

## 다축공작기계의 공간오차 예측 및 검증

황주호<sup>a,b\*</sup>, 류엔카오<sup>b</sup>, 부이바친<sup>a</sup>, 박천홍<sup>a</sup>**Estimation and Evaluation of Volumetric Position Errors for Multi-axis Machine Tools**Jooho Hwang<sup>a,b\*</sup>, Ngoc Cao Nguyen<sup>b</sup>, Chin Ba Bui<sup>a</sup>, Chun-Hong Park<sup>a</sup><sup>a</sup> Dep. of Ultra precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea<sup>b</sup> Dep. of Nano-mechatronics, University of Science and Technology, 217 Gajung-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-333, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	14	November	2013
Revised	22	January	2014
Accepted	4	February	2014

*Keywords:*

Generic kinematic model  
 Multi-axis machine tool  
 Volumetric error  
 Geometric error  
 Five-axis machine tool

**ABSTRACT**

This paper describes a method of estimating and evaluating the volumetric errors of multi-axis machine tools. The estimation method is based on a generic model that was developed from conventional kinematic error models for the geometric and thermal errors to help predict the volumetric error easily in various configurations. To demonstrate the advantages of the model, an application in the early stages of a five-axis machine tool design is presented as an example. The model was experimentally evaluated for a four-axis machine tool by using the data from ISO230-6 and R-test measurements to compare the estimated and measured volumetric errors.

**1. 서론**

공작기계는 3차원 형상의 가공을 위하여 3축이상의 직선 및 회전 테이블이 상대운동을 하면서 가공을 하는 것이 일반적이다. 3축이 동시 이동을 수행하기 때문에 각축의 위치결정 정밀도 뿐 만 아니라, 각운동오차, 진직도오차 및 직각도 등이 복합적으로 영향을 주게 된다.

공작기계의 직선 및 회전 테이블에 존재하는 6 자유도의 운동오차를 다축오차로 확장하기 위하여 기존의 문헌에 소개된 동차변환 행렬(Homogeneous Transformation Matrix, HTM)<sup>[1-6]</sup>을 사용

할 경우 공간오차의 해석은 가능하지만 축구조가 변화함에 따라 다른 수식이 유도되게 되고 이것을 프로그래밍 하려면 공간오차 모델을 완성하고 3차원상의 오차를 구할 수 있게 된다. 하지만, 축 배열순서가 바뀔 때 따라 구하여지는 오차모델 수식이 바뀌게 되며, 직선 3축과 회전 2축을 갖고 있는 5축 공작기계의 경우 720 개의 축구조가 존재한다<sup>[5]</sup>.

축 구조의 변화에 따른 그 만큼의 수식이 존재한다는 것이다. 본 논문에서는 축 구조가 변화해도 이에 따라 해석을 수행 할 수 있는 일반화된 모델을 제시하여 공간오차의 해석 및 이의 실험적 검증방법에 대하여 기술하고자 한다.

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7119

Fax: +82-42-868-7180

E-mail address: joocho@kimm.re.kr (Joocho Hwang).

## 2. 동차변환 행렬을 이용한 공간오차 예측

공작기계는 3차원 좌표위를 상대운동을 하면서 일반적으로 가공을 하기 때문에 오차의 예측에 있어서 공구가 있는 부분과 모재가 있는 부분으로 묶어서 일반적으로 계산을 수행하며 공간상의 위치  $E_{rel}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$E_{rel} = {}^R T_{work}^{-1} \cdot {}^R T_{tool} \quad (1)$$

