

## 머시닝센터의 원운동정도 측정시스템의 구성

(Organization of Measuring System of Circular Motion Accuracy of Machining Center )

김 영 석\*

남 공 석

(조선대 정밀기계공학과) (충남대 기계공학과)

### ABSTRACT

In recent years, it has been variously developed for testing the accuracy of circular motion of NC machine tools, for example Telescoping Ball Bar Method by Bryan, Circular Test Method by Knapp and r-θ Method by Tsutsumi etc., but it is not yet settled in the code of measuring methods of motion errors of NC machine tools, because of errors of measuring units and sensors, and also especially the difficulties of centering of measuring units.

In this paper, in use of magnetic type linear scale with resolution of 0.5 μm and tick pulses come out from computer, it has become possible for detecting of linear displacement of radial errors and measuring of revolution angle of circular motion of NC machine tools.

오늘날의 기계부품 특히 금형부품은 인간의 미적감각에 맞추어 곡면형상을 요구하는 경향이 두드러지게 나타나고 있다. 이와 같은 인간의 욕구를 충족시키기 위하여 공작기계의 기능 또한 무한히 발달되어 가고 있는 실정이다. 공작기계중에서도 특히 각종 NC 공작기계의 발달은 인간의 기능을 추월하여, 인간의 기능으로서로는 도저히 가공할 수 없을 정도의 복잡하고 정교한 가공을 NC 공작기계는 수행해 낼 수 있게 되었다.

이와 같이 복잡하고 정교한 가공을 할 수 있는, 높은 고기능의 NC 공작기계의 운동정밀도를 측정할 수 있는 각종 계측장비들이 새롭게 개발되거나, 또 개선되고 있는 실정이다. 아울러, 측정데이터들의 분석과 종합에 의한 오차의 원인과 대책뿐 아니라, NC 공작기계의 정밀도의 표현방법에 대해서도 개발되고 있다.

NC 공작기계의 운동정도 측정방법에는 여러가지가 있으나, 그 중에서도 원운동정도측정, 위치결정운동측정, 및 회전과 직선반복운동측정(회전과 직선)등이 대표적으로 행해지고 있다. 원운동정도측정은 가공되어 나온 원형제품의 정밀도를 측정하는 방법과, 무부하 상태에서 주축을 회전시키지 않고 NC 공작기계의 테이블의 원운동시의 정밀도를 측정하는 두가지 방법이 있으나, 전자는 가공물과 공구의 재질 및 기계적성질, 가공조건등에 따라 달라지므로 후자의 경우를 주로 채택하여 측정하고 있다. 위치결정운동측정과 회전과 직선반복운동측정등은 테이블위에 하중을 올려놓은 부하상태 및 무부하상태에서 행할 수 있다.<sup>[1] [2]</sup>

원운동정도측정에 관한 규정은 ISO 230-1<sup>[3]</sup>에 규정된 바와 같이, 실험장치 본체는 테이블위에 고정되어 있고, 머시닝 센터의 스펀들축에 고정된 원형봉(Cylindrical bar)과 전기탐촉자(Electrical probe)사이의 틈새변화를 반경방향으로 감지하게 되어 있다. 그러나, 이것은 중심정렬이 어렵고, 회전고정구(Rotary fixture)의 회전 운동정밀도에 오차가 포함되어 측정에 영향을 미친다고 볼 수 있다.

지금까지 개발되어 사용되고 있는 원운동정도측정방법에는 Bryan의 Telescoping Ball Bar Method [ DBB(Double Ball Bar) Method ]<sup>[4]</sup>, Knapp의 회전운동시험법(Circular Test Method)<sup>[5]</sup>, 그

리고 Tsutsumi의 r-θ법(r-θ Method)<sup>[6]</sup>등이 있다.

DBB법<sup>[4]</sup>은 봉(Bar)의 중간에 모아레형(Moire type)의 광전형 센서(Optical sensor)를 삽입하고, 봉(Bar)의 양단에 각각 강구(Steel Ball)를 부착시켜, 공작기계의 스펀들과 봉(Bar)의 회전중심에 각각 자석(Magnet)을 이용하여 이탈하지 않도록 지지하고 있다. DBB법은 회전각의 검출은 행해지지 않고, 원호보간이송시의 원주속도와 컴퓨터의 샘플링 시간(Sampling time)에서 계산되는 회전각을 이용하여 극좌표로 표시한다.

회전운동시험법(Circular Test Method)<sup>[5]</sup>은 높은 정밀도를 갖는 마스터-링(Master ring)을 제작하여 진원도시험을 거친후, 접촉식의 2차원 탐촉자(Probe)변위계를 사용하여 마스터-링(Master ring)의 회전정밀도를 측정하는 것이다. 이것은 마스터-링(Master ring)의 정밀도, 2차원 탐촉자(Probe)와 마스터-링(Master ring)의 접촉시의 마찰 및 마모에 의해 영향을 받는다고 볼 수 있다.

