

## CNC 원통연삭기 이송오차의 발생요인에 관한 실험적 연구

고 해 주\*, 정 윤 교\*\*

### An Experimental Study on the Generative Elements of Feed Errors in CNC Cylindrical Grinding Machine

Hai-Ju Ko\*, Yoon-Gyo Jung\*\*

#### ABSTRACT

The accuracy of machine tools is the major factor concerned with the accuracy of the processed work. The feed errors of feed system in machine tool, therefore, make the machining errors of work directly on processing. In this point, this study focused on the generative elements of feed errors in CNC cylindrical grinding machine, such as supporting method of ball screw, the effect of pitch and yaw error and the position detecting method in servo system when operating its shaft of grinding wheel head. Furthermore, in order to improve the driving accuracy of this machine tool, feed errors are measured by a laser interferometer. Results obtained in this study provide some useful informations to attain high accuracy of CNC machine tool.

**Key Words :** Feed errors(이송오차), Yaw errors(요오차), Pitch errors(피치오차), CNC Machine tool(CNC 공작기계), Laser interferometer(레이저간섭계), Backlash(백래시)

#### 1. 서 론

공작기계는 공구와 공작물간에 주어지는 상대운동으로 이루어지며 그 요소로는 회전운동요소와 안내요소, 구동요소 및 그것들의 접속으로 구성되어진다. 이러한 구성요소에는 각각의 오차를 가지고 있고, 그 요소의 오차가 누적되어 가공물의 최종치수 정밀도를 결정하게 되는데, 공작기계의 이송구동축 운동에서 발생하는 위치결정 정밀도에 따라서 가공물의 치수 정밀도에 가장 큰 영향을 받게 된다. 그러한 위치결정 정밀도에 영향을 주는 인자로서는 이송계의 강성, Back-lash, 안내면의 슬롯저항 그리고 이송계의 자세변화 등이 해당된다(1).

실제 이송구동부는 각 부품의 탄성변형으로 인해 이송부가 변형을 일으켜 제어이득(制御利得)을 저하시키는 결과를 초래하므로 가능한 한 이송구동부의 강성을 높여 탄성변형에 의한 오차를 최소화 시키는 것이 바람직하다(2). 이와같은 관점에서 이송구동계의 위치결정 정밀도는 그 시스템이 필요로 하는 기능과 정도가 각기 다르고 사용하는 요소의 조합에 따라 달라짐으로, 이 요소의 양호성에 따라 변화가 있게 되어, 이에 대한 최적의 모델을 결정함에 있어서는 각 공작기계의 특성에 따른 연구가 이루어져야 할 것으로 본다(3-5).

본 연구에서는 이송나사로 구동되는 CNC 원통연삭기의 스톱대축 이송구동계의 오차발생 요인에 대해 실험적

\* ㈈기아기공 기아기계기술연구소 주임연구원

\*\* 창원대학교 기계공학과 (정회원)

인 검토를 수행하였다. 이를 위하여 이송구동계의 강성에 따른 영향과 이송안내면의 각 운동에 의한 위치정밀도 영향 및 서보계 위치검출장치의 종류에 따른 위치오차의 재현성(Repeatability)의 유무, 그리고 오차보상관계를 레이저 간섭계를 이용한 정밀측정을 통하여 비교 검토함에 의해 이송오차를 최소화시킬 수 있는 CNC 공작기계 이송구동축 설계의 기본방향을 마련하는데 역점을 두고 연구를 수행하게 되었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

공작기계의 단일구동축 운동중에 발생하는 오차로는 구동계 공간상에서 3개의 직선운동 오차와 3개의 회전운동 오차로 구성된 총 6개의 자유도(DOF : degree of freedom)를 갖는다(6). 그림 1은 이러한 운동오차를 나타낸 것으로서 실제적인 구동계에서는 6개의 자유도중 5개의 운동에 의해 영향을 받는 1개의 직선운동을 구현함에 있으며, 이것이 구동계의 이송오차로 나타나게 된다.

