

초정밀 가공 기계의 진동 특성 해석

김성걸* · 박영일** · 김석현***

Analysis on the Vibration Characteristics of Ultra Precision Machine Tools

Seong Geol Kim * · Young Ii Park ** · Seock Hyun Kim ***

ABSTRACT

Ultra-precision machine tool equipped with the diamond bite tip is used to machine optical products, drums of VTR or computer hard disk. It needs nano technology in the surface roughness of workpiece. To perform the nano scale machining, ultra-precision machine tool must be designed and manufactured in consideration of the vibration characteristics. In this paper, using the finite element analysis, we investigate the modal parameters of the ultra-precision machine tool structures, which use cast iron, granite and alumina ceramic for the bed materials. To verify the numerical results, we manufacture a model of ultra-precision machine tool using granite bed and perform impulse test. Through the theoretical and experimental analyses, we could compare and estimate the vibration characteristics of the three models for the ultra-precision machine tools.

1. 서 론

초정밀 제품을 가공하기 위해서는 가공 기계의 스피들, 공구대, 이송대, 측정장치 그리고 기계구조등, 각 부분의 정밀도는 물론, 조립되었을 때, 진체 시스템의 정밀도

가 유지되어야만 초정밀 절삭가공이 가능하다. 이와 같은 정밀도를 유지하기 위하여 기초가 되는 초정밀 가공기계의 구조물은 일반 공작기계의 특성과는 달리 시간과 온도변화에 따라 형상 및 치수 정밀도가 안정되어야 하고, 기계작업 중 발생하는 내부 및 외부진동의 흡수성이 뛰어나야 하며, 공작기계의 정적 및 동적 하중을 충분히 지지할 수 있어야만 초정밀 가공기계의 기능을

* 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

** 서울산업대학교 기계설계학과

*** 강원대학교 정밀기계공학과

발휘할 수 있다[1]. 특히, 베드부는 동작기계의 기초이므로, 초정밀 가공의 경우, 베드의 역할은 더욱 중요하며, 기존의 주철(cast iron)재 베드에서 화강암(granite)재 질로, 앞으로는 신소재인 알루미늄나 세라믹(alumina ceramic)으로 발전되어가는 추세이다[2~4]. 베드의 진동은 초정밀가공시 공구의 위치에 영향을 주어 공작물의 표면에 이상변형을 발생시킬 수가 있다[5]. 본 논문에서는 초정밀 동작기계의 베드재료인 주철 및 미래의 베드재료인 화강암, 알루미늄나 세라믹을 사용한 초정밀 동작기계의 동적 수치해석을 수행하여 구조물의 고유진동수와 고유모드를 계산한다. 그리고 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 신소재인 화강암재의 베드를 제작하고, 간단한 초정밀 동작기계 시스템을 구성하여 진동모드시험을 수행한다. 일반적으로 동작기계의 베드는 정반과 동일한 기능을 갖는 것으로 볼 수 있으며, 베드 상부의 진동이나 열전도, 열팽창 등을 차단, 가공정밀도의 저하를 방지하는 역할을 수행한다. 따라서, 베드부의 진동특성을 사전에 예측하고, 요구되는 진동특성을 갖도록 베드부를 설계하는 것이 초정밀동작기계의 개발을 위하여 중요한 연구과제가 된다.

2. 초정밀 동작기계의 수치 해석

2.1 유한요소 모델링

본 논문에서는 초정밀 동작기계 구조물의 모델링 방법으로 다음과 같은 가정을 하였다. 첫째, 스펀들과 X-테이블 및 베드의 볼트 결합부(bolted joint) 모델링에서 볼트 결합부 위치의 절점만 결합하고 나머지 부분은 1mm 간격으로 띄웠다. 둘째, 주축과 인덱스 테이블(index table)은 공기베어링(air bearing)에 의하여 지지되어 있어, 높은 진동수를 갖는 동작기계 구조물의 진동 특성에는 영향을 거의 미치지 않는 것으로 보고 모델링에서 제외하였다. 셋째, 일반

