

## CNC 공작기계 상에서 접촉식 측정 프로브를 이용한 홀 측정 프로그램 개발

이 찬 호\* · 이 응 석\*†

\* 충북대학교 기계공학부

### Development of Hole Inspection Program using Touch Trigger Probe on CNC Machine Tools

Chan Ho Lee\* and Eung Suk Lee\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

(Received December 20, 2010; Revised November 16, 2011; Accepted November 22, 2011)

**Key Words** : Touch Trigger Probe(접촉식 측정 프로브), Hole-Plate(홀 플레이트), Roundness Tester(진원도 측정기), Eccentricity(편심량), Least Square Center(최소자승 중심), Pre-Travel(프리트래블)

**초록**: 다양한 소비자의 요구에 따라 가공된 제품을 좀더 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 공작기계 내 자동계측장치를 적용하는 사례가 급격히 증가하고 있다. 자동 계측으로 가장 많이 활용되는 접촉식 측정 프로브는 주로 공작물의 가공 원점을 설정하고, 정확한 치수 검사를 통한 불량유무 판정 및 보상가공에 많이 활용된다. 따라서 본 연구에서는 기기상 자동계측장치인 접촉식 측정 프로브를 활용하여 가공된 형상을 신속하고 정확하게 측정하는 방법을 연구하였으며 이를 위하여 가장 많이 활용되는 홀 측정 사이클에 대한 매크로 프로그램을 개발하였다. 또한 측정 시 홀의 진원도 오차에 따라 발생할 수 있는 편심량을 시뮬레이션하여 분석하였으며 본 연구의 신뢰성을 높이기 위하여 기기상에서 개발된 홀 측정 매크로 프로그램을 이용하여 홀 플레이트에 대한 측정이 이루어졌으며, 진원도 오차에 따른 편심량을 검증하였다.

**Abstract**: According to many customers' requests, optical measurement module (OMM) applications using automatic measuring devices to measure the machined part rapidly on a machine tool have increased steeply. Touch trigger probes are being used for job setup and feature inspection as automatic measuring devices, and this makes quality checking and machining compensation possible. Therefore, in this study, the use of touch trigger probes for accurate measurement of the machined part has been studied and a macro program for a hole measuring cycle has been developed. This hole is the most common feature to be measured, but conventional methods are still not free from measuring error. In addition, the eccentricity change of the least square circle was simulated according to the roundness error in a hole measurement. To evaluate the reliability of this study, the developed hole-measuring program was executed to measure the hole plate on the machine and verify the roundness error in the eccentricity simulation result.

### 1. 서 론

최근 가전 제품, 휴대전화 등에 대한 소비자의 요구가 다양해짐에 따라, 다품종 소량 생산의 경향이 강해지고 있다. 이에 따라 금형 제조 및 가공업체에서도 고정밀도화, 단납기화가 이전보다 더욱 강하게 요구되어 경쟁에서 살아남기 위해서는 지속적인 품질관리와 제조 프로세스의 혁신이

필요하게 되었다. 이러한 시장 요구를 반영하여 가공된 제품을 좀더 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 공작기계 내에 자동계측장치를 적용하는 사례가 급격히 증가하고 있으며, 그 활용가치 또한 높아지고 있다.

자동계측장치는 일반적으로 공구를 측정하는 공구셋팅 장치와 공작물 원점을 설정하거나 가공된 공작물의 치수를 측정하는 접촉식 측정 프로브로 구분할 수 있다.

공구셋팅 장치는 상대적으로 저렴한 비용으로 다양한 공구길이 및 경 측정을 자동으로 편리하게

† Corresponding Author, [eungsuk@chungbuk.ac.kr](mailto:eungsuk@chungbuk.ac.kr)  
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

수행할 수 있을 뿐만 아니라, 장시간 가공에 따른 스펀들의 온도 변화를 정확히 측정하여 열변형 보정까지 수행할 수 있다는 장점이 있어 많이 활용되고 있다.<sup>(1)</sup>

반면 접촉식 측정 프로브는 주로 공작물의 가공 원점을 자동으로 업데이트하는 기본적인 기능 이외에 최근에는 가공 공정 중간에 측정과 보정을 수행하는 인프로세스(In process) 기능을 통해서 제품 치수를 장비 내에서 직접 측정하여 불량유무를 즉각 판단하는 용도로 많이 사용되고 있으며 정밀 공차가공을 위한 보상가공에 많이 활용되고 있다.

