

리니어스케일을 이용한 NC 선반의 원 운동정도 측정

김영석[#], 김재열^{*}, 한지희^{**}, 정정표^{**}, 윤원주^{**}, 송인석^{***}

Measuring of Circular Motion Accuracy of NC Lathe using Linear Scales

Young Suk Kim[#], Jae Yeol Kim^{*}, Ji Hee Han^{**}, Jung Pyo Jung^{**}, Won Ju Yun^{**}, In Suk Song^{***}

ABSTRACT

It is very important to measure circular motion accuracy of NC lathes it affects accuracy, performance, interchangeability and quality of machine parts machined by the NC lathes in industries.

So, in this study, measuring units system to measure circular motion accuracy two axes circular motion accuracy of NC lathes was composed of two optical linear scales installed on the z and x-axes of work coordinate system on NC lathe and a computer inserted with PC counter card enables to obtain measuring data. Here, ATC(Automatic Tool Changer) and moving part of linear scales are fixed with magnet bases in order to measure circular motion accuracy of the ATC of NC lathe.

And next, computer software was developed in order to measure the circular motion accuracy of NC lathe under resolution of $0.1 \mu\text{m}$ using two linear scales, and also computer softwares were developed so that measuring data could be modeled on plots and be analyzed numerically.

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

현대의 산업사회에서 NC 선반의 운동 정밀도와 성능은 각종 기계부품의 제작 및 가공에 있어서 정밀도와 성능 그리고 기능적인 품질에 영향을 주는 매우 중요한 사항으로 판단 할 수 있다. 이러한 추세를 고려하여 보면, NC 선반에 있어서도

운동정도의 측정과 그 정밀도의 향상 및 그 운동오차의 감소를 위한 지속적인 연구의 필요성이 대두된다.

지금까지의 연구경향을 살펴보면, 원운동의 정밀도에 대한 측정방법으로서 1982년 스위스의 Knapp은 2차원 면위계(2-Dimensional probe)와 마스터링(Master ring)을 사용한 회전운동 시험법(Circular

주 저 자, 조선대학교 기전공학과(yakim@chosun.ac.kr)
주 소: 501-756 광주광역시 동구 서석동 375
* 조선대학교 교수
** 조선대학교 대학원
*** 조선대학교 기계시스템분석실험실

Test Method), 1982년 미국의 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)의 Bryan이 변위 측정용 센서로서 LVDT 와 2개의 강구 및 영구자석을 사용한 TMBB 법(Telescoping Magnetic Ball Bar Method), 일본의 Kakino는 DBB 법(Double Ball Bar Method), 또한 Tsutsumi는 전기적인 탐촉자(Electrical probe)로서 정전용량형의 커패시턴스 센스(Capacitance sence)나 와전류형의 에디 커런트 (Eddy current)등의 로터리 엔코더(Rotary encoder)를 사용하여 반경 방향의 변위와 로터리 엔코더의 회전각도로 원운동 정도를 측정할수 있는 r-θ 법(r-θ Method)등이 연구되어 보고되고 있다. 최근에는 영국의 Renishaw 회사에서 개발한 보울-바(Ball bar) 시스템은 측정장치와 NC 선반의 바이트의 중심정렬을 쉽게 하기 할 수 있어서 가장 널리 사용되고 있으나 측정용 바(bar)의 길이가 한정되어 있어서 규격이 작은 NC 선반은 완전한 하나의 원 운동을 할 수 없는 것이 불편하다.

NC 선반은 일반적으로 직선 운동과 원 운동으로서 제품을 가공하게 되므로, 원과 호에 관한 이송운동의 정밀도 향상과 이 과정에서 발생한 오차의 감소를 위한 다양한 연구를 필요로 하여 현재 까지도 많은 연구들이 진행되고 있다.

