

CNC선반의 열적 거동 해석 (Thermal Behavior Analysis of a CNC Lathe)

안 경기(포항공과대학교 기계공학과 대학원), 조 동우*(포항공과대학교 기계공학과)

K.G.Ahn, D.W.Cho*(POSTECH)

Abstract : In operating automated manufacturing systems, the long term stability and reliability of NC machine tools become most critical issues. Especially the machining accuracy is dominated by the thermal deformation of machine tools which remains still unsolved and causes troubles in manufacturing operations. Although researches have been carried out on the thermal behavior of a machine tools to minimize or control the thermal deformation of machine tools, the computer models for an analysis of the thermal behavior in machine tools has yet to appear in the open literature. The object of the paper is to present a method of modeling the thermal behavior of a machine tool. The method will make use of finite elements and be capable of modeling whole machine structures as well as of heat generation processes in the kinematic system components. And temperature distributions and thermal deformations of a CNC lathe are analyzed using the finite element method and are compared with those measured in practice.

Keywords : Machine Tool(공작기계), Heat(열), Temperature Distribution(온도 분포), Thermal Deformation(열변형), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

장시간 무인운전 되는 공작기계 발열부의 온도 상승에 따른 공작기계의 정밀도의 변화는 가공 부품의 최종 품질을 좌우하게 된다. 또한 이와 같은 열변形에 의한 오차는 전체 형상 오차의 25% - 70% 까지를 차지하고 있어 그 중요성을 더하고 있다.

공작기계의 열적 거동에 영향을 미치는 열원은 일반적으로 크게 내부 열원과 외부 열원, 두 부분으로 나눌 수 있다. 내부 열원은 공작기계 안에 있는 것으로 설계자의 판단에 따라 정하여 지게 되고, 장소를 이동하더라도 그 위치가 바뀌지 않는다. 외부 열원은 공작기계의 설계에 무관하게 존재하며, 보통 공작기계가 놓여지는 장소에 따라 달라진다. 내부 열원은 다시 세부 항목으로 나뉘어 질 수 있는데, 그 예로서는 주축, 주축 동력 전달계, 유압 시스템, 윤활 시스템, 안내면, 리드스크류, 전기모터, 전기동력 배분 시스템, 절삭 공정, 냉각 시스템 등이 있다. 이러한 열원들은 항상 직, 간접적으로 공작기계의 여러 구조물들과 열적교환을 한다. 특히, 주축과 이에 관련된 구동 시스템들은 열적 거동에 의한 오차에 대해 영향을 많이 받는다. 주축 시스템의 열원은 주축 베어링, 기어, 기어 축의 베어링, 클리치와 브레이크 등이다.

발열에 의한 공작기계의 정밀도의 변화는 예측 가능하다는 특성에 의해 공작기계의 설계 단계에서부터 열적 안정성을 예측하고 이에 따른 최적 설계를 위한 데이터를 찾는 것이 가능하다. 즉, 열적 대칭 설계, 발열유니트의 적절한 배

치, 발열유니트에 대한 적절한 온도 상승 억제기법 또는 구조물의 재질 변경 등으로 발열을 효과적으로 차단 또는 방열하고 열적 거동을 상쇄시키는 설계 안을 도출하는 것이 가능하다.

Okushima^{1,2}는 정상상태에서의 공작기계의 칼립부의 열변형을 유한요소법을 이용하여 해석하였고, 이를 확대시켜서 비정상 상태에서의 공작기계의 내부 열원들에 의한 온도 분포와 열변형의 해석을 수행하였다. G.Spur³는 공작기계의 열적 거동을 해석하는데 있어서 중요한 요소인 대류열전달 계수를 구하는 방법을 소개하였고, Moriwaki⁴는 주변 온도의 변화에 따른 공작기계의 온도 분포와 열변형을 역시 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

이러한 기존의 연구 결과들을 바탕으로 하여 본 논문에서는 공작기계 구조 전체의 온도 분포와 이에 의한 공작기계의 열적 거동을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 특히, 오늘날 대부분의 공작기계에 적용되어지고 있는 공작기계의 가공부를 덮고 있는 커버를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우로 나누어 해석함으로써 이의 유무에 따른 차이를 보였고, 실제 실험을 통하여 공작기계의 가공부를 덮고 있는 커버를 고려하지 않은 경우보다 고려한 경우의 해석 결과가 더 실제 실험 결과와 근접한 값을 갖는다는 것을 보여 주었다. 그리고 해석 대상인 공작기계의 열적 거동을 해석하기 위한 모델링과 그 해석은 IDEAS의 Pre-Processor와 FEM Package인 ABAQUS의 Solver를 사용하였다.

