

본 연구는 97년도 경북대학교 신진교수 연구과제비에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

수직형 선반의 평면 오차 민감도 분석 및 신뢰도 평가

여 규 환*, 양 승 한**

Sensitivity Analysis and Confidence Evaluation for Planar Errors of a Vertical Turning Center

Gyuhwan Yeo*, Seunghan Yang**

ABSTRACT

Geometric and thermal errors are key contributors to the errors of a computer numerically controlled turning center. A planar error synthesis model is obtained by synthesizing 11 geometric and thermal error components of a turning center with homogeneous coordinate transformation method. This paper shows the sensitivity analysis on the temperature change, the confidence evaluation on the uncertainty of measurement systems, and the error contribution analysis from the planar error synthesis model. Planar error in the z direction was very sensitive to the temperature change, and planar errors in the x and z directions were not affected by the uncertainty of measurement systems. The error contribution analysis, which is applicable to designing a new turning center, was helpful to find the large error components which affect planar errors of the turning center.

Key Words : machine tool accuracy(공작 기계 정확도), planar error synthesis analysis(평면 오차 합성 모델), homogeneous coordinate transformation method(균일 좌표 변환 방법), confidence evaluation(신뢰도 평가), error contribution analysis(오차 분담 분석)

1. 서 론

오늘날 대량생산과 무인 자동화 생산에서 공작 기계의 사용은 필수적이다. 공작 기계를 이용한 실제 가공에서 공작물과 기하학적 기준간의 불일치정도인 공작물의 오차가 발생하며 오차 요인으로는 공작 기계, 절삭 과정과 환경 요인으로 대별된다. 기존의 연구에 의하면 공작물의 오차에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 공작 기계이며 공

작 기계의 오차중 열변형 오차가 40~70%까지 차지하고 기하학적 오차도 상당한 부분을 차지한다^{(1)~(4)}. 그래서 지금까지 공작 기계의 기하학적 오차와 열변형 오차를 모델링하기 위하여 많은 연구가 이루어져왔다. 그 중에서 오차 합성 모델은 기하학적 오차와 열변형 오차를 합성한 모델로써 단순 기하학적 모델보다 더 효과적으로 공작 기계의 평면 오차를 모델링하였다⁽⁵⁾. 본 연구에서는 균일 좌표 변환 방법을 이용한 2차원 공작 기계의 기하학적 오차

* 경북대 기계공학부 대학원
** 경북대 기계공학부

와 열변형 오차의 합성 모델을 만들었으며 이를 평면 오차 합성 모델이라 한다.

평면 오차 합성 모델은 공작 기계 제작자에게 공작 기계 구성 요소들의 오차, 조립으로 인한 오차 등 기본적인 정보와 작업 초기에 발생하는 오차, 작동 범위 및 시간에 따라 변화하는 평면 오차의 예측과 각 오차들이 평면 오차에 미치는 직접적인 영향 등의 유용한 정보를 제공하고 이에 의해 평면 오차의 실시간 보정을 가능케 한다. 실시간 보정을 하기 위해선 평면 오차 합성 모델에 영향을 주는 측정 장치들의 불확실성에 대한 신뢰도 평가를 하여야 하고 장시간에 걸친 공작 기계의 작동으로 인한 기계의 온도 변화가 평면 오차에 주는 영향을 고려하여야 한다. 그리고 평면 오차중 큰 비중을 차지하는 오차 요소들을 선별하는 오차 분담 분석을 통하여 기계 설계시 기계 정확도를 효과적으로 향상시키는 유용한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 평면 오차 합성 모델을 이용하여 다음의 연구를 하였다.

첫째, 실험데이터에 영향을 주는 측정 장치의 불확실성에 대한 평면 오차 합성 모델의 신뢰도 평가를 하였다. 각 오차 요소 모델은 측정 장치의 불확실성을 포함하는 실험 데이터를 이용하여 만들고 평면 오차 합성 모델은 이들 오차 요소 모델의 합성이므로 각 오차 요소 모델이 가지고 있는 측정 장치의 불확실성은 합성되어 평면 오차에 영향을 미친다. 따라서 측정 장치의 불확실성에 대한 평면 오차 합성 모델의 신뢰도 평가를 고려하였다.

둘째, 온도 변화에 따른 열변형이 평면 오차에 미치는 영향을 알아보았다. 생산성 향상을 위해 공작 기계의 작동 시간이 길어지고 있으며 장시간의 작동으로 인하여 공작 기계에 모터, 스피들 회전, 슬라이드 움직임, 절삭 과정 등으로부터 발생하는 열로 인해 공작 기계에 온도 변화가 발생한다. 이러한 온도 변화에 의한 공작 기계의 열변형이 평면 오차에 미치는 영향을 알아보았다.

셋째, 평면 오차 합성 모델을 이용한 평면 오차에 대한 오차 분담 분석을 하였다. 공작 기계의 평면 오차를 줄이고 제작비를 줄이기 위해서 평면 오차에 영향을 주는 모든 오차 요소의 오차를 줄이는 것보다 평면 오차에 큰 영향을 미치는 오차 요소들을 선별하여 줄이는 것이 효과적이다. 따라서 평면 오차 합성 모델을 이용하여 오차 분담 분석을 하였다.