NC 공작기계의 운동오차의 종류에는 여러가지가 있고, 그 발생원인 또한 여러가지가 복합되어 일어나기 때문에 정확한 규명을 하기가 어려운 형편이나 차츰 그 원인을 규명하여 공작기계의 정밀도를 높여려는 움직임이 활발히 진행되고 있다.<sup>[6][7][8]</sup>

r-θ법(r-θ Method)<sup>[6]</sup>은 전기탐촉자(Electrical probe)와 로터리 엔코더(Rotary encoder)를 사용하여 반경방향의 변위와 회전각도로 원운동정도를 측정한다. 이것은 회전각을 정확히 분할하여 샘플링 할 수 있는 장점이 있으나, 회전축에 구름베어링을 사용하였기 때문에 베어링의 정밀도에 의해 영향을 받을 수 있다.

그러나, 위에 열거한 측정기들은 설치시에 측정기의 회전중심과 공작기계의 스펀들축의 중심정렬(Centering)에 어려움이 있어서, 최근에는 영국의 Renishaw 회사에서 개발한 것으로, DBB법과 원리는 같으나, 중심정렬의 어려움을 제거하기 위하여 공작기계의 스펀들축을 측정기 센터에 맞추는 것이 아니고, 특수하게 고안한 강구(Steel Ball)가 부착된 Base Alignment를 조정하여 NC 공작기계의 스펀들축에 부착된 자석(Magnet)에 움직여 중심정렬하기 때문에 편리한 점이 있다.

미소변위측정용 센서에는, 광학적인 간섭현상을 이용하여 각종 반도체 수광소자와 파장이 일정한 레이저광을 이용하는 레이저간섭

계가 있고, 또 교차된 줄무늬를 갖는 박육 통과하는 발광다이오드의 명암의 변화를 각종 반도체수광소자로 받아들여 전기적인 펄스 신호로 출력하는 모아레형(Moire type)이 있다. 전기적인 갭 센서 Gap sensor)에는 가변인덕턴스원리를 이용한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 비롯하여 정전용량형의 커패시턴스 센서(Capacitance sensor)등이 있고, 특수한 코우팅막에 치밀한 자성체를 넣은 자석형(Magnetic type)의 마그네스케일(Magnescale)등이 있다. 각종 센서의 분해능(Resolution)은 1펄스당 0.001mm의 BLU(Basic Length Unit)를 갖는 NC 공작기계의 경우에는 1 μm 이하의 분해능을 가져야 한다.

본 연구에서는 변위센서로는 자석형(Magnetic type)의 마그네스케일(Magnescale)을 이용하고, 각변위 측정은 컴퓨터에서 나오는 틱(Tick)수를 이용하여 측정시스템을 구성하여, 머시닝 센터의 원운동정도를 측정하려고 한다.

## 2 원운동정도의 측정원리

NC 공작기계에서 원운동정도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 기계원점  $O(0, 0, 0)$ 로 놓고 NC 공작기계에서 지평상의 원운동의 중심의 위치를  $o(X_0, Y_0, Z_0)$ 라 하고, 지평상의 원운동의 반경을  $R(R_x, R_y, R_z)$ 라 하면, 지평상의 원운동의 위치  $P(X_0+R_x, Y_0+R_y, Z_0+R_z)$ 와 원운동시에 공구선단이 실제로 어느 위치  $P'(X_0+R_x', Y_0+R_y', Z_0+R_z')$ 에 있는가를 측지하여 그 차이를 계산하여 정확한 원운동을 하는가를 측정하는 것으로, 오차  $\Delta R(\Delta R_x, \Delta R_y, \Delta R_z)$ 는 다음식으로 정의한다 [10].

$$\begin{aligned} \Delta R &= P' - P \\ \text{또는 } \Delta R &= R' - R \\ \therefore R' &= R + \Delta R \end{aligned} \quad (2.1)$$

이고, 여기서  $R'(R_x', R_y', R_z')$ 는 공구선단의 실제 위치이다. 그러므로, 각 X, Y 및 Z-축방향의 오차  $\Delta R_x, \Delta R_y$  및  $\Delta R_z$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= R_x' - R_x \\ \Delta R_y &= R_y' - R_y \\ \Delta R_z &= R_z' - R_z \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기에서 NC 공작기계의 지평상의 진원의 반경을  $R$ 라 하면 각 X, Y 및 Z-축방향의 반경의 길이  $R_x, R_y$  및  $R_z$ 는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} R_x &= R \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \\ R_y &= R \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi \\ R_z &= R \cdot \sin\theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

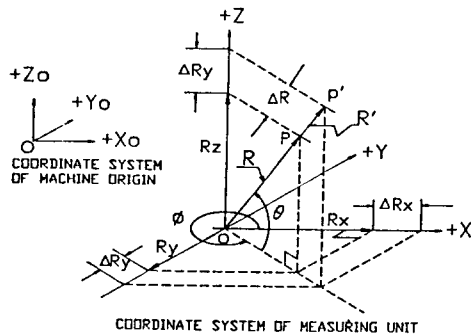


Fig. 1 Measuring Principles of Circular Motion Errors.

