

# 다구찌 방법을 이용한 고속 이송방식 레이저 절단기의 최적 절단 조건에 관한 연구

임상현\*, 박동근\*, 이춘만#

## A Study on the Optimal Cutting Condition of High Speed Feeding Type Laser Cutting Machine by Taguchi Method

Sang Heon Lim\*, Dong Keun Park\* and Choon Man Lee#

### ABSTRACT

Cutting by a high speed laser cutting machine is one of most effective technologies to improve productivity. This paper has studied to obtain the cutting characteristics and optimal cutting conditions in a high speed feeding type laser cutting machine by Taguchi method in design of experiments. A  $L_9(3^4)$  orthogonal array is adopted to study the effect of adjustment parameters. The adjustment parameters consist of cutting speed, laser power, laser output duty and assistant gas pressure. And the quality feature is selected as surface roughness of sheet metal. Variance analysis is performed in order to evaluate the effect of adjustment parameters on the quality feature of laser cutting process.

**Key Words** : Laser cutting machine (레이저 절단기), Design of experiments (실험계획법), Optimal cutting condition (최적 절단 조건), Taguchi method (다구찌 법)

### 1. 서론

레이저 절단은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, 용융상태의 재료를 가스제트에 의해 제거하는 레이저 용융절단(Laser fusion cutting), 재료의 승화 또는 증발에 의해 제거하는 레이저 승화 절단(Laser sublimation cutting), 그리고 반응성 가스와의 상호 작용에 의한 반응열을 추가로 이용하는 레이저 연소절단(Laser assisted cutting)으로 대별할 수 있다.<sup>1</sup> 이중 특히 연소절단은 절단 가능 두께와 절단 속도

면에서 여타 방법에 비해 유리하고 경제적이기 때문에 산업계에서 가장 널리 쓰이고 있다.<sup>2-6</sup>

레이저 절단성능에 영향을 미치는 주요 인자에는 레이저 출력, 재료의 특성, 절단가스, 절단 헤드, 레이저 효율 등 여러 가지를 들 수 있다.<sup>7</sup> 일반적으로 레이저 절단에서의 재료 제거의 원리는 그림 1에서 보는 바와 같이 첫째, 레이저에 의해 대상 재료를 용융점 이상으로 가열하고, 둘째, 가스를 이용하여 용융 또는 증발된 재료를 불어내는 두 단계로 이루어진다.<sup>1</sup> 첫째 단계에서는 레이저의 출력 및 효율이 중요한 파라미터로 작용을 한다고 볼 수 있고

접수일: 2004년 1월 13일; 게재승인일: 2004년 4월 9일

\* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

# 창원대학교 기계설계공학과

E-mail cmlee@sarim.changwon.ac.kr Tel. (055) 279-7572

, 두 번째 단계에서는 가스압력이 중요한 작용을 한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 개발된 고속 이송방식 레이저 절단기의 절단성능 평가와 최적 절단 조건을 구하는데 목적이 있다. 따라서 개발된 레이저 절단기의 절단 성능 평가를 위해 실험계획법 중 다구찌법(Taguchi method)을 사용하여 그 실험을 실시하였고 데이터의 형태로 얻어지는 반응치(특성치)에 대해서 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 분산분석(Analysis of variance)을 통해 판단하였다.

