

< 論 文 >

스핀들 회전 오차 측정의 디지털 방법에 관한 연구

공 인 복* · 박 윤 창** · 김 승 우***

(1989년 3월 4일 접수)

A Digital Measurement Method for Rotational Errors of a Machine Spindle

In Bog Kong, Yun Chang Park and Seung Woo Kim

Key Words : Spindle Accuracy(스핀들 회전 정밀도), Digital Measurement(디지털 측정), Machine Tool(공작 기계), Radial Errors(반경방향 오차), Computer-Aided Inspection(컴퓨터 원용검사)

Abstract

A digital testing method for measurement of radial error motions of a spindle is investigated with special emphasis on developing a computer-aided in-situ inspection system for machine tool manufacturing. The method utilizes three non-contact type probes and an optical encoder, based on a special computational algorithm to eliminate undesirable offset and roundness errors of the master spindle. Details of the design of hardware and software required to realize the testing method are described. Finally, advantages and limitations of the method are discussed with several test results.

기 호 설 명

a, b : 축적인자(scale factor)
 $C(\theta)$: 마스터볼의 설치 편심량
 CA, CB : $C(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 F_n, G_n : $S(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 N : 스펀들 1회전당 측정점의 수
 n : n 번째 조화차수(harmonic wave)
 $P1n, Q1n$: $S1(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 $P2, Q2n$: $S2(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 $P3n, Q2n$: $S3(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여

현, 정현 계수
 $R(\theta)$: 마스터볼의 회전각도에 따른 진구도 오차
 RA_n, RB_n : $R(\theta)$ 함수의, 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 $RC(\theta)$: $R(\theta)$ 함수와 $C(\theta)$ 함수를 합한(summation) 함수
 $RCAn, RCBn$: $RC(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 $S(\theta)$: 각 변위계의 측정치로 표현되는 함수
 $S1(\theta), S2(\theta), S3(\theta)$: 각 변위계의 측정값
 $X(\theta)$: 스펀들 회전오차의 X축 성분
 $Y(\theta)$: 스펀들 회전오차의 Y축 성분
 XAn, XBn : $X(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 YAn, YBn : $Y(\theta)$ 함수의 푸리에급수 전개시 여현, 정현 계수
 θ : 마스터볼의 회전각도

*한국과학기술원 생산공학과

**기아기공(주) 기계기술연구소

***정회원, 한국과학기술원 생산공학과

ϕ, τ : 비접촉 변위계의 설치각도

1. 서 론

공작기계의 스핀들 회전정도는 가공물의 진원도(roundness)와 표면 거칠기(rugness)에 상당한 영향을 미친다. 따라서 스핀들 회전정도의 측정은 공작기계의 성능평가 측면에서 뿐만아니라, 최종 가공물의 형상을 예측하는데 중요한 역할을 한다. 스핀들 회전정도 측정의 기존방법으로는 다이알계 이치를 이용하는 단순방법⁽¹⁾과 Trusty⁽²⁾와 Bryan-Vanherck⁽⁴⁾가 제시한 비접촉식 변위계와 오실로스코프를 이용하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이들 방법은 애널로그 측정법에 기준한 것으로 스핀들 회전시, 스핀들에 정착된 마스터볼 표면의 떨림으로 스핀들 회전오차를 측정하는데 이때 마스터볼의 설치 편심량 및 진구도 오차가 스핀들의 회전 오차에 중첩되어 스핀들 오차만의 정확한 측정이 어려운 문제점을 가지고 있다. 이러한 중첩오차로 부터 스핀들 회전오차만을 분리하는 방법에 대한 연구로는 Donaldson⁽⁵⁾, Whitehouse⁽⁶⁾등에 의해 이론적으로 행해졌으며, Shigeo⁽⁷⁾는 Whitehouse⁽⁶⁾가 제시한 방법을 응용하여 마스터볼의 진구도 오차를 제거한 스핀들 떨림의 실질적 측정 방법을 제시하였다. CIRP⁽⁸⁾는 이전까지 알려진 스핀들 회전정도 측정 방법을 정리하고 측정 개념, 오차의 분류방법을 제시 하였으며 측정 용어의 정의를 정립하였다. 이에 대한 국내 연구 현황으로는 창원 기계 연구소에서 스핀들 회전정도 측정에 관한 연구가 진행중이며, 한양 대학교에서는 접촉식 변위계를 이용한 공작물의 진원도 측정⁽⁹⁾에 대한 논문을 발표한바 있다. 한국 과학기술원에서는 스핀들 회전 정도 측정^(10,11)에 대해 연구하였으며 현재 이를 인프로세스 측정 및 가공제어에 적용하기 위해 연구를 계속 진행중이다.

