

나노초 및 피코초 레이저를 이용한 FPCB의 절단특성 분석

신동식, 이제훈, 손현기, 백병만
한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

FPCB Cutting Process using ns and ps Laser

Dongsig Shin, Jaehoon Lee, Hyonkee Sohn and Byoungman Paik

Intelligent Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

Ultraviolet laser micromachining has increasingly been applied to the electronics industry where precision machining of high-density, multi-layer, and multi material components is in a strong demand. Due to the ever-decreasing size of electronic products such as cellular phones, MP3 players, digital cameras, etc., flexible printed circuit board (FPCB), multi-layered with polymers and metals, tends to be thicker. In present, multi-layered FPCBs are being mechanically cut with a punching die. The mechanical cutting of FPCBs causes such defects as burr on layer edges, cracks in terminals, delamination and chipping of layers. In this study, the laser cutting mechanism of FPCB was examined to solve problems related to surface debris and short-circuiting that can be caused by the photo-thermal effect. The laser cutting of PI and FCCL, which are base materials of FPCB, was carried out using a pico-second laser(355nm, 532nm) and nano-second UV laser with adjusting variables such as the average/peak power, scanning speed, cycles, gas and materials. Points which special attention should be paid are that a fast scanning speed, low repetition rate and high peak power are required for precision machining.

Key Words: Pico-second laser(피코초 레이저), nano-second laser(나노초 레이저), FPCB(연성회로기판), FCCL(연성동박적층필름), laser cutting(레이저 절단)

기호설명

λ = 파장(nm)
 Φ = 초점크기(μm)
 E_u = 단위길이 당 주입에너지(J/mm)
 P_{ave} = 평균출력(W)
 $Rep.$ = 펄스 반복율(Hz)
 v = 빔 조사속도(mm/s)
 t = 단위길이 당 절단시간(s·cycles/mm)
 N = 절단에 필요한 조사회수(cycles)
 D_p = 펄스폭(ps, ns)

1. 서론

FPCB(Flexible Printed Circuit Board)는 필름,

노광, 현상, 에칭, 박리, 가접 및 도금 등의 공정 후 타발공정을 통하여 최종적으로 절단이 된다. 현재 대부분의 타발공정은 금형에 의한 타발공정으로서 Punch와 Die를 이용한 Bridge형 금형 및 전단 방식의 절단 금형을 사용하고 있다.

Table 1은 금형공정과 레이저 가공공정을 비교한 지표로서 기존의 금형공정은 레이저 가공공정에 비해 높은 생산성을 가지는 장점이 있으나 절단면이 거칠고, 필름이 찢어지는 현상이 발생하며, 접촉단자에서 크랙 등의 현상이 발생하는 등 정밀도에 한계가 노출되어 전자 제품의 소형화 및 슬림화 추세에 부응하기 어려운 단점이 있다^{1,4}.

반면 레이저 가공공정은 단공정으로서 간편하여 다품종 소량생산의 추세에 부합되며 정밀가공이 가능하여 소형화 및 슬림화 추세에 적합한 장점이 있지만 이는 적정 레이저 변수를 선정하여 최적의

Table 1 Punching and laser cutting process of FPCB.

Process	Punching process	Laser cutting
mass productivity	High(500-600 punching/hr)	low
flexibility (production)	Low(design>2days, >10,000\$)	High(design<several hours)
process	two steps or several steps	single step
limitation	- coarse cutting edge - delamination onf film - crack on the terminal - low accuracy ($\pm 0.1mm$)	- surface debris - electronic short - low productivity

Table 2 Quality and productivity in laser cutting process of FPCB.

product	process	Laser cutting	
		Quality	Productivity
Single Layer FPCB		◎	△
Double Layer FPCB		◎	△
Multi-Layer FPCB		△	△
R-FPCB	Rigid part	×	×
	Flexible part		

◎: most excellent, ○: excellent, △: normal, ×: weak

Table 3 Experimental conditions.

