

머시닝센터에서 고정밀 가공을 위한 NC 기술

정 성 중

한양대학교 공과대학 기계설계학과, 생산시스템 및 제어 실험실

NC Technology for High-Precision Machining in Machining Centers

Sung-Chong Chung

MANufacturing Systems & Control Laboratory

Department of Mechanical Design & Production Engineering

HANYANG UNIVERSITY

KEY WORDS : Precision machining, Geometric error, Thermal error, Tool management, In-process measurement, Inspection, MPPGT, Off-line, Real time, Neural networks, Compensatory control, Geometric adaptive control

ABSTRACT : This paper deals with a geometric error simulator, measurement and inspection of workpiece errors on the machine tools, and identification and compensation methodology of thermal errors in machining centers. In order to raise the machining accuracy of workpieces a measurement and inspection system on the machine tool is developed. By using MPPGT module Manual and CNC type CMMs are realized on the machining centers. To compensate for geometric and thermal deformation errors of machining centers, a real time and an off line geometric adaptive control system were developed on the machining centers. A vertical and a horizontal machining center equipped with FANUC OMC were used for experiments. Performance of the systems were confirmed with a large amount of experiment.

1. 서론

최근의 제품 생산 환경에서는 고정산성, 안정성, 다양화 등의 추세에 발맞추어 기계가공에서 FA 화가 급격하게 진척되고 있다. 공작기계도 생산공정의 자동화 추세에 따라 머시닝센터가 개발되어 기계가공에 이용되고 있다.

기계가공의 최적화와 조립공정의 안정화 그리고 고기능성 제품을 개발하기 위해서는 고정도 가공이 중요하다. 머시닝센터 상에서 고정도 가공을 실현하기 위해서는 설계, 가공, 조립 및 제어에 관련된 요소기술과 통합화 기술의 개발이 필요하다. 아울러 공작물과 공구의 정밀도와 장착상태 등을 신속 정확하게 감지 제어할 수 있는 인프로세스(In-Process) 측정시스템과 가공영역 내에서 다축의 기하학적인 오차구조와 열변형오차 등에 의하여 야기되는 기하학적 오차의 규명과 보상제어 기술이 필요하다.

본 연구에서는 머시닝센터의 구조부와 이송부의 오차와 변형에 따라서 야기되는 기하학적인 오차와 열변형오차 등을 규명할 수 있는 시뮬레이터, 오프라인(Off-Line) 및 온라인(On-Line) 열변형오차 보상제어기(Compensatory Controller)의 개발 사례를 소개한다. 아울러 인프로세스 측정을 통한 공구와 공작물의 정도관리를 머시닝센터 상에서 수행할 수 있는 온더머신(On the Machine) 오차측정 및 관리 시스템의 개발 사례도 소개 한다.

2. 기하학적오차 시뮬레이터⁽¹⁾

형상오차와 조인트오차에 따라 가공점에서 야기되는 오차를 규명할 수 있는 기하학적오차 시뮬레이터에 대하여 소개한다.

2.1 형상변환 행렬

공작기계의 i 번째 형상요소에 대한 형상변환 행렬은

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_i^s & \beta_i^s & A_i + \delta a_i \\ \alpha_i^s & 1 & -\gamma_i^s & B_i + \delta b_i \\ -\beta_i^s & \gamma_i^s & 1 & C_i + \delta c_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 되고, 여기서

A_i, B_i, C_i = 각각 x_1, x_2, x_3 방향으로의 형상치수

$\delta a_i, \delta b_i, \delta c_i$ = 각각 x_1, x_2, x_3 방향으로의 형상오차

$\beta_i^s, \gamma_i^s, \alpha_i^s$ = 각각 x_1, x_2, x_3 방향으로의 비틀림 각오차.

2.2 조인트변환 행렬

i 번째 이송계에서 x_i 방향으로 이송시 조인트변환 행렬은

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_i(x_i) & \beta_i(x_i) & \delta_1 x_i + P_i(x_i) \\ \alpha_i(x_i) & 1 & -\gamma_i(x_i) & \delta_2 x_i + Q_i(x_i) \\ -\beta_i(x_i) & \gamma_i(x_i) & 1 & \delta_3 x_i + R_i(x_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이고, 여기서

$P_i(x_i), Q_i(x_i), R_i(x_i)$ = 위치오차 또는 진척도오차

$\gamma_i(x_i), \beta_i(x_i), \alpha_i(x_i)$ = 각각 x_1, x_2, x_3 축에 대한 각오차

δ_{ij} = dirac delta.

