

기계 체적오차가 고려된 가공형상-거칠기 측정 OMM 시스템

이상준*(대전대), 김선호(한국기계연구원), 김옥현(충북대)

The OMM system for machined form and surface roughness measurement concerned with volumetric error

Sang Jun Lee(Daechun College), Sun Ho Kim(KIMM), Ock Hyun Kim(CNU)

ABSTRACT

Machining information such as machined form and surface roughness accuracy is an important factor for manufacturing precise parts. To this regard, OMM(On the Machine Measurement) has been issued for last several decades to alternate with CMM. In this research, measuring system consisting of a laser probe is developed for machined form and surface roughness measurement on the machine tool. The obtained machined form accuracy is compared with reference one defined in CAD model. The measured surface roughness data is compared with measured master surface beforehand. Furthermore, using the pre-defined volumetric error map approach compensates the geometric accuracy of the machine tool. The overall performance is compared with CMM, and verified the feasibility of the measurement system.

Key Words : On the Machine Measurement(OMM)(기상측정), Machined error(가공오차), Surface Roughness(거칠기), Laser Probe(레이저 프로브), Volumetric Error(체적오차)

1. 서론

소품종대량 가공시스템의 경우에는 가공된 부품의 형상이나 치수를 측정하거나 검사하기 위한 별도의 공정과 장비를 두는 것이 유리하다. 다품종소량 가공시스템에서 생산되는 부품의 경우에는 이와 같은 방식은 비효율적일 수가 있다.⁽¹⁾ 따라서 가공이 끝난 제품을 검사하기 위해 금형과 같은 제조라인에서는 3차원 측정기(Coordinate Measuring Machine; CMM)를 설치하여 운용하고 있으나, 투자비가 많이 들고 운용상 특별한 관리가 필요하며, 가공기와 측정기가 서로 다른 환경에서 운용되기 때문에 이를 고려하기 위한 열 평형 시간 등이 필요해 비경제적 요인이 되고 있다. 특히, 3차원 측정기의 한정된 크기 때문에 대형 가공물이라든지 제조공정 특성상 가공물의 분리가 어려운 경우에는 가당한 측정 방법이 없는 실정이다.⁽²⁾

이러한 문제들을 해결하기 위해, CNC(Computer numerical control) 동작기계에서 가공

이 완료된 후, 공구를 측정용 센서인 프로브(Probe)로 교체하여 OMM이 가능한 시스템이 연구되고 있다.⁽²⁾ 이러한 연구의 발전은 OMM 시스템의 근간인 동작기계의 정밀도와 다양하고 정밀한 측정용 센서의 발전에 기인한다. 동작기계 정밀도의 경우, 구조계의 최적화, 구동 및 이송계의 고정밀화, 열변형 보정기술 등에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 정밀 센서의 경우, 접촉식 및 비접촉식에 대한 다양한 고정밀도 제품의 등장으로 OMM에 대한 가능성을 더욱 밝게 해 주고 있다.

최근의 대표적인 연구로는 터치 트리거 프로브(Touch trigger probe) 대신 스캐닝 프로브(Scanning probe)를 이용함으로써 가공면의 프로파일을 고속으로 검출하기 위한 연구,⁽³⁾ 동작기계에 3차원 측정기의 기능을 적용하여 동작기계를 복합기능화하기 위한 연구,⁽⁴⁾ CMM 공정을 OMM 공정으로 대체하고자 하는 경우 가장 큰 관심사인 오차를 원인별로 해석하고 분석하고자 하는 연구 등이 이루어졌다.⁽⁵⁾ 운용에 있어서는 CAD/CAM/CAI를 통

합하기 위해 OMM 측정오차를 폐회로 구조에 의해 모델링하고자 하는 연구 등이 이루어져 왔다.⁽⁶⁾ 이러한 연구는 가공 생산성 향상, 공작기계의 복합기능화, 가공 시스템에서의 정보통합을 지향하고 있다는 점에서는 공통점을 가진다.

