

공작기계 열변형 보정을 위한 발열실험 방법에 관한 연구

윤인준*, 김형식⁺, 고태조⁺⁺, 김희술⁺⁺
(논문접수일 2003. 7. 25, 심사완료일 2003. 10. 16)

A Study on the Thermal Experiment for the Compensation of Thermal Deformation in Machine Tools

In Jun Yoon*, Hyung Sik Kim⁺, Tae Jo Ko⁺⁺, Hee Sool Kim⁺⁺

Abstract

Thermal distortion is a critical issue in machine tools, especially in high speed machining. This is the reason why recent machine tools have thermal compensation function. To compensate thermal distortion, it is necessary to make a model that has some relationship between temperature and deformation. Various experimental methods have widely been used in thermal test: constant spindle speed, unit step speed increase, random spindle speed, etc. This paper focuses on which type of spindle operation condition is good for thermal experiment. Also, experimental data is modeled using multiple linear regression models and compared each other to select a method. Consequently, it turned out that the condition of 75% constant of maximum spindle speed is good enough to generate temperature and distortion data.

Key Words : Machine Tools(공작기계), Thermal Deformation(열변형), Compensation(보정), Experimental Method(실험방법)

1. 서론

제조 공정에 있어서 공작기계의 정밀도는 가공품의 정밀도를 결정하는 중요한 요소로 취급되고 있으며, 이것은 품질관리 측면에서 가장 기본이기 때문에 공작기계의 오차개선을 위해 많은 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁾. 이러한 오차들은

기계 구조나 부품들의 기하학적 오차, 기계요소들의 상대적 운동에 기인하는 동역학적 오차, 피삭재의 정적 혹은 동적인 변형, 그리고 열변형으로 기인하는 오차 등 여러 가지 다양한 원인을 가진다⁽²⁾. 특히 열변형 오차는 전체 공작기계 정밀도에 지대한 영향을 미치며, 전체오차의 40~70% 정도라는 결과가 나와 있다⁽³⁾. 그 중에서도 주축의 발열에

* 주저자, 영남대학교 기계공학과 (ijyoon@osg.co.kr)
주소: 712-160 경북 경산시 대동 214-1

+ 평화 오일씰 (주)

++ 영남대 기계공학부

의한 열변형이 볼 스크류나 슬라이더의 마찰, 절삭열 등 다른 요인에 의한 열변형보다 훨씬 큰 영향을 미치며⁽⁴⁾, 보정하는 방법에 따라 다르겠지만 전체 열변형 오차의 70% 이상을 주축의 발열로부터 보정하였다는 결과가 발표되었다⁽⁵⁻⁷⁾. 공작기계의 열변형 오차를 줄이기 위해서는 일반적으로 인위적으로 발열을 일으켜서 열변형을 야기시키고, 운전 조건과 특정부위의 온도를 열변형과 매핑하여 실제 운전할 때의 열변형 오차로 예측하여 보정을 하는 기법을 사용한다. 따라서 대부분의 논문은 열변형을 신경회로망이나 퍼지 논리 또는 다중선형회귀법을 이용하여 매핑하는 연구^(8-13,21), 그리고 다수 영역의 온도데이터 중에서 실제 열변형에 중요하게 영향을 미치는 소수의 센서 위치를 파악해내는 연구 등으로 압축시킬 수가 있다^(2,14-15). 이 중에서 특히 상기에서 기술하였듯이 주축의 발열이 전체 열변형의 대부분을 차지하기 때문에 주축의 열변형에 관한 관심은 더욱 크다.

주축에 관한 연구는 1950년대에 체코슬로바키아에서 J. Tlustý⁽¹⁶⁾에 의해 제안되었는데, 그는 정전 용량형 센서를 이용하여 비접촉식으로 주축의 반경방향 오차운동을 극좌표로 표현하였다. 그 이후 1960년대 및 70년대에 미국의 Lawrence Livermore 국립연구소, 1980년 및 90년대에는 영국의 AMTRI (Advanced Manufacturing Technology Research Institute) 등에서 많은 연구가 진행되었다.

