

NC 공작기계의 운동정도 측정에 관한 연구(제2보)

-머시닝 센터의 직선 사이클 위치결정정도 측정에 관하여-

김 영 석*

A study on Measuring of Motion Accuracy of NC Machine Tools(No. 2)

- about Measuring of Linear Cycle Positioning Accuracy of Machining Center -

Kim Young Seuk*

Abstract

It is very important to test linear cycle positioning accuracy of Machining centers as it affect all other machines machined by them in industries. For example, if the linear positioning accuracy of each axes directions is bad, the size of works will be wrong and the change-ability will be bad in the assembly of machine parts

In this paper, measuring systems are organized to measure linear displacements of table or spindle of machining center using laser interferometer, magnescale and tick pulses coming out from computer in order to get data at constant time intervals from the sensors. And each set of data gotten from test is expressed to a plots by computer treatment and the results of linear positioning error motion is estimated to numerics by statistical treatments.

1. 서 론

머시닝 센터의 직선 위치결정정도는 산업현장에서 사용하는 다른 모든 기계들의 제작에 있어서, 그 치수 정밀도와 성능 및 기능적인 품질에 영향을 미치는 것으로, 머시닝 센터의 성능과 정밀도의 향상을 위해서는, 측정용 센서의 선택과 측정방법, 그리고 오차운동의 표현방법과 그 오차운동의 원인분석 및 머시닝 센터의 개선방향 등에 대해

서 필수적으로 연구되어야 한다. 그리하여 머시닝 센터의 직선 사이클 위치결정정도의 측정방법과 분석방법을 표준화하여 머시닝 센터의 운동정도 평가에 기준이 되는 방법을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 머시닝 센터의 직선 사이클 위치결정정도 측정을 위하여 레이저 간섭계 시스템(laser interferometer system)과 자석식의 라니어 스케일을 사용하는 마그네-스케일 시스템(magnescale system)을 동시에

* 조선대학교 기계공학부

설치하여 측정하였다. 그리하여, 오차 데이터의 획득과 분석을 위한 소프트웨어, 그리고 측정결과를 그림으로 모델링하기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하여, 머시닝 센터의 직선 사이클 위치결정정도 측정을 합리적으로 행하는 방법을 연구한다.

2. 직선 사이클 위치결정정도의 측정원리

머시닝 센터에서 직선 위치결정정도 측정원리^{(1),(2),(3)}는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, xyz-좌표계에서 직선 위치결정의 오차 또는 위치편차 $\Delta L(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 는 측정 시작점의 위치를 좌표계의 원점 $O(0, 0, 0)$ 에 놓고, 직선 위치결정의 지령위치 $L(x, y, z)$ 와 직선 위치결정후의 실제위치 $L'(x', y', z')$ 와 의 차로 다음식과 같이 정의한다.

$$\Delta L = L' - L \quad (1)$$

여기서 ΔL : 직선 위치결정의 오차 또는 위치편차, L' : 직선 위치결정후의 실제위치, L : 직선 위치결정의 지령위치이다.

또, 머시닝 센터에서 각 축방향의 직선 위치결정정도 측정의 오차 또는 위치편차는 다음과 같다.

$$\Delta x = x' - x \quad (2)$$

$$\Delta y = y' - y \quad (3)$$

$$\Delta z = z' - z \quad (4)$$

여기서 Δx_i : x-축방향의 오차 또는 위치편차, Δy_i : y-축방향의 오차 또는 위치편차, Δz_i : z-축방향의 오차 또는 위치편차, x' : x-축방향의 실제 위치, y' : y-축방향의 실제 위치, z' : z-축방향의 실제 위치, x : x-축방향의 지령위치, y : y-축방향의 지령위치, z : z-축방향의 지령위치이다.

머시닝 센터에서 직선 사이클 위치결정정도 측정 방법은 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이, 테이블 또는 스펀들 축의 한 점을 시작점에 놓고, 직선 사이클 위치결정의 각 지령위치에 이동한후 반환점을 거쳐 다시 시작점에 돌아 오게 하여 각 위치의 실제위치를 측정하여, 그 운동정도를 평가하는 것으로, i 위치의 직선 사이클 위치결정의 오차 또는 위치편차 $\Delta L_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ 는 다음과 같이 정의한다.

