

Nd:YAG UV 레이저를 이용한 연성회로 다층기판 절단특성에 대한 연구

An analysis of Cutting Characteristic of Multilayer FPCB using Nd:YAG UV Laser System

최경진^{1,✉}, 이용현¹
Kyung Jin Choi^{1,✉} and Young-Hyun Lee¹

¹ 강남대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Kangnam Univ.)
✉ Corresponding author: kjchoi@kangnam.ac.kr, Tel: 031-280-3713

Manuscript received: 2009.10.21 / Revised: 2009.12.7 / Accepted: 2009.12.30

The FPCB is used for electronic products such as LCD display. The process of manufacturing FPCB includes a cutting process, in which each single FPCB is cut and separated from the panel where a series of FPCBs are arrayed. The most-widely used cutting method is the mechanical punching, which has the problem of creating burrs and cracks. In this paper, the cutting characteristics of the FPCB have been experimented using Nd:YAG DPSS UV laser as a way of solving this problem. To maximize the industrial application of this laser cutting process, test samples of the multilayered FPCB have been chosen as it is actually needed in industry. The cutting area of the FPCB has four different types of layer structure. First, to cut the test sample, the threshold laser cut-off fluence has been found. Various combinations of laser and process parameters have been made to supply the acquired laser cut-off fluence. The cutting characteristics in terms of the variation of the parameters are analyzed. The laser and process parameters are optimized, in order to maximize the cutting speed and to reach the best quality of the cutting area. The laser system for the process automation has been also developed.

Key Words: Flexible PCB (연성회로기판), Multilayer (다층기판), Laser Cutting (레이저절단), Laser Micromachining (레이저 미세가공), Nd:YAG UV Laser (Nd:YAG UV 레이저)

1. 서론

연성회로기판(flexible PCB, FPCB)은 작고 가벼우며, 내 굴곡성이 커 3 차원 배선이 가능해서, 현재 다양한 휴대용 단말기를 비롯한 많은 전자기기의 핵심부품이다. FPCB 는 sheet 형태로 제작되며, 절단공정에 의해 단품으로 분리된다. 현재 널리 사용되는 절단방법은 기계적 펀칭(punching)과 기계적 툴을 이용한 라우팅(routing)이며, 가공 정밀도의 한계와 Fig. 1 과 같이 찌꺼기(burr)와 크랙(crack)이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 특히

Cu-metal 층이 노출되어 있는 커넥터와 접촉패드(contact pad)에서의 크랙에 의해 전기적 불량에 발생하는 문제점이 있다.

기존 기계적 절단방법의 문제점을 해결하기 위해 레이저를 이용한 FPCB 절단에 대한 연구가 수행되어 왔다. 기초연구에서는 FPCB 층의 주 재료인 PMMA(polymethyl methacrylate), PET(polyethylene terephthalate), PI(polyimide)와 FCCL(flexible copper clad layer)를 대상으로 레이저 플루언스 (fluence)와 각 물질의 어블레이션 깊이(ablation depth)사이의 관계를 나타내기 위한 이론적 모델의 구성, 시뮬

레이션과 실험적 검증이 수행되어 왔다.^{1,4} 응용연구에서는 레이저 및 공정 매개변수 변화에 따른 각 물질의 어블레이션 상태 및 성능 등 산업적인 측면에서의 측정 및 분석을 수행하고 있다.⁵⁻⁷

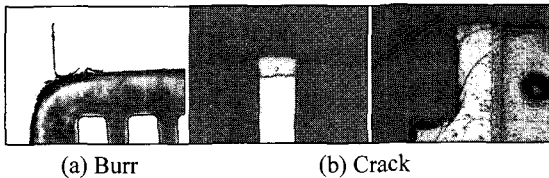


Fig. 1 Burr and crack

그러나 이 연구들은 레이저 가공을 위한 실 적용에는 만족할 만한 결과를 제공하지 않는다. 즉 FPCB의 주 재료인 FCCL과 PI 필름 각각에 대한 대상물질의 가공이 시작되는 임계 레이저 플루언스(threshold laser fluence)가 수 J/cm² 이하의 매우 낮은 값으로, 실질적인 FPCB 절단 시 필요한 레이저 플루언스와는 큰 차이가 있다. 또한 레이저 및 공정 매개변수 변화에 따른 분석 시 단순히 매개변수의 값을 변화시켰을 뿐 매개변수 조합에 의해 결정되는 레이저 플루언스의 변화는 고려하지 않았다.

본 논문에서는 실제 양산되는 다층 FPCB를 대상으로 정의된 절단선의 레이저 절단가공 특성을 분석하였다. 절단선 상의 각 위치별 층 구조를 분석하여 동일한 구조의 테스트 시료를 제작하였다. 첫 번째 실험에서는 임계 레이저 절단 플루언스(threshold laser cut-off fluence, $F_{thres-cutoff}$)를 도출하였다. $F_{thres-cutoff}$ 는 대상 시료가 절단되는 시점까지 공급된 총 레이저 플루언스(total laser fluence, F_{total})로 정의된다. 두 번째 실험에서는 도출된 $F_{thres-cutoff}$ 와 동일하거나 일정 범위내의 F_{total} 가 공급되기 위한 다양한 매개변수 조합을 구성하여 실험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 매개변수 변화가 가공 상태 및 성능에 미치는 영향과 FPCB 절단을 위해 적용 가능한 총 레이저 플루언스의 범위를 조사하였다.

