

眞円度 評価法에 있어서 最小自乘法과 最小領域法の 比較

康明順* · 韓應教* · 權炯湖** · 劉承憲**

A Study on the Comparison of Least Squares Roundness with Minimum Zone Roundness

Myung-Soon Kang, Eung-Kyo Han, Dong-Ho Kwon and Seung-Han Yoo

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the variations of out-of-roundness due to its assessment methods for the practical workpieces.

Experiments were carried out with the test specimens having the typical roundness profile. The roundness measuring system which has the autocentripetal functions and the automatic centering table unit was used.

From the experimental results, it was found that the ratio of LSC to MZC values varied with the shape of roundness profiles, and the rate of variation for out-of-roundness was increased logarithmically with the increment of undulations by the effect of filter.

Therefore, it is suggested that the least squares center method should be useful with the sufficient accuracy except for some special cases in the roundness profiles, and the condition of filter has considerable influence upon the out-of-roundness to be measured.

Nomenclature

(English letters)

a : Distance of the least squares center from the center of the chart for X-direction

b : Distance of the least squares center from the center of the chart for Y-direction

Ai, Bi : Harmonic coefficients of the series

D : Diameter of the workpiece

* 漢陽大學校 教授

** 漢陽大學校 大學院

$f(\theta)$: Signal of the roundness profile from pick-up
 $G(\theta)$: Characteristics of instruments errors
 $H(\theta, \phi)$: Out-of-roundness including instruments errors
 i : Harmonic orders
 n : Number of radial ordinates
 O : Center of the least squares circle
 R : Radius, radius of the least squares circle
 S : Specimen number for classification
 $F(\theta)$: Out-of-roundness of specimen

(Greek letters)

α, β, γ : Angle between anvils for three-point methods
 ΔR : Out-of-roundness
 ΔR_q : Assessment of roundness from least squares center
 ΔR_z : Assessment of roundness from minimum zone center
 $\epsilon(\theta)$: Signal of out-of-roundness for polar coordinates
 θ : Rotational angle
 σ : Standard deviation
 Σr : Sum of radial distances of points P from the least squares center
 Σx : Sum of all X values
 Σy : Sum of all Y values
 ϕ : Phase angle

(Abbreviations)

AVR. : Average
 LSC : Method of Least Squares Center
 MZC : Method of Minimum Circumscribed circle Center

MIC : Method of Maximum Inscribed circle Center

u.p.r. : Undulations per revolution

1. 緒 論

機械部品中에는 曲面部分을 갖고 있는 것이 많으며, 軸, 齒車, Bearing과 같은 回轉機械部品은 그 幾何學的 形狀程度에 따라 그 性能이 크게 左右된다. 따라서, 形狀精度에 따른 幾何偏差¹⁾의 問題가 대두대며, 幾何偏差의 種類로는 眞直度, 平面度, 眞圓度등 여러가지를 들 수 있다. 특히 面轉部品の 精度를 잘 알기 위해서는 그 둥글기의 精密測定 및 評價가 반드시 必要하므로, 그 둥근정도를 敎值化하여 表明한 것이 眞圓度이다.

超精密 測定分野는 물론이고, 現代工業은 圓形部品の 幾何學的 形狀에 대하여 매우 嚴格한 管理를 要球하고 있으므로, 보다 高精度로 眞圓度 測定 및 評價를 할 수 있는 方法이 要請되고 있다.

從來의 眞圓度の 測定法은 直徑法, 三點法, 半徑法으로 나누어지며,²⁻⁵⁾ 이중에서 理論的으로는 가장 嚴密함에도 불구하고 淸급이 까다로와 外面당했던 半徑法에 의한 測定評價法이 淸近 淸부신 Computer 技術의 發達에 힘입어 脚光을 받게 되었다. 半徑法에 의한 眞圓度評價法으로는 最小自乘法, 最小領域法, 內接圓中心法 등이 있으며, 現在 最小自乘法 및 最小領域法이 가장 널리 利用되고 있다.

眞圓度는 圓形形體의 幾何學的圓에 대한 어긋남의 크기로 定義되며, 眞圓度 表示法은 淸近 最小領域法에 의해 規定되는 傾向을 보이고 있으나,^{6,7)} 일반적으로 最小領域法은 Computer를 利用하더라도 상당한 演算時間을 요구하므로 時間的, 經濟的으로 最小自乘法에 비해 不利하다.

한편 最小自乘法은 比較的 간단한 演算만으로 眞圓度 評價가 可能하지만, 最小領域法에 의한 結果에 비해 淸均 10% 정도 過大評價되는 것으로 알려져 왔다.

最小自乘法 眞圓度에 對한 研究로는 英國의 R. E. Reason⁸⁾, 日本의 井戸⁹⁾, 後藤¹⁰⁾의 研究報告가 있었으며, 1965年 J. A. Nedler와 R. Mead¹¹⁾에 의해 Simplex method가 發表된 以後, 이를

利用한 最小領域法에 대한 研究가 最近 塚田¹²⁾, 下河邊¹³⁾, 加藤¹⁴⁾ 등에 의해 發表된 바 있다. 그러나, 評價法에 따른 差異의 實態에 對한 報告는 없으며, 眞圓度測定值에 영향을 미치는 Filter에 對해 明確히 研究된 바는 없었다.

本 研究에서는 代表的인 形狀의 被測定物에 對하여 最小自乘法 및 最小領域法을 適用하였을 때, 그 差異의 實態를 比較檢討하여, 測定目的에 따라 評價法의 올바른 選擇法을 제시하며, 또한 Filter의 設定에 따른 眞圓度測定值의 變化를 糾明하는 데 目的을 두었다.

