

레이저 표면경화처리에서 빔의 형태가 경화층 크기에 미치는 영향에 관한 연구

김재웅*

A Study on the Effect of Beam Mode on the Size of Hardened Zone in Laser Surface Hardening

J. W. Kim*

ABSTRACT

Analytical models for the prediction of the size of hardened zone in laser surface hardening are presented. The models are based on the solutions to the problem of three-dimensional heat flow in plates with infinite thickness. The validity of the model was tested on medium carbon steel for Gaussian mode of beam. Then the model for rectangular beam was used for the prediction of the size of hardened zone on various hardening process parameters. From the calculation results it appeared that the size and shape of the hardened zone are strongly dependent on process parameters such as beam mode, beam size, and traverse speed.

Key Words : Laser Surface Hardening(레이저 표면경화), Laser Beam(레이저 빔), Transformation Hardening(변태경화), Medium Carbon Steel(중탄소강), Gaussian Beam(가우시안 빔), Rectangular Beam(사각형 빔), 3-Dimensional Steady State(3차원 정상상태), Hardened Zone(경화층)

기호설명

- | | |
|---|---|
| a : half width of rectangular beam in x-direction | \hat{r} : effective radius of Gaussian beam |
| b : half width of rectangular beam in y-direction | x, y, z : coordinate system of moving heat source |
| c : specific heat of material | A, B, X, Y, Z, R : dimensionless parameters |
| d_m : maximum hardened depth | A_b : area of rectangular beam (=4ab) |
| Q_G : heat input density of Gaussian beam | A_s : start temperature of austenization |
| Q_R : heat input density of rectangular beam | D_b : effective diameter of Gaussian beam (=2r) |
| | K : thermal conductivity of material |
| | Q : power of laser beam |

* 영남대학교 기계공학과(중신회원)

T_0 : initial temperature of material
 U : traverse speed of beam
 W_s : width of hardened zone at surface

α : thermal diffusivity
 η : absorptivity of material
 ρ : density of material

1. 서 론

강재와 주철재료로 만들어진 기계부품의 레이저 표면경화(laser surface hardening) 처리는 고밀도 에너지 빔을 이용한 새로운 표면경화 기술로서 레이저 빔을 부품표면에 조사하면서 이동시키면 레이저 빔이 조사된 표면부분이 급속 가열되었다가 내부급속으로의 열전도에 의해 급속 냉각되는 자기담금질(self-quenching) 효과로 변태경화(transformation hardening)가 일어나 표면층의 미소 깊이에 높은 경도를 얻는 방법이다. 이 기술은 화염경화나 고주파 표면경화등 기존 방법에 비해 열변형이 매우 작고, 복잡한 형상 및 국부적인 표면경화가 가능하며, 경화깊이의 조절이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 또한 가공속도가 빠르고 자동화 적용이 용이하면서도 향상된 경도, 내마모성, 내피로성등의 기계적 성질을 얻을 수 있어 실린더 라이너, 캠 샤프트, 기어 그리고 피스톤 링 홈(piston ring groove) 등의 표면경화에 적용되고 있다(1, 2).

레이저 표면경화에서 공정변수들은 레이저 출력, 레이저 빔의 크기 및 형태(mode), 빔 이송속도, 급속의 성질등을 들 수 있으며, 이들의 적절한 조합이 이루어질 때 만족한 경화층을 얻을 수 있다(3). 공정변수들이 표면경화층의 크기에 미치는 영향을 해석하기 위하여 실험 또는 수학적 모델을 이용하여 연구되어 왔다. Mathur(1)는 실험을 통하여 레이저 출력밀도분포가 링(ring) 모양의 형태(TEM₀₁ mode)와 가우시안(Gaussian) 형태(TEM₀₀ mode)인 경우의 공정을 해석하였으며, Molian(2)은 진동하는 빔(oscillated beam)과 사각형 빔(square beam)에 대해 역시 실험을 통하여 해석하였다.

수학적 방법은 열전도 이론에 의한 온도분포를 해석하므로써 연구되었는데, Lax(4)는 정지된 가우시안 빔에 의한 온도방정식을 제안하였고, Sanders(5)는 이동하는 가우시안 빔에 대해 공정을 해석하였다. Arata(6)는 정상상태의 여러가지 빔에 대한 온도방정식을 이용하여 공정을 해석하였는데 주로 사각형 면적을 가진 2차원-

