

# Machining Center에서 2차원 원호보간의 복합오차 검출 및 수치제어에 의한 고정밀도 가공방법에 관한 연구

김 정 순\*

## A study on detection of composite errors and high precision cutting method by numerical control of two-dimensional circular interpolation in machining centers

Jeong-soon Kim

### ABSTRACT

This paper describes an application step of a R- $\theta$  method which measures circular movements in machining centers. The detection of composite errors of circular movements and a high precision cutting method in machining centers were investigated by the analysis of data measured by R- $\theta$  method which can detect the rotating angle and is applicable to variable measuring radius.

When the error by squareness error and unbalance of position-loop-gain were mixed, the detection method of each error was proposed. Although the errors by squareness error and backlash compensation were mixed, the errors by squareness error could be detected. If the errors by unbalance of position-loop-gain and backlash compensation were mixed, the errors by unbalance of position-loop-gain could not be detected. A high precision cutting method, which uses the NC program compensated by using feed-back data from error measured by the R- $\theta$  method, was proposed.

### 1. 서 론

NC공작기계의 가공정밀도에 지배적인 영향을 미치는 요인으로서 공작기계의 운동정밀도가 있다. 공작기계에 운동오차가 있으면 가공형상에 그것이 전사되어 가공오차가 크게 되기 때문에 운동정밀도를 아는 것이 고정밀

도한 가공에 반드시 필요하다. 기계를 구성하는 여러 요소의 치수, 형상정밀도가 나쁘면 공작기계의 운동정밀도가 나쁘지만, 또한 조립이나 제어계의 조정에 의해서도 영향을 받는다. 한편, 생산의 현장에서는 설비의 경년 변화에 따른 가공정밀도의 저하를 방지하기 위해 NC공작기계의 운동정밀도 검사가 정기적으로 행해지고

\* 군산대학 공학연구소

있다.

NC공작기계는 position-loop-gain, Velocity-loop-gain, Backlash compensation 등의 여러가지 조정가능한 NC장치의 Parameter가 있다. 이들의 조정에 의해서 NC공작기계의 운동정밀도는 큰 영향을 받기 때문에 이것을 최적의 상태로 조정하기 위해서는 기하학적인 운동오차나 위치결정정밀도, 공작정밀도 등의 시험, 검사만으로는 불충분하다.

그래서 이러한 문제들을 해결하기 위해 직접 절삭하지 않고 원호보간에 의한 공작기계의 운동정밀도를 평가할 수 있는 방법으로서 W. Knapp 이 제안한 Circular test법<sup>(1)(2)</sup>과 kakino가 제안한 Double ball bar법<sup>(3)(4)</sup>이 개발되어 사용되고 있고 또한 Ball bar법으로 Quick Check(RENISHOW, LTD)<sup>(5)</sup>, M. Bardekin이 제안한 Contisure<sup>(7)</sup>가 있다. 이들의 측정기로 Machining Center의 원호보간정밀도를 측정하여 오차를 진단하는 방법이<sup>(1)-(6)</sup> 제안되어 국제표준화기구(ISO, TC39/SC2)에서도 공작기계의 원운동 시험방법으로서 채용하는 것이 결정되었다<sup>(8)</sup>. 이 원호보간정밀도시험은 NC공작기계의 기하학적인 운동만이 아니라 지금까지 불명확해왔던 제어System이나 이송속도에 의존하는 오차원인까지 절삭하지 않고 평가할 수 있는 새로운 측정방법이다. 그러나 Circular test법은 회전각의 검출을 할 수 없고, Master ring 과 Probe를 접촉시켜서 측정하기 때문에 마찰이 작용해 고속이송시에는 측정지연이 일어나기 쉽다는 결점이 있다. 또한 DBB법에서도 회전각의 검출은 되지 않고 구조상 작은 반경의 측정을 할 수 없을 뿐 아니라, 검출부인 Moire scale 과 plunger 기구의 응답성이 낮기 때문에 고주파성분을 포함한 진동의 측정이 불합리하다는 결점이 있다.

그래서 상술한 2가지 방법의 대체 방법으로 간단하고 값싸게 제작할 수 있는 새로운 원호 보간정밀도 측정장치와 측정 system(이하 R- $\theta$ 법이라 한다)을 개발하여 Circular Test법과 Double ball bar법과 측정결과를 비교 검토한 결과 그 우수성은 이미 보고<sup>(9)(10)</sup>되었다.

본 연구에서는 R- $\theta$ 법 측정기의 응답단계로서 R- $\theta$ 법에 의해 얻어진 운동궤적으로부터 복합오차 검출법과 본 측정기로 측정한 오차 data를 이용하여 원래의 NC program을 보정하여 수정된 NC program을 재실행하는 방법에 의한 고정밀도 가공 방법을 제안 하였다.

## 2. 복합오차 측정법

NC공작기계를 원호보간운동 시켰을 때 운동오차의 궤적과 기계의 오차원인과의 관계에 대해서 W.Knapp에 의한 연구가 있지만 Kakino에 의해 오차원인의 분석이 체계화 되어 얻어진 운동궤적<sup>(4)</sup>을 pattern화 하였다.

