

구조물의 정적, 열적 변형에 의한 공작기계의 공간오차 예측 Prediction of Volumetric Error by Static & Thermal Deformation of Machine Tool's Structures

*#오정수¹, 이찬홍¹

*#J. S. Oh¹ (ojs82@kimm.re.kr), C. H. Lee¹

¹ 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부 초정밀기계시스템연구실

Key words : Volumetric Error, Kinematics of Machine Tools, Static & Thermal Deformation

1. 서론

고성능 공작기계를 구매하는 기업 담당자는 2 가지 특성에 대해서 면밀한 검토를 한다. 첫 째는 공작기계의 기하학적 정밀도이고, 둘째는 공작기계의 가공 신뢰성이다. 지금까지 공작기계의 기하학적 정밀도는 이송축을 기본으로 각 축방향의 반복 위치정밀도와 진직도를 측정해서 장비의 전체적 성능을 가늠해 왔다. 그러나 최근 가공물의 형상이 중대형 3D 형상이고 복잡한 것이 많아, 이 큰 볼륨의 공작물을 가공하는 공작기계의 절삭점 궤적오차를 베드와 컬럼상에 있는 이송축 기준으로 평가하는 것은 정확성이 떨어지기 때문에, 공구가 움직이는 주요 공간 경로상의 공간오차로 직접 예측 평가할 필요가 있다.

공작기계의 공간오차는 변화가 완만하고 기초오차가 되는 정적 성분에 진동과 같은 동적 성분의 합으로 볼 수 있다. 여기서 정적 성분에 많은 영향을 미치는 인자는 장비의 자중에 의한 구조물의 변형, 절삭력에 의한 구조물의 변형, 열변형에 의한 구조물의 변형을 들 수 있다. 이러한 변형은 구조물 내에 복합적으로 발생되고, 구조물 끝에 위치한 절삭점의 공간적 운동오차를 야기한다. 또한 각 이송유닛이 상대운동을 하는 경우, 다축 간의 운동학적 링크 계산을 통해 복잡한 공간오차 map 을 만들어 내야 한다.

본 논문에서는 자중, 절삭력 그리고 열변위로 인한 구조물의 변형중 가장 강성이 약한 이송 안내면의 형상 왜곡량을 분석하여, 각 축 안내오차에 의한 작업영역 내에서의 공간오차를 예측하는 방법을 서술하였다. 공간오차 예측에 사용한 소프트웨어는 상용의 강체 운동해석 모듈이고, 각 축의 안내오차는 정의된 굴곡을 가진 평판에 롤러가 추종되는 기구로 실현하였다.

2. 정적, 열적 변형에 의한 이송축 안내면 오차

이송축 안내면의 오차는 가공시 갖게 되는 가공오차가 원인이 될 수도 있지만 하중에 의한 변형이 일반적으로 더 크다. 공작기계에 작용하는 하중 중 시간적 변화가 적은 것은 정적 하중과 열적 하중으로 볼 수 있다. 정적인 하중으로는 구조물 질량에 의한 자중과 공작물을 가공 시 수반되는 절삭력이 있으며 열적인 하중으로는 장시간 기계 구동 시 주축 회전모터와 이송계 모터의 발열이 있다. 또한 가공 중 칩(chip)이 구조물에 쌓이면서 발생하는 열도 있다. 하중에 의한 안내면의 변형이 가공에 전사가 되는 오차라 가정할 때, 본 논문에서는 변형과 오차를 같은 의미로 서술 하였다. 또한 하중에 따른 안내면의 오차를 추출하여 운동 오차 및 공간 오차로 변환하였다. Fig. 1 은 4 축 초소형 미세 가공기이고, 이송축의 Stroke 를 도시하였다.

설계단계에서 안내면의 변형에 의한 공간오차를 예측하기 위해서 우선 FEM 을 통한 구조해석을 진행하였다. 구조물의 재질은 회주철(gray cast iron)로 하였다. 보다 실제 공작기계 해석환경에 맞추고자 구조물의 하단에 4 개의 마운트(mount)를 추가하였고 해석에 불필요한 부품들은 제외하였다.