2.3 기하학적오차

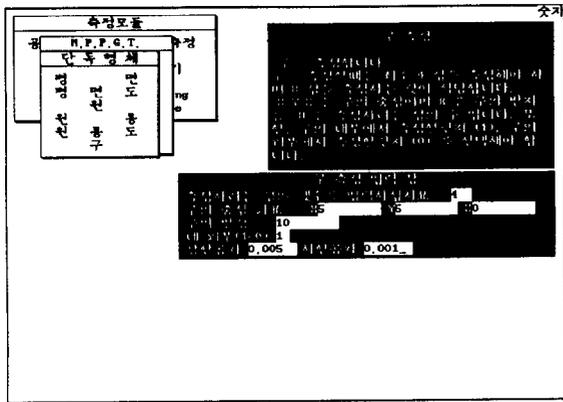
식(1) 과 (2) 를 이용하여 3축 공작기계의 기하학적오차를 모형화 하면, 질속점 $\{r_i\}$ 에서 오차벡터

$$\{e\} = [H_{res}]_{actual}(0) - \{r_i\} \quad (3)$$

가 되고, 여기서 $[H_{res}]_{actual} = \{[T_1][\phi_1][T_2][\phi_2][T_3][\phi_3][T_4]\}_{actual}$, $[T_i]$ = 주축, $[T_1]$ = 킬링, $[T_2]$ = 재능, $[T_3]$ = 테이블의 형상변환 행렬이며, $[\phi_1]$ = z 축, $[\phi_2]$ = y 축, $[\phi_3]$ = x 축 이송계의 조인트변환 행렬 이다.

2.4 수치실험

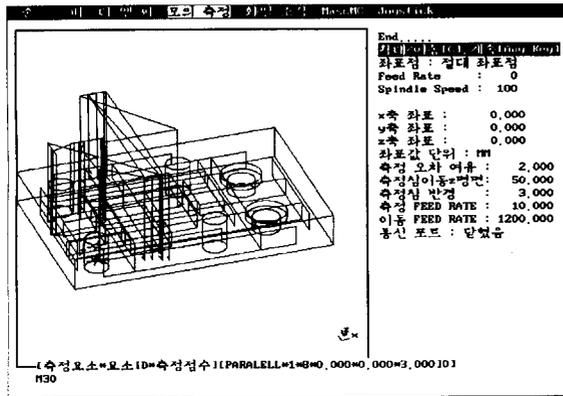
식 (3) 과 실제 가공시 발생할 수 있는 오차요소를 고려한 250



<Fig. 6> Usage of MPPGT module for sphere measurement

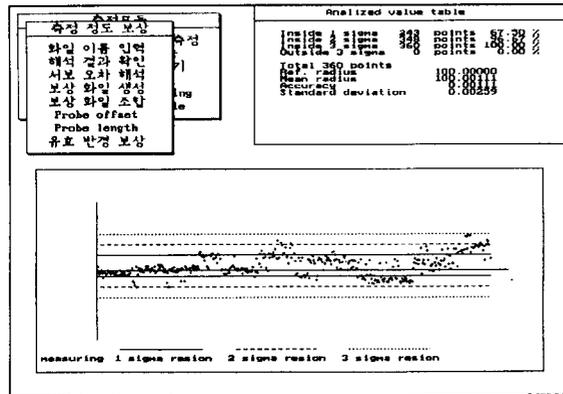
측정모듈		단일 항목 반복 검사			
공작물 좌표계(원점) 측정		검사 대상	부품		
측정신뢰도 검사기능		도면 기준	100,000mm		
측정 프로그램 생성기		회전 공차	-0.020	직각 공차	10.020
측정에 관한 설명		측정 순서	측정값	오차	
해석 및 검사		1	99.999	+0.001	
해석 확인		2	99.999	-0.002	
좌표 변환		3	99.999	-0.001	
보상 확인		4	99.999	-0.001	
통산 검사		5	99.999	-0.001	
단일 항목 검사		6	99.999	-0.002	
기하학적 관계		7	100.000	0.000	
		8	99.999	-0.001	
		9	99.999	-0.001	
		10	100.000	-0.000	
		11	100.000	-0.000	
		12	100.000	-0.000	
		13	100.000	0.000	
		14	100.000	-0.000	
		15	99.999	-0.001	
평균		99.999			
최소값		99.999	최대값	100.000	
편차		0.002	편차	0.001	
가공한정		합계			

