

# 리니어 스케일을 이용한 NC 선반의 원 운동정도 측정 시스템의 구성

김영석\*, 김재열<sup>+</sup>, 김종관<sup>++</sup>, 한지희<sup>+++</sup>, 정정표<sup>+++</sup>

(논문접수일 2004. 2. 19, 심사완료일 2004. 5. 17)

## Organization of Circular Motion Accuracy Measuring System of NC Lathe using Linear Scales

Young Seuk Kim\*, Jae Yeol Kim<sup>+</sup>, Jong Kwan Kim<sup>++</sup>, Ji Hee Han<sup>+++</sup>, Jung Pyo Jung<sup>+++</sup>

### Abstract

Measurements of circular motion accuracy of NC lathe have achieved with ball bar systems proposed by Bryan, but the ball bar systems have influenced on the measuring data by way of the accuracy of the balls and the contacts of balls and bar seats. Therefore in this study, error data during of circular motion of ATC(Automatic Tool Changer) of NC lathe will be acquired by reading zx plane coordinates using two optical linear scales. Two optical linear scales of measuring unit are fixed on z-x plane of NC lathe, and the moving part is fixed to ATC and then is made to receive data of coordinates of the ATC at constant time intervals using tick pulses coming out from computer. And then, error data files of radial direction of circular motion are calculated with the data read, and the aspect of circular motion are modeled to plots, and are analysed by means of statistical treatments of circularity, means, standard deviations etc.

**Key Words** : NC lathe(NC 선반), Circular motion accuracy(원 운동정도), Circular motion errors(원 운동오차), Error motion(오차운동), Linear scale(리니어 스케일)

## 1. 서론

NC 선반의 원 운동정도는 각종 기계부품의 가공에 있

어서 부품의 정밀도와 성능에 영향을 주는 매우 중요한 사항으로, 그 운동정도의 측정과 연구는 NC 선반의 품질향상을 위하여 지속적으로 연구할 필요가 있다.

\* 조선대학교 기전공학과 (ysakim@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대학교 기전공학과

++ 조선대학교 기계공학과

+++ 조선대학교 대학원 생산·가공공학과

원 운동정도의 측정은 NC 선반의 회전운동에서 일정한 시간간격으로 한 회전하는 동안의 운동오차를 읽어 들여서 NC 선반의 운동정도를 평가할 수 있는 대표적인 방법으로, 지금까지의 연구경향을 살펴보면, 원운동의 정도에 대한 측정방법으로서 1982년 스위스의 Knapp<sup>(1,2)</sup>은 2차원 변위계(two dimensional probe)와 마스터 링(master ring)을 사용한 회전운동 시험법(circular test method)을 발표하였고, 1982년 미국의 LLNL(Lawrence liver more national laboratory)의 Bryan<sup>(3)</sup>은 변위 측정용 센서로서 LVDT와 2개의 강구 및 영구자석을 사용한 TMBB법(telescoping magnetic ball bar method)을 발표하여 볼 바(ball bar) 측정법의 효시가 되었다. 한편, 일본의 Kakino<sup>(4)</sup>는 광학식의 리니어 스케일을 사용한 DBB법(double ball bar method)을, 또, 일본의 Tsutsumi<sup>(5)</sup>는 전기적인 탐촉자(electrical probe)로서 정전용량형의 커패시턴스 센스(capacitance sensor)나 와전류형의 에디 커런트(eddy current) 등과 로터리 엔코더(rotary encoder)를 사용하여 반경방향의 변위와 로터리 엔코더의 회전각도로 원 운동정도를 측정할 수 있는  $r-\theta$ 법( $r-\theta$  method) 등이 연구되어 보고되고 있다.

최근에는 영국의 Renishaw 회사에서 개발한 볼 바 시스템(ball bar system)은 측정 장치와 NC 선반의 바이트의 중심정렬(centering)을 쉽게 할 수 있어서 가장 널리 사용되고 있으나, 측정용 바(bar)의 길이가 한정되어 있고, 볼과 그 접촉부의 정밀도에 영향을 받게 되어 있다.

