

◆ 특집 ◆ 고유연 머시닝센터의 설계기술

신개념 머시닝센터의 신뢰성 향상 설계기술

High Reliability Design for New Concept Machining Center

이찬홍^{1,✉}, 김양진¹Chan Hong Lee^{1,✉} and Yang Jin Kim¹

1 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 (Ultra-Precision Machine Systems Research Team, KIMM)

✉ Corresponding author: chlee@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7120

Manuscript received: 2011.6.21 / Accepted: 2011.6.28

In this paper, the capability index is introduced in order to improve the reliability of new concept machine tools and the method to improve the machine accuracy from the analysis of cutting process, statistical methodology and influence factors are proposed. In addition, the rib structure of bed and column in machine tools is analyzed by using the thermal impact method in order to analogize the rib pattern which has the small thermal deformation under thermal boundary condition. In the analysis of column rib structure, thermal boundary condition is separated to heat conduction and heat transfer to appropriate real boundary condition. Finally, performance chart of bed and column rib structure is provided for designer to estimate each rib pattern and select rib structure appropriating to thermal condition.

Key Words: Reliability (신뢰성), Capability Index (능력 지수), Cutting Process (가공 공정), New concept Machine Tools (신개념 공작기계), Rib Structure (리브 구조물), Maximum-Minimum Temperature Difference (최대최소 온도차), Thermal Deformation (열변위)

1. 서론

공작기계의 평가는 지금까지 가공 능력과 가공 정밀도의 관점에서만 주로 이루어져 왔으나, 최근에 부품의 가공 정밀도 산포도가 일정하게 유지되면서 생산될 수 있는 기계장비의 신뢰성이 중요한 관점으로 떠오르고 있다.¹ 공작기계 사용자는 최종적으로 공작물의 가공 정밀도를 일정하게 유지하면서 대량 생산해서 매출을 증대시키므로, 가공 정밀도의 레벨에 무관하게 경제적인 면에서는 가공 장비의 신뢰성이 매우 중요하다.²

이러한 가공장비의 신뢰성은 능력지수 (Capability Index) 라는 수치를 통해서 장비의 가공 정밀도 유지능력을 판단할 수 있다. 이 수치는 실

제적으로 주어진 형상에 대해 다수의 공작물을 가공해서 획득하기 때문에 매우 현실적인 값이 된다. 공작기계를 가장 많이 구매하는 자동차 업계는 능력지수의 도입이 시작되었고, 해외의 유명 자동차 회사는 이미 10 년 전부터 사용을 하고 있어 글로벌화를 지향하는 공작기계 제조회사는 능력지수에 의한 장비 제조와 평가를 준비 중에 있다.

공작기계의 능력지수에 영향을 미치는 요소는 많이 있지만, 특히나 공작기계의 구조형태와 조립 오차 때문에 생기는 운동학적 오차와 구조물의 온도차에 의한 열변형이 가장 큰 영향을 미친다. 현대식 공작기계는 대부분의 구동력이 전기모터에 의해서 가동되므로 손실부분이 열로 변환되어 구조물에 전달되는 일종의 전열기 모델로서, 열의

입출력이 빈번해서 열변형의 상태가 수시로 변화한다. 그러나 공작기계의 주요 열원은 일정한 위치에 설치되어 지속적으로 구조물에 열전달을 함으로써, 열량의 크기와 지속시간에 따른 구조물의 열변형은 어느 정도 경향을 나타내게 된다. 그래서 설계단계에서 구조물의 리브 형태에 따른 베드와 컬럼의 열변형 경향을 사전에 분석함으로써 구조물의 열변형에 의한 장비 신뢰성 손상을 억제할 수 있다.

본 논문에서는 신개념 머시닝센터의 신뢰성 향상을 위한 방법으로 능력지수를 도입하였고, 능력지수를 평가하기 위한 가공공정과 분석기법, 그리고 영향인자에 대한 분석으로 신뢰성을 증가시키는 방법론을 제시하였다. 또한 베드와 컬럼 구조물의 리브 패턴을 열변형의 관점에서 분석해서, 주어진 열원에 대해 가공점의 열변위가 가장 작은 구조물의 리브 패턴을 선택함으로써 능력지수를 향상시키는 영향인자를 근본적으로 개선하는 방법론을 서술하였다.

2. 고신뢰 공작기계를 위한 설계 과정

고신뢰 공작기계는 가공 정밀도의 높낮이와 관계없이 장비의 적정한 가공 정밀도를 주위 환경에 무관하게 일정하게 유지하는 능력을 일컫는다. 그래서 공작기계의 가공 정밀도에 영향을 미치는 요

소를 Fig. 1 과 같이 정의하고 관리한다면, 가공 정밀도를 일정하게 유지할 수 있다.

첫째 공작기계의 구조형태에서 야기되는 운동학적 오차는 핵심 부품의 길이와 각도, 구멍 등의 가공 정밀도와 조립오차에 의해서 발생한다. 이러한 운동학적 오차를 안정화시키기 위해 조립단계에서 각 부품의 형상과 기하학적 상대조건을 잘 관리하고, 조립시 공차를 면밀히 확인한다. 둘째 구조물의 정적, 동적 오차는 가공 시 발생하는 절삭력이 구조물의 강성에 대해 나타나는 것으로서 절삭력의 변동분이 작도록 하거나, 구조물의 강성을 크게 유지해서 절대적인 변위 레벨을 작게 한다. 또한 동적인 처짐은 운동 유니트의 질량에 큰 영향을 받음으로 경량화에 집중을 해야 하고, 구조물간의 결합부에는 공차를 작게하고, 결합강성이 큰 부품을 사용한다. 셋째 열적 오차는 구조물의 온도차이에 의해서 발생하는 것으로서 제거할 수는 없고, 열변위를 중요하지 않은 방향으로 유도하는 방법, 열전달이 어렵도록 열흐름 경로를 차폐하거나 냉각하는 방법, 주위 온도를 항온으로 만들어 열의 입출력이 항상 평형을 이루도록 하는 방법을 사용하면 열적 오차를 어느 정도 유지할 수 있다. 넷째 공작기계 구조물의 모든 역학적 특성이 지속적으로 유지될 수 있다면, 마지막으로 이송 축을 제어하는 영역에서 오차를 최소한으로

