

◆특집◆ 위치결정 기술

고정밀 이송계의 위치결정오차 보정 기술

정재일*, 김홍석*, 김종원**

Positional Error Compensation Technology
for Precise Feed-Drive System

Chae Il Cheong*, Hong Seok Kim*, Jong Won Kim**

Key Words : CNC machine tool(CNC 공작기계), NC device(수치제어 장치), Positioning Accuracy(위치결정 정밀도), Positioning error compensation(위치 오차 보정), Thermal error compensation(열변형 오차 보정), Cutting force (절삭력), tool deflection compensation (공구 처짐 보정)

1. 서론

최근 10 년 동안 학계와 산업계에서의 정밀절삭가공에 대한 연구는 높은 정밀도의 부품을 짧은 시간에 가공하고, 동시에 가공비용의 최소화를 목표로 발전되어 왔으며, 가공물의 정밀도에 직접 영향을 미치는 이송계에 요구되는 위치결정 정밀도 수준도 더욱 높아지고 있다.

이송계의 위치결정 정밀도를 높이기 위한 방법은 크게 3 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 설계부터 대상기계에 발생할 수 있는 오차 요인들을 줄일 수 있는 구조와 부품-리니어 가이드 등-을 설계하는 방법이다. 둘째, 작동조건이나 가동시간에 따라 변화하는 오차를 줄이기 위해 부가적인 시스템을 대상기계에 부착하는 등의 방법이다. 공작기계에서 발생하는 열변형을 줄이기 위하여 수냉식 열순환 시스템을 부가하는 것이 한 예이다. 마지막으

로 각 오차요인을 반영할 수 있는 온도나 절삭력 등의 값과 각 순간의 오차 값들 사이의 모델링을 통하여 소프트웨어적으로 이송계의 제어부에 접근하여 보정을 수행하는 소프트웨어 보정방법이 있다.

그러나, 설계과정에서 대상기계에 나타날 수 있는 많은 오차 원인들을 모두 고려하여 설계했다 하더라도 열변형과 같이 시간에 따라 변화하는 오차들을 완전히 제거할 수 없다. 또한, 부가적인 시스템을 적용시키는 경우에는 부가되는 시스템의 가격이 전체 공작기계의 가격에 더해지고 이에 따라 가격 경쟁력이 떨어지게 되는 문제가 있다. 반면에 소프트웨어를 이용한 보정 방법은 기존 CNC 제어기의 고정밀화, 고지능화와 사용자 모듈의 첨가 등의 역할을 수행할 수 있는 PC-NC 의 출현을 통하여 보다 쉽게 공작기계, 3 차원 측정기 등에 실지로 적용되고 있으며, 부품공차나 조립공차의 등급을 높여 제작하는 경우보다 5%에서 50%까지의 낮은 가격에 같은 정밀도의 가공을 수행하는 기계를 개발할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁾.

절삭가공에 의해 발생하는 공작물의 정밀도는 크게 공구와 소재사이의 계획된 경로에 대한 편차, 공구의 탄성변형과 마모조건에 의한 오차, 그리고 소재의 탄성변형에 의한 오차 등에 의하여 결정된

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

Tel. 02-880-7144, Fax. 02-875-4848

Email: jongkim@snu.ac.kr

생산 시스템의 지능화, 특히, 병렬기구를 이용한 공작기계, 폐속 제작기계(rapid prototype machine), 6 자유도 motion simulator 에 관심을 가지고 있다.

다. 경로에 대한 편차는 다시 기하학적 편차(geometric deviation)와 동적 편차(kinematic deviation)의 두 가지로 나뉘어 진다. 기하학적 편차는 위치 결정 정밀도 오차와 공작 기계 부품의 기하 공차를 의미하며, 동적 편차는 좌표계를 따라 이동할 때 발생하는 위치 제어 오차를 의미한다. 각 편차는 공작기계의 요소 부품의 가공 오차, 본체 소조립 및 대조립 오차, 다양한 절삭조건에 따른 정적, 동적 열변형 등에 의해 결정된다.