또, 실제 측정된 반경길이를  $R'$ 라 하면 각 X, Y 및 Z-축방향의 실제의 반경의 길이  $R_x', R_y', R_z'$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_x' &= R' \cdot \cos\theta' \cdot \cos\phi \\ R_y' &= R' \cdot \cos\theta' \cdot \sin\phi \\ R_z' &= R' \cdot \sin\theta' \end{aligned} \quad (2.4)$$

그러므로 실제 측정시에는 원운동반경의 오차  $\Delta R$ 를 측정하여  $R' = R + \Delta R$ 에 의해 구한 데이터를 처리하여 그 오차의 개적을 모델링하거나 진원도를 구하게 된다.

## 3. 실험장치 및 중심정렬(Centering)

본 연구에 사용한 사용한 실험기기들의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. 실험기기들의 제원

[A] 리니어 스케일(Linear scale)	
모델명, 제조회사	DA100-005A, SONY (일본)
측정범위(가동길이)	5.2 mm
측정오차	0.002 mm
사용온도범위	0 ~ 50 ° C
[B] 감지기(Detector)	
모델명, 제조회사	MD20A, SONY(일본)
분해능	0.5 μm
출력상	A·B상 및 Up /Down상
사용온도범위	0 ~ 55 ° C
[C] 자석(Magnet) A, B	
크기(직경 x 길이)	φ10 x 10 mm
흡인력	60kgf
[D] 자석(Magnet) C	
모델명, 제조회사	KM-04C, KANETEC (일본)
흡인력	30kgf
[E] 머시닝 센터	
모델명, 제조회사	VMC-650, 화천기계 (한국)
Controller	FANUC 0M
BLU(Basic Length Unit)	0.001mm
[F] 강구(Steel Ball)	
직경, 제조회사	φ1/2", NTN(일본)
진구도(眞球度)	정밀급, 0.05 μm이하

[G] RENISHAW BALL BAR SYSTEM

측정범위, 재조회사	±1 MM
센서, 분해능	LVDT, ±1 0.1 μm
상대변위 오차	±[1*(0점에서의 변위)+1μm]

본 연구에 사용한 실험시스템의 계통도는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 여기에서 리니어 스케일(Linear scale)은 원운동시의 반경방향의 직선변위를 감지한다. 여기에서 감지된 오차의 양은 감지기(Detector)를 통하여 인터페이스 카드를 거쳐 컴퓨터로 입력된다. 한편 회전각도의 산출은 컴퓨터에서 1초에 18.2개가 나오는 틱(Tick)수를 계산하여 각도를 산출하여 되어 있다. 컴퓨터에서 데이터를 변환하여 원운동오차계측을 컴퓨터 화면이나 레이저 프린터 또는 XY-플로터로 출력된다. 컴퓨터와 머시닝 센터는 RS-232C로

본 연구에 사용한 실험장치의 계통도는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 여기에서 리니어 스케일(Linear scale)은 원운동시의 반경방향의 직선변위를 감지한다. 여기에서 감지된 오차의 양은 감지기(Detector)를 통하여 인터페이스 카드를 거쳐 컴퓨터로 입력된다. 한편 회전각도의 산출은 컴퓨터에서 1초에 18.2개가 나오는 틱(Tick)수를 계산하여 각도를 산출하여 되어 있다. 컴퓨터에서 데이터를 변환하여 원운동오차계측을 컴퓨터 화면이나 레이저 프린터 또는 XY-플로터로 출력된다. 컴퓨터와 머시닝 센터는 RS-232C로 접속되고 머시닝 센터 구동용의 NC 프로그램이 전송된다.

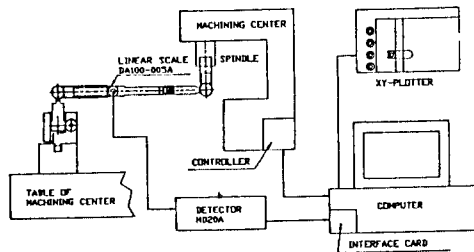


Fig. 2 Schematic Diagram of Measuring System.

본 연구에 사용한 실험장치본체는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 두개의 강구(Steel ball) 사이에 리니어 스케일(Linear scale)을 삽입하고 두개의 자석(Magnet)과 3점지지볼좌(3 Point Ball Seat)에 접속되어 가능한 정확한 원운동을 하도록 하였다.

NOTE: MATERIALS ARE BRASS EXCEPT SPECIFIED.  
① IS ACETAL.

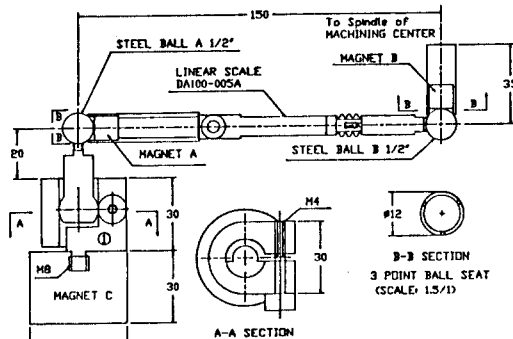


Fig. 3 Measuring Unit.

리니어 스케일(Linear scale)은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 자석 형태로, 축방향으로 이동하면서 측정의 초기점을 0로 하여 오차의

변위량을 감지하여 A,B상을 조합하여 0.5 μm의 분해능을 10진수로 나타내게 되어 있다.