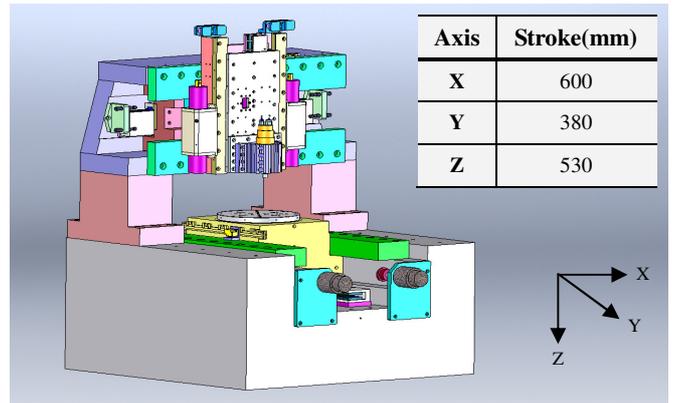


Fig. 1 Original model without volumetric error

Fig. 2 는 정적 및 열적 하중상태에서 각각의 구조물 변형 형태이다. a)는 자중으로 인한 전체 변형이고 b)와 c)는 절삭력과 열하중 상태에서의 전체 변형이다. 절삭력은 임의의 값으로 주축과 회전 테이블 사이에 상호 작용력이 작용하는 조건으로 하였다. 그리고 열적 하중은 과도상태(transient state)에서 가이드의 발열과 많은 량의 칩(chip)이 회전테이블 옆에 쌓였을 때 칩에 의한 발열을 가정하여 heat flux 를 적용하였다.

안내면의 변형으로 인한 이송계의 수평 및 수직 흔들림은 양쪽의 가이드 중 그 변형이 큰 방향으로 따라간다. 때문에 각 안내면의 변형을 살펴 보았다. Table 1 에는 Fig.1 로부터 각 하중 상태에 따른 3 축 안내면의 변형을 해석하여 정리하였다. 그래프의 가로축은 안내면의 Stroke 이며 세로축은 변위이다. Table 1 를 정리한 결과 자중에 의한 변위는 $1 \times 10^{-9} \sim 10^{-6} m$ 의 스케일(Scale)을 보이며 절삭력에 의한 변위는 $1 \times 10^{-9} \sim 10^{-7} m$ 를, 열적 상태에서의 변위는 $1 \times 10^{-6} \sim 10^{-5} m$ 의 스케일을 보였다. 또한 X 축 테이블 이송 안내면의 변형이 Y 축 및 Z 축 이송안내면의 변형에 약 10 ~ 1000 배의 스케일을 보여 공간오차 시뮬레이션 결과는 X 축 변형 성분이 지배적일 것으로 예상된다. 본 연구에서는 오차를 수반한 시뮬레이션의 시각적 결과를 극대화하기 위해서 자중, 절삭력, 열하중 등 복합하중이 적용된 상태를 가지고 다음 절에서 진행과정을 보일 것이다.

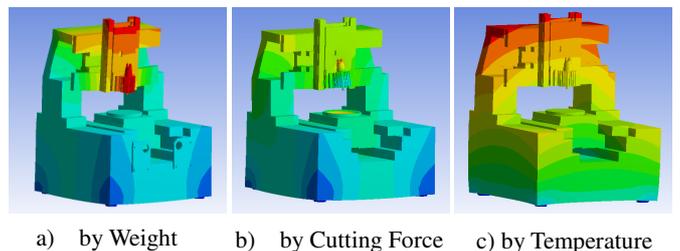


Fig. 2 Deformation of machine tool under weight, cutting force and temperature

Table 1 Guide error data of 3 feeding units under weight, cutting force and temperature

| Load state | X-axis | Y-axis | Z-axis |
|---------------------|--------|--------|--------|
| Under Self-Weight | | | |
| Under Cutting force | | | |
| Under Thermal load | | | |