2. 공작기계의 온도 분포 및 열변형 해석

2.1 공작기계의 열적 거동 모델링

공작기계의 열적 거동을 유한요소법으로 해석하기 위한 열전달과 열변형에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

열전달 방정식

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = (kT_{,i})_{,i} + f \quad \text{in } \Omega$$

경계 조건

$$T = T(x_i, t) \quad \text{on } \partial\Omega_e$$

$$kT_{,i} \cdot n_i = q - h(T - T_o) \quad \text{on } \partial\Omega_h$$

초기 조건

$$T(x_i, 0) = T_0(X_i)$$

ρ : 밀도

c : 비열

f : 소산된 에너지

n_i : 단위 법선 벡터

T_o : 대기 온도

h : 대류 열전달 계수

k : 열전도도

q : 열유속

열변형 방정식

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad \text{in } \Omega$$

경계 조건

$$u_i = u_i \quad \text{on } \partial\Omega_{u_i}$$

$$\sigma_{ij} n_j = h_i \quad \text{on } \partial\Omega_{h_i}$$

σ_{ij} : 응력 텐서

u_i : 단위 벡터

f_i : 단위 체적당 주어진 물체력

공작기계는 극히 복잡한 구조물로 이루어져 있으므로 유한요소법을 사용하여 해석을 할 경우 세부적인 사항까지 고려한 상세 모델링을 하는 것은 곤란하다. 특히, 공작기계 특유의 리브를 포함하고 있는 구조를 모델링하는 경우에는 리브부분은 모델링을 단순화하기 위해서 생략하는 경우가 많다.

먼저 유한요소법으로 공작기계를 해석하기 위해서 공작기계의 구조를 단순화 하는 방법으로 공작기계를 이루는 모든 구조물을 솔리드 타입으로 가정하였고, 각 구조물의 형

태는 육면체 구조로 단순화 하였으며 이러한 변화에 따른 차수 차이는 없어진 부분과 새로 생겨난 부분의 평균값으로 보정하였다. 요소의 형태는 3차원의 육면체를 사용하였고, 절점수는 8개로 육면체의 각 꼭지점에 하나의 절점이 존재하는 형태를 택하였다. 또한 대부분의 NC공작기계에서 볼 수 있는 가공부를 덮고 있는 커버의 유무에 따른 공작기계의 열적 거동을 알아보기 위하여 커버가 없는 구조와 커버가 있는 구조로 각각 모델링하여 해석하였다. 그리고 공작기계의 열적 거동을 유한요소법으로 해석하기 위하여 구성한, 모델의 기하학적인 형상은 커버가 없는 경우와 커버가 있는 경우로 나누어 각각 Fig.1의 (a)와 (b)에서와 같이 나타내어진다. 또한 유한요소법으로 모델링을 할 때, 커버가 없는 모델에 사용된 요소와 절점수는 각각 761, 1358이고, 커버가 있는 모델에 사용된 요소와 절점수는 각각 781, 1442이다.

