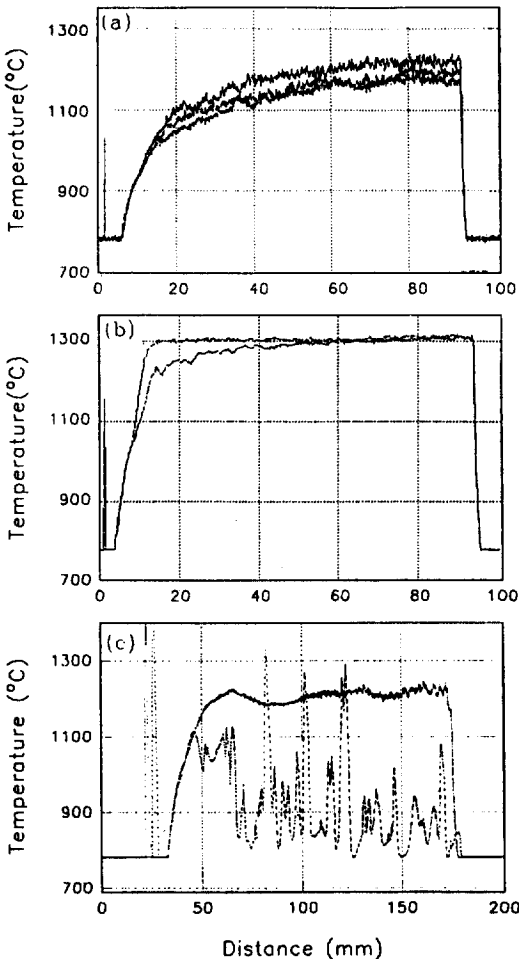


Fig. 3 Effect of graphite coating thickness on the surface temperature and the hardness profile in laser hardening(3kW, 0.4 m/min).

Fig. 4는 레이저 출력 3kW, 이송속도 0.4m/min으로 레이저 열처리하였을때 코팅제에 따른 시편의 표면온도를 상호 비교한 것이다. 표면온도는 sand blasting 처리후 흑연분말코팅(↓,300℃), 흑연분말(1,200℃), 흑색페인트(1,190℃) 코팅처리 순서로 낮아졌으며, 표면에 흑연분말을 코팅한 두 시편은 레이저 빔 조사가 시작될 지점에서 60mm 이상에서는 편차가 적은 안정된 온도분포를 나타내

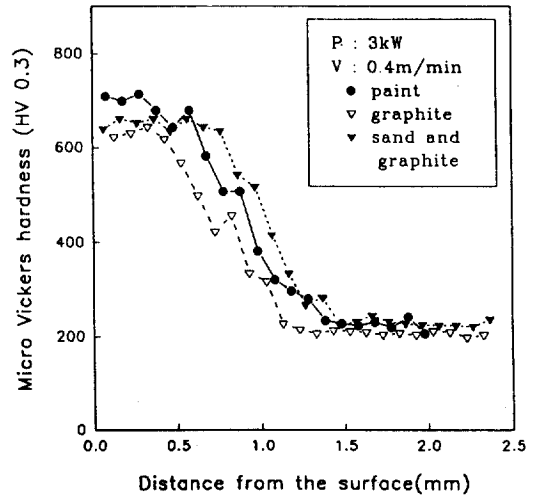


**Fig. 4** Effect of coating materials on the surface temperature of SM45C steel in laser hardening  
 (a) Graphite coating  
 (b) Sand blasting and graphite coating  
 (c) Black paint coating

었지만, 흑색페인트 코팅을 한 경우의 표면온도는 레이저 빔 조사 초기에 페인트의 인화로 인해 높은 피크가 생기고 70mm이후에도 흑연분말보다 큰 온도 편차가 나타났다.

Fig. 5는 Fig. 4의 온도측정에 사용한 레이저 열처리 시편의 단면 경도로서, 최대경도는 흑색페인트 코팅(700Hv), sand blasting 처리후 흑연분말 코팅(650Hv), 흑연분말 코팅(620Hv)의 순으로 낮아졌으며, 경화 깊이는 흑색페인트와 sand blasting 처리된 시편이 1.3mm정도이고, 흑연분말만을 코팅한 시편은 1.1mm를 나타내었다.

