

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 인코넬 718 판재 절단시 모서리부 절단 특성 분석

안 동 규* · 변 경 원*

*조선대학교 공과대학 기계공학과

Investigation of Cutting Characteristics in the Sharp Corner for the Case of Cutting of Inconel 718 Super-alloy Sheet Using High-power CW Nd:YAG Laser

Dong-Gyu Ahn* and Kyung-Won Byun*

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

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

(Received August 18, 2008 ; Revised October 14, 2008 ; Accepted October 20, 2008)

Abstract

The objective of this paper is to investigate the effects of the laser power, the material thickness, corner angles, and the loop size on the formation of the corner in the cutting of Inconel 718 super-alloy sheet using high-power CW Nd:YAG laser. In order to investigate the influence of corner angles and loop sizes on the melted area and the formation of corner in the sharp corner, angular cutting tests and loop cutting tests were carried out. The results of the angular cutting tests were shown that the melted area is minimized and the melting mode is changed from nose melting in the thickness direction to the secondary melting induced by the attached dross when the corner angle is 90°. Through the results of loop cutting tests, the variation of the melted area and the corner shape in the sharp corner according to the loop size were examined. In addition, it was shown that a proper loop size is approximately 3 mm. The results of above experiments will be reflected on the knowledge base to generate optimal cutting path of the laser.

Key Words : CW Nd:YAG laser, Inconel 718 super-alloy, Cutting characteristics, Corner angle, Melted area, Loop size

1. 서 론

최근 다양한 형상의 금속 제품을 유연/쾌속 가공할 수 있는 특성 때문에 레이저 절단공정의 자동화, 조선 및 전자 산업 등 산업계 전반에 걸쳐 폭넓게 적용되고 있다^{1,2)}. 산업 현장에서 레이저 절단 공정을 이용한 제품 제작시 중요 관심사 중 하나가 금속 박판재의 고속/정형가공이다. 특히 레이저 절단 공정은 고에너지 밀도를 가진 비접촉식 가공으로 일반 절삭가공으로 가공할 수 없는 복잡한 형상, 미세 형상 및 극취성 재료의 고속 가공/유연 가공이 가능하다^{3,4)}.

1.06 μm 의 파장대를 가지는 Nd:YAG 레이저의 경우 산업적으로 많이 사용되고 있는 10.6 μm 파장대의 CO₂ 레이저보다 가공물의 레이저 흡수율이 매우 높고, 초점 크기가 작아 국소 영역에 고밀도 에너지를 집적하여 고속으로 금속 박판을 절단함으로써 절단 후 제품변형을 최소화 할 수 있어 산업적 활용 영역이 확장되고 있다. 또한 Nd:YAG 레이저는 고체 레이저로 안정적인 출력을 연속적으로 얻을 수 있는 장점이 있다⁵⁻⁷⁾.

니켈 기반 초합금인 인코넬(Inconel) 재료는 뛰어난 내부식성과 고온에서의 우수한 기계적 물성 때문에 항공기 부품, 가스 터빈 부품, 원자력 부품 및 조선 부품등에 많이 적용되고 있다. 그러나 인코넬 재료의 고

강도, 극취성 및 높은 절삭 저항 등의 난삭성 특성 때문에 일반적인 기계가공이 매우 어려워 레이저 천공, 레이저 절단 레이저 지원 기계가공 (Laser assisted machining) 공정 등 레이저 응용 가공 기술 개발에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다⁸⁻¹¹⁾.

레이저를 이용한 박판재 절단시 레이저 절단경로가 평면상에 일정각을 가지는 평면내 경사절단을 수행할 경우 모서리 부분의 과도 열집적에 의한 과용융이 발생한다. 이 과용융 현상은 일반적으로 모서리 곡률이 작아질수록 현저히 증가한다. 급격한 곡률변화 부위의 과용융 현상을 해결하기 위한 방안으로는 레이저 절단경로 변경과 모서리부 곡률 처리 및 레이저 절단속도 제어 등의 방법들이 많이 사용되고 있다. 특히, 광응용 박판재 절단 경로 생성 전용 프로그램 개발에서는 균일 절단속도로 판재를 절단하기 위하여 레이저 절단 경로 변경 방법에 대한 연구를 많이 수행하고 있다^{12,13)}. Han 등은 해석적 방법을 통하여 CO₂ 레이저를 이용한 탄소강판 절단시 모서리 절단각에 따른 모서리부 온도 분포에 대한 변화를 분석하였다¹⁴⁾. Ahn 등은 CSP 1N 냉연 강판의 연속파형 Nd:YAG 레이저 절단시 모서리 절단각과 루프크기가 용융면적에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다¹⁵⁾.

