

수치제어선반의 이송특성에 관한 연구

여인완*, 박철우**, 이상조***

Characteristics of Feed Mechanism in NC Lathe

In-Wan Yeo*, Cheol-woo Park**, Sang-Jo Lee***

ABSTRACT

In this paper, the motion of ballscrew and shape of workpiece are the main objective variables varying with load conditions. To verify feed mechanism in NC lathe, the monitoring system is designed and cutting condition variables are spindle speed depth of cut and feed. During machining, rotation number of ballscrew, motion of ballscrew in direction to gravity center and cutting force are measured. After machining, the roughness of workpiece is measured.

Key Words : Ballscrew(볼나사), NC lathe(NC선반), Feed mechanism(이송기구), Cutting force(절삭력), Roughness(표면거칠기)

1. 연구의 배경 및 내용

볼나사는 나사축과 너트사이에 강구를 개재시켜 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기계요소이다. 고효율과 고정도라는 우수한 성능을 가진 볼나사는 각종 공작기계나 삼차원 측정기 등의 이송기구로 사용되어 지고 있으며, 최근 들어 우주항공, 반도체 집적회로 제조장치, 비구면 가공기 등 초정밀 이송과 위치결정기구로도 많이 사용된다. 볼나사를 이송기구로 채택한 공작기계 이송정밀도는 사용용도에 따라 수 μm 에서 수백 μm 까지 정밀도를 가질 수 있다고 한다. 이렇게 이송기구로 사용되는 볼나사는 볼나사 자체 정밀도와 사용연한으로 인한 노후화, 설

치 오차 및 환경변화로 인해 오차가 발생한다.

본 연구에서는 수치제어 선반의 이송계를 대상으로 하여, 이송계의 정밀도와 운동상태를 알 수 있는 시스템을 구상하여, Fig. 1과 같이 절삭시 이송기구의 이송특성과 공작물의 형상을 고찰한다. 그리고 작업조건에 따라, 즉, 무부하 이송실험과 부하(절삭)실험을 통한 이송기구의 특성을 알아보고자 한다. 이때, 주축회전속도, 절삭깊이, 이송속도를 절삭변수로 하고, 이들 절삭조건에 따라 선삭가공을 행하여 이송 볼나사의 회전정도와 축의 상하변위를 알아보고, 동시에 절삭력과 가공후 공작물의 표면거칠기와의 관련성에 대해서도 알아본다.

현대자동차 울산연구소

LG산전

*** 연세대학교 공과대학 기계공학과

변수로 선정한다. 불나사의 회전정도는 로터리 엔코더로 측정하고, 불나사 회전시 발생하는 축의 상하변위는 갭센서를 이용하여 측정한다. 그리고 절삭과정에 공구동력계로 절삭력을 측정하며, 가공 후에 가공물의 표면형상 중 파상도(Waviness), 최대높이 표면거칠기(R_y)를 측정한다. 파상도는 표면형상(Profile)에서 고주파 성분인 표면거칠기(R) 성분을 제거한 것으로서 표면의 전체적인 굴곡을 나타낸다.

3.2 실험장치

Fig. 5는 본 실험에 사용된 장치의 개략도이다. 로터리 엔코더를 이송모터가 부착된 이송축의 반대 측단에 고정하였고, 여기서 나오는 신호는 자체 제작한 32비트 카운터를 통한 후 인터페이스 카드를 통해 PC로 전달된다. 갭센서는 와전류형으로 이송모터와 불나사가 연결된 부분의 그루브 없는 불나사 원통부에 설치하여, 불나사의 회전시 상하변위를 측정한다.

본 실험에서는 불나사 축 아래 부위에 갭센서를 장착하여 절삭력 중 가장 큰 성분인 주분력과 같은 방향으로 축 흔들림을 측정하고자 한다. 공구동력계는 감도가 좋은 압전소자형으로 삼분력을 동시에 측정할 수 있다. 공구동력계는 공구대에 고정하여 가공시 발생하는 절삭력을 측정한다. 절삭력중 불나사의 상하움직임과 같은 방향인 주분력과 이송불나사 회전으로 인한 테이블의 이송방향인 이송분력을 고려대상으로 한다. 갭센서와 공구동력계는 각각의 증폭기를 통한 뒤 A/D 보드를 이용 PC로 전달된다. 각 센서로부터의 신호는 디지털 신호로 전환된 뒤 동시에 PC로 저장되는데 데이터의 저장을 원활히 하기 위해 PC 램 메모리에 우선 저장시킨 후 실험이 끝난 뒤 하드디스크에 저장하는 방식을 취했다. 이송불나사의 윤회는 # 20 머신 오일을 사용한 강제윤회방식이며, 기어박스에는 #5 기어 오일로 스플래쉬 윤회방식이다. Table 1은 앞서 설명한 실험장치의 사양이다.

3.3 실험조건

무부하실험과 절삭실험으로 나누어 다음과 같은 조건에서 실험을 하였다.

3.3.1 무부하실험

절삭을 하지 않고 이송만을 한 실험이다. 본 연구에 사용된 선반의 Z축 이송속도범위가 1~4000 mm/min 이며 실험에서 이송속도는 이송속도범위의 10~3500

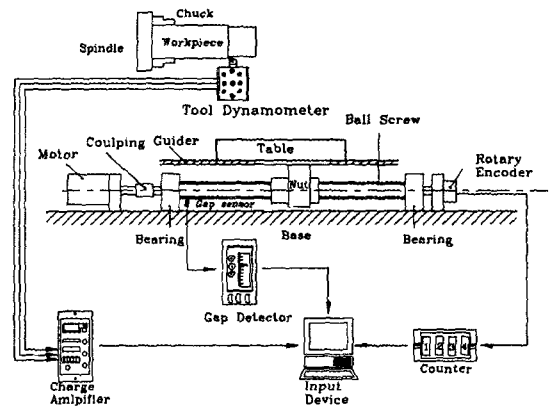


Fig. 5 Experimental setup

Table 1 Specification for experimental setup and measuring device

Apparatus	Specification		Manufacturer & Model
NC Lathe	z-axis DC servo motor	1.1 KW	DAEWOO Heavy Ind. PAN-20
	z-axis LBU	1.0 $\mu\text{m}/\text{pulse}$	
	Feed Command	1 ~ 4000 mm/min	
	Feed Ball Screw Lead	8.0 mm	
Rotary Encoder	resolution	10000 pulse/rev	Heidenhain ROD 426
	scanning frequency	300 kHz	
Gap Sensor	measurement range	0.05 ~ 2.05 mm	ONO SOKKI VS - 021
Gap Detector			ONO SOKKI VT - 102
Tool Dynamometer	3-axis force components		KISTLER TYPE 9257B
Tool Dynamometer Charge Amplifier			KISTLER TYPE 5019A
Surface Roughness Tester	resolution	2.0 nm	Mitutoyo SV - 600
A/D Converter	A/D : 8ch (differential)		Advantech Co PCL - 718

mm/min 구간을 택하는데 속도구간을 저속, 중속, 고속 세 단계로 나눈다.

