

기상(機上) 3차원 측정기술을 이용한 공작기계 적용시험에 관한 연구 A Study on the Experiment of Machine tools with Measurement of 3-D Object on the Machine

김현철*, 신은호, 윤현구, 고해주(위아(주))

Hyeon Cheol Kim, Eun Ho Sin, Heon Ku Yun, Hai Ju Ko(WIA CORP.)

Abstract

For testing machine tools, we used test the work by measure of 3-D object that it was made by the machine tool. By reason of these, We have spent to the cost of measure and have delayed supply to user.

In this study, we made a macro-program and a application program in order to test automatic the machine tool. So, if you constitute a ring core and a touch prove in machine tool, you should test the property of machine tool.

1. 서론

공작기계를 생산함에 있어 조립이 완성된 기계를 검사하기 위하여 대부분의 MTB(Machine Tool Build)에서는 표준규격의 공작물을 가공한 후 3차원 좌표측정기를 이용하여 그 공작물을 검사함으로써 기계의 오차 또는 성능을 평가하게 된다. 그러나 3차원 좌표측정기는 고가의 장비이며, 또한 그 정밀성을 보존하기 위해 별도의 설치공간을 필요로 하고 있다. 따라서 완성된 기계에서 가공된 공작물을 3차원 좌표 측정실로 이동하는 과정이 필요하며 이로 인하여 공작기계의 조정 작업시간이 늘어나는 결과를 가져왔다. 이를 해결하기 위한 방법으로 센서 기술을 이용한 기상(機上)에서의 측정방식의 필요성이 점차 대두되어 가고 있다.

1.1 기상 센서 기술

기상에서 3차원 좌표측정장치를 구현하기 위해서는 센서 기술을 사용하여야 한다. 보통 기상에 적용하고 있는 방식에는 대표적으로

OP(Optical), FM(Frequency Modulation), RC(Ring Core)방식 있는데 이들 각각의 특징은 다음과 같다.

OP와 FM은 ZERO 센서를 이용하는 방식으로, 먼저 OP방식은 적외선을 이용하여 공작물의 프로브(probe)에 접촉된 상태를 수광부에 전송하게 되며, FM방식은 FM무선주파수를 이용하여 접촉된 상태를 수신 측에 전송하게 된다. 따라서 ZERO 센서는 수신 측이 멀리 있어도, 접촉면이 도체이든 부도체이든 접촉되는 순간 접촉된 상태를 수신측에 보내게 된다. 반면 RC방식에 비해 비용이 더 들어간다.

RC방식은 터치프로브(Touch Probe)가 공작물에 접촉되는 순간 probe와 공작기계 사이에는 미세한 전류가 흐르게 되며 이 전류를 RC가 검출하여 공작물과 접촉 상태를 체크하게 된다. 이 RC는 ZERO센서를 이용하는 것보다 비용이 적게 들지만 센서를 설치하는 작업이 힘들어진다는 것이다. 그러나 본 연구에서는 앞에 설명한 기상(機上)의 3차원 좌표 측정장치 중 적은 비용과 공작기계 설치에 적합한 RC방식을 적용하였다. 물론 ZERO 센서를 이용하여도 같은 결과를 갖는다.

본 연구에서는 기상에 구현된 3차원 측정기술을 이용하여, 제작된 기계에서 가공된 공작물(시편)을 바로 그 기계에서 평행도·직진도·직각도 등을 측정함으로써, 기계의 기하학적 정도를 시험평가 할 수 있는 방법을 제시하였다.

1.2 부가적인 기능

기상에서 3차원 좌표를 얻기 위해서 앞에 설명한 프로브와 RC장치만을 이용한다면, 수동으로 MPG나 JOG를 이용하여 좌표값을 얻어낸다. 그

리나 이런 방법은 엄청난 양의 수작업을 요구하기 때문에, 본 연구에서는 기계에 맞는 매크로 프로그램과 마이크로 프로그램을 기계로 전송할 수 있고 측정된 3차원 좌표데이터를 PC환경으로 가져 올 수 있는 프로그램을 자체 개발하여 적용함으로써 수작업의 양을 줄일 수 있다.

반면에 동작기계의 NC부분에서는 고속 Skip 기능을 제공하여야 한다. 만일 NC에 고속 Skip 기능이 없다면 측정 좌표에 대한 측정 정도를 보장할 수가 없어 측정 장치로 활용 할 수 없게 된다.

