

지능공작기계를 위한 가공 지식의 지식베이스 구성 및 운영

이 승 우* · 이 화 기**

*한국기계연구원 지능기계연구센터 · **인하대학교 산업공학과

Building a Machining Knowledge Base for Intelligent Machine Tools

Seung Woo Lee* · Hwa Ki Lee**

*Intelligent Machine Systems Research Center KIMM

**Department of Industrial Engineering, INHA University

Abstract

Intelligent machines respond to external environments on the basis of decisions that are made by sensing the changes in the environment and analyzing the obtained information. This study focuses on the construction of a knowledge base which enables decision making with that information. Approximately 70% of all errors that occur in machine tools are caused by thermal error.

In order to proactive deal with these errors, a system which measures the temperature of each part and predicts and compensates the displacement of each axis has been developed. The system was built in an open type controller to enable machine tools to measure temperature changes and compensate the displacement.

The construction of a machining knowledge base is important for the implementation of intelligent machine tools, and is expected to be applicable to the network based intelligent machine tools which look set to appear sooner or later.

Keywords : Machining Knowledge Base, Intelligent Machine Tools, Thermal Errors, Offset Value, Multiple Linear Regression, Neural Network

1. 서 론

최근의 공작기계는 외부의 환경변화에 대해 능동적으로 인식하고 스스로 사고하며 환경변화에 대응하는 지능화 공작기계로 개발방향이 전환되고 있다. 지능공작기계는 외부의 환경변화를 인식하는 센싱부 혹은 모니터링 기능과 인식된 정보를 판단하는 지식처리부와 이를 바탕으로 환경변화에 대처하는 Action 처리부로 구성된다[1].

이 중에서 지식처리부에 대한 연구는 전문가 시스템(Expert System)을 이용한 지식처리부가 있지만 대부분 off-line 상에서 운용되어 지식정보의 처리가 늦고,

공작기계의 제어처리부와 인터페이스 문제 때문에 여러 가지 문제점을 가지고 있다[2].

이를 위한 해결 방법으로는 공작기계에 사용되는 개방형제어기인 PC-NC에 지능화를 위해 개발된 소프트웨어를 실장(implement)하고 이를 NC 제어기의 제어부와 연결시켜 공작기계의 지능화를 위한 연구가 많이 진행되고 있다[1, 3].

본 연구에서는 지능공작기계구현을 위해 공작기계에 사용되는 machining 정보를 지식베이스로 구성하고 이를 실제 공작기계에 운영하여 지능공작기계를 구현하는 연구를 수행하였다.

† 본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원으로 수행되었음.

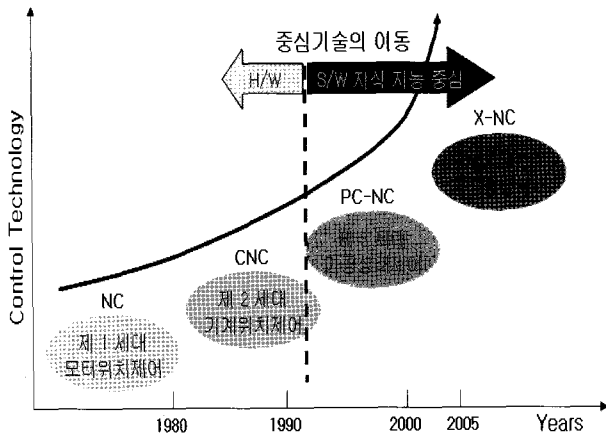
2007년 8월 접수; 2007년 10월 수정본 접수; 2007년 10월 게재확정

2. 지식베이스의 구성

2.1 지식베이스의 구조

1990 년대에 들어 다양한 소프트웨어를 사용하게 하는 개방형 제어기 기술, 고성능 PC의 등장, CAD 시스템과의 데이터 교환을 용이하게 해 주는 STEP-NC (Standard for the Exchange of Product Model - Numerical Controller) 기술, 외부 시스템과의 데이터 교환이 가능하게 하는 Internet이 공작기계의 지능화를 가능하게 하였다.

<그림 1>은 NC 공작기계의 역사를 나타내고 있다. 그림에서 나타낸 바와 같이 개방형 제어기가 등장하면서 NC의 중심기술이 하드웨어 중심에서 소프트웨어 중심으로 이동하고 있다[2].



