

◆특집◆ 2010년대를 위한 공작기계산업 발전방향

공작기계 기계기술 발전방향

김태원*

Development Direction of Machine Tool Mechanical Technology

Taewon Gim *

Key Words : Machine tool (공작기계), Mechanical technology (기계기술), Dynamic robustness (동적 강인성), Thermal robustness (열적 강인성)

1. 서론

주축과 이송계의 고속화를 통해 반복적인 경 절삭에 의해 공작물을 가공하던 고속가공이 주목을 받던 시대에서 현재는 어떻게 하면 가공시간을 최소화하는 고효율가공을 달성할 수 있는가가 생산성 측면에서 중요시되고 있다.¹ 고속가공이 반드시 가장 최소의 가공시간을 나타내는 것이 아님이 밝혀졌고, 이에 따라 고속 경절삭가공에 절삭깊이를 늘린 경절삭 기능이 혼합된 형태의 고성능가공에 대한 발전이 이루어졌고, 현재는 여기에 이송속도의 공구경로 및 칩부하에 대한 가감속제어에 의한 고효율가공방법이 기술발전의 주테마로 잡아가고 있는 중이다.

고효율 가공을 공작기계에서 구현하기 위해 동적성분의 중요성이 높아지고 있는 추세이며, 특히 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 가동범위영역이 넓어지게 된다. 공작기계에서 나타나 문제시되는 물리량은 어떤 경우에는 시간에 대한 함수이고, 어떤 경우에는 공간의 함수이며 이 둘은 공정상의 특징속도에 연관되어져 있다.

공작기계 유닛이나 구조물의 정·동적 취약성에 기인하는 변형이나 진동은 직접적으로 공구/공작물계에 영향을 미쳐 표면품위를 떨어뜨리고, 이송속도의 제어범위가 좁아지게 되어 고효율 가공이 불가능해진다. 열변위 오차는 시간에 따라 변동하는 가동 속도 특성과 외부 환경요인이 동시에 작용하여 발생기구해석에 있어 어려움이 따르며 이에 따라 향후 기술발전이 요구되는 기술분야가 된다. 그러므로, 동·열적 강인성 확보가 향후 공작기계 기계기술의 주요한 목표가 되며 3 절에서 알아볼 중요한 기반기술이 된다. 높은 신뢰성을 가진 고품질의 제품을 낮은 가격에 공급하여 향후 세계 경제권에서 경쟁력을 선진국 수준으로 유지하는 것을 비전으로 설정한다면, 먼저 시장요구와 이에 따른 공작기계 개발 프로세스를 살펴보는 것이 순서일 것이다.

* 두산인프라코어㈜ 공기자동화 BG 연구개발실

Tel. 055-280-4355, Fax. 055-284-8764

Email taewon.gim@doosan.com

터닝센터와 머시닝센터의 정확도향상 관련 연구를 수행하고 있으며, 모든 회전이송축과 직선이송축에 직결구동을 채용한 5축 가공기에 관한 구조,부가댐핑장치,서보장치에 관한 기초 연구에도 관심을 가지고 있다.

2. 신개념 공작기계 개발

새로운 기술의 개발은 시장의 요구나 연구개발자의 창의적인 아이디어에 의해 시작되며, 어떤 경우이나 제품의 형태로 상업화가 되어야 개발 프로세스가 완결된다. 미래에 필요한, 연구실이나 시

장에서 검증되지 않은 기술을 개발 확보하는 프로세스를 Fig. 1 과 같이 나타낼 수 있으며, 최종적으로 확보된 기술은 제품개발에 응용되는 형태이다.