2. 3차원 형상데이터의 해석 알고리즘

본 연구에서 측정된 형상데이터를 해석하기 위한 주 알고리즘으로 최소오차자승법을 이용하였다.

2.1 점의 측정

점은 보통 여러번 측정하여 그 평균값을 택한다.

$$(x_i, y_i, z_i) \quad i = 1 \sim N$$

$$X = \frac{1}{N} \sum_i x_i, Y = \frac{1}{N} \sum_i y_i, Z = \frac{1}{N} \sum_i z_i \quad (1)$$

여기서 (x_i, y_i, z_i) 는 측정된 점이고, N은 측정된 점의 수이며 X, Y, Z는 해석 결과이다.

2.2 선

선은 2개 이상의 점을 측정함으로써 구성되며, 최소오차자승법을 이용하여 해석한다. 2차원 평면내에서의 선의 Fitting 알고리즘은 다음과 같다. xy평면에서 직선의 방정식은

$$y = ax + b, \quad f = ax + b - y \quad (2)$$

이고, 양변을 제곱하면

$$O_j = f^2 = (ax + b - y)^2 \quad (3)$$

이 된다. 여기서 O_j 는 최소화 되어야 하는 목적함수이며, O_j 를 a, b에 대하여 편미분하여 계산하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \sum_i x^2 & \sum_i x \\ \sum_i x & \sum_i 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i xy \\ \sum_i y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i x^2 & \sum_i x \\ \sum_i x & \sum_i 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_i xy \\ \sum_i y \end{bmatrix} \quad (5)$$

와 같고 기울기는 a가 된다.

NC에서 측정된 데이터는 3차원이므로 3차원 공간상에서 직선을 Fitting할 필요가 있다. 공간상에서 직선의 방정식은

$$\frac{x-x_0}{A} = \frac{y-y_0}{B} = \frac{z-z_0}{C} \quad (6)$$

이다. 다음에 A, B, C 가 0 이 되는 경우를 고려하면

① $A \neq 0, B \neq 0, C \neq 0$ 인 일반적인 경우

$Z = 0$ 이라 두고 xy 평면 위에 투영된 직선을 최소오차자승법으로 fitting 한다. $Y = 0$ 이라 두고 xz 평면 위에 투영된 직선을 최소오차자승법으로 fitting 한다. $X = 0$ 이라 두고 yz 평면 위에 투영된 직선을 최소오차자승법으로 fitting 한다.

$$y = ax + b \quad (7a)$$

$$x = cz + d \quad (7b)$$

$$z = ey + f \quad (7c)$$

㉞ xy 평면과 만나는 점 ($z = 0$)

$$x = \frac{d}{c} ac^2 e + (d + cf + bce)$$

$$= d + cf + bce + acde \quad (8a)$$

$$y = \frac{d}{c} ac + b = b + ad \quad (8b)$$

㉞ yz 평면과 만나는 점 ($x = 0$)

$$y = -\frac{(d + cf + bce)}{ace} a + b$$

$$= b - \frac{(d + cf + bce)}{ce}$$

$$= -\frac{(d + cf)}{ce} \quad (9a)$$

$$z = -\frac{(d + cf + bce)}{ac^2 e} - \frac{d}{c}$$

$$= \frac{(-d - cf - bce - acde)}{ac^2 e} \quad (9b)$$

㉞ zx 평면과 만나는 점 ($y = 0$)

$$x = -\frac{b}{ac} ac^2 e + (d + ef + bce)$$

$$= d + cf + bce - bce = d + cf \quad (10a)$$

$$z = -\frac{b}{ac} - \frac{d}{c} = -\frac{b + ad}{ac} \quad (10b)$$

② xy 평면에 평행한 경우, $z = \text{const}$

$$y = ax + b$$

$$z = f$$

$$\vec{n} = (l, m, 0) \quad (11)$$

(l, m은 0이 아닌 임의의 실수)

③ yz 평면에 평행한 경우, $x = \text{const}$

$$\begin{aligned} y &= az + b \\ x &= f \\ \vec{n} &= (0, m, l) \end{aligned} \quad (12)$$

(l, m 은 0 이 아닌 임의의 실수)

④ zx 평면에 평행한 경우, $y = \text{const}$

$$\begin{aligned} z &= ax + b \\ y &= f \\ \vec{n} &= (l, 0, m) \end{aligned} \quad (13)$$

(l, m 은 0 이 아닌 임의의 실수)