산업현장에서 까다로운 가공제품 치수공차 및 단 납기에 대한 요구가 더욱 가속화되면서 가공 후 3 차원 측정기를 이용한 기존 방법에 의한 제품 검증과정은 문제 발생시 대처가 늦을 뿐 아니라 후처리 비용이 증가하여 원가절감 경쟁에서 뒤쳐지게 된다. 어떻게 하면 가공 공정 내에서 치수 검증에 신뢰성을 부여하고, 보정가공을 할 수 있을 것인가의 문제는 금형가공 전체 공정의 프로세스를 얼마나 단축할 수 있는가와 직결되는 현안이다.

따라서 본 연구에서는 기기상 자동계측장치인 접촉식 측정 프로브를 활용하여 가공된 형상을 신속하고 정확하게 측정하는 방법을 연구하였으며, 이를 위하여 가장 많이 활용되는 홀 측정 사이클에 대한 매크로 프로그램을 개발하였다.

공작기계 상에서 접촉식 측정 프로브로 홀 측정을 수행하기 위해서는 일반적으로 소재 중심을 기준으로 상하, 좌우 4 점을 측정하고, 각각의 측정된 위치의 기계좌표를 CNC 컨트롤러 메모리상의 공통변수에 저장하고 매크로 프로그램의 연산을 통하여 중심 및 직경을 결정한다. 하지만 이러한 단순 연산방식은 기기 상에서 가공 후 측정 시 측정환경이 청결하지 못한 이유로 절삭유 또는 칩 등의 영향으로 인한 측정오차가 발생하는 경우 편심 및 치수오차가 발생하는 원인이 될 뿐만 아니라 이러한 측정에서 결과는 홀 형상의 진원도 오차에 의해서 많은 영향을 받았다.

일반적으로 가공된 홀은 임의의 진원도 오차를 가지기 때문에 본 연구에서는 측정 시 홀의 진원도 오차에 따라 발생할 수 있는 편심량을 시뮬레이션 하여 분석하였다. 또한 본 연구의 신뢰성을 높이기 위하여 기기상에서 개발된 홀 측정 매크로 프로그램을 이용한 홀 플레이트 실제 측정이 이루어 졌으며, 진원도 오차에 따라 측정 점의 갯수와 편심량의 관계를 검증하였다.

## 2. 홀 측정 매크로 프로그램

### 2.1 프로브 교정

접촉식 측정 프로브를 이용한 정확한 측정을 위해서는 기준구 또는 링게이지를 이용한 프로브 길이, 스타일러스 볼 반경/오프셋 등에 대한 교정이 필요하다. 프로브의 프리 트래블 특성에 따른 유효 길이 및 볼 반경 값이 교정된 상태에서 소재의 정확한 직경 및 치수가 결정된다. 또한 주축의 중심선과 스타일러스 볼 중심이 일치하지 않아서 발생하는 X/Y 오프셋에 따른 편심 오차를 교정한 상태에서 소재의 정확한 중심 및 위치가 결정된다.

Fig. 1 은 링게이지를 이용하여 접촉식 측정 프로브를 교정하는 그림이며,<sup>(2)</sup> Fig. 2 는 프리트래블 교정 결과를 나타낸 그래프이다.