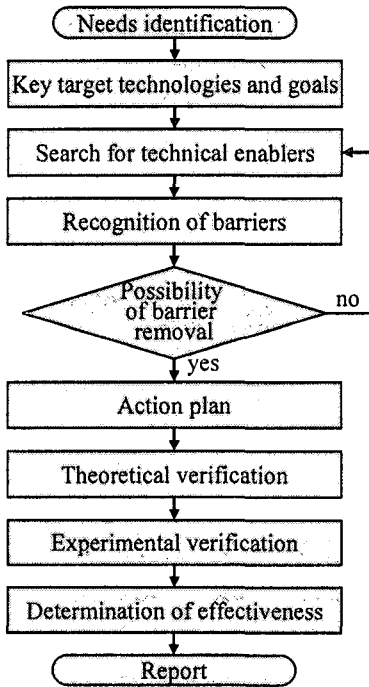


Fig. 1 Technology development process

제조업에 사용되는 공작기계는 서론에서 고효율가공의 중요성을 언급한 바와 같이 항상 생산성을 가장 최상위의 개념으로 보며, 이에 따른 하부상세 요구사항을 Table 1 과 같이 정리할 수 있다. 공정능력은 사용자가 품질수준을 결정함에 있어 기본적인 사항으로 일반적으로 C_p 혹은 C_{pk} 값으로 표현되는 지수로 나타낸다. 공작기계에서 가공되는 부품의 품질특성을 나타내며 생산성을 나타내는 싸이클 타임과 함께 고려해야 할 사항이다. 기존의 공작기계에서 달성하기 힘든 공정능력, 싸이클 타임 요구가 일어날 경우에는 이에 따라 유닛, 구조의 개선에 의한 신제품개발이 이루어지게 된다.

공작기계는 또한 24 시간 생산활동에 필요한 핵심장비로 신뢰성이 중요하며, 사용자 요구사항으로는 가용도의 향상이 지속적으로 관찰되고 있다. 가용도는 여러가지 정의가 있지만 향후 비가동시간에 Table 1 의 빠른 공정 셋업과 공정전환의

개념까지 포함한 형태로 전개될 것이므로, 이에 대한 신기술 개발이 필요할 것으로 예상된다. 또한, 실가공전에 공구/공작물/공작기계 전체를 고려한 시뮬레이션을 통해 최적화된 가공조건을 선정하여 시행착오를 겪지 않고 바로 원하는 부품을 가공할 수 있게 해주는 기술도 필요하게 된다.

Table 1 Continuous needs for machine tools

Needs	Progress by 2006	Future efforts
Process capability	●●●●●	●●●
Cycle time	●●●	●●●
Availability	●●●	●●●●●
Quick setup & changeover	●●	●●●●●
First-pass accuracy	●	●●●
Integration	●●●	●●
Life cycle cost	●●	●●●●

다품종 소량생산이나 한가지 종류의 고가부품을 가공하는 비중이 높아짐에 따라 실적작 가동시간의 향상을 위하여 선삭/밀링/연삭/레이저가공 등 여러가지 공정이 한대에서 가능한 복합가공기나 공작물의 자세를 변화시켜 탈착/장착의 시간을 줄인 5 축 가공기의 중요성이 높아지고 있으며 향후 공작기계 시장의 주류를 이룰 것으로 예상되며 신개념 공작기계 필요성이 특히 이분야에 예상된다.

한편 병렬형 기구의 경우 공작기계에 적용시 강력절삭이 불가하고 정확도 확보에 어려움이 많아 확산이 느렸는데, 관련 기술의 발달과 주축 자세변화에 대한 소요시간이 기존 5 축가공기와는 비교할 수 없을 정도로 빠르게 되어 점점 상품성 있는 병렬형 공작기계의 시장 출현이 가속화 되고 있다.

사용자 요구사항 중 통합화 분야는 주로 FMC 등에 사용되는 제조환경상의 생산 정보 흐름에 관한 것으로 국내 개발사례는 미비한 형편이고, 무인화를 위한 기반기술로서 개발이 필요하다. 최근 들어 환경문제가 많이 제기되고 있고 공작기계 또한 예외가 아니다. 사용되는 절삭유나 윤활유는 모두 환경에 악영향을 미치는 물질이며 최소량을 사용할 수 있는 기술들이 계속 개발되고 있다. 공작기계 소재 또한 유럽의 경우 주물소재를 사용할 경우 고가여서 합성 콘크리트를 채용하는 것도 특이한 사항이며, 사용자 측면에서 공작기계의 운용에 필요한 경비를 절감할 수 있는 기술을 지속적으로 개발해야 한다.

