한국정밀공학회지 제 20 권 제 12 호 (2003 년 12 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No.12, December 2003

기상측정시스템과 오차보정을 이용한 가공정밀도 향상

최진필#, 민병권*, 이상조*

Machining Accuracy Improvement by On Machine Part Measurement and Error Compensation

Jin-Phil Choi#, Byung-Kwon Min*, Sang-Jo Lee*

ABSTRACT

This paper suggests a methodology for improving the machining accuracy by compensating for the machining errors based on on-machine measurement process. Probing errors and machine tool errors included in the measurement data were calibrated or compensated to obtain the actual machining errors. Machine tool errors were modeled in forward and backward directions according to the axis movement direction to consider the effects of backlash errors on the measurement data, and model parameters were determined by measuring a cube array artifact. A rectangular workpiece was machined and then measured with a touch probe as a verification experiment. Machining experiments showed that the machining errors were reduced to within the designated tolerance after compensating for the actual machining errors by modifying the original toolpath for the next-step machining.

Key Words : OMM(기상측정), Touch Probe(터치프로브), Error Model(오차모델), Backlash Error(백래쉬 오차), Error Compensation (오차보정)

1. 연구배경

기상측정(On Machine Measurement, OMM) 시스템이란 소품종 대량생산 시스템에서 가공위주의 공작기계에 측정기능을 부여하여 한대의 공작기계로 가공과 측정을 동시에 수행하게 함으로써 제품의 생산비용과 시간을 줄이고 가공정밀도를 높이는 것이 목적이다.[1] 기상측정시스템을 구현하기 위한 센서에는 터치프로브, 스캐닝프로브, 레이저프로브 등이 있으나, 접촉식의 터치프로브가 비교적 가격이 저렴하고 사용하기가 쉽기 때문에 공작물 좌표계 설정 및 공구파손 검출 등에 널리 사용되고 있다.

터치프로브를 이용하여 공작물을 측정할 경우 측정데이터에는 가공오차 뿐 아니라 공작기계 오차와 프로빙 오차 등이 포함되는데, 이러한 오차요인들을 체계적으로 규명하여 측정데이터에서 가공오차만을 분리한 후 실제가공오차를 기준으로 제품의 불량여부를 검토하고 필요한 경우 재가공 등의 후속작업를 해야 한다. 기존의 기상측정 관련 연구들을 살펴보면 공작기계에 3 차원측정기와 유사한 측정기능을 부여하기 위해 CNC 컨트롤러

접수일: 2003 년 3 월 13 일; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일
교신저자: 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail: fcel2@korea.com, Tel: (02) 2123-3855
* 연세대학교 기계전자공학부

에 측정용 G 코드를 이식한 경우,[2] 가공물의 기상 측정시 발생하는 측정오차를 해석하기 위한 오차 모델을 제시한 연구,[2,3,4] CAD 모델에 기초하여 측정경로를 수립하고 측정데이터를 보정하는 연구 [5] 등이 주를 이루고 있다. 또한, 터치프로브에서 얻어지는 측정데이터의 정밀도를 높이기 위해 특수한 기준시편 등을 이용하여 공작기계의 오차를 예측하기 위한 연구 [6,7] 도 수행되었으나, 이를 실제 가공에 적용하여 가공오차를 보정한 사례는 많지 않다.

본 연구에서는 가공물을 기상에서 측정하고 측정데이터를 이용하여 재가공을 수행함으로써 가공정밀도를 높이는 기상측정 및 오차보정 시스템을 구현하고자 하였다. 기존의 레이저 간섭계를 이용한 오차측정방식은 측정시간과 비용이 많이 소요된다는 단점이 있으므로, 본 연구에서는 터치프로브와 cube array artifact 를 이용하여 공작기계의 오차를 신속하게 규명하였다. 또한, 공작기계의 이송방향 즉 터치프로브의 측정방향을 고려하기 위해 백래쉬 오차를 포함하는 오차모델을 제시하였다. 오차모델을 검증하기 위해 스텝게이지를 이용하여 측정방향에 따른 오차를 측정하고 보정하였으며, 실제가공에 기상측정시스템을 적용하기 위해 블록가공을 수행하였다. 가공이 종료된 후 터치프로브로 공작물을 측정하고, 공작기계오차와 프로빙오차를 반영하여 측정데이터로부터 실제 가공오차를 추출하였다. 초기의 가공경로를 수정함으로써 가공오차를 보정하고, 재가공이 끝난 후 공작물을 터치프로브로 재측정한 다음 CMM 으로 옮겨 측정하여 오차보정의 타당성을 확인하였다.

