

CNC 공작기계의 열변형 오차 보정 (II) - PC-NC 제어기용 오차보정 알고리즘 분석 -

이재종*, 최대봉*, 박현구**

Compensation of Thermal Errors for the CNC Machine Tools (II) - Analysis of Error Compensation Algorithm for the PC-NC Controller -

Jae-Jong Lee*, DaeBong Choi* and HyunKoo Park**

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 errors, thermally-induced errors, and the deterioration of the machine tools. Geometric and thermal errors of machine tools should be measured and compensated to manufacture high quality products. In metal cutting, the machining accuracy is more affected by thermal errors than by geometric errors. In this study, the compensation device and temperature-based algorithm have been presented in order to compensate thermal error of machine tools under the real-time. 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 (error compensation), 오차보정 장치(error compensation device), 보정알고리즘(compensation algorithm), PC-NC 라인센터(line center)

1. 서론

공작기계에서 작업 중에 발생하는 다양한 형태의 열변형 오차가 공작기계의 가공정도에 직접적인 영향을 미침에 따라서 각 공작기계 업체에서는 이러한 열변형 오차를 최소화하기 위해서 다양한 연구를 진행하고 있다. 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 예

측하여 보정하는 시스템이 개발되어 머시닝센터에 적용되고 있다.

선진 공작기계 업체의 경우 이미 Table 1과 같이 별도의 오차보정장치를 자사 공작기계에 부착하여 열변형 오차 보정을 하고 있으며, 다수의 공작기계 업체들이 일차적으로 냉각시스템을 이용하거나 Z축 방향의 열변형 오차를 최소화하고 있다. 이에 비해서 국내의 공작기계 업체의 경우 불과 최근에 공작기계의 열변형 오차의 중요성을 인식하여 설계관점에서 별도의 오차보정장치를 부착하지 않고 열변형오차에 대해서 안정화 될 수 있도록 이송계와 구조계 열적 안정화기술을 개발하여 적용하고 있어 향후 열변형 오차를 최소화할 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 방법은 구조적인 측면에서 접근하기 때문에 작업조건과 가공특성에

* 한국기계연구원 자동화연구부
** 충남대학교 기계공학과 대학원

따라서 발생하는 열원에 의해서 다양한 형태로 변화하는 열변형 오차에 대해서 대응하기가 어렵다. 따라서, 열변형 오차에 대한 별도의 오차보정기술이 적용되지 않은 기존 CNC공작기계 및 PC-NC를 채용하고 있는 공작기계의 열변형 오차를 최소화하기 위한 기술이 필요하다.

본 논문에서는 PC-NC를 채용하지 않은 CNC공작기계에 적용할 수 있는 오차보정 알고리즘과 PC-NC를 채용하는 공작기계의 열변형 오차를 보정하기 위한 알고리즘에 대해서 기술하고자 한다. 본 논문에서는 CNC 머시닝센터와 PC-NC 라인센터를 대상으로 했고, 일차적으로 수평형 머시닝센터를 대상으로 열변형 오차의 특성을 측정/해석 했고, 수평형 머시닝센터를 대상으로 오차보정 실험을 수행했다.

Table 4. Examples for the thermal error compensation in Japan.

기업명	특징	적용기계
Osaka Kiko	<ul style="list-style-type: none"> Z축 열변형 측정 후 자동보정 발생열 억제/열관제/열강성 향상기술을 적용한 공작기계 생산 	<ul style="list-style-type: none"> Machining Center Milling Machine
Brother	<ul style="list-style-type: none"> Z축 방향의 변위를 측정하여 기계의 위치좌표를 보정 	<ul style="list-style-type: none"> Tapping Machine
Yasda Kokyo	<ul style="list-style-type: none"> 베드, 칼럼, 테이블, 새들에 온도제어장치를 부착하여 공작기계의 전체온도를 제어 	<ul style="list-style-type: none"> Machining Center
Hidachi Seki	<ul style="list-style-type: none"> 열변형 오차 예측 장치를 부착하여 발생온도에 따른 오차를 예측 	<ul style="list-style-type: none"> Machining Center

