

# 공작기계 스피들 부위의 열분포 분석 및 오차 보정

† . \* . \*\* . \*\*

## Analysis of Thermal Distribution and Compensation of Error for Spindle of Machining Center

H. S. Ko<sup>†</sup>, K. H. Park<sup>\*</sup>, H. -R. Seo<sup>\*\*</sup>, and J. -S. Ha<sup>\*\*</sup>

**Key Words:** CNC Machining Center(공작기계), Thermal Error Compensation(열오차 보정), Multiple Variable Method(다변수 회귀법), Infrared Camera(적외선 카메라)

### Abstract

Thermal error compensation has been developed for CNC (Computer Numerical Control) machining center with moving heat sources. The thermal error in CNC machining center has an effect on machining accuracy more than the geometric error does. Thus, temperature distributions of a spindle unit have been analyzed numerically by a Finite Differential Method and experimentally by an infrared (IR) camera in this study. A multiple variable method has been derived to estimate the thermal deformation of the machine origin stably and effectively after measuring deformation and temperature data. The experimental results for a vertical machining center have shown that the thermal errors of the machine origins were reduced more than 30% by the developed method.

### 1.

CNC공작기계는 다품종 소량생산에 가장 적합한 공작기계로 현재 국내의 많은 공장에서 사용되고 있다. CNC공작기계에 의해 부품을 정밀하게 가공할수록 소형화 및 경량화를 달성할 수 있고, 조립 및 작동정밀도를 향상시킬 수 있다. 절삭가공의 정밀도에 영향을 미치는 인자는 공작계의 구조, 공작기계 고정방법 및 기초절삭모수, 공구의 종류와 형상, 가공물을 공작기계에 고정하는 방법, 절삭유 사용유무, 정비 상태 및 마모정도, 가동환경 등 다양하다.

기존 공작기계의 가공정도는 작업자의 숙련도에 좌우되었으나 고속화, 정밀화 되어가는 산업

구조에서 컴퓨터가 내장된 CNC공작기계의 가공정도는 절삭작업시 발생하는 진동, 열, 공작기계의 구조계, 이송계의 변형 등에 의해 좌우된다. 따라서, 기계 가공물의 가공정밀도 향상을 위해 공작기계에서 발생하는 오차를 제어, 보정하는 기술이 절실히 필요하다. 오차의 종류에는 기계의 진동, 채터 및 스피들의 진동에 의해 발생하는 오차인 dynamic error와 공작기계 구성요소인 안내면, 칼럼, 볼스크류 등의 기하오차와 온도변화에 의한 열변형 오차인 quasi-static error가 있으며 본 연구에서는 공작기계의 CNC 및 고정도화 가속에 따라 공작기계의 정밀도에 많은 영향을 미치는 열변형에 대한 연구를 목표로 한다.

공작기계에서 발생하는 열변형의 주요한 열원은 주축계와 주축계 베어링 그리고 이송계 드라이브에 의한 발열이다. 이는 주축의 신연 및 비틀림과 컬럼의 휨 그리고 볼스크류의 열팽창을 발생시켜 최종적으로 10 μm 이상의 열변형을 야기시킨다. 공작기계 열변형은 기계 각 요소의 형상오차에 의한 열변형과 이송부의 조인트오차에

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hanseoko@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7453 FAX : (031)290-5849

\* 성균관대학교 대학원 기계설계학과

\*\* (주) 두산메카텍 공작기계 사업 부문

의한 열변형으로 구분할 수 있다. 형상오차는 주로 주축 및 컬럼의 열변형에 의해 나타나며 조인트오차와 함께 최종적으로는 공구와 공작물 사이의 상대적 오차를 발생시킨다. 열변형 오차를 줄이는 해결책은 공작기계의 설계 개선과 오차보상 기술로 나눌 수 있다. 설계 개선에 의한 방법은 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에, 최근에는 열변형 모델에 의한 공작기계 오차보상에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(1)</sup>.