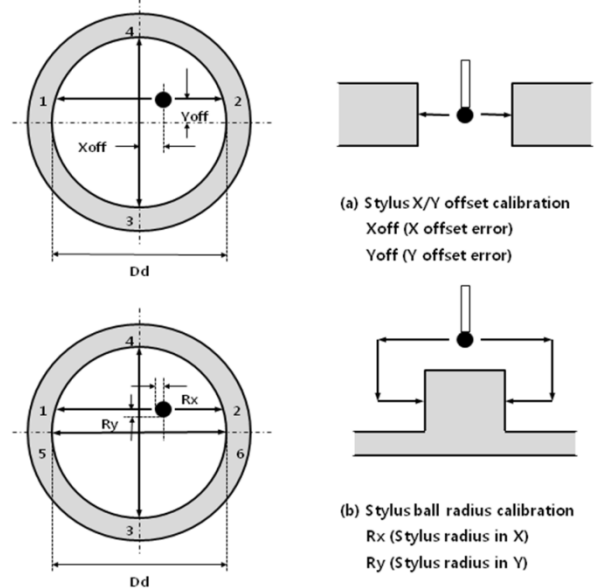


Fig. 1 Calibrating the stylus ball radius and X/Y offset

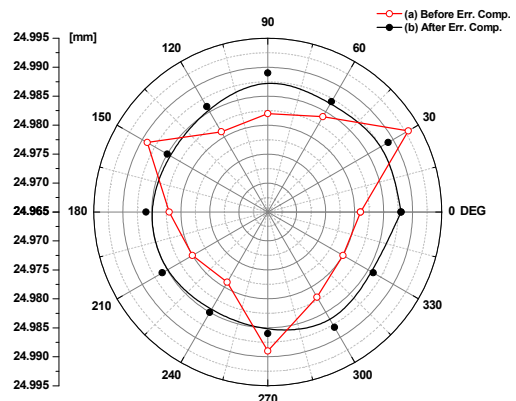


Fig. 2 Calibration plots of pre-travel variation

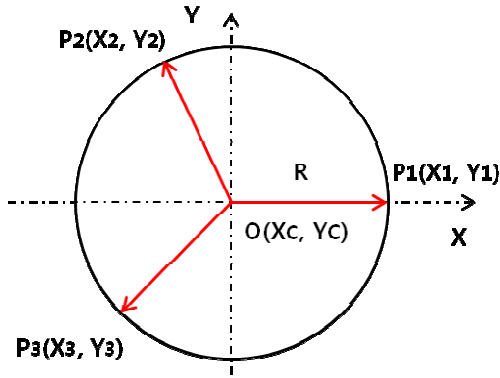


Fig. 3 Center finding from 3 points calculation on circle

### 2.2 3점 측정 사이클

교정이 완료된 프로브를 이용하여 본 연구에서 제안한 기기상에서 홀 플레이트의 공간좌표 측정을 위한 홀 측정 매크로 프로그램이 개발되었다.

Fig. 3과 같이 원주상에서 3점 벡터방향 측정을 통한 원 중심 및 반경을 확인할 수 있는 방정식이 유도되었다.

원의 중심( $X_c, Y_c$ )과 반경  $R$ 을 가지는 원에서 원호상의 임의의 위치 ( $X, Y$ )에 대하여 반경을 구하는 일반적인 원의 방정식은 식 (1)과 같다.

$$(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 = R^2 \quad (1)$$

위 식을 계산하여 고차 항 순으로 전개하면 식 (2)와 같다.

$$X^2 + Y^2 + A \cdot X + B \cdot Y + C = 0 \quad (2)$$

여기서  $A = -2 \cdot X_c$ ,  $B = -2 \cdot Y_c$ ,  $C = X_c^2 + Y_c^2 - R^2$ 로 표현된다.

식 (2)를 행렬의 형태로 구성하면

$$\begin{bmatrix} X & Y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = K \quad (3)$$

여기서  $K = -[X^2 + Y^2]$ 이다.

원의 중심 및 반경을 구하기 위하여 원호 상의 최소 3점에 대한 임의의 위치를 가지고 식 (3)과 같이 행렬의 형태로 배열하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $K_1 = -[X_1^2 + Y_1^2]$ ,  $K_2 = -[X_2^2 + Y_2^2]$ ,  $K_3 = -[X_3^2 + Y_3^2]$ 이다.

따라서 식 (5)와 같이 3점 위치에 대한 역행렬을 이용하여 A, B, C의 해를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)를 전개하면 A의 해는 식 (6)과 같이 표현되고, 따라서 식 (7)에 따라 원의 X 중심을 구한다.

$$A = \frac{K_1 \cdot (Y_2 - Y_3) + K_2 \cdot (Y_3 - Y_1) - K_3 \cdot (Y_2 - Y_1)}{X_1 \cdot (Y_2 - Y_3) - X_2 \cdot (Y_1 - Y_3) - X_3 \cdot (Y_1 - Y_2)} \quad (6)$$

$$X_c = -\frac{A}{2} \quad (7)$$

식 (5)를 전개하면 B의 해는 식 (8)과 같이 표현되고, 따라서 식 (9)에 따라 원의 Y 중심을 구한다.

$$B = \frac{K_1 \cdot (X_3 - X_2) + K_2 \cdot (X_1 - X_3) - K_3 \cdot (X_1 - X_2)}{X_1 \cdot (Y_2 - Y_3) - X_2 \cdot (Y_1 - Y_3) - X_3 \cdot (Y_1 - Y_2)} \quad (8)$$

$$Y_c = -\frac{B}{2} \quad (9)$$

또한 식 (5)를 전개하면 C의 해는 식 (10)과 같이 표현되고, 따라서 식 (11)에 따라 원의 반경  $R$ 을 구한다.