3. 성능향상을 위한 기반 기술 개발

3.1 동적 강인성 확보

공작기계에 요구되는 사용자 요구사항을 Table 1 과 같이 나타낼 수 있지만, 여기에는 기본적인 사항이 누락되어 있으며 이는 절삭성능이다. 절삭성능이 누락되어 있는 이유는 공작기계의 경우 3축 머시닝 센터 등 형태나 크기가 비슷하더라도, 사용용도에 따라 여러가지 범주의 기계들이 생기고 있고, 사용자는 원하는 공작물 절삭이 가능한 기계를 구매하기 마련이기 때문이다.

절삭성능을 높인 고성능 공작기계를 제작할 수 있는 기초기술이 동적 강인성 확보 기술이다. 주로 구조물의 형상과 크기에 대한 여러가지 기술안에 대한 FEM 해석을 통한 동적 컴플라이언스 최적화에 초점이 맞추어져 있지만, 공작기계 사용자 입장에서 바로 인식이 될 수 있는 성능지수로 절삭성능지수를 대표삼아 기술의 특성을 얘기할 수 있다. 절삭시험의 경우 동일한 기계를 사용하더라도 공구 형태나 상태, 공작물, 절삭조건에 크게 영향을 받으므로 이와 최대한 독립적으로 결정할 수 있는 지수가 절삭성능지수이다.

어떤 주축속도에서 채터가 일어나지 않는 범위내 사용가능한 최고 모터 출력 P_{cr} (임계 가공출력)과 모터 연속 출력 P_c 와의 비를 절삭성능지수 C_s 로 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며,^{2,3}

$$C_s = \frac{P_{cr}}{P_c} \quad (1)$$

1 보다 작을 경우에는 주축모터의 연속출력이 100% 사용되기 전에 채터가 발생하여 기계의 효율성을 떨어지게 만든다. 1 과 같거나 이상이면 채터가 없는 조건에서 주축모터의 출력을 최대치로 칩제거에 사용되게 된다. 여러 공작기계의 절삭성능을 비교시 유용하게 사용될 수 있다.

임계 가공출력 P_{cr} 은 전 주축속도영역에서 채터가 발생하지 않는 임계 축방향 절삭깊이와 공구, 공작물에 의해 결정되는 값이다. 축방향 절삭깊이는 Fig. 2 와 같은 진동시험으로 결정할 수 있으며, 주축/홀더/공구계의 동적 컴플라이언스 값으로 성능을 예측하기도 한다.

동적강인성의 확보를 통하여 사용자가 원하는 절삭가공이 가능해지며, 절삭성능지수를 높이는 방향으로의 지속적인 연구가 필요하다. 채터 외에

가공 중에 단속절삭 등에 의한 강제진동이 발생하기도 하고, 구동계나 서보계 혹은 공구교환장치 등 주변장치도 진동원이 되므로 이에 대한 고려도 필요하다.

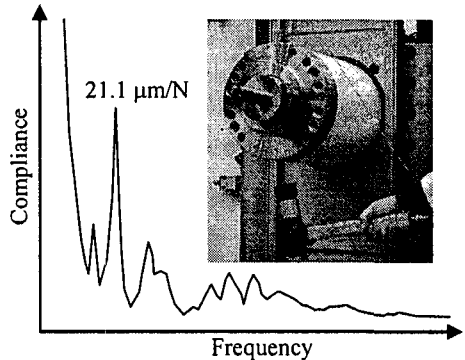


Fig. 2 Dynamic compliance test of spindle

공작기계의 속도가 빨라짐에 따라 캐리지의 질량중심과 구동점과의 윗셋에 의해 관성 크로스토크 현상으로 기능점이 각운동 혹은 이와 관련된 진동이 Fig. 3 과 같이 발생하는 경우가 많이 생기고 있다. 그 외, 불평형질량에 의한 내부진동은 널리 알려져 있는 현상이며, 최근에는 자동평형제어 장치를 채용한 공작기계도 출시되고 있고, 관성 크로스 토크에 의한 진동을 서보제어기능에 의해 저감시키는 등 능동진동제어장치의 개발 적용이 활발하고 향후 중요한 연구분야가 되고 있다.

