

(論 文)

진원도 측정기의 오차특성에 관한 연구

한 응 교* · 노 병 옥** · 허 민 석**

(1989년 3월 6일 접수)

An Analysis of Performance Error of High Precision Measuring Instrument

Eung Gyo Han, Byung Ok Rho and Min Suk Her

Key Words: Roundness Error(회전 오차), The Error of the Performance(형상 오차) Roundness Measurement(진원도 측정), Standard Specimens(표준 시험편) Air Bearing(공기 베어링)

Abstract

A phase evil method and spectrum analysis were instrument error which is originated from measurement system and the form error of standard specimens. An instrument with a rotating table supported by an air bearing is calibrated using standard specimens. The phase of standard specimens was measured 12 times on the rotating table with rotating 30 in turn and its measurement magnification was set by 100000 times. As a result of data analysis of all the observations, read out at each of 144 orientations(per 2.5) from recorded datafiles, the error of the performance of the instrument and those of the standard specimens are evaluated and a systematic deviation of the instrument is determined. In the particular instrument used in the present experiment, the deviation of the instrument is determined with the accuracy of 15 nm and those of standard specimens with the accuracy of 23, 13 nm, respectively. The reproducibility of the instrument is investigated, too. If the instrument is calibrated by using the above standard specimens, then the accuracy of the measurement of roundness error can be improved to about 15 nm.

기 호 설 명

a, b : 최소자승중심원의 직각좌표

a_i, b_i, c_i, d_i : 후리에급수의 상수

$e(\theta)$: 진원도 신호

$F(\theta)$: 시편의 형상오차

$\hat{F}(\theta)$: 형상오차의 값

$G(\theta)$: 측정기의 회전오차

$\hat{G}(\theta)$: 측정기 회전오차의 추정값

$H(\theta, \phi)$: 기록된 진원도신호 (θ, ϕ)의 후리에급수

N : 후리에급수의 극좌표

P_1, P_2, \dots, P_n : 진원도신호의 극좌표

R : 최소자승 중심원의 반경

ΔR : 진원도

X_1, X_2, \dots, X_n } : 진원도신호의 직각좌표
 Y_1, Y_2, \dots, Y_n }

ϕ : 회전테이블의 위상각

θ : 시편의 회전각

* 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계과

** 정회원, 한양대학교 대학원

1. 서 론

공업계의 발전과 더불어 정도높은 기계부품의 필요성이 높아지고 있는 실정이다.

기계의 운동에 있어서는 회전운동이 대표적인 것 중의 하나이며 따라서 기계부품의 형상중에는 원형이 많게 된다.

이러한 회전운동을 하는 기계부품에 발생하는 회전운동의 오차는 회전체의 진원도에 원인이 있으며, 이 진원도가 나뉠 경우 진동과 소음 그리고 마멸이 발생하게 된다.

근년 진원도의 중요성이 한층 부각되어 축의 회전정도에 대한 연구^(1,2)와 함께 진원도에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다.

진원도를 정확히 판단하기 위해서는 정도높은 측정기 뿐만 아니라 측정방법 또한 중요한 것이다.

측정방법으로는 직경법, 반경법, 3점법⁽³⁻⁶⁾ 등이 있으며 이들 중 종래에는 측정이 간편한 직경법과 V블록 3점법이 많이 이용되어 왔다.

그러나 이 방법은 측정조건과 피측정물의 형태에 따라 진원도를 잘못 측정하는 경우가 있었으며 현재에는 반경법의 취급상 난점을 많이 보완한 새로운 측정기가 보편화 되고 있다.

이러한 반경법을 이용한 측정기도 고정도화 함에 따라 편심에 의한 영향과 회전정도를 무시할 수 없

으며 이를 보정 또는 제거해야 하는 어려움이 뒤따르게 되었다.

본 연구에서는 반경법 진원도 측정기의 회전정도와 편심에 의한 영향을 제거하여 시험편의 형상오차와 측정기 자체의 오차특성을 분리함으로써 진원도 측정의 정도를 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 검토하였다. 진원도의 표시법으로는 최근 최소영역법에 의해 규정되는 경우가 많으나 이는 일반적으로 많은 연산시간을 요구하므로 비경제적인 면이 있다.

반면에 최소자승중심법(least squares center method : LSC)⁽⁷⁾은 비교적 간단한 계산으로 진원도 평가가 가능하므로 본 논문에서는 최소자승중심법에 의하여 진원도 평가를 하였다.

2. 이론해석

2.1 최소자승중심법(LSC)에 의한 진원도 평가법

최소자승중심법⁽⁷⁾은 편심을 제거하기 위해 Fig. 1 처럼 원형 기록지의 중심을 원점으로 하고, 도형을 N 등분하여 각각의 교점 P_1, P_2, \dots, P_n 의 직각 좌표상의 값을 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ 이라고 하면, 구하는 중심 $O(LSC)$ 의 XY 좌표값 a, b 및 평균반경 R 은 다음과 같이 주어진다.

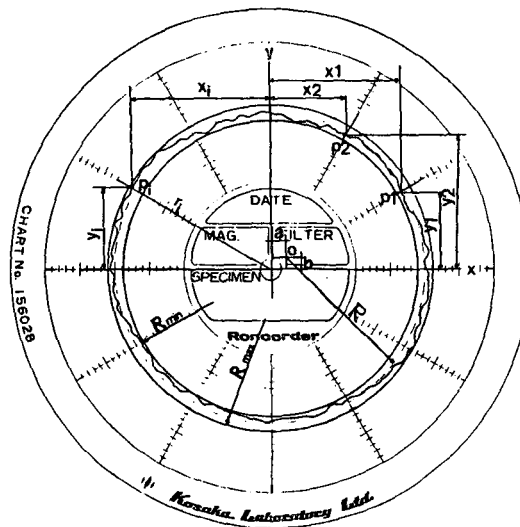


Fig. 1 Least squares center method

$$a = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum y_i}{n} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{n} \quad (3)$$

a, b 를 구하면, 중심원 O 가 결정되므로 O 를 중심으로 다시 수정 계산하여 새로 그려진 도형에 외접하는 원과 내접하는 원을 그릴 수 있다. 이 동심원의 반경차($R_{max} - R_{min}$)를 배율로 나누면 최소자승 중심법에 의한 진원도를 얻는다.

