

공작기계 주축 열변형 보정을 위한 실험방법에 관한 연구

고태조*(영남대 기계공학과), 김희슬(영남대 기계공학과), 김형식(영남대 대학원 기계공학과),
김선호 (KIMM)

Research on the Experiment Methods for the Compensation of Thermal Distortion of Machine Tool Spindle

T. J. Ko(Mecha. Eng. Dept. YU), H. S. Kim(Mechanical Eng. Dept., YU), H. S. Kim(Mechanical Eng. Dept., YU), S. H. Kim(KIMM)

ABSTRACT

Thermal drift of the machine tool spindle due to temperature increase dominates the major source of the machine tool error. To compensate the thermal errors, software based error correction methods could be implemented. In this case, we need model to map the relationship between temperature and thermal distortion. Traditionally, two or three different methods have been tried: step increase of spindle speed, constant, random. The latter two methods are described in the document of ISO/DIS230-3. In this research, three different methods were verified through the experiments from the viewpoint of compensation of thermal distortion. Constant spindle speed turned out good enough for monitoring the behavior of the thermal drift and modeling the relationship between temperature and thermal distortion.

Key Words : Thermal distortion (열변형), Machine tool spindle (공작기계주축), Compensation (보상), Experiment (실험)

1. 서론

공작기계의 CNC 및 고정도화가 가속되면서 공작기계의 정밀도에 많은 영향을 미치는 열변형에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 공작기계에 있어서 정밀도에 영향을 미치는 인자로서는 준정적인 오차와 동적인 오차로써 구분이 가능하지만[1], 실제로 공작기계의 운전에 따라서 정도에 영향을 미치는 열변형에 의한 오차는 전체 공작기계의 가공 오차에 70% 정도까지를 지배한다고 알려져 있다[2]. 이 중에서 특히 주축의 발열에 의한 열변형 오차가 이송계 구동에 의한 것이나 또는 절삭열 등 다른 요인에 의한 발열오차보다도 영향이 매우 크다[3].

주축에 관한 연구는 1950 년도에 체코슬로바키아에서 J. Tlustý 에 의해 제안이 되었는데[4], 그는 정전용량형센서를 이용하여 비접촉으로 주축의 반경오차운동을 극좌표형태로 구현해내었다. 그 이후 1960 년 및 70 년대에 미국의 Lawrence Livermore National Laboratories, 1980 년 및 90 년대에 영국의 AMTRI(Advanced Manufacturing Technology Research Institute) 등에서 많은 연구가 진행되었다.

이상적인 주축의 경우 회전운동을 제공하는 1 자유도 운동만이 있고, 나머지 5 자유도 운동은 오차운동에 관여한다. 이러한 오차운동은 보정으로 줄일 수가 있고, 보정하는 방법에 따라서 다르겠지만 열변형 오차의 70% 이상을 보정하였다는 결과가 발표되었다[5][6][7]. 주축의 열변형에 의한 보정을 위해서는 발열실험을 통하여 열변형 데이터를 수집하여야 하고, 이를 위한 실험법이 이미 BS3800:Part 3:1990 과 ASME B5.54-1992 에서 다루어지고 있다. 또한 ISO/DIS 230-3 에서는 draft standard 상태로 발열실험을 국제규격화로 추진을 하고 있다 [8].

이상과 같은 실험에서 가장 문제가 되는 것은 주축의 발열실험 방법이며, ISO/DIS 230-3 에서도 이 부분에 대해서는 일정 주축속도와 가변(랜덤)주축속도의 두가지에 대해 모두 기록하고 있다. 그중에서, 일반적으로 열변형 보정을 위한 데이터를 확보하기 위한 실험에서 많은 사람들은 현장의 문제와 비슷한 상황으로 조건을 설정한다면 랜덤한 주축 회전속도를 부여한 실험을 선호한다. 따라서 본 연구에서는 주축의 열변형에 의한 오차를 모델링하여

보정할 목적으로 주축발열실험을 실시할 때 어떠한 실험이 타당한지를 실험적인 방법으로 규명을 하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험은 수직형 머시닝센터(AV45, 대우)에서 시행되었다. Fig. 1 과 같이 주축의 5 자유도 운동인 오차를 측정하기 위해서는 Fig. 2 와 같이 5 개의 비접촉식 센서와 테스트 바가 필요하다. 이 센서는 x, y, z 방향으로의 선형 오차와 x, y 방향으로의 틸팅오차를 비접촉식으로 측정하도록 고정 치구에 장착되어 있다. 비접촉식 센서로서는 해상도 10 $\mu\text{m/Volt}$ 의 와전류형 센서를 사용하며, 테스트 바는 길이 300 mm, 직경 30 mm 로서, 각각 50 및 250 mm 의 위치에 센서가 부착되도록 구성하였다. 테스트 바의 측정위치는 공작기계 이송축의 중앙이 되도록 하였다.

