

## 저탄소 강판의 레이저 절단에서 자동 초점거리 추적이 절단 품질에 미치는 영향

안동규\*, 변경원<sup>+</sup>, 유영태<sup>++</sup>

(논문접수일 2007. 5. 2, 심사완료일 2007. 6. 21)

### 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

Dong-Gyu Ahn\*, Kyung-Won Byun<sup>+</sup>, Young-Tae Yoo<sup>++</sup>

#### Abstract

The objective of this research work is to investigate into effects of an auto tracking of the focal distance on the quality of the cut part in the cutting of a low carbon sheet using a high-power CW Nd:YAG laser. An auto-tracking system with a capacitance based distance control loop has been employed to perform a real control of the focal distance. In order to examine the influence of the auto-tracking of a focal distance on the optimum focal distance, the kerfwidth, surface roughness and the formation of the cut section, several linear cutting tests have been carried out using the auto-tracking system. The results of experiments have been shown that the optimum focal distance is 0.9mm. In addition, it has been shown that the variation of kerfwidth and the surface roughness of the cut part with control of the focal distance are reduced 40-80% and 30-55% in comparison with those of the cut part without tracking of the focal distance. From the results of the experiments, it has been found that the real time tracking of the focal distance can improve the part quality.

**Key Words** : Laser cutting(레이저 절단), Low carbon sheet(저탄소 강판), Focal distance(초점 거리), Auto-tracking system(자동추적 장치), Kerfwidth(절단폭), Surface roughness(표면 조도)

\* 조선대학교 기계공학과 (smart@mail.chosun.ac.kr)

주소: 501-743 광주광역시 동구 서석동 375번지

+ 조선대학교 일반대학원 기계공학과

++ 조선대학교 메카트로닉스공학과

## 1. 서론

레이저가공은 높은 에너지 밀도를 가지는 고출력 열원으로 고속가공이 가능하므로 가공재료에 열영향부 및 가공 후 열변형을 적게 발생시켜 자동차/선박/전자산업 등 고정밀 절단 및 용접이 필요한 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 레이저를 이용한 박판절단은 레이저의 초점크기 내에 고출력의 에너지가 밀집되고, 고속으로 절단하므로 레이저의 열에 의한 가공재료의 열전달 반경이 적고, 이에 따라 가공 후 열변형이 최소화되는 정밀 제품 절단이 가능하다.

그러므로 열원을 이용한 비접촉식 박판재 절단이 요구되는 경우 산소절단, 플라즈마 절단에 비하여 레이저 절단은 정밀절단이 가능한 장점을 가지고 있다<sup>(4,5)</sup>. 현재, 산업적으로 폭넓게 사용되는 있는 레이저 절단공정은 연속파형 특징과 10.6 $\mu\text{m}$ 의 파장대를가지는 CO<sub>2</sub> 레이저 절단 공정이다.

Nd:YAG 레이저는 고체 레이저로서 레이저의 안정성이 높고 고출력을 얻을 수 있으며, 1.06 $\mu\text{m}$ 의 파장대를 가지고 있어 CO<sub>2</sub> 레이저 보다 가공물의 빔 반사율이 매우 낮고 작은 영역에 에너지가 집중됨으로써 열영향부가 작아서 제품의 열변형이 작게 일어난다. 특히, 탄소강의 경우 Nd:YAG 레이저가 CO<sub>2</sub> 레이저보다 빔 흡수율이 7배 이상 높아 고효율의 제품 절단이 가능하다<sup>(6)</sup>. 이러한 이유로, 최근 고출력 Nd:YAG 레이저 절단에 대한 학문적/산업적 연구/적용이 활발히 진행되고 있다<sup>(6,7)</sup>.

레이저 가공 공정에서 레이저 출력, 레이저 이송 속력, 보호가스 및 레이저 초점 거리 등 다양한 공정변수가 있다. 특히 레이저 초점거리의 경우 절단 공정 실험을 위하여 초기에 결정하여야 하는 주요변수로서 실제적으로 레이저에서 재료로 전달되는 에너지의 크기와 레이저 빔의 품질/특성을 결정하는 주요 공정변수이다<sup>(8)</sup>. Abdel Ghany 등은 펄스 및 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 1.2mm 두께의 오스테나이트계 스테인리스 금속 박판의 절단에서 초점위치가 절단면의 절단폭(Kerfwidth) 형성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다<sup>(9)</sup>. 또한, 펄스 및 연속파형 Nd:YAG 레이저를 가진 6축 로봇을 이용한 아연 도금 강판 절단시 초점거리가 드로스 높이, 절단폭 및 표면조도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다<sup>(10)</sup>. Karatas 등은 금속판재의 레이저 절단시 레이저 빔허리 위치가 절단폭, 물결무늬 생성, 절단면 후면부의 드로스 형성 및 절단면의 국부 파단에 관한 연구를 수행하였다<sup>(11)</sup>.