적으로 동작기계를 설치할 때는 베드 바닥면을 방진재나(isolation material) 공기스프링(air spring)으로 설치하지만, 유한요소모델의 단순화를 위하여 베드 바닥면 전체를 자유로이 움직이게 모델링하였다. 본 논문에서 사용된 유한요소 모델은 초정밀 동작기계 전체를 단순화하여 모델링하였으며, 표기상 구분을 위하여 초정밀 동작기계를 베드부와 주축부(베드 위부분)로 나누었다. 유한요소해석에서 주축부는 주철과 알루미늄나 세라믹 등 2종류의 재료를 사용하였고, 베드부는 주철, 화강암, 알루미늄나 세라믹 등 3종류의 재료로 모델링하였다. 모델 1에서 주축부는 주철재를, 베드부는 화강암을 사용하였고, 모델 2에서 주축부는 주철재를, 베드부는 알루미늄나 세라믹을 사용하였다. 모델 3에서 주축부와 베드부 모두 알루미늄나 세라믹을 사용하였고, 모델 4에서는 주축부와 베드부 모두 주철재를 사용하였다. 모델 1, 2, 3을 유한요소 모델링하기 위하여 사용된 절점수는 741개이다. 8절점 육면체요소를 이용하여 모델링하였고, 사용된 요소수는 405개이다. 모델 1, 2, 3에서의 베드부는, 내부의 빈곳이 없는 구조로 되어 있다. 모델 4는 절점수를 756개, 요소수를 361개로 모델링하였다. 일반적인 주철베드의 형상은 베드내부가 비어 있으나, 모델 1, 2, 3과 모델 4의 주축부 외형은 동일하므로 모델 1을 대표적으로 Fig. 1에 도시하였다.

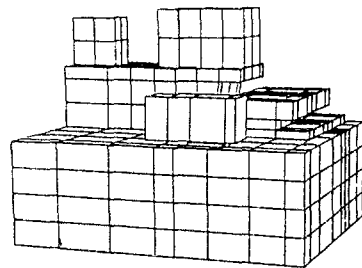


Fig. 1. Finite element model of an ultra precision machine tool

PC용 유한요소해석 패키지인 SUPER-SAP을 사용하여, 2000Hz 범위에서 강체 (rigid body) 모드를 포함한 15개의 모드를 계산하였다. Table 1은 유한요소해석을 위하여 사용된 재료들의 물성치를 보인다.

Table 1. Properties of used materials

	Weight Density (N/m^3)	Young's Modulus (N/m^2)
Case Iron	7.70701×10^4	1.17×10^{11}
Granite	2.6084×10^4	3.90×10^{10}
Alumina Ceramic	3.8243×10^4	3.70×10^{11}

2.2 수치해석 결과

Table 2는 모델 1, 모델 2, 모델 3, 모델 4의 모드해석 결과를 나타내고 있으며, Fig. 2~Fig. 5는 모델 1의 대표적인 모드 형상을 보이고 있다.

Table 2. Result of modal analysis

No. of Mode	Natural Frequency(Hz)			
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
1	399.4	536.6	1126.6	361.5
2	483.6	673.9	1422.7	471.4
3	660.2	849.7	1903.6	666.4
4	767.1	916.3	1982.6	742.3
5	1099.9	1106.7	2225.7	928.6

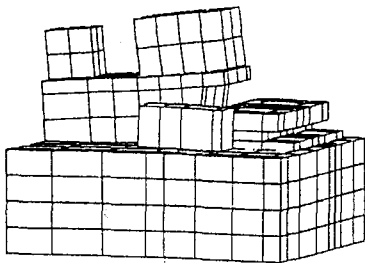


Fig. 2. 1st mode of model 1

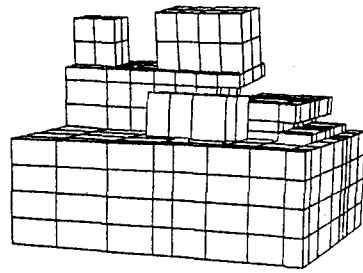


Fig. 3. 2nd mode of model 1

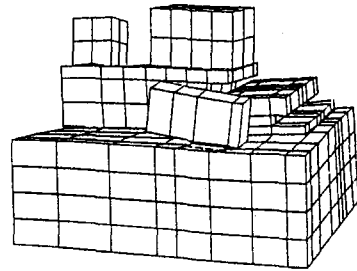


Fig. 4. 3rd mode of model 1

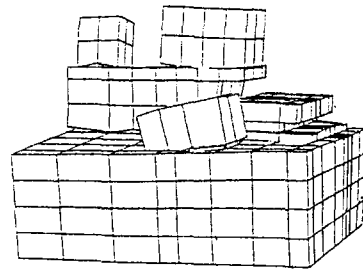


Fig. 5. 4th mode of model 1

각 모델에서 사용된 재질을 비교해 보면, 주철재가 단위 체적당 질량이 가장 크고 그 다음으로 알루미늄 세라믹이며, 화강암이 가장 가볍다. 또한, 재료의 탄성계수(E)는 알루미늄 세라믹이 가장 크며, 주철이 그 다음이며, 화강암이 가장 작은 값을 나타낸다. 그러나 전체 시스템의 굽힘강성은 탄성계수와 관성모멘트의 곱으로 표시되므로