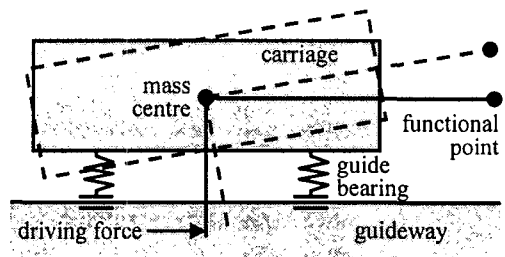


Fig. 3 Inertial cross talk

CNC 서보기능에까지 진동억제 기능이 개발 적용되고 있는 이유는 공작기계에서 발생하는 진동에 의한 공구선단의 변위에 의해 가공물 표면이 Fig. 4 에 보인 바와 같이 물결무늬, 줄무늬 등의 가공결함이 발생하여 후가공이 필요해지는 단점이

발생하기 때문이다. 주축, 이송계 등 유닛 단위의 동적 강인성 확보와 구조물의 동적강인성 확보를 통해 결과적으로 고품위의 공작물을 빠른 시간에 가공할 수 있게 된다. 기계적인 기술수단으로 경제성이 없을 경우에는 능동진동제어 기능에 의한 진동억제가 필요하며, 다축 복합 가공기 경우와 같은 복잡한 공작기계의 경우에는 형상과 크기에 대한 많은 제약조건 때문에 기계와 제어부를 동시에 고려하는 메카트로닉스 관점에서 기계를 설계하는 방법론이 점점 필요해지고 있다.

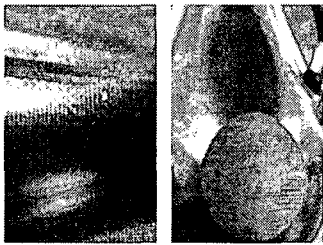


Fig. 4 Surface defects due to vibration

상기와 같은 진동원에 대한 구조물의 동적 강인성을 확보하기 위해서는 공작기계의 경우 특히 수십 Hz 영역의 저주파 진동모드에 대한 고려가 필요하다. Fig. 5 와 같은 형태의 상대적으로 집중된 질량에 의한 고유진동모드가 수십 Hz 영역에 존재하면 관성 크로스 토크에 취약해지고, 서보 특성에 악영향을 미치게 된다. 많은 경우 기본 형상의 최적화로는 한계점이 보이기 때문에, 새로운 구조의 공작기계 개발 필요성도 제기되고 있다. 연구개발 방향은 경량 고강성 구조이며 재질문제까지 고려한 창의적인 아이디어가 필요한 분야라고 할 수 있다.

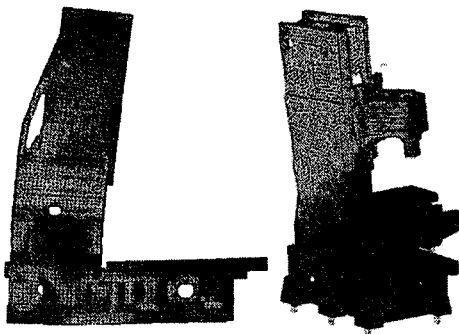


Fig. 5 Low frequency vibration mode

3.2 열적 강인성 확보

열적하중은 내부응력을 발생시키지 않으면서도 변위를 발생시키므로 일반적인 구조물의 설계 관점에서 접근할 경우 오류가 생길 수 있다. 따라서, 열발생량의 저감이나 냉각기구에 의해 열변위를 감소시키는 것이나, 열대칭구조 등 기계구성의 개선 등으로 열변위를 최소화 시키는 것이 공작기계 개발시 일차적으로 고려해 보아야 할 사항이며, 과도기 특성이 문제시 될 경우 열변위 보정방법이 필요하게 되기도 한다.

