한국정밀공학회지 제 19 권 제 1 호 (2002 년 1 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, January 2002.

고정도 열변위보정을 위한 주축대의 열적굽힘에 대한 연구

김태원*, 하재용*, 고태조**

Research into Head-body Thermal Bending for High-accuracy Thermal Error Compensation

Tae-weon Gim*, Jae-yong Hah*, Tae Jo Ko**

ABSTRACT

Machine tools are engineered to give high dimensional accuracy in machining operation. However, errors due to thermal effects degrade dimensional accuracy of machine tools considerably, and many machine tools are equipped with thermal error compensation function. In general, thermal errors can be generated in the angular directions as well as linear directions. Among them, thermal errors in the angular directions contribute a large amount of error components in the presence of offset distance as in the case of Abbe error. Because most of thermal error compensation function is based on a good correlation between temperature change and thermal deformation, angular thermal deformation is often to be the most difficult hurdle for enhancing compensation accuracy. In this regard, this paper investigates the effect of thermal bending to total thermal error and gives how to deal with thermally induced bending effects in thermal error compensation.

Key Words : Machine tool (공작기계), Head body(주축대), Thermal error (열변위 오차), Thermal bending (열적굽힘), Thermal error compensation (열변위오차 보정)

기호설명

a = regression coefficient
e = thermal error
I = area moment of inertia
K = temperature gradient
L_i = offset distance
P_i = position of reference point
s = neutral axis
T = temperature
x,y,z = rectangular coordinates
α = thermal expansion coefficient
δ = total thermal error

1. 서론

고속•고정도 가공에 대한 요구가 확대되고 산업계에 적용이 되어감에 따라[1-2], CNC 공작기계의 열변위 오차와 서보계 오차가 가공품의 정밀도에 직접적인 영향을 미치는 중요한 두 인자가 되고 있다. 상기 두가지 오차는 모두 동적인 거동을 보

☞ 2001 년 3 월 9 일 접수
* 대우종합기계(주) 공기자동화본부 연구개발실
** 영남대학교 기계공학과

이는 오차성분으로 정적인 오차성분인 기하학적 오차나 자중에 의한 변형과 같이 오차의 정량화 방법 혹은 보정방법 등이 명확히 정의되어 있지는 않다[3]. 열변위 오차의 경우 총오차중 비율적으로는 최고 70%까지 차지할 수 있는데[4], 항상 일정한 값을 나타내는 것은 아니며, 공작기계의 운전조건 및 시간 경과에 따라 변동하게 된다. CNC 공작기계 관련 공업규격[5]을 참조하면, 열변위 오차에 관한 한 항상 고객과 협의하여 운전조건 등을 정하도록 되어 있음을 알 수 있다.

기계적인 하중과는 달리, 열적 하중은 내부 응력을 발생시키지 않으면서도 변위를 생성시키므로 일반적인 구조물의 설계관점에서 접근할 경우 기술적인 오류를 발생시킬 수 있다. 따라서 열발생량의 저감이나 냉각기구에 의해 열변위를 감소시키는 것이나[6], 열대칭구조 등 기계구성의 개선 등으로 열변위를 최소화 시키는 것이 공작기계 개발시 일차적으로 고려해 보아야 할 사항이다. 그러나, 공작기계의 고속화가 진전됨에 따라, 열변위도 그 거동이 고속화되고 있어 기계적으로 완전히 제거하는 것은 어려운 일이며 이에 따라 열변위 보정이 더욱 더 필요하게 된다.

CNC 선반과 같이 일정한, 그러나 짧은 시간간격을 두고 공작물이 가공완료되는 경우는 공작물 치수 측정에 의한 보정이 최선책이 될 수 있으나[7], 머시닝 센터와 같이 가공공정이 복잡하거나 시간이 많이 걸리는 경우 공작물이나 기계자체 등을 직접측정하는 보정방법은 기술적으로 어려움이 많아 보통 기계구조물의 온도측정값으로 열변위를 예측하는 간접 보정방법을 택하는 것이 일반적이다. 기계구조물의 온도와 열변위의 상관관계를 이용하여 공학적인 근사를 하는 방법으로 많은 적용실적이 있으며 정도향상에 큰 효과를 보고 있다[8-10]. 그러나, 정밀한 보정을 위해서는 매우 많은 점의 온도값이 필요하고, 또한 비정상상태의 거동은 정확히 기술하기 힘들다는 단점이 있다[6]. 실제 CNC 공작기계에 적용하여 본 결과로는, 주축대 열굽힘 현상에 의한 열변위 거동의 왜곡 현상이 보정에 있어 가장 큰 문제점으로 나타나고, 또한 열굽힘 현상이 비정상상태에서 기여도가 큰 현상이어서 더욱 더 보정상에 큰 오차요인으로 나타나고 있어 본 논문에서는 보정정도의 향상을 위하여 열굽힘현상에 대한 이론적이며 실험적인 고찰을 해 보고자 한다.