본 연구에서는 공작기계 생산 현장에서 직접적으로 이용될 수 있는 측정시스템의 개발을 목표로 이 제까지 이론적으로 제안된 스핀들 정밀도 측정방법을 종합 분석하여 디지털 측정의 기본이론을 정립하고 이를 기반으로 마이크로 컴퓨터를 이용한 측정시스템을 실제 제작하였다. 또한 실험을 통하여 본 연구에서 제안된 측정 시스템의 성능을 기존의 애널로그 측정방법과 비교 검토함으로써 본 방법의 우수성 및 제한점을 실증적으로 입증하고자 하였다.

2. 디지털 측정 이론

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하고 있는 스핀들 회전 정밀도의 디지털 측정을 위한 3점 측정의 기본 원리를 보여주고 있다. 측정은 스핀들에 정착된 마스터볼의 회전시 떨림을 3개의 비접촉식 변위계에 의해 이루어지며 각각의 변위계로 부터 얻어지는 신호는 애널로그 형태로써 각각 마스터볼의 회전각도 θ 의 함수인 $S1(\theta), S2(\theta) S3(\theta)$ 로 표시할 수 있다. 이때 변위계로 부터 측정되는 신호는 스핀들 회전오차의 X축 성분 $X(\theta)$ 와 Y축 성분 $Y(\theta)$ 뿐만아니라 마스터볼 자체의 진구도 오차 $R(\theta)$ 와 정착시 발생하는 편심오차 $C(\theta)$ 가 포함된다. 마스터볼의 진구도오차 $R(\theta)$ 는 푸리에급수(Fourier series)를 이용하여 다음과 같이 θ 에 대해 전개할 수 있다.

$$R(\theta) = \sum_{n=1}^{N/2} (RAn \cos n\theta + RBn \sin n\theta) \quad (1)$$

이때 $n=0$ 성분은 마스터볼 직경의 평균값이며 진구도 오차와는 무관하므로 고려하지 않았다. 같은 원리로 스핀들 회전 오차 $X(\theta)$ 와 $Y(\theta)$ 를 전개하면 다음과 같다.

$$X(\theta) = \sum_{n=1}^{N/2} (XAn \cos n\theta + XBn \sin n\theta) \quad (2)$$

$$Y(\theta) = \sum_{n=1}^{N/2} (YAn \cos n\theta + YBn \sin n\theta) \quad (3)$$

또한 마스터볼의 설치 편심성분 $C(\theta)$ 는 1회전당 1회 떨림성분으로 나타나므로

$$C(\theta) = CA \cos \theta + CB \sin \theta \quad (4)$$

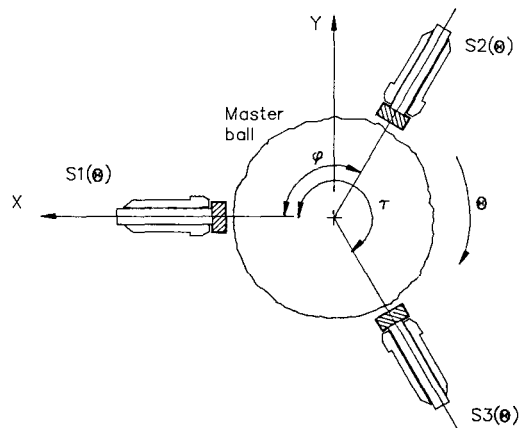


Fig. 1 Measuring principle of three points measurement technique

로 전개할 수 있다. 식 (4)에서 보는바와 같이 편심 성분 $C(\theta)$ 는 1차 조화함수 성분만을 포함하고 있다.