<Fig. 9> Measuring result for 100 mm gauge block



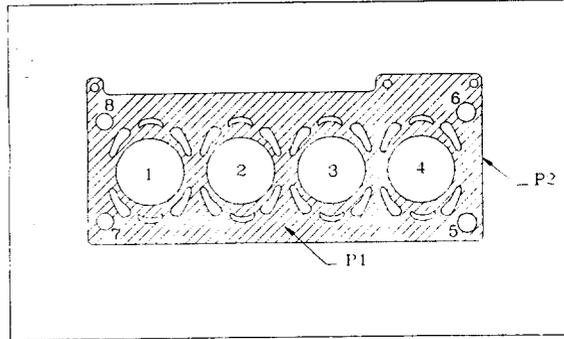
<Fig. 7> off-line simulation of measuring program

φ200 링게이지의 측정결과와 그의 산포도를 <Fig. 8> 에 보였으며, <Fig. 9>에 100 mm 게이지블록의 반복측정 결과를 제시하였다.



<Fig. 8> Measuring result for φ200 ring gauge

<Fig. 10> 은 엔진블록 측정시 측정항목을 보인 것이고, <Fig. 11> 과 <Fig. 12> 는 단일항목 측정결과와 종합검사 결과의 일부를 보인 것이다. 링게이지, 블록게이지를 이용한 측정 결과에서 볼 수 있듯이 머시닝센터 상에서 구현된 좌표측정기 기능인 MascMC 는 만족할 만한 측정신뢰도를 가지며, 다양한 공작물의 측정 및 해석에 이용할 수 있다.



<Fig. 10> Measuring items for engine block

측정모듈	검사상자서
공작물 좌표계(원점) 측정	측정항목
측정신뢰도 검사기능	내선
측정 프로그램 생성기	측정점수
측정에 관한 설명	12 항목번호 : 4
해석 및 검사	산차의 수공차
해석 확인	0.050
좌표 변환	회전차의 수공차
보상 확인	-0.050
통산 검사	회전기하공차
기하학적 관계	0.050
	검사항목
	결과
	측정값
	오차
	도면표시
	800.000
	80.000
	320.062
	01.004
	측정결과
	중심오차
	-0.198
	0.994
	0.600
	지정
	76.300
	측정결과
	76.300
	지정오차
	0.001
	지원도 해석
	평균
	99.999
	최소값
	99.999
	최대값
	100.000
	오차범위
	0.001
	편차
	0.002
	합계

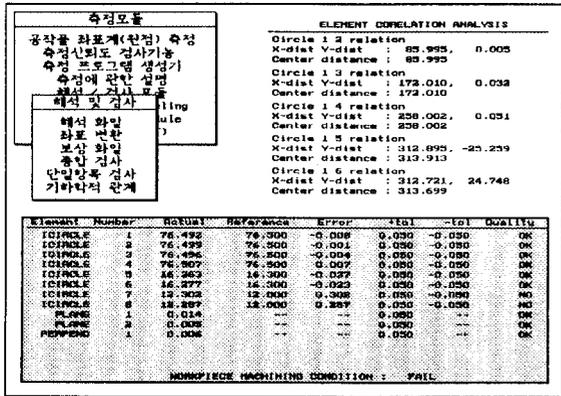
<Fig. 11> Inspection report for an item

5. 오프라인 열변형오차 규명 및 보상제어 시스템

정밀가공에서는 가공중 발생하는 오차를 측정장치를 이용하여 측정 후 가공조건을 조절하여 공작물 자체의 오차개선을 추구하는 GAC (Geometric Adaptive Control: 기하학적 적응제어) 방법이 요구된다^{1,7,8,9,10,11)}. 가공정도를 저하시키는 주요한 원인으로 작용하는 것은 공작기계의 이동부분과 형상부분에서 발생하는 기하학적인 오차와 공작기계의 발열이나 주위의 온도변화^{12,13,14)}에 따라서 야기되는 열변형 오차등이다.

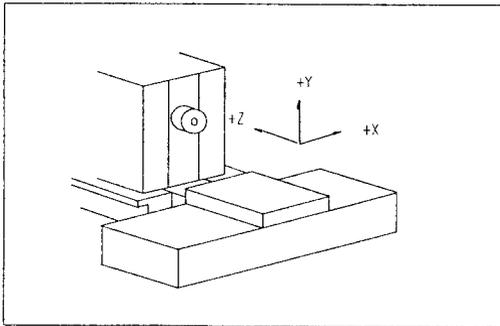
설계단계에서 대칭설계, 열원분리, 재질개선, 유체순환을 통한

냉각 등을 도입하여 저열변위 공작기계를 설계하고 있지만 완전한 설계법은 존재하지 않으며, 주위온도 변화에 따른 해결책은 항온실의 설계나 오일사위법 등으로 해결하고 있다. 그러나, 이러한 설계법이나 제어 기술 등은 경제적인 측면에서 많은 비용이 요구되며 실용화에 어려움이 있는 것이 현실이다.