2 열적굽힘 현상의 중요성

주축대 열적굽힘현상이 있는 공작기계의 열변위 거동과 보정에 따른 문제점을 살펴보기위해 Fig. 1 과 같은 구성의 수직형 머시닝 센터를 본 논문에서 다루기로 한다. 구성은 Fig. 1(a)에서 보듯이 주물구조의 주축대(head body)가 고정된 칼럼에 있는 수직방향 안내면상에서 이송하여 z 축을 이루고, 또한 주축대에는 주축(spindle) 및 관련 구동계가 조립되어 있다. 주축은 모터와 Fig. 1(b)에서 보듯이 벨트에 의해 구동된다. 한편 주축 상부의 실린더는 공구를 착탈하기 위한 장치이다.

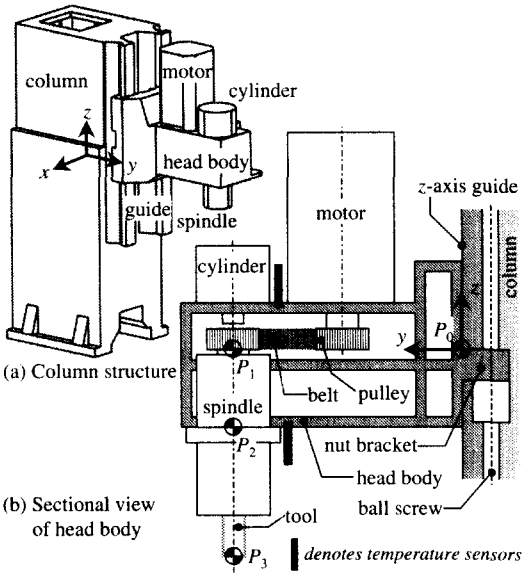


Fig. 1 Interesting structural parts of machining center

금형가공이 대표적인 고속•고정도 가공의 경우 현재 일반 금속가공업계에서 적용되고 있는 상용적인 절삭이송속도는 최고 *2m/min* 이므로[1], 이송계의 열변위보다는 상대적으로 주축의 고속회전에 기인하는 열변위가 더 큰 비중을 차지하며, 특히 Fig. 1(b)와 같은 구조의 경우 주축대에 모든 열원이 집중되어 있어 주축자체보다는 주축대의 열변위 영향이 더 큰 편이다. 가장 큰 열원은 동력전달부인 벨트 구동부로 주축 베어링의 열발생량보다 벨트 구동에 기인하는 열발생량이 더욱 크다. 머시닝센터 주축대는 가공영역에서 이송하는 운동

체여서 벨트구동부가 주축대 내부에 완전히 밀폐되어 냉각조건 또한 불리하게 되어, 결국 Fig 1(b)에 나타낸 점 P_0 와 P_1 사이에 큰 온도 변화가 생겨 가공정도에 악영향을 미치게 된다. 실제 열변위를 측정한 예를 보면 Fig. 2 와 같다. Fig. 1(a)에서 보듯이 x 방향으로는 주축대가 주축중심에 대하여 대칭을 이루고 있어, x 방향 열변위는 10μm 이하로 안정적이므로 상대적으로 매우 큰 y,z 방향 열변위만 다루기로 한다.

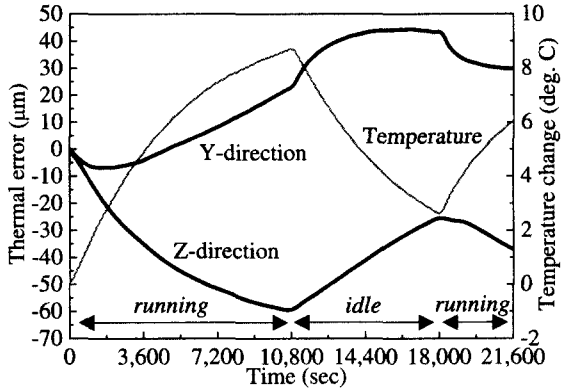


Fig. 2 Thermal error due to spindle running

열변위는 주축을 처음 10,800 초동안 4,000*rpm* 일정속도로 회전시키고 다음 7,200 초동안 정지시킨 다음 또다시 회전시키면서 총 6 시간 동안 비접촉 변위센서로 150 *mm* 테스트바 선단 즉, 점 P_3에서 측정하였다. z 방향 열변위를 살펴보면, 주축이 회전함에 따라 Fig. 1(b)의 좌표계에 따른 음의 방향으로 전형적인 주축의 축방향 변위를 볼 수 있다. 주축이 정지할 경우에는 다시 양의 방향으로 돌아가는 경향을 보이며 다시 회전하면 열변위는 증가된다. 이러한 경향은 같이 그려진, 주축대 온도변화 경향과 유사함을 Fig. 2 에서 알 수 있으며, 열변위 보정 또한 상관관계가 있어 문제점이 없을 것으로 보여진다. 그러나, y 방향 열변위를 살펴보면 물리적으로 이해하기 힘든 경향을 보인다. 즉, 주축이 회전하기 시작하면 Fig. 1(b)의 점 P_3 가 y 음의 방향으로 후퇴하다가 다시 양의 방향으로 늘어나는데, 주축이 정지할 경우 온도가 내려가는 구간임에도 불구하고 계속 y 양의 방향으로 증가되는 경향을 보인다. 다시 회전하면 y 음의 방향으로 후퇴하는 현상을 보이고 있다. 18,000 초가 지난 시점에서 살펴보면 2 시간 정지하였음에도 불구하고 y 방향 열변위가 더 커지는 현상이 발생하게 된다. 이것은 Fig. 3 과 같이 온도와 변위 그래프에서도 확인 할 수 있다. z 방향의 경우는 대표되는 온도변화와 선형적인 관계를 볼 수 있지만, y 방향으로는 전혀 선형적인 관계가 이루어지지 않음을 볼 수 있다. 그래프 모양이 히스테리시스와 비슷한 거동을 보여 미소마찰에 의한 열적 히스테리시스현상이라고 볼 수도 있으나, 열적 굽힘현상을 고려할 경우 문제는 쉽게 해결 될 수 있다.

