

# 레이저 표면경화에서 경화깊이 예측

## Prediction of the Hardening Depth in Laser Beam Hardening

서 정원\*(인하대학교 대학원) 김 재도(인하대학교)

### 1. 서론

레이저는 지향성이 매우 높기 때문에 아주 작은 면적 내에 레이저 빔 에너지를 모을 수 있다. 따라서 매우 큰 에너지 밀도를 필요로 하는 심용입 용접(deep penetration welding), 절단(cutting), 천공(drilling), 표면경화(transformation hardening), 레이저 그레이징 등 정밀가공에 이용되고 있다. 고출력 레이저를 이용한 표면경화 기술은 국부 처리가 가능하고, 가공재료의 뒤뜰림이 거의 없으며, 표면경화 깊이를 조절할 수 있다. 또한 표면경화후 기계가공이 필요없고, 복잡한 형상 처리가 가능하며, 다른 경화법에 비하여 처리속도가 빠른 장점이 있다. 레이저에 의한 재료 가공의 주요 변수는 레이저 출력(power), 주사속도(scanning speed), 레이저 빔 크기(spot size), 에너지 분포 및 흡수율 등이다.

점열원(point heat source)과 선열원(line heat source)에 대한 온도분포의 일반해는 1941년 Rosental<sup>(1)</sup>에 의해 열 유속식이 처음 제시된 이후 정지 혹은 저속 주사 빔에만 사용될 수 있는 Lax<sup>(2)</sup>의 시간 독립 열 방정식(time independent heat equation)과 레이저 빔 에너지가 모두 재료의 표면 내에서 흡수된다고 가정한 Cline and Anthony<sup>(3)</sup>의 표면흡수 해(surface absorption solution)가 제시되었다. D.J.Sanders<sup>(4)</sup>는 고형체(solid target)내에서 주사 가우시안 레이저 빔의 흡수에 의해서 발생하는 일반적인 해를 제시하였다.

본 연구에서는 이동 열원에 대한 수치해석 방법과 FEM에 의한 레이저 열원의 온도 분포를 구하여 경화 깊이와 경화 폭을 예측할 수 있는 모델을 구성하는데 있다.

### 2. 이론해석

#### 2-1 해석적인 방법

금속의 표면경화는 고출력 레이저 빔이 이동함으로써 금속 표면층의 가열과 동시에 급격한 냉각으로 인한 금속 조직의 변화 때문에 발생된다. 금속에서는 온도분포와 경화 사이에 관계가 존재하게 된다. 이때 온도분포는 주사속도, 레이저 빔 반경, 레이저 출력에 의존한다. 빠르게 움직이는 고출력 열유속은 고체 내에 열전도에 의해 지배받는다. 고형체내에서 주사 가우시안 빔의 흡수에 의하여 발생하는 온도 상승의 일반해가 D.J. Sanders에 의하여 제시되었다. 그러나 D.J. Sanders 식은 흡수깊이를 고려하여 용접의 경우 수십  $\text{cm}^{-1}$ 의 흡수계수를 사용하나 레이저 표면경화에서는  $10 \sim 10^6 \text{ cm}^{-1}$  정도의 흡수계수를 사용하기 때문에 레이저 표면경화의 온도분포를 구하는데 적당하지 않은 것으로 사료된다.

본 연구에서는 이동 선열원(line heat source)을 고려한 Cline and Anthony의 해를 사용하였다. 열원은 빔 반경 R을 갖는 가우시안 분포이다. 재료는 흡수깊이(absorption depth)  $a^{-1}$ 보다 훨씬 두꺼운 것으로 가정한다. 열전도도 k와 단위 체적당 비열  $C_p$ 는 여러 온도 범위에서 상수값으로 가정한다. 비정상 열전도 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 T = \left\{ \frac{1}{D} \right\} \partial T / \partial t - Q / c_p \quad (1)$$

여기서  $D = k / \rho c$ 는 열확산계수, Q는 내부 열원이다. 고정된 좌표계를 사용하며 레이저 빔은 z방향과 수직하고, 시간  $t = 0$ , 위치  $z = 0$ 에 조사된다. 빔은 x축 방향으로 속도 v로 움직인다. 빔 직경은 R이고 출력이 P인 재료에 수직한 이동 가우시안 빔 열원은 다음 식으로 나타낸다.