주축의 온도상승에 의한 열변형을 보정하기 위해서는 발열 실험을 통해 열변형 데이터를 수집해야 하는데, 이를 위한 실험방법은 BS3800: Part 3:1990과 ASME B5.54-1992에서 다루어지고 있다. 또한 ISO 230-3에서도 공작기계의 발열실험 방법이 국제 규격화되었다⁽¹⁷⁾. 이상과 같은 발열 실험에서 가장 문제가 되는 것은 주축의 발열실험 방법이며, ISO 230-3에서는 일정 주축속도와 가변(랜덤)주축 속도 두 가지 모두에 대해 기록하고 있다. 또한 일반적으로 연구자들은 열변형 보정을 위한 데이터를 확보하기 위한 실험에서 실제 상황과 비슷한 운전조건으로 열변형 데이터를 확보하기 위하여 랜덤한 주축 회전속도를 선택하고 있다. 이러한 운전조건 선정 그 자체는 문제가 될 것이 없지만 실제 운전조건과 동일하게 한다는 가정은 열변형 데이터를 확보하는데 있어서 타당하지는 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주축의 온도상승에 대한 거동파악을 목적으로 하지 않고, 열변형 보정을 위한 데이터를 확보하려는 목적에서 실험을 할 때 어떠한 운전조건이 가장 타당한 것인지를 실험을 통하여 결정해보고자 한다.

2. 열변형 실험 방법

실험은 3축 수직머시닝센터(ACE V45: 대우)에서 수행되었는데, Fig. 1과 같이 주축의 5자유도 운동인 오차를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 5개의 비접촉 캡센서(와전류형 : 10 μ m/volt)와 테스트 바를 이용하였다. 이 센서는 x, y,

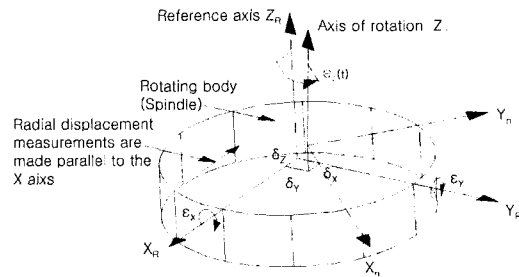
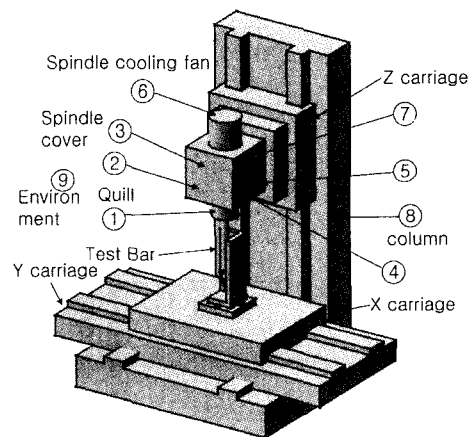
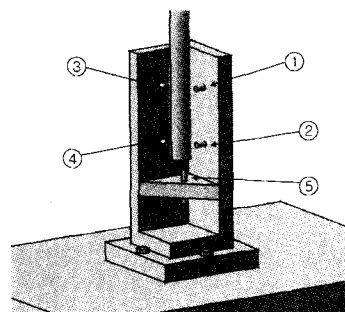


Fig. 1 Motion and errors about an axis of rotation



(a) Position of thermocouples



(b) Position of five sensors

Fig. 2 Sensory system and position of thermocouples

z 방향에 대한 각각의 선형 오차와 x, y 방향으로의 틸팅 오차를 비접촉식으로 측정하도록 고정치구에 장착되어 있다. 테스트 바는 열팽창을 무시할 수 있는 인바(Invar)재질로서 길이 300mm, 직경 30mm이고, 주축에 장착하였을 때 끝단에서 각각 50 및 250mm의 위치에 센서가 근접하도록 설치하였다. 공작기계 내에서 테스트 바의 측정위치는 공작기계 이송축의 중앙이 되도록 하였다. 한편 공작기계의 온도를 측정하기 위해 J형 열전대(측정범위 -210~760℃)를 비교적 온도상승이 높은 부위에 부착하였는데, Fig. 2에서처럼 모터의 냉각팬을 포함하여 주축 주변 7곳과 킬럼 그리고 대기의 온도 변화를 측정하기 위하여 추가로 각각 2개의 센서를 부착하여 총 9개의 센서를 사용하였다.

본 실험에서는 주축 자체의 열 영향만을 평가의 대상으로 하기 때문에 킬럼 1곳을 제외하고는 다른 구조물이나 이송계에 대해서는 별도의 센서를 부착하지 않았다. 변위와 온도 데이터는 각각 A/D 컨버터(Advantech)와 Tempscan(I/O Tech)을 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 각각의 데이터는 NC의 M코드 기능을 이용하여 외부 트리거로 공작기계의 주축이 매 5분간 회전하다가 측정하기 위하여 10초간 정지하는 사이에 주축 Orientation 기능을 이용하여 항상 일정한 위치에 정지할 때 측정하였다.

