

소형-고속 스피ن들의 반경방향 오차분석 방법

이용삼*(경북대 대학원), 이재하(경북대 대학원), 양승한(경북대학교 기계공학부)

Analysis of radial error motion in a small-sized and high-speed spindle

E. S. Lee(Mechanical. Eng. Dept. KNU), J. H. Lee(Mechanical Eng. Dept., KNU)

S. H. Yang(Mechanical Eng. Dept., KNU)

ABSTRACT

In this paper, an efficient method is proposed to analyze the radial error of a miniaturized-high speed spindle system. Initially, a device is constructed for measuring the radial error motion using capacitance sensors. The capacitance sensors are placed perpendicular to the axis of the shaft and at 90° to each other. The spindle is rotated at high speed and the profile of the spindle is recorded. An algorithm is developed for analyzing the spindle data and determining the radial error of spindle. The present algorithm uses homogeneous transform matrix (HTM) method and iterative process for determining the radial error. The analysis procedure is performed for different speeds of the spindle. The data obtained from the present system and the results of evaluation are also presented in this paper. It is observed that this method is effective in determining and analyzing the spindle errors for high speed miniaturized spindle.

Key Words: Radial Direction Error(반경방향 오차), Eccentricity(편심), Roundness(진원도), Spindle Error(스핀들 오차), Capacitance Sensor(정전용량변위센서), Miniaturized-High Speed spindle(소형-고속 스피ن들)

1. Introduction

산업 전반에 걸쳐서 장비나 기기의 소형, 고속, 정밀화 추세가 보편화 되어가고 있는 요즘, 기계 및 많은 분야에서 미세하고 정교한 작업 수행을 위해 우수한 성능의 스피ن들 시스템을 필요로 하고 있다. 스피ن들 시스템의 오차는 평면 및 홀(Hole) 작업 시에 제품(Workpeice)의 가공면과 위치 결정에 큰 영향을 미치며, 또한 그 오차로 인해 스피ن들 자체의 손상을 가져오는 결과를 초래한다.

일반적으로 6 자유도를 갖는 스피ن들 시스템은 반경방향 오차(Radial Direction Error), 표면오차(Face Error), 축 방향 오차(Axial Direction Error), 경사 오차(Tilt Error)들로 분류된다.¹ 특히, 반경방향 오차는 가공품의 치수에 큰 영향을 미치며 스피ن들의 주된 특성이다.² 본 연구에서는 소형, 고속 스피ن들의 반경방향 오차 (Radial Direction Error)를 측정하기 위한 측정 알고리즘을 제안한다. 즉, 기준물을 이용한 측정의 경우, 측정데이터에서 기준물에 의한 영향을 제거해야 하므로 측정된 데이터를 분석해야 한

다. 기준물에 의한 영향에는 크게 편심과 진원도가 있다.³ 이 분야의 대한 연구 동향을 살펴보면, 많은 학자들이 Donaldson의 방법⁴을 적용해서 진원도 오차와 스피ن들 오차를 분리하기 위한 여러 가지 연구 방법들을 제시하였다. 기존의 연구 방법들을 크게 두 가지로 분류하면, 멀티 스텝 방식(multi-step method)^{5,6} 과 멀티 프루브 방식(multi-probe method)⁷ 으로 나눌 수 있다. 전자는 반전법(Reversal Method) 과 멀티오리엔테이션 방법을 포함하며, 프루브를 한 개만 사용해서 데이터를 얻는 방식이다. 이것은 스피ن들이 좋은 반복성(Repeatability)을 가져야 하는 단점이 있다. 삼점법(3-Point Method)이 속하는 후자는 두 개 이상의 프루브를 사용하여 측정하므로 멀티스텝 방식에서의 스피ن들 오차의 반복성을 필요로 하지 않는 장점이 있으나, 고주파 성분이 정확하게 측정되지 않는 단점이 있다.⁷ 또한, 이와 같은 오차 분석 방법들은 과도한 측정시간의 소요와 턴테이블(Turtable)이나 스타일러스(stylus)타입의 부가적인 기구를 필요로 한다.