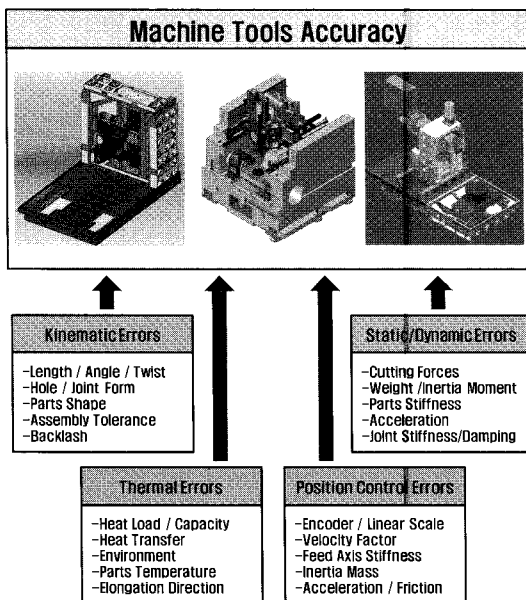


Fig. 1 Influence factors on machine tools' accuracy

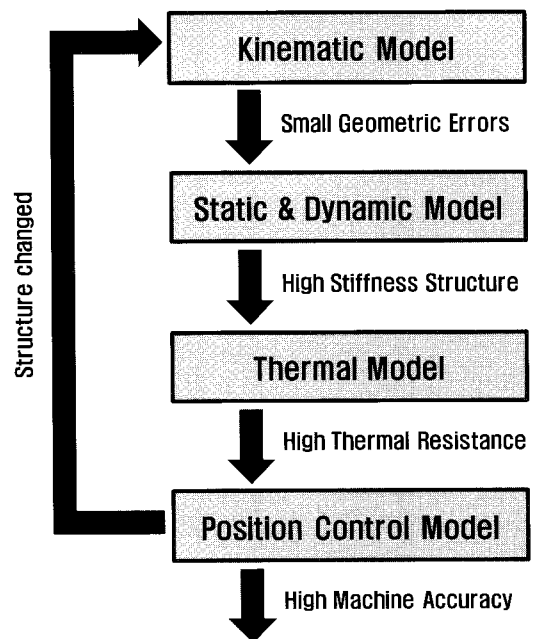


Fig. 2 Design process for high reliability machine tools

유지하면 된다. 위치제어 오차는 위치를 측정하는 센서의 종류와 설치위치에 따라 오차를 크게 감소시킬 수 있고, 볼스크류를 사용하는 경우 길이와 지름을 적절히 절충해서 축 관성이 감소하고 강성이 증가하는 방향으로 볼스크류를 선택하면 오차를 감소시킬 수 있다. 또한 위치제어를 중앙에서 실행하는 CNC 에서 속도계수와 가감속도를 이송계의 강성을 고려하여 조절하면 진동이 작아지면 서 오차를 감소시킬 수 있다.

Fig. 2 에는 공작기계의 신뢰성을 높일 수 있는 방법론에 대해 공작기계의 가공정밀도 영향인자와 관련하여 표시하였다. 공작기계는 초기 개념설계 단계에서 구조물 형태와 이송축의 개수와 방향을 기반으로 하는 운동학적 모델에 대한 검토가 이루어져야 하고, 결과적으로 절삭점에서 기하학적인 오차가 작도록 조립 오차를 관리해야 한다. 다음으로 구조물의 정동적 변형에 대해서 검토가 이루어 지는 모델에서 가능하면 구조물의 강성이 증가하도록 경량화와 리브 구조를 사용한다. 계속해서 열적 모델에서는 열전달이 잘 되지 않도록 구조를 만들고 주요 구조물에서는 온도 차이가 나타나지 않도록 한다. 마지막으로 공작기계가 역학적으로 안정이 되면 위치제어 관점에서 오차가 감소하도록 구조와 제어기법을 최적화하면 된다. 만약 이 단계에서 요구하는 오차범위를 넘게 된다면 다시 첫 번째 단계부터 구조변형에 의한 가공오차를 줄여가는 노력을 해야 한다.

3. 공작기계의 능력지수 평가 기법

지금까지 공작기계의 평가기법은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나뉘어서 실행되었다. 직접적인 방법으로는 공작기계의 기하학적 정도, 정동적 강성, 열적 변위 등을 센서에 의해 직접 측정해서 장비의 다양한 특성을 파악하는 방법으로 평가하였고, 간접적인 방법으로는 규격으로 정해진 가공물을 한 두 개 가공해서 요소 형상에 대한 가공정밀도를 평가함으로써 장비를 평가하였다. 물론 간접적인 방법은 가공공정으로 인한 영향으로 인해 장비의 특성을 정확히 분리해 낼 수는 없다. 이러한 평가 방법들은 특별한 시기와 조건에서 획득된 결과로서, 공작기계의 일반적이고 장기간 동안을 대표하는 장비 특성으로 볼 수 없다.

그래서 공작기계 사용자의 입장에서 시간과 환

경에 무관한 장비의 특성으로 인정할 수 있는 평가방법이 필요하게 되었다. 이것을 위해 능력지수에 의한 평가기법이 개발되었다. 능력지수는 대량 생산을 위주로 하는 공작기계를 평가하는 값으로서, 사용자가 요구하는 가공형상에 대해 수십 개의 공작물을 가공해서 가공오차에 대해 통계기법을 사용함으로써 계산된다. 이때 기본조건으로 가공물 한 개의 가공시간은 10 분 이내가 되어야 하고, 하루 총 가공시간은 8 시간, 몇 일 간격으로 계속될 수 있고, 계절에 따른 가공공정이 고려되기도 한다. 결국, 능력지수의 의미는 계획된 가공공정에서 제품의 치수 안정성을 확인하는 것이라고 할 수 있다.