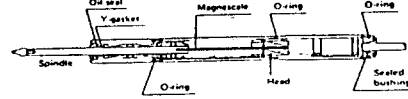


Fig. 4 Linear Scale DA100-005 (SONY)

실험장치와 머시닝 센터의 스피indle축의 중심정렬에는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 자석 C를 머시닝센터의 테이블위에 부착시켜 고정시키고, 볼트를 풀어 4자유도 봉이 자유롭게 움직일 수 있도록 한 후 머시닝센터의 스피indle을 이동시켜 강구 A와 3점지지볼좌를 자석에 의해 접촉시킨다. 다음에 볼트를 죄어 4자유도 봉을 고정시키고, 스피indle을 움직여 10 mm 위로 올린 다음 원운동의 반경만큼 이동시키고, 다시 추축을 10 mm 아래로 내린다.

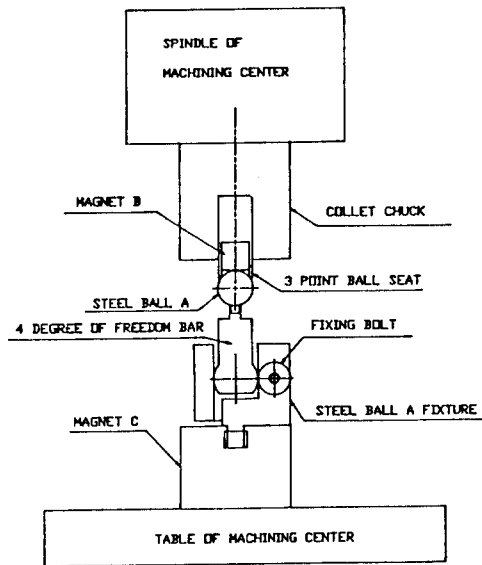


Fig. 5 Centering of Measuring Unit.

4. 실험방법

실험순서는 먼저 컴퓨터와 머시닝 센터를 가동시키고, 다음에 실험장치와 머시닝 센터 스피indle축과 지지대볼의 중심정렬을 행한 후, 스피indle을 Z-축 방향으로 10 mm 올린후, 원운동의 회전반경 만큼 이동시켜, 다시 Z-축 방향으로 10 mm 내린후, 리니어 스케일봉을 머시닝 센터 스피indle축의 지지볼좌의 자석과 지지대볼에 접촉시켜 지지시킨다.

XY-평면상에서는 스피indle을 원운동의 회전중심에서 Y-축 방향으로 149.99 mm 이동시켜 두고, 컴퓨터의 프로그램을 가동시킨후 측정용 시작한다. 이것은 150.00 mm까지 이동한 후에 테이블을 1 바퀴 만큼 회전시켜 1회전동안의 데이터를 채집하도록 프로그램이 구성되어 있다.

한편 ZX(또는 ZY)-평면상에서는 스피indle을 원운동의 회전중심에서 X(또는 Y)-축 방향으로 149.41 mm, Z-축방향으로 -10 mm 이동시켜 두고, 190° 회전시키면서 180° 회전하는 동안의 데이터를 채집하도록 되어 있다. 이것은 테이블의 회전운동의 처음 시작과 마지막 정지시의 데이터를 제외시키기 위한 것으로, 테이블은 보통, 안내면상에서 유박위에 부유된 상태에서 이동이 진행되지만, 처

움 시작과 마지막 정지시에는 유막이 파괴되어 고체접촉을 하기 때문에 불안정한 데이터들이 얻어질 수 있기 때문이다.

그리하여 각 평면상에서 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)의 데이터들을 얻어서 컴퓨터에 저장한뒤, 원운동오차가 분석되고 Autocad 패키지에서 그림으로 나타낼 수 있도록 되어 있다.

### 5. 데이터의 처리

실험중에 얻어진 데이터들은 파일(file)로서 컴퓨터 메모리에 저장되고, 다음에 분석프로그램에 의해 처리되어 진원도를 표시한다. 진원도의 표시방법에는 최소의접중심반경과 최대의접중심반경의 차로 표시하는 방법과 최소사승중심법에 의한 방법으로 구하였다.

최소의접중심반경과 최대의접중심반경의 차로 표시하는 방법은 리니어 스케일(Linear scale)의 초기점(Initial point)을 기준으로, 초기점 보다 큰 쪽을 +값(Rmax.), 작은 쪽을 -값(Rmin.)으로 정하여 그 오차의 절대값을 더하여 진원도(Circularity)로 표시하였다 (Fig. 1 참조).

