

문형 5축 머시닝센터의 기하학적 오차해석 및 가상가공 시스템 개발

Development of a Geometric Error Analysis and Virtual Manufacturing System
for Gantry-Type 5-Axis Machining Centers

윤태선, 조재완, 김석일 (한국항공대학교 기계설계학과), 광범만 (한국과학기술원 기계공학과)

Tae-Sun Yun, Jae-Wan Cho, Seok-Il Kim (Mechanical Design & Engineering Dept., Hankuk Aviation Univ.),
and Byung-Man Kwak (Mechanical Dept., Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Abstract

To quickly determine the effect of the substitute component on the machine's performance is very important in the design and the manufacturing processes. And minimizing machine cost and maximizing machine quality mandate predictability of machine accuracy. In this study, in order to evaluate the effects of the component's geometric errors and dimensions on the machining accuracy of gantry-type 5-axis machining centers, a geometric error analysis and virtual manufacturing system is developed based on the mathematical model for the shape generation motion of machine tool considering the component's geometric errors and dimensions, the solid modeling techniques and so on.

Keyword : 문형 5축 머시닝센터(Gantry-Type 5-Axis Machining Center), 기하학적 오차(Geometric Error), 가상가공(Virtual Manufacturing), 가공오차(Machining Error), 솔리드모델(Solid Model)

1. 서론

공작기계의 가공정밀도와 가공능률의 한계를 좌우하는 주요 요인으로는 공작기계의 운동정도와 함께 정적·동적·열적 외력에 의한 변형을 들 수 있다. 공작기계는 공작물을 가공하기 위한 지령에 따라서 형상창성운동을 수행하며, 그 과정에서 절삭과정을 포함한 공작기계의 내·외부환경으로부터 여러 가지 형태의 힘, 진동, 열 등을 받게 되어 정적 및 동적 오차를 유발하게 된다. 특히 공작기계의 운동기구가가지고 있는 기하학적 오차는 공작기계의 운동정도에 직접적인 영향을 주게 되고, 그 결과로 발생하는 형상창성운동의 오차는 가공정밀도의 저하를 초래하게 된다.

일반적으로 오차는 기준값으로부터의 편차로 정의된다는 점 때문에 공작기계의 기하학적 오차 연구에서는 오차모델에 대한 중요성이 별로 인식되어 있지 않았다. 즉 제조자의 입장에서는 각각의 구성요소를 어느 정도의 정밀도로 제작하고, 조립해야 하는가가 중요하고, 사용자의 입장에서는 기능적으로 공구와 공작물의 상대오차만이 중요하기 때문이었다. 그러나 각각의 기하학적 오차가 가공정밀도에 미치는 영

향을 평가하거나, 합성된 기하학적 오차들이 궁극적으로 제품의 가공형상에 어떠한 형태로 나타나는가를 예측하기 위해서는 수학적 오차모델의 정립이 반드시 필요하게 된다. 이와 관련해서 Renshetov와 Portman⁽¹⁾은 공작기계의 형상창성운동과 가공형상의 관계를 수학적으로 해석하였고, 階戶 등⁽²⁾과 양희구⁽³⁾는 그 이론에 입각하여 3축 머시닝센터의 형상창성운동과 가공오차 해석에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 문형 5축 머시닝센터의 형상창성운동에 대한 수학적 모델을 구축하고, 그 모델을 토대로 기하학적 오차와 가공오차의 관계를 체계적으로 분석할 수 있는 문형 5축 머시닝센터의 기하학적 오차에 의한 가공오차 해석시스템을 개발하였다. 특히 기하학적 오차가 존재하는 경우에는 구성요소의 크기에 따라서 가공오차의 값이 달라지기 때문에 문형 5축 머시닝센터의 가공오차를 해석하는 과정에서 그 구성요소의 치수 효과도 함께 고려하였다. 또한 가상가공(virtual manufacturing)기법^(4,5)과 문형 플라노 밀링머신(plano milling machine)의 가공정밀도 검사방법⁽⁶⁾을 토대로 문형 5축 머시닝센터의 가공정밀도를 가상적으로 평가하는 기능도 구축하였다.

