

고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 냉연 강판 절단시 공정변수의 절단폭에 미치는 영향

안동규[#], 김민수^{*}, 이상훈^{*}, 박형준^{**}, 유영태^{***}

Influence of process parameters on the kerfwidth for the case of laser cutting
of CPS 1N sheet using high power CW Nd:YAG laser

Dong-Gyu Ahn[#], Min-Su Kim^{*}, Sang-Hoon Lee^{*}, Hyung-Jun Park^{**} and Young-Tae Yoo^{**}

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the influence of process parameters, such as power of laser, cutting speed of laser and material thickness, on the practical cutting region and the kerfwidth for the case of cutting of CSP 1N sheet using high power Nd:YAG laser in continuous wave(CW) mode. In order to obtain the practical cutting region and the relationship between process parameters on the kerfwidth, several laser cutting experiments are carried out. The effective heat input is introduced to consider the influence of power and cutting speed of laser on the kerfwidth together. From the results of experiments, the allowable cutting region and the relationship between the effective heat input and kerfwidth for the case of cutting of CSP 1N sheet using high power CW Nd:YAG laser have been obtained to improve the dimensional accuracy of the cut area.

Key Words : CW Nd:YAG laser (연속파형 Nd:YAG 레이저), CSP 1N sheet (CSP 1N 냉연강판), Laser cutting (레이저 절단), Process Parameter (공정변수), Practical cutting region (절단가능영역), Effective heat input(유효 열입력량), Kerfwidth (절단폭)

기호설명

T = thickness of material

P = power of laser

V_{tr} = cutting speed of laser

η = average dross area in the cut area

n : number of dross in the measured area

A_i : area of each dross

B_j : sub-area of each dross

κ = straightness of the cut edge

δ_L : deviation of the cut edge on the left side

δ_R : deviation of the cut edge on the right side

V_{tr,min} : minimum cutting speed

V_{tr,max} : maximum cutting speed

α = kerfwidth

Q_{eff} = effective heat input

[#] 접수일: 2005년 1월 12일; 게재승인일: 2005년 4월 15일

[#] 교신저자: 조선대학교 기계공학과

E-mail smart@mail.chosun.ac.kr Tel.(062) 230-7043

^{*} 조선대학교 일반대학원 기계공학과

^{**} 조선대학교 산업공학과

^{***} 조선대학교 기전공학과

λ_1, λ_2 : the coefficients to relate the kerfwidth with the effective heat input

1. 서론

레이저가공은 높은 에너지 밀도를 가지는 고출력 열원으로 고속가공이 가능하므로 가공재료에 열영향부 및 가공후 열변형은 적게 발생시켜 자동차/선박/전자산업등 고정밀 절단 및 용접이 필요한 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다.¹⁻³ 레이저를 이용한 박판절단은 레이저의 스포크기 (Spot size) 내에 고출력의 에너지가 밀집되고, 고속으로 절단하므로 레이저의 열에 의한 가공재료의 열전달 반경이 적고, 이에 따라 가공후 열변형이 최소화되는 정밀 제품 절단이 가능하다. 그러므로, 열원을 이용한 비접촉식 박판재 절단이 요구되는 경우 산소 절단, 플라즈마 절단에 비하여 레이저 절단은 정밀 절단이 가능한 장점을 가지고 있다.⁴⁻⁵ 현재, 산업적으로 폭넓게 사용되는 있는 레이저 절단공정은 연속파형 특징과 $10.6\mu m$ 의 파장대를 가지는 CO_2 레이저 절단 공정이다.