3. 실험 계획법

주축의 회전에 의한 발열과 열변형과의 관계에 관한 실험을 위해서 일정한 주축 회전속도, 단계별로 회전수를 증가시키는 회전속도, 그리고 랜덤한 경우인 3가지 실험방법으로 수행하였다. ISO 230-3에서는 현재 일정 주축회전속도와 랜덤한 주축속도의 두 가지의 경우를 제안하고 있으며, 최소 운전시간은 4시간 이상, 그리고 1시간의 냉각 시간을 갖도록 하고 있다⁽¹⁸⁾. 그러나 본 연구에서는 금속 재료가 상온에서 발열을 할 때 8시간 정도 경과하여야 열팽형 상태에 도달한다는 경험아래, 최소 8시간을 운전한 후 8시간 이상을 냉각시키는 실험을 수행하였다.

발열실험에서 일정한 주축 회전속도의 경우 최대회전속도의 75%에서 운전 되도록 하고 있으며, 본 실험에서 사용하는 공작기계의 주축 회전속도가 4,500rpm이기 때문에 이 경우 3,000rpm으로 연속 운전이 되도록 한다. 두 번째는 회전수가 동일한 비율로 증가하는 것으로, 주축 최고 회전수의 25%, 50%, 75%, 100%로 회전한 다음 다시 반복되는 형태이다. 그리고 마지막은 회전수가 랜덤한 경우로서 주축 최고 회전수의 25%에서 25%별로 100%까지 속도를

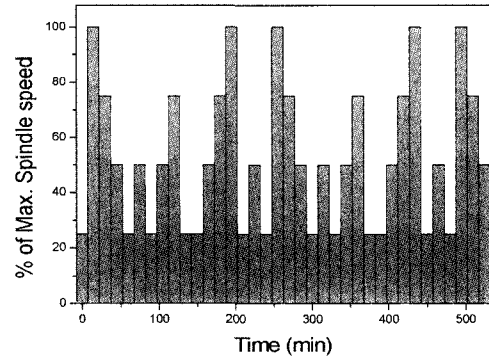


Fig. 3 Variable spindle speeds for thermal test

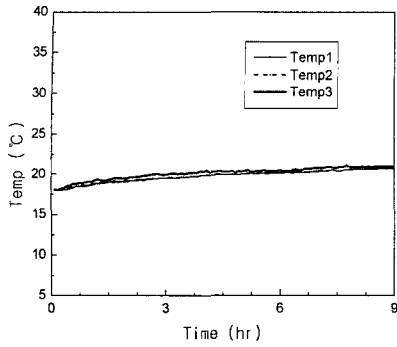
임의로 변경하는 경우이고, 이 경우의 속도변화 그래프는 Fig. 3과 같다.

4. 결과 및 고찰

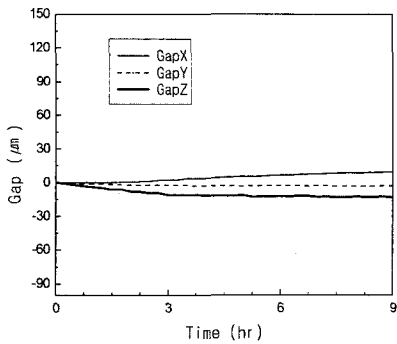
4.1 발열실험 결과

가장 먼저 공작기계의 설치 환경에 대한 실험을 수행하였다. 이는 ISO에서도 규정되어 있으며, 가능하면 환경의 영향을 받지 않는 곳에 공작기계를 설치하는 것을 권장하고 있다. Fig. 4와 같이 온도의 변화는 오전 9시부터 5시까지 무부하 상태에서 측정하게 되는데, 대기의 온도는 최소 온도 17℃에서 시작하여 시간이 경과할수록 온도가 상승한다. 이에 따라서 기계의 온도도 상승하며, 하루 중 21℃까지 상승하여 최대 15μm 정도의 오차를 유발하였다. 한편, 항온조건 하에서도 무부하 운전에 대한 열 변형을 측정하였는데, 공장의 경우 항온을 하더라도 일과 중 최대 2℃ 이상의 온도 변화가 발생하며, 이에 따라서 공작기계도 최대 6 μm의 변형이 일어남을 확인하였다.

