

## 터치프로브와 Cube Artifact 를 이용한 공작기계 오차의 신속한 규명

최진필\*(연세대 대학원), 이상조(연세대 기계공학과), 권혁등(한국생산기술연구원)

### Fast Assessment of Machine Tool Errors Using a Touch Probe and Cube Array Artifact

J. P. Choi (YONSEI Univ.), S. J. Lee (YONSEI Univ.), H.D.Kwon (Seoul Nat'l Univ. of Tech.)

#### ABSTRACT

In this paper, a methodology to assess machine tool errors quickly is suggested using a touch probe and a cube array artifact. Parameterized error models derived are expressed of model coefficient vectors and backlash errors to be determined. To determine the unknown model coefficient vectors, a cube array artifact is proposed. Considering CMM measurement data of cube vertex coordinates, error vectors for all axes are obtained and used to complete the error model. Some simulation results show that the suggested error model can follow the true values within  $10 \mu m$ . To verify the error model, a circular part with two concentric circles is measured and simulated. The results show that the differences between CMM and OMM radius errors are smaller than  $15 \mu m$ .

**Key Words:** Machine Tool Error Model, On-Machine Measurement (OMM), Touch Trigger Probe, Cube Array Artifact, Backlash errors

#### 1. 서론

기존의 제품생산 방식은 공작기계에서 제품을 가공한 후 CMM 과 같은 별도의 측정기로 이동시켜 검사공정을 수행하게 된다. 검사결과 제품이 요구되는 공차에 부합되지 않으면, 다시 공작기계로 운반되어 재가공을 수행하고 측정작업을 수행하게 된다. 이 경우 가공 및 측정 프로세스가 별도로 이루어지게 되므로, 제품 생산시간이 길어지게 되고 제품을 측정하는 동안 기계는 idle 상태에 놓이므로 제품생산의 효율성이 떨어지게 된다. 또한, 제품의 반복적인 loading/unloading 은 공작물 좌표계를 변화시켜 가공정밀도를 저하시키는 요인이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기상측정(OMM) 시스템에 대한 요구가 증가하고 있으며, 이는 기존의 공작기계에 측정기능을 부여함으로써 현대의 공작기계로 가공과 측정을 동시에 수행하고자 하는 것이다(Fig.1) [1].

기상측정 시스템을 구현하기 위한 센서로서 일반적으로 터치프로브를 사용하는데, 대부분의 경우 공작물의 좌표계 설정이나 간단한 형상을 측정하는

데 그 활용범위가 국한되어 있는 실정이다. 터치프로브의 정밀도는 매우 우수한 편이지만, 공작기계 주축에 장착되어 제품을 측정할 경우 터치프로브 자체의 오차 이외에 공작기계의 다양한 오차들이 측정데이터에 반영되게 된다. 기상측정을 통해 제품의 합격여부를 판별하고 허용공차를 벗어난 경우 재가공을 하기 위해서는, 측정데이터에서 순수한 가공오차만을 분리할 수 있는 방법이 요구된다.

- Machining
- Measurement & Inspection
- Re-machining



Design Change

Fig.1 Overview of OMM System

OMM 측정데이터에서 가공오차를 분리하기 위

해서는 먼저 공작기계의 오차특성을 정확히 파악하여야 한다. 공작기계의 기하학적, 열적 오차를 예측하기 위해 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔으며 [2], 본 연구에서는 기존의 동차변환행렬을 이용한 입체오차 모델링 기법을 통해 공작기계의 기하학적 오차를 모델링하였다. 터치프로브를 이용하여 공작기계의 오차를 규명하기 위해, 각각의 오차성분을 다항식으로 가정하여 모델계수 벡터로 구성된 오차 모델을 수립하였다. 또한, 공작기계의 백래쉬 오차를 오차모델에 포함시킴으로써 터치프로브의 측정 방향에 따른 오차를 계산할 수 있도록 하였다.

제안된 오차모델의 모델계수를 결정하기 위해서 8 개의 큐브로 구성된 Cube Array Artifact[2]를 제안하였다. CMM 을 이용하여 각 큐브의 꼭지점 좌표를 측정 후, 터치프로브를 이용하여 측정함으로써 오차모델에 필요한 계수벡터를 계산하였다. 제안된 오차모델의 타당성을 검증하기 위해 원형시편을 측정하고 OMM 측정값과 CMM 측정값의 반경오차를 비교하였다. 실험결과 두 측정값의 차이가 15  $\mu\text{m}$  이내로 나타났는데, 공작기계와 터치프로브의 반복정밀도를 고려할 때 만족스러운 결과라 할 수 있다.

