

◆ 특집 ◆ 자동화를 넘어 자율화 (첨단제조를 위한 자율화)

## 공작기계 장시간 가공중 열변형의 CNC 자율보정 기술

### Autonomous Compensation of Thermal Deformation during Long-Time Machining Process

김동훈<sup>1,✉</sup>, 송준엽<sup>1</sup>  
Dong-Hoon Kim<sup>1,✉</sup> and Jun-Yeob Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀시스템연구소 (Department of Ultra Precision Machines & Systems, KIMM)  
✉ Corresponding author: kdh680@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7148

Manuscript received: 2014.2.11 / Revised: 2014.3.10 / Accepted: 2014.3.14

*The biggest factors, which lower the machining accuracy of machine, are thermal deformation and chatter vibration. In this article, we introduce the development case of a device and technology that can automatically compensate thermal deformation errors of machine during long-time processing on the machine tool's CNC (Computerized Numerical Controller) in real time. In machine processing, the data acquisition of temperature signal in real time and auto-compensation of the machine origin of machine tools depending on thermal deformation have significant influence on improving the machining accuracy and the rate of operation. Thus, we attempts to introduce the related contents of the development we have made in this article : The development of a device that embedded the acquisition part of temperature data, linear regression to get compensation value, compensation model of neural network and a system that compensates the machine origin of machine tool automatically during manufacturing process on the CNC.*

Key Words: Thermal Deformation (열변형), Compensation (보상), CNC (수치제어기), Machining Process (가공 공정)

#### 1. 서론

일반적인 머시닝 센터와 같은 공작기계에서 가공에 미치는 파라미터를 분석하면 열변형, 채터 그리고 공구 마모 등이며, 이 중에서 열변형이 전체 오차원인의 70%, 채터진동이 30% 가까이 차지하고 있다. 즉, 공작기계에서 가공정밀도를 저하시키는 가장 큰 요인은 열변형이다.<sup>1-3</sup> 공작기계는 가공을 위해 X축과 Y축 및 Z축으로 이동하는 가공툴을 가지는데 가공툴은 온도에 민감하여 가공시간이 지남에 따라 온도가 변화되어 열변형을 초래한다.<sup>4,6</sup> 본 연구는 공작기계가 장시간 가공 중 열

변형이 일어나 가공 축의 처짐 등에 따른 가공 오차가 발생시 이를 실시간으로 보상하여 가공정밀도 저하를 방지하기 위하는 것이 목적이다. 구체적으로는 이를 위하여 열변형 보상 알고리즘이 탑재된 공작기계 열변형 보상 진단용 임베디드 디바이스 및 CNC연계 실시간 보정시스템에 관한 것이다. 열변형을 고려한 것은 열 변형이 공작기계에서 발생하는 오차 중 가장 큰 원인을 차지하며 이와 같은 오차는 공작기계의 정밀도에 심각한 영향을 미치기 때문이다. 이를 해결하기 위하여 열 변형 예측모델 및 기계원점 보정을 위한 기능이 공작기계의 컨트롤러인 CNC에 실장되어 테스트 되

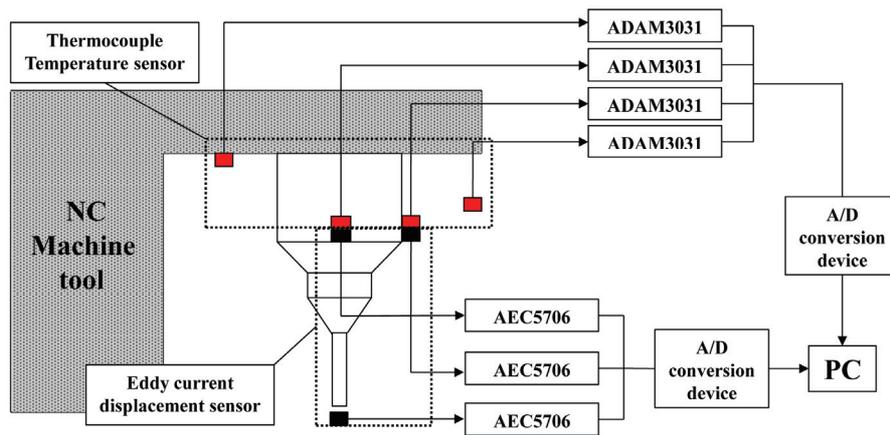


Fig. 1 Basic experimental environment

었다. 이는 장시간 열변형이 발생하여도 기계 가공 중 실시간으로 기계원점 보정이 자율적으로 이루어져 가공 품질을 높이고 불량을 최소화하기 위한 것이다.