2. 眞圓度測定 및 評價法에 對한 理論

2-1. 眞圓度 測定法

眞圓度測定法에는 直徑法, 三點法, 半徑法이 있다. 直徑法은 被測定物의 圓形部分에 直角인 斷面內의 지름을 數方向에서 測定하여, 그 測定值의 最大値와 最小値의 差로 眞圓度を 表示하는 方法이다. 高精度를 要하지 않는 境遇에 便利한 方法이며, Fig. 1에서 알 수 있듯이 等價變形圓(같은 지름의 變形圓)인 境遇에는 直徑値가 나타나지 않으므로 眞圓度誤差의 檢出이 不可能한 結점이 있다. 따라서, 주로 橢圓形狀의 偏差를 求하는 境遇에만 쓰는 것이 바람직하며, 直徑測定에 따른 測定誤差가 包含되므로 주의가 必要하다.

三點法에 의한 眞圓度는 圓形部分을 2點으로 支持하고 回轉시킬때, 그 두점의 垂直 2等分線 위의 輪廓 移動距離로 表示한다. 이때 두 支持點에서 圓形部分의 接線이 이루는 角度를 명기할 必要가 있다. 等徑變形圓의 檢出이 可能하며, Fig. 2에 보인 바와 같이 測定目的에 따라 適當한 角度의 V블록, 三腳개이지 등을 利用하여 測定한다.

半徑法에 의한 眞圓度는 圓形部分의 半徑의 最大値와 最小値의 差로 나타나며, 現在의 眞圓度測定器는 대부분 半徑法을 採用하고 있다. 被測定物을 가상중심주위로 回轉시킬 때, 그 半徑의 벗어남을 測定하며, 偏心의 影響을 제거하면 眞圓度を 求할 수 있다. 半徑法 眞圓度測定器는 Fig. 3과 같이 被測定物을 回轉시키는 테이블回轉式과 檢出器를 被測定物 周圍로 回轉시키는 檢出器回轉式의 두가지 方式이 있다. 檢出器回轉式은 回轉에 對한 負荷는 檢出器뿐이므로 高精度의 測定이 可能하며,

비교적 大型 試料의 測定이 可能한 長點이 있다. 測定時에는 測定器의 回轉中心과 被測定物의 圓形部分軸心이 一致해야 正確한 測定이 可能하므로 求心作業이 必要하나 機械的인 求心操作에는 限界가 있으므로, 一般的으로 analog computer에 의한 電氣的 求心補正處理를 하여, 完全히 求心된 記錄圖形을 얻게 된다. 이와 같은 演算은 Analog 回路의 積分器에 의해 眞圓度測定記號를 2π 만큼 積分하여, 調和係數를 求하고 偏心成分을 加減演算器로 제거함으로써 간단히 이루어진다.

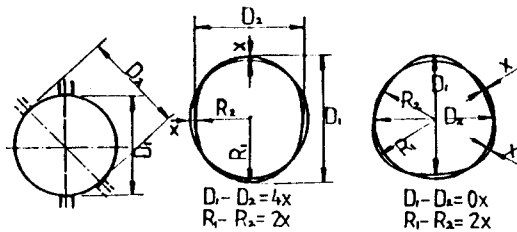


Fig. 1. Diameter variation & Instrument errors

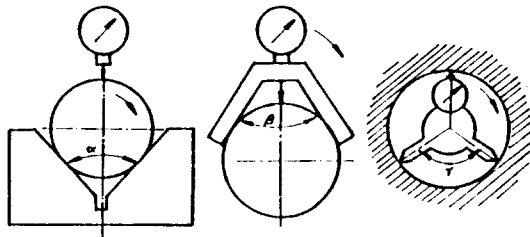


Fig. 2. Measurement by three-point methods

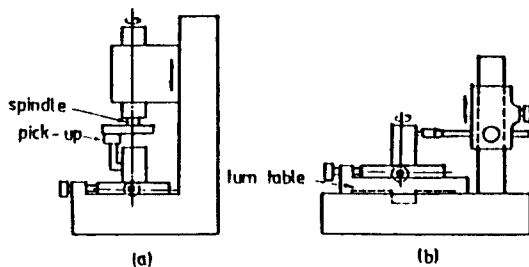


Fig. 3. Measurement of variations in radius

2-2. 半徑法에 의한 眞圓度 評價法

2.2.1 Analog computer의 利用

檢出器와 被測定物의 相對的인 回轉에 의해 眞圓度を 測定할 때, 檢出器에 의해 얻어지는 信號는 1

소가 되는 圓(平均圓)과 同心으로 內·外接하는 두圓의 半徑差로 眞圓度を 나타내는 評價法¹⁸⁾이다. 이때 求하여진 最小自乘中心(LSC)은 唯一하며, 最小自乘平均圓 또한 唯一한 性質을 갖는다. 最小自乘圓의 有用한 또 다른 性質은 Fourier 級數의 1次高調波로 表現될 수 있다는 것이다. 그러나 最小自乘法은 測定部分에 Spline과 같이 불연속적인 部分이 있을 경우에는 一般적으로 適用이 곤란하다. 評價結果는 最小領域法에 비해 平均 10% 정도 크게 나타나며, 一般적으로 그 비는 1.0 보다 작을 수 없고, 1.3을 超過하는 境遇는 드물다. 그러나 離散的인 測定點밖에 測定이 되지 않는 경우 또는 測定誤差를 無視할 수 없는 경우에는 아무래도 最小自乘法에 의한 形狀의 推定이 必要하다.

