

2차원 CNC 선반에서 평면 오차 민감도 분석

Planar Error Sensitivity Analysis in a CNC Turning Cen

여 규 환(경북대 대학원), 이 진 현(안동공업전문대), 양 승 한(경북대 공대)

Gyu-Hwan Yeo(Graduate School, Kyungpook National Univ.), Jin-Hyeon Lee(Andong Technical College),

Seung-Han Yang(Kyungpook National Univ.)

ABSTRACT

Geometric and thermal errors are responsible for major components of the errors of a computer numerically controlled turning center. The planar errors of a CNC turning center are comprised of 11 geometric and thermal error components. The error synthesis model is formulated by homogeneous coordinate transformation method and expresses the effect of such error components on the planar error of a CNC turning center. In this paper, the sensitivity analysis of the model on the noises through sensing and the change of temperature is addressed. The sensitivity analysis shows that the error synthesis model is robust on the noises and z planar error is much affected by the change of temperatures.

Key Words : homogeneous coordinate transformation method(균일 좌표 변환 방법), sensitivity analysis(민감도 분석), error synthesis model(오차 합성 모델), machine tool accuracy(공작 기계 정확도)

1. 서 론

공작물의 정확도란 가공된 공작물과 치수 및 기하학적 기준간의 일치정도를 말한다⁽¹⁾. 공작물의 정확도는 공작물 성능의 중요한 측정기준이므로 정확한 공작물생산이 중요하다. 반면, 공작물의 오차는 가공된 공작물과 치수 및 기하학적 기준간의 불일치정도를 말하며 여러 가지 오차원인들을 가지고 있다. 그 중에서도 공작 기계의 오차가 공작물의 오차에 가장 큰 영향을 끼친다. 기존의 연구결과를 살펴보면 준정적 오차중에서 기하학적 오차와 열변형 오차가 공

작 기계 오차에 매우 큰 영향을 준다^(2,3,4).

따라서, 기하학적 오차와 열변형 오차를 규명하고 이를 모델링하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔으며 그 중 경험적인 모델로써 선형가변모델, 지수합수모델, FEM모델, 시변형 체적오차 모델 등이 제안되었다. 시변형 체적오차 모델을 이용하여 2차원 수직 선반에서 절삭 공구와 이상적인 공작물간의 상대운동오차인 평면 오차(planar error)를 모델링하였다. 본 연구에서 시변형 평면 오차 합성 모델은 11개의 기하학적 및 열변형 오차들로 이루어져 있으며 x방향 및 z방향 평면 오차를 수식화하였고 균일 좌표

변환 방법(homogeneous coordinate transformation method)에 의해 유도하였다. 본 연구의 목적은 기하학적 오차의 측정에서 발생하는 노이즈에 대한 시변형 평면 오차 합성 모델의 민감도와 작동 시간동안 2차원 수직 선반 각 지점의 온도 상승에 따른 2차원 수직 선반의 평면 오차 변화를 살펴보는 것이다.

그 방법으로는 다음과 같은 순서를 밟았다.

- 1) 기하학적 및 열변형 오차요소들을 정의하고 시변형 평면 오차 합성 모델을 만든다.
- 2) 난수를 발생시켜 시변형 평면 오차 합성 모델의 민감도 분석을 한다.
- 3) 온도 상승에 따른 열변형 오차요소와 2차원 수직 선반의 x방향 및 z방향 평면 오차의 변화를 알아본다.

2. 평면 오차 합성 모델링

2.1 평면 오차 요소들의 정의

2차원 CNC 선반의 평면 오차 합성 모델에는 기하학적 오차요소 8개, 열변형 오차요소 3개, 총 11개 요소가 포함되어 있다. 1)~6)은 공구좌표계에 따라서도 변화하며, 1), 4), 9)~11)은 CNC 선반 각 지점의 온도에 따라 변화한다.