2. 평면 오차 합성 모델

2.1 평면 오차 요소

수직형 선반의 평면 오차 합성 모델은 기하학적 오차와 열변형 오차로 이루어져 있으며 평면 오차의 분류는 Fig. 1에 나타내었다. 기하학적 오차는 공작 기계의 기하학적 부정확도에 따른 오차로서 병진 운동 오차와 회전 운동 오차로 나뉘어진다. 병진 운동 오차에는 선형 변위 오차와 진직도 오차가 있으며 선형 변위 오차에는 x축 선형 변위 오차와 z축 선형 변위 오차가 있고 진직도 오차도 역시 x축 진직도 오차와 z축 진직도 오차가 있다. 회전 운동 오차에는 각도 오차, 직각도 오차와 평행도 오차가 있으며 각도 오차에는 x축 각도 오차와 z축 각도 오차가 있다. 열변형 오차는 공작 기계 각 지점의 온도 변화에 의해 발생하는 열변형 오차로서 온도 변화에 따른 스피들의 변형을 고려한 스피들 틸트(spindle tilt)와 스피들 드리프트(spindle drift)가 있으며 스피들 드리프트에는 x방향 스피들 드리프트와 z방향 스피들 드리프트가 있다.

위와 같은 평면 오차 분류에 의한 총 11개의 기하학적 오차 요소들과 열변형 오차 요소들을 나열하면 다음과 같다.

- 1) x축 선형 변위 오차 : δ_{xx}
- 2) x축 진직도 오차 : δ_{zx}
- 3) x축 각도 오차 : ϵ_{yx}
- 4) z축 선형 변위 오차 : δ_{zz}
- 5) z축 진직도 오차 : δ_{xz}
- 6) z축 각도 오차 : ϵ_{yz}
- 7) 스피들과 z축간의 평행도 오차 : η_{sz}
- 8) z축과 x축간의 직각도 오차 : η_{zx}
- 9) x방향 스피들 드리프트 : δ_{xs}
- 10) z방향 스피들 드리프트 : δ_{zs}
- 11) y축 둘레의 스피들 틸트 : ϵ_{ys}

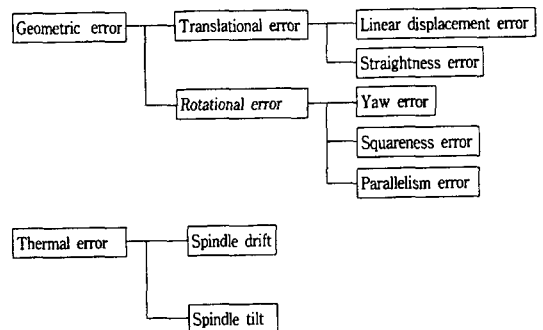


Fig. 1 The Separation of planar errors

1)~6)은 x방향 슬라이드의 이동 거리와 z방향 슬라이드의 이동 거리에 따라 변화하는 기하학적 오차 요소들이며, 7)~8)은 2차원 수직형 선반의 조립 과정에서 발생하는 기하학적 오차 요소들이며 상수값이다. 그리고 9)~11)은 2차원 수직형 선반에서 온도 변화에 따른 스프링의 열변형 오차들이다. 1)~8)도 역시 온도 변화에 따라 열변형이 발생하나 본 연구에서는 온도 변화에 따른 2), 3), 5)~8)의 열변형은 작아서 무시하고 1), 4)의 열변형만을 고려하였다.

2.2 평면 오차 합성 모델링

평면 오차 합성 모델링은 절삭하는 공구 팁(tool tip)의 위치와 절삭될 공작물의 위치가 동일하다는 가정으로부터 시작하며 평면 오차 합성 모델링의 순서는 다음과 같다. 우선 기준좌표계와 국부좌표계를 정하고 공구 팁의 위치를 국부좌표계에서 기준좌표계로 변환하여 나타낸다. 이 때 좌표 변환은 균일 좌표 변환 방법을 사용한다. 그 다음 절삭될 공작물의 위치를 기준좌표계로 나타낸다. 마지막으로 절삭하는 공구 팁의 위치와 절삭될 공작물의 위치가 같기 때문에 공구 위치 벡터와 공작물 위치 벡터를 동등하게 두고 행렬식을 풀다.

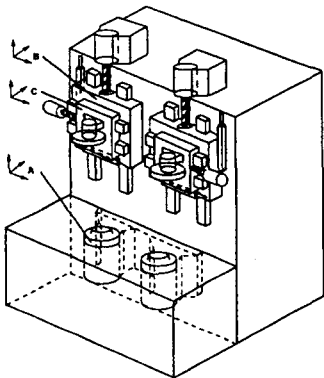


Fig. 2 Vertical turning center (Accu-cell 300)

Fig. 2는 2차원 수직형 선반(Accu-cell 300)를 나타낸다. 먼저 2차원 수직형 선반의 좌표계로서 기준좌표계 A와 국부좌표계인 z방향 슬라이드 좌표계 B, x방향 슬라이드 좌표계 C를 설정하였다. 공구 팁의 위치와 공작물의 위치는 벡터로 나타내었다. 식(1)은 기준좌표계에서의 공구 팁의 위치를 나타낸 식이며 x방향 슬라이드 좌표계 C에서의 공구 위치를 기준좌표계 A에서 위치로 변환하였