HTM을 이용한 공간오차의 예측에 있어서 Fig. 1 및 2는 5축가공기의 간략한 모델의 예를 보여주고 있으며 차이는 기계 베드와 연결된 고정 부분이 XYZ 순이고 다른 하나는 YCX 순으로 되어 있는 차이가 있다. 이때의 공간오차를 구하기 위한 HTM을 식으로 나타내면 Fig. 1의 모델은 식 (2), Fig. 2의 모델은 식 (3)와 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} {}^R T_{Work} &= T_Y \cdot T_{X-Y} \cdot T_X \cdot T_{C-X} \cdot T_C \cdot T_W \\ {}^R T_{Tool} &= T_Z \cdot T_{B-Z} \cdot T_B \cdot T_T \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} {}^R T_{Work} &= T_Y \cdot T_{C-Y} \cdot T_X \cdot T_{X-C} \cdot T_C \cdot T_W \\ {}^R T_{Tool} &= T_Z \cdot T_{B-Z} \cdot T_B \cdot T_T \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  ${}^R T_{Work}$ 와  ${}^R T_{Tool}$ 는 각각 가공물부분과 공구부분을 나

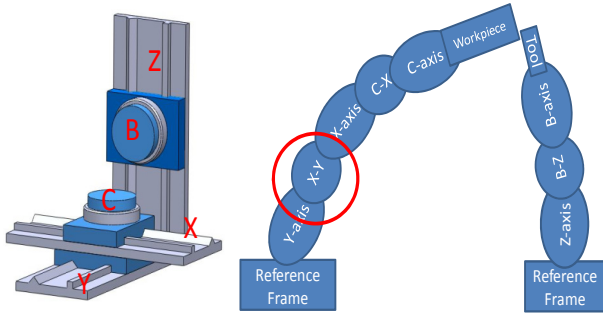


Fig. 1 Five-axis configuration: FYXCFZB

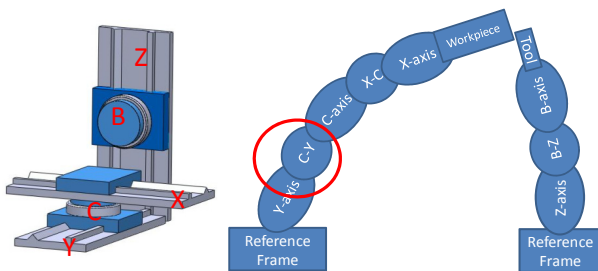


Fig. 2 Five-axis configuration: FYCXFZB

타내며  $T_X, T_Y, T_C, T_Z, T_B$ 는 기존의 연구결과에서 제시된 바 있다<sup>[1-4]</sup>. 공간오차에서 중요한 모델요소가 공작기계의 제작에서 필연적으로 나타나는 축의 정렬오차이며  $T_{X-Y}, T_{C-X}, T_{B-Z}, T_{C-Y}, T_{X-C}, T_{B-Z}$ 는 직각도, 평행도, 오프셋(Offset) 오차를 포함한 축의 연결부의 상대적인 동차변환행렬이며 축 정렬오차를 나타낸다. 축의 조립오차를 동차변환행렬의 형태로 나타낸 예는 기존의 연구에서 찾아볼 수 없으며, 이러한 정렬오차를 동차변환행렬로 표현할 수 있음에 따라, 공간오차를 일반화 시킬 수 있게 된다.

## 3. 공간오차예측을 위한 일반화 모델

전술한 바와 같이 5축 공작기계의 경우 720개의 오차가 필요하며 이를 수식화 하여 모든 경우에 대하여 프로그램화 하는 것은 많은 시간과 노력이 요구된다.

공작기계의 720개의 축 구조를 정의하기위하여 축의 조합을 기호로 표시하여야 하는데, 기존의 공작기계 축의 방향에 따른 기호를 그대로 사용하여 Fig. 3와 같이 정의할 수 있다. Fig. 1이나 2와 같이 축의 구조를 정하면 자동적으로 축의 구조와 좌표의 방향도 결정되어 공간오차를 정의하고 프로그램화 할 수 있게 된다.