공작기계의 열변형은 내·외부 열원의 영향하에 있는 중요부품이나 구조물의 열팽창에 의해 발생하며, 가공하고자 하는 소재의 치수 정확도에 직접적으로 악영향을 미치게 된다. 주로 소형부품을 대량으로 연속 가공하게 되는 터닝 센터의 경우는 직경치수의 변동을 유발하게 되고, 장시간 가공이 요구되는 금형가공용 머시닝 센터의 경우는 형상의 불일치를 일으킨다. 이러한 열적 영향에 대한 공작기계의 오차값을 결정하기 위하여 현재 ISO 에서는 230 시리즈 중 3 편에 이에 대한 시험통칙을 기술하고 있기도 하다.

서론에서도 언급한 바와 같이 열변위의 경우 주축이나 이송축 외 유닛 단위 이상의 구조에서 일어나는 현상을 정확히 규명하기 힘든 경우가 대부분이며 그 예를 Fig. 6 에 보인다.

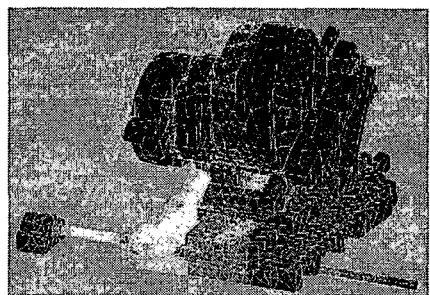


Fig. 6 Thermal deformation of turning centre saddle

터닝 센터의 경우 공작물 직경방향인 X 방향으로의 변형이 생길 경우 가공치수에 악영향을 미치고, 이에 따라 공정능력이 떨어지게 되므로 이런 경우를 방지하는 설계기술이 필요하게 된다. 일차적으로 X 축 불나사에 관심을 기울이게 되겠지만, Z 방향으로 급속이송이 빈번하게 일어나는 공정의 경우 Z 불나사에서 발생한 열이 새들에 전도되고

변형을 유발시켜 새들 구조물의 X 방향 열변형으로 가공치수의 변동이 발생하는 현상을 해석한 예가 Fig. 6 이며 이와 같이 공작기계의 가동조건, 환경조건에 관계된 모든 인자를 고려하여야 정확한 열변위 발생 메커니즘을 알 수 있게 되며, 이러한 개념을 기초로한 열변위 예측 프로세스 개발이 필요하다. 열변형의 전체적인 모양이 선형적으로 일어나는 경우도 있지만 Fig. 7 과 같이 변형이 일어나는 면에 대해 읍셋이 존재하는 유닛이 기준면의 굽힘에 의해 상대변위가 커지게 되는 경우도 있다.

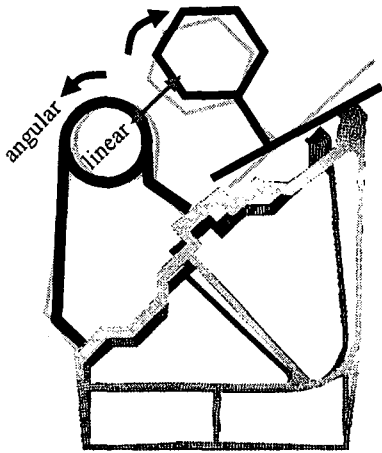


Fig. 7 Linear vs angular deformation

상기 두가지 예와 같이 열적 강인성 확보를 위해서는 다양한 종류의 열변위 현상에 대한 물리적인 이해가 필요하며, 삼차원 열변위 측정이 현재 기술로는 불가능하므로 실제 온도측정 실험 데이터를 기준으로 FEM 과 CFD 를 이용한 해석모델에 의존할 수 밖에 없는 상황이며 향후 실험데이터가 필요없는 정도의 기술발전이 기대된다.