다. 식(1)에서 $T_A(t)$ 는 기준좌표계에서의 공구 팁의 위치 벡터이며 $T_C(t)$ 는 x방향 슬라이드 좌표계 C에서의 공구 팁의 위치 벡터이다. τ_A^B 는 z방향 슬라이드 좌표계 B를 기준좌표계 A로 바꾸주는 변환 행렬이고, τ_B^C 는 x방향 슬라이드 좌표계 C를 z방향 슬라이드 좌표계 B로 바꾸주는 변환 행렬이다. 식(2)에서 좌항은 기준좌표계 A에서의 공작물의 위치 벡터를 나타내며 우항은 기준좌표계 A에서의 공구 팁의 위치벡터를 나타낸다. 따라서 식(2)에 의해 공구 팁의 위치와 공작물의 위치를 일치하게 된다. 식(3)은 식(1)의 τ_A^B , τ_B^C 를 나타낸 것이다.

$$T_A(t) = \tau_A^B \tau_B^C T_C(t) \tag{1}$$

$$(W + \Delta W)_A = T_A(t) \tag{2}$$

$$\tau_A^B = \begin{bmatrix} 1 - \epsilon_{yz} & \delta_{zz} + z + M_{rcz} \\ \epsilon_{yz} & 1 & \delta_{xz} + z\eta_{sz} + M_{rex} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tau_B^C = \begin{bmatrix} 1 - \epsilon_{yx} & \delta_{zx} - x\eta_{zx} + M_{ctz} \\ \epsilon_{yx} & 1 & \delta_{xx} + x + M_{ctx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서, W_A 는 오차가 없는 기준좌표계 A에서의 공작물의 위치를 나타내는 벡터이고 ΔW_A 는 오차가 발생한 기준좌표계 A에서의 공작물의 위치 오차를 나타내는 벡터이다. 식(1)을 식(2)에 대입하여 구하면 식(4)에 나타난 x방향 평면 오차와 식(5)에 나타난 z방향 평면 오차가 구해진다.

$$\Delta W_x = \delta_{xx} + \delta_{xz} + \eta_{sz}z + (\epsilon_{yz} + \epsilon_{yx} - \epsilon_{ys})T_z + \delta_{xs} + (\epsilon_{yz} - \epsilon_{ys})M_{ctz} - M_{rcz}\epsilon_{ys} \tag{4}$$

$$\Delta W_z = \delta_{zx} + \delta_{zz} - (\eta_{zx} + \epsilon_{yz})x - (\epsilon_{yz} + \epsilon_{yx} - \epsilon_{ys})T_x + \delta_{zs} - (\epsilon_{yz} - \epsilon_{ys})M_{ctx} + M_{rcz}\epsilon_{ys} \tag{5}$$

Fig. 2를 참고하면 x, z는 각각 x방향 슬라이드의 이동 거리와 z방향 슬라이드의 이동 거리를 나타내며 실험에서 x는 0에서 165.1(mm)까지 움직였으며 z는 0에서 219.5(mm)까지 움직였다. 그리고 M_{rcz} 와 M_{ctx} 는 기준좌표계 A에 대한 z방향 슬라이드 좌표계 B의 x방향 및 z방향의 오프셋을 나타내고 M_{ax} 와 M_{cz} 는 z방향 슬라이드 좌표계

B에 대한 x방향 슬라이드 좌표계 C의 x방향 및 z방향의 오프셋을 나타내고 T_1 와 T_2 는 x방향 슬라이드 좌표계 C에 대한 공구 팁의 x방향 및 z방향의 오프셋을 나타낸다.

3. 평면 오차 합성 모델의 신뢰도 평가

평면 오차 합성 모델은 총 11개의 기하학적 오차와 열변형 오차로 이루어져 있으며 각 오차 모델들은 실험 데이터를 이용하여 만든다. 이러한 실험 데이터는 레이저 측정기 (HP 5528A)와 열 센서에 의해 얻어지며 각각 1 μm 의 불확실성과 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 의 불확실성을 가지고 있다. 이러한 측정 장치의 불확실성에 대한 평면 오차 합성 모델은 신뢰도를 가질까? 라는 의문이 제기된다. 따라서 본 장에서는 측정 장치의 불확실성에 대한 평면 오차 합성 모델을 신뢰도 평가하기 위해 각 오차 모델들을 신뢰도 평가하였다.

3.1 통계학적 검증

각 오차 모델의 신뢰도 평가시 통계학적 검증(statistical test)을 사용하였다. 각 오차 모델은 실험 데이터를 피팅한 곡선으로 표현되므로 각 오차 모델은 곡선의 파라미터에 의해 결정된다. 따라서 각 오차 모델의 신뢰도 평가를 위해선 곡선 파라미터의 대표값인 평균과 분산을 신뢰도 평가하여야 한다. 곡선 파라미터의 평균과 분산에 대한 통계학적 검증이 유사하므로 분산에 대한 통계학적 검증을 식(6)~식(8)에 나타내었으며 식(6)의 H_0 는 측정 장치의 불확실성이 없는 실험데이터의 모분산과 측정 장치의 불확실성이 포함된 실험 데이터의 표본 분산이 같다는 귀무가설을 나타내고 식(7)의 H_1 은 위의 모분산과 표본 분산이 다르다는 대립가설을 나타낸다. 우선 실험에서 얻은 데이터값을 정규값으로 가정하고 실험 데이터를 피팅한 곡선의 각 파라미터를 a_i 라 하고 각 파라미터의 모분산을 $V(a_i)$ 라 한다. 노이즈를 포함한 실험 데이터를 피팅한 곡선의 각 파라미터를 \hat{a}_i 라 하고 각 파라미터의 표본 분산을 $V(\hat{a}_i)$ 라 한다. 그리고 식(8)에서 $\bar{V}(\hat{a}_i)$ 는 표본 분산의 평균을 나타내고 s 는 표본분산의 표준편차를 나타내고 n 은 표본분산의 표본의 수를 나타낸다.