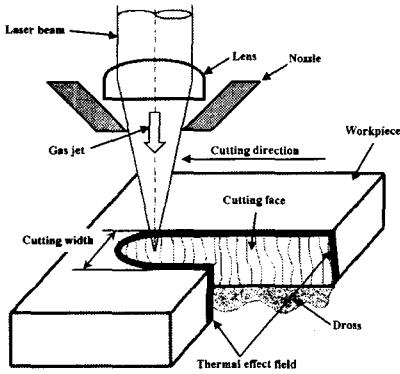


Fig. 1 Principle of laser cutting system

## 2. 이론

### 2.1 다구찌 방법

많은 변수들에 의하여 지배되는 복잡한 현상이 있을 때 각 변수가 전체 현상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다양한 변수의 조합에 대하여 실험을 수행하여야 한다. 또한 변수의 조합은 실험으로부터 얻어지는 분석결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 신중하게 선택되어야 한다. 다구찌 이전의 실험계획법에서는 총 변수조합(Full factorial)에 대한 실험을 선택하였고 변수 조합이 실험결과를 왜곡시키지 않게 하기 위하여 직교 배열표(Orthogonal array)를 이용하였다. 총 변수조합은 그 숫자가 매우 많게 되어 실험의 횟수가 방대하게 된다. 이러한 문제에 대하여 다구찌는 직교 배열표를 이용해서 각 변수의 영향을 분석하는 방법을 제안하였다. 이 방법에 따르면 총 변수조합에 비하여 현저히 감소된 실험만으로 각 변수의 영향을 확인할 수 있게 되었

다. 또한 변수들을 현실적으로 제어가 가능한 제어 변수(Control factor)와 제어가 어려운 잡음변수(Noise factor)로 구분하여 최적 제어변수의 조합을 찾는 방법을 제안하였다. 이는 복잡한 통계이론을 통하여 잡음변수의 영향을 차단하고자 하는 종래의 실험계획법에 비하여 훨씬 더 이해하기 쉽고 현실적인 방안으로 받아들여지고 있으며 강인 설계(Robust design)의 기본적인 수단을 이루고 있다. 강인 설계는 제품의 사용 환경, 작업자의 숙련도, 소비자의 수준 등과 같은 잡음변수의 영향 하에서 생산 및 소비 비용이 최소화된 제품을 최단 시간에 시장에 공급하는 것을 목적으로 한다. 여기서 소비 비용은 제품이 완벽하지 못하여 사용과정에서 소비자가 추가로 부담해야 하는 제반 비용을 말한다. 다구찌법은 제품의 개발 초기 단계에서 각 설계변수의 영향을 신속하게 파악하고 발생 가능한 문제를 예방하는 수단을 제공하므로 강인 설계의 유력한 수단이 된다.

또한 다구찌 방법의 강건 설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 SN비(Signal to noise ratio)를 사용한다. SN비는 신호 대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호입력의 힘과 잡음의 힘의 비율로서 나타낸다. 즉 각각의 조절인자의 SN비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 잡음에 대하여 강건해진다.

SN비는 목적함수, 즉 특성치(Characteristic value)에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(Normal is best), 망소(Lower is better), 망대(Higher is better)특성으로 나누어진다. 본 연구에서는 특성치를 절단면의 표면 거칠기로 선정하여 표면 거칠기의 값이 작을수록 좋은 망소 특성을 선정하였다. 망소 특성의 SN비는 다음 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

위 식에서  $n$ 은 측정값의 수를 나타내고  $y_i$ 는 측정된 특성값을 나타내며 SN값의 단위는 데시벨(dB)이다.<sup>8</sup>

## 2.2 분산분석

실험계획법에서 많이 이용되는 데이터의 분석 방법으로는 분산분석, 상관분석, 회귀분석 등이 있으나 본 연구에서는 분산분석을 사용하였다.

분산분석은 실험계획법에서 가장 많이 이용되는 방법으로, 실험에서 얻은 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인별의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제곱평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이란 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이라 할 수 있다.

만약 어떤 특성치에 대하여 요인으로서 A, B, C 및 오차(E)가 있을 경우, 각각의 변동 즉, 제곱합을 각각  $S_A, S_B, S_C, S_E$  라 하면, 이들의 총변동  $S_T$ 는 다음 식이 성립한다.

$$S_T = S_A + S_B + S_C + S_E \quad (2)$$

오차변동  $S_E$ 에 비하여  $S_A, S_B, S_C$ 가 각각 상대적으로 어느 정도 큰가를 비교하여 A, B, C가 각각 얼마나 큰 영향을 주는 요인인가 아닌가를 결정하는 것이다.

