

구조변형과 기하학적 오차를 고려한 수직형 선반의 가공오차 해석시스템 개발

Development of a Machining Error Estimation System for Vertical Lathes with Structural Deformation and Geometric Errors

이원재*, 윤태선 (한국항공대학교 대학원), 김석일 (한국항공대학교)

Won-Jae Lee, Tae-Sun Yun (Graduate School, Hankuk Aviation Univ.) and Seok-II Kim (Hankuk Aviation Univ.)

Abstract

In this study, a machining error estimation system for vertical lathes with structural deformation and geometric errors, is realized based on the virtual manufacturing technologies. The positional and directional errors of cutting tool are determined by considering the geometric errors and dimensions of machine components and by introducing the equilibrium condition between the cutting force and structural deformation. Especially, the machining errors of vertical lathes are estimated by using the prescribed cutting test(JIS B 6331). The system can be implemented to evaluate the machining accuracies of vertical lathes at the design process and to design the high precision vertical lathes.

1. 서 론

공작물의 품질을 저하시키는 가공오차는 공작기계 자체가 가진 기하학적 오차나 구동기구에 의한 오차, 가공공정에서 발생하는 절삭력이나 열에 의한 오차, 그리고 공작기계, 공작물 및 공구를 둘러싸고 있는 환경에 의한 오차 등과 관련되어 있다. 일반적으로 가공오차는 치수오차, 형상오차, 표면조도로 나누어서 고려되는데, 특히 공작기계 구성요소의 기하학적 오차와 절삭력에 의한 구조변형은 치수정도와 형상정도에 많은 영향을 주고 있다.^(1,2)

구성요소의 기하학적 오차가 공작기계의 가공정밀도에 미치는 영향을 정량적으로 해석하기 위해서는 수학적 오차모델의 정립이 필요하다.^(2,3) 그러나 구성요소의 기하학적 오차가 서로 동일한 경우에도 구성요소의 치수가 클수록 공작기계의 가공정밀도가 저하되기 때문에 수학적 오차모델에는 구성요소의 치수효과도 함께 고려되어야 한

다.

또한 기하학적 오차나 구조변형에 의해서 야기되는 공구의 위치오차와 방향오차는 공구와 접촉하는 공작물 표면의 가공상태를 변화시킨다. 따라서 지금까지의 해석학적인 연구^(4,5)에서와 같이 공작기계의 가공오차를 공구 선단점이나 절삭점의 위치오차로서 제시하는 방법으로는 실제 공작물의 절삭상태를 충분히 반영할 수 없게 된다. 궁극적으로 공구의 위치오차와 방향오차를 고려해서 공작물의 가공상태를 예측하고, 그 결과를 토대로 공작기계의 가공정밀도를 평가하는 개념이 도입될 필요가 있다.

본 연구에서는 수직형 선반의 가공정밀도를 설계단계에서 체계적으로 평가할 수 있는 기반을 구축하기 위해서 수직형 선반의 형상창성운동에 대한 수학적 모델을 토대로 구성요소의 치수와 기하학적 오차가 가공오차에 미치는 영향, 그리고 절삭력에 의해서 야기되는 구조변형이 가공오차에 미치는 영향을 해석할 수 있는 시스템을 개발하였다. 수직형 선반의 운전조건과 공구의 제원에 의해서 변화하는 절삭력은 3차원 절삭이론을 토대로 해석하였으며, 절삭상태에서의 공구의 위치오차와 방향오차는 절삭력과 구조변형 사이의 평형조건을 고려해서 결정하였다. 특히 공작물의 가공상태를 예측하기 위해서 JIS B 6331에서 규정한 NC 선반의 절삭시험방법⁽⁶⁾에 준하는 가상가공기법^(7,8)을 사용하였다.