식 (1)과 식 (4)를 합쳐 새로운 함수 $RC(\theta)$ 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} RC(\theta) &= R(\theta) + C(\theta) \\ &= \sum_{n=1}^{N/2} (RAn \cos n\theta + RBn \sin n\theta) \\ &\quad + CA \cos \theta + CB \sin \theta \\ &= \sum_{n=1}^{N/2} (RCA_n \cos n\theta + RCB \sin n\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

즉 식 (5)의 RCA_1 , RCB_1 은 마스터볼의 진구도 오차와 설치시의 편심오차 성분을 포함하여 스핀들 회전정도 측정에 발생하는 오차항을 나타내고 있다. 비접촉 변위계의 신호는 기하학적 고찰을 통해 다음과 같이 표기됨을 알 수 있다.

$$S1(\theta) = RC(\theta) + X(\theta) \quad (6)$$

$$S2(\theta) = RC(\theta - \phi) + X(\theta) \cos \theta + Y(\theta) \sin \theta \quad (7)$$

$$S(\theta) = RC(\theta - \tau) + X(\theta) \cos \tau + Y(\theta) \sin \tau \quad (8)$$

식 (6), (7), (8)로부터 마스터볼의 진구도 오차와 스핀들 회전오차를 분리하는 방법은 두가지로 나눌 수 있다.

2.1 행렬식의 형태로 계산하는 방법

변위계 $S1(\theta)$, $S2(\theta)$, $S3(\theta)$ 로부터 측정되는 신호는 다시 푸리에 변환하면 다음과 같이 표현된다.

$$S1(\theta) = \sum_{n=1}^{N/2} (P1n \cos n\theta + Q1n \sin n\theta) \quad (9)$$

$$S2(\theta) = \sum_{n=1}^{N/2} (P2n \cos n\theta + Q2n \sin n\theta) \quad (10)$$

$$S3(\theta) = \sum_{n=1}^{N/2} (P3n \cos n\theta + Q3n \sin n\theta) \quad (11)$$

식 (2) (3) (5)를 식 (6) (7) (8)에 대입하여 정리하고 이 결과와 식 (9) (10) (11)을 연립하면

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos n\phi & -\sin n\phi & \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ \sin n\phi & \cos n\phi & 0 & \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ \cos n\tau & -\sin n\tau & \cos \tau & 0 & \sin \tau & 0 \\ \sin n\tau & \cos n\tau & 0 & \cos \tau & 0 & \sin \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} RCA_n \\ RCB_n \\ XAn \\ XBn \\ YAn \\ YBn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P1n \\ Q1n \\ P2n \\ Q2n \\ P3n \\ Q3n \end{bmatrix} \quad (12)$$

또는 $Ax = b$

이 얻어지며 스핀들 회전오차의 $X(\theta)$ 및 $Y(\theta)$ 는 식 (12)의 선형 연립방정식의 해를 각각의 조화차수 n 에 대해 구한후 식 (2)와 (3)에 대입함으로써 얻어질 수 있다. 이때 식 (12) 해의 존재여부는 A 행렬의 행렬식(determinant)에 의해 결정되는데 이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D &= (\sin \tau)^2 [(\cos \phi - \cos n\phi) \\ &\quad - \sin \phi / \sin \tau (\cos \tau - \cos n\tau)]^2 \\ &\quad + (\sin n\phi - \sin \phi / \sin \tau \sin n\tau)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 알 수 있는 바와 같이 행렬식의 값은 조화차수 n , 변위계의 설치각도 ϕ 와 τ 의 함수로써 이 값이 "0"이 되지 않는 ϕ 와 τ 를 구함으로써 측정이 가능한 변위계의 설치각도를 구할 수 있다. 먼저 행렬식의 값이 "0"이 되는 경우를 살펴보면 $\tau=0, 180$ 도 일때와 $\phi=\tau$ 일때는 조화차수 n 에 무관하여 "0"이 되며, $\tau=\phi+\pi$ 일때와 $\phi=0, 180$ 도 일때는 조화차수 n 이 홀수 일때 "0"이 된다. 이때 조화차수 n 이 짝수일때는 행렬식의 값이 일정(constant)하다. 또한 $n=1$ 일때는 변위계의 설치각도 ϕ 와 τ 에 무관하게 행렬식의 값이 "0"이 되므로 이 성분은 구할 수 없다. 다음은 행렬식의 값이 "0"이 되지 않는 경우를 살펴보면 한바퀴당 측정점의 수를 $N=2^k$ 로 선택하고 360도를 N 등분한 후 ($\phi(i)=360/i$ $i=1, 2, \dots, n-1, n, n+1, \dots, N$) ϕ 를 임의의 각도 $\phi(n)$ 으로 선정할 때 τ 를 설치할 곳으로는 K 가 짝수인 경우 $\phi(n)$ 를 연속적으로 2 등분 한후 최후로 남는 각도들의 지점이며, K 가 홀수 일때는 $\phi(n)$ 를 3등분하고 이를 연속적으로 2 등분한 후 최후에 남는 각도들의 지점이다. 이와 같이 ϕ 와 τ 를 선정할 때는 조화차수 $n=1$ 성분을 제외한 $n=2 \sim N/2$ 성분의 값을 구할 수 있으므로 식(12)로부터 RAn , RBn , XAn , XBn , YAn , YBn 을 구하고 이를 식 (1) (2) (3)에 대입하면 마스터볼의 진구도 오차 성분과 스핀들의 회전오차 성분을 각각 구할 수 있다.