$$H_0 : V(a_i) = V(\hat{a}_i) \quad (6)$$

$$H_1 : V(\hat{a}_i) < V(a_i) \text{ and } V(\hat{a}_i) > V(a_i) \quad (7)$$

$$Z_o = \frac{\bar{V}(\hat{a}_i) - V(a_i)}{s/\sqrt{n}} \quad (8)$$

유의 수준을 0.05, 즉 95%의 신뢰도로 평가할 때 식

(8)의 검정통계량(Z_o)의 절대치가 2.56보다 작거나 같으면 귀무가설을 채택하고 2.56보다 크면 귀무가설을 기각한다. 3.2절에서는 통계학적 검증을 이용하여 오차 모델을 신뢰도 평가하였다.

3.2 오차 모델의 신뢰도 평가

각 오차 모델의 신뢰도 평가는 크게 기하학적 오차 모델의 신뢰도 평가와 열변형 오차 모델의 신뢰도 평가로 나누어진다. 기하학적 오차 모델은 실험데이터를 슬라이드의 이동 거리에 대해 피팅한 곡선으로 표현되고 열변형 오차의 모델은 실험데이터를 온도 변화에 대해 피팅한 곡선으로 표현된다. 본 절에서는 기하학적 오차중 x축 선형 변위 오차와 열변형 오차중 x방향 스피들 틸트를 신뢰도 평가하였다. 위 오차 요소들의 수학적 모델은 다음과 같다. 단, 실험 데이터는 정규값이라 가정한다.

$$\delta_{xx} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (9)$$

$$\delta_{xx} = d_0 + d_1\Delta T_1 + d_2\Delta T_2 + d_3\Delta T_3 + d_4\Delta T_1^2 + d_5\Delta T_2^2 + d_6\Delta T_3^2 \quad (10)$$

식(9)는 피팅한 곡선과 실험 데이터간의 차이가 허용 오차 이내로 되는 최소한의 고차식이 5차임을 나타내며 식(10)의 ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 는 열변형 오차의 하나인 x방향 스피들 틸트를 측정하기 위해 수직형 선반 몸체에 부착한 열 센서들의 온도 변화 파라미터들을 나타낸다. 실험을 통하여 각 오차 모델의 곡선 파라미터의 대표값인 평균과 분산을 구한 뒤 평균을 $M(a_i)$ 와 $M(d_i)$, 분산을 $V(a_i)$ 와 $V(d_i)$ 로 나타내었다. 실험 데이터는 레이저 측정기와 열 센서의 불확실성을 포함하고 있어서 노이즈를 포함하는 오차 요소의 새로운 수학적 모델을 식(11)과 식(12)에 나타내었다. 레이저 측정기의 불확실성은 독립동일분포(Independent and identical distribution)와 평균이 "0"이고 분산이 "1/36 μm "인 정규 분포를 따르는 노이즈로 가정하고 열 센서의 불확실성은 독립동일분포와 평균이 "0"이고 분산이 "0.25/36 $^{\circ}\text{C}$ "인 정규 분포를 따르는 노이즈로 가정한다.

$$\hat{\delta}_{xx} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x + \hat{a}_2x^2 + \hat{a}_3x^3 + \hat{a}_4x^4 + \hat{a}_5x^5 \quad (11)$$

$$\hat{\delta}_{xx} = \hat{d}_0 + \hat{d}_1\hat{\Delta T}_1 + \hat{d}_2\hat{\Delta T}_2 + \hat{d}_3\hat{\Delta T}_3 + \hat{d}_4\hat{\Delta T}_1^2 + \hat{d}_5\hat{\Delta T}_2^2 + \hat{d}_6\hat{\Delta T}_3^2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_{xx} &= \delta_{xx} + \xi_1, & \hat{\delta}_{yx} &= \varepsilon_{yx} + \xi_3, \\ \hat{\delta}_{zz} &= \delta_{zz} + \xi_4, & \hat{\delta}_{xz} &= \delta_{xz} + \xi_5, & \hat{\varepsilon}_{yz} &= \varepsilon_{yz} + \xi_6, \\ \hat{\eta}_{sz} &= \eta_{sz} + \xi_7, & \hat{\eta}_{zx} &= \eta_{zx} + \xi_8 \\ \hat{T}_1 &= T_1 + \eta_1, & \hat{T}_2 &= T_2 + \eta_2, & \hat{T}_3 &= T_3 + \eta_3 \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)에서 ξ_i 는 레이저의 불확실성에 대한 노이즈를 나타내고 η_i 는 열 센서의 불확실성에 대한 노이즈를 나타내고 T_1, T_2, T_3 는 열변형 오차의 하나인 x방향 스핀들 틸트를 측정하기 위해 수직형 선반 몸체에 부착한 열 센서들의 온도 파라미터들을 나타낸다. 그리고 각 오차 모델의 신뢰도 평가는 다음과 같다. 단, x축 선형 변위 오차의 예를 들었다.