2.2 진원도 오차특성의 함수화

진원도 측정기로부터 기록되어지는 측정치는 시험편의 형상오차 외에 시험편의 설정위치 및 방위, 측정기의 회전 오차특성으로부터 생기는 계통오차(systematic error), 측정기의 불안정성에 의한 우연오차 등이 포함된다.

검출기와 시험편의 상대적인 회전에 의해 얻어지는 신호는 1회전당 2π 를 주기로 하는 회전각 θ 의 함수 $f(\theta)$ 이다. 이것을 후리에 급수로 전개하면

$$f(\theta) = a_0 + (a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta) + \sum_{i=2}^{\infty} (a_i \cos i\theta + b_i \sin i\theta) \quad (4)$$

이다.

여기서, a_0 는 시험편의 원주에 대한 변위계의 평균치인 반경성분이고, 제 2항은 회전 중심과 측정된 원의 중심의 편심성분이며 제 3항은 측정된 진원도 신호성분이다. 식 (4)의 후리에 계수 a_0, a_1, b_1 은 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos \theta d\theta \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin \theta d\theta \quad (7)$$

따라서, 검출기로부터 얻어진 $f(\theta)$ 를 1회전 만큼 적분하여 식 (5), (6), (7)을 이용하면 반경 성분 및 편심 성분을 알 수 있으므로 진원도 신호 $e(\theta)$ 는

$$e(\theta) = f(\theta) - (a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta) \quad (8)$$

으로 된다.

따라서, 기록도형의 진원도 ΔR 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta R = |e(\theta)_{\max} - e(\theta)_{\min}| \quad (9)$$

여기서, 식 (1), (2), (3)은 식 (6), (7), (5)과

같으므로 최소자승 중심법에 의한 진원도는 식 (9)와 같이 후리에 급수를 이용해도 얻을 수 있음을 알 수 있다.

시험편의 형상오차를 $F(\theta)$ 라고 하면 식 (4)의 a_0, a_1, b_1 을 소거한 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F(\theta) = \sum_{i=2}^{\infty} a_i \cos i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} b_i \sin i\theta \quad (10)$$

또, 측정기의 회전방위에 대응한 계통오차가 있는 경우는 다음과 같다. 식 (10)은 측정기에 오차가 없고 시험편의 형상만이 출력으로 표시될 때의 식이지만, 측정기에 반경방향의 회전 흔들림이 있고 일정방향에 일정량만큼 변화할 때 이것을 측정기의 오차특성 $G(\theta)$ 로 하면 식 (11)과 같은 형식으로 나타낼 수 있다.

$$G(\theta) = \sum_{i=2}^{\infty} c_i \cos i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} d_i \sin i\theta \quad (11)$$

여기서, 식 (10)으로 표현되는 형상의 시험편을 식 (11)의 오차 특성을 갖는 측정기로 측정할 때, 기준방위에 대하여 ϕ 의 각도로 설치하여서 얻어지는 도형을 $H(\theta, \phi)$ 라고 하면 $H(\theta, \phi)$ 는 형상오차 $F(\theta + \phi)$ 와 측정기의 오차특성 $G(\theta)$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

즉, 기준방위에 대해 ϕ 의 각도로 시험편을 설치하였을 때의 형상오차 $F(\theta + \phi)$ 는 식 (12)와 같다.

$$F(\theta + \phi) = \sum_{i=2}^{\infty} a_i \cos i(\theta + \phi) + \sum_{i=2}^{\infty} b_i \sin i(\theta + \phi) \quad (12)$$

따라서, $H(\theta, \phi)$ 는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(\theta, \phi) = G(\theta) + F(\theta + \phi) = \sum_{i=2}^{\infty} \{a_i \cos i(\theta + \phi) + c_i \cos i\theta\} + \sum_{i=2}^{\infty} \{b_i \sin i(\theta + \phi) + d_i \sin i\theta\} \quad (11)$$

2.3 시험편의 형상오차와 측정기의 오차특성의 분리

진원도 측정기의 일반적인 정도 검사법은 형상오차가 작은 시험편을 표준시험편으로 하여 측정기의 검사를 행하며, 통상의 측정에서는 측정기의 오차는 무시할 수 있다.

그러나, 표준시험편의 정도 검사와 그것과 동등

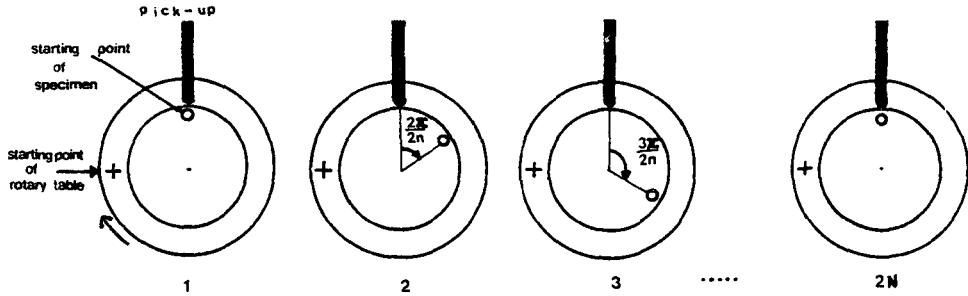


Fig. 2 A Phase different method

의 고정도로 형상을 구할 필요가 있는 시험편의 정도 측정에서는 측정기 자체의 오차가 문제가 된다.

만약, 표준시험편의 형상오차를 알거나 측정기의 오차특성을 안다면 식 (13)의 a_i, b_i 또는 c_i, d_i 의 어느 것이 既知의 계수가 되어 보정을 할 수 있다.

그러나, 이 兩者가 어느 것도 未知의 경우에는 실험에 의하여 $F(\theta)$ 와 $G(\theta)$ 를 분리하지 않으면 고정도의 측정을 기대할 수 없다.

형상오차를 나타내는 식 (10)의 우변은 무한대까지의 항을 가지고 있지만, 제 n 차 調和次數 (Harmonic order)까지 나타낸다면, 등간격으로 $2(n+1)$ 점 이상 샘플링한 데이터로부터 식 (10)의 모든 항의 계수 a_i, b_i 를 구할 수 있으므로 시험편의 형상오차를 완전히 표현할 수 있다.

이것은 식 (11)의 측정기의 방위 오차특성에 대해서도 같이 적용된다.

또, $J \leq n, m > 2n$ 의 조건에서 ϕ 를 $\frac{2\pi}{m}$ 씩 등간격으로 취하면

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^m a_j \cos j(\theta + \phi_k) &= 0 \\ \sum_{j=1}^m b_j \sin j(\theta + \phi_k) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

으로 되어 식 (14)는 어떤 j, θ 에 대해서도 성립한다.

