

레이저 표면경화에서 경화깊이 예측

김 재 도,* 조 종 두,* 서 정 원,** 조 응 무***

Prediction of Case Depth in Laser Beam Hardening

Jae-Do Kim,* Chong-du Cho,* Jung-Won Seo,** Yong-Moo Cho***

ABSTRACT

In order to predict the case depth and case width in laser transformation hardening, a finite element method was used to analyze the temperature distribution on the material. Laser hardening of the specimens of SM45C and STD11 steels was experimented by using the continuous wave CO₂ laser with the various travel speeds and the defocused Gaussian beam mode. Phosphate coating was adopted on the surface of SM45C to increase the absorption of 10.6 μm laser energy. Experimental data show good agreement with the theoretical predictions. The maximum possible case depth can be predicted for the given laser hardening conditions, such as laser power, and travel speed.

Key Words : Case depth(경화깊이), Case width(경화폭), Laser hardening(레이저 경화), Gaussian beam mode(가우시안 빔 모드), Self-quenching(자기 쿨링)

1. 서 론

고출력 레이저를 이용한 재료 가공 기술은 급속히 발전되어 왔는데, 고출력 CO₂ 레이저 및 Nd:YAG 레이저 등이 개발되면서 종래에 할 수 없었던 재료 가공이 가능해졌고, 생산성이 크게 향상되었다. 레이저 빔은 지향성이 매우 높기 때문에 렌즈나 미러를 통하여 수십 내지 수백 μm의 아주 작은 면적 내에 레이저 빔 에너지를 모을 수 있다. 따라서 대단히 큰 에너지 밀도를 만들어 낼 수 있으므로 용접, 절단, 드릴, 표면 경화 등

에 이용하고 있다.⁽¹⁻⁸⁾

레이저 표면 경화는 레이저 빔이 조사된 금속 표면이 공기 중에서 급냉되는 원리로서, 탄소강, 합금강, 공구강 및 주철에 적용되고 있다. 레이저 표면 경화 기술은 국부 처리가 가능하고, 제품의 열변형이 없으며, 처리 속도가 종래의 표면 경화법에 비해서 매우 빠르기 때문에 선진국 산업체에서 급속히 적용되고 있다. 국부적으로 표면 경화가 요구되는 기계 부품의 마모 특성을 향상 시키고, 피로특성을 향상시켜 내구 연한을 증가시킬 수 있다. 대부분의 기계부품은 마모가 심하게 일어나는

* 인하대학교 기계공학과
 ** 대우자동차 기술연구소
 *** 대우전문대학 금형설계과

부위는 일부분으로서 국부적인 표면 경화가 요구된다. 레이저 빔은 이같은 목적에 가장 적합하다.

레이저 빔 가공경화는 세 가지의 가공 변수 블럭으로 구별할 수 있는데, 레이저 발진 장치, 빔을 전달 하는 광학 장치, 경화할 재료 특성이다. 첫째 변수는 레이저 발진장치 제작회사에 의해서 이미 고정된 변수들을 포함하게 되는데, 레이저 출력, 빔 모드, 빔 크기 등의 레이저 빔 특성에 관련된 것이다. 둘째 변수 블럭은 레이저 빔을 발진 장치에서 경화 재료까지 보내기 위한 광학 시스템에 관련된 것이다. 포커싱 렌즈에 의한 초점 거리, 초점 심도, 빔 발산 등이 포함된다. 셋째 변수 블럭은 경화할 재료의 물리적 특성에 의해서 결정되는데, 표면 반사율, 열 전도도, 열 확산도 등이다.⁽⁹⁻¹⁴⁾

레이저 표면 경화에 대한 열전달 문제는 점열원이나 선열원 으로서 반무한 평면에 대한 몇가지 해석적인 방법이 Carlswow와 Jaegar⁽²⁰⁾에 의해서 제시되었다. Shercliff 등⁽²¹⁾은 3 차원 문제로서 근사적인 해석법으로 레이저 표면 경화에서 온도 해석을 하였으며 경화층 깊이에 대한 예측을 시도하였다.

레이저 표면 경화 변수를 연구하고, 경화 깊이와 경화 폭을 예측하는 연구는 중요하다. 주어진 레이저 표면 경화 조건에 대해서 경화 깊이와 경화 폭을 예측하는 것은 산업 현장에서 즉시 실용화하여 시간과 경비를 절감할 수 있기 때문이다. 자동차의 피스톤 링 그로브, 크랭크 샤프트의 펄렛부, 디젤 엔진의 실린더 라이너 등의 레이저 표면 경화를 적용하기 위한 기초연구로서 주어진 레이저 표면 경화 조건에 대한 경화 깊이와 경화 폭을 유한요소법을 통하여 예측하였다. 실험을 통하여 이론 결과와 비교 검토하였다.