$Nd:YAG$ 레이저는 고체 레이저로서 레이저의 안정성이 높고 고출력을 얻을 수 있으며, $1.06\mu m$ 의 파장대를 가지고 있어 CO_2 레이저 보다 가공물의 범 반사율이 매우 낮고 작은 영역에 에너지가 집속됨으로써 열영향부가 작아서 제품의 열변형이 작게 일어난다.⁴ 특히, 탄소강의 경우 $Nd:YAG$ 레이저가 CO_2 레이저보다 범 흡수율이 7 배 이상 높아 고효율의 제품 절단이 가능하다.⁵ 이러한 이유로, 최근 고출력 $Nd:YAG$ 레이저 절단에 대한 학문적/산업적 연구/적용이 활발히 진행되고 있다.⁶⁻⁷

레이저를 이용한 박판재의 정밀 절단을 위하여서는 레이저 절단공정변수의 제품 정밀도에 미치는 영향성에 대한 연구가 필요하다. Na 와 Yang 등은 700 W 급 CO_2 레이저를 이용한 2mm 두께의 강판과 스테인레스 판재 절단시 보호가스압력의 영향성에 대한 연구를 수행하였다.⁸⁻⁹ Park 등에 의하여 700 W 급 CO_2 레이저를 이용한 강판재 절단시 절단속도, 레이저출력 및 가스압력의 절단폭 (Kerfwidth)에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.¹⁰ Yilbas는 CO_2 레이저를 이용한 연강판재 절단시 재료두께별 절단속도와 레이저 출력관계에 대한 연구를 수행하였다.¹¹⁻¹² Aloke 등은 CO_2 레이

저를 이용한 연강 박판재 절단시 열입력과 절단속도의 절단폭에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.¹³ Dorn 등은 펄스 $Nd:YAG$ 레이저의 비정질 합금 절단시 절단속도, 펄스간격, 입력량의 절단부 조직변화에 대한 영향성에 대하여 연구하였다.¹⁴ Naeem 등은 1.5kW 급 연속파형 $Nd:YAG$ 레이저를 이용한 연강 판재 절단시 빔특성 (Beam quality), 초첨 크기, 가스압력이 절단가능 속도, 절단 가능 두께, 최적 가스 압력등에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.¹⁵ 한편, 1.0 kW 이상의 고출력 연속파형 $Nd:YAG$ 레이저를 이용한 CSP IN 냉연강판 절단시 레이저출력, 레이저 절단 속력 및 재료 두께가 절단폭에 미치는 영향에 대한 선행 연구는 문헌상으로 거의 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 1.0 kW 이상의 레이저 출력력을 가지는 고출력 연속파형 $Nd:YAG$ 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP IN 냉연강판 절단시 절단속도, 레이저출력, 재료두께가 각 조건별 절단가능영역과 절단폭에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 각 공정변수조합에 대한 절단가능영역 (Practical cutting region) 을 도출하였다. 또한, 레이저 출력력과 절단속도를 동시에 고려할 수 있는 유효 열입력량(Effective heat input)과 절단폭의 상관관계를 도출하였다.

2. 실험 및 분석 방법

2.1 실험 방법

본 연구에서는 고출력 연속파형 $Nd:YAG$ 레이저의 CSP IN 박판재 절단시 공정변수의 절단폭 영향성에 대한 연구를 수행하기 위하여 먼저 각 절단조건별 절단가능영역을 선정하였다. 그후, 선정된 절단가능영역내에서 공정변수의 절단폭에 미치는 영향성에 대하여 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 최대 출력 2.8kW 의 연속파형 $Nd:YAG$ 레이저와 절단가스분사 장치가 부착된 6 자유도 운동이 가능한 로봇 레이저 절단 시스템을 이용하였다.

본 실험에 사용된 연속파형 $Nd:YAG$ 레이저는 독일 Trumpf 사⁷에서 제작된 아크 플래시 램프 펌핑 장치가 부가된 레이저 발진기에서 생성된다. 연속파형 $Nd:YAG$ 레이저의 파장은 $1.06\mu m$ 이며, 초첨크기는 0.6 mm 이다. 레이저 범의 공간모드는

TEM₀₀ 모드를 사용하였다. 시편으로 사용된 판재는 포항제철에서 개발되어 자동차용 및 구조물 판재로 많이 사용되고 있는 CSP 1N 압연강판을 사용하였다. CSP 1N 압연강판 박판재의 재료성분비는 Table 1 과 같다.