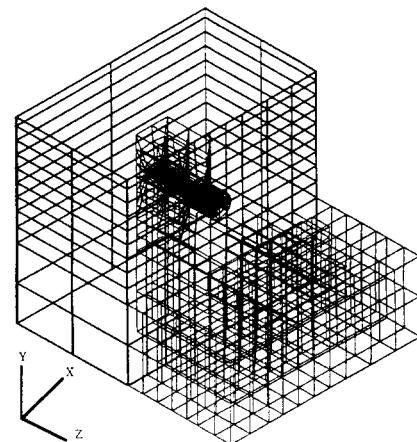


Fig.1 Model for FEM analysis (a)without cover

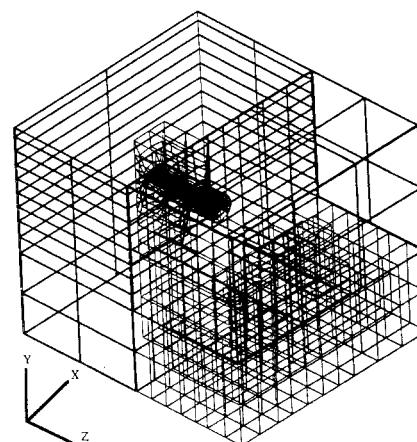


Fig.1 Model for FEM analysis (b)with cover

물체를 해석하는데 있어서 필요한 물체의 열적환경조건들을 수치 해법으로 푸는 것은 가능하다. 그러나 문제가 되는 것은 이들 경계 조건을 얼마나 정확하게 파악하느냐 하는 것이다. 본 해석에서는 비교적 영향이 적은 열 방사를 제외한 나머지 조건을 가지고 경계 조건을 설정하였다.

온도 지정의 경계 조건은 온도를 측정할 필요가 있지만 이제까지의 측정 기술로는 그 한계가 있다. 대류열전달계수는 오래 전부터 연구되어져 왔고, 다양한 경우에 대하여 이에 대한 산출식은 어느정도 구해져 있다. 대류열전달계수는 경계면 근처의 유체의 상태에 크게 좌우되므로 물체의 형상, 주위의 환경에 따라 고려되어질 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 주어진 값들을 근거로 하여 평균 등가의 값을 취하였다.

한편, 해석에 있어서의 가정 및 조건은 다음과 같다.

- ① 모델은 굽일한 재질로 구성되어 있고, 그물성치는 주철의 물성치와 같으며 각 물성치는 온도 의존성이 일정하다. 주철의 물성치는 다음과 같다.

$$\text{영율}(E) = 102\text{GPa}$$

$$\text{포아송 비}(\nu) = 0.27$$

$$\text{열전도}(k) = 46\text{W/mK}$$

$$\text{열 확장계수} = 1.17\text{E}-5\text{K}^{-1}$$

$$\text{비열}(c) = 420\text{J/kgK}$$

$$\text{밀도}(\rho) = 7272\text{kg/m}^3$$

- ② 대류열전달계수의 평균 등가의 값은 $21\text{W/m}^2\text{K}$ 이다.
- ③ 열변형 해석에서, 공작기계의 밀면을 구성하고 있는 절점들의 Y축 방향으로의 변위는 없다.
- ④ 모든 절점의 초기 온도는 27°C 로 가정한다.
- ⑤ 기계 가공은 하지 않는 것으로 가정한다. 따라서 이에 따른 발열은 없다.
- ⑥ X축과 Z축의 안내면은 마찰에 의하여 열이 발생한다.
- ⑦ 모델 뒷쪽의 박스 구조에 들어 있는 모터들에 의한 발열은 박스의 안쪽면으로부터의 열 유속으로 대치한다.
- ⑧ 스핀들 베어링부의 발열은 시간에 따른 일정한 양의 열 유속으로 대치한다.
- ⑨ X축 안내면 구동 모터에 의한 발열은 그 모터와 접한 면에 속한 절점들로부터의 열 유속으로 대치한다.
- ⑩ 공작기계 본체와 떨어져 있는 유압 모터에 의한 발열은 그 영향을 고려하지 않는다.

2.2 유한요소법에 의한 해석

2.2.1 온도 해석

Fig.2에서는 10시간 동안 공작기계를 작동시킨 후 구해지는 공작기계의 온도 분포를 커버가 없는 경우와 있는 경우에 대하여 나타내었다. 그림에서 보여지듯이 스핀들 부분과 X축 모터가 있는 부분, 그리고 뒷쪽의 박스 부분의 칼럼구조의 온도가 많이 올라간다. 한편 시간에 따른 온도의 변화를 실험적으로 구한 온도 변화와 비교하기 위해서 절점의 위치가 스핀들에서 120mm 정도 떨어진 세 곳의 절점 즉, N1794, N1894, N1910에서의 온도 변화와 Z축 안내면의 끝 부분의 두 절점, N492, N557에서의 시간에 따른 온도 분포를 구하였다.