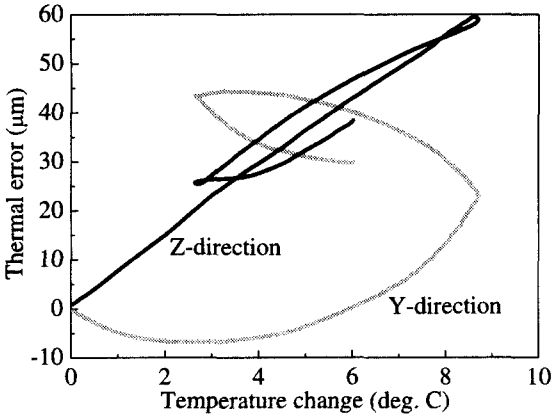


Fig. 3 Thermal error vs temperature change

열적 굽힘현상은 구조물 내부에 온도구배가 생길 경우 발생하는 것으로 일반적으로 빔에 적용되는 기계적인 굽힘 모멘트에 의한 굽힘현상과 동일하다. Fig. 1(b)와 같은 주축대 구조에서는 상부에는 모터, 벨트 구동부 등 열원이 배치되어 있고 하부에는 주축만 앞부분에 있고 또한 이 주축은 종종 오일 쿨러에 의해 냉각되어 주축대는 상부와 하부간에 온도편차가 생긴다. 상부온도가 증가하면(주축 회전시점), 주축대는 아래쪽으로 굽힘현상이 발생되게 되어 결국 주축대로부터 오프셋을 가지는 공구 끝점은 음의 y 방향으로 이동하게 된다. 반대로 온도구배가 줄어들면(주축 정지시점), 굽힘현상이 없어지면서 결과적으로 공구 끝지점은 양의 y 방향으로 이동하게 된다. 즉, Fig. 2 와 같은 y 방향 변위 거동은 주축대의 열적 굽힘현상에 기인하는 것이며 이것은 열변위 오차를 고려시, 직선방향 뿐만 아니라 회전방향도 고려해야 함을 알 수 있고, 문헌상에는 통상적으로 선형성분만을 고려한 경우가 대부분이다[4,6].

열적굽힘현상의 또 다른 중요성은 구조물내부에 온도구배가 생길 경우 발생하므로 정상상태보다는 비정상상태에서 더 큰 중요성을 갖는다는 것이다. Fig. 2 의 실제 측정 데이타에서 보다시피, 주축의 기동과 정지시점후 열굽힘 현상때문에 y 방향 열변위는 급격한 변화를 보임을 알 수 있다. 이러한 비정상 상태에서는 열적 굽힘현상이 없더라도, 구조물 온도값에 의한 열변위 보정은 편차를 보인다[6]. 이것은 Fig. 4 에서 실제 확인 할 수 있다.

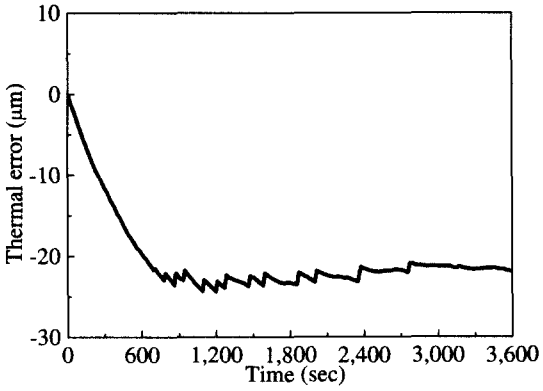


Fig. 4 Residual thermal error after compensation

Fig. 4 는 동일한 기계에 z 방향 열변위 보정을 행한 후 잔류 열변위를 측정한 결과이다. 온도와 변위의 상관관계는 식(1)과 같은 다중선형회귀분석법을 통해 구하였다. 온도센서는 Fig. 1(b)에 보인 바와 같이 주축대 상하부에 각각 한 개(T_1, T_2), 베드 후면에 기준센서 한 개(T_0) 총 3 개를 사용하였다.

$$e = a_0 + \sum_{i=1}^{2} a_i (T_i - T_0) \tag{1}$$

보정 결과를 살펴보면 600 초 이후부터 나타나는 톱니바퀴 모양이 실제 보정이 이루어지는 부분이다. 즉, 주축은 아래쪽으로 늘어나는 경향이 있는데 보정을 통하여 반대쪽으로 연속적으로 계속 보정량이 작용되는 것을 나타낸다. 그러나, 처음 600 초 동안은 전혀 보정이 이루어지지 않음을 볼 수 있고 이에 따라 $23\mu m$ 의 열변위가 잔류된다. 이것은 주축이 회전하자 마자 바로 열변위는 생기고 있으나 실제 열원으로부터는 떨어져서 설치될 수 밖에 없는 온도센서에는 그 변화가 감지 되지 않음을 의미하며 600 초 이후부터 온도변화가 감지됨을 의미하고 있다.