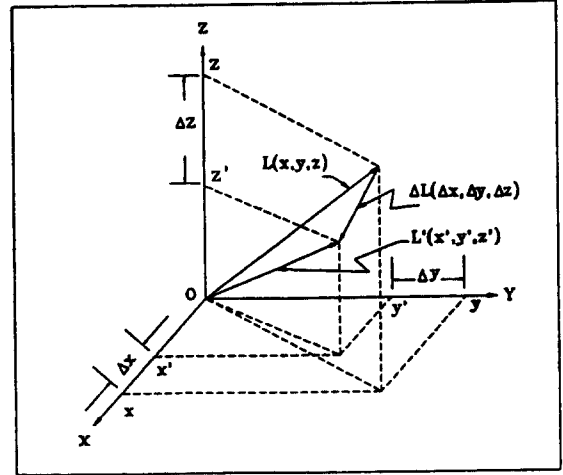


Fig. 1 Measuring principle of linear positioning.

$$\Delta L_i = L'_i - L_i \quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \quad (5)$$

여기서 ΔL_i : i점의 오차 또는 위치편차, L'_i : i점의 실제 위치, L_i : i점의 지령위치, $i = n, n+1, \dots, 2n$ $i = 0, 1, \dots, n$: 전진행정 목표점, 복귀행정 목표점이다.

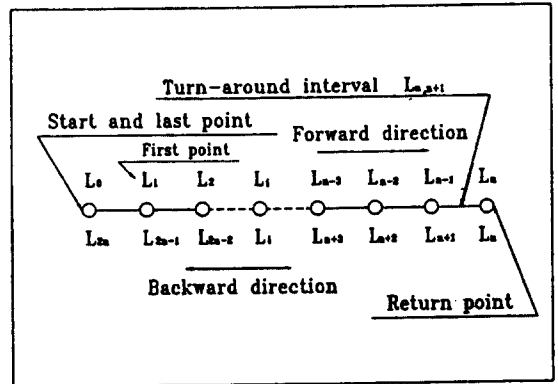


Fig. 2 Measuring method of linear cycle positioning.

머시닝 센터에서 각 축방향의 직선 사이클 위치결정정도 측정의 오차 또는 위치편차는 다음과 같다.

$$\Delta x_i = x'_i - x_i \quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \quad (6)$$

$$\Delta y_i = y'_i - y_i \quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \quad (7)$$

$$\Delta z_i = z_i' - z_i \quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \quad (8)$$

여기서 Δx_i : x-축방향의 i점의 오차 또는 위치편차, Δy_i : y-축방향의 i점의 오차 또는 위치편차, Δz_i : z-축방향의 i점의 오차 또는 위치편차, x_i' : x-축방향의 i점의 실제 위치, y_i' : y-축방향의 i점의 실제 위치, z_i' : i점의 실제 위치, x_i : x-축방향의 i점의 지령위치, y_i : y-축방향의 i점의 지령위치, z_i : z-축방향의 i점의 지령위치, $i = 0, 1, \dots, n$: 전진행정의 위치, $i = n, n+1, \dots, (2n)$: 복귀행정의 위치이다.

여기에서, 지령상의 복귀행정의 $n, n+1, \dots, (2n)$ 점은 각각 전진행정의 $n, (n-1), \dots, 0$ 점과 완전히 일치한다. 직선 사이클 위치결정정도 측정에서 구간오차(interval errors)는 (i+1)점의 실제 위치에서 i점의 실제 위치를 뺀 값, 또는 (i+1)점의 오차 ΔL_{i+1} 에서 i점의 오차 ΔL_i 를 뺀 값으로 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned} \Delta L_{i,i+1} &= \Delta L_{i+1} - \Delta L_i \\ &= (L_{i+1}' - L_{i+1}) - (L_i' - L_i) \\ &\quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\Delta L_{i,i+1}$: i~(i+1) 구간의 구간오차, ΔL_{i+1} : (i+1)점의 오차, ΔL_i : i점의 오차, L_{i+1}' : (i+1)점의 실제 위치, L_{i+1} : (i+1)점의 지령위치, L_i' : i점의 실제 위치, L_i : i점의 지령위치이다.

구간오차는 머시닝 센터에서 피치오차 보정의 자료로 사용될 수 있는 데, 여기에도 서어보계의 응답오차등이 포함되어 나타날 수 있다.

반환오차(turn-around error)는 직선 사이클 위치결정정도 측정의 n점에서 (n+1)점까지의 반환구간에서 발생하는 오차로 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta L_R &= \Delta L_{n+1} - \Delta L_n \\ &= (L_{n+1}' - L_{n+1}) - (L_n' - L_n) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 ΔL_R : 반환오차, 즉, n~(n+1) 구간의 구간오차, $\Delta L_{n+1} = L_{n+1}' - L_{n+1}$: (n+1)점의 오차, $\Delta L_n = L_n' - L_n$: n점의 오차, L_{n+1}' : (n+1)점의 실제 위치, L_{n+1} : (n+1)점의 지령위치, L_n' : n점의 실

제 위치, L_n : n점의 지령위치이다.

