

# 스핀들회전오차 종합적성능평가 기술에 관한연구 (Combined Error Performance of Machine Tool spindle)

신 현장\*(서울대 대학원), 이석원(서울대 대학원), 박희재(서울대)  
H.J.Shin(SNU), S.W.Lee(SNU), H.J.Pahk(Prof.SNU)

Key Word : spindle, axial motion, tilt motion, radial motion, gap sensor,combined error motion

ABSTRACT : The spindle directly affects parts accuracy during machining, or work piece in machine tools. In this paper a comprehensive study is performed combined error performance of machine tool spindle. The developed methology has been practically applied to a spindle of machine tools.

## 1.서론

최근의 공작기계의 고정밀화, 고생산성으로 발전하고 있다. 그리고 제품의 정밀도 또한 가공의 조건이 더욱 더 까다로워지고 있다. 이에 공작기계의 정밀도도 더욱 더 높이는 과제가 남아있다. 여러 가지의 오차 성분들 중에서 베드부분이 움직이는 직선방향의 오차와 밀링에서처럼 공구가 회전하거나 선반에서처럼 공작물이 회전하는 것과 같이 회전방향의 오차성분이 존재한다. 이들 오차 성분은 가공시 가공물의 형상정밀도나 표면조도등 품질을 향상시키는 데 절대적인 영향을 미친다. 일반적인 공작기계의 대부분은 모두 회전운동을 사용하여 절삭가공을 행하고 있다. 지금까지 직선운동형태의 오차 성분을 측정하고 평가하는 여러 가지의 방법이 많이 제기되고 있지만 회전운동형태의 오차에 대한 측정과 평가는 그리 널리 알려지지 않고 있다. 또한 실제 적용시에 편심량의 제거와 복합적인 운동의 영향으로 평가방법이 쉽지가 않았다. 본 논문에서는 이런 공작기계제작회사의 생산현장에서의 스팀들 부분의 오차의 측정과 평가를 하기 위하여 두 개의 마스터 볼을 사용하고 이에 적용할 갭센서를 장착할 수 있는 적당한 치구를 사용하여 반경방향의 오차, 축방향 오차, 또한 회전축의 틸팅오차 등을 측정하여서 분석할 수 있는 시스템을 구현해 보았다. 이러한 일련의 장치들은 모두 컴퓨터와 인터페이스 하여 자동적으로 데이터를 받아들인 다음 그 데이터를 이용하여 수치적인 계산을 행하고, 오차 평가를 하는 모듈을 사용하여 최종적인 오차를 평가한다. 스팀들의 측정에서 특이한 점은 공작기계는 스팀들의 구조적인 원인에 의한 오차성분으로 정적인 오차로 생각하기 쉬우나, 여러가지의 회전속도에 대해서 다양한 오차 형태를 이루고 있으며 그 최대오차량도

달라지는 것을 본 논문에서 발견하였다.

## 2. 스팀들 회전 정밀도 측정 이론

### 2.1 5자유도 (5 degree of freedom)

스핀들의 운동은 크게 5가지의 운동을 한다. 이 운동의 주원인으로는 베어링의 진원도 오차, 유막의 불균일한 두께 등이 있으며 공작기계의 구조적인 영향으로는 진동, 댄핑, 가공시의 체터링 등을 들 수가 있다.

스핀들은 3종류의 선형운동과 3종류의 각운동으로 구성되는 6자유도 운동을 한다.

이들중 Z축에 대한 스팀들의 회전운동은 스팀들 본래의 운동으로서 회전오차와는 무관한 성분이고 나머지 다섯 가지 자유도는 절삭시의 축방향 위치, 반경방향 위치, 스팀들의 각변위를 나타내며 민감방향(sensitive direction)에 따라서 회전오차와 직접적인 관계를 갖는 운동이다.

### 2.2 반경방향운동(Radial Motion)

다음과 같이 반경방향의 운동이 2가지(X축, Y축)로 구분되며 다음과 같이 정의 할 수 있다.

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

스핀들이 X축 방향으로 평행이동 하는 운동이다.

Y radial motion ;  $Y(\theta)$  (순수한 Y축방향의 반경방향 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 측정값은 마스터 볼에서의 상대적인 거리를 측정 한 것이어서 마스터 볼의 반지름을 더해주고 계산을 수행한다. 즉  $X(\theta)$ 와  $Y(\theta)$ 가 중심 원에 가까울수록 좋은 공작기계라고 할 수 있겠다.

### 2.3 축방향운동(Axial Motion)

축방향운동은 스핀들이 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.

