

〈論 文〉

## 접촉식 프로브의 오차교정 및 보정기술

박희재\* · 이교일\*

(1994년 3월 2일 접수)

## Calibration/Compensation of Errors of the Touch Probe

Heuijae Pahk and Kyoil Lee

**Key Words :** CMM(3차원 측정기), Machine Tool(공작기계), Touch Probe(접촉식 프로브), Probe Error Calibration Compensation(프로브오차 교정/보정)

## Abstract

Touch trigger probes are widely used for inspection purposes in the CMM(Coordinate measuring machine) or machine tool. The errors introduced by measurement probe are fairly systematic, thus can be calibrated and compensated properly. This paper presents a technique for the error calibration and compensation of the probe errors, which can be easily applicable to the manufacturers and users of the measurement probe. The probe coordinate system is defined for the probe error assessment, and a reference sphere ball is measured, and the probe errors are calibrated. The calibrated probe errors are represented in the 3D error map and 2D error map along probing direction. Detail algorithms for the error compensation are proposed.

## 1. 서 론

오늘날 많은 산업현장 및 연구분야에서 광범위하게 사용되고 있는 대부분의 3차원 측정기는 접촉식 프로브를 사용하고 있으며, 또한 최근들어 공작기계의 다기능화의 추세에 따른 측정기능을 가지는 대부분의 공작기계의 경우에, 틀매가진에 접촉식 프로브를 장착하고 있어서, 측정 및 검사의 목적으로 사용하고 있다. 전체 측정정밀도(overall accuracy, total measuring accuracy)의 관점에서 볼 때, 사용자가 직접 경험하는 측정정도는 기계 시스템의 기하학적/기구학적 정도뿐만 아니라, 측정프로브의 정도의 영향을 받게 되며, 일반적으로 프로브의 정도는 프로브의 길이, 직경 등에 따라 달라지게 된다. 따라서 측정 및 검사작업의 고정도화를 위해서 프로브의 오차를 측정하고 평가하는 기술이

점차 중요시되고 있다. Pegg<sup>(1)</sup>은 프로브 성능시험을 위해서 기준볼을 사용하고, 프로브의 교정을 위해서는 레이저를 이용하였다. Kunzmann<sup>(2)</sup>은 정밀 기준볼을 이용하여 프로브의 오차를 평가하고 이를 3차원 벡터로 표시하는 방법을 제안하였다. 기존의 방법들은 프로브오차를 측정하고 평가하는 유효하나, 오차를 교정하고 보정하여 정밀한 측정프로브로서의 기능을 하게 하는 면에 있어서 만족할 만한 기술을 아직 제시되고 있지 못한 형편이다. 본 연구에서는 기준 구면볼을 3차원 등간격으로 프로빙하여, 프로브오차 측정과 보정을 위한 프로브좌표계를 정의하고, 기준 구면볼의 측정을 통한 프로브오차의 교정, 프로브오차 맵의 작성과 이를 이용한 오차보정 등에 대해서 설명하고자 한다.

## 2. 프로브오차의 측정과 교정

접촉 트리거방식의 측정프로브는 크게 세부분으

\*정회원, 서울대학교 기계설계학과

로 구성된다. 팁(tip), 프로브 바늘(stylus), 그리고 프로브 몸체부분이다. 프로브가 접촉하는 측정력은 프로브 몸체의 굽힘효과로 인해 프로브바늘의 탄성변형을 야기한다. 따라서, 프로브바늘의 탄성 변형을 조절하기 위해서 바늘 팁의 공칭반경보다는 유효반경이 사용된다.

대부분의 상용의 접촉프로브들은 트리거링회로를 가지는데, 트리거링을 야기하는 미소변위는 프로빙(probing)방향에 의존해서 약간씩 변하게 된다. 이때, 프로빙방향에 의존하는 오차를 프로브오차(probe lobing error, pretravel variation)라고 부른다. Fig. 1은 측정기로 정밀한 링을 측정할 경우에 나타나는 전형적인 프로브오차 패턴을 보이고 있는데, 여기서, 프로브의 오차는 매우 계통적인 것을 확인할 수 있으며, 따라서 이는 적절한 방법에 의해서 교정 및 보정이 가능하게 된다.