2. FPCB 물질구성 및 구조

FPCB의 구성물질은 절연체(insulator, PI film), 도체(동박, Copper), 접착 필름(adhesive film), 보강판(stiffener)이며, 실제 제작공정에서 사용되는 각 물질의 재원은 Table 1과 같다.

Table 1 Material specification for the test sheets

Item	Spec.(thickness, μm)	
Cover layer (PI)	12.5	
Adhesive	20~30	
Base film	Copper (R.A.)	18
	Adhesive	10
	PI film	25
Stiffener (adhesive)	80	
Plating	Ni	3
	Au	0.03

Fig. 2는 양면 FPCB의 한 예로써 외곽 절단선의 각 위치에 따른 층 구조와 물질구성을 나타낸다. Connector 1(이하 C1)은 다른 기판과의 전기적 신호연결을 위한 것이며, 한쪽 면에는 보강판 용도로 두꺼운 PI film을 접착하고, 다른 한 면에는 전기적 신호연결을 위해 Cu-metal의 커넥터 패턴이 생성되어 있다. Connector 2(이하 C2)는 TFT LCD 패널과의 연결을 위한 OLB(out lead bonding) 터미널이다. FPCB 층 구성 중 가장 단순하며 얇다. C1 층과 마찬가지로 전기적 신호연결을 위한 Cu-metal의 커넥터 패턴이 생성되어 있으나, 보강판은 사용하지 않는다. C2 층의 절단선은 대부분의 경우 Cu-metal 커넥터 패턴 위쪽에 생성된다. Contact pad(이하 CP)는 접지용으로 사용되며, Cu-metal 층이 양쪽 면에 생성되어 있는 층 구조를 가진다. Outline(이하 OL)는 FPCB 절단선 대부분을 차지하며, C2의 양쪽 면에 접착필름을 이용하여 절연을 위해 얇은 PI 필름(cover layer)을 접착한 구조이다. 절단선의 폭은 100μm이며, 이는 FPCB 제조공정에서 발생하는 공정오차를 고려한 것이다.

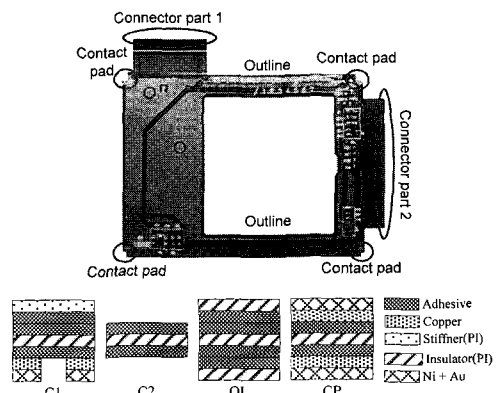


Fig. 2 Layer structures of the cross section

3. 레이저 절단 공정분석 및 가공 시스템

3.1 레이저 절단 공정분석

FPCB 주 재료인 FCCL 과 PI 필름에 대해 레이저 및 공정 매개변수 변화가 절단특성에 미치는 영향에 대한 많은 연구와 실험이 수행되었다. 이들의 결론은 레이저 빔의 중첩율(overlap ratio)이 높을수록 가공 깊이는 증가하며, 반복주파수(pulse repetition rate)가 높을수록 절단속도(cutting speed)가 높다는 것이다.^{1,6,7,9} 그러나 이러한 절단특성은 특정 매개변수 변화의 영향이 아니라 레이저 및 공정 매개변수 조합에 의해 결정된 레이저 플루언스의 영향이다. 따라서 도출된 결론들은 레이저 플루언스가 크기 때문에 더 깊이 가공된 것이며, 반복횟수가 줄어들기 때문에 절단속도가 높게 계산되는 것이다. 따라서 레이저 미세가공에서 레이저 및 공정매개변수의 영향 분석 시 레이저 플루언스가 동일하거나 일정 범위 내인 조건하에서 매개변수의 변화가 미치는 영향을 분석해야 한다.

Q-switch 레이저를 이용하여 레이저 빔을 궤적을 따라 이동시키면서 가공을 수행하는 경우 Fig. 3 과 같이 레이저 플루언스가 두 가지의 형태로 도시된다. Fig. 3(a)는 레이저 플루언스가 펄스형태이며, Fig. 3(b)는 레이저 플루언스가 일정하다.

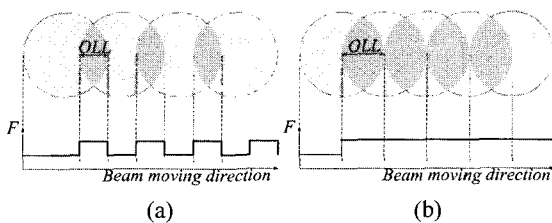


Fig. 3 Laser fluence patterns: (a) Pulse laser fluence F : $f_{pulse} = 20\text{kHz}$, $v_{beam} = 200\text{mm/sec}$, $\phi_{beam} = 15\mu\text{m}$, $N = 1.5$, $OLL = 5.0\mu\text{m}$, (b) Constant laser fluence F : $f_{pulse} = 20\text{kHz}$, $v_{beam} = 150\text{mm/sec}$, $\phi_{beam} = 15\mu\text{m}$, $N = 2.0$, $OLL = 7.5\mu\text{m}$

레이저 플루언스의 형태는 반복주파수, 빔 직경 (beam diameter) 및 빔 이동속도 (beam speed)에 의해 결정되며, 이들 사이의 관계는 식 (1)과 같다.

