

NC 선반의 원 운동정도 측정장치의 개발

김영석*, 김재열*

Development of Measuring Units of Circular Motion Accuracy on NC Lathe

Young-seuk Kim* , Jae-yeol Kim*

Abstract

It is very important to test circular motion accuracy of NC machine tools as it affects all other machines machined by them in industries. In this paper, it has become possible to detect errors of linear displacement of radial directions for circular motion accuracy test using newly assembled magnetic type of linear scale so called Magnescale ball-bar system. It has also organized computer program systems using tick pulses come out from computer for getting error motion data at constant time interval in circular motion test on NC lathe. Error data gotten from test is expressed to plots and analysed to numerics by various statistical treatments.

Key Words : NC lathe(NC 선반), Circular motion accuracy(원 운동정도), Circular motion error(원 운동오차), Error motion(오차 운동)

1. 서 론

NC 선반의 운동정도와 성능은 산업현장에서 사용하는 다른 모든 기계들의 제작에 있어서 그 정밀도와 성능 및 기능적인 품질에 영향을 미치는 것으로, NC 선반의 성능과 정밀도의 향상을 위해서는 측정기 자체에 대한 연구와 측정방법, 오차운동의 표현방법과 NC 선반의 운동정도 표시방법, 그리고 그 오차운동의 원인분석 및 NC 선반의 개선방향 등에 대해서 필수적으로 연구되어야 한다.

지금까지 개발되어 사용되고 있는 원운동정도 측정방법

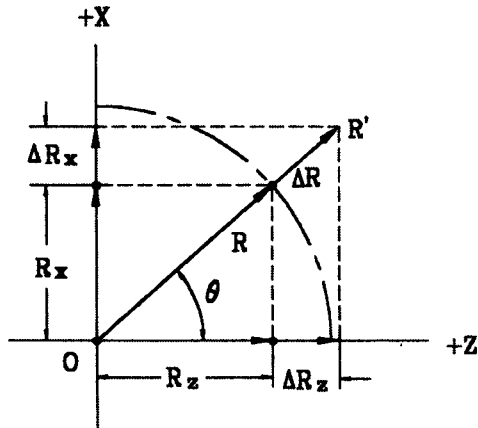
에는 Bryan의 TMBB법(Telescoping Magnetic Ball Bar Method)^{(1), (2)}, Knapp의 회전운동시험법(Circular Test Method)⁽³⁾, Kakino의 DBB법(Double Ball Bar Method)⁽⁴⁾, 그리고 Tsutsumi의 r- θ 법(r- θ Method)⁽⁵⁾ 등이 있다.

NC 선반의 원 운동정도 측정은 머시닝 센터에서와는 달리 지그를 별도로 제작하여야 하는 복잡성 때문에 많은 연구가 되어 있지 않아, NC 선반의 원 운동정도를 측정하기 위한 측정장치와 측정방법을 개발하고, 얻어진 오차 데이터를 분석하는 방법에 대하여 연구하려고 한다. 또한, 원 운동시험장치에 의한 오차를 최대한 줄이고, NC 선반

* 조선대학교 기계공학부
(김영석 ysakim@chosun.ac.kr)

의 주축 중심선과 실험장치의 마그네스케일 볼-바(Magnescale ball bar)의 중심정렬을 정확하고 쉽게 하기 위하여, 4개의 자유도를 갖는 볼-조인트(ball-joint)와 고정구(fixture), 그리고 공구선단에 해당하는 강구의 중심에 맞도록 3점 볼-좌(3 point ball seat)를 제작하였다. 그리하여, NC 선반의 ATC 공구대의 원 운동오차를 측정장치에서 받아들여, 이 오차 데이터의 수집을 위한 소프트웨어를 구성하고, 측정결과를 그림으로 모델링하고, 분석하기 위한 프로그램을 개발하였다.

2. 원 운동정도의 측정원리



Work coordinate system

Fig. 1 Measuring principle of circular motion error

NC 선반의 원 운동정도의 측정원리^{(6),(7)}는 ATC(Automatic Tool Changer) 공구대가 원 운동시에 지령한 기준원에 대하여 어느 정도의 오차를 가지고 운동하는가 하는 정도를 측정하는 것이다.