실제 레이저 가공 공정에서 시편의 국부적 변형이나 시편의 치구 장착 상태에 의한 미세한 곡률 발생으로 인하여 초

점 거리가 초기 설정 거리와 조금씩 달라지게 된다. 이러한 현상으로 인한 제품 품질 변화에 대처하기 위하여 레이저 가공 공정에 대한 실시간 초점거리 제어에 대한 연구가 많이 수행되고 있다<sup>(12)</sup>. Biermann 등은 Nd:YAG 레이저 절단 및 용접공정에서 커패시터(Capacitor)센서 시스템을 이용한 초점거리를 실시간 제어가 제품 품질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다<sup>(13)</sup>. Haran 등은 Nd:YAG 레이저를 이용한 1mm 강판 용접시 광행차를 이용한 실시간 초점거리 제어 방법이 용접 품질에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다<sup>(14)</sup>.

본 논문에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 저탄소 강판 절단시 커패시터스 기반의 초점거리 자동 추적 시스템을 이용한 실시간 초점 거리 제어가 절단 품질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 실시간 초점 거리 제어를 하지 않은 절단면과 실시간 초점 거리 제어를 수행한 절단면을 비교/분석하여 실시간 초점 거리에 따른 절단면 품질 변화를 분석/고찰하였다.

## 2. 실험 및 분석 방법

### 2.1 실험 방법 및 초점 거리 제어 방법

본 연구에서 사용된 실험 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 본 실험에서는 최대 출력 2.8kW의 연속파형 Nd:YAG 레이저와 동축 노즐을 가지는 절단 가스 분사 장치가 부착된 6 자유도 로봇 절단 시스템을 사용하였다.

레이저는 독일 Trumpf사<sup>(15)</sup>에서 제작된 아크 플래시 램프 펌핑 장치가 부착된 레이저 발전기에서 생성된다. 레이저의 파장은 1,064nm이고, 초점 크기는 0.6mm이며, 빔 공간 모드는 TEM<sub>00</sub> 모드이다. 레이저의 에너지 분포는 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 가진다.

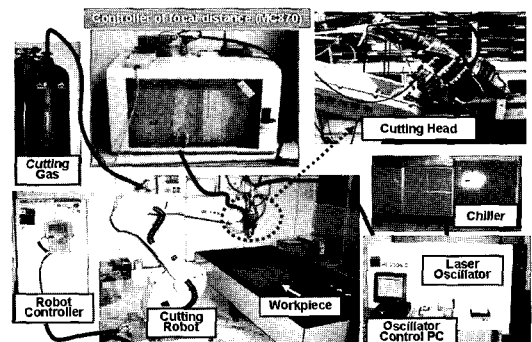


Fig. 1 Experimental set-up

레이저 절단 노즐 끝단부(Nozzle tip)와 시편의 최상면 사이 거리를 초점 거리로 정의하였다. 레이저 절단 실험중 초점거리는 Fig. 1의 자동 초점거리 제어 장치가 포함된 오토트래킹(Auto-tracking) 시스템에 의하여 제어된다. 자동 초점거리 제어 장치는 독일 PRECITEC사<sup>(16)</sup>의 MC870 제어 장치와 제어 신호를 받아 들어 노즐의 급속 수직 이동을 수행하는 선형 이동 장치(Linear driver) LD30C 로 구성된다.

자동 초점거리 제어 방식은 커패시터 센서 시스템 방식으로 Fig. 2와 같이 노즐 끝단부를 양극(+ charge)으로 하고 시편을 음극(- charge)으로 하여 노즐 끝단부와 시편 상부의 초기 초점 거리( $Z_0$ )를 기준으로 제어 장치에서 기준 전압을 생성한다. 그 후, 제어 장치에서 레이저 절단중 초점 거리가 변함( $\Delta Z_0$ )에 따라 발생하는 커패시턴스(Capacitance) 변화에 의한 가공 중 전압이 산출된다. 최종적으로 기준 전압과 가공 전압의 전압차를 계산하고, 이 전압차를 압전 센서(Piezoelectric sensor)가 부착된 선형 이동 장치로 전송하여 전압차 만큼 선형 이동 장치가 수직 방향으로 노즐을 급속 이동하도록 하여 초기 초점 거리를 유지하도록 한다.