Variables	Symbols	Picosecond (ps) laser (RAPID: Lumera)		Nanosecond (ns) laser (Q302-HD: JDSU)
		532	355	355
Wavelength (nm)	λ	532	355	355
Spot size (μm)	ϕ	30		
Focal length (mm)	f	100		160
Pulse duration (sec)	D_p	12×10^{-12}		80×10^{-9}
Average power (W)	P_{ave}	1.8-3.9	0.6	8.0

가공품질을 달성하였을 경우에 한정한다. 즉 공정 최적화가 이루어지지 않았을 경우 Surface debris, 및 단락현상(절단면의 용착 및 열반응에 의한) 등의 문제가 발생할 수 있어 메커니즘의 이해를 통해 상기 결함을 최소화 할 수 있는 공정의 개발이 필요하다⁵⁻⁸. 이러한 단점은 Table 2에서 보여주는 바와 같이 Rigid-FPCB의 레이저 가공이 어려운 원인으로 작용하고 있다.

본 논문에서는 레이저 가공의 문제점인 FPCB에서의 낮은 생산성과 열영향을 보완하기 위한 실험내용을 다루고 있으며 극초단펄스 레이저와 나노초 UV레이저를 이용하여 FPCB의 기반재료인 FCCL(Flexible Copper Clad Laminate)를 절단하며 생산성 및 열영향을 비교하고 있다.

2. 실험방법

본 실험은 FPCB의 레이저 가공시 발생했던 문

제점인 낮은 생산성과 열영향을 개선하기 위한 새로운 공정에 대한 시도로써 나노초 UV레이저 및 피코초 레이저의 가공공정비교에 초점을 맞추고 있다. Table 3은 실험에 사용된 레이저 및 가공변수로서 12피코초의 펄스폭(D_p)을 가지는 빔이 조사 가능한 피코초레이저 Super(RAPID, Lumera laser GmbH)와 80나노초의 펄스폭(D_p)의 빔을 조사하는 나노초 UV레이저(JDSU사 Q302-HD)의 가공성능을 비교분석하였다. 실험에 있어 초점크기(ϕ)에 의한 가공성의 차이를 배제하기 위하여 초점크기를 동일하게 설정하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 FCCL(Flexible Copper Clad Layer: 연성동박적층필름)에 대한 도식으로서 원재료인 폴리이미드(PI) 필름과 동박을 점착층을 사이에 두고 붙이는 다층으로 구성된다. 이는 휴대폰·LCD 등에 주로 쓰이는 연성회로기판(FPCB)의 핵심 소재로서 FCCL에 에칭 등을 통해 필요한 회로를 형성하면 FPCB가 된다.

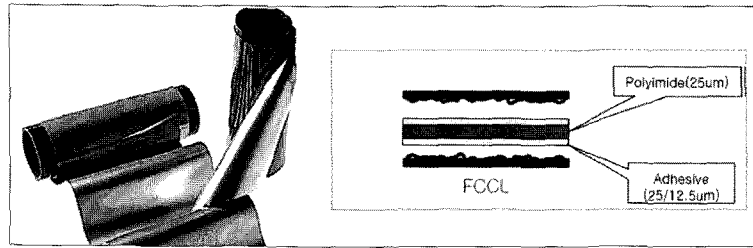


Fig. 1 Picture and layered structure of FCCL.



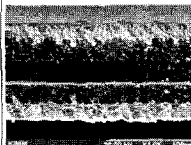

	E_u (J/mm)	f (s/mm)	cross-sectional View	
ps-laser	0.2	0.33		
			0.6 W, 200 kHz, 300 mm/s, 100 cycles, 12 ps	0.6 W, 400 kHz, 300 mm/s, 100 cycles, 12 ps
ns-laser	0.16	0.02		
			8 W, 30 kHz, 200 mm/s, 4 cycles, 80 ns	8 W, 30 kHz, 1000 mm/s, 20 cycles, 80 ns

Fig. 2 SEM images of the cut edge of FCCL using ps-laser and ns-laser in 355 nm wavelength.



