고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 냉연강판 절단 공정의 3 차원 열전달 해석

김민수*(조선대 대학원 기계공학과), 안동규(조선대 기계공학과), 이상훈(조선대 대학원 기계공학과),
유영태(조선대 기전공학과), 박형준(조선대 산업공학과), 신호준(조선대 대학원 기전공학과)

Three-dimensional heat transfer analysis of laser cutting process for CSP 1N sheet using high power CW Nd:YAG laser

M. S. Kim(Graduate School CSU), D. G. Ahn(Dept. of Mech. Eng. CSU), S. H. Lee(Graduate School CSU),
Y. T. Yoo(Dept. of Mechatronics Eng. CSU), H. J. Park(Dept. of Industrial Eng. CSU),
H. J. Shin(Graduate School CSU)

ABSTRACT

The objective of this research work is to investigate into the three-dimensional temperature distribution using quasi steady-state heat transfer analysis for the case of the laser cutting of CSP 1N sheet using high power CW Nd:YAG laser. The laser heat source is assumed as a volumetric heat source with a gaussian heat distribution in a plane. Through the comparison of the results of analyses with those of the experiments, the optimal finite element model is obtained. Finally, characteristics of the three-dimensional heat transfer and temperature distribution have been estimated by the optimal finite element model.

Key Words : CW Nd:YAG laser (연속파형 Nd:YAG 레이저), CSP 1N sheet (CSP 1N 냉연강판), Three-dimensional heat transfer analysis (3 차원 열전달 해석)

1. 서론

레이저가 산업적으로 각광을 받는 이유는 레이저 가공 공정은 매우 작은 열영향부를 발생시키며, 가공시 제거되는 재료의 양이 매우 작을 뿐만 아니라, 비접촉 가공으로 인해 가공저항이 발생하지 않는 장점을 가지고 있기 때문이다. 또한, 레이저 절단공정은 레이저의 초점크기 내에 고출력의 에너지가 집속됨과 동시에 고속으로 절단하므로 레이저 열에 의한 가공재료의 열반경이 매우 적어 가공재료 내부에 잔류응력을 작게 발생시키고, 가공 후 열변형이 최소화되어 고속/정밀 제품 절단이 가능하다.

이러한, 장점 때문에 오늘날 자동차/선박/전자제품 등 고정밀 절단 및 용접이 필요한 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다. 특히, Nd:YAG 레이저는 레이저의 안정성이 높고, 고출력을 얻을 수 있으며, 1.06 ㎛ 의 파장을 가지고 있어 10.6 ㎛ 의 파장을 가진 CO_2 레이저 보다 가공물의 빔 반사율이 매우 낮아 Nd:YAG 레이저 가공의 산업적 적용과 학문적 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편, Ghany 와 Newishy 는 펄스와 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 1.2 mm 스테인레스 판재 절단에 대한 연구를 수행하였다.[1] Tsirkas 등은 SYSWELD 를 이용하여 Butt-joint 레이저 용접 공정의 유한요소해석에 대한 연구를 수행하였다.[2] Labudovic 등은 레이저 표면처리에 대한 3 차원 유한요소 모델링에 관한 연구를 수행하였다.[3] Lee 등은 비드 용접과 관련된 레이저 키홀 용접의 열원 모델링에 대한 연구를 수행하였다.[4]

위와 같은 여러가지 레이저 가공 및 유한요소 모델해석에 대한 선행 연구가 수행 되었으나, 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 박판재 절단 공정의 3 차원 열전달 해석에 관한 선행 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이

저를 이용한 2 mm 이하의 CSP 1N 냉연강판 절단 공정의 3 차원 열전달 해석을 통해서 재료 내부의 3 차원 열전달 특성과 온도분포에 대한 분석을 수행하였다.

2. 모델링 및 해석방법

2.1 지배 방정식

레이저 절단공정에서의 비정상 온도분포 T(x,y,z,t) 는 3 차원 비정상 열전도 방정식인 식 (1) 을 만족시켜야 한다.

$$\vec{\nabla} \cdot (k\vec{\nabla} T) + \dot{q} = \rho c \dot{T} \tag{1}$$

열입력이 이동열원 형태로 주어질 경우, 열원에 좌표계가 부착되어 이동하는 것으로 가정하여 준정상상태 (Quasi steady state) 의 지배방정식으로 변환할 수 있다. 이때, 고정좌표계(x, y, z, T)와 이동좌표계(x_M, y_M, z_M, T)의 관계는 식(2)를 만족하여야 한다.