원 운동의 반경방향의 오차 또는 위치편차 ΔR 는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, 원운동의 중심 $O(0, 0)$ 에서 지령상의 원 운동의 위치 R 와 원 운동시에 NC 선반의 공구선단의 반경방향의 실제 측정거리 R' 와의 차로 다음과 같이 표시된다.

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

$$R' = R + \Delta R \quad (2)$$

여기서 R : 지령상의 기준원 운동의 반경(mm)

R' : 측정장치에서 실제 측정반경(mm)

ΔR : 원 운동에서 반경방향의 오차(mm, 또는 μm)

그러므로, Z 및 X-축방향의 투영 오차 또는 투영 위치편차 ΔR_z 와 ΔR_x 는 각각 다음과 같다.

$$\Delta R_z = R'_z - R_z \quad (3)$$

$$\Delta R_x = R'_x - R_x \quad (4)$$

여기서 NC 선반의 지령상의 원 운동의 반경을 $R(R_z, R_x)$ 라 하면, Z 및 X-축방향의 거리 R_z 와 R_x 는 다음과 같다.

$$R_z = R \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$R_x = R \cdot \sin \theta \quad (6)$$

여기서 θ : ZX-평면에서 Z-축을 기준으로 한 회전각(rad. 또는 deg.)이다.

또, 공구선단의 실제 측정한 반경을 $R'(R'_z, R'_x)$ 라 하면, Z 및 X-축방향의 실제 측정길이 R'_z 와 R'_x 는 각각 다음과 같다.

$$R'_z = R' \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$R'_x = R' \cdot \sin \theta \quad (8)$$

그러나 실제 측정시에는 원 운동정도 측정장치와 센서의 길이상의 제약 때문에, 원 운동의 반경방향의 오차 ΔR 를 측정하여 식 (2)에 의해 구한 데이터를 처리하여, 그 오차운동의 궤적을 모델링하거나 데이터를 분석하고 진원도를 구하게 된다.

3. 원 운동정도 측정시스템의 구성

원 운동정도 측정 시스템의 전체적인 계통도는, Fig. 2에서 보여주는 바와 같이, 마그네스케일 볼-바 시스템(magnescale ball-bar system)은 ATC 공구대의 원 운동시의 반경방향의 직선변위를 감지하고, 여기에서 감지된 오차의 크기는 감지기(detector)를 통하여 인터페이스 카드(interface card)를 거쳐 컴퓨터로 읽혀진다. 한편, 오차 데이터를 일정한 시간간격으로 받아들이기 위해서는, 컴퓨터에서 1초에 18.2개가 나오는 틱(tick)수를 이용하고, 또 이 틱수

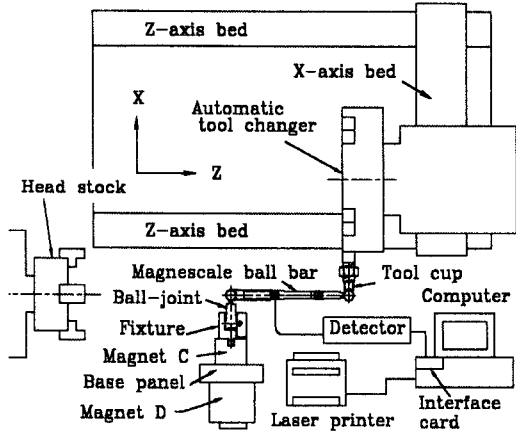


Fig. 2 Schematic diagram of measuring system

를 이용하여 회전각도를 산출한다.

원 운동정도 측정에 사용한 실험장치 본체는 Fig. 3에서 보는 바와 같이, 강구(steel ball) A는 볼-조인트에 고정되어 있고, 마그네스케일 볼-바(magnescale ball-bar)는 양단에 자석 A와 강구 B가 고정되어 있고, 그 사이에 들어있는 마그네스케일은 길이 방향으로 입출하면서 오차를 감지하게 되어 있다. 그리고, 공구점(tool cup)은 강구가 자석 B(magnet B)에 의해 3점 볼-좌(3 point ball seat)에 밀착·접촉되어 운동할 수 있도록 되어 있다.