$$v_{beam} = (\phi_{beam} \times f_{pulse}) / N \tag{1}$$

$$N = \phi_{beam} / (\phi_{beam} - OLL) , 0 \leq OLL < \phi_{beam}$$

여기서 v_{beam} 는 빔 이동속도, f_{pulse} 는 반복주파수, ϕ_{beam} 는 이론적으로 계산된 빔 직경이다. OLL 은 이웃한 두 레이저 빔 중첩길이(overlap length)이며, N 은 중첩계수(overlap coefficient)로 정의한다. Fig. 3(b)와 같은 레이저 플루언스 패턴을 생성하기 위해서는 N 이 정수가 되도록 OLL 을 선정 한 후, 정수 N 을 이용하여 v_{beam} 을 계산한다. 여기서 f_{pulse} 와 ϕ_{beam} 는 레이저 발생장치 및 광학계 구성에 의해 고정된 매개변수이다. N 은 연속적인 두 레이저 빔의 중첩되는 정도를 나타내는 중첩계수로, 중첩계수가 크면 중첩율이 높다는 것을 의미한다. OLL 이 커지면, N 은 커지고 식 (1)에 의해 빔 이동속도는 작아진다.

레이저에 의해 공급되는 F_{total} 는 레이저 및 공정 매개변수에 의해 결정된다. $N=1$ 인 경우, 레이저 빔 영역에 공급되는 레이저 플루언스는 하나의 레이저 펄스에 의해 공급된 것이다. 그러나 $N=2$ 인 경우, OLL 로 정의된 영역의 레이저 플루언스는 연속적인 두 개의 레이저 펄스에 의해 공급된다. 여기서 n 번 반복 가공하는 조건을 고려하면 $N=2$ 인 경우, 공급되는 F_{total} 는 펄스 당 레이저 플루언스 (fluence per laser pulse, F_{pulse})의 $2n$ 배이다. 따라서 일정한 레이저 플루언스 패턴을 가지는 조건에서 중첩된 영역에 공급되는 F_{total} 는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$F_{total} = F_{pulse} \times NOR \times N \tag{2}$$

여기서, NOR 은 반복가공횟수(number of repeat)이다. 예를 들어 $F_{pulse} = 10 \text{ J/cm}^2$ 일 때, $NOR=10$, $N=2$ 와 $NOR=5$, $N=4$ 의 F_{total} 는 식 (2)로부터 200 J/cm^2 로 동일하다. 따라서 식 (2)를 이용하여 유사한 F_{total} 를 공급하기 위한 다양한 레이저 및 공정 매개변수 조합을 생성할 수 있으며, 이를 기반으로 한 실험결과로부터 중첩계수 또는 빔 이동속도에 대한 영향을 독립적으로 분석할 수 있다.

3.2 레이저 소스 및 시스템

레이저 미세가공에서 적절한 레이저 소스와 파장의 선택은 매우 중요하다. 적절한 파장의 선택을 위해서는 대상물질의 파장 별 흡수율을 조사하는 것이 일반적인 방법이다.¹ 대표적 far IR의 레이저 파장은 $10.6\mu\text{m}$ 로서 CO_2 레이저 파장에 해당된다. far IR 파장의 레이저 빔에 대해 절연체는 흡수

율이 매우 높으나, 탄화현상(carbonization)과 찌꺼기 발생이 문제점으로 지적되며, 메탈(Cu, Au)은 대부분 반사되는 특성이 있어 가공이 어렵다는 문제점이 있다. 파장이 532nm 인 Green 레이저의 경우, Cu 의 흡수율은 높으나, Au 과 PI 에 대해서는 상대적으로 낮은 흡수율을 가지고 있다. 그러나 PI 의 임계 레이저 플루언스가 Cu 의 것보다 낮기 때문에 가공은 가능하지만, Cu 를 가공하기 위한 높은 레이저 플루언스로 PI 층을 가공할 경우 탄화현상 및 찌꺼기가 발생한다.^{1,9,10} UV 레이저는 Nd:YAG 레이저의 제 3 고조파로 355nm 의 파장을 가지며, 절연체와 메탈 모두에 대해 상대적으로 높은 흡수율을 가지고 있다. 또한 수십 ns 의 짧은 레이저 펄스를 발생시킬 수 있어, 탄화현상 및 찌꺼기 발생에 있어 보다 유리한 특성을 가지고 있다.

본 논문에서 사용된 레이저 시스템의 구성도는 Fig. 4 와 같다. 레이저 빔 발생기는 COHERENT 사의 AVIA355-7000 이며, 파장은 355nm, 전류 95%에서 최대 파워-에너지는 5.6W-145μJ@40kHz 이다. 레이저 발전기, 광학 스캐너, PLC 및 위치제어 유닛으로 구성되며, PC 기반 제어 프로그램을 통해 운영된다. PC 기반 제어 프로그램에서는 시스템 각 부분의 상태를 모니터링하며, 레이저 발전기와 광학 스캐너 그리고 스테이지를 연동하여 레이저 빔을 이동시킴으로써 가공 공정을 수행한다.

