

공작기계 칼럼 구조물의 열적 특성 및 평가척도 Rating Scale & Thermal Characteristics of Machine Tool Column

*김양진¹, 이찬홍¹

*Y. J. Kim¹, C. H. Lee¹

¹ 한국기계연구원 나노융합/생산시스템연구본부 초정밀기계시스템연구실

Key words : Machine tool column, Thermal displacement, Maximum-minimum temperature variation

1. 서론

최근의 공작기계는 초고속 주축 등의 등장으로 인해 많은 열원으로부터의 열적부하가 공작기계 구조물에 가해지고 있다. 공작기계의 주요한 열원으로는 주축, 안내면, 베어링 등이 있으며, 그 중에서도 주축으로부터의 열은 공작기계 내부를 흘러 여러 구조물이 열변형이 일어나는 원인이 되어왔다. 이러한 공작기계 내부 구조물 중에서도 칼럼 부분의 열변형은 가장 크게 문제시되어왔으며, 칼럼 부분의 열변형이 공작기계의 가공 정확도에 가장 큰 영향을 끼친다고 해도 과언이 아니다.

이와 같은 공작기계 칼럼 부분의 열변형을 제어하기 위하여 이전부터 많은 연구가 시행되어 왔었다^{1, 2}. 하지만, 지금까지의 공작기계의 열변형에 대한 대책은 체계적이라고 말할 수는 없고, 취약부분의 열변형을 계측하는 정도였으며, 공작기계 전체의 열변형의 상태를 파악하기는 상당히 어려웠다. 최근에는 유한요소법을 이용하여 공작기계 열변형에 대한 정확도가 높은 시뮬레이션이 가능해졌으며, 그 결과를 실제의 설계에도 적용할 수 있게 되었다. 이와 같은 FEM 해석 결과를 이용하여 공작기계 구조의 대칭성, 열원을 구조로부터 분리하는 방법, 재료의 개선, 발열부의 냉각 등이 이루어져 왔지만, 이러한 수단을 이용하고도 공작기계의 열변형을 완벽하게 제어할 수는 없다.

또한 FEM 해석에 의한 열변형 대책이 정강성, 동강성을 함께 고려한 리브 칼럼 구조물에서의 확장까지는 아직 이루어지지 않고 있으며, 현장의 설계자들은 현재까지의 감에 의지하여 실제로 설계를 해왔었다. 공작기계 구조물에 다용되고 있는 리브 구조물은 주로 공작기계의 중량강성비를 높이기 위해서 사용되고 있으며, 베드, 칼럼 등 기본 구조물에 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 리브 구조물에 따른 공작기계 칼럼의 열적 특성을 설정하여 비교/검토함으로써 열적으로 안정한 칼럼 리브 구조물을 도출하는 것을 목적으로 한다.

2. 공작기계 작동시간과 열적 경계조건

1 일을 단위로 공작기계의 작동시간을 고려해보면, 우선 아침 9시부터 3시간 동안 공작기계가 작동하고 있다고 볼 수 있다. 이후 1시간 동안 공작기계의 전원을 내리면, 공작기계 내부의 열원으로부터의 열적 부하가 없어지고 다시 오후 1시부터 오후 6시까지 공작기계가 작동하고 있다고 간주할 수 있다. 공작기계가 정지되어 있는 1시간 동안은 공작기계에는 주위 환경과의 대류 조건만이 유일한 열적 경계조건이 될 수 있으며, 그 외의 시간에는 주축에서 발생하는 공작기계 내부의 열적 경계조건 및 주위 환경과의 대류 조건이 열적 경계조건이 될 수 있다. 본 연구에서는 공작기계 내부의 열원으로는 주축으로부터 발생하는 열만을 고려하였으며, 그 외의 열원으로부터의 열적 경계조건은 주축으로부터의 열원에 비해서 무시할 수 있을 정도로 작다고 고려하여 본 연구에서는 배제하였다.

3. 모델의 설정 및 열적 Criteria

본 연구에서는 가장 기본적인 수직형 머시닝센터의 칼럼을 해석 대상으로 선정하였다. 수직형 머시닝센터 이외

에도 수평형 머시닝센터, Gantry Type의 머시닝센터, Portal Type의 머시닝센터 등이 있으며, 각각 다른 종류의 칼럼 구조물이 이용되고 있기 때문에 머시닝센터 전체의 칼럼으로 해석을 일반화하기 위해서는 머시닝센터의 종류별로 칼럼 구조물을 분석하는 것이 필요하다. 아래 그림에 대표적인 머시닝센터를 나타낸다.

