

## 기준물을 이용한 공작기계 위치오차 보정기술에 관한 연구 A Study on the Error Compensation of Machine Tool Position Using Reference Artifact and On-machine probe

조남규(한양대 기계산업공학부), 박재준(한양대 대학원), 정성중(한양대 기계공학부)  
Nahm-Gyoo Cho(Hanyang Univ.), Jae-Jun Park(Graduate School, Hanyang Univ.)  
And Sung-Chong Chung(Hanyang Univ.)

### Abstract

In this paper, a methodology of geometrical error identification and compensation for NC machine tool position. We have proposed a reference artifact with which, in measuring the coordinate system of NC machine, the robust coordinate systems are given. The coordinate system of the NC machine could be compensated successfully with the information obtained by measuring the reference artifact and our compensation algorithm. Monte Carlo simulation is used to evaluate coordinate referencing ability and, the uncertainties of the machine tool position is estimated and observed through the compensation process by simulation.

**Key Words:** Manufacturing Machine(공작기계), Reference Artifact(기준물), Error Compensation(오차 보정), Scale Factor(스케일상수), Uncertainty(불확도)

### 1. 서 론

급속도로 발전하고 있는 현대 산업기술과 더불어, 기계 및 전자분야를 필두로 제품의 고기능화 및 고성능화를 달성하기 위한 고정밀부품의 생산에 대한 요구가 그 어느 때 보다도 절실한 상태이다. 더욱이, 이들 정밀 생산기계들이 현대 산업사회의 특성인 고생산성을 만족하기 위해서는 자동화 및 무인화를 통한 가공 공정의 고속화를 실현하지 않으면 안된다. 이와 같은 시대적인 요구에 부응하기 위한 많은 연구가 수행되고 있으며, 장시간 사용에도 목적하는 가공정도를 만족하는 공작기계 개발이 시급한 과제로 부각되고 있다.

공작기계를 이용한 가공부품의 오차를 야기시키는 요인으로 공작물의 설치작업에서 발생하는 오차나 가공조건 설정에 의해 결정되는 가공작업자체의 오차 등이 있다. 그러나, 이러한 문제점들에 대해 엄밀한 조치와 배려가 수행된 경우에도, 공작기계의 이송부분 및 기계구조물의 형상부에서 발생하는 기하학적인 오차, 그리고 공작기계 구동에 의한 자체 발열이나 주위의 온도변화에 따라서 야기되는 열변형 오차 등은 절삭공정 전체에서 야기되는 총 가공 오차량의 70% 정도에 해당하는 오차를 초래한다<sup>(1)</sup>. 따라서, 최적의 가공조건 선정을 위

한 가공 메카니즘 자체에 대한 체계적이고 실질적인 연구 외에도, 이와 같은 오차 요인에 대한 대책을 위한 연구 또한 매우 중요하다.

이와 같은 문제점들을 해결하여 고정도화를 실현하기 위한 방법으로, 가공오차의 발생원인을 근원적으로 제거하여 가공정밀도를 향상시키는 방법을 먼저 생각할 수 있다. 이렇듯 오차를 회피하기 위한 연구로, 대칭설계에 의한 방법, 열원을 분리하여 독립시키는 방법, 열변형의 영향을 감소시킬 수 있는 재질을 선택하는 방법, 강제 냉각에 의한 온도제어법 등이 시도되고 있으나<sup>(1-3)</sup>, 이러한 방법들은 대체로 경제적인 부담이 크고, 설계 및 생산기술 등의 이유로 실용화에 많은 어려움이 있다.

한편, 이와는 다른 오차발생에 대한 대책으로, 가공오차를 예측/규명하고 그 영향을 보상하는 오차규명 및 보상제어에 의한 방법이 있다<sup>(4-5)</sup>. 이 방법에 관련한 연구에서 현재까지 가장 많이 보고되고 있는 방법으로 레이저 간섭계나 기구불바 등을 사용한 오차규명법이 있으나, 이 방법들은 설치 및 방법이 매우 번거로운 뿐 아니라, 많은 소요시간과 함께 세심한 주의가 필요하여, 자가규명법(self-calibration method)<sup>(6-7)</sup>과 같은 보다 편리한 방법의 개발이 시급하다.

