

3차원 유한요소 모델링을 통한 공작기계 구조의 정적 변형도 해석

김 현석*, 이 수정, 정 광섭, 이 대길

Three dimensional finite element analysis of static deflections of a machine tool structures

Kim Hyun Surk, Su Jeong Lee, Kwang Seop Jeong and Dai Gil Lee

ABSTRACT

The three dimensional finite element models for the basic deflection of linear motion guides and ball screws were developed. From the comparison of the results calculated by the finite element method with those by the experiment, it was proved that the modeling method might be applied to real machine tool structures.

From the structural analysis of the headstock of the machine tool, it was found that the static stiffness was calculated within 6.5 % error.

Key Words : Machine Tool, 3-Dimensional Finite Element Model, Linear Motion Guide, Ball Screw, Stiffness, Solid Modeling

최근 공작기계는 가공 기술의 발전에 따라 고강성화 및 고정도화를 추구하고 있다. 공작기계의 고강성화는 구조의 보강을 통해 이루어질 수 있으며, 고정도화는 고정도를 갖는 기계요소의 채용으로 해결될 수 있다. 공작기계의 고정도화를 위해서 공기정압 베어링(Aerostatic Bearing), 유정압 베어링(Hydrostatic bearing) 및 직선운동 가이드(Linear Motion Guide) [1-2]를 사용한 직선운동기구 등이 가장 많이 사용되고 있다.

이들 중에서 직선운동 가이드는 부가적인 주변장치가 필요 없고, 비교적 쉽게 고정밀도를 얻을 수 있으며, 치수별로 규격화되어 있기 때문에 고정밀도를 요구하는 공작기계는 물론 머시닝 센터(Machining Center)에도 사용이 점차 확대되고 있다. 그러나, 직선운동 가이드를 사용하여 공작기계를 설계·제작할 경우, 직선운동 가이드의 공급측에서 제시한 제품 사양서(Catalog) [3]에 근거하여 설계를 진행하게 되며, 그에 따른 설계의 타당성 여부의 검증이 어려운 실정이다.

설계의 타당성에 대한 검증 방법의 하나로서 유한요소

법(Finite Element Method)을 이용하여 구조해석을 수행하는 방법이 있다[4-10]. 이 경우 각각의 구조 부분들에 대한 해석 결과는 비교적 타당성이 인정되지만, 이러한 구조들의 결합으로 구성된 전체 구조에 대한 해석 결과는 많은 오차를 내포하게 되어, 해석 결과의 신뢰도가 저하된다. 전체 구조에 대한 해석에 있어서 오차 발생의 가장 큰 요인은 전체 구조의 각각의 연결 부위에 대한 모델링을 할 때 실제의 연결 부위의 부하 작용 상태를 반영하지 않은 단순화된 요소의 사용에 기인한다. 따라서, 실제 연결 부위의 부하 조건과 유사하게 모델링을 할 수 있다면, 공작기계의 전체 구조에 대한 유한요소 해석을 통해 공작기계의 정적 강성(Stiffness)을 정확히 예측할 수 있게 되고, 구조물의 제작에 앞서 공작기계의 정적 강성과 관련하여 예측되는 문제점을 보완할 수 있게 된다.

본 연구에서는 직선운동 가이드와 볼스크류(Ball Screw)를 사용하는 공작기계의 구조해석을 위해 기계요소들의 모델링 방법을 개발하였다. 개발한 모델링 방법의 타당성을 입증하기 위하여, 직선운동 가이드와 볼스크류를 사용하여 제작한 설계의 공작기계에 개발한 모델링 방법을 적용하고 유한요소 해석을 수행하여 실험 결

과와 비교하였다. 공작기계의 구조해석을 위해 사용한 유한요소 프로그램(Finite Element Program)은 ANSYS 5.0[11]이며, 공작기계의 정적 강성을 구하기 위하여 정적 처짐량(Static Deflection)을 계산하였고, 해석에 사용한 동일 부하에 대한 정적 처짐량을 실험적으로 측정하여 비교하였다.

