

에어베어링을 이용한 초정밀 회전 스테이지의 반경방향 오차 분석 The Analysis of Radial Error Motion in Precision Rotar tage Using Air-bearing

*김진호¹, #한창수², 신동의³, 윤덕원³, 이용기³

*J. H. Kim¹, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)², D. I. Shin³, D. W. Yun³, Y. G. Lee³

¹ 한양대학교 대학원, ² 한양대학교 기계공학과, ³ 한양대학교 대학원

Key words : Air-Bearing, Error Motion, Runout, Reversal method

1. 서론

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(axis of rotation)에는 X, Y, Z 방향으로 3개의 축평행이동(axial and radial translation error) 성분과 pitch 및 yaw 오차를 유발시키는 2개의 각도오차(angular error)가 있다. 임의의 변위 센서에 의해서 측정되는 원시데이터(raw data)는 회전축의 오차(error motion), 조립시 정렬불일치(miss-align)에 의해 발생하는 편심오차(centering error) 및 측정면의 형상오차(profile error)를 포함한다. 이러한 회전축에서 발생하는 오차를 정확하게 분석하기 위해 스피들 회전 정도에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 1970년에는 Spragg 와 Whitehouse 에 의해 측정면을 일정한 각도로 증가시켜 N 회의 측정으로 형상오차와 반경방향의 에러모션을 분리시키는 multi-step method 를 제시 하였고[1], 1972년에는 R.R,Donaldson 에 의해 기 준구 와 실린더의 형상오차를 측정결과로부터 분리시키는 방법으로 reversal method 가 제시되었으며[2,3], 여러 개의 센서를 사용하여 분리 하는 multi-probe method 등이 진행 되어왔다[4,5].

본 연구에서는 에어베어링(Air-bearing)과 에어부싱(Air-bushing)에 의해 회전축을 지지며, 직접구동 모터(Direct Drive Motor)를 사용한 초정밀 회전스테이지의 반경방향 오차를 측정하였으며, 반전법(reversal method)을 사용하여 반복적인 오차와 비반복적인 오차 분석을 하였다.

2. 이론적 배경

임의의 변위 센서에 의해서 측정 되는 원시 데이터를 T.I.R(Total Indicated Reading)이라 한다. T.I.R 은 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 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 편심오차 성분 제거
2. 장시간 측정 시 발생 되는 드리프트 제거
3. 형상오차와 회전축 오차 분리
4. 반복적·비반복적 회전축 오차 분리

2-1. 편심오차 성분 제거

편심오차(set-up error, centering error)는 스테이지를 스피들 로터(rotor)에 장착 시 발생되는 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)와 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 에러 값들이 누적되어 값 자체가 발생하는 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 확인과 그의 보상 및 제거가 필요하다.

2-3. 형상오차 제거

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.

Fig.2 의 도널드슨 반전법은 2 회의 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 측정한 변위 데이터 M 은 형상오차 θ 와 반경 방향의 에러모션 ϕ 을 포함하고 있으며, 식(1)로 나타낼 수 있다.

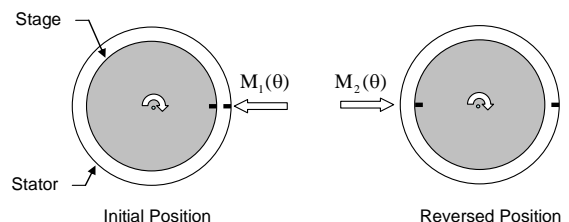


Fig. 1 Schematic of the Donaldson reversal method

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

두 번째 측정 데이터, M 는 스테이지와 변위센서를 180도 반전하여 측정을 하며, 식(2)로 표현된다.

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

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

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

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

3. 측정 시스템 구성 및 측정 결과

정전용량 변위센서에서 측정된 신호와 회전체 내부에 설치된 로터리 엔코더(encoder) 카운터 신호는 16 비트 A/D converter 를 통해 PC 에 저장된다. 정전용량 변위 센서는 3nm 의 분해능과 0.83nm 의 노이즈 레벨 및 $\pm 100 \mu\text{m}$ 의 측정 범위를 가지고 있다. 로터리 엔코더는 1 회전당 12,595,200 개의 카운터 신호를 제공하며, 회전체의 절대 위치는 로터리 엔코더의 인덱스 신호(index signal)를 이용하여

