Nd:YAG레이저를 이용한 스텐실 절단공정 II
-레이저의 공정변수가 스텐실 절단특성에 미치는 영향-

Stencil cutting process by Nd:YAG laser II
-Influence of process parameters on cutting characteristics of stencil-

이제훈*, 서정*, 김정오*, 신동식**, 이영문***

J. H. Lee, J. Seo, J. O. Kim, D. S. Shin, Y. M. Lee

*한국기계연구원 레이저기술연구그룹, **경북대학교 대학원 기계공학과
***경북대학교 기계공학부

ABSTRACT

This study deals with the laser cutting of stencil for the PCB. The most important aim of this study is to determine optimal conditions which make good-quality stencil in Nd:YAG laser cutting. We made an experiment according to various variables (power, type of mask, gas pressure, cutting speed, and pulse width) and analyzed the cutting characteristics (surface roughness, kerf width, dross). Each variable has optimal value for good-quality cut edge under fixed condition. And neural network after learning experimental data with a million time iteration could predict surface roughness of cut edge under arbitrary condition approximately.

Keywords :
Nd:YAG laser(Nd:YAG레이저), stencil(스텐실), cut edge(절단면), surface roughness(표면 조도), neural network(신경회로망), dross(드로스), kerf width(절단폭), mask(마스크)

1. 서 론

스텐실(stencil)은 PCB상에 회로를 구축하기 위하여 전기전도성 물질을 도포하는 공정에 필수적으로 사용되어 지는 마스크이다. 일반적으로 스텐실은 스텐레스 박판에 포토리소그라피 공정을 이용하여 패턴을 형성한 후 부식 공정에 의해 재료를 제거하여 제작되어 진다[1]. 그러나 최근

환경문제가 크게 부각됨에 따라 기존의 화학적 제작 공정은 환경 친화적인 공정으로의 대체가 시급히 요구되고 있다. 레이저를 이용한 스텐실 제작 공정은 정밀 절단에 의하여 패턴이 제작되기 때문에 기존의 제작공정과 비교하여 매우 단순하며 환경 친화적인 공정으로 주목받고 있다[2]. 레이저를 이용한 스텐실 제작공정은 기존의 부식 방법과는 달리 레이저 절단에 의하여 패턴이 형성되기 때문에 레이저 가공 시스템에서 구현할 수 있는 최소의 선폭이 매우 중요하며 레이저 빔에 의해서 절단된 절단면의 상태가 전도성 페이스트의 도포 및 수명에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2]. 본 연구에서는 스텐실 제작공정의 주요 변수들이 절단면 표면 조도에 미치는 영향을 분석하였고 최적 절단조건을 구하기 위하여 신경회로망(neural network) 이론을 이용하여 스텐실의 절단 특성을 예측하였다.

2. 실 험

2.1 실험 장치

실험에 사용된 재료는 스텐실 제작용 스텐레스 강판(SS304, 두께 0.15mm)으로 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

시편의 절단형상은 Fig. 1에 나타난 바와 같으며 절단폭(kerf width) 및 절단면의 조도 측정이 용이하도록 빔의 절단경로를 설정하였다.

Fig. 2는 실험에 사용한 레이저 스텐실 가공 시스템으로서 TEM_{00} mode의 Nd:YAG 펄스 레이저를 사용하였으며 광학계는 초점거리가 40mm인 절단헤드를 사용하였다. 또한 레이저 발진기에서 가공부위까지의 빔 이송 거리를 가공헤드의 구동 위치에 무관하도록 일정하게 유지하기 위해서 빔 이송거리 보정장치를 장착하였다[2].

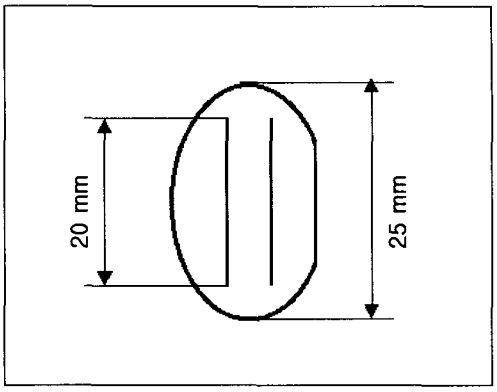


Fig. 1 Geometry and dimensions of workpiece

Fig. 2 Stencil cutting system

레이저 절단공정은 고체, 액체, 기체의 상이 공존하는 과정으로 많은 지배 변수를 가지며 상호간에 영향을 미치는 복잡한 공정 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 변수들이 절단면에 미치는 영향을 규명하기 위하여 주요 공정변수에 따라 순차적인 실험을 수행하였으며 실험 결과에 대한 고찰을 통하여 적정변수를 도출하였다. 주요 공정변수로는 절단가스압(gas pressure), 빔출력(power), 펄스폭(pulse width), 절단속도(cutting speed)

Table 1. Chemical composition of specimen

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
SS304	69.731	0.037	0.883	1.568	0.054	0.025	17.49	0.111	0.114	9.265

및 마스크의 형상(mask type)으로 하였으며 시스템의 안정성을 고려하여 Table 2에 나타난 조건으로 실험하였다.

