

# 연성인쇄회로기판의 액중 레이저 절단

김택구<sup>+</sup>, 김주한\*

(Manuscript received: Jul, 24, 2012 / Revised: Oct, 20, 2012 / Accepted: Oct, 22, 2012)

## Laser Cutting of Flexible Printed Circuit Board in Liquid

Teakgu Kim<sup>+</sup>, Joohan Kim\*

### Abstract

The laser cutting process which is flexible and rapid usually provides a better result in cutting of flexible printed circuit boards (FPCB). However, circuit-short by the re-deposition of debris from laser ablation or its heat affect zone (HAZ) on the cutting surfaces can be a problem. A laser cutting process of FPCB in the presence of liquid can minimize these negative effects. The temperature distribution of copper and polymer parts of FPCB was analyzed with numerical simulation and the experimental results were presented to evaluate this process. Generally, laser cutting under liquid has advantages of less re-deposition of carbides and less HAZ on the cutting edges. However, bubble generation and laser beam control through the liquid media should be considered carefully to obtain a successful result.

**Key Words** : Flexible printed circuit board(연성인쇄회로기판), UV laser(자외선 레이저), Carbide(탄화물), Heat Affected Zone (HAZ, 열 영향부)

## 1. 서론

연성회로기판(flexible printed circuit board: FPCB)은 얇고 유연한 성질을 가진 인쇄회로기판으로 IT제품의 마이크로 패키징(micro packaging)에 광범위하게 사용되고 있다. FPCB는 전자 기기 내부의 복잡한 전기회로의 구성과 기판 및 부품을 입체적으로 연결하는 경우에 사용되며, 정밀한 가공을 필요로 한다<sup>(1,2)</sup>. 또한 일부 FPCB는 내부의 전기적 연결을 수행하기 위하여 다양한 형태의 외력에 대한 피로수명이 요구된다.

일반적으로 설계된 FPCB는 기계식 절단공정을 통하여 최종 제품화하는 방식으로 제작된다. 기계적으로 가공하는 경우 신속한 개별 절단이 가능하나, 그 공정이 유연하지 않아 새로운

형상의 FPCB 절단의 적용에 있어 공정의 새로운 모델링 등에 많은 시간이 소요되며, 기계식 절단공정에서 발생하는 재료모서리의 버(burr)와 마이크로 크랙(micro-crack)에 의해 절단의 정밀도가 저하될 수 있다<sup>(2)</sup>. 레이저 공정의 경우 비접촉 광 에너지 전달의 메커니즘을 가지고 있어 적절한 공정조건을 적용하는 경우 다양한 재료를 신속하게 절단할 수 있는 장점이 있다. 이러한 레이저 공정의 우수성을 이용한 FPCB의 절단 공정이 수 년 전부터 연구 개발되어왔다<sup>(1,2)</sup>. 기본적으로 FPCB의 절단공정에 다양한 파장을 지닌 레이저를 이용한 공정<sup>(2-4)</sup>과 나노초 및 피코초레이저를 이용한 절단공정이 연구보고되었다<sup>(5-7)</sup>. FPCB의 레이저 절단 공정을 수행하는 경우, FPCB의 주 구성물질인 폴리머 필름(polymer film) 및 금속전도층(copper layer)을 집속

+ 서울과학기술대학교 NID 융합기술 대학원

\* 교신저자, 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

주소: 서울 노원구 공릉동 서울과학기술대학교 기계공학과 다산관 335호

✉ Corresponding Author E-mail: joohankim@seoultech.ac.kr

레이저 빔을 통해 정밀 어블레이션하고 이를 통해 FPCB 절단을 수행한다. FPCB의 구성 재료와 레이저빔의 상호 작용에 대한 메커니즘은 성공적인 절단을 위해 중요한 요소이며 이에 이와 관련된 레이저 가공 폴리머-금속 복합층의 특성이 연구되어 왔다<sup>(8-10)</sup>.

이러한 연구들을 요약해 볼 때 FPCB의 레이저 절단공정에서 고속의 레이저 패턴 이송 속도와 낮은 레이저 플루언스(flucence)의 조합을 통하여 커팅 면의 HAZ의 저감을 기대할 수 있으나<sup>(9)</sup>, 공정 중 발생한 열화 탄화물의 흡착으로 인하여 커팅 단자에 전기적 단락이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 FPCB의 액상 매질 내에서 레이저 절단 공정을 고안하였다. 액상 매질 내에서의 어블레이션은 FPCB의 열 효과를 최소화시킬 수 있으며, 레이저 가공에 따른 기판의 탄화물이 절단면 및 단자 표면에 부착하지 않도록 하는 효과를 기대할 수 있다. 이에 액상 매질내의 FPCB 레이저 커팅에 대한 공정 및 실험결과를 제시하였고 일반 레이저 절단과 액상 매질 내에서의 레이저 절단의 비교분석을 통해 본 공정의 장단점을 제시하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 FPCB의 구성 및 광학적 성질