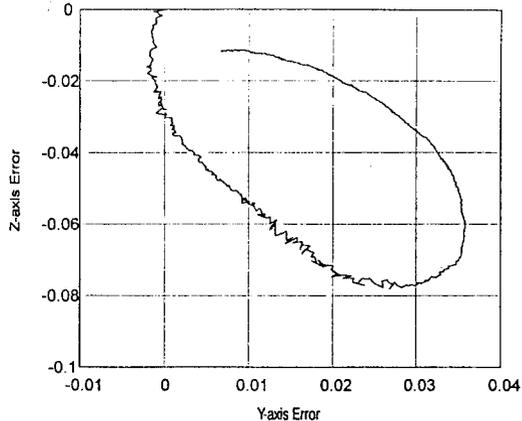


<Fig. 12> Overall inspection report

<Fig. 13> 은 수평형머시닝센터 (MCH-5, 세일중공업) 의 구조를 보여준다. 스피들속도를 0 - 5000 rpm 사이에서 변화시키면서 10 시간 가동시 yz 축 기계원점의 변화거동을 실험하면, <Fig. 14> 와 같이 z 축에서 80 μm, y 축에서 40 μm 정도의 오차거동이 발생하게 된다.

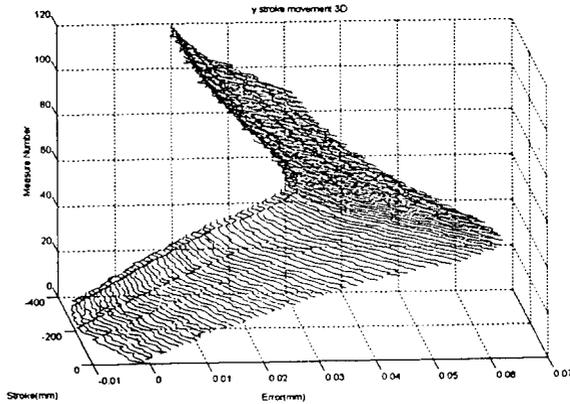


<Fig. 13> Schematic diagram of the horizontal machining center

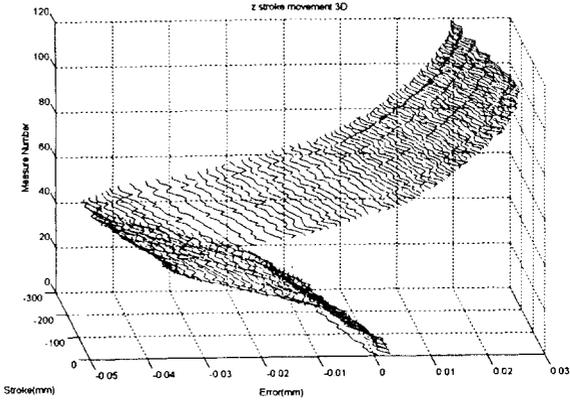


<Fig. 14> Change of machine origin due to warm up in the yz plane

<Fig. 15> 는 동일 조건하의 y 축과 z 축에서 이송구간에 따른 오차거동을 보인 것이다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 열변형 오차는 비반복적으로 발생하는 랜덤오차로서 그 양을 post processing 방법으로 측정된 후 제어하는 오프라인(off-line) 보상제어법이 필요함을 알 수 있다.



(a) y - axis



(b) z - axis

<Fig. 15> Displacement error measurement due to machine warm up

여기서는 온도변화에 의하여 야기되는 머시닝센터의 체적오차계산을 다루고자 하며, 열전대를 이용한 간접적인 추정방식^{(17),(14)}이 아닌, 측정기구 장안에 의한 직접적인 열변형오차 측정을 통한 오프라인 오차 규명과 보상제어법⁽¹⁵⁾을 소개한다.

5.1 측정플레이트와 오차 규명⁽¹⁵⁾

열변형에 의하여 야기되는 체적오차의 비주기적인 보정이 필요시 접촉식 측정프로브, 진구, 자석판을 이용하여 개발한 측정플레이트 (<Fig. 16> 참조) 를 이용한다.