2. 구성요소의 치수와 기하학적 오차의 영향

2.1 수직형 선반의 형상창성운동

Fig.1은 본 연구에서의 해석 대상인 수직형 선반의 구조를 보여주고 있다. 수직형 선반은 공작물의 아래로 주축(θ 축)이 위치하고, 베드, 칼럼, X축 안내기구, 새들, Z축 안내기구, 공구대, 그리

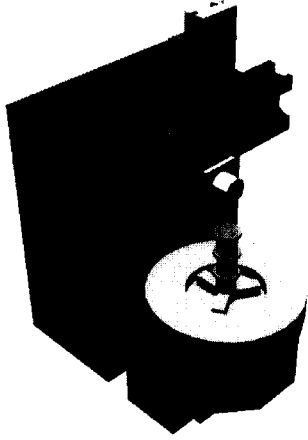


Fig.1 Structure of vertical lathe

고 공구로 이어져 있기 때문에 수직형 선반의 형상창성함수 r_0 는 식 (1)과 같이 표현되는데, 구성요소들의 상대 병진운동량과 상대 회전운동량을 나타내는 변수만이 포함되어 있다.

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

여기서 r_n 은 공구의 위치벡터이며, A^k 는 $k=1, 2, 3$ 일 때 X축, Y축, Z축의 병진운동, 그리고 $k=4, 5, 6$ 일 때 A축, B축, C축의 회전운동에 대응하는 4×4 크기를 갖는 동차 좌표변환행렬이다.

2.2 구성요소의 치수와 기하학적 오차의 모델화

공작기계의 기하학적 오차가 존재하는 경우에는 그 구성요소의 치수에 따라서 가공오차의 값이 달라지기 때문에 공작기계의 가공오차를 올바르게 해석하기 위해서는 구성요소의 치수도 고려할 필요가 있다. 식 (1)을 토대로 구성요소의 치수를 고려한 수직형 선반의 형상창성함수 r_0 을 구하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} r_0 = & A^3(-H_2) A^6(\theta) A^2(L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \\ & A^1(l + R) A^3(H_1 + H_2) A^2(-L_4) \\ & A^1(x + X_p) A^2(-L_3) A^3(z + Z_p) \\ & A^3(-H_1) A^2(-L_1 - L_2) A^1(-l - R) r_n \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 R 는 터릿의 반경, l 는 공구의 길이, L_1 은 공구 중심에서 터릿 선회면까지의 거리, L_2 는 터릿 선회면에서 Z축 안내면까지의 거리, L_3 는 Z축 안내면에서 X축 안내면까지의 거리, L_4 는 X축 안내면에서 칼럼 선단면까지의 거리, H_1 은 X축 안내면 중심과 척 상면의 높이차, H_2 는 척의 높이를 각각 의미한다. 또한 X_p 와 Z_p 는 공

작물 좌표계와 공구 좌표계 사이의 X축과 Z축 방향의 오프셋이다. $A^1(\pm R)$, $A^1(\pm l)$, $A^2(\pm L_1)$, $A^2(\pm L_2)$, $A^2(\pm L_3)$, $A^2(\pm L_4)$, $A^3(\pm H_1)$ 및 $A^3(\pm H_2)$ 는 구성요소의 상대운동이 아니라 구성요소의 치수만큼 좌표계를 이동시키는 의미를 나타낸 것이며, $A^1(X_p)$ 와 $A^3(Z_p)$ 는 공작물 좌표계와 공구 좌표계 사이의 오프셋을 나타내는 것이 된다.

만약 공작기계의 각 구성요소의 운동에 존재하는 오차가 미소하여 중첩이 가능한 선형성을 갖는다면, 전체의 위치오차는 그것들의 중첩에 의해서 나타난다. 따라서 수직형 선반의 형상창성운동에 대한 위치오차 Δr 은 아래와 같이 주어진다.