NC공작기계의 운동오차는 (1)위치에 의존하는 오차 (2)제어계에 의존하는 오차 2가지로 분류된다. 위치에 의존하는 오차를 다시 분류하면 (a)Ball screw, Linear scale 등의 주기적인 오차 (b)Backlash, Backlash 보정에 의한오차 (c)Pitch error에 의한 오차 (d)2축간의 직각도 오차로 분류되고, 제어계에 의존하는 오차를 분류하면 (a)position-loop-gain 불일치 (b)Stick motion (c)Servo의 응답지연에 의한 반경감소 (d)Velocity-loop-gain에 의한 오차로 분류된다.

이미 발표한 R- $\theta$ 법 측정 System 개발에서는 운동오차의 요인중 Ball screw의 Pitch error에 의한 주기적인 오차, Backlash와 Backlash 보정에 의한 오차, X-Y 두축간의 직각도 오차에 의한 오차, position-loop-gain의 불일치에 의존하는 오차, Servo 응답지연에 의한 반경감소에 대한 운동궤적과 오차요인에 대해서 고찰하였다. 오차가 단일의 경우에는 비교적 쉽게 그 오차원인을 진단할 수 있다. 그러나 실제의 원호보간 정밀도 측정시에는 여러가지 오차가 하나의 원호형상에 혼합되어 나타난다.

그래서 본 연구에서는 실제 Machining Center에서 현저하게 나타나는 오차중 45° 방향으로 변위를 주는 직각도오차, position-loop-gain의 불일치, Backlash에 대해서 고찰하였다. 단, Backlash는 정량적으로 오차를 줄 수 없기 때문에 Backlash 대신에 Backlash 보정을 주었다.

### 2-1. 2축의 직각도 오차와 position-loop-gain 불일치의 복합오차

#### (1) 직각도 오차에 의한 오차 이론식<sup>(6)</sup>

두 축의 운동방향에 직각도 오차가 존재하는 것은 실제로 매우 많다. 이 오차는 ① 하나의 구조체에 두개의 안내가 존재하는 경우에 두개의 안내면이 직각이 되지 않는 경우 ② Column의 기초불량에 의해 Column이 전후 좌우로 기울어져 결과적으로 두개의 운동축이 직교하지 않는 경우등이 있다.

직각도 오차의 이론식은 Fig. 1에 나타난 것 처럼 Y축이 X축에 대해서 CCW 방향으로 미소한 각  $c(\mu\text{m}/$

mm)만큼 경사져 있다고 생각할 수 있다. 이때 Y축 이송에 따라서 생기는 X방향의 오차  $C_x$ 는

$$C_x = Y \times \tan(c) = c \times Y(Q \text{ } c\alpha 0)$$

이 된다.  $C_y=0$ 이기 때문에 오차 Vectro는  $\vec{c}(C_x, 0)$ 로 된다. 이것을 오차의 기본식

$$\Delta R = \frac{1}{R}(C_x \times X + C_y \times Y) \tag{1}$$

에 대입하면

$$\Delta R = \frac{1}{R}(cY \times X) \tag{2}$$

식(2)에  $X=R \cos \theta$ ,  $Y=R \sin \theta$ 을 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta R &= cR \sin \theta \cos \theta \\ &= \frac{cR}{2} \sin 2\theta \quad (\text{단, } \theta \text{는 CW방향이 양수}) \end{aligned} \tag{3}$$

로 직각도 오차가 주어진다. 식(3)으로부터 알 수 있듯이 직각도 오차는 이송속도에 의존하지 않고 Fig. 1 처럼 장축과 단축의 차는  $2cR$ 이다. 따라서 장축과 단축의 차를 구하면, 즉  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$ 일때의 오차 Data만 알면 간단히 직각도오차를 구할 수 있다. Fig. 2는 직각도 오차  $20\mu\text{m}/150\text{mm}$ 만을 주었을 때 직각도 오차를 검출한 것이다.

(2) position-loop-gain의 불일치에 의한 오차 이론식<sup>(4)</sup>  
X축과 Y축 각각의 position-loop-gain을  $K_{sx}$ ,  $K_{sy}$

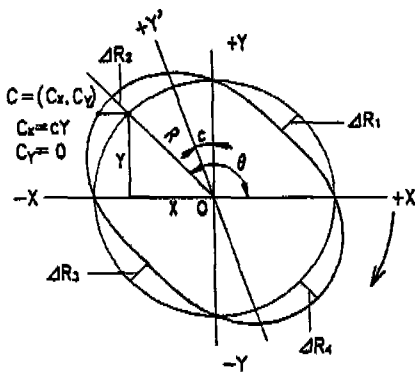


Fig. 1 Coordinate system of evaluation squareness error

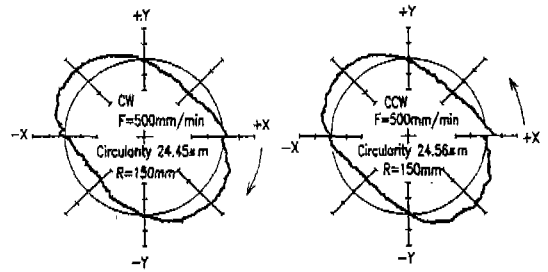


Fig. 2 Effect of squareness error

로 했을 경우를 생각하면, 이때 지령치와의 오차인 위치편차  $Dx$ ,  $Dy$ 는 다음과 같다.