따라서, 시험편의 형상을 $n-1$ 차 調和次數까지의 항으로 표시하고 전 원주를 $2n$ 등분 하여서 ϕ 를 $\frac{2\pi}{2n}$ 만큼씩 회전시켜 $2n$ 개의 진원도 도형을 구한다(Fig. 2)⁽¹¹⁾.

각 진원도 도형을 후리에 급수 전개하고 반경성분(a_0)과 편심성분을 소거한 다음에 측정기의 방위와 일치하도록 각 항을 더하면, 식 (14)의 관계에 의하여 시험편의 형상성분은 소거되어서 식 (11)의 $G(\theta)$ 를 $2n$ 배 한 값이 얻어진다.

따라서, $G(\theta)$ 의 추정치(estimate value) $\hat{G}(\theta)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{G}(\theta) &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} \left[\sum_{i=2}^{\infty} \{a_i \cos i(\theta + \phi_k) \right. \\ &\quad \left. + c_i \cos i\theta\} + \sum_{i=2}^{\infty} \{b_i \sin i(\theta + \phi_k) \right. \\ &\quad \left. + d_i \sin i\theta\} \right] \\ &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} H(\theta, \phi_k) \end{aligned} \quad (15)$$

같은 방법으로 $F(\theta)$ 의 추정치(Estimate value) $\hat{F}(\theta)$ 는 식 (16)으로 된다.

$$\begin{aligned} \hat{F}(\theta) &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} \left[\sum_{i=2}^{\infty} \{a_i \cos i(\theta + \phi_k) \right. \\ &\quad \left. + c_i \cos i(\theta + \phi_k)\} + \sum_{i=2}^{\infty} \{b_i \sin i(\theta + \phi_k) \right. \\ &\quad \left. + d_i \sin i(\theta + \phi_k)\} \right] \\ &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} H(\theta + \phi_k, \phi_k) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (4)에서 반경성분과 편심성분에는 측정기의 오차가 포함되지 않은 것으로 간주하여 실험을 하였다.

3. 실험

3.1 실험장치

실험장치는 Bronze係 燒結金屬의 多孔質 재료를 베어링 재료로 이용한 靜壓 공기베어링 (air bearing)⁽¹³⁾으로 지지된 반경법 진원도 측정기 EC-10H (Kosaka Laboratory, Ltd, Japan)를 사용하였다 (Fig. 3)

Fig. 4는 실험에 사용한 반경법 진원도 측정기의 Block diagram이며 Table. 1은 측정기의 제원을 표시한다.

실험에 사용한 시험편은 경질유리를 재료로한 半球에 금속 베이스를 부착한 진원도 표준편 SSR의

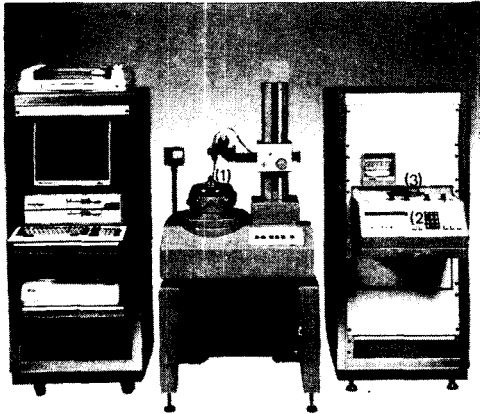


Fig. 3 Roundness measuring instrument(Roncorder EC-10H) (1) Measuring part (2) Calculating part (3) Recording part

2종류를 사용하였다.

3.2 실험방법

Fig. 1의 位相差法의 원리⁽¹⁰⁾에 의하여 변위계로부터의 출력을 검출한다.

검출기를 통과한 신호는 정밀한 표준시험편의 형상을 측정한 것이어서 신호전압은 미세하므로 이를 증폭할 필요가 있다.

신호의 증폭은 전치증폭기에서 주증폭기로 전송하기에 알맞도록 증폭한 다음 필터를 통과시킨 후, 이 신호에 대해서 10만배로 증폭하여 A/D변환기

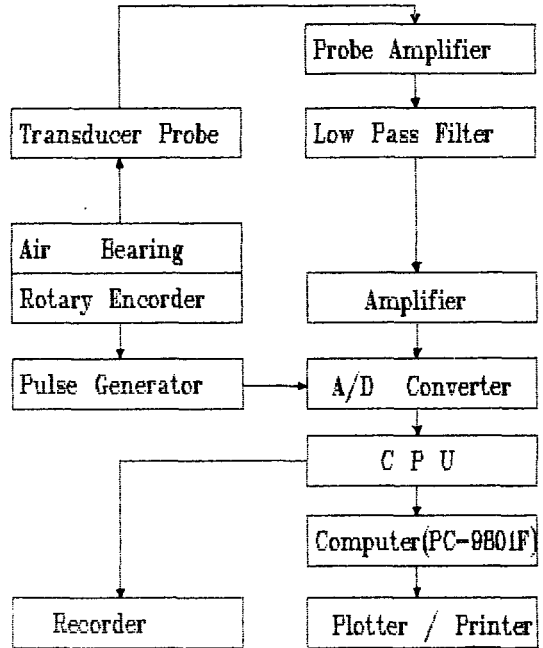


Fig. 4 Block diagram of measuring system

(분해능 : 8 bit, Sampling Time : 10n sec)를 통과하여 디지털화 되고 Rotary Encoder의 출력(2048 pulse/rev)도 A/D 변환기를 통과하여 디지털화 된다.

