

Machining Center의 空間精度 測定裝置의 開發

김 영 석*, 남 궁 석**

Development of Measuring Units of Space Motion Accuracy in Machining Center

Young Seuk Kim*, Suk Namgung**

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 $r-\theta$ Method by Tsutsumi etc., but these methods are all 2-dimensional measuring methods on plane.

These simple methods of circular motion accuracy test of NC machine tools have been studied by many reserchers as above, 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 and the spindle of machining center.

In this paper, in use of 2 rotary encoders and 1 magnetic type linear scale with resolution of $0.5\mu\text{m}$, it has become possible for measuring of 3 dimensional space motion accuracy.

Key words : NC machine tool (NC 공작기계), Machining center (머시닝 센터), Circular motion accuracy (원운동정도), Linear scale (리니어 스케일), Rotary encoder (로터리 엔코더), Positioning accuracy (위치결정운동정도)

1. 서 론

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 기능으로서는 도저히 가공할 수 없을 정도의 복잡하고 정교한 가공을 NC 공작기계는 수행해 낼 수 있게 되었다.

이와 같이 복잡하고 정교한 가공을 할 수 있는, 고기능의 NC 공작기계의 운동정밀도를 측정할 수 있는 각

* 조선대학교 정밀기계공학과

** 충남대학교 기계공학과

종 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, 무부하상태에서 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.⁽¹⁾⁽²⁾

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

지금까지 개발되어 사용되고 있는 원운동정도측정방법에는 Bryan의 Telescoping Ball Bar Method (DBB(Double Ball Bar) Method),⁽⁴⁾ Knapp의 회전운동시험법(Circular Test Method),⁽⁵⁾ 그리고

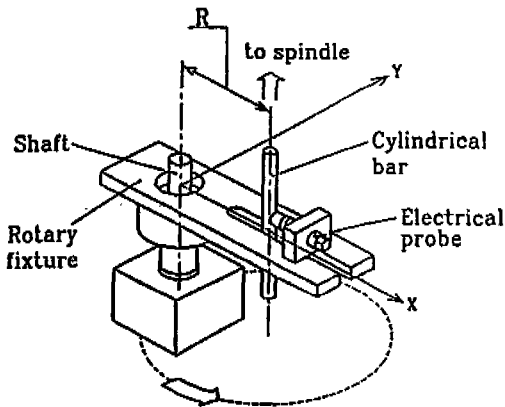


Fig. 1 Rotating 1 Dimensional Probe (by ISO 230-1)

Tsutsumi의 $r-\theta$ 법($r-\theta$ Method)⁽⁶⁾등이 있다.

DBB법⁽⁴⁾은 Fig. 2와 같이 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 스핀들과 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.

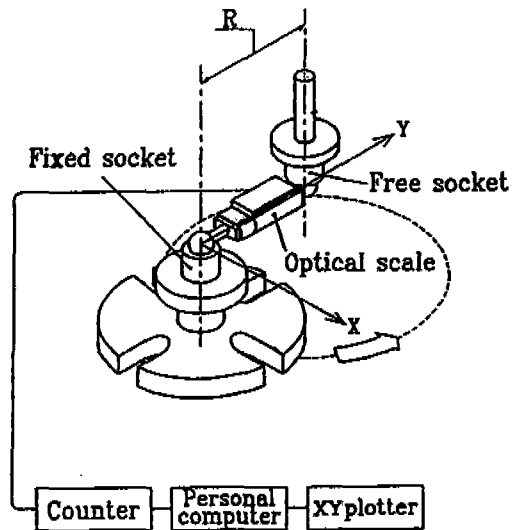


Fig. 2 Telescoping Ball Bar Method (by Bryan)

회전운동시험법(Circular Test Method)⁽⁵⁾은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 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 높이려는 움직임이 활발히 진행되고 있다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

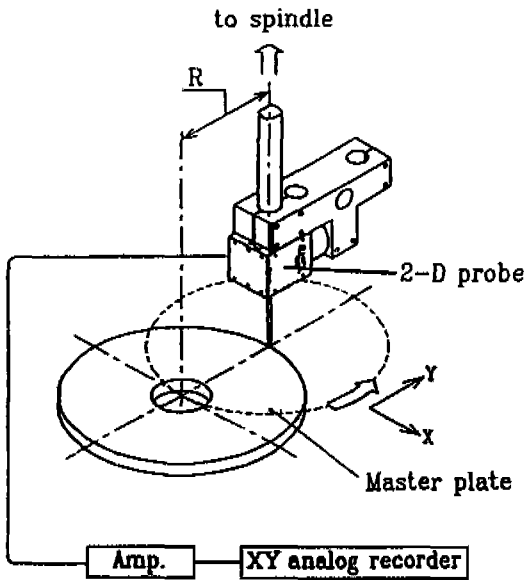


Fig. 3 Circular Test Method (by Knapp)

