

眞圓度 測定器의 誤差特性에 대한 解析

- 위상차법 -

An Analysis of Performance Error of Roundness Measuring Instrument
- by phase different method -

韓 應 教.* 許 玫 碩** 朴 翼 根**
E. K. Han, M. S. Her, I. G. Park

ABSTRACT

A phase different method to evaluate the instrument error of roundness measuring instrument and the form error of specimens for the calibration of the instrument is used. An instrument with a rotary table supported by an air bearing was calibrated by using the standard balls as a standard. The calibration was carried out repeatedly by setting the same ball in 12 phase angles(per 30°) on the table and by recording their roundness errors with a magnification of 100,000 times. As a result of data analysis of all the observations, readout at each of 144 orientations(per 2.5°) from recorded data file, the error of performance of the instrument and the specimens are separated.

In the particular instrument used in the present experiment, the error of the instrument was determined with the accuracy of 0.0164 (μm) and the form error of the specimens was determined with the accuracy of 0.0264, 0.0172 (μm), respectively.

If the instrument was calibrated by using the above specimens, then the accuracy of the measurement of roundness error can be improved to about 0.017 (μm).

NOMENCLATURE

a_i, b_i, c_i, d_i : Coefficient of fourier series.

$F(\theta)$: Form error of specimens.

$G(\theta)$: Instrument error.

$\hat{F}(\theta)$: Estimation value of form error of specimens.

$\hat{G}(\theta)$: Estimation value of instrument error.

$H(\theta, \phi)$: Fourier series of roundness error in (θ, ϕ) .

ϕ_k : Phase of k-th harmonic component in Fourier series.

n : Harmonic order of Fourier series.

$\varepsilon(\theta)$: Roundness signal.

ΔR : Roundness.

θ : Rotating angle of recorded round-

* 한양대학교 정밀기계공학과

** 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

ness figure

ϕ : Phase angle of specimen to starting point of rotary table.

1. 緒 論

眞圓度 測定器는 變位檢出器 또는 테이블을 회전하여 그 回轉軸으로부터 試驗片 표면까지의 거리변화를 回轉角에 對應하여 記錄한다. 이 도형이 眞圓으로부터의 差(眞圓度 誤差)를 正確하게 나타내능가를 判定하기 위하여 一般적으로 眞圓도가 좋은 標準試驗片을 利用한다. 이것은 眞圓인 標準試驗片에서 얻은 外觀上의 形狀誤差 成分이 測定器의 誤差라고 생각하는 檢査이다. 그러나 標準試驗片의 檢査와 같은 高精密度를 要求하는 경우는 이와 같은 方法으로 測定器를 檢査하는 것은 不可能하다.

따라서, 本 研究에서는 試驗片에 形狀誤差가 있고 測定器에도 회전부분의 方位에 따라서 誤差가 있을 때, 이 兩者를 분리하고 試驗片의 正確한 형상과 測定器의 誤差特性을 各 各 別개로 구하여 眞圓度 測定器의 測定 精密도를 向上시키는 方法에 대하여 檢討하였다.

2. 眞圓度 誤差의 解析法

2.1 眞圓度 誤差特性의 函數化

眞圓度 測定器에 의해 記錄되는 도형에는 試驗片의 形狀誤差外에 試驗片의 設定位置 및 方位, 주로 測定器의 回轉誤差特性으로부터 생기는 系統誤差(Systematic error)¹⁾ 및 測定器의 불안정성, 우연오차 등이 包含된다.

