

## 머시닝센터의 체적오차 보상을 통한 구면 가공형상 측정 OMM 시스템 연구

김성청\*\*, 김옥현\*\*, 이응석\*\*, 오창진\*, 이찬호\*

### A Study of an OMM System for Machined Spherical form Using the Volumetric Error Calibration of Machining Center

Sung Chung Kim\*\*, Ok Hyun Kim\*\*, Eung Suk Lee\*\*, Chang Jin Oh\* and Chan Ho Lee\*

#### ABSTRACT

The machining accuracy is affected by geometric, volumetric errors of the machine tools. To improve the product quality, we need to enhance the machining accuracy of the machine tools. To this point of view, measurement and inspection of finished part as well as error analysis of machine tools has been studied for last several decades. This paper suggests the enhancement method of machining accuracy for precision machining of high quality metal reflection mirror or optics lens, etc. In this paper, we study 1) the compensation of linear pitch error with NC controller compensation function using laser interferometer measurement, 2) the method for enhancing the accuracy of NC milling machining by modeling and compensation of volumetric error, 3) the spherical surface manufacturing by modeling and compensation of volumetric error of the machine tool, 4) the system development of OMM without detaching work piece from a bed of machine tool after working, 5) the generation of the finished part profile by OMM. Furthermore, the output of OMM is compared with that of CMM, and verified the feasibility of the measurement system.

**Key Words** : Machining accuracy(가공정밀도), Volumetric error(3차원 입체오차), OMM(On the Machine Measurement, 기기상 측정), CMM(Coordinate Measuring Machine, 3차원 좌표측정기)

#### 1. 서 론

최근 제품의 정밀도를 높이고, 품질을 개선하기 위하여 공작기계의 가공정도를 향상시키려는 노력이 급격히 증가하고 있다. 이를 위하여 공작기계가 가지고 있는 3차원 위치오차를 측정하고 해석해야 할 뿐만 아니라 가공이 끝난 제품을 측정 및 검사를 통하여 제품 설계 시 제시된 사양을 만족하는지 판단하고, 여기서 얻어지는 오차 정보를 가공 공정

으로 다시 피드백(Feedback)하는 기능이 요구된다<sup>[1]</sup>. 일반적으로 공작기계의 3차원 위치오차는 무부하시의 위치정밀도를 나타내고 기계의 상태에 따라 변하며, 따라서 공작기계의 가공정도에 영향을 끼친다. 공작기계는 공작물의 정적부하와 가공시의 가공부하에 따라 제품에 명시된 위치정밀도를 유지할 수 없으며, 명시된 값보다 훨씬 큰 3차원 위치오차를 갖게 된다<sup>[2]</sup>. 3차원 위치오차(Volumetric error)는 공작기계 각 구성요소 간의 기하학적인 관계에

☞ 2001년 1월 6일 접수  
\* 충북대학교 대학원  
\*\* 충북대학교 기계공학과

따라 발생하며, 3차원 위치오차를 측정하는 방법으로는 일반적으로 레이저 간섭계 및 전자레벨 등을 이용하고 있다. 3차원 위치오차가 보상된 후 가공된 가공물을 측정 및 검사를 통하여 제품의 CAD 모델과 일치하는지를 확인하고 분석할 필요가 있다. 국내 산업현장에서는 현재 가공이 끝난 제품을 검사하기 위하여 금형과 같은 제조라인에서 사용되는 3차원 좌표측정기(CMM)를 사용하고 있다. 이는 생산현장의 품질관리에 필수적인 장비로 고도의 정밀도를 요구하는 부품이나 자유곡면과 같은 복잡한 형상을 가지고 있는 금형의 정도 측정을 위한 효과적인 검사설비로 중요한 역할을 하고 있지만, 구입과 관리에 있어서 고비용이 요구되며, 관리가 어렵고 설치 및 측정시간이 길어져 비경제적이며, 측정을 위한 가공물의 이동시간은 생산성 저하의 요인이 되고 있다. 또한 3차원 측정기의 한정된 크기 때문에 대형 공작물이나 공정 특성상 가공물의 분리가 어려운 경우에는 마땅한 측정 방법이 없는 실정이다<sup>[3]</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 가공이 끝난 제품을 공작기계 위에서 떼어내지 않은 상태에서 스핀들 축에 접촉식 변위센서를 사용하는 연속점 측정 방식의 OMM에 대한 연구를 수행하였다. 다품종 소량 가공 시스템에서 생산되는 부품의 경우 온머신 측정의 필요성이 높아지고 있으므로, 공작기계의 3차원 위치오차 보상 및 온머신 측정을 체계화될 필요성이 있다. 본 논문에서는 현재 해외 기술의존도가 높은 고품질의 금속

