

Hole-Plate를 이용한 NC공작기계의 공간 오차 측정 및 분석

박달근*, 이응석⁺

(논문접수일 2005. 4. 13, 심사완료일 2005. 12. 6)

Volumetric Error Calibration of NC Machine Tools using a Hole-Plate Artifact

Dal Geun Park*, Enug Suk Lee⁺

Abstract

A method of the volumetric error measurement and calibration of NC machine tools is studied using an artifact method. In this study, a hole-plate is designed and machined using stainless steel. We tested and applied the hole-plate artifact in a commercial CMM(Coordinate Measuring Machine), after calibration of the hole-plate using a precise CMM. It has been shown that not only the measurement of geometric error components but also the 2D length error calculation in a working volume is available using the hole-plate artifact method. The results of study can also be used in NC machine with touch probe as the same method in CMM.

Key Words : Hole-plate(홀-플레이트), Coordinate Measuring Machine(CMM, 3차원좌표측정기), Geometric error(구조적 오차), NC공작기계(NC Machine Tools), Volumetric error(공간오차)

1. 서론

NC공작기계를 이용한 정밀가공을 위해서는 3축 이상오차를 측정, 보상하여야 하는 것이 필수적이다. NC공작기계의 오차를 측정하기 위한 플레이트 형태를 지닌 검사 장치인 artifact는 ball/hole-plate⁽¹⁻³⁾ 또는 Cone-plate로 제안되었으며, 본 연구에서는 홀(Hole)과 판(plate)형으로 구성된 Hole-plate artifact에 대하여 측정 및 분석 방법 등을 연구하였다. BSI BS 6808⁽²⁾의 Part 3에서는 3차원좌표측정기(CMM,

Coordinate Measuring Machine)의 오차를 측정할 때 Fig. 1과 같은 ball-bar구조의 artifact사용을 추천하고 있으며, CMM에서 오차를 측정할 때 같은 artifact나 같은 종류의 artifact를 사용해야 한다고 규정하고 있다. E.S. Lee⁽⁴⁾은 Hole-plate를 이용한 CMM의 공간 오차 측정에 대하여 연구하였으며, plate에서의 볼과 Hole의 중심에서 팽창에 의한 굽힘 영향, Hole-plate의 설계 및 설치 시 발생하는 오차, 공간 오차에 대한 분석에 대해 연구하고 있다. 3축 CMM의 공간 오차 측정 방법, 온도에 의한 영향, 오차 함수에 대하여서도

* 충주대 기계공학과 (dgpark@chungju.ac.kr)
주소: 380-702 충주시 이류면 검단리 123번지
⁺ 충북대학교 기계공학부

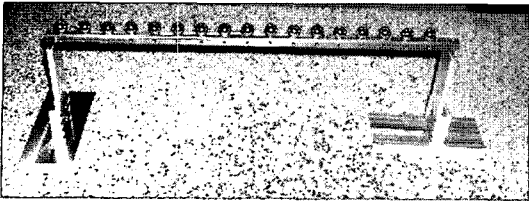


Fig. 1 Ball-bar artifacts⁽¹⁾

연구되었다⁽⁵⁾.