자가규명법은 추가적인 측정장비 대신 공작기계 상에 장착되는 프로브와 기준물(reference artifact)을 이용하여 오차의 규명 및 보상제어를 수행하는 방법으로, 레이저 간섭계나 기구불바를 이용하는 경우와는 달리 설치 등의 번잡한 과정이 없으며, 개발하기에 따라서는 오차의 측정 및 보정의 자동화가 가능하므로 편리한 방법이다. 그러나, 이 방법 역시 NC 공작기계 상의 위치결정오차를 직접적인 방법으로 측정하여 자가규명을 할 수 있도록 하기 위한 효율적인 기준물의 설계 및 보정기술에 관한 연구는 아직 미미한 상태이다.

이와 같은 배경으로부터, 추가적인 측정장비 없이 공작기계 상에 장착된 접촉식 측정프로브와 기준물을 이용하는 자가규명법의 개념을 기초로 하고, 가공체적 내 오차의 효율적인 규명을 위한 기준물의 제안 및 보정량 산출기술의 제안을 본 연구의 목표로 하였다.

### 2. 공작기계의 위치결정오차 보정법

본 연구에서 제안한 공작기계 위치결정오차 규명용

위한 시스템의 좌표 관계와 기준물의 개략적인 형태를 fig.1에 보인다.

Fig. 1에 보이는 바와 같이, 보정 작업을 위한 공작기계 좌표계에 관한 정보는 공작기계 상에 설치되는 기준물을 공작기계에 장착된 측정프로브로 측정하여 얻어진다. 또, 기준물의 형상은 기준물 내의 좌표계를 결정하기 위해 3개의 정구로 구성되는 기준물좌표계 결정부와 기준물 내의 임의의 공간에 위치하는 목적구로 이루어져 있다. 목적구는 보정하고자 하는 공작기계의 작업영역과 보정 후의 목적하는 정밀도를 고려하여 적절하게 배치된다. 실제의 보정작업에 사용되는 기준물의 형상은 보정 작업에 선행하여 3차원좌표측정기(CMM: coordinate measuring machine)를 이용한 확인과정을 거친 후 사용되며, 형상 정보는 기준물좌표계 결정부의 측정으로부터 결정되는 기준물좌표계에 대한 정보와 함께 기준물좌표계에 의해 표현되는 각 목적구의 위치 정보로 구성된다.

공작기계 좌표계의 보정량은, 이와 같이 미리 확인된 기준물의 형상 정보를 토대로, 공작기계 상에 장착된 측정프로브를 이용한 기준물의 형상측정에 의해 수집된 측정 정보를 분석하여 그 오차량과 함께 산출된다.

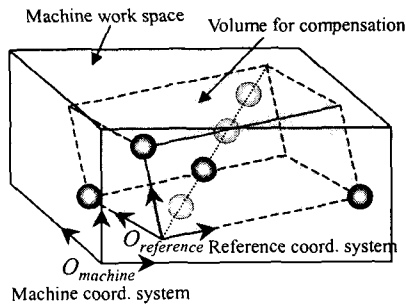


Fig. 1 Geometric relation for calculating positioning error on machine

보정작업의 주요 순서는 Fig.2와 같다.

