

레이저 미세가공용 자동초점장치를 이용한 오프라인 초점 오차 보상에 관한 연구

Autofocus system for off-line focusing error compensation in micro laser fabrication process

김상인¹, 김호상^{1,✉}

Sang In Kim¹ and Ho Sang Kim^{1,✉}

¹ 고등기술연구원 로봇/생산기술센터 (Center for Robot & Manufacturing Tech., Institute for Adv. Eng.)

✉ Corresponding author: hoskim@iae.re.kr, Tel: 031-330-7332

Manuscript received: 2009.1.6 / Accepted: 2009.3.6

Micro laser fabrication techniques can potentially be used for the manufacture of microstructures on the thin flat surfaces with large diameter that are frequently used in semiconductor industries. However, the large size of wafers can cause the degraded machining accuracy of the surface because it can be tilted or distorted by geometric errors of machines or the holding fixtures, etc. To overcome these errors the off-line focusing error compensation method is proposed. By using confocal autofocus system, the focusing error profile of machined surface is measured along the pre-determined path and can be compensated at the next machining process by making the corrected motion trajectories. The experimental results for silicon wafers and invar flat surfaces show that the proposed method can compensate the focusing error within the level of below 6.9 μm that is the depth of focus required for the laser micromachining process.

Key Words: Autofocus System (자동초점장치), Off-line Focusing Error Compensation (오프라인 초점오차 보상), Laser Micromachining (레이저 미세가공), Confocal Theory (공초점 원리), Error Compensation Table (오차보상 테이블)

1. 서론

최근 반도체, 통신 및 광학 디스플레이, 항공우주 분야의 기술 개발로 인해 고부가가치를 실현하기 위한 제품의 초정밀화, 초소형화의 추세가 급속히 진행되고 있다. 그리고 이를 뒷받침하기 위한 가공기술로서 레이저 미세가공 방법이 주목을 받고 있다.¹ 그러나 이러한 가공법을 실제 제품에 적용하고 마이크로 단위의 정밀도를 확보하기 위해 레이저 초점의 스팟(spot) 크기를 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하며 많은 연구자들에 의해 관련 연구가 진행되어져 왔다. 스팟 크기를 일정

하게 유지하기 위해 가공 시스템의 각 축의 기하학적 오차, 가공하고자 하는 재질의 고유한 물성, 시편을 고정하는 마운트에 의해 가공면과 레이저 빔이 완벽하게 수직을 이루지 못하여 발생하는 오차 등 많은 요인을 고려하여 초점오차를 최소화해야 한다.

초점오차를 최소화하기 위해 가공물과 레이저 헤드 사이의 거리를 정확히 측정해야 하며 대표적으로 비전을 이용하거나 레이저 간섭계를 이용하는 방법이 있다.^{2,3} 전자는 광축 방향으로 반복이 필요하므로 측정시간이 많이 소요되는 단점이 있고 전자와 후자 모두 추가적인 레이저소스와 반사

경들의 가공기 설치 및 정렬작업 등에 의한 단점이 존재하므로 실제 레이저 가공기에 장착, 사용시 정밀도를 향상시키는 데 어려움이 있다. 또한 레이저 용접 공정에서 마이크로급의 액츄에이터를 Z 축상에 추가로 설치하여 기존의 방식에 비해 공정의 가공 정밀도를 향상시키는 방법도 제시된 바 있으나 측정 정밀도 면에서 미세가공 용도에 적합하지 못한 문제점을 가지고 있다.⁴

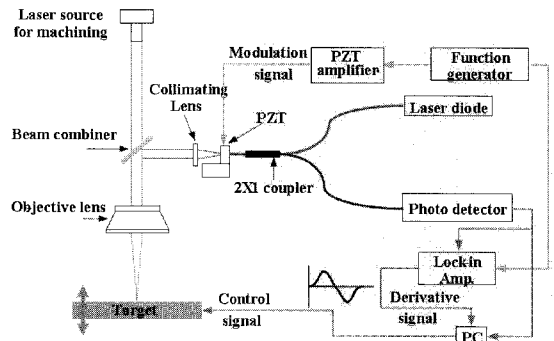
한편, 광축 방향의 초점위치를 정확히 측정하기 위해 공초점 방식을 이용한 연구가 현미경 분야에서 많이 이루어지고 있다.^{5,6} 특히 공초점 원리와 광섬유에 의한 광원 변조를 이용한 자동초점장치 방식은 압전소자와 광섬유를 이용하여 특정 주파수로 광을 변조시키고 미소신호동기증폭기를 이용하여 시편상의 초점평면에서 반사되는 신호 중 불필요한 신호들을 차단시키는 특징을 가지고 있다. 이 방법은 광축 방향 초점위치의 측정정밀도를 향상시킬 수 있으며 광 검출기 출력의 미분 신호를 이용하므로 초점오차의 방향을 알 수 있어 초점 위치 보상 시 Z 축의 반복이송이 필요 없으며 관련 부품들의 정렬오차에 둔감한 장점이 있다.⁷⁻⁹

