

비접촉센서에 의한 공작기계의 주축회전 정밀도 검출과 평가

김 정 두*

Detection and Estimation of Spindle Accuracy of Machine Tools by Non-contact Type Sensor

Jeong-Du Kim*

1. 서 론

최근에 와서 전자, 컴퓨터, 정밀기계산업과 같은 고정밀 산업의 발달과 함께 산업계에서 요구되는 공작기계의 정밀도는 점점 더 높아지고 있다. 특히 초정밀급의 공작기계에 있어서 주축의 회전정밀도는 가공형상 오차중 진원도, 원통도, 평면, 표면 거칠기 등에 직접적으로 영향을 주기 때문에 상당한 비중을 차지하며 여러 가지 측정법들이 고안되고 개발되어져 왔다. 공작기계뿐만 아니라 최근에는 전자산업 관련 정밀기기(예를 들어, VTR, 메모리 등)에도 축의 고속화와 더불어 회전정밀도가 제품의 품질에 결정적인 요소로 대두되고 있다.

본 기술해설에서는 정밀 공작기계 주축을 중심으로 비접촉센서에 의한 회전정밀도의 검출과 측정결과에 대한 평가 등에 대하여 기술하였다.

2. 회전정밀도의 정의

주축의 회전정밀도는 주축 중심의 움직임 자체의 정밀도로서 생각할 수도 있지만 여기서는 가공형상 오차를 가져오는 주축 중심의 움직임으로 정의한다. 이와 같은 경우 공구에 대한 공작물의 상대운동을 생각하지 않으면 안된다. 즉 공작기계에서 피삭재가 가공될 때 공작물의 형상에 영향을 미치는 것은 공작물 및 공구의 절대위치

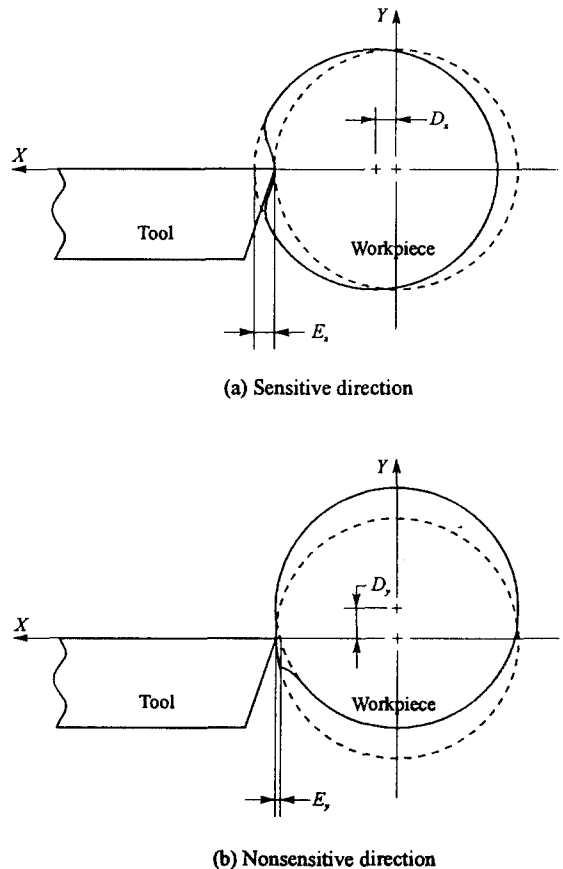


Fig. 1 Sensitive and nonsensitive direction of spindle accuracy

* 한국과학기술원 기계공학과

방향에는 민감방향(sensitive direction)과 둔감방향(nonsensitive direction)이 있다. 이상적인 창성면에 대해 직교하는 방향을 민감방향이라 하며, 주축의 민감방향 운동이 가공형상오차에 지배적인 영향을 주게된다. 둔감방향은 민감방향에 직교하는 방향이며 이러한 둔감방향의 운동은 가공형상 오차에는 2차적인 영향밖에 주지 않는다.

선삭가공에서 그림1에서 보는 바와 같은 가공을 할 경우 주축의 X축 방향으로 D_x 만큼의 회전오차가 발생하면 이 양은 곧바로 피삭재의 형상에 $E_x (=D_x)$ 만큼의 오차를 야기시킨다. 반면에 주축이 Y축 방향으로 D_y 만큼의 회전오차가 발생하면 이로 인한 피삭재의 형상오차 E_y 는 다음 식과 같이 된다.

$$E_y = \frac{D_y^2}{2R} \quad (1)$$

여기서, D_y = Y 방향의 회전오차량
 E_y = D_y 로 인한 피삭재의 형상오차
 R = 피삭재의 평균 반경

예를 들어 $R=100\text{mm}$, $D_y=0.1\text{mm}$ 일 경우에 $E_y=0.05\mu\text{m}$ 로서 D_y 의 1/2000정도의 오차량이다. 즉 민감방향의 회전오차는 피삭재의 형상에 직접적인 오차요인이 되는 반면에 둔감방향의 회전오차는 피삭재의 형상에 거의 영향을 미치지 않을 정도로 작음을 알 수 있다.

일반적인 회전오차운동은 그림2의 관계에서 다음의 식으로 주어진다.

$$e(\theta) = Z(\theta) \cos \phi + r(\theta) \sin \phi + \alpha(\theta) \quad (2)$$

$$(L \sin \phi - R \cos \phi)$$

여기서 $e(\theta)$ = 주축의 회전오차운동 (Spindle Error Motion)

$Z(\theta)$ = 축방향 회전오차운동 (Axial Error Motion)

$r(\theta)$ = 순수반경방향 회전오차운동 (Pure Radial Error Motion)

$\alpha(\theta)$ = 각운동 회전오차운동 (Angular Error Motion)

