

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판재 절단시 공정변수의 절단표면특성에 미치는 영향

안동규*, 김민수+, 이상훈+, 유영태**, 박형준***

Influence of Process Parameters on Characteristics of the Cut Surface for the Case of Cutting of CSP 1N Sheet Using High Power CW Nd:YAG Laser

Dong-Gyu Ahn*, Min-Su Kim+, Sang-Hoon Lee+, Young-Tae Yoo** and Hyung-Jun Park***

Abstract

The objective of this research work is to investigate the influence of process parameters, such as power of laser, travel speed of laser and material thickness, on roughness and striation of the cut surface for the case of cutting of CSP 1N sheet using high power Nd:YAG laser with continuous wave (CW). In order to find the practical cutting region and the relationship between process parameters on the roughness and the striation, several laser cutting experiments are carried out. From the results of experiments, the allowable cutting region and an optimal cutting speed for each cutting condition have been obtained to improve the quality of the cut surface. In addition, it has been shown that the surface roughness is related to the number of striation and depth of valley of the cut surface.

Key Words : CW Nd:YAG Laser (연속파형 Nd:YAG 레이저), CSP 1N sheet (CSP 1N 냉연강판), Surface Roughness (표면조도), Striation of the cut surface (절단면 물결무늬), Optimal Cutting Speed (최적절단속력)

1. 서론

레이저가공은 높은 에너지 밀도를 가지는 고출력 열원으로 고속가공이 가능하므로 가공재료에 작은 열영향부를 생성시키고 가공후 열변형은 적게 발생시켜 자동차/선박/전자 제품등 고정밀 절단 및 용접이 필요한 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다.⁽¹⁾ 레이저를 이용한 박판절단은 레이저

의 스폿크기 (Spot size) 내에 고출력의 에너지가 밀집되고, 고속으로 절단하므로 레이저의 열에 의한 가공재료의 열전달 반경이 적고, 이에 따라 가공재료 내부에 잔류응력을 작게 발생시켜 가공후 열변형이 최소화되는 제품 절단이 가능하다. 그결과, 박판절단시 과도한 열전달 반경에 의한 큰 후변형이 발생하는 산소절단이나 플라즈마 절단보다 우수한 고정밀 제품을 절단할 수

주저자, 조선대학교 기계공학과 (smart@mail.chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

+ 조선대 기계공학과

++ 조선대 기전공학과

+++ 조선대 산업공학과

있는 장점을 가지고 있다.⁽²⁾ 현재, 산업적으로 폭 넓게 사용되고 레이저 절단공정에 사용되는 레이저는 10.6 μm 의 파장을 가지는 CO₂ 레이저이다.

Nd:YAG 레이저는 레이저의 안정성이 높고 고출력을 얻을 수 있으며, 1.06 μm 의 파장을 가지고 있어 CO₂ 레이저 보다 가공물의 빔 반사율이 매우 낮고 작은 영역에서 에너지가 집중되므로써 영향부가 작아서 제품의 열변형이 작게 일어난다. 그러므로, 최근 고출력 Nd:YAG 레이저 절단기의 산업적 적용이 활발히 진행되고 있다.⁽³⁾

고정밀 레이저 절단 제품을 가공하기 위하여서는 레이저 절단시 공정변수와 절단면 특성의 관계에 대한 연구가 필요하다.

King 등은 CO₂ 레이저를 이용한 연강판 절단시 펄스(Pulse)에 따른 절단면 특성 변화에 대해서 연구를 하였다.⁽⁴⁾ Olsen 등은 CO₂ 레이저를 이용한 연강판 절단시 공정변수인 레이저 출력, 레이저 절단속력 및 가스압력이 절단면 물결무늬(Striation) 형성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.⁽⁵⁾ Yilbas 는 CO₂ 레이저를 이용한 연강판재 절단시 가스압력과 레이저 절단속력이 절단면 품질에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.⁽⁶⁾ Dorn 등은 펄스 Nd:YAG 레이저의 비정질 합금 절단시 절단속도, 펄스간격, 입력량의 절단부 조직변화에 대한 영향성에 대하여 연구하였다.⁽⁷⁾

한편, 1.0 kW 이상의 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 압연강판절단시 레이저 절단속력, 레이저출력 및 재료두께가 절단면의 품질에 미치는 영향에 대한 선행 연구는 문헌상으로 거의 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP 1N 냉연강판 절단시 레이저 절단속력, 레이저출력 및 재료두께가 절단면 표면조도 및 물결무늬 형성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 이 결과로부터 최적 절단면 품질을 가지는 최적 절단 속력을 도출하였다.