본 논문에서는 기존의 현미경 분야에서 사용되는 공초점 원리와 광섬유에 의한 광원변조를 이용한 측정방식을 레이저 미세가공 공정에 적용하고 오프라인(Off-line) 방법에 의한 초점오차 보상방법(Focusing error compensation method)을 제안하였다. 이 방법은 Z 축의 반복이송이 필요 없고 관련부품의 정렬오차에 둔감하므로 실제 가공기 적용에 장점을 가지며 오프라인 방식을 채택함으로써 레이저를 이용한 가공공정에 적용하기에 적합한 특성을 가진다. 또한 본 방법은 대부분의 가공공정에서 사용되는 CNC 형태의 모션제어기에 적용할 수 있도록 2 차원 형태의 오차보상테이블(ECT, Error Compensation Table) 작성 방식을 사용하고 사용자에게 프로그램 작성과 CNC 조작 시 편의성을 제공할 수 있는 특징을 가지고 있다. 제안된 방법의 효용성을 확인하기 위해 자동초점장치를 Z 축에 부착할 수 있도록 설계, 제작하였으며, 반도체 분야에 사용되는 실리콘 웨이퍼와 음극선관(CRT, Cathode-Ray Tube)용 섀도우 마스크(Shadow mask)에 사용되는 인바(Invar) 재질의 평판 시편 표면에 제안된 방법을 적용하여 각 축에 대한 표면 프로파일과 보상된 후 오차의 프로파일 데이터를 얻는 실험을 수행하였다.

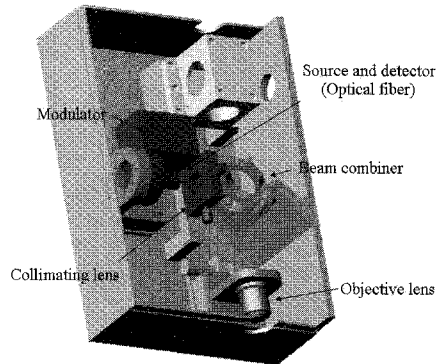
2. 공초점 자동초점장치를 이용한 오프라인 초점오차 보상

2.1 공초점 자동초점장치 구성

공초점 자동초점 장치의 전체적인 구성은 Fig. 1(a)와 같다. 광원의 파장은 632 nm, 최대 출력은 2.5 mW이며 레이저 광원은 2x1 광결합기(Coupler)를 거쳐 광섬유 끝단으로 전파된다.



(a) Block diagram



(b) Layout

Fig. 1 Confocal type autofocus system

광섬유 끝단은 광축 방향으로의 변조를 위해 압전소자에 고정되어 진동되며 광원 끝단에서 변조된 광은 시준렌즈(Collimating lens)를 지나 평행광으로 바뀐다. 이 평행광은 광결합기(Beam combiner)를 거쳐 초점크기 1.7 μm , 초점 심도 6.9 μm 인 집광렌즈(Objective lens)를 통해 측정할 시편에 반사되고 반사된 빔은 같은 경로를 통해 다시 광섬유 끝단에 입사하게 된다. 입사된 빔은 2x1 광결합기를 거쳐 광검출기에 의해 검출되고, 미소신호동기증폭기(Lock-in amplifier)에 입력된다. 미소신호동기증폭기는 광검출기에서 검출된 입력신호

와 파형발생기(Function generator)의 변조용 신호를 이용하여 광장도 값의 광축 방향 거리에 대한 미분형태에 해당하는 신호를 발생시킨다. Fig. 1(b)는 이러한 공초점 자동초점장치의 구현을 위해 설계, 제작된 경통과 관련 부품들을 포함한 시스템의 모습이다.

2.2 실험 장치 구성

실험 장치는 Fig. 2 와 같이 X, Y, Z 축 3 개의 축을 갖는 형태로서 Y 축은 시편 이송, X, Z 축은 자동초점장치 및 관련 치구의 이송과 광축 방향 자동초점 조절기능을 수행한다. 각 축은 레이저 미세가공을 위해 정밀구동이 가능하도록 제작되었으며 Z 축은 수직방향의 이송을 위해 볼 스크류 방식에 의한 회전형 모터 구동방식을 사용하였고 각 축의 모션 제어를 위해 상용 제어기인 미국 Deltatau 사의 UMAC 을 사용하였다. 각 축의 사양은 Table 1 과 같다.

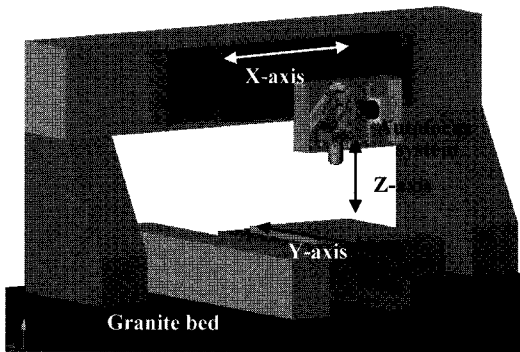


Fig. 2 Equipment for laser micromachining

Table 1 Specifications of the 3-axis precision stage

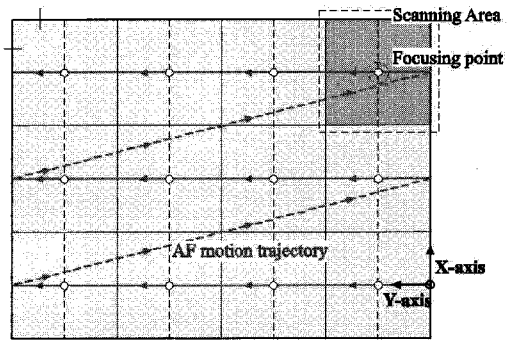
Item	X-axis	Y-axis	Z-axis
Travel(mm)	600	600	100
Accuracy(μm)	± 3	± 3	± 3
Repeatability(μm)	± 0.5	± 0.5	± 2