이들은 각각 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다.

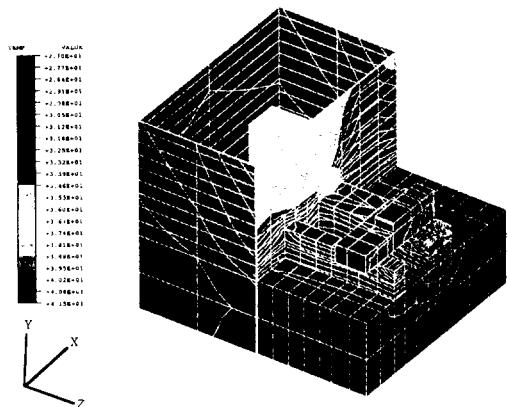


Fig.2 Contour of temperature distribution (a)without cover

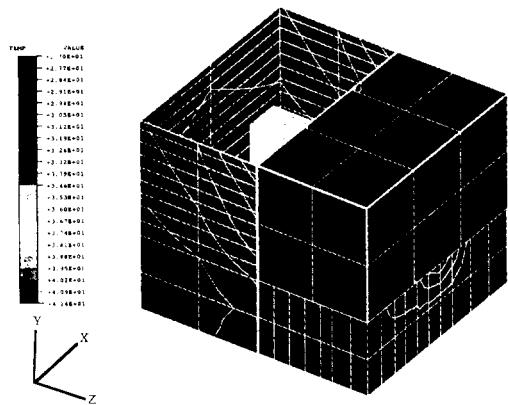


Fig.2 Contour of temperature distribution (b)with cover

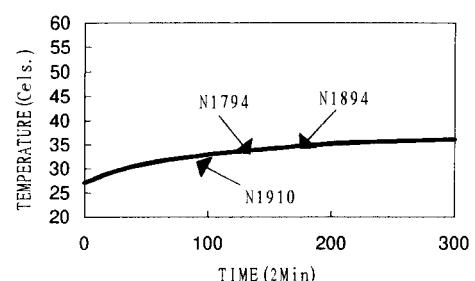


Fig.3 Temperature profile using FEM (Column) (a)without cover

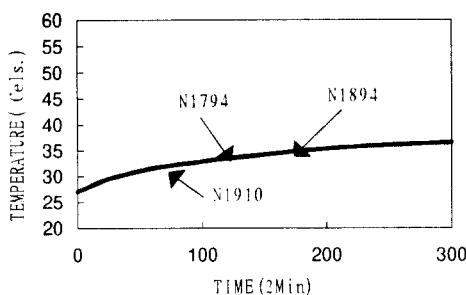


Fig.3 (b)with cover

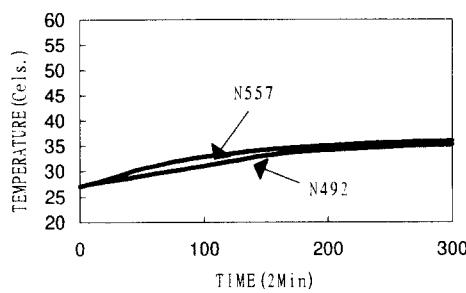


Fig.4 Temperature profile using FEM (ZGuide) (a)without cover

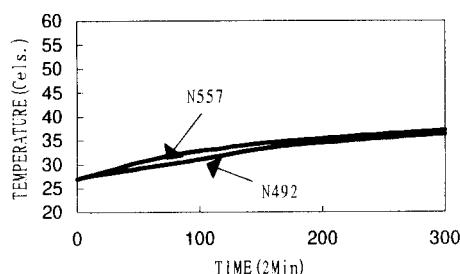


Fig.4 (b)with cover

2.2.2 열변형 해석

공작기계 가동 시 열변형에 의한 위치 오차를 알아보기 위해 공작기계의 스픈들 끝부분의 열변형량을 커버를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대하여 구해 보면 10시간 동안 가동 후의 공작기계의 열변형량은 X,Y,Z축에 대하여 각각 $2.2155 \mu\text{m}$, $3.6359 \mu\text{m}$, $-0.1489 \mu\text{m}$ 와 $2.267 \mu\text{m}$, $3.7694 \mu\text{m}$, $-0.1552 \mu\text{m}$ 가 된다. 이것은 기계 가공을 하지 않은 상태라는 것을 고려해 볼 때 기계가 공시에는 훨씬 더 많은 열변형이 일어날 것이고, 또한 스픈들이 달려 있는 칼럼 부의 기하학적 구조와 강성이 열변형에 의한 가공 오차에 상당한 영향을 끼치리라는 것을 미루어 알 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험 장치 및 방법