Fig. 1은 가공 시스템에 OMM 시스템을 적용했을 때, 개선된 가공 시스템의 흐름을 보여주고 있다. OMM을 적용하는 경우, 공정이 단순해지는 특징을 가지지만, 공작기계의 운동계와 측정계의 운동계가 동일하기 때문에 공작기계가 갖는 체적오차, 가공열에 의한 열변형 오차, 공구로부터 기인하는 오차 등이 OMM 측정값에 반영된다는 단점을 갖는다. 이것은 종래의 방법인 CMM 측정값을 기준으로 OMM 측정값을 비교할 때 OMM 시스템의 측정오차 원인이 되고 있다. 이러한 오차 중에서 열변형 및 공구로부터 기인하는 오차는 가공환경에 따라 어느 정도 억제 가능하나, 체적오차의 경우에는 억제가 어려운 특징을 갖는다.

본 논문에서는 가공종료 후, 레이저 측정 프로브를 이용해 가공형상을 측정한 후, 얻어진 신호를 이용해 가공면의 거칠기와 형상오차를 구하고

자 했다. 가공면 거칠기는 미리 얻어진 거칠기 표준값과 비교하여 상대적으로 구하는 방법을 이용했다. 형상오차는 공작기계의 체적오차를 제거하기 위해 미리 구해진 체적오차를 OMM으로부터 구한 형상오차에 반영하여 보상함으로써 OMM 정확도를 향상시키고자 했다. 이러한 내용을 Fig. 2에 나타내었다. 제안된 시스템의 성능 평가는 OMM에서 측정된 부품을 CMM으로 옮겨 측정을 하고 두 가지의 측정기에서 측정된 값을 비교했다.

2. 시스템 구성

CNC 공작기계에서 OMM을 구성하기 위해 사용이 가능한 센서로는 3점 볼(Ball)의 점접신호를 이용한 터치 트리거 프로브, 스타일러스(Stylus)가 평행 이동기구를 갖는 스캐닝 프로브 및 비접촉 방법인 레이저 변위계(Laser displacement sensor) 등이 있다.

터치 프로브는 구조가 간단하다는 장점이 있으나, 3점 볼이 스타일러스를 지지하므로 측정방향에 따라 측정압의 차이가 발생하며, 초기 이동량이 변화하여 이로 인한 오차가 발생한다. 또한, 측정원리상 측정물과 프로브가 접촉한 후 인터페이스 유닛을 통해 CNC에서 스킵(Skip) 신호를 입력받은 뒤, 그때의 기계좌표값을 측정값으로 하기 때문에 프로브의 이동속도에 따라 프리 트래블 에러(Pre Travel Error)를 가지기 때문에 이에 대한 보상이 필요하며 측정속도가 비교적 느린 단점을 갖고 있다.^(7,8) 스캐닝 프로브는 스타일러스가 3축 평행 이동식 탄성기구를 가지기 때문에 탄성기구의 스케일 이동에 따른 펄스(Pulse) 출력을 연산하는 것의 의해 간단히 대상물의 형상측정이 가능하다. 높은 분해능을 가지면서도 응답성이 좋아 고속측정이 가능하다. 이에 비해, 레이저 변위계는 광축 방향으로만 측정이 가능하다는 단점을 가지지만, 높은 측정정밀도를 얻을 수 있고 측정속도가 빠르며 거칠기 정보와 형상정보를 동시에 얻을 수 있는 장점을 갖는다.

이상과 같은 센서의 특징을 고려하여 본 연구에서는 레이저 변위계를 사용했다.

Fig. 3에 구성된 OMM 시스템을 나타냈다. CNC 밀링 머신은 3축의 제어축을 가지고 1 μm 단위로 제어가 가능하며 모터에 부착된 엔코더(Encoder) 외에 각축에 리니어 스케일(Linear scale)이 설치되어 비교적 위치결정 정밀도가 우수한 기계가 사용되었으며, 가공과 측정을 수행하는 역할을 한다. 가공면의 형상과 거칠기를 측정하기 위한 레이저 변위계는 1 μm 까지 측정이 가능하며 1 μm로

