

# 5축 CNC 공작기계의 오차합성모델링 및 보정 알고리즘

양승한\*, 이철수\*\*

## Error Synthesis Modeling and Compensation Algorithm of a 5-Axis CNC Machine Tool

Seung-Han Yang\* and Chul-Soo Lee\*\*

### ABSTRACT

A 5-axis CNC machine tool is more useful compared with a 3-axis machine tool, because the position and the orientation of a tool tip can be controlled simultaneously. Unlike the 3-axis machine tool, the 5-axis machine tool has the volumetric position error and volumetric orientation error due to the quasi-static error of each machine tool joint which is a major source of machined part error. So, the generalized error synthesis model of the 5-axis CNC machine tool was developed to predict and to compensate for the volumetric position error and the volumetric orientation error. It was proposed that a compensation algorithm to correct simultaneously the volumetric position error and the volumetric orientation error of the 5-axis CNC machine by error inverse kinematic.

**Key Words** : 5-axis CNC machine tool(5축 CNC 공작기계), error synthesis model(오차 합성 모델), volumetric error(체적오차), error inverse kinematics(오차 역기구학)

### 1. 서 론

5축 공작기계는 3개의 직선축과 2개의 회전축으로 구성되어 있어서 공작물에 대해서 일정한 방향 밖에 갖지 못하는 기존의 3축 공작기계와 달리 효율적인 공구자세를 가질 수 있기 때문에 공작물의 정밀도를 높일 수 있고 3축의 경우에는 접근이 불가능한 곡면의 가공을 할 수 있다. 따라서 최근 5

축 공작기계가 임펠러, 항공기 부품, 터빈 블레이드, 선박용 프로펠러 등의 가공에 널리 쓰이고 있으며 자동차 차체나 플라스틱 사출 금형에도 도입이 증가하고 있다. 또한 근래에는 공작기계의 고속화, 고정밀화의 추세에 따라서 공작기계의 오차를 발생시키는 주요한 원인인 열변형 오차와 기하학적 오차 같은 기계의 준정적 오차<sup>(1),(2)</sup>를 모델링하고 그것을 보정하는 연구가<sup>(3),(4)</sup> 많이 수행되고 있다.

\* 경북대학교 기계공학부

\*\* 경북대학교 기계공학부 대학원

그러나 5축 공작기계의 경우에는 각 축의 오차들이 합성되어 나타나는 제적오차와 이것을 예측하는 오차합성모델<sup>(5)</sup>에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 그리고 대부분의 오차합성모델이 측정된 오차요소로부터 성해지는 기준좌표계에 대한 고려가 없어서 보정시 문제가 생기며 특히 5축 공작기계는 2개의 회전축 때문에 오차모델이 비선형이 되어서 보정값의 오차까지 고려해서 위치오차(position error)와 방향오차(orientation error)를 동시에 보정할 수가 까다롭다.

본 논문에서 측정된 오차요소로부터 기준좌표계를 설정하는 방법과 이러한 기준좌표계에 의한 5축 CNC 공작기계의 오차합성모델을 제시하였다. 그리고 보정값의 오차를 고려하는 오차 역기구학(error inverse kinematics)을 이용하여 체적위치 오차와 방향오차를 동시에 보정할 수 있는 알고리즘을 제안하고 평가했다.

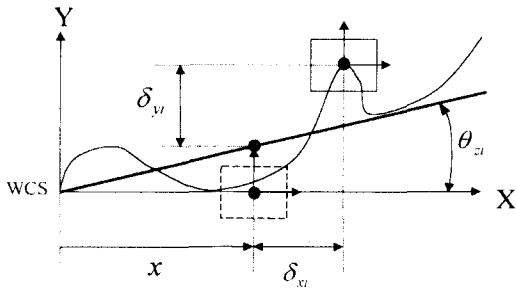


Fig. 1 Translation error of a prismatic joint

## 2. 오차합성모델

### 2.1 직선축

공작기계의 각 축(joint)에서 발생하는 기하학적, 열변형 오차는 레이저 광학계와 같은 측정장비로 측정<sup>(3)</sup>될 수 있으며 체적오차는 측정된 오차들을 이용해서 기준좌표계(WCS; world coordinate system)를 설정한 후, 이 기준좌표계에 대한 지역좌표계(LCS; local coordinate system)들의 상대적인 관계를 이용해서 모델링된다. 이때 직선축의 상대적 위치는 Fig. 1과 같이 측정된 오차의 곡선적합 직선(curve fitted line). 3개의 병진오차, 3개의 회전오차성분으로 나타내며 식(1)과 같이 균일변환행렬(homogeneous transformation matrix)로 표현된다.

