

선반 주축의 회전운동 정도 측정

김영석*

(논문접수일 2007. 7. 22, 심사완료일 2007. 8. 30)

Measuring of Rotational Accuracy of Lathe Spindle

Kim, Young Seuk*

Abstract

It is important to measure the rotational accuracy of lathe spindle as it affects to the qualities of all machines machined by the lathe using in industries. The bad rotational accuracy of lathe spindle are caused mainly by weariness of the spindle in using and quality of spindle when machining and using low level bearings. It occurs especially in case of lathes because the cutting force acting to work-piece act on one side to the spindle not to both sides symmetrically.

Therefore in this study, constructing experimental apparatus for measuring of rotational accuracy by using eddy current type gap sensors AEC5706PS and sensors, s-06LN, data acquisition board DT9834(USB type) and software for data acquisition, DT Measure Foundry ver. 4.0.7 etc., error data acquired in the rotational accuracy test of lathe spindle are analysed in plots and statistical treatments.

Key Words : Rotational accuracy(회전운동 정도), Radial error(반경오차), Gap sensor(갭센서), Eddy current type(와전류형)

1. 서론

선반 주축의 회전운동 정도는 각종 기계부품의 선삭가공에 있어서 부품의 정밀도와 성능에 영향을 주는 매우 중요한 사항으로, 그 회전운동 정도의 측정과 연구는 선반의 품질향상을 위하여 지속적으로 연구할 필요가 있다. 선반 주축의 회전운동 정도의 측정은 주축을 회전시켜 일정한 시간간격으로 회전중인 주축의 회전운동 정도를 갭센서(gap sensor)에 의해 받아들여 회전운동 정도를 분석하는 것이다.

본 논문의 연구방법은 선반 주축의 회전체로서 대상체(target)를 정밀하게 제작하여 풀림처리한 후 선반 주축의 모오스 테이퍼(morse taper)부에 장착하여 4개의 갭센서를 사용하여 선반 주축의 회전운동정도를 측정하여 선반 주축 중심의 운동양상을 점군으로 표시하고 오차 데이터를 분석하려고 한다. 그리하여 선반 주축의 회전정도를 정량화하여 공작기계의 설계와 가공 및 조립에 있어서 선반 주축의 정밀도를 향상시킬 수 있는 방법을 모색하는 데 도움이 되겠다.

* 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ysakim@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

2. 와전류형 갭센서의 변위 측정원리

와전류형 갭센서(eddy current type gap sensor)의 변위 측정원리는 상호유도 이론에 의해 2차코일 대신 강판을 가까이 하면 기전력으로 발생한 전류는 강판자신의 저항으로 강판에서 열에너지가 되어 발산하므로 1차측에 전력에너지가 공급되어야 한다. 이와 같은 강판위의 전류를 와전류라 하는데 이 때문에 1차측에 전압상승이 일어난다. 이 1차측의 전압상승은 강판을 가까이 하면 할수록 전압상승이 커지게 되므로 이 센서의 출력전압(V_o)을 변위로 환산하여 측정하게 된다. 또 변압기는 50~60Hz의 교류전원을 사용하나 와전류형 갭센서는 1,000Hz~30,000Hz의 교류전원을 사용하므로 1차측에 높은 에너지 공급이 필요하게 되고 이에 상응하여 발전전압이 쉽게 떨어져서 약한 전원에서도 좋은 선형성능을 가지도록 설계하는 것이다.

그러므로 와전류형 갭센서는 이 원리에 의해 1차코일은 와전류형 갭센서의 프로우브(probe)로 2차측은 강판을 대상체로, 그리고 교류전원을 고주파 발전기로 대응시키면 대상체가 프로우브에 접근하면 발전전압이 떨어지고 멀리하면 상승하는데 이 발전전압을 변위로 환산하여 측정하게 된다.

