

주축의 회전정도 측정시스템의 개발

신 영 재* · 박 종 권** · 이 후 상***

Development of the Measuring System of the Rotational Accuracy of Main Spindles

Young-Jae Shin · Jong-Kweon Park** · Hu-Sang Lee****

ABSTRACT

In order to satisfy the industrial requirements to measure the rotational error motion of main spindles and to find out the source of the error motion, some measuring systems were made. Their measuring principle are based on the 3-point roundness measurement. In these measuring systems, the measurements are processed by digital calculation technique and the form error and the rotational error motion of main spindles are separated. In the present paper, the principle of 3-point method is introduced and some application examples are shown.

1. 서 론

제품의 생산성 향상과 고급화에 의하여 선진 공작기계의 사용이 보편화되어 가고있다. 이러한 공작기계의 개발에 필요한 것으로 공작기계의 고기능화, 고속화, 고정도화 기술로 분류되고 주축의 회전정도는 공작기계의 고정도화 기술 가운데 한부분이다. 일반적으로 피삭재를 가공할때 주축의 떨림에 의하여 피삭재가 소정의 형상되로 가공되지 않으며 피삭재의 표면조도가 나빠진다.

따라서 주축의 떨림을 작게하기 즉 회전정도를 향상시키기 위하여 주축의 회전정도에 대한 연구와 회전 정도 측정법의 개발이 필요하다. 이와같은 연구를 수행하기 위한 여러가지의 회전 정도의 측정법이 개발되어 있지만 이들 측정법에서는 형상정도가 높은 측정용 마스터 바(Master bar) 혹은 마스터 볼(Master ball)을 사용하고 있으며 가공중에 회전정도의 측정이 용이하지 않다. 또한 고정도의 마스터 볼을 사용하지 않는 경우 마스터 볼의 형상 오차에 의하여 측정정도가

*공작기계연구실 연구원

**공작기계연구실 선임연구원

***공작기계연구실 책임연구원

저하될 요소가 있다. 이러한 것에 대하여 3점법은 마스터 볼의 형상오차의 보증이 가능하여 고정도의 측정이 가능하며 가공중에서도 측정이 용이하다.

본 논문에서는 3점법의 측정원리를 기술하고 이 방법에 의하여 공작기계 및 계측기 주축의 회전정도를 측정할 수 있는 회전정도 측정시스템을 개발하여 선반주축의 회전정도를 측정하였다.

2. 측정원리

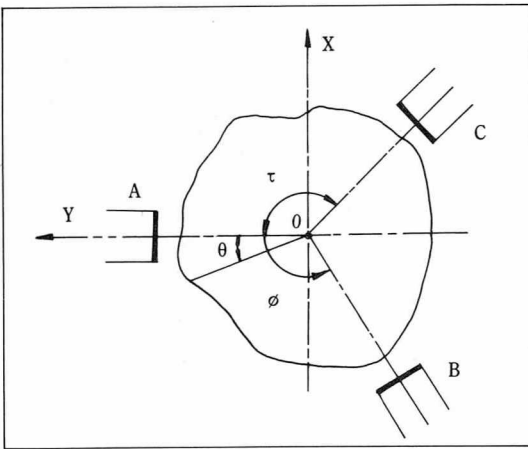


그림 1) 측정원리

그림 1에서 보듯이 변위센서 A, B, C의 중심선을 좌표계 X-Y의 원점 0와 만나도록 하고 각 변위센서간의 각도를 ϕ 와 τ , Y축으로 부터 측정된 주축의 회전각도를 θ 라 하며 주축의 단면형상 $r(\theta)$ 를 다음과 같이 정의 한다.

$$r(\theta) = R_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cdot \cos k\theta + B_k \cdot \sin k\theta) \quad \dots(1)$$

여기서 R_0 는 주축의 단면형상의 평균반경이다. 그리고 $R_A, R_B, R_C, x(\theta), y(\theta)$ 를 다음과 같다고 한다.