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P = O_{i-1}^i + x_i + \theta_i \times x_i + \delta_i \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zi} & \epsilon_{yi} \\ \epsilon_{zi} & 1 & -\epsilon_{xi} \\ -\epsilon_{yi} & \epsilon_{xi} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$T_{i-1}^i$ : (i)축에서 (i-1)축으로의 균일변환행렬

$O_{i-1}^i$ : (i-1)축과 (i)축의 오프셋(offset) 벡터

$x_i$ : i축의 공칭이동값; i축이 이상적으로 이동하는 값

$\theta_i$ : 기준좌표계에 대한 곡선적합 직선의 회전 각도벡터

$\delta_i$ : 병진오차

$\epsilon_{ij}$ : j축의 i방향에 대한 회전오차

### 2.2 회전축

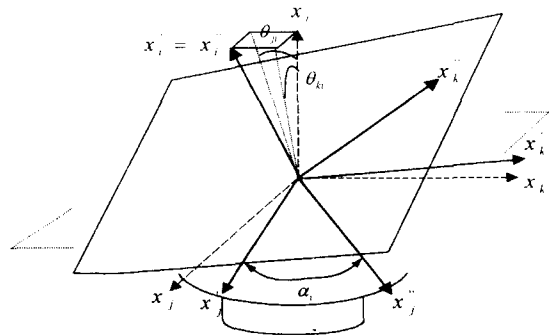


Fig. 2 Error kinematics of a rotary joint

공작기계의 회전축의 오차는 Fig. 2와 같이 표현된다.

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P = O_{i-1}^i + \delta_i \quad (5)$$

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \quad (6)$$

여기서,

$R_1$ :  $x_j$ 에 대해  $\theta_{ji}$  회전,  $x_k$ 에 대해  $\theta_{ki}$  회전

$R_2$ :  $x_i'$ 에 대해  $\alpha_i$  회전

$R$  :  $x_j''$  에 대해  $\epsilon_{ji}$ ,  $x_j''$  에 대해  $\epsilon_{ji}$ ,  
 $x_k''$  에 대해  $\epsilon_{ki}$  회전

### 2.3 좌표계 설정

공작기계의 체적오차는 각 축(joint)에서 측정된 오차들의 합성이므로 체적오차를 나타내는 오차 합성모델의 기준좌표계는 각 축의 오차 측정시의 기준좌표계를 고려하여 설정되어야 한다. 일반적으로 공작기계를 구성하는 기본적인 3축은 LM 가이드로 구성되어 있고 각 슬라이드는 이 가이드를 따라 움직인다. 이때 설계시의 3축은 이상적으로는 서로 직각이지만 실제로는 각 축들간에 직각도 오차가 존재한다. 오차합성모델의 기준좌표계는 임의의 위치에 임의의 방향으로 설치할 수 있으나, 이 좌표계의 방향을 적절히 선택하면 최소한으로 직각도 오차 요소를 줄여서 표현할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 측정값의 곡선적합직선과 기준좌표계의 한 축을 일치시키고 또다른 한 축은 다른 곡선적합직선과 같은 평면상에 오도록 설정하여 3개의 직각도 오차를 정한다.