그러나 Fig. 1에서와 같이 프로우브에서 대상체(target)가 멀어질수록 틈새 t 가 커져 영향력이 점차적으로 감소하므로 동일한 간격을 변화시켜도 간격이 멀어질수록 전압변화폭은 감소하여 발전전압과 거리의 관계는 비직선적(non-linear)이 된다. 따라서 이 자체로는 사용하기 어렵고 직선화회로(linearizer)를 채용하여 측정범위내에서 간격변화와 전압변화의 관계를 직선화시켜서 사용한다. 또 센서의 발전 주파수는 1kHz이상으로 직류자계는 물론 50, 60 및 400Hz등의 교류자계에서도 주파수 영역이 서로 달라 영향을 받지 않는 장점이 있고, 또 측정 대상체의 표면가공 상태가 좋지 않아도 되고, 또한 측정 대상체가 평판이 아니고 원통형이더라도 센서직경의 3배 이상이면 측정치에 영향을 주지 않는다.

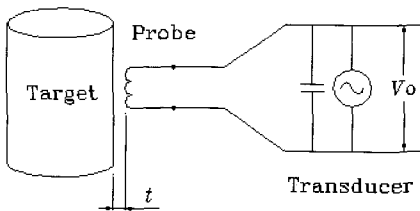


Fig. 1 Principle of eddy current type gap sensor

3. 회전운동 정도 측정 장치의 구성

회전운동 정도 측정 장치의 구성은 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 측정 대상체를 선반주축의 모오스 테이퍼부에 고정시켜 가능한 정밀가공을 하여 폴리우레탄 원통을 심압대축에 끼워 고정시키고, 심압대를 이동시켜 측정 대상체의 외주에 끼워 넣은 후 컴퓨터를 가동시켜 데이터 획득 소프트웨어를 열어 놓고 갭센서를 폴리우레탄 원통에 조립한다. 이때 갭센서와 대상체와의 변위를 컴퓨터 화면상에서 보면서 변위값이 0(zero)근처에 오도록 조정하여 고정시킨다.

Table 1은 실험장치에 사용된 각종 품목의 사양과 규격을 보여주고 있다.

Fig. 3은 측정 대상체(target)로서 모오스 테이퍼(morse

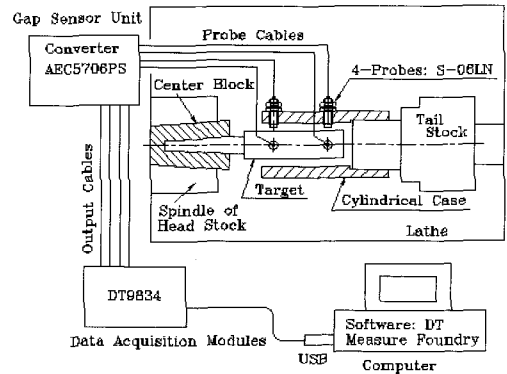


Fig. 2 Schematic diagram of measuring apparatus on lathe

Table 1 Specifications of measuring system

Item	Specifications
Data Acquisition Modules	Model: DT9834(Data Translation co.)
	Resolution: 16bits
	Range: 0~±10V
Cylindrical Case	MC Nylon
Target	SCM415(85kgf/mm ²)
Converter	AEC5706PS(refer to table 2)
Sensor	S-06LN(refer to table 2)
Software for data acquisition	DT Measure Foundry ver. 4.0.7 (AEC co.)
Lathe	Model: TIPL-4(Tongil co.)

taper) No. 4로 가공하여 열처리한 것으로 주축의 센터블록 (center block)에 끼워 고정시키게 된다.

Fig. 4는 선반주축의 테이퍼부에 센터블록(center block)을 끼우고 다시 여기에 측정 대상체(target)를 끼워 원통 케이스(cylindrical case)에 프로우브(probes)가 장착되어 있는 모양을 보여 주고 있다. 갭센서의 위치는 선반주축의 센터블록의 표면에서 50mm 와 100mm 위치 점에서 측정을 하게 된다. 그러므로 각 지점마다 x, y 두 축의 센서가 한 세트로 설치되므로 총 4개의 갭센서를 설치하게 된다.

Table 2는 갭센서에 대한 여러 가지 제원으로 해상도는 최대 0.1 μ m이고 측정거리는 1mm(1,000 μ m)이내이다.