3. 오프라인 초점오차 보상 실험

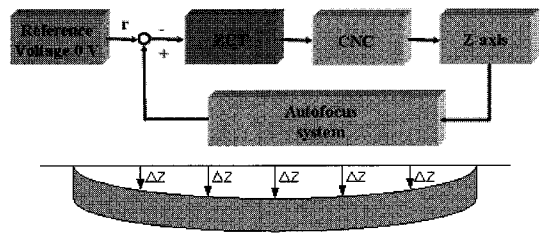
3.1 오프라인 초점오차 보상 개요

본 연구에서 제안된 오프라인 초점 오차보상 방법은 비교적 큰 사이즈의 가공시편을 레이저 미세 가공기에서 가공할 때 초점오차를 최소화 하기 위해 사용할 수 있다. Fig. 3(a)와 같이 평판 형태의

가공시편을 가공할 때 시편은 X, Y 방향으로 이송되며 광축인 Z 축 상으로 레이저가 조사되어 가공이 수행된다. 이러한 형태의 가공시 시편의 고정 상태 또는 가공기의 기하학적인 오차 등에 의해 원치 않는 형태로 시편이 변형되거나 기울어져 있는 경우가 발생하며 이를 보상하기 위해 오프라인 방식의 오차보상 방식을 고려할 수 있다.



(a) Working principle of compensation method



(b) Block diagram for compensation

Fig. 3 Schematic of off-line focusing error compensation

실제로 가공기의 각축 방향 이송은 시작점과 중간 점, 마지막 점 등과 도달시간, 가속도 등을 지정하여 모션 프로그램을 통하여 실행시키는데 전체영역에 대해 오차보상을 위한 모션 프로그램을 작성하기에는 현실적으로 어려움이 있으므로 Fig. 3(a)와 같이 가공 시편의 영역을 X, Y 축 각 방향으로 몇 개의 분할영역으로 구분하여 보상하는 방법을 고려할 수 있다. 이때 한 개의 분할영역 또는 가공 시 스캐닝 영역(Scanning area)을 고려하여 이 영역을 대표할 수 있는 초점(Focusing point)의 X, Y 좌표를 선정할 수 있으며 각 분할영역의 초점들을 연결하는 자동초점을 위한 운동경로(Autofocus motion trajectory)를 선정할 수 있다.

1 차로 이러한 운동경로에 대해 이송을 수행하며 시편이 변형되거나 기울어진 것에 대한 초점오

차 Δz 를 구할 수 있으며 구해진 초점오차를 이용하여 2 차적인 이송 시 보상경로가 포함된 수정된 모션 프로그램을 작성하여 오차를 보상할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같이 공초점 자동초점장치의 미소신호동기증폭기 출력값이 기준전압(Reference voltage)인 0 V에 도달한 경우 Z 축 상에 정렬된 것으로서 모션제어기의 오차보상데이터 기능을 이용하여 가공기의 Z 축에 수정된 모션 프로그램을 재 작성하여 보상을 수행하게 된다.

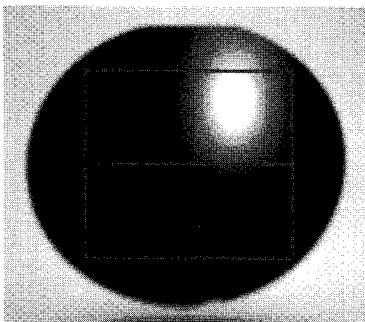
3.2 실리콘 웨이퍼 평면 초점오차 보상 실험

제안된 오차보상 방법의 효용성을 확인하기 위해 실리콘 웨이퍼 표면에 오프라인 방식으로 초점오차 보상 실험을 수행하였다. 초기에 실리콘 웨이퍼의 초점오차신호를 취득하기 위하여 Fig. 4(a)의 4 인치 웨이퍼에 대해 Fig. 4(b)와 같이 X 축 방향으로 60 mm, Y 축 방향으로 30 mm 간격으로 스캐닝 방식으로 초점오차를 측정하였다. 초점오차는 Fig. 1(a)의 미소신호동기증폭기의 출력값으로서 광강도 값의 초점오차의 변화에 따른 미분 값에 해

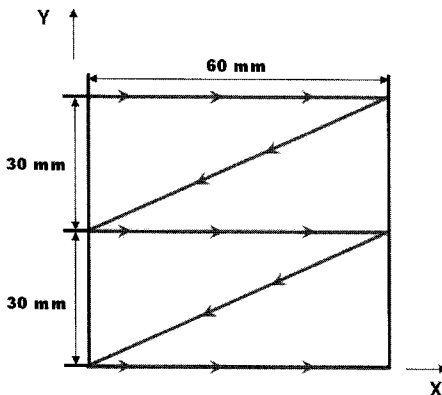
당하며 이 신호를 통해 초점으로부터 시편의 측정면이 위 방향 또는 아랫 방향에 있는 지의 정보와 앞으로 초점거리를 0 으로 개선하기 위한 거리정보를 알 수 있다. 이 신호값은 모션제어기(UMAC)에서 제공하는 오차보상데이터블로 변환되어 Z 축의 모션 프로그램으로 재 입력됨으로써 초점오차의 보상을 수행할 수 있다.

실리콘 웨이퍼에 대해 초점오차의 변화에 따른 광 강도 값의 변화 곡선을 Fig. 5 와 같이 측정하였다. 측정 조건은 자동초점장치의 광원 출력 2.0 mW, 광원 변조 주파수 50 Hz, 진폭 10 μ m이며 광축 또는 Z 축 방향에 대해 반복이송하며 Fig. 5 와 같은 선형 구간을 측정할 수 있다. 선형구간의 길이는 약 140 μ m이고 1 μ m당 자동초점장치의 출력전압은 0.089V 로 발생되고 있음을 알 수 있다. 이 값을 기준으로 자동초점장치의 출력전압과 실리콘 웨이퍼 표면에서의 초점오차에 대한 비례계수를 계산할 수 있으며 이를 이용하여 웨이퍼 표면의 초점과의 거리를 계산할 수 있다.