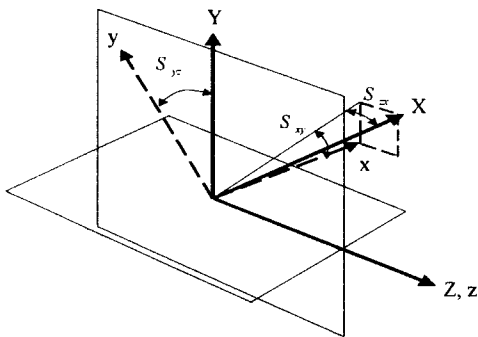


Fig. 3 World coordinate system

### 2.4 오차합성모델 유도

공작기계의 각 축의 이상적인 위치와 오차는 기준좌표계에 대한 지역좌표계들의 상대적인 위치와 방향을 나타내는 균일변환행렬에 의해 모델링된다. 그리고 공구의 끝에는 공구좌표계(TCS)를, 공작물의 가공점에는 공작물 좌표계(PCS)를 설치한다. 공작물을 깎기 위해서 공작물의 한 점에 공

구를 위치시켰을 때 오차가 존재하지 않는다면 기준좌표계에 대해서 표현되는 공작물좌표계와 공구좌표계는 일치하게 된다. 따라서 균일변환행렬에 의해서 (7), (8)식이 성립한다.

$$\tau_{0,N}^t = \tau_{0,N}^p \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \tau_{0,N}^1 \cdot \tau_{1,N}^2 \cdots \tau_{n-1,N}^n \cdot \tau_{n,N}^t \\ & = \tau_{0,N}^1 \cdot \tau_{1,N}^2 \cdots \tau_{m-1,N}^m \cdot \tau_{m,N}^p \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$\tau_{i-1}^i$  :  $i$  좌표계에서  $i-1$ 좌표계로의 균일변환행렬

$n$  : 공구의 움직임을 결정하는 축의 수

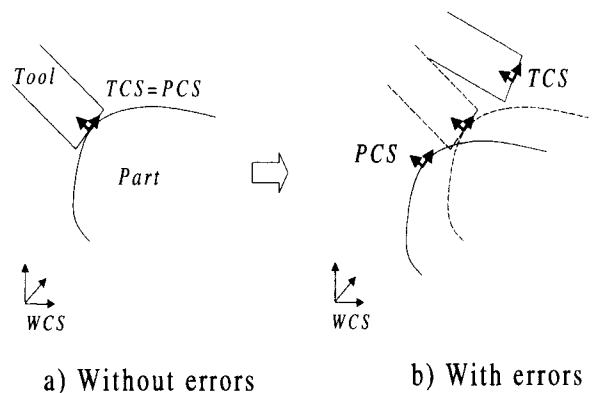
$m$  : 공작물의 움직임을 결정하는 축의 수

아랫첨자  $N$  : 오차가 없을 때 변환행렬

최종 축  $m$ 과 공작물 사이에는 준정적 오차가 존재하지 않으므로 식(9)가 성립하고 오차합성모델은 식 (10)과 같이 유도된다.

$$\tau_m^p = \tau_{m,N}^p = \tau_{m,N}^{m-1} \cdots \tau_{1,N}^1 \cdot \tau_{0,N}^1 \cdots \tau_{n,N}^t \quad (9)$$

$$\tau_p^t = \tau_p^0 \cdot \tau_0^t = \tau_p^m \cdot \tau_m^{m-1} \cdots \tau_1^1 \cdot \tau_0^1 \cdots \tau_n^t \quad (10)$$



a) Without errors

b) With errors

Fig. 4 Tool and part coordinate system

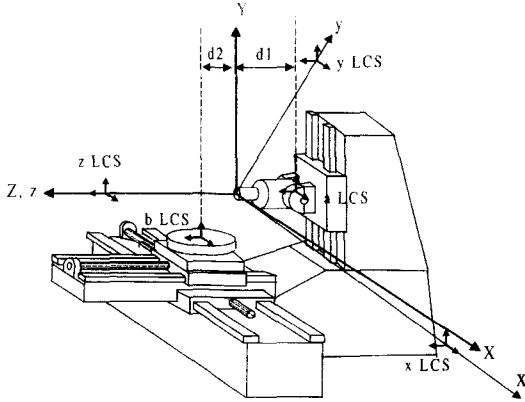


Fig. 5 A 5-axis horizontal CNC machine

**2.5 5축 CNC 공작기계의 오차 합성모델**

Fig. 5와 같은 형태의 5축 수평 머시닝 센터의 기하학적 오차를 유도하였다. 이 머시닝 센터는 기본적인 x, y, z 축 3개의 직선축과 공작물을 회전시키는 b, 공구를 회전시키는 a의 두 개의 회전축으로 구성되어 있다.