진원도 측정기에는 프로필의 차단주파수를 제한하기 위해서 필터가 내장되어 있는데 그 진폭전달 특성은 동일한 시정수를 갖는 두개의 독립된 C-R

Table 1 Specification of roundness instrument(EC-10H)

Item	Specification
1. Rotating speed	5 rpm
2. Centering range	Recording paper ± 75 (mm)
3. Measuring range	$\phi 2.5 \sim \phi 350$ (mm)
4. Maximum load	35(kg)
5. Measuring force	Max. 100(mN)
6. Magnification ratio	$\times 100000, \times 40000, \times 20000 \sim \times 200$
7. Filter	N500, N150, N50, N15, D500~D15
8. Stylus arm	Radius 0.8(mm)
9. Measuring height	Max. 350(mm)

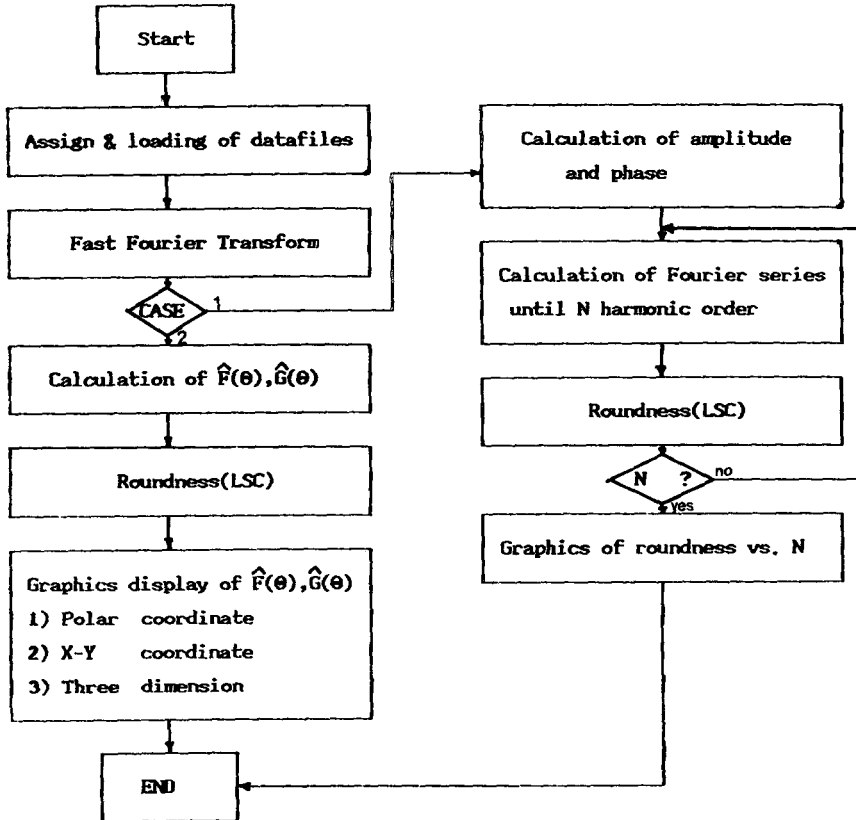


Fig. 5 Flow chart of data analysis

회로로 산출한 것과 같다.

본 실험에서 사용한 프로브는 측정력 100mN이 내 가변식이며 검출분해능은 0.5nm(단 앰프의 성능에 의함)의 것을 사용하였다.

진원도를 계산할 때 시험편의 진원도 추정은 조화차수 n 에 의해 구하여 진다. 여기서 n 이 ∞ 로 갈수록 올바른 진원도 값을 구할 수가 있으나 이것은 불가능하다.

그래서 진원도 값에 오차를 주지 않는 n 의 최소값을 알아보기 위한 측정으로 n 을 변수로 하여 진원도를 측정해 보았다⁽¹⁶⁾.

또, 진원도 측정기의 회전정도가 시험편의 진원도 측정에 미치는 영향을 알아보기 위하여 분리된 측정기의 오차의 스펙트럼과 시험편의 진원도의 스펙트럼을 구하여 비교하여 보았다.

Fig. 5는 측정기의 오차와 시험편의 형상오차를 구하기 위한 데이터 처리의 흐름도(flow chart)이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 조화차수(Harmonic Order) N 과 진원도
시험편의 형상오차와 진원도 측정기의 오차추정을 위하여 조화차수 N 을 결정하는 것은 중요한 문제가 된다.

진원도를 계산할 때 시험편의 진원도 추정은 조화성분 $\sum_{i=2}^N (a_i \cos i\theta + b_i \sin i\theta)$ 의 조화차수 N 에 의해 구해진다. N 가 ∞ 로 갈수록 정확한 진원도 값을 구할 수가 있으나 이것은 불가능 하므로 진원도 값에 오차를 주지 않는 N 의 최소값을 알아보기 위하여 N 을 변수로 하여 진원도를 추정해 본 결과 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

N 이 증가함에 따라 형상오차가 (+)증가하는 것은 항상 일정한 것이 아니며, 위상이 변하고 시

험편이 달라짐에 따라 달라지며 (-)감소도 하게 된다.

그림에서 알 수 있는 것처럼 N 을 60차수까지 고려하면 진원도값에 영향을 미치지 않으며, N 이 커짐에 따라 최소자승중심법(LSC)에 의한 진원도값이 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다.

실제로 차수를 60으로 할 때와 70으로 할 때 측정기의 회전오차 분리값의 차이는 전위상각에서 평균 $0.002\mu\text{m}$ 으로 나타났으며 이 값은 진원도 측정기의 분리된 회전오차값 $0.015\mu\text{m}$ 의 13%에 해당하게 된다.

그러나 차수를 200으로 하여 계산하면 회전오차의 분리값에 2%의 영향을 미치나 이렇게 하면 많은 시간이 요구될 뿐만 아니라 60 차수와 70차수

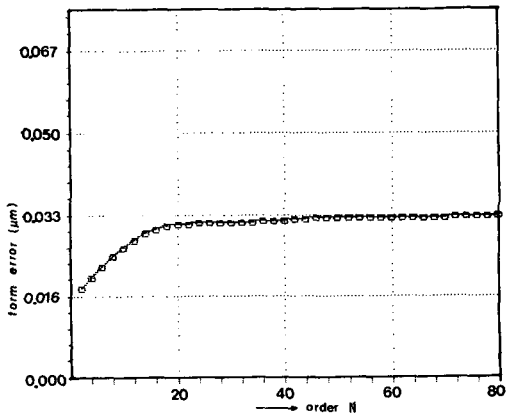
사이의 차 $0.002\mu\text{m}$ 보다 훨씬 작은값 즉 sub nano meter의 부분으로 들어가게 된다.

이 값은 실제로 진원도 측정기의 불균일한 성분들(지반의 진동, 측정실의 온도, 측정기 구동부분의 진동)에 의해서 생기는 값들보다 미세한 값이므로 고려할 가치가 적은 것으로 생각되어 본 연구에서는 조화차수를 60으로 하여 계산을 행하였다.