오차보상은 열변형 예측과 보상제어로 이루어지는데, 먼저 열변형 예측은 해석적 방법과 경험적 모델에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 유한요소법과 유한차분법에 의한 해석적 방법<sup>(2)</sup>은 기계경계조건 및 여러 절삭조건하에서 변화하는 열발생률에 대한 충분한 정보를 제공하지 못하기 때문에 정확성을 보장할 수 없고, 해석에 걸리는 시간 때문에 실시간 오차보상에 적용하는 것은 불가능하다. 따라서, 실시간 오차보상에는 계산시간이 짧은 경험적인 모델이 이용된다. 경험적인 열오차 모델은 비선형적인 열오차의 특성을 잘 표현해야 할 뿐 아니라 서로 다른 절삭조건에 대해서 예측 성능이 안정되어 있어야 한다. Moriwaki<sup>(3)</sup>는 온도측정치에 기초한 신경회로망 모델을 구성하여 열변형 예측 및 비선형적인 모델의 자동 생성을 시도하였으나, 다른 절삭조건에 대한 비교 평가가 이루어지지 않았다. Blomquist<sup>(4)</sup>는 온도에 대해서는 1차, 위치에 대해서는 2차의 열변형 모델을 가정하였으나 열변형 특성이 온도에 관해 비선형적인 것을 고려하지 않았다. 정성중 등<sup>(5),(6)</sup>은 GMDH(group method of data handling)를 이용하여 입력변수와 비선형 모델 생성의 자동화를 구현하고 다른 절삭 조건에 대한 높은 예측성능을 확인하였으며, 실험을 통해 전체 열변형량 중에서 원점의 이동이 차지하는 비율이 상당히 크다는 것을 밝힌 바 있다.

본 연구는 공작기계 가동시에 스핀들 부위의 열분포를 유한요소기법을 이용해서 모델링하고 적외선 카메라(Infrared Camera)로 정밀 측정하여 주요 발열 부위를 파악한 후, 레이저 센서로 측정된 여러 운전 상태에서의 주축 변형 오차와 주축계 발열부의 온도 데이터를 분석해서 수식화하는 것을 목표로 한다. 따라서, 실험에서 얻은 데이터로 운전 상태에 따른 스핀들 부위의 온도 분포와 주축의 변형량을 파악하고 CNC공작기계 가

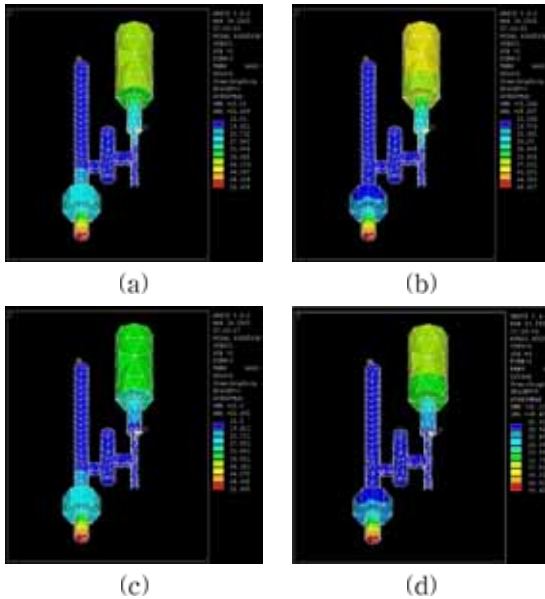
공 오차의 큰 원인이 되는 열변형을 감소시키기 위한 실시간 보정 알고리즘을 개발하였다.

## 2.

공작기계 스핀들 부의 열전달 경로 및 온도 분포를 해석하기 위해 유한요소법을 이용하였다. 유한요소법은 복잡한 구조물에 대한 기계적, 열적 거동을 예측하고 경향을 파악할 수 있는 효과적인 해석방법 중의 하나이다. 공작기계 스핀들 부의 구성은 모터부와 크랭크샤프트, 기어축, 회전축 등으로 되어 있으며 모터부에서의 발열이 축을 통하여 헤드 부 전체로 퍼져 나가는 양상을 띄고 있다.