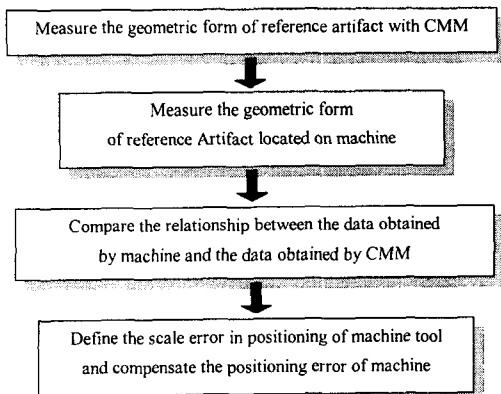


Fig. 2 Error compensation process

### 3. 위치결정오차의 보정량 산출

#### 3.1 기준물의 좌표계 결정부

앞에서 설명한 바와 같이, 공작기계 위치결정오차는 CMM에 의해 획득되어 기준물좌표계로 표현된 기준물의 형상 정보와 공작기계 상에서 측정되어 공작기계 좌표계로 표현된 두 형상 정보의 비교 분석에 의해 결정된다. 이를 위하여, Y. Shen 등<sup>(8)</sup>은, 정밀 가공된 정육면체의 모서리를 중심으로 하는 서로 수직하는 3개의 면으로부터, 각각 3점, 2점, 1점의 측정점을 선정하여 좌표계 파악을 위한 측정 정보를 수집하고 있다. 그러나, 이 방법은 선정된 측정점의 분포 상태에 따른 좌표계 결정에 있어서의 정밀도 변화를 피하기 어려우며, 좌표계의 파악을 위한 측정과정에 작용하는 공작기계의 위치결정오차의 영향을 피할 수 없다. 이러한 문제점들은 공작기계의 작업영역이 극히 좁은 공간으로 한정되는 경우에는 어느 정도 사용이 가능하나, 보정하고자 하는 대상 영역이 넓어짐에 따라 고정밀의 보정효과는 기대할 수 없게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 보완하기 위해, 시판되는 3개의 정구를 이용하고, 공작기계의 위치결정오차가 공작기계상에서의 측정에 의한 기준물 좌표계 결정에 미치는 영향을 제거하는 방법을 고안하였다. 따라서, 기준물이 제공하는 일정한 위치 정보는 기준물을 구성하는 정구의 중심위치가 되며, 이 중심 위치는 CMM이나 공작기계로 정구 표면에 적절히 설정되는 측정점을 측정하여, 그 결과로부터 최소제곱법을 적용하여 산출한다.

기준물의 공간을 그림의 정육면체로 표현되는 보정 대상 영역과 같다고 할 경우, Fig. 1에 보이는 바와 같이 각각의 정구를 영역의 세 꼭지점 근방에 위치시키고 있다. 좌표계의 결정을 위해서는 임의의 위치에 정구를 설정해도 상관없으나, 공작기계의 작업 영역 전체에 걸쳐 정구가 흩어져 있도록 배치하는 것이 오차를 최소화할 수 있다.

#### 3.2 공작기계 위치결정오차가 기준물의 좌표계 파악에 미치는 영향을 제거한 기준물좌표계의 결정

##### 3.2.1 스케일오차의 규명

공작기계의 작업공간 내에서는 전 영역에 걸쳐서 스케일오차의 형태의 계통오차가 존재한다. 그러므로, 기준물좌표계를 결정하기 위한 측정에도 예외없이 이러한 오차가 유입되므로, 이에 대한 대책이 요구된다. 본 연구에서는, 이러한 영향을 제거하기 위하여, 공작기계 좌표계상에서의 좌표축  $x, y, z$ 에 대한 스케일상수(scale factor)를 각각  $s, t, u$ 로 두고, 주어진 조건으로부터 이 값들을 산출하여, 기준물좌표계의 파악에 스케일오차가 미치는 영향을 제거하도록 하였다.

CMM과 공작기계에서 측정된 기준물좌표계 결정부를 구성하는 정구의 좌표를 식(1)과 같이 표기하기로

한다.

$${}^c P_i = (x_i, y_i, z_i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

같은 방법으로, 공작기계에 의해 측정된 값을

$${}^m P_i = (x_{im}, y_{im}, z_{im}), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

라고 하면, 스케일상수  $s, t, u$  는 다음과 같이 정의된다.

$$s = \frac{x_m}{x}, t = \frac{y_m}{y}, u = \frac{z_m}{z} \quad (3)$$

이상의 조건에 의해 표현된 기준물좌표계 결정부의 좌표관계를 Fig. 3 에 보인다. 그림에 보이는 좌표값은 3 개의 정구 모두가 측정값으로부터 표현되는 값이 되었으나, 계산의 편의를 위해 2 번 및 3 번 구의 좌표는 1 번 구의 위치를 기준으로 하여 상대적인 좌표값으로 나타내었다. 또, CMM 에 의해 측정된 측정값으로부터 산출되는 구와 구사이의 거리를  $l_1, l_2, l_3$  로 하여 나타내었다.