$$Dx = \frac{Vx}{K_{sx}}, \quad Dy = \frac{Vy}{K_{sy}} \tag{4}$$

따라서, 오차 Vectro는

$$\vec{c} = \left( -\frac{Vx}{K_{sx}}, -\frac{Vy}{K_{sy}} \right) \tag{5}$$

로 주어진다. 단,  $Vx$ ,  $Vy$ 는 각각 이송속도 F의 X, Y 축 성분인  $F'(\text{mm/sec})=F(\text{mm/min})/60$ 으로 원호보간 이송할 때

$$Vx = -(\pm F' \sin \theta) \tag{6}$$

$$Vy = \pm F' \cos \theta \tag{7}$$

으로 된다. 단 위쪽이 CCW 방향, 아래가 CW 방향으로 움직였을 경우이다. 식 (5), (6), (7)을 기본식 (1)에 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{-(\pm F' \sin \theta)}{K_{sx}} \cos \theta - \frac{\pm F' \cos \theta}{K_{sy}} \sin \theta \\ &= \pm \epsilon \times \frac{F'}{2} \sin 2\theta \end{aligned} \tag{8}$$

(단,  $\epsilon = \frac{K_{sy} - K_{sx}}{K_{sx} \times K_{sy}}$  : position-loop-gain의 불일치 정도)

이 된다. Fig. 3  $\{(K_{sx}, K_{sy})=(40\text{sec}^{-1}, 30\text{sec}^{-1})\}$ 처럼  $45^\circ$  방향으로 장축을 가진 타원이 된다. 회전방향이 바뀌면 장축과 단축이 바뀐다.

(3) Backlash에 의한 오차 이론식

Y축에 Backlash가  $a \mu\text{m}$  존재하는 경우를 생각하면 Y축에 대해 정방향으로 이송을 한 경우에는  $a/2$ 만큼 위치결정 오차가 생기고 부방향으로 이송하였을 경우에

는  $-a/2$ 만큼 위치결정 오차가 생긴다. 따라서 오차

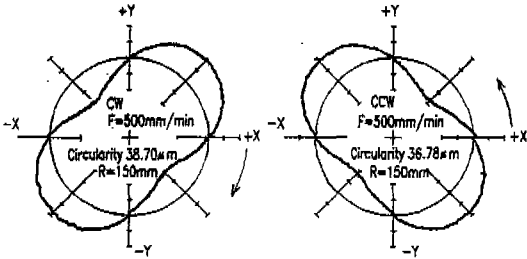


Fig. 3 Effect of unbalance of position-loop-gain

$\dot{C} = (0, \pm \frac{a}{2})$ 로 된다. 이것을 식(1)에 대입하면

$$\Delta R = \pm \frac{a}{2} \cos \theta \quad (9)$$

로 된다. 단, 부호는 정방향 일때는(-), 부방향 일때는(+ )이다. Fig. 4는 Backlash 보정을  $20\mu\text{m}/150\text{mm}$ 인 경우의 운동궤적이다.

(4) 직각도 오차 검출 방법

$R-\theta$ 법에서는 Rotary encoder에 의해 정확히 각도 검출을 하고 있기 때문에 쉽게  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$  일때의 오차 Data를 구하여 직각도 오차를 구할 수 있

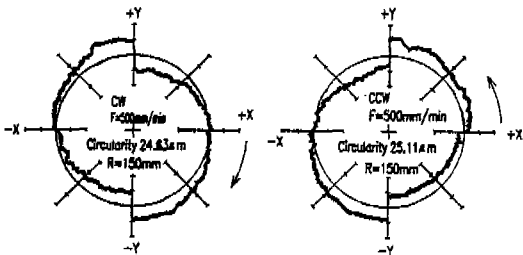


Fig. 4 Effect of backlash compensation

다. 그러나 실제의 Machining Center에서는 다양한 오차가 포함되기 때문에 그들의 오차를 제거하지 않으면 안된다.

우선 검출기의 Noise나 Ball screw의 pitch에 의한

주기적인 오차 등의 반경방향의 진동에 의한 오차를 이 동평균처리<sup>(10)(11)</sup>에 의해 제거하여 전체의 운동궤적 형상을 파악하는 것으로 한다. 또한 그 처리각도는  $10^\circ$ 로 한다.

또한 직각도 오차와 똑같이  $45^\circ$  방향으로 장축을 가진 position-loop-gain의 불일치에 의한 오차를 제거하지 않으면 안된다. 이하에 그 방법을 서술한다.