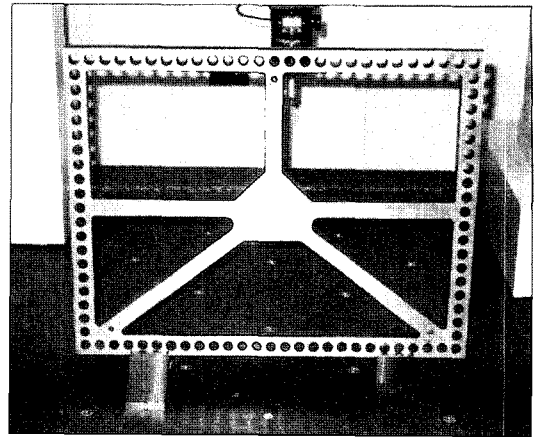
본 연구에서는 Hole-plate를 설계하고, 이를 이용하여 NC 밀링 및 3차원좌표측정기(CMM) 등 NC공작기계의 구조적인 공간오차(geometric volumetric error)를 측정 및 분석한다. Hole-plate artifact로 NC공작기계 또는 CMM의 오차를 측정하기 위해서는 먼저 정확한 Hole의 2차원 위치 좌표를 알고 있어야 한다. 다음으로 Hole-plate의 calibration 테이블을 구성한 후 측정대상 NC공작기계 또는 CMM에서 Hole-plate에 의한 측정을 수행 한 후 calibration 테이블에 의해 오차 벡터를 구하고, 공간오차 벡터를 구할 수 있다. 여기서는 1차적으로 설계, 제작된 Hole-plate artifact를 이용하여 학교에서 사용 중인 CMM의 공간오차를 측정 분석하였다.

2. Hole-plate artifact 설계

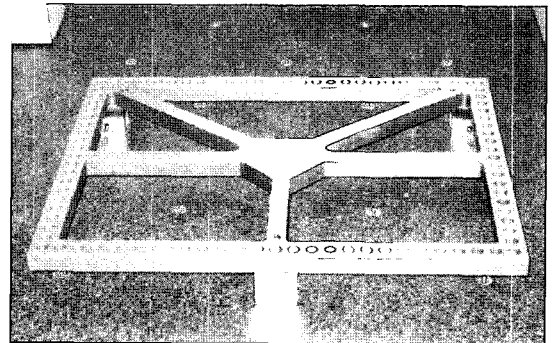
2.1 Hole-plate 설계 및 제작

Hole-plate는 Fig. 2와 같이 FANUC controller의 와이어 컷 방전가공기로 정밀가공 하여 제작되었으며, 가능한 다수의 Hole을 포함하며(Hole 직원도 2.5 μ m 이내), Hole-plate의 재료는 연강의 열팽창계수($11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)이므로 열팽창을 최소화 하기 위하여 Stainless Steel (STS308, 열팽창계수 $9.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)로 제작되었다. Hole-plate의 크기는 통상의 중소형 NC공작기계의 작업범위를 고려하여 Fig. 3과 같이 설계하였다. Fig. 4는 Hole-plate설치의 경우 자중에 의해 얼마나 처짐이 발생하는지를 알기 위해서 FEM을 이용한 처짐량 계산이며, 해석 Tool은 ANSYS Model FEA Ver 5.0으로 하였으며 경계조건은 받침대를 이용하여 3점 고정 상태로 하였다. Hole-plate의 자중은 고려하였으며, 계산결과에서 두께 20mm인 경우 최대 처짐량은 7 μ m가 발생하였다.

Hole-plate artifact 방법은 CMM과 NC공작기계의 작업 공간에서 3차원 위치 오차 벡터를 측정하는 장치 및 방법이며, 3차원 위치오차 벡터 값은 다음의 목적으로 사용된다. 1차원 오차 값을 기존의 NC공작기계 제거기 기능인 pitch error compensation 데이터로 사용하고 3차원 오차 값을 error



(a) Vertical Set-up



(b) Horizontal Set-up

Fig. 2 Manufactured hole-plate artifact(thickness 20mm) and measurement in a CMM

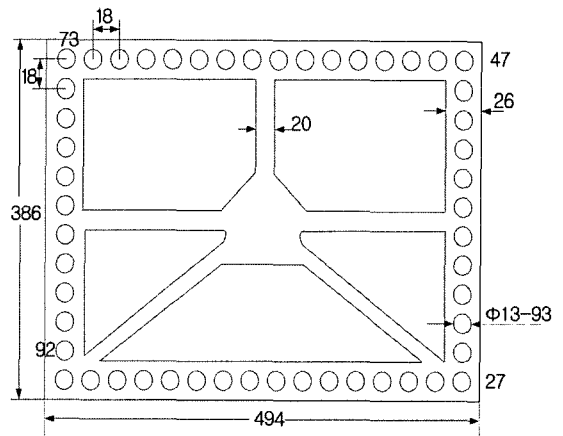


Fig. 3 Hole-plate artifact design, stainless steel(No. of hole 73)