2. 열변형 오차보정 알고리즘

2.1 공간상의 열변형 오차 특성

스핀들 유니트 및 이송계 등에 의해서 발생하는 열원은 공작기계의 구조계, 이송계, 주축계에 직접적인 영향을 미침에 따라 열변형 오차는 Fig.1과 같이 공작기계의 공간상에서 비대칭형태로 발생한다. Fig.1과 같이 열변형 오차는 공간상의 위치에 따라 다르며, 이러한 특성으로 인해서 임의의 한 점에서 측정된 오차를 이용하여 공작기계의 열변형 오차를 보정할 경우 단순한 원점보정과 유사하며, 공간상에서 정확한 오차보정이 곤란하다. 따라서, 공작기계의 공간상의 열변형 오차보정을 위해서는 정확한 공간상의 열변형 오차지도 (volumetric thermal error map)가 필요하다. 이러한 오차지도는 구 측정시스템이나 DBB를 이용할 수 있으며, 다양한 온도변화와 그 때의 열변형 오차를 이용하여 정확한 오차지도의 생성이 가능하다.

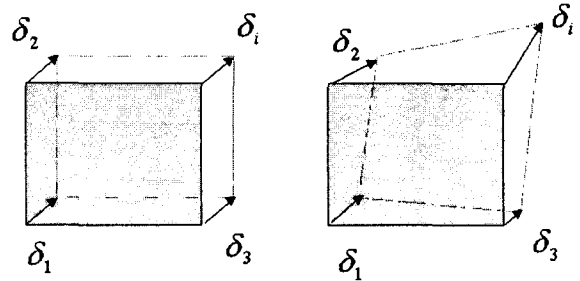


Fig.1 Thermal deformation patterns in machine tools

2.2 공간상의 열변형 오차 특성

열변형 오차지도의 생성시점은 시간변화량을 기준으로 하는 방법과 온도변화량을 기준으로 하는 방법이 있다. 시간변화량을 이용할 경우 온도변화가 없는 경우에도 연속적인 오차지도를 생성해야 하지만 온도변화량을 기준으로 할 경우 온도변화가 있을 때에만 오차지도를 생성하기 때문에 비교적 유리하다. 본 논문에서는 Fig.2와 같이 온도변화량이 임의의 값을 초과했을 때마다 오차지도를 생성했다.

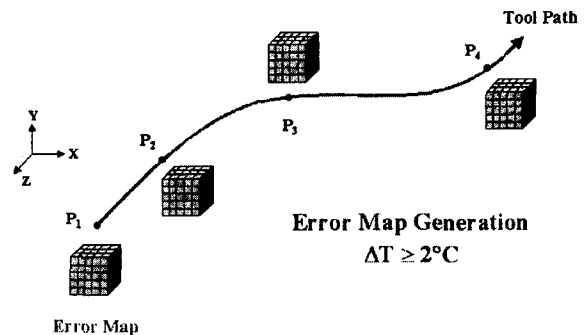


Fig.2 Concept of the error map generation

이 때 생성된 오차지도를 이용하여 공간상의 위치에 따른 공작기계의 전영역에 대한 열변형 오차보정값을 결정하고, 현재 위치를 검출한 후 현재 위치를 기준으로 임의의 간격으로 오차보정량을 결정한 다음 신속한 오차보정을 실행하며, 새로운 오차지도가 생성될 때까지 정해진 공간상의 오차보정량을 이용하여 연속적인 오차보정을 수행한다. 따라서, 공간상에서 연속적인 오차보정을 하기 위해서는 공작기계의 X, Y, Z축의 이송위치를 검출해야 한다. Fig.3은 가공 중에 이송위치에 따른 오차보정의 개념을 나타낸 것이다.

