

# High Lead Ball Screw를 사용한 고속이송계의 특성

고해주\*, 박성호\*\*, 정윤교\*\*\*

## The Characteristics of High Speed Feed Drive System using High Lead Ball Screw

Haiju Ko\*, Seongho Park\*\*, Yoongyo Jung\*\*\*

### Abstract

The study on the high-speed machine tool is very important for the improvement of productivity since it can shorten cutting and non-cutting time. Especially, high speed of feed drive system is the major research field. In the industries of the advanced countries, the feed drive systems at the speed of 60 m/min have been already developed based on the high lead ball screws.

In this study, a high speed feed drive system at the speed of 60 m/min has been developed, and its movement characteristics are investigated. As the movement characteristics, positioning accuracy, angular accuracy, straightness and micro step response are measured. Thermal characteristics of the system is also discussed. For measuring the movement characteristics, a laser interferometer, a memory-based Hi-coder and a cooling device are used. The experimental results confirm that the movement characteristics and the thermal behavior of the system are satisfactory in the aspect of accuracy and stability.

**Key Words :** Machine tool(공작기계), High speed feed drive system(고속이송계), Positioning accuracy(위치결정 정밀도), High lead ball screw(대 리드 볼 스크류)

## 1. 서 론

최근에 산업현장에서 생산형태를 바꾸기 위한 자율가공, 적응제어 및 무인 자동시스템 등과 같은 생산시스템의 연구가 활발히 진행중이며, 이러한 연구의 하나로 고속지능형 공작기계의 개발이 부각되고있다. 일반적으로 공작

기계의 고속화 목적은 절삭시간과 비 절삭시간의 단축을 통한 생산성 향상을 들 수 있으며, 절삭시간의 단축은 고속가공 기술의 연구성과에 많은 영향을 받고 있다. 고속화와 함께 고정밀화, 가공형상의 복잡화가 추구되면서 가공정밀도 향상과 열변위 제어를 통한 고정도, 고품위 가공이 가능한 공작기계의 개발이 요구되어 지고 있다.

\* 위아 주식회사(hjk@wia.co.kr)  
\*\* 창원대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\* 창원대학교 기계공학과

고속 가공기의 경우 현재 고속이송 시스템으로는 볼 스크류를 채용한 서보 모터(Servo Motor) 구동방식으로 이송속도 50m/min의 연구와 리니어모터(Linear Motor)를 사용한 구동방식으로 100m/min의 이송계 고속화 연구 등이 수행되고 있으며<sup>(1)(2)</sup>, 국내 공작기계의 경우 볼 스크류를 적용하여 최대 이송속도가 40m/min의 개발사례는 알려져 있으나, 60m/min이상은 아직 보고되지 않고 있다. 반면에 선진국에서는 60m/min이상을 실용화하였으며, 리니어모터 적용의 고속공작기계는 국내 대기업 위주의 산업현장에서 선진국의 기계를 시범적으로 도입하여 실용성을 검증하는 수준에 있다.

이송계의 일반적인 제어구조는 전류제어계, 속도제어계 및 위치제어계로 구성되어 각 제어계는 안정성(Stability)이 보장되어야 하고, 특히 안정성에 영향을 미치는 속도제어계에 대해 충분한 고려가 필요하게 된다.<sup>(3)</sup> 이러한 공작기계에서 이송계를 평가하기 위한 방법으로 정적오차의 측정에는 레이저 간섭계를 이용한 측정방법<sup>(4)(5)</sup>이 일반적이며, 공작기계의 공간상의 오차 및 이송계의 운동오차를 측정하기 위한 방법으로 원궤적 시험(Circular test)방법<sup>(6)</sup>과 기구학적 볼바(Kinematic ball bar)를 이용한 측정방법<sup>(7)</sup>이 사용되고 있다. 또한 열변형 오차를 줄이기 위해서는 절삭가공 시 발생하는 다양한 형태의 발생 열을 최소화할 수 있도록 공작기계의 구조설계를 개선하여 가공정밀도를 높이기 위한 연구와 열변형 오차를 측정하여 소프트웨어로 보상하는 연구 등이 진행되고 있다.<sup>(8)</sup>

따라서, 본 연구에는 이송속도 향상에 따라 발생하는 공작기계의 문제점을 해결하기 위하여 중공 볼 스크류를 적용한 1축 이송계를 설계·제작하고, 메모리 하이코드와 레이저 간섭계를 이용하여 고속 이송계의 제어계 특성 및 기하학적 특성을 분석하며, 냉각장치를 사용하여 열변형 특성을 분석함으로써 60m/min의 고속 이송계를 실현하고자 한다.