FPCB는 여러 재료의 복합된 층으로 구성되어 있으며 일반적으로 구리로 구성된 전도층과 이의 보호를 위한 다양한 폴리머(Polyimide, Polymethylate, Methacrylate, 등)로 구성된다. 이러한 FPCB의 구성 재료는 접착물질을 이용한 압착공정으로 완성된다. 시편으로 사용된 FPCB의 단면 구조를 Fig. 1에 표현하였다. 레이저 절단을 수행하는 경우에 구리의 어블레이션을 위한 임계 플루언스(threshold flucence)가 높아 폴리머에 대한 열 영향을 최소화 할 수 있는 제한조건에서 두 가지 재료를 동시에 가공할 수 있는 가공변수 설정이 필요하다.

레이저 가공에 있어서 레이저빔-재료 상호작용이 중요하며 특히 가공재료의 레이저빔 파장에 대한 광학특성을 공정설계에 있어 고려하는 것이 필요하다. 본 실험에 사용된 재료들의 광학적 특성은 광학스펙트로미터(Ocean Optics, HR4000)를 이용하여 측정하였고 실험에 사용된 FPCB의 구리와 폴리머의 광학적 특성을 Fig. 2와 같이 얻을 수 있었다. 구리와 폴리머 필름의 가공을 동시에 수행하기 위하여 고집속 에너지를 가하는 경우 일반적으로 재료의 UV영역의 흡수율이 높기 때문에

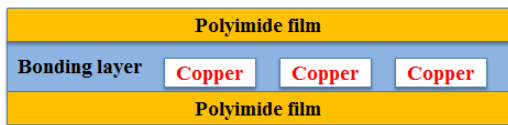


Fig. 1 Sectional structure of FPCB

UV레이저를 이용하여 가공하는 것이 유리하다. 폴리머는 UV 영역의 레이저를 이용한 가공을 수행하는 경우에 있어 레이저의 광화학(photo-chemical) 작용에 의해 어블레이션이 발생하며 이를 통해 정밀 가공이 가능하다. 355nm파장의 광선에 대한 폴리머 필름과 구리의 흡수율은 각각 91.2%와 81.8%로 측정되었다.

본 연구에서는 폴리머 필름 또는 구리 단자의 액중 부식이 일어나지 않도록 전자기기 세정용 솔벤트를 이용하였다. 일반적인 액체 중 레이저 가공에서는 레이저 빔이 액체를 통과하기 때문에 액체의 광학적 특성 또한 가공에 큰 영향을 미친다. 따라서, 액체의 광학적 투과율에 관한 정보는 레이저가 절단재료에 입사하는 출력밀도와 같은 레이저 공정 파라미터를 산출하는 중요한 정보가 된다. 본 세정용 솔벤트의 광학적 투과율은 앞에 이용한 광학스펙트로미터를 통해 측정하였고 이에 대한 결과를 Fig. 3과 같이 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용하는 355nm파장의 레이저에서는 약 27.7%의 투과율을 보이는 것으로 측정되었다. 액중 투과시 레이저 에너지가 어느 정도 솔벤트에 흡수되는 것으로 여겨질 수 있으며 이를 가공 재료에 대한

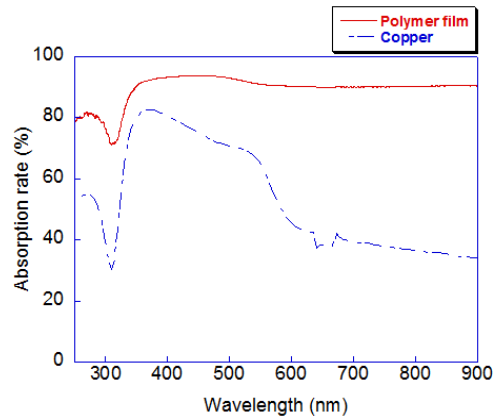


Fig. 2 Absorption rates of copper and polymer with respect to various wavelengths

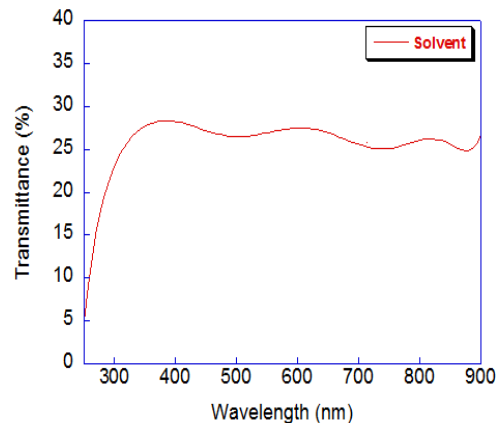


Fig. 3 Transmittance of solvent with respect to various wavelengths

영향으로 고려할 수 있으나 실험적으로 레이저 가공시 솔벤트의 온도변화는 크지 않아 실제 에너지 흡수를 통한 열적 부수 효과는 가정하지 않았다. 또한 솔벤트가 자연 기화하는 경향을 보였으나 그 변화가 공정시간과 비교해 볼 때 매우 작아 그 효과도 무시하였다.

