

# 레이저 스텐실 가공 시스템 및 공정 기술 개발

이제훈\* , 서정\* , 김정오\* , 신동식\*\* , 이영문\*\*\*

## Development of Laser Process and System for Stencil Manufacturing

Jae Hoon Lee\*, Jeong Suh\*, Jeng O Kim\*, Dong Sig Shin\*\*, Young Moon Lee\*\*\*

### ABSTRACT

Stencil is used normally as a mask for solder pasting on pad of PCB. The objective of this study is to develop stencil cutting system and determine optimal conditions which make good-quality stencil by using a Nd:YAG laser. The effects of process parameters such as laser power, type of mask, gas pressure, cutting speed and pulse width on the cut edge quality were investigated. In order to analyze the cut surface characteristics(roughness, kerf width, dross) optical microscopy, SEM photography and roughness test were used. As a result, the optimal conditions of process parameters were determined, and the practical feasibility of the proposed system is also examined by using a commercial Gerber file for PCB stencil manufacturing.

**Key Words** : Nd:YAG laser(Nd:YAG레이저), stencil(스텐실), cut edge(절단면), surface roughness(표면 조도), dross(드로스), kerf width(절단폭), mask(마스크)

### 기호설명

$R_a$  = Arithmetic average surface roughness

$P_p$  = Peak Power

$P_{ave}$  = Average Power

FWHM = Full Width at Half Maximum(86.5%)

### 1. 서론

스텐실(stencil)은 PCB상의 Pad에 솔더(solder)를 도포할 때 마스크 역할을 하며 칩부품을 장착하는 공정에 필수적으로 사용되는 패턴이 형성된 스텐

레스 판재이다<sup>(1)</sup>. 일반적으로 스텐실은 스텐레스 박판에 포토리소그래피 공정을 이용하여 패턴을 형성한 후 부식 공정에 의해 재료를 제거하여 제작되어진다<sup>(2)</sup>. 그러나 최근 환경문제가 크게 부각됨에 따라 기존의 화학적 제작 공정은 환경 친화적인 공정으로의 대체가 시급히 요구되고있다. 레이저를 이용한 스텐실 제작 공정은 정밀 절단에 의하여 패턴이 제작되기 때문에 기존의 제작공정과 비교하여 매우 단순하며 환경 친화적인 공정으로 주목받고있다<sup>(3)</sup>. 또한 Fig. 1에서 보는 바와 같이 레이저 절단 가공에 의한 절단면이 에칭가공에 의한 절단면 보다 진직도가 뛰어나고 절단폭(kerf width)도 작음을 알 수 있다.