- 1) 실험을 통하여 측정된 x축 선형 변위 오차를 최소자승법을 이용하여 곡선을 생성한다.
- 2) 생성된 곡선상의 임의의 10개의 점을 정하여 10개의 x축 선형 변위 오차를 발생시킨다.
- 3) 위에서 발생한 x축 선형 변위 오차를 정규값이라고 가정하고 각 x축 선형 변위 오차마다 10 개의 노이즈를 발생시킨다.
- 4) i번째 노이즈를 포함하는 각 x축 선형 변위 오차를 최소자승법으로 이용하여 새로운 곡선을 i 개를 생성한 뒤 이들 곡선 파라미터의 평균을 새로운 곡선 파라미터로 정한다.
- 5) 1)~4)를 6번 반복한다. 실험을 통하여 얻은 곡선 파라미터의 평균 및 분산과 노이즈를 포함하는 새로운 곡선 파라미터의 평균 및 분산을 구한다.
- 6) 5)에서 구한 값을 이용하여 곡선 파라미터를 가설검증한다.
- 7) 가설검증의 신뢰성을 높이기 위해 1)~6)을 10번 반복하여 가설검증을 한다.

위와 같은 절차를 통하여 얻은 x축 선형 변위 오차 모델과 x방향 스핀들 드리프트 모델의 곡선 파라미터들에 관한 평균과 분산의 모든 검정통계량의 절대치가 임계치인 2.56보다 작은 값이 발생하였다. 곡선 파라미터의 평균과 분산에 대한 귀무가설이 채택된다는 것은 평면 오차를 이루고 있는 각 오차 모델이 레이저 측정기와 열 센서의 불확실성에 영향을 받지 않는다는 것이다. 이것은 통계학적 검증을 통해 95%의 신뢰도를 가진다.

4. 평면 오차 합성 모델의 민감도 분석

본 장에서 온도 변화에 따른 열변형 오차의 발생과 이러한 영향으로 인한 평면 오차의 열변형에 대해 알아본다.

4.1 열변형 오차

본 연구에서 온도 변화에 따라 열변형이 발생하는 오차 요소들로 선형 변위 오차, 스핀들 드리프트와 스핀들 틸트로 정하였다. 그 중 스핀들 드리프트와 스핀들 틸트는 순수 열변형 오차, 즉 온도 변화에 의해서만 발생하는 오차이며 선형 변위 오차는 슬라이드의 이동 거리와 온도 변화에 의해 발생하는 오차이다. 그래서 선형 변위 오차는 기하학적 오차와 열변형 오차로 나눌 수 있으며 수학적 모델은 식(14)에 나타내었다.

$$\delta_{xx} = \delta_{xx,g} + \delta_{xx,t}, \quad \delta_{zz} = \delta_{zz,g} + \delta_{zz,t} \quad (14)$$

여기서, $\delta_{xx,g}$ 은 x축 선형 변위 오차중 기하학적 오차를 나타내고 $\delta_{xx,t}$ 는 x축 선형 변위 오차중 열변형 오차를 나타내며 $\delta_{xx,g}$ 은 z축 선형 변위 오차중 기하학적 오차를 나타내고 $\delta_{xx,t}$ 는 z축 선형 변위 오차중 열변형 오차를 나타낸다.

4.2 온도 변화의 영향

수직형 선반 각 지점의 온도 변화가 열변형 오차를 발생시키고 이러한 열변형 오차는 최종적으로 수직형 선반의 평면 오차에 영향을 준다. 수직형 선반의 15곳에 열 센서를 부착하여 기계 각 지점의 온도 변화를 측정하였으며 이렇게 측정된 온도 변화의 평균값을 평균 온도 변화라 하였다. 평균 온도 변화에 따른 z축 선형 변위 오차의 열변형과 x축 선형 변위 오차의 열변형은 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4에서 그림의 x축은 슬라이드의 이동 거리를 나타내고 그림의 y축은 발생한 오차를 나타내며 실선과 "+", "o", "*"는 각각 0℃, 약 2.8℃, 약 6.5℃, 약 8.4℃의 평균 온도 변화를 나타낸다. Fig. 3에서 평균 온도 변화가 0℃를 나타내는 실선을 살펴보면 z방향 슬라이드를 0에서 219.5(mm)까지 움직였을 때 "z=0(mm)"에서 발생한 z축 선형 변위 오차와 "z=219.5(mm)"에서 발생한 z축 선형 변위 오차의 상대적 차이가 크게 발생한 것을 미루어 보아 z축 선형 변위 오차는 작업 초기에 이미 큰 기하학적 오차가 발생하였음을 알 수 있으므로 기계 설계시 z축 선형 변위 오차의 기

