

# 볼바를 사용한 회전 테이블의 기하학적 오차 추정

## Geometric Errors Estimation of a Rotary Table using Double Ball-bar

이광일<sup>1</sup>, 이동목<sup>1</sup>, 권성환<sup>1</sup>, 양승한<sup>1,✉</sup>  
Kwang-Il Lee<sup>1</sup>, Dong-Mok Lee<sup>1</sup>, Sung-Hwan Kweon<sup>1</sup> and Seung-Han Yang<sup>1,✉</sup>

1 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.)

✉ Corresponding author: syang@knu.ac.kr, Tel: 053-950-6569

Manuscript received: 2010.5.25 / Accepted: 2010.9.2

*In this paper, double ball-bar is used to estimate the geometric errors of a rotary table, which includes one-axial motion, two-radial motions and two-tilt motions, except the angular positioning error. To simplify the measurement procedures, three measurement steps have been designed and developed. At each measurement step, one end of the double ball-bar is fixed at the nose of spindle and the other end is located on the rotary table. And specific circular test path is planned to keep the distance between two balls as constant at ideal case. The relationship including the geometric errors of a rotary table and the measured distance between two balls which is distorted by the geometric errors is defined by using ball-bar equation. Each geometric error is modeled as 4<sup>th</sup> order polynomial considering C<sup>1</sup>-continuity. Finally the coefficients of polynomial are calculated by least-square method. Simulation is done to check the validation of the suggested method considering set-up errors and measurement noise. Suggested method is applied to estimate geometric errors of a rotary table of a 5-axis machine tool.*

Key Words: Double Ball-bar (볼바), Rotary Table (회전 테이블), Geometric Error Estimation (기하학적 오차 추정), Circular Test Path (원호 경로), Ball-bar Equation (볼바 방정식)

### 기호설명

a, b, c = rotational angle of rotary table A, B, C, (rad)  
R = nominal radius at ball-bar measurement, (mm)  
 $\Delta R_i$  = radial error at i-th measurement, i=1, 2, 3, (mm)  
 $\delta_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  = positional and angular error in i-direction of j-axis, i=x, y, z, j=a, b, c, (mm, rad)  
 $d_{ijk}$ ,  $e_{ijk}$  = k-th coefficient of positional and angular error in i-direction of j-axis, i=x, y, z, j=a, b, c, k=1, 2  
L = length of fixture at 2<sup>nd</sup> ball-bar measurement, (mm)  
 $EM_i$  = 4×4 error matrix of i-axis, i=a, b, c  
 $AM_i$  = 4×4 rotation matrix of i-axis, i=a, b, c  
 $T_i$  = actual pose of i-axis distorted by geometric errors, i=a, b, c

$TB_i$  = position of the ball-center fixed at the nose of spindle at i-th measurement, i=1, 2, 3  
 $WB_i$  = position of the ball-center located on the rotary table at and i-th measurement, i=1, 2, 3  
 $(t_{xi}, t_{yj}, t_{zi})^T, (w_{xi}, w_{yj}, w_{zi})^T$  = set-up error of  $TB_i$  and  $WB_i$  at i-th measurement, i=1, 2, 3  
 $A_i$  = covariance matrix at i-th measurement, i=1, 2, 3  
 $\bar{x}_i$  = coefficient vector at i-th measurement, i=1, 2, 3  
 $b_i$  = radial error vector at i-th measurement, i=1, 2, 3

### 1. 서론

복잡한 형상의 부품을 가공함에 있어 공구와 공작물 간의 자세 결정은 가공 공정의 간소화와

최종 가공품의 품질향상을 위해 반드시 필요하다. 이를 위하여 기존 직선 3 축 기반의 공작기계에 2 개의 회전 테이블이 결합된 5 축 공작기계가 널리 연구 및 개발되고 있다.<sup>1</sup> 그러나 공작기계의 기하학적 오차는 각 이송축의 제작 및 축 간의 조립에 있어 필연적으로 발생하며, 이는 최종 가공품의 품질에 악영향을 나타내기때 반드시 측정을 통하여 평가 및 보정해야 한다.<sup>2</sup>

직선 이송축의 기하학적 오차를 측정하기 위해 레이저 간섭계 기반의 측정을 널리 사용하고 있으며,<sup>3</sup> 정전용량 센서 및 PSD 를 사용한 측정 시스템을 연구 및 개발하고 있다.<sup>4,5</sup> 직선 3 축 공작기계의 경우 직선 이송축의 측정데이터와 동차변환행렬(homogeneous transformation matrix) 기반의 오차합성 모델을 사용하여 공작물과 공구 사이의 체적오차(volumetric error)를 계산하고 보정함으로써 최종적으로 공작기계의 정밀도를 향상시키는 방법이 널리 알려져 있다.<sup>6-8</sup>

