

공작기계의 체적오차 보정과 가상가공 시스템에 관한 연구
A study of the Volumetric Error Compensation and Virtual Machining System
in a Machine Tool

양승한(경북대 공대), 권성환(경북대 대학원), 이진현(안동 정보대)
Seung-Han Yang(Kyungpook National Univ.),
Sung-Hwan Kweon(Graduate School, Kyungpook National Univ.),
Jin-Hyeon Lee(Andong Info. Tech.)

Abstract

The objective of this study is to estimate and to compensate for the volumetric error of a workpiece influenced by the geometric error of a machine tool. In this paper, the volumetric error is defined and error synthesis model is presented. Then, the volumetric error of workpiece is compared through the virtual machining and a new tool-path is generated to compensate for the error in the post-processor of CAM system using the error synthesis model. By this method, the error is compensated without modification or replacement of a machine tool being in use.

Key Words : volumetric error(체적오차), virtual machining(가상가공), post-processor(후처리기), error synthesis model(오차합성 모델)

1. 서론

현대 산업은 복잡한 형상의 공작물뿐만 아니라 더욱 정밀하고 빠른 시간 내에 다량으로 생산할 수 있는 가공 시스템을 요구하고 있다. 사람의 손에 의한 가공은 원하는 정밀도를 얻기 위해서 많은 숙련을 필요로 하며 빠른시간내에 많은 제품을 생산하는 것은 어렵다. 이러한 이유로 현대 산업은 CNC공작기계를 중심으로 많은 발전이 이루어지고 있으며 고정도의 공작물을 생산하기 위한 공작기계를 생산하기 위해 제조기술을 개발하고 있다. 공작기계는 생산 단계에서 자체의 오

차를 가지고 있으며, 또한 공작기계의 사용기간이 길어질수록 오차는 더욱 커지게 된다. 이러한 오차는 최종적으로 생산되는 공작물에 포함되며 요구되는 정밀도를 만족 시킬 수 없게 된다. 따라서 공작물의 오차를 제거하는 것이 고정도를 위해 필수적이다. 공작물의 오차를 제거하기 위해 공작기계 오차를 CNC제어기에서 보정할 수 있으며, 실시간으로 보정하는 연구가 이루어졌다[1,2].

위와 같이 CNC제어기에서 보정할 경우 기존의 오래된 CNC공작기계에서는 어려움이 있으며, 많은 공작기계를 운용하는 사용자는 많은 비용을 부담하게 된다. 따라서 본 논문에서는 공작기계의 체적 오차의 합성 모델을 제시하고 공작물의 오차를 가상 가공상태에서 평가하며, CAM시스템의 후처리기(Post-processor)에서 공작물의 오차를 보정할 수 있는 방법론을 제시한다.

2. 공작기계의 체적오차 정의 및 오차 합성모델

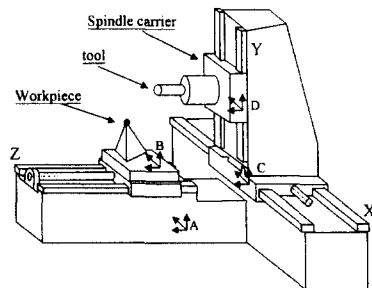


Fig. 1 The coordinate system on the Machining Center

기계구조에서 한 조인트당 기하학적 오차는 6개가 생길 수 있다. 그것은 3개의 위치오차와 3개의 방향성 오차이다. 체적오차 합성모델을 유도하는 일반적인 과정은 다음과 같다. 위의 그림과 같이 좌표계를 움직이는 각 슬라이더에 지정한다. 베드위의 좌표계 A를 기준좌표계로 간주하고 테이블 좌표계 B는 Z축 슬라이더에 좌표계 C는 X축 슬라이더에 마지막으로 좌표계 D는 스피들 캐리어에 고정한다. 체적 오차 합성모델을 유도하는 일반적인 과정은 다음과 같다. 공구팁의 좌표계를 국부좌표계로 수식화하고 균일변환행렬에 의해 좌표계 A에 대한 좌표계로 변환한다. 그 다음, 공작물의 절삭될 점의 좌표를 국부좌표계로 표현하고 역시 균일변환행렬로 좌표계 A에 대한 좌표계로 변환시킨다. 여기서 절삭될 공작물의 점과 공구팁의 위치는 이상적으로는 같아야 되지만 오차로 인해서 차이가 생긴다. 따라서 여기에 최종 오차벡터를 고려해 주면 두 점은 일치하게 된다.