반환오차는 백래시 오차(back-lash error), 보울 스크 루우의 피치오차 그리고 서어보계의 응답오차 등이 복합적으로 나타나는 것으로, 주로 백래시 오차에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 백래시 오차를 측정하는 방법은 각 축방향으로 테이블 또는 스피들 축을 밀어 놓고, 밀어 놓은 방향으로 백래시 오차보다 크다고 생각되는 가능한 짧은 거리를 왕복운동하게 하여, 복귀하지 못한 거리를 다 이알 게이지나 리니어 스케일로 측정한다. 백래시 오차는 반환오차의 값에 (-1)을 곱한 것으로 다음과 같이 근사적으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta L_B &\approx -\Delta L_R \\ &\approx \Delta L_{n+1} - \Delta L_n \\ &\approx (L_{n+1}' - L_{n+1}) - (L_n - L_n') \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 ΔL_B : 백래시 오차, L_{n+1}' : (n+1)점의 실제 위치, L_n' : n점의 실제 위치이다.

3. 직선 위치결정정도 측정장치의 구성

직선 위치결정정도 측정 시스템의 전체적인 계통도는 Fig. 3, 4, 5의 각 축방향의 측정시스템에서 보여주는 바와 같이, 레이저 발생장치는 머시닝 센터의 외부 지면에 고정시키고, 레이저 간섭계의 고정거울(fixed mirror)은 머시닝 센터의 프레임에 그리고 이동거울(moving mirror)

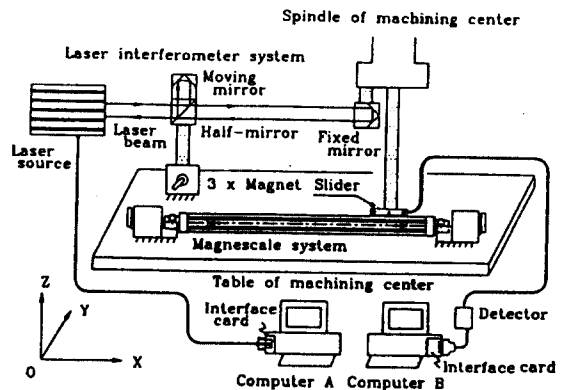


Fig. 3 Organization of measuring system to x-axis direction.

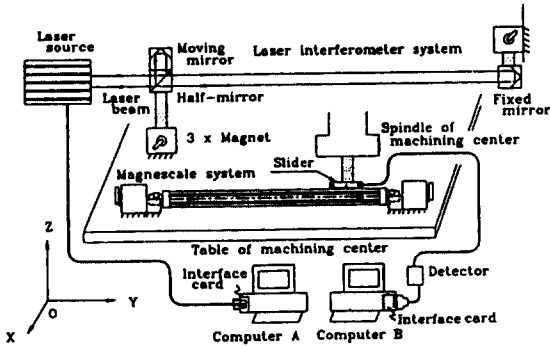


Fig. 4 Organization of measuring system to y-axis direction.

은 이동체에 고정하여, 고정거울과 이동거울에서 반사되는 레이저 비ーム의 간섭현상에 의해 발생하는 명암의 차이를 포토 다이오드(photo diode)에서 받아들여 전기적인 파형으로 출력하고, 이것을 PCMCIA 카드를 거쳐 컴퓨터에 수치로 읽히게 된다.

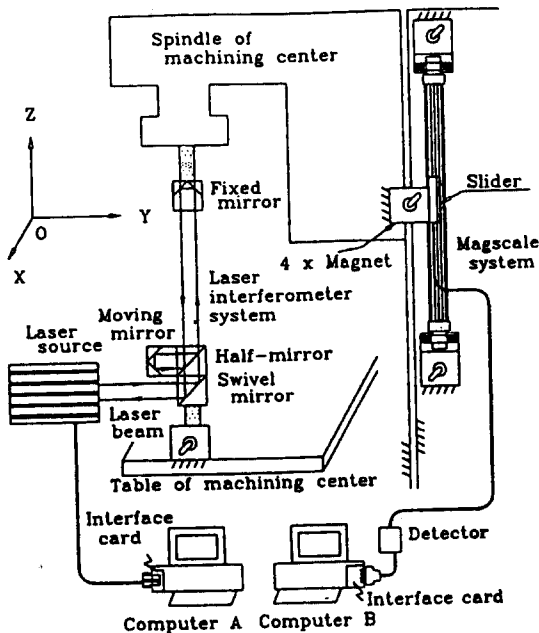


Fig. 5 Organization of measuring system to z-axis direction.

또, 마그네-스케일 시스템(magnescale system)은 자석형으로, 코발트-크롬합금의 스페터막에 치밀하게 박혀 있는 자성체의 자계를 슬라이더(sl原因)가 이동하면서 직선 변위량을 헤드(head)에서 전기적인 A, B상의 신호로 출력하게 되어 있고, 이 신호를 감지기(detector)를 통하여 인터페이스 카드의 디코더(decoder)를 거쳐 컴퓨터에 10진수로 데이터를 출력하게 되어 있다.

직선 사이클 위치결정정도 측정 시스템의 구성에 사용한 실험기들의 제원은 다음 Table 1, 2에서 보여 주는 바와 같다.