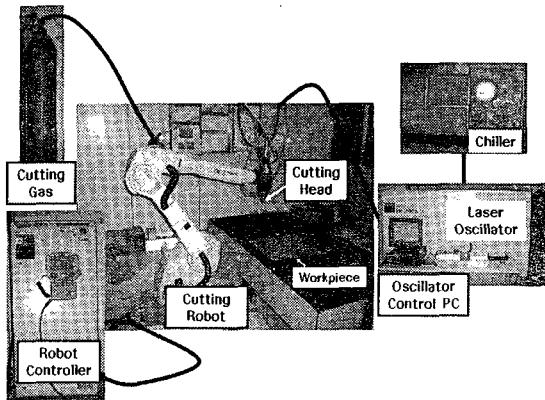


Fig. 1 Experimental set-up

Table 1 Chemical composition of CSP 1N (wt %)

C	Mn	P	S	Ti	Al
0.03	0.07	0.01	0.01	0.05	0.03

본 연구에 사용된 레이저 공정변수는 레이저 출력(P)과 레이저 절단속력(V_u)이며, 재료변수는 재료두께(T)를 선정하였다. 실험에 사용된 공정변수와 재료두께는 Table 2 와 같으며, 절단가스 압력은 0.1 MPa 로 고정하였다. 절단속력 간격을 1,000 mm/min 으로 하였다. 특히, 판재 두께는 0.5 mm 에서 2 mm 사이로 산소절단과 플라즈마 절단시 절단 후 변형에 의하여 절단이 양호하지 못한 영역을 선정하였다.

Table 2 Experimental conditions

Process Parameters	Conditions
Power of laser (Watt)	1,200-1,800
Cutting speed of laser (mm/min)	2,000-10,000
Thickness of CSP 1N (mm)	0.5-2.0
Gas pressure (MPa)	0.1

시편의 레이저 절단시 시편과 레이저의 각도가 90° 인 수직절단을 수행하였다. 시편은 아세톤으로 표면 세척을 수행한 후 사용하였다. 실험에 사용된 절단가스는 일반적으로 산화열을 이용한 저탄소강 절단에 많이 사용되는 산소가스^{5, 8-9, 16}를 사용하였다.

레이저 절단 길이는 Fig. 2 와 같이 실험분석시 초기 레이저 안정화 길이 및 절단 종료부의 영향이 절단 품질 평가에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 100 mm 로 선정하여 60 mm 이상의 절단 품질 평가 길이가 확보되도록 하였다.

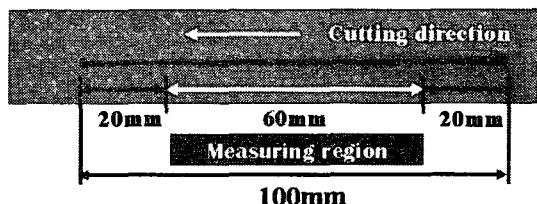


Fig. 2 Measuring region in the cut area.

2.2 실험 결과 분석 방법

절단가능영역 도출 및 공정변수의 절단가능영역 영향성 분석은 실험 결과 얻어진 절단면의 평균 드로스 면적 (Average dross area : η) 과 절단면의 직진도를 척도 (κ) 로 하여 결정하였다.

평균 드로스 면적과 절단면의 직진도는 하부 절단면 (Bottom side of the cut edge) 에서 측정하였다. 평균 드로스 면적은 식 (1) 및 Fig. 3 과 같이 측정범위내의 전체에 포함되는 드로스 면적을 전체 드로스 개수 (n) 로 나눈 것으로 정의하였다. 한 개의 드로스 면적은 Fig. 3 과 같이 삼각형으로 형성된 여러 개의 부속면적의 합으로 정의하였다. 절단면의 직진도는 식 (2) 및 Fig. 4 와 같이 절단면 양쪽의 표면 요철의 평균으로 정의하였다.