- R_A : 변위센서 A와 중심점 O와의 거리
- R_B : 변위센서 B와 중심점 O와의 거리
- R_C : 변위센서 C와 중심점 O와의 거리
- $x(\theta)$: X방향의 회전오차

$y(\theta)$: Y방향의 회전오차
 각 변위센서의 출력 $S_A(\theta), S_B(\theta), S_C(\theta)$ 는 다음과 같이 된다.

$$S_A(\theta) = R_A \cdot r(\theta) - y(\theta) \quad \dots\dots(2)$$

$$S_B(\theta) = R_B \cdot r(\theta - \phi) - y(\theta) \cos \phi + x(\theta) \sin \phi \quad \dots\dots(3)$$

$$S_C(\theta) = R_C \cdot r(\theta + \tau) - y(\theta) \cos \tau - x(\theta) \sin \tau \quad \dots\dots(4)$$

변위센서의 출력합을 $S(\theta)$ 을 다음과 같이 한다.

$$\begin{aligned} S(\theta) &= S_A(\theta) + a \cdot S_B(\theta) + b \cdot S_C(\theta) \\ &= R_A + a \cdot R_C + b \cdot R_C - R_0(1+a+b) \\ &\quad + x(\theta) (a \cdot \sin \phi - b \cdot \sin \tau) \\ &\quad - y(\theta) (1+a \cdot \cos \phi + b \cdot \cos \tau) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} [\{ A_k(1+a \cdot \cos \phi + b \cdot \cos \tau) \\ &\quad + B_k(b \cdot \sin k\tau - a \cdot \sin k\phi) \} \cos k\theta \\ &\quad + \{ B_k(1+a \cdot \cos \phi + b \cdot \sin \tau) \\ &\quad + A_k(a \cdot \sin k\phi - b \cdot \sin k\tau) \} \sin k\theta] \quad \dots\dots(5) \end{aligned}$$

여기서 a, b 는 상수이다 다음식이 만족하도록 a, b, ϕ, τ 를 선택한다.

$$\left. \begin{aligned} a \cdot \cos \phi - b \cdot \sin \tau &= 0 \\ 1+a \cdot \cos \phi + b \cos \tau &= 0 \end{aligned} \right] \quad \dots\dots(6)$$

식(6)에 의하여 식(5)는 $x(\theta)$ 및 $y(\theta)$ 와 무관하게 된다. 따라서 식(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S(\theta) &= R_A + a \cdot R_B + b \cdot R_C - R_0(1+a+b) \\ &\quad - \sum_{k=2}^{\infty} \{ (A_k \alpha_k + B_k \cdot \beta_k) \cos k\theta \\ &\quad + (B_k \cdot \alpha_k - A_k \cdot \beta_k) \sin k\theta \} \quad \dots(7) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_k &= 1+a \cdot \cos \phi + b \cdot \cos \tau \\ \beta_k &= -a \cdot \sin \phi + b \cdot \sin \tau \end{aligned} \right] \quad \dots\dots(8)$$

$S(\theta)$ 를 푸우리에 트랜스폼 (Fourier transform) 하여 얻은 푸우리에 계수(Fourier coefficients)를 F_k, G_k 라 하면 식(7)에 의하여 F_k 와 G_k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_k &= -A_k \cdot \alpha_k - B_k \cdot \beta_k \\ G_k &= -B_k \cdot \alpha_k + A_k \cdot \beta_k \end{aligned} \quad \dots\dots(9)$$

식(9)로 부터 $r(\theta)$ 의 푸우리에 계수를 다음식에 의하여 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} A_k &= 7(-\alpha_k \cdot F_k + \beta_k \cdot G_k) / (\alpha_k^2 + \beta_k^2) \\ B_k &= (-\beta_k \cdot F_k + \alpha_k \cdot G_k) / (\alpha_k^2 + \beta_k^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

식(10)에 구하여진 $r(\theta)$ 의 추정량을 $\bar{r}(\theta)$ 로 표시하고 식(2,3,4)에서 직류성분 R_0, R_A, R_B, R_C 를 제거하면 식(2,3,4)는 다음과 같이 된다.

$$S_A(\theta) = -\bar{r}(\theta) - y(\theta) \quad \dots\dots(11)$$

$$\begin{aligned} S_B(\theta) &= -\bar{r}(\theta - \phi) - y(\theta) \cos\phi \\ &\quad + x(\theta) \sin\phi \end{aligned} \quad \dots\dots(12)$$

$$\begin{aligned} S_B(\theta) &= -\bar{r}(\theta - \tau) - y(\theta) \cos\tau \\ &\quad - x(\theta) \sin\tau \end{aligned} \quad \dots\dots(13)$$