이상의 실험으로부터 흑연분말을 코팅한 경우는 흑색페인트를 코팅한 시편에 비하여 경화깊이 및 경도에서 약간 낮지만, 레이저 처리시 온도측정에서 비교적 안정된 온도분포를 나타냄으로써 표면경도 및 경화깊이가 균일하여 on-line 공정제어에 유리할 것으로 판단된다. Sand blasting 처리하여 흑연분말을 코팅한 경우 흑연분말만을 코팅하였을 경우보다 다중흡수에 의한 영향으로 경도 및 경화깊이가 약간 증가하였다. 흑색페인트를 코팅한 후 레이저 열처리한 시편의 경도 및 경화층 깊이는 흑연분말을 코팅한 경우보다 약간 크지만 표면온도의 편차가 큰 단점이 있었다.



**Fig. 5** Effect of coating materials on the hardness profile(3kW, 0.4m/min)

3. 2 레이저 경화특성 및 미세조직

Fig. 6은 레이저 출력을 2kW, 3kW, 4kW에서 이송속도를 0.2~2.0m/min까지 변화시켰을 때 얻어진 시편의 단면경도로서, 이송속도가 증가할수록 경도 및 경화깊이가 감소하고 있다. Fig. 6(b)는 레이저 비임 출력을 3kW로 고정하고, 이송속도를 0.2~0.9m/min까지 변화시켰을 때 경도분포를 나타낸 것으로써, 이송속도가 0.4m/min일 때 표면경도는 약 700Hv이었고, 경화깊이는 1.4mm이었다. 이송속도가 0.9m/min에서는 경화표면의 경도는 모재와 같았다. 이것은 빠른 이송속도로 인해 오스테나이트 변화가 일어날 정도로 입열량이 충분

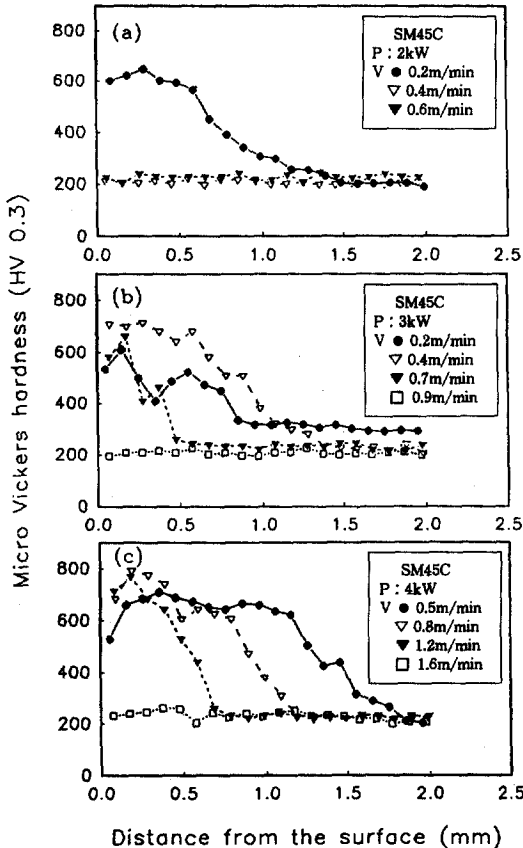


Fig. 6 Effect of transfer velocity on the hardness profile of laser hardened SM45C steel at a given laser power of 2kW, 3kW and 4kW.

하지 못하므로 경화층이 형성되지 않았기 때문이다.

Photo. 1은 레이저 출력 3kW, 이송속도 0.4m/min에서 레이저 처리한 시편의 단면조직 사진이다. 비교적 낮은 이송속도로 인해 입열량이 커서 Photo. 1(a)에서 보는 것과 같이 1.4mm에 이르는 깊은 경화층을 형성하고 있다. 최외표면의 미세조직은 Photo. 1(b)과 같이 조대한 래스 마르텐사이트로 이루어져 있고, 기지를 향하여 내려간 Z<sub>2</sub> 부분은 Photo. 1(c)에서 볼 수 있듯이 미세한 마르텐사이트와 퍼얼라이트가 존재하고 있다. 기지조직인 Z<sub>3</sub>부위는 Photo. 1(d)와 같이 어닐링한 중탄소강의 전형적인 조직인 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있다.