<Fig. 17> 은 측정플레이트를 이용하여 <Fig. 13> 공작기계의 warm up 후 체적오차를 측정된 결과이다. <Fig. 17> 과 <Fig. 14> 의 실험결과에서도 볼 수 있듯이 <Fig. 13> 형태의 수평형머시닝센터에서 오차거동은 yz 축이 서로 연성되어 있고 x 축은 비연성 되어 있음을 알 수 있다.

공간상에서의 체적오차는 yz 축이 서로 연성되어 있는 2차 비선형 모델을 이용하여 식 (4) 로 부터 규명한다.

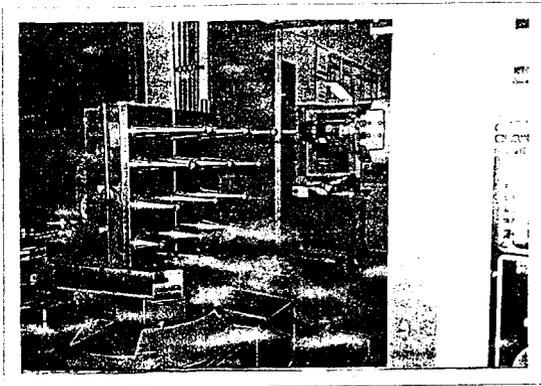
$$c = [K^T K]^{-1} K^T e \quad (4)$$

여기서

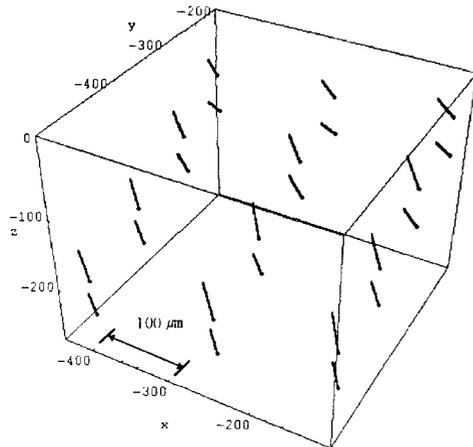
c = 2차 비선형모델의 계수 벡터

e = 측정플레이트로부터 얻어지는 측정오차 벡터

K = 진구 위치에 따라서 생성되는 계수행렬.

