

유한요소법을 이용한 레이저 표면경화처리 공정변수의 민감도 해석

이 세 환* · 양 영 수*

*전남대학교 공과대학 기계공학과

Sensitivity Analysis of Processing Parameters for the Laser Surface Hardening Treatment by Using the Finite Element Method

Se-Hwan Lee* and Young-Soo Yang*

*Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Abstract

A methodology is developed and used to evaluate the response sensitivity of the thermal systems to variations in their design parameters. Technique for computing the sensitivity of temperature distributions to changes in processing parameters needed to decide the more effective laser input parameters for laser surface hardening treatment is considered. In this study, a state equation governing the heat flow in laser surface treatment is analyzed using a three-dimensional finite element method and sensitivity data of the processing parameter obtained using a direct differentiation method is applied to the sensitivity analysis. The interesting processing parameters are taken as the laser scan velocity and laser beam radius (r_b), and the sensitivities of the temperature T versus v and r_b are analyzed. These sensitivity results are obtained with another parameters fixed. To verify the numerical analysis results, hardened layer dimensions (width and depth) of the numerical analysis are compared with the experimental ones. (Received December 8, 2000)

Key Words : Sensitivity analysis, Laser surface hardening treatment, Processing parameter, FEM(Finite Element Method), Direct differentiation method

1. 서 론

구조 시스템 설계변수의 변화에 따른 반응 민감도를 이용한 해석 방법이 최근 상당히 발전함과 동시에 여러 분야에서 다양하게 이용되고 있다^{1~6)}. 이러한 민감도 해석 방법의 발달은 설계 시스템의 최적화 조건을 찾기 위한 방법으로 많이 사용되고 있으며 최근에는 여러 가지 방법이 개발되고 있다. 또한 민감도 해석, 그 자체의 의미만으로도 목적함수에 대한 시스템 변수의 정성적인 분석이 가능하다. 지금까지 발달되어온 이산 구조시스템의 전형적인 민감도 해석방법은, 유한차분법(FDM), 수반변수법(AVM), 직접미분법(DDM) 등이 있으며 각각의 장단점을 가진다. 유한차

분법은 원식의 반복계산만으로 쉽게 민감도 결과를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 스텝 크기를 크게 하면 생기는 절사오차(truncation error)와 스텝 크기가 너무 작으면 발생하는 순환오차(round-off error)를 포함하게 되는 단점을 가진다. 수반변수법의 경우는 유한차분법의 경우와 같은 많은 반복계산을 필요로 하지 않는다는 장점을 가진 반면에 수반 변수 벡터를 정의하고 계산해야 하는 복잡성을 가진다. 반면에 구하고자 하는 설계변수의 직접 미분이 가능하여 직접 수치계산에 이용할 수 있다면 직접미분법은 위의 두 방법의 장점만을 가질 수 있다⁷⁾.

레이저를 이용한 표면 경화처리 시 사용되는 공정변수의 변화에 따른 민감도 해석 방법을 이용하면 어떤 공정 변수가 높고자 하는 경화 폭 이나 깊이에 민감한

정도를 알 수 있다. 레이저 표면 처리 시 레이저 빔에 의해 재료가 가열되는 과정에서 열변형이 발생할 수 있다. 이는 레이저 빔의 초점거리를 달라지게 하고 이것은 곧 레이저 빔 반경이 달라지는 것을 의미한다. 특히 정밀한 가공을 요구하는 가공에서는 공정 변수들의 변화에 따라 경화층의 크기 변화에 민감한 정도를 알 필요가 있다.

본 연구에서는 레이저 표면 경화처리 공정을 상태 방정식으로 표현되는 온도 분포 지배 방정식을 3차원의 유한요소법을 이용하여 계산하였고, 공정변수에 대한 민감도 해석은 위에서 언급한 민감도 해석 방법 중 효율적으로 적용 가능한 방법인 직접미분법을 선택하여, AISI 1045 강판의 레이저 표면 경화처리 시 주요한 공정 변수인 레이저 빔 반경과 이송속도에 대한 경화층의 폭과 깊이에 따른 민감도 해석을 하였다. 빔 반경과 빔 이송속도에 대한 민감도 계산 시, 다른 공정 변수들은 고정하였고 특히 레이저 빔으로부터 입열은, 단위길이 당 일정하게 입열 되는 조건에서 각각의 민감도 값을 비교하였다. 온도분포 계산 결과로부터, 각 빔 반경의 조건에서 경화층의 폭이 각 적용된 조건에 따라 비선형적 거동을 함을 알 수 있었고 이는 민감도 계산 결과로부터 추론이 가능하였다. 또한 이러한 결과는 실험을 통해 이미 얻어진 온도분포 결과를 수치 해석 결과와 비교함으로써 검증하였다⁸⁾.