$$\Delta r = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta x = & (\delta_{xx} + \delta_{xz} + \delta_{x\theta}) C_\theta + (\delta_{yx} + \delta_{yz} + \delta_{y\theta}) S_\theta \\ & - \alpha_x(z + Z_p - H_1) S_\theta - \alpha_z H_1 C_\theta \\ & - \alpha_\theta(z + Z_p - H_2) S_\theta + \beta_x(z + Z_p - H_1) C_\theta \\ & + \beta_z H_1 C_\theta - \beta_\theta(z + Z_p - H_2) C_\theta \\ & + \gamma_x\{(L_1 + L_2 + L_3) C_\theta + (l + R) S_\theta\} \\ & + \gamma_z\{(L_1 + L_2) C_\theta - (l + R) S_\theta\} \\ & - \gamma_\theta\{(-L_1 + l) C_\theta - (x + X_p) S_\theta\} + b_{xz} z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y = & (\delta_{xx} - \delta_{xz} - \delta_{x\theta}) S_\theta + (\delta_{yx} + \delta_{yz} + \delta_{y\theta}) C_\theta \\ & - \alpha_x(z + Z_p + H_1) C_\theta + \alpha_z H_1 C_\theta \\ & - \alpha_\theta(z + Z_p + H_2) C_\theta - \beta_x(z + Z_p + H_1) S_\theta \\ & + \beta_z H_1 S_\theta - \beta_\theta(z + Z_p + H_2) S_\theta \\ & + \gamma_x\{(L_1 + L_2 + L_3) S_\theta - (l + R) C_\theta\} \\ & - \gamma_z\{(L_1 + L_2) S_\theta - (l + R) C_\theta\} \\ & + \gamma_\theta\{(x + X_p) C_\theta - (L_1 - l) S_\theta\} - a_{yz} z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta z = & \delta_{zx} + \delta_{zz} + \delta_{z\theta} - \alpha_x(L_1 + L_2 + L_3) - \alpha_z(L_1 + L_2) \\ & - \alpha_\theta(L_1 - l) + (\beta_x + \beta_z)(l + R) - \beta_\theta(x + X_p) \end{aligned}$$

여기서 δ_x , δ_y , δ_z 는 X축, Y축, Z축 방향의 병진오차, 그리고 α , β , γ 는 X축, Y축, Z축에 대한 회전오차를 의미한다. 이 오차들은 구성요소의 상대운동량에 따라서 달라지는 구성요소 위치의 함수이다. 또한 a_{yz} 는 Y축과 Z축 사이의 직각도 오차, b_{xz} 는 X축과 Z축 사이의 직각도 오차를 의미하며, 표현의 편의를 위해서 $\cos \theta$ 와 $\sin \theta$ 는 C_θ 와 S_θ 로 나타내었다.

또한 기하학적 오차가 존재하는 수직형 선반에서는 식 (3)과 같은 공구의 위치오차만이 아니라 공구의 방향오차도 발생된다. 본 연구에서는 방향오차를 B축(Y축 중심의 회전축)과 C축(Z축 중심의 회전축)의 각도오차인 Δb 와 Δc 의 형태로 정의하는 개념을 사용하였다.

수직형 선반에서 공구의 방향오차 Δb 와 Δc 는 이상적인 공구축 벡터 $u = [l \ 0 \ 0]^T$ 와 오차가 있는 실제적인 공구축 벡터 $v = [v_x \ v_y \ v_z]^T$

의 외적관계를 이용하면 구할 수 있다. 특히 공구축 벡터 v 는 공구 선단부를 기점, 공구 후단부를 중점으로 하는 벡터이며, 대응되는 조건들과 함께 식 (3)을 이용하면 구할 수 있다. 두 공구축 벡터들의 외적관계를 토대로 ZX 평면상에서 결정되는 B축 방향오차 Δb 와 XY 평면상에서 결정되는 C축 방향오차 Δc 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta b = \sin^{-1}\left(\frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}\right) \quad (4)$$

$$\Delta c = \sin^{-1}\left(\frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}\right) \quad (5)$$