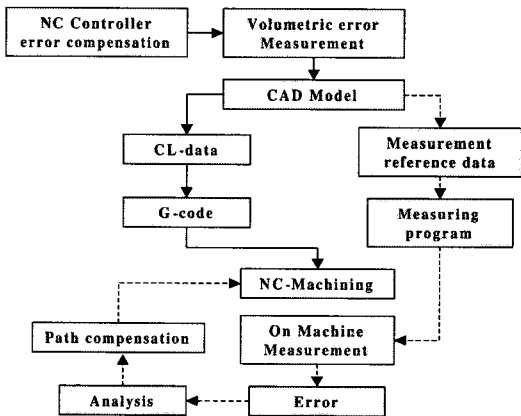


Fig. 1 Lay out of the proposed method for volumetric error calibration

반사경, 광학렌즈 등 초정밀자유곡면의 가공을 위한 가공정밀도 향상에 이러한 관점을 적용하였다. 정밀한 구면형상 가공을 위해 체적오차 보정을 실시하고, 위치오차가 보상된 공작기계에 접촉식 변위센서를 장착하여 가공이 끝난 공작물을 기기상에서 직접 측정하여 가공된 구면의 형상오차를 생성하였고, 3차원 좌표측정기를 통하여 비교 검증을 함으로써 온머신 시스템을 이용한 측정의 신뢰도를 평가하였다. 본 연구에서 제안하는 방식의 개략도는 아래 Fig.1과 같다. 점선을 따르는 가공 순서가 OMM을 통한 반복가공 절차이다.

## 2. 오차 모델링에 의한 체적오차 해석

### 3축 이송계 오차

3축 공작기계의 이송기구에서 발생하는 오차는 일반적으로 21개의 오차요소로 표현된다. 각 축에 대한 위치오차 3개와 각도오차 3개, 그리고 각 축간의 직각도 오차 3개로 구성된다. Fig.2는 한 축이 이동할 시 발생하는 위치오차와 각도오차를 표현한 것이다. XYZ축 이동시 발생하는 오차형태는 동일하며 각 축에 대한 위치오차와 각도오차는 4×4 변환메트릭스로 표현될 수 있다.

식(1)은 Y축 이동시 발생하는 위치오차 및 각도오차에 대한 변환행렬이다.

$$T_j = \begin{bmatrix} 1 & -\phi_z(Y) & \phi_y(Y) & \delta_x(Y) \\ \phi_z(Y) & 1 & -\phi_x(Y) & \delta_y(Y)+Dy \\ -\phi_y(Y) & \phi_x(Y) & 1 & \delta_z(Y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\delta_y(Y)$ ,  $\delta_z(Y)$ ,  $\delta_x(Y)$ 는 Y축 방향의 병진오차이며  $\phi_z(Y)$ ,  $\phi_x(Y)$ ,  $\phi_y(Y)$ 는 회전오차이다.

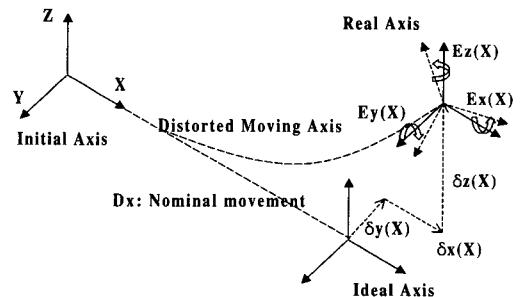


Fig. 2 Error components for linear motion

식(2)는 Z축 이동시 발생하는 위치오차 및 각도오차에 대한 변환행렬이다. 또한 공구축인 z축을 기준축으로 가정할 경우, X,Y,Z축 사이의 직각도 오차가 정의될 수 있으며, Y,Z축간의 직각도 오차에 대한 변환행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_k = \begin{bmatrix} 1 & -\phi_z(Z) & \phi_y(Z) & \delta_x(Z) \\ \phi_z(Z) & 1 & -\phi_x(Z) & \delta_y(Z) \\ -\phi_y(Z) & \phi_x(Z) & 1 & \delta_z(Z)+Dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_{jk} = \begin{bmatrix} 1 & -EA(YZ) & 0 & 0 \\ EA(YZ) & 1 & -EC(YZ) & 0 \\ 0 & EC(YZ) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 EA(YZ)는 y축에 대한 yaw오차이며 EC(YZ)는 y축에 대한 pitch오차이다. X, Y, Z축 이동에 의한 위치변환은 각각 다음과 같다.