Table 2. Experimental condition

Parameter	value
Beam mode	TEM00 (Pulse)
Gas Pressure(bar)	2~16
Frequency(Hz)	700
Nozzle gap(mm)	0.1
Mean Output Power(W)	4~32
Pulse width(ms)	0.09~0.17
Cutting speed(m/min)	0.5~2
Mask type	No mask Circular mask Quadrangular mask

여기서 노즐갭(nozzle gap)이란 노즐과 모재 사이의 간격을 말하는 것으로서 노즐의 직경이 0.7mm이고 절단폭 0.1mm 이하인 절단환경에서 가스의 분산을 막고 노즐의 절대압력과 대기압의 비가 1.89보다 클 경우 생기는 MSD(Mach Shock Disk)[3),4)]를 시편 아래에 발생시키기 위하여 0.1mm의 미세노즐갭을 두었다. 빔 출력은 노즐헤드를 통과하기 전의 값이며 빔 조사시 용융금속의 제거 및 산화방지를 위해서 비교적 다른 물질과 반응을 일으키지 않는 질소가스(N_2)를 사용하였고[5)] 가스압은 절단노즐 상단 압력계의 값을 기준으로 하였다. 또한 실험에 사용된 마스크는 가공헤드의 집속렌즈에 입사되는 빔 경로에 설치하였다.

2.2 측정

절단특성은절단면의표면조도(surface roughness), 절단폭 및 드로스(dross)의 양으로 설정하였다. 또한 표면조도(Ra)는 무접촉식 3차원 광학 조도측정기로 측정하였다. 광학식 조도측정은 두 광속이 중첩되었을 때 밝기가 증감되는 광간섭현상을 이용하여 입사광속이 기준광속과 측정광속으로 분할되어 각각 측정면과 기준면에 입사된후 두광속이 다시 두면에서 반사되어 모아지게 되고 광경로차에 의해 발생한 간섭무늬를 영상처리 및 해석기법에 의해 재현된 3차원 형상으로부터 측정이 이루어진다6). 절단폭은 광학현미경으로 측정하였고 드로스는 정성적인 기준에 의해 5등급으로 나누어 판단하였으며 1등급이 드로스가 가장 적은 등급을 나타낸다. 절단면의 표면 상태는 SEM (Scanning Electron Microscope) 사진으로 분석하였다.

2.3 신경회로망에 의한 표면조도 예측

신경회로망 모델은 스텐실 제작과 같이 입력변수가 많고 비선형일경우에는 신경회로망 모델이 강력한 학습능력을 가지고 있어 효과적으로 이용될 수 있다.

실험을 통해 측정된 값은 신경회로망 학습이론(neural network)에 의거하여 표면조도를 학습하였으며 임의의 입력조건에 대한 예측값과 실험값을 비교해 보았다. 학습을 위한 입력값(input)으로 출력, 가스압, 펄스폭 및 절단속도를 설정하였으며 표면 조도를 목표값(target)으로 설정하였다. 신경회로망 이론에 사용된 학습법은 오차역전파(Error Back Propagation) 학습법으로서 알고리즘은 Fig. 3에 나타낸 바와 같으며 학습조건은 Table 3에 나타내었다[1),7)~10)].

Table 3. Learning condition

Parameter	Value
Number of hidden layer	2
Weight	Wkl(20×6)) Wjk(17×21) Wij(1×18)
Learning rate (initial,final)	(0.2, 0.05)
Momentum (initial,final)	(0.1, 0.05)
Number of learning	1000000

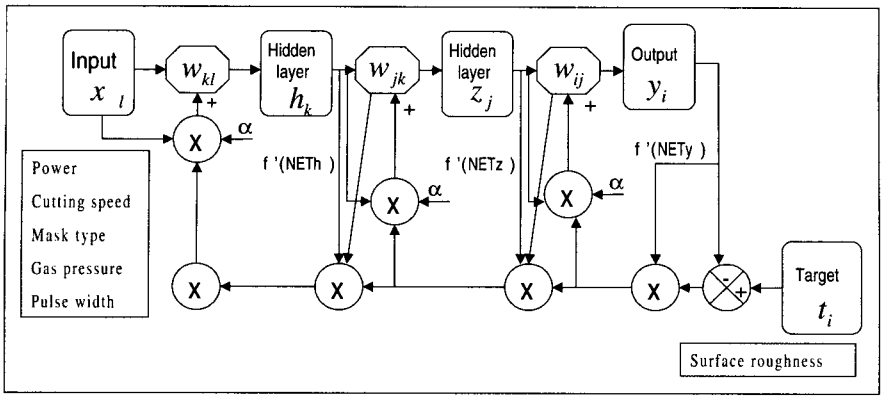


Fig. 3 Algorithm of E.B.P(Error Back-propagation)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 출력에 따른 절단특성