3. 절삭력과 구조변형의 영향

3.1 절삭조건과 절삭력의 관계

일반적으로 절삭력은 칩두께 외에도 절삭속도 v 와 공구의 상면 경사각 α_n 에 의해서 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 절삭이론을 토대로 절삭력을 결정할 때 요구되는 전단응력 τ_s , 전단각 ϕ , 그리고 마찰각 β 는 칩두께, 절삭속도 및 상면 경사각의 함수로 주어질 필요가 있는데, HSS 공구로 S45C 소재를 절삭할 때의 그 관계식^(4,5)은 식 (6)에서 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi &= 106.7(vf)^{0.5} + 0.375\alpha_n + 13.64 \\ \tau_s &= 1.586(vf)^{-0.25} + 67.703 \\ \beta &= 48.4(vf)^{0.125} + 28.586 + \alpha_n - \phi \end{aligned} \quad (6)$$

절삭날의 3차원 절삭과정을 절삭면 좌표계 a-b-c에서 대해서 나타낸 Fig.2에서 선분 OA는 절삭날, 면 OABC는 공구 경사면을 의미한다. 이 경우에 절삭속도 v 와 칩유출속도 v_c 가 형성하는 평면상에서의 유효 경사각 α_e 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

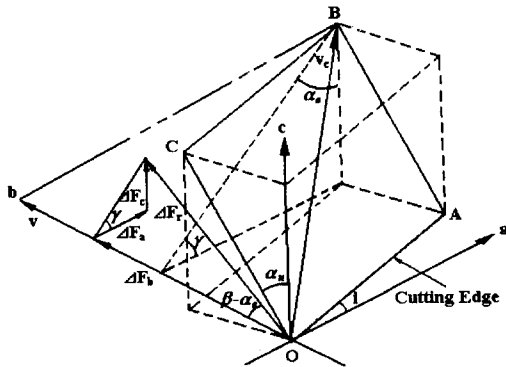


Fig.2 Cutting edge and force

$$\alpha_e = \sin^{-1}(\sin^2 i + \cos^2 i \sin \alpha_n) \quad (7)$$

여기서 i 는 공구 기움각이고, γ 는 절삭날과 절삭속도가 이루는 평면과 칩 유출속도와 절삭속도가 이루는 평면 사이의 각도로서 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\gamma = \cos^{-1}\left\{\frac{\sin i \cos i (1 - \sin \alpha_n)}{\cos \alpha_e}\right\} \quad (8)$$

절삭날에 작용하는 절삭저항 F_r 은 절삭이론을 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_r = \frac{-\tau_s A}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha_e)} \quad (9)$$

여기서 A 는 칩 단면적을 의미하며, 이송량 f 와 절삭깊이 d 에 대해서 $A = fd$ 의 관계를 갖는다. 또한 식 (10)은 절삭력 F_r 을 Fig.2에 제시한 절삭면 좌표계 a-b-c에서의 분력으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} F_a &= F_r \sin(\beta - \alpha_e) \cos \gamma \\ F_b &= F_r \cos(\beta - \alpha_e) \\ F_c &= F_r \sin(\beta - \alpha_e) \sin \gamma \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 공작기계 좌표계 X-Y-Z에서의 분력은 좌표 변환관계를 이용하면 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F_x &= -F_c \\ F_y &= F_b \\ F_z &= F_a \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 절삭력과 구조변형의 관계

본 연구에서는 절삭점에 작용하는 X축, Y축 및 Z축 방향(공작기계 좌표계 X-Y-Z에서의 좌표축 방향)의 단위 하중들에 의한 공구대 선단부에서의 위치 변화와 방향 변화를 나타내는 유연성은 위치의 함수로서 주어진다고 가정하였다.

