

CNC 공작기계용 온라인 실시간 위치오차 보정시스템의 개발

정재일*, 김종원*, 남원우**, 이상조**

Development of Online Realtime Positioning Error Compensation System for CNC Machine Tools

Chae-il Chung*, Jongwon Kim*, Weon-woo Nam**, Sangjo Lee**

ABSTRACT

The online realtime positioning error compensation system 'SKY-PACS' is developed to correct geometric errors, thermal errors and tool deflection errors induced by cutting forces on the vertical machining center. 'SKY-PACS' communicates position commands and position compensation signals with the CNC controller at 100Hz, which is CNC control frequency. So the compensation procedure can be applied during axis movement. Using 'SKY-PACS', Maximum 1 axis positioning accuracy was corrected from $5\mu\text{m}$ to $2\mu\text{m}$ and the squareness error of X-Y table was corrected from $51\mu\text{m}/\text{m}$ to below $4\mu\text{m}/\text{m}$. The error compensation under the cutting condition is carried out by ISO10791-7. And the measurement of test-pieces shows that the roundness is corrected from $8\mu\text{m}$ to below $5\mu\text{m}$.

Key Words : CNC machine tool(CNC 공작기계), NC device(수치제어장치), Positioning Accuracy(위치결정정밀도), Positioning error compensation(위치오차보정)

1. 서론

절삭가공에 의해 발생하는 공작물의 정밀도는 크게 공구와 소재사이의 계획된 경로에 대한 편차와 공구의 탄성변형과 마모조건에 의한 오차, 소재의 탄성변형에 의한 오차 등에 의하여 결정된다. 경로에 대한 편차는 다시 기하학적 편차(geometric deviation)와 동적 편차(kinematic deviation) 두 가지로 나뉘어 진다. 기하학적 편차는 위치 결정 정밀도 오차와 공작 기계 부품의 기하 공차를 의미하며, 동적 편차는 좌표계를 따라 이동할 때 발생하는 위치 제어 오차를 의미한다. 각 편차는 공작 기계의 요소 부품의 가공 오차, 본체 소조립 및 대

조립 오차, 다양한 절삭조건에 따른 정적, 동적 열변형 등에 의해 결정된다. 이러한 경로에 대한 편차를 일반적으로 재현성을 갖는다고 가정하고, 위치결정정밀도 오차, 열변형 오차, 절삭력에 의한 변형량 등을 미리 측정한 뒤에, 각 축의 현재좌표값에 대하여 일정한 양을 보정함으로써 경로에 대한 편차를 감소시키는 연구가 많이 진행되어 왔다.

지금까지 연구되어 온 CNC 공작기계 오차보정 시스템은 크게 정적오차보정 시스템, 준정적(quasi-static)오차보정시스템 및 동적오차보정시스템으로 구분할 수 있다. 정적 오차보정시스템은 각 축의 현재 좌표값에서의 보정값이 시간에 따라서 변하지 않는 위치보정시스템을 말한다. 기존 CNC 공작

* 서울대학교 기계공학부

** 연세대학교 기계전자공학부

기계에서 기본적으로 제공되는 백래쉬 보정기능과 피치오차 보정기능이 대표적인 예이다.

Park 등⁽¹⁾은 상용 머시닝센터의 CNC와 삼차원 좌표측정기(CMM)의 제어기를 연결하여, 시험절삭한 소재를 CMM에서 측정한 뒤에, 측정결과에 의거하여 즉시 머시닝센터 CNC에 내장된 피치오차 보정표를 수정할 수 있는 보정시스템을 연구하였다. 그러나, 기존의 피치오차 보정표를 이용한 보정은 각 축의 스트로크를 일정한 간격(예를 들어, 10mm 간격)으로 분할하여, 분할된 각 구간별로 위치지령치를 보정하기 때문에 얻을 수 있는 위치보정정밀도에 한계가 있다.