2. 레이저 빔 특성

2-1. 출력 및 초점크기

레이저는 전자기 형태의 빔으로 연속적 혹은 단속적인 펄스의 형태로 방출되는데 광학장치에 의해서 특정한 초점직경을 갖도록 초점거리를 조정할 수 있다. 레이저 표면경화에서도 재료가 용융되기전 최적의 표면경화를 할 수 있는 에너지 밀도가 존재하게 된다. 레이저 출력은 초점크기와 밀접한 관계를 가지고 있는데 가우시안 모드에서 에너지 분포는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 \exp(-2 \frac{r^2}{W_0^2}) \quad (1)$$

여기서 r 은 반경이며 W_0 는 초점 반경이다.

$$W_0 = \frac{\lambda f}{\pi W_1} \quad (2)$$

λ 는 레이저 파장이고 f 는 렌즈의 초점거리이며 W_1 는 렌즈에 입사되는 빔반경이다.

범허리(waist), W 는 빔의 진행방향인 z 축에 대하여

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

로 표현된다.

본 연구에서는 레이저 표면 경화에서 가장 간단한 방법이고 경화폭 조정이 가능한 비초점 빔(defocused beam)을 사용하였다. 이 방법은 볼록 렌즈로 레이저 빔을 모았을 때 초점 아래 부분에 모아지는 빔을 이용하는 것이다. 중심 부분에 가장 많은 에너지가 조사되기 때문에 재료의 중심 부분에서 가장 큰 경화깊이를 얻을 수 있다.

2-2. 흡수와 반사

레이저 빔을 재료에 조사시키면 입사된 레이저 빔의 일부는 재료 표면에서 반사되고 일부는 투과되며 나머지는 흡수된다. 재료가 금속일 경우 레이저 빔은 투과되지 못하므로 반사되는 레이저 빔을 제외하고 모두 흡수된다. 금속표면에 조사된 레이저 빔은 빔의 파장, 재료의 열전도도, 에너지 밀도, 온도, 전기전도도, 코팅 두께, 코팅재료 등에 따라 흡수되는 정도는 다르게 된다. 흡수된 레이저 빔은 금속격자의 음자 및 자유전자들과 충돌에 의하여 10^{-15} sec 이내에 열로 바뀌어 금속 표면의 온도를 증가시킨다. 금속의 온도가 증가함에 따라 전기전도도는 감소하므로 레이저 빔의 흡수되는 양은 증가하게 된다.

3. 이론적 해석

3-1. 유한요소 해석

Fig. 1과 같이 레이저로 유입되는 열에 의하여 재료에서는 복잡한 열적 거동을 일으키며 열영향부위의 미

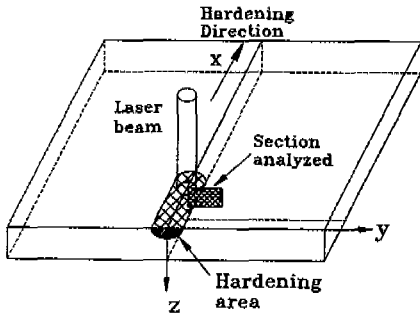


Fig. 1 Laser hardening configuration of model

소구조를 변화시킨다. 실제의 상태는 복잡한 거동을 하기 때문에 비정상, 3차원 문제로 해석을 해야 하지만 레이저를 이용한 표면경화의 경우 x 방향으로 조사되는 레이저 빔에 의한 온도변화는 측면의 y 방향과 두께의 z 방향과 비교하여 무시할 수 있다. 만약 레이저 빔이 작으면 표면 경화될 대상은 반무한(semi-infinite) 형상으로 가정할 수 있으므로 본 연구에서는 2차원 비정상 열전도 방정식을 가지고 해석을 하였다. 복사에 의한 손실은 본 연구에서 무시하였으며, 재료는 등방체이고 물리적 성질은 온도에 관계없이 일정하다고 가정하였다.