여기서 X와 Y방향으로의 반경방향 회전오차를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(\theta) &= [\{S_B(\theta) + \bar{r}(\theta - \phi)\} \cos\tau \\ &\quad - \{S_C(\theta) + \bar{r}(\theta + \tau)\} \cos\phi] / \\ &\quad \sin(\phi + \tau) \end{aligned} \quad \dots\dots(14)$$

$$y(\theta) = -\bar{r}(\theta) - S_A(\theta) \quad \dots\dots(15)$$

3. 측정시스템

그림 2에 회전정도 측정시스템의 구성도가 나타나 있다. 측정시스템은 3개의 용량형 변위센서, 1개의 포토센서(Photo sensor), A/D 컨버터, 퍼스널 컴퓨터, 플롯터 혹은 프린터로 구성된다. 주축의 회전축에 수직한 평면상에서 변위센서 B는 변위센서 A와의 각도 ϕ 를 133° 로 하고 변위센서 C는 변위센서 A와의 각도 τ 를 118° 가 되도록 설치 한다. 주축이 $360^\circ/128$ 회전할 때마다 각각의 변위센서로부터 변위를 측정 즉 주축의 1회전 동안 128개의 변위를 측정하여 컴퓨터로 읽어들이는다. 이렇게 측정된 변위는 컴퓨터에서 측정원리에 따라 주축의 형상 $r(\theta)$ 과 회전오차 $x(\theta)$ 및 $y(\theta)$ 를 구하며 회전오차를 주파수분석

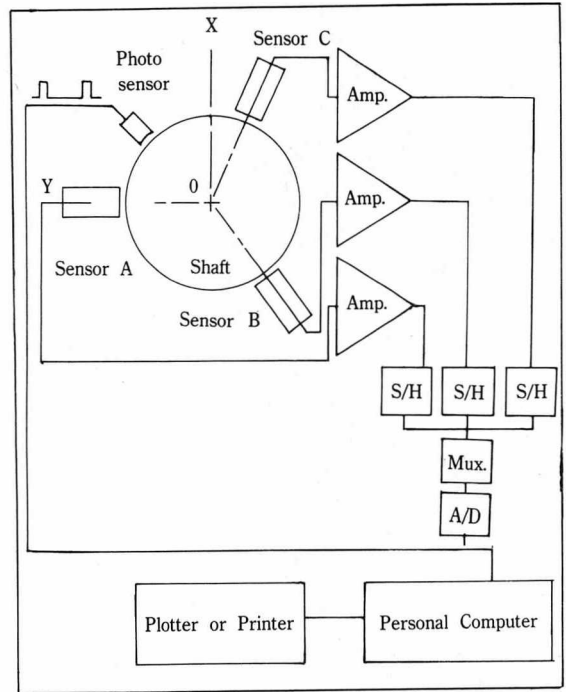


그림 2) 회전정도 측정시스템

하여 회전오차에 영향을 주는 주파수들을 찾아 회전오차의 원인을 알아보도록 되어있다.

4. 측 정

본 주축의 회전정도 측정시스템을 사용하여 선반 주축의 반경방향의 회전오차 $y(\theta)$ 를 측정 하였다. 주축의 분당회전수[rpm]을 300, 600, 900, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000로 변화 시키면서 각 회전수에서 4회전분을 측정하여 그 결과를 그림 3에 나타낸다. 측정된 결과로부터 회전오차를 구하여 각 회전수에 따른 회전오차의 분포를 그림 4에 나타내었다. 여기에서 보듯이 회전수가 증가함에 따라 회전오차가 커지는 것을 알 수 있으며 1500rpm부터 2000rpm까지의 구간은 회전오차가 감소하는데 이는 1500rpm에서 다소 변위측정 중의란의 영향을 받은 것으로 보인다. 각 회전수에서 구한 회전오차를 주파수분석한 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 그림을 보면 2000 rpm이상에서는 최대진폭을 나타내는 주파수영역

