

◆특집◆ 공작기계의 열변형

공작기계 구조물의 열적 응답 및 개선

김태원*

Thermal Response of Machine-tool Structures and Improvement

Tae-weon Gim*

Key Words : Machine tool (공작기계), Thermal error (열변위오차), Structure (구조물)

1. 서론

CNC 공작기계를 사용하는 업계의 요구수준이 높아지고 고속화가 진전되고 있어⁽¹⁾, 동적 성분의 중요성이 높아지고 있는 추세이며, 가공표면품질, 윤곽가공 정확도, 열변위 오차에 대한 기대욕구가 커지고 있다. 이러한 동적성분의 경우 특징속도가 이송계의 경우 수십 m/min, 주축의 경우 수만 rpm 까지 확대되고 있어, 평가해야 할 스펙트럼 영역이 넓어지게 된다. 어떤 오차성분은 시간에 대한 함수이고, 또 다른 것들은 공간의 함수이며 이 둘은 공정상의 특징속도에 연관되어져 있다. 열변위 오차는 시간에 따라 변동하는 가동 속도 특성과 외부 환경요인이 동시에 작용하여 발생기구해석에 있어 어려움이 따른다.

열적하중은 내부응력을 발생시키지 않으면서도 변위를 발생시키므로 일반적인 구조물의 설계 관점에서 접근할 경우 오류가 생길 수 있다. 따라서, 열발생량의 저감이나 냉각기구에 의해 열변위를 감소시키는 것이나⁽²⁾, 열대칭구조 등 기계구성의 개선 등으로 열변위를 최소화 시키는 것이 공

작기계 개발시 일차적으로 고려해 보아야 할 사항이며, 과도기 특성이 문제시 될 경우 기존의 열변위 보정방법이 필요하게 되기도 한다^(3,4,5). 본 논문에서는 공작기계 개발시 응용하였던 열변위 오차 저감을 위한 기술을 간략히 소개하고자 한다.

2. 열변위 오차저감을 위한 기초 개념

2.1 열적 견실성

열변위오차는 계통오차성분과 우연오차성분이 있다. 내부열원에 의한 영향은 계통오차성분이고, 세어되지 않은 외부환경변화에 의한 영향은 우연오차성분으로 나타난다. 이러한 두성분은 공통적으로 어떤 특징시간에 걸친 총변동값으로 나타낼 수 있다. 이 경우 공구-공작물간 열변위오차 e 와 열적영향을 미치는 N 개의 인자 x_i 에 대해, 인자변동의 평균값 $x_{i,0}$ 부근에서 선형 테일러 급수 전개로 근사할 수 있다면, 변동을 나타내는 분산은 불확도 전파와 같은 유형의 식⁽⁶⁾이 된다.

$$\text{Var}(e) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \text{Var}(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \text{Cov}(x_i, x_j) \tag{1}$$

식(1)은 열적영향을 미치는 각인자의 변동이 민감도모수 $(\partial f / \partial x_i)$ 에 의해 열변위 오차의 변동으로 나타남을 나타낸다. 열적으로 견실한 경우는 민감도모수가 작아 공작기계에 작용되는 열적입력의 변동에 대해 그 출력인 열변위의 변동이 억제

* 대우종합기계(주) 공기자동화본부 연구개발실
Tel. 055-280-4355, Fax. 055-284-8764
Email tgim@dhild.co.kr
터닝센터와 머시닝센터의 정확도향상 관련 연구를 수행하고 있으며, 모든 회전이송축과 직선이송축에 직결구동을 채용한 5 축 가공기에 관한 구조, 부가맵핑장치, 서보장치에 관한 기초 연구에도 관심을 가지고 있다.

되는 경우(Fig. 1 참조)로 예를 들어 구조물의 온도 변화가 많이 생겨도 공구끝의 열변위 오차는 작은 경우이다.

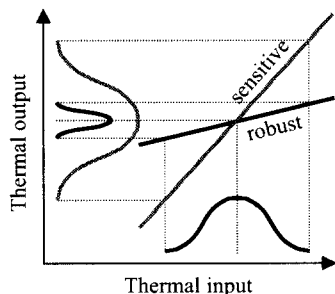


Fig. 1 Concept of thermal robustness

민감도모수가 클 경우는 작은 열적변동에도 큰 열변위오차를 갖는다. 공작기계는 공구끝의 위치를 측정하여 위치제어를 하지 않으므로, 구조루프가 그대로 측정 루프가 되는 경우가 많아, 열적하중이 큰 공작기계에 있어서 측정루프를 따라 구조물에 의한 열변위가 생길 경우 가공정확도에 적지않은 영향을 미치게 된다.