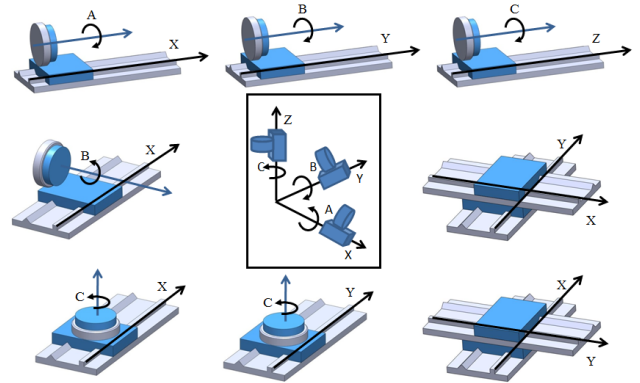


Fig. 3 Generalized coordinates for configuration of multi-axes

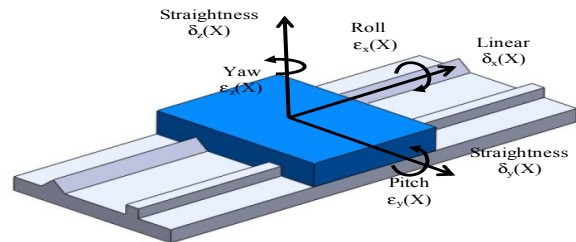


Fig. 4 Motion errors of the X-axis

### 3.1 직선이송축의 동차변환행렬 일반화

직선운동축은 X, Y, Z축이며 강체운동을 한다고 가정하면 각각의 축은 위치오차를 포함하여 6자유도의 운동오차를 가지게 된다. X 축을 기준으로 기술하면 Fig. 4에 보이는 바와 같이  $\delta_x(X)$ ,  $\delta_y(X)$ ,  $\delta_z(X)$ 과 같은 직선운동오차를 갖게 되며,  $\varepsilon_x(X)$ ,  $\varepsilon_y(X)$ ,  $\varepsilon_z(X)$ 와 같은 각운동 오차를 갖게 된다.

이때 X축의 x, y, z방향의 오차를 구하기 위한 HTM은 식 (4)와 같이 나타내어진다.

$$T_{X-p} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(X) & \varepsilon_y(X) & X+\delta_x(X) \\ \varepsilon_z(X) & 1 & -\varepsilon_x(X) & \delta_y(X) \\ -\varepsilon_y(X) & \varepsilon_x(X) & 1 & \delta_z(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

공작기계는 일반적으로 다른축과 연동되어 3차원상에서 상대운동을 하는데 이때 두 축간의 상대오차는 Fig. 5와 같은 상대좌표 변환에 의하여 구할 수 있다.

두 좌표간의 원점의 차이인 offset 값의 x, y, z 방향의 값을 각각  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$ 로 x, y, z 방향에 대하여 각도변화를  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$ ,  $\gamma_z$ 로 나타내면 두 축간의 상대오차 HTM은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{rel} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & O_x \\ 0 & 1 & 0 & O_y \\ 0 & 0 & 1 & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_x & -\sin\gamma_x & 0 \\ 0 & \sin\gamma_x & \cos\gamma_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma_y & 0 & \sin\gamma_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\gamma_y & 0 & \cos\gamma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma_z & -\sin\gamma_z & 0 & 0 \\ \sin\gamma_z & \cos\gamma_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

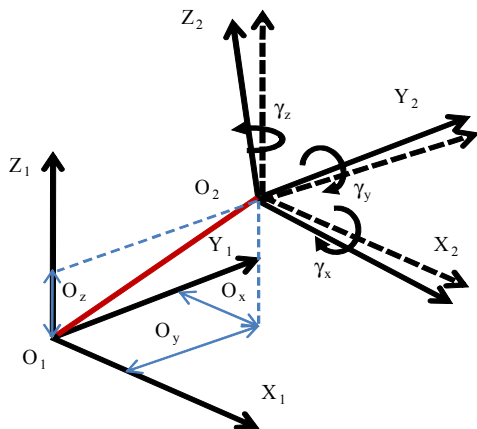


Fig. 5 Transformation between two coordinates

일반적인 직교좌표축을 갖는 Fig. 6과 같은 X-Y 이송계의 경우  $\gamma_{xy}$ 와  $\gamma_{xz}$ 는 각각 직각도 오차를 나타내며 그 값이 충분히 작아 식 (5)의 상대오차 HTM을 식 (6)와 같이 간략화하여 나타 낼 수 있다.