출력에 따른 절단특성을 규명하기 위해 출력을 4W에서 32W 까지 변화시키면서 실험하였다. Fig. 4는 출력에 따른 절단면의 전자현미경 사진으로서 저출력 영역에서는 용융금속 및 산화물의 높은 점도(viscosity)로 인하여 절단하부로의 원활한 분출이 이루어지지 않았으며 용융물의 재응고로 인하여 완전한 절단이 이루어지지 않은 부분이 발생하였다. 이는 저출력으로 인하여 용융폭이 매우 좁게 형성되고 절단 가스가 용융물을 제거하기에 충분한 가스압을 형성하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 이 경우 Fig. 4a)에서 보여 주는 바와 같이 일정한 줄 무늬(striation)를 형성하지 못하고 절단면에 미분출된 용융금속 및 산화물이 발견되었다. 반면 Fig. 4(d)에서 보는 바와 같이 고출력 영역에서는 용융면적이 넓어지면서 용융금속이 전부 제거되지 않고 하부에 재응고되는 현상이 발생하였고 빔 가장자리부의 출력밀도가 증가하여 저출력에서의 열영향부 영역이 용융되어 절단부 상단의 용융체적이 넓어졌다. Fig. 5는 출력에 따른 표면조도를 측정한 결과로서 식(1)과 같이 정의 되는 중심선 평균 조도를 사용하였다.

$$Ra = \frac{1}{L}\int_0^L |f(x)|dx \fallingdotseq \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|f(x_i)| \quad (1)$$

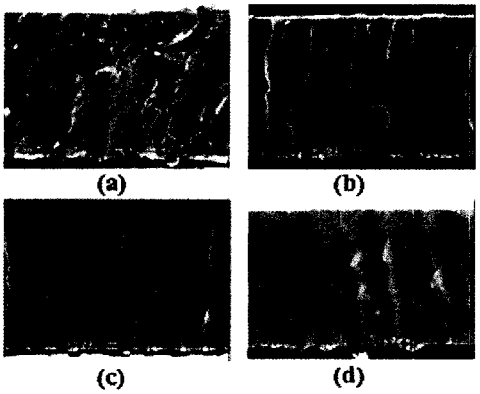


Fig. 4 SEM photos of cut edge with laser power (a)4W,(b)12W,(c)24W and (d)32W

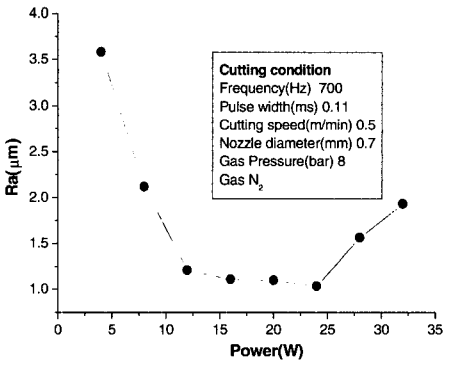


Fig. 5 Cut edge roughness vs laser power

24W의 조건에서 표면조도(Ra)가 1.03㎛로서 가장 낮은 값을 나타내었으며 절단면에는 줄무늬의 패턴이 일정하게 형성되었다. 출력이 증가할 수록 줄무늬 패턴이 커지면서 절단부의 상단에 용융물이 응고되는 현상이 나타났다. Fig. 6은 출력에 따른 절단폭의 변화를 나타낸 것으로 출력이 증가함에 따라 절단폭이 넓어지고 있다. 출력 32W에서의 절단폭은 출력 4W일 때의 절단폭 보다 약 2배 커졌으며 절단면의 조도가 최적인 출력 24W에서는 98㎛ 절단폭을 나타내었다.

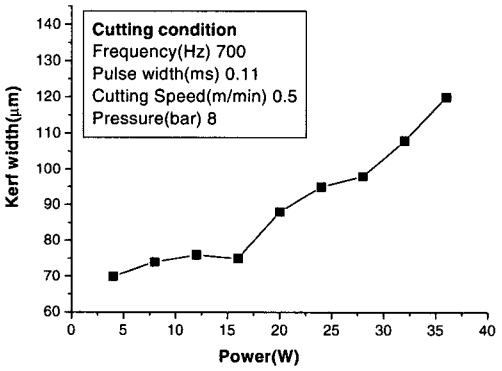


Fig. 6 Kerf width vs laser power

3.2 마스크 형상에 따른 절단특성

레이저 빔의 가장자리 부분이 절단면의 형상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 가공헤드의 집광렌즈 입사빔 광로에 Fig. 7에 나타낸 두 종류의 마스크를 사용하여 절단실험을 수행하였다. 이때 집광렌즈에 입사되는 빔의 직경은 22mm이고 각 마스크에 의해 제거된 부분은 입사 빔의 가장자리로서 전체 단면적의 33%이다. Fig. 8은 마스크에 의한 빔 외곽부의 차단원리를 나타낸 것이다.