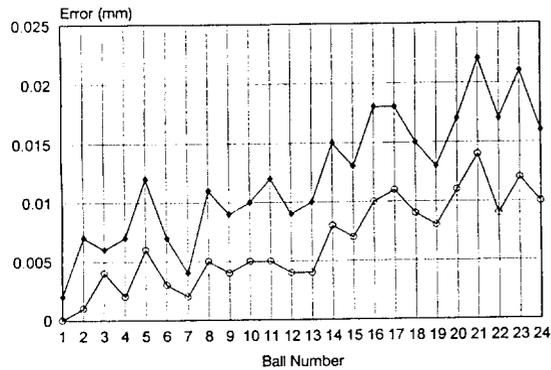


<Fig. 16> Overall view of the measuring plate system

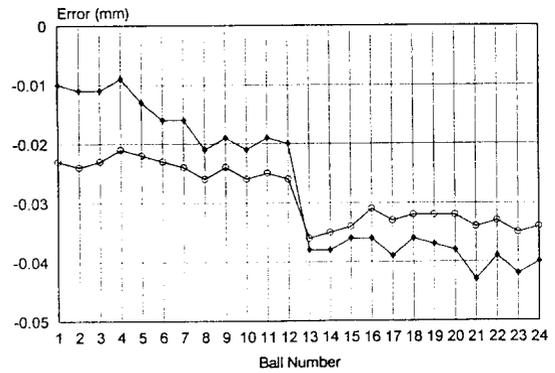


<Fig. 17> Volumetric error measurement

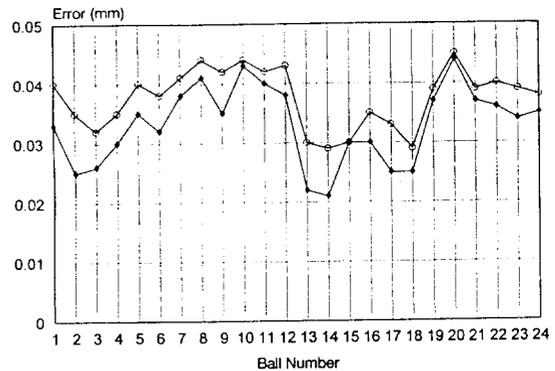
5.2 보상제어



(a) x - axis



(b) y - axis

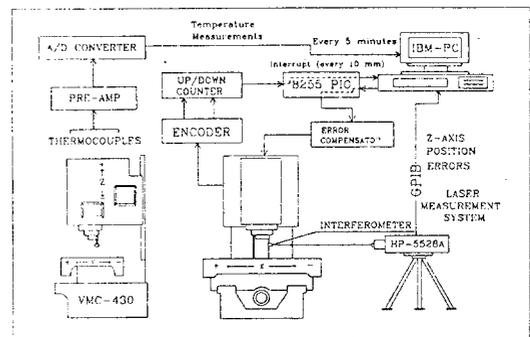


(c) z - axis

<Fig. 18> Off-line GAC result for the horizontal machining center

NC 장치의 피치오차 파라미터 보상법과 Macro - B 프로그램 수정기법으로 기계 작동중 체적오차를 보상제어⁽¹⁵⁾ 한다. <Fig. 18> 은 5.1 절에 제시된 규명법을 이용하여 체적오차를 규명후, GAC 기법을 Fanuc OMC 가 장착된 MCH-5 수평형 머시닝센터에 적용한 결과이다. x, y, z 축 모두 측정플레이트의 진구가 장착된 위치에서 $\pm 10 \mu\text{m}$ 내의 제어 정도를 기검을 알 수 있다.

6. 온라인 열변형오차 보상제어 시스템



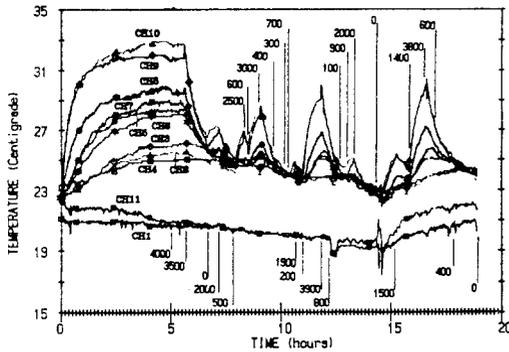
<Fig. 19> Thermal error identification set up

Donmez 등⁽⁷⁾이 NC 선반에서 열전대를 이용한 열변형오차의 규명 및 온라인 실시간 보상제어를 실시한 이후, 주위 온도 변화에도 능동적으로 대처하며 열변형오차를 실시간 보상제어할 수 있는 GAC 기술에 많은 관심을 가지게 되었다.^(1,8,9,10,11,14)

여기서는 열전대를 이용하여 머시닝센터 사용시 발생하는 열변형거동을 규명하고, 실시간으로 열변형오차를 보상제어할 수 있는 GAC 시스템에 대하여 소개 한다.

6.1 열전대 이용 열변형오차의 규명

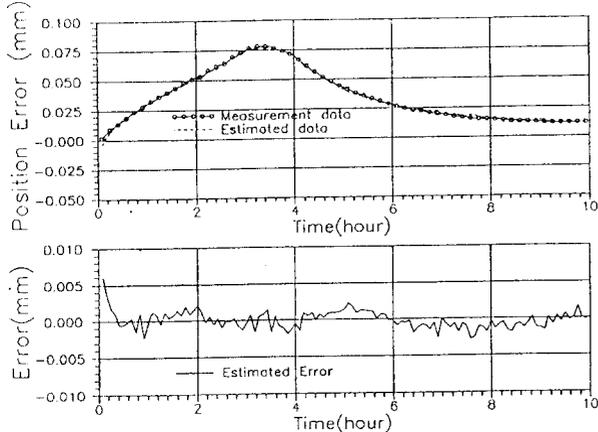
<Fig. 19> 는 수직형 머시닝센터에서 z 축의 열변형거동을 모형화하기 위한 장치를 보여준다. Warm up 과 주위 온도 변화시 발생하는 열변형오차를 측정하기 위해 엔코더 신호에 따라서 정확한 위치오차를 측정할 수 있는 레이저측정기 (HP-5529A) 를 사용하였고, 열전대를 이용하여 공작기계 각 부위의 온도를 측정하였다. (<Fig. 20> 참조)