본 연구에서는 두 개의 직교하는 정전용량변위

센서(Capacitance Sensor)와 한 개의 RPM측정용 센서 그리고 기준원판을⁸ 이용하여 소형-고속 스펀들의 회전속도에 대한 반경방향 오차를 측정하였다. 또한, 새로운 측정데이터 분석 방법을 통해 효과적으로 소형-고속스핀들의 반경방향 오차를 평가할 수 있음을 보였다.

2. Measurement algorithm

기준물을 이용한 측정의 경우, 기준물의 정도가 측정 정도에 영향을 미치게 된다. 따라서, 스펀들 시스템의 회전에 대한 반경방향오차를 측정하기 위해 기준물인 기준원판에 대한 해석이 선행되어야 한다.

2.1 Eccentricity of the master ring

먼저, 편심에 의한 측정 데이터의 변화를 분석하기 위해 시뮬레이션을 행하였다. Fig. 1 과 같이 기준좌표계를 설정하고 반지름 R_0 인 원 데이터를 생성한다. 편심은 기준좌표계 상의 원점과 실제 원의 회전중심과의 거리로 나타낸다. 임의의 편심 e 가 있는 원이 편심을 중심으로 회전한 뒤 변환된 원 데이터는 좌표변환행렬을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{C}_i = (\text{Trans}M \cdot \text{Rot}M \cdot \text{Trans}M^{-1}) \cdot \vec{C}_{i-1} \quad (1)$$

Where,

$$\text{Trans}M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & e \cos \theta \\ 0 & 1 & e \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{Rot}M = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

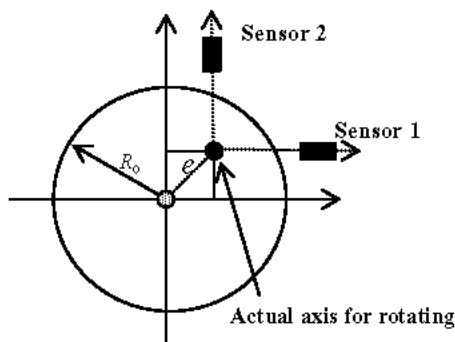


Fig. 1 Schematic diagram of the master ring with eccentricity

여기서, \vec{C}_i 는 i 번째 원 데이터를 나타낸다.

각 센서로부터 측정되는 값은 센서가 위치하는 수평, 수직 축과 변환된 원과 만나는 점이 된다. 원 데이터를 연속적으로 얻을 수는 없으므로 만나는 점을 찾기 위해 센서가 위치한 축에 가장 가까운 두 점 사이를 선형 보간하여 원하는 점을 찾는다. 구한 각 센서의 측정값을 극좌표상에 나타내면 각 센서에 대한 두 개의 원 형상을 얻을 수 있다. 센서가 위치한 축이 회전중심과 편차가 생기면 극좌표상의 원의 반지름이 달라지게 된다. 따라서, 원의 반지름이 같도록 실제 측정 시 각 센서의 위치를 조절해 주어 회전중심에 일치 되도록 해야 한다. 결국, 얻어진 두 원의 중심과 극좌표의 원점 사이의 거리는 정확히 편심과 일치 하게 된다. 하지만, 편심외에 스펀들 오차와 같은 다른 영향들이 함께 존재하는 경우에는 극좌표상에서 정확한 원 형상을 얻을 수 없다. 이 경우, Fig. 2 와 같이 최소자승법 (Least Square Method)을 이용하여 적합 원(Best Fit Circle)을 구할 수 있다. 따라서, 이 적합 원의 중심과 기준좌표계의 원점 사이의 거리를 구할 수 있고 이는 편심에 대한 추정치가 된다. 스펀들 오차가 편심보다 작고 회전에 대해 반복성이 없다면 여러 번의 회전 시험을 통해 추정오차를 줄일 수 있다.