2. 터치프로브를 이용한 기상측정시스템

2.1 시스템 구성

Fig. 1 은 터치프로브(MP10, Renishaw Inc.)를 이용한 기상계측 시스템의 개략도로서 스타일러스(stylus) 끝단의 볼(ball)을 이용하여 측정을 수행하는 프로브, 프로브에서 나온 신호를 공작기계 컨트롤러에 전달해주기 위한 OMI(Optical Machine Interface), 스킵신호에서 저장된 기계좌표를 PC 로 전송하기 위한 통신케이블(RS232) 등으로 구성되어 있다. 터치프로브는 공작기계의 주축에 장착되며, 가공이 종료된 후 ATC 를 통해 자동교환되어 측정 및 검사작업을 수행하게 된다.

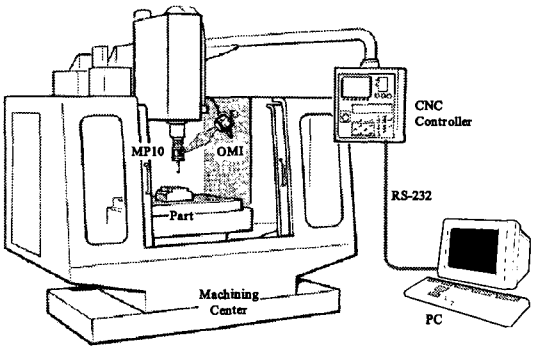
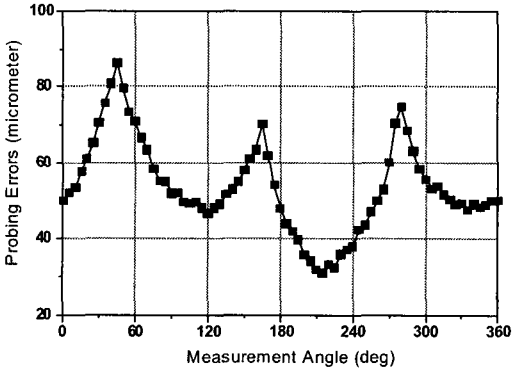


Fig. 1 OMM system configuration

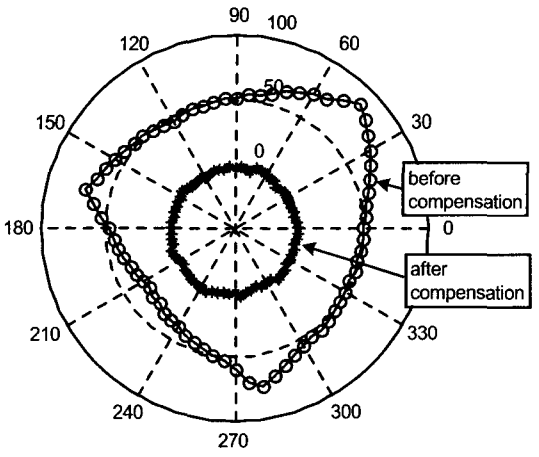
2.2 프로빙 오차

터치프로브는 구조적 특성 [1,3] 으로 인해 측정데이터가 측정방향에 따라 달라지게 되는데, 이를 프로빙오차라 한다. 프로빙오차는 계통오차로서 간단한 보정작업을 통해 제거할 수 있게 되며, 일반적으로 정밀하게 제작된 링게이지를 이용하여 캘리브레이션을 수행한다. Fig. 2 는 스타일러스 길이 50mm, 볼반경 1.0mm 인 터치프로브로 직경이 29.998mm 인 링게이지를 5° 간격으로 측정한 결과로서, 120°의 위상차를 가지는 3 개의 로브(lobe)가 생성됨을 알 수 있는데 이는 터치프로브가 3 점 지지방식의 구조 [1] 를 가지기 때문이다.

이와 같은 프로빙오차는 측정방향(θ)에 따른 반경오차를 계산하여 보정함으로써 쉽게 제거할 수 있다. Fig. 2 (b)는 프로빙오차를 보정한 결과를 보여주는데, 오차보정후 프로빙오차는 3 ㎛ 이내로 감소하였음을 알 수 있다.