$$Q = P \frac{\exp\{-[(x-vt)^2 + y^2](2R^2)^{-1}\} h(z)}{2\pi R^2 \lambda} \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 흡수깊이이다.  $z$ 는  $0 < z < \lambda$  일 경우  $h(z)=1$  이고,  $z > \lambda$  이면  $h(z) = 0$  이다. 표면  $x', y', z'$ 에서의 열유속으로 인해 임의의 위치  $x, y, z$ 에서  $t$ 시간 후의 온도는 다음과 같다.

$$T = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (Q/C_p)(x'y'z't') \times G(x'y'z't' | xyz t) dx' dy' dz' dt' \quad (3)$$

$t=0$ 에서 레이저 빔에 의한 온도분포는 레이저 빔이  $x', y'$ 에 있고,  $t'$ 의 시간 전의 가우시안 분포에 영향을 받는다.  $x', y'$ 에 대하여 적분을 하고 무차원화한 변수로 바꿔 쓰면 다음과 같다.

$$T(x, y, z) = P(C_p DR)^{-1} f(x, y, z, v) \quad (4)$$

$$\text{여기서 } f = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-H)}{(2\pi^3)^{1/2}(1+\mu^2)} d\mu$$

$$H = \frac{(X + \rho/2\mu^2)^2 + Y^2}{2(1+\mu^2)} + \frac{z^2}{2\mu^2}$$

$$\mu^2 = 2Dt^2/R, \quad \rho = V/\mu, \quad X = x/R, \\ Y = y/R, \quad Z = z/R$$

온도를 구하는데 있어서 적분 과정은 Simpson법칙을 사용하였고 무한 적분이므로 Improper 적분을 사용하여 수렴되는 적분값을 trial and error 방식으로 구하였다.

## 2-2 유한요소 해석

레이저로 유입되는 열에 의하여 재료(평판)에서는 복잡한 열적 거동이 발생된다. 또한 열영향 부위의 미소 구조를 변화시킨다. 실제의 상태는 대단히 복잡한 거동을 하기 때문에 비정상, 3차원 문제로 해석을 해야만 한다. 그러나 레이저 빔 표면경화에 있어서는 유입되는 열원의 이송속도가 열전달 속도보다 높다고 가정하면  $x$ 방향으로 조사되는 레이저 빔에 의한 온도 변화는 측면의  $y$ 방향과 두께의  $z$ 방향과 비교하여 무시할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 2차원 비정상 열

전도 방정식을 가지고 해석을 하였다. 경화부의 열전도에 따른 온도 해석은 stefan조건을 고려한 비정상, 2차원 열전도 방정식으로 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

여기서  $T = T(y, z, t)$ 는 온도가 공간과 시간의 함수로서 설정할 수 있으며  $\rho$ 는 밀도이고  $C_p$ 는 비열이다.  $k_y, k_z$ 는 각각  $y, z$ 방향의 열전도도이고  $Q$ 는 단위체적당 공급되는 열량이다. 레이저 빔 표면경화에 있어서 초점이 재료 표면 아래 부분에 위치하기 때문에 비교적 큰 점크기(spot area)를 갖는다. 그러므로 레이저 절단 및 용접과 비교하여 표면온도는 비교적 낮다. 비정상 온도해석을 할 때 복사에 의한 손실은 없는 것으로 가정하고 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

(1) 초기조건

$$T = T_i \quad \text{at hardening zone } t = 0 \quad (6)$$

(2) 경계조건

$$k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h(T - T_\infty) = 0 \quad (7)$$

여기서  $y, z$ 는 직교좌표계이고  $n_y, n_z$ 는 각방향에 대한 방향여현(direction cosine)을 나타내며,  $h$ 는 대류열전달 계수이고  $T$ 는 경화부의 온도이다.