$$T_x = T_i + T_{ik} \quad (4)$$

$$T_y = T_j + T_{jk} \quad (5)$$

$$T_z = T_k \quad (6)$$

각 축의 위치변환식을 적용하여 테이블 이동에 기인한 오차벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{xy} = T_x \cdot T_y \cdot I - O_{xy} \quad (7)$$

여기서 I는 제로벡터로서  $[0,0,0,1]^T$ 이고  $O_{xy}$ 는 테이블 이상적 이동좌표계의 원점  $[x,y,0,1]^T$ 이다. 또한 공구이동에 기인한 오차벡터는 식(8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_z = T_z \cdot I - O_z \quad (8)$$

여기서  $O_z$ 는 공구의 이상적 이동좌표계의 원점으로서  $[0,0,z,1]^T$ 이다. 결과적으로 3차원 오차벡터

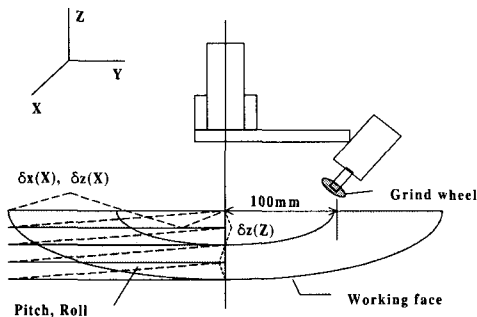


Fig. 3 Error components in parabolic face machining with wheel grinder

는 테이블 이동에 기인한 오차벡터와 공구이동에 기인한 오차벡터의 합으로 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_p = E_{xy} + E_z \quad (9)$$

### 2축 이송계 오차

구면 가공을 위하여 본 연구에서 필요한 가공축은 X축과 Z축이므로 3축 이송계 오차를 모두 고려하지 않고 X와 Z축의 오차성분만 고려하여 volumetric error 식을 구성하였다. 가공 특성상 Y축 방향으로 주축에 설치한 지그에 의하여 연삭숫돌이 Z축으로부터 100mm의 Offset이 생기기 때문에 Z축의 Y축에 대한 각도오차가 고려되었다. Fig.3은 머시닝 센터에서 포물면 경면 가공을 위하여 다이아몬드 휠을 사용하는 실험 장치도이다. 아래 Table. 1은 구면가공에 있어서 영향을 미치는 오차 요소들이다.

식(10,11)은 X축, Z축 이동시 발생하는 위치오차 및 각도오차에 대한 변환행렬을 나타낸다.

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & -\phi_z(X) & \phi_y(X) & \delta_x(X)+Dx \\ \phi_z(X) & 1 & -\phi_x(X) & \delta_y(X) \\ -\phi_y(X) & \phi_x(X) & 1 & \delta_z(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T_k = \begin{bmatrix} 1 & -\phi_z(Z) & \phi_y(Z) & \delta_x(Z) \\ \phi_z(Z) & 1 & -\phi_x(Z) & \delta_y(Z) \\ -\phi_y(Z) & \phi_x(Z) & 1 & \delta_z(Z)+Dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

공구축인 Z축을 기준축으로 가정할 경우, X, Z축간 직각도 오차는 아래와 같이 표현된다.

$$T_{ik} = \begin{bmatrix} 1 & -EA(XZ) & EB(XZ) & 0 \\ EA(XZ) & 1 & 0 & 0 \\ -EB(XZ) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 EA(XZ)는 x축에 대한 Yaw오차이며 EB(XZ)는 x축에 대한 Pitch오차이다. X, Z축 이동에 의한 최종 위치변환행렬은 식(13,14)와 같다. 각 축을 함께 고려할 시 발생하는 Volumetric오차

$$T_x = T_i + T_{ik}, \quad (13)$$

$$T_z = T_k \quad (14)$$

는 테이블 ( $E_x$ )과 공구이동 ( $E_z$ )에 기인한 오차벡터의 합으로 표현된다.

