

CNC 공작기계의 열변형 오차 보정 (I)

- 보정장치 기초실험 -

Compensation of Thermal Error for the CNC Machine Tools (I)

- The Basic Experiment of Compensation Device -

이 재 종*, 최 대 봉*, 곽 성 조*(한국기계연구원),
박 현 구**(충남대 기계공학과 대학원)

JaeJong Lee*, DaeBong Choi*, SungJo Kwak* (KIMM),
HyunKoo Park** (ChungNam Nat'l Univ.)

Abstract

One of the major limitations of productivity and quality in metal cutting is the machining accuracy of machine tools. The machining accuracy is affected by geometric and thermal errors of the machine tools. In this study, the compensation device is manufactured in order to compensate thermal error of machine tools under the real-time. 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 compensate thermal characteristics under several operating conditions, experiments performed with five gap sensors and manufactured compensation device on the horizontal machining center.

Key Words : 열변형 오차(thermal error), 오차보정 장치(error compensation device), 접촉식프로브(touch probe), 갭센서(gap sensor), 구 측정구(ball artifact)

1. 서론

공작기계의 가공정도는 공작기계를 구성하고 있는 각 구성요소의 기하학적인 상태에 의해서 발생하는 기하오차와 가공 중에 발생하는 절삭열과 스피ndl의 고속회전에 의한 발열과 이송축의 반복적인 이송에 의해서 발생하는 마찰열 및 주위온도 변화에 의한 열변형 오차에 의해서 직접적인 영향을 받는다. 일반적으로 열변형 오차는 공작기계의 기하오차에 비해서 가공정도에 큰 영향을 미치며, 공작기계에서 발생하는 오차의 40~70%는 열변형 오차에 의해서 발생한다[4]. 이러한 현상은 공작기계의 기하오차는 조립한 후에 품질관리와 위치오차의 보정(compensation)을 통해서 설계단계의 정도를 유지하지만 발생 열에 의한 열변형 오차는 작업조건과 가공특성에 따라서 발생하는 열원에 의해서 복잡한 형태로 발생하여 오차 보정이 곤란하기 때문이다. 따라서, 가공정도를 향상시키기 위해서는 작업 중에 발생하는 복잡한 열변형 오차

를 최소화시켜야 한다. 이러한 열변형 오차를 최소화시키기 위한 방법으로 Spur는 공작기계 설계 관점에서 열원냉각방법, 열변형이 없는 재질이나 열전도도가 낮은 재질을 사용하는 방법과 발생하는 열변형 오차를 측정하여 보정하는 방법을 제시했다[4]. 그러나 최적설계를 통해서 열변형 오차를 줄이는 데에 고가의 비용과 소재개발 등의 한계가 있기 때문에 열변형 오차를 최소화하기 위한 방법으로 측정을 통한 열변형 오차 보정방법이 연구되고 있으며[2,3,5], Z축 방향의 열변형 오차를 예측하여 보정하는 시스템이 개발되어 머시닝센터에 적용되고 있다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 CNC공작기계에서 발생하는 열변형 오차를 신속하게 보정하는 방법으로 오차보정 장치를 제작하여 작업 중에 발생하는 열변형 오차를 보정하기 위한 최소지령 단위별 이송오차 보정 및 열변형 오차보정을 위한 기초실험을 수행했다. 기초실험을 위해서 제작된 오차보정 장치는 향후 라인센터 및 CNC머시닝센터의 열변형 오차를 실시간 적으로 보정이 가능할

것으로 판단된다. 본 논문에서는 제작된 오차보정 장치의 기본특성 및 측정된 열변형 오차에 대한 보정실험을 중심으로 기술하고자 한다. 오차 측정은 접촉식프로브(touch probe)와 갭 센서(gap sensor)를 사용하여 라인센터와 유사한 구조를 가지고 있는 수직형, 수평형 머시닝센터를 대상으로 열변형 오차의 특성을 측정/해석 했고, 수평형 머시닝센터를 대상으로 오차보정 실험을 수행했다.

2. 열변형 오차 보정장치

열변형 오차 보정장치는 다음 Fig.1과 같이 접촉식프로브와 구축정구(ball artifact)를 이용한 오차측정 시스템 또는 오차예측 모델을 이용하여 오차측정/해석 및 예측되는 오차를 보정한다. 오차예측 모델은 신경회로망을 이용하는 방법과 다중 회귀 분석법을 이용했다. 오차보정 장치는 오차해석 시스템과 직렬통신 방법으로 인테페이싱 되어 있고, 대상 공작기계와는 DI/DO방법으로 인테페이싱되어 있다. 따라서, 오차해석 시스템에서 결정되는 X, Y, Z축 방향의 오차 보정량은 직렬통신방법으로 오차보정장치에 전송되고, 전송된 오차보정량은 DI/DO를 통하여 공작기계의 Macro변수로 전송됨으로써 오차보정이 가능하다.