2.2 축척상수를 이용하는 방법

식 (6) (7) (8)에 식(5)을 대입하고 식 (7) (8)에 각각 축척인자(scale factor) a , b 를 곱하여 더한 결과를 $S(\theta)$ 라 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S(\theta) &= S1(\theta) + a S2(\theta) + b S3(\theta) \\ &= X(\theta) \{1 + a \cos \phi + b \cos \tau\} \\ &\quad + Y(\theta) \{a \sin \theta + b \sin \tau\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{n=1}^{N/2} [(RCAn(1 + a \cos n\phi + b \cos n\tau) \\
 & - RCBn(a \sin n\phi + b \sin n\tau)) \cos n\theta \\
 & + \{RCAn(a \sin n\phi + b \sin n\tau) \\
 & + RCBn(1 + a \cos n\phi + b \cos n\tau)\} \sin n\theta] \quad (14)
 \end{aligned}$$

여기서 $a \sin \phi + b \sin \tau = 0$

$$1 + a \cos \phi + b \cos \tau = 0 \quad (15)$$

를 만족하는 a, b 값을 구하고 이를 식(14)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned}
 S(\theta) = \sum_{n=2}^{N/2} [(RCAn \alpha n - RCBn \beta n) \cos n\theta \\
 + (RCAn \beta n + RCBn \alpha n) \sin n\theta] \quad (16)
 \end{aligned}$$

으로 된다. 여기서

$$\begin{aligned}
 \alpha n &= 1 + a \cos n\phi + b \cos n\tau \\
 \beta n &= a \sin n\phi + b \sin n\tau \quad (17)
 \end{aligned}$$

이다. 실제 측정으로 부터 얻어지는 식 (14)의 $S(\theta)$ 형태를 푸리에 변환 하면

$$S(\theta) = \sum_{n=1}^{N/2} (Fn \cos n\theta + Gn \sin n\theta) \quad (18)$$

으로 얻어지므로 식 (16)과 식 (18)로 부터 $RCAn$ 과 $RCBn$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 RCAn &= (Fn \alpha n + Gn \beta n) / (\alpha n + \beta n) \\
 RCBn &= (Gn \alpha n - Fn \beta n) / (\alpha n + \beta n) \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서 구한 $RCAn, RCBn$ 을 이용하여 마스터볼의 진구도 오차를 구하고이 결과를 식 (6) (7) (8)에 대입하여 스핀들 회전오차를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X(\theta) &= S1(\theta) - RC(\theta) \\
 Y(\theta) &= [S2(\theta) - RC(\theta - \phi) \\
 & - X(\theta) \cos \phi] / \sin \theta \quad (20)
 \end{aligned}$$

2.3 행렬식 형태의 방법과 축적상수를 이용하는 방법의 분석

이상의 두가지 스핀들 회전오차 분리방법에 대해 실질적인 디지털 측정 시스템의 인프로세스 응용 관점에서의 효율을 비교하였다. 이들 비교는 수식의 계산량 및 변위계의 각도 선정조건 등의 관점에서 비교 검토 하였으며 그 결과는 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 인프로세스 측정 관점에서 볼때 축적 상수의 방법으로 해를 구하는 것이 계산 시간 및 측정 시스템의 설계면에서 유리함을 알 수 있다.