2.2 Roundness error of the master ring

기준원판의 표면거칠기는 정전용량센서를 이용한 측정에 크게 영향을 미치지 않는다. 하지만, 진원도 오차는 필수적으로 고려되어야 한다. 앞서 설명한 것과 같이 편심을 구하여 측정데이터에서 제거한 뒤 진원도 오차도 분리해야 한다. 일반적으로

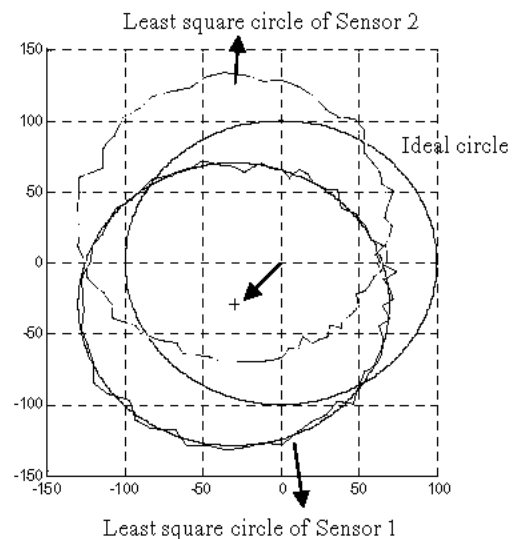


Fig. 2 Plots of simulated sensing data

물체의 표면거칠기를 측정하는 장치는 파상도, 표면거칠기, 잡음을 분리하는 기능을 가지고 있다. 특히, 파상도와 표면거칠기는 필터링을 통해 분리되게 되는데 이때 필요한 컷오프 주파수가 표준으로 제시되어 있다. 대부분 가공공정상 발생한 기준원판의 진원도 오차는 스핀들 오차에 비해 저주파 특성을 가지고 있으며 스핀들의 회전에 반복적이고 스핀들 회전 주파수에 정수배인 주파수 특성을 가지고 있다. 따라서, 측정 데이터의 주파수 특성을 FFT(Fast Fourier transform)를 이용하여 분석하고 스핀들 회전 주파수에 정수배인 컷오프 주파수를 결정한다. 스핀들 회전 주파수의 5 배를 컷오프 주파수로 선택하였다.

2.3 Procedure of measuring data analysis

Fig. 3 은 측정 데이터 분석 과정을 나타내는 순서도이다. 일정한 회전속도로 회전하는 스핀들의 x, y 방향에 센서를 설치하고 이를 이용하여 변위를 측정한다. Step 1 을 통해 편심을 제거할 수 있으며 Step 2 에서 진원도 오차를 분리하게 된다.

3. Experiments & Results

3.1 Experimental setting up

스핀들 오차를 측정 할 때 대부분 기준구(Master sphere)를 기준으로 사용한다. 하지만, 본 연구에 측정대상인 소형-고속 스핀들 시스템에는 적용할 수가 없다. 소형 스핀들에 장착 가능한 기준구를 제작하기가 까다로우며 비용도 많이 들게 된다. 따라서, 기준구 대신 Fig. 4 와 같이 원판 형상의 기준원판을 가공하여 사용하였다. 회전하는 스핀들의 변위를 얻기 위해 15nm 의 분해능을 갖는 비접촉식 정전용량형 변위센서(Capacitance sensor)를 설치하였다. 측정된 변위는 드라이버를 통해 전압값으로 변환되고 이를 디지털 오실로스코프를 이용하