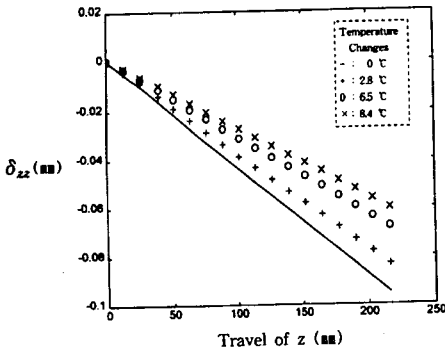


Fig. 3 The effect of temperature changes to linear displacement error in the z direction

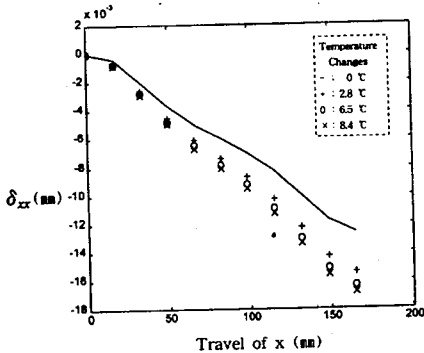


Fig. 4 The effect of temperature changes to linear displacement error in the x direction

하학적 오차를 줄이는 것이 매우 중요하다. 그리고 z축 선형 변위 오차에 약 35 μm의 열변형이 발생하여 온도 변화에 민감한 반응을 보였다. 이에 반해 x축 선형 변위 오차는 작업 초기에 약 12 μm의 작은 기하학적 오차를 가지며 Fig. 4를 보면 온도 변화에 따른 열변형이 약 5 μm로 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있다. 나머지 순수 열변형 오차인 스피들 드리프트와 스피들 틸트는 세 곳의 온도 변화에 영향을 받으므로 4차원의 그림이 필요하지만 그림을 그릴 수가 없어서 수치상으로 알아보았다. 스피들 드리프트는 약 4~5 μm정도가 발생하였고 스피들 틸트는 거의 발생하지 않았다.

이러한 온도 변화에 따른 열변형 오차가 최종적으로 평면 오차에 미치는 영향은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5는 온도 변화에 따른 x방향 평면 오차의 열변형을 나타내고 Fig. 6은 온도 변화에 따른 z방향 평면 오차의 열변형을 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6에는 세 개의 평면이 있는데 밑에서부터 각각 0°C, 약 2.8°C, 약 8.4°C의 평

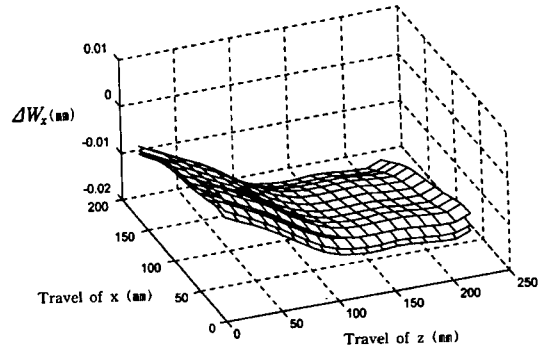


Fig. 5 The effect of temperature changes to planar error in the x direction

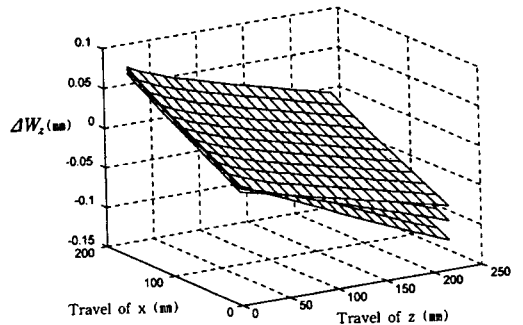


Fig. 6 The effect of temperature changes to planar error in the z direction

균 온도 변화를 가진다. x방향 평면 오차에는 약 2 μm의 적은 열변형이 발생하였으며 Fig. 5에서 볼 수 있다. 이는 x방향 평면 오차에 영향을 주는 열변형 오차가 온도 변화에 거의 영향을 받지 않았기 때문이다. 이에 반해 z방향 평면 오차에는 약 50 μm의 매우 큰 열변형이 발생하였는데 Fig. 6에서 볼 수 있다. 이는 z방향 평면 오차에 영향을 주는 z축 선형 변위 오차에 약 35 μm의 열변형이 발생하였기 때문이다. 따라서 z방향 평면 오차는 온도 변화에 많은 영향을 받기 때문에 열변형이 적은 재료 선택이나 열변형에 대한 오차 보정이 필요하다.

5. 오차 분담 분석

본 장에서는 오차 분담 분석을 통하여 각 오차 요소들이 실제로 평면 오차에 미치는 영향을 살펴보고 그 중 평면 오차에 큰 영향을 주는 오차 요소들을 고려하여 평면 오차를 효과적으로 줄이는 방법을 알아보았다.

