

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판 절단공정의 열전달 특성 분석

안동규[#], 김민수^{*}

A Study on Heat Transfer Characteristics of Laser Cutting for the CSP 1N Sheet Using High-power CW Nd:YAG Laser

Dong-Gyu Ahn[#], Min-Su Kim^{*}

ABSTRACT

The objective of this research work is to investigate into heat transfer characteristics of the laser cutting of CSP 1N sheet using high power CW Nd:YAG laser. In order to investigate the heat transfer characteristics, three dimensional quasi stationary and steady-state heat transfer analysis has been carried out. 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 experiments, the proper finite element model has been obtained. In addition, characteristics of the three-dimensional heat transfer and temperature distribution have been estimated by the finite element model. Finally, the minimum temperature at the center for cutting of the material has been estimated.

Key Words : CW Nd:YAG Laser(CW Nd:YAG 레이저), CSP 1N Sheet(CSP 1N 박판), Quasi-Stationary and Steady-State(준정적 정상상태), Three-dimensional Heat Transfer Analysis(3차원 열전달 해석).

1. 서 론

레이저 가공은 높은 에너지 밀도를 가지는 고출력 열원으로 고속가공이 가능하므로 가공재료에 작은 열영향부를 생성시키고 가공후 열변형은 적게 발생시켜 고정밀 절단 및 용접이 필요한 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다. 이러한, 장점 때문에 오늘날 자동

차/선박/전자제품 등 고정밀 절단 및 용접이 필요한 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다^[1]. 특히, Nd:YAG 레이저는 레이저의 안정성이 높고, 고출력을 얻을 수 있으며, 1.06 μm 의 파장을 가지고 있어 10.6 μm 의 파장을 가진 CO₂ 레이저 보다 가공물의 빔 반사율이 매우 낮아 Nd:YAG 레이저 가공의 산업적 적용과 학문적 연구가 활발히 진행되고 있다^[2,4]. 한편, 레이저 절단공정을 분석하기 위해서는 레이저 절단시 재료 내부에 발생하는 3차원 열전달 특성에 대한 정량적 고찰이 필요하다. 이와 관련된 연구는 1940년대에 Rosental 이 준정적상태 가정과 이동좌표계를 이용한

교신저자 : 조선대학교 기계공학과
E-mail : smart@mail.chosun.ac.kr
* 조선대학교 대학원 기계공학과

해석적 접근법으로부터 유한요소법에 이르기까지 다양한 연구가 진행되어 왔다^[5]. Eagar 등은 이동식 분포 열원에 의하여 재료내부에 생성되는 온도분포에 대한 수학적 모델링을 하였다^[6]. Mazumder 등은 연속 파형 레이저를 이용한 재료가공에 대한 열전달 모델을 개발하였다^[7]. 박준홍 등은 FDM 방법을 이용하여 레이저 절단공정에서의 절단 메카니즘 및 절단폭 해석에 대한 연구를 수행하였다^[8]. Kim 등은 고에너지 레이저 절단공정을 위한 2차원 유한요소모델을 개발하였다^[9]. Hillebrand 등은 유한요소법을 이용하여 윤곽 레이저 절단시 재료 가열 현상을 해석하였다^[10]. 이와 같이 레이저 절단중 재료내부에 발생하는 열전달 현상 해석에 대한 여러 가지 선행 연구가 수행되어왔다. 그러나, 고훈력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판재 절단 공정의 3차원 열전달 해석에 관한 선행 연구는 찾아보기 어렵다. 또한, Nd:YAG 레이저의 경우 2,000 mm/min 이상의 고속절단을 수행하고 Nd:YAG 레이저의 파장대가 1.06 μm 로 기준에 CO₂ 레이저 절단공정에 대한 온도분포 측정장비의 측정파장대와 유사한 파장대 이어서, Nd:YAG 레이저 절단시 내부에 발생하는 열전달 특성과 온도분포를 정량적으로 측정하기 매우 어렵다.

본 연구에서는 고훈력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP 1N 냉연강판 절단 공정의 3차원 열전달 해석을 통해서 공정변수 조합이 재료 내부의 3차원 열전달 특성과 온도분포에 미치는 영향을 분석/고찰하였다. 또한, 공정조건별 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP 1N 냉연강판 절단을 위하여 소요되는 중앙부 최소 온도를 예측하였다.

