

리브 구조에 따른 머시닝센터 베드의 열적 특성 평가

김양진*

(논문접수일 2010. 10. 22, 심사완료일 2010. 11. 25)

Thermal Characteristic Estimation of NC Machining Center Bed following Rib Structure

Yangjin Kim*

Abstract

Rib structure has been used to bed and column of machine tool to heighten weight stiffness ratio, cost performance and weight saving.

In this paper the bed rib structure was estimated with thermal characteristics. Using superposition principle, machine tool designer can describe every complicated heat generation in the machine tool thermal source. As thermal characteristics, thermal deformation of guide rail and column and Maximum-minimum temperature variation were selected. The size, configuration and direction against the thermal loading surface operated to the thermal characteristics. The DB chart was made following rib structure estimating thermal characteristics. With superposition principle and DB chart, machine tool designer can prognosticate the thermal characteristics without FEM analysis to every bed rib structure.

Key Words : Machine tool(공작기계), Ribbed structure(리브 구조), Maximum-minimum temperature variation(최대최소 온도차), Thermal displacement(열변위)

1. 서론

최신의 공작기계에는 초고속 주축의 등장으로 인해 많은 열원으로부터의 열적 경계조건이 베드와 칼럼 등의 주요 구

조 본체에 가해지고 있다. 따라서 베드와 칼럼은 정/동적으로 뿐만이 아니라 열적으로도 안정된 구조를 가지고 있어야만 한다.

공작기계의 가공 정확도 저하의 원인으로 이와 같은 열적

* 한국기계연구원 초정밀기계시스템연구실 (yangjin@kimm.re.kr)
주소: 305-343 대전광역시 유성구 장동 171

불안정으로부터 파생하는 열변형을 생각할 수 있다. 이와 같은 공작기계 열변형의 방지를 위해서 예로부터 많은 연구가 수행되어 왔으나⁽¹⁻²⁾, 현재에도 공작기계 열변형 예측에는 모든 모델에 유한요소해석을 적용하여 예측하는 정도의 방법이 적용되고 있을 뿐이다.

이와 함께 공작기계의 베드, 칼럼에는 리브 구조물이 사용되고 있다. 공작기계의 중량 중에서 가장 큰 비율을 차지하는 베드와 칼럼에 리브 구조물이 사용되고 있는 이유로는 베드와 칼럼의 경량화, 환경 친화성, 제작 가격 저렴성 등이 가장 쉽게 실현될 수 있는 구조물이기 때문이다. 그리고 무엇보다도 공작기계에 요구되고 있는 중량 강성비를 크게 하기 위해서 베드와 칼럼에 리브 구조물이 사용되고 있다. 따라서 이와 같은 리브 구조물이 사용되고 있는 베드와 칼럼의 정적/동적/열적인 특성을 해석하고 평가하는 연구는 공작기계의 가공 정확도를 향상시키기 위해서 반드시 필요한 연구라고 할 수 있다.

지금까지 베드, 혹은 칼럼의 설계에 있어서 리브의 사용은 설계자의 감에 의지하는 경향이 매우 컸다. 따라서 이와 같은 다양한 리브 구조물을 가지고 있는 베드 구조물을 설계함에 있어서 열적으로 안정된 패턴을 가지고 있는 리브 구조물의 열적 특성을 DB화하여 실제 공작기계 설계자들에게 제공할 필요가 있다. 리브 구조에 따른 열적 특성을 DB화함으로써 실제 공작기계 설계자들이 설계함에 있어서 모든 모델을 FEM 해석을 하지 않아도 리브 구조에 따른 베드의 열적 특성을 예측할 수 있다.

리브 구조물이 이용된 베드 구조물의 정적 해석 및 평가는 1950년대 후반, 독일의 Loewenfeld에 의해서 보고되었고, 베드 구조물의 리브 배치의 효과를 알아볼 수 있도록 DB화되어 있다⁽³⁾.