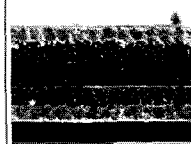
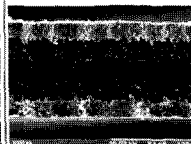
	E_u (J/mm)	f (s/mm)	cross-sectional View	
ps-laser (532nm)	0.2	0.33		
			2.6W, 100kHz, 300mm/s 50cycles, 12ps	3.9W, 100kHz, 1000mm/s 130cycles, 12ps
ns-laser (355nm)	0.16	0.02		
			8 W, 30 kHz, 400 mm/s, 8 cycles, 80 ns	8 W, 30 kHz, 1600 mm/s, 32cycles, 80 ns

Fig. 3 SEM images of the cut edge of FCCL using 532 nm ps-laser and 355 nm ns-laser.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 피코초 레이저와 나노초 레이저 그리고 355 nm와 532 nm의 파장에 따른 생산성 및 열영향을 비교하고 있다. 피코초와 나노초 레이저의 비교에서 동일한 침투출력을 형성시키기 불가능하며 동일한 평균출력을 맞추기 위해 나노

초 레이저의 출력을 낮출 경우 가공이 되지 않는 문제가 있어 각 레이저의 최고출력에서 비교실험을 진행하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 355 nm 및 532 nm의 파장에서 피코초(12 ps)와 355 nm파장의 나노초(80 ns)의 가공성을 비교하기 위해 단위길이 당 주입에너지(E_u) 및 단위길이 당 절단시간(f)의 개념을 적용하

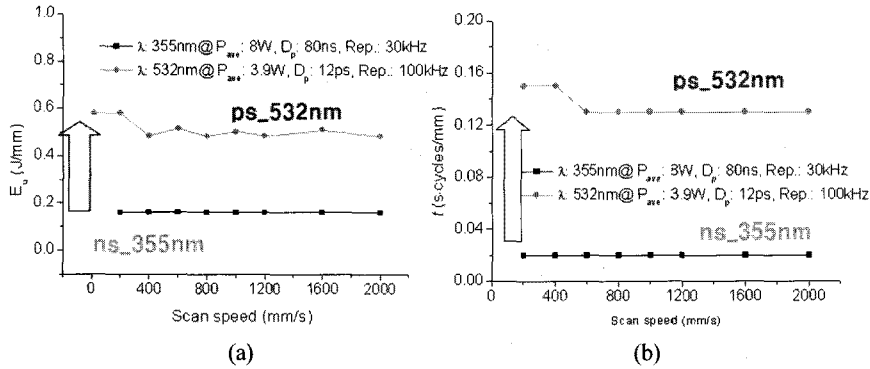


Fig. 4 Comparison of (a) input energy and (b) process time between 355 nm ns-laser and 532 nm ps-laser.

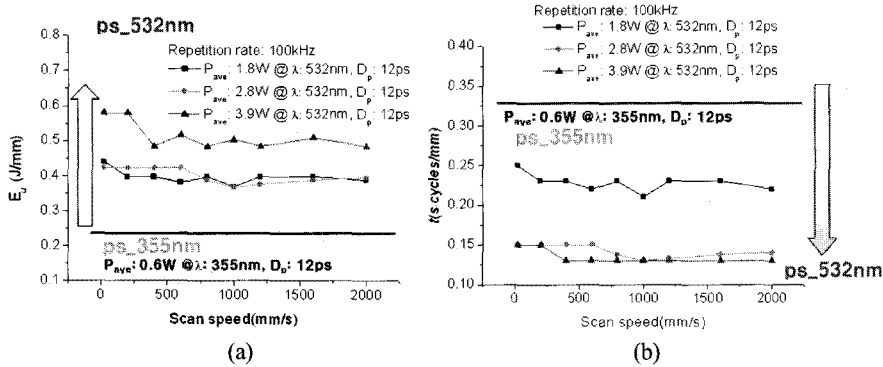


Fig. 5 Comparison of (a) input energy and (b) process time between 355 nm ps-laser and 532 ns ps-laser.