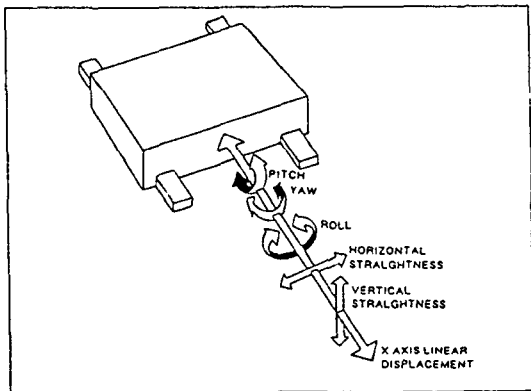


Fig.1 Linear motion errors of rigid body

축의 지지방법에 따른 강성도차가 이송오차에 미치는 영향을 검토하기 위해 이송축계의 지지방법을 그림 2에서와 같이 고정-자유형 및 고정-고정형의 방법으로 구분하였으며, Servo계의 위치제어 방법에 따라 이송오차의 정도변화를 측정하기 위하여 Quasi-Closed Loop system과 Closed-Loop system으로 구성하여 본 연구를 수행하였다.

측정 시스템의 구성은 그림 3에 표시한 것처럼 마이

크로 컴퓨터를 중심으로 한 레이저 간섭계와 수치제어 원통연삭기로 구성된다. 연삭기의 CNC 내에 입력된 Program에 의해 이송축을 구동 시키면 각 위치검출 방식에 따라 위치신호를 CNC 내에 Feed back 시킴과 동시에 레이저 간섭계 및 Display unit를 통하여 이송변위를 측정하여 마이크로 컴퓨터에 입력시킨 후 분석처리 된다.

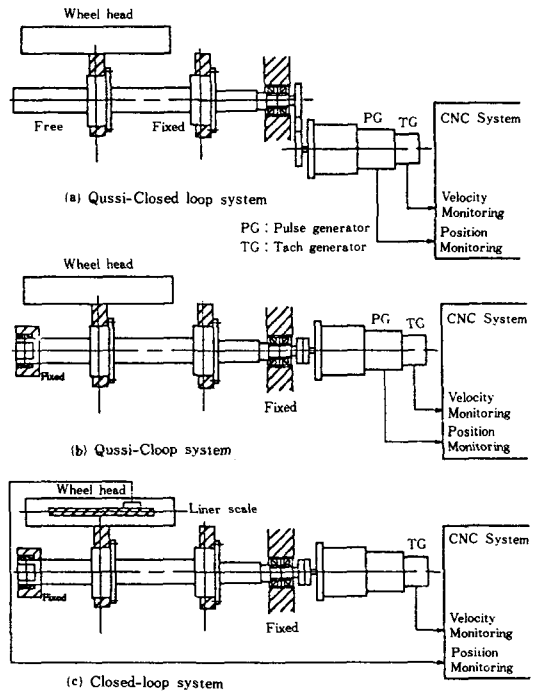


Fig.2 Supporting and position controlling method in driving system

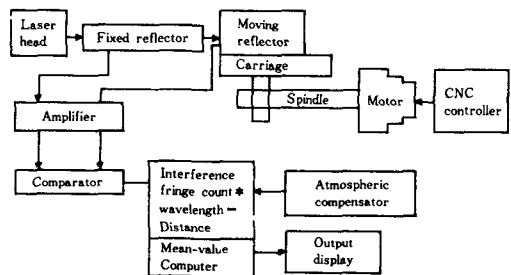


Fig.3 Experimental set-up

### 2.2 실험방법

이송구동계의 특정 위치에서 변위를 측정하고자 할

때는 신뢰도의 향상을 위해 측정을 어느 회수이상 반복적으로 실시해야 하며, 이 경우 실제 측정되는 변위는 그림 4와 같이 특정한 통계학적 분포를 갖게 된다. 이 경우 분포곡선은 데이터의 통계학적 분산으로 정의되며 일반적으로 구동계의 위치검출기 분해능 및 위치제어기의 성능과 안정성, 그리고 공작기계 구조물의 기계적 안정성, 안내면 마찰력의 거동, 구동계 백래쉬, 히스테리시스 등에 영향을 받게 된다.

신뢰성 있는 이송오차를 구하기 위해서는 그림 4에서와 같이 특정위치로의 구동계 접근을 양방향에서 실시하여야 하며 이송오차를 구하기 위한 요소로서 Systematic error, Back lash, Positional scatter width, Positional uncertainty가 요구되어지며 그러한 값을 구하는 과정은 아래와 같다(7).

