

다층 PCB 기판의 미세 가공을 위한 UV레이저 어블레이션에 관한 연구

장원석, 김재구, 윤경구, 신보성, 최두선, 황경현(한국기계연구원 정밀가공그룹)

A Study on UV Laser Ablation for Micromachining of PCB Type Substrate

W.S. Chang, J.G. Kim, K.K. Yoon, B.S. Shin, D.S. Choi, K.H. Whang (Precision Machining Group, KIMM)

ABSTRACT

Recently micromachining using DPSSL(Diode Pumped Solid State Laser) with 3rd harmonic wavelength is actively studied in laser machining area. Micromachining using DPSSL have outstanding advantages as UV source comparing with excimer laser in various aspect such as maintenance cost, maskless machining, high repetition rate and so on. In this study micro-drilling of PCB type substrate which consists of Cu-PI-Cu layer was performed using DPSS Nd:YAG laser(355nm, wavelength) in vector scanning method. Experimental and numerical method(Matlab simulation, FEM) are used to optimize process parameters and control machining depth. The main mechanism of this process is laser ablation. It is known that there is large gap between energy threshold of copper and that of PI. Matlab simulation considering energy threshold of material is performed to effect of duplication of pulse and FEM thermal analysis is used to predict the ablation depth of copper. This study could be widely used in various laser micromachining including via hole microdrilling of PCB, and micromachining of semiconductor components, medical parts and printer nozzle and so on.

Key Words : DPSSL (Diode Pumped Solid State Laser), Laser micromachining (레이저 미세가공), PCB type substrate (PCB 형태의 모재), FEM thermal analysis (유한요소 열해석)

1. 서론

DPSSL(Diode Pumped Solid State Laser)의 3고조파를 이용한 미세형상 가공 기술은 최근 마이크로 비아홀 가공을 중심으로 활발히 연구되고 있다. 기존의 미세형상 가공에 사용되는 레이저로는 UV의 엑시머 레이저가 주종을 이루고 있었으나 일부 응용에 대해서는 DPSSL의 UV대역을 이용한 가공으로 급속히 변화가고 있는 추세이다. 그 이유 중의 하나는 미세가공을 위한 UV 파장대를 발전시키는 에너지원이 엑시머 레이저인 경우 출력이나 빔의 크기면에서 유리하나 마스크 제작의 비용, 시간 및 설계 변경문제, 위험한 가스의 관리 및 비용의 문제가 있기 때문이다. 따라서 유지보수가 간단하면서 출력이 안정되고 펄스 반복율이 높은 DPSSL의 벡터 스캐닝 방식의 가공방법이 최근 선호되고 있다.

UV에 의한 재료 가공은 광에 노출된 재료와의 작

용에 의해서 일어나며, 재료의 흡수성질에 따라 다르지만 폴리머의 경우 내부분자 결합이 열 영향에 의한 것이라기 보다는 광 화학 작용에 의해 파괴되어 급속히 외부로 나가며 그 과정은 레이저 빔 조사 후 약 20~30 μ s 이내에 이루어진다. 재료별 어블레이션 깊이/펄스는 단위 면적당 에너지 밀도에 의해 다르지만 관통가공이 아닌 경우 펄스 수에 의해 가공 깊이를 수 μ m급 이하로 제어할 수 있어 미세가공에 유리하다. 또한 구리의 경우 파장이 긴 CO₂ laser(10.6 μ m) 레이저는 흡수율이 낮아 가공이 어려우나 파장이 짧은 UV영역에서는 흡수율(65%)이 높아 열에 의한 미세가공이 가능하다. 이러한 친공 특징은 미세가공에 유리하여 회로기판 비아홀 가공, 반도체 부품 제작, 미세 마킹, 의료용 부품 제작 등 여러 산업 분야에 폭넓게 응용되고 있다.

본 연구에서는 Fig.1에서와 같이 단일 재료가 아닌 9 μ m의 구리층 사이에 25 μ m의 PI층이 들어가 있는

PCB type의 모재를 레이저로 미세 홀 가공을 할 때 적정 공정변수를 실험적으로 찾고 그때의 가공면 품질을 예측하기 위하여 상용 수학 코인인 Matlab과 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 열해석을 함으로써 이론적 접근을 시도하였다.

