

# 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 냉연강판 절단시 공정변수의 절단면 특성에 미치는 영향

안동규<sup>#</sup>, 김민수<sup>\*</sup>, 박형준<sup>\*\*</sup>, 유영태<sup>\*\*\*</sup>

## Influence of Process Parameters on the 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

Dong-Gyu Ahn<sup>#</sup>, Min-Su Kim<sup>\*</sup>, Hyung-Jun Park<sup>\*\*</sup> and Young-Tae Yoo<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

Laser cutting technology is one of flexible rapid manufacturing technologies with various advantageous including a high cutting speed, manufacturing of parts with a complex shape and others. The quality of the cut part and the optimum cutting conditions are highly dependent on the combination of the process parameters. The objective of this research works is to investigate the influence of process parameters, such as power of laser, cutting speed of laser and material thickness, on the surface roughness and the striation formation of the cut section for the case of cutting of CSP 1N sheet using high power Nd:YAG Laser with a continuous wave (CW). In order to find the relationship between process parameters and the surface roughness and the striation formation of the cut section, several experiments are carried out. Through the investigation of the empirical results, it has been shown that the surface roughness is highly related to the striation formation, including the frequency and angle of the striation, of the cut section. From the results of experiments, an optimum cutting speed for each cutting condition has been obtained to improve both the quality of the cut surface and the cutting efficiency.

**Key Words** : CW Nd:YAG laser (연속파형 Nd:YAG 레이저), CSP 1N sheet (CSP 1N 냉연강판), Surface roughness (표면조도), Striation formation (절단면 표면골극 형성), Optimum cutting condition (최적 절단조건)

### 기호설명

P = power of laser

$V_{tr}$  = cutting speed of laser

T = thickness of material

$R_a$  = average absolute value of the profile excursions from the mean line

L = length of measurement

접수일: 2006년 2월 13일; 게재승인일: 2006년 6월 2일

# 교신저자: 조선대학교 기계공학과

E-mail [smart@mail.chosun.ac.kr](mailto:smart@mail.chosun.ac.kr) Tel. (062) 230-7043

\* 조선대학교 대학원

\*\* 조선대학교 산업공학과

\*\*\* 조선대학교 메카트로닉스 공학과

$R_{max}$  = maximum roughness  
 $F$  = striation frequency per millimeter  
 $m$  = number of striation in the measurement area  
 $S$  = length of the striation measurement  
 $\phi_j$  = striation angle in the measurement area  
 $\chi$  = average striation angle  
 $n$  = number of measurement point for the striation formation  
 $V_R$  = cutting speed of laser with a minimum surface roughness  
 $V_{S,N}$  = cutting speed of laser with the maximum average striation frequency per millimeter  
 $V_{S,A}$  = cutting speed of laser with the maximum average striation angle  
 $V_{OP}$  = optimum cutting speed

## 1. 서론

레이저 절단 공정은 다양한 형상의 제품을 정밀 패속제작 할 수 있는 유연 가공 공정으로써 자동차, 조선, 전자산업등 산업계 전반에 폭넓게 적용되고 있다.<sup>1,2</sup> 레이저 절단 공정은 비접촉 가공으로 가공 소재의 절단 저항이 없고, NC 제어 장치와 결합하여 일반 절삭가공으로 가공할 수 없는 복잡한 형상, 미세 형상 및 극 취성 재료의 가공도 가능하다.<sup>3</sup> 레이저 절단시 레이저의 초점 내에 고밀도의 에너지가 집중 되고 고속으로 절단을 수행함으로써 가공 재료내에 열전달 반경과 열영향부(Heat affected zone : HAZ) 를 작게 발생시켜 절단 후 변형을 최소화시킨다. 그러므로 레이저를 박판 절단에 적용할 경우 산소절단과 플라즈마 절단과 비교하여 정밀/고속 절단이 가능하다.<sup>4</sup>

현재 산업 현장에서는 10.6  $\mu\text{m}$  의 파장대를 가지면 연속파형 특징을 가진 CO<sub>2</sub> 레이저 절단공정이 많이 보급되어 있다. 최근 레이저의 가격이 감소하고, 정밀 부품과 국소 영역에 대한 가공이 요구되는 산업적 경향에 의하여 고체 레이저로써 안정된 고출력을 나타내며, 1.06  $\mu\text{m}$  의 파장대로서 CO<sub>2</sub> 레이저보다 초점 크기 작아 고집적화된 고밀도의 에너지를 얻을 수 있는 연속파형 Nd:YAG 레이저의 산업적 활용이 시도되기 시작하고 있다.<sup>3</sup> 탄소강에 Nd:YAG 레이저를 적용할 경우 CO<sub>2</sub> 레이저보다 7 배 이상의 빔 흡수율을 높일 수 있으며, 고 집적된 에너지로 고속 절단함으로써 절단 후