$$y_M = y - V_{tr} \times t, x_M = x, z_M = z \tag{2}$$

$$T(x,y,z,t) = T(x, y - V_{tr} t, z) \tag{3}$$

식 (1)에 이동좌표계를 적용하면, 3 차원 열전도 방정식은 식 (4)로 변환된다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y_M}\left(k\frac{\partial T}{\partial y_M}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c\left\{\frac{\partial T}{\partial t_M} - V_{tr} \times \frac{\partial T}{\partial y_M}\right\} \tag{4}$$

2.2 열원 모델링

레이저 절단공정에서 절단에 영향을 미치는 열에너지는 레이저에 의하여 투입되는 열량, 산소와의 반응에 의한 산화열, 피절단물의 기화열 등이 있다.

본 연구에서는 레이저 빔을 2 차원 가우시안 분포를 가지는 원통형 열원으로 가정하여 레이저에 의한 입열량은 식(5)와 같이 가정하였다.

$$Q_R(r,T) = a(T) \cdot \frac{2Q}{\pi r_0^2} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) \tag{5}$$

여기서 Q 는 레이저 출력, r_0 는 레이저 유효반경이고, r 은 레이저 빔 중심에서의 거리, a(T) 는 피절단물의 온도에 따른 레이저 흡수율이다.

절단부의 용융 침식면에서 산소 가스에 의한 산화 반응열이 추가적인 에너지로 공급되며, 용융금속의 기화로 손실되는 열에너지가 존재한다. 이 산화열과 기화열을 고려한 총 열입열량 식(6) 과 같이 표현할 수 있다.

$$f(t) = P_{rea} - P_{evp} + Q_R(r,T) \tag{6}$$

여기서, P_{rea} 는 산화열, P_{evp} 는 기화열, $Q_R(r,T)$ 는 레이저에 의한 입열량이다.

산화열에 의한 입열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{rea} = a_1 \cdot a_2 \cdot e \cdot n_0 \cdot \frac{dl}{dt} \tag{7}$$

a_1 은 산화율, a_2 는 산화열에 대한 흡수율, $e_r n_0$ 은 피절단물의 단위 체적당 발생하는 산화열, dl/dt 는 용융침식면의 속도이다.

용융 침식면에서 피절단물의 기화에 의해 빠져나가는 기화열은 Clausius-Clapeyron 식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{evp} = e_v \cdot \frac{133.3}{\sqrt{2\pi \cdot k_B \cdot T_S \cdot m_S}} \cdot 10^{(A/T_S)} \cdot 10^B \cdot T_S^C \tag{8}$$

P_{evp} 는 기화열, k_B 는 볼쯔만 상수, m_S 는 분자질량, e_V 는 한 분자당 기화열, T_S 는 용융침식면의 온도, A,B,C 는 상수이다.

2.3 유한요소 격자

모델링 시편의 크기는 실험결과 시편의 크기가 온도분포에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된 평면 넓이 20 mm X 20 mm 를 선정하였으며, 재료의 두께는 실험에서 사용된 1.0 mm, 2.0 mm 를 선정하였다.

Fig. 1 은 3 차원 열전달 해석을 위한 유한요소 격자이다. 모델링은 내부 열전달에 관여하는 3 차원 입체 요소와 외부 경계조건에 의한 열전달에 관여하는 2 차원 평면 요소로 구성되었다. 또한, 급격한 온도변화를 나타내는 중심부 부근에는 요소간격을 조밀하게 생성하여 보다 정확한 열전달 현상을 구현할 수 있도록 하였다. Table 1 은 두께별 유한요소 격자수 및 절점수를 나타낸다. Fig. 2 는 열전달 해석에 사용된 열전도 계수, 밀도 및 비열이다.

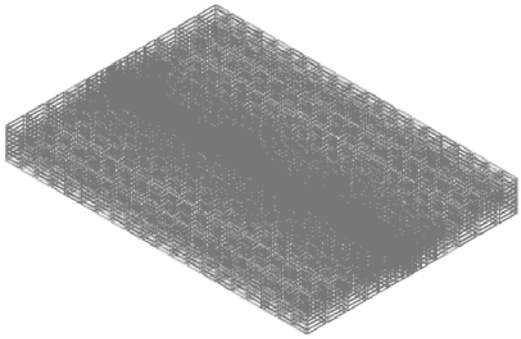

Fig. 1 Mesh of the Specimen (T=2.0 mm)