형상함수  $[N]$ 을 가중함수로 하여 식(5)에 Galerkin법을 적용하고 이 식을 정리하면 비정상 열전도 문제에 대한 유한요소식은

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

으로 쓸 수 있다. 이때 행렬  $[k], [c]$ 와 벡터  $\{f\}$ 는 다음과 같다.

$$[k] = \int_{\Omega} k \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right\} d\Omega \quad (9)$$

$$[c] = \int_{\Omega} \rho C_p [N]^T [N] d\Omega \quad (10)$$

$$\{f\} = \int_{\Omega} Q [N]^T d\Omega - \int_{\Gamma} [N]^T h (T - T_\infty) d\Gamma \quad (11)$$

단,  $\Gamma$ 는 요소의 경계를 의미한다. 그러므로 식(8)을 모든 요소에 대하여 조합하면 전체의

유한요소식을 얻을 수 있으며 이 식을 이용하여 프로그램 하였다.

한편 비정상  $\frac{\partial \phi}{\partial t}$  항은 유한차분법 중에서

Crank-Nicolson 차분식을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[ \frac{1}{2}[k] + \frac{1}{\Delta t}[c] \right] (\phi(t + \Delta t)) = \left[ -\frac{1}{2}[k] + \frac{1}{\Delta t}[c] \right] (\phi(t)) + (F) \quad (12)$$

식(12)의 우변의 값은 알고 있는 값이므로 비정상 열전도 문제의 열전도 해석을 식(12)에 초기조건을 대입하고 Gauss 소거법을 이용하여 미소 시간 증분  $\Delta t$ 에 따른 전영역의 열전도 과정을 해석하였다. (5-7)

### 3. 실험

수치해석 결과의 타당성을 확인하기 위해 SM45C 강에 레이저 빔을 주사하여 열영향부의 크기를 측정후 이론 해석 결과와 비교하였다. 1.2kW CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 SM45C 강에 레이저 빔을 주사하였다. 에너지 밀도를 줄일 수 있는 가장 간단한 방법인 Defocused 빔을 사용하였고 TEM<sub>00</sub>인 빔 모드 사용하여 주사속도가 1~3.5 m/min인 조건으로 변경하며 실험을 하였다. 시편은 온도에 관계없이 높은 흡수율을 얻을 수 있도록 인산염 코팅을 하였고 열영향부의 크기를 측정하기 위해 시편의 단면을 절단하여 Mounting, Polishing 하였다. 5% Nital 용액으로 부식을 하였으며 경화된 부분을 금속 광학현미경에서 경화 폭과 깊이를 측정하였다. 또한 마이크로 경도 시험기를 사용하여 폭과 깊이 방향으로 경도를 측정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig.1은 식(4)에 의하여 재료표면에서 무차원화된 온도분포를 보여 주고 있다. Fig.2는 x축에 따른 온도분포가 여러 속도에 따라 구해진 것을 나타낸다. 속도가 증가함에 따

라 최고 온도는 감소되고 이동하고 있는 레이저 빔 중심으로 부터 뒤쪽으로 옮겨진다. Fig.3는 깊이에 따른 온도 감소를 나타내고 있다. Fig.4는 재료표면 아래에서의 온도가 속도의 증가에 따라 재료가열 온도가 줄어들어 온도가 감소함을 보여 주고 있다.

금속재료의 흡수율은 Fig.6에서 알 수 있듯이 상온에서 10%미만이나 금속의 녹는 온도에 도달했을 때 40~50% 정도로 상승하고 금속의 증발 온도에 도달해서는 90% 이상까지 증가한다. 본 실험에서는 레이저 표면경화를 효율적으로 하기 위해 인산염 코팅을 하여 흡수율을 높이도록 하였는데 Fig.7은 인산염 코팅을 한 시편의 SEM 사진이다. 인산염 코팅이 작은 판상의 물체를 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 작은 반사체 역할을 해서 표면 내에서 다중 반사에 의해 흡수율이 증가하는 것으로 알려져 있다.