2. 문형 5축 머시닝센터의 형상창성운동

일반적으로 공작기계는 주축, 베드, 테이블, 칼럼 등과 같이 여러 가지 구성요소들로 이루어져 있으며, 공작물에 대한 공구의 궤적은 이러한 구성요소들의 상대운동이 중첩됨으로써 형성된다. 따라서 공작기계의 형상창성운동은 공작물로부터 공구까지 연결되는 하나의 역학적 연쇄(chain)라는 관점에서 생각할 수 있다. 본 연구에서는 형상창성운동과 관련된 각각의 구성요소들에 대해서 공작물로부터 공구까지 순차적으로 좌표계 $S_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 를 부여하였다. 여기서의 첨자 i 는 i 번째의 구성요소를 의미한다.

그리고 각 구성요소의 운동은 인접한 좌표계 사이의 상대운동으로 볼 수 있기 때문에 공작기계의 형상창성운동은 각 좌표계 사이의 상대운동의 중첩에 의해서 이루어지는 것이라고 간주할 수 있다. 따라서 공작기계의 구성요소들을 6자유도의 운동을 갖는 강체라고 가정하면, 구성요소의 상대운동 k 를 X축, Y축, Z축 방향의 병진운동인 경우에는 1, 2, 3, 그리고 X축, Y축, Z축 방향의 회전운동인 경우에는 4, 5, 6으로 각각 표현할 수 있다.

결과적으로 인접한 두 요소 S_{i-1} 과 S_i 의 상대운동이 1자유도를 갖는다면, 이 좌표계 사이의 상대운동은 1~6 사이의 숫자 중에서 하나로 표현된다. 이러한 숫자를 공작기계의 구성요소의 연쇄순서로 배열한 것을 기구코드 \bar{k} 라고 정의하는데, 식 (1)은 그 예를 보여주고 있다.

$$\bar{k} = k_1 k_2 \dots k_n \quad (1)$$

이와 같이 구성요소들의 좌표계를 설정하고, 운동형태를 나타내는 기구코드를 설정하는 것으로 공작기계의 형상창성운동을 수학적으로 표현하는 것이 가능하다. 또한 공작기계 구조를 체계적으로 표현하기 위해서 베드의 경우와 같이 절대운동이 없는 정지한 구성요소의 위치에는 상대운동 k 를 0으로 부여한다. 결국 식 (1)에 있어서 절대운동이 없는 구성요소가 S_i 라고 할 때 k_i 의 우측에 0을 삽입함으로써 구조코드 K 를 정의할 수 있다. 즉 이러한 경우에는 식 (2)와 같은 형태로 구조코드 K 를 나타낼 수 있으며, 이러한 개념에 의해서 공작기계의 구조를 수학적으로 표현하는 것이 가능하다.

$$K = k_1 k_2 \dots k_i 0 k_{i+1} \dots k_n \quad (2)$$

그리고 이 연쇄에 있어서 각 구성요소 사이의 상대운동에 대응되는 동차 좌표변환을 순차적으로 수행함으로써 공구 좌표계 S_n 에서의 절삭점의 공구 위치벡터는 최종적으로 공작물 좌표계 S_0 로 변환된다. 따라서 공구와 공작물의 상대운동, 즉 형상창성

함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_0 = A^1 A^2 \dots A^i \dots A^j \dots A^n r_n \quad (3)$$

여기서 r_n 은 공구의 위치벡터이며, A 는 $k=1\sim 6$ 의 상대운동에 대응하는 4×4 의 크기를 갖는 동차 좌표변환행렬이다.

본 연구에서 해석 대상으로 하고 있는 문형 5축 머시닝센터의 구조는 Fig.1에 제시하였다. 문형 5축 머시닝센터는 공작물의 아래로 베드가 위치하고, 베드를 지나서 X축 안내기구, 칼럼, 톱브리지(top bridge), Y축 안내기구, 새들(saddle), Z축 안내기구, 램(ram), C축 안내기구, 선회대, A축 안내기구, 주축, 그리고 공구로 이어져 있기 때문에 기구코드 \bar{k} 는 식 (4)와 같이 결정된다.

$$\bar{k} = 123646 \quad (4)$$

여기서 1, 2, 3은 각각 X축, Y축, Z축 병진운동기구를 의미하고, 6, 4, 6은 각각 C축, A축, 주축 회전운동기구를 나타내고 있다.