공정변수의 절단폭에 미치는 영향에 대한 분석은 실험결과 도출된 절단가능영역에서 수행하였다. 절단폭은 상부 절단면 (Upper side of the cut section) 과 하부 절단면에서 각각 절단폭을 측정한 후, 평균값으로 정의하였다.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m b_j)_i}{n} \quad (1)$$

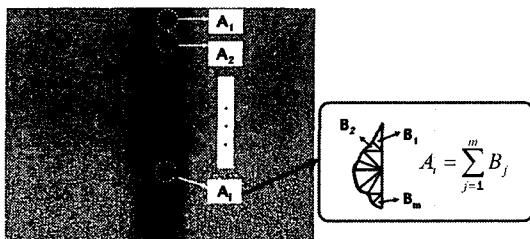


Fig. 3 Measuring methodology of the average dross area

$$\kappa = \frac{\delta_R + \delta_L}{2} \quad (2)$$

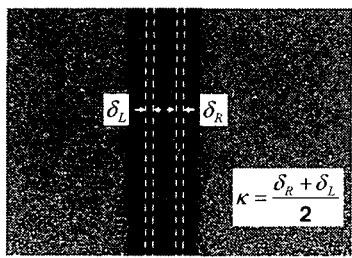


Fig. 4 Estimation method of straightness for the cut edge

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공정변수의 절단가능영역 영향성

본 연구에서는 평균 드로스 면적 0.5 mm^2 이하, 직진도 0.1 mm 이하인 경우에 대하여 절단가능영역으로 선정하였다. 또한, 절단 단면 검사결과가 과용융, 미절단, 표면 굴곡등 양호하지 못한 절단 특성을 나타내는 조건에서는 절단이 불가능한 것으로 판단하였다. Table 3은 실험결과 도출된 각 실험조건별 CW Nd:YAG 레이저의 CSP 1N 박판재 절단가능영역이다.

Figs. 5 와 6 은 재료 두께 0.5 mm 일때의 레이저 절단 속력과 평균 드로스 면적과의 관계 및 레이저 절단 속력과 직진도와의 관계이다.

Figs. 7, 8 및 9 는 레이저 출력 $1,600 \text{ Watt}$, 재료 두께 1 mm 에서의 최소 절단가능속력($V_{tr,min}$)과 최대 절단가능속력($V_{tr,max}$) 영역 전후의 절단면 형상이다. 절단가능영역 전후 절단면 분석결과 Fig. 7 과 같이 각 두께별 최소 절단가능속도 이전에는 레이

저 출력이 매우 높아 모재로 과도한 양의 열전달이 일어나 모재의 과용융이 발생하고, 발생된 용융물을 산소가스가 효율적으로 제거하지 못해 과도한 드로스 생성 및 과용융에 의한 절단부위 재충전 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다.

Table 3 Practical cutting region of each cutting condition

T (mm)	P (Watt)	$V_{tr,min}$ (mm/min)	$V_{tr,max}$ (mm/min)
0.5	1,200	4,000	10,000
	1,400	4,000	10,000
	1,600	5,000	9,000
	1,800	5,000	9,000
1.0	1,200	4,000	6,000
	1,400	4,000	7,000
	1,600	4,000	7,000
	1,800	4,000	7,000
1.6	1,200	2,000	5,000
	1,400	2,000	5,000
	1,600	3,000	5,000
	1,800	3,000	5,000
2.0	1,200	3,000	4,000
	1,400	3,000	5,000
	1,600	3,000	5,000
	1,800	3,000	5,000

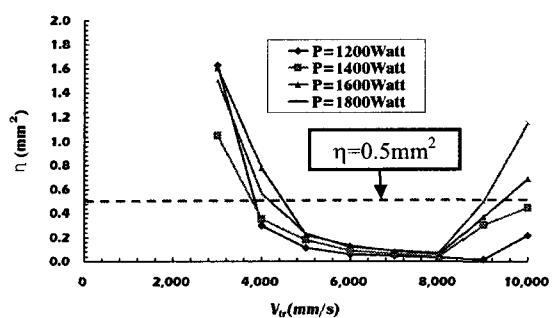


Fig. 5 Influence of cutting speed on the average dross area according to power of laser