2. 유한요소 정식화

2.1 온도 분포 해석

온도 분포해석을 위한 수치해석은 유한요소법을 이용하였다. 3차원의 비정상 열전도 방정식은 다음 (1) 식과 같다.

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, q_x, q_y, q_z 는 각 방향으로의 열유속 성분, \dot{Q} 는 내부 열발생량, ρ 는 밀도, c_p 는 비열 그리고 T 는 온도를 나타낸다.

이동 좌표계를 사용하여 정리하고 준 정상상태를 가정하면 아래 (2)식과 같이 표현 할 수 있다⁹⁾.

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial \xi} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \rho c_p (-v) \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (2)$$

여기서, v 는 빔 이송속도를 나타낸다.

해석영역과 경계조건은 Fig. 1과 Fig. 2에 표시하였다. 이러한 관계식 (2)는 가중잔류법(weighted residual

method)을 이용하여 각 부분을 정리하고 적분을 취하면 다음 (3)식과 같은 유한 방정식이 된다.

$$\int_{\Omega(e)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial \xi} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) N_i d\Omega = 0 \quad (3)$$

(3)식을 각 요소의 경계 Γ 에서 열 입력과 대류를 고려하여 가우스 정리를 이용하여 정리하면 아래(4)식과 같은 유한요소 결과 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega(e)} \rho c_p (-v) \frac{\partial T}{\partial \xi} N_i d\Omega - \int_{\Omega(e)} \left(\frac{\partial N_i}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_1} q_i N_i d\Gamma - \int_{\Gamma_2} h(T-T_a) N_i d\Gamma \end{aligned} \quad (4)$$

(4)식에 다음과 같은 경계조건 (5)식을 대입하고 적분 형태를 행렬식으로 정리하면, 결과적으로 다음과 같은 (6)식으로 나타난다.

$$\begin{aligned} & k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad \text{on } \Gamma_1 \\ & k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T-T_a) \quad \text{on } \Gamma_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \int -\rho c_p v [N]^T \left[\frac{\partial N}{\partial \xi} \right] [T] d\Omega \\ & + \left(\int [B]^T [k] [B] d\Omega + \int h [N]^T [N] ds \right) [T] \\ & = \int q [N]^T ds + \int h T_a [N]^T ds \end{aligned} \quad (6)$$

위의 결과식에서 열원 q 의 모델은 정규분포(Gaussian distribution)로 재료에 플럭스(flux) 형태로 유입된다고 가정하였다. 이러한 열원 식은 온도 분포 해석과 민감도 해석 시에 동일하게 사용하였다. 사용한 열원 분포식은 다음과 같다.

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r_b^2} \text{Exp}\left[-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \quad (7)$$

여기서, $Q=A(\text{absorptivity}) \times (Q_L)$ (laser output power), $r_b =$ 전 열유속의 95%가 입력되는 빔 반경(characteristic beam radius)이다.

2.2 민감도 해석

본 연구에 사용된 레이저 표면 처리의 주요 공정변수인 레이저 빔의 반경과 빔의 이송속도를 선택하였다. 민감도 해석 방법은 온도분포 해석과 동시에 직접미분법을 이용하여 민감도 해석 식을 정식화 한 후에 온도 분포와 동시에 민감도 값을 구하는 효과적인 방법을

선택하였다. 또한 경화층이 형성되는 기준 온도는 A_s 로 그 기준 온도는 723°C 로 가정하였다⁽¹⁰⁾. 또한 온도 분포에 따른 열 물성 값들을 고려하여 온도해석 및 민감도 해석을 동시에 수행하였다⁽¹¹⁾.