- 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) 스핀들과 z축간의 평행 오차 : η_{sz}
- 8) z축과 x축간의 직각 오차 : η_{zx}
- 9) x방향 스핀들 드리프트 : δ_{xs}

10) z방향 스핀들 드리프트 : δ_{zs}

11) y축 둘레의 스핀들 틸트 : ϵ_{ys}

2.2 평면 오차 합성 모델링

평면 오차 합성 모델은 공구 팁(tool tip)의 위치와 공작물의 위치가 동일하다는 가정으로부터 유도된다. Fig 1은 2차원 수직 CNC 선반(Accu-Cell 300)을 나타낸다. 좌표계로 기준좌표계 A, z방향 슬라이드 좌표계 B, x방향 슬라이드 좌표계 C를 설정하였다. 공구 팁의 위치와 공작물의 위치의 좌표 변환은 균일 좌표 변환 방법에 의해 이루어진다.

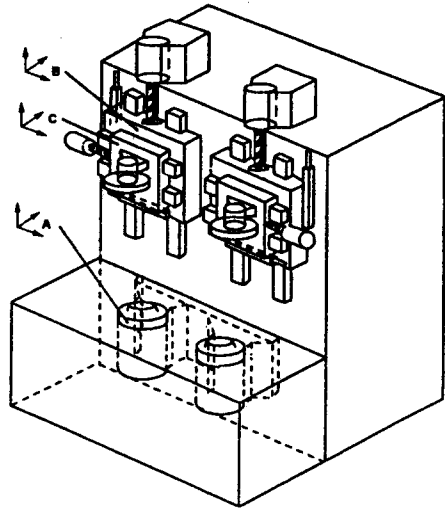


Fig 1. 2차원 수직 CNC 선반(Accu-cell 300)

먼저 x방향 슬라이드 좌표계 C에서의 공구 위치를 기준좌표계 A에서 위치로 변환하면 식(1)과 같다.

$$T_A(t) = r_A^B r_B^C T_C(t) \quad (1)$$

$(W + \Delta W)_A$ 는 기준좌표계 A에서 공작물의 위치를 나타내므로 식(2)가 구해지며 식(2)로부터 공작물

오차 벡터 $\Delta \mathbf{W}_A$ 가 식(3), 식(4)와 같이 구해진다.

$$(\mathbf{W} + \Delta \mathbf{W})_A = \tau_A^B \tau_B^C \mathbf{T}_C(t) \quad (2)$$

$$\Delta W_x = \delta_{xx} + \delta_{xz} + \eta_{sz}z + (\epsilon_{yz} + \epsilon_{yx} - \epsilon_{ys}) \quad (3)$$

$$T_z + \delta_{xs} + (\epsilon_{yz} - \epsilon_{ys})M_{ctz} - M_{rcz} \epsilon_{ys}$$

$$\Delta W_z = \delta_{zx} + \delta_{zz} - (\eta_{zx} + \epsilon_{yz})x - (\epsilon_{yz} + \epsilon_{yx} - \epsilon_{ys})T_x + \delta_{zs} - (\epsilon_{yz} - \epsilon_{ys})M_{ctx} + \quad (4)$$

$$M_{rcx} \epsilon_{ys}$$

여기서, $T_A(t)$ 와 $T_C(t)$ 는 각각 기준좌표계 A와 x방향 슬라이드 좌표계 C에서의 공구 팁의 위치 벡터이다. τ_A^B 는 z방향 슬라이드 좌표계 B를 기준좌표계 A로 바꾸는 변환 행렬이고, τ_B^C 는 x방향 슬라이드 좌표계 C를 z방향 슬라이드 좌표계 B로 바꾸는 변환 행렬이다.

3. 평면 오차 합성 모델의 민감도 분석

본 절에서 노이즈에 따른 기하학적 오차요소들의 민감도와 온도 변화에 따른 열변형 오차요소들의 민감도를 분석하고 최종적으로 x방향 및 z방향 평면 오차에 미치는 영향을 알아본다.