2. 실험 및 분석 방법

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저의 CSP 1N 박판재 절단시 공정변수의 절단폭 영향성에 대한 연구를 수행하기 위하여 우선적으로 각 조건별 절단가능영역을 선정하였다. 그후, 선정된 절단 가능영역내에서 공정변수의 절단면 표면 조도와 물결무늬 형성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 최대 출력 2.8kW의 연속파형 Nd:YAG 레이저와 절단가스분사 장치가 부착된 6자유도 운동이 가능한 로봇 레이저 절단 시스템을 이용하였다. 시편으로 사용된 판재는 포항제철에서 개발되어 자동차용 및 구조물 판재로 많이 사용되고 있는 CSP 1N 압연강판을 사용하였다. 본 실험에 사용된 연속파형 Nd:YAG 레이저는 독일 Trumpf사에서 제작된 아크 플래시 램프 펌핑 장치가 부가된 레이저 발전기에서 생성된다. 레이저의 파장은 1.06 μm 이며, 초점크기는 0.6 mm 이다. CSP 1N 압연강판 박판재의 재료성분비는 Table 1과 같다.

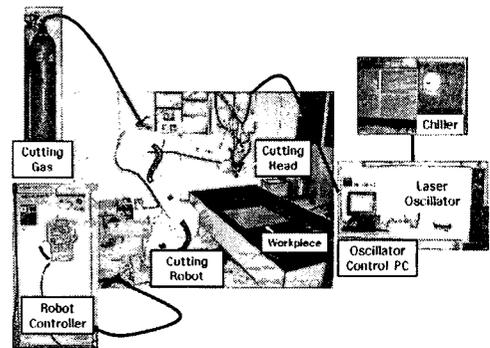


Fig. 1 Experimental set-up

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_w)이며, 재료변수는 재료두께(T)를 선정하였다. 실험에 사용된 공정변수와 재료두께는 Table 2와 같으며, 절단가스 압력은 0.1 MPa로 고정하였다. 특히, 판재 두께는 0.5 mm에서 2 mm 사이로 산소절단과 플라즈마

절단시 절단후 후변형에 의하여 절단이 양호하지 못한 영역을 선정하였다. 레이저 절단 길이는 실험분석시 초기 레이저 안정화 길이 및 절단 종료부의 영향이 절단 품질 평가에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 100 mm 로 선정하여 50 mm 이상의 절단 품질 평가 길이가 확보되도록 하였다.

Table 2 Experimental conditions

Process parameter	Condition
Power of laser (Watt)	1,200 - 1,800
Travel speed of laser (mm/min)	2,000 - 10,000
Thickness of CSP 1N (mm)	0.5 - 2.0

3. 실험 결과 분석 및 고찰

3.1 공정변수의 절단가능영역 영향성

절단가능영역 도출 및 공정변수의 절단가능영역 영향성 분석은 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판재 절단 실험 결과 얻어진 절단면의 평균 드로스 면적(η) 과 절단면의 직진도(κ)를 척도로하여 결정하였다. 평균드로스 면적은 식(1)과 같이 계산된다.

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

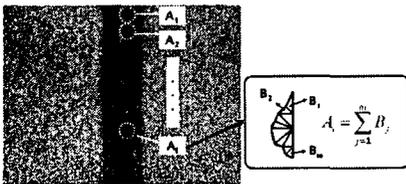


Fig. 2 Measuring methodology of the average dross area

본 연구에서는 평균 드로스 면적 0.5 mm^2 이하, 직진도 0.1 mm 이하인 경우에 대하여 절단가능영역으로 선정하였다. Table 3는 실험결과 도출된 각 실험조건별 레이저 절단가능영역이다. Fig. 3은 재료 두께 0.5 mm 일때의 레이저 절단속도와 평균 드로스 면적과의 관계이다.

