

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 저탄소 냉연강판 절단시 모서리부 절단 특성 분석

안 동 규* · 유 영 태**

*조선대학교 공과대학 기계공학과

**조선대학교 공과대학 메카트로닉스공학과

Investigation of Cutting Characteristics in the Sharp Edge for the Case of Cutting of a Low Carbon Steel Sheet using High-power CW Nd:YAG Laser

Dong-Gyu Ahn* and Young-Tae Yoo**

*Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwang-Ju 501-759, Korea

**Dept. of Mechatronics Engineering, Chosun University, Gwang-Ju 501-759, Korea

Abstract

The objective of present research works is to investigate the effects of process parameters, including the power of laser, cutting speed, material thickness, and the edge angle, on the melted area in the sharp edge of the cut material for the case of cutting of a low carbon steel sheet using high-power CW Nd:YAG laser. In order to investigate the influence of edge angle and size of loop on the melted area in the sharp edge, angular cutting tests and loop cutting tests have been carried out. From the results of angular cutting tests, the relationship between the edge angle and the melted area has been obtained. The results of the experiments have been shown that the melted area is rapidly reduced from 120° of the edge angle and the melted area is nearly zero at 150° of the edge angle. Through the results of loop cutting experiments, the relationship between the cutting angle on the melted area in the edge according to the size of loop have been obtained. In addition, it has been shown that a proper size of loop is nearly 3 mm as the corner angle is greater than 90° and 5 mm as the corner angle is less than 90°. The results of above experiments will be reflected on the knowledge base to generate optimal cutting path of the laser.

*Corresponding author : smart@mail.chosun.ac.kr

(Received June 7, 2006)

Key Words : CW Nd:YAG laser, low carbon sheet, Cutting characteristics, Sharp edge, Edge angle, Size of loop

1. 서 론

레이저 절단공정은 다양한 형상의 제품을 정밀쾌속제작 할 수 있는 유연 가공 공정으로써 자동차, 조선, 전자산업등 산업계 전반에 걸쳐 폭넓게 적용되고 있다¹⁻³⁾. 레이저 절단 공정은 비접촉 가공으로 절단 저항이 없고, NC 제어 장치와 결합하여 일반 절삭가공으로 가공할 수 없는 복잡한 형상, 미세 형상 및 극 취성 재료

의 가공도 가능하다^{4,5)}.

현재 산업 현장에서는 10.6 μm 의 파장대를 가지면서 연속파형 특징을 가진 CO₂ 레이저를 이용한 절단공정이 많이 보급되어 있다. 최근 레이저의 가격이 감소하고, 정밀부품과 국소영역에 대한 가공이 요구되는 산업적 경향에 의하여 고체 레이저로써 안정된 고출력을 나타내며, 이론적으로는 1.06 μm 의 파장대로써 CO₂ 레이저보다 초점크기가 작아 고 집적화된 고밀도의 에너지를 얻을 수 있는 연속파형 Nd:YAG 레이저의 산

업적 활용이 시도되기 시작하고 있다⁴⁾. 탄소강에 Nd:YAG 레이저를 적용할 경우 CO₂ 레이저보다 7배 이상의 빔 흡수율을 높일 수 있으며, 고 집적된 에너지로 고속 절단함으로써 절단 후 제품열변형을 최소화 할 수 있다. 이와 같은 이유로 최근 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 박판재 절단에 대한 학문적 연구 및 산업적 적용이 활발히 진행되고 있다⁶⁻⁸⁾.

레이저를 이용한 금속 박판 절단시 레이저 절단경로가 평면상에 일정각을 가지고 평면내 경사절단을 수행할 경우 급격한 곡률 변화가 발생하는 모서리 부분에서 과도한 열집적에 의하여 과용융이 발생한다. 급격한 곡률변화 부위에 대한 과용융 해결 방안으로 레이저 절단 경로 변경과 모서리부 곡률 처리 및 레이저 절단속도 제어 등의 방법들이 많이 사용되고 있다. 특히, 광용융 박판재 절단 전용 프로그램 개발에서는 균일 절단속도로 판재를 절단하기 위하여 레이저 절단 경로 변경 방법에 대한 연구를 많이 수행하고 있다^{9,10)}. 레이저 절단 조건에 따른 최적의 레이저 절단 경로 변경을 위하여서는 레이저 절단 경로 변경 특성치인 경로 변경량의 정량적 도출이 필수적이다.