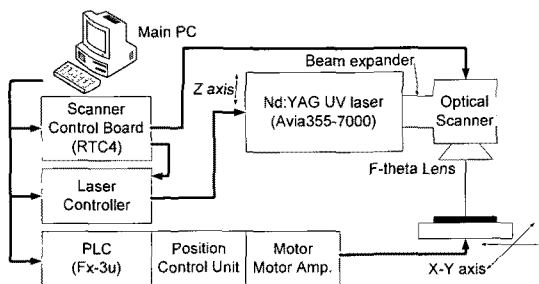


Fig. 4 Schematic of developed laser system

4. 실험결과

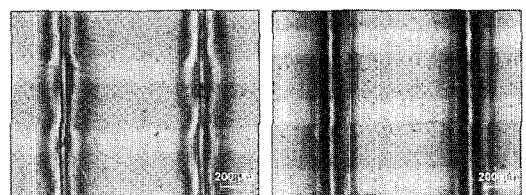
본 논문에서 실험은 2 단계로 수행되었으며, 실험을 위한 레이저 및 공정 매개변수의 범위는 Table 2 와 같다. 특히 반복주파수는 레이저 발전기 최저값인 40kHz 로 고정하였다. 1 단계 실험에서는 각각의 테스트 시료를 절단하기 위해 필요한 $F_{thres-cutoff}$ 을 도출하였다. 빔 간 영향을 최소화 하기 위해

빔 이동속도는 레이저 빔이 중첩되지 않는 최대 속도인 600mm/sec(중첩계수 $N=1$)로 고정하였다. 실험을 통해 시료가 절단되는 반복가공횟수를 도출하였고, 식 (2)에 의해 계산된 F_{total} 를 임계 $F_{thres-cutoff}$ 로 정의하였다. 두 번째 단계는 도출된 $F_{thres-cutoff}$ 와 동일하거나 일정 범위 내의 레이저 플루언스를 공급하기 위한 매개변수 조합을 구성하여 절단 실험을 수행하였다.

Table 2 Laser and process parameters range for the experiments

Parameter	Range
Beam speed(mm/sec) - Overlap coef.(N : constant)	600-1, 300-2, 200-3, 150-4, 120-5, 100-6
Fluence per laser pulse(J/cm ²)	82, 78, 73, 68
Beam diameter (μm)	15 (fixed)
Pulse repetition rate(kHz) - Pulse width(ns)	40-16.5 (fixed)
Max. Laser pulse energy(μJ)	145

본 논문에서 레이저 가공 시 발생하는 HAZ (Heat-Affected Zone)은 두 가지 형태로 구분한다. Trivial-HAZ(이하 T-HAZ)으로 열 영향에 의해 물성의 변화는 일어나지 않으며 변색되는 정도의 가벼운 변형이 이루어지는 것을 의미한다. Severe-HAZ(이하 S-HAZ)으로 열 영향에 의해 물성의 변화가 나타나 탄화되는 현상이 나타나는 정도의 심한 변형이 이루어지는 것을 의미한다. 이러한 HAZ 의 구분은 레이저 플루언스의 크기에 따라 PI 필름의 반응 특성이 다르기 때문이다. Fig. 5 는 PI 필름이 표면에 있는 CI sheet 를 서로 다른 조건에서 가공한 결과로, 두 가지 형태의 THZ 을 쉽게 구분할 수 있으며, Fig. 6 은 T-HAZ 을 세정한 후의 표면 상태로 열 영향에 의한 물성변화가 없음을 알 수 있다.



(a) T-HAZ (b) S-HAZ
 $(F_{pulse}=82.09J/cm^2, f_{pulse}=40kHz, \phi_{beam}=15\mu m, F_{total}=2955J/cm^2)$
 Fig. 5 Two types of HAZ : (a) $v_{beam}=600mm/sec, N=1, NOR=36$, (b) $v_{beam}=100mm/sec, N=6, NOR=6$

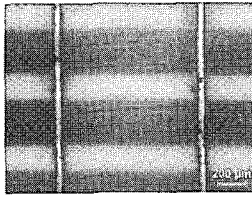


Fig. 6 Cutting state after cleaning of a T-HAZ

4.1 레이저 절단 플루언스

각 테스트 시료의 $F_{thres-cutoff}$ 는 Table 3 과 같다. OL sheet 가 가장 두꺼운 시료이며, C1 sheet 가 가장 높은 $F_{thres-cutoff}$ 를 필요로 한다. Table 3 으로부터 $F_{thres-cutoff}$ 는 시료의 두께보다는 층 구성물질에 영향을 많이 받는 것으로 판단되며, 그 주된 물질은 Cu-metal 층과 보강판과 절연체로 사용되는 PI 필름이다.

Table 3 $F_{thres-cutoff}$ of the test sheets

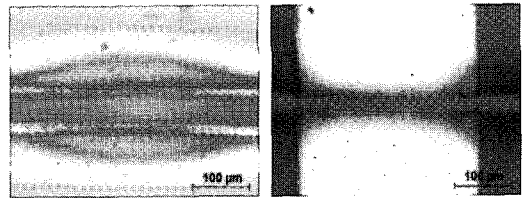
Test sheet	Thickness(μm)	$F_{thres-cutoff}$ (J/cm ²)
OL	200	1781~1970
C1	190	2740~2955
CP	110	2109~2134
C2	80	410~468

OL sheet 의 절단 상태는 레이저 빔이 조사된 윗면에서 열 영향에 의해 변색된 부분이 관찰될 뿐이며, 아랫면에서는 절단선에 찌꺼기가 존재하는 것이 관찰된다.

CP sheet 의 경우, 레이저 빔이 조사된 윗면에서 S-HAZ 이 관찰되며, 약 100μm 정도의 영역은 미세한 분말 형태의 debris 로 오염되어 있는 것이 관찰된다. 아랫면에서는 절단선 주변에만 S-HAZ 이 관찰되며, debris 에 의한 오염은 없다.