즉, 소프트웨어를 이용한 보정은 위에서 기술한 기하학적오차, 열변형 오차, 절삭력에 의한 공구 처짐 오차의 3 가지오차를 주 보정 대상으로 하며, 많은 연구자들에 의해 이들 오차들을 소프트웨어를 통하여 보정하는 연구와 적용에 대한 노력들이 이루어져 왔다.

본 기사에서는 현재까지 국내외에서 이루어진 이송계 보정 시스템의 연구 결과와 각 오차원인에 대한 보정방법, 연구 동향, 국내 산업계의 적용 사례에 대하여 살펴보고자 한다. 먼저 2 장에서 보정 시스템의 종류와 구성에 대하여 기술하고 3 장에서 기하학적 오차의 보정, 4 장에서 절삭력에 의한 가공오차의 보정, 5 장에서 열변형에 의한 오차의 보정에 대하여 중점적으로 기술하였다.

2. 보정 시스템의 종류와 구성

지금까지 연구되어 온 CNC 공작기계 오차보정 시스템은 보정이 적용되는 주기에 따라 크게 정적 오차보정 시스템, 준정적(quasi-static) 오차보정 시스템 및 동적(dynamic) 오차보정 시스템으로 구분할 수 있다. 정적 오차보정 시스템은 각 축의 현재 좌표 값에서의 보정 값이 시간에 따라서 변하지 않는 위치보정시스템을 말한다. 기존 CNC 공작기계에서 기본 기능으로 제공되는 백래쉬 보정 기능과 피치오차 보정 기능이 대표적인 예이며, 한번 측정된 오차를 이용하여 보정 값으로 이용하므로 수동적 보정 시스템(Passive compensation system)이라고도 한다. 정적 오차 보정 시스템은 기계의 작동조건에 따라 변화하는 열변형 오차나 절삭력에 의해 발생하는 오차등과 같이 시간에 따라 변화하는 오차를 보정할 수 없다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 일정한 주기마다 기계작동조건을 감시(monitoring)하여 보정치를 내보내주는 준정적, 동적 오차 보정 시스템이 구성되고 사용

되고 있으며, 이들을 능동 보정 시스템(active compensation system)이라 부르기도 한다.

준정적 오차 보정 시스템은 주로 열변형의 보정에 사용되는 시스템으로 크게 2 가지로 나눌 수 있다. 첫번째 방법은 DNC (Direct NC)를 통하여 CNC 프로그래밍의 G 코드값을 변경시키는 방법이다⁽²⁾. 그러나 이 방법은 G 코드의 최종 좌표 값만 변경시킬 수 있을 뿐이고 DNC 를 통한 위치 보정 시점이 일정하지 않아 경로사이의 보정은 불가능하다. 두 번째 방법은 PMC 를 수정하여 외부 PC 로부터 CNC 내부에 저장되는 각 축의 원점 좌표 값을 시간에 따라서 변경시키는 방법이다. Chen^(3,4), Yang⁽⁵⁾, Srivastava⁽⁶⁾ 등은 공작기계의 제어기 원점을 PMC 를 통하여 외부 PC 에서 직접 수정해주는 방식을 이용하여 시스템을 구성하고 공작기계의 다양한 가동조건에 따른 열변형 오차를 보정하는 연구를 수행하였다. 이 방법으로는 보정 주기가 약 20Hz, 즉, 50ms 의 주기로 축의 원점 좌표 값을 변경시켜 보정을 수행할 수 있으며, Yang⁽⁵⁾에 의하면 공작기계의 열변형은 기계에 따라 약간의 차이는 있지만 30 분에 10 μ m 정도의 변형이 생기므로, 20Hz 의 보정 주기를 가지는 시스템의 경우 열변형 오차를 보정하는 데에는 무리가 없음을 알 수 있다.

