

# 觸針式變位檢出器를 이용한 3點法眞圓度測定에 관한 研究

韓 應教\*\*, 崔 萬壽\*, 盧 炳沃\*

## A Study on Roundness Measurement by Three Point Method with Stylus Type Pickups

Eung-Kyo Han, Man-Soo Choi, Byung-Ok Rho

### ABSTRACT

Recently, in precision working, precision is in submicron. Therefore, when we measure various finished goods in superfine measurement, because it is relatively difficult to disregard effect of surroundings, these effect of surroundings must be compensated or canceled.

In this study, for roundness measurement, three point method is researched which is able to cancel the effect of rotation accuracy of axis and eccentricity of workpiece. It is difference between this three point method and traditional three point method whose measuring apparatus have three movable pickups positioned with angle and between the pickups. As a results, when rotation accuracy of axis is varied from  $0.02\mu\text{m}$  to  $0.05\mu\text{m}$  the width of variation of measured roundness is  $0.04\mu\text{m}$ .

And, when eccentricity of workpiece is varied from 0 to  $4\mu\text{m}$ , the width of variation of measured roundness is  $0.005\mu\text{m}$ . These error width are disregarded because they are in 10% of measured roundness.

Therefore, by this three point method, the effect of rotation accuracy of axis and the effect of eccentricity of workpiece are canceled.

And we are able to select the angle between the pickups ( $\phi$  and  $\tau$ ) by means of relation between  $F_k$  and K.

---

\*\* 漢陽大學校 教授.

\* 漢陽大學校 大學院

NOMENCLATURE

$a$ : Magnification Ratio Pickup B to Pickup A	$y(\theta)$ : Y Directional Component of Radial Vibration
$C_k$ : Amplitude of the kth Harmonic Component in Fourier series expansion of a Workpiece Contour	$\phi$ : Angle between the pickup A and Pickup B
$N$ : Computation Order of Fourier Series	$\psi_k$ : Phase of kth Harmonic Component in Fourier Series
$b$ : Magnification Ratio of Pickup C to Pickup A	$r(\theta)$ : Distance between Center and Contour in Age
$F_k$ : Magnification Ratio of Amplitude $C_k$	$\hat{S}_A$ : Measured Analogue Signal from Pickup A
$O$ : Center of Pickups A, B, C	$\hat{S}_C$ : Measured Analogue Signal from Pickup C
$O'$ : Rotation Center of Workpiece	SB : Digital Signal from SB
$r_o$ : Radius of least square circle	$x(\theta)$ : X Directional Component of Radial Vibration
$\hat{S}_B$ : Measured Analogue Signal from pickup B	$\theta$ : Rotation Angle of Workpiece
SA : Digital Signal from SA	$\zeta$ : Angle between the Pickup A and Pickup C
SC : Digital Signal from SC	R : The Position of Pickups where the Outputs of Pickups are Zero

1. 序 論

工業界의 진전과 더불어 精度높은 機械部品の 필요성이 많아지고 있는 실정이다.

機械部品の 형상중에는 원형이 많으며 기계의 運動에 있어서는 회전운동이 代表的이다.

이러한 회전운동을 하는 기계부품에 發生하는 회전운동의 誤差는 회전체의 眞圓度에 원인이 있으며, 이 眞圓도가 낮을경우 진동과 소음 그리고 마찰이 發生하게된다.

近年 宇宙開發時代가 시작됨에 따라 眞圓度の 중요성이 한층부각되어 軸의 회전精度에 대한 연구<sup>1)2)</sup>와 함께 眞圓度에 대해 많은 연구가 進行되어 왔다.

眞圓度を 正確히 판단하기 위해서 精度높은 측정기가 必要하겠지만 測定方法 또한 重要的 것이다.

측정방법으로는 半徑法, 直徑法, 3點法<sup>3)-6)</sup> 등이 있어 이들중 從來에는 測定이 간편한 直徑法과 V

Block 3點法이 이용되어 왔으나 측정조건과 비측정물의 形態에 따라 眞圓度を 잘못 測定하는 경우가 있다.

현재에는 取扱이 不便했던점을 보완한 많은 測定器의 出現으로 半徑法이 널리 쓰이고 있다.

이러한 半徑法도 高精度化에 따라 무시할 수 없게되는 회전정도와 偏心에 의한 영향을 보정 또는 제거해야 하는 어려움이 뒤따르게 되었다.

本 研究에서는 회전정도와 偏心에 의한 영향을 除去하는 方法으로 3個의 觸針式 변위검출기를 이용한 3點法에 대해서 연구해 보았다.

3點法에 대해서 青木保雄, 大園成夫에 의한 연구보고<sup>7)8)</sup>가 있었지만 實驗的 考察이 어려웠고 角度선정에 대한 확실한 규명이 없었으므로, 本 實驗은 日本 小坂研究所에서 제작한 Air Bearing을 이용한 회전 Table<sup>9)</sup>과 分解能이 높은 觸針式 변위검출기등 최신장비로 3點法眞圓度 測定에 대한 實驗的 高찰을 해보았으며 각도선정에 대해서 研究 檢討 하였다.