## 2. 기존연구 분석

열변형 오차를 줄이는 해결책은 대상 기계의 설계 변경을 통한 개선과 오차 보상 기술로 나눌 수 있다. 설계 개선에 의한 방법은 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에 그 적용에는 한계를 가지고 있다. 오차 보상방법은 열변형 예측과 보상제어로 이루어지는데 여기서 열변형 예측은 해석적 방법과 경험적 모델에 의한 방법으로 적용되고 있다. 국내에서 주로 하는 해석적 방법으로는 유한요소법과 유한차분법이 대표적이며, 이방법은 기계의 경계조건 및 여러 절삭조건에서 변화하는 열발생율에 대한 충분한 정보를 제공하지 못하기 때문에 정확성을 보장할 수 없을 뿐만 아니라 해석에 소요되는 시간 때문에 실시간 오차보상에는 적용하는 것은 불가능하다.

따라서 국외에서는 공작기계의 실시간 오차보상으로 계산시간이 짧은 경험적 모델을 사용하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 열 오차 보상은 주로 PC를 이용하여 열 오차 모델을 통해 온라인으로 계산된 보상값을 실시간으로 공작기계에 적용하는 방법으로 구현되어 왔다. 또한 보상신호의 적용은 실시간 NC 명령 수정, 기계 서보루프의 위치 피드백 신호에 아날로그 전압을 삽입하는 아날로그 보상, 그리고 디지털 I/O 통신 포트를 이용하

여 CNC 제어기에 디지털 값을 전송하여 기계서보루프의 구동신호를 수정하는 디지털 보상이 있다. 그러나 NC 명령수정 기법은 이송명령의 양 끝점만 보상이 되고 고속가공의 실현에는 장애가 된다. 또한 아날로그 및 디지털 보상작업은 적용할 수 없는 공작기계가 많은 뿐만 아니라 구현하기가 어려우며 기계의 피드백신호와 충돌하지 않도록 해야 한다.

국내외 모두 무엇보다 기존의 모든 방법들은 PC나 노트북을 이용하여 열변형에 따른 보상치, 즉 기계 원점을 얼마만큼 +, -하여야 열변형에 따른 치짐 등을 보상할 수 있을지 기계원점 Offset값을 계산하여 분석하는 정도였다. 이는 PC나 노트북을 이용함으로써 기계와의 실시간성이 떨어지며, 특히 실제 기계가공 중 보상은 이루어지지 않는다. 따라서 장시간 가공중 가공축의 열변형이 발생하여도 가공 중에 실시간 기계원점 보정이 자율적으로 이루어져 가공 품질을 높이고 불량을 최소화하는 차별적 방안이 필요한 것이다. 이러한 배경으로 본 논문에서는 임베디드 타입의 열변형 보상장치 개발 및 CNC연계를 통하여 실시간 가공중 보상을 이루도록 하였다.

## 3. 보상알고리즘 내장형 열변형 보상장치

열변형 데이터 취득을 위하여 Fig. 1과 같이 실험환경을 구성하였다. 즉, 공작기계에는 가공툴이 장착되며 가공툴의 주변으로는 X축, Y축, Z축의 변위를 측정하기 위한 와전류변위센서를 연결한다. 또한, X축, Y축, Z축, 및 대기의 온도를 측정하기