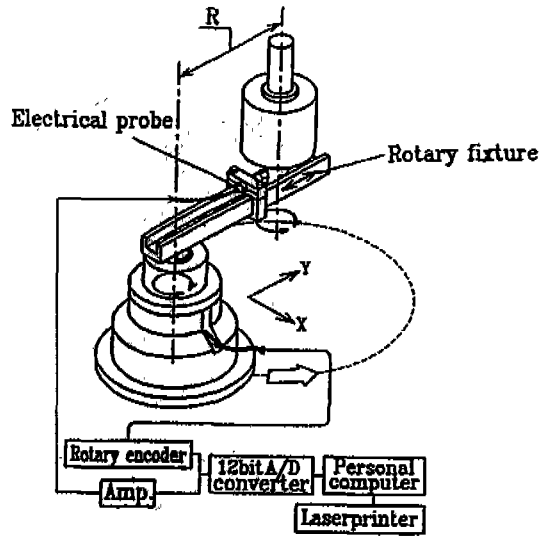


Fig. 4 r - θ Method (by Tsutsumi)

본 논문에서는 위와 같은 원운동정도측정기의 개발의 내력을 살펴보고, 센서를 달리하여 측정장치를 구성하여, 다른 측정장치와 비교실험을 하려고 한다.

Fig. 4의 r- θ 법(r- θ Method)⁽⁹⁾는 전기탐촉자(Electrical probe)와 로터리 엔코더(Rotary encoder)를 사용하여 반경방향의 변위와 회전각도로 원운동정도를 측정한다. 이것은 회전각을 정확히 분할하여 샘플링할 수 있는 장점이 있으나, 회전축에 구름베어링을 사용하였기 때문에 베어링의 정밀도에 의해 영향을 받을 수 있다.

그러나, 위에 열거한 측정기들은 설치시에 측정기의 회전중심과 공작기계의 스핀들축의 중심정렬(Centering)에 어려움이 있어서, 최근에는 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 영국의 Renishaw회사에서 개발한 것으로, DBB법과 원리는 같으나, 중심정렬의 어려움을 제거하기 위하여 공작기계의 스핀들축을 측정기 센터에 맞추는 것이 아니고, 특수하게 고안한 강구(Steel Ball)가 부착된 Base Alignment를 조정하여 NC 공작기계의 스핀들축에 부착된 자석(Magnet)에 움직여 중심정렬하기 때문에 편리한 점이 있다.

미소변위측정용 센서에는, 광학적인 간섭현상을 이용하여 각종 반도체 수광소자와 파장이 일정한 레이저광을 이용하는 레이저간섭계가 있고, 또 교차된 줄무늬를

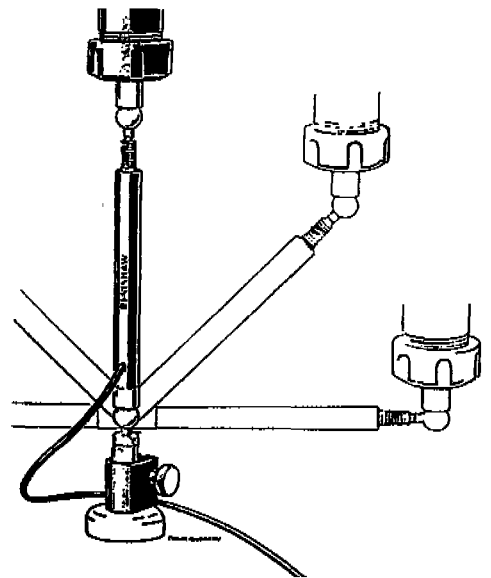


Fig. 5 Renishaw Quick Check (by Renishaw Ltd.)

갖는 막을 통과하는 발광다이오드의 명암의 변화를 각종 반도체수광소자로 받아들여 전기적인 펄스신호로 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 m 이하의 분해능을 가져야 한다.

본 연구에서는 변위센서로는 자석형 (Magnetic type)의 마그네스케일 (Magnescale)을 이용하고, 각변위 측정을 위하여 2개의 모아레형 (Moire type)의 로터리 엔코더 (Rotary encoder)를 이용하여 측정장치를 구성하여, NC 공작기계의 원운동정도를 측정하려고 한다.