Fig. 6(b)를 보면, 같은 레이저 출력 3kW에서 이송속도가 0.4m/min보다 더 느린 0.2m/min에서는 오히려 표면경도가 급격히 저하되고 경도도 측정위치에 따라 현저하게 달라지고 있는데, 이것은 낮은 이송속도로 인해 입열량이 커서 표면에서 재용융이 일어나 자기 담금질 효과가 충분하지 못하기 때문이다. Photo. 2는 3kW, 0.2m/min에서 레이저 처리한 시편의 미세조직으로서 표면부에서 용융(surface melting)이 일어나 상당히 조대한 결정립이 형성되어 있다. Photo. 2(b)는 Photo. 2(a)의 Z<sub>1</sub>을 확대한 사진이다. Photo. 2(c)와 (d)는 Photo. 2(b)에 표시한 입내(Z<sub>2</sub>)와 입계(Z<sub>3</sub>)의 주사전자현미경사진으로서, 입내는 Photo. 2(c)와 같이 마르텐사이트가 존재하며, 입계는 Photo. 2(d)와 같이 층상구조의 퍼얼라이트가 형성되어 있다. 결정입내의 경도는 640Hv 정도이며, 입계부위는 340Hv 정도의 경도를 나타내었다. 위와 같은 3kW, 0.2m/min 처리조건에서의 경도 저하는 표면층의 용융으로 인해 냉각속도가 낮아져 마르텐사이트 생성량이 감소하고 퍼얼라이트가 증가하였기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7은 이송속도를 0.8m/min로 일정하게 하고 레이저 출력을 변화시켰을 경우의 경도분포 곡선으로서, 출력이 증가할수록 최대경도는 2kW에

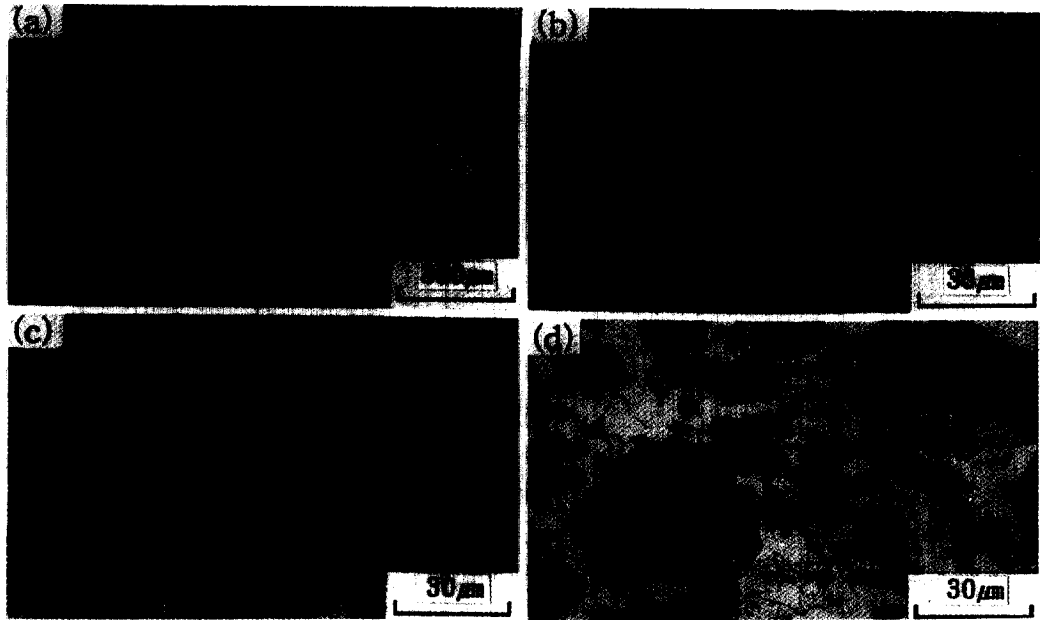


Photo. 1 Optical microstructure of cross sectional area. (b), (c) and (d) correspond to the microstructures of  $Z_1$ ,  $Z_2$  and  $Z_3$  zone respectively.