## 2. 測定原理

Fig1. 나타낸 것과같이 檢出器 A,B,C의 交點을 0으로하고 0'를 회전중심으로 한다.

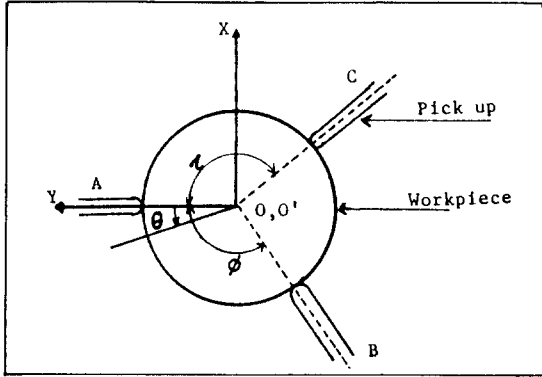


Fig. 1 Pickup and Workpiece

점 0'를 교점으로하여 被測定物에 固定한 XY軸을 잡고 Y軸으로 부터 회전각도를  $\theta$ 라고한다.

一般的으로 0'와 0는 一致하지 않지만 점 0와 0'가 가까이 있다고 가정하면 피측정물의 원형부분 輪郭은 다음과 같이 fourier 급수전개가 가능하다.

$$r(\theta) = r_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(K\theta + 4k) \quad (1)$$

檢出器, 각각의 出力 SA, SB, SC는 다음과 같다.

$$SA(\theta) = R - r(\theta) - y(\theta) \quad (2)$$

$$SB(\theta) = R - r(\theta - \phi) - y(\theta) \cos \phi + x(\theta) \sin \phi \quad (3)$$

$$SC(\theta) = R - r(\theta + \tau) - y(\theta) \cos \tau - x(\theta) \sin \tau \quad (4)$$

檢出器 A,B,C의 배율을 1:a:b로 하면 총출력 S(θ)는

$$S(\theta) = SA(\theta) + aSB(\theta) + bSC(\theta) = (R - r_0)(1 + a + b) + x(\theta)(a \sin \theta - b \sin 2\theta) - y(\theta)$$

$$(1 + a \cos \theta + b \cos \tau) - C_1 \{ \cos(\theta + \psi_1) + a \cos(\theta - \phi + \psi_1) + b \cos(\theta + \tau + \psi_1) \}$$

$$- [ \sum_{k=2}^{\infty} C_k \{ \cos(k\theta + \psi_k) + a \cos(k\theta - k\phi + \psi_k) + b \cos(k\theta + k\tau + \psi_k) \} ]$$

로 나타내어 진다.

식(5)를 고쳐쓰면

$$S(\theta) = (R - r_0)(1 + a + b) + x(\theta)(a \sin \phi - b \sin \tau) - y(\theta)(1 + a \cos \phi + b \cos \tau) - C_1 \cos(\theta + \psi_1 + \delta_1)$$

$$\{ (1 + a \cos \phi + b \cos \tau)^2 + (a \sin \phi - b \sin \tau)^2 \}^{1/2} - \sum_{k=2}^{\infty} C_k \cdot F_k \cos(k\theta + \psi_k + \delta_k) \\ F_k = \{ (1 + a \cos k\phi + b \cos k\tau)^2 + (a \sin k\phi - b \sin k\tau)^2 \}^{1/2} \quad (6)$$

여기서  $\delta_k = \tan^{-1} \{ (a \sin k\phi - b \sin k\tau) / (1 + a \cos k\phi + b \cos k\tau) \}$  이다.

식(6)을 보면 1項은 測定系와 피측정물에 의해서 決定되어지는 定數이다.

2項과 3項은 半徑方向의 진동을 X軸과 Y軸 方向으로 분해한 成分을 表示하고 있다.

4項은 피측정물의 中心 0'가 輪郭의 最小自乘円 中心에 一致하지 않기 때문에 발생하는 偏心項이고 5項은 輪郭形狀의 조화성분을 나타내는 項으로 測定에 의해 구하려는 項이다.

그래서 2項과 3項의 진동성분과 4項의 偏心成分을 제거시킬 수 있는 條件은 다음과 같다.

$$1 + a \cos \phi + b \cos \tau = 0$$

$$a \sin \phi - b \sin \tau = 0 \quad (7)$$

式(7)에서 보면 (a,b)(φ,τ)를 조정하여 회전정도에 의한 영향과 偏心에 의한 영향을 제거시킬 수 있다.

## 3. 測定裝置 및 調整

測定에 使用된 장치를 Fig2의 Block diagram에서 보여준다.