요인 A에 의하여 발생하는 변동 즉 제곱합은 뚜렷한 이유에 의한 것이나 오차에 의한 변동은 아직 원인이 규명되지 않은 부분이라고 할 경우 이들의 상관관계에서 통계적으로 유의한 영향의 정도는 다음과 같이 구할 수 있다. 이들의 변동 즉 제곱합을 각각  $S_A, S_B$ 로 표시하고 이와 관련된 자유도를 각각  $\phi_A, \phi_E$ 로 나타내면  $S_A/\phi_A$ 는 A의 제곱평균으로  $V_A$ 로 놓고,  $S_E/\phi_E$ 는 E의 오차분산으로  $V_E$ 로 놓으면 이들 값의 비율

$$F_0 = \frac{V_A}{V_E} \quad (3)$$

가 크면 요인 A가 오차요인에 비해 통계적으로 유의한 영향을 준다고 한다.<sup>8)</sup>

## 3. 실험

### 3.1 실험 장치 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 레이저 가공을 할 때 가장 많이 사용되어지고 있는 SS41 강판을 이용하였다. 시험편의 규격은 60×30 mm이다. 그리고 강판의 두께는 2 mm, 3 mm 두 종류를 사용하여 실험하였다. 이렇게 두께를 두 종류만 선정한 이유는 개발된 레이저 절단기는 4 kW의 출력을 가지므로 20 mm 까지 충분히 절단이 가능하나 산업현장에서 가장 많이 사용하는 두께를 선정함으로써 본 연구에서 얻어진 결과를 현장에 적용할 수 있게 하기 위함이다. Fig. 2는 개발되어진 레이저 절단기를 이용

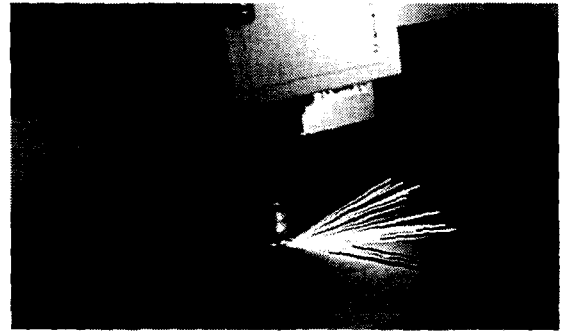


Fig. 2 Laser cutting process

하여 절단 실험을 하고 있는 모습을 나타내고 있고, 절단 성능을 측정하기 위한 조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Cutting conditions

	Condition 1	Condition 2
Cutting speed [mm/s]	3200	2500
Power [W]	2300	2100
Duty [%]	85	85
Gas pressure [N/m <sup>2</sup> ]	58839.9	68648.4

Table 1의 조건을 가지고서 절단을 실시한 후 표면 상태를 측정하기 위하여 촉침식 표면 조도계(Surfest SV-600, Mitutoyo)를 이용하였다. 데이터의 신뢰를 위해 5번의 절단을 실시하였고 각각 평균을 구하였다. 그 결과는 다음 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보여지는 바와 같이 각 절단 조건에 따라 그 표면 거칠기가 다르게 나타남을 알 수 있다. 이에 실험을 통해 각 절단 조건을 변수로 삼아 최

적 절단 조건을 구할 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Results of cutting conditions

Thickness	Results [ $\mu\text{m}$ ]	
	Condition 1	Condition 2
2 mm	2.914	3.125
3 mm	3.268	3.002

### 3.2 실험 방법

본 연구에서는 실험계획법 중에서 다구찌법을 적용하여 절단 성능을 평가하였고, 최적절단조건을 구하였다. 본 연구에서는 개발된 레이저 절단기를 이용하여 절단속도, 레이저의 출력, 효율, 가스압 등을 인자로 설정하였으며 각각의 경우에 대해서 등 간격으로 수준을 배치하였다. 이렇게 선정된 인자와 수준을 Table 3에 나타내었다. 표면거칠기에 영향을 미친다고 생각되는 인자와 수준들을  $L_9(3^4)$ 의 직교 배열표를 이용하여 배치하였고 이를 Table 4에 나타내었다. 직교 배열표에 의한 가공 실험을 2회 실시하여 각 절단 시편의 중심선 평균 거칠기 ( $R_a$ )를 측정된 후 상용 프로그램인 MINITAB을 이용하여 SN비를 계산하였고, 분산 분석을 실시한 후 최적 절단 조건을 찾아내었다.<sup>9</sup>