3. 이송축 오차에 의한 절삭점의 공간오차 예측

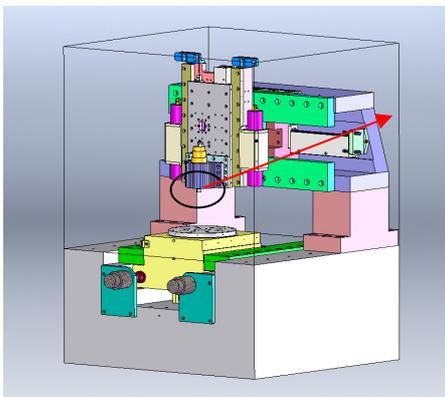
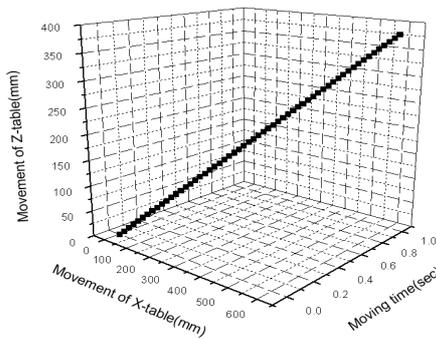
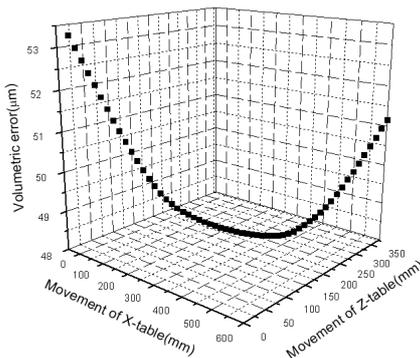


Fig. 3 Moving Direction of Tool End



a) Distance between 2 points



b) Moving errors between 2 points

Fig. 4 Moving error between diagonal 2 points under 3 kind of load state

X 축 테이블과 Y 축 테이블에 진행방향으로 가이드의 변형을 적용하면 XY 평면 상의 이송오차가 된다. 이를 공간 상으로 확대하면 공간오차가 되는 것이다. Table 1 은 가이드 전 길이에 대한 변형을 나타낸다. 일반적으로 이송 테이블은 가이드의 제한된 작업영역 내에서 움직이나 본 연구에서는 이송테이블이 가이드 전 면을 따라 움직인다는 가정하에 공간오차를 이끌어 낼 것이다. 공간오차를 알아보기 위해서는 기구학적 해석이 선행되었다.

공구의 끝점, 즉 절삭점의 공간오차를 알아보자. Fig. 3 에서는 공간상의 임의의 위치 절삭점이 위치해 있으며 앞으로 진행될 방향이 제시되어 있다. 운동해석 모듈을 이용하여 이송오차를 적용하여 X 축 및 Z 축 이송테이블을 가이드 전면을 따라 680mm 와 - 380mm 이동시켰다. 그 결과는 Fig. 4 와 같다. a)는 이동 시간에 따른 전체 변위이며 b)는 그에 따른 공간 오차이다. 또한 공간상의 임의의 위치를 0 점으로 하였다. 앞에서 예상한 바와 같이 Fig. 4 의 b)는 열하중 상태에서의 X 축 에러 데이터와 변형 추세가 일치했다.

4. 결론

고성능 공작기계의 공간적 가공정밀도를 사전에 평가하기 위해서, 1 차원적인 이송축의 위치정밀도와 진직도를 측정하는 대신에, 각 이송축의 안내면 정밀도를 적용하고 운동학적 링크계산을 통하여 절삭점의 공간오차를 예측 평가하였다.

- 1) 상용 강체운동 해석 모듈을 이용하여, 이송 안내면 오차를 기반으로 절삭점의 공간오차를 추출하였다.
- 2) 공작기계에서 일반적으로 발생하는 구조물의 자중, 절삭력 그리고 열변위로 인한 안내면 오차를 복합적으로 적용하여 공간오차를 평가하였다.
- 3) 절삭점의 공간오차 평가 기법을 역이용 하면, 공작물의 가공오차 원인을 구조물의 정동열적 취약부에서 규명할 수 있다.

참고문헌

1. Kuang-Hau Chang, Motion Simulation and Mechanism Design With Cosmosmotion 2007, SDC Publication, 2008
2. Saeed Moaveni, FINITE ELEMENT ANALYSIS Theory and application with ANSYS third edition, Pearson Prentice Hall, 2008
3. Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, Virtual Machine Tool, Annals of CIRP, Vol. 54, No. 2, pp. 651-673, 2005.