모델링은 우선 내부 축부분과 모터부분, 그리고 축에 대해서 각각 수행하였으며 이번 실험의 관심부분인 스핀들 부위를 ANSYS 5.6을 이용하여 중점적으로 해석하였다. 해석을 위한 경계 조건으로는 모터에서 발생하는 열원과 절삭부에서 발생하는 열원, 그리고 대기에 접촉하는 표면에서의 대류를 고려하였으며 기계 내부 모델링의 경우 대기온도는 15℃로 균일하다고 가정하였다. 또한 모터부에서 발생한 열량은 모두 축을 통해 전도된다고 가정하였으며 절삭부 부분의 회전에 의한 열량 및 베어링에 의한 열전도와 냉각유의 흐름도 고려하였다.

정상 상태에서 공작기계 내부 부위와 축 부위에 대한 열전달 해석과 축 부위의 열변형 해석을 수행하였는데 해석 결과에 의하면 먼저 내부 부위의 열전달의 경우 모터부와 절삭부에서 발생한 열이 각 축 부위를 따라 전도됨을 알 수 있었다. 모터의 발열량과 그에 따른 절삭부의 회전에 의한 열량은 고정된 것이어서 이를 변형하는 것은 어려우므로 발열부 주위에 강제 대류가 발생한다고 가정하고 이에 따른 열전달량의 추이를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 대기 온도를 15℃로 가정하고 공작기계의 정격 출력(15kW)과 스핀들의 회전속도(4000rpm)를 고려하였을 때 내부 기계 부위의 온도분포를 살펴보면 (Fig. 1 (a)), 모터부와 절삭부에서 발생하는 열이 각 축을 따라서 전도되는 것을 볼 수 있다. 최고 온도를 보이는 지점은 절삭부위로 대기 온도보다 약 40℃ 정도 높은 양상을 보였으며 모터 부위도 상당히 높은 온도 분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 이를 참고로 하여

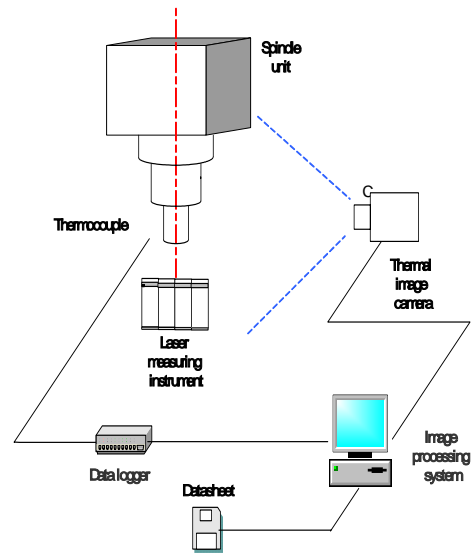


**Fig. 1** Temperature distributions of inner components for machining center: (a) no forced convection, (b) forced convection for spindle unit, (c) forced convection for motor and (d) forced convection for spindle and motor

Fig. 1 (b)에는 가장 높은 온도를 보이는 지점인 절삭부에 강제 대류 ( $h=250 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ )를 가정하여 모델링 결과를 그려 보았다. 전체적으로 온도는 약  $4^\circ\text{C}$  정도 감소하고 있음을 관찰할 수 있고 특히 절삭부에서 발생한 열이 위의 경우와 비교해서 상당히 협소하게 전도되는 것을 알 수 있다. Fig. 1 (c)는 모터부에 강제 대류를 가정했을 때의 모델링 결과인데 절삭부에 강제 대류를 주었을 때와는 달리 온도 감소는 거의 나타나지 않았으며 공작기계 내부의 복잡한 구조를 감안하더라도 전극부에 대한 강제 대류는 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다. Fig. 1 (d)는 전극부와 절삭부에 각각 강제 대류를 가정한 모델링 결과인데 온도 감소폭이 (b)의 결과에 비해 미미하게 나타났다. 위의 결과를 종합해 볼 때 온도 상승폭을 줄이기 위해서는 절삭부 자체에 대한 강제 대류를 고려해야 한다는 결론을 얻을 수 있었다.

