

# 접촉식 3점지지법에 의한 내경측정의 기하학적 오차 해석

김민호\*, 김태영#

## Geometric Error Analysis of Contact Type Three Points Supporting Method for Inner Diameter Measurement

Min Ho Kim\* and Tae Young Kim#

### ABSTRACT

Inner diameter of bearing race is automatically measured by complete inspection system after grinding process. Contact type three points supporting method is widely applied to automatic inner diameter measurement because of its excellent stability. However, the geometric consideration regarding three points supporting method is not sufficient. In this study, the error equation from geometric error analysis of three points supporting method is found. The effect of factors in the error equation is also investigated. The error equation is linear for difference of diameter in sample and master on range of tolerance. An error becomes more and more larger, when the distance of two supporting balls or the diameter of supporting ball are increased. In the result, some considerations are proposed for measurement of inner diameter by the three points supporting method.

**Key Words** : Inner Diameter (내경), Three Points Supporting Method (3점 지지법), Geometric Error (기하학적 오차), Bearing (베어링)

### 기호설명

<p><math>D_m</math> : 마스터의 지름</p> <p><math>D</math> : 샘플의 지름</p> <p><math>T_m</math> : 3점지지법 측정에 의한 마스터의 상하 접촉점 사이의 거리</p> <p><math>T</math> : 3점지지법 측정에 의한 샘플의 상하 접촉점사이의 거리</p> <p><math>D_b</math> : <math>O_2, O_3</math>를 중심으로 하는 지지볼의 지름</p> <p><math>R_b</math> : <math>O_2, O_3</math>를 중심으로 하는 지지볼의 반지름</p>	<p><math>L</math> : 두 지지볼 중심을 잇는 직선거리(<math>\overline{O_2O_3}</math>)</p> <p><math>O_m</math> : 마스터의 중심</p> <p><math>R_m</math> : 마스터의 반지름(<math>\overline{O_mA_m}</math>)</p> <p><math>H_m</math> : 마스터 중심에서 두 지지볼의 접촉점을 잇는 선까지의 수직 거리(<math>\overline{O_mF_m}</math>)</p> <p><math>O</math> : 샘플의 중심</p> <p><math>R</math> : 샘플의 반지름(<math>\overline{OA}</math>)</p> <p><math>H</math> : 샘플 중심에서 두 지지볼 중심을 잇는 선까지의 수직 거리(<math>\overline{OF}</math>)</p> <p><math>e</math> : <math>O_1</math>이 <math>\overline{O_2O_3}</math>의 수직이등분선으로부터 떨어</p>
---	--

접수일: 2007년 8월 27일; 게재승인일: 2008년 3월 5일

\* 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

# 교신저자: 전북대학교 정밀기계공학과

E-mail: kimty@chonbuk.ac.kr Tel. (063)270-2371

- 진 거리, 즉 편심량( $\overline{I_m O_1} = \overline{I O_1}$ )
- $R_{b1}$  :  $O_1$ 을 중심으로 하는 지지볼의 반지름
- $H_{m1}$  : 마스터 중심에서  $O_1$  지지볼의 접촉점까지의 높이 ( $\overline{O_m G_m}$ )
- $H_1$  : 샘플 중심에서  $O_1$  지지볼의 접촉점까지의 높이 ( $\overline{O G}$ )

1. 서론

베어링의 생산공정에서 베어링 내륜 및 외륜의 내경과 외경의 치수는 품질을 좌우하는 중요한 인자로서, 내/외륜의 연삭공정후 조립공정 전에 내경과 외경의 치수를 측정후 양품만을 선별하여 조립공정으로 보내야만 한다.<sup>1</sup>

현재 베어링 생산업체들의 거의 모든 공정은 자동화되어 있어 품질검사 또한 자동화로 전수검사를 하고 있다. 따라서 품질검사 공정의 싸이클 타임도 다른 공정의 싸이클 타임과 맞추어 10초이내에 이루어져야 한다. 이러한 자동화 공정에서 외경측정보다는 내경측정에 어려운 점이 더 많다.