- i) 저속 : 10 ~ 100 mm/min
- ii) 중속 : 100 ~ 1000 mm/min
- iii) 고속 : 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 mm/min

저속, 중속은 각각의 최저 속도의 정수배로 실험조건을 정하였고, 모든 실험조건에 대해 3회이상 반복하였다. 이송시 발열로 인한 오차를 줄이기 위해 30분간 워밍업하고, 특히 고속실험에서는 1회 실험 후, 20초간 휴지시간을 두었다. 불나사가 약 1바퀴 이상 회전한 후에 데이터를 획득하기 시작하였고, 특히 고속실험에서는 정지상태에서부터 데이터를 획득하는 실험도 병행하여 불나사의 회전수를 이용한 이송속도가 지령속도에 수렴하는 정도도 알아보았다.

3.3.2 절삭실험

공작물은 기계구조용 강 SM45C ($\phi 70 \times 300$)를 사용하였고, 공구는 코팅된(TiN) 초경팁을 사용하였다. 실험에 앞서 2~3 mm 정도의 절삭깊이로 외주를 가공하여 원재료 표면의 불균일을 제거하고 척과 심압대의 편심과 편각을 보정하였다. 실험조건은 다음과 같다.

- i) 주축회전속도 : 500, 1000, 1500 rpm
- ii) 이송속도 : 50, 100, 200, 400, 800 mm/min
- iii) 절삭깊이 : 0.5, 1.0, 2.0 mm/min

이송속도는 무부하실험에서 특정한 경향이 나타나는 속도범위를 포함하여 선정하였고, 탄소강 선삭가공시 정삭과 중삭에 해당하는 범위로 절삭깊이와 주축회전속도를 정하였다. 주축회전속도와 이송속도의 관계로부터 구해지는 이송량은 중삭가공의 범위를 넘어가는 과도한 절삭이 이루어지는 실험조건도 포함한다.

데이터의 획득은 불나사가 1회전이상 진행된 뒤 가공물과 공구와의 거리가 Z축 방향으로 약 10 mm 정도 남겨놓은 상태에서 시작하여, 가공길이가 40 mm 이상 되면 절삭을 끝맺는다. 즉, 이송만이 이루어지는 처음 10 mm 구간과 절삭이 이루어지는 40 mm 구간에 대해 데이터를 획득하고 또한 절삭유가 가해진 상황에서 절삭조건에 따라 실험한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 무부하실험

앞서 제시한 이송실험 조건에 따라 불나사의 회전수를 이송거리 (X_r), 이송오차 (E_d), 누적이송오차의 대표직선 (fit (E_d))으로 환산하고, 축의 상하변위를 계산한다.

4.1.1 지령 이송속도에 따른 이송오차

Fig. 6은 고속실험에서 누적이송오차 대표직선의 편차

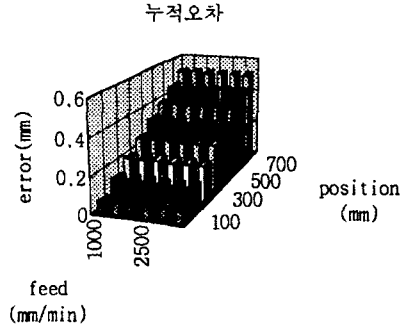


Fig. 6 Mean travel deviation with respect to feed and position

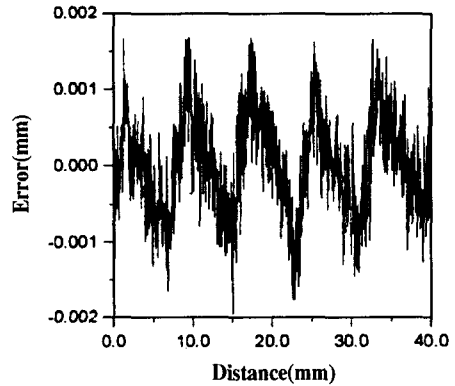
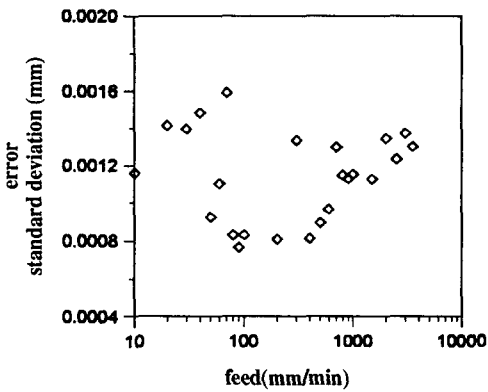


Fig. 7 Travel deviation error at 200mm/min

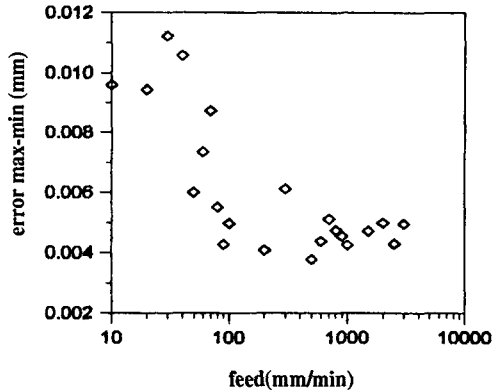
를 이송속도와 위치에 대해 나타낸 것으로 동일한 위치에서 이송속도에 따른 누적이송오차는 차이가 없으나 위치에 따라서는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 즉, 동일위치상에서 이송속도 변화에 따른 누적이송오차의 변화는 없으며 단지 불나사의 회전수에 비례함을 알 수 있다.