$$C = \frac{K_2 \cdot (X_3 \cdot Y_1 - X_1 \cdot Y_3) + K_1 \cdot (X_3 \cdot Y_2 - Y_3 \cdot X_2) - K_3 \cdot (X_2 \cdot Y_1 - Y_2 \cdot X_1)}{X_3 \cdot (Y_1 - Y_2) - X_2 \cdot (Y_1 - Y_3) - X_1 \cdot (Y_3 - Y_2)} \quad (10)$$

$$C = X_c^2 + Y_c^2 - R^2, \quad R = \sqrt{-C + X_c^2 + Y_c^2} \quad (11)$$

원의 반경  $R$ 을 구하는 또 다른 방법으로 앞서 구한  $X_c, Y_c$  해를 이용하여 식 (12)와 같이 직접 계산할 수 있다.

$$R = \sqrt{(X_1 - X_c)^2 + (Y_1 - Y_c)^2} \quad (12)$$

### 2.3 매크로 프로그램 생성

교정 및 측정용 프로그램은 산업현장에서 가장 많이 사용되는 공작기계용 수치제어장치인 화낙(FANUC) 컨트롤러를 기준으로 커스텀 매크로를 이용하여 프로그래밍을 수행하였다.

스타일러스 볼에 대한 런아웃(Run out) 조정이 완료 후 교정모드를 수행하여 정확한 접촉식 측정

**Table 1** Measuring G code cycles

No	Measure cycles	G code commands	Inputs	Outputs
1	Probe Length Calibration	G800 A1. Zz Tt	A1 Probe length cal. cycle Zz Ref. surface position Tt Tool offset number	Tool offset update
2	Stylus Offset Calibration	G800 A2. Dd Zz	A2 Stylus offset cal. cycle Dd Ring gauge diameter Zz Measuring height	#502 X offset #503 Y offset
3	Ball Radius Calibration	G800 A3. Dd Zz	A3 Ball radius cal. cycle Dd Ring gauge diameter Zz Measuring height	#500 X radius #501 Y radius
4	Bore Measure	G801 Aa Bb Cc Dd Ss	Aa First measure angle Bb Second measure angle Cc Third measure angle Dd Boss diameter Ss Work offset no.	Work offset update
5	Boss Measure	G801 Dd Zz Ss	Dd Bore diameter Zz Boss measure height Ss Work offset no.	Work offset update
6	Sphere Measure	G802 Dd Zz Ss	Dd Bore diameter Zz Boss measure height Ss Work offset no.	Work offset update

하여 최소자승 원(Least square circle) 분석법이 사용된다.<sup>(3)</sup>

Fig. 5 와 같이 측정중심을 원점으로 하고 도형을 n 등분하여 각각의 교점  $P_1, P_2, \dots, P_n$  위 직각 좌표상의 값을  $X_1, X_2, \dots, X_n$  그리고  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  으로 하면 최소자승 중심 (Least square center) O 의 X, Y 좌표상의  $X_c, Y_c$  및 평균반경 R 은 식 (13)으로 구한다.

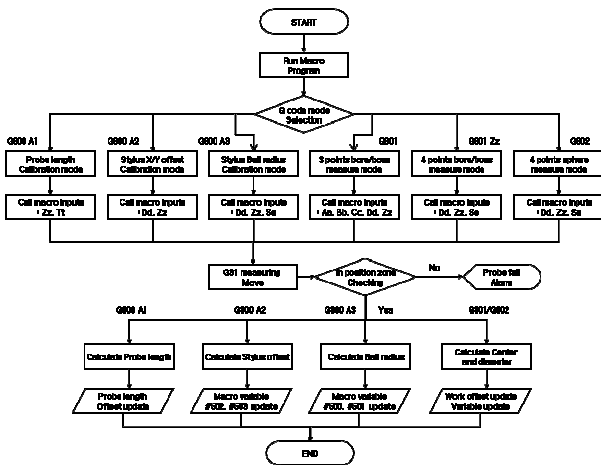
$$X_c = \frac{2\sum X_i}{n}, Y_c = \frac{2\sum Y_i}{n}, R = \frac{\sum \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}}{n} \quad (13)$$

$X_c, Y_c$  를 구하고 새로운 중심원 O 를 기준으로 새로 그려진 도형에 내접원과 외접원을 그릴 수 있다. 이 동심원의 반경차( $R_{max}, R_{min}$ )가 최소자승 원 분석법에 의한 진원도 오차이다.