내경측정방법<sup>2</sup>에는 크게 비접촉식과 접촉식으로 나누어 볼 수 있으며 비접촉식에는 머신비전, 레이저센서나 와전류센서 등을 이용한 측정방법이 있고, 접촉식에는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer: 선형변위차동변압기)와 공기마이크로미터가 주로 사용되고 있다. 생산현장에서는 연삭후 측정물을 세척해도 절삭유와 칩 등이 남아 있어 비접촉식측정에 영향을 줄 수 있는 요인들이 많아 접촉식 방법을 주로 사용하고 있다.<sup>3</sup>

접촉식 방식으로 많이 사용되고 있는 LVDT를 이용한 측정은 내경에 접촉되어 직경선을 따라 비례적으로 움직이는 부위에 LVDT를 접촉시켜 직경을 측정한다. 이때 내경에 접촉되는 점을 두 점으로 할 경우 그 두 점을 이은 직선이 측정하고자 하는 원의 중심을 지나야 한다. 하지만 이러한 조건이 되도록 두 점을 접촉시키기가 쉽지가 않다. 더욱이 자동측정의 경우에는 현장의 여러 가지 열악한 환경으로 두 접촉점으로 신뢰할 수 있는 직경을 측정할 수가 없다. 따라서 Fig. 1(b)와 같이 원에 3 점을 접촉시켜 직경을 측정하는 3점지지법을 사용한다.<sup>4</sup> 이 방법은 세 점이 항상 이등변삼각형이 되도록 접촉시키는 방법으로 3점이 모두 원에 접촉되면 이등변 삼각형의 꼭지점에서 밀변에 수직한 선은 항상 원의 중심을 지나게 된다. 3점 지지법은 자

동측정시 세 점이 원에 접촉되도록만 하면 되므로 내경 측정 위치의 신뢰성이 높고, 위치탐색 시간이 짧은 장점을 가지고 있다.

하지만 내경의 자동측정에서 많이 쓰이고 있는 3점지지법에 대한 기하학적 고찰이 이루어지지 않은 상태에서 밀변과 꼭지점과의 수직 거리의 차이를 직경의 차이로 잘못 인식하고 사용하고 있다.

본 논문에서는 3점지지법에 의한 내경 측정에서 비교측정의 타당성 검증을 위해 기하학적 해석을 통하여 오차 공식을 도출하고 오차에 영향을 미치는 인자들에 대한 관계를 밝히고자 한다. 또한 이를 통하여 3점지지법 측정기 제작과 사용시 유의해야 할 점들에 대해 연구하였다.

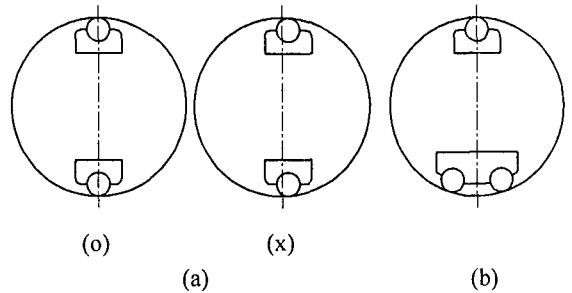


Fig. 1 Inner diameter measurement (a) Two points supporting method (b) Three points supporting method

2. 베어링 내경 자동측정

Fig. 1(a)에서와 같이 2점지지법에 의한 내경 측정의 경우 접촉된 두 점의 거리가 측정하고자 하는 원이 내경인지 확인하기가 어렵고, 내경을 측정할 수 있게 접촉되도록 하는 방법 또한 쉽지 않지만 3점지지법은 Fig. 1 (b)와 같이 원에 접촉되는 세 점이 항상 이등변삼각형이 되도록만 하면 이 세 점이 모두 원에 접촉되는 것만으로 원의 중심을 측정기의 측정선에 쉽게 일치시킬 수 있다. 또한 3점지지법은 2점지지법에 비해 측정중 측정물의 진동이나 움직임을 더 빨리 제거할 수 있고 측정물을 더 안정적으로 고정하여 측정에 유리한 환경을 만들어 준다는 장점도 가지고 있다. 이러한 점들 때문에 대부분의 베어링 내경 자동측정기에서는 3점지지법을 이용하고 있다.

또한, 베어링 내경 자동측정에서는 절대측정보

다는 기준이 되는 측정물 즉 마스터의 측정값과의 차이값으로 피측정물의 절대값을 알아내는 비교측정법을 이용하고 있다. 비교측정기는 측정범위는 작아도 분해능이 높아 동일한 제품의 공차나 오차를 측정하는 정밀측정에 유리하고, 측정범위가 작아 측정오차 누적이 절대측정기에 비해 적고 크기도 작게 제작할 수 있어 자동화 측정에 유리한 점을 가지고 있다.