본 실험에 사용된 시편은 자동차 및 구조물용으로 많이 사용되고 있는 CSP 1N 저 탄소강판으로 제작하였다. CSP 1N 저 탄소강판의 성분비는 Table 1과 같다.

본 연구에서는 레이저 출력(P), 레이저 절단 속도( $V_r$ ) 및 재료 두께(T)를 공정변수로 선정하여 실험을 수행하였다. 실험은 2단계 방법으로 수행하였다. 1단계로 오토트래킹 시스템을 사용한 레이저 절단을 위한 최적 초점 거리 선정 실험을 수행하였다. 1단계 실험에서 선정된 최적 초점 거리를 이용하여 2단계 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 2와 같이 Ahn 등의 연구에서 제시된 실시간 초점거리 제어를 사용하지 않은 조건에서의 고출력 Nd:YAG 레이저를 이용한 CSP 1N 박판재 절단시 각 출력 및 재료 두께별 최적 절단 속도<sup>(17)</sup>로 선정하였다.

레이저 절단 실험은 시편과 레이저 빔의 각도가 90°를 유지하는 수직 절단 실험을 수행하였다. 시편은 아세톤으로 표면 세척하여 절단 실험 중 레이저 빔이 표면 이물질에 의한 흡수 및 반사의 영향을 받지 않도록 하였다. 실험은 오토트래킹 시스템을 이용한 실시간 초점거리 제어를 수행한 경우와 초점거리 제어 없이 절단한 경우를 각각 실시하여 절단면 품질의 변화를 비교/분석 하였다.

레이저 절단은 Fig. 3과 같은 직선 절단을 수행하였다. 절단 길이는 실험 분석시 초기 레이저 안정화 길이와 절단 최종부가 절단면 품질 평가에 영향을 미치지 않도록 전체 100mm로 선정하여, 60mm 이상의 절단 품질 평가 길이가 확보되도록 하였다.

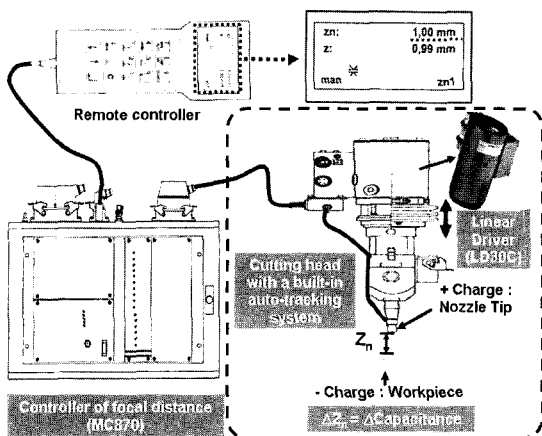


Fig. 2 Schematic of the auto-tracking system for the real-time control of a focal distance

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

Table 2 Experimental condition

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

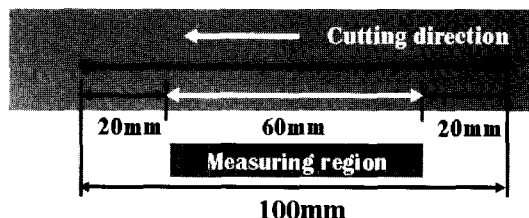


Fig. 3 Measuring region in linear cutting tests

### 2.2 실험 결과 분석 방법

본 연구에서는 실시간 초점거리 제어가 절단면 품질에 미치는 영향성을 분석하기 위하여 절단면의 절단폭 및 표면조도를 측정하였다.

절단폭은 절단면의 상부 절단면과 하부 절단면에 대한 절단폭을 각각 측정하여 이들 절단폭을 평균하여 1회 측정값을 산출하였다. 절단폭은 광학현미경으로 절단면을 촬영한 후, 광학현미경의 거리 측정 기능을 이용하여 측정하였다. 절단폭은 절단 품질 평가 길이내에서 10회를 측정하여 평균값으로 산출하였다.

