

PZT로 구동되는 회전 스테이지의 오차 운동 분석

김진호*, 신동익⁺, 윤덕원⁺, 한창수⁺⁺, 이상무⁺⁺⁺, 남경태⁺⁺⁺

(논문접수일 2007. 6. 25, 심사완료일 2007. 9. 4)

An Error Motion Analysis of Rotary Stage Driven By PZT

Jinho Kim*, Dongik Shin⁺, Deokwon Yun⁺, Changsoo Han⁺⁺, Sangmoo Lee⁺⁺⁺, Kyungtae Nam⁺⁺⁺

Abstract

Axis of rotation error on rotary system are significant; such as the spindle radial error motion of a aligner, wire bonder and inspector machine which results in the poor state of manufactured goods. In this paper, the simple stage which consists of one PZT actuator and rotary encoder, is analyzed and measured by high resolution capacitance type displacement sensor. As the result of experiment, the paper discusses several issues that must be considered when designing rotary stage driven by PZT.

Key Words : PZT actuator(압전 액츄에이터), Axis of Rotation(회전축), Error Motion(오차 운동)

1. 서론

반도체 및 디스플레이 장비의 발전과 더불어 정도 높은 기계 부품 및 장비의 필요성과 그 성능에 대한 측정, 평가의 비중이 높아지고 있는 실정이다. 이러한 장비들 중 얼라이너(aligner), 와이어 본더(wire bonder) 및 검사장비(inspector)에 있어서 직선 및 회전운동을 하는 장비의 오차는 스테이지 위에서 작업하는 작업물의 거리와 위치를 미소하게 변화시키게 된다. 이는 가공 및 검사 중 오차를 만들어 불량 제품 생산에 직접적으로 영향을 미치는 가장 중요한 인자라 할 수

있다. 회전운동을 하는 회전체의 오차에는 원형 부분의 기하학적 원으로부터 벗어난 원인에서 발생하는 형상오차(roundness error), 조립 시 발생하는 편심오차(centering error)와 회전축의 미소한 움직임과 각도 방향으로의 기울어짐에 의해 발생하는 5자유도 기생오차가 있다.

이러한 회전체의 오차를 정확히 판단하기 위해서 스핀들 회전 정도에 관한 연구가 꾸준히 계속되어 왔다. 1972년에는 R,R,Donaldson^(1,2)에 의해 기준구와 실린더의 형상오차를 측정결과로부터 분리시키는 방법으로 반전법(reversal method)이 제시되었고, 1970년에는 spragg와 whitehouse에 의해

* 한양대학교 대학원 기계공학과 (jiropunch@naver.com)

주소: 426-791 경기도 안산시 상록구 사1동 한양대학교 제1공학관 111호 첨단로봇연구실

+ 한양대학교 대학원 기계공학과

++ 한양대학교 기계공학과

+++ 한국생산기술연구원

일정한 각도로 증가시켜 N회의 측정으로 형상오차와 축 방향 오차를 분리시키는 multi-step method를 제시 하였다⁽³⁾.

본 연구에서는 높은 분해능을 갖는 PZT의 장점⁽⁴⁾을 이용하여 단순진동을 회전운동으로 변환한 회전형 스테이지를 측정 하였으며, 2개의 정전용량센서(capacitance sensor)를 사용하여 PZT로 구동되는 회전체의 반지름 방향오차(radial error motion) 측정 및 PZT의 위치에 따른 회전체의 오차 분석을 하였다.

2. 이론적 배경

Fig. 1은 반경방향 회전오차(radial error motion)과 형상 오차(roundness error)를 분리하는 단계를 나타낸 것이다. 변위 센서에 의해 측정 데이터는 T.I.R(Total Indicated Reading)이라는 회전체의 각 회전마다 반복되는 RRO(Repeatable RunOut)과 진동 및 측정기의 불안정성에 의해 발생하는 비 반복적인 NRRO(Non-Repeatable RunOut)로 되어 있다. 이를 분리하기 위한 방법으로는 평균법(Average method), 단일점법(Single point method), 빼기법(Subtraction method), 주파수 영역법(Frequency domain method)⁽⁵⁾이 있으며, 그 중 단일점법이 가장 작은 표준편차 값으로 NRRO를 얻을 수 있다.

