

레이저 용융 절단 해석 프로그램 개발

민현식⁺, 이성환^{*}

(논문접수일 2001. 12. 28, 심사완료일 2002. 4. 2)

Development of a Quality Analysis Program for Laser Fusion Cutting

Huen-Sick Min⁺, Seoung-Hwan Lee^{*}

Abstract

Though the laser cutting process is increasingly used in industry, a process automation and systematic database is still yet to be developed. In this study, as the fundamental step toward the construction of a reliable process expert system, a laser cutting quality monitoring /analysis system is developed based on simulations and experimental results. The relations between laser process parameters and laser cutting surface quality parameters such as kerf geometry, striation, surface roughness and dross formation are characterized and analyzed. A graphical user interface is used to visualize the results.

Key Words : Laser Fusion Cutting Mechanism(레이저 용융절단), Cut Qualities(절단 품질)

1. 서론

1960년대에 레이저가 처음 개발된 이래, 레이저 가공은 경쟁력이 있는 공정으로 자리잡고 있다. 그 중 레이저 절단은 산업에 이용되는 레이저 공정 중에서 50~80%의 큰 비중을 차지하고 있다⁽¹⁾.

현재까지 많은 레이저 가공에 관한 연구와 절단 메커니즘에 대한 연구, 센서 시스템 개발에 대한 연구가 활발히 이루어졌지만, 체계화된 데이터 베이스 형태로 사용자에게 일관성 있게 제공되지는 못하였고, 그 때문에 중복된 실험,

연구를 반복해야 하는 등 경제적 손실이 있어왔다^(2,10). 이와 같이 전문가의 경험과 기술에 상당 부분 의존하고 있는 레이저 가공 분야에서는 전문가의 경험과 연구를 통하여 얻은 지식을 체계적으로 수집 정리하여 데이터 베이스화해야 할 필요성이 요구된다.

본 논문은 Fig. 1과 같은 지능형 자동 공정제어 시스템 중 최적화된 가공 조건을 산출하는 전문가 시스템 구축의 기초를 마련하기 위한 절단 해석 프로그램을 구현하는데 목적이 있다.

구체적으로 이론식을 바탕으로 한 절단 메커니즘 해석 법

⁺ 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

^{*} 주저자, 한양대학교 기계공학과 (sunglee@hanyang.ac.kr)

주소: 425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지, Tel: 031-400-5288

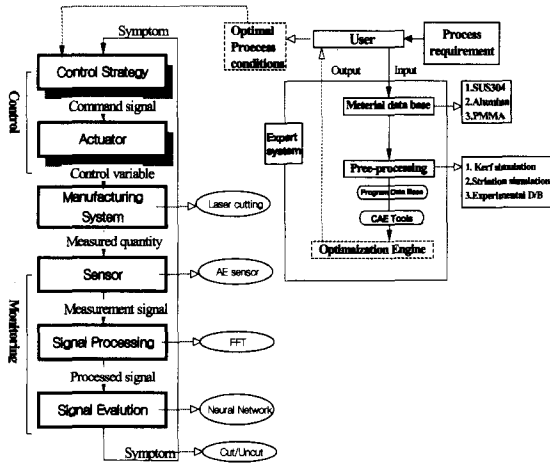


Fig. 1 A typical structure of an intelligent automatic supervisory system

을 알아보고 그 결과를 시뮬레이션 하였고 실험을 통하여, 레이저 공정 변수에 따른 절단 단면 및 표면 조도 등의 특성을 고찰하였다. 이론과 실험을 통한 결과들을 프로그램화하여 GUI형태로 구현하였다.

2. 절단 메카니즘 및 시뮬레이션

2.1 개요

절단 가공의 이론적인 연구 목적은 보다 빠른 절단 속도, 향상된 절단 품질 그리고 최대 절단 두께의 증가에 있으며 본 연구에서는 그 중 절단면 품질에 관심을 두고 그 메커니즘을 밝혀 최적의 절단 조건을 구하려 한다. 먼저, Cai⁽³⁾가 제안한 열역학적 모델과 Schuocker, Lio^{(4),(5)}가 제안한 절단면의 주기적 줄무늬 형성에 대한 이론 해석을 통해, 그 결과의 타당성을 검증한 후, 실험 및 수치 해석 방법을 병행하여 열원의 이송 속도, 재질 등의 주요 매개 변수들을 바꾸어 가며 연구를 수행하였다.

