

Laser 가공용 자동초점장치를 이용한 off-Line 오차보상에 관한 연구 Autofocus system for off-line error compensation in micro laser fabrication process

*#김상인¹, 이광일¹, 김호상¹, 이경돈¹

*S. I. Kim(ksi2958@iae.re.kr)¹, K. I. Lee¹, H. S. Kim¹, D. K. Lee¹

¹고등기술연구원 로봇/생산기술센터

Key words : Autofocus system, Error compensation table, Micro laser fabrication

1. 서론

자동초점조절은 고 배율 광학 측정분야 또는 제품의 가공 정도를 검사하는 분야에 가장 중요한 기술 중의 하나이다. 기존에는 비접수차 방법, 이심 빔 방법을 이용하여 하나의 단일 실리콘 광검출 소자를 통해 초점조절을 수행하는 방법을 이용하였으나 현재는 편홀이나 광섬유가 시편상의 초점평면에서 반사된 광만을 받아들이며 불필요한 신호들을 차단시키는 역할을 하여 시편상의 공역점의 정보만을 얻는 결과를 가져오므로써 광축 방향 분해능을 향상시킬 수 있는 공초점 초점조절 방식을 많이 이용하고 있다.¹

본 연구에서는 위와 같은 측정분야에 사용되는 공초점 광학 현미경 원리를 micron 또는 sub-micron 단위의 레이저 미세 패턴 가공에 적용하였고, 기존의 비전이나 초점거리의 계산을 통한 부정확한 초점조절로 인해 발생하는 초점 오차를 제거하는 실험을 수행하였다. 또한 가공에 사용하는 레이저와 측정에 쓰이는 레이저가 동일한 광축상에서 가공과 측정이 동시에 이루어질 수 없는 단점을 보완하기 위해 가공면을 측정 후 초점오차가 보상된 프로파일을 따라 가공을 수행하는 off-line 초점오차보상을 제안하였다. 그리고 레이저 가공시 초점위치에 가공시편을 이송해주는 방식²과 달리 공초점 신호를 제어신호로 사용하여 자동초점장치가 부착된 Z축의 이송을 통한 자동초점조절을 수행하였다. 실험은 이송축의 특성을 파악하기 위해 레이저 인터페로미터를 이용하여 Z축의 반복정밀도를 측정하고, 이를 고려한 off-line 방식의 초점거리 보상을 수행하였으며, 초점 오차보상 전, 후 레이저 가공을 통해 가공 선평의 변화를 측정하여 측정 분야에서 사용되고 있는 공초점 방식의 자동초점조절이 레이저 가공에 적용이 가능한지를 확인하였다.

2 실험 장치 구성

2-1 자동초점장치 측정 원리

레이저 미세가공 시스템은 Fig. 1 (a)에 나타난 바와 같다. Fig. 1 (a)과 같이 공초점 방식의 자동초점조절을 하기 위해 광섬유에서 나오는 측정 광원에 압전소자(piezoelectric actuator)를 이용하여 변조를 가한다. 그리고 측정 시편으로부터 반사되어 나오는 신호를 검출하여 미소신호동기증폭기(lock-in amplifier)를 통해 Fig. 1 (b)와 같이 광축 방향으로의 이동 거리에 따른 공초점 신호(중방향 특성곡선)의 미분 신호를 얻는다. 미소신호동기증폭기에 의한 공초점 신호의 미분 신호는 자동초점조절을 위한 Z축 제어신호로 사용하게 된다. Fig. 1 (b)에서 미분신호의 선형적인 구간, 즉 공초점 신호의 반치 폭이 실제로 자동 초점조절영역이 된다.¹ 이때 광축 방향으로 시편의 움직임에 따른 공초점 신호의 측정 영역은 측정에 사용된 레이저, 대물렌즈의 개구수(N.A.), 편홀 역할을 하게 되는 광섬유 코어의 반경에 따라 결정된다. 그러나 반치폭을 크게 하면 자동 초점 조절 영역이 넓어지게 되나, 공초점 신호의 광축 방향 분해능은 떨어지게 되는 트레이드 오프(trade-off) 관계가 있으므로 적

절한 조절이 필요하다.

본 연구에서는 실제로 자동 초점조절영역이 되는 공초점 신호의 반치폭 즉 미소신호동기증폭기(lock-in amplifier)를 통한 미분신호의 선형적인 구간은 초점평면으로부터 ±45 μm 로 설정하였다.

