

공작기계 원점 열변형오차의 실시간 규명 및 보상제어

Real-time Estimation and Compensation of Thermal Error for the Machine Origin of Machine Tools

안중용*(한양대 대학원 기계설계학과), 정성중(한양대 기계공학부)

J. Y. Ahn*(Han Yang Univ. Graduate School), S. C. Chung(Han Yang Univ.)

Abstract

In order to control thermal deformation of machine origin of machine tools due to internal and external heat sources, the real-time compensation system has been developed. First, GMDH models were constructed to estimate thermal deformation of machine origin for a vertical machining center through the measurement of deformation data and temperature data of specific points on the machine tool. Thermocouples and gap sensors are used respectively for measurement. These models are nonlinear equations with high-order polynomials and implemented in a multilayered perceptron type network structure. Secondly, work origin shift method were developed by implementing digital I/O interface board between CNC controller and IBM-PC. The work origin shift method is to shift the work origin by the compensation amounts which is calculated by pre-established GMDH model. From the experimental result, thermal deformation of machine origin was reduced to below $\pm 5\mu\text{m}$.

1. 서론

최근 자동차, 항공기, 공작기계, 반도체 등 공업 제품의 고기능 고품질화가 요구되면서 모기계(Mother Machine)인 공작기계의 고정도화에 대한 요구가 증대되고 있다.^(1~3) 자동화 공작기계 특히 머시닝센터에서는 무인화 지향이 강력하게 요청되면서 장시간 운전에도 일정한 가공정도를 유지하는 것이 중요한 과제로 부각되고 있다.

절삭공정에서는 여러 가지 오차요인들에 의하여 가공정밀도가 영향을 받게 된다. 가공정도를 저하시키는 주요원인에는 공작기계의 기하학적 오차와 열변형 오차 등이 있다. 그중 열변형의 영향은 40~70%로서 고정도 가공을 위해서는 열변형의 제어가 중요한 문제로 인식되고 있다.^(1~4)

열오차를 줄이는 해결책은 공작기계의 설계 개선과 오차보상 기술로 나눌 수 있다. 설계 개선에 의한 해결은 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에, 열변형 예측 모델에 의한 공작기계 오차보상에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽⁴⁾

오차보상은 열변형 예측과 제어로 구분할 수 있다. 먼저, 열변형 예측작업은 해석적 방법과 경험적 모델에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 유한요소법과 유한차분법에 의한 해석적 방법⁽⁵⁾은 기계 경계 조건 및 여러 절삭조건하에서 변화하는 열발생에 대한 충분한 정보를 제공하지 못하기 때문에 정확성을 보장할 수 없고, 해석에 걸리는 시간 때문에 실시간 오차보상은 불가능하다.

경험적인 모델은 계산시간이 짧기 때문에 실시간 오차보상에 유리하다. 그러나, 경험적 모델을 얻는 과정에서 센서 위치, 학습데이터 및 모델의 구조 선택이 연구자의 경험과 직관에 의존하게 된다.⁽⁴⁾ 이를 개선하기 위하여 정성중 등은 수직형 머시닝센터의 열변형을 예측하기 위하여 열원 근처의 시계열 온도데이터를 이용한 신경회로망모델을 구성하여 비선형적인 열변형 모델의 자동 생성을 제안하였다.^(2,3) 또한 많은 실험을 통해 전체 열변형량 중에서 공작기계의 원점 이동이 위치 의존적인 열변형량보다 큰 비율을 차지하고 원점열변형의 보상만으로도 열오차를 줄이는 데에 큰 효과를 낼 수 있음을 밝힌 바 있다.^(6,7)

