

〈論 文〉

FDM 을 이용한 레이저 절단 공정에서의 절단 메카니즘 및 절단폭의 해석

박준홍* · 한국찬* · 나석주**

(1993년 2월 12일 접수)

A Study on Cutting Mechanism and Heat Transfer Analysis in Laser Cutting Process

J.H. Park, G.C. Han and S.J. Na

Key Words : Laser Oxygen Cutting(레이저연소절단공정), Boundary Fitted Coordinate System
(경계밀착좌표계), Melting front(용융침식면), Kerf Width(절단폭)

Abstract

A two-dimensional transient heat transfer model for reactive gas assisted laser cutting process with a moving Gaussian heat source is developed using a numerical finite difference technique. The kerf width, melting front shape and temperature distribution were calculated by using the boundary-fitted coordinate system to handle the ejection of workpiece material and heat input from reaction and evaporation. An analytical solution for cutting front movement was adopted and numerical simulation was performed to calculate the temperature distribution and melting front thickness. To calculate the moving velocity of cutting front, the normal distribution of the cutting gas velocity was used. The kerf width was revealed to be dependent on the cutting velocity, laser power and cutting gas velocity.

1. 머릿말

레이저 절단 공정은 레이저 빔이 물체 표면에 수렴되어 작용하고 초점에서의 레이저 빔이 절단 경로의 앞부분(leading edge)을 생성하고 고압의 절단가스로 녹은 모재를 제거해 주면서 절단이 이루어지는데 있다. 레이저 절단은 절단 방법의 차이에 의해 크게 세 분야로 나뉜다. 본 논문에서 다루고자 하는 공정은 절단부를 레이저빔으로 가열하면, 절단가스로 이용되는 산소와 산화 반응을 일으켜 반응열이 생성되고, 형성된 슬래그(Slag)를 산소

가스로 제거해 주는 레이저 연소 절단 공정이다.

레이저 절단에 대한 해석은 절단면상에서 용융된 모재의 얇은 층(film)이 존재한다는 것이 고속촬영으로 밝혀진 다음 많은 발전이 이루어져 왔다. Schuocker⁽¹⁾는 레이저 절단시에 나타나는 독특한 줄무늬(Striation)에 대한 해석을 하였다. Vicanek⁽²⁾은 레이저 용융절단에서 용융된 모재가 절단가스에 의해 떨어져 나갈 때의 유동을 계산하였다. Chryssoulouris⁽³⁾는 절단침식면상에 금사면을 위치하고 이면에서의 열전달 방정식으로부터 절단가능한 최대 두께를 유도하였다.

그러나 레이저 절단은 많은 공정변수를 갖는 공정이며 정확한 절단 메카니즘은 아직 밝혀지지 않았다. 최적 절단 조건은 많은 부분에서 아직 실험

*한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

데이터에 의존을 하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 FDM을 이용한 수치해석을 통하여 공정변수의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 레이저 절단 부위의 FDM 해석

2.1 레이저 절단 공정의 모델링

Fig. 1은 레이저 연소 절단 공정의 일반적인 형상을 보여주고 있다. 집광된 레이저 빔이 물체의 윗 부분에 주사된 후 용융된 부분을 보조가스의 높은 압력으로 제거해 주면서 절단이 이루어진다. 이 용융 부분은 레이저로부터의 입열량과 산소와의 반응열에 의해 생성된다. 레이저 절단은 이 부분에서 피절단물의 제거가 이루어지면서 절단이 진행되는 공정이다. 레이저 빔으로부터의 입열은 거의 이 부분에서 이루어지며 이 열은 전도열, 승화열 등에 의해 주위로 빠져 나간다. 따라서 절단 품질은 이 용융 침식면의 형성과 소멸, 그리고 생성되는 형태에 의해 영향을 받는다. 따라서 절단공정의 모델링은 이 용융침식면에서부터 시작되어야 한다. 본 논문에서는 절단 침식면에 대한 해는 이론해를 이용하여 모델링하고 절단물 내부에서의 열전달은 FDM을 이용한 수치해석을 통하여 계산한다. 박판의 절단에서는 두께방향의 열전달이 넓이 방향의 열전달에 비해 무시할 수 있으므로 2차원 모델로써 열전달 방정식을 풀 수 있다.

