

# 대형공작기계에서 열변형을 고려한 기하학적 오차 모델링

## Geometric Error Modeling of Super-Size Machine Tools With Thermal Deformation

\*민복기<sup>1</sup>, #정성종<sup>2</sup>

\*B. K. Min<sup>1</sup>, #S. C. Chung(schung@hanyang.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 기계공학과

Key words : Homogeneous Transformation Matrix, Kinematic Chain, Volumetric Error

### 1. 서론

최근 항공기, 조선, 플랜트 산업 등의 급속한 발전에 따라서 고정밀 대형부품가공에 대한 요구가 크게 증대되고 있다. 초대형 공작기계에서는 대형공작물을 장시간 사용에도 일정한 가공정도를 유지하는 것이 중요한 과제로 부각되고 있다. 가공정도를 저하시키는 주요한 원인으로 작용하는 요인은 공작기계의 이송부분과 기계구조물의 형상부분에서 발생하는 기하학적인 오차와 공작기계의 발열이나 주위의 온도변화에 따라서 야기되는 열변형 오차 등이다. 이들은 공구와 공작물의 설치 조건 및 가공조건을 적정하게 선정할 경우에도 전체 절삭공정에서 야기되는 가공 오차의 70% 정도를 점유한다.<sup>(1)</sup> 소형공작기계의 형상변환 요소에서 열에 의한 각오차가 작아 무시할 수 있다.<sup>(2)</sup> 하지만, 대형공작기계의 경우는 각요소의 대형화로 인하여 열에 의한 각오차를 고려해야 한다.

본 연구에서는 대형공작기계의 기하학적 오차와 열변형 오차에 의한 체적오차 (Volumetric error)를 각 축의 오차특성을 나타낼 수 있는 동차변환행렬(homogeneous transformation matrix)을 이용한 기구학적 연쇄(kinematic chain)에 의해 수학적으로 기하학적 오차 모델링을 한다.

### 2. 대형공작기계 체적오차 모델링

대형공작기계에서 발생하는 오차는 대형공작기계의 테이블, 칼럼, 베드 등과 같이 기구

의 링크에 해당하는 형상변환요소에서 발생하는 형상오차와 대형공작기계의 이송부와 같이 기구와 조인트에 해당하는 조인트변환요소에서 발생하는 조인트오차로 나뉜다.<sup>(3)</sup>

형상오차와 조인트오차를 수학적으로 표현할 수 있는 동차변환행렬을 이용하여 가공점에서의 위치벡터를 구하기 위하여 Fig. 1 과 같이 15 개의 좌표축으로 나타낸다.

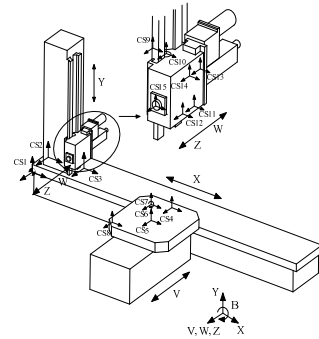


Fig. 1 Structure configuration of a super-size floor type boring machine

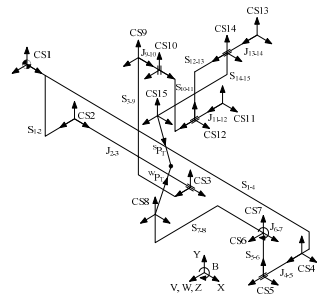


Fig. 2 Kinematic chain of a super-size floor boring machine

Fig. 1 은 5 개의 이송축을 같은 초대형 플로워 타입 보링 머신의 구조도로 Fig. 2 를 이용하여 기구학적 연결기구를 보인 것이다. Fig. 2 의 CS1-CS2, CS1-CS4, CS5-CS6, CS7-CS8, CS3-CS9, CS10-CS11, CS12-CS13, CS14-CS15 는 형상변환요소  $S_{1-2}, S_{1-4}, S_{5-6}, S_{7-8}, S_{3-9}, S_{10-11}, S_{12-13}, S_{14-15}$  를 표현하고, CS2-CS3, CS4-CS5, CS6-CS7, CS9-CS10, CS11-CS12, CS13-CS14 는 조인트변환요소  $J_{2-3}, J_{4-5}, J_{6-7}, J_{9-10}, J_{11-12}, J_{13-14}$  를 표현하며, 식 (1)과 같이 표현된다.<sup>(2)</sup>