<그림 1> NC 공작기계의 개발 역사

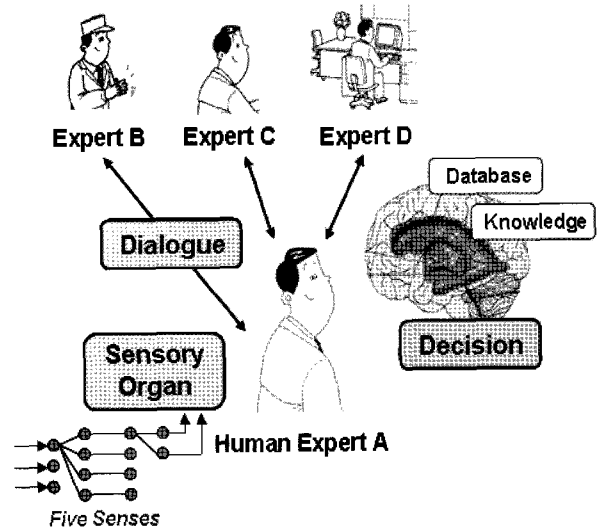
시스템의 효율적 구조에 대한 연구는 분산 제어 그리고 자율적으로 운용되는 지능기계에 대한 연구가 진행되고 있다. 이를 위한 구조분석은 인간의 행동이 가장 좋은 예이다.

<그림 2>에서 보는 것과 같이 오감에 의해 외부환경을 인식하고 신경을 통해 뇌에게 현재 상태에 대해 전달한다. 인간의 뇌는 전달받은 정보를 바탕으로 의사 결정을 내리게 된다. 의사 결정은 인간의 뇌에 쌓여 있는 지식에 의해 결정된다. 그리고 결정된 의사에 따라 외부환경에 반응한다.

지능공작기계에서도 마찬가지로 인간의 오감(시각, 후각, 청각, 미각, 촉각 등)은 기계의 상태를 감시하거나 파악하는 각종 센서에 해당되며 지식처리부는 개방형 제어기와 제어기에 탑재되어 있는 각종 소프트웨어들이다[7].

대화기능은 Internet의 발달과 함께 다른 기계와의 정보를 교환하는 기능이라 할 수 있다. 지능공작기계

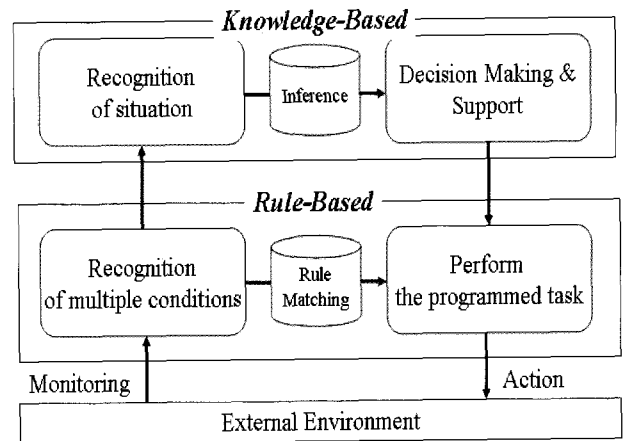
서 인간의 뇌에 해당하는 지식처리부는 가공에 필요한 정보를 지식베이스(knowledge base)화하여 센서에서 올라오는 상태를 바탕으로 의사결정을 하게 된다.



<그림 2> 인간전문가의 지식처리

<그림 3>은 지능공작기계에서의 지식베이스 구성을 나타낸 것이다. 센서에 의해 받은 신호는 먼저 규칙베이스에게 전달된다. 규칙베이스는 다양한 조건에 맞는 규칙을 검색하고, 해당되는 규칙이 있으면, 규칙의 수행부에 의해 프로그램된 업무를 수행한다. 만약 해당되는 규칙이 없으면 지식베이스 부분으로 우회(by pass)하여 모니터링된 신호를 바탕으로 상황을 인식한다. 인식된 상황은 추론되어 의사결정 혹은 지원 작업을 수행한다.

즉 지식베이스는 규칙베이스(rule base)를 바탕으로 구성되어 있으며, 그림 3에서의 각 기능들은 독립적 혹은 서로 연동되어 작용한다. 각 부문이 가지고 있는 부분적인 지식은 서로 통합되어 사용되기도 한다[4, 5].