1) position-loop-gain의 불일치 제거  
position-loop-gain의 불일치에 의한 오차는 식(8)과 같다. 간략하게 하기 위해 식(8)를

$$\Delta R = \pm \delta \sin 2\theta \quad (10)$$

$$[\delta = (\frac{1}{K_{sx}} - \frac{1}{K_{sy}}) \frac{F'}{2}]$$

라 한다. 지금 직각도 오차와 position-loop-gain에 의한 오차가 포함되어진 운동궤적을 생각하면, 그때의 오차  $\Delta R$ 은

$\Delta R = (\text{직각도 오차}) + (\text{position-loop-gain 불일치에 의한 오차})$

로 된다. 따라서 CCW 및 CW는

$$\Delta R_{ccw} = (cR/2)\sin 2\theta + \delta \sin 2\theta \quad (11)$$

$$\Delta R_{cw} = (cR/2)\sin 2\theta - \delta \sin 2\theta \quad (12)$$

$[(\Delta R_{ccw} : \text{ccw}$  경우의 오차 )  
 $(\Delta R_{cw} : \text{cw}$  경우의 오차 )

식 (11)(12)로부터 직각도 오차를 검출할때는 식(11)+식(12)에 의해 구한다.

$$(\Delta R_{ccw} + \Delta R_{cw})/2 \quad (13)$$

position-loop-gain을 검출할때에는식(11)-식(12)에 의해 구한다.

$$(\Delta R_{cw} + \Delta R_{ccw})/2 \quad (14)$$

따라서 식(13)로부터 position-loop-gain의 불일치에 의한 오차를 제거할 수 있다.

2) 직각도 오차검출 Algorithm

i) CW, CCW의 data를 이동평균처리<sup>(10)(11)</sup>한다.

- ii)  $(CW+CCW)/2$ 를 구한다.
- iii) 장축과 단축의 차  $L$ 을 구한다.  
 $L = \Delta R_2 + \Delta R_4 - \Delta R_1 - \Delta R_3$  (Fig. 1로부터)(15)

iv)  $2cR=L$ 로부터 ( $R$ 은 측정반경)  
 $cR = L/2$  (16)

식(16)에서  $Y$ 축이  $X$ 축에 대해서  $c \mu\text{m}/R \text{ mm}$ 만큼  $CCW$ 방향으로 기울어져 있다. 즉, 식(16)에서  $L > 0$  일때  $Y$ 축이  $X$ 축에 대해서  $CCW$  방향으로  $L < 0$  일때  $CW$  방향으로 기울어진다.

3) position-loop-gain 불일치에 의한 오차 검출 Algorithm

- i)  $CW, CCW$ 의 data를 이동평균처리한다. (처리 각도 약  $10^\circ$ )

- ii)  $(CW - CCW) / 2$ 를 구한다.
- iii) 장축과 단축의 차  $L$ 을 구한다.  
 $L = \Delta R_2 + \Delta R_4 - \Delta R_1 - \Delta R_3$  (Fig. 1로부터)(15)

iv)  $2\epsilon \times F' = L$ 에서  
 $\epsilon = L/2F'$

따라서  $L/2F'$ 의 값이 측정 data로부터 구하여진 실제의 불일치 정도

4) 직각도 오차와 position-loop-gain의 불일치 복합오차시 각각의 오차 검출

직각도 오차 및 position-loop-gain의 불일치에 의한 오차는 모두  $45^\circ$  방향으로 장축을 가지는 오차이다. 실험용 Machining Center에서  $R=150\text{mm}, F=500\text{mm/min}$ 의 조건으로 직각도 오차  $20 \mu\text{m}/150 \text{ mm}$  및 position-loop-gain  $(K_{sx}, K_{sy})=(40, 30)$  일때 측정결과를 Fig. 5(a)에 나타낸다. 그림에 나타난 것처럼  $CW$ 와  $CCW$  모두 전체의 형상을 잘 알수가 있다.

Fig. 5(b)의 결과를,  $(CW+CCW)/2$ 와  $(CW/CCW)/2$ 의 형상을 각각 Fig. 6(a), (b)에 나타내었다.

Fig. 6(a)는 직각도 오차  $20 \mu\text{m}/150\text{mm}$ 만을 주었을 때에 직각도 오차를 검출한 Fig. 2와 일치한다. 또한 Fig. 6(b)는 position-loop-gain의 불일치  $\{(K_{sx}, K_{sy})=(40, 30)\}$ 에 의한 오차만을 주었을 때, posi-

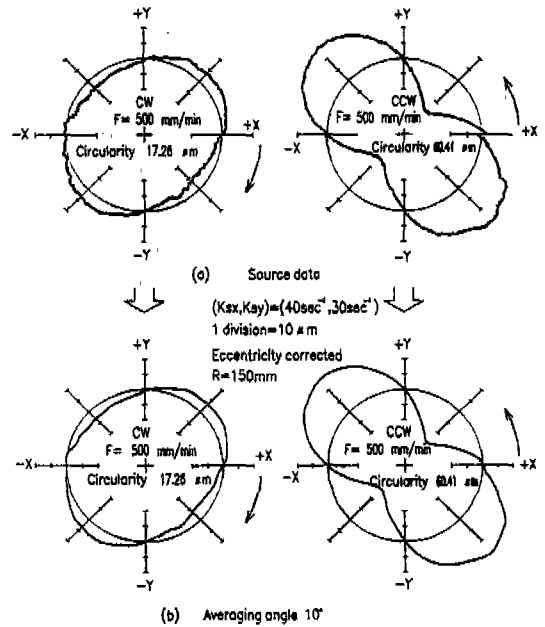


Fig. 5 Effect of composite error (squareness error + unbalance of position-loop-gain)