(1) Systematic error

양방향 분포곡선에서 측정된 위치값들의 평균값으로 표시된다.

$$X_i = \frac{\bar{X}_i \uparrow + \bar{X}_i \downarrow}{2} \quad (2, 1)$$

$\bar{X}_i \uparrow = +$  방향접근의 평균값

$\bar{X}_i \downarrow = -$  방향접근의 평균값

(2) Back lash

양방향 분포곡선에서 측정된 위치 평균값들의 차로 나타낸다.

$$U_i = |\bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow| \quad (2, 2)$$

(3) Positional scatter width

$$P_{si} = 6\bar{S}_i = 3(S_i \uparrow + S_i \downarrow) \quad (2, 3)$$

S : 표준편차

$$S_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \uparrow - \bar{X}_i \uparrow)^2} \quad (2, 4)$$

$$S_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \downarrow - \bar{X}_i \downarrow)^2} \quad (2, 5)$$

(4) Positional uncertainty

$$P_{ui} = U_i + P_{si} = U_i + 3(S_i \uparrow + S_i \downarrow) \quad (2, 6)$$

위치정밀도에 있어서 이들 측정치의 산포가 가우스(Gauss)의 정규분포라는 가정을 기초로 하고 있다. 시스템 오차는 측정 범위의 평균적 오차로 실제적으로 정밀도 향상을 위해 보상될 수 있는 오차이며, 3S로 표

시되는 무작위 오차(Random Error)는 공작기계의 구동정밀도에서 보상이 될 수 없는 오차이다.

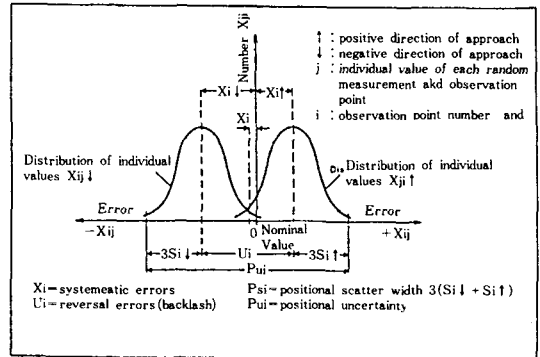


Fig. 4 Error measurement procedure

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 이송구동계 강성에 따른 정밀도 영향

이송구동부는 볼나사와 너트, 플렌지, 하우징, 기어박스 등으로 이루어져 있으며 구동부 전체시스템 설계에서 고려되어야 할 사항은 먼저 이송구동부가 입력지령에 대해 시간적인 지연없이 응답할 수 있어야 한다.

실제의 이송구동부는 각 부품의 탄성으로 인해 이송부가 동작전에 운동에너지를 탄성변형 에너지로 흡수하는 형태로 나타나며, 초기 가속도 이후에는 흡수된 에너지가 방출되어 구동시스템에 Over shoot가 일어나 제어회로에 바람직하지 못한 결과를 초래한다. 이런 이유로 인해 가능한 한 부품의 강성을 높이는 것이 이송구동부의 설계에서 필요하다(8).

이송나사계의 축방향강성(K<sub>T</sub>)은 나사축의 축방향강성(K<sub>S</sub>), 너트의 축방향강성(K<sub>N</sub>), 지지베어링의 축방향강성(K<sub>B</sub>) 및 너트·베어링 설치부의 축방향강성(K<sub>H</sub>)의 조합으로 나타난다. 그림 5는 고정-자유와 고정-고정형에 대한 이러한 조합을 나타내며 다음식으로 표시할 수 있다(9).

$$\Delta L = \frac{F_a}{K_T} \quad (3, 1)$$

$\Delta L$  : 이송나사계의 축방향 탄성변위 ( $\mu m$ )

$F_a$  : 이송나사계에 걸리는 축방향하중 (kgf)