기존 연구들에서는 CO₂ 레이저를 이용한 일반 강판 절단시 모서리 용융 특성 분석에 관한 연구가 대부분이며, 1.0 kW 이상의 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 저탄소 냉연강판의 절단시 절단공정변수와 모서리 용융량 상관관계 도출에 대한 연구는 문헌상으로 거의 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 1.0 kW 이상의 레이저 출력을 가진 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 저탄소 냉연강판 절단시 절단속도, 레이저 출력, 재료 두께 및 평면내 재료 절단각이 모서리 용융량 및 열영향부 형성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 이 연구결과를 이용하여 공정변수와 모서리 경사각에 대한 모서리 용융량 상관관계 모델을 도출하며, 평면내 각도 절단시 경로 수정이 필요 없는 임계 모서리각을 도출하고자 한다. 또한, 평면내 경사절단시 용융면적을 최소화하기 위하여 절단 루프 크기와 모서리 용융량 관계를 분석/고찰 하였다. 이 결과를 이용하여 루프크기에 따른 모서리각, 유효입열량 및 재료두께와 모서리 용융량 상관관계 모델을 도출하고자 한다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 최대 출력 2.8 kW의 연속파형 Nd:YAG 레이저와 절단가스 분사장치가 부

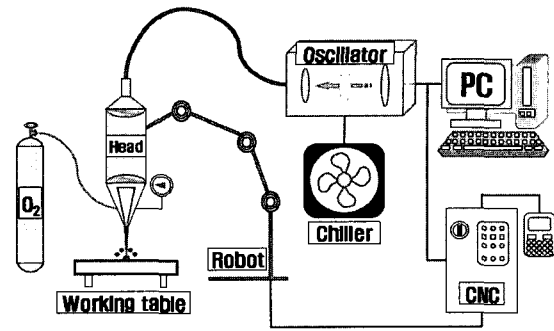


Fig. 1 Experimental set-up

착된 6자유도 로봇 레이저 절단시스템을 이용하였다.

본 실험에 사용된 연속파형 Nd:YAG 레이저는 아크 플래시 램프 펌핑 장치가 부가된 레이저 발전기에서 생성된다. 레이저의 파장은 1.06 μm 이며, 초점크기는 0.6 mm 이다. 레이저 빔의 공간모드는 TEM₀₀ 모드를 사용하였다. 레이저 초점 위치는 Karatas 등¹⁰⁾의 연구결과를 근거로 하여 예비 실험으로 결정된 시편 위 레이저빔 직경이 최소화되는 절단노즐과 시편사이 거리로 선정하였다. 본 연구에 적용한 레이저 초점거리는 사전 실험 결과 취득된 절단 노즐 끝단과 시편사이 거리 1.0 mm 로 선정하였다.

본 연구에 사용된 저탄소 냉연강판의 재료성분비와 기계적 물성은 각각 Table 1 및 2와 같다.

본 연구에 사용된 공정변수는 레이저 출력 (P), 레이저 절단속도 (V_{tr}), 재료두께 (T) 및 평면내 모서리각 (Edge angle : θ) 이다.

절단실험은 평면 각도절단 실험과 루프절단 실험을 수행하였다. 평면 각도절단 실험에서는 Fig. 2(a)와 같이 레이저와 박판재를 수직하게 설정한 후, 재료내 레이저 이동경로에 평면내 재료 절단각을 부여하였다. 이 평면내 재료 절단각은 절단시 구현하고자 하는 평면내 모서리각과 동일하다.