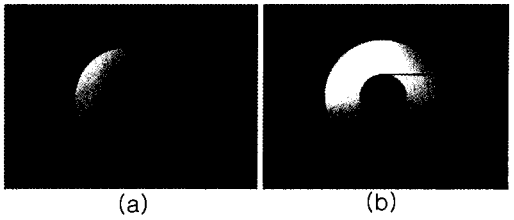


Fig. 7 Photos of (a) quadrangular and (b)circular mask types

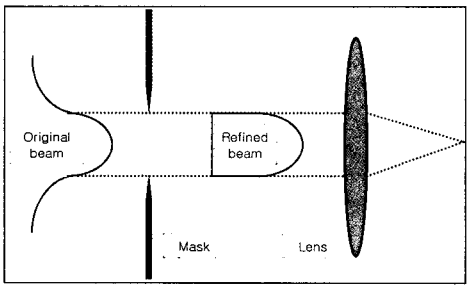


Fig. 8 Principle of refining by mask

Fig. 9는 마스크의 종류에 따른 절단면의 형상을 보여 주고 있다. Fig. 9(a)는 마스크를 사용하지 않은 상태의 가공 형상으로서 마스크를 사용한 Fig. 9(b)나 Fig. 9(c) 보다 줄무늬가 불규칙하게 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 9(a)의 경우 절단면의 상단부가 가장자리 빔의 영향으로 펄스 주기에 따른 규칙적인 레이스 형상이 나타나고 있다.

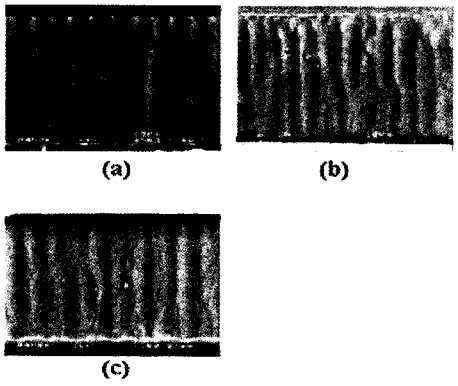


Fig. 9 SEM Photos of cut-edge with (a) No mask, (b) Quadrangular mask and (c) Circular mask

Fig. 10은 마스크 종류에 따른 표면 조도 나타낸 것으로서 사각 마스크가 절단시편의 직선구간에서 중심선 평균 조도(Ra)가 0.86㎛로서 가장 우수함을 나타내는 반면, 곡선(R=25mm) 구간에서는 원형 마스크를 사용한 경우 보다 표면이 거칠게 나타나고 있다. 이는 마스크 형상에 의한 가장자리부의 펄스 중첩도가 저하된 것에 기인한 것으로 예측할 수 있다.

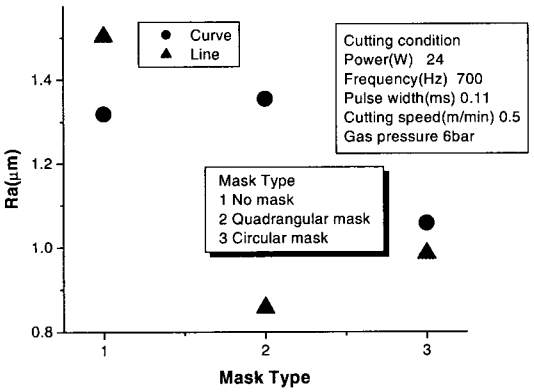


Fig. 10 Cut edge roughness for different mask types

Fig. 11은 마스크를 사용했을 경우 절단폭이 줄어드는 현상을 나타낸다. 이는 레이저빔 외곽부의 잔 빔을 차단함으로서 에너지 밀도구배의 향상과 모재에서의 빔 출력 저하에 의한 영향이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 마스크를 통과한 빔의 출력은 18W로서 이때 절단폭은 Fig. 6과 같이 마스크가 없는 상황에서의 동일 출력에 따른 절단폭과는 구별이 된다. Fig. 10에서 보는 바와 Table 2 같이 사각마스크의 경우에는 곡면 절단시 표면조도가 급격히 저하되기 때문에 다양한 패턴을 절단해야 하는 유연성을 고려하여 호환성이 뛰어난 원형마스크를 선정하여 실험하였다.