능력지수 C_m 은 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 가공 허용공차 a 에 대한 실제 측정오차 b 의 비로 표시되고, 한계 능력지수 C_{mk} 는 실제 측정오차의 반에 대한 근접 최대, 최소 허용공차까지의 거리로 정의된다. 그래서 한계 능력지수는 측정오차가 작거나 허용공차의 중앙에 위치할수록 커지게 된다. 세계 유수의 자동차 회사들이 요구하는 C_{mk} 는 1.67로서 Table 1 에서 보이는 바와 같이 10 만개의 부품을 가공한 것 중 6 개가 허용공차를 벗어나는 능력을 가진 공작기계를 요구하는 것이다.

공작기계의 능력지수를 분석하는 데는 통계처리 과정 외에 많은 가공조건 결정과정이 필요하다. Fig. 4 에 6 단계의 전체 과정을 나타낸다.

능력지수를 분석하기 위해서는, 가장 먼저 공작기계를 인수하고 싶은 사용자가 요구하는 가공

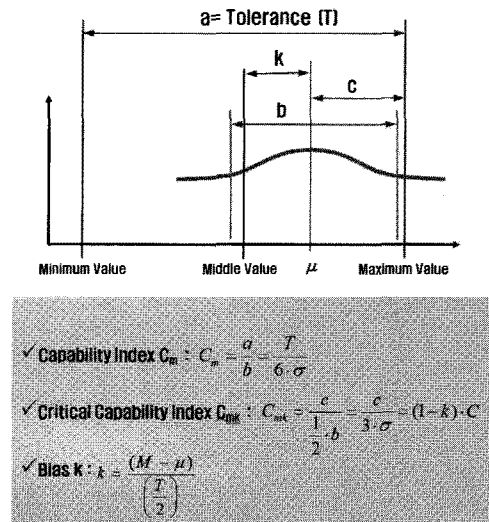


Fig. 3 Calculation of capability index in machine tools

Table 1 Characteristics of capability index

Capability Index C_{mk}	1.00	1.33	1.67	2.00
σ in Tolerance Range T	6	8	10	12
Percentage of 6σ inside T [%]	100	75	60	50
Percentage of Parts inside T [%]	99.73002	99.99366	99.99994	100.000000
Percentage of Parts outside T [%]	0.26998	0.00634	0.00006	0.000000

시험의 시간과 절차를 협의의 통해 결정해야 한다. 능력지수는 아직 국제적으로 결정된 시험 공작물이 없기 때문에 해당 공작기계의 인수가가 요구하는 시험 공작물을 사용하게 된다. 이때 주위의 온도와 지반 조건을 결정해야 하고, 사용하는 측정기도 협의해야 한다. 둘째로 가공시험하기 전에 장비를 예열시키는 것이 필요하다. 공작기계는 가공을 하면서 각종 베어링과 절삭부위에서 열이 발생해서 열변형이 생긴다. 그래서 이로 인한 가공오차가 생기는 것을 사전에 제거해야만 정확한 능력지수를 계산할 수 있다. 그래서 주축 회전과 이송 속도 조건을 결정하고, 구조물의 온도를 냉각 제어해서 안정된 분위기에서의 열변위를 확인해서 가공오차에서 열변위 부분을 제어한다. 셋째, 가공준비를 한다. 가공오차와 표면조도를 사전에 결정하고, 가공조건도 협의에 의해 결정한다.

넷째, 가공을 시작한다. 보통 25-50 개 정도의 부품을 가공하고, 가공시간은 한 개의 부품당 10분 이내로 하는 가공 내용으로 결정한다. 다섯째, 가공부품의 정밀도를 측정하고 측정장비의 분해능과 신뢰성을 기록한다.

여섯째, 능력지수를 평가한다. 이때 평가과정에서 생기는 능력지수에 대한 영향값 중 경향을 갖는 요소인 공구의 마멸이나, 방향에 따른 측정기의 분해능 등의 영향은 제거해야 하고, 가공공정은 진동이 없이 안정한 상태에서 실행이 되어야 한다. 최종적으로 통계학적인 방법을 통해서 능력

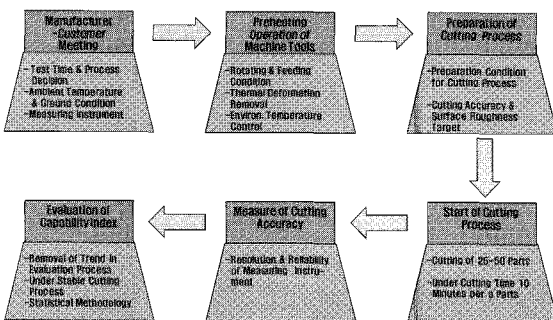


Fig. 4 Evaluation process of capability index

지수를 평가하되 부품오차의 산포도는 정규분포로 가정하였다.