그러나 5 축 공작기계를 구성하는 회전 테이블의 기하학적 오차 측정과 관련한 연구는 현재로써 미흡하다.<sup>9,10</sup> 레이저 간섭계와 정밀 인덱스를 사용하면 회전 테이블의 회전축에 대한 각 위치 오차(angular positioning error)는 측정하지만, 축 방향 오차(axial motion), 반경 오차(radial motion) 그리고 틸트 오차(tilt motion)의 측정에는 문제가 있다. 이를 극복하기 위하여 오토콜리메이터(autocollimator)와 LVDT 를 사용한 연구가 있으나, 고가의 측정 장비 및 복잡한 측정 과정을 필요로 한다.<sup>11</sup> 또한 볼바 및 2 차원 Probe 를 사용하여 회전 테이블의 기하학적 오차를 측정하는 경우 측정과정에서 발생하는

셋업 오차(set-up error) 및 각각의 기하학적 오차를 정량적으로 정의함에 있어 어려움이 있다.<sup>12,13</sup>

본 논문에서는 볼바를 사용하여 회전 테이블의 각 위치 오차를 제외한 5 개의 기하학적 오차를 추정한다. 측정의 간소화를 위하여 3 번의 측정을 진행하며, 측정데이터에 포함된 셋업 오차의 영향을 분리한다. 각각의 기하학적 오차는 C<sup>1</sup>-연속성을 고려한 4 차 다항식으로 모델링 하고, 볼바 방정식을 사용하여 기하학적 오차와 측정데이터의 관계를 정의한다.<sup>14,15</sup> 최소자승법을 적용하여 4 차 다항식의 계수를 계산함으로써 최종적으로 기하학적 오차를 추정한다. 모의실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하고 5 축 공작기계의 회전테이블에 적용하여 기하학적 오차를 추정 및 보정한다.

## 2. 회전 테이블의 기하학적 오차 추정

### 2.1 기하학적 오차의 다항식 모델링

공간상에 위치하는 회전 테이블 C 는 회전축 Z 에 대하여 회전 운동만을 추종하도록 설계 및 제작하지만, 구성품과 제작 과정의 불완전에 의하여 예상하지 못한 거동을 나타낸다. 이러한 거동은 강체의 6 자유도에 해당하는 6 개의 기하학적 오차로 정의하면 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 축 방향 오차( $\delta_{zc}$ ), 2 개의 반경 오차( $\delta_{xc}$ ,  $\delta_{yc}$ ), 각 위치 오차( $\epsilon_{zc}$ ) 그리고 2 개의 틸트 오차( $\epsilon_{xc}$ ,  $\epsilon_{yc}$ )로 모델링 한다. 여기서 6 개의 기하학적 오차는 회전 테이블의 회전각 c 에 종속적이다. 기하학적 오차에 의하여 왜곡된 회전 테이블의 자세 T<sub>c</sub>는 식 (1)과 같이 모델링 한다. 기하학적 오차는 동일한 기준에서의 평가를 위하여 절대좌표계 {F}에 대하여 정의한다.

$$T_c = EM_c AM_c \tag{1}$$

여기서,

$$EM_c = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zc} & \epsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ \epsilon_{zc} & 1 & -\epsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\epsilon_{yc} & \epsilon_{xc} & 1 & \delta_{zc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$AM_c = \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{를 나타낸다.}$$

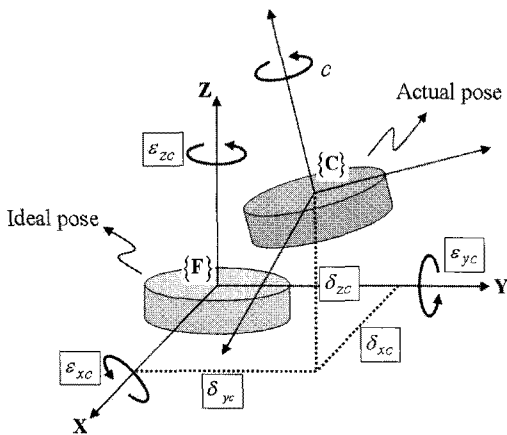


Fig. 1 Geometric errors of a rotary table

회전 테이블의 기하학적 오차는 회전각  $c$  에 종속적이며, 회전각  $c$  가  $0, 2\pi$  인 경우  $C^1$ -연속성을 나타낸다. 또한 회전각  $c$  가  $0$  인 경우를 회전 테이블의 기준 자세로 정의하면, 회전각  $c$  가  $0, 2\pi$  일 때 기하학적 오차는  $0$  이다. 이를 고려하여 기하학적 오차를 4 차 다항식으로 나타내면, 회전 테이블의 기하학적 오차는 식 (2)와 같이 모델링 한다.