그러므로 본 연구에서는 볼 바 시스템의 볼과 그 접촉부의 영향을 받지 않는 상태로 원 운동정도를 측정하기 위하여 본 시스템을 개발하게 된 것이다.

## 2. 원 운동정도 측정원리

원 운동정도 측정원리는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이,

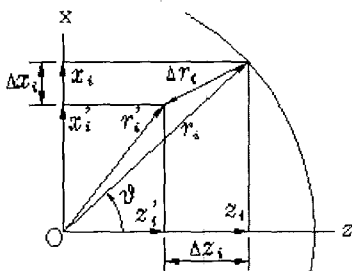


Fig. 1 Measuring principle of circular motion error

NC 선반에서 ATC 공구대의 원 운동의 중심위치를  $O(0,0)$ 로 놓고,  $i$ 점의 원 운동의 오차  $\Delta r_i$ 는, 지령상의 원 운동의 위치  $r_i$ 와 원 운동 시에 NC 선반의 ATC 공구대의 실제 측정위치  $r_i'$ 와의 차로, 다음 식과 같이 정의 한다.

$$\Delta r_i = r_i' - r_i \quad (1)$$

여기에서,  $r_i = (x_i, z_i)$  : 지령상의 원 운동의 반경(mm)  
 $r_i' = (x_i', z_i')$  : 원 운동의 반경방향의 실제 측정거리(mm)  
 $\Delta r_i = (\Delta x_i, \Delta z_i)$  : 원 운동의 반경방향의 오차( $\mu\text{m}$ )  
 $i = 1, 2, \dots, n$  : 원 운동오차의 측정점

그러므로  $x, z$ 축 방향의 오차  $\Delta x_i, \Delta z_i$ 는 각각 다음과 같다.

$$\Delta x_i = x_i' - x_i \quad (2)$$

$$\Delta z_i = z_i' - z_i \quad (3)$$

여기에서,  $x_i, z_i$ 는 리니어 스케일에서 측정한 좌표 값이고, 원 운동의 회전 반경을  $r_i$ 라 하면  $x_i, z_i$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$x_i = r_i \sin \theta \quad (4)$$

$$z_i = r_i \cos \theta \quad (5)$$

$\theta$ 는  $zx$  평면에서  $z$ 축을 기준으로 한 회전각(rad.)으로 다음과 같이 계산한다.

$$\theta = \pi \times \frac{i}{n} \quad (6)$$

여기에서,  $i$ 는 측정 점의 위치이고,  $n$ 은 측정 데이터의 총수이다.

그러므로 리니어 스케일에 의한 측정에서  $i$ 점의 반경방향의 원 운동오차  $\Delta r_i$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta r_i = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta z_i)^2} \quad (7)$$

그러므로 식 (7)에 의해 구한 원 운동 오차 데이터를 처리하여 그 오차운동의 궤적을 모델링하거나 진원도를 구하게 된다.

### 3. 리니어 스케일의 변위 측정원리

리니어 스케일의 변위 측정원리는 Fig. 2의 싱글 필드 스캐닝(single field scanning)을 갖는 장치는 측정신호를 발생하는 그레이팅에서 빛의 굴절을 이용하는 것으로, 광원과 집속렌즈 및 인덱스 그레이팅이 일체로 반사형의 긴 스케일과 상대운동을 하게 된다. 스케일이 움직일 때, 저 순위의 빛의 파동은 고순위의 빛의 파동과 변위에 비례하여 중첩되고 간섭을 일으켜 위상전이(phase shifts)를 일으키게 되고, 이 위상전이를 평가하여 변위를 측정하게 된다.