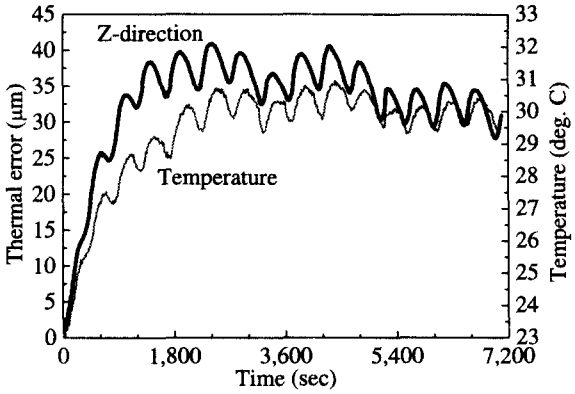


Fig. 5 Mismatch between temperature and thermal error of 20,000rpm spindle

기계내부 온도값에 의한 열변위 보정방법은 온도센서의 위치, 갯수에 영향을 많이 받으므로 초기 과도 열변위 현상과 동일한 반응을 나타내는 온도지점을 찾아내어 사용하면 되나, 실제 양산되는 기계의 경우 온도센서의 추가적인 부착이 공간의 제약과 추가적인 원가상승문제 때문에 실무적으로 어려운 경우가 많다. 결국 초기 비정상상태를 정확히 보정하기 위해서는 주축 베어링의 온도가 필요하게 되나 실제 양산기계에서는 부착이 힘들다. 문헌상에도 이러한 현상때문에 주축내부 베어링 회전부위에 온도센서를 부착하자는 의견까지 있다[6]. 온도와 열변위의 시정수가, 특히 고속주축의 경우, 상이하여 Fig. 5 에 보인 바와 같이 두 거동이 불일치하는 경우까지 있으므로 보정후 잔류오차는 증가하게 된다. 이러한 관점에서 볼 경우 열굽힘현상은 주축의 기동과 정지와 시간차 없이 밀접한 관계가 있는 비정상 상태인 동시에 온도변화 추이와 작은 상관관계를 가지므로, 온도값만으로 보정을 행할 경우 일정한 회전속도에서는 그 정도를 보장 할 수 있겠으나 잦은 가동조건 변화에서는 높은 보정정도를 보장할 수 없다. 그러나, 열변위보정을 사용한 Fig. 4 와 같은 초기 600 초간의 비정상상태 혹은 안정화시간은 열변위 보정을 사용하지 않은 Fig. 2 의 수시간에 이르는 안정화시간에 비해서는 열변위 보정이 매우 효과적임을 보여주고 있는 것이며 비정상적인 상태의 추가적

인 해석에 의해 더욱 향상된 정도를 달성할 수 있다는 것을 암시해주고 있다.

열굽힘 현상은 Abbe 오차에서 볼 수 있듯이[11], 오프셋 거리를 가질 경우 매우 큰 증폭효과를 보인다. 열굽힘에 의한 구조물의 각도변화는 최대 200μrad 까지 대상기계에서 관찰되고 있어 선형적인 열변위보다도 더 큰 오차성분이 된다. 이러한 현상은 이송계에서도 나타날 수 있는데 이미 3 차원 측정기 안내면에 열굽힘현상을 억제하는 구조를 채용하여 열적영향에 둔감한 측정기를 상용화한 예가 있으며[12], 엄밀한 이론적인 해석을 행한 문헌도 있다[13]. 또한 현재 판매되고 있는 고정도 공작기계의 경우 안내면 중심부에 냉각 구조를 채용한 경우가 많다. 정적인 원인에 기인하는 안내면의 굽힘에 의한 Abbe 오차는 일정하지만, 열적인 영향하의 굽힘은 시간에 따라 변동하는 동적인 성분이어서 기계구조 설계시나 열변위 보정시에 반드시 독립적으로 고려해야 할 사항임을 알 수 있다.

3. 열적 굽힘현상의 해석

3.1 빔요소의 열변형

주축대의 열적굽힘을 살펴보기 이전에 간단한 빔요소의 열변형에 대하여 이론적으로 고찰해본다. 먼저 구조물의 균일한 온도 변화에 의해 발생되는 선형 열변형은 다음과 같이 표시할 수 있으며(좌표계는 Fig. 6 에 따름), 단면적이나 탄성계수와는 무관함을 볼 수 있어 기계적인 하중에 의한 강성문제로 접근하면 안됨을 볼 수 있다.

$$e_y = \alpha \int T dy \tag{2}$$

다음으로 Fig. 6(a)와 같은 열적 굽힘현상을 해석하기 위해, 빔에 열적인 하중만 가해질 경우에 대한 지배방정식을 다음과 같이 유도한다[14-15].