로터리 엔코더 신호를 앞서 제시한 식 (5)로 이송거리가 약 40 mm 이고 이송속도는 200 mm/min인 경우의 이송오차를 Fig. 7에 나타내었는데, 이송오차는 불나사의 한 피치인 8mm 를 주기로 변하고 있음을 알 수 있다. 이것은 절삭시 불나사의 흔들림이 이송오차에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주는 것이다.

Fig. 8(a)와 (b)는 불나사의 1피치에 대한 이송오차의 표준편차와 최대값과 최소값의 차이를 이송속도에 대해 구하였다. x축은 이송속도를 나타낸 것이다. 이송속도에 따른 이송오차의 표준편차 그래프에서 특정한 경향은 나



(a) Standard deviation



(b) Difference between maximum & minimum value

Fig. 8 Travel deviation error with respect to feed

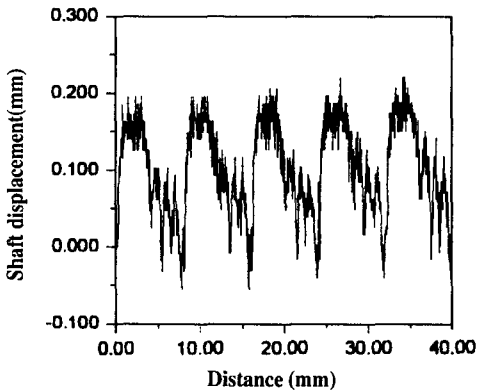


Fig. 9 Shaft motion at 200 mm/min

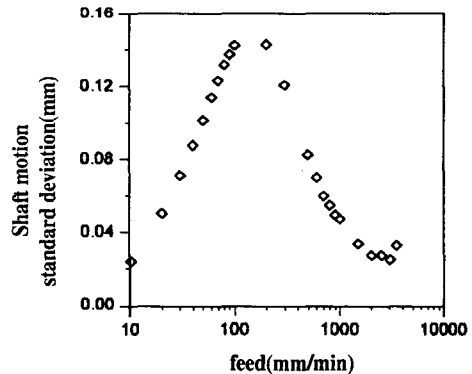


Fig. 10 Shaft motion standard deviation with respect to feed

타나지 않고, 모두 $2.0\mu\text{m}$ 이내로 들어옴을 알 수 있다. 또한 이송오차의 최대값과 최소값의 편차는 $12\mu\text{m}$ 이내이고 특히 이송속도가 증가함에 따라 편차의 크기가 줄어들음을 알 수 있다.

4.1.2 지령 이송속도에 따른 축 선회

Fig. 9는 이송속도 200 mm/min으로 40 mm 정도 이송되는 동안 축의 흔들림을 나타낸다. 축 변동이 볼나사의 1피치에 해당하는 8mm를 주기로 하고 있으며, 각 주기당 축의 상하변위 값은 일정하다. 각 실험조건에서 볼나사 피치인 8 mm에 해당하는 주기는 똑같이 나왔지

만 상하진폭의 크기는 각기 달랐다.

Fig. 10은 이송속도에 따른 축상하운동의 표준편차를 나타낸 것으로, 본 실험의 경우, 이송속도 100~200 mm/min에서 최고값을 나타낸다. 이는 볼나사와 테이블의 위치에 따른 볼나사 진동 모드와 관련이 있을 것으로 판단되나 추후 정밀한 진단이 필요하다.

4.2 절삭실험

절삭조건에 따른 이송오차 (E_{fd}), 누적대표이송오차 ($\text{fit}(E_d)$), 축의 상하운동(흔들림)을 알아보고 이들 각각에 대해 절삭력과의 관계를 고찰한다.

4.2.1 절삭조건에 따른 절삭력

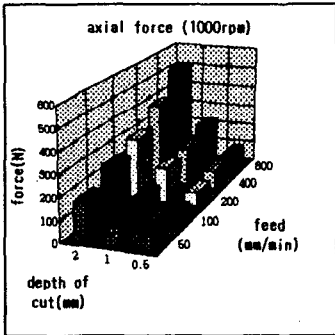
Fig. 11(a)은 주축회전속도 1000 rpm 에서 절삭깊이와 이송속도에 따른 이송분력을 나타낸 것으로 절삭깊이와 이송속도가 증가하면 절삭력은 증가한다. (b)는 절삭깊이가 1.0 mm로 일정한 조건에서 주축회전속도와 이송속도에 따른 이송분력을 나타낸 것으로 일정한 주축회전속도에서 이송속도가 증가하면 절삭력은 증가하고 일정한 이송속도에서 주축회전속도가 증가하면 절삭력은 감소한다.

Fig. 12(a)는 Fig. 11(a)와 같은 조건에서 주분력을 나타낸 것으로 절삭깊이와 이송속도에 비례하여 절삭력은 증가하고 같은 실험조건에서 이송분력보다 크기는 더 크다. Fig. 12(b)는 Fig. 11(b)와 같은 조건에서 주분력을 나타낸 것으로 이 또한 이송속도에 절삭력은 비례하고 주축회전속도에는 반비례하지만, 역시 주분력의 크기는 이송분력보다 크다.

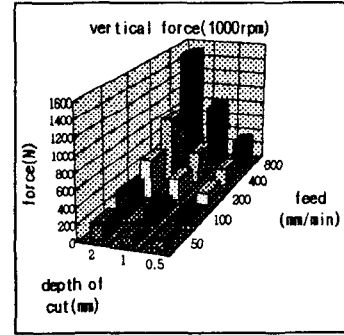
4.2.2 절삭조건에 따른 이송오차 및 절삭력과와의 관계

Fig.13은 절삭깊이 2.0 mm, 이송속도 200 mm/min, 주축회전속도 1000 rpm 에서 불나사가 무부하상태로 10 mm 정도 이송후 절삭이 개시되었을 때, 이송오차와 이송분력과의 관계를 나타내는데, 좌측 y축은 이송오차를, 우측 y축은 절삭력을 나타낸다. 절삭이 시작되면, 이송오차의 폭이 절삭전보다 커지고 주기성도 떨어진다. 절삭으로 인한 외란 때문에 불나사의 회전운동이 불안정해짐을 알 수 있다.

