

# 지능제조설비를 위한 열변형 보상장치 및 실시간 CNC보정 기술 개발사례

김동훈, 송준엽 | 한국기계연구원  
차석근 | (주)에이시에스

## [ 요약문 ]

공작기계에서 가공정밀도를 저하시키는 가장 큰 요인은 열변형 및 채터진동이다. 본 고에서는 이 중 장시간 가공 중 기계의 열변형에 따른 문제점을 자동으로 공작기계 CNC(Computerized Numerical Controller) 제어기상에서 실시간으로 보상하여 주는 장치 및 기술개발 사례에 대한 내용을 언급하고자 한다. 기계가공에서 온도신호의 실시간 데이터 취득 및 열변형에 따른 공작기계 원점(Work Offset)의 자율보정이 가공정밀도 향상 및 가동을 향상에 많은 영향을 끼친다. 이에 따라 본 고에서는 온도 데이터의 취득부와 보상을 위한 보정값 추출을 위한 선형회귀법 및 신경회로망의 보정모델을 임베디드화한 디바이스와 CNC상에서 가공 중 공작기계 원점 자동보정을 하는 시스템을 개발하였기에 관련내용을 소개하고자 한다.

## 1. 연구배경 및 기존동향

일반적인 머시닝 센터와 같은 공작기계에서 가공에 미치는 파라미터를 분석하면 다음과 같다. 우선 가공 정밀도를 저하시키는 원인은 공작기계의 기하학적 오차, 가공 공정, 구동 매커니즘 그리고 환경적인 요인을 들 수 있다. 기하학적인 오차는 구조물의 부정확한 가공, 부정확한 조립, 이송 유니트의 부정확성, 서보 시스템 등에서 발생한다. 가공 공정에서 오차는 공구 상태 및 가공 시편의 상태가 원인이 된다. 구동 매커니즘에서 오차는 주축 베어링, 이송체와 안내부, 이송 나사 및 각종 모터류에 의한 것이다. 위와 같은 원인은 정적 혹은 동적 변형, 열변형, 직선 혹은 회전 운동의 오차, 응답 특성의 변화 및 공구 손상의 현상으로 나타나게 된다. 주요 파라미터로는 열변형, 채터 그리고 공구 마모 등이며 이 중에서 열변형이 전체 오차원인의 70%, 채터진동이 30% 가까이 차지하고 있다. 채터란 절삭 가공 중에 생기는 이상 진동으로 이상 상태를 말하며 공작물의 표면 거칠기, 공구 수명, 가공 오차 및 절삭 과정의 안정성에 나쁜 영향을 준다. 즉 요약하자면 공작기계에서 가공정밀도를 저하시키는 가장 큰 요인은 열변형 및 채터진동이다.

공작기계는 가공을 위해 X축과 Y축 및 Z축으로 이동하는 가공물을 가지는데 가공물은 온도에 민감하여 가공시간이 지남에 따라 온도가 변화되어 열변형을 초래한다. 본 연구는 공작기계가 장시간 가공 중 열변형이 일어나 가공축의 처짐 등에 따른 가공 오차를 실시간으로 보상하여 가공정밀도 저하를 방지하기 위하여 고안된 열변형 보상 알고리즘이 탑재된 공작기계 열변형 보상 진단용 임베디드 디바이스 및 보정시스템에 관한 것이다. 열변형을 고려한 것은 열변형이 공작기계에서 발생하는 오차 중 약 70% 정도를 차지하며 이와 같은 오차는 공작기계의 정밀도에 심각한 영향을 미치기 때문이다. 열변형 예측모델 및 기계원점 보정을 위한 기능이 공작기계의 컨트롤러인 CNC에 실장되어 테스트 되었다. 이는 열변형이 발생하여도 기계 가공 중 실시간 기계원점 보정이 자율적으로 이루어져 가공 품질을 높이고 불량률을 최소화하는 등 생산성 효과를 가져올 수 있다.

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.



해석적 방법으로는 유한요소법과 유한차분법이 대표적이며, 이 방법은 기계의 경계조건 및 여러 절삭조건에서 변화하는 열발생률에 대한 충분한 정보를 제공하지 못하기 때문에 정확성을 보장할 수 없을 뿐만 아니라 해석에 소요되는 시간 때문에 실시간 오차보상에 적용하는 것은 불가능하다.