2.2 열원

레이저 연소절단 공정에서 열원으로는 레이저에 의한 복사열, 산소와의 반응에 의한 산화열, 피절단물의 용융열, 기화열 등이 있다. 열전달 방정식을 수치해석 할 때 이러한 열원들은 각각 다른 방법에 의해 포함된다. 먼저 용융열은 피절단물의 온도에 따른 물성치의 변화에 포함한다. 두번째 레이저에 의한 복사열은 레이저의 흡수율, 반경, 모드 등에 의해 결정되며 FDM 방정식의 열원항(source term)에 포함을 시킨다. 세번째 기화열과 산화열은 열이 발생하는 경계에서의 경계조건으로 포함시킨다.

레이저에 의한 복사열에 가장 큰 영향을 미치는 금속의 레이저 흡수율은 여러가지 요인(편광 방향, 조사각, 표면 조도, 산화물, 레이저 빔에 의한 플라즈마 등)에 의해 영향을 받는다. 순수 금속에서 수직으로 조사되는 레이저의 흡수율은 CO₂레이저

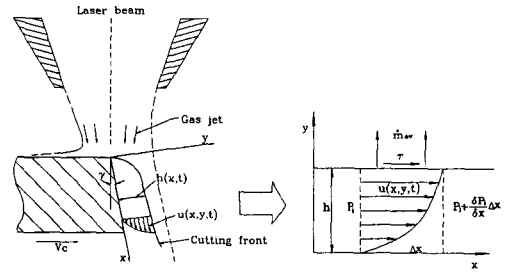


Fig. 1 Schematic diagram of laser-oxygen cutting process-Control volume in molten layer

의 경우 약 20%미만이다. 그러나 피절단물의 온도가 상승하면서 피절단물 위에 형성되는 산화막에 의해 흡수율은 높아진다.^{(1),(4)} 더욱이 용융 침식면에서는 레이저의 입사각이 작고 산소와의 반응에 의해 형성되는 두꺼운 산화막이 존재하므로 흡수율은 더욱 높아져서 80% 이상의 흡수율을 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 온도에 따라서 변하는 레이저의 흡수율을 이용한다(800~1500℃ : 50%, 1500℃ : 80%).

절단에 이용되는 레이저의 모드는 주로 TEM₀₀ 모드가 이용된다. 이 모드는 촛점에서 가우시안 분포(gaussian distribution)를 갖는다. 따라서 레이저빔을 2차원 가우시안 분포를 가지는 선열원으로 가정할 수 있다.⁽⁵⁾

$$q(r, T) = a(T) \frac{3Q}{\pi R_0^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R_0^2}\right) \quad (1)$$

여기서 Q 는 레이저 출력, R_0 는 레이저 유효 반경, r 은 빔 중심에서의 거리, $a(T)$ 는 모재의 온도에 따른 레이저 흡수율이다.

용융 침식면에서의 입열량은 다음과 같다.

$$f(t) = P_{rea} - P_{evp} + q(r, T) \quad (2)$$

여기서 P_{sea} 은 산화열, P_{evp} 은 기화열, $q(r, T)$ 는 레이저에 의한 입열량이다. 산화열이 침식면에서 어떠한 방법으로 모재에 전달되는지는 아직 명확하지 않다. 녹은 피절단물이 전부 산화하여 모두 산화열을 모재쪽으로 전달하는 모델이 있었으나,^{(1),(6)} 실제 측정된 데이터는 전무한 상태이다. 여기에서는 몇가지 가정을 세워서 산화열을 모델링하고자 한다.

가정 1. 피절단물의 산화는 용융된 부분에서만 일어난다.

가정 2. 절단가스에 의해 떨어져 나가는 부분중 일부가 산화하고 산화열을 일부 모재로 전달한다.

가정 1, 2 에 의해 용융 침식면에서 산화열에 의한 입열량은 다음과 같다.

$$P_{rea} = a_1 \cdot a_2 \cdot e_R \cdot n^0 \cdot \frac{dl}{dt} \quad (3)$$

여기서 a_1 , a_2 는 각각 산화율, 산화열에 대한 흡수율이고 $e_R \cdot n_0$ 는 필단물의 단위 체적당 발생하는 산화열이며 $\frac{dl}{dt}$ 은 용융침식면의 속도이다.