Fig. 6(a)에서 Fig. 6(c)까지 Fig. 4(b)에 도시된 가공시편의 모션 경로를 따라 초점오차를 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 6(a)는 시편을 Y 축으로 0 mm 지점에서 X 축 방향으로 60 mm만큼 이송하면서 측정된 결과이고, Fig. 6(b)는 Y 축으로 30 mm 지점에서 X 축 방향으로 60 mm 만큼 이송하면서 측정된 결과이며, Fig. 6(c)는 Y 축으로 60 mm 지점에서 X 축 방향으로 60 mm 만큼 이송하면서 측정된 결과이다. 실제 측정 데이터(Raw data)는 오차보상에 적용하기 위해 4 차의 다항식으로 근사화된 데이터(Fitted data)로 변환할 수 있다. Table 2 는 근사화된 데이터의 결과를 나타내며 이로부터 오차보상



(a) Photograph



(b) Motion trajectory

Fig. 4 Silicon wafer for experiment

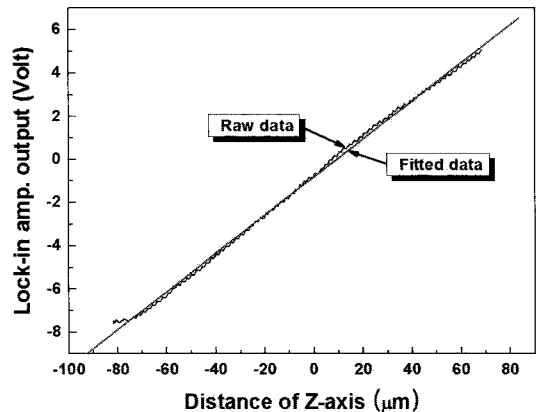


Fig. 5 Linear range of autofocusing for silicon wafer

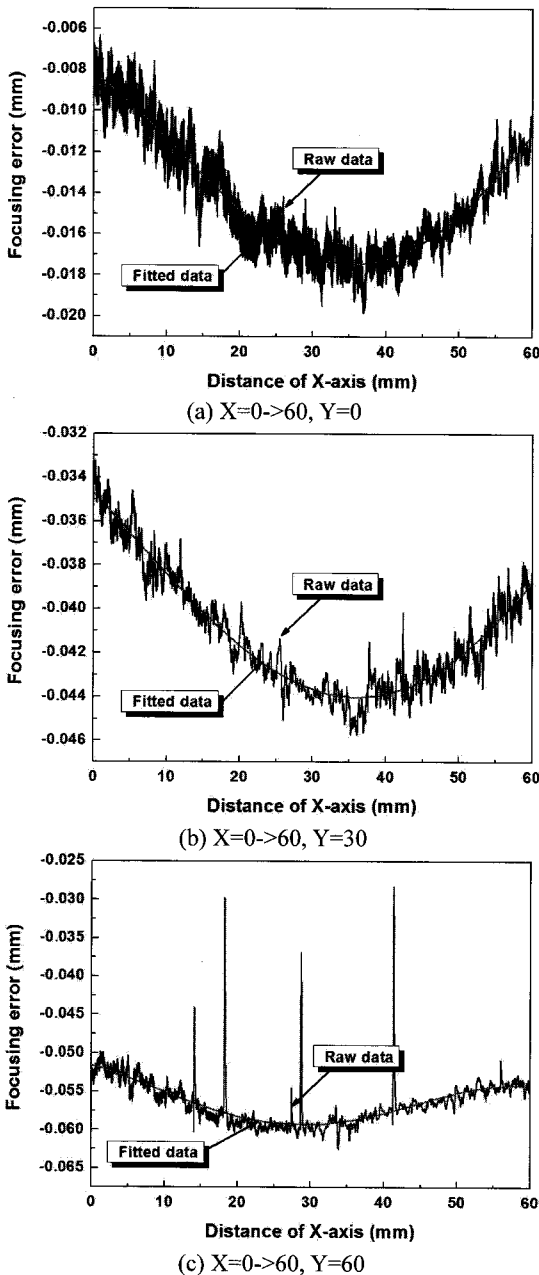


Fig. 6 Focusing errors of silicon wafer before off-line error compensation

테이블을 작성할 수 있다. Fig. 7 은 Fig. 6(a)에서 Fig. 6(c)의 결과들을 3 차원 상에 표현한 결과로서 시편이 Y 축 방향으로 최대 40 μ m 가량 기울어져 있으며 X 축 방향으로 포물선 모양으로 휘어져 있음을 나타낸다. 이는 실리콘 웨이퍼 시편의 취부

시 특정방향으로 기울어 지거나 자중에 의해 포물선 모양으로 휘어지는 현상을 반영하며 보상 전 초점오차가 51.1 μ m인 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Fitted result of focusing error before error compensation (silicon wafer)

Silicon wafer	$Z=aX^4+bX^3+cX^2+dX+e$		
	Y=0	Y=30	Y=60
a	-2.754×10^{-9}	-1.447×10^{-9}	-6.863×10^{-9}
b	$+4.202 \times 10^{-7}$	$+2.256 \times 10^{-7}$	$+7.368 \times 10^{-7}$
c	-1.219×10^{-5}	-3.484×10^{-6}	-1.601×10^{-5}
d	-2.357×10^{-4}	-3.595×10^{-4}	-2.565×10^{-4}
e	0.1054	0.0788	+0.062