공작기계의 열변형 오차보정은 오차보정 시점을 결정하고, 각각의 시점에서 결정되는 오차보정량을 이용하여 오차보정을 수행한다. 이 때 사용되는 오차보정 시점을 결정하는 방법으로는 일정 시간을 기준으로 오차보정을 수행하는 시간기준의 오차보정과 일정한 온도 변화량을 기준으로 오차보정 시점을 결정하는 온도 변화량 중심의 오차보정 방법이 있다. 본 논문에서는 대상 공작기계에서 사용되고 있는 제어기의 제약조건에 의해서 시간중심의 오차 보정 만을 수행했고, 향후 시간과 온도중심의 오차보정을 실현할 계획이다.

3. 열변형 오차 측정/보정 실험 및 분석

3.1 열변형 오차 측정 및 분석

작업 중에 발생하는 다양한 작업조건에 의한 스핀들유니트 및 모터의 열원, 반복적인 이송에 따른 볼스크류의 마찰열원과 주위온도 등의 변화

에 의해서 머시닝센터의 열변형 오차가 발생한다. 이러한 열변형 오차의 특성은 구성하고 있는 머시닝센터의 구조에 의해서 다르게 발생한다.

본 논문에서는 일반적으로 머시닝센터의 열변형 오차가 주축회전에 의해서 지배적인 영향을 받기 때문에 주축회전과 이송조건에 따른 수평형과 수직형 구조의 머시닝센터 열변형 오차 특성을 평가하기 위하여 다양한 절삭조건을 사용했다.

측정실험은 수평형/수직형 머시닝센터의 열변형 오차와 공간상에서 발생하는 열변형 오차의 변화특성을 분석하고, 수평형/수직형 구조를 가지고 있는 머시닝센터의 열변형 특성을 해석하기 위해서 수행했다.

측정장치는 수평형 공작기계의 열변형 특성을 신속하게 측정/분석하기 위해서 갭센서와 인바계의 테스트 바를 사용하여 임의의 공간상의 한 점에서의 열변형 오차와 각변위를 측정했고, 공간상에서 발생하는 스핀들유니트와 이송계의 열변형 특성을 측정하기 위해서 접촉식 프로브를 사용했다. 본 측정장치에서 사용한 인바(Invar)는 열팽창계수가 일반강의 약 1/10정도여서 주위온도변화에 의한 열변화 영향을 최소화할 수 있고, 접촉식프로브는 측정정도가 $1\mu\text{m}(2\sigma)$ 이다. 다음 Fig.2는 오차보정 장치와 레이저간섭계를 이용한 실험장치를 나타낸 것이다.

Fig.3 과 같은 복합적인 작업조건을 사용하여 스핀들 유니트를 9 시간 동안 회전시켜 열원을 발생 시켰고, 매 10 분 간격으로 측정된 스핀들 유니트의 열변형 오차를 측정했다. Fig.4 는 실험조건 1 과 2 에 의해서 측정된 수평형 머시닝센터의 열변형 오차이다.

이러한 실험결과로부터 스핀들유니트의 회전수가 증가함에 따라 X축 방향의 열변형 오차는 공작기계의 대칭구조로 인해서 크게 나타나지 않고, Y, Z방향에서 비교적 크게 변하고 있는데 이는 발생열원에 의한 영향으로 스핀들 유니트가 직접적인 영향을 받기 때문으로 판단된다. 특히, Y축 방향의 측정값이 크게 변화하고 있는데 이러한 결과는 수평형 머시닝센터의 구조상 스핀들 유니트가 Y축의 볼 스크류에 의해서 지지되고 있어 발생열원이 Y축의 볼 스크류에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

3.2 열변형 오차보정 장치의 특성 실험

열변형 오차보정 장치의 특성과 대상 공작기계의 이송량 보정특성을 분석하기 위해서 공작기계의 X, Y, Z 축 방향으로 1 μ m, 5 μ m, 10 μ m 값을 단계적으로 지령한 후 -1 μ m, -5 μ m, -10 μ m 값을 단계적으로 지령하여 대상 공작기계의 실제 이송량을 레이저간섭계를 이용하여 측정했다. 다음 Fig.5는 X, Y, Z 축 방향의 이송계 특성 실험 결과이다. Fig.5와 같이 X축의 경우는 1 μ m과 5 μ m으로 지령했을 때 공작기계의 이송정도와 Resolution에 의해서 정확한 이송특성을 얻지 못했고, 방향이 바뀌는 시점에서 이송계의 백래쉬오차에 의해서 지시된 오차보정값과 공작기계의 실제이송값이 다르게 나타났으며, 측정된 백래쉬 오차는 약 4 μ m 정도이다. 이에 비해서 Y, Z축의 경우 정확한 이송이 이루어졌음을 알 수 있다.