최대 절단 가능 속력 이상부터는 Fig. 9 와 같이 절단면에 주기적인 요철이 발생하기 시작하였

다. 레이저의 절단 속력이 증가되면서 레이저에서 가공물로 전달되는 단위시간당 에너지 공급량이 감소한다. 그러므로, Fig. 9 와 같은 최대 절단 가능 속력 이상의 고속 절단 영역에서는 레이저에서 가공물로 절단되는 적은 단위시간당 에너지 때문에 판재 두께방향으로 완전 용융이 발생하기 위한 시간 간격이 증가한다. 이때, 레이저의 고속 이동과 계속적인 가공물 가열 및 용융풀내 용융재료 유동에 의하여 레이저 절단 방향으로 가공물 내부의 초기 용융부, 최대 용융부 및 용융 선단 사이에 용융량 차이가 발생하고, 이로 인하여 용융량이 많은 부분에서 가공물로 많은 열전달이 발생한다. 그결과 Fig. 9 와 같이 고속 레이저 절단에서는 절단부 표면 요철이 발생하는 것으로 사료된다.

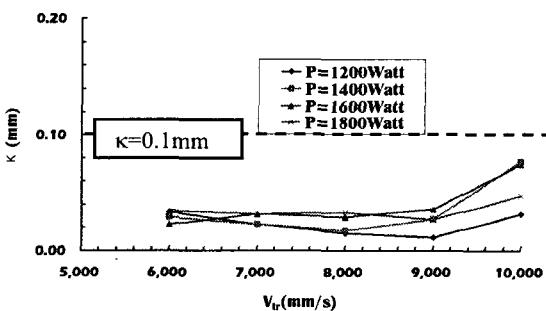


Fig. 6 Influence of cutting speed on the straightness according to power of laser

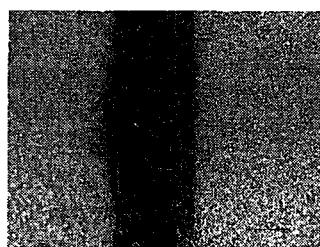


Fig. 7 The shape of the cut section in the region of a low cutting speed ($V_{tr} = 3,000$ mm/min, $P = 1,600$ Watt, $T = 1.0$ mm, Bottom side of the cut edge)

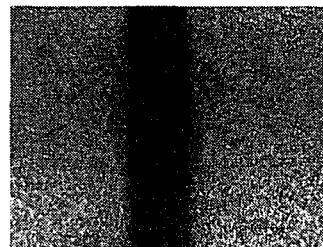


Fig. 8 The shape of the cut section in the practical cutting region ($V_{tr} = 5,000$ mm/min, $P = 1,600$ Watt, $T = 1.0$ mm, Bottom side of the cut edge)

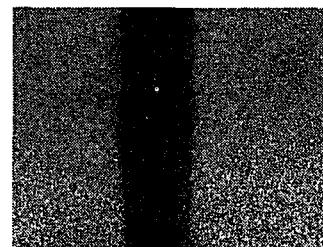


Fig. 9 The shape of the cut section in the region of high cutting speed ($V_{tr} = 8,000$ mm/min, $P = 1,600$ Watt, $T = 1.0$ mm, Bottom side of the cut edge)

Table 3 에 의하면 재료 두께가 증가할수록 최소절단가능속력과 최대절단가능속력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 재료두께가 증가할수록 절단을 위해 요구되는 재료 용융량이 증가하여, 레이저로부터 가공물로 추가적 유효 입열량이 소요되기 때문으로 사료된다.

동일 재료 두께에서 레이저 출력이 증가할수록 최소절단가능속력이 증가하였다. 이것은 레이저 출력이 증가할수록 재료의 용융량이 증가하나 절단가스압력은 일정하여, 용융된 재료를 완전히 제거하지 못하고 절단면에 잔존하게 함으로써 절단면의 드로스량을 증가시키기 때문으로 사료된다. 이것은 절단가스 압력을 조절함으로써 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 공정변수의 절단폭에 미치는 영향

본 연구를 통하여 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판재 절단시 공정변수와 절단폭 관계를 규명하였고, 이를 이용하여 정

형화된 실험식을 유도하였다.