### 3.

측정부의 온도장을 실시간으로 촬영할 수 있는 적외선 카메라를 이용하여 공작기계 스핀들 부위



**Fig. 2** Experimental setup for infrared camera, thermocouple and laser

의 온도장을 측정하였다. 적외선 카메라는 비디오 카메라처럼 작동 하지만 영상이 일반적인 “light”가 아닌 “infrared energy”를 검출하는 것이 일반 비디오 카메라와 다른 점이며 따라서 물체로부터 방사되는 열에너지로부터 온도 분포를 얻을 수 있다. 주축부의 온도 변화는 Fig. 2에 보이는 것처럼 적외선 카메라와 동시에 12개의 T형 열전대를 이용하여 측정함으로써, 온도 측정의 정확도를 검증하였다. 공작기계의 주축 변형은 시간이 지남에 따라서 랜덤하게 변화하므로 주축부 하단에 레이저 측정기를 설치한 뒤 시간에 따른 변형량을 측정하였다. 주축의 회전수는  $5000\text{rpm}$ , 가동시간은 주축변형과 대기온도를 측정한 1차 실험의 경우 6시간, 주축변형과 대기온도, 주축부의 온도를 측정한 2차 실험의 경우 5시간으로 하였다.

공작기계 주축부의 온도는 처음에는 상온과 같은 온도를 기록하다가 가동 시간이 증가함에 따라서 주축부 중앙 하단의 우측 부위에서부터 온도 증가가 이루어지기 시작한다. 여기서 발생한 열은 8자 형상을 나타내며 전도가 이루어지게 되고 점차 주축부 전체로 퍼져나가기 시작한다. 가동시간이 늘어날수록 주축부의 온도도 비례해서 증가하는 현상을 보이며 이 현상은 5-6시간 후 공작기계의 온도가 정상상태의 특징을 보일 때까지 Fig. 3에 보이는 것처럼 계속 이어지게 된다.

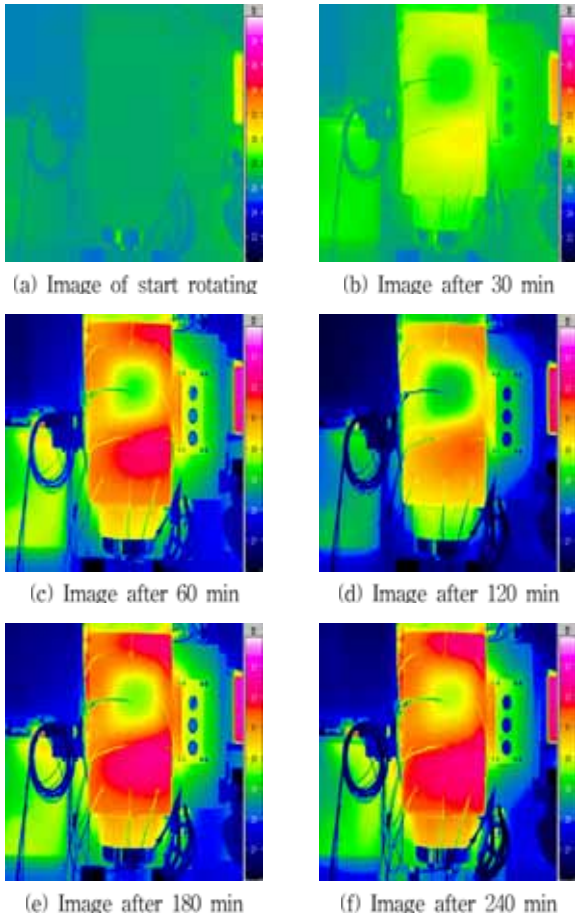
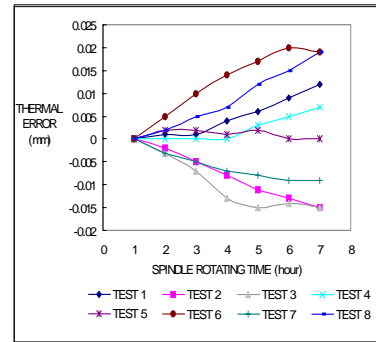