본 연구에서는 다양한 베드 리브 모델과 리브 모델을 평가하기 위한 열적 특성을 설정하여 리브 모델에 따라서 어떠한 열적 성향을 나타내는지를 DB화하는 것을 목적으로 한다. 이와 함께 다양한 열적 특성 중에서도 열변위에 초점을 맞추어서 FEM 해석을 거치지 않아도 다양한 리브 모델에 대해서 열변위 거동을 예측하는 것을 목적으로 한다.

2. 정위치 열원의 발열량과 중첩의 원리

공작기계의 경우, 내부 열원으로서의 주축 베어링, 주축 모터, 직선 이송 기구 모터, 볼스크류등이 있으며, 그 위치도 알려진 것이 대부분이다. 이러한 경우에는 열변형을 평가할 때 그 발열량을 추정하는 것이 매우 중요하다.

공작기계와 같이 그 구조가 매우 복잡해질 때에는 구조 내부의 열원에서 발열이 발생하여도 열원 주변의 온도는 상승하지만, 공작기계의 열변형에 영향을 끼치는 구조 부분의 온도가 상승할 때까지는 시간이 걸리는 경우가 많다. 즉, 공작기계 구조에 유입한 열이 짧은 시간에 가공 정확도에 영향을 끼치는 열변형으로 이어지는 것이 아니라 열원으로부터 열이 주위에 확산해서 가공 정확도에 영향을 끼치는 열변형이 나타나는 것이 일반적이다. 그리고 열원으로부터의 열이 주위에 확산하면 열원 부근의 온도 상승보다는 주위 구조의 온도 상승이 작아지기 때문에 결과적으로 열이 주위에 퍼지기 힘들게 되며, 유입 열량의 영향이 장시간 남게 된다.

공작기계 열원에 있어서의 기본적인 발열 거동으로는 Fig. 1과 같은 펄스 형태의 발열 거동이 있다. Fig. 1과 같이 발열

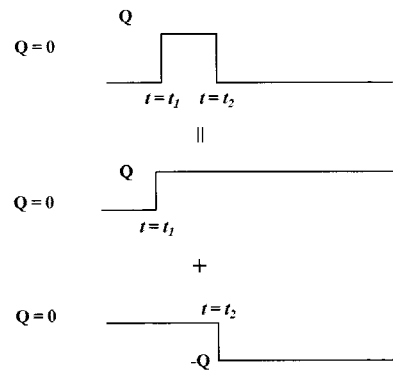


Fig. 1 Pulse heat generation

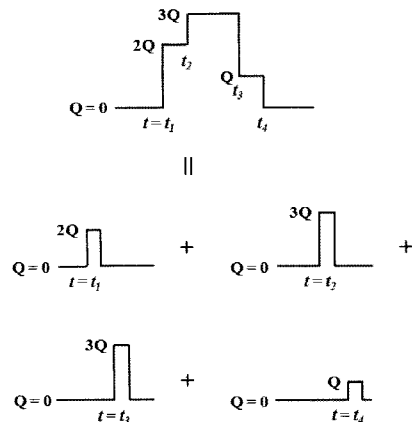


Fig. 2 Superposition Principle

량이 $+Q$ 이며 펄스폭이 Dt 의 펄스 형태의 발열은 발열량이 $+Q$ 인 스텝상의 발열과 Dt 시간 후의 발열량이 $-Q$ 인 스텝상의 발열을 중첩하는 것과 동일하다고 생각할 수 있다. 즉, 동작기계의 경우에는 주축의 회전수에 따라서 발열량이 스텝상으로 변화한다고 가정할 수 있을 때에는 스텝상의 발열을 실험적으로 구할 수 있으며, 이를 펄스 형태로 표현할 수 있다. 또한, Fig. 2와 같은 발열 거동의 경우에도 펄스 형태의 발열로 분해해서 생각할 수 있다. 변동이 큰 경우에도 시간 스텝을 세밀하게 분할하여 스텝상의 발열 거동으로 근사시킬 수 있다.