원 운동정도 측정시스템의 구성에 사용한 실험기기들의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of NC lathe and Magnescale ball-bar system

Item	Specification
NC Lathe	Model MECCA 3, Maker Nam-Seon(Korea) Basic Length Unit 0.001mm
Magnescale	Model, Maker DA100-005A, Sony(Japan), Measurement Range 5.2 mm
Detector	Model MD20A, Sony(Japan), Resolution 0.5 μ m, Output phase A B or Up/Down
Magnet A, B	Size (Dia. \times Length) ϕ 10 \times 10 mm
Magnet C	Model KM-04C, Maker Kanetec(Japan), Size (Dia. \times Height) ϕ 30 \times 25 mm
Steel Ball A, B	Diameter ϕ 1/2", Maker NTN(Japan) Sphericity 0.05 μ m
Fixture	Material: Acetal
3 point ball seat	Material: Chromium Brass

4. 원 운동정도의 측정방법

원 운동정도 측정은 NC 선반의 회전운동에서 일정한 시간간격으로 반경방향의 운동오차를 읽어 들이는 것으로, NC 선반의 운동정도를 평가할 수 있는 대표적인 방법이라고 할 수 있다.

NC 선반에서 원 운동정도 측정은, Fig. 4에서 보여주는 바와 같이, 시계방향의 회전운동에서는 ATC 공구대의 공구선단(tool edge)을 원 운동의 회전중심에서 Z-축방향으로 -149.41 mm, X-축방향으로 -13.073 mm 이동시켜 두고, A점에서 B점까지는 컴퓨터 프로그램에 NC 선반의 회

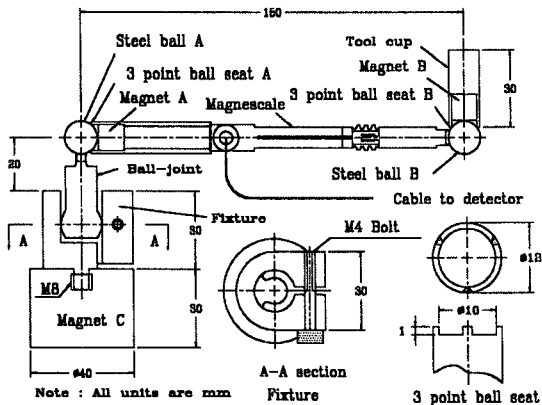


Fig. 3 Measuring unit of circular motion accuracy

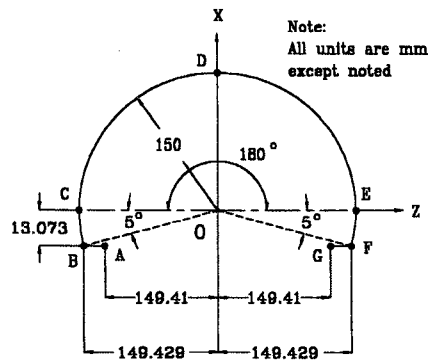


Fig. 4 Paths of tool edge on circular motion test unit

전운동의 시작을 알리는 신호로서 이용하기 위한 것이다.

B점에서 시작하여 190° 회전시키면서, C점에서 데이터를 얻기 시작하여 E점까지 180° 회전하는 동안의 데이터를 수집하도록 되어 있고, 처음과 마지막 5° 회전하는 동안은 데이터를 얻지 않는 공회전을 하게 된다. 이것은 ATC 공구대의 회전운동의 처음 시작과 마지막 정지시의 데이터를 제외시키기 위한 것으로, ATC 공구대는 보통 안내면상에서 유막위에 부유된 상태에서 이송이 진행되지만, 처음 시작과 마지막 정지시에는 유막이 파괴되어 고체 접촉을 하기 때문에 불안정한 데이터들이 얻어질 수 있기 때문이다.

다음에, F점을 지나 G점에서 회전운동을 완료한다. 또한, 반시계 방향의 회전운동에서는 G점에서 시작하여 그 역순으로 A점에서 회전운동을 완료한다.