여기서, 공구팁의 점을 먼저 스피들캐리어 좌표계 D로 표현하고, X축 슬라이더 좌표계 C로 변환한 다음, 마지막으로 좌표계 A로 변화하였다. 따라서 이과정을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_A = \tau_{A^C}^C \tau_{C^D}^D T_D \quad (1)$$

여기서,

T_D : 스피들 캐리어 좌표계 D에서 공구팁의 벡터

$\tau_{C^D}^D$: 스피들 좌표계 D에서 슬라이더 좌표계 C로의 변환행렬

$\tau_{A^C}^C$: 슬라이더 좌표계 C에서 좌표계 A로의 변환 행렬

T_A : 좌표계 A에서 공구팁의 벡터이다.

같은 방법으로 공작물의 절삭점을 Z축 슬라이더 좌표계 B로, 다시 아래식과 같이 좌표계 A로 변형한다. 이때 방정식에는 오차벡터가 포함되어 있다.

$$(W + \Delta W)_A = \tau_A^B (W + \Delta W)_B \quad (2)$$

여기서,

$(W + \Delta W)_B$: Z축 좌표계 B에서 공작물의 이상차원 벡터 W_B 와 오차벡터 ΔW_B

τ_A^B : 슬라이드 Z축 좌표계 B에서 좌표계 A로의 변환 행렬

$(W + \Delta W)_A$: 좌표계 A에서 공작물의 이상차원 벡터 W_A 와 오차벡터 ΔW_A 이다.

두 벡터 T_A 와 $(W + \Delta W)_A$ 를 같게 두면 다음의 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\tau_A^C \tau_C^D T_D = \tau_A^B (W + \Delta W)_B \quad (3)$$

이식을 이용해서 공작물 오차벡터 ΔW_B 를 구할 수 있다. 여기서 공작물 오차벡터 ΔW_B 는 B의 좌표계로 표현된 오차벡터이다.

$$W_B = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x + Oxy_x + Ozz_x + x \\ T_y + Oxy_y + Ozz_y + y \\ T_z + L + Oxy_z + Ozz_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_D = \begin{bmatrix} T_x + \varepsilon_{yx}L \\ T_y - \varepsilon_{xx}L \\ T_z + L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tau_A^C = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & Ozz_x + \delta_{zx} + x \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & Ozy_y + \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & Ozz_z + \delta_{zx} - S_{zx}x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\tau_C^D = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{yy} & Oxy_x + \delta_{xy} - S_{xy}y \\ \varepsilon_{zy} & 1 & -\varepsilon_{xy} & Oxy_y + \delta_{yy} + y \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} & 1 & Oxy_z + \delta_{zy} - S_{zy} + y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tau_A^B = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{yz} & \delta_{zz} \\ \varepsilon_{yz} & 1 & -\varepsilon_{zx} & \delta_{yz} \\ -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zx} & 1 & \delta_{zz} + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,

W_x, W_y, W_z : Z축 슬라이드 시스템 B에서 공작물 좌표

T_x, T_y, T_z : 스피들 캐리어 좌표계 D에서 표준 공구팁의 좌표

L : 공구 교환시, 공구 윗셋 길이

x : X축 좌표계에서 새들의 이동거리

y : Y축 좌표계에서 스펀들 캐리어의 이동거리

z : Z축 좌표계에서 크로스 슬라이드의 이동거리

Oxy_x, Oxy_y, Oxy_z : X축 원점 O_x 에 대한 Y축 원점 O_y 의 세 방향거리

Ozx_x, Ozx_y, Ozx_z : Z축 원점 O_z 에 대한 X축 원점 O_x 의 세 방향거리

$\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$: X,Y,Z축 방향의 선형 변위 오차

$\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}$: 진직도 오차 (δ 는 병진오차를 나타낸다); 첫 아래 첨자는 오차 방향을 표시한다. 다음 아래 첨자는 슬라이드의 움직이는 방향을 표시한다.

$\epsilon_{yx}, \epsilon_{zx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{zy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}$: 각도 오차 (ϵ 는 회전오차를 나타낸다); 첫 아래 첨자는 오차 축 방향을 표시한다.; 다음 아래 첨자는 슬라이드의 움직이는 방향을 표시한다.