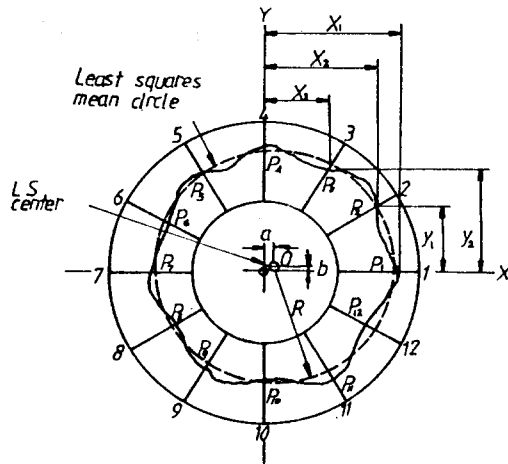


Fig. 5. Determination of least squares center and circle

Fig. 5에서 離散的인 測定點에 對한 最小自乘圓의 決定方法¹⁹⁾을 보였다. Sampling한 測定法의 數를 n 이라 할 때, 근사적으로 다음 式이 成立한다.

$$R = \frac{\sum r}{n} \dots\dots\dots (7)$$

$$a = \frac{2 \sum x}{n} \dots\dots\dots (8)$$

$$b = \frac{2 \sum y}{n} \dots\dots\dots (9)$$

단, R 은 最小自乘圓의 半徑이며, a 및 b 는 記

録紙中心에서 最小自乘中心까지의 距離이다.

그런데, 式(7), (8), (9)는 式(2), (3), (4)와 결국 같으므로 最小自乘法에 의한 眞圓度는 Fourier 級數를 利用해도 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

2.2.4 測定器의 誤差特性

材料의 形狀誤差를 $F(\theta)$ 라 하면,

$$F(\theta) = \sum_{i=2}^{\infty} A_i \cos i \theta + \sum_{i=2}^{\infty} B_i \sin i \theta \dots\dots\dots (10)$$

測定器에 誤差特性 $G(\theta)$ 가 있다고 하면, 마찬가지로,

$$G(\theta) = \sum_{i=2}^{\infty} C_i \cos i \theta + \sum_{i=2}^{\infty} D_i \sin i \theta \dots\dots\dots (11)$$

따라서 式(9)로 表現되는 形狀의 試料를 式(10)의 特性을 갖는 測定器로 測定할 때, 基準方位에 對해 ϕ 의 角度로 setting하여 얻어지는 圖形 $H(\theta, \phi)$ 는

$$\begin{aligned} H(\theta, \phi) &= G(\theta) + (\theta + \phi) \\ &= \sum_{i=2}^{\infty} \{ A_i \cos i (\theta + \phi) \\ &\quad + C_i \cos i \theta \} \\ &\quad + \sum_{i=2}^{\infty} \{ B_i \sin i (\theta + \phi) \\ &\quad + D_i \sin i \theta \} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

2.2.5 外接圓中心法 및 內接圓中心法

外接圓中心法(MCC)은 記錄圓形에 對하여 最小 外接圓을 求하여, 그 中心을 共有하고 圓形의 內側에 接하는 圓을 그렸을 때, 그 두圓의 半徑差로 眞圓度を 나타내는 方法이며, 內接圓中心法(MIC)은 最大內接圓을 求하여 그 中心을 共有하고 圖形의 外側에 接하는 圓과의 半徑差로 眞圓度を 評價하는 方法이다.

이와같은 評價法의 發想은 過去 軸의 境遇에는 ring gauge로, 구멍의 경우에는 plug gauge에 의해 眞圓度の 評價를 해온데서 비롯된 것이다.

2.2.6 眞圓度測定器의 filter

眞圓度測定器에는 Profile의 山數를 制限하기 위한 Low pass filter가 內藏되어 있으며²⁰⁾, 그 振幅傳達特性은 同一한 時定數를 갖는 두개의 獨立된 C-R回路로 算出한 것과 같다²¹⁻²⁴⁾. Fig. 6은 u. p. r.에 對한 Filter의 振幅傳達率을 나타내는 것이다. Cut-off의 基準은 最大振幅傳達率의 75%이다.

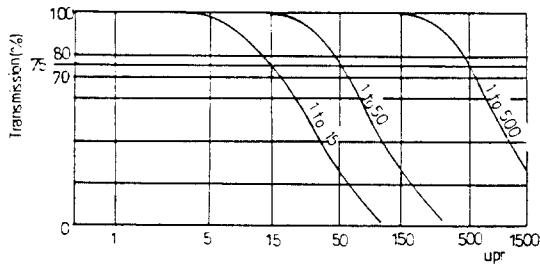


Fig. 6. Transmission characteristics of the filter

3. 實 驗

3-1. 實驗裝置

半徑法에 의한 眞圓度의 測定에 使用한 測定裝置 및 試驗片은 다음과 같다.

(1) 半徑法 眞圓度 測定器 MODEL EC-40 D

本 裝置는 檢出器回轉式으로 最小領域法, 最小自乘法, 內接圓中心法, 外接圓中心法등에 의한 多項目 解析이 形狀記憶에 의해 1回의 測定으로 可能하며, 圓形記錄과 同時에 演算된 測定結果는 Digital로 16자리 Character display(LED)에 의해 表示해준다.

또한, 眞圓度外에도 眞直度, 同軸度, 圓筒度, 平行度등의 幾何偏差의 測定이 可能한 萬能形眞圓度測定器로서, 求心操作을 돕기 위해 Analog computer에 依한 電氣的 自動求心裝置 및 微動機構에 의한 自動 Centering table unit를 裝備하고 있으므로 測定에 高度의 熟練을 요하지 않는다. 測定器의 構成은 測定부와 演算部, 그리고 記錄部로 이루어져 있다. Fig. 7은 本 測定器의 block diagram이다.