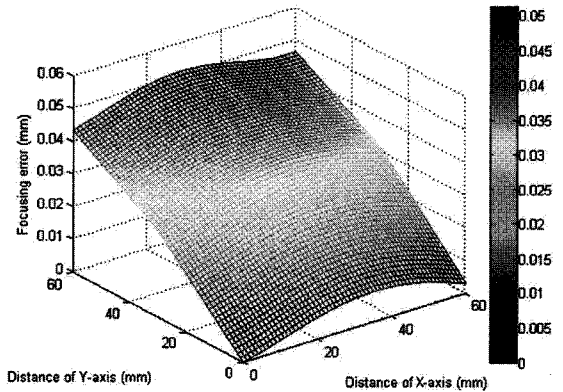
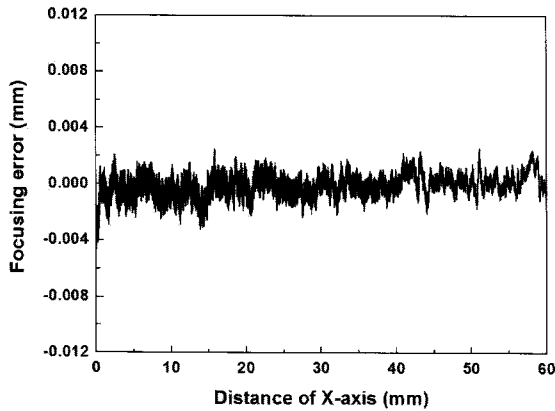


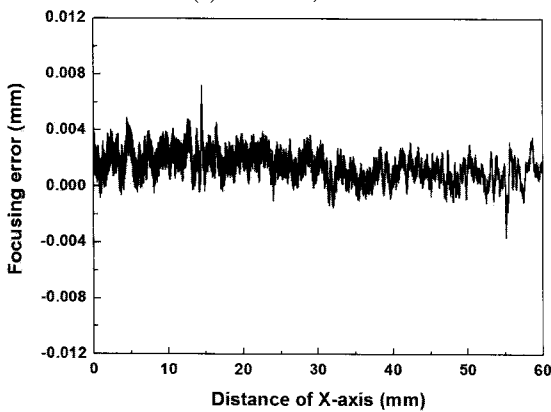
Fig. 7 Focusing error of silicon wafer before error compensation(3D)

측정된 초점오차를 보상하기 위해 제안된 오프라인 초점오차 보상방법을 적용하였다. Table 2 의 결과를 이용하여 자동초점장치가 장착된 Z 축이 X 축, Y 축의 이송에 따라 수정된 경로를 따라가도록 오차보상테이블을 작성하였다. 그리고 같은 방식으로 X 축으로 60 mm, Y 축으로 30 mm 간격으로 스케닝 방식을 이용하여 수정된 모션프로그램을 이용하여 이송하면서 초점오차를 재 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 8(a)에서 Fig. 8(c)에 표시하였으며 보상 후 초점오차가 보상 전에 비해 수 μ m 이내로 감소된 것을 알 수 있다. 대체로 이러한 결과는 사용한 실험장치의 Z 축 방향 반복정밀도가 반영된 결과로서 제안된 방법이 효과적으로 오차보상을 수행할 수 있음을 나타낸다. Fig. 9 에 이러한 결

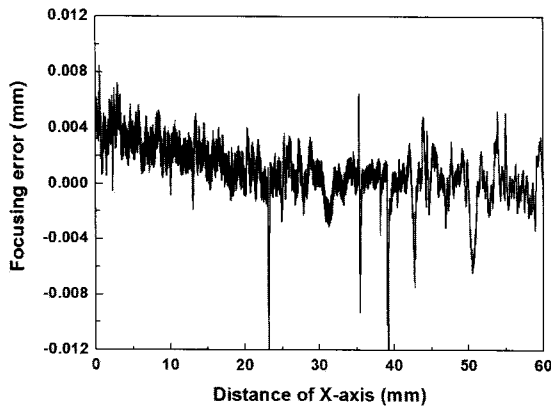
과들을 3 차원상에 함께 나타냈으며, 보상 전 초점 오차가 51.1 μm 에서 오프라인 초점오차 보상 후 최대 3.8 μm 로 감소한 것을 확인하였다



(a) X=0->60, Y=0



(b) X=0->60, Y=30



(c) X=0->60, Y=60

Fig. 8 Focusing errors of silicon wafer after off-line focusing error compensation

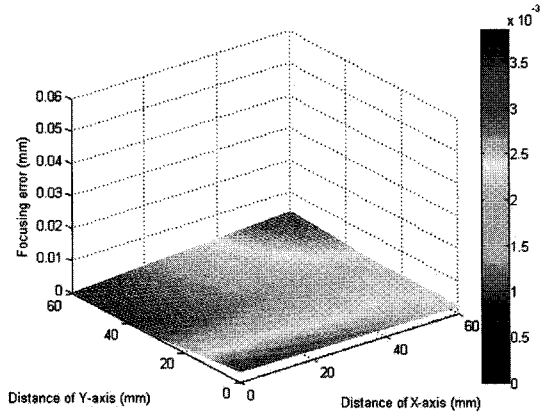
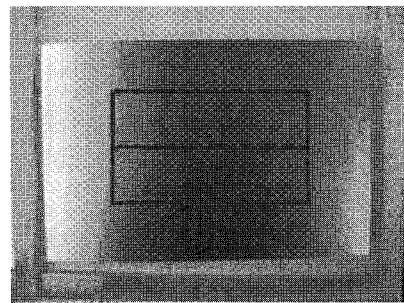