위에서 논한 중첩의 원리를 이용함으로써 동작기계에 가해지는 열량에 대해서 개별로 FEM 해석을 실행하지 않아도 단 시간 동안 열량(열유속)을 가하는 FEM 해석을 실행함으로써 복잡한 형태의 열원에 대한 온도 분포 역시 예측할 수 있게 된다.

3. 중첩의 원리의 검증

중첩의 원리는 본 연구에 있어서 실제 동작기계 설계자들이 유한요소해석을 하지 않아도 리브 구조물의 열적 특성을 예측하는 데 있어서 가장 기본이 되는 전제가 된다. 따라서 본 절에서는 2절에서 논한 중첩의 원리를 증명한다.

중첩의 원리를 증명하기 위해서 Fig. 3과 같은 베드 모델을 사용하였다. Fig. 3의 베드 모델은 $2.1m \times 1.5m \times 0.3m$ 의 치수를 지닌 베드 리브 모델이며, 재료로는 회주철 FC250을 사용하였다. 회주철 FC250의 물성치를 Table 1에 나타낸다.

Fig. 3과 같이 모델의 옆면에 작은 면을 설정하여 Fig. 4의 (a), (b)와 같은 열적 경계 조건을 부과하여 반대 측면에서 온도 분포를 측정하였다. (a)의 경계조건은 4종류의 열유속을 모두 부과한 후에 반대 측면에서의 온도를 측정하는 것이며, (b)의 경계조건은 각각의 열유속을 부과한 후 반대 측면 온도를 측정하여 합하는 것이다.

Fig. 5에 열적 경계 조건 (a)와 (b)에 따른 온도 분포를 나타낸다. 2가지 열적 경계 조건으로부터 얻은 온도 분포간의 표준 편차를 계산하면 2.25×10^{-4} 이었다. 표준 편차의 값이 충분히 작다고 판단하여, 중첩의 원리가 성립됨을 최종적으로 확인할 수 있었다.

4. 열적 특성 평가 항목

본 연구에서는 가장 기본적인 머시닝센터의 베드의 리브를 해석 대상으로 선정하였다. Fig. 6과 같이 베드의 아랫면에

리브가 설치되어 있다고 가정하고 윗면에 직선 이송 기구인 가이드 레일과 가이드 레일을 구동하는 모터를 설치하였다.

본 연구에서는 리브를 평가하기 위한 열적 특성을 다음과 같이 설정하였다.

1. 레일 부분의 열변위
2. 칼럼 부분의 열변위

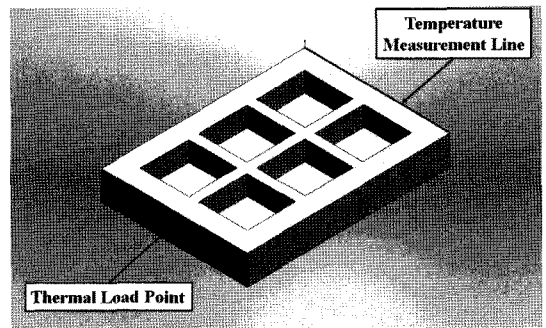
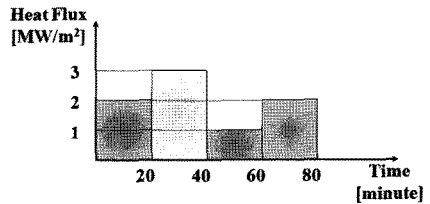


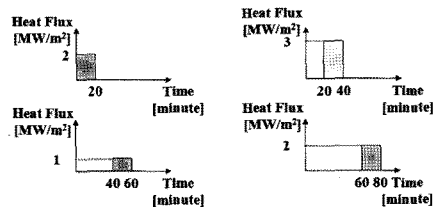
Fig. 3 Model for confirmation of superposition principle

Table 1 Properties of FC250

Density	7300 kg/m ³
Coefficient of Thermal Conductivity	50.4 W/m-K
Specific Heat	546 J/kg-K



(a) Thermal boundary condition



(b) Thermal boundary condition

Fig. 4 Thermal boundary condition

3. 구조물의 최대최소 온도차

공작기계란 변위를 기준으로 하는 강성 설계를 바탕으로 실제 설계가 이루어지기 때문에, 여러 열적

특성 가운데에서도 변형과 관계되는 열변위의 선정이 가장 중요하다고 할 수 있다.