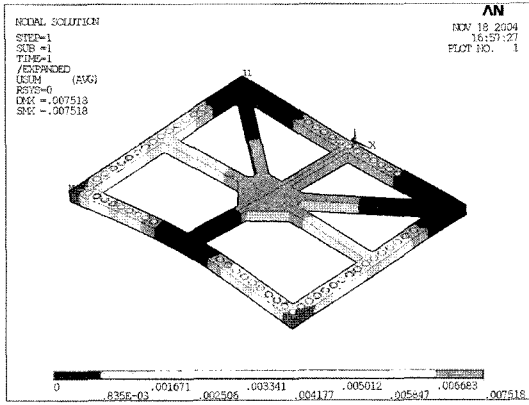


Fig. 4 Deflection calculation for hole-plate artifact using FEM, in the case of horizontal set-up case, thickness 20mm plate(Max. deflection 7 μ m)

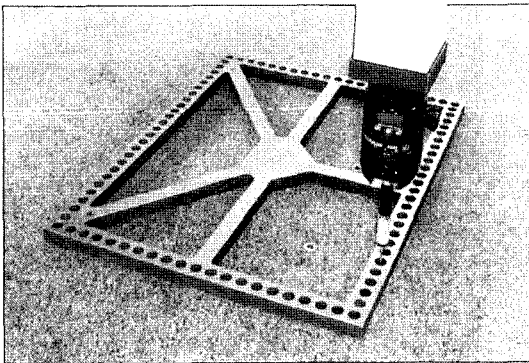
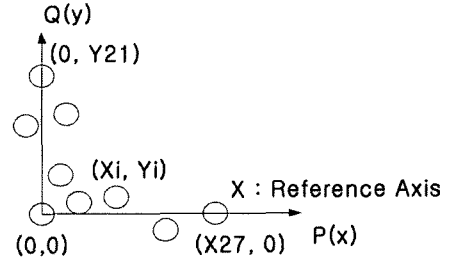


Fig. 5 Hole-plate calibration using a standard CMM (Model Duck-In, Zodiac)

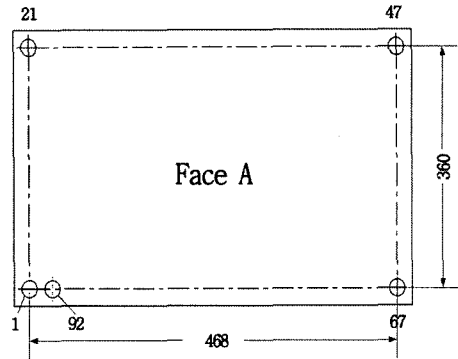
map으로 구성하여 NC제어기에 ROM data로 저장, 가공 프로그램의 자동 위치 보상 목적으로 사용된다.

2.2 Hole 위치 좌표 교정

먼저 정밀한 표준 CMM을 사용하여 Hole 중심의 2차원 좌표를 얻기 위하여 Fig. 6의 좌표로 Hole-plate calibration table을 작성한다. Fig. 7은 Hole-plate calibration data의 6회 측정값을 표시한 실제 좌표이며, CMM의 자체 오차를 고려하여도 편차는 그리 크지 않음을 보인다. 6회 측정 평균 값은 가능한 표준 CMM의 임의 공간에서 측정 위치를 선정하였다. CMM에서 각 Hole 중심 간격을 정밀하게 측정하여 각 Hole 고유번호에 대한 2차원 좌표를 기록한다. 이때 Hole-plate의 한쪽 면의 일정한 깊이에서 측정하고 그 값을 기록