Table 1 Chemical compositions of low carbon steel sheets (wt %)

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

Table 2 Mechanical properties of low carbon steel sheets

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Max. Strain	Young's Modulus (GPa)
144	302	0.4	176

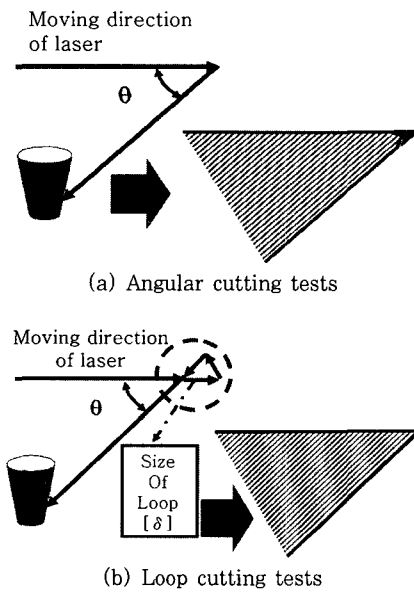


Fig. 2 Concept of angular cutting and loop cutting tests

평면 각도절단 실험에 사용된 실험 범위는 Table 3 과 같이 Ahn 등¹²⁾ 의 연구에 의하여 제시된 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 시험소재 절단 시 각 출력별 표면조도가 최소화되는 절단 속도 전후 영역을 선정하였다. 절단 가스는 산소가스로 선정하였으며, 절단가스의 순도는 99.99 % 이고 절단가스압력 (P_g) 은 0.1 MPa 로 하였다. 평면내 모서리각은 30° 에서 150° 까지 30° 간격으로 선정하였다.

루프절단 실험에서는 Fig. 2(b) 와 같이 이동경로의 평면 재료 절단각 발생부위에 루프 크기 (Size of loop : δ) 만큼 추가적인 경로를 부여 하였다. 실험에 사용된 루프크기는 0 mm, 3 mm 및 5 mm로 선정하였다. 루프 절단 실험은 Table 3 의 절단 속도 중 Table 4 와

Table 3 Experimental conditions of angular cutting tests

T (mm)	P (KW)	V_{tr} (m/min)	P_g (MPa)	θ ($^\circ$)
0.5	1.2-1.8	6.0-8.0	0.1	30, 60, 90, 120, 150
1.0	1.2-1.8	5.0-7.0		
1.6	1.2-1.8	3.0-5.0		
2.0	1.2-1.8	3.0-5.0		

Table 4 Experimental conditions of loop cutting tests

T (mm)	P (kW)	V_{tr} (m/min)	P_g (MPa)	δ (mm)	θ ($^\circ$)
0.5	1.2-1.8	8.0	0.1	0, 3, 5	30, 60, 90, 120
1.0	1.2	6.0			
	1.4-1.8	7.0			
1.6	1.2-1.8	5.0			
2.0	1.2-1.4	4.0			
	1.6-1.8	5.0			

같이 표면 조도가 최소화되는 최적 절단 속도에서 실험을 수행하였다.

2.2 실험 결과 분석 방법

평면각도 절단실험과 루프 절단실험시 모서리부의 용융면적 (A_T) 은 식 (1) 및 Fig. 3 의 방법을 이용하여 광학 현미경으로 모서리부를 측정 한 후, 전체 용융 면적을 여러개의 단위 삼각형으로 나누어 각각의 면적을 계산하고 이 국소 면적들을 합하여 산출하였다.

$$A_T = \sum_{j=1}^m A_j \tag{1}$$

여기서 A_T , A_j 및 m 은 각각 모서리부 총 용융 면적, 총 용융 면적을 구성하는 단위 삼각형의 면적 및 단위 삼각형의 개수이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평면 각도 절단 실험 결과 및 고찰

Fig. 4, 5 및 6 은 평면 각도 절단 실험 결과이다. Fig. 4 는 시편두께 1.0 mm, 레이저출력 1.6 kW, 및 레이저 절단속도 6.0 m/min 에서의 각도별 절단면 상태를 나타내었다. Fig. 5 는 각 레이저 출력별 표면 조도가 최소화되는 절단속도에서의 재료두께에 대한 레이저 출력별 평면 재료 절단각과 모서리 용융면적의 상관관계이다.