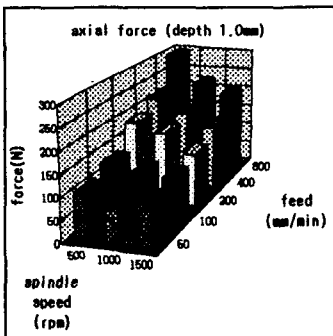
Fig. 14(a)는 주축회전속도 1000 rpm 에서 절삭깊이와 이송속도에 따른 이송오차의 편차를 나타낸 것으로 무부하실험과는 달리 이송속도가 증가하면, 이송오차의 편차가 증가한다. 그러나 절삭깊이에는 뚜렷한 경향이 없다. 그리고 Fig. 14(b)는 절삭깊이 1.0 mm 에서 주축회전속도와 이송속도에 따른 이송오차의 편차를 나타낸 것으로 이송속도가 증가하면, 이송오차의 편차가 증가하는



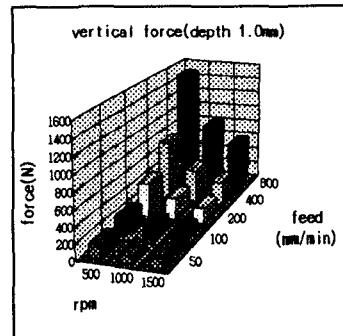
(a) 1000 rpm



(a) 1000 rpm



(b) Depth 1.0 rpm



(b) Depth 1.0 rpm

Fig. 11 Axial force with respect to cutting conditions

Fig. 12 Vertical force with respect to cutting conditions

편이고 주축회전속도에는 반비례 경향을 보인다. 이는 같은 실험조건에서 절삭력과 같은 양상이다.

Fig. 15는 주축회전속도가 1000 rpm으로 (a)는 절삭

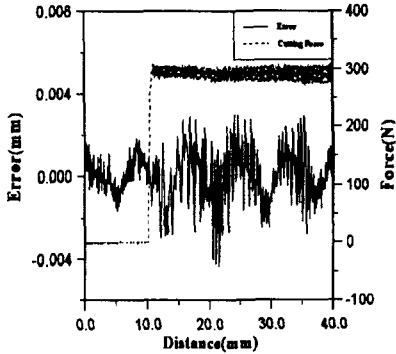
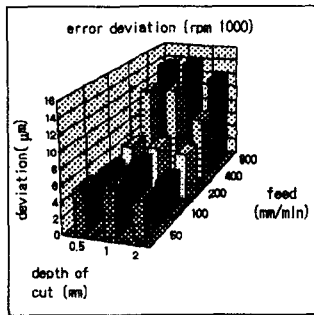


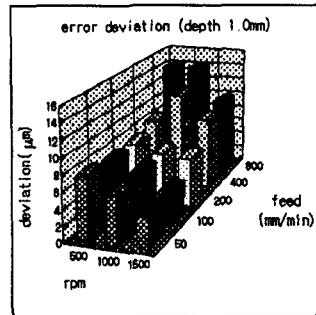
Fig. 13 Travel deviation error and cutting force

깊이 0.5 mm 에서 이송속도에 따른 이송오차 편차와 이송분력을 나타내었고, (b)는 절삭깊이가 2.0 mm 인 경우이다. 각각 좌측 y축은 이송오차의 편차를, 우측 y축은 이송분력을 나타낸다. 이송오차의 편차 크기는 절삭깊이의 변화로 인한 이송분력의 크기에는 무관하지만 이송속도에는 비례한다.

Fig.16(a), (b)는 절삭깊이 1.0 mm 에서 각각 주축회전속도 500, 1500 rpm 일 경우의 이송분력과 이송오차의 편차에 대해 알아본 결과이다. 주축회전속도의 증가는 동일한 이송속도에서 이송오차의 편차와 절삭력을 감소시키고, 이송속도의 증가는 이송오차 편차와 절삭력을 증가시킨다. 앞서 이송만 행한 실험에서는 이송속도와 이송오차의 관계가 일정치 않았지만, 절삭실험에서는 이송속도가 증가하면 이송오차 편차가 증가함을 알 수 있다.

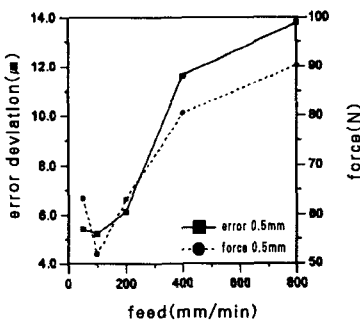


(a) 1000 rpm

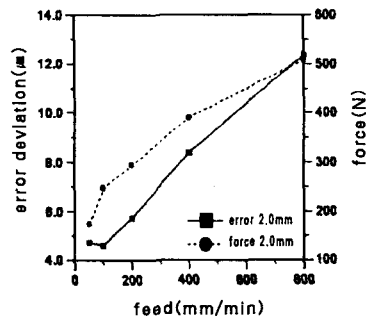


(b) Depth 1.0

Fig. 14 Travel deviation error with respect to cutting conditions

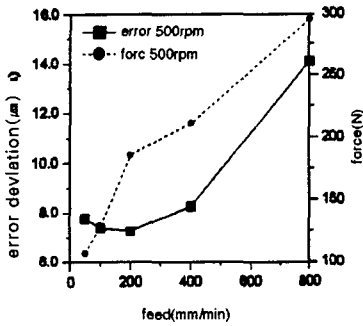


(a) Depth 0.5mm

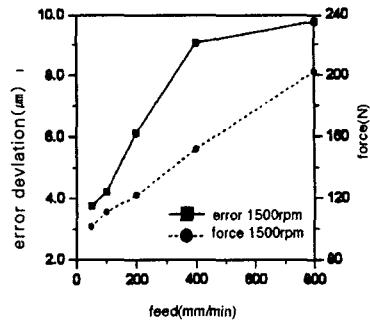


(b) Depth 0.2mm

Fig. 15 Travel deviation error and axial force at spindle speed 1000rpm



(a) 500rpm



(b) 1500rpm

Fig. 16 Travel deviation error and axial force at depth 1.0mm

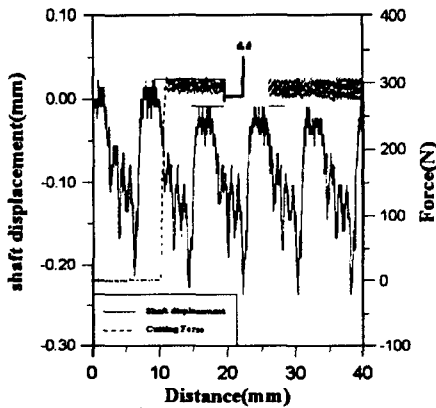
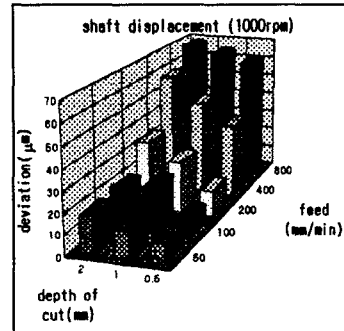