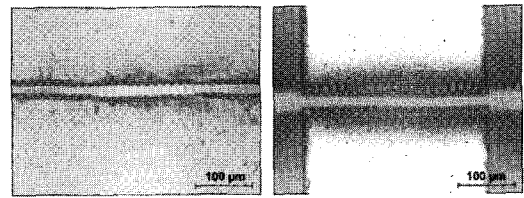
C1 sheet 의 절단공정은 레이저 빔의 조사면에 따라 두 가지 방법이 가능하다. 첫 번째는 보강판에 레이저 빔을 조사하는 것이고, 두 번째는 Cu-metal 패턴 면에 레이저 빔을 조사하는 것이다. C1 을 절단하기 위한 $F_{thres-cutoff}$ 를 도출하기 위한 실험에서는 두 가지 조사방법을 모두 실험하였다. 보강판이 접착된 면에 레이저 빔을 조사한 경우, $F_{thres-cutoff}$ 는 2740~2955 J/cm² 이며, Cu-metal 패턴이 있는 면에 레이저 빔을 조사한 경우, $F_{thres-cutoff}$ 는 2796~3037 J/cm² 으로 유사하였다. 그러나 보강판 면은 Fig. 7(a)에서와 같이 레이저 빔에 의해 T-HAZ 이 발생하였고, Cu-metal 패턴 면은 Fig. 8(b)에

서와 같이 레이저 빔에 의해 S-HAZ 이 발생하였다. 위 두 가지 공정방법을 비교한 결과, 공정 조건 및 성능은 유사하나, 보강판 면에서 레이저 빔을 조사하는 공정방법이 FPCB 의 전기적 신호연결을 위해 중요한 Cu-metal 패턴의 절단상태가 우수하기 때문에, 본 논문에서는 보강판 면에서 레이저 빔을 조사하는 공정으로 실험을 수행하였다.



(a) Stiffener side(top) (b) Cu-metal side(bottom)

Fig. 7 Laser beam incidence on the stiffener side



(a) Stiffener side(bottom) (b) Cu-metal side(top)

Fig. 8 Laser beam incidence on the Cu-metal pattern side

C2 sheet 의 절단선은 제조 사양에 따라 다르지만 일반적으로 커넥터 패턴 위쪽의 base film 상에 생성된다. 레이저 빔이 조사된 윗면에서는 절단선을 중심으로 두 가지 형태의 열 반응 영역이 나타난다. 약 50~100μm 범위 내의 영역은 접착 층이 열 반응으로 인해 물성이 변화하는 S-HAZ 로 구분되며, 탄화현상은 관찰되지 않으나, 경화된 상태로 외부 충격에 의해 떨어져 나가는 현상이 관찰되었다. 절단선을 중심으로 약 100~500μm 정도의 영역 또한 접착 층이 열 반응으로 변색된 것으로 판단된다. 그러나 이는 세정에 의해 제거되지는 않으며, 탄화현상 및 열 경화로 인한 특징 또한 관찰되지 않는다. 아랫면은 단지 절단선에서 열 영향이 관찰될 뿐 debris 에 의한 오염은 관측되지 않는다.

4.2 다층 FPCB 절단 특성

테스트 시료 별 절단 성능은 Table 4 와 같다. F_{total} 는 실험에 적용된 Table 2 의 $F_{thres-cutoff}$ 를 기준으로 구성된 레이저 및 공정 매개변수의 조합 중 테스트 시료가 절단된 레이저 플루언스의 최대-최

소값으로, 매개변수 조합과 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 테스트 시료 중 가장 얇고 단순한 층 구조를 가진 C2 sheet의 절단 폭이 가장 작았으며, 절단속도도 가장 높았다. C1 sheet의 절단속도가 가장 낮았으며, 이것은 보강판으로 사용된 두꺼운 PI 필름을 절단하기 위해 높은 F_{total} 가 필요했기 때문이다. C1 sheet의 절단 폭은 Table 4에서 Cu-metal 패턴영역(이하 C1-Cu 영역)과 Cu-metal 패턴이 없는 영역(이하 C1-PI 영역)의 두 가지로 구분하여 제시하였으며, 절단 후 아랫면의 C1-Cu 영역과 C1-PI 영역에서 약 3.1 μ m의 단차가 발생하였다. 절단 폭은 평균값이며, 각 테스트 시료 절단 폭의 표준편차는 1~2 μ m로 매우 작았다. 이는 $F_{thres-cutoff}$ 와 유사한 레이저 플루언스를 공급할 경우, 절단여부 및 절단 폭에 대한 레이저 및 공정 매개변수의 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

Table 4 Cutting characteristics of the test sheets

Layer	F_{total} (J/cm ²)		Cutting width(μ m)		Cutting speed (mm/s)
	Min.	Max.	Top	Bottom	
OL	1766	2055	40.45	11.52	25.0
CP	2055	2462	22.14	10.93	23.0
C1-PI	2740	3125	39.43	15.66	16.7
C1-Cu			38.18	9.41	
C2	368	548	17.29	8.82	120.0