제품의 열변형을 최소화할 수 있다. 이와 같은 이유로 최근 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 박판재 절단에 대한 학문적 연구 및 산업적 적용이 활발히 진행되고 있다.<sup>5-7</sup>

레이저를 이용한 판재 절단시 제품 품질은 절단폭, 열영향부 크기, 바닥면 드로스량 및 절단면 특성에 의하여 결정된다.<sup>8</sup> 레이저 절단면 특성은 표면조도 및 표면 굴곡 형성 (Striation formation) 에 의하여 평가될 수 있다.<sup>9-10</sup> 그러므로, 레이저 절단중 가공 조건에 대한 표면 조도 및 표면 굴곡 형성에 대한 다양한 실험 및 해석적 연구가 진행되고 있다.<sup>11-12</sup> Schuocker 등은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 탄소강 절단시 절단폭내의 재료가 제거 되기전 용융층의 진동을 이용하여 주기적 표면 굴곡 생성의 원인을 규명하고자 하였다.<sup>13</sup> Arata 등<sup>14</sup> 과 Ivarson 등<sup>15</sup> 은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 탄소강 절단시 반응성 가스의 산화 동역학을 이용하여 절단 무늬 표면굴곡 생성의 원인 규명하고자 하였다. Arata 등은 산화 반응선단속력 (Speed of the oxygen reaction front) 이 절단속력보다 클 때 반응가스에 의한 절단면 측면 연소현상이 현저히 나타난다고 보고 하였다. Lee 등은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 탄소강 절단시 표면굴곡 형성에 대한 해석적 모델 개발에 대한 연구를 수행하였으며,<sup>16</sup> Karatas 등은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 탄소강 절단시 재료두께와 레이저 빔 초점 위치가 표면굴곡 무늬 형성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.<sup>17</sup> Lim 등은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 탄소강 절단시 다루지 방법을 공정변수와 표면조도 상관관계를 분석하여 최적절단 조건을 도출 하였다.<sup>18</sup> 한응교 등은 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 SUS304 강판 절단시 레이저 출력에 따른 펄스 폭과 표면조도의 상관관계를 연구한 바 있다.<sup>19</sup> 위 사전 연구들을 검토한 결과 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 냉연강판 절단시 레이저 출력, 레이저 절단 속력 및 재료두께가 절단면 표면조도 및 표면 굴곡 무늬 형성에 미치는 영향에 대한 선행 연구는 문헌상으로 거의 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 1.0 kW 이상의 레이저 출력을 가진 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP 1N 냉연강판 절단시 절단속력, 레이저 출력, 재료 두께가 절단면 표면조도 및 표면 굴곡 형성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한, 표면 조도와 표면굴곡 상관 관계를 분석 하

였으며, 양호한 절단면 품질을 가지며 절단 속력을 최대화 할 수 있는 최적 절단 조건을 도출하였다.

## 2. 실험 및 분석 방법

### 2.1 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 최대 출력 2.8 kW 의 연속파형 Nd:YAG 레이저와 절단가스분사 장치가 부착된 6 자유도 로봇 레이저 절단 시스템을 이용하였다. 본 실험에 사용된 연속파형 Nd:YAG 레이저는 독일 Trumpf 사<sup>20</sup> 에서 제작된 아크 플래시 램프 펌핑 장치가 부가된 레이저 발전기에서 생성된다. 레이저의 파장은 1.06  $\mu\text{m}$  이며, 초점크기는 0.6 mm 이다. Karatas<sup>17</sup> 는 CO<sub>2</sub> 레이저로 1.5 mm 와 3.5 mm 강판을 절단할 때 시편내부에서 위치할 때 절단품의 절단폭, 표면조도가 최소화 되며 절단면의 표면 물결 무늬 개수가 최소화된다고 보고하였다. 이 결과를 이용하여 본 연구에서는 레이저 초점 위치는 예비 실험으로 시편위 레이저빔 직경이 최소화되는 절단노즐과 시편사이 거리로 선정하였다. 예비실험 결과 취득된 레이저 초점거리는 1.0 mm 이다. 레이저 빔의 공간모드는 TEM<sub>00</sub> 모드를 사용하였다. 본 연구에 사용된 CSP 1N 압연강판의 재료성분비는 Table 1 과 같다.

