

<論 文>

레이저 및 전자빔을 이용한 표면 열처리

김흥준* · 최우천* · 김숙환** · 권영각**

(1994년 7월 25일 접수)

Heat Treatment Using a Laser Beam or an Electron Beam

H. J. Kim, W. C. Choi, S. H. Kim and Y. G. Kweon

Key Words: Surface Heat Treatment(표면 열처리), HAZ(열영향부), Hardness(경도), Phase Change(상변화), Carbon Content(탄소 함유량)

Abstract

Surface heat treatment using a laser beam or an electron beam is studied through numerical analyses and experiments. For the surface heat treatment process, a theoretical model is developed to predict the effects of laser beam power, travel speed and properties of a workpiece on the depth and width of the heat affected zone(HAZ). The shape of HAZ and the hardness of heat-treated surface are experimentally obtained using an electron beam. Three materials(SS41, S45C and S55C) are selected as workpiece materials. The hardness of HAZ is increased up to 3 times for materials of a low carbon content. The results of the numerical analysis are compared with those of experiments. The comparison shows that the numerical model predicts larger depths and widths.

기 호 설 명

- [A] : Tridiagonal 행렬
- c_p : 가공물의 비열
- {F} : 전 단계에서 계산된 온도와 경계조건에 의해 결정되는 벡터
- h : 대류 열전달계수
- k : 가공물의 열전도율
- q'' : 레이저빔의 열유속
- {T} : 각 노드에서의 온도벡터
- T^n : n번째 계산 후 SOR을 적용한 각 노드의 온도
- T_0 : 주위온도
- v : 빔의 이동속도
- α : 열확산계수
- ϵ : 수렴허용치
- ρ : 가공물의 밀도

ω : SOR 벡터

1. 서 론

대부분의 기계부품에서 마모, 부식, 마찰 및 피로 파괴가 표면에서 발생한다. 표면에서 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위해 사용하는 방법은 탄화처리, 질화처리, 시안처리, 코팅, 클래딩, 표면 합금 등이 있다. 또한 금속조직의 상변화를 통하여 표면강도를 향상시키는 표면 열처리가 있다. 이러한 기존의 기술은 필요한 부위뿐만 아니라 나머지 부분의 기계적 특성도 향상시키므로 많은 시간과 비용이 소요되며 열변형에 의하여 후가공을 필요로 하게 된다. 최근에는 전자빔과 레이저빔을 이용하여 표면을 가공함으로써 빠른 시간에 피로파괴, 마모, 부식등에 잘 견딜 수 있는 표면을 얻을

*정회원, 포항공과대학교 기계공학과
**정회원, 산업과학기술연구소

수 있으며 가공후 열변형이 거의 없으므로 후가공이 필요없어 가공 경비를 줄일 수 있는 잇점이 있다. 표면 열처리는 용융점이하로 가공물을 가열하여 레이저만이 장점인 빠른 자기냉각(self-quenching)효과를 이용하여 금속조직을 변화시켜 금속 표면의 강도를 향상시키는 가공방법이다.

레이저 표면 열처리에 관해서는 여러가지 실험과 이론적 해석이 많이 이루어져 있다. Anthony의 연구⁽¹⁾에서는 3차원 비정상상태에 대한 초보적 모델이 제시되었고 Festa의 연구⁽²⁾에서는 2차원 정상상태에 대한 이론적 모델의 제시와 실험을 통한 검정을 하였다. 그리고 Atsushi의 연구⁽³⁾에서는 2차원 비정상 상태에 대한 이론적 모델이 제시되었다. 이밖의 여러 연구에서 실험과 이론적 접근이 있지만 이론적 모델에서는 주로 2차원 모델링에 한정되어 있다.

본 연구에서는 레이저 표면 열처리에 대하여 3차원 정상상태의 수치해법에 의한 해석을 하였으며 실험을 통하여 모델을 검정하였다.

2. 표면 열처리의 삼차원 유한차분법

2.1 해석모델

레이저를 이용한 표면 열처리는 레이저빔을 defocus시켜 가공물에 주사하여 온도를 높이고 자기 냉각효과로 가공물의 표면 조직을 변화시켜 강도를 향상시키는 가공공정이다. 이때 가공물은 용융점이하로 가열되고 빠르게 냉각되어 기존의 열처리에서 얻을 수 없는 조직을 가지게 된다. 본 연구에서는 1회 빔이 주사되는 경우에 대하여 고려한다. 본 수치해석 모델에 사용한 가정은 다음과 같다.