2. 원 운동정도 측정원리

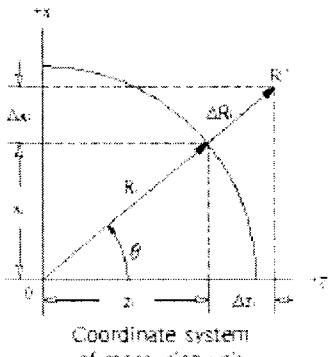


Fig. 1 Measuring principle of circular motion error

NC 선반에서 원 운동정도를 측정하는 Fig.1에서 보여주는 바와 같이, NC 선반에서 ATC 공구대의 중심위치를 $O(0,0)$ 로 놓고, 원 운동의 오차

$\Delta R_i(\Delta x_i, \Delta z_i)$ 는, 지령상의 원 운동의 위치 $R_i(x_i, z_i)$ 와 원 운동시에 NC 선반의 ATC 공구대의 실제 측정위치 $R_i'(x'_i, z'_i)$ 와의 차로, 다음 식과 같이 정의 한다.

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

여기서 $R_i(x_i, z_i)$: 지령상의 원 운동위치(mm)
 $R_i'(x'_i, z'_i)$: 원 운동의 실제 측정위치(mm)
 $\Delta R_i(\Delta x_i, \Delta z_i)$: 원 운동에서 반경 방향의 오차(mm, 또는 μm)

그러므로, 각 x, z축 방향의 오차 $\Delta x_i, \Delta z_i$ 는 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 값이고, x_i, z_i 는 NC 선반의 ATC 공구대의 지령상의 원 운동의 반경을 r 라 하면 다음과 같이 계산한다.

$$x_i = r \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$z_i = r \cdot \cos \theta \quad (5)$$

여기에서 r : 원 운동의 회전반경(mm)

θ 는 zx 평면에서 z 축을 기준으로 한 회전각(rad 또는 deg)으로 다음과 같이 계산한다.

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

여기에서, i 는 측정점의 위치이고, n 은 측정 데이터의 총 수이다.

그러므로, 리니어 스케일에 의한 측정에서 원

운동오차는 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

장치의 기본구성은 스케일, 검출헤드, 분할 읽음 회로로 구성되어 있다. 스케일은 빛을 투과 혹은 반사하는 부분과 못하는 부분이 똑같은 간격과 폭의 격자를 형성하고 있다. 검출헤드는 빛을 보내는 광원(LED 혹은 램프), 인덱스 슬릿(index slit), 투과하거나 반사된 빛을 검출하는 수광소자로 구성되어 있다. 인덱스 스케일은 이동방향의 빛을 검출하는 수광소자로 구성되어 있다. 인덱스 스케일은 이동 방향의 판정 및 분할을 할 수 있도록 하기 위하여 90° (1/4 피치) 위상 차이가 있는 신호를 발생시킬 수 있는 구조로 되어 있다.

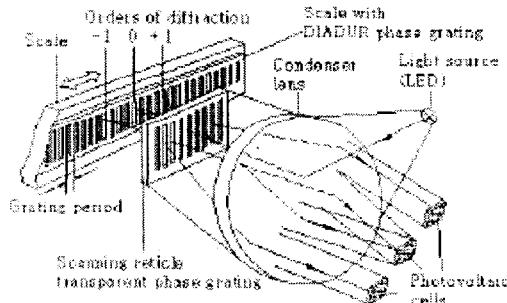


Fig. 2 Measuring principle of displacement by the linear scale with one single-field scanning

리니어 스케일의 변위 측정원리는 Fig. 2의 싱글 필드 스캐닝(single-field scanning)을 갖는 장치는 측정신호를 발생하는 그레이팅에서 빛의 굴절을 이용하는 것으로, 광원과 접속렌즈 및 인덱스 그레이팅이 일체로 반사형의 긴 스케일과 상대운동을 하게 된다. 스케일이 움직일 때, 저순위의 빛의 파동은 고순위의 빛의 파동과 변위에 비례하여 중첩되고 간섭을 일으켜 위상 전이(phase shifts)를 일

으키게 되고, 이 위상 전이를 평가하여 변위를 측정하게 된다.