Table 1. Specification of laser interferometer system

(1) Laser unit	Model, Maker	ML-10, Renishaw(England)
	Laser, Power	He-Ne, Class II (1 mW)
	Wave length	633 nm (0.633 μm)
	Frequency stability	Better than 1 part in 10,000,000
	Resolution	0.001 μm(1 nm)
(2) Environmental compensation unit	Model, Maker	EC-10, Renishaw(England)
	Temperature range	0~40° C ±1.1 ppm
	Measuring objects	Air and material temperature, Air pressure, Relative humidity

Table 2. Specification of magnescale system

Model, Maker	Model, Maker	SR50-025A, Sony(Japan)
(1) Linear scale	Measurement Range	0~250 mm
(2) Detector	Model, Maker	MD20A, Sony(Japan)
	Resolution	0.5 μm
	Power requirement	DC+5V(±5%)
	Output phase	A·B or Up/Down
(3) Machining center	Model, Maker	VMC-650, Whacheon(Korea)
	Controller	FANUC 0M
	Basic length unit	0.001 mm(1 μm)

4. 직선 사이클 위치결정정도의 측정방법

직선 사이클 위치결정정도 측정은 머시닝 센터의 테이블 또는 스펀들 축이 지령한 위치로 이동한 후 일정시간 정지하는 운동을 반복하게하여 시작점에 되돌아 오게 하

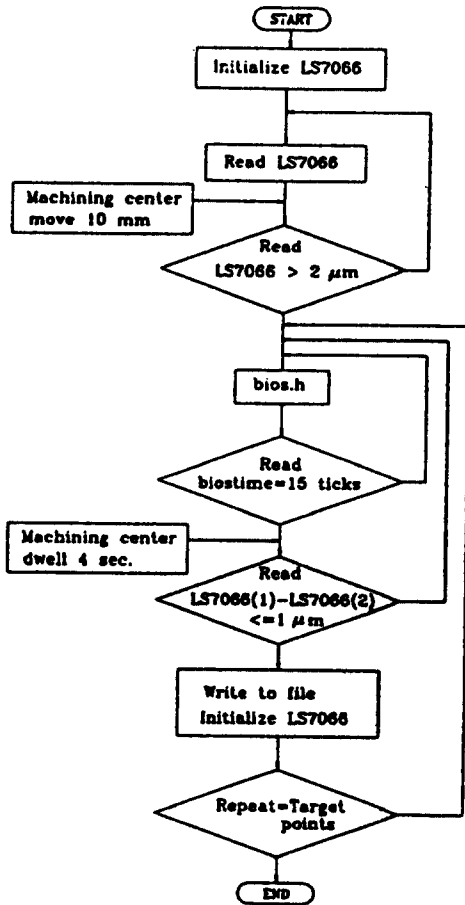


Fig. 6 Flow chart of measuring system of linear cycle positioning.

는 것으로, 정지중에 레이저 간섭계 시스템과 마그네-스케일 시스템을 통하여 동시에 실제 위치를 측정하게 된다

마그네-스케일 시스템에서 데이터를 얻는 플로우 차트는 Fig. 6과 같이, 컴퓨터를 가동시켜 마그네-스케일을 초기화하여 측정치를 받아들일 준비를 시켜두고, 머시닝 센터를 가동하여 테이블 또는 스피들 축이 이동함에 따라 이동거리가 1 μm 이상이 되면 측정을 개시하게 된다. 마그네-스케일 시스템은 컴퓨터에서 1초에 18.2개가 나오는 틱(ticks)수에 의해 일정한 시간간격으로 마그네-스케일을 읽어들인다. 그리하여 머시닝 센터의 테이블 또는 스피

들 축의 정지중에는 그 측정치가 대체로 일정하게 나오기 때문에 그 현재의 측정치와 방금전의 측정치의 차가 1 μm 이하가 되면 측정값으로 간주하게 된다. 이것은 머시닝 센터자체의 진동에 의해 정지중에도 1 μm 이하의 변동이 있기 때문이다.

본 실험에서는 10 mm 이동하고 4초간 정지하게하여 경험적으로 15틱의 시간간격으로 마그네-스케일을 읽어들이 15틱전에 측정치와 현재의 측정치의 차가 1 μm 이하로 변동이 적으면 최종 측정치로 간주하도록 컴퓨터 프로그램을 구성하였다.

5. 측정 데이터의 처리

직선 사이클 위치결정도 측정에서 얻어진 측정 데이터들은 파일로서 컴퓨터 메모리에 저장되고, 각 위치의 오차 또는 위치편차를 식 (6), (7), (8)에 의해 구하여 그림으로 나타내게 된다. 그리하여 오차 또는 위치편차의 최대값과 첫 번째 위치와 최종 위치, 그리고 반환구간의 오차를 구하여 분석하게 된다.