## 2. 고속이송계의 설계 및 제작

60m/min의 고속 이송계의 구성을 위하여 본 연구에서는, 하이 리드 볼 스크류를 사용한 서보 모터 구동방식 구조의 채용과 동시에 볼 스크류의 회전수의 상승을 병행하는 방식을 채택하였다. Fig. 1은 볼 스크류를 이용한 이송계의 개략도를 나타내며, 볼 스크류의 리드는 나사축경의 1/2 전후를 갖는 것이 많이 사용되어진다. 본 이송계의 설계에서는 이송속도( $V_{max}$ ) 60m/min을 실현하기 위하여 모

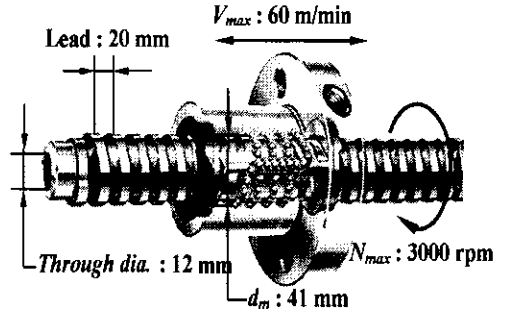


Fig. 1 Explanation drawing of feed drive system with ball screw

터 회전수( $N_{max}$ ) 3,000rpm, 볼 스크류의 리드를 20mm로 설계하였다.

볼의 공전속도가 크게되면 볼의 반복충격력에 의해 볼의 순환기구나 나사의 홈에 손상이 생기게 되어 볼 스크류의 허용최대회전수가 제한된다. 허용회전수는 볼의 중심원경( $d_m$ )과 모터 회전수의 곱으로 표시되며, 일반적인 이송계는  $d_m \times N_{max}$ 의 허용치가 7만 정도이나, 고속용으로 15만을 적용하고 있다.<sup>(9)</sup> 따라서 이러한 조건을 만족하는 볼의 중심원경으로 직경을 41mm로 설계하여 제작하였다.

고속이송에 있어서 가장 문제가 되는 것은 이송에 따른 볼 스크류의 열팽창과 너트의 예압에 따른 마찰토크 증가가 직접적인 열로 발생하며, 이것은 위치결정정밀도에 심각한 영향을 주게 된다. 이러한 열에 의한 영향을 최소화하기 위하여 구조설계에서 중공 볼 스크류를 채택하여 냉각오일을 중공부위로 통과시켜서 냉각효과에 의한 열변형 오차의 개선을 시도하였다.

본 연구에서는 이러한 설계 기준에 따라 이송계를 제작하였으며, 구성요소로서는 서보 모터, 플렉시블 커플링, 중공 볼 스크류, 지지베어링, 리니어 가이드 및 이송 테이블로 구성하고, 제어계는 FANUC CNC를 적용하였다. Fig. 2

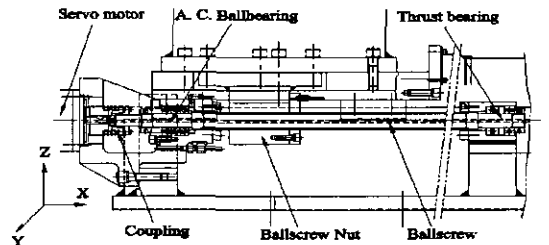


Fig. 2 Construction of high speed feed drive system



Fig. 3 Photo of high speed feed drive system

는 본 연구에서 직접 설계한 고속이송계의 설계 도면을 나타내며, Fig. 3은 제작한 이송계의 구조를 보여주고 있다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