檢出器와 試驗片의 상대적인 回轉에 의해 얻어지는 信號는 1回轉, 2π 를 주기로 하는 回轉角 θ 의 함수 $f(\theta)$ 이다(Fig.1). 이것을 Fourier 級數로 전개하면 式 (1)과 같다.

$$f(\theta) = a_0 + (a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta) + \sum_{i=2}^{\infty} (a_i \cos i\theta + b_i \sin i\theta) \dots \dots \dots (1)$$

여기서, a_0 는 眞圓度 信號의 半徑에 관계하는 半徑成分이고, 제 2 항은 회전중심과 測定된

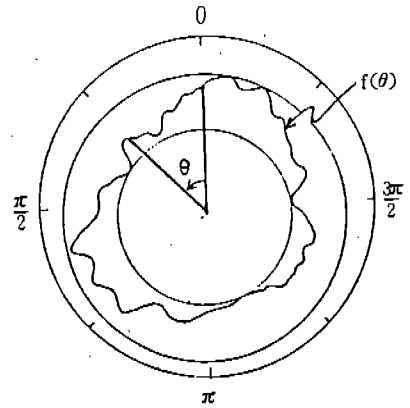


Fig. 1. An example of roundness signal.

試驗片의 중심의 편심成分이며, 제 3 항은 測定된 眞圓度 信號成分이다.

한편, 式 (1)의 Fourier 級數의 係數 a_0, a_i, b_i 는 式 (2)와 같이 쓸 수 있다.²⁾

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

$$a_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos \theta d\theta \dots \dots \dots (3)$$

$$b_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin \theta d\theta \dots \dots \dots (4)$$

따라서, 檢出器로부터 얻어진 $f(\theta)$ 를 1回轉만큼 적분하여 式 (2), (3), (4)를 이용하면 반경 성분 및 편심성분을 알 수 있으므로, 眞圓度 信號 $\epsilon(\theta)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(\theta) = f(\theta) - (a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta) (5)$$

따라서, 記錄된 도형의 眞圓度 ΔR 은 式 (6)으로 나타낼 수 있다.²⁾

$$\Delta R = |\epsilon(\theta)_{\max} - \epsilon(\theta)_{\min}| \dots \dots \dots (6)$$

試驗片의 形狀誤差를 $F(\theta)$ 라고 하면,

$$F(\theta) = \sum_{i=2}^{\infty} a_i \cos i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} b_i \sin i\theta \dots \dots \dots (7)$$

이다.

또, 測定器에 測定器誤差 $G(\theta)$ 가 있다고 하면 마찬가지로

$$G(\theta) = \sum_{i=2}^{\infty} c_i \cos i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} d_i \sin i\theta \dots \dots \dots (8)$$

이다.

따라서, 식 (7)로 표현되는 形狀誤차를 가진 試驗片을 식 (8)의 誤차를 갖는 測定器로 試驗片의 眞圓度를 測定할 때, 基準方位에 대해 위상각 ϕ 의 각도만큼 試驗片을 回轉 테이블 위에서 回轉시킨 후 試驗片을 設置하여 眞圓度を 測定한다(Fig. 2). 이때 얻어지는 도형을 Fourier 級數로 전개한 식을 $H(\theta, \phi)$ 로 표기하면, $H(\theta, \phi)$ 는 形狀誤차 $F(\theta + \phi)$ 와 測定器의 誤차 $G(\theta)$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

즉, 基準方位에 대해 위상각 ϕ 의 각도로 試驗片을 設置하였을 때의 形狀誤차 $F(\theta + \phi)$ 는 식 (9)와 같다.

$$F(\theta + \phi) = \sum_{i=2}^{\infty} a_i \cos i(\theta + \phi) + \sum_{i=2}^{\infty} b_i \sin i(\theta + \phi) \dots\dots\dots (9)$$

따라서, $H(\theta, \phi)$ 는 식 (10)으로 表示할 수 있다.²⁾

$$\begin{aligned} H(\theta, \phi) &= G(\theta) + F(\theta + \phi) \\ &= \sum_{i=2}^{\infty} \{a_i \cos i(\theta + \phi) + c_i \cos i\theta\} + \\ &\quad \sum_{i=2}^{\infty} \{b_i \sin i(\theta + \phi) + d_i \sin i\theta\} \dots\dots (10) \end{aligned}$$

2.2 試驗片의 形狀誤차와 測定器의 誤差 特性의 分離

試驗片의 형상을 $(n-1)$ 의 次數(Harmonic Order)까지의 항으로 表示하고 全圓周를 $2n$ 등분하여, ϕ 를 $2\pi/2n$ 만큼씩 試驗片을 回轉시켜 $2n$ 個의 眞圓度 道형을 구한다(Fig. 2).