본 연구에서는 1.0 kW 이상의 레이저 출력을 가진 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 인코넬 718 판재에 대한 평면 경사 절단시 레이저 출력, 모서리 절단각 및 재료 두께가 모서리 용융량과 모서리부 절단 형상 생성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 이 연구결과를 이용하여 최소 용융 면적 발생 모서리 절단각을 도출하였으며, 모서리 절단각에 따른 모서리 용융 특성 변화에 대한 고찰을 수행하였다. 또한, 평면내 경사 절단시 용융면적을 최소화하기 위하여 절단 루프 크기와 모서리 용융량 상관관계를 분석/고찰 하였다. 이 결과로부터 각 레이저출력 및 재료 두께 조합에 대한 모서리 용융량이 최소화되는 루프크기를 도출하였다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 최대 출력 2.8 kW 의 연속파형 Nd:YAG 레이저와 절단가스 분사장치 및 자동 초점 거리 조절 장치가 부착된 6자유도 로봇 레이저 절단시스템을 이용하였다. 이 로봇 절단 시스템의 자동 초점 거리 조절 장치 (Auto-tracking system)

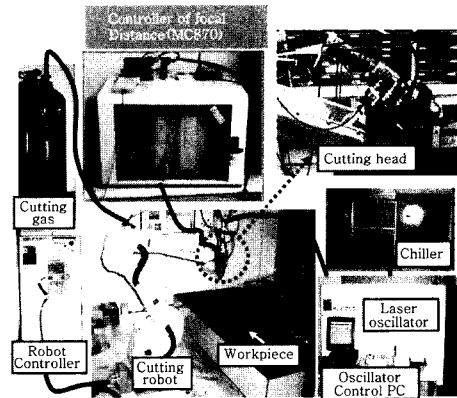


Fig. 1 Experimental set-up

는 판재 절단중 재료의 용융률 변화 및 미세 변형등에 의하여 발생하는 절단 노즐 끝단부와 시편 사이의 캐패시턴스 (Capacitance) 변화에 따른 전압차를 실시간으로 측정하여, 이 전압차 만큼 압전 센서가 부착된 급속 선형 이동 장치를 수직 이동 하여 초점 거리를 일정하게 유지 한다¹⁶⁾.

본 실험에 사용된 연속파형 Nd:YAG 레이저는 아크 플래시 램프 펌핑 장치가 부가된 발전기에서 레이저를 생성한다. 레이저의 파장, 초점크기 및 횡축 공간 모드는 각각 1.06 μm, 0.6 mm 및 TEM₀₀ 모드이다. 레이저 초점 거리는 Karatas 등¹⁷⁾ 의 연구결과를 근거로 하여 예비 실험으로 결정된 시편 위 레이저빔 직경이 최소화 되고, 시편 예비 절단시 절단 폭이 최소화되는 절단노즐과 시편사이 거리로 선정하였다. 본 연구에 적용한 레이저 초점거리는 사전 실험 결과 취득된 절단 노즐 끝단과 시편 사이 거리 1.0 mm 로 선정하였다.

본 연구에 사용된 인코넬 718 박판재의 재료성분비와 기계적 물성은 각각 Table 1 및 2 와 같다.

본 연구에 사용된 공정변수는 레이저 출력 (P) 재료 두께 (T), 평면내 모서리 절단각 (Corner angle : θ) 및 루프 크기 (Size of loop : δ) 이다. 절단 실험은

Table 1 Chemical compositions of Inconel 718 sheets (wt %)

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta
52.5	19.0	18.5	3.0	5.1

Table 2 Mechanical properties of Inconel 718 sheets

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Max. Strain	Young's Modulus (GPa)
550	965	0.3	200

평면 각도 절단 실험과 평면 루프 절단 실험의 2가지 실험을 수행하였다.