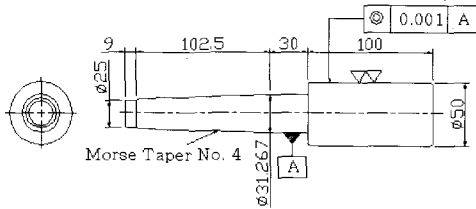


Fig. 3 Detail of target piece

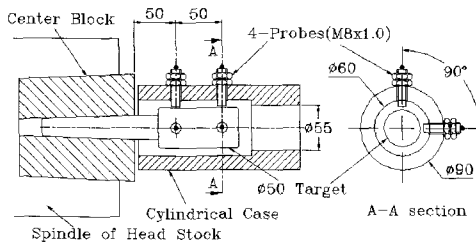


Fig. 4 Detail of measuring target and probes

Table 2 Specification of gap sensor (Model: AEC5706PS AEC co.)

Item	Specifications			
	1	2	3	4
Mode	1	2	3	4
Characteristics of frequency	DC ~ 30Hz	DC ~ 80kHz	100Hz ~ 15kHz	100Hz ~ 80kHz
Output	10mV/ μ m		100mV/ μ m	
Resolution	0.02 μ m	0.1 μ m	0.05 μ m	0.09 μ m
Measuring range	0 ~ 1000 μ m			
Measuring accuracy	\pm 0.8%			
Linearity of output	0.2 ~ 0.8mm \pm within 1%			

Fig. 5는 갭센서의 프로우브의 모양을 보여주고 있다. 프로우브를 장착할 때에는 그림에서 보여주는 바와 같이 프로우브의 선단 5mm 부분은 노출되어 장착 되어야 한다.

4. 데이터 획득용 프로그램

Fig. 6의 측정 데이터를 얻는 컴퓨터 프로그램은 DT Measure Foundry ver 4.0.7(Data Translation co.)로 A/D config의 설정주파수는 각 채널당 1,000Hz이고 1초당 약 1,000개의 데이터를 받게 되는 데, 약 5,000개의 데이터 세트를 얻는 데 5초 정도 걸리게 된다.

선반 주축의 회전수는 50rpm부터 1,500rpm까지 회전속도를 다양하게 변화시켜가면서 측정할 수 있다.

5. 회전운동 정도 측정방법과 분석방법

선반 주축의 회전운동 정도 측정은 1회전하는 동안에 모든 데이터를 받아들이기에는 컴퓨터의 하드웨어가 시간적인 속도를 따라가지 못하므로 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 주축이 여러 회전을 하는 동안에 $i=1, 2, \dots, i, i+1, \dots, N-1, N$ 까지 측정 데이터의 수를 일정개수까지 받

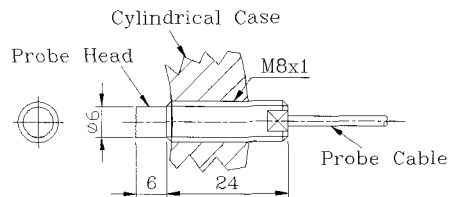


Fig. 5 Detail of sensor head

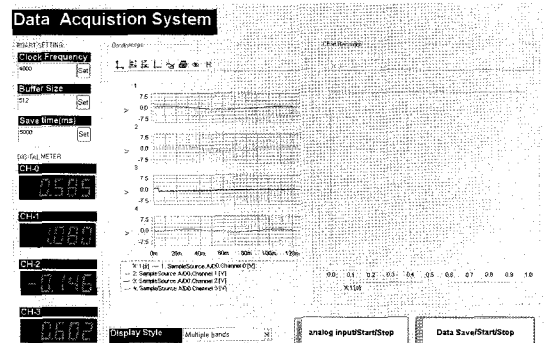


Fig. 6 Data acquisition system of measure foundry

아들리게 소프트웨어를 구성한다. 그러므로 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 1번부터 번호순으로 측정점을 잡아가면 여러 회전하는 동안에 많은 수의 측정점을 얻게 된다.