Fig. 10 은 CSP 1N 박판재 두께와 레이저 출력에 대한 절단속력과 절단폭 (α) 의 상관관계이다. Fig. 10 과 같이 절단폭은 레이저 절단속력이 절단 할 때 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 레이저 출력이 증가할수록 절단폭이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 실험 한 조건에 대하여서는 절단폭은 최소 0.47 mm 에서 최대 0.79 mm 사이의 값을 나타내었다. Fig. 11 은 두께 1.0 mm, 레이저 출력 1,800 Watt 에서 레이저 절단속력별 절단면 형상 변화이다.

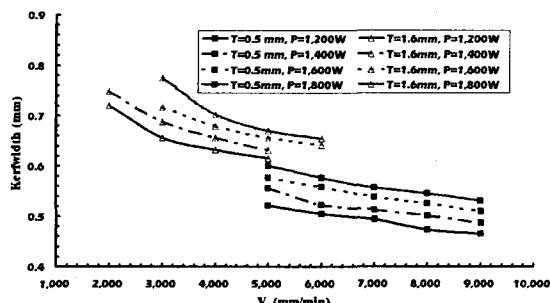


Fig. 10 Influence of cutting speed and power of laser on kerfwidth

Fig. 12 는 레이저 출력에 대한 재료 두께별 레이저 절단 속력과 절단폭의 관계를 나타낸다. Fig. 12 와 같이 재료의 두께가 두꺼워질수록 절단폭이 증가함을 알 수 있었다.

이것은 재료의 두께가 두꺼워질수록 레이저에 의하여 용융시켜야 할 가공물의 깊이와 체적이 증가함으로써 가공재료가 가스압력에 의하여 완전 제거될 수 있도록 가공물이 충분히 용융되기 위하여서는 레이저에서 가공물로 투입되는 추가적인 열량과 시간간격이 요구되고, 이로 인하여 얇은 판재보다 판재의 수평방향으로 열전달이 더욱 많이 발생하기 때문으로 사료된다.

가공물의 두께가 증가할수록 레이저에 의한 가공물 최하단면까지 용융을 시킬 수 있는 시간 간격이 길어져서, 용융풀에서 재료로 열전달되는 시간이 증가하고 이로 인하여 절단폭이 증가한다. 그리고, 재료가 두꺼워짐에 따라 길어진 재료 용융 시간 간격 동안 레이저 에너지가 가공물 하부로

유실되지 않고 용융풀에 계속적으로 열 에너지를 공급시키는 것이 절단폭을 증가시키는 추가적인 요인으로 사료된다.

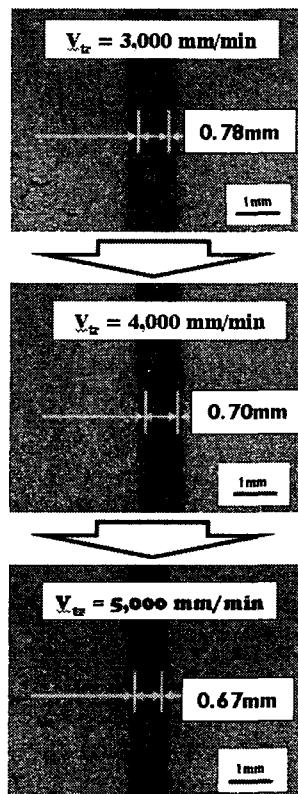


Fig. 11 Influence of cutting speed on shape of cut section and kerfwidth ($T = 1.6\text{ mm}$, $P = 1,800\text{ Watt}$)

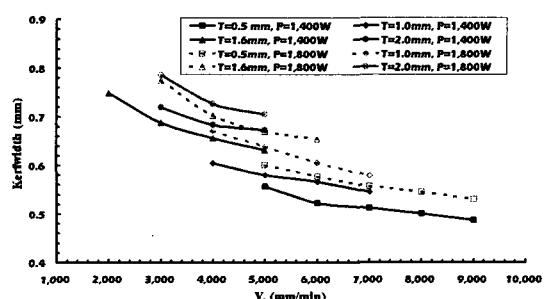


Fig. 12 Influence of laser cutting speed and workpiece thickness on kerfwidth

본 연구의 실험 조건에서는 공정변수중 재료두께와 레이저 출력이 절단폭에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

레이저 절단면의 수직도는 재료의 두께에 관계 없이 $88^\circ - 89^\circ$ 를 유지하였다. 이 결과로부터 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판재 절단시 절단면은 거의 수직단면을 형성함을 알 수 있었다.

