

CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement : I. 측정오차 모델링

조명우*, 이세희**, 서태일***

On-Machine Measurement of Sculptured Surfaces Based on CAD/CAM/CAI Integration : I. Measurement Error Modeling

Myeong-Woo Cho*, Se-Hee Lee** and Tae-Il Seo***

ABSTRACT

The objective of this research is to develop a measurement error model for sculptured surfaces in On-Machine Measurement (OMM) process based on a closed-loop configuration. The geometric error model of each axis of a vertical CNC machining center is derived using a 4×4 homogeneous transformation matrix. The ideal locations of a touch-type probe for the sculptured surface measurement are calculated from the parametric surface representation and X-, Y-directional geometric errors of the machine. Also, the actual coordinates of the probe are calculated by considering the pre-travel variation of a probe and Z-directional geometric errors. Then, the step-by-step measurement error analysis method is suggested based on a closed-loop configuration of the machining center including workpiece and probe errors. The simulation study shows the simplicity and effectiveness of the proposed error modeling strategy.

Key Words : OMM(機上測定: On-Machine Measurement), Sculptured Surface(자유곡면), Geometric Errors(기하학적 오차), Measurement Errors(측정오차)

1. 서론

3 차원 자유곡면(sculptured surface)은 자동차, 항공기 부품 등의 설계에 있어서 기능적인 역할이나 심미적인 수요의 증가로 인하여 최근에 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 가공된 자유곡면의 고정밀도 측정을 위하여 컴퓨터로 제어되는 3 차원측정기 (CMM : Coordinate Measuring Machine)가 널리 쓰이고 있으며, 수동측정작업에 의한 오차발생 가능성 배제 및 측정 정밀도의 향상을 위하여 CAD 데이터 베이스로부터 최적의 측정조건을 도

출하기 위한 CAI (Computer-aided Inspection) 기술의 응용에 관한 연구가 이루어져 왔다^[3,7,8]. 그러나, 3 차원 측정기를 사용하는 측정작업은 가공이 완료된 제품의 측정은 고정도로 수행할 수 있으나, 공작기계에서 가공이 끝난 제품을 3 차원 측정기의 테이블로 이동시켜 측정하기 때문에, 이동 및 초기 설정을 포함한 전체적인 측정시간의 증가로 생산성 저하의 원인이 되며, 고가의 측정기를 사용하여야 하므로 고비용이 발생된다는 단점이 있다. 또한 가공 중에 있는 공작물의 형상 정밀도 측정이 요구되는 경우에는, 측정 후 다시 공작기계에서

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원

*** 인하대학교 기계기술광동연구소

고정할 때 오차가 발생하여 제품의 정밀도를 저하시키는 요인이 될 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 CNC 공작기계에서 일련의 가공이 완료된 후, 공구를 측정용 프로브로 교환하여 가공물의 정밀도를 자동으로 측정하여 형상 정밀도를 판별하는 OMM (On-Machine Measurement: 기상측정) 방법이 최근에 연구되고 있다^{14,11)}. 그러나, 가공용 공작기계의 정밀도는 일반적으로 3 차원 측정기에 비하여 낮기 때문에, OMM 에 의한 측정결과는 3 차원 측정기에 의한 것보다 정밀도가 좋지 않게 된다. 공작기계의 정밀도는 운전온도, 진동, 진직도, 주축과 이송계 사이의 직각도 등 여러 오차요소에 의하여 영향을 받으며, 이들 중 공작기계를 구성하고 있는 기계 부품의 기구학적 연결장치의 치수나 형태의 오차에 기인하는 기하학적인 오차는 정밀도에 영향을 주는 중요한 요소 중의 하나이다. 여기에 공구 대신 장착된 프로브의 설치오차, 가공을 위해 공작물을 테이블에 고정할 때 발생하는 공작물의 탄성 변형 등이 복합적으로 측정오차의 원인이 되며^{12,4,6)}, 접촉식 프로브를 사용하였을 경우 접촉방향에 따라서 변화하는 프로빙 오차도 기하학적 오차와는 관계가 없으나, 실제 형상과 측정값과의 사이에 오차를 발생시키는 원인의 하나라고 볼 수 있다. 다축 공작기계의 기하학적 오차모델의 개발을 위하여 많은 연구가 진행 되어왔으며^{14,5,7,8,10)}, 3 차원 측정기의 경우에도 응용되어¹²⁾, 가공 및 측정 오차의 예측과 보정에 적용되고 있다. 따라서, 공작기계를 사용하여 측정작업을 수행하는 OMM 의 경우에도 공작기계 자체의 오차 외에 테이블의 이송에 따라 변화하는 공작물 표면의 목표 측정점의 좌표변환 및 프로브 오차가 고려된 통합오차 모델의 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구는 자유곡면을 OMM 할 때 발생할 수 있는 측정오차를 폐회로 구조(closed-loop configuration)⁹⁾에 의하여 모델링하는 데 목적을 두고 있으며, 이를 위하여 공작기계의 기하학적 오차와 프로브 접촉시 발생하는 프로빙 오차를 고려한 통합오차 모델이 제시되었다. 본 연구에서 측정오차 모델링의 대상으로 한 수직형 머시닝 센터의 경우, 공작물은 X, Y 방향으로 이송되는 테이블 위에 놓여지기 때문에, 이송계의 기하학적 오차에 의한 테이블의 좌표변환에 따라서 목표 측정점의 위치가 변화하며, 이는 통상적으로 사용하는 이동