2001년 8월 23일 접수

\* 한국기계연구원 레이저기술연구그룹

\*\* 경북대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 경북대학교 기계공학부

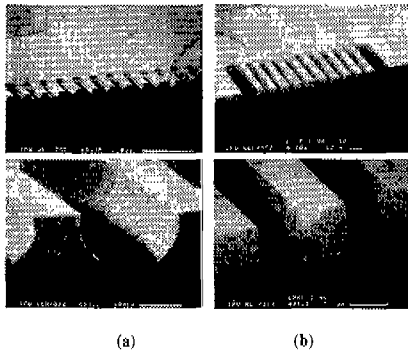


Fig. 1 SEM photographs of stencil produced by (a)etching and (b)laser cutting

레이저를 이용한 스텐실 제작공정은 기존의 부식 방법과는 달리 레이저 절단에 의하여 패턴이 형성되기 때문에 절단면의 상태가 중요하며 이는 솔더의 도포 및 수명에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져있다<sup>(3)</sup>. 본 연구에서는 스텐실의 제작을 위한 가공시스템을 구축하였으며 성능의 검증 및 실용화를 위하여 스텐실 제작공정의 주요 변수들이 절단면의 표면 조도에 미치는 영향을 분석하였고 순차적 실험을 통하여 최적 절단조건을 도출하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험에서 구축한 레이저 가공기는 크게 레이저 발진기, 구동부 그리고 제어부로 구성되어 있다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 펄스 타입의 Nd:YAG 레이저에서 방출되는 레이저 빔은 텔레스코프를 통과하여 빔의 직경이 2배에서 4배까지 확대되어지며 동시에 먼 거리 이송을 위하여 평행 광선으로 만들어진다. 이러한 빔은 빔 이송거리 보정장치(DCD)<sup>(5)</sup>를 통과하여 집속렌즈가 장착된 가공헤드에서 집광되어 x-y 테이블 상에 위치한 가공물에 조사되어진다. 빔 이송거리 보정장치는 이송거리의 변화에 의한 초점의 크기 변화를 보정하여 항상 일정한 초점 크기를 구현시켜준다.

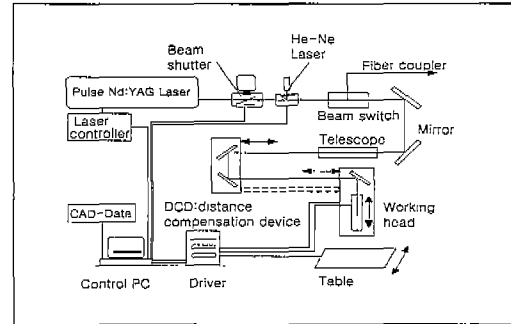


Fig. 2 Configuration of stencil cutting system by Nd:YAG laser

또한 빔 스위칭을 통하여 빔을 선택적으로 스텐실 가공헤드나 광섬유를 통한 가공헤드로 이송할 수 있도록 구성되어 있다. 제어부는 PC에 의한 빔 이송경로 제어 시스템과 레이저 빔의 출력 제어 시스템으로 구성되었다. PC에서는 사용자 위주의 CAD 프로그램으로 작성된 가공 데이터를 CAM 데이터로의 변환이 가능하며 또한, 기존의 Gerber 파일을 CAD/CAM 파일로 변환하여 x-y 테이블의 경로 및 셔터(shutter)를 제어할 수 있다. 레이저 빔 제어기에서는 펄스폭, 여기램프 전압, 펄스 반복수를 제어하여 빔의 출력을 결정한다. 스텐실 박판을 수평으로 유지하기 위해서 공압을 이용한 스텐실 클램핑(clamping) 장치를 설계하여 탈착이 용이하도록 하였다.

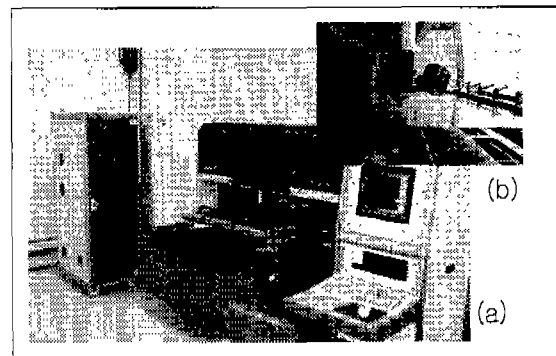


Fig. 3 (a) Stencil cutting system, (b) Cutting head

Fig. 3(a)는 실험에 사용한 레이저 스텐실 가공 시스템의 사진으로서 TEM<sub>00</sub> mode의 Nd:YAG 펄

스 레이저( $\lambda=1064\text{nm}$ )를 사용하였으며, Fig. 3(b)는 절단장면의 사진으로서 광학계는 초점거리가 40mm인 절단헤드를 사용하였다.