$$\begin{aligned}
 [S_{1,2}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{12}^s(T) & \varepsilon_{12}^s(T) & a_1 + \Delta a_1(T) \\ \varepsilon_{12}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{12}^s(T) & b_1 + \Delta b_1(T) \\ -\varepsilon_{12}^s(T) & \varepsilon_{12}^s(T) & 1 & c_1 + \Delta c_1(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & [S_{1,4}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{14}^s(T) & \varepsilon_{14}^s(T) & a_1 + \Delta a_1(T) \\ \varepsilon_{14}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{14}^s(T) & b_1 + \Delta b_1(T) \\ -\varepsilon_{14}^s(T) & \varepsilon_{14}^s(T) & 1 & c_1 + \Delta c_1(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [S_{3,9}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{39}^s(T) & \varepsilon_{39}^s(T) & a_3 + \Delta a_3(T) \\ \varepsilon_{39}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{39}^s(T) & b_3 + \Delta b_3(T) \\ -\varepsilon_{39}^s(T) & \varepsilon_{39}^s(T) & 1 & c_3 + \Delta c_3(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & [S_{5,6}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{56}^s(T) & \varepsilon_{56}^s(T) & a_5 + \Delta a_5(T) \\ \varepsilon_{56}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{56}^s(T) & b_5 + \Delta b_5(T) \\ -\varepsilon_{56}^s(T) & \varepsilon_{56}^s(T) & 1 & c_5 + \Delta c_5(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [S_{7,8}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{78}^s(T) & \varepsilon_{78}^s(T) & a_7 + \Delta a_7(T) \\ \varepsilon_{78}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{78}^s(T) & b_7 + \Delta b_7(T) \\ -\varepsilon_{78}^s(T) & \varepsilon_{78}^s(T) & 1 & c_7 + \Delta c_7(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & [S_{10-11}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{10-11}^s(T) & \varepsilon_{10-11}^s(T) & a_{10} + \Delta a_{10}(T) \\ \varepsilon_{10-11}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{10-11}^s(T) & b_{10} + \Delta b_{10}(T) \\ -\varepsilon_{10-11}^s(T) & \varepsilon_{10-11}^s(T) & 1 & c_{10} + \Delta c_{10}(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [S_{12-13}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{12-13}^s(T) & \varepsilon_{12-13}^s(T) & a_{12} + \Delta a_{12}(T) \\ \varepsilon_{12-13}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{12-13}^s(T) & b_{12} + \Delta b_{12}(T) \\ -\varepsilon_{12-13}^s(T) & \varepsilon_{12-13}^s(T) & 1 & c_{12} + \Delta c_{12}(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & [S_{14-15}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{14-15}^s(T) & \varepsilon_{14-15}^s(T) & a_{14} + \Delta a_{14}(T) \\ \varepsilon_{14-15}^s(T) & 1 & -\varepsilon_{14-15}^s(T) & b_{14} + \Delta b_{14}(T) \\ -\varepsilon_{14-15}^s(T) & \varepsilon_{14-15}^s(T) & 1 & c_{14} + \Delta c_{14}(T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [J_{2-3}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{21}(x,T) & \varepsilon_{21}(x,T) & x + \delta_x(x,T) + P_1(T) \cdot x \\ \varepsilon_{21}(x,T) & 1 & -\varepsilon_{21}(x,T) & \delta_y(x,T) \\ -\varepsilon_{21}(x,T) & \varepsilon_{21}(x,T) & 1 & \delta_z(x,T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [J_{4-5}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{42}(v,T) & \varepsilon_{42}(v,T) & \delta_x(v,T) - S_{42} \cdot v \\ \varepsilon_{42}(v,T) & 1 & -\varepsilon_{42}(v,T) & \delta_y(v,T) \\ -\varepsilon_{42}(v,T) & \varepsilon_{42}(v,T) & 1 & v + \delta_z(v,T) + P_2(T) \cdot v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [J_{6-7}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{63}(r,T) & \varepsilon_{63}(r,T) & \delta_x(r,T) \\ \varepsilon_{63}(r,T) & 1 & -\varepsilon_{63}(r,T) & \delta_y(r,T) \\ -\varepsilon_{63}(r,T) & \varepsilon_{63}(r,T) & 1 & \delta_z(r,T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [J_{9-10}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{94}(y,T) & \varepsilon_{94}(y,T) & \delta_x(y,T) + S_{94} \cdot y \\ \varepsilon_{94}(y,T) & 1 & -\varepsilon_{94}(y,T) & y + \delta_y(y,T) + P_3(T) \cdot y \\ -\varepsilon_{94}(y,T) & \varepsilon_{94}(y,T) & 1 & \delta_z(y,T) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [J_{11-12}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{115}(w,T) & \varepsilon_{115}(w,T) & \delta_x(w,T) \\ \varepsilon_{115}(w,T) & 1 & -\varepsilon_{115}(w,T) & \delta_y(w,T) - S_{99} \cdot w \\ -\varepsilon_{115}(w,T) & \varepsilon_{115}(w,T) & 1 & w + \delta_z(w,T) + P_4(T) \cdot w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 [J_{13-14}]_{\text{actual}} &= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{136}(z,T) & \varepsilon_{136}(z,T) & \delta_x(z,T) \\ \varepsilon_{136}(z,T) & 1 & -\varepsilon_{136}(z,T) & \delta_y(z,T) - S_{99} \cdot z \\ -\varepsilon_{136}(z,T) & \varepsilon_{136}(z,T) & 1 & z + \delta_z(z,T) + P_5(T) \cdot z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\varepsilon_{xi}^s, \varepsilon_{yi}^s, \varepsilon_{zi}^s (i=1\sim 8)$ 와  $\varepsilon_{xi}, \varepsilon_{yi}, \varepsilon_{zi} (i=1\sim 6)$ 는 형상변환요소와 조인트변환요소의 열에 의한 각변형 오차이며,  $\Delta a_i, \Delta b_i, \Delta c_i$ 는 각 형상변환요소의 열에 의한 병진변형 오차