실험은 기계 가공을 하지 않고, 스픈들 회전과 Z축의 이송만을 행한 조건에서의 공작기계의 열적 거동을 해석하였고, 이 때의 스픈들 속도와 이송 속도는 각각 1750rpm과 2000mm/min로 설정하였다.

Fig.5에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 그림에서와 같이 해석 대상인 공작기계의 24곳에 열전대를 부착하고, 1, 2분 간격으로 24곳의 온도를 10시간 동안 측정하였다. 공작기계의 표면에서 측정되어진 온도는 열전대를 따라 온도측정시스템에서 온도가 보정되어진 다음 그 온도 값이 RS232C를 통하여 바로 PC로 저장되어진다. 이와 같은 일련의 작업들이 온도를 측정하면서 동시에 이루어진다. 다음 표 3.1에서는 실험에 사용되어진 공작기계와 실험 장치의 사양을 표시하였다.

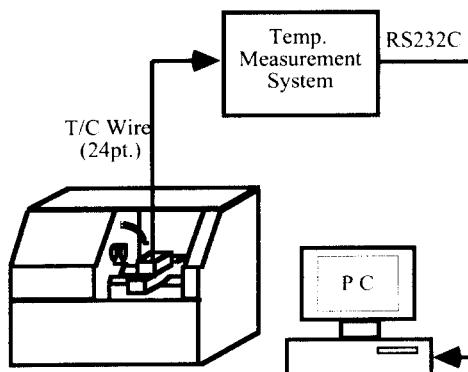


Fig.5 Schematic of the System

Table 3.1 실험 장치의 사양

공작기계	TONG IL CNC TEPS TNL-20 2-Axis Lathe(X,Z Axis)
Computer	IBM 486 33MHz
T/C Wire	T-type Teflon Insulation Dia : 0.25mm
Temp. Measurement System	TempScan/1000 I.O Tech 32ch.

3.2 실험 결과 및 고찰

Fig.6에서 Fig.11 까지는 총 24개의 측정점 중에서 X

Guide 6, Column 5, Column 6을 제외한 21개의 측정점에서의 시간에 따른 온도 변화를 나타내었다.

먼저 Fig.6은 공작기계의 가공부를 덮고 있는 커버의 안쪽 공기의 온도와 바깥쪽의 대기 온도를 나타내었다. 그림에서 보여지듯이 안쪽 공기의 온도는 점진적으로 증가하는 반면, 바깥쪽 공기 온도는 초기에는 안쪽 공기 온도보다 높았지만 시간이 갈수록 오히려 안쪽 공기 온도보다 낮아진다. 이는 공작기계 내부의 발열과 공작기계 바깥쪽인 실험실의 에어컨디셔너의 작동에 기인한 것으로 안쪽의 온도는 대류 열전달과 열 유속에 의해서 계속하여 온도가 상승한다.

Fig.7은 공작기계의 각 모터에서의 온도 변화를 나타내었다. 그림에서 공작기계 바깥쪽에 위치한 Spindle Motor에서의 온도 증가량은 공작기계 안쪽에 위치한 Z Guide Motor와 X Guide Motor에서의 온도 증가량보다 상대적으로 적음이 알 수 있다.