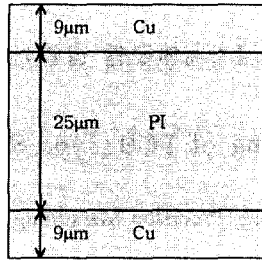
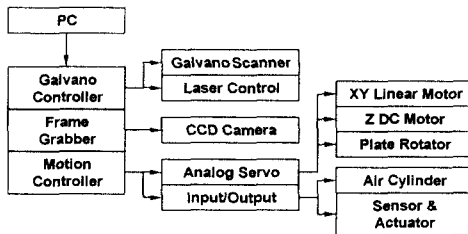


Fig.1 PCB type substrate layer

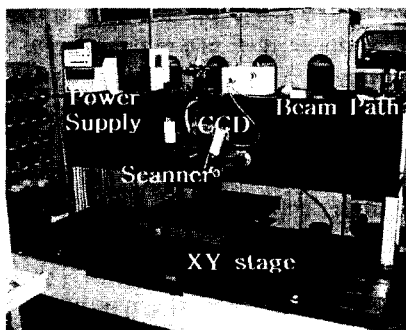
2. 레이저 미세 가공

2.1 시스템 구성 및 특징

레이저 가공을 위한 시스템의 기본적인 구성도 및 구성된 시스템의 사진은 Fig.2과 같다. PC 내부에 스캐너 컨트롤러, 회상 처리기, 모션 컨트롤러 등을 장착하여 천공에 필요한 모션 제어, 레이저 제어 및 모니터링을 할 수 있도록 하였고 이를 통합하는 S/W를 구성하였다.



(a) Diagram of system construction

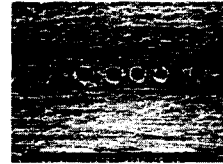


(b) Laser machining system

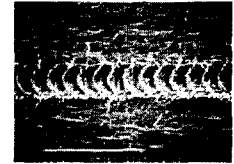
Fig.2 Laser micromachining system lay out

2.2 레이저 천공 실험

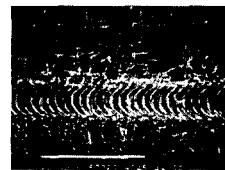
레이저 천공에 있어서 가공 프로세스의 가장 중요한 인자로는 펄스의 반복율과 스캐너의 미러 속도에 의한 펄스 중첩과의 관계이다. 사용되는 레이저의 발진이 펄스형태이므로 펄스 반복율과 스캐너의 미러 속도와의 관계로 인하여 다음 Fig.3에서와 같이 펄스 형태의 가공, 준 CW의 가공, CW-like 가공으로 나눌 수 있고 가공하고자 하는 형상과 공정에 따라 한가지 형태 또는 두가지 이상을 조합 사용하여야 한다.



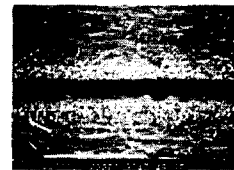
(a) 851mm/sec



(b) 213mm/sec



(c) 106mm/sec



(d) 53mm/sec

Fig.3 Laser pattern at the indicated values of marking speed with 15kHz pulse repetition rate

2.3 가공형상 시뮬레이션

본 연구에서는 가공 재료의 어블레이션 임계에너지 이상이 될 때 가공이 되는 특성을 이용하여 펄스의 중첩 정도에 따라 나타나는 가공면을 예측하기 위하여 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 시도하여 결과를 Fig.4에 나타내었다.

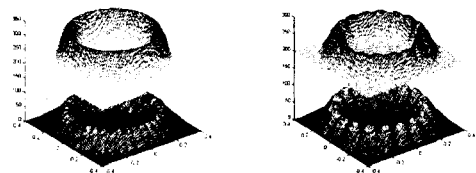
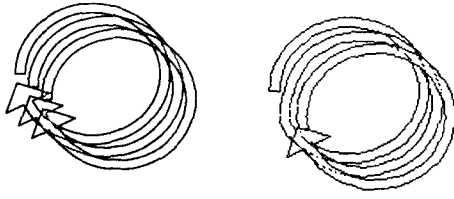


Fig.4 Estimation of the result of duplicated pulses

구리의 레이저 천공에 있어서 1회전에 의해 천공하는 것은 레이저 출력이 작으므로 수 회 반복하여야 하며 예상할 수 있는 방법으로는 다음 Fig.5와 같

이 두 가지가 있다.



(a) Intermittent rotation (b) Continuous rotation

Fig.5 Intermittent and continuous rotation in trepanning the hole

천공해야 할 구멍이 다수인 경우 전체 구멍을 한 번씩 가공하는 것과 구멍 하나를 수회 가공한 후 전체로 하는 것에 대하여 검토해 본 결과 후자가 품질 면에서 월등함을 알 수 있었다. 전자의 경우는 천공 조건에 따라 다르며 그 영향은 주로 Laser-off delay에 의해 영향을 받음을 알 수 있었고 Laser-off delay를 길게 한 경우에도 후자에 비해 품질이 좋지 않음을 알 수 있었다.