이며,  $S_{xy}, S_{vx}, S_{wy}, S_{zy}$ 는 축간의 직각도 오차이며,  $P_x, P_y, P_z$ 는 이송축의 선형 열팽창을 모델링한 것이다. 그리고  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 는 이송축의 위치 오차 및 진직도 오차를 의미한다.

가공체적의 원점에 대한 가공점 위치는  ${}^w P_T$ 이며, 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 {}^w P_T &= [X + dX \quad Y + dY \quad Z + dZ \quad 1]^T \\
 &= [S_{7-8}]_{\text{actual}}^{-1} [J_{6-7}]_{\text{actual}}^{-1} [S_{5-6}]_{\text{actual}}^{-1} [J_{4-5}]_{\text{actual}}^{-1} [S_{1-4}]_{\text{actual}}^{-1} \\
 &\quad \times [S_{1-2}]_{\text{actual}} [J_{2-3}]_{\text{actual}} [S_{3-9}]_{\text{actual}} [J_{9-10}]_{\text{actual}} [S_{10-11}]_{\text{actual}} \\
 &\quad \times [J_{11-12}]_{\text{actual}} [S_{12-13}]_{\text{actual}} [J_{13-14}]_{\text{actual}} [S_{14-15}]_{\text{actual}} {}^S P_T \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서,  ${}^S P_T = [t_x \quad t_y \quad t_z \quad 1]^T$ 는 공구에 대한 가공점 위치이다. 식 (2)를 통하여 각 축의 가공체적 오차인  $dX, dY, dZ$ 를 구할 수 있다.

#### 4. 결론

소형공작기계에서는 형상변환요소의 각오차가 작기 때문에 고려되지 않고 모델링이 되었다. 하지만, 대형공작기계의 형상변환요소에서 발생하는 각오차는 공작기계의 가공정도에 영향을 미치기 때문에 형상변환요소의 각오차 요소들을 포함하는 모델링이 필요하다.

본 논문에서는 대형공작기계의 기하학적 오차와 열변형 오차를 포함하는 체적오차를 동차변환행렬을 이용한 기구학적 연쇄에 의해 수학적으로 모델링 하였다. 또한, 각 축의 가공체적 오차를 구할 수 있다.

#### 후기

본 연구는 2012년 지식경제부의 정부지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Bryan, J., "International Status of Thermal Error Research," Annals of CORP, 2, 645-656, 1990.
2. Kim, K D., Chung, S C., "On-Machine Inspection System Accuracy : Improvement using an Artifact," Journal of Manufacturing Systems, 4, 299-308, 2004.
3. Slocum, A H., "Precision machine design," Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall, 1992.