한편 공작기계의 온도를 측정하기 위해서 J 형 열전대(측정범위 $-210\sim 760\text{ }^{\circ}\text{C}$)를 주축 주변 7 곳에 부착을 하였다. 또한 대기의 온도측정과 껍센서 부착용 치구의 온도변화를 측정하기 위하여 추가로 2 개의 센서를 부착하여 총 9 개의 센서를 사용하였다. 본 실험에서는 주축 자체의 열영향만을 평가의 대상으로 하기 때문에 주축 이외의 다른 구조물이나 이송계에 대해서는 별도의 센서를 부착하지 않았다.

변위와 온도 데이터는 각각 A/D converter (Advantech)와 Temp scanner(I/O Tech)를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 각각의 데이터는 외부 트리거 기능을 이용하여 공작기계의 주축이 매 5 분간 회전하다가 측정을 위하여 10 초간 정지하는 사이에 주축 Orientation 기능을 이용하여 항상 일정한 위치에 위치시키고, M 기능을 이용하여 트리거신호를 만들어서 측정을 하였다. 실험은 항온상태와 항운을 하지 않는 두가지 경우에 대해 각각 실험을 하였다.

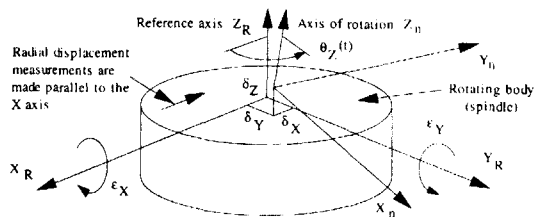


Fig. 1 Motion and errors about an axis of rotation

3. 실험계획법

주축의 회전에 의한 발열실험을 위해서 일정한 주축 회전속도, 단계별로 회전수를 증가시키는 회전속도, 그리고 랜덤한 경우인 3 가지 실험을 수행하였다. ISO/DIS 230-3 에서는 현재 일정주축속도와

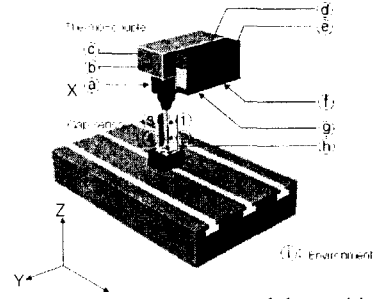


Fig. 2 Five sensor test system and the positions of thermocouple

랜덤한 주축속도의 두가지 경우를 제안하고 있으며, 최소 운전시간은 4 시간 이상, 그리고 1 시간의 냉각시간을 갖도록 하고있다. 그러나 본 연구에서는 금속재료가 발열시 8 시간 정도 경과하여야 열평형상태에 도달한다는 경험아래 최소 8 시간을 운전한 후 1 시간을 냉각시키는 실험을 수행하였다.

일정한 주축속도의 경우 공작기계 최대회전속도의 75%에서 운전되도록 하고 있으며, 이 경우 3,000rpm 으로 연속운전이 되도록 한다. 두번째로 단계별 속도를 증가시키는 경우는 1,000rpm 부터 매 15 분이 지난 후 각각 2,000, 3,000, 4,000rpm 으로 회전수를 증가시킨 후 다시 1,000 rpm 부터 실험을 하였다. 세번째로 랜덤한 경우는 주축 최고 회전수의 25%에서 25%별로 100%까지 속도를 변경하는 경우이고, 이 경우의 속도변화 그래프는 Fig. 3 과 같다.