가우시안(rectangular Gaussian) 형태의 빔에 의한 경화층 크기와 연화부 크기에 대해 연구하였다. Na(7)는 유한요소법을 이용한 수치모델을 이용하여 가우시안 빔의 직경이 경화층 크기에 미치는 영향을 해석하였다. 수치모델에 의한 2차원 열유동해석은 온도의존 물성치를 적용할 수 있다는 점과 임의의 빔형태를 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있는 반면 빔의 이송속도가 열전도 속도보다 빠른 경우에 적용할 수 있으며, 임의의 위치에 대한 온도이력을 구할 경우에도 전체영역을 계산해야 하므로 많은 계산시간이 소요되는 불편함도 있다. 그러나 표면경화 처리에 대한 경화깊이의 실시간 제어, 표면온도의 제어등과 같은 공정제어와 온도측정 센서의 최적위치(sensor location) 선정등을 해석할 경우에는 임의위치에 대한 온도 계산이 가능하거나 계산시간이 짧은 열유동 해석방법이 요구된다. 이에 적합한 것이 해석적인 방법이며 레이저 빔을 이용한 변태경화처리시 높은 경도를 얻고 표면형상의 변형을 초래하지 않도록 그 최고온도가 용융점 이하가 되는 조건을 사용하므로 열전도 이론에 의한 해석적인 방법이 실험결과와 잘 일치되는 것을 볼 수 있다(4, 6).

본 연구에서는 가우시안 빔과 사각형 빔에 의한 반무한고체(semi-infinite body)에서의 해석적 모델을 이용하여 빔의 형태 및 크기가 경화층 크기에 미치는 영향을 해석하였으며, 특히 지금까지의 모델(4-7)과는 달리 사각형 빔에 의한 경화층 크기의 해석에서 사각형 빔의 가로 대 세로의 비(aspect ratio)에 따른 변화를 해석하였다. 위 모델에 의한 계산결과를 Na(7, 8)의 실험결과와 비교 검토하였다. 사각형 빔은 균일한 경화층 깊이를 얻는데 적합하며, 가로 대 세로의 비에 있어서 최대의 경화층 폭을 나타내는 값이 존재하는 것을 볼 수 있었다.

2. 이론해석

강재나 주철재료의 레이저에 의한 표면경화는 레이저 빔의 출력, 이송속도, 빔 형태, 출력밀도 혹은 빔의

크기등의 인자를 조절하여 재료표면에 조사시키므로써 급속하게 가열하였다가 내부급속에 의해 급속 냉각되는 자기담금질 효과로 마르텐사이트의 표면조직이 형성되어 경화시키는 방법이다. 레이저 표면경화에서는 최고 도달 온도가 용융점 이하가 되도록 하므로 빔의 출력밀도는 용접이나 절단의 경우에 비해 적게 선정된다. 표면경화에 적합한 출력밀도를 얻기 위한 방법으로 재료표면이 집광렌즈의 초점거리를 벗어나게 하는 방법(defocused beam), 빔을 경화방향에 직각으로 고속 요동시키는 방법(oscillated beam), 오목 반사경으로 다수의 평면거울(segment mirror)을 조합하여 출력밀도를 균일하게 집광시키는 방법(integrated beam)을 사용하며, 또한 균일한 출력밀도의 원형 또는 사각형 빔을 만드는 방법으로 켈라이도스코프(kaleidoscope)를 이용한 방법이 있다⁽⁹⁾. 이렇듯 레이저 빔은 적절한 광학계의 설계에 의해 출력밀도의 분포가 조절될 수 있는 장점을 가지고 있으며 균일한 출력밀도를 갖는 빔에 의한 표면경화층은 경화깊이가 균일한 평평한 모양으로 만들어지므로 다수의 빔 조사(multi-pass)에 의한 경화깊이가 전체적으로 균일한 결과를 얻을 수 있어 표면경화처리에 적합한 빔으로 여겨지고 있다.

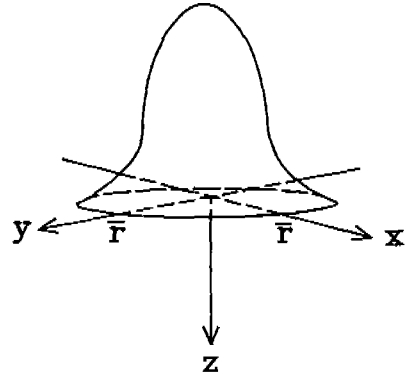
본 해석에서는 여러가지 가능한 빔의 형태중에서 일반 레이저 가공기에서 쉽게 얻을 수 있는 가우시안 형태와 표면경화에 적합한 빔으로 여겨지는 사각형 빔을 열원으로 하였으며, Fig.1에 레이저 빔의 출력형태와 좌표계를 나타내었다. 여기서 좌표계(x, y, z)는 표면에서 빔의 중심을 원점으로 하는 이동 좌표계이며, 빔은 x축 방향으로 U의 속도로 진행한다. 분포열원을 점열원의 집합체로 볼 수 있으며, 임의의 시간 t'에 미소시간 dt'동안 발생한 점열원 q'의 열량이 이후 임의의 시간 t에 임의의 위치에 미치는 온도 증분량은 무한영역에서 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$dT = \frac{q' dt'}{8\rho c [\pi\alpha(t-t')]^{3/2}} \exp \left[-\frac{\{(x+U(t-t'))^2+y^2+z^2\}}{4\alpha(t-t')} \right] \quad (1)$$

여기서 α 는 열확산계수(thermal diffusivity)이며, ρ 와 c 는 각각 밀도와 비열이다.