2. 원운동정도의 측정원리

NC 공작기계에서 원운동정도는 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 기계원점을 O(0, 0, 0)로 놓고 NC 공작기계에서 지령상의 원운동의 중심의 위치를 o(X₀, Y₀, Z₀)라 하고, 지령상의 원운동의 반경을 R(R_X, R_Y, R_Z)라 하면, 지령상의 원운동의 위치 R(X₀+R_X, Y₀+R_Y, Z₀+R_Z)와 원운동시에 공구선단이 실제로 어느 위치 R'(X₀+R_X', Y₀+R_Y', Z₀+R_Z')에 있는가를 측정하여 그 차이를 계산하여 정확한 원운동을 하는가를 측정하는 것으로, 오차 ΔR(ΔR_X, ΔR_Y, ΔR_Z)는 다음식으로 정의한다.⁶⁾⁽¹⁰⁾

$$\Delta R = R' - R \tag{2.1}$$

$$\therefore R' = R + \Delta R$$

이고, 여기서 R(R_X, R_Y, R_Z)는 공구선단의 실제 위치이다. 그러므로, 각 X, Y 및 Z-축방향의 오차 R_X, R_Y 및 R_Z는 다음과 같다.

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

여기에서 NC 공작기계의 지령상의 진원의 반경을 R라 하면 각 X, Y 및 Z-축방향의 반경의 길이 R_X, R_Y 및 R_Z는 다음과 같이 구한다.

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

또, 실제 측정한 반경길이를 R라 하면 각 X, Y 및

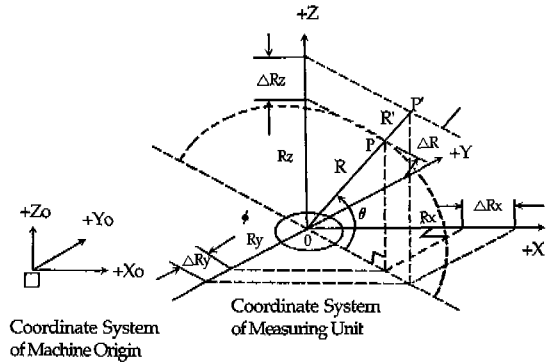


Fig. 6 Measuring Principles of Circular Motion Errors

Z-축방향의 실제의 반경의 길이 R_X', R_Y', R_Z'는 다음과 같다.

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

그러므로 실제 측정시에는 R를 측정하여 원운동반경의 실제위치 R'=R+ΔR에 의해 구한 데이터를 처리하여 그 오차의 궤적을 모델링하거나 진원도를 구하게 된다.

3. 실험장치 및 중심정렬(Centering)

본 연구에 사용한 실험장치는, Fig. 7에서 보는 바와 같다. 여기에서 두개의 로터리 엔코더 (Rotary Encoder)는 XY-평면의 회전량과 ZX-평면(또는 ZY-평면)의 회전량을 감지하게 되어 있고, 리니어 스케일 (Linear scale)은 원운동시의 반경방향의 직선변위를 감지한다. 이들 감지된량은 인터페이스 카-드를 통하여 컴퓨터로 입력되고, 또 컴퓨터에서 원운동오차 궤적이 XY-플로터로 출력된다. 컴퓨터와 머시닝 센터는 RS-232C로 접속되고, 머시닝 센터 구동용의 NC 프로그램이 전송된다.

리니어 스케일 (Linear scale)은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 자석형이고, 로터리 엔코더 (Rotary encoder)는 광전형으로 회전량을 감지하여 10진수로 나타내게 되어 있다.