또한 고정되어 있는 베드의 위치를 고려한 구조코드 K 는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$K = 0123646 \quad (5)$$

결국 문형 5축 머시닝센터의 형상창성함수 r_0 는 식 (3)과 (4)에 의해서 식 (6)과 같이 표현되는데, 구성요소들의 병진운동량과 회전운동량을 나타내는 변수만이 포함되어 있다.

$$r_0 = A^1(x) A^2(y) A^3(z) A^6(c) A^3(a) A^6(\theta) r_n \quad (6)$$

3. 문형 5축 머시닝센터의 기하학적 오차모델

공작기계의 가공오차에 영향을 미치는 요인으로는

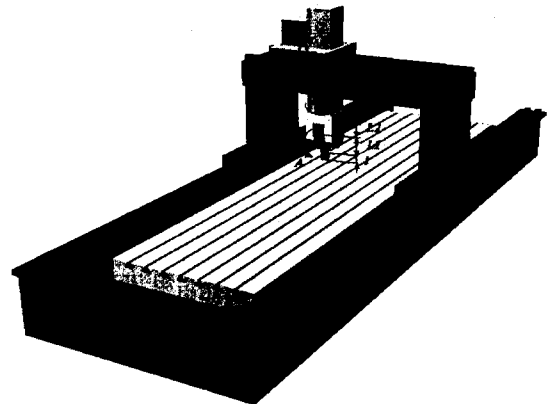


Fig.1 Structure of gantry-type 5-axis machining center

여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 공작기계의 가공오차는 공작기계의 기하학적 오차가 전사된 것으로 간주하여 공작기계에 기하학적 오차가 존재하는 경우의 수학적 모델을 구축하였다. 특히 공작기계의 기하학적 오차가 존재하는 경우에는 그 구성요소의 크기에 따라서 가공오차의 값이 달라지기 때문에 공작기계의 가공오차를 올바르게 해석하기 위해서는 구성요소의 치수도 고려할 필요가 있다. 따라서 문형 5축 머시닝센터의 구성요소의 치수를 고려한 형상창성함수 r_0 은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} r_0 = & A^3(B) A^1(x) A^3(l+L_1+L_2+L_3-B) \\ & A^2(-L_5) A^2(y) A^2(L_6) A^3(L_4) \\ & A^3(z) A^2(L_5-L_6) A^3(-L_3-L_4) \\ & A^6(c) A^3(-L_2) A^4(a) A^3(-L_1) \\ & A^6(\theta) A^3(-l) r_n \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 B 는 베이스의 상면과 X축 안내면의 높이차, l 은 공구의 길이, L_1 은 주축 선단부에서 A축 회전중심까지의 거리, L_2 는 A축 회전중심에서 C축 회전면까지의 거리, L_3 는 C축 회전면에서 Y축 안내면까지의 거리, L_4 는 Y축 안내면에서 새들의 Z축 안내면 중심까지의 거리, L_5 는 C축 회전중심에서 새들의 Y축 안내면 중심까지의 거리, L_6 는 새들의 Y축 안내면 중심에서 Z축 안내면까지의 거리를 각각 의미한다

그리고 식 (7)의 $A^3(\pm B)$, $A^3(\pm l)$, $A^3(\pm L_1)$, $A^3(\pm L_2)$, $A^3(\pm L_3)$, $A^3(\pm L_4)$, $A^3(\pm L_5)$ 및 $A^3(\pm L_6)$ 는 구성요소의 상대운동을 나타내는 것이 아니고, 구성요소의 치수만큼 좌표계를 이동시키는 의미를 나타낸 것이다. 결과적으로 $A^1(x)$, $A^2(y)$, $A^3(z)$, $A^4(a)$, $A^6(c)$, 그리고 $A^6(\theta)$ 만이 구성요소 사이의 상대운동을 나타내고 있는 동작 좌표변환행렬이 된다.

만약 어느 구성요소 사이에 오차가 존재하고, 그것이 미소하여 중첩이 가능한 선형성을 갖는다면 위치오차 Δr 은 아래의 관계식과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta r = \varepsilon r \quad (8)$$

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma & \beta & \delta_x \\ \gamma & 0 & -\alpha & \delta_y \\ -\beta & \alpha & 0 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

여기서 ε 은 오차를 나타내는 행렬이며, δ_x , δ_y , δ_z 는 각각 X축, Y축, Z축 방향의 병진운동오차, 그리고 α , β , γ 는 각각 X축, Y축, Z축에 대한 회전운동오차를 의미한다.