실질적인 굽힘강성의 크기는 베드내부가 빈 주철재보다 화강암재가 더 크게 된다. 이와 같은 재료의 특성으로 인하여, 각 모델에 대하여 서로 해당되는 모드형상과의 고유진동수를 비교하면, Table 2와 같다. 동작기계 구조물 전체를 주철재로 모델링한 모델 4의 시스템 고유진동수가 가장 낮고, 모델 1, 모델 2, 모델 3의 순서로 해당 고유진동수가 증가하게 된다.

모든 모델에서 모드형상은, 저차에서는 주축부만의 변형이 주로 나타나고 있고, 베드부의 변형은 거의 발생하지 않으나, 고차로 갈수록 주축부의 변형과 더불어 베드부의 변형도 발생되었다. 모델 별로 서로 해당되는 모드를 비교하면, 강체모드를 제외한 첫번째, 두번째 모드에서는 베드부의 변형은 거의 없고, 스피들이 있는 주축대의 1차 굽힘 모드를 나타내며, 세번째 모드 이후부터는 각각의 모델에 대하여 모드의 순서가 바뀌는 것을 확인할 수 있었다. 베드부의 변형을 비교하면, 베드재질이 주철재인 모델 4의 변형이 가장 크므로 진동면에서 불리하다. 주철베드 내부의 공동으로 베드부의 강성이 저하되어 변형이 크게 발생되기 때문이다. 그 다음이 화강암재 베드를 사용하는 모델 1이고, 알루미나세라믹을 사용하는 모델 2와 모델 3에서는 베드부의 변형이 거의 나타나지 않았다. 화강암을 베드 재료로 사용한 모델 1에서도 고차모드에서 베드부의 변형이 나타났는데, 이는 화강암재가 주철재에 비하여 탄성계수가 작고, 주철 주축부와의 강성 차이로 상대적으로 변형이 크게 발생되기 때문인 것으로 보인다. 그러나 화강암재의 베드는 알루미나세라믹에 비해서 제작과정이 비교적 단순하고, 가격도 저렴할 뿐 아니라, 주철재에 비해서는 열전도와 감쇠효과가 훨씬 우수하므로, 초정밀 동작기계의 베드재료로서 경쟁력을 가진다. 알루미나 세라믹을 사용한

모델 2와 모델 3에서는 구조물의 고유진동수들이 다른 재료를 사용한 베드에 비하여 상당히 큰 값을 나타내고 있고, 베드부의 변형도 거의 없음을 관찰할 수 있었다. 오늘날 신소재로서 각광을 받고 있는 알루미늄이나 세라믹은 열전도, 열팽창, 감쇠효과, 동특성등 모든면에서 다른 재료보다 월등한 면을 나타내고 있으나, 아직 실용화는 되지 못하고 있다.

3. 초정밀 동작기계의 실험적 해석

3.1 실험장치와 방법

유한요소에서 결과의 검증을 위하여, 초정밀 가공기계의 구조모델을 제작하였다. 알루미나세라믹 구조는 제작이 매우 어려우므로, 현재 주철재를 대체하는 재료로 각광을 받는 화강암재 베드를 사용하여 Fig. 6

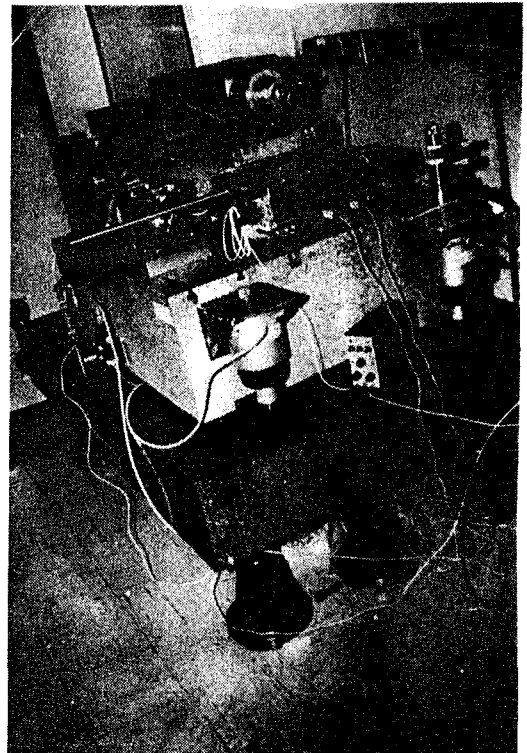


Fig. 6. Ultra precision machine tool.