머시닝센터의 z축과 y축으로 기준좌표를 설정하면 y축에 1개, x축에 2개의 직각도 오차요소가 발생한다. 그리고 각 좌표계간의 원점 오프셋(offset)을 없애기 위해서 기준좌표계(WCS)와 각 지역좌표계(LCS)들의 원점은 동일하게 공구 끝에 설정했다.

(10)식에 의해서 아래의 (11)식이 성립하고 미소항을 소거하면 (12)식이 구해진다.

$$\tau_p^t = \tau_b^b \cdot \tau_z^z \cdot \tau_x^x \cdot \tau_o^o \cdot \tau_y^y \cdot \tau_a^a \cdot \tau_a^t \quad (11)$$

$$\tau_p^t = \begin{pmatrix} 1 & -\lambda_z & \lambda_y & \mu_x \\ \lambda_z & 1 & -\lambda_x & \mu_y \\ -\lambda_y & \lambda_x & 1 & \mu_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu_x = & \delta_{xz} + \delta_{zx} - \delta_{xb} - \delta_{bx} + \delta_{yx} + \epsilon_{ya}(d_1 + L) + \epsilon_{yb}(d_1 + d_2 \\ & + z - (d_1 + L) \cos a) + \epsilon_{yx}(d_1 - (d_1 + L) \cos a) + \epsilon_{zx}(y - \\ & (d_1 + L) \sin a) + \epsilon_{zy}(d_1 + L) \sin a + \epsilon_{zz}(y - (d_1 + L) \sin a) \\ & \epsilon_{zb}(y - (d_1 + L) \sin a) \cos b + \epsilon_{yb}(-y + (d_1 + L) \sin a) \sin b \\ & \epsilon_{yz}(d_1 + z - (d_1 + L) \cos a) + LP_{yza} + P_{xya}(d_1 + L) \cos a + \\ & P_{xza}(d_1 + L) \sin a + P_{yza}(y - (d_1 + L) \sin a) + (\delta_{za} - \delta_{zb} - \\ & \delta_{zx} + \delta_{zy} - \delta_{zz}) \sin a - \epsilon_{xa}(d_1 + L) + \epsilon_{xy}(-d_1 - L + d_1 \cos a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_y = & \delta_{yz} + (xS_{xz} - yS_{yz}) \sin a + (\delta_{ya} - \delta_{yb} - \delta_{yx} - \delta_{yy} - \delta_{yz}) \\ & \cos a + x\epsilon_{zx} \cos a + x\epsilon_{zz} \cos a - (\epsilon_{yb} + \epsilon_{yx} + \epsilon_{yz})x \sin a + \epsilon_{yy} \\ & (d_1 + L - d_1 \cos a - y \sin a) + \epsilon_{xb}((d_1 + L - (d_1 + d_2 + z) \\ & \cos a - y \sin a) \cos b - x \cos b \sin b) + \epsilon_{zb}(x \cos a \cos b + (d_1 \\ & + L - (d_1 + d_2 + z) \cos a - y \sin a) \sin b) + \epsilon_{xz}(d_1 + L - (d_1 \\ & + z) \cos a - y \sin a) - LP_{xza} + (P_{yza} + S_{xy})x \cos a + P_{xyb}(d_1 \\ & + L - (d_1 + d_2 + z) \cos a - y \sin a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_z = & (xS_{xz} - yS_{yz}) \cos a + \delta_{zs} + (\delta_{za} - \delta_{zb} - \delta_{zx} + \delta_{zy} - \delta_{zz}) \\ & \cos a - (\epsilon_{yb} - \epsilon_{yx} + \epsilon_{yz})x \cos a - (\delta_{ya} - \delta_{yb} - \delta_{yx} + \delta_{yy} + \\ & \delta_{yz}) \sin a - d_1 \epsilon_{xy} \sin a - x\epsilon_{za} \sin a - x\epsilon_{zz} \sin a + \epsilon_{xb}(x \sin a \\ & \sin b - y \cos a \cos b + (d_1 + d_2 + z) \cos b \sin a) + \epsilon_{xx}(d_1 \sin a \\ & - y \cos a) + \epsilon_{zb}(-x \cos b \sin a - y \cos a \sin b + (d_1 + d_2 + z) \\ & \sin a \sin b) + \epsilon_{xz}((d_1 + z) \sin a - y \cos a) - xP_{yza} \sin a - xS_{xy} \\ & \sin a + P_{xyb}(-y \cos a + (d_1 + d_2 + z) \sin a) \end{aligned}$$