그 중에서도 공작기계의 형상 창성 운동에 크게 관여하는 공작물과 공구 부분의 열변위와 관련되어 있는 부분을 열적 평가 항목으로 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 머시닝센터의 베드를 해석 대상으로 하고 있기 때문에, 공구 부분에 해당하는 칼럼 부분의 열변위와 공작물 부분에 해당하는 레일 부분의 열변위를 열적 평가 항목으로 설정하였다.

열변위 이외에도 열변위를 발생시키는 가장 직접적인 원인이 되는 구조물 전체의 최대최소 온도차를 열적 평가 항목으로 선정하였다.

상기의 열적 특성 평가 항목에 따라서 머시닝센터의 리브를 Fig. 7과 같이 DB화한다. Fig. 7.과 같이 리브 모델에 따른 열적 특성을 DB화함으로써 실제 공작기계 설계자들은 모든 베드 모델에 대해서 FEM 해석을 실행하지 않아도 DB를 참고함으로써 베드의 열적 특성을 어느 정도 예상할 수가 있다.

5. 베드 리브 모델의 설정 및 FEM 해석

본 연구에서 사용할 리브 모델을 Fig. 7에 나타낸다. 모델은 2.1m×1.5m×0.3m의 치수를 지닌 베드 리브 모델이며, 모델의 아랫면에 리브가 배치되어 있다.

열부과면으로는 직선 이송 기구의 모터 부분으로 설정하였으며 300초 동안 10000W/m²의 열유속을 부과하였다. 열해

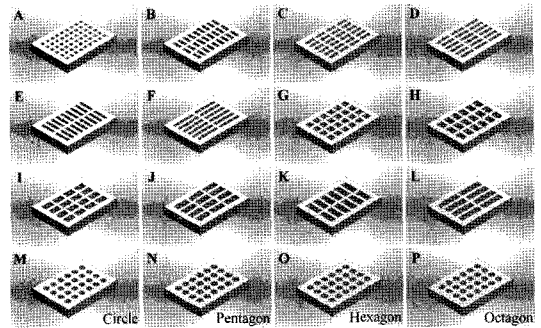


Fig. 7 Bed rib model for FEM Analysis

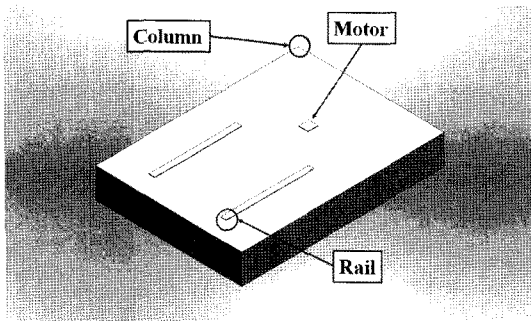


Fig. 5 Guide Rail & motor on the bed

Table 2 Properties of FC250

Density	7300 kg/m ³
Coefficient of Thermal Conductivity	50.4 W/m-K
Specific Heat	546 J/kg-K
Coefficient of Heat Transfer	5 W/m ² -K
Bulk Temperature	18°C
Young's Modulus	210 GPa
Poisson Ratio	0.27

Deflection (mm)	Rail	Column
Temperature Difference (C)		