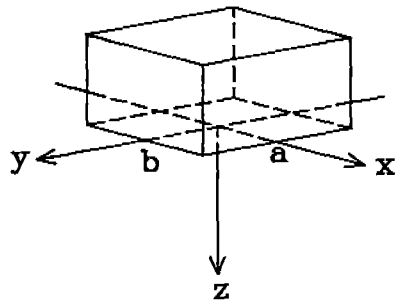
열원이 x-y평면에 분포된 경우에 모재로 입열된 에너

$$q = \frac{3Q}{\pi \bar{r}^2} \exp\left(-3\frac{x^2+y^2}{\bar{r}^2}\right)$$



(a) Gaussian beam

$$q = \frac{Q}{4ab}$$



(b) Rectangular beam

Fig.1 Beam mode and coordinate system

지 밀도는 $q_i(x, y)$ 로 표현할 수 있고, 이때 열원분포내의 임의의 위치 (x', y') 에 입열된 미소열량 $q_i(x', y')$ $dx'dy'$ 에 의한 온도 증분량은 반 무한고체에서 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$dT = \frac{q_i(x', y') dt' dx' dy'}{4\rho c [\pi\alpha(t-t')]^{3/2}} \exp \left[-\frac{\{(x-x')+U(t-t')\}^2+(y-y')^2+z^2}{4\alpha(t-t')} \right] \quad (2)$$

모재로 입열된 에너지 밀도 $q_i(x, y)$ 는 가우시안 빔의 입열밀도(q_G)와 사각형 빔의 입열밀도(q_R)로써 각각 Fig. 1에 표시한 레이저 빔 출력밀도에 모재로 흡수된 비율을 적용하므로써 다음과 같이 나타낼 수 있다(6, 7).

$$q_G(x, y) = \frac{3\eta Q}{\pi \bar{r}^2} \exp\left\{-3 \frac{x^2+y^2}{\bar{r}^2}\right\} \quad (3)$$

$$q_R(x, y) = \frac{\eta Q}{4ab}, \quad -a \leq x \leq a, \quad -b \leq y \leq b \quad (4)$$

여기서 Q 는 레이저 출력, η 는 재료의 흡수율(absorptivity)이며 \bar{r} 는 가우시안 빔에서 빔 출력의 95%를 포함하는 유효반지름이고 $2a$ 와 $2b$ 는 각각 사각형 빔의 x -방향과 y -방향 길이를 나타낸다. (3)식과 (4)식을 (2)식에 적용하므로써 각각 가우시안 빔과 사각형 빔에 의한 모재의 온도분포식을 구할 수 있다. 식을 간단히 하기 위해서 $r = \bar{r}/\sqrt{3}$ 로 하고,

$$X = \frac{Ux}{2a}, \quad Y = \frac{Uy}{2a}, \quad Z = \frac{Uz}{2a}, \quad \frac{Ur}{2a} \quad \text{로 놓고}$$

(3)식을 (2)식에 대입하여 적분을 취하고, 가우시안 열원에 의한 3차원 정상상태의 온도방정식을 구하기 위해 $t \rightarrow \infty$ 로 적용하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$T = T_0 + \frac{\eta QU}{(2\pi)^{3/2} K \alpha} \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{R^2+2u} \right\} \frac{1}{\sqrt{u}} \exp\left\{-\frac{(X+u)^2+Y^2}{R^2+2u} - \frac{Z^2}{2u}\right\} du \quad (5)$$

여기서 T_0 는 재료의 초기온도(initial temperature)이고 K 는 열전도도(thermal conductivity)이며, u 는 시간을 성분으로 하는 적분 매개변수이다.

사각형 빔에 대해서도 마찬가지로

$$A = \frac{Ua}{2a}, \quad B = \frac{Ub}{2a} \quad \text{로 놓고 식(4)를 (2)에 대입하여}$$

적분을 취하고 $t \rightarrow \infty$ 로 적용하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$T = T_0 + \frac{\eta QU}{32(2\pi)^{1/2} ABK\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{u}} \exp\left\{-\frac{Z^2}{2u}\right\} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{Y+B}{\sqrt{2u}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{Y-B}{\sqrt{2u}}\right) \right\} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{X+A+u}{\sqrt{2u}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{X-A+u}{\sqrt{2u}}\right) \right\} du \quad (6)$$

여기서 $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$ 이다.