표면조도는 시편 절단면의 최대높이( $R_{max}$ )와 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )를 절단 품질 평가 길이내에서 5회 측정하여 평균값으로 산출하였다. 단면 측정 부위는 두께 방향으로 중심부를 측정하여 1회 측정값을 산출하였다. 표면조도는 Mitutoty 사의 Sufstest 402를 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 최적 초점 거리 선정

본 실험을 수행하기 전에 사전 실험으로써 최적 초점거리를 선정하기 위한 1단계 실험을 수행하였다. Fig. 4와 5는 1단계 실험 결과이다.

Fig. 4는 초점거리별 절단면 및 절단면 주위의 시편 상태에 미치는 영향을 나타낸다. Fig. 4에서 초점거리( $Z_n$ )가 0.9mm 일때 시편의 절단폭( $\alpha$ )이 미세하나마 작게 나타남과 초점거리 0.8mm일때 보다 시편 바닥면에 드로스(Dross)가 작게 형성됨을 알 수 있었다. 드로스는 용융 소재 중 절단시 완전히 제거되지 못하고 절단면 바닥면에서 부착된 방울형상의 용융 잔존물이다.

Fig. 5에서 초점거리가 0.8mm일 경우 시편의 절단폭이 초점거리가 0.9mm일때 보다 1-6% 정도 크게 형성됨을 알 수 있었다. 또한, 초점거리가 1.0mm일 경우 시편의 절단폭이 초점거리가 0.9mm일때 보다 4-25% 정도 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

이 결과들로부터 실시간 초점거리 추적을 수행할 경우 절단폭이 최소화되고 시편의 후면에 드로스량이 최소화되는 최적의 초점거리가 0.9mm임을 알 수 있었다. 또한, 실시간 초점거리 추적을 수행할 경우 최적 초점거리가 0.9mm로, 실시간 초점거리 추적을 수행하지 않은 경우 최적 초점거리인 1.0mm<sup>(17)</sup>에 비하여 레이저 절단중 0.1mm 정도 노즐 끝단부가 시편쪽으로 가까워짐을 알 수 있었다.

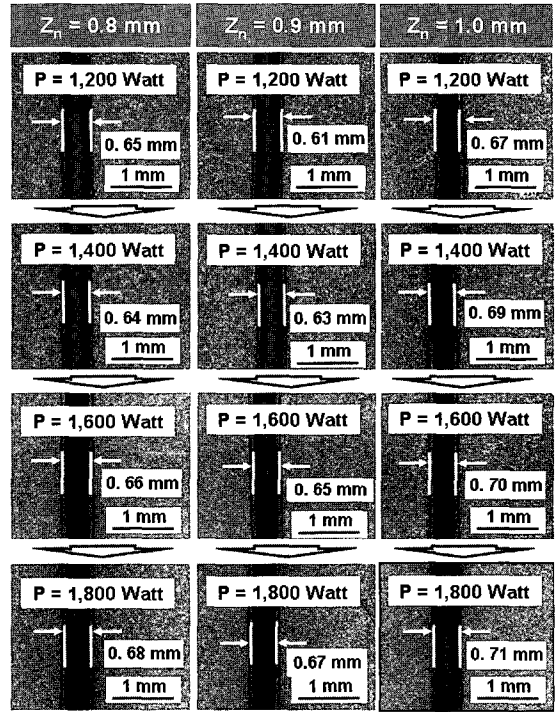


Fig. 4 Influence of a focal distance on the kerfwidth ( $T = 1.6\text{mm}$ )

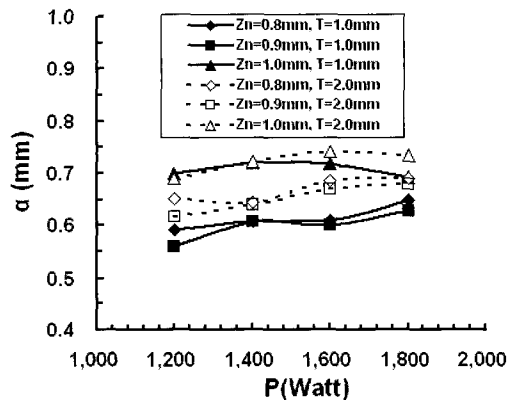


Fig. 5 Influence of a focal distance on kerfwidth

### 3.2 자동 초점거리 추적에 따른 절단폭 및 절단부 형상 변화

1단계 실험결과 취득된 최적 초점거리로 실시간 자동 초점거리 추적을 수행하여 시편 절단 실험을 수행하였다. 또한, 이 결과를 실시간 초점 거리 추적을 수행하지 않은 경우