Fig. 6 Database of bed rib structure

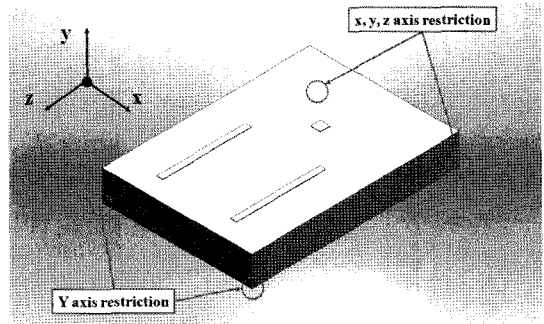


Fig. 8 Structural boundary condition

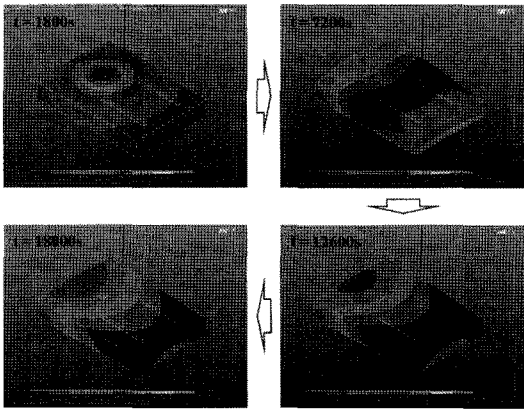


Fig. 9 Thermal deformation distribution with time

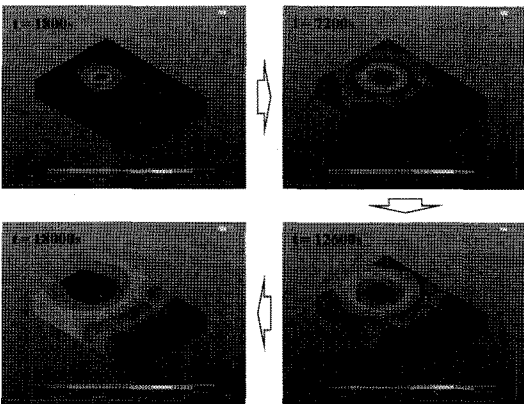


Fig. 10 Temperature distribution with time

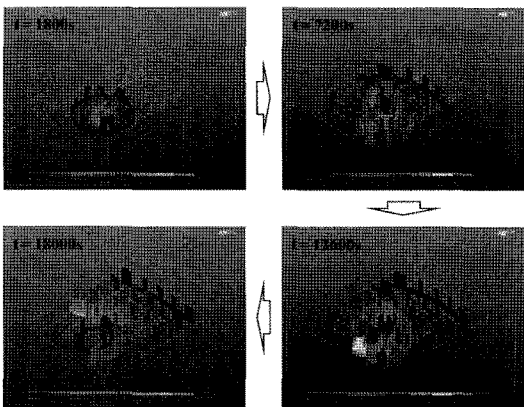


Fig. 11 Isosurface temperature distribution with time

석의 정상 상태로는 18000초(5시간) 후를 설정하였으며, 정상 상태에 도달했을 때, 레일 및 칼럼 부분의 열변위, 구조물의 최대최소 온도치를 평가하였다. 열변위에 관해서는 시간에 따라서 모든 열변위 데이터를 추출함으로써 시간에 따라 열변위가 어떠한 거동을 나타내는지도 확인하였다. 모터 부분에 열유속을 부과하는 것과 동시에 베드 구조물의 모든 면에 대기 온도(18°C)와의 자연 대류 조건을 설정하였다. 재료로는 회주철 FC250을 설정하였으며, FC250의 구조적/열적 물성치를 Table 2에 나타낸다.

열해석을 시행한 후 구조해석을 실행할 때에는 모델의 아랫면 모터 부분 2점에서는 모든 자유도를 구속하였으며 반대편 2점에서는 Fig. 8과 같이 y축 방향(중력 작용 방향)에 대해서만 변위를 구속하였다.

리브는 열부과면과 수직 방향 및 수평 방향으로 나누어서 모델링함으로써 리브의 배치에 대한 영향을 확인할 수 있으며, 치수의 영향을 확인하기 위해서 치수에 도 변화를 주었다.

