

## 고속볼스크류를 사용한 이송계 특성에 관한 연구

### A Study on Characteristics of Feed Drive System using High Speed Ballscrew

박성호\*, 고해주(창원대학교 대학원), 정윤교(창원대학교)

Seongho Park\*, Haiju Ko (Changwon Univ. graduate school), Yoongyo Jung(Changwon Univ.)

#### Abstract

It can be acquired the high effective productivity through of high speed, precision of machine tools, and then, machine tools will be got a competitive power. Industrially advanced countries already developed that the high speed feed is 60m/min using the high speed ball screw. Also, a lot of problems have happened the feed drive system. It is necessary to study about the character of positioning accuracy, heat generation and high speed control for feed drive system of high speed.

In this study, we make use of the feed drive system with a high lead ball screw. We'll develop the feed drive system at the speed of 60m/min. Using the design of the mechanical element and the high speed control, the basic design concept can be established. After manufacturing one-shaft feed drive system and then conducting the performance test, It'll be analyzed properties of the high speed feed drive system.

#### 1. 서론

산업현장의 생산성향상을 위해서 절삭시간의 단축은 필연적이며 이는 단위시간당 절삭속도(Cutting rate) 및 절삭이송속도(Cutting feed rate)를 증가시켜 절삭시간을 단축시켜야 하며, 이를 실현하

기 위해서는 공작기계의 요소기술인 고속주축과 더불어 고속이송계의 연구가 이루어져야 한다.

이러한 고속가공기에 적합한 이송시스템은 최대 이송속도, 가속도 및 이에 부합되는 이송력을 통해 높은 생산성을 얻어야 하며, 이에 필요한 이송시스템의 정밀도는 기하학적 정밀도와 동적이송 정밀도에 의해 기계의 구조적인 동특성 및 열적 안정성을 악화시키지 않아야 한다. 고속가공기의 경우 현재 고속이송 시스템으로 하이리드 볼스크류(High Lead Ball Screw)를 채용한 서보모터(Servo Motor) 구동방식과 리니어모터(Linear Motor)를 사용한 구동방식으로 분류되며, 국내 공작기계의 경우 볼스크류를 적용해 최대이송속도 40m/min인 반면에 세계수준은 60m/min 이상을 실용화하고 있으며, 리니어모터 적용의 경우는 국내에서는 연구 초기단계로 경제성 문제로 인해 실용화 적용에는 한계성을 보이고 있다.

공작기계 이송계의 고속화를 실현하기 위해 위치결정정밀도, 열변형, 탄성변형 및 고속제어 특성 연구가 동시에 이루어져야함에 따라 본 연구에서는 하이리드의 볼스크류를 이용하여 최대이송속도 60m/min의 고속이송계를 설계, 제작하고, 이를 사용하여 고속이송계의 성능평가를 수행함으로써 제어계 및 이송계의 고속화 특성을 분석하였다.

#### 2. 고속화 특성

이송계 고속화의 안내 및 운동성 향상을 위해서는 경량 고강성 운동체의 개발과 저마찰 저진동 안내방식의 확립 및 볼스크류 발열방지 대책이 필요하고, 제어특성을 위해서는 고효율, 고마력의 구동장치와 고속구동용 제어장치의 구성이 요구된다.

## 2.1 볼스크류의 특성

### 2.1.1 High Lead 볼스크류 채용

볼스크류로 고속이송을 실현하기 위해서 하나는 볼 나사의 리드를 크게 하는 High Lead화의 방법과 또 하나는 볼스크류의 회전수를 올리는  $d_m \cdot n$ 화의 방법이 있다. 고속화의 요구에 부응하기 위해서는 어느 하나의 방법만으로는 불가능하며 두 가지의 방법을 병용하고 있으며, 최근에는 이러한 High Lead 볼스크류를 이용한 서보모터 구동방식으로 이송속도 60m/min 및 가속도 1G를 구현하고 있다. 볼의 공전속도가 크게 되면 반복 충격력에 의해 볼의 순환기구나 나사 홈에 손상을 생기게 되어 볼스크류의 허용 최대회전수가 제한된다. 따라서, 일반적으로  $d_m \cdot n$ 허용치가 7만이나 고속용으로는 15만이 적용되고 있으며, 볼스크류의 너트 부를 2줄 나사로 적용하여 유효권수의 증가에 따라 고강성 및 고부하의 용량을 실현할 수 있다.