민감도 해석의 수식화는 위의 온도분포 해석의 결과식으로부터 출발한다. (6)식을 간단히 표현하면 (8)식과 같이 표현할 수 있다.

$$[\psi](b,T) = [K][T] - [R] = 0 \quad (8)$$

여기서, b 는 임의의 설계 변수, T 는 온도, $[K]$ 는 시스템의 전도 행렬, $[T]$ 미지 온도 행렬, $[R]$ 은 열 하중 행렬이다.

온도분포에 대한 각 공정변수의 민감도를 계산하기 위해서 먼저 레이저 빔의 이송속도를 공정변수로 놓으면 다음과 같은 일반적인 미분에 의한 민감도 식이 된다.

$$\left[\frac{\partial \psi}{\partial v}\right] = \left[\frac{\partial K}{\partial v}\right][T] + K\left[\frac{\partial T}{\partial v}\right] - \left[\frac{\partial R}{\partial v}\right] = 0 \quad (9)$$

각 항들을 자세히 관찰하면 다음과 같이 표현할 수 있다. 첫 번째 전도항에 대한 미분 항은 (10)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial K}{\partial v} = \frac{\partial K}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial v} \quad (10)$$

온도에 대한 미분 항을 포함한 비선형을 고려하면 (11)식을 포함한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial T} &= \int (\rho \frac{\partial C}{\partial T})_v [N]^T \left[\frac{\partial N}{\partial \xi} \right] d\Omega \\ &+ \int [B]^T \left[\frac{\partial k}{\partial T} \right] [B] d\Omega \end{aligned} \quad (11)$$

또한 열 하중 항에 대한 미분은 (12)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial R}{\partial v} = \int \frac{\partial q}{\partial v} [N]^T ds \quad (12)$$

우변의 미분 항을 각각 구하고 이들 항을 다시 정리하면 온도분포 유한요소 수식화와 유사한 형태로 아래 (13)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\tilde{K}]\left[\frac{\partial T}{\partial v}\right] = [\tilde{R}] \quad (13)$$

여기서, 각 항들은 다음 (14)식으로 표현된다.

$$[\tilde{K}] = \frac{\partial K}{\partial T} [T] + [K]$$

$$[\tilde{R}] = \int \frac{\partial q}{\partial v} [N]^T ds + \left(\int \rho c_p [N]^T \left[\frac{\partial N}{\partial \xi} \right] d\Omega \right) [T] \quad (14)$$

또한, 레이저의 열원에 대한 미분식은 아래의 식과 같이 표현되며 $C=Q/v$ 를 일정하게 가정하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} q(r) &= \frac{3Q}{\pi r_b^2} \text{Exp}\left[-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] = \frac{3Cv}{\pi r_b^2} \text{Exp}\left[-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \\ \left\{ \frac{\partial q}{\partial v} \right\} &= \frac{3C}{\pi r_b^2} \text{Exp}\left[-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (15)$$

이와 유사하게, 레이저 빔 반경에 관한 민감도 해석식도 빔 이송속도 민감도 해석식의 전개와 유사하게 다음과 같이 구할 수 있다. 위에서 나타낸 (7)식을 빔 반경에 대해 미분하면 (16)식과 같이 나타나고, 각 항들을 위의 이송속도 관계와 유사하게 정리해보면 (17), (18)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K]\left[\frac{\partial T}{\partial r_b}\right] = \left[\frac{\partial R}{\partial r_b}\right] - \left[\frac{\partial K}{\partial r_b}\right][T] \quad (16)$$

$$\left[\frac{\partial R}{\partial r_b}\right] = \int \frac{\partial q}{\partial r_b} [N]^T ds \quad (17)$$

$$\left[\frac{\partial K}{\partial r_b}\right] = \frac{\partial K}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r_b} \quad (18)$$

이들 항을 최종 유한 요소관계식 형태로 표현하면 (19)식과 같이 나타나며, 각 항 요소들은 수식 (20), (21)식에 나타내었으며 열원에 대한 미분 항은 위에서 구한 빔 이송속도 민감도 식의 경우와 동일하다.