식(5)와 (6)은 각각 가우시안 빔과 사각형 빔에 의한 모재의 온도방정식이며, 이 식들로부터 임의의 위치에서 빔의 이송속도(U)와 레이저 빔 출력(Q)에 따른 온도분포를 컴퓨터를 이용한 적분으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 정해진 입열량에 대해 이송속도와 빔의 크기를 변화시켜 계산하였다. 표면경화 재료는 실험치(7, 8)와 비교하기 위해 AISI 1045 강재를 대상으로 하였으며, 온도 의존성 물성치들은 Table 1에 나타낸 바와 같이 상온에서 용융점까지의 평균치를 계산에 적용하였다. 또한 재료의 레이저 흡수율은 레이저 가공에서 중요한 변수이며, 온도, 재료의 표면상태, 레이저 파장등에 따라 크게 변화될 수 있으나, 연삭된 표면의 중탄소강을 대상으로 하였을 경우 CO₂레이저의 흡수율은 15-16%로 측정된 것을 볼 수 있어, (6, 7) 1000W의 CO₂레이저 출력에 대해 흡수율(7) 15%를 계산에 적용하였다.

Table 1. Physical properties of AISI 1045 and process parameters used in computation (6)

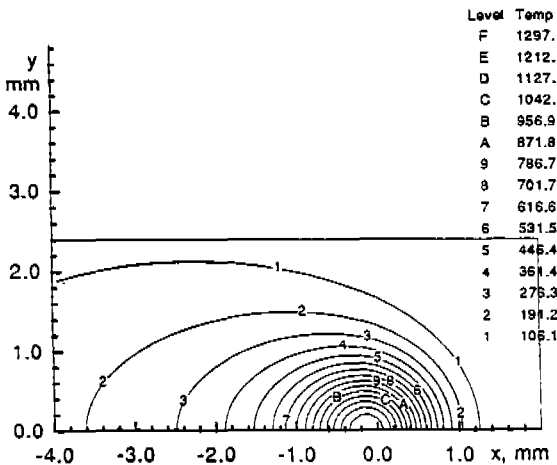
Thermal conductivity(K)	: 0.0086 cal/sec mm °C
Thermal diffusivity(α)	: 7.4 mm ² /sec
Initial temperature(T_0)	: 20°C
Melting temperature	: 1500°C
Heat input(ηQ)	: 150W

3. 결과 및 고찰

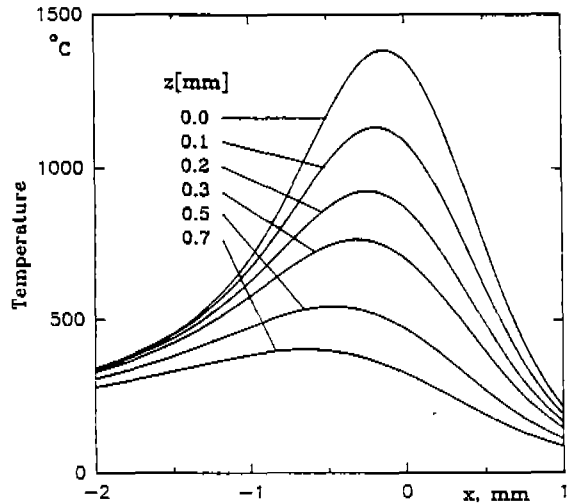
Fig. 2는 가우시안 빔에 의한 재료표면 및 내부의 온도분포를 나타낸다. 레이저 빔에 의한 표면경화는 재료 표면 부근의 온도가 오오스테나이트 생성온도(A_s)보다

높이 가열되었다가 급속 냉각되면서 마르텐사이트 조직이 형성되어 이루어진다. 그러나 상변태온도 A_s 는 가열 속도에 따라 변화하며, 가열속도가 빠를수록 높아진다. 이는 가열속도가 빠를수록 α -철이 오오스테나이트로 변태되기 전에 과열될 수 있다는 것과 탄소의 용해가 보다 높은 온도에서 일어나는 것이 원인으로 알려져 있으며(11), 팽창율 또는 비저항의 측정을 통한 실험적 방법에 의해 가열속도가 클수록 상변태온도가 높아지는 것으로 나타났다(12). Fig. 2(b)에서 x좌표는 빔의 중심을 원점으로 하는 이동좌표계이므로 온도 증가부분에 대한 단위길이당 온도변화량에 빔 이송속도를 곱하므로써 가열속도를 구할 수 있다. 따라서 최고온도가 높을수록 가열속도는 더욱 크게된다. 이렇게 빠른 가열속도에 의한 상변태온도 A_s 는 평형상태의 상변태온도(A_{c1})인 723°C보다 높게되며, 증탄소강에 대하여 Na(13)와 Arata(6)는 각각 830°C와 850°C를 레이저 표면경화에서의 상변태온도로 제안하였고, 상변태온도 이상으로 가열된 부분은 이후 냉각과정을 거쳐 마르텐사이트 조직으로 변태하여 경화한다는 것을 보였다. 본 계산결과로 부터 경화층의 크기를 결정하는데 상변태온도 A_s 는 850°C를 적용하였으며, 용융온도는 1500°C로 하여 해석하였다.