Figs. 9 와 11에 나타난 실험결과를 이용하여 레이저 출력과 레이저 절단속력이 절단폭에 미치는 영향을 동시에 고려하기 위해 유효 열입력량 (Q_{eff}) 을 식(3)과 같이 도입하였다.

$$Q_{eff} = \frac{P}{V_{tr}} \quad (3)$$

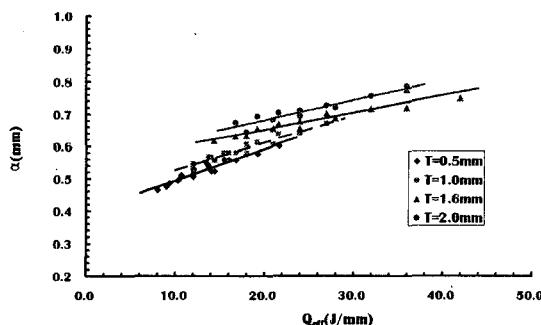


Fig. 13 Relationship between effective heat input and kerfwidth

Fig. 12는 두께별 유효 열입력량과 절단폭의 관계이다. 절단폭과 유효 열입력량과의 관계식을 정의하기 위하여 실험데이터를 선형화귀법으로 분석하였다. 이 분석 결과를 이용하여 식(4)와 같은 절단폭과 유효 열입력량의 선형 관계식을 유도할 수 있었다.

$$\alpha = \lambda_1 Q_{eff} + \lambda_2 = \lambda_1 \frac{P}{V_{tr}} + \lambda_2 \quad (4)$$

Table 4 는 절단폭과 유효열입력량의 관계식에서의 각 상수와 상관 계수 (Correlation coefficient)이다. Table 4 에서 절단폭과 유효 열입력량의 상관 계수가 0.90 - 0.94 범위를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 절단폭과 유효 열입력량의 관

계는 강한 선형성이 존재함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 12 와 같이 CSP 1N 박판재 두께 증가시 유효 열입력량에 대한 절단폭의 민감도가 감소함을 알 수 있었다.

Table 4 Coefficient of equation for the relationship between kerfwidth and effective heat input

T (mm)	λ_1	λ_2	Correlation coefficient
0.5	0.0097	0.398	0.93
1.0	0.0085	0.441	0.94
1.6	0.0053	0.546	0.91
2.0	0.0061	0.560	0.90

4. 결론

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP 1N 박판재 절단시 절단속도, 레이저출력, 재료두께가 각 조건별 절단 가능영역과 절단폭에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, CSP 1N 재료두께에 따른 레이저 출력별 절단가능속력범위를 취득할 수 있었다. 재료 두께가 증가할 수록 최소절단가능속력과 최대절단가능속력이 감소하는 현상과 동일 재료 두께에서 레이저 출력이 증가할수록 최소절단가능속력이 증가하는 현상을 알 수 있었다.

둘째, 레이저출력, 레이저 절단속도 및 CSP 1N 재료 두께와 절단폭의 상관관계를 유도할 수 있었다. 절단폭은 레이저 절단속력 증가시 거의 선형적으로 감소하는 형태를 나타내며, 레이저 출력과 절단폭은 비례관계에 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 실험한 조건에 대하여서는 절단폭은 최소 0.47 mm에서 최대 0.79 mm 사이의 값을 나타내었다. 또한, 재료의 두께가 증가할수록 절단을 위한 재료 용융량이 증가하고, 이로 인하여 가공물의 용융풀 형성시 열량과 형성시간이 증가됨에 따라 박판재의 절단면에 수직한 방향으로 열전달이 많이 발생하여 재료의 절단폭이 증가하는 것을 알 수 있었다.