$$\lambda_x = -P_{xyb} + P_{xza} + \epsilon_{za} - \epsilon_{xb} \cos b - \epsilon_{xx} + \epsilon_{xy} - \epsilon_{xz} - \epsilon_{xb} \sin b$$

$$\begin{aligned} \lambda_y = & P_{yza} + P_{xya} \cos a + (P_{xza} - P_{yza}) \sin a + \epsilon_{ya} + (-\epsilon_{yb} - \\ & - \epsilon_{yx} + \epsilon_{yy} - \epsilon_{yz}) \cos a + (-\epsilon_{zx} + \epsilon_{zy} - \epsilon_{zz} + \epsilon_{xb} \sin b \\ & - \epsilon_{zb} \cos b) \sin a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_z = & (P_{xza} - P_{yza}) \cos a - P_{xya} \sin a + \epsilon_{za} + (-\epsilon_{zb} \cos b - \epsilon_{xz} \\ & + \epsilon_{zy} - \epsilon_{zz}) \cos a + (\epsilon_{yb} + \epsilon_{yx} - \epsilon_{yy} + \epsilon_{yz}) \sin a + \epsilon_{xb} \cos a \\ & \sin b \end{aligned}$$

여기서,

- $\delta_{x_1, x_2}$  :  $x_2$ 조인트의  $x_1$ 방향으로의 병진오차
- $\epsilon_{x_1, x_2}$  :  $x_2$ 조인트의  $x_1$ 축에 대한 회전오차
- $S_{x_1, x_2}$  :  $x_1$ 축과  $x_2$ 축 사이의 직각도 오차
- $P_{x_1, x_2, x_3}$  :  $x_3$ 조인트의  $x_1, x_2$  평면상의 평행도 오차
- $L$  : 공구의 오프셋(offset) 길이

**3. 오차 보정**

**3.1 보정 알고리즘**

앞에서 언급한 오차합성모델을 통해 공작기계의

순정적 오차로 인해서 공구의 공작물 사이에 발생 하는 위치오차와 방향오차를 알 수 있다. 그러나 이것은 공작물의 가공점에 위치하는 PCS에 대해서 표현된 것이므로 실제적인 보정을 위해서는 공작물의 원점좌표계에 대해서 표현되는 오차가 필요하다. 공작물은 최종적으로 베드 위에 고정되므로 공작물의 원점좌표계는 마지막 베드의 좌표계와 일치시킬 수 있다. 본 논문에서 적용한 수평형 5축 공작기계의 경우 공작물은 회전축인 b축 위에 고정되게 되므로 공작물의 원점좌표계는 b축 좌표계와 일치시킬 수 있다. 따라서 공작물 좌표계로 표현되는 오차합성모델이 식(13)과 같이 유도될 수 있고 이것은 오차가 포함된 공작기계의 기구학적 모델이다.

$$\tau_b^t = \tau_b^z \cdot \tau_z^x \cdot \tau_x^o \cdot \tau_o^y \cdot \tau_y^a \cdot \tau_a^t \quad (13)$$

그리고 공작기계에 오차가 없을 때 이상적인 기구학적 모델은 다음 식과 같이 유도된다.

$$\tau_{b,N}^t = \tau_{b,N}^z \cdot \tau_{z,N}^x \cdot \tau_{x,N}^o \cdot \tau_{o,N}^y \cdot \tau_{y,N}^a \cdot \tau_{a,N}^t \quad (14)$$

