

저속 회전 스테이지의 5자유도 회전축 오차 분석에 관한 연구

한창수^{†*} · 김진호^{*} · 신동익^{**} · 윤덕원^{**} · 이용기^{**} · 이상무^{***} · 남경태^{***}

^{†*}한양대학교 기계공학과, ^{**}한양대학교 대학원, ^{***}한국생산기술연구원

A Study on the Analysis of 5-DOF Axis of Rotation Error in Low Speed Rotary Stage

Chang Soo Han^{†*}, Jin Ho Kim^{*}, Dong Ik Shin^{**}, Deok Won Yun^{**},
Yung Gi Lee^{**}, Sang Moo Lee and Gyung Tai Nam

^{†*}Dept. Of Mechanical engineering in Hanyang University

^{**}Graduate school of Hanyang University

^{***}Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

Rotary stages in semiconductor, display industry and many other fields require challenging accuracy to perform their functions properly. Especially, Axis of rotation error on rotary system is significant; such as the spindle error motion of the aligner, wire bonder and inspector machine which result in the poor quality products. To evaluate and improve the performance of such precision rotary stage, undesired movements on the other 5 degrees of freedom of the rotary stage must be measured and analyzed. In this paper, we have measured the three translations and two tilt motions of the worm gear type spindle with high precision capacitive sensors. To obtain the radial error motion, we have used Donaldson's reversal technique. And the axial components of the spindle tilt error motion can be obtained accurately from the axial direction outputs of sensors by Estler face motion reversal technique. Further more we have designed and developed the sensor mounting jig with standard cylinder for reversal method.

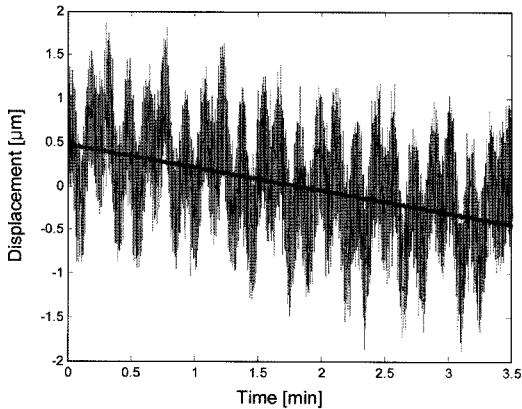
Key Words : Semiconductor, Axis of rotation, Donaldson's reversal technique, Estler face motion reversal technique, Error motion, Capacitive sensor

1. 서 론

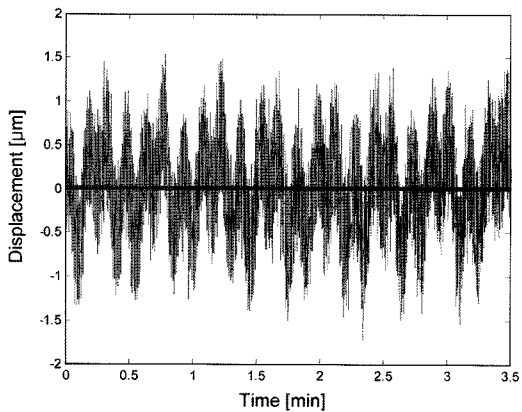
반도체 및 디스플레이 장비의 발전과 더불어 정도 높은 기계 부품 및 장비의 필요성과 그 성능에 대한 측정·평가의 비중이 높아지고 있는 실정이다. 얼라이너(aligner), 배선 접착기(wire bonder) 및 검사기(inspector)와 같은 장비에 있어서 직선 및 회전운동을 하는 스테이지의 오차는 작업하는 작업물의 거리와 위치를 미소하게 변화시키게 된다. 이는 가공 및 검사 중 오차를 만들어 불량 제품 생산에 직접적으로 영향을 미치는 가장 중요한 인자라 할 수 있다.