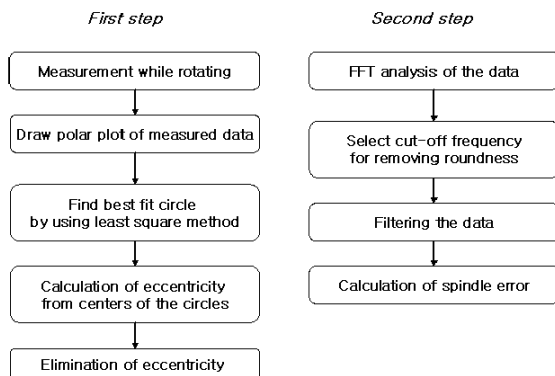


Fig. 3 Flowchart of the proposed algorithm

Table 1 Specification of a capacitance sensor

Sensor size	Calibration	Range	Resolution
C Φ 1.7mm	Standard	125 μm~ 375 μm	15nm

여 계속하였다. 또한, 고속 회전하는 스핀들의 RPM 을 측정하기 위해 스핀들 척(Chuck)의 홈 위치에 변위센서를 설치하여 회전주기를 샘플링 할 수 있도록 하였다. 이를 이용해 실제 스핀들의 회전속도를 구할 수 있다. 센서의 대역폭은 회전속도에 대한 최대 샘플링 데이터 수를 제한하며, 대역폭이 클수록 많은 데이터를 안정적으로 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용된 센서 대역폭은 20kHz 로, 최대 샘플링 주파수를 16kHz 로 설정한 후, 각 회전속도에 대한 측정 데이터 수를 계산하였다.

스핀들의 반경방향 오차는 회전축에 대해서 직각방향으로의 불필요한 움직임을 나타낸다. 이 오차 요소는 x 와 y 축, 두 직각방향에 센서를 설치해 측정하게 된다. 앞서 설명한 바와 같이 실제 회전 중심과 측정방향 축이 일치 하도록 센서의 x, y 위치를 조절하여 각 센서의 측정값의 변동폭이 같게 한다. 스핀들의 내부 온도 영향을 최소화 하기 위해 실험하기 전 2000rpm 으로 20 분 정도 공회전을 행했다. 회전속도를 저속영역(2500rpm)에서 고속영역(6000rpm)까지 9 단계로 나눠서 각 회전속도에 대한 x, y 축 방향 변위를 측정하였다.

3.2 Experiment results and considerations

측정된 데이터를 이용해 편심을 구할 때 스핀들 오차가 영향을 미치게 된다. 스핀들 오차가 커지면 적합 원의 중심이 편심만 존재 하는 경우와 다르게 된다. 따라서, 스핀들 오차가 편심을 정확하게 구하기 위해서 스핀들 오차가 최소가 되어야 한다. 예비실험을 통해 각 회전속도에 대한 변동폭을 확

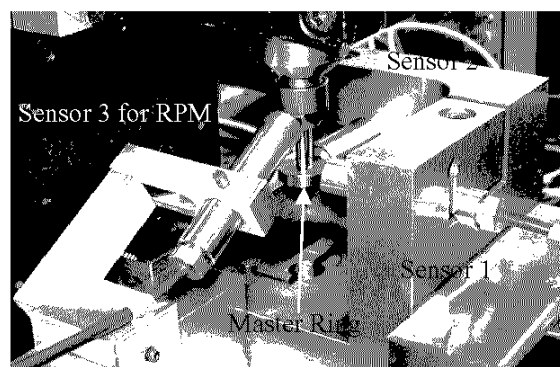


Fig. 4 Setting up for experiment device

Table 2 Result for the data analysis

RPM	Eccentricity(μm) (Real value; 40.5)	Roundness(μm) (Real value 1.8)	Spindle(μm)	
			X-data(max,min)	Y-data(max,min)
2500	39.80	1.94	5.59,-4.36	4.79,-4.76
5000	39.98	1.68	4.76,-4.90	4.67,-3.98
10000	40.15	1.92	4.05,-3.05	3.07,-2.81
15000	40.14	1.67	3.98,-3.49	3.56,-3.39
20000	40.55	1.62	3.66,-2.87	2.85,-2.98
25000	41.64	1.62	3.82,-2.44	3.40,-2.67
30000	42.21	1.62	3.31,-2.02	3.53,-2.56
40000	44.94	1.62	4.28,-3.05	3.10,-3.73
60000	49.60	1.62	7.90,-11.71	5.39,-6.01

