마이크로/메조 스케일 공작기계를 위한 정밀 위치측정 프레임

*홍대희[1], 김동남[2], 정경모[3], 김기영[4]
[1] 고려대학교 기계공학과, [2,3,4]고려대학교 기계공학과 대학원

Precision Metrology Frame For Micro/Meso-Scaled Machine Tool

*Daehie Hong[1], Dongnam Kim[2], Kyungmo Jung[3], Kiyoung Kim[4]
[1] Dept. of Mech. Eng., Korea Univ., [2,3,4] Dept. of Mech. Eng. Graduate School Korea Univ.

Key words : Metrology frame, Micro/Meso-scaled Machine, Kinematics, Error Analysis

1. Metrology Frame

Micro/meso 스케일의 밀링은 작은 부품을 필요로 하는 의공학이나 항공 산업 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 담당하고 있다. Micro/meso 스케일로 가공된 부품은 보통 기존의 밀링 머신으로는 가공이 불가능한 밀리미터에서 마이크로미터에 이르는 사이즈의 부품을 말한다. [1,2,3] 이러한 micro/meso 스케일의 가공은 MEMS(micro-electromechanical systems)와는 다른 방법으로써 다양한 종류의 재료를 빠른 속도로 3 차원 가공이 가능한 제조 방법이다.

이처럼 micro/meso 스케일의 부품 가공이 점차 증가하고 있는 상황에서 위와 같이 작은 정밀한 제조 공정을 위해서는 새로운 장비를 필요로 한다. [4,5] 본 연구에서는 작은 스케일로 가공된 제품의 품질을 높이기 위하여 metrology frame 이라는 장치를 새로이 개발하였다. 이 metrology frame은 micro/meso 스케일의 밀링 머신이 가공한 부품의 치수 정밀도를 높이기 위해 정확한 위치 측정을 할 수 있도록 고안된 장치이다. 이러한 위치 측정은 수직거리를 측정할 수 있는 3 개의 거리 센서를 이용하여 툴의 위치(가공물과의 상대적인 위치)를 측정하는 것으로 가능하다. 거리를 측정하는 센서는 가공 툴의 끝점(툴팁)에서 모두 교차하고 있어 공작기계의 베드가 움직일 때 생기는 툴의 위치 오차를 제거할 수 있다. 그러나 세 개의 센서를 툴팁에 향하도록 설치하는 것은 매우 정교한 작업에 해당하므로 tool station을 필요로 한다. 본 논문에서는 센서 설치를 위한 tool setting station에 관한 내용, 그리고 metrology frame의 순, 역기구학 해석을 다룬다.

2. Metrology Frame 의 기구학 해석

Metrology frame 은 3 축 밀링 머신에 탑재된 것으로서, 3 개의 거리센서가 대칭으로 배열되어 공작기계 툴팁을 향하고 있으며 베이스에 고정된 경사면에 수직으로 향하게 설계되어 있다. 센서는 툴 좌표계에, 그리고 경사면은 베이스 좌표계에 고정되어 있기 때문에 metrology frame 은 공작물에 대한 상대적인 툴의 위치를 직접적으로 측정할 수 있다. 또한 중요한 에러 요인으로 Abbe 옵셋을 피할 수 있도

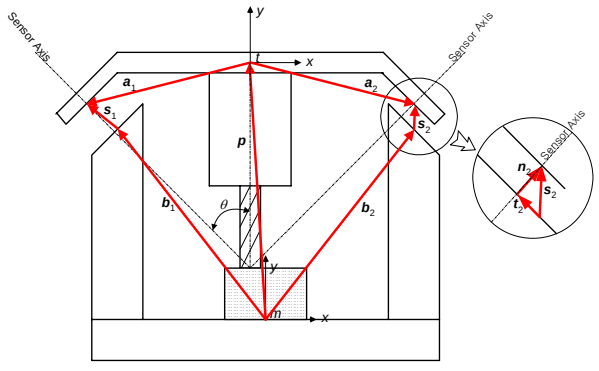


Fig. 1 Schematics of metrology frame simplified to 2 dimension

록 설계되어 있고 온도에 영향을 최소한으로 받기 위해 invar 로 metrology frame 을 제작하였다.