$$[\tilde{K}]\left[\frac{\partial T}{\partial r_b}\right] = [\tilde{R}] \quad (19)$$

$$[\tilde{K}] = \frac{\partial K}{\partial T} [T] + [K] \quad (20)$$

$$[\tilde{R}] = \int \frac{\partial q}{\partial r_b} [N]^T ds \quad (21)$$

3. 유한요소 해석과정

본 연구에서 사용된 유한요소 해석방법은 온도분포 해석과 민감도 해석을 동시에 수행하는 것으로 하였다. 온도분포 해석은 이동 좌표계를 사용한 3차원의 준 정상상태(quasi-stationary state)로 가정하여 사

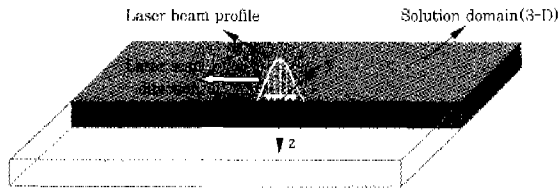


Fig. 1 Schematic diagram of the laser scan system and solution domain.

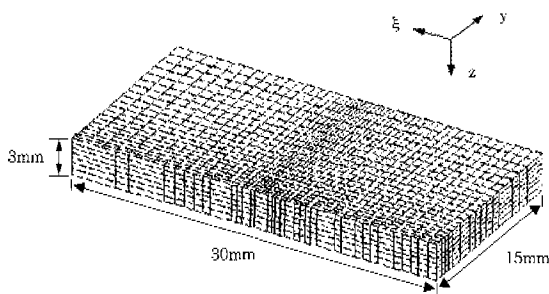


Fig. 2 Finite element mesh and size used in thermal and sensitivity analysis

용하였으며 그 개략적인 관계는 Fig. 1에 나타내었다. 수치계산에 사용된 요소의 종류는 8 node solid element를 사용하였으며 열원이 집중되어 온도구배가 심한 부분에서는 요소의 크기를 보다 조밀하게 하였다. 사용된 절점(node)의 수는 8,568개이며 요소 수는 7,000개로 유한 요소의 분포와 모델의 크기는 Fig. 2에 나타나있다.

또한, 해석 조건에 적용한 경계조건은 위에서 언급한 정규분포 형태의 열원이 플럭스 형태로 유입하게 하였고, 입열부를 제외한 주위의 각 영역에서 대류 조건을 Fig. 3에 나타낸 조건과 같이 고려하였다.

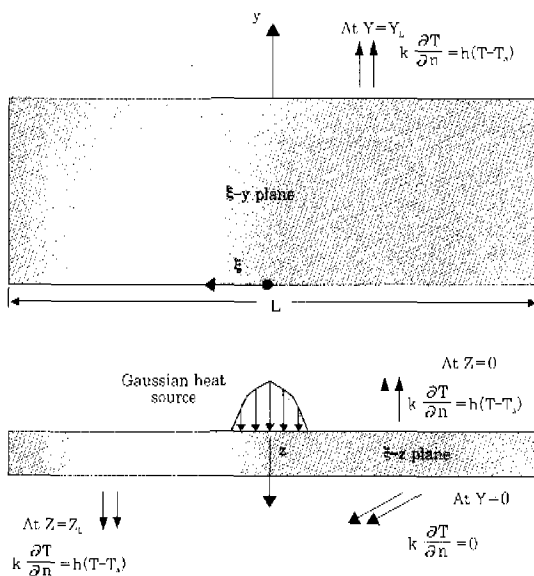


Fig. 3 Coordinates system and applied boundary conditions of FE model

Table 1 Selected processing parameters for temperature and sensitivity analysis.

$r_b(\text{mm})$	$C=10(\text{J/mm})$		$C=20(\text{J/mm})$		$C=30(\text{J/mm})$	
	$Q(\text{w})$	$v(\text{mm/s})$	$Q(\text{w})$	$v(\text{mm/s})$	$Q(\text{w})$	$v(\text{mm/s})$
1.0	180	18	200	10	300	10
	250	25	200	13	390	13
	300	30	400	20	600	20
	-	-	500	25	750	25
1.5	180	18	200	10	300	10
	250	25	260	13	390	13
	300	30	400	20	600	20
	400	40	500	25	750	25
2.0	180	18	200	10	300	10
	250	25	260	13	390	13
	300	30	400	20	600	20
	400	40	500	25	750	25