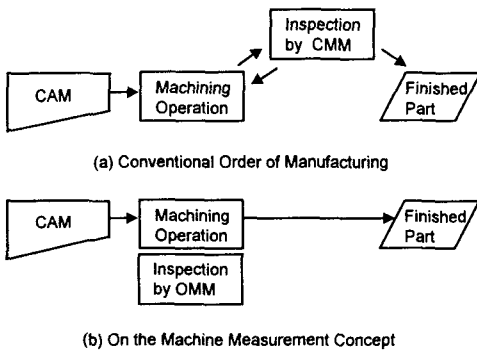


Fig. 1 Concept of OMM system

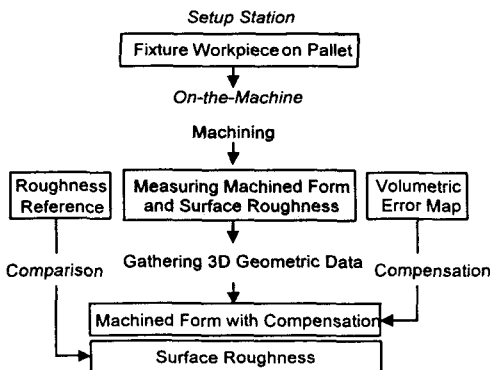


Fig. 2 Measurement information flow

아나로그 출력이 가능한 것이 사용되었으며 가공 후 주축에 설치되어 측정을 수행한다. 반도체 레이저를 이용한 변위계는 수광부가 PSD(Position sensitive detector)형과 CCD(Charge coupled device)형이 있는데 다양한 가공면에 적용하기에 용이한 CCD형이 사용되었다. OMM을 위해서 CAD에서 정의된 가공물의 형상은 2가지의 NC 프로그램을 생성한다. 가공용 NC 프로그램은 공구의 직경과 가공오차(Tolerance)를 고려하여 생성된다. 측정용 NC 프로그램은 레이저의 스폿 사이즈(Spot size)와 CAD에서 정의된 형상을 최대한 반영하여 NC 프로그램을 생성한다. 가공용 및 측정용 NC 프로그램은 OMM 컴퓨터에서 CNC로 DNC(Direct numerical controller)를 이용하여 전송한다. 레이저로부터 출력되는 측정값은 OMM 컴퓨터로 ADC(Analog to digital converter)를 통해 입력된다. 입력된 신호는 적절한 데이터 처리를 통해 가공면 거칠기와 형상오차로 표현된다. OMM 컴퓨터의 DB(Data base)에는 표준시편을 이용한 거칠기 정보와 체적오차값이 저장되어 있다. 측정된 형상오차는 미리 레이저 간섭계(Laser interferometer)에 의해 구해진 체적오차를 반영하여 형상오차값을 산출하게 되며, 가공면 거

칠기는 표준시편의 거칠기와 비교를 통해 산출하게 된다.

3. 가공 및 측정 실험

3.1 가공

가공 및 측정 실험을 위한 시편은 길이 300mm, 폭 20mm, 높이 200mm의 알루미늄 판재가 사용되었다. 가공형상은 CAD에서 정의했으며 가공된 시편을 Fig 4에 나타내었다. 보간에 따른 가공특성을 OMM에 반영시키기 위해 110mm는 곡면보간 상승(A-B 구간), 60mm는 곡면보간 하강(B-C 구간) 그리고 75mm는 직선보간 하강(C-D 구간)으로 했으며 나머지 구간은 평면으로 정의했다. 좌표상으로는 A점은 Y-130mm, B점 Y-35mm, C점 Y+25mm 그리고 D점은 Y+100mm에 해당된다. A 구간에서는 경사각이 35도에 이르며 C 구간에서는 15도 정도의 경사각을 갖게 형상을 정의했다. 공구는 직경 10mm의 볼 엔드밀이 사용되었다. 가공조건은 주축 회전수 1,000rpm에서 이송속도는 500mm/min.로 가공이 이루어 졌다. CAM에서는 가공오차(Tolerance)를 0.001mm로 정의해서 NC 프로그램을 생성했다. 평면구간에서는 CMM에서 평면을 정의할 때 오차를 줄이기 위해 CUSP를 0.001mm로 가공을 수행했다.