### 2.2 열적효과 예측을 위한 모델링

액체에서 FPCB의 절단을 수행하는 것은 대기조건에서 가공을 수행하는 것에 비하여 FPCB가 열적 영향을 적게 받을 것으로 예상하였으나 실제 온도 분포를 실험적으로 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 이에 실제 공정 결과를 해석하는데 시뮬레이션을 이용하여 근사적으로 그 열적 경향을 예측하였다. 어블레이션이 끝난 후 표면에 남아 있는 열의 분포는 매크로스케일의 열전달로 분석이 가능하다. 본 연구에서는 액체중의 레이저 가공과 일반 레이저 가공의 어블레이션 후 온도 분포 예측을 위해 식 (1)과 같은 열확산 지배방정식을 적용하였다.

$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) \quad (1)$$

여기서  $C_p$ 는 FPCB의 열용량 이고  $\rho$ 는 밀도,  $k$ 는 재료의 열전도율이다. 각각의 특성은 온도에 따른 함수이지만 계산시간의 단축을 위해 일정한 상수로 가정하였다. 본 지배방정식을 풀기 위해 사용된 초기조건은 아래의 식 (2)와 같다. 식 (2)는 해석을 수행하기 위한 가장 처음의 초기조건으로 대기의 온도와 시편의 온도 모두 300K인 것으로 가정하였다.

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = 300K \quad (2)$$

레이저 가공에 의해 시편이 액중 냉각될 때 액중으로의 열의 이동을 확인하기 위해서는 유체내의 열전달을 이론적으로 결정해 줄 필요가 있다. 이 열전달량은 대류 열전달계수의 도입이 필요하다. 식 (3)은 레일리수(Rayleigh number)로, 유체의 층류 및 난류유동에 의하여 자연대류가 발생하는 경우의 평균 누셀수(Nusselt number)를 계산할 수 있다. 평균 누셀수를 이용하여 평균 대류열전달 계수가 계산되면 경계조건으로 설정이 가능하다.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (3)$$

여기서  $\beta$ 는 유체의 체적팽창계수이고  $\nu$ 는 동점성 계수,  $\alpha$ 는 열확산계수 이다. 각각은 재료주변 매질의 열 물성값을 참고로 하여 설정되어야 한다. 식 (4)는 고온평판의 윗면 또는 저온평판의 아랫면에서 쓰이는 레일리수와 누셀수의 상관관계이다.

$$\overline{N_L} = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (4)$$

이렇게 누셀수를 산출한 경우 평균 대류열전달 계수는 식 (5)에서 계산할 수 있다.

$$\overline{h} = \frac{\overline{N_L} k}{L} \quad (5)$$

여기서  $k$ 는 열전도 계수이며,  $L$ 은 자연대류에 의하여 열전달이 일어날 것으로 예상되는 영역이다.

식 (3)~(5)에서 고려되는 사항은 자연대류에 의하여 발생하는 열전달을 모사하기 위한 수식들로, 액중 상태에서는 레이저 초점부근에서 비등(boiling)에 의하여 열전달이 발생할 것으로 판단된다. 식 (6)은 액중 막비등(film boiling)에 적용되는 평균 누셀수의 식이다. 액체-기체의 밀도차에 의하여 야기되는 체적력  $g(\rho_l - \rho_v)$ , 잠열  $h_{con}$ , 표면장력  $\sigma$ , 그리고 액체 또는 증기의 열물성치들, 즉,  $\rho, c_p, k, \mu$ 에 의해 의존한다. 이를 통하여 평균 대류열전달 계수를 산출할 수 있으며 식 (7)의 유효 복사 열전달 계수를 함께 산출하여 식 (8)을 통해 총 열전달 계수를 계산할 수 있다.

$$N_D = \frac{\overline{h_{con}} D}{k_v} = C \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fs} D^3}{\nu_l k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (6)$$

$$\overline{h_{rad}} = \frac{\epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} \quad (7)$$