실제 수치 계산에 사용된 열 입력 조건은 Table 1.과 같다. 이러한 조건은 단위 길이 당 동일한 열량을 가지는 $Q/v=C$ (J/mm) 값을 정의하고 각 10, 20, 30 J/mm인 경우에 대해 주어진 빔 반경과 이송속도를 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 온도분포해석

레이저 표면경화 처리시의 온도분포는 3차원의 준 정상상태로 가정하여 유한요소법에 의해 계산하였다. 이와 같은 준 정상상태 가정은 계산 시간을 줄일 수 있었으며, 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 레이저 빔의 흡수율(absorptivity)은 전 해석 조건에서 동일하게 35%로 가정하여 전체 입열량의 계산에 사용하였다. 또한 동일한 열량 조건 하에서 결과를 구하기 위하여 단위 길이 당 입열량이 일정한 ($C=Q/v$) 조건에서 온도분포와 민감도 값을 비교하였다.

Fig. 4에는 수치해석에 의한 결과값을 기존의 실험 값과 비교 검증하기 위해 주어진 조건에서 입열의 크기에 대한 경화층의 폭과 깊이에 대한 결과를 비교하였다. 주어진 입열 조건에서는 일반적으로 입열량의 크기가 증가함에 따라 경화층의 폭과 깊이가 모두 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 수치해석 결과는 실험 결과와 비교적 일치하는 경향을 나타내고 있으며, 열 입력의 크기에 따라 변화를 보이는 것은 열 입력의 크기가 흡수율에 따라 변화함을 고려하

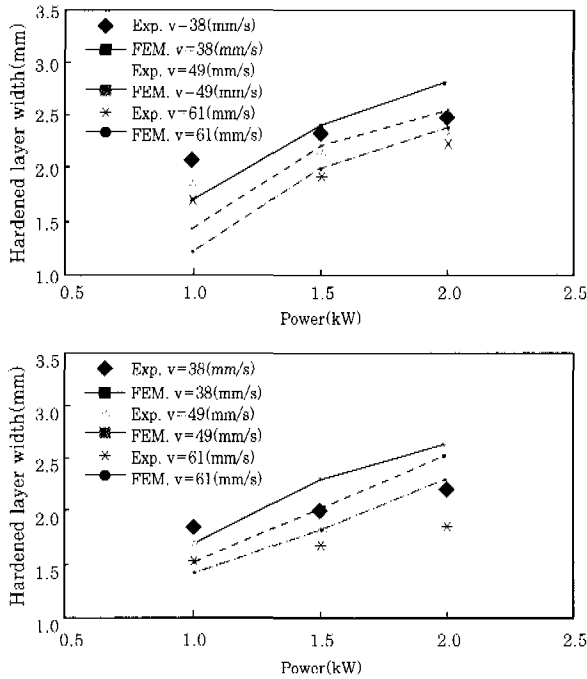


Fig. 4 Comparison of hardened profile dimensions with various laser power(experimental data ref.7).

지 않았기 때문이라 생각된다.

Fig.5는 $C(=Q/v)$ 조건에 따른 경화층의 크기를 나타내고 있다. 결과에 의하면, 일반적으로 단위 길이 당 입열 조건인 C 의 크기가 10J/mm 에서 30J/mm 로 증가함에 따라 경화층의 폭과 깊이 모두 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 경화 폭의 크기는, 동일한 단위 길이 당 입열 조건 내에서는 빔 반경의 크기와 속도가 변함에 따라 그 크기의 변화를 나타내었다. 상대적으로 저 입열량을 가지는 $C=10J/mm$ 인 경우, 주어진 각 빔 반경과 빔 이송 속도에 따른 경화 폭의 크기를 보면 저속도 구간에서 빔 반경이 1.5mm 인 경우와 1.0mm 인 경우에서 경화폭 크기의 천이구간이 나타남을 볼 수 있다. 상대적으로 큰 반경을 가지는 2.0mm 인 경우는 저속도 구간과 고속도 구간에서 큰 차이를 나타내고 있으며 이는 동일한 입열 조건에서 빔 반경의 크기에 따라 경화층의 크기가 달라짐을 의미한다. 유사하게 $C=20J/mm$ 일 때의 결과를 보면 주어진 속도 구간에서 빔 반경의 크기가 변화함에 따라 경화층 크기의 천이를 보임을 알 수 있다. $C=30J/mm$ 인 경우는 열 입력에 의한 크기가 상대적으로 커서 빔 반경의 크기가 커짐에 따라 경화폭의 경우는 오히려 커짐을 알 수 있다. 결과적으로, 경화층의 깊이는 빔 반경의 크기와 속도변화에 따라 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있으나, 경화 폭은 주어진 구간에서 각 빔 반경의 크기 변화에 따라 증가 후 감소하는