한편 Fig. 5는 일정한 회전수로 운전할 때, 즉 주축 최고 회전수의 75%인 3,000rpm에서의 발열과 주축의 열변형 오차를 나타낸 것이다. 주축보다는 기어박스 및 회전플리부위의 온도가 상대적으로 높게 나타나며, 온도는 약 15℃에서 시작하여 31℃까지 상승한다. 기계를 정지한 후 20시간이 경과되면 15℃ 정도로 발열실험 전의 온도로 하강한다. 여기서 회전 시간에 따른 온도의 변화가 잘 나타나는데, 가동시간에 따라 온도는 증가하지만 어느 일정 시간 이상에서는 온도의 증가가 완만해지면서 수렴하게 된다. 회전수가 빨라지면 동일한 시간에 온도의 변화가 큼을 실험을 통하여 알 수 있었다.



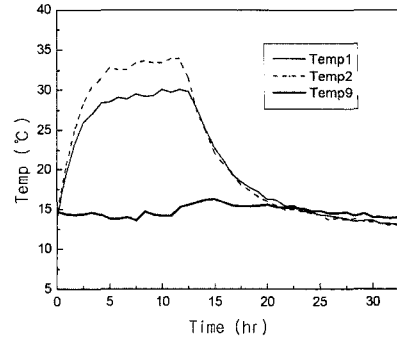
(a) Temperature change



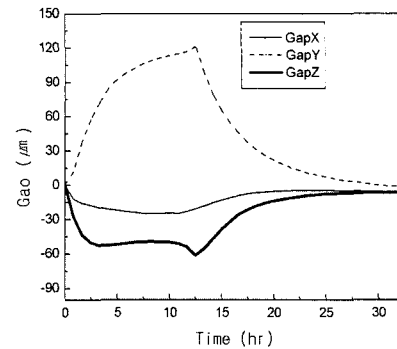
(b) Spindle distortion

Fig. 4 Trends of environment temperature and spindle distortion

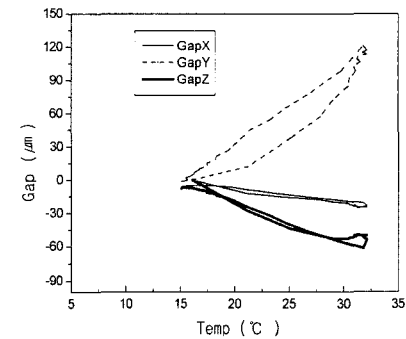
주축의 회전, 즉 발열에 따라서 주축도 열변형하게 된다. 이 경우 기계의 좌우방향(X축)으로는 어느 정도 열 대칭이 확보되어 최대 약 $24\mu\text{m}$ 정도만 변형을 하지만, 전후 방향(y 방향)으로는 최대 $126\mu\text{m}$ 까지 변형이 되면서 서서히 열평형에 도달함을 알 수 있다. 한편 주축의 길이방향(z방향)으로는 $61\mu\text{m}$ 정도의 열팽창이 발생한다. 여기서 특이한 것은 변형이 온도의 상승에 따라 초기에 미세하게 방향이 반대로 변형되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 초기 열팽창 시 내부 부품들의 조립상태에 따라서 상호간의 간섭 등에 의해 일어나는 현상으로 이해되며, 이러한 비선형성은 모델의 구축에 있어서 많은 어려움을 주게 된다^(19,20). Fig. 5(c)는 온도센서 1번의 온도변화와 이에 따른 열변형의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 이 관계에서는 각축의 변형이 온도의 변화와 상관성을 갖고 있으나 온도상승과 냉각시의 궤적을 달리 하는 유사 히스테리시스 효과(pseudo-hysteresis effect)를 나타내고 있다⁽¹⁹⁾. 이 이유는 금속의 온도가 상승할 때의 팽창속도와 냉각할 때의 수축 속도가 차이가 나기 때문에 발



(a) Temperature change



(b) Spindle distortion



(c) Relationship between temperature and spindle distortion

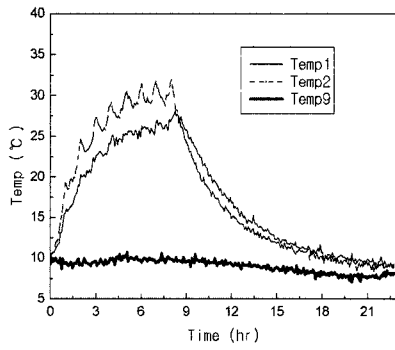
Fig. 5 Temperature and spindle distortion under constant rotational speed (3,000rpm)

생하는 현상이다. 이것은 주축의 열변형이 공작기계의 운전 조건에 따른 변수가 아니고, 주축의 발열에 의한 온도변화에 따른 변수임을 보여주는 것이다.