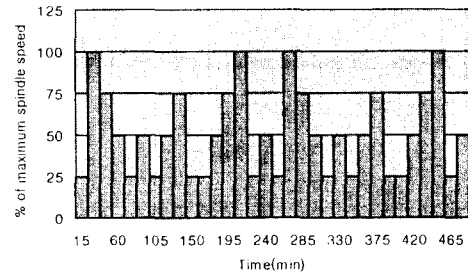


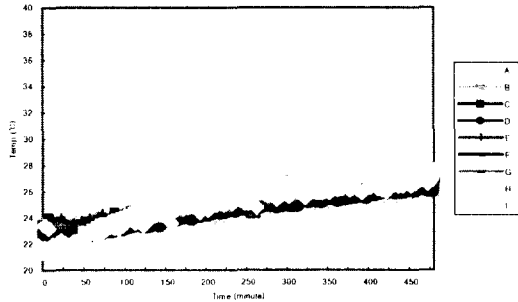
Fig. 3 Variable spindle speed spectrum for thermal distortion tests

4. 결과 및 고찰

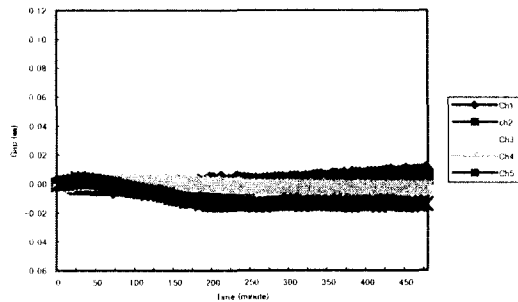
4.1 발열실험결과

가장 먼저 공작기계의 설치환경에 대한 실험을 수행하였다. 이는 ISO 에서도 규정이 되어 있으며, 가능하면 환경의 영향을 받지 않는 곳에 공작기계를 설치하는 것을 권장하고 있다. Fig. 4 와 같이 온도의 변화는 오전 9 시부터 5 시까지 무부하상태에서 측정하게 되는데, 최초 온도 21 $^{\circ}\text{C}$ 에서 시작하여 시간이 경과할수록 온도가 상승한다. 이에 따라서 기계의 온도도 상승하며 하루 중 26 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상

승을 하여 최대 $15 \mu\text{m}$ 정도의 오차를 유발한다. 한편, 항온조건하에서도 무부하 운전에 대한 열변형을 측정하였는데, 공장의 경우 항온을 하더라도 일과중 최대 2°C 이상의 온도 변화가 발생하며, 이에 따라서 공작기계도 최대 $6 \mu\text{m}$ 의 변형을 일으키게 된다.



(a) Temperature change

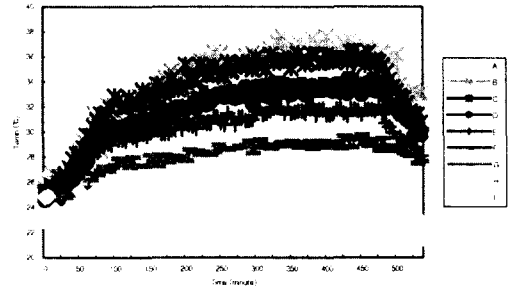


(b) Spindle distortion

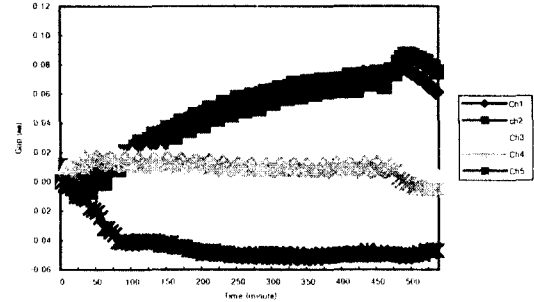
Fig. 4 Environmental temperature and spindle distortion

한편, Fig. 5는 $1,000\text{rpm}$ 씩 회전수를 올렸을 때의 발열과 주축의 열변형 오차를 나타낸다. 주축보다는 기어박스 및 회전폴리 부위의 온도가 상대적으로 높게 나타나며, 온도는 약 25°C 에서 37°C 까지 상승한다. 기계를 정지한 후 1시간이 경과하면 33°C 정도로 온도가 하강한다. 이에 따라서 주축도 열변형하여, 기계의 좌우방향(x 축)으로는 어느 정도 열대칭이 확보되어 최대 $17 \mu\text{m}$ 정도 변형을 하지만, 전후방향(z 방향)으로는 최대 $87 \mu\text{m}$ 까지 변형이 되면서 서서히 열평형점으로 진행됨을 알 수가 있다. 한편 주축의 길이방향(z 방향)으로는 $51 \mu\text{m}$ 정도의 열팽창이 발생한다.