또한, 식 (9)에 의해 구한 구간오차 데이터의 파일을 만들어, 분석용 프로그램에 의해 오차 또는 위치편차의 최대 변동범위와 변동폭 그리고 평균, 분산, 평균편차, 표준편차 등을 구하고, 구간오차의 변동양상을 그림으로 모델링하게 된다.

6. 측정결과 및 분석

측정결과를 Fig. 8 ~ 10과 Table 3, 4에서 분석결과를 정리하여 보여 주는 바와 같이, 그림으로 모델링한 결과의 오차의 양상은 비슷하나, 수치적으로 분석한 경우

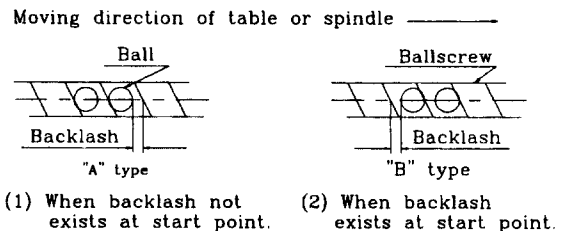


Fig. 7 Starting types of table or spindle position.

에는 차이가 많이 나타나고 있다.

Table 3, 4에서 A형(A type)은 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이, 시작시에 테이블 또는 스피들 축을 진행방향과 같은 방향으로 밀어놓고 측정된 결과이고, B형(B type)은 시작시에 테이블 또는 스피들 축을 진행방향과 반대 방향으로 밀어놓고 측정된 결과이다. 그러므로, A형은 시작시에 백래시가 포함되어 있지 않아 첫 번째 점 오차가 작으나 최종점 오차는 절대치로 크게 나타나 있고, B형은 시작시에 백래시가 포함되어 있어 첫 번째 점 오차가 크고, 최종점 오차는 절대치로 작게 나타나 있다.

그러므로 백래시가 있는 경우는 테이블 또는 스피들 축의 밀어놓은 방향이 진행방향과 같은 경우와 다른 경우에 각각 직선 사이클 위치결정정도가 영향을 크게 받기 때문에, 동일 품종의 다량생산시에는 제품의 호환성에 영향을 미치게 되어, A형 또는 B형의 어느 한가지 가공방식을 채택하여야 한다.

또한, 백래시가 포함되어 있는 구간은 백래시와 보울 스크루우의 피치오차가 합해져서 오차가 크게 나타나므로, 보울 스크루우의 피치오차보정에서 제외시키는 것이 바람직하다.

Table. 3 Comparison of measuring results by laser interferometer system.

Measuring system	Laser interferometer system					
	X-axis		Y- axis		Z- axis	
Type of table or spindle position	A type	B type	A type	B type	A type	B type
File no.	mx5-15	mx5-16	my5-25	my5-26	mz5-29	mz5-30
Max. error(μm)	-12.0	-21.6	-24.3	-28.1	-11.8	-9.4
First point error(μm)	-0.5	-9.8	-5.1	-9.2	-2.7	-0.3
Last point error(μm)	10.1	0.1	3.3	0.0	-2.0	0.4
Turn-around error(μm)	-14.6	-14.2	-9.3	-10.3	3.3	2.6
Range of errors(μm)	-14.6 ~2.0	-14.2 ~2.4	-9.3 ~0.8	-10.3 ~1.1	-2.7 ~3.3	-2.5 ~2.6
Fluctuation width of error(μm)	16.6	16.6	10.1	11.4	6.0	5.1
Mean of errors	-0.33	-0.42	-0.51	-0.55	-0.15	-0.14
Variance	4.80	6.48	3.19	4.68	1.66	1.65
Average deviation	0.51	0.76	0.69	0.76	0.53	0.65
Standard deviation	2.19	2.55	1.78	2.16	1.29	1.28

Table. 4 Comparison of measuring results by magnescale system.

Measuring system	Magnescale system.					
	X-axis		Y- axis		Z- axis	
Type of table or spindle position	A type	B type	A type	B type	A type	B type
File no.	mx5-15	mx5-16	my5-25	my5-26	mz5-29	mz5-30
Max. error(μm)	-25.5	-38.0	-27.0	-29.5	-29.5	-28.5
First point error(μm)	-0.5	-13.5	-5.5	-8.5	-3.5	-2.0
Last point error(μm)	15.5	1.5	3.0	0.0	-1.5	0.5
Turn-around error(μm)	-18.0	-17.5	-9.5	-10.5	-0.5	-1.0
Range of errors(μm)	-18.0 ~2.0	-17.5 ~2.5	-9.5 ~1.0	-10.5 ~1.0	-3.5 ~1.5	-3.5 ~1.5
Fluctuation width of error(μm)	20.0	20.0	10.5	11.5	5.0	5.0
Mean of errors	-0.65	-0.76	-0.56	-0.58	-0.56	-0.56
Variance	7.25	10.18	3.34	4.31	1.84	1.74
Average deviation	0.69	1.04	0.69	0.65	0.63	0.57
Standard deviation	2.69	3.19	1.83	2.08	1.36	1.32