편심량은 식 (14)와 같이 공칭원 중심에서 최소자승원 중심까지의 거리로 정의된다.<sup>(4)</sup>

$$Eccentricity = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \quad (14)$$

$X_c$  와  $Y_c$  는 최소자승원의 편심된 X, Y 좌표이다.



**Fig. 4** Macro program flowchart for Probe calibration and 3 points bore/boss measure cycle

프로브 유효길이 및 스타일러스 X/Y 오프셋과 스타일러스 볼 반경을 보정하기 위한 매크로 변수를 설정한다. 교정이 끝나면 측정 프로브는 측정을 수행하기 위한 준비가 완료되며 2.2 절에서 전개된 원의 방정식으로 유도된 수식을 이용하여 홀 측정 후 중심 및 직경에 대한 해를 구하는 매크로 프로그램이 생성되었다.

Fig. 4 는 접촉식 측정 프로브 교정 및 홀 측정 사이클을 수행하기 위한 매크로 프로그램 순서도 (Flowchart)를 나타내며, Table 1 은 NC 내장형 G 코드 프로그램과 측정 시 입력값과 출력값에 대한 의미를 나타낸다.

### 3. 진원도 오차 영향 평가

#### 3.1 최소자승법에 의한 진원도 평가

일반적으로 진원도 분석 시 편심을 제거하기 위

#### 3.2 진원도 오차에 따른 편심량 시뮬레이션

접촉식 측정 프로브를 이용한 내경 홀 측정 시 진원도 오차에 따라 발생하는 편심량에 대하여 연구하였다.

이를 위하여 홀의 진원도 오차의 크기에 따라 측정 점의 수가 편심량에 미치는 영향을 분석하였다.

공칭반경에 대하여 진원도 대역을 설정하고 진원도 대역 중심의 홀 진원도 오차가 시뮬레이션 되었으며 보이는 것처럼 균등한 각도에 대하여 측정 포인트가 고려되었다.

Fig. 5 는 균등한 각도분할로 8 포인트를 가지고 시뮬레이션된 오차에 의하여 결정된 최소 자승 원의 예를 보여준다.

Fig. 6 은 임의의 50 점을 이용하여 진원도 오차를 시뮬레이션 하고, 홀 측정 시 진원도 오차의 크기에 따라 최소자승 원의 중심이 편심되는 정도를 그래프로 나타낸다. 측정은 홀 내경 둘레를 8 점 또는 16 점 균등하게 측정한 것으로 가정하였다. Fig. 6 (a)는 8 점 측정 시 편심의 변화를 표시하며, 시뮬레이션 결과는 진원도 오차가 증가할수록 편심이 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 3  $\mu\text{m}$  의 진원도 오차 범위에서는 최대 1  $\mu\text{m}$  이하의 편심이 발생하고 있으며, 이는 정밀가공에서 홀 가공 시 진원도 오차를 3  $\mu\text{m}$  이

내로 관리하는 경우, 진원도에 따른 편심의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 의미한다.

Fig. 6(b)와 같이 16 개의 측정 점으로부터 계산된

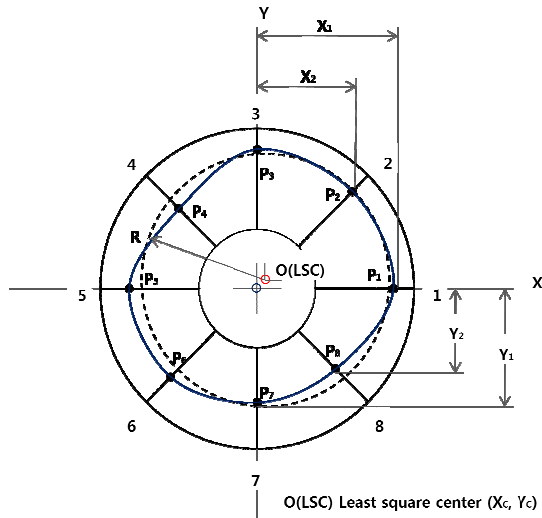
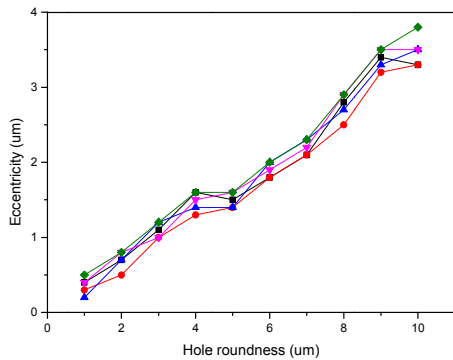
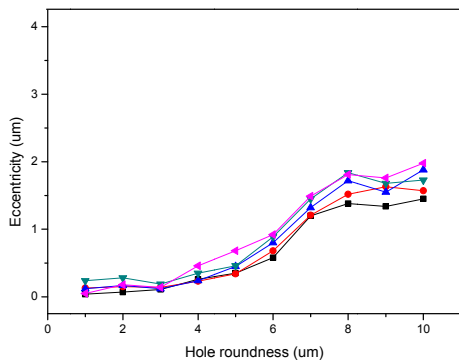