Fig. 5에 공작기계의 능력지수를 평가하는 실제 과정을 나타내었다. 부품을 가공하는 방법은 일차적으로 약 6 시간 동안 25 개의 부품을 Fig. 5의 상단 공작물 같이 가공하고, 추가로 공작기계의 기하학적 정도를 평가하기 위해서 2 시간 동안 하단 공작물 같이 가공하는 공정을 실행한다. 25 개의 부품을 가공하는 공정에서는 매 5 개의 공작물을 가공한 후 5 분 동안 기계의 열변위 측정을 위해서 원점을 접촉해서 측정하고, 다음으로 C1 가공에서 9 분 동안 구멍이 없는 공작물을 가공하고 3 분 동안 가공물을 교환한다. 이러한 과정을 C2-C4 까지 4 번 반복하고 5 번째인 C5 는 동일한 공작물에서 9 분 가공하고 10 분간 구멍을 가공하고 3 분간 공작물을 교환한다. 이렇게 75 분 간의 과정을 5 번 반복한다. 이와 같은 과정으로 열변위로 인한

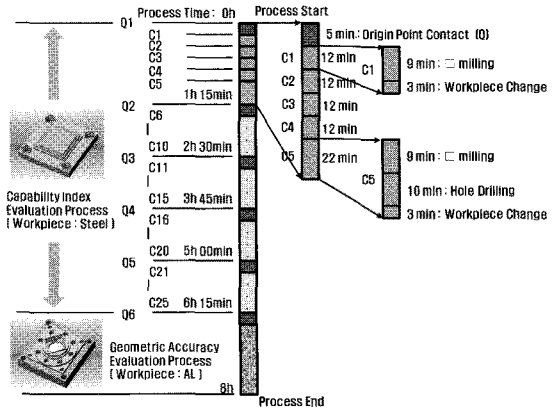


Fig. 5 Cutting process for capability index

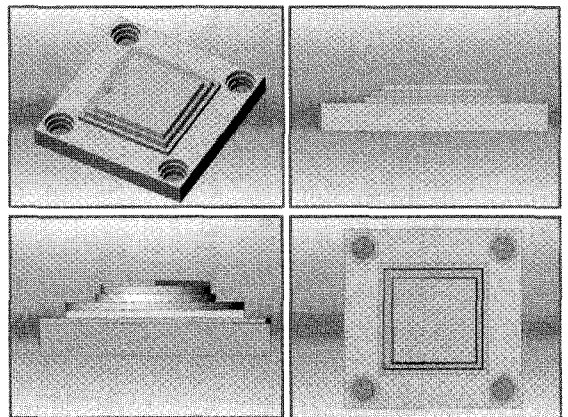


Fig. 6 Workpiece for capability index

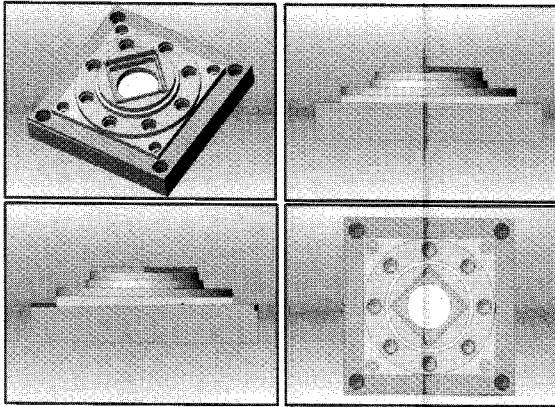


Fig. 7 Workpiece for geometric accuracy

오차를 측정해서 경향을 제거하고 25 개의 가공부품으로 능력지수를 분석한다. 이 과정 후에 기하학적인 오차가 얼마나 발생하는지 알기 위해서 1 개의 복잡한 형상의 공작물을 가공해서 측정한다. 주로 정사각형의 직각도와 구멍 간의 간격, 각 평판단차의 기울기 등을 측정한다.

Fig. 6 에는 능력지수를 위한 공작물의 형상을 표시하였고, Fig. 7 에는 기하학적 오차 측정을 위한 공작물 형상을 표시하였다.

4. 능력지수의 영향 인자와 개선 인자

공작기계의 능력지수를 높이기 위해 공작기계 요소에 대한 설계와 제어는 가공오차가 작은 방향으로 잘 이루어져야 한다. 이와 더불어, 공작기계의 능력지수가 가공공정과 측정기술의 수준때문에 낮게 평가된다면 불필요하게 시간이 소비되므로 주변 공정조건에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

Fig. 8 에는 능력지수에 대해 영향을 미치는 공작기계 주변요소들을 나타낸 것으로 *표식이 있는 항목은 공작기계의 설계가 완료된 다음에도 변화가 가능한 항목이고, 이외의 항목은 설계단계에서만 변화 가능한 것들이다. 그래서 공작기계가 제작돼서 능력지수를 평가 받을 때 *표식이 있는 항목에 대해 주의를 기울이면 높은 능력지수를 획득할 수 있다. 예를 들면 주변조건 부문에서 주변온도는 가공시험을 하는데 매우 중요한 항목이므로 항상 일정한 온도가 되어야 하고 사전에 결정되어야 한다. 공작물 부문에서 공작물의 강성은 절삭력에 의한 공작물의 처짐 때문에 가공오차가 생기므로 강성이 매우 크거나 처짐값이 보정이 되어야

한다. 공작기계 부문에서 구조물의 정동적 강성은 가공방향과 이송계의 위치에 따라서 강성이 변화하므로 가공시 가장 강성이 큰 방향으로 가공한다. 그리고 열변형은 냉각을 통해서 가능한한 억제한다. 측정기 부문에서 측정기의 분해능은 가능한한 미소한 분해능을 사용함으로써 측정정도를 높인다.

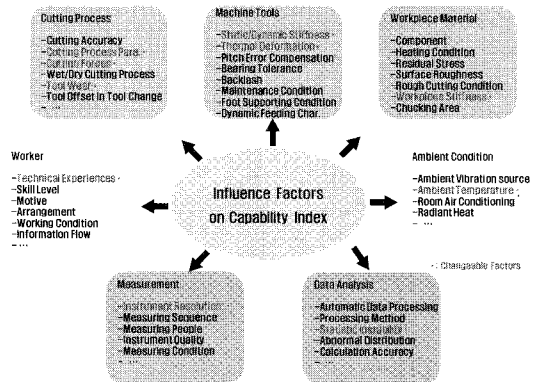


Fig. 8 Influence factors on capability index

5. 공작기계 열변형에 의한 신뢰성 손상 영향

공작기계의 능력지수에 영향을 끼치는 또 다른 요소로서 공작기계의 열변형을 생각할 수 있다. 공작기계 열변형의 경우 그 거동이 복잡한 양상을 지니고 있어 그 거동을 예측하여 능력지수를 높이는 것은 매우 어렵다.