L = 주축중심과 절삭점까지의 거리

R = 회전중심에서 절삭점까지의 거리

ϕ = 주축과 절삭점이 이루는 각

θ = 원주방향각

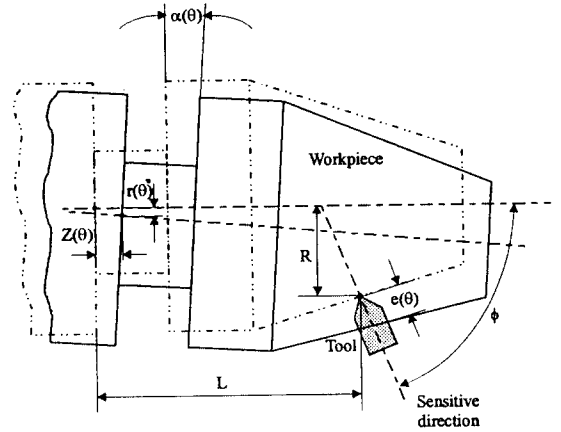


Fig. 2 General Case of Error Motion

축방향의 운동 $Z(\theta)$ 운동은 주축이 Z축 방향으로 평행이동하는 운동으로서 선반에서의 단면가공시에 아주 중요한 회전오차 요인이 된다. 순수반경방향운동 $r(\theta)$ 운동은 주축이 X-Z면상에서 X축방향으로 평행 이동하는 운동이다. 각운동 $\alpha(\theta)$ 운동은 X-Z면상에서 주축의 각운동 성분으로서 이 운동으로 인한 가공오차는 주축의 축방향 위치에 따라 변한다. 그림3은 회전축의 기본적인 6종류의 자유도를 나타낸다.

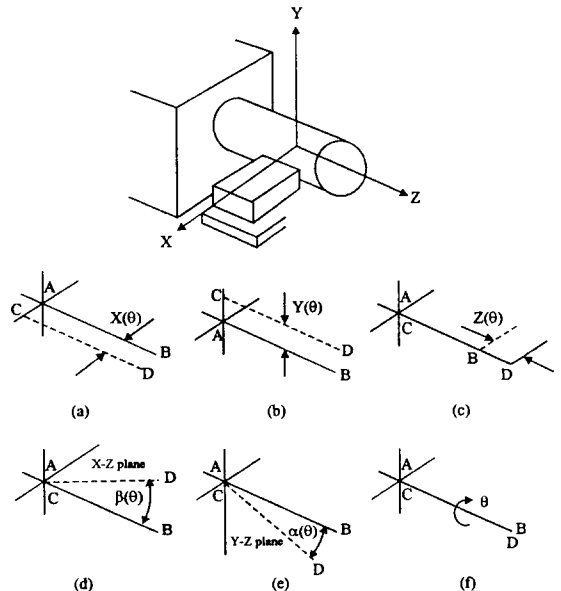


Fig. 3 Six basic degrees of freedom of axis of rotation

가공형상오차는 주축의 반경방향운동 성분(Pure Radial Motion), 축방향운동성분(Axial Motion), 각운동성분(Angular Motion)과 절삭점의 위치와 방향에 따라 정해지게 되며 이러한 성분들이 가공형상오차에 영향을 미치는 회전오차운동의 정도를 회전정밀도라 정의한다.

이와 같이 정의하면 회전오차운동과 회전정밀도에서는 주축의 민감방향에의 운동만이 중요하다. 따라서 그림4에서 나타낸 것과 같이 공구가 주축에 고정되어 회전하면서 절삭이 행해지는 민감방향회전형(회전센시티브방향, 공구회전형)과 공작물에 주축에 고정되어 회전하면서 고정된 공구에 의해 절삭되어지는 민감방향고정형(고정센시티브방향, 공작물회전축)으로 구분할 수 있다. 이러한 분류는 각각의 경우에 있어서 회전오차가 공작물

의 형상오차에 미치는 영향이 다르기 때문이다. 즉 민감방향 고정형일 경우는 민감방향이 고정되어 있으므로 공작물을 장착해서 회전시키는 주축의 회전오차중 민감방향 성분만이 공작물의 형상에 오차를 크게 발생시킨다. 반면에 민감방향 회전형의 경우는 민감방향이 공구의 회전운동과 더불어 회전하기 때문에 공구 장착방향의 회전오차 성분이 중요하게 된다.

3. 회전정밀도 KS 규격 정의

한국공업규격(KS)의 KSB 4001 "공작기계의 시험방법 통칙" 중 회전축의 흔들림에 대한 정의, 표시방법과 시험사항 및 측정방법은 다음과 같다.

회전축의 흔들림 : 회전축의 흔들림의 정의, 표시방법과 시험사항 및 측정방법은 다음에 따른다.

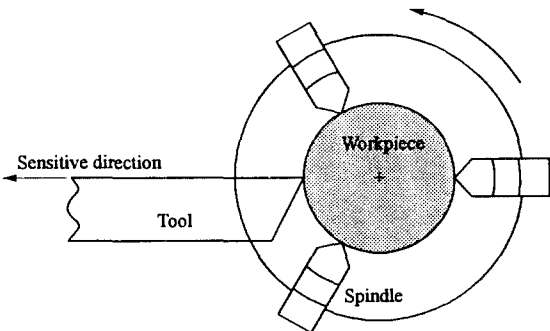
(1) 정 의 : 회전하는 원통형 기계부분의 회전중심의 반지름 방향의 움직임의 정도

(2) 표시방법 : 축을 매우 낮은 속도로 회전시켜, 수회전 중의 축 표면의 반지름 방향의 움직임을 최대치로 나타낸다. 이 경우의 측정치는 표면의 불규칙의 합성으로 한다.

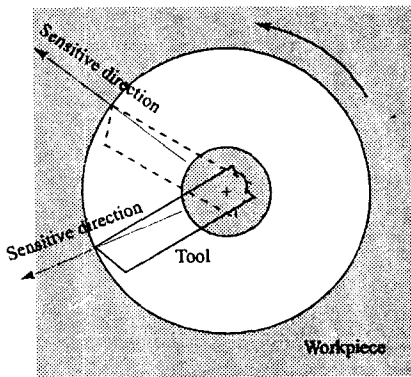
4. 회전정밀도의 평가방법

회전정밀도를 정량적으로 평가하기 위해서는 그림5에 나타낸 것과 같이 오차운동을 축의 회전과 같은 시기에 극좌표상에 그려서 나타내면 편리하다. 임의의 축방향 위치에서의 반경방향 운동을 극좌표로 표시한 것은 그 위치에서 절삭한 축 또는 구멍의 진원도 프로필과 대응을 할 수 있기 때문이다.

