

# 비선형 거동을 고려한 머시닝센터의 열변위 보정 Thermal Compensation of Machining Centres having Nonlinear Behaviour

\*#김태원, 하재용, 김태형

\*#Taeweon Gim (taeweon.gim@doosan.com), Jae-Yong Ha, Tae-Hyung Kim  
두산인프라코어(주)

Key words : Thermal deviation, Compensation, Machining Centre, Non-linear Deformation

## 1. 서론

공작기계에서 발생하는 열변위는 가공 정확도를 악화시키는 주요 인자로, 고속으로 회전하는 베어링 등 내부 열원과 환경온도 변동 등 외부 열영향에 의해 기계 구조부에 온도변동이 발생하여 공구와 공작물간의 편차로 나타난다. 최근 생산성 향상을 목적으로 주축/이송계의 고속화에 따른 내부 열발생량이 증가되고 있고, 구조물의 최적설계에 따라 질량이 감소 추세에 있어 열변위 저감이 더욱 중요하게 다루어 지고 있다. 특히 대형 수직형 머시닝센터의 경우 높은 칼럼이나 긴 외팔보 형태의 구조물에서 발생하는 단순 팽창/수축 등 선형거동이 아닌 굽힘, 뒤틀림 등 비선형 거동에 의한 열변위에 의해 편차가 크게 증폭되어 공구선단점에서 발생하고 있고 열변위 보정을 통하여 열적 편차 저감이 필요하다.

## 2. 열적편차 모델링

공작기계 구조물의 변형 형태는 구조물의 크기, 형상과 작용하는 힘 혹은 온도분포에 따라 결정되며 총변형은 그림 1 과 같은 기본 변형 형태의 합으로 나타낼 수 있다. 열변형의 경우 온도분포가 길이 방향으로만 변동할 경우 단순 팽창/수축의 형태로 나타나고 열변위 보정 또한 용이하게 수행할 수 있다.

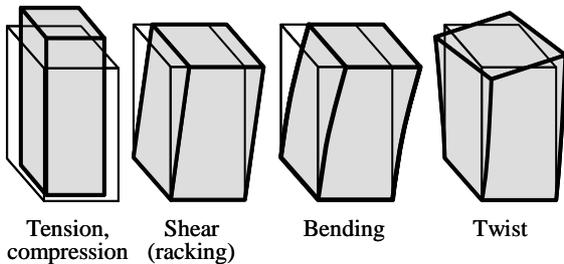


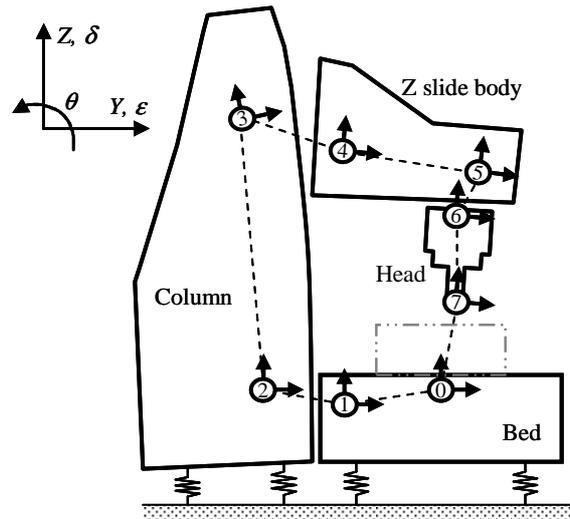
Fig. 1 Deformaton mode of structural members

구조물 내부에서 온도분포가 한방향으로 구배가 발생할 경우에는 굽힘이 발생되며, 각도편차에 따른 성분이 크게 나타나게 된다. 한편 온도분포가 두 방향의 구배를 가질 경우에는 그림 1 과 같은 뒤틀림 변형형태를 나타내게 된다. 공작기계 구조물의 굽힘 변형은 아베 오차에서 볼 수 있듯이, 오프셋 거리를 가질 경우 매우 큰 증폭효과를 보인다. 기하학적인 원인에 기인하는 안내면의 굽힘에 의한 아베 오차는 일정하지만, 열적인 영향하의 굽힘은 시간에 따라 변동하는 동적인 성분으로서 실시간 보정이 필요하게 된다.