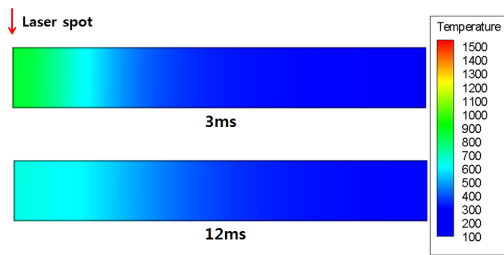
여기서  $C$ 는 상관상수로 비등이 발생하는 영역의 형상에 따라 변경된다.

$$\overline{h}^{-4/3} = \overline{h}^{4/3} + \overline{h_{rad}} \overline{h}^{1/3} \quad (8)$$

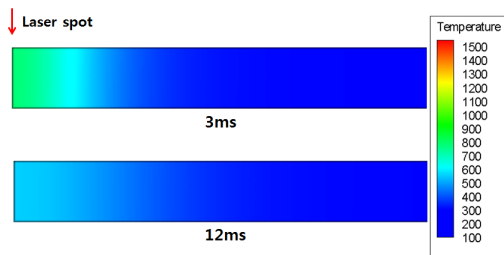
실제 가공이 진행되는 경우 레이저의 초점은 재료의 표면을 따라 이동하며 초점 부근의 물질만 국부적으로 가열을 하게 된다. 그러나 모델의 단순화를 위해 구리 시편에 열을 가하는 부분을 레이저 패턴이 지난 이후 레이저 빔에 의해 가열되는 에너지의 양으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 레이저 절단 공정은 어블레이션에 의해 절단이 이루어진다. 이러한 과정이 대기 조건에서 일어나는 경우 물질 제거 이후 가공부의 열은 자연대류 및 재료 내부로의 전도에 의해 확산된다. 액체 조건인 경우는 일반적인 레이저 가공에 비하여 더 복잡한 거동으로 예측할 수 있다. 레이저가 입사하여 물질을 직접 어블레이션시킬 때 표면에서 플라즈마 생성 등으로 마이크로초 단위의 물질 이동과 패턴이 지나간 직후에는 비등에 의해 열전달이 발생한다.

초점으로부터 멀리 떨어져 있거나 패턴이 지나고 다소의 시간이 경과한 경우 액체의 대류에 의해 열의 확산이 일어날 것으로 예상된다. 구리의 흡수율과 솔벤트의 레이저 투과율을 고려하면 시편이 입사하는 평균출력은 약 2W이다. 이 경우에 레이저의 초점크기를 고려하면, 단위 면적당 입사되는 레이저의 출력은  $400\text{kW}/\text{cm}^2$ 로 계산되었다. 실제 시뮬레이션을 통한 결과는 수치 열 해석 패키지인 ANSYS-Fluent를 이용하였다. Fig. 4는 구리의 표면이 각각 공기 또는 솔벤트와 접해있는 경우 시뮬레이션의 온도분포 결과의 단면 형상이다. 대칭된 면의 한쪽 부분만을 해석하였으며 레이저 조사는 왼쪽끝에서 이루어진 것으로 가정하였다.

재료에 레이저가 입사되는 경우 에너지 밀도가 높은 지점에서는 어블레이션이 발생하며, 에너지 밀도가 낮아질수록 순차적으로 용융 또는 가열이 발생할 수 있다. 그러나 단면 형상에서 용융이 발생하는 지점은 매우 미소하여 광학 현미경 상으로 관찰되지 않기 때문에, 용융은 발생하지 않는 것으로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 레이저에 의한 열적 영향을 세부적으로 확인하기 위하여 어블레이션으로 제거된 소재를 제외하고 남아있는 소재의 경계부분을 레이저의 조사에 의해 900K의 가열된 상태의 소재의 경계를 열적 영향이 시작되는 부분으로 가정한 후 남아 있는 소재의 열분포를 확인하였다. 5ms 간 레이저 조사를 수행하는 경우 조사 지점에서 구리의 온도가 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이후, 레이저 조사를 멈춘 이후에는 조사지점에서 전도 및 대류에 의하여 열이 확산하는 것을 확인할 수 있다. 3ms와 12ms의 시간 경과에 따른 온도분포를 살펴보면 솔벤트 조건에서 구리에 발생한 열이 더 적으며,



(a)



(b)

Fig. 4 Numerical simulation results for 3 ms and 12 ms cooling after 5 ms radiation: (a) air (b) solvent

더 빠른 냉각이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

공기와 솔벤트 내부에서 가공을 수행하는 경우 온도 분포를 비교하기 위하여 표면의 각 지점에 따른 온도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 레이저 조사부와 가까운 부분에서는 100K가량의 온도차이가 구리 표면에서 발생한 것을 확인할 수 있다. 솔벤트 조건에서의 레이저를 조사하는 경우는 최고 지점의 온도가 낮아진 결과로 더 낮은 온도 구배를 확인할 수 있다. 이는 실제 가공에 있어서 최고 온도에 의한 열확산을 효과적으로 조절할 수 있다는 것을 의미하는 것으로 해석할 수 있다.