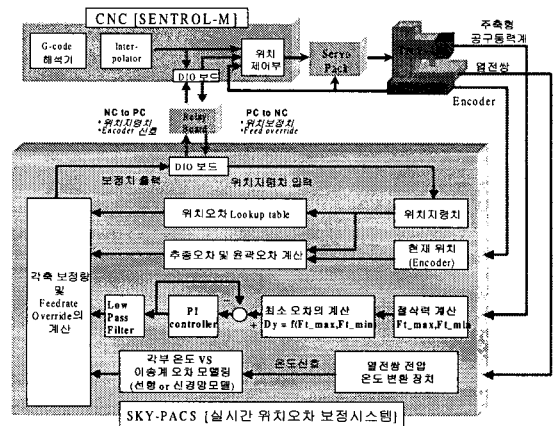


Fig. 1 Dynamic positioning error compensation system

마지막으로 공작기계의 제어주기만큼의 빠르기로 위치 보정을 실시하는 동적 오차보정 시스템이 있다. 동적 오차보정 시스템은 공작기계 X-Y 테이블의 직각도 오차나 절삭력에 의한 가공오차를 보정하기 위하여 대상 CNC 의 제어주기로 보상을

수행하는 시스템이다⁷⁾. CNC 의 제어주기로 보상을 수행하므로 2축, 3축 동시 이송 시에 발생하는 윤곽오차나 절삭력의 변화보다 빠르게 보정을 수행하여야 하는 시스템에 적합하다. Fig.1 은 소프트웨어 오차보정시스템의 개념도를 나타내고 있다. 오차보정시스템은 CNC 의 외부에 존재하며, CNC 에서 보정에 필요한 정보를 얻어 이를 기준으로 보정값을 계산, 출력하는 역할을 하고 있다.

3. 기하학적 오차의 보정

기하학적오차는 대조립 후에 기계에 남아있는 오차들을 말하며 다음과 같은 종류로 나누어 볼 수 있다.

- 가) 위치결정정밀도(Positioning accuracy)
- 나) 진직도 오차(Straightness)
- 다) 이송계 각축의 각도 오차(Angle error)
- 라) 이송계 축사이의 직각도 오차(Squareness)
- 마) 백래쉬 오차
- 바) 추중오차 (Contouring error)

상용 CNC 에서는 위치결정 정밀도와 백래쉬 오차 보정을 위한 기능을 제공하고 있으나, 진직도 오차, 각도오차, 직각도 오차의 경우에는 대조립, 소조립 시에 조정을 통하여 허용공차를 만족시키는 방법을 주로 사용하고 있다.

근래에 들어 PC-NC 및 고성능의 CNC 가 개발되면서 기존의 방식에 비해 보다 정밀한 보정이 가능해 지고 있으며, 위치결정오차의 경우 기존의 일정간격사이의 Step 보정이나 보정값 사이의 선형 보간을 통한 보정보다 발전된 형태의 보정 방법이 연구 되고 있다.

정재일⁷⁾등은 상용 공작기계의 CNC 와의 병렬 통신을 통하여 CNC 의 제어주기 만큼의 속도로 보정을 수행하는 동적 오차보정 시스템(SKY-PACS)을 구성하고 이를 이용하여 위치결정오차 및 직각도 오차를 보정하는 연구를 수행하였다. Fig.2 은 동적위치오차 보정 시스템을 이용하여 위치결정오차의 보정을 수행한 결과이다.

그리고, 박희제⁸⁾등은 상용 머시닝 센터의 CNC 와 삼차원좌표측정기(CMM)의 제어기를 연결하여, 시험 절삭한 소재를 CMM 에서 측정된 뒤에, 측정결과에 의거하여 곧바로 머시닝 센터 CNC 에 내장된 피치오차 보정표를 수정할 수 있는 보정시

스템을 연구하였다.

일본의 FANUC 사⁹⁾에서도 1999 년 발표된 논문을 통하여 새로운 보정방법을 통하여 정밀한 위치결정오차를 가지는 시스템을 제시하였다. 기존 CNC 에서 사용되던 보정표 방식을 좀더 세밀하게 만들어 볼스크류의 피치 오차의 선형 성분만이 아니라 가공오차에 의한 사인성분까지 보정을 수행한 연구 결과를 보고하였다.