Fig. 1 은 metrology frame 의 기구학 해석을 위한 벡터와 파라미터들을 표현한 그림이다. 편의상 2 차원으로 기구학 해석을 한 뒤에 3 차원으로 확장한다. Metrology frame 은 툴 좌표계와 베이스 좌표계로 나누어 모델링 할 수 있는데, 베이스 좌표계는 공작물을 잡고 있는 좌표계이며, 툴의 위치는 이 좌표계에서 정의가 된다. 그리고 툴 좌표계는 툴팁에 원점을 가진다. Fig. 1 에서는 표현하는데 있어 편의를 위해 툴 좌표계를 일정거리만큼 옵셋시킨 센서 설치 프래임의 윗부분에 정의하였다. 실제로는 이 툴 좌표계가 툴팁에서 정의되어야 한다.

역기구학 해석은 베이스 좌표계에서 본 툴팁의 위치 p 가 주어졌을 때 센서로부터 얻어지는 측정 길이를 구하는 것이다. 센서 끝단과 경사면 위에 정해진 한 점 사이의 벡터를 s_i 라 하면 s_i 는 다음과 같으며 a_i 와 b_i 는 정해진 상수 벡터이다.

$$s_i = p - b_i + a_i \tag{1}$$

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 경사면이 실제 센서 벡터와 수직을 이루어야 하나 약간의 각도 오차가 있기 때문에 s_i 는 n_i 과 t_i 단위벡터로 표시할 수도 있다.

$$s_i = l_i n_i + m_i t_i \tag{2}$$

이때 l_i 는 센서의 측정값을 의미하며 이것은 s_i 벡터를 센서 측정 방향 축으로 정사영시킨 것이다. 결과적으로 정리하면 l_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$l_i = \frac{s_i \cdot \{n_i - t_i(n_i \cdot t_i)\}}{1-(n_i \cdot t_i)^2}, \quad i = 1,2 \tag{3}$$

각도 오차가 작다는 가정아래 l_i 는 다음과 같이 표현 가능하며, 2 차원에서 3 차원으로 확장시키면 n_i 벡터만을 3 차원으로 확장시키면 된다.

$$l_i \approx s_i \cdot \{n_i - t_i(n_i \cdot t_i)\} \tag{4}$$

순기구학 해석은 역기구학과 반대로 센서 측정 값을 알 때 베이스 좌표계에서 본 p 벡터를 구하는 것이다. 이것은 앞서 역기구학 해석에서 구한 l_i 와 p 사이의 관계에서 구할 수 있으며 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$p = qN^{-1} \tag{5}$$

이때 q 와 N 은 다음과 같다.

$$p = (p_x, p_y, p_z), \quad q = (l_1, l_2, l_3), \quad N = \begin{bmatrix} n_{1x} & n_{2x} & n_{3x} \\ n_{1y} & n_{2y} & n_{3y} \\ n_{1z} & n_{2z} & n_{3z} \end{bmatrix} \tag{6}$$

3. Error Analysis 와 Simulation

여러 가지 오차 요인은 위치 벡터 p 에 영향을 주는데 이

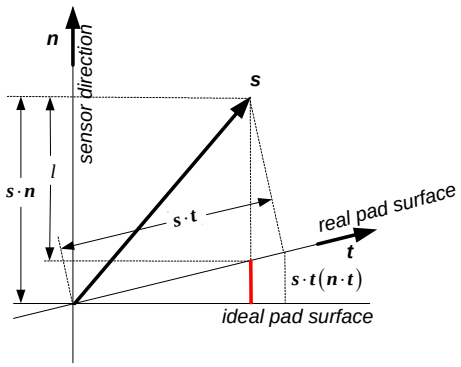


Fig. 2 Correction of sensor reading due to slight deviation

러한 오차 요인은 metrology frame 구성 요소 설치 시에 생기는 오차와 관계를 가지고 있다. 다음과 같은 요인들이 이에 해당된다.

- 베이스 좌표계와 툴 좌표계 사이의 회전 오차
- 상수 벡터의 오차
- 센서 방향의 오차
- 센서 측정 길이의 오차
- 경사면의 각도 오차

베이스 좌표계의 프레임은 조립이 견고하게 완성된 뒤에 그 치수를 CMM 을 이용하여 정확하게 측정할 수 있기 때문에 경사면의 틀어진 각도를 얻을 수 있다. 그리고 다른 오차는 센서 측정 길이의 오차에 포함시킬 수 있다.