Fig. 3 Temperature variation of spindle with time

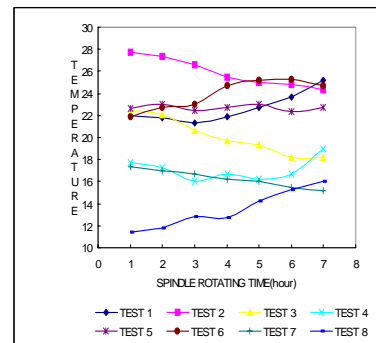
주축부의 중앙부 상단과 주축부 하단 부위는 다른 곳에 비해서 낮은 온도분포를 나타내고 있는데 이는 냉각유 효과 때문인 것으로 생각된다.

주축의 변형량과 대기온도를 측정 한 1차 실험의 경우 Fig. 4에 보이는 것처럼 주축의 변형량 추이와 상온의 온도 추이가 거의 같다는 것을 알 수 있다. 주위의 온도가 저온에서 고온으로 바뀌게 되면 공작기계의 변형량은 +방향으로 증가하는 경향을 보이며, 고온에서 저온으로 바뀌게 되면 변형량은 -방향으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 주위 온도의 고-저 차가 클수록 변형량도 비례해서 증가하는데 이는 주위의 온도가 변화함에 따라 공작기계 주축부 부품들이 열팽창, 또는 열수축을 일으키게 되고 이에 따라 변형량도 같이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

주축의 변형량과 대기 온도, 주축부의 온도를 측정 한 2차 실험의 경우 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 주축 변형량과 대기온도의 추이, 대기온도의 편차와의 관계는 1차 실험에서와 거의 같은 양상을

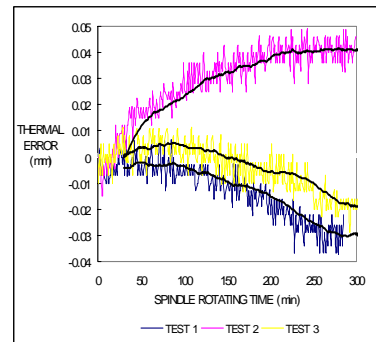


(a)

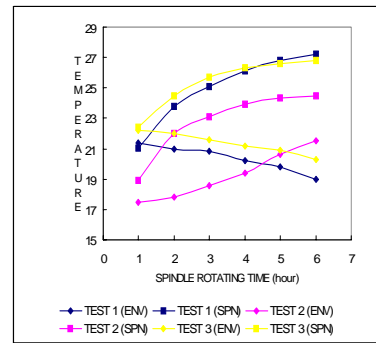


(b)

Fig. 4 1st experiment for (a) spindle distortion and (b) ambient temperature



(a)



(b)

Fig. 5 2nd experiment for (a) spindle distortion and (b) ambient temperature

보이며 공작기계 주축부의 온도 분포는 시간이 지남에 따라서 점점 상승하는 경향을 보인다.

#### 4.

공작기계 모터부에서의 발열과 외기의 온도 등에 의해 각 부위에 열이 전도되고 내부 부품들의 조립상태에 따라 예측불가능한 열팽창, 또는 열수축이 일어나는데 이것이 주축부 열변형의 직접적인 원인이 된다. 열변형은 여러 요인들에 의해서 일어나고, 또한 각 요인들이 서로 직접적인 연관이 없기 때문에 이들 사이의 관계를 파악하여 보정식을 세우기에는 상당한 어려움이 따르므로 오차 보정 방법으로 다변수 회귀법을 사용하였다. 다변수 회귀법이란 공작기계의 변형과 같이 변형요인이 여러 가지이고 각각의 요인이 비선형적인 관계를 가질 때에 사용하는 보정방법인데, 변형량과 변형요인들의 관계를 통합적으로 풀어내는 것이 아니라 하나씩 순차적으로 대치시키고 변형요인들을 변수로 분리한 후 각 변수들이 변형에 끼치는 영향을 상수로 설정함으로써 최종적으로 보정에 이용하는 방법이다.