## 2. 공작기계 오차모델 [3]

Fig.2 는 본 연구에서 사용한 수직형 머시닝 센터의 좌표계를 보여주고 있다. 기준좌표계에 대한 공구 끝단의 오차를 결정하기 위해 동차변환행렬을 이용하였고, 임의의 지령위치에서 오차가 포함된 모델식은 식(1)과 같다[2]. 여기에서,  $a_i, b_i, c_i$  는 각 좌표계의 물리적 dimension,  $\delta_{ii}$  는  $i$  번째 축의 선형오차,  $\epsilon_{ij}$  는  $j$  축 이송시  $i$  축 방향의 각도오차,  $\delta_{ij}$   $j$  축 이송시  $i$  축 방향의 진직도오차,  $S_{ij}$  는 직교하는 두 축사이의 직각도 오차를 각각 의미한다.

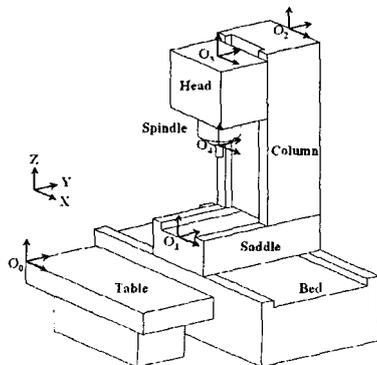


Fig.2 Coordinate system of a three-axis machine tool

$$\begin{aligned}
 P_x &= x + \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} + \left( z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) \epsilon_{yx} \\
 &\quad + \left( z + L + \sum_{i=3}^4 c_i \right) \epsilon_{yy} + (L + c_4) \epsilon_{yz} - \left( y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) \epsilon_{zx} \\
 &\quad - \left( \sum_{i=3}^4 b_i \right) \epsilon_{zy} - b_4 \epsilon_{zx} - y S_{xy} - z S_{zx} \\
 P_y &= y \delta_{yx} + \delta_{yy} + \delta_{yz} - \left( z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) \epsilon_{xy} \\
 &\quad - \left( z + L + \sum_{i=3}^4 c_i \right) \epsilon_{yy} - (L + c_4) \epsilon_{yz} + \left( \sum_{i=2}^4 a_i \right) \epsilon_{zx} \\
 &\quad + \left( \sum_{i=3}^4 a_i \right) \epsilon_{zy} + a_4 \epsilon_{zz} - z S_{yz} \\
 P_z &= z + \delta_{zx} + \delta_{zy} + \delta_{zz} + \left( y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) \epsilon_{xz} + \left( \sum_{i=3}^4 b_i \right) \epsilon_{xy} \\
 &\quad + b_4 \epsilon_{xz} - \left( \sum_{i=2}^4 a_i \right) \epsilon_{yx} - \left( \sum_{i=3}^4 a_i \right) \epsilon_{yy} - a_4 \epsilon_{yz}
 \end{aligned} \quad (1)$$

오차모델을 신속하게 규명하기 위해, 각 오차성분을 축위치에 대한 다항식으로 근사화하여 매개변수화하였다. 선형오차의 경우 축위치에 비례하므로 1 차함수로 가정하였고, 각도오차는 축위치에 대한 1 차함수와 2 차함수로 표현하여 모델의 정확성을 비교하였다. 진직도 오차는 이송축과 직교하는 두 축에 대한 각도오차를 적분하여 얻을 수 있으며, 직각도 오차는 상수항으로 고려하였다.

각 오차성분을 선형함수로 근사화하고 입체오차 모델에 대입하여 미지의 모델계수에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$E = Bp \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix}
 x & 0 & 0 \\
 0 & y & 0 \\
 0 & 0 & z \\
 0 & -\left( z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) x & \left( y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) x \\
 \left( z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) x & 0 & -\left( \frac{1}{2} x + \sum_{i=2}^4 a_i \right) x \\
 -\left( y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) x & \left( \frac{1}{2} x + \sum_{i=2}^4 a_i \right) x & 0 \\
 0 & -\left( z + L + \sum_{i=3}^4 c_i \right) y & \left( \frac{1}{2} y + \sum_{i=3}^4 b_i \right) y \\
 \left( z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) y & 0 & -\left( \sum_{i=3}^4 a_i \right) y \\
 -\left( \frac{1}{2} y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) y & \left( \sum_{i=3}^4 a_i \right) y & 0 \\
 0 & -\left( \frac{1}{2} z + L + c_4 \right) z & b_4 z \\
 \left( \frac{1}{2} z + L + c_4 \right) z & 0 & -a_4 z \\
 -b_4 z & a_4 z & 0 \\
 -y & 0 & 0 \\
 0 & -z & 0 \\
 -z & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$

식(2)에서  $\mathbf{E}$ 는 오차벡터,  $\mathbf{B}$ 는 스칼라 행렬,  $\mathbf{p}$ 는 결정해야 할 미지의 모델계수 벡터이다. 모델계수 벡터  $\mathbf{p}$ 는 최소자승 추정량을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{p} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \quad (3)$$

오차벡터  $\mathbf{E}$  ( $3 \times 1$ )는 터치프로브를 이용하여 artifact의 큐브 꼭지점을 측정하여 얻을 수 있고, 계수행렬  $\mathbf{B}$  ( $3 \times 15$ )는 축위치의 함수로써 측정점의 위치정보로부터 구할 수 있다.