특히 공구대 선단부에서의 유연성은 공작기계와 공작물의 구조변형 특성, 그리고 공구의 치수

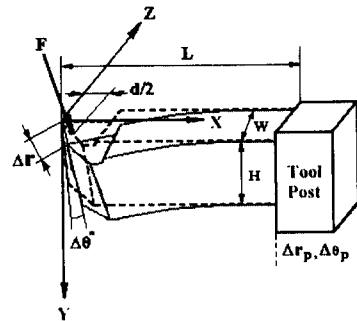


Fig.3 Structural deformation

효과를 모두 반영하고 있기 때문에 방향성을 갖게 되는데, 그 형태는 식 (12)와 같이 9개의 요소들로 이루어진 위치 유연성 행렬 K_r 과 방향 유연성 행렬 K_θ 로 나타낼 수 있다.

$$K_r = \begin{pmatrix} K_{rxx} & K_{rxy} & K_{rxz} \\ K_{ryx} & K_{ryy} & K_{ryz} \\ K_{rzx} & K_{rzy} & K_{rzz} \end{pmatrix}, K_\theta = \begin{pmatrix} K_{\theta xx} & K_{\theta xy} & K_{\theta xz} \\ K_{\theta yx} & K_{\theta yy} & K_{\theta yz} \\ K_{\theta zx} & K_{\theta zy} & K_{\theta zz} \end{pmatrix} \quad (12)$$

따라서 식 (11)에 의해서 결정되는 절삭력 벡터 F 와 식 (12)에 제시한 유연성 행렬들을 이용하면, 공구대 선단부에서의 위치오차 벡터 Δr_p 와 방향오차 벡터 $\Delta \theta_p$ 는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta r_p = [\Delta x_p \ \Delta y_p \ \Delta z_p]^T = K_r \cdot F \quad (13)$$

$$\Delta \theta_p = [\Delta a_p \ \Delta b_p \ \Delta c_p]^T = K_\theta \cdot F \quad (14)$$

결과적으로 Fig.3과 같이 외팔보로 근사화한 선삭공구의 굽힘 변형과 축방향 변형을 고려한 공구 선단부에서의 방향오차 Δb 와 Δc , 위치오차 Δx , Δy 및 Δz 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta b &= \Delta b_p + \frac{F_z L^2}{2EI_z} \\ \Delta c &= \Delta c_p - \frac{F_y L^2}{2EI_y} \\ \Delta x &= \Delta x_p + 2L - L \left\{ \cos \Delta \theta_p^* + \frac{\sin(\Delta \theta^* - \Delta \theta_p^*)}{\Delta \theta^* - \Delta \theta_p^*} \right\} \\ &\quad - \frac{1}{2} d(1 + \cos \Delta \theta^*) + \frac{F_x L}{EA_h} \\ \Delta y &= \Delta y_p - L \Delta c_p - \frac{1}{2} d \Delta c + \frac{F_y L^3}{3EI_y^3} \\ \Delta z &= \Delta z_p + L \Delta b_p + \frac{1}{2} d \Delta b + \frac{F_z L^3}{3EI_z^3} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 d 는 절삭깊이, 상첨자 *는 Y축 성분과 Z축 성분의 벡터합을 의미한다. 그리고 L , I_y , I_z , A_h 는 공구홀더의 길이, Y축에 대한 단면 2차 모멘트, Z축에 대한 단면 2차 모멘트, 단면적이며, $L' = L - 0.5d$ 를 의미한다.

3.3 절삭력과 구조변형의 평형조건

절삭조건에 의해서 좌우되는 절삭력은 공작기계, 공작물 및 공구의 구조변형을 유발한다. 그리고 이러한 구조변형은 다시 절삭조건을 변화시켜 초래하여 절삭력이 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 보다 정량적인 해석을 위해서 절삭조건-절삭력-구조변형의 평형조건을 고려한 가공오차 문제를 다루었다.

구조변형에 의해서 직접적으로 영향을 받는 것은 절삭날에 대한 유효 칩두께 f_e 와 유효 절삭깊이 d_e 이다. 선삭공정에서의 유효 칩두께 f_e 와 유효 절삭깊이 d_e 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_e = f \cos(i + \Delta b) \quad (16)$$

$$d_e = \frac{d - \Delta z + \frac{L}{2} \{ \sin(i + \Delta b) - \sin i \}}{\cos(i + \Delta b)} \quad (17)$$

식 (16)과 (17)에 나타낸 유효 칩두께 f_e 와 절삭깊이 d_e 는 궁극적으로 식 (9)에 제시한 절삭력에 영향을 주고, 그 절삭력은 다시 구조변형을 유발하여 식 (15)에서와 같이 절삭날의 위치와 방향 변화를 초래하는데, 본 연구에서는 식 (15)에 제시한 공구 선단부의 위치오차의 벡터합에 대한 변화량이 $0.1\mu\text{m}$ 이하일 때 절삭조건-절삭력-구조변형이 평형상태에 도달하였다고 간주하였다.