Fig2에서 보여준 바와같이 測定에 使用된 鋼球를 회전 Table 위에 회전중심을 맞추어 놓는다.

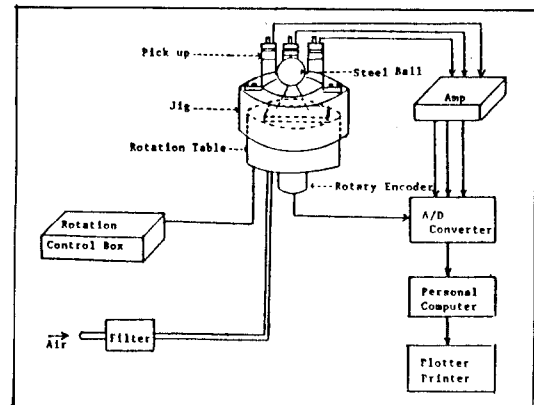


Fig. 2 Block Diagram of Measurement Apparatus

Photo1에서 보여주는 檢出器사이의 각도는 式(7)을 만족하는 범위내의 각도  $\phi 136^\circ$ ,  $\tau 120^\circ$  정도로 하였다.

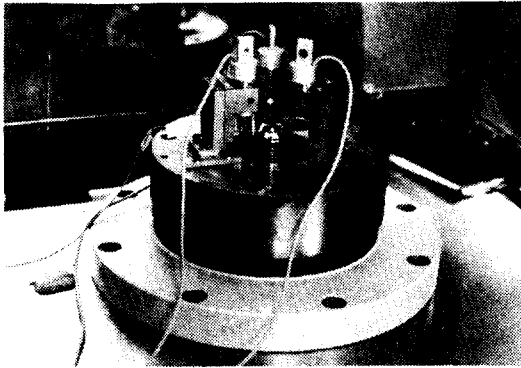


Photo 1. Setting of Detecting Patt

測定에 사용된 장치의 전체를 Photo2에서 보여주고 있다.

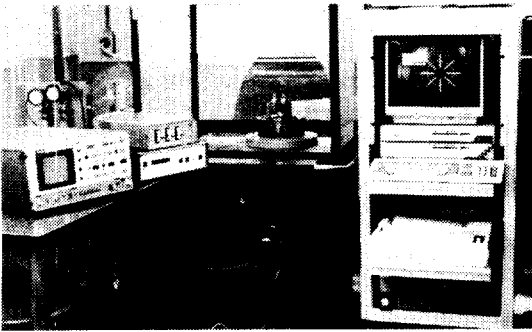


Photo 2. Measurement Apparatus

실험에 사용된 Low Pass Filter의 特性을 Fig3에 나타내어져 있다.

振幅傳達率 75%를 나타내는 山數를 15로하여 표면거칠기와 구별하는 基準으로 하였다.

### 3-2. 檢出器의 높이 調整

3개의 檢출기가 동일한 평면을 測定하기 위해서는 檢出器들의 높이가 모두 같아야하므로 檢출기의 높이를 조정해야 한다.

먼저 Fig4와 같은 장치에서 회전 table 上面으

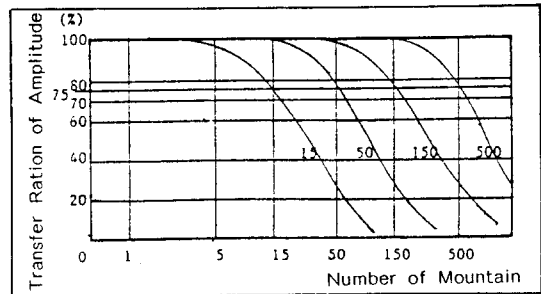


Fig. 3 Characteristics of Low Pass Filter

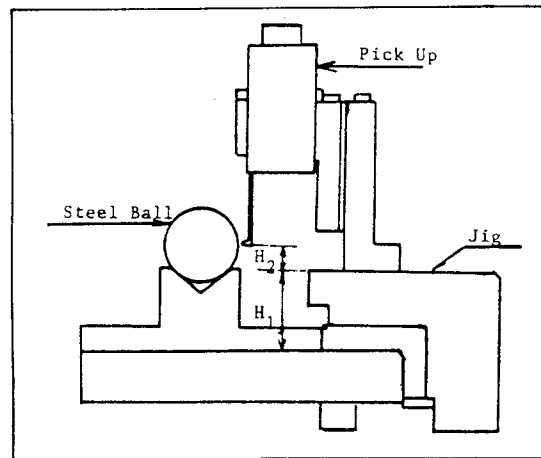


Fig. 4 Height Adjustment of Pickups

로 부터 檢출기의 높이  $H_1$ 을 변위檢출기로서 각각 측정하고 다시  $H_2$ 를 공구현미경으로 測定하여 이 두 結果를 이용하여 Table 上面으로 부터 檢출기 A,B,C의 相對인 높이를 계산한다.