원 운동정도 측정에서 중심정렬은 ATC 공구대의 회전 중심에서 회전반경만큼 정확히 위치결정하여야 한다. 그렇지 않으면 오차값들이 편위를 일으키고, 커지는 요인이 된다. ZX-평면상에서 중심정렬을 하기 위해서는, Fig. 5에

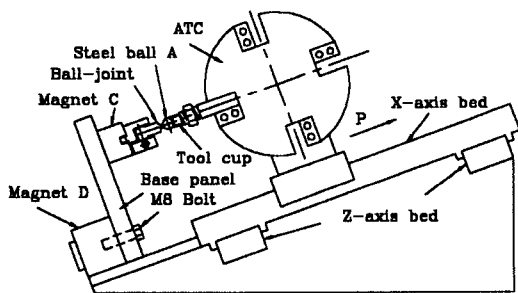


Fig. 5 Centering of ball-joint and ATC tool edge

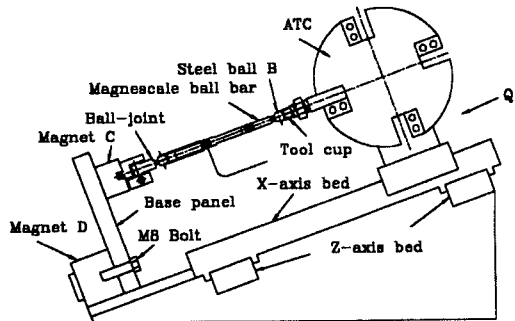


Fig. 6 Setting of magnescale ball-bar and ATC tool cup

서 보여주는 바와 같이, NC 선반의 X-축 베드와 평행한 평면위에 베이스 패널(base panel)을 자석 D와 함께 고정시키고, 고정구(fixture)의 고정용 볼트(M4 bolt)를 풀어 볼-조인트(ball-joint)가 고정구안에서 자유롭게 움직일 수 있도록 한 후, ATC 공구대를 접근시켜, 볼-조인트의 강구 A와 ATC 공구대의 공구컵(tool cup)의 3점 볼-좌(3 point ball-seat)를 자석 B에 의해 접촉시킨다. 다음에, 고정용 볼트(M4 bolt)를 죄여 볼-조인트를 고정시키고, ATC 공구대를 화살표 P의 방향으로 155 mm 올려, 볼-조인트와 ATC 공구대의 공구컵(tool cup)을 분리시킨다.

다음에, 마그네스케일 볼-바(magnescale ball-bar)를 볼-조인트와 ATC 공구대의 공구컵사이에 넣고, ATC 공구대를 화살표 Q의 방향으로 5 mm 접근시켜, Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 측정장치를 셋팅한다.

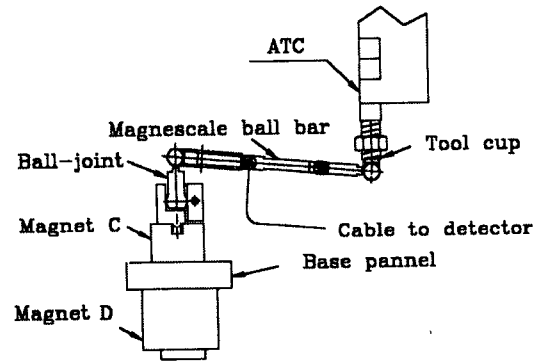


Fig. 7 Start point of circular motion

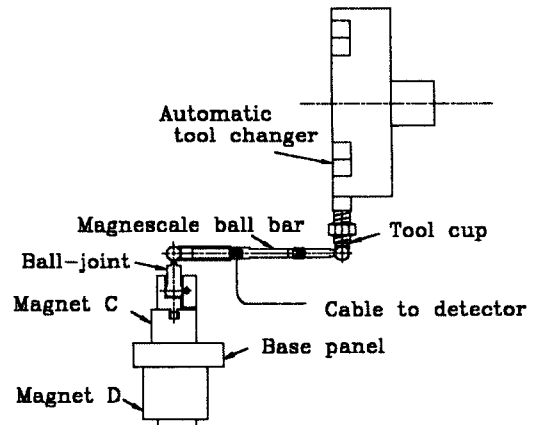


Fig. 8 Start point of measuring

Fig. 7은 NC 선반의 ZX-평면상에서 원 운동 시작점의 위치 즉, Fig. 4의 G점에 해당하는 위치를 보여주고 있고, Fig. 8은 데이터를 받아들이기 시작하는 E점(Fig. 4)을, 그리고 Fig. 6은 D점(Fig. 4)의 위치를 보여주고 있다.

