

레이저 표면 경화처리 공정변수의 민감도 해석에 관한 연구

A study on the sensitivity analysis of processing parameters for the laser surface hardening treatment

이 세 환*, 양 영 수**

전남대학교 공과대학 기계공학과

ABSTRACT A methodology is developed and many 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 for deciding the more effective laser input parameters for laser surface hardening treatment are 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 applied for sensitivity analysis. The interesting processing parameter is taken as the laser scan velocity and characteristic beam radius (r_b) of the sensitivity of the temperature T versus v and r_b is analyzed. And these sensitivity results obtained in another parameters are fixed condition. To verifying the numerical analysis results, hardened layer dimensions (width and depth) of the numerical analysis compared with the results of an experimental data.

1. 서 론

구조 시스템 설계변수의 변화에 따른 반응 민감도를 이용한 해석 방법이 최근 상당한 발전을 함과 동시에 여러 분야에서 다양하게 이용되고 있다¹⁻⁶⁾. 이러한 민감도 해석 방법의 발달은 설계 시스템의 최적화 조건을 찾기 위한 방법과 함께 발달하고 있다. 또한 민감도 해석, 그 자체의 의미만으로도 목적함수에 대한 시스템 변수의 정성적인 분석이 가능하다. 지금까지 발달되어온 이산 구조시스템의 전형적인 민감도 해석방법은, 유한차분법(FDM), 직접미분법(DDM), 수반변수법(AVM) 등이 있으며 각각의 장단점을 가진다.

본 연구에서는, 위에서 언급한 민감도 해석 방법 중 효율적으로 적용 가능한 방법을 선택하여, AISI 1045 강판의 레이저 표면 경화 처리 시 주요한 공정 변수인 빔 반경과 빔 이송속도에 대한 민감도 해석을 하였다. 레이저를 이용한 표면 경화 처리 시 사용되는 공정변수의 변화에 따른 민감도 해석 방법을 이용하면 어떤 공정변수가 얻고자 하는 경화 폭 이나 깊이에 민감한 정도를 알 수 있다. 레이저 표면 처리 시에는 레이저빔에 의해 재료가 가열되는 과정에서 열변형이 발생할 수 있다. 이는 레이저빔의 초점거리를 달라지게 하고 이것은 곧 레이저 빔 반경이 달라지는 것을 의미한다. 그러므로 본 연구에서는 빔 반경의 변화와 빔 이송속도에 대한 경화층의 크기 변화에 민감한 정도를 알고자 하였다. 레이저 표면 경화 처리 공정을 상대 방정식으로 표현되는 온도 분포 지배 방정식을 3차원의 유한요소법을 이용하여 계산하였고, 직접 미분법을 사용하여 공정변수에 대한 민감도 해석을 하였다. 빔 반경과 빔 이송속도에 대한 민감도 계산 시, 다른 공정변수 들은 고정하였고 특히 레이저빔으로부터 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 실험결과 이미 얻어진 온도분포 결과를 수치해석 결과와 비교함으로써 검증하였다⁷⁾.

2. 유한요소 수식화

2.1 온도 분포 해석

온도 분포해석을 위한 수치해석은 유한요소법을 이용하였다. 삼차원의 비정상 에너지 방정식으로부터 출발하여 이동좌표계를 사용하여 정리하고 준 정상상태를 가정하면 아래(1)식은 (2)식과 같이 표현된다. 해석영역과 경계조건은 Fig.1과 Fig.2에 표시하였다.

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

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

이러한 관계식 (2)는 가중잔차법을 이용하여 각 부분을 정리하고 적분을 취하면 다음 (3)식과 같은 유한 방정식이 된다.

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

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

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

위에 식에 다음과 같은 경계조건 식 (5)을 대입하고 행렬식의 적분형태로 정리하면, 결과적으로 다음과 같은 식(6)으로 나타난다.

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

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

2.2 민감도 해석

본 연구에 사용된 레이저 표면 처리의 중요 공정변수인 레이저빔의 반경과 빔의 이송속도를 선택하였다. 민감도 해석 방법은 온도분포 해석과 동시에 직접미분법을 이용하여 민감도 해석 식을 정식화 한 후에 온도분포와 동시에 민감도 값을 구하는 효과적인 방법을 선택하였다. 또한 경화층이 형성되는 기준 온도는 As 온도를 723℃로 가정하였다⁷. 또한 온도분포에 따른 열 물성치들을 고려하여 온도해석 및 민감도 해석을 해석하였다.

민감도 해석의 수식화는 위의 온도분포 해석의 결과 식으로부터 출발한다. 위 (6)식을 간단히 표현하면 아래 (7)식과 같이 표현할 수 있다.

$$[\mathbf{W}](b, T) = [\mathbf{K}][\mathbf{T}] - [\mathbf{R}] = \mathbf{0} \quad (7)$$

여기서, $[\mathbf{K}]$ 는 시스템의 전도 행렬, $[\mathbf{T}]$ 미지 온도 행렬, $[\mathbf{R}]$ 은 열 하중 행렬이다.