브릿지 타입(moving bridge type)의 3 차원 측정기의 경우와도 상이한 점이다. 통상적인 이동 브릿지 타입의 3 차원 측정기의 경우, 피측정물은 정지되어 있는 상태에서 이동 브릿지에 설치된 측정 프로브가 X, Y, Z 의 3 축 방향으로 이동하여 측정하는 방식을 사용하고 있기 때문에, 피측정물의 위치에 따른 실제 목표 측정점의 좌표변환은 발생하지 않는다고 생각할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 수직형 머시닝 센터로 자유곡면을 측정할 때 발생하는 측정오차의 모델링을 위하여 X, Y 축 방향의 기하학적 오차와, 이에 기인하는 테이블에 놓여진 자유곡면 표면의 측정점의 좌표변환, 그리고 Z 축의 오차와 이에 설치된 접촉식 프로브의 프로빙 오차를 복합적으로 고려하는 폐회로 구조를 사용한 측정오차 모델링 방법을 제안하였고, 모의실험을 통하여 제안된 오차모델의 효용성을 검증하였다.

2. 공작기계의 기하학적 오차 모델링

일반적인 공작기계는 X, Y, Z 각 방향으로 운동할 수 있는 이송테이블과 이를 구동하기 위한 구동장치 등으로 구성되어 있다. 한 방향으로의 직선운동시 발생할 수 있는 오차는 각 축 방향에 대하여 발생하는 3 개의 병진오차(translational errors)와 각 축에 대한 3 개의 회전오차(rotational errors)로 표현될 수 있으며, 일반적인 강체운동의 6 자유도의 오차성분으로 나타낼 수 있다. 3 축 공작기계의 경우에는 각 축의 직각도에도 오차가 발생하며, 이를 직각도 오차(squareness errors) 라고 한다. 본 연구에서 사용된 공작기계의 기하학적 오차 각 성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

2.1 병진오차와 회전오차의 표현

본 연구에서는 자유곡면의 OMM 에 가장 일반적으로 사용되는 수직형 3 축 머시닝 센터를 기본 대상으로 하여 측정오차를 모델링 하였으며, 각 축에 대한 오차성분은 다음과 같이 표시된다.

$EX_i(X_j)$: X_j 축 방향으로 이송시 X_i 축에 대하여 발생하는 병진오차 성분

$EA_i(X_j)$: X_j 축 방향으로 이송시 X_i 축에 대하여 발생하는 회전오차 성분

X 축 방향으로의 이송시 발생하는 오차성분을 Fig.1 에 나타내었으며, 이동점에 대한 좌표는 회전각이 미소한 경우 다음과 같은 4x4 변환행렬에 의하여 표시될 수 있다.

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & -EC(X) & EB(X) & EX(X)+D_x \\ EC(X) & 1 & -EA(X) & EY(X) \\ EB(X) & EA(X) & 1 & EZ(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 T_i 는 공작기계 원점에 대한 좌표변환행렬이며, D_x 는 제어기 지령에 의한 X 축 방향의 목표위치, 첨자 i 는 X 방향으로의 이동을 각각 의미한다. Y, Z 축 방향으로의 이송시 발생하는 좌표변환행렬 T_j, T_k 는 동일한 방법으로 구할 수 있다.

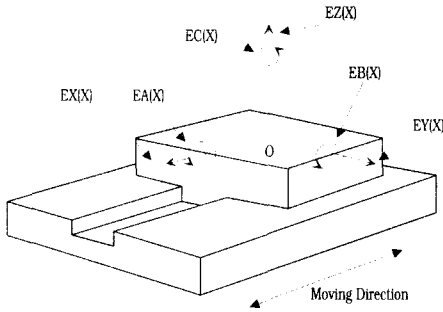


Fig. 1 Error components in X-directional movement

2.2 직각도 오차의 표현

수직형 3축 머시닝 센터의 직각도 오차는 Z 축을 기준축으로 할 때, Fig.2 에 나타낸 바와 같이 Z 축과 X, Y 두 축 사이의 각도오차로 정의되며, 다음과 같이 표현된다.

$EA_i(XZ)$: Z 축을 기준으로 한 X 축의 X_i 축 방향의 직각도 오차 성분

$EA_i(YZ)$: Z 축을 기준으로 한 Y 축의 X_i 축 방향의 직각도 오차 성분

직각도 오차가 미소한 경우 Z 축에 대한 X 축의 직각도 오차에 의한 4x4 변환행렬은 다음의 근사식으로 표현할 수 있으며, Y 축의 직각도 오차도 동일한 방법으로 구할 수 있다.