Fig. 17 Shaft displacement and cutting force

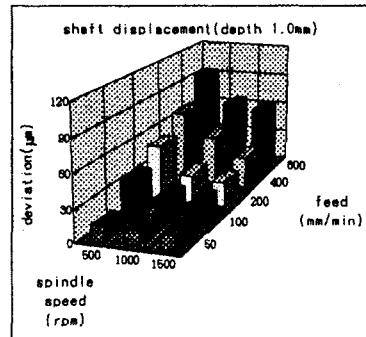
4.2.3 절삭조건에 따른 축의 처짐 및 절삭력과와의 관계

Fig. 17은 절삭깊이 2.0 mm, 이송속도 200 mm/min, 주축회전속도 1000 rpm 에서 절삭력과 축의 움직임을 나타내었다. 좌측 y축은 볼나사 상하 변위를 나타낸 것이고, 우측 y축은 주분력을 나타낸다. 무부하로 볼나사가 회전하여 10 mm 정도 움직인 후 절삭이 시작되면 절삭이전보다 축변위값이 전체적으로 Δd만큼 감소하는데, 이는 갠센서가 축아래에 설치되어 있으므로 축이 아래로 처짐을 의미한다. 이는 절삭으로 인해 볼나사 사이에 있는 테이플과 너트의 변위가 볼나사에 영향을 미친다고 할 수 있다. 그러나 절삭이 일어나도 축변위의 볼나사 피치 8 mm 에 대한 주기성은 변하지 않는다.

Fig. 18(a)는 주축회전속도 1000 rpm 으로 절삭깊이와 이송속도의 변화에 따른 축처짐을 나타낸 것으로 절삭



(a) 1000 rpm



(b) Depth 1.0mm

Fig. 18 Shaft displacement with respect to cutting conditions

깊이와 이송속도에 축처짐이 비례함을 알 수 있다. Fig. 18(b)는 절삭깊이 1.0mm로 이송속도가 증가하면 축처짐이 증가하지만 주축회전속도에는 반비례한다. 즉 동일한 절삭조건에서 절삭력의 변동과 유사하다.

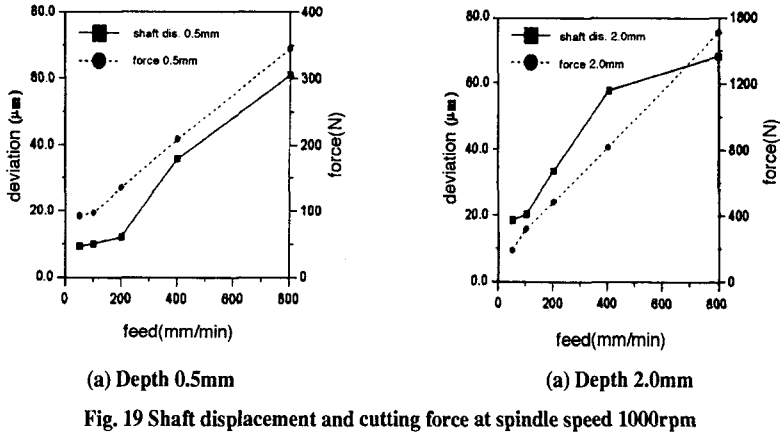


Fig. 19 Shaft displacement and cutting force at spindle speed 1000rpm

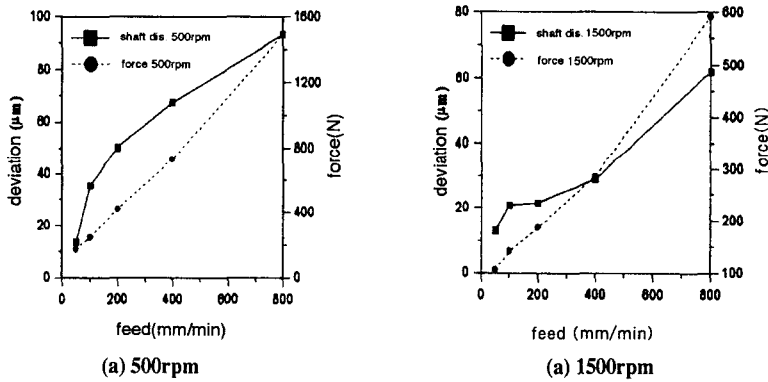


Fig. 20 Shaft displacement and cutting force at depth 1.0mm

Fig. 19와 Fig. 20은 이를 알아보기 위한 축변위와 절삭력을 비교한 그림이다. Fig. 19(a),(b)는 주축회전속도 1000 rpm 에서 절삭깊이가 각각 0.5 mm, 2.0 mm 일 때 이송속도에 대해 축처짐과 축처짐과 같은 방향의 절삭력인 주분력을 나타낸 것이다. Fig. 20(a),(b)는 절삭깊이 1.0 mm 에서 주축속도가 500, 1500 rpm 일 때 이송속도에 대해 축변위와 절삭력을 나타낸다. 각각 좌측 y축은 축의 처짐을, 우측 y축은 주분력을 나타내었다. 이송속도가 증가하면 축의 처짐은 증가하나 절삭조건의 변화에 따른 절삭력의 절대값과 축 처짐량사이의 정량화는 성립되지 않았다. 무부하이송실험에서는 축 선회회의 표준편차가 이송속도 100~200 mm/min 에서 가장 큰 값을 가졌으나 절삭실험에서는 축 처짐을 살펴본 바에 의하면 축선회 표준편차에 관계없이 이송속도에 비례하여 축 처짐이 증가한다.