2.1 프로브좌표계

프로브의 다양한 자세에 대해서 프로브오차를 효과적으로 측정 및 평가하기 위해, 프로브좌표계(x', y', z')를 고려하였다. Fig. 2는 상용의 2축 프로브의 개략을 보이며, 여기서, A, B는 각각 틸트

(tilt), 롤(roll)각도를 의미한다. 틸트각도(A)는 0도에서 90도의 범위에서, 롤각도(B)는 0도에서 360도의 범위에서 통상 사용된다. z'축은 프로브팁의 중심에서 프로브바늘의 방향을 가리키고, x'축은 롤각(B)이 0도일 때 공칭 기계좌표계 x축과 일치하고 롤각의 변화에 따라서 변화하는 방향을 의미한다. 한편 y'축은 z'축의 수직평면에 있으며 x'축에 수직하는 방향으로서 x', y', z'축이 오른 손법칙을 따르는 방향으로 정의한다. 프로브 및 공칭 기계좌표계가 공통 원점을 가진다면, 프로브좌표계(x', y', z')와 기계좌표계(x, y, z)사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다. 즉, e<sub>x'</sub>, e<sub>y'</sub>, e<sub>z'</sub>를 각각 x', y', z' 방향의 단위벡터라고 하면,

$$\begin{aligned}
 e_{z'} &= (-\sin A \cos B, -\sin A \sin B, \cos A) \\
 e_{y'} &= e_{z'} \times e_z / |e_{z'} \times e_z| \\
 &= (-\sin B, \cos B, 0) \\
 e_{x'} &= e_{y'} \times e_{z'} / |e_{y'} \times e_{z'}| \\
 &= (\sin A \cos B, \cos A \sin B, \sin A)
 \end{aligned} \tag{1}$$