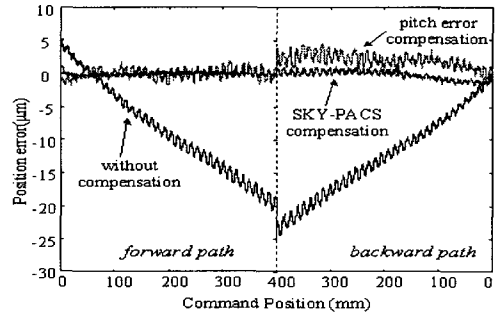


Fig. 2 Positioning accuracy after & before error compensation [7]

4. 절삭력에 의한 공구 처짐 오차의 보정

절삭력에 의하여 가공물에 생기는 오차는 칩재, 절삭력에 의해 공구가 탄성변형을 일으켜 발생하는 가공오차와 들쭉, 가공물의 탄성변형에 의한 오차로 나눌 수 있다. 특히 엔드밀을 이용한 가공을 하는 경우에는 엔드밀이 주축의 한쪽 끝에 매달려 있는 형태로 가공이 이루어지며, 이 때문에 절삭력에 의하여 엔드밀의 처짐이 발생하는 경향이 있다.

고 정밀 가공을 위하여 반드시 필요한 분야임에도 불구하고 열변형이나 기하학적오차의 보정에 대한 연구에 비하여 절삭력에 의한 오차보정 연구에 대한 보고는 많지 않은 편이다. 이것은 가공물의 정밀도가 결정되는 정삭 과정에서 절삭력은 무시할 만큼 작으며, 공구 처짐 또한 무시할 만큼 작기 때문이다. 그러나, 금형제작과 같은 분야에서는 경도가 매우 높은 재료에 대해 연삭 가공을 수행하지 않고 최종 형태로 가공하는 사례가 점점 늘어나고 있으며, 깊은 포켓과 같이 가공물의 형태가 특수한 금형을 절삭가공 해야 할 경우도 차츰 늘어나고 있는 추세이며, 이와 같은 경우에는 절삭력에 의한 공구 처짐 오차를 무시할 수

없다. 따라서 현재는 절삭력에 의한 가공오차의 보정에 대한 연구가 미미한 편이나 앞으로는 연구가 활발히 이루어질 것으로 생각된다.

4.1 국내외 연구 동향

Watanabe 등⁽¹⁰⁾은 주축에 스트레인 게이지를 이용한 토크센서를 장착하고 측정값에서 공구의 처짐을 계산할 수 있는 모델링을 구성하였다. 보정은 적응제어를 이용한 공구위치 보정과 이송속도 오버라이드를 이용한 이송속도 변화를 통하여 가공오차를 줄이는 보정 방법을 사용하였다.

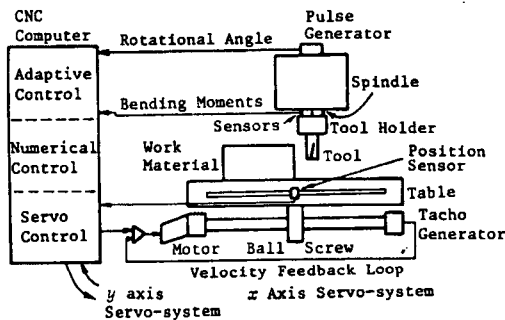


Fig. 3 compensation system for cutting-force induced error[10]

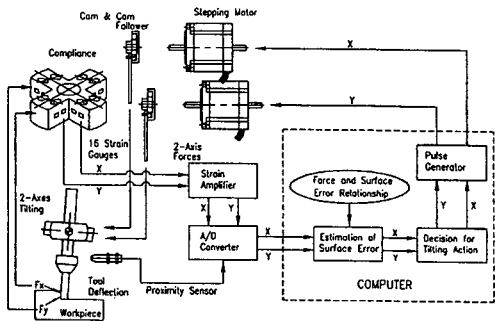


Fig. 4 Configuration for the tool deflection compensation system[12]

S.Yang, S.Yuan, J.Ni⁽¹¹⁾는 Turning 센터에 대해 공구가 설치되는 부분에 압전소자(piezo)를 장착하여 절삭력을 측정하고 가공물의 처짐과 공구에 처짐을 모델링하여 가공오차를 예측하였다. 이와 같이 측정된 절삭력 대 처짐 모델링에서 보정값을 계산하고 PMC를 통하여 보정 신호를 CNC로 출력하여 보정을 수행하였다.