(a) calibration coordinate



(b) Hole number definition

Fig. 6 Hole-plate calibration coordinate and hole number

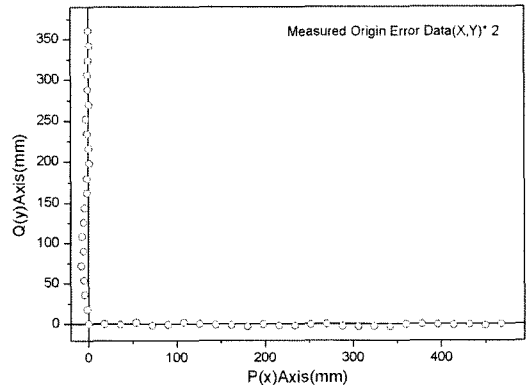


Fig. 7 Hole-plate calibration data (scale x 2) in P(x), Q(y) coordinates (average of 6 times measurement)

하여야 하고, plate 두께의 1/2 정도의 깊이가 적당하다. 이때 Hole-plate의 온도 T_1 을 기록하고 각각 좌표는 계측기 표준 교정 온도인 20°C로 다음 식 (1)과 같이 보정한다.

$$(X, Y) \text{좌표보정 값} = \text{표준교정온도에서의 기준점에서 측정점 까지 길이} \times \text{Plate의 열팽창 계수} \times (T_1 - 20) \quad (1)$$

Hole 중심 거리의 교정은 덕인(주)에서 제작된 정밀 CMM으로 측정되었으며, Fig. 7과 같이 수평 위치에서 각 Hole의 X, Y 좌표가 측정되었다. 향후 Hole-plate의 검 교정을 위해서 표준과학연구원의 표준 CMM에서 측정 및 검 교정 성적서의 발급이 필요할 것이다.

3. Hole-plate 설치 오차

Hole-plate는 측정 설치 시에 원 오차와 직각도 오차를 포함하고 평판 면을 고려하여야 한다. 그러나 만약 측정높이가 같은 값으로 보정하면 오차들을 최소화 할 수 있다. Hole-plate 설치오차의 4가지의 경우를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 수평 및 수직 설치오차는 테이블의 편평도의 상태와 수평대, 수직대의 서로 다른 길이가 원인이 된다. 설치오차는 평판이 경사진 각을 이루고 Hole 거리에도 영향을 준다. Set-up 오차는 보정이 가능하다. 측정높이가 같은 양으로 보정되면 오차를 최소화 할 수 있다. case 2, case 3의 경우는 보정이 불필요하지만 case 1에서와 같이 경사각의 값이 조정 가능한 1' 미만인 경우는 오차가 적으므로 case 2나 case 3는 보정이 불필요하다.