지배 방정식, 초기 조건 및 경계 조건은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \left[k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q \quad (4)$$

$$\text{초기조건: } T = T_i, t = 0 \quad (5)$$

$$\text{경계조건: } k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h(T - T_\infty) = 0 \quad (6)$$

T는 온도, ρ는 밀도, Cp는 비열이다. k는 열전도도,

$$\text{Heat Flux : } q = \frac{\rho P}{\sqrt{\pi R^2}} \exp(-2y^2/R^2)$$

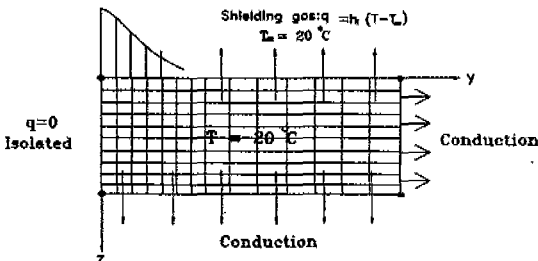


Fig. 2 Solution domain of FEM and boundary conditions

h는 대류 열전달계수, Q는 단위 시간당, 단위 체적당 공급되는 열량이다.

본 모델에서 사용된 요소는 2차원 사각형 요소로 Fig. 2와 같다.

해석대상을 유한개의 요소로 분할하면 온도분포는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$T(y, z, t) = [N(y, z)] \cdot \{\phi(t)\} \quad (7)$$

N은 절점온도와 요소내 온도등을 결합한 형상함수 행렬로서 요소 절점수가 n개라 하면 [N]은 1×n의 행렬로 구성되고 ϕ(t)는 시간 t에서 요소의 절점온도 벡터를 나타낸다. 형상함수 [N]을 가중함수로 하여 식 (4)에 Galerkin법을 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$[k]\{\phi\} + [c] \frac{\partial \phi}{\partial t} = \{f\} \quad (8)$$

{ϕ}는 전체 절점의 온도벡터, [k]는 열전도 행렬, [c]는 열용량 행렬, {f}는 열유속 벡터이다.

비정상 $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 항은 유한차분법 중에 Crank-Nicolson 차분식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2}[k] + \frac{1}{\Delta t}[c] \right) \{\phi(t + \Delta t)\} \\ & = \left(-\frac{1}{2}[k] + \frac{1}{\Delta t}[c] \right) \{\phi(t)\} + \{f\} \end{aligned} \quad (9)$$

3-2. 해석과정

본 연구에서 SM45C 강과 STD11 강을 사용하여 모델해석을 하였고 실험 결과와 비교하였다. 온도해석을 위한 초기조건으로 시편의 초기온도는 20°C이며 주위 온도는 20°C로 일정하다고 가정하였다. x 방향은 평판의 두께에 비하여 길어서 열전달이 일어나는 경우이나 반무한 조건으로 가정하여 온도해석을 하였다. Table 1에 재료의 물리적 성질을 표시하였다.⁽¹⁷⁾

유한요소법을 위한 요소분할은 중앙횡단면에 대하여 형상 및 경계조건이 대칭이므로 모델의 우측면을 해석하였고, 온도구배가 크게 나타나는, 즉, 레이저 빔이 조사되는 부분을 세밀하게 분할하였다. 온도해석에 사용된 시편의 절점 및 요소수는 각각 546개와 500개로 하여 요소 크기에 비교적 영향을 받지 않는 사각형 요소를 취하여 4절점 요소를 이용하였다.

Table 1 Physical properties of materials

	SM45C	STD11
Thermal conductivity(W/m°C)	38	23.5
Density(g/cm ³)	7,860	7,612
Specific heat(J/kg°C)	460	460.24
Melting point(°C)	1,530	
Boiling point(°C)	2,900	

4. 실험

4-1. 실험재료

실험에 사용한 시편은 두께 6mm의 SM45C 강과 두께 5mm의 STD11 강이다. 시편을 200×30 mm로 기계가공한 후 표면상태를 동일하게 하기 위해서 사포 (#400)를 사용하여 연마하였다. 레이저 빔이 금속표면에서 높은 흡수율을 얻기 위하여 인산염으로 표면코팅을 하였는데 두께는 약 5 μm 였다.

4-2. 레이저 장치

SM45C 강의 표면경화 실험은 Toshiba사의 연속파 1.5 kW CO₂ 레이저를 사용하였고, STD11 강의 표면경화 실험은 Panasonic에서 제작한 연속파 2kW CO₂ 레이저를 사용하였다.