한편, 測定時 使用되는 Stylus arm은 그 길이에 따라 b type과 c type이 있는데, 本 實驗에서는 길이 61mm, 錐針先端半徑 0.8mm인 b type

의 標準 MODEL SA-117 (日本·小坂研究所製)을 使用했다.

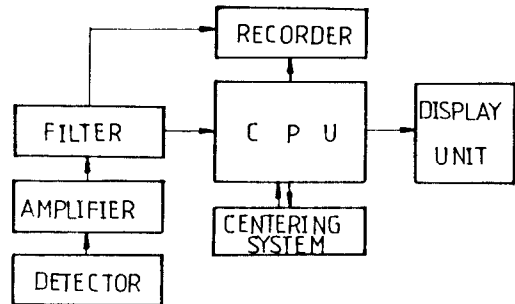


Fig. 7. Block diagram of roundness measuring apparatus

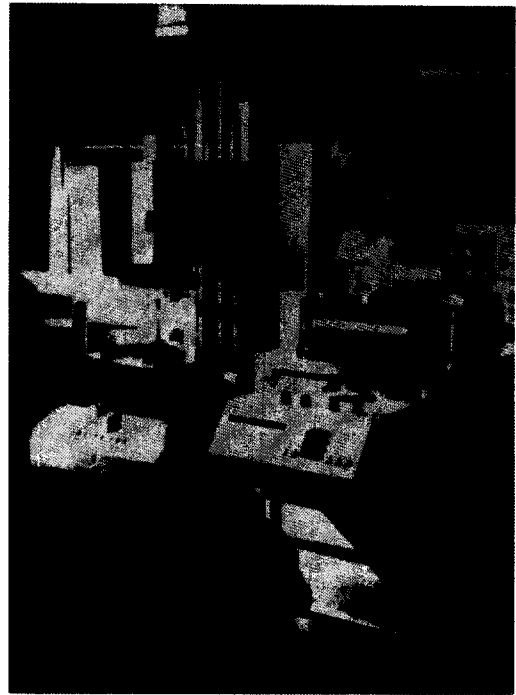


Photo. 1. Experimental apparatus

Photo. 1은 眞圓度 測定器 EC-40D의 外觀이다. 다음은 眞圓度 測定器 EC-40D의 示方이다.









- ①回轉精度: 0.04μm 以內
- ②檢出器 回轉速度
測定時: 4 r.p.m
centering時: 8 r.p.m
- ③電氣的求心範圍: 記錄紙上 ± 75 mm

- ④ table 移動量: X, Y 각각 15 mm
- ⑤眞円度測定範圍: 内外最大지름 ϕ 380 mm
- ⑥最大積載荷重: 80 kg
- ⑦最大積載높이: 480 mm
- ⑧測定力: 150 mN 以下 可變式
- ⑨Filter (N low-pass):
15, 50, 150, 500 undulations/ rev.
- ⑩縱倍率 (stylus b):
100.200.500.1000.2000.5000.10000 倍
- ⑪自動 centering table 의 試片設定範圍: 基準回轉軸心에서 ± 5 mm 以内
- ⑫本體 size 및 重量:
600 × 810 × 1980 mm, 650 kg
- ⑬製作所: 日本 小坂研究所(株)

(2) 試驗片

工作物의 旋盤加工時, 例를 들어 Three-jawed chuck 에 工作物을 固定시킬 경우, 工作物 素材에는 應力이 發生한다. 이것을 機械上으로는 完全히 眞円加工 하더라도 Chuck 으로부터 풀어내면 内部應力의 解放에 의해 形狀은 3 角形的으로 變形하여 眞円度 誤差가 생긴다. 이때 眞円度 Profile 은 Chuck 의 jaw數 및 把持力에 따라 달라진다.

Table. 1. List of specimens

S.No.	Shape	Classification	Material	Remarks
1		collar	SS-41	
2		cylindrical roller		
3		ball bearing 1	bearing steel	6303Z
4		2	"	7204B
5		hexagonal wrench		
6		workpiece 1	BSBM	
7		ball bearing 3	bearing steel	6005V
8		workpiece 2	SS-41	

試驗片으로는 이처럼 眞円度 Profile 이 代表的인 形狀인 것²⁵⁾으로 8種選擇하였으며, 本 實驗에 使用된 Spec. 및 Profile 의 形狀을 Table 1에 보였다. 試驗片의 番號는 편의상 任意로 附與한 것이며, 測定目的에 따라 1, 2, 3 番 試片은 正多角形狀, 3 番 試片은 일그러진 달걀형상, 4 番 試片은 楕圓形狀의 Profile 을 갖는 것이었으며, 7 番

試片은 變形을 주지 않은 日本精工 (NSK)의 Bearing 이었다. 6.8 番 試片은 Filter 의 效果를 實驗하기 위해 比較의 거친 成分의 Profile 을 갖는 것을 擇한 것이다.

Photo. 2는 實驗에 使用된 試驗片이다. Photo. 2에서 알 수 있듯이 5 番 試片은 Three-jawed chuck 에 固定시켜 測定하였다.

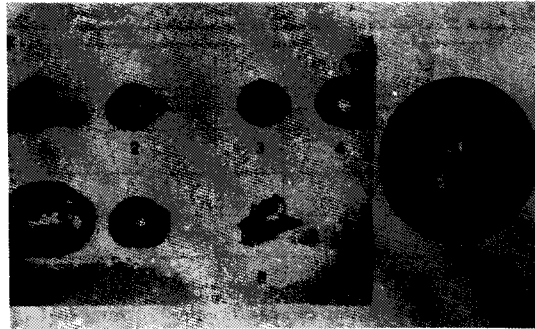


Photo. 2. Specimens

3 - 2. 實驗方法

本 實驗에서 使用된 假定은 다음과 같다.