각 眞圓度 道형을 Fourier 級數로 전개하고, 半徑成分(a_0)과 편심성분(a_1, b_1)을 소거한다

음에 測定器의 方位에 일치하도록 각 항을 더하면, 식 (10)으로부터 形狀誤차 성분은 소거되어 식 (8)의 $G(\theta)$ 를 $2n$ 배한 眞圓度 道형(진원주를 $2n$ 등분 하였으므로)만이 얻어진다. 따라서, 測定器의 誤차 $G(\theta)$ 의 추정치 $\hat{G}(\theta)$ 는 식 (11)과 같이 된다.²⁾

$$\begin{aligned} \hat{G}(\theta) &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} \{ \sum_{i=2}^{\infty} \{ a_i \cos i(\theta + \phi_k) + \\ &\quad c_i \cos i\theta \} + \sum_{i=2}^{\infty} \{ b_i \sin i(\theta + \phi_k) + \\ &\quad d_i \sin i\theta \} \} \\ &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} H(\theta + \phi_k) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

같은 方法으로 試驗片의 形狀誤차 $F(\theta)$ 의 추정치 $\hat{F}(\theta)$ 는 식 (12)로 나타낼 수 있다.²⁾

$$\begin{aligned} \hat{F}(\theta) &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} \{ \sum_{i=2}^{\infty} \{ a_i \cos i(\theta + \phi_k) + \\ &\quad c_i \cos i(\theta + \phi_k) \} + \sum_{i=2}^{\infty} \{ b_i \sin i(\theta + \phi_k) + \\ &\quad d_i \sin i(\theta + \phi_k) \} \} \\ &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} H(\theta + \phi_k, \phi_k) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

3. 실험장치 및 방법

실험은 브론즈(Bronze)系 燒結金屬의 多孔質材料를 베어링 재료로 이용한 靜壓기체베어링^{3) 4)}으로 지지된 진원도 측정기를 대상으로 하였다(Fig. 3). 진동과 주위온도 변동등의 환경에 의한 영향을 차단하기 위해 石定盤 위의 아크릴 밀폐상자 안에 진원도 측정기를 설치하여 진원도 측정을 행한다.

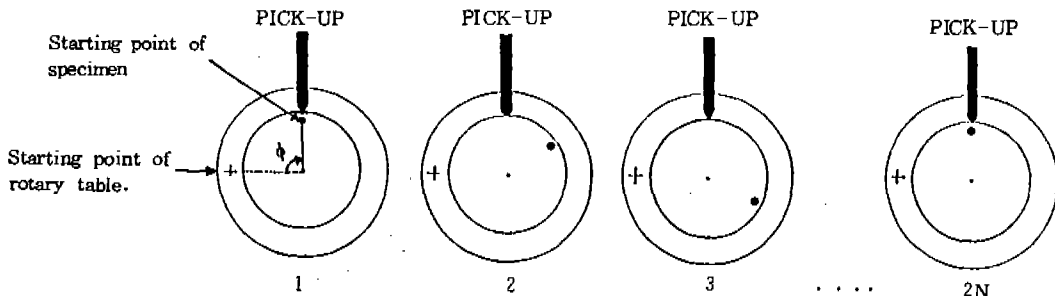


Fig. 2. Diagram of phase different method.

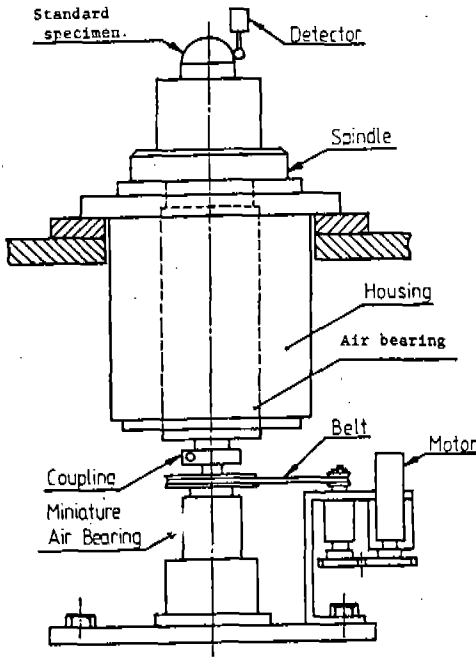


Fig. 3. The experimental construction of the rotary table.