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_H} \quad (3, 2)$$

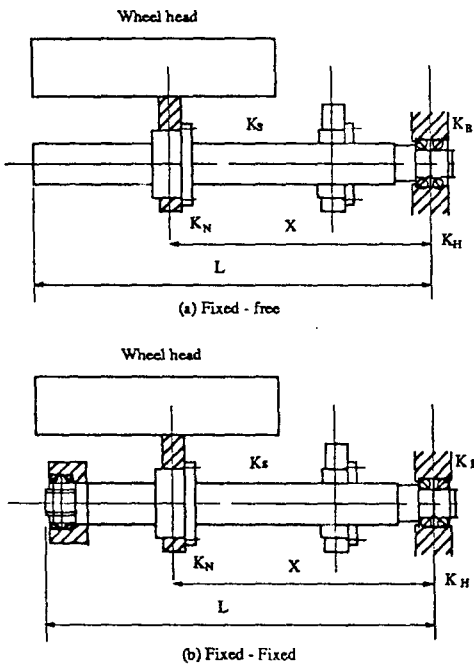


Fig. 5 Total axial stiffness of feed screw system

이송나사 회전의 강성이 약하면 Lost motion의 원인 ◦ 되며, 위치결정 정도를 향상시키기 위해서는 이송계의 각 구성요소의 축방향 강성도를 균형있게 설계함이 필요하다. 본 연구에서는 실험에 사용된 CNC 연삭기의 이송나사를 지지방법에 따른 강성치를 비교한 결과 그림 6과 같이 나타났으며, 여기서 최대축방향 강성은 고정-자유인 경우 너트가 지지베어링에서 멀어질수록 강성이 감소하여 부하작용점 최대거리에서 강성이 최소로 나타났다. 반면에 고정-고정인 경우는 강성이 처음에는 감소하다가 부하작용점 거리가 0.6x~0.7x(mm, x=200)인 점에서 최소로 나타나다 다시 상승함을 보여주고 있다. 이때 탄성변위량을 나타내고, 고정-고정인 경우 부하작용점 거리에 따라 증가하며 최대거리에서 최대변위량을 나타내고, 고정-고정인 경우 부하작용점 거리가

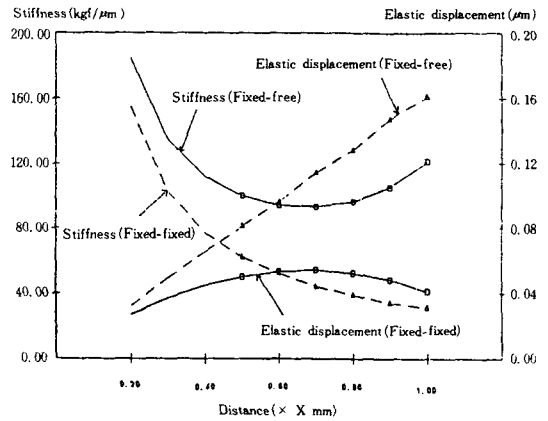


Fig. 6 Comparison of stiffness and elastic displacement between fixed-free and fixed type

0.6x~0.7x인 점에서 최대로 나타나다, 다시 감소함을 보여주고 있다. 표1은 이송나사축계의 전체 축방향 강성을 최대변위가 나타나는 점을 기준으로 표시한 결과이다.

계 전체의 강성은 이송나사의 최소 축방향 강성치를 고려하여 검토하였으며, 너트와 지지베어링은 설계부위가 동일 조건으로 되어 강성비교가 같게 나타나고 Screw축의 강성에 따라 값이 달라지고 있다. 그림 7은 이송구동계의 구분에 따른 위치오차를 측정된 결과로 200mm 구동에서 고정-자유인 경우는 약 60μm 정도를 나타내며 고정-고정인 경우는 15~17μm 나타내어, 고정-자유에 비해 위치오차가 40μm 이상의 감소를 보여주고 있다.

이상의 결과, 이송나사의 지지방법에 따라 강성차이가 뚜렷이 나타나고 이송축계의 설계시 강성을 높이는 경우 고정-고정의 형태를 적용함이 바람직함을 나타내고 있다. 반면에 양단고정을 시켰을 때는 전체시스템의 강성은 중진되지만 외부온도의 변화나 이송나사의 온도상승은 축의 팽창을 가져와 이송구동부의 오차의 요인이 될

표 1. 이송나사축계 강성 및 변위비교

구 분	Screw축		Nut		지지베어링		Total	
	$K_S$	$\Delta L_S$	$K_N$	$\Delta L_N$	$K_B$	$\Delta L_B$	$K_T$	$\Delta L$
고정-자유	31	0.13	71	0.06	110	1.1	18.04	0.208
고정-고정	93	0.043	71	0.06	110	1.1	29.50	1.121

수 있으므로 열팽창에 따른 지지베어링의 부하중대 및 구조물의 변형이 일어나지 않도록 고려한 고정-반고정의 구조로 사용하는 방법이 고려되고 있다(10).