회전운동을 하는 회전축 오차에는 X, Y, Z 방향으로 3개의 축평형이동(axial and radial translation error) 성분과 pitch 및 yaw 오차를 유발시키는 2개의 각도오차(angular error)가 있으며, 임의의 변위 센서에 의해서 측정 되는 원시 데이터(raw data)는 회전축의 오차(error motion), 조립 시 정렬불일치(miss-align)에 의해 발생하는 편심오차(centering error) 및 측정면의 형상오차(profile error)를 포함한다. 따라서 회전 시 축의 이동에 의해 발생하는 오차를 측정·분석하기 위해서는 형상오차와 편심오차를 분리 및 제거해야 한다. 이러한 회전축에서 발생하는 오차를 정확하게 분석하기 위해 스핀들 회전 정도에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 1970년에는 Spragg와 Whitehouse에 의해 측정면을 일정한 각도로 증가시켜 N회의 측정으로 형상

[†]E-mail : cshan@hanyang.ac.kr



(a) Drift component data



(b) Elimination of drift component

Fig. 1. Drift component data and its elimination.

오차와 반경방향의 에러모션(error motion)을 분리시키는 multi-step method를 제시 하였고[1], 1972년에는 R, R, Donaldson에 의해 기준구와 실린더의 형상오차를 측정결과로부터 분리시키는 방법으로 반전법(reversal method)이 제시되었으며[2, 3], 여러 개의 센서를 사용하여 분석을 하는 multi-probe method등이 진행 되어왔다[4, 5].

본 연구에서는 웜기어(worm gear)방식으로 구동되는 저속 회전스테이지의 5 자유도 회전축 오차 측정 분석을 통해 회전체의 성능 평가를 하였으며, 반지름·축방향의 오차 측정을 위한 센서 지그(jig)와 반전법을 용이하게 구현하기 위한 기준 실린더를 설계 및 제작 하였다.

2. 이론적 배경

임의의 변위 센서에 의해서 측정 되는 원시 데이터

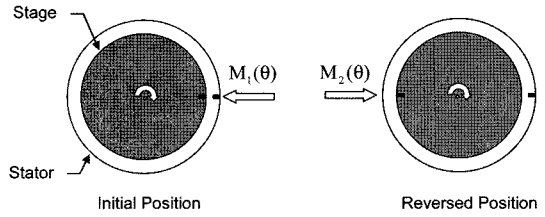


Fig. 2. Schematic of the Donaldson reversal method.

를 T.I.R(Total Indicated Reading)이라 한다. T.I.R은 매 회전마다 반복되는 런아웃(repeatable runout)과 진동 및 측정기의 불안정성에 의해 발생하는 비반복적인 런아웃(non-repeatable runout)으로 이루어져 있으며, 이를 분리하기 위한 방법으로 평균법(Average method), 단일점법(single point method), 빼기법(subtraction method) 및 주파수 영역법(frequency domain method)이 있다.

비반복적인 런아웃은 디스크와 헤드 사이에서 트랙-오동록(Track-misregistration)이라는 오작동을 유발시켜 디스크의 고 자기 기록 밀도화를 저해하는 가장 큰 요인으로 작용하고 있어 고속의 회전을 요하는 하드 디스크 성능의 지표로 평가된다. 또한 공작기계의 회전 주축이나 베어링, 자동차의 크랭크 샤프트나 홀 등과 같이 조립상 매우 정밀한 진원의 형상을 평가하기 위해서는 형상오차의 측정을 필요로 한다. 하지만 얼라이너, 배선 접착기 및 검사기와 같이 저속 회전 스테이지 위에서 작업을 하는 장비의 경우에는 회전 축의 오차가 작업중인 제품에 직접적인 영향을 미치는 요인이 되므로 회전체 회전축의 오차 측정·분석이 필요하며, 그에 따른 보상이 필요하다.

회전축의 오차를 측정·분석하기 위해서는 불필요한 오차의 분리 및 제거를 위한 알고리즘과 수치해석적인 방법이 필요하며, 원시데이터(T.I.R)에서 회전축의 오차는 다음과 같은 과정에 의해 분석을 할 수 있다.