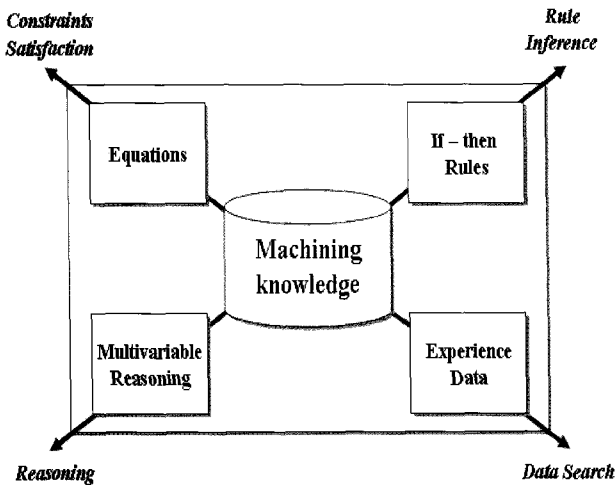


<그림 3> 지식베이스의 구조

구성된 지식을 효율적으로 사용하기 위한 방법은 크게 bottom-up approach와 top-down approach가 있다.

이 중 top-down approach 방법은 divide and conquer라고 하는데, 원래의 문제 해결을 위해 각각의 하위 문제들을 분할하고 해결하는 방법이라고 할 수 있다. 문제해결을 위한 지식은 <그림 4>와 같은 네 가지로 구분된다. 이것은 방정식(equations), 규칙(rules), 의사결정(decision making) 및 경험(experience) 데이터 등이다[6].

이들 형태의 지식을 이용하기 위한 방법으로는 제약 조건 만족(constraints satisfaction)을 위해서는 방정식 형태의 지식이 필요하고, 규칙기반추론 (rule inference)은 if-then, 추리(reasoning)는 다중변수에 의한 상태추론과 데이터 검색(data search)은 경험적 지식을 바탕으로 두고 있다.



<그림 4> 지식베이스의 네 가지 분류

2.2 열 변형 보정 지식 베이스

공작기계에서의 machining 정보는 매우 다양하다.

가공조건, 공구경로 자동 결정, 적응제어 등의 모든 공작기계에 범용 적으로 적용할 수 있는 고속화 가공 기술과 상태감시, 고장원인분석, 보정 등 특정장치에 의해 운영되는 운영기술 등 많은 정보들이 있다.

공작기계에서 발생하는 오차는 오차의 형태에 따라 정적오차와 동적오차로 구분한다. 동적오차는 기계의 진동, 채터 및 스피들의 진동에 의해 발생하며, 정적오차는 공작기계의 안내면, 컬럼, 볼 스크루 등 구조계의 조립 특성에 따른 기하오차와 열 변형오차로 구분된다.

특히 열 변형 오차는 공작기계의 정밀도에 심각한 영향을 미치는 것으로 분석되고 있다.

변형(thermal errors)은 공작기계 전체 오차 량의 약

70%를 차지한다[8]. 열 변형량 오차와 관련된 연구는 크게 공작기계의 구조설계 관점에서 다양한 형태의 발생 열을 최소화하여 가공정도를 높이기 위한 연구와 열변형 오차의 모델링 및 측정을 통하여 보정하는 연구 등이 있다. 그러나 열 변형 오차는 공작기계를 최적 설계를 하더라도 피할 수 없기 때문에 모델링 및 측정에 관한 연구가 많이 진행되고 있다[10].

본 연구에서는 열 변형 실험을 통해 변형 량을 예측하고 이를 보정할 수 있는 예측 모델을 개발하여 이를 지식베이스에 방정식(equations) 형태로 구성하였다.

열 변형 예측 모델을 구성하는 방법은 열 변형 실험을 하여 이때의 온도와 변형을 기록하여 이를 바탕으로 예측모델을 생성한다. 생성된 예측모델은 4개의 관측점 온도 값을 입력하면 3축의 변형 량(Displacement) 값을 제시한다. 사용된 모델은 다중선형회귀분석법과 신경회로망 분석법이다.