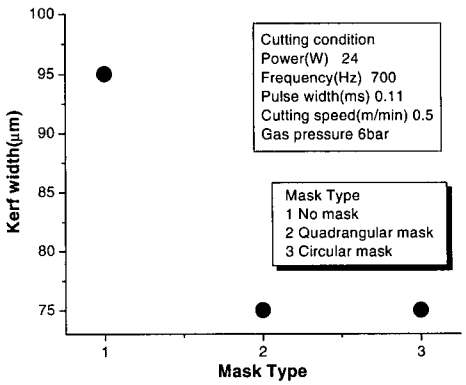


Fig. 11 Kerf width for different mask types

3.3 가스압에 따른 절단특성

가스압을 2bar에서 16bar 까지 변화시키면서 가스압이 절단면의 품질에 미치는 영향을 관찰한 결과 Fig. 12와 같이 가스압에 따른 절단면의 SEM 사진을 얻을수 있었다. Fig. 12(a)의 경우 절단 가스의 압이 충분하지 못하여 절단면 하단부에 드로스가 불규칙하게 형성됨을 알 수 있으며 가스의 압력이 증가함에 따라 절단면의 줄무늬가 규칙적으로 형성되고 있으나 가스압 16bar 에서는 줄무늬가 다시 불규칙해지고 있음을 알 수 있다.

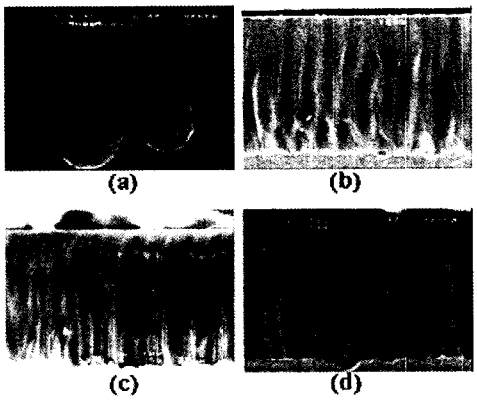


Fig. 12 SEM photos of cut edge with gas pressure (a)2bar,(b)6bar,(c)8bar and (d)16bar

Fig. 13은 가스압에 따른 절단면의 표면조도로서 가스압의 상승에 따라 용융물에 닿는 가스의 모멘텀에 의한 견인력의 상승으로[5] 용융모재의 제거가 원활히 이루어 졌음을 알 수 있으며 12bar에서 0.64μm로서 가장 낮은 표면조도를 나타내었다.

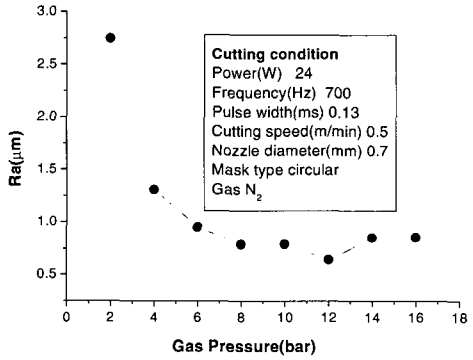


Fig. 13 Cut edge roughness vs gas pressure

Fig. 14는 가스압에 따른 절단폭의 변화를 나타내고 있다. 가스압이 상승함에 따라 절단폭이 줄어들며 이는 고압의 가스 하에서 용융물의 제거가 빠르고 절단폭보다 현저히 큰 노즐직경에서 나오는 가스에 의한 모재의 대류 열전달에 의해 냉각속도가 증가하여 용융부와 열영향부가 감소하여 생기는 현상으로 판단된다. 그러나 8bar 이상의 가스압에서는 표면조도 뿐만 아니라 절단폭에서도 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없었다.

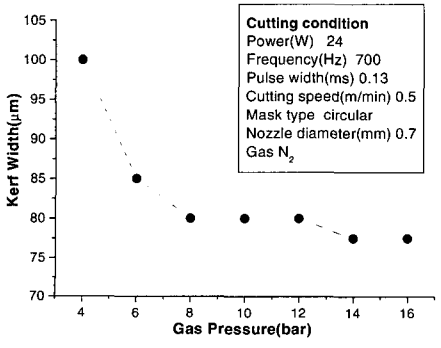


Fig. 14 Kerf width vs gas pressure

Fig. 15는 가스압에 따른 드로스 상태를 나타내고 있으며 가스압이 증가함에 따라 드로스가 현저히 감소하다가 8bar 이상에서는 드로스의 양이 일정하였으며 14bar 이상에서는 절단면과 절단면 하단에 형성된 난류(turbulence)[11]의 영향으로 드로스의 발생량이 증가하였다. 이를 고려하여 본 실험에서는 적정 가스압을 8bar로 설정한 후 실험을 수행하였다.