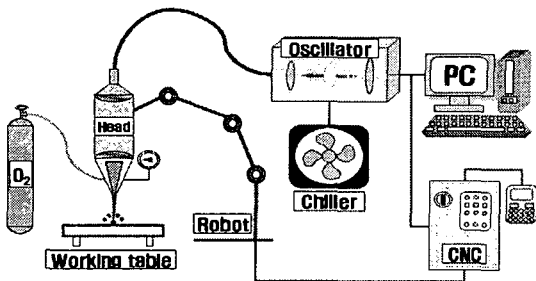


Fig. 1 Experimental set-up

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 공정변수는 레이저 출력 (P), 레이저 절단속력 ( $V_r$ ) 및 재료두께 (T) 이다. 본 연

구에 사용된 실험 범위는 Table 2 와 같이 Ahn 등<sup>7</sup> 의 연구에 의하여 제시된 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판재 절단시 각 절단 조건별 절단 가능영역에 1,000 mm/min 여유 범위를 주어 선정하였다. 절단가스는 산소가스로 선정하였으며, 절단가스의 순도는 99.99 % 이고 압력은 0.1 MPa 로 하였다.

레이저 절단시 시편과 레이저의 각도가 90° 인 수직절단을 수행하였다. 시편은 아세톤으로 표면 세척 후 실험에 사용하였다. 레이저 절단 길이는 Ahn 등<sup>7</sup> 의 연구와 같이 초기 레이저 안정화 길이 및 절단 종류부의 영향이 절단면 특성에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 총 절단 길이 100 mm 중 중앙부 60 mm 만을 절단 품질 평가 길이로 선정하여 절단 품질 평가 길이에서만 표면조도 및 표면굴곡 형성 특성을 분석하였다.

Table 2 Experimental conditions

T (mm)	P (Watt)	$V_r$ (mm/min)
0.5	1,200-1,800	4,000-10,000
1.0	1,200	4,000-7,000
	1,400-1,800	4,000-8,000
1.6	1,200-1,400	2,000-5,000
	1,600-1,800	3,000-6,000
2.0	1,200	3,000-4,000
	1,400-1,800	3,000-5,000

### 2.2 실험 결과 분석 방법

#### 2.2.1 절단면 표면조도 분석 방법

레이저 절단면에서의 표면조도는 재료두께 방향으로 위치에 따라 차이가 발생할 수 있다. 그러므로, 평균조도를 나타내는 두께 방향 중심선<sup>14</sup> 에서 표면조도를 측정하였다. 길이방향으로는 절단 품질 평가 길이 전체를 5 mm 간격으로 나누어 12 회 측정 후, 취득된 데이터 값을 측정횟수로 평균하여 취득하였다. 한 측정지점에서는 3 회 표면조도를 측정 후 평균함으로써 해당 지점에 대한 표면조도를 산출하였다. 표면조도는 Mitatoyo 사의 Surfest 402 축침식 표면조도계를 이용하여 중심선 평균거칠기 ( $R_a$ ) 와 최대 조도 ( $R_{max}$ ) 값을 측정하였다.

각 공정조건별 표면조도 변화에 따른 절단면 형상 변화를 확인하기 위하여 광학식 3 차원 형상

측정 장비인 ACCURA 2000 을 이용하였다.

### 2.2.2 절단면 표면굴곡 형성 특징 분석 방법

레이저 절단시 공정변수의 절단면 표면 굴곡 형성에 미치는 영향은 광학현미경으로 절단면을 확대 촬영하여 절단면에서 관측된 표면굴곡 발생 빈도수 및 표면굴곡 경사각을 측정하여 분석하였다.

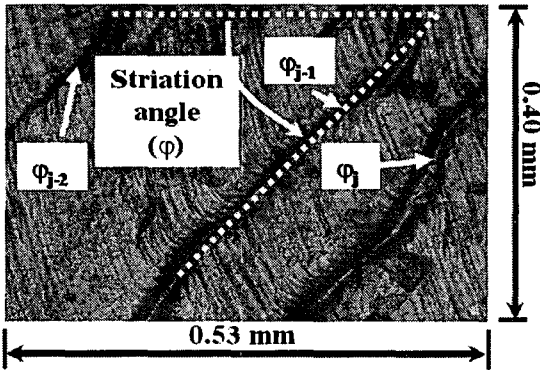


Fig. 2 Definition of striation angle and size of measurement area

$$F = \frac{\sum_i^n \left( \frac{m}{S} \times 1000 \right)_i}{n} \quad (1)$$

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m \varphi_j / m \right)_i}{n} \quad (2)$$

절단면은 절단 품질 평가 길이 내 6 곳을 10 mm 간격으로 Fig. 2 와 같은 크기로 촬영하였으며, 측정횟수 만큼 평균하여 단위 밀리당 평균 표면굴곡 발생빈도수 (Average striation frequency per millimeter : F) 와 평균 표면굴곡 경사각 (Average striation angle :  $\chi$ ) 을 산출하였다. 평균 표면굴곡 경사각은 시편의 중앙부에서 측정하였다. 또한, 평균 표면굴곡 경사각은 절단면의 표면굴곡 경사각이 갑자기 변화되는 파단부 위의 영역인 절단부 영역에서 측정하였다. 단위 밀리당 표면굴곡 발생빈도수와 평균 표면굴곡 경사각의 정의는 각각 식 (1),

식(2) 와 같다. 본 연구에는 표면굴곡 측정길이(S)가 534  $\mu\text{m}$  이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 절단면 표면조도 실험 결과 및 고찰

Fig. 3 은 실험결과 도출된 공정변수와 절단면 중심선 평균 거칠기와 및 최대 조도의 상관관계이다.