다중선형회귀분석법은 변수들과의 관계를 나타내는 수학적 모델을 구성하고 변수들의 관측된 값을 통한 모형추정을 통해 예측 및 분석을 하는데 사용한다[9].

여기에서는 하나의 반응변수와 여러 개의 설명변수들 사이를 설명하고자, x, y, z 대기(the air) 등 4개의 독립변수를 사용하고 x, y, z 축의 displacement 3개를 출력하고 있기 때문에 <그림 5>와 같이 3개의 선형회귀식이 필요하다.

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$$

$$Y_2 = \beta_5 + \beta_6 X_1 + \beta_7 X_2 + \beta_8 X_3 + \beta_9 X_4$$

$$Y_3 = \beta_{10} + \beta_{11} X_1 + \beta_{12} X_2 + \beta_{13} X_3 + \beta_{14} X_4$$

Y_1 : X axis displacement, Y_2 : Y axis displacement, Y_3 : Z axis displacement
 X_1 : X axis temperature, X_2 : Y axis temperature, X_3 : Z axis temperature
 X_4 : atmosphere temperature, β_{0-14} : regression constant

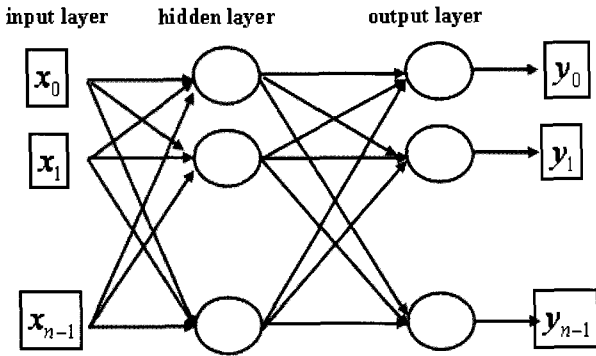
<그림 5> 다중 선형회귀 모델

신경회로망을 이용한 예측모델은 Hopfield 신경회로망, 다층퍼셉트론, 경쟁학습 신경회로망, 자가조직화 신경회로망, Adaptive Resonance Theory 신경회로망 등이 있으나 열 변형 예측 모델을 구성하기 위한 적합한 모델로서 다층 퍼셉트론을 이용한 신경회로망을 구성하였다.

다층퍼셉트론은 패턴인식이나 함수 근사화에 적합한 모델로 <그림 6>에 나타낸 것 같이 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 hidden layer가 존재한다[8].

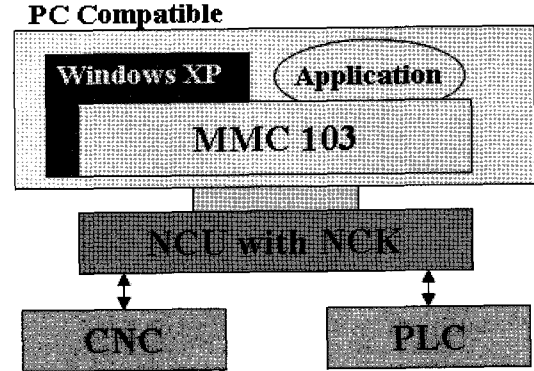
학습 algorithm은 error back propagation method로

서 은닉층과 출력층의 가중치를 변화시킨다. 이를 바탕으로 입력층과 은닉층의 가중치를 변화시켜 가면서 오차를 최소화 하는 방법이다. 본 연구에서 사용한 각 층의 뉴런수는 입력층 4, 은닉층 6, 출력층 1 이다.



<그림 6> 다중 퍼셉트론 신경회로망 모델

application에서 생성된 명령을 CNC 및 PLC에 신호를 보낼 수 있다. 개발된 예측 모델을 포함 지식베이스도 응용(application) 영역에 설치할 수 있다.



<그림 7> 개방형 NC 제어기의 소프트웨어 구조

3. 적용연구

3.1 개방형 제어기 실장

열 변형 보정(compensation)을 위해 앞에서 구성한 2개의 예측모델을 기반으로 열 변형 보정 지식베이스를 구성하였다. 지식베이스는 열 변형 예측 규칙(rule)을 기본적으로 관리하며 java를 이용하여 사용자 인터페이스를 구성하였다.