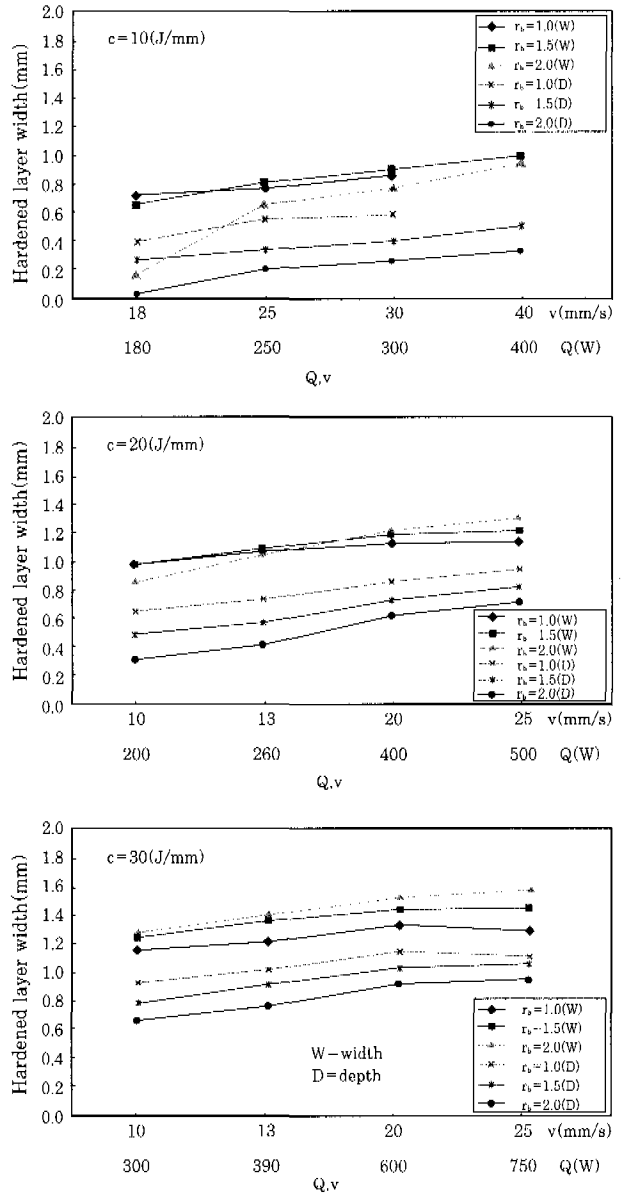


Fig. 5 Hardened half width and depth for uniform net heat input conditions.

천이구간을 가짐을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터, 빔의 반경과 빔 이송 속도 조건 사이에 경화폭의 크기를 결정하는 최적의 조건이 존재함을 알 수 있다.

4.2 민감도 해석

민감도 해석 결과는 레이저 빔 반경이 1.5mm인 각 입열량의 크기 변화에 대해 각 경화폭과 경화두께의 빔 반경과 빔 이송속도의 민감도 크기를 고찰하였다. Fig. 6에는 각각의 일정 입열 조건에 대한, 경화층 빔 반경에 대한 민감도를 나타내고 있다. 빔 반경에 대한 민감도의 경우 $C=10J/mm$ 인 저 입열의 경우 음의 민감도 값을 가지다가 속도가 증가함에 따라 양의 값