최소사승중심법에 의한 방법은 모든 샘플점들의 반경값들을 다음 식에 의해 구하여 XY-좌표상의 편위중심점을 각각 X-축 편위중심(Center off X)과 Y-축 편위중심(Center off Y)으로 표시하였고, 평균반경(Average of Radius)을 구하였다.

$$ax = 2 \sum R_i \times \cos(\theta) / n \quad (4.1)$$

$$by = 2 \sum R_i \times \sin(\theta) / n \quad (4.2)$$

$$\theta = 2\pi \times i / n \quad (4.3)$$

$$ar = \sum R_i' / n \quad (4.4)$$

$$\Delta R_i = R' - R \quad (4.5)$$

여기서 ax : X-축의 편위중심 (mm)  
 by : Y-축의 편위중심 (mm)  
 R<sub>i</sub>' : 각 Sampling 점들의 실측반경값 (mm)  
 ΔR<sub>i</sub> : 각 Sampling 점들의 오차 (μm)  
 θ : 각 Sampling 점들의 라디안각  
 i : 각 Sampling 점의 위치값 (i = 1 ~ n)  
 n : Sample 수  
 ar : 평균반경 (mm)

### 6. 실험결과 및 고찰

이 측정실험에서 얻어진 결과는 Fig. 6과 같고, 여기에서 나타난 오차들의 종류와 그 원인들을 요약하면 다음과 같다.<sup>[11]</sup> 그러나 이 논문에서는 실험장치의 개발에 중점을 두었기 때문에, 나타난 오차의 체계적인 검증은 하지 않고, 단지 다른 자료에서 검증된 항목들에 의해 비교하여 설명한 것들이다.

#### 6.1 축 후진 스파이크(Axis Reversal Spike)

이것은 테이블의 원운동시에 각 축의 이송운동의 반환점에서 일어나는 뾰족한 못과 같은 짧은 후진운동으로, 이것은 이송속도에 따라 그 크기가 달라지는데, 그원인은 볼스크루우와 너트의 틈새가 너무커서 각 축의 반환점에서 순간적으로 속도가 0이 되어 중지하였다가 출발하는 데서 오는 구동기계의 탄성적인 충동이라고 볼 수 있다. 이 실험에 사용한 머시닝센터는 주로 Y-축 방향에서 뾰족한 모서리를 나타내고 있다.

#### 6.2 백래시 단계(Backlash Step)

이것은 각 축의 반환점 부근에서 이송속도에 관계없이 일어나

는 것으로, 볼스크루우와 너트의 백래시가 너무 크거나 작은 경우, 또는 볼스크루우와 너트기계의 마모가 일어난 경우로 볼 수 있다. 그리하여 두 축이 동시에 이송운동시에는 일어나지 않다가 한 축의 속도가 0이 되는 부근에서 구동력의 공백에서 오는 백래시 미끄러짐(Backlash slip)으로 볼 수 있다. 이 실험에 사용한 머시닝센터는 주로 Y-축 방향에서 원주방향의 반경의 차이로 나타나고 있다.

#### 6.2 타원형 오차

이것은 Fig.6에서 보는 바와같이 45° 또는 135° 대각선 방향으로 달걀모양의 타원이 얻어지는 것으로 X-축과 Y-축의 볼-스크루우들이 서로 직각이 아닌 경우에 발생한다고 볼 수 있다. 또 각 축들 사이의 서보 부우프 게인(Servo loop gain)들이 맞지 않아 한 축이 다른 축을 이끌고 가는 결과를 가져온다. 그러므로 이끌고 가는 축의 부우프 게인(Loop gain)이 더 높다고 볼 수 있다.

#### 6.3 주기적 오차 (Cyclic Error)

이것은 원주주위에서 주기와 진폭이 모두 변하면서 주기적인 조화함수의 오차가 나타나는 것으로 그원인은 축의 볼스크루우가 유격이 커서 일어 나가거나, 볼스크루우의 조립이 편위되어 있을 때 흔히 일어나는 것으로 알려져 있다.

오차의 원인에는 측정기 자체의 오차와 머시닝센터의 운동오차 및 외부에서 들어 오는 외부진동에 의한 오차로 대별할 수 있는데, 측정기 자체의 오차에는 볼의 정밀도, 3점지지짜의 정밀도에 미스의 오차가 포함될 수 있고, 중심정렬과 회전반경만큼 스피들이 이동하는 데 따른 부정확한 위치결정이 오차에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 7에서는 본 실험결과와 비교하기 위하여 동일한 실험을 행하여 결과를 보여준 것이다. 이상의 측정결과를 종합하여 진원도의 변화를 표로 보이면 Table 2, 3에서 보이주고 있다..

Table 2 측정결과 (본 실험) 단위 μm

이송속도 (mm.min)	xy		zx		zy	
	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW
100	67.33	70.00	26.40	23.60	63.71	65.71
200	70.67	72.33	24.40	22.40	63.14	65.43
300	73.67	73.67	23.20	23.60	65.43	64.86
400	74.33	73.67	22.80	23.60	62.29	64.57
500	74.00	74.00	21.60	24.00	64.29	65.71
평균	72.00	72.73	23.68	23.44	63.97	65.25

Table 3 측정결과 (Renishaw Ball Bar System) 단위 μm

이송속도 (mm.min)	xy		zx		zy	
	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW
100	66.6	69.8	24.8	25.7	63.3	53.0
200	67.2	71.2	21.6	25.9	50.6	61.6
300	59.2	64.8	19.5	22.8	58.0	78.0
400	64.4	68.3	18.5	19.0	55.3	79.3
500	59.2	65.2	18.1	16.6	57.1	72.5
평균	63.32	67.86	20.5	22.00	56.86	68.88

### 7. 결 론

이상과 같은 실험장치의 개발에 의해 얻어진 경험과 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 실험에 사용한 머시닝 센터는 Y-축방향의 백래시량이 60 ~ 70 μm 으으로 크게 나타 났고, Y-축방향의 백래시 교정이 필요하고, X-축 방향의 백래시는 비교적 작은 것으로 나타났다.
- (2) X-축의 +축과 파 Y-축 모두는 축 후진 스파이크가 나타났고, X-축 부근에서 주기적 오차(Cyclic error)가 커지는 것을 확인할 수 있다.