본 실험조건에서는 CSP 1N 시편 절단면의 표면조도가 Table 3 과 같이 중심선 평균 거칠기의 경우 최소 0.3  $\mu\text{m}$  에서 최대 1.9  $\mu\text{m}$  정도이며, 최대 조도는 최소 1.8  $\mu\text{m}$  에서 최대 10.6  $\mu\text{m}$  정도의 값을 나타내었다.

본 실험 조건에서는 레이저 출력이 증가할수록 절단면 표면조도가 조금씩 증가하나, 레이저 절단 속력과 재료두께의 표면조도 영향성이 레이저 출력의 표면조도 영향성 보다 크게 나타났다. 특히, 레이저 절단속력 2,000 mm/min 인 경우에는 중심선 평균거칠기와 최대 조도가 모두 현저히 증가하였다. 이 현상은 Arata 등의 연구결과<sup>8, 14</sup>에서 보고된 같이 절단속력 2,000 mm/min 부근부터 산화반응 선단속력이 절단속력보다 빨라져 취입산소의 산화반응에 의한 절단면 연소현상이 절단면 조도 형성에 큰 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

재료두께가 증가할수록 절단면 표면조도가 증가하는 것으로 나타났다. 이 현상은 재료두께가 증가될수록 재료 용융을 위한 추가적인 열에너지가 필요하고 이로 인하여 절단면내 용융물의 존재 시간이 길어져, 용융물의 열에너지를 절단 재료쪽으로 많이 절단시킴으로써 절단면 용융깊이가 깊어지고 용융주기가 길어지기 때문이다. 또한, 재료두께가 증가 할수록 좁은 절단속력 영역에서 급격한 표면조도의 변화가 나타났다.

Fig. 3 과 4 에서 레이저 절단속력이 증가하면 절단 표면조도가 감소하다가 어느 일정속력 이상이 되면 표면조도가 급격히 증가하는 현상이 나타났다. 이 현상은 모든 재료두께와 레이저 출력에서 동일하게 나타났다. 이 결과로부터 각 재료두께와 레이저 출력에 대한 표면조도가 최소값을 가지는 임계절단속력이 존재함을 알 수 있었다.

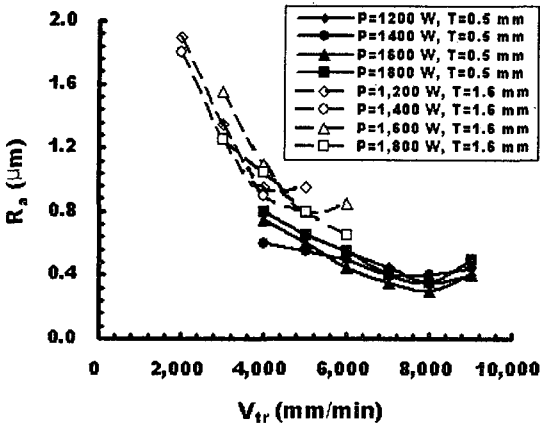


Fig. 3 (a) Influence of cutting speed and power of laser on the average absolute value of the profile excursions from the mean line

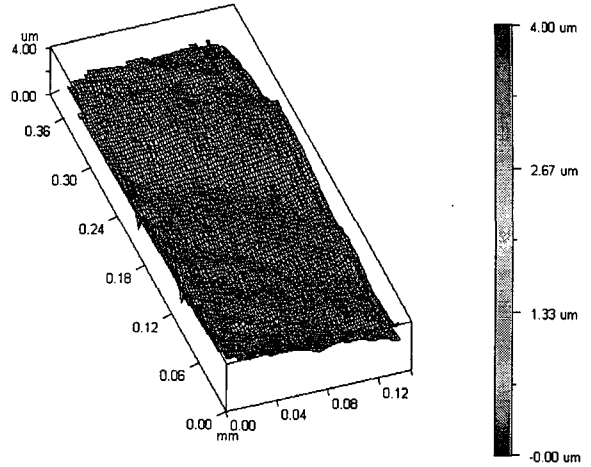


Fig. 4(a) Influence of the cutting speed on the profile of the cut section ( $P = 1,800$  Watt,  $T = 1.0$  mm,  $V_{tr} = 4,000$  mm/min)