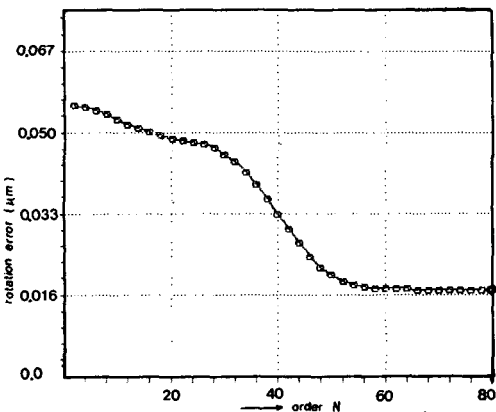
4.2 진원도 측정의 안정성

진원도 측정의 안정성을 확인하기 위하여 시험편(A,B)을 회전테이블 위에 설치하고, 각 방위에서 시험편의 진원도를 측정하였다.

Fig. 7은 각 방위에서 측정한 시험편의 진원도 데이터를 X축을 방위(ϕ), Y축을 각 방위에서 측

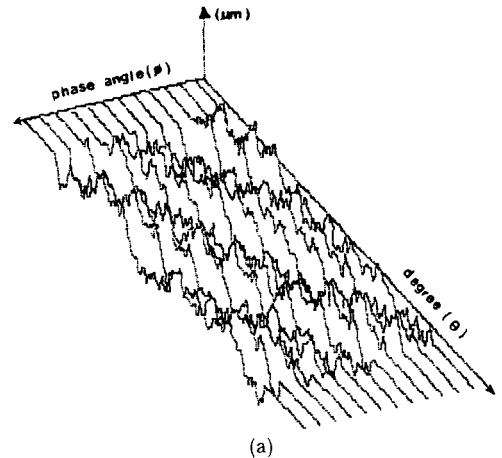


(a) Form error of the specimen.

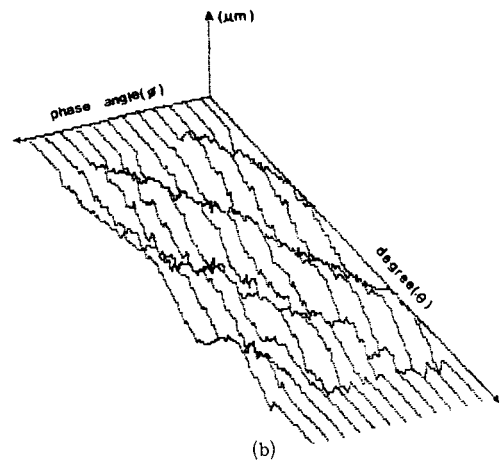


(b) Rotation error of the Instrument.

Fig. 6 Roundness vs. Harmonic order



(a)



(b)

Fig. 7 Three dimension graph of roundness signal in each phase angle

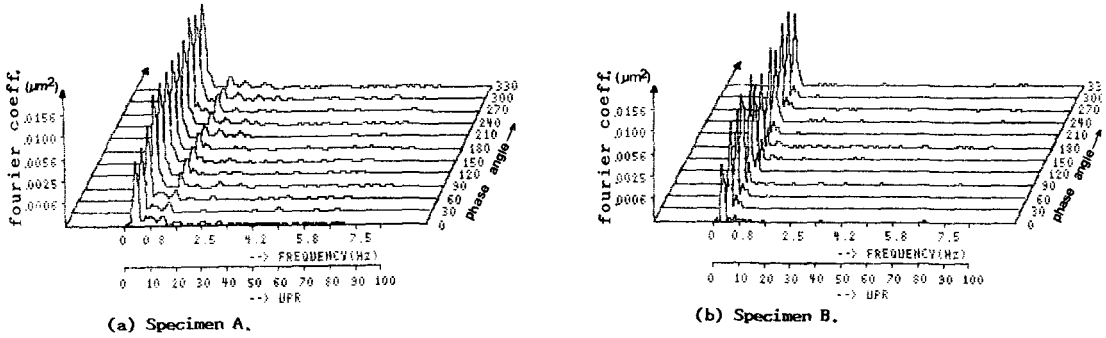
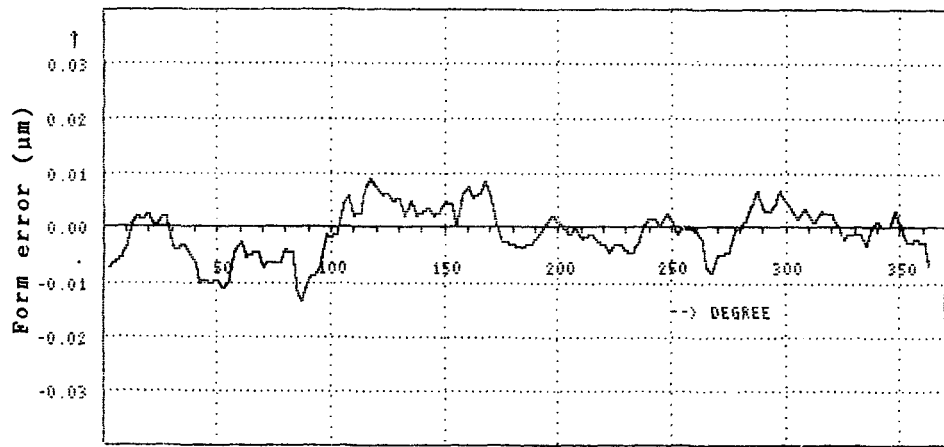
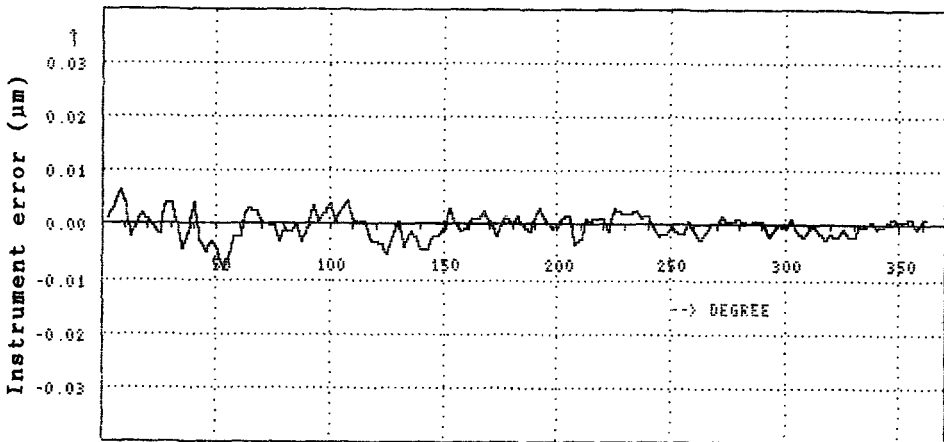


Fig. 8 Power spectrum of measured roundness signal in each phase angle



(a)



(b)

Fig. 9 Analyzed results($\hat{F}(\theta)$, $\hat{G}(\theta)$) of roundness signal

정한 진원도 신호의 회전각도 성분(θ), 그리고 Z 축을 진원소 신호의 진폭(μm)으로 하는 3차원 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 각 방위에서 측정된 진원도 신호는 각각 회전각도(θ) 만큼의 위상차이를 가지면서, 각각의 각도에서 진폭까지 잘 일치하고 있다.