이처럼 두 좌표계 사이의 관계는 3×3 변환행렬 T<sub>p</sub>로 나타내어진다. 즉,

$$[x', y', z']^T = T_p [x, y, z]^T$$

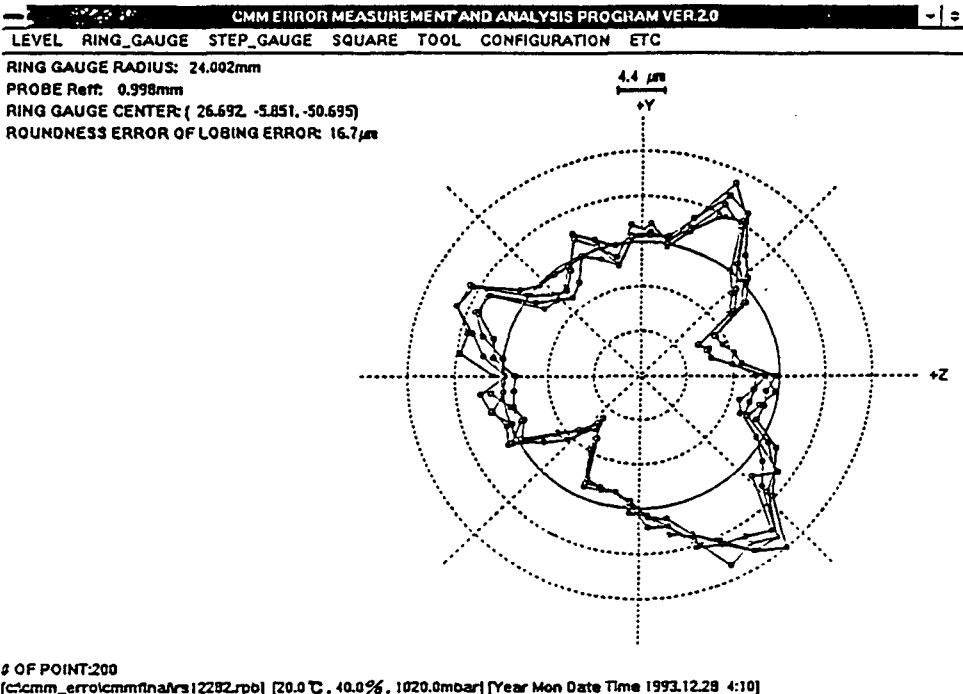


Fig. 1 A typical probing error pattern

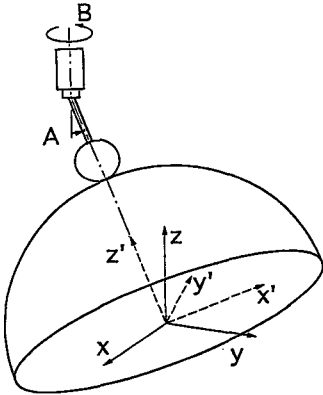


Fig. 2 Probe coordinate system

$$Tp = \begin{bmatrix} \cos A \cos B & \cos A \sin B & \sin A \\ -\sin B & \cos B & 0 \\ -\sin A \cos B & -\sin A \sin B & \cos A \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, A, B는 각각 프로브의 틸트(tilt), 롤(roll)각이다.

관계식(2)는 기준구의 측정, 프로브오차 교정, 그리고 유용하게 사용한다.

### 2.2 기준구의 측정경로

프로브오차는, 크기가 상대적으로 작은 기준구의 반구부를 등간격으로 측정함으로써 평가된다. 프로브오차는 프로빙(probing)방향의 함수로서 평가되기 때문에 프로브오차 교정을 위한 프로빙의 방향은 구면볼에 법선방향이 되도록 한다. 3차원 측정기를 통해서 측정을 수행하는 경우, 측정점에 대해 법선방향으로 프로브를 진행하도록 하는 것이 일반적인 관행인데 이는 법선방향이 아닐 경우 프로브볼이 접촉면에서 미끄러짐으로 말미암아 정확한 접촉점을 측정하는 것이 어렵기 때문이다. 오늘날 많은 측정기는 CNC(computer numerical control) 기능을 내부에 갖추고 있으므로, 수동 측정경로보다는 자동 CNC 측정경로를 사용하는 것이 바람직한데, 이는 정확한 법선방향의 프로빙은 자동 CNC 측정경로 생성을 통해서 쉽게 수행되기 때문이다. 측정경로를 생성하는 절차를 보면, 우선 4점을 구 위에서 수동작업으로 측정하여, 자동 CNC 측정경로 생성을 위한 구의 반경(R)과 그 중심좌표(a, b, c)를 구한다. 중심좌표(a, b, c)와 반경R이 결정되면, 프로브목표점 즉, 자동생성된 측정점들이 구 위에서 구해진다.

틸트 및 롤각으로 표현되는 다양한 프로브셋업에 대한 측정경로의 표준화를 위해서 프로브좌표계를 고려한다. R을 구의 반경,  $\phi$ 를  $z'$ 축으로부터의 각, 그리고  $\theta$ 는  $x'$ 축으로부터의 각도,  $(\phi_i, \theta_j)$ 를 기준구면상에서의 (i, j)번째의 프로빙방향(법선방향)을 나타내는 각도라고 할때, 프로브좌표계에서의 측정 목표점의 좌표값( $Xt', Yt', Zt'$ )는

$$\begin{aligned} (Xt', Yt', Zt') \\ = (R \sin \phi_i \cos \theta_j, R \sin \phi_i \sin \theta_j, R \cos \phi_i) \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다. 실제 측정기에서 측정을 수행하기 위해서는 측정 목표점이 기계좌표계로 변환되어야 하므로, 따라서 식(3)을 기계좌표계의 값( $Xt, Yt, Zt$ )로 변환하면,

$$\begin{aligned} [Xt, Yt, Zt]^T \\ = Tp^{-1} [Xt', Yt', Zt']^T + [a, b, c]^T \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 이때 Tp는 식(1)의 변환행렬이고,  $[a, b, c]^T$ 는 기계좌표값에서 정의된 초기 수동측정에 의한 중심좌표값이다. 계산된  $[Xt, Yt, Zt]$  값들로부터, 대응되는 CNC 코드가 프로그램되고, 측정기에 입력되어서, 구 측정을 수행한다. Fig. 3은 상용의 3차원 측정기상에서 생성된 CNC 코드의 예를 보이고 있다.