용융침식면에서 피절단물의 기화에 의해 빠져 나가는 기화열은 Clausius-Clapeyron 식(1)에 의해 다음과 같다.

$$P_{evp} = e_v \cdot \frac{133.3}{\nu(2\pi \cdot k_B \cdot T_s \cdot m_s)} 10^{(A/T_s)} \cdot 10^B \cdot T_s^C \quad (4)$$

여기서 k_B 는 볼츠만 상수, m_s 는 분자 질량, e_v 는 한 분자당 기화열, T_s 는 용융침식면의 온도이고 A, B, C 는 상수이다.

2.3 용융침식면의 전개

용융침식면의 움직임은 용융침식면 내부에서의 질량보존식으로부터 구한다.⁽⁶⁾ 기화와 절단가스에 의해 제거되는 절단물의 양은 용융침식면의 움직임을 유발한다(Fig. 2).

$$\frac{dl}{dt} \cdot \rho = \dot{m}_{ev} + \dot{m}_{vel} \quad (5)$$

여기서 \dot{m}_{ev} 은 모재의 기화에 의해 절단되는 양, \dot{m}_{vel} 은 절단가스에 의해 절단되는 양, l 은 용융침

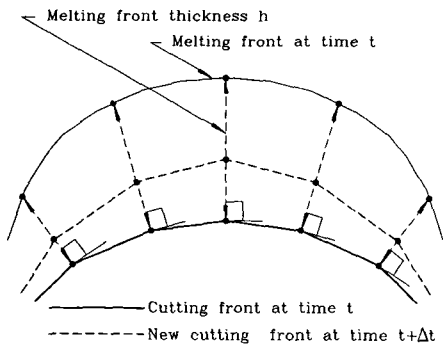


Fig. 2 Propagation of cutting front in FDM analysis of laser cutting

식면의 위치이다. 먼저 기화에 의해 절단되는 양은 식(4)로부터 얻어진다.

절단가스에 의한 절단효과를 구하기 위해서는 용융침식면 내부에서의 피절단물의 유동상태를 알아야 한다. 레이저 절단의 경우 강한 절단가스에 의해 녹은 부분은 효율적으로 떨어져 나가며 피절단물 위에는 두께가 수십 μm 정도로 작은 용융 침식면이 형성된다. 따라서 유동은 피절단물 위에서 2차원의 모델로써 해석이 가능하다. 유동에 대한 몇 가지의 가정으로부터 용융침식면을 통하여 떨어져 나가는 절단물의 양을 구할 수 있다.⁽²⁾

$$\dot{m}_{vel} = \int_0^h u \, dy = \frac{h^2}{\eta} \left[\frac{\tau}{2} - \frac{h}{3} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad (6)$$

여기서 η 는 절단물의 동적 점성 계수(dynamic gas viscosity), τ 는 절단가스에 의한 절단 침식면에서의 전단 응력(shear stress), p 는 절단 침식면 상에서의 절단가스의 압력 h 는 용융침식면의 두께, u 는 용융침식면에서 피절단물의 x -방향 속도이다.

전단 응력과 절단 가스의 압력을 구하기 위해서는 노즐을 통한 후 절단가스의 속도분포를 알고 있어야 한다. 여기에서는 레이저를 중심으로 최고속도와 반경이 주어진 정규 분포를 가지는 함수로써 절단가스의 속도분포를 나타내었다.⁽⁷⁾

$$v_g = v_{gmax} * \exp\left(-\frac{r^2}{R_{gas}^2}\right) \quad (7)$$

여기서 V_{gmax} 는 최대 절단가스 속도, R_{gas} 는 절단가스의 유효 반경이다.

절단면에서 매 시간마다 구한 용융 침식면의 속도로부터 새로운 용융침식면의 위치를 구할 수 있으며 이는 새로운 해석구간을 형성시킨다. 또한 용융 침식면의 움직임에 따라 시뮬레이션에서의 절단 폭이 결정된다.

2.4 지배 방정식

피절단물내의 평면 방향에 대한 2차원 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_{source} - Q_{sink} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

여기서 Q_{source} 는 피절단물에 들어가는 입열량, Q_{sink} 는 주위로 빠져 나가는 열량이다.