Fig. 5 Simulated hole roundness error and an example of the calculated least squares circle



(a) With 8 data points



(b) With 16 data points

Fig. 6 Hole roundness effect on the calculated eccentricity of the least squares circle centre, with assumed uniformly spaced measuring points

편심량은 8 점을 사용할 때보다 훨씬 작아지는 것을 확인할 수 있다. 홀 둘레 균등하지 않는 임의의 각도에서 측정 점의 계산결과도 균등한 측정 데이터와 유사하다.

시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 가공된 홀 내부는 진원도 오차를 포함한다. 이러한 진원도 오차는 균등하게 분포되거나 주기적이지는 않지만 최소자승 원 중심에 어느 정도 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 진원도에 따른 편심을 제거하기 위하여 본 연구에서는 홀 플레이트의 진원도 오차 측정 및 측정 점의 개수가 증가함에 따라 편심이 감소하는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

#### 4. 홀 측정 실험 및 평가

##### 4.1 실험장치 구성

본 연구에서 개발된 홀 측정 매크로 프로그램을 적용하기 위한 실험이 이루어졌다.

우선 진원도 측정기를 이용하여 홀 플레이트의 진원도를 측정하였고, 시뮬레이션 결과와 같이 진원도에 따른 편심을 제거하기 위하여 홀 플레이트의 내접원에 대하여 측정 점을 3/4/5/6/8/9/10/12/24/36 으로 구분하여 홀 내경을 측정하였고, 측정 점의 수에 따라서 실제 최소자승원 중심의 변화를 관찰하였다.

Fig. 7 은 진원도 측정 그림이며 Table 2 는 실험에 사용된 진원도 측정기 규격을 나타낸다. 실험을 통하여 확인된 진원도 측정 결과는 이후 터치 프로브를 이용한 홀 계측 시 측정 점 수에 따른 편심량의 변화를 분석하는데 활용되었다.

또한 Fig. 8 과 같이 화낙 ROBO DRILL-21ai 탭핑 머신 상에서 홀 플레이트 계측을 위한 OMM 시스템이 구성되었다. 접촉식 측정 프로브 선정 시 프로빙 오차가 최소자승 중심(LSC)에 미치는 영

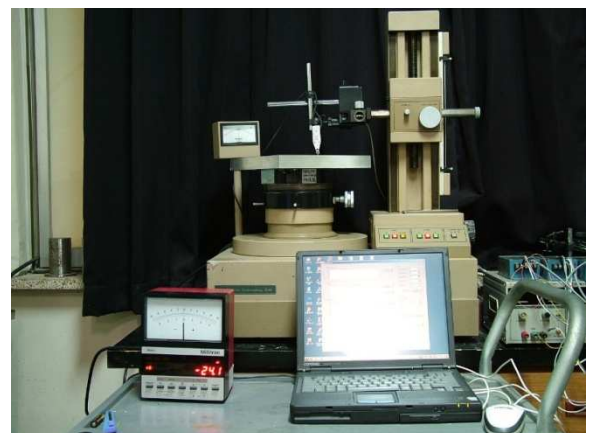


Fig. 7 Hole plate roundness test

향을 최소화하기 위하여 스트레인 게이지를 사용하여 프리트래블 변화를 최소화 한 레니쇼 사의 MP700 고정도 프로브가 사용되었다. Table 3 은 MP700 고정도 프로브 규격을 나타낸다.

MP700 접촉식 측정 프로브는 설치 후 프로브 상단의 미세조절나사를 이용하여 스타일러스 중심과 주축 중심을 2 $\mu\text{m}$  이내로 일치시킴으로써 주축 중심에 대한 X/Y 편심량을 보정하였고, 2 장에서 제시한 교정사이클을 운영하여 프리 트래블 특성에 따른 스타일러스 볼 반경오차와 프로브 길이오차를 보정하였다.