### 3. 실험 방법

Fig. 6에 절단 시험을 위한 레이저 시스템 구성을 개략적으로 나타나 있다. 실험에 사용된 레이저는 355nm의 파장을 가진 Nd:YVO<sub>4</sub> 레이저(Photonics Industries, DS20HE-355) 이다. 레이저는 스캐너를 통과한 이후 하단의 렌즈를 통하여 집속된다. 집속 빔의 최소 직경은 공기 중에서 약 18 $\mu\text{m}$ 이다. 대기에 있어서 가공을 수행하는 경우 시편은 초점에 정확히 위치시킨 다음 가공을 수행하나, 솔벤트 안에서 가공을 수행하는 경우 시편은 솔벤트 표면으로부터 오프셋을 고려하여 초점을 축방향의 반

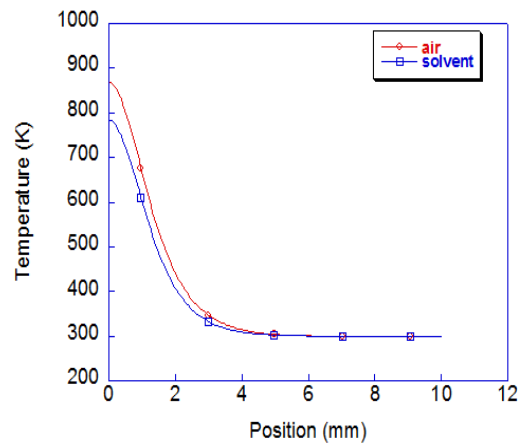


Fig. 5 Temperature profiles of copper for 3 ms cooling after 5 ms radiation

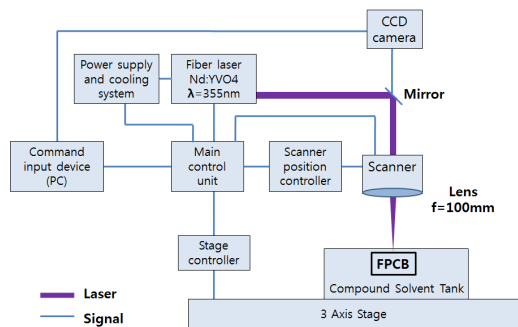


Fig. 6 Laser system for FPCB cutting in liquid

**Table 1 Laser process parameter in air and solvent**

Process condition	air	solvent
Repetition rate(kHz)	30 ~ 100	
Average power(W)	2 ~ 10	4 ~ 18
Fluence(J/cm <sup>2</sup> )	7.9 ~ 26.2	15.7 ~ 235.7
Total Energy(J)	1	10 ~ 20

복 실험을 통해 재조정하였다. 이는 레이저가 공기로부터 액체로 들어갈 때 그 초점의 위치가 일반 공기 중보다 위에 있음이 고려되었다.

실험의 가공 파라미터는 Table 1에 나타나 있다. 대기조건에서 가공을 수행하는 경우에는 빠른 가공속도와 높은 반복률의 가공 파라미터가 열영향부의 생성을 방지하고, 탄화물의 흡착률을 줄일 수 있다. 그러나 솔벤트 중에서 가공을 수행하는 경우에는 액체의 투과율과 흡수율을 고려한 상태에서 가공에 사용되는 파라미터를 비교할 수 있었다.

공기와 솔벤트 중의 가공조건에서 수치적 가공 파라미터의 비교는 가공속도와 레이저 출력의 조합으로 비교할 수 있다. 시편에 입사하는 레이저의 단위 면적당 레이저 출력에 따라 출력밀도를 산출하여 이를 주요 가공변수로 설정하고, 각각의 경우에 따라 HAZ의 넓이를 비교하였다. 펄스 레이저를 이용한 가공에서 고려되어야 하는 펄스당 에너지밀도인 플루언스는 다음과 같이 표기될 수 있다.

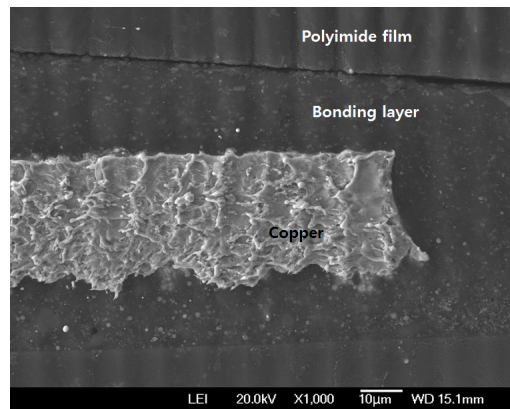
$$F = \frac{E_p}{A} = \frac{4 \times P_{ave}}{\pi \times D^2 \times r.r} \quad (9)$$

여기서,  $P_{ave}$ 는 가공 당시의 평균 출력이며  $D$ 는 재료에 입사하는 레이저의 스폿 사이즈  $r.r$ 은 레이저 펄스의 반복률이다.