2. 유한요소 모델링 및 해석방법

2.1 유한요소 지배방정식

레이저 절단공정에서의 비정상 온도분포 $T(x,y,z,t)$ 는 3차원 비정상 열전도 방정식인 식 (1)을 만족시켜야 한다^[5].

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

여기서, k , ρ , c 및 \dot{q} 는 열전도 계수, 밀도, 비열 및 단위시간당 입열량이다.

열원이 균일 속력으로 이동하는 형태로 주어질 경우, Fig. 1과 같이 열원에 좌표계가 부착되어 이동하는 이동 좌표계 (Moving coordinate)를 도입할 수 있다^[5,11]. 이때, 고정좌표계(x, y, z, t)와 이동좌표계(x_M, y_M, z_M, t)의 관계는 식 (2)를 만족하여야 하며, 이동좌표계에서와 고정좌표계에서의 재료내 온도는 식 (3)과 같이 동일하여야 한다.

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

$$T(x_M, y_M, z_M, t) = T(x, y - V_{tr} \times t, z, t) \quad (3)$$

여기서, V_{tr} 은 레이저 절단속력이다.

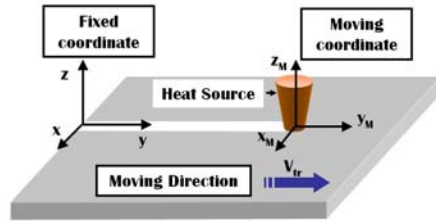


Fig. 1 Schematics of moving coordinate and fixed coordinate

식 (1)에 이동좌표계를 적용하면, 3차원 비정상 열전도 방정식은 식 (4)로 표현될 수 있다. 특히, 레이저 절단부중 초기 절단부와 최종 절단부를 제외한 영역에서는 시간에 관계없이 균일 절단 특성이 나타남으로 준정적 정상상태 (Quasi-stationary and steady state)로 가정할 수 있다. 또한, 재료물성치인 열전도도, 밀도 및 정압비열은 온도의 함수이다. 그러므로 준정적 정상상태에서의 재료 내부 3차원 온도분포는 식 (5)를 만족하게 된다. 식 (5)에 대한 유한요소 지배방정식은 식 (6)과 같이 표현될 수 있다^[11].

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

$$\frac{\partial}{\partial x_M} \left(\frac{\partial T}{\partial x_M} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = - \frac{\rho c V_{tr}}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial x_M} \quad (5)$$

$$[C(T)]\left\{T\right\}+[K(T)]\{T\}+\{V\}=\{Q(t)\} \quad (6)$$

여기서, $[C(T)]$, $[K(T)]$, $\{V\}$ 및 $\{Q(t)\}$ 는 각각 용적 행렬, 강성행렬, 속도벡터 및 절점 열유동 벡터이다.

식 (6)을 만족하는 재료내부 3차원 온도분포를 계산하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 SYSWELD V6.2 을 사용하였다.

2.2 열원 모델링

레이저 절단공정에서 절단에 영향을 미치는 열에너지는 레이저에 의하여 투입되는 열량, 산소와의 반응에 의하여 추가적으로 공급되는 산화열, 피절단물의 기화에 의하여 손실되는 기화열이 있다. 이 3가지 열에너지는 식 (7)과 같은 총 입열량을 만족하여야 한다.

$$P(t) = Q_R(r, T) - P_E + P_R \quad (7)$$

여기서, $P(t)$, $Q_R(r, T)$, P_E 및 P_R 은 각각 총 입열량, 레이저 열원에 의한 입열량, 기화에 의한 열손실 및 산화열에 의한 입열량이다.

본 연구에서는 TEM₀₀ 모드를 가진 레이저를 사용하였으므로, 레이저 빔을 2차원 가우시안 분포를 가지는 원통형 열원으로 가정하여 레이저에 의한 입열량은 식 (8)과 같이 가정하였다.

$$Q_R(r, T) = a(T) \frac{2Q}{\pi r_o^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_o^2}\right) \quad (8)$$

여기서, P 는 레이저 출력이며, r_o 는 레이저 유효반경이고, r 은 레이저 중심에서의 거리이며, $a(T)$ 는 피절단물의 온도에 따른 레이저 흡수율이다.