이 두 計算에 의한 結果는 A 檢출기의 檢출부가 B와 C 檢出器의 檢출부보다 각각  $160\mu\text{m}$ ,  $90\mu\text{m}$  씩 높게 나타나서 檢출기 B와 지그사이에 그리고 檢출기 C와 지그사이에 해당하는 높이를 만큼의 높이를 보강하여 檢출기 A의 높이와 모두갈게 測定裝置를 만들었다.

### 3-3. 檢출기 사이의 角度測定

올바른 진원도를 測定하기 위해서는 正確한 角度를 구하는 것이 必要하다.

만약 角度測定誤差가 크게될 경우 眞圓度 測定值의 誤差가 크게된다.

Fig5에 나타난 것과같은 Rod가 달린 시험편을 회전시켜서 각각의 Pickup A,B,C에서 같은 위치를 측정하도록 한다.

檢出된 Data로 부터 Fig6과 같이 Rod의 접촉부 형태를 알 수가 있다.

Rod의 원단 돌출부를 正確하게 測定하기 위해

서 Rotary Encoder의 出力을 2048puls/rev로 하여 測定하였다.

Fig6의 (a),(b),(c)로부터 돌출부를 추정하기 위해서 (a),(b),(c)그림에 中心線을 잡고 그 위치로부터 角度를 계산하였다.

그 結果는  $\phi$ 가  $136.4^\circ$   $r$ 가  $119.5^\circ$ 로 計算되었다.

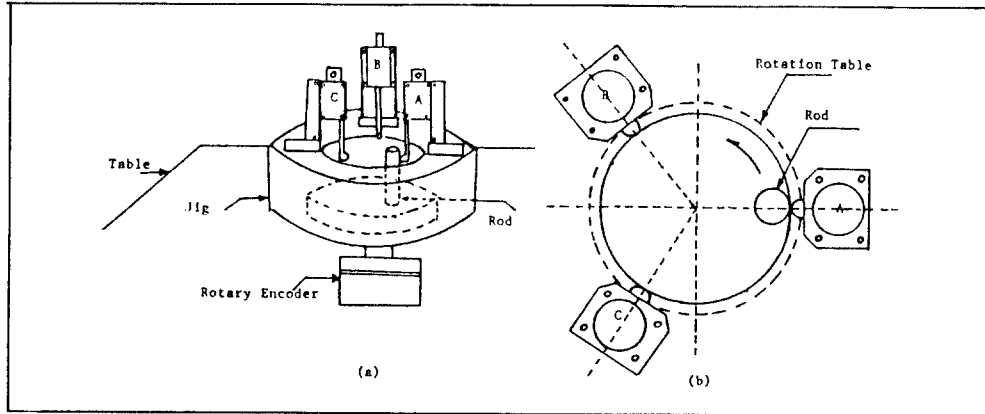


Fig. 5 Apparatus of Angle Measurement between Pickups

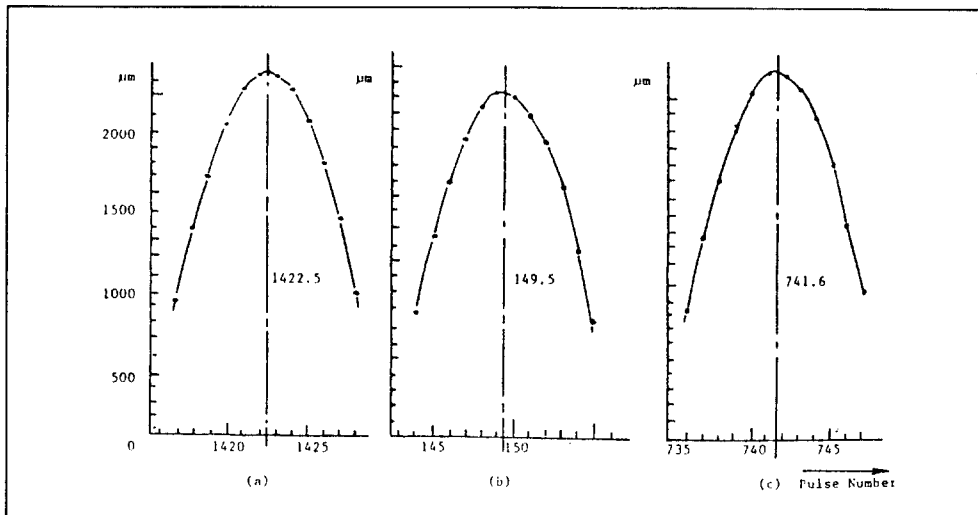


Fig. 6 Measured Data on Measuring Angle between Pickups

### 3-4. 檢出器의 倍率調整

實驗에 사용되는 3개의 檢出器 A,B,C의 倍率은 상대적으로 調整하기 위해 Fig7에 보여 준 장

치를 使用하였다.

Function Generator에서 발생된 정현파가 Hi-Vol, Amp에서 증폭되어 PZT Oscillator를 振動시키게 된다.