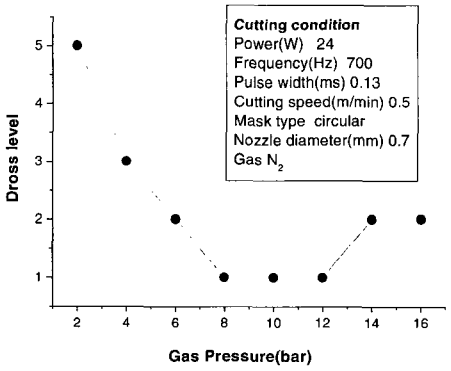


Fig. 15 Dross level vs gas pressure

3.4 절단속도에 따른 절단특성

절단속도에 따른 절단특성을 평가하기 위해 절단속도를 0.5m/min에서 2.0m/min까지 변경해가며 실험을 하였다. 절단속도가 느린 경우 온도구배가 완만하여 절단부의 용융부가 넓어짐으로 인해 가스의 운동량에 의해 제거되는 범위 또한 커지며 절단속도가 과도하게 빠르면 용융금속이 절단부에서 제거된 흔적이 뚜렷이 남게되어 결국 표면조도가 저하되는 결과를 초래한다. 즉, 온도구배가 너무 급격하게 형성되어 응고가 그만큼 빠르게 진행되어 표면장력으로 인한 보상이 이루어지지 않게 된다[12].

Fig. 16은 절단속도에 따른 절단면을 나타낸 것으로 이를 반영해주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 속도가 증가할수록 펄스간 간격이 증가하여 표면 조도가 커지게 되며 줄무늬의 방향도

사선으로 기울기가 증가하고 있다. 이러한 현상에 따른 표면조도를 Fig. 17에서 보여주고 있으며 실험범위내의 조건에서는 저속일수록 표면조도가 우수함을 알 수 있고 0.5m/min에서 표면조도는 0.65㎛이었다.

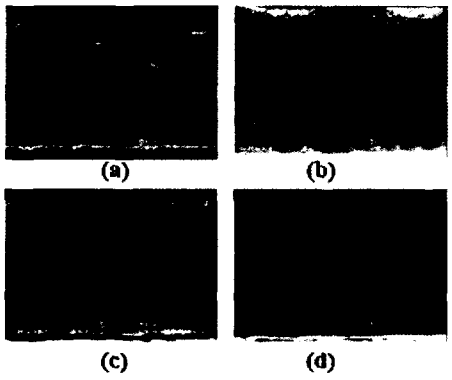


Fig. 16 SEM photos of cut edge with cutting speed (a)0.5m/min,(b)1.0m/min, (c)1.5m/min and (d)2.0m/min

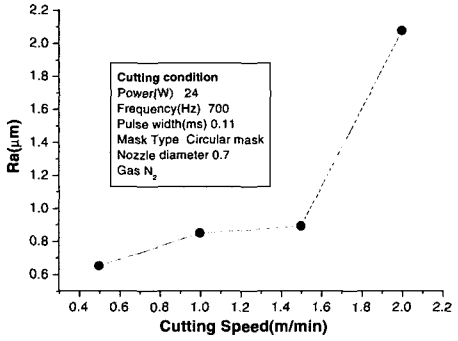


Fig. 17 Cut edge roughness vs cutting speed

Fig. 18은 절단속도에 따른 절단폭과 중첩율의 변화를 나타내고 있으며 절단 속도가 증가함에 따라 중첩율(overlap ratio)이 떨어지며 절단폭도 줄어들었다. 이는 속도가 증가함에 따라 중첩도가 50% 이하로 낮아지면서 펄스의 원형 형상이 절단면에 더욱 뚜렷이 나타남으로 인하여 표면조도가 저하되었다.

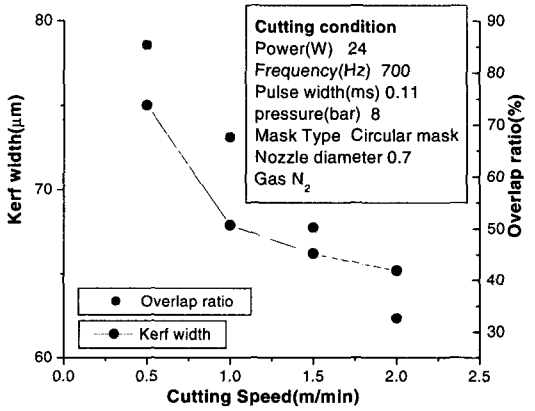


Fig. 18 Kerf width and Overlap ratio vs cutting speed

3.5 펄스폭에 따른 절단특성

펄스폭에 따른 표면조도를 구하기 위하여 상기 실험에서 결정된 조건에서 펄스폭을 0.09ms에서 0.17ms 까지 변화시키면서 실험을 하였다. 펄스폭은 첨두출력과 관계되며 Table 4와 같은 첨두출력 분포를 나타내며 식 (2)에 따라 구한 값이다5).

$$Pp = Pave \times \frac{1}{FWHM} \times \frac{1}{Frequency} \quad (2)$$

Pp : Peak Power

$Pave$: Mean Power

FWHM: Full Width at Half Maximum(86.5%)

Table 4. Peak power with pulse width on mean power 24W

	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
Peak power	442	398	362	332	306	284	265	249	234

Fig. 19는 펄스폭에 따른 절단면의 형상으로서 높은 첨두출력(짧은 펄스폭)에서는 큰 온도구배를 가지는 용융부가 순간적으로 분출되면서 깊은 골을 형성하였으며 낮은 첨두출력(긴 펄스폭)에서는 깊은 골은 형성되지 않았으나 용융모재의 흐름방향이 일정하지 않고 상대적으로 산만하였다.