2. 모델링 방법

직선운동 가이드의 작동 원리는 다음과 같다. 직선운동 가이드 블럭(Linear Motion Guide Block)의 리테이너(Retainer)안에는 볼이 들어 있어서 구름마찰을 통해 마찰저항을 최소화하여 원활하게 움직일 수 있도록 구성되어 있으며, 직선운동 가이드 블럭에 하중이 작용하면 볼과 레일사이에 변위가 발생하여 4개 혹은 6개의 직선운동 가이드 블럭으로 구성되는 평면의 평형을 유지할 수 있도록 되어 있다. 이러한 직선운동 가이드의 특이한 작동 원리 때문에 직선운동 가이드를 사용한 공작기계의 구조를 설계 또는 평가하기 위해서 유한요소법을 사용한 해석을 수행할 경우 직선운동 가이드의 모델링(Modeling) 방법이 매우 중요하다.

대부분의 공작기계의 해석에서는 직선운동 가이드와 같은 연결 부위를 단순화하여 하나의 스프링으로 모델링을 하여 해석한다. 그러나, 직선운동 가이드의 경우 직선운동 가이드 블럭 내의 볼과 레일은 직선상의 여러 점에서 연속적으로 점 접촉하여 힘을 전달하기 때문에 단순한 스프링으로 해석하는 경우 오차 발생의 원인이 된다.

직선운동 가이드의 작동 원리를 살펴보면 직선운동 가이드 블럭 내의 볼과 레일이 직선상의 연속적으로 점 접촉을 하고 있어서, 실제 형상에 가까운 모델링을 위해서는 각각의 볼과 레일의 접촉 부위를 스프링으로 모델링하여야 한다. 그러나, 이러한 작업은 모델링을 복잡하게 하며, 각각의 볼에 적당한 크기에 따라서 해석의 결과에 영향을 끼치기 때문에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하고 손쉽게 직선운동 가이드를 모델링하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

직선운동 가이드 블럭이 설치되는 부분에 직선운동 가이드 블럭에 해당하는 크기의 솔리드 블럭(Solid Block)

을 생성시킨 후, 직선운동 가이드의 힘-변위 곡선으로부터 응력-변형률 관계로 변환시키고, 변환된 응력-변형률 관계 곡선으로부터 솔리드 블럭의 탄성계수를 얻는다. 이러한 방법으로 계산된 탄성계수값은 솔리드 블럭의 물성 자료로 사용된다. 모델링 된 직선운동 가이드의 경계조건을 적용시키기 위해서 직선운동 가이드에서 볼과 레일이 실제로 접촉하는 부위를 절집으로 선정하였다. 이러한 방법으로 직선운동 가이드를 모델링하게 되면 실제 직선운동 가이드의 작동 원리와 잘 부합하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 직선운동 가이드 블럭과 레일사이의 힘-변위 관계 곡선을 이용하여 직선운동 가이드 블럭과 레일을 하나의 솔리드 블럭으로 모델링하였다. Fig. 1은 직선운동 가이드의 구조와 직선운동 가이드의 모델링을 위한 솔리드 블럭을 나타낸다. Fig. 2는 직선운동 가이드의 힘-변위 곡선을 나타내고 있다.