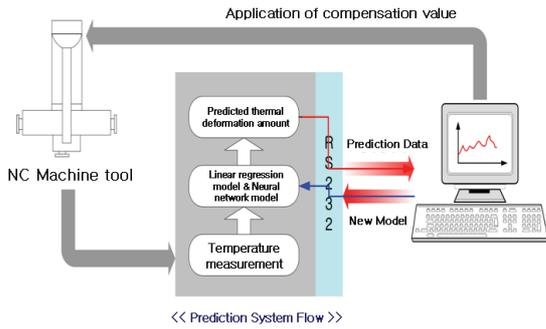


Fig. 2 Interface concept by using embedded device with compensation algorithm

이한 열전대 온도센서를 연결한다. 이러한 열전대 온도센서로부터의 각 X축, Y축, Z축, 및 대기의 온도값이 A/D 변환장치로 입력되고, 한편 와전류변위센서로부터 X축, Y축, Z축의 변위값이 A/D 변환장치로 입력된다. PC는 두 개의 A/D 변환장치로부터 입력된 온도데이터와 변위데이터를 입력받아 열변형데이터를 측정할 수 있다. 이러한 열변형데이터로부터 오차보상값을 산출하여 룩업테이블화하였다.

이러한 경우, PC나 노트북을 이용하여야 하므로 기계와의 실시간이 떨어져 가공중 실제 보상이 이루어지지 않는다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2처럼 공작기계의 열 변형에 따른 온도신호의 실시간 데이터 취득 및 가공중 공작기계 원점 자율보정을 이루기 위하여 보정값 추출을 위한 선형회귀법과 신경회로망 기반의 보정모델이 탑재된 데이터 취득부를 임베디드화한 디바이스로 개발하며, CNC와 연계되어 가공중 실제 자율보정이 되는 시스템 구조를 정립하였다.

본 연구의 열변형 보상 알고리즘은 중선형 회귀모델과 신경회로망 모델로 구성이 된다. 두 모델은 공작기계의 온도 변화와 이로 인한 공구 끝단의 변형량과 관계된 측정 데이터를 기반으로 도출하였다. 본 연구의 열변형 보상 알고리즘 중 중선형회귀 모델은 어떤현상이 변수들과의 인과관계에 의해 나타날 때 그 관계를 수학적으로 설명하기 위한 통계적인 방법이다. 본 연구에서 적용된 회귀모델의 계수 추정은 최소제곱법을 이용하였다. 아래 수식은 본 연구에서의 중선형회귀모델의 일반식을 나타내고 있다. 여기서 y는 열변형 예측치를 나타내고 x는 각 축의 온도와 대기온도를 나타내고 있다.

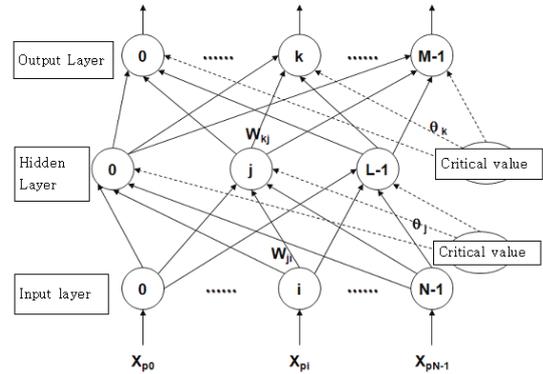


Fig. 3 Architecture of neural network for compensation algorithm

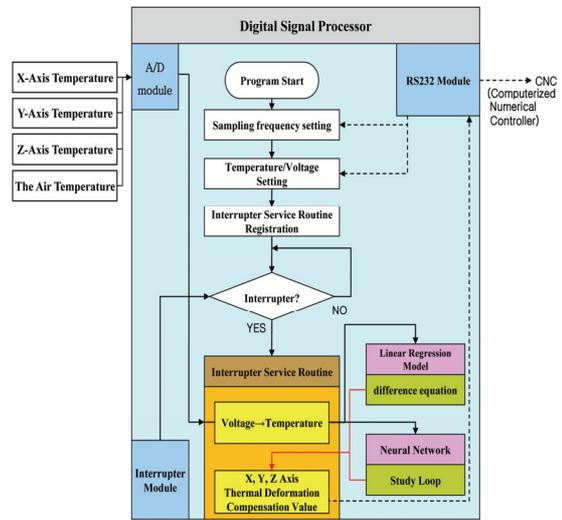


Fig. 4 Internal mechanism of embedded device

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \\
 Y_2 &= \beta_5 + \beta_6 X_1 + \beta_7 X_2 + \beta_8 X_3 + \beta_9 X_4 \\
 Y_3 &= \beta_{10} + \beta_{11} X_1 + \beta_{12} X_2 + \beta_{13} X_3 + \beta_{14} X_4
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