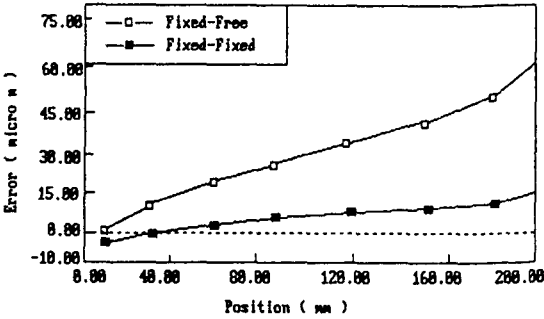


Fig. 7 Comparison of positioning error between fixed-free and fixed-fixed type

3.2 이송 안내면의 각운동에 따른 위치정밀도 영향

본절에서는 각운동오차 즉 Pitch 및 Yaw 오차가 위치오차에 미치는 영향을 검토했다. 측정오차는 이송구동부에서 측정점간의 거리에 비례하여 나타나므로 실제가공이 이루어지는 부위에서 오차를 확인하기 위하여 그림 8-a와 같이 모델링을 하여 다음과 같이 기본식을 정립하였다. Pitch 및 Yaw 오차가 작용할 경우 측정점 A에서 위치오차가  $E_A$ 이고 Pitch 및 Yaw 오차가  $\alpha$ 일 때 구동점 C에서의 위치오차는 다음과 같이 된다.

$$E_C = E_A - l_2 \sin \alpha \quad (\alpha < 1^\circ) \quad (3.3)$$

여기서 C에서 A까지 거리  $l_2$ 의 부호는 C점이 A점보다 아래에 있어서 음의 값을 가지므로 일반적인 표현을 적용하면 구동에서의 위치오차  $E_C$ 는

$$E_C = E_A + l_2 \sin \alpha \quad (3.4)$$

가공점 B에서 位置誤差는  $E_B$

$$E_B = E_C + l_1 \sin \alpha \quad (3.5)$$

로 나타난다. 여기서  $l_1$ 은 C점에서 B점까지의 거리이다.

공작기계 이송계를 강체(Rigid Body)로 가정하면 이송계의 오차는 측정점에서의 값을 나타내지만 실제로 공구 선단이 공작물의 가공에 직접 영향을 나타내므로 측정점과 연삭수들대에서의 오차로 구분하여 나타내었으며, 여기에서 Pitch와 Yaw 오차의 영향이 없는 경우 위치오차는 검출기의 종류에 따라서 달라지게 된다. 커