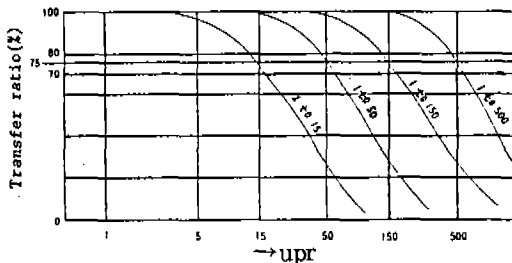


Fig. 4. Characteristic curves of low pass filter (number 1 to 15 is characteristic curve of normal filter N15).

Fig. 4는 실험에 사용한 필터(Low Pass Filter)의 특성곡선으로, 그 진폭 전달특성은 동일한 時定數를 갖는 두개의 독립된 C-R회로로 算出한 것과 같다. 이 그림은 검출기에서 검출된 신호의 1회전당 진동수(Undulation per revolution; upr)에 대한 필터의 진폭 전달율을 나타내는 것이다. 본 실험에서는 진폭 전달을 75%를 나타내는 1회전당 진동수를 50으로 선정하여 그 이하 만의 진동수를

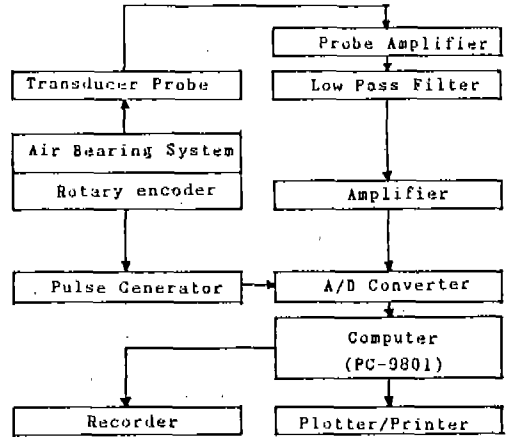


Fig. 5. Block diagram of measuring system.

통과시켜 표면거칠기와 구별하였다.

Fig. 3과 같이 표준 시험편을 설치하고, Fig. 2의 立相差法의 원리에 의하여 검출기로부터의 출력을 검출한다.

Fig. 5는 측정계의 구성도를 나타낸다. 여기로부터 알 수 있듯이 변위계에서 검출된 신호는 증폭기에서 10만배로 증폭된 다음 A/D 변환기를 통과하여 디지털 신호로 바꾼다. 또, 로터리 엔코더(Rotary encoder)에서 출력된 1회전당 2048펄스도 디지털화 되어 컴퓨터에 입력된다. 컴퓨터에서는 검출기에서 입력된 신호중 필터에서 진동수(upr) 50이하로 선정된 데이터를 최소자승 중심법(Least Squares Center method)⁹⁾의 원리에 의하여 진원도를 계산하고, 형상오차의 추정치 $\hat{F}(\theta)$ 와 측정기 오차의 추정치 $\hat{G}(\theta)$ 를 구하여, 프린터와 플로터 그리고 원형기록계에 결과를 출력시킨다.

Fig. 6은 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력된 진원도 신호와 로터리 엔코더의 펄스신호를 데이터로 하여 측정기의 오차와 시험편의 형상오차를 구하는 오차해석 프로그램의 흐름도이다.