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 9에서 보는 바와

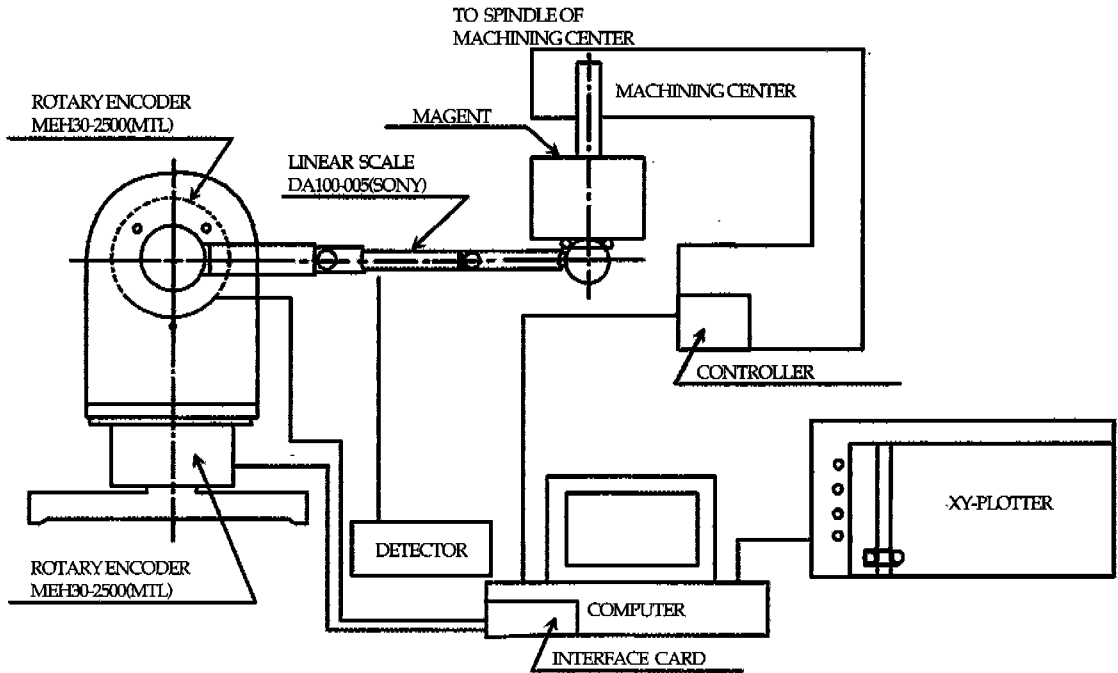


Fig. 7 Schematic Diagram of Measuring System

같이 DBB법과 유사하지만 두개의 로터리 엔코더 (Rotary encoder)를 사용하여 XY - 평면운동의 회전각(θ)과 ZX - 평면 (또는 ZY - 평면)의 회전각(ϕ)을 측정하도록 되어 있어서, 3차원의 공간정도를 동시에 측정할 수 있도록 고안한 것이다. 두개의 강구(Steel ball)를 지지하는 데에는 자석(Magnet)과 3점지지 링(3 Point Ring)을 사용하여 회전운동의 오차를 최대한 제거하도록 하였고, 실험장치와 머시닝 센터의 스피indle축의 중심정렬에는 Fig. 10(a), (b)에서 보는 바와 같이 지그를 사용하여 항상 일정한 중심정렬이 이루어 지

도록 하였으나, 아무래도 지그의 정밀도에 영향을 받는다고 볼 수 있다.

실험장치와 머시닝 센터의 스피indle축을 가능한 정확히 중심정렬하기 위해서 Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이, 양단 강구 봉(Double Ball Bar)을 해체하여 지그(1)을 사용하여 실험장치를 고정하고, 다음에 Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 지그(2)를 사용하여 자석(Magnet)에 3점지지 링(3 Point Ring)을 강력 접촉제로 고정시켰다. 마지막으로 양단 강구 봉(Double Ball Bar)을 결합시켜 조립하였다. 두개의 강구(Steel Ball)과

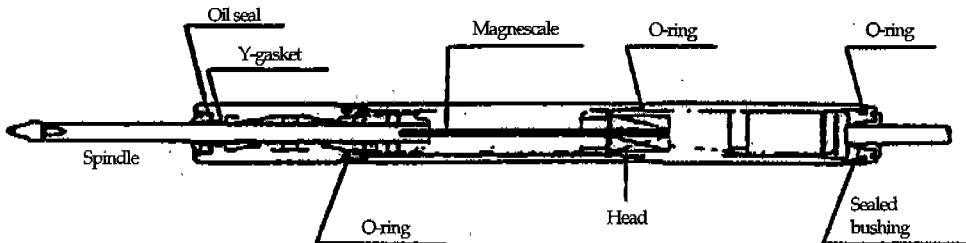


Fig. 8 Linear Scale DA100 - 005 (SONY)