### 2.1.2 볼스크류의 발열특성

High Lead 볼스크류를 이용한 고속이송에 있어서 가장 문제가 되는 것은 발열과 볼스크류의 열팽창으로 인해 위치결정정밀도의 저하이며, 볼스크류의 너트에 예압을 주어 사용함으로써 예압에 대한 마찰토크가 직접적인 열로 발생하게 된다. 또한 작동유의 온도상승, 모터나 기어 등의 발열, 윤활제의 온도상승 등이 복합적인 결과로서 나타난다.

이러한 열적 영향을 줄이기 위해서는 여러 가지 설계 대책을 고려해야 하는데, 기구학으로 중공 볼스크류의 채택으로 냉각효과의 개선을 들 수 있으며, 발생된 열을 외부적인 측정장치와 CNC를 이용하여 열변위를 보상하는 연구가 활발히 진행되고 있으나 기계의 특성에 따라서 오차보정의 효과는 각기 다르게 나타나고 있다.

Table 1 Specification of ballscrew

Item	Specification	
Pitch circle of dia. of balls (mm)	41	
Lead (mm)	20	
Through Dia. of shaft (mm)	12	
Circuit(Turns x Circuit)	2.5 x 2	
Feed (m/min)	60	
Basic load rating Ca(kgf)	Dynamic	6,380
	Static	15,600

본 연구에서는 이상의 고속특성에 적합한 Lead 20mm의 중공 볼스크류를 설계하였으며, 주요사양을

Table 1에 나타내었다.

## 2.2 제어계의 특성

### 2.2.1 서보계 구성

이송계는 NC로부터 이송지령이 주어지면 NC의 메모리 카드에 입력된 PLC 데이터를 통하여 I/O 카드에서 기계와 인터페이스를 행하고, 서보AMP를 구동시킨다. 여기서 생성된 동력을 이용해 서보모터가 회전하고 이송테이블이 움직이게 된다. 고속서보계의 구현을 위해서는 PWM(Pulse Width Modulation) 제어회로의 고속화 처리가 필요하고, 연산처리 속도를 높이며, ASIC화를 통해 고속신호 처리 및 단순화를 실현하고 있다.

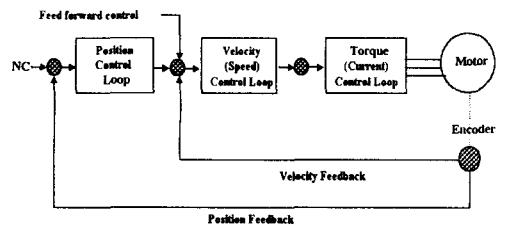


Fig. 1 Composition of control system

위치제어, 속도제어, 전류제어 루프로 구성되는 S/W는 최근에 엔코더만에 의한 피드백 제어방식으로 발생하는 서보계의 지연오차를 줄이며, 고응답성을 실현함으로써 고속가공이 가능하도록 피드백 제어와 병행하여 Feed forward제어를 실현하고 있다.

### 2.2.2 고속제어 파라메타

최적의 이송환경을 구현하기 위해 서보계는 초기설정을 수행하며 통상적으로 자동실행으로 맞추고 있다. 부하 이너샤비, 위치검출기, 검출단위, 속도 및 위치 Pulse수 등을 Feedback 방식에 따라 자동으로 설정하게 되는데, 이 경우는 일반적으로 이송속도가 낮은 조건에서 맞기 때문에 고속이송에는 초기설정 값이 맞지 않아서 이송계의 최적특성을 구현할 수가 없다. 따라서 고속화를 실현하기 위해서는 고속특성에 맞게 관련 파라메타를 변경하여 최적의 조건을 갖추어야 하고, 이와 관련되는 주요 파라메타를 Table. 2에 나타내었다. 이 중에서 기계의 응답성 관련과 진동방지 및 정상속도 도달시간에 따라 제어계의 영향이 크게 좌우되고 있다.