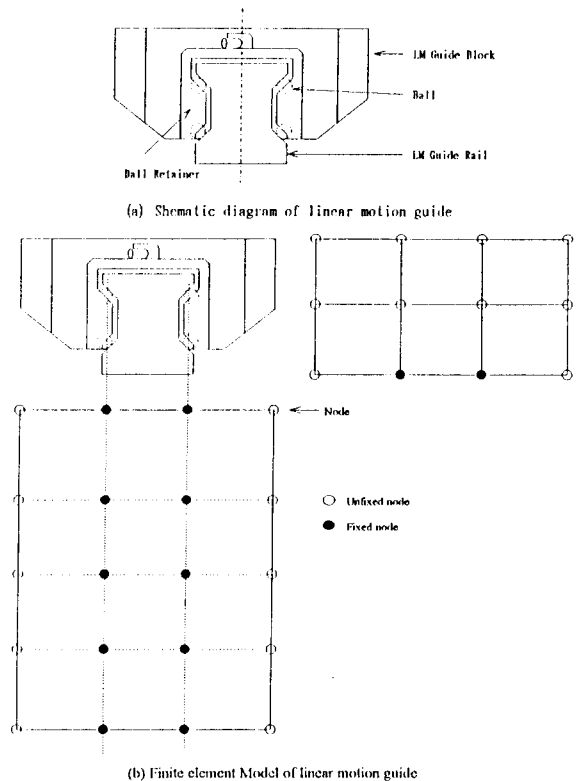


Fig. 1 Schematic illustration and finite element model of linear motion guide

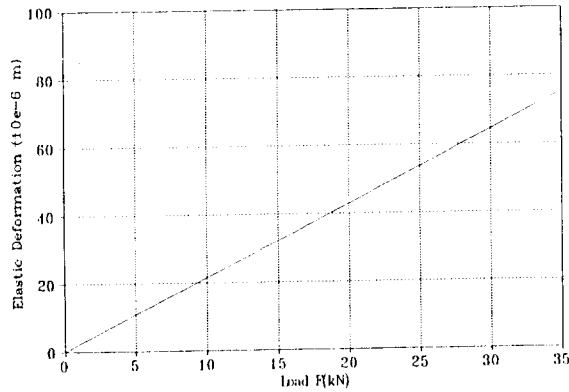


Fig. 2. Load-deflection curve of linear motion guide

본 연구에서 개발한 직선운동 가이드의 모델링 방법이 타당성 여부를 검증하기 위해서 실제로 직선운동 가이드와 볼스크류를 사용하여 제작된 공작기계를 대상으로 해석과 실험을 병행하여 비교 검토하였다.

본 연구를 위해 선정된 해석 대상은 Straight Type 평면 연삭기의 헤드스톡(Headstock) 부분이다. 헤드스톡 부분을 해석 대상으로 선택한 것은 Straight Type 평면 연삭기에 있어서 강성이 가장 취약한 부분이며, 가공에 직접적인 영향을 미치기 때문에 연삭기를 설계할 때 가장 주의해야 할 부분이기 때문이다. 해석 대상인 헤드스톡 부분의 강성을 예측하기 위하여 정적 처짐량을 계산하였으며, 실제 공작기계의 정적 처짐량은 헤드스톡의 전방 끝단에 총 10.2kg (100 N)의 추를 올려 하중을 가한 후 발생한 정적 처짐량을 측정하였다. 실험 결과와 해석 결과의 비교를 위해서 헤드스톡의 자중만 존재하는 경우와 100N의 하중이 자중과 함께 헤드스톡에 걸리는 경우로 나누어 해석을 수행하였다. 이 두 가지 해석 결과에서 정적 처짐량의 차이값을 실험 결과와 비교하여 해석 결과의 타당성 여부를 검증하였다. Fig. 3은 100 N의 하중을 헤드스톡에 가한 경우 컬럼의 위치에 따른 헤드스톡의 정적 처짐량을 나타내고 있다. 실험에서의 100 N의 하중에 대한 평균 정적 처짐량은 9.37 μm 이다. 이 값을 정적 강성으로 환산하면 10.67 N/ μm 가 된다. Fig. 4는 컬럼에서의 헤드스톡의 높이가 110 mm인 경우 하중의 변화에 따른 헤드스톡의 나타낸다.

Fig. 5는 헤드스톡 부분을 유한요소로 모델링한 것이며, 해석에서는 굽힘 하중을 전달할 수 있도록 개선된 8

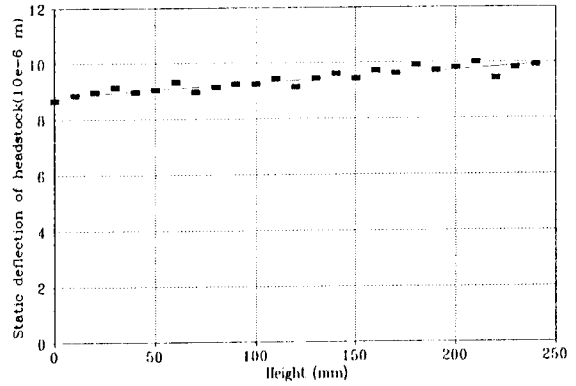


Fig. 3. Static deflections of headstock in experiments w.r.t.