선반 주축의 회전운동 정도 측정원리는 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이, 선반주축의 모스 테이퍼부의 센터블록에 대상체(target)을 끼워 갭센서를 그림과 같이 세팅하여 두개의 갭센서를 좌표축으로 하는 x, y 좌표계상에서 $i(i = 1, 2, 2, \dots, N)$ 점의 두 축의 회전운동시의 변위 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 를 측정하여, 2개의 갭센서를 축으로 하는 좌표계 Oxy 를 기준으로 i 점의 x, y 축 방향 상대변위(relative displacement) x_i, y_i 는 각각 다음과 같이 구한다.

$$x_i = \Delta x_i - \Delta x_1, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$y_i = \Delta y_i - \Delta y_1, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

여기에서,

x_i : x 축 방향의 i 점의 상대변위(μm)

y_i : y 축 방향의 i 점의 상대변위(μm)

Δx_i : x 축 방향의 i 점의 변위(μm)

Δy_i : y 축 방향의 i 점의 변위(μm)

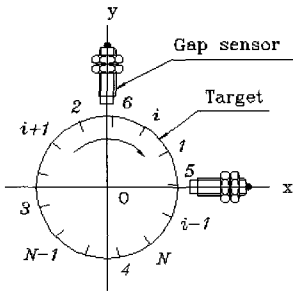


Fig. 7 Measuring points of rotational accuracy

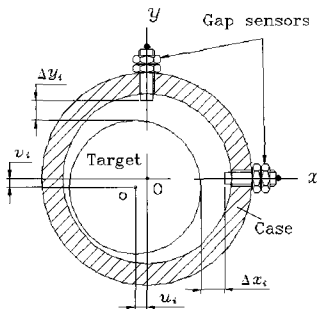


Fig. 8 Measuring principle of rotational accuracy

Δx_1 : x 축 방향의 첫 번째 점의 변위(μm)

Δy_1 : y 축 방향의 첫 번째 점의 변위(μm)

그러나 식 (1)과 (2)는 얻어진 측정값들이 첫 번째 얻어진 측정값에 대한 상대적인 값으로 구해지므로 다음과 같이 데이터의 표준화(data standardization) 과정을 거쳐 평균이 0인 데이터로 변환하여야 한다.

데이터의 표준화 과정은 우선 표본 데이터 세트 $\{x_i\}, \{y_i\}(i = 1, 2, \dots, N)$ 의 표본 평균(sample mean) \bar{x}, \bar{y} 는 각각 다음과 같이 구한다.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6)$$

여기에서,

\bar{x} : 표본 데이터 세트 $\{x_i\}$ 의 표본 평균

\bar{y} : 표본 데이터 세트 $\{y_i\}$ 의 표본 평균

표본 데이터의 값들은 데이터의 표준화 처리에 의해 평균이 0인 새로운 값들로 다음과 같이 u_i, v_i 로 바꾸어 주어야 한다.

$$v_i = y_i - \bar{y}, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

$$u_i = x_i - \bar{x}, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

이 (u_i, v_i) 는 좌표계 Oxy 를 기준으로 i 점의 xy 평면상의 대상체(target)의 중심 o 의 좌표값으로 이것을 Fig. 9의 xy 평면상에 점군으로 묘사한다.

또한 점군의 편위량(center-off position)은 (u_i, v_i) 좌표값의 합으로 $(x, y) = \left(\sum_{i=1}^N u_i, \sum_{i=1}^N v_i \right)$ 의 좌표점으로 표시한 것이다.

한편, i 점의 반경방향의 회전오차(rotational error of radial direction)는 식 (7), (8)에 의해 구한 표준화한 표본 데이터 세트 $\{u_i\}, \{v_i\}(i = 1, 2, \dots, N)$ 값을 가지고 다음과 같이 계산한다.

$$r_i = \sqrt{(u_i)^2 + (v_i)^2} \quad (9)$$

여기에서,

r_i : i 점의 반경방향의 회전오차(μm)

최대 반경오차(max. radial error)는 $r_i (i = 1, 2, \dots, N)$

, N 중에서 가장 큰 반경방향의 오차값이다.