형상오차와 반경방향 회전 오차를 분리하기 위한 방법으로는 2회의 측정 데이터와 간단한 수식에 의해 분리 가능한 Donaldson Reversal method와 스피들들을 기준으로 측정자가 정한 일정한 각도인 ϕ 만큼씩 스테이지를 N-1회 회전하여 얻은 측정값으로 분리 할 수 있는 Multi-step method, 3개 이상의 센서를 사용하여 X, Y의 상대적인 센서 데이터 값에 의해 분리하는 Multi-probe method⁽⁶⁾등이 있다. 본 연구에 사용된 Reversal method는 Fig. 2와 같이 임의의 위치에서 초기 위치(initial position)를 잡고 측정 데이터를 얻는다. 두 번째 측정에서는 스테이지와 센서를 180도 반전시켜(reversal position) 측정하여 식 (1,2)에 의해 형상오차 $P(\theta)$ 와 반지름방향 회전 오차 $S(\theta)$ 를 분리 할 수 있다.

$$P(\theta) = \frac{m_I(\theta) + m_R(\theta)}{2} \quad (1)$$

$$S(\theta) = \frac{m_I(\theta) - m_R(\theta)}{2} \quad (2)$$

편심오차(set-up error)는 스테이지를 스피들 로터에 장착 시 발생하는 불가피한 오차이다. 한 주기 성분(fundamental

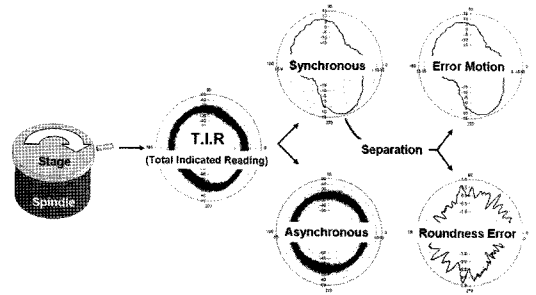


Fig. 1 Separation of spindle error motion and roundness error

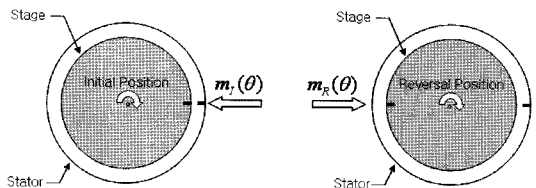


Fig. 2 Schematic of the Donaldson reversal method

component)을 야기 시키는 편심 오차를 제거하기 위한 방법으로는 FFT(Fast Fourier Transformation)를 이용한 주파수 분석(frequency analysis)을 통해 한 주기 성분을 제거하는 방법과 최소자승적합(least squares fit technique)을 이용한 방법이 있다.

3. 측정 장치 구성

반경방향 회전축 오차 측정을 위한 PZT 회전체는 Fig. 3과 같다. PZT는 팽창 할 때 큰 힘을 낼 수 있지만 수축 할 때에는 팽창 할 때에 비해 약 1/500의 힘 밖에 내지 못한다는 성질을 이용하여 마찰력과 관성력을 이용한 간단한 구동 메커니즘을 구현 하였다. 회전체 내부에는 일정한 마찰력을 제공할 수 있고 마멸에 강한 재료인 알루미나(alumina)와 한 개의 PZT를 접촉하는 방식으로 PZT의 단방향 직선운동은 원형의 알루미나를 주기적으로 밀어내 회전운동으로 변환하게 된다. 회전체 시스템은 150mm*150mm*110mm 크기의 지름 120mm인 스테이지로 구성되어 있으며, 센서 고정을 위해 알루미늄으로 제작된 센서 마운팅과 로타리 엔코더 지그를 보여주고 있다. 회전체를 방진 테이블에 설치하고 외부로부터의 기계적인 진동을 최대한 억제한 상태에서 측정을 할 수 있도록 환경을 구축 하였다.