4.2.4 절삭조건에 따른 누적이송오차

앞 절의 실험과 같은 방법으로 무부하와 부하시 누적이송오차를 비교한다. 이 실험에서 누적이송오차는 이송속도에 무관하고 위치에 선형적으로 증가하는 특징을 나타내었는데, 4.2.2에서 보았듯이 절삭이 시작되면, 이송만 이루어질 때보다 이송오차의 진폭이 커지고 주기성 또한 떨어진다. 이것이 누적이송오차에 어떤 영향을 미치는지 알아본다. 즉 절삭이 이루어질 때, 불나사의 회전수를 이송만 이루어질 때의 불나사 회전수와 비교하여 절삭저항이 불나사 회전수에 어떠한 영향을 주는지 알아본다. 절삭실험에서 위치 10 mm는 무부하 상태이고 이후 절삭이 이루어진다.

Fig. 21(a)는 절삭조건이 이송속도 100 mm/min, 주축회전속도 1000 rpm 이고, (b)는 이송속도 400 mm/min, 주축회전속도 1000 rpm으로 부하여부, 이송

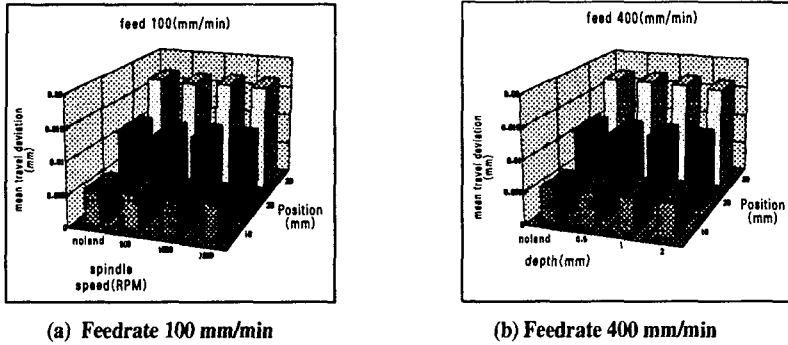


Fig. 21 Mean travel deviation at spindle speed 1000 rpm

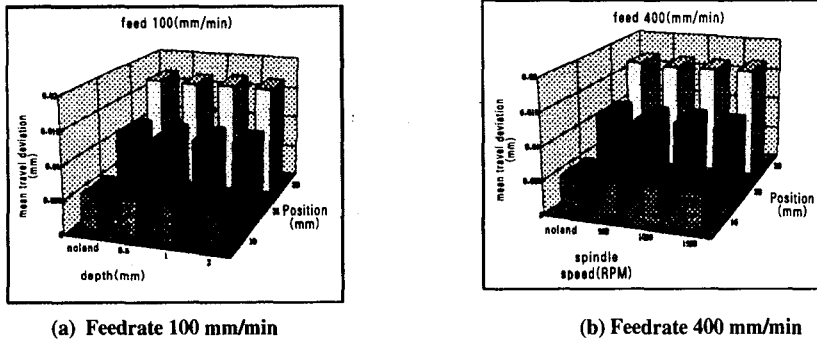


Fig. 22 Mean travel deviation at depth 1.0 mm

속도, 절삭깊이에 무관하지만 위치에 따라 누적이송오차가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 22(a)는 이송속도 100 mm/min, 절삭깊이 1.0 mm 에서 주축회전속도와 위치에 따라 누적이송오차를 나타내고 (b)는 절삭조건이 400 mm/min, 절삭깊이 1.0 mm 에서 누적이송오차를 보여준다. 위치에 따라 누적이송오차가 증가하는 경향이지만, 부하여부와 주축회전속도, 이송속도에 무관함을 알 수 있다. 이송과 절삭을 동시에 행한 절삭실험에서도 위치 10 mm 당 누적이송오차가 일정해 절삭이 누적이송오차에 영향을 미치지 못한다. 절삭력은 이송목표치까지의 볼나사 회전수에는 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

4.3 표면형상

실험조건에 따른 표면형상과 이송오차와의 관계를 알아 본다.

4.3.1 일정한 절삭깊이에서 표면형상

1.0 mm의 일정한 절삭깊이에서 주축회전속도와 이송속도를 변화시킨 절삭실험에서 이송오차와 공작물표면형상과의 관계를 고찰한다. 파상도는 표면의 고주파 성분인 표면거칠기성분(R)을 배제하여 표면 전체의 굴곡을 나타낸다. 알려진 바에 의하면 가공물에 파상도가 생기는 것은 절삭시 진동, 공구와 공작물의 처짐 등이 원인이라는 연구결과가 있다(15).

Fig. 23(a)는 이송속도 100 mm/min, 절삭깊이 1.0 mm, 주축회전속도 1000 rpm에서 절삭만이 포함된 이송오차를 가공길이 40 mm 에 대해 나타내었고, (b)는 그때의 가공표면 파상도를 나타낸 것으로 가공길이 역시 40 mm 에 대해 그린 것이다. 파상도와 이송오차가 같은 주기인 볼나사의 피치인 8 mm로 주기성을 가진다. 파상도가 처음과 끝부분에서 명확히 않은 것은 절삭의 처음과 끝부분으로 과도 상태의 절삭과정때문이고, 또한 표면 거

