

열적 환경변화에 의한 공작기계의 구조적 특성

이재종*, 이찬홍*, 최대봉*(한국기계연구원), 박현구**(충남대 기계공학과 대학원)

Thermal Deformation Characteristics of the Adaptive Machine Tools under Changes of Thermal Environment

J. J. Lee, C. H. Lee, D. B. Choi (KIMM), H. K. Park (ChungNam Nat'l Univ., Graduate School)

ABSTRACT

In metal cutting, the machining accuracy is more affected by thermal errors than by geometric errors. This paper models of the thermal errors for error analysis and develops on-the-machine measurement system by which the volumetric error are measured and compensated. The thermal error is modeled by means of angularity errors of a column and thermal drift error of the spindle unit which are measured by the touch probe unit with a star type styluses, a designed spherical ball artifact, and five gap sensors. In order to analyze the thermal characteristics under several operating conditions, experiments performed with the touch probe unit and five gap sensors on the vertical and horizontal machining centers.

Key Words : Thermal deformation error(열변형 오차), Thermal environment change(열환경변화), Active machine tools(능동형가공기), Error prediction(오차예측), Gap sensor(갭센서), Touch probe(접촉식프로브)

1. 서론

공작기계의 가공정도는 공작기계를 구성하고 있는 각 구성요소 들의 조립상태와 기하학적인 상태에 의해서 발생하는 위치오차, 각변위 오차와 진폭도 및 직각도 등에 의해서 일차적으로 영향을 받는다. 이외에, 가공 중에 발생하는 절삭열과 스피들의 고속회전에 의한 발열과 이송축의 반복적인 이송에 의해서 발생하는 마찰열 및 주위온도 변화에 의한 열변형 오차에 의해서 가공정도는 직접적인 영향을 받는다. 일반적으로 많은 실험결과에 기초해서 보면 열변형 오차는 공작기계의 기하오차에 비해서 가공정도에 큰 영향을 미치며, 공작기계에서 발생하는 오차의 40~70%는 열변형 오차에 의해서 발생한다[1,4]. 이러한 현상은 공작기계의 기하오차는 조립한 후에 품질관리와 위치오차의 보정(compensation)을 통해서 설계단계의 정도를 유지하지만 발생 열에 의한 열변형 오차는 작업조건과 가공특성에 따라서 직접적인 영향을 받고, 발생온

도에 의해서 복잡한 형태로 나타나기 때문에 오차보정이 곤란하기 때문이다.

이러한 열변형 오차를 최소화시키기 위한 방법으로 Prof. Spur는 공작기계 설계관점에서 열원냉각방법, 열변형이 없는 재질이나 열전도도가 낮은 재질을 사용하는 방법과 발생하는 열변형 오차를 측정하여 보정하는 방법을 제시했다. 그러나 최적설계를 통해서 열변형 오차를 줄이는 데에 고가의 비용과 소재개발 등의 한계가 있기 때문에 최근에 공작기계의 열변형 오차를 최소화시키기 위한 방법으로 측정을 통한 열변형 오차 보정방법이 연구되고 있으며[2-5], Z축 방향의 열변형 오차를 예측하여 보정하기 위해서 뉴로퍼지 알고리즘을 머시닝센터에 적용한 시스템도 개발되고 있다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 현재 개발하고 있는 “능동형 가공기의 열적 오차보정 시스템 개발”과 관련하여 실시간으로 오차보정이 가능한 시스템을 개발하여 상용 머시닝센터에 적용하기 위한 일환으로 대상 공작기계의 주축계, 구조계, 이송계

의 열변형 오차특성을 측정·해석했다. 이를 위해서 공작기계 외부 열적 환경변화에 따른 구조계의 열특성, 작업조건변화에 따른 공작기계의 열특성 및 고속주축의 회전조건에 따른 열특성을 측정·해석했다. 사용된 실험조건은 대상 공작기계의 작업 한계(최고 회전수, 작업시간, 급속이송속도)를 고려하여 다양한 실험조건을 복합하여 이용했고, 계절 변화와 작업환경이 다른 상태에서 발생하는 열변형 특성을 분석하기 위해 24시간 동안 대기온도 변화와 가열실험을 통한 열변형 오차 특성실험을 수행했다.

