

공작기계 주축 스피들 종합오차 측정 및 평가기술개발 Development of System for Measurement and Evaluation for Machine tool Spindle

신현장*(서울대 대학원), 이석원(서울대 대학원), 박희재(서울대 기계설계학과)
H.J.Shin, S.W.Lee, H.J.Pahk(SNU)

Key Word: Spindle(스핀들), Rotating sensitive direction(회전민감방향), Axial motion(축방향운동), Radial motion(반경방향운동), Gap sensor(갭센서), Reversal technique(반전법).

ABSTRACT : The spindle is a very important parts of machine tools. The evaluation of spindle motion is required for improving the performance of machine tools. The evaluation tools have been developed for precision spindle by the reversal technique, and 3D error map motion of spindle is proposed. This technique makes us understand the total movement of spindle more easily. The proposed technique has been successfully applied to practical machine tools, giving high potentials for the spindle performance measurement.

1. 서론

현재의 공작기계는 고정밀, 고생성의 방향으로 나아가고 있다. 공작기계의 성능이 정밀화되어 갈수록 이에 대한 평가기술의 필요성 또한 높아지고 있다. 스피들의 정밀도는 공작물의 가공정도에 직접적인 영향을 주는 요소이기 때문에 이것에 대한 평가기술 확보는 중요한 의미를 갖는다. 본 실험에서는 특히 반전법을 이용한 공작기계의 성능평가에 중점을 둔다.

2. 스피들 회전 정밀도 측정이론

2.1 반경방향운동(Radial Motion)

반경 방향의 운동은 2가지로(X축, Y축)로 다음과 같이 구분된다.

X radial motion ; $X(\theta)$ (순수한 X축방향의 반경 방향 운동)

스핀들이 X축 방향으로 평행이동 하는 운동이다.

Y radial motion ; $Y(\theta)$ (순수한 Y축방향의 반경 방향 운동)

스핀들이 Y축 방향으로 평행이동 하는 운동이다.

그리고, 공구나 공작물의 거리에 따라서 공구의 끝의 운동오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(\theta) = r_0 + X(\theta)\cos\theta + Y(\theta)\sin\theta \quad (1)$$

(r_0 : 센서와 측정 물간의 거리에 의한 반경)

위와 같은 식에 의해서 알 수 있듯이 반경방향의 오차성분은 형상정밀도 뿐만 아니라 표면조도에도 영향을 미치게 된다. 그러므로 여기서 $X(\theta)$ 와 $Y(\theta)$ 의 값들이 작을수록 더 좋은 결과를 가져온다. 본 논문에서 측정을 한 결과는 마스터 볼에서의 상대적인 거리를 측정 한 것이어서 마스터 볼의 반지름을 더해주고 계산을 수행을 한다. 그 결과 $X(\theta)$ 와 $Y(\theta)$ 가 동심원에 가까울수록 좋은 공작기계라고 할 수 있겠다.

2.2 축방향운동(Axial Motion)

축방향운동은 스피들이 Z축 방향으로 평행이동 하는 운동으로 가공물의 형상정밀도에 직접적인 영향을 끼치는 요소이다. 따라서 대부분의 공작기계의 구조물의 변형에 의해서 결정되는 것으로 거의 변화가 없는 것이지만 특히 열변형의 영향을 많이 받는다.

3. 스피들 회전 정밀도 측정시스템

3.1 실험장치 구성

Fig. 1 과 같이 마스터 볼과 갭센서, 앰프, AD 보

드로 구성된다. 검센서를 이용해서 신호를 받아들이고 센서 앰프를 통해 증폭된 신호를 A/D 보드가 신호를 받아들이게 된다. Table 1 은 각각의 측정장비에 대한 규격이다.