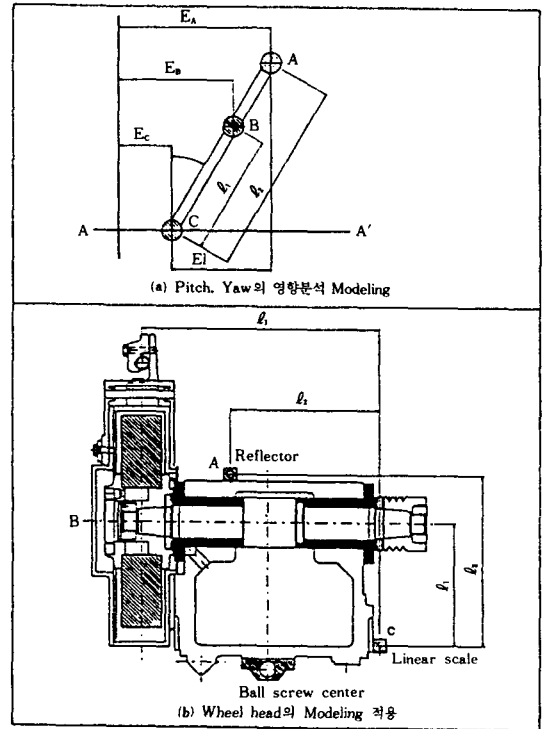


Fig. 8 Modeling of angle motion

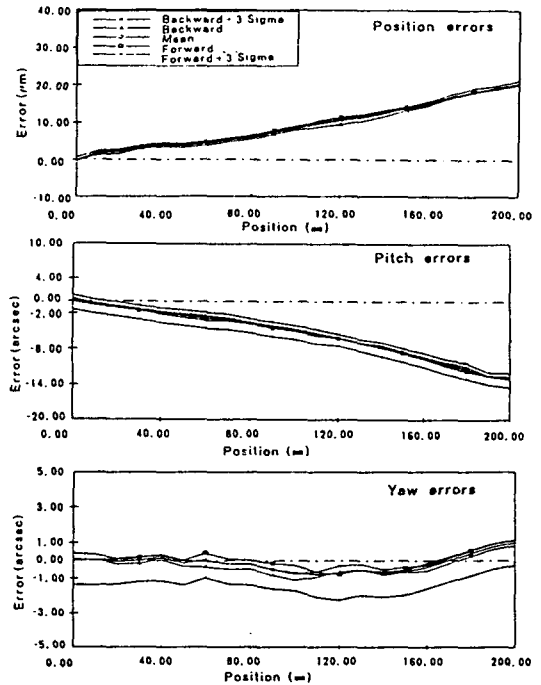


Fig. 9 Measured position, pitch and yaw error

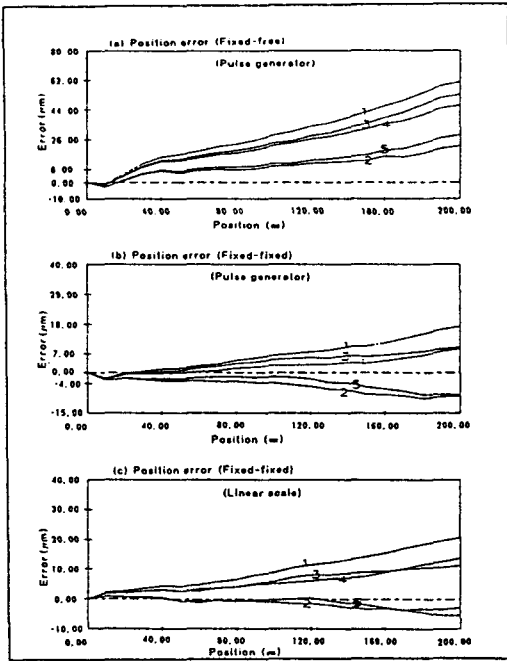


Fig.10 Influence of pitch and yaw error on position error

플링을 사용한 직결구동 방식에서 Pulse generator로 제어하는 경우는 위치오차가 Ball screw의 오차로 볼 수 있으며, Linear scale로 제어하는 경우는 Scale의 오차로 볼 수 있는 것이다.

그림 8-b는 이러한 모델링을 적용시킨 CNC 연삭기의 연삭숫돌대를 나타내고 있다. 그림 9는 각 측정점에서 위치오차, Pitch 오차, Yaw 오차를 측정된 결과를 나타내었다. 그림 10에서는 레이저 간섭계에 의한 측정점에서의 위치오차로 가공점에서의 위치오차를 계산하여 Pitch 및 Yaw 오차가 위치오차에 미치는 영향을 이송구동계의 고정방식 및 위치검출장치의 종류에 따라 각각 표시하였다. 그림중에서 ①은 측정점에서의 위치오차, ②는 Pitch와 Yaw 오차의 영향이 없다고 볼 때 가공점에서의 위치오차, ③은 Pitch만 작용하고 Yaw 오차의 영향이 없다고 볼 때 가공점에서의 위치오차 ④는 Yaw 오차만 작용한 Pitch가 없다고 볼 때 가공점에서의 위치오차 변화를 나타낸다. 그림에서 ②와 ④의 차이가 Yaw 오차에 의해 나타나는 위치오차이며 ②와 ③의 차이는 Pitch 오차에 의해서 발생하는 위치오차의

양으로 위치오차에 상당히 큰 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 ②와 ③의 차이는 Pitch와 Yaw 오차가 동시에 영향을 미칠 때 가공점에서의 위치오차이다.

결론적으로 이송구동계의 고정방식 및 위치검출장치의 종류에 따라서는 큰 차이를 볼 수 없고 이송구동계의 안내면의 Pitch 오차가 Yaw 오차에 비해 위치오차에 미치는 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 서보계 위치검출 방식에 따른 영향

공작기계의 이송오차는 서보계의 위치검출 방식에 따라 달라지며, 제어기술의 고도화에 따라 고정도, 고응답성이 뛰어난 CNC 공작기계를 구성할 수 있다. 서보계의 위치검출 방식은 Pulse generator를 Servo motor에 취부하여 Ball screw의 회전각도를 검출하는 Quasi-closed loop system과 Linear scale을 연삭숫돌에 부착하여 숫돌대의 이송부에서의 위치를 검출하는 Closed-Loop system으로 분류할 수 있다.