보정식 제작 시 상온의 온도분포는 저온에서 고온으로 상승하는 경우와 고온에서 저온으로 하강하는 경우로 나누어서 온도추이와 변형량과의 관계에 대해 고려하였다. 또한 고온-저온 사이의 온도편차가 클수록 변형량도 비례해서 증가하고 공작기계 주축부의 온도는 주위온도에 따라서 상승폭이 다르기 때문에 이 세가지 요소에 대해 외기온도-변형량, 주축부온도-변형량의 형태로 나누어서 각각에 대한 보정식을 세운 후 최종적으로 이를 보완하였다. 다변수 회귀법을 이용해서 작성된 보정식은 다음과 같다.

$$y = \alpha(0.02\beta + 2\gamma + 0.05\gamma^2 + \delta) \quad (1)$$

시간대 별로 주위 온도가 상승 또는 하강을 하기 때문에 시간당 변위지수를  $\alpha$ 라 하면 가동시간을 기준으로 08~16시까지는 -(마이너스)로 설정하고 17~07시까지는 +(플러스)로 설정하였다. 만일 그 경계값에서 가동 시 그 전까지의 마지막 변형량을 원점으로 계산하면 부호가 바뀌게 되고 이 경우 대기의 온도추이는 변형량의 방향을 나타내는 주요 요인이 된다.  $\beta$ 는 공작기계 가동시

작 시의 외기의 온도이다. 대기의 온도가 높을수록 주축의 변형량도 더 커지게 된다. 대기의 온도가 변형에 차지하는 비율은 온도의 증감에 따라서 온도추이에 대해 0.02정도의 영향을 가진다.  $\gamma$ 는 공작기계의 가동시간으로 1시간마다 입력되는 형식을 취하며 온도추이에 대해 2 정도의 영향을 가진다. 또한 시간이 경과할수록 기계 자체에 축적된 열이 누적되어 변형에 끼치는 영향이 커지므로 누적분포인 0.05를 추가하였다.  $\delta$ 는 공작기계 가동시작 시의 주축부 온도로서 실제의 경우 냉각유의 온도로 파악할 수 있으며 주축부의 온도가 20℃ 이하일 경우 2로 설정하고 20℃ 이상일 경우는 1로 설정한다. 이것은 공작기계의 주축부 온도와 외기 온도가 어느 정도 시차를 보이며 주축부가 고온에서 가동을 시작할 경우 저온보다 열팽창률이 낮아지기 때문이다. 변형량의 크기가 상온의 온도편차와 밀접한 관계가 있기 때문에 초기 온도를 변수로 설정한 뒤, 가동시간 중의 온도편차를 예상하여 보정하는 방식을 취하였다.

위에서 개발된 식을 가동시간으로부터 1시간 단위로 실험 데이터에 적용하여 보정하였으며 종료시간까지 지속적으로 적용하였다. 1차 실험은 대기온도의 상승, 하강에 따른 공작기계 주축부의 열변형량을 측정하고 측정시간은 6시간인데 Fig. 4 (a)에서 볼 수 있듯이 보정 전의 열변형은 공작기계의 가동시간이 증가함에 따라서 계속 증가함을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 열변형의 증감은 대기온도의 변화 추이와 거의 흡사한 양상을 보이며 주목할 만한 사실은 열변형이 거의 일어나지 않은 것으로 측정된 5번 실험의 경우에 실제 대기온도도 항온을 유지한 상태라는 것이다. 공작기계의 운전 시에 항온을 유지할 경우 열변형을 큰 폭으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있지만 실제 공작기계가 가동되는 공장의 경우 이 요건을 충족시키기는 어렵다. 이들 데이터를 기초로 하여 위에서 작성한 보정식을 적용한 결과인 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 각 경우의 열변형량은 Fig. 4 (a)와 비교했을 때 30% 이상씩 감소하였다. 다만 보정식이 대기온도가 변화 한다는 가정하에 세워진 것이기 때문에 항온을 유지한 1차의 5번 실험의 경우 보정식을 적용하기 전보다 변형량 수치가 약간 증가되는 현상을 보였다.