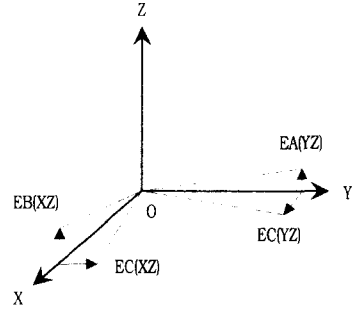


Fig. 2 Squareness errors

$$T_{ik} = \begin{bmatrix} 1 & -EC(XZ) & EB(XZ) & 0 \\ EC(XZ) & 1 & 0 & 0 \\ EB(XZ) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.3 이송운동에 의한 기하학적 오차

수직형 3축 머시닝 센터의 기하학적 오차는 각 축 방향으로의 이송 시에 발생하는 병진오차 및 회전오차와 각 축사이의 직각도 오차로 구분된다. 임의의 좌표계에서 공작기계에 의하여 발생하는 기하학적 오차는 이러한 오차들의 합으로 표현될 수 있으며, 공작기계의 테이블이 X 축 방향으로 이송될 때 최종 목표점에서의 변환행렬 T_x 는 다음과 같이 구할 수 있다.

테이블이 X 축 방향으로 D_x 만큼 이송되었을 때의 좌표변환행렬은 다음과 같다.

$$L_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

또한, Z 축에 대한 X 축의 직각도 오차에 의하여 발생하는 목표점에서의 오차성분은 식(2)와 (3)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$T_{XZ} = T_{ik} L_x - L_x$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -EC(XZ) & EB(XZ) & 0 \\ EC(XZ) & 0 & 0 & EC(XZ)D_x \\ EB(XZ) & 0 & 0 & -EB(XZ)D_x \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서, X 축 방향으로 이동시 병진오차 및 회전오차는 식(1)과 (4)에 의하여 다음과 같이 계산될 수

있다.

$$\mathbf{T}_x = \mathbf{T}_i + \mathbf{T}_{xz} = \begin{bmatrix} 1 & -EC(X)-EC(XZ) & EB(X)+EB(XZ) & EX(X)+D_x \\ EC(X)+EC(XZ) & 1 & -EA(X) & EY(X)+EC(XZ)D_x \\ 0 & EC(X) & 1 & EZ(X)-EB(XZ)D_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

위의 행렬은 X 축 방향으로 이송시 임의의 목표점에 대하여 공작기계의 기하학적 오차에 의한 좌표 변환행렬을 나타내며, 같은 방법으로 \mathbf{T}_y 와 \mathbf{T}_z 를 구할 수 있다.

3. 프로브 오차 모델링

3 차원 측정기 또는 OMM 에 의하여 측정작업을 수행할 때 널리 쓰이는 접촉 트리거 방식의 측정 프로브는 측정물과 직접 접촉하는 프로브 볼 (probe ball), 접촉에 의하여 발생하는 미소변위를 전달하는 프로브 바늘(stylus), 그리고 기계적인 변위를 전기적 신호로 변환하는 변환기(transducer)의 세부분으로 구성되어 있다. 접촉식 프로브의 변환기는 트리거링 회로(triggering circuit)를 가지는데, 트리거링을 야기하는 미소변위는 프로브의 접촉방향에 따라서 변화하며, 이를 프로브 오차(probe lobing error, pre-travel variation)라고 한다^[2]. 본 연구에서는 이러한 프로브오차를 공작기계의 기하학적 오차 모델과 결합시켜 OMM 에 의한 측정작업시 발생하는 측정오차를 모델링하였다.

3.1 프로브 좌표계

접촉식 프로브를 이용하여 곡면을 측정할 때, 측정오차를 최소화하기 위하여서는 프로브가 곡면의 법선방향으로 접근하여야 한다^[8]. 이렇게 곡면의 법선방향에 따라서 변화하는 프로브 오차를 효과적으로 측정 및 평가하기 위하여 프로브의 접촉 방향을 기준축으로 하는 프로브 좌표계가 사용되며, Fig.3에 프로브 좌표계와 공작기계의 기계좌표계와의 관계를 도시하였다.

이때, 프로브 좌표계와 기계좌표계가 공통원점을 가지고 있다면, 두 좌표계 사이의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[x' \ y' \ z' \ 1]^T = \mathbf{T}_p [x \ y \ z \ 1]^T \quad (6)$$

여기에서 \mathbf{T}_p 는 두 좌표계 사이의 4×4 좌표변환

행렬이며 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\theta & \cos\phi \sin\theta & \sin\phi & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ -\sin\phi \cos\theta & -\sin\phi \sin\theta & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

위의 식에서 ϕ 와 θ 는 프로브의 기계좌표계에 대한 틸트(tilt)각과 롤(roll)각을 나타낸다.

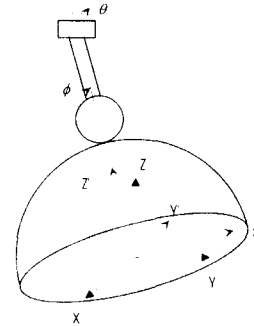


Fig. 3 Probe coordinate system

3.2 프로브 오차

접촉식 프로브를 사용하는 측정오차는 기준구의 측정 데이터를 사용하여 보정될 수 있으며, Fig. 4 에 기준구를 사용하여 측정방향에 따라 변화하는 프로브의 측정오차 보정을 위한 개요가 도시되어 있다. 이 때, 프로브 볼의 유효반지름을 R_e , 기준구의 (ϕ_i, θ_i) 방향으로 정의되는 프로브 오차를 $PE(\phi_i, \theta_i)$, (ϕ_j, θ_j) 위치에서의 기준구 반경을 $R_s(\phi_j, \theta_j)$ 그리고 기준구와 프로브 볼 중심사이의 측정거리를 $R_m(\phi_i, \theta_j)$ 이라고 하면, 다음과 같은 관계가 성립된다^[2].