- ①計測器의 觸針은 試驗片을 正確히 Trace 한다.
- ②測定結果는 digital 表示되므로 Read-out error 는 없다.
- ③溫度變化, 外部振動등에 의한 環境誤差는 無視한다.
- ④被測定物의 기울어짐에 의한 影響은 無視할 수 있다.

眞円度 0.025 μ m인 眞円度標準片 (master ball)으로 測定器의 信賴性을 確認하고, 測定目的에 따라 다음 세가지의 實驗을 수행하였다.^{26, 27)}

3. 2. 1 偏心の 影響測定

眞円度 測定器에 內藏되어 있는 電氣的自動求心裝置로 偏心補正을 하더라도 機械的求心操作이 不充分하거나 外部影響에 의해 正確한 求心이 不可能할 때는 正確한 測定結果를 기대할 수 없다. 따라서, 自動 Centering table 에 의한 求心이 된 경우와 150 μ m의 偏心量으로 偏心시켜 測定한 結果를 比較하였다. 偏心方向은 任意的으로 다르게 하였으며, 각각 1個所를 5回 반복 測定하였고, 測定倍率은 100 倍, Filter 는 N50 으로 하였다. 試驗片으로는 理論的으로 最小領域法 및 最小自乘

法에 의한 測定結果에 差가 없는 正多角形 6角렌치(5番試片)를 選擇하였다. 測定을 위한 補助機構로 Three-jawed chuck을 使用하였다.

3.2.2 眞円度評價法에 따른 測定結果의 差異 評價方法에 따라 實際測定物에 對해 어떠한 差異를 보이는지 알아보기 위해, 代表的인 Profile의 試驗片 6種(1番~6番試片)을 選擇하여, 測定部位를 A, B, C, 3個所로 나누어, 各各 5回 반복 測定한 平均値를 測定結果로 취하였다. 自動 Centering table 및 自動求心裝置에 의해 求心하였으며, 測定倍率は 500倍, Filter는 N50으로 하였다. 但, 6番試片에 對해서는 記錄便宜上 2000倍로 測定하였다.

3.2.3. Filter의 影響測定

一般의 眞円度測定器에는 測定目的에 따라 Profile의 山數를 制限하는 Low-pass filter가 內장되어 있는데, 眞円度測定結果는 Filter 條件에 따라 어떻게 달라지는가를 알아보기 위해, 比較的 거친 Profile의 6, 8番 試驗片과 眞円으로 보여지는 Profile의 7番試驗片의 1個所를 求心된 狀態에서 Filter를 N15, 50, 150, 500으로 바꾸어 가며 測定하였다. 測定倍率は 6, 7番試片에 對해 5000倍, 8番試片에 對해 500倍로 하였으며, 6番試片은 5回, 7, 8番試片은 各各 2回 반복測定하였다. 使用한 stylus의 先端半徑은 0.8mm이었으며, 測定Mode는 最小自乘法에 국한하였다.

Photo.3은 Master ball의 測定例이다.

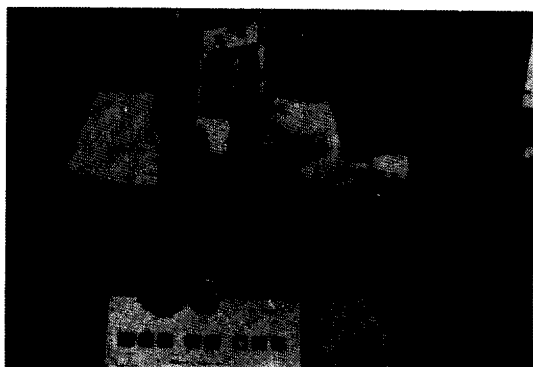


Photo. 3. Measurement of roundness

4. 實驗結果 및 考察

얻어진 實驗值 및 標準偏差와 分散의 計算結果는 NEC의 16bit micro computer PC-9801로 處理하였으며, Table 2에 나타낸바와 같다.

Table 2. Results of experiment

Table with 2 main sections: 'RESULTS OF EXPERIMENT 1' and 'RESULTS OF EXPERIMENT 2'. Each section contains a table with columns for CONDITION, trial numbers (1-5), AVERAGE, SD(IN-1), and V. It includes various LSC, RZC, MZC, HZC, MHC, and MIC measurements for different test pieces and filter settings.

(UNIT: μm)										
S	COORD	1	2	3	4	5	AVERAGE	SD(M-1)	V	
4 (C)	LSC	2.91	3.10	3.02	3.06	3.05	3.0200	0.0719	0.0452	
	MZC	2.28	2.26	2.49	2.22	2.20	2.4900	0.0671	0.0945	
	HFC	2.89	2.69	2.37	2.66	2.64	2.4900	0.1202	0.0145	
	HIC	2.92	2.73	2.96	3.00	2.84	2.8900	0.1072	0.0115	

* FOOTNOTE: THE 1ST COMMENT MEANS SPECIMEN NO. 2ND COMMENTS ARE MEASURED PARTS
 MEASURING INSTRUMENT: EC-400
 MAGNIFICATION: 50X EXCEPT SP. 4 (100X)
 SPECIMEN NO.: SP. 1 2 3 4 5 6
 FILTER: N 30
 DATE: 1983/02/07 - 02/10.
 MEASURED BY: DOKO HO 1400M.