1. 한 주기 성분인 편심오차성분 제거
2. 장시간 측정 시 발생 되는 드리프트 제거
3. 형상오차와 회전축 오차 분리
4. 반복적·비반복적 회전축 오차 분리

2.1. 편심오차성분 제거

편심오차(set-up error, centering error)는 스테이지를 스핀들 로터(rotor)에 장착 시 발생하는 불가피한 오차이다. 편심오차는 직교좌표계에서 정현파(sinusoidal wave)형상의 한 주기 성분(fundamental component)을 야기 시키며, 아무리 작은 값이라도 제거해야만 한다. 본 연구에서는 한 주기 성분을 제거하기 위해 FFT(Fast

Fourier Transform)과 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 이용한 주파수 분석(frequency analysis)을 통해 한 주기 성분을 제거 하였다.

2.2. 드리프트 성분 제거

장시간 측정 시 여러 값들이 누적되어 값 자체가 발산하는 센서 드리프트(sensor drift) 현상이 발생 할 수 있다. 마이크로미터 이하의 치수를 다룰 때 미소한 오차는 잘못된 결과를 야기할 수 있기 때문에 측정 전·후 드리프트 성분의 유·무 확인이 필요하며, 그의 보상이 필요하다. Fig. 1은 시간에 따른 드리프트 현상과 회귀분석(regression)을 사용하여 드리프트 현상을 제거한 그래프를 보여 주고 있다.

2.3. 회전축오차와 형상오차 분리

한 주기 오차 성분인 편심오차 및 드리프트 성분을 제거한 데이터는 변위 센서 측정면의 형상오차와 회전축 오차인 에러모션(error motion)을 포함하고 있다. 따라서 회전체의 성능을 평가하기 위해서는 형상오차를 분리하여 에러모션만을 추출해야 한다.

본 연구에서는 도널드슨 반전법(Donaldson's Reversal method)과 에스틀러 반전법(Estler face reversal method)을 적용하여 반경방향 회전축 오차와 축방향 및 기울기 방향의 오차 성분 분석을 하였다.

2.3.1. Donaldson's Reversal Method

Fig. 2의 도널드슨 반전법은 2회의 측정으로 반경방향의 형상오차와 에러모션을 간단하고 정확하게 분리하는 방법으로 진원도 평가 및 반경방향의 회전축오차 측정을 하기 위한 방법으로 사용되어 왔다. 임의의 초기 위치(initial position)에서 측정된 변위 데이터 M_1 은 형상오차 $P(\theta)$ 와 반경 방향의 에러모션 $S(\theta)$ 을 포함하고 있으며, 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$M_1(\theta) = P(\theta) + S(\theta) \tag{1}$$

두 번째 측정 데이터, M_2 는 스테이지와 변위센서를

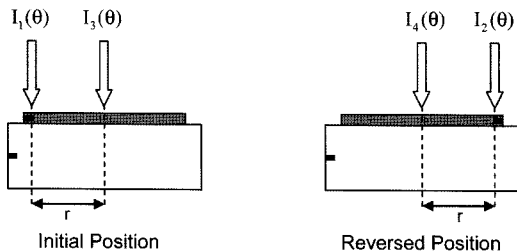


Fig. 3. Schematic of the Estler face motion reversal method.

180도 반전하여 측정을 하며, 식(2)로 표현된다.

$$M_2(\theta) = P(\theta) - S(\theta) \tag{2}$$

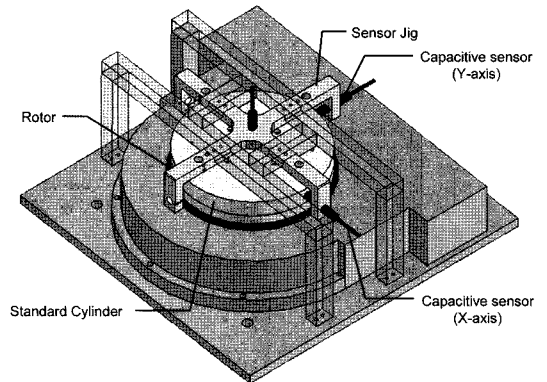
M_2 는 M_1 과 동일한 형상오차의 값을 가지고 있지만, 반전된 센서의 위치에 의해서 부호가 반대인 에러모션 값을 가지게 된다. 따라서 형상오차와 반경방향 에러모션은 식(3)과 식(4)의 관계식에 의해서 분리를 할 수 있다.

