

# 5 축 공작기계의 기하학적 오차 평가 및 배분 Evaluation and Distribution of Geometric Errors for 5-axis Machine Tool

\*박성령<sup>1</sup>, 이동목<sup>1</sup>, #양승한<sup>2</sup>

\*S. R. Park<sup>1</sup>, D. M. Lee<sup>1</sup>, #S. H. Yang(syang@knu.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup> 경북대학교 기계공학부

Key words : Geometric Error, 5-axis Machine Tool, Error synthesis model, Error budget

## 1. 서론

바이오, 우주항공 등 많은 산업분야에서 복잡하고 정밀한 가공품의 사용 증가로 5 축 공작기계의 초정밀화가 이루어지고 있다. 5 축 공작기계의 초정밀화를 위해 구동기, 피드백 시스템, 제어기 등에 최선의 기술이 도입되고 있다. 그럼에도 불구하고 초정밀 5 축 공작기계에는 스케일(Scale), 동적(Dynamic), 환경(Environment) 및 기하학적(Geometric) 오차들이 존재한다. 그러므로 초정밀 5 축 공작기계의 구현을 위해 이러한 오차들의 제어는 필수적이다. 특히 기하학적 오차는 공작기계의 설계 단계에서 고려해야 할 중요한 요소이다.

오차합성모델을 기반으로 5 축 공작기계의 기하학적 오차를 측정하고 평가하는 연구가 많이 이루어졌다. Ahn 등<sup>1</sup>은 3 축 공작기계에 대한 체적오차의 불확실성에 대해 분석을 했다. Tsutsumi 등<sup>2</sup>은 5 축 공작기계의 축을 동시 제어하여 볼바(Ball-bar)로 병진 및 회전오차를 측정하는 방법을 제시했다. Lee 등<sup>3</sup>은 설계 단계에서 3 축 가공기 형태별로 체적 오차를 예측하고 최소의 체적 오차를 가지는 형태를 선정하였다.

본 논문은 5 축 공작기계에 대해 체적오차에 주요하게 작용하는 기하학적 오차를 찾는 방법과 체적오차가 시스템의 성능을 만족하기 위하여 각 구동축의 기하학적 오차를 배분하는 방법에 대해 논하고자 한다.

## 2. 오차합성모델

체적오차에 미치는 주요한 기하학적 오차를 찾고 이를 배분하기 위해서 먼저 오차합성모델의 유도가 선행되어야 한다. 공작기계의 최종 오차합성모델은 기하학적 오차의 정의에 따라 달라진다. 그러므로 먼저 기하학적 오차의 정의는 필수적이다. 병진오차(Translational Error)는 선형변위오

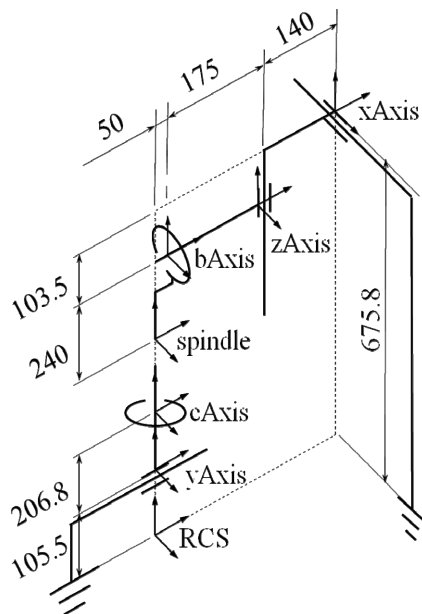


Fig. 1 Schematic diagram of 5-axis machine tool (unit: mm)