$$T_{X-rel} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{xy} & \gamma_{xz} & O_x(X) \\ \gamma_{xy} & 1 & 0 & O_y(X) \\ -\gamma_{xz} & 0 & 1 & O_z(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

두 축의 직각도 오차를 표시함에 있어 기호는 다음과 같은 순서로 정의 하였다. x 축이 y 축에 연결된 경우  $\gamma_{xy}$ , x 축이 z 축 위에 연결된 경우  $\gamma_{xz}$ , 마찬가지로 회전축 B와 C축에 연결된 경우에는 각각  $\gamma_{xB}$ ,  $\gamma_{xC}$ 처럼 표시한다.

이로부터 정렬오차를 포함한 일반화된 X 축의 오차는 식 (7)와 같이 표현될 수 있다.

$$T_X = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{xy} & \gamma_{xz} & O_x(X) \\ \gamma_{xy} & 1 & 0 & O_y(X) \\ -\gamma_{xz} & 0 & 1 & O_z(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(X) & \varepsilon_y(X) & X+\delta_x(X) \\ \varepsilon_z(X) & 1 & -\varepsilon_x(X) & \delta_y(X) \\ -\varepsilon_y(X) & \varepsilon_x(X) & 1 & \delta_z(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

마찬가지로 Y 및 Z 축에 대하여도 식 (8)와 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_Y = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{yx} & 0 & O_x(Y) \\ \gamma_{yx} & 1 & -\gamma_{yz} & O_y(Y) \\ 0 & \gamma_{yz} & 1 & O_z(Y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(Y) & \varepsilon_y(Y) & \delta_x(Y) \\ \varepsilon_z(Y) & 1 & -\varepsilon_x(Y) & Y+\delta_y(Y) \\ -\varepsilon_y(Y) & \varepsilon_x(Y) & 1 & \delta_z(Y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

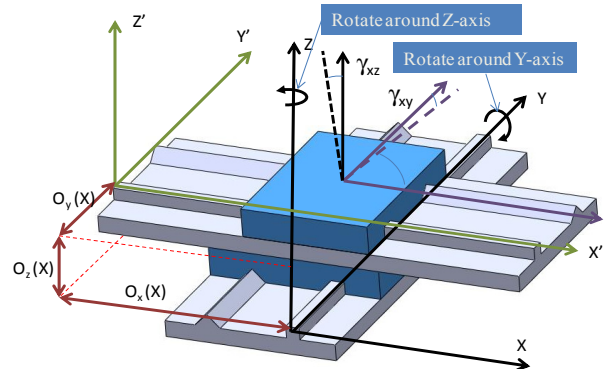


Fig. 6 Alignment errors between X-axis and Y-axis

$$T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \gamma_{zx} & O_x(Z) \\ 0 & 1 & -\gamma_{zy} & O_y(Z) \\ -\gamma_{zx} & \gamma_{zy} & 1 & O_z(Z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(Z) & \varepsilon_y(Z) & \delta_x(Z) \\ \varepsilon_z(Z) & 1 & -\varepsilon_x(Z) & \delta_y(Z) \\ -\varepsilon_y(Z) & \varepsilon_x(Z) & 1 & Z + \delta_z(Z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3.2 회전축의 동차변환행렬 일반화

회전축에 대하여도 직선이송축과 마찬가지로 강체운동을 6자유도의 운동오차를 가지게 된다. Fig. 7에 보이는 바와 같이 A 축에 대하여 운동오차를 살펴보면  $x, y, z$  방향에 대한 직선 운동오차는  $\delta_x(A), \delta_y(A), \delta_z(A)$ 이며 회전위치오차  $\varepsilon_x(A), y$  및  $z$  축에 대한 tilt 오차  $\varepsilon_y(A), \varepsilon_z(A)$ 로 표현된다.