식(13)은 공작물의 원점좌표계에서 본 공구의 위치와 방향을 나타내며 오차가 포함되어 있다. 식(14)는 이상적인 기구학을 고려한 공구의 위치와 방향을 나타낸다. 만약 공작기계의 각 축의 오차가 존재하지 않는다면 식(13)과 식(14)는 일치하게 된다. 일반적으로, 공구를 공작물의 공구 경로상에 특정한 방향성을 가지며 위치시키기 위한 각 축의 이동 값들은 식(14)를 역으로 풀어서 구하게 되는데 5축의 경우 직선축 3개의 이동 값과 회전축 2개의 회전 각도가 구해진다. 이것을 공칭값(nominal value)이라고 하자. 각 축의 이동 값에 따라 측정된 오차들을 다항식으로 모델링하면 식(13)은 각 축의 이동 값의 함수가 된다. 따라서 공작물의 원점좌표계로 표현되는 오차는 다음과 같이 표현될 수 있으며 이것을 ECM(error compensation matrix)이라고 정의한다.

$$ECM = T_b^t(\mathbf{nx}) - T_b^t(\mathbf{cx}) \quad (15)$$

여기서,  $\mathbf{nx} = [nx, ny, nz, na, nb]$ ,

$$\mathbf{cx} = [cx, cy, cz, ca, cb]$$

$n_i$  : i축의 공칭 이동값  
 $c_i$  : 보정된 i축의 이동값

$$F_i(cx, cy, cz, ca, cb) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (16)$$

$$F_1 = ECM(1, 4)$$

$$F_2 = ECM(2, 4)$$

$$F_3 = ECM(3, 4)$$

$$F_4 = ECM(3, 1)$$

$$F_5 = ECM(3, 2) \quad (17)$$

여기서,

$ECM(i, j)$  는 ECM 행렬의 i행 j열의 요소

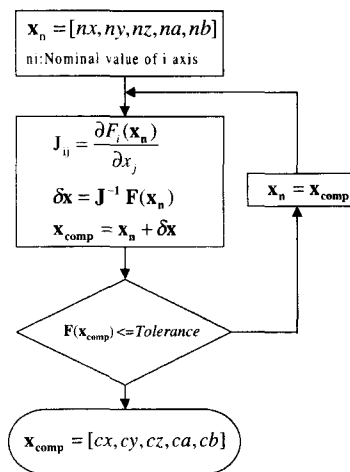


Fig. 6 The compensation procedure

식(15)의 ECM에서 위치와 방향의 오차를 나타내는 부분이 영행렬이 되도록 하는  $\mathbf{cx}$ 를 찾으면 공구가 공작물의 원하는 위치에 원하는 방향을 가지며 존재하게 하기 위한 각 축의 이동 값들을 알 수 있다. 따라서 먼저 위치오차를 나타내는 ECM(1,4), ECM(2,4), ECM(3,4)을 목적함수로 잡을 수 있다. 그리고 ECM에서 회전 오차를 나타내는 것은 회전행렬 요소인 6개이지만 5축에서 제어할 수 있는 공구의 자세는 2개, 즉 공구의 피치(pitch)와 요(yaw)이므로 일반적인 회전행렬에서 공구의 롤(roll)이 영향을 끼치는 항들은 제외시키면 회전행렬 세 번째 행, 즉 ECM에서는 ECM(3,1), ECM(3,2), ECM(3,3)이 남게된다. ECM(3,1)과

ECM(3,2)은 ECM(3,3)과 동축적이므로 세 개 중 앞의 두 개 ECM(3,1)과 ECM(3,2)를 선택해서 전부 5개의 식, ECM(1,4), ECM(2,4), ECM(3,4), ECM(3,1), ECM(3,2)을 목적함수로 식(16), 식(17)과 같이 설정한다.

위의 과정에 따라 이 5개의 식을 0 또는 최소로 하는  $cx$ 의 값을 구한다. 이 5차 연립방정식은  $cx$ 의 값들이  $\cos$ 과  $\sin$ 함수에 포함되어 있는 비선형식이므로 선형식으로는 풀 수가 없다. 따라서 Fig. 6과 같이 Newton raphson method 로 근을 구한다. 이때 초기 값을 잘못 설정하면 수렴하지 않거나 국부 최소점에 수렴할 위험이 있다. 그러나 공작기계의 오차의 단위는 이 공칭값에 비해 매우 적으므로  $nx$ 의 값을 구해야 할  $cx$ 값과 근접해 있다. 따라서 이  $nx$ 의 값을 먼저 구하여 초기 값으로 쓰면 매우 안정적이면서 빠르게 수렴할 수 있다.