2.2 실험방법

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

Table 1 Chemical composition of stencil plate

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
SS304	69.73	0.04	0.88	1.57	0.051	0.025	17.49	0.11	0.11	9.27

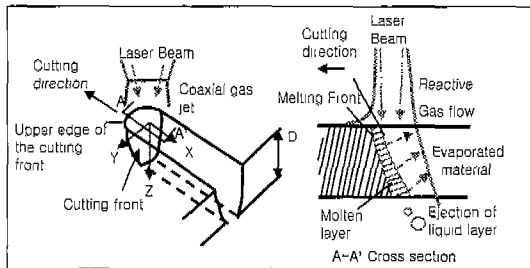


Fig. 4 Schematic diagram of laser cutting process

Fig. 4는 레이저 절단원리를 나타내고있다. 고 에너지 밀도의 레이저빔이 재료 표면에 조사되면 흡수된 에너지는 재료의 온도를 상승시키며 얇은 용융 액체층을 형성시킨다. 이 용융 액체층은 레이저와 동축으로 불어주는 강한 가스 제트로 생긴 가스유동과 용융층 표면 사이의 마찰과 절단영역 내의 압력 구배에 의해 재질 하단으로 배출된다. 이와 같은 메카니즘은 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.

시편의 절단형상은 Fig. 5에 나타난 바와 같으며 절단폭 및 절단면의 조도 측정이 용이하도록 빔의 절단경로를 설정하였다.

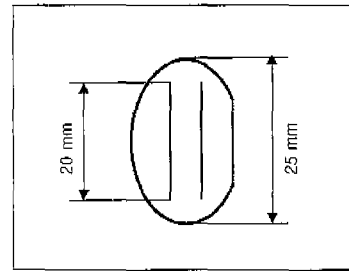


Fig. 5 Geometry and dimensions of workpiece

주요 공정변수는 절단가스압(gas pressure), 빔 출력(power), 펄스폭(pulse width), 절단속도(cutting speed) 및 마스크의 형상(mask type)이며, 기초 실험을 통하여 적정 변수의 영역을 도출하였으며 본 실험은 Table 2에 나타난 조건으로 실험하였다.

Table 2 Experimental conditions

Parameter	value
Beam mode	TEM <sub>00</sub> (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)<sup>(4),(5)</sup>를 시편 아래에 발생시키기 위하여 0.1mm의 미세 노즐갭을 선정하였다. 또한 빔 조사시 용융금속의 제거 및 산화방지를 위해서 비교적 다른 물질과 반응을 일으키지 않는 질소가스(N<sub>2</sub>)를 사용하였으며<sup>(5)</sup> 가스압은 절단노즐 상단 압력계의 값을 기준으로하였다. 또한 실험에 사용된 마스크는 가공헤드의 집속렌즈에 입사되는 빔 경

로에 설치하였다.

### 2.3 측정

절단특성은 절단면의 표면조도( $R_a$ ), 절단폭 및 드로스(dross)의 양<sup>(6)</sup>으로 설정하였다. 또한 표면조도는 광간섭현상<sup>(7)</sup>을 이용한 광학식 3차원 조도 측정기로 측정하였으며, 절단폭은 광학현미경으로 측정하였고 드로스는 정성적인 기준에 의해 5등급으로 나누어 판단하였다. 여기서 1등급이 드로스가 가장 적은 등급을 나타낸다. 또한 절단면의 표면 상태는 SEM으로 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 출력에 따른 절단특성

출력에 따른 절단특성을 규명하기 위해 출력을 4W에서 36W 까지 변화시키면서 실험하였다. Fig. 6은 출력에 따른 절단면의 SEM 사진 및 표면조도의 분포를 나타내고있다. 저출력 영역에서는 용융금속 및 산화물의 높은 점도(viscosity)로 인하여 절단하부로의 원활한 분출이 이루어지지 않았으며 용융물의 재응고로 인하여 완전히 절단되지 않은 부분이 발생하여 높은 표면조도를 나타내었다.