그리고 이러한 오차가 공작기계의 각 구성요소 사이에 존재하면, 전체의 위치오차는 그것들의 중첩에

의해서 나타난다. 따라서 머시닝센터의 형상창성운동에 대한 위치오차 Δr 은 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\Delta r = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta x = & \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} + \delta_{xa} + \delta_{xc} + \delta_{x0} \\ & - \gamma_x(y + Y_p - L_5) - \gamma_y L_6 \\ & - \gamma_z(L_5 - L_6) + \beta_x(z + Z_p - B) \\ & + \beta_y(z + Z_p - l - L_1 - L_2 - L_3) \\ & - \beta_z(l + L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \\ & - \beta_a(l + L_1) - \beta_c(l + L_1 + L_2) \\ & - \beta_\theta l + b_{xz}z - c_{xy}y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y = & \delta_{yx} + \delta_{yy} + \delta_{yz} + \delta_{ya} + \delta_{yc} + \delta_{y0} \\ & - a_x(z + Z_p - B) \\ & - a_y(z + Z_p - l - L_1 - L_2 - L_3) \\ & + a_z(l + L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \\ & + a_a(l + L_1) + a_c(l + L_1 + L_2) \\ & + a_\theta l - a_{yz}z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta z = & \delta_{zx} + \delta_{zy} + \delta_{zz} + \delta_{za} + \delta_{zc} + \delta_{z0} \\ & + a_x(y + Y_p - L_5) + a_y(L_6) \\ & + a_z(L_5 - L_6) \end{aligned}$$

여기서 a_{yz} 는 Y축과 Z축 사이의 직각도 오차, b_{xz} 는 X축과 Z축 사이의 직각도 오차, c_{xy} 는 X축과 Y축 사이의 직각도 오차를 나타낸다. 그리고 X_p , Y_p 및 Z_p 는 공작물에 설정한 좌표계 S_0 와 베드에 설정한 좌표계 S_n 의 X축, Y축 및 Z축 방향의 움직임량을 의미한다.

결과적으로 기하학적 오차가 존재하는 문형 5축 머시닝센터로 가공하는 경우의 절삭점의 위치 r 은 다음과 같이 형상창성함수 r_0 과 위치오차 Δr 의 합으로 표현된다.

$$r = r_0 + \Delta r \quad (10)$$

4. 시스템의 적용례 및 고찰

본 연구에서는 문형 5축 머시닝센터의 형상창성운동에 대한 수학적 모델을 토대로 구성요소의 치수와 기하학적 오차가 가공오차에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있는 문형 5축 머시닝센터의 가공오차 해석시스템을 개발하였다. 특히 가상가공기법과 문형 플라노 밀링머신의 가공정밀도 검사방법을 토대로 문형 5축 머시닝센터의 가공정밀도를 가상적으로 평가할 수 있는 기능도 구축하였다. 그리고 시스템의 개발환경은 플랫폼으로 IBM PC 586, 오퍼레이팅시스템으로 Windows 95/NT, 컴퓨터언어로 Visual C++ 등을 사용하였다.

Fig.2는 문형 5축 머시닝센터의 가공오차 해석시스템에 대한 전체적인 작업흐름을 관리하는 GUI (graphic user interface) 기능을 보여주고 있다. 가공오차 해석을 위해서는 (1) 문형 5축 머시닝센터의

모델명 설정, (2) 구성요소의 치수 설정, (3) 기하학적 오차의 설정이 필요하며, 그 정보들을 토대로 (4) 직선보간, 원호보간 및 장방형 영역에 대한 가공오차 해석, (5) 가상가공에 의한 가공정밀도 평가를 수행할 수 있다. 해석에 필요한 정보들을 입력하지 않은 경우에는 작업흐름도상에서 그 부분에 대한 설정이 요구됨을 해당 아이콘의 색깔을 오프(off)함으로써 그래픽적으로 사용자에게 알려주도록 되었다. 따라서 이러한 개념의 작업흐름도를 통해서 시스템 사용시의 오류를 방지할 수 있다.

또한 본 연구에서는 자체 개발한 B-Rep 솔리드모델러인 SmartSolid⁽⁷⁾를 이용하여 문형 5축 머시닝센터의 주요 구성요소들의 형상을 모델링하고, 그 결과를 토대로 문형 5축 머시닝센터의 3차원 형상을 생성하였다. Fig.3은 동일중공업에서 제공한 주요 제원을 토대로 재구성한 문형 5축 머시닝센터의 형상을 보여주고 있다.