Fig. 3은 가우시안 빔에 의한 레이저 표면경화에서 계산에 의한 경화층의 크기와 실험치(7, 8)를 비교한 것으로, 빔의 유효직경(Db)과 빔 이송속도(U)의 변화에 따른 경화층의 크기 변화를 나타낸다. 비교결과 특히 표면용융(surface melting)이 일어나지 않은 영역에서



(a) Isothermal lines of surface



(b) Thermal cycles in x-z plane

Fig. 2 Temperature distribution of laser hardened AISI 1045 by Gaussian beam (Db=2.2mm, U=1.0m/min)

서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 표면용융이 발생한 조건에서는 계산치가 실험치에 비해 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 실제로 용융이 발생할 때 잠열에 의해 용융부의 온도 증가가 저하되는 반면 계산에서는 용융에 의한 잠열을 고려하지 않아 실제보다 높은 온도분포가 나타난 것으로 사료된다. 실제의 표면경화 조건으로써 제품의 정밀도 유지 및 기계적 성질의 향상을 위하여 표면용융이 일어나지 않도록 선정하는 것을 고려하면 본 이론식이 경화층 크기를 예측하는데 잘 적용될 수 있음을 알 수 있다. 그림으로부터 동일한 빔 이송속도에서 빔의 직경이 커질수록 경화층 폭은 점점 넓어져 최고치에 도달한 다음 감소하며, 경화층 깊이는 단순 감소하는 것을 볼 수 있어 빔 직경이 경화층 크기에 영향을 크게 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 식(6)에 의해 계산된 재료표면 및 내부의 온도분포를 나타내며, 열원의 형태는 정사각형 빔을 적용한 것이다. Fig. 4(a)에서 표면의 온도분포중 상변태온도(850°C)의 등온선 형태가 사각형에 근사하는 것이 보이며, Fig. 4(b)에서는 가우시안 빔(Fig. 2(b))에 비해 최고온도 도달위치가 빔의 뒷쪽에 나타나는 것을 볼 수 있다.

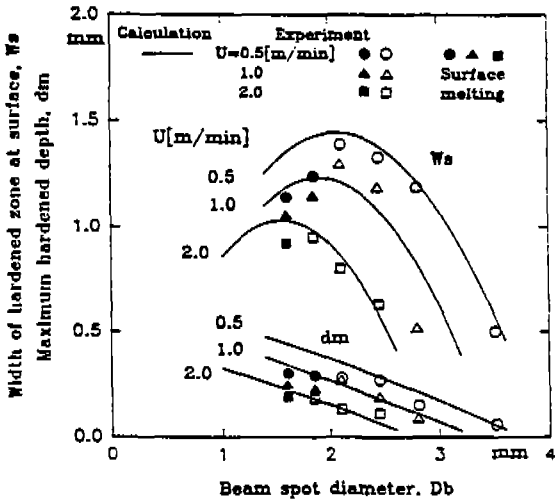
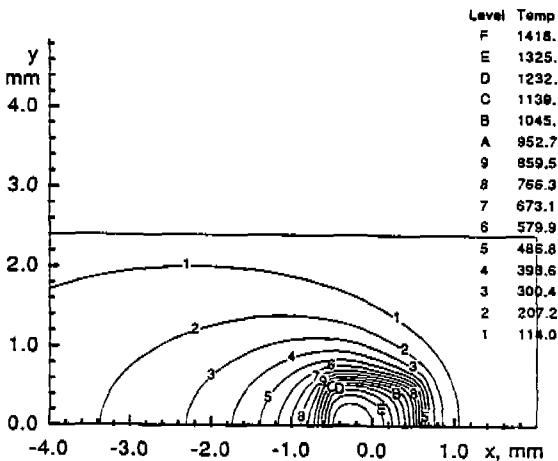
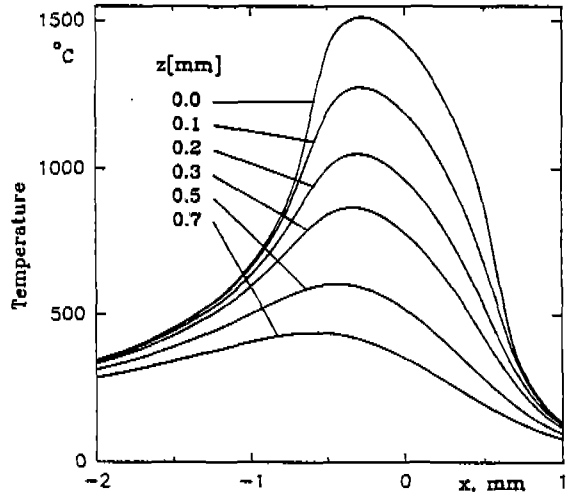