$$R_e - PE(\phi_i, \theta_j) = R_m(\phi_i, \theta_j) - R_s(\phi_i, \theta_j) \quad (8)$$

여기에서, 효과적인 보정을 위해서 프로브 볼의 공칭반경보다는 유효반경이 사용되며, 이는 프로브가 접촉하는 과정에서 발생하는 프로브 바늘의 미소 탄성변형량을 보정하기 위한 것이다. 식(8)에서 우변은 주어진 값이므로 이로부터 좌변의 값을 결정할 수 있으며, 프로브의 유효반경 R_e 는 우변의 상수항으로부터, 프로브 오차 $PE(\phi_i, \theta_j)$ 는 변수항으로부터 각각 구할 수 있다.

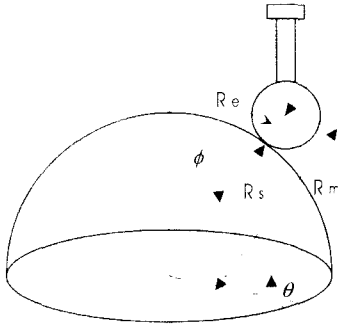


Fig. 4 Probe error calibration

프로브 오차는 다른 기하학적 오차와는 달리 위치에 따라 변화하는 함수가 아니고 프로브의 접촉방향에 따라 변화하는 함수이므로 오차보정은 프로빙 방향에 따라서 수행된다. 따라서, OMM에 의하여 곡면측정시 프로빙 방향은 대상 측정점에서의 곡면의 법선벡터로 정의되며, 동작기계의 기계좌표계에서 정의되는 프로빙방향의 단위벡터를 (M_x, M_y, M_z)라 할 때, 프로브오차에 의한 측정오차의 좌표변환행렬은 다음과 같다.

$$TL = PE(\phi, \theta) [M_x \ M_y \ M_z \ 1]^T \quad (9)$$

여기에서 ϕ 와 θ 는 프로브의 접근방향으로부터 계산되며, 대상곡면의 법선벡터의 각 방향성분이 N_x, N_y, N_z 로 주어지는 경우 다음과 같다.

$$\phi = \cos^{-1} N_z, \theta = \tan^{-1} \left(\frac{N_y}{N_x} \right) \quad (10)$$

4. 폐회로 구조를 이용한 측정오차 분석

3차원 측정기나 OMM으로 자유곡면을 측정할 때, 실제 측정결과는 동작물의 형상오차뿐만 아니라, 측정에 사용되는 측정기 자체의 오차도 포함하고 있다. 동작기계 위에서 측정작업을 수행하는 OMM의 경우, 측정에 사용되는 동작기계의 기하학적 정밀도가 3차원 측정기에 비하여 낮으며, 이송테이블의 관성등에 의한 추가적인 오차발생요소로 인하여 측정기에 의한 오차요소는 더욱 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 폐회로 구조¹⁾를 이용하여 측정오차의 모델링을 용이하게

할 수 있는 방법을 제시하였다.

4.1 폐회로 구성

수직형 머시닝 센터의 경우, 동작물은 수평으로 X-, Y-축 방향으로 이송되는 테이블 위에 고정되고, 측정 프로브는 Z-축에 설치되어 측정작업을 수행하게 된다. 이상적인 경우, Fig. 5에 나타난 바와 같은 폐회로 구조가 성립하게 되며, 다음과 같은 식이 성립한다.

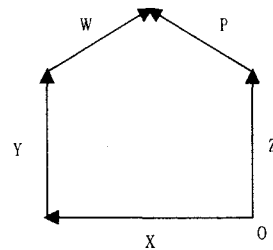


Fig. 5 Closed-loop configuration for the multi-axis machine tool (ideal case)

$$X + Y + W = Z + P \quad (11)$$

위의 식에서 X, Y, Z 는 각 방향으로의 이송량, W 는 동작기계 원점에서 자유곡면 표면의 측정점까지의 거리이며 P 는 프로브 볼의 측정물과의 접촉점의 위치를 각각 나타낸다. 그러나, 전술한 동작기계의 기하학적 오차 및 프로브 오차 등의 이유로 식(11)의 폐회로가 성립되지 않으며, 이 경우 각 오차요소를 고려한 모델이 Fig. 6에 도시되어 있다.

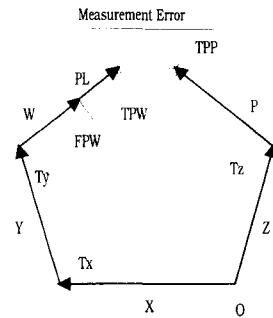


Fig. 6 Closed-loop configuration for the multi-axis machine tool (including errors)

Fig.6 에 나타낸 바와 같이, 자유곡면 표면의 측정점은 X 축과 Y 축 오차의 합에 의하여 실제 좌표가 변환되게 되며, 측정 프로브도 Z 축의 오차에 기인하여 실제 측정경로가 달라지게 되고, 여기에 프로빙 방향에 따라 변화하는 프로브 오차까지 포함되어 전체 오차를 발생시키게 된다. 따라서 OMM 에서 발생하는 측정오차는 측정점의 좌표변환에 따른 이상적인 프로브 볼 중심의 좌표와 실제로 프로브가 접촉하여 트리거링이 야기되었을 때의 좌표와의 차이로 정의될 수 있다.