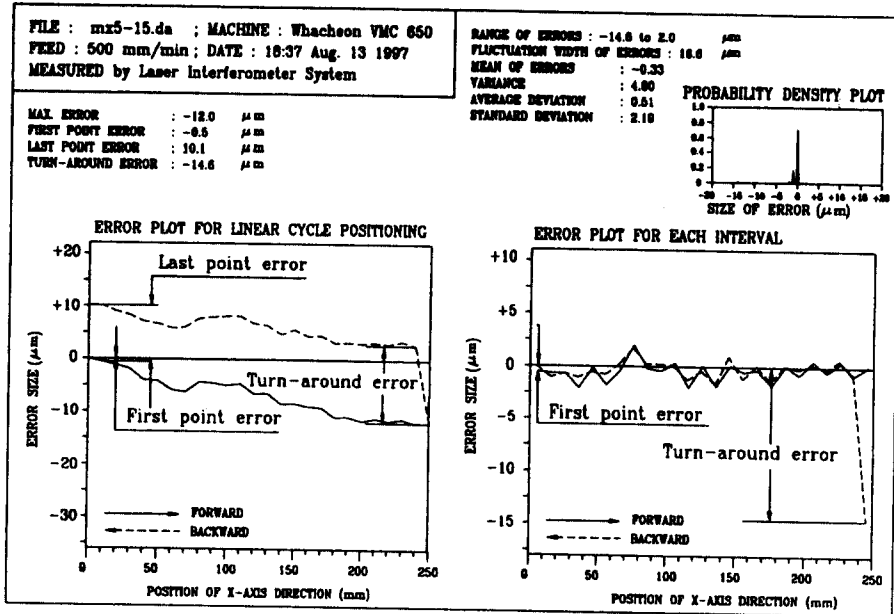
동일한 제품을 여러개 가공시에는, 대부분 B형으로 가공하는 경우가 많은데, 제품의 호환성에 문제가 발생할 염려가 있기 때문에 테이블 또는 스피들 축의 위치를 A형과 B형중 어느 한가지 가공방식을 선택하여 일관성있게 가공할 필요가 있다.

Fig. 8~10과 Table 3, 4에서 x, y-축의 파일번호(File no.) mx5-15, 16 그리고 my5-25, 26에서 보면, 첫 번째 점 오차(First point error)가 작은 A형 즉, 시작점에 백래시가 포함되지 않은 경우는 최종점 오차(Last point error)는 크게 나타나고 있고, 최대오차 및 분산이 작게 나타나고 있다. 그러나 B형 즉, 시작점에 백래시가 포함되어 있는 경우는 최종점 오차는 작게 나타나고 있으나, 최대오차와 분산이 크게 나타나 있다. 그러나, 파일번호(File no.) mz5-29, 30의 백래시가 적은 z-축은 큰 변화를 찾아 볼 수 없다.

시작점에 백래시가 포함되지 않은 A형이 정도의 측면에서 반드시 좋다고 볼 수는 없는 데, 그것은 최종점 오차가 커져서 시작점에 복귀하지 못하기 때문이다

또한, 레이저 간섭계 시스템의 측정결과가 마그네-스케일 시스템의 측정결과보다 양호한 것으로 나타나고 있는

(1) When backlash not exists at start point.



(2) When backlash exists at start point.