Table 2. Parameter for high speed

NO.	Content	Function
517	Loop Gain	기계응답성 조정
524	Acceleration/deceleration time constant	정상속도 도달시간조정
8303	PI control ON	저주파 진동방지 기능
8321	Load inertia ratio	기계공진, 이음방지 기능
8343	Velocity Loop integral gain	이동 중 응답성 향상 기능
8344	Velocity Loop proportional gain	이동 중 진동방지 기능

### 3. 실험장치 구성 및 성능평가

#### 3.1 실험장치 구성

High Lead의 중공 볼스크류를 적용하여 스트로크 400mm 이송계를 Fig. 3과 같이 구성하였다.

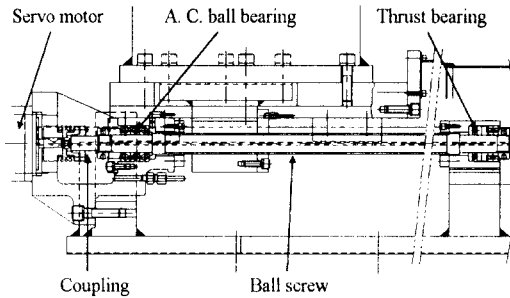


Fig. 3 Drawing of high speed feed tester(X-direction)

이송계의 구성요소로는 AC서보모터, 플렉시블 커플링, 중공 볼스크류, 지지베어링, 리니어 가이드, 이송테이블로 구성되고, 제어계는 FANUC의 CNC장치로 구축하였으며, 열변형 특성을 위하여 오일 냉각장치를 추가하여 특성연구를 수행하였다.

#### 3.2 성능평가

##### 3.2.1 서보 파라미터 조정

서보계의 파라미터 조정에 따른 이송속도를 확인하기 위하여 이송계의 서보파워 유니트 상의 전류를 메모리 하이코드(Memory Hi-Coder)를 이용하여 60m/min에 대한 속도선도를 측정하였다. 표준 파라미터에서 주요 파라미터를 단계별로 수정하면서 전류와 토크의 경향을 파악하면서 속도선도와 토크선도의 변화가 안정된 값을 찾아내는 반복실험을 수행하여 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 가속 후 정속 초기점에서 속도선도가 불안정하다

점차 안정됨을 보여주고 있다.