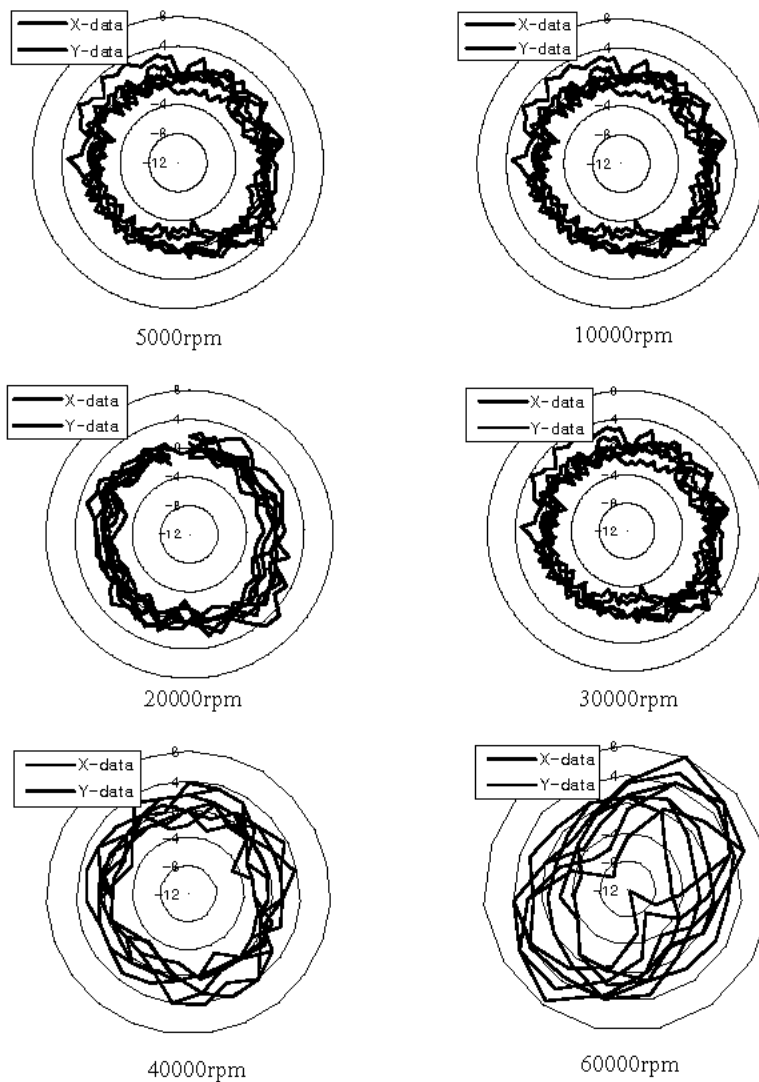


Fig. 5 Plots of spindle errors (unit: μm)