Fig. 4와 5는 레이저 출력 $1,600 \text{ Watt}$ 에서의 각 두께별 최소 절단가능속력($V_{tr,min}$)과 최대 절단가능속력($V_{tr,max}$) 영역 전후의 절단부 조직 사진을

보여준다. Fig. 4와 5의 비교 분석결과 각 두께별 최소 절단가능속도 이전에는 레이저 출력이 매우 높아 모재로 많은 양의 열전달이 일어나 모재의 과용융이 발생하고, 발생된 용융물을 산소 가스가 효율적으로 제거하지 못해 과용융에 의한 절단부위 재충진 현상이 두드러진다. 두께별 최대 절단가능속력 이후에는 레이저의 이송속력이 매우 빨라 레이저로부터 모재로 절단이 가능한 모재 용융물이 생길 수 있는 충분한 에너지가 부가되지 못하여 절단이 이루어지지 않는 특징을 나타내었다.

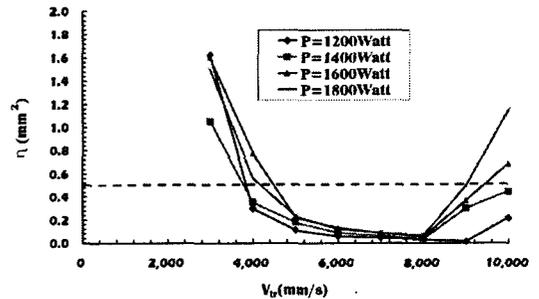
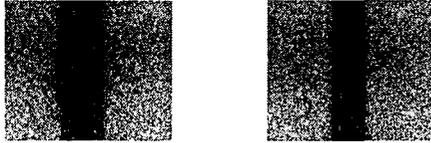


Fig. 3 Influence of cutting speed on the average dross area according to power of laser

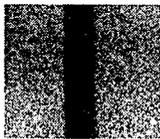
Table 3 Practical cutting region of each cutting condition

Thickness (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

Table 3 으로부터 재료 두께가 증가할수록 최소절단가능속력과 최대절단가능속력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 재료두께가 증가할수록 절단을 위한 재료 용융량이 증가함으로, 이를 위하여 추가적 유효입열량이 증가하기 때문으로 사료된다. 동일 재료 두께에서 레이저 출력이 증가할수록 최소절단가능속력이 증가하였다.



(a) $V_{tr}=3,000$ mm/min (b) $V_{tr}=4,000$ mm/min

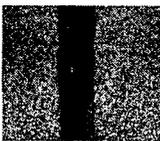


(c) $V_{tr}=5,000$ mm/min

Fig. 4 Cutting characteristics in back and forth of minimum cutting speed ($P=1,600$ Watt, $T=1.0$ mm, Lower surface)



(a) $V_{tr}=6,000$ mm/min (b) $V_{tr}=7,000$ mm/min



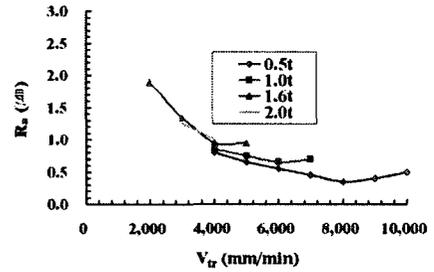
(c) $V_{tr}=8,000$ mm/min

Fig. 5 Cutting characteristics in back and forth of maximum cutting speed ($P=1,600$ Watt, $T=1.0$ mm, Lower surface)

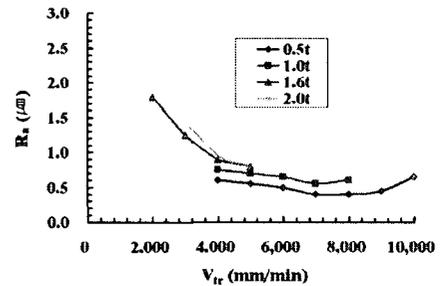
3.2 공정변수의 표면조도에 미치는 영향

공정변수의 절단면 표면조도에 미치는 영향성 분석 및 고찰은 3.1절에서 취득된 절단가능영역에서 수행하였다. Fig. 6 은 레이저출력에 대한 가공재료의 두께별 절단 속력과 평균표면조도(R_a)의 상관관계를 나타낸다. Fig. 6 에서와 같이 절단 시편의 두께가 두꺼워 질수록 표면 거칠기는

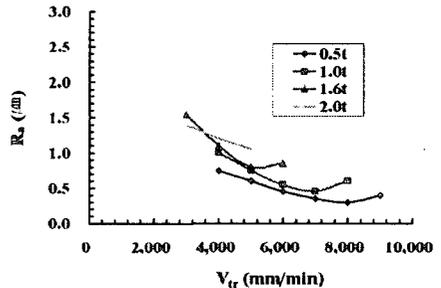
증가함을 알 수 있다.