또, Fig. 7 (a), (b)의 진원도 신호를 고속 푸리에 변환(fast fourier transform)하여 그 스펙트럼을 구한 결과 Fig. 8과 같은 그래프를 얻었다.

각 방위에서 푸리에 변환된 진원도 신호의 스펙트럼은 서로 같은 주파수 성분을 가지고 있으며, 그 진폭값은 다소의 차이는 있지만 전체적으로 아

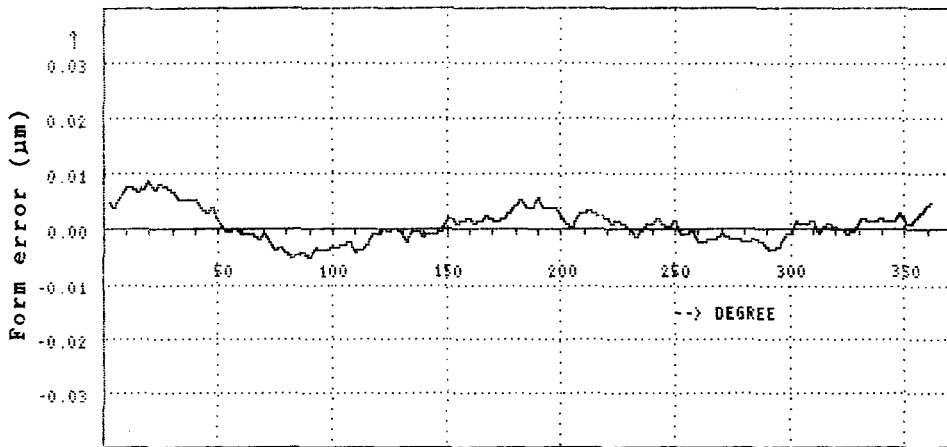
주 근사함을 알 수 있다.

따라서, 실험에 사용한 진원도 측정기는 진원도 측정의 재현성이 우수하며 안정되어 있다.

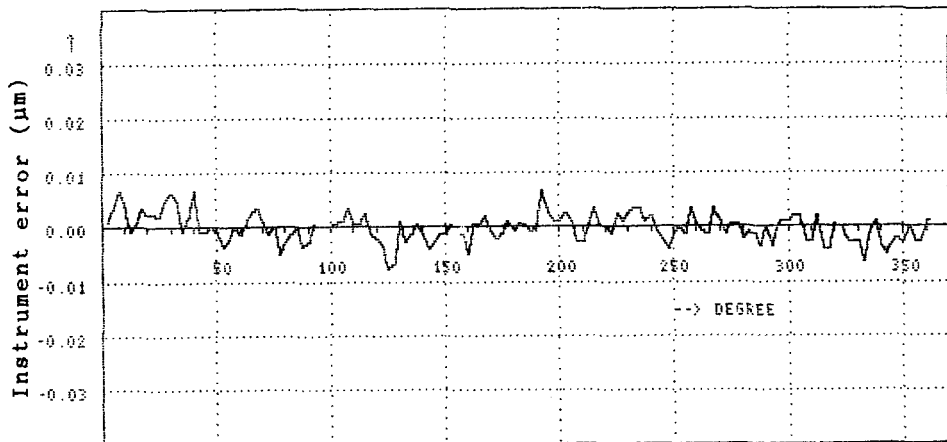
4.3 진원도 측정기의 회전오차와 시험편의 형상오차

2종류의 표준시험편을 사용하여 진원도를 측정하고, 이 데이터를 해석하여 진원도 측정기의 회전오차와 시험편의 형상오차를 추정한 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 9 (a)는 시험편 A의 형상오차와 추정치($\hat{F}(\theta)$)의 그래프이고, (b)는 진원도 측정기의 회전



(a)



(b)

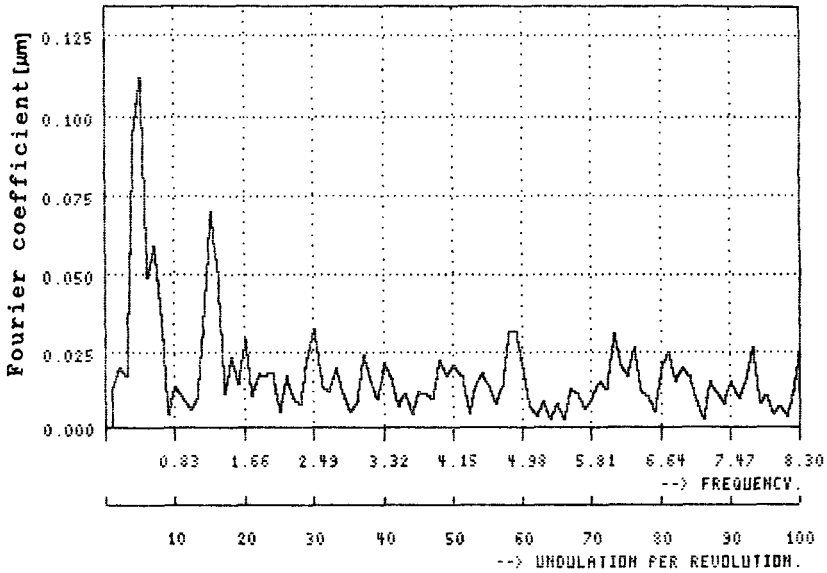
Fig. 10 Analyzed results($\hat{F}(\theta)$, $\hat{G}(\theta)$) of roundness signal

오차의 추정치($\hat{G}(\theta)$)의 그래프이다. Fig. 10 (a), (b)는 시험편 B에 대한 각각의 결과이다.