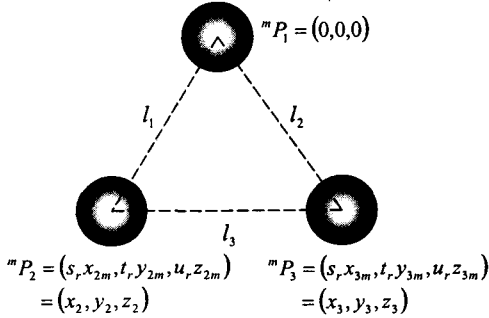


Fig. 3 Geometry of reference coordinate system

그러므로, 이상의 조건을 정리하면 식(4)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 &= l_1^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 &= l_2^2 \\ (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2 &= l_3^2 \end{aligned} \quad (4)$$

또, 식(3)의 스케일상수의 정의를 적용하면, 식(4)는 다음의 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{bmatrix} x_{2m}^2 & y_{2m}^2 & z_{2m}^2 \\ x_{3m}^2 & y_{3m}^2 & z_{3m}^2 \\ (x_{3m} - x_{2m})^2 & (y_{3m} - y_{2m})^2 & (z_{3m} - z_{2m})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_r^2 \\ t_r^2 \\ u_r^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1^2 \\ l_2^2 \\ l_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 식(5)로부터 기준물좌표계 결정에 영향을 준 공작기계의 스케일상수가 결정된다.

### 3.2.2 임시 기준물좌표계의 결정

한편, 앞서 이미 언급한 바와 같이, 지점  ${}^m P_1, {}^m P_2, {}^m P_3$  를 각각 공작기계 좌표계에서 측정된 정구의 중심좌표라고 하고, 이들이 이루는 삼각형의 무게

중심으로 정의되는 기준물 좌표계의 원점을  ${}^m P_c$  로 하면,

$${}^m P_c = \frac{1}{3} ({}^m P_1 + {}^m P_2 + {}^m P_3) \quad (6)$$

과 같이 주어진다. 따라서, 식(5)로부터 결정되는 스케일상수와 식(6)으로부터 스케일오차의 영향이 제거된 기준물좌표계의 원점좌표는 다음의 식(7)로 주어진다.

$$\begin{aligned} {}^m P_c &= \left( \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}, \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \right) \\ &= \left( \frac{x_{1m} + x_{2m} + x_{3m}}{3s_r}, \frac{x_{1m} + x_{2m} + x_{3m}}{3t_r}, \frac{x_{1m} + x_{2m} + x_{3m}}{3u_r} \right) \\ &= (x_c, y_c, z_c) = (P_x, P_y, P_z) \end{aligned} \quad (7)$$

또, 기준물좌표계의  $x$  축 방향을 좌표계 원점에서 1 번구로 향하는 방향으로 하고,  $z$  축 방향은 세 정구로 주어지는 평면의 법선방향으로 정의하면,  $y$  축 방향은  $x$  축과  $z$  축에 직교하는 방향으로 결정되어 다음의 식(8), (9), (10)과 스케일상수를 적용함으로써 각각 얻어지게 된다.

$$\vec{x}_r = \overrightarrow{{}^m P_c P_1}, \quad \hat{x}_r = \frac{\vec{x}_r}{|\vec{x}_r|} \quad (8)$$

$$\left( \overrightarrow{OP} - \overrightarrow{O^m P_c} \right) \cdot \vec{z}_r = 0, \quad \hat{z}_r = \frac{\vec{z}_r}{|\vec{z}_r|} \quad (9)$$

$$\vec{y}_r = \vec{z}_r \times \vec{x}_r, \quad \hat{y}_r = \frac{\vec{y}_r}{|\vec{y}_r|} \quad (10)$$

### 3.2.3 기준물좌표계의 결정

기준물좌표계의 결정함에 있어, 본 연구에서는 편의상 기준물좌표계결정부를 구성하고 있는 3 정구의 중심부에 임시의 직교좌표계를 결정한 후, 다시 이 좌표계를 변환하여 최종의 기준물좌표계는 기준물 공간의 모서리에 위치하도록 하였다. 따라서, 앞의 3.2.2 절에서 설명한 방법에 의해 결정된 좌표계는 다음의 식(11)과 같은 동차변환행렬식(homogeneous transformation matrix)으로서 주어지는 변환식에 의해 변환되어 적용된다.

$${}^r T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$n_x = \hat{x}_r \cdot \hat{x}_r, \quad n_y = \hat{x}_r \cdot \hat{y}_r, \quad n_z = \hat{x}_r \cdot \hat{z}_r$$

$$o_x = \hat{y}_r \cdot \hat{x}_r, \quad o_y = \hat{y}_r \cdot \hat{y}_r, \quad o_z = \hat{y}_r \cdot \hat{z}_r$$

$$a_x = \hat{z}_r \cdot \hat{x}_r, \quad a_y = \hat{z}_r \cdot \hat{y}_r, \quad a_z = \hat{z}_r \cdot \hat{z}_r$$