$$\begin{aligned} \delta_{ic} &= d_{ic1}(c^4 - 2\pi c^3 - 2\pi^2 c^2 + 4\pi^3 c) \\ &\quad + d_{ic2}(c^3 - 3\pi c^2 + 2\pi^2 c), \\ \varepsilon_{ic} &= e_{ic1}(c^4 - 2\pi c^3 - 2\pi^2 c^2 + 4\pi^3 c) \\ &\quad + e_{ic2}(c^3 - 3\pi c^2 + 2\pi^2 c), \quad i = x, y, z \end{aligned} \quad (2)$$

**2.2 기하학적 오차 추정**

회전 테이블의 기하학적 오차를 추정하기 위하여 볼바를 사용하는 경우 초기  $TB_i$ 와  $WB_i$ 를 설치할 때 셋업 오차가 필연적으로 발생한다. 회전 테이블 좌표계  $\{C\}$ 의 자세에 대한 불확실에 의하여  $TB_i$ 와  $WB_i$ 를 설계된 좌표에 정확하게 위치하는 것이 어려운 것과  $WB_i$ 를 소켓(socket)에 고정함에 있어 물리적인 구속력 등에 의하여 셋업 오차가 발생한다. 이러한 셋업 오차는  $TB_i$ 와  $WB_i$ 에 모두 나타나며, 각각  $(t_{xi}, t_{yi}, t_{zi})^T, (w_{xi}, w_{yi}, w_{zi})^T$ 로 표현한다. 일정한 값(constant)을 나타내는 셋업 오차를 기하학적 오차의 4 차 다항식 계수와 함께 계산함으로써 측정시 발생하는 셋업 오차의 영향을 분리한다.

**2.2.1 반경 오차  $\delta_{xc}, \delta_{yc}$  추정**

반경 오차  $\delta_{xc}, \delta_{yc}$ 를 추정하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 볼바를 설치한다. 회전 테이블 좌표계  $\{C\}$ 의 원점에  $TB_1$ 를 위치시킬 때 셋업 오차  $(t_{x1}, t_{y1}, t_{z1})^T$ 가 발생하며,  $WB_1$ 을  $(R, 0, 0)^T$ 에 위치하는 경우 셋업 오차  $(w_{x1}, w_{y1}, w_{z1})^T$ 가 나타난다. 이러한 경우 회전 테이블의 회전각  $c$ 에 의한  $WB_1$ 의 위치는 식 (1)을 사용하여 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$WB_1 = T_c [R + w_{x1} \quad w_{y1} \quad w_{z1} \quad 1]^T \quad (3)$$

볼바 방정식을 사용하여  $TB_1, WB_1$ 와 볼바 측

정데이터  $R + \Delta R_1$ 의 관계를 나타내면 식 (4)와 같이 정의된다. 여기서 기하학적 오차와 셋업 오차의 고차항은 크기가 미소하기에 고려하지 않는다.

$$\begin{aligned} (R + \Delta R_1)^2 &= |TB_1 - WB_1|^2 \\ \Delta R_1 &= \cos\theta(\delta_{xc} - t_{x1}) + \sin\theta(\delta_{yc} - t_{y1}) + w_{x1} \end{aligned} \quad (4)$$

볼바의 측정 방향에 의하여 측정데이터  $R + \Delta R_1$ 은 식 (4)와 같이 반경 오차  $\delta_{xc}, \delta_{yc}$ 와 셋업 오차  $t_{x1}, t_{y1}, w_{x1}$ 를 포함한다. 따라서 식 (2)를 식 (4)에 대입하면 측정데이터  $R + \Delta R_1$ 와 반경 오차  $\delta_{xc}, \delta_{yc}$ 의 다항식 계수는 식 (5)와 같다.

$$A_1 x_1 = b_1 \quad (5)$$

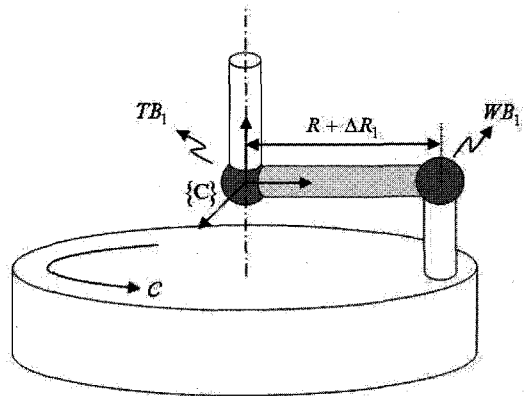


Fig. 2 Ball-bar set-up for 1<sup>st</sup> measurement

여기서,  $A_1$ 는 회전각  $c$ 로 구성된 행렬이며,  $x_1$ 은 다항식 계수( $d_{xc1}, d_{xc2}, d_{yc1}, d_{yc2}$ )와 셋업 오차( $t_{x1}, t_{y1}, w_{x1}$ )로 구성된 열벡터(column vector)이다. 그리고  $b_1$ 은 측정데이터  $\Delta R_1$ 로 이루어진 열벡터이다. 최소자승법을 사용하여 다항식 계수와 셋업 오차를 계산하고, 최종적으로 반경 오차  $\delta_{xc}, \delta_{yc}$ 를 추정한다.