였다. 식 (1)은 단위길이 당 주입된 에너지를 나타내는 식으로서 펄스에너지(평균출력/펄스반복률)와 단위길이당 주입된 펄스의 수(펄스반복률/조사속도)의 곱으로 정의할 수 있다. 또한 단위길이 당 절단시간은 절단에 필요한 조사회수(N)에 조사속도를 나눈 값으로서 식 (2)로서 정의할 수 있다.

$$E_u = \frac{P_{ave}}{Rep.} \times \frac{Rep.}{v} = \frac{P_{ave}}{v} \quad (1)$$

$$t = \frac{N}{v} \quad (2)$$

실험결과 단위길이 당 주입에너지(E_u)는 나노초 레이저(8 W)의 경우 피코초레이저(0.6 W)에 비해 적은 에너지가 주입되었고 단위길이 당 절단시간(t)는 나노초 레이저(8 W)의 경우 피코초 (0.6 W)에 비해 15배 빠른 절단시간을 가진다는 것을 알 수 있었다. 그렇지만 열영향에 있어서는 피코초 레이저의 경우 나노초의 경우에 비해 열적 영향이 적어 정밀절단에 유리하다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 4는 피코초 355 nm, 532 nm(0.6~3.9 W)와 나노초 355 nm(8 W)의 단위길이 당 주입에너지 및 절단속도를 비교하고 있는 그래프로서 실험결과 피

코초 532 nm(1.8-3.9 W)를 이용하여 FCCL을 절단하는 경우 나노초 355 nm(8 W)에 비해 3배의 단위길이 당 에너지가 필요하고 나노초 355 nm(8 W)에 비해 단위길이 당 절단시간은 약 7배 길어지는 현상이 발견되었다. 나노초 레이저의 경우 가공속도가 빠른 이유로서는 열적영향에 의한 것으로 판단되며 이로 인하여 가공품질 측면에서는 피코초 532 nm가 우수하다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 피코초 영역에서의 355 nm 와 532 nm에 대한 파장별 분석결과로서 피코초 532 nm(1.8~3.9 W)를 이용하여 FCCL을 절단하는 경우 355 nm(0.6 W)에 비해 2~3배의 단위길이 당 에너지를 필요하고 355 nm(0.6 W)에 비해 가공속도는 약 3배 빨라진다는 결론을 얻을 수 있었다. 즉 355 nm파장의 경우 532 nm파장의 경우보다 흡수율이 높아 단위길이 당 주입 에너지는 낮아지나 평균출력의 한계로 인하여 가공속도를 높일 수 없는 단점이 있었다. 이와 같은 실험결과와 Fig. 6에 나타난 구리의 흡수율로서 설명이 가능하다¹. 즉 레이저를 이용하여 FCCL을 가공할 경우 초기흡수는 구리층에서 발생하는데 355nm의 경우가 532nm의 경우에 비해 흡수율이 약 2배 가량 높기 때문에 가공속도에 영향을 준 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of FPCB cutting property using ns and ps laser.