### 2.3 프로브오차 교정

프로브의 오차교정은 기준구(마스터 볼)의 측정 데이터로부터 얻어진다. 즉, CNC 측정경로에 의해서 측정이 수행되면, 측정된 데이터는 파일에 입력되게 된다. 측정데이터로부터 프로브의 오차를 교정하는 방법은 다음과 같다.

Fig. 4에서 기준 구의  $(\phi_i, \theta_j)$ 위치에서의 반경을  $Rs(\phi_i, \theta_j)$ , 구와 프로브간의 측정된 반경을  $Rm(\phi_i, \theta_j)$ ,  $(\phi_i, \theta_j)$  방향에서의 프로브오차(구내부로 의 진행방향을 양의 방향으로 함)를 Probing( $\phi_i, \theta_j$ ), 프로브팁의 유효반경을 Reff라고 하면, Fig. 4로부터 다음의 관계가 만족된다.

$$\text{Reff} - \text{Probing}(\phi_i, \theta_j) = Rm(\phi_i, \theta_j) - Rs(\phi_i, \theta_j) \quad (5)$$

따라서 프로브팁의 유효반경, Reff는 식(5)의 좌변의 상수항으로부터, 프로브오차 Probing은 좌변의 변수항으로부터 구한다.

사용중인 프로브의 오차를 평가하기 위해, 1마이크론 이하의 진구도(sphericity)를 갖는 반경 25.006

file:ring.cnc		date:11-2-1992 14:27:29.26			
# 1	<HILF><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	50.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
	<HILF><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
	<HILF><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
	<ANT><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
# 2	<HILF><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
	<ANT><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
# 3	<HILF><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
	<ANT><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
# 4	<HILF><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
	<ANT><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
# 5	<HILF><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0
	<ANT><X>	-285.137<Y>	124.251<Z>	0.000<TAS>PH9 A	0.0 B 0.0

Fig. 3 A generated measurement path

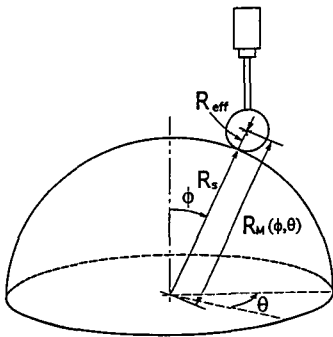


Fig. 4 Probe error calibration

mm의 기준 볼을 공칭반경 1 mm, 프로브길이 30 mm의 측정기 프로브로 측정하였다. 측정방향을 정밀하게 하기 위하여 측정경로는 PC를 사용해서 ( $\phi, \theta$ ) 방향을 따라서 매 18도 간격으로 생성하고, 생성된 경로는 측정기에 심은 후 측정작업을 수행하여, 모두 101점(5개의 위도원상의 100점과 정상의 1점)을 측정하였다. 측정된 기준구의 데이터는 식(5)에 의해서 분석되었다.