- 복사 열전달 무시
- 가공물의 물성치는 온도에 대하여 일정
- 열전도 계수는 모든 방향에 대하여 같음
- 레이저빔의 강도는 사각형 분포를 가짐

고온으로 가열되는 부분의 면적이 적으므로 복사 열전달은 무시하였고, 물성치는 온도에 따라 변하나 용융점까지의 변화량을 알 수 없어 일정한 것으로 두었다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

삼차원 유한차분법에 사용된 좌표계는 Fig. 1에 보는 것과 같으며 좌표계는 레이저 빔에 고정되도

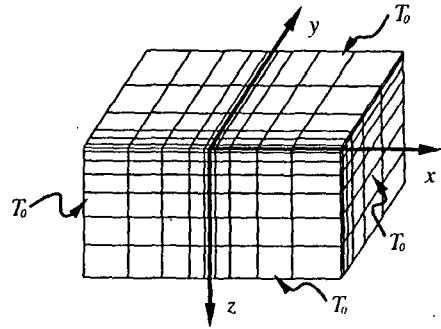


Fig. 1 Coordinate system and grids for numerical analysis

록 설정하였고, 재료는 양의 x방향으로 이동된다. 이러한 좌표계에서는 재료내의 온도는 정상상태의 분포가 된다. 사용된 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

· 지배방정식

$$\rho c_p v \frac{\partial T}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

· 경계조건

$$T = T_0, \text{ at } x = x_{\max}$$

$$T = T_0, \text{ at } x = x_{\min}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \text{ at } y = 0$$

$$T = T_0, \text{ at } y = y_{\max}$$

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} - h(T - T_0), \text{ at } z = 0$$

$$T = T_0, \text{ at } z = z_{\max} \quad (2)$$

여기서, h 는 가공물의 온도 T 와 주변 온도 T_0 사이의 대류 열전달계수, ρ 는 가공물의 밀도, c_p 는 가공물의 비열, v 는 가공물의 이동속도, 계산구간을 충분히 크게 취하면 경계(x_{\max} , x_{\min} , y_{\max} , z_{\max})에서의 온도를 T_0 로 둘 수 있다.

식(1)을 풀기 위해서 Fig. 1에서 보여진 것과 같은 부등 간격의 차분⁽⁴⁾을 가진 유한차분법을 사용하였으며 좌변에 있는 대류항(convection term)에 대해서는 upwinding scheme⁽⁵⁾을 사용하였다. 부등 간격의 차분은 등간격의 차분을 이용할 때보다 적은 시간에 원하는 부분의 결과를 얻을 수 있다. 표면 열처리 공정에서 주된 가공이 이루어지는 부분은 빔이 작용하는 부분 근처이므로 이 부분의 차분

을 조밀하게 생성시켰다. 유한 차분식으로 식(1)을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma_j T_{i,j-1,k} - (1 + \gamma_j) T_{i,j,k} + T_{i,j+1,k}}{\Delta y_j^2} \\ & + \frac{\delta_k T_{i,j,k-1} - (1 + \delta_k) T_{i,j,k} + T_{i,j,k+1}}{\Delta z_k^2} \\ & + \frac{\beta_i T_{i-1,j,k} - (1 + \beta_i) T_{i,j,k} + T_{i+1,j,k}}{\Delta x_i^2} \\ & - \frac{\nu}{\alpha} \frac{T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k}}{\Delta x_{i-1}} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\beta_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1}}, \quad \gamma_j = \frac{\Delta y_j}{\Delta y_{j-1}}, \quad \delta_k = \frac{\Delta z_k}{\Delta z_{k-1}} \quad (4)$$

경계조건을 차분식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{i,j,k} &= T_0, \quad \text{at } x = x_{\max} \\ T_{i,j,k} &= T_0, \quad \text{at } x = x_{\min} \\ T_{i,j,k} &= T_{i-1,j,k}, \quad \text{at } y = 0 \\ T_{i,j,k} &= T_0, \quad \text{at } y = y_{\max} \\ q'' &= -k \frac{T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k}}{\Delta z_{k-1}} - h(T_{i,j,k} - T_0), \\ & \quad \text{at } z = 0 \\ T_{i,j,k} &= T_0, \quad \text{at } z = z_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