5. 측정 데이터의 수집

원 운동정도 시험에서 일정한 간격으로 측정 데이터를 수집하기 위한 시간간격은 컴퓨터에서 1초에 18.2개의 틱수(ticks)를 이용한다. NC 선반의 ATC 공구대가 1/2회전하는 동안의 틱수 t_h 와 데이터를 얻는 시간간격 t_g 및 회전각 θ_j 의 산출은 다음과 같이 계산한다.

$$t_h = 18.2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{2 \cdot F / 60} = 1092 \cdot \frac{\pi \cdot R}{F} \quad (9)$$

$$t_g = t_h / N \quad (10)$$

$$\theta_j = \pi \times j / N \quad (11)$$

여기서 t_h : NC 선반의 ATC가 1/2회전하는 동안의 틱수(ticks)

- R: 원 운동의 반경(R=150 mm)
- F: ATC 공구대의 이송속도(mm/min)
- t_g : 데이터를 얻는 시간간격(ticks)
- N: 총 샘플수
- j: 샘플점(j=1~N)
- θ_j : j 샘플점의 회전각(radian)

원 운동정도 시험에서 측정 데이터를 얻는 컴퓨터 프로그램의 플로우 차트는 Fig. 9와 같다. 먼저, 파일 이름과 이송속도, 대략적인 측정 데이터의 수를 입력하고, 1/2회전의 틱수, 데이터를 얻는 시간간격 그리고, 5° 회전할 동안의 틱수를 계산하여, 파일을 열고, 마그네스케일의 현재 위치를 초기화하여 영(0)으로 놓는다. 다음, NC 선반의 시작 버튼을 누르면 ATC 공구대가 움직이게 되고, Fig. 4의 A-B, 또는 G-F 단계에서 오차가 0.01 mm 이상 커지므로, 이 시점에서부터 5° 회전할 동안의 틱수에 달할 때까지는 오차 데이터를 기록하지 않는다.

다음에, C점 또는 E점에서부터 오차 데이터를 받아들이기 시작하여 시계방향은 C-D-E, 그리고 반시계방향은 E-D-C를 거치게 된다. NC 선반의 ZX-평면에서는 측정장치의 구조상 ATC 공구대가 원 운동의 1/2회전하는 동안의 오차 데이터를 수집하여 그림으로 모델링하고 분석하

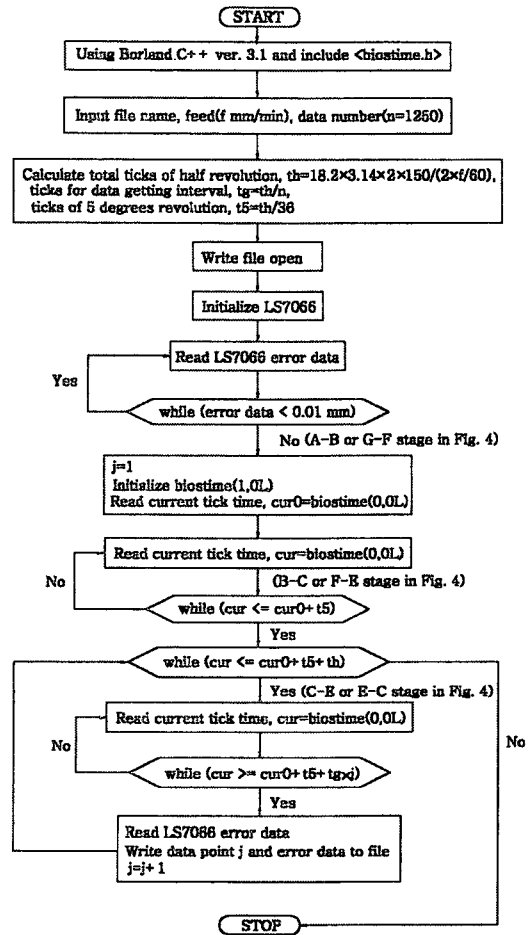


Fig. 9 Flow chart for data obtainment

게 된다.