측정해석결과 유효반경은 0.997 mm로 구해졌고, 최대 프로브오차는 6.6  $\mu\text{m}$ , 최소 프로브오차는 -9.0  $\mu\text{m}$ , 제곱평균(root mean square) 프로브오

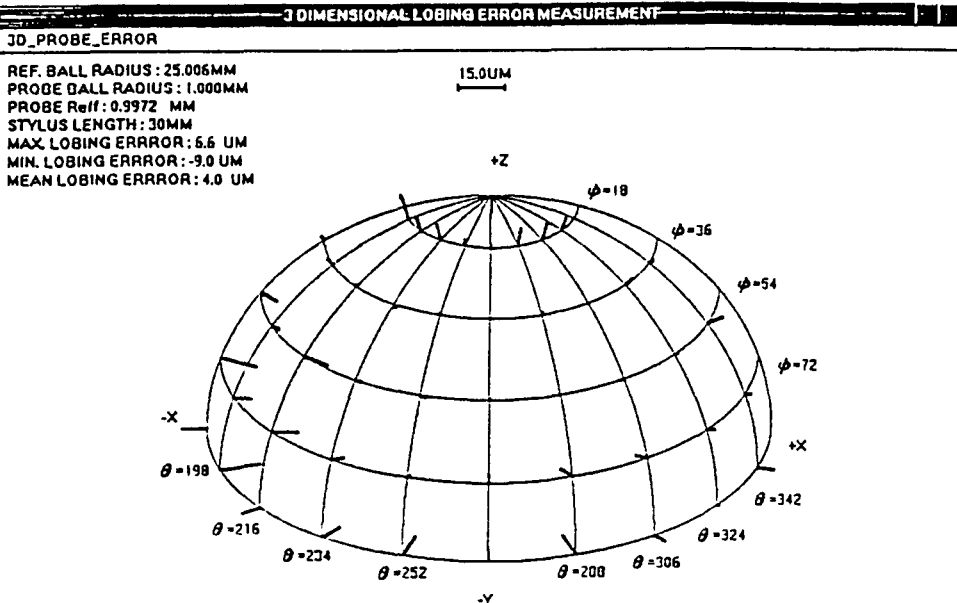


Fig. 5 3D probing error map

차는 4.0  $\mu\text{m}$ 로 구해졌다. 측정된 프로브오차를 저장하여 오차보정을 위한 자료로서 사용하기 위해서 프로브오차 맵의 작성이 필요하다. 본 연구에서는 측정된 프로브오차가 (1) 기준반구상에서 프로브오차를 3차원 벡터로 표시하는 방법과 (2) 프로브운동방향 평면 직교좌표( $\phi, \theta$ )상에서 프로브오차 동심원에서 반경방향으로의 편차로 표시하는 방법이 구현되었다. Fig. 5는 반구위에 프로브오차가 3차원 벡터형상으로 나타낸것을 보인다. 그림에서 프로브오차들은 각각( $\phi, \theta$ )위치에서 법선방향을 따라서 화살로 그려지며, 그 크기는 프로브오차, 즉,  $\text{Probing}(\phi, \theta)$ 에 비례한다. 한편, 기준반구상의 3차원 벡터도시는 반구의 뒷면에 있는 프로브오차를 나타내지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 또하나의 새로운 방법이 제안되었다. 즉, ( $\phi, \theta$ )위치에서 반경방향으로의 편차(radial deviation)으로 표시될 수 있으며, 따라서 프로브오차는 동심원 위의 반경편차로 나타내어진다. 이렇게 작성된 프로브오차 맵은 주어진 프로브셋업에 대해서 유효하여, 프로브오차의 보정에 사용할 수 있게 된다.

### 3. 프로브오차 보정

프로브오차가 다른 기하학적 오차와는 달리 위치 좌표의 함수가 아니고 프로빙방향의 함수이므로, 따라서 프로브오차 보상은 프로빙방향에 대해서 수행되어야 한다. 즉, ( $Mx, My, Mz$ )을 기계좌표계에서 프로빙방향을 나타내는 단위벡터라 할때, 기계좌표계에서 프로빙방향은, 프로브좌표계로 변환 되어야 한다. 이는 프로브오차 맵이 프로브좌표계에 대해서 교정되었기 때문이다. 따라서, 프로브좌표계로 변환된 프로빙방향( $Mx', My', Mz'$ )은 다음과 같다.