4. 시스템의 적용례 및 고찰

본 연구에서는 수직형 선반의 형상창성운동에 대한 수학적 모델을 토대로 구성요소의 치수와 기하학적 오차가 가공오차에 미치는 영향, 그리고 절삭력에 의해서 야기되는 구조변형이 수직형 선반의 가공오차에 미치는 영향을 해석할 수 있는 시스템을 개발하였다. 특히 수직형 선반의 가공오차는 가상가공기법과 NC 선반의 가공정밀도 검사방법을 토대로 평가하였다.

4.1 기하학적 오차에 의한 가공오차 예측

구성요소의 기하학적 오차가 수직형 선반의 가공정밀도에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 각각의 구성요소에 대한 기하학적 오차들에 대한 입력이 요구된다. 대상 공작기계에 대한 측정정보가 존재하는 경우에는 그 값을 활용하는 것이 바람직하지만, 일반적으로 공작기계의 초기 설계 단계에서는 구성요소의 기하학적 오차에 대한 측정정보를 확보하지 못하고 있기 때문에 설계기준으로 부여할 정보나 유사한 형태의 공작기계에 대한 측정정보를 활용해야 한다.

본 연구에서는 수직형 선반의 형상창성운동과 직접적으로 관련 있는 주축, 새들, 공구대에 대한 기하학적 오차를 입력, 수정, 저장할 수 있는 형태의 GUI들을 구축하였고, 이를 토대로 가상적인 기하학적 정보들을 입력하였다. 또한 가공오차의 해석례를 도출하기 위해서 요구되는 식 (5)와 관련된 구성요소의 치수들은 $L_1=180\text{mm}$, $L_2=465\text{mm}$, $L_3=120\text{mm}$, $L_4=315\text{mm}$, $H_1=1,020\text{mm}$, $H_2=255\text{mm}$, $R=127.5\text{mm}$, $l=60\text{mm}$ 로 가정하였다.

Fig.4와 5는 한 점($X=0\text{mm}$, $Z=0\text{mm}$)에서 다른 점($X=0\text{mm}$, $Z=800\text{mm}$)으로 직선보간할 때 발생하는 공구의 위치오차와 방향오차를 보여주고 있다. 이 경우의 X축 위치오차는 최대 -0.0820mm ,