일반적으로 공작기계 내부와 주변 환경에는 많은 열원이 존재하고 있으며 이와 같은 내부 열원과 외부 열원에 의해서 공작기계 구조물의 각 구성 요소에서 열변형이 발생하여 최종적으로 가공물의 가공 정확도가 저하하게 된다. 현재까지는 이와 같은 공작기계 열변형을 억제하기 위한 대책으로 저발열 열원의 사용, 열변형을 고려하여 부분 구조에 있어서의 열대칭 구조의 채용, 열원 격리 설계, 열변형에 강한 재료의 사용 등이 있으나 이와 같은 대책만으로도 공작기계에서 발생하는 모든 열변형을 완벽하게 억제, 제어할 수는 없다.⁵

공작기계 구조물 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 베드와 칼럼에는 리브 구조물이 사용되고 있다. 이와 같은 리브 구조물이 베드와 칼럼에 사용되고 있는 것은 경량화, 제작 가격의 저렴성 등이 가장 쉽게 실현될 수 있는 구조물이기 때문이며, 무엇보다도 공작기계에 요구되고 있는 중량 강성

비를 크게 하기 위해서이다.

베드와 칼럼에 사용되고 있는 리브 구조물의 정적, 동적인 평가는 1950 년대 후반, 독일의 Loewenfeld 에 의해서 보고된바 있으며, 베드 구조물의 리브 배치의 효과를 상대 강성, 상대 고유진동수 등의 관점에서 고찰할 수 있도록 DB 화 되어 있다. 본 연구에서는 베드와 칼럼에 사용되고 있는 다양한 리브 구조물을 열적 특성 평가 항목을 중심으로 평가하여 이를 DB 화하는 것을 목적으로 한다.

6. 베드 구조물의 열변형 안정 리브 패턴 생성 기법

6.1 열적 중첩의 원리

공작기계의 내부 열원으로는 주축 모터와 주축 베어링, 직선 이송 시스템의 볼스크류와 이송 모터 등 대부분이 이미 그 위치가 알려져 있다. 이러한 경우에는 열원에서 발생하는 발열량을 추정하는 것이 중요한 요소가 된다. 공작기계 열원에서의 기본적인 발열 거동으로는 Fig. 9 과 같은 펄스 형태의 발열을 생각할 수 있다. Fig. 9 의 좌측의 그림과 같이 발열 거동에서는 +Q 와 -Q 의 두 가지 펄스 형태의 발열을 중첩하는 것과 동일하다고 생각할 수 있으며, Fig. 9 의 우측과 같은 복잡한 발열 거동에 대해서도 펄스 형태의 발열로 나누어서 생각할 수 있다.⁶

상기의 중첩의 원리를 이용함으로써 공작기계에 가해지는 다양한 종류의 열량에 대해서 개별적으로 FEM 해석을 시행하지 않아도 펄스 형태의 열량을 가하는 FEM 해석에서 얻은 온도 분포를 바탕으로 복잡한 형태의 열원에 대해서도 온도 분포를 쉽게 예측할 수 있다.

중첩의 원리를 이용해서 Fig. 10 과 같은 모델에 Fig. 11 과 같은 열적 경계조건을 부과하여 맞은편에서의 온도 분포를 측정하였다.

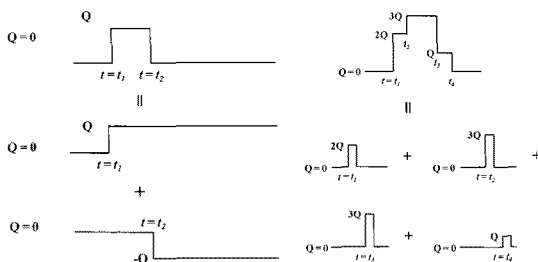


Fig. 9 Superposition principle

Fig. 11(a)의 열적 경계조건은 4 개의 경계조건을 일시에 부과하는 것이며, Fig. 11(b)의 열적 경계조건은 4 개의 경계 조건을 개별로 부과하는 것이다.

Fig. 11(a)의 열적 경계 조건과 Fig. 11(b)의 열적 경계 조건에 의한 온도 분포는 일치하는 양상을 보이고 있었으며, 의해 중첩의 원리가 FEM 해석 결과에 적용 가능함을 알 수 있다.

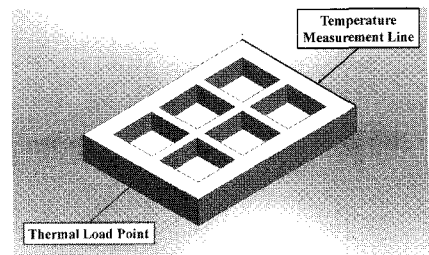


Fig. 10 Sample model for superposition principle

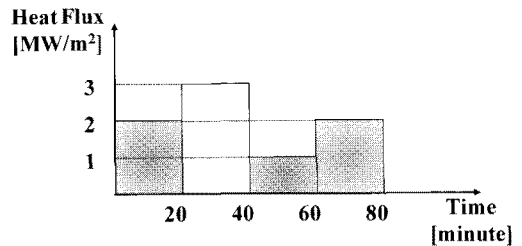


Fig. 11(a) Boundary condition 1

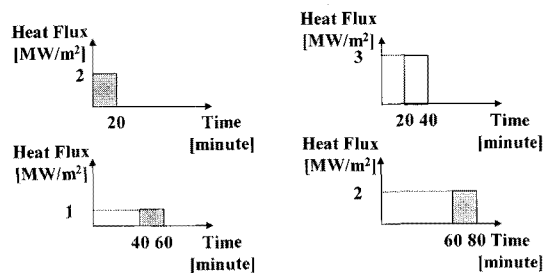


Fig. 11(b) Boundary condition 2

6.2 베드 리브 구조물의 열적 특성 평가 항목

본 연구에서는 베드 리브 구조물의 열적 특성을 평가할 수 있는 항목으로 다음과 같은 3 가지 항목을 설정하였다.