(a) probing errors with respect to approach angle



(b) probing error compensation

Fig. 2 Probing errors of a touch trigger probe

3. 공작기계 오차의 규명

터치프로브를 이용하여 공작물을 측정, 검사할 경우 측정데이터는 순수한 가공오차 이외에 프로빙오차와 공작기계의 위치오차가 포함되게 되므로, 앞절에서 설명한 프로빙오차의 보정과 마찬가지로 공작기계의 오차를 규명하고 측정값에 반영할 수 있도록 해야 한다. 본 연구에서는 동차변환행렬을 이용하여 공구끝단에서의 위치오차를 예측한 후, 각 오차성분을 선형으로 단순화하여 파라미터 모델을 수립하였다. 또한, 프로빙 오차와는 별도로 공작기계의 이송방향, 즉 터치프로브의 측정방향에 따른 측정오차의 변화를 예측하기 위해 이송축의 백래쉬오차를 포함하는 오차모델을 제시함으로써 임의의 측정방향에 대한 공작기계의 위치오차를 예측할 수 있도록 하였다.

3.1 입체오차모델

Fig. 3 은 본 연구에서 사용한 수직형 머시닝센터(통일중공업, TNV40A)의 좌표계를 보여주고 있다. 기준좌표계에 대한 공구 끝단의 오차를 결정하기 위해 각 이송축에 대한 동차변환행렬을 구성하고, 공구좌표계에서 기준좌표계까지 연속적으로 곱하여 작업공간내 임의위치에서의 위치오차를 구하면 식(1)과 같다.[8]

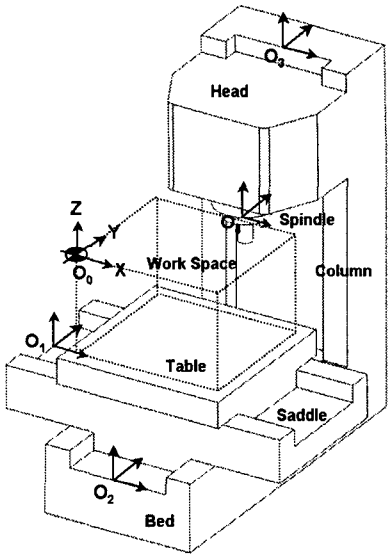


Fig. 3 Coordinate system of a three-axis machine tool

$$
\begin{aligned}
E_x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} + \left(z + L + \sum_{i=2}^{4} c_i \right) \varepsilon_{yx} \\
&\quad + \left(z + L + \sum_{i=3}^{4} c_i \right) \varepsilon_{yy} + (L + c_4) \varepsilon_{yz} - \left(y + \sum_{i=2}^{4} b_i \right) \varepsilon_{zx} \\
&\quad - \left(\sum_{i=3}^{4} b_i \right) \varepsilon_{zy} - b_4 \varepsilon_{zz} - y S_{xy} - z S_{zx} \\
E_y &= \delta_{yx} + \delta_{yy} + \delta_{yz} - \left(z + L + \sum_{i=2}^{4} c_i \right) \varepsilon_{xx} \\
&\quad - \left(z + L + \sum_{i=3}^{4} c_i \right) \varepsilon_{xy} - (L + c_4) \varepsilon_{xz} + \left(\sum_{i=2}^{4} a_i \right) \varepsilon_{zx} \\
&\quad + \left(\sum_{i=3}^{4} a_i \right) \varepsilon_{zy} + a_4 \varepsilon_{zz} - z S_{yz} \\
E_z &= \delta_{zx} + \delta_{zy} + \delta_{zz} + \left(y + \sum_{i=2}^{4} b_i \right) \varepsilon_{xx} + \left(\sum_{i=3}^{4} b_i \right) \varepsilon_{xy} \\
&\quad + b_4 \varepsilon_{xz} - \left(\sum_{i=2}^{4} a_i \right) \varepsilon_{yx} - \left(\sum_{i=3}^{4} a_i \right) \varepsilon_{yy} - a_4 \varepsilon_{yz}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

여기에서, a_i, b_i, c_i 는 각 좌표계의 물리적 dimension, δ_{ii}는 i번째 축의 선형오차, ε_{ij}는 j축 이송시 i축 방향의 각도오차, δ_{ij}는 j축 이송시 i축 방향의 진직도오차, S_{ij}는 직교하는 두 축사이의 직각도 오차를 각각 의미한다.

3.2 오차모델의 파라미터화

입체오차모델을 파라미터화하기 위해, 각 오차성분을 축위치에 대한 선형함수로 근사화하여 매개변수화된 오차모델을 만든다. 진직도 오차의 경우 축방향의 각도오차를 적분하여 얻게 되므로, 입체오차모델은 2 차 다항식 형태를 가지게 된다 [6]. 직각도 오차는 축위치에 관계없이 일정한 상수항으로 고려하였다. 또한, 이송축 원점에서의 오차를 0 으로 설정하고 원점에서 멀어지는 방향을 정방향으로 가정함으로써 정방향 오차모델을 얻을 수 있게 된다.