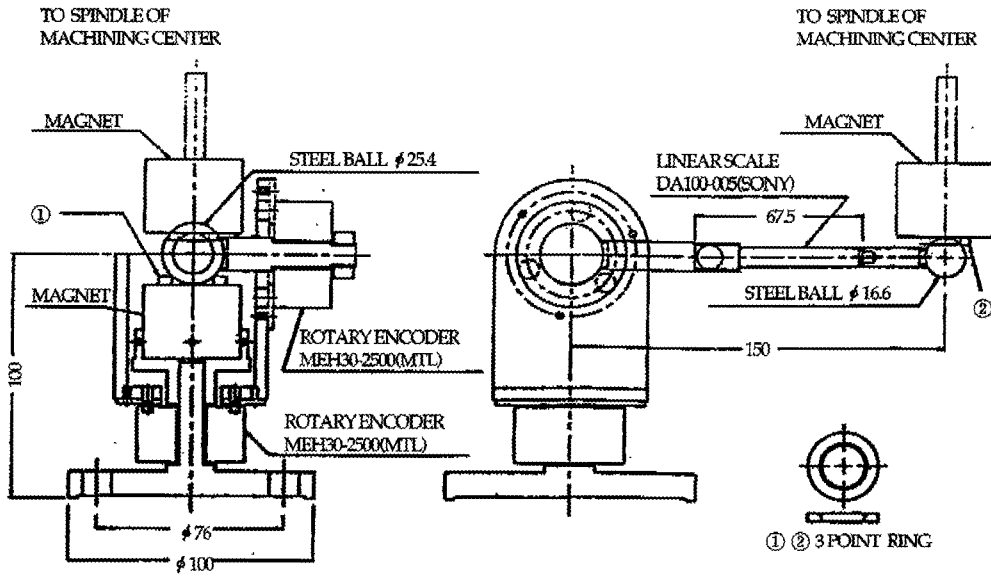


Fig. 9 Measuring Unit

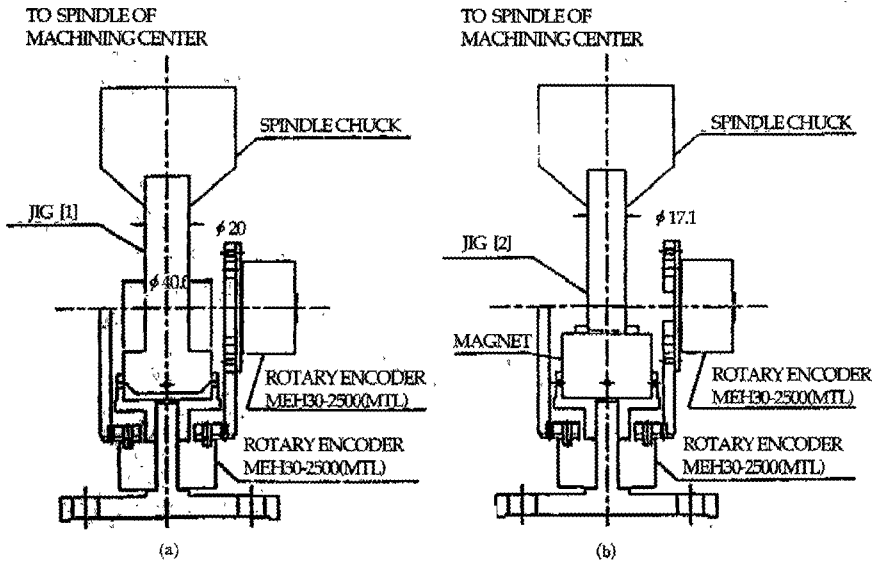


Fig. 10 Centering of Measuring Unit.

봉(Bar)의 결합은 역시 강력 접착제로 영구접합시켰다. 그리하여 머시닝 센터를 가동시켜 Y-축 방향으로 길이 150.00 mm만큼 이동하여 실험을 하게 된다. 중심정렬을 좀더 정확히 맞추기 위하여 머시닝 센터를 가동시켜 컴퓨터 프로그램에 의해 출력되는 데이터들을 검토하여 테이블을 미소이동시켜 가며 중심정렬을 하였다. 여기에서 사용한 실험기기들의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 실험기기들의 제원

| [A] 리니어 스케일(Linear scale) | |
|------------------------------|---|
| 모델명, 제조회사 | DA100 - 005, SONY (일본) |
| 측정범위(가동길이) | 5.2 mm |
| 측정오차 | 0.002 mm |
| [B] 감지기(Detector) | |
| 모델명, 제조회사 | MD20A, SONY(일본) |
| 분해능 | 0.5 μ m |
| 출력상 | A·B상 및 Up /Down상 |
| [C] 로터리 엔코더(Rotary Encoder) | |
| 모델명, 제조회사 | MEH30-2500, MTL(일본) |
| 분해능 | 10,000/rev. |
| 출력펄스수 | 2500 Pulse/rev. |
| 출력상 | A·B·Z상 |
| 출력위상차 | A·B위상차 90° \pm 45° (T/4 \pm T/8), Z상T \pm T/2 |
| [D] 자석(Magnet) | |
| 모델명, 제조회사 | KM-04C, KANETEC (일본) |
| 흡인력 | 30N |
| [E] 머시닝 센터 | |
| 모델명, 제조회사 | VMC-650, 화천기계 (한국) |
| Controller | FANUC 0M |
| BLU(Basic Length Unit) | 0.001mm |
| [F] 강구(Steel Ball) | |
| 직경, 제조회사 | ϕ 25.5mm, ϕ 16.6mm, NTN(일본) |
| 진구도(眞球度) | 정밀급, 0.05 μ m이하 |
| [G] Renishaw Ball Bar System | |
| 측정범위, 제조회사 | \pm 1 mm, Renishaw(영국) |
| 센서, 분해능 | LVDLT, \pm 0.1 μ m |