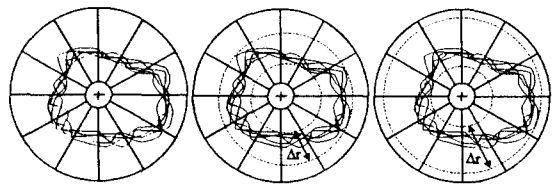
각 오차운동의 극좌표선도에서 다음의 값들을 정의할 수 있다.



(a) Fixed sensitive direction



(b) Rotating sensitive direction



(a) Polar plot of error motion (b) Minimum zone center radius (c) Polar center radius

Fig. 5 Polar coordinate plot of spindle error motion

Fig. 4 Fixed and rotating sensitive direction

(3)시험사항 및 측정방법

시험 사항		번호	측정기구	측정치를 구하는 방법	측정 방법 그림	대표적인 적용보기 (참고)
외면의 흔들림	외면의 흔들림	10-11	테스트인디케이터(정치)	회전중의 지시 눈금 값의 최대차		선반, 밀링머시인, 연삭기, 수평보오링머시인의 주축.
	축에 끼운 부속부품의 외면의 흔들림	10-21	테스트인디케이터(정치)	회전중의 지시 눈금 값의 최대차		선반, 원통연삭기의 샌터.
내면의 흔들림	내면의 흔들림	10-31	테스트인디케이터(정치)	회전중의 지시 눈금 값의 최대차		터릿선반의 주축, 콜릿척 부착구멍, 다축 자동선반의 주축 구멍.
		10-32	테스터바아와 테스트인디케이터(정치)	회전중의 지시 눈금 값의 최대차		선반, 밀링머시인, 레이디얼 드릴링머시인, 연삭기의 주축구멍.
	측구멍에 끼운 부속부품의 내면의 흔들림	10-41	테스터바아와 테스트인디케이터(정치)	회전중의 지시 눈금 값의 최대차		터릿선반, 단축 자동선반의 콜릿척

- ① 반경방향 운동 : 최소 영역원반경차 (MZDRW)
- ② 축방향 운동 : 극좌표중심 원반경차 (PCRW)
- ③ 각방향 운동 : 최소영역 원반경차 (MZCRW)

그림5(b), (c)에 각각 오차운동의 최소영역원과 극좌표 중심원이 나타나 있다. 일반적으로 주축의 오차운동은 1회전의 운동이 동일하게 재형성 되지 않는 경우가 많고 따라서 수 회전을 플롯해서 회전정밀도를 평가할 필요가 있다.

원통절삭의 경우 식(2)에 $\phi=90^\circ$ 를 대입하면, 원통형상오차를 생기게 하는 오차운동은 다음 (3)식과 같이 된다.

$$e(\theta) = r(\theta) + La(\theta) \quad (3)$$

실제의 원통절삭에서는 반경방향 운동과 각방향 운동 성분을 제외하고 평가하며 최소영역 원반경차로 평가한다.

단면절삭의 경우 식(2)에 $\phi=0^\circ$ 를 대입하면 평면도 오차를 생기게 하는 오차운동은 다음 (4)식과 같이 된다.

$$e(\theta) = Z(\theta) - R\alpha(\theta) \quad (4)$$

축방향 운동은 그림5에 나타난 것과 같이 극좌표 중심원반경차로 평가한다. 공구인선의 형상, 절삭기구 등이 원인하는 사상면 거칠기가 무시할 수 있을 정도로 작은 경우에는 그림5(b), (c)에 나타난 수회전분을 취했을 때의 궤적의 반경방향의 폭이 가공된 사상면의 표면 거칠기와 대응될 수 있다

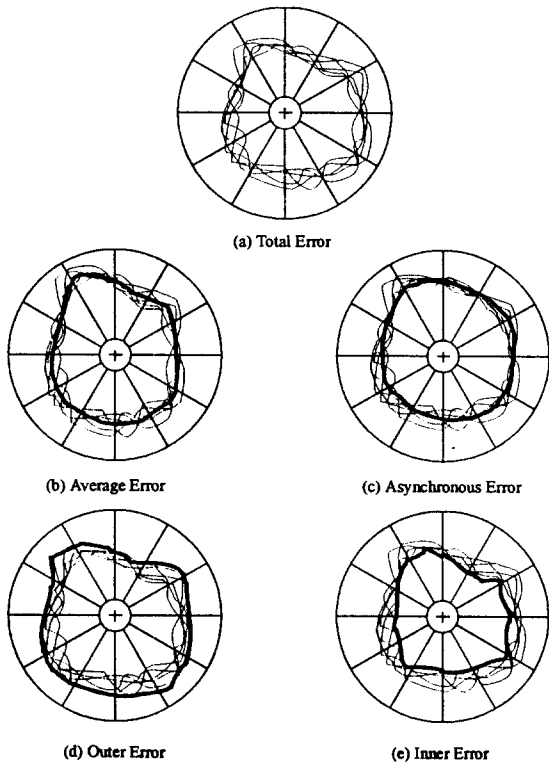


Fig. 6 Types of error motion

그림6은 회전오차의 종류를 표시한 것으로 각 종류별로 회전오차의 정의를 간략히 설명하면 다음과 같다.

- ① 전체오차성분(Total Error Motion)
측정으로부터 얻은 원래 그대로의 전체오차 표시
- ② 평균오차성분(Average Error Motion)
각 회전각도에 있어서, 전체오차를 측정회전수로 나눈

값으로 주축의 특성이 가장 뚜렷이 나타나며 또 이 값은 피삭재의 진원도에 직접적인 영향을 미침.

③ 비동기 오차성분(Asynchronous Error Motion)

전체오차성분과 평균오차성분의 차이로 가공물의 표면 거칠기를 예측할 수 있음. 특히 정압 및 동압베어링으로 지지되는 주축에 있어서는 이 오차성분이 매우 작아서 정밀가공에 이용될 수 있음.

④ 외곽오차성분(Outer Error Motion)

각 회전각도에서 측정된 오차값 중에서 가장 외곽의 값들을 연결하여 그린 것으로 공작기계 중에서 연삭기의 연삭지식 주축에 있어서는 이 값이 매우 중요하며 그 이유는 연삭가공 특성상 스파크아웃(Spark-Out)이 될 때까지 가공하기 때문이다.

⑤ 내곽오차성분(Inner Error Motion)

각 회전각도에서 측정된 오차값 중에서 가장 안쪽의 값들을 연결하여 그린 것으로 연삭기에서 중요한 인자가 된다.