$$[Mx', My', Mz']^T = Tp^{-1}[Mx, My, Mz]^T \quad (6)$$

여기서,  $Tp$ 는 두 좌표계 사이의 변환행렬이며, 프로브오차를 보정하기 위해 각도( $\phi, \theta$ )는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \arccos(Mz' / \sqrt{Mx'^2 + My'^2 + Mz'^2}) \\ &= \arccos(Mz') \end{aligned} \quad (7)$$

$$\theta = \arctan(My' / Mx') \quad (8)$$

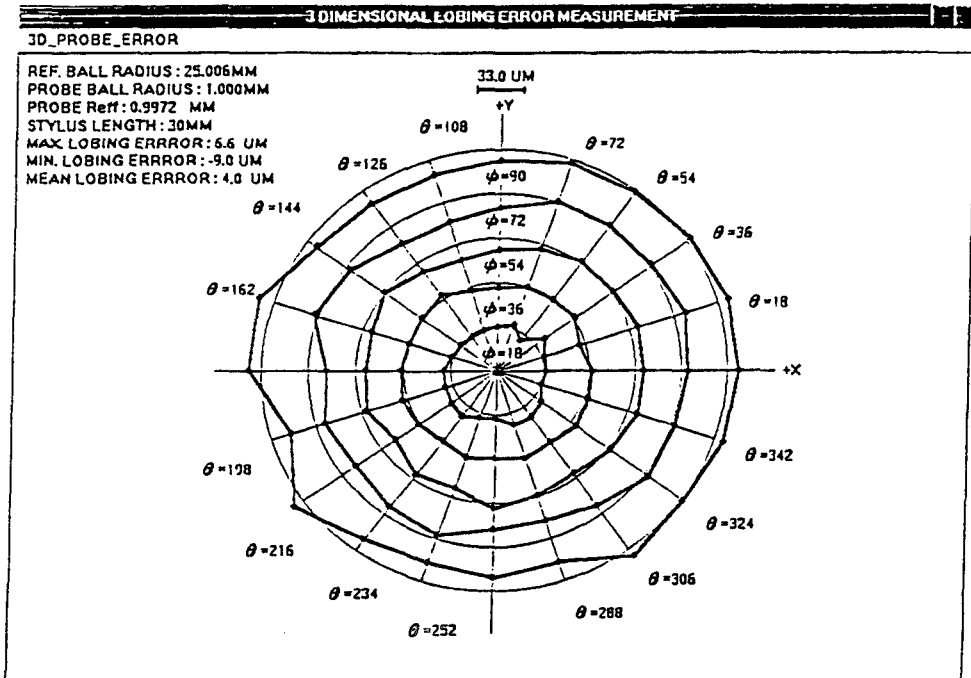


Fig. 6 Probing error map on the ( $\phi, \theta$ ) orthogonal nets

프로빙방향의 각( $\phi, \theta$ )을 알고 있을 때, 프로브오차는 Fig. 4, 5의 프로브오차 맵으로부터 구해질 수 있다. ( $\phi, \theta$ )각이 프로브오차 맵의 ( $\phi_i, \theta_j$ )값들과 일치하지 않을 때는, 적절한 선형보간을 수행한다.

이제 프로브오차는 기계좌표계에서 프로빙방향의 반대방향( $-Mx, -My, -Mz$ )으로 보정되게 된다. 이는 프로브오차 만큼의 미소변위를 추가로 이동했기 때문이다. 따라서 보정된 좌표값( $Xc, Yc, Zc$ )은 보정전 좌표값과 프로빙방향으로의 오차의 차가 된다. 즉,

$$\begin{aligned} [Xc, Yc, Zc]^T \\ = [X, Y, Z]^T - \text{Probing}(\phi, \theta) \\ [Mx, My, Mz]^T \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, ( $X, Y, Z$ )은 기계좌표계에서의 보정전 좌표값이고, ( $\phi, \theta$ )각은 프로브좌표계에서의 프로빙 방향 ( $Mx', My', Mz'$ )에 근거하여 프로브오차 맵으로부터 결정된다. 따라서 식(9)는 프로브의 오차를 보정하는 구체적인 식이 된다.