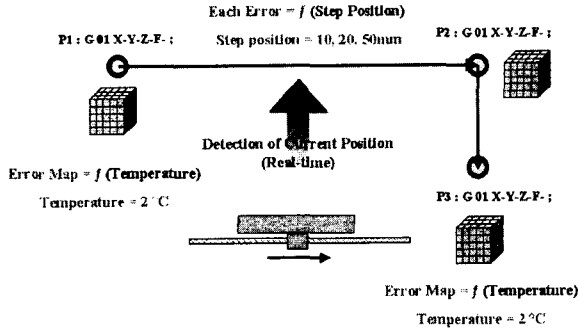


Fig.3 Error compensation using the generated error map

Fig.3과 같이 공작기계가 P1→P2→P3로 이동할 때 오차보정을 위해서 기존 CNC공작기계의 경우 NC코드의 EOB(end of block)에서 움셋값을 조정하기 때문에 중간에서 오차보정을 하기 위해서는 별도의 I/O보드를 사용하거나 현재위치 검출장치가 필요하다. 그러나, PC-NC의 경우 현재 위치값을 연속적으로 검출할 수 있어 오차지도가 생성된 다면 공간상에서 연속적인 오차보정이 가능하다. 본 논문에서는 PC-NC를 적용하기 위한 전단계로써 기존 CNC공작기계에 적용할 수 있는 오차검출장치를 제작하여 오차보정을 위한 기초실험을 수행했다.

2.3 PC-NC제어기의 오차보정 알고리즘

PC-NC제어기를 탑재한 공작기계 이외에 CNC공작기계의 경우 공간상의 열변형 오차를 보정할 경우 가장 문제가 되는 것은 현재 위치좌표를 검출하는 것과 오차 보정시 발생하는 전후위치에서의 간섭무늬를 제거해야 하는 문제가 있다.

전술한 바와 같이 공작기계에서 발생하는 열변형 오차는 Fig.1과 같이 공간상의 위치에 따라서 다르게 나타나기 때문에 절삭공구의 이동위치에 따라 각각 다르게 나타나는 열변형 오차를 검출하여 보정해야 한다. 이를 위해서는 반드시 절삭공구의 이동위치를 신속하게 검출해야 하며, 기존 CNC공작기계의 경우 이러한 기능이 제공되지 않기 때문에 별도의 I/O장치를 부착하여 검출해야 하나 PC-NC를 부착한 공작기계의 경우는 신속한 위치검출이 가능하다.

PC-NC제어기를 이용하여 열변형 오차를 보정할 경우 제어기에서 제공하는 Look Ahead모듈을 이용하여 스무딩(Smoothing)을 통하여 오차보정시 발생하는 간섭무늬를 제거할 수 있다. 오차보정에 따른 간섭무늬를 제거할 수 있는 방법으로는 오차

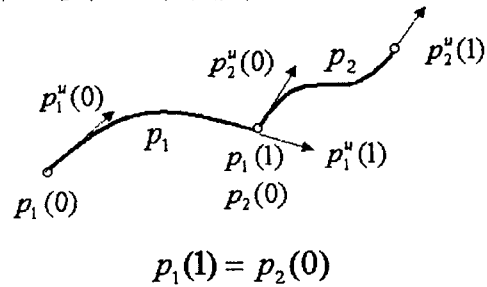
보정점에서의 C^0, C^1, C^2 연속성조건(continuity conditions)을 고려할 수 있다. Fig.4은 C^0, C^1 의 연속성을 나타낸 것이다.

$$p_i(1) = p_{i+1}(0) \quad (1)$$

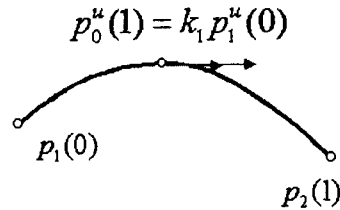
$$p_i''(1) = k_1 p_{i+1}''(0) \quad (2)$$

$$p_i'''(1) = k_2 p_{i+1}'''(0) \quad (3)$$

여기서, k_1, k_2 는 비례상수이고, p_i'' 는 교점에서의 1차 도함수이고, p_i''' 는 교점에서의 2차 도함수를 나타낸다.



C^0 : No gap/breaks between beginning and ending points



C^1 : Two curves segments requires a common tangent line

Fig.4 C^0, C^1 , and C^2 continuity conditions

C^0 연속성조건은 식(1)과 같이 오차보정점이 동일해야 하며, C^1 연속성조건은 식(2)와 같이 오차보정점에서 동일 접선을 갖도록 보정하고, C^2 연속성조건은 식(3)과 같이 오차보정점에서 동일한 곡률을 갖도록 보정하는 것이다. 이러한 연속성을 만족할 수 있도록 오차보정량을 결정함으로써 보정점에서 발생

하는 간섭무늬를 제거할 수 있다.