평면 각도 절단 실험에서는 Fig. 2(a) 와 같이 레이저와 박판재를 수직하게 설정한 후, 레이저 이동경로에 평면내 재료 모서리 절단각을 부여하였다. 이 평면내 재료 모서리 절단각은 절단시 구현하고자 하는 평면내 모서리각과 동일하다.

평면 각도 절단 실험에 사용된 실험 범위는 Table 3 과 같다. 본 실험에서 레이저 절단속도는 Ahn 등¹⁸⁾ 의 연구에 의하여 제시된 고풍속 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 인코넬 718 박판재 절단 시 각 출력별 절단폭이 최소화되는 절단 속도를 사용하였다. 절단 가스는 산소 가스로 선정하였으며, 절단가스의 순도는 99.99 % 이고 절단가스압력 (P_g)은 0.1 MPa 이다. 실험에 사용된 평면내 모서리 절단각은 30° 에서 150° 까지 30° 간격으로 선정하였다.

평면 루프 절단 실험에서는 Fig. 2(b) 와 같이 이동 경로의 평면내 모서리 절단각 발생부위에 루프 크기 만큼 추가적인 경로를 부여 하였다. 실험에 사용된 루프

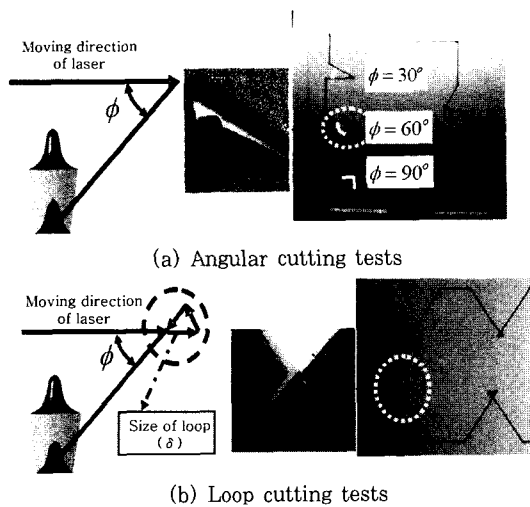


Fig. 2 Concept of angular cutting and loop cutting tests

Table 3 Experimental conditions of angular cutting tests

T (mm)	P (W)	V_{tr} (mm/min)	P_g (MPa)	ϕ ($^\circ$)
1.6	1,400	7,000	0.1	30, 60, 90, 120, 150
	1,600	7,000		
	1,800	8,000		
2.0	1,400	5,000		
	1,600	6,000		
	1,800	6,000		

크기는 0 mm, 3 mm 및 5 mm 이다.

본 실험중 레이저 절단기의 CNC 제어상 속도 가감 속 특성에 따른 모서리부 용융 특성 변화는 고려하지 않았다.

2.2 실험 결과 분석 방법

평면 각도 절단 실험과 평면 루프 절단 실험에서 모서리부의 용융 면적 (ψ) 은 식 (1) 및 Fig. 3 과 같이 광학 현미경으로 모서리부를 측정한 후, 모서리부의 전체 용융 면적을 여러개의 단위 삼각형으로 나누어 각각의 면적을 계산하고 이 국소 면적들을 합하여 산출하였다.

$$\Psi = \sum_{i=1}^m \Psi_i \quad (1)$$

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

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평면 각도 절단 실험 결과 및 고찰

Fig. 4 는 시편 두께 1.6 mm, 레이저 출력 1,800

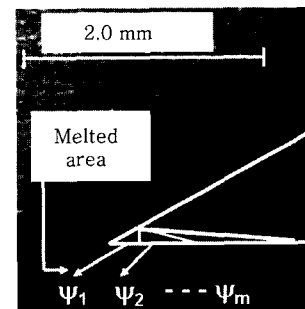


Fig. 3 Measurement scheme of the melted area (Ψ) in the sharp corner

Table 4 Experimental conditions of loop cutting tests

T (mm)	P (W)	V_{tr} (mm/min)	P_g (MPa)	δ (mm)	ϕ ($^\circ$)
1.6	1,400	7,000	0.1	0, 3, 5	30, 60, 90, 120, 150
	1,600	7,000			
	1,800	8,000			
2.0	1,400	5,000			
	1,600	6,000			
	1,800	6,000			

W 및 레이저 절단 속도 6,000 mm/min 에서의 모서리 절단 각도에 따른 시편의 절단 상태 변화이다.