고속이송에 문제가 되는 것은 고속으로 가속시킬 때, 최대속도 구간에서 일정한 속도를 유지시키는 것이다. 제어계에서 이러한 이송계의 운동성을 표현하기 위해서 CNC의 제어반내에 이송축 제어용 드라이브의 외부출력 단자에 A/D보드를 연결하고, 여기에 메모리 하이코드를 연결하여 속도 및 토크를 측정하였다. 측정되어진 데이터의 신뢰성을 검증하기 위하여 레이저 간섭계를 사용하여 실제 외부에 나타나는 속도를 측정하여 비교 분석하였다.

이송계의 기하학적 정밀도는 Fig. 4에서 보는바와 같이, 1개의 위치오차, 3개의 각운동 오차, 2개의 진직도 오차를 가지고 있으며, 본 실험에서는 이러한 오차들을 레이저 간섭계를 통하여 비교 검토하였다. 각각의 오차측정을 위해서 전체 행정 400mm를 20mm씩 분할하고 데이터를 ISO 203-2 "수치제어 공작기계의 위치정밀도 및 반복정밀도의 결정" 규정에 준하여 왕복측정 하였으며, 또한, 미소이송

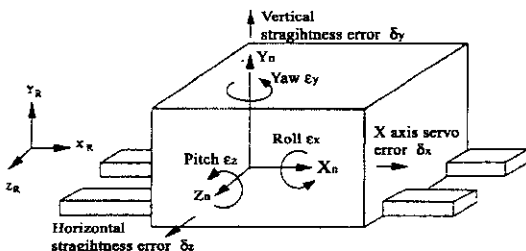


Fig. 4 Error components of linear moving shaft

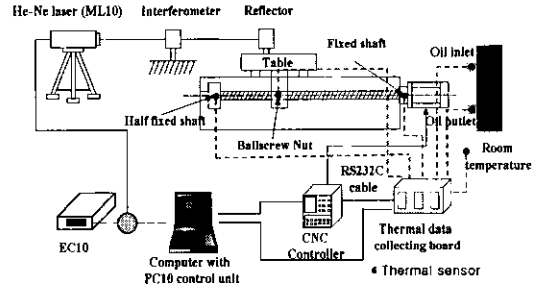


Fig. 5 Experimental setup

정밀도는 이송테이블의 미소위치 변화를 이송속도 50mm/min로 10회 왕복운동하고, 100Hz의 검출단위로 미소운동특성을 확인하였다.

또한, 이송계의 고속에 따른 열 특성을 평가하기 위하여 온도검출 센서를 볼 스크류의 너트부, 볼 스크류 지지베어링의 고정축, 반고정축 및 냉각 오일의 입구 및 출구에 설치하여 온도 변화를 측정하였다. 여기에 사용되어진 온도 검출센서는 주위환경에 강하고, 온도검출 오차가  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이 하인 백금축은 저항체(PT 100  $\Omega$ )를 사용하였다. 온도센서를 설치 후 8시간 연속으로 온도를 측정하여 PC를 통하여 데이터를 수집하고, 수집된 데이터는 실시간으로 그래픽처리가 가능하도록 하였다. Fig. 5에는 본 실험에서 구축한 실험장치를 나타내고 있다.

### 4. 성능평가

#### 4.1 제어계의 운동성 평가

이송계의 운동성은 일반적으로 고속 이송시에 발생하는 최대 속도구간에서 정속 유지로 평가되어진다. 제어계에서 이러한 이송계의 운동성에 미치는 파라미터로는 부하 관성비, 가감속 시정수, 루프게인, 속도루프 비례게인 및 속도루프 적분게인 등이 있으며, 이송속도 도달시간의 제어, 기계응답성 조정, 이동 중 진동영향 및 응답성의 향상에 영향을 미치고 있다. 이러한 파라미터는 초기에 제어시스템에서 자동조율(Auto Tuning)기능을 사용하여 설정하지만, 고속이송에서는 Fig. 6의 ①에서 보는 바와 같이, 속도 및 토크선도에 현저한 변동이 발생되어진다. 따라서, 이러한 파라미터를 조정하여 안정된 속도 및 토크를 발생시킬 수 있도록 제어를 고속에서 실시하여야 한다.