2.4 CNC 공작기계의 열변형 오차보정 장치

PC-NC를 채용하지 않은 기존 CNC공작기계의 열변형 오차보정 장치는 오차해석 시스템과 직렬 통신 방법으로 인테페이싱 되어 있고, 대상 공작기계와는 DI/DO방법으로 인테페이싱(Interfacing)되어 있다. 따라서, 오차해석 시스템에서 결정되는 X, Y, Z축 방향의 오차 보정량은 직렬통신방법으로 오차보정장치에 전송되고, 전송된 오차보정량은 DI/DO를 통하여 공작기계의 Macro변수로 전송됨으로써 오차보정이 가능하다. 다음 Fig.5는 오차보정 장치의 Configuration과 신경회로망을 통하여 연속적으로 오차보정값을 제공하는 오차보정 프로그램이다.

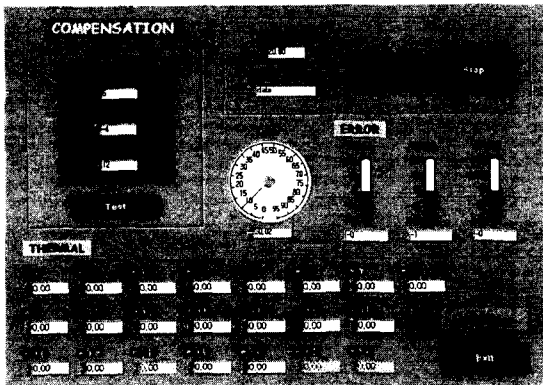


Fig.5 Configuration of the compensation device and software

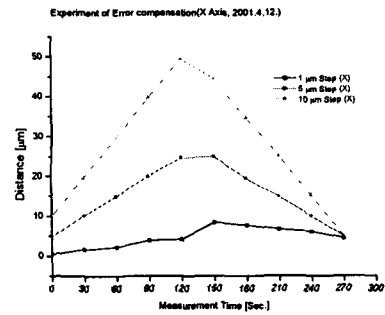
개발된 오차보정 장치는 이송위치에 따른 연속적인 오차보정은 곤란하지만 임의의 위치에서의 실시간적인 오차보정은 가능하며, 향후 CNC 평면 연삭기의 오차보정 실험에 활용할 계획이다.

3. 열변형 오차보정 실험 및 분석

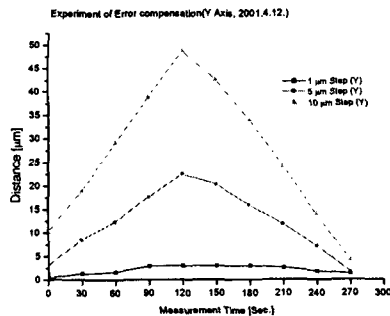
3.1 CNC 열변형 오차보정 장치의 특성실험

PC-NC 제어기를 탑재한 공작기계의 열변형 오차보정의 가능성을 분석하기 위해서 CNC 제어기를 탑재한 수평형 머시닝센터를 대상으로 열변형 오차보정실험을 수행했다. 실험은 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

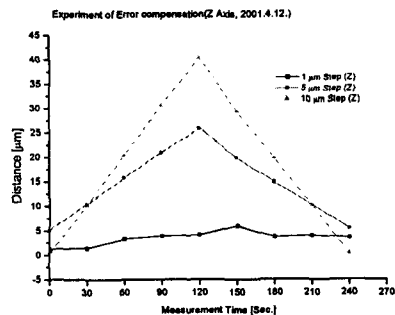
공작기계의 실제 이송량을 레이저간섭계를 이용하여 측정했다. 다음 Fig.6은 X, Y, Z축 방향의 이송계 특성 실험 결과이다. Fig.6과 같이 X축의 경우는 1 μ m과 5 μ m로 지령했을 때 공작기계의 이송정도와 Resolution에 의해서 정확한 이송특성을 얻지 못했고, 방향이 바뀌는 시점에서 이송계의 백래쉬오차에 의해서 지시된 오차보정값과 공작기계의 실제이송값이 다르게 나타났으며, 측정된 백래쉬 오차는 약 4 μ m 정도이다. 이에 비해서 Y, Z축의 경우 정확한 이송이 이루어졌음을 알 수 있다.