Table 1 Error components in parabolic face machining

Axis	Error components & symbol
X-axis	Linear displacement error $\delta_x(X)$
	Vertical straightness error $\delta_z(X)$
	Vertical straightness error $\delta_y(X)$
	Pitch error $\psi_z(X)$
	Yaw error $\psi_y(X)$
	Roll error $\psi_x(X)$
Z-Axis	Linear displacement error $\delta_z(Z)$
	Vertical straightness error $\delta_x(Z)$
	Vertical straightness error $\delta_y(Z)$
	Pitch error $\psi_y(Z)$
	Yaw error $\psi_x(Z)$
	Roll error $\psi_z(Z)$
Z-X Plane	Squareness error: EA(XZ) yaw error for X-axis, EB(XZ) pitch error for X-axis

$$E_x = T_x \cdot I - O_x \quad (15)$$

$$E_z = T_z \cdot I - O_z \quad (16)$$

여기서,  $I$ 는  $[0,0,1z,1]^T$  ( $1z$ : Z축에서 공구위치까지의 오프셋 양)이며,  $O_x$ 는 테이블의 이상적 이동좌표계의 원점으로  $[x,0,0,1]^T$ 이다. 그리고  $O_z$ 는 공구의 이상적 이동좌표계의 원점으로  $[0,0,z,1]^T$ 이다. 따라서 구면가공 정밀도에 영향을 미치는 3차원 오차벡터는

$$E_p = E_x + E_z \quad (17)$$

의 관계식이 사용된다.

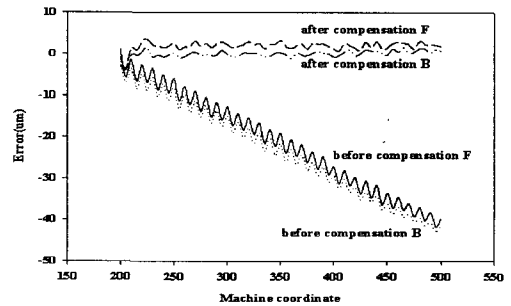
### 3. 측정실험 및 보상

먼저 무부하시의 공작기계 위치오차 측정 후 NC 제어기의 보상기능을 통하여 선형 이송오차를 보상하였다. 물론 레이저간섭계를 이용하여 각 축의 중심에서 선형 이송오차를 측정하였고, ISO 선형 이송오차 평가이론에 의한 방법을 따라 본 연구를 수행하였다. 가공하고자 하는 포물면의 반경이 250mm이고, 가공면의 깊이가 약 6mm이므로 x축의 경우 선형이송거리를 5mm로 하고, z축의 경우 보다 정밀한 보정을 위하여 이송거리를 1mm로 하여 위치오차를 측정하였다.

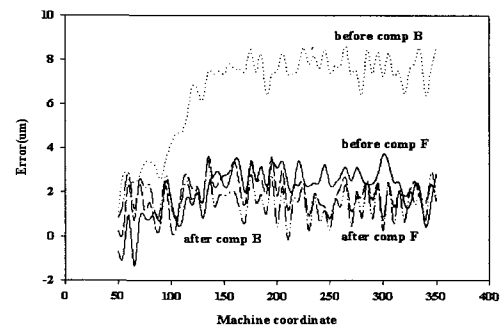
다음으로 전자레벨 및 레이저간섭계를 이용하여 각 축의 각도오차를 측정하였다. 공작기계 테이블 위에 전자레벨 헤드를 각각 다른 방향으로 올려놓고 X, Y축 pitch와 roll오차를 측정하였으며,

Z축의 Pitch와 Yaw오차는 주축에 수평대를 설치한 뒤 레벨헤드를 각각 X, Y 방향으로 올려놓고 측정하였다. 또한 레이저 간섭계를 사용하여 위치 오차 측정 후 높이를 다르게 하고 다시 측정된 모든 오차성분이 종합된 체적오차 모델링에 따라 각 축의 pitch와 yaw 오차를 얻었다. 측정 데이터에 의해 계산된 3차원 오차벡터를 보상가공시 가공 프로그램에 적용하여 체적오차가 보상된 공작물을 얻을 수 있다.