**2.2.2 틸트 오차  $\varepsilon_{xc}, \varepsilon_{yc}$  추정**

틸트 오차  $\varepsilon_{xc}, \varepsilon_{yc}$ 를 추정하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 볼바를 설치한다. 이는 Fig. 2와 비교하면 길이  $L$ 의 치구(fixture)를 사용하는 차이를 보이며, 틸트 오차  $\varepsilon_{xc}, \varepsilon_{yc}$ 의 영향을 볼바의 측정 방향에 나타내기 위함이다.  $TB_2$ 와  $WB_2$ 는 식 (6)과 같다.

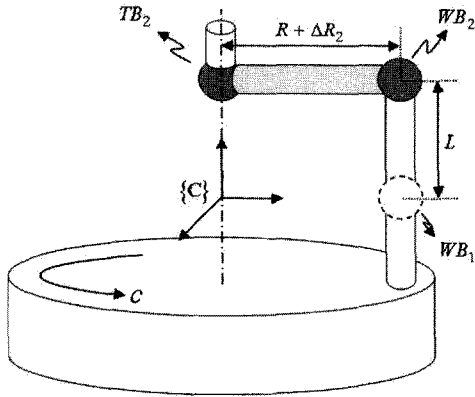


Fig. 3 Ball-bar set-up for 2<sup>nd</sup> measurement

$$TB_2 = [t_{x2} \quad t_{y2} \quad L + t_{z2} \quad 1]^T \quad (6)$$

$$WB_2 = \mathbf{T}_c [R + w_{x2} \quad w_{y2} \quad L + w_{z2} \quad 1]^T$$

앞서의 과정과 동일하게 볼바 방정식을 사용하면,  $TB_2$ ,  $WB_2$ 와 볼바 측정데이터  $R + \Delta R_2$ 의 관계는 식 (7)과 같다.

$$\Delta R_2 = \cos\theta(L\varepsilon_{yc} + \delta_{xc} - t_{x2}) + \sin\theta(-L\varepsilon_{xc} + \delta_{yc} - t_{y2}) + w_{x2} \quad (7)$$

틸트 오차  $\varepsilon_{xc}$ ,  $\varepsilon_{yc}$ 는 치구의 길이  $L$ 에 의하여 볼바의 측정데이터에 영향을 미치며, 앞서 추정된 반경 오차  $\delta_{xc}$ ,  $\delta_{yc}$ 를 식 (7)에 대입함으로써 측정데이터와 틸트 오차  $\varepsilon_{xc}$ ,  $\varepsilon_{yc}$ 의 다항식 계수는 식 (8)의 형태와 같다.

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 = \mathbf{b}_2 \quad (8)$$

최소자승법을 사용하여 다항식의 계수 및 셋업 오차를 계산함으로써, 틸트 오차  $\varepsilon_{xc}$ ,  $\varepsilon_{yc}$ 를 추정한다.

### 2.2.3 축 방향 오차 $\delta_{zc}$ 추정

축 방향 오차  $\delta_{zc}$ 를 추정하기 위하여 볼바를 Fig. 4와 같이 설치하는 경우 볼바 방정식을 적용함으로써 식 (9)의  $TB_3$ ,  $WB_3$ 과 측정데이터  $R + \Delta R_3$ 의 관계는 식 (10)과 같다.

$$TB_3 = [t_{x3} \quad t_{y3} \quad R + t_{z3} \quad 1]^T \quad (9)$$

$$WB_3 = \mathbf{T}_c [w_{x3} \quad w_{y3} \quad w_{z3} \quad 1]^T$$

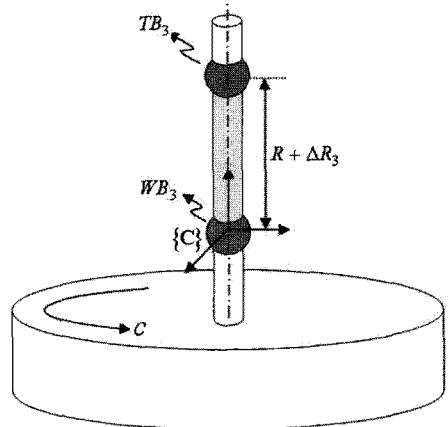


Fig. 4 Ball-bar set-up for 3<sup>rd</sup> measurement

$$\Delta R_3 = t_{z3} - w_{z3} - \delta_{zc} \quad (10)$$

측정데이터와 다항식의 계수 및 셋업 오차의 관계는 식 (11)과 같이 정의하며, 최소자승법을 적용하여 다항식의 계수를 계산함으로써 축 방향 오차  $\delta_{zc}$ 를 추정한다.

$$\mathbf{A}_3 \mathbf{x}_3 = \mathbf{b}_3 \quad (11)$$

3 번의 측정으로 회전 테이블의 5 개의 기하학적 오차를 추정하였다. 각 위치 오차  $\varepsilon_{zc}$ 는 회전 테이블의 자세에 영향을 미치지만, 생성된 측정 경로에서 볼바의 측정 방향과는 직각을 이루기 때문에 측정데이터에는 영향을 나타내지 않는다.

