

## 표면품질 향상을 위한 레이저 절단조건

Determination of Optimal Cutting Condition  
for High Quality Cutting Surface

황 경 현

(한국기계연구소 가공기술실)

## ABSTRACT

The quality of cutting surface such as surface roughness, heat affected zone, kerf width can be improved by controlling the parameters of cutting process. These parameters includes cutting velocity, laser beam power, material depth and assistant gas. Thermodynamic analysis and systematical experiments are attempted to predict and determine the optimal cutting condition. There exists the optimal cutting condition to ensure high quality surface. Under this operation, the minimum surface roughness of the mild steel, the stainless steel and the titanium becomes  $6.8\mu\text{m}$ ,  $13\mu\text{m}$  and  $10\mu\text{m}$  respectively.

## (1) 서 론

레이저 절단시 절단면에 수직 방향으로 띠(striation)가 형성되고 이러한 띠는 절단면을 거칠게 하는 요인이 되며 우수한 표면 조도를 요구하는 제품의 가공에는 제한을 받게 된다. 절단면의 질을 향상시키기 위해서는 띠에 의한 표면의 거칠기를 감소시키기 위하여 띠의 생성원인, 뒤뜰림 역학, 띠의 크기와 주기를 조절하는 방법, 열(혹은 에너지)을 조절하여 정상상태의 용융물 흐름을 유도하는 방법등이 개발되어야 한다. 또한 열변형구간, 절단면의 진지도, 드로스부착 여부, 절단폭등이 제품의 품질을 좌우하는데 절단속도, 레이저 출력, 보조가스종류 및 압력등을 조절함으로써

품질을 향상 시키는 최적 절단조건을 결정할 수 있다. 레이저 절단은 높은 에너지 밀도를 이용하여 용융이나 증발에 의해 이루어지며 연속파(Continuous wave)에 의한 연속공정인 경우에도 내부적으로는 주기적인 레이저 - 피가공물의 상호작용으로 볼 수 있다.

레이저 출력의 순간적인 섭동이 어떤 순간에 형성되는 용융물층의 주기적인 운동을 야기시키며 또한 온도의 변동을 일으켜 결과적으로는 이러한 운동때문에 절단면에 뒤뜰림(distortion)이 발생된다. 재료의 제거는 증발(evaporation)과 축출(ejection)에 의해 이루어지며 레이저절단 역학(mechanism)을 이해하기 위해서는 용융, 증발과 축출이 이러한 레이저 절단의 여러 변수들에 어떤 관련들이 있는가를 아는 것이 중요하다. 이러한 현상을 야기시키는 인자나 조절할 수 있는 변수로는 출력, 절단속도, 보조가스 종류와 압력, 노즐 형상등 여러가지 요인이 있다.

가스제트에 의한 용융물 축출의 동적 모델에 관한 연구는 Arata (1-2)에 의해 본격적으로 시작되었으며 Schu"cker (3-4), Vicane(5), Decker(6) 등에 의해 용융물에 대한 정적 및 동적 모델을 세워 이러한 시스템에 대한 열(혹은 에너지) 평형 방정식을 세워 해를 얻거나 용융물의 유동 방정식을 세워 이 시스템의 안정성과 띠의 주기나 크기를 예측하였다. 부분적으로는 이러한 이론적인 예측과 실험이 일치하지만 전체적으로는 차이가 있으며 실험이 체계적으로 수행되지 못해 실제 이용되는데는 어려움이 있었다.

본 연구에서는 일차적으로 실험에 의해 티타늄, 연강, 스테인레스강에 대한 최적 절단조건을 체계적으로 분석하고 열역학적 모델을 세워 실험에 필요한 변수를 결정하고 경향을 분석하여 보도록 하겠다.

(2) 열역학적 모델 및 수치해석

열전도 계수 K, 비열 C, 밀도 ρ 등의 물성치를 등방성으로 보고 레이저 빔은 고체 내부로 방향과 온도에 관계 없이 일정한 흡수율을 가지고 거의 표면에서만 흡수가 일어나며 고체에서 기체로의 상변화는 증발온도 T<sub>ev</sub> 한단계에서 일어난다고 가정하고 흡내에서의 다중 반사를 무시하면 다음과 같은 지배 방정식과 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\rho c u \frac{\partial T}{\partial x} = k \nabla^2 T \quad \dots(1)$$

$$x \rightarrow \pm\infty, \quad y \rightarrow \pm\infty, \quad z \rightarrow \infty, \quad : T \rightarrow T_\infty \quad \dots(2)$$

표면에서의 에너지 균형으로부터 다음 조건을 구할 수 있다.

$$\alpha F_0 (\hat{n} \cdot \hat{k}) \exp [-(x^2 + y^2)/R^2] = h(T - T_\infty) - k(\hat{n} \cdot \nabla T) - \rho h_{fg} u (\hat{i} \cdot \hat{n}) \quad (3)$$

여기서 F<sub>0</sub>는 레이저 빔 중심에서의 플럭스이며 α는 흡수계수, h는 대류 열전달 계수, h<sub>fg</sub>는 승화 잠열이며  $\hat{n}$ 은 흡 표면에 수직인 단위 벡터이다.