근사화화된 오차들을 입체오차모델에 대입하여 미지의 모델계수에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{Bp} \tag{2}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & z \\ 0 & -\left(z+L+\sum_{i=2}^{4} c_i\right)x & \left(y+\sum_{i=2}^{4} b_i\right)x \\ \left(z+L+\sum_{i=2}^{4} c_i\right)x & 0 & -\left(\frac{1}{2}x+\sum_{i=2}^{4} a_i\right)x \\ -\left(y+\sum_{i=2}^{4} b_i\right)x & \left(\frac{1}{2}x+\sum_{i=2}^{4} a_i\right)x & 0 \\ 0 & -\left(z+L+\sum_{i=3}^{4} c_i\right)y & \left(\frac{1}{2}y+\sum_{i=3}^{4} b_i\right)y \\ \left(z+L+\sum_{i=3}^{4} c_i\right)y & 0 & -\left(\sum_{i=3}^{4} a_i\right)y \\ -\left(\frac{1}{2}y+\sum_{i=3}^{4} b_i\right)y & \left(\sum_{i=3}^{4} a_i\right)y & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{2}z+L+c_4\right)z & b_4 z \\ \left(\frac{1}{2}z+L+c_4\right)z & 0 & -a_4 z \\ -b_4 z & a_4 z & 0 \\ -y & 0 & 0 \\ 0 & -z & 0 \\ -z & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

식(2)에서 $\mathbf{E}$ 는 오차벡터, $\mathbf{B}$ 는 스칼라 행렬, $\mathbf{p}$ 는 결정해야 할 미지의 모델계수 벡터이다. 모델계수 벡터 $\mathbf{p}$ 는 최소자승 추정량을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{p} = \left(\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{B}\right)^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{E} \tag{3}$$

오차벡터 $\mathbf{E}$ (3× 1)는 터치프로브를 이용하여 artifact 의 큐브 꼭지점을 측정하여 얻을 수 있고, 계수행렬 $\mathbf{B}$ (3× 15)는 축위치의 함수로써 측정점의 위치정보로부터 구할 수 있다.

이송축이 역방향으로 이동하는 경우, 즉 터치프로브의 측정방향이 역방향인 경우에는 공작기계의 백래쉬오차 등에 의해 측정값이 달라지게 되므로, 정방향과는 달리 백래쉬 오차를 오차모델에 포함시켜야 한다. 백래쉬 오차는 다른 오차성분과 마찬가지로 축위치에 따라 달라지지만, 모델을 단순화하기 위해 축위치에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 각 오차성분에 백래쉬 오차항을 추가하고, 입체오차모델에 대입하여 정리하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{E}_{BWD} = \mathbf{E}_{FWD} + \mathbf{Fh} \tag{4}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\left(z+L+\sum_{i=2}^{4} c_i\right) & \left(y+\sum_{i=2}^{4} b_i\right) \\ \left(z+L+\sum_{i=2}^{4} c_i\right) & 0 & -\left(\sum_{i=2}^{4} a_i\right) \\ -\left(y+\sum_{i=2}^{4} b_i\right) & \left(x+\sum_{i=2}^{4} a_i\right) & 0 \\ 0 & -\left(z+L+\sum_{i=3}^{4} c_i\right) & \left(\sum_{i=3}^{4} b_i\right) \\ \left(z+L+\sum_{i=3}^{4} c_i\right) & 0 & -\left(\sum_{i=3}^{4} a_i\right) \\ -\left(\sum_{i=3}^{4} b_i\right) & \left(\sum_{i=3}^{4} a_i\right) & 0 \\ 0 & -(L+c_4) & b_4 \\ (L+c_4) & 0 & -a_4 \\ -b_4 & a_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

여기에서, $\mathbf{E}_{FWD}$ 는 정방향으로 이송할 경우의 오차벡터로서 식(2)와 같으며, $\mathbf{E}_{BWD}$ 는 역방향으로 이송할 경우의 오차벡터를 의미한다. 즉, 역방

향 오차모델은 정방향 오차모델의 오차값에 백래쉬오차에 의한 항이 새롭게 추가된 형태임을 알 수 있다. 3× 18 행렬 $\mathbf{F}$ 는 식(2)의 $\mathbf{B}$ 와 같이 측정점에 대한 위치정보로부터 계산되며, 미지의 모델계수벡터 $\mathbf{h}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{h} = \left(\mathbf{F}^{T}\mathbf{F}\right)^{-1}\mathbf{F}^{T}\left\{\mathbf{E}_{BWD} - \mathbf{E}_{FWD}\right\} \qquad (5)$$