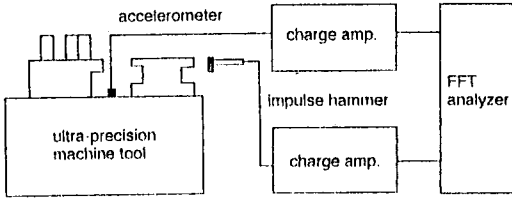


Fig. 7. Schematic diagram of experimental set-up for impulse test.

에서와 같이 단순화시켜 제작하였다. 충격 시험법(impulse test)을 이용한 구조물의 동특성을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같은 실험장치를 사용하였다. 초정밀 가공기계의 한 지점에 가속도계를 부착한 후, 충격 햄머(impulse hammer)로 타격하여 충격력과 가속도를 FFT 신호분석기에 입력하여 주파수응답함수를 구한후, 모드변수 추출을 위한 커브피팅작업을 수행하여 구조물의 고유진동수와 고유모드를 구하였다(6, 7)

실제 구조물은 X, Y, Z의 3축 방향으로 변위를 발생시키나, 수치해석 결과에서 대부분의 모드에서 변형이 상하 Z방향으로만 발생되었으므로, 가속도계는 Z방향으로 부착하여 측정하였다. 타격점은 99개를 선정하였으며, 그 중 33번 위치인 베드 상단부

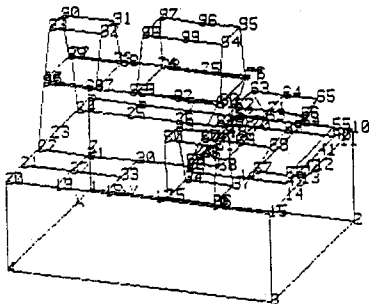


Fig. 8. Impact positions for the impulse test.

에 가속도계를 부착하였다. Fig. 8은 타격점의 위치를 표시한다.

3.2 모드시험 결과

본 실험에서 측정된 구조물의 고유진동수를 Table 3에 나타내었고, 고유모드는 ZONIC 모달 프로그램을 이용하여 추출하였다. Fig. 9~Fig. 12은 측정된 모드중 대표적인 예를 보인다.

Table 3. Result of modal analysis

No. of Mode	Natural Freq. (Hz)
1	345.0
2	457.5
3	635.0
4	742.5
5	1000.0

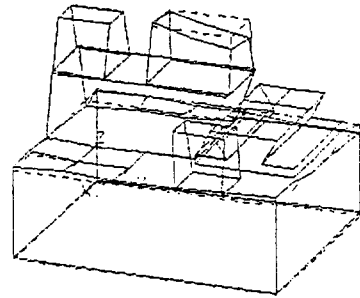


Fig. 9. 1st mode by modal testing.

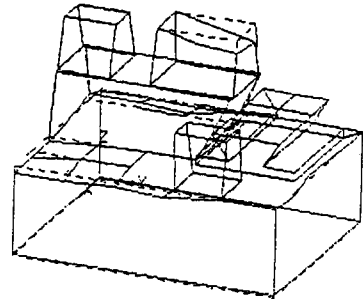


Fig. 10. 2nd mode by modal testing.

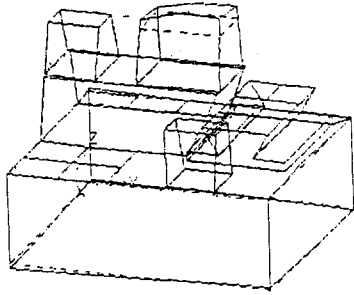


Fig. 11. 3rd mode by modal testing.

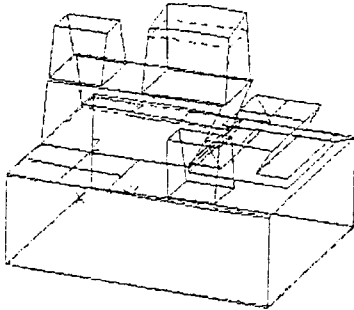


Fig. 12. 4th mode by modal testing.