S_{xy}, S_{yz}, S_{zx} : 두 축 사이의 직각 오차

$\epsilon_{xs}, \epsilon_{ys}$: x,y축 방향의 스펀들 틸트

2차 이상의 오차 항들을 무시하면, 공작물의 체적 오차를 식(4)에서 식(8)을 이용해서 식(3)으로부터 풀 수가 있다.

$$\begin{aligned} \Delta W_x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} - \delta_{zx} + L\epsilon_{ys} \\ &+ (T_z + L + Oxy_z)\epsilon_{yx} + (T_z + L)\epsilon_{yy} \\ &- (T_z + L + Ozx_z + Oxy_z - z)\epsilon_{yz} \quad (9) \\ &- (T_y + Oxy_y + y)\epsilon_{zx} + T_x\epsilon_{zy} \\ &+ (T_y + Oxy_y + y + Ozx_y)\epsilon_{zz} - yS_{xy} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_y &= \delta_{yx} + \delta_{yy} - \delta_{yz} - L\epsilon_{xs} \\ &- (T_z + L + Oxy_z)\epsilon_{xx} - (T_z + L)\epsilon_{xy} \\ &+ (T_z + L + Oxy_z + Ozx_z - z)\epsilon_{xz} \quad (10) \\ &+ (T_x + Oxy_x)\epsilon_{xy} + T_x\epsilon_{zy} \\ &- (T_x + Oxy_x + x + Ozx_x)\epsilon_{zz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_z &= \delta_{zy} + \delta_{zx} - \delta_{zz} + (T_y + Oxy_y + y)\epsilon_{xx} \\ &+ T_y\epsilon_{xy} - (T_y + y + Oxy_y + Ozx_y)\epsilon_{zz} \quad (11) \\ &- (T_x + Oxy_x)\epsilon_{yx} - T_x\epsilon_{yy} \\ &+ (T_y + Oxy_y + x + Ozx_x)\epsilon_{yz} - xS_{zx} - yS_{zy} \end{aligned}$$

3. 공구경로 계획과 생성

CAD시스템에서 자유곡면이 생성된 후에 CAM시스템에서는 이 설계곡면을 가공하기 위한 공구경로를 계획하고 생성한다. 공구경로 계획은 cartesian 방식과 parametric 방식으로 나눌 수 있다. Parametric방식을 이용한 공구경로 계획은 CAD에서 생성된 데이터를 변환과정없이 직접적으로 사용할 수 있으며, 수치적 계산이 간단하여 CAD/CAM시스템에서 널리 사용된다[3,4].

Parametric 평면에서 공구경로 계획이 이루어진 후에는 공구가 실제적으로 이동해야할 경로를 생성해야 한다. 공구경로는 Fig.2처럼 설계곡면으로부터 윗셋거리만큼 떨어져 있는 윗셋곡면에 존재하므로, 설계곡면의 점(CC)에서 법선벡터를 계산함으로써 공구경로(CL)값을 계산할 수 있다.

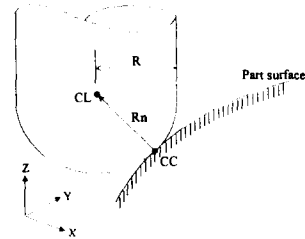


Fig. 2 CC and CL point

$$O(u, v) = Q(u, v) + f(d) \cdot n(u, v) \quad (12)$$

$O(u, v)$: 윗셋곡면

$Q(u, v)$: 설계곡면

$n(u, v)$: 설계곡면의 법선벡터

$f(d)$: 공구팁의 반경에 의해 결정되는 윗셋 거리에 대한 함수

식(12)에 의해 윗셋곡면이 계산되며, CL데이

터는 이 곡면상에 존재한다. 설계곡면 $Q(u, v)$ 는 NURBS식을 사용하며 다음과 같이 표현된다[4,5].

$$Q(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l w_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) P_{i,j}}{\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l w_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)} \quad (13)$$

여기서, $P_{i,j}$ 는 설계곡면의 조정점, $w_{i,j}$ 는 가중치이며, $N_{i,k}$ 과 $N_{j,l}$ 는 정규화된 기본함수로서 다음과 같이 나타난다.

$$N_{i,1} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq u < x_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - x_i}{x_{i+k-1} - x_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{x_{i+k} - u}{x_{i+k} - x_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u)$$

$$N_{j,1} = \begin{cases} 1 & \text{if } y_j \leq v < y_{j+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$N_{j,l}(v) = \frac{v - y_j}{y_{j+l-1} - y_j} N_{j,l-1}(v) + \frac{y_{j+l} - v}{y_{j+l} - y_{j+1}} N_{j+1,l-1}(v) \quad (14)$$