오차보상 제어 방법으로는 피드백 가로채기 방법(feedback interception method)과 원점 이동 방

법(origin-shift method)이다. 피드백 가로채기 방법은 서보시스템의 피드백 루프의 제어신호를 가로채어 컴퓨터에서 계산된 사각파의 신호를 집어 넣음으로써 구현된다. 이 작업은 다루기 힘들고 기계의 피드백 신호와 간섭하지 않도록 세심한 주의가 필요하다. 원점 이동 방법은 보상 컴퓨터에서 오차 보상량을 계산하여 CNC 제어기의 서보루프 명령 신호에 더해진다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 가공중의 공작기계 원점의 열변형을 기계 각부의 온도측정기에 기초하여 고정도로 예측하고 장시간의 운전에도 $\pm 5\mu\text{m}$ 의 정도를 유지하도록 보정하는 것을 목적으로 한다. 비선형 모델식을 자동으로 생성하는 GMDH(group method of data handling) 알고리즘⁽⁹⁾을 이용하여 열변형 예측 모델을 생성하였다. 생성된 열변형 오차 모델과 컴퓨터와 CNC간의 인터페이스 보드 및 디지털 I/O를 이용하여 공작물 원점 이동법(work origin shift method)을 구현하였다. 수직형 머시닝센터를 대상으로 주축의 무부하 회전상태에서 열적거동 예측과 보정을 시도함으로써 제안된 열변형 예측 모델의 정확도와 보정법을 검증하였다.

2. 열변형 예측 모델링

2.1 모델 생성을 위한 데이터 수집

원점의 열변형 예측을 위한 학습 모델링의 수행을 위해서는 공작 기계의 온도데이터와 동기된 기계원점의 변위 데이터가 필요하다. 실험은 수직형 머시닝센터(화천기공(주) VMC-430)를 대상으로 하였고, X, Y, Z 스트로크는 $760 \times 430 \times 500$ mm이다.

Fig. 1과 같은 실험 장치로 기계의 각 부분 온도 및 주위 온도와 이와 동기된 원점의 변위를 6 시간 동안 1분 간격으로 측정하였다.

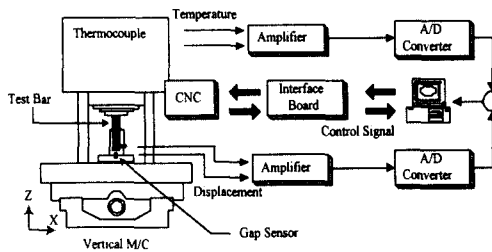
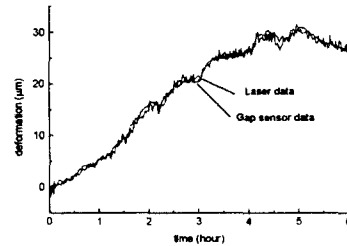


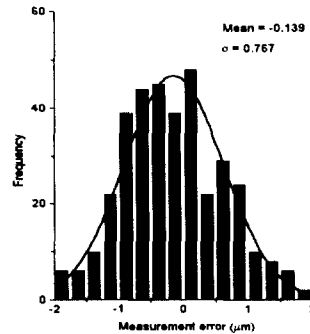
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

원점의 변화량은 테스트바와 제작한 측정용 지그에 고정된 갭센서를 사용하여, X, Y, Z 축방향에 대해 학습데이터를 구축하였다.

Fig. 2는 테스트바와 갭센서에 의해 측정된 변위의 신뢰성을 확인하기 위하여 Y 축 열변형에 대해 레이저 측정장치(HP5529A)에 의해 측정된 데이터와 비교한 결과이다. Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 레이저 측정데이터를 기준으로 한 갭센서 측정값의 오차는 평균 $-0.119\mu\text{m}$, 표준편차 $0.79\mu\text{m}$ 이다.



(a) Measurement of deformation with gap sensor



(b) Histogram of Deviation of Measurement
Fig. 2 Comparison gap sensor measurement with laser measurement

온도측정에는 64개의 T형 열전대, 열전대신호의 증폭과 샘플을 위한 A/D 변환기 (Metrabyte DAS-20)를 이용하였다.

내부열원과 외부열원에 의한 영향과 전혀 다른 환경에서의 열변형 모델의 적용성을 확인하기 위하여 2가지 조건으로 실험하였다. 실험 1은 외부열원인 실내 온도를 자연스럽게 방치하고 주축을 랜덤하게 회전시키면서 데이터를 채취한 것이다. 실험 2는 실내 온도를 일정하게 유지하고 주축 회전수를 단조 증가 및 감소시킨 것이다.

이상의 실험조건으로 기계 각부의 온도 및 원점의 열변형량을 채취한 결과, 실험 1에 대해서

대표적인 15개 측정점의 온도변화와 원점의 열변형량을 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 최고 7°C 온도 변화에 31 μ m의 열변형이 발생하였으며, 주축회전에 의하여 Z 축 외에도 X 및 Y 축 방향으로 많은 열변형이 생겼음을 알 수 있다. 이는 열적 비대칭성에 기인한 것이다.