Fig. 6, 7은 각각 일정한 주축회전과 랜덤으로 변화시킨 주축의 회전에 대한 온도와 열변형의 결과이다. 일정한 주축회전의 경우 열변형 경향은 앞의 경우와 동일하며, 주축온도는 40°C 까지 상승하고, 열변형은 y 방향으로 최대 $100 \mu\text{m}$ 까지 변형을 한다. 또한 z 방향으로로는 $53 \mu\text{m}$ 정도 증가한다. 특이한 것은 이 경우 y 축 방향으로 온도 상승에 따라서



(a) Temperature change



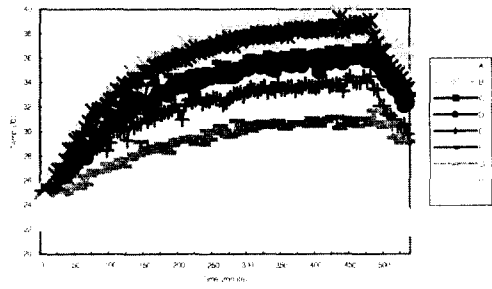
(b) Spindle distortion

Fig. 5 Temperature and spindle distortion under step increase of rotation speed

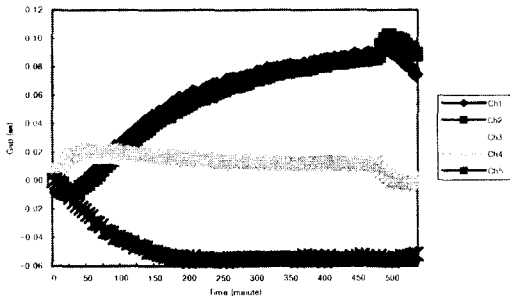
초기에 감소를 하다가 증가하는 경향을 잘 관찰할 수가 있는데 이는 초기 열팽창시에 내부 부품들의 조립상태에 따라서 상호간의 간섭 등에 의해 일어나는 현상으로 이해되며, 이러한 비선형성은 모델을 구축할 때 많은 어려움을 주게 된다. 한편, Fig. 7과 같이 랜덤한 주축회전속도의 변화에 대해서도 경향은 Fig. 6과 동일하게 나타나며, 단지 온도가 충분히 올라가지 않았음을 알 수가 있다. 그러나 3 경우 모두 주축의 회전이 증가하면 온도도 동시에 증가하며, 온도의 증가와 동시에 주축의 변형도 동시에 증가함을 볼 수가 있다.

4.2 열변형 모델링

이상의 세가지 실험을 통하여 살펴보면, 열변형 오차를 보정하기 위한 실험을 실시할 때 어떤 방법으로 실험을 하든 온도의 상승과 하강에 따라 동일하게 주축이 변형함을 알 수가 있다. 이를 보다 명확히 하기 위하여 다변수 선형회귀법을 이용하여 각각의 열변형 성분에 대해 온도에 대해 모델링을 해보았다. Fig. 8은 랜덤한 경우와 일정한 주축속도인 경우의 온도에 대한 변형관계 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 주축의 회전조건에 관계없이 온도에 대한 변형의 관계가 일치함을 알 수가 있다. 이는 앞서서도 기술되었듯이 발열실험을 위하여 여러 조건으로 운전할 필요가 없음을 의미한다. 이 값중에서 y 축의 방향인 채널 1번에 대해서만 모델