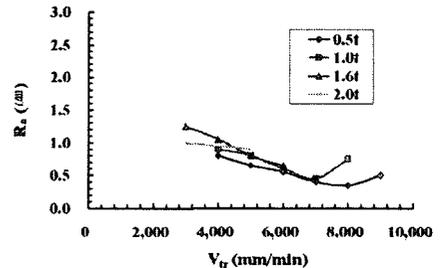
(a) Power = 1,200 Watt



(b) Power = 1,400 Watt



(c) Power = 1,600 Watt



(d) Power = 1,800 Watt

Fig. 6 Influence of travel speed of laser and thickness of material on roughness for each power of laser

또한, 절단가능영역 내에서 절단속력이 증가할수록 절단면의 표면조도는 감소하다가 특정속력 이후 급격히 표면조도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이결과로부터 레이저 출력별 재료두께에 대한 표면조도가 최소화되는 최적절단속력이 존재함을 알 수 있었다.

3.3 공정변수의 절단면 물결무늬 형성에 미치는 영향

공정변수의 절단면 특성에 미치는 영향성 분석을 위하여 절단면 표면 조도 뿐만 아니라, 절단면 물결무늬 형성 특성에 대해서도 분석/고찰을 수행하였다. 공정변수의 절단면 물결무늬 형성 특성에 미치는 영향성에 대한 분석은 절단면의 확대 사진을 촬영하여 절단면에 관측된 물결무늬의 경사각 및 발생개수 변화의 고찰 통하여 수행하였다. Fig. 7은 물결무늬 경사각 (Striation angle)의 정의이다.

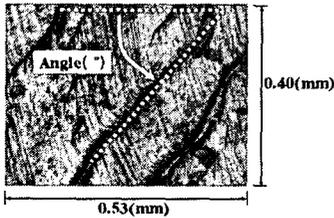


Fig. 7 Definition of striation angle for the cut surface (X 600)

Fig. 8 은 두께 1.0mm에서 레이저출력별 물결무늬의 개수와 절단속력의 관계이다. Fig. 8과 9와 같이 레이저 출력이 증가할수록 물결무늬의 개수도 증가함을 알 수 있었다.

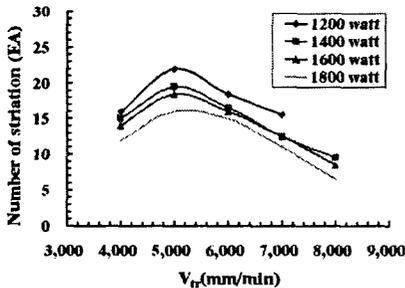


Fig. 8 Influence of travel speed and power of laser on number of striation (T=1.0 mm)

Fig. 10과 같이 최적절단속력인 5000 mm/min을 최대값으로 물결무늬의 개수가 감소하기 시작함을 알 수 있었다. 이 현상은 모든 두께에서 나타났다. 이것은 최적의 가공속력에서부터 속력이 증가할수록 판재의 상부와 하부사이의 온도구배가 증가하고 이로 인하여 레이저 절단방향으로 상부의 절단선단부 위치와 하부의 절단선단부 위치의 차이가 증가하기 시작함으로써 스파크 샤워 (Spark shower)의 유동각이 커지기 때문으로 사료된다. Fig. 11와 12는 각 최적절단속력에서 재료두께와 물결무늬의 발생개수 및 레이저 출력과 물결무늬의 발생개수 관계를 나타낸다. 각 조건별 최적절단속력에서는 재료의 두께와 레이저 출력이 증가할수록 물결무늬의 발생개수가 감소하지만 절단면의 표면조도는 증가함을 알 수 있었다.