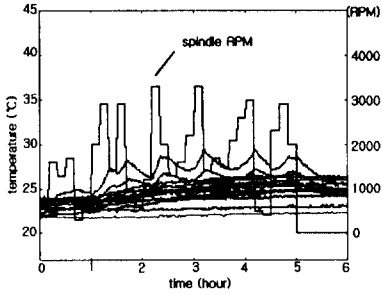


Fig. 3 Temperatures at each location

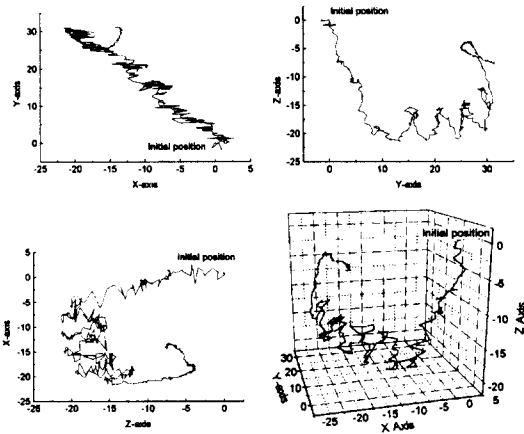


Fig. 4 Deformation of origin

2.2 GMDH를 이용한 열변형 예측 모델링

공작기계는 서로 다른 시정수(time constant)를 갖는 다수의 기계 구조로 구성되어 있다. 따라서, 공작기계 원점의 열변형은 주축 자체의 열변형 뿐만 아니라 칼럼의 휨과 같이 상대적으로 시정수가 큰 구조의 열변형에 의해서도 영향을 받게 된다. 따라서, 공작기계 원점의 열변형은 기계 각 부분의 온도에 관해 비선형적이며 상호 연성된 모델식으로 표현될 수 있다. 식 (1)은 3차원 공간내에서 각축 방향으로 발생하는 공작기계 원점의 열변형량을 표현한 것이다.

$$\delta = a + \sum_{i=1}^m b_i T_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} T_i T_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} T_i T_j T_k + \dots \quad (1)$$

여기서, δ = 열변형량

T_i, T_j, T_k, \dots = 기계 각 부분의 온도 및 온도 변화량

m = 온도 측정 점수

본 연구에서는 위와 같은 비선형 모델식의 구조 및 계수를 결정하기 위하여 다층 퍼셉트론 회로망 (multilayered perceptron-type network)의 구조를 생성해 주는 GMDH 방법을 도입하였다.⁽⁹⁾ 이 알고리즘의 특징은 최종적으로 비선형 고차 다항식 형태의 모델을 생성해 주고 생성 과정에서 계수뿐만 아니라 모델의 구조를 최적화 과정에 의해 자동으로 생성해 주는 것이다.⁽⁹⁾

식 (2)는 입력변수가 x_i, x_j 이고 출력변수가 y 인 경우 GMDH 방법의 기본식이다.

$$y = A + Bx_i + Cx_j + Dx_i^2 + Ex_j^2 + Fx_i x_j \quad (2)$$

그리고, 입력변수가 m 개인 경우 최종적으로 생성되는 모델식은 식 (3)과 같은 Ivakhnenko 다항식으로 표현된다.

$$y = a + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (3)$$

이 식 (3)은 앞에서 가정한 열변형 모델식 (2)와 동일한 형태를 지니고 있다. GMDH 알고리즘은 채취한 데이터의 분류, 추정오차가 작은 입력변수의 선택, 그리고 식 (4)로 주어지는 정규 기준값 (regularity criterion) r_j 의 최소값인 RMIN의 비교에 의한 최적화 과정으로 구분될 수 있다. Fig. 5는 GMDH 알고리즘의 블록 선도를 보인 것이다.