여기에서, 샘플수 n=1250은 데이터를 얻는 틱수를 계산하기 위하여 입력하는 것으로, 실제 수집된 샘플수하고는 약간 다를 수 있다. 또한, 샘플링 시간간격을 1틱이하로 하면, 데이터를 얻는 시간간격이 일정하지 않으므로, 최소 샘플링 시간간격은 1틱으로 하는 것이 바람직하다.

6. 측정 데이터의 처리

원 운동정도 시험에서 얻어진 오차데이터는 기준 좌표계의 중심에서 편심되어 있는데, 그 원인은 첫째, 측정장치 중심에서 NC 선반의 회전 반경값 만큼 정확히 위치결

정을 하지 못한 경우, 둘째, 측정기 자체의 부정확한 제작 및 조립, 특히, 마그네스케일 볼-바의 진직도의 불량, 셋째 측정장치의 마그네스케일 볼-바의 중심선과 ATC 공구대의 공구궤의 중심선이 동일 평면상에서 교차하지 않는 경우로 대별할 수 있다.

원 운동정도 시험에서 얻어진 측정 데이터의 편향을 제거하기 위하여는, 데이터의 표준화 처리를 하여야 한다. 이것은 N개의 데이터값의 집합

$$\{u_j\} \quad j=1,2,\dots, N \quad (12)$$

에서 표본평균은 다음과 같다.

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \quad (14)$$

\bar{u} 는 표본평균으로, 표본 데이터의 값들은, 오차 데이터의 원 운동의 편향을 제거하기 위하여, 각 샘플값에서 식 (14)의 표본평균을 빼주어, 표본평균이 영(0)인 새로운 값들로, 다음과 같이 바꾸어 주어야 한다.

$$x_j = u_j - \bar{u}, \quad j=1,2,\dots, N \quad (15)$$

모든 잇따르는 식들은 변형된 데이터 $\{x_j\}$ 에 의하여 서술될 것이다. 이 변환된 표본 데이터 $\{x_j\}$ 의 분산 s^2 은 다음과 같다.

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N x_j^2 \quad (16)$$

그리고, 분산의 제곱근 s는 표준편차이다.

모든 샘플점들의 오차값들을 기록지의 ZX-좌표계의 원점 기준으로 ZX-좌표계상의 편위중심점을 다음과 같이 구한다.

$$z_c = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta z_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta R_j \cdot \cos \theta_j \quad (17)$$

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta x_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta R_j \cdot \sin \theta_j \quad (18)$$

여기서 j : 각 샘플점의 위치값 ($j=1 \sim N$)

N : 총 샘플수

z_c : Z-축의 편위중심(mm)

x_c : X-축의 편위중심(mm)

ΔR_j : 반경방향의 오차(μm)

θ_j : 각 샘플점의 회전각(rad.)

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

$$C_r = \Delta R'_{\max} - \Delta R'_{\min} \quad (19)$$

여기서 C_r : 원 운동의 진원도(μm)

$\Delta R'_{\max}$: 최대오차(μm)

$\Delta R'_{\min}$: 최소오차(μm)