백래쉬 오차는 다른 오차성분과 마찬가지로 축 위치에 따라 달라지지만, 모델을 단순화하기 위해 축위치에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 각 오차성분에 백래쉬 오차항을 추가하고 앞에서와 동일한 과정을 통해 다음과 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{E}_{BWD} = \mathbf{E}_{FWD} + \mathbf{Fh} \quad (4)$$

$\mathbf{E}_{FWD}$ 와  $\mathbf{E}_{BWD}$ 는 artifact를 측정하여 쉽게 얻을 수 있으며,  $\mathbf{F}$ 는 식(2)의  $\mathbf{B}$ 와 같이 측정점에 대한 위치정보에서 구할 수 있으므로, 미지의 백래쉬 벡터  $\mathbf{h}$ 는 식(6)과 유사하게 구할 수 있다.

$$\mathbf{h} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \{\mathbf{E}_{BWD} - \mathbf{E}_{FWD}\} \quad (5)$$

### 3. Cube Array Artifact를 이용한 모델 계수 벡터의 추정

#### 3.1 artifact 설계

오차모델 계수벡터를 결정하기 위해서, Fig.3과 같이 8개의 큐브로 구성된 Cube Array Artifact를 고안하였다[2]. 각 큐브를 정방향과 역방향에서 측정함으로써, 각 오차모델의 모델계수를 결정하게 된다. 각 큐브의 크기는  $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ , base plate의 크기는  $460\text{mm} \times 320\text{mm}$ 로서 기계의 작업영역을 최대한 포함하도록 하였다. 공간상의 큐브배열은 공작기계 작업공간의 특성을 최대한 반영할 수 있도록 선정하였다. Fig.4와 같이 CMM을 이용하여 각 큐브의 꼭지점 좌표를 측정하고 이를 기준값으로 가정하였다. Artifact를 공작기계 베드 위에 설치한 후, CMM 측정과 동일한 방법으로 큐브 꼭지점의 좌표를 측정하여 오차벡터를 구성하였다. 오차벡터를 이용하여 미지의 모델계수 벡터인  $\mathbf{p}$ 와  $\mathbf{h}$ 를 결정하여 오차모델을 완성하였다.

#### 3.2 시뮬레이션

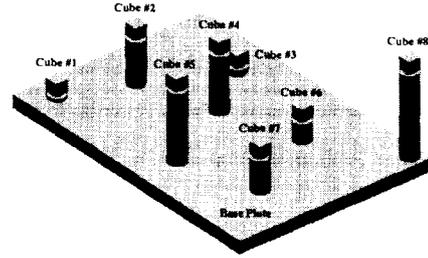


Fig.3 Cube Array Artifact

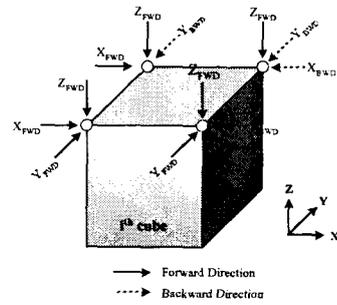
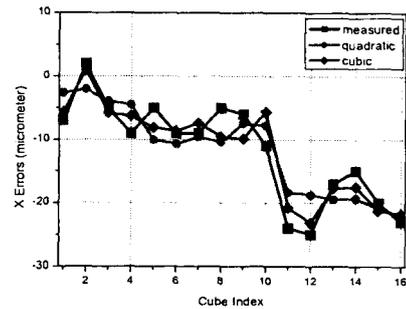
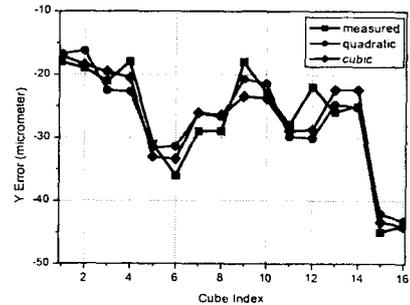


Fig.4 Measurement Points

결정된 모델계수를 이용하여 각 큐브 꼭지점에서 오차를 시뮬레이션한 결과를 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 quadratic model은 각 오차성분을 선형으로 가정한 경우이고, cubic model은 각 오차성분을 2차 다항식으로 근사화한 경우이다.

