

기술논문

공정 모니터링 광학모듈이 장착된 UV 레이저 미세가공 플랫폼 제작

손현기*, 이재훈*, 정용운*, 김상인**, 한재원***

*한국기계연구원, **고등기술연구원, ***연세대학교

Fabrication of a UV laser micromachining platform with process-monitoring optical modules

H. Sohn*, J. H. Lee*, Y. W. Jeong*, S. I. Kim**, J. W. Hahn***

*Korea Institute of Machinery and Materials,

Institute for Advanced Engineering, *Yonsei university

ABSTRACT

Laser micromachining has increasingly been adopted in various advanced industries where the high-precision machining of large-area, high-density and multi-layered components is in a strong demand. To effectively meet the requirements, the laser micromachining process must be carefully monitored. In order to facilitate the development of a new laser micromachining process and/or a new system, we have fabricated a UV laser micromachining platform that is equipped with optical modules for monitoring the process online. They include a laser power stabilizing module, a module for laser-induced breakdown spectroscopy, and an auto-focusing module.

Key Words : Laser power stabilization, laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), auto-focusing (AF)

1. 서론

최근 반도체, 디스플레이, 전자 산업 등 첨단산업 분야의 추세는 고정세화/고집적화/대면적화로 대변될 수 있다. 즉, 가공 선폭(line width)이 수 마이크로 또는 서브 마이크로급으로 미세화 되고 있으며, 다양한 종류의 폴리머와 금속이 적층된 다층 기판(multi-layered substrate)을 선별적으로 가공해야 한다. 또한 생산성 향상 및 원가 절감을 위해 가공면적이 넓어지고 있다^[1].

현재 레이저 미세가공기술은 다양한 첨단산업 분야에서 활발하게 적용되고 있으며, 그 응용 분야는 더욱 확대될 것으로 기대된다. 첨단산업분야의 고정세화/고집적화/대면적화 추세에 효율적으로 대응하기 위해 필수적인 것 중의 하나가 레이저 미세가공 공정에 대한 실시간 모니터링이다.

본 논문에서는 레이저 미세가공 공정 및 시스템 개발 시 활용할 수 있는 레이저 미세가공 플랫폼(platform)을 개발하였다. 개발된 플랫폼에는 공정을 실시간 모니터링하기 위해 레이저 출력 안정화 모듈(laser power stabilizing module)과 LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy) 모듈이 장착되어 있으며, 대면적 기판(substrate)의 정밀 가공을 위해 자동초점정렬 모듈(auto-focusing module)이 설치되어 있다.

2. UV 레이저 미세가공 플랫폼

Fig. 1에 레이저 미세가공 플랫폼의 주요 구성 모듈에 대한 개략도를 나타내었다. 광학모듈 및 시편을 이송하기 위해 공간 활용 측면에서 효율

적인 split-axis 타입의 3축 정밀 스테이지가 장착되어 있다. 레이저 빔의 집속(focusing)을 위해 Z축에 장착된 집속 렌즈와 스캐너를 선택적으로 사용할 수 있으며, 레이저 출력 안정화 모듈은 플랫폼 배면에 고정되어 있으며, 자동초점정렬 모듈과 LIBS 모듈은 Z축에 설치되어 있어 레이저 빔 집속기구와 동시에 이송된다. Fig. 2에 제작된 플랫폼을 나타내었으며, Table 1,2에 주요 구성부품의 사양을 요약하였다.