Fig. 3 Comparison of calculated width and depth of hardened zone with experimental ones of Na^(7, 8) (Heat input=150W)

Fig. 5는 정사각형 빔에서 빔의 크기와 이송속도에 따른 경화층의 크기를 나타낸다. 여기서 이송속도가 0.5, 1.0, 2.0 m/min에 대해 빔의 크기(2a)가 각각 1.3, 1.2, 1.1mm 보다 큰 경우 표면용융이 발생하지 않았다. 경화층 폭의 최대값이 가우시안 빔의 경우보다 큰 것으로 나타나, 적정조건을 선정하면 넓은 면적을 경화처리해야 하는 경우에 보다 효율적인 처리가 가능함을 알 수 있다. 또한 빔의 형태를 직사각형 모양으로



(a) Isothermal lines of surface



(b) Thermal cycle in x-z plane

Fig. 4 Temperature distribution of laser hardened AISI 1045 by rectangular beam ($A_b = 1.41\text{mm}^2$, $b/a = 1.0$, $U = 1.0\text{m/min}$)

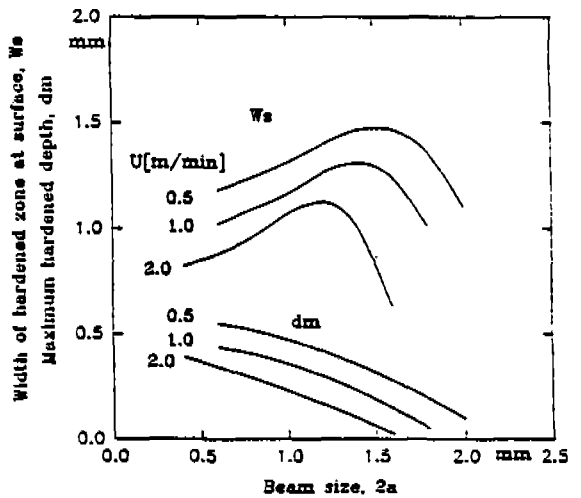


Fig. 5 Calculated width and depth of hardened zone by rectangular beam ($b/a = 1.0$)

만들므로써 더욱 큰 폭의 경화층을 예상할 수 있으며, 이때의 계산결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 빔의 면적(A_b)을 정해두고 빔의 가로(y-방향크기) 대 세로(x-방향크기)의 비율(aspect ratio : b/a)을 변화시켰을 때의 경화층 크기를 나타내었다.

Fig. 6은 빔의 이송속도가 0.5 m/min인 경우로, 빔 면적(Ab)이 2.56, 1.96 mm^2 인 조건은 표면용융이 없는 상태로 직사각형비가 증가함에 따라 경화층 폭이 증가하다 최고치에 도달한 이후 감소하는 결과를 보이고 있다. 빔 면적이 1.41 mm^2 인 조건은 직사각형비가 3.0까지는 표면용융이 발생하며 더 큰 비율에서는 표면용융이 발생하지 않았다. 여기서 경화층 폭의 최대치는 비교적 큰 직사각형비에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 3.0이내의 직사각형비에 의한 경화층 폭의 증가는 단순증가하므로, 최대의 경화층 폭은 정사각형 빔에서 최대의 경화층 폭을 얻을 수 있는 빔의 면적(Ab)에 의해 결정된다. 직사각형비가 2.0일때 정사각형 빔에 의한 경우보다 약 20%의 경화층 폭이 증가되었다.

Fig. 7은 빔의 이송속도가 1.0 m/min인 경우로, 빔 면적이 1.96, 1.41 mm^2 인 조건은 표면용융이 없는 상태, 1.0 mm^2 인 조건은 직사각형비가 5.0까지 표면용융이 발생한 경우이다. 여기서도 Fig. 6과 비슷한 결과를 나타내었으며, 직사각형비가 2.0일 때 정사각형 빔에 의한 경우보다 약 25% 증가된 경화층 폭을 나타내었다. 따라서 사각형 빔에 의한 레이저 표면경화에서 적절한 빔 면적과 직사각형 비를 선정하므로써 가우시안 빔에 의한 경우보다 훨씬 큰 경화층 폭을 얻을 수 있다.