⑤ xy, yz 평면에 평행한 경우

$$\begin{aligned} x &= \text{const} \\ z &= \text{const} \end{aligned} \quad (14)$$

xz 평면을 뚫는선

⑥ yz, zx 평면에 평행한 경우

$$\begin{aligned} x &= \text{const} \\ y &= \text{const} \end{aligned} \quad (15)$$

xy 평면을 뚫는선

⑦ xy, yz 평면에 평행한 경우

$$\begin{aligned} y &= \text{const} \\ z &= \text{const} \end{aligned} \quad (16)$$

yz 평면을 뚫는선

⑧ 기타

$$x = \text{const}, y = \text{const}, z = \text{const} \quad (17)$$

2.3 면

면은 3점 이상의 측정값을 이용하여 최소오차자승법으로 Fitting한다. 3차원 공간상에서 평면의 방정식은

$$lx + my + nz = q \quad (18)$$

$$x + \frac{m}{l}y + \frac{n}{l}z = \frac{q}{l} \quad (19)$$

이며, $m/l = b, n/l = c, q/l = d$ 라 두면

$$x + by + cz = d \quad (20)$$

와 같이 쓸 수 있다. 최소화할 목적함수는

$$o_j = f^2 = (x + by + cz - d)^2 \quad (21)$$

과 같이 되고 b, c, d 에 대하여 편미분하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial O_j}{\partial b} &= 2(x + by + cz - d)y = 0, \\ & y^2b + yzc - yd = -xy \\ \frac{\partial O_j}{\partial c} &= 2(x + by + cz - d)z = 0, \\ & yzb + z^2c - zd = -xz \\ \frac{\partial O_j}{\partial d} &= 2(x + by + cz - d)(-1) = 0, \\ & yz + zc - d = -x \end{aligned} \quad (22)$$

이 된다. 행렬식으로 쓰면

$$\begin{bmatrix} \sum_i y^2 & \sum_i yz & \sum_i (-y) \\ \sum_i yz & \sum_i z^2 & \sum_i (-z) \\ \sum_i y & \sum_i z & \sum_i (-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i (-xy) \\ \sum_i (-xz) \\ \sum_i (-x) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i y^2 & \sum_i yz & \sum_i (-y) \\ \sum_i yz & \sum_i z^2 & \sum_i (-z) \\ \sum_i y & \sum_i z & \sum_i (-1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_i (-xy) \\ \sum_i (-xz) \\ \sum_i (-x) \end{bmatrix} \quad (24)$$

이 되며, 따라서 평면위의 법선벡터는

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \pm \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{b}{\sqrt{1+b^2+c^2}} \\ \frac{c}{\sqrt{1+b^2+c^2}} \end{pmatrix} \quad (25)$$

와 같이 된다. 또한, 원점에서 평면에 수직으로 내린 직선의 길이(원점부터의 최단거리)는

$$P = \begin{cases} \frac{d}{\sqrt{1+b^2+c^2}}, & d \neq 0 \\ 0, & d = 0 \end{cases} \quad (26)$$

이다. 따라서 평면의 방정식은

$$n_x x + n_y y + n_z z = P \text{ 와 같이 된다.}$$

2.4 원

원은 최소 3개의 점으로 형성되며 최소오차자승법을 이용하여 Fitting한다. 수직형 머시닝 센터에서 생성되는 원은 xy 평면 위에 있는 것으로 가정하므로 z 좌표값은 무시한다. xy 평면 위에서 원의 방정식은

$$f = x^2 + 2ax + y^2 + 2by + c = 0 \quad (27)$$

이고 양변을 제곱하면 목적함수

$$O_j = f^2 = (x^2 + 2ax + y^2 + 2by + c)^2 \quad (28)$$

가 만들어진다. 목적함수를 a, b, c 에 대하여 편미분하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial O_j}{\partial a} &= 2(x^2 + 2ax + y^2 + 2by + c)(2x) = 0 \\ \frac{\partial O_j}{\partial b} &= 2(x^2 + 2ax + y^2 + 2by + c)(2y) = 0 \\ \frac{\partial O_j}{\partial c} &= 2(x^2 + 2ax + y^2 + 2by + c)(1) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_i 2x^2 & \sum_i 2xy & \sum_i x \\ \sum_i 2xy & \sum_i 2y^2 & \sum_i y \\ \sum_i 2x & \sum_i 2y & \sum_i 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i -x(x^2 + y^2) \\ \sum_i -y(x^2 + y^2) \\ \sum_i -(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \quad (30)$$