리니어 스케일은 간섭 스캐닝원리에 의해 수광소자에서 신호를 발생시키는 것으로, 스캐닝 레티클(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 접속렌즈로 된 장치이다.

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

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

4. 원 운동정도 측정장치의 구성

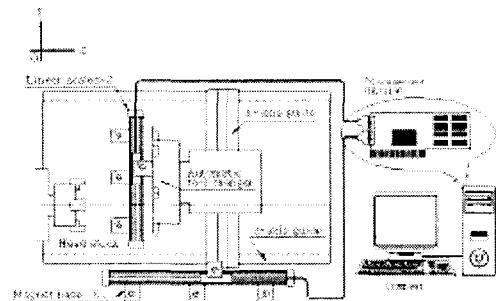


Fig. 3 Setting of linear scales on NC lathe

NC 선반에서 원 운동정도 측정장치의 구성은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이, 리니어 스케일을 L-bar에 고정시키고 NC 선반의 x 축 방향과 z 축 방향으로 두 개의 리니어 스케일이 서로 수직이 되도록 마그네트 베이스(magnet base)로 고정시킨다. 다음에 x 축 방향의 리니어 스케일과 z 축 방

향의 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.

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

Items	Specifications
Measuring standard	DIADUR phase grating on steel
Grating period:	8 μm
Thermal expansion coefficient:	$\alpha_{therm} \approx 10 \text{ ppm/K}$
Output signals/	$\sim 1 \text{ Vpp}/$
Signal periods	4 μm
Accuracy grades	$\pm 2 \mu\text{m} (\pm 0.00008 \text{ in.})$
Recomm'd meas. steps	1 μm to 0.1 μm
Measuring lengths	ML340 mm(13.4 in.) ML540 mm(21.3 in.)
Power supply	5V±5%/ $<150 \text{ mA}$ (with terminating resistor $Z_0=120\Omega$)

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

Item	Specifications
Signal inputs	2×~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 1과 2는 원 운동정도 측정 시스템 구성에 사용된 리니어 스케일과 PC 카드의 제원이다. 여기에서 보면, 리니어 스케일의 분해능은 0.1 μm 이고, PC 계수 카드(PC counter card)는 2 채널의 사인파(sine wave)를 1 Vpp로 입력하여 1024-배(1024-

fold)할 수 있도록 되어 있다.

5. 원 운동정도 측정 방법

원운동의 측정은 NC 선반의 회전운동에서 일정한 시간간격으로 1회전하는 동안의 운동오차를 읽어 들이는 것으로 NC 선반의 운동정도를 평가할 수 있는 방법이다.

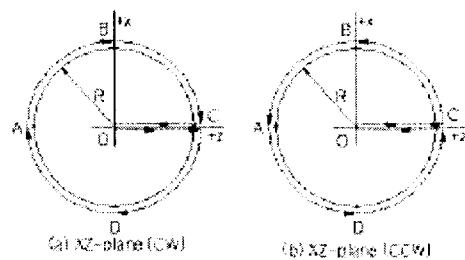


Fig. 4 Paths of ATC on circular motion accuracy test

NC 선반에서 원 운동정도 측정은, Fig. 4(a)에서 보여주는 바와 같이, ATC 공구대의 운동은 O 점에서 시작하여 C 점을 지나 D,A,B를 거쳐 다시 C 점을 지나 O 점으로 되돌아올 때까지 이다.

또한 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)처럼 시계방향(CW)회전과 반시계 방향(CCW)회전을 동일한 조건을 주어 측정한다. Fig. 4(b)의 궤적은 O 점을 시작으로 하여 C→B→A→D→C→O 순서로 이동한다. 측정 데이터는 처음부터 끝까지 받아들여 데이터의 처리시에 선별하여 불필요한 데이터를 제거하고 사용하였다.