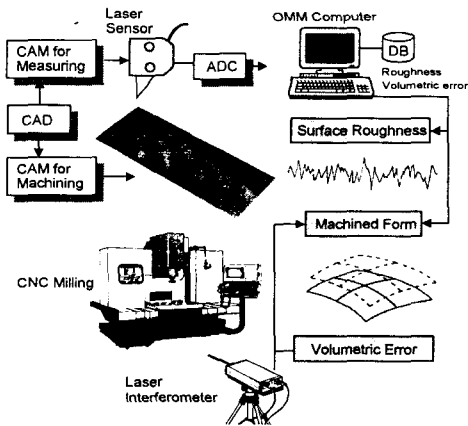


Fig. 3 Configuration of OMM system

3.2 공구 중심과 센서 중심의 일치화

OMM 시스템은 가공이 완료된 후 공구를 측정 프로브로 교체하여 기계상에서 가공형상을 측정하는 시스템이다. 따라서 측정을 위해 공구와 교체된 프로브의 중심은 공구의 중심과 일치하는 것이 이상적이다. 만일 어느 방향으로 중심이 편심되어 있으면 형상의 목표위치와 실제 측정위치가 차이가 나게 되어 정확한 측정이 되지 않는다. 볼(Ball) 형 프로브를 사용하는 경우에는 중심좌표를 알고 있는 기준구멍(Known hole)을 이용해 공구중심에 대한 측정 프로브의 편심을 측정하고, 이를 보상하는 방법이 효율적이다.⁽³⁾ 그러나 레이저 센서의 경우에는 광축으로만 측정을 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 이미 중심을 알고 있는 구멍에 구(Sphere)를 올려놓고 구의 중심을 측정하여 공구중심과 프로브 중심을 일치시키는 방법을 고안해서 적용했다. 이에 대한 원리를 Fig. 5에 나타내었다. 공작기계상에서 가공을 통해 미리 알고 있는 기준구멍의 중심 P_1 과 기준원에 올려 놓은 구의 중심 P_2 가 일치하기 때문에 P_2 의 좌표를 측정하여 이 값을 P_1 으로 좌표 변환하게 된다. 레이저 변위계를 이용한 P_2 좌표의 측정은 X 방향과 Y 방향에 있어 최고점을 찾는 알고리즘을 이용했다. 그림

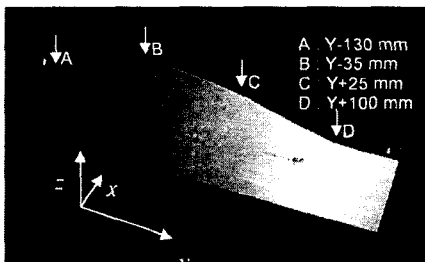


Fig. 4 Machined specimen

에서 보이는 기준구멍은 가공 후, 형상에 지장을 주지 않는 위치를 선택했다. 기준구는 측정정확도를 높이기 위해 1 μ m 이내의 정밀도를 갖는 직경 12.7mm의 백색 지르코나이트가 사용되었다. 두 개의 기준구멍을 만든 것은 CMM 측정시 기준좌표를 정하기 위함이다.

3.3 거칠기 및 형상오차 측정

가공이 끝난 후, 주축에 측정용 레이저 변위계를 설치했다. 측정용 NC 프로그램은 CAD에서 정의된 형상으로부터 레이저 변위계의 스폿 사이즈가 30 μ m인 점을 감안하여 생성되었다. 가공오차(Tolerance)는 가공용 NC 프로그램에 비해 10배 작게 했다. 측정원리는 절삭가공이 CAD에서 정의된 형상대로 가공이 이루어졌다면, 측정용 NC 프로그램을 이용해 가공면을 트레이스할 때 레이저 변위계의 출력이 0이 되어 형상오차는 0이라는 사실에 기초한다.

이를 위해, 공작기계의 Z축은 형상측정이 이루어지기 전에 측정 NC 프로그램에 의해 기준위치로 옮겨 레이저 변위계는 제로 세팅을 하게 된다. 이러한 원리로 OMM에 의해 측정된 데이터를 Fig. 6에 나타내었다. 측정은 500 mm/min. 속도로 이루어졌다. Fig. 6 (a)에서 가로축은 Y축 위치를 나타내며 세로축은 측정된 형상오차를 나타낸다. 측정 분해능은 1 μ m 단위로 측정했으며 측정주파수는 1 kHz 그리고 12 비트 ADC가 사용되었으며 샘플링은 100 Hz로 했다. 그림에서 양의 값은 언더 컷(Under cut)