식(27)을 다시 쓰면

$$(x+a)^2 + (y+b)^2 - a^2 - b^2 + c = 0 \quad (31)$$

와 같이 되며 따라서 중심좌표와 반지름은 아래의 식과 같다.

$$(-a, -b) \quad (32)$$

$$\sqrt{a^2 + b^2 - c^2} \quad (33)$$

3. 3차원 측정 시험

모든 측정 요소에서 그 점의 데이터를 얻기 위해 다음 fig.1에서 보이는 바와 같은 과정을 갖는다. 먼저 측정침을 '측정 준비점'으로 이동한다. 다음에 '측정 시작점'까지 '이동 이송속도'로 이동한 후에 NC의 Skip 기능을 이용하여 '측정 종료점'까지 '측정 이송속도'로 '측정 방향'을 향해 움직이면서 측정을 시작한다. 측정침이 측정 대상물에 접촉하여 Skip 신호가 트리거되면 이동을 정지하고 그때의 좌표값을 컴퓨터로 전송한 후에 측정침이 '측정 준비점'으로 되돌아가 한 점의 측정이 종료된다.

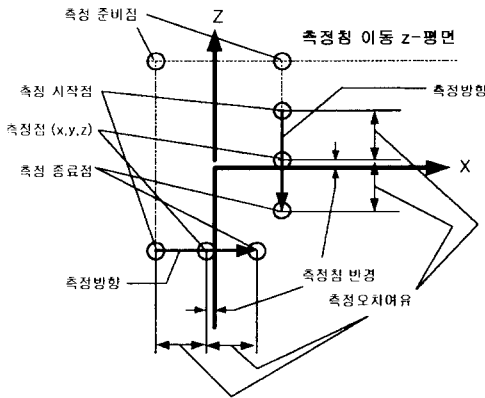


fig. 1 측정침의 이동방법

한 점을 측정하기 위해서는 앞의 설명과 같이 공작기계는 복잡한 동작을 수행한다. 따라서 이와 같은 동작을 할 수 있도록 하기 위해 특별히 개발된 구동 매크로(MACRO)프로그램을 공작기계에 지령하여야 한다. 본 연구에서 사용하는 매크로 프로그램은 USER MACRO B형태를 이용하며, 이 때문에 기종이 다른 NC 적용시 매크로의 수정이 불가피하게 된다.

다음 그림은 측정을 수행하는 매크로의 일부분이다.

```

WHILE[#11LE2.]DO2
G04 X500
G31 G90 Y5. F50
G04
#[540.+#11]=#5062
#[550.+#11]=#5042
G01 Y1.5 F500
#11=#11+1
END2
    
```

fig. 2 점 측정 매크로

3.1 진직도 검사

공작기계에서 진직도를 측정하기 위해 점 측정 방법으로 일정간격의 3차원데이터를 얻는다. 이 때 fig. 3과 같이 프로브의 중심값의 최소오차 상승법으로 선의 방정식을 계산하고, 이 선과 측정된 데이터와의 거리를 이용하여 공작기계 진직도를 판단하게 된다.

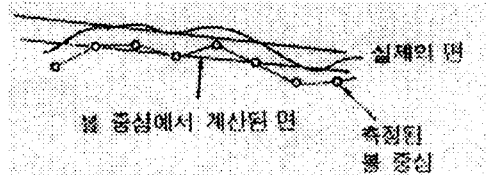


fig. 3 수평도 측정

3.2 평행도 검사

진직도 검사 기준에 만족하는 기계는 fig.4와 같이 최소오차법에 의해 측정된 직선과 C면에서 측정된 점들과 거리를 NC지령값과 비교하여 나타난 오차로써 평행도를 판단한다.

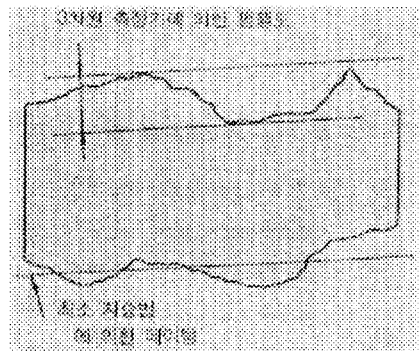


fig. 4 평행도 측정

3.3 직각도 검사

직각도 검사는 fig.5와 같이 A면의 직선 방정식을 구한 후 이 직선에 B면의 점들을 수선으로 내린 값의 범위를 나타낸다.