식 (4)와 마찬가지로 일반화된 회전테이블의 A 축의 경우 식 (10)와 같이 표현되어진다.

$$T_{A-P} = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_y(A)\sin(\theta_A) - \varepsilon_z(A)\cos(\theta_A) & \varepsilon_y(A)\cos(\theta_A) + \varepsilon_z(A)\sin(\theta_A) & \delta_x(A) \\ \varepsilon_z(A) & \varepsilon_x(A) + \cos(\theta_A) & -\sin(\theta_A) & \delta_y(A) \\ -\varepsilon_y(A) & \sin(\theta_A) & \varepsilon_x(A) + \cos(\theta_A) & \delta_z(A) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Fig. 8은 직선 축(Y축) 위에 회전 축(A축)이 올라간 예를 보여

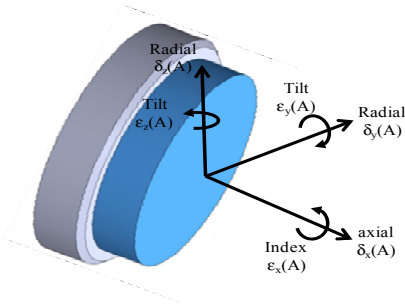


Fig. 7 Motion errors of the A-axis

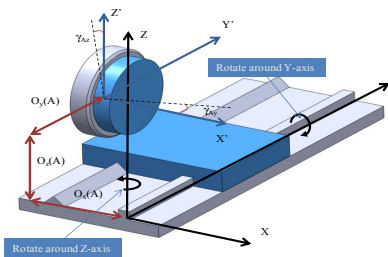


Fig. 8 Assembly errors for the A-axis

주고 있다. Fig. 6와 마찬가지로의 축 정렬오차를 정의하였을 경우 식 (11)와 같이 일반화된 HTM을 유도할 수 있다.

$$T_A = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{Ay} & \gamma_{Az} & O_x(A) \\ \gamma_{Ay} & 1 & 0 & O_y(A) \\ -\gamma_{Az} & 0 & 1 & O_z(A) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_y(A)\sin(\theta_A) - \varepsilon_z(A)\cos(\theta_A) & \varepsilon_y(A)\cos(\theta_A) + \varepsilon_z(A)\sin(\theta_A) & \delta_x(A) \\ \varepsilon_z(A) & \varepsilon_x(A) + \cos(\theta_A) & -\sin(\theta_A) & \delta_y(A) \\ -\varepsilon_y(A) & \sin(\theta_A) & \varepsilon_x(A) + \cos(\theta_A) & \delta_z(A) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

마찬가지로, 회전축에대한 일반화된 오차를 유도하면 B축 및 C 축에 관한 오차는 식 (12) 및 (13)과 같이 유도될 수 있다.

$$T_B = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{Bx} & 0 & O_x(B) \\ \gamma_{Bx} & 1 & -\gamma_{Bz} & O_y(B) \\ 0 & \gamma_{Bz} & 1 & O_z(B) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_y(B) + \cos(\theta_B) & -\varepsilon_z(B) & \sin(\theta_B) & \delta_x(B) \\ \varepsilon_x(B)\sin(\theta_B) + \varepsilon_z(B)\cos(\theta_B) & 1 & -\varepsilon_x(B)\cos(\theta_B) + \varepsilon_z(B)\sin(\theta_B) & \delta_y(B) \\ -\sin(\theta_B) & \varepsilon_x(B) & \varepsilon_y(B) + \cos(\theta_B) & \delta_z(B) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$T_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \gamma_{Cx} & O_x(C) \\ 0 & 1 & -\gamma_{Cy} & O_y(C) \\ -\gamma_{Cx} & \gamma_{Cy} & 1 & O_z(C) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_z(C) + \cos(\theta_C) & -\sin(\theta_C) & \varepsilon_y(C) & \delta_x(C) \\ \sin(\theta_C) & \varepsilon_z(C) + \cos(\theta_C) & -\varepsilon_x(C) & \delta_y(C) \\ \varepsilon_x(C)\sin(\theta_C) - \varepsilon_y(C)\cos(\theta_C) & \varepsilon_x(C)\cos(\theta_C) + \varepsilon_y(C)\sin(\theta_C) & 1 & \delta_z(C) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 3.3 공간오차의 해석

공작기계의 공간오차를 포함한 실제위치의 공구의 움직이는 경로와 가공위치의 상대운동으로 식 (14)와 같이 표현되어진다.

