

공작기계 베드 구조물의 정적/동적/열적 모델링 및 평가

Static/Dynamic/Thermal Modeling and Estimation of Ribbed Plate of Machine Tool

*#김양진¹, 이찬홍¹

*#Y. J. Kim(yangjin@kimm.re.kr), C. H. Lee

¹ 한국기계연구원

Key words : Machine tool, Ribbed plate, Modeling, Heat transfer, Thermal displacement

1. 서론

우리들이 일상생활에서 특별한 의식 없이 사용하고 있는 공업 제품은 일반적으로 다수의 부품으로부터 구성되어 있다. 이러한 부품들은 완성된 제품에 필요한 형상, 치수, 성질을 보유하도록 가공된다. 가공법에는 절삭 가공, 변형 가공(성형 가공), 부가 가공 등 여러 종류가 있으며 그 중에서 일반적으로 절삭 가공을 수행하는 기계를 공작기계라 부른다.

이와 같이 기계 가공 시스템의 중핵을 담당하고 있는 공작기계에 대해 최근에는 무인화와 자동화, 높은 가공 정확도가 요구되어지고 있다. 공작기계의 가공 정확도를 지배하는 요인으로는 정적/동적/열적인 요인이 있으며, 그 중에서도 공작기계의 열변형은 가공 정확도를 지배하는 매우 중요한 인자로서 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다.

공작기계의 주요 구조 요소 중에는 베드, 칼럼, 테이블, 주축 헤드 등이 있으며 이 중에서 베드, 칼럼에는 리브 구조물이 다용되고 있다. 공작기계의 중량 중에서 가장 큰 비율을 차지하는 베드와 칼럼에 리브 구조물이 다용되고 있는 이유로는 베드와 칼럼이 경량화, 환경 친화성, 가격 저렴성 등이 가장 쉽게 실현될 수 있는 구조물이기 때문이다. 그리고 무엇보다도 공작기계에 요구되고 있는 중량 강성비를 크게 하기 위해서 베드와 칼럼에 리브 구조물이 다용되고 있다. 따라서 이와 같은 리브 구조물이 다용되고 있는 베드와 칼럼의 정적/동적/열적인 특성을 해석하고 평가하는 연구는 공작기계의 가공 정확도를 향상시키기 위해서 반드시 필요한 연구라고 할 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 Database화 되어 있다.

하지만, 리브 구조물을 포함하고 있는 공작기계 베드에 열적인 부하가 있을 때의 열전달의 경로와 각 위치에서의 열변위를 해석적으로 검증하는 연구는 지금까지 많이 이루어지지 않고 있었다. 이는 열적인 변형이 정적/동적인 변형에 비해 고려해야 할 항목이 많고, 수학적으로도 비선형 미분방정식을 풀어야 하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 리브 구조물을 포함하고 있는 공작기계의 베드 구조물에 있어서, 열적 경계조건 및 열적 부하 조건에 따른 베드 구조물의 열전달의 경향을 해석하는 것을 목적으로 한다. 그리고 열전달의 경향으로서 열전달의 경로 및 각 위치에서의 열변위를 해석의 대상으로 한다.

열전달의 경로를 정확하게 파악함으로써 설계자들은 사전에 열변형의 영향이 적은 공작기계의 베드 구조물을 설계할 수 있고 냉각 방식도 쉽게 고안해낼 수 있다.

최종적으로는 Loewenfeld의 정적 해석과 같이 리브 구조물에 열적인 부하가 있을 때의 각 부분의 물성치(열변위, 온도, 열유속 등)를 Database화하는 것을 목적으로 한다.

2. 리브 구조물의 정적/동적 특성

본 연구는 Loewenfeld의 정적/동적 해석을 바탕으로, 리브 구조물을 포함한 공작기계 베드 구조물의 열해석을 진행시킬 예정이다. 이 장에서는 리브 구조물을 포함한 공작기계 베드

구조물을 대상으로 한 Loewenfeld의 정적/동적 해석을 소개한다. Loewenfeld가 해석 대상으로 선정한 변수로는 리브 구조물의 상대 강성, 단위 중량의 상대 강성, 그리고 공진주파수이다.