프로브오차의 측정과 보정의 구체적인 절차는 다음과 같다.

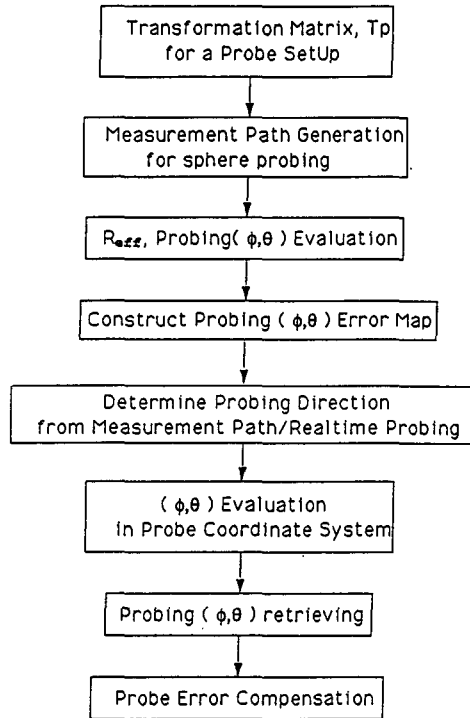


Fig. 7 Flow chart for the probe error calibration/compensation

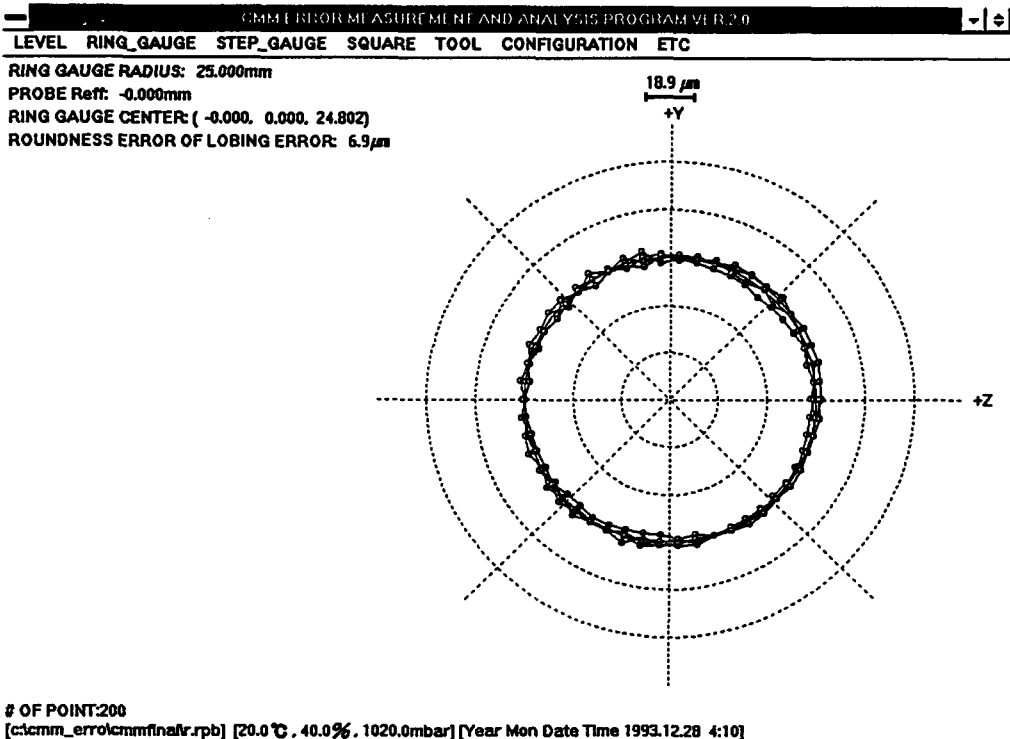


Fig. 8 Ring gauge measurement after probing error compensation

(1) 사용중인 프로브의 셋업에 대한 프로브좌표계를 설정하고, 기계좌표계와의 변환행렬  $T_p$ 를 계산한다.