본 연구에서는 레이저 유효반경을 최대 레이저 열원 강도의 5% 값을 가지는 지점을 선정하였다. 레이저 흡수율은 식(9) 와 같이 표현될 수 있다. Fig. 2와 같이 광대역 스펙트로 포토미터로 Nd:YAG 레이저의 파장대인 1.06 μm 에서 CSP 1N 의 표면조건별 반사율 측정결과 경면조건에서 65 % 정도로 나타났다. 그러므로 초기 레이저 흡수율은 35 % 정도이나, 레이저가 공이 진행됨에 따라 온도상승에 의한 전기전도도 감소와 재료제거에 의한 다중반사로 흡수율 증대 및 산

화물 층에 의한 에너지 흡수율 증가^[8] 등을 고려하여 80 % 의 흡수율을 적용하였다.

$$a(T) = 1 - R(T) \quad (9)$$

여기서, $R(T)$ 는 온도에 따른 피절단물의 레이저 반사율이다.

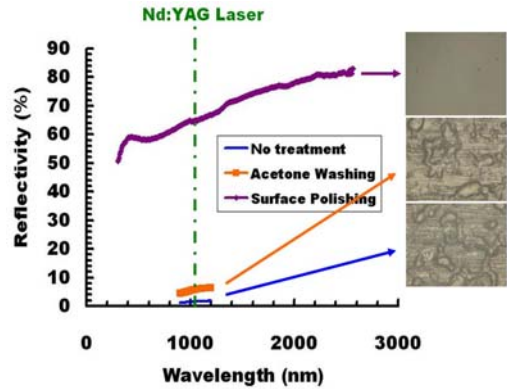


Fig. 2 Reflectivity of CSP 1N sheet

산화열에 의한 입열량은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며, 용융 침식면에서 피절단물의 기화에 의해 손실되는 열은 식 (11)과 같이 Clausius- Clapeyron 식으로 나타낼 수 있다^[8].

$$P_R = e_r \cdot n_o \cdot \frac{dl}{dt} \quad (10)$$

여기서, $e_r \cdot n_o$ 및 $\frac{dl}{dt}$ 는 각각 피절단물의 단위 체적당 발생하는 산화열 및 용융 침식면 속도이다.

$$P_E = e_v \cdot \frac{133.3}{\sqrt{2\pi k_B T_s m_s}} \cdot 10^{(A/T_s)} \cdot 10^B \cdot T_s^C \quad (11)$$

여기서, k_B , m_s , e_v , T_s 는 각각 볼츠만 상수, 분자질량, 단위 분자당 기화열, 용융침식면의 온도이며, A , B , C 는 상수이다.

산화열과 기화열은 레이저 입열량이 작용하는 레이저 유효반경내에서만 생성된다고 가정하였다. 실제 산화열과 기화열 산출시 사용된 상수들의 값들은 Table 1 과 같다.

Table 1 Data for calculation of evaporation energy and reaction energy^[8]

k_B (J/K)	1.38×10^{-23}
m_s (kg)	9.23
n_0 (atom/m ³)	8.709×10^{19}
e_v (eV)	3.31
e_R (kJ/mole)	368
T_s (K)	1773
A	-19,710
B	13.27
C	-1.27

2.3 유한요소해석 방법 및 경계조건

시편의 유한요소해석 크기는 실험결과 시편크기가 온도 분포에 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 평면 넓이 20 mm X 20 mm 를 선정하였다. 해석에 사용된 재료 두께는 1.0 mm, 1.6 mm, 2.0 mm 이다.

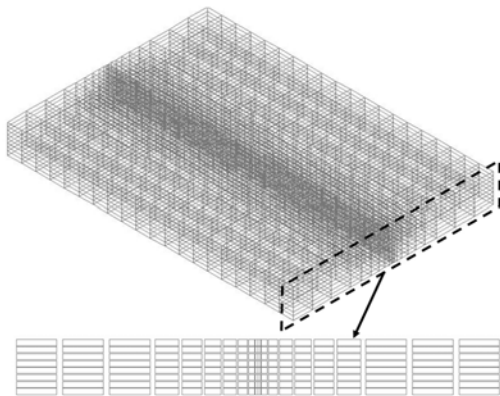


Fig. 3 Finite elements for analysis

Fig. 3은 3차원 열전달 해석에 사용된 유한요소격자이다. 유한요소모델 생성시 레이저 열원이 이동하는 중심부에서 발생하는 급격한 온도변화를 예측하기 위하여 중심부 좌우 5 mm 에서는 바이어스(Bias) 격자 생성법을 이용하여 중심부쪽으로 조밀한 격자가 생성되도록 하였다. 사용된 유한요소격자의 종류는 육면체요소와 표면요소이다. Table 2는 3차원 열전달 해석에 사용된 유한요소격자수와 절점수이다.