본 연구에 적용된 신경회로망 모델은 학습방법으로 오류역전과법을 사용하는 다층 퍼셉트론 구조를 채택하였다. Fig. 3은 본 연구에서 적용된 다층 퍼셉트론 구조를 나타내고 있다. 여기서 는 입력층과 은닉층의 결합강도를 나타내고, 는 은닉층과 출력층의 결합 강도를 나타내고 있다. 본 연구에서 결합강도와 신경회로망 모델의 관계 계수들은 측정된 온도와 변형량을 기초로하여 최소 10000회 이상의 학습을 통해 결정되었다.

Fig. 4처럼 임베디드를 위한 DSP에서 선형회귀 모델(linear regression) 및 신경회로망(Neural network) 모델을 기반으로 하는 보정모델은 연산에 소요되는 시간이 최소가 되도록 알고리즘화 되었으며, 인터럽트 발생시 사용자에게 의해 선택된 모델로 분기하도록 설정되어 있다.

**4. 실시간 CNC 연계 오프셋 보정**

기계 가공중 실시간 자동보상을 위해서는 공작기계 제어기인 CNC를 통한 3축(X, Y, Z)의 기계원점값의 자율보정이 필요하다. 이를 위하여 임베디드 보상장치와 CNC를 다음과 같은 프로그래밍 인터페이스 방식으로 연계하였다. 즉, 공작기계 제어기 커널인 NC Kernel 변수 [예: \$P\_UIFR(...)] 및 Link 변수 [예: /Channel/UserFrame/LinShift(...)]를 접근할 수 있도록 사용자 코드(VC++)작성 및 HMI (Human Man Interface, CNC 화면영역)에 OEM서브모듈로 기능을 임베디드를 함으로 CNC에 실장하였다.

따라서 온도 데이터 취득 및 보정모델을 통한 보상값 생성 모듈은 임베디드 디바이스로 제작되어 공작기계 3축 열변형 발생 위치에 연결되었으며, 실제 가공을 총괄하는 프로세서인 공작기계 CNC에는 CNC 내부의 파라미터를 가공중 자동 변경할 수 있는 보정액션 기능이 임베디드되어 있어 실시간 자율 보정이 이루어진다. Fig. 5에 기계 가공중 실시간 자동보상이 가능하도록 공작기계 CNC에 자율보정 기능을 내부에 구현한 결과를 나타내었다.

CNC 자율보정을 통하여 가공중 열변형 보상이 효과가 있었는지 확인하기 위하여 Fig. 6처럼 실제 장시간(13시간 이상) 가공 및 보정 실험을 수행하였다. 여기서 보상기능 없이 가공만 한 경우의 가공 오차와, 작업자 개입을 통한 수동 보상에 의한 가공 오차, 그리고 가공중에 공작기계 CNC상에서의 자율 보정을 통한 자동보상에 의한 가공 오차를 가공시간과 같이 분석 비교하였다.

실제 가공 및 보정 실험 후 다음과 같은 결과를 얻었다. 결과적으로 보상기능 없는 경우는 장시간 가공중 16.5 $\mu$ m이라는 가공오차가 발생하여 정밀도가 많이 저하되었지만, 자율보상 기능의 경우 장시간 가공중에도 가공오차가 3.9 $\mu$ m로 가공오차가 보상기능없을 때 보다 70% 이상 개선되었다. 그리고 임베디드 보상장치와 CNC의 연계를 하지 않고 작업자가 CNC를 조작하면서 수동으로 보상