Table 3 Factors and levels used in the experiment

Sign	Factor	Unit	Level		
			1	2	3
A	Cutting speed	mm/min	2000	2750	3500
B	Power	W	2000	2750	3500
C	Duty	%	80	90	100
D	Gas pressure	$\text{N/m}^2$	39227.6	68648.4	98069.1

Table 4 Orthogonal array table for  $L_9(3^4)$

Experiment No.	Factor			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
Sign	A	B	C	D

### 4. 실험결과 및 분석

Fig. 3은 SS41, 2mm 강판을 절단했을 때의 표면 거칠기( $R_a$ )의 평균값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 MINITAB software를 이용하여 SN비를 계산하여 Table 5에 나타내었다.

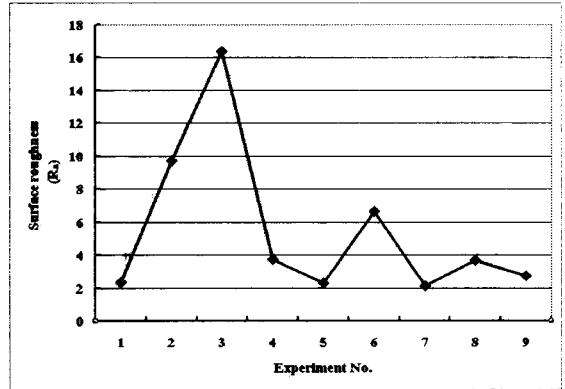


Fig. 3 Variation of surface roughness for experiment number (SS41, 2mm)

Table 5 SN ratios (SS41, 2mm)

Experiment No.	Surface roughness ( $R_a$ )		SN ratio
	1	2	
1	2.444	2.244	-7.3992
2	9.842	9.638	-19.7712
3	16.277	16.423	-24.2704
4	3.73	3.738	-11.4435
5	2.293	2.243	-7.1129
6	6.641	6.629	-16.4368
7	3.001	1.181	-6.4071
8	3.577	3.781	-11.3146
9	2.631	2.831	-8.7264

Table 6은 각 수준에 대한 SN비를 나타내고 있으며 Fig. 4에 그래프로 표시하였다.

Table 6 Response table of SN ratios (SS41, 2mm)

Level	A	B	C	D
1	-17.1469	-8.4166	-11.7169	-7.7461
2	-11.6644	-12.7329	-13.3137	-14.205
3	-8.816	-16.4779	-12.5968	-15.6761
Rank	1	2	4	3

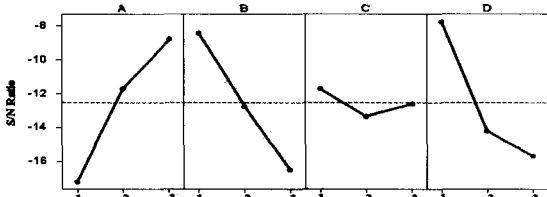


Fig. 4 Plot of SN ratios (SS41, 2mm)

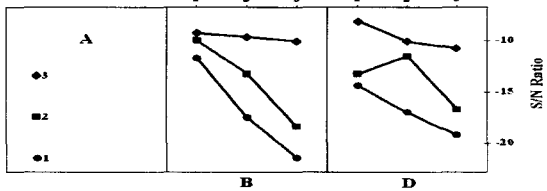


Fig. 5 Plot of interaction of SN ratios (2mm)