5. 회전정밀도의 검출법

기본적으로 비접촉식의 변위계 픽업과 정도가 높은 마스타구(또는 링)를 사용하며 변위계의 한쪽을 주축에,

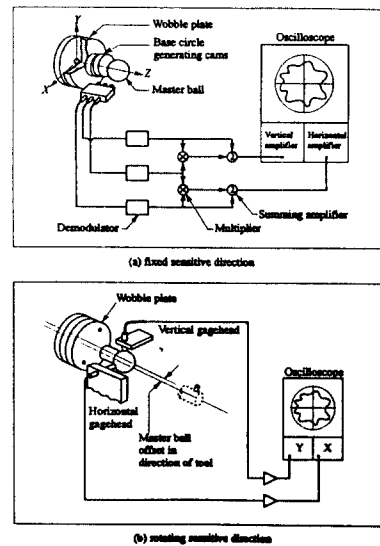


Fig. 7 Test methods for radial motion with fixed sensitive direction and rotating sensitive direction

다른 한쪽을 공구대 또는 테이블에 부착하여 주축을 회전시킬 때의 픽업과 마스타구 사이의 틈의 변동을 검출한다. 이것을 기하학적 기초원에 실어 회전각도에 대응하는 극좌표로 표시한다. 앞에서 설명한 바와 같이 반경방향 운동과 주축방향 운동에 대해서는 공작물이 붙은 부분에 마스타구를 장착하고 공구가 붙은 부분의 민감방향에 픽업을 붙이는 방법이 제일 좋다. 각방향 운동은 반경방향 운동을 2군데에서 검출하고 그 차이를 축장간 폭 (L_{12})으로 나누어 검출한다. 즉, 두 지점의 반경방향오차성분 $r_1(\theta)$, $r_2(\theta)$ 를 측정하고 다음 (5)식에 의해 각운동 방향오차를 산출한다.

$$a(\theta) = \frac{1}{L_{12}} [r_2(\theta) - r_1(\theta)] \quad (5)$$

이와 같은 측정원리에 기초한 공구회전형과 공작물회전형의 반경방향 오차측정법을 각각 그림7(a), (b)에 나타내었다. 그림에 나타난 요동판(Wobble Plate)과 XY이동 테이블은 마스타구의 중심을 회전축의 중심과 일치시키기 위해 사용한다. 그리고 리사주도형을 그리는 방법을 그림8에 나타냈다. 리사주도형은 마스타구를 조금 편심시켜 주축에 붙이고 두 개의 픽업을 서로 직각으로 공구대에 붙여 간극의 차이를 검출하는 방법으로 가공형상오차에 영향을 미치는 오차운동을 검출하는 방법이 아니라 주축 중심의 움직임을 검출하는 방법으로 가공형상오차와 대응을 할 수 없는 단점이 있다.

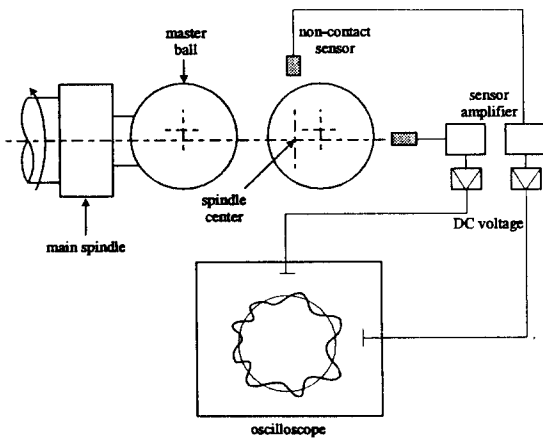


Fig. 8 Lissajous' figure of spindle accuracy

초정밀공작기계의 주축의 회전정도를 측정하는 경우에는 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다. 우선 첫째로, 초정밀공작기계의 경우에는 주축의 반경방향 회전정밀도가 최소영역인 반경차(MZCRW)로 $0.1\mu\text{m}$ 이하이기 때문에 사용하는 마스타구의 진원도는 그 이하이어야 한다. 마스타구로서 직경 25.4mm 정도의 것을 사용하면 실험장치의 설치가 간편하지만 이 정도의 크기의 경우에는 현재 얻을 수 있는 가장 우수한 것도 $0.03 - 0.05\mu\text{m}$ 정도의 진원도 오차가 있다. 따라서, $0.1\mu\text{m}$ 수준의 회전정밀도를 측정하는 경우에는 문제가 적지만 $0.01\mu\text{m}$ 수준의 회전정밀도를 측정하려고 할 경우에는 마스타구의 진원도 형상을 보다 정도가 높은 진원도 측정기로 측정해서 수정할 필요가 있다. 이 방법을 사용하려고 해도 현재의 상황에서는 $0.01\mu\text{m}$ 의 수준으로 정확히 진원도를 측정할 수 있는 측정기는 없다. 예를 들어 측정할 수 있다 해도 마스타구도 조금은 경년변화(Secular Change)하기 때문에, 절대의 신뢰를 갖기에는 무리가 있다.

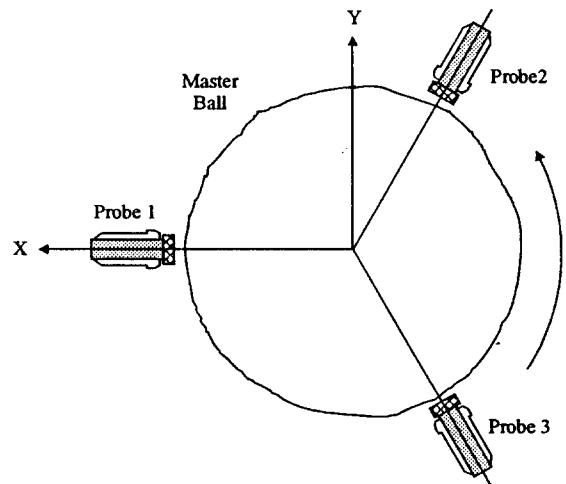


Fig. 9 Three points measurement method for radial motion

그래서, 최근에는 매우 정밀한 마스타구를 필요로 하지 않는 3점법이 개발되었다. 이 방법은 그림9에서 보는 바와 같이 픽업을 3개 사용하여 마스타구와의 사이를 3군데에서 측정하고, 각각 사이의 변화를 푸리에해석(Fourier Analysis)하고 재합성해 마스타구의 진원

도 형상과 주축의 오차운동을 동시에 찾아내는 방법이다. 이 때 3개의 픽업이 이루는 각도를 정확히 구하고, 동시에 3개의 픽업외 감도를 엄밀히 조정할 필요가 있다.