을 가짐을 알 수 있다. 이것은 저 입열의 낮은 속도 하에서는 경화층 폭의 변화가 심하게 변동하고 있음을 나타낸다. 이는 Fig. 5에 나타나있는 경화폭의 천이영역을 보면 그 사실을 알 수 있다. 반면에 상대적으로 큰 입열의 경우, 즉, 빔반경이 1.5mm이고 $C=30\text{J/mm}$ 인 경우는 모두 양의 민감도 값을 가지는데 이는 주어진 모든 속도 변화구간에서 경화폭이 증가함을 알 수 있다. Fig. 7에서는 최대 경화폭을 가지는 지점에서 빔 이송속도에 대한 민감도를 나타내고 있다. 대부분의 입열 조건 구간에서 음의 민감도 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 속도가 증가함에 따라 모두 경화폭이 감소하고 있음을 나타내고 입열량이 증가함에 따라 그 민감도 정도가 빔 반경의 경우보다 상당히 크게 나타남을 알 수 있었다. 결과적으로, 빔 이송속도 민감도의 경우 입열량이 증가하면 경화폭의 변화가 속도 변화에 대해서 크기 변화가 심하게 나타남을 예측할 수 있다.

최대 경화층 두께를 가지는 점에서의 민감도는 위에서 언급한 경화폭의 경우와 같은 조건의 해석 결과를 Fig. 8 과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 것

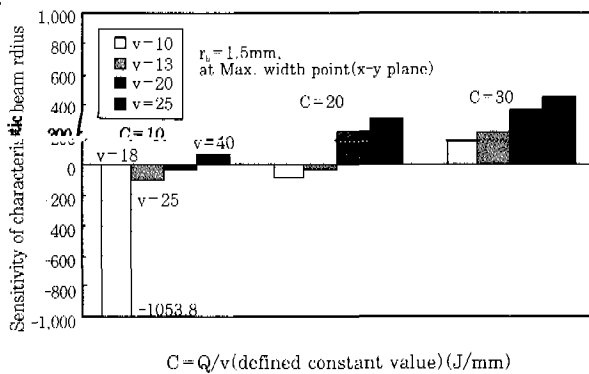


Fig. 6 Sensitivity analysis results of characteristic beam radius(at maximum hardened width point: $r_b=1.5\text{ mm}$).

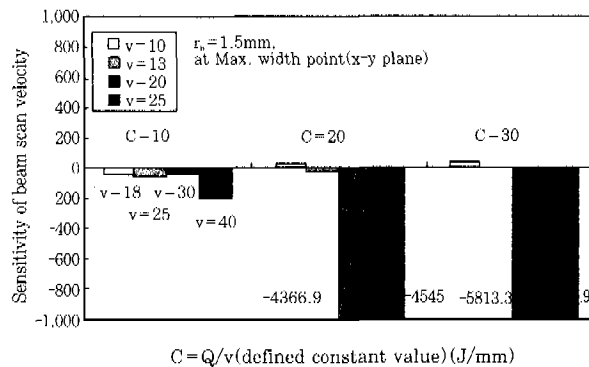


Fig. 7 Sensitivity analysis results of laser scan velocity (at maximum hardened width point: $r_b=1.5\text{ mm}$).

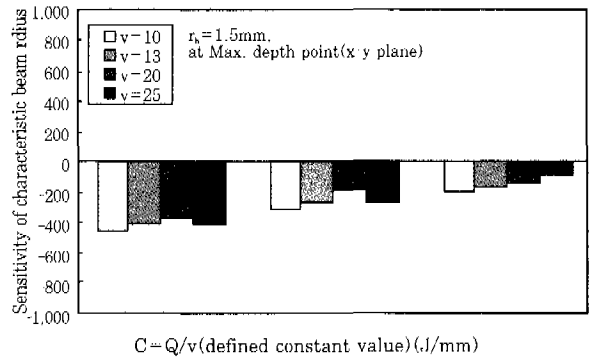


Fig. 8 Sensitivity analysis results of characteristic beam radius(at maximum hardened depth point: $r_b=1.5\text{ mm}$).