절단이 진행 되면서 모재가 녹아서 없어지기때문에 용융침식면이 움직임에 따라서 모재와 함께 움직이는 격자 생성이 필요하다. 따라서 모재에 맞게 형성된 격자를 다시 라플라스(laplace) 변환을 하여 격자들이 서로 수직인 변환영역으로 변환 시킨 다음 열전도 방정식을 푼다.⁽⁸⁾ Fig. 3은 실제 영역에서 해석 영역으로의 변환을 보여주고 있다. 변환 영역에서 열전도방정식은 (9)식과 같다.

$$[K(T_{\epsilon}\xi_x + T_{\eta}\eta_x)]_{\epsilon}\xi_x + [k(T_{\epsilon}\xi_x + T_{\eta}\eta_x)]_{\eta}\eta_x + [K(T_{\epsilon}\xi_y + T_{\eta}\eta_y)]_{\epsilon}\xi_y + [K(T_{\epsilon}\xi_y + T_{\eta}\eta_y)]_{\eta}\eta_y + Q_{source} - Q_{sink} = \rho c \frac{\delta T}{\delta t} \quad (9)$$

식(22)로부터 변환영역에서의 FDM을 유도 한다. 확산항(diffusion term)과 열원항(source term)은 2 차중간미분방식을 이용하였다. 시간에 대한 미분은 음함수 미분법(fully implicit method)을 이용하였다. 변환 영역에서 한 노드에서의 검사체적을 잡아서 유한미분식을 유도하였다. 조합된 식은 TDMA 방법을 이용하여 해를 구하였다. 또한 수렴 속도를 빨리 하기 위해서 완화법(under relaxation method)을 이용하였다.

2.5 경계 조건

모재에 들어온 열이 대류와 복사에 의한 빠져 나가는 열량은 Vinokurov⁽⁹⁾가 제안한 (10)식을 이용한다.

$$q = -h_{eff}(T_s - T_a) \quad (10)$$

여기서 $h_{eff}(=0024\epsilon T_s^{1.61}(W/m^2C))$ 는 유효열전달 계수(effective heat transfer coefficient), ϵ 는 표면 방사율($\cong 0.9$), T_s 는 표면 온도, T_a 는 주위 온도이다.

절단이 진행 되면서 생성되는 용융침식면의 크기는 수십 μm 이며 이곳에서 온도의 변화가 가장 심하다. 따라서 피절단물상에 생성되는 격자는 계산 시간을 단축하고 좀더 정확한 해에 근접하기 위해서 용융침식면에 가까운 곳에 많은 격자가 생성되도록 하였다.⁽⁹⁾ Fig. 4가 절단이 이루어지면서 생성되는 격자를 보여 주고 있다.

레이저 절단의 잇점은 집중된 열원과 효과적인 용융물질의 제거에 있다. 실제 절단을 행할때 레이저빔에서 멀리 떨어진 곳의 온도 변화는 거의 없음을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 해석영역을 레이저를 중심으로 움직이는 일정한 구역으로 선정하였다. 열원에서 멀리 떨어진 A, B, C면(Fig. 4)에서는 전도열에 의한 열전달만이 존재할것이므로 이 부분의 경계 조건으로써 전도경계조건을 이용하였다. 용융 침식면에서의 산화열과 기화열에 의한 입열을 경계(Fig. 4, D면)에서의 온도경계조건으로써 처리하였다.

레이저 빔이 움직이면서 제거되는 모재에 의해 새로운 격자가 생성될 때 형성된 격자점에서의 초기온도에 대한 계산을 하기 위하여 쌍 1차 방정식

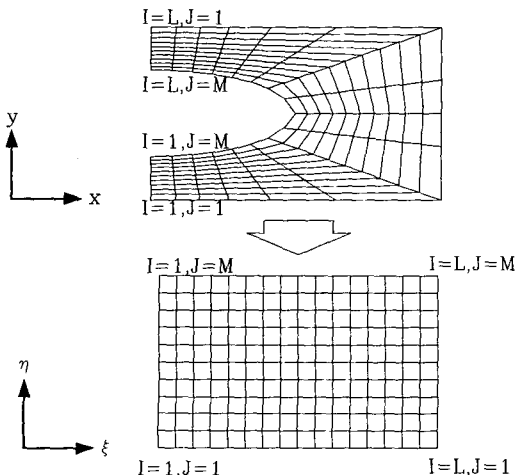


Fig. 3 Transformation of solution domain (x-y to $\xi - \eta$)