그림 11-a 및 11-b는 위치검출 방식으로서 Pulse generator를 사용하여 위치오차를 측정된 결과이고 그림 11-b는 그림 11-a에서 Backlash를 보정한 결과이다. 그림 11-c는 Linear Scale을 사용하여 위치오차를 측정하여 Backlash를 보정한 결과로써 이 두가지 위치검출 측정방법이 위치오차에 미치는 영향을 비교하여 보면, 위치오차의 절대값에는 미소한 차이를 보이나, 각위치의 반복능에서는 Linear scale을 사용한 경우가 2 $\mu$ m 내외로 Pulse generator를 사용한 경우보다 현저하게 감소함을 보여주고 있어, 그 우수성이 인정된다. 이 경우에서 반복능이 우수한 경우가 이송계의 무작위오차가 적고 시스템 오차로만 존재하므로 위치보상효과를 크게 할 수 있어 이송계의 고정밀화를 기대할 수 있다.

### 3.4 이송오차의 보상

백래쉬 보상은 수치제어기에서 X, Y 및 Z축 또는 기타 회전축에 백래쉬의 양을 보상할 수 있는 기능을 고려해서 설계되어 있으며, 백래쉬 양을 측정하여 수치제어기내의 할당된 어드레스(Address)에 입력 시키므로써 백래쉬의 보상이 이루어진다. 소프트웨어 보상방법은 이송변위 오차를 수치제어기에 입력시켜 놓으므로써 수치제어기가 공작기계의 이송에 대하여 제어와 보상을 할 수 있게 하는 방법으로써 소프트웨어 보상방법은 시스템 오차에 해당하는 양만큼을 보상하기 때문에 시스템오차

값 자체보다는 시스템오차로 부터 얼마만큼의 범위내에 분포되어 있는가에 따라서 영향을 받게된다.

그림 11-a에서는 서보계의 피드백 시스템을 Pulse generator로 사용하였을 경우의 위치오차의 변화를 나타낸다. 전진방향과 후퇴방향으로 접근하면서 측정된 각 방향의 위치오차의 차가 약 7 $\mu$ m 정도로 나타나는 것으로서 백래쉬가 발생함을 알 수 있다. 이것을 CNC 장치내 백래쉬 보상기능을 이용하여 보상을 하였을 경우는 그림 11-b와 같이 약 3 $\mu$ m 정도로 백래쉬의 양이 줄었으며, 이송축을 후퇴방향 접근의 경우에 백래쉬의 영향으로 인해 위치오차가 달라짐을 알 수 있다.

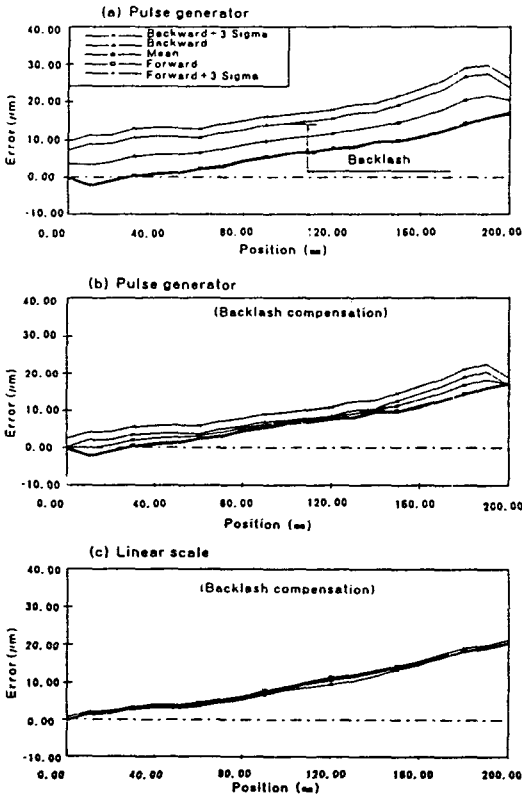


Fig.11 Influence of position monitoring type on position error

위치오차 측정결과를 CNC 장치내 보상기능을 이용하여 위치오차 평균값을 각 구간별로 구하여 피치오차를 보상한 결과를 그림 12에 나타내었다. Pulse generator를 사용하여 보상한 경우 전체 이송구간에서 위치오차가 2~3 $\mu$ m 정도이고, Linear scale을 사용한

경우는 4~5 $\mu$ m 정도로 아주 양호한 결과를 나타내었다. 또 0~40mm 구간에서는 오차의 경향이 비슷하나 40mm 이상 200mm로 가면서 오차가 현저하게 차이가 남을 나타내어 이 구간에서 보상의 효과가 큼을 보여주고 있다.