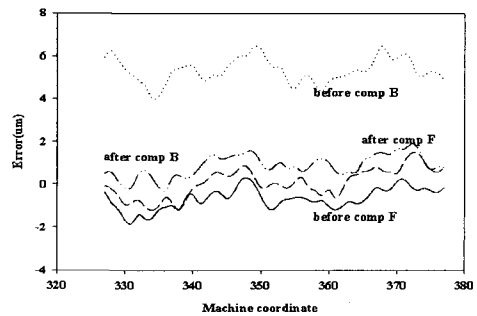
X축의 전체 stroke의 위치오차를 측정한 결과



(a) X-axis



(b) Y-axis



(c) Z-axis

Fig. 4 Linear error measurement and compensation in machining center

기계좌표의 앞부분에서 볼스크류의 마모 및 펄립 등의 문제가 발생하여 가공구간을 최소 오차 발생 부분인 200mm에서 500mm까지 구간으로 선정하여 이 부분을 측정된 결과  $40\mu\text{m}$  이상의 누적오차가 발생하였고, 보상결과 약  $4\mu\text{m}$  이내로 향상되었다 (Fig.4a). Y축의 경우 구면가공에 직접 사용되지 않는 축이지만 가공이 완료된 후 온머신 측정을 위하여 위치오차를 보정하였다. 300mm의 가공구간을 선정하여 측정된 결과 백래쉬 오차를 포함하여 약  $10\mu\text{m}$ 의 누적오차가 발생하였으며 이를 보상하여  $2\mu\text{m}$  이내로 향상되었다(Fig.4b). 또한 가공물의 깊이에 직결되는 Z축의 경우 정밀한 보정을 위하여 가공구간인 320mm에서 380mm까지 이송길이를 1mm로 하여 측정된 후 보상을 하였으며, 측정구간의 오차는 총  $8\mu\text{m}$ 이었으며 보상한 결과  $2\mu\text{m}$  이내로 향상되었다(Fig.4c).

각도오차 측정은 X축을 따라 pitch, yaw, roll오차를 5회 반복 측정하였으며 Fig.5에서 평균값을 보여준다. X축 볼스크류에서 발생하는 최대 pitch 오차는 4.8sec이며, 가공높이 약340mm를 고려하였을 때 가공정도에 직접적으로 미치는 오차는  $8\mu\text{m}$ 로 판정되었으며, 최대 yaw오차는 11.8sec이며 가공정도에 20 $\mu\text{m}$ 의 영향을 주었다. 또한 최대 roll 오차는 1.5sec이며, 가공물의 지름 250mm를 고려하였을 때 최대  $1\mu\text{m}$ 의 영향을 주었다.

Z축의 측정은 반사경 가공범위 내에서 Pitch와 Yaw오차를 각각 5회 반복 측정하였으며 Fig.6에서는 측정평균값을 나타내었다. Z축 볼스크류에서 발생하는 최대 pitch오차는 12.2sec이며, 연삭숫돌과 주축과의 거리 100mm를 고려하였을 때 발생하는 Z축 방향 길이오차는  $5.9\mu\text{m}$ 이며, 가공물의 곡률에 따른 깊이를 3mm로 가공할 경우 가공정도에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 오차는 0.35 $\mu\text{m}$

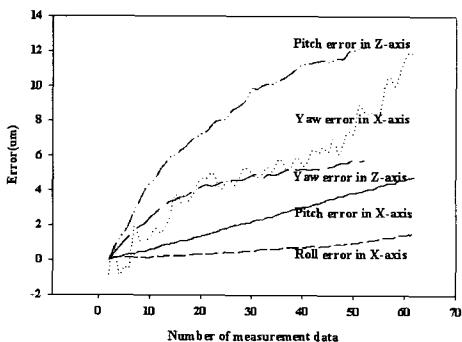


Fig. 5 Angular error measurement in X, Z axis

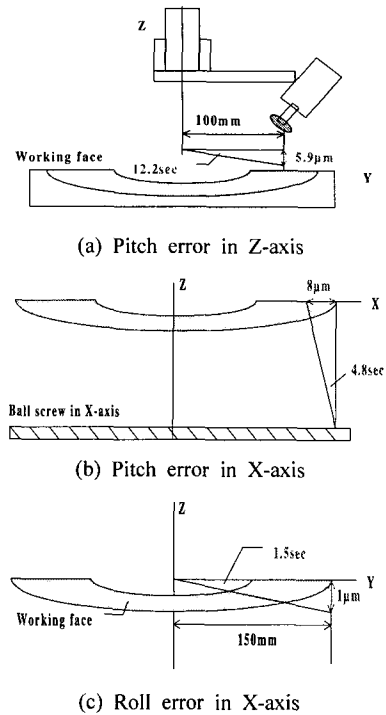


Fig. 6 Measured error analysis in parabolic face machining

로 판정되었다. 또한 Z축 최대 yaw오차는 5.8sec이며, 이는 공구를 X축 방향으로 설치하지 않기 때문에 가공정도에 특별히 영향을 주지 않았다.