Fig.8에서는 Spindle Unit과 Z Guide Bearing Side, Spindle Bearing Side에서의 시간에 따른 온도 변화를 보여 주고 있다. Spindle Unit은 Spindle Motor와 벨트로 연결되어 있고, 10시간 경과 후에는 온도가 53°C 이상이 된다. 서로 인접한 위치에 있는 Spindle Bearing Side와 Z Guide Bearing Side의 온도 변화는 서로 비슷한 경향성을 보여 준다. Fig.9는 공작기계의 뒷쪽에 위치하고 있는 박스 부분의 칼럼구조에서 앞면의 온도 분포를 나타내었다.

Fig.10과 Fig.11에서는 각각 Z Guide와 X Guide에서의 시간에 따른 온도 변화를 나타내고 있다. 특히, Fig.11에서 X guide 5의 온도가 다른 곳에서 보다 높은 이유는 X Guide 5의 위치가 X Guide Motor 바로 옆에 위치하고 있기 때문이다.

한편, 앞에서 유한요소법으로 몇 개의 절점에서 구한 시간에 따른 온도 변화를 Fig.3과 Fig.4에 대하여 구하였었는데 이에 대응하는 위치에서 실험적으로 시간에 따른 온도 변화를 구한 그림이 각각 Fig.9와 Fig.10이다. 이들 그림을 비교해 봄으로써 본 연구에서의 열적 거동에 대한 유한요소법 해석의 타당성을 알아볼 수 있다. 먼저, Fig.3과 Fig.9를 비교해 보면 전반 4시간 동안에는 실험치가 해석치 보다 초기의 기울기가 약간 높아 약 1°C 정도의 오차가 발생하지만 전체적인 온도 변화의 경향성은 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 그리고 특히, 5시간 이후부터는 실현값인 Fig.9의 기울기는 거의 일정한 것에 비하여 Fig.3 (a)에서의 해석 값은 기울기가 점차 감소하고 있다. 이는 공작기계의 가공부를 덮고 있는 커버가 존재함으로써 커버 안쪽의 열원에 의해 생성되어진 열량이 커버 밖으로 모두 전달되어지지 못하기 때문이다. 한편 공작기계 가공부의 커버를 고려하여 해석한 결과인 Fig.3 (b)는 5시간 이후부터의 온도 증가율이 실제 실험값과 보다 더 유사하다. 그리고 Fig.4와 Fig.10의 비교에서도 실험값과 해석 값은 1°C 정도의 오차를 보여 주고 있다. 여기에서도 앞의 경우에서와 같이 유한요소법을 사용하여 해석을 하기 위한 모델링에서 공작기계의 커버 내에서의 열보존에 의한 영향을 고려하여 모델링한 Fig.4 (b)의 결과가 더 실제 값에 가깝다.

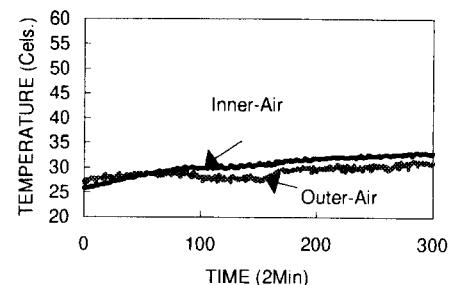


Fig.6 Temperature profile in experiment (Air)

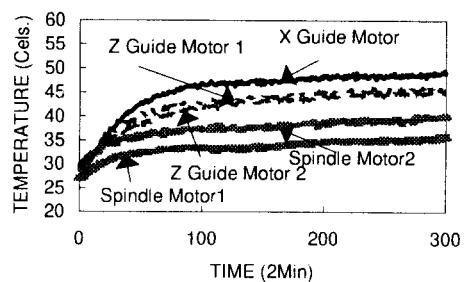


Fig.7 Temperature profile in experiment (Motor)

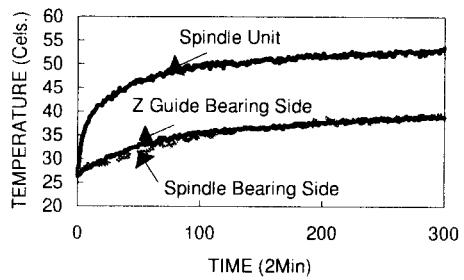


Fig.8 Temperature profile in experiment (Etc.)