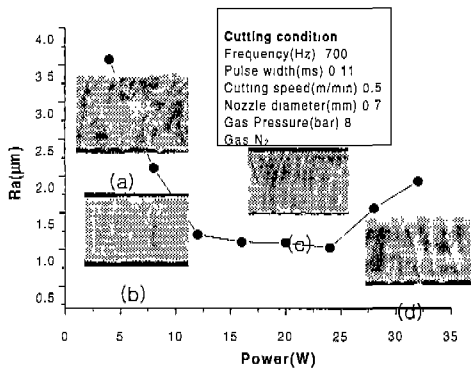


Fig. 6 Cut edge roughness vs. laser power: (a)4W, (b)12W, (c)24W and (d)32W

이 경우 Fig. 6(a)에서 보여 주는 바와 같이 일정한 줄 무늬(striation)를 형성하지 못하고 절단면에 미분출된 용융금속 및 산화물이 발견되었다.

반면 Fig. 6(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 넓어짐으로 인해 표면조도가 다시 상승하였다. 여기서 표면조도는 식(1)과 같이 표현되는 중심선 평균조도를 사용하였다.

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

24W의 조건에서 표면조도( $R_a$ )가  $1.03 \mu m$ 로서 가장 낮은 값을 나타내었으며 절단면에는 줄무늬의 패턴이 일정하게 형성되었다. 출력이 증가할수록 줄무늬 패턴이 커지면서 절단부의 상단에 용융물이 응고되는 현상이 나타났다.

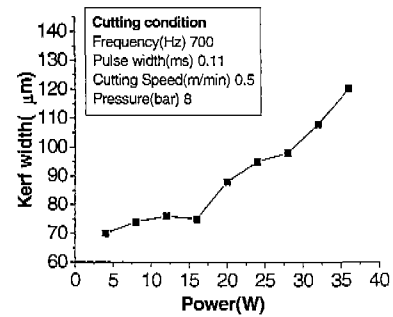


Fig. 7 Kerf width vs. laser power

Fig. 7은 출력에 따른 절단폭의 변화를 나타낸 것으로 출력이 증가함에 따라 절단폭이 넓어지고 있다. 출력 32W에서의 절단폭은 출력 4W일 때의 절단폭 보다 약 1.6배 커졌으며 절단면의 조도가 최적인 출력 24W에서는  $98 \mu m$  절단폭을 나타내었다.

### 3.2 마스크의 형상에 따른 절단특성

레이저 빔의 가장자리 부분이 절단면의 형상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 가공헤드의 집광렌즈 입사빔 광로에 Fig. 8에 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. 9는 마스크에 의한 빔 외곽부의 차단원리를 나타낸 것이다.