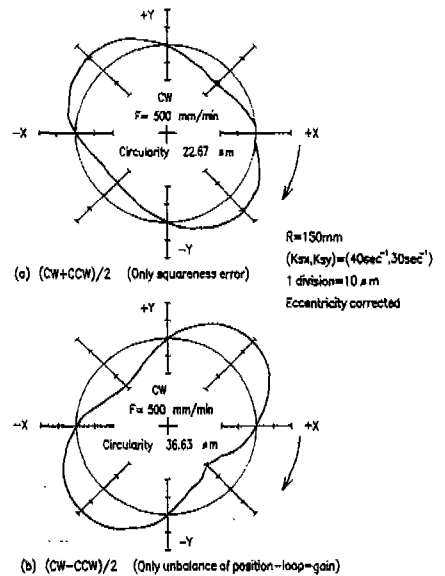


Fig. 6 Analysis of squareness error and unbalance of position-loop-gain in composite error

tion-loop-gain의 불일치를 검출한 Fig. 3의 결과와 일치한다. 정확히 일치하지 않는 것은 이동평균처리하면 진원도가 약간 변하기 때문이다.

Fig. 7에 직각도 오차만 주어진 경우와, 직각도 오차에 position-loop-gain의 불일치를 주었을 때의 직각도 오차 측정치와 이송속도와의 관계를 나타낸다. 설정한 직각도 오차는 20  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}/150\text{mm}$ 이고, position-loop-gain의 불일치는  $(K_{sx}, K_{sy})=(40\text{sec}^{-1}, 30\text{sec}^{-1})$ 이다. 그림에서 직각도 오차 측정치는 position-loop-gain의 불일치에 의한 오차가 포함되어도 직각도 오차만 있을 때에 검출한 측정치와 거의 일치하고 있다. 이것으로부터 직각도 오차는 position-loop-gain의 불일치에 의한 오차가 포함되어도 검출할 수가 있다는 것을 알았다.

Fig. 8에 position-loop-gain의 불일치만 있는 것과 position-loop-gain의 불일치에 직각도 오차를 주었을 경우의 position-loop-gain 불일치를 검출한 값과 이송속도와의 관계를 나타낸다. 주어진 오차 설정값은 Fig. 7과 똑같다. Fig. 8로부터 어떠한 직각도 오차를 포함하여도 position-loop-gain의 불일치를 검출한 측정값과 일치하고 있다.

따라서 position-loop-gain의 불일치는 직각도 오차가 포함되어도 검출할 수 있다. 이처럼 직각도 오차의

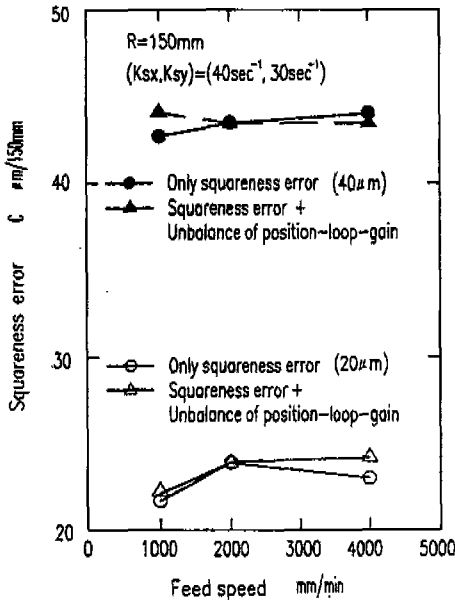


Fig. 7 Relationship between squareness error and feed speed in composite error

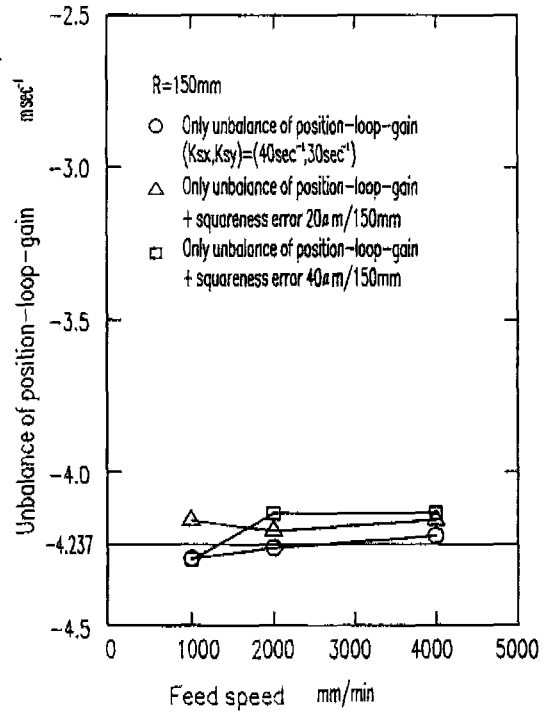


Fig. 8 Relationship between unbalance of position-loop-gain and feed speed in composite error

position-loop-gain 불일치의 오차가 혼합되어 있을 경우는  $(CW/CCW)/2$ 에 의해 각각의 오차를 검출할 수가 있다.