- 1) 구조물의 최대최소 온도차
- 2) 칼럼 접속 부위의 열변위
- 3) 레일 접속 부위의 열변위

열변형을 일으키는 가장 큰 원인이 구조물의 내부에 존재하는 온도 구배이며 이와 같은 온도차를 평가하기 위한 항목으로 구조물의 최대최소 온도차를 설정하였다. 관심 부분의 열변위로는 Fig. 12 와 같이 칼럼과 결합되는 부분의 열변위와 직선 이송 시스템이 위치하는 레일 부분의 열변위로 설정하였다.

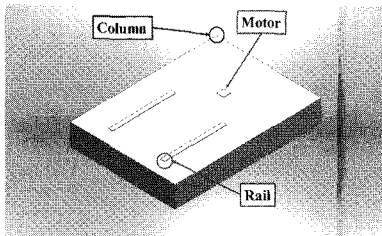


Fig. 12 Concerned point of bed rib structure

중첩의 원리를 이용하여 베드 구조물의 다양한 리브 형태를 상기의 열적 특성 항목으로 평가한 후에 DB 화함으로써 실제 공작기계 설계자들이 구조물에 대해서 개별의 유한요소해석을 실행하지 않아도 베드 구조물의 열적 특성을 알아볼 수 있다.

6.3 베드 리브 모델의 설정 및 열적 특성 평가 항목 DB 화

본 연구에서 사용할 리브 모델(2.1 m X 1.5 m X 0.3 m)을 Fig. 14 에 나타낸다. 열 부과면으로는 직선 이송 시스템의 모터 부분으로 설정하였으며, 300 초 동안 10,000 W/m²의 열유속을 부과하였다. 열해석의 정상 상태로는 5 시간 후를 설정하였으며, 정상 상태에 있어서의 레일 및 칼럼 부분의 열변위, 구조물의 최대최소 온도차를 평가하였다. 모터 부분에 열유속을 부과함과 동시에 베드의 모든 면에 대기 온도(18℃)와의 자연 대류 조건을 설정하였다. 베드의 재료로는 회주철 FC250 을 설정하였으며 회주철 FC250 의 구조적/열적 물성치를 Table 2 에 나타낸다. 열해석에서 구조 해석으로 넘어갈 때의 구조 경계 조건으로는 Fig. 14 와 같이 베드의 하단 부분을 구속하였다. 열유속 부과 후의 모델 G 의 온도 분포 및 열변형 분포를 각각 Fig. 15 와 Fig. 16 에 나타낸다. Fig. 15 의 온도 분포와 같이 열유속 부과 지점을 중심으로 리브를 따라서 열이 전달되어 감을 알 수 있었다. 또한, Fig. 16 과 같이 열변형 분포는 직선 이송 시스템의 가이드 레일을 따라서 확장되어 감을 알 수 있었다.

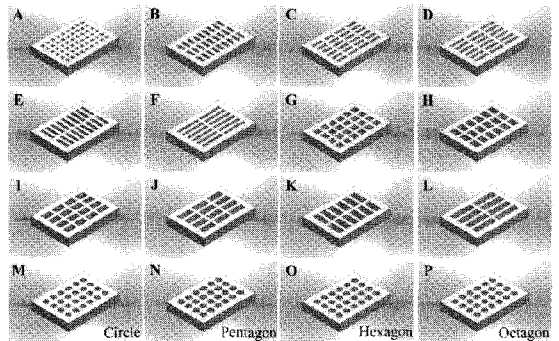


Fig. 13 Bed rib structure for DB

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
Ambient temperature	18℃
Young's Modulus	210 GPa
Poisson Ratio	0.27