(3) XY-평면, ZX-평면, ZY-평면 모두 타원형의 오차가 대각선 방향으로 두드러지게 나타나고 있어 이에 대한 서보시스템의 개선이 필요하다고 사료된다.

(4) ZX-평면의 진원도오차가 작게 나타나는 것은 백래시의 영향을 적게 받아서 위치결정이 비교적 좋은 때문인 것으로 볼 수 있다. 반면에, ZY-평면은 백래시의 영향으로 오차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

(5) 원운동정도측정기의 정밀도는 정확한 중심정렬이 필요하고, 또 회전반경의 정확한 위치결정이 필수적이다. 이를 위해서는 레이저 장비를 이용한 고정밀도의 위치결정이 필요한 것으로 사료된다.

### 8. 참고문헌

- (1) KS B4001(1990), 공작기계의 시험방법 통칙.
- (2) JIS B6336(1986), Test code for performance and accuracy of machining centers.
- (3) ISO 230-1(DIS:1992), Acceptance code of machine tools, part 1, Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions.
- (4) J. B. Bryan, "A Simple Method for Testing Measuring Machine and Machine Tools", Part 1, Principles and Applications, Precision Engineering, 4-2, pp 61-63, 1982.
- (5) W. Knapp, "Text of the Three-dimensional uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Application to the Machine Errors", CIRP, 32-1, pp 459-462, 1982.
- (6) Yoshaki 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.
- (7) Yoshaki Kakino, Yukitoshi Ihara and Yoshio Nakatsu, "NC工作機械の運動精度に関する研究(第2報)-DBB法による運動誤差原因の診斷-", 精密工學會誌 52 / 10, pp 73-79, 1986.
- (8) Yoshaki Kakino, Yukitoshi Ihara and Yoshio Nakatsu, "NC工作機械の運動精度に関する研究(第2報) -サーボ系の性能が運動精度に及ぼす影響-", 精密工學會誌 53 / 8, pp 80-86, 1987.
- (9) 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.
- (10) 垣野義昭, 井原之敏, 藤原章彦, DBB法による NC工作機械の精度評價法, REALIZE INC., pp 3-8, 1990.
- (11) Renishaw Transducer System Limited, Catalog, Renishaw Quick Check Error Plot Diagnosis, Aug. 1992.

Fig 6(A) Results of Measuring, XY-PLANE

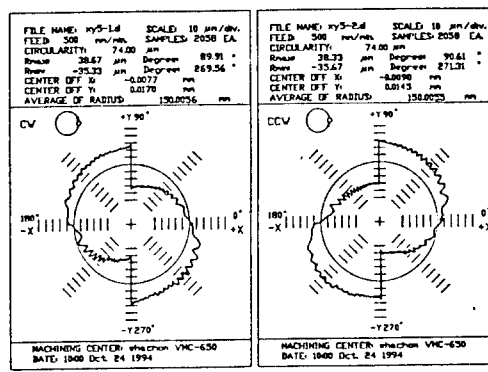
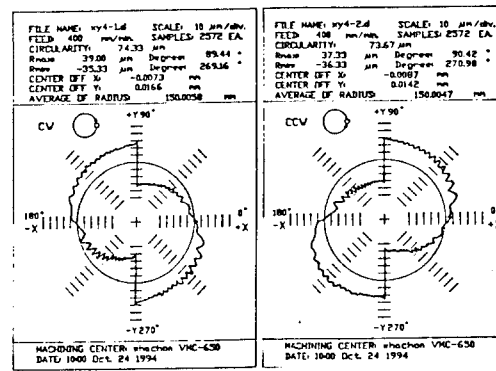
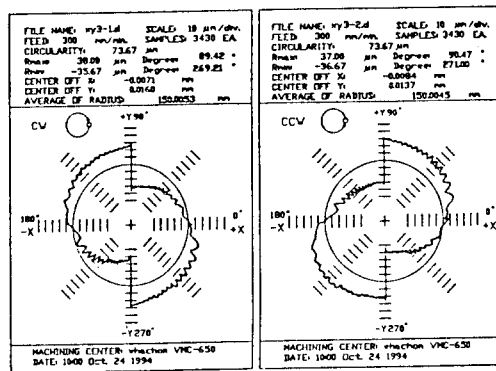
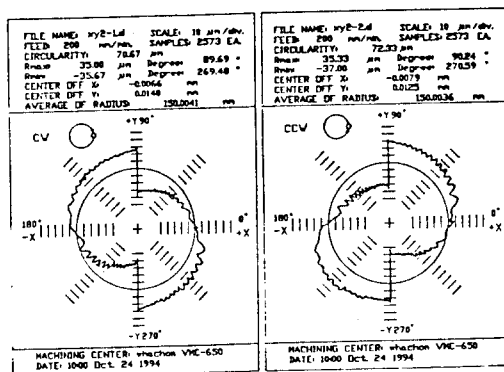
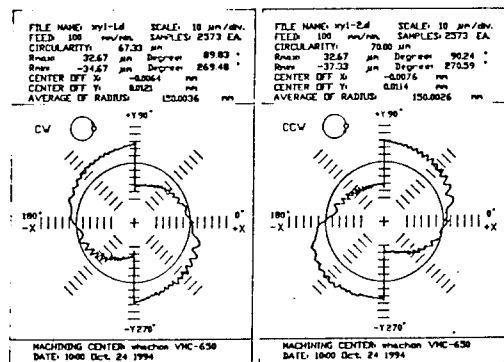