4. 실험방법

실험순서는 먼저 머시닝 센터를 가동하고, 다음에 컴퓨터와 XY-플로터를 가동하여 실험장치와 머시닝 센터 스펀들축의 중심정렬을 행한후, Y-축 방향으로 150.00 mm 이동하여 양단 강구 봉(Double Ball Bar)을 실험장치와 머시닝 센터 스펀들축의 중심에 고정된 자석(Magnet)에 지지시켜, XY-평면상에서는 테이블을 1바퀴 반을 회전시켜 1회전동안에 출력되는 데이터를 채집하도록 프로그램이 구성되어 있다. 이것은 테이블의 회전운동의 처음 시작과 마지막 정지시의 데이터들을 제외시키기 위한 것으로, 테이블은 보통, 안내면상에서 유막위에 부유된 상태에서 이송이 진행되지만, 처음 시작과 마지막 정지시에는 유막이 파괴되어 교체접촉을 하기 때문에 불안정한 데이터들이 얻어질 수 있기 때문이다. 여기에서 실험중에 머시닝 센터의 스펀들축은 회전하지 않고 고정되어 있고, 테이블이 회전운동을 하는 동안 리니어 스케일(Linear scale)을 통해서 반경방향의 변위가 감지된다.

그리하여 XY-평면상에서 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)의 데이터들을 얻어서 컴퓨터에 저장한뒤, 원운동오차가 분석된다.

5. 데이터의 처리

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

최소외접중심반경과 최대외접중심반경의 차로 표시하는 방법은 리니어 스케일(Linear scale)의 초기점(Initial point)을 기준으로, 반경이 큰 쪽을 +값, 작은 쪽을 -값으로 정하여 절대값이 가장 큰 값(Rmax.)과 가장 작은 값(Rmin.)을 찾아서 그 절대값을 더하여 진원도(Circularity)로 표시하였다. (Fig. 6 참조)

최소자승중심법에 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.

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

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

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

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

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

- 여기서 ax : X - 축의 편위중심 (mm)
 by : Y - 축의 편위중심 (mm)
 R_i' : 각 샘플점들의 실측반경값 (mm)
 ΔR_i : 각 샘플점들의 오차 (mm)
 θ_i : 각 샘플점들의 라디안각
 i : 각 샘플점의 위치값 (i = 1 ~ n)
 n : 샘플수
 ar : 평균반경 (mm)

6. 실험결과 및 고찰

이 측정실험에서 얻어진 결과는 Fig. 11과 같고, 여기에서 나타난 오차들의 종류와 그 원인들을 요약하면 다음과 같다.⁽¹¹⁾ 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, 그 원인은 볼스크루우와 너트의 틈새가 너무커서 각 축의 반환점에서 순간적으로 속도가 0이 되어 중지하였다가 출발하는 데서 오는 구동계통의 탄성적인 충돌이라고 볼 수 있다. 이 실험에 사용한 머시닝센터는 Fig. 10에서 보는 바와 같이, 주로 Y-축 방향에서 뾰족한 모서리를 나타내고 있다.

6.2 백래시 단계(Backlash Step)

이것은 각 축의 반환점 부근에서 이송속도에 관계없이 일어나는 것으로, 볼스크루우와 너트의 백래시가 너무 크거나 작은 경우, 또는 볼스크루우와 너트계통의 마모가 일어난 경우로 볼 수 있다. 그리하여 두 축이 동시에 이송운동시에는 일어나지 않다가 한 축의 속도

가 0이 되는 부근에서 구동력의 공백에서 오는 백래시 미끄러짐(Backlash slip)으로 볼 수 있다. 이 실험에 사용한 머시닝센터는 Fig. 10에서 보는 바와 같이, 주로 Y-축 방향에서 원주방향의 반경의 차이로 나타나고 있다.

6.3 고체마찰 미끄러짐(Stick Slip)

이것은 각 축의 반환점 부근에서 이송속도가 어떤 속도이하로 떨어질때 유막이 파괴되어 고체접촉이 되어, 노이즈가 일어나는 것으로 이송속도가 커지면 사라지는 것이다. 여기에서도 배율을 크게하면 X-축 부근에서 확실히 나타나는 것을 볼 수 있다.

6.4 사각형 에러(Squareness Error)

이것은 Fig. 10에서 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 루우프 게인(Servo loop gain)들이 맞지 않아 한 축이 다른 축을 이끌고 가는 결과를 가져온다. 그러므로 이끌고 가는 축의 루우프 게인(Loop gain)이 더 높다고 볼 수 있다.