따라서 공작기계의 실시간 오차보상으로 계산시간이 짧은 경험적 모델을 사용하는 연구가 진행되어 왔다. 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 이용하여 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 많을 뿐만 아니라 구현하기가 어려우며 기계의 피드백 신호와 충돌하지 않도록 해야 한다.

무엇보다 기존의 모든 방법들은 PC나 노트북을 이용하여 열변형에 따른 보상치, 즉 기계 원점을 얼마만큼 +, -하여야 열변형에 따른 치정 등을 보상할 수 있을지 기계원점 Offset값을 계산하여 분석하는 정도였다. 이는 PC나 노트북을 이용함으로써 기계와의 실시간성이 떨어지며, 특히 실제 기계가공 중 보상은 이루어지지 않는다. 이러한 이유는 열변형 등을 연구하는 사람들이 공작기계 제어기인 CNC를 잘 모르며, 안다고 하더라도 사용하는 정도이지 내부적인 CNC Kernel에 대한 이해가 부족하고 이 부분은 CNC Vendor에 종속적인 영역이기에 내부적으로 접근하기에 많은 어려움이 있으며 영역 또한 또 다른 분야로 여겨졌기 때문이다.

따라서 장시간 가공중 가공축의 열변형이 발생하여도 가공 중에 실시간 기계원점 보정이 자율적으로 이루어져 가공 품질을 높이고 불량률을 최소화하는 방안이 필요하다.

## 2. 임베디드 타입의 열변형 보상장치 개발

열변형 데이터 취득을 위하여 그림 1과 같은 실험환경을 구성하였다. 즉, 공작기계에는 가공틀이 장착되며 가공틀의 주변으로는 X축, Y축, Z축의 변위를 측정하기 위한 와전류변위센서를 연결한다. 또한, X축, Y축, Z축 및 대기의 온도를 측정하기 위한 열전대 온도센서를 연결한다. 이러한 열전대 온도센서로부터의 각 X축, Y축, Z축 및 대기의 온도값이 A/D변환장치로 입력되고, 와전류변위 센서로부터 X축, Y축, Z축의 변위값이 A/D변환장치로 입력된다. PC는 두 개의 A/D변환장치로부터 입력된 온도데이터와 변위데이터를 입력받아 열변형데이터를 측정할 수 있다. 이러한 열변형데이터로부터 오차보상값을 산출하여 록업테이블화 하였다.

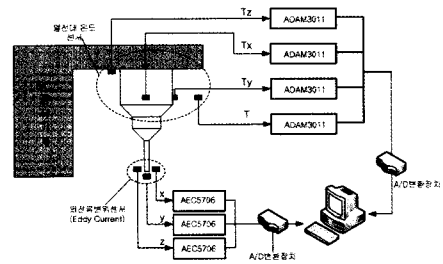


그림 1. 기본적인 열변형 데이터 취득 실험 구성도

이러한 경우 PC나 노트북을 이용하여야 하므로 기계와의 실시간이 떨어져 가공중 실제 보상이 이루어지지 않는다. 따라서 본 연구에서는 그림 2처럼 공작기계의 열변형에 따른 온도신호의 실시간 데이터 취득 및 가공중 공작기계 원점 자율보정을 이루기 위하여 보정값 추출을 위한 신경회귀법과 신경회로망 기반의 보정모델이 탑재된 데이터 취득부를 임베디드화한 디바이스로 개발하며, CNC와 연계되어 가공중 실제 자율보정이 되는 시스템 개발을 목적으로 하고 있다.