4.2 프로브 위치의 계산

모든 오차가 없다고 가정하였을 때, 자유곡면 측정시 프로브의 이상적인 위치는 측정점에서 곡면의 단위법선벡터(unit normal vector)를 계산하고, 법선방향으로 프로브 볼의 반경만큼 이동시켜 구할 수 있다. Bezier 곡면의 경우, 자유곡면상의 측정점 W 는 다음과 같은 식으로 정의될 수 있다.

$$W = [W_x \quad W_y \quad W_z \quad 1]^T$$

$$= r(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} \cdot B_{i,m}(u) B_{j,n}(v) \quad u, v \in [0, 1] \quad (12)$$

여기에서 P_{ij} 는 특성다면체의 꼭지점, $B_{i,m}(u)$ 와 $B_{j,n}(v)$ 는 Bernstein 다항식이다. 또한, 측정점에서 프로빙 방향을 결정하기 위한 단위법선벡터 N 은 다음과 같이 계산된다.

$$N = [N_x \quad N_y \quad N_z \quad 1]^T = \frac{r_u(u, v) \times r_v(u, v)^T}{|r_u(u, v) \times r_v(u, v)|} \quad (13)$$

이 때, 주어진 측정점에 대응하는 프로브 볼 중심의 이론적인 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$PL = W + RN \quad (14)$$

여기에서 PL 은 (PL_x, PL_y, PL_z) 로 표시되는 프로브 볼 중심의 이론적인 좌표, R 은 프로브의 공칭반경, W 는 식(12)에서 주어지는 측정점의 좌표, 그리고 N 은 식(13)에 의하여 계산되는 측정점에서의 단위법선벡터를 각각 나타낸다.

4.3 폐회로 구조에 의한 3차원 오차의 표현

이상과 같이 정의된 각 오차요소를 Fig.6 에 나타낸 모델을 사용하여 합성하면, 이론적인 프로브 볼 중심의 좌표와 실제적인 좌표값을 계산할 수 있으며, 이들의 차이로부터 OMM 에 의한 자유곡면 측정시에 발생하는 측정오차의 모델과 같이 결정할 수 있다.

STEP 1. 프로브 볼 중심의 이론적 위치 계산

- X, Y 축 방향으로 이송시 테이블의 좌표변환

X, Y 동시 이동인 경우 테이블 변환행렬은 다음과 같다.

$$T_{xy} = T_x T_y \quad (15)$$

여기에서 T_{xy} 는 X 와 Y 축 방향으로 동시 이송시의 변환행렬이며, T_x 와 T_y 는 식(5)에서 계산되는 X, Y 축 방향으로 이송시의 변환행렬이다.

- 테이블의 이송에 의한 측정점의 실제 위치

수직형 머시닝 센터의 경우, 공작물은 XY 테이블 위에 위치하며, 테이블 이송에 의한 좌표변환에 의하여 측정점의 실제 좌표도 변화하게 된다. 따라서, 대상 자유곡면 표면의 측정점은 기계좌표계 내에서 다음과 같이 표현된다.

$$FPW = T_x T_y W = \begin{bmatrix} FPX(W) \\ FPY(W) \\ FPZ(W) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기에서 W 는 식(12)에서 계산되는 자유곡면 표면의 측정점 좌표이며, FPW 는 테이블 이송에 의한 오차요소를 포함한 측정점의 실제 위치를 나타낸다.

- 이론적인 프로브 위치의 계산

자유곡면 표면의 주어진 측정점에 대응하는 이론적인 프로브 볼 중심의 위치는 식(14)로부터 계산될 수 있으며, 실제 측정점이 오차에 의하여 식(16)에서 나타낸 바와 같이 좌표변환이 발생하였으므로, 이에 대응하는 프로브 볼 중심의 위치는 다음과 같다.

$$TPW = \begin{bmatrix} TPX(W) \\ TPY(W) \\ TPZ(W) \\ 1 \end{bmatrix} = PL = \begin{bmatrix} FPX(W) + RN_x \\ FPY(W) + RN_y \\ FPZ(W) + RN_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

STEP 2. 인식된 프로브 볼 중심의 좌표계산

- Z 축 오차를 고려한 실제 측정좌표의 표현

수직형 머시닝 센터의 경우, 측정 프로브는 Z 축을 따라서 이송되므로, 프로브의 실제 위치는 Z 축의 기하학적 오차에 따라 변환된다. 따라서, Fig.6 에 도시한 바와 같이, 이 때의 오차는 Z 축의 기하학적 오차성분과 식(9)로 주어지는 프로브의 접근방향에 따라 변화하는 프로빙 오차의 합성으로 구해질 수 있다. 측정 프로브가 공작물과 접촉하여 변환기를 통하여 인식된 기계좌표계에서의 프로브 볼의 좌표변환을 **TPP** 라고 하면, 이는 다음과 같이 구해진다.

$$TPP = T_z TL = \begin{bmatrix} TPX(T) \\ TPY(T) \\ TPZ(T) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기에서 T_z 은 Z 축의 기하학적 오차를 나타내는 4x4 변환행렬이며, **TL** 은 식(9)로 주어지는 프로빙 오차이다.