Fig. 4 및 5 에서와 같이 평면내 재료 절단각이 150° 이상일 때에는 모서리부에 용융면적이 거의 발생하지 않았다. 평면 재료 절단각이 90° 이상일 경우에는 평면 재료 절단각 증가에 따라 모서리 용융면적이 완만한 증가를 나타내었다. 그러나 평면 재료 절단각 90° 와 150° 사이에서는 급격한 용융면적의 변화가 일어났

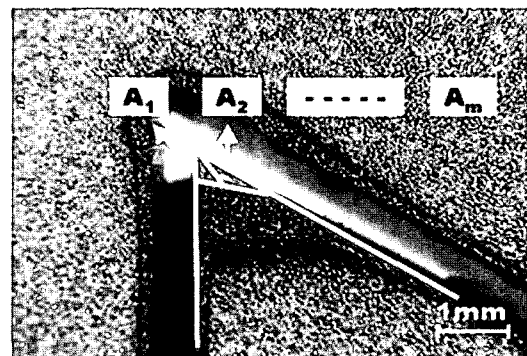


Fig. 3 Measuring methodology of the melted area in the edge

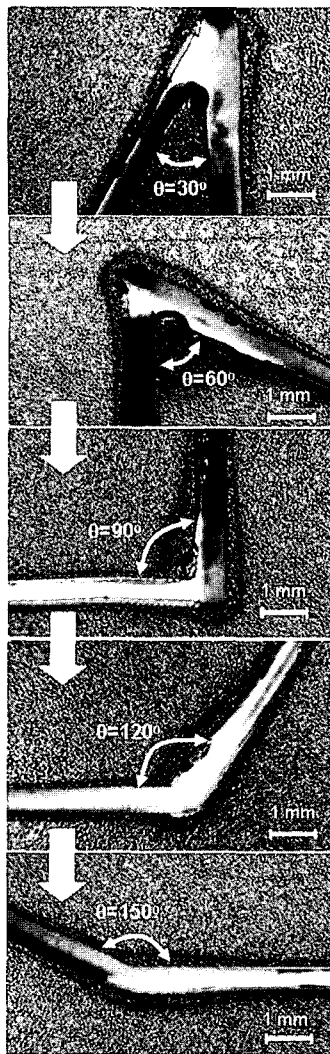
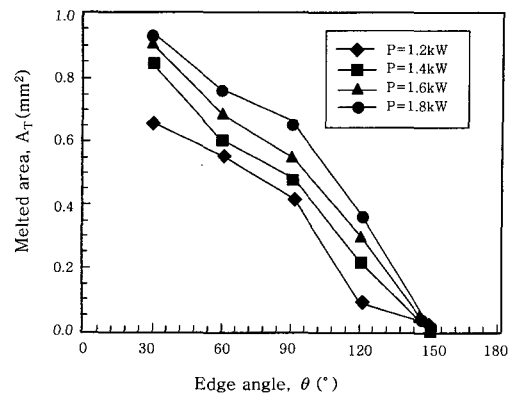


Fig. 4 Formation of the melted area in the edge according to the cutting angle ($T = 1.0\text{mm}$, $P = 1.6\text{ kW}$, $V_{tr} = 6.0\text{ m/min}$)