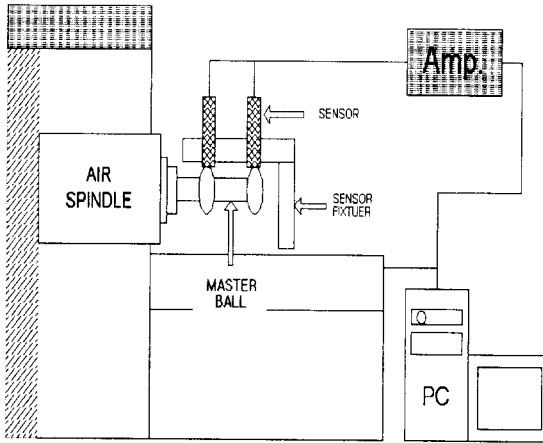


Fig.1 MEASUREMENT SETTING

3.2 평가 알고리즘
3.2.1 반경방향운동

마스터볼의 장착 시 포함된 편심량을 제거를 위해서 각각의 편심량을 구한다.

$$X_a = \frac{2 \sum_{i=1}^N X(\theta)}{N}, \quad Y_a = \frac{2 \sum_{i=1}^N Y(\theta)}{N}$$

이 값을 제거함으로써 보정된 값을 구할 수 있다. 보정된 값은 아래와 같다.

$$\overline{X}(\theta) = X(\theta) - X_a, \quad \overline{Y}(\theta) = Y(\theta) - Y_a$$

편심량이 제거된 \overline{X} , \overline{Y} 는 스피들의 회전정도를 나타내는 값이다.

3.2.2 Rotating Sensitive Direction

지름방향의 운동오차는 다음식으로 표시된다.

$$r(\theta) = r_0 + X(\theta)\cos\theta + Y(\theta)\sin\theta$$

θ : 스피들의 회전각

$X(\theta)$: X축 측정결과

$Y(\theta)$: Y축 측정결과

종류	내용
A/D Board:	Analog Input (A/D convert) Resolution: 16 bit A/D sampling rate: 100 KHz Max.
ADva ntec PCL-816	Digital Input Channel: 16 개 Level: TTL compatible Input load: 0.5V@0.4Ma(max.); 2.7 V @50 μ A(min.)
검센서 precision	Lion Precision: 10.000 Volts/mils (Sensitivity Hi) standoff 4.000mils Lion 1v당 0.1 mils = 2.54 μ m 해상도 《20(Voltage변화량)/65536(16bit=2 ¹⁶)=0.305 mV 0.305 * 2.54 = 0.775 nm》 Bandwidth Settings: 1 KHZ
마스터볼	Upper Ball: 1 in 오차 0.000004 in = 0.1016 μ m Lower Ball: 1 in 오차 0.0000025 in = 0.0635 μ m

Table 1. Measuring System Spec.

r_0 : 마스터볼과 센서사이의 정렬에 의해 생기는 반경.

$X(\theta), Y(\theta)$ 는 각각 X, Y축에서 센서를 통해 얻은 데이터이다.

3.2.3 3차원 운동오차 분석

$r(\theta) = x(\theta)\cos(\theta) + y(\theta)\sin\theta \Rightarrow$ radial motion in rotating sensitive direction

$Z_1(\theta) = Z_0(\theta) + r[\alpha(\theta)\sin\theta - \beta(\theta)\cos\theta] \Rightarrow$ Face motion in rotating sensitive direction

$$r_1(\theta) = x_1(\theta)\cos\theta + y_1(\theta)\sin\theta$$

$$r_0(\theta) = x_0(\theta)\cos\theta + y_0(\theta)\sin\theta$$

$r_1(\theta), r_0(\theta)$ 는 Z축의 길이에 따른 회전민감방향(rotating sensitive direction)을 나타낸다.

여기서 $x_1(\theta), x_0(\theta) = x_0(\theta) + L \cdot \beta(\theta)$

$$y_1(\theta), y_0(\theta) = y_0(\theta) - L \cdot \alpha(\theta)$$

3.2.4 Reversal Technique

때때로 우리는 정밀도가 그다지 높지 않은 마스터 볼을 가지고 스핀들을 측정하거나 마스터볼보다 훨씬 정밀한 스핀들을 측정해야 하는 경우가 있다. 아주 고정밀급의 마스터 볼의 제작에는 상당한 비용이 들게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해서 리버설 테크닉(반전법)을 사용하게 된다. 이 기술은 1972년 리버무어 국립연구소의 밥 도날슨에 의해서 소개되었다. 이 방법은 때때로 도날슨 리버설 테크닉이라 불린다. Fig.2는 이 방법을 설명한다.