구성요소의 기하학적 오차가 문형 5축 머시닝센터의 가공정밀도에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 각각의 구성요소에 대한 기하학적 오차들의 입력이

요구된다. 기존 공작기계의 성능을 개선할 때와 같이 대상 공작기계에 대한 측정정보가 존재하는 경우에는 그 값을 활용하는 것이 가장 바람직하지만, 공작기계의 초기 설계단계에서는 구성요소의 기하학적 오차에 대한 측정정보가 없기 때문에 설계값으로 부여할 정보나 유사한 형태의 공작기계에 대한 측정정보를 활용해야 한다.

본 연구에서는 문형 5축 머시닝센터의 형상창성운동과 직접적으로 관련이 있는 갠트리(gantry), 새들, 램, 선회대, 주축대, 주축 등에 대한 기하학적 오차들을 입력, 수정, 저장할 수 있는 GUI 기능을 구축하였다. 그리고 입력된 기하학적 정보들을 그래프 형태로 컴퓨터 화면상에 출력하는 기능을 구현하였다. 그 예로서 갠트리에 대한 기하학적 오차를 설정하기 위한 GUI 기능, 그리고 병진운동오차와 회전운동오차의 그래프 출력결과를 Fig.4~6에 제시하였다.

Fig.7은 문형 5축 머시닝센터의 주축을 테이블 중앙에 위치시킨 상태에서 갠트리를 전체 이동구간에 걸쳐서 이동시킬 때 나타나는 직선보간시의 위치오차를 보여주고 있다. 그리고 Fig.8에는 문형 5축 머