6.5 기계진동(Machine Vibration)

이것은 기계자체의 진동이나 외부에서 들어오는 진동에 의해서 일어나는 것으로 이송속도에 의해서도 영향을 받는다. 이 실험에서는 45° 또는 135°의 대각선 방향에서 나타나는데, 이송속도를 크게 하면 더욱 크게 나타난다.

위에 열거한 오차들 이외에도 여러가지 오차의 종류가 있고 또 측정기 자체의 정밀도의 문제도 있으며, 특히 중심정렬의 어려움등으로, 오차는 그원인 또한 복잡되어 발생하기 때문에 완벽한 측정기는 거의 불가능하다고 볼 수 있다. 특히 실험장치에서 가장 정밀도가 높아야 하는 강구(Steel Ball)와 리니어 스케일(Linear scale)의 정밀도에 의존하는데, 이것들에도 Table 1에서 보는 바와 같이 약간의 오차가 포함되어 있다고 볼 수 있다. 또한, 매 측정시마다 여러가지 요인, 즉 본 머시닝 센터의 열변형이나 백래시 및 볼스크루우와 너트의 부정확등으로, 정확한 원운동 시작위치결정의 오차, 중심정렬의 오차등으로 인하여, 얻어지는 데이터는 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다.

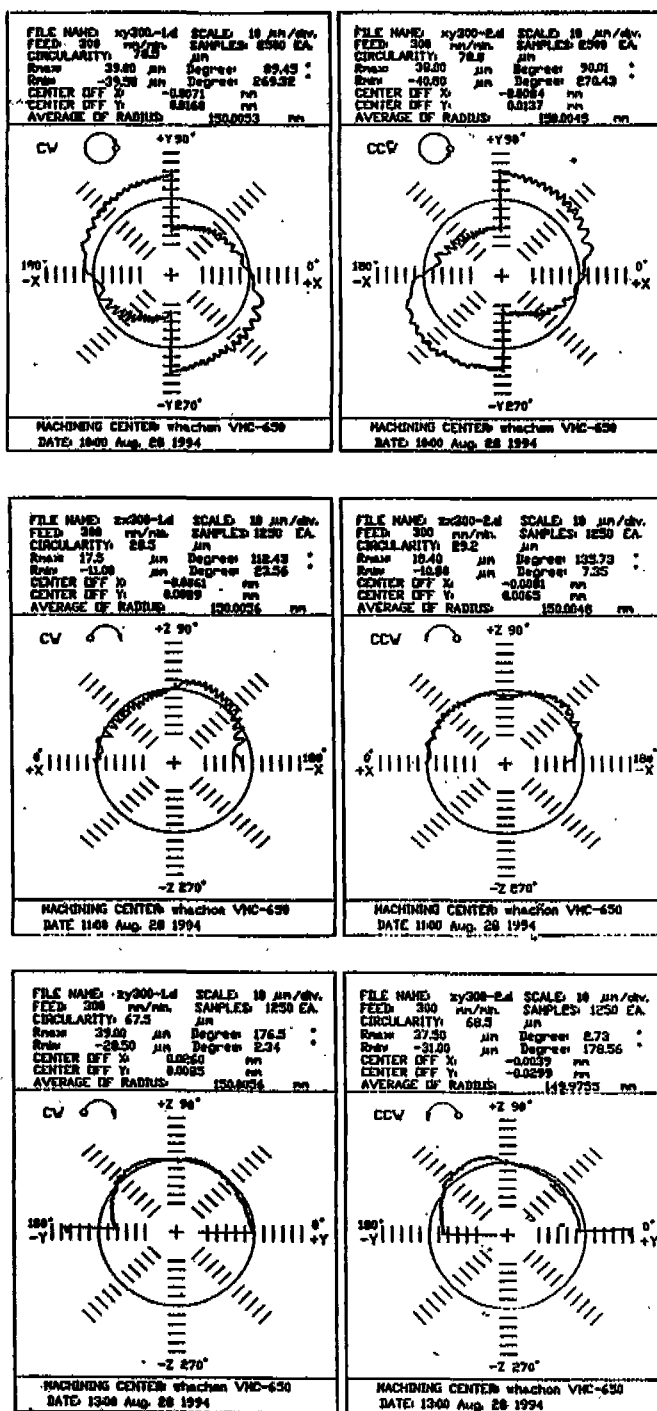


Fig. 11 Results of Measuring

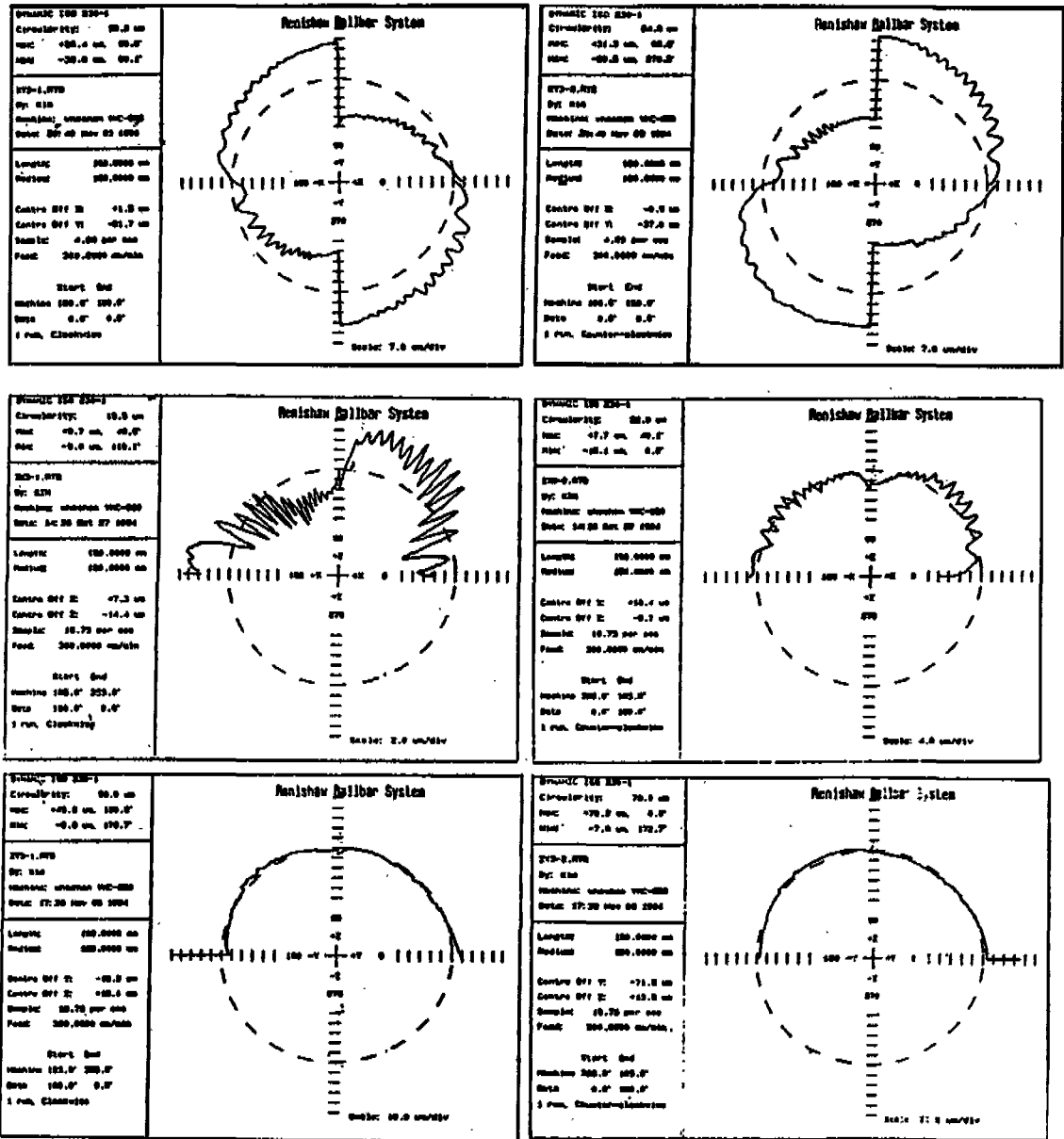


Fig. 12 Results of Renishaw Ball Bar System

7. 결 론

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

(1) 원운동정도측정기의 정밀도는 정확한 중심정렬이

필요하고, 이를 위한 정밀한 지그를 고안하여 이용할 수 있도록 해야한다.

(2) 원운동정도측정의 표준이 될 수 있는 고정밀급의 기준측정기의 개발이 필요하다고 본다.

(3) 여러가지 측정기 마다 감도의 차이가 있고, 데이

터의 샘플링수가 달라서 진원도에 차이가 있으므로, 이에 대한 표준화가 필요하다고 사료된다.

(4) 본 실험에 사용한 머시닝 센터의 원운동정도 측정 결과는 Fig. 11, 12과 같고, Y - 축 방향의 백래시량이 크게 나타났고, 따라서 Y - 축 방향의 백래시 교정이 필요하며, X - 축 방향의 백래시는 거의 작은 것으로 나타났다.

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, Ake-toshi 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價 -", 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断 -", 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 - 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, 藤原章翁, 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 Ball bar Diagnostics Manual.