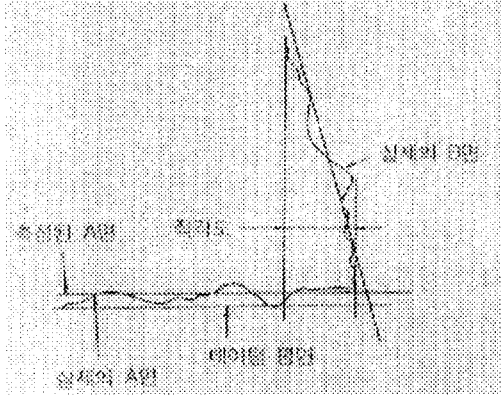


fig. 5 직각도 측정

3.4 위치결정 정밀도 측정

가공시편에 Boring Bar를 사용하여 중심과 중심에서 좌·우·앞·뒤에 일정 간격으로 $\phi 20 \sim \phi 25$ 의 Boring 가공을 실시한다. 가공방법은 백래쉬 오차를 방지하기 위해 1방향 가공을 원칙으로 한다.

가공된 원 각각의 중심위치를 최소오차자승법으로 측정하여 중심원의 중심과 거리를 구한다. 이때 이 값과 NC에서 지령한 거리와의 오차를 측정하여 위치결정 정밀도를 판정하게 된다.

가공프로그램에서의 가공 데이터는 중심원의 중심(공작물원점)에서 좌·우·앞·뒤의 Boring 원의 중심과의 XY축과의 거리는 90mm가 표준이다.

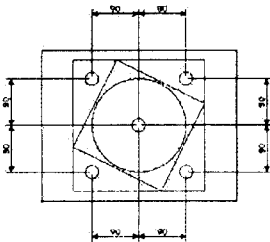


fig. 6 표준시편의 위치결정 정밀도 측정

3.5 진원도 측정

G02 ixx jxx의 G-code명령으로 가공을 실시한 후 fig.7과 같이 임의의 점들을 측정한다. 이

때 NC에 지령한 반지름과 가공된 원의 임의의 점들과의 거리 오차에 의하여 진원도를 검사하게 된다.

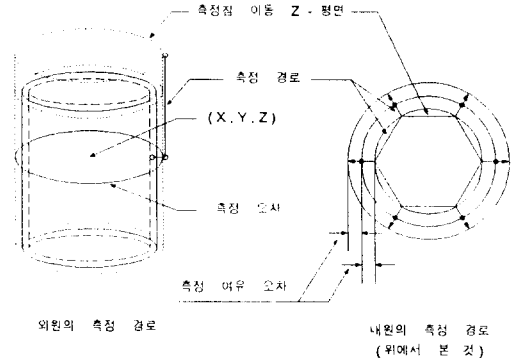
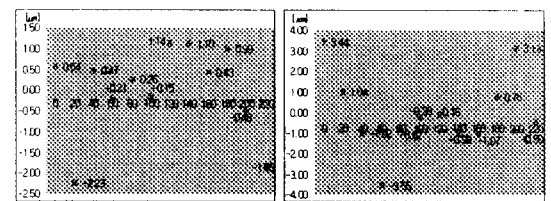


fig.7 진원도 측정 경로

4. 실험결과 및 고찰

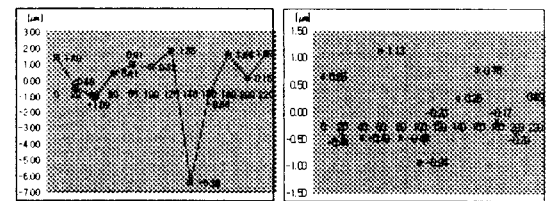
본 연구에서는 WIA(주)에서 개발되고 있는 시제품을 이용하였다. 일단 시제품은 그 정도가 정확하지 않고 오차발생 확률이 높아 본 연구에서 구현하고자 하는 시스템 검사를 할 수 있는 환경을 제공한다. 따라서 다음에 나타낸 시험 데이터는 같은 기계에서 얻은 자료를 사용하기 보다 각각의 검사항목에 알맞은 데이터를 얻을 수 있는 시제품들을 이용하여 측정하였다.