Table 6과 Fig. 4에서 알 수 있듯이 표면 거칠기에 기여하는 인자는 절단속도 - 레이저 출력 - 가스 압력 - 효율의 순서로 나타났으며 표면 거칠기의 영향에 C인자인 효율이 미치는 영향이 다른 요인에 비해 매우 작으며 A인자인 절단속도가 다른 인자에 비해 표면 거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요 인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 레이저 광이 모재를 녹이고 지나갈 때 보조가스를 이용하여 불어내어 절단하는 원리를 가지고 있기 때문에 최대한 가스의 영향을 작게 받을 수 있는 것이 바로 이송속도가 증가하면 되기 때문이라 판단된다. 또한 Fig. 5에서 보는 바와 같이 각 변수간의 교호 작용(Interaction)은 없으므로 SN비를 이용하여 최적 조건을 구하는 것은 타당성이 있다 할 수 있다. 이에 Fig. 4로부터 최적 수준을 결정할 수 있는데

Table 7 Present condition and optimal condition (SS41, 2mm)

	Present condition	Optimal condition
Cutting speed [mm/min]	2750	3500
Power [W]	2000	2000
Duty [%]	80	80
Gas Pressure [N/m <sup>2</sup> ]	39227.6	39227.6

A3, B1, C1, D1이 SN비로부터 구할 수 있는 최적 수준이다. 현장에서 사용하고 있는 조건의 수준이 본 연구에서 이용한 수준에 포함되어 있는데 A2, B1, C1, D1이 그것이다. 이것을 Table 7에 상세하게 표현하여 나타내었다. 현재와 최적조건에서의 SN

Table 8 SN ratios from present and optimal condition (SS41, 2mm)

	Present condition	Optimal condition
SN ratio	-1.91665	0.931707

비 추정값을 비교한 결과를 Table 8에 나타내었다. Table 8로부터 최적조건일 때가 현재조건보다 SN 비로 (0.931707) - (-1.91665) = 2.848357 만큼 개선 되었음을 알 수 있다. 이를 금액으로 환산하면  $10^{0.2848357} = 1.926$  배만큼 손실금액이 개선됨을 알 수 있다. 이상과 같이 SN비를 이용한 간편법으로 최적화 된 결과를 도출하였고 분산분석을 통해 앞서 구해진 최적 결과가 맞는지 검증해 보았다. Table 9는 효율을 풀링(Pooling)하여 분산분석한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 풀링이란 오차분산이나 다른 인자들의 분산에 대해 상대적으로 큰 유의성을 나타내지 못하는 인자를 실험상 나타낼 수 있는 오차로 판단하여, 오차 인자로 판단함을 의미하고 옳은 판단인가에 대한 검증은 분산비, 즉 F검정으로 확인한다.

Table 9 ANOVA table for R<sub>a</sub> after pooling

Factor	S	φ	V	F <sub>0</sub>	F(0.1)
A	8.3309	2	4.1655	9.7213*	9.0
B	8.0612	2	4.0306	9.4052	9.0
C	Pooled factor				
D	7.0900	2	3.5450	8.2723	9.0
E	0.6752	2	0.3376		
T	24.1573	8			

\* : 90% confidence level

Fig. 6은 SS41, 3mm 강판을 절단했을 때의 표면

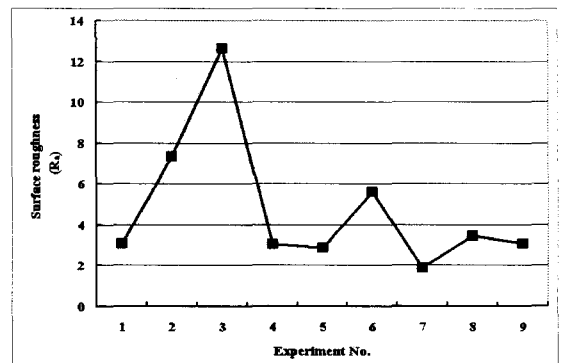


Fig. 6 Variation of surface roughness for experiment number (SS41, 3mm)

거칠기( $R_a$ )의 평균값을 나타낸 것이다. 앞과 동일한 실험 방법 및 분석을 거쳐 다음 결과들을 정리하였다. Fig. 6을 보면 Fig. 3의 절단 성향과 비슷한 결과를 나타내는 것을 보여주고 있다. 이로 인해 앞선 결과값과 비슷하게 나올 것이라는 유추가 가능해진다.