2.2 열역학적 모델링

소재의 단위 절단면에서의 열 평형 방정식은, 피가공물로의 열손실, 복사열, 보조 가스에 대한 냉각 효과 등을 무시한다고 가정하면, 아래 식 (1)과 같다.

$$E_b(x, y)dx dy = E_{cond(x, y)}dy + E_p(x, y)dx dy \quad (1)$$

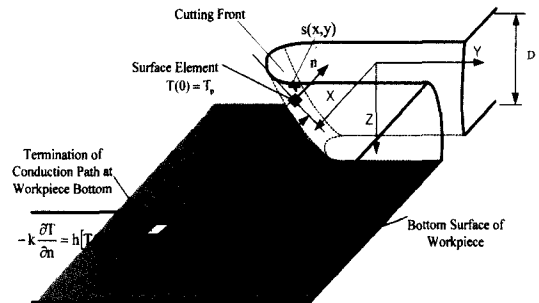


Fig. 2 Idealized cutting front geometry and finite surface element

여기서, E_b 는 빔의 초기 에너지이고, E_{cond} 는 전도 에너지, E_p 는 상변화 에너지이다.

흡수된 빔 에너지 출력과 소재의 상 변화 반응은 Fig. 2와 같이 x-y 평면에 수직인 방향으로 일어나지만, 열전도 반응은 단위 절단면의 수직 방향, 즉 n 방향으로 일어난다고 가정한다.

2.2.1 레이저 빔 에너지

TEM₀₀(Transverse Electromagnetic Mode)인 경우의 레이저 빔 강도는 식 (2)로 표현된다.

$$I(x, y) = \frac{a(u, y)}{\pi R^2 V} \exp\left(-\frac{u^2 + y^2}{R^2}\right) du \quad (2)$$

여기서, I는 빔 에너지 강도, R(x,y)는 빔의 반경, a는 총 흡수율이다.

(x,y) 점에 집적된 빔 에너지는 I의 시간에 대한 적분 형태로 구현될 수 있는데, 레이저 절단시 절단 속도가 일정하다는 가정 하에 시간 증분은 $dt = du/V$ 이다. 따라서 빔 에너지는 식 (3)과 같다.

$$E_b(x, y) = \int_{-\infty}^x \frac{a(u, y)P}{\pi R^2 V} \exp\left(-\frac{u^2 + y^2}{R^2}\right) du \quad (3)$$

여기서, u는 이동 좌표계의 x축 이다.

2.2.2 상변화 에너지와 전도 에너지

상 변화 에너지는 단위 체적 요소를 상온 T_∞ 에서 용융점까지 올리는데 필요한 에너지로 표현된다.

$$E_p(x, y)dydx = \rho[L + c_p(T_p - T_\infty)] \cdot s(x, y) \cdot dx dy \quad (4)$$

여기서, ρ 는 밀도, L 는 잠열, c_p 는 비열, $s(x, y)$ 절단 깊이 T_p 는 상변환 온도이다.

레이저 입사에 의한 열 전도 현상이 정상 상태라고 가정하면, x 축 양의 방향으로 주사 속도 V 로 이송하는 소재 내부의 열전도 문제를 지배하는 Fouriers 식은 (5)와 같이 표현된다.

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} + V \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

여기서, α 는 열 확산도이다.

여기서, ϕ 는 단위 절단면의 y 축과의 각도, θ 는 단위 절단면의 x 축과의 각도이다.

절단 단위면의 개략도인 Fig. 3에서 기하학적 관계식 (6)을 식(5)에 대입하면 상미분 방정식인 식 (7)을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi}} \frac{\partial}{\partial n} \quad (6)$$

$$\frac{d^2 T}{dn^2} + \frac{V}{\alpha} \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi}} \frac{dT}{dn} = 0 \quad (7)$$

또, Fig. 2에서 소재가 유한한 두께 D 를 가질 경우, 소재 바닥에 있는 절단 단위면까지의 열 전도 경로의 길이 (x, y) 를 유도할 수 있다.