공기베어링을 이용하는 초정밀공작기계에서는 가공한 사상면의 품위가 특히 중요시되며 이와 같은 경우에는 극좌표중심원 반경차를 상당히 많은 주축회전수에 대해서 추종할 필요가 있다. 그러나 상당히 미소한 오차운동의 재현성이 문제가 되며 극좌표로 표시하면 배율이 올라가기 어려워 단 1개의 선으로 될 수 있기 때문에 오히려 극좌표 표시를 하지 않는 편이 좋다.

일반적으로 회전정밀도 측정의 연산과 표시는 아날로그로 행해지고 있지만, 측정정도를 보다 한 단계 올리기 위해서는 디지털쪽이 좋다. 아날로그식 측정법은 기초원 생성을 하기가 어려우며, 마스터구의 진구도 오차가 회전정밀도에 누적되며, 마스터구 편심영향의 회전오차 중첩, 회전오차 원인규명의 난이성 등의 문제점을 안고 있다. 디지털의 경우는 리얼타임의 측정과 표시가 어렵고 측정장치의 고가화 및 운반도 어렵기 때문에 두 가지 경우의 장단점을 고려하여 적절한 방법을 선택하여야 한다.

회전정밀도가 좋지 않은(축방향 회전정도에서 10 μ m 정도) 구름베어링 주축을 사용하는 경우에는 가공형상오차와 잘 대응하는 회전오차운동을 측정할 수 있으며 정압베어링 선반주축의 경우 이 방법으로 측정한 회전오차운동은 반경방향 회전정밀도로 적어도 0.1-0.2 μ m정도 까지 진원도오차와 잘 대응하고 있는 것으로 여러 문헌

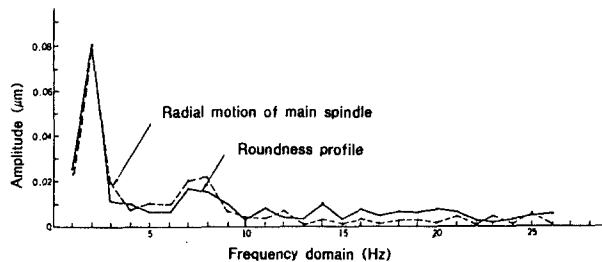
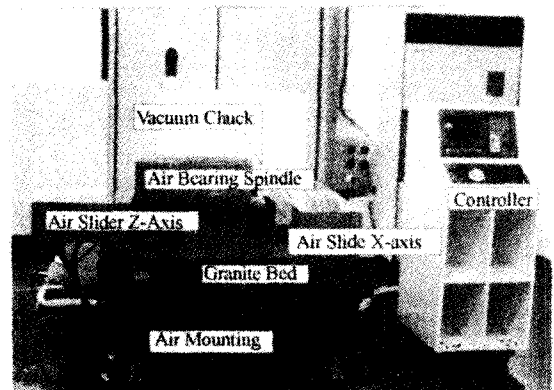


Fig. 10 Comparison of Fourier analysis of radial motion of main spindle and roundness profile of machined spindle(2000rpm)

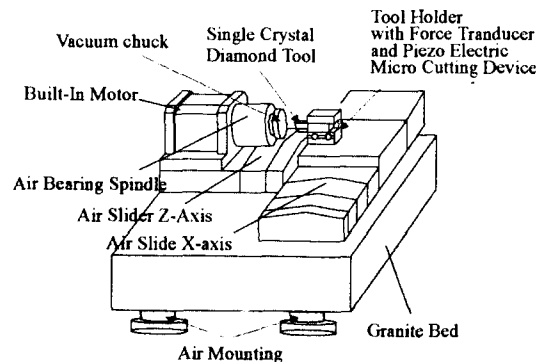
에서 보고 되고 있다. 그림10은 공작물 회전형의 반경방향운동과 가공물의 진원도 형상을 푸리에 해석한 결과

를 나타낸 것이다. 진원도 형상에서 2Hz 성분이 특히 크고, 7Hz, 8Hz 및 14Hz에서도 진폭이 크게 나타나며 이에 대응하는 주축의 반경방향운동에서도 2Hz성분이 특히 크고, 7Hz, 8Hz 및 12Hz에서 진폭이 큰 성분이 존재하고 있음을 볼 수 있다. 양자를 비교하면 주파수성분과 진폭이 함께 상당히 잘 대응하고 있는 것을 알게 된다.

江黑철공소제작의 NC선반(NUCPAL-10)도 초정밀급의 각접촉 구형 베어링을 사용하며 이것을 사용해 다이아몬드공구로 가공된 공작물의 진원도 오차는 0.3 μ m 이하이고, 그 사상면의 표면거칠기는 0.5 μ mRmax이다. 유압 동압베어링을 사용한 G.보레사(서독)제의 선반을 사용해서 같은 형상의 절삭을 행하면 진원도오차는 0.15 μ m이하, 사상면 표면거칠기는 0.1 μ mRmax 이하



(a)Photograph of Ultraprecision lathe System



(b)Schematic Diagram of Ultraprecision lathe System

Fig. 11 Overview of Developed Ultraprecision Lathe System

의 것이 쉽게 얻어질 수 있으며 반경방향 회전정도도 $0.15\mu\text{m}$ 이하로 보고되고 있다. 진원도오차에 영향을 미치는 반경방향 회전정도는 구름베어링을 사용한 주축도 우수하긴 하지만 반경방향 운동에는 고주파성분이 상당히 있어서 정압베어링을 사용한 주축보다도 회전오차가 훨씬 크고 통상적으로 초정밀 경면가공에 사용하는 것은 곤란하다. 東芝기계계의 정압형의 구면공기 베어링을 사용한 주축의 반경방향 운동과 주축방향 운동의 회전정도는 $0.05\mu\text{m}$ 이하이고, 사상면 표면거칠기를 지배하는 반경방향의 레적의 폭은 $0.02\mu\text{m}$ 이하로 평가된다. 그림11은 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 정밀가공 및 공작기계 연구실에서 개발된 초정밀선반을 나타낸다. 이 선반은 공기정압 베어링을 장착한 초정밀