이 振動의 변위가 檢出器 D에서 檢出되어 진다. 이 두개의 검출신호를 Multicorder에 동시에 記録시켜서 진폭을 비교 調整하였다.

本 實驗에서는  $\phi=136.4^\circ$ ,  $\tau=119.5^\circ$  이므로 식(7)을 이용하여 檢出器 倍率 a,b는 각각 0.9, 0.7로 계산되었다.

즉, 檢出器 A,B,C의 倍率을 1:0.9:0.7이 되게 調整하였다.

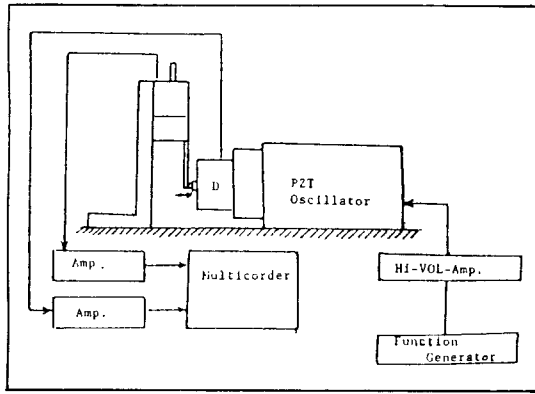


Fig. 7 Adjustment of Magnification ratio in Pickups

#### 4. 測定方法

Fig8은 측정과정을 보여주고 있다.

회전속도 10 rpm으로 회전시킨 鋼球로부터 Analog 변위  $S_a, S_b, S_c$ 가 檢出된다.

檢出된 신호는 Amp.에서 증폭된 다음, A/D Converter에서 Digital化된다.

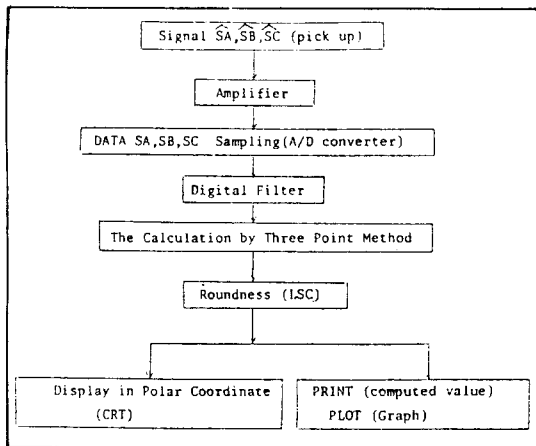


Fig. 8 Flow Chart of Measurement Procedure

이때 사용된 Rotary Encoder의 出力은 2048puls/Rev으로 하였다.

Digital 신호중 Digital Filter에서 산봉여리 수 15이하로 선정된 Data가 Personal Computer에 의해 3점법 計算이 되어 調和成分의 진폭이 구해진다.

이 調和成分의 振幅을 이용하여 LSC法에 의해 眞圓度값을 구한다.

이렇게 하여 구해진 結果가 Computer의 CRT 상에서의 極座標로 표시되어지고 다시 이것을 프린터, 플어터(Printer, Plotter)에서 出力시켰다.

Photo3에서 실험에 사용된 鋼球를 보여주고 있다. 直徑 30.16mm이고 眞圓도가 約  $0.1\mu\text{m}$  정도라고 測定된 鋼球를 利用하였다.

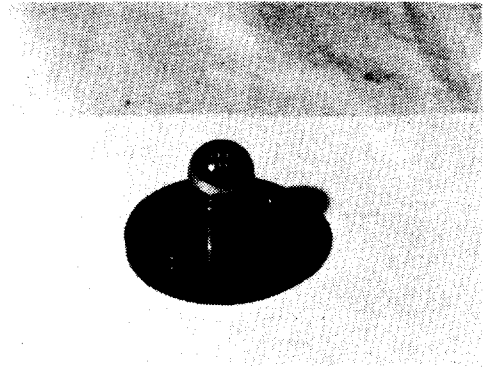


Photo 3. Steel Ball Workpiece

이러한 3點法 眞圓度를 計算할 때 被測定物의 眞圓度 推定은 調和成分  $\sum_{k=2}^N C_k \cos(K\theta + \psi_k)$ 에 의해 구해진다.

여기서  $N$ 가  $\infty$ 로 갈수록 올바른 眞圓度값을 구할수가 있으나 이것은 不可能하다.

그래서 眞圓度값에 오차를 주지않는  $N$ 의 최소값을 알아보기위한 測定으로  $N$ 을 변수로 하여 眞圓度를 測定해 보았다.

즉  $N=2,5,10,15,\dots$ 로 간격을 5로하여 測定하였다.

또 眞圓度에 미치는 회전정도의 영향을 알아보기 위한 方法으로 空氣 Bearing을 이용한 회전 Table의 給氣압력을  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서  $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 變化시켜 회전정도를 變化시켰다.