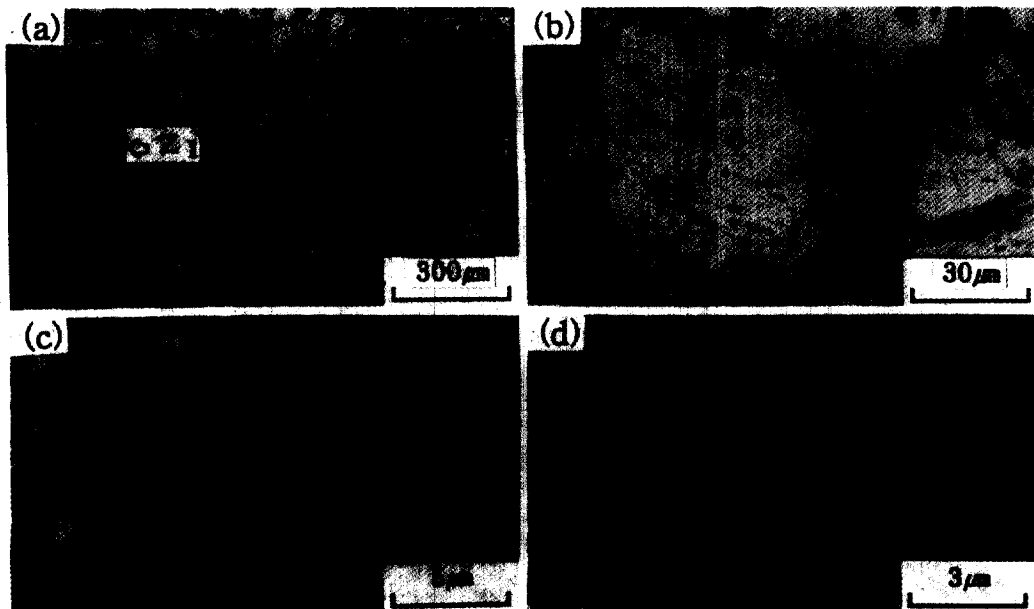


Photo. 2 Optical and scanning electron micrographs showing the formation of martensite and pearlite after laser hardening(3kW, 0.2m/min). (b), (c) and (d) correspond to the microstructures of  $Z_1$ ,  $Z_2$  and  $Z_3$  zone respectively.

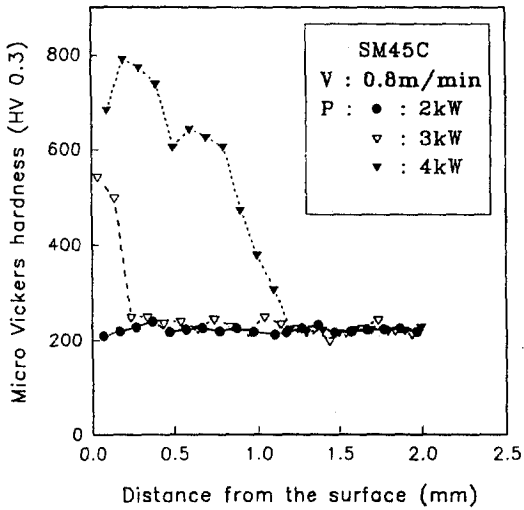


Fig. 7 Effect of laser power on the hardness profile of laser hardened SM45C steel at a given transfer velocity of 0.8m/min.

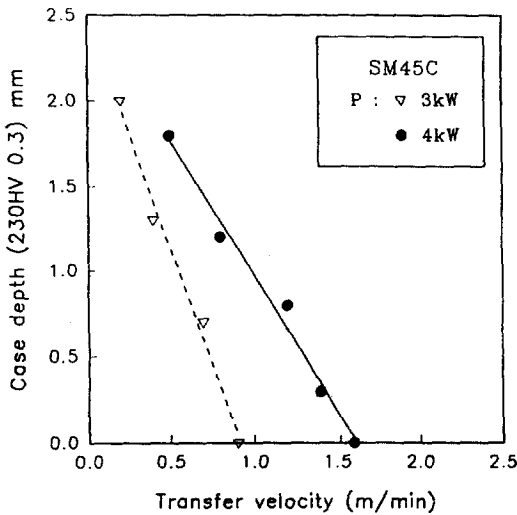


Fig. 8 Relation between case depth and transfer velocity of laser hardened SM45C at the laser powers of 3kW and 4kW.