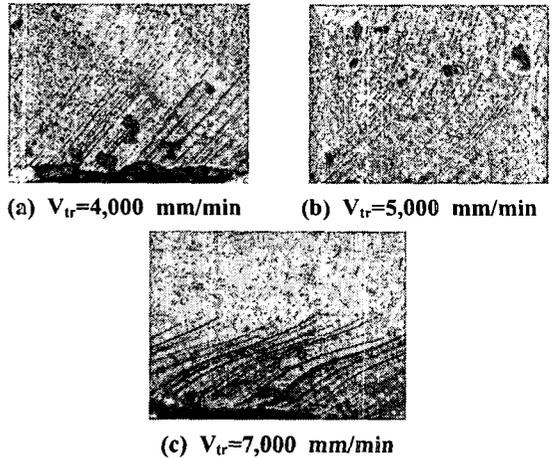


Fig. 9 Influence of travel speed on the striation formation of the cut surface (T=1.0mm)

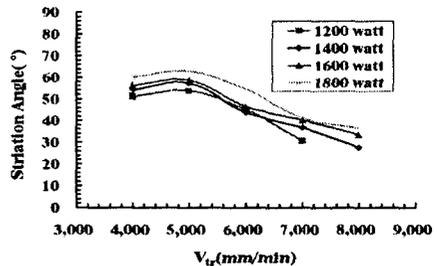


Fig. 10 Influence of travel speed and power of laser on striation angle (T=1.0 mm)

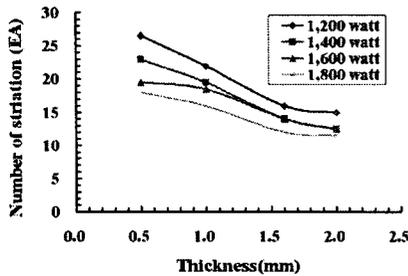


Fig. 11 Influence of thickness of material and power of laser on number of striation

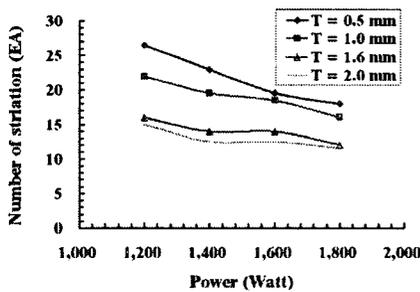


Fig. 12 Influence of thickness of material and power of laser on striation angle

4. 결론

본 연구에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP IN 박판재 절단시 공정변수가 절단면의 표면조도 및 물결무늬 형성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, CSP IN 재료두께에 따른 레이저 출력별 절단가능속력범위를 취득할 수 있었다. 레이저 출력, 레이저 절단속력 및 재료두께가 절단면 표면조도와 절단면 물결무늬 형성에 미치는 영향성을 정량적으로 유도할 수 있었다. 각 공정조건별 절단면의 표면조도가 최소화되는 최적절단속력을 도출할 수 있었다. 최대절단가능속력으로 갈수록 물결무늬 경사각이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다.

둘째, 레이저 절단시 최적절단속력 전에는 절단속력이 증가할수록 표면조도가 감소하고 물결무늬 개수가 증가하나, 최적절단속력 후부터는

절단속력이 증가할수록 표면조도가 증가하고 물결무늬 개수가 감소하는 것을 알 수 있었다.

향후 절단가스 압력의 절단면 품질에 대한 영향성과 2.0 KW 이상의 고출력에서의 절단면 특성 변화에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 조선대학교의 “지역협력연구센터사업(RRC) : 레이저 응용 신기술 개발사업”에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Caristan, C. L., 2004., "Laser Cutting ; Guide for Manufacturing," *Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn Michigan U.S.A., pp.3~54.
- (2) Ready, J. F., 1997, "Industrial Applications of Lasers," *Academic Press*, San Diego CA U.S.A., pp.315~334.
- (3) <http://www.trumpf.com>
- (4) King, T. G., Powell, J., 1986, "Laser-Cut Mild Steel-Factors Affecting Edge Quality," *International Journal of Wear*, Vol.109, pp.135-144.
- (5) Olsen, F. O., 1989, "Cutting Front Formation in Laser Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol.38, No.1, pp.215~218.
- (6) Yilbas, B. S., 2004, "Laser Cutting Quality Assessment and Thermal Efficiency Analysis," *Journal of Material Processing Technology*, Article In Press.
- (7) Dorn, L., Lee, K. -L., Munasinghe, N., 1994, "Nd:YAG Laser Cutting of Amorphous Alloys," *DVS-Berichte*, Vol.163, pp.447~455.