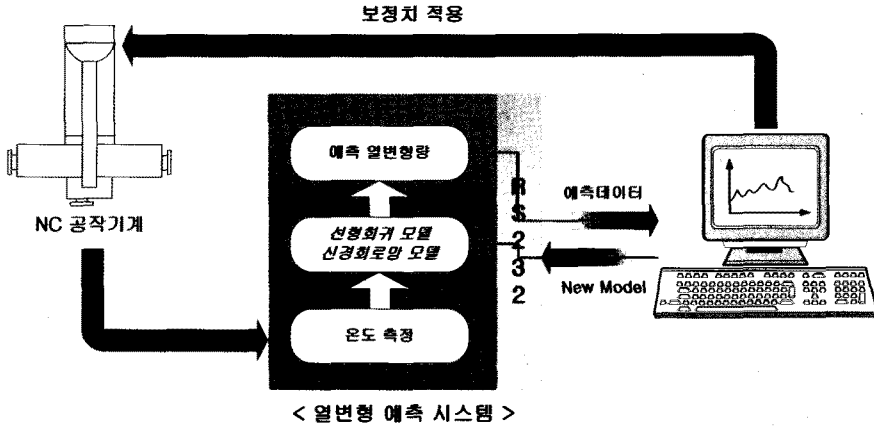


그림 2. 가공중 실시간 보정을 위한 열변형 보상 실험장치 구성도

본 연구의 열변형 보상 알고리즘이 탑재된 디바이스는 공작기계 X, Y, Z 3축의 온도 입력센싱 단자, 대기온도 입력센싱 단자, A/D Convert 모듈, 5V 스위칭 파워, RS232C 통신모듈 및 프로그래밍이 가능한 DSP를 포함하며, 본 연구의 범위는 열변형 보상 알고리즘이 탑재된 디바이스와 공작기계 제어기인 CNC상에서 가공중 열변형에 따른 공작기계의 원점보정을 자동으로 하는 기능을 포함한다. 그림 3은 공작기계 열변형 보상 진단용 디바이스를 나타낸 것이다. 디바이스 내부에는 열변형을 예측하기 위한 각 축의 온도와 대기 온도를 측정하기 위해 16채널의 A/D 컨버터를 사용하고 있다. A/D 컨버터의 입력범위, 샘플링 주기, 변환채널의 설정은 통신을 통해 입력되는 설정치에 의해 유동적으로 설정 값이 변경될 수 있도록 알고리즘화 되어있으며, 통신을 위해 RS232 모듈을 내장하고 있다. 또한 온도 센서로부터 출력되는 전압과 이에 해당하는 온도는 적용되는 온도센서에 따라 변경이 가능하므로 이를 고려하여 입력전압에 해당하는 온도가 유동적으로 설정가능하도록 하였다. 초기 입력 범위는 0~3.3V의 전압값과 0~100℃ 온도 값으로 설정되어 있다. Firmware Device는 입력되는 온도가 보상 모델의 한계치를 초과하게 되었을 경우 이를 사용자에게 표시하기 위한 LED Display 회로를 포함하고 있다. DSP (Digital Signal Processor)에서 온도를 측정하기 위한 샘플링 주기는 내부 인터럽트를 이용하여 수행된다. 또한 매 샘플링 주기마다 내부에 삽입된 열변형 보상 모델의 알고리즘을 호출하여 입력된 온도에 대한 열변형 예측 값이 RS232 통신 모듈을 통해 외부로 출력될 뿐만 아니라 온도 샘플링 주기가 외부 사용자에게 의해 변경될 수 있도록 하는 알고리즘이 삽입되어 있다. DSP의 내부에 삽입된 알고리즘의 변경을 위해 JTAG 포트를 추가하였으며 개발된 장치의 초기화를 위해 Reset 버튼이 추가되어 있다.

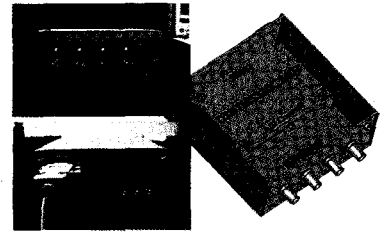


그림 3. 임베디드 타입의 열변형 보상장치

임베디드용 Firmware Device의 기본적인 시뮬레이션을 위한 Labview 프로그램과의 연동되는 모습을 그림 4에 나타내고 있다. 이는 DSP에 삽입된 열보상 모델의 신뢰성 평가 등을 통하여, 개발된 장치를 공작기계의 열보상에 적용하기 전에 시뮬레이션 할 수 있는 장점을 제공하기 위함이다.