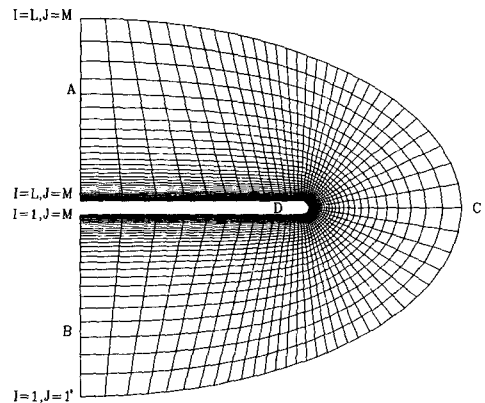


Fig. 4 Example of solution domain and mesh generation for FDM analysis

의 보간 방법 (bilinear interpolation method) 을 이용하였다. FDM 은 격자 내부에서는 온도분포가 선형적이라고 가정하면서 식을 유도하는 방법이므로 이 보간방법에 의한 오차는 거의 없다고 할 수 있다.

레이저 절단 공정의 시뮬레이션은 먼저 열전도 방정식으로부터 온도분포를 구한 다음, 용융침식면의 크기를 계산하여 떨어져 나가는 양을 구하여서 새로운 해석구간을 형성시킨다. 해석에 이용된 재료는 AISI 1042 탄소강이며 온도에 따라서 변하는 물성치를 이용하였다.⁽¹⁰⁾

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 용융침식면

시뮬레이션은 두께 1 mm 판재를 중심으로 하였으며 전형적인 해석결과는 Fig. 5 와 같다. 절단가스의 속도는 노즐을 통과하면서 초음속의 유동을 나타내며 피절단물 상에서는 아음속이다.

시뮬레이션 결과를 보면 레이저 열원을 중심으로 U자 형상의 용융 침식면이 형성 되어 있음을 볼 수 있다. 형성되는 용융 침식면의 크기는 실제 공

정에서 수십 μm 이다. 시뮬레이션을 하면 각 공정 변수에 따라 약간의 차이가 있지만 20~40 μm 의 크기를 나타내었다 (Fig. 6). 열영향부의 크기는 실험에서는 약 0.1 mm 이내에 열영향부가 생성된다. 시뮬레이션에서 용융침식면 주위에 형성되는 열영향부의 크기는 0.1mm 내외로 거의 실험치와 비슷하였다. 용융 침식면의 크기는 절단이 시작하는 곳에서는 심한 유동이 존재하나 시간이 지나면 준정상 상태에 도달하여 거의 일정한 크기를 유지하였다.

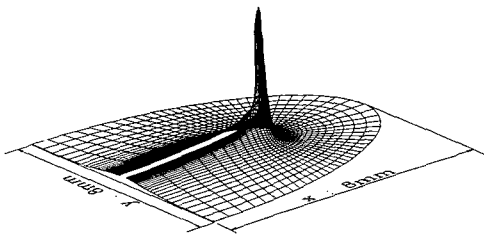


Fig. 5 Example of temperature distribution in solution domain

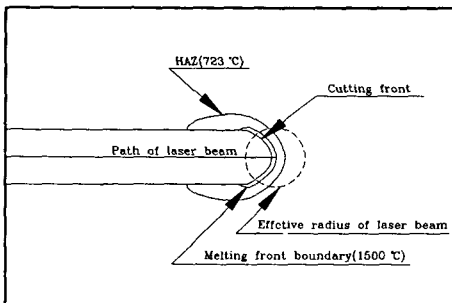


Fig. 6 Temperature distribution and HAZ boundary around cutting front

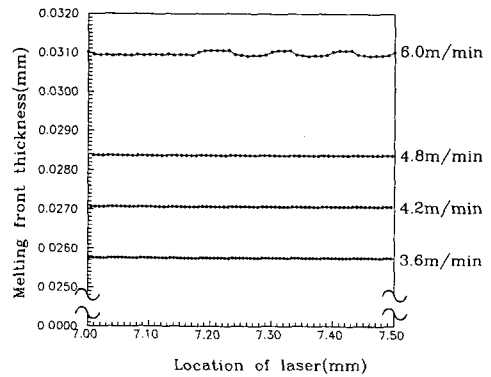


Fig. 7 Variation of melting front thickness with cutting speed (Start position of laser cutting : 4.8mm)