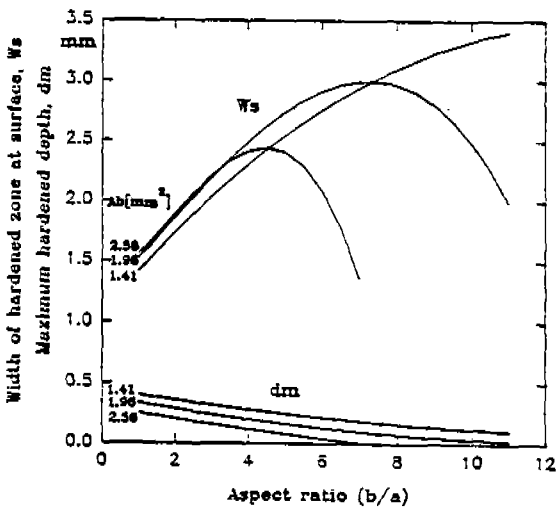


Fig. 6 Effect of aspect ratio of rectangular beam on the hardened width and depth ($U=0.5m/min$)

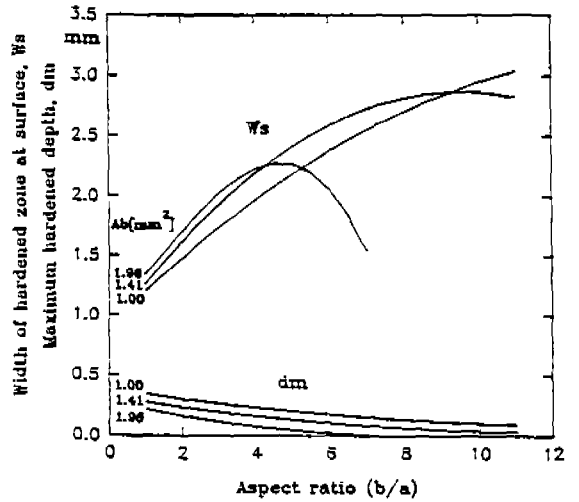
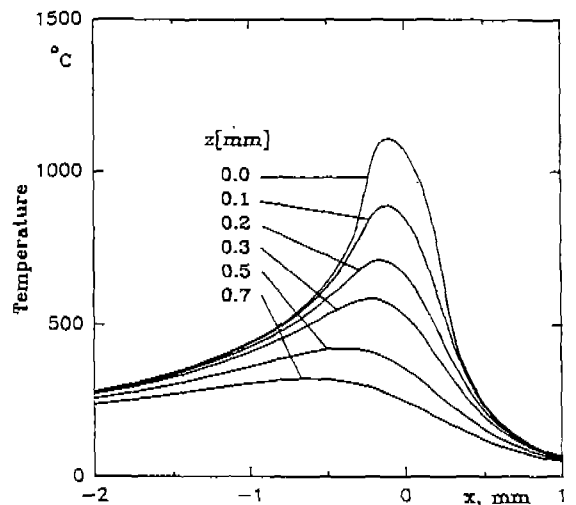
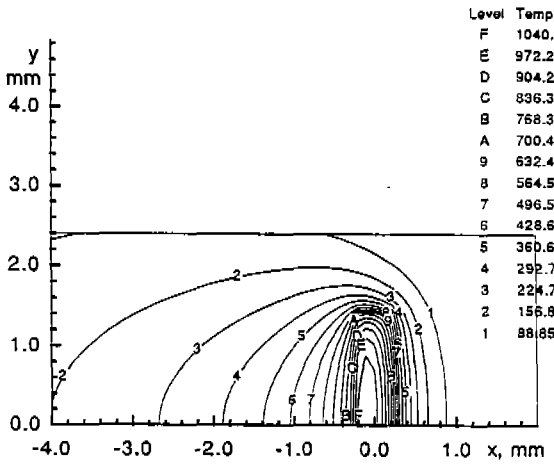


Fig. 7 Effect of aspect ratio of rectangular beam on the hardened width and depth ($U=1.0m/min$)

Fig. 8은 빔 이송속도 1.0 m/min, 빔 면적 1.41 mm^2 그리고 직사각형비가 6.0인 경우의 재료표면과 내부의 온도분포이다. 표면에서의 A_s 온도 구역이 빔 모양에 따라 y -방향으로 길게 나타나며 표면중심($y=z=0.0$)에서의 온도이력에서 최고온도가 같은 조건의 정사각형 빔의 경우(Fig. 4(b))보다 훨씬 적은 것을 볼 수 있다. 이것은 빔의 면적이 같더라도 재료표면이 빔



(a) Isothermal lines of surface



(b) Thermal cycles in x-z plane

Fig. 8 Temperature distribution of laser hardened AISI 1045 by rectangular beam ($Ab = 1.41\text{mm}^2$, $b/a = 6.0$, $U = 1.0\text{m/min}$)

과 접촉하는 시간이 짧아진 것에 의한 결과이다. 따라서 직사각형 빔에 의해 표면용융을 일으키지 않고 넓은 경화층 폭을 얻을 수 있음을 나타낸다. 또한 Fig. 9에서와 같이 사각형 빔은 경화층이 평평한 형상을 나타내므로 다수의 빔 조사(multi-pass)에 의한 경우에도 전체적으로 균일한 경화깊이를 얻을 수 있다.