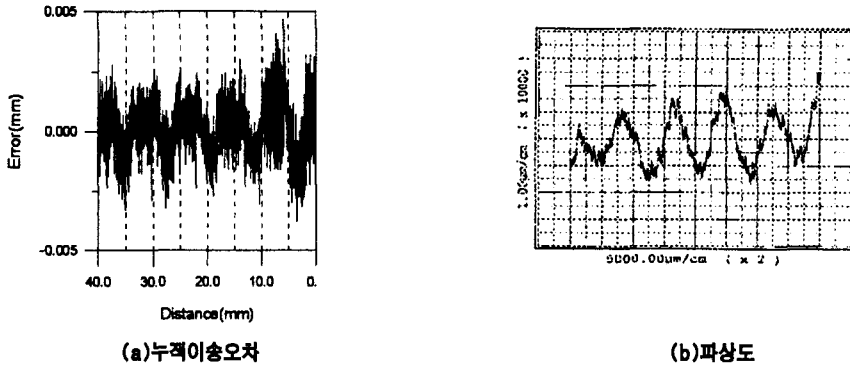


Fig. 23 Travel deviation error and waviness

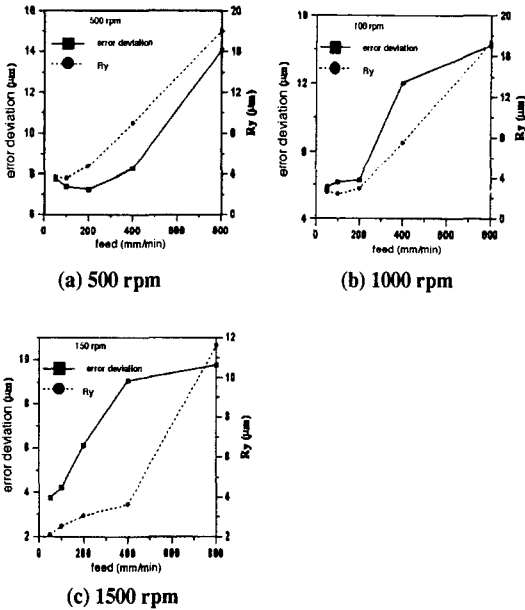


Fig. 24 Travel error deviation and Ry at depth 1.0 mm

칠기 측정시 진입 길이(start-up length)와 이탈 길이(finish length)를 주지 않은 영향도 있으리라 판단된다. 파상도의 주기성에 대하여 살펴보면, 이송오차가 양(+)인 경우는 누적대표직선보다 누적이송오차값이 큼을 의미하고, 이는 불나사 회전이 이전보다 빨리 되어 동일한 시간에 이송거리가 많음을 의미한다. 이는 가공위치에 따라 가공양상이 달라 이송이 빠른 구간에서는 파상도의 값이 양으로 되리라 판단된다. (a)에서 x축 처음 40 mm 인 부분은 절삭이 끝나는 부분이고 (b)는 x축 처음부분이

Table 2 Feedrate and periodic waviness with respect to experimental conditions

(단위 mm/rev)

rpm	500		1000		1500	
	이송량	주기성	이송량	주기성	이송량	주기성
feed (mm/min)						
50	0.1	×	0.05	△	0.033	△
100	0.2	△				
200	0.4	△			0.133	△
400	0.8	×	0.4	△	0.266	△
800	1.6	×	0.8	×	0.533	×

×: 전혀 없음, △: 약간 보임, ○: 뚜렷

절삭이 끝나는 부분으로 거리에 대해 이송오차와 파상도의 형상이 일치한다. 이런 현상은 모든 실험조건에 대해 나타나는 것은 아니고 특정 이송량에 대해서 나타났다.

Table 2는 실험조건에 따른 이송량 mm/rev과 파상도의 주기성이 나타나는 정도를 표시하였다. Fig. 24는 절삭깊이 1.0 mm 에서 주축회전속도와 이송속도에 따른 이송오차와 최대높이 표면 거칠기(R_y)를 비교한 것으로 이송속도에 비례하여 이송오차와 표면 거칠기가 증가하고, 주축회전속도에는 표면 거칠기는 반비례하며, 이송오차도 대부분이 반비례하는 결과가 나왔다. 이송오차의 변화와 표면 거칠기의 변화가 절삭조건에 따라 동일함을 알 수 있다. 주축회전속도에 관계없이 이송속도가 커지면 표면 거칠기가 나빠지고 이송량이 공작물 표면에 전사되는 경향이 있다. 일정한 이송속도에서 주축회전속도가 증가하면 표면 거칠기가 좋아짐을 알 수 있다.

4.3.2 일정한 주축회전속도에서의 표면형상

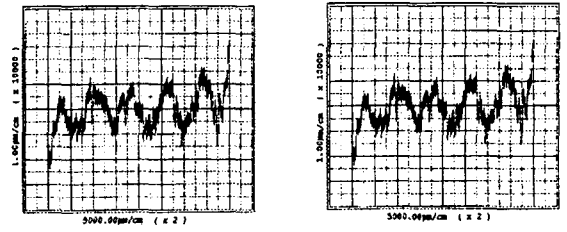
Table 3은 일정한 주축회전속도 1000 rpm 에서 절삭 깊이와 이송속도에 따른 주기성을 알아보았다. 같은 이송량에서 절삭깊이의 변화에 따른 파상도의 주기성은 변함이 없다. 절삭깊이의 변화에는 관계없이 이송량에 파상도의 주기성이 나타남을 알 수 있다. Fig. 25는 주축회전속도 1000 rpm 에서 절삭깊이와 이송속도에 따른 이송오차와 최대높이 표면거칠기(R_y)를 비교하였다. 이송속도

가 증가하면 최대높이 표면거칠기와 이송오차가 증가하지만 절삭깊이에 대해서는 이송오차, 표면거칠기 모두 무관한 것으로 결과가 나왔다. 또 Fig. 26을 보면 0.1 ~ 0.2 mm/rev 에서 표면거칠기의 주기성이 뚜렷하게 나타나며 이송속도가 증가하면 최대높이 표면거칠기가 커져 주기성은 보이지 않고 공작물에 이송량이 전사되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 Periodic waviness relation to depth of cut and feedrate

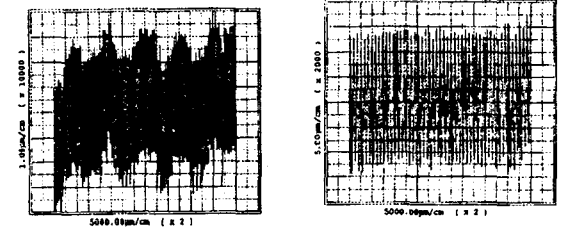
절삭깊이 (mm) \ 이송속도 (mm/min)	0.5	1.0	2.0	이송량 (mm/rev)
50	×	△	×	0.05
100	△	○	△	0.1
200	○	○	○	0.2
400	△	△	△	0.4
800	×	×	×	0.8