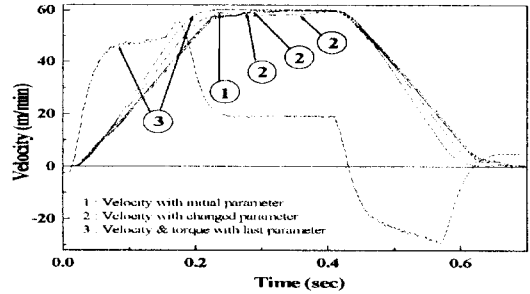


Fig. 5 Comparison of velocity with variable parameter

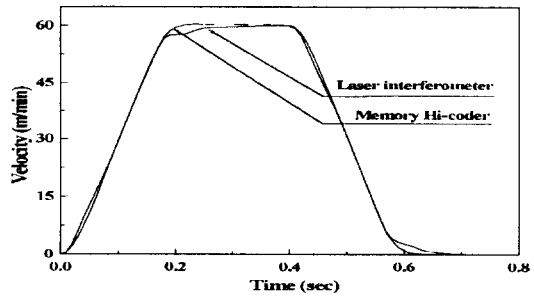


Fig. 6 Comparison of velocity using Laser interferometer and Memory hi-coder

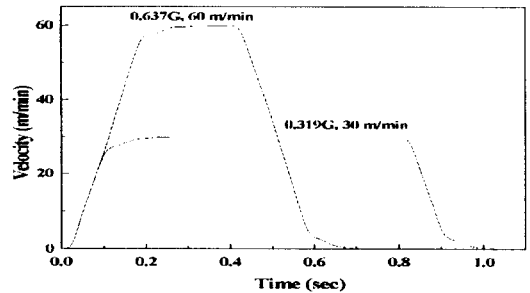


Fig. 7 Positioning time about 30, 60 m/min

속도선도의 검증을 위하여 메모리 하이코드로 측정된 선도와 레이저 간섭계를 사용한 측정의 결과를 비교하여 Fig. 6에 나타내었는데, 전반적으로 속도구현은 유사하며, 레이저 간섭계 측정에서 가속 후 정속 초기에 속도의 미달구간이 나타나는데, 이는 실제 테이블의 운동이 관성력과 응답성 차이로 인하여 나타난 결과로 분석된다.

레이저 간섭계를 이용하여 이송속도 30, 60m/min로 400mm를 위치결정 하는데 소요되는 시간을 Fig. 7에 도식적으로 비교하였으며, 가속도

는 0.32G, 0.64G로 나타났고, 60m/min에서 가속도 1G를 실현하기 위해서는 이송계의 관성력에 대해 응답성을 향상시키고, 부하이너샤비를 줄이고 가속 시간을 단축시켜야 할 것으로 분석된다.

### 3.2.2 기하학적 정밀도

이송계의 위치정밀도를 분석하기 위하여 레이저 간섭계를 이용하여 정밀측정을 수행하고, 측정Data는 ISO-230의 규정에 따라 반복횟수 5회 반복측정을 실시하였다. 레이저 간섭계는 반사되어 돌아오는 파장의 차를 이용하여 이송계의 위치, 속도, 가속도 등을 측정하였다. 또한 위치오차를 자동보정 S/W를 사용하여 각 측정점에서 위치오차가 최소가 되도록 하여 이송계의 고정밀도를 구현하였다.

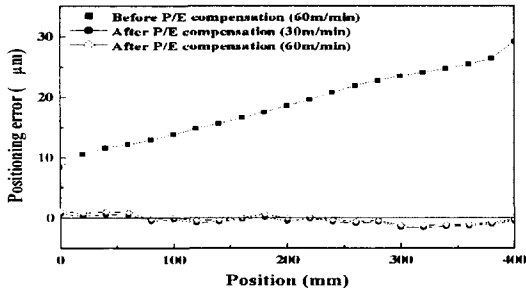


Fig. 8 Positioning accuracy of before & after B/S pitch error compensation

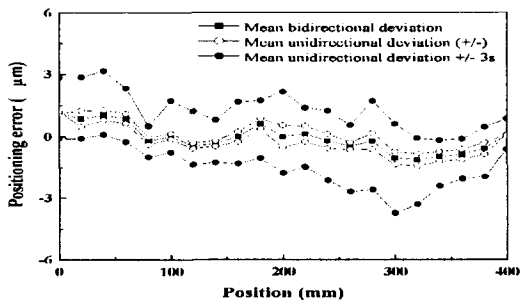


Fig. 9 Bidirectional accuracy, repeatability after pitch error compensation (60 m/min)

Fig. 8은 피치에러를 보정 전후로 구분하여 측정하고, 피치오차 보정 전후의 위치정밀도 향상을 나타낸 것으로 보정 전 위치오차가 최고 30 $\mu$ m에서 보정 후 2 $\mu$ m로 93%의 향상을 보여주고 있다. Fig. 9는 60m/min의 속도를 전진, 후퇴 양방향의 위치결정정

밀도와  $\pm 3s$ 로 표현을 하였으며, Accuracy가 6.5 $\mu$ m이고, 양방향 위치 결정 재현성은 4.5 $\mu$ m로 나타났다.

이송계의 각운동(피칭, 요잉) 오차를 이송속도 30, 60m/min로 구분하고 측정된 결과를 Fig. 10에 나타내고, Fig. 11은 두가지 속도에 대해 수평, 수직 진직도를 측정된 결과이다. 각운동 오차에서 요잉오차는 측정결과가  $\pm 1$ arcsec로 아주 우수하며, 피칭오차는 400mm에서 -4.5arcsec로 양간 처짐을 보여주고 있다.