***** RESULTS OF EXPERIMENT 3 *****

(UNIT: μm)										
S	FILTER	1	2	3	4	5	AVERAGE	SD(M-1)	V	
6	N500	2.19	2.18	2.18	2.19	2.19	2.1860	0.0055	0.0000	
	N150	2.12	2.14	2.08	2.10	2.06	2.1000	0.0316	0.0010	
	N 50	2.05	1.92	2.00	1.95	1.99	1.9220	0.0497	0.0025	
	N 15	1.76	1.71	1.75	1.72	1.77	1.7420	0.0259	0.0007	
7	N500	1.72	1.64				1.6000	0.0566	0.0032	
	N150	1.53	1.51				1.5200	0.0141	0.0002	
	N 50	1.29	1.33				1.3100	0.0283	0.0008	
	N 15	1.11	1.13				1.1200	0.0141	0.0002	
8	N500	21.67	21.69				21.6800	0.0137	0.0002	
	N150	20.63	20.54				20.5850	0.0626	0.0049	
	N 50	17.84	17.66				17.7500	0.1272	0.0162	
	N 15	14.57	14.51				14.5400	0.0424	0.0018	

* FOOTNOTE: THE NUMBER OF CURVATURE OF STYLUS IS R.O.U.
 MEASURING INSTRUMENT: EC-400
 MAGNIFICATION: 500X EXCEPT SP. 8(100X)
 SPECIMEN NO.: SP. 6 7 8
 FILTER: N 300 150 50 15
 DATE: 1983/02/10.
 MEASURED BY: DOKO HO 1400M.

4 - 1. 備心の影響

Fig.8은 最小自乘法 및 最小領域法에 對해 求心이 되었을 경우와 偏心시켜 測定한 경우의 差異를 보인 것이다. Fig.8에서 求心測定時에 比하여 偏心測定한 경우에는 測定値의 흠어짐이 큰 것을 알 수 있다. 또한 그때의 平均値는 評價方法이 같으면, 偏心시킨 경우에도 大同小異함을 알 수 있으므로, 電氣의 求心補正範圍를 벗어나지 않으면, 여러번 測定한 結果의 平均値를 취함으로써 無理없는 測定値를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

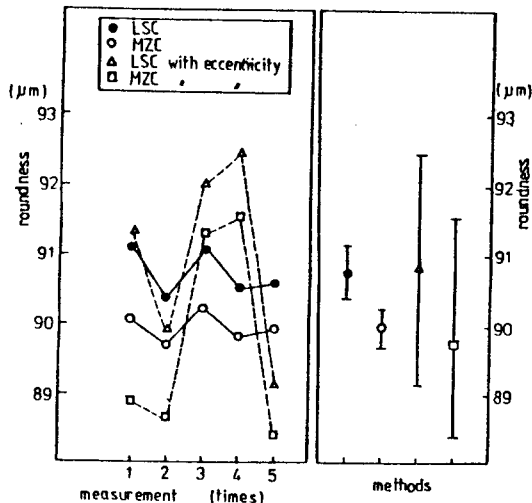


Fig. 8. Effect of eccentricity on out-of-roundness

4 - 2. 眞円度 評價法에 의한 差異

一般的으로 最小自乘法에 의한 評價結果는 最小領域法에 의한 結果에 比해 10% 정도 過大評價되는 것으로 알려져 왔는데, 本 實驗에서도 平均 9.8%크게 나타나 그 事實을 確認하였다.

Fig.9는 그 差異를 Profile 形狀에 따라 再配列하여 圖示한 것이며, 試驗片의 形狀特異性에 따라 그 差가 달라지고 있음을 보여준다. Profile이 橢圓形인 4番과 Profile이 正六角形인 5番試驗片의 경우에는 두 評價方法이 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 한편, 일그러진 달걀形狀의 Profile을 갖는 3番試驗片의 경우에는 두 評價法에 의한 差가 20%에 이르므로, 實用上으로 問題가 있음을 알 수 있다.

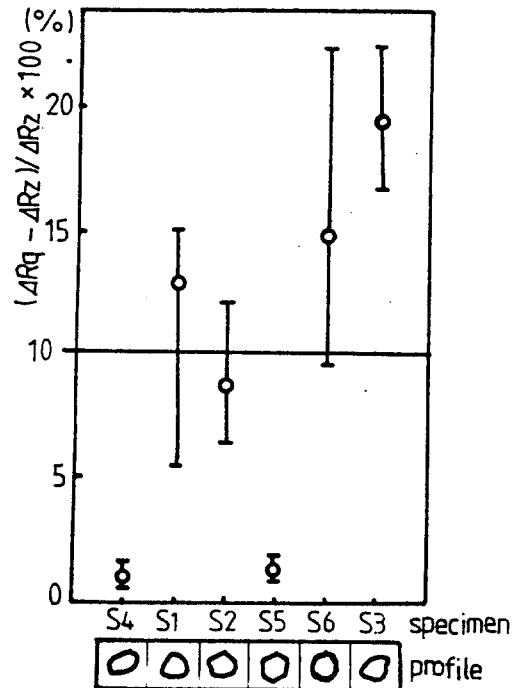


Fig. 9. Difference between least squares roundness and minimum zone roundness due to profiles

Fig.10는 半徑法에 의한 各 眞円度評價에 따른 分散을 나타낸 것으로, 最小自乘法 및 最小領域法에 의한 結果는 매우 安定되어 있으나, 內接円中心法 및 外接円中心法에 의한 評價時에는 分散이 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 內接円中心

回轉 2π 를 周期로 하는 回轉角 θ 의 函數 $f(\theta)$ 이다. 이것을 Fourier 展開하면,

$$f(\theta) = A_0 + (A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta) + \sum_{i=1}^{\infty} (A_i \cos i\theta + B_i \sin i\theta) \dots (1)$$

여기서, A_0 는 半徑에 關係하는 直流成分이고, 第 2項은 回轉中心과 測定된 圓의 中心의 偏心成分이며, 第 3項은 測定된 眞圓度信號 成分이다.