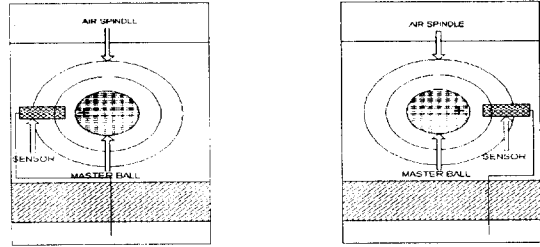


Fig.2 REVERSAL TECHNIQUE

3.2.5 Reversal Technique 의 실험과정

- 1) 마스터볼을 스핀들에 가능한 한 중심에 맞춰 장착한다. 이것은 대부분의 센서의 선형성이 일정한 범위 내에서만 나타내기 때문이다.
- 2) 스핀들과 진공척에 표시를 한다.
- 3) 데이터를 받는다. 원점이 안 맞을 경우를 위해서 여러 번 회전시켜서 평균값을 이용한다.
- 4) Fig.2와 같이 180도 회전시킨다. 좋은 결과를 얻기 위해서는 회전 시키기 전과 같은 높이에 있는 것이 좋다.
- 5) 데이터를 받는다. 역시 여러 번 회전시켜서 평균값을 이용한다.
- 6) 아래 식을 이용하여 스핀들과 마스터볼의 운동오차를 구한다.

$$T_1(\theta) = S(\theta) + P(\theta) + A\cos\theta$$

$$T_2(\theta) = -S(\theta) + P(\theta) + B\cos\theta$$

두식을 더하거나 빼면

$$P(\theta) = \frac{T_1(\theta) + T_2(\theta)}{2}$$

$$S(\theta) = \frac{T_1(\theta) - T_2(\theta)}{2}$$

$S(\theta)$: 마스터볼의 운동오차량

$P(\theta)$: 스핀들의 운동오차량

3.3 스핀들 회전 정밀도 측정결과

본 실험은 초정밀 선반을 센서의 장착방법과 실험 환경에 따라 몇 가지 경우로 나눠서 실험을 했다.

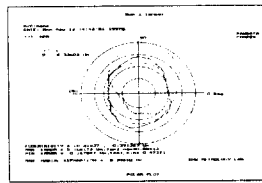


Fig.3 sensor 1

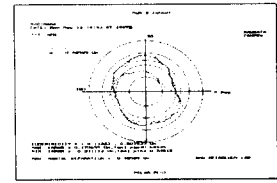


Fig.4 sensor 2

Y축 방향의 스핀들 운동오차는 336 nm, 410 nm로 측정되었다.

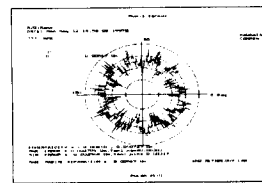


Fig.5 Sensor 1

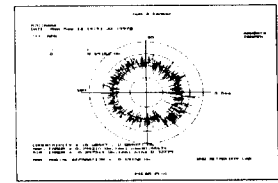


Fig.6 Sensor 2

초정밀 선반의 노이즈성분이 692 nm인 반면에 마이크로 미터에서 측정했을 때는 5.7 nm로 측정되었다.

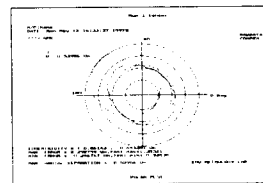


Fig.7 X-AXIS

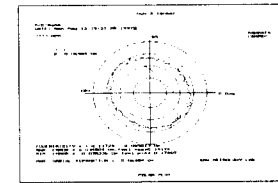


Fig.8 Z-AXIS

X축 방향의 스핀들 운동오차는 540 nm. Z축 방향의 스핀들 운동오차는 69.8 nm로 측정되었다.

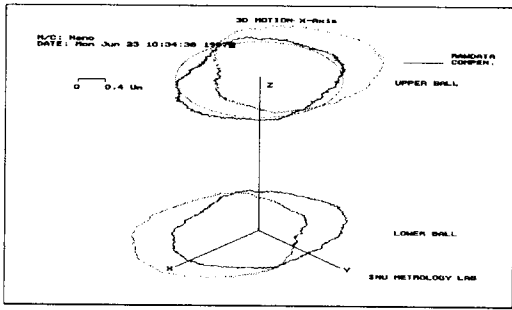


Fig.9 3D-X AXIS PLOT

⇒X 방향에서 측정된 결과를 3차원으로 표시.