Table 1 Matrix method vs scale factor method

Method	Matrix method	Scale factor method
Comparison		
FFT		
Computational time	4.5sec	1.5sec
Master ball coefficients computational time	3.0sec	2.0sec
Inverse transformation computational time	1.5sec	1.5sec
Total computational time (IBM AT, 10MHz)	9.0sec	4.5sec
Measuring angles	constrained	not constrained
First harmonic (n=1) component	not separated	not separated

*Computational times are based on the 64 samplings per revolution

3. 측정 시스템의 설계

2장에서 언급한 측정원리를 적용하여 마스터볼의 진구도 오차와 스핀들 회전 오차를 측정할 수 있는 측정 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 측정 시스템은 비접촉식 변위계, 샘플/홀더(sample and holder) 및 A/D 변환기로 이루어지는 하드웨어와 이를 구동하는 소프트웨어로 구분된다. 비접촉식 변위계는 와류식(eddy current type)으로 응답 주파수가 10kHz이고 민감도는 8mV/μm인데 3개의 변위계에서 각각 측정되는 신호를 동시에 샘플링 하기 위해 각 변위계는 각각의 샘플/홀더를 가지고 있다. 이때 샘플링 시작신호는 스핀들의 1회전당 256개 펄스를 발생하는 광학 인코더를 이용하여, 스핀들의 회전과 동기시켜 얻는다. 샘플링된 애널

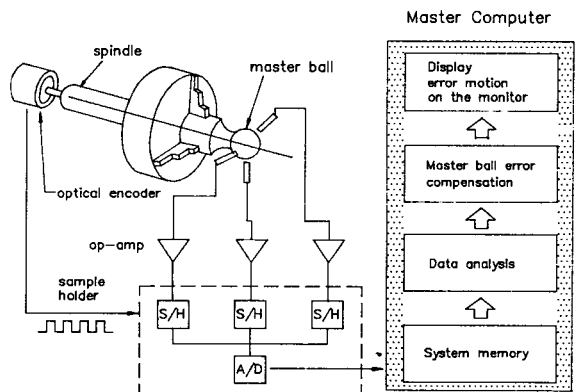


Fig. 2 Schematic diagram of a measurement system

Table 2 Result of system calibration

	Sensitivity	Resolution	Maximum error	Full scale error
Sensor-A	-1.7727	5 (2.8 μ m)	12(6.77 μ m)	0.68(%)
Sensor-B	-1.7835	4 (2.2 μ m)	12(6.73 μ m)	0.67(%)
Sensor-C	-1.7687	4 (2.3 μ m)	11(6.22 μ m)	0.62(%)

로그 형태의 측정신호는 12 bit A/D변환기(신호변환 시간 : 1.5 μ sec)를 통해 디지털 형태로 변환되어 어셈블리어(assembly language)에 의해 컴퓨터 메모리에 수록된다. 소프트웨어는 컴퓨터에 수록된 측정치를 데이터 처리하여 각 회전오차를 종류별로 구하는 주 프로그램과 이를 모니터상에 도시하는 그래픽 프로그램으로 구성 되어있다. 측정 가능최고 회전수를 높이기 위해 저속과 고속에서 1회전당 샘플링수를 다르게 할 수 있도록 프로그래머블 카운터(programmable counter)를 사용 하였으며, 이때 측정 가능 최고 회전수는 1회전당 128번 샘플링 할 경우 8000rpm이다. 측정 시스템의 분해능은 입력 전압 범위가 20V인 12bit A/D 변환기를 사용하므로 $20V/4096=4.88mV$ 이고 이는 변위계 실제 측정치로 0.61 μ m에 해당한다. 그러나 실제 각

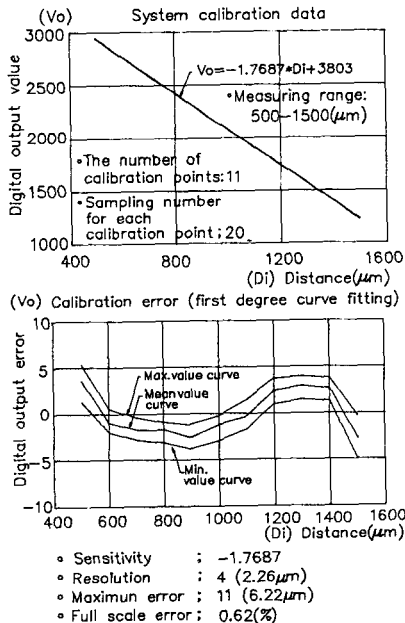


Fig. 3 Calibration data(Sensor-C and A/D converter)

변위계의 특성이 조금씩 차이가 있기 때문에 각각 실험 보정하여 이 결과를 측정에 적용하였다. 이때 입력은 변위계와 마스터볼간의 변위이며 출력은 A/D 변환된 디지털값으로 실험 보정하여 1차식으로 곡선 맞춤한 결과는 Table 2 및 Fig. 3과 같다.