3.1 노이즈 모델

기존의 기하학적 오차요소값을 정규값(nominal value)이라고 가정하고 각 오차요소에 노이즈를 첨가하였을 때 노이즈를 첨가한 기하학적 오차요소들에 대한 모델은 다음과 같다.

$$\hat{\delta}_{xx} = \delta_{xx} + \xi_1, \quad \hat{\delta}_{zx} = \delta_{zx} + \xi_2, \quad \hat{\epsilon}_{yx} = \epsilon_{yx} + \xi_3,$$

$$\hat{\delta}_{zz} = \delta_{zz} + \xi_4, \quad \hat{\delta}_{xz} = \delta_{xz} + \xi_5, \quad \hat{\epsilon}_{yz} = \epsilon_{yz} + \xi_6$$

$$\hat{\eta}_{sz} = \eta_{sz} + \xi_7, \quad \hat{\eta}_{zx} = \eta_{zx} + \xi_8 \quad (5)$$

노이즈 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7$ 과 ξ_8 는 독립동일분포(independent and identical distribution)와 평균이 0이고 분산이 25/36인 정규분포를 따른다고 가정한다. 따라서,

$$E[\xi_1] = E[\xi_2] = E[\xi_3] = E[\xi_4] = 0$$

$$E[\xi_5] = E[\xi_6] = E[\xi_7] = E[\xi_8] = 0$$

$$V[\xi_1] = V[\xi_2] = V[\xi_3] = V[\xi_4] = \frac{25}{36}$$

$$V[\xi_5] = V[\xi_6] = V[\xi_7] = V[\xi_8] = \frac{25}{36}$$

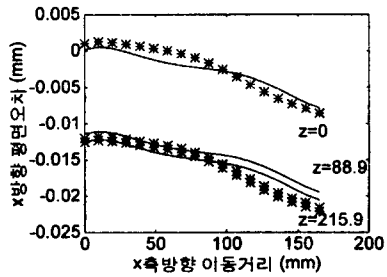
$$E[\xi_i \xi_j] = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ \frac{25}{36} & i = j \end{cases} \quad (6)$$

3.2 노이즈의 영향

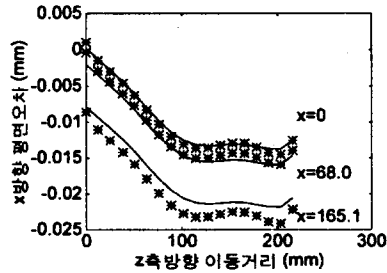
x방향 평면 오차와 z방향 평면 오차의 노이즈에 대한 민감도 분석은 다음과 같은 절차로 수행하였다. 이때 x방향 슬라이드의 이동 거리는 0~165.1 mm, z방향 슬라이드의 이동 거리는 0~215.9 mm이다.

- 1) x축 이동 거리내의 임의의 점을 열 개 정한다.
- 2) 각각의 점에서 18개의 난수를 발생시켜 x축 선형 변위 오차에 첨가한다.
- 3) 최소자승법으로 새로운 곡선매개변수를 얻는다.
- 4) 새로 구한 곡선매개변수를 사용하여 새로운 x축 선형 변위 오차를 구하고 평균값을 얻는다.
- 5) 다른 오차요소들도 위와 같은 방법으로 구한 뒤, x방향 및 z방향 평면 오차를 구한다.

Fig 2와 Fig 3은 노이즈 첨가에 따른 x방향 및 z방향 평면 오차의 변화를 시뮬레이션한 결과이다. "*"는 노이즈를 첨가한 평면 오차를 나타내고 실선은 노이즈를 첨가하지 않는 평면 오차를 나타낸다

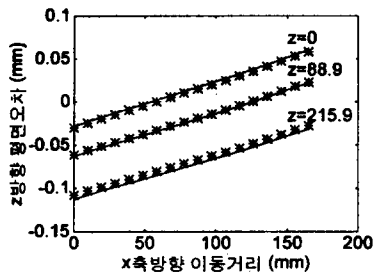


(a)

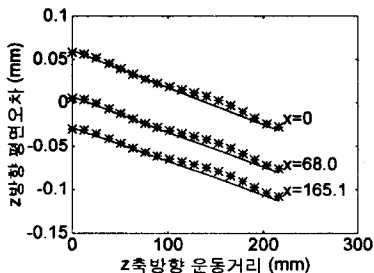


(b)

Fig 2. 노이즈 첨가에 따른 x방향 평면 오차 변화



(a)



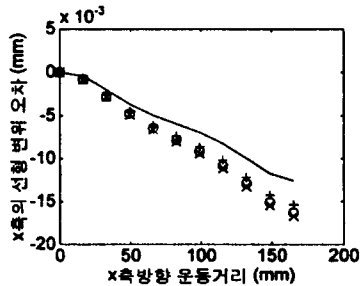
(b)