해석적인 방법으로 흡수율을 결정하기 위해 Cline and Anthony의 해를 사용하여 실험 결과와 비교하였다. Fig.8과 Fig.9에서 알 수 있듯이 빔 직경을 3.3mm로 고정하고 주사속도를 변경했을 때 흡수율이 90%에서 실험 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 레이저 빔 출력은 레이저 빔 발전장치로 부터 발전을 한 후에 반사거울을 거쳐 대기를 통과하여 재료표면에 도달했을 때 발전장치의 출력보다 적은 출력 에너지가 재료표면에 주사된다. 여러 연구자들에 의해 제시된 20% 출력 에너지의 감소가 있다고 설정하고 수치해석 방법을 수행하였다. 또한 수치해석에서 경화층은 오스테나이트가 생성되는 Ac<sub>1</sub> 온도 이상으로 가열된 영역으로 정의할 수 있는데 레이저 표면경화 처리는 고밀도 에너지가 국부적으로 가열되어 경화층의 가열율이 크게 나타나기 때문에 평행상태의 Ac<sub>1</sub> 온도를 상변태 온도로 생각 하는 것이 바람직하지 못하다. 본 연구에서는 840°C를 SM45C의 상변태 온도로 택하였다. 모델로 선정한 판재의 경계조건은 Fig.5와 같으며 사각형 요소(quadrilateral element) 360개로 분할하여 해석을 수행하였다. 시편의 초기온도는 20°C 이며 재료는 등방성체(isotropic material)로 가정을 하였

다. FEM에서 흡수율을 90%로 하고 빔 직경을 3.3mm로 할 경우 빔 직경이 상대적으로 작아져 에너지 밀도는 급격히 증가하게 되어 표면 경화층을 예측할 수 없었다. 이것은 인산염 코팅을 할 경우 저출력에서도 비슷한 가공경화 층을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

Fig.10과 Fig.11을 참고하면 경화처리 가능 범위에서 주사속도가 감소할수록 경화가 일어나는 깊이는 증가함을 볼 수 있고, 빔 직경이 클수록 경화 깊이는 감소하면서 경화 폭은 약간 증가함을 알 수 있다. 이것은 빔 직경이 증가할수록 단위 면적당 에너지 밀도가 감소되기 때문이다. 주사속도가 일정하게 증가함에 따라 경화층 두께는 경화 폭보다 급격히 감소함을 알 수 있는데 이것은 재료표면의 오스테나이트 생성온도가 레이저 빔의 정체시간(dwelling time)에 비례하고 열 용입 깊이는 정체시간의 입방근에 비례하기 때문이다. 경도 정도를 결정하는 표면온도와 경화층 깊이는 레이저 출력과 빔 직경, 주사속도를 조절함으로써 원하는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 열원으로 가정한 가우시안 빔은 빔 직경이 커짐에 따라 적절한 열원 분포를 나타내지 못하기 때문에 이론 해석 결과와 실험 결과의 차이가 생긴 것으로 사료된다. 또한 이동 주사 빔에서 속도가 증가함에 따라 최고 온도는 레이저 빔 중심으로 부터 뒤쪽에 위치하게 되는데 유한요소 해석 방법에서는 이것을 고려할 수 없었다. 이론 해석에서 온도 의존성 물성치를 평균값으로 가정하여 상수값을 사용하였는데 온도 의존성 물성치를 사용한다면 실험 결과와 이론 결과의 차이를 줄일 수 있을 것이다. (8-10)

## 5. 결론

레이저 표면경화 처리에서 수치해석 방법으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이론 해석에서 빔 직경을 일정하게 하고 주사속도에 따라 재료표면에서 흡수되는 열유속량은 변하기 때문에 오스테나이트 생성온도가 변하게 된다. 그러므로 최적의 주사속도가 존재함을 알 수 있다.

(2) 해석적인 방법을 사용하여 빔 직경 3.3mm로 고정할 경우 주사속도 1 m/min 이상에서 경화 폭과 깊이를 예측할 수 있었다.

(3) 빔 직경 5mm인 경우 해석적인 방법보다 FEM을 사용하여 경화 폭과 깊이를 예측할 수 있었다.

