

## Desktop 가공기의 제어특성 평가

박종영\*(부산대 대학원), 이득우(부산대), 김정석(부산대), 정우섭(주테크맥)

### The control characteristic evaluation of Desktop machine tool

J. Y. Park(Graduate School, Pusan National Univ.), D. W. Lee(Pusan National Univ.),  
J. S. Kim(Pusan National Univ.), W. S. Jeung(TechMac Co.)

#### ABSTRACT

Recently, as the demand of small-sized precision parts is rising in precision industry such as mobile, automobile, optic, etc, the requirement of small-sized machine tool is increasing. Desktop machine tool define small-sized machine tool that is able to install in table. According to diminishing in size, Desktop machine tool is able to economize production cost by reducing work area and consuming electric power. But Desktop machine tool generates vibration in acceleration and deceleration modes by inertia force of moving part. Also vibration is generated when it move simultaneously two axis or three axis. Such generating vibration situation is reason of declining stiffness of machine tool structure because of smallizing in size. And this vibration has a large effect on precision of machining products. Therefore, evaluating of the control characteristic is necessary for minimizing vibration of machine tool as much as possible to accomplish precision machining of small-sized parts.

**Key Words** : Machine Tool (공작기계), Desktop, Small-sized Machine(소형기계), Precision Machining (정밀가공)

#### 1. 서론

최근 공작기계에 있어서는 고속 주축 시스템의 개발과 리니어 모터를 사용한 고속 이송 시스템이 개발되어 고속 지능형 가공시스템의 연구가 활발히 진행되고 있지만 고집적, 소형화 되어가는 초정밀 부품에 대한 수요의 증가로 인하여 이에 대한 소형 부품을 생산하기 위한 시스템 개발이 필요한 실정이다. 소형부품 산업은 특히 구성 부품의 크기가 1mm 이하인 정밀 시계 부품과 인공치아, 의료용 부품 산업에서는 제품의 크기에 비하여 에너지, 공간, 생산비용의 측면에서 효율성이 저하되고 있다. 소형부품 산업은 IT 산업의 발전과 더불어 항공분야, 광학분야, 자동차 산업 등 여러 분야에서 그 중요성이 더욱 증가하고 있으며, 이에 대한 소형금형 산업도 발전하고 있다.

가공시스템의 소형화는 생산비용, 에너지 등의 측면에 있어서 많은 절감효과를 가져올 수 있으며 공간의 활용에 있어서도 필요한 공간에 언제나 설치 해제가 용이하여 생산의 유연성을 가져 올 수

있다. 그러나 Desktop 형태의 가공시스템은 구동 요소 부품의 소형화와 자체 규모의 소형화로 인하여 강성적인 면에서 문제가 발생하게 되며 가감속이나 2/3 축 동시구동시에 이송부의 관성력에 의해 진동이 발생하게 된다. 진동 발생은 공작기계의 정밀도를 평가하는 중요한 요소로써 정밀 소형 부품을 생산하는 Desktop 가공시스템에 있어서는 제품의 질을 평가하는 중요한 요소로 작용하게 된다. Desktop 가공기의 필요성이 증가하고 있음에도 불구하고 이러한 시스템의 특성에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 정밀 부품 및 소형 금형을 생산할 수 있는 고강성 Desktop 가공기를 설계 및 제작한 후 진동상태, 정밀도, 제어특성을 평가함으로써, 최적의 성능을 구현하기 위한 방안을 규명하고자 한다.

#### 2. Desktop 가공기의 고강성 설계

##### 2.1 구조 및 요소 선정

일반적으로 공작기계의 형태는 칼럼 이동형과 테

이블 이동형의 두 가지 형태로 나누어진다. 첫번째 칼럼 이동형은 3 축이 집적되어 가동 중량이 일정하여 운동특성 예측이 유리하지만 축이 집적되어 구조적 정밀도 확보가 어렵고 이송부의 질량 증가로 가감속시 충격량과 동적 안정성이 불리하다. 두번째 테이블 이동형은 구조적 정밀도에 유리하며 가동 중량의 감소로 가감속시 진동 발생이 적으며 비교적 기계의 고강성화를 실현할 수 있다. 그러나 운동특성 예측이 어렵다는 단점이 있다.