OL sheet와 C1 sheet는 레이저 빔 조사면이 PI 필름이며, 표면 절단 상태는 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 T-HAZ와 S-HAZ가 유사하게 발생하였다. 두 테스트 시료 모두 빔 이동속도가 100~150 mm/sec ($N=4, 5, 6$)에서 다른 매개변수의 조건에 관계없이 S-HAZ가 발생하였다. 이는 레이저 빔에 의해 공급되는 총 에너지가 $F_{thres-cutoff}$ 와 유사하더라도 이동속도가 낮아 중첩계수가 높은 경우에는 열 축적에 의한 열 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 특이한 점은 OL sheet에서는 HAZ의 폭이 일정하지만, C1 sheet에서는 빔 이동속도가 200 mm/sec ($N=3$) 이상인 경우에 발생한 T-HAZ의 폭이 Fig. 5(a)와 같이 C1-Cu 영역은 좁고 C1-PI 영역은 넓은 형태로 나타난다. 이는 PI 필름과 접착 필름의 UV 파장에 대한 흡수율이 Cu-metal의 흡수율보다 좋으나, Cu-metal 패턴 층의 열 전도도가 상대적으로 높고, Cu-metal 패턴 표면에서의 냉각효과로 인해

C1-Cu 영역에서 열에 의한 영향이 적게 나타난 것으로 판단된다. 즉 C1-PI 영역의 경우 UV 파장의 레이저 빔 흡수율은 작으나, 상대적으로 낮은 열전도도로 인해 C1-Cu 영역을 절단하기 위한 과도한 에너지에 의해 축적된 열에 의해 C1-Cu 영역보다 T-HAZ가 넓게 나타나는 것이다. 또한 이러한 특성으로 인해 동일한 에너지를 공급하였을 경우 C1-Cu 영역과 C1-PI 영역의 절단 폭 차이가 약 6 μ m 발생하였다.

아랫면의 경우, HAZ는 특별히 관찰되지 않으며, 다만 레이저의 빔 이동속도가 느린 경우에 C1-Cu 영역과 C1-PI 영역의 경계면에서 열 영향이 관찰되었다. OL sheet의 아랫면의 절단상태는 이동속도가 낮을수록 절단폭은 일정하게 유지되나, 이

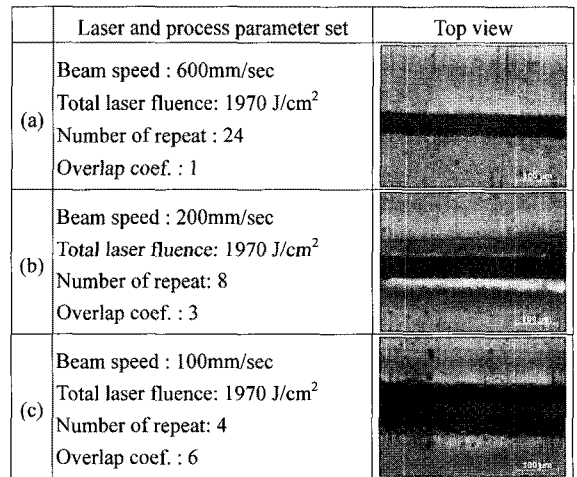


Fig. 9 Cutting qualities of the OL sheet($F_{pulse}=82$ J/cm²)

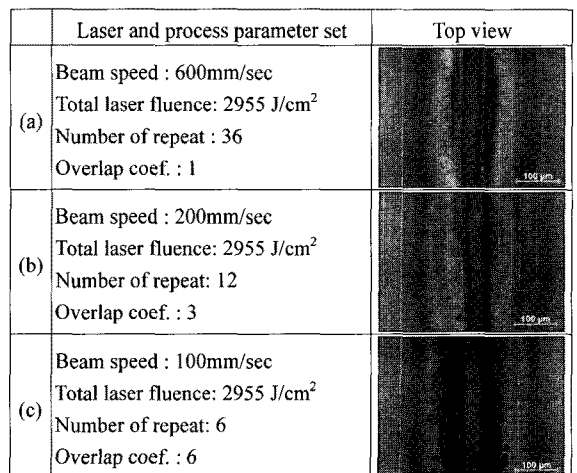


Fig. 10 Cutting qualities of the C1 sheet($F_{pulse}=82$ J/cm²)

동속도가 높을수록 절단폭은 불규칙하였다. 또한 대부분의 경우에 있어 절단선 주변에 찌꺼기가 관찰되었으며, 빔 이동속도가 높을수록 덩어리 형태로 나타났다.

CP sheet 의 윗면의 절단상태는 모든 조건에서 Fig. 11 과 같이 S-HAZ 이 발생하였으며, 빔 이동속도가 느릴수록 굵은 형태의 debris 가 발생되었다. 아랫면의 절단상태는 모든 조건에서 절단선 주변에만 S-HAZ 이 발생하였으나 폭은 매우 작다. 또한 빔 이동속도가 느릴수록 절단폭이 불규칙하였다. 또한 절단선 주변에 찌꺼기가 많았다.

C2 sheet 의 절단상태는 윗면과 아랫면 모두 빔 이동속도가 낮을수록 절단선 주변에 찌꺼기발생과 그 폭이 증가하였다. 발생된 찌꺼기는 레이저 빔

에 반응하여 열 경화되어 취급과정에서 쉽게 이탈되었다. 특히 Fig. 12(c)와 같이 윗면에서는 빔 이동속도가 낮을수록 접착 필름과 PI 필름의 절단폭에서 차이가 발생하였다.

위 테스트 시료들의 아랫면에서 절단선 주변에 발생된 찌꺼기는 구성물질 중 접착 필름과 PI 필름이 광열적 반응에 의해 용융되었으나 완전히 어블레이션 되지 못하고 주변에 붙어 굳은 것으로 판단된다.