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=nt+1}^n (y_i - z_{ij})^2}{\sum_{i=nt+1}^n y_i^2} \quad j = 1, 2, \dots, \binom{m}{2} \quad (4)$$

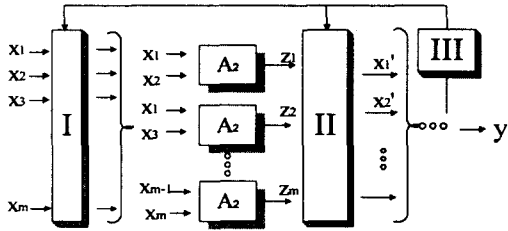
여기서, m = 현 레벨의 입력 변수 개수

n = 총 데이터 개수

nt = 학습 데이터 개수

y_i = 측정된 출력값

z_{ij} = GMDH 기본식에 의한 출력값



I : Division of the original data
 II : Self-selection of the intermediate variable
 III : Optimization of the threshold
 A_2 : Generator of a partial polynomial
Fig. 5 Block diagram of GMDH

GMDH 모델을 생성하기 위하여 아래와 같이 입력 데이터군을 설정하였다. 독립 변수는 64 채널에서 측정된 현재와 1스텝 이전의 온도데이터이고, 종속 변수는 갠센서로 측정된 각 축의 변위 데이터이다. 0~4시간 동안의 학습 데이터와 4~6시간 사이의 검사 데이터로 각각 구분하였다.

Fig. 6은 생성된 GMDH 모델에 의한 Z 축 열변형의 예측결과를 도시한 것이다. 최대 예측 오차는 각각 X 축 $5.6\mu\text{m}$, Y 축 $2.5\mu\text{m}$, Z 축 $4.5\mu\text{m}$ 으로 공작기계 원점의 열변형을 잘 추정함을 알 수 있다.

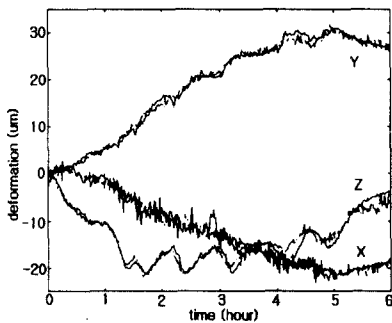


Fig. 6 Learning result by GMDH model

Fig. 7은 가공조건이 상이한 실험 2의 온도 측정치를 실험 1에서 얻은 모델식을 사용하여 열변형을 예측한 결과를 보인 것이다. 추정오차가 $7\mu\text{m}$ 이내로서 상이한 가공조건에 열변형 예측에도 생성된 모델을 적용할 수 있음을 보여주고 있다.

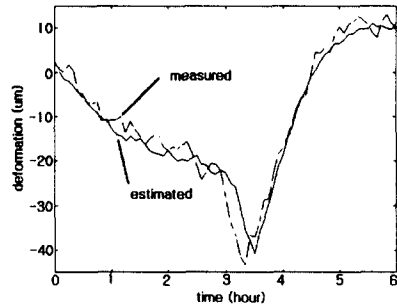


Fig. 7 Estimation result of exp. 2 from the learning model of exp. 1

3. 원점 열변형 보정 실험

원점 열변형 보정은 온라인으로 측정된 온도 데이터를 앞절에서 생성된 GMDH 모델에 입력시켜 계산된 보상값 만큼 공작물의 원점을 이동시킴으로써 구현된다. 예를 들어, 3축 머시닝센터에서 X, Y, Z 방향의 원점 열변형 오차가 각각 $\Delta O_x, \Delta O_y, \Delta O_z$ 라면 원점은 X, Y, Z 방향으로 각각 $-\Delta O_x, -\Delta O_y, -\Delta O_z$ 만큼 이동시킨다.

Fig. 8은 공작물 원점 이동법에 의한 보정 원리를 도식화한 것이다. 가공 시작 후 최초로 열변형 오차를 계산하여 보정하면, 그후로부터의 보정시에는 이동된 기준원점 좌표에 대해 상대적으로 발생된 열변형을 계산하여 보정해야 한다.

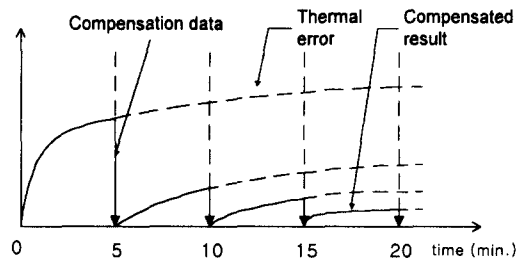


Fig. 8 Work origin compensation logic

Fig. 9는 공작물 원점 이동법에 의한 머시닝 센터 원점의 열변형 보정 실험 장면이다. 보정을 위한 제어는 컴퓨터와 CNC 제어기로 분류되어 있고 제작한 인터페이스 보드를 통해 제어신호 및 보상 데이터를 전송한다.