리니어 스케일은 간섭 스캐닝원리에 의해 수광소자에서 전기적인 신호를 발생시키는 것으로, 스캐닝 레티클(scanning reticle)은 굴절된 빔의 성분을 발생하고 중첩시키는 투명한 위상 그레이팅(phase grating)으로 되어 있다. 긴 스케일은 반사형의 위상 그레이팅으로 되어 있고, 광원은 LED(light emitting diode)와 집속렌즈로 된 장치이다.

간섭 스캐닝은 굴절의 순위로 0과 +1, 그리고 1의 3개의 빔성분이 인덱스 그레이팅(index grating)에서 발생한다. 이 빔성분들은 스케일의 위상 그레이팅에서 다시 한번 굴절의 0순위가 제거된 점에서 굴절된다.

현재 스케일에서 반사된 순위의 +1과 1의 빔 성분들은 그들의 위상 위치(phase positions)에서 거리정보를 포함하고 있고, 인덱스 그레이팅에서 간섭을 초래한다. 그 결과로서 얻어지는 빔의 변조에 의해 수광소자는 3개의 하이텐하인 회사(Heidenhain co.)의 엔코더(encoder) 특성을 갖는 2개의 90° 위상 전이된 신호를 가지고 3개의 120° 위상전이(phase shifted)된 신호를 발생한다.

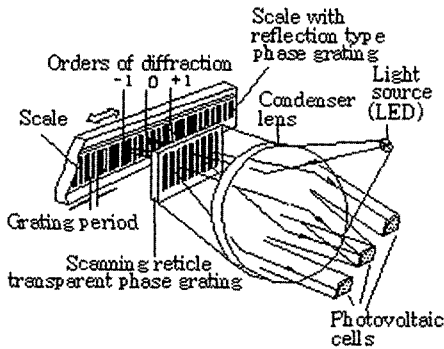


Fig. 2 Measuring principle of displacement by the linear scale with one single field scanning

### 4. 원 운동정도 측정 장치의 구성

NC 선반에서 원 운동정도 측정 장치의 구성은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이, 리니어 스케일을 L bar에 고정시키고 NC 선반의 x축 방향과 z축 방향으로 두 개의 리니어 스케일이 서로 수직이 되도록 마그네트 베이스(magnet base)로 고정시킨다. 다음에 x축 방향의 리니어 스케일과 z축 방향의 리니어 스케일의 가동부분을 NC 선반의 ATC 공구대의 일부에 마그네트 베이스로 부착시켜 ATC 공구대와 같이 구성한다.

그리하여 리니어 스케일에서 나오는 전기적 신호를 PC 계수 카드(PC counter card)에서 받아들여 수치화하여 오차 데이터를 컴퓨터에서 읽어 들이게 한다.

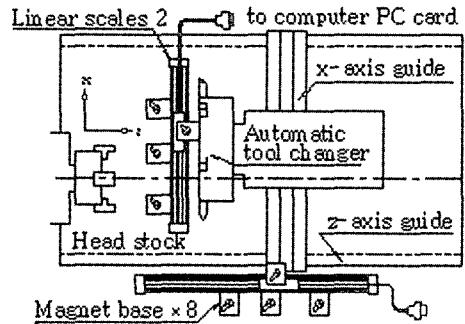


Fig. 3 Setting of linear scales on NC lathe

Table 1 Specification of linear scale (Model: LF 183, Heidenhain co., Germany)

Items	Specifications
Measuring standard	DIADUR phase grating on steel
Grating period:	8 $\mu$ m
Thermal expansion coefficient:	$\alpha_{therm} \approx 10 \text{ PPM/K}$
Output signals/Signal periods	Sine wave 1 Vpp/ 4 $\mu$ m
Accuracy grades	$\pm 2\mu\text{m} (\pm 0.00008 \text{ in.})$
Recommended Measuring steps	1 $\mu$ m to 0.1 $\mu$ m
Power supply	5V $\pm 5\%$ < 150 mA (with terminating resistor Z <sub>0</sub> =120 $\Omega$ )