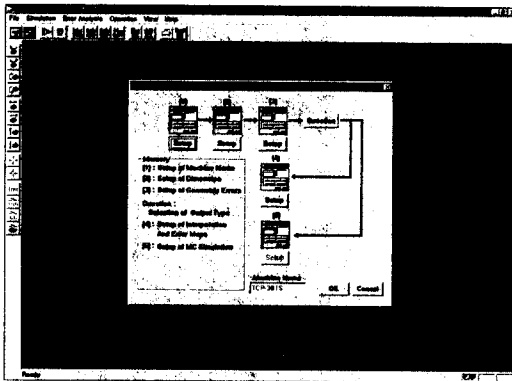


Fig.2 Work flow of system

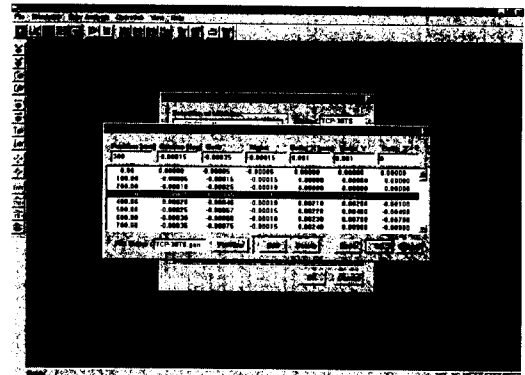


Fig.4 Setup of geometric errors for gantry

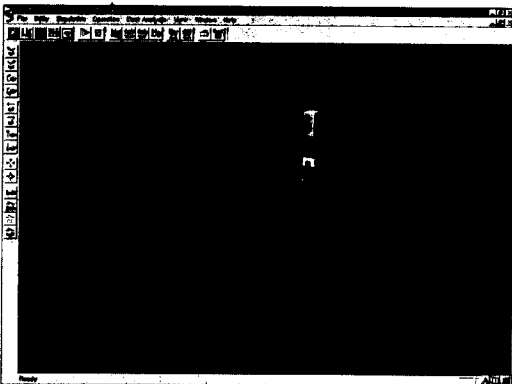


Fig.3 Generation of gantry-type 5-axis machining center

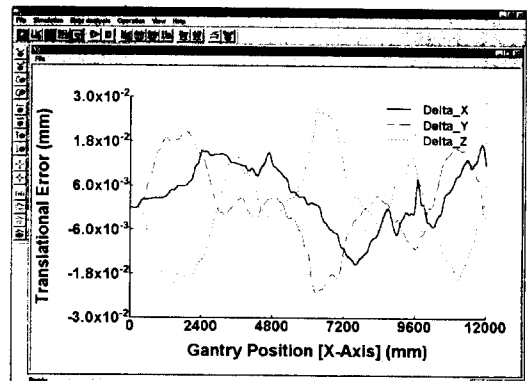


Fig.5 Translational errors of gantry

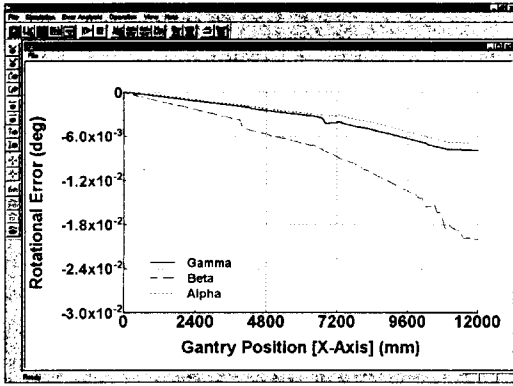


Fig.6 Rotational errors of gantry



Fig.9 MDI window for virtual manufacturing

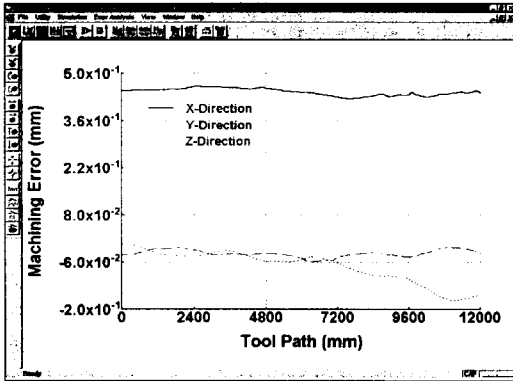


Fig.7 Machining error for linear interpolation

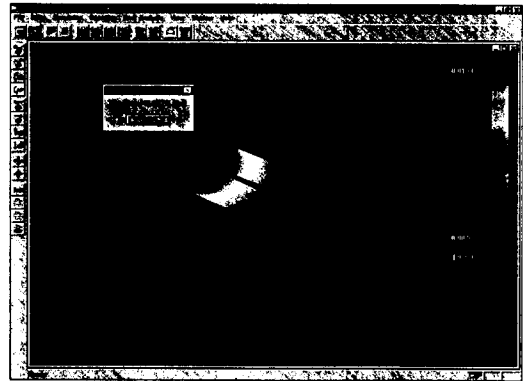


Fig.10 Machining error for flatness testing

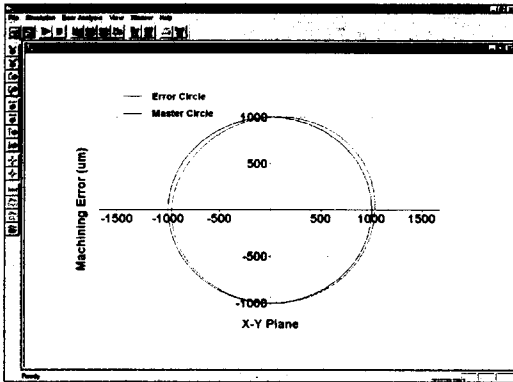


Fig.8 Machining error for circular interpolation

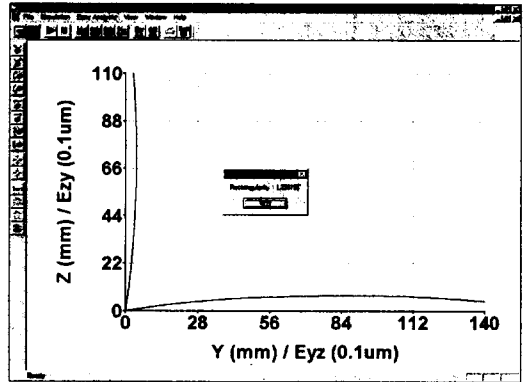


Fig.11 Machining error for rectangularity testing

시닝센터로 XY평면상에서 직경 100mm의 원을 가공할 때에 나타나는 원호보간시의 위치오차를 제시하였다.

가공오차 해석시스템의 가상가공기능은 Fig.9에서 볼 수 있는데, Fig.2에 제시한 작업흐름에서의 단계 (5)에 대응되는 것이다. MDI 화면의 좌측 상단에는

공구로 공작물을 가공하는 모습, 그리고 좌측 하단에는 공구경로와 함께 공구에 의해서 가상가공된 공작물의 모습을 보여주고 있으며, 화면의 우측에는 문형 5축 머시닝센터의 형상창성운동 형태를 나타내었다.