(4) 인산염 코팅을 할 경우 저출력에서 효율적인 표면경화층을 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- [1] D. Rosenthal, "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting", Welding J, 20(5), pp. 220s - 234s (1941)
- [2] M. Lax, "Temperature Rise Induced by a Laser Beam", J. of Appl. Phys, 48(9), PP. 3919 - 3924 (1977)
- [3] H. E. Cline and T. R. Anthony, "Heat Treating and Melting Taterial with a scanning Laser or Electron beam", J. of Appl. Phys, 48(9), pp. 3895 - 3900 (1977)
- [4] D. J. Sanders, "Temperature Distributions Produced by Scanning Gaussian Laser Beams", Applied Optics, 23(1), PP. 30 - 35 (1984)
- [5] 矢川元基, 宮崎則幸., "有限要素法による熱応力・クリ-ブ・熱傳導解析", 사이エンス社, PP. 115 - 134 (1985)
- [6] Segerlind, Larry J., "Applied finite element analysis", John Wiley & Sons, Chap. 3 (1976)
- [7] D. W. Pepper and J. C., Heinrich, "The Finite Element Method", Hemisphere Publishing, Chap. 3 - 5 (1992)
- [8] S. J. Na, S. Y. Lee, K. E. Lee, and T. K. kim, "Numerical analysis of laser surface hardening of a medinm carbon steel", Proc. 3th Int. Conf. Laser in Manufacturing, PP. 383 - 392 (1986)

- [9] R. A. Willgoss, J. H. P. C. Megaw and J. N. Clark, "Laser Welding of Steels for Power Plant", Optics and Laser Technology, PP. 73 - 87 (1979)
- [10] S. L. Engel, "Basic of Laser Heat Treating", Source book on applications of the laser in metalworking, ASM, PP. 149 - 171 (1976)

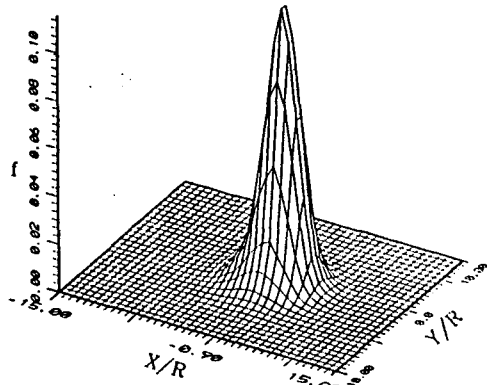


Fig.1 Dimensionless surface temperature distribution.

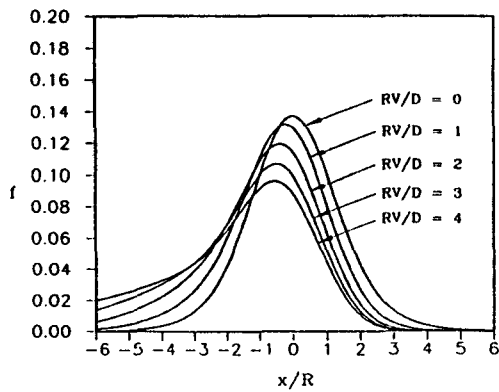


Fig.2 Calculated dimensionless temperature distribution  $f$  along the  $x$  axis which is the path of the laser beam for different scanning velocities.

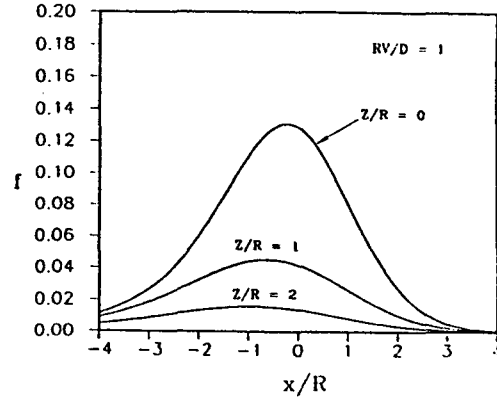


Fig.3 Temperature dimensionless distribution  $f$  at different depths below the surface at a constant scanning velocity.

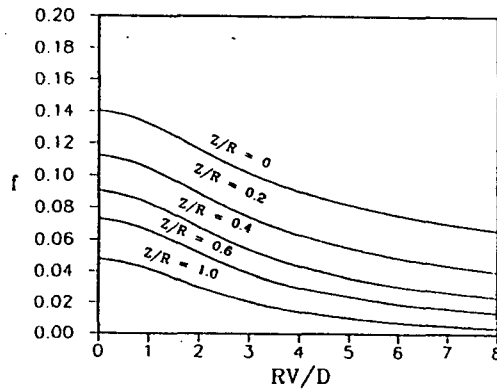


Fig.4 The effect of velocity on the temperature distribution  $f$  at different depths below the surface.