한편, (1)式的 A_0, A_1, B_1 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \dots (2)$$

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos \theta d\theta \dots (3)$$

$$B_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin \theta d\theta \dots (4)$$

따라서, 檢出器로부터 얻어진 $f(\theta)$ 를 1回轉만큼 積分하여 (2), (3), (4)式을 利用하면 半徑信號 및 偏心信號를 알 수 있으므로 眞圓度信號 $\epsilon(\theta)$ 는

$$\epsilon(\theta) = f(\theta) - (A_0 + A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta) \dots (5)$$

이 演算을 轉用 Analog computer로 하면 基準圓, 眞圓度, 圓筒度 등의 記錄 및 直讀이 可能해진다.

實用上 Computer를 쓰는 意義는 眞圓度を 偏心圖形誤差없이 記錄할 수 있다는 점과 나아가 眞圓度 등의 判讀이 容易해지며, 時間的 短縮效果와 함께 非專門家도 쉽게 良好한 測定結果를 얻을 수 있다는 데 있다. 이때 眞圓度 ΔR 은 다음 式으로 나타낼 수 있다.

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

2.2.2 最小領域法

어떤 圓形部分을 두개의 幾何學的 同心圓으로

위쳤을 때, 두 원의 間격이 最小가 되는 경우의 두 원 半徑差로 眞圓度を 表示하는 方法은 ISO R 1101에 근거한 最小領域法에 의한 것이다. 즉, Fig. 4에서 두개의 同心圓 사이의 領域 $\Delta R = |R_{\max} - R_{\min}|$ 의 값이 最小가 되도록 最小領域中心을 설정하고, 그때의 ΔR 을 眞圓度로 취하는 方法이다.

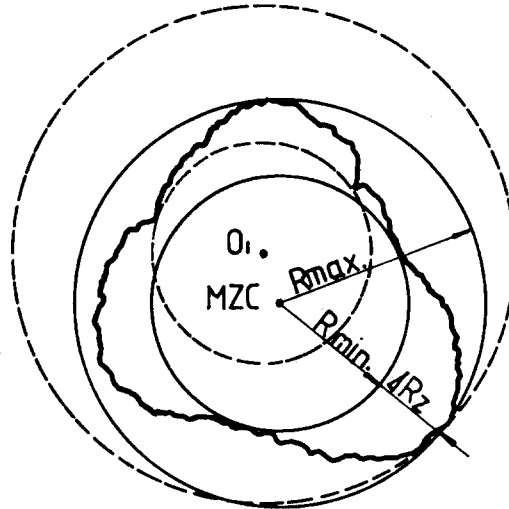


Fig. 4. Determination of minimum zone center

最小領域法에 의해 眞圓度を 求하려면, 多數의 同心圓이 그려진 Template를 記錄圓形에 直接 대어 읽어내는 方法¹⁵⁾과 數直解析에 의한 方法¹⁶⁾을 써야 한다. 前者의 경우에는 熟練이 必要하고, 後者の 경우에는 試行錯誤에 의한 反復計算으로 많은 演算時間을 요한다. 과거에는 檢出信號에 交差하는 任意的 圓을 그려, 이 圓과 同心으로 檢出信號에 內接 및 外接하는 두 圓의 半徑差를 求하고, 이를 反復하여 最小半徑差를 求하는 Algorithm을 썼으나, 1965年 J.A. Nedler와 R. Mead가 提案한 Simplex method가 알려진 以後, 이를 利用한 改良 Simplex法 등의 最適化技法에 의한 最小領域法에 對한 研究가 활발히 進行되고 있다. 그러나 아직까지 그 方法은 明確히 確立되어 있지 않다.

2.2.3 最小自乘法

記錄圖形위에 任意的 幾何學的 圓을 그렸을 때, 이 圓과 記錄圖形으로 포위된 面積의 自乘합이 最

法 및 外接円中心法을 사용할 경우에는 數回測定한 評價値를 眞円度로 취해야 할 것이다.

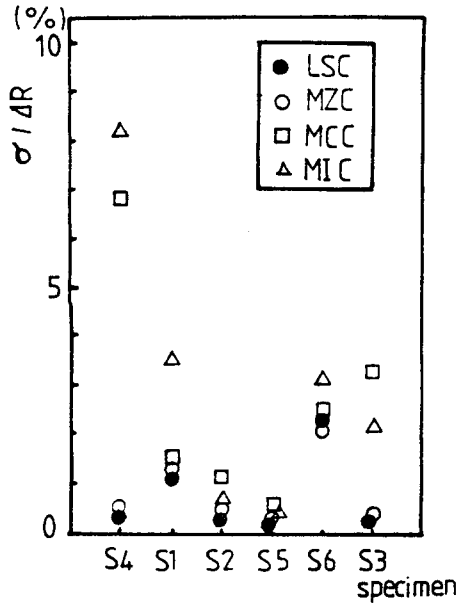


Fig. 10. Dispersion of roundness due to methods of the assessment

4 - 3. Filter의 影響

Fig. 11은 N 15 filter로 測定한 값을 基準으로 filter를 N50, N150, N500으로 各各 바꾸

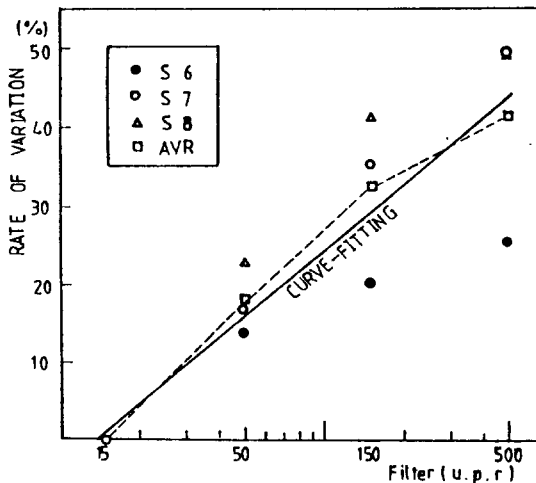


Fig. 11. Effect of filter in assessment of roundness (stylus tip radius = 0.8mm)