그리고 JIS B 6230에서 규정한 문형 플라노 밀링

머신의 가공정밀도 검사방법과 가상가공기법에 토대를 두고 해석한 평면도와 직각도에 대한 예측결과는 Fig.10과 11에 각각 제시하였다. 특히 본 연구에서는 Fig.10과 같이 공작물의 표면에 존재하는 미세한 가공오차 형태를 가시화하기 위해서 Gouraud 셰이딩(shading)기법을 응용하였다.

또한 본 연구에서는 시스템 사용자가 오차를 분석하거나 보고서를 작성하는 데 소요되는 시간과 노력을 최소화시킬 수 있도록 오차해석 결과로서 제공되는 그래프 정보들은 클립보드(clipboard)로의 복사가능하고, 윈도우즈 메타파일(windows metafile)로도 저장이 가능하도록 시스템을 구축하였다.

아울러서 이상과 같이 구성요소의 치수와 기하학적 오차가 문형 5축 머시닝센터의 가공오차에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있는 가공오차 해석시스템은 요구되는 가공정밀도를 갖는 문형 5축 머시닝센터를 설계/제작하는 단계에서의 기하학적 오차에 대한 기준값을 제시하고 평가할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 문형 5축 머시닝센터를 설계/제작하는 단계에서 구성요소의 기하학적 오차에 대한 기준값을 제시하고 평가할 수 있는 문형 5축 머시닝센터의 가공오차 해석시스템을 구축하였다. 특히 요구되는 가공정밀도를 갖는 문형 5축 머시닝센터의 설계/제작을 위해서 필요한 구성요소의 기하학적 오차에 대한 결정이 가공오차 해석시스템에 의해서 체계화될 수 있기 때문에 설계자와 제작자의 경험에 의해서만 수행되었던 이러한 작업에 대한 신뢰성과 일관성을 향상시킬 수 있다. 그리고 본 연구를 통해서 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 구조 분석결과를 토대로 문형 5축 머시닝센터의 형상창성운동에 대한 수학적 모델을 구축하였다.
- ② 구성요소의 치수와 기하학적 오차가 문형 5축 머시닝센터의 가공오차에 미치는 영향을 평가할 수 있는 오차모델을 구축하였다.
- ③ 직선보간, 원호보간, 장방형 영역에 대한 문형 5축 머시닝센터의 가공오차 해석모델을 개발하였다.
- ④ 문형 5축 머시닝센터의 형상창성운동, 공구경로, 공작물의 가공상태 등을 3차원적으로 가시화하는 솔리드모델 기반의 가상가공모델을 개발하였다.
- ⑤ 문형 플라노 밀링머신의 가공정밀도 검사방법과 가상가공기법에 토대를 둔 문형 5축 머시닝센터의 가공정밀도 예측모델을 개발하였다.

1. D.N. Renshetov and V.T. Portman, *Accuracy of Machine Tools*, ASME Press, 1988.
2. 階戸紀男, 石澤浩司, 田中文基, 岸浪建史, 山田誠, “工作機械の形狀創成運動モデルと加工形狀モデルに關する研究 (第2報) - 加工形狀測定による形狀創成運動モデルの推定 -”, 日本精密工學會 春季大會 學術講演會 講演論文集, 1991, pp.1099.
3. 양희구, “머시닝센터의 가상가공 및 오차해석에 관한 연구”, 한국항공대학교 석사학위논문, 1997
4. P.J. Willis, A. Bowyer, R.I. Taylor and G.M. Bayliss, “Virtual Manufacturing”, International Workshop on Graphics and Robotics, Schloss Dagstuhl, Germany, 1993.
5. G.M. Bayliss, A. Bowyer, R.I. Taylor and P.J. Willis, “Virtual Manufacturing”, CSG 94 - Set-theoretic Solid Modelling Techniques and Applications, Winchester, UK, 1994.
6. *JIS Handbook 30* - 工作機械, 日本規格協會, 1997.
7. 양희구, 김석일, “B-Rep 솔리드모델을 이용한 머시닝센터용 CAD/CAM시스템 개발(I) - 반모서리 자료구조의 B-Rep 솔리드모델러에 관한 연구”, 한국정밀공학회 논문집, 제13권 제3호, 1996, pp.150-157.