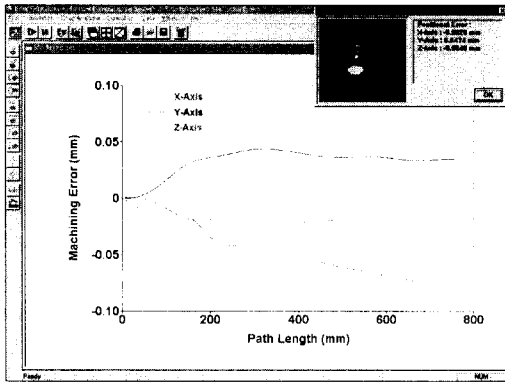


Fig.4 Positional error for linear interpolation

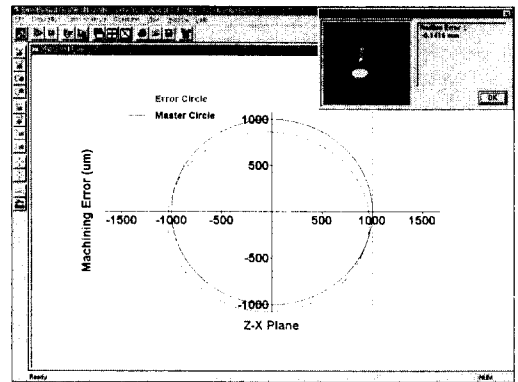


Fig.6 Positional error for circular interpolation

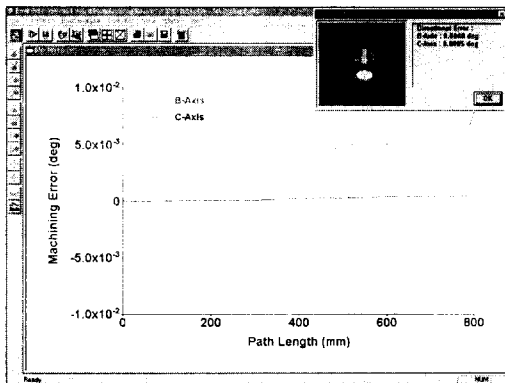


Fig.5 Directional error for linear interpolation

Y축 위치오차는 최대 0.0434mm, Z축 위치오차는 최대 -0.0240mm, B축 방향오차는 최대 0.0080°, 그리고 C축 방향오차는 최대 0.0005°로 나타났다. 또한 Fig.6에는 한 점(X=100mm, Z=100mm)을 중심으로 ZX 평면상에서 직경 100mm의 원을 가공할 때에 나타나는 원호보간시의 위치오차를 제시하였는데, 반경방향의 위치오차는 최대 -0.1416 mm인 것으로 예측되었다.

외경 절삭정도(진원도와 원통도)를 평가하기 위해서 절삭조건으로 이송량 0.5mm/rev, 절삭깊이 0.2mm, 절삭날 길이 10mm 등을 사용하였다. JIS B 6331의 규정조건과 구성요소의 치수 및 기하학적 오차를 고려해서 예측한 진원도와 원통도는 0.0078mm와 0.0296mm로 나타났는데, 그 예측결과는 Fig.7에 제시하였다.

그리고 정면 선삭가공에 의한 단면 절삭정도(평면도) 평가는 앞서의 외경 절삭정도 평가와 동일한 조건을 사용하여 수행하였다. JIS B 6331의 규정조건과 기하학적 오차를 고려해서 예측한 평

면도는 Fig.8에서 볼 수 있듯이 0.0100mm로 나타났다.

4.2 구조변형에 의한 가공오차 예측

절삭력과 구조변형이 고려된 외경 절삭정도(진원도와 원통도)를 평가하기 위해서 사용한 절삭조건은 공구 재질 HSS, 공작물 재질 S45C, 이송량 0.5mm/rev, 절삭깊이 0.2mm, 절삭속도 120 m/min, 절삭날 길이 10mm, 공구 기움각 5°, 공구 상면 경사각 10°, 공구홀더 길이 50mm, 공구홀더 폭 20mm, 공구홀더 높이 20mm 등이다. JIS B 6331의 규정조건과 절삭력 및 구조변형을 고려해서 예측한 진원도와 원통도는 모두 0.0140mm로 나타났으며, 그 예측결과는 Fig.9에 제시하였다.

정면 선삭가공에 의한 단면 절삭정도(평면도) 평가를 위해서 사용한 절삭조건은 절삭속도 120 m/min 대신에 주축회전수 150rpm을 적용했다는 점을 제외하면 외경 절삭정도 평가에서의 절삭조건과 동일하다. JIS B 6331의 규정조건과 절삭력 및 구조변형을 고려해서 예측한 평면도는 Fig.10에서와 같이 0.0479mm로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 수직형 선반의 설계단계에서 구성요소의 치수와 기하학적 오차, 그리고 절삭력과 구조변형이 가공오차에 미치는 영향을 체계적으로 예측할 수 있는 수직형 선반의 가공오차 해석시스템을 개발하였다. 그리고 본 연구를 통해서 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 구성요소의 치수와 기하학적 오차가 수직형 선반의 가공오차에 미치는 영향을 평가할 수 있는 오차모델을 구축하였다.