<Fig. 20> Temperature records

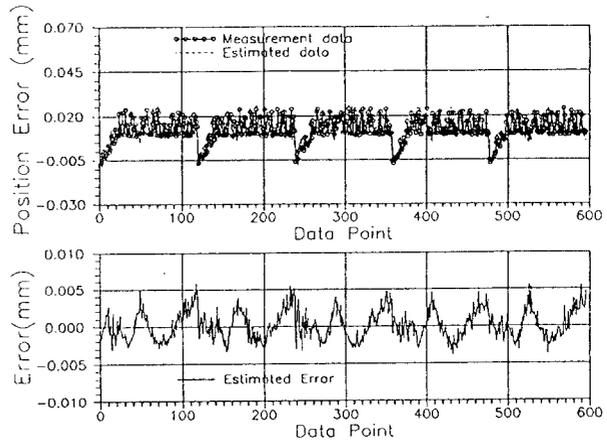
(1) GMDH 법⁽⁸⁾

앞서 제시한 <Fig. 19> 와 같은 구조를 갖는 실험장치를 <Fig. 13> 과 같은 수평형 머시닝센터에 구축한 후, 측정된 온도 및 오차값을 이용하여 z 축 기계원점의 열변형거동을 1966 년 소련의 Ivakhnenko 교수가 창안한 GMDH (Group Method of Data Handling) 알고리즘⁽¹⁶⁾을 이용하여 모형화 하던 <Fig. 21> 과 같이 된다. <Fig. 22> 는 동일한 MCH-5 에서 y 축의 이송구간에 따라 발생하는 열변형오차를 GMDH 로 모형화한 후, 랜덤하게 샘플한 결과를 도시한 것이다. 원점의 경우는 $\pm 3 \mu\text{m}$



<Fig. 21> Modeling result for z-axis machine origin

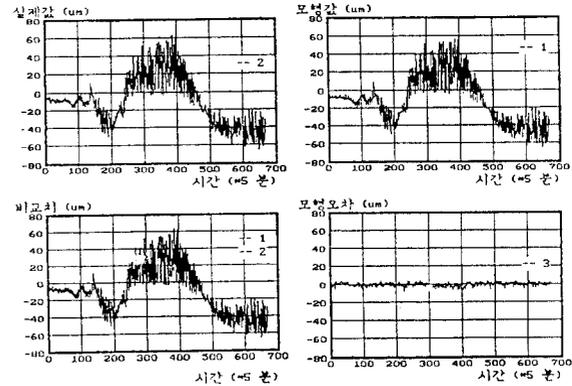
내에서 열변형거동의 규명이 이루어지며, 이송구간에 따라서는 $\pm 5 \mu\text{m}$ 정도의 규명 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 얻어진 모형을 이용하여 실시간에서 온도측정만을 통한 오차모형의 신뢰도를 검증한 결과 $\pm 10 \mu\text{m}$ 의 정도를 확인할 수 있었다.



<Fig. 22> Modeling result for y-axis positioning error

(2) 신경망기법⁽¹⁾

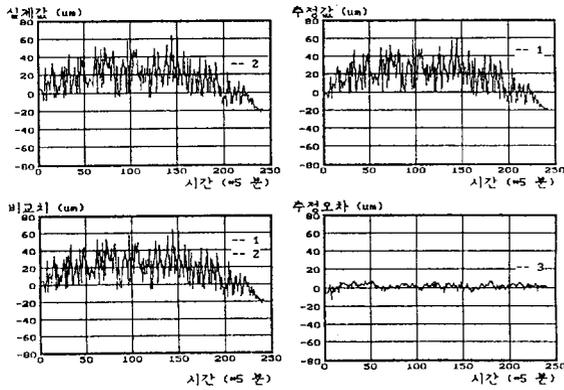
신경망기법을 <Fig. 19> 의 수직형 머시닝센터에 적용한 결과, <Fig. 23> 과 같은 모형화 결과를 얻었다. 이 열변형거동 모형을 이용하여 실시간에서 온도측정을 통한 열변형오차를 추정한 결과 <Fig. 24> 와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 서로 다른 주위 온도 변화와 기계작동 조건에서 20 시간 동안 실행한 열변형오차의 추정에서 $\pm 5 \mu\text{m}$ 내의 신뢰도를 검증할 수 있었다.



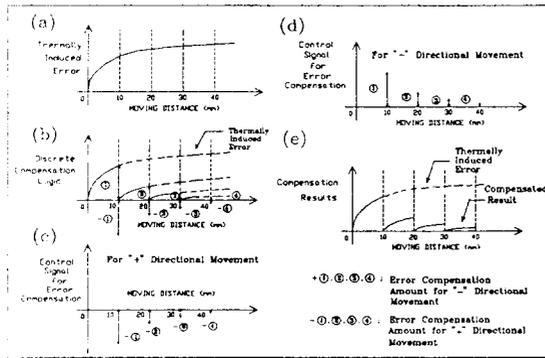
<Fig. 23> Modeling result of thermal deformation