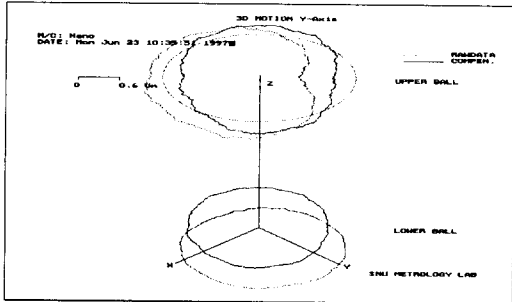


Fig.10 3D-Y AXIS PLOT

⇒Y 방향에서 측정된 결과를 3차원으로 표시.

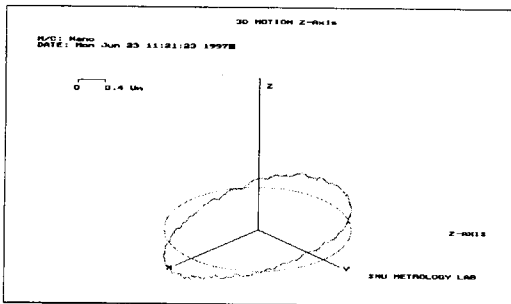


Fig.11 3D-Z AXIS PLOT

⇒Z 방향에서 측정된 결과를 3차원으로 표시.

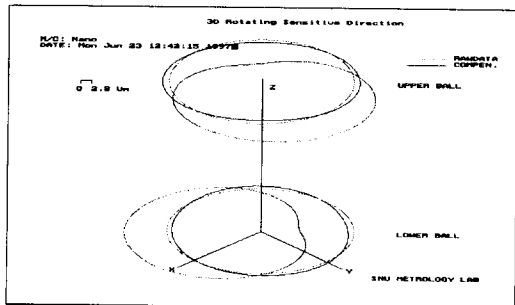


Fig.12 3D-ROTATING SENSITIVE DIRECTION

⇒Upper ball, Lower ball에서 측정된 Rotating Sensitive Direction을 3차원으로 한 화면에 표시.

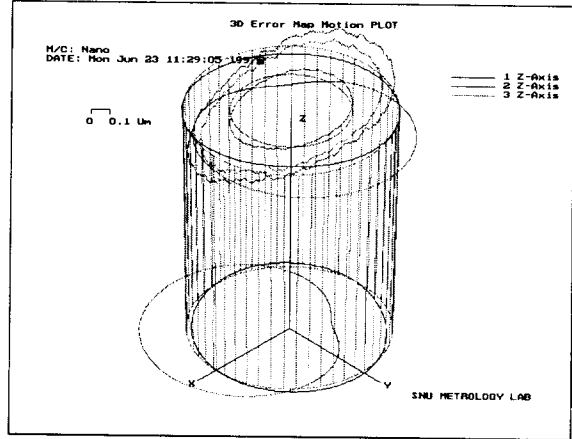


Fig.13 3D ERROR MAP MOTION

⇒스핀들 운동오차분석에 모든 데이터를 한 화면에 입체적으로 표시.

4. 결론

(1) 리버설테크닉을 이용해서 스핀들의 운동오차가 Lower master ball 은 611 nm, Upper master ball 은 525 nm로 측정 되었다.

(2) 스핀들에 센서를 장착했을 때와같은 위치에 마이크로미터에 센서를 장착했을 때 692 nm, 5.7 nm의 측정 결과가 나왔다. 둘의 오차량이 큰 차이를 나타내기 때문에 공작기계 자체의 노이즈가 상당히 큰 것을 알 수 있다.

(3) 측정된 데이터를 바탕으로 3차원으로 표현하는 시스템을 구현했다.

5. 참고문헌

- [1] "Unification of Terminology concerning the Error Motion of axes of rotation", 1975, Lawrence Livermore Laboratory.
- [2] "Axes of Rotation Methods for Specifying and testing", ANSI/ASME B83.4M, 1985
- [3] "Precision Spindle and Bearing Error Analysis", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.35, NO.2, pp 187-193, 1995