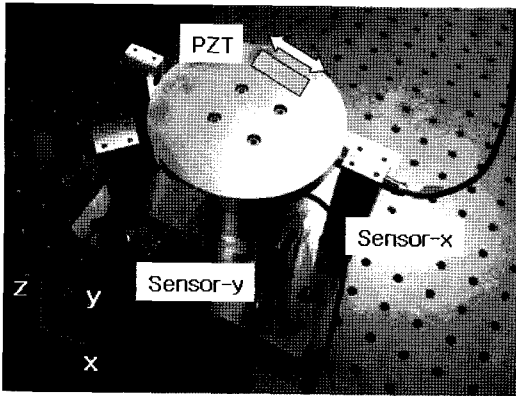


Fig. 3 Rotary stage driven By PZT

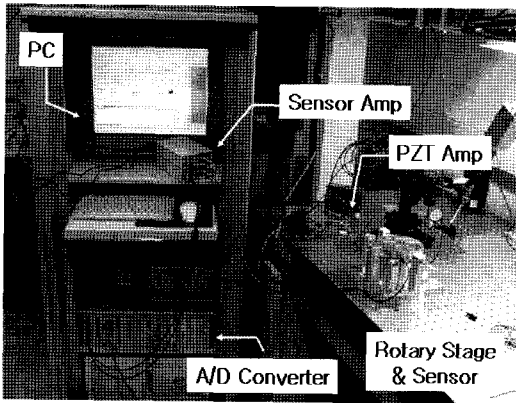


Fig. 4 Overview of the experimental setup system

본 연구를 수행하기 위한 전체적인 오차 측정 시스템은 Fig. 4와 같다. 정전 용량 변위 센서(capacitance type displacement sensor)에서 측정된 신호와 회전체에 설치된 로터리 엔코더의 회전 카운트 신호는 A/D converter를 통해 PC에 저장 된다. 정전용량 변위 센서는 3nm의 분해능과 $\pm 100\mu\text{m}$ 의 범위 측정이 가능하다. 회전체의 T.I.R은 로터리 엔코더에서 나오는 전기적 신호(index signal)를 이용하여 스테이지의 1회전 주기에서 2500개의 측정 데이터(sampling data)를 얻었으며 스테이지가 100회전할 때까지의 변위를 측정하여 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 120rpm의 회전 속도로 회전하는 스테이지를 sensor-x와 sensor-y로 측정한 각각의 오차 요소를 극좌표

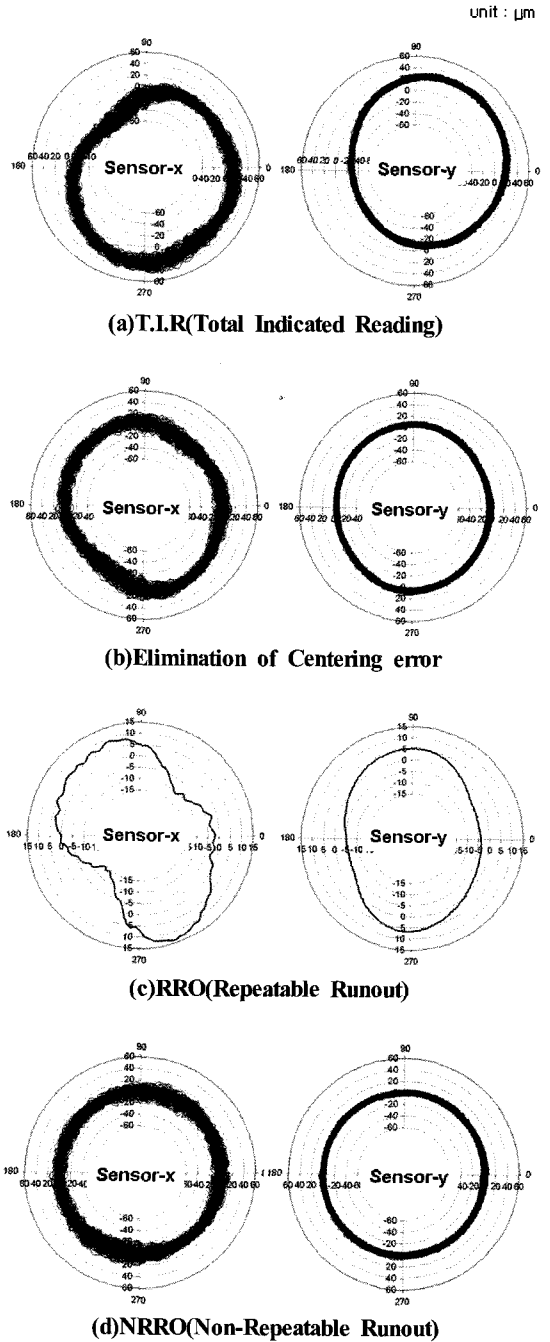


Fig. 5 T.I.R, RRO and NRRO from Sensor-x, Sensor-y

(Polar plot)로 표현한 것이며, 각각의 센서에 대한 Peak-to-Peak 값과 표준편차는 Table 1과 같다. T.I.R은 편심오차

Table 1 Statistical properties of T.I.R, RRO and NRRO of Sensor-x and Sensor-y

	pk-pk(μm)		σ (μm)	
	Sensor-x	Sensor-y	Sensor-x	Sensor-y
T.I.R	63.29	26.51	9.72	4.92
RRO	28.09	12.63	7.39	3.90
NRRO	47.15	16.63	6.33	3.00