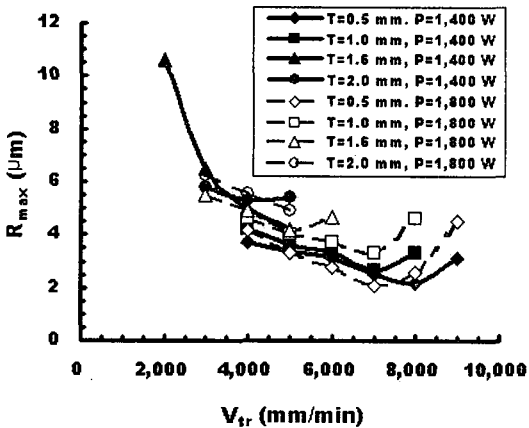


Fig. 3(b) Influence of cutting speed and thickness of workpiece on the maximum roughness

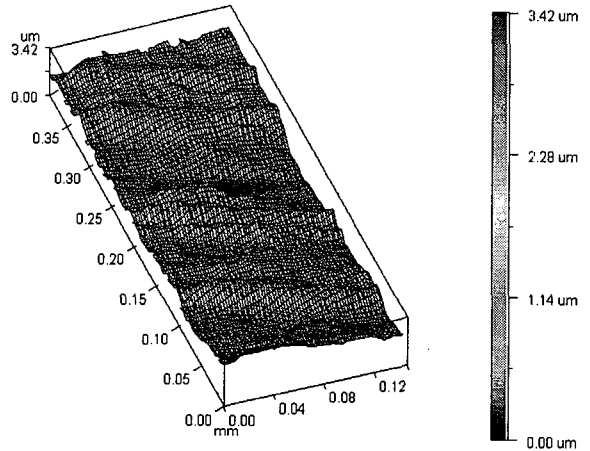


Fig. 4(b) Influence of the cutting speed on the profile of the cut section ( $P = 1,800$  Watt,  $T = 1.0$  mm,  $V_{tr} = 6,000$  mm/min)

Table 3 Range of the surface roughness for each thickness

T (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )		$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	
	Min	Max	Min	Max
0.5	0.30	0.80	1.80	4.00
1.0	0.45	1.00	2.70	5.35
1.6	0.65	1.90	4.15	10.60
2.0	0.90	1.45	4.90	6.00

3 차원 표면형상 측정기로 CSP 1 절단면 표면형상 측정결과 Fig. 4 와 같이 절단속력이 감소할 경우 주기가 길고 높이가 높은 요철들이 발생하고 절단속력이 증가됨에 따라 주기가 짧고 높이가 낮은 요철로 변하는 것을 알 수 있었다.

### 3.2 절단면 표면굴곡 실험 결과 및 고찰

Fig. 5 는 표면굴곡 실험결과 나타난 레이저 절단속력, 레이저 출력 및 재료두께와 단위 밀리당 평균 표면굴곡 발생빈도수의 상관관계이다.

레이저 출력과 재료두께가 증가할수록 단위 밀리당 평균 표면굴곡 발생빈도수는 감소하는 것으로 나타났다. 레이저 절단속력이 증가할수록 단위 밀리당 평면 표면굴곡 빈도수가 증가하다가 임계 절단속력 이후에는 단위 밀리당 평균 표면굴곡 빈도수가 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다.

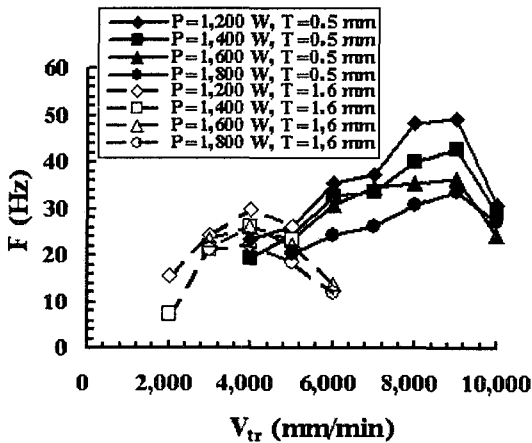


Fig. 5 Influence of cutting speed and power of laser on the average striation frequency per millimeter

Fig. 5 의 결과와 Fig. 3 의 결과를 비교/분석한 결과 레이저 절단속력이 증가할수록 절단면 표면 조도를 유발시키는 절단면 표면요철의 깊이는 감소하고 표면 요철 수는 증가하며, 재료두께와 레이저 출력이 증가하면 표면요철의 깊이가 증가하고 표면요철 수는 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5 에서 레이저 절단속력 2,000 mm/min 에서는 평균 표면굴곡 발생 빈도수가 현저히 감소하였다. 이 현상은 Fig. 3 의 결과 분석과 같이 산소가스의 산화현상에 의한 절단면 측면 연소로 인하여 절단면 표면을 추가적으로 용융시켜 표면요철깊이는 깊어지게 하고 요철주기는 길게 만들기 때문으로 사료된다.