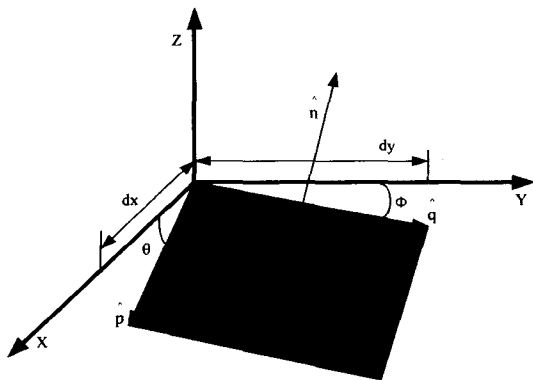


Fig. 3 Orientation and size of surface element

$$\delta(x, y) = [D - s(x, y)] \sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi} \quad (8)$$

주어진 경계조건(Fig. 2)을 이용하여 온도 구배 및 분포를 구한 후, x 방향의 열 플럭스(Heat flux)를 경로에 따른 적분을 하면 다음과 같이 전도 열에너지가 구해진다.

$$E_{cond}(x, y)dA = \left(\int_{-\infty}^x -k \left[\frac{\partial T(x, y, n)}{\partial n} \right]_{n=0} \sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi} \frac{du}{V} \right) \cdot dx dy \quad (9)$$

2.2.3 Geometric Solution

식 (3), 식 (4), 식 (9)를 식 (1)에 대입하면 최종적인 수치 모델 식 (10)를 얻을 수 있다⁽³⁾.

$$\begin{aligned} & \left[\int_{-\infty}^x \frac{a(u, y)P}{\pi R(u, y)^2 V} \exp\left(-\frac{u^2 + y^2}{R(u, y)^2}\right) du \right] \cdot dx dy \\ & = \rho[L + c_p(T_p - T_\infty)] s(x, y) \cdot dx dy \\ & + \left(\int_{-\infty}^x -k \left[\frac{\partial T(x, y, n)}{\partial n} \right]_{n=0} \sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi} \frac{du}{V} \right) \cdot dx dy \end{aligned} \quad (10)$$

2.2.4 레이저 절단 시뮬레이션

커파(Kerf) 형성은 절단이 빔을 중심으로 대칭이라는 가정 하에 소재의 반 평면을 대해서만 시뮬레이션 하였다. 레이저 출력의 범위는 본 연구 장비의 출력 범위인 100W ~ 350W, 절단 속도는 100mm/min ~ 1500mm/min, 재료는

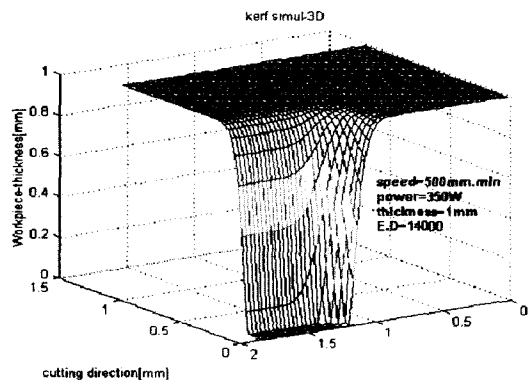


Fig. 4 3D simulation of cutting fronts for SUS304

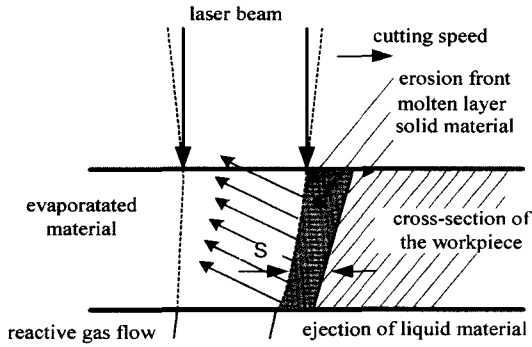


Fig. 5 The mechanism of laser cutting

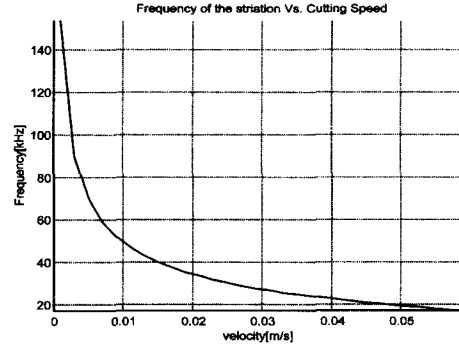


Fig. 6 Natural frequency of the striation vs. cutting speed

SUS304를 사용하였다.