STEP 3. 측정오차의 계산

최종적으로, OMM 에 의한 자유곡면 측정시 발생하는 3 차원 측정오차는 식(17)로 주어지는 이상적인 측정 프로브의 위치 **TPW** 와 실제 인식된 프로브의 위치 **TPP** 의 차이에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$VE = TPW - TPP$$

$$= \begin{bmatrix} TPX(W) \\ TPY(W) \\ TPZ(W) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} TPX(T) \\ TPY(T) \\ TPZ(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VEX \\ VEY \\ VEZ \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기에서 **VEX,VEY,VEZ** 는 각각 측정오차의 X, Y, Z 방향의 성분이며, 전체 오차량은 다음과 같이

계산된다.

$$|VE| = \sqrt{(VEX)^2 + (VEY)^2 + (VEZ)^2} \quad (20)$$

5. 모의 실험

본 연구에서는 수직형 머시닝 센터에서 접촉식 프로브에 의한 자유곡면의 OMM 시 3 차원 좌표에 따라 변화하는 공작기계의 기하학적 오차와, 프로브의 접근방향에 따라서 변화하는 프로빙 오차를 포함한 통합오차 모델을 동차 변환행렬을 이용하여 구하는 방법을 제시하였으며, 제시한 오차 모델링 방법에 대한 효용성을 검증하기 위하여 다음과 같은 모의 실험을 행하였다.

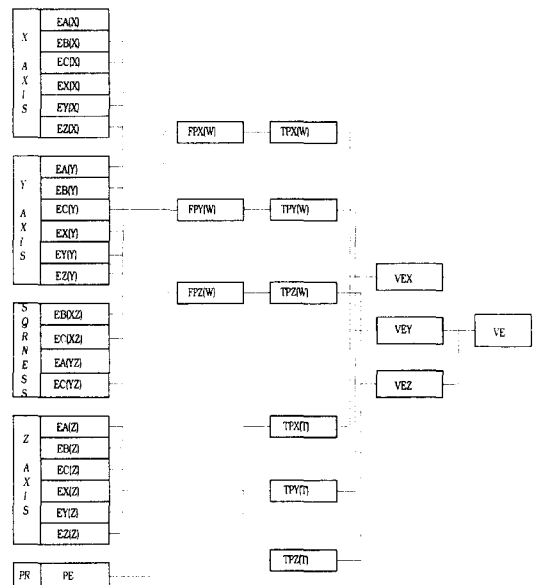


Fig. 7 Error components in OMM process using vertical machining center

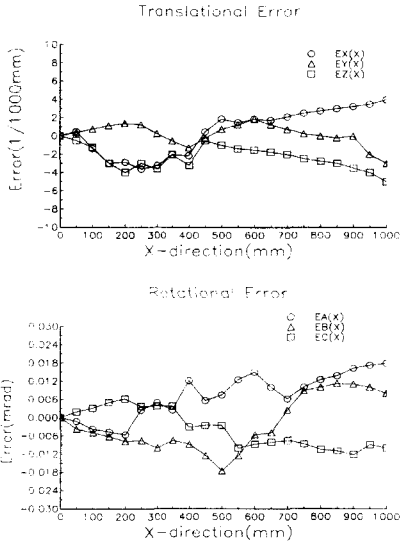
5.1 오차 성분의 구성

3 축 수직형 머시닝 센터를 사용한 OMM 시의 측정오차를 구성하는 오차요소들이 Fig.7 에 나타나 있으며, Fig.8 에는 모의실험에서 사용된 각 축의 병진오차와 회전오차가 도시되어 있다. 각 축 방향의 이송범위는 1000mm 로 하였으며, 공작기계 원점에서의 각 오차요소는 0 으로 설정하고, 이에 대한 각 오차요소들을 50mm 간격으로 생성하였다

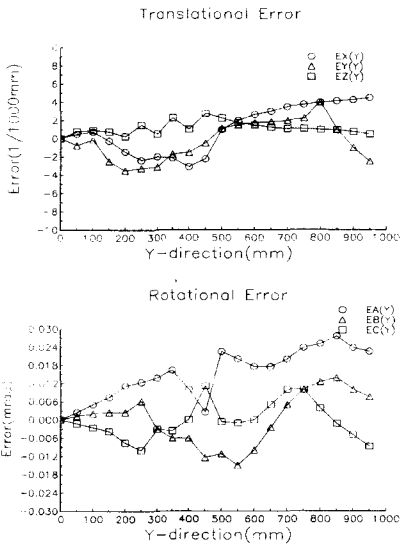
Z 축을 기준으로 하였을 때, 직각에서 어긋난 각도오차로 표시되는 X 축과 Y 축의 직각도 오차를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1. Squareness errors