최초 설계는 제어 특성을 파악하기 위해 제어 특성이 일정한 칼럼 이동형을 선택하였으나 칼럼 이동형은 Y 축 이송부의 질량이 증가함에 따라 X 축과 Z 축이 집적되어 있는 테이블 이동형을 최종 선택하여 설계하였다. 칼럼 이동형의 경우 Y 축의 강성을 향상시키기 위해서는 요소 부품의 크기가 커지게 되므로 Desktop 가공기가 수용할 수 있는 범위를 벗어나는 구조가 되기 때문에 강성을 충분히 높일 수 있는 구조로 사용하기에는 사용할 수 있는 요소부품의 크기는 한정적이었다. 이송계의 요소부품은 고정밀 운동이 가능하도록 볼스크류와 LM Guide 를 사용하였으며, 서보 모터를 사용하여 피드백 제어가 가능하도록 하였다.

## 2.2 고강성 설계

Desktop 가공기를 경량화 시키기 위한 방법은 단지 최대한 이송부의 구성 요소들을 집적 시킴으로써 이송부의 질량을 최대한 감소시키는 방법밖에 없다. 베이스와 X 축 지지대는 가공기의 전체적인 안정성을 가지게 하고 무게를 경량화 시키기 위해 Granite 정반을 사용하였다. 가공기의 크기는 Desktop 형태의 가공기가 수용할 수 있는 최대 X, Y, Z 축의 스트로크의 범위를 300(mm) X 300(mm) X 200(mm)로 정하고 이를 기준으로 설계하였다. 최종 설계된 가공기의 외곽크기는 X 축방향 680mm, Y 축방향 730mm, Z 축방향 1000mm 이다. X 축의 구조는 그림과 같이 'C' 구조로 하여 Z 축의 질량에 의해 발생하는 모멘트를 가장 잘 버틸 수 있게 하였다. Z 축은 평판 구조로써 Z 축에 볼스크류, 모터등이 결합되어 LM Guide 의 레일이 이동하도록 구성되어 있다. Z 축 자체는 볼스크류와 모터등을 지지하기 위한 수단이며 힘을 받지 않는 구조이기 때문에 이 부분의 두께를 최소화하여 스피들을 X 축에 최대한 가깝게 하여 Z 축에 의한 모멘트 크기를 최소화하였다. 그리고 볼스크류와 모터등을 고정된 Z 축에 결합시킴으로써 Z 축 이송부의 질량을 최소화하였다. Z 축의 강성은 Z 축이 상하로 움직임에 따라 큰 영향을 받았고 절삭력을 부가하였을 때는 변화량 값이 큰 편차가 발생하였다. 편차를 최소화하기 위하여 Z 축에 보강재를 추가하였다. 보강재는 절삭력이

부가되었을 때 최대 변형이 발생하는 Z : (+95mm) 지점에서 변형량의 편차가 최소가 되도록 하였다.

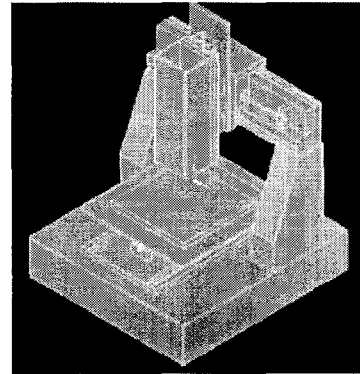


Fig. 1 Assembly drawing of Desktop machine tool

## 3. 이송정밀도 평가

### 3.1 위치결정정밀도

Laser Interferometer 를 사용하여 이송정밀도를 평가하였다. 측정은 각 축의 스트로크에서 10mm 씩 스텝 이송을 하면서 5 회 왕복 측정하여 반복정밀도도 같이 측정하였다. 측정 결과 위치결정정밀도는 X, Y, Z 축 모두  $\pm 3 \mu\text{m}$  이내의 정밀도를 나타내었고, 반복정밀도는  $2 \mu\text{m}$  이내의 정밀도로 나타내었다. 리니어 스케일과 같은 피드백 제어 장치를 사용하면 더 나은 정밀도를 확보 할 수 있을 것으로 예상된다.