M.Y.Yang⁽¹²⁾등은 엔드밀 가공 시에 절삭력이

공구를 기울어지게 하는데 착안하여 엔드밀을 직접 기울어지게 할 수 있는 장치를 개발하여 가공오차의 보정을 수행하였다. 이 시스템은 주축에 장착한 후 내부에 설치된 스트레인 게이지로부터 절삭력을 측정하고, 측정값과 절삭력에 의한 공구 처짐을 모델링하여 보정을 수행하였다.

5. 열변형의 오차의 보정

열변형 오차는 열원의 전파와 오차사이에 비선형성으로 인해 설계와 생산 단계에서 오차를 줄이는 것은 어려운 점이 많다. 특히 고정도 가공을 요하는 현실에서 전체 가공오차의 40~70%를 차지하는 열변형 오차는 반드시 고려되어야 할 부분이다. 공작기계의 열변형은 주 열원인 주축부와 이송계를 중심으로 발생하기 때문에 이들에 대한 보정 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다.

상용 공작기계의 열변형 오차를 막기 위해서는 열팽창 계수가 낮은 재료의 사용이나 냉각시스템의 설치로 열 발생을 제거하거나, 기계 각부의 온도로부터 오차량을 예측하여 실시간으로의 보정하는 등의 고려가 필요하다. 전자가 근본적으로 열변형 오차를 줄일 수 있는 방법이지만 생산 비용의 향상으로 가격이 높아지기 때문에 상대적으로 효율적인 보정 알고리즘에 대한 연구가 보다 활발하게 진행되고 있는 실정이다.

열변형 오차의 보정 방법은 직접 보정 방법과 간접 보정 방법으로 나눌 수 있다. 직접 보정 방법은 실제 절삭 중에 주기적으로 가공물의 오차를 측정하여 보정하는 것이고 간접 보정 방법은 기계 각부의 온도 변화를 파악하여 이를 열변형 오차와 연결하는 방법이다. 직접 보정 방법은 실제 절삭시 절삭유나 칩에 의해 생기는 문제를 해결해야 하고 고비용을 감수해야 하는 어려움 때문에 현실적으로 불가능하여, 현재는 간접 보정 방법을 많이 쓴다. 간접 보정 방법에서 사용하는 모델링으로는 선형회귀법과 인공 신경망을 많이 사용하는데 전자는 선형성을 가정한 데서 기인하는 한계가 있으나 오차의 원인을 설명하기가 용이하고, 후자는 비선형 문제의 해결에는 유용하지만 오차 원인의 설명과 분석이 어렵다. 이외에 FEM과 유한차분법으로 기계의 오차를 예측하는 방법은 오차의 경향을 파악하는 데는 좋지만 정확한 경계조건을 찾기 어렵고 해석에 오랜 시간이 걸리기 때문에

실제로 적용하기는 어렵다. 단 오차의 원인과 분석에는 유용한 도구로 쓰일 수 있다.

5.1 국내 산업계 동향

학계에서 진행되는 많은 연구에 비해서 실제 산업계에서 공작기계에 적용되는 사례는 아직 미미한 실정이다. 왜냐하면 공작기계의 열 변위 특성이 아직 명확하게 규정되어 있지 않으며, 열변형 보정 시스템의 구현을 위해서는 기계마다 많은 양의 실험이 필요하기 때문이다. 또한 다양한 외부조건에 대한 열변형 오차의 민감도도 공작기계에 열변형 보정 시스템을 적용하는데 걸림돌이 되고 있다. 따라서 빠른 시간 내에 설치가 가능하며, 외부환경에 민감하지 않은 견실한 시스템의 구축이 중요한 문제로 대두되고 있다. 현재 산업계에서는 열변형 오차를 줄이기 위하여 제작단계에서 열팽창 계수가 낮은 재료를 사용하거나, 공작기계 각 부위의 온도로부터 발열부의 오차를 예측하는 보정시스템을 연구하고 있다. 보정 시스템의 연구는 열변형 오차의 50% 이상을 차지하는 주축부 열변형 오차를 중심으로 이루어지고 있으며, 그 중요성이 널리 인식되면서 이송계에도 점차 확산되어 가고 있다. 대우중공업은 열원의 차단을 위해서 주축에 쿨링자켓을 설치하여 베어링의 발열을 차단하는 연구를 진행하고 있으며, 대우중공업과 통일중공업은 주축 주위에 열전쌍을 부착하여 그 온도분포로부터 주축의 오차를 선형적으로 예측하여 보상하는 수직형 공작기계를 실제 생산하고 있다.