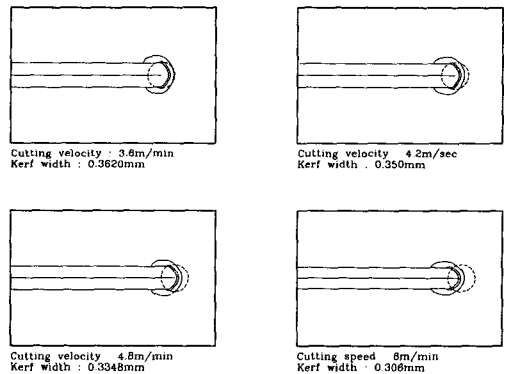
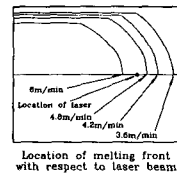


Fig. 8 Kerf width variation with cutting speed (simulation) (Cutting gas velocity 230m/sec, laser power 700W)

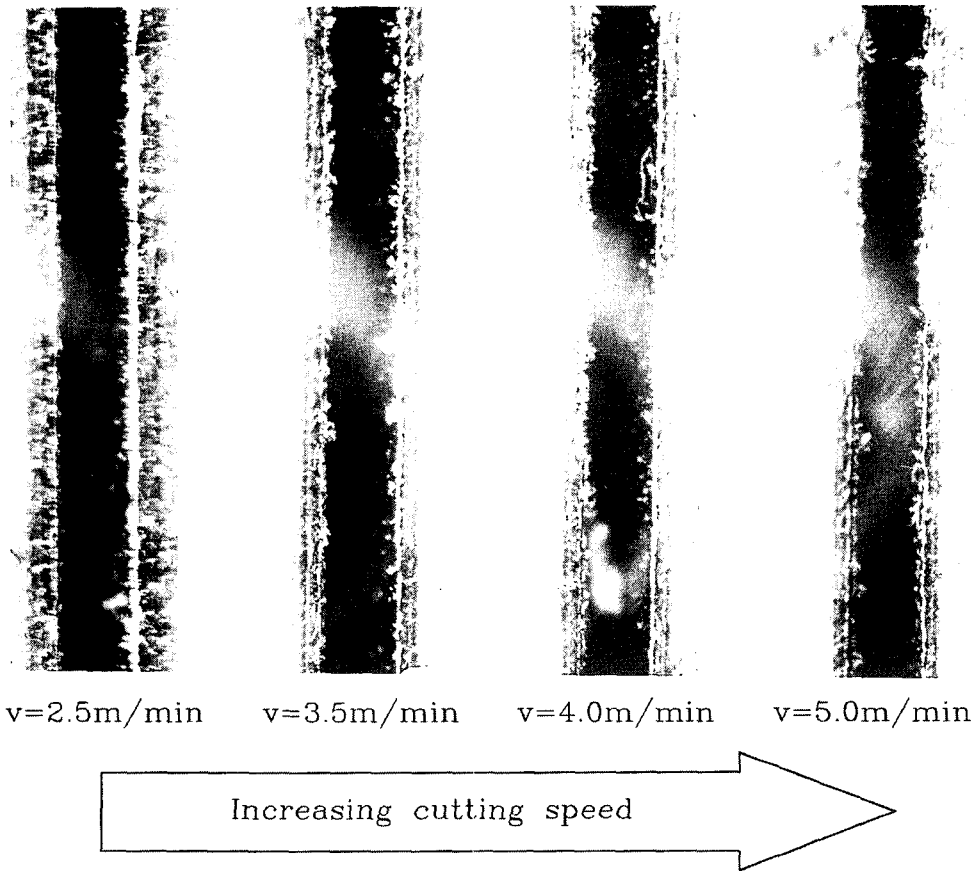


Fig. 9 Kerf width variation with cutting speed(experiment) (Cutting gas pressure 2kgf/cm², laser power 700W)