Fig. 4는 SUS304에 대하여 식 (10)를 시뮬레이션한 결과이다.

Table 1 Thermo-physical, mechanical and optical properties of 304 Stainless Steel

Melting Point [K]	1703
Latent Heat of fusion [J/kg]	2.70E5
Thermal conductivity [W/m*K]	26
Specific heat [J/kg*K]	600
Density [kg/m ³]	8000
Liquid viscosity [kg/m*s]	6.0E-3
Electrical resistivity[Ω *m] at 20	9.1E-7
Absorptivity at melting point	0.68

2.3 레이저 절단면 조도의 이론 해석

레이저 절단시 절단면의 주기적 줄무늬 형성을 설명하기 위해 Schoucker, Yao^{(4),(5)} 등은 용융물에 대한 정적 및 동적 모델을 세워 이에 대한 해를 구하는 방법을 제안하였는데, Fig. 5에서 보는 바와 같이 절단면을 경사지게 하고 보조가스 영향과 증발, 축출되는 효과를 포함시켰다.

동적 해석을 위한 에너지 평형 방정식은

$$aP_L(t) + P_R(t) - P_{loss}(T, V) = c_v db s \frac{dT}{dt} + c_v db T \frac{ds}{dt} \quad (11)$$

여기서, $aP_L(t)$ 는 레이저 흡수 에너지, b 는 절단 폭, $P_R(t)$ 는 반응 에너지. $P_{Loss}(T, V)$ 는 에너지 손실, c_v 는 용융 상태

의 비열이다. 또, 질량 방정식은

$$m_{gain}(V) - m_{loss}(T, s) = \rho_m db \frac{ds}{dt} \quad (12)$$

여기서, ρ_m 는 용융 상태의 비열, m_{gain} 는 용융상태의 질량 이득, m_{loss} 는 용융상태의 질량 손실이다.

식(11)과 식(12)은 비선형 방정식이므로 섭동법(Perturbation method)을 이용하면, 식(13)를 얻을 수 있다.

$$s_1'' + \beta \cdot s_1' + \omega_o^2 \cdot s_1 = [aP_{L1}(t) + P_{R1}(t)] \left(\frac{\partial m_{loss}}{\partial T} \right)_o \frac{1}{c_v db s_o \rho_m db} \quad (13)$$

여기서, s 는 용융면의 두께이고,

$$\beta = \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial T} \right)_o \frac{1}{c_v db s_o} + \left(\frac{\partial m_{loss}}{\partial s} \right)_o \frac{1}{\rho_m db} - \frac{T_o}{s_o} \left(\frac{\partial m_{loss}}{\partial T} \right)_o \frac{1}{\rho_m db}$$

이며, 따라서 용융층의 표면 고유 진동수는

$$\omega_o^2 = \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial T} \right)_o \cdot \left(\frac{\partial m_{loss}}{\partial s} \right)_o \cdot \frac{1}{c_v db s_o \rho_m db} \quad (14)$$

과 같이 표현된다.

Fig. 6은 절단 속도에 따른 용융층의 표면 고유 주파수를 시뮬레이션 한 결과다. 주사 속도가 증가함에 따라 표면 고유 주파수가 감소하는(즉 표면 거칠기가 증가하는) 경향을 볼 수 있다.

3. 레이저 공정 변수에 따른 절단 특성

3.1 개요

레이저 절단은 고밀도 열원을 이용한 고속 절단이기 때문에 생산성이 매우 높고, 제한된 크기의 집중된 빔으로 가공하기 때문에 정밀 절단이 가능하며, 절단 전면에 걸쳐 여타의 방법에 비해 품질 특성이 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 품질 특성을 만족하기 위해서는 가공상의 중요한 공정 변수들이 적절하게 선정되어야 한다. 이러한 가공 인자는 레이저 가공기가 결정되면 고정되는 요소들도 있는 반면 작업자의 입장에서 결정해야 하는 것도 많다. 작업자가 선정하여야 할 공정 변수로는 레이저 빔의 형태(연속파 또는 펄스), 절단 속도, 사용가스의 종류 및 압력(유량) 등이 있으며 이외에도 출력의 크기, 초점 위치 및 재료적 요소(성분, 두께) 등이 있다⁽⁶⁾.