$$P(\theta) = \frac{M_1(\theta) + M_2(\theta)}{2} \tag{3}$$

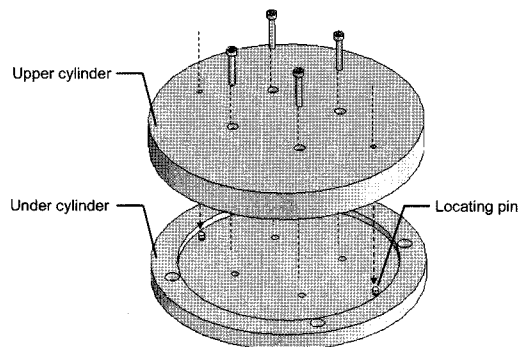
$$S(\theta) = \frac{M_1(\theta) - M_2(\theta)}{2} \tag{4}$$

2.3.2. Estler Face Reversal Method

Fig. 3의 에스틀러 페이스 반전법(Estler face motion reversal technique)[6]은 도널드슨 반전법과 동일하게 스테이지와 변위센서의 180도 반전과 2회의 측정으로 축방향과 기울기 오차를 분석 할 수 있다. 초기위치에서의 측정값은 식(5)와 같이 축방향의 형상오차(flat-



(a) Precision Stage and measurement system configuration



(b) The separated reference cylinder for reversal method

Fig. 4. Measurement system and reference cylinder.

ness error) $F(\theta)$, 축방향 에러모션(axial error motion) $A(\theta)$ 및 기울기 에러모션(tilt error motion) $T(\theta)$ 을 포함한다.

$$I_1(\theta) = F(\theta) + rT(\theta) + A(\theta) \quad (5)$$

회전 스테이지와 변위센서를 180도 반전하여 측정값 I_2 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_2(\theta) = F(\theta) - rT(\theta) + A(\theta) \quad (6)$$

축방향의 데이터는 I_1 과 I_2 측정 시 동시에 측정하지 않아도 되지만, 기울기 오차 분석을 위해서는 필요하다. 축방향의 측정 데이터는 식(7)과 같이 표현 할 수 있으며,

$$I_3(\theta) = I_4(\theta) = A(\theta) \quad (7)$$

축방향 및 기울기 에러모션은 식(5)~(6)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A(\theta) = \frac{I_3(\theta) + I_4(\theta)}{2} \quad (8)$$

$$T(\theta) = \frac{1}{r} \left(\frac{I_1(\theta) - I_2(\theta)}{2} - \frac{I_3(\theta) + I_4(\theta)}{2} \right) \quad (9)$$

또한, 축방향 형상오차인 편평도(flatness error)는 다음과 같다.

$$F(\theta) = \frac{I_1(\theta) + I_2(\theta)}{2} - \frac{I_3(\theta) + I_4(\theta)}{2} \quad (10)$$

3. 측정 시스템 구성

3.1. 센서 지그 및 기준 실린더 제작

본 연구를 수행하기 위한 회전 측정 시스템은 Fig. 4(a)의 센서고정 지그(sensor mounting jig)와 Fig. 4(b)의 기준 실린더 구성되어 있다.

센서고정 지그는 십자 모양의 단일 강체로 되어 있으며, 총 9개의 센서고정 홀(hole)에 의해서 상황에 적절한 변위 측정 센서의 설치가 가능하다.

기준 실린더는 반전법을 보다 간단하고 정확하게 구현 할 수 있도록 상·하 두 개의 실린더로 구성이 되어 있다. 하판 실린더는 회전스테이지에 고정되며, 상판 실린더는 하판 실린더에 체결된다.