3.2 공정변수에 따른 절단품질의 변화

절단속도에 따른 용융침식면의 크기의 변화는 Fig. 7 과 같다. 절단 속도에 따른 절단폭의 변화는 Fig. 8 와 같다. 절단속도가 빨라지면서 절단폭이 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 절단속도가 빨라지면 용융침식면에 단위 시간당 들어가는 열량은 커지고 용융침식면의 크기는 커지면서 효율적인 절단물의 제거가 이루어진다. 따라서 모재쪽으로 들어가는 열과 절단폭이 줄어드는 결과를 보여준다. 그러나 절단 속도가 아주 작으면 오히려 절단폭이 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 용융 침식면의 속도가 레이저 빔의 속도보다 빨라서 레이저로부터의 입열량이 줄기 때문이다. 실험과 시뮬레이션이 비슷한 경향을 보이고 있다(Fig. 9,10).

절단가스의 압력을 증가시키면 용융물의 제거가 빠르게 되면서 용융침식면의 두께가 작아지나, 용

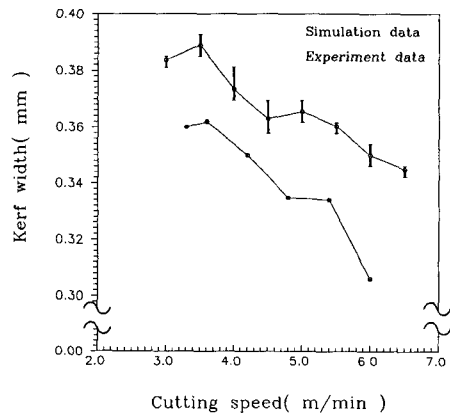
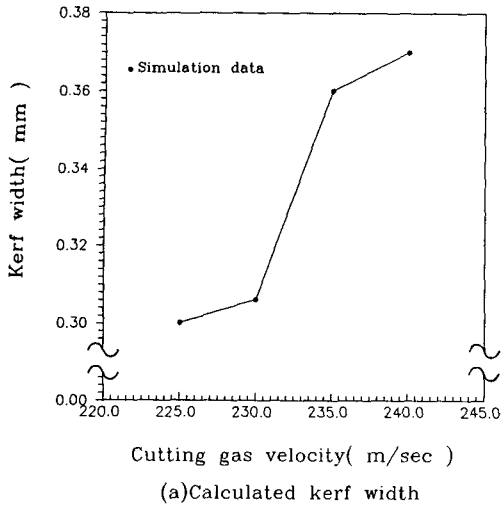
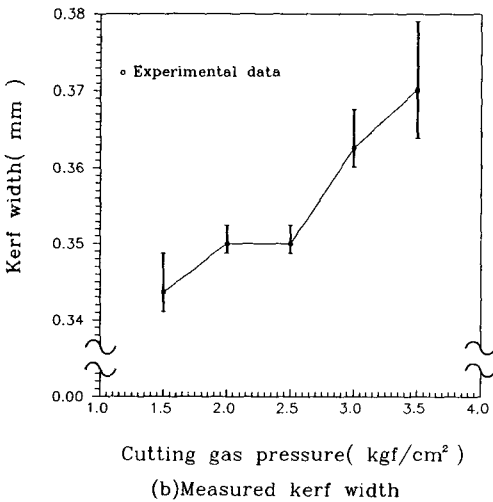


Fig. 10 Calculated and measured kerf width for varying cutting speed



(a) Calculated kerf width



(b) Measured kerf width

Fig. 11 Calculated and measured kerf width for varying cutting gas velocity

용침식면의 크기가 작아지면서 레이놀드수가 작아져서 용융침식면상에서 피절단물의 유동은 층류의 성격을 갖음으로써 절단품질은 향상된다. 높은 절단 압력일 경우 레이저로부터 떨어진 곳에 생성되는 용융침식면에서도 높은 절단가스 압력을 받는다. 따라서 산화열과 산화물의 제거의 증가는 절단폭의 증가를 가져온다(Fig. 11).