1.5 kW 레이저의 집속장치는 초점거리 127mm인 ZnSe렌즈이며 시편 테이블은 원하는 위치에 자동으로 x, y, z축 조정이 가능한 Hybrid type 이다. 2 kW 레이저의 집속장치는 초점거리 127 mm인 ZnSe 렌즈이며 공작 테이블은 NC형이다.

4-3. 레이저 표면경화 실험

SM45C 강의 표면경화 실험은 주사속도(scanning speed)를 0.25~3.0 m/min의 속도범위에서 0.25 m/min 증가시켜 실험하였다. 표면의 산화를 방지하기 위해서 보호가스는 아르곤을 사용하였고, 유량은 15 kgf/cm²이었다. 에너지 밀도를 줄일 수 있고 경화폭과 깊이를 조절할 수 있는 비초점(defocused) 가우시안 빔을 사용하였다.

STD11 강의 실험은 레이저 표면경화의 가능변수 범위에서 이루어졌다. 레이저 출력은 2kW로 사용하였고, 빔 주사속도는 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4 m/min으로 표면경화 처리하였다. 재료 표면에 조사된 레이저 빔 직경은 5 mm이다. STD11 강은 SM45C에 비하여 표면경화가 잘 되지 않는 재료이고 열 용입량이 많아야 경화가 일어난다. 실험에서는 질소를 측면에서 수평과 60°경사지게 15 kgf/cm²의 압력으로 분사하였다.

4-4. 경화 깊이 측정 및 경도측정

표면 경화층의 깊이와 폭을 측정하기 위해서 광학현미경을 사용하였다. SM45C 강의 경화층을 5% Nital 용액으로 2초 동안 부식하였고, STD11 강의 시편은

대류열전달 계수 h 는 6.5 W/m² °C로 하였고, 레이저 빔이 조사될 때 보호가스(shielding gas)가 재료 표면 위에 15 kgf/cm²의 압력으로 불어주기 때문에 재료 상면부는 강제 대류로 가정하여 대류열전달 계수 75 W/m² °C를 사용하였다.

금속재료의 흡수율은 상온에서 10% 미만이나 용융온도에 도달했을 때 50% 이상으로 상승하고 금속의 증발온도에 도달해서는 90%이상까지 상승하는데 본 실험에서는 레이저 에너지 흡수를 증가시키기 위해서 코팅처리를 하였으므로 흡수율을 90%로 하여 계산을 하였다. 레이저 빔 출력은 레이저 빔 발전장치로부터 발전한 후에 반사거울을 거쳐 대기를 통과하여 재료표면에 도달했을 때 발전장치의 출력보다 적은 레이저 에너지가 재료표면에 도달된다. 타연구자들에 의해 제시된 20%의 레이저 에너지 감소가 있다고 가정하였다.^(4,19)

에너지 밀도를 줄일 수 있고 경화폭과 깊이를 조절할 수 있는 비초점(defocused) 가우시안 빔을 사용하였다. 재료 표면에 조사된 레이저 빔 직경을 5 mm로서 식(3)에 의해서 계산된 것이다. 기초 실험을 한 결과 비초점 가우시안 빔인 경우 레이저 빔 직경이 5 mm인 경우에 표면 경화가 잘 이루어 졌었다.

이동하는 레이저 빔이 입의 위치에서 이동거리를 이동속도로 나누어 시편이 받은 조사시간을 구할 수 있는데, 빔 직경 5mm와 주사속도 1 m/min로 조사할 경우 해석 대상이 받는 레이저 빔 조사시간은 0.3초이므로 0.01초 간격으로 해석 하였다. 냉각해석은 TTT 곡선상의 코(nose)부분을 통과하지 않고 마르텐사이트 조직이 생성될 수 있는 냉각속도를 확인하기 위해 1초까지 0.01초 간격으로 하였다.

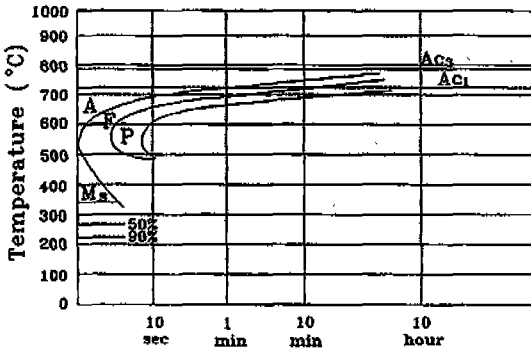


Fig. 3 Time-Temperature-Transformation of medium carbon steel.
(A:Austenite, F:Ferrite, P:Pearlite, Ms: Starting temp. of martensite)

Villela 액에 15초 동안 처리하였다. 마이크로 비이커스 경도시험기를 사용하여 깊이 방향으로 경도도 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

표면온도가 용융점 이하로 유지되면서 오스테나이트 온도이상으로 가열된 표면층은 기지 조직 내부로 열이 전달되어 공기 중에서 급속히 냉각되는 자기쿼칭(self-quenching) 작용에 의해 표면층만 경화되는 것이 레이저 표면 경화이다.