Fig 6(B) Results of Measuring, ZX-PLANE

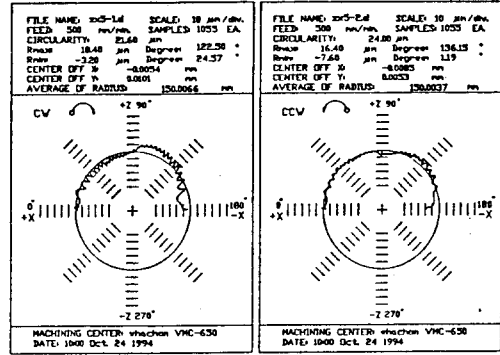
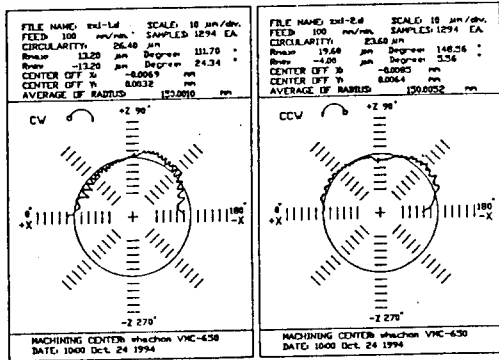
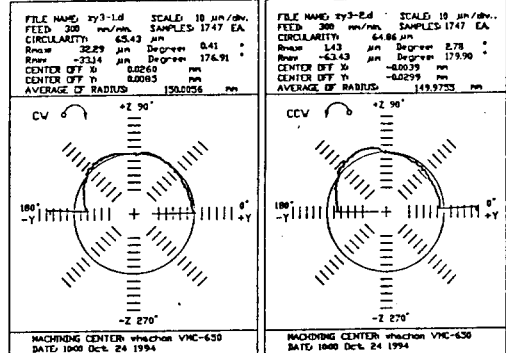
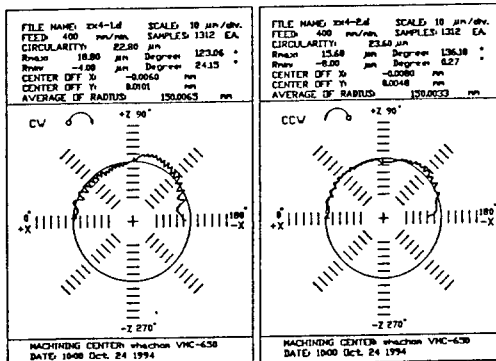
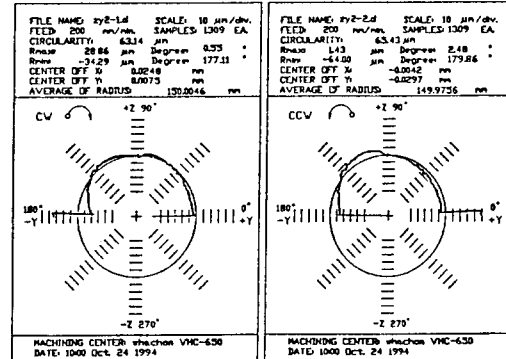
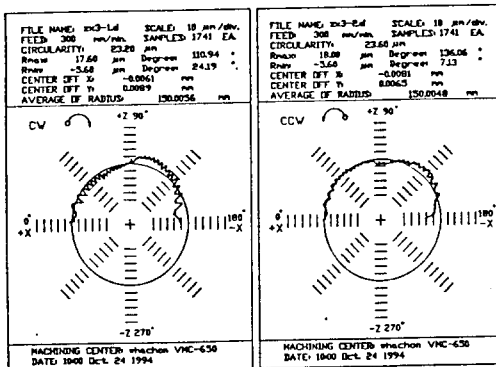
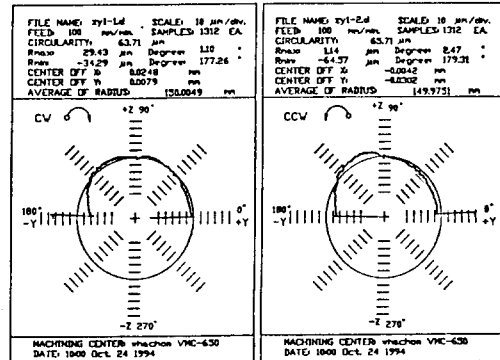
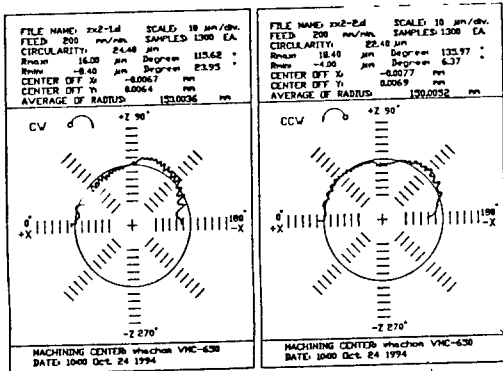