테스트 시료에 대한 절단 실험결과로 볼 때, $F_{thres-cutoff}$ 와 유사한 레이저 플루언스를 공급할 경우 매개변수 변화에 관계없이 유사한 절단 성능을 구현할 수 있었다. 그러나 레이저 빔이 조사된 윗면과 아랫면의 절단상태는 매개변수 변화에 영향을 받았다. 우수한 절단 상태를 위한 공정조건은 Fig. 13 과 같이 중첩계수 N 이 2 또는 3 인 경우로, 이때의 빔 이동속도는 본 논문에서 개발된 레이저 시스템의 경우 200mm/sec 또는 300mm/sec 이다. 중첩계수 $N=1(600\text{mm/sec})$ 인 경우도 적용은 가능하나, 절단선이 레이저 빔 형상으로 인해 직선이 아닌 물결모양이다. Fig. 13 에 표시된 모든 점들은 2 단계 실험의 모든 레이저 및 공정 매개변수 조합들을 나타내며, 이 중 검은색은 최적의 조건을 표시한 것으로, 동일한 총 레이저 플루언스를 공급하더라도, 이를 위한 F_{pulse} 와 N 에 따른 v_{beam} 가 중요한 매개변수임을 알 수 있다.

다른 사양의 레이저 시스템을 이용할 경우, 중첩계수 N 을 2 또는 3 으로 설정하고, 식 (1)에 의해 빔 이동속도를 결정한다. 중첩계수와 시스템의 F_{pulse} 를 이용하여 도출된 $F_{thres-cutoff}$ 와 유사한 F_{total} 가 되기 위한 반복가공횟수를 계산하여 시스템에 적용하면 유사한 절단상태를 얻을 수 있다.

	Laser and process parameter set	Top view
(a)	Beam speed : 600mm/sec Total laser fluence : 2134 J/cm ² Number of repeat : 26 Overlap coef. : 1	
(b)	Beam speed : 200mm/sec Total laser fluence : 2216 J/cm ² Number of repeat : 9 Overlap coef. : 3	
(c)	Beam speed : 100mm/sec Total laser fluence : 2462 J/cm ² Number of repeat : 5 Overlap coef. : 6	

Fig. 11 Cutting quality of the CP sheet($F_{pulse}=82 \text{ J/cm}^2$)

	Laser and process parameter set	Top view
(a)	Beam speed : 600mm/sec Total laser fluence : 410 J/cm ² Number of repeat : 5 Overlap coef. : 1	
(b)	Beam speed : 200mm/sec Total laser fluence : 492 J/cm ² Number of repeat : 2 Overlap coef. : 3	
(c)	Beam speed : 100mm/sec Total laser fluence : 492 J/cm ² Number of repeat : 1 Overlap coef. : 6	

Fig. 12 Cutting qualities of the C2 sheet($F_{pulse}=82 \text{ J/cm}^2$)

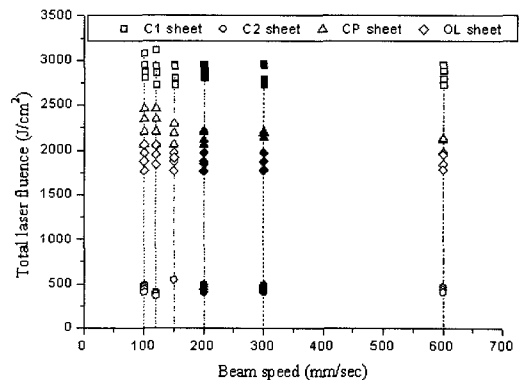


Fig. 13 Optimal range of the laser and the process parameters

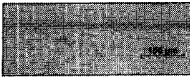
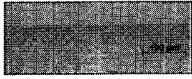

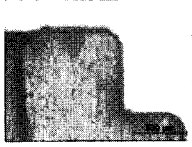
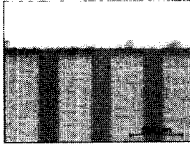
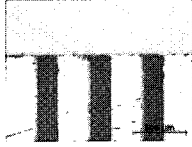
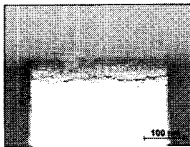
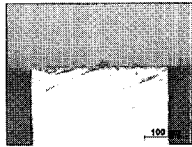
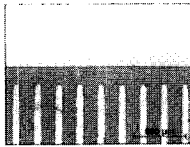
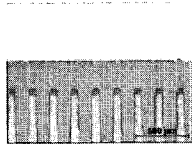
Test sheet	Punching	Laser cutting
OL		
CP		
C1		
		
C2		

Fig. 14 The comparison of qualities between laser cutting and mechanical punching

Table 4 를 바탕으로 계산된 테스트 모델(절단선의 총 길이 304.8mm)의 평균 절단속도는 46.14 mm/sec (평균 절단소요시간 6.6sec)이며, 윗면의 평균 절단폭은 31.5 μ m, 아랫면의 평균 절단폭은 11.27 μ m 이다. 실험에 사용된 모델에 대해 금형을 이용한 펀칭 공정의 절단속도는 45.7mm/sec 이며, 레이저 절단속도는 46.2mm/sec 이다. 펀칭 공정 조건은 총 2 회 타발 수행(내측, 외측), 소요시간 40 초(1 회당 20 초), 총 절단길이 1828.8mm(6 개의 단품을 동시에 절단)이다.