Fig. 4 에서 절단된 시편의 상단부에서는 모서리부 용융이 거의 발생하지 않아 모서리부의 형상이 절단각도와 거의 유사한 형상을 나타내었다. 평면 모서리 절단각이 작아질수록 모서리부로의 열집중이 증가하여 모서리부 열영향 영역과 용융 영역이 확대 되었다. 그러나 평면 모서리 절단각이 증가할수록 열 영향 영역과 용융 영역이 절단 경로를 따라 주위로 퍼져나가는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5 는 시편 두께와 레이저 출력별 평면 모서리 절단각도와 모서리 용융면적 상관관계이다. Fig. 5 에서 평면 모서리 절단각 90° 까지는 평면 모서리 절단각이 증가할수록 모서리 용융면적이 감소하다가, 평면 모서리 절단각 90° 이상에서는 평면 모서리 절단각이 증가할수록 모서리 용융면적이 증가하는 것을 알 수 있었다. 평면 모서리 절단각이 30° 인 경우에는 평면 모서리 절단각이 90° 일때에 비하여 약 1.3-1.8 배 정도의 모서리 용융면적이 증가하며, 평면 모서리 절단각이 150° 인 경우에는 평면 모서리 절단각이 90° 일때에

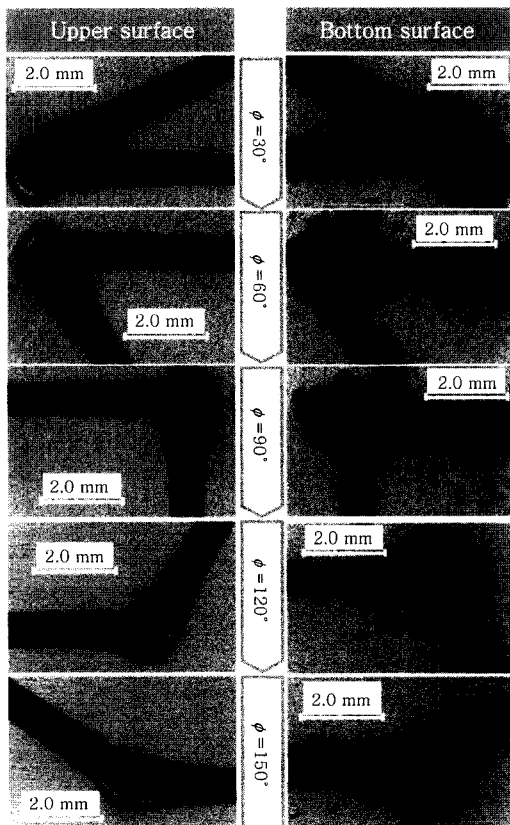


Fig. 4 Variation of the melted area and the corner shape according to the cutting angle (T = 1.6 mm, P = 1,800 W and $V_{tr} = 8,000$ mm/min)

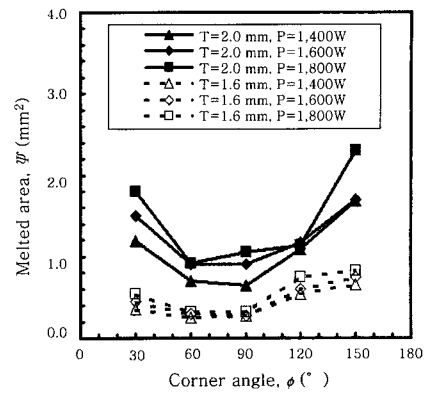


Fig. 5 Influence of the corner angle, the material thickness and the laser power on the melted area in the sharp corner

비하여 약 1.8-2.7 배 정도의 모서리 용융면적이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 본 실험 범위에서 모서리부 최대 용융면적이 약 2.3 mm² 정도임을 알 수 있었다.