이때 리니어 스케일의 장점을 살려 원의 크기 변화를 다양하게 적용하고, 이 속도의 변화를 주어가며 데이터를 측정한다.

리니어 스케일은 운동시의 변위에 따라 전기적 펄스를 보내고 인터페이스 카드를 통해 컴퓨터로 읽어 들린다.

컴퓨터에서는 1초에 18.2개의 시작 펄스가 나오는데, 이것을 이용하여 리니어 스케일에서 측정 데이터를 일정한 시간간격으로 받아 들인다.

측정 데이터를 얻는 시간 간격은 컴퓨터에서 나오는 틱(ticks)수로서 1~2 틱 간격으로 측정 데이터를 얻는다.

원 운동정도 시험에서 측정 데이터를 얻는 프

로그램의 플로우 차트는 Fig.5 와 같다.

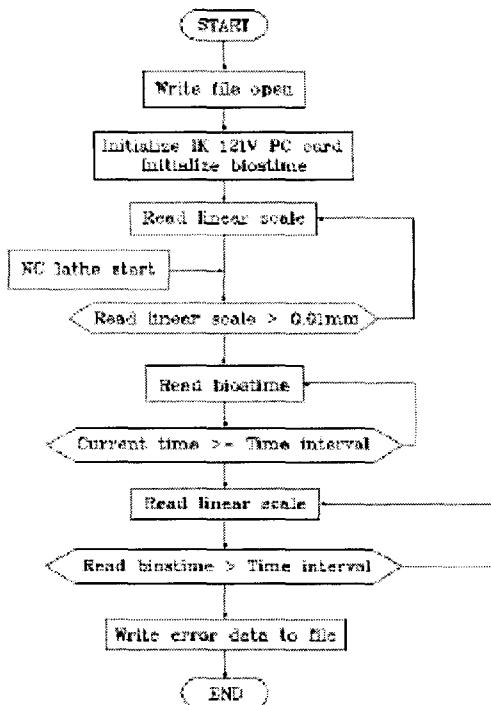


Fig. 5 Flow chart for data acquisition of circular motion accuracy

6. 측정 데이터의 처리

오차 데이터의 파일을 만들어, 분석용 프로그램에 의해 원 운동오차의 최대 변동범위와 변동폭 그리고 평균, 분산, 평균편차, 표준편차, 등을 구하고, 직선 운동오차의 변동양상을 그래프로 모델링하였다.

분산(Variance)은 오차 데이터의 변화폭의 상대적인 표현이라고 할 수 있고, 표준편차는(Standard deviation)는 분산의 제곱근으로 계산되는 것으로, 평균(Mean)에 대한 오차들의 편차의 정도를 나타낸다. 또한, 평균편차(Average deviation)는 평균에 대한 오차데이터의 편차의 절대값의 총합을 샘플 수로 나눈 것으로, 표준편차는 약간 추상적인 개념인 데 반하여 평균편차는 보다 더 실제적인 편차 값이다.

원 운동정도 시험에서 얻어진 측정 데이터의

편향을 제거하기 위해서 데이터의 표준화 처리를 하여야 한다.

그리하여, 진원도(circularity)는 원 운동의 최대 오차와 최소 오차의 차로서, 다음과 같이 구하게 된다.