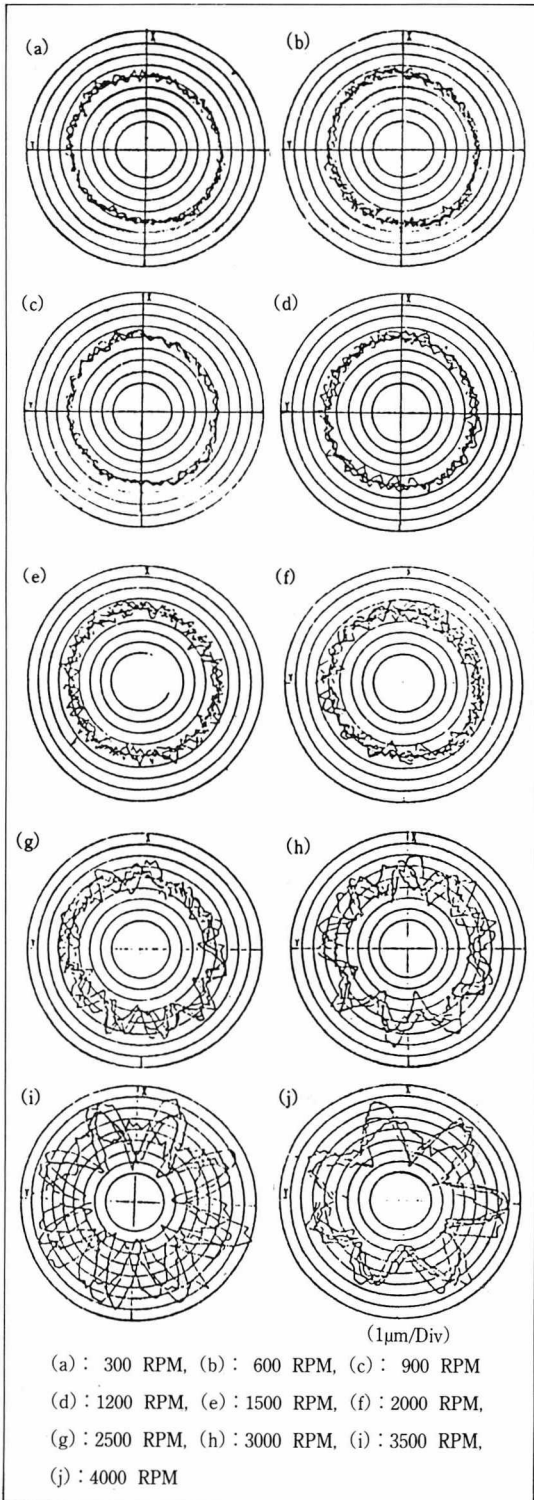


그림 3) 3점법을 이용한 회전정도 측정

이 회전수에 관계없이 일정하다는 것을 알 수 있다. 따라서 462Hz 부근의 주파수 영역이 선반 주축유닛트의 고유진동수 중 하나임을 알 수 있다. 이 결과를 표1에 정리하여 나타낸다.

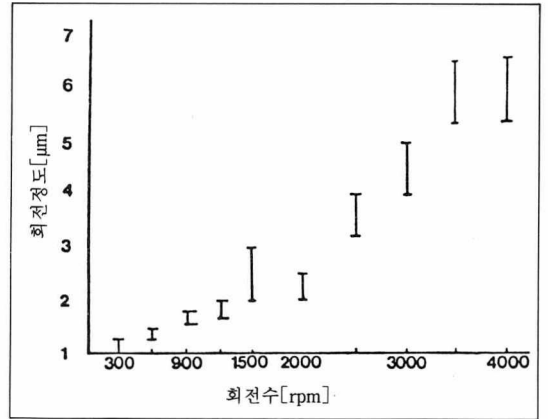
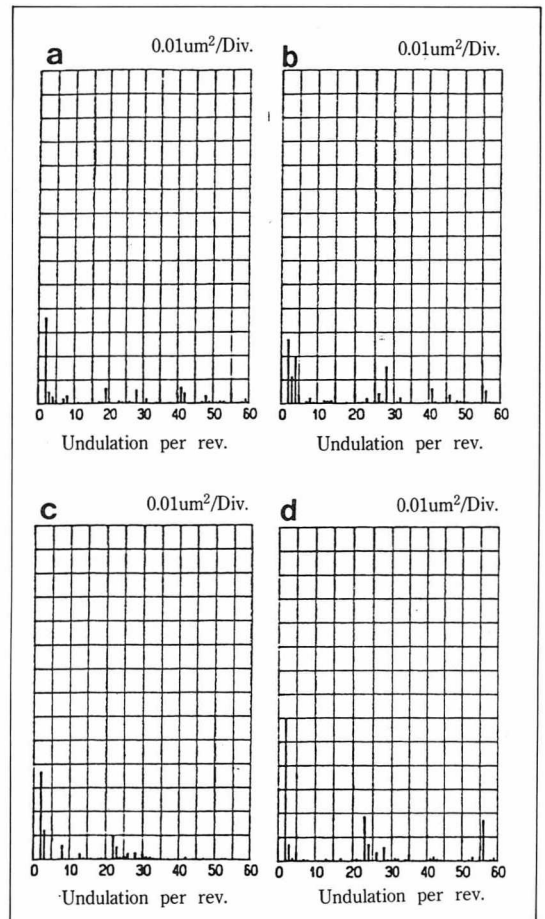