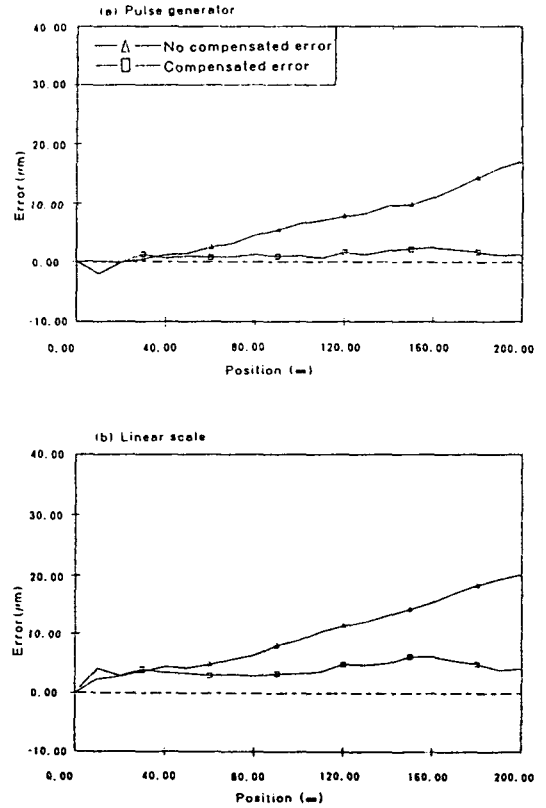


Fig.12 Position error measured with pitch error compensation function

#### 4. 결 론

본 연구에서는 레이저 간섭계를 이용하여 CNC 원통 연삭기의 이송구동계에서 발생하는 위치오차를 이송오차 발생요인별로 정밀하게 측정, 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이송축계의 Ball screw의 지지방법으로서 강성이 높고 양단고정식이 송축의 위치정도를 향상시킬 수 있음이 확인 되었다.
- (2) Pitch 및 Yaw 오차가 위치오차에 미치는 영향

을 검토한 결과 Pitch 오차에 Yaw 오차의 영향은 무시할 수 있을 정도로 적음을 알았다. 따라서 공작기계의 정밀구동 시스템의 구축을 위해서는 Pitch 오차를 최소화 시킬 필요가 있다.

(3) 서보계의 위치검출 방법에서 Pulse generator와 Linear scale 장치의 사용에 있어서 위치오차에 미치는 영향을 검토한 결과, Linear scale의 사용이 각 위치에서 위치오차의 재현성(Repeatability)의 우수함을 알게 되었다.

(4) 소프트웨어 보상에 있어서 Pitch 오차를 보상을 한 경우가, 전체이송구간에서 보상을 하지 않은 경우와 비교해서 위치오차가 현저하게 줄어, 이송계의 고정도화를 실현하는데 적합함이 입증되었다.

### 참고문헌

1. 木材浩哉, "NC 機の位置決め 精度の測定について", 日本機械學會誌, 75巻, 1號, pp. 72, 1972
2. 諸貫信行, "工作機械の送り 駆動系の運動精度", 機械の研究, 42巻, 1號, pp. 181-182, 1990
3. J. Tlustý, "Techniques for Testing Accuracy of NC Machine Tools", 12th MTDR

- Conference, 1972
4. T. Treib, "Error Budgetting-Applied to the Calculation and Optimization of the Volumetric Error Field of Multi-axis System", Annals of the CIRP Vol.36/1, pp.365-367, 1987
  5. G. Herreman and F. Berry, "Laser Measurement Systems for Machine Tool Testing-Machine Tool Accuracy", Vol. 5, UCRL-52960-5, 1980
  6. 김승우, "레이저 간섭계를 이용한 工作機械의 精密度 測定技術", 工作機械技術세미나, 韓國機械研究所, pp. 44, 1990
  7. JM, Weak, "Metrological Analysis and Performance Tests", Handbook of Machine Tools, Volume 4, John Wiley & Sons, pp. 26-30, 1980
  8. 強力 및 超精密 研削加工을 위한 適應制御 CNC 研削機 開發 (1)", 과기처 특정연구개발사업 연구보고서, pp. 130-132, pp. 364-365, 1987
  9. "NSK 精機製品 User's Guide", NIPPON SEIKO K. K., pp. A19, 1987
  10. 山口利明, "ボールねじを用いた 精密位置決め技術", 應用機械工學, 1號, pp. 109, 1991