Table 10 SN ratios (SS41, 3mm)

Experiment No.	Surface roughness ( $R_a$ )		SN ratio
	1	2	
1	3.185	2.945	-9.7286
2	7.556	7.136	-17.3210
3	12.54	12.74	-22.0349
4	3.341	2.707	-9.6116
5	2.994	2.752	-9.1667
6	5.466	5.746	-14.9731
7	1.810	1.970	-5.5292
8	3.499	3.397	-10.7513
9	3.011	3.123	-9.7343

Table 11 Response table of SN ratios (SS41, 3mm)

Level	A	B	C	D
1	-16.3615	-8.2898	-11.8177	-9.5432
2	-11.2505	-12.413	-12.2223	-12.6078
3	-8.6716	-15.5808	-12.2436	-14.1326
Rank	1	2	4	3

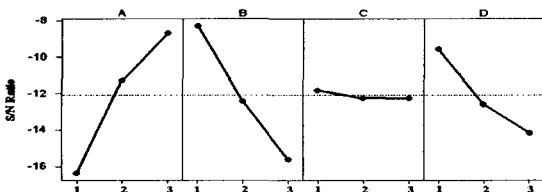


Fig. 7 Plot of SN ratios (SS41, 3mm)

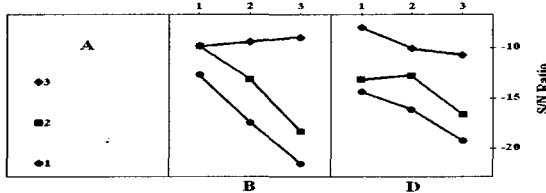


Fig. 8 Plot of interaction of SN ratios (2mm)

앞서 유추한 바와 같이 Table 11과 Fig. 7은 Table 6과 Fig. 4에서 보여 준 결과값과 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에 보이는 바와

같이 교호작용은 거의 존재하지 않으므로 앞의 경우처럼 Fig. 7로부터 최적 수준을 결정할 수 있는데 A3, B1, C1, D1이 SN비로부터 구할 수 있는 최적 수준이다. 현장에서 사용하고 있는 조건의 수준이 본 연구에서 이용한 수준에 포함되어 있는데 A3, B1, C3, D1이 그것이다. 이것을 Table 12에 상세하게 표현하였다.

Table 12 Present condition and optimal condition (SS41, 3mm)

	Present condition	Optimal condition
Cutting speed [mm/min]	3500	3500
Power [W]	2000	2000
Duty [%]	100	80
Gas Pressure [N/m <sup>2</sup> ]	39227.6	39227.6

현재와 최적조건에서의 SN비 추정값을 비교한 결과를 다음 Table 13에 나타내었으며 앞선 방법과 동일하게 계산을 수행하였고 Table 14에 분산분석표를 제시하였다.

계산을 수행한 결과 최적조건일 때가 현재조건보다 SN비로  $(-2.03871) - (-2.44334) = 0.40463$  만큼 개선되었음을 알 수 있다. 이를 금액으로 환산하면  $10^{0.040463} = 1.097$  배만큼 손실금액이 개선됨을 알 수 있다.

Table 13 SN ratios from present and optimal condition (SS41, 3mm)

	Present condition	Optimal condition
SN ratio	-2.44334	-2.03871

Table 14 ANOVA table for  $R_a$  after pooling

Factor	S	$\phi$	V	$F_0$	F(0.1)
A	9.0021	2	4.5011	10.0213*	9.0
B	8.5322	2	4.2661	9.4982	9.0
C	Pooled factor				
D	5.5519	2	2.7760	6.1805	9.0
E	1.3283	2	0.6642		
T	24.4145	8			

\* : 90% confidence level

Fig. 9는 절단면의 형상을 공구 현미경으로 촬영한 결과를 나타내었다. 현재 사용하고 있는 조건과 실험을 통해 구한 최적 절단 조건을 이용하여

절단을 실시하고 그 절단면을 볼 때 육안으로도 최적 절단 조건으로 구한 시편이 더 나은 표면 거칠기를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것을 통해 생산품의 품질 향상이 있을 것을 예측할 수 있다.