그림 4) 회전수에 따른 회전오차의 분포



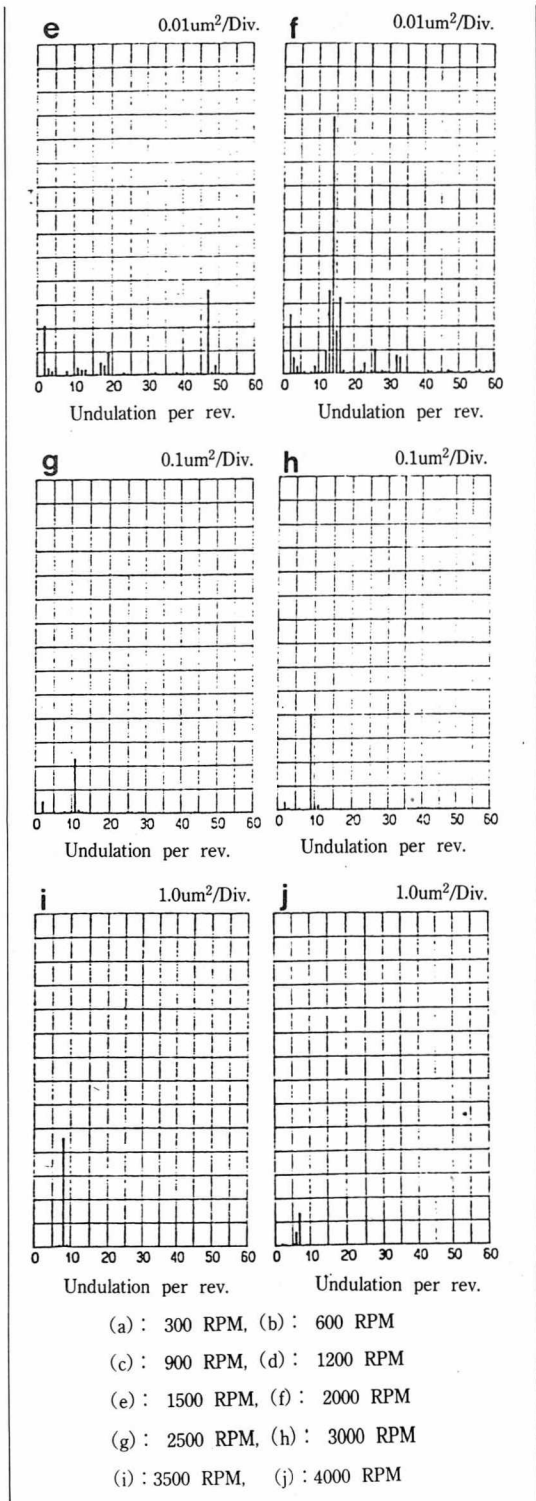


그림 5) 회전오차의 주파수 분석

표 1) 각 회전수에서 최대진폭의 주파수

회전수 [rpm]	산수 [undulation]	주파수 [Hz]
2000	14	467
2500	11	458
3000	9	450
3500	8	467
4000	7	467
평균 주파수		462

cf. 주파수 = (회전수 × 산수) / 60

5. 결 론

본 연구에서는 주축의 회전정도 측정장치를 개발하였으며 이것을 이용하여 선반주축의 회전정도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 3점법을 이용한 주축의 회전정도 측정시스템은 기존의 회전정도 측정법 보다 제작하기가 간단하다.
- ② 회전축의 형상오차와 회전오차를 분리할 수 있어 고정도의 측정이 가능하다.
- ③ 변위센서의 설치가 용이하므로 공작물의 가공중 회전정도의 측정이 가능하다.
- ④ 측정된 회전오차로부터 회전체의 이상진단을 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 垣野義昭, 北澤治郎, “工作機械上での3點法圓筒度測定に關する研究”, 精密機械, 44卷 11號, 1978, 1386
- [2] 三井公之, “精度診斷技術の研究”, 日本機論, 48卷 425號, 1982, 115
- [3] 신영재, “고정도 스피들의 회전정도 측정에 관한 연구”, 企業技術, 4卷 2號, 1989, 26
- [4] V Venkatraman, “Analysis of spindle running accuracy-1”, Machinery and production eng., 22, Jan., 1975, 66
- [5] V Venkatraman, “Analysis of spindle running accuracy-2, Machinery and production eng., 12,

Feb., 1975, 146

[6] V Venkatraman, "Analysis of spindle running

accuracy-3", Machinery and production eng., 16,

Apr., 1975, 359