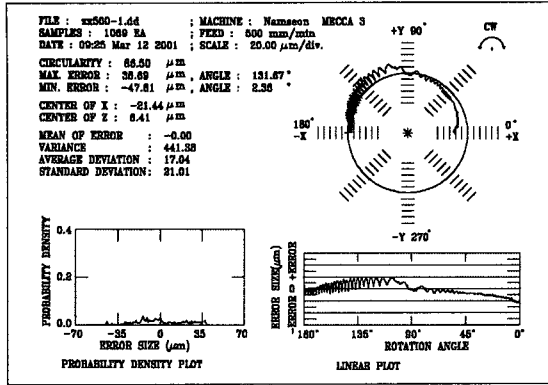
7. 실험결과 및 고찰

측정결과는 Table 2와 Fig. 10에서 보여 주는 바와 같이, 또 실험에 사용한 NC 선반은 시계방향과 반시계방향의 진원도와 오차운동의 궤적이 다르게 나타나고 있는데, 이것은, 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)의 양방향 동일성이 좋지 않다는 것을 나타내고 있다. 또, 확률밀도의 그림에서 보여 주는 바와 같이, 시계방향의 오차 데이터가 반시계방향의 오차 데이터보다 널리 퍼져 있고, 또, 분산(variance), 평균편차(average deviation), 표준편차(standard deviation)등이 크다고 하는 것은 시계방향의 진원도(circularity)가 좋지 않다는 것을 더욱 확실하게 보여 주고 있다.

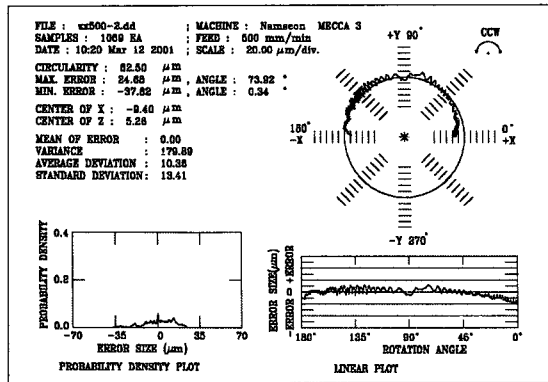
오차 데이터의 양상을 직선상으로 펼쳐보인 것은 각 위치의 오차운동의 모양과 크기를 보다 명확하게 볼 수 있다는 것이다.

Table 2 Results of circular motion accuracy test
(Feed: 500 mm/min)

Measuring Direction	CW	CCW
Circularity(μm)	86.50	62.50
Max. Error(μm)	38.69	24.68
Min. Error(μm)	-47.61	-37.82
Center off Z	6.41	5.26
Center off X	-21.44	-9.40
Mean of Error	0.00	0.00
Variance	441.38	179.89
Average Deviation	17.04	10.36
Standard Deviation	21.01	13.41



(a) Clock-wise path of tool edge



(b) Counter clock-wise path of tool edge

Fig. 10 Results of circular motion accuracy test

8. 결론

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

- (1) NC 선반의 원 운동정도 시험에서, NC 선반과 실험 장치의 정확한 중심점결과, 공구선단이 회전반경만큼 이동할 때, 높은 정밀도의 위치결정이 되지 않으면 불량한 오차 데이터가 진원도와 분석결과에 영향을 미치게 된다.
- (2) NC 선반의 원 운동정도 시험에서, 컴퓨터의 틱수를 이용하여 오차 데이터를 샘플링할 때, 1 틱(Tick) 이하로 하는 것은, 샘플링 수가 일정하지 않아 오차 데

이터의 처리결과에 약간의 영향을 미칠 수 있다.

- (3) 본 원 운동시험에 사용한 NC 선반은 시계방향과 반시계방향의 진원도와 원 운동의 오차계측에서 차이가 나타나는 것은, NC 선반의 양방향 동일성과 선삭 가공품의 호환성에서 그 적부성이 재고되어야 한다.

후 기

이 논문은 2000년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) 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
- (2) J. B. Bryan, "A Simple Method for Testing Measuring Machine and Machine Tools", (Part 2, Construction and details), Precision Engineering, vol. 4, no. 3, pp. 125~128, Jul. 1982
- (3) 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
- (4) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara, Aketoshi Kamei and Toru Ise, "NC工作機械の運動精度に関する研究(第1報) -DBB法による運動誤差の測定と評価-", 精密工學會誌 52-7, pp. 85~90, 1986
- (5) 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, 58C-545, pp. 271~276, 1992
- (6) DBB法によるNC工作機械の精度評價法, 垣野義昭, 井原之敏, 藻原章翁, REALiZE INC., 1990
- (7) M. Burdekin, W. Jywe, "Application of Contisure for the Verification of Contouring Performance of Precision machines." 6th International Precision Engineering Conf., Brounschweig, Germany, 1991