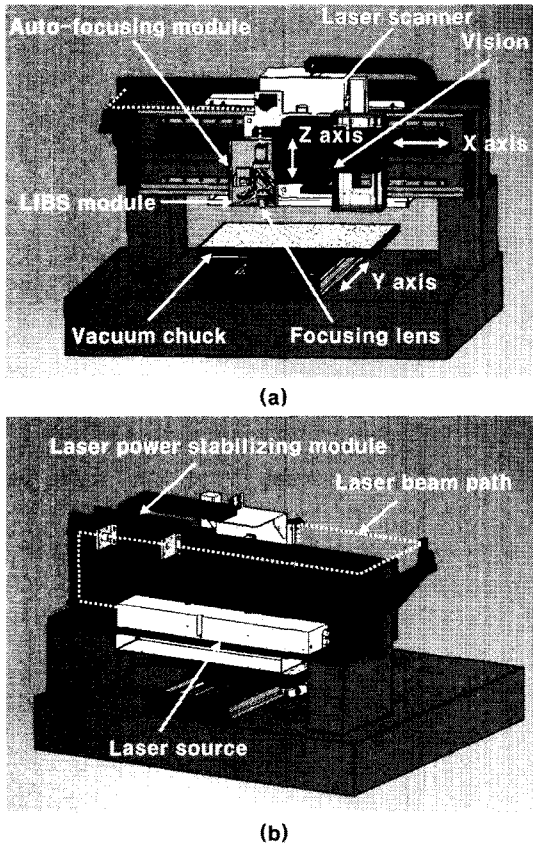


Fig. 1 Schema of the laser micro-machining platform: (a) front and (b) rear view.

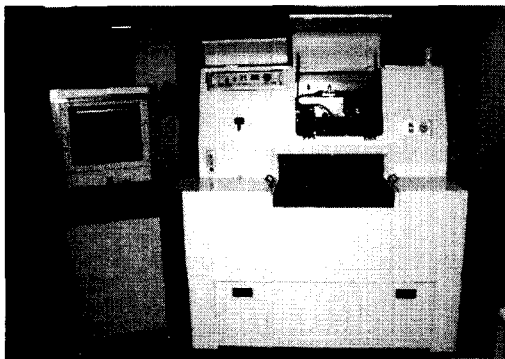


Fig. 2 Laser micro-machining platform.

Table 1. Specifications of UV laser source

Wavelength	355 nm
Spatial mode	TEM00
Repetition rate	0-250 kHz
Ave. power	10 W @ 30 kHz
Pulse width	80 ns
Power stability	< 2% rms

Table 2. Specifications of the precision 3-axis stage

Items	X axis	Y axis	Z axis
Max. travel (mm)	600	600	100
Accuracy (μm)	± 3	± 3	± 3
Repeatability (μm)	± 0.5	± 0.15	± 2
Payload (kg)	25	15	15

3. 레이저 출력 안정화 모듈

최근 출시되는 미세가공용 레이저의 출력 안정도는 대개의 경우 2%이하 이지만, 미세가공의 경우 2%의 출력 변화량도 가공 정밀도에 직접적인 영향을 미치게 된다.

반파장판(half-wave plate)과 선형 편광자(linear polarizer)로 구성된 광학 감쇄기(optical attenuator)에서 반파장판의 각도를 변화시키면 선형 편광자를 통과한 레이저 빔의 출력을 조절할 수 있다^[2]. 선형 편광자 다음에 분광기(beam splitter)를 설치하여 레이저 발진기(source)에서 방출되는 레이저 빔의 출력 변화를 감지하고 이를 PID 제어하여 레이저 출력을 조절할 수 있다^[3].

Fig. 3에서 보는 바와 같이 플랫폼의 배면에 고정된 출력 안정화 모듈은 반파장판, PBS(polarization beam splitter), 분광기(99:1), 출력 센서 등으로 구성되어 있다. 광학 감쇄기의 반파장판은 정밀급 회전모터(분해능 0.02°)에 장착되어 있으며, PBS는 플랫폼에 장착된 UV 레이저의 펄스 에너지와 반복률(repetition rate)을 고려하여 선정하였으며, 분광기에서 레이저 출력의 1%를 분기하여 출력을 모니터링 및 제어한다.