3.2. 실험 방법 및 시스템 구성

전체적인 오차 측정 시스템은 Fig. 5와 같다. 정전용량 변위센서(Capacitance type displacement sensor)에서 측정된 신호와 회전체 내부에 설치된 로터리 엔코

더(encoder) 카운터 신호는 16비트 A/D converter를 통해 PC에 저장된다. 정전용량 변위 센서는 3 nm의 분해능과 0.83 nm의 노이즈 레벨 및 $\pm 100 \mu\text{m}$ 의 측정 범위를 가지고 있다. 로터리 엔코더는 1회전당 36,000,000개의 카운터 신호를 제공하며, 회전체의 절대위치는 로터리 엔코더의 인덱스 신호(index signal)를 이용하여 1회전당 4000개의 측정 데이터(sampling data)로 분석하였다. 또한 회전체를 방진 테이블에 설치하여 외부로부터의 기계적인 진동을 최대한 억제한 상태에서 측정을 할 수 있도록 환경을 구축 하였다.

측정을 위한 회전체는 스테핑 모터로 구동되며 720/1의 기어비를 가지는 웜기어 동력전달 방식으로 최대 2rpm이하의 저속 회전을 가진다.

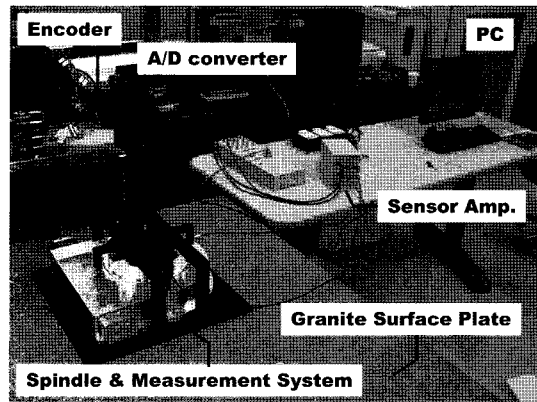
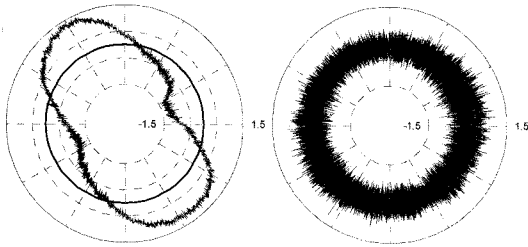


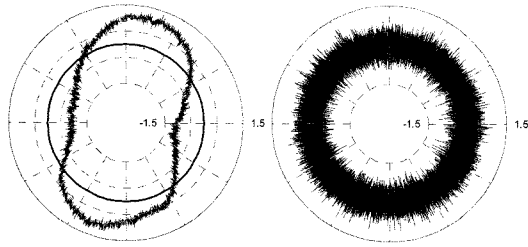
Fig. 5. Experimental Setup.

4. 측정 결과

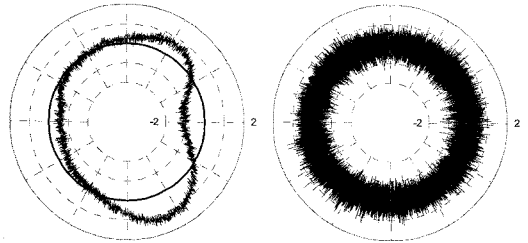
Fig. 6은 반경방향과 축방향 및 기울기 에러모션을 x , y 축에 위치한 센서들의 변위 데이터를 매 회전마다 반복되는 동기 에러모션(synchronous error motion)과 비동기 에러모션(asynchronous error motion)을 극좌표(polar plot)로 표현한 것이며, Table 1은 5자유도 에러모션에 대한 각각의 오차를 표준편차로 나타낸 것이다. FFT와 IFFT를 이용하여 한 주기 성분을 제거한 데이터는 회귀분석(regression)에 의해 드리프트 현상이 제거되며, 도널드슨과 에스틀러 반전법을 통한 반경방향과 축방향의 형상오차를 분리하였다. 페이스 에러모션(face error motion)은 기울기 오차 측정 센서 위치인, 중심에서 65 mm 거리에 대한 결과를 나타낸 것이다. $2.87 \mu\text{m}$, $2.72 \mu\text{m}$ 의 반경방향 동기오차를 가지는 반면 $3.12 \mu\text{m}$, $3.79 \mu\text{m}$ 의 표준편차를 가지는 비동기 에러모션을 얻을 수가 있었다. 반경방향뿐만 아니라 축방향 및 기울기 방향의 역시 비동기 에러모션이 동기 에러모션보다 비교적 큰 편차를 가지는 결과를 볼 수 있는데,