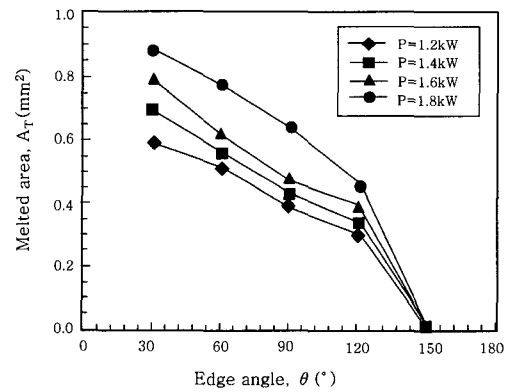
다. 특히, 평면내 재료 절단각이 120° 에서 90°로 감소할 경우 거의 1.5배 에서 2배 이상의 용융 면적이 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 4 에서 평면내 재료 절단각이 작은 경우에는 모서리부에서만 집중적으로 용융영역이 형성되어 과용융이 발생하고, 평면내 재료 절단각이 증가할수록 용융영역이 모서리부에서 주위 영역으로 퍼져나감으로써 국부적인 열 집중이 둔화되어 용융 면적이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5 에서와 같이 레이저 출력의 증가시 모서리부 용융면적은 선형적으로 증가하였다. 또한, 각 두께별 레이저 출력 증가에 따라 모서리 용융면적은 거의 일정한 증분량을 나타내었다. 본 실험 조건에서 최대 모서리 용융면적은 0.96 mm^2 이었다.

일반적으로 레이저 절단과 용접공정에서 레이저 출력과 레이저 절단속도와 제품 품질의 상관관계를 통계적



(a) $T = 1.0\text{ mm}$, $V_{tr} = 6.0\text{ m/min}$



(b) $T = 1.6\text{ mm}$, $V_{tr} = 4.0\text{ m/min}$

Fig. 5 Influence of cutting angle and the power of laser on the melted area in the sharp edge at the optimum cutting speed

으로 유도할 때, 유효 입열량을 많이 도입하고 있다^{7,13,14}. 레이저 절단공정에서 레이저 출력이 증가할수록 재료에 유입되는 에너지는 선형적으로 증가하고, 레이저 절단속도가 증가할수록 재료에 유입되는 에너지는 반비례하게 감소한다^{7,13,14}. 유효 입열량 모델은 레이저 가공조건, 레이저 종류 및 재료에 따라 수학적 모델이 조금씩 다르게 표현된다. 본 연구에서는 Ahn 등의 연구결과에서 제시된 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 시험소재 절단 시 유효 입열량과 절단폭 상관관계 유도시 도입된 식 (2) 와 같은 유효 입열량식을 사용하였다.

$$Q = \frac{P}{V_r} \tag{2}$$

여기서 Q는 유효 입열량이다.

Fig. 6 은 각 재료 두께별 유효 입열량에 따른 평면내 재료 절단각과 용융 면적의 상관관계이다.

Fig. 6 의 유효 입열량이 증가할 경우 모서리 용융면적이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 동일 유효

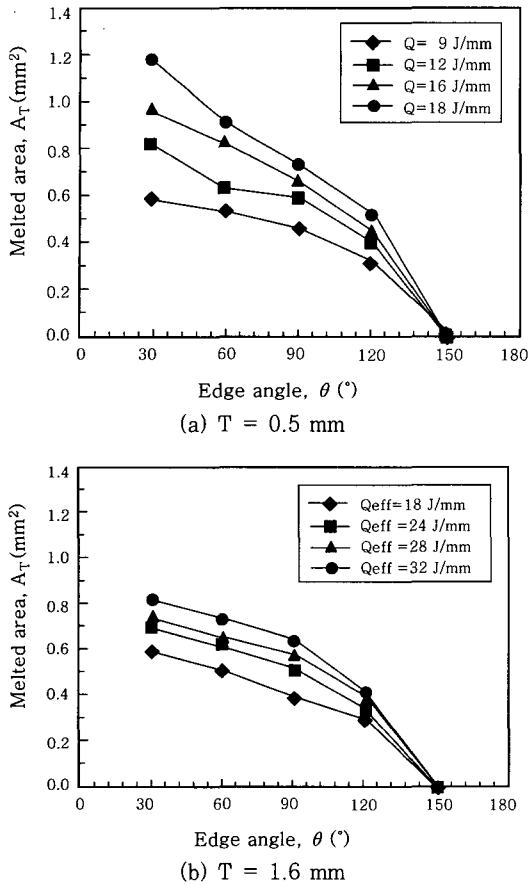


Fig. 6 Influence of cutting angle and the effective heat input on the melted area in the edge