표면에서의 온도가 높게 나타나고 깊이가 증가함에 따라 온도가 급격히 감소되는데 이것은 레이저 열원이 재료표면에 조사될 때, 흡수된 레이저 빔은 급속격자의 음자 및 자유전자들과 충돌하여 10^{-13} 초 이내에 열로 바뀌어 급속표면의 온도를 증가시킨다.⁽²³⁾

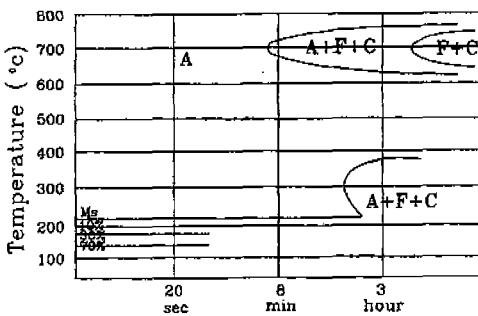


Fig. 4 Time-Temperature-Transformation of STD11.
(A:Austenite, F:Ferrite, C:Cementite)

Fig. 3은 중탄소강의 TTT 곡선을 도시한 것으로서, 중탄소강은 TTT 곡선상에서 코(nose) 부분이 약 550℃에 있으므로 840℃ 온도 이상의 안정한 오스테나이트 구역에서 코(nose) 부분을 통과하지 않고 Ms 온도인 약 200℃ 정도까지 140℃/sec 이상의 냉각속도를 가져야 마르텐사이트 조직이 생성되어 경화층을 얻을 수 있다.

수치해석에서 SM45C의 경우 경화층은 오스테나이트가 생성되는 AC1 온도 이상으로 가열된 영역으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 840℃를 SM45C의 상변태 온도로 택하였다.

Fig. 4은 STD11의 TTT곡선을 도시한 것으로 코(nose) 부분은 약 700℃에 있으며 비교적 냉각시간이 길어도 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있다. STD11의 일반적인 열처리 온도는 약 1050℃에서 공냉하므로 레이저 표면경화 처리 시에도 재료의 온도가 이 온도까지 가열되어야 한다. 레이저 빔을 조사하면 가공 재료표면의 온도는 증가하다 감소하므로 재료의 온도분포를 알면 경화층을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 주사속도 1.0 m/min, 빔직경 5mm로 표면 가열한 모델의 단면부(SM45C)에서 시간에 따른 냉

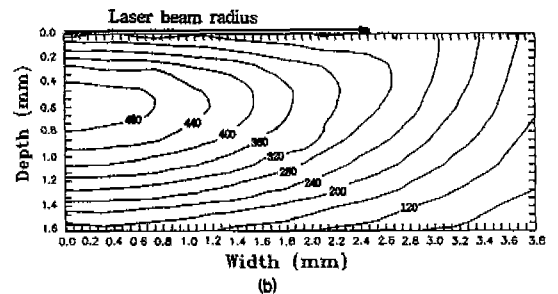
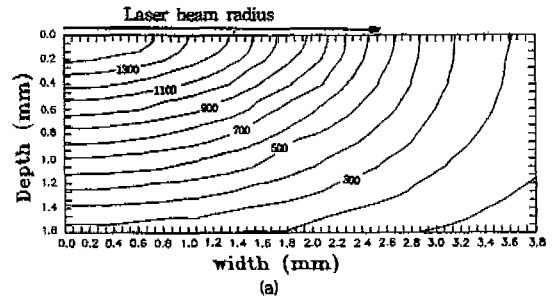


Fig. 5 Temperature field of SM45C at travel speed 1.0 m/min
(a) Maximum temperature distribution,
(b) 0.1 sec after heating

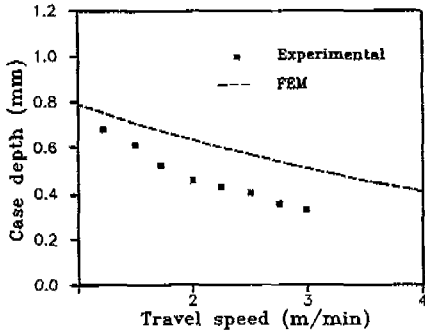


Fig. 6 Comparison of the experimental results with the calculated case depths in SM45C, spot size 5.0mm