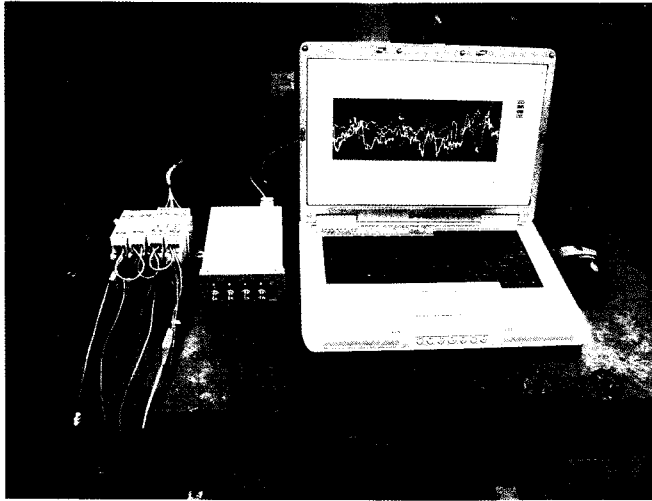


그림 4. Labview programming을 통한 시뮬레이션

그림 5에 장시간 가공중(예 13시간 이상) X, Y, Z축과 대기온도의 변화하는 값을 분석한 결과를 나타내었으며, 그림 6에 장시간 가공에 따른 온도변화 발생 이전과 이후의 가공정밀도 측정에 따른 차이를 기반으로 열변형에 따른 평균 가공오차를 추출하였다.

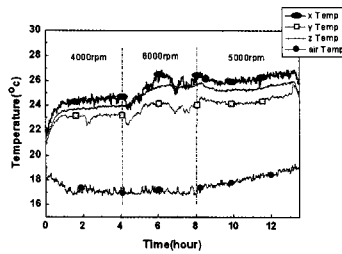


그림 5. 장시간 가공중 발생하는 가공축의 온도 변화

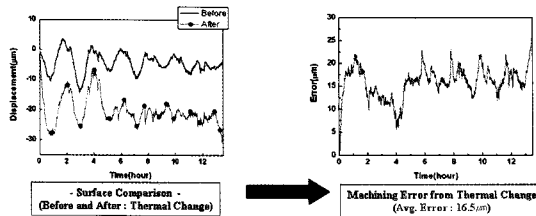


그림 6. 장시간 가공중 온도변화에 따른 열변형 평균 오차 추출

본 연구의 열변형 보상 알고리즘은 중선형 회귀모델과 신경회로망 모델로 구성된다. 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 통계 방법이다. 본 연구에서 적용된 회귀모델의 계수 추정에는 최소제곱법을 이용하였다. 아래 수식은 본 연구에서의

중선형회귀모델의 일반식을 나타내고 있다. 여기서  $y$ 는 열변형 예측치를 나타내고  $x$ 는 각 축의 온도와 대기온도를 나타내고 있다.

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

본 연구에 적용된 신경회로망 모델은 학습방법으로 오류역전파법을 사용하는 다층 퍼셉트론 구조를 채택하였다. 아래의 그림은 본 연구에서 적용된 다층 퍼셉트론 구조를 나타내고 있다. 여기서는 입력층과 은닉층 그리고 은닉층과 출력층의 결합 강도를 나타내고 있다. 본 연구에서 결합강도와 신경회로망 모델의 관계 계수들은 측정된 온도와 변형량을 기초로 하여 최소 10,000회 이상의 학습을 통해 결정되었다.

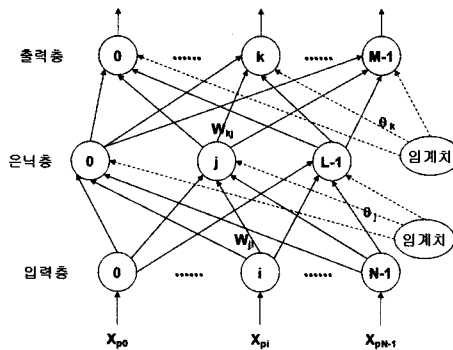


그림 7. 신경회로망 구조

DSP에서 선형회귀모델(linear regression) 및 신경회로망(Neural network) 모델을 기반으로 하는 보정모델은 연산에 소요되는 시간이 최소화 되도록 알고리즘화 하였으며, 인터럽터 발생시 사용자에게 의해 선택된 모델로 분기하도록 설정되어 있다.