Fig. 6 은 평균 표면굴곡 발생빈도수에 대한 임계 절단속력 이전과 이후에서의 절단부의 바닥면 쪽 절단면 사진을 나타낸다.

평균 표면굴곡 발생빈도수에 대한 임계 절단속력 이전에는 Fig. 6(a) 와 같이 절단면 전체가 양호한 절단상태를 나타내는 절단영역만을 나타내나, 평균 표면굴곡 발생빈도수에 대한 임계 절단속력 이후에는 Fig. 6(b) 와 같이 절단면 하단부에 투입 열량 부족으로 인한 재료의 치연제거와 현저한 표면굴곡 경사각 감소를 일으키는 파단영역이 급격히 성장하는 것이 관찰되었다.

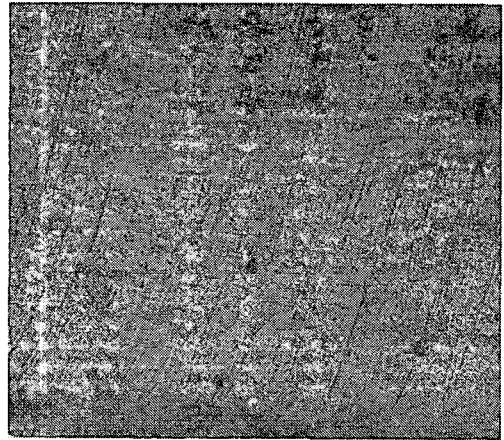


Fig. 6(a) Striation formation in the bottom area of the cut section ( $T=1.0$  mm,  $P = 1,400$  W,  $V_{tr} = 4,000$  mm/min)

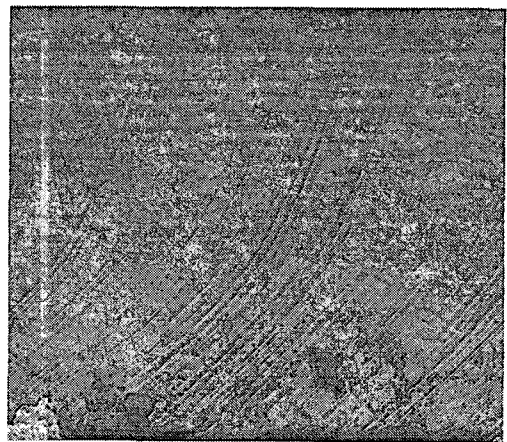


Fig. 6(b) Striation formation in the bottom area of the cut section ( $T=1.0$  mm,  $P = 1,400$  W,  $V_{tr} = 6,000$  mm/min)

그러므로 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 판재 절단시 절단면 두께방향으로 균일한 절단면 품질을 얻기 위해서는 재료두께 및 레이저 출력별 최소 평균 표면 굴곡 발생 속도 이하에서 절단을 수행하여야 됨을 알 수 있었다.

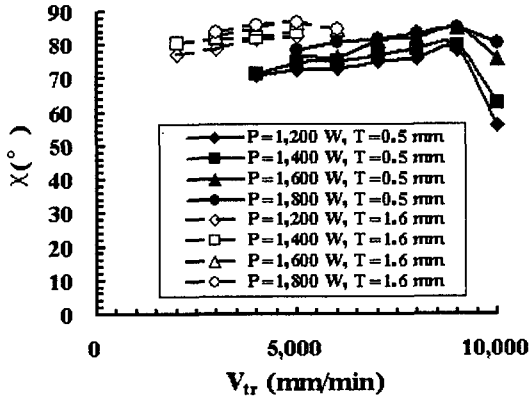


Fig. 7(a) Influence of cutting speed and power of laser on the averaged striation angle at the center line of the cut section

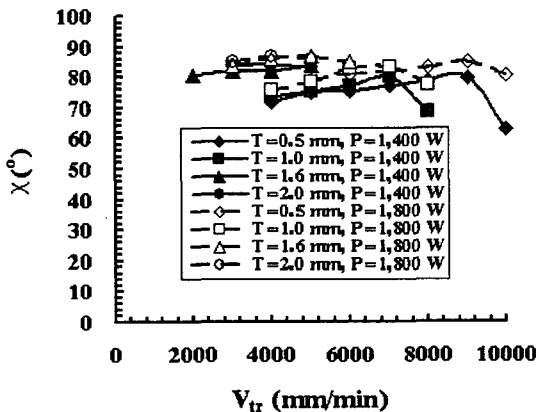


Fig. 7(b) Influence of cutting speed and thickness of workpiece on the averaged striation angle at the center line of the cut section

Fig. 7 은 실험결과 취득된 레이저 절단속력, 레이저 출력 및 재료두께와 평균 표면굴곡 경사각의

상관관계이다. 평균 표면굴곡 경사각은 절단속력 증가시 일정한 범위의 값을 나타내다가 임계 절단속력 이후 현저히 감소하는 현상을 보였다. 레이저 출력 및 재료 두께 증가시 평균 표면굴곡 경사각은 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 임계 절단속력 이후에 재료두께가 두꺼워 질수록 평균 표면굴곡 경사각의 감소량이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.