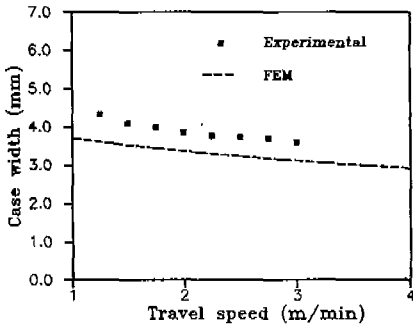


Fig. 7 Comparison of the experimental results with the calculated case width in SM45C, spot size 5.0mm

각온도 변화를 도기한 것이다. 냉각개시 후 0.01 초에서 오스테나이트 생성온도 이상으로 가열된 표면층은 0.8mm 정도이다. 0.1초 이내에 TTT 곡선상의 코(nose) 부분에 해당하는 550 °C 이하 온도로 냉각이 되기 때문에 마르텐사이트 조직이 발생됨을 예측할 수 있다.

Figs. 6과 7은 SM45C의 레이저 빔의 주사속도 1에서 3 m/min 변화에 대하여 생성된 경화폭과 경화깊이를 나타낸 것이다. 주사속도가 증가함에 따라 계산된 경화깊이는 실험결과보다 약간 크게 예측되었고 경화폭은 계산 결과가 실험 결과보다 약간 작게 나타났다. 이것은 레이저 빔의 주사속도가 증가할수록 레이저 빔이 재료 표면에서 표면 열원으로 작용하며 빔 중심부의 온도는 빔반경 방향의 온도보다 급격히 감소하기 때문에 수치적인 방법으로 구한 경화 깊이가 실험치에 비해서 약간 크게 나타난 것이다.

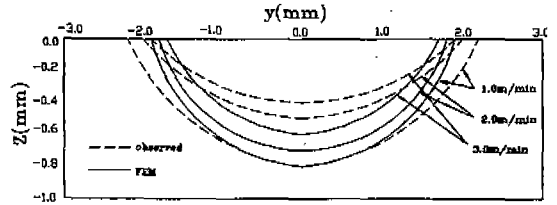


Fig. 8 Comparison between the calculated and observed hardening boundaries in SM45C

경화처리 가능 범위에서 주사속도가 감소할수록 경화가 일어나는 깊이는 증가함을 알 수 있고, 주사속도가 일정하게 증가함에 따라 경화층 깊이는 경화폭보다 급격히 감소함을 알 수 있는데 이것은 재료의 오스테나이트 생성온도가 레이저 빔의 정체시간(dwel time)에 비례하고 열 용입 깊이는 정체시간의 입방근에 비례하기 때문이다. 경화처리가 어려운 매우 느린 주사속도에서는 표면온도가 너무 증가되어 열이 기저조직 내부로 깊이 침투되므로 충분한 자기냉각(self-quenching)을 얻지 못하고 표면층만 용융하게 된다.

Fig. 8은 수치적으로 계산된 경화층과 실험에 의해 구한 경화층에 대한 단면도이다. 예측된 경화층이 실험결과와 비교적 일치함을 알 수 있다. 주사속도가 증가함에 따라 유한요소법에 의해 계산한 경화층이 실험에 의한 경화층보다 크게 나타나는데 속도가 증가하면 재료에서의 최고온도는 감소되고 레이저 빔 중심으로부터 뒤쪽으로 최고온도가 이동하게 되는데 이것을 유한요소법에서 고려하지 못했고 열원을 일정한 시간의 함수로 계산했기 때문에 실험에 의한 경화층보다 크게 나타난 것으로 생각된다.

SM45C에서는 금속표면에 인산염 코팅을 하여 레이저 에너지 흡수율을 증가시키도록 하였는데, 금속표면에 있는 인산염이 작은 판상의 물체를 형성하여 이것이 반사체 역할을 하여 표면 내에서 다중반사에 의해 흡수율이 증가하는 것으로 알려져 있다.⁽²²⁾

Fig. 9는 STD11 강의 주사속도에 따른 경화깊이를 나타낸 것으로 수치해석 결과와 실험결과가 서로 근사함을 알 수 있다. Fig. 10은 STD11 강의 주사속도에 따른 경화폭을 나타낸 것이다. 수치해석 결과와 실험결과를 비교하면 비교적 잘 일치한다.