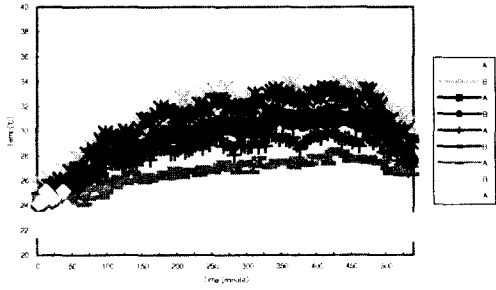


(a) Temperature change

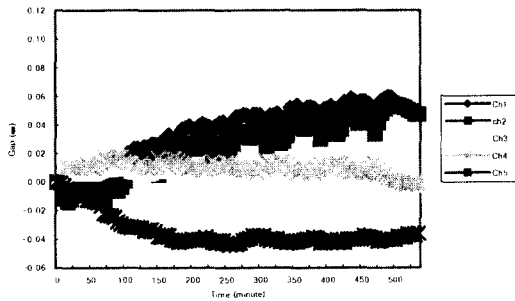


(b) Spindle distortion

Fig. 6 Temperature and spindle distortion under constant rotation speed



(a) Temperature change



(b) Spindle distortion

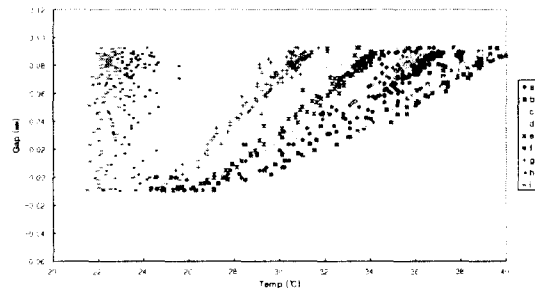
Fig. 7 Temperature and spindle distortion under

random rotation speed

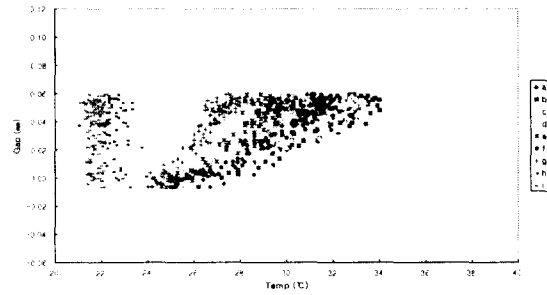
링을 해보면 식 (1) 및 (2)로 각각 모델링될 수가 있다. 두 모델은 각각 R^2 (결정계수)가 0.971 및 0.95 로 모델링이 어느정도 정확함을 알 수 있으며, 특히 식 (1)의 모델이 우수함을 알 수가 있다. 발열을 예측하기 위한 값을 대입하여보면 식 (1) 및 (2) 모두 해당 온도에 대해 거의 비슷한 값으로 예측을 하고 있다. 채널 1 번 이외의 다른 조건하에서도 모델링을 해보면 마찬가지로 일정한 회전속도로 운전되는 조건이 모델링이 보다 잘 됨을 알 수가 있다.

$$y_i = -0.346 + 0.002596A_i + 0.00227B_i - 0.00456C_i + 0.00292F_i + 0.01027G_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$y_i = -0.334 + 0.002362A_i + 0.00188B_i - 0.00621C_i + 0.008494F_i + 0.006742G_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$



(a) Constant speed



(b) Random speed

Fig. 8 Dot plot of thermal distortion vs. temperature

4. 결론

주축의 열변형을 위한 실험을 위해서는 다양한 회전수의 주축발열실험보다는 최고 회전수의 75%에 해당하는 일정한 회전수 발열실험이 모델링 측면 뿐만 아니라 기계의 거동을 살펴는데 보다 유리하다. 또한, y 축의 경우 발열 초기에는 주축이 음의 방향으로 기울다가 팽창하게 되는 비선형성을 나타내고 있으며, 주축의 길이방향 팽창에 있어서는 초기에는 급격하게 팽창하다가 팽창이 둔화되는 양상을 나타낸다. 이러한 비선형성은 다변수 선형 회귀

법의 정밀도를 저하하게 되며, 보다 비선형적인 신경회로망과 같은 기법을 사용하는 것이 유리하다.

참고문헌

1. A. H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice-Hall International Ed., 1992.
2. J. Bryan, "International status of thermal error research (Keynote)," Annals of the CIRP, Vol. 16, pp. 203, 1968.
3. N. Srinivasa, J. C. Ziegert, "Automated measurement and compensation of thermally induced error maps in machine tools," Precision Engineering, Vol. 19, pp. 112-132, 1996.
4. J. Tlustý, "System and methods of testing machine tools," Microtechnic, Vol. 13, 1959.
5. H. J. Park, S. W. Lee, K. I. Lee, Y. J. Cho, "Thermal error measurement and compensation techniques for the 5 degree of freedom spindle drifts in CNC machine tools,"
6. J. S. Chen, G. Chiou, "Quick testing and modeling of thermally-induced errors of CNC machine tools," Int. J. of Mach. Tools and Manufact., Vol. 35, No. 7, pp. 1063-1074, 1995.
7. J. S. Chen, "Neural network based modeling and error compensation of thermally-induced spindle errors," Int. J. of Adv. Manufact. Technol., Vol. 12, No. 4, pp. 303-308, 1996.
8. A. Statham, A. Martin, D. M. S. Blackshaw, "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, 1997.