최종적으로는 리브의 형상을 확인하기 위해서 모델 M-P 까지 원, 5각형, 6각형, 8각형의 리브를 설치한 베드 모델도

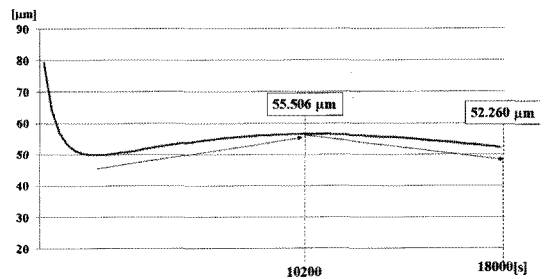


Fig. 12 Thermal deformation of rail with time

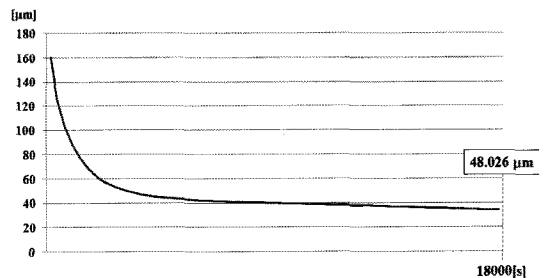


Fig. 13 Thermal deformation of column with time

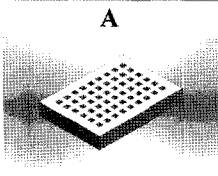
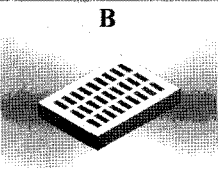
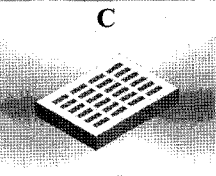
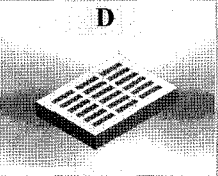
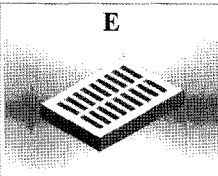
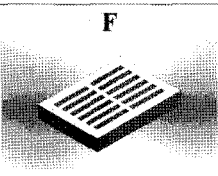
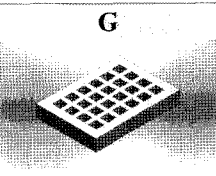
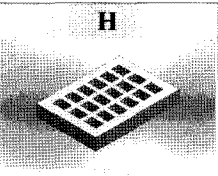
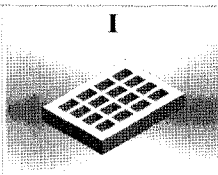
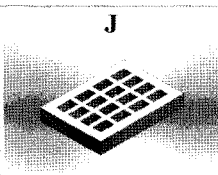
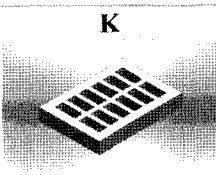
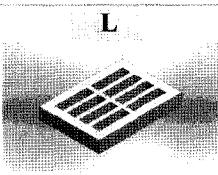
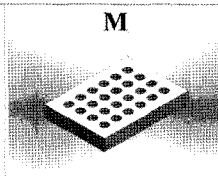
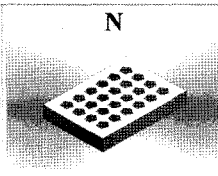
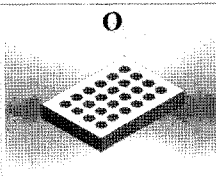
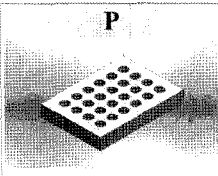
Plate				
	Deformation (μm)	49.831	51.133	49.568
Rail Column	31.614	31.985	33.980	34.030
Temperature Difference(°C)	3.112	3.449	3.479	3.566
Plate				
	Deformation (μm)	51.287	48.169	52.260
Rail Column	31.678	35.552	33.975	34.208
Temperature Difference(°C)	3.669	3.732	3.534	3.654
Plate				
	Deformation (μm)	53.204	53.185	54.519
Rail Column	35.653	36.140	34.471	38.160
Temperature Difference(°C)	3.786	3.903	3.972	4.074
Plate				
	Deformation (μm)	52.873	52.778	52.834
Rail Column	33.917	33.808	34.342	33.904
Temperature Difference(°C)	3.417	3.511	3.486	3.471

Fig. 14 DB of bed rib model

해석 대상으로 설정하였다. 모델 G와 모델 M-P까지의 리브 형상의 경우 리브의 외접원의 치수는 동일하다.