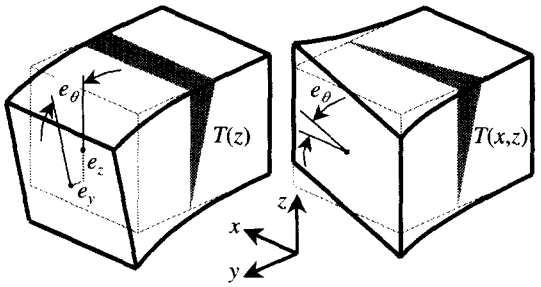
$$\frac{d^2 e_z}{dy^2} = \frac{de_\theta}{ds} = -\frac{\alpha}{I}\iint zT dx dz \tag{3}$$

식(3)을 온도변화 $T(z)$가 z 방향으로 선형적이라고 가정하고 각 오차성분을 외팔보에 대해 구하면 다음과 같다.

$$e_z = -\frac{\alpha K}{2} y^2 \tag{4}$$

$$e_\theta = -\alpha K y \tag{5}$$

여기서 K 는 온도구배로 (dT/dz)이다. 역시 열굽힘현상 또한 기계적인 응력과는 무관함을 알 수 있어서 단면 2 차 모멘트를 크게 하여 변형량을 줄이는 등의 일반적인 구조 강성향상방법은 적용할 수 없다. 한편, 온도구배 K 가 구조물 내부에서 변화하는 경우에는 Fig. 6(b)와 같은 열적 비틀림 현상까지 발생하나 공작기계에서는 그 영향이 미비하여 여기서 별도로 해를 구하지는 않는다.



(a) thermal bending (b) thermal torsion

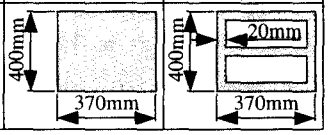
Fig. 6 Angular direction deformation due to thermal effects

온도구배는 굽힘 뿐만 아니라 독립적인 y 방향 신축도 발생시키는데 다음과 같은 관계가 있다.

$$e_y = e_N - z(de_z/dy) \tag{6}$$

여기서 e_N 은 중립축의 신축이며 식(2)를 사용하여 구할 수 있다. 한편, Fig. 1 과 같은 주축대 구조는 이상화된 빔의 특성에서 많이 벗어난 살두께 20mm 내외의 중공구조로 되어있어 직접적인 적용 이전에 Table 1 과 같이 유한요소해석법 등으로 값의 차이를 조사해볼 필요가 있다. 상하 온도차가 10$^\circ C$ 일경우 계산한 결과는 서로 잘 맞는 것으로 보인다.

Table 1 Calculation results

	Analytical	FEM
e_z	-69μm	-67μm
e_θ	209μrad	219μrad
Model (L660mm)		

3.2 대상 기계의 해석

빔에 대한 열변형 해석을 대상기계에 응용하기 위하여 Fig. 1(b)의 주축대구조를 Fig. 7 과 같이 열적영향하에서 신축과 굽힘을 하는 요소로 모델화하였다. 여기서 칼럼부를 제외한 이유는 상대적으로 칼럼부 온도변화가 주축대에 비해 작기 때문이며, 급격한 온도변화에 따른 비정상상태의 영향이 다른 어느 부위보다 작기 때문이다. Fig. 7 에 나타낸 것과 같이 Fig. 1(b)의 점 P_0 와 P_1 사이의 주축대(기준길이 L_1)는 온도구배에 의해 열적굽힘이 발생되는 빔요소로 모델화하였다.

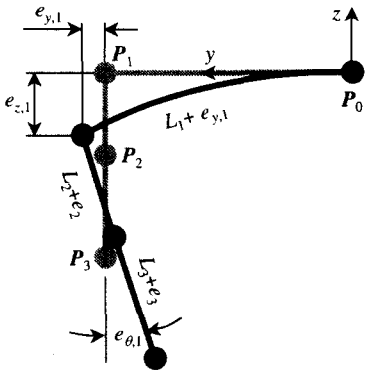


Fig. 7 Thermal error model of head body structure

점 P_0 는 주축대가 볼나사 너트와 조립되는 브라켓부와 칼럼의 안내면이 교차되는 지점으로 이 점을 기점으로 하여 공구끝의 열변위를 yz 방향으로 기술할 수 있다. 전술한 바와 같이 열적 굽힘이 있을 경우 총 3 가지 오차성분이 발생하게 되어, 점 P_1 에 적용되는 신축인 $e_{y,1}$ 과 굽힘에 의한 처짐 $e_{z,1}$, 그리고 점 P_2 와 P_3 에 적용되는 각도변화 $e_{\theta,1}$ 으로 주축대 오차성분이 구성된다.