4. 회전오차 측정 및 고찰

4.1 컴퓨터 시뮬레이션

실제 스핀들 회전오차 측정에 앞서 디지털 측정 원리의 타당성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시 하였다. 가상한 마스터볼의 진구도오차와 스핀들 회전오차는 랜덤 성분으로 생성하였고, 변위계 설치각도는 식(12) A행렬의 행렬식이 "0"이 되지 않는 ϕ 와 τ 을 선정하였다. 가상한 마스터볼과 스핀들 회전오차로 변위계의 측정치를 얻었으며 이 값으로 식(14)의 $S(\theta)$ 을 계산하고 식(19)을 통해 마스터볼에 대한 푸리에급수의 여현, 정현 계수를 구하였다. 이 계수를 역변환하여 마스터볼의 진구도오차를 계산하고 이 결과를 식(20)에 대입하여 스핀들 회전오차를 구하였다. 계산된 진구도오차와 스핀들 회전오차를 가상한 오차들과 비교한 결과 Fig. 4와 같이 조파차수 $n=1$ 성분을 제외한

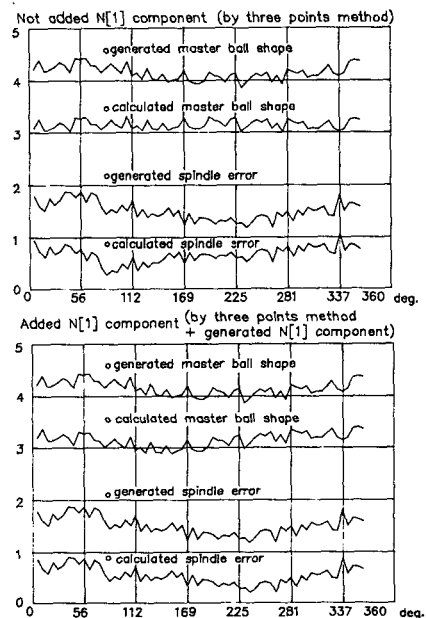


Fig. 4 Plot of generated and calculated master ball and spindle error

나머지 성분은 잘 일치하였다. 다음은 변위계의 설치각도가 측정에 미치는 영향을 알아보기 위해 식 (12) A행렬의 행렬식이 "0"이 되지 않는 또다른 ϕ 와 τ 각도들을 선정하여 시뮬레이션을 실시한 결과 처음에 계산하여 얻은 결과와 일치하였다. 이로부터 변위계의 설치 각도는 측정결과의 무관함을 알 수 있었다.

4.2 회전오차 측정 실험 결과 및 검토

본 연구에서 설계한 제작한 측정 시스템을 이용하여 실험용으로 제작한 스피들의 회전 오차를 Fig. 5와 같이 측정하였다. 이때 사용한 마스터볼의 직경은 30mm, 32mm이며 스피들 회전 속도, 변위계의 설치 각도, 한바퀴당 샘플링 수를 변화시키면서 측정한 결과는 Table 3, Table 4, Table 5와 같다.

Fig.6, Fig. 7은 스피들 평균 회전오차와 마스터볼의 진구도오차를 각 회전수에 따라 도시한 것으로 스피들 회전수와 1회전당 샘플링수 및 변위계의 각도를 변경시키면서 측정한 경우 측정치가 잘 일치

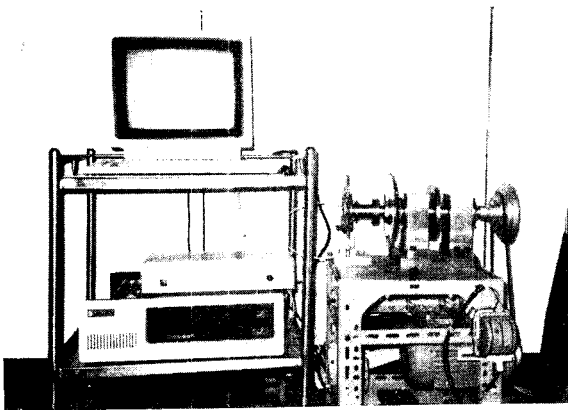


Fig. 5 Picture of digital measurement system setup

Table 3 Measuring result of rotational spindle error ($\phi=90, \tau=217$) Unit : μm