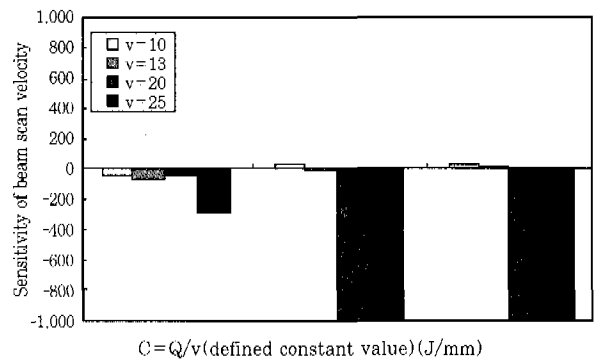


Fig. 9 Sensitivity analysis results of laser scan velocity(at maximum hardened depth point: $r_b=1.5\text{ mm}$).

과 같이, 경화층 두께에 대한 빔 반경의 민감도는 전체적으로 음의 값을 가짐을 알 수 있다. 즉, 주어진 전 조건에서 빔 반경의 크기 변화에 대해서 경화층의 깊이는 감소함을 의미한다. 또한 빔 반경이 1.5mm인 경우 입열량의 크기가 증가함에 따라 민감도는 감소하였다. 이러한 결과는 Fig. 5에 나타난 경화 깊이에 대한 크기 변화를 보면 알 수 있다. Fig. 9는 경화층 두께에 대한 빔 이송속도 민감도의 경우를 나타낸다. 전체적으로 경화폭의 경우와 유사하게 거동하였으며 입열량이 증가함에 따라 상대적으로 큰 음의 민감도를 나타내고 있다. 이러한 결과는 빔 반경이 커짐에 따라 더욱 현저하게 나타났으며 상대적으로 높은 입열 조건인 경우에 경화 깊이가 쉽게 변화할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

레이저 표면 경화 처리시의 경화층의 크기를 3차원 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 또한 직접미분법을 이용하여 레이저 빔 반경의 변화와 빔 이송속도에 따른 경화층의 크기 변화에 대한 민감도를 단위 길이 당 입열이 동일한 여러 가지 조건 하에서 계산하고 이

를 비교한 후 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 온도분포 계산 결과 경화층의 크기는 참고문헌의 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었고, 입열량의 증가에 따라 경화층의 크기는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

(2) 온도분포와 민감도 계산 결과에 의하면 빔 반경과 속도 그리고 입열 조건에는 최적의 값이 존재함을 알 수 있었고, 본 연구의 주어진 조건에서 입열량이 $C=30J/mm$ 이면 빔 속도의 변화에 대해 경화층 크기의 천이구간은 존재하지 않고 증가하였다.

(3) 민감도 해석 결과 경화폭의 변화양상은 상대적으로 저 입열의 낮은 속도 구간에서 빔 반경에 대한 민감도가 크게 나타났고, 고입열 구간에서는 속도에 대한 민감도가 크게 나타남을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 2000년도 전남대학교 학술연구비와 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. E. J. Haug, K. K. Choi and V. Komkov: Design Sensitivity Analysis of Structural Systems, Academic Press, Orlando, FL (1986)
2. R. Tomovic, Sensitivity Analysis of Dynamic Systems: McGraw-Hill, New York (1963)
3. R. K. Brayton and R. Spence: Sensitivity and Optimization, Elsevier, New York (1980)
4. H. J. Kelly, George Leitmann: Method of Gradients Optimization Techniques with Applications to Aerospace Systems, Academic Press, Orlando, FL (1962)
5. C. L. Irwin, and T. J. Obrien: Sensitivity Analysis of Thermodynamics Calculations, U.S. Dept. of Energy Rept., DOE/METC/82-53 (1982)
6. H. A. Dwyer, T. Peterson, and J. Brewer: Sensitivity Analysis Applied to Boundary Layer Flow, Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Springer-Verlag, NY (1976)
7. H. M. Adelman and R. T. Haftka: Sensitivity Analysis of Discrete Structural Systems, AIAA Journal, 24-5(1986), 823-832
8. R. C. Reed, Z. Shen, J. M. Robinson and T. Akbay: Laser transformation hardening of steel: effects of beam mode, beam size and composition, Materials Science and Technology, 15(1999), 109-118
9. Koichi Masubuchi: Analysis of welded structure, Pergamon press (1980)
10. Y. S. Yang: A study on the residual stress in thermal processing by the arc and Laser beam, Ph.D. thesis, KAIST (1991)
11. Metal Handbook, American Society for Metals (10th Edition), Metal Park, OH (1990) Vol.1