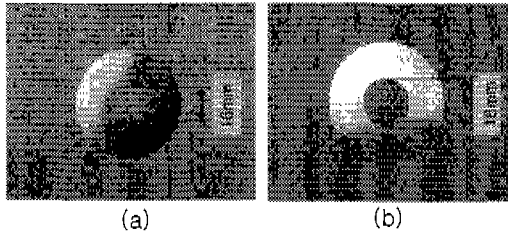


Fig. 8 Mask shapes: (a) quadrangular and (b) circular type

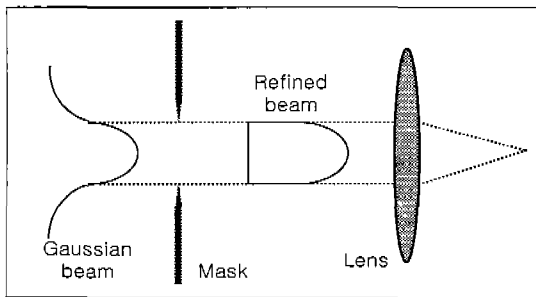


Fig. 9 Principle of laser beam refining by mask

Fig. 10은 마스크의 종류에 따른 절단면의 형상 및 표면 조도를 보여주고있다. Fig. 10(a)는 마스크를 사용하지 않은 상태의 가공 형상으로서 마스크를 사용한 Fig. 10(b)나 Fig. 10(c) 보다 줄무늬가 불규칙하게 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 10(a)의 경우 절단면의 상단부가 가장자리 빔의 영향으로 펄스 주기에 따른 규칙적인 레이스(lace)무늬 형상이 나타나고있다. 또한 사각마스크가 절단시편의 직선구간에서 중심선 평균 조도(Ra)가  $0.86 \mu\text{m}$ 로서 가장 우수함을 나타내는 반면, 곡선(R=25mm) 구간에서는 원형 마스크를 사용한 경우 보다 표면이 거칠게 나타나고있다. 이는 마스크 형상에 의한 가장자리부의 펄스 중첩도가 저하된 것에 기인한 것으로 예측할 수 있다.

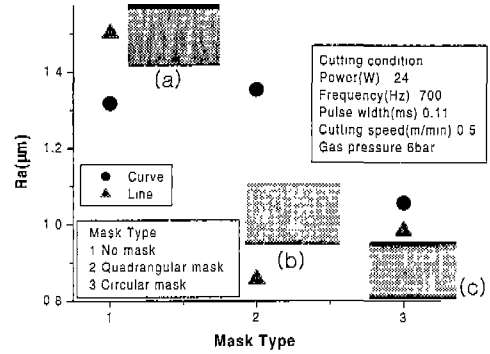


Fig. 10 Cut edge roughness for different mask types: (a) No mask, (b) Quadrangular mask and (c) Circular mask

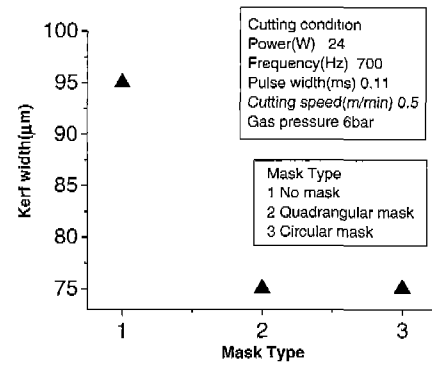


Fig. 11 Kerf width for different mask types

Fig. 11은 마스크를 사용했을 경우 직선구간에서 절단폭이 줄어드는 현상을 나타낸다. 이는 레이저빔 외곽부를 차단함으로써 에너지의 밀도구배를 향상시켰기 때문인 것으로 판단된다. 또한 사각마스크의 경우에는 곡면 절단시 표면조도가 급격히 저하되기 때문에 다양한 패턴을 절단해야 하는 유연성을 고려하여 호환성이 뛰어난 원형마스크를 선정하여 실험하였다.

### 3.3 가스압에 따른 절단특성

가스압을 2bar에서 16bar 까지 변화시키면서 가스압이 절단면의 품질에 미치는 영향을 관찰한 결과 Fig. 12와 같이 가스압에 따른 표면조도 및 절단면의 SEM사진을 얻을 수 있었다. Fig. 12(a)의 경우 절단 가스의 압력이 충분하지 못하여 절단면의 하단부에 드로스가 불규칙하게 형성됨을 알 수 있으며, 가스의 압력이 증가함에 따라 용융물에 닿는 가스의 모멘텀에 의한 견인력의 상승으로 용융모재의 제거가 원활히 이루어 졌음을 알 수 있었다<sup>(6)</sup>. 또한, 이때 절단면의 줄무늬가 규칙적으로 형성되고 있으나 가스압이 16bar로 증가한 상태에서는 줄무늬가 다시 불규칙해지고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 12bar에서 0.64  $\mu\text{m}$ 로서 가장 낮은 표면조도를 나타내었다.