2.2 치수 응답

열적건실성은 개념설계 단계에서 유용한 수단이 됨에 반해, 열적변동환경하에서 시간에 따른 물체의 치수변동인 치수응답은 시간에 따른 이력을 살펴보는 발생기구의 분석에 관한 얘기이다. 서로 다른 물체간에 열적 시정수의 차이에 의한 상이한 치수응답에 대한 고찰은 이미 오래전에, 공작물, 표준기, 측정기 등 측정의 세가지 요소에 대하여 Fig. 2,3 과 같이 설명되었다⁽⁷⁾.

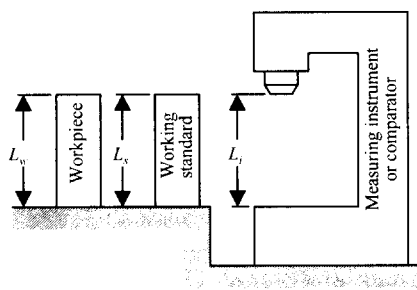


Fig. 2 Three element system in measurement

외부 환경온도가 변동하는 조건에서는 Fig. 2의 각 요소의 길이가 Fig. 3 과 같이 서로 다른 위

상과 진폭을 가진 치수응답으로 나타나서 특정 시점에서의 측정에 오차로서 작용한다는 내용이다.

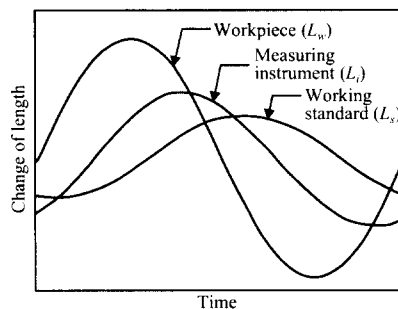


Fig. 3 Dimensional response of 3 element system

치수응답의 경우, 특징 주기가 길면 길수록 치수응답에 나타나는 영향도는 커지므로 일차적으로 특징주기가 하루인 성분을 살펴볼 필요성이 있으며, 대표적인 것으로 일교차 등에 기인한 환경온도변동오차이다. 기계 가공조건에 의한 열적변동의 주기는 이송계의 경우를 예로 들면 상대적으로 짧아 영향도는 작은 편이다.

3. 열변위 저감 사례

3.1 터닝센터

터닝센터는 짧은 가공시간을 요하는 부품의 대량생산에 사용되는 특징이 있으며, 주축이나 이송축의 운전주기도 상대적으로 짧아 운전조건보다는, 주기가 긴 외부환경온도변화에 더 큰 영향을 받는다. 그러므로, 열적 건실성의 개념으로는 전체적인 기계구성의 대칭설계가 일차적으로 중요하며 터닝 센터의 대칭성은 Fig. 4 와 같이 적용한다.

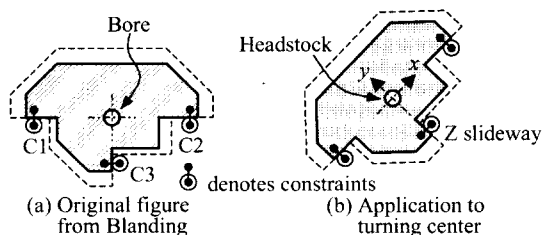


Fig. 4 Axial symmetry applied to turning center

Fig. 4(a)는 구속면이 방사상으로 배치되어 있을 경우 중앙 구멍의 위치는 어떠한 온도변화에도 변동이 없는 방사상 대칭구조를 나타낸다⁽⁸⁾. 이것은

(b)에 나타난 바와 같이 구멍을 주축, 각 구속면을 미끄럼면으로 생각하여 터닝 센터에 적용할 수 있다. 즉, Fig. 5 와 같이 터닝센터에서 기계구성은 구속면의 배치에 의해 한정된 부분내에서 방사상 대칭구조를 가질 수 있게 설계할 수 있다.