또 평균 반경오차(average radial error) \bar{r} 는 다음과 같이 계산한다.

$$\bar{r} = \frac{\sum r_i}{N} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (10)$$

두 변수의 표준화한 표본 데이터 세트 $\{u_i\}, \{v_i\} (i=1,2,\dots,N)$ 의 표본 공분산(sample covariance) C_{uv} 은 다음과 같이 구한다.

$$C_{uv} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i \cdot v_i) \quad (11)$$

식 (11)의 표본 공분산은 정상 에르고딕 과정(stationary ergodic process)에서 분산의 무편향 평가치(unbiased estimator)이다. 표본 공분산 C_{uv} 는 두 오차값의 곱을 모두 더한 것으로 오차값들이 분산되어 있는 정도를 표현하는 것으로 수치가 클수록 회전운동 정도가 불량한 것으로 판단할 수 있다. 또 공분산의 (+)값은 데이터가 1, 3상한으로 치우쳐 있는 것이고 (-)값은 2, 4상한으로 치우쳐 있는 것을 의미한다.

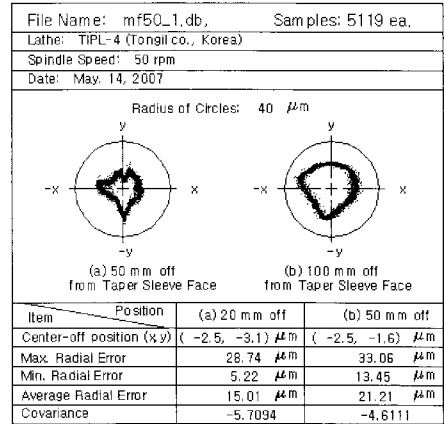
그러므로 식 (1), (2)에 의해 구한 회전운동 오차 데이터를 처리하여 (7), (8)에 의해 표준화처리를 한 오차 데이터를 가지고 그 오차운동의 궤적을 모델링하거나 식 (9)에 의해 반경방향의 오차를 구하여 최대 반경오차(max. radial error), 최소 반경오차(min. radial error) 그리고 평균 반경오차(average radial error)를 구하고, 오차 데이터의 분포상태를 분석하기 위하여 공분산 등의 통계적 처리를 하게 된다.

6. 측정결과 및 분석

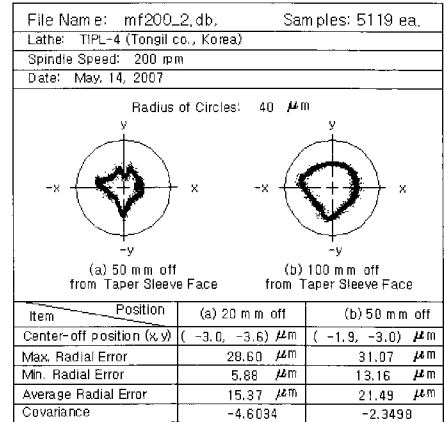
Fig. 9는 선반 주축의 회전속도를 변화시켜 가면서 회전운동 정도 측정을 행한 결과를 분석하고 그 회전 양상을 그림으로 보여주는 것이다.

여기에서 보면 선반주축의 센터블록의 표면에서의 거리에 따라 최대 반경오차, 최소 반경오차, 평균 반경오차 그리고 공분산 등이 커지는 양상을 보이고 있다. 그러나 회전속도에 따른 변화는 그다지 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있다.

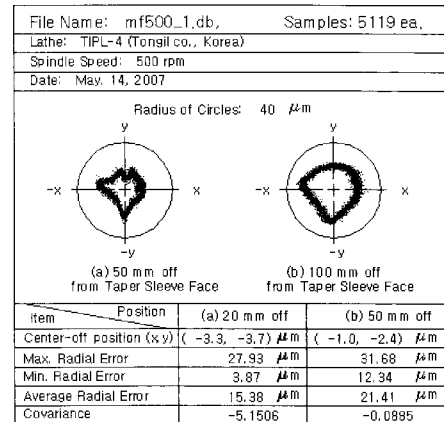
그러나 선반주축의 센터블록의 표면에서의 거리에 따라 최대 반경오차는 현저히 커지는 것을 볼 수 있고, 표본 공분산의 값이 (+)이면 주축 중심의 회전운동 궤적이 1, 3상한으