NC기술은 1990년대부터 하드웨어 중심기술에서 소프트웨어를 이용한 지식/지능 중심의 기술로 이동되고 있다. 이는 PC를 기반으로 한 개방형 제어기(PC-NC)가 공작기계에 적용되고 이를 활용한 많은 기술이 개발되었기 때문이다. PC의 기능과 장점을 NC에 접목하여 사용자의 편리성을 제고하거나 고유기능을 이식하는데 사용되는 개방형제어기 기술은 개발자와 사용자 모두에게 폭넓은 이점과 우수성을 제공하여 다양한 분야에서 사용되고 있다.

개방형 제어기 기술은 그 동안 폐쇄형 제어기가 가지고 있는 많은 문제점들을 해결하였다. 개방형 제어기의 장점은 NC 개발업체가 제공하는 NC 기능에 국한되지 않고, 사용자의 필요에 따라 적합한 NC 기능 추가가 가능하다는 것이다. 이것은 다른 응용프로그램과의 연계로 사용자 편리성을 극대화 있을 뿐만 아니라 작업 효율의 증가도 기대할 수 있다.

<그림 7>은 본 연구에 사용된 개방형 제어기의 소프트웨어 구조를 나타낸 것으로 PC영역에서는 PC 고유의 사용자 인터페이스와 운용프로그램이 실행되며, NC Kernel은 MMC(Man Machine Control)에 의해

3.2 지식베이스를 이용한 원점 보정

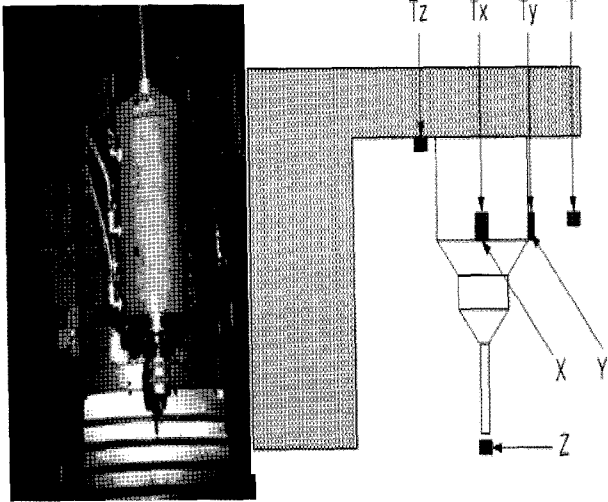
공작기계에서의 주축운동은 일반적으로 x, y, z 방향에 대한 3개의 선형운동과 x, y 방향에 대한 2개의 틸팅운동 그리고 회전축에 대한 틸팅운동 등 총 6개의 운동이 있다.

공작기계의 주축이 회전으로 인하여 발열이 일어나면 6개의 운동 중에서 회전축에 대한 틸팅운동은 회전축의 운동방향과 일치하기 때문에 제외되고 나머지 5개의 운동 방향으로 오차가 각각 발생하게 된다. 그러나 가정 많은 오차가 발생하는 방향은 x, y, 축의 선형운동에서 발생된다.

개발된 예측모델의 정확도를 시험하기 위하여 개방형 controller를 장착한 3축 milling machine을 대상으로 하였다. 온도의 측정을 위해 <그림 8>에 나타난 것 같이 총 4개의 thermo couple(Tx, Ty, Tz, T)을 설치하였으며, 변형량 측정을 위해 3개의 eddy current type(X, Y, Z)의 gap sensor를 이용하여 실제 변형량을 측정하였다. 열 변형 실험은 ISO/DIS 230-3 및 BS3800: part3:1900 그리고 ASME B5.54-1992 규격을 따른다[10].

열 변형 예측모델을 생성하기 위한 실험환경구축은 위의 그림에서 보는 것과 같이 수직형 머시닝센터(vertical machining center)의 주축을 중심으로 설치된 독립 열전대(isolated thermocouple input module)를 이용하여 머시닝센터의 운용 시 발생하는 온도의 변화량을 측정하였다.

온도의 측정은 최소 10분에 1개씩의 데이터를 획득하고 획득된 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 최소 4시간에서 6시간의 데이터를 획득하여야 한다.