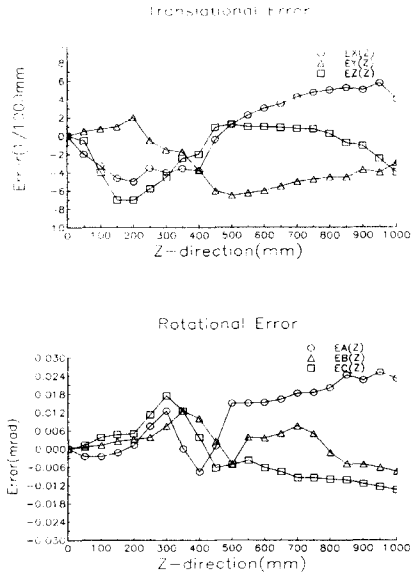
Between X and Z	Between Y and Z
EA(XZ) = 0.067 mrad	EA(YZ) = 0.026 mrad
EB(XZ) = -0.010 mrad	EC(YZ) = -0.021 mrad



(a) X-directional error components



(b) Y-directional error components



(c) Z-directional error components

Fig. 8 Error components of a machine tool

프로빙 오차는 접근방향에 따라서 틸트(tilt)각 ϕ 와 롤(roll)각 θ 의 함수로 표현되며, 3 축 공작기계를 사용한 OMM 의 경우 틸트각은 $0^\circ - 90^\circ$ 의 범위에서, 롤각은 $0^\circ - 360^\circ$ 범위에서 정의된다. 본 연구의 모의실험에서는 틸트각은 전체 범위를 5 등분, 롤각은 20 등분하여 각 좌표에 해당하는 오차성분을 생성하였으며, Fig.9 에 모의 실험에 사용된 오차 데이터를 도시하였다.

5.2 모의 실험

수직형 머시닝 센터를 사용하는 OMM 의 경우, 측정대상 자유곡면은 X, Y 축 방향으로 이동되는 테이블에 놓여 있다. 따라서, 기계좌표계에서 테이블의 이동에 의한 오차는 식(15)에 나타난 바와 같이 두 방향의 오차행렬의 연산에 의하여 구해진다. 테이블 위에 공작물이 위치하고 있으므로 자유곡면 상의 측정점의 좌표는 이 행렬에 의하여 변환되며, 식(16)에 의하여 구해진다. 이 때, 기하학적 오차요소는 좌표에 따라 변화하는 것이 일반적이기 때문에, 오차에 의한 측정점의 좌표변환은 기계원점에 대한 공작물의 설치 위치에 따라서 변화하게 된다.

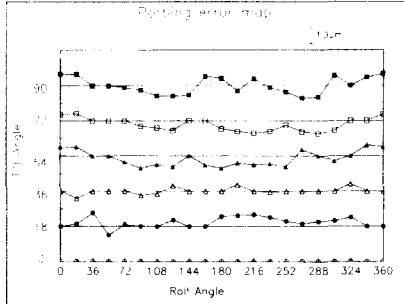


Fig. 9 Pre-travel error of a touch-type probe

본 연구에서는 Fig.10 에 도시한 바와 같이, Bezier 곡면 생성방법에 의하여 300mm x 300mm 의 밀면 크기를 가지는 자유곡면을 생성하였으며, 공작물 좌표계의 원점이 기계좌표계에서 (200,200,0) 의 위치에 있는 경우로 가정하여 모의실험을 행하였다.

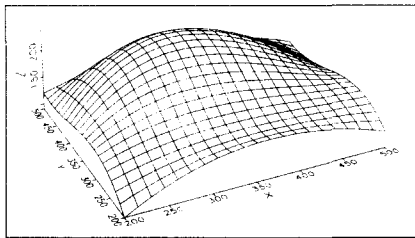
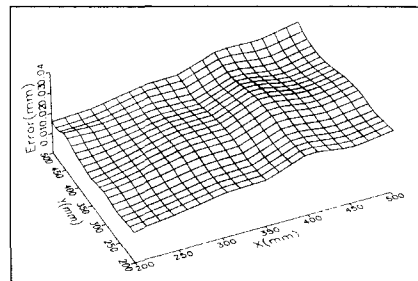


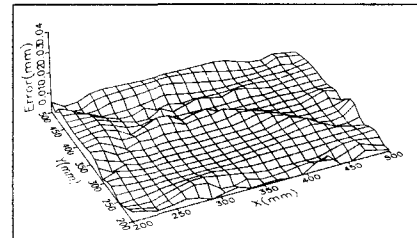
Fig. 10 A sculptured surface workpiece

곡면상의 측정점에 대한 프로브의 접근방향은 해당 측정점의 법선벡터로부터 구할 수 있으며, 접촉이 발생하였을 때, 변환된 측정점에 대한 이상적인 프로브의 좌표는 식(17)로부터 구하였다. 본 연구에서는 공칭직경이 5mm, 스타일러스 길이 100mm 인 접촉식 프로브를 사용하여 측정하는 경우에 대하여 모의실험을 행하였다. 프로브의 실제 위치는 Z 축의 기하학적 오차에 따라 변환된다. 또한 전술한 바와 같이, 실제 프로브가 접촉했을 때 접근 방향에 따라서 프로빙 오차가 발생하므로, 접촉신호가 감지되었을 때 실제 측정점의 좌표는 두 오차의 합성으로 식(18)에 의해 구하였다. 따라서, 자유곡면 측정시 발생하는 오차는 요구되는 프로브 볼의 좌표와 실제 접촉후에 인식되는 프로브 볼 좌표의 차이로 정의되며, 식(20)에 의하여 구하였다. 모의실험에 있어서 Fig.8 과 Fig.9 에 나타난 오차요소와 좌표가 일치하지 않는 경우에는 선형보간 방법을 사용하여 임의의 좌표에 대한 오차값을 구하였다. 제시한 순서에 따라서 자유곡면을 수직형 머시닝 센터와 접촉식 프로브를 사용하는 OMM 시의 측정오차를 모의실험을 통하여 계