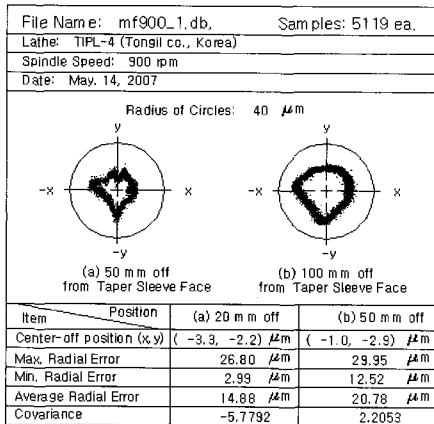
(a) Spindle speed: 50rpm



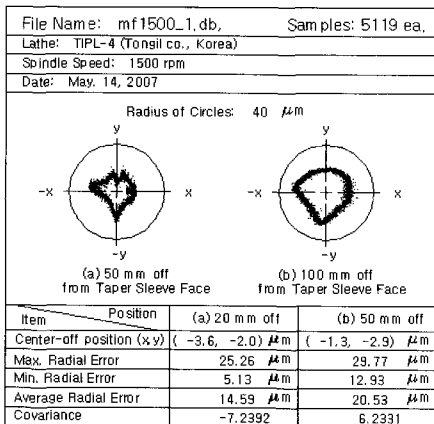
(b) Spindle speed: 200rpm



(c) Spindle speed: 500rpm



(d) Spindle speed: 900rpm



(e) Spindle speed: 1,500rpm

로 타원의 장축이 있게 되고, (-)이면 2, 4상항으로 타원의 장축이 있게 된다. 그러나 이 선반은 그림 상에서 그 타원 정도가 그다지 크지 않은 것으로 나타나고 있다.

7. 결론

선반에서 주축의 회전운동 정도 시험을 하기 위하여 실험 장치를 구성하고 실험을 위한 소프트웨어를 구성하고 실험에서 얻어진 데이터를 얻어 분석하는 프로그램을 제작하여 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 와전류 형식의 갭센서를 사용하여 선반 주축의 2점식 회전운동 정도 측정을 위한 측정 시스템을 구축하여 그 회전운동 정도를 측정하고, 그 회전운동 정도를 통계적인 수치로 표시하는 분석 프로그램을 제작하였다.
- (2) 선반 주축의 2점식 회전운동 정도 측정에서 얻어진 오차 데이터는 컴퓨터 프로그램에 의해 그 운동오차의 양상을 그림으로 모델링 하였고, 또 오차 데이터의 최대값과 평균 그리고 공분산 등을 구하여 회전운동 정도를 분석할 수 있도록 하였다.
- (3) 센터블록 단면에서의 거리에 따라 최대 반경오차, 최소 반경오차, 평균 반경오차 그리고 공분산 등이 커지는 양상을 보이고 있다. 그러나 회전속도의 변화에 따른 분석 결과의 변화는 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

후기

“이 논문은 2005년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.”

참고 문헌

- (1) RDonaldson, R. R., 1972, “A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error”, *Annals of the CIRP*, Vol. 21/1, pp. 125~126.
- (2) Zhang, G. X. and Wang, R. K., 1993, “Four-Point Method of Roundness and Spindle Error Measurements”, *Annals of the CRIP*, Vol. 42/1, pp. 593~596.
- (3) Shinno, H., Mitsui, K., and Tatsue, Y., 1987, “A New Method for Evaluating Error Motion of Ultra Precision Spindle”, *Annals of the CRIP*, Vol. 36/1, pp. 381~384.
- (4) QI, X., SHIMIZU, S. and IMAI, N., 1999, “Measuring Method of Thermal Displacement for Machine Tools”, *Journal of JSPE*, Vol. 65, No. 3, pp. 396~400.