### 3.2 보정 알고리즘의 실제적용

보정 알고리즘을 시뮬레이션(simulation)하기 위해 Fig. 7과 같이 CL(cutter location)데이터를 포함하는 오프셋 곡면(offset surface)을 가정하였다. 먼저 이 오프셋 곡면의 CL 데이터에 Fig. 5의 5축 공작기계의 공구가 곡면에 수직인 방향으로 위치하기 위한 각 축의 값들을 기구학적 해석을 통해서 구하였다. 그리고 이  $nx$ 와 보정으로 구할  $cx$ 값의 기구학적 검증은 위해서 Fig. 8과 같이 가상 5축 공작기계로<sup>(6)</sup> 시뮬레이션을 하였다.

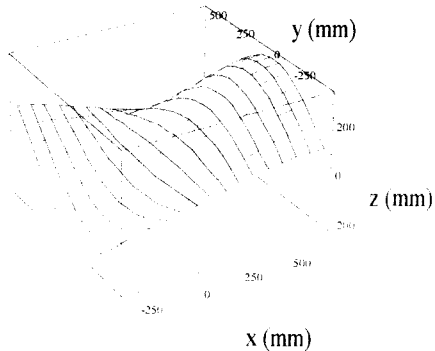


Fig. 7 The part offset surface

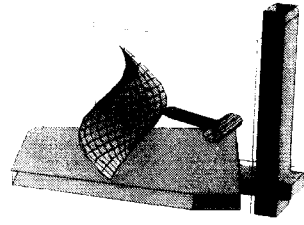
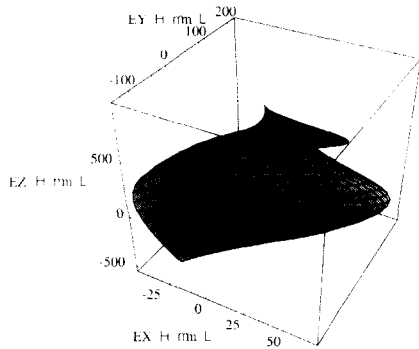
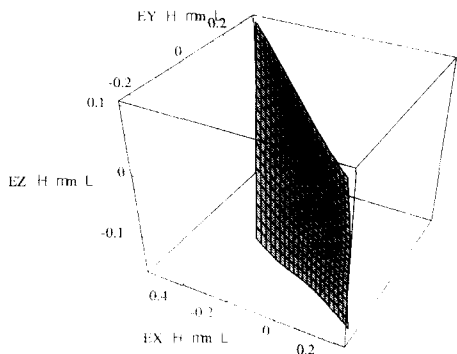


Fig. 8 A virtual 5-axis machine



a) Before compensation

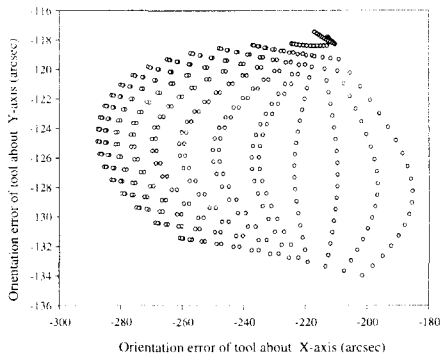


b) After compensation

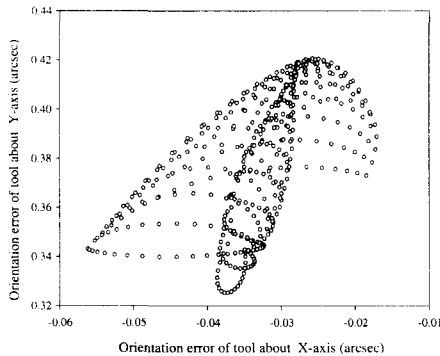
Fig. 9(a) Volumetric position error map

Fig. 5의 공작기계의 형태는 3축 공작기계에 2축이 더하여진 형태이며 오차합성모델을 적용하기 위

해 각 오차요소들은 3축의 경우 레이저로 측정되어진 값<sup>(3)</sup>들을 사용했으며 2축의 경우 측정되어진 값을 참조하여<sup>(7)</sup> 인위적으로 생성하였다.