**Table 2** Specifications of roundness tester(Kosaka, EC-2A)

Specifaicons	Details
Table turning speed	6 RPM
Probe mahr(Germany) millitron	M1240
Resolution	0.1 $\mu\text{m}$
Data acquisition speed	6 Samples/sec
Measurement range	0 ~ 1800 $\mu\text{m}$

**Table 3** Specifications of touch probe

Specifications	Renishaw, MP700
Sensor directions	$\pm X, \pm Y, +Z$
Transmission type	360° infra-red optical
Transmission range	OMM: 6 m (19.7 ft)
Uni-directional repeatability (max 2 sigma at stylus tip)	0.35 $\mu\text{m}$ (0.00001 in) With 100mm stylus
Pre-travel variation in XY plane	$\pm 0.25 \mu\text{m}$ ( $\pm 0.00001$ in)
XYZ (variation from sphere)	$\pm 1.75 \mu\text{m}$ ( $\pm 0.00004$ in)
XY trigger force – constant	0.19 N (0.68 ozf)
+Z direction trigger force	3.25 N (11.69 ozf)

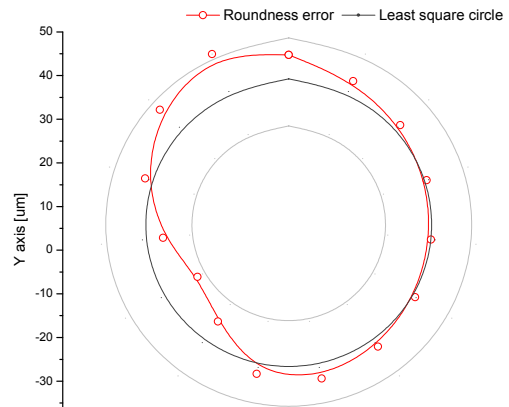


**Fig. 8** Hole measurement on machine using Touch probe

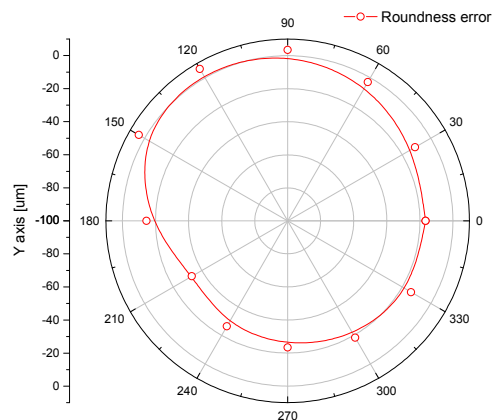
Fig. 9 은 진원도 측정기를 이용하여 측정된 홀 플레이트의 진원도 측정 결과이며 최소자승 중심을 기준으로 최소외접원과 최대내접원을 그렸을 경우 진원도 오차는 대략 40 $\mu\text{m}$  이다.

Fig. 10 는 접촉식 측정 프로브를 이용하여 측정된 홀 플레이트의 진원도 측정 결과이다. 홀 내경에 대하여 10 도 간격으로 총 36 점에 대한 계측이 이루어 졌기 때문에 앞서 진원도 측정기에서 출력된 그래프와 같이 원주면 전 구간에 대한 상세한 진원도 형상을 얻을 수는 없지만 구간별 오차를 종합하여 홀 내경의 전반적인 진원도 형상의 분포를 확인할 수 있었다.

프로브를 이용하여 측정한 최대 진원도 오차는 35 $\mu\text{m}$  로 확인 되었으며, Fig. 9 진원도 측정기의 측정 결과와 비교하였을 경우 전체적으로 유사한 형상의 진원도를 가지기 때문에 접촉식 측정 프로브를 이용한 기기상 진원도 측정에 신뢰성을 부여할 수 있었다.



**Fig. 9** Roundness plot from Roundness tester



**Fig. 10** Roundness plot from Touch trigger probe



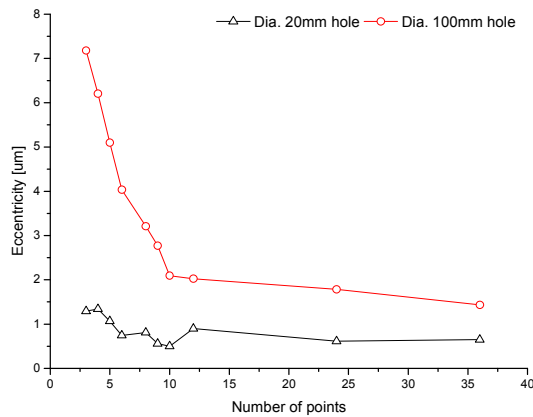


Fig. 11 Eccentricity variation from hole measure points

앞장에서 검증한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 이러한 진원도 오차를 가지는 홀의 중심을 측정 시 측정 점의 갯수에 따라 발생할 수 있는 편심량에 대하여 실험하였다.