펄스 반복률을 150 kHz에 설정하고 레이저 출력 안정화 모듈을 이용하여 레이저 발진기의 출력 안정도를 30분 동안 측정한 결과, 1.677%(rms)로 나타났다(Fig. 4(a) 참조). 이때 제어는 하지 않았고, 발진 초기에 나타나는 출력이 불안정한 구간은 분석 시 제외하였다. 동일한 조건에서 출력 안정화 모듈을 제어하면서 출력 안정도를 측정하

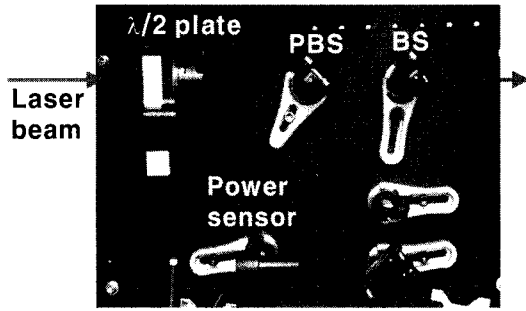


Fig. 3 Laser power stabilizing module.

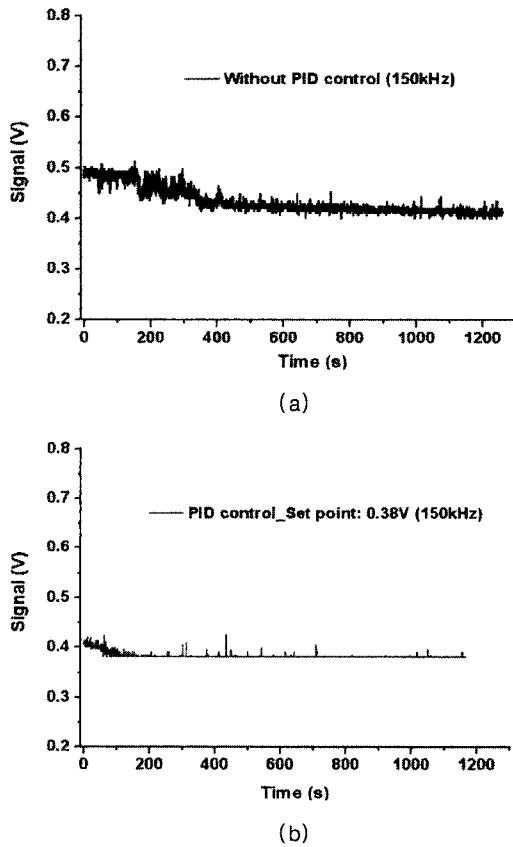


Fig. 4 RMS stability change in laser power of UV laser (a) without and (b) with the PID control.

였으며, 측정된 출력 안정도는 0.332%로 크게 향상되었다(Fig. 4(b) 참조). 펄스 반복률을 30 kHz로 변경한 경우 0.310%의 출력 안정도를 얻을 수 있었다.

최근 출시되는 DPSS 레이저의 경우 가공 시 레이저 빔의 발진을 TTL 신호로 제어하는 경우가 많다. 이 경우 레이저 출력 안정화 모듈에 입사하는 레이저 빔의 출력 변화율이 출력 조절을 위해 반파장판을 회전시키는 회전모터의 응답속

도보다 빨라져서 출력 안정화에 시간 지연이 발생하게 되어 출력 안정도가 오히려 떨어지게 된다. 따라서 레이저 출력 안정화 모듈 다음에 레이저 빔 셔터(shutter)를 설치하여 사용하는 것이 레이저 출력 안정화 측면에서 더욱 바람직하다.

4. LIBS 모듈

모바일 기기 등 각종 전자제품에 널리 사용되는 FPCB(flexible PCB)는 제품의 고집적화 추세에 따라 다층화 되고 있다. FPCB와 같이 여러 가지 재료로 구성된 다층 소재에 blind 비어홀(via-hole)을 드릴링하는 경우에 특정한 층까지 선택적으로 가공하게 되며, 이때 LIBS 기법을 활용하여 현재 가공되고 있는 층의 소재를 파악할 수 있다^[4,5].