a) Before compensation



b) After compensation

Fig. 9(b) Volumetric orientation error map

구하여진  $n_x$ 를 오차합성모델에 대입하여 Fig. 7의 CL 데이터를 따라갈때의 체적 위치오차와 방향성 오차를 Fig. 9와 같이 구할 수 있었다. 그리고 3.1절의 보정 알고리즘을 적용하여 새로운  $c_x$ 를 구한 후 오차합성모델에 대입하여 보정 후의 오차를 구하였다.

시뮬레이션 결과, 보정후 체적위치오차맵의 범위

가 x축 방향으로 (-44.7,68), y축 방향으로 (-135,215), z축 방향으로 (-518,941)  $\mu\text{m}$ 에서 x축 방향으로 (-0.55,0.27), y축 방향으로 (-0.23,0.35), z축 방향으로 (-0.16,0.1)  $\mu\text{m}$ 로 줄었고 방향오차맵의 범위가 x축을 중심으로 (-287.5,-185.3) arcsec, y축을 중심으로 (-134,-117.5) arcsec 에서 x축에 대해서 (-0.16,0.24) arcsec, y축에 대해서 (-0.49,0.77) arcsec로 줄었다. 그리고 시뮬레이션 결과로 제안된 알고리즘이 체적 위치오차와 방향 오차를 동시에 보정하는데 유효함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 5축 CNC 공작기계의 측정오차로 기준좌표계를 설정하는 오차합성모델을 개발하였고 오차보정행렬을 사용하는 보정알고리즘을 제안하여 체적오차를 해석하고, 보정하여 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 측정된 오차를 고려하여 기준좌표계를 설정, 모델링하는 실용적인 오차합성모델링법을 제시하였다.
- (2) 제시된 오차합성모델을 통해 5축 CNC공작기계의 준정적 오차로 인한 공작물의 오차를 평가해 볼 수 있는 체적오차맵(위치오차와 방향오차)을 구하였다.
- (3) 공작기계의 오차 역기구학적 모델을 통해 오차보정행렬을 정의하였고 이 행렬을 이용하여 체적위치오차와 방향오차를 동시에 정확하게 보정하는 알고리즘을 제안하였으며 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 실효성을 입증하였다.
- (4) 제안된 알고리즘은 공작기계의 오차를 보정하는 각 축의 값을 새롭게 생성시킬 수 있으므로 후처리기상에서의 보정과 같은 소프트웨어적인 보정에 효과적으로 이용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. J. B Bryan, "International Status of Thermal Error Research," Annals of CIRP, pp. 645-656, 1990.
2. P. M. Ferreira and C.R. Liu, "A Method for Estimating and Compensating Quasistatic Errors of

- Machine Tools," *Journal of Engineering for Industry*, v115, pp. 149-159, 1993.
3. S. Yang, J. Yuan, and J. Ni "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation," *Journal of Manufacturing Systems*, v15, No. 2, 1996.
  4. S. Yang, J. Yuan, and J. Ni "The Improvement Thermal Error Modeling and Compensation on Machine Tools by CMAC Neural Network," *Int. J.Mach.Tools Manufact.* v36, No. 4, pp. 527-537, 1996.
  5. W. J. Love and A. J. Scarr, "Determination of the Volumetric Accuracy of Multi-Axis Machines," *Proceedings of the 14th MTDR Conference*, v14, pp. 307-315, 1973.
  6. I. D. Faux. M. J. Pratt, "Computational Geometric For Design and Manufacture," Ellis Horwood, Chichester, 1980.
  7. W. Knapp, "Testing Rotary Axes on NC Machine Tools," *Annals of CIRP*, Vol. 39, No.1 pp. 549-552, 1990.