이번 절에서는 스테인레스강을 대상으로 하여 위에 언급한 레이저 절단 요소들이 절단면 조도와 절단부 하부에 부착되는 Dross 생성 상태 및 절단면 형상에 미치는 영향을 분석하였다.

3.2 실험 장치 및 방법

실험에서 사용된 실험 조건은 Table 2에 제시된 바와 같다. 레이저 장치는 TRUMF 353D형이다. 사양은 연속파 TEM₀₀모드의 Nd-YAG 레이저로 최대 출력이 350W이다. 실험에 사용된 재료는 두께 1.0mm의 SUS304, 절단 가스는 질소를 사용하였다. 절단면의 표면 거칠기 측정은 Taylorsurf를 사용하였고, Dross의 특성은 광학 현미경(배율 x5)을 이용한 정성적인 기준에 의해 5등급으로 (1 등급이 드로스 발생) 나누어 판단하였다⁽⁷⁾.

Table 2 Cutting conditions

Parameter	Value
Material & thickness[mm]	SUS304, 1mm
Power of laser[W]	300,330,350
Gas pressure[kgf/cm ²]	10,15,20
Cutting speed[mm/min]	500,800,100
Nozzle gap[mm]	0.2
Beam mode	TEM ₀₀ (C.W)

3.3 실험 결과 및 고찰

3.3.1 절단면의 표면 거칠기

Fig. 7은 레이저 출력 별로 절단 속도와 절단 조도에 따른 표면 거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 절단 속도가 증가하면서 표면 거칠기는 증가하는 경향을 보인다. 이것은 절단 속도가 느린 경우 온도 구배가 완만하여 절단부의 용융부가 넓어짐으로 인해 가스의 운동량에 의해 제거되는 범위 또한 커지며, 절단 속도가 과도하게 빠르면 용융금속이 절단부에서 제거된 흔적이 뚜렷이 남게 되어 결국 표면 조도가 저하되는 결과를 초래하기 때문이다⁽⁶⁾. 즉 온도 구배가 지나치게 커지면 용융구가 그만큼 빠르게 진행되어 표면장력으로 인한 보상이 이루어지지 않게 되는 이유이다. 또, 절단 가스의 압력이 증가할수록 표면 거칠기는 감소하는 경향을 보인다. Fig. 8은 가스압에 따른 절단면의 표면 조도로서 가스압의 상승에 따라 용융물에 닿는 가스의 모멘텀에 의한 전인력의 상승으로 용융 모재의 제거가 원활히 이루어짐을 알 수 있다.