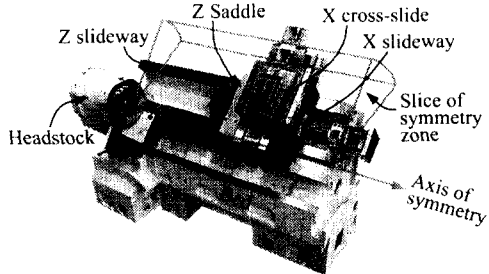


Fig. 5 General view of slant-bed turning center

방사상 대칭구조를 채용한 터닝센터의 환경온도변동오차(ETVE)를 측정하기 위하여 Fig. 6 과 같은 측정기구부를 고안하였다. 저열팽창 재질의 마스터나 치구를 사용하지 않더라도 두개의 센서 A,B 의 신호 s_A, s_B 의 평균값을 취함으로써 측정기구부에서 나타나는 환경온도변동오차를 최소화하여 순수한 터닝센터의 오차 e 만을 측정하도록 고안된 구성이다.

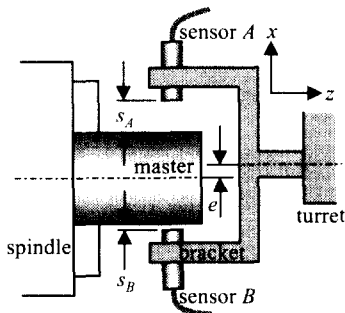


Fig. 6 Measurement setup for ETVE

측정된 결과는 Fig. 7 에 보인 바와 같이, 대기온도와 베드 온도간에 위상차와 진폭감소가 나타남을 볼 수 있고, 공구-마스터간 위치오차는 온도 변화와는 다른 추세를 보임을 알 수있는데, 부품들이 각기 방향성이 있는 치수응답을 가지고 있기 때문이다. 방사상 대칭구조가 아닌 기계보다 3 배 이상의 연속가공정확도 향상을 주어 일과시간중 직경 $10\mu\text{m}$ 이내의 편차를 달성하였다.

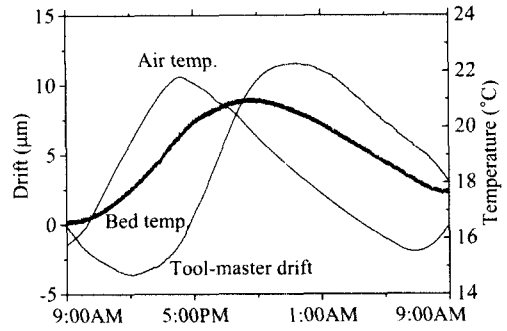


Fig. 7 ETVE due to air temperature variation

3.2 머시닝 센터

머시닝센터는 터닝센터에 비하여 주축의 동작 주기가 매우 길며, 주축부의 열영향에 의한 구조물의 열응답이 중요성을 갖는다. Fig. 8 과 같이 벨트에 의해 구동되는 수직형 머시닝 센터의 공구끝점 P_3 의 y 방향 열변위 δ_{y3} 와 z 방향 δ_{z3} 를 살펴보자.

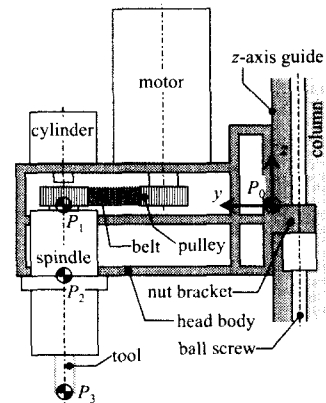


Fig. 8 Cross-sectional view of head body

주축대는 단순신장뿐만아니라 열적굽힘현상도 동시에 발생된다. P_3 점의 총변위오차를 P_1 점에서의 순수신장오차성분 $e_{y,1}$, $e_{z,1}$ 과 $e_{\theta,1}$ 에 의한 굽힘오차성분으로 분해하여 나타내면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_{y3} &= e_{y,1}(t) + (L_2 + L_3) \times e_{\theta,1}(t) \\ \delta_{z3} &= e_{z,1}(t) + e_2(t) + e_3(t) \\ e_{z,1}(t) &= (L_1/2)e_{\theta,1} \end{aligned} \quad (2)$$

분해한 후 각 성분을 Fig. 9 에서 살펴보면 물리적으로 이해가능한 시계열 데이터가 됨을 알 수

있다. 이 경우 구조물의 열변위를 저감하기 위해서는 벨트구동부에서 발생하는 열량을 줄여 굽힘변형에 의한 오차성분을 줄이는 것이 일차적인 목표가 된다.