Fig. 2는 베어링 외륜의 내경을 측정할 수 있는 LVDT를 이용한 3점지지법 비교측정기이다.

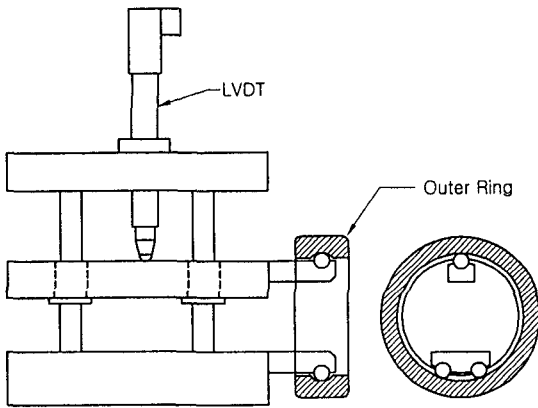


Fig. 2 Inner diameter measurement device of outer ring using LVDT

### 3. 기하학적 오차 해석

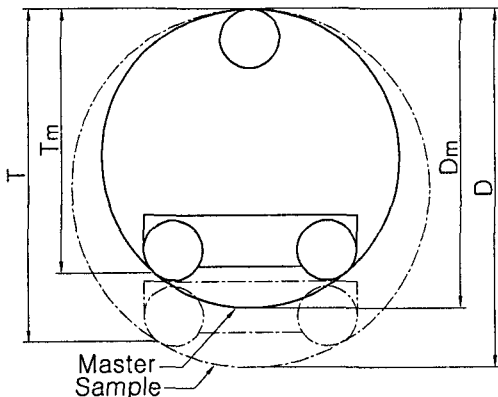


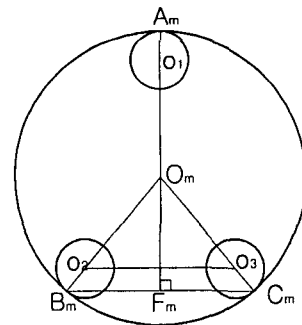
Fig. 3 Inner diameter measurement of master and sample by three points supporting

3점지지법에 의한 내경측정을 도식화 하면 Fig. 3 과 같다. 비교측정에서 실제 마스터와 샘플의 직경차이는  $D-D_m$ 이고 3점지지법으로 측정된 직경차는  $T-T_m$ 이다. 산업현장에서는  $D-D_m$  과  $T-T_m$ 이 당연히 같은 값이라고 인식하고 사용하고 있다. 과연 이러한 인식에 문제점이 없는지 기하학적 공식 유도를 통하여 살펴보자.

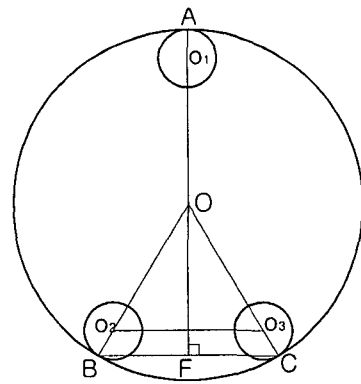
3점 지지법의 기하학적 오차해석은 측정물의 원에 내접하는 세 점의 접촉점이 항상 이등변삼각형을 이루며 측정하는 경우와 이등변삼각형에서 편심이 있을 경우를 고려한 두가지 경우를 생각하여 공식을 유도해 보기로 한다.

#### 3.1 세 지지점이 항상 이등변 삼각형일 때

먼저 측정물의 원에 내접하는 세 지지점이 항상 이등변 삼각형을 이루며 움직이는 이상적인 측정기의 경우로 Fig. 4와 같이 가정하여 오차 공식을 유도하여 보자.



(a) Master



(b) Sample

Fig. 4 Diagram of three points supporting for inner diameter measurement (isosceles triangle)

$O_1, O_2, O_3$ 가 항상 이등변삼각형을 이루며 측정을 한다고 가정하고 3점 지지법의 측정오차를 기하학적으로 해석하면 다음과 같다.