본 실험에서 2kW CO₂ 레이저에 의해 얻을 수 있는 STD11의 경화깊이는 0.6 mm, 경화폭은 4 mm이었다. 이 실험결과는 SM45C를 인산염 코팅을 하여 1.5 kW 레

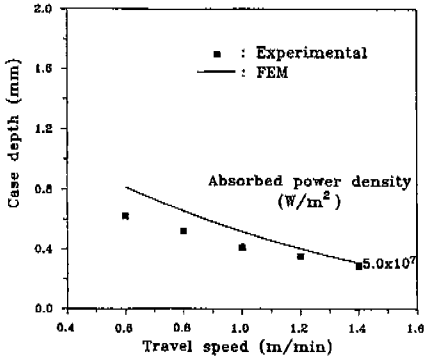


Fig. 9 Comparison of the experimental results with the calculated case depths in STD11

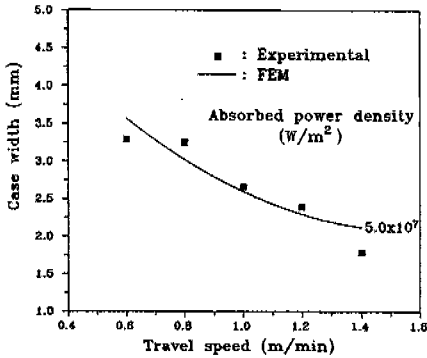


Fig. 10 Comparison of the experimental results with the calculated case widths in STD11

이저로 표면경화 처리한 결과와 비슷함을 알 수 있었다.

Fig. 11는 STD11 강 의 주사속도에 따라 경화된 단면도이다. 주사 속도가 증가함에 따라 유한요소법에 의해 계산한 경화폭과 경화깊이는 실험결과보다 약간 크게 나타났다.

Fig. 12는 레이저 표면경화 처리된 부분의 단면사진이고, Fig. 13은 마이크로 비커스 경도시험기를 사용

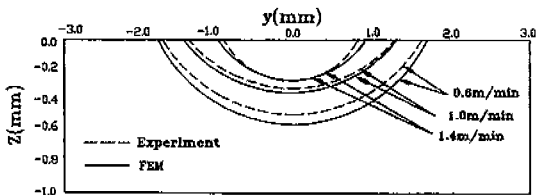


Fig. 11 Comparison between the calculated and observed hardening boundaries in STD11

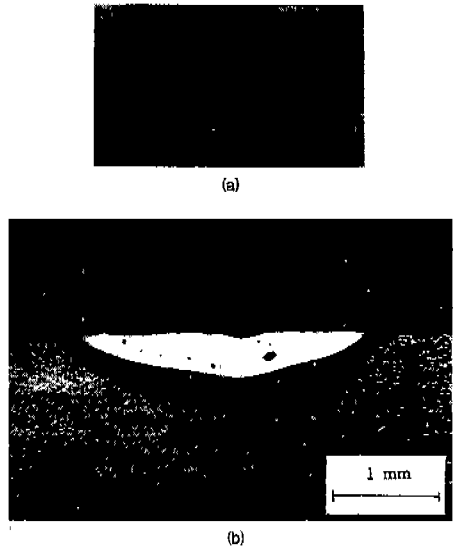


Fig. 12 Cross sections of hardened layer.
(a) SM45C, Laser power=1.5 kW, travel speed=1.0m/min ($\times 20$)
(b) STD11, Laser power=2 kW, travel speed=0.8 m/min. ($\times 20$)

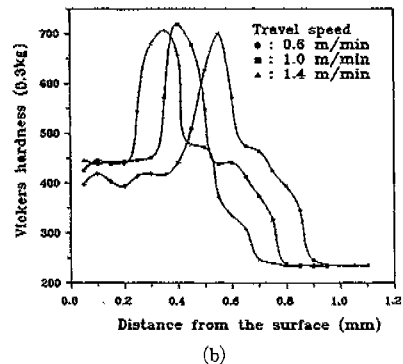
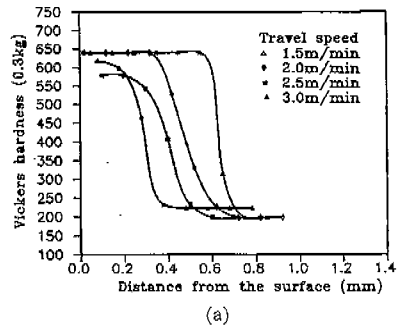


Fig. 13 Vickers microhardness distributions of laser hardened materials. (a) SM45C steel, (b) STD11 steel

하여 경도를 측정한 결과이다. SM45C 모재의 경도치는 200 Hv인데 레이저 경화처리 후의 경도는 580에서 650 Hv로 약 3배 증가함을 알 수 있다.