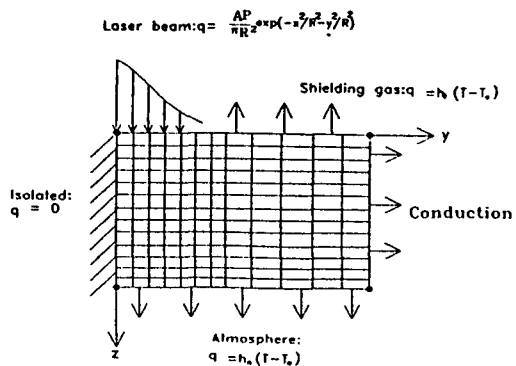


Fig.5 Solution domain and boundary conditions.

다. FEM에서 흡수율을 90%로 하고 빔 직경을 3.3mm로 할 경우 빔 직경이 상대적으로 작아져 에너지 밀도는 급격히 증가하게 되어 표면 경화층을 예측할 수 없었다. 이것은 인산염 코팅을 할 경우 저출력에서도 비슷한 가공경화 층을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 10과 Fig. 11을 참고하면 경화처리 가능 범위에서 주사속도가 감소할수록 경화가 일어나는 깊이는 증가함을 볼 수 있고, 빔 직경이 클수록 경화 깊이는 감소하면서 경화 폭은 약간 증가함을 알 수 있다. 이것은 빔 직경이 증가할수록 단위 면적당 에너지 밀도가 감소되기 때문이다. 주사속도가 일정하게 증가함에 따라 경화층 두께는 경화 폭보다 급격히 감소함을 알 수 있는데 이것은 재료표면의 오스테나이트 생성온도가 레이저 빔의 정체시간(dwelling time)에 비례하고 열 용입 깊이는 정체시간의 입방근에 비례하기 때문이다. 경도 정도를 결정하는 표면온도와 경화층 깊이는 레이저 출력과 빔 직경, 주사속도를 조절함으로써 원하는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 열원으로 가정한 가우시안 빔은 빔 직경이 커짐에 따라 적절한 열원 분포를 나타내지 못하기 때문에 이론 해석 결과와 실험 결과의 차이가 생긴 것으로 사료된다. 또한 이동 주사 빔에서 속도가 증가함에 따라 최고 온도는 레이저 빔 중심으로 부터 뒤쪽에 위치하게 되는데 유한요소 해석 방법에서는 이것을 고려할 수 없었다. 이론 해석에서 온도 의존성 물성치를 평균값으로 가정하여 상수값을 사용하였는데 온도 의존성 물성치를 사용한다면 실험 결과와 이론 결과의 차이를 줄일 수 있을 것이다. (8-10)

## 5. 결론

레이저 표면경화 처리에서 수치해석 방법으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이론 해석에서 빔 직경을 일정하게 하고 주사속도에 따라 재료표면에서 흡수되는 열유속량은 변하기 때문에 오스테나이트 생성온도가 변하게 된다. 그러므로 최적의 주사속도가 존재함을 알 수 있다.

(2) 해석적인 방법을 사용하여 빔 직경 3.3mm로 고정할 경우 주사속도 1 m/min 이상에서 경화 폭과 깊이를 예측할 수 있었다.

(3) 빔 직경 5mm인 경우 해석적인 방법보다 FEM을 사용하여 경화 폭과 깊이를 예측할 수 있었다.

(4) 인산염 코팅을 할 경우 저출력에서 효율적인 표면경화층을 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- [1] D. Rosenthal, "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting", *Welding J.*, 20(5), pp. 220s - 234s (1941)
- [2] M. Lax, "Temperature Rise Induced by a Laser Beam", *J. of Appl. Phys.*, 48(9), pp. 3919 - 3924 (1977)
- [3] H. E. Cline and T. R. Anthony, "Heat Treating and Melting Material with a scanning Laser or Electron beam", *J. of Appl. Phys.*, 48(9), pp. 3895 - 3900 (1977)
- [4] D. J. Sanders, "Temperature Distributions Produced by Scanning Gaussian Laser Beams", *Applied Optics*, 23(1), pp. 30 - 35 (1984)
- [5] 矢川元基, 宮崎則幸., "有限要素法による熱応力・クリ-ブ・熱傳導解析", *サイエンス社*, pp. 115 - 134 (1985)
- [6] Segerlind, Larry J., "Applied finite element analysis", *John Wiley & Sons*, Chap. 3 (1976)
- [7] D. W. Pepper and J. C., Heinrich, "The Finite Element Method", *Hemisphere Publishing*, Chap. 3 - 5 (1992)
- [8] S. J. Na, S. Y. Lee, K. E. Lee, and T. K. kim, "Numerical analysis of laser surface hardening of a medium carbon steel", *Proc. 3th Int. Conf. Laser in Manufacturing*, pp. 383 - 392 (1986)