LIBS 기법은 원자분광 분석법과 발광 분석법을 기본으로 하며, 시료 표면에서 발생하는 플라즈마 상태의 원자나 이온에서 발산되는 빛을 분광 분석한다. 가공 소재에 따라 분광 특성 피크(characteristic peak)의 파장대가 구별이 되므로, 다층 소재의 가공 시 가공 층의 소재가 변경이 되는 시점, 즉 경계면을 판별할 수 있다^[6]. 일반적으로 금속 재료의 경우 각 금속의 고유 분광 스펙트럼이 존재하며, 폴리머 재료의 경우는 탄소를 중심으로 수소, 산소, 질소 등의 조성비에 따라 분광 스펙트럼의 크기가 달라지므로 이를 이용하여 종류를 판별할 수 있다.

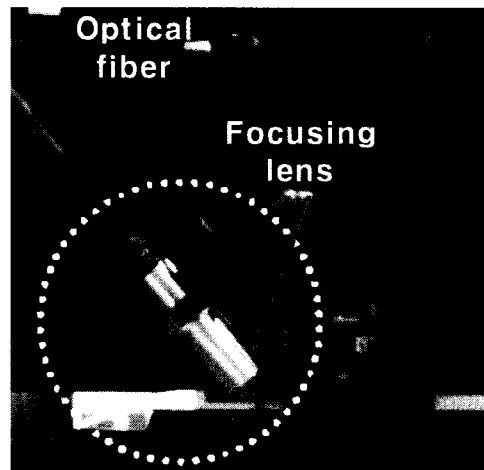


Fig. 5 LIBS module.

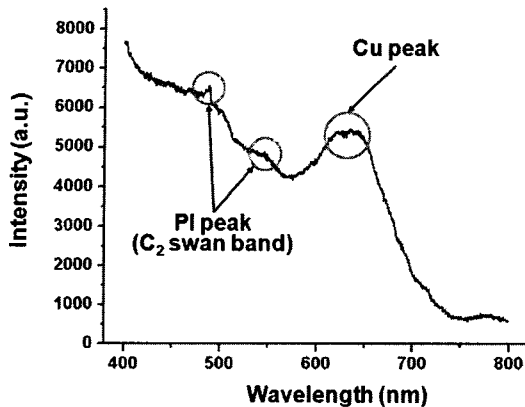


Fig. 6 Plasma spectrum measurement of FPCB (repetition rate at 30 kHz).

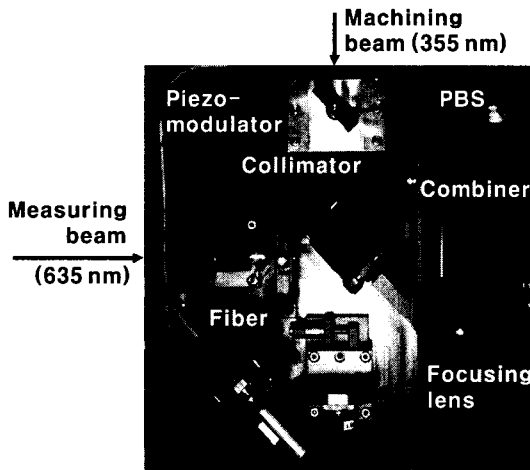


Fig. 7 Auto-focusing module.

플랫폼에 장착된 LIBS 모듈은 초점렌즈와 수광용 광파이버로 구성되어 있으며, Fig. 5에 나타난 것과 같이, 경통의 양쪽 끝에 초점렌즈와 광파이버가 고정된다. 사용된 광파이버는 다중 모드로 지름이 200 μm 이며, NA는 0.22이다. LIBS 모듈은 원리상 objective 렌즈 옆에 설치되며, 경통은 초점 위치를 정렬할 수 있도록 슬라이딩이 가능한 구조로 제작되었다. 광파이버의 반대편 끝에 연결된 분광 분석기(spectrometer)의 측정 파장 범위는 280-780 nm이다.

레이저 펄스 반복률을 30 kHz로 설정한 후 폴리이미드(polyimide)와 구리(copper)로 구성된 FPCB 원소재에 대해 LIBS 분석을 수행하였다. 폴리이미드층 가공 시에는 폴리머의 특성 피크인 C₂ swan band가 나타나는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 6 참조). 플랫폼에 사용된 소형 분광 분석

기의 분해능이 플라즈마 발생 주기보다 길어서 적분형태로 결과를 수집하였기 때문에 구리층 가공 시 구리의 특성 피크는 600-700 nm 사이에 섞여서 나타난 것을 볼 수 있다.