Table 1 Number of elements and nodes

T(mm)	Elements	Nodes
1.0	2,760	2,205
2.0	4,680	3,969

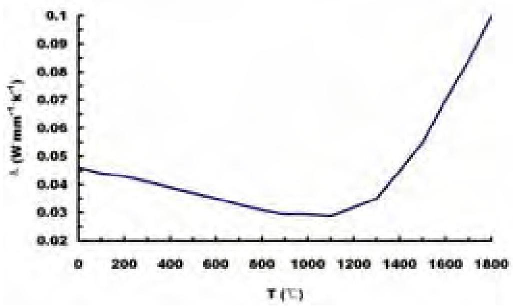

Fig. 2 (a) Thermal conductivity

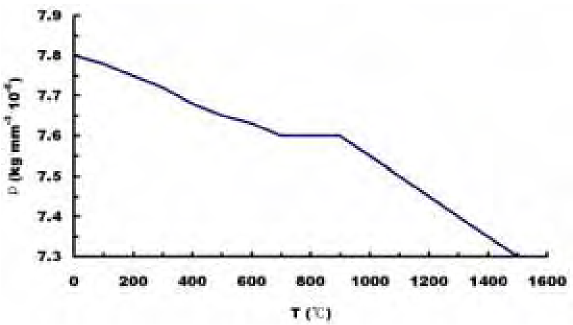

Fig. 2 (b) Density

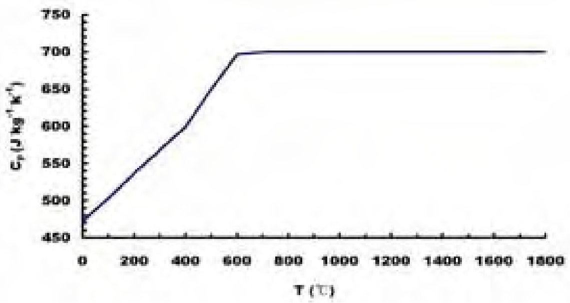

Fig. 2 (c) Specific heat

2. 4 경계 조건

레이저 절단공정 해석을 위한 경계조건은 대류와 복사에 의한 열전달이 고려되었다. 절단 가스가 직접 분사되는 시편의 윗면은 강제대류로 나머지 부분은 자연대류로 계산하였다. 대류에 열손실은 식(9) 와 같이 계산하였다.

$$q_{conv} = \bar{h}(T_{\infty} - T) \tag{9}$$

여기서, 는 평균 대류 계수이다.

평균 대류 계수는 식(10)으로 계산하였다.

$$Nu_L = \frac{\bar{h}_L L}{k} = C \cdot \mathrm{Re}_L^{1/2} \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \tag{10}$$

N_{uL} 은 너셀 수이고, L 은 기체의 흐름 방향을 기준으로 한 평판길이, Re 는 레이놀즈 수, Pr 은 프란틀 수이며, C 는 상수이다.

복사에 의한 열전달은 Stefan-Boltzmann 법칙으로부터 구한 식(11) 을 통해 계산하였다.

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \tag{11}$$

ε 은 방사율, A 는 표면 면적, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다.

2. 5 유한요소 해석 방법

본 연구에서는 준정상상태 3 차원 열전달 해석을 SYSWELD V6.10 을 이용하여 수행하였다. 레이저 열원은 전체 시편 길이의 75% 인 시작점으로부터 15 mm 에 위치한 것으로 가정하여 해석을 실시하였다.

해석조건은 ahn 등의 연구결과에 따라 유효 열입력량 (effective heat input : Qeff)이 같은 경우에 대하여 절단속력과 입열량에 관계없이 동일 조건으로 산정하였다. 유효 열입력량은 식 (12) 와 같이 계산된다.

$$Q_{eff} = \frac{P}{V_{tr}} \tag{12}$$

여기서 P 와 V_{tr} 은 각각 레이저 출력과 이동속력이다.

3. 해석 결과 및 고찰

3. 1 최적 유한요소 모델링 도출

온도 분포를 정확하게 예측하기 위하여 해석 모델의 보정하여 최적 유한요소 모델을 도출하였다. 해석 모델 보정은 해석 결과 도출된 용융 면적에 해당되는 부분의 폭을 절단폭으로 가정하고, Fig. 3

과 같이 해석에서 계산된 절단폭과 실험에서 얻어진 해당 조건의 절단폭에 값을 비교하여 해석 결과와 실험 결과의 차이가 ±5 % 될 때까지 반복 수행하였다.