Table 2 Number of elements and nodes

T (mm)	Elements (EA)	Nodes (EA)
1.0	2,760	2,205
1.6	4,680	3,969
2.0	4680	3,969

레이저 절단공정 해석을 위한 경계조건은 Fig. 4과 같이 재료 부분별 다른 경계조건을 부여하였다. 대류에 의한 열손실의 경우 절단 가스가 직접 분사되는 시편의 윗면은 강제대류조건으로 적용하였으며, 나머지 부분은 자연대류 조건을 적용하였다. 또한, 열원이 지나가는 시편위 윗면은 복사에 의한 열손실도 고려되었다. 강제대류에 대한 평균 대류계수(\bar{h}_f)는 식 (12)와 같이 계산되었으며, 자연대류에 대한 평균 대류계수(\bar{h}_n) 는 식 (13)과 같이 계산되었다.

$$\bar{h}_f = C \cdot \frac{k}{L} \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \tag{12}$$

여기서, C, k, L, Re_L 및 Pr 은 각각 비례상수, 열전도도, 특성길이, 레이놀즈수 및 프란틀 수이다.

$$\bar{h}_n = 0.27 \cdot \frac{k}{L} \cdot Ra_L^{1/4} \tag{13}$$

여기서, Ra_L 은 레이레이 수이다.

상면부의 복사 열손실은 식(14)와 같은 스테판-볼쯔만 식을 이용하였다.

$$q_{rad} = \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T + T_0)(T^2 + T_0^2) \tag{14}$$

여기서, ϵ , A, 및 σ 는 각각 복사계수(Emissivity), 표면적 및 스테판-볼쯔만 상수이다.

레이저 절단공정에 대한 3차원 열전달 해석시 해석은 Ahn 등의 연구결과^[4]에서 제안한 고효율 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판 절단시 절단 가능 영역내에서 수행하였다. 해석조건은 Ahn 등의 연구결과^[4]에 따라 동일 재료두께에 대해서는 유효입열량 (Effective heat input : Q_{eff}) 이 같은 경우에 대하여 절단속력과 입열량에 관계없이 동일조건으로 가정하였다. 유효입열량은 식 (15)와 같이 정의된다.

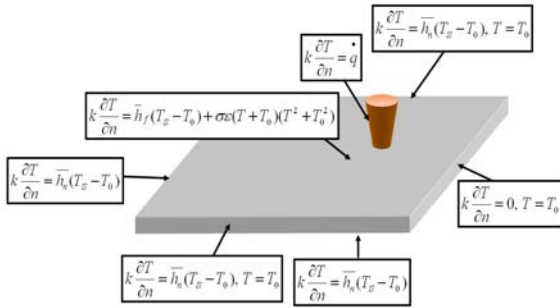


Fig. 4 Boundary conditions for analysis

$$Q_{eff} = \frac{P}{V_{tr}} \quad (15)$$

여기서, V_{tr} 은 레이저 절단속력이다.

유한요소해석에 사용된 재료의 열전도도, 밀도 및 비열은 Fig. 5와 같다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 공정조건에 따른 열전달 특성 고찰

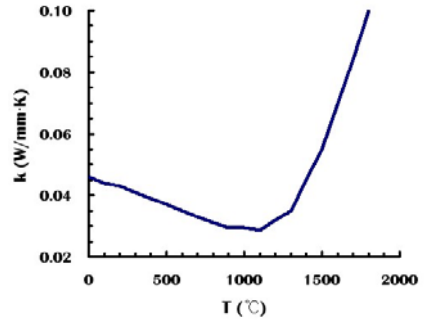
Fig. 6, 7 및 8은 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판재 절단시 재료내부에 발생하는 열전달 특성을 3차원 준정적 정상상태 열전달해석을 통하여 해석한 결과이다.

본 해석결과 모든 해석 조건에 대하여 열원 중심에서 좌우 0.8 mm 내에서 용융온도인 1,500 °C 이상의 온도로부터 상온까지 급격한 온도 변화를 나타내었다. 그러므로 레이저 절단 공정중 열전달이 발생하는 영역은 1.6 mm 내외로 매우 작음을 알 수 있었다.