샘플과 마스터의 실제 직경차를  $\Delta D$ 라고 하면 식(1)과 같이 쓸 수 있고, 3점 지지법에 의해 측정된 샘플과 마스터의 직경차를  $\Delta D'$ 라 하면 식(2)와 같이 쓸 수 있다. 이때 3점 지지법에 의한 측정오차는 식(3)과 같다.

$$\Delta D = 2(R - R_m) \quad (1)$$

$$\Delta D' = (R + H) - (R_m + H_m) \quad (2)$$

$$E = \Delta D' - \Delta D = H - H_m - R + R_m \quad (3)$$

한편  $\overline{F_m C_m}$ 은  $\triangle O_m B_m C_m$ 과  $\triangle O_m O_2 O_3$ 가 닮은꼴임을 이용하여 비례식으로 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\overline{F_m C_m} = \frac{R_m}{R_m - R_b} \frac{L}{2} \quad (4)$$

$H_m$ 은  $\triangle O_m F_m C_m$ 에서 피타고라스의 정리와 식(4)를 이용하여 식(5)과 같이 쓸 수 있고,  $H$ 는  $\triangle OFC$ 를 이용하여 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$H_m = \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{R_m}{R_m - R_b} \frac{L}{2}\right)^2} \quad (5)$$

$$H = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{R - R_b} \frac{L}{2}\right)^2} \quad (6)$$

따라서 식(3)은 식(5)와 식(6)를 대입하여 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

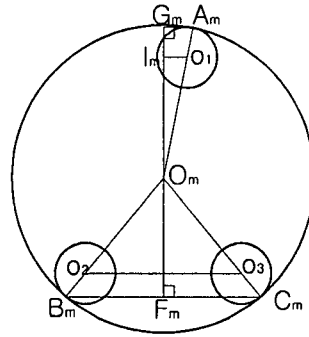
$$E = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{R - R_b} \frac{L}{2}\right)^2} - \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{R_m}{R_m - R_b} \frac{L}{2}\right)^2} - R + R_m \quad (7)$$

식(7)을 통하여 3점 지지법으로 내경을 측정할

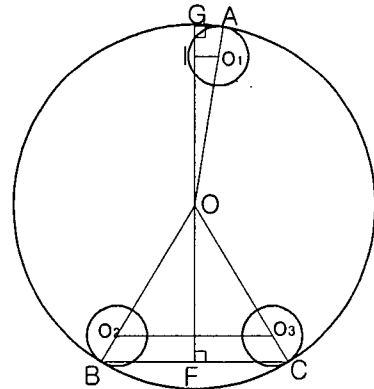
경우  $L > 0$  and  $R \neq R_m$ 인 조건에서는 항상 기하학적 오차가 발생하게 됨을 알 수 있다.

### 3.2 세 지지점이 이등변 삼각형이 아닐 때

3점 지지법의 이상적인 측정기는 세 점이 항상 이등변 삼각형을 이루지만 현실에서는 편심오차가 있을 수 밖에 없다. 따라서 Fig. 5와같이 편심이 있을 경우를 고려하여 오차공식을 유도해 보자.



(a) Master



(b) Sample

Fig. 5 Diagram of three points supporting for inner diameter measurement(not isosceles triangle)

$O_1, O_2, O_3$ 가 이등변삼각형을 이루지 못하고  $O_1$ 이 꼭지점에서 e만큼 편심되어 있을 경우를 고려하여 측정오차를 기하학적으로 해석하면 다음과 같다.

3점 지지법에 의해 측정된 샘플과 마스터의 직경차  $\Delta D'$ 는 식(8)과 같이 쓸 수 있다. 이때 3점 지지법에 의한 측정오차는 식(9)과 같다.

$$\Delta D = (H + H_1) - (H_m + H_{m1}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E &= \Delta D' - \Delta D \\ &= H + H_1 - H_m - H_{m1} - 2R + 2R_m \\ &= (H - H_m - R + R_m) + (H_1 - H_{m1} - R + R_m) \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)를 보면 O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>을 중심으로 하는 지지볼에 의한 오차와 O<sub>1</sub>을 중심으로 하는 지지볼의 편심에 의한 오차의 합으로 이루어진 것을 볼 수 있다.