5.1 오차 분담

각 오차 요소들이 실제로 평면 오차에 미치는 영향을 알아보기 위해 식(4)와 식(5)를 식(15)와 식(16)과 같이 각 오차 요소항으로 바꾸어 나타내었다. 식(15)는 x방향 평면 오차를 나타내며 x축 선형 오차, z축 진직도 오차, 평행 오차, x축 및 z축 각도 오차, x방향 스피들 드리프트와 스피들 틸트항으로 이루어져 있고 식(16)은 z방향 평면 오차를 나타내며 z축 선형 오차, x축 진직도 오차, 직각 오차, x축 및 z축 각도 오차, z방향 스피들 드리프트와 스피들 틸트항으로 이루어졌다.

$$\Delta W_x = \delta_{xx} + \delta_{xz} + \eta_{sz}z + T_z \epsilon_{yx} + (T_z + M_{ctz}) \epsilon_{yz} + \delta_{xs} - (T_z + M_{ctz} + M_{rcz}) \epsilon_{ys} \quad (15)$$

$$\Delta W_z = \delta_{zx} + \delta_{zz} - \eta_{zx}x - T_x \epsilon_{yx} - (x + T_x + M_{ctx}) \epsilon_{yz} + \delta_{zs} + (T_x + M_{ctx} + M_{rcx}) \epsilon_{ys} \quad (16)$$

먼저 x방향 평면 오차의 오차 분담 분석을 하였다. 단, 평균 온도 변화는 약 2.8 °C이다. 식(15)에 의한 x방향 평면 오차는 Fig. 7에 나타내었으며 실제로 약 23 μm 정도의 오차가 발생하였다. x방향 평면 오차는 대부분 x축 선형 변위 오차에 의해 발생하였으며 x축 선형 변위 오차가 x방향 평면 오차에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 x축 선형 변위 오차는 x방향 슬라이드의 이동 거리와 거의 비례적으로 늘어나는 것을 볼 수 있고 실제 발생한 오차는 약 15 μm 정도였다. 따라서 기계 설계시 x축 선형 변위 오차를 고려하면 x방향 평면 오차는 효과적으로 줄일 수 있다.

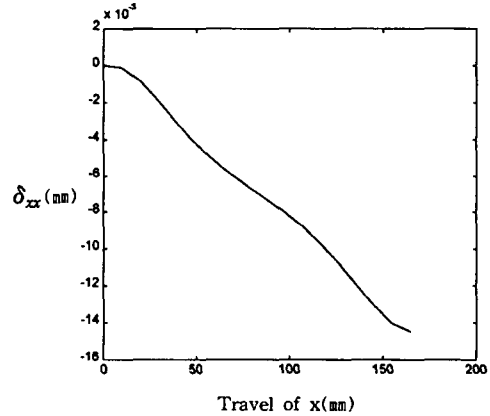


Fig. 8 Contribution of linear displacement error of the x-axis to planar error in the x direction

그리고 z방향 평면 오차의 오차 분담 분석을 하였다. 단, 평균 온도 변화는 약 2.8 °C이다. 식(16)에 의한 z방향 평면 오차는 Fig. 9에 나타내었으며 x방향 평면 오차와는 달리 약 173 μm의 매우 큰 오차가 발생하였다. 이것은 z방향 평면 오차의 90% 이상을 차지하는 z축 선형 변위 오차와 직각도 오차 때문이며 z방향 평면 오차에 대한 두 오차의 영향은 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10은 z축 선형 변위 오차의 영향을 나타내었으며 슬라이드의 이동 거리에 거의 비례적으로 늘어나는 것을 볼 수 있다. 실제로 z축 선형 변위 오차는 약 82 μm의 상당히 큰 오차가 발생하였으며 이 중 기하학적 오차가 상당한 양을 차지하였다. 식(16)에 의하면 직각도 오차는 z방향 평면 오차에 $-\eta_{zx}x$ 의 영향을 주며 그 영향은 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11를 보면 직각도 오차가 z방향 평면 오차에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 실제 약

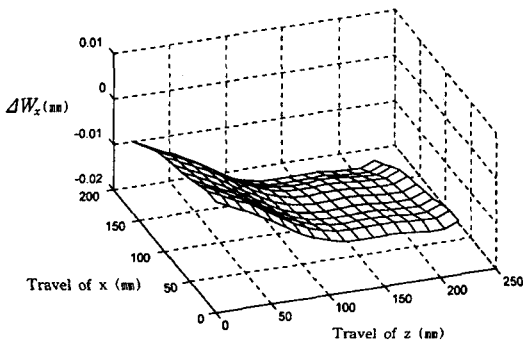


Fig. 7 Planar error in the x direction

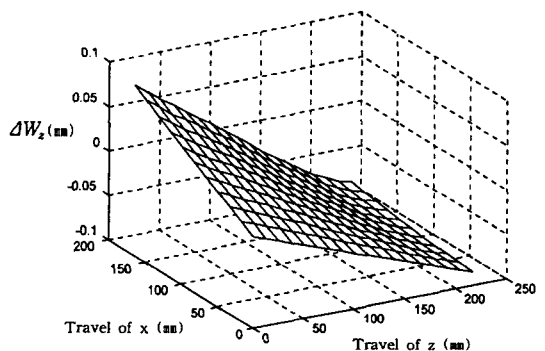


Fig. 9 Planar error in the z direction

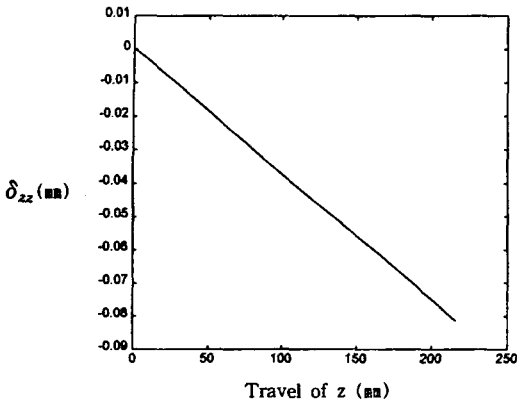


Fig. 10 Contribution of linear displacement error of the z-axis to planar error in the z direction