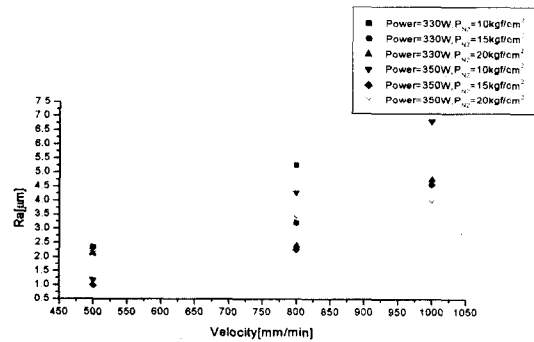


Fig. 7 Surface roughness vs. cutting speed

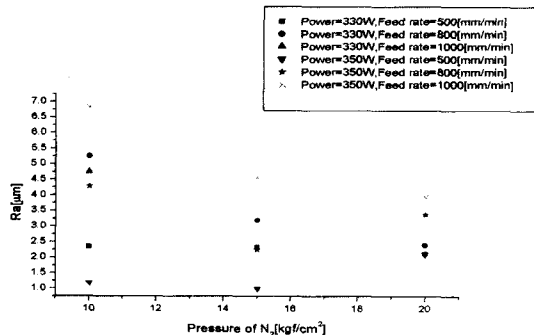


Fig. 8 Surface roughness vs. shield gas pressure

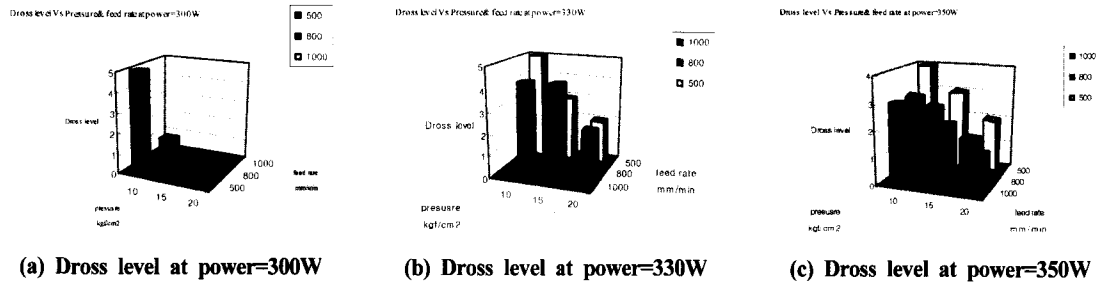


Fig. 9 Dross level vs. pressure & feed rate

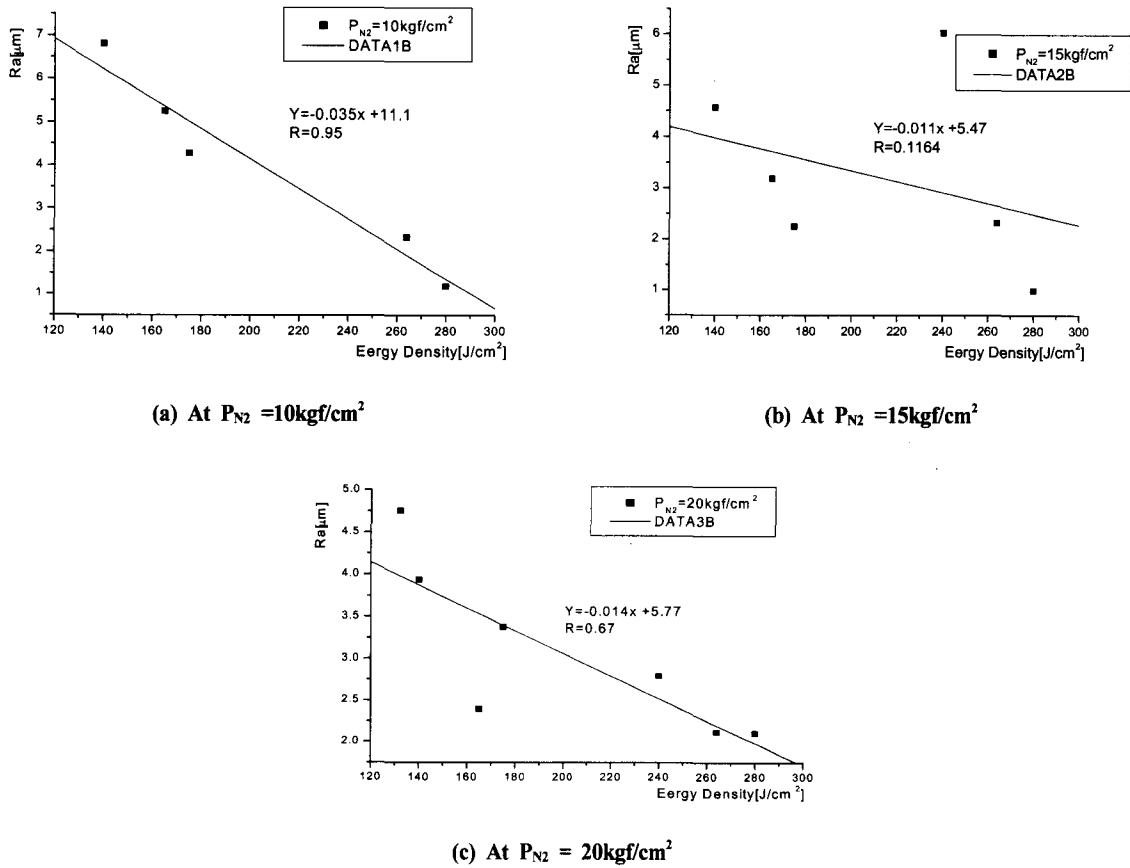
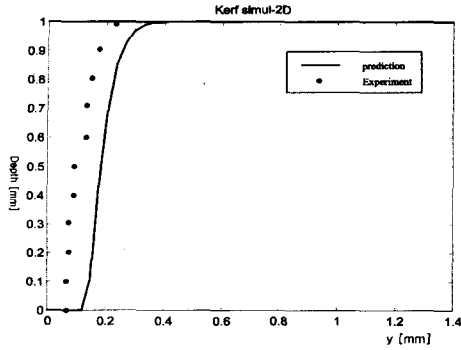