3.3 열변형 오차 보정 실험 및 결과

열변형 오차보정 실험은 Fig.3의 실험조건 1과 2에 따라 스피들 유니트를 회전시키면서 깎센서를 이용하여 측정된 열변형 오차를 해석하여 매 30분 간격으로 해석된 오차를 Mirror image 개념으로 오차보정량을 결정하여 오차보정 장치로 전송한 다음 레이저 간섭계를 이용하여 오차보정 정도를 측정했다. 다음 Fig.6은 실험조건 1에 의해서 측정된 열변형 오차를 이용하여 결정된 오차보정값과 레이저간섭계로 측정된 공작기계의 실제 이송값을 나타낸 것이다. X축의 경우 Fig.5의 실험결과에서 기술한 바와 같이 백래쉬와 이송오차에 의해서 약 5 μ m 정도 까지 오차보정이 가능했고, Z축의 경우도 약 6 μ m 까지 오차보정이 가능했다. 이에 비해서 Y축의 경우 약 2 μ m까지 오차보정이 실현되었다.

향후 접촉식프로브와 구 측정구를 이용하여 공간상의 열변형 오차를 측정할 다음 신경회로망과 다층 회귀분석모델을 이용한 오차예측 모델을 이용하여 공간상의 열변형 오차를 보정할 수 있는 보정시스템을 제작하여 PC-NC를 채용하고 있지 않은 CNC공작기계에 적용할 계획이다.

4. 결론

본 논문에서는 실시간으로 열변형 오차를 보정하기 위한 방법을 개발하기 위한 일환으로 접촉식 프로브와 깎 센서를 사용하여 작업조건에 따른 수평형 머시닝센터의 온도변화 특성과 열변형 오차를 측정/해석했고, 열변형 오차보정 장치를 제작하여 오차보정장치의 특성분석 및 다양한 실험조건에서 측정된 열변형 오차보정 실험을 수행했다. 이러한 실험결과로부터 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 깎 센서와 접촉식프로브를 이용하여 신속하고, 고정도로 열변형 오차를 측정했고, 오차보정 장치를 이용하여 오차보정의 가능성을 검토했다.
- 2) 오차보정 실험결과 각 축방향에 대해서 이송계를 1 μ m, 5 μ m, 10 μ m 씩 미소지령을 했을 때 구조적으로 백래쉬가 큰 X축을 제외하고는 정확한 오차보정이 이루어졌다.
- 3) 다양한 실험조건에서 측정된 열변형 오차를 X, Y, Z축 방향으로 보정했을 때 오차보정 정도는 각 축에 대해서 약 4 μ m까지 오차보정이 수행되었다. 따라서, 향후 공간상의 오차보정이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) J.S. Chen, et al, "Thermal Error Modeling for Volumetric Error Compensation", Sensors and Signal Processing for Manufacturing, PED-Vol.55, ASME, 1992
- (2) 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
- (3) M.Yang, J. Lee, "Measurement and Prediction of thermal Error of a CNC Machining Center using Two Spherical Balls", J. of Materials Processing Technology, Vol.75, No.1-3, 1998
- (4) Bryan, J.B., "International Status of Thermal Error Research (1990)", Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, 1990
- (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

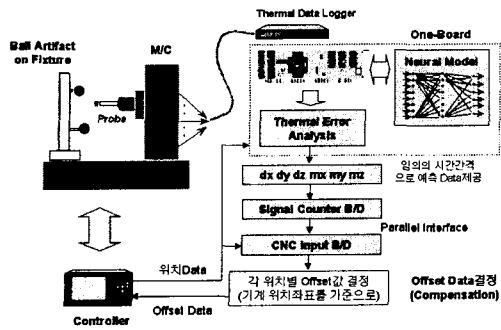


Fig.1 Block diagram of Compensation system

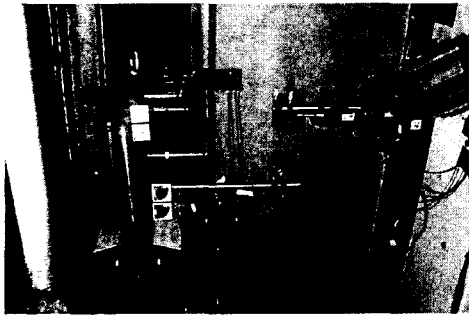
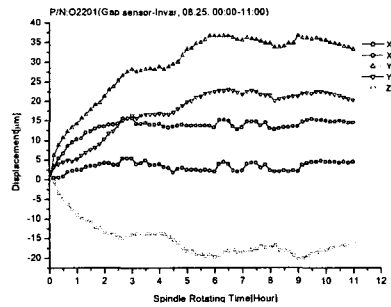
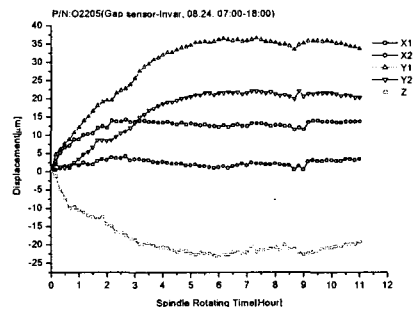