### 2-2 직각도 오차와 Backlash 보정의 복합오차시 각각의 오차검출

Fig. 9(a)에 직각도 오차만을 주었을 경우와 (b)에 직각도 오차에 Backlash 보정을 주었을 경우의 측정결과를 나타낸다. Fig. 9(b)에서는 (a)에 비해서 45° 방향의 변위가 CW일때 작고, CCW 일때 크게 나타내져 있다.

Fig. 10에 Fig. 9을 이동평균처리 후  $(CW+CCW)/2$  및  $(CW-CCW)/2$ 의 결과를 나타낸다. Fig. 10(a)의 (1)과 (b)의 (1) 45° 방향의 변위는 거의 일치하고, Backlash 보정이 포함되어도 직각도 오차 성분을 검출할 수 있다는 것을 알았다. 또한 Fig. 10(b)의 (2)로부터 Backlash 보정은 position-loop-gain의 불일치에 의한 오차와 똑같이 45° 방향으로 오

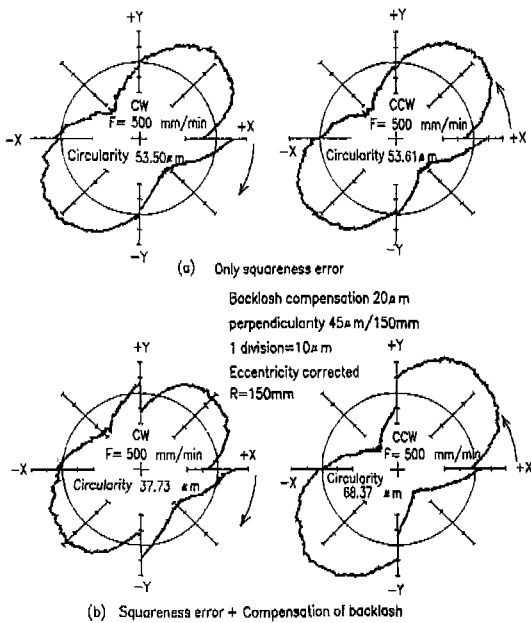


Fig. 9 Effect of composite error

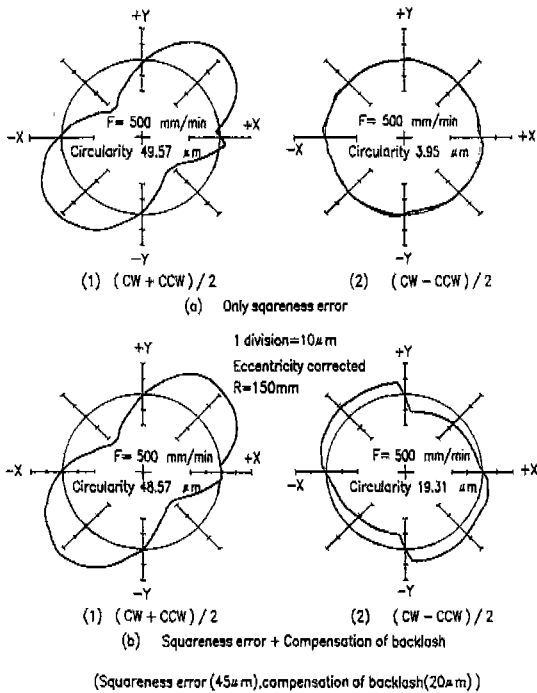


Fig. 10 Analysis of squareness error in composite error

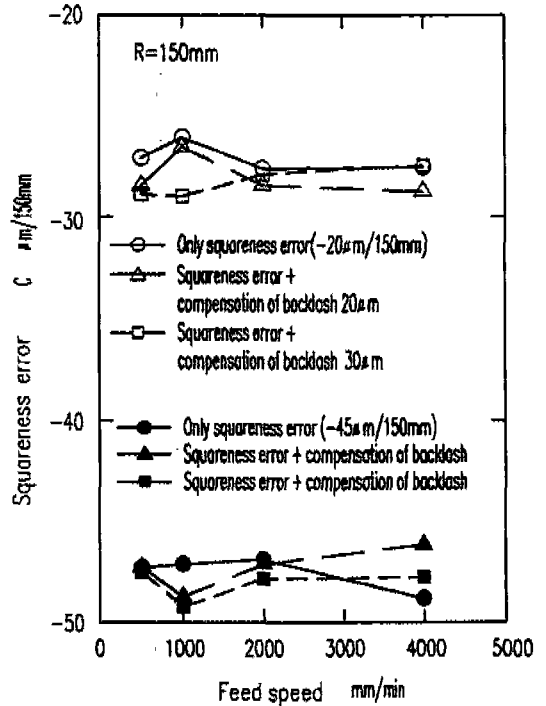


Fig. 11 Relationship between squareness error and feed speed in composite error

차가 주어지는 것을 알았다.

Fig. 11에 직각도 오차만 주어진 경우와 직각도 오차에 Backlash 보정을 한 경우의 직각도 오차 측정치와 이송속도와의 관계를 나타낸다. 설정한 직각도 오차는  $-20\mu\text{m}$ ,  $-45\mu\text{m}/150\text{mm}$ , Backlash 보정 지령치는  $20\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$ 이다. 그림으로부터 직각도 오차는 Backlash 보정이 포함되어도 검출할 수 있는 것을 알았다.