6.2 온라인 보상제어⁽¹⁾

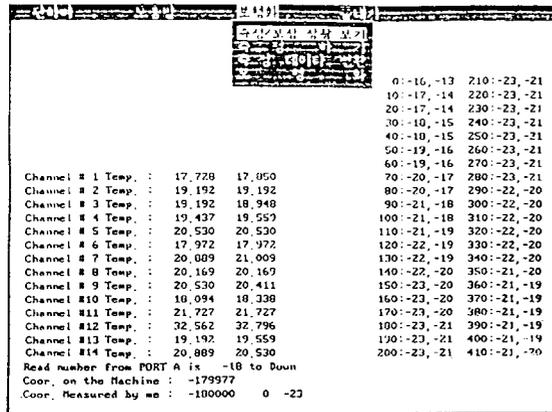
앞절에서 소개한 신경망기법을 통하여 모형화된 열변형거동 모형과 <Fig. 25> 와 같은 보상제어법을 이용하여 GAC 기법을 개발하였다. <Fig. 19> 에 제시된 인터페이스 장치를 이용하여 기계작동 중 온라인 보상제어를 실행한 결과 <Fig. 26> 과 같은 제어결과를 얻을 수 있었다. 매 10 mm 구간에서 측정된 제어결과에서 볼 수 있듯이 열변형오차의 온라인 기하학적 적응제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.



<Fig. 24> Checking result of thermal deformation



<Fig. 25> Compensatory control signal according to thermal error



<Fig. 26> On-line GAC result of thermal error

7. 결 론

머시닝센터의 구조부와 이송부의 변형 및 오차에 따라서 야기되는 기하학적인 오차를 규명할 수 있는 시뮬레이터, 그리고 인프르세스 측정용을 통한 공구 및 공작물의 온도관리를 온더머신 에서 할 수 있는 오차측정 및 관리 시스템의 개발 사례를 소개하였다.

측정플레이트 개발을 통한 오프라인 열변형오차 규명 및 기하학적 적응제어기 개발 사례를 소개하였으며, 아울러 GMDH 및 신경망기법을 이용한 온라인 열변형오차 규명 및 기하학적 적응제어기 개발에 대한 사례를 소개하였다.

참 고 문 헌

- (1) 정성중 등, 1991, 1992, 정밀가공을 위한 자동차보상 기능을 갖는 머시닝센터 개발, 연구보고서, 화천기공(주).
- (2) 은율, 1995, "가공공정의 실시간 상태감시 및 제어 기술에 관한 연구", 석사논문, 한양대학교.
- (3) 박우열, 1994, "온더머신 오차 측정 및 검사 시스템의 개발", 석사논문, 한양대학교.
- (4) 김승철, 1995, "금형가공용 MascCAM 시스템 개발에 관한 연구", 석사논문, 한양대학교.
- (5) 공민규, 1995, "온더 머신 측정 및 검사 시스템의 정도 개선", 석사논문, 한양대학교.
- (6) 정성중, 1995, 자동측정 및 CAD/CAM/CAT 일괄처리 시스템, 한양대학교.
- (7) M.A.Donmez, D.S.Blomquist, R.J.Hocken, C.R.Liu and M.M.Barash, 1986, "A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation", Precision Engineering, Vol. 8/4, pp. 187-196.
- (8) 정성중 등, 1994, 고정밀 고생산성 머시닝센터 개발, 연구보고서, 세일중공업.
- (9) H.K.Tonshoff and J.P.Wulfberg, 1990, "Compensation of thermal induced displacements in machine tools", Proceedings of the Manufacturing International, Vol. 5, ASME, pp. 41-50.
- (10) M.Matsuo, T.Yasui and T.Inamura, 1989, "Measurement and decomposition of thermal deformation of a machining center", Transactions of the JSPE, Vol. 55/9, pp. 1681-1686.
- (11) S.Koda et. al., 1990, "Automatic compensation of thermal expansion of the ball screw in machining centers", Transactions of the JSME (c), Vol. 56, No. 521, pp. 154-159.
- (12) N.Nishisaki, S.Hory, M.Tsutsumi, and M.Kunieda, 1987, "Thermal deformation of machine tools caused by temperature variations in machine shops", Transactions of the JSME (c), Vol. 53, No. 495, pp. 2408-2413.
- (13) 정성중, 박정균, 1992, "유한차분법을 이용한 볼스크류 시스템의 열팽창 해석", 한국정밀공학회지, 제9권, 제4호, pp. 44-57.
- (14) OKK, 1990, TDC system, JIMTOF'90.
- (15) 양종태, 1995, "수치제어 공작기계의 열변형오차 보정법", 석사논문, 한양대학교.
- (16) S. T. Farlow, 1984, Self-organizing methods in modeling, Marcel Dekker Inc., N. Y.