Fig. 10 The surface roughness vs. energy density

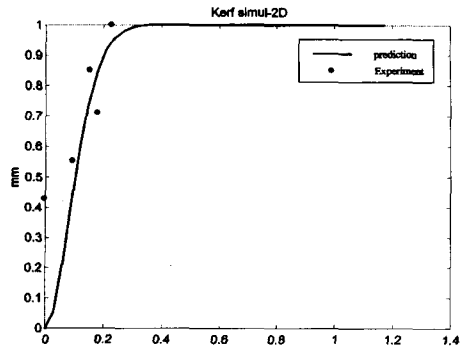
3.3.2 드로스(Dross) 생성 특성

레이저의 절단 품질 중에서 절단 폭이 좁거나 표면 조도가 낮다는 사실만으로는 아직 최적의 절단 조건이라고 할 수 없다. 절단품의 2차 가공 여부를 좌우하는 요소로서 절

단부의 드로스 생성 여부, 제거의 용이성 및 그 크기 등이 중요하게 취급되고 있다. Fig. 9는 가스압이 증가함에 따라 드로스가 현저하게 감소하는 것을 보여주고 있다.



(a) Comparison of predicted and measured profiles (cutting speed=500mm/min, power=350W, gas pressure=10bar)



(b) Comparison of predicted and measured profiles (cutting speed=1700mm/min, power=350W, gas pressure=10bar)

Fig. 11 Comparison of predicted and measured profiles

3.3.3 에너지 밀도에 따른 표면 거칠기

절단에 영향을 끼치는 여러 인자(레이저 출력, 주사 속도, 초점의 위치등)를 정량화(Normalizing)하기 위한 에너지 밀도는 다음과 같이 정의된다⁽³⁾.

$$ED = \frac{P}{2VR_f} \quad (15)$$

여기서, P는 레이저 파워, V는 이송속도, R_f는 집속된 레이저 빔의 반경이다.

에너지 밀도는 레이저 절삭 조건들이 가공시 실제 소재에 영향을 미치는 정량적인 기준으로, Fig. 10은 에너지 밀도와 표면 거칠기의 관계를 나타낸 것이다. 에너지 밀도가 증가함에 따라 표면 거칠기가 대체로 선형적으로 감소함을 볼 수 있다.

3.3.4 에너지 밀도에 따른 절단면 특성

Fig. 11은 에너지 밀도에 따른 절단면의 형태를 측정된 결과로, 이미 언급한 절단 시뮬레이션 결과 (Fig. 4)와 실험 결과를 비교한 것이다. 수치 해석 결과와 실험 결과에 의한 절단면 형성 경향이 일치함을 알 수 있다.

지금까지의 실험 결과, 다양한 가공 조건이 절단 품질에 미치는 결과와 정량화 된 인자와의 관계를 얻을 수 있었고, 향후 추가 실험을 통해서 얻은 실험식 등을 기초로 한 데이터 베이스 구축이 가능성을 보였다.

4. 레이저 절단 해석 프로그램

본 연구에서는 Fig 1의 지능형 공정 제어 시스템 모델^{(8),(9)}을 토대로 해석 기반의 모듈, 데이터 베이스 기반의 모듈을 구축하였다. 위와 같은 모듈과 공정 모니터링 시스템들을 객체화하여 절단 해석 프로그램이라 명칭 하였다.

먼저 2.2절과 2.3절에서 얻은 해석 모델을 사용자가 사용하기 용이하게, GUI (Graphic User Interface) 형태로 프로그래밍하여 구축하였다. Fig. 12는 순서도이고 재질, 레이저 출력, 절단 속도, 재질 두께 등의 가공 조건이 입력 인자이며, 출력은 절단면 형상과 절단 속도변화에 따른 용융층의 특성 인자들이 그래프의 형태로 보여진다. Fig. 13은 이론식을 토대로 구축한 절단 해석 시뮬레이션 프로그램의 기본 화면이다.

또한, Fig. 14는 3장에서 얻은 가공 조건에 따른 실험 결과와 실험식을 기초로 하여 Case-Based Knowledge System⁽⁹⁾을 구축하였다. 가공 조건을 입력하면 예측되는 드로스 상태 및 표면 거칠기 등의 절단 품질을 출력하는 프로그램이다.