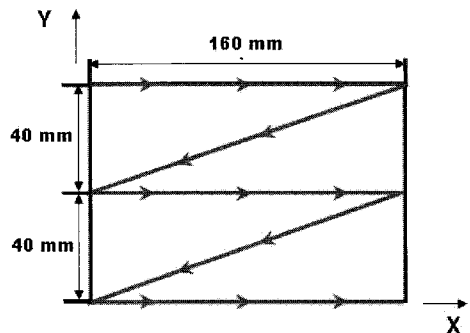
Fig. 9 Three-dimensional plot of focusing error of silicon wafer after error compensation

3.3 인바 평면 초점오차 보상 실험

제안된 방법의 효용성을 확인하기 위해 웨도우 마스크용 인바 평판 표면에 초점오차 보상 실험을 진행하였다. 전체적인 실험방법은 앞 절의 실리콘 웨이퍼의 경우와 같은 방식을 사용하였다. 사용한 인바 평판은 Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)와 같이 사각형 모양으로서 X 축으로 160 mm, Y 축으로 40 mm 간격으로 스캐닝 방식으로 초점오차를 측정하였다.



(a) Photograph



(b) Motion trajectory

Fig. 10 Invar flat plate for experiment

인바 평판에 대해 광강도 값의 광축 방향 거리에 대한 미분형태에 해당하는 신호를 측정하여 Fig. 11 에 나타내었다. 선형구간의 길이는 약 140 μm 이고 1 μm 당 자동초점장치의 출력전압은 0.035 V 로 발생되고 있음을 알 수 있다. 이 값을 기준으로 인바 평판의 초점오차를 Fig. 10(b)의 운동 경로를 사용하여 측정하였다. Fig. 12(a)는 Y 축으로 0 mm 지점에서 X 축 방향으로 160 mm 만큼 이송하면서 측정한 결과이고, Fig. 12(b)는 Y 축으로 40 mm 지점에서 X 축 방향으로 160 mm 만큼 이송하면서 측정한 결과이며, Fig. 12(c)는 Y 축으로 80 mm 지점에서 X 축 방향으로 160 mm 만큼 이송하면서 측정한 결과이다. 실리콘 웨이퍼에 비해 인바 평판의 표면 조도가 좋지 않아 초점오차의 측정결과에 노이즈 성분이 크게 혼합되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 13 은 Fig. 12(a)에서 Fig. 12(c)까지의 결과를 3 차원

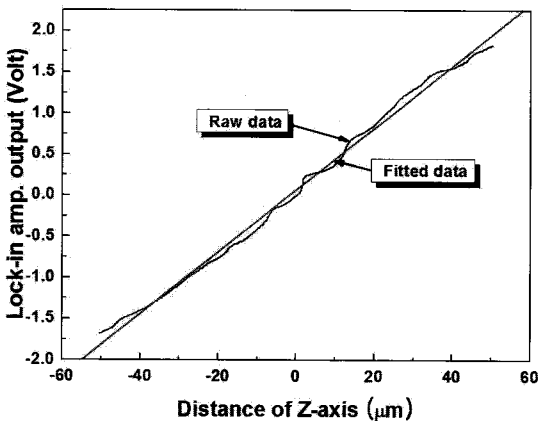


Fig. 11 Linear range of autofocusing for invar flat plate

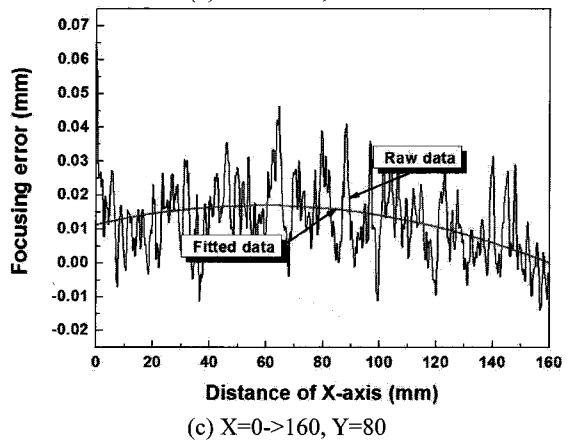
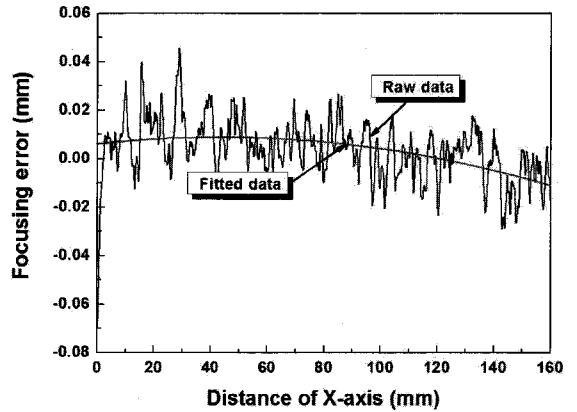
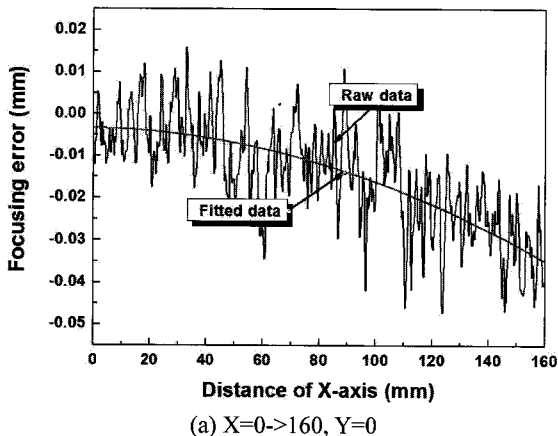