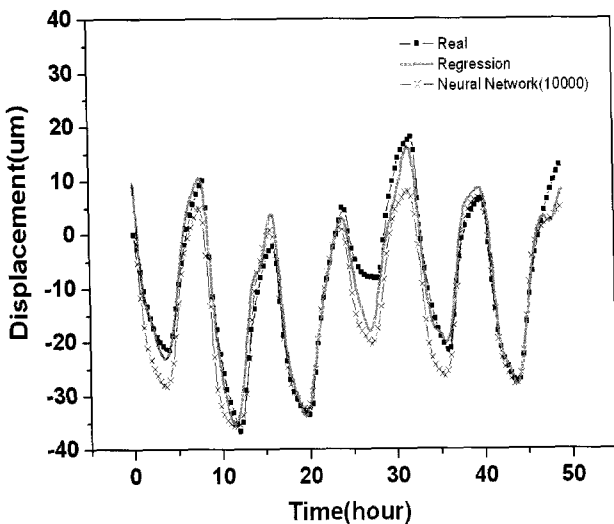


<그림 8> 열 변형 예측모델 생성을 위한 열 변형 실험

실험은 총 50시간을 진행하였으며 주축온도의 변화량과 함께 이때의 변위 량을 와전류 type의 갭(gap) 센서를 이용하여 측정하였다. 운전속도는 수직형 머시닝 센터에서 가장 많이 사용하는 가공 영역인 4000 - 6000 rpm의 영역을 중심으로 무 부하 상태로 운전하였으며 각각의 속도에서 4시간씩 운전하고 4시간 냉각하는 실험을 반복하였다. 이와 같은 이유는 실제 공작기계가 운용되는 환경에 적용하기 위해서이다.

이와 같은 실험을 통해 수직형 머시닝센터의 열 변형은 상대적으로 x축보다 z축과 y축의 변형 량이 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

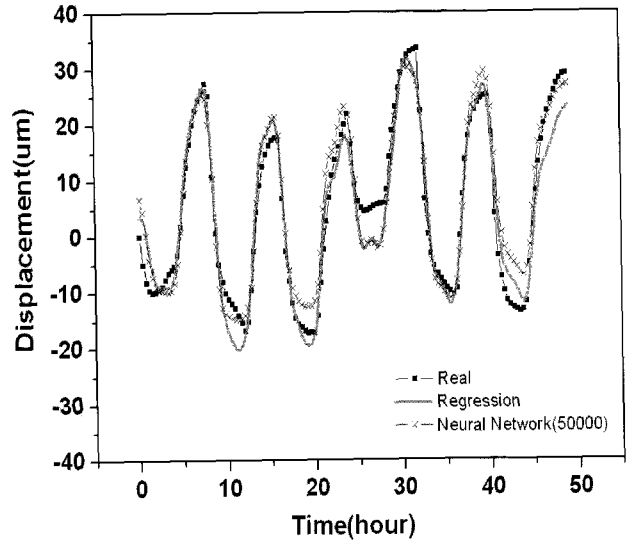
<그림 9>는 y축의 변형량을 비교한 것으로 신경회로망에서 학습을 10000회 한 결과이며, <그림 10>은 z축에 의한 변형량 비교를 나타낸 것으로 신경회로망 모델에서 50000회 학습한 결과를 나타낸 것이다.



<그림 9> 예측 모델 및 실제 변형 량과의 비교 (y 축)

분석된 결과로는 신경회로망 모델이 회귀분석 모델보다 예측의 정확도가 조금 더 우수한 것으로 분석되었으나 실제 개방형제어기에서의 운용을 위해서는 선형회귀 모델을 사용하였다. 이는 선형회귀 모델의 구조가 간단하기 때문이다.

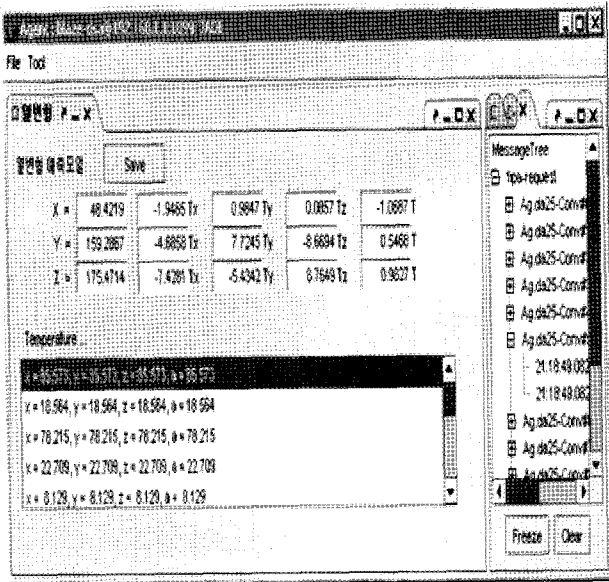
이와 같이 분석된 모델 식을 이용하여 본 연구에서는 규칙베이스에 계산규칙(computation rule) 형태로 보정 량 값을 예측하도록 하였다.