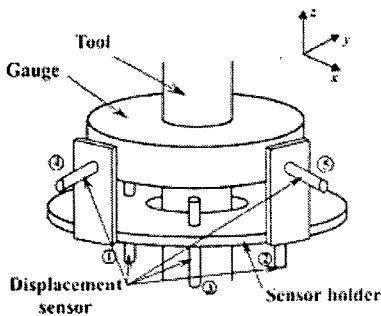


Fig. 5 Diagram of compact measuring system. [13].

5.2 국내 연구 동향

조동우⁽¹³⁾ 등은 Fig.5 처럼 실제 절삭 시 스피들 오차 측정을 위한 시스템을 개발하였으며, 새로운

개념의 인공신경망(Neural network)을 이용, 오차를 모델링 하였다. 기존의 인공신경망은 발열부의 온도를 입력으로 사용하여 오차를 예측한 반면, 이 연구에서는 절삭력, 외기 온도, 절입 깊이, 주축 회전수, 절삭시간, 공구 위치를 입력으로 오차를 예측하여 오차함수 생성에 필요한 실험을 최소화하고자 하였으며, 3 μ m 이내의 오차예측 성능을 보여주었다

김수광⁽¹⁴⁾ 등은 11 개의 T-type 열전쌍과 적외선 복사 열전쌍 (infrared radiation thermocouple) 을 이용하여 볼스크류의 온도 분포를 조사하였으며, FEM 을 이용하여 실시간으로 볼스크류 전체의 온도 분포를 예측할 수 있는 모델을 생성하였다. 레이저 간섭계를 이용하여 오차를 측정하고, 볼스크류와 가이드에 대해서 MLCM (modified lumped capacitance method) 와 GEA (genius education algorithm)을 이용하여 오차모델함수를 생성하여 3.79 μ m 이내의 정밀도를 보여주었다.

이석원⁽¹⁵⁾ 등은 수직형 공작기계를 대상으로 하여 19 개의 열전쌍을 부착하고, 레이저 간섭계를 이용하여 이송계, 주축부의 21 종류의 오차를 측정하였다. 체적오차(volumetric error)를 보정하기 위한 수학적인 전개 수단으로 동차변환행렬을 사용하였으며, 상관 계수식을 이용하여 각 축에 민감한 열전쌍을 결정하고, 선형 회귀법, 인공신경망, 시스템 검증법을 사용, 오차를 모델링하여 상호 비교하였다. 실시간 보정 시스템으로 실제 보정한 결과 $\pm 5 \mu$ m 이내의 성능을 확인할 수 있었다.

5.3 국제 연구 동향

Jianguo Yang⁽¹⁶⁾ 등은 turning center 의 볼스크류를 비롯한 기계 각부에 16 개의 써미스터 (thermistor)를 장치하였고, 오차의 원인을 냉각제 온도, 볼스크류의 팽창, 스피들의 변형의 3 가지로 나누어 각각에 대한 열 변위의 특성을 파악하려 하였다. 또한 최소 오차만을 목적으로 하지 않고, 다양한 환경적 요인을 고려하여 견실한 오차모델을 찾고자 하였다. 4 개의 써미스터만을 사용하여 35 μ m 의 오차를 6 μ m 이내로 줄인 결과를 제시하고 있다.

Chih-Hao Lo⁽¹⁷⁾ 등은 2 개의 스피들을 가지는 수직형 터닝센터에 총 46 개의 열전쌍을 설치하였고, 이들 중 오차모델을 위한 최적의 열전쌍을 찾아내고자 하였다. 이 연구에서는 Group technology

라는 최적화 기법을 사용하였는데, 이는 기계 각 부 열전쌍들의 상관관계를 측정하여 그룹으로 나누고, 이들 중 대표온도를 찾아 변수를 결정하는 방식이다. 직관에 의한 결정과 선형 회귀법, 상관관계법등을 Group Technology 와 더불어 언급하고 있으며, 46 개의 열전쌍 중 4 개만을 사용하여 20 μm 의 오차를 2.2 μm 이내로 감소시킨 결과를 보여주고 있다.