서 210Hv, 3kW에서 550Hv, 4kW에서 790Hv로 증가하였다. 그리고, 2kW에서는 표면경화가 일어나지 않았고, 3kW 및 4kW에서의 경화깊이는 각각 0.25mm와 1.2mm를 나타내었다.

Fig. 8은 3kW와 4kW의 레이저 출력에서 이송 속도의 변화에 따른 경화깊이를 나타낸 것이다. 출력이 일정할 경우 이송속도가 증가할수록 단위면적당 입열량이 적어지므로 경화깊이는 거의 직선적으로 감소하였다. SM45C는 합금강에 비하여 경화능이 높지 않은 강종이지만 레이저 열처리를 통하여 표면경화층이 기지보다 3배 이상의 경도를 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

SM45C 강재의 표면경화처리를 목적으로 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 열처리할 때 주요 공정인자인 재료의 표면코팅 조건, 레이저출력 및 이송속도가 표면경화 특성에 미치는 영향을 연구하고 미세조직 변화와 시편의 표면온도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 레이저 표면경화 처리시 최대경도는 790Hv 이었고 경화깊이는 1.5mm까지 얻을 수 있다.

2) 일정한 레이저 비입 출력에서 이송속도가 증가할수록 즉, 입열량이 감소할수록 경화깊이는 거의 직선적으로 감소한다.

3) 레이저 출력 3kW, 이송속도 0.2m/min와 같이 입열량이 큰 경우, 표면에서 용융이 일어나 경도가 저하되는데, 이는 표면온도가 액상선까지 올라가 냉각시 오스테나이트가 일부 마르텐사이트로 변태되나 대부분 조대한 퍼얼라이트로 변태되어 연화되기 때문이다.

4) 시료표면에 1회 코팅(흑색페인트 : 6.8 $\mu$ m, 흑연분말 : 2.7 $\mu$ m)한 경우는 레이저빔의 흡수율이 낮아 충분한 경화 효과를 나타내지 못하지만, 2회 이상 코팅(흑색페인트 : 15.4 $\mu$ m, 흑연분말 : 9.5 $\mu$ m)한 경우는 코팅 횟수에 관계없이 충분한 경화깊이와 경도를 얻을 수 있다.

5) 레이저 열처리시 표면온도 측정 결과 시편 표면의 코팅제로서 흑연분말이 흑색페인트에 비하여 균일한 온도분포를 얻을 수 있다.



## 참 고 문 헌

1. M. I. Cohen : "Material Processing" Sec F4, 'Laser Handbook'(ed) F. T. Arechi and E. O. Shulz-Dudois, North-Holland Pub Co. Amsterdam(1972).
2. J. F. Ready : "Industrial Applications of Laser" Academic Press, New York(1978).
3. W. W. Duley : "CO<sub>2</sub> Laser Effect and Applications" Academic Press, New York(1978).
4. N. Rykalin, A. Vglov and A. Kokola : "Laser Machining and Welding" Pergamon Press, Oxford(1978).
5. A. E. Bell : "Review and Analysis of Laser Annealing" RCA Review, 40, 3(1979).
6. C. W. White and P. S. Peercy : "Laser and Electron beam Processing of Materials" Academic Press, New York(1980).
7. 석명근 : 대한금속학회 회보, Vol. 1, (1988) 1039.
8. Y. Asaka, H. Kobayashi and S. Arita : Proceedings of LAMP '87(Osaka, 1978)555.
9. 김도훈 : "레이저 가공학", 경문사, (1990) pp. 235~255.
10. 김도훈, 박영서, 윤영주, 김용 : 대한금속학회지, Vol. 21, (1983)365.
11. T. Rudlaff and F. Dausinger : "Increasing the Efficiency of Laser Beam Hardening", ICALAO, (1990)451~458.