### 3.3 공작기계 좌표계와 기준물좌표계의 관계

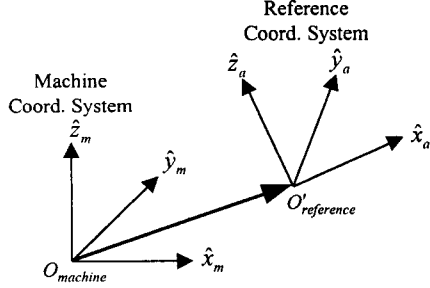


Fig. 4 Machine coordinate system and reference coordinate system

이상에 의해 결정되어지는 기준물좌표계와 공작기계 좌표계의 관계를 정리하면, 다음의 식(12)와 같은 동차 변환행렬식으로 쓸 수 있다.

$${}^m_r T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$n_x = \hat{x}_m \cdot \hat{x}_{r'}, \quad n_y = \hat{x}_m \cdot \hat{y}_{r'}, \quad n_z = \hat{x}_m \cdot \hat{z}_{r'}$$

$$o_x = \hat{y}_m \cdot \hat{x}_{r'}, \quad o_y = \hat{y}_m \cdot \hat{y}_{r'}, \quad o_z = \hat{y}_m \cdot \hat{z}_{r'}$$

$$a_x = \hat{z}_m \cdot \hat{x}_{r'}, \quad a_y = \hat{z}_m \cdot \hat{y}_{r'}, \quad a_z = \hat{z}_m \cdot \hat{z}_{r'}$$

식에서,  $\hat{x}_m = (1,0,0)$ ,  $\hat{y}_m = (0,1,0)$ ,  $\hat{z}_m = (0,0,1)$ 은 공작기계 좌표계의 각 축의 단위벡터이다.

### 3.4 공작기계의 보정량 산출

Fig. 5에 공작기계좌표계와 기준물좌표계, 그리고 목적구의 위치관계를 보인다.

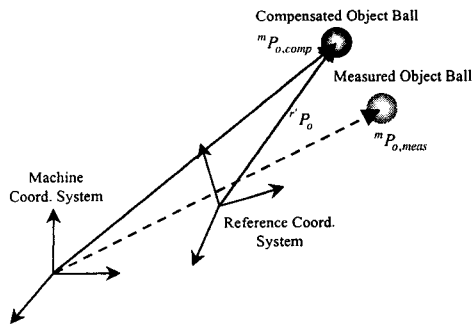


Fig. 5 Relationships between the machine coordinate system and the reference coordinate system

공작기계 상에서 측정하여 얻어진 목적구의 위치벡터  ${}^m P_{o,meas}$ 는 공작기계의 위치결정오차를 포함하고 있으며, 본 연구에 의해 제안된 방법에 의해 보정된 목적

구의 위치벡터  ${}^m P_{o,comp}$ 는 식(13)과 같이 쓸 수 있다.

$${}^m P_{o,comp} = {}^m_r T {}^r T {}^r P_o \quad (13)$$

그러므로, 공작기계 스케일오차의 보정량  $e_{scale}$ 은 두 벡터  ${}^m P_{o,meas}$ 과  ${}^m P_{o,comp}$ 의 차로 나타낼 수 있다.

$$e_{scale} = {}^m P_{o,meas} - {}^m P_{o,comp} \quad (14)$$

여기서,  ${}^m P_{o,comp} = (x_{o,comp}, y_{o,comp}, z_{o,comp})^T$

$${}^m P_{o,meas} = (x_{o,meas}, y_{o,meas}, z_{o,meas})^T$$

결국, 이 때의 스케일상수는 다음의 식(15)와 같이 된다.

$$s_o = \frac{x_{o,comp}}{x_{o,meas}}, \quad t_o = \frac{y_{o,comp}}{y_{o,meas}}, \quad u_o = \frac{z_{o,comp}}{z_{o,meas}} \quad (15)$$

식(15)로 주어지는 스케일상수는 Fig. 1에 보이는 기준물좌표계의 원점과 목적구를 꼭지점으로 하는 정육면체 공간에 해당하는 영역에서 공작기계좌표계가 갖는 스케일오차에 해당한다. 따라서, 이 정육면체에 해당하는 공간에서의 공작기계좌표계는 이 값을 기준으로 보정하면 된다.