2-2 자동초점장치 및 레이저 가공실험장치 구성

자동초점 장치는 Fig. 2 (a)와 같이 상자형태의 경통 내에 광원 소스와 디텍터 역할을 수행하는 광섬유, 광섬유에서 나오는 측정 광원의 변조를 위한 압전소자, 광섬유에서 나오는 발산(divergence)된 광원을 평행광으로 바꾸주기 위한 시준(collimating)렌즈 그리고, 가공용 레이저와 자동초점장치의 광원을 하나의 대물 렌즈에 입사 시켜 주기 위한 빔 콤파이너(beam combiner), 가공용 시편에 광을 집속시키기 위한 대물 렌즈를 포함하는 구성으로 제작하였다. 이러한 경통은 Fig. 2 (b)와 같이 가공용 실험 장치에 모듈형태로 장착되어 Z 축의 이송에 의해 시편에 집광되는 레이저의 초점 오차를 측정 하게 된다. Fig. 2 (b)의 가공실험 장치는 X, Y, Z 총 3개의 축을 갖는 형태로서 Y 축은 시편이송, X, Z 축은 경통 및 관련 치구의 이송 및 광축방향 자동초점 조절기능을 수행한다. 각 축은 레이저 미세가공을 수행할 수 있도록 X 축은 에어베어링을 장착한 리니어 모터구동방식을 택했으며, Y 축은 크로스롤러 베어링 지지에 의한 리니어 모터구동방식을 택하였다. Z 축은 수직방향의 이송을 위해 볼 스크류 방식에 의한 회전형 모터 구동방식을 선정하였으며, 각 축의 정밀 이송을 위해 상용 제어기인 Delta Tau사의 Turbo PMAC 2를 사용하였다.

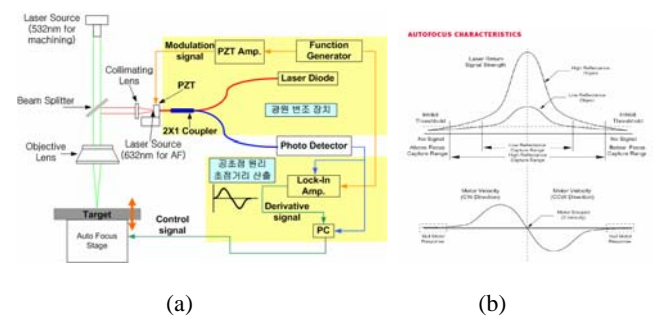


Fig. 1 Principle of auto-focus system

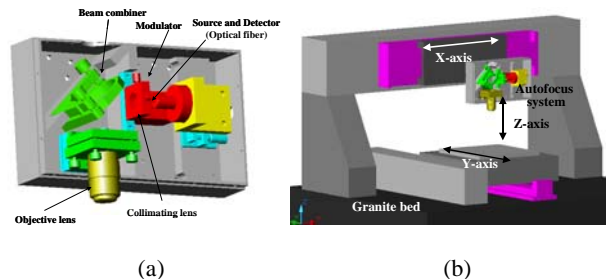


Fig. 2 Auto-focus system in micro laser fabrication machine

3. 실험결과 및 고찰

3-1 이송축(Z 축)의 정밀도

이송축인 Z 축의 정밀도 측정을 위해 Z 축을 이송구간 (85 mm 구간)에 대해 17 mm 간격으로 5 회 왕복하고 이때 반복정밀도를 레이저 인터페로미터(HP5529A)를 사용하여 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 3 과 같이 양방향 반복정밀도 1.08 μm 로 측정되었으며 자동초점장치를 사용할 때 초점 오차를 보상할 경우 Z 축의 반복정밀도에 해당하는 초점오차를 가진다.

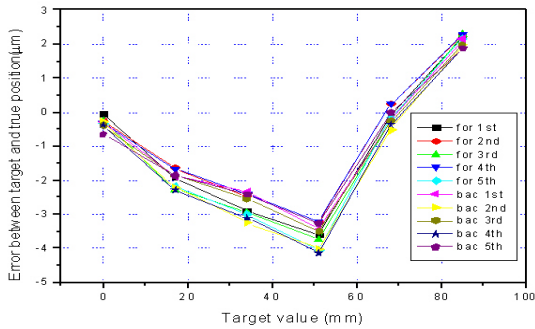


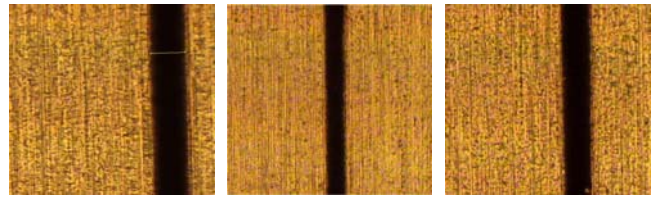
Fig. 3 Repeatability of displacement measurements in Z-axis

3-2 Invar 표면에의 자동초점장치 적용실험

자동초점장치가 레이저 가공에 사용이 가능한지 검증하기 위하여 표면이 불균일한 Invar 에 대해 off-line 방식으로 자동초점 적용실험을 수행하였으며 초점오차가 보상되었는지를 확인하기 위해 레이저 가공을 통해 선폭 변화를 측정하였다.