### 3.3 최적 절단 속력 도출

고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 강판 절단면 분석을 통하여 재료 두께별 레이저 출력에 대한 최소 표면조도 절단속력 ( $V_R$ ), 최대 단위길이당 평균 표면굴곡 발생빈도수를 가지는 절단속력 ( $V_{S,N}$ ) 및 최대 평균 표면굴곡 경사각을 가지는 절단속력 ( $V_{S,A}$ ) 을 Table 4 와 같이 얻을 수 있었다.

Table 4 Critical cutting speed and an optimum cutting for each cutting condition

T (mm)	P (Watt)	$V_R$ (mm/min)	$V_{S,N}$ (mm/min)	$V_{S,A}$ (mm/min)	$V_{OP}$ (mm/min)
0.5	1,200	8,000	9,000	9,000	8,000
	-1,800				
1.0	1,200	6,000	5,000	6,000	6,000
	-1,800				
1.6	1,200	5,000	4,000	5,000	5,000
	-1,800				
2.0	1,200	4,000	4,000	4,000	4,000
	-1,400				
	-1,800				

레이저 절단 제품의 품질은 절단면 표면조도에 매우 의존적이다. Table 4 에서 최소 표면조도 절단속력, 최대 단위길이당 평균 표면굴곡 발생빈도수를 가지는 절단속력 및 최대 평균 표면굴곡 경사각을 가지는 절단속력이 거의 비슷한 절단속력 영역내에 있음을 알 수 있었다. 그러므로 표면조도가 최소값 나타내는 절단속력을 각 재료두께별 레이저 출력에 대한 최적절단속력 ( $V_{OP}$ ) 으로 선정하였다.

Fig. 8 은 재료두께별 레이저 출력에 대한 최적 절단속력에서의 중심선 평균 거칠기와 최대조도

변화를 나타낸다. 이 결과로부터 고효율 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP IN 강판 절단시 각 최적 절단 조건에서 절단면의 최대조도 범위가 2.0에서 6.2  $\mu\text{m}$  범위를 나타내는 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

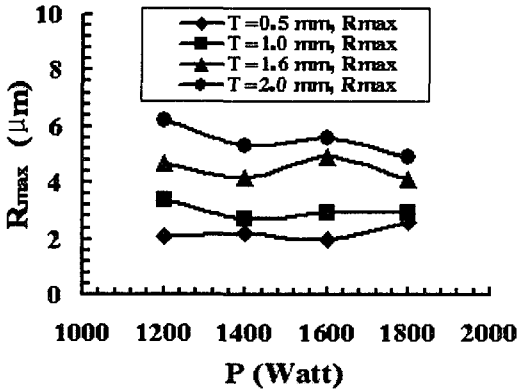


Fig. 8 Average absolute value of the profile excursions from the mean line and maximum roughness in each optimum cutting condition

#### 4. 결론

본 연구에서는 1.0 kW 이상의 레이저 출력을 가진 고효율 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP IN 냉연강판 절단시 절단속력, 레이저 출력, 재료 두께가 절단면 표면조도 및 표면 굴곡 형성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 고효율 CW Nd:YAG 레이저의 출력과 절단속력 및 CSP IN 박판 두께와 중심선 평균 거칠기 및 최대 표면조도 상관관계를 도출할 수 있었다. 또한, 표면조도가 최소화되는 임계절단속력 범위내에서 중심선 평균거칠기의 경우 0.3  $\mu\text{m}$  - 1.9  $\mu\text{m}$  범위 및 최대조도의 경우 1.8  $\mu\text{m}$  - 10.6  $\mu\text{m}$  범위의 값을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 레이저 절단속력 2,000 mm/min 이하에서는 취입산소의 산화에 의한 측면연소효과가 커져서 표면조도가 급격히 증가됨을 알 수 있었다.

둘째, 재료두께, 레이저 출력 및 레이저 절단속력과 절단면 표면굴곡 형성 특성의 정량적 척도인

평균 표면굴곡 발생 빈도수와 평균 표면굴곡 경사각의 상관관계를 도출할 수 있었다. 레이저 공정 변수조합별 평균 표면굴곡 발생빈도수와 평균 표면굴곡 경사각이 최대화는 임계절단속력이 존재함을 알 수 있었다. 평균 표면굴곡 발생빈도수가 최대화는 임계절단속력이후에는 절단면 하부에 파단 영역이 급격히 성장하는 것을 알 수 있었다. 또한, 공정변수와 표면조도 및 표면굴곡 형성 특성의 상관관계를 분석하면 레이저 절단속력이 증가할수록 절단면 표면조도를 유발시키는 표면 요철의 깊이는 감소하고 표면 요철 수는 증가하며, 재료두께와 레이저 출력이 증가하면 표면 요철의 깊이가 증가하고 표면 요철 수는 감소하는 것을 알 수 있었다.