셋째, 레이저 출력과 절단속도의 절단폭에 미치는 영향성을 동시에 고려하기 위하여 유효 열입

력량을 도입하였다. 유효 열입력량과 절단폭은 강한 선형성을 나타내었다. 또한, 재료 두께별 유효 열입력량과 절단폭 실험식을 유도할 수 있었다.

향후, 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 박판재 고정밀 절단을 위하여 절단가스의 압력의 제품정밀도 영향성과 공정변수의 표면조도와 절단면 줄무늬(striation)에 미치는 영향에 대한 연구가 계속되어야 될 것으로 사료된다. 레이저 절단 영역의 정밀 분석과 품질의 레이저 빔의 준성을 분석을 위하여 절단 속력 편차의 세분화를 통한 추가적인 실험 및 레이저 빔 특성/입사각/공간모드에 대한 연구가 추후 진행되어야 될 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서 취득된 데이터베이스를 이용한 CW Nd:YAG 레이저 절단시스템 전용 최적절단경로 생성 CAD/CAM 시스템 개발에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

후기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-042-D00192)

참고문헌

1. Pollmann, W. and Becker, W., "Laser-Assisted Manufacturing Technology in the 3rd Millennium," Proceedings of the LANE 2001, pp. 39 - 54, 2001.
2. Larsson, J. K., "The Mature Technique of Laser Processing in Body Manufacture – Long Term Production Experiences and Recent Developments," Proceedings of the LANE 2001, pp. 55 - 74, 2001.
3. Geiger, M., "Manufacturing Science-Driving Force for Innovation," Advanced Technology of Plasticity 2002, Vol. 1, pp. 17 - 30, 2002.
4. Ready, J. F., "Industrial Applications of Lasers," Academic Press, San Diego CA U.S.A., pp.315-417, 1997.
5. Caristan, C. L., "Laser Cutting ; Guide for Manufacturing," Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan U.S.A., pp.3-54, 2004.
6. Wollermann-Windgassse, R. and Schinzel, C., "Laser Technology in Manufacturing-State of the Art at the Beginning of the 21st Century," Proceedings of the LANE 2001, pp. 87 - 102, 2001.
7. <http://www.trumpf.com>
8. Yang, Y. S., Na, S. J., Kim, W. B. and Kim, T. K., "Influence of Cutting Pressure on Laser Cut Quality," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol.5, No.1, pp.63~70, 1988.
9. Na, S. -J., Yang, Y. -S., Koo, H. -M. and Kim, T. -K., "Effect of Shielding Gas Pressure in Laser Cutting of Sheet Metals," Transactions of the ASME ; Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.111, pp.314-318, 1989.
10. Park, J. H., Han, G. C. and Na, S. J., "A Study on Cutting Mechanism and Heat Transfer Analysis in Laser Cutting Process," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.17, No.10, pp.2418-2425, 1993.
11. Yilbas, B. S., "Experimental investigation into CO₂ laser cutting parameters," Journal of Materials Processing Technology, Vol.58, pp.323-330, 1996.
12. Yilbas, B. S., "Effect of Process Parameters on the Kerfwidth during the Laser Cutting Process," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer Part B; Journal of Engineering Manufacture, Vol.215, pp.1357-1365, 2001.
13. Aloke, R., Girrish, V., Scrutton, R. F. and Molian, P. A., "A Model for Prediction of Dimensional Tolerances of Laser Cut Holes in Mild Steel Thin Plates," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.37, pp.1069-1087, 1997.
14. Dorn, L., Lee, K. L., Munasinghe, N., "Nd:YAG Laser Cutting of Amorphous Alloys," DVS-Berichte, Vol.163, pp.447-455, 1994.
15. Naeem, M., Matthews, M., Ingram, S., "Parametric Study of Laser Cutting of Steel Using 1.5kW Continuous Wave Nd:YAG Laser," Proceedings of Laser Materials Processing Conference, pp.152-158, 1999.
16. Chen, S. L., "The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting," Journal of Materials Processing Technology, Vol.88, pp.57-66, 1999.