베이스 좌표계에 대해서 툴 좌표계가 일정 각도 만큼 틀어져 있을 경우에 그 회전 행렬을 R 이라 하면 행렬의 각 요소는 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 로써 x, y, z 에 대하여 작은 회전 오차를 의미한다. 이 회전 행렬을 이용하여 앞서 기구학 해석으로부터 얻은 식에 대입을 하여 정리를 하면 결과적으로 얻는 p 벡터의 오차는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta p = \left[n_i^T\right]^{-1}\{\delta l_i\} - \left[n_i^T\right]^{-1}\left[\left(a_i \times n_i\right)^T\right]\delta\omega \qquad (7)$$

$$\delta\omega = \left(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z\right) \qquad (8)$$

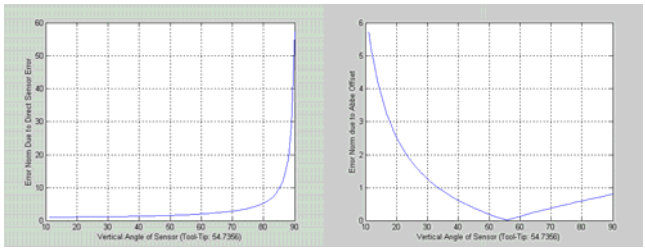
위 (7) 식의 우변에서 첫 번째 항은 센서 오차에 의한 부분이므로 정확한 센서와 경사면의 정밀한 가공으로 최소화 시킬 수 있다. 그리고 적당히 조작된 센서 벡터를 이용하면 경사면이 센서 축과 이루는 각도를 수직으로 배열할 수 있다.

우변의 두 번째 항은 Abbe 에러를 의미하며 매우 작은 값을 나타내지만 a_i 벡터의 크기에 따라 그 크기가 커질 수 있다. 따라서 센서 축이 가능한 좌표축의 중심을 향할 수 있도록 해야 이 오차를 제거할 수 있다.

다음 Fig. 3 은 앞서 유도된 오차 해석을 증명하기 위해 시뮬레이션한 결과이다. 센서는 수평면에 대해서 120 도 만큼씩 떨어져 있고, z 축에 대해 54.7356 도 만큼 기울어져 있다. 이때 이상적으로는 센서 축이 교차하는 지점에 툴팁이 있다. 그러나 시뮬레이션에서는 센서의 수직 각도를 0 도에서 80 도까지 변화시켜가면서 생기는 오차의 크기를 계산하였으며 Fig. 3 의 (a)와 (b)는 (7) 식에서 첫번째 항과 두번째 항을 무차원화시킨 결과이다.

4. Sensor 와 Tool Setting Station

Metrology frame 을 설계하는데 있어서 중요한 사항은 센서가 툴팁을 향하도록 배열하는 것이며 이러한 목적을 달성하기 위해 특별히 제작된 세팅 스테이션을 Fig. 4 에서 보여주고 있다. 적절한 과정을 통해 센서를 올바르게 설치할



(a) due to direct sensor error (b) due to Abbe offset

Fig. 3 Simulation results, uncertainties versus error sources

Fig. 4 Picture of sensor setting station

수 있도록 도와주며, 툴을 교체하였을 경우에도 항상 센서가 툴팁을 향할 수 있도록 고안하였다. 이 세팅 스테이션을 통해 Abbe error 를 서브 마이크로 단위까지 줄일 수 있어 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

Metrology frame 은 작은 워크스페이스를 갖는 3 축 가공 머신이나 장비의 위치 측정에 적용될 수 있는 새로운 장치이다. 본 논문에서는 Metrology frame 의 기구학 해석과 오차 해석 그리고 센서를 세팅할 수 있는 장치에 대해서 다루었다. 뿐만 아니라 이를 통해 Abbe 오차가 크게 줄어들었음을 확인했으며, CMM 을 통해 센서 세팅 장치가 만족할 만한 결과를 얻었음을 확인할 수 있었다.

후기

이 논문은 2005 년 학술진행재단의 지원(KRF-2005-041-D00117)과 2006 년 BK2 사업 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Masuzawa,T., and Tonshoff, H.K., “Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools,” Annals of the CIRP, Vol.46(2), 1997.
2. Masake,T., “Micro Electro-Discharge Machining Technology,” National Technical Report, Vol.39(5), 1996.
3. Friedrich,C., et. al, “Direct Fabrication of Deep X-ray Lithography Masks by Micromechanical Milling,” Procs 12th ASPE Annual Meeting, Norfolk VA, pp.458-461, 1997.
4. National Science Foundation Workshop on M4: Micro/Meso-Mechanical Manufacturing, Northwestern Universigy:Evanston, IL, May 2000.
5. Mikropro:Investigation of the International State of the Art of Micro Production Technology, by the Technical University Braunschweig, University if Karlsruhe, and Fraunhofer Institute for Production Technology(Aachen).