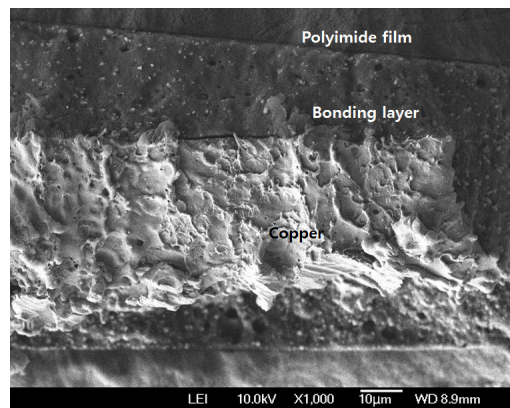
#### 4. 결과 및 토의

공기 중에서 가공을 수행한 경우 가공부의 표면은 레이저 패턴의 이송속도가 빠를수록, 레이저의 반복률이 높을수록 낮은 펄스당 에너지에서 해당 가공물의 HAZ가 줄어들어 가공부에 흡착되는 탄화물의 밀도는 더 높아진다. 이러한 탄화물은 기관에 있어 전기적으로 단락을 일으킬 수 있다.

솔벤트에서 가공을 수행하는 경우 대기 조건에서 가공을 수행하는 파라미터와 동일한 출력으로 레이저를 조사하면 솔벤트의 투과율에 의하여 실제 시편에 입사하는 출력이 낮아져 이에 대한 보정이 필요하였다. 이에 실험에 있어서는 355nm 파장의 레이저에 관한 솔벤트의 투과율을 고려하였고 이에 시편에 입사하는 레이저의 실제 출력은 공기와 솔벤트 조건에서 동일한 것으로 설정하였다.



(a)



(b)

**Fig. 7 SEM images of cross-sectional view: (a) under air cutting and (b) under solvent cutting**

일반 대기 조건 및 솔벤트 조건에서 가공을 수행한 시편들 단면 SEM촬영된 사진이 Fig. 7에 나타나 있다. 실험에 있어 솔벤트에서 가공을 수행한 시편은 가공 파라미터와 단면의 형상이 대기에서 가공한 시편과 다른 양상을 보였다. 대기 조건에서 가공을 수행한 시편은 반복률이 높고 가공속도가 빠를수록 단차진 구리가 매끈한 형상을 보인데 반하여 솔벤트에서 가공을 수행한 시편은 느린 가공속도의 조건에서 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 공기중 가공에 있어 시편의 단면(Fig. 7(a))에서 레이저의 가공속도가 낮거나 반복률이 낮은 경우에는 구리 부분이 미세하게 용융된 모습을 확인할 수 있었다. 이는 어블레이션되지는 않았지만 충분히 에너지를 흡수한 구리가 용융되며 산화되거나 다른 물질과 결합하여 전기전도도의 변화를 일으킬 수 있다. 레이저 패턴의 이송속도가 동일한 경우에는 반복률이 낮을수록 가공된 구리 단차부분의 물결무늬가 더욱 조밀하게 생성된 것을 관찰하였다. 그러나 실제적으로 실제 가공 성능에 영향을 미치는 플루언스에 관하여 분석을 하는 것이 더 정확한 분석이 될 수 있다. 즉, 펄스당 에너지가 작아질수록 열영향의 측면에서 가공성능이 우수한 것으로 나타났다.

본 단면 형상의 분석 결과 구리는 폴리이미드 필름에 비하여 열영향을 더 많이 받은 것으로 관찰되었다. 구리를 용융시키지 못하고 잔류한 열은 구리 전체의 온도를 높게 되지만, 폴리이미드 필름과 내부의 접착물질이 용융되거나 탄화된 흔적은 발견되지 않았다. 절단면의 형상에 있어 액중 가공된 폴리머 부분의 형상은 공기중의 가공된 시편과 비슷한 형상을 보여주고 있다. 특히 공기중에 가공된 샘플의 경우 레이저의 조사에 따른 주기적인 열전달의 효과로 물결무늬의 패턴이 관측되었으나 액중 레이저 가공에 있어서는 이러한 물결무늬가 관측되지 않았다. 구리부분의 가공에 있어서 액중 레이저 가공의 경우 다소 불균질한 면이 관찰되었는데 이는 레이저빔의 공기와 솔벤트의 계면을 통과할 때 빔의 산란 또는 미세 굴절에 의해 다소 불균질한 스폿을 만들어내는 것이 원인인 것으로 판단된다.