진직도 측정의 경우 측정 데이터는 다른 측정값들과 달리 레이저 간섭계의 옵틱(Optic)의 설치오차를 포함하게 된다. 이에 대한 값을 보상하기 위해서 옵틱의 Misalignment에 의한 오차 값을 제외 시킬 수 있는 Least square fit를 이용하였다. 측정결과는 전 구간에서 속도 두가지 경우 모두 기하학적으로  $\pm 2 \mu$ m로 양호한 상태를 보여주고 있다.

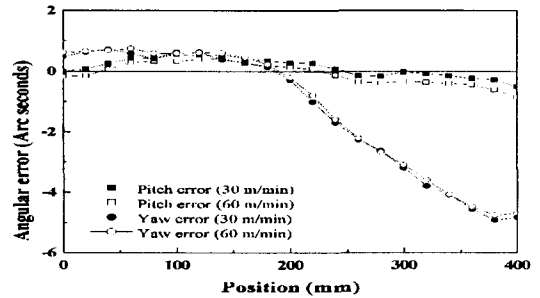


Fig. 10 Comparison of pitch, yaw (30, 60 m/min)

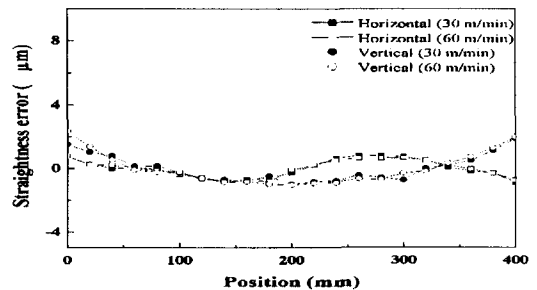


Fig. 11 Comparison of horizontal & vertical straightness (30, 60 m/min)

고속이면서 고정밀 이송을 구현하기 위해서는 미소 이송정밀도가 우수해야 되는데, Fig. 12는 미소이송정밀도의 측정으로 축의 분해능을 검증하기 위하여 실시하였다. 이송속도는 절삭이송 50mm/min로 이송단위 5

$\mu\text{m}$ 로 10회 왕복 측정된 것이다. 관성에 의해 방향 전환 점을 제외하면 양호한 상태를 보이고  $5\mu\text{m}$ 의 10회 누적 결과  $50\mu\text{m}$ 위치에서 누적오차가  $2\mu\text{m}$ 를 보인다.  $5\mu\text{m}$ 이하의 미소이송에서는 안내면의 스틱슬립 및 구조물의 관성력작용에 의해 고정밀이송이 실현되지 못하였다.

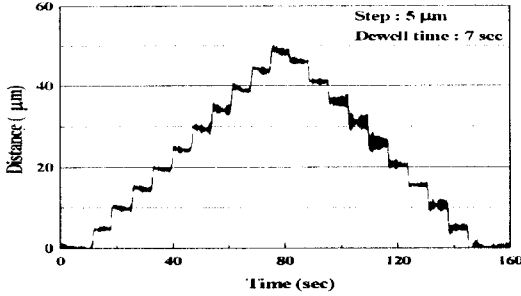


Fig. 12 Micro step response of feed driving system

### 3.2.3 열특성 실험

하이리드 볼스크류를 이용한 서보모타 구동방식의 고속화 구현에 있어 가장 문제시되는 것은 발열과 이에 따른 볼스크류의 열팽창이다. 이를 확인하고 열팽창 감소방안을 위해 열변위 실험을 실시하였으며, 측정을 위해 온도와 열변위로 인한 기하학적인 오차의 두 가지를 수행하였다. Fig. 13은 측정장치의 간략도로 레이저 간섭계를 이용 이송계의 위치오차 측정시스템과 기계 각 부위와 중공 볼스크류를 통한 열팽창 방지를 위한 오일 냉각장치의 오일 입출구에 각각 백금축은 저항체(PT100 $\Omega$ )의 온도센서를 부착하고 온도수집을 수행하였다. 측정은 8시간 연속으로 온도센서로 들어온 데이터를 수집보드를 통해 PC로 전달되고 입력된 데이터는 실시간으로 그래픽 처리되게 하였다.