4. 결과 및 고찰

진원도를 계산할때 시험편의 형상오차의 추정치 $\hat{F}(\theta)$ 와 측정기의 오차 추정치 $\hat{G}(\theta)$ 는 식(11), (12)에 의해 구해지나, 調和次數 n 에 의

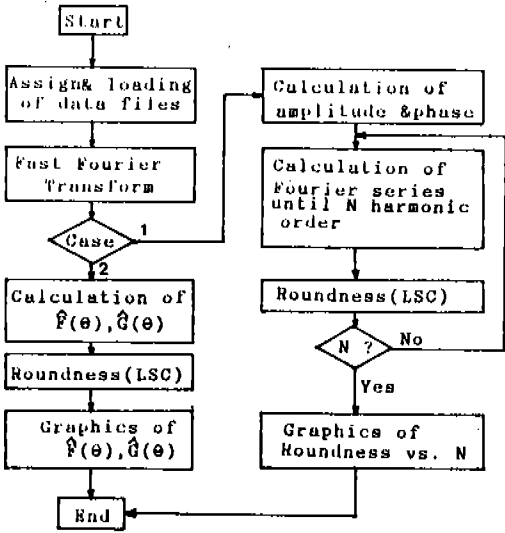
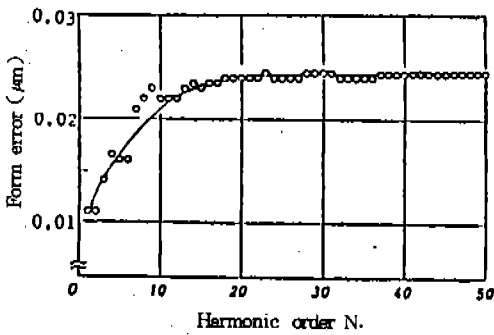
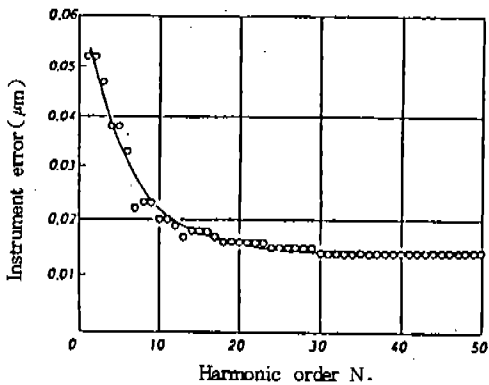


Fig. 6. Flow chart of data analysis.



(a) Form error of specimen



(b) Instrument error

Fig. 7. An effect of harmonic order N to form error and Instrument error.

해 영향을 받는다. 따라서 n 이 ∞ 로 갈수록 정확한 진원도값을 구할 수가 있으나 이것은 실제로는 불가능하다. 진원도값에 오차를 주지 않는 n 의 최소값을 알아보기 위한 실험으로 n 을 변수로 하여 형상오차와 측정기의 오차를 추정 한 결과 Fig. 7과 같은 오차를 얻었다.

그림에서 調和次數 n 을 50까지 고려하면 오차값의 추정치는 n 이 커짐에 따라 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 각각의 위상 ϕ 에서 측정 한 1회전분의 진원도 신호를 X-Y평면에 나타낸 것이다.

각 위상 ϕ 에서 진원도 신호는 서로 잘 일치함을 그림에서 알 수 있다. 따라서, 실험에서 사용한 진원도 측정기는 측정의 재현성이 우수하며 안정되어 있음을 확인할 수 있다.

2종류의 표준 시험편을 사용하여 진원도를 측정하고, 이 진원도 신호를 해석하여 측정기의 오차와 시험편의 형상오차를 추정 한 결과 Fig. 9와 Fig. 10과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 9(a)는 표준시험편 A의 형상오차의 추정치 $\hat{F}(\theta)$ 이고, Fig. 9(b)는 측정기의 오차추정치 $\hat{G}(\theta)$ 이다. 또, Fig. 10(a), (b)는 표준시험편 B에 대한 각각의 추정치를 나타낸 그래프이다.

실험에서 시험편 A의 형상오차의 추정치는 $0.0264(\mu m)$ 이고, 분리된 측정기 오차의 추정치는 $0.0174(\mu m)$ 이다. 시험편 B의 형상오차의 추정치는 $0.0172(\mu m)$ 이고, 분리된 측정기 오차의 추정치는 $0.0153(\mu m)$ 이다.

Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)의 측정기의 오차추정 그래프를 비교하여 보면 각각의 각도에서 진폭의 크기가 잘 일치하고 있으며, 전체적인 형상도 일치함을 알 수 있다. 따라서, 본 실험에서 사용된 오차해석의 원리와 수치해석법이 반경법 진원도 측정기에서 검출된 시험편의 진원도 신호중에 포함되어 있는 측정기의 오차와 시험편의 형상오차를 분리함으로써 측정기의 오차가 포함되지 않는 시험편의 진원도를 구하는 것이 가능함을 알았다.

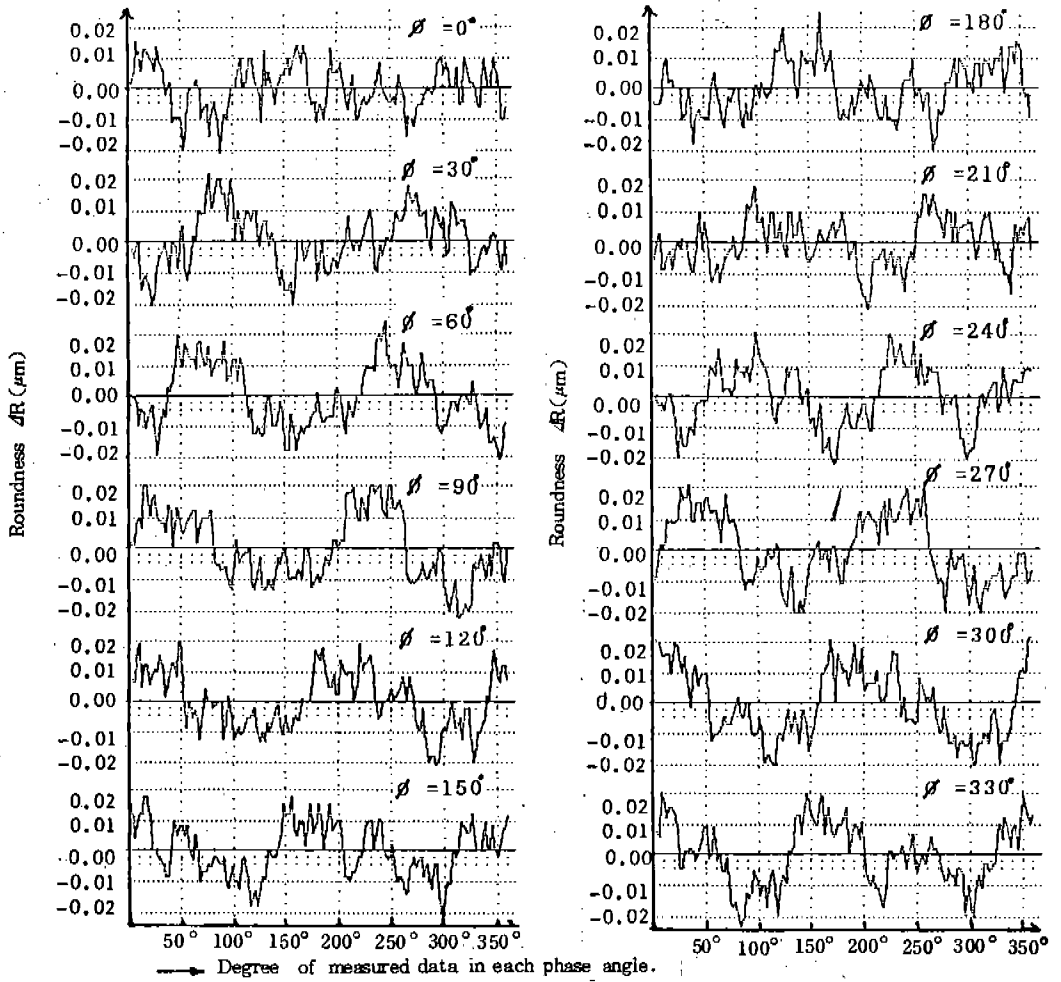
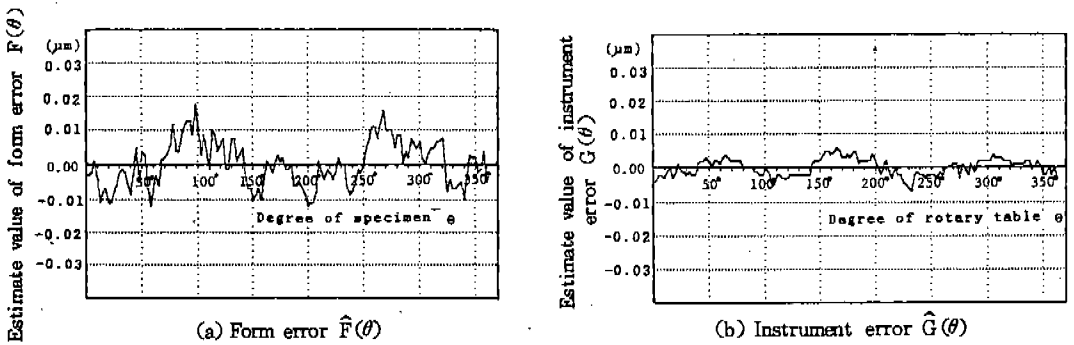