실험에 객관성을 부여하기 위하여 피 측정 홀은 홀 플레이트의 직경 100mm 중심 홀과 직경 20mm 측면 홀 두 종류를 선정하였다.

접촉식 측정 프로브를 이용하여 측정된 기준물 중심 홀의 진원도 오차는  $35\mu\text{m}$  이고 측면 홀의 진원도 오차는  $4\mu\text{m}$  으로 확인하였으며 진원도 오차의 크기에 따라 측정 점의 갯수와 편심량의 관계를 실험을 통해 알아보았다.

동일한 홀에 대하여 3/4/5/6/8/9/10/12/24/36 점 측정이 각각 이루어졌으며 측정 점의 차이에 따라 3장에서 서술한 방식으로 최소자승 중심 및 평균 반경이 구해졌다.

측정 결과 Fig. 11 와 같이 상대적으로 진원도 오차가 적은 측면 홀에서는 측정 점의 갯수가 최소자승 중심에 적은 영향을 미치는 반면 중심 홀과 같이 진원도 오차가 큰 원을 측정 시에는 정확한 중심을 얻기 위하여 측정 점의 갯수가 매우 중요한 것을 알 수 있었다.

결론적으로 홀의 크기나 진원도에 관계없이 측정 점이 증가할수록 편심량이 감소하여 정확한 중심이 산출될 수 있다는 것을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기기상 자동계측장치인 접촉식 측정 프로브를 이용하여 가공된 홀 형상을 정확하게 측정하는 방법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원호상의 임의의 3 점 위치를 이용하여 원 중심 및 반경을 구하는 방정식을 유도하였으며,

CNC 상에서 접촉식 측정 프로브를 운영하기 위한 매크로 프로그램을 개발하였다.

(2) 홀 측정 시 최소 자승 원 분석법을 이용하여 편심이 원의 진원도 오차의 크기에 비례하여 증가하는 현상을 시뮬레이션 하고, 진원도 오차와 편심의 상관관계를 검증하였다.

(3) 접촉식 측정 프로브를 이용하여 가공 시편 홀 플레이트의 중심 원에 대한 진원도 측정을 수행하였으며, 기기상 측정 결과와 진원도 측정기의 측정 결과를 비교/분석하여 기기상 측정의 신뢰성을 얻을 수 있었다.

(4) 기기상에서 홀 플레이트의 중심 홀과 측면 홀에 대한 측정을 통하여 측정 점의 갯수가 증가할수록 편심량이 감소하는 것을 검증하였다. 이는 가공된 홀이 진원도 오차를 가질 경우 편심 발생에 따른 측정오차를 줄이기 위한 기준으로 활용될 수 있다.

(5) 편심 보정을 위한 측정 점의 증가는 전체 측정시간을 증가시키는 원인이 된다. 따라서 제품 공차범위를 고려하여 적절한 측정 점의 갯수를 선정하는 것이 필요하다.

(6) 본 연구를 통하여 홀 측정 시 편심 오차를 줄이고 정확한 측정이 가능하도록 하는 방법을 제시함으로써 접촉식 측정 프로브의 활용성을 높일 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Lee, E. S., Lee, C. H. and Kim, S. C., 2008, "Machining Accuracy Improvement by Automatic Tool Setting and On Machine Verification," *Key Engineering Materials*, Vols. 381-382, pp. 199~202
- (2) Renishaw, 1995, "Inspection Plus Software Programming Manual," Renishaw PLC, United Kingdom.
- (3) Han, G. H., Rho, B. O. and Her, M. S., 1989, "An Analysis of Performance Error of High Precision Measuring Instrument," *Trans. Of the KSME*, Vol. 13, No. 5, pp. 862~874
- (4) Lee, E. S. and Burdekin, M., 2001, "A Hole-Plate artifact Design for the Volumetric Error Calibration of CMM," *Int J Adv. Manuf. Technol.*, Vol.17, pp. 508~515
- (5) Park, D. G., 2010, "Volumetric Error Calibration of Machine Tools Using Artifact," PhD thesis, Mechanical Engineering div., CBNU.
- (6) Lee, E. S., 1993, "Volumetric Error Calibration of CNC-Machine Using Artifact Method," PhD thesis, Manufacturing Div., UMIST.