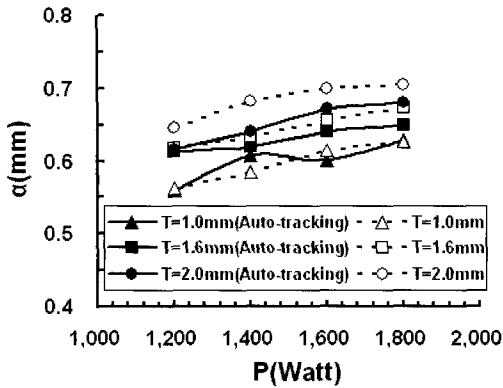


Fig. 6 Variation of kerfwidth according to uto-tracking of the focal distance

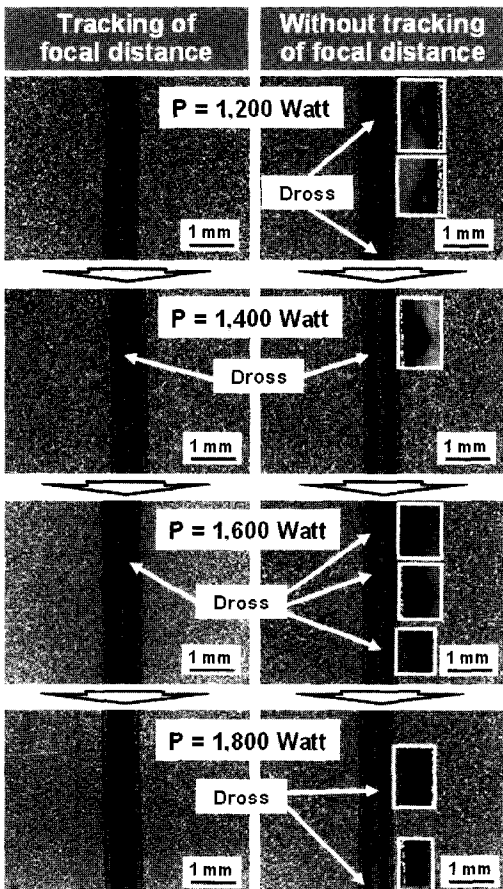


Fig. 7 Variation of the formation of the cut surface according to auto-tracking of a focal distance (T = 1.6mm)

와 비교하기 위하여 실시간 초점 거리 추적을 수행하지 않은 경우에 대한 시편 절단 실험을 수행하였다.

Fig. 6과 7은 실험 결과 얻어진 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우와 실시간 초점거리 추적을 수행하지 않은 경우에 대한 절단폭 변화 및 절단면 상태를 나타낸다.

본 실험결과 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우 두께 1.0mm, 1.6mm 및 2.0mm에 대하여 각각 0.56-0.63mm, 0.61-0.65mm 및 0.62-0.68mm의 절단폭이 형성됨을 알 수 있었다.

Fig. 6을 고찰한 결과 시편 두께가 1.0mm일때는 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우와 실시간 초점거리 추적을 수행하지 않은 경우의 절단폭이 거의 유사함을 알 수 있었다. 그러나 시편 두께가 1.6mm 이상이 될 경우에는 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우가 실시간 초점거리 추적을 수행하지 않은 경우에 비하여 1-6% 정도 작은 절단폭이 형성됨을 알 수 있었다.

이 현상은 재료가 두꺼워질수록 재료의 두께방향 용융량이 많아지고 고 입열량이 요구됨에 따라 절단폭 영역외의 잔존 재료 영역으로 열전달이 많이 발생하여 시편의 변형이 증대되는데, 실시간 초점거리 추적을 수행할 경우 이러한 미세 변형에 적응하는 일정 초점거리가 유지 되어 시편에 균일 에너지 공급이 가능하기 때문에 사료된다.

Fig. 6에서 실시간 초점 거리 추적을 수행한 경우 시편 두께 변화에 대한 절단폭 변화가 0.03-0.07mm 정도로 실시간 초점 거리 추적을 수행하지 않은 경우보다 40-80% 정도 작아짐을 알 수 있었다.