**Table 2 Specifications of PC counter card  
(Model: IK 121V, Heidenhain co., Germany)**

Item	Specifications
Signal inputs	2 sine wave 1 Vpp
Signal subdivision (Signal period : meas. step)	Up to 1024 fold
Max. input frequency	400 kHz
Counter(per channel)	32 bits
Driver software	Turbo Pascal

Table 1은 원 운동정도 측정 시스템의 구성에 사용된 리니어 스케일의 제원으로, 리니어 스케일의 분해능(Measuring steps)은 0.1 $\mu$ m이고, 정밀도 등급(Accuracy grades)은 임의의 1m 측정 시에 선형 오차  $\pm 2\mu$ m( $\pm 0.00008$  in.)이다.

Table 2의 PC 계수카드(PC counter card)는 2채널의 사인파(sine wave)를 1Vpp로 입력하여 1024배(1024 fold)할 수 있도록 되어 있다.

### 5. 원 운동정도 측정방법

NC 선반에서 ATC 공구대의 운동경로는 Fig. 4(a)의 시계방향(CW)의 회전경로는 O점에서 시작하여 A→B→C→D→A→O경로로 이동한다. Fig. 4(b)의 반시계방향(CCW)의 회전경로는 O점에서 시작하여 A→D→C→B→A→O경로로 이동한다.

원 운동정도 시험에서 측정 데이터를 얻는 프로그램의 플로우 차트는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5의 플로우 차트를 보면 먼저 측정 데이터를 얻는 컴퓨터 프로그램을 가동시켜 데이터 파일을 열어 놓고, IK

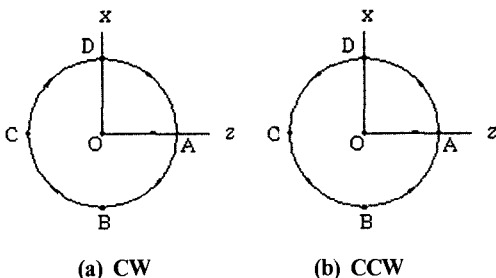


Fig. 4 Paths of ATC on circular motion accuracy test

121V PC 계수 카드를 영(zero)으로 초기화하여 둔다. 다음 총 원 운동거리에 해당하는 시간을 틱수(ticks)를 구하여 두고, 측정의 종료를 위하여 사용한다.

한편, 컴퓨터에서는 1초에 18.2개의 시각 펄스가 나오는데, 이것을 이용하여 리니어 스케일에서 측정 데이터를 일정한 시간 간격으로 받아들일게 된다. 측정 데이터를 얻는 시간 간격은 컴퓨터에서 나오는 틱(ticks)수로서 1~2틱 간격으로 측정 데이터를 얻는다. 다음에 NC 선반의 프로그램을 가동시켜 ATC 공구대가 0.01mm 이동하면 현재시각을 틱수로 읽어 들이고 종료시각을 계산하고 측정 데이터를 일정한 시간간격으로 읽어 들여 파일로 저장하게 된다. 한편 종료시간과 일치하게 되면 더 이상 데이터를 얻지 않고 프로그램은 중지하게 된다.