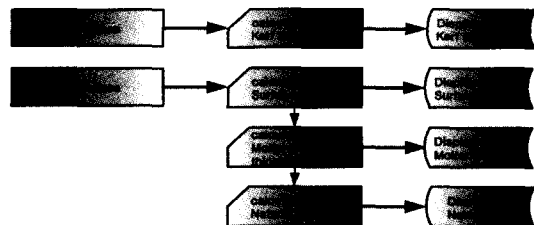


Fig. 12 Flowchart of the simulation program

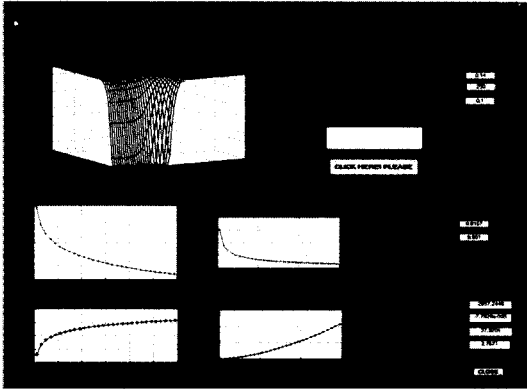


Fig. 13 Nd-YAG laser cutting process simulation program

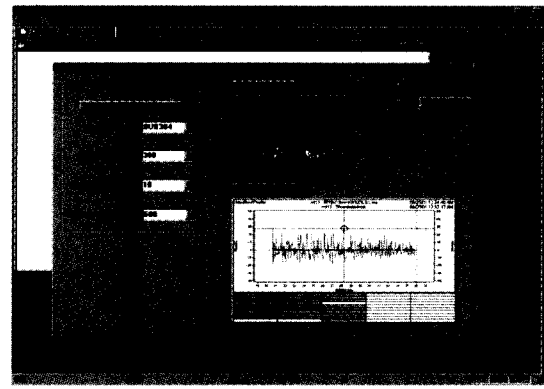


Fig. 14 laser cutting characteristics prediction program

5. 결론

본 논문은 최적화된 가공 조건을 산출하는 전문가 시스템 구축의 기초를 마련하기 위해, 관련 이론과 실험을 정리하여 다음과 같은 절단 해석 프로그램을 구현하였다.

- (1) 절단 메커니즘 해석을 통한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 개발
- (2) 레이저 공정 변수에 따른 절단 특성의 D/B화

향후, 이론과 실험적으로 얻어진 가공 데이터를 기초로 가공 최적화를 위한 추론 알고리즘을 적용한 전문가 시스템 개발이 요구된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2000-000322-0) 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

- (1) 최은석, 한국찬, 나석주, "레이저 절단에서 Sugeno 퍼지 적분을 이용한 재료 유사성 비교에 관한 연구," 대한 용접학회지, 제12권, 제3호, pp. 356~363, 1994.

- (2) 장옥진, 김봉채, 김재도, "레이저 절단에서 광소자를 이용한 가공공정 모니터링," 한국 정밀공학회지, 제13권, 제12호, pp. 30~37, 1996.
- (3) Lihong Cai., "Model-based process planning for laser cutting," University of California, Berkeley, 1996.
- (4) P.Di Pietro, Y.L. Yao., "A new technique to characterize and predict laser cut striations," Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 7, pp. 993~1002, 1995.
- (5) George Chryssolouris., "Laser Machining: Theory and Practice," Springer-Verlag, 1991.
- (6) 이기호, 김기철, "냉연 스테인리스강판의 레이저 절단 특성," 대한 용접학회지, 제14권, 제5호, pp. 59~68, 1996.
- (7) 이제훈, 서정, "Nd-YAG 레이저를 이용한 스텐실 절단 공정 II," 한국 레이저공학회지, 제4권, 제2호, pp. 47~57, 2001.
- (8) Maciej Szafarczyk, "Automatic supervision in manufacturing," Springer-Verlag, 1994.
- (9) Hamid R., "Design and Implementation of intelligent manufacturing systems," Prentice Hall, 1995.
- (10) 민현식, 이성환, 안선웅, "AE센서를 이용한 레이저 용융 절단 모니터링," 한국공작기계학회지, 제11권, 제3호(계재예정), 2002.