#### 4. 온머신 측정 시스템

CNC 공작기계에서 OMM시스템을 구성하기 위해 비교적 높은 분해능을 가지면서 응답성이 좋고 고속측정이 가능한 접촉식 LVDT 변위센서( $\pm 0.5\text{mm}$  측정범위, 0.05% Linearity)를 사용하였다. Fig.7은 머시닝센터에서 포물경면의 측정을 위하여 LVDT 센서로 구성된 OMM 시스템이다. 온머신 측정을 위하여 가공물의 CAD 모델에 대한 가공과 측정 각각의 NC 프로그램이 필요하다. 공구의 직경과 가공오차를 고려하여 가공용 NC프로그램이 생성되고, 가공 후 가공물의 형상에 대한 임의의 위치에서의 기계좌표 값을 계산하여 측정용 NC 프로그램을 생성하였다. 본 시스템에서 측정 프로그램은 C언어로 프로그래밍 되었다. 무부하시의 체적오차가 보상된 경로로 가공된 공작물을 동

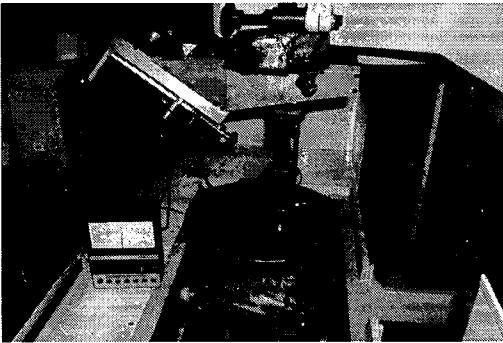


Fig. 7 On machine measuring system for machining center using a touch probe

일한 공작기계에서 직접 측정하는 OMM 시스템을 이용하여 수정가공을 함으로써 보상이 이루어지지 않은 가공오차, 환경오차 등에 대한 보상이 가능하다.

측정프로브는 직경 2 mm의 구의 형상을 가지고 있기 때문에 Fig.8에서와 같이 시편에서 측정하고자 하는 점은 P인데도 불구하고 볼의 반경에 의하여 Q점에 접촉한다. 편의상 Z 방향만 생각할 때 접촉점의 불일치로 인한 오차  $\Delta Z$ 는 그림에서와 같이 접촉각  $\theta$ 의 함수로 표현된다. 임의의 자유곡면의 형상 측정시, 접촉각  $\theta$ 는 가공물의 곡률반경의 크기와 중심점에서의 움푹량을 기준으로 비례식으로 계산하였다. 본 연구에서는 측정 물과의 접촉에 따른 오차를 감안하여 측정 프로그램 생성시 각 위치에서 측정오차  $\Delta Z$ 의 크기를 고려하였다. 본 시스템에서 사용된 측정프로그램은 Turbo C++ 환경에서 PC의 Com Port로 데이터가 수신되도록 프로그래밍 되었다 (Fig.9).