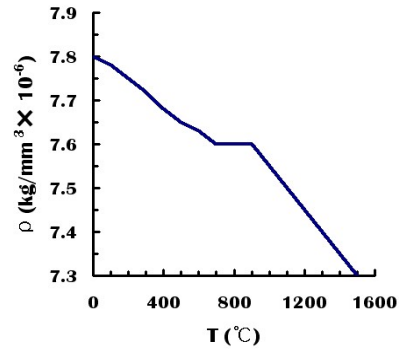
Fig. 7의 결과를 고찰하면 유효입열량이 증가할수록 열전달이 발생하는 영역이 넓어짐을 알 수 있었다. 특히, 재료 용융이 발생하는 1,500 °C 이상의 영역의 경우 유효입열량 증가에 따라 현저하게 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 8의 결과를 고찰하면 재료두께가 증가할수록 레이저 이동방향에 수직인 방향으로 용융폭은 증가하나, 레이저 이동방향으로의 용융깊이는 현저히 감소함을 알 수 있었다.

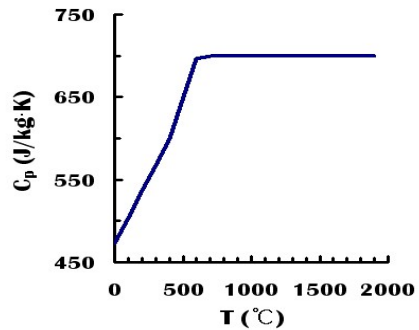
이 결과로부터 유효입열량은 레이저 이동방향과 수직인 방향으로의 용융폭 변화에 큰 영향을 미치며, 절단재료의 두께는 레이저 이동방향의 용융폭에 미치는 영향이 크음을 알 수 있었다.



(a) Thermal conductivity



(b) Density



(c) Specific heat

Fig. 5 Material data for FE analysis

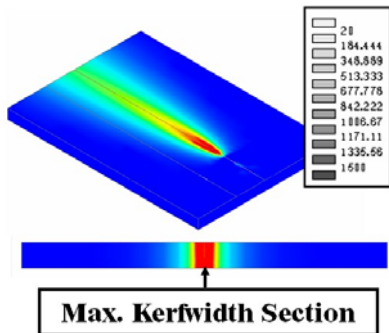


Fig. 6 Results of FE analysis ($T=1.0$ mm, $Q_{\text{eff}} = 19.2$ J/mm)

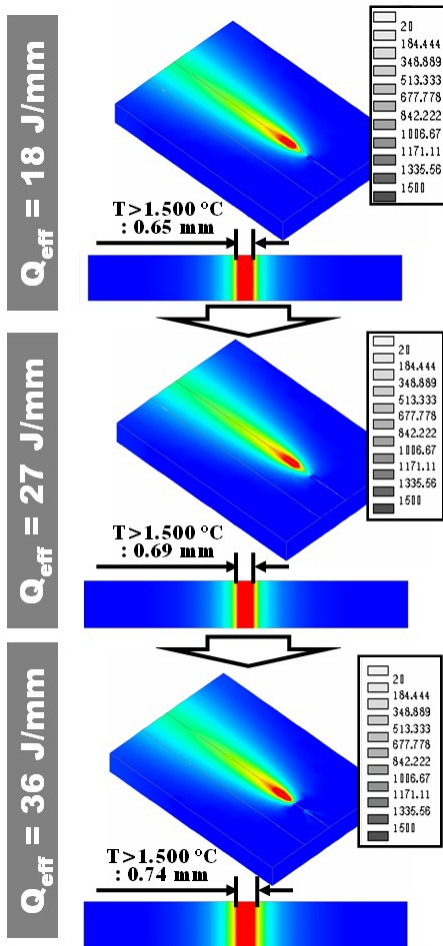


Fig. 7 Influence of effective heat input on the temperature distribution ($T=1.6$ mm)