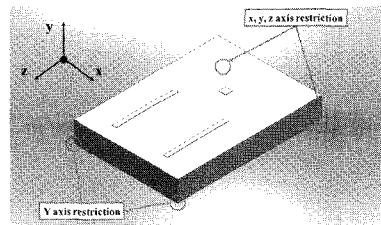


Fig. 14 Boundary condition for thermal deformation analysis

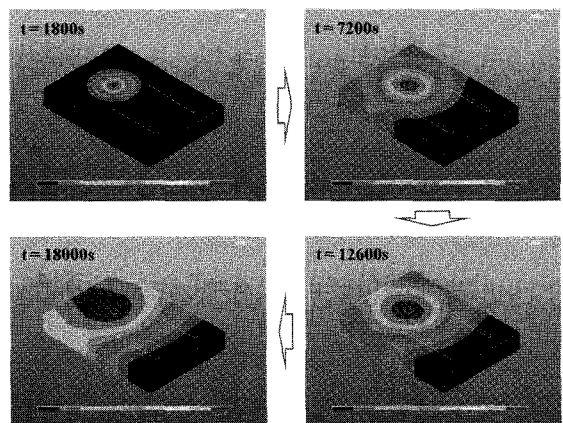


Fig. 15 Temperature distribution with time

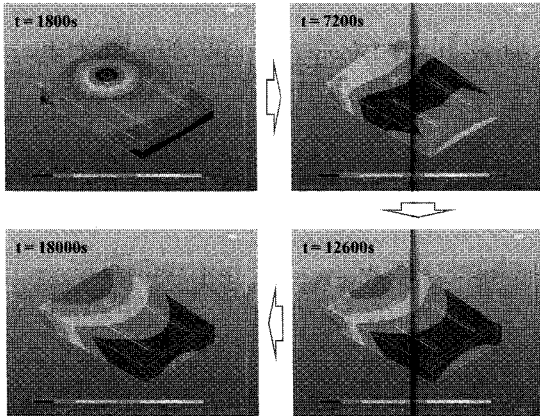


Fig. 16 Thermal deformation distribution with time

모델 G의 정상 상태에서의 최대최소 온도차는 3.534°C이었으며, 레일 부분의 열변위는 52.26 μ m, 칼럼 부분의 열변위는 48.03 μ m이었다. 각 모델에 대해서 열해석을 실행하여 열적 특성 평가 항목을 DB화한 것을 Fig. 17에 나타낸다. DB Chart를 바탕으로 리브의 치수가 커질수록 열전달이 쉽게 일어나서 구조물의 최대최소 온도차가 커짐을 알 수 있었으며, 리브의 형상이 다각형에 가까울수록 구조물의 최대최소 온도차가 작아짐을 알 수 있었다. 그리고 리브의 치수가 주된 열전달 방향으로 커지면 레일에서의 열변위는 작아지지만, 칼럼에서의 열변위는 커졌으며, 주된 열전달 방향과 수직 방향으로 커지면 레일 및 칼럼에서의 열변위는 커짐을 알 수 있었다.

따라서 열원이 되는 지점에 리브를 집중적으로 배치함으로써 레일 및 칼럼에서의 열변위를 최대한 억제되며, 구조물의 최대최소 온도차 또한 억제됨을 알 수 있었다.

7. 칼럼 구조물의 열변형 안정 리브 패턴 생성 기법

7.1 칼럼 구조물의 열변형

공작기계 구조물 중에서 베드와 함께 리브 구조물이 가장 많이 사용되고 있는 구조물로는 칼럼을 생각할 수 있다. 가장 일반적인 머시닝센터 칼럼의 경우에는 주축 헤드 부분에서 발생한 열량이 칼럼에 부착되어 있는 직선 이송 시스템을 통해서 이동하기 때문에 주축 모터와 주축 베어링에서 발생하는 열량이 칼럼의 열변형에 가장 큰 영향을 끼친다.

Plate		A	B	C	D
Deformation (μ m)	Rail	49.833	51.133	49.568	49.194
	Column	51.614	51.986	50.836	50.816
Temperature Difference(°C)		3.112	3.449	3.479	3.566
Plate		E	F	G	H
Deformation (μ m)	Rail	51.181	48.169	52.260	53.355
	Column	51.878	58.852	53.978	54.598
Temperature Difference(°C)		3.669	3.732	3.584	3.654
Plate		I	J	K	L
Deformation (μ m)	Rail	53.104	53.185	54.419	53.101
	Column	58.653	56.349	54.671	58.160
Temperature Difference(°C)		3.786	3.903	3.972	3.974
Plate		M	N	O	P
Deformation (μ m)	Rail	52.878	52.778	52.834	53.009
	Column	59.917	53.898	54.343	53.984
Temperature Difference(°C)		3.417	3.518	3.486	3.471

Fig. 17 DB for bed rib structure

실제로 공작기계에서 발생하는 열변형의 가장 큰 부분은 주축 모터에서 발생하는 열량에 의해서 칼럼이 휘어지는 현상이다. 이와 같은 칼럼의 휨 현상은 형상 창성 운동을 시행하는 공작기에 있어서 공구와 공작물 사이의 상대적인 거리를 변화시켜 공작기계의 가공 정밀도에 현저하게 악영향을 끼친다.

이와 같은 주축 모터가 칼럼의 앞면에 배치되어 있으면 칼럼이 전체적으로 뒤로 휘어지는 현상을 보이며, 주축 모터가 뒷면에 배치되어 있으면 칼럼이 전체적으로 앞으로 휘어지는 현상을 보이게 된다. 본 연구에서는 최신 머시닝센터의 설계 동향에 따라서 주축 모터가 앞에 배치되어 있는 상황을 고려한다.

7.2 열적 특성 평가 항목 및 칼럼 리브 모델

칼럼의 리브 구조물 역시 베드의 리브 구조물과 동일한 논리를 바탕으로 열적 특성 항목을 평가할 수 있다. 칼럼의 경우에는 휨 현상이 열변형에 있어서 가장 큰 부분을 차지하고 있기 때문에 칼럼의 휨 현상을 정량적으로 나타내는 항목이 필요하다. 따라서 칼럼의 열적 특성 평가 항목으로

는 다음과 같은 사항을 설정하였다.

1. 구조물의 최대최소 온도차
2. 칼럼의 수직 방향 기울기
3. 칼럼의 수직 방향 온도 구배

칼럼 구조물의 열변형 역시 구조물 전체의 온도 구배로 인해 발생하기 때문에 구조물의 최대최소 온도차를 열적 평가 항목으로 선정하였다. 그리고 칼럼의 휨 현상을 나타내는 칼럼의 수직 방향 기울기와 칼럼 휨 현상의 원인이 되는 칼럼의 수직 방향 온도 구배 역시 열적 특성 평가 항목으로 설정하였다.

본 연구에서 대상으로 한 칼럼 리브 모델은 Fig. 18 과 같다.

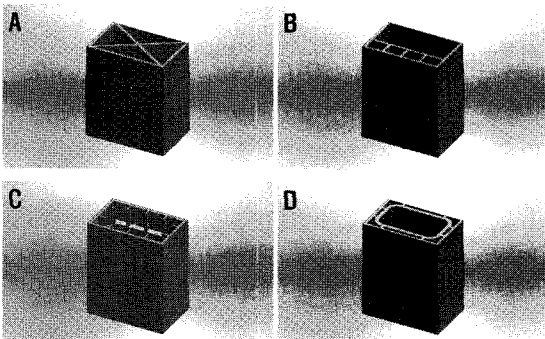


Fig. 18 Column rib structure for DB

상기의 칼럼 리브 모델 중에서 A 모델은 크로스 리브를 사용한 모델이며, B 모델은 전면 벽에 리브를 배치한 이중벽 구조의 모델, C 모델은 칼럼의 벽면에 보강대를 설치한 모델이며, D 모델은 좌우 대칭형의 열 밸런스를 지니도록 한 더블 칼럼 모델이다.