Fig. 9에 모델 G의 시간에 따른 리브 모델의 열변위 분포를 나타낸다. 정상 상태에서의 모델 전체의 최대 열변위는 60.4 mm이었으며 레일 부분의 열변위는 52.26mm, 칼럼 부분의 열변위는 48.026mm이었다.

Fig. 10에 시간에 따른 온도 분포의 변화를, Fig. 11에 시간에 따른 온도 분포 변화의 등온선을 나타낸다. 정상 상태에서의 최대최소 온도차는 3.534℃임을 확인하였다. Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 모터 부분에 부과된 열이 리브를 따라서 확산되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12과 Fig. 13에 레일 및 칼럼 부분에서의 시간에 따른 열변위 변화를 나타낸다. 모터 부분에 열을 가함과 동시에 리브를 따라서 열이 전달되어 10200초까지 열변위가 증가함을 알 수 있었으며, 10200초 후에는 레일 부분의 열변위가 안정되어 가고 있음을 알 수 있었다.

이에 반해서 칼럼 부분의 열변위는 열부하면과 근접하고 있는 이유로 리브를 따라서 열이 전달되고 있는 구간이 나타나지 않았으며, 열부과 후에 점차적으로 열변위가 안정되어 정상 상태에서는 48.026mm의 열변위를 보이고 있었다.

모델 G의 열/구조 해석과 동일한 조건으로 Fig. 7의 모델에 대해서 해석을 실행하여 Fig. 6과 같은 DB를 작성하였다. DB를 Fig. 14에 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 리브 모델에 따라서 베드의 열적 특성을 평가하기 위해서 중첩의 원리를 이용해서 베드에 가해지는 모든 열원을 표현할 수 있음을 검증함과 동시에 여러 리브 모델에 대해서 열적 특성을 평가하여 Fig. 15와 같은 DB를 작성하였다. 리브에 따른 열적 특성에 관해서 정리하면 다음과 같다.

(1) 리브의 치수가 커질수록 열전달이 쉽게 일어나서 구조물

의 최대최소 온도차가 커진다.

- (2) 리브의 치수가 주된 열전달 방향과 수직 방향으로 커지면 레일 및 칼럼에서의 열변위는 커진다.
- (3) 리브의 치수가 주된 열전달 방향으로 커지면, 레일에서의 열변위는 작아지지만, 칼럼에서의 열변위는 커진다.
- (4) 리브의 형상이 다각형에 가까울수록 구조물의 최대최소 온도차는 작아진다.

참고 문헌

- (1) Sata, T., Takeuchi, Y., Okubo, N., and Sato, K., 1975 "Control of the Thermal Deformation of a Machine Tool(1st Report) -Rapid Stabilization of a Machine Tool before Working," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 41, pp. 592~597.
- (2) Takeuchi, Y., Okubo, N., and Sata, T., 1975, "Control of the Thermal Deformation of a Machine Tool(2nd Report) -Control on Varying Heat Source," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 41, pp. 1084~1089.
- (3) Loewenfeld, K., 1957, "Die Gestaltung von Platten," *Konstruktion*, Vol. 5, pp. 180~187.
- (4) Hori, S., Nishiwaki, N., and Ishitomi, K., 1996, "Study on Estimating Thermal Deformation of Machine System," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 96, pp. 1391~1396.
- (5) Hori, S. and Nishiwaki, N., 1997, "Study on Thermal Deformation of Machine Tool Structure Estimated by Its Basic Characteristics," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 97, pp. 1836~1841.