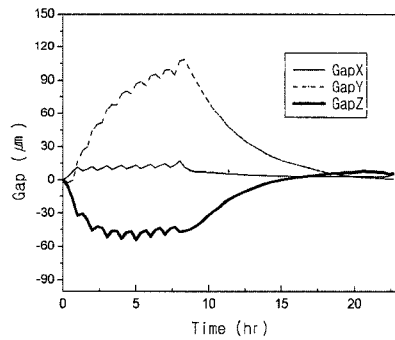
Fig. 6은 주축 회전수를 주축최고 회전수의 25%, 50%,

75%, 100%로 각각 15분간 회전하여 8시간 가동될 때의 열변형 결과이다. 회전수의 변화에 따라서 주축의 열변형도 빠른 시정수를 가지고 변화함을 나타내고 있다. 여기서도 마찬가지로 주축 회전수의 변화와 온도 및 변형은 Fig. 5의

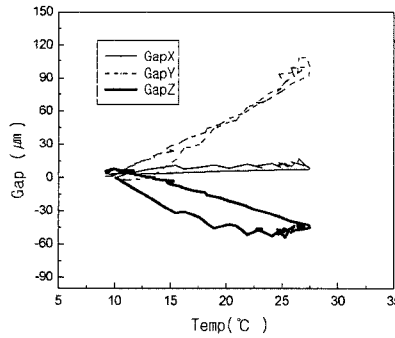
경우와 거의 유사한 경향으로 열변형이 일어남을 보이며 상호관계를 갖고 있음을 보인다. Fig. 7은 주축 회전수가 랜덤하게 변하는 경우로서, 주축회전수가 앞서 보았던 실험 조건의 동일 가동시간에 비해 평균적으로 낮기 때문에 온도



(a) Temperature change

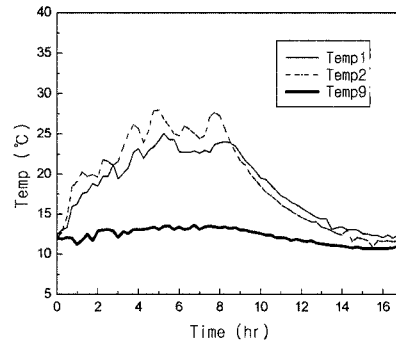


(b) Spindle distortion

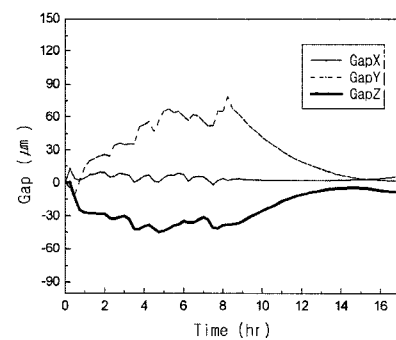


(c) Relationship between temperature and spindle distortion

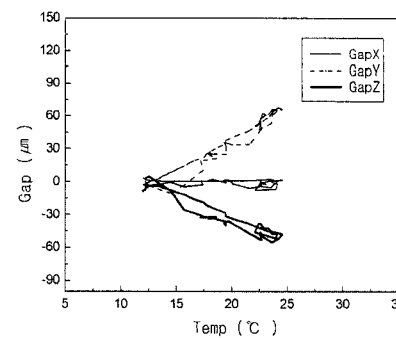
Fig. 6 Temperature and spindle distortion under step increase rotational speed



(a) Temperature change



(b) Spindle distortion



(c) Relationship between temperature and spindle distortion

Fig. 7 Temperature and spindle distortion under random rotational speed

및 갭의 변화의 크기가 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있다. 그러나 열변형은 온도의 상승에 따라서 잘 추종이 되고 있으며, 또한 온도와 발열의 상관성이 낮은 발열이지만 잘 나타내져 보이고 있다.