### 2.4 틸팅 모션(Tilt motion)

스핀들 회전축의 각변위운동이다. 아베 오차(Abbe error)와 관련되며 공구의 입의의 지점에서 반경방향오차를 더욱 가중시키는 운동 성분이며 다음과 같이 정의된다.

X축을 회전중심으로 하는 각운동 ;  $\alpha(\theta)$   
Y-Z면상에서의 스핀들의 각운동 성분으로 회전 중심은 X축과 평행하다.

Y축을 회전중심으로 하는 각운동 ;  $\beta(\theta)$   
X-Z 면상에서의 회전운동으로 회전의 중심은 Y축과 평행하다.

이 운동은 반경방향에 영향을 미치기 때문에 공구의 길이가 길어질수록 오차량이 크게 나타난다. 다시말하면  $\alpha(\theta)$ ,  $\beta(\theta)$ 는 스핀들의 휘어진 정도를 나타내는 값으로 적은 값일수록 정밀도가 높은 기계라고 할 수 있다.

### 2.5 혼합운동(Combined Error motion)

위와 같이 스핀들이 5자유도 운동을 한다. 이들 운동이 독립적으로 움직이는 것이 아니고 서로 중

첩되어서 나타나기 때문에 실제의 운동은 이들이 복합적으로 나타난다. 즉 반경방향 운동이 틸팅모션과 같이 나타날 경우 축방향의 한 위치에서 반경방향 운동을  $\gamma_o(\theta)$ 라하고 각운동을  $\alpha(\theta)$ 라 할 경우 다른 한 점에서 반경방향 오차 운동  $\gamma(\theta)$ 라고 하면 다음과 같이 구해진다.

$$\gamma(\theta) = \gamma_o(\theta) + L \times \alpha(\theta) \quad (2)$$

(L은 두 점 사이의 축방향 거리이다.)

선반이나 보링 가공 시에 아주 중요한 오차 운동이다. 그래서 Fig.1 과 같은 치구를 사용하여서 그 영향을 독립적으로 분리했다. 그 결과 각각의 운동에 대한 여러 가지의 정보를 구할 수가 있다. 축방향운동  $Z(\theta)$ 와 각운동  $\alpha(\theta)$ 이 동시에 일어나서 생기는 오차 운동이다. 또한 공구 끝의 평면을 가공할 경우 단면운동을 하는 데에 대한 오차를 구하려면 그 끝단 점의 운동을  $f(\theta)$ 라 하고 공작물의 회전중심에서 질삭 점까지의 반경방향 거리를 R 이라 하면 다음과 같다.

$$f(\theta) = Z(\theta) - R \times \alpha(\theta) \quad (3)$$

이 값은 엔드밀의 경우 그 표면 거칠기를 결정하는 요소이므로 평면을 가공할 경우 아주 중요한 요소가 된다.

## 3. 스핀들 회전정밀도 측정 시스템

### 3.1 실험장치 구성

Fig.2 과 같이 두 개의 마스터 볼이 장착된 실린더를 사용해서 5개의 캡센서를 사용해서 각각의 신호를 센서 앰프를 통해서 증폭된다. 다시 증폭된 신호를 다시 A/D보드를 통해서 디지털신호로 변환한다. 디지털로 변환된 신호는 측정평가를 위한 자료로 사용된다.

### 3.2 평가 알고리즘

#### 3.2.1 반경방향 운동

측정된 값  $r(\theta)$ 은 마스터 볼의 상대위치이므로 마스터 볼의 반지름을  $R_0$ 이라하면 미스터 볼의 위치  $R(\theta)$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$R(\theta) = r(\theta) + R_0 \quad (4)$$

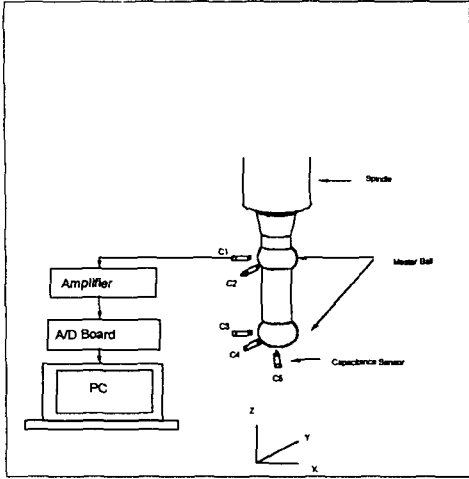


Fig.1 Experimental Setup for Roundness Error Measurement

이고 여기 C(1)에서 다시 회전각의 값으로  $X(\theta)$ ,  $Y(\theta)$  의 좌표값으로 바꾸기 위해서 다음과 같은 변환을 한다.