다음 fig.8과 fig.9는 본 실험대상 기계에서 시편을 제작한 후 각 면의 진직도를 나타낸다.



a. Y축 -방향 b. Y축 +방향

fig.8 X축 진직도



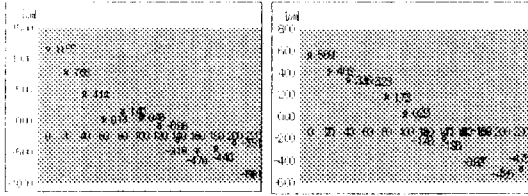
a. X축 -방향 b. X축 +방향

fig.9 Y축 진직도

여기에서 X축의 진직도 및 Y축의 진직도는

허용 정도($10\mu\text{m}$)범위 안에 들어간다는 것을 알 수 있다.

평행도의 측정에서도 진직도에 사용된 데이터와 같은 데이터를 이용하여 분석하였다.



a. X축 평행도 b. Y축 평행도
fig. 10 평행도

fig.10에서 알 수 있듯이 X축 및 Y축 모두 측정된 데이터들이 허용 기준치($20\mu\text{m}$) 안에 들어와 있는 것을 알 수 있다.

그러나 직각도 측정에서는 그림 fig.11에서 나타나 듯이 허용정도($15\mu\text{m}$)를 벗어나 있다.

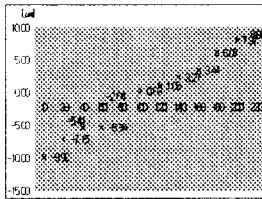


fig. 11 X축에 대한 Y축의 직각도

이상의 실험결과 기계의 진직도 및 평행도는 허용오차 범위에 들어와 있으나, 직각도에서 허용하는 오차를 벗어나 이 기계는 약간 비틀어져 있다는 것을 본 연구에서 사용된 기상의 3차원 측정기술로 검증할 수 있다.

다음 Table 1,2에서는 위치결정 정도를 실현한 데이터를 나타내었으며

Table 1 각 홀의 중심좌표 (단위:mm)

| | 중심 | 오/뒤 | 오/앞 | 왼/앞 | 왼/뒤 |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| X축 | 638.214 | 728.215 | 728.214 | 548.221 | 548.225 |
| Y축 | -349.000 | -259.046 | -437.996 | -437.996 | -258.997 |

Table 2 중심홀과 각 홀과의 거리오차 (단위:mm)

| | 오/뒤 | 오/앞 | 왼/앞 | 왼/뒤 |
|-------|--------|-------|-------|-------|
| X축 오차 | -0.001 | 0.000 | 0.007 | 0.011 |
| Y축 오차 | 0.046 | 1.004 | 1.004 | 0.003 |

나타낸 바와 같이 앞쪽 방향의 두 홀 모두 Y축의 위치결정 정도에 큰 오차가 나타남을 알 수 있다. 따라서 기계는 반드시 수정이 필요하다.

마지막으로 fig.12는 기상에서 지름 250mm 원의 보링작업 후 가공면의 진원도를 측정된 태

이터를 3차원 Data sheet에 나타내었다.

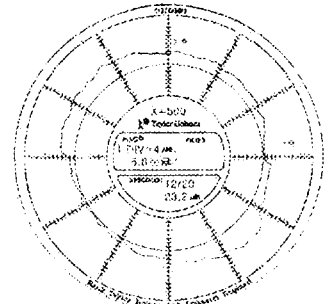


fig. 12 진원도 측정

fig.12의 측정 데이터에서 최소값과 최대값의 차는 $23.5\mu\text{m}$ 으로 허용 오차 $10\mu\text{m}$ 범위를 벗어남을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 RC(Ring core)방식과 프로브를 이용하여 기상에서 3차원 측정 기술을 구현하여 공작기계에 적용한 결과 다음과 같은 결론 얻을 수 있었다.

- 1) 측정 환경에 맞는 매크로 프로그램을 개발하여 적용함으로써 자동측정이 가능하게 되었다.
- 2) 공작기계의 기상에서 진직도, 평행도, 직각도, 위치결정 정밀도 및 진원도를 측정할 수 있어서 기계의 조립상태를 시험평가 할 수 있게 되었다.
- 3) 기상에서 3차원 측정기술을 구현하여 공작기계의 특성을 점검함으로써 측정시간의 단축과 고가의 측정장비를 대용할 수 있는 방법을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Yoram Koren, 1983, Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill International editions.
2. Ki-Yin Chang and Erik D. Goodman, 1991, "A Method for NC Tool path Interference Detection for A Multi-Axis Milling System", Control of Manufacturing
3. Taksaki H, "Moire Topography," Applied Optics, 1970
4. R.S.Medlock, "Sensors for Mechanical Properties," J.Phys.E: Sci. Instrum., 1983