3.3 모델 파라미터의 추정

정방향과 역방향 오차모델의 파라미터를 결정하기 위해 Fig. 4 와 같이 8 개의 큐브로 구성된 cube array artifact 를 이용하였다.[8] 먼저 각 큐브의 꼭지점을 정방향에서 측정하여 얻은 오차벡터와 각 꼭지점에 대한 기준좌표로를 이용하여 오차모델의 모델계수 $\mathbf{p}$ 를 결정하게 된다. 역방향 오차모델의 경우 정방향 오차모델로부터 계산한 오차와 큐브를 역방향에서 측정하여 얻은 오차벡터를 이용하여 모델계수 $\mathbf{h}$ 를 결정하였다. 공작기계 상에서 artifact 를 측정하기 전에 CMM 에서 캘리브레이션을 수행하였고, 이 값을 오차벡터를 계산하기 위한 기준값으로 사용하였다.

추정된 모델계수를 이용하여 큐브 꼭지점에서의 위치오차를 모의실험한 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 그림에서 ■는 이송방향이 정방향인 경우 터치프로브를 이용하여 측정한 오차, ●는 역방향의 측정오차를 의미한다. 또한, □은 정방향의 경우 오차모델을 통해 예측된 값을 의미하며, ○은 역방향의 경우 예측된 오차값을 나타낸다. 시뮬레이션 결과, 오차모델을 통해 추정된 위치오차와 실제 측정값의 차이가 대략 5 ㎛ 이내로서 오차모델이 타당함을 알 수 있다. 또한, 이송방향이 정방향인 경우와 역방향인 경우의 오차값이 비교적 큰 차이를 가짐을 알 수 있으며, 터치프로브를 이용하여 가공물을 측정할 경우 프로빙오차의 보정뿐 아니라 이송축의 방향을 고려하여 위치오차를 보정해야 보다 정확한 결과를 얻을수 있음을 알 수 있다.

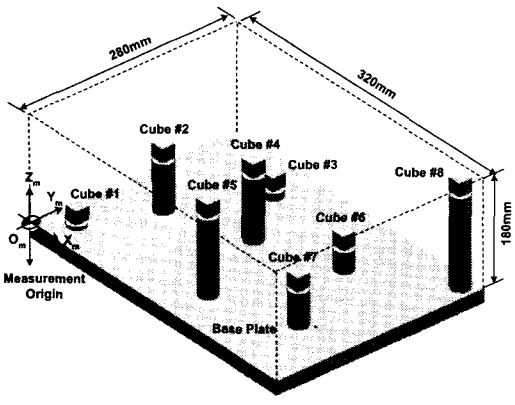
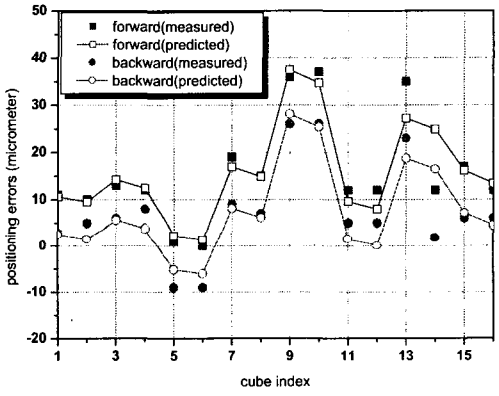