시편의 용융 상태를 고찰한 결과 Fig. 6 과 같이 평면 모서리 절단각이 작아질수록 모서리부 열집중이 증가되어 시편의 바닥면 모서리부의 용융면적 뿐만 아니라 시편 두께 방향으로 점점 더 깊게 모서리부가 용융되는 것을 알 수 있었다. 그러나 평면 모서리 절단각이 90° 이상인 영역에서 평면 모서리 절단각이 증가할수록 상부에서 용융된 재료의 하단부 절단면 부착에 의한 시편 바닥부 용융량이 증가되어 모서리부 용융 면적이 계속적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 5 에서 인코넬 재료의 두께가 1.6 mm 에서 2.0 mm 로 증가될 경우 모서리부 용융면적이 1.5-3.4 배 정도 증가되며,

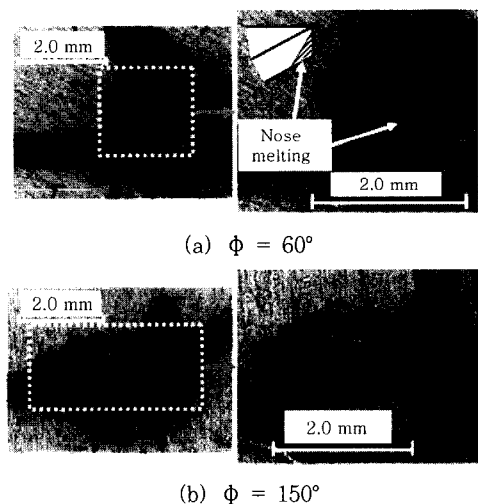


Fig. 6 Influence of corner angle on melting mode of the corner (T = 2.0 mm, P = 1,400 W and $V_{tr} = 5,000$ mm/min)

시편 두께가 증가할수록 레이저 출력 변화에 따른 시편의 모서리부 용융 면적 변화가 증가됨을 알 수 있었다. 또한 평면 모서리부 절단각이 30° 와 150° 일 경우, 레이저 출력 증가에 따라 모서리부 용융 면적이 크게 증가 하는 것을 알 수 있었다.

본 실험 조건에서의 인코넬 718 판재 절단시 평면 모서리 절단각 90° 에서 모서리 용융면적이 최소화되는 것을 알 수 있었다. 또한, 평면 모서리 절단각 90° 에서 모서리부 용융 모드가 시편 하단 모서리 침두부의 용융에서 상부 용융 재료의 시편 하단부 절단면 부착에 의한 2차 용융으로 변경됨을 알 수 있었다.

3.2 루프 절단 실험 결과 및 고찰

모서리 용융면적이 최소화 되는 루프 크기를 도출하기 위하여 루프 절단 실험을 수행하였다. 본 실험 결과 Fig. 7, 8 및 9 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 7 및 8 은 루프 크기에 따른 절단된 시편의 상하단의 모서리부 형상 및 용융 상태를 나타낸다. Fig. 7 을 고찰한 결과 루프 크기 3 mm 이상에서는 상면 모서리부 형상이 절단각도와 거의 동일한 형상을 가진 예리한 모서리를 얻을 수 있었으며, 모서리부의 열 집중 현상에 의한 시편내 국소 영역 용융 및 열영향부 생성이 거의 나타나지 않았다.

Fig. 8 에서 루프 크기가 3 mm 이상이 될 경우 절단된 시편의 하단부 모서리 용융이 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다. 특히 평면 모서리 절단각도가 150° 인 경우, 루프를 도입하지 않은 평면 각도 절단과 달리 상부에서 용융된 재료의 하단부 절단면 부착에 의한 시편 바닥부 용융 현상이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 평면내 모서리 절단 각도가 30° 에서는 모서리 침두 부분에 매우 작은 용융 영역과 열영향 영역이 생성된 것을 알 수 있었다. 그러므로 평면내 모서

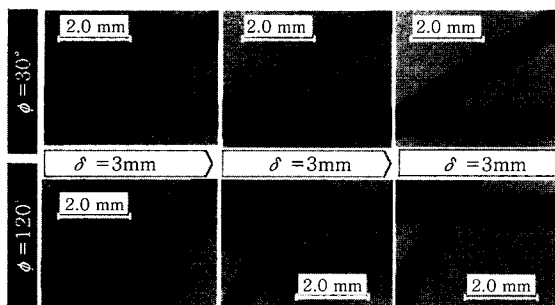


Fig. 7 Variation of the corner shape and the heat affected area according to the size of loop (Upper surface, T = 1.6 mm, P = 1,600 W, and V_{tr} = 7,000 mm/min)