점 P_1 과 P_2 사이의 주축대(기준길이 L_2)는 단순한 선팽창이 일어나서 e_2 의 오차를 발생시키는 것으로 모델화하였는데, 점 P_2 는 주축대와 주축이 조립되는 기준면상에 있다. 점 P_2 와 P_3 사이는 주축부(기준길이 L_3)로 온도변화에 의해 신축되는 오차성분 e_3 가 발생된다. Fig. 7 의 기하학적 구성에 따른 P_1 의 열변위 오차를 포함한 위치는

$$y_1(t) = L_1 + e_{y,1}(t) \tag{7}$$

$$z_1(t) = e_{z,1}(t) \tag{8}$$

이 되며 식(4),(5)를 사용하여 식(8)은 다음과 같이 변환된다.

$$z_1(t) = e_{z,1}(t) = \frac{L_1}{2} e_{\theta,1} \tag{9}$$

점 P_2, P_3 의 열변위 오차를 포함한 좌표는 각각 점 P_1, P_2에 대해 다음과 같이 표시된다.

$$y_{2,1}(t) = \left[L_2 + e_2(t)\right] \times e_{\theta,1}(t) \tag{10}$$

$$z_{2,1}(t) = L_2 + e_2(t) \tag{11}$$

$$y_{3,2}(t) = \left[L_3 + e_3(t)\right] \times e_{\theta,1}(t) \tag{12}$$

$$z_{3,2}(t) = L_3 + e_3(t) \tag{13}$$

위의 식들을 사용하여 다음과 같이 점 P_3 의 열적 영향하에서의 위치변화를 기준 좌표계에 대해 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} y_3(t) &= L_1 + \delta_{y3} \\ &= L_1 + \left[e_{y,1}(t) + (L_2 + L_3) \times e_{\theta,1}(t)\right] \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} z_3(t) &= L_2 + L_3 + \delta_{z3} \\ &= L_2 + L_3 + \left[e_{z,1}(t) + e_2(t) + e_3(t)\right] \end{aligned} \tag{15}$$

식(14),(15)의 결과를 살펴보면 $e_{z,1}$ 는 $e_{\theta,1}$ 과 식(9)와 같이 관련이 되어 있으므로, 굽힘에 의한 각도변화가 오프셋 거리 L_1, L_2, L_3 에 의해 공구끝의 위치오차를 크게 변동시킬 수 있음을 알 수 있다. 한편, 선형 열변위 성분인 $e_{y,1}, e_2, e_3$ 또한 식(2)와 같이 상기 오프셋 거리에 영향을 받는다. 이 경우 Fig. 8 과 같은 열적 견실성에 대한 개념을 살펴볼 수 있다.

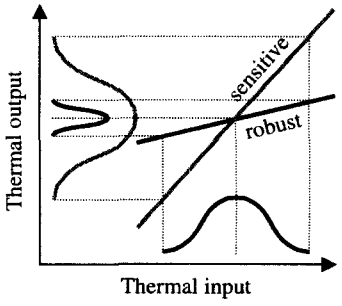


Fig. 8 Thermal robustness

열적으로 견실한 경우는 공작기계에 작용되는 열적 입력(열발생)의 변동에 대해 그 출력인 열변위의 변동이 억제되는 경우로 예를 들어 구조물의 온도변화가 많이 생겨도 공구끝의 열변위 오차는 작은 경우이다. 이것은 식(14),(15)를 참조하면 오프셋 거리와 연관이 됨을 알 수 있으며 작을 경우는 큰 온도변화가 있더라도 오차자체는 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 열적으로 민감할 경우 즉, 오프셋 거리가 클 경우는 작은 온도변화에도 큰 열변위 오차를 갖는다. 공작기계는 공구끝의 위치를 측정하여 위치제어를 하지 않으므로, 구조 루프가 그대로 측정 루프가 되는 경우가 많다. 즉, 열적, 기계적 하중이 큰 공작기계에 있어서 측정 루프를 따라 구조물에 의한 열변위 오차가 생길 경우 가공정도에 큰 영향을 미치게 되므로, 상기에 논한 바와 같이 열적 견실성에 대해 설계단계에서부터 면밀히 검토해야 한다.

4. 실험에 의한 검증 및 보정 전략

주축대의 열적굽힘현상이 지배적인 열변위 현상일 경우, Fig. 7 의 점 P_1 의 열변위 $e_{y,1}$ 과 $e_{z,1}$ 이 지배적인 인자이지만, 테이블 상면으로 부터의 높이가 문제시 되어 정밀측정이 곤란하다. 그러나, 식(14),(15)를 참조하면, 공구끝에서의 각도 변화의 측정에 의해 다른 오차성분들이 유도될 수 있으므로 Fig. 9 와 같은 일반적인 방법을 사용할 수 있다.