실험과 수치결과는 Table 2의 모델 1과 Table 3으로부터, 10% 이내의 오차로 비교적 잘 일치하고 있다. 이 차이는 결합부의 단순 모델링, 구조모델링의 단순화 및 실험 오차등에 기인하는 것으로 보인다. 모드형상도 Fig. 2~Fig. 5와 Fig. 9~Fig. 12를 비교할 때, 다소간의 차이는 보이나, 전체적인 형상은 일치하고 있으므로 설계단계에서, 유한요소해석을 통하여 전체 구조물의 진동특성을 파악하는 것이 가능할 것으로 보인다. 한편, 실험을 통하여 구한 초정밀 동작기계의 진동모드를 살펴보면 대부분의 모드에서 스피들이 있는 주축대의 변형이 크게 발생되고 있고, 2차 이상 모드에서는 베드위에 있는 마찰구동부(friction drive)의 변형이 크게 관찰된다. 마찰구동부는 가공에 직접적인 영향을 미치지는 으나 이 부분의 강성을 보강함으로써, 변형

을 저감시킬 수 있을 것이다. 스피들은 가공에 직접적으로 큰 영향을 주므로, 방진설계, 고강성 유지등을 통하여 외부진동의 유입을 차단하고, 내부진동을 작게 하기 위한 정밀설계가 요구된다. 본 연구의 연구대상인 화강암재 베드부의 변형은 실험해석에서도, 수치해석에서도 유사하게 다른 부분에 비하여 매우 작게 나타났다. 베드위에 있는 X-테이블은 베드와 연결되는 부분이 많으므로 베드와 거의 동일한 움직임을 보였다. 따라서, 최소한 진동특성면에서는 화강암재의 베드가 주철재 베드에 비하여 초정밀가공에 보다 적합한 것으로 평가된다. 신소재인 알루미늄세라믹과 비교할 때, 강도나 열변형, 열전도 및 진동특성에서 열세이나, 가공성 및 가격경쟁력이 있는 것으로 평가된다.

4. 결 론

초정밀 동작기계 구조물의 고유진동수가 높을수록 동작물의 표면조도가 좋아진다는 일반적 사실로부터, 동작기계의 동적 안정성에 가장 영향이 큰 베드의 재질을 변경하면서 유한요소해석을 수행하였다. 초정밀 가공기계의 동적 특성을 비교하기 위하여, 기존의 주철재베드, 대체재인 화강암베드 및 신소재인 알루미늄 세라믹 등 3가지의 베드를 모델링하였다. 동특성 측면에서 알루미늄 세라믹을 사용한 구조물이 가장 안정된 해석결과를 보였고 화강암재, 주철재 순서였다. 그러나 알루미늄 세라믹재료는 아직 실용화 단계가 아니므로, 현재 초정밀 동작기계의 베드재료로 각광받는 화강암재의 동적 우수성을 확인할 수 있었다. 또한, 수치해석의 검증을 위하여 주축대, X-테이블, 마찰구동부, 화강암베드부로 구성된 단순 초정밀 동작기계 시스템을 제작하였다. 수치해석과 실험해석의 결과를 비교할 때, 고유진동수는 10%이내의 오차를 보였으며, 전체 모드는 대부분 일치하였다. 유

한요소해석과 모드시험을 통하여 초정밀
공작기계의 구조진동특성을 예측하고 초기
설계의 기반을 구축할 수 있었다.

Reference

1. P.R.Hannah, "A Personal Prospective on the Quest for Higher Precision Diamond Turning Lathes", Proc. of the Int. Con. for Ultraprecision Tech., pp.236~251, 1988.
2. M.Tsutsumi, K.Unno, M.Yoshino and F.Yamauchi, "New Material Application to Ultraprecision Lathe", Proc. of the Int. Con. for Ultraprecision Tech., pp.171~183, 1988.
3. M.Weck, and R. Hartel, Ultraprecision in Manufacturing Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
4. S. A. Abdin, R.K. Shenoy and M.E. Visveswaran, "Investigation on Granite as a Material for Metrology Aids", Annals of the CIRP, vol. 27, pp.377~381, 1978.
5. M.Weck, R.Hartel and T.Bispink, "Limits of Workpieces Accuracy caused by the Geometrical and Dynamical Behavior of Ultraprecision Diamond Turning Machines", Proc. of the Int. Con. for Ultraprecision Tech., pp. 153~170, 1988.
6. D.J.Ewins, Modal Testing : Theory and Practice, Reaserch Studies Press, 1984.
7. J.S.Bendat and A.G.Piersol, Engineering Applications of Correlations and Spectral Analysis, John Wiley & Sons, 1980.