레이저의 출력이 커지면 생성되는 용융침식면은 절단 가스에 의해 쉽게 제거되며, 따라서 남아 있는 용융침식면의 크기는 작아져서 절단품질은 향상된다. 레이저의 출력이 커지면 피절단물에 열이 크

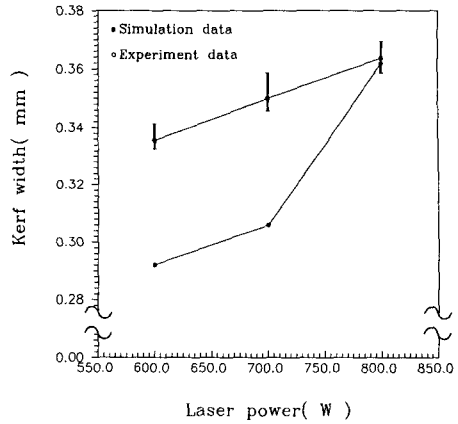


Fig. 12 Calculated and measured kerf width for varying laser power

게 들어 간다. 따라서 절단폭도 커지게 된다(Fig. 12).

4. 결 론

유한 미분법을 이용한 수치해석을 통하여 레이저 연소 절단 공정에 대한 시뮬레이션을 하였으며 이때 공정변수의 변화에 따른 절단결과에 대하여 알아 보았다. 레이저 출력, 절단가스 압력 그리고 절단속도를 변화시키면서 시뮬레이션 한 결과 실험결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 절단 속도가 빠를수록 옆으로 빠져 나가는 열량이 감소하여 절단폭은 감소한다. 용융침식면의 크기는 절단 속도가 빠를수록 피절단물에 단위 시간당 입열량이 커지면서 증가한다. 둘째 절단가스의 속도가 증가하면 효율적인 용융물의 제거에 의해 용융침식면의 크기는 작아진다. 따라서 절단가스의 속도가 빠를수록 용융물의 유동은 층류의 성질을 띠우게 되어 절단품질은 좋아진다. 셋째, 레이저 출력이 커지면 절단폭은 증가하지만 용융침식면의 크기는 줄어들어서 용융물은 층류의 성질을 띠운다. 따라서 레이저 출력이 커지면 절단폭은 커지지만 좋은 절단품질을 얻을 수 있다.

참고문헌

(1) Schuocker, D., 1987, "The Physical Mechanism

- and Theory of Laser Cutting," The Industrial Laser Annual Hanjdbook, pp. 65~79.
- (2) Vicanek, M., Simon, G., Urbassek, H.M. and Decker, I., 1987, "Hydrodynamic Instability of Melt Flow in Laser Cutting," Journ. of Phys. D: Appl. Phys., Vol. 20, pp. 140~145.
- (3) Chryssolouris, G., 1990, "Laser Machining," Springer Verlag, New York, pp. 192~208.
- (4) Kim, T.H. and Chong, K.C., 1992, "Absorbtion Calculation of CO₂ Laser Beam on Stainless Steel and Carbon Steel by Numerical Method," Proceedings of LAMP '92, pp. 287~292.
- (5) Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., 1984, "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," Metall. Trans., Vol. 15B, pp. 299~305.
- (6) 정재동, 이재식, 1992, "Heat Transfer Analysis of Striation Formation in Laser Cutting Process.," 제 3 회 국제 레이저 가공기술 심포지움, pp. 31~52.
- (7) 양영수, 나석주, 구형모, 김태관, 1987, "레이저 절단품질에 미치는 절단압력의 영향(1)," 한국정밀공학회지, 제 4 권 제 4 호, pp. 84~92.
- (8) Goldman, A. and Kao, Y.C., 1981, "Numerical Solution to a Two Dimensional Conduction Problem using Rectangular and Cylindrical Body Fitted Coordinate Systems," Journ. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 753~758.
- (9) Lho, T.J. and Na, S.J., 1991, "A Study on Three-dimensional Transient Heat Flow in Circumferential GTA Welding of Pipes using Periodicity Conditions," PIME Part B, Journ. of Engng. Manufacture, Vol. 205, pp. 271~278.
- (10) Bruce, P.B., 1978, "Metals Handbook," 9th edition, Vol.1, 1978, American Society for Metals, Ohio, pp. 145~151.