식(3)과 식(5)에 대해 ADI(alternative directional implicate)방법⁽⁶⁾를 적용하여 x , y 및 z 방향에 대한 tridiagonal 행렬식을 얻을 수 있다. 즉,

$$[A]\{T\} = \{F\} \quad (6)$$

여기서,

[A]: Tridiagonal 행렬

{T}: 각 노드에서의 온도벡터

{F}: 전 단계에서 계산된 온도와 경계조건에 의해 결정되는 벡터

본 프로그램은 온도가 수렴할 때까지 반복 계산을 수행한다. 그리고 반복 계산중 전 단계에서 계산한 온도를 다음 단계의 온도 계산에 사용하며 온도 분포를 빨리 수렴하도록 하기 위해 SOR (successive overrelaxation) 방법⁽⁷⁾을 적용하여 온도를 계산한다. 각 노드에서의 온도는 다음과 같이 계산된다.

$$T^n = T^{n-1} + \omega(T - T^{n-1}) \quad (7)$$

여기서,

T^n : n 번째 계산 후 SOR을 적용한 각 노드의 온도,

T^{n-1} : $n-1$ 번째에 계산된 각 노드의 온도

ω : SOR 계수

T : 식(6)로부터 계산된 각 노드의 온도.

수렴조건은 식(7)에서 보는 것과 같다.

$$\sum_{i,j,k} \left| \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n-1}}{T_{i,j,k}^{n-1}} \right| < \epsilon \quad (8)$$

여기서, ϵ 은 수렴 허용치(convergent tolerance)이고 $izro$ 는 $x=0$ 인 노드점을 나타낸다. $x=0$ 에서 yz 평면의 온도 변화량 합을 이용하여 수렴조건을 평가하였다. 온도 분포에 대한 변화량 합의 허용치를 $\epsilon=0.01$ 로 선택하였으며, 계산에 사용된 가공물 재료의 물성치와 입력값은 SI 단위계를 사용하였다. 모든 조건에 대하여 SOR 계수가 1.21일 때 가장 빠른 수렴을 보였으며, 따라서 $\omega=1.21$ 로 결정하였다.

3. 표면 열처리 실험 및 고찰

3.1 레이저와 전자빔 용접의 비교

실험은 레이저빔 대신 전자빔 용접기를 사용하여 실험결과를 얻었다. 전자빔의 경우 레이저빔과 유사한 성질을 가지므로 레이저로 실험했을 때와 같은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 레이저와 전자빔 용접의 특징은 Table 1에 보는 바와 같다.

빔의 에너지 밀도와 열영향부 크기 및 빔의 형상에서 거의 같은 특징을 가지고 있다. 그러나 전자빔의 경우 작업 환경이 고진공을 유지해야 하는 단점이 있다. 전자빔의 작동 원리는 고압으로 가속된

Table 1 Characteristics of laser and electron beam

	Laser	EBW
Condition for machining	None	High vacuum
Cost for machine	Expensive	Cheap
Cost for machining one workpiece	Cheap	Expensive
Energy density	$10^4 - 10^7$	$10^4 - 10^7$
Welding depth	Sallow	Deep
HAZ size	Small	Small
Energy transmission medium	Photon	Electron

Table 2 Chemical compositions of materials

Steel	Chemical Composition(Wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
SS41	0.162	0.284	0.593	0.015	0.009	0.015
S45C	0.412	0.254	0.760	0.014	0.005	0.013
S55C	0.470	0.232	0.715	0.014	0.005	0.015

Table 3 Material properties for numerical analysis.

Steel	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$k(\text{W/m}\cdot\text{K})$	$c_p(\text{J/kg}\cdot\text{K})$
SS41	7830	52.036	513.8
S45C	7840	44.5	475.7
S55C	7840	41.344	421.4

전자가 emitter를 통하여 방출되어 전자기 렌즈에 집중된 후 가공물에 충돌하여 가공이 이루어진다.

3.2 실험 시편 제작

실험에서 표면 열처리시 가공변수의 영향을 비교 검토하기 위하여 사용한 소재는 SS41, S45C 및 S55C이었으며 사용한 소재의 성분 분석결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 보는 바와 같이 세가지 소재의 화학적 조성은 탄소 함유량에 비교적 큰 차이가 있다. 실험에 적용한 표면 열처리 파라미터(parameter)는 가속전압(100 kV), 빔전류(10 mA), 이동속도(600~900 mm/min)이다. 이동속도는 600, 700, 800, 900 mm/min 4가지로 변화시켰으며 빔의 크기는 $9.5 \times 1.3 \text{ mm}^2$ 이다. 열영향부의 형상과 조직 특성을 평가하기 위하여 $1 \mu\text{m}$ 의 diamond paste로 연마하였다. 연마후 Nital(알콜 95%+질산 5%)로 etching하여 표면 열처리된 부위의 특성을 비교하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