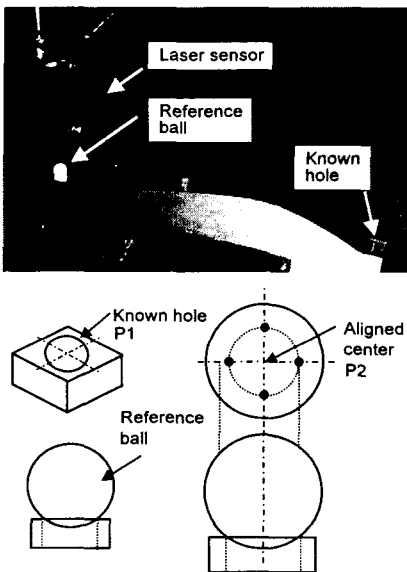


Fig. 5 Center alignment method between cutting tool and measuring sensor

을 나타내며 음의 값은 오버 컷(Over cut)을 나타낸다. Fig 6 (a)에서 작은 그래프는 얻어진 데이터를 이용해 가공면 거칠기를 추정하기 위한 기준시편의 거칠기 측정예를 나타낸 것이다. 기준시편은 JISB0659에서 정의하는 시편 중 밀링용 Rmax 12를 예로 든 것이다. 기준시편 거칠기와 비교해 보면 측정된 가공면 거칠기는 평균적으로 Rmax 10 정도로 추정된다.

측정된 신호를 이용해 형상오차를 추출하는 방법으로는 이동평균(Moving average)을 이용했다. 데이터 처리는 측정 이송속도, 레이저 출력신호, 샘플링 속도 등을 고려하여 100Hz로 수집된 데이터를 30개씩 이동평균을 취하였다. Fig. 6 (b)는 Fig. 6 (a)에 이동 평균을 적용한 것이다. 그림에 보이듯이 언더 컷과 오버 컷의 특징이 명확하게 나타나고 있다. 그림에 보이듯이 절삭저항이 절삭방향과 역으로 작용하는 영역에서는 언더 컷이 발생했고, 절삭저항이 절삭방향으로 작용하는 영역에서는 오버 컷이 발생했음을 알 수 있다. 또한, 형상각도가 큰 영역에서 형상오차가 크게 나타나고 형상각도가 일정한 C-D 영역에서는 형상오차가 일정함을 볼 때, 이는 CAM 및 공구로부터 기인하는 오차로 추정할 수 있다.

4. 체적오차 모델링 및 측정

X, Y, Z, 3축을 갖는 공작기계에서 1개의 축이 직선운동을 할 때 발생할 수 있는 오차는 각 축 방향에 대하여 발생하는 3개의 병진오차(translational errors; $\delta_x, \delta_y, \delta_z$)와 각 축에 대한 3개의 회전오차(rotational errors; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$), 그리

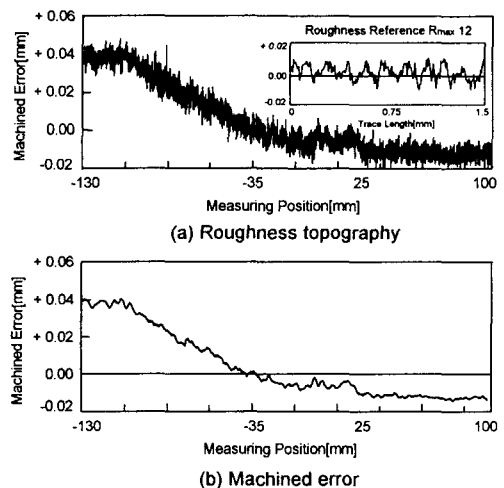


Fig. 6 Measured machined error using OMM

고 각 축의 직각도오차(squareness errors)로 표현이 가능하다. 3축 공작기계의 운동을 매트릭스(Matrix)로 나타내면, X, Y, Z축 운동은 각각 다음과 같이 표현이 가능하다.⁹⁾

$$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

공작기계 전체의 운동을 r 이라고 하면, r 은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$r = A^1(x) A^2(y) A^3(z) r_1 \quad (2)$$

여기서 r_1 은 공구의 형상벡터이며, e 는 단위벡터가 된다. 이동점에 대한 회전각이 미소한 경우, 공작기계가 각축으로 이송할 때 발생하는 3축의 병진오차와 회전오차는 다음과 같은 4x4 변환행렬에 의하여 표시될 수 있다.

$$E_n = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_{zn} & -\varepsilon_{yn} & \delta_{zn} \\ -\varepsilon_{zn} & 0 & -\varepsilon_{xn} & \delta_{zn} \\ -\varepsilon_{yn} & -\varepsilon_{xn} & 0 & \delta_{zn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 E_n 은 공작기계 원점에 대한 좌표변환행렬이며, n 은 방향을 나타낸다. 3축 공작기계를 고려한다면, Z축을 기준축이라 하면, X-Z, Y-Z축에 대한 두 개의 직각도가 존재한다. 만일 직각도오차가 작다고 가정하면, 다음과 같은 행렬로 표시 가능하다.