## 3. 모의실험 및 실험

### 3.1 모의실험

제한한 오차 추정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 모의실험을 진행한다. 모의실험에서는 회전 테이블의 6 개의 기하학적 오차를 생성하고 셋업 오차( $\pm 5 \sim 30 \mu\text{m}$ )를 사용하여  $TB_i$ ,  $WB_i$  그리고 볼바의 측정데이터  $R + \Delta R_i$ 를 계산한다. 또한 측정시 발생하는 측정오차를 고려하여 정규분포(normal distribution)를 나타내는 잡음(noise,  $\pm 0.05 \mu\text{m}$ )을 볼바의 측정데이터에 추가한다. 생성된 기하학적 오차와 추정된 기하학적 오차의 차이인 추정 오차(estimation error)를 평가함으로써 제안된 오차 추정 방법의 타당성을 나타낸다.

모의실험에 사용된 볼바의 길이  $R$  과 치구의

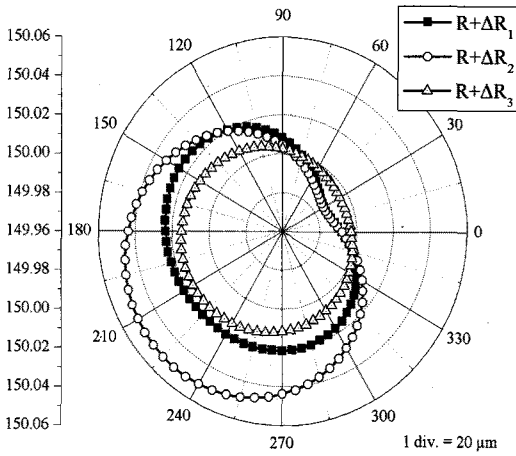


Fig. 5 Calculated ball-bar data for simulation

길이 L 은 각각 150mm 이다. 기하학적 오차, 셋업 오차 및 잡음이 포함된 측정데이터  $R+\Delta R_i$  는 Fig. 5 와 같이 계산된다. 생성된 기하학적 오차와 추정된 기하학적 오차 및 추정 오차는 Fig. 6 에 나타내었으며, 1000 회의 모의실험에서 발생한 추정 오차의 절대치는 Fig. 7, Table 1 과 같다. 모의실험 결과와 같이 제안된 알고리즘은 미소한 추정 오차를 나타낸다. 그러나 반경 오차  $\delta_{xc}$ ,  $\delta_{yc}$  의 추정에는 최대  $0.9\mu\text{m}$ , 틸트 오차  $\epsilon_{xc}$ ,  $\epsilon_{yc}$  의 추정에는 최대  $8.1\mu\text{rad}$  의 추정 오차를 나타내며, 이는 고정밀의

공작기계(분해능:  $1\mu\text{m}$ ,  $17.4\mu\text{rad}$ )에 적용 가능한 추정 오차이다.

### 3.2 실험

제안된 오차 추정 방법을 사용하여 5 축 공작 기계의 회전 테이블의 기하학적 오차를 추정한다. 실험에는 Renishaw 社의 볼바 QC10 을 사용한다. 측정 과정은 Fig. 8 과 같으며 볼바의 측정데이터는 Fig. 9 에 나타내었다. 측정데이터  $R+\Delta R_3$  는 PV 가  $1\mu\text{m}$  이며, 이는 축 방향 오차  $\delta_{zc}$  가 미소함을 의미한다. 따라서 상대적으로 큰 편차를 보이는  $R+\Delta R_1$ ,  $R+\Delta R_2$  를 사용하여  $\delta_{xc}$ ,  $\delta_{yc}$ ,  $\epsilon_{xc}$ ,  $\epsilon_{yc}$  를 추정하였으며, Fig. 10 에 나타내었다. 또한 계산된 셋업 오차는 Table 2 에 정리하였다.

추정된 기하학적 오차  $\delta_{xc}$ ,  $\delta_{yc}$ ,  $\epsilon_{xc}$ ,  $\epsilon_{yc}$  의 타당성을 검증하기 위하여, 5 축 공작기계의 직선 이송축 X, Y 를 사용하여 기하학적 오차 및 셋업 오차를 보정하고 측정데이터  $\Delta R_2$  의 감소 여부를 확인하였다. 반경 오차  $\delta_{xc}$ ,  $\delta_{yc}$  를 보정한 경우의 측정데이터  $\Delta R_{\text{radial}}$ , 틸트 오차  $\epsilon_{xc}$ ,  $\epsilon_{yc}$  를 보정한 경우의 측정데이터  $\Delta R_{\text{tilt}}$  그리고 반경 오차와 틸트 오차를 모두 보정한 경우의 측정데이터  $\Delta R_{\text{all}}$  를 Fig. 11 에 나타내었다. 반경 오차와 틸트 오차를 각각 보정한 경우 측정데이터가 감소하며, 특히 반경 오차와 틸트 오차를 모두 보정한 경우 측정데이터