6. 결 론

CO₂ 레이저 표면경화에 대하여 유한요소법을 이용하여 경화깊이와 경화폭을 예측하였고, 중탄소강인 SM45C 과 합금공구강인 STD11 강을 레이저 표면 경화실험하여 이론 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정한 레이저 출력에 대하여 주사속도가 증가함에 따라 경화 깊이와 경화층은 일정하게 감소되고 예측 결과와 실험 결과가 잘 일치하였다.

(2) 주어진 레이저 표면 경화 조건(레이저 출력, 빔 크기, 주사속도, 경화할 재료의 물리적 성질 등)에 의해서 유한요소법으로 경화층의 깊이와 경화폭을 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 레이저 표면 경화된 SM45C 강의 경도는 모재보다 약 3배 증가하였고, 합금공구강 STD11 강은 2.5 배 증가함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 "1993년도 교육부 학술연구조성비 (ME 93-E-07)"의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. L. Branst, "Ring Groove Hardening Enhances Engine Life", Lasers and Applications, Oct.:16, 1985.
2. R. Walker, "Applying Multikilowatt CO2 Lasers in Industry", Lasers and Applications, Apr.:62-69, 1984.
3. I. C. Hawkes, "Practical Experience with Laser Heat Treatment", Proc. 4th Int. Conf., Lasers in Manufacturing, May:20-22, 1987.
4. J. D. Kim, "Prediction of the Penetration Depth in Laser Beam Welding", KSME J,

- Vol.4, No.1:32-39, 1990
5. J. Benedek, A. Shachral and L. Levin, "Case Hardening of Steel by a CO2 Laser Beam", Optics and Laser Technology, Oct.:247-253, 1980.
6. M. Lax, "Temperature Rise Induced by a Laser Beam", J. Appl. Phys., Vol.48, No.9:3919-3924, 1977.
7. H. E. Cline and T. R. Anthony, "Heat Treating and Melting Material with a Scanning Laser or Electron Beam", J. Appl. Phys., Vol.48, No.9:3895-3900, 1977.
8. H. Koebner, Industrial Applications of Lasers, John Wiley & Sons, 1984.
9. M. Bass, Laser Materials Processing, North-Holland, 1983.
10. A. K. Mathur and P. A. Molian, "Laser Heat Treatment of Cast Irons:Optimization of Process Variables", Trans. of ASME, Vol.107, July.:200-207, 1985.
11. P. J. Oakley, "Laser Heat Treatment and Surfacing Techniques", The Welding Institute, Research Report:4-10, 1981.
12. J. F. Ready, Industrial Applications of Lasers, Academic Press, 1978.
13. P. J. Oakely, "Review of Laser Heat Treatment and Surfacing Techniques", The Welding Institute, Research Report:1-25, 1985.
14. D. M. Hull and A. Stewart, "Laser Beam Profiles Principles and Definitions", Laser and Applications, Oct.:75-80, 1985.
15. S. S. Charschan, Lasers in Industry, van Nostrand Reinhold, 1972.
16. J. T. Luxon and D. E. Parker, Industrial Lasers and their Applications, Prentice-Hall, 1985.
17. American Institute of Physics Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill, 1972.
18. S. L. Engel, "Basic of Laser Heat Treating", GTE Sylvania, Inc., Electro-Optics

- Organization, Mar.:149-171, 1976.
19. G. H. Harth, W.C. Leslie, V. G. Gregson and B. A. Sanders, "Laser Heat Treating of Steel", Source Book on Applications of the Laser in Metalworking, ASM:172-178, 1976.
 20. H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Oxford U. P., 2nd ed., 1959.
 21. H. R. Shercliff et al., "The Prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening", Metallurgical Trans. A, Vol.22A, Oct.:2459-2466, 1971.
 22. S. D. Ferris, H. J. Leamy and J. M. Poate, Laser-Solid Interactions and Laser Processing-1978, American Institute of Physics, 1978.
 23. O. Sandven, "Laser Surface Transformation Hardening", Metals Handbook, IXth ed., Vol.4, American Society for Metals, Ohio:507-517, 1978.