이처럼 직각도 오차에 Backlash 보정 (Backlash)가 포함되어도  $(CW+CCW)/2$ 에 의해 직각도 오차를 검출할 수가 있다.

### 2-3 position-loop-gain 불일치와 Backlash 보정의 복합오차시 각각의 오차 검출

position-loop-gain 불일치에 의한 오차와 Backlash 보정은 CW, CCW 있어서  $45^\circ$  방향으로 똑같이 오차가 주어진다. 따라서 position-loop-gain 불일치에 Backlash 보정 (Backlash)이 포함되어지면 position-loop-gain 불일치를 검출할 수 없다.

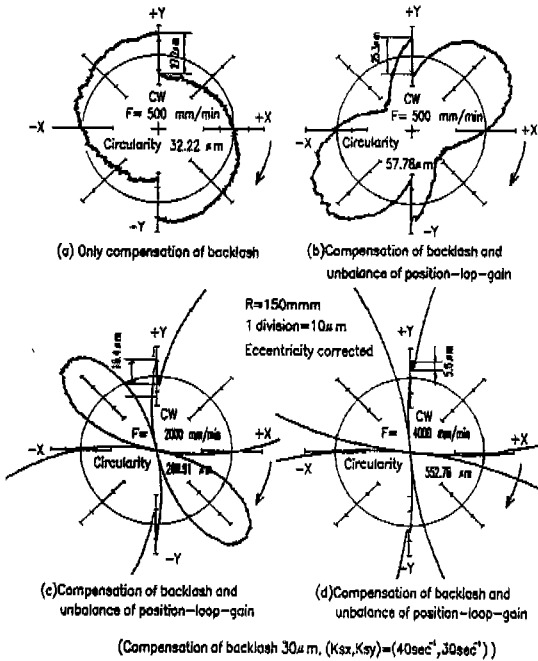


Fig. 12 Effect of feed speed

Fig. 12에 나타난 것처럼 Backlash 보정량에 position-loop-gain 불일치에 의한 오차가 포함되어지면 이송속도의 증가에 따라 Backlash 보정량은 감소하고, Backlash 보정에 의한 영향이 작게 된다.

이상의 결과를 정리하면, 본 연구에서 고찰한 것 중에서 직각도 오차에는 어떠한 종류의 오차가 포함되어도 검출할 수가 있고, position-loop-gain에 대해서는 Backlash 보정이 포함되면 position-loop-gain의 불일치를 검출할 수가 없다는 것을 알았다.

### 3. 보정된 NC program을 재실행시키는 방법에 의한 고정밀도 가공방법

공작기계의 최고의 성능을 발휘하기 위해서는 그 기계 전체의 작업공간 전체에 걸쳐서 보정을 행하는 방법보다는, 가공형상을 직접 평가하여 오차 보정을 하는 방법이 유리하다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 가공하고 싶은 형상을 미리 R-θ법 측정기로 측정해 놓고, 측정 data를 이용하여 원래의 NC program을 수정하여 수정된 NC

program을 Feedback 시키는 것에 의해 NC 공작기계의 최고의 정밀도를 끌어내는 방법을 고안하였다. 이 방법에 의해서 공작기계의 2차원 원호보간 정밀도를 비약적으로 개선할 수 있는데, 이 방법의 오차보정 순서는 다음과 같다.

i) 원호를 1250개의 직선보간으로 분할 근사한 NC program을 작성한다(본 연구에서 고안한 측정장치의 측정 data는  $(r, \theta)$ 의 점열의 집합이다. 실제의 운동이 이 점열을 연결한 직선으로 근사하여 측정을 하기 때문에 Rotary encoder의 분해능이 충분히 크지 않으면 직선 분할 근사오차가 무시될 수 없게 크게 된다. 그래서 반경 R의 원을 측정할때에 Rotary encoder의 분해능에 의해 직선 분할 근사오차가 어떻게 변하는 가를 계산해 본 것이 Fig. 13이다. Fig. 13으로부터 반경 R이 150mm 이하의 경우는 Rotary encoder의 분해능이 2500 ppr(Pulse per round)이상이면 직선 근사오차는 무시할 수가 있다는 것을 알았다.

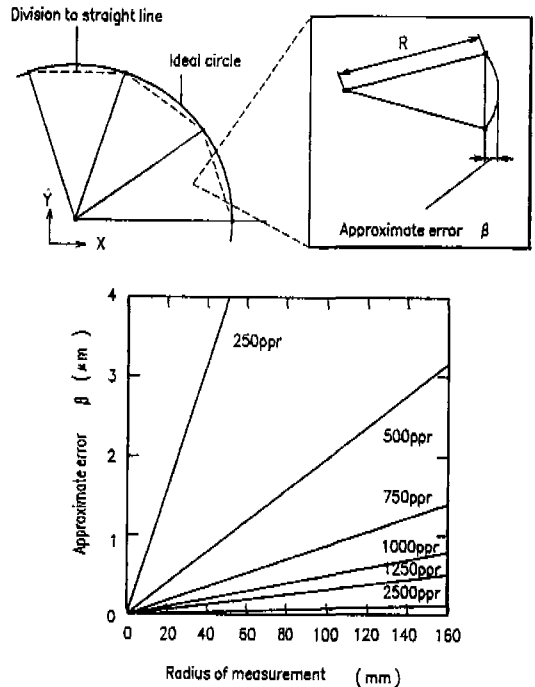


Fig. 13 Relationship between radius of measurement and approximate error of division into straight line