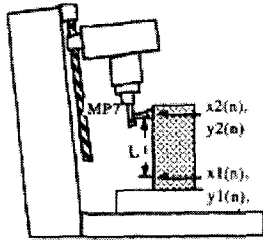


Fig. 6(a) Calibration of column bending [3]

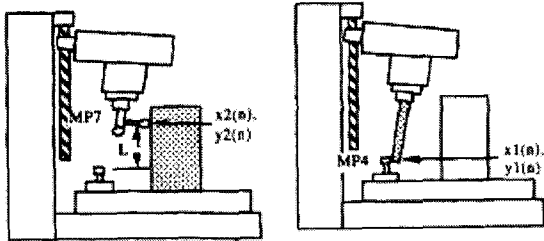


Fig. 6(b) Calibration of the tool-axis inclination [3]

J.S. Chen^(3,4)등은 열 대부분의 열변형 보정을 위한 실험이 무 부하 상태에서 진행되는 것에 의문을 제기하였다. 실제 절삭 시에는 냉각제의 순환이나 절삭력 등의 발생으로 기계의 열적 현상이 달라지기 때문이다. 따라서 Fig.6 와 같이 실제 절삭 시에 오차를 측정할 수 있는 탐침(probe)을 사용하여 무 부하 상태의 실험이 실제 절삭 시 적용될 수 없다는 것을 증명하였다. 또한 ANN (Artificial Neural network)을 사용한 오차모델을 생성하여 실제 절삭 시에도 40 μm 의 오차를 5 μm 이내로 감소시킬 수 있다는 것을 보여주었다.

Manfred Weck⁽¹⁸⁾등은 밀링머신에 Fig.7 과 같이 40 개의 열전쌍을 설치하고 인공지능망을 이용하여 스펀들의 오차모델을 생성하였다. 자동으로 net size 를 결정하는 알고리즘을 생성하여 최소의 필요 열전쌍을 결정하고 NC 통하여 실제 보정하였다. 각 축 방향으로 평균 8 μm 이내의 오차성능을 확인하였으며, 선형회귀법과 모든 열전쌍을 사용

한 인공지능망의 결과로부터 자동 신경망 크기 결정 알고리즘의 효율성을 증명하고자 하였다.

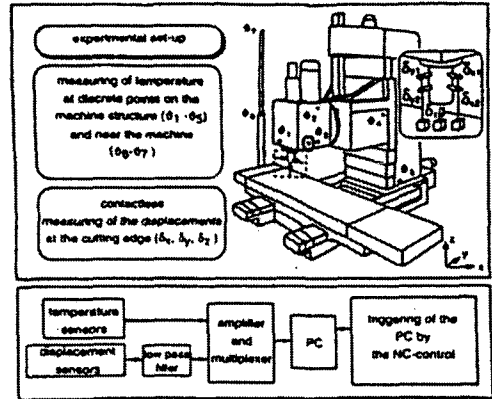


Fig. 7 (a) Experimental set-up [18]

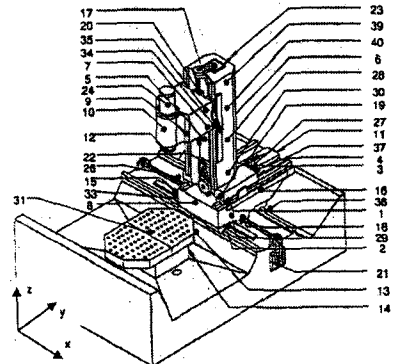


Fig. 7 (b) investigated milling machine [18]

6. 결론

위치결정정밀도의 향상을 위한 소프트웨어 보정은 대상기계에서 발생하는 오차의 원인들을 반영하는 센서측정값과 각 상태에서의 오차값을 모델링하고 작동조건에 따라 변화하는 오차의 보정을 수행하는 방법으로 정의된다. 보정되는 주기에 따라 정적, 준정적, 동적 오차보정 시스템으로 나뉘어지며, 그 중 동적 오차보정 시스템은 대상 CNC 의 제어주기로 보정이 이루어지는 시스템을 말한다. 소프트웨어를 이용한 보정 방법을 이용하여 기하학적오차, 열변형에 의한 오차, 절삭력에 의한 오차들을 보정하는 연구가 수행되고 있으나, 주로 열변형과 같이 작동조건에 따라 변화하는 오차원인을 보정하는데 사용되어 왔다. 소프트웨어