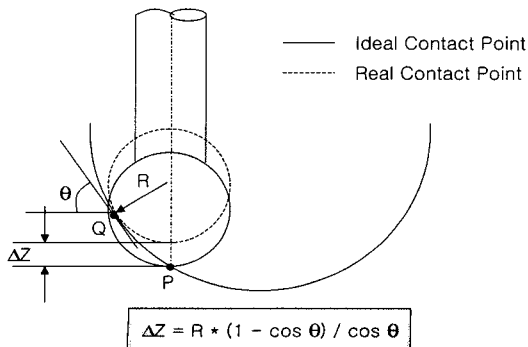


Fig. 8 Contact point between a stylus and a workpiece

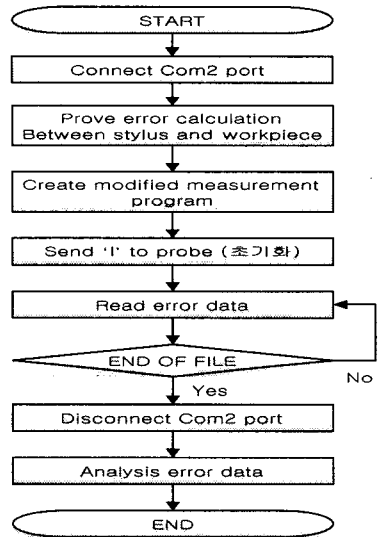


Fig. 9 Flow chart for the measuring algorithm

## 5. 온머신 측정 실험 및 결과

먼저 평면가공 실험 후 측정된 결과에서 센터라인의 가공정도를 관찰한 결과 전체적으로 중간부분이 아래로 쳐지는 현상을 발견할 수 있었으며, 가장 편평도가 좋은 가공라인을 사용하여 전면에서 온머신 측정하였다. 측정점은 가공면에 수직수평 20 mm의 등간격으로 하였다. 온머신 측정 결과 Y축 방향으로 회전테이블 및 가공물의 설치오차로 추정되는 약 80 $\mu$ m 정도의 기울기 성분을 볼 수 있었으며 이를 제거하여 Fig.10에서 측정형상을 보였다. 그림에서와 같이 중심부와 외곽이 낮은 도우넛 형태를 가지고 있고, 평면도는 약 9  $\mu$ m가량이며 부분적으로 높은 부분이 보인다. 약 2 시간 정도의 비교적 짧은 시간에 측정을 실시하여 온도에 의한 열변형 영향이 적었을 것으로 판단되고 부분적으로 나타나는 높은 부분은 공작기계 가이드의 반복정밀도의 영향으로 보인다. 본 실험에서 CMM측정실은 20 $^{\circ}$  C로 설정되었으며, OMM측정시의 온도 변화는 고려되지 않았으나 측정 중 온도차이로 인하여 20mm 높이의 가공물(유리)의 열변형은 적다고 가정한다. (유리의 열팽창계수  $7 \times 10^{-6} / ^{\circ}$ C)

다음으로 온머신 측정 결과와 비교가 용이하

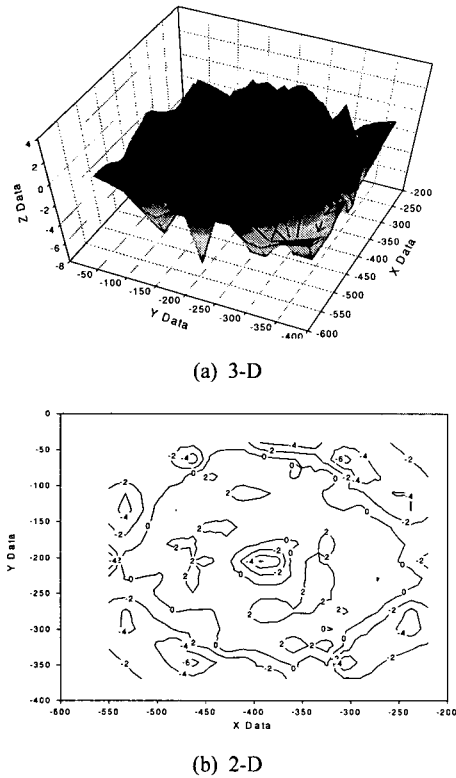


Fig. 10 Flat work piece measurement by OMM for verification test of the system

도록 CMM 상의 측정점 좌표를 머시닝센터 좌표와 근사하도록 방향을 설정하였고 측정실의 실내 온도와 소재의 온도차가 없도록 측정기에 장시간 보관하였다. Fig.11에 CMM 측정 후 온머신 측정과 마찬가지로 설치 오차로 판단되는 약  $50\mu\text{m}$  정도의 기울기 성분을 제거한 결과를 3차원 형상으로 나타내었다. Fig.10의 온머신 측정 결과와 비교할 때 도우넛 형상이 선명하게 나타나고 있고 전체 형상이 유사함을 알 수 있다. CMM 측정 결과 평면도는  $6\mu\text{m}$  이하인 것으로 나타났다.

평면가공이 완료된 후 같은 가공조건으로 구면가공(곡률반경 2000R)에 적용하였다 (Fig.12). 가공 후 가공면의 각 위치에서의 Z의 좌표값을 계산한 후 측정프로그램을 생성하였다. 평면과 마찬가지로 중심점에서 X,Y축에서 등간격으로 20mm씩 이동 후 접촉각 오차가 고려된 Z높이로 이동하여 구면의 형상오차를 얻었다. 온머신시스템을 통하여 측정된 구면형상에 대해 CMM 측정 데이터를