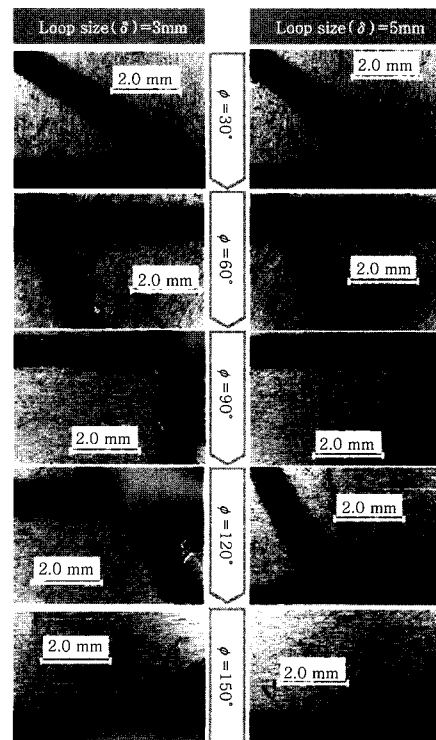


Fig. 8 Variation of the melted area and the corner shape according to the size of loop (Bottom surface, T = 2.0 mm, P = 1,800 W, and V_{tr} = 6,000 mm/min)

리 절단 각도가 30° 미만인 초예각 절단에서는 루프절단보다 모서리에 곡률을 부여하는 절단방식이 모서리 용융 영역을 최소화하는 절단방식일 것으로 사료된다.

Fig. 9 는 루프크기에 따른 평면내 모서리 절단각도 별 모서리 용융면적의 변화를 나타낸다. 루프크기를 각각 3 mm 와 5 mm 로 적용하였을 때, 모서리부 용융면적이 각각 0.02-0.14 mm² 및 0.01-0.09 mm² 로 아주 작게 나타났다. Fig. 9 에서 루프절단을 수행하지 않은 경우와 루프 크기가 3 mm 와 5 mm 를 적용한 경우를 비교한 결과, 모서리 용융면적의 크기가 각각 루프크기 0 mm 일 때에 비하여 70 ~ 98 % 및 75 ~ 99 % 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 두께가 두꺼워질수록 루프크기의 모서리 용융부 최소화에 미치는 영향이 현저히 증가함을 알 수 있었다.

본 실험결과로부터 인코넬 718 박판재를 실험조건내에서 절단할 경우 루프크기를 3 mm 내외로 설정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1.0 kW 이상의 레이저 출력을 가진 고효율 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이

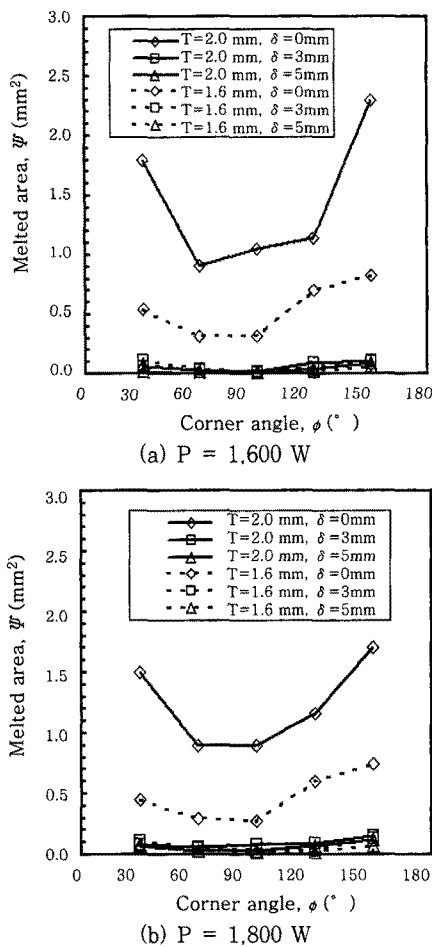


Fig. 9 Influence of the loop size on the melted area in the sharp corner

하의 인코넬 718 판재 절단시 레이저 출력, 재료 두께, 평면내 모서리 절단각 및 루프크기가 모서리 용융과 모서리 생성 특성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 평면 각도 절단 실험을 통하여 평면내 모서리 절단각, 레이저 출력 및 재료 두께와 모서리 용융 면적의 상관관계를 도출할 수 있었다. 또한, 평면내 모서리 절단각이 90° 일 때 모서리부 용융 면적이 최소화되며, 모서리부 용융모드가 시편 하단 모서리 첨두부의 용융에서 상부 용융 재료의 시편 하단부 절단면 부착에 의한 2차 용융으로 변경됨을 알 수 있었다.