Fig. 4 Cube array artifact

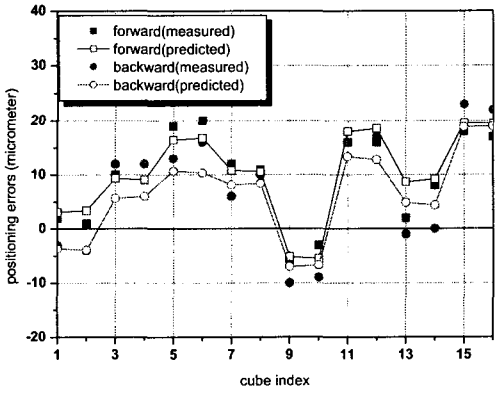
4. 실험

4.1 오차모델 검증실험

공작기계의 이송방향에 따른 위치오차의 변화를 살펴보기 위해, 스텝게이지를 공작기계 테이블에 설치하여 측정하였다. 실험에 사용한 스텝게이



(a) x-axis



(b) y-axis

Fig. 5 Predicted and measured positioning errors at cube corners

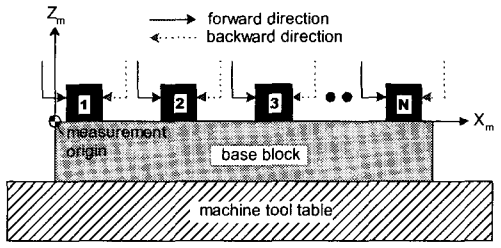
자는 각 블록의 크기가 10mm 이고, 피치간격이 20mm 로서 블록의 양쪽면을 Fig. 6 (a)와 같은 경로로 측정하였다. 정방향과 역방향으로 각 3 회씩 측정하여 평균값을 Fig. 6 (b)에 나타내었다. 그림으로부터 x 축의 전체 이송구간에서 위치오차는 정방향(◆)과 역방향(●) 모두 축위치에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 역방향의 경우 정방향에 비해 약 7 ㎛ 정도 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 이송축의 백랙쉬 오차 등에 기인하는 오차로서 터치프로브의 프로빙 오차와 함께 가공물의 측정값에 영향을 미치게 된다.

오차모델에서 결정된 모델계수를 이용하여 각 측정위치에서의 위치오차를 계산하여 측정오차를 보정한 결과, 정방향(◇)과 역방향(○) 모두 ±5 ㎛ 이내로 줄어들었음을 알 수 있다.

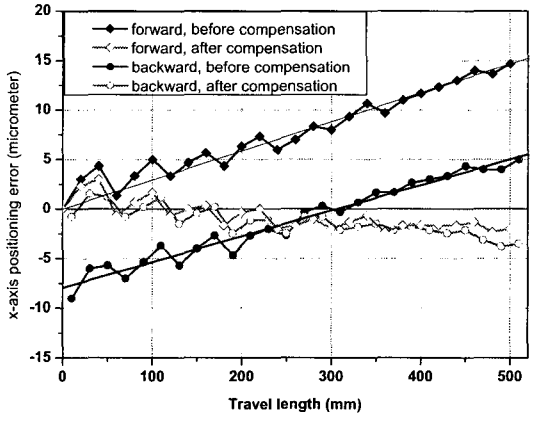
4.2 블록가공실험

기상계측시스템을 이용하여 가공물의 정밀도를 향상시키기 위한 실험으로서, Fig. 7 과 같이 직선보간을 이용한 블록가공을 수행하였다. 블록의 크기는 160mm× 160mm 이며, 공구변형에 의한 오차를 최소화하기 위해 ISO 10791-7[9] 에서 제시한 정삭조건으로 가공을 수행하였다. 즉, 축방향 절입깊이 = 6.0mm, 반경방향 절입깊이 = 0.2mm, 스핀들 회전속도 = 1,200rpm, 이송속도 = 200mm/min 으며, 직경이 10mm 인 2 날 평엔드밀을 사용하여 알루미늄(Al-6061) 시편을 상향절삭하였다.

1 차 가공이 종료된 후 공구를 터치프로브로 교환하고, 가공면을 시계방향(A⇒B⇒C⇒D)으로 측정하였다. 측정방향은 그림과 같이 가공면에 수직이며, 각 직선구간에 대하여 10mm 간격으로 15 점씩 측정한 얻은 가공오차를 Fig. 8 에 나타내었다. 측정원점은 Fig. 7 의 가공원점과 동일하게 설정하였으며, 3-2-1 method[10] 를 이용하여 측정좌표계를 설정하고 측정원점에서의 가공오차를 0 으로 간주하였다.



(a) Measurement path



(b) Measured positioning errors

Fig. 6 Measurement of step gauge

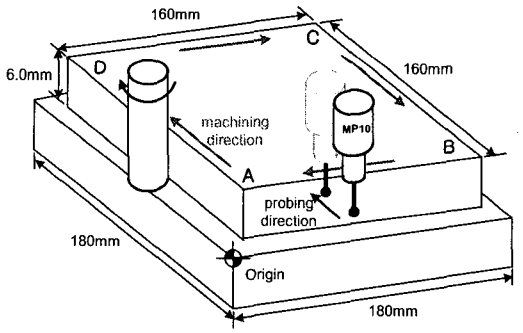


Fig. 7 Dimension of block

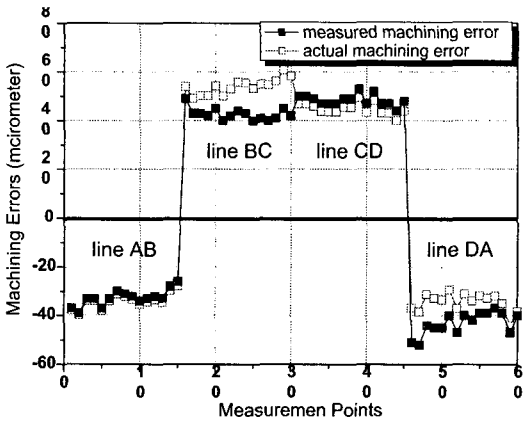


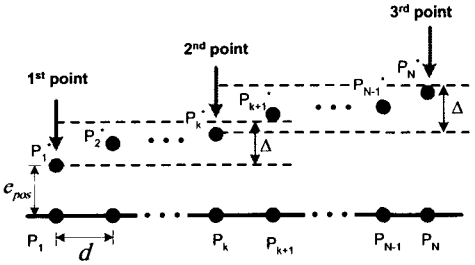
Fig. 8 Machining errors after first machining