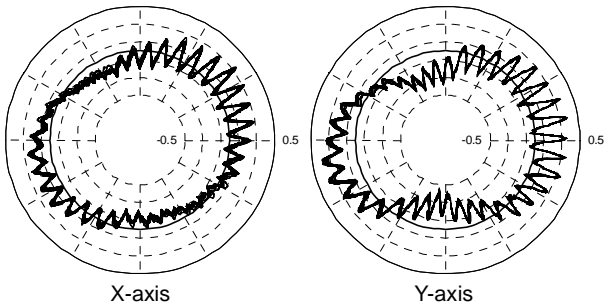


Fig. 2 Total Error Motion Polar Plot of x, y Axis

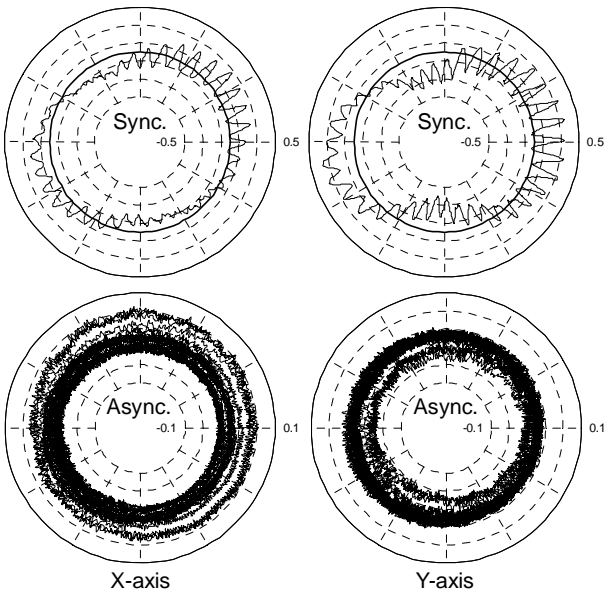


Fig. 3 Synchronous and Asynchronous Error Motion Polar Plot

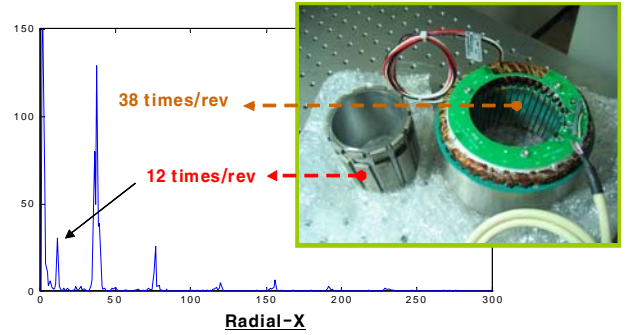


Fig. 4 Spectral Analysis of x-axis Error Motion

1 회전당 4000 개의 측정 데이터(sampling data)로 분석을 하였다. 또한 회전체를 방진 테이블에 설치하여 외부로부터의 기계적인 진동을 최대한 억제한 상태에서 측정을 할 수 있도록 환경을 구축 하였다.

그림 2 는 $0.62 \mu\text{m}$ 와 $0.87 \mu\text{m}$ 의 표준편차를 가지는 Total Error Motion 을 극좌표로 표현한 것이며, 이는 편심오차, 드리프트성분 및 형상오차를 제거한 것이다. 그림 3 은 Total Error Motion 의 평균을 구함으로써 $0.51 \mu\text{m}$ 와 $0.77 \mu\text{m}$ 의 표준 편차를 가지는 두 축의 동기오차(Synchronous error motion)와 $0.14 \mu\text{m}$, $0.12 \mu\text{m}$ 의 비반복적 오차성분인 비동기 오차(Asynchronous error motion)를 나타낸 것이다.

동기오차는 38 개의 비교적 큰 골(node)과 마루(antinode) 형상을 가지고 있다. x 축 방향의 동기 오차를 FFT 분석을 해본 결과 그림 4 와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에 사용된 회전체 모터는 38 개의 스테이터 마그넷(Stator Magnet) 과 12 개의 로터 마그넷(Rotor Magnet)으로 구성되어 있으며, 그에 따른 자기장의 영향에 의해 동기적인 회전축 오차를 유발한다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 회전정도 오차 분석 알고리즘인 반전법을 사용하여 에어베어링과 에어부싱으로 이루어진 직접구동 모터 회전체의 반경방향 오차 분석을 하였다. 본 연구의 회전스테이지 측정 결과 모터 마그넷 영향에 의해 발생하는 회전축오차를 최소화하기 위해서는 회전체의 제어 및 보상이 필요함을 알 수 있었다. 현재 측정 결과는 반경방향의 측정만이 이루어져 있으나 차후 측방향과 기울기방향으로의 측정을 할 계획이다.

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., 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 DJ. "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