본 실험에 있어서 절단 형상과 더불어 중요한 절단면의 열적 영향의 증감 및 탄화물의 흡착이다. Fig. 8은 공기와 솔벤트 각각의 조건에서 절단을 수행한 경우 플루언스에 대한 HAZ 및 탄화물의 흡착 넓이를 비교한 그래프이다. 공기중에서 가공을 수행하는 경우 플루언스가 낮을수록, 절단 속도가 빨라질수록 HAZ의 넓이는 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 여기서 가공을 수행하는 경우 레이저 조사속도가 증가함에 따라 소재제거율(material removal rate)은 적어지기 때문에 가공횟수는 늘어나게 된다. 앞에서 분석한 바와 같이 액중 레이저의 흡수율이 높기 때문에 투과되는 레이저 플루언스는 공기중보다 상대적으로 작다. 이는 상대적으로 가공속도와 관련 있는 가공효율의 저하를 예상할 수 있다. 하지만 단순 일반재료의 절단이 아닌 전기적 단락과 같은 절단표면의 재료적 품질이 전체공정의 성공을 결정하는 본 공정에서는 어느 정도 감수할 수 있는 부분이라 판단된다.

정량적으로 비교해 볼 때 앞선 시뮬레이션 결과 폴리머-구리 가공면의 열적 영향은 액중에서 최대 11% 감소하는 것으로 나

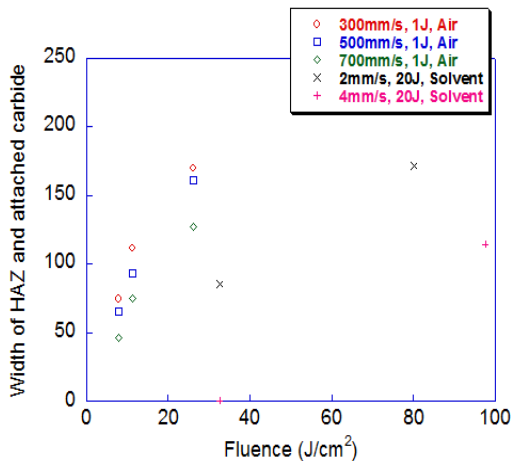


Fig. 8 Width of the HAZ and attached carbide

타났다. 이는 열에 의한 영향부분만을 시뮬레이션한 결과이다. 실제 실험 결과와 비교에서는 같은 레이저 플루언스의 경우 가공 환경의 상이로 일괄적인 비교를 수행하는 데는 무리가 있다. 하지만 간접 비교의 방법으로 최종 절단이 발생하는 솔벤트의 공정조건의 27%의 레이저 투과율을 고려한 레이저 플루언스 조건을 가진 공기중의 결과와 비교하여 보았을 때 대략 8~20%의 HAZ 감소를 실험적으로 관찰할 수 있었다. 이와 같은 오차는 단순 열적 영향으로부터의 모델로부터 어블레이션이 발생하였을 때의 내부 액중의 비등에 따른 경계조건의 변화 및 물성치의 온도에 따른 변화 등의 고려가 모델에 적절히 반영되지 못했기 때문이라 판단되나 전체적인 열적 효과의 감소는 시뮬레이션과 유사한 분포를 확인할 수 있다.

Fig. 9는 솔벤트와 공기중에서 가공한 시편의 폴리머부분에서 EDS를 통한 원소 성분을 분석한 결과이다. EDS는 20kV의 전압을 인가하여 측정을 수행하였다. EDS 측정의 경우 공기와 솔벤트에서 각각 동등한 경향을 보여 대표적인 결과를 하나씩만 표기하였다. 폴리이미드 필름 부분에서 검출된 원소의 분포 중, 솔벤트 내부에서 절단을 수행한 시편에서 산소 및 구리가 더 적게 검출된 것을 확인할 수 있다. 이는 실제 가공에 있어 레이저 어블레이션에 의한 구리이온의 생성 및 관련 탄화

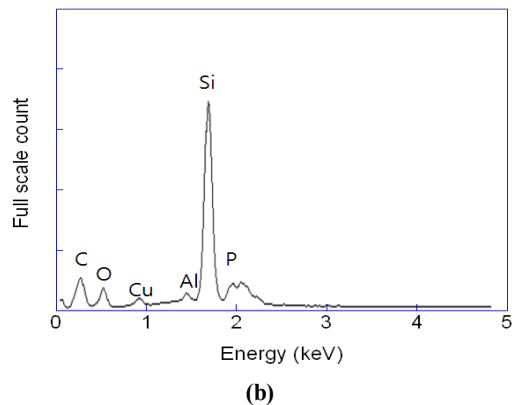
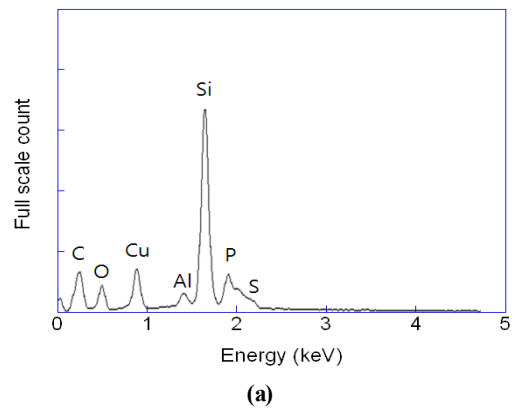