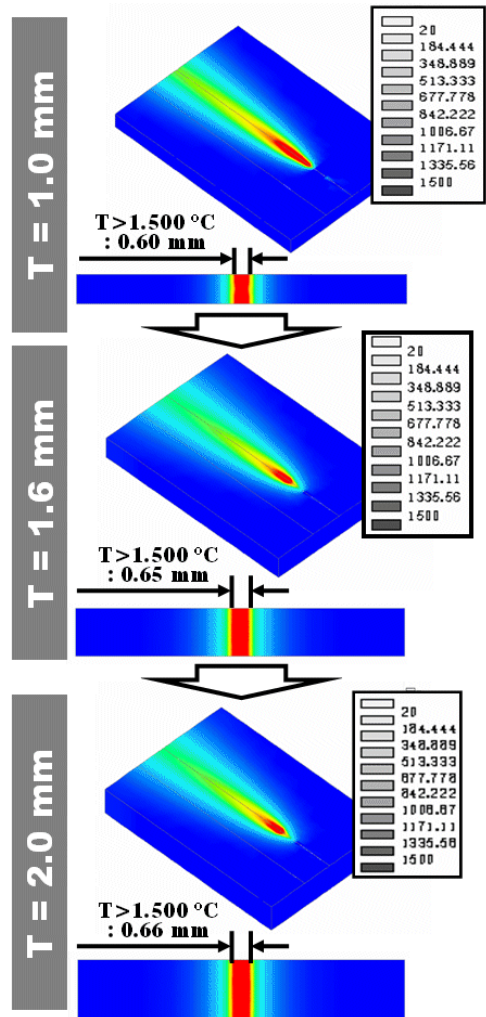


Fig. 8 Influence of thickness on the temperature distribution ($Q_{\text{eff}} = 18$ J/mm)

3.2 공정조건에 따른 절단폭 및 최대 온도 변화

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판재 절단시 재료내부에 발생하는 열전달 특성을 3차원 준정적 정상상태 열전달해석을 통한 절단폭(Kerfwidth) 예측을 수행하였다. 재료 용융점인 1,500 °C 이상의 온도영역에서는 용융이 발생하여 취입가스에 의하여 제거된다고 가정하여 절단폭을 산출하였다.

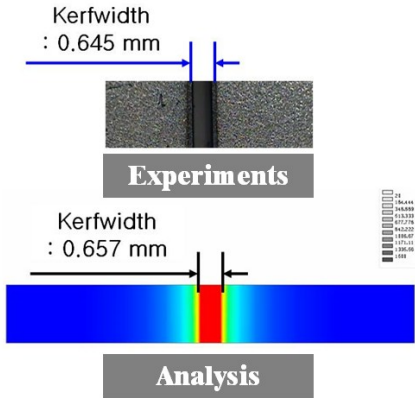


Fig. 9 Comparison of the results of analysis with those of experiments with respect to kerfwidth

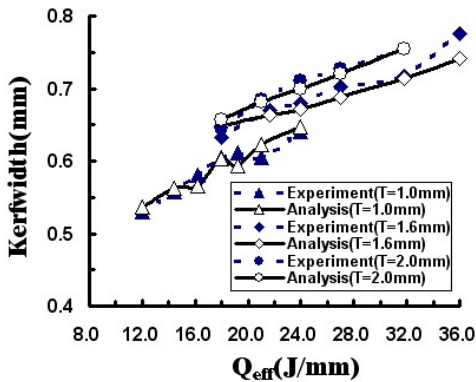


Fig. 10 Influence of the effective heat input on the kerfwidth

절단폭 예측결과 Fig. 9 및 10과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 9 및 10의 결과와 같이 본 유한요소 해석결과와 실험결과가 매우 잘 일치함으로 알 수 있었다. 이결과로부터 본 연구에 사용된 준정적 정상상태를 가정한 3차원 열전달 유한요소모델이 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판재 절단시 재료내부에 발생하는 열전달현상을 예측하기에 타당한 모델임을 알 수 있었다.

Fig. 10에서 유효입열량이 증가할수록 절단폭이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 재료 두께가 일정한 경우 유효입열량이 절단폭을 결정짓는 주요인자임을 알 수 있었다.