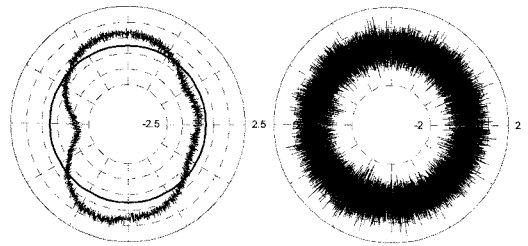
(a) Radial error motion (x-axis)



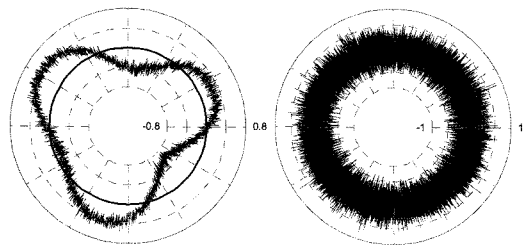
(b) Radial error motion (y-axis)



(c) Face error motion (x-axis)



(d) Face error motion (y-axis)



(e) Axial error motion

Fig. 6. Results of 5-DOF Synchronous and Asynchronous error motion polar plots.

이는 회전체 최대 회전속도에서의 측정이 동력 전달 중 마찰 및 진동에 의한 것이라 사료 된다.

측정 결과를 바탕으로 회전 스테이지의 사용목적 및 요구 스펙에 따라서 동기오차는 제어시스템에 의한 보상이 요구되며, 제어시스템에 의한 보상이 불가능한 비동기오차는 베어링, 웜기어 및 정도 높은 모터설계가 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 스테이지 위에서 작업을 하는 저속 회전 스테이지의 성능 평가를 위한 측정 및 분석을 하였다. 웜기어(worm gear) 방식으로 구동되는 저속 회전체를 도널드슨 반전법(Donaldson reversal method)과 에스틀러 반전법(Estler face motion reversal method)을 적용하여 반경방향을 비롯하여 축방향과 기울기 에러모션을 측정·분석 하였으며, 회전체 시스템을 측정하기 위한 센서지그 및 반전법을 수월하게 측정하기 위한 기준 실린더를 개발하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 성장동력사업 중 차세대 IT 제품생산을 위한 초정밀 로봇구동기술개발에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Spragg, R. and Whitehouse, D., procedures of the Institute of Mechanical Engineers, 182, 1968
2. Donaldson, R.R., "A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error.", CIRP-Annals., Vol. 21, No. 1, pp.125~126, 1972.
3. Evans, C.J., Hocken, R.J. and Estler, W. T., Self-calibration: reversal, redundancy, error separation, and absolute testing. CIRP Annals, Vol. 45, No. 2, pp. 483-492, 1996.
4. Grejda, R.D., "Use and Calibration of Ultraprecision Axes of Rotation With Nanometer Level Metrology", in Mechanical Engineering. 2002, The Pennsylvania State University. p.135.
5. Whitehouse, D.J. "Some Theoretical Aspects of Error Separation Techniques in Surface Metrology", J. of Phys. E: Sci. Inst., Vol. 9, pp. 531-536, 1976.
6. James, G. Salsbury., "Implementation of the Estler face motion reversal technique", Precision Engineering., Vol. 27, pp.189-194, 2003.