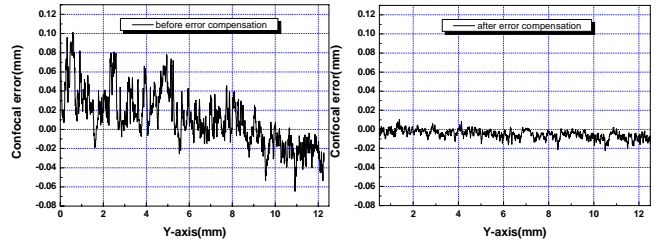
먼저, 초점오차보상을 하지 않은 상태에서 300 mW 의 레이저 출력과 0.01 mm/sec 의 X 축 이송속도로 시편의 일정영역(길이 12.5 mm)을 레이저 가공하였다. 가공된 구간의 각 지점 선폭 변화를 측정한 결과는 Fig. 4 와 같다. Fig. 4 와 같이 길이 0 mm 지점에서 선폭은 82.6 μm , 길이 6 mm 지점에서 선폭은 51.1 μm , 그리고 길이 12.5 mm 지점에서 선폭은 82.2 μm 로 측정되었고, 각 위치에 따라 가공된 레이저 선폭이 변화가 크게 발생한 것을 볼 수 있다.

이를 보상하기 위해 자동초점장치를 이용하여 초점오차보상 후 레이저 가공을 수행하였다. Invar 표면의 초기 초점오차를 측정하기 위해 자동초점장치의 광원은 출력 1.5 mW, 광원 변조는 주파수 50 Hz, 진폭 10 μm 으로 하였으며, X 축에 대해 이송속도 1.56 mm/sec 의 속도로 12.5 mm 의 구간에 대해 측정하였다. 미소신호동기증폭기를 이용하여 공초점신호의 미분 신호를 초기 Invar 가공면의 초점오차신호로서 사용하였다. 획득된 초기 초점오차신호는 Fig. 5 (a)와 같고, 최대 단차는 약 80 μm 로 측정되었다. 이 신호 값을 PMAC 의 오차보상테이블(Error Compensation Table, ECT)로 정의하고, Z 축에 적용하여 off-line 피드백 제어를 통해 초점오차를 보상하였다. 보상 후 자동초점장치로 재 측정된 결과는 Fig. 5 (b)와 같이 약 10.5 μm 의 단차를 가진 초점오차신호를 얻었다. ECT 적용 후에도 약 10.5 μm 의 단차가 나타나는 것은 Z 축의 반복정밀도 및 ECT 의 정의에 사용된 가정에 기인한 것으로 판단된다. 초점오차 보상 후 같은 조건으로 레이저 가공을 수행하였다. 각 지점의 가공 결과는 Fig. 6 과 같이 길이 0 mm 지점에서 선폭 54.6 μm , 길이 6 mm 지점에서 선폭 51.1 μm , 길이 12.5 mm 지점에서 선폭 53.4 μm 로 측정되었고, 초점오차보상 후에는 각 위치에 따라 일정한 레이저 가공 선폭이 유지됨을 확인하였다.



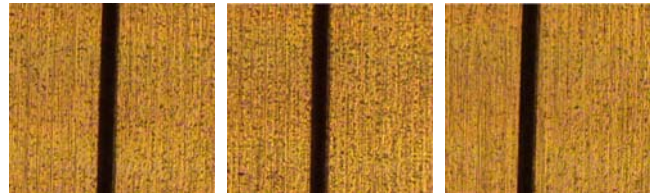
(a) Start Point (b) Middle Point (c) End Point

Fig. 4 Microscope view of machined surface before off-line error compensation



(a) before (b) after

Fig. 5 Comparison of auto-focusing signals before and after off-line error compensation



(a) Start Point (b) Middle Point (c) End Point

Fig. 6 Microscope view of machined surface after off-line error compensation

4. 결론

본 연구에서는 레이저 가공시 정확한 초점위치를 찾기 위해 광학 현미경 등 측정 분야에서 사용되는 공초점 방식의 자동초점조절을 레이저 미세가공에 적용하였고, 레이저 가공기에 부착하여 모듈형태로 사용할 수 있도록 경통을 제작하였다. 그리고 레이저 가공과 측정이 하나의 축 상에서 동시에 이루어질 수 없는 단점을 보완하기 위해 가공면을 측정 후 보상된 프로파일을 따라 가공을 수행하는 off-line 방식의 초점오차보상을 수행하였다. Invar 표면에 제안된 방식을 적용한 결과 초점오차보상 전에는 가공 구간의 각 지점에서 초점오차로 인해 일정하지 않은 레이저 가공 선폭이 나타났으나, 초점오차보상 후에는 모든 지점에서 약 50 μm 선폭을 유지함을 확인하였다.

후기

본 연구는 지식경제부 차세대신기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다

참고문헌

1. 박정재, 김승우, 이호재, “공초점 원리와 광섬유 광원 변조를 이용한 무한보정 현미경 자동초점”, 한국광학회지, 제 15 권 제 6 호, 583- 590, 2004.
2. 이재석, 김상인, 김호상, 이경돈, “유연힌지와 레버구조를 이용한 자동초점조절 미세구동 장치에 대한 연구”, 레이저가공학회 2006 추계학술대회, 407-418, 2006