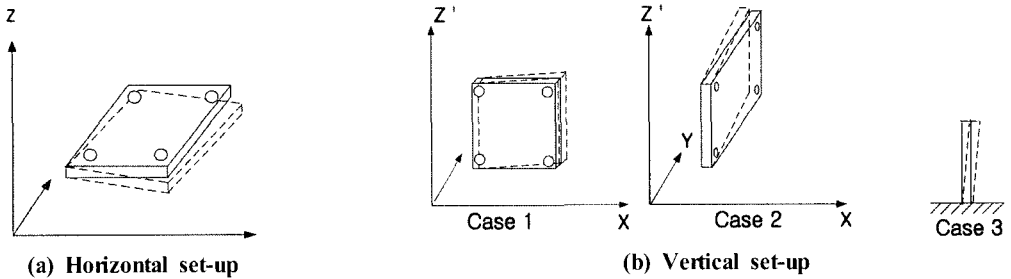


Fig. 8 Hole-plate set-up errors

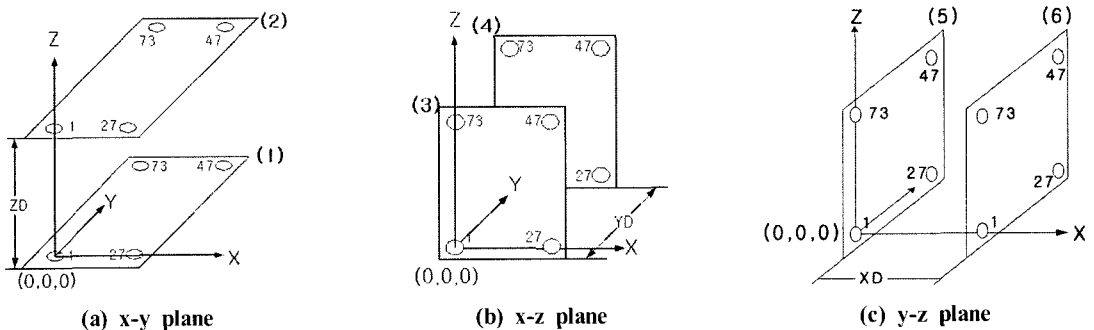


Fig. 9 2-D hole-plate set-up cases in 3 planes on CMM table

4. Hole-plate를 이용한 오차 측정

4.1 Hole-plate 공간오차 측정방법

NC공작기계의 경우는 공구 홀더에 touch probe를 장착하고 Fig. 9와 같이 수직, 수평의 6가지 경우로 설치하고 각각 Hole 중심 좌표를 측정한다. 측정 시 Hole-plate의 측정 온도 T2를 기록한다. 이때 Hole-plate의 수직, 수평 설치를 위하여 적절한 받침대가 필요할 것이다. 각 평면에서 Hole-plate 설치 간격은 28 Hole의 경우 다음과 같이 정한다. Hole-plate 두께의 1/2에서 XD와 YD(Hole 1-27 사이의 중심거리)는 같고 ZD는 Hole 1 - 20 사이의 중심거리로 표시한다.

Hole-plate는 Fig. 9와 같이 수평과 수직으로 위치시키고 (a) x-y plane, (b) x-z plane, (c) y-z plane을 CMM에서 각 Hole 중심 값을 측정한다. CMM 테이블에서 측정된 case (3), (4)와 (5), (6)의 경우 설치 위치거리(XD, YD)는 CMM probe 길이로부터 결정하였다. 이때 측정된 Hole 중심 데이터는 설치 오차를 포함하고 있다. 수직 설치의 경우 보정축의 경사진 각을 고려해야 한다. NC제어기의 pitch error compensation값은 Fig. 9와 같이 각축의 4가지 경우의 평균오차 값을 구하여 보상 값으로 사용한다. CMM 테이블

블의 측정된 case (3), (4), (5)와 (6)의 경우 roll오차가 측정된 Hole 데이터는 설치 오차 데이터를 포함하고 수직 설치의 경우 경사진 각은 보정 축을 고려하여 좌표 변환하여야 한다. 직각도 측정은 제작된 Hole-plate artifact를 이용하여 CMM에서 측정 시 수평으로 설치하여 중심좌표를 이용한 직각도를 측정하였다. artifact 측정 시 온도변화가 클 경우는 artifact의 열팽창계수를 사용하여 20°C로 calibration 값을 보정하고, 실제 측정시의 온도를 측정하여 다시 20°C로 보정하여 비교하여야 한다.

4.2 Hole-plate를 이용한 Y축 오차 측정

Hole-plate 데이터를 측정하여 기계 구조적인 21가지 오차 성분 측정이 가능하며, 여기서는 6종류의 경우의 측정 방법을 Fig. 9, 12에서 보이고 있다. Fig. 10~12는 각도오차 Y축($E_x(Y)$, $E_y(Y)$, $E_z(Y)$)과 yaw, pitch, roll Hole 라인 데이터를 이용한 오차 측정 방법이다. 여기서 roll오차 측정의 경우 Hole-plate 수직 설치의 경우(5와 6) CMM 오차 측정