본 연구에서는 이러한 파라미터들을 CNC장치에 따른 서보계 자동조율 프로그램을 사용하여 초기설정 데이터

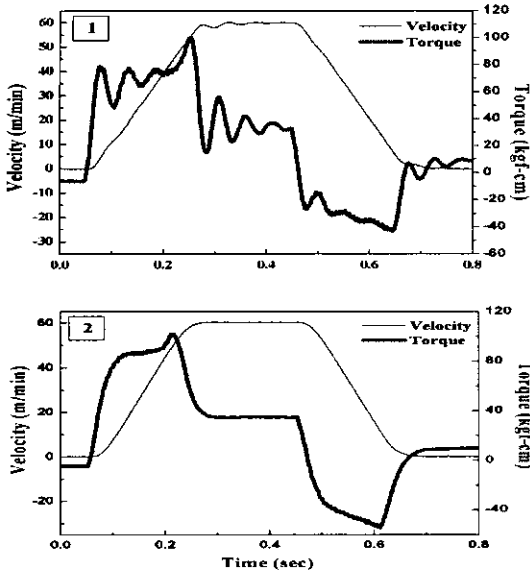


Fig. 6 Comparison of velocity and torque chart with variable servo parameter

Table 1 Servo Parameter

No	Name	Initial data	Last data	Function
517	Loop gain	4200	3200	Adjustment of machine responsibility
524	Acceleration/Deceleration time constant	200 msec	160 msec	Adjustment of arriving time of target velocity
8321	Load inertia ratio	0	30	Prevention of vibration, noise
8343	Velocity loop integral gain	165	100	Adjustment of machine responsibility during moving
8344	Velocity loop proportional gain	-1474	-2200	Prevention of vibration effect during moving

를 찾아내고, 고속이송에 영향을 많이 주는 순서대로 파라미터를 조정하면서 메모리 하이 코드로 선도를 출력하여 비교하고 최적의 선도가 구현되는 값을 도출하였다. 이와 관련된 파라미터를 Table 1에 보여주고 있다.

Fig. 6의 ②는 관련 파라미터를 최종 조정 후 속도와 토크가 가속, 정속, 감속의 전구간에 걸쳐 안정된 선도를

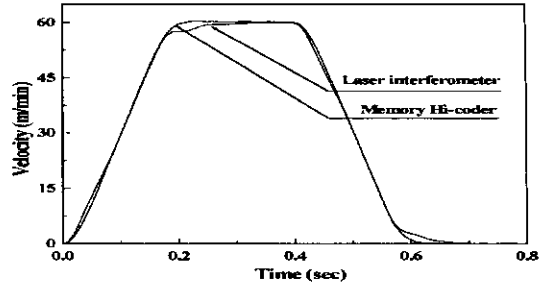


Fig. 7 Comparison of velocity using laser interferometer and memory hi-coder

나타내고 있으며, 본 실험에서는 최종 조정된 파라미터의 값으로 모든 실험을 수행하였다. 여기에서 Fig. 6의 ②에서 보여주는 측정된 속도 및 토크선도의 신뢰성 검증을 위하여, 레이저 간섭계를 사용하여 이송계의 속도를 외부에서 직접 측정하고, 메모리 하이코드에 의한 측정 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이, 속도선도는 전반적으로 2가지 유형이 유사하게 나타나고, 미소한 차이는 측정위치와 측정방식의 차이로 발생되며, 이러한 속도선도가 구현되기 위해서는 토크선도가 동시에 안정된 조건을 유지해야 나타날 수 있기 때문에 메모리 하이코드에 의한 측정신뢰성이 입증됨을 보여주고 있다.