열변위 오차에 대한 저감기술을 기술의 탄생, 소멸, 적용을 나타내는 Hype 커브를 사용하여 Fig. 8 과 같이 나타낼 수 있다. 동적 강인성 확보와 관련된 지수인 절삭능력지수와 동일한 개념으로 열현상에 대해서는 공정능력지수를 꼽을 수 있음을 이전에 설명하였고, 절삭열에 의한 절삭유 온도상승 영향, 고속회전부 열발생에 대한 대책 등이 일차적인 열적 강인성 확보에 중요한 단계가 되며, Fig. 8 에도 이와 관련된 기술들은 제품에 적용되어 성숙단계에 있음을 표시해주고 있다. 공작기계가 다축화와 소형화가 동시에 진행된다면, 모든 열원에 대한 직접적인 생각방법이 필요해진다.

유닛이나 구조물의 온도변동이 불가피한 경우에는 대칭구조를 채용하여 그 영향을 최소화하며 이것은 일반화된 기술이라고 할 수 있으며, 향후 이 개념을 확대한 열변형이 없는 구조에 대한 연구가 시작될 것으로 보인다. 이와 함께 환경온도 변동오차(ETVE) 저감 수단도 큰 연구 테마로 자리 잡을 것이다.

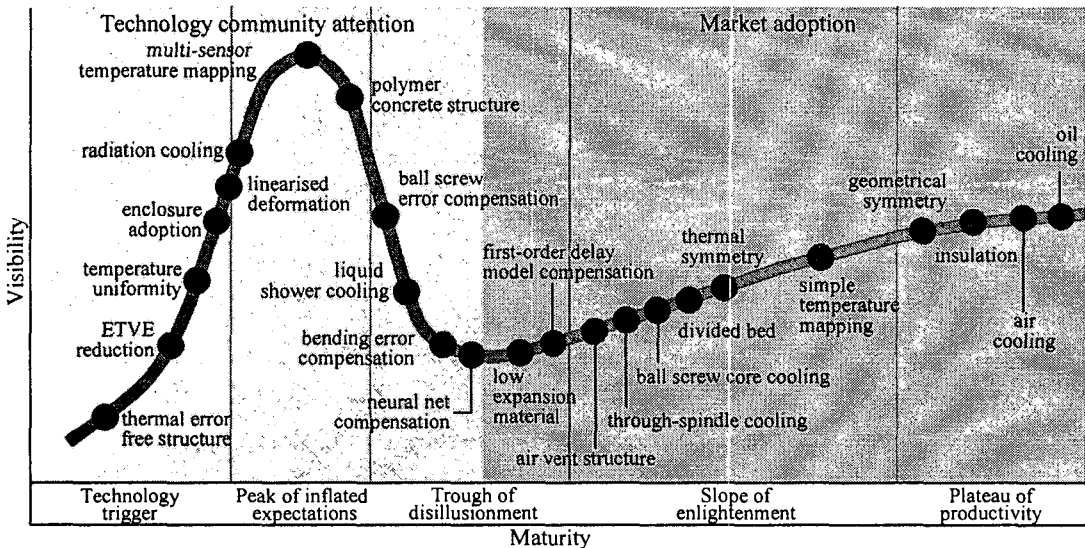


Fig. 8 Technology hype curve for thermal error reduction

능동진동제어와 마찬가지로 열분야에도 열변위 보정 혹은 능동열제어 기술분야가 있으며, 많은 연구가 진행되어 왔고,⁴ 또한 앞으로도 더욱 발전할 분야이다. 터닝센터와 같이 일정한, 그러나 짧은 시간간격을 두고 공작물이 가공완료되는 경우는 공작물 치수 측정에 의한 보정이 최선책이 될 수 있으나, 머시닝 센터와 같이 가공공정이 복잡하거나 시간이 많이 걸리는 경우 공작물이나 기계자체 등을 직접측정하는 보정방법은 기술적으로 어려움이 많아 보통 기계구조물의 온도측정값으로 열변위를 예측하는 간접 보정방법을 택하는 것이 일반적이다. 기계구조물의 온도와 열변위의 상관관계를 이용하여 공학적인 근사를 하는 방법으로 많은 적용 실적이 있으며 정확도향상에 큰 효과를 보고 있다. 그러나, 정확한 보정을 위해서는 매우 많은 점의 온도값이 필요하고, 또한 비정상상태의 거동은 정확히 기술하기 힘들다는 단점이 있다.