개발하고자 하는 공정에서 대상으로 하는 소재에 최적화된 센서 및 필터를 사용하면 각 소재의 특성 피크를 쉽게 구별할 수 있다.

5. 자동초점정렬 모듈

레이저 미세가공의 가공 정밀도를 높이기 위해서는 가공 중에 레이저 빔과 가공 기판 사이의 간격을 일정하게 유지해야 한다. 즉, 레이저 빔의 초점이 항상 기판 표면에 위치하도록 해야 한다. 레이저 빔의 이송 정밀도 오차와 기판의 초기 고정 오차 및 표면 평탄도(flatness) 오차 등에 의해 가공 중에 레이저 빔과 기판 사이의 간격은 계속 변화하게 된다. 이 간격 오차는 대면적 기판을 가공하는 경우 더욱 증가하게 된다.

Fig. 7에 플랫폼에 장착된 자동초점정렬 모듈의 내부 구조를 나타내었다. 자동초점정렬은 레이저 빔 집속기구의 위치를 조절하는 것이므로 objective 렌즈와 스캐너와 함께 Z축에 장착되며, Z축의 최대 허용하중(payload)은 15 kg이므로(Table 2 참조), 이를 초과하지 않도록 모듈을 구성하는 광학 부품 및 경통의 무게를 최소화 하였다.

플랫폼에 장착된 자동초점정렬 모듈은 압전 변조기(piezo modulator)를 이용하여 광파이버(optical fiber)에서 방출되는 측정광(632 nm)을 변조하고, 기판에서 반사되는 공초점(confocal) 신호를 측정하여 기판과 초점 사이의 간격을 검출하게 된다^[7]. 검출된 간격 분포를 스테이지 컨트롤러에 입력하면 가공 시 간격 분포를 고려하여 Z축이 이송하게 된다. 기판의 표면 상태에 따라 측정광의 반사도가 변화하게 되므로, X, Y축을 고정된 상태에서 Z축을 이송하면서 기판 표면으로부터 반사되는 측정광 양을 측정하여 간격과 반사광 양 간의 선형 구간을 구한다. 이 선형 구간을 반치폭이라고 하며, 반치폭 내에서 자동초점정렬을 할 수 있다.

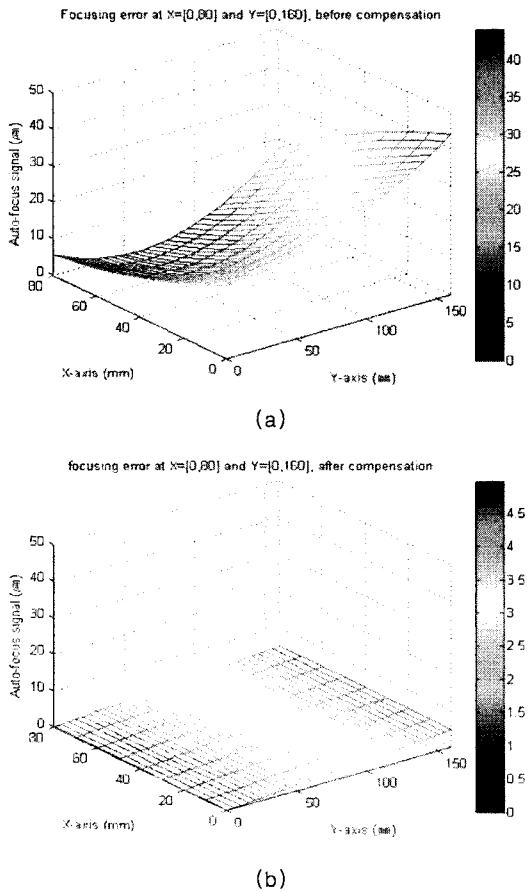


Fig. 8 Gap distribution between focusing lens and INVAR sheet: (a) without and (b) with auto-focusing.