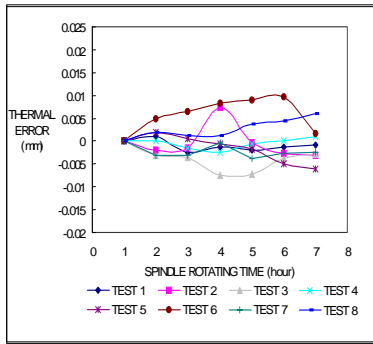


Fig. 6 Results of compensation for 1st experiment using developed equation

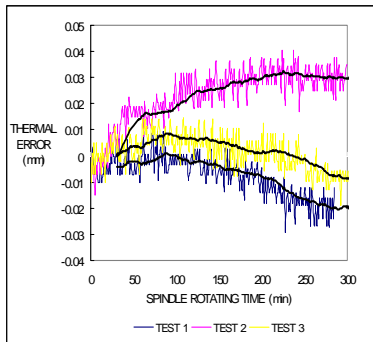


Fig. 7 Results of compensation for 2nd experiment using developed equation

다음에는 주축부의 열분포와 변형량, 대기온도를 동시에 측정된 2차 실험에 보정식을 적용하여 보았다. 대기온도는 모두 상승, 또는 하강하며 1차 실험의 경우와 다른 점은 가동시간을 5시간으로 조절하여 측정했다는 것이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 위의 경우와 마찬가지로 주축 변형량은 Fig. 5 (a)와 비교했을 때 각각 30% 이상씩 감소하였다. 따라서, 보정식에 포함된 4가지 변수를 모두 적용할 경우 큰 폭의 변형량 감소를 얻어낼 수 있고 경우에 따라서는 3가지 이하의 제한된 변수만을 적용해도 어느 정도의 보정이 이루어질 수 있다는 것을 알 수 있었다.

5.

수직형 공작기계를 대상으로 주축회전수를 5000rpm으로 회전시킨 경우, 기계 주축부 부분의 온도측정치 및 대기 온도 변화, 가동시간 등을 독립 변수로 하는 경험식을 유도하였고, 그 식에 의해 주축 원점의 변형량을 추정하고 보정하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공작기계 주축방향 중 가장 많은 변형을 보이는 축은 Z축이며, Z축의 변형 추이는 대기온도의 변화 추이와 거의 비슷한 양상을 보인다.
- (2) 시뮬레이션을 이용하여 주축부 내부의 온도 분포와 냉각유의 효율, 주축의 변형량 등을 예상할 수 있다.
- (3) 공작기계 주축부의 열분포를 파악함으로써 주요 열원의 위치와 열 전도 방향을 알 수 있으며, 데이터를 최적설계에 적용할 수 있다.
- (4) 다변수 회귀법에 의해 생성된 보정식으로 공작기계의 열변형 오차는 최소 30%이상 감소된다.

- (1) Chen, J. S., Yuan, J. X., Ni, J. and Wu, S. M., "Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Errors onn a Machining Center", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 472~479, 1993.
- (2) Weck, M., Mckeown, P., Bonse, R. and Herbst, U., "Reduction and Compensaton of Thermal Errors in Machine Tools", Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 2, pp. 589~598, 1995.
- (3) Toshimichi Moriwaki, Eiji Shamoto and Masahiro Kawano, "Estimation of Thermal Deformation of Machine Tool by Applying Neural Network", 日本機械學會論文集(C編), 61券 584号, pp. 427~432, 1995.
- (4) Blomquist, Donald S., "Quality in Automated Manufacturing", Control and Dynamic Systems, Vol. 45, pp. 163~196, 1992.
- (5) 안중용, 정성중, "GMDH 알고리즘에 의한 머시닝센터 원점의 열변형 예측", 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, No. 12, pp. 2126~2135, 1998.
- (6) 양종태, 정성중, "측정플레이트를 이용한 공작기계 오차보상", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 187~192, 1994.
- (7) 윤정환, 이상준, "TLC와 컬러화상처리를 이용한 자동차 실내 환기유동의 온도장 측정 연구," 한국자동차학회 논문집, Vol. 5, pp. 120~128.
- (8) 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, "화상처리 기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정기법 개발," 대한기계학회 논문집(B), 제 20권, 제 10호, pp. 3334~3343, 1996.