Fig. 7과 같은 시편의 절단면을 고찰한 결과 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우와 실시간 초점 거리 추적을 수행하지 않은 경우의 절단면 형상은 유사하나, 실시간 초점거리를 수행한 경우가 시편 후면에 발생하는 드로스가 적게 발생함을 알 수 있었다.

### 3.3 자동 초점거리 추적에 따른 표면조도 및 절단면 변화

Fig. 8과 9는 실험 결과 얻어진 절단면에 대한 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )와 최대 조도( $R_{max}$ )를 측정된 결과이다.

본 측정 결과 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우 시편 두께 1.0mm, 1.6mm 및 2.0mm에 대하여 0.27-0.37 $\mu$ m, 0.48-0.62 $\mu$ m, 0.58-0.66 $\mu$ m의 중심선 평균 거칠기와 1.46-1.90 $\mu$ m, 2.26-3.01 $\mu$ m, 2.58-3.14 $\mu$ m의 최대 조도가 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 8과 9를 고찰한 결과 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우가 실시간 초점거리 추적을 수행하지 않은 경우에 비하

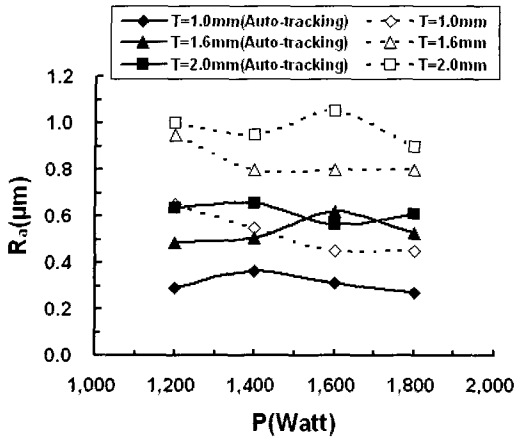


Fig. 8 Influence of the real-time control of the focal distance on the average roughness of mid-line ( $R_a$ )

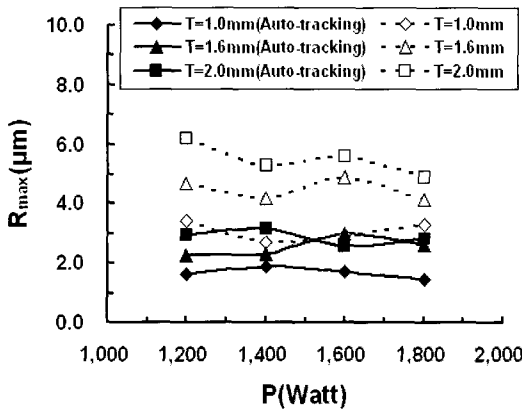


Fig. 9 Influence of the real-time control of the focal distance on the maximum roughness ( $R_{max}$ )

여 중심선 평균 거칠기는 0.14-0.48 $\mu\text{m}$  정도 감소하며, 최대 조도는 0.80-3.26 $\mu\text{m}$  정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 실시간 초점거리 추적을 수행하면 절단면의 거칠기가 중심선 평균 거칠기 측면에서 30-55%, 최대 조도 측면에서 30-54% 향상되어 보다 매끄러운 단면을 가지는 제품을 취득할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우와 실시간 초점거리 추적을 수행하지 않은 경우에 대한 절단면 표면 상태이다. Fig. 10에서 두께가 1mm인 경우에는 두 가지 비교 대상 모두의 절단면 표면 상태는 거의 유사한 형태를 나타낼 수 있었다.