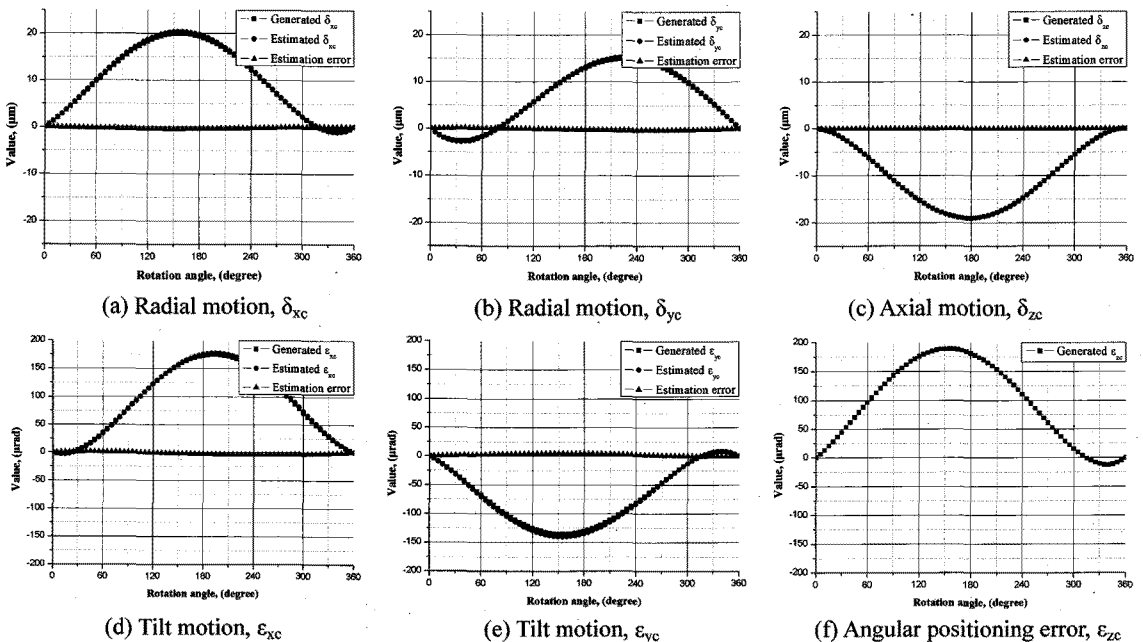
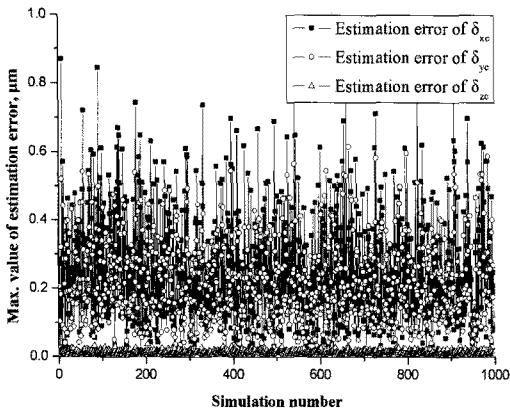
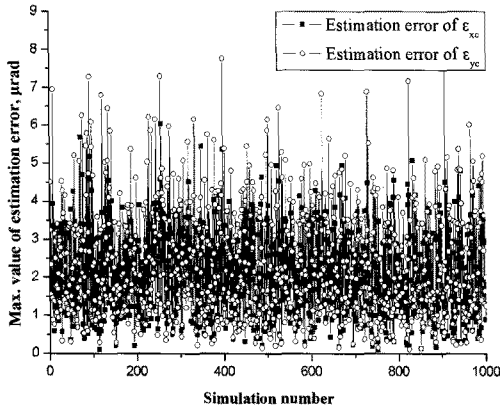


Fig. 6 Simulation result using suggested estimation method

$\Delta R_{all}$  는 최대  $3.5\mu\text{m}$  의 값을 나타낸다. 측정데이터  $\Delta R_{all}$  이 정확하게 0 이 되지 않는 것은 제안된 방법의 추정 오차 및 보상에 사용된 직선 이송축 X, Y 의 특성(분해능, 정확도, 정밀도, 백래쉬 등)의 영향이다. 그러나 측정데이터  $\Delta R_2$  는 추정된 기하학적 오차를 보상함으로써 약 80% 감소한다.