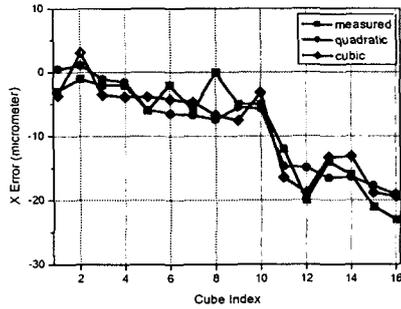


(a) X positioning errors

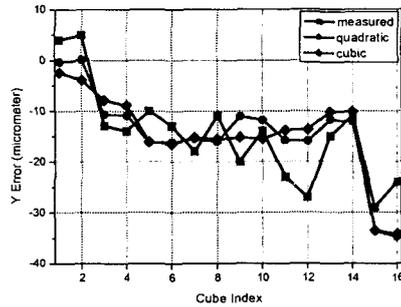


(b) Y positioning errors

Fig.5 Measured and estimated errors (forward)



(a) X positioning errors



(b) Y positioning errors

Fig.6 Measured and estimated errors (backward)

### 3.3 검증실험

제안된 오차모델의 타당성을 검증하기 위해, Fig.7 과 같이 원형시편을 사용하였다. 내부원의 직경은 280mm, 외부원의 직경은 300mm 으로서, 그림과 같이 원호의 중심을 기준으로 90° 간격으로 측정방향이 달라지며 동일한 각도에 대해서도 내부원과 외부원의 측정방향이 정반대로 변화함을 알 수 있다. Fig.8 은 CMM 과 OMM 으로 측정된 반경오차를 비교하고 있다. OMM 의 경우 원을 15° 간격으로 측정하고, 측정방향을 고려하여 공작기계의 오차를 보정함으로써 실제오차 값을 얻은 것이다. CMM 과 OMM 측정값의 편차가 15  $\mu\text{m}$  이내로 나타났다.

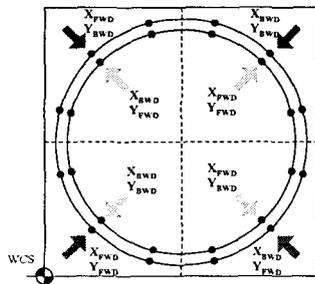
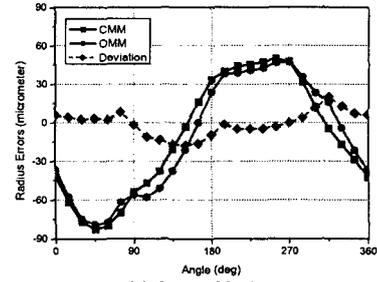
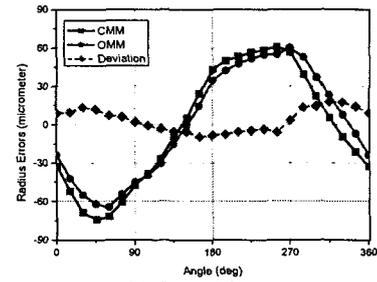


Fig. 7 Measurement Scheme of a Round Testpiece



(a) Inner Circle



(b) Outer Circle

Fig.8 Comparison of CMM and OMM data

### 4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 터치프로브와 cube array artifact 를 이용하여 공작기계의 오차를 신속하게 규명할 수 있는 방법을 제시하였다. 터치프로브의 측정방향을 고려하기 위한 오차모델을 제시하였으며, 고안된 artifact 를 이용하여 모델계수를 결정하였다. 모의실험결과 제안된 오차모델이 큐브 꼭지점의 측정값을 10  $\mu\text{m}$  이내로 추종함을 알 수 있었으며, 원형시편을 이용한 검증실험에서도 OMM 측정오차를 15  $\mu\text{m}$  이내로 줄일 수 있었다. OMM 시스템을 이용하여 제품의 가공정밀도를 높이기 위해서, 제품가공 후 공작기계 테이블 상에서 제품을 측정하고 측정데이터에서 가공오차를 분리하여 보정하고 재가공을 수행하는 연구가 필요하다.

### 참고문헌

1. 이상준, 김선호, "OMM 시스템에서의 측정오차 해석", 한국정밀공학회지 제 15 권 제 5 호, pp.34-41, 1998
2. J. Mou, "A Systematic Approach To Enhance Machine Tool Accuracy For Precision Manufacturing", Int. J. Mach. Tools & Manufact., Vol.37, No.5, pp. 669-685, 1997
3. 최진필, 이상조, 권혁동, "OMM 시스템에서 측정방향을 고려한 가공물의 오차평가", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.632-635, 2002