	나노초 레이저(355 nm)	피코초 레이저 (355 nm/532 nm)	비 고
단위길이당 주입에너지(E_w)	0.16 J/mm(@ 8 W)	0.2 J/mm(@355 nm, 0.6 W) 0.4 J/mm(@ 532 nm, 2.8 W)	532 nm의 파장은 355 nm에 비해 구리층에서 흡수율을 저하
단위길이당 절단 시간(t)	0.02 sec/mm(@ 8 W)	0.33 sec/mm(@355 nm, 0.6 W) 0.12 sec/mm(@ 532 nm, 3.8 W)	피코초 레이저를 이용하여 절단속도를 높이려면 평균 출력을 개선하여야 함
구리층의 열적 영향	열적영향에 의한 용융물 다량 발견	용융물이 상대적으로 적게 발견	다층/고집적화의 추세에 따라 구리층의 비열적 가공조건 도출 필요

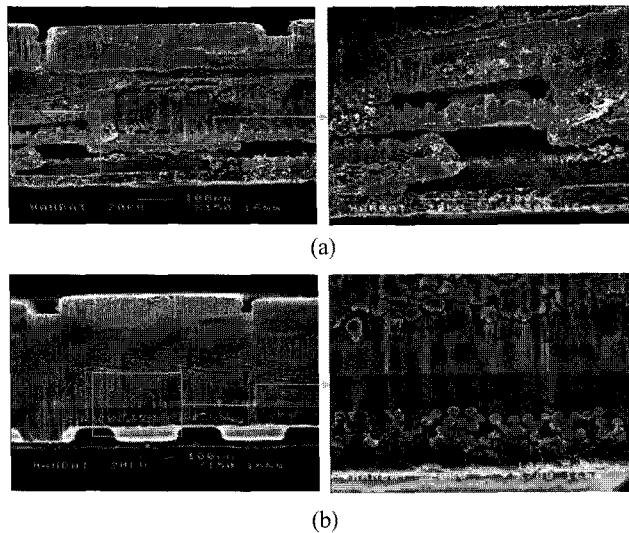


Fig. 7 SEM images of cut edge of rigid layer of FPCB under the followed conditions (a) ns-laser: 80ns, 355 nm, 30 kHz, 8 W, 1600 mm/s, 300 cycles and (b) ps-laser: 12 ps, 532 nm, 100 kHz, 3.8 W, 1000 mm/s, 1700 cycles.

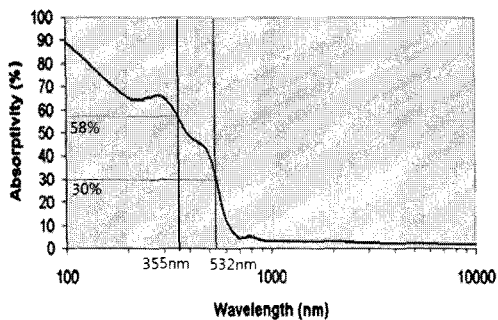


Fig. 6 Absorptivity of copper according to wavelength.

Fig. 7은 피코초 레이저 (532 nm)와 나노초 레이저(355 nm)를 이용한 Rigid-FPCB의 절단 결과를 비교한 절단면부의 SEM사진으로서 피코초 레이저의 경우 나노초 레이저를 이용하여 절단한 경우에 비해 용융물이 적게 형성되었다는 것을 알 수 있으며 Rigid층 내의 유리섬유 형상이 선명히 나타나는 것으로 보아 열적영향이 상대적으로 적다는 것을 보여주고있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 점선으로 표시된 부분(동일위치)의 성분분석(EDX)결과로서 피코초레이저를 이용한 가공결과는 모재성분인 Si와 O의 함량이 높게 나오는 반면 나노초레이저의 가공결과는 단자에서 볼 수 있었던 Cu성분이 높다는 것을 보여주고 있다. 이는 나노초 레이저의 경우 다층 FPCB의 경우 단락의 위험이 높아진다는 것을 보여준다.