Fig.2 Experimental Set-up for touch probe and laser interferometer

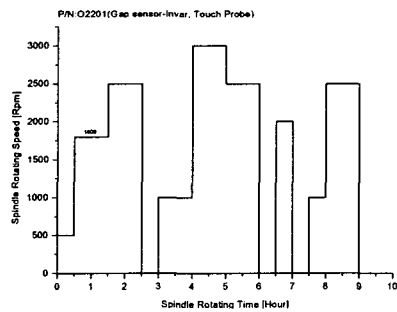


(a) Experimental condition 1

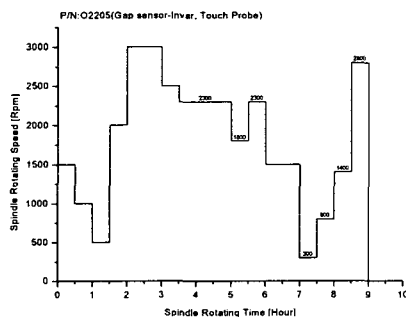


(b) Experimental condition 2

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

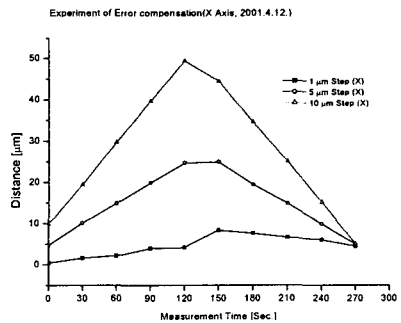


(a) Experimental condition 1

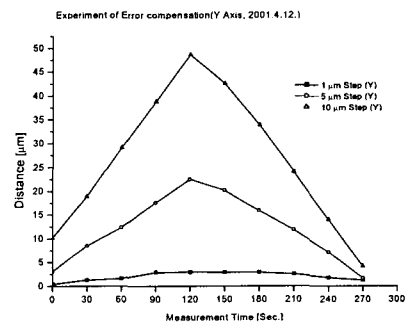


(b) Experimental condition 2

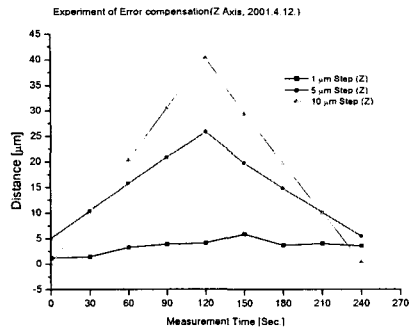
Fig.3 Experimental conditions



(a) X axis



(b) Y axis



(c) Z axis

Fig.4 Experiment of step movement in X and Z axes using compensation device

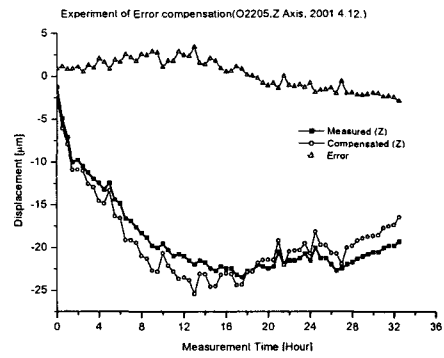
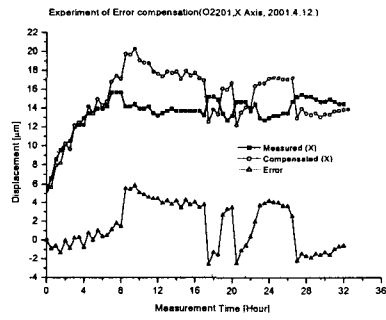
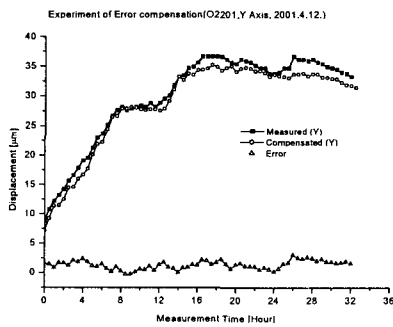


Fig.7 Compensation result under experimental condition 2



(a) X axis



(b) Y axis

Fig.6 Compensation result under experimental condition 1