Fig 6(C) Results of Measuring, ZY-PLANE



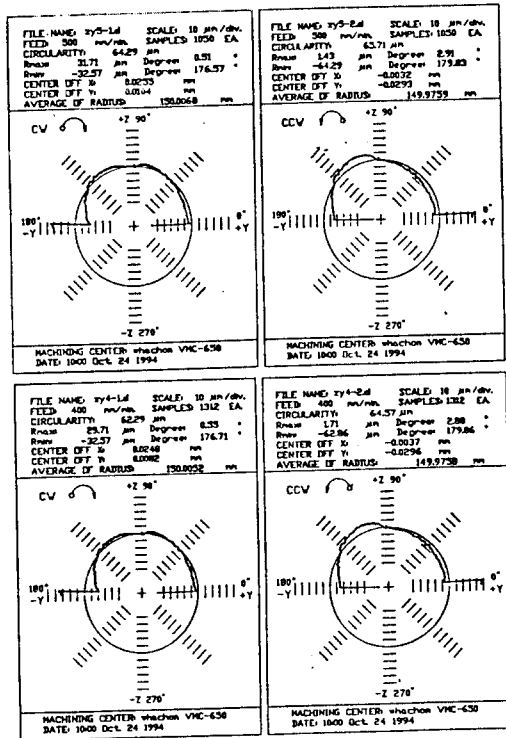


Fig 7(A) Results of Renishaw Ball Bar, XY-PLANE

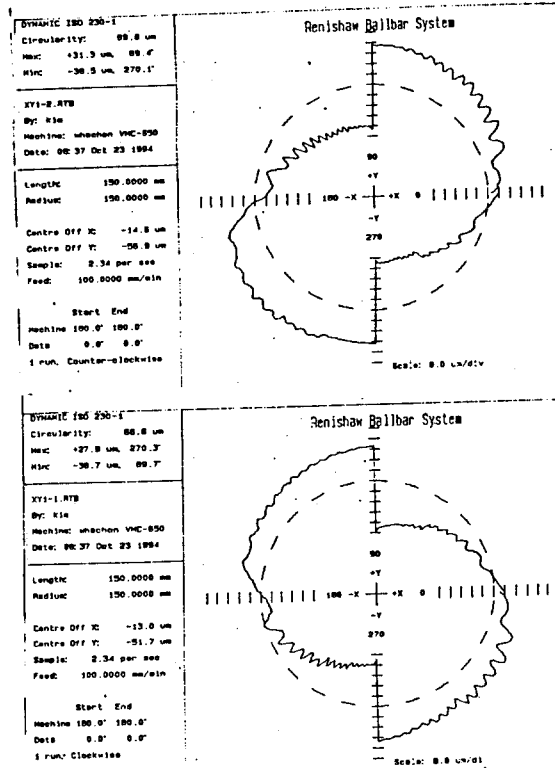


Fig 7(B) Results of Renishaw Ball Bar, ZX-PLANE

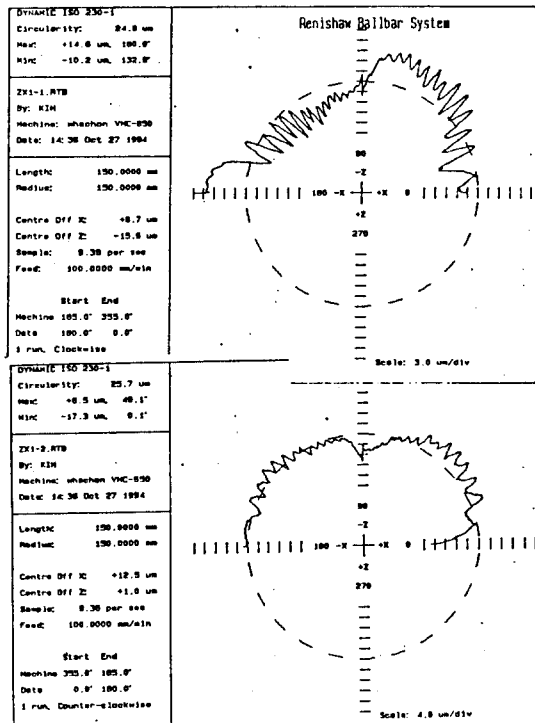


Fig 7(C) Results of Renishaw Ball Bar, ZY-PLANE