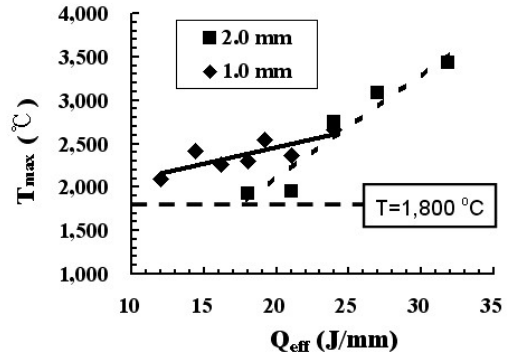


Fig. 11 Influence of the effective heat input on maximum temperature in the workpiece

Fig. 11은 유효입열량과 재료내부 중앙부에서의 온도(T_{max})와 상관관계이다. 이결과에서 1.0 mm에서 보다 2.0 mm에서 유효입열량 변화에 따라 재료 중앙부 온도의 변화가 많이 나타남을 알 수 있었다. 또한, 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판재 절단시 레이저 열원의 중앙부에 해당되는 절단 재료 위치에서의 온도가 1,800 °C 이상이 되어야 절단이 가능함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판 절단 공정에 대한 3차원 열전달 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구를 통하여 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판 절단시 재료내부에 발생하는 3차원 열전달 특성에 대하여 정량적으로 분석할 수 있었다. 레이저 절단시 열원 중심에서 좌우 0.8 mm 내에서 용융온도인 1,500 °C 이상의 온도로부터 상온까지 급격한 온도 변화를 나타내었다.
2. 유효입열량은 레이저 이동방향과 수직인 방향으로의 용융폭 변화에 큰 영향을 미치며, 절단재료의 두께는 레이저 이동방향의 용융폭에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다.
3. 본 연구에서 사용된 유한요소모델과 실험결과를 비교/분석한 결과 본 연구에 사용된 유한요소모델

이 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판 절단시 재료내부에 발생하는 3차원 열전달 특성을 예측하기에 타당한 모델임을 알 수 있었다.

4. 유효입열량이 증가할수록 절단폭과 최대온도이 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며, 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판재 절단시 레이저 열원의 중앙부와 일치하는 재료내부의 온도가 1,800 °C 이상이 되어야 절단이 가능함을 알 수 있었다.

추후, 본 연구에서 개발된 유한요소해석 모델의 개선을 위하여 레이저 절단시 시편 내부 온도분포에 대한 추가적 실험적 연구가 계속되어야 될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2005년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참고문헌

1. Geiger, M., "Manufacturing Science-Driving Force for Innovation," *Advanced Technology of Plasticity 2002*, Vol. 1, pp. 17-30, 2002.
2. Abdel Ghany, K. and Newishy, M., "Cutting of 1.2 mm Thick Austenitic Stainless Steel Sheet using Pulsed and CW Nd:YAG Laser," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, pp. 438-447, 2005
3. Ahn, D. G., Kim, M. S., Lee, S. H., Park, H. J. and Yoo, Y. T., "A Study on the Influence of Process Parameters on characteristics of the cut surface for the Case of Laser Cutting of CSP IN Sheet using High Power CW Nd:YAG Laser," *Proceedings of the KSPME Spring Conference 2005*, pp. 72-77, 2005.
4. Ahn, D. G., Kim, M. S., Lee, S. H., Park, H. J. and Yoo, Y. T., "Influence of Process Parameters on the Kerfwidth for the Case of Laser Cutting of CSP IN Sheet using High Power CW Nd:YAG Laser," *Journal of Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp. 19-26, 2005.
5. Rosental, D., "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting," *Welding Research Supplement*, Vol. 20, pp. 220-234, 1941.
6. Eagar, T. W. and Tsai, N. S., "Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Source," *Welding Research Supplement*, pp. 346-355, 1983.
7. Mazumder, J. and Steen, W. M., "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing," *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, pp. 941-947, 1980.
8. Park, J. H., "A Study on Cutting Mechanism and Heat Transfer in Laser Cutting Process using FDM," *KAIST M. S. Thesis*, 1993.
9. Kim, M. J. and Majumdar, P., "Computational Model for High Energy Laser Cutting Process," *Numerical Heat Transfer Part A*, Vol. 27, pp. 717-733, 1995.
10. Hillebrand, A., Decker, I. and Wohlfahrt, W., "Calculation of Workpiece Heating During Contour Cutting by Laser Beam with the Finite Element Method," *Schweiben und Schneiden*, Vol. 45, pp. 487-490, 1993.
11. Labudovic, M. and Hu, D. and Kavacevic, R., "Three-dimensional Finite Element Modeling of Laser Surface Modification," *Proceedings of Institute Mechanical Engineers Part B ; Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 214, pp. 683-692, 2000.