(a) Estimation errors of axial- and radial motions



(b) Estimation errors of tilt motions

Fig. 7 Estimation errors of simulations

Table 1 Maximum value of estimation errors of simulations, ( $\mu\text{m}$ ,  $\mu\text{rad}$ )

Geometric error	Max. value
$\delta_{xc}$	0.894
$\delta_{xc}$	0.616
$\delta_{xc}$	0.037
$\epsilon_{xc}$	6.034
$\epsilon_{ye}$	8.107
$\epsilon_{zc}$	-

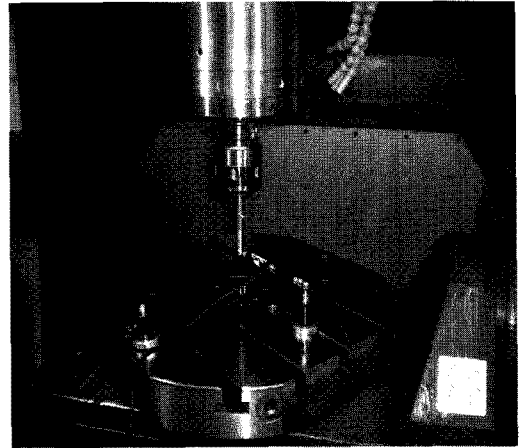
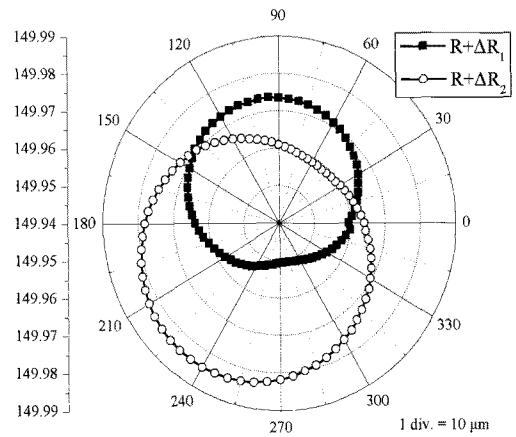
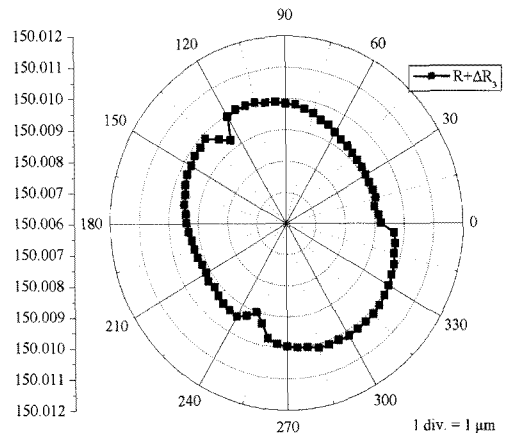