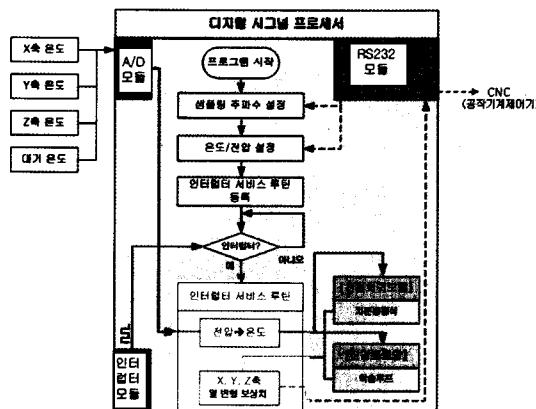


그림 8. 보정모델(선형회귀모델 및 신경회로망모델)이 탑재된 열변형 보상장치 내부구성도



선형회귀모델 및 신경회로망모델을 통해 예측된 열변형 결과는 실제 장시간 실험시 발생된 열변형 결과와 비슷한 예측결과를 제시하였다. 즉, 시뮬레이션 결과 보상모델의 예측치가 신뢰성을 가짐을 그림 9에서 알 수 있었다.

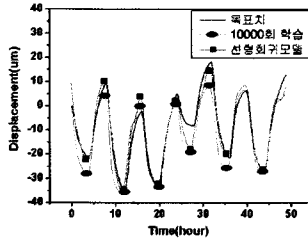


그림 9. 보정모델의 열변형 예측치의 신뢰도 확인

### 3. 실시간 CNC연계 보정기술 개발

기계 가공중 실시간 자동보상을 위해서는 공작기계 제어기인 CNC를 통한 3축 (X, Y, Z)의 기계원점값의 자율보정이 필요하다. 이를 위한 임베디드 보상장치와 CNC와의 연계도를 그림 10에 나타내었다. 즉, 공작기계 제어기 커널인 NC Kernel 변수 [예 : \$P\_UJFR(...)] 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 임베디드 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 CNC내부의 파라미터를 가공중 자동 변경할 수 있는 보정액션 기능이 임베디드되어 있어 실시간 자율 보정이 이루어 진다.

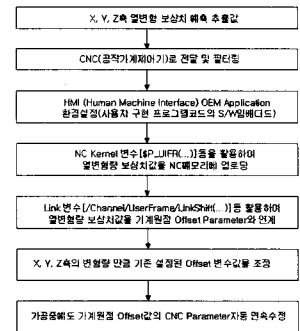


그림 10. 실시간 열변형 보정을 위한 임베디드 보상장치와 CNC와의 연계도

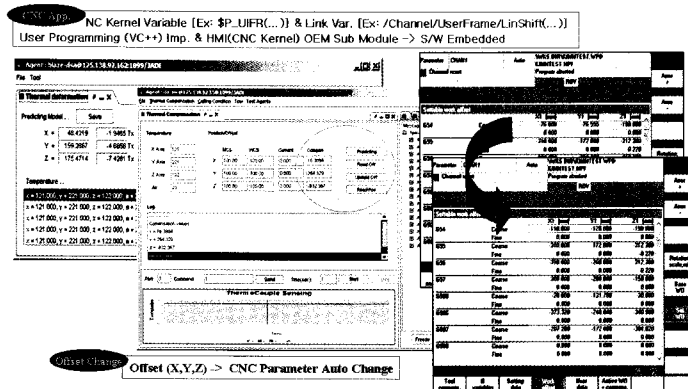


그림 11. 실시간 열변형 보상을 위한 CNC에서의 기계원점 자율보정

CNC 자율보정을 통하여 가공중 열변형 보상이 효과가 있었는지 확인하기 위하여 그림 12처럼 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 동작기계 CNC상에서의 자율 보정을 통한 자동보상에 의한 가공 오차를 가공시간과 같이 분석 비교하였다.