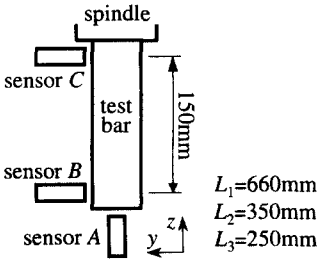


Fig. 9 Experimental set-up

변위센서 *A* 로부터 나오는 신호는 식(15)의 오차성분의 합 δ_{z3} 를 나타내고, 변위센서 *B* 로부터 나오는 신호는 식(14)의 오차성분의 합 δ_{y3} 를 나타낸다. 또한, 변위센서 *C* 측정값과 *B* 측정값의 차를 이용하여 각도변화 $e_{\theta,1}$ 을 계산할 수 있다. 그러므로, 식(9)에 의해 $e_{z,1}$ 을 구할 수 있고 식(14)와 (15)를 이용해 $e_{y,1}$ 과 (e_2+e_3)를 구할 수 있다. e_2 와 e_3 는 같은 방향 선형 열변위이므로 독립적으로 구할 필요성은 없다. 변위측정과 함께 주요부의 온도변화도 측정하였다. 주축은 4 시간동안 6,000*rpm* 으로 회전시키고 그다음 2 시간은 정지시켜 기동과 정지등 비정상상태의 거동이 충분히 드러나게 시험하였다. Fig. 10 은 주요부 온도변화를 나타내는 것으로 주축보다 주축대 상부의 온도가 5 도정도 높아 굽힘이 발생되고 있음을 알 수 있다.

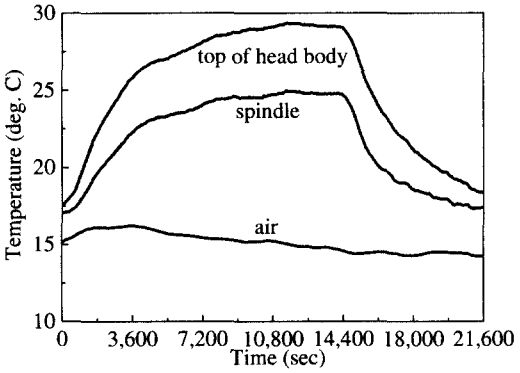


Fig. 10 Temperature changes

Fig. 11 은 y 및 z 방향 열변위 오차로 총오차를 각도변화 측정값과 기준치수로 신축성분과 굽힘성분으로 식(14),(15)를 적용하여 계산한 결과까지 같이 나타내었다.

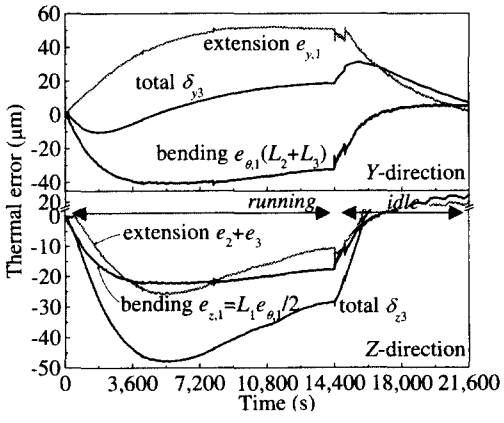


Fig. 11 Thermal error components

y 방향 열변위 총오차 δ_{y3}, 즉 Fig. 9 의 센서 *B*

로 측정한 값을 Fig. 11 에서 살펴보면 Fig. 2 의 경우와 마찬가지로 물리적인 해석이 불가능해 보인다. 이것을 Fig. 9 의 변위센서 *B,C* 에 의해 측정한 굽힘 $e_{\theta,1}$ 에 의해 생기는 성분을 계산하고, 이값을 총오차에서 감하여 신축 $e_{y,1}$ 만 나타나게 그려보면 온도측정 데이타에 의해 물리적인 해석이 가능하게 된다. Fig. 10 에서 주축대 구조물의 평균적인 온도상승을 8 도로 보고 기준길이 $L_1(660mm)$에 대해 식(2)에 의한 신축을 구하면 Fig. 11 의 신축성분 열변위 오차량에 상당해진다.

z 방향 역시 *y* 방향의 경우와 동일하게 취급할 수 있다. 그러나, Fig. 10 의 주축온도는 지속적으로 상승하나 Fig. 11 의 *z* 방향 신축열변위는 시간이 지남에 따라 다시 줄어드는 양상을 보이는 것 때문에 보정시 큰 오차가 생길 우려가 있다. 이것은 주축 선단 내경 테이퍼부의 점진적인 온도상승에 의해 결과적으로 테이퍼부가 확공이 되어, 테스트 바가 주축에 대해 상대적으로 상승되어 일어나는 현상이다. 이런 현상이 장시간 지속될 경우 테스트 바 혹은 공구가 주축 테이퍼로부터 빠지지 않는 현상이 종종 일어나게 된다. 이 현상은 특히 테이퍼부 살두께가 얇은 주축에 많이 일어나며, 이경우 주축 선단부에 압축공기를 상시 불어주거나, 테이퍼 안쪽 약 1/2 을 사용하지 않을 경우 많이 줄어들게 되어 안정적인 경향을 보이게 된다.

이론적, 실험적 결과에 따르면, 열변위 보정을 할 경우, 열적굽힘의 영향이 큰 공작기계의 경우 굽힘에 관한 오차성분을 별도로 취급해야 고정도의 보정을 할 수 있으므로, 다음과 같은 보정전략의 수립이 필요하게 된다.