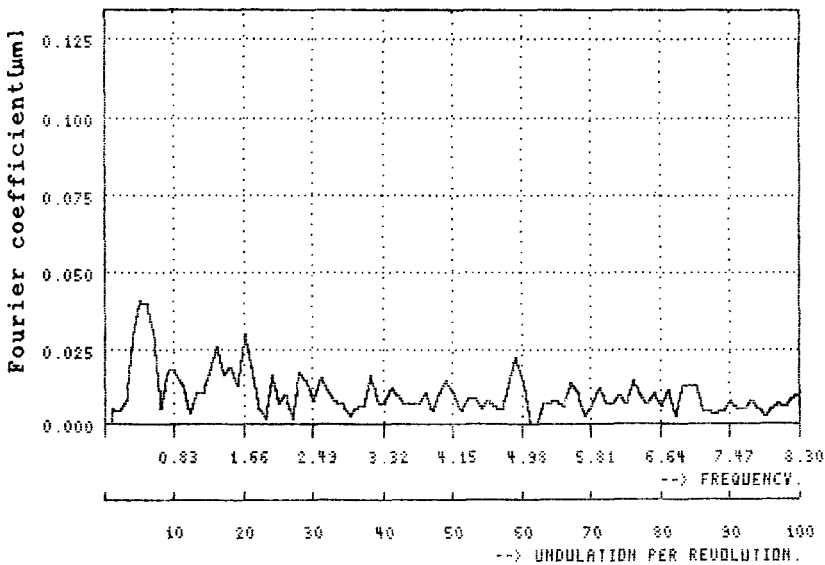
시험편 A의 형상오차의 추정치는 $0.023\mu\text{m}$, 진원도 측정기의 회전오차의 추정치는 $0.014\mu\text{m}$ 이며, 시험편 B의 경우는 각각 $0.013\mu\text{m}$, $0.015\mu\text{m}$ 으로 되었다.

2종류의 시험편에서 분리된 Fig. 9(b)와 Fig. 10 (b)의 측정기의 회전오차를 비교하여 보면 각각의 각도에서 그 진폭이 일치하고 있음을 알 수 있다.

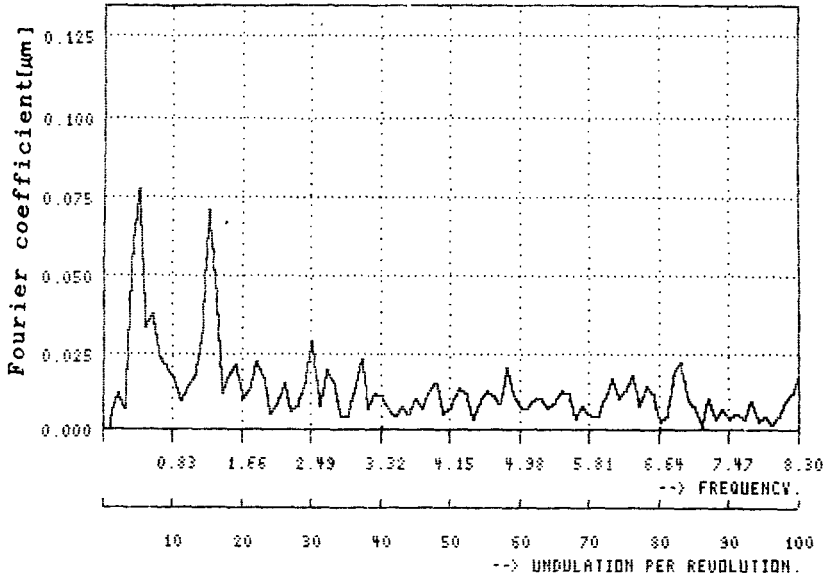
따라서, 본 실험에서 사용된 오차해석의 원리와 데이터 해석법이 진원도 측정기의 회전오차와 시험편의 형상오차를 고정밀도로 분리하였음을 알 수



(a)



(b)



(c)

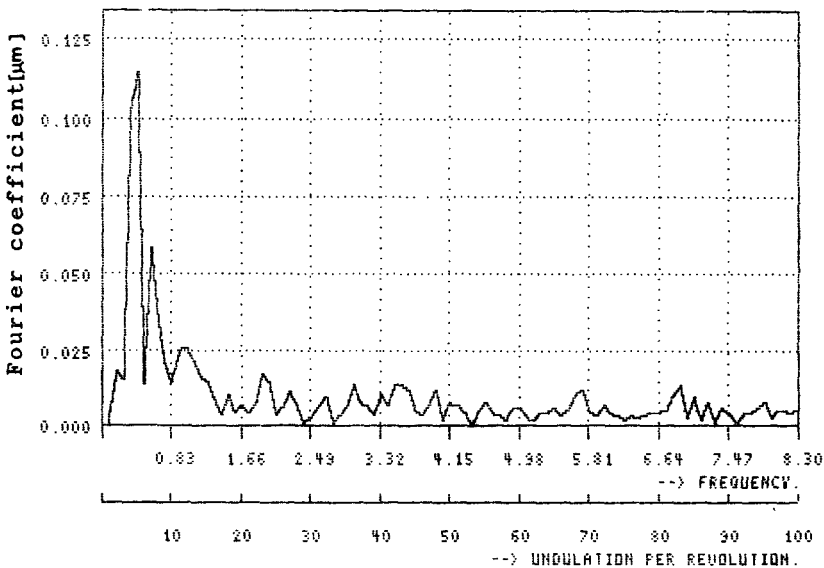
Fig. 11 Analyzed results of roundness signal(specimen A)

있다.

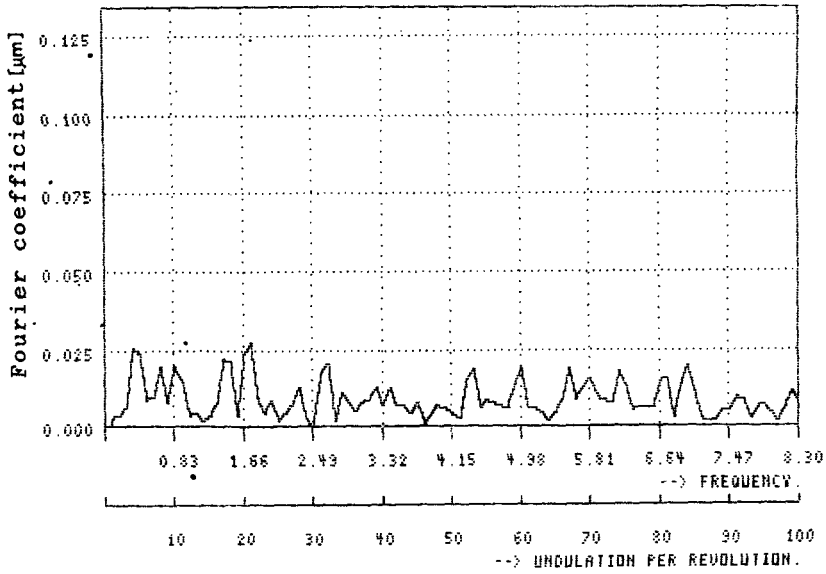
4.4 진원도 측정기의 회전오차가 시험편의
진원도 측정에 미치는 영향
앞절에서 구한 진원도 측정기의 회전오차와 시험

편의 형상오차, 그리고 각 위상에서 구한 진원도의
평균값을 고속 후리에 변환하여 각각의 스펙트럼을
구한 결과 Fig. 11, 12와 같이 나타났다.