(2) 사용중인 프로브셋업으로서 기준구를 측정하여, 프로브의 유효반경과 프로브오차를 계산한다. 이때, 측정의 정도를 위해서 자동측정경로를 생성한다.

(3) 계산된 프로브오차에 대해서 프로브오차 맵을 작성하여 저장한다.

(4) 보정이 이루어질 측정프로브의 방향을 결정한다.

(5) 프로빙방향을 프로브좌표계로 변환한다.

(6) 프로브오차 맵으로부터 오차를 찾아 식(9)에 의해서 보정을 수행한다.

이상의 프로브오차 측정 및 보정의 절차가 Fig. 7에 있다.

본 연구에서는 산업현장에서 사용되고 있는 상용 측정기의 프로브오차 보정을 위한 두가지 실제적인 방법으로서 (1) 실시간 온라인 보정, (2) 측정프로빙경로를 고려한 오프라인 보정이 구현되었다.

실시간 보정을 위해서는 실시간에서 프로브의 이동방향을 계산한다. 이는 프로빙 전후의 기계좌표값으로부터 이동방향을 구한 후, 이에 대응하는 프로브오차를 보정하는 방법이며, 오프라인 보정은 측정경로로부터 프로빙경로를 미리 알고 있을때에 사용할 수 있다. 이때, 보정전 좌표값들은 저장되고 측정작업의 완료후에 보정되어진다.

본 연구에서 개발된 프로브오차 평가와 보정 알고리즘은 성공적으로 구현되었다. Fig. 8은 프로브 보정 후에 링게이지를 측정한 결과로서, 보정전에는 (Fig. 1참조) 16.7  $\mu\text{m}$ 의 프로브오차에서 보정후에는 6.9  $\mu\text{m}$ 의 프로브오차로 약 2.5배 감소되었다.

#### 4. 결 론

접촉식 프로브의 오차를 측정하고 보정하는 기술을 제안하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 기준구를 3차원의 등간격으로 측정하는 방법

에 의해서 접촉식 프로브오차를 측정하고 보정하는 기술을 제안하였다.

(2) 프로브의 자세에 따라 정의 되는 프로브좌표계는 프로브오차를 측정하고 교정하는데 매우 유효하였다.

(3) 프로브오차를 프로빙방향 평면상 프로브오차 맵으로 표시하는 방법이 제안되었다.

(4) 프로브오차를 보정하는 식이 제안되었으며, 이는 기하학적 오차와 연계하여 오차를 보정할 수 있는 식이 된다.

(5) 기준구의 측정경로 생성, 오차측정, 프로브오차 교정, 프로브오차 맵, 오차보정 등이 컴퓨터 환경에서 구현되어 매우 정밀하며, 효율적인 측정과 보정을 구현하였다.

(6) 개발된 기술은 상용 3차원 측정기에 적용한 결과, 그 효율성이 입증되었다.

#### 참고문헌

- (1) Peggs, G., 1990, "Traceability for Coordinate Measurement Technology," *Proc. of the 28th International MATADOR Conference*, UMIST, UK, pp. 463~468.
- (2) Kunzmann, H., Treppe, E. and Waldele, F., 1993, "Concept for the Traceability of Measurements with Coordinate Measuring Machines," *International Progress in Precision Engineering*, pp. 40~52.
- (3) Zhang, G., Veale, R., Chorlton, T., and Hocken, R., 1985, "Error Compensation of Coordinate Measuring Machine," *Annals of CIRP*, Vol 34/1, pp. 445~448.
- (4) Busch, K., Kunzmann, F. and Waldele, F., 1985, "Calibration of Coordinate Measuring Machines," *Precision Engineering*, Vol. 7(3), pp. 139~144.
- (5) Hocken, R., 1977, "Three Dimensional Metrology," *Annals of CIRP*, Vol. 26/1, pp. 403~408.