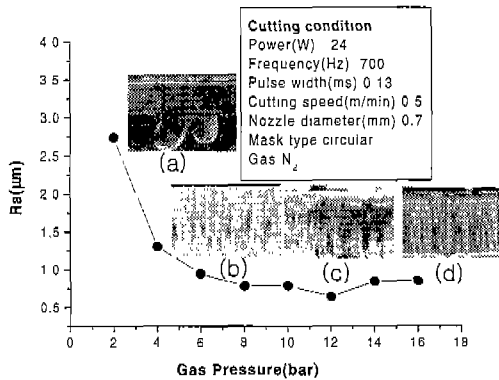


Fig. 12 Cut edge quality vs. gas pressure:  
(a)2bar, (b)6bar, (c)8bar and (d)16bar

Fig. 13은 가스압에 따른 절단폭의 변화를 나타내고있다. 가스압이 상승함에 따라 절단폭이 줄어들며 이는 고압의 가스 하에서 용융물의 제거가 빠르고 절단폭 보다 현저히 큰 노즐직경에서 나오는 절단가스에 의한 모재의 대류 열전달에 의한 냉각속도의 증가로 인해 용융부와 열영향부의 폭이 감소하여 생기는 현상으로 판단된다. 그러나 8bar 이상의 가스압에서는 표면조도 뿐만 아니라 절단폭에서도 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없었다.

가스압에 따른 드로스 상태를 Fig. 14에서 보여주고있다. 가스압이 증가함에 따라 드로스가 현저히 감소하다가 8bar 이상에서는 드로스의 양이 일정하였으며, 14bar 이상에서는 절단면과 절단면

하단에 형성된 난류(turbulence)<sup>(8)</sup>의 영향으로 드로스의 발생량이 다시 증가한 것으로 판단된다. 이를 고려하여 적정 가스압을 8bar로 설정한 후 실험을 수행하였다.

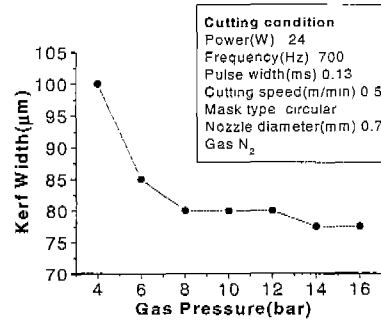


Fig. 13 Kerf width vs. gas pressure

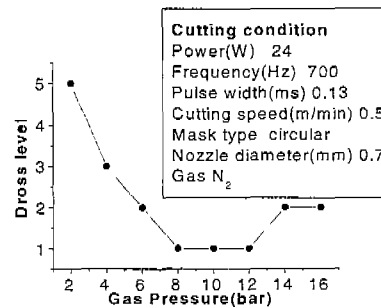


Fig. 14 Dross level vs. gas pressure

### 3.4 절단속도에 따른 절단특성

절단속도에 따른 절단특성을 관찰하기 위하여 절단속도를 0.5m/min에서 2m/min까지 변경해가며 실험하였다. 절단속도가 느린 경우 온도구배가 완만하여 절단부의 용융부가 넓어짐으로 인해 가스의 운동량에 의해 제거되는 범위가 커지며 또한, 절단속도가 과도하게 빠르면 용융금속이 절단부에서 제거된 흔적이 뚜렷이 남게되어 결국 표면조도가 저하되는 결과를 초래하였다. 즉, 온도구배가 너무 급격하게 형성되어 응고가 그만큼 빠르게 진행됨으로 표면장력으로 인한 보상이 이루어지지 않게된다<sup>(9)</sup>. Fig. 15는 절단속도에 따른 절단면과 표면 조도를 나타낸 것으로 이를 반영해주고있다.

그림에서 보는 바와 같이 속도가 증가할수록 펄스 간 간격이 증가하여 표면 조도가 커지게 되며 줄무늬의 방향도 사선으로 기울기가 증가하고있다. 실험범위내의 조건에서는 저속일수록 표면조도가 우수함을 알 수 있고 0.5m/min에서 표면조도는  $0.65 \mu\text{m}$ 이었다.