Fig. 14, 15는 60m/min를 적용하여 각 부위에서 발생하는 온도와 열변위를 측정하여 나타낸 결과로 볼스크류를 냉각하기 전에는 고정축과 볼스크류 너트부위에서 베어링 지지부 및 안내면에 비해 온도가 약 5~7 $^{\circ}\text{C}$ 상승함을 보이며, 동일 속도에 대해 볼스크류를 냉각한 후에는 약 2~3 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도상승으로 냉각효과를 확인할 수 있었고, 이것을 Fig. 15에서 오일 냉각에 따라 볼스크류의 팽창량이 최대 $30\mu\text{m}$ 이상 감소됨을 보여주고 있다. Fig 14에서 최대 발열을 예상했던 볼스크류의 너트부위보다 고정축의 온도상승이 더 높은 이유는 근접해 있는 서보모타의 장시간

가동으로 인한 열 전달의 결과로 기인한다.

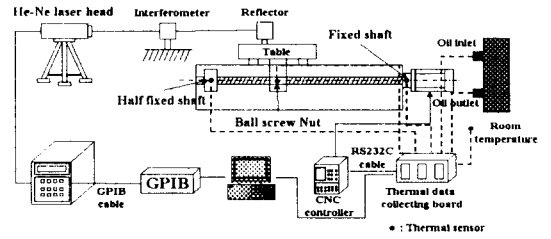


Fig. 13 Diagram of heat displacement measurement

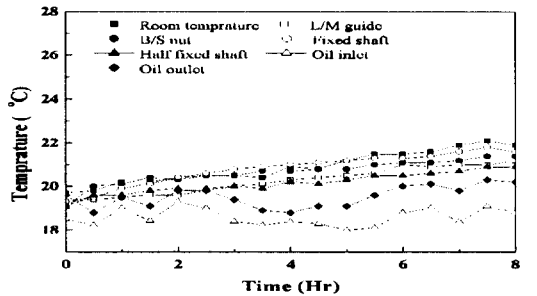
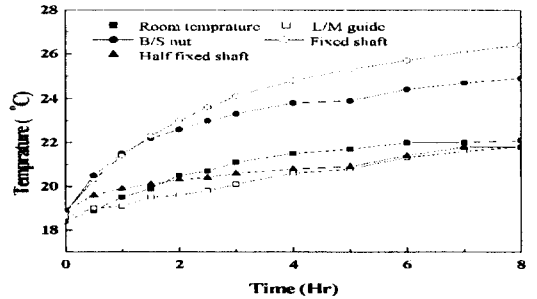


Fig.14 Comparison of temperature change with cooling & without cooling condition (60m/min)

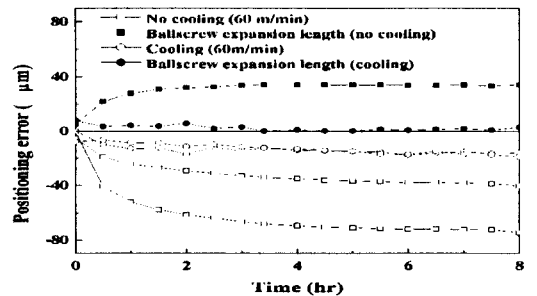


Fig. 15 Comparison of B/S expansion length with cooling & without cooling condition)

이송마찰이 가장 많이 발생하는 볼스크류 너트

부의 온도변화를 Fig. 16에 나타내었는데 오일냉각에 따라 발생온도가 약 2~3°C의 감소를 가져왔다.