#### 4.2 기하학적 정밀도

기하학적 정밀도의 측정은 이송계의 설계 및 조립과정을 통하여 제작된 이송계의 구조적 안정성을 평가하기 위한 시험이다. Fig. 8은 이송위치에 대한 위치결정 정밀도를 평가하기 위한 것으로, 전체구간을 20mm씩 구분하여 자동 피치에러 보정 전후의 위치오차를 나타낸 것으로, 위치정밀도는 보정 전 위치오차가 최고 30 $\mu$ m에서 보정 후 2 $\mu$ m로 향상을 보여주고 있어 전구간에 걸쳐 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 9는 피치오차 보정 후 각 측정 점의 위치 오차 값을 60m/min의 속도에 대하여 전진(+), 후퇴(-) 양방향에 대하여 반복실험을 하였다. 평균편차와 표준편차의 추정치(평균편차  $\pm 3\sigma$ )로 표현한 것으로, 축의 위치결정 정밀도는 6.5 $\mu$ m이고, 재현성(Repeatability)은 4.5 $\mu$ m로 나타났으며, 속도증가에 따른 위치결정이 양호함을 알 수 있었다.

이송계의 각운동(Pitch, Yaw) 정밀도를 측정하기 위하여 이송속도를 30, 60m/min로 2가지로 구분하고 전체구간을

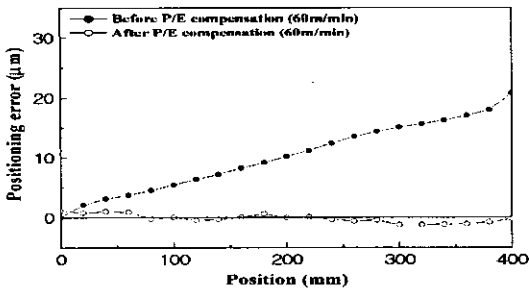


Fig. 8 Comparison of positioning accuracy with and without ball screw pitch error compensation

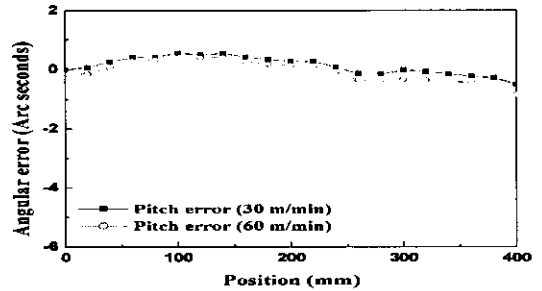


Fig. 10 Pitch error of feed driving system

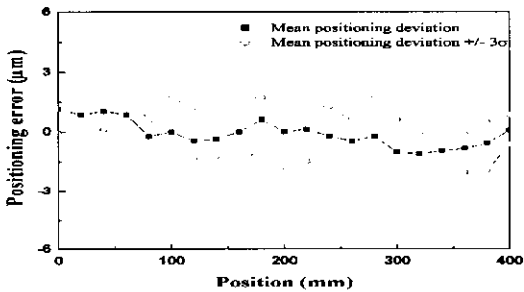


Fig. 9 Mean positioning deviation, mean positioning deviation  $\pm 3\sigma$  after pitch error compensation

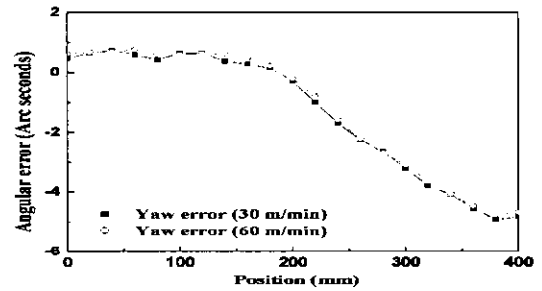


Fig. 11 Yaw error of feed driving system

20mm 간격으로 양방향에서 실험한 결과의 평균값을 Fig. 10, 11에 나타내었다. 이송계의 상하변동인 피치(Pitch) 오차는  $\pm 1$ arcsec로 우수하며, 좌우변동인 요(Yaw) 오차는  $-4.5$ arcsec( $0.0014$  degree)로 차이를 보이나 전체 구간에서 각운동 오차는 모두 미세하였다. 이송속도에 따른 차이도 거의 동일하며, 특히 위치오차에 영향이 큰 피치오차량이 적어서 이송계가 양호한 조립 상태를 나타낸다.