H<sub>m1</sub>은 ΔO<sub>m</sub>G<sub>m</sub>A<sub>m</sub>과 ΔO<sub>m</sub>I<sub>m</sub>O<sub>1</sub>이 닮은꼴임을 이용하고 피타고라스의 정리를 이용하여 식(10)과 같이 쓸 수 있고, H<sub>1</sub>는 ΔOGA와 ΔOIO<sub>1</sub>을 이용하여 식(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{m1} = \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{R_m \times e}{R_m - R_{b1}}\right)^2} \quad (10)$$

$$H_1 = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R \times e}{R - R_{b1}}\right)^2} \quad (11)$$

따라서 식(9)는 식(10)과 식(11)을 대입하여 식(12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{R - R_b} \frac{L}{2}\right)^2} \\ &\quad - \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{R_m}{R_m - R_b} \frac{L}{2}\right)^2} - R + R_m \\ &\quad + \sqrt{R^2 - \left(\frac{R \times e}{R - R_{b1}}\right)^2} \\ &\quad - \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{R_m \times e}{R_m - R_{b1}}\right)^2} - R + R_m \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 O<sub>1</sub>을 중심으로 하는 지지볼의 편심에 의한 오차만을 분리하여 공식으로 나타내면 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} E_e &= H_1 - H_{m1} - R + R_m \\ &= \sqrt{R^2 - \left(\frac{R \times e}{R - R_{b1}}\right)^2} \\ &\quad - \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{R_m \times e}{R_m - R_{b1}}\right)^2} - R + R_m \end{aligned} \quad (13)$$

### 3.3 적용예(세 지지점이 이등변삼각형을 이룰 때)

3.1에서 구한 식(7)의 오차식이 샘플의 지름에 따라 어떤 양상을 보이는지 살펴보고, 두 지지볼 사이의 거리와 두 지지볼의 지름이 오차에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 실제 예를 적용하여 오차값들을 살펴보기로 한다.

Fig. 6은 마스터의 지름이 10mm, 지지볼의 지름이 1mm일 경우 두 지지볼의 간격 L이 각각 3, 4, 5mm일 때 샘플의 직경 10±4mm 사이에서 측정 오차를 식(7)을 적용하여 구한 그래프이다. 전체적인 그래프의 양상은 마스터의 직경과 샘플의 직경이 같을 경우에는 오차가 없으나 샘플이 마스터의 직경보다 커질수록 +오차가 커지고 반대로 샘플이 마스터 직경보다 작아질수록 -오차가 커짐을 알 수 있다. 두 지지볼의 간격 L이 클수록 오차의 크기도 커진다.

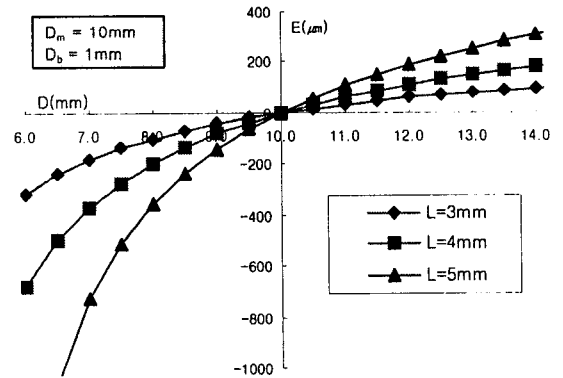


Fig. 6 Error of three points supporting measurement (D<sub>m</sub> = 10mm, D<sub>b</sub> = 1mm, D = 10±4mm)

Fig. 7은 마스터의 지름이 10mm, 두 지지볼의 간격 L이 4mm일 경우 두 지지볼의 지름 D<sub>b</sub>가 각각 0, 1, 2mm일 때 샘플의 직경 10±4mm 사이에서 측정 오차를 식(7)을 적용하여 구한 그래프이다. 두 지지볼의 직경의 영향은 직경이 커질수록 오차도 커짐을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에서는 전체적인 오차 양상을 보기 위해 샘플의 지름 공차가 ±4mm일때의 영역에 대해서 그래프를 그려 보았으나 실제 생산현장에서 베어링류의 관리 공차는 ±50μm정도이다.