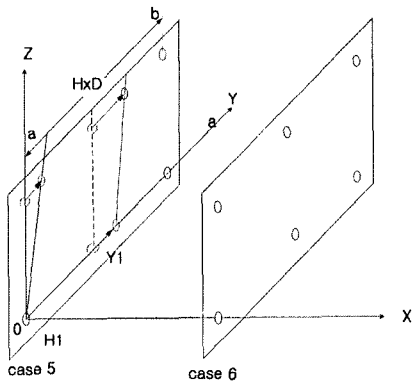


Fig. 10 Pitch error measurement using set-up case (5), (6)

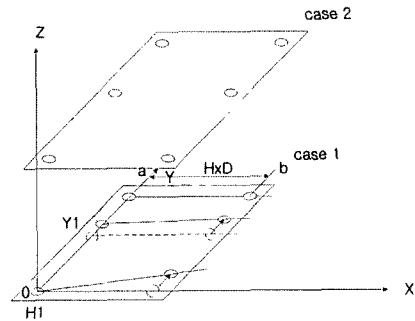


Fig. 11 Yaw error measurement using set-up case (1), (2)

테이블의 진직도와 두 종류 설치의 경우 Z축 오차의 원인을 포함한다. 그러므로 Y-roll오차계산의 경사각(Y_i)도 Z축 오차의 원인이 된다. 여기서는 HT(i)로 보정되었다. Hole-plate 경사각은 x축 오차에 Z-roll측정이 같은 각 HT(i)이다. 위치 오차는 Hole 오차데이터를 이용하여 쉽게 측정할 수 있고 Hole 라인은 같은 방향이다. 진직도 오차는 또한 Hole 라인으로부터 대각선 방향의 오차 데이터를 이용하여 쉽게 측정된다. 직각도 오차는 같은 평면의 두 개의 진직도 오차의 가장 최적라인으로부터 계산된다. X-Y직각도와 S_{xy} 는 Hole-plate 설치의 case (1)에서 측정할 수 있다. S_{xz} 는 case (3)과 S_{yz} case (4)로부터 측정할 수 있다.

5. 오차 분석

5.1 각도 오차(Angular error)

각도 오차 중에 X축에서의 pitch오차 계산의 경우 Fig. 13은 Fig. 9에서 case (1), (4)번을 선택하여 pitch를 구하면

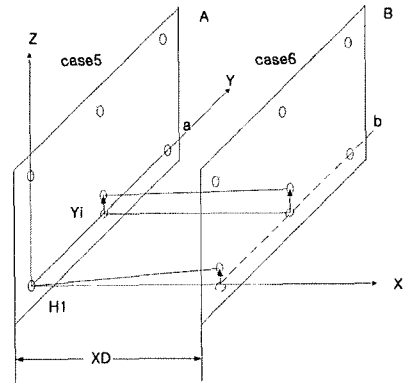


Fig. 12 Roll error measurement using set-up case (5), (6)

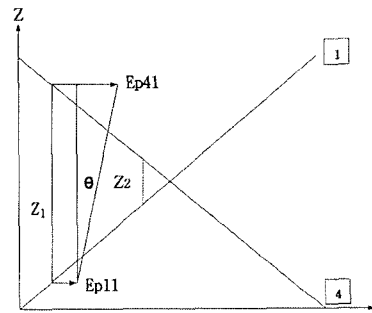


Fig. 13 Pitch error calculation in the X-axis

E_{p41} 벡터와 E_{p11} 벡터의 차이 때문에 각도가 기울어지게 되고 이것을 계산식으로 나타내면,

$$\sum_{i=1}^{27} Ey(x)_i = \sum_{i=1}^{27} \tan^{-1} \frac{Ep4i - Ep1i}{Z_i} \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있고, yaw, roll 오차도 같은 방법으로 구할 수 있다.

5.2 위치 오차(position error)

위치 오차 중에 X축 위치오차의 경우 Fig. 14의 측정 예를 들면, 위에서 구한 X축 pitch오차의 각도를 가지고 E_{p41} , E_{p11} 를 통과하는 직선을 기준 X축으로 연장할 하면 기준 X축과의 교점을 구할 수 있는데 이때의 기준 X축과의 교점에서의 X값과 첫 번째 Hole의 X값과의 차이를 X축 방향의 위치 결정 오차라고 한다. 다른 Y, Z축의 위치 결정오차도 같은 방법으로 계산 할 수 있다.