이때 변화하는 회전정도와 함께 眞圓度を測定해 보았다.

그리고 偏心に 의한 영향을 알아보기 위해 偏心量을  $4\mu\text{m}$  까지 任意로 주어 偏心量과 眞圓度を測定해 보았다.

또, 3點法과의 비교를 위해 반경법진원도測定器(EC-10)로 동일한 鋼球를  $15^\circ$ 씩  $90^\circ$ 까지 회전시켜 가면서測定하였으며 3개의 檢出器사이 각도를 선정하는데 있어서 가장 좋은 각도를 찾아내기 위해 5개의 角度를 정하였다.

이 5개의 각도에 대해서 角度誤차를  $0.1^\circ$ 씩  $1.0^\circ$ 까지 증가시킬 때 측정된 진원도값이 어떻게 나타나는가에 대해서 알아보았다.

### 5. 結果 및 考察

本實驗에서 眞圓度は  $0.085\mu\text{m} \sim 0.09\mu\text{m}$  사이의 값으로測定되었으며 計算次數  $N$ 의 決定에 대한 결과 Graph는 Fig9에, 回轉精度的 영향 그리고 偏心に 의한 영향을 알아본測定結果 graph는 Fig10과 Fig11와 같이 나타났다.

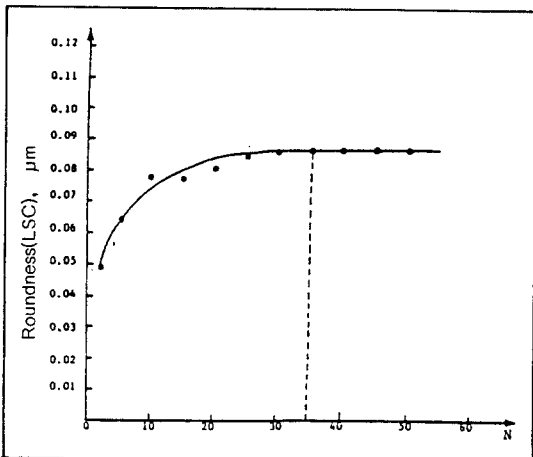


Fig. 9 Roundness vs. Computation Order N.

半徑法眞圓度測定器(EC-10)로測定한 결과와 3點법으로測定한結果가 Table1에 나타내어져 있다.

Table2는 임의로 선택한 각도의 a, b를 보여주고 있으며 이러한 角度에 있어서 각도측정오차에

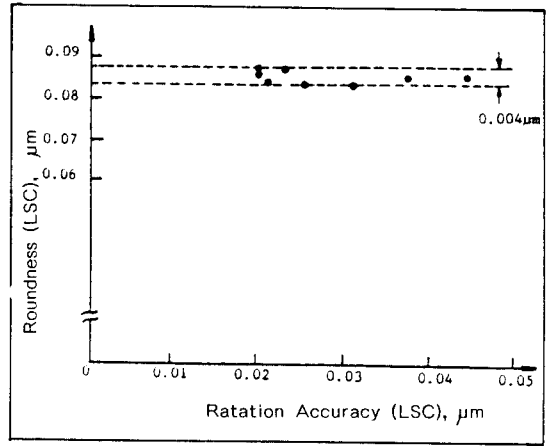


Fig. 10 Relation between the Rotation Accuracy and Roundness.

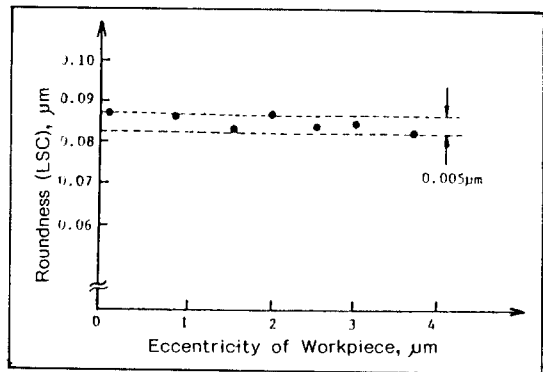


Fig. 11 Relation between the Eccentricity of Workpiece and Roundness

Measurement Method	Degree( $^\circ$ )						
	0	15	30	45	60	75	90
Radius Method ( $\mu\text{m}$ )	0.08	0.10	0.10	0.11	0.09	0.11	0.10
Three Point Method ( $\mu\text{m}$ )	0.086	0.086	0.085	0.084	0.086	0.086	0.089

Table 1. Comparison of Three Point Method with Radius Method

	$\phi$ ( $^\circ$ )	$\tau$ ( $^\circ$ )	a	b
1	161.7	156.1	0.603	0.468
2	151.9	142.0	0.673	0.515
3	136.4	119.5	0.897	0.711
4	154.7	129.4	0.797	0.441
5	150.5	119.5	0.870	0.492