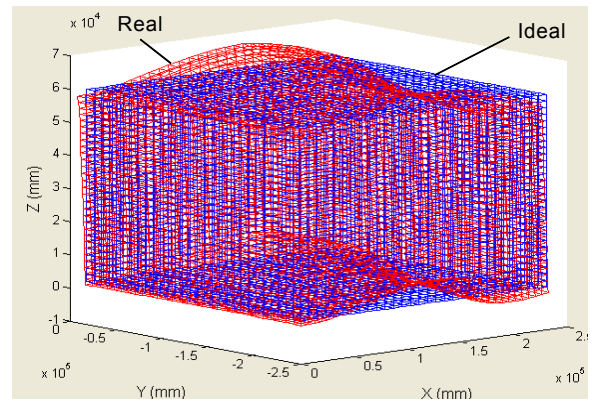


Fig. 9 Simulation results of the volumetric errors

$$E_{rel} = {}^R T_{work}^{-1} {}^R T_{tool} = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & O_{13} & P_x \\ O_{21} & O_{22} & O_{23} & P_y \\ O_{31} & O_{32} & O_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,  $T_{work}$  및  $T_{tool}$ 은 식 (2)와 (3)에서 언급한 가공물부분 HTM의 역행렬과 공구부분의 HTM 행렬의 곱을 나타내며, 이 결과 중  $P_x, P_y, P_z$ 가 3차원의 위치오차를 포함한 실제의 위치좌표에 해당되며,  $O_{11} \sim O_{33}$ 은 공구의 방향<sup>[1]</sup>을 나타내고 공간오차의 계산에는 사용하지 않지만 임펠러와 같은 곡면가공시 공구의 각도오차 해석에 사용될 수 있다.

공간오차는 실제위치와 이상적인 좌표와의 차이이며 식 (15)와 같이 표현될 수 있다.

$$VE(X, Y, Z) = P_{real}(X, Y, Z) - P_{ideal}(X, Y, Z) \quad (15)$$

여기서,  $E_{ve}$ 는 공간오차,  $P_{real}(X, Y, Z)$ 은  $P_x, P_y, P_z$ 를 성분으로 하는 위치벡터  $P_{ideal}(X, Y, Z)$ 은 이상적인 위치좌표 값이 되며, Fig. 9는 식 (15)를 이용하여 공간상에 오차를 표현한 결과이다. 이상의 방법을 활용하면 운동오차 정렬오차의 모든 행렬이 4x4의 정방행렬이기 때문에 일정간격으로 측정된 데이터를 행렬의 형태로 바

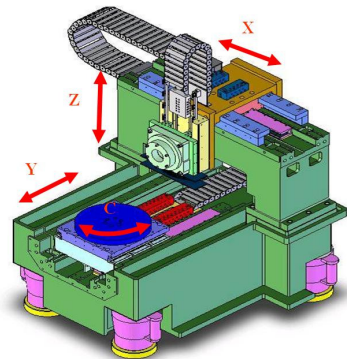


Fig. 10 Four-axis machine tools

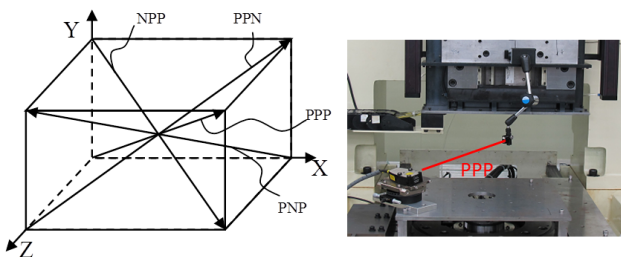


Fig. 11 Four body-diagonal measurements

로처리 할 수 있어, Fig. 1과 Fig. 2에서 보이는 바와 같은 축 구조의 변화를 쉽게 프로그래밍화 할수 있는 장점을 가지게 된다.