3. 수치해석

3.1 모델링

본 수치해석의 목적은 레이저가 조사될 때 펄스 증첩에 대한 구리 층의 온도 분포를 조사하여 가공 깊이를 예측하고 가공부 주위의 열영향을 조사하는 것이므로 3차원으로 모델링하여 레이저가 조사되는 구리층 주위와 PI층 온도 분포의 해석에 관심을 두었다. 각 재료의 두께는 균일하며 서로 완전한 접촉을 이루고 있는 것으로 가정하였으며 해석을 위하여 상용 FEM 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 실제 초단파의 UV영역 레이저빔이 가해질 경우 재료와 열적(photothermal) 반응뿐만 아니라 광화학(photochemical) 반응이 일어나 PI와 같은 폴리머 재료의 경우 열영향 없이 제거되는 메커니즘이 발생하는 것으로 알려져 있다. 본 공정의 경우 PI의 제거를 위한 레이저의 변수 보다 위쪽의 구리층을 제거하는 조건이 더 큰 영향을 미치는 것으로 보고 금속인 구리층의 열영향 해석에 초점을 맞추어 광화학 반응은 고려하지 않았다.

3.2 열해석

레이저 펄스 조사에 의한 기관의 가열 메커니즘은 구리 표면층에서부터 레이저빔의 에너지 흡수가 이루어져 점차 내부로 레이저빔이 침투하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 레이저빔의 침투를 고려하여 모델링 하기 위하여 레이저와 재료의 상호 작용에 의한 레이저빔 침투 속도를 Semak과 Matsunawa

의 모델을 기본으로 하여 재료 내부의 열 생성(heat generation)이 속도를 가지고 이루어지도록 모델링하였다. 레이저빔이 가해질 때 재료 표면에서 이루어지는 작용은 Fig.6에서와 같이 급속히 가열된 재료표면에 발생하는 반충압력에 의한 용융층 제거를 고려하여 생각할 수 있다.

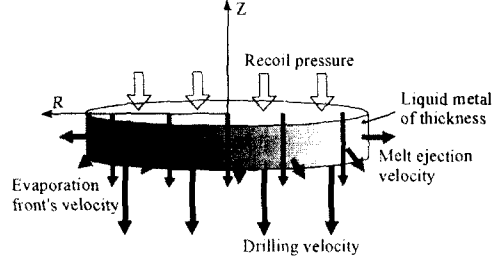


Fig.6 The physical model of melt removal from the interaction zone

이러한 물리적 현상은 Fig.7에서와 같이 가공후의 가공부 주위에 나타난 구리 잔유물의 형태를 관찰할 때 더욱 분명하게 알 수 있다.



Fig.7 Expelled copper dross around hole

위의 관계로부터 시간에 따른 금속의 제거율을 생각하면 다음과 같다.

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{dm_m}{dt} + \frac{dm_v}{dt} \quad (1)$$

m_s 는 고체금속, m_m 는 용융된 금속, m_v 는 기화되는 금속의 질량을 나타낸다. 즉 고체의 제거 속도는 증발되는 속도와 반충압력에 용융부가 빔주위로 밀려서 제거되는 속도의 합과 같다. 이것을 Fig.6에서와 같이 생각하여 식(1)의 각 항을 계산하면 식(2)과 같이 된다.

$$\pi r_f^2 \rho_s v_d = 2\pi r_f \delta_m \rho_m v_m + \pi r_f^2 \rho_m v_v \quad (2)$$

여기서 첨자 m 은 용융상태를 나타내며 s 는 고체상태를 나타낸다. 용융부의 두께를 Semak의 논문에서 가정한 바와 같이 $\delta_m \approx a_m/v_d$ (a_m : thermal diffusivity of melt)로 근사시키고, 레이저빔 침투 속도(drilling velocity, v_d)에 대한 2차식으로 나타내

면 다음과 같다.

$$v_d^2 - \frac{\rho_m}{\rho_s} v_v v_d - 2 \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{a_m}{r_f} v_m = 0 \quad (3)$$

(3)식에서 v_d 에 대한 2차 방정식을 풀어 양의 해만을 구하면 다음과 같다.

$$v_d = \frac{1}{2} \left[\frac{\rho_m}{\rho_s} v_v + \left\{ \left(\frac{\rho_m}{\rho_s} v_v \right)^2 + 8 \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{a_m}{r_f} v_m \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

여기서 증발속도(v_v)는 레이저의 전체 에너지가 금속을 증발시킬 수 있는 부피로 계산하였다. 또 용융 금속이 반충압력(recoil pressure)에 의하여 제거되는 속도(melt ejection velocity, v_m)를 계산하기 위하여 Fig.6에서 보는 바와 같이 생각하면, 증기압이 작용할 때 밖으로 밀려나는 용융 금속의 흐름은 회전 없이 반경방향으로의 속도만 갖는다고 가정하여 Bernoulli의 식을 이용하면 다음과 같다.