해석은 그림(1)에서 보는 바와같이 3개의 영역으로 나누어 이루어 질수 있는데 영역1은 상변화가 일어나지 않는 영역이며 영역2는 기화가 일어나는 영역, 영역3은 기화가 일어나지 않는 영역이다. 각 영역에 대해 수치 해석에 의한 해를 구할 수 있다.

그림(2)는 수치해석에 의해 얻어진 속도 변화에 따른 영역2의 형상을 나타내는 것으로 속도가 커지면 η(=V/R)가 감소되는 것을 볼 수 있다. 즉 속도가 커지면 절단폭(Kerf width)이 감소한다.

(3) 실험 기구 및 재료

실험은 1.35KW CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였으며 구체적인 사양은 도표(1)과 같고 실험에 이용된 재료는 도표

(2)와 같다.

(4) 실험 결과 및 검토

절단변수로는 출력, 가공속도, 보조가스종류와 압력, 가공물의 두께 등을 선택하였고 절단면의 품질을 평가하는데는 표면조도, 절단폭, 드로스생성여부, 드로스 높이등을 택하였다. 절단폭 측정은 절단의 정밀도를 평가하는 방법으로 이용되며 표면 조도 측정은 절단면의 품질과 후처리 공정의 필요성 여부를 결정하는 방법이다. 그림(3)에는 절단속도에 따른 절단면의 형상을 보여준다. 그림(4)는 두께가 일정하고 출력과 절단속도를 변화시켰을 때의 절단 상태를 보여주는데 레이저 광을 조사시켜도 어느정도 이상이 되지 않으면 절단이 되지 않는 임계출력은 재료의 두께에 따라 변하며 임계 출력 이상에서도 어느 출력이하에서는 절단속도에 관계없이 dross-free 구간이 없다. 출력이 증가할 수록 저속측에서 self-burning이 일어나기 쉬우나 dross-free 영역은 증가하며 최대 절단 속도도 거의 비례하여 증가함을 보여준다. 출력이 증가하면 우수한 절단면을 얻을 수 있는 dross-free 영역이 커지며, 두께 2mm의 연강절단시 출력 600 - 800 watts에서 1.5 - 3.5m/min이다.

그림(5)에는 절단속도를 증가시켰을 경우의 절단폭 변화를 도시한 것으로서 절단 속도가 증가할수록 절단폭이 감소되는 양상이 뚜렷하며 최대 절단 속도에서 가장 좁은 절단폭을 갖는다. 그림(6)에는 self-burning시 절단면을 보여주는데 속도가 낮을 경우에는 규칙적인 원호는 C.W인 경우에도 순간적인 주기 운동에 의해 레이저 절단이 이루어 지고 있음을 보여준다. 절단속도는 표면조도에 영향을 주는데 조도를 최소화 시키는 최적 절단 속도가 그림(7)에 도시된다. 같은 속도에서는 출력이 높을수록 표면조도가 향상되고 절단 속도가 빨라지면 출력의 영향이 적어지며 출력이 커지면 최소 조도를 갖는 최적 속도가 증가한다. 스테인레스강은 같은 조건으로

절단할 경우 연강보다도 절단면의 조도가 거칠며, 그림(8)에서 볼 수 있듯이 입구측의 조도는 절단속도의 영향을 거의 받지 않지만, 중앙부와 출구측의 경우에는 절단 속도에 매우 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 절단면의 하단에 드로스가 부착되는 것은 열역학적 출력 평형이 맞지 않아 국부적인 발열반응에 의해 생기거나, gas jet에 의한 용융물 제거 운동이 균형을 이루지 않을때 생긴다. 속도에 따라 드로스의 배치와 형상이 바뀌어 지는데 피의 모양에 따라 용융물이 흘러내리다 하단부근에서 흐름의 수평방향 momentum 성분이 하단에 드로스를 부착되게 하기 때문이다. 특히 속도가 큰 경우에 부착되는 드로스는 산소에 의해 발화가 되며 절단면 하단의 품질이 나빠지는데 Vicane(5)에 의해 주장된 안정성 이론에 의하면 속도를 낮추고 보조 가스 압력을 크게 하면 드로스의 양을 감소시킬 수 있다. 티타늄의 경우도 SUS와 같이 dross-free의 영역은 존재하지 않으며 쉽게 제거되지 않는다. 티타늄의 경우 한가지 특이한 현상은 절단면의 한쪽으로만 드로스가 부착되는 속도 구간이 있는데 두께 1mm의 티타늄의 경우 750 watts출력으로 절단하는 경우 임계 속도는 1.2m/min 정도로 이 속도보다 높을 경우에는 그림(9)과 같이 한쪽으로 드로스가 부착된다.