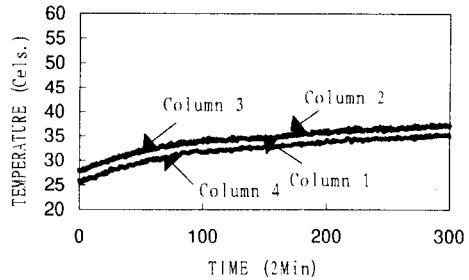


Fig.9 Temperature profile in experiment (Column)

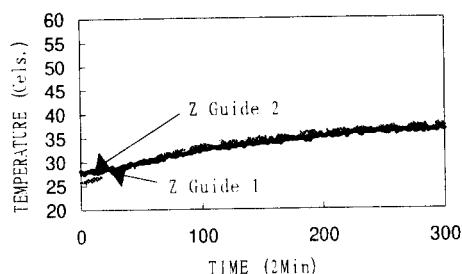


Fig.10 Temperature profile in experiment (Z Guide)

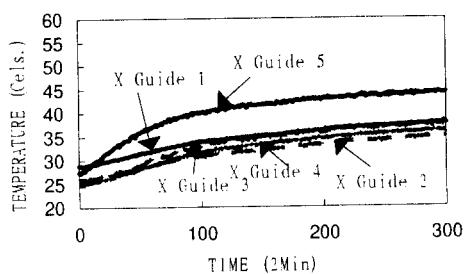


Fig.11 Temperature profile in experiment (X Guide)

4. 결론

본 연구에서는 실제 현장에서 사용하고 있는 공작기계를 대상으로 하여 열원에 의한 공작기계 구조물의 온도 변화와 이에 따른 구조물의 열변형 해석을 수행하였다. 이제까지의 연구 결과를 정리해 보면 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있다.

- 유한요소법에 의한 공작기계의 열적거동해석은 타당성 있는 정밀도를 가지고 행하여질 수 있다.
- 유한요소법에 의한 공작기계의 열적거동해석에 있어서 단순화한 모델의 사용은 약간의 보정을 함으로써 해석에 있어서 충분한 정밀도를 유지하면서도 계산을 용이하게 해 준다.
- 유한요소법에 의한 공작기계의 열적거동해석에 있어서 경계조건 설정은 상당히 중요하며, 이를 설정하기 위한 보다 정확한 방법과 보정수법의 개발이 요구되어진다.
- 대부분의 NC공작기계에 적용되어 있는 커버를 고려하여 해석함으로써 보다 실제 값과 유사한 결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

1. Keiji Okushima, Yoshiaki Kakino, Toshihiko Kikuchi, "Study on the Thermal Deformations of Machine Tools", 精密機械, 39卷 2號, 1973, pp.100 - 106.
2. K.Okushima, Y.Kakino, "Compensation of Thermal Displacement by Coordinate System Correction", Annals of the CIRP, Vol.24, 1975, pp.327 - 331.7.
3. G.Spur, E.Hoffmann, Z.Paluncic, K.Benzinger, H.Nymoen, "Thermal Behaviour Optimization of Machine Tools", Annals of the CIRP, Vol.37, 1988, pp.401 - 405.
4. J.Bryan, "International Status of Thermal Error Research", Annals of the CIRP, Vol.39, 1990, pp.645 - 656.
5. Method for Thermal Deformation Corrections of CMMs", Vol.39, 1990, pp.557 - 560.
6. Toshimichi Moriawaki, Chengeh Zhao and Motonobu Nishiuchi, "Thermal Deformation of Machining Center due to Temperature Change in the Environment", 日本機械學會論文集(C編), 57卷539號, 1991, pp.2447 - 2452.