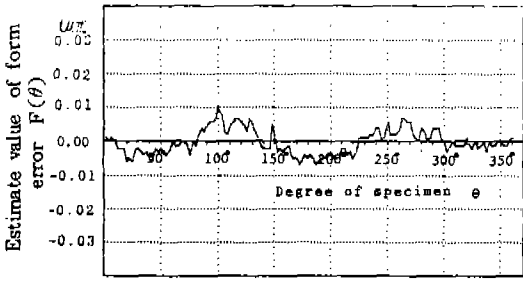
Fig. 8. Roundness profile of measured data in each phase angle (specimen A).



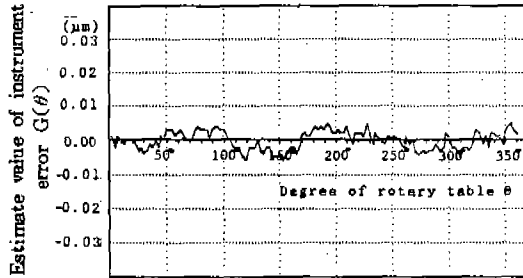
(a) Form error $\hat{F}(\theta)$

(b) Instrument error $\hat{G}(\theta)$

Fig. 9. An analyzed results of measured data for specimen A.



(a) Form error $\hat{F}(\theta)$



(b) Instrument error $\hat{G}(\theta)$

Fig. 10. An analyzed results of measured data for specimen B.

5. 결 론

靜壓 기체 베어링으로 지지된 반경법 진원도 측정기에 의한 시험편의 진원도 측정에 있어서, 시험편의 형상오차와 측정기의 오차를 분리,

평가하는데 대하여 검토하였다.

이 결과, 진원도 측정기에 임의의 오차가 있고 시험편에도 임의의 형상오차가 있을때, 본 오차해석법으로 이 兩者를 우수하게 분리할수 있게 되었다. 따라서, 진원도 측정기의 사용자가 진원도의 표준을 설정할 수 있으며, 어떤 특정한 진원도 측정기를 교정함으로써 다른 임의의 표준 시험편을 교정하여 진원도 측정의 표준을 공급하는 체제를 확립할 수 있다.

參 考 文 獻

1. 谷口 修, 堀込泰雄: 計測工學, 森北出版株式會社(1977).
2. 澤邊雅二: 高精度回轉軸の回轉精度測定法とその問題點, 日本精密機械 45卷 10號 (1979), pp. 79~84.
3. 朴淳祥: 多孔質靜壓 空氣 Bearing을 이용한 高精度 回轉 Table의 性能評價, 한양대학교 대학원(1985).
4. 金喆熙, 韓應教: 多孔質靜壓 氣體 Bearing式 回轉 Table의 性能에 관한 研究, 大韓機械學會, 1982년 春季學術大學 (抄錄集)
5. 宮本紘三: 精密測定について—主として表面粗さ・眞円度測定. 小坂研究所(1987), pp. 2~8.