이상과 같이 열변형 데이터 수집을 위한 세 가지 실험의 경우 모두 주축의 회전수가 증가하면 온도도 빠른 시정수를 가지고 증가하며, 온도의 증가와 동시에 주축의 변형도 동시에 증가함을 알 수 있다. 또한, 온도의 상승 및 냉각에 따라서 열변형량은 유사 히스테리시스 현상을 나타내면서 이력을 갖게 되는 것을 볼 수 있으며, 이 이력은 주축의 운전 조건과 관계없이 일정한 패턴을 유지하게 된다. 즉, 주축의 열변형은 주축주변의 온도분포와 관계를 가지고 있음을 보여준다. 주축의 회전수와는 관계없이 온도가 증가하면 열변형량도 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 발열 데이터를 확보하기 위하여 일정한 회전수로만 운전하는 조건으로 열변형 데이터를 확보하여도 됨을 보이지만, 반대로 히스테리시스 효과로 인하여 온도상승 및 냉각에 따라서 서로 다른 열변형 경로를 가지고 있어서 오차 보정을 위한 모델 생성시에 상당한 어려움을 주게 된다⁽¹⁹⁾.

4.2 열변형 모델링

이상의 세가지 실험을 통하여 살펴보면, 어떤 방법으로 실험을 하든지 온도의 상승과 하강에 따라 동일하게 주축이 변형을 함을 알 수가 있었다. 이를 보다 명확하게 하기 위해 다변수 선형 회귀법을 이용하여 각각의 열변형 성분에 대해 열변위를 모델링 해보았다. 대상으로 하는 축방향은 변형량이 상대적으로 큰 Y축을 대상으로 하였다. 또한, 공작기계를 구성하는 각 부품들의 온도 상승은 제한된 몇 개의 열원으로 부터 발생된 열이 전달되어 나타난 결과로서 열변형은 이 온도들과 강한 의존성을 나타낸다. 따라서 다수개의 센서 중에서 모델의 효율성을 위해 열변형과 상관계수가 가장 큰 온도 변수를 상관계수를 이용하여 구하였다.

온도와 갭의 변화의 측정값 (x, y) 라 하고 n 개의 측정값 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \dots (x_n, y_n)$ 이 주어진다

면 상관계수 r 은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

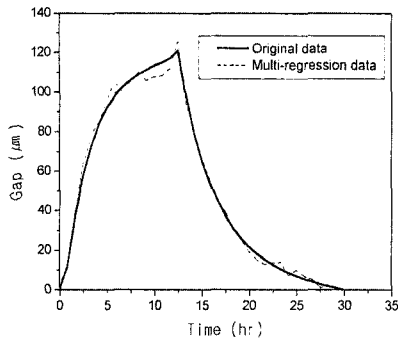
여기서 \bar{x}, \bar{y} 는 x, y 의 평균, σ_x, σ_y 는 x, y 의 표준 편차이다. 위와 같은 방법으로 3,000rpm에서 온도 변수 9개와 각 축의 갭 변화 3개의 상관계수를 피어슨(Person) 공식으로 구해본 결과를 표로 나타내면 Table 1과 같다. 여기서 각각의 절대값이 상관계수를 나타내며 절대값이 클수록 상관관계가 큰 것이다. 즉, X축의 갭의 변화 Gap X는 t_2, t_7 이 가장 큰 상관을 가진다. 또한 Y축의 갭의 변화 Gap Y는 t_1, t_6 , 그리고 Z 축의 갭의 변화 Gap Z는 t_1, t_2 가 가장 큰 상관관계를 보여준다. 그러나 그 외의 다른 온도 변수들은 각 축의 열변형에 그다지 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 동일한 방법으로 Random 운전조건에서의 상관계수를 구해본 결과 X축의 갭의 변화 Gap X는 t_1, t_4 가 가장 큰 상관을 가진다. 또한 Y축의 변형인 Gap Y는 t_1, t_2 , 그리고 Z 축의 변형인 Gap Z는 t_2, t_7 이 가장 큰 상관관계를 나타내었다. 이는 주축의 회전수와 상관없이 갭의 변화가 거의 일정한 온도 변수들과 관련이 있다는 것을 의미한다. 이를 이용하여 3,000rpm 조건에서 상관 계수가 큰 4개의 온도변수(t_1, t_2, t_6, t_7)와 이에 대해 가장 민감한 방향인 Gap Y의 변화를 다중선형 회귀모델에 적용해보면 식 (2)와 같으며 이때의 모델의 정확도를 나타내는 결정계수 R^2 의 값이 0.994이다. 이때의 모델링 결과는 Fig. 8(a)이다.