Fig. 14 는 테스트 시료의 각 부분에 대한 펀칭 공정과 레이저 공정의 절단 상태를 비교한 것이다. C2 sheet 와 OL sheet 는 두 공정방법의 절단 상태가 거의 유사하다. 그러나 CP sheet 의 경우 펀칭 공정에서 발생한 크랙이 레이저 공정에서는 발생하지 않는 것을 알 수 있다. C1 sheet 에서 커넥터 말단이 레이저 공정을 수행하였을 때 깨끗한 절단 상태를 확인할 수 있었으며, 특히 Cu-metal 패턴에서의 크랙이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 Nd:YAG UV 레이저를 이용하여 FPCB 절단 테스트를 수행하고 레이저 및 공정매개변수 변화에 따른 절단 상태 및 특성을 분석하였다. FPCB 특정 모델의 절단선과 동일한 물질구성과 층 구조를 가지는 테스트 시료를 제작하여 절단실험을 수행하였다. 테스트 시료를 절단하기 위한 임계 레이저 절단 플루언스를 도출하였고, 레이저 및 공정매개변수 조합을 구성하여 도출된 임계 레이저 절단 플루언스 주변 값을 실험에 적용하였다.

실험결과, 각 테스트 시료 별로 레이저 및 공정매개변수 변화에 대해 절단폭과 절단속도 등의 절단성능은 거의 유사하였다. 그러나 레이저 빔이 조사된 표면의 절단상태는 레이저 및 공정 매개변수 변화에 따라 차이를 보였다.

CP sheet 를 제외한 모든 테스트 시료는 F_{pulse} 가 68~82 J/cm² 일 때, 빔 이동속도 200mm/sec(N=3) 또는 300mm/sec(N=2)에서 절단상태가 우수하며, 높은 절단속도를 구현할 수 있는 것으로 판단된다. 이때 반복가공횟수는 중첩계수에 따라 다르며, 총 레이저 플루언스도 반복가공횟수와 중첩계수에 따라 약간의 차이가 있었다. 본 논문에서 사용된 레이저 시스템의 경우 최상의 절단상태를 구현하기 위한 레이저 및 공정 매개변수 중 중첩계수 N=3 (빔 이동속도 200mm/sec)을 기준으로 F_{pulse} =82 J/cm² 일 때 반복가공횟수와 총 레이저 플루언스는 OL sheet 는 8 회-1970 J/cm², C1 sheet 는 12 회-2955 J/cm², CP sheet 는 9 회-2216 J/cm², C2 sheet 는 2 회-492 J/cm² 이었다.

실험을 위해 선정된 FPCB 에 대한 절단속도는 단품 6 개를 동시에 절단하는 펀칭 공정은 약 45.7mm/sec 이며, 레이저 공정은 46.2mm/sec 이나, 절단 품질은 더 우수하였다.

다만, 레이저 빔의 이동속도가 낮아 중첩계수가 커질수록 S-HAZ 이 발생하여 절단 품질에 떨어지는 경향이 있다. 특히 CP sheet 의 경우 모든 레이저 및 공정 매개변수 조건에서 S-HAZ 이 발생하고, debris 에 의한 오염이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 또한 C1 sheet 에서는 동일한 레이저 절단 플루언스에 의해 C1-Cu 영역과 C1-PI 영역의 절단폭에서 단차가 발생함을 알 수 있었다. 이러한 문제는 현재의 산업응용에는 문제가 되지 않으나, 향후 이의 개선을 위한 기초연구가 필요하다.

참고문헌

1. Huske, M., "Burr and Stree-Free Cutting of Flexible Printed Circuits," OnBoard Technology 6, pp. 18-21, 2006.
2. Oh, J. Y. and Shin, B. S., "A Study on Laser Ablation of Copper Thin Foil by 355nm UV laser Processing," J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 134-139, 2007.
3. Shin, D. S., Lee, J. H., Suh, J. and Kim, T. H., "Excimer laser induced ablation of PMMA and PET," J. of Korean Society of Laser Processing, Vol. 6, No. 1, pp. 33-40, 2003.
4. Yoon, K. K. and Bang, S. Y., "Modeling of polymer ablation with excimer lasers," J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 60-68, 2005.
5. Shin, B. S., Oh, J. Y. and Sohn, H., "Theoretical and experimental investigations into laser ablation of polyimide and copper films with 355-nm Nd:YVO₄ laser," J. of Material Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 260-263, 2007.
6. Shin, D. S., Lee, J. H., Suh, J. and Sohn, H. K., "Laser Cutting process for FPCB using ps and ns UV laser," Proc. of the KSPE Spring Conference, pp. 329-330, 2008.
7. Bae, H. S., Ryu, K. H. and Nam, G. J., "Study of Laser Machining Properties about Raw Material FPCB," Proc. of the KSPE Spring Conference, pp. 379-380, 2008.
8. Chung, Y. W., Lee, J. H., Sohn, H. K., Shin, D. S. and Kim, J. H., "A Study on FPCB machining by picosecond laser ablation," Proc. of the KSPE Spring Conference, pp. 25-26, 2007.
9. Meier, D. J. and Schmidt, S. H., "PCB Laser Technology for Rigid and Flex HDI-Via Formation, Structuring, Routing," IPC Printed Circuits Expo, 2002.
10. Henry, M., Harrison, P., Wendland, J. and Parsons-Karavassilis, D., "Cutting flexible printed circuit board with a 532nm Q-switch diode pumped solid state laser," Proc. of ICALEO, Paper No. M804, 2005.