## 4. 공작기계 스케일 오차의 보정 성능

본 연구에서 제안한 공작기계의 오차보정법은 공작기계가 갖는 스케일오차를 제거하기 위한 것이므로, 이러한 보정에 의해 성공적으로 스케일오차가 보정되었다 해도 우연오차는 여전히 남아있게 된다. 그리고, 제안된 스케일오차의 보정량 역시, CMM에 의한 기준물 형상의 측정 시 유입되는 측정오차, 공작기계의 좌표계를 결정하는 리니어 스케일의 분해능, 탑재된 센서의 분해능 등에 의한 측정오차와 작업중의 외란을 포함하여 보정량 산출과정에 유입되는 다양한 오차 요인에 의해 불확도를 갖는다. 보정량 산출을 위한 측정에 유입된 이러한 오차는 보정 과정 중에 순차적으로 전파되며, 최종적으로는 보정 오차의 형태로 나타나게 된다.

본 연구에서는 이러한 보정 오차를 검토하기 위해 monte carlo simulation을 적용하였다. 시뮬레이션 실험은 각 검토사항에 대해 10000회씩 수행되었으며, 측정분해능에 의한 측정오차 성분으로는 사각분포와 정규분포의 두 가지 분포 형태를 갖는 우연 오차 성분이 발생되어, monte Carlo simulation에 원인 요소 오차로 사용되었다. CMM과 공작기계의 측정분해능은 각각  $0.5 \mu m$ 와  $5.0 \mu m$ 로 설정되었으며, 분해능을 고려한 측정 오차 성분은 정규분포의 경우 분해능의 한계구간을 99% 신뢰구간으로 생각하여 오차 성분이 발생되었으며, 사각분포의 경우에는 분해능의 한계구간이 사각분포구간과 동일하게 설정되었다.

보정을 위한 기준물 공간은 한 변의 길이가 각각 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm인 경우

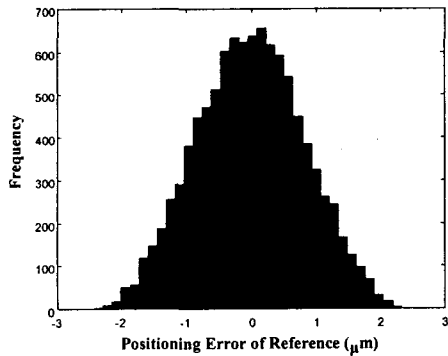
에 대하여 검토되었다. 또, 기준물의 좌표계결정 과정 중에 공작기계가 갖는 스케일오차는 각 좌표축에 대하여 2%로 하였다.

Table. 1 에 기준물좌표계의 결정 성능을 보인다.

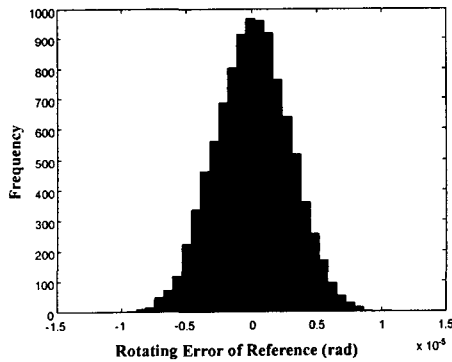
Length (mm)	Uniform Distribution		Normal Distribution	
	$(e_p)_{rms}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$(e_\theta)_{rms}$ [rad]	$(e_p)_{rms}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$(e_\theta)_{rms}$ [rad]
100	0.8148	$15.4619 \times 10^{-6}$	0.4709	$9.0503 \times 10^{-6}$
200	0.8161	$7.8395 \times 10^{-6}$	0.4681	$4.3899 \times 10^{-6}$
300	0.8221	$5.1836 \times 10^{-6}$	0.4726	$2.9388 \times 10^{-6}$
400	0.8130	$3.8974 \times 10^{-6}$	0.4698	$2.2174 \times 10^{-6}$
500	0.8149	$3.0429 \times 10^{-6}$	0.4664	$1.7970 \times 10^{-6}$