5.3 오차 분석 결과

4가지 방향의 측정 순서와 측정방향으로 Hole-plate를 경사로 설치 측정하여 오차벡터를 구하고 구한 오차 벡터를 이용하여 X, Y, Z축에서의 위치오차 3개, 각도오차인 pitch, yaw 오차를 구하였다. CMM 에서 측정하여 계산된 오차 성분 결과를 Fig. 15에 나타내었다.

5.4 2차원 길이 오차 측정

Hole-plate 데이터는 오차벡터(ex, ey)로부터 Fig. 9의 6가지 설치 cases의 측정 데이터로부터 각 Hole의 2원 길이

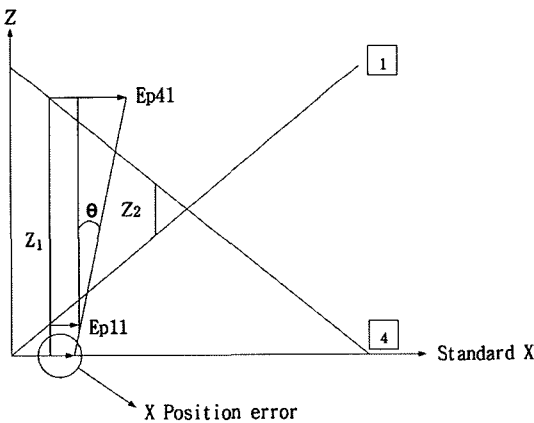
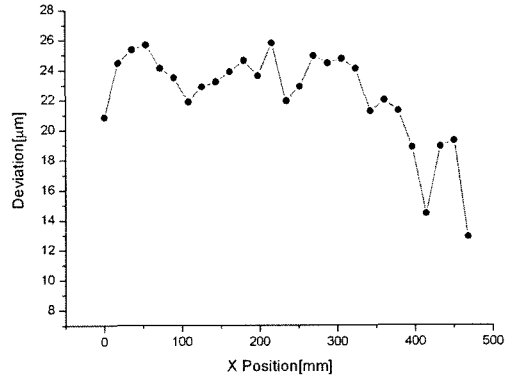
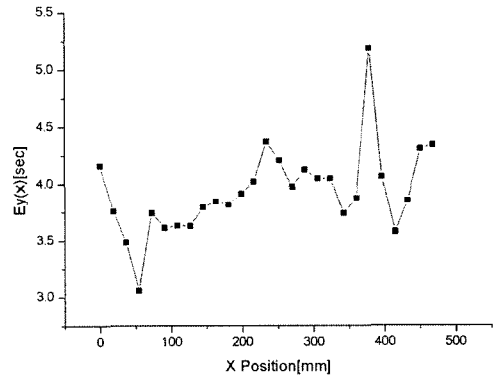


Fig. 14 Position error calculation in the X-axis

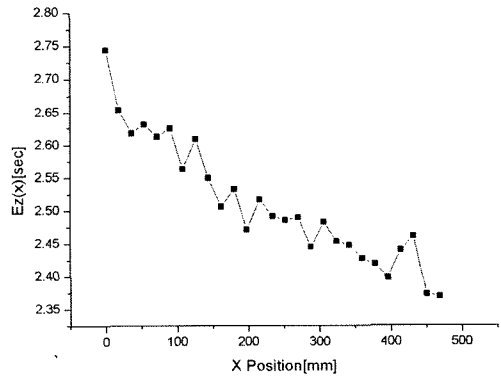
오차 측정이 가능하다. Fig. 16는 기준 Hole (1)에 대한 1차원 데이터로부터 2차원 길이 오차 벡터를 구성하는 것을 보여준다. 측정된 데이터로부터 직교방향에 두 Hole사이의 2