설계곡면의 법선벡터는 Fig.3에서 보듯이 u 와 v 방향의 접선벡터를 구한후 이 두 벡터의 외적에 의해 계산된다.

$$n(u, v) = \frac{\frac{\partial Q(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial Q(u, v)}{\partial v}}{\left| \frac{\partial Q(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial Q(u, v)}{\partial v} \right|} \quad (15)$$

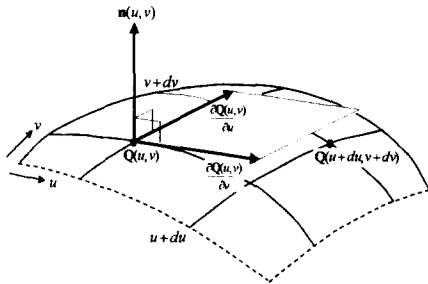


Fig. 3 Tangent and Normal vector of Surface

4. 가상가공에 의한 공작물의 오차평가와 공작물의 체적오차 보정

공작기계의 오차는 최종적으로 공작물의 오차로 나타난다. 따라서 CAD시스템에서 생성한 공작물의 형상을 가공했을 때 공작기계의 오차를 포함하는 공작물의 오차를 평가하는 것이 중요하다.

이 장에서는 2, 3장에서 논의한 공작기계의 기하학적 오차모델과 공구경로를 생성하는 식을 이용하여 공작기계에서 가공했을 때, 공작물에 나타나는 기하학적 오차를 평가하며, 이러한 오차를 줄이기 위해 CAM 시스템의 주 프로세서에서 생성한 공구경로를 후처리기에서 공작물의 오차를 보정하여 새로운 공구경로를 생성하게 된다. Fig.4는 공작물의 오차평가와 오차보정을 위한 과정을 나타낸다.

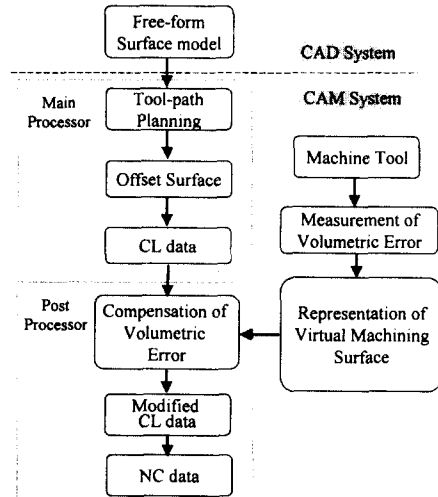


Fig. 4 Procedure of Volumetric Error Compensation

4.1 가상가공에 의한 공작물의 오차평가

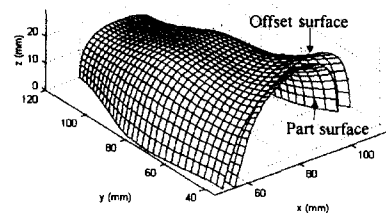


Fig. 5 Presentation of Part Surface and Offset Surface

Fig.5는 3장에서 논의된 식을 사용하여 계산된 설계곡면과 오프셋곡면을 나타낸다. 그러나 이 경우는 공작기계의 오차를 고려하지 않고 공구경로를 생성하므로, 가공을 할 경우 공작물에는 오차가 발생한다. Fig.6, Fig.7은 2장에서 정의한 공작기계의 체적 오차 모델을 사용하여 공작물 오차의 평가를 나타낸다.

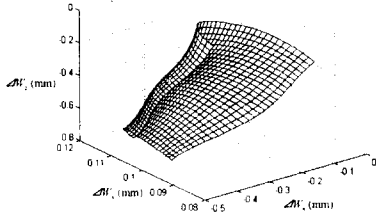


Fig. 6 Volumetric Error Map of a Workpiece

Fig.6은 공작물의 체적오차 맵을 보여주고 있다. 이 공작물의 체적 오차는 최소 241.176 μm 와 최대 885.645 μm 을 가지며 다음식에 의해 계산된다.