리브 구조물이 없는 간단한 베드 구조물의 휨 강성(Torsional Stiffness)은 다음의 식(1)과 같이 표현된다.

$$c = \frac{Gd_1^3 A}{3B} \quad (1)$$

위의 식(1)에서 G 는 재료의 강성치, d_1 은 베드 구조물의 두께, $2A$ 는 베드 구조물의 폭, $2B$ 는 베드 구조물의 길이를 나타낸다. 폭이 d_2 , 깊이가 h 인 외륜이 리브에 의해서 보강된 베드 구조물의 휨 강성과 대각선 방향의 길이 d_3 의 리브에 의해서 보강된 베드 구조물의 휨 강성은 식(2), 식(3)으로 나타내어진다.

$$c_1 = \frac{G}{3B} (d_1^3 A + 2d_2^3 h) \quad (2)$$

$$c_2 = 2E \frac{A^2 h^3 d_3}{(A^2 + B^2)^{3/2}} \quad (3)$$

따라서 외륜의 리브와 대각선 방향의 리브에 의해서 보강된 베드 구조물의 전체적인 휨 강성은 다음의 식(4)로 표현되어진다.

$$c_0 = \frac{G}{3B} (d_1^3 A + 2d_2^3 h) + 2E \frac{A^2 h^3 d_3}{(A^2 + B^2)^{3/2}} \quad (4)$$

식(4)로부터 리브 구조물을 포함한 베드 구조물의 휨 강성은 리브 깊이의 세제곱에 비례하고, 외륜 리브의 깊이의 세제곱에 비례한다는 것을 알 수 있다.

식(4)을 바탕으로 Loewenfeld는 여러 가지 리브를 포함하고 있는 공작기계 베드 구조물(330 mm x 330 mm x 35 mm, 250 mm x 450 mm x 35 mm, 200 mm x 550 mm x 35 mm)에 대해서 그 상대 강성, 단위 중량의 상대 강성, 그리고 공진주파수를 Database화하여 정리하였다.

Loewenfeld의 연구는 설계자들이 많은 시간을 소요하지 않고 리브를 포함한 베드 구조물의 정적/동적 특성의 경향을 알기 쉽게 나타내주고 있는 것에 의미가 있다.

3. 모델링

본 연구에서 대상으로 하는 공작기계 베드 구조물 또한 Loewenfeld가 대상으로 했던 베드 구조물의 모델(330 mm x 330 mm x 35 mm, 250 mm x 450 mm x 35 mm, 200 mm x 550 mm x 35 mm)을 이용할 계획이다. 리브 구조물 또한 기본적으로는 대각선 리브 구조와 외륜 리브 구조를 바탕으로 하며, 대각선 리브 구조를 다양화시켜 모델링을 전개할 방침이다.

4. 열원의 추정 방법

공작기계의 열변형은 공작기계를 구동하기 위해 소모되는 열에 의한 영향뿐만이 아니라 주위의 온도로부터도 영향을 받는다. 공작기계의 열원이 되는 부분에 열이 유입되면 그 부분의 온도가 상승하게 되고, 공작기계 구조의 다른 부분과의 온도차에 의해서 열의 흐름이 발생되어 이러한 열의 흐름에 의해서 주위의 공작기계 구성 요소가 가열되어 다시 온도가 상승하게 되어 결과적으로 열변형이 발생하게 된다.

여기서 공작기계 베드 구조물의 열전달 경향 및 열변위를 정확하게 파악하기 위해서는 열적 초기 조건 및 열적 경계 조건의 바탕이 되는 열원의 위치 및 열원 발열 거동을 정확하게 파악하고 있어야 한다.

공작기계의 열원으로서의 주축 베어링, 주축 모터, 이송 구동 모터, 이송 구동 볼스크류, 절삭점등, 그 위치가 알려져 있는 것이 대부분이다. 이 경우에 열변형 및 열변위를 평가하는 점에 있어서 그 발열량을 파악하는 것이 중요하다. 그리고 공작기계의 열변형 거동을 파악하기 위해서는 공작기계 구조의 발열량과 온도 변동의 관계를 구하는 것이 중요하다.

공작기계 열원의 기본적인 발열 거동으로서 다음 그림1과 같은 펄스상의 발열 거동이 있다.

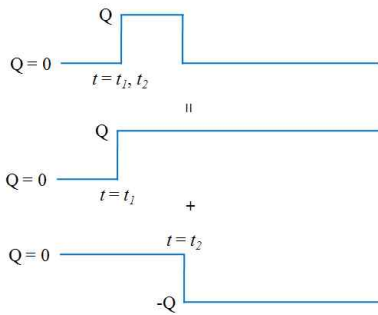


Fig.1 Pulse Heat

위 그림에서 나타내는 것과 같이 발열량이 Q , 펄스폭이 Δt 의 펄스상의 발열은 발열량이 $+Q$ 인 스텝상의 발열과 $-Q$ 인 스텝상의 발열을 중첩시키는 것과 같다는 것을 알 수 있다. 즉, 공작기계처럼, 주축의 회전수에 따라서 발열량이 스텝상으로 변화한다고 가정할 때, 스텝상의 발열을 실험적으로 구할 수 있고, 이를 바탕으로 펄스상의 발열을 표현할 수 있다.