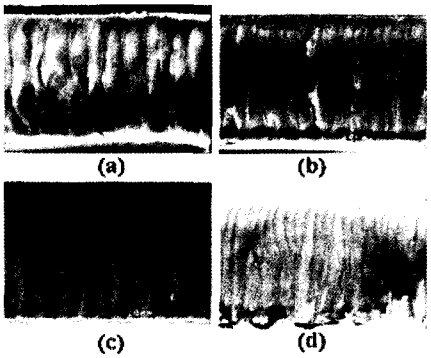


Fig. 19 SEM Photo of cut edge with pulse width (a)0.09ms, (b)0.1ms, (c)0.14ms and (d)0.15ms

Fig. 20은 펄스폭에 따른 절단면의 표면조도로서 첨두출력(peak power)의 상승에 따라 포물선의 분포를 나타내고 있으며 펄스폭 0.14ms에서 표면조도가 0.56μm, 절단폭은 78μm를 나타내었다. Fig. 21은 지금까지 찾아낸 적정변수를 이용해 제작한 샘플로서 양호한 품질의 제품을 제작할 수 있었으며 스텐실 뿐만 아니라 다양한 분야의 평판가공도 가능함을 알 수 있으며 환경저해공정인 방전가공, 에칭가공을 대체할수 있다.

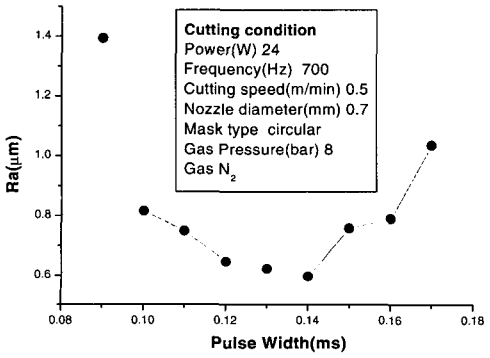


Fig. 20 Cut edge roughness vs pulse width

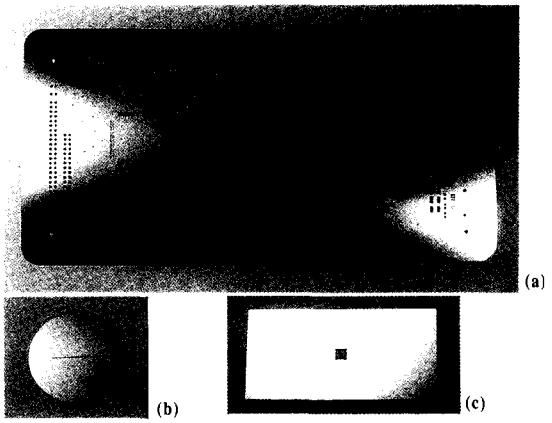


Fig.21 Cut Samples with optimal variables (a) Stencil, (b)Optical slit and (c)Mask for UV. laser

3.6 신경회로망의 활용

지금까지 순차적 실험에 의한 적정변수(Table 5)를 찾아보았다.

Table 5. Optimal condition of thin stainless steel cutting

Input		Output		
Parameter	value	Roughness (μm)	Kerf width (μm)	Dross level
Gas Pressure(bar)	8	0.6	78	1
Frequency(Hz)	700			
Nozzle gap(mm)	0.1			
Mean Output Power(W)	24			
Pulse width(ms)	0.14			
Cutting speed(m/min)	0.5			
Mask type	Circular type			

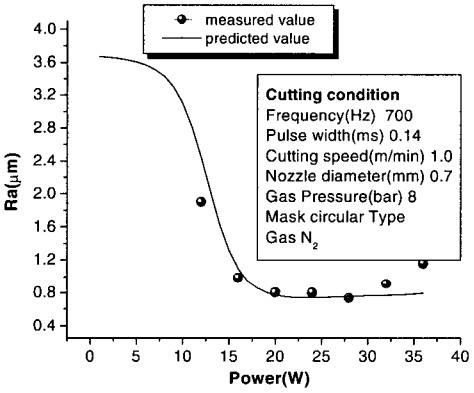
그러나 다양한 조건에서의 표면조도를 예측하기 위해서 신경회로망 학습법[7)~10)]을 이용하였으며 100만 번의 학습을 통한 최종 오차에너지[1)]는 0.0054를 나타내었으며 이때 오차에너지는 학습의 기준을 나타내며 식 (3)으로 표현된다. Fig. 22는 위의 학습을 통해 얻을 수 있는 연결강도와 미학습 입력변수의 행열곱 즉, 예측값(preestimated value)과 실제 측

정값(true value)값과 비교한 그래프로서 측정값의 83%가 신경회로망에 의한 예측값과 0.2㎛이내의 오차를 나타내었다.