CNC 선반으로 주축의 회전 정밀도를 측정하기 위하여 와 전류(Eddy Current)형태의 비접촉 변위계(Gap Sensor)와 아날로그신호를 디지털신호로 변환시키는 A/D 변환기를 사용하였으며 스피들의 회전수에 따라서 성능을 평가하고 PC상에 결과를 보여주는 프로그램을 개발하였다. 초정밀선반 스피들 외주에 변위센서를 설치하고 회전수를 변화키면서 회전 정밀도를 측정하였다. 그림12는 회전 정밀도 측정 S/W의 흐름도를 나타낸 것이다. 먼저 변위센서를 측정 부위에 설치하고, 측정 S/W를 구동시켜 주축의 회전수, 데이터 개수, 그리고 샘플링 시간 등을 입력한다. A/D 변환후 회전 정밀도, 변위의 평균, 최대치, 최소치, 런아웃을 출력하고 화면에 회전 형상을 극좌표계에서 표시한다. 그림13은 초정밀선반의 회전정밀도 측정 결과를 주축회전수에 따라 나타낸 것이다.

예압이 주축회전정밀도에 미치는 영향에 대한 연구에 의하면 예압이 주축의 강성과 베어링의 온도변화에 영향을 미치므로 주축의 회전운동에 큰 영향을 미치게 된다. 예압을 크게 할수록 주축의 강성은 증가하지만 온도 역시 증가하게 된다. 따라서 최적의 예압조건이 형성되어야 주축의 회전정밀도가 우수하게 된다. 비접촉 간극센서에 의하여 측정된 데이터로부터 반경방향의 주축의 회전오차운동을 얻는 과정을 살펴보면 다음과 같다. 일반적으로 비접촉 간극센서에 의하여 측정된 데이터는 그림 14에서 보는 바와 같이 다음과 같은 오차운동을 포함한다.

- ▶ 초기고정위치 $S_i(X), S_i(Y)$
- ▶ 마스터링의 형상오차 $F_i(X), F_i(Y)$
- ▶ 회전운동 순간중심과 마스터링과의 편심 $D_i(X), D_i(Y)$
- ▶ 주축오차운동 $E_i(X), E_i(Y)$

비접촉 간극센서에 의하여 얻어지는 측정신호를 $G_i(X), G_i(Y)$ 라 하면 다음과 같다.

$$G_i(X) = S_i(X) + F_i(X) + D_i(X) + E_i(X)$$

$$G_i(Y) = S_i(Y) + F_i(Y) + D_i(Y) + E_i(Y)$$

초기고정위치 $S_i(X), S_i(Y)$ 는 상수이므로 회전정밀도에는 영향을 미치지 못하며 측정데이터로부터 쉽게 제거할 수 있다. 마스터링의 형상오차 $F_i(X), F_i(Y)$

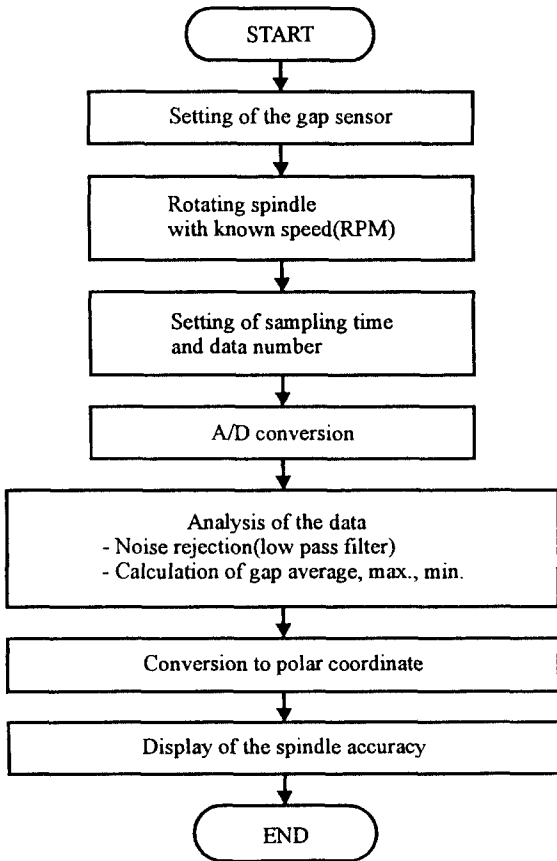
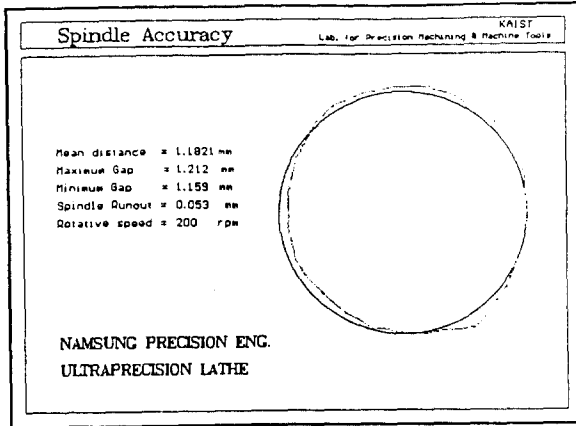
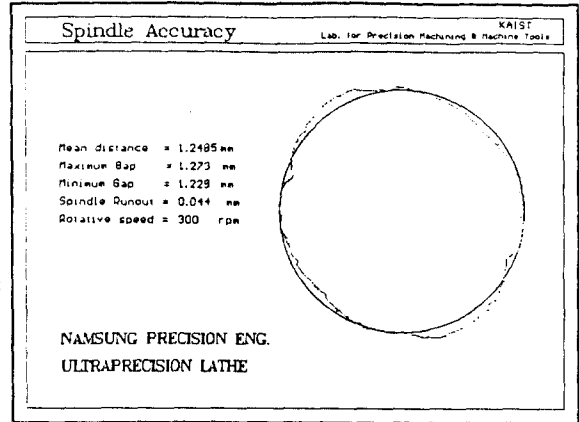