입열량 조건에서 절단 시편의 두께가 증가할수록 모서리 용융면적이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 재료 두께가 증가할수록 재료 내부로 전도 열손실 되는 양이 증가하기 때문으로 사료된다. 재료두께가 얇아질수록 유효 입열량 변화에 대한 모서리 용융면적 변화폭이 커지는 것을 알 수 있었다. 특히, 두께가 두꺼워지고 평면내 재료 절단각이 120° 이상인 경우에는 고 유효입열량 조건에서 용융면적의 변화가 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다.

본 실험 결과를 이용하여 CW Nd:YAG 레이저로 저탄소 냉연강판을 평면내 각도 절단 수행시 평면내 재료 절단각이 150° 이상일 경우에는 루프처리나 모서리 곡률부여와 같은 방법을 수행하고 않고 절단을 수행하여도 모서리부 용융이 거의 없이 정형가공이 가능함을 알 수 있었다.

3.2 루프 절단 실험 결과 및 고찰

각 평면 경사 절단 조건에서 모서리 용융면적이 최소화 되도록 하는 루프 크기를 도출하기 위하여 루프 절

단 실험을 수행하였다. 본 실험 결과 Fig. 8 및 9 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 7 에서 루프 크기가 증가 할수록 모서리부의 용융 면적과 열영향부의 면적이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히, 평면내 재료 절단각이 30°, 60° 및 90° 일 경우 루프 크기가 0 mm 일 때와 비교하여 루프 크기가 3 mm 와 5 mm 일 때 모서리부에서 용융영역이 거의 발생하지 않고 원하는 가공형상이 구현됨을 알 수 있었다. 그러나 평면내 재료 절단각이 30° 일 경우모서리부에 드로스 (Dross) 가 많이 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러므로, 평면내 재료 절단각이 30° 이하의 예각을 형성할 경우 루프절단을 수행하여도 모서리부 용융이 발생하기 시작할 것으로 사료된다.

Fig. 8 의 결과에서 루프 크기가 3 mm 와 5 mm 로 증가할 때 모서리 용융면적의 크기가 각각 루프크기 3 mm 일 때의 30 ~ 60 % 및 20 ~ 30 %정도로 현저히 감소함을 알 수 있었다. 특히, 루프 크기가 3 mm 이상인 경우는 평면내 재료 경사각이 90° 이상인 영역에서는 모서리 용융면적이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 두께가 얇아질수록 루프크기의 모서리 용융부 최소화에 미치는 영향이 현저히 증가함

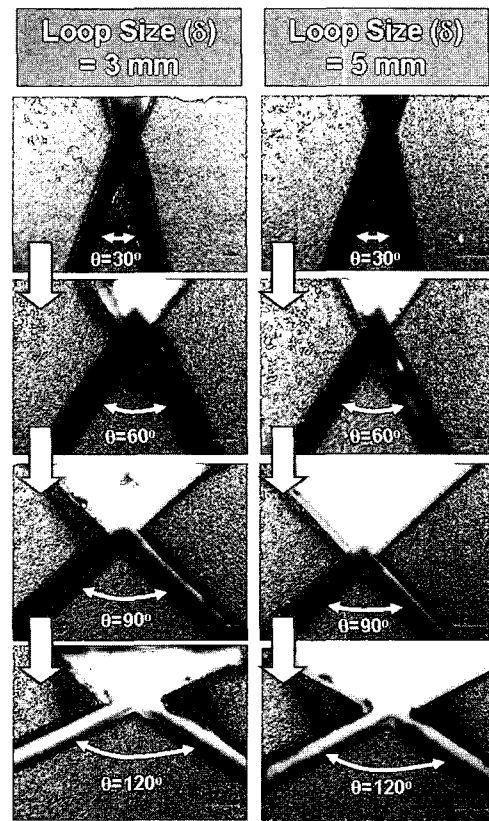


Fig. 7 Formation of the melted area in the edge according to the cutting angle ($T = 1.6$ mm, $P = 1.4$ kW, $V_{tr} = 4.0$ m/min)