선형 변형일 경우에는 한개의 온도센서로 열변위를 용이하게 예측할 수 있지만, 굽힘 변형일 경우에는 최소 3 개 이상의 온도센서가 필요하게 되어 공작기계 구조물의 변형 형태를 실험이나 해석을 통하여 반드시 굽힘을 고려해야 하는 부재를 파악해야 하고 이에 대한 보정 방법을 달리해야 한다. 굽힘 성분의 고려 여부를 결정하기 위해서는 그림 2 와 같은 열적편차 모델링을 수립하여 각 성분의 기여도를 분석할 필요가 있다. 그림 2 에서는 칼럼과 Z 슬라이드

드 바디, 그리고 헤드와 굽힘현상이 발생한다고 가정하고 각 편차 성분을 표로 나타내었다. 베드는 단순 선형 변형만 발생한다고 가정하였다. 칼럼의 굽힘에 의한 각도편차  $\theta_{3,2}$ 에 의해 칼럼에서 Y방향 열적편차  $-L_{3,2}\theta_{3,2}/2$ 가 발생된다<sup>(1)</sup>. 또한, 각도 편차  $\theta_{3,2}$ 는 길이  $L_{3,2}$ 에 따라 변하는 값이어서 이송축의 위치 정보도 보정에 필요함을 알 수 있으나, 통상적으로 대표되는 한 지점에서의 값을 이용하면 충분하다.

Z 슬라이드 바디 길이  $L_{5,4}$ 에 의해 공구선단점은 칼럼의 각도편차  $\theta_{3,2}$ 에 의해  $L_{5,4}\theta_{3,2}$ 만큼의 열적 편차가 발생함을 또한 알 수 있으며, 특히 슬라이드 바디의 길이가 긴 대형 기계의 경우 편차가 크게 증폭될 수 있음을 알 수 있다. 공구선단점에서의 총편차는 각 부재에서 발생하는 편차성분의 합으로 나타낼 수 있다.



Link	Mode	Y	Z
0→1	Linear	$\epsilon_{0,1}$	$\delta_{0,1}$
2→1	Linear	$\epsilon_{2,1}$	$\delta_{2,1}$
3→2	Linear Bending	$-L_{3,2}\theta_{3,2}/2$	$\delta_{3,2}$
4→3	Linear	$\epsilon_{4,3}$	$\delta_{4,3}$
5→4	Linear Bending	$\epsilon_{5,4}$	$L_{5,4}\theta_{3,2}/2 + L_{5,4}\theta_{3,2}$
6→5	Linear	$\epsilon_{6,5}$	$\delta_{6,5}$
7→6	Linear Bending	$L_{7,6}\theta_{7,6}/2 + L_{7,6}\theta_{5,4}$	$\delta_{7,6}$
7→0	Total	$\Sigma$	$\Sigma$

Fig. 2 Thermal deviation modelling of vertical machining centres

### 3. 열변위 보정

굽힘 열변위가 크게 발생하는 대형 수직형 머시닝센터를 대상으로 열변위를 시험하여 선형 성분과 비선형 성분을 분리하고 각 성분의 기여도를 분석한 결과를 그림 3에 나타내었다. 주축에 테스트 만드렐을 장착하고 Y 방향으로 높이를 달리하여 2 개의 변위센서를 설치하고 Z 방향으로 변위센서 한 개를 설치하여 각도 편차까지 측정하였다.

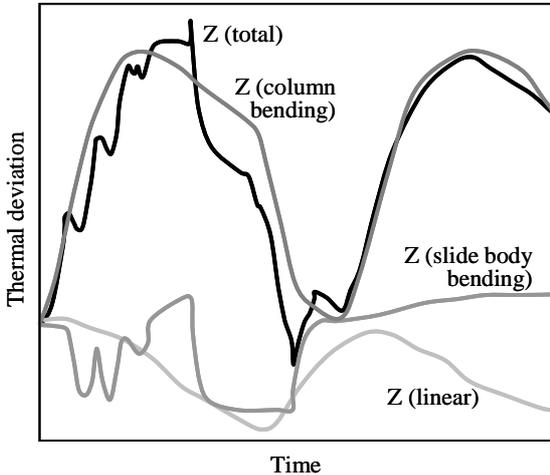


Fig. 3 Decomposition of thermal deviation

측정된 Z 방향 열적 편차를 선형과 굽힘으로 분리하기 위하여 먼저 각 부재의 평균온도 상승값을 기준으로 선형 팽창량을 추정하였다. 총 Z 방향 편차로부터 선형 성분을 제거하면 굽힘성분만 남게 된다. 굽힘 성분을 칼럼과 Z 슬라이드 바디 성분으로 분리하기 위하여 주축의 운전에 의한 열변위 측정 데이터로부터 Z 슬라이드 바디의 굽힘량을 온도 데이터로부터 추정하였다. 추정된 결과가 그림 3의 Z 방향 편차 성분 중 슬라이드 바디 굽힘 성분이다. 나머지 성분은 칼럼의 굽힘에 의한 Z 방향 열적 편차로 칼럼에 온도 편차가 크게 발생할 경우 지배적인 성분이 된다.