height of headstock on the column

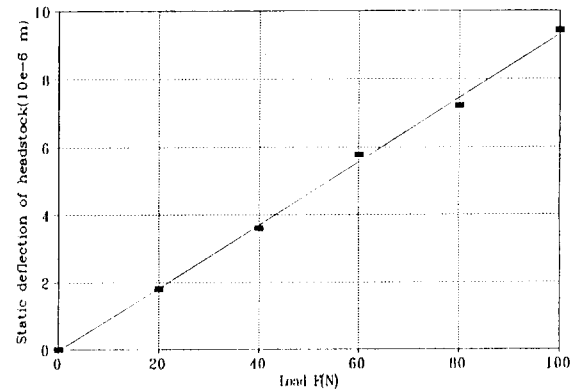


Fig. 4. Static deflection of headstock in experiments w.r.t.

applied load (height=110 mm)

절점의 6면체 요소를 사용하였다. 경계조건(Boundary Condition)은 실제적으로 직선운동 가이드와 볼스크류에 작용하는 부하조건에 가깝도록 다음과 같이 설정하였다. 직선운동 가이드의 경우, Z축 방향(컬럼에서의 이동방향)의 레일을 따라 자유롭게 움직일 수 있으나, 직선운동 가이드 블럭은 헤드스톡에 고정되어 있고, 레일은 컬럼에 고정되어 있다. 따라서 이들을 함께 모델링한 솔리드 블럭의 경우 경계 조건은 X축과 Y축 방향으로는 변위를 고정을 시키고, Z축 방향으로로는 변형이 가능하도록 설정하였다. 또한 볼스크류의 너트 부분은 헤드스톡에 고정되어 있고, 서보 모터의 브레이크 장치에 의해 정지상태인 경우 Z축 방향(컬럼에서의 이동방향)으로 고정되어 헤드스톡의 하중의 대부분을 지지한다. 그러나, X축

- 1) 직선운동 가이드를 솔리드 블럭으로 모델링함으로써 솔리드 블럭 전체가 스프링의 역할을 할 수 있도록 하였으며, 실제 직선운동 가이드의 작동 원리에 가까운 해석이 가능하였다.
- 2) Straight type 평면 연삭기의 헤드스톡 부분의 정적 강성을 예측하기 위해 제시한 모델링 방법을 사용하여 유한 요소 해석을 수행하고, 실험을 통해 비교하였으며, 6.5%의 오차를 나타내었다.
- 3) 공작기계 전체의 정적 강성도를 계산하기 위해서는 헤드스톡뿐만 아니라 컬럼과 세들에 대한 해석이 포함되어야 한다.

참 고 문 헌

- 1) M. Weck, *Machine Tools*, John Wiley & Sons, Vol.2, 1984, pp 173~205.
- 2) A. H. Slocum, *Precision Machine Design*, Prentice-Hall inc., 1992.
- 3) *The Linear Motion Product Range (Catalog)*, Star Co., German, 1990.
- 4) O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method*, 4th. edn., McGraw-Hill, Vol.1, 1989.
- 5) N. Kikuchi, *Finite Element Methods in Mechanics*, Cambridge University Press, 1985.
- 6) G. Dhatt and G. Touzot, *The Finite Method Displyed*, John Wiley & Sons, 1984.
- 7) E. Zahavi, *The Finite Element Method in Machine Design*, Prentice Hall Inc., 1992.
- 8) A. D. Dimarogonas, *Computer Aided Machne Design*, Prentice Hall Inc., 1989.
- 9) E. Encarnacao and E. G. Schlechtendahl, *Computer Aided Design*, Springer -Verlag., 1983.
- 10) J. D. Faux and M. J. Pratt, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horward / Wiley, 1981.
- 11) *Solid Modeling for Revision 5.0 (ANSYS User Manual)*, Swanson Analysis Systems Inc., 1989.