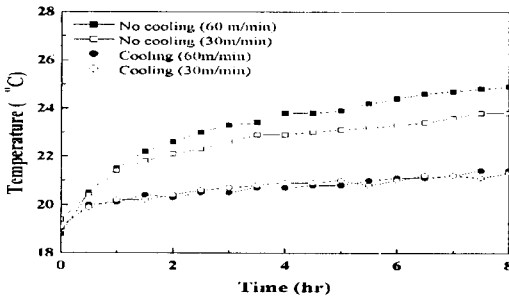


Fig. 16 Comparison of nut temperature change with cooling & without cooling (30, 60 m/min)

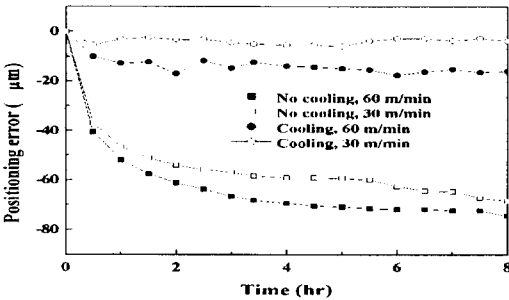


Fig. 17 Comparison of half-fixed shaft positioning error with cooling & without cooling condition

Fig. 17은 볼스크류의 최대 열팽창량을 보이는 반고정축의 위치변화를 오일 냉각의 유무에 따라 구분한 것으로 60 $\mu$ m정도의 위치오차 감소효과를 보여주고 있다. 또한 전반적으로 볼스크류 냉각 전에는 60m/min이송에서 누적 위치오차가 크고, 2시간 이전까지 급격한 열변위를 보이는 반면에 오일 냉각의 경우는 누적 위치오차도 줄은 반면에 이송시작 직후부터 위치오차의 안정성을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고속이송계의 실현을 위하여 High Lead의 볼스크류를 사용한 이송속도 60m/min를 구현하여 위치정정밀도, 열변형, 탄성 변형 및 고속제어 특성 연구를 수행한 결과 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

(1) 고속특성에 맞는 NC파라메타를 조정하여 이송속도 60m/min를 실현하였고, 측정방법에 따른 속도의 검증을 실시한 결과, 추종오차는 양호하게 나타났으며, 가속직후 초기에서 속도 미달은 모터의 이송지령에 대해 이송계의 관성력과 응답성의 차이로 인해서 발생하는 오차로 분석된다.

(2) 60m/min에서 가속도 0.64G로서 1G를 구현하기 위해서는 가감속 시정수와 부하이너샤비의 단축을 통하여 속도와 토크의 최적조건을 찾는 것이 필요하다.

(3) 이송계의 기하학적 정밀도는 이송 전구간에서 위치결정정밀도, 각운동오차 및 진폭도오차 모두 양호하게 나타났으며, 반면에 미소스텝 이송은 최소이송단위 5 $\mu$ m이하에서는 고정밀 이송이 실현되지 못하였다

(4) 중공 볼스크류의 적용과 오일냉각의 적용유무를 통하여 온도와 열변위를 8시간 연속 운전한 결과 60m/min 이송에서도 냉각의 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 이송시작 직후부터 위치오차의 안정성을 나타내었고, 발열은 모터측 베어링 지지면에서 가장 많았는데, 이는 서보모터의 발생열이 전달된 것으로 분석되어진다.

본 연구는 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구소에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. M.Ninomiya, "Friction and Temperature Rise of Ball screw", NSK Bearing Journal No. 637, pp.13-14, 1994
2. M.Ninomiya and K.Miyaguchi, "Recent Development of Ball Screws", NSK Technical Journal No. 664, pp.1-4, 1997.
3. FANUC AC Servo Motor  $\alpha$  Series Parameter Manual, FANUC LTD., p20, 1994
4. 大塚二郎, "ねじ駆動による 超精密位置決定ぬ (第1報)", 日本精密工學會誌, 56-11, pp2033-2038 1990.
5. 諸眞信行, "工作機械の 送り駆動系の 運動精度", 機械の研究, 42-1, pp181-182, 1990.
6. 松本秀樹, "超高精度 直線運動 機構(第2報)", 精密工學會誌, 54-10, pp1945-1988, 1995.