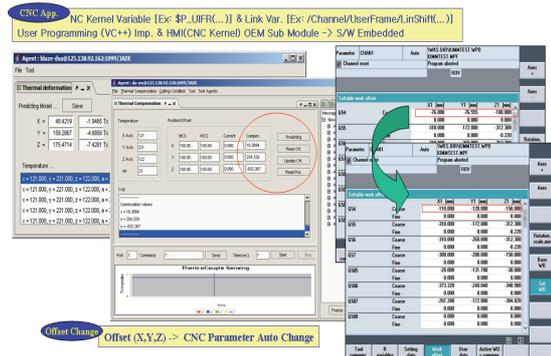


Fig. 5 CNC based autonomous change of offset values for thermal deformation compensation

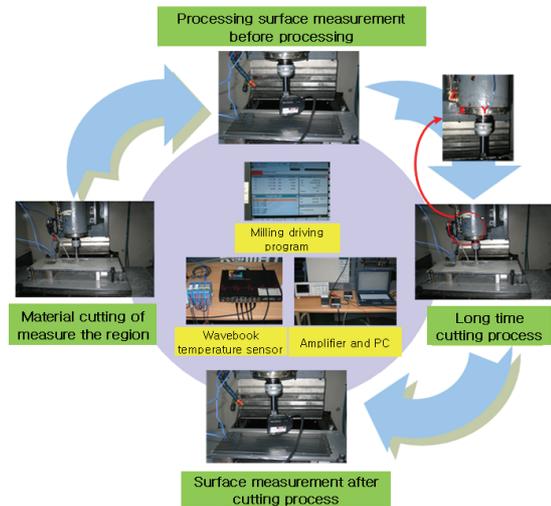


Fig. 6 Evaluation experiment during long-time machining process

한 경우는 보상기능이 없을 때 보다는 가공오차가 줄었지만, 자동보상의 경우보다는 가공오차가 1.9 $\mu$ m만큼 많이 발생하였고 가공시간 또한 자동보상의 경우보다 9.1% 정도 길어졌다. 이는 기계를 정지 시키고 보상치를 적용한 후 다시 가공하는 과정에서 기계적인 백래쉬 등의 오차로 인하여 가공 정밀도가 떨어지며, 가공시간도 작업자 개입시간인 더 걸린 것으로 확인되었다.

**5. 결론**

본 연구의 결과인 열변형 보상 알고리즘이 탑재된 임베디드 디바이스는 데이터 취득부 및 보정

을 위한 보상모델이 PC 기반이 아니라 하드웨어로 임베디드 되어 있어서 실시간으로 가공툴의 3축 및 대기온도 등의 신호취득이 가능하고 기계원점 보정값의 산출이 실시간으로 구하여 진다는 장점과 적용대상 공작기계의 변경 시 새로운 보상모델의 적용이 편리한 장점을 가지고 있다. 또한, 공작기계 제어기인 CNC와 연계되어서 실제 가공중 자율보정이 실시간으로 이루어지는 것이 장점이 있었다. 그리고 기존의 열보상을 위해 적용된 공작기계의 설계 개선을 통한 방법에 비해 시간과 비용측면에서 유리할 뿐만 아니라 서보루프의 구동 신호를 변경하는 기존의 아날로그 및 디지털 보상 방법에 비해 적용이 매우 간편하고 실시간성이 우수하여 생산성 향상 및 경제적인 이득을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## REFERENCES

1. Kim, D. H. and Song, J. Y., "Ubiquitous-Based Mobile Control and Monitoring of CNC Machines for Development of u-Machine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 455-466, 2006.
2. Kim, D. H. and Song, J. Y., "Knowledge-Evolutionary Intelligent Machine-Tool - Part 1: Design of Dialogue Agent based on Standard Platform," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 11, pp. 1863-1872, 2006.
3. Cheah, R., "Design and Implementation of an MMS Environment on ISODE," *Computer Communications*, Vol. 20, No. 15, pp. 1354-1364, 1997.
4. Kim, D. H., Kim, S. H., and Koh, K. S., "CNC-Implemented Fault Diagnosis and Web-based Remote Services," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 5, pp. 1095-1106, 2005.
5. Wright, P. K., "Principles of Open-Architecture Manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 187-202, 1995.
6. Yellowley, I. and Pottier, P. R., "The Integration of Process and Geometry within an Open Architecture Machine Tool Controller," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 34, No. 2, pp. 277-293, 1998.