Fig. 9 EDS analysis of polyimide cross-section: (a) air(1J, 500 mm/s) (b) solvent(20J, 4 mm/s)

물의 부착의 확률이 솔벤트 내부에서의 커팅수행에 있어서 더 낮고 이에 따라 레이저 절단에 있어서의 문제점을 개선할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 FPCB의 공기 중 가공에 의해 발생하는 열영향과 탄화물의 발생을 줄이기 위한 액체 중 FPCB의 레이저 가공에 대한 연구를 수행하였고 요약된 결론은 다음과 같다.

- (1) FPCB 폴리머 및 액중 레이저 전파에 대한 광학 특성이 분석되었으며 이를 통해 액중 레이저 가공의 공정 파라미터를 설정하였다. 특히, 액중 공정에 있어서 레이저 투과율이 공기중 공정에 비하여 27%로 감소하였으며 이에 대해 성공적인 절단을 위해 공기중 보다 상대적으로 높은 가공 레이저 플루언스를 필요로 하였다.
- (2) 액중 열적영향에 대한 샘플의 온도분포가 수치적 모델링을 통하여 얻어졌으며 액중에서의 공정이 열적 영향을 줄일 수 있는 것으로 예상되었다. 본 실험의 경우에는 11%의 열적 영향 감소가 예상되었다.
- (3) 액중 레이저 공정 실험을 통해 대기조건에서의 레이저 공정과 비교했을 때 8~20%의 개선된 열영향부와 탄화물의 저감을 확인할 수 있었다.
- (4) 액중 레이저 가공의 경우 레이저 파장에 따른 투과율감소에 대해 공정상의 효율저하를 가지고 올 수 있으나 탄화물의 흡착 및 가공 시 열적 영향이 중요한 소재의 가공에 있어서는 그 장점을 이용할 수 공정이라 판단된다.

## 후 기

이 연구는 2012서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

- (1) Huske, M., 2006, "Burr And Stress-free Cutting of Flexible Printed Circuits," *On Board Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 18~21.

- (2) Henry, M., Harrison, P. M., and Wendland, J., 2005, "High Speed Cutting of Copper Foil with a 532nm Diode Pumped Solid State Laser for Microelectronics Application," *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich*, pp. 1~6.
- (3) Henry, M., Harrison, P. M., Wendland, J., and Parsons-Karavassilis, D., 2005, "Cutting Flexible Printed Circuit Board with a 532nm Q-switched Diode Pumped Solid State Laser," *ICALEO 2005 Proceedings M804*, pp. 1~8.
- (4) Choi, K. J., and Lee, Y. H., 2010, "An Analysis of Cutting Characteristic of Multilayer FPCB using Nd:YAG UV Laser System," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 9~17.
- (5) Bae, H. S., Choi, J. H., Ryu, G. H., and Nam, G. J., 2009, "Study of Machining Properties about FPCB with using UV DPSS Laser," *Proceedings of the KSPE 2009 Autumn Conference*, pp. 417~418.
- (6) Park, H. C., Ryu, K. H., Shin, S. H., Nam, G. J., and Kwon, N. I., 2010, "Study of Laser Cutting of Multilayer FPCB by using UV Pulse Laser," *KSPE 2010 Spring Conference*, pp. 287~288.
- (7) Chung, Y. W., Lee, J. H., Sohn, H. K., Shin, D. S., and Kim, J. H., 2007, "A Study of FPCB Machining by Picoseconds Laser Ablation," *KSPE 2007 Spring Conference*, pp. 25~26.
- (8) Oh, J. Y., and Shin, B. S., 2007, "A Study on Laser Ablation of Copper Thin foil by 355nm UV Laser Processing," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 134~139.
- (9) Bae, H. S., Ryu, K. H. and Nam, G. J., 2008, "Study of Laser Machining Properties about Raw Material FPCB," *KSPE 2008 Spring Conference*, pp. 383~384.
- (10) Kruusing, A., 2004, "Underwater and Water-assisted Laser Processing: Part 2-Etching, Cutting, and Rarely used Methods," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 329~352.