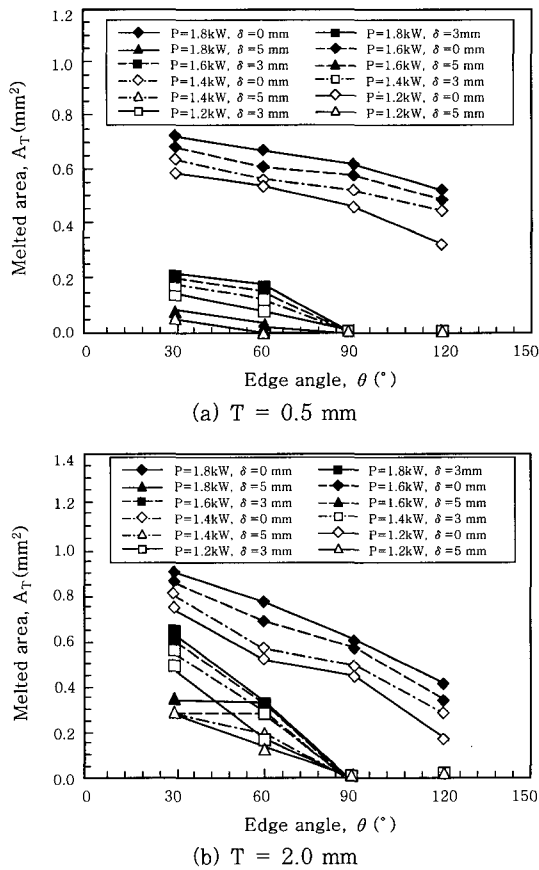


Fig. 8 Influence of cutting angle and the size of loop on the melted area in the edge for each optimum cutting condition

을 알 수 있었다.

본 실험결과로부터 평면내 재료 절단각이 90° 이상인 경우에는 절단 루프크기를 3 mm 이상으로, 평면내 재료 절단각이 90° 이하인 경우에는 루프크기를 5 mm 내외로 설정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 또한, 평면내 재료 절단각이 30° 이하의 예각을 형성할 경우 루프절단보다 모서리에 곡률 크게 부여하는 절단방식을 채택하는 것이 모서리 용융 면적을 최소화하는 절단 방식으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1.0 kW 이상의 레이저 출력을 가진 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 저탄소 냉연강판 절단시 절단속도, 레이저 출력, 재료 두께, 평면내 재료 절단각 및 루프크기가 모서리 용융면적에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 평면 각도 절단 실험을 통하여 절단속도, 레이저 출력, 재료 두께 및 평면내 재료 절단각과 모서리 용융

면적의 상관관계를 도출할 수 있었다. 또한, 평면내 재료 절단각이 150° 이상인 경우에는 모서리 용융면적이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

2) 동일 유효 입열량에서는 재료두께가 증가 할수록 모서리 용융면적이 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히, 재료가 얇아질수록 유효 입열량이 모서리 용융면적 생성에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있었다.

3) 루프 절단 실험을 통하여 루프크기와 모서리 용융 면적의 상관관계를 도출할 수 있었다. 평면내 재료 절단각이 90° 이상인 경우에는 루프크기 3 mm 이상에서는 모서리 용융 면적이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한, 루프크기가 3 mm 와 5 mm 로 증가할 때 모서리에서의 용융 면적의 크기가 각각 루프크기 0 mm 일 때의 30 ~ 60 % 및 20 ~ 30 % 정도로 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 평면내 재료 절단각이 30° 이하의 예각을 형성할 경우 루프절단보다 모서리에 곡률 크게 부여하는 절단방식이 모서리 용융면적을 최소화하는 절단방식일 것으로 사료된다.