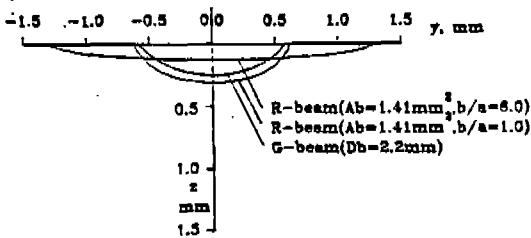


Fig. 9 Hardened zone shapes of material by Gaussian (G) and rectangular (R) beams ($U = 1.0\text{m/min}$)

4. 결론

열전도 이론에 의한 해석해를 이용하여 빔의 형태에

따른 경화층의 크기를 해석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이론식에서 표면용융에 의한 잠열효과를 고려하지 못하여 표면용융이 발생한 경우 계산된 경화층 크기는 실험치 보다 크게 나타났으나, 실제 사용 조건은 표면용융이 발생하지 않는 경우이며, 이때 경화층 크기는 계산치와 실험치가 잘 일치되는 것으로 나타났다.
- (2) 정사각형 빔에 의한 경화층 폭은 가우시안 빔의 경우와 마찬가지로 주어진 빔 이송속도에서 빔의 크기가 커질수록 증가하다가 최고치에 도달한 다음 감소하는 결과를 나타내었다.
- (3) 직사각형비에 따른 경화층 폭은 비교적 큰 형상비에서 최대치를 나타내었으며, 직사각형비가 2.0일때 정사각형 빔에 비해 20-25%의 경화층 폭 증가를 나타내었다.
- (4) 사각형 빔에 의한 경화층 깊이는 가우시안 빔에 비하여 균일한 형상을 나타내어 표면경화처리에 적합하며, 적절한 빔 면적과 형상비를 선정하므로써 보다 효율적인 경화처리를 기대할 수 있다.

후 기

이 논문은 1992년도 영남대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Mathur, A. K. and Molian, P. A., "Laser Heat Treatment of Cast Irons-Optimization of Process Variables : Part 1", Trans. of ASME, J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, pp.200~207, 1985
2. Molian, P. A. and Mathur, A. K., "Laser Heat Treatment of Cast Irons-Optimization of Process Variables : Part 2", Trans. of ASME, J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 108, pp.233~239, 1986
3. Ashby, M. F. and Easterling, K. E., "The Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beams-I. Hypo-Eutectoid Steels", Acta Metallurgica, Vol. 32, No. 11, pp.1935

- ~1948, 1984
4. Lax, M., "Temperature Rise Induced by a Laser Beam", J. of Applied Physics, Vol. 48, No. 9, pp.3919~3924, 1977
 5. Sanders, D. J., "Temperature Distributions Produced by Scanning Gaussian Laser Beams", Applied Optics, Vol. 23, No. 1, pp.30~35, 1984
 6. Arata, Y., Inoue, K., Maruo, H. and Miyamoto, I., "Application of Laser for Material Processing -Heat Flow in Laser Hardening", IIW Doc IV-241-78, 1978
 7. Na, S. J., Kim, S. D., Lee, K. E. and Kim, T. K., "Optimal Beam Spot Diameter for the Laser Surface Hardening of a Medium Carbon Steel", Proc. Laser Materials Processing Symp. ICALEO86 Arlington VA, pp.113~119, 1986
 8. 나석주, "레이저 빔을 이용한 용접 및 표면경화 처리에 관한 연구", 연구보고서, 한국과학기술원, 1986
 9. Shono, S., Ishide, T. and Mega, M. "Uniforming of Laser Beam Distribution and its Application to Surface Treatment", IIW Doc IV-450-88, 1988
 10. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, pp.266-270, 1959
 11. Easterling, K., Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths & Co Ltd., pp.112~115, 1983
 12. Feuerstein, W. J. and Smith, W. K., "Elevation of Critical Temperatures in Steel by High Heating Rates", Trans. of ASM, Vol. 46, pp.1270~1281, 1954
 13. Na, S. J. and Yang, Y. S., "Influence of Heating Rate on the Laser Surface Hardening of a Medium Carbon Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 34, pp.319-330, 1988