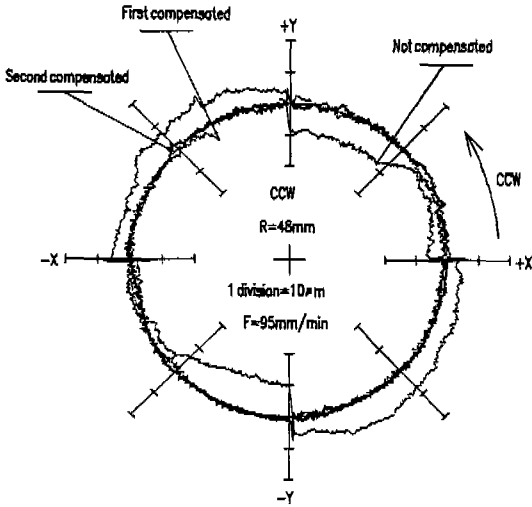


Fig. 14 Compensation of circular movement

ii) R- $\theta$ 법 측정기에서 원호보간정밀도를 측정하여 그 측정 data를 computer에 입력한다.

iii) 얻어진 오차 data를 이용하여 원래의 NC program을 보정한다.

iv) 보정된 NC program을 재실행하여 만족할 만한 정밀도가 얻어질 때까지 보정을 반복한다.

이 보정의 결과를 Fig. 14에 나타낸다. 이 실험에서는 1회째의 보정으로 거의 최고의 정밀도를 얻고 있다. 보정을 2회, 3회 반복하여도 1회째의 결과 이상으로 정밀도를 향상시킬 수는 없었다. 그 이유는 측정대상 Maching Center의 위치결정 정밀도에서 Y축의 1방향 반복 정밀도가 3.5 $\mu$ m정도이기 때문에, 이 보정에 의해서 거의 한계적 성능을 발휘하고 있어 이 이상의 정밀도 향상은 곤란하다고 생각한다. 이렇게 보정한 NC program을 이용해서, 실제의 가공정밀도가 어느 정도 향상되었는가를 Direct test에 의해 측정해본 결과, 위에서 설명한 보정방식이 유효함이 확인 되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Machining Center에서 비절삭방법으로 원호보간 정밀도에 의한 공작기계의 운동정밀도를 측정하기 위해 R- $\theta$ 법이라는 새로운 측정장치를 개발하여 이 측정기에 의해 얻어진 측정 Data를 해석하여 Machining Center의 복합오차 고찰과 고정밀도한 가

공 방법을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두 축간의 직각도 오차와 position-loop-gain의 불일치에 의한 오차가 복합되어 있을때 각각의 오차를 검출하는 방법을 제시하였다.

(2) 직각도 오차에 Backlash 보정이 포함되어도 직각도 오차를 검출할 수 있다.

(3) position-loop-gain 불일치와 Backlash보정이 포함되면 position-loop-gain의 불일치를 검출할 수가 없다.

(4) 측정된 오차 Data를 이용하여 원래의 NC program을 보정하여 수정된 NC program을 재실행 하는 방법에 의해 고정밀도 가공을 할 수 있다.

#### 參考文獻

1. Knapp, W.: Test of the Three Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors, Annals of the CIRP, 32, 1(1983), 459
2. Knapp, W. and Hrovat, S.: The circular Test for Testing NC-Machine Tools, S. Hrovat, (1987), Zurich
3. 埜野義昭, 井原之敏, 龜井明敏, 伊勢徹: NC 工作機械の運動精度に關する研究(第1報)DBB 法にする運動誤差の測定と評價, 精密工學會誌, 52-7(1988), 1193
4. 埜野義昭, 井原之敏, 原章: DBB 法にする NC 工作機械の精密評價方法, リアライズ社(1990)
5. Bryan, J.B. : A simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools (Part 1 : Principle and Application), Precision Engineering, 4-2(1982), 61
6. "Renishow Quick Check", Catalogue, Renishow Ltd., England, 1991
7. M. BURDEKIN and J. PARKK, "Contis-ure-A Computer Aided System for Accessing The contouring accuracy of Machine Tools", Proceedings of the twenty-seventh International Matador Conference, edited by B. J. Davies, pp.197-230
8. 堤正臣: ISO 檢査規格の概要とJIS化, マシニング

- センタのISO 精度検査と後の対応, 日本機械學會, No. 910-15(1991), 1
9. 堤正臣, 酒井浩二, 金貞淳: NC 工作機械の圓運動の新しい測定方法, 日本機械學會 論文集C論, 58-545(1992) 271
10. 김정순, 남궁 석, 堤正臣: Machining Center의 2차원 원호보간 정밀도 진단System의 개발, 한국정밀공학회, 제10권, 2호, 1993, 6
11. 岩尾憲三: コンピュータ計測のノウハウ(波形データ處理とそのマルゴリズム), Software Design, pp.134-143, 1991, 9月