차(Linear Displacement Error)와 진직도(Straightness Error)가 있고 회전오차(Rotational Error)에는 롤(Roll), 피치(Pitch), 및 요(Yaw)가 있다. 축간 관계 오차는 직각도(Squareness)가 있다.<sup>4,5</sup> 또한 설계 단계에서는 각 축의 로컬좌표계 불일치로 인한 오프셋 오차(Offset Error)를 고려해야 한다.<sup>3</sup> 표현의 용이성을 위해 식(1)과 같이 HTM(Homogeneous Transform Matrix)을 나타낸다. 여기서  $R$ 은 좌표계의 자세를 나타내는  $3 \times 3$  행렬이고  $T$ 는 좌표계의 위치를 나타내는  $3 \times 1$ 의 벡터이다. 오차합성모델은 식(2)와 같이 Kinematic Chain을 이용하여 C 축의 로컬좌표계에서 바라본 공구의 끝점에 대한 오차를 합성하여 모델링을 수행했다.<sup>3,4</sup> 각 구동축의 오차모델을 식(2)에 대입하여 계산하면 식(3)과 같이 오차합성모델에 대한 최종 결과를 얻는다.<sup>6</sup>

$$HTM = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = [R|T] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} {}^{RCS} \tau_{cAxis} &= {}^{RCS} \tau_{yAxis} \cdot {}^{yAxis} \tau_{cAxis} \\ {}^{RCS} \tau_{spindle} &= {}^{RCS} \tau_{xAxis} \cdot {}^{xAxis} \tau_{zAxis} \cdot {}^{zAxis} \tau_{bAxis} \cdot {}^{bAxis} \tau_{spindle} \\ {}^{cAxis} \tau_{spindle} &= {}^{cAxis} \tau_{RCS} \cdot {}^{RCS} \tau_{spindle} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} {}^{cAxis} \tau_{spindle} &= [C^t \cdot (I + R(x) - R(y) + R(z) + R(b) - R(c) + S(x) - S(y) \\ &\quad + S(z) + S(b) - S(c)) \cdot B + C^t \cdot B \cdot S(t) \mid C^t \cdot ((I - R(y) - R(c) \\ &\quad - S(y) - S(c)) \cdot (O(x) + X) - (I - R(y) - R(c) - S(y) - S(c)) \cdot \\ &\quad (O(y) + Y) + (I + R(x) - R(y) - R(c) + S(x) - S(y) - S(c)) \cdot \\ &\quad (O(z) + Z) + (I + R(x) - R(y) + R(z) - R(c) + S(x) - S(y) + S(z) \\ &\quad - S(c)) \cdot O(b) - (I - R(c) - S(c)) \cdot O(c) + (I + R(x) - R(y) + R(z) \\ &\quad R(b) - R(c) + S(x) - S(y) + S(z) + S(b) - S(c)) \cdot B \cdot O(t) + Oe(x) \\ &\quad + T(x) - Oe(y) - T(y) + Oe(z) + T(z) + Oe(b) + T(b) - Oe(c) - \\ &\quad T(c) + B \cdot (Oe(t) + T(t))] \end{aligned} \quad (3)$$

## 3. 주요오차 요소 및 오차 배분

초정밀 5 축 공작기계의 구현은 많은 비용과 시간이 요구된다. 그런 만큼 모든 오차 요소 중 일부만을 고려하여 초정밀을 구현할 수 있다면 많은 이점이 있다. 본 절에서는 체적오차에 영향을 주는 기하학적 오차 중 주요 인자를 통계적 방법인 Fractional Factorial Design을 이용하여 도출하는 방법을 제시한다. 주요오차 요소를 찾기 위하여 상용프로그램인 MINITAB<sup>TM</sup>에서 제공하는 Plackett-Burman 설계를 이용하였다. 오차합성모델에서 정의한 기하학적 오차는 52개의 요소로 구성되어 있어 Plackett-Burman 설계를 이용하는 것은 불가능하다. 3 축 공작기계에 대한 기하학적 오차의 보정과 관련하여 많은 연구가 이루어져 있다. 그러므로 본 연구에서는 직선 구동축의 병진 오차와 그와 유사한 특성을 가지는 오프셋 오차는 고려하지 않았다. 최종적으로