R P M		324		512		840	
Sampling no.		64	128	64	128	64	128
Master ball radius: 32m	Master ball		6.2	6.2	6.1	5.9	
	Total error		33.2	33.9	33.2	33.9	
	Average error		30.0	31.3	31.2	30.5	
	Asynchr error		2.6	1.6	3.7	1.1	
	Outer error		29.8	31.4	31.6	30.9	
	Inner error		31.3	31.4	31.6	31.9	

Table 4 Measuring result of rotational spindle error ($\phi=90, \tau=217$) Unit : μm

R P M		324		512		840	
Sampling no.		64	128	64	128	64	128
Master ball radius: 30mm	Master ball	24.1	24.2	22.4	23.5	23.2	23.4
	Total error	34.4	34.7	34.5	34.9	34.4	35.0
	Average error	31.8	32.0	31.0	32.9	32.8	31.7
	Asynchr error	1.7	1.8	5.2	5.6	3.3	5.2
	Outer error	31.9	32.6	31.0	33.9	31.4	33.4
	Inner error	31.8	33.7	29.7	31.9	31.4	32.1

Table 5 Measuring result of rotational spindle error ($\phi=90, \tau=145$) Unit : μm

R P M		324		512		840	
Sampling no.		64	128	64	128	64	128
Master ball radius: 30mm	Master ball	23.3	24.0	24.5	23.1	22.7	24.1
	Total error	32.4	32.6	33.2	31.4	34.4	31.4
	Average error	30.9	29.8	30.3	28.6	30.6	29.6
	Asynchr error	2.2	2.8	3.1	3.3	9.0	5.2
	Outer error	30.2	28.9	30.4	28.2	32.4	30.92
	Inner error	30.6	28.6	31.6	29.5	31.2	29.5

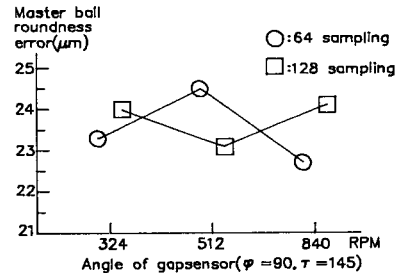
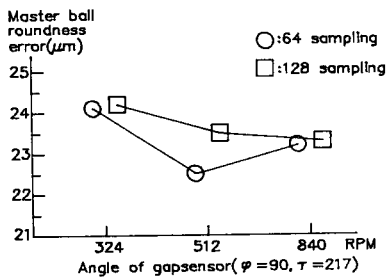


Fig. 6 Plot of master ball roundness error

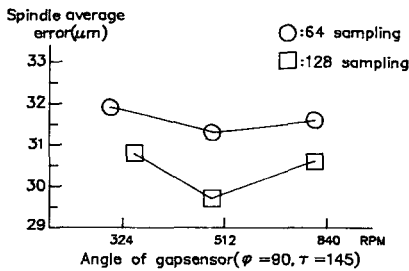
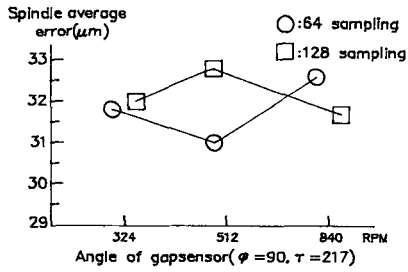


Fig. 7 Plot of spindle average error

◦ Sensor angle ; $\phi=90, \tau=145$ ◦ The number of measuring revol. ; 5
 ◦ RPM : 512 ◦ The sampling number ◦ 5 $\mu\text{m}/\text{div}$
 ◦ Master ball radius ; 30mm for each revol. ; 64 ◦ Unit ; μm