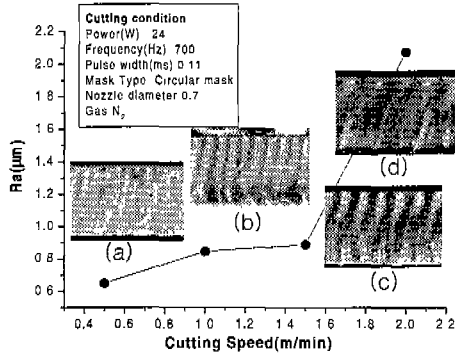


Fig. 15 Cut edge quality with different cutting speed: (a)0.5m/min, (b)1.0m/min, (c)1.5m/min and (d)2.0m/min

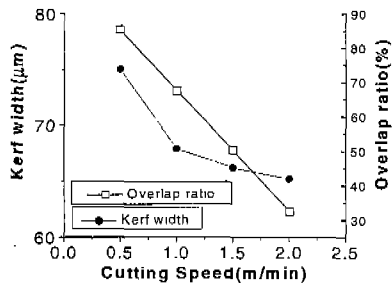


Fig. 16 Kerf width and overlap ratio vs. cutting speed

Fig. 16은 Fig. 15와 동일한 실험조건하에서 절단속도에 따른 절단폭과 중첩율<sup>(6)</sup>의 변화를 나타내고있고 절단 속도가 증가함에 따라 중첩율(overlap ratio)이 떨어짐으로 인하여 절단폭이 줄어들었다. 이는 속도가 증가함에 따라 중첩도가 50% 이하로 낮아지면서 펄스의 원형 형상이 절단면에 더욱 뚜렷이 나타남으로 인하여 표면조도가 저하되었다.

### 3.5 펄스폭에 따른 절단특성

펄스폭이 표면조도에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 상기 실험에서 결정된 조건으로 펄스폭을 0.09ms에서 0.17ms 까지 변화시키면서 실험을 하였다. 펄스폭은 첨두출력과 관계되며 Table 3과 같은 첨두출력 분포를 나타내며 식 (2)에 따라 구한 값이다<sup>(6)</sup>.

$$P_p = P_{ave} \times \frac{1}{FWHM} \times \frac{1}{Frequency} \quad (2)$$

Table 3 Peak power with pulse width (average power: 24W, Frequency: 700Hz)

Pulse width	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

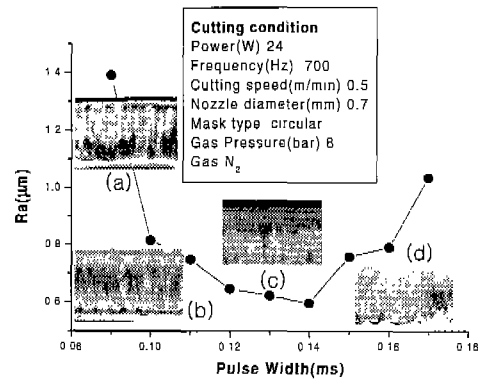


Fig. 17 Cut edge quality with different pulse width: (a)0.09ms, (b)0.1ms, (c)0.14ms and (d)0.15ms

Fig. 17은 펄스폭에 따른 절단면의 형상 및 표면 조도로서 짧은 펄스폭(높은 첨두출력)에서는 큰 온도구배를 가지는 용융부가 순간적으로 분출되면서 깊은 골을 형성하였으며 긴 펄스폭에서는 깊은 골을 형성되지 않았으나 용융물의 분출방향이 일정하지 않고 상대적으로 산만하여 펄스폭의 증가에 따라 포물선 분포를 나타내었다. 이때 펄스폭 0.14ms에서 표면조도가  $0.6 \mu\text{m}$ , 절단폭은  $78 \mu\text{m}$ 를 나타내었으며 Fig. 18과 같이 3차원 형상으

로 재현 가능하였다.