#### 4. 공간오차예측 적용실험

실험적인 검증을 위하여 Fig. 10에 보이는 바와 같은 구조를 갖는 4축의 공작기계에 대하여 실험검증을 수행하였다. C축 위에 공작물이 올라가고 Z축에 공구대가 부착되는 구조를 가지고 있기 때문에 가공물부분이 Y-C 축 공구부분이 X-Z가 된다. 공간오차에 대한 측정평가는 3차원의 격자에 대하여 모두 측정 할 수가 없기 때문에 두 가지 방식으로 나누어 오차를 측정하였다. 직선 3축이 움직이는 경우에는 공간오차 측정 오차규격인 ISO 230-6 규격<sup>[7]</sup>에 의하여 대각선측정 방법을 이용하여 수행하였으며, 회전 C축과 X, Y 축이 연동하여 움직이는 R-test 방법<sup>[8]</sup>을 이용하여 직선-회전 공간오차 검증을 수행하였다.

Fig. 11은 대각오차의 측정의 경로와 실제 측정하는 모습을 보여 주고 있다. ISO 230-6 규격에 의하여 PPP, NPP, PNP 그리고 PPN 방향에 대하여 측정을 수행하였다. 측정은  $X \times Y \times Z = 240 \times 240 \times 60 \text{ mm}^3$ 에 대하여 정전용량형센서와 0.1  $\mu\text{m}$  평탄도를 갖는 마스터 미러를 이용하여 6자유도 운동오차를 측정하였으며 이것을 식 (14)에 의하여 공간오차를 구하였다.

예측된 오차 값을 Fig. 12에 보이고 있으며 이의 결과에 4개의

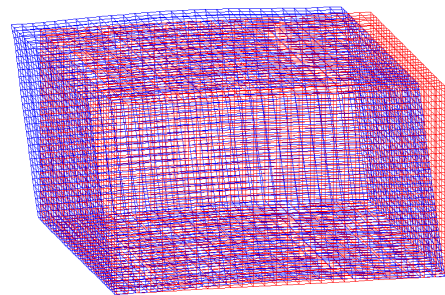


Fig. 12 Volumetric errors of the 4-axis machine tools

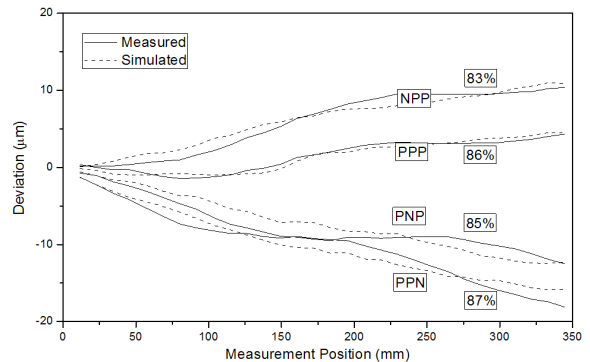


Fig. 13 Volumetric errors of the 4-axis machine tools

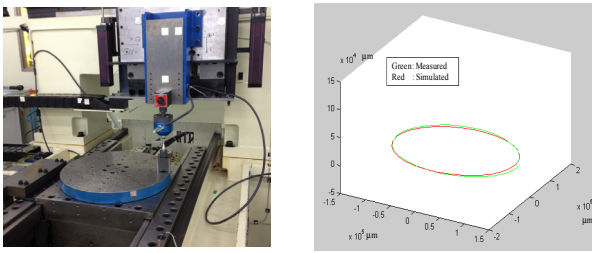


Fig. 14 R-test and comparison of R-test results

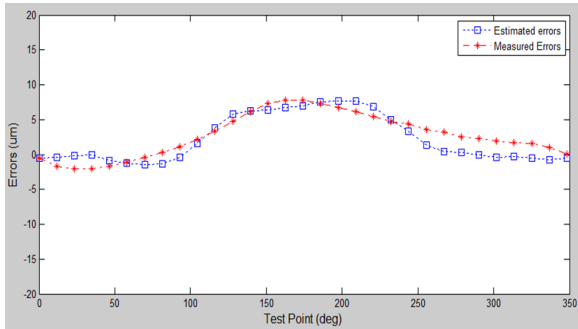


Fig. 15 Comparison between the estimated and measured Z-direction errors on R-test