2. 작업조건변화에 따른 구조물 열특성

공작기계의 열변형 특성은 스피들 유니트, 모터, 볼스크류 및 주위온도변화 등에 의해서 직접적인 영향을 받으며, 특히 스피들 유니트의 회전에 의해서 가장 큰 영향을 받는다. 이러한 측면에서 본 연구의 대상 공작기계인 수직형, 수평형 머시닝센터의 열변형 특성을 분석하기 위해서 실제 가공조건을 고려한 다양한 형태의 작업조건을 사용하여 공작기계의 열변형 오차 특성을 분석했다. 실험방법은 공작기계가 가지고 있는 스피들유니트 및 이송계의 최대 회전수, 최대 이송속도 및 작업시간을 고려하여 복합적인 실험조건을 적용하여 각 실험조건에 따른 대상 공작기계의 온도변화 특성과 열변형 오차 특성을 측정하고, 분석했다.

2.1 측정장치의 구성

본 실험의 측정장치는 갭 센서(gap sensor)를 이용한 열변형 오차 측정장치, 온도검출장치, 측정용 치구 및 온도/열변형 오차 해석시스템으로 구성되어 있다. 열변형 오차 측정실험은 머시닝센터의 스피들헤드부에 열팽창계수 $\alpha=1.2e-6$ 인 인바재(Invar)의 테스트바를 설치하고, 갭센서용 치구를 이용하여 온도변화에 따른 열변형 오차를 측정했다. 실험 중에 측정되는 온도와 열변형 오차는 일정한 시간간격으로 측정되며, 이러한 측정값은 측정과 동시에 RS232C를 통해서 해석용 PC로 업로드(upload)할 수 있도록 구성했다.

작업조건에 따른 온도변화 특성을 검출하기 위해서 Fig.1과 같이 20개의 열전쌍을 대상 공작기계의 스피들유니트, 칼럼, 이송계 및 주위온도를 측정할 수 있도록 설치했고, 주위온도변화에 의한 열변형의 영향을 최소화하기 위해서 측정용치구에도 열전쌍을 설치했다.

2.2 측정실험 및 결과

열변형 오차 측정실험은 열원에 의해서 발생하는 공작기계의 열변형 오차를 측정하기 위해서 Fig.2와 같은 복합적인 실험조건(실험조건#1, 실험조건#2)을 사용하여 스피들 유니트를 9시간 동안 회전시키면서 매 10분 간격으로 발생온도와 스피들 유니트의 열변형 오차를 측정했다. 실험조건은 공작기계에서 발생할 수 있는 임의의 실험조건을 포함할 수 있도록 구성했다. Fig.3은 실험조건1과 2를 사용했을 때 측정된 온도변화 특성이고, Fig.4는 실험조건 #1과 #2에 의해서 측정된 열변형 오차특성이다.

이러한 실험결과로부터 열원이 발생할 때 스피들 유니트에 부착된 공구 끝점은 XY, YZ평면상에서 -X, +Y, -Z방향으로 변화함을 알 수 있다. 또한, 회전수가 증가함에 따라 측정값은 Y, Z방향에서 비교적 크게 변하고 있는데 이는 발생열원에 의한 영향으로 스피들 유니트가 직접적인 영향을 받기 때문이라고 판단된다. 특히, Y축 방향의 측정값이 크게 변화하고 있는데 이러한 결과는 수평형 머시닝센터의 구조상 스피들 유니트가 Y축의 볼스크류에 의해서 지지되고 있어 발생열원이 Y축의 볼스크류에 직접적인 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

실험조건변화에 따른 온도변화 특성과 열변형 오차의 경우 Fig.3, Fig.4와 같이 스피들 회전수에 의해서 직접적인 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 결과는 수직형 머시닝센터의 구조로 볼 때 스피들 유니트가 외팔보 구조의 칼럼에 의해서 지지되고 있음으로 해서 Y축과 스피들 축 방향(Z축)으로 급격히 변화하고 있는 것으로 판단된다.

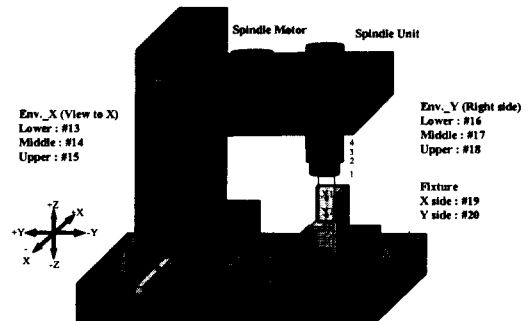


Fig.1 Set-up of the thermo-couples

3. 외부환경변화에 따른 구조물 열특성

공작기계의 열변형 보정분야에 Neural Network 이나 Regressive Method와 같은 통계적 방법이 쓰이고 있으나, 초기 모델링과 유사한 발열패턴이나 여러차례 학습된 경우에는 정확성이 유지되지만, 그외에 계절에 따른, 작업자의 난방습관에 따른, 공장내의 기류변화에 따른 기계의 설치환경이 변화하거나 미리 학습되지 않은 환경이 섞여 있는 공정의 경우에는 열변형 예측에 큰 문제가 있어 국한된 환경에서만만이 적용이 가능하다. 그래서 미리 적용대상과 유사한 기중에 외부 환경변화에 따른 열변형 특성을 측정 분석하였다.