$$E_{xz} = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_z(XZ) & -\varepsilon_y(XZ) & 0 \\ -\varepsilon_z(XZ) & 0 & 0 & 0 \\ -\varepsilon_y(XZ) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이를 종합하면, X축 오차를 가지는 공작기계의 운동오차는 (3), (4)의 합으로 구해진다.

$$E = E_x + E_{xz} \quad (5)$$

결국, X 방향의 오차는 다음 (6)식과 같이 표현이 가능하다.

$$\Delta r = Er \quad (6)$$

OMM 공작기계를 대상으로 기하학적 오차를 측정하기 위한 실험이 이루어졌다. 측정은 가공환경을 고려하여 가공이 종료된 후 측정을 수행했다. 측정영역은 OMM이 이루어지는 영역을 대상으로 국소적으로 정했다. 측정은 레이저 간섭계(Renishaw ML10)를 이용해 각 축 방향에 대해 1개의 위치오차, 2개의 진직도오차 그리고 롤, 요, 피치오차를 측정했다. 또한, 각 축 평면에 대해 3개의 직각도오차를 구해 21개의 오차 성분을 측정했다. 측정된 값은 오차 모델에 의해 기하학적 오차가 구해졌다. 구해진 예를 Fig. 7에 나타내었다. 그림은 모델링된 전체 영역에서 가공방향인 Y축과 공구높이에서의 Z축 기하오차를 구한 예이다.

5. 보상 및 평가

구성된 OMM 시스템에 의해 측정된 형상오차의 성능을 평가하기 위해, OMM에서 측정된 시편을 CMM(MERLIN 1100)으로 옮겨 두 개의 기준구멍과 기준면 그리고 동일한 CAD 데이터를 이용해 측정을 수행했다. 사용된 CMM은 $U1=3+L/300\text{mm}$ μm , $U3=3+L/250\text{mm}$ μm 의 오차를 가지며, 측정 프로브는 직경 1mm의 스타일러스가 사용되었다. 측정간격은 Y-135mm에서 Y+100mm까지 5mm 간격으로 47개가 측정되었다.

CMM으로 옮겨진 시편은 24시간의 열평형 시간을 가진 후 측정이 이루어졌으며 측정은 3회 반복해서 이루어졌다. CMM 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. OMM에서 측정한 결과와 동일한 측정 패턴을 가짐을 알 수 있다.

본 연구에서 개발한 OMM의 성능을 평가하기 위한 방법으로 OMM 측정결과와 CMM 측정값을 비교하는 방법을 이용했다. 공작기계의 체적오차를 OMM 측정값에 반영하여 OMM 측정치를 보상하기 위해, Fig. 7의 체적오차에서 공구의 Z 위치에 따른

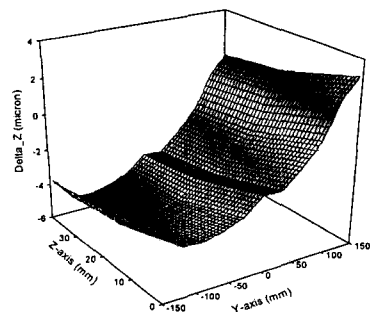


Fig. 7 Volumetric error

체적오차를 분리했다. 이를 Fig. 9에 나타냈다. 가로축은 공구의 Y축 위치를 그리고 세로축은 체적오차를 나타낸다.

Fig. 10은 OMM과 CMM의 측정값의 차이를 나타낸 것이다. 가선선은 체적오차가 고려되지 않은 차이 값이며, 굵은선은 체적오차가 고려된 차이 값을 나타낸 것이다. 보상 후 차이 값은 전 영역에서 $10\mu\text{m}$ 이내임을 알 수 있다. 차이 값에서도 경사각이 큰 영역(A-B)에서 크게 나타나고 경사각이 일정한 영역(C-D)에서는 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 레이저 스폿 외곽에서의 광의 집중도(Intensity) 영향을 받는 것으로 추정된다. OMM이 갖는 $\pm 10\mu\text{m}$ 정도의 오차는 일반적인 3차원 고정밀 가공품에도 적용이 가능할 것으로 추정된다.