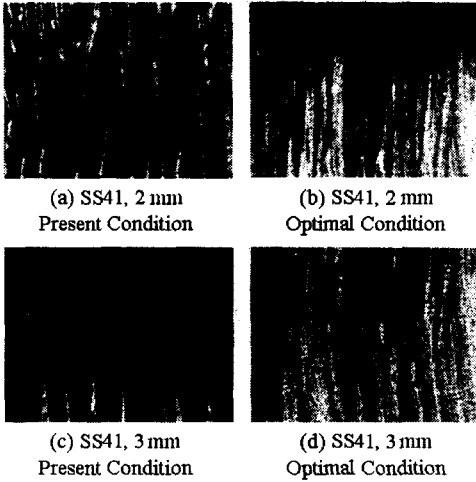


Fig. 9 Shape of cutting surface

### 5. 결론

본 연구에서 수행한 각각의 내용을 정리하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 개발된 레이저 절단기의 절단 성능을 실험을 통해, 절단 조건에 따른 레이저 절단기의 절단 특성을 파악하였고, 실험계획법 중 다구찌법을 적용하여 실험을 수행하였다. 그리고 절단 속도, 레이저의 출력, 효율 및 보조가스의 압력이 표면 거칠기에 미치는 영향을 SN비와 분산분석을 이용하여 분석하였다. 이러한 일련의 과정을 통해 얻어진 결과를 살펴 최적 절단 조건을 구할 수 있었다.
2. 실험 및 분석을 통해 절단속도, Laser의 출력, 보조가스의 압력이 표면 거칠기에 영향을 많이 미친다는 것을 알 수 있었으며, 효율은 그다지 크게 영향을 끼치지 못하는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 최적 조건을 SN비를 이용하여 간편하게 구하여 현장에서 사용하는 방법을 제시하였다.
3. 공구 현미경을 이용하여 절단면을 촬영한 결과, 실험을 통해 얻어진 최적 절단 조건이 현재 사용하고 있는 절단 조건 보다 더 좋은 표면 거

칠기를 생성함을 알 수 있고, 이것으로 인해 생산성의 향상이 있을 것을 예측할 수 있다.

### 후기

본 연구는 2003년도 창원대학교와 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Bang, S. Y. and Han, Y. H., "Nozzle and Gas Jet Flow in Laser Cutting," J. of the KWS, Vol. 12, No. 2, pp. 1-10, 1994.
2. Burton, G. and Frankhouser, L., "Electron Beam Welding," Welding Journal, Welding Research Supplement, October, pp. 401-409, 1959.
3. Luxon, J. T. and Parker, D. E., "Industrial Lasers and their Applications," Prentice Hall, pp. 68-83, 1985.
4. 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.
5. Lee, H. J., Cho, M. Y., Yoo, W. J. and Kim, J. D., "Effect of Assistant Gas Pressure In Laser Cutting of STS304," J. of the KSPE, Vol. 12, No. 3, pp. 15-22, 1995.
6. Chen, S. L., "The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO<sub>2</sub> laser cutting," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 88, pp. 57-66, 1999.
7. Wang, J., Wong, W. C. K., "CO<sub>2</sub> laser cutting of metallic coated sheet steels," J. of Materials Processing Technology, Vol. 95, pp. 164-168, 1999.
8. Lee, S. B. "Introduction to Taguchi Method," Sangjosa, 2000.
9. Lee, S. B. "Application of Taguchi Method Using the MINITAB," ERETEC, pp. 91-171, 2001.