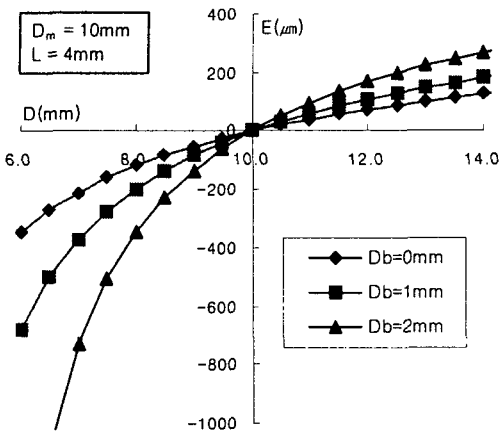


Fig. 7 Error of three points supporting measurement ( $D_m = 10\text{mm}$ ,  $L = 4\text{mm}$ ,  $D = 10 \pm 4\text{mm}$ )

그래서 샘플지름 공차  $\pm 50\mu\text{m}$  영역에서 오차를 살펴보면 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

Fig. 8은 마스터의 지름이 10mm, 지지볼의 지름이 1mm일 경우 두 지지볼의 간격 L이 각각 3, 4, 5mm일때 샘플의 직경  $10 \pm 0.05\text{mm}$  사이에서 측정 오차를 식(7)을 적용하여 구한 그래프이다. 샘플지름 공차  $\pm 50\mu\text{m}$  영역에서 오차는 샘플지름에 대해 거의 선형적인 양상을 보이고 있다. 샘플지름이 10.05mm일 때 오차는 각각  $L = 3\text{mm}$ 일 경우 약  $1.3\mu\text{m}$ ,  $L = 4\text{mm}$ 일 경우 약  $3.5\mu\text{m}$ ,  $L = 5\text{mm}$ 일 경우 약  $6\mu\text{m}$ 이다.

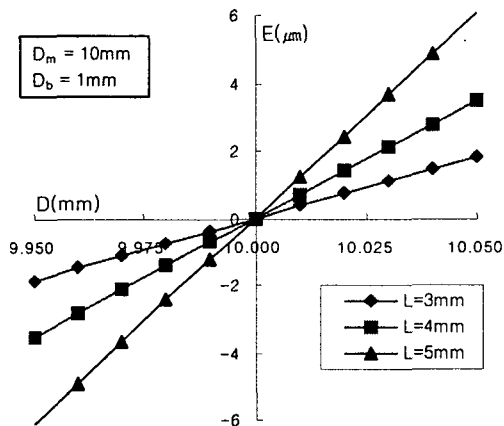


Fig. 8 Error of three points supporting measurement ( $D_m = 10\text{mm}$ ,  $D_b = 1\text{mm}$ ,  $D = 10 \pm 0.05\text{mm}$ )

Fig. 9는 마스터의 지름이 10mm, 두 지지볼의 간격 L이 4mm일 경우 두 지지볼의 지름  $D_b$ 가 각각 0, 1, 2mm일 때 샘플의 직경  $10 \pm 0.05\text{mm}$  사이에서 측정 오차를 식(7)을 적용하여 구한 그래프이다. 샘플지름이 10.05mm일 때 오차는 각각  $D_b = 0\text{mm}$ 일 경우 약  $2.3\mu\text{m}$ ,  $D_b = 1\text{mm}$ 일 경우 약  $3.5\mu\text{m}$ ,  $D_b = 2\text{mm}$ 일 경우 약  $5.7\mu\text{m}$ 이다.

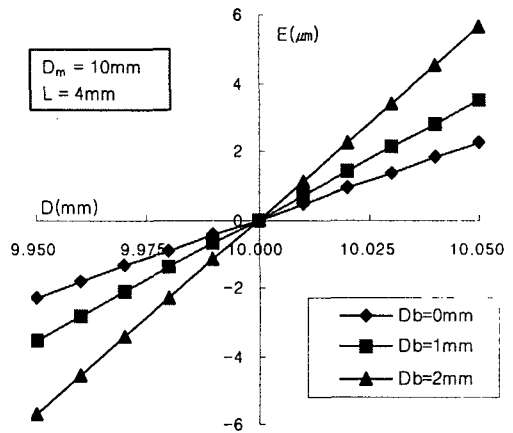


Fig. 9 Error of three points supporting measurement ( $D_m = 10\text{mm}$ ,  $L = 4\text{mm}$ ,  $D = 10 \pm 0.05\text{mm}$ )

Fig. 10은 Fig. 7에서 마스터와 샘플의 지름, 두 지지볼 사이의 거리, 지지볼의 지름들이 모두 4배로 확대 되었을 때 샘플의 지름  $40 \pm 0.05\text{mm}$ 에서 오차를 식(7)을 적용하여 구한 그래프이다. 오차 Fig. 8에서와 거의 동일하다.