현대식 생산시스템의 경우에 가공 정밀도의 일관된 유지를 위해 공기조화 설비는 기본요건중의 하나라 할 수 있지만 이런 공장은 대부분 크기가 매우 커서 공장내부에서 온도차이에 의한 다소간의 난기류는 피할 수가 없다. 그리고 안정된 온도 환경이라 해도 작업개시 시각의 온도변화와 점심시간동안 기계작동 정지로 인한 주위온도의 변화는 2~3℃ 정도 변화한다. 또한 낮 동안 햇빛의 영향으로 인해서 남향벽과 북향벽 근처의 온도차이는 2~3℃ 정도 생기고, 겨울에 조립완성품의 출고를 위한 대형 셔터를 개폐하는 경우 문 주위의 온도환경은 급격히 변화한다. 이와 같이 최신 장비 하에서도 작업장 내부에는 많은 온도변화 요인이 상존한다. 더욱이 적지 않은 공작기계 사용자들은 개인용 난방 및 냉방기구를 작업장에서 사용하고 있어서 국내와 같이 -6~31.1℃ (부산기준)의 온도차이를 갖는 지역에서는 계절에 따른, 시설에 따른 불안정 대류에 의한 영향은 매우 크다 하겠다.

외적인 환경에서도 공작기계의 고성능화에 따른 각종 고속 모터류의 고온공기 배출과 주축냉각 장치 및 작동유 냉각장치 등에서의 열배출로 인해 작업개시와 동시에 공작기계 샤프트내의 온도환경은 샤프트 밖의 온도보다 4~5℃가 높아진다. 그래서 외적 환경을 인위적으로 조성하기 위해서 기계외곽에 400×400×400cm³의 입방체의 이중 비닐 방열막을 설치하였다. 이 항온공간의 공기야열은 세 개의 2 KW급 열풍기를 이용하였고 항온실 내부의 온도제어는 내부 온도측정용으로 공간 중앙에 열전대를 설치하였다. 그리고 PID제어에 의해서 온도를 0.3℃내로 제어하였다.

첫 번째 실험으로서 자연대류에 의한 공작기계 구조물의 온도변화를 관찰하였다(Fig.5). 자연대류는 매일 그 온도의 변화가 낮과 밤에 의해, 맑고