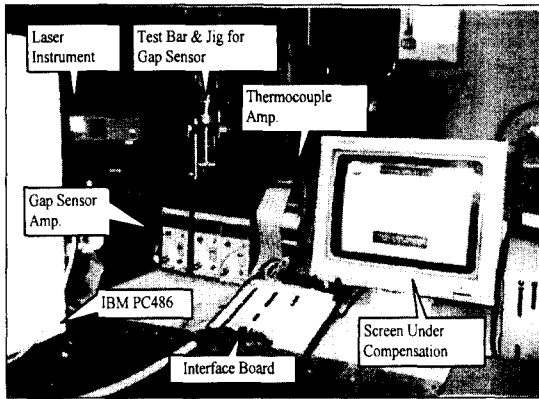


Fig. 9 Experimental Setup for Compensation by shifting work origin

Fig. 10은 보상 제어의 흐름도이다. 컴퓨터의 보정 작업은 매 1분마다 기계 각부의 온도를 측정하여 메모리에 저장하는 모듈, 명령 송수신 모듈과 보상값 계산 모듈로 구성되어 있다. 보정 작업을 위한 PC 프로그램의 시퀀스는 다음과 같다.

```

PC.Compensation {
  While(1){
    ReadTemperature(every_1min.);
    If(start_signal) Compensation(axis, data);
  }
}

```

CNC에서의 보정 작업은 데이터 초기화, 명령 송수신, 공작물 원점 이동 및 컴퓨터 작동 감시 모듈 등으로 구성되어 있다. 보정 작업을 위한 CNC 프로그램은 가상코드 G4000을 호출함으로써 시작되고, 시퀀스는 다음과 같다.

```

CNC.Compensation(work_coordinate) {
  InitializeDO(0~5);
  For(i=0; i<3; i++) {
    SendControlSignal(start_signal, axis);
    ReceiveControlSignal(axis, compensation_data);
    ShiftWorkOrigin(axis, compensation_data);
    SendControlSignal(finish_signal);
  }
}

```

PC와 CNC사이의 송수신 데이터의 정의는 PC를 기준으로 다음과 같다.

```

Define_Signal(data.control) {
  DigitalIn(bit 4, value compensation_start);
  DigitalIn(3~2, not_used);
  DigitalIn(1~0, axis_flag);
  DigitalOut(15, PC_working_check_flag);
  DigitalOut(14~13, axis_flag);
  DigitalOut(12~0, compensation_data);
}

```

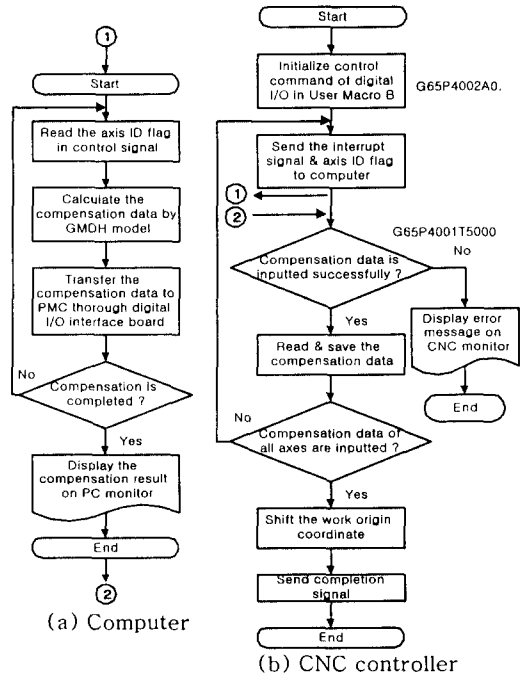


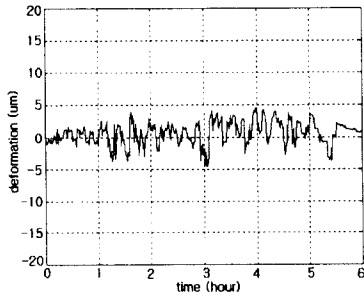
Fig. 10 Flow Chart of Compensation by shifting work origin

Table 1은 실험 1의 조건으로 운전했을 때 공작물 원점 이동법을 적용하여 원점의 열변형을 보정한 결과에 대한 통계치이다. 95%의 신뢰구간에서 X 축은 $4\mu\text{m}$, Y 축은 $4\mu\text{m}$, Z 축은 $5\mu\text{m}$ 이내로 원점의 열변형이 제어됨을 알 수 있다.