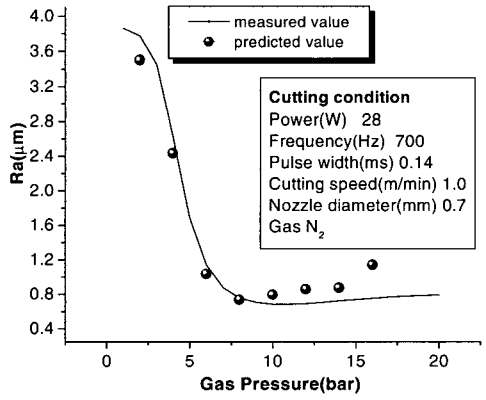
$$E=\frac{1}{2}\sum_{i}(\mathbf{target}_i-\mathbf{output}_i)^2 \quad (3)$$

target : 최종 목표값

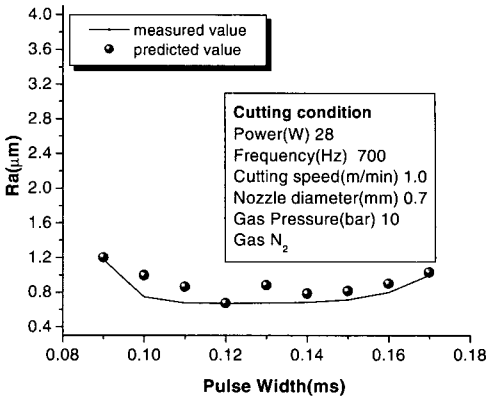
output : 학습시 발생한 출력값



(a)



(b)



(c)

Fig. 22 Comparison of measured and predicted surface roughness depending on (a)Power, (b)Gas pressure, (c)Pulse width

4. 결 론

본 논문은 PCB제작용 스텐실의 레이저 절단 가공에 관한 연구로서 공정변수가 스텐실의 절단면의 표면조도, 절단폭 및 드로스의 양에 미치는 영향을 분석해 본 결과 적정조건을 구할 수가 있었고 다음과 같은 경향을 알수 있었다.

(1) 표면조도는 출력, 펄스폭의 증가에따라 포물선 분포, 가스압의 증가에 따라 반비례곡선 분포를, 절단속도의 증가에 따라 기하 급수적으로 커지는 이차곡선분포를 나타내었고 마스크를 사용함으로서 표면 조도를 줄일수 있었다.

(2) 절단폭은 출력의 증가에 따라 비례적으로 커졌으며 가스압, 절단속도에 따라 반비례곡선 분포를 나타내었으며 마스크의 사용으로 절단폭을 줄일수가 있었고, 펄스폭에는 큰 영향이 없었다.

(3) 가스압이 증가할수록 드로스의 양이 급격히 줄어들었으나 14bar 이상에서는 다시 드로스가 생겨나는 현상이 발견되었다.

또한, 실험을 통해 얻은 조건을 이용하여 양질의 스텐실을 제작할수 있었으며 평판의 패턴절단에 용이함을 알수 있었다. 실험외의 조건에서의 표면조도는 신경 회로망을 사용하여 근사적으로 예측할수 있었고 이는 향후 공정 자동화시에 필요한 절단 형상에 대한 최적의 조건을 산출하는데 응용 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 신동식, 이제훈, 한유희, 이영문, "Nd:YAG 레이저를 이용한 스텐실 절단 공정", 한국레이저가공학회지, Vol. 3, No. 3, pp. 13~19, 2000
2. 이제훈, "PCB 제작에의 레이저 응용기술", Workshop 발표자료, 한국기계연구원, 2001
3. L.Prandtl, "The Essentials of Fluid Dynamics", Blackie&Son, 1952
4. B.A.Ward, "Supersonic characteristics of nozzles used with lasers for cutting", 'ICALEO'84, 1984
5. 김도훈, "레이저 가공학", 경문사, 1990
6. 김동원, "기계공작법", pp 691, 동명사, 1998
7. Simon Haykin, "Neural Networks", Prentice Hall International Editions, pp.161~175, 234~230, 751~756, 1999
8. S.Y.kung, "Digital Neural Networks", Prenticehall international, Inc., pp. 184~192, 1993
9. 이현엽,문경일, "MATLAB을 이용한 퍼지뉴로",아진, pp. 245~281
10. Frank h. Eeckman, "Neural Systems: Analysis and Modeling", Kluwer Academic, pp. 5~38, 1993
11. John Powell, "CO_2 Laser cutting", Spinger-Verlag, pp 95p
12. 한유희, "레이저 절단", 한국레이저가공학회지(기술논문) 제2권 1호,1999