Fig. 2(a) X axis positioning error

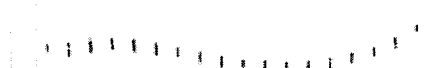


Fig. 2(b) Y axis positioning error



Fig. 2(c) Z axis positioning error

### 3.2 운동정밀도

운동정밀도는 이동정도에 대한 오차량을 말하며, 측정은 위치결정정밀도와 같은 방법으로

Straightness Interferometer 를 사용하여 측정하였다. 운동정밀도에 대한 측정결과는 세 축이 모두  $5\mu\text{m}$  이내의 정밀도를 만족하였고 Y 축의 정밀도가  $\pm 2\mu\text{m}$  으로 가장 양호한 결과를 나타내었다.



Fig. 3(a) X axis linear motion error



Fig. 3(b) Y axis linear motion error



Fig. 3(c) Z axis linear motion error

### 3.2 미세이송 평가

미세이송 특성에 대한 측정은 각 축의 임의의 지점에서  $1\mu\text{m}$  이하로 5 회 이상 스텝이송 하여 이에 대한 응답을 시간에 대한 함수로 측정하였다. 미세이송 측정 시 이송계의 속도는  $25\text{mm/s}$  이며, 시스템의 최대 속도는  $50\text{mm/s}$  이다. 측정결과  $1\mu\text{m}$  에 대한 미세이송은 좋은 응답을 보여 주었으며  $0.1\mu\text{m}$  에서는 다소 응답 상태가 양호하지 못하지만  $0.1\mu\text{m}$  의 미세 이송이 요구되는 경우에는 이송속도를 낮춤으로써 충분히 가능하게 된다



Fig. 4(a) X axis micro step( $1\mu\text{m}$ ,  $0.2\mu\text{m}$ ,  $0.1\mu\text{m}$ )



Fig. 4(b) Y axis micro step( $1\mu\text{m}$ ,  $0.2\mu\text{m}$ ,  $0.1\mu\text{m}$ )



Fig. 4(c) Z axis micro step( $1\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $0.3\mu\text{m}$ )

## 4. 제어특성 평가

### 4.1 응답성 평가

서보모터는 두 가지 형태로 제어되어 진다. 전압을 이용하여 속도나 토크를 제어하는 아날로그 방식과 이동거리를 펄스수로 환산하는 펄스 제어방식이 있다. 본 연구에서는 사용된 서보계는 위치제어 모드를 사용한다. 공작기계에서 정밀도를 향상시키기 위해서는 이송계가 지정된 목표 위치까지 빠른 시간 내에 도달하여야 한다. 하지만, 응답이 빨라지게 되면 구조물에 진동과 소음을 유발시키게 된다. 소형 정밀 부품을 생산하는 공작기계에서 진동이란 제품의 품질에 치명적인 영향을 끼치게 된다. 그러므로 서보계의 응답성을 조절하여 구조물의 진동을 최소화 시켜야 한다. 발생하는 진동상태를 측정하기 위해 응답상태를 조절하면서 Laser Interferometer 를 사용하여 목표위치에 도달하는 상태를 파악하고 동시에 가속도계를 사용하여 이송시에 발생하는 진동의 크기를 측정하였다. 이송은 이송계가 충분한 가속 시간을 가질 수 있도록 같은 위치에서  $20\text{mm}$  스텝 이송하면서 실험하였다. 그때의 이송축의 속도는  $25\text{mm/s}$  이며, 가속도는  $400\text{mm/s}^2$  로 입력위치 지령에 대해 1 차 지연 형태를 가진다.

응답성 측정결과 저응답에서 고응답으로 갈수록 목표지점에 대한 응답이 빨라지지만 중응답 상태 이후로는 위치값에 대한 오버슈트가 거의 발생하지 않았으며 고응답에서 발생한 진동도 이 상태에서 거의 일정함을 알 수 있었다. 그러므로 설정값은 최소의 진동값을 가지면서 안정된 응답선도를 가지도록 하였다. 이때 고유진동수를 측정하면, 사용된 AC 서보 모터 제작 회사에서 제시한 각 공진주파수에서의 추천 설정값과 거의 일치함을 확인 할 수 있었다. 그리고, 최적 설정치에서 Desktop 가공기는 최대  $25\mu\text{m}$  정도의 진동이 발생함을 이상의 실험을 통해서 알 수 있었다.