$$v_m = \sqrt{\frac{2p_r}{\rho_m}} \quad (5)$$

위 관계를 이용하여 침투속도(v_d)를 구하고 여기에 빔이 조사되는 동안 변화되는 시간을 곱하여 레이저가 조사되는 각 부분에서의 침투깊이(d)를 구하였다. 본 논문에서 제시한 열원의 방정식은 다음과 같다.

$$Q(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_0^2 d} \left(\frac{r_f}{r_0} \right)^2 \exp \left[- \frac{2(x^2 + y^2)}{r_f^2} \right] u(z) \quad (6)$$

식(6)는 Hugel이 깊이방향으로 레이저의 초점이 변하는 것을 고려한 열속의 식을 레이저빔의 침투깊이(d)를 정의하여 단위 부피당 생성되는 열원으로 변형한 것이다.

여기서 $u(z)$ 는 빔의 침투깊이까지는 1의 값을 갖고 증발이 일어나지 않는 깊이에서는 0을 갖도록 하여 각 시간마다 침투깊이(d)를 계산하여 레이저빔이 표면에서부터 점차적으로 내부로 침투되는 것으로 모델링 하였다. r_f 는 빔이 초점에서 벗어나 변화되는 유효반경이며, r_0 는 재료표면에 조사되는 레이저빔의 유효반경을 나타낸다.

위에서 설명한 열원의 방정식을 적용하여 중첩에 의한 가공 깊이 변화를 수치해석을 통하여 알아보았다. Fig.3(d)의 실험결과를 이용하여 구리층의 완전한 제거가 일어나는 조건인 스캔속도 53mm/sec로 하여 해석하였고 4번의 레이저 펄스가 가해졌을 때의 온도 분포를 Fig.8에 나타내었다. 이때 단 펄스가 가해졌을 경우는 위쪽의 구리층의 아래 부분까지 충분히 가열이 되지 않아 구리층의 제거가 어려우나 중첩되어 레이저 펄스가 가해지면서 구리층의 하단까지 용융온도 이상으로 온도가 올라가 가열층의 반충압력에 의하여 제거가 되리라는 것을 예측할 수 있다. 이러한 결과는 제거 깊이를 조절하기 위한 스캔속도

와 레이저 공정 변수의 변화에 대한 가공조건 선정과 가공부 예측의 수단으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

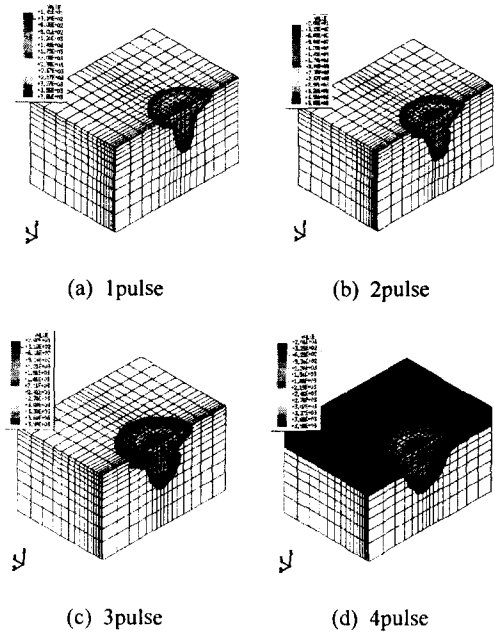


Fig.8 Temperature distribution at scanning speed 53mm/sec

4. 결론

PCB type의 구리와 PI층으로 이루어진 기판의 레이저 가공시 가공깊이를 정밀하게 조절하기 위하여 실험적 이론적 분석을 통하여 가공조건 및 가공품질을 예측할 수 있는 기반을 마련하였다.

참고문헌

1. Semak, V., and Matsunawa, A., "The Role of Recoil Pressure in Energy Balance during Laser Materials processing", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.30, pp.2541-2552, 1997.
2. Kaplan, A., "A Model of Deep Penetration Laser Welding Based on Calculation of the Keyhole Profile", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.27, pp.1805-1814, 1994.
3. Lee, S.K., and Na, S.J., "KrF Excimer Laser Ablation of Thin Cr Film on Glass Substrate", Appl. Phys. A, Vol.68, pp.417-423, 1999
4. 장원석, 나석주, "미세 레이저 용접에서 용융부 형상예측을 위한 열원의 방정식에 관한 연구" 대한용접학회지, 제18권, 제4호, pp. 489-494, 2000.