그림에서 ■는 터치프로브에서 얻어진 가공오차로서 측정값에서 기준값을 뺀 값이고, 기준면에 대하여 대략 40 ㎛ 내외의 가공오차를 가짐을 알 수 있다. 측정데이터로부터 실제가공오차를 얻기 위해서는 프로빙오차와 기계오차를 고려해야 하는데, 오차모델에서 예측된 기계오차를 보정할 경우 프로브의 접근방향에 따라 보정해야 할 오차량이 달라지게 된다. Fig. 7 에서 AB 구간의 측정방향은 Y 축 정방향, BC 구간은 X 축 역방향, CD 구간은 Y 축 역방향, DA 구간은 X 축 정방향이므로, 측정방향에 따라 오차모델로부터 위치오차량을 계산하여 측정된 가공오차량을 보정해야 한다. 이상과 같은 방법으로 기계오차를 고려하여 계산된 실제가공오차를 나타내는 것이 □로서, BC 구간과 DA 구간의 경우에는 측정값과의 차이가 10 ㎛ 내외로 비교적 크게 나타남을 알 수 있다. AB 구간과 CD 구간의 경우 측정된 가공오차와 실제가공오차의 편차가 5 ㎛ 이내로서 비교적 적게 나타남을 알 수 있다.

4.3 최소측정점 선정

Fig. 7 의 경우에 10mm 등간격으로 측정을 수행했으며 총 60 개의 측정점을 필요로 한다. 측정점의 증가함에 따라 측정시간이 증가하고 가공시와 측정시 주위환경의 변화로 인한 측정오차가 유발될 수 있기 때문에, 가능한 적은 수의 측정점을 선정하여 측정을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 최소 측정점을 선정하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다(Fig. 9).

(1) 등간격(d) 의 N 개 예비측정점을 선정
(2) k 번째 예비측정점(P_k)에서 프로브 측정방향에 따른 위치오차를 보정하여 P_k^*라 함



P_k : equally spaced measurement points
P_k^* : measurement points with positioning error compensation
d : constant measurement intervals
△ : pre-defined limit

Fig. 9 Selection of Minimum Measurement Points

(3) 첫번째 예비측정점과의 편차량($e_k=P_k^*-P_1^*$) 계산
(4) 편차량이 지정값(Δ)보다 커지는 점(P_{k+1}^*)을 두번째 측정점으로 선정
(5) 두번째 측정점을 기준으로 위의 과정을 반복

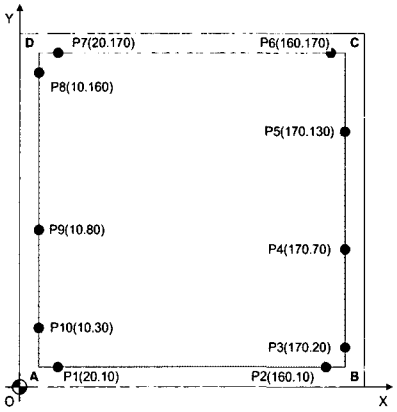


Fig.10 Selected Measurement Points

초기 측정점 간격(d)을 10mm, 기준값(Δ)을 5 ㎛로 선정한 후 Fig. 7 의 가공시편에 상기 알고리듬을 적용한 결과, 측정점의 개수가 최초 60 개에서 10 개로 줄었으며 이를 Fig. 10 에 나타내었다.

4.4 보정가공

선정된 최소측정점에서의 측정값으로부터 실제 가공오차를 예측하고, 보정가공을 수행하였다. k 번째 측정점(P_k)에서의 실제가공오차를 e_k 라 하면 보정점의 좌표 (P_k^*)는 다음과 같다.

$$P_k^* = P_k + 2e_k \tag{6}$$

각 측정점에 대한 보정점을 직선보간하는 2 차 가공경로를 만들어 2 차가공을 수행한 후, 터치프로브를 이용하여 선정된 10 개의 측정점에서 가공오차를 측정한 결과를 Fig. 11 에 나타내었다.