- [9] R. A. Willgoss, J. H. P. C. Megaw and J. N. Clark, "Laser Welding of Steels for Power Plant", Optics and Laser Technology, PP. 73 - 87 (1979)
- [10] S. L. Engel, "Basic of Laser Heat Treating", Source book on applications of the laser in metalworking, ASM, PP. 149 - 171 (1976)

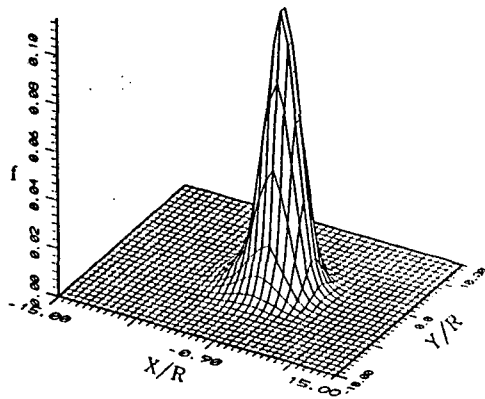


Fig.1 Dimensionless surface temperature distribution.

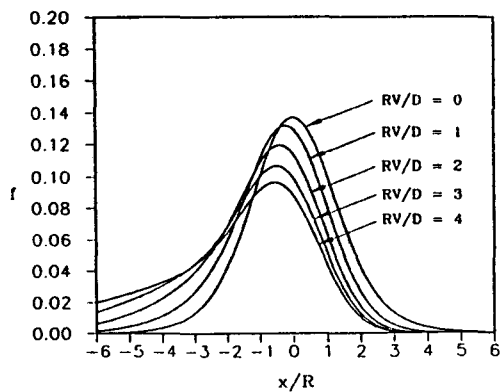


Fig.2 Calculated dimensionless temperature distribution  $f$  along the  $x$  axis which is the path of the laser beam for different scanning velocities.

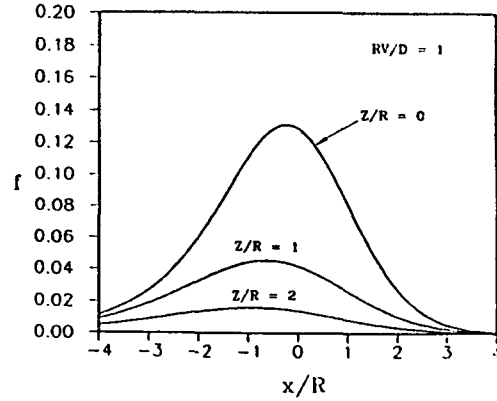


Fig.3 Temperature dimensionless distribution  $f$  at different depths below the surface at a constant scanning velocity.

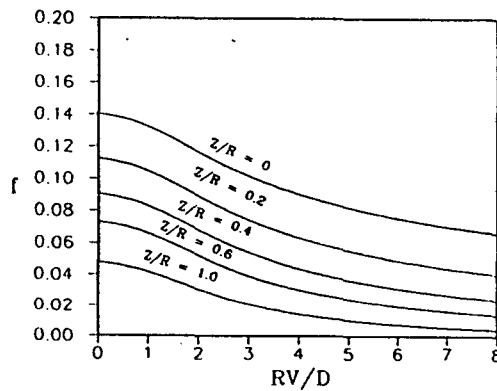


Fig.4 The effect of velocity on the temperature distribution  $f$  at different depths below the surface.