$$X(\theta) = R(\theta) \cdot \cos \theta, \quad Y(\theta) = R(\theta) \cdot \sin \theta \quad (5)$$

이 값은 마스터 볼의 장착시 포함된 편심을 내포하고 있다. 이 양을 보정하기 위해서 다음과 같은 X축 편심량( $X_a$ )과 Y축 편심량( $Y_a$ )을 계산한다.

$$X_a = \frac{2 \sum_{i=1}^N X(\theta)}{N}, \quad Y_a = \frac{2 \sum_{i=1}^N Y(\theta)}{N} \quad (6)$$

이 값을 각각의 값에 각 위치에서 보정을 하는 식은 다음과 같다.

$$\overline{X}(\theta) = X(\theta) - X_a, \quad \overline{Y}(\theta) = Y(\theta) - Y_a \quad (7)$$

여기에서 편심량을 제거된 값  $\overline{X}$ ,  $\overline{Y}$  는 스피ndl의 회전정도를 나타내는 값이 된다.  $\overline{X}$ ,  $\overline{Y}$  데이터로부터 최소자승원을 만들어서 최대와 최소의 값을 비교하여 스피ndl의 회전정도를 평가할 수 있는 척도가 된다.

### 3.2.2 틸팅 운동

C1, C2, C3, C4에서 측정된 신호를 다음과 같은 식으로 X축, Y축 각각 기울어진 각을 구할 수 있다.

$$\alpha(\theta) = \frac{C1(\theta) - C3(\theta)}{L}, \quad \beta(\theta) = \frac{C2(\theta) - C4(\theta)}{L} \quad (8)$$

여기서  $\alpha(\theta)$ ,  $\beta(\theta)$ 는 X축, Y축 방향으로 기울어진 각이며 L은 센서간의 거리이다.  $\alpha(\theta)$ ,  $\beta(\theta)$  값이 적으면 적을수록 Z축방향과 일치하여 스피ndl이 도는 것으로 가공에 있어서 아주 중요한 요소가 되면 특히 공구의 길이가 길어지게 되면 식(2)에 의거하여 반경방향의 오차를 더 크게 나타나게 되어 오차를 증가시키는 요인이 되고 있고 또한 지름이 아주 큰 정면 밀링커터인 경우는 식(3)에 의거하여 축방향의 길이의 오차를 크게 가지게 되므로 또한 가공물의 오차를 크게 가져오는 요인이 되고 있다.

### 3.2.3 FFT(Fast Fourier Transform)

스피ndl 회전운동에 의해서 나타난 데이터를 다음과 같은 FFT를 수행한다.

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)}, \quad \omega_N = e^{-2\pi i/N} \quad (9)$$

$X(k)$ 는 주파수성분으로 k에 해당하는 주파수의 크기를 분석해 준다. 가령 100Hz의 사인(sine)이나 코사인(cos)값을 입력값으로 넣게 되면 FFT에 의해서 100Hz에 해당하는 값이 가장 크게 나타난다. 그래서 회전체에서 오차량을 위와같은 알고리즘을 사용하면 회전시 그 성분으로 크기가 나타나게 될 것이고 그것의 주파수를 알아낼 수가 있다. FFT를 이용하면 스피ndl 구성 부품들의 정밀도, 기하학적인 오차등, 회전오차에 원인을 분석할 수 있는 좋은 자료가 될 것이다. 특히, 오차의 성분이 클수록 FFT에 의해서 크게 나타나며 지배적인 주파수의 성분을 쉽게 찾을 수가 있다.

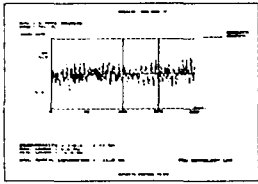
### 3.3 스피ndl 회전 정밀도 측정 실험 결과

센서 C1, C2, C3, C4에서 측정된 값들을 구하면 편심에 의해서 원의 형태가 한쪽 방향으로 치우치는 것을 볼 수가 있다. 이것은 마스터볼의 중심축과 스피ndl의 중심축과 일치하지 않은 것으로 소프트웨어적으로 계산을 하여 보정을 할 수가 있다.

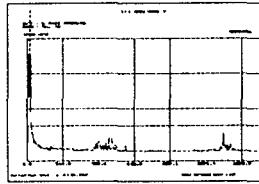
실험은 스피ndl 회전 속도를 최소1000rpm에서 최대 5000rpm까지 수행하였다.