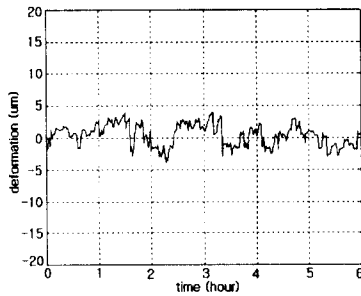
Table 1 Statistical value of compensation result

axis	Mean	σ	max. error
X	-0.6	1.8	4.6
Y	0.5	1.3	3.9
Z	1.6	1.7	5.6

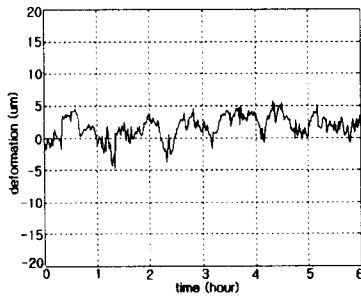
Fig. 11은 각축에 대한 원점 보정 결과를 도식한 것이다.



(a) X-axis



(b) Y-axis



(c) Z-axis

Fig. 11 Compensation Result for exp. 1

4. 결론

수직형 머시닝센터를 대상으로 주축회전수를 랜덤하게 변화시킨 경우, 기계 각부분의 온도측정치 및 시간이력 데이터를 독립 변수로 하는 GMDH 모델에 의해 주축원점의 열변형량을 추정하고 공작물 원점 이동법에 의해 보정하는 것을 시도하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) GMDH 알고리즘을 이용하여 기계 각 부분의 온도에 관해 고차의 비선형적이며 상호 연성된 열변형의 모델식을 자동으로 생성하였다.
- (2) GMDH 모델의 입력 데이터에 시간이력 정보

를 추가함으로써 적은 온도 측정점의 입력변수로 고정도의 원점 열변형 추정이 가능했다.

(3) GMDH 모델과 공작물 원점 이동법을 이용한 공작기계 원점의 실시간 열변형 보정 시스템을 개발하였다.

(4) 열변형 보정 시스템을 적용한 결과, 장시간의 운전에도 원점 변화량이 최대 $\pm 5\mu\text{m}$ 이내로 유지됨을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Weck, M., Mckeown, P., Bonse, R. and Herbst, U., 1995, "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 2, pp. 589~598.
- (2) 정성중, 1996, "머시닝센터에서 고정밀/고능률 가공을 위한 NC기술", 공작기계, 제68호, pp. 29~47.
- (3) 정성중, 1995, "머시닝센터에서 고정밀 가공을 위한 NC 기술", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 748~754.
- (4) Chen, J. S., Yuan, J. X., Ni, J. and Wu, S. M., 1993, "Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Errors on a Machining Center", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 472~479.
- (5) Moriwaki, T., Sugimura, N. and Wang, L., 1994, "Development of Modeling System for CAD/CAE of Machine Tools (2nd Report)", *JSPE*, Vol. 60, No. 7, pp. 959~963.
- (6) 양종태, 정성중, 1994, "측정플레이트를 이용한 공작기계 오차보정", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 187~192.
- (7) 정성중, 박영진, 김승철, 김창성, 양종태, 1994, "고정밀 고생산성 머시닝센터 개발을 위한 절삭상태 및 열변형 적응제어 기술", 제2회 G7첨단생산시스템 Workshop 논문집, pp. 124~131.
- (8) Ni, J., 1997, "CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real-Time Error Compensation", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 717~725.
- (9) Liu, C. R., Ferreira, P. M., Liang, G. R. and Srinivasan, R., 1988, "Technological Developments In Intelligent Manufacturing Systems", *Intelligent Manufacturing Systems*, Vol. I, Elsevier Science Publishers, pp. 93~104.