Fig. 8 Ball-bar measurement at 5-axis machine tool

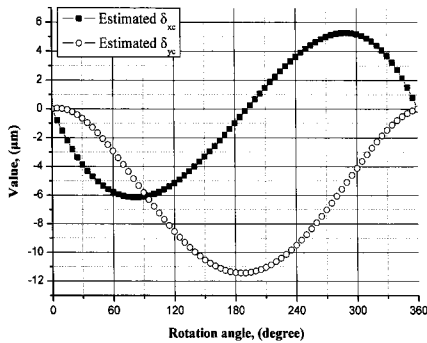


(a) Measured data,  $R+\Delta R_1$ ,  $R+\Delta R_2$

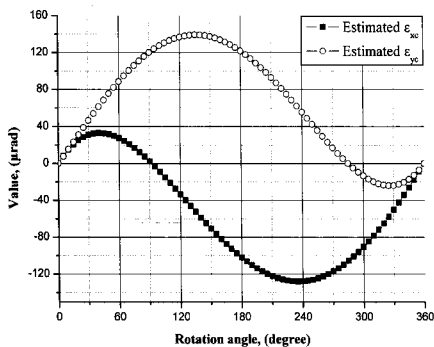


(b) Measured data,  $R+\Delta R_3$

Fig. 9 Measured data at 5-axis machine tool



(a) Estimated radial motion,  $\delta_{xc}$ ,  $\delta_{ye}$

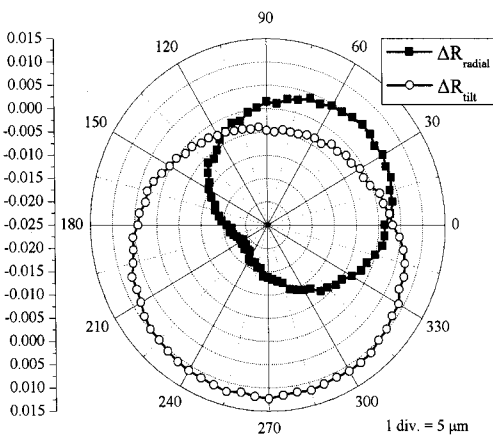


(b) Estimated tilt motion,  $\epsilon_{xc}$ ,  $\epsilon_{ye}$

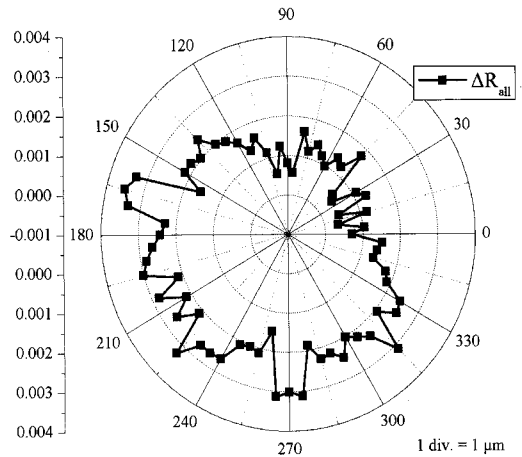
Fig. 10 Estimated geometric errors

Table 2 Calculated set-up error, ( $\mu\text{m}$ )

set-up error	value	set-up error	value
$t_{x1}$	-1	$t_{x2}$	-16
$t_{y1}$	18	$t_{y2}$	-13
$w_{x1}$	38	$w_{x2}$	20



(a) Radial error,  $\Delta R_{\text{radial}}$ ,  $\Delta R_{\text{tilt}}$



(b) Radial error,  $\Delta R_{\text{all}}$

Fig. 11 Radial errors with compensation

#### 4. 결론

본 논문에서는 회전 테이블의 기하학적 오차를 추정하기 위하여 볼바 측정 방법을 제안하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 회전 테이블의 5 개 기하학적 오차 추정을 위한 3 회의 볼바 측정 방법을 제안함.
- 볼바 측정데이터, 회전 테이블의 기하학적 오차 및 초기 셋업 오차의 관계를 정의함.
- 최소자승법을 사용하여 회전 테이블의 기하학적 오차 및 셋업 오차를 추정함.
- 5 축 공작기계의 회전 테이블 오차 추정 및 보정 전(17 $\mu\text{m}$ ), 보정 후(3.5 $\mu\text{m}$ )의 측정데이터를 통하여 제안된 측정 방법의 타당성을 검증함.

#### 후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0018890).

#### 참고문헌

- Uddin, M. S., Ibaraki, S., Matsubara, A. and Matsushita, T., "Prediction and Compensation of Machining Geometric Errors of Five-axis Machining

- Centers with Kinematic Errors,” Precision Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 194-201, 2009.
2. ISO 230-1, “Test Code for Machine Tools-Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Finishing Conditions,” ISO, 1996.
  3. Chen, G., Yuan, J. and Ni, J., “A Displacement Measurement Approach for Machine Geometric Error Assessment,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 1, pp. 149-161, 2001.
  4. Lee, J. H., Liu, Y. and Yang, S. H., “Accuracy Improvement of Miniaturized Machine Tool: Geometric Error Modeling and Compensation,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1508-1516, 2006.
  5. Park, S. R., Hoang, T. K. and Yang, S. H., “A New Optical Measurement System for Determining the Geometrical Errors of Rotary Axis of a 5-axis Miniaturized Machine Tool,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 175-179, 2010.
  6. Lee, D. M. and Yang, S. H., “Mathematical Analysis for Geometrical Error Synthesis Modeling of Machine Tools,” Proceeding of the KSPE Spring Conference, pp. 71-72, 2008.
  7. Eman, K. F. and Wu, B. T., “A Generalized Geometric Error Model for Multi-axis Machines,” Annals of CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 253-256, 1987.
  8. Yang, S. H., Yuan, J. and Ni, J., “Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-time Error Compensation,” Journal of Manufacturing Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 113-124, 1996.
  9. Lee, K. I., Lee, D. M. and Yang, S. H., “Estimation of Geometric Errors for a Rotary Table with Double Ball-bar Measurements,” Proceeding of the KSPE Spring Conference, pp. 239-240, 2009.
  10. ISO 230-7, “Test Code for Machine Tools-Part 7: Geometric Accuracy of Axes of Rotation,” ISO, 2006.
  11. Suh, S. H., Lee, E. S. and Jung, S. Y., “Error Modelling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, No. 9, pp. 656-663, 1998.
  12. Ihara, Y., Lin, S. and Kakino, Y., “Analysis of the Motion Accuracy of 5-axis Controlled Machining Centers using DBB Method,” International Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 188-193, 1998.
  13. Knapp, W., “Testing Rotary Axes on NC Machine Tools,” Annals of CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 549-552, 1990.
  14. Hai, N., Yuan, J. and Ni, J., “Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error using Telescoping Ball Bar,” ASME, PED, 68-1, pp. 277-286, 1994.
  15. Lee, D. M. and Yang, S. H., “Analysis for Singularity Problem in the Ball-bar Equation,” Proceeding of the KSPE Spring Conference, pp. 241-242, 2009.