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

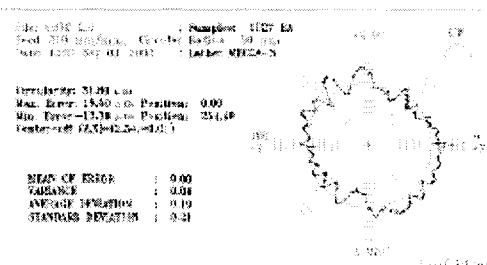
여기서 C_r : 원 운동의 진원도(μm)

ΔR_{\max} : 원 운동의 최대 오차(μm)

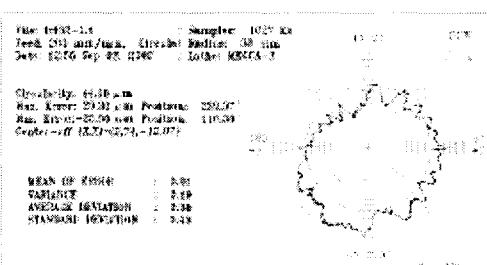
ΔR_{\min} : 원 운동의 최소 오차(μm)

7. 실험 결과

원 운동정도 측정에 의해 얻은 데이터를 그림으로 모델링한 것을 보여 주고 있다. 여기에서 보면



(a) Counter clock-wise path of ATC (CW)



(b) Counter clock-wise path of ATC(CCW)

Fig. 6 Results and analysis of circular motion accuracy test (feed : 200 mm/min)

Fig 6 은 원의 회전반경이 $r = 30 \text{ mm}$ 이며, 이 속도 $f = 200 [\text{mm}/\text{min}]$ 를 주어 시계방향과 반시계방향에 대하여 원 운동 오차데이터를 측정한 것을 그림으로 표시한 것이다. 그림에서 오차의 크기는 $5 \mu\text{m}/\text{division}$ 로 나타내었으며, Fig 6(a)는 시계방향을 Fig 6(b)는 반시계 방향의 오차운동을 나타낸 것이다. 여기에서 보면 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 에서 불스크류의 백래시(Back-lash)오차가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Table 3은 시계방향과 반시계 방향의 오차운동의 특성을 비교하기 위하여 표로 정리한 것으로, 원의 진원도와 각 오차에 대한 측정의 결과는 시계방향의 오차운동이 반시계 방향의 오차운동보다 더 양호한 것을 알 수 있다.

Table 3. Comparison of results of analysis between the CW and the CCW

(Feed : 200 mm/min)

Measuring Direction	CW	CCW
Circularity (μm)	31.80	44.10
Max. Error (μm)	18.50	20.30
Min. Error (μm)	-13.30	23.80
Center off Z	2.34	2.74
Center off X	-0.01	-12.07
Mean of Error	0.00	0.01
Variance	0.04	0.19
Average Deviation	0.19	0.38
Standard Deviaition	0.21	0.43

8. 결론

NC 선반에서 원 운동정도 측정 장치의 제작 및 시스템의 구성, 그리고 원 운동정도 측정 실험에서 얻어진 데이터를 분석하고, 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 광학식 리니어 스케일 측정 시스템을 이용하여 NC 선반의 원 운동정도 측정을 위한 측정 시스템을 구축하고, 그 원 운동오차를 측정하고, 그 진원도를 수치로 표시하였다.

2) NC 선반의 원 운동정도 측정에서 얻어진 오차 데이터는 컴퓨터 프로그램에 의해 그 운동오차의 양상을 그림으로 모델링하였고, 또한, 오차

데이터의 평균, 분산, 표준편차, 평균편차등을 구하였다.

참고문헌

1. W. Knapp, "Test of the Three dimensional uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Application to the Machine Errors", Ann. CIRP, 32-1, pp. 459~462, 1982.
2. W. Knapp, and A. Wirtx, 1988, "Accuracy of Length Measurment and Positioning(Statical Measurement and Contouring Mode)", CRIP, Vol. 37, pp. 551~514.
3. M. Tsutsumi, Koji Sakai and J. S. Kim, "A New Measuring Method of Circular Movement of NC Machine Tools-Development of Alternative Method for Standardization-", Trans. of JSME, 58-545, pp. 271 ~276, 1992.
4. J. B. Bryan, "A Simple Method for Testing Measuring Machine and Machine Tools", Part 1, Principles and Applications, Precision Engineering, vol.4, no.2, pp.61~63, Apr.1982.