고정도화에 따른 진직도의 기하학적 정밀도가 중요시되며, 이에 대한 실험으로 이송계의 진직도 측정된 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 그래프에서 수평 진직도는 이송테이블 좌우의 이송오차이고, 수직 진직도는 상하의 이송오차를 나타낸다. 진직도 측정의 경우 다른 측정값들과 달리 레이저 간섭계의 옵틱(Optics) 설치오차를 포함하게 된다. 이에 대한 값을 보상하기 위해서 옵틱의 정렬오차(Misalignment)에 의한 오차 값을 제외시킬 수 있는 최소자승법(Least mean square fit)을 이용하여 데이터를 표현하였다. 측정결과 전구간에서 두 가지 속도의 경우 모두 기하학적으로  $\pm 2\mu\text{m}$ 로 양호한 상태를 보여주고 있다.

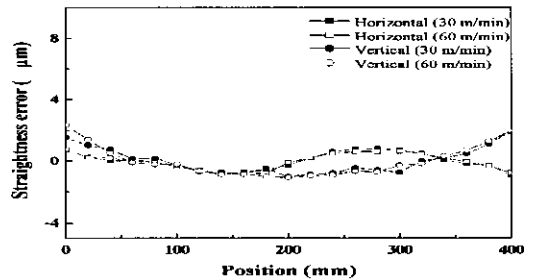


Fig. 12 Horizontal and vertical straightness error of feed driving system (30, 60 m/min)

또한, 고속이송과 더불어 고정밀 이송을 구현하기 위해서는 미소이송 정밀도가 우수해야 한다. Fig. 13은 미소이송 정밀도를 측정된 것으로, 각 단계의 값이 양호한 상태를 보이며,  $5\mu\text{m}$ 로 이송 시  $50\mu\text{m}$ 의 위치에서 누적오차가  $2\mu\text{m}$ 로 고정밀도를 유지하였다.  $5\mu\text{m}$ 이하의 미소이송에서는 위치검출용 펄스코더(Pulse coder)를 12,500펄스로 하고, CNC의 분해능은  $1\mu\text{m}$ 로 제어하게 구성하였으나, 볼스크류의 리드가 20mm의 대 리드로 구성되어서 이송 안대면의

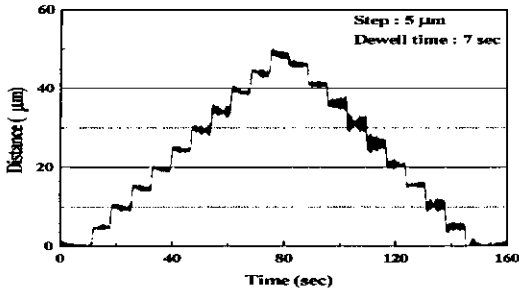


Fig. 13 Micro step response of feed driving system

스티크슬립 및 관성력의 작용에 의해 미세 이송의 실현이 다소 불안정하였다.

### 4.3 열특성 평가

볼 스크류를 이용한 서보 모터 구동방식의 고속화 구현에 있어서 가장 문제시되는 것은 발열과 이에 따른 볼 스크류의 열팽창이다. 발열과 열팽창을 확인하고 오일냉각을 통한 볼 스크류의 열팽창 오차 감소방안을 마련하기 위하여, 이송계 각부의 온도변화와 열팽창으로 인한 기하학적인 오차의 두 가지 측정을 실시하였다.