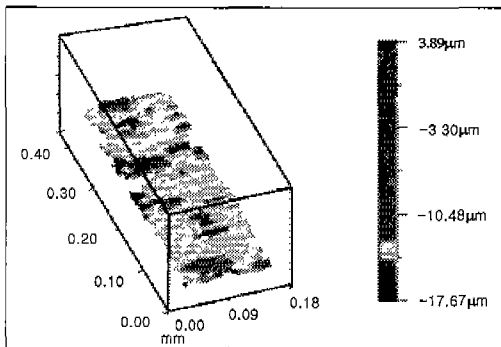


Fig. 18 Three dimensional view of roughness on optimum condition

Fig. 19(a)는 도출된 최적의 공정변수를 이용해 샘플을 제작하는 장면이다. Fig. 19(b)는 상용 회로설계 소프트웨어인 ORCAD에서 생성된 Gerber 파일을 CAD/CAM 파일로 변환시켜 레이저 절단에 의해 직접 제작한 스텐실 마스크이다.

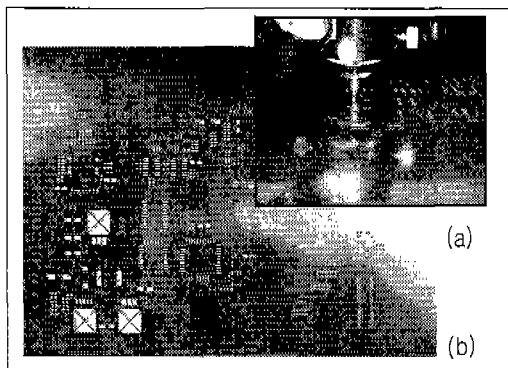


Fig. 19 A view of cutting process and completed stencil for solder mask

#### 4. 결론

기존의 환경저해공정인 스텐실 제작을 레이저(Nd:YAG laser) 절단 공정으로 대체할 수 있는 가공 시스템 개발 및 주요 공정 변수가 절단 품질에

미치는 영향을 분석하였으며, 실용화를 위한 공정 및 시스템의 평가를 실용 가공으로 입증하였다.

(1) 표면조도는 출력, 펄스폭의 증가에 따라 포물선 분포, 가스압의 증가에 따라 반비례 곡선 분포를, 절단속도의 증가에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타내었고, 마스크를 사용함으로써 표면 조도를 줄일 수 있었다.

(2) 절단폭은 출력의 증가에 따라 비례적으로 증가하였으며, 가스압, 절단속도에 따라 반비례 곡선 분포를 나타내었다. 마스크의 사용으로 절단폭을 줄일 수 있었고, 펄스폭에는 큰 영향이 없었다.

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

(4) 기존의 Gerber 파일을 레이저 가공용 파일로 변환시켜, 솔더 마스크용 스텐실 제작을 완성함으로써 실용화의 가능성을 입증하였다.

#### 참고문헌

1. 최영규, "인쇄회로 설계와 배선 기술," 홍릉과학출판사, pp. 200, 2000.
2. 신동식, 이제훈, 한유희, 이영문, Nd:YAG 레이저를 이용한 스텐실 절단 공정, 한국레이저가공학회지, Vol. 3, No. 3, pp. 13~19, 2000.
3. 이제훈, "PCB 제작에의 레이저 응용기술," Workshop 발표자료, 한국기계연구원, 2001.
4. L.Prandtl, "The Essentials of Fluid Dynamics," Blackie & Son, 1952.
5. B.A.Ward, "Supersonic characteristics of nozzles used with lasers for cutting," 'ICALEO'84, 1984.
6. 김도훈, "레이저 가공학," pp. 280~281, 286, 166, 163, 경문사, 1990.
7. 김동원, "기계공작법," 동명사, pp. 691, 1998.
8. John Powell, "CO<sub>2</sub> Laser cutting," Spinger-Verlag, pp. 95, 1993.
9. 한유희, "레이저 절단," 한국레이저가공학회 기술논문, 제2권 1호, 1999.