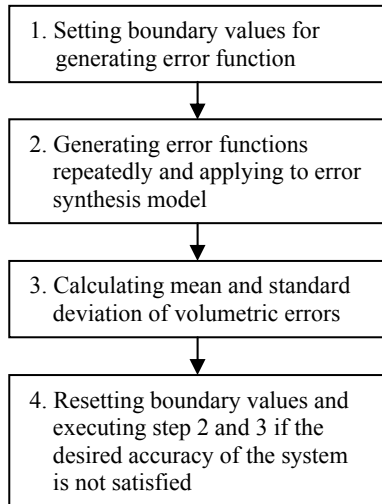


Fig. 2 Flow chart for distribution of geometric errors

실험 설계시 34 개의 오차 요소를 적용하였고 전체 실험은 72 번으로 하였다. 각도와 관련된 오차는 (+)를 0.00001 로 (-)를 0 으로 변위와 관련된 오차는 (+)를 0.5 로 (-)를 0 으로 설정하였다. 각각의 실험은 오차합성모델을 이용하여 최대 체적오차를 반응 값으로 계산했다. 최종적으로 요인 설계 분석을 하여 각각의 기하학적 오차에 대한 P-Value 값을 얻었다. 유의 수준 0.05 로 P-Value 가 0.05 보다 작은 인자를 선정하여 체적오차에 큰 영향을 미치는 요소로 판단했다.

선정된 주오차 요소만을 고려하여 시스템의 성능을 만족하는 범위내에서 기하학적 오차를 배분했다. Fig. 2 는 오차 배분에 대한 순서도이다. 오차합성모델은 수학적으로 비선형적인 함수이다. 그러므로 해석적인 방법으로 해를 얻기 어렵다. 본 연구에서는 통계적 기법을 통하여 기하학적 오차를 배분했다. 먼저 모든 오차 요소에 대해 랜덤으로 1000 개의 오차함수를 생성한다. 기존의 5 축 공작기계의 오차 측정 데이터를 기반으로 오차함수를 생성하여 오차들의 형태에 대한 정확성을 높였다. Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 생성한 오차함수를 오차합성모델에 적용한 후 체적오차에 대한 평균과 표준편차를 구한다. 이 통계 데이터를 이용하여 시스템의 성능을 만족하는지에 대해 가설검증을 통하여 판단한다. 만족하지 않으면 기하학적 오차 중 가장 민감한 요소를 선정하고 경계조건을 재설정한다. 시스템의 성능을 만족할 때까지 이 과정을 반복수행한다.

### 5. 결론

초정밀 5 축 공작기계를 구현하기 위해 기하학적 오차의 제어는 필수적이다. 본 연구는 체적오차에 가장 민감한 기하학적 오차 요소를 찾는 방법과 오차를 배분하는 방법을 제시하였다. 먼저 가상의 5 축 공작기계를 오차합성모델로 구현하였다. 실험계획법으로 기하학적 오차의 주요인자를 찾고 랜덤한 오차함수를 이용하여 통계적 방법으로 기하학적 오차를 배분하였다.

### 후기

이 논문은 2007 년도 정부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10045-0)

### 참고문헌

1. Ahn, K.G. and Cho, D.W., "An analysis of the volumetric error uncertainty of a three-axis machine tool by beta distribution," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, **40**, 2235-2248, 2000.
2. Tsutsumi, M. and Sato, A., " Identification of angular and

- positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, **44**, 1333-1342, 2004.
3. Lee, J.H., Yang, S.H., and Kim, Y.S., "Evaluation for Static and Dynamic Characteristics of a miniaturized Machine Tool according to Its Configuration," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IL, USA, IMECE 2006-14261*, 2006.
4. Yang, S.H., Kim, K.H., Park, Y.K., and Lee, S.G., "Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test," *International journal of Advanced Manufacturing Technology*, **23(7/8)**, 495-500, 2004.
5. Rahman, M., Heikkala, J., and Lappalainen, K., "Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **40(10)**, 1535-1546, 2000.
6. 박성령, 양승한, "기하학적 오차를 고려한 5 축 공작기계 설계: 직선축의 이송거리 한계," *한국정밀공학회 2008년도 추계학술대회논문집*, 617-618, 2008.