Fig. 5 Position & vibration diagram in low response



Fig. 6 Position & vibration diagram in high response

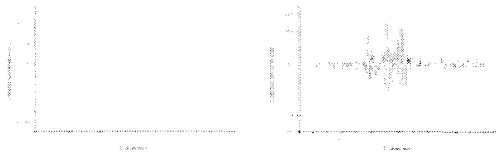


Fig. 7 Position & vibration diagram in optimum response



Fig. 8 Resonance frequency (130Hz)

#### 4.2 위치 추종오차

이전의 실험결과에 의한 시스템의 최적의 응답상태에서 연속 동작시 발생하는 추종오차량을 측정하였다. 추종오차  $e$  는 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$e = V / K_v$$

( $V$  : 동작속도,  $K_v$  : 위치회로이득(/s))

추종오차는 동작속도에 비례하고, 위치회로이득에 반비례하므로 속도 증가시 발생하는 오차는 NC 가공의 오차로서는 매우 큰 값이 된다. 사용된 서보계는 오토튜닝 모드로써 위치지령에 대한 위치루프 게인값이 자동으로 조절되도록 설정되어 있다. 실험은 1mm/s, 5mm/s, 25mm/s, 50mm/s 의 속도에서 10mm 만큼 이송한 뒤 휴지시간을 주지 않고 시작점으로 왕복 운동하면서 이때의 실제 이송량을 Laser Interferometer 를 사용하여 5 회 측정하여 평균 오차량을 구하였다. 각 속도에서의 오차량과 그때의 게인값은 다음과 같다.

속도	1 mm/s	5 mm/s	25 mm/s	50 mm/s
오차량	1.3 ?m	2.9 ?m	2.6 ?m	4.2 ?m
게인값	222 rad/s	222 rad/s	229 rad/s	216 rad/s

각 속도에서 가감속 시간영역과 크기가 다르기 때문에 이론값에 대한 오차량과의 차이가 발생하였다. 실제로 25mm/s, 50mm/s 의 속도에서는 이동간에 게인값이 변화하였고, 서보계가 위치

루프 게인값이 두 가지 형태로 제어되기 때문에 이론값과 실제값의 차이는 비교할 수 없지만, 이에 대한 경향과 사용된 서보계의 추종오차량이 4?m 이내임을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서 Desktop 가공시스템을 제작하여 정밀도와 제어특성을 평가함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Desktop 형태의 시스템은 이송범위가 축소되어 급속 이송에 대한 중요성보다는 최대 속도를 낮추어 분해능을 높임으로써 0.1?m 의 최소 분해능을 얻을 수 있었다.
- (2) 시스템의 고강성 설계를 통하여 가공기의 진동량을 2.5?m 이내로 달성하여 시스템의 안정성을 유지할 수 있었다.
- (3) 본 시스템에서 위치 추종오차는 전 이송속도에서 4?m 이내의 정밀도를 유지할 수 있었고, 앞으로 시스템의 고유진동수를 더욱 높일 수 있도록 경량화 구조설계를 하면 이송계의 응답성과 위치 추종오차를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. ㈜대우종합기계, "고속고정밀 금형가공센터 개발에 관한 연구", 산업자원부, 2002.
2. 고해주, 박성호, 정운교, "High Lead Ball Screw 를 사용한 고속이송계의 특성" 한국공작기계학회지, 제 10 권, 제 4 호, pp. 97-103, 2001.
3. 박천홍, "정밀요소부품(이송시스템)의 신뢰성", 부산대학교 고장분석 및 신뢰성연구센터 세미나, pp. 28-51, 2003.
4. 김석일, 최대봉, 강종표, 김남경, "최신공작기계 설계기술", 반도출판사, 1995
5. 백인환 외, "공작기계 -구동기구 및 설계원리", 청문각, 1997.
6. 김현석, 정광섭, 이대길, "초정밀 3축 CNC 연삭기의 구조설계 및 평가", 대한기계학회논문집, 제 19 권, 제 12 호, pp. 3392~3402, 1995.