인하고 변동이 작은 영역의 측정데이터를 통해 편심과 진원도 오차를 분석하였다. 분석결과를 비교를 하기 위해 CMM 을 이용하여 기준원판의 편심과 진원도 오차를 측정했다. 2,500rpm 에서 20,000rpm 까지의 데이터를 이용하여 구한 편심과 진원도 오차를 분석한 결과를 CMM 측정치와 비교한 결과 기준원판의 편심 추정오차는 1 μm 이하인 것을 알 수 있다. 그 이상의 영역에서는 회전속도에 따라 편심에 대한 추정오차 값이 증가하는 현상을 보였다. 이 현상의 원인을 규명하기 위해 회전속도에 따른 전체 스핀들 시스템의 변위를 측정하였다. 일정한 회전속도에서 변위가 커지는 것을 통해 그 회전 주파수 주위에 공진주파수가 존재함을 알 수 있었으며 25,000rpm 이상의 회전속도에서는 변위가 점점 크게 발생했다. 즉, 진동모드에 따른 변위가 발생하여 스핀들을 반경방향 오차측정에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 따라서, 25,000rpm 이상의 회전속도에 대한 편심 추정 결과는 진동모드에 의한 변동 영향이 기준물의 편심에 포함된 것으로 사료된다. 또한, 진원도 오차도 회전속도가 증가함에 따라 데이터 수가 줄어들어 주파수 분석을 통한 필터의 컷오프 주파수를 결정하기가 힘들다. 또한, 진원도 오차는 회전속도와는 상관없이 기준물에 기인하기 때문에 주파수 분석이 명확한 20,000rpm 이하의 분석 결과를 이용하여 결정하였다. 고속의 경우, 20,000rpm 일 때의 진원도 오차를 최소사승법을 이용하여 5 차 다항식으로 보간하여 적용하였다. Table 2 는 회전속도에 대한 스핀들 오차와 기준구의 편심, 진원도 오차들을 분석한 결과를 나타낸다.

Table 2 의 스핀들 오차를 각각의 회전속도 영역에서 그래프로 표현하면 Fig. 5 와 같이 스핀들의 오차범위를 쉽게 확인 할 수 있다. 이 그래프를 통해 정밀한 작업을 수행할 경우, 회전속도에 따른 스핀들의 반경방향오차가 미치는 영향을 알 수 있다.

4. Conclusions

본 연구에서는 두 개의 직교하는 정전용량변위 센서(Capacitance Sensor)와 한 개의 RPM 측정용 센서 그리고 기준원판을 이용해서 소형-고속 스핀들의 회전속도 및 반경방향 오차를 측정 후, 새로운 측정데이터 분석 방법을 통해 효과적으로 소형-고속스핀들의 반경방향 오차를 평가할 수 있음을 보였다. 실제 CMM 을 이용하여 측정한 기준원판의 측정값과 2,500 ~ 20,000rpm 영역에서 제안한 알고리즘을 통해 분석된 결과값의 진원도와 편심편차가 1 μm 이하임을 알 수 있었다. 회전속도가 상승할수록 스핀들 오차의 영향이 크게 미치는 이유는 진동

모드에 의한 변동 영향이 기준물의 오차요소에 포함된 것으로 생각된다. 이 경우 20000rpm 일때의 진원도 오차를 5 차 다항식으로 보간하여 스핀들 오차를 구했다. 따라서, 향후 진동 모드에 대한 문제점을 고려하면 본 연구에 적용된 알고리즘이 보다 정밀한 분석을 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. ANSI/ASME B89.3.4M, Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing. New York : ASME, 1992.
2. Martin, D.L., Tabenkin, A.N., Parsons, F.G. "Precision Spindle and Bearing Error Analysis" Tools Manufact. Vol. 35, No.2, pp. 187-193, 1995.
3. Shoji Noguchi, Tadao Tsukada and Atsushi Sakamoto "Evaluation method to determine radial accuracy of high-precision rotating spindle units" Precision Engineering 17:266-273, 1995.
4. Donaldson, R.R. "A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error." CIRP Annals, vol.21/1, p.125, 1972.
5. Estler, W. T, Evans, C. J., Shao, L. Z. "Uncertainty estimation for multiposition form error metrology" Precision Engineering 21:72-82, 1997
6. Linxiang, C. "Measuring Accuracy of Multistep Method in the Error Separation Technique." Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol.22, p.903, 1989.
7. Gao, W., Kiyono, S., Nomura, T. "A New Multiprobe Method of Roundness Measurements." Precision Engineering, vol.19/1, p.37, 1996.
8. Eric Marsh, Robert Grejda "Experiences with the master axis method for measuring spindle error motions" Precision Engineering 24:50-57, 2000.