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

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

여기서, 우변의 미분 항을 각각 구하여 다시 써보면 온도분포 유한요소 수식화와 유사한 형태로

$$\begin{aligned} [\tilde{\mathbf{K}}] \left[\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial v} \right] &= [\tilde{\mathbf{R}}] \\ [\tilde{\mathbf{K}}] &= \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial T} [\mathbf{T}] + [\mathbf{K}] \\ [\tilde{\mathbf{R}}] &= \int \frac{\partial q}{\partial v} [N]^T ds + \left(\int \rho c_p [N]^T \left[\frac{\partial N}{\partial \xi} \right] d\Omega \right) [\mathbf{T}] \end{aligned} \quad (10)$$

관계식을 정리할 수 있다. 결과 식은 아래 (10)식과 정리된다.

또한, 레이저의 열원은 가우시안(Gaussian) 분포를 가정하였으며⁸, 아래의 식과 같이 표현되며 $C=q/v$ 를 일정하게 가정하여 계산하였다.

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

$$\left\{\frac{\partial q}{\partial v}\right\} = \frac{3C}{\pi r_b^2} \text{Exp}\left[-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \quad (11)$$

이와 유사하게 레이저빔 반경에 관한 민감도 해석식도 구할 수 있으며 계산에 적용하였다.

3. 결과 및 토의

레이저 표면경화 처리시의 온도분포와 민감도 값의 계산은 삼차원의 준 정상상태 가정을 한 유한요소법에 의해 계산하였다. 이와 같은 준 정상상태 가정은 계산 시간을 줄일 수 있었으며, 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 레이저빔의 흡수율은 동일하게 35%로 가정하여 열 입력에 사용하였다. 또한 동일한 열량 조건하에서 결과를 구하기 위하여 $C=q/v$ 인 여러 가지 조건에서 온도 분포와 민감도 값을 비교하였다. Fig.3에 입열의 크기에 대한 경화층의 깊이와 폭을 실험에 의한 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 실험 결과와 거의 동일한 경향을 나타내고 있으며, 열 입력의 크기에 따라 변화를 보이는 것은 입열의 크기가 흡수율에 따라 변화함을 고려않았기 때문이라 생각된다. Fig.4는 $C=20$ 인 경우의 각 빔 반경과 빔 이송 속도에 따른 경화층의 크기를 나타낸다. 경화층의 깊이는 빔 반경의 크기와 속도변화에 따라 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있으나, 경화폭은 이 구간에서 각 빔 반경에 따라 천이구간을 가짐을 알 수 있었다. 이는 빔의 반경과 빔 이송속도간의 최적의 조건이 존재함을 알 수 있다.

민감도 해석 결과 레이저빔 반경이 1.5mm인 경우를 Fig.5와 Fig.6에 각각의 일정 입열 조건에 대한, 경화층 빔 반경에 대한 민감도와 빔 이송속도에 대한 민감도 값을 나타내고 있다. 빔 반경의 민감도의 경우 $C=10$ 인 저 입열의 경우 음의 민감도 값을 가지다가 속도가 증가함에 따라 양의 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 저 입열의 낮은 속도 하에서는 경화층 폭의 변화가 심하게 변동하고 있음을 나타낸다. 이는 Fig.4에 나와있는 경화폭의 천이역을 보면 그 사실을 알 수 있다. 반면에 저 입열의 경우, 즉, 빔 반경이 1.5mm이고 $C=30$ 인 경우는 모두 양의 민감도 값을 가지는데 이는 모든 속도 변화구간에서 경화폭이 증가함을 알 수 있다. Fig.6에서는 빔 이송속도에 관한 민감도를 나타내고 있다. 거의 모든 조건 구간에서 음의 값, 즉 속도가 증가함에 따라 모두 경화폭이 감소하고 있음을 나타내고 그 민감도 정도가 빔 반경의 경우보다 상당히 크게 나타남을 알 수 있었다.

4. 결 론

레이저 표면 경화 처리시의 경화층의 크기를 준 정상상태 조건의 삼차원 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 조건하에서 계산하고 이를 비교하였다.