Fig 3. 노이즈 첨가에 따른 z방향 평면 오차 변화

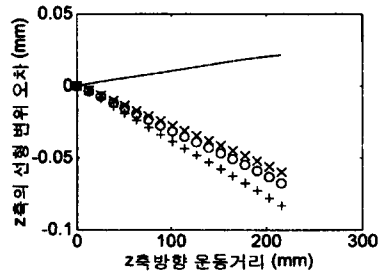
각 기하학적 오차요소에 노이즈가 첨가되더라도 x 방향 및 z방향 평면 오차의 최대 변화량은 3 μm 이하로 노이즈에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

3.3 온도 변화의 영향

작동 시간에 따라 CNC 선반 각 지점의 온도는 상승한다. 온도 변화에 영향을 받는 오차요소는 δ_{xx} , δ_{zz} , δ_{xs} , δ_{zs} 와 ϵ_{ys} 이다⁽⁴⁾. Fig 4는 온도 변화에 따른 x축 선형 변위 오차와 z축 선형 변위 오차의 변화를 나타낸다.



(a)

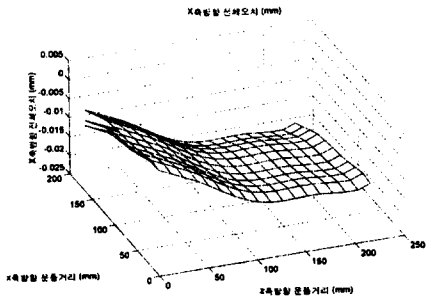


(b)

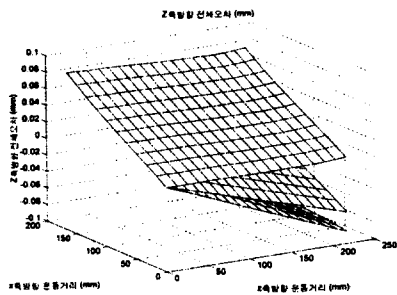
Fig 4. 온도 변화에 따른 x축 및 z축 선형 변위 오차

Fig 4의 (a)와 (b)에서 실선은 냉 조건인 경우 즉, 온도 변화가 "0"인 선형 변위 오차를 나타낸다. "+"는 각 지점의 평균 온도 변화가 약 2.8 $^{\circ}\text{C}$ 인 경우, "o"는 약 6.5 $^{\circ}\text{C}$ 인 경우, "*"는 약 8.4 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화

가 있을 때 선형 변위 오차를 나타낸다. 온도 변화에 따른 z축 선형 변위 오차가 x축 선형 변위 오차보다 훨씬 큰 변화를 보임을 알 수 있다. Fig 5는 x방향 및 z방향 평면 오차의 온도에 따른 변화를 나타낸다.



(a)



(b)

Fig 5. 온도 변화에 따른 x방향 및 z방향 평면 오차

x방향 평면 오차의 최대 변화량은 $4.4\mu\text{m}$ 정도로서 온도 변화에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 z방향 평면 오차는 최대 $89.9\mu\text{m}$ 정도의 큰 변화를 보인다. 이는 z방향 평면 오차를 이루고 있는 z축 선형 변위 오차, z방향 스펀들 드리프트가 온도 변화에 상당히 민감한 반응을 보이기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 노이즈와 온도 변화에 대한 x평면

오차의 민감도 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평면 오차 요소중 기하학적 오차요소에 노이즈가 첨가되더라도 평면 오차의 최대 변화량은 $3\mu\text{m}$ 이하로 평면 오차는 노이즈에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.
- 2) z방향 평면 오차가 x방향 평면 오차보다 온도 변화에 큰 영향을 받는다. 이는 z방향 평면 오차 요소중 z축 선형 변위 오차와 z방향 스펀들 드리프트가 온도 변화에 따라 민감한 반응을 나타내기 때문이다.
- 3) 수직 CNC 선반의 경우 온도 변화에 따른 수직 방향(z방향) 평면 오차를 보정할 수 있는 구조 설계가 요구된다.

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, pp149-159, 1993
4. 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