#### (5) 결 론

1. 가우징 (gouging)이 발생될때까지 절단속도를 증가 시키면 절단폭이 감소한다. 티타늄, 스테인레스강, 연강 순으로 절단폭 변화가 절단 속도에 민감하다.
2. 표면조도를 최소화하고 표면 질 (quality) 이 최상의 상태로 되는 절단속도가 존재한다.

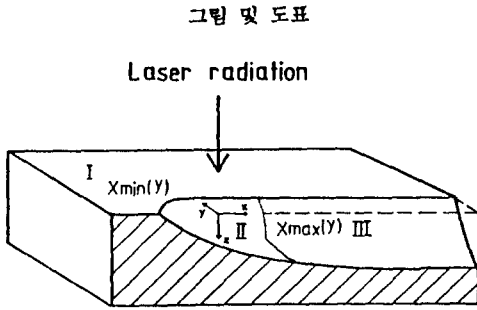
(도표(3)참조)

3. 임계 출력 이상에서는 절단 속도에 따라 self-burning, 드로스 부착, dross-free, 드로스 부착 구간이 있다.

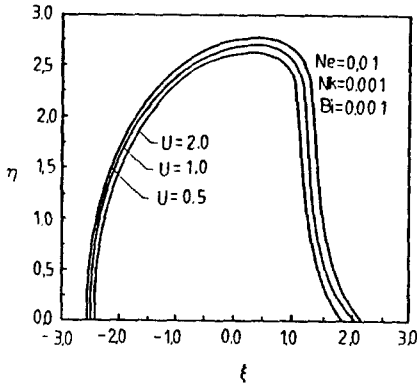
4. 두께가 얇은 경우 (보통 1mm미만)에서는 어느 위치에서나 표면조도와 표면 상태가 균일하나 두께가 두꺼울 경우 절단면의 상단에서 가장 좋은 표면을 얻을 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Y.Arata, H.Maruo and S.Takeachi, "Dynamic Behavior in Laser Cutting of Mild Steel", Trans. Jpn. Weld. Res. Inst., Osaka Univ., 8 (2), 15-26, 1979.
2. Y.Arata, H.Maruo and I.Miyamoto, "Improvement of Cut Quality in Laser-Gas-Cutting Stainless Steel", Orange County Manufacturing and Metalworking Conference and Exposition, Anaheim CA, NOV. 11-13, 72-83, 1981.
3. D.Schuo"cker and B.Walter, "Theoretical Model of Oxygen Assisted Laser Cutting", Inst.Phys. Conf.Ser NO.72, 5th GCL Symp., Oxford, 20-24, 1984.
4. D.Schuo"cker, "Physical Mechanism and Modelling of Laser Cutting", SPIE V01 701, ECOOSA, 390-398, 1986.
5. M.Vicane, G.Simon, "Hydrodynamical Instability of Melt Flow in Laser Cutting", J.Phys.D, Appl. Phys. 20, 140-145, 1987.
6. I.Decker, J.Ruge, "Physical Models and Technological Aspects of Laser Gas Cutting", V01.455 SPIE, 81-85, 1982.



그림(1) 레이저 조사에 의한 3가지 영역



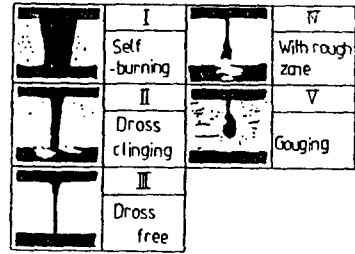
그림(2) 속도 변화에 따른 영역 2의 형상

항 목	사 양
제조회사 및 기종	대우 QUASAR 1350 - L (PRC 사 FH 1500)
최대 출력	1350 C.W. (펄스 발진가능)
파 장	10.6 $\mu m$
빔 모드	TEM <sub>00</sub>
렌즈	5" ZnSe
노즐	$\phi$ 1.2 mm