- (1) 온도분포 계산 결과 경화층의 크기는 참고문헌의 실험 결과와 잘 일치함을 나타내었고 입열 량의 증가에 따라 경화층의 크기는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 온도분포와 민감도 계산 결과 빔 반경과 속도 그리고 입열 조건에는 최적의 값이 존재함을 알 수 있었고, 본 연구의 주어진 조건에서 입열 량이 일정량 이상($C=30$)이면 빔 속도의 변화에 대해 경화층 크기의 천이구간은 존재하지 않고 증가하였다.
- (3) 민감도 해석 결과 저 입열의 낮은 속도 구간에서 빔 반경에 대한 민감도 크게 나타났고, 고 입열 구간에서는 속도에 대한 민감도가 크게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Haug, E. J., K. K. Choi and V. Komkov, Design Sensitivity Analysis of Structural Systems ,

Academic Press, Orlando, FL ,1986

2. Tomovic, R., Sensitivity Analysis of Dynamic Systems, McGraw-Hill, New York, 1963
3. Brayton, R. K. and R. Spence, Sensitivity and Optimization, Elsevier, New York, 1980
4. Kelly, H. J., George Leitmann, Method of Gradients, Optimization Techniques with Applications to Aerospace Systems, Academic Press, Orlando, FL, 1962
5. Irwin, C. L., and T. J. OBrien, Sensitivity Analysis of thermodynamics Calculations , U.S. Dept. of Energy Rept., DOE/METC/82-53, 1982
6. Dwyer, H. A., and T. Peterson, A study of Turbulent Flow with Sensitivity Analysis, AIAA paper, 1980, 80-1397
7. Reed, R. C., 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, , 1999, 15:109-118
8. Yang, Y. S., A study on the residual stress in thermal processing by the arc and Laser beam , Ph.D. thesis, KAIST, 1991

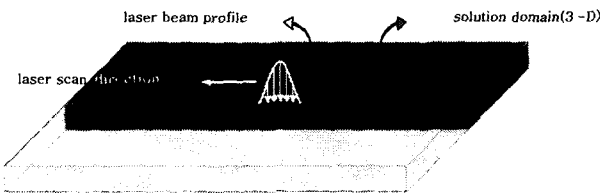


Fig.1 Schematic diagram of the laser scan system and solution domain.

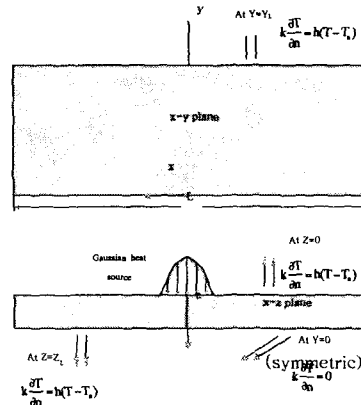


Fig.2 Coordinates system and applied boundary conditions of FE model

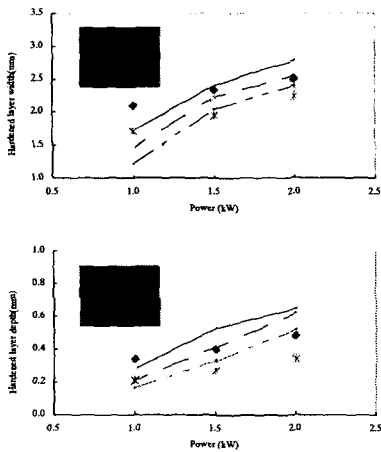


Fig.3. Comparison of hardened profile dimensions with various laser power (ref.7)

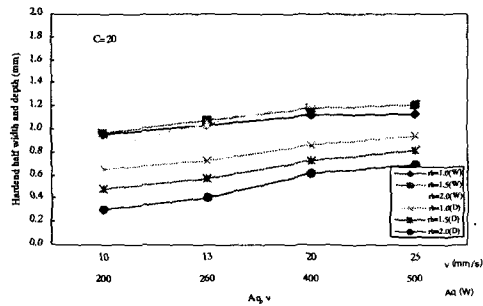


Fig.4. Hardened dimensions for uniform net heat input

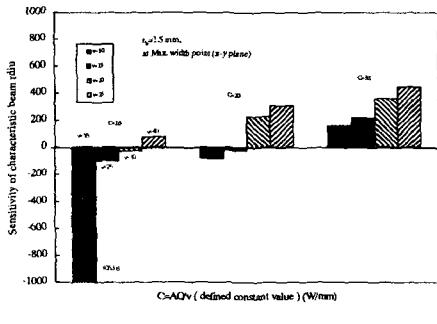


Fig. 5 Sensitivity analysis results of characteristic beam radius at maximum hardened width point.

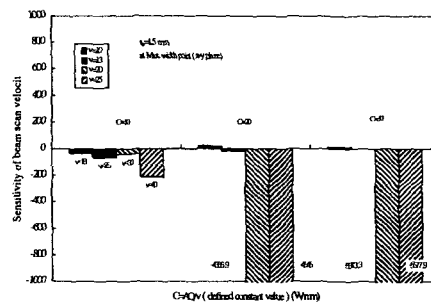


Fig.6 Sensitivity analysis results of laser scan velocity at maximum hardened width point.