Table. 1 Estimation error of reference coordinate system

기준물좌표계 원점의 위치 파악 결과에 보이는 불확도  $e_p (= e_{p_x} = e_{p_y} = e_{p_z})$  는 공작기계의 위치결정 분해능  $5.0 \mu\text{m}$  에 비해 충분이 적은 값을 보이고 있으며, 기준물좌표계의 자세 파악에 있어서도 불확도



(a) Positioning error



(b) Rotating error

Fig. 6 Estimation error due to uniform distributed error (l=500mm, population:10000)

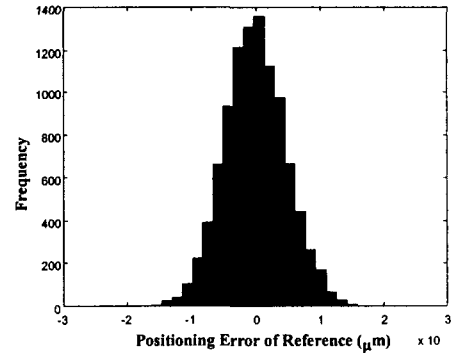
$e_\theta (= e_\alpha = e_\beta = e_\gamma)$  역시 만족할 정도로 좋은 추정 성능을 보이고 있다.

또, Table. 1 의 결과 중에서, 기준물 공간의 한 변의 길이가  $500\text{mm}$  인 경우, 정규분포와 사각분포를 따르는 원인 오차 성분에 의한 기준물좌표계 위치 및 자세오차의 분포 형태를 Fig. 6 와 Fig. 7 에 각각 보이고 있다.

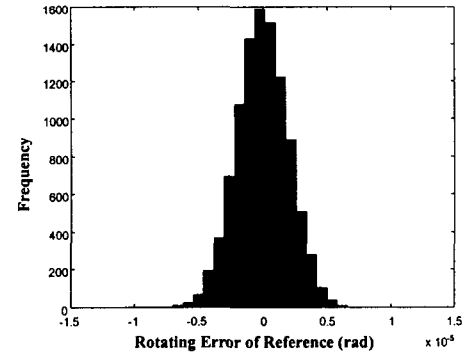
한편, 제안된 기준물좌표계의 위치 및 자세파악을 위한 알고리즘에서는 기준물좌표계 파악을 위한 측정시 공작기계의 스케일오차가 미치는 영향을 제거하기 위해, 스케일상수를 도입하였다. 스케일상수를 도입한 알고리즘과 스케일오차를 무시한 알고리즘을 사용한 결과 비교를 Fig. 8 에 보인다. (a)의 결과는 스케일오차를 무시한 채 기준물좌표계의 위치를 추정한 결과의 추정오차를 보이며, (b)는 제안된 알고리즘에 의한 결과를 보인다.

측정에 유입된 우연오차 등의 영향에 의해 두 결과 모두가 산포하고 있으나, (a)의 결과는 공작기계가 갖는 스케일오차의 영향으로 전체적으로 바이어스된 추정값을 보이고 있으며, 반면에 제안된 알고리즘에 의한 결과에서는 이러한 영향이 제거되고 있음을 확인할 수 있다.

공작기계 스케일오차의 보정량 결정을 위해, 이제까지 검토한 기준물좌표계결정부 및 목적구의 측정에 의한 기준물의 형상파악 능력의 검토결과를 Table. 2 에 보

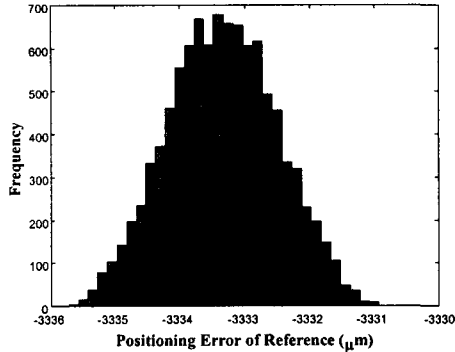


(a) Positioning error

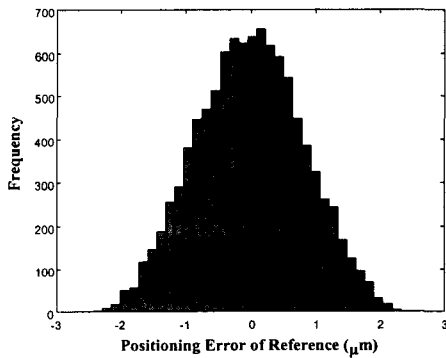


(b) Rotating error

Fig. 7 Estimation error due to normal distributed error (l=500mm, population:10000)



(a) Error of estimated position without scale error compensation



(b) Error of estimated position with scale error compensation

**Fig. 8** The effect of scale error compensation (uniform distribution,  $l=500\text{mm}$ , population: 10000)

인다.