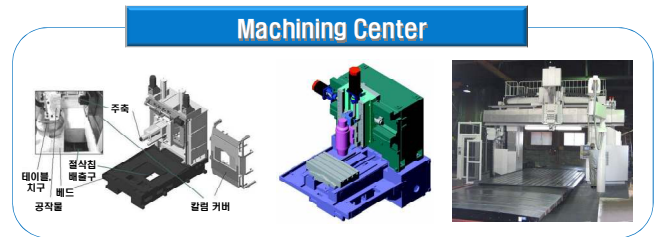


Fig. 1 Classification of machining center

본 연구에서는 해석 대상이 되는 칼럼 리브 구조물로 아래와 같은 모델을 선정하였다. 본체 칼럼 부분에 들어갈 리브의 형상으로는 정사각형, 원, 정육각형, 정팔각형의 4가지를 선택하였으며, 칼럼의 앞부분에 배치될 예정인 주축 부분에서 열적 부하가 가해지게 되며, 베드와는 볼트 결합부로 체결된다고 가정하였다.

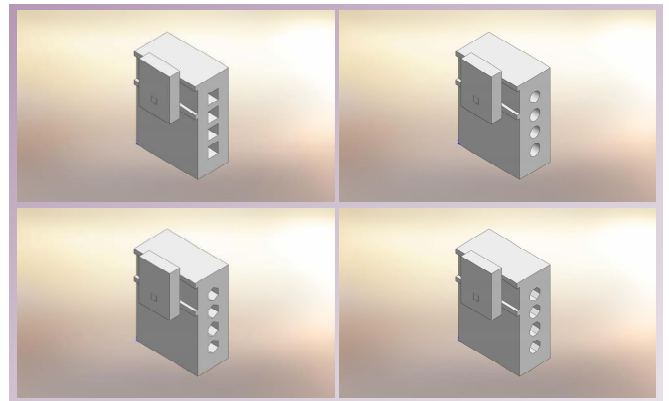


Fig. 2 Model for analysis

본 연구에서 칼럼 리브 구조물을 평가할 열적 Criteria로서 다음 4가지 항목을 설정하였다.

1. 주축 부분의 열변위
2. 주축 부분의 기울기 파악
3. 칼럼 구조물의 최대최소 온도차
4. 주축 부분의 온도 구배(Gradient)

공작기계는 일반 기계장비와는 달리 응력 설계가 아닌 강성 설계(변위 설계)를 기본으로 하기 때문에, 변위량, 그 중에서도 공작기계의 형상창성운동에 직접 참여하는 주축 부분의 열변위를 평가할 필요가 있다. 그리고 칼럼의 열변형은 주축으로부터의 열적 부하로 인해 그림 3과 같이 칼럼 구조물 전체가 앞으로 휘는 형상을 나타내고 있기 때문에 주축 부분의 기울기, 즉 휨 정도를 평가해야 한다.

온도 부분에 관해서는 구조물의 최대최소 온도차가 상대적으로 열변형의 원인이 되기 때문에 평가해야 하며, 주축 부분의 온도 구배의 파악에 의해 칼럼 구조물의 리브의 영향을 평가할 수 있기 때문에 평가 항목에 포함시켰다.

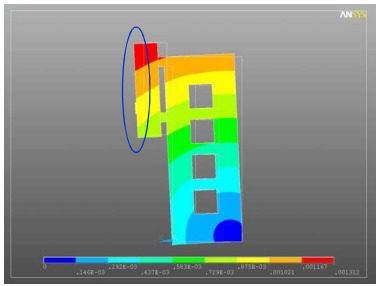


Fig. 3 Deformation of machine tool column

4. FEM 해석 및 고찰

그림 2 에서 제시한 모델을 이용하여 FEM 해석을 실행하였다. 열적인 경계조건으로는 주축 부분에 10000W/m²의 열유속을 다음 그림과 같은 시간에 따라서 가한다.

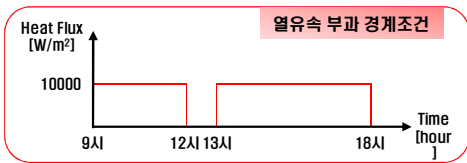


Fig. 4 Thermal Boundary Condition

구조물의 재료로는 회주철 FC250 을 설정하였으며, FC250 의 물성치는 다음 표와 같다.

Table 1 Properties of FC250

열전도율	50.4[W/(m·K)]
비열	546[J/(kg·K)]
밀도	7300[kg/m ³]
열팽창계수	11.5 X 10 ⁻⁶ [1/K]
영율	152.3[GPa]
열전달계수	20[W/(m ² ·K)]

모든 면에는 대류 조건이 부과되며, 구조해석으로 이행할 때에는 베드와 볼트 결합부로 체결되어 있다고 가정하여 칼럼 구조물의 하단 4 점 중, 주축 부분의 2 점은 베드 평면상의 변위를 구속하고, 후단의 2 점은 모든 방향의 변위를 구속하였다.

시간에 따른 칼럼 구조물(리브 구조 : 정사각형)의 온도 분포 및 주축 부분의 온도 구배를 그림 5 에 나타낸다.