Fig. 14는 60m/min를 적용하여 볼 스크류의 축심 냉각에 따라 이송계 각 부위에서 발생하는 온도변화를 나타낸 결과이다. 볼 스크류를 냉각 전 고정축과 볼 스크류 너트 부위의 온도변화가 반고정축 및 안내면에 비해 약 5~7℃ 상승하였고, 동일 조건에 대해 볼 스크류를 연속적으로 냉각한 조건에는 약 2~3℃의 온도상승으로 냉각 효과를 확인할 수 있었다. 최대 발열을 예상했던 볼 스크류의 너트 부위보다 고정축의 온도상승이 더 높은 이유는 근접한 서보 모터의 장시간 가동으로 인한 열 전달의 결과에 기인한 것으로 판단된다.

볼 스크류의 열팽창 량을 분석하기 위하여 양쪽끝단의 베어링 고정축과 반고정축 사이의 길이변화를 비교하여 냉각유무로 실험한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 베어링 고정축을 기준으로 반고정축의 위치 변화 값이 냉각이 없는 경우 최대 35µm의 열팽창 량을 나타내었으나, 냉각을 했을 경우는 5µm 이내로 30µm 이상의 감소를 나타내었다.

이송마찰이 가장 많이 일어나는 볼 스크류 너트 부의 온도변화를 Fig. 16에 나타내었으며, 속도 증가에 따른 온도상승을 축심 오일냉각으로 약 2~3℃의 발열 억제 효과를 확인할 수 있었다.

Fig. 17은 볼 스크류의 최대 열팽창 량을 보이는 반고정

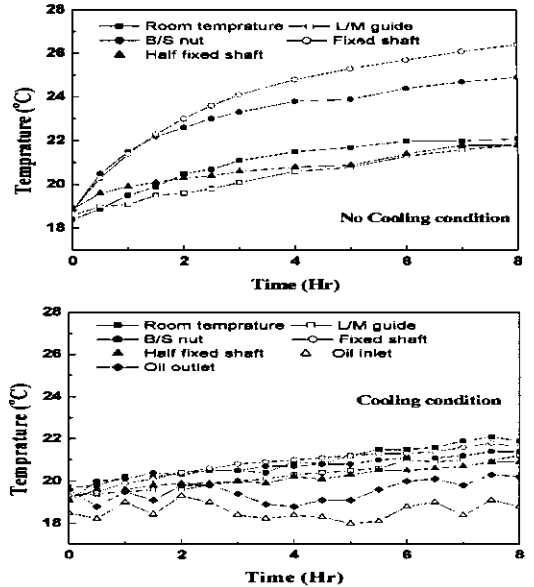


Fig. 14 Comparison of temperature change with under cooling and no cooling condition (60m/min)

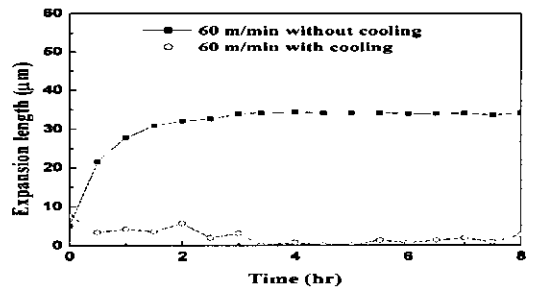


Fig. 15 Ball screw expansion length under cooling and no cooling condition

축의 위치변화를 오일 냉각의 유무에 따라 구분한 것으로, 냉각에 의해 60µm정도의 위치오차 감소효과를 보여주고 있다. 또한 전반적으로 볼 스크류 냉각 전에는 60m/min 이송에서 누적 위치오차가 크고, 2시간대까지 열변위가 증가세를 보이는 반면에 오일 냉각의 경우는 누적 위치오차도 줄었으며, 이송시작 직후부터 위치오차의 안정성을 나타내고 있다. Fig. 16과 Fig. 17에서 속도증가에 따른 너트부의 온도증가와 반고정축의 열팽창 량 증가는 항온상태에서 실험한 조건으로 데이터가 비교적 안정되어 나타났으며, 오일냉각에 따른 냉각효과를 확인할 수 있었다.