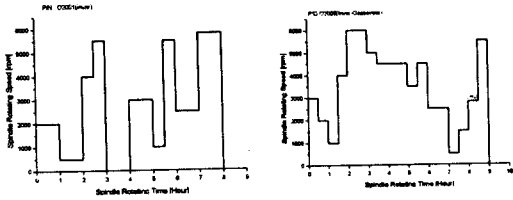


Fig.2 Experimental conditions #1 and #2

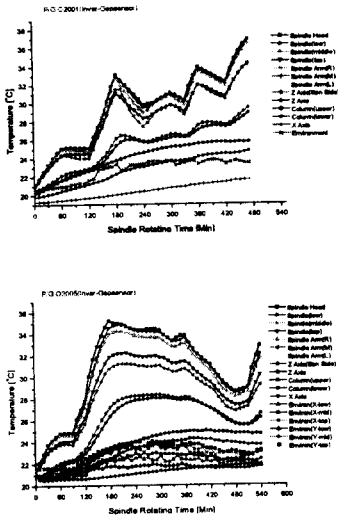


Fig.3 Trends of temperature under experimental conditions #1 and #2

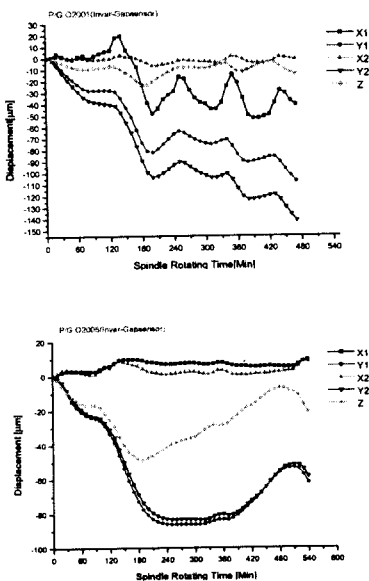


Fig.4 Trends of thermal error under experimental conditions #1 and #2

흐림에 따라 차이가 있으므로 48시간동안 측정을 하였다. 외부온도에 따라 우선 구조물의 온도변화가 생기는 것은 컬럼으로서 외부공기에 노출되는 면적이 많고 크기에 비해 열용량이 작기 때문에 외부환경에 민감하다고 생각된다. 이때 열반응의 지연시간은 약 35분정도로서 다음으로 민감한 반응을 보이는 주축대와 주축전반부의 지연시간 45분보다 10분정도 빠르다. 결국 컬럼은 초기 환경변화에 대해 기계의 열변형을 주도하게 되는 Unit가 되기 쉽다. 기계 구조물중 가장 열반응이 늦은 것은 이송테이블과 베드로서 지연시간이 약 65분이고 주변장치와 열전달 관점에서 연결이 많이 되어 있고 무게가 타부품에 비해서 큰 것처럼 열용량이 큰 것이 외부온도 민감도가 떨어지는 원인으로 생각된다.

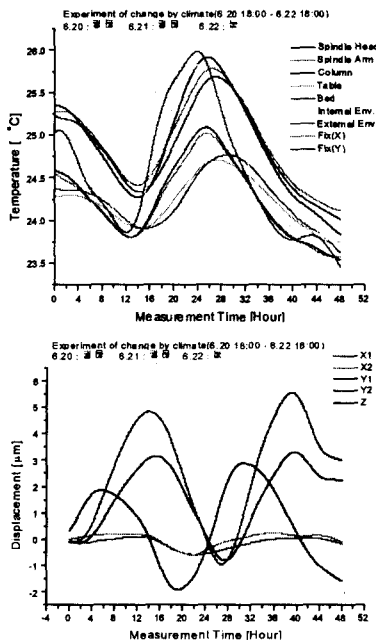


Fig.5 Temperature and thermal displacement changes of structure by natural environment

자연대류에 의한 열변형은 Y, Z방향에서 외부온도 변화와 주기를 같이하고 있으나 Y방향은 주기가 모사된 형태를 취하고 있는 반면 Z축은 5시간 정도 지연현상이 나타나고 있다. X축은 변화의 크기가 작고 외부 온도주기에 무관하게 거동하고 있어서 설계 단계에서 좌우 열용량의 대칭성이 잘 반영되었다고 할 수 있다.

Fig.8에는 항온 34°C에서 각 Unit의 온도상승을 보여주고 있다. 이 결과에서는 각 위치에서의 온도상승 속도와 열용량 예측, 온도 안정시간을 파악할

수 있다. 역시 컬럼에서의 온도상승 속도가 가장 높고 온도 안정시간이 5시간 정도로 나타난 것으로 보아 외부와의 접촉면적이 넓고, 열용량이 매우 큰 것을 알 수 있다. 다음으로 주축대가 뒤를 따르고 있다. 테이블은 상승속도가 낮아 외부와의 접촉면적은 작은 것으로 나타나고 온도의 안정한 상태가 2시간이내인 것으로 보아 열용량이 적은 것을 알 수 있다. 베드 또한 상승속도는 낮지만 온도 안정시간이 9시간 정도로서 열용량이 매우 큰 것을 알 수 있다. 이때의 열변위 곡선은 X인 경우 1시간정도 변화가 있는 후 3 μ m로 안정되고 온도곡선이 안정된 후에는 변화가 거의 나타나지 않아서 X방향에서는 설계상에 문제가 없다. Y방향에는 5시간정도 변화가 있는 후 33 μ m에 다다르고 온도가 모든 Unit에서 안정화 되면서 20 μ m정도의 열변위를 나타내고 있다. Z방향에서는 초기에 열용량이 작은 주축, 주축하우징 등 Unit에 의해 -방향의 열변위가 있었고 후에 컬럼등에 의해 +방향으로 반전이 되었다.

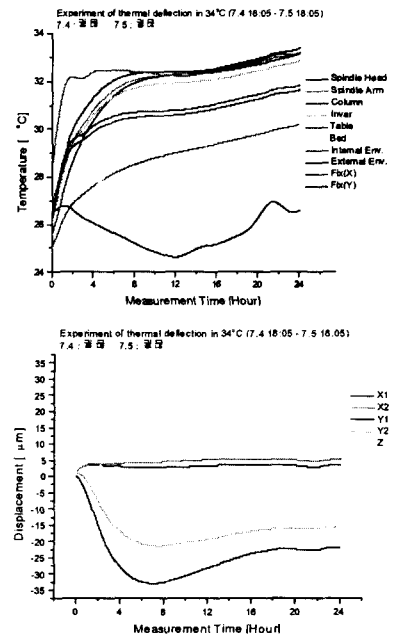


Fig.6 Temperature and thermal displacement changes in constant environment

Fig.9는 3시간동안의 가열과 그이후 냉각을 연계한 복합환경에 대한 구조물의 온도변화와 열변위를 나타내었다. 복합환경에서도 앞서 관찰되었던 각 Unit의 온도상승 속도, 열용량의 패턴 등이 뚜렷이 나타나서 일시적인 현상이 아님을 보이고 있다.