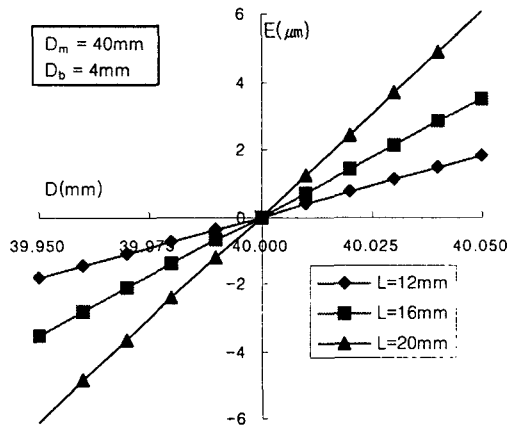


Fig. 10 Error of three points supporting measurement ( $D_m = 40\text{mm}$ ,  $L = 4\text{mm}$ ,  $D = 10 \pm 0.05\text{mm}$ )

이는 같은 비율의 측정에서 동일한 공차 구간에 서는 거의 동일한 오차가 있음을 보인다.

**3.4 적용예(세 지지점이 이등변삼각형이 아닐 때)**

세 지지점이 이등변삼각형을 이루지 못하고 편 심을 가지고 있을 때를 고려하여 3.2에서 구한 오 차식 식(12)는  $O_2, O_3$ 을 중심으로 하는 지지불에 의 한 오차와  $O_1$ 을 중심으로 하는 지지불의 편심에 의 한 오차의 합으로 되어 있다.  $O_2, O_3$ 을 중심으로 하 는 지지불에 의한 오차는 3.3에서 살펴보았으므로  $O_1$ 을 중심으로 하는 지지불의 편심에 의한 오차만 을 살펴보기 위해 식(13)을 적용하여 오차값의 양 상을 살펴보기로 한다.

Fig. 11에서와 같이 편심만을 고려한 오차의 양 상이 Fig. 6과 같이 편심이 없을 때의 양상과 같음 을 볼 수 있다. 이는 식(5)에서 두 지지불사이의 거 리  $L$ 과 식(13)에서 편심  $e$ 가 같은 역할을 하고 있음 을 알 수 있다.

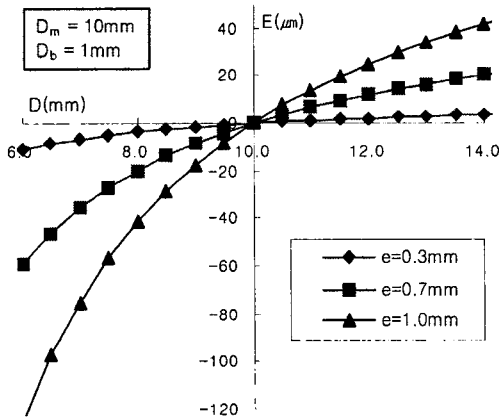


Fig. 11 Error of three points supporting measurement ( $D_m = 10\text{mm}$ ,  $D_b = 1\text{mm}$ ,  $D = 10 \pm 4\text{mm}$ , not isosceles triangle)

Fig. 12는 마스터의 지름이 10mm, 지지불의 지 름이 1mm일 경우 편심 $e$ 가 각각 0.3, 0.7, 1mm일 때 샘플의 직경  $10 \pm 0.05\text{mm}$  사이에서 편심만을 고려한 측 정 오차를 식(13)을 적용하여 구한 그래프이다. 샘플지름 공차  $\pm 50\mu\text{m}$  영역에서 오차는 샘플지름에 대해 거의 선형적인 양상을 보이고 있다. 샘플지름 이 10.05mm일때 오차는 각각  $e = 0.3\text{mm}$ 일 경우 약

$0.07\mu\text{m}$ ,  $e = 0.38\text{mm}$ 일 경우 약  $3.5\mu\text{m}$ ,  $e = 1\text{mm}$ 일 경 우 약  $0.77\mu\text{m}$ 이다. 전체 오차는 두지지불 사이에 의 한 오차와 편심에 의한 오차의 합이 된다. 그러나 Fig. 7에서 두 지지불 사이의 거리에 의한 오차에 비해서 편심에 의한 오차는 아주 작음을 알 수 있 다. 이는 편심  $e$ 가 두지지불 사이의 거리  $L$ 에 비해 아주 작기 때문이다.