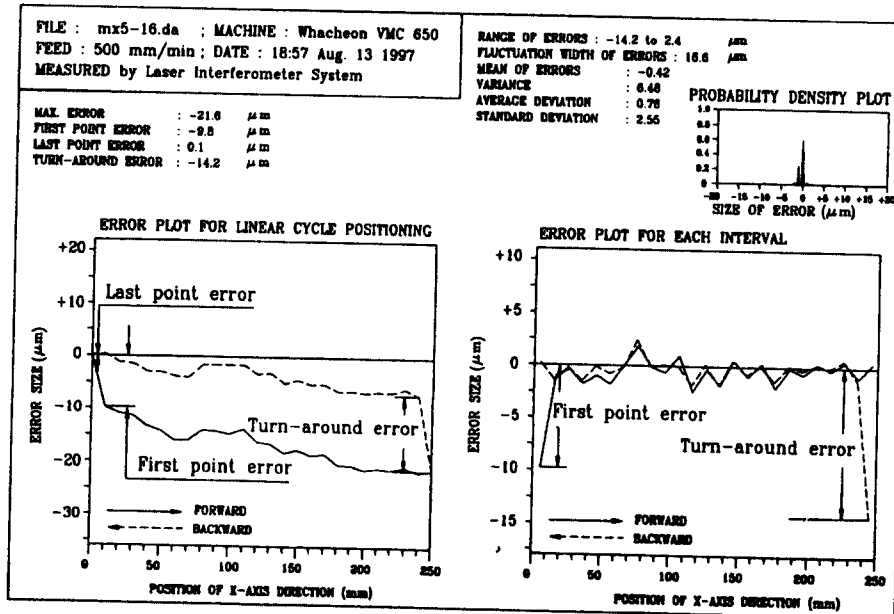
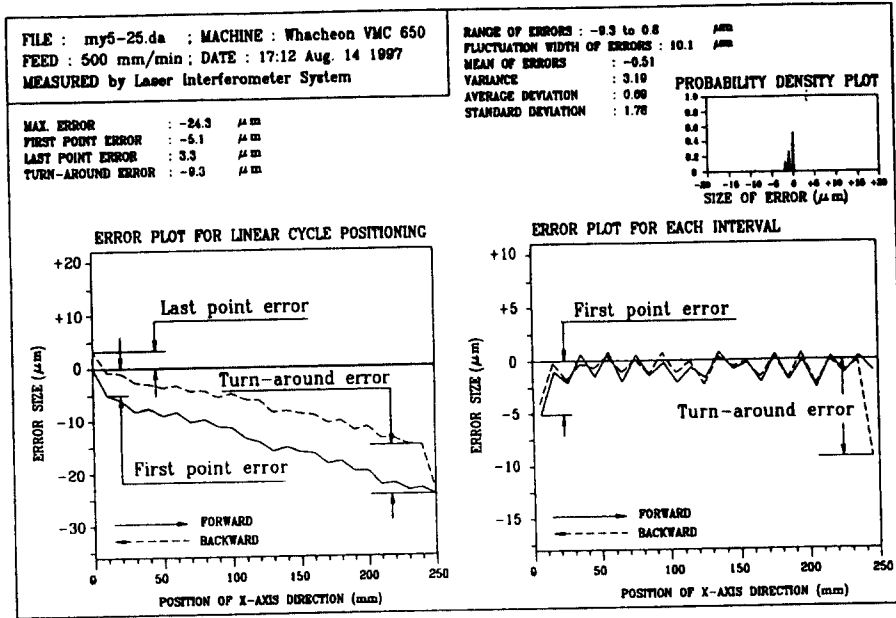


Fig. 8 Error plots and analysis for x-axis by laser interferometer system.

(1) When backlash not exists at start point.



(2) When backlash exists at start point.

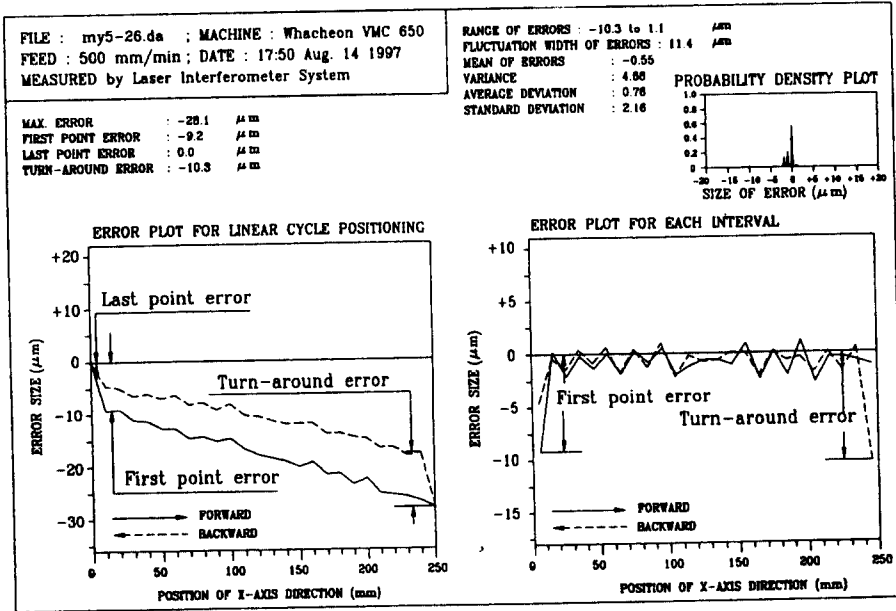
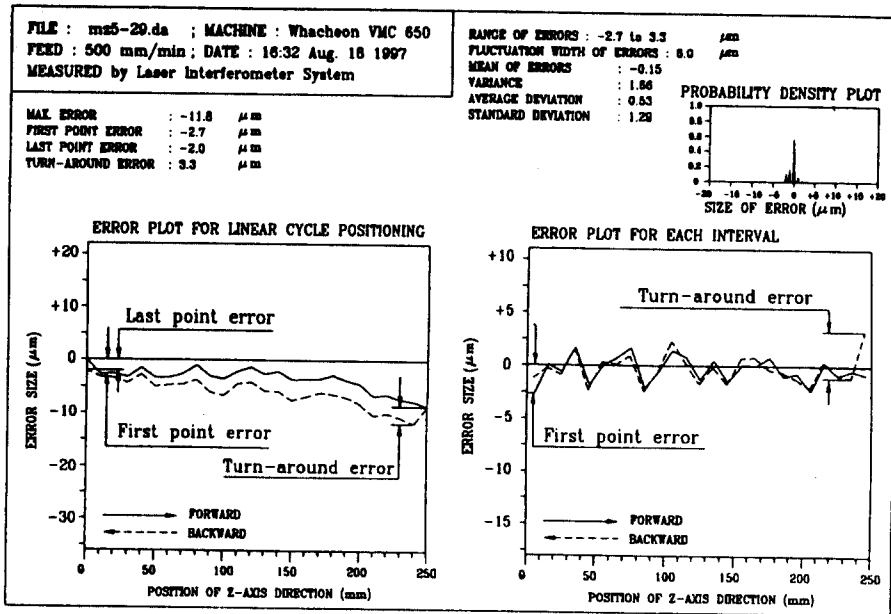