(a) X axis



(b) Y axis



(c) Z axis

Fig.6 Experiment of step movement in X and Z axes using compensation device

3.2 열변형 오차보정 실험 및 결과

본 논문에서는 일반적으로 머시닝센터의 열변형 오차가 주축회전에 의해서 지배적인 영향을 받기 때문에 주축회전과 이송조건에 따른 수평형 머시닝센터 열변형 오차 특성을 평가하기 위하여 다양한 실험조건을 사용했다.

실험조건은 Fig.7과 같은 복합적인 작업조건을 사용하여 스피들 유닛을 9시간 동안 회전시켜 열원을 발생시켰고, 매 10분 간격으로 측정된 스피들 유닛의 열변형 오차를 측정했다. Fig.8은 실험조건1과 2에 의해서 측정된 수평형 머시닝센터의 열변형 오차이다.

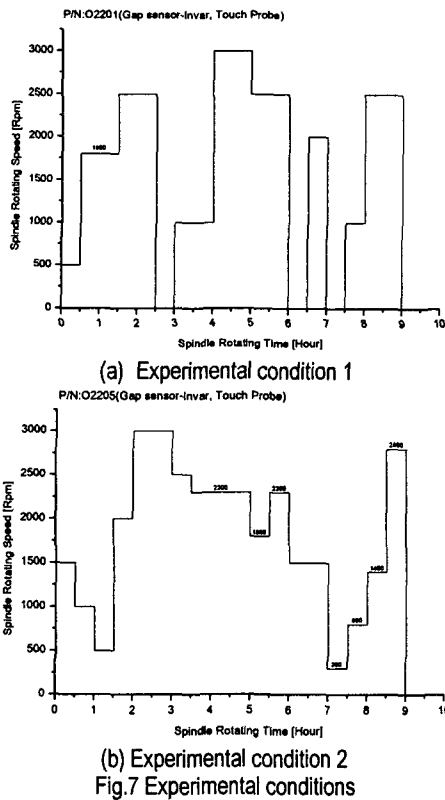
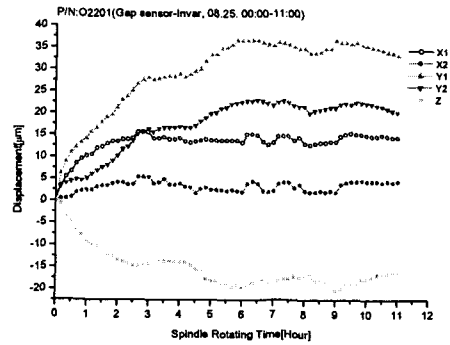


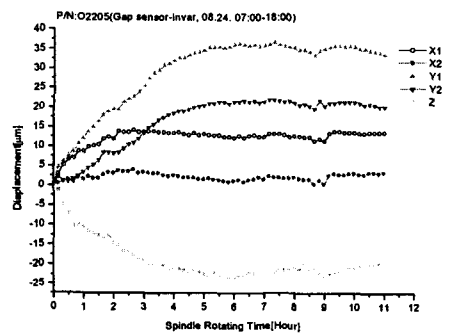
Fig.7 Experimental conditions

열변형 오차보정 실험은 측정된 열변형 오차를 해석하여 매 시간 간격으로 해석된 오차를 Mirror image 개념으로 오차보정량을 결정하여 오차보정 장치로 전송한 다음 레이저 간섭계를 이용하여 오차보정 정도를 측정했다. 다음 Fig.9와 Fig.10은 실험조건 1과 실험조건 2에 의해서 측정된 열변형 오차를 이용하여 결정된 오차보정값과 레이저 간섭계로 측정된 공작기계의 실제 이송값을 나타낸 것이다. X축의 경우 Fig.6의 실험결과에서

기술한 바와 같이 백레쉬와 이송오차에 의해서 약 $5\ \mu\text{m}$ 정도 까지 오차보정이 가능했고, Z축의 경우도 약 $6\ \mu\text{m}$ 까지 오차보정이 가능했다. 이에 비해서 Y축의 경우 약 $2\ \mu\text{m}$ 까지 오차보정이 실현되었다.