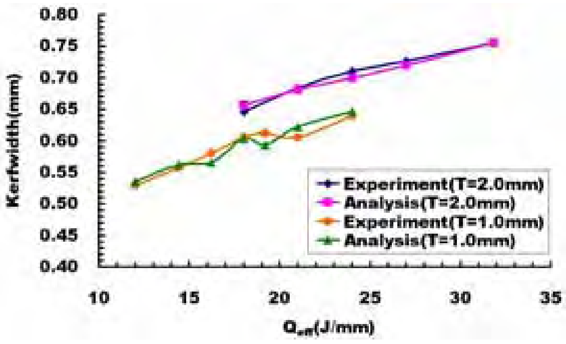

Fig. 3 Comparison of the results of analysis with those of experiments (kerfwidth)

3. 2 유한요소 해석 결과 및 고찰

3 차원 준 정상상태 열전달 해석을 통하여 1.0 KW 이상의 고출력에서 CW Nd:YAG 레이저로 CSP 1N 박판재를 절단할 때의 재료 내부 온도 분포를 계산하였다.

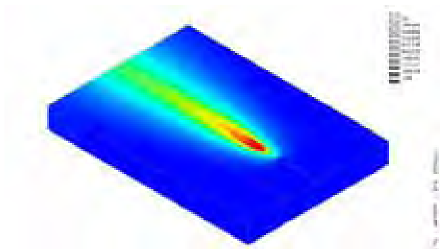

Fig. 4 Results of FE analysis (Q_{eff} = 18 J/mm, T = 2mm)

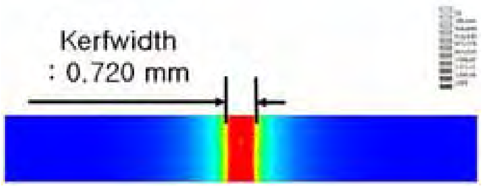

Fig. 5 Results of FE analysis (T=2.0 mm, Q_{eff} = 27 J/mm)

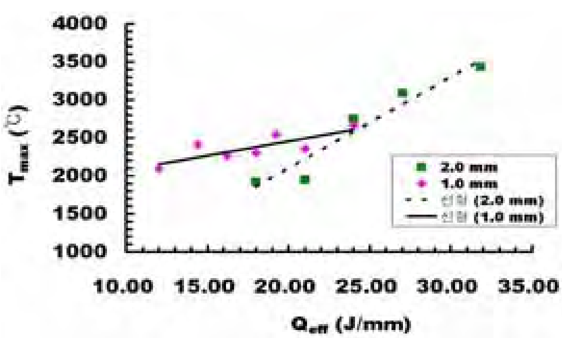

Fig. 6 Relationship between effective heat input and maximum temperature

해석 결과 Fig. 4 및 5 와 같이 열원중심에서 좌우 0.5 mm 내에서 급격한 온도 변화가 발생함을 알 수 있었다. 실험 결과와 동일하게 유효열입력량이 증가할 때, 절단폭이 증가하는 것을 알 수 있었다. 열원 모델을 원통형 열원으로 가정하였기 때문에 단면 온도분포는 두께 방향으로 일정하게 나타났다.

최대 온도는 용융부의 중심에서 발생하였으며, Fig. 6 과 같이 최대 온도 또한 유효 입열량 증가에 따라 선형적으로 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP 1N 냉연강판 절단 공정의 3 차원 열전달 해석을 수행하였다.

반복해석 기법을 이용한 절단폭 측면에서 실험결과와 일치하는 열전달 해석 모델을 수립할 수 있었다. 또한, 레이저 절단 공정중 발생하는 3 차원 온도 분포 특성을 알 수 있었다. 특히, 레이저 열원의 중심부를 중심으로 좌우로 0.5 mm 내에서 급격한 온도 변화가 발생함을 알 수 있었다. 용융재료내 최대 온도는 유효열입력량 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2004-042-D00229)

참고문헌

1. Ghany, K. A., "Cutting of 1.2mm Thick Austenitic Stainless Sheet Using Pulsed and CW Nd:YAG Laser," Journal of Materials Processing Technology, Article in Press, 2005.
2. Tsirkas, S. A., Papanikos, P., Kermanidis, T., "Numerical Simulation of the Laser Welding Process in Butt-Joint Specimens," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 134, pp. 59-69, 2003.
3. Labudovin, M., Hu, D., Kovacevic, R., "Three-dimensional Finite Element Modeling of Laser Surface Modification," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 214, pp. 683-692, 2000.
4. Lee, J. Y., Lee, W. B, Yoo, C. D., "Heat Source Modeling of Laser Keyhole Welding : Part 1-Bead Welding," Journal of KWS, Vol. 23, No. 1, pp. 48-54, 2005.