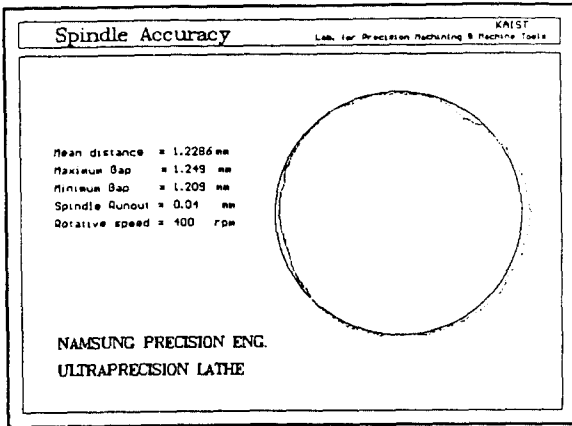
Fig. 12 Flow chart for spindle accuracy measurement



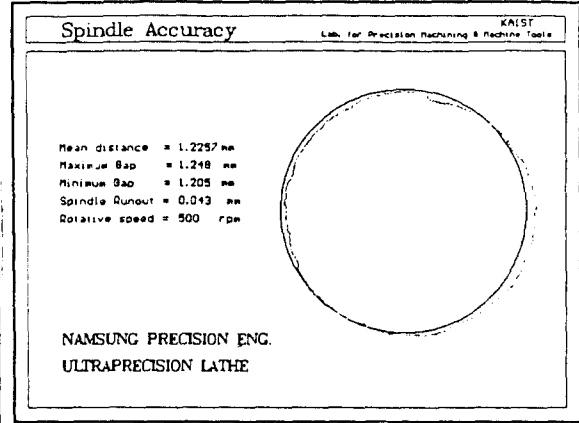
(a) 200 rpm



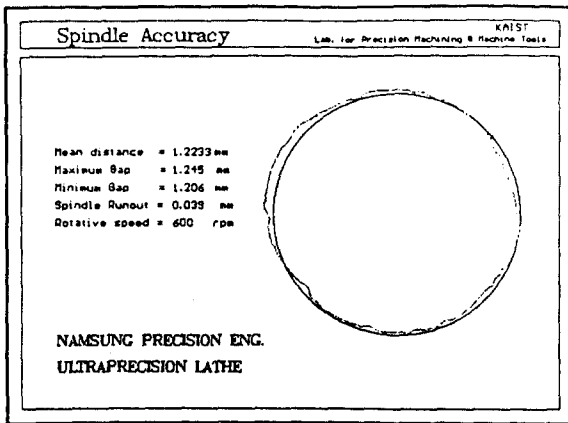
(b) 300 rpm



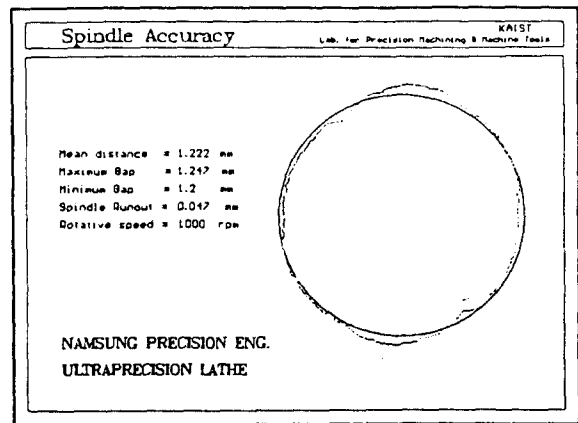
(c) 400 rpm



(d) 500 rpm



(e) 600 rpm



(f) 1000 rpm

Fig. 13 Measurements of spindle accuracy of the ultraprecision CNC lathe

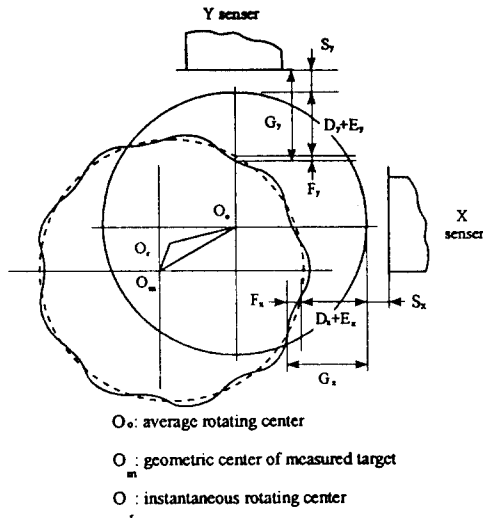


Fig. 14 The measuring schematics of spindle error motion

는 정밀한 진원도 측정기에 의하여 미리 구하고 그 데이터를 가지고 있어야 한다. 회전운동 순간중심과 마스터링과의 편심 $D_i(X), D_i(Y)$ 는 다음 식과 같이 Finite Fourier Series Analysis에 의하여 구한다.

$$\begin{aligned} D_i(X) &= A_1 \cos(2\pi i/N) + B_1 \sin(2\pi i/N) \\ D_i(Y) &= A_1 \cos(2\pi i/N - \pi/2) + B_1 \sin(2\pi i/N - \pi/2) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_1 &= (2/N) \sum_{i=1}^N [D_i(X) + E_i(X)] \cos(2\pi i/N) \\ B_1 &= (2/N) \sum_{i=1}^N [D_i(Y) + E_i(Y)] \sin(2\pi i/N) \end{aligned} \quad (7)$$

이며 N 은 1회전당 샘플링수이다. 측정된 회전오차운동 $E_i(X), E_i(Y)$ 에서 민감 반경방향의 오차운동 ($\Delta E_i(R)$)을 다음 식과 같이 구할 수가 있다.

$$\Delta E_i(R) = \sqrt{E_i(X)^2 + E_i(Y)^2} \cos \left\{ \tan^{-1} \left\{ \frac{E_i(Y)}{E_i(X)} \right\} - \beta \right\} \quad (8)$$

여기서 β 는 X 방향의 간극센서를 기준으로 한 절삭공구의 각도이다.