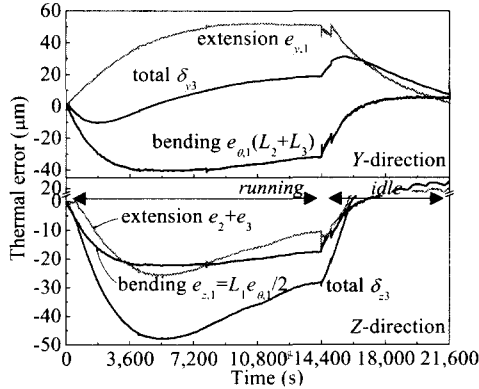


Fig. 9 Decomposition of thermal error at tool tip

고속에서의 회전안정성을 위해서는 벨트폭이 커야 하고, 열발생량을 줄이기 위해서는 작아야 하는데, 폭이 좁은 벨트를 사용한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이때 주축 회전수 조건은 타이밍 벨트구동으로는 허용 이상인 10,000rpm 이다.

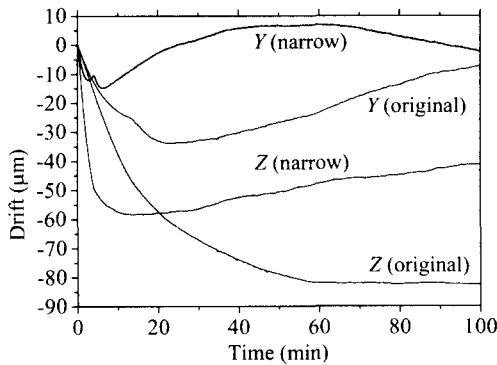


Fig. 10 Effect of belt width in thermal error

Fig. 10의 좁은 폭의 벨트를 사용했을 경우 그 그래프를 보면 초기에 불안정한 추세가 나타나는데 이것은 타이밍 벨트가 풀리길이 방향으로 위치를 이동함으로써 나타나는 현상이다. 이것은, 폭이 넓은 벨트에 비해 구동안정성은 저하됨을 뜻하고 어떠한 작은 변동도 결국 가공정확도에 영향을 미칠 수 있다.

4. 결론

열적건실성은, 실제 생산공정에서는 열변위 오차의 대소보다는 열변위오차의 장·단기적 변동이 공정능력에 직접적인 영향이 있음을 반영한 것으로, 열적 입력조건에 변동에도 오차의 변동이 확대되지 않는 구조의 설계를 목표로 하는 개념이다. 어떤 경우, 공작기계 구조물의 열응답이 매우 급격하게 변동하는 추세를 보이는 경우가 있다. 각 부품의 열변위 추세가 같은 방향성을 가지거나 열적굽힘현상이 있을 경우에 그런 현상들이 나타나게 된다. 이 경우 각 부품의 치수응답에 대한 명확한 이해가 있어야 전체 구조물의 열변위 오차를 저감할 수 있다. 그러나, 측정과 해석에 있어서 불확도가 무시하지 못할 열문제이므로, 정확한 발생 기구의 해석에 어려움이 많은 것도 사실이다.

참고문헌

1. Smith, S., and Thusty, J., "Current Trends in High-speed Machining," J. Manuf. Sci. and Engg B, Vol. 119, No. 4, pp. 664 - 666, 1997.
2. Weck, M., McKeown, P., et al., "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp. 589-598, 1995.
3. Koelsch, J.R., "Thermal Compensation: Sound Science in Milling," Quality, April, 2001.
4. 양승환, 이철수, "5 축 CNC 공작기계의 오차합성모델링 및 보정 알고리즘," 한국 정밀공학회지, 제 16 권, 제 8 호, pp. 122-129, 1999.
5. 황석현, 이진현, 양승환, "CNC 공작기계에서 열변형 오차보정 시스템의 고장진단 및 복구," 한국 정밀공학회지, 제 17 권, 제 4 호, pp. 135-141, 2000.
6. Taylor, B.N. and Kuyatt, C.E., Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST Technical Note 1297, U.S. Government Printing Office, Washington, 1994.
7. Bryan, J., McClure, E.R., Pearson, J.W., Brewer, W., "Thermal Effects in Dimensional Metrology," ASME 65, Prod. 13, 1965.
8. Blanding, D.L., Principles of Exact Constraint Mechanical Design, Eastman Kodak Company, Rochester, NY, 1992.