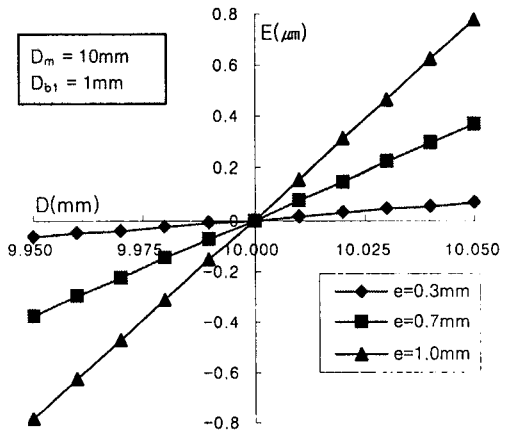


Fig. 12 Error of three points supporting measurement ( $D_m = 10\text{mm}$ ,  $D_b = 1\text{mm}$ ,  $D = 10 \pm 0.05\text{mm}$ , not isosceles triangle)

**4. 결과**

3점 지지법에 의한 기하학적 오차 공식을 유도 하고 이를 이용하여 실제 예를 적용한 결과 마스터 와 샘플의 직경이 동일하지 않을 경우에는 항상 오 차가 존재하게 됨을 알 수 있다. 이때 샘플이 마스 터의 직경보다 클 경우에는 + 오차가 발생하고 샘 플이 마스터의 직경보다 작을 경우에는 -오차가 발 생한다. 이러한 오차의 양상은  $\pm 50\mu\text{m}$ 의 공차구간에 서 볼 때 샘플의 직경에 대해 거의 선형적이다.

두 지지불 사이의 거리가 더 멀수록, 지지불의 직경이 클수록 오차는 더 커진다.

세 지지점이 이등변 삼각형을 이루지 못하고 편 심되어 있을 경우 편심에 의한 오차가 추가로 발생 한다. 편심에 의한 오차 양상도 편심이 없을 때의 양상과 같다. 편심만에 의한 오차는 편심을 두 지 지지불 사이 거리의 1/100이하정도로 관리 한다면 두 지지불 사이의 거리에 의한 오차에 비해 무시할 만 큼 작다.

## 5. 결론

본 연구에서는 3점 지지법의 오차해석 결과 3점 지지법에 의한 내경 측정시 다음과 같은 점들을 고려해야 한다는 결론을 얻었다.

1. 마스터의 지름은 샘플의 측정 공차범위의 중간값을 갖도록 해야한다. 오차는 마스터의 값에서 멀어질수록 커지기 때문이다.

2. 마스터의 지름을 샘플의 측정 공차범위의 중간값으로 해서 측정시 실체는 공차 범위보다 더 좁게 공차관리를 하게 된다. 샘플이 마스터보다 클 때는 + 오차로 인해 실제보다 큰 값이 나오고 마스터보다 작을 때는 -오차로 인해 실제보다 작은 값이 나오기 때문이다.

3. 따라서 정확한 공차관리를 위해서는 오차공식에 의한 오차값을 공차값에 더하여 공차관리를 해야 한다.

4. 지지불 사이의 거리와 지지불의 지름은 측정의 안정성을 해치지 않는 범위 내에서 가능한 작게 해야 한다.

5. 세 지지점이 이동변삼각형을 이루지 못하고 편심이 존재할 경우 편심을 고려한 오차공식을 적용해야 한다.

## 참고문헌

1. Kim, J. S., Kang, M. C. and Bae, J. C., "A Scheme on Roundness Improvement in Internal Grinding for Bearing Inner Race," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 60-66, 1996.
2. Lim, J. S., "Development of In-Process Gauging Technology," Korea Research Institute of Standards and Science, pp. 1-79, 1989.
3. Lee, H. M., "Measuring Inside Diameter with Electronic Micrometer," Department of Intelligent Machinery System a Master's Thesis, Pusan National University, pp. 1-16, 1998.
4. Han, E. K., Choi, M. S. and Rho, B. O., "A Study on Roundness Measurement by Three Point Method with Stylus Type Pickups," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 47-55, 1987.
5. Lee, J. K., Lee, J. D., "Precision Measurement

Engineering," Gijeon, pp. 180-237, 2002.

6. Han, M. Y. and Hahn, H. S., "Automatic Focusing Vision System for Inspection of Size and Shape of Small Hole," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 80-86, 1999.