Fig. 12 Focusing errors of invar flat plate before off-line focusing error compensation

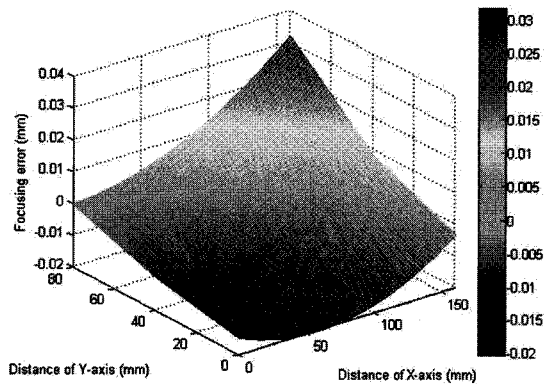


Fig. 13 Three-dimensional plot of focusing error of invar surface before error compensation

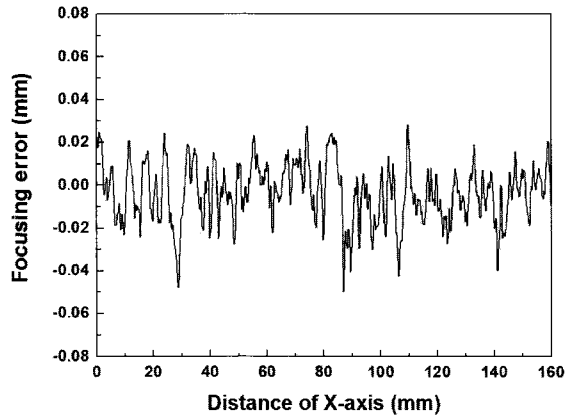
상에서 함께 보여주며 실리콘 웨이퍼의 경우와 같이 인바 평판이 특정 방향으로 기울어져 있고, 중

심이 쳐져있는 것을 확인할 수 있었고, 보상 전 초점오차가 44.0 μm인 것을 확인할 수 있다.

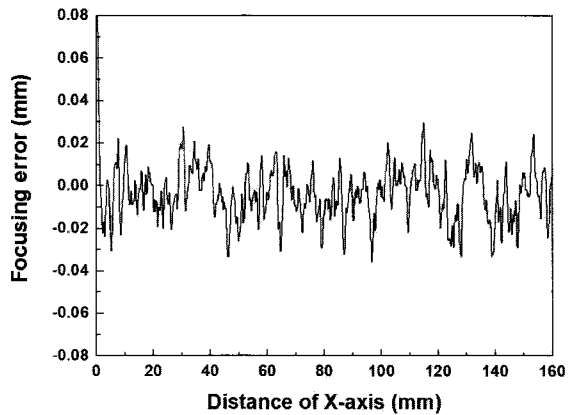
측정된 초점오차를 보상하기 위해 실리콘 웨이퍼의 경우와 동일하게 오프라인 초점오차 보상 실험을 수행하였다. 자동초점장치가 장착된 Z 축이 자동적으로 초점오차만큼 이송할 수 있도록 측정된 초점 오차값을 고차 피팅을 통해 X 축, Y 축에 대한 Z 축의 함수로 근사화하고, 근사화된 함수의 형태와 계수를 Table 3 에 나타내었다. Table 3 의 근사화된 함수를 이용하여 X 축, Y 축 이송 시 자동초점장치가 장착된 Z 축이 보상된 경로로 이송할 수 있도록 오차보상테이블을 작성하여 모션제어기에 입력해 주었다. 그리고 보상 전과 같은 방식으로 X 축으로 160 mm, Y 축으로 40 mm간격으로 스캐닝 방식으로 초점오차를 재 측정하였다. 수정된 경로를 이송하며 초점오차를 측정한 결과는 Fig. 14(a)부터 Fig. 14(c)와 같다. 또한 3 차원상에 다시 표현한 그림은 Fig. 15 와 같으며 보상 전 초점오차 44.0 μm로부터 제안된 오프라인 초점오차 보상 후 약 5.0 μm로 감소된 결과를 확인할 수 있다.

Table 3 Fitted result of focusing error before error compensation (invar)

Invar	$Z=aX^2+bX+c$		
Position	Y=0	Y=40	Y=80
a	-1.132×10^{-6}	-1.475×10^{-5}	-1.641×10^{-6}
b	-1.64×10^{-5}	$+1.281 \times 10^{-4}$	$+1.917 \times 10^{-4}$
c	-0.00322	0.00616	0.01146

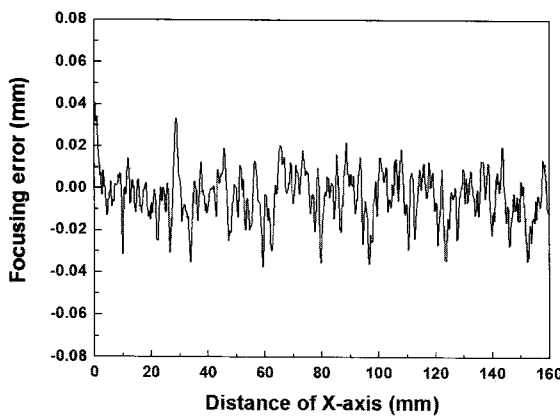


(b) X=0->160, Y=40



(c) X=0->160, Y=80

Fig. 14 Focusing errors of invar flat plate after off-line focusing error compensation