실제 CNC 공작기계에 적용하여 본 결과로는 열굽힘 현상에 의한 열변위 거동의 왜곡 현상이 보정에 있어 가장 큰 문제점으로 나타나고 있고, 또한 열굽힘 현상자체가 비정상상태에 의한 기여도가 큰 현상이어서 더욱 더 보정상에 큰 오차요인으로 나타나고 있어 문제시되며 Fig. 7 에 보인 바와 같이 열변위의 선형화로 해결할 수 밖에 없으나, 굽힘이 발생하면 위치에 따라 기능점의 오차값이 변하므로 실시간 위치 제어 루프상에서 이에 대한 보정을 행하는 경우도 고려할 수 있다.

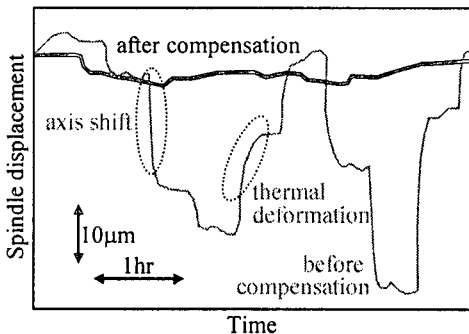


Fig. 9 Thermal error compensation of high speed spindle

정압예압을 사용한 고속주축은 열변위 외에도 불의 원심력에 기인하는 축방향이동도 발생하여 주축변위는 Fig. 9 에 보인 바와 같이 매우 큰 값을 나타내며, 이에 대한 보정이 필요하며 보정을

행한 후에는 작은 주축선단 변위를 보이게 된다. 열변위 보정 역시 변위 발생 메커니즘의 이해능력에 따라 보정효율이 결정되며 또한 예측된 보정량을 CNC 위치제어루프상에서 적용하는 방법도 중요한 문제가 된다. 왜냐하면 대부분의 열변위 보정이 서보기능에 포함되어 계산되지 않아 잘못 적용할 경우 단차나 줄무늬 등의 표면결함이 공작물에 나타날 수 있기 때문이다.

4. 결론

고효율 가공의 효과적인 구현을 위한 기반기술로 동·열적 강인성 확보 기술과 발전방향에 대해 서술하였다. 또한, 사용자 요구사항에서 출발하여 세부적인 기술적 요구사항까지 연결 될 수 있음을 살펴보았다. 공작기계는 공구끝의 위치를 측정하여 위치제어를 하지 않으므로, 구조 루프가 그대로 측정 루프가 되는 경우가 많다. 즉, 기계적, 열적 하중이 큰 공작기계에 있어서 측정 루프를 따라 구조물에 변위 오차가 생길 경우 가공정확도에 큰 영향을 미치게 되므로, 상기에 논한 바와 같이 동·열적 강인성에 대해 설계단계에서부터 면밀히 검토해야 한다. 열적으로 강인한 경우는 공작기계에 작용되는 열적 입력의 변동에 대해 그 출력인 열변위의 변동이 억제되는 경우이며, 동적인 경우도 마찬가지이다.

참고문헌

1. Benes, J., "Speed Up, Slow Down for High Productivity," American Machinist, Vol. 5, No. 9, 2006.
2. Badrawy, S., "Dynamic Modeling and Analysis of Motorized Milling Spindles for Optimizing the Spindle Cutting Performance," Report, Moore Nanotechnology Systems, 2006.
3. Jokiel, B. Jr., "Improved Manufacturing of MC4531 Mold Bodies using High-Speed Machining," SAND 2002-3305 Report, Sandia National Laboratories, 2002.
4. Hwang, S. H., Lee, J. H., Yang, S. H., "Fault Diagnosis and Recovery of a Thermal Error Compensation System in a CNC Machine Tool," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 135-141, 2000.