### 6. 측정 데이터의 처리

오차 데이터의 파일을 만들어, 분석용 프로그램에 의해

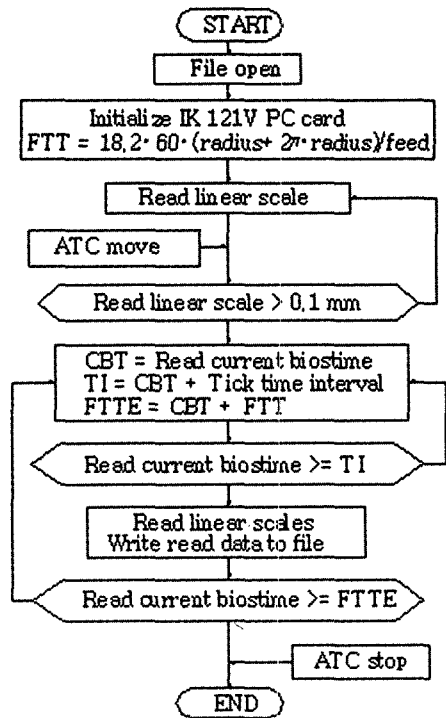


Fig. 5 Flow chart for data acquisition of circular motion accuracy test

원 운동오차의 최대 변동범위와 변동 폭 그리고 평균, 분산, 평균편차, 표준편차 등을 구하고, 직선 운동오차의 변동양상을 그림으로 모델링 하였다.

원 운동정도 시험에서 얻어진 오차 데이터는 원 운동의 중심에서 측정 데이터의 편향을 제거하기 위해서 데이터의 표준화 처리(data standardization)를 하여야 한다. 데이터의 표준화 처리는 계측기의 오차가 점점 커지거나 작아지는 계측기의 오차를 제거하기 위해 필요한 것으로 이것은 모든 반경방향의 원 운동오차의 평균을 구하여 각각의 원 운동오차에서 감하여 평균이 영(0)이 되도록 하는 것으로, 이후, 오차 데이터를 분석하거나 그림으로 모델링할 때의 원 운동 오차값으로 사용된다.

그리하여, 진원도 오차(circularity error)는 원 운동의 최대오차와 최소오차의 차로써, 다음과 같이 구하게 된다.

$$C_r = \Delta r_{max} - \Delta r_{min} \quad (8)$$

여기에서  $C_r$  : 원 운동의 진원도 오차( $\mu\text{m}$ )

$\Delta r_{max}$  : 원 운동의 최대오차( $\mu\text{m}$ )

$\Delta r_{min}$  : 원 운동의 최소오차( $\mu\text{m}$ )

### 7. 실험결과 및 분석

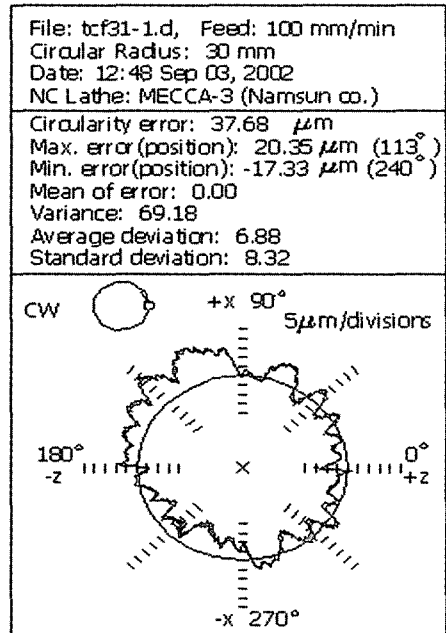
Fig. 6은 원 운동의 회전반경(circular radius)을 변화시키 가면서 원 운동정도를 측정하여 분석하고 그림으로 모델링 한 것이다.

이 NC 선반은 x축과 z축 사이의 서보 루우프 게인(servo-loop gain)들이 서로 맞지 않아 타원형 경로를 그리는 것으로 한축이 다른 축을 끌고 가는 운동양상을 보여주는 것을 나타내고 있고, 또 각 축의 반전점 부근에서 운동오차의 크기가 급변하는 백래시 오차가 발생하는 것을 보여 주고 있다.