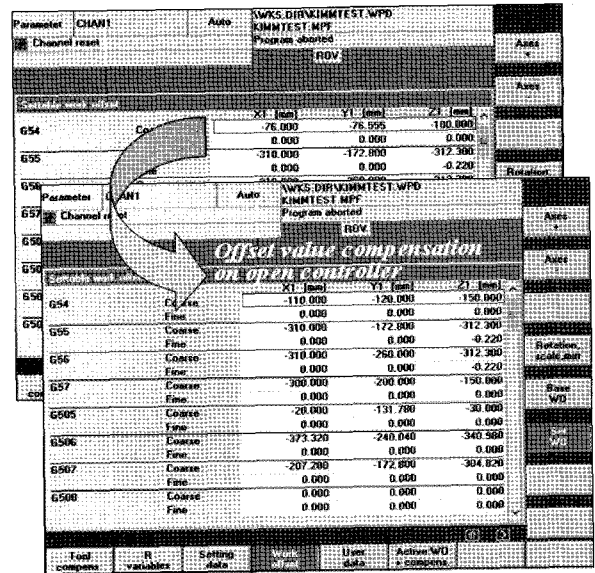
<그림 10> 예측 모델 및 실제 변형 량과의 비교(z 축)

<그림 11>은 구성된 예측모델에 상수 입력을 통해 가공 중 혹은 외부환경의 변화에 따른 예측모델이 변경되었을 때 상수만을 변경하여 예측모델을 실시간으로 변경할 수 있게 하였다. 이를 이용하여 실시간으로 수집되는 공작기계의 온도를 이용하여 공작기계의 변형된 량을 계산하여 개방형 제어기에 보정 작업을 수행할 수 있게 하였다.

열 변형에 의한 변형 량 보정 방법은 NC 수정명령, 서보계의 위치 피드백 신호에 아날로그 전압을 삽입하는 아날로그 보상, 통신포트를 이용하여 개방형제어기에 디지털 값을 전송하여 서보계의 위치 값을 보정하는 디지털보상 및 offset 보정법이 있다. 그 중에 사용자가 가장 사용하기 쉽고 적용이 간편한 방법이 offset (원점) 보정법이다.



Real Time Compensation



<그림 12> Offset 값 수정에 의한 열 변형치 보정

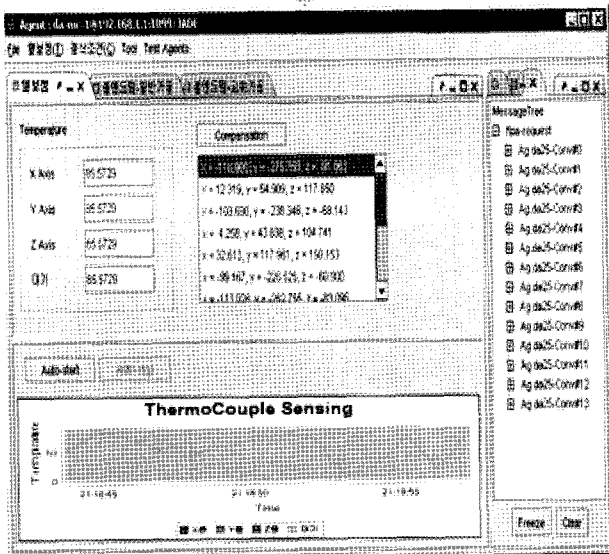
4. 결론

본 연구에서는 지능공작기계를 위한 가공정보의 지식베이스 구성에 관한 연구를 수행하였다. 공작기계의 가공 오차(error) 중 가장 많은 오차를 나타내는 열 변형 오차를 실시간으로 보정하기 위해 열 변형 실험을 통해 두 개의 예측 모델을 구성하였다.