Table 2. Angle  $\phi$ ,  $\tau$  and Magnification ratio a, b

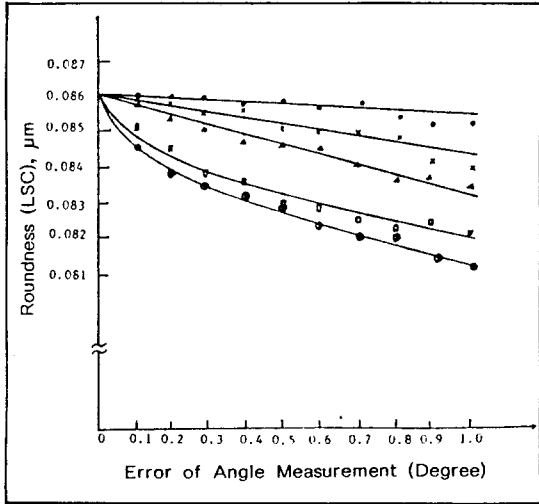


Fig. 12 Relation between the Error of Angle Measurement and Roundness

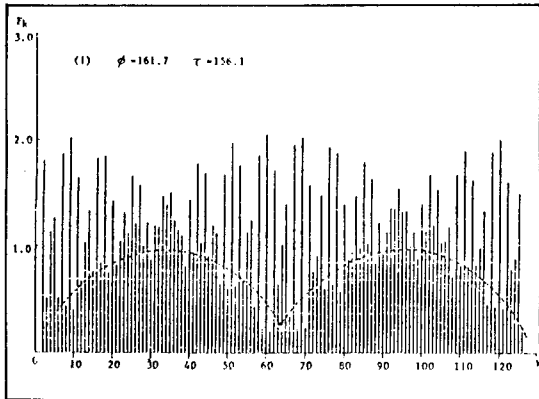


Fig. 13 Relation between  $F_k$  and  $k$

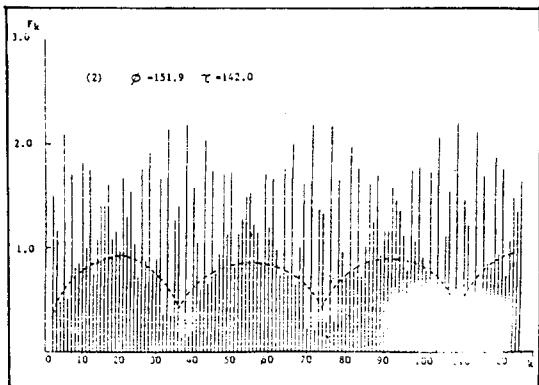


Fig. 14 Relation between  $F_k$  and  $k$

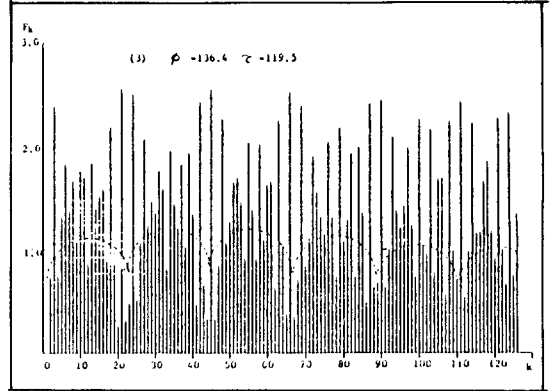


Fig. 15 Relation between  $F_k$  and  $k$

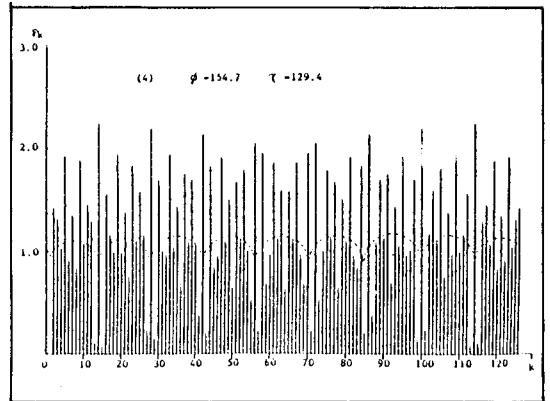


Fig. 16 Relation between  $F_k$  and  $k$

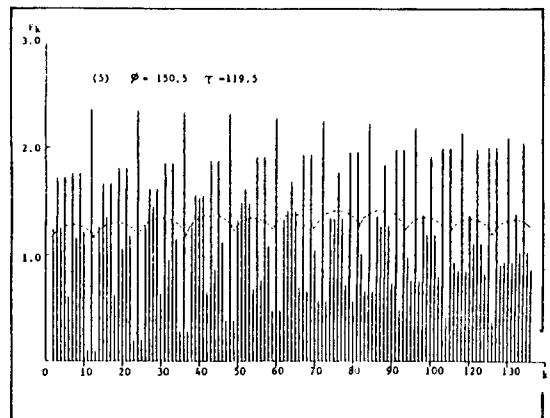


Fig. 17 Relation between  $F_k$  and  $k$

대한 眞圓度測定의 結果가 Fig12와 같이 나타났  
다.