×: 전혀 없음, △: 약간 보임, ○: 뚜렷



(a) 100 mm/min

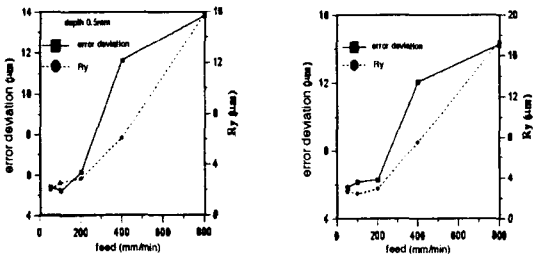
(b) 200 mm/min



(c) 400 mm/min

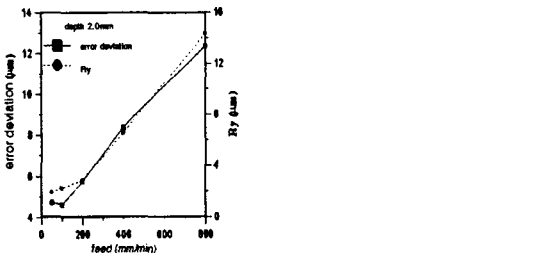
(d) 800 mm/min

Fig. 26 Waviness at 1000 rpm, 2.0 mm with respect to feed



(a) Depth 0.5mm

(b) Depth 1.0mm



(c) Depth 2.0mm

Fig. 25 Travel error deviation and R_y at 1000 rpm

5. 결론

수치제어 선반의 이송기구부인 볼나사의 운동 메커니즘을 규명하기 위한 시스템을 구성하여 무부하실험과 절삭깊이, 주축회전속도, 이송속도 등을 변화시킨 절삭실험을 통해 이송볼나사의 운동 특성과 절삭력 및 가공물의 형상을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭이 볼나사의 회전에 영향을 미쳐 무부하실험보다 절삭시 이송오차가 커지고 불안정해진다. 일정한 절삭깊이에서 절삭조건 변화에 따른 절삭력의 증가로 인해 이송오차는 증가한다. 그러나 일정 주축회전속도에서 절삭깊이 변화에 따른 이송오차의 변화는 무관한 결과를 보였다.

2. 이송불나사의 상하변위는 불나사리드를 주기로 변하고 상하진폭값은 이송속도에 따라 달라진다. 절삭시 이송불나사의 상하변위는 역시 불나사 피치를 주기로 변하지만 불나사 상하변위가 전체적으로 주분력 방향으로 처지는데 이 처짐량은 절삭조건에 따라 다른 절삭력 크기변화에 비례한다.

3. 불나사의 회전량을 알 수 있는 누적이송오차를 통하여 부하여부와 절삭조건에 상관없이 누적이송오차값이 위치에 따라 일정하게 누적되고 이는 위치에 선형적이다.

4. 특정한 절삭조건에서 표면 파상도의 변화가 이송불나사 피치인 8mm를 주기로 변하고 그 위상이 이송오차와 같음을 통해 표면 거칠기가 좋은 경우 가공 표면의 굴곡은 이송오차와 관계가 있다.

5. 이송속도가 증가함에 따라 최대높이 표면거칠기 (R_{p3})는 증가하고 또한 이송량이 표면에 전사됨을 알 수 있다. 주축회전속도의 증가는 표면 거칠기를 좋게 하지만 절삭깊이의 변화는 표면 거칠기에 영향을 주지 않았다. 일정 절삭깊이에서 주축회전속도가 증가하면 이송오차와 최대높이 표면거칠기값이 대체로 작아졌지만 일정 주축회전속도에서 절삭깊이가 증가하면 이송오차와 최대높이 표면거칠기는 특별한 경향이 나타나지 않았다. 그러나 이송속도의 증가는 이송오차와 최대높이 표면거칠기 모두 증가한다. 그러므로 절삭조건에 따른 이송오차와 표면 거칠기의 변화가 유사하다.

참 고 문 헌

1. ISO 230-2 : 1988(E) Acceptance code for machine tools - Part2 : Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools.
2. 통상산업부, 파기처, 고정밀 가공 및 측정기술에 관한 연구, 1994, 1995.
3. J. Mou and C. R. Liu, "A Method for Enhancing the Accuracy of CNC Machine Tools for On-Machine Inspection," Journal of Manufacturing System, Vol. 11, No. 4, pp. 229 - 237, 1992.
4. 고훈주, 정운교, "CNC 원통연삭기 이송오차의 발

- 생요인에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제10권 제1호, pp. 62-69, 1993.
5. 전언찬 외 3명, "CNC 공작기계의 위치결정 정밀도 향상에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제11권 제6호, pp. 5-11, 1994.
6. Y. C. Shin, H. Chin, M and J. Brink, "Characterization of CNC Machining Centers," Journal of Manufacturing System, Vol.10, No.5, pp. 407-421, 1991.
7. M.. Weck, "Performance Analysis of Feed-Drive Systems in Diamond Turning Machining Specified Test Samples," Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 601-604, 1992.
8. T. Asao, Y. Mizugaki and M. Sakamoto, "Precision Turning by Means of a Simplified Predictive Function of Machining Error," Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 447-450, 1992.
9. H. Yonezawa, Y. Hirata and H. Sasai, "Positioning Table with High Accuracy and High Speed," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 433-436, 1990.
10. Y. Kakino, Y. Nakatsu, "The Measurement of Motion errors of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by using Telescoping Magnetic BallBar Method," Annals of the CIRP, Vol.36, pp 377-380, 1987.
11. 한국 산업 규격, KS B1020, 정밀 불나사(Precision BallScrew), 1993.
12. D. D. Fuller, Theory and Practice of Lubrication for Engineers, John Wiley & Sons, 2nd Ed. pp. 343-386, 1984.
13. ISO 3408-1 : 1991(E/F) Ball screws Part1 : Vocabulary and designation .
14. FANUC SYSTEM 6T, maintenance manual, pp. 87-152
15. 박준호, 정밀측정시스템공학, 야진출판사, pp. 26-288, 1993.
16. M. Weck, Handbook of Machine Tools, John Wiley & Sons, Vol.4, pp. 9-42, 1984.
17. S. Kato, N. Sato, "Some Considerations on Characteristics of Static Friction of Machine Tool Slideway," Journal of Lubrication

- Technology, ASME, Vol. 94, No. 1, pp. 234-247, 1972.
18. 竹内芳美 외 5명, "超精密旋削加工機の開發と加工誤差補正," 日本機械學會論文集, 57卷 542, pp. 157 - 161, 1991.
19. Jenq-Shyong Chen, "Computer-Aided Accuracy Enhancement For Multi-Axis CNC Machine Tool," Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 35, No. 4, pp. 593 - 605, 1994.