선형회귀 분석 및 신경회로망 모델을 구성하였으며, 실제 변형 량과의 비교 및 분석을 통해 개방형제어기에 적용이 용이한 다중 선형 회귀분석모델을 열 변형 오차 보정 지식 베이스로 구축하였다.

개발된 모델을 개방형 제어기에 실장하였으며, 이를 이용해 offset 값 보정을 통해 열 변형 오차를 보정하였다. 이를 이용하여 가공 중에 발생하는 열 변형 오차를 최소화할 수 있으며, 자동으로 온도센서를 추출하여 보정 값을 제시하고, offset 값 보정을 하는 지능기능을 개방형 제어기를 장착하고 있는 공작기계에 구현할 수 있다.

추후에는 공작기계의 더 많은 가공정보를 지식베이스화하여 지능기계를 구현할 수 있는 기반을 구성할 예정이다.



<그림 11> 회귀분석모델을 이용한 실시간 보정

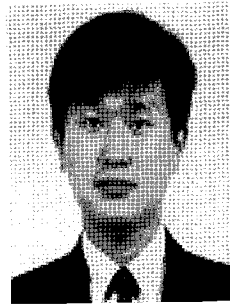
<그림 12>는 개방형제어기에서 offset 값 자동보정 화면을 나타낸 것이다. 이는 NC 프로그램의 G 코드를 이용하여 보정한다.

5. References

- [1] 김선호, “지식기반형 지능화 기계와 지식진화형 지능화 기계”, 한국정밀공학회지, 19 (2002):17-25.
- [2] 한국기계연구원 연구보고서, 지식진화기반 지능제조설비 및 인터넷 통합관리기술(1),(2), 과학기술부, 2004.
- [3] 이승우, 송준엽, 이화기, 김선호, “공작기계지능화를 위한 에이전트 기반 의사결정지원시스템”, 산업경영시스템학회지, 29 (2003):87-93.
- [4] Wang, Huaqing, "Intelligent Agent-Assisted Decision Support System: Intelligent of Discovery, Knowledge Analysis and Group Analysis", Expert System with Applications, 12 (1997):323-335.
- [5] Ranjit Bose, "Intelligent Agents Framework for developing Knowledge-Based Decision Support System for Collaborative Organizational Processes", Expert System with Applications, 11 (1996):247-261.
- [6] Bui, T. and Lee, J., "An Agent-Based Framework for Building Decision Support System", Decision Support Systems, 25 (1999):225-237.
- [7] 박홍석, “에이전트 기술 응용 Shop Floor 제어방안”, 한국정밀공학회지, 18 (2001):176-181.
- [8] 이재중, “공작기계의 열 변형 오차 모델링 기법”, 한국정밀공학회지, 19 (2002):19-24.
- [9] 김희술, 고태조, 김선호, 김형식, 정종운, “회귀분석을 이용한 열 변형 오차 모델링에 관한 연구”, 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, 1 (2002): 47-52.
- [10] 김희술, 고태조, 김형식, 김선호, “공작기계 주축 열 변형 보정을 위한 실험방법에 관한 연구”, 한국정밀공학회 추계학술대회, 1 (2001):300-304

저 자 소 개

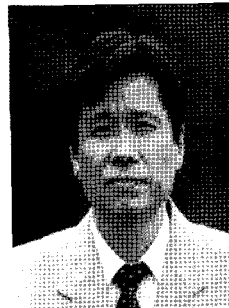
이 승 우



인하대학교에서 산업공학과 학사, 석사, 박사학위를 취득하였으며 현재 한국기계연구원 지능기계연구센터 선임연구원으로 재직하고 있다. 관심분야는 생산시스템 설계, 지능화 시스템, 디지털 팩토리 및 신뢰성 분야 등이다.

주소: 대전시 유성구 신성로 104

이 화 기



서울대학교 원자핵공학과에서 학사를 취득하고, 미 Texas A&M 대학교 산업공학과에서 석사와 박사를 취득하였다. 현재 인하대학교 산업공학과 교수로 재직 중에 있으며, 관심분야는 생산 및 물류분야의 일정계획, 시뮬레이션 등이다.

주소 : 인천시 남구 용현동 253 인하대학교 기계공학부
산업공학 전공