(a) Experimental condition 1



(b) Experimental condition 2

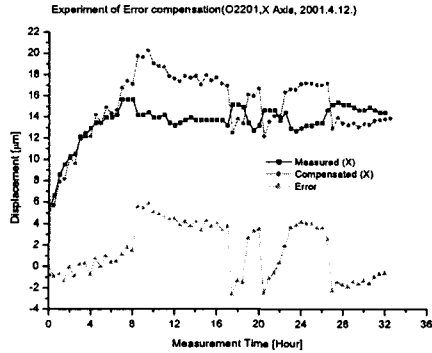
Fig.8 Trends of thermal deformation error under experimental condition 1 and 2

향후 접촉식프로브와 구 측정구를 이용하여 공간상의 열변형 오차를 측정한 다음 신경회로망과 다층 회귀분석모델을 이용한 오차예측 모델을 이용하여 공간상의 열변형 오차를 보정할 수 있는 보정장치 및 PC-NC에 적용할 수 있는 오차보정 모듈 개발하여 현재 개발되고 있는 PC-NC에 탑재할 계획이다.

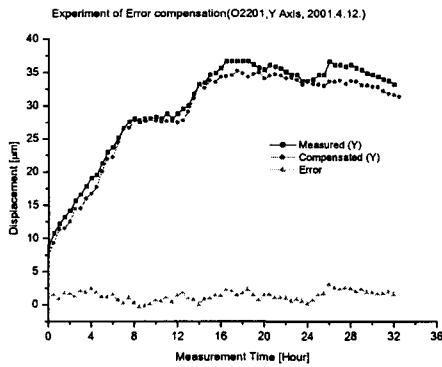
5. 결론

본 논문에서는 상용 CNC머시닝센터 및 PC-NC를 채용하고 있는 라인센터를 대상으로 실시간으로 열변형 오차를 보정하기 위한 방법을 개발하기 위해서 공간상의 열변형 오차 보정 알고리즘에 대해서 기술했다. 또, 기존 CNC공작기계에 적용할 수 있는 열변형 오차보정 장치를 제작하여 오차보정 장치의 특성분석 및 다양한 실험조건에서 측정

된 열변형 오차보정 실험을 수행했다. 이러한 실험결과로부터 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.



(a) X axis



(b) Y axis

Fig.9 Compensation result under experimental condition 1

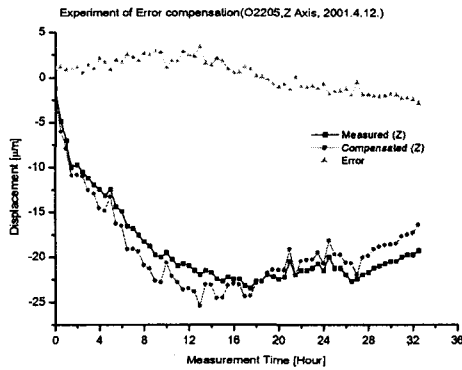


Fig.10 Compensation result under experimental condition 2

- 1) CNC 및 PC-NC채용 공작기계의 열변형 오차를 실시간으로 보정할 수 있는 오차보정 방법론 및 오차보정의 문제점을 분석했다.
- 2) 접촉식프로브를 이용하여 신속하고, 고정도로 열변형 오차를 측정했고, 오차보정 장치를 이용하여 오차보정의 가능성을 검토했다.
- 3) 보차보정 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.
- 4) 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. 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
3. Bryan, J.B., "International Status of Thermal Error Research (1990)", Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, 1990
4. 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
5. JaeJong Lee, MinYang Yang, "Measurement of the Volumetric Thermal Errors for CNC Machining Center using the Star-type-styluses Touch Probe", Int. J. of KSPE, Vol.1, No.1, June, 2000
6. 이재종 외 3, "열적 환경변화에 의한 공작기계의 구조적 특성", 한국정밀공학회 2000년 춘계학술대회논문집
7. 이재종, 박현구, "CNC 머시닝센터의 열변형 오차측정 및 실시간 보정", 대한기계학회 2000년도 동역학 및 제어부문 하계 학술대회