본 연구에서 취득된 결과는 추후 최적 레이저 절단 경로 생성 프로그램에서 형상에 따른 최적 경로 보정량 계산 알고리즘 개발을 위한 지식 데이터베이스로 활용될 예정이다. 또한, 루프를 도입할 수 없는 형상이나 평면내 모서리각이 작은 경우에 필요한 모서리부 가공 곡률과 용융면적의 상관관계에 대하여 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 산업자원부 지정 조선대학교 치과용 정밀 장비 및 부품 지역혁신센터의 연구비 지원에 의해 연구 되었음.

참 고 문 헌

1. J.K. Larsson : The Mature Technique of Laser Processing in Body Manufacture - Long Term Production Experience and Recent Development, Proceedings of the LANE 2001, (2001), 55-74
2. M. Geiger : Manufacturing Science-Driving Force for Innovation, Advanced Technology of Plasticity, 1 (2002), 17-30
3. R. Wollermann-Windgasse and C. Schinzel : Laser Technology in Manufacturing-State of the Art at the Beginning of the 21st Century, Proceedings of the LANE 2001, (2001), 87-102
4. J.F. Ready : Industrial Applications of Laser, Academic Press, 1997, 315-417
5. J. H. Lee, J. Suh, H. K. Sohn and D. S Shin : Trends in Micromachining Technology Using

- Ultrashort Pulse Lasers, Journal of KWS, 24-1 (2006), 26-32 (in Korean)
6. K. Abdel Ghany and M. Newishy : Cutting of 1.2 mm Thick Austenitic Stainless Steel Sheet Using Pulsed and CW Nd:YAG Laser, Journal of Materials Processing Technology, 168 (2005), 438-447
 7. D. G. Ahn, M. S. Kim, S. H. Lee, H. J. Park and Y. T. Yoo : Influence of Process Parameters on the Kerfwidth for the case of Laser Cutting of CSP 1N Sheet Using High Power CW Nd:YAG Laser, Journal of Korean Society of Precision Engineering, 22-7 (2005), 19-26 (in Korean)
 8. D. G. Ahn and M. S. Kim : A Study on Heat Transfer Characteristics of Laser Cutting for the CSP 1N Sheet Using High-power CW Nd:YAG Laser, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 5-1 (2006), 51-58 (in Korean)
 9. G. C. Han and S. J. Na : A Study on Torch Path Planning in Laser Cutting Processes Part 1 : Calculation of Heat Flow in Contour Laser Beam Cutting, Journal of Manufacturing Processes, 1-1 (1999), 54-61
 10. H. S. Choi, S. H. Lee, D. G. Ahn, D. Y. Yang, D. S. Park and H. C. Chae : Development of Algorithms for Accuracy Improvement in Transfer-Type Variable Lamination Manufacturing Process Using Expandable Polystyrene Foam, Transaction of the Society of CAD/CAM Engineers, 8-4 (2003), 212-221 (in Korean)
 11. C. Karatas, O. Keles, I. Uslan and Y. Usta : Laser Cutting of Steel Sheets : Influence of Workpiece Thickness and Beam Waist Position on Kerf Size and Stria Formation, Journal of Materials Processing Technology, 172 (2006), 22-29
 12. D. G. Ahn, M. S. Kim, H. J. Park and Y. T. Yoo : Influence of Process Parameters on Surface Roughness and the Striation Formation of the Cut Section for the Case of Cutting of CSP 1N Sheet Using High Power CW Nd:YAG Laser, Journal of Korean Society of Precision Engineering, 23-7 (2006), 30-38 (in Korean)
 13. B. H. Zhou and S. M. Mahdavian : Experimental and Theoretical Analyses of Cutting Nonmetallic Materials by Low Power CO₂-Laser, Journal of Materials Processing Technology
 14. 김도훈 : 레이저 가공학, 경문사, 2002, 279-294 (in Korean)