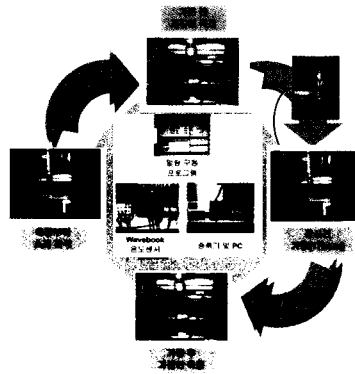


그림 12. 가공 및 보정의 실제 실험

실제 가공 및 보정 실험 결과인 가공정밀도 및 가공시간을 그림 13에 비교하여 나타내었다. 결과적으로 보상기능 없는 경우 장시간 가공중 16.5 $\mu$ m이라는 가공오차가 발생하여 정밀도가 많이 저하되었지만, 자동보상의 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 보상한 경우는 보상기능이 없을 때 보다는 가공 오차가 줄었지만, 자동보상의 경우보다는 가공오차가 1.9 $\mu$ m만큼 많이 발생하였고 가공시간 또한 자동보상의 경우보다 9.1%정도 길어졌다. 이는 기계를 정지시키고 보상치를 적용한 후 다시 가공하는 과정에서 기계적인 백래쉬 등의 오차로 인하여 가공 정밀도가 떨어지며, 가공시간도 작업자 개입시간인 더 걸린 것이다.

● 가공 정밀도

- 보상과정 없는 경우 : 평균 가공오차 16.5 $\mu$ m
- 수동으로 보상 경우 : 64.8% 개선 (16.5 -> 5.8)
- 자동으로 보상 경우 : 75.4% 개선 (16.5 -> 3.9)



● 가공시간

- 보상과정 없는 경우 : 13시간 30분 (가공시간)
- 수동으로 보상 경우 : 14시간 85분 (기존보다 81분 길어짐)
- 자동으로 보상 경우 : 13시간 30분 (보상처리속도 평균10ms x 81번, 총 1초 이하로 기존시간 대비)

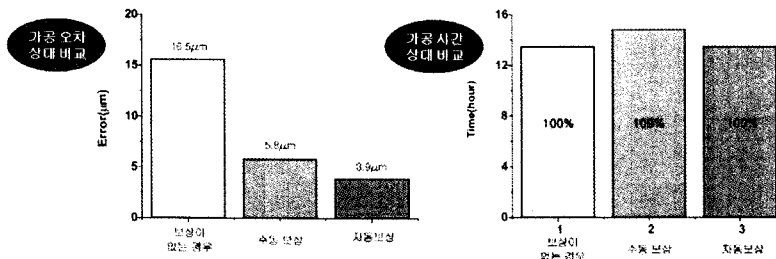


그림 13. 가공 및 보정의 실제 실험



## 4. 기대효과 및 활용방안

본 연구의 열변형 보상 알고리즘이 탑재된 임베디드 디바이스는 데이터 취득부 및 보정을 위한 보상모델이 PC기반이 아니라 하드웨어로 임베디드되어 있어서 실시간으로 가공물의 3축 및 대기온도 등의 신호취득이 가능하고 기계원점 보정값의 산출이 실시간으로 구해 진다는 장점과 적용대상 공작기계의 변경 시 새로운 보상모델의 적용이 편리한 장점을 가지고 있다. 또한, 공작기계 제어기인 CNC상에서 실제 가공중 자율보정이 실시간으로 이루어지는 것이 장점이다. 그리고 기존의 열보상을 위해 적용된 공작기계의 설계 개선을 통한 방법에 비해 시간과 비용측면에서 유리할 뿐만 아니라 서보루프의 구동신호를 변경하는 기존의 아날로그 및 디지털 보상방법에 비해 적용이 매우 간편하고 실시간성이 우수하여 생산성 향상 및 경제적인 이득을 얻을 수 있다는 효과가 있다.

## 참고 문헌

- [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.



김 동 훈

- 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부  
조정밀기계시스템실 책임연구원
- 관심분야 : M2M기계복합지능화,  
u-Manufacturing, 생산정보화,  
Machine Vision
- E-mail : kdh680@kimm.re.kr



송 준 엽

- 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부  
조정밀기계시스템실 실장
- 관심분야 : 지능형정밀생산시스템,  
반도체공정장비 지능화
- E-mail : sjy658@kimm.re.kr



차 석 근

- (주)에이시에스 전무이사
- 관심분야 : MES, 생산정보화
- E-mail : sk\_cha@acs.co.kr