$$y_i = -132.376 + 6.425t_1 - 10.494t_2 + 18.67t_6 - 5.919t_7 \quad (2)$$

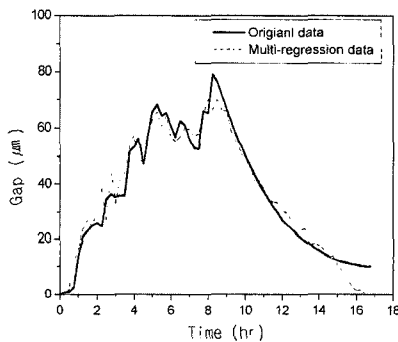
그리고 적용하는 온도변수의 수와 모델의 정확성을 알아 보기 위해 측정된 모든 온도변수들을 포함하는 다중선형 회귀모델은 식 (3)과 같으며, 이때의 결정계수 R^2 는 0.975이다.

Table 1 Correlation coefficient between temperature and thermal distortion

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
GAP X	-0.9736	-0.9851	-0.9834	-0.7733	-0.9828	-0.9826	-0.9847	-0.7837	0.2230
GAP Y	0.9804	0.9673	0.9435	0.8764	0.9505	0.9729	0.9633	0.9167	0.0199
GAP Z	-0.9833	-0.9654	-0.9536	-0.8665	-0.9507	-0.9642	-0.9582	-0.8468	-0.0056



(a) Multi-linear regression model for Gap3 at Y axis (3,000 RPM)



(b) Multi-linear regression model for Gap3 at Y axis (Random RPM)

Fig. 8 Comparison of multi-regression model between different RPM conditions

$$y_i = -168.173 + 0.993t_1 + 2.404t_2 - 6.816t_3 - 3.858t_4 - 5.509t_5 + 12.422t_6 + 5.753t_7 + 5.003t_8 + 0.69t_9 \quad (3)$$

따라서 상관계수가 큰 온도변수를 다변수 선형 회귀 열변형 모델에 적용하면 모든 온도변수 9개를 포함하는 모델보다 훨씬 간편할 뿐만 아니라 계산의 속도나 정확도 면에서도 우수하다는 것을 알 수 있다. 위와 같이 구해진 상관계수가 큰 온도변수 4가지를 주축의 회전수가 다른 랜덤한 회전 조건에서 Gap Y에 대해 다중선형 회귀 모델을 구성해보면 식 (4)와 같이 된다.

$$y_i = 19.003 + 4.642t_1 + 2.042t_2 - 7.953t_6 - 1.3t_7 \quad (4)$$

이 모델에 대한 결과는 Fig. 8(b)이고, 이때의 모델의 정확성

을 나타내는 결정계수 R^2 는 0.947이다. 결국 온도와 갭의 변화가 수도 히스테리시스를 무시한다면 거의 선형적인 변화로 간주할 수 있으며, 이를 다중선형 회귀모델로 구성하면 주축의 회전수와는 관계없이 일정 개수의 온도변수와 갭의 변화로 가능하다. 이것은 열변형 모델을 만들기 위하여 실험을 할 때 동일한 운전조건에서 만든 열변형 데이터를 사용하여도 됨을 의미한다. 동시에 앞의 모델링 결과를 살펴보면 단순 고정 회전수 실험방법이 회귀분석 모델을 이용하여 모델링할 때 모델링의 정확도면에서 우수하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 공작기계의 열변형 보정을 위하여 온도와 열변위의 상관관계를 실험적으로 확보하기 위한 실험방법에 대해 연구를 하였다. 실험방법은 주축이 일정한 회전속도로 구동되는 경우, 단계적으로 회전수를 상승하였다가 이를 반복하는 경우, 그리고 랜덤한 조건인 경우로 나누었다. 실험결과 열변위는 주축의 회전수의 증가에 따른 온도상승에 민감하게 반응하고 있으며, 주축온도 상승시와 냉각시 그 경로를 달리하는 히스테리시스현상을 보였다. 또한 열변형은 단순하게 온도의 상승과 관계가 있기 때문에 열변형 실험시에는 일정 회전수로 운전하는 경우가 실험의 간편성 및 확보 데이터의 정확성 면에서 유리함을 확인하였다. 이를 검증하기 위하여 다수개의 센서 중에서 유효한 소수의 온도데이터를 결정하고, 이를 이용하여 다변수회귀분석법을 통하여 모델링해본 결과, 일정 회전수의 실험이 보다 유리함을 보였다.