첫째, Fig. 7 의 L_1, L_2 는 변동이 없으나 L_3 의 경우 공구에 따라 그 길이가 변하기 때문에 적정한 공구기준길이의 설정이 필요하게 된다. 그러나, 보통 고속•고정도 작업의 경우 주축선단으로부터 공구끝의 거리를 최소한으로 하여 가공하는 것이 일반적이므로 100 에서 150*mm* 정도를 그 기준길이로 삼으면 된다.

둘째, 열굽힘 현상은 열변위가 안정화되기 전까지 상태의 전형적인 비정상상태거동이므로 정상상태와 비정상상태를 구분하여 보정을 행해야 할 필요성이 생긴다. 이것은 Fig. 4 에 보인 바와 같이 신축열변위에도 적용되는 사항이므로 일차지연계로 열변위 발생기구를 모델링하여 주축 동작시간에 따라 보정을 행하는 것도 한 방법이 되며, 정상상태일 경우에는 식(1)과 같은 온도-변위 상관관계를 이용하는 것이 바람직하다.

5. 결론

온도구배에 기인하는 열적굽힘현상의 중요성은 Abbe 오차의 경우와 같이 각도변화는 큰 오프셋 거리를 가진 운동체에 작용될때 그 성분의 기여도가 커진다는 점 때문이다. 그리고 열적영향하에서 일어나는 굽힘현상이므로 일정한 값을 가지지 않는 동적성분이어서 해석이나 보정에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 열변위 보정상의 정도향상을 목적으로 열적굽힘현상을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 열적굽힘의 기여도가 큰 공작기계의 경우 대표되는 온도값의 변화와 상관관계없이 열변위 거동이 왜곡되는 현상이 나타난다.

둘째, 빔요소의 해석에 의해 온도구배는 굽힘에 의한 각도변화와 신축을 독립적으로 발생시키고 있으며, 단면형상이 아니라 전체 높이에 영향을 받기 때문에 복잡한 벽구조인 공작기계 구조물에도 이론해의 적용이 가능하다.

셋째, 굽힘현상이 있는 공작기계의 열변위를 신축 열변위 성분과 각도변화에 의한 굽힘 열변위 성분을 계산하는 방법을 제시하였으며 실험에 의해 검증을 하였다.

넷째, 열변위 오차를 선형변위와 각변위로 성분화하여 열변위 보정을 할 필요성은 비정상상태에서 굽힘현상이 발생한다는 이유에 의해 정당화된다.

참고문헌

1. Heisel, U., and Gringel, M., "Machine Tool Design Requirements for High-speed Machining," Annals of the CIRP, Vol. 45, pp. 389-392, 1996.
2. Smith, S., and Tlusty, J., "Current Trends in High-speed Machining," J. Manuf. Sci. and Engg B, Vol. 119, No. 4, pp. 664 - 666, 1997.
3. CIRP STC <<Me>> Working Party on 3DU, "A Proposal for Defining and Specifying the Dimensional Uncertainty of Multi-axis Measuring Machines," Annals of the CIRP, Vol. 27, pp. 623-630 1978.

4. Bryan, J., "International Status of Thermal Error Research (1990)," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 645-656, 1990.
5. ISO 230-2:1997, Test code for machine tools – Part 3: Evaluation of thermal effects
6. Weck, M., McKeown, P., *et al.*, "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp. 589-598, 1995.
7. Liu, Z.Q., and Venuvinod, P.K., "Error Compensation in CNC Turning Solely from Dimensional Measurements of Previously Machined Parts," Annals of the CIRP, Vol. 48, pp. 429-432, 1999.
8. Chen, J.S., Yuan, J.X., Ni, J. and Wu, S.M., "Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Errors on a Machining Center," Trans. ASME: J. Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 472-479, 1993.
9. 양승한, 이철수, " 5 축 CNC 공작기계의 오차 합성모델링 및 보정 알고리즘," 한국 정밀공학회지, 제 16 권, 제 8 호, pp. 122-129, 1999.
10. 황석현, 이진현, 양승한, "CNC 공작기계에서 열변형 오차보정 시스템의 고장진단 및 복구," 한국 정밀공학회지, 제 17 권, 제 4 호, pp. 135-141, 2000.
11. Bryan, J.B., "The Abbe Principle Revisited: An Updated Interpretation," Prec. Engg, Vol. 1, pp. 129-132, 1979.
12. Breyer, K.H. and Pressel, H.G., "Paving the Way to Thermally Stable Coordinate Measuring Machines," In: Seyfried, P., Kunzmann, H., McKeown, P. and Weck, M. (eds.), Progress in Prec. Engg, Springer-Verlag, Berlin, pp. 56-75, 1991.
13. Wasson, K.L., Slocum, A.H. and Lienhard, J.H., Straightness Errors of Rectangular Beams Caused by Ambient Air Temperature Gradients, MIT Industrial Liaison Program Report No. 10-40-93, Dept. of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, MA, 1993.
14. Schellekens, P., Soons, J. *et al.*, Development of Methods for the Numerical Error Correction of Machine Tools, Report No. EUR 15377 EN, Eindhoven University of Technology, Brussels, Luxembourg, 1993
15. Allen, D.H., and Haisler, W.E., Introduction to Aerospace Structural Analysis, John Wiley, New York, NY, 1985.