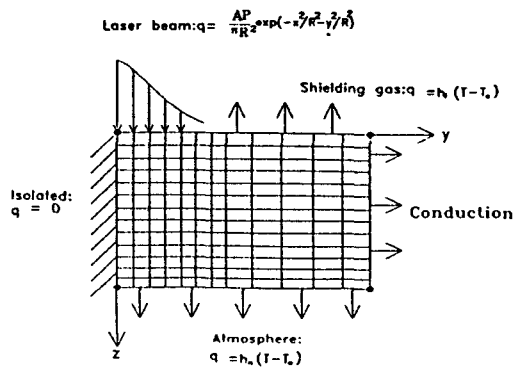


Fig.5 Solution domain and boundary conditions.

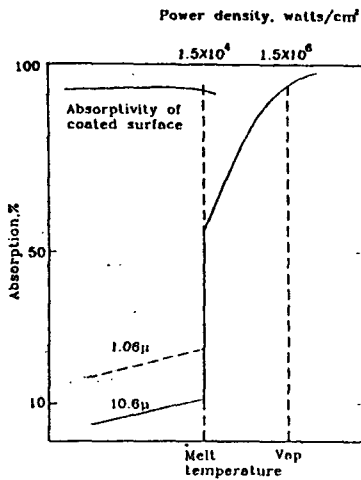


Fig. 6 Simplified model of the absorption related to different wavelengths for Fe-alloys.



Fig. 7 Plated phosphate on SM45C steel.

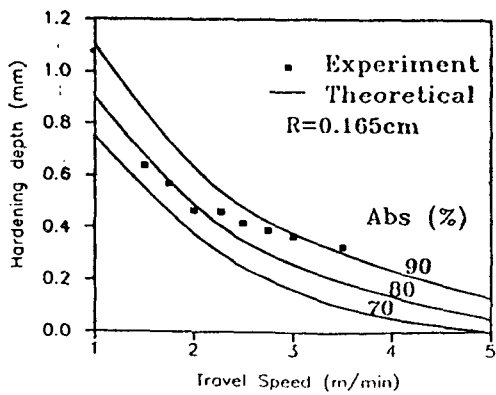


Fig. 8 Comparison of experiment and calculated depth of hardened zones.

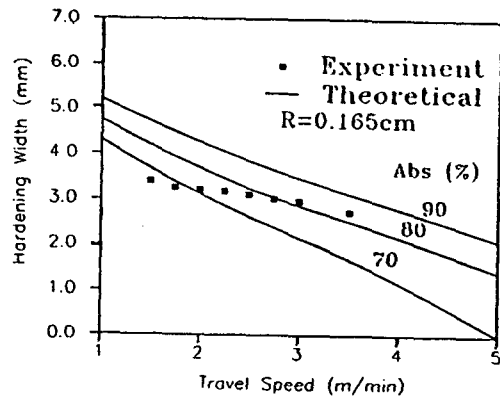


Fig. 9 Comparison of experiment and calculated width of hardened zones.

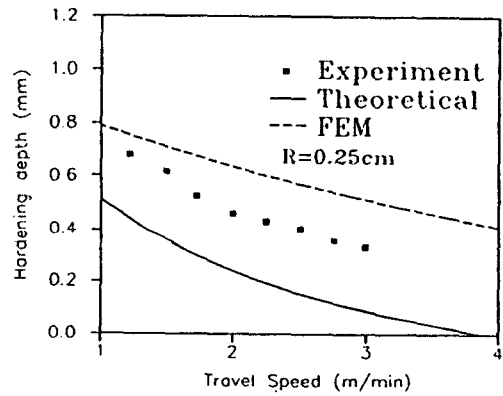


Fig. 10 Comparison of calculated depth of hardened zones with experimental result.

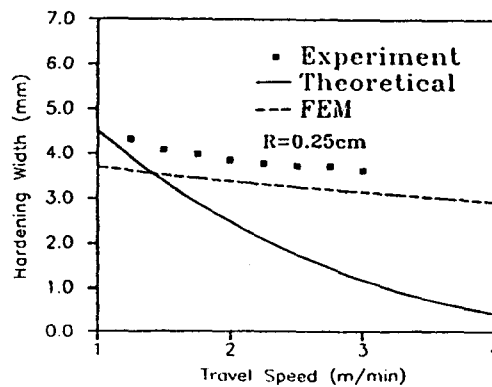


Fig. 11 Comparison of calculated width of hardened zones with experimental result.