참고 문헌

- (1) Donaldson, R., and Patterson, S., 1983, "Design and Construction of a Large Vertical Axis Diamond Turning Machine," *SPIE*, 27th Ann. Tech. Symp..
- (2) Lee, D. S., Choi, J. Y., and Choi, D. -H., 2003, "ICA Based Thermal Source Extraction and Thermal Distortion Compensation Method for a Machine Tool," *International Journal of Machine Tools & manufacture*, Vol. 43, pp. 589~597.
- (3) Bryan, J., 1990, "International Status of the Thermal Error Research," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 2, pp. 645~656.

- (4) Bryan, J., Carter, D., Closer, W., and Hamilton, J., 1982, "Order of Magnitude Improvement in Thermal Stability Using a Liquid Shower on a Measuring Machine", *Precising Machining Work shop*, S.M.E st Paul, UCRL 87591.
- (5) Weck, M., and Zangs, L., 1975, "Computing the Thermal Behaviour of Machine Tools Using the Finite Element Method-Possibilities and Limitations," *16th MATADOR Conf.*, Vol. 16, pp. 185~194.
- (6) Srinivasan N., and Zigert, J. C., 1996, "Automated Measurement and Compensation(1) of Thermally Induced Error Maps in Machine Tools," *Precision Engng.*, Vol. 19, pp. 112~132.
- (7) Yuan, J., and Ni, J., 1998, "The Real-Time Error Compensation Technique for CNC Machining System," *MECHATRONICS*, Vol. 8, pp. 359~380.
- (8) Hattori, M., Noguchi, H., Ito, S., and Inoue, H., 1996, "Estimation of Thermal Deformation in Machine Tools Using Neural Network Technique," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, pp. 765~772.
- (9) Mize, C. D., and Ziegert, J. C., 2000, "Neural Network Thermal Error Compensation of Machining Center," *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 338~346.
- (10) Lee, J. H., Lee, J. H., and Yang, S. H., 2000, "Thermal Error Modeling of a Horizontal Machining Center Using the Fuzzy Logic Strategy," *KSME*, Vol. 24, No. 10, pp. 2589~2596.
- (11) Chen, J. S., and Ni, J., 1996, "Thermal Error Modeling for Real-Time Error Compensation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 12, pp. 266~275.
- (12) Yang, Q. D., Bergh, C. V. d., Vanherck, P., and Kruth, J., 2000, "Linear Regression and Neural Net Models Applied to Thermal Error Compensation in Machine Tools," *European Journal Mech. & Env. Eng. M.*, Vol. 44, No. 3, pp. 146~152.
- (13) Ahn, J., and Chung, S., 1998, "Estimation of Thermal Deformation for the Machine Origin of Machining Centers using GMDH Algorithm," *Transactions of the KSME*, Vol. 22, No. 12, pp. 2126~2135.
- (14) Ma, Y., Yuan, J., and Ni, J., 1999, "A Strategy for the Sensor Placement Optimization for Machine Thermal Error Compensation," *ASME Manufacturing Science and Engineering*, MED-Vol. 10, pp. 629~637.
- (15) Lo, C., Yuan, J., and Ni, J., 1999, "Optimal Temperature Variable Selection by Grouping Approach for Thermal Error Modeling and Compensation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1383~1396.
- (16) Tlustý, J., 1959, "System and Methods of Testing Machine Tools," *Microtechnics*, Vol. 13.
- (17) Statham, A., Martin, A., and Blackshaw, D. M. S., 1997, "Assessing the Thermal Distortion Caused by Spindle Rotation of a Machining Center Using the Draft Standard ISO/DIS 230-3," *Laser Metrology and Machine Performance III*, pp. 101~111.
- (18) ISO 230-3, 2001, *Test code for machine tools-Parts: Determination of thermal effects*, 1st edition, March 01.
- (19) Kim, T. W., Ha, J. Y., and Ko, T. J., 2002, "Research into head-body thermal bending for high-accuracy thermal error compensation," *Journal of KSPE*, Vol. 19, No. 1, pp. 56~64.
- (20) Yang, H., and Ni, J., 2003, "Dynamic Modeling for Machine Tool Thermal Error Compensation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, pp. 245~254.
- (21) Lee, J., Choi, D., Park, H., and Kwak, S., 2001, "Characteristics Analysis and Compensation of Thermal Deformation for Machine Tools with respect to Operating Conditions," Vol. 10, No.4 pp. 70~75.