시뮬레이션 실험의 조건은 기준물좌표계의 위치 및 자세파악의 성능 검토를 위한 조건과 동일하게 주어졌으며, 목적구 측정시의 측정 오차 성분이 추가로 부가되었다.

목적구 위치의 추정 성능 평가를 위해, 목적구의 위치는 기준물 공간 내에서 기준물좌표계의 원점으로부터

Length (mm)	Uniform Distribution	Normal Distribution
	$(e_r)_{rms} [\mu\text{m}]$	$(e_r)_{rms} [\mu\text{m}]$
100	2.8447	1.6724
200	2.8973	1.7008
300	2.9632	1.7221
400	2.8833	1.6545
500	2.8684	1.6555

**Table. 2** Estimated positioning error in reference volume of machine after compensation (population: 10000)

최대거리에 있도록 설정되었다. 이것은 목적구의 위치가 기준물의 원점에서 거리가 멀어질수록, 기준물좌표계 추정 오차의 영향에 의해 목적구 위치의 추정 성능이 저하하기 때문에, 비교적 큰 오차의 발생을 관찰하기 위한 것이다. 표의 결과로부터, 원인 오차가 사각분포에 따르는 경우와 정규분포에 따르는 경우 모두 공작기계의 위치결정분해능에 비해 적은 값을 나타내고 있어, 스케일오차의 제거를 위한 보정에 충분히 이용 가능함을 알 수 있다.

## 5. 결론

공작기계의 위치결정 성능의 향상을 목표로 공작기계의 스케일오차를 보정하기 위한 보정법의 제안 및 평가를 수행한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 스케일오차를 갖는 공작기계 등의 측정장비에 의한 측정값으로부터, 그 영향을 제거하여 효율적으로 좌표계 및 형상파악이 가능한 기준물을 제안하였다.
- (2) 제안된 기준물을 이용하여 공작기계의 스케일오차를 보정하기 위한 보정량 산출식을 제안하였다.
- (3) 불확도 분석에 의해, 제안된 기준물의 형상 파악 성능 및 보정량의 추정 성능을 평가하고, 본 연구에 의해 제안된 보정법의 적용 가능성을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) J. B. Bryan, 1990, "International Status of Thermal Error Research(1990)," *Annals of CIRP*, Vol. 39, No. 2, pp. 472-479.
- (2) J. S. Chen, J. X. Yuan, J. Ni and S. M. Wu, 1993, "Real-time Compensation for Time-Variant Volumetric Errors on a Machining Center," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, No. 11, pp. 472-479.
- (3) M. Weck, P. Mckeown, R. Bonse and U. Herbst, 1995, "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools," *Annals of CIRP*, Vol. 44, No. 2, pp. 589-598.
- (4) M. A. Donmez, D. S. Blomquist, R. J. Hocken, C. R. Liu and M. M. Barash, 1986, "A General Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation," *Precision Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 187-196.
- (5) 정성중, 현광익, 1989, "삼차오차 모형을 이용한 다축공작기계의 기하학적 오차규명 및 측정장치 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 132-139.
- (6) G. Belforte, B. Bona, E. Donati, F. Ferraris, I. Gorini, S. Morei, M. Peisino and S. Sartoni, 1987, "Coordinate Measuring Machines and Machine Tools Selfcalibration and Error Correction," *Annals of CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 359-364.
- (7) H. Kunzmann, E. Trapet and F. Wäldete, 1990, "A Uniform Concept for Calibration, Acceptance, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machine Using Reference Objects," *Annals of CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 561-564.
- (8) Y. Shen, N. A. Duffie, 1995, "An Uncertainty Analysis Method for Coordinate Referencing in Manufacturing Systems," *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp. 42-48.