(a) Position error



(b) Pitch error



(c) Yaw error

Fig. 15 Position and angular error calculation data in the X axis using the hole-plate artifact

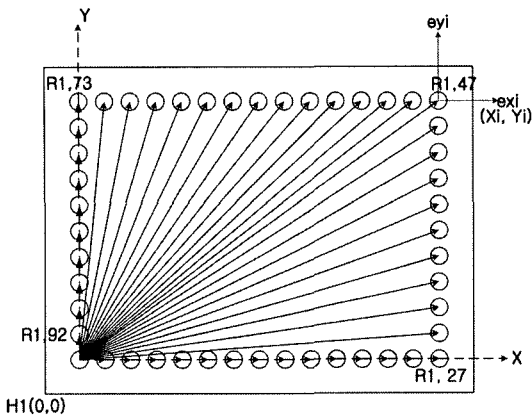


Fig. 16 2-D length error, $E(i,j)$ calculation with respect to hole(1)

차원 오차벡터 $E(i, j)$ 를 Hole (i, j) 에서의 길이오차를 식 (4)와 같이 계산할 수 있다. 같은 방법으로 XY, XZ, 및 YZ plane에서 측정된 2차원 길이오차를 직각방향으로 구성하여 3차원 길이오차 벡터(e_x, e_y, e_z) 측정이 가능하다.

$$\begin{aligned} \text{Nominal length } R &= \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}, \\ \text{Measured length } R &= \sqrt{(X_i + e_{x_i})^2 + (Y_i + e_{y_i})^2}, \\ \text{2-D length error } E(i,j) &= R_{1,27} - R_{1,1} \end{aligned} \quad (4)$$

6. 결론

Hole-plate artifact를 설계 및 제작하여 상업용 3차원좌표 측정기(CMM)의 공간 오차를 측정 및 분석연구를 수행하였으며, Hole-plate 방법으로 다축 NC 이송계의 구조적인 오차 성분 측정이 가능함을 보였다. Hole-plate artifact는 기존의 레이저 시스템이나 다른 Artifact ball bar나 invar를 이용한 Hole-plate Artifact은 제작비가 고가이고 ball bar는 설

치 시 각각의 ball을 교정하여야 하나 본 논문에서 제시되어 제작된 Hole-plate는 설치시 교정만 필요하므로 3차원 작업 공간 내의 공간오차를 측정 및 분석이 경제적 및 효율적이다. 본 연구와 같은 방법으로 머시닝 센터 등 NC 공작기계에서도 Touch probe를 이용한 다축 이송계의 공간오차 측정이 가능하다. 본 연구에서 얻어진 pitch, yaw 등 오차 성분 값은 NC 공작기계 이송계의 기계적인 정도 보정 데이터로 사용될 것이다. 또한, 1차원 오차 값은 기존 NC 공작기계의 Pitch Error Compensation 데이터로, 3차원 오차 값은 Error Map으로 구성하여 NC제어기에 ROM Data로 저장, 가공 프로그램의 자동 위치 보상 목적으로 활용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) Koo, S. S., 2002, "A study on the Volumetric Error Measurement and Calibration of NC Machine tools using Ball-bar Artifact and Touch probe," CBNU. MSc Thesis.
- (2) British Standard, 1989, BS 6808 Part 3 : *Coordinate Measuring Machines*.
- (3) Lee, E. S., 1993, "Computer Aided Volumetric Error Calibration of CNC-Machines and Coordinate Measuring Machines by the Artifact Method," Ph. D thesis, UMIST.
- (4) Lee, E. S., Wi, H. G. and Burdekin, M., 1996, "3-Dimensional Error Calibration of CMMs Using a Hole- plate Artefact," Vol. 13, No. 4.
- (5) Zhang, G., 1985, "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines," *Annals of the CIRP*, Vol. 34/1.
- (6) Sin, T. M., 2001, "ANSYS Application for the First Stage User," Chungju. Uni.