실제로 추정된 칼럼의 굽힘에 의한 열적편차가 발생되는지 검증하기 위하여 그림 4에 보인 바와 같이 단순한 기하학적인 관계로 공구 선단의 위치편차를 계산한 결과 유사한 크기의 편차값을 얻을 수 있었다. 각도 편차 0.02/300은 ISO 규격 허용치 최대치 수준이며 온도 변동에 의해 통상적으로 나타나는 각도 편차 수준이다. 작은 크기의 공작기계에서는 큰 영향이 없으나 대형기계의 경우 심각한 수준의 편차를 발생시킬 수 있는 값이다.

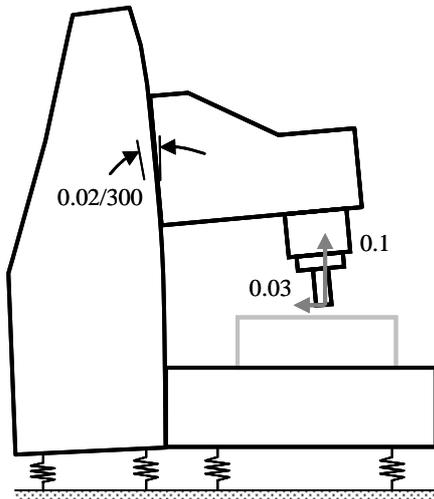


Fig. 4 Deviation in tool centre point due to column bending

상기 편차성분의 분석결과로부터 최소한 칼럼의 굽힘 영향은 보정시 고려되어야 함을 알 수 있다. 굽힘에 의한 성분을 보정하기 위하여 칼럼에는 최소 3 개의 온도센서가 필요하게 되며 하부 2 개 상부 1 개 설치하여 보정작업을 수행하였다. 일반적으로 열변위 보정을 위한 온도센서는 주요 온도변동부분의 최고 변동점 부위 혹은 열원 부근에 설치하는 것이 바람직하다<sup>(2)</sup>. 선형 팽창 성분이 지배적일 경우에는 관련 구조물에 온도 센서 한 개를 사용할 경우도 많은데 문제되는 경우는 온도 변동의 시정수와 변위 변동의 시정수가 서로 다를 경우이다. 특히 주축이 고속으로 회전하다가 정지할 경우 온도는 급격히 떨어지는 반면 변위는 천천히 원래상태로 돌아가게 된다. 온도-변위의 불일치로 인한 보정 오차는 주축의 회전수 변동이 잦을 경우 값이 커지게 된다.

칼럼의 굽힘 열변위와 기타 구조물의 선형열변위를 보정한 결과를 그림 5에 나타내었다. 총 40 시간 동안 측정된 데이터이며 이때 환경온도 변동은 10 도로 매우 가혹한 조건이었다. 또한 주축의 회전수 변동을 주기적으로 발생시켜 온도-변위 불일치에 의한 편차도 나타나게 하였다. 보정후 대부분의 열적 편차는 주축 회전수 변동에 의한 온도-변위 불일치 오차 성분임을 알 수 있다.

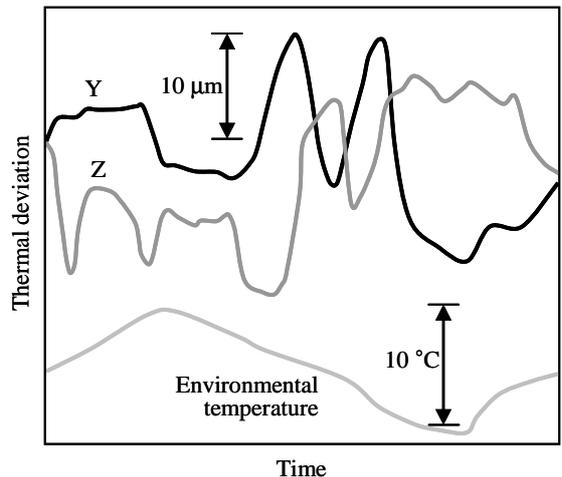


Fig. 5 Thermal deviation after compensation

### 4. 결론

구조물의 굽힘 거동이 있는 공작기계의 열변위를 단순 선형 열변위 성분과 각도변화를 발생시키는 굽힘 열변위 성분으로 분리하여 기여도를 비교하여 열변위 보정을 수행하는 방법을 제시하였으며 실험에 의해 검증을 하였다. 대형 공작기계의 경우 각도 편차에 의한 편차 증폭이 발생되므로 경우에 따라서는 굽힘 성분만 보정을 하여도 충분히 만족할 만한 수준의 정확도를 얻을 수 있게 된다.

### 참고문헌

1. 김태원, 하재용, 고태조, “고정도 열변위보정을 위한 주축대의 열적굽힘에 대한 연구,” 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 1 호, 56-64, 2002
2. Zhu, J., Robust Thermal Error Modeling and Compensation for CNC Machine Tools, PhD Thesis, Univ. of Michigan, 2008