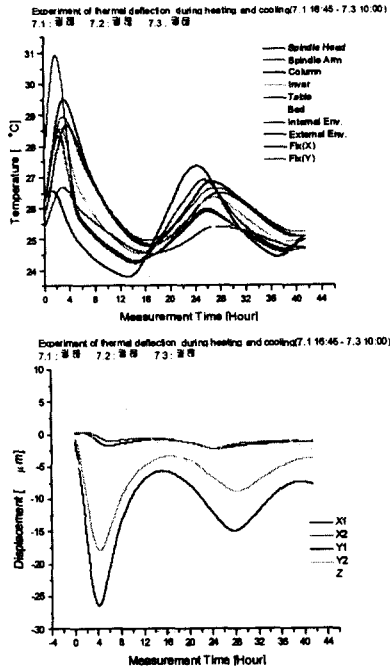


Fig.7 Temperature and thermal displacement changes in heating and cooling environment

4. 결론

본 논문에서는 능동형가공기의 열변형 오차보정 시스템 개발과 관련하여 상용 가공기의 열변형 특성을 분석하기 위해서 갭 센서와 열팽창계수가 매우 작은 인바재의 테스트바를 사용하여 온도변화 특성과 열변형 오차를 측정·해석했다. 실험방법은 공작기계의 외적 열환경 변화와 대상 공작기계의 가공특성(최고회전수, 최대이송속도, 작업시간)을 고려한 복합적인 실험조건에 따른 온도변화특성과 열변형 오차 특성을 측정하여 분석했다. 이러한 실험결과로부터 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 갭 센서와 테스트바를 외적열원변화와 작업조건변화에 따른 열변형 오차를 실시간적으로 측정했고, 오차보정 가능성을 검토했다.
- 2) 수평형 머시닝센터의 경우 구조특성에 의해서 온도변화에 의해서 Y, Z방향의 오차가 크게 나타났는데 이는 발생열원이 Y축에 직접적인 영향을 미치기 때문이고, 수직형 머시닝센터의 경우 외팔보 구조에 의해서 Y, Z축 방향의 열변형 오차는 발생온도에 의해서 직접적인 영향을 받는다.
- 3) 전반부베어링의 냉각이 하우징의 온도분포,

온도상승, 열변위 억제 효과가 매우 크고, 하우징부의 열변위 억제가 필요하다.

- 4) 외부 온도환경 실험을 통해 각 Unit의 온도가 열변위에 시간적으로 미치는 영향을 분석하였다.
- 5) Step 온도환경 실험을 통해 각 Unit의 상대적인 외부 접촉정도, 열용량, 온도안정 시간을 계산하였다.

참고문헌

1. Font: Times New Roman 9pt. Tlustý, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517-521, 1990.
1. J.Bryan, "International Status of Thermal Error Research," Annals of CIRP, Vol.39, No.2, pp645-656, 1990
2. J.S. Chen, et al, "Thermal Error Modeling for Volumetric Error Compensation," Sensors and Signal Processing for Manufacturing, PED-Vol.55, ASME, 1992
3. S.Yang, et al, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation," J. of Manufacturing Systems, Vol.15, No.2, 1996
4. M.Yang, J. Lee, "Measurement and Prediction of thermal Error of a CNC Machining Center using Two Spherical Balls," J. of Mat. Proc. Tech., Vol.75, No.1-3, 1998
5. JaeJong LEE, MinYang YANG, "Modeling and Measurement of Volumetric Thermal Errors for CNC Machining Center using On-the-Machine Measurement System," X Workshop on Supervision and Diagnostics of Machining system, 1999
6. W.Knapp, E. Matias, "Test of the Three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors," Annals of CIRP, Vol.32, No.1, pp459-464, 1983
7. J. Mou, C.R. Liu, "A Methodology for Machine Tools Error Correction using Reference Parts," Int. J. of Comp. Int. Manufact., Vol.8, No.1, pp229-233, 1995