2) 루프 절단 실험을 통하여 루프크기와 모서리 용융 면적 및 모서리 생성 특성의 상관관계를 도출/고찰 할 수 있었다. 루프크기가 3 mm 이상일 경우 본 실험 조건에서는 시편의 모서리 용융 현상이 거의 발생하지 않음 알 수 있었다. 또한, 루프크기가 3 mm 와 5 mm 로 증가할 때 모서리에서의 용융 면적의 크기가 각각 루프크기 0 mm 일 때에 비하여 70 ~ 98 % 및 75 ~

99 % 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 평면내 재료 절단각이 30° 이하의 예각을 형성할 경우 루프 절단보다 모서리에 곡률 부여하는 절단방식이 모서리 용융면적을 최소화하는 절단방식일 것으로 사료된다.

추후 본 연구에서 취득된 데이터를 최적 레이저 절단 경로 생성 프로그램에서 형상에 따른 최적 경로 보정량 계산용 지식 데이터베이스로 활용될 예정이다. 또한, 루프를 도입할 수 없는 형상이나 평면내 모서리각이 30° 이하의 경우에 필요한 모서리부 가공 곡률과 용융 면적의 상관관계에 대한 연구와 CNC 제어상 속도 가감속 특성에 의한 모서리부 가공 특성에 대한 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 지식경제부 지정 지역혁신센터(RIC) : 레이저 응용 신기술개발 연구센터의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 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
2. M. Geiger : Manufacturing Science-Driving Force for Innovation, Advanced Technology of Plasticity, 1 (2002), 17-30
3. J.F. Ready : Industrial Applications of Laser, Academic Press, 1997, 315-417
4. 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)
5. K. Abdel Ghany, K. Abdel Rafea and M. Newishy : Using a Nd:YAG Laser and Six Axes Robot to Cut Zinc-Coated Steel, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28 (2006), 1111-1117
6. 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 (2005), 19-26 (in Korean)
7. A. K. Dubey and V. Yadava : Experimental Study of Nd:YAG Laser Beam Machining-An Overview, Journal of Materials Processing Technology, 195 (2008), 15-26
8. W. T. Chien and S. C. Hou : Investigating the Recast Layer Formed During the Laser Trepan Drilling of Inconel 718 Using the Taguchi Method,

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **33** (2007), 308-316
9. G. Thawari, J. K. Sarin Sundar, G. Sundararajan and S. V. Joshi : Influence of Process Parameters During Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Nickel-Base Superalloys, Journal of Materials Processing Technology, **170** (2005), 229-239
 10. A. A. Bugayev, M. C. Gupta and R. Payne : Laser Processing of Inconel 600 and Surface Structure, Optics and Lasers Engineering, **44** (2006), 102-111
 11. M. Anderson, R. Patwa and Y. C. Shin : Laser-Assisted Machining of Inconel 718 with an Economic Analysis, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **46** (2006), 1879- 1891
 12. G. C. Han and S. J. Na : A Study on Torch Path Planning in Laser Cutting Processes Part 2 : Cutting Path Optimization Using Simulated Annealing, Journal of Manufacturing Processes, **1** (1999), 62-70
 13. H. J. Park and D. G. Ahn : Knowledge-based CNC Torch Path Generation for Laser Cutting of Planar Shapes, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **37** (2008), 302-313
 14. 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** (1999), 54-61
 15. D. G. Ahn and Y. T. Yoo : 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, Journal of KWS, **24-4** (2006), 316-322 (in Korean)
 16. D. G. Ahn, K. W. Byun and Y. T. Yoo : Effects of an Auto-tracking of the Focal Distance on the Quality of the Cut Part in the Laser Cutting of a Low Carbon Sheet, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, **16-4** (2007), 101-107 (in Korean)
 17. 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
 18. D. G. Ahn, K. W. Byun and M. C. Kang : A Study on Thermal Characteristics in the Cutting of Inconel 718 Super-alloy Using CW Nd:YAG Laser, Journal of Materials Science & Technology, (2008), Submitted