있을 때, 最小自乘法 眞円度測定値의 變化率을 나타낸 것이다. Filter의 Undulation이 增加함에 따라 測定된 眞円度는 N15 Filter의 測定値에 對해 對數적으로 增加함을 알 수 있다. 그 評價値에 對한 curve-fitting¹⁷⁾을 실시한 결과 $Y = 12.26 * \ln(X/13.34)$ 인 變化率의 關係式을 얻었으며, 이 式으로부터, ISO/DIS4291에 規定되어있는 N1500 Filter의 眞円度評價値는 N15인 경우에 비해 57.9%나 過大評價될 것으로 推定되었다. 위 實驗式은 指數函數에 對한 Program을 利用하여 얻었다.

以上으로부터 眞円度는 그 評價方法이나 Filter條件등에 의해 상당한 差가 생기는 것을 알았다. 따라서, 眞円度の 許容値를 設計圖面에 推定할 경우, 特히 Filter條件을 明記해야 할 必要가 있다.

한편, 最小領域法에 의한 보다 効率的인 Software의 開發이 要望되므로, 앞으로 새로운 Algorithm에 對한 계속적인 研究가 必要하다고 생각된다.

5. 結 論

以上과 같은 實驗結果에 따른 考察을 整理要約해 보면, 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

(1) 眞円度評價法중 最小自乘法이 最小領域法의 結果에 비해 過大評價되는 정도는 試片의 形狀特異性에 따라 달라지며, 表面波狀度가 크거나 眞円度 Profile의 形狀이 特殊한 경우를 除外하면 最小自乘法을 쓰는 것이 有用하다.

(2) Filter의 Undulation이 增加함에 따라 眞円度の 變化率은 對數적으로 增加한다.

References

1. JIS B 0621 - 1984
2. KS B 0604 - 73
3. JIS B 0607 - 1960
4. B.S 3730 - 1964
5. ISO/DIS 4291 - 1983
6. KS B 0425 - 81

7. JIS B 0621 - 1974
8. R.E. Reason : "Report on the Measurement of roundness Rank Precision Industries," 1966
9. M. Ido, R. Nagata : "On the New Measure of Roundness," Precision Eng., Vol. 28, No. 10, pp. 571-576, 1962
10. M. Goto, K. Iizuka : "A Method for Evaluating Form Errors of Cyindrical Parts," Precision Eng., Vol. 41, No. 5, pp. 477-482, 1975
11. J.A. Nedler, R. Mead : "A Simplex Method for Function Minimization," Computer Journal, 7, p. 308, 1965
12. T. Tsukada, T. Kanada : "An Evaluation Technique for Minimum Zone Roundness by means of an Operation Method," Precision Eng., Vol. 49, No. 10, pp. 1351-1357, 1983
13. A. Shimokohbe : "Evaluation of Form Errors by Minimum Zone Method," Precision Eng., Vol. 50, No. 4, pp. 697-703, 1984
14. H. Kato, Y. Nakano : "Easy Method of Analyzing Roundness Profile Curves by Using Tablet Digitizer," Precision Eng., Vol. 49, No. 5, pp. 624-629, 1983
15. T. Tsukada, T. Kanada : "Minimum Zone Evaluation of Cyindricity by Optimization Technique," Precision Eng., Vol. 50, No. 4, pp. 652-657, 1984
16. M. Goto, K. Iizuka : "An Analysis of Performance Error of Roundness Measuring Instrument," Report of the N. R. L. M., Vol. 28, No. 1, pp. 18-24, 1979
17. M.S. Caceci, W.P. Cacheris : "Fitting Curves to Data," BYTE, May, pp. 340-362, 1984
18. M. Sawabe, T. Furue : "The Comparison of the Measuring Methods for the out of Cylindricity," Report of the N. R. L. M., Vol. 28, No. 1, pp. 25-28, 1979
19. 塚田, 金田 : "圓筒形狀測定における サンプルリング条件の一決定法", 昭和 57 年度 精機學會春季學術講演會論文集, pp. 74~76, 1982.
20. 遠藤大海 : "精密測定器入の 電子技術應用", 日本機械學會誌 第 78 卷第 675 號, pp. 111~115, 1975.
21. 江川 満 : "真圓度測定器における 回轉軸系の設計と問題點", 精密機械 45 卷 10 號, pp. 1210~1214, 1976.
22. 澤邊雅二 : "高精密回轉軸の回轉精度測定とその問題點", 精密機械 45 卷 10 號, pp. 1237~1242, 1979.
23. 森 吉雄 : "真圓度 測定の話(1)~(7)", 計量管理 Vol. 32, No 3~9.
24. 江村 超 : "メカトロニクス入門", 日刊工業新聞社, 東京, pp. 1~36, 1983.
25. Nippon Seiko K.K. : "NSK Ball and Roller Bearings," 1982
26. "真圓度測定器 MODEL EC-4D 取扱説明書", 小坂研究所, 1981.
27. Thomas G. Beckwith : "Mechanical Measurements," 3rd ed., Addison-Wesley Pub. Co., pp. 23-46, pp. 150-168, 1983