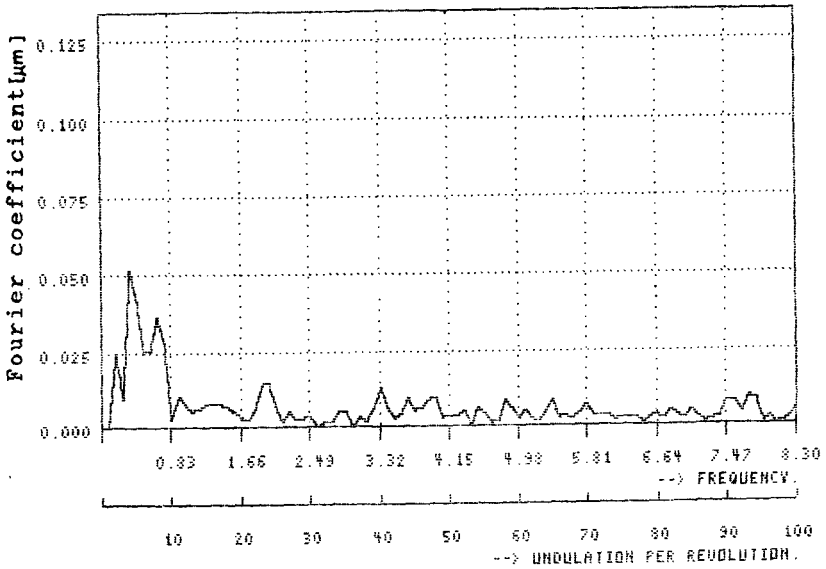
Fig. 11, 12를 비교하여 보면 진원도 신호의 변동
성분은, 형상오차의 각각의 변동성분을 그대로 반



(a)



(b)



(a)

Fig. 12 Analyzed results of roundness signal(specimen B)

영하면서, 측정기의 회전오차의 변동성분과 진폭의 차이는 있지만 그 변동성분들은 거의 일치하고 있다. 따라서, 고정밀도의 진원도 측정에 있어서는 진

원도 측정기의 회전오차가 시험편의 진원도 측정에 기여하는 정도는 4.3절의 결과에서도 확인할 수 있듯이 매우 높은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

반경법 진원도 측정기로 시험편의 진원도를 측정할 때, 얻어진 진원도 도형 속에 포함된 진원도 측정기의 회전오차 성분과 시험편의 형상오차 성분을 분리, 평가하는 방법에 대하여 검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 진원도 측정기에 회전오차가 있고 피측정물에 형상오차가 있을 때, 본 오차해석법을 검출된 진원도 신호로터 이 兩者를 高精度로 분리할 수 있음을 알았다.

(2) 진원도 측정기의 회전오차를 분리, 검정하여 진원도 측정의 정도를 약 $0.015\mu\text{m}$ 까지 개선할 수 있었다.

고정도의 진원도 측정에 있어서 진원도 측정기의 회전오차가 피측정물의 진원도 측정에 기여하는 정도는 매우 높은 비율을 차지하고 있으므로, 앞으로 진원도 측정기의 회전오차를 발생시키는 원인을 정확히 규명하여 보다 정확한 진원도 측정을 실현하여야 하겠다.

후 기

본 연구는 1987.7.1~8.31까지 일본 KOSAKA 연구소에서 실험을 하여 완성한 것입니다. 실험을 하게 배려하여 주신 KOSAKA 연구소의 味岡 사장님 또 실험을 도와주신 西山 본부장님, 宮本 차장님, 桜井 과장님께 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- (1) 한응교, 노병욱, 1987, "측침식 변위검출기를 이용한 3점법 진원도 측정에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 4 권, 제 2 호, pp. 47~55.
- (2) 三井公之, 1982, "精度診断記述の研究". 日本機械學會論文集(C編)第48卷, 第425号, p. 115~123.
- (3) 沢邊雅二外3名, 1980, "旋盤主軸回転誤差の工作物眞円度への寄與, 日本精密機械學會 第46卷, 第5号, pp. 576~583.
- (4) KS B0604, KS B0501.
- (5) ISO R1101.
- (6) JIS B0621.
- (7) 青木保雄, 大園成夫, 1966, "3点法眞円度測定法の展開", 日本精密機械, 第32卷, 第12号, pp. 831~836.
- (8) 한응교, 유승현, 1985, "眞円度平價法에 있어서 最小自乘法과 最小領域法의 比較", 韓國精密工學會誌, Vol. 2, No. 3, pp. 59~69.
- (9) 田中信章 外5名, 1986, "超精密回転軸の性能評價", 日本精密工學回春季大會學術講演會論文集, pp. 499~500.
- (10) 恒野義昭 外3名, "軸の回転精度に関する研究(第1報)—工具回転型の半徑方向回転精度の新しい測定法—", 日本精密機械, 第43卷, 第6号, pp. 76~81.
- (11) 田中信章 外3名, 1984, "高精度多孔質靜圧空氣軸受 スピンドルの性能", 日本精密機械學會春季大會學術講演會論文集, pp. 177~178.
- (12) 沢邊雅二(1979), "高精度回転軸の回転精度測定法とその問題点", 日本精密機械 第45卷, 第10号, pp. 79~84.
- (13) 中村哲夫, 1978, "測定器の誤差評價の方法", 日本精密機械, 第44卷, 第10号, pp. 47~53.
- (14) 中野幸久, 1932, 精密測定機術.
- (15) 小野道産, 1969, "眞円道の測定法とその表示", 機械と工具, 7, 36.

(1) 한응교, 노병욱, 1987, "측침식 변위검출기를 이용