(a) X=0->160, Y=0

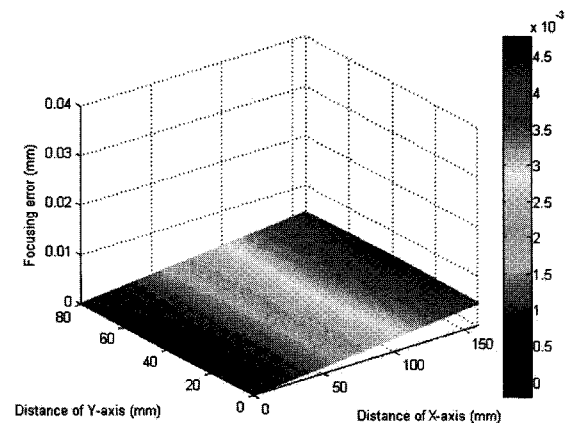


Fig. 15 Three-dimensional plot of focusing error of invar surface after off-line focusing error compensation

인바 평판에 대한 초점오차 보상 결과 많은 양의 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있었지만 실리콘 웨이퍼의 경우에 비해 오차 보상 후 재 측정된 초점 오차가 상대적으로 크게 나타난 것은 시편의 표면상태의 차이때문에 동일한 거리 또는 오차들에 대해 각각의 시편에 대해 공초점 장치의 신호값의 레벨의 차이가 발생하며 실리콘 웨이퍼의 경우 인바평판에 비해 높은레벨의 전압을 발생하므로 노이즈 등의 외부환경요인에 상대적으로 둔감했기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 미세 가공 시 발생하는 초점오차 보상을 위해 고 배율 광학 현미경에서 사용되고 있는 공초점 원리의 자동초점장치를 응용한 오프라인 초점오차 보상방법을 제안하였다. 제안된 방법은 가공 전 미리 가공영역에 대해 모션경로를 지정하여 초점오차의 프로파일을 측정하고 실제 가공 시 수정된 보상경로를 통하여 관련 오차를 제거하는 방법이다. 제안된 방법의 성능을 확인하기 위해 공초점 자동초점장치를 제작하고 실리콘 웨이퍼와 인바 평판 표면에 대해 초점오차 보상 실험을 수행하였다. 실험결과, 실리콘 웨이퍼의 경우 보상 전 초점오차 $51.1 \mu\text{m}$ 에서 오프라인 초점오차 보상 후 $3.8 \mu\text{m}$ 로 감소한 결과를 확인하였다. 또한 인바 평판 표면의 경우 보상 전 초점오차 $44.0 \mu\text{m}$ 에서 오프라인 초점오차 보상 후 $5.0 \mu\text{m}$ 로 감소함을 확인하였다. 이러한 결과는 사용한 실험장치의 Z 축 이송 시 발생하는 기계적인 오차와 그 밖의 가공시편의 재질 별로 반사율의 차이에 따라 근사화 과정에서 나타나는 오차들에 의한 것으로 판단된다. 또한 이러한 수준의 보상 후 초점오차를 통해 본 연구에서 사용된 집광렌즈의 초점 심도 $6.9 \mu\text{m}$ 에 대해 제안된 공초점 원리의 자동초점장치를 이용한 오프라인 오차보상법이 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 추후 제안된 방법을 실제 가공기에 적용하기 위해 샘플마다 동일한 조건으로 위치되도록 관련 지그를 제작, 설치하고 반복적인 위치고정을 할 수 있는 방법들에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 차세대 신기술 개발사업

(2008)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 저자들은 실험장치의 대여와 관련 조연을 해주신 한국기계연구원의 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Li, C., Shi, X., Si, J., Chen, T., Chean, F., Liang, S., Wua, Z. and Hou, X., "Alcohol-assisted photoetching of silicon carbide with a femtosecond laser," *Optics Communications*, Vol. 282, No. 1, pp. 78-80, 2009.
2. Kimura, S. and Wilson, T., "Confocal scanning optical microscope using single-mode fiber for signal detection," *Applied Optics*, Vol. 30, No. 16, pp. 2143-2150, 1991.
3. Lin, Q., Bai, L., Xue, S. and Chen, L., "Autofocus system for Microscope," *Optical Engineering*, Vol. 41, No. 6, pp. 1289-1294, 2002.
4. Lee, J. S., Sohn, Y. I., Park, K. Y. and Lee, K. D., "Development of intelligent filler wire feeding device for improvement of weld quality," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 59-66, 2006.
5. Yoo, H. K., Kang, D. K., Lee, S. W. and Gweon, D. G., "Error analysis and alignment tolerancing for confocal scanning microscope using Monte Carlo method," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 2, pp. 92-99, 2004.
6. Kang, Y. J., Song, D. H., Ryu, W. J. and Baik, S. H., "A study on the con-focal microscope for the surface measurements," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 73-81, 2003.
7. Park, J. J., Kim, S. W. and Lee, H. J., "Autofocus of infinity-corrected optical microscopes by confocal principle and fiber source modulation technique," *Journal of the Optical Society of Korea*, Vol. 15, No. 6, pp. 583- 590, 2004.
8. Kim, S. I., Lee, K. I., Kim, H. S. and Lee, K. D., "Autofocus system for off-line error compensation in micro laser fabrication process," *Proceedings of KSPE Spring Conference*, pp. 603-604, 2008.
9. Neumann, B., Damon, A., Hogenkamo, D., Beckmann, E. and Kollmann, J., "A laser-autofocus for automatic microscopy and metrology," *Sensors and Actuators*, Vol. 17, No. 1-2, pp. 267-272, 1989.