셋째, 공정변수와 표면조도 및 표면굴곡 형성 특성의 상관관계를 이용한 재료두께별 레이저 출력에 대한 고효율 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 2 mm 이하의 CSP IN 냉연강판 최적 절단 조건을 도출할 수 있었다. 또한, 이때 표면 조도의 범위는 최대 조도로 2.0  $\mu\text{m}$  - 8.2  $\mu\text{m}$  범위의 값을 나타냄을 알 수 있었다.

추후, 추가적인 연구를 통하여 레이저 빔 초점 위치, 절단가스 압력, 레이저 빔 특성, 레이저 빔 공간 및 레이저 빔 편광 특성의 표면조도 및 표면 굴곡 형성 특성 영향성에 대한 연구가 계속적으로 수행되어야 할 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.

#### 후 기

이 논문은 2004 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2004-042-D00229)

#### 참고문헌

1. Larsson, J. K., "The Mature Technique of Laser Processing in Body Manufacture - Long Term Production Experiences and Recent Development," Proceedings of the LANE 2001, pp. 55-74, 2001.
2. Geiger, M., "Manufacturing Science-Driving Force for Innovation," Advanced Technology of Plasticity



- 2002, Vol. 1, pp. 17-30, 2002.
3. Ready, J. F., "Industrial Applications of Lasers," Academic Pres, San Diego CA U.S.A., pp. 315-417, 1997.
  4. Caristan, C. L., "Laser Cutting ; Guide for Manufacturing," Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan U.S.A., pp. 3-44, 2004.
  5. Wollermann-Windgasse, R. and Schinzel, C., "Laser Technology in Manufacturing-State of the Art at the Beginning of the 21<sup>st</sup> Century," Proceedings of the LANE 2001, pp. 87 -102, 2001.
  6. Abdel Ghany, K. and Newishy, M., "Cutting of 1.2 mm Thick Austenitic Stainless Steel Sheet using Pulsed and CW Nd:YAG Laser," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 168, pp. 438-447, 2005.
  7. Ahn, D. G., Kim, M. S., Lee, S. H., Park, H. J. and Yoo, Y. T., "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 Korea Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 7, pp. 19-26, 2005.
  8. Pietro, P. D. and Yao, Y. L., "A New Technique to Characterize and Predict Laser Cut Striations," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 35, pp. 993-1002, 1995.
  9. King, T. G., "Laser-Cut Mild Steel-Factors Affecting Edge Quality," International Journal of Wear, Vol. 109, pp. 135-144, 1986.
  10. Olsen, F. O., "Cutting Front Formation in Laser Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 215-218, 1989.
  11. Pietro, P. D. and Yao, Y. L., "An Investigation into Characterizing and Optimizing Laser Cutting Quality-A Review," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, pp. 225-243, 1994.
  12. Chen, K., Yao, Y. L. and Modi, V., "Numerical Simulation of Oxidation Effects in the Laser Cutting Process," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 835-842, 1999.
  13. Schuocker, D., "Dynamic Phenomena in Laser Cutting and Cut Quality," Journal of Applied Physics, Vol. 40, pp. 9-14, 1986.
  14. Arata, Y., Maruo, H., Miyamoto, I. and Takeuchi, S., "Dynamic Behavior in Laser Gas Cutting of Mild Steel," Transaction of JWRI, Vol. 8, No. 2, pp. 15-26, 1979.
  15. Ivarsson, A., Powell, J., Kamalu, J. and Magnusson, C., "The Oxidation Dynamics of Laser Cutting of Mild Steel and the Generation of Striations on the Cut Edge," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 40, pp. 359-374, 1994.
  16. Lee, M. W. and Lim, L., "An Analytical Model for Striation Formation in Laser Cutting," Applied Surface Science, Vol. 247, pp. 277-284, 2005.
  17. Karatas, C., Keles, O., Uslan, I. and Usta, Y., "Laser Cutting of Steel Sheets : Influence of Workpiece Thickness and Beam Waist Position on Kerf Size and Stria Formation," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 172, pp. 22-29, 2006.
  18. Lim, S. H., Lee, C. M. and Chung, W. J., "A Study on the Optimal Cutting Condition of a High Speed Feeding Type Laser Cutting Machine by using Taguchi Method," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 7, No. 1, pp. 18 -23, 2006.
  19. Han, E. K., Park, T. W., Lee, B. S., Lee, M. H. and Lim, H. S., "The Effects on Cutting Performance by Machining Parameters of Nd:YAG Laser," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 1-12, 1992.
  20. <http://www.trumpf.com>