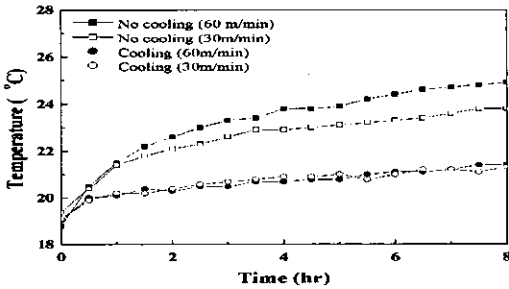


Fig. 16 Comparison of nut temperature change under cooling and no cooling condition (30, 60 m/min)

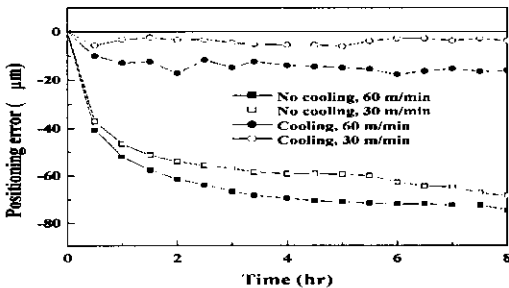


Fig. 17 Half-fixed shaft positioning error under cooling and no cooling condition (30, 60 m/min)

## 5. 결 론

본 연구에서는 고속 이송계의 실현을 위하여 High Lead의 중공 볼 스크류를 사용하여 이송속도 최대 60m/min를 구현하는 1축 이송계를 설계, 제작하고, 제어계의 고속특성 평가, 기하학적 정밀도 평가 및 열특성 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고속이송에 적합한 볼 스크류, 지지배어링, 서보 모터 등의 선정으로 60m/min의 고속 이송계를 설계하고 제작하였다.
- (2) 고속특성에 맞는 제어계의 구현으로 응답성 및 진동 방지 기능의 향상을 위한 NC 파라미터를 최적화 시켜서 이송속도 60m/min의 고속화를 실현 하고 이송계의 안정성을 확보하였다.
- (3) 이송계의 속도증가에 따른 기하학적 정밀도를 측정 한 결과 전구간에서 각운동 오차와 진직도 오차 모두 양호하며, 종합적인 양방향 위치정밀도는 6.5 $\mu$ m,

위치 재현성은 4.5 $\mu$ m으로 고정밀도를 유지 하였다.

- (4) 중공 볼 스크류의 적용과 8시간 연속의 오일냉각을 통하여 온도변화를 확인한 결과 볼 스크류의 고정축과 너트 체결 부에서 3 $^{\circ}$ C이내의 온도상승으로 냉각효과가 뚜렷하였고, 열팽창 량은 최대 발열부인 반고정축에서 위치오차 60 $\mu$ m의 감소효과를 나타냈으며, 이송직후부터 위치오차의 안정성을 유지 시키고 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술 연구센터 지원에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 한국기계연구원, "고속·고정도 위치결정기술 개발 보고서", 산업자원부, pp. 300~324, 2000.
- (2) 은인용, "Linear Motor를 이용한 위치결정 기술", 한국정밀공학회지, 제17권, 제12호, pp. 20~25, 2000.
- (3) 최종률, "공작기계 시스템의 모델링과 동적특성 분석", 한국정밀공학회지, 제16권, 제1호, pp. 265~266, 1999.
- (4) Bryan, J.B., "International Status of Thermal Error Research(1990)", Annals of CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 645~656, 1990.
- (5) 고해주, "CNC 공작기계 이송오차 발생요인에 관한 실험적 연구", 한국정밀공학회지, 제10권 제1호, pp. 62~64, 1993.
- (6) Koda, S. et al., "Control of Thermal Deformation of Machine Tool Column Using Laser Spot Detection System", J. of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 55, No. 9, pp. 158~163, 1989.
- (7) Pahk, H. et al., "Development of Computer-Aided Inspection System with CMM for Integrated Mold Manufacturing", Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 557~560, 1993.
- (8) Mou, J., et al., "A Method for machine tools error correction using reference parts", Int. J. of Computer integrated manufacturing, Vol. 8, No. 1, pp. 64~77, 1992.
- (9) Toshiaki Yamaguchi, "High performance technology in ball screw", Vol. 61, No.3, pp. 333~338, 1995.