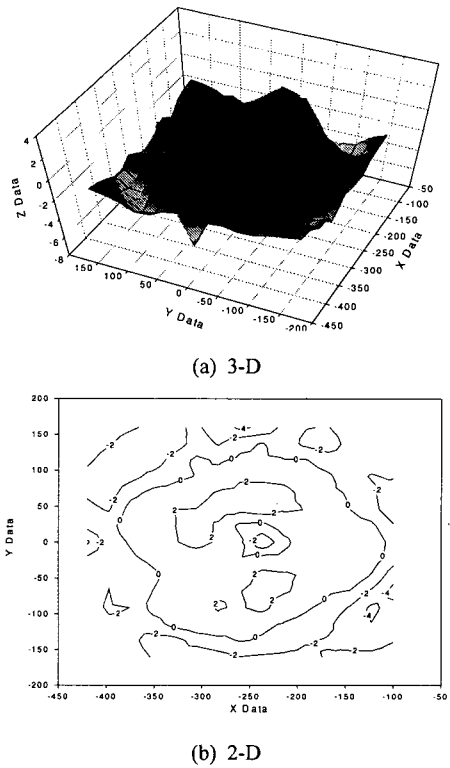
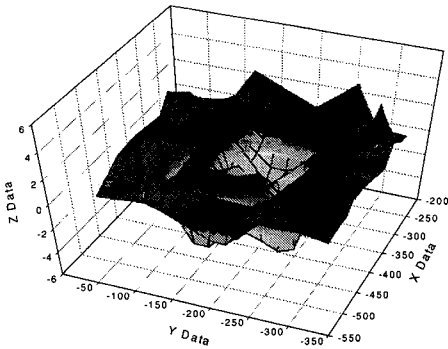


Fig. 11 Flat work piece measurement by CMM for verification test of the system

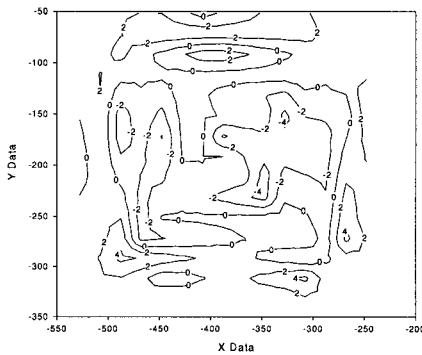
기준으로 비교하였으며, 그 결과를 Fig.13에 보였다. 비교 결과에서 온머신 측정시스템의 오차는 CMM 측정기에 대하여 약  $4\mu\text{m}$  이내의 상대오차를 가지고 있는 것으로 나타났고, 이 시스템은 신속한 오차측정이 가능하기 때문에 다품종 소량 생산 공정을 위한 부분적인 현장적용에 이용되어 생산성 및 효율성을 높일 수 있을 것으로 판별된다.



Fig. 12 Spherical work piece with a diamond wheel



(a) 3-D



(b) 2-D

Fig. 13 Comparison result by OMM and CMM for a spherical work piece

## 6. 결 론

본 연구에서는 CNC 공작기계의 공간상 기하오차를 측정/해석하기 위하여 오차모델링과 2차원 회전축 대칭 가공물의 연삭가공을 하였다. 가공된 공작물을 공작기계 상에서 접촉식 변위센서를 이용한 연속점 측정 방식의 OMM 시스템을 구성하였다. 가공기의 위치오차를 보상하고 OMM 시스템으로 측정된 오차는 3차원 좌표측정기를 기준으로 성능을 평가하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) NC제어기 보상기능을 이용하여 각 축의 위치 오차를 보상한 결과 X, Y, Z축 방향에서  $\pm 2\mu\text{m}$  이하로 오차범위를 줄일 수 있었다
- 2) 3차원 위치오차를 측정 후 수학적 오차모델에 적용함으로써 가공물의 정밀도는 크게 향상될 수 있다.

- 3) 본 연구의 온머신 측정 시스템을 이용하여 가공물의 신속한 오차 측정이 가능하였고, 온머신 측정 오차를 감소시키기 위하여 측정에 사용한 센서의 반경에 따른 오차를 분석하였다.
- 4) 온머신 측정의 결과를 CMM 측정 결과와 비교하여 최대  $4\mu\text{m}$ 의 상대오차를 가지고 있다는 것을 보임으로써 본 연구에서 개발한 온머신 측정시스템의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-1-304-008-4) 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 이상준, 김선희, 김옥현, "기계 체적오차가 고려된 가공형상-거칠기 측정 OMM 시스템," 한국정밀공학회, 춘계논문집, pp. 681-686, 2000.
2. 손진욱, 서석환, 정세용, 이응석, 위현근, "공작기계 3차원 오차보상을 통한 측정기로의 활용과 반복가공," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, 1996.
3. Kim S.H., Kim I.H., "The development and evaluation of OMM(On-the-Machine Measuring) system using scanning probe," Journal of KSPE, Vol. 13, No. 10, pp. 71-77, 1996.
4. S.H. Suh, E.S. Lee, J.W. Sohn, "Enhancement of Geometric Accuracy via an Intermediate Geometrical Feedback Scheme," Journal of Manufacturing System, Vol. 18, No. 1, 1999.
5. Eman, K.F., "A Generalized Geometric Error Model For Multi-Axis Machines," Annals of the CIRP Vol. 36, No. 1, 1987.