가공변수에 따른 열영향부의 경도 특성을 비교 평가하기 위하여 미소 경도시험기를 사용하여 하중 25g으로 측정하였다. 또한 열영향부의 깊이, 폭 및 면적을 비교 평가하기 위하여 image analyzer를 사용하여 측정하였다. Figs. 2, 3, 4에 보여진 경도 분포가 심한 편차를 보이는 것은 측정시 하중을 적게 주어 정확한 경도 대표값이 측정되지 못한 것

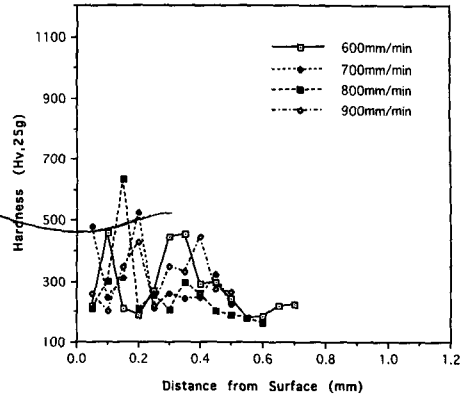


Fig. 2 Hardness distribution of heat-treated SS41

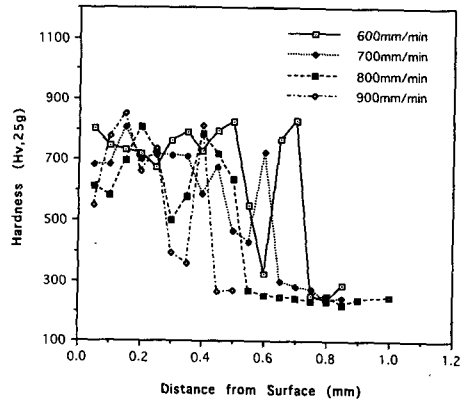


Fig. 3 Hardness distribution of heat-treated S45C

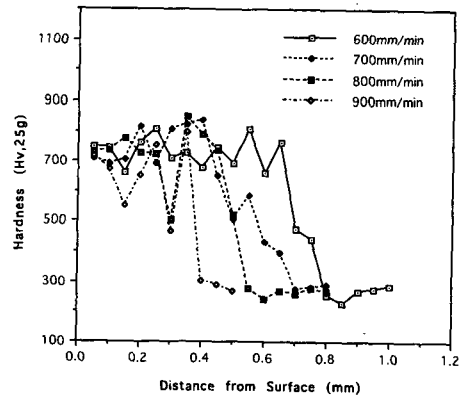


Fig. 4 Hardness distribution of heat-treated S55C

으로 보이며 하중을 증가시키면 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 표면 열처리후 경도는 SS41의 경우는 2.5배, S45C와 S55C의 경우는 3.5 배 정도 향상되었다. 실험에 쓰인 저탄소강에서는



Fig. 5 Macrostructure of heat-treated low carbon steel

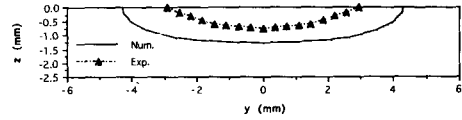
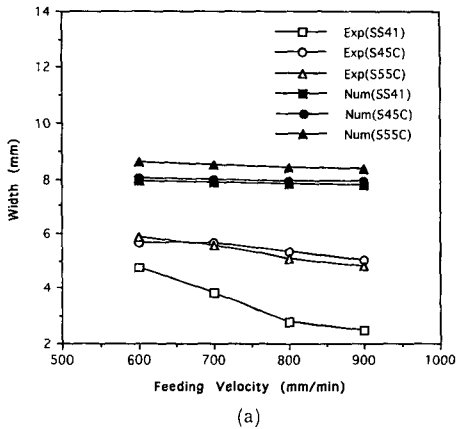


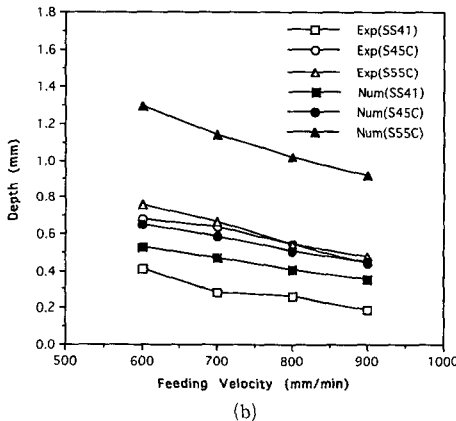
Fig. 7 Comparison of experimental and numerical results for HAZ shape(S55C; $v=600$ mm/min)