4. 결론

기존의 FPCB 레이저절단 공정에서 문제점으로 제시되었던 단락현상을 최소화하기 위해 공정을 연구하기 시작하였으며 피코초 레이저와 나노초 레이저를 이용하여 열적영향이 최소화 되는 조건을 도출하고자 하였다. 실험결과 나노초 레이저는 피코초 레이저 355 nm 및 532 nm 파장의 빔에 비

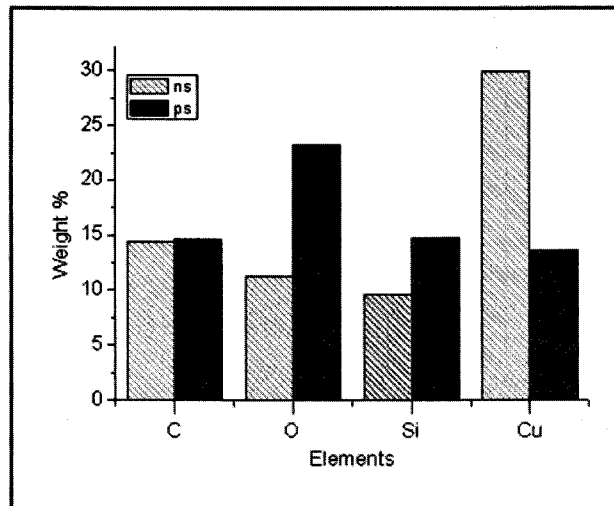


Fig. 8 Comparison of EDX analysis results in dot line of Fig. 7 between ns-laser and ps-laser cutting.

하여 단위길이 당 주입에너지가 다소 낮고 평균출력이 높아 절단속도가 뛰어나다는 것을 알 수 있었다. 그렇지만 구리층의 열적영향은 피코초 레이저가 나노초 UV레이저에 비하여 적다는 것을 알 수 있었다. 이로써 내릴 수 있는 결론은 나노초 레이저는 피코초 레이저의 경우에 비해 가공속도가 빨라 양산공정에 적합하며 피코초 레이저는 나노초 레이저에 비해 용융물이 적게 발생하여 다층/고집적화에 적합하나 출력이 낮은 단점이 있어 현대에서의 양산가공으로의 적용이 어렵다는 것을 보여준다. 그렇지만 여러 선도 업체에서 극초단 펄스레이저의 고출력화에 대한 시도가 이루어지고 있으므로 생산성의 문제는 빠른 시일 내에 해결될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 차세대신기술개발사업인 “레이저 미세가공공정 및 시스템 상품화 기반 기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Matt Henry, Paul Harrison, Jozef Wendland, Ducan Parsons-Karavassilis, “Cutting Flexible Printed Circuit Board with a 532 nm Q-switched Diode Pumped Solid State Laser,” in proceedings of ICALEO 2005, pp. 412-419, 2005.
- 2) Schmidt, M., Eber, G., “The Future of Lasers in Electronics,” in Proceedings of ICALEO 2003, Jacksonville, Florida, LMF, pp. 112-123, 2003.
- 3) Owen, M.D. Electronic Packaging: Electrical Interconnects, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 1st Edition, Magnolia Publishing Inc, Chapter 25, pp. 661-665, 2001.
- 4) Meier, D.J., Schmidt, S.H., “PCB Laser Technology for Rigid and Flex HDI: Via Formation,” Structuring, and Routing, CircuiTree, 2002.
- 5) N. Arnold and N. Bityurin, “Model for laser-induced thermal degradation and ablation of polymers,” Appl. Phys. A Vol. 68, pp. 615-625, 1999.
- 6) G.C. D' Couto and S.V. Babu, “Heat transfer and material removal in pulsed excimer-laser-induced ablation: Pulse width dependence,” J. Appl. Phys. Vol. 76, pp. 3052-3058, 1994.
- 7) S.R. Cain, F.C. Burns, C.E. Otis and B. Braren, “Photothermal description of polymer ablation: Absorption behavior and degradation time scales,” J. Appl. Phys. Vol. 72, pp. 5172-5178, 1993.
- 8) N. Arnold, B. Luk'yanchuk and N. Bityurin “A fast quantitative modelling of ns laser ablation based on non-stationary averaging technique,” Appl. Surf. Sci. Vol. 127, 184-192, 1998.