7.3 열해석 및 열적 특성 평가 항목 DB화

칼럼의 경우에는 수직 방향으로의 구조가 존재하고 있기 때문에 베드의 열해석과는 별개로 대류 조건을 조금 더 상세하게 설정할 필요가 있다. 실

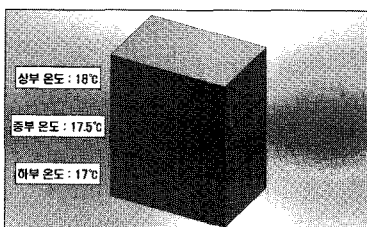


Fig. 19 Boundary condition of heat transfer

제 동작기계가 가동하고 있는 공간의 온도가 칼럼의 수직 방향에 따라서 다르기 때문에 Fig. 19 와 같이 칼럼 구조물의 상부, 중부, 하부로 나누어서 대기 온도를 다르게 설정할 필요가 있다.

상기의 모델을 바탕으로 칼럼의 열해석을 열전도와 열전달로 나누어서 실행한다. 열전도 해석의 경우에는 중첩의 원리를 이용하여 주축 모터 부분에 열유속 경계 조건을 부과하며, 열전달 해석의 경우에는 상기의 대류 조건을 열적 경계 조건으로 부과한다. 열유속 경계 조건을 1초 동안 1500 W/m²

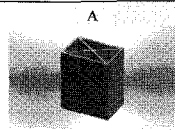
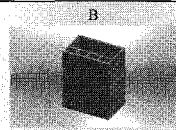
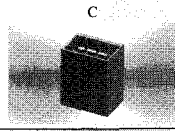
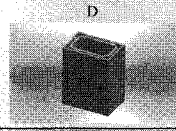
Column		
Inclination[-]	14.242	7.397
Temperature Difference[C]	5.081	2.268
Gradient[C/m]	0.718	0.323
Column		
Inclination[-]	13.601	8.325
Temperature Difference[C]	2.697	2.176
Gradient[C/m]	1.029	0.284

Fig. 20 DB chart of column rib structure on heat conduction

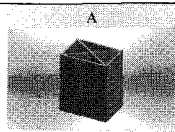
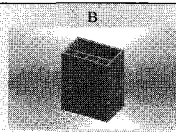
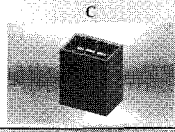
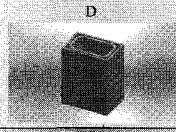
Column		
Inclination[-]	1.562	0.714
Temperature Difference[C]	0.685	0.432
Gradient[C/m]	0.111	0.081
Column		
Inclination[-]	1.439	0.787
Temperature Difference[C]	0.487	0.325
Gradient[C/m]	0.124	0.097

Fig. 21 DB chart of column rib structure on heat conduction

의 열유속을 주축 모터 부분에 부과하였으며, 구조물의 재료로는 베드의 경우와 동일하게 주철 FC250 으로 설정하였다. 주철 FC250 의 물성치는 상기의 Table 2 와 같다.

Fig. 18 의 리브 구조물을 열전도와 열전달로 나누어서 열해석을 실행한 후의 열적 특성 평가 항목을 DB 화한 것을 Fig. 20 과 Fig. 21 에 나타낸다. 열전도와 열전달의 경우 모두 열원 발생 지점 근방에 리브가 집중적으로 배치되어 있는 B 모델과 D 모델이 열적으로 안정된 모델임을 알 수 있었다.

8. 결론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고신뢰 공작기계를 설계하기 위한 4 개의 특성 별 과정과 목표를 설정하여 단계별로 가공오차를 감소시키는 방법을 제안하였다.
- 2) 신개념 공작기계의 신뢰성을 평가하기 위한 방법으로 능력지수 평가법을 도입하였다.
- 3) 능력지수의 향상을 위한 공작기계 주변조건 의 영향인자를 분석하여, 설계 중과 설계 후 단계로 나누어서 변경 인자를 도입하였다.
- 4) 공작기계 베드와 칼럼의 리브 구조물에 대한 열적 특성 평가 항목을 설정하였고, 중첩의 원리를 이용하여 간편 열해석만으로 리브 구조물의 열적 특성을 평가할 수 있는 기법을 개발하고 구조물 형태 열특성 DB Chart 를 제공하였다.
- 5) 열원 부근에 리브를 배치함으로써 구조물의 최대최소 온도차, 열변위, 칼럼의 기울기, 온도 구배가 보강됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "IT 부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발 사업" 의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Sadlon, R., "Mechanical Application in Reliability," Reliability Analysis Center, 1993.
2. Lee, S. Y., "Reliability Engineering," Hyeong Seol Press, 1997.
3. Tsutsumi, M. and Saito, A., "Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers," Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 8, pp. 771-780, 2003.
4. Uddin, M. S., Ibaraki, S., Matsubara, A. and Matsushita, T., "Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors," Precision Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 194-201, 2009.
5. Takeuchi, Y., Okubo, N. and Sata, T., "Control of the Thermal Deformation of a Machine Tools(2nd Report)-Control on Varying Heat Source-," Journal of The Japan Society for Precision Engineering, Vol. 41, No. 490, pp. 1084-1089, 1975.
6. Nishiwaki, N., Hori, S., Tsutsumi, M. and Kunieda, M., "Thermal Deformation of Machine Tools caused by Temperature Variations in Machine Shops," Journal of The Japan Society of Mechanical Engineer, Vol. 53, No. 495, pp. 2408-2413, 1987.