그림에서 ■은 Fig. 8 에서와 마찬가지로 1 차가공 후 최소측정점에서 공작기계의 위치오차가 반영된 실제가공오차를 의미하며, □는 2 차가공을 수행한 후 측정된 가공오차를 의미한다. 1 차가공 후 가공오차는 기준값에서 대략 40 ㎛으며, 2 차가공을 수행한 후 가공오차는 ± 5 ㎛ 내외로 감소하였음을 알 수 있다. OMM 측정데이터의 신뢰성을

확인하기 위해 2 차가공이 끝난 공작물을 CMM 으로 옮겨 측정한 결과(●)를 함께 보여주고 있는데, OMM 과 CMM 측정값의 편차가 대략 5 ㎛ 이내로서, 본 연구에서 사용한 기상측정시스템과 이를 이용한 오차보정의 타당성을 확인할 수 있었다.

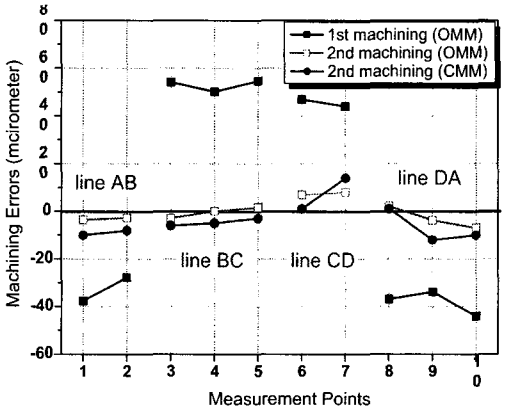


Fig. 11 Machining errors after error compensation

5. 결론

본 연구에서는 터치프로브를 이용하여 가공정밀도를 향상시키는 방법을 제시하였으며, 이를 실제 가공에 적용함으로써 기상측정시스템의 효용성을 검증하였다. 터치프로브의 측정데이터에 포함된 공작기계의 위치오차를 제거하기 위해, 이송축의 백래쉬 오차를 고려한 입체오차모델을 제안하였고, cube array artifact 를 이용하여 모델계수를 추정하였으며 스텝게이지를 이용한 측정실험으로부터 오차모델의 타당성을 검증하였다. 기상측정시스템을 블록가공에 적용한 결과 오차보정 후 가공오차를 10 ㎛ 이내로 줄일 수 있었고, CMM 측정값(기준값)과의 편차도 5 ㎛ 이내로 나타났다. 상기의 기상측정시스템은 공작기계에 측정기의 기능을 부여함으로써, 공작기계의 효율성을 높이고 기존의 제품검사 방식에서 야기되는 문제점들을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Kim, S. H., Kim, D. H., "On-the-Machine Measurement System," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 16, pp.9-18, 2001.
2. Kim, K. D., Chung, S. C., "Design and Analysis of 2 ½ Dimensional On-the-Machine Measuring and Inspection System Using Touch Trigger Probes," J., of KSME, Vol. 23, No. 1, pp. 37-46, 1999.
3. Cho, M. W., Lee, S. H., Seo, T. I., "On-Machine Measurement of Sculptured Surfaces Based on CAD/CAM/CAI Integration: 1. Measurement Error Modeling", J. of the KSPE, Vol. 16, No. 10, pp. 172-181, 1999.
4. Lee, S. J., Kim, S. H., Kim, O. H., The Analysis of Measuring Error in OMM System," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 5, pp. 34-42, 1998.
5. Park, J. W., Ko, T. J., "OMM system based on CAD model," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 6, pp. 37-42, 2001.
6. Mou, J., Liu, C. R., "A methodology for machine tools error correction using reference parts," Int. J. Computer Integrated Manufacturing, Vol. 8, No. 1, pp. 64-77, 1995.
7. Yang, M.Y., Lee, J.J., "Measurement and prediction of thermal errors of a CNC machining center using two spherical balls," J. of Materials Processing Technology, Vol.75, pp.180-189, 1998.
8. Choi, J. P., Lee, S. J., "Quick Assessment of Positioning Errors of a Machine Tool Using a Cube Array Artifact and a Touch Probe," The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology (CPT2002), pp. 230-234, KIMM, Korea, 2002.
9. ISO 10791-7, "Test conditions for machining centers – Part 7: Accuracy of a finished part," International Standard Organization, 1998.
10. Shen, Y. L., Duffie, N. A., "Uncertainties in the Acquisition and Utilization of Coordinate Frames in Manufacturing Systems," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 527-530, 1991.