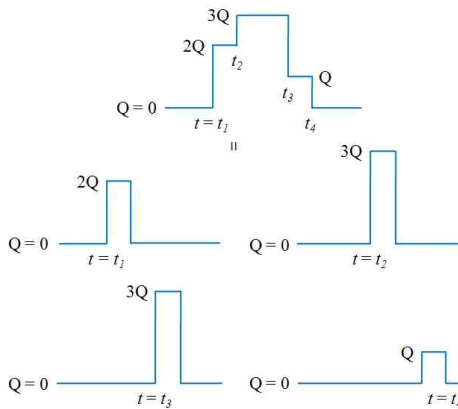


Fig.2 Superposition of Pulse Heat

그림2의 윗부분에 나타나 있는 발열 거동은 4가지의 펄스상의 발열로 나누어서 생각할 수 있다. 그리고 발열 거동의 변동을 클 경우에도 시간 스텝을 미세하게 분할하여 스텝상의 발열 거동의 집합체로 근사시킬 수 있다.

본 연구에서는 온도 변동에 앞서서 공작기계에 유입되는 열유속(Heat Flux)을 구하는 방법으로 열원 근방의 온도를 구하는 방법을 채택한다.

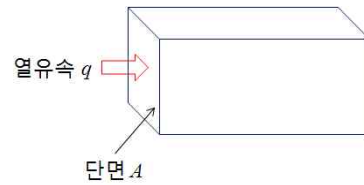


Fig.3 Model Block for Numerical Analysis

그림3과 같은 직육면체의 모델을 생각한다. 그림과 같이 한 면으로 열이 유입하여 다른 면으로 열전달을 h 의 값을 가지고 열이 방출된다고 가정한다. 한 면으로 임의의 열유속 $q(t)$ 가 유입되었을 때, 유입면 근방의 온도 $T(t)$ 는 온도 특성 데이터 $T_p(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n T_p(t - (n-1)\Delta t) \quad (5)$$

온도 특성 데이터 $T_p(t)$ 는 펄스상의 열유속 $q_p(t)$ 가 유입하였을 때의 온도 변화를 나타낸다. α_n 은 보정 계수라 불리며, 식(5)로부터 구할 수 있다. 보정 계수를 구함으로서 유입되는 열유속을 다음의 식(6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$q(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n q_T(t - (n-1)\Delta t) \quad (6)$$

복수의 열원이 존재하는 공작기계에 있어서도, 위의 방법은 중첩의 원리(Superposition Principle)를 이용하여 유입되는 열유속을 산출해낼 수 있다.

열원의 발열 거동과 열원으로부터 유입되는 열유속으로부터 공작기계 베드 구조물에 부과되는 온도 분포를 산출해낼 수 있고 온도 분포와 유입되는 열유속으로부터 열적 초기 조건 및 열적 경계 조건을 구해낼 수 있다.

5. 급후의 연구 일정

급후에는 다양한 리브 구조를 포함하고 있는 공작기계 베드에 대해서 2장에서 서술한 Loewenfeld의 정적/동적 해석을 바탕으로 열해석을 진행시킬 예정이다. 4장에서 기술한 열원 추정 방법을 토대로 열적 초기 조건 및 열적 경계 조건을 결정하여 FEM 해석을 통해서 임의의 위치에서의 온도, 열유속 등을 구하여 열변위의 값을 결정한다. 최종적으로는 전체 베드 구조물에서 열이 어떠한 경로로 전달되는지를 평가/확인할 예정이다.

참고문헌

- [1] Loewenfeld K., "Die Gestaltung von Platten," Konstruktion 1957; 9-5: 180-187
- [2] 工作機械設計マニュアル-工作機械の設計学 (基礎編), 社団法人 日本機械工業連合会, 社団法人 日本工作機械工業界
- [3] 森脇俊道, 뉴럴넷에 의한 마시닝센터의 열변형予測, 日本機械学会論文集, 58-550, 1992
- [4] 森脇俊道, 뉴럴넷에 의한 工作機械의 열변형予測, 日本工作機械論文集, 61-584, 1995