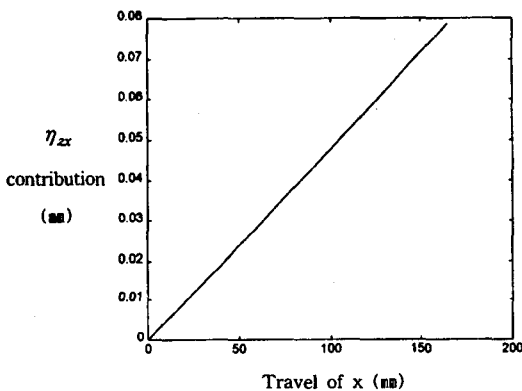


Fig. 11 Contribution of squareness error to planar error in the z direction

80 μm의 오차가 발생하였다. 직각도 오차는 공작 기계를 조립할 때 x방향 슬라이드와 z방향 슬라이드가 직각을 유지하지 못하여 발생한 기하학적 오차이며 상수값이다. 따라서 z축 선형 변위 오차의 기하학적 오차와 직각도 오차는 기하학적 오차로서 이미 기계에 존재하고 있는 오차이므로 기계 설계 및 조립시 이 두 오차를 고려하면 큰 오차가 발생한 z방향 평면 오차를 상당히 효과적으로 줄일 수가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 공작물의 오차에 가장 큰 영향을 끼치는 공작 기계의 평면 오차에 대해 기하학적 오차와 열변형 오차에 대한 수학적 및 경험적인 평면 오차 합성 모델

을 만들었다. 제작비에 대한 평면 오차의 정확도 향상을 위해, 평면 오차 합성 모델을 이용하여 실험시 발생하는 각 오차 요소로 인한 측정 장치 불확실성의 중첩에 대한 평면 오차 합성 모델의 신뢰도 평가, 작업 조건에 따른 평면 오차의 변화와 공작 기계 설계 및 제작시 평면 오차에 큰 영향을 주는 오차를 선별하여 평면 오차를 효과적으로 줄이는 오차 분담 분석을 하였다.

1) 공작물의 오차에 가장 큰 영향을 끼치는 공작 기계의 평면 오차에 대해 기하학적 오차와 열변형 오차를 정의하고 실험을 통한 각 오차 발생량을 측정하여 공작 기계의 평면 오차에 대한 수학적이며 경험적인 평면 오차 합성 모델을 만들었다.

2) 각 오차 요소의 합성으로 인해 각 오차 요소들이 내포하고 있는 측정 장치의 불확실성이 중첩되어 평면 오차에 영향을 주며 통계학적 검증에 의해 이러한 불확실성의 중첩에 대한 평면 오차 합성 모델의 검정통계량 절대치가 임계치인 2.56보다 작은 값이 발생함으로써 평면 오차 합성 모델은 측정 장치에 내재된 불확실성의 중첩에 대해 95%의 신뢰도를 가진다. 이는 평면 오차 합성 모델이 레이저 측정기와 열 센서의 불확실성에 영향을 받지 않을 확률이 95%라는 것을 뜻한다.

3) 생산성 향상을 위해 공작 기계의 작업 시간 연장에 따른 모터, 스피들 회전 등의 열로 공작 기계의 온도 변화가 발생하고 이러한 온도 변화는 수평 방향인 x방향 평면 오차에는 미미한 영향을 주었으나 수직 방향인 z방향 평면 오차에 약 50μm의 큰 열변형을 발생시켰다. 이것은 z방향이 수직 방향이기 때문에 판단된다.

4) 각 오차 요소들의 평면 오차에 대한 오차 분담 분석을 한 결과, 약 23 μm의 x방향 평면 오차에 비해 z방향 평면 오차는 약 173 μm의 큰 오차가 발생하였으며 z방향 평면 오차의 약 90%를 z축 선형 변위 오차의 기하학적 오차 부분과 직각도 오차가 차지하였다.

5) 수직 공작 기계의 오차를 줄이기 위해 z방향 평면 오차는 줄이는 것이 매우 중요하다. z방향 평면 오차를 효과적으로 줄이기 위해선 공작 기계 설계 및 제작시

정적 오차이면서 z방향 평면 오차의 약 90%를 차지하는 z축 선형 변위 오차의 기하학적 오차 부분과 직각도 오차를 줄이는 것이 매우 중요하다.

참고 문헌

1. Hocken, R. J., "Technology of Machine Tools, Vol. 5, Machine Tool Accuracy," Machine Tool Task Force, 1980.
2. Bryan, J. B., "International Status of Thermal Error Research(1990)," Annals of CIRP, Vol. 39, No. 2, pp. 645-656, 1990.
3. Ferreira P. M. and C. R. Liu, "A Method for Estimating and Compensating Quasistatic Errors of Machine Tools," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 149-159, 1993.
4. Okushima, K. and Y. Kakino, "Compensation of Thermal Displacement by Coordinate System Correction," Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 283-286, 1988.
5. S. Yang, J. Yuan and J. Ni, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Compensation," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 15, No. 2, April, 1996.