Fig9에 나타난 Graph를 보면 次數 N가 35 이상부터는 眞圓度값이 거의 일정하게 나타나고 있으므로 本 實驗에서 Fourier 급수의 計算次數 N을 35로 하였다.

半徑法에 의해 나타난 測定結果는 Table1에서와 같이 회전정도와 偏心の 영향으로 인해 3점법으로 測定한 眞圓度값보다 誤差가 크게 발생하였다.

그리고 任意로 준 회전정도변화와 偏心量의 변화에 의한 眞圓度 값의 變化量이 Fig10, Fig11에서 보여준 것 같이 각각 最大幅이 0.004 $\mu$ m과 0.005 $\mu$ m으로 나타났다.

이는 眞圓度값이 10%이내에 있으므로 무시할 수가 있어 3點法에 의한 眞圓度測定에서는 회전정도와 偏心の 영향이 除去되어 진다는 것을 알 수 있었다.

각도선정을 위해서 선택한 5개의 각도좌표에 대해 Simulation해 본 結果는 Fig12와 같이 나타났다.

檢出器사이의 角度 測定誤差가 커지더라도 眞圓度값의 변화가 작은 1과 2 곡선을 나타내는 각도  $\phi=161.7$ ,  $\tau=156.1$ 과  $\phi=151.9$ ,  $\tau=142.0$ 은 測定가능한 角度라고 할 수 있으며, 4와 5 곡선의 각도  $\phi=154.7$ ,  $\tau=129.4$ 와  $\phi=150.5$ ,  $\tau=119.5$ 는 3點法 測定을 할 때 피해야 할 각도라고 할 수 있다.

Fig13과 Fig14는 Fig12의 곡선 1과 2의 각도에 있어서의  $F_k$ 와 K의 關係 Graph이다.

이를 보면 K의 변화에 대해  $F_k$ 값의 변화 Cycle의 주기가 점선으로 표시된 것 처럼 크게 나타나고 있으며 4와 5 곡선을 나타내는 각도에 있어서의  $F_k$ 와 K의 關係 Graph인 Fig16과 Fig17을 보면 K의 변화에 대해서  $F_k$ 값의 변화 Cycle의 주기가 작게 나타나고 있다.

그러므로  $F_k$ 와 K의 關係 Graph를 보고 각도를 선정할 수 있다고 생각되어진다.

## 6. 結 論

觸針式 變位 檢出器를 이용한 3點法 眞圓度測定을 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 현재까지 使用되어온 半徑法 眞圓度 測定에서 측정기에 장치된 회전축의 회전정도에 의한 영향과 비측정물의 偏心에 의한 영향으로 인해 系統 誤差가 發生하게 되어 조정밀측정에서는 어려움이 따르나 本 3點法에 의한 測定에 있어서는 이러한 誤差가 除去되어 보다 더 精密한 測定을 할 수가 있다는 것을 알았다.

2. 3點法 眞圓度 測定에서는 檢出器사이의 각도는 확대율  $F_k$ 와 次數 K와의 關係로서 선정될 수 있다고 생각된다.

3. 3點法 眞圓度 測定을 할 때 角度設定의 基準이 확실히 규명되어 지는것이 앞으로의 研究課題라 생각되어진다.

## 參 考 文 獻

1. 三井公之:精密診斷技術の研究, 日本機械學會論文集(C 偏)48, 425(1982) p115~123.
2. 澤邊雅二. 外 3名:族盤主軸回轉精度誤差の工作振圓度~の寄與, 日本精密機械 46 卷 5 號 p576~p583.
3. KSB0604, KSB0501
4. ISO R1101
5. JIS B0621
6. JMA S5021
7. 青木保雄, 大園成夫:3點法眞圓度 測定法の~展開, 日本精密機械 32 卷 12 號(1966), p.831~836.
8. 大園成夫:眞圓度 測定法の研究(1970)
9. 朴淳祥:多孔質靜壓 空氣 Bearing을 利用한 高精度 回轉 Table의 性能評價(1985).
10. 中野幸久:精密測定技術(1982)
11. 吉田岑男:眞圓度に關ち 問題點. 日本精密機械 39 卷 5 號(1973), p478~p482.
12. 江川滿:眞圓度測定器にむけそ回轉軸系の設計と問題點. 日本精密機械 45 卷 10 號(1979) p.1210~1220.
13. 園山寄昭八, 藤原晴夫, 眞圓度向上の太の圓筒加工法, 日本精密機械 43 卷 10 號(1977)p1167~1172.
14. 小野道彦:眞圓度の測定法とその表示, 機械と工具, 7(1969), 36.