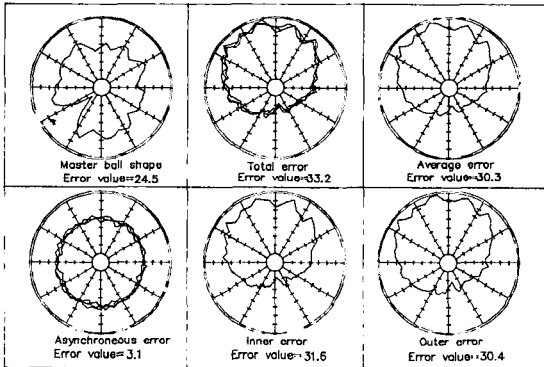


Fig. 8 Measuring results of experimental spindle at 512 RPM

함을 볼 수 있다. 그러나 그림에서와 같이 측정치 중 일부가 약간씩 벗어남을 볼 수 있는데 이에 대한 이유로는 조화차수 $n=1$ 성분을 고려하지 않으므로 인해 생기는 영향, 변위계의 분해능 및 노이즈의 영향으로 생각된다. 또한 측정 원리는 측정값을 점(point) 측정치를 적용하였으나 본 측정 시스템의 측정값은 측정 부위의 면적에 관계하는 와류식 변위계(변위지름 : $5\mu\text{m}$)이므로 이 역시 측정에 영향을 미친 것으로 생각된다. Fig. 8은 본 측정 시스템의 소프트웨어를 통해 측정치로부터 스핀들의 각

회전오차를 종류별로 도시한 것으로 본 측정시스템은 측정치와 함께 실제 마스터볼의 진구도 형상과 회전시 스핀들 떨림 형상을 직접 육안으로 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 지금까지 종래의 회전정도 측정법인 오실로스코프를 이용한 애널로그 측정방법의 문제를 보완하여, 마스터볼의 진구도 오차와 스핀들 회전오차를 분리 측정하기 위해 디지털 측정이론을 도입하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 이론의 타당성을 입증하였다. 광학 인코더, 비접촉 변위계, A/D 변환기 및 마이크로 컴퓨터를 이용하여 디지털 측정 시스템의 측정 장치를 완성하였고 측정조건을 변화시면서 마스터볼의 진구도오차와 스핀들 회전오차를 분리 측정하였다. 지금까지 연구 결과를 종합해 보면 조화차수 $n=1$ 성분을 구할 수 있는 방법을 검토하여 측정 이론을 보완하고 이 이론을 실현할 수 있는 정밀한 디지털 측정시스템을 구성한다면, 하나의 측정 시스템으로 가공중의 스핀들 회전오차와 공작물의 진원도를 동시에 인프로세스(in-process) 측정할 수 있고 이 측정치로 가공제어(work control)를 원하는 공작물의 형상을 얻을 수 있을 것으로 결론지어진다. 또한 실험실에서 사용하고 있는 고가의 정밀한 측정 시스템과 성능이 거의 비슷하면서도 값싼 측정기를 작업 현장에서 직접적으로 적용할 수 있으므로 현장 작업의 정밀도 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Schlesinger, G., 1966, "Testing Machine Tools", Machinery Polishing Co.
- (2) Trusty, J., 1967, "System and Methods of Testing Machine Tools", Microtechnic, Vol. 13, pp. 162~173.
- (3) James, B. and Rishard C., 1967, "Spindle Accuracy", American Machinist, December 4, pp. 149~165.
- (4) Bryan, J.B. and Vanherc, P., 1975, "Unification of Terminology Concerning the Error of Axis of Rotation.", CIRP Annals, Vol. 24/2, pp. 555~562.
- (5) Donaldson, R., 1972, "A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error", CIPR Annals, Vol.21/1, pp. 125~126.

- (6) Whitehouse, D.J., 1976, "Some Theoretical Aspects of Error Separation Techniques in Surface Metrology.", *Journal of Physics: Scientific Instruments*, Vol.9, pp. 531~536.
- (7) Shiegeo, O., 1974, "On a new Method of Roundness Measurement based on the Three Point Method", *Proc. of the ICPE, TOKYO*, pp. 457~462.
- (8) Unification Document ME, 1976, "Axes of Rotation." *CIRP Annels*, Vol. 25/2.
- (9) 한응교, 최만수, 1987, "접촉식 변위 검출제를 이용한 3점법 진원도 측정에 관한 연구", *한국정밀공학 회지*, 제4권, 제2호, pp. 47~55.
- (10) 박윤창, 1988, "스핀들 회전정도 측정에 관한 연구", *한국과학기술원 생산공학과 석사학위 논문*.
- (11) 공인복, 1989, "회전정밀도 측정의 디지털 방법에 관한 연구", *한국과학기술원 생산공학과 석사학위 논문*.