$$VE_{work} = \sqrt{\Delta W_x^2 + \Delta W_y^2 + \Delta W_z^2} \quad (16)$$

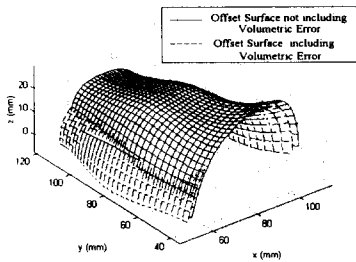


Fig. 7 Virtual Machining Before Compensation (Volumetric error value $\times 10$)

Fig.7은 체적오차 맵을 공구경로를 포함하는 오프셋곡면에 적용하여 나타낸 것이다. 오차값이 작으므로 오차값을 10배 확대하여 적용한 결과를 보여주고 있다. 점선으로 나타난 면이 오차가 포함된 공구경로가 되며, 공구는 이 면을 따라 공작물을 가공하게 되어 공작물에는 이러한 오차가 포함된다.

4.2 공작물의 체적오차 보정

4.1에서는 오차를 보정하지 않을 때, 공구경로에 나타나는 오차를 보여주었다. 이 절에서는 2장의 오차모델을 사용하여 Fig.4에서 나타낸 CAM시스템의 post-processor에서 가공후의 공작물의 오차가 최소가 되도록 주 프로세서에서 생성된 공구경로를 수정하여 새로운 공구경로를 생성하였다.

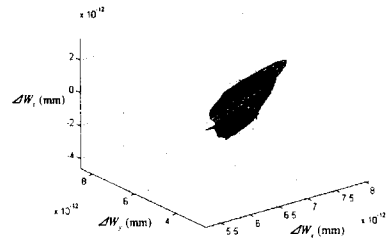


Fig. 8 Volumetric Error Map of workpiece After Compensation

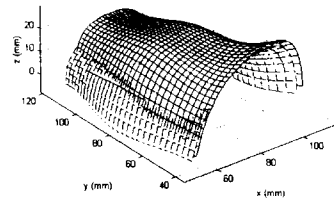


Fig. 9 Virtual Machining After Compensation (Volumetric error value $\times 10$)

오차모델을 사용하여 보정한 후의 오차를 Fig.8에 보여주고 있으며, 식(16)을 사용하여 계산했을 때, 오차의 최소, 최대값은 각각 $6 \times 10^{-9} \mu\text{m}$, $12.4 \times 10^{-9} \mu\text{m}$ 로써 매우 작은값을 나타낸다. Fig.9는 보정전과 보정후의 공구경로를 서로 비교한것으로써, 오차를 10배 확대하여 비교하였다. 그림에서 점선으로 나타난 면은 보정전의 공구경로, 실선으로 나타난 면은 보정후의 공구경로를 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 3축 공작기계의 체적오차를 정의하고 오차 합성모델식을 제시하였으며, 이를 사용하여 공작물의 오차를 보정하였다.

- 1) 가상가공을 통하여 3축 공작물 체적오차 맵을 구성함으로써 오차의 분포 정도를 알 수 있으며 공작물의 오차에 미치는 영향을 평가할 수 있다.
- 2) 오차합성모델식을 통하여 보정 후, 생성된 새로운 공구경로를 사용함으로써 공작물에 나타나는 체적오차가 줄어들었음을 확인하였고, 실제로 가공시 공구경로가 이상적인 공구경로를 따라 이동한다는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과, 체적오차가 $885.645 \mu\text{m}$ 에서 $12.4 \times 10^{-9} \mu\text{m}$ 로 감소하였다.
- 3) 이 방법에 의한 오차보정은 기존에 사용중인 공작기계의 수정이나 교체없이 소프트웨어적인 방법만으로 이루어지므로, 최근에 대두되고 있는 역공학(Reverse Engineering)의 측면에서 큰 장점을 가진다.

참고문헌

1. S.Yang, J.Yuan, and J.Ni. "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation", SME, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 15/No.2, 1996
2. S.Yang, J.Yuan, and J.Ni, "The Improvement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation", Journal of Manufacturing System, Vol 15/No.2, 1996
3. Chen,Y.D, Ni,J, and Wu,S.M. "Real-Time CNC Tool Path Generation for Machining IGES Surfaces", ASME 1991, pp187-199, 1991
4. Faux,I.D, and Pratt,M.J, "Computational geometry for design and manufacture", Ellis Horwood, Chichester, UK, 1980
5. Piegl,L. and Tiller,W. "Curve and Surface Constructions Using Rational B-Splines", Computer-Aided Design, Vol. 19, No.9 pp. 609-616, November, 1987