영국의 크랜필드 대학(Cranfield Unit for Precision Engineering, CUPE)에서는 최근 초정밀주축의 회전정밀도의 측정에 마스타구를 대신해 마스타링을 사

용하고 총 8개의 비접촉변위계를 사용하고, 동시에 도날드슨 반전법을 사용해서 마스타구의 진원도 오차를 수정하는 측정법을 개발하였으며 측정오차는 $0.01\mu\text{m}$ (10nm)이하에 이르고 있다. 즉 다이아몬드 선삭을 위해 새로 개발된 초정밀 공기베어링의 성능평가를 위해서 용량형 게이지를 이용하여 회전정밀도를 측정할 수 있는 시스템을 개발하였으며 측정시스템의 분해능은 10nm이고 디지털 회로와 아날로그 회로의 조합으로 셋업시간을 줄일 수 있다. 마스터 실린더에 고정된 120개의 광학엔코더를 이용하여 800rpm까지는 1회전당 120개의 데이터를 동시에 얻을 수 있으며 회전수가 800rpm을 넘으면 샘플링수가 줄어들어 6000rpm일 경우 1회전당 16지점의 데이터를 얻을 수 있다. 마스터 실린더 주축의 편심오차를 온라인으로 보정하여 오실로스코프로 실시간으로 그 결과를 볼 수 있으며 데이터는 이산화되고 Donaldson reversal법에 의하여 오차수정을 하게 된다. 용량형 게이지 측정시스템은 8개의 동일한 콘텐서에 축적되는 전하에 기초하는데 2세트는 4분원에 1세트는 반경방향에 나머지 1세트는 축방향을 측정할 수 있게 고정된다. 주어진 시간에서 주어진 양의 전하가 축전되면, 흐르는 전압을 측정하게 되고 이 때 측정된 전압은 간극과 선형적인 관계를 가지게 된다. 4분원 방향의 측정된 전압을 조합하여 이득오차를 제거하고 주축의 X, Y 방향의 회전오차운동을 알 수 있게 된다. 증폭, 필터링, 전압의 조합 등과 같은 아날로그 신호처리 과정은 그림15와 같다. 용량계 전압의 컨버터에서 나오는 출력신호는 고주파통과 필터를 거쳐 DC 성분을 제거한다. 최종적으로 (A-C), (D-B) 신호가 조합이 되어 회전오차에 대한 정보를 제공한다.

각접촉 구름베어링에 의해 지지되는 주축의 5자유도계 모델 해석에 관한 연구에 의하면 그림16과 같이 주축을 모델링하고 해석하였다. 5자유도는 x 와 y 축의 반경방향, $x-y$ 평면에 수직방향, z 축의 축방향, x 와 y 축에 대한 요동들로서 그림16의 (a)는 주축모델을 나타내고 (b)는 x 와 y 축에 대한 주축의 진동모드를 나타낸다. 이러한 5자유도계 모델을 연삭주축에 적용하여 해석을 하였으며 이 때 베어링은 주축에 강제결합되고 축방향으로는 100N으로 예압되었으며 주축은 강체로 가정을 하였다.

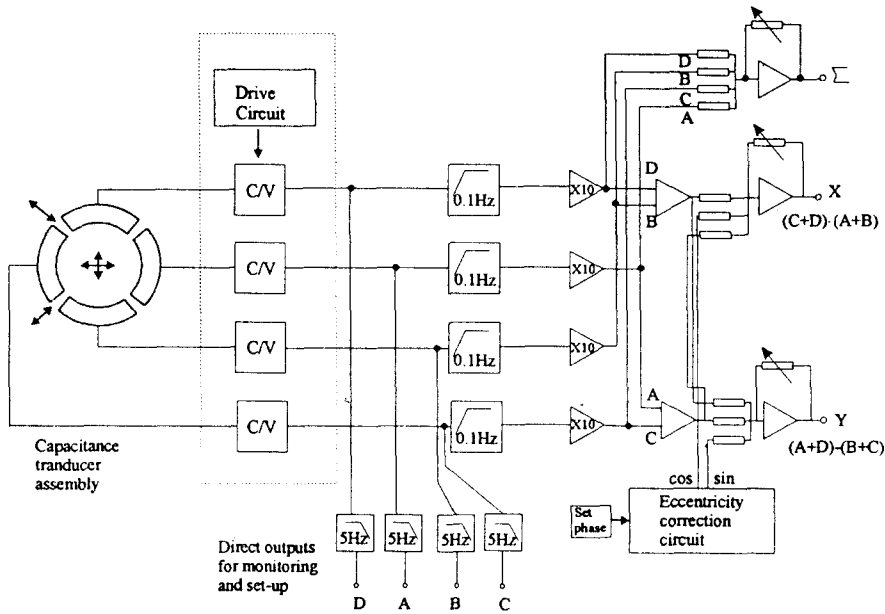


Fig. 15 Analogue Signal Processing

참고 문헌

- [1] K. Kim and S.S. Kim, Effect of preload on running accuracy of spindle, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 29, No.1, pp.99-105, 1989.
- [2] P.D. Chapman, A capacitance based ultra-precision spindle error analyser, Precision Engineering, Vol. 7, No.3, pp. 129-137, 1985.
- [3] R. Aini, H. Rahnejat and R. Gohar, A five degrees of freedom analysis of vibrations in precision spindles, J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No.1, pp.1-18, 1990.
- [4] Y.Gao and K.Foster, A study of in-process computer aided evaluation of size and form error for cylindrical workpieces, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.31, No.3, pp.405-414, 1991
- [5] 垣野 義昭, 工作機械의 主軸回轉 精密度 測定, 工作機械, pp.103-114, 1986

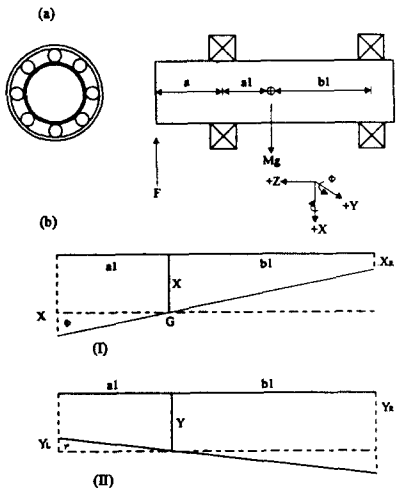


Fig. 6 (a) The spindle model
 (b) I : The rocking mode of the spindle about the Y-axis at the center of gravity G.
 II : The rocking mode of the spindle about X-axis at the center of gravity G