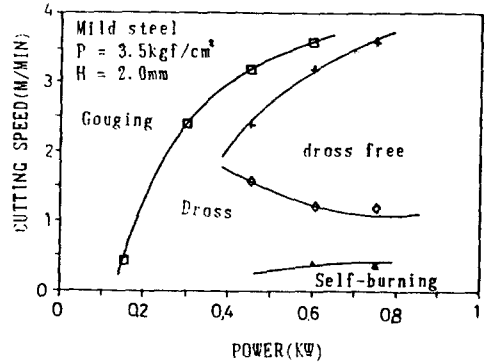
도표(1) 실험에 이용된 레이저 가공기 사양

피가공물	구 성 성 분
연강(SS41)	탄소-0.13, 규소-0.07, 망간-0.59 인-0.015, 황-0.018
SUS 304	탄소-0.08, 규소-1.0, 망간-2.0, 인-0.04 황-0.03, 니켈-8-10.5, 크롬-18-20
티타늄	수소-0.002, 산소-0.08, 질소-0.01 철-0.05, 탄소-0.01

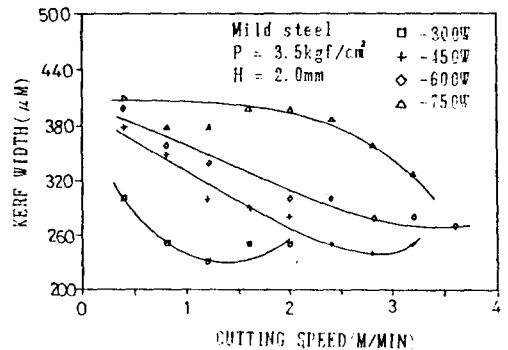
도표(2) 피가공물의 구성성분



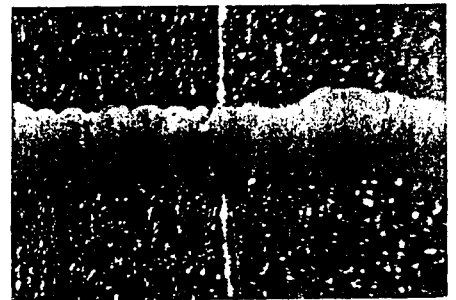
그림(3) 절단속도에 따른 절단면의 형상



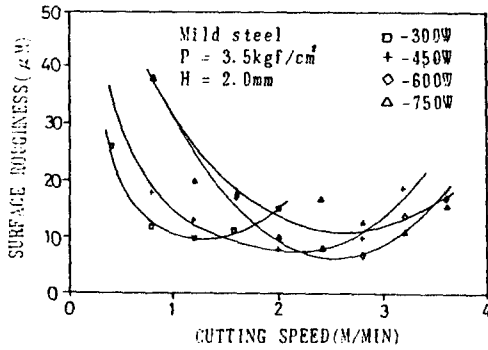
그림(4) 출력과 절단속도에 따른 절단 상태



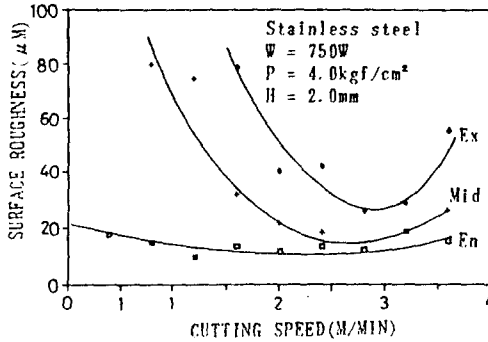
그림(5) 절단속도에 따른 절단폭 변화(연강)



그림(6) self-burning시의 절단면 (두께1mm, 출력750W, 절단속도400mm/min, 연강)



그림(7) 절단속도에 따른 표면조도



그림(8) 위치에 따른 절단속도와 표면조도의 관계



그림(9) 티타늄 절단시 드로스 부착모습  
 (두께1mm, 출력750W, 절단속도2200mm/min, 보조가스 Ar)

재 료	두께	출력	보조가 스압력	절단속도	표면조도 ( $\mu\text{m}$ )
SUS	1t	150	4.0	400	16
		300		800	13
		450		2,000	16
		600		2,400	18
		750		2,400	16
SUS	2t	450	4.0	1,600	35
		600		2,400	36
		750		2,400	26
연강	1t	150	3.5	1,600	6.8
		300		3,200	8.7
		450		3,200	8.6
		600		3,200	8.0
		750		3,200	10.0
연강	2t	300	3.5	1,200	10.6
		450		2,400	7.4
		600		2,800	7.0
		750		3,200	11.6
연강	3t	450	3.5	1,600	19.6
		600		2,000	18
		750		2,400	12
연강	4t	450	3.5	800	39
		600		1,600	20
		750		2,000	15
티타늄	1t	450	3.5	1,200	10
		600		2,400	12
		750		3,200	13

도표(3) 최적 절단조건