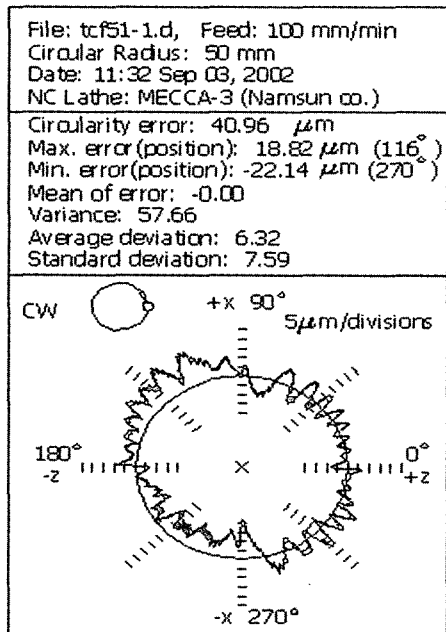
측정과 분석결과에 대한 원 운동의 진원도 오차(circularity error), 최대 오차(max. error), 최소 오차(min. error), 평균(mean of error), 평균 편차(average deviation), 표준 편차(standard deviation) 등은 수치가 작을수록 운동정도가 좋은 것으로, 원 운동의 반경의 변화에 따라 크게 차이는 보이지 않으나 그림의 양상은 약간 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 8. 결론

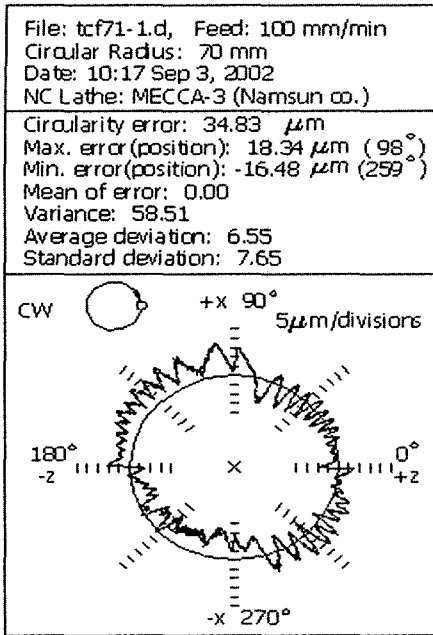
NC 선반에서 원 운동정도 측정 장치의 제작 및 시스템의



(a) Circular radius 30mm



(b) Circular radius 50mm



(c) Circular radius 70mm

Fig. 6 Analysis of circular motion accuracy test of NC lathe

구성, 그리고 원 운동정도 측정 실험에서 얻어진 데이터를 얻어 분석하는 프로그램을 제작하여 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 광학식의 리니어 스케일 측정 시스템을 이용하여 NC 선반의 원 운동정도 측정을 위한 측정 시스템을 구축하여, 그 원 운동오차를 측정하고, 그 진원도를 수치로 표시하는 프로그램을 개발하였다.
- (2) NC 선반의 원 운동정도 측정에서 얻어진 오차 데이터는 컴퓨터 프로그램에 의해 그 운동오차의 양상을 그림으로 모델링 하였고, 또 오차 데이터의 평균, 분산, 표준

편차, 평균편차 등을 구하여 원 운동정도를 분석할 수 있도록 하였다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Knapp, W., and Matthias, E., 1983, "Test of the Three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors," *CIRP Annals*, 32-1, pp. 459~462.
- (2) Knapp, W., and A. Wirtz, 1988, "Accuracy of Length Measurement and Positioning(Statical Measurement and Contouring Mode)," *CIRP Annals*, 37-1, pp. 551~ 514.
- (3) Bryan J. B., Apr. 1982, "A Simple Method for Testing Measuring Machine and Machine Tools," Part 1, Principles and Applications, *Precision Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 61~63.
- (4) Kakino, Y., Ihara, Y., Kamei, A., and Ise, T., 1986, "Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools(1st Report)-The Measurement and Evaluation of Motion Errors by Double Ball Bar Test," *JSPE*, Vol. 52, No. 10, pp. 73~79.
- (5) Tsutsumi, M., Sakai, K., and Kim, J. S., 1992, "A New Measuring Method of Circular Movement of NC Machine Tools Development of Alternative Method for Standardization," *Trans. of JSME*, Vol. 58(C), No. 545, pp. 271~276.