Fig. 9 Error plots and analysis for y-axis by laser interferometer system.

(1) When backlash not exists at start point.



(2) When backlash exists at start point.

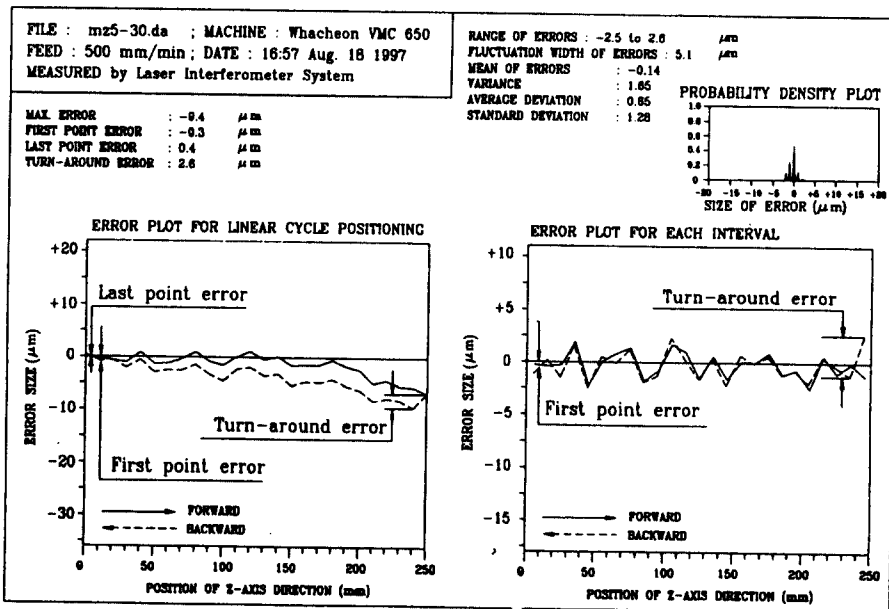


Fig. 8 Error plots and analysis for z-axis by laser interferometer system.

데, 이것은 마그네-스케일의 분해능이 레이저 간섭계 시스템의 분해능에 비해 좋지않아 오차가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있고, 또 마그네-스케일의 열팽창에도 원인이 있는 것으로 알려져 있다.^[5]

7. 결 론

머시닝 센터에서 직선 사이클 위치결정정도 측정에서 얻어진 데이터를 분석하고, 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 레이저 측정 시스템은 설치하는 데 상당한 어려움이 있으나, 높은 정밀도를 얻을 수 있는 반면, 마그네-스케일 시스템은 설치하기가 용이하나, 분해능이 크고 온도보정을 하지않아 비교적 높은 정밀도를 얻지 못하였다.
- (2) 백래시가 있는 경우는 테이블 또는 스펀들 축의 밀어놓은 방향이 진행방향과 같은 경우와 다른 경우에 각각 직선 사이클 위치결정정도가 영향을 크게 받기 때문에, 동일 품종의 다량생산시에는 제품의 호환성에 영향을 미치게 되어, 동일한 한가지 가공 방식을 채택하여야 한다.
- (3) 백래시가 포함된 구간은 보울 스크루우의 피치오차 보정에서 제외시켜야 한다.

후 기

이 논문은 1997년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

1. JIS B6336(1986), Test code for performance and accuracy of machining centers.
2. ISO 230-1(DIS:1992), Acceptance code of machine tools, part 1, Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions.
3. ISO 230-2(1988), Acceptance code of machine tools, part 2, Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools.
4. 박희재, 김인기, "볼 스크류 전구간 피치오차 측정시스템(Precision Measurement System for Ball Screw Pitch Error)", 한국정밀공학회, '94년도 추계 학술발표대회 논문집 pp. 279-285, 1994.
5. DBB法による NC工作機械の精度評價法, 垣野義昭, 井原之敏, 藻原章翁, REALiZE INC., 1990.