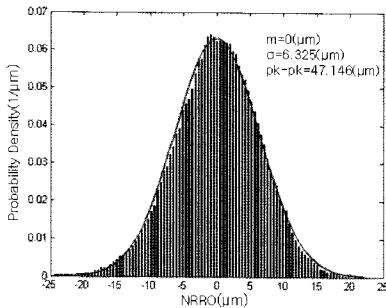


Fig. 6 Probability density function of NRRO

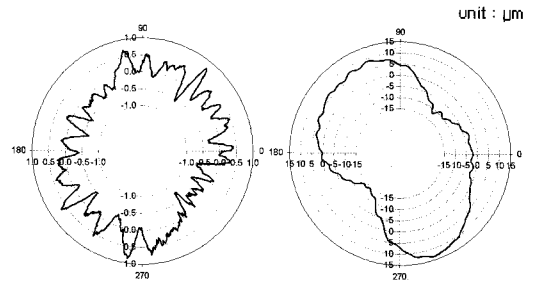
Table 2 Statistical properties of roundness error and radial error motion of Sensor-x

	pk-pk(μm)	σ (μm)
Roundness Error	1.65	0.32
Radial Error Motion	27.90	7.43

를 포함하고 있으므로 이를 제거하기 위하여 각 회전 시 발생 하는 한주기 성분의 주파수에 대한 오차를 FFT(Fast Fourier Transformation) 방법으로 제거하였으며, 평균법(average method)를 이용하여 RRO와 NRRO를 분리하였다. Sensor-x의 측정값은 Sensor-y에 비해 약 2배 이상의 오차값을 가지고 있는 것을 관찰 할 수 있는데, 이는 x축으로 단순 진동을 하는 PZT에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 NRRO의 평균과 표준편차를 가지는 정규분포표이다. NRRO의 분포는 정규 분포에 가까우며 평균이 0임을 알 수 있다.

Fig. 7은 X축 방향에 대한 형상오차와 반지름방향 오차를 반전법(Reversal method)을 사용하여 분리한 결과를 극좌표로 표현하였으며 Table 2는 Peak to Peak와 표준편차를 나타내었다. 스테이지의 형상오차는 $0.324\mu\text{m}$ 의 표준편차를 가진 비교적 매끄럽게 가공된 스테이지로 볼 수 있다. 그에 비해 $7.416\mu\text{m}$ 의 표준편차와 $27.904\mu\text{m}$ 의 Peak to Peak



(a)Roundness error (b)Radial error motion

Fig. 7 Roundness error & Radial Error motion

Table 3 1st Measurement Bearing(B1) vs 2nd Measurement Bearing(B2)

	pk-pk(μm)		σ (μm)	
	B1	B2	B1	B2
Roundness error	1.646	1.078	0.324	0.252
Error motion	27.904	5.706	7.416	1.681

를 가지는 반경방향 회전오차는 회전축의 불안정한 성향을 보여주고 있다. 이는 회전체 시스템의 설계에서의 결함과 볼베어링의 결함 및 손상의 문제과 생각하여, 정도 높은 볼베어링으로 교체하여 실험을 한 결과 Table 3의 값을 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 PZT를 이용한 간단한 회전 스테이지에 대한 측정 결과를 분석하였고, PZT의 운동방향에 대한 회전체 오차에 미치는 영향에 대한 분석을 하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) PZT로 구동되는 회전체의 오차는 PZT의 직선운동 방향으로의 진동이 반경 방향 회전오차에 많은 영향을 미치게 됨으로 PZT를 이용한 회전체를 설계 시에는 진동을 제어 할 수 있는 축 설계가 필요하다.
- (2) 여러 개의 PZT를 사용하여 회전체를 설계할 경우 PZT의 설치 위치를 고려하여 진동을 최소화 할 수 있는 방향으로 설계를 해야 더욱 더 오차를 줄 일수 있을 것으로 사료된다.

- (3) 회전축의 진동성분을 보상하기 위해 정도 높은 베어링의 사용이 회전체의 성능에 지배적인 영향을 끼치는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 성장 동력사업 중 차세대 IT 제품생산을 위한 초정밀 로봇 구동기술 개발에 의해 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Donaldson, R. R., 1972, "A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error," *CIRP-Annals*, Vol. 21/1, pp. 125~126.
- (2) ANSI/ASME B89.3.4M., 1985, *Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing Standard*, pp. 1~70.
- (3) Spragg, R. C., and Whitehouse, D. J., 1970, "New unified approach to surface metrology," *J. of Proc Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 185, pp. 697~707.
- (4) Yun, D., 2005, "Development of Manipulator for Handling Micro Components in Vacuum" *KSMTE Spring Conference 2005*, pp. 40~44.
- (5) Rouchard, G., and Lau, L., 1987, "An Investigation Of Non-Repeatable Spindle Runout," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-23, No. 5, pp. 3687~3689
- (6) Whitehouse, D. J., 1976, "Some Theoretical Aspects of Error Separation Techniques in Surface Metrology," *J. of Phys. E: Sci. Inst.*, Vol. 9, No. 7, pp. 531~536.