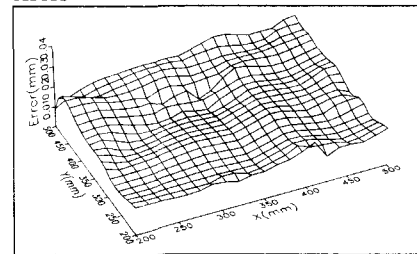
산한 결과가 Fig.11 에 나타나 있다. Fig.11 에서 (a) 는 공작기계의 기하학적 오차만을 고려하였을 때, (b)는 프로빙 오차만을 고려하였을 때의 결과이며, (c)는 본 연구에서 제시된 통합모델을 사용하여 계산된 측정오차의 예측값이다. 이 결과는 공작기계의 열변형에 따른 오차요소의 변화, 바이스 고정에 의한 공작물의 변형 등의 오차요소는 고려되지 않아서 실제 오차값과는 다소 차이가 있을 것으로 사료되나, 다른 오차요소가 정의되어 있는 경우 유사한 방법으로 통합오차 모델을 개발할 수 있을 것으로 사료된다.



(a) Measurement errors caused by geometric errors of a 3-axis machine tool



(b) Measurement errors caused by probe pre-travel errors



(c) Integrated measurement errors by proposed method

Fig. 11 Measurement errors for a sculptured surface workpiece in OMM

6. 결론

본 연구는 수직형 머시닝 센터를 사용하는 OMM 으로 자유곡면을 측정할 때 발생하는 측정

오차를 모델링하는 데 목적을 두었다. 본 연구에서는 공작기계의 기하학적 오차와 접촉식 프로브의 프로빙 오차, 공작물 표면의 목표 측정점의 좌표변환 등을 고려하여 폐회로 구조를 이용하여 자유곡면의 측정오차를 예측하는 모델을 제시하였으며, 모의실험을 통하여 각 오차성분에 의하여 발생하는 최종 측정오차를 구하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 수직형 머시닝 센터를 사용한 OMM 시 측정 오차를 폐회로 구조에 의하여 모델링하였다.
- (2) 공작기계의 기하학적 오차 외에, 테이블 위에 위치한 공작물 표면의 목표 측정점의 좌표변환과 접촉식 프로브의 방향에 따라 변화하는 프로빙 오차도 함께 고려하여 실제 경우에 적합한 오차모델을 제시하였다.
- (3) 각 오차 성분들을 동차 변환행렬로 표시하여 보다 간단하고 용이하게 오차를 구할 수 있도록 하였다.
- (4) 제시된 방법의 검증을 위하여 모의실험을 행하여 최종 측정오차를 예측하였다.
- (5) 향후 공작기계의 열변형에 의한 오차를 포함한 모델의 개발이 가능하며, 적절한 실험을 통하여 이를 검증할 수 있는 기반을 제시하였다.

후기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-98-003-E00103)에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 남우선, 정성중, "3차원 자유곡면 언더머신 측정 및 검사 시스템의 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 911-914, 1997.
2. 박희재, "정밀도 성능평가를 위한 3차원 측정기 수치모델 개발," 대한기계학회논문집, 제 20 권, 제 3 호, pp. 945-959, 1996.
3. 박희재, 안우정, 김왕도, "CAD/CAI 통합에 기초한 박형 단면을 가지는 항공기 터빈 블레이드의

- 성밀측정기술 개발," 대한기계학회논문집, 제 20 권, 제 6 호, pp. 1743-1752, 1996.
4. 이상준, 김선호, 김옥현, "OMM 시스템에서의 측정오차 해석," 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 5 호, 1998.
5. Chatterjee, S., "An Assessment of Quasi-Static and Operational Errors in NC Machine Tools," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 16, No. 1, pp. 59-68, 1997.
6. Cho, J.H. Cho, M.W. and Kim, K. "Volumetric Error Analysis of a Multi-axis Machine Tool Machining a Sculptured Surface Workpiece," International Journal of Production Research, Vol. 32, No. 2, pp. 345-363, 1994.
7. Cho, M.W, Kim, M.K. and Kim, K., "Flexible Inspection System Based on a Vision Guided Coordinate Measuring Machine," International Journal of Production Research, Vol. 33, No. 5, pp. 1433-1448, 1995.
8. Duffie, N., Bollinger, J, and Kronenberg, M., "CAD Directed Inspection and Error Analysis Using Patch Database," Annals of the CIRP, Vol. 33, pp. 347-350, 1984.
9. Ferreira, P.M. and Richard Liu, C., "A Method for Estimating and Compensating Quasi-static Errors of Machine Tools," Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, Feb., 1993.
10. Mou, J. and Richard Liu, C., "A Method for Enhancing the Accuracy of CNC Machine Tools for On-Machine Inspection," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 229-236, 1992.
11. Shen, Y. and Moon, S., "Mapping of Probe Pre-travel in Dimensional Measurements Using Neural Networks Computational Technique," Computers in Industry, Vol. 34, pp. 295-306, 1997.