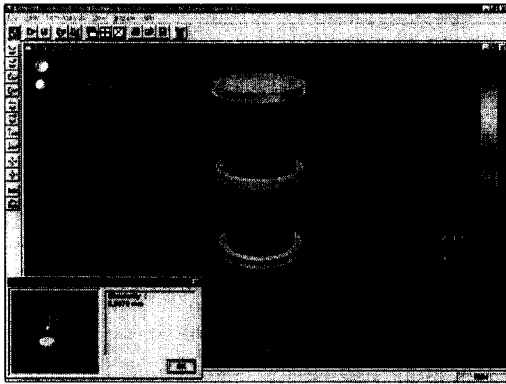


Fig.7 Machining error for turning with geometric errors

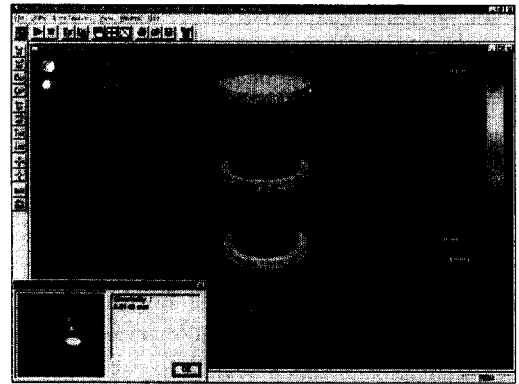


Fig.9 Machining error for turning with structural deformation



Fig.8 Machining error for facing with geometric errors

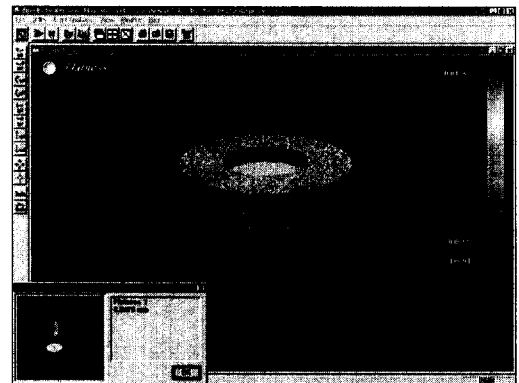


Fig.10 Machining error for facing with structural deformation

- ② 공작물과 접촉하고 있는 절삭날 부분에 작용하는 절삭력을 3차원 절삭이론에 토대로 두고 예측하였다.
- ③ 절삭상태에서의 공구의 위치오차와 방향오차는 절삭력과 구조변형의 평형조건을 고려해서 결정하였다.
- ④ 수직형 선반의 형상창성운동, 공작물의 가공상태 등을 3차원적으로 가시화하는 솔리드 모델 기반의 가상가공모듈을 개발하였다.
- ⑤ NC 선반의 가공정밀도 검사방법(JIS B 6331)과 가상가공기법에 기반을 둔 수직형 선반의 가공오차 예측방법을 개발하였다.

참고문헌

1. 김석일 외, 최신 공작기계 설계기술, 반도출판사, 1995.
2. D.N. Renshetov and V.T. Portman, Accuracy of Machine Tools, ASME Press, 1988.
3. 階戸紀男, 石澤浩司, 田中文基, 岸浪建史, 山田誠, “工作機械の形状創成運動モデルと加工形状モデルに関する研究,” 日本精密工學會 春季大會 學術講演會 講演論文集, 1991, pp.1099.
4. 박희덕, 양민양, “볼랜드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구,” 대한기계학회 논문집, 제13권 3호, pp.433-442, 1989.
5. 조현덕, “자유곡면을 이용한 5축 정밀가공에 관한 연구,” 한국과학기술원 박사학위 논문, 1993.
6. JIS Handbook - 工作機械, 日本規格協會, 1997.
7. 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.
8. P.J. Willis, A. Bowyer, R.I. Taylor and G.M. Bayliss, “Virtual Manufacturing,” International Workshop on Graphics and Robotics, Schloss Dagstuhl, Germany, 1993.