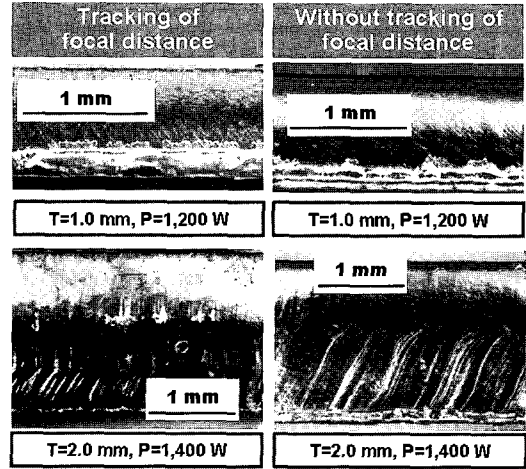


Fig. 10 The formation of the cut section

#### 4. 결론

본 논문에서는 고출력 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 저탄소 강판 절단시 커페시턴스 기반의 초점거리 자동 추적 시스템을 이용한 실시간 초점 거리 추적이 절단 품질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실시간 초점거리 추적을 수행할 경우 절단폭과 시편 후면의 드로스가 최소화되는 최적 초점거리가 0.9mm임을 알 수 있었다.
- (2) 실시간 초점 거리 추적을 수행할 경우 시편의 두께가 두꺼워질수록 절단폭이 감소하며, 시편 두께 변화에 대한 절단폭 변화가 0.03-0.07mm 정도로 실시간 초점 거리 추적을 수행하지 않은 경우보다 40-80% 정도 작아짐을 알 수 있었다. 또한, 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우와 실시간 초점 거리 추적을 수행하지 않은 경우의 절단면 형상은 유사하나, 실시간 초점거리를 수행한 경우가 시편 후면에 발생하는 드로스가 적게 발생함을 알 수 있었다.
- (3) 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우가 실시간 초점거리 추적을 수행하지 않은 경우 모두가 절단면의 형상은 거의 유사하나, 실시간 초점거리 추적을 수행한 경우가 절단면의 거칠기가 중심선 평균 거칠기 측면에서 30-55%, 최대 조도 측면에서 30-54% 향상됨을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) Pollmann, W. and Becker, W., 2001, "Laser-Assisted Manufacturing Technology in the 3rd Millennium," *Proceedings of the LANE 2001*, pp. 39~54.
- (2) Larsson, J. K., 2001, "The Mature Technique of Laser Processing in Body Manufacture Long Term Production Experiences and Recent Developments," *Proceedings of the LANE 2001*, pp. 55~74.
- (3) Geiger, M., 2002, "Manufacturing Science- Driving Force for Innovation," *Advanced Technology of Plasticity 2002*, Vol. 1, pp. 17~30.
- (4) Ready, J. F., 1997, "Industrial Applications of Lasers," Academic Press, San Diego CA U.S.A., pp. 315~417.
- (5) Caristan, C. L., 2004, "Laser Cutting Guide for Manufacturing," *Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn Michigan U.S.A., pp. 3~54.
- (6) Dorn, L., Lee, K. L. and Munasinghe, N., 1994, "Nd:YAG Laser Cutting of Amorphous Alloys," *DVS-Berichte*, Vol. 163, pp. 447~455.
- (7) Naeem, M., Matthews, M. and Ingram, S., 1999, "Parameteric Study of Laser Cutting of Steel Using 1.5 kW Continuous Wave Nd:YAG Laser," *Proceedings of Laser Materials Processing Conference*, pp. 152~158.
- (8) Lemoine, F., Jouvard, J. M., Andrzejewski, H. and Grevey, D. F., 1995, "Influence of the Nature of Optical Fibers in Materials Treatment by Nd:YAG Lasers," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 337~342.
- (9) Abdel Ghany, K. and Newishy, M., 2005, "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.
- (10) Abdel Ghany, K., Abdel Rafea, H. and Newishy, M., 2006, "Using a Nd:YAG Laser and Six Axes Robot to Cut Zinc-Coated Steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, pp. 1111~1117.
- (11) Karatas, C., Keles, O., Uslan, I. and Usta, I., 2006, "Laser Cutting of Steel Sheet : Influence of Work-piece Thickness and Beam Waist Position on Kerf Size and Stria Formation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 22~29.
- (12) Zhang, X., Chen, W., Jiang, P., Liu, C. and Guo, J., 2003, "Double Closed-Loop Control of the Focal Point Position in Laser Beam Welding," *Measurement Science Technology*, Vol. 14, pp. 1938~1943.
- (13) Biermann, S., Topkaya, A. and Jagiella, M., 1992, "Capacitive Clearance Sensor System for High Quality Nd:YAG Laser Cutting and Welding of Sheet Metal," *Proceedings of European Conference on Laser Treatment of Materials*, pp. 51~56.
- (14) Haran, F. M., Hand, D. P., Peters, C. and Jones, J. D. C., 1996, "Real-time Focus Control in Laser Welding," *Measurement Science Technology*, Vol. 7, pp. 1095~1098.
- (15) <http://www.trumpf-laser.com>
- (16) <http://www.precitec.de>
- (17) Ahn, D. G., Kim, M. S., Park, H. J. and Yoo, Y. T., 2006, "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," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 30~38.