자동초점정렬 모듈의 성능을 검증하기 위해 OLED 마스크용 INVAR 박판에 대해 자동 초점정렬 실험을 수행하였다. 견장된 박판의 크기는 160 mm × 300 mm이고, 두께는 30 μm이다. 박판은 알루미늄 프레임에 견장되어 있으나, 자중에 의한 처짐이 생겨서 패터닝 시 위치에 따라 가공선폭의 차이가 발생하게 된다. 박판의 인장상태를 대칭으로 가정하고 전체 면적의 1/4(80 mm × 150 mm)에 대해 자동초점정렬을 수행하였다. 실험에서 INVAR 박판에 대해 측정한 반치폭은 ± 50 μm이다.

Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 자동초점정렬 모듈을 이용하여 초기 박판의 고정 상태를 측정한 결과 최대 간격 오차는 44 μm이며, 박판의 중심점에서 발생하였다. 이 경우에 초점거리가 짧은 objective 렌즈를 사용하는 경우 가공이 되지 않는 부분이 발생할 수 있다. 측정된 간격 분포를 스테이지 컨트롤러에 입력한 후 자동초점정렬 모

듈을 이용하여 간격 분포를 측정한 결과 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 최대 간격 오차는 4.9 μm로 감소되었다.

자동초점정렬 모듈의 성능을 향상시키기 위한 가장 직접적인 방법은 Z축의 정밀도를 향상시키는 것이다. 또한, Z축에 부착되는 광학 기구의 중량을 최소화하여 자중에 의한 처짐을 최소화할 필요가 있으며, Z축 부하 중량의 평형의 유지하는 것도 중요하다. 자동초점정렬 모듈을 적용하는 경우 개발하고자 하는 시스템의 구조 및 사양에 최적화하여 모듈의 구조 및 구성 광학 부품을 선정하여야 한다.

6. 결론

본 논문에서는 레이저 미세가공 공정 및 시스템 개발에 활용될 수 있는 UV 레이저 미세가공용 플랫폼을 개발하였다. 개발된 플랫폼에는 레이저 미세가공 공정 개발 시 공정을 모니터링하고 분석할 수 있는 레이저 출력 안정화 모듈과 LIBS 모듈이 장착되어 있으며, 고정밀, 대면적 가공 시 가공정밀도를 유지하기 위해 레이저 빔의 초점과 기판의 거리를 일정하게 유지하기 위한 자동초점정렬 모듈이 장착되어 있다. 이들 광학모듈을 활용하여 개발된 공정을 수행하는 전용 시스템 개발을 위한 시스템의 최적 사양을 도출할 수 있다.

후 기

본 논문은 지식경제부에서 지원 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제(차세대신기술개발사업)의 지원으로 작성되었음.

참고문헌

- 1) 지식경제부, “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발에 관한 산업분석”, 연구기획보고서, 2007. 8.
- 2) B.H. Kolner, “Intensity noise enhancement in

- the half-wave plate/polarizer attenuator,” *Opt. Lett.* Vol. 16, No. 11, pp. 784, 1991.
- 3) 류훈철, 곽승우, 강동원, 김정식, 한재원, “PID 제어기법을 이용한 펄스 레이저 출력 안정화에 관한 연구”, 한국레이저가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 89-96, 2006. 6.
 - 4) T. Lippert, A. Wokaun, “Laser processing of novel functional materials,” *CHIMIA*, Vol.55, No. 10, pp. 783, 2001.
 - 5) A. W. Miziolek, “Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) fundamentals and applications,” *CAMBRIDGE*, pp. 7-11, 2006.
 - 6) 류훈철, 김석, 한재원, “레이저 유도 플라즈마 분광분석법을 이용한 연성회로기판가공공정의 시간적 계측”, 한국레이저가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 119-129, 2007. 6.
 - 7) 김상인, 이광일, 김호상, 이경돈, “이송축 특성을 고려한 미세가공용 오토포커싱 장치의 피드백 제어”, 한국레이저가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 102-107, 2007. 6.