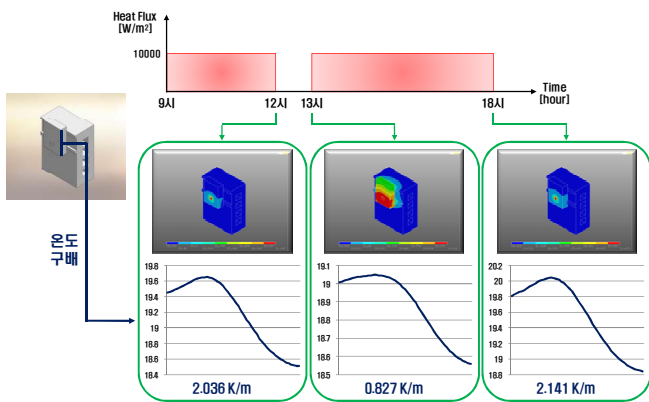


Fig. 5 Temperature and Thermal Gradient with time

그림 5 에서 알 수 있듯이 1 시간 동안의 공백 기간이 그 후의 온도 분포에 영향을 끼치고 있으며, 이는 공백 기간 동안 열이 칼럼 내부로 전달되어 그 후의 열유속 부과에 따른 온도 분포에도 영향을 끼치고 있기 때문이다. 오후 6 시에서의 구조물의 최대최소 온도차는 13.463 도였으며, 주축 부분의 온도 구배는 약 2.141 K/m 였다. 리브 구조물의 종류에 따라 최대최소 온도차 및 주축 부분에서의 온

도 구배는 큰 차이를 보이고 있지 않았다. 이는 부과된 열량이 칼럼 본체로는 전달되지 않았기 때문이며, 따라서 리브에 따른 영향을 확인할 수 없었다.

다음 그림 6 은 시간에 따른 열변위 분포 및 주축 부분에서의 휨 정도를 나타낸다

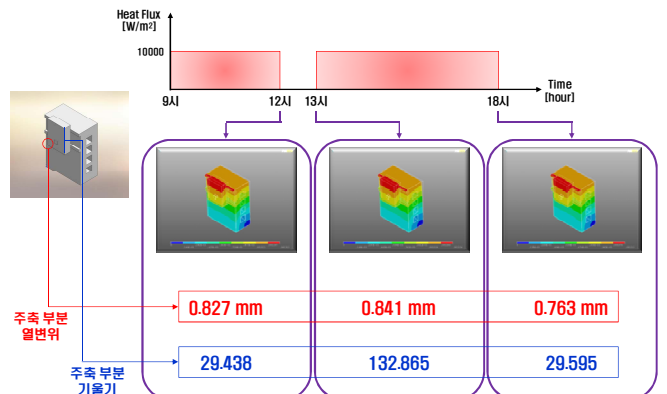


Fig. 6 Thermal displacement and deformation with time

그림 6 에서 알 수 있듯이, 열부하 시간과 함께 주축 부분에서의 열변위는 안정되어 가고 있다는 것을 알 수 있었다. 주축 부분의 기울기는 공백 기간을 거치는 동안 크게 증가함을 알 수 있었으나, 다시 열원이 부하됨에 따라 안정되어감을 알 수 있었다.

주축 부분의 열변위에 관해서는 리브 구조물에 따라 큰 차이가 보여졌다. 이는 열이 리브 구조물이 존재하는 칼럼 본체에까지 전달되지 않아도, 구석 경계조건에 따른 열변형을 해석할 때에 리브 구조물이 영향을 끼치고 있기 때문이다. 다음 그림 7 에 리브 구조물에 따른 열적 평가 항목을 DB 화한 것을 나타낸다.

Column		정사각형	원	정육각형	정팔각형
열변위	주축	0.763	0.554	0.284	0.513
	기울기	29.595	28.383	26.538	28.249
온도	온도차	13.463	13.438	13.429	13.670
	구배	2.141	2.145	2.141	2.730

Fig. 7 DB of thermal characteristics

5. 결론

1. 공작기계 칼럼 리브 구조물을 평가할 수 있는 4 가지 항목을 제시하였으며, 평가 항목을 적용할 수 있는 모델을 선정하였다.
2. 4 가지 평가 항목을 중심으로 칼럼 리브 구조물을 평가하였으며, 항목 중에서 가장 중요한 항목인 주축 부분의 열변위가 리브 구조물에 따라 크게 다르다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Nobuhiko Nishiwaki, Sankei Hori, Masaomi Tsutsumi, Masanori Kunieda, "Thermal Deformation of Machine Tools Caused by Temperature Variations in Machine Shops," The Japan Society of Mechanical Engineers, **53**, 2408~2413, 1987.(in Japanese)
2. Keiji Okushima, Yoshiaki Kakino, Hirotsugu Sawai, Toshihiko Kikuchi, "Thermal Deformation of Machine Tools (1st Report): Thermal Deformation of Column in Steady-state," The Japan Society for Precision Engineering, **38**, 283~288, 1972.(in Japanese)