그리고 1° 간격으로 데이터를 추출하기 위해서 샘플링 주파수를 각 회전속도에 맞도록 조정하였다. 여기서 점선은 마스터볼의 장착시 편심량이 포함된 것이고 실선은 편심량을 제거한 것이다. Fig.2 에서 볼 수 있듯이 회전속도에 따라서 오차

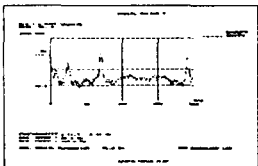
의 형태뿐만 아니라 최대오차량도 다르게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 또한 FFT에 의해서 나타나는 특정 주파수의 에너지값도 다르게 나타내고 있고 경향도 다르게 나타나는 것을 알 수가 있다. Fig.3 에서는 각 회전속도에 대해서 5자유도 운동의 최대오차량을 나타낸 것이다. 여기서는 회전속도에 따라서 최대오차를 가지는 운동이 다르게 나타나는 것을 알 수가 있다. 따라서 회전속도에 따른 가공오차도 다르게 나타날 것으로 예상된다.



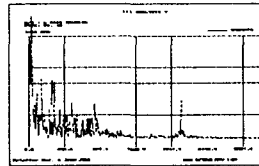
(a) Rotating velocity(1000rpm)



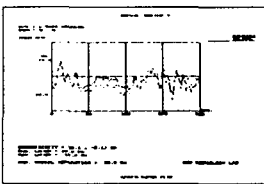
FFT (1000rpm)



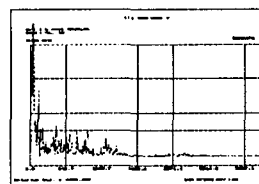
(b) Rotating velocity(2000rpm)



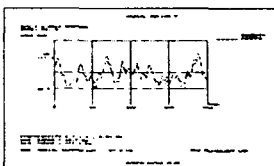
FFT (2000rpm)



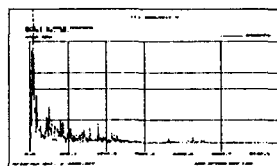
(c) Rotating velocity(3000rpm)



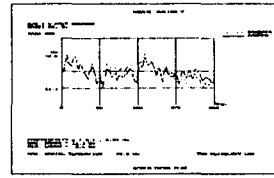
FFT (3000rpm)



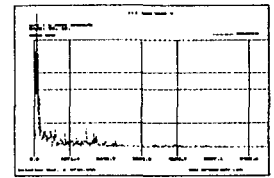
(d) Rotating velocity(4000rpm)



FFT (4000rpm)



(e) Rotating velocity(5000rpm)



FFT (5000rpm)

Fig.2 회전속도에 따른 센서(C3)에서의 측정값과 FFT 변환값

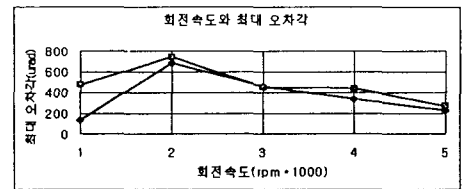
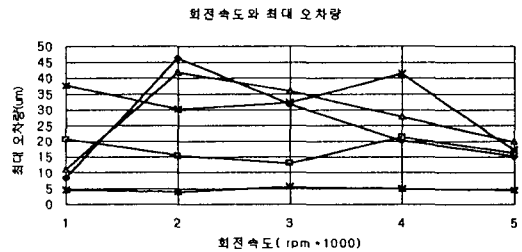


Fig.3 회전속도에 따른 최고오차량과 최고 오차각

그리고 Fig.4 은 회전속도 2000rpm일 때 5자유도에 대한 오차량을 측정하고, 또한 FFT에 의해서 나타난 결과이다. 위의 그림에서 보면 같은 회전속도일 때, 반경방향 운동, 틸팅운동과는 연관성이 존재하나, 축방향운동과는 경향이 다르게 나타나는 것을 알 수가 있다. 즉, FFT에 의한 데이터들은 반경방향 운동과 틸팅운동에서는 그림의 형태가 유사한 형태를 이루는 것을 알 수가 있으며 이것은 동일한 주파수의 성분을 가지고 있다는 것을 의미한다. 하지만 축방향의 오차성분의 FFT는 전혀 다른 형태의 그래프라는 것을 볼 수가 있으며 반경방향이나 틸팅형태의 운동과 다르게 운동한다는 것을 판별할 수가 있다. 특정 주파수에서 FFT의 값이 특히 강하게 나타나는 것을 보면 동적인 요소에 의해서 진동을 하는 것을 알 수가 있으며 이 주파수를 알 수가 있으므로 진동의 원인을 규명할 수도 있을 것이다.