대각선 오차를 구하여 함께 비교한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 실 측정값과 예측된 오차 사이에는 그 차이가 약 17% 수준으로서 양호한 예측 수준임을 보여준다.

직선-회전 축의 오차측정에 사용된 R-test 방법은 X-Y 축에 의하여 원호보간 운동을 수행하고, 동시에 같은 반경에 대하여 C축이 운전을 하여 두축이 움직이면서 보이는 오차를 측정하는 방법이다. 이방법을 통하여 측정하는 모습과 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 측정된 결과를 살펴보면 대부분이 C 축의 회전중심과 X-Y 평면이 이루고 있는 직각도가 맞지 않아서 생긴 오차임을 알 수 있으며, R-test를 통하여 구한 직각도 오차를 직각도오차로 입력하여 구한결과를 Fig. 15에 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 그 차이가 2  $\mu\text{m}$  이하로 직선-회전축이 이루는 오차도 양호하게 예측이 가능함을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 다축의 공작기계가 갖는 운동오차와 축 정렬오차를 포함한 모든 기하학적 오차를 행렬의 형태로 나타내어 일정간격별로 예측 혹은 측정된 값을 수치적으로 계산할 수 있는 일반화된 동차변환행렬을 제시하였다.

제시된 방법을 이용하여 4축 공작기계에 적용하여 직선 3축 및 직선 2축 회전 1축에 적용하여 예측 값과 실 측정값을 비교하여 그 유용성을 검증하였다.

## References

- [1] Slocum, A. H., 1992, Precision Machine Design, Prentice Hall, New York.
- [2] Okafor, A. C., Ertekin, Y. M., 2000, Derivation of Machine Tool Error Models and Error Compensation Procedure for Three Axes Vertical Machining Center using Rigid Body Kinematics, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40 1199-1213.
- [3] Treib, T., Matthias, E., 1987, Error Budgeting-Applied to the Calculation and Optimization of the Volumetric Error Field of Multiaxis Systems, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 36 365-368.
- [4] Mackeown, P. A., 1984, The Mechanical Design of High Precision Machines CUPE Short Course, Cranfield.
- [5] Bohez, E. L. J., 2002, Five-Axis Milling Machine Tool Kinematic Chain Design and Analysis, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42 505-520.
- [6] Kiridena, V., Ferreira, P. M., 1993, Mapping the Effects of Positioning Errors on the Volumetric Accuracy of Five-Axis CVC Machine Tools, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 33 417-437.
- [7] ISO, 2002, Test Code for Machine Tools, Part 6. Determination of Positioning Accuracy on Body and Face Diagonals (Diagonal Displacement Tests), ISO 230-6:2002, International Organization for Standardization, Geneva.
- [8] Weikert, S., 2004, R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 53 429-432.
- [9] Lee, K. -I., Yang, S. -H., 2012, Performance Evaluation of Radial Error of a Rotary Table at Five-axis Machine Tool, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21 208-213.
- [10] Mahbubur, R. Md., Heikkala, J., Lappalainen, K., Karjalainen, J. A., 1997, Positioning Accuracy Improvement in Five-axis Milling by Post Processing, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37 223-236.
- [11] Lee, M. -K., Park, J. -J., Lee, E. -S., Kim, N. -S., 2011, A Study on the Z axis Deflection Compensation of the Cross Rail for Gantry Type Machine Tools, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20 357-360.
- [12] Liang, H. , Hong, H., Svoboda, J., 2002, A Combined 3D Linear and Circular Interpolation Technique for Multi-axis CNC Machining, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124, 305-312.