보정으로 열변형을 보정하기 위하여 대상기계의 주요발열부의 온도를 센서를 이용하여 측정하고 온도 대 오차사이의 모델링으로부터 보정값을 결정하고 이를 적용시키는 것이다.

CNC 제어기의 고지능화와 개방형 CNC 의 개발, PC-NC 의 적용등에 의해 소프트웨어를 이용한 보정방법은 쉽게 대상 기계에 적용할수 있게 되었으며, 앞으로도 널리 쓰일 것으로 생각된다.

참고문헌

1. S.Satori, G.X.Zhang, "Geometric error measurement and compensation of machines," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 2, pp. 599-609, 1995.
2. V. S. B. Kiridena , P. M. Ferreira, "Computational approaches to compensating quasistatic errors of three-axis machining centers," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 1, pp. 127-145, 1994.
3. J. S. Chen, G. Chiou, "Quick test and modeling of thermally induced errors of CNC machine tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 7, pp. 1063-1074, 1995.
4. J. S. Chen, J .X. Yuan, J. Ni and S. M. Wu, "Real-time compensation for time variant volumetric errors on a machining center," *Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 472-479, 1993.
5. S. Yang, J. Yuan and J. Ni, "Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation," *Journal of manufacturing systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 113-124, 1996.
6. A. K. Srivastava, S. C. Veldhuis and M. A. Elbestawit, "Modelling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 9, pp. 1321-1337, 1995.
7. 정재일, 김홍원, 남원우, 이상조, "CNC 공작기계용 온라인 실시간 위치오차 보정시스템 개발," *한국 정밀공학회지*, 제 16 권, 제 10 호, pp. 45-52, 1999.
8. Heui-Jae Pahk, Jong-Hoo Kim and Kyo-Il Lee, "Integrated real time compensation system for errors introduced by measurement probe and machine geometry in commercial CMMs," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 9, pp. 1045-1058, 1996.
9. 寺嶋洋也, 泥田 潔, "高精密ピッチ誤差補正機能," *日本精密工學會誌 秋季學術大會*, pp. 517, 1999.
10. T. Watanabe and S. Iwai, "A control system to Improve the accuracy of finished surfaces in milling," *Transaction of the ASME, Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control*, Vol. 105, pp. 192-199, 1983.
11. S. Yang, J. Yuan and J. Ni, "Real-time cutting force induced error compensation on a turning center," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 11, pp. 1597-1610, 1997.
12. M.Y.Yang and J.G.Choi, "A Tool Deflection Compensation system for endmilling accuracy improvement," *Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing science and engineering*, Vol. 120, pp. 222-229, 1998.
13. K.G. Ahn , D.W. Cho, "In-process modeling and estimation of the thermal induced errors of a machine tool during cutting," *Int. J. Adv. Manufact. Technol*, 15, pp. 299-304, 1999.
14. S.K. Kim , D.W. Cho, "Real-time estimation of temperature distribution in a ball-screw system," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, pp. 451-464, 1997.
15. 이석원, "CNC 공작기계의 스핀들과 이송축 열변형 오차의 측정 및 보정시스템 개발에 관한 연구" 서울대학교 공학박사학위논문, 2000.
16. Jianguo Yang, Jingxia Yuan, Jun Ni, "Thermal error mode analysis for error compensation on a CNC turning center," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 39, pp. 1367-1381,1998.
17. Chih-Hau Lo, Jingxia Yuan, Jun Ni, "Optimal temperature variable selection by grouping approach for thermal error modeling and compensation," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 39, pp. 1383-1396, 1999.
18. Manfred Weck, Uwe Herbst, "Compensation of thermal errors in machine tools with a minimum number of temperature probes based on neural networks," *ASME*, pp. 423-430, 1998.