다. 그러나 일반적인 열처리에서와는 달리 탄소가 확산될 시간적인 여유가 없으므로 금속 미세 조직은 전혀 다른 형태를 보여 주고 있다. 금속 미세 조직의 변화는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 표면 열처리후 변화된 조직은 펄라이트 조직이 탄소 확산에 의하여 일부는 마르텐사이트 조직으로 변화하고 일부는 페라이트 조직으로 변하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 6에서 표면 열처리된 폭과 깊이에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였고 Fig. 7에서는 S55C에 전자빔을 600 mm/min로 주사했을 때의 수치해석으로 구한 열영향부의 형상과 실험으로 구한 열영향부의 형상을 비교하였다. 수치해석에 사용한 물성치는 직접 측정된 값을 사용하였으며 흡수율은 100%로 가정하였다. 폭에 대해서 수치 결과는 평균적으로 50%정도 큰 결과를 나타냈으며 깊이에 대해서는 70% 정도 큰 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 물성치에 대한 온도의 영향을 무시한 것과 흡수율을 100%로 가정한 것에 기인하는 것으로 생각된다.



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of experimental and numerical results for HAZ width (a) and depth (b)

탄소 함유량이 큰 재료일수록 열처리후에 경도가 크게 증가함을 의미한다. 따라서 표면 열처리의 경우 경도에 지배적인 영향을 주는 파라미터는 일반적인 열처리에서와 같이 탄소 함유량을 알 수 있

4. 결 론

본 연구에서는 레이저를 이용한 표면 열처리에 대하여 연구를 하였다. 레이저를 이용한 표면 열처리에 대하여 이론적 방법에서는 무한물체로 모델링 하였으며, 수치적 방법에서는 부등 간격의 차분과 SOR 방법을 적용하여 짧은 시간에 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 실험을 실시하여 제시된 모델을 검증하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면 열처리의 수치해석 결과는 폭에 대해서는 약 50% 정도 큰 결과를 나타냈으며 깊이에 대해서는 약 70% 정도 큰 결과를 보였다.

(2) 보다 정확한 물성치와 빔에 대한 데이터를 적용한다면 비교적 짧은 시간에 수치해석을 통하여 실험 결과와 근사적으로 일치하는 결과를 얻을 수

있을 것으로 생각된다.

(3) 일반적인 열처리에서와 같이 탄소 함유량이 표면 열처리 공정에 있어서 경도 변화에 가장 지배적 영향을 주는 가공 파라미터임을 알 수 있었다.

(4) 표면 열처리후 금속 조직은 일반적인 열처리에서는 볼 수 없는 미세 조직이 되었고 경도는 2.5에서 3.5배 정도 향상이 됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구의 실험을 적극적으로 지원해주신 산업기술연구소 접합연구실 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Nurminen, J. I., Bruck, G. J., 1989, "Laser Cladding and Alloying for Surface Modifications," *CRC Surface Modification Engineering*, Vol. 2, pp. 193.
- (2) Cline, H. E. and Anthony, T. R., 1977, "Heat Treating and Melting Material with a Scanning Laser or Electron Beam," *J. Appl. Phys.*, Vol. 48(9), pp. 3896~3900.
- (3) Festa, R., Nenci, F., Manca, O. and Naso, V., 1993, "Thermal Design and Experimental Analysis of Laser and Electron Beam Hardening," *ASME J. Engg. for Industry*, Vol. 115, pp. 309~314.
- (4) Atsushi, I., Tauqir, A. and Strutt, P. R., 1987, "Computerized Integration of Electron Beam Rapid Solidification and Heat Treatment," *Material Science and Engineering*, Vol. 89, pp. L25~L29.
- (5) Fletcher, C. A., 1988, *Computational Techniques of Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin.
- (6) Carnahan, B., Luther, H. A. and Wilkers, J. O., 1969, *Applied Numerical Methods*, John Wiley & Sons.
- (7) Robert, C. and Pfahl, Jr., 1984, "Two-dimensional Quasi-Stationary Temperature Distribution In a Moving Infinite Slab with Orthotropic Properties," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 18, pp. 191~204.