6. 결론

본 연구에서는 가공 생산성을 높이기 위해 OMM을 통해 가공면의 거칠기와 형상오차를 측정하고자 했다. 또한, OMM의 시스템 특성상 문제가 되는 체적오차를 제거하기 위해 체적오차를 모델링하고 이를 OMM 측정값에 반영시켜 측정성능을 향

상시키고자 했다.

OMM 시스템은 측정 센서로서 레이저 변위계를 사용하고, CAD 형상정보로부터 측정용 NC 프로그램을 생성함으로써 효과적으로 거칠기와 형상오차를 구할 수 있었다. 가공면을 토포그래피로 표현할 수 있었으며 거칠기 값은 기준시편 거칠기와 비교를 통해 산출이 가능했다. 형상오차는 얻어진 데이터를 이동평균을 취함으로써 구할 수 있었다. OMM에 의해 측정된 형상오차는 체적오차를 반영하여 보정한 결과, CMM과 비교할 때, $\pm 10\mu\text{m}$ 이내의 측정정확도를 갖는 것으로 평가되었다.

개발된 OMM 시스템을 가공 시스템에 적용할 경우, 공정연계, 측정소요시간, 투자효율 등에서 많은 이득을 가져다 주게 될 것이다.

향후에는 동작기계의 열변형, 미끄럼 안내면 등에서 발생하는 미소한 스틱 슬립(Stick Slip), 운동 전달장치에서 발생하는 백래시(Backlash), 가공물의 열변형, 공구의 휨 등을 OMM 시스템에 적용하여 성능을 향상 시키고자하는 연구가 추진되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- Owen, J. V., "CMMs on the Shop Floor," Manufacturing Engineering, April, pp. 66-70, 1991.
- Keizo, U., "Die & Mold 3-Dimensional Measuring on the Machine," Conf. on Die and Mold Technology, pp.208~209, 1994.
- Kim S. H and Kim, I. H., "The development and evaluation of OMM(On-the-Machine Measuring) system using scanning probe," J. of KSPE, Vol. 13, No.10, pp. 71-77, 1996.
- Lee, S. W, and Kim, S. H., "Development of On-the-Machine Measurement(OMM) system," J. of Industrial Engineering Interface, Vol. 11, No.1, pp. 199-205, 1998.
- Lee, S. J., Kim S. H., Kim O. H., "The analysis of measuring error in OMM system," J. of KSPE, Vol. 15, No.5, pp. 34-42, 1998.
- 조명우, 이세희, 서태일, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 OMM : I 측정오차 모델링," 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, pp. 172-181, 1999.
- Kreuci, J. V., "CMM Measurement Enhancement Using Probe Compensation Algorithms" SME Technical Paper MS90-09, 1990.
- Taylor, A. , "Performance Characteristics of Touch Trigger Probes", SME Technical Paper MS90-266, 1990.
- Reshetov, D. N. and Portman, V. T., "Accuracy of machine tools," ASME Press, 1988.

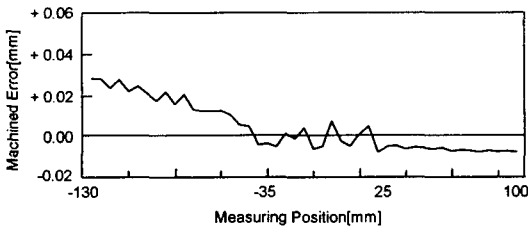


Fig. 8 Volumetric error concerned with cutter position

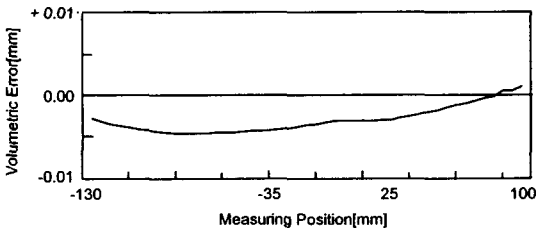


Fig. 9 Volumetric error concerned with cutter position

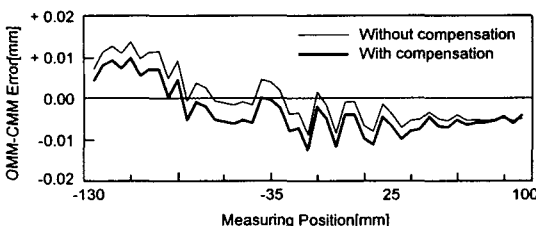


Fig. 10 Error between OMM and CMM