한편, 최근에 공작기계 가동 중에 구조물에 발생하는 열에 의한 열변형 오차를 보정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 열변형 오차는 절삭조건이나 가공시간등에 변화하는 공작기계 각부의 온도의 함수이기 때문에, 앞에서 언급한 고정된 피치오차 보정표에 의한 정적 오차보정 시스템으로는 대응할 수 없다. 따라서, CNC 공작기계 구조물의 발열상태에 대한 열변형 오차함수를 어떻게 구할 것인가 하는 문제는 별도로 하고, 일단 열변형 오차함수를 알아낸 후에 어떠한 방법으로 위치보정값을 CNC에 입력시키는가 하는 문제가 대두되었다. 현재 제안된 방법 중에서 첫번째 방법은 DNC(Direct NC)를 통하여 CNC 프로그래밍의 G 코드값을 변경시키는 방법이다⁽²⁾. 그러나 이 방법은 G 코드의 최종좌표값만 변경시킬 수 있을 뿐이고 DNC를 통한 위치보정 시점이 일정하지 않아 실시간 보정이 불가능하다. 두 번째 방법은 PMC를 수정하여 외부 PC로부터 CNC 내부에 저장되는 각 축의 원점좌표값을 시간에 따라서 변경시키는 방법이다. Chen^(3,4), Yang⁽⁵⁾, Srivastava⁽⁶⁾ 등은 공작기계의 제어기 원점을 PMC를 통하여 외부 PC에서 직접 수정해주는 방식을 이용하여 시스템을 구성하고 공작기계의 다양한 가동조건에 따른 열변형 오차를 보정하는 연구를 수행하였다. 이 방법으로는 보정주기가 약 20Hz, 즉, 50ms의 주기로 축의 원점 좌표값을 변경시킬 수 있으며, Yang⁽⁵⁾에 의하면 공작기계의 열변형은 기계에 따라 약간의 차이는 있지만 30분에 10 μ m 정도의 변형이 생기므로, 20Hz의 보정주기를 가지는 시스템의 경우 열변형 오차를 보정하는 데에는 무리가 없음을 알 수 있다.

그러나, 이 방법도 공작기계 X-Y 테이블의 직각도오차와 같이 공작기계의 제어주기만큼의 빠르기

로 위치 보정을 실시하여야 하는 동적오차보정 시스템에는 적합하지 않으며, 특히 절삭력에 의한 오차를 보정하기 위해서는 절삭력의 변화속도보다 빠르게 보정할 수 있는 시스템이 필요할 뿐 아니라 3축 동시이송시의 윤곽오차를 보정할 수 있는 시스템이 필수적이다. 이와 같이 대장기계의 작동 환경이나 작업 조건에 의해 변화하는 대장기계의 오차를 보정하기 위하여 각부의 온도나 절삭 공정에서의 절삭력을 측정하여 이에 따라 오차와 오차원인을 모델로 구성하고 이를 이용하여 실시간으로 보정값을 출력하는 시스템을 실시간 온라인 오차보정 시스템이라 한다.

본 논문에서는 먼저 상용 머시닝센터에 실용적으로 적용가능하면서, 보정주기가 100Hz, 즉, 10ms의 간격으로, 축의 원점좌표값의 변경이 아니라 직접 CNC 내부의 위치지령치값을 변경시킬 수 있는 방법을 제시한다. 이와 같은 PC와 CNC 사이의 인터페이스 방법을 이용하면, 기존의 피치오차 보정기능에 의하여 얻을 수 있는 위치결정정밀도보다 더욱 정밀한 위치결정정밀도를 구현할 수 있다. 본 연구에서는 실시간 온라인 위치오차 보정 시스템을 구성과 하드웨어적인 사양에 대해 설명하고, 새롭게 구성된 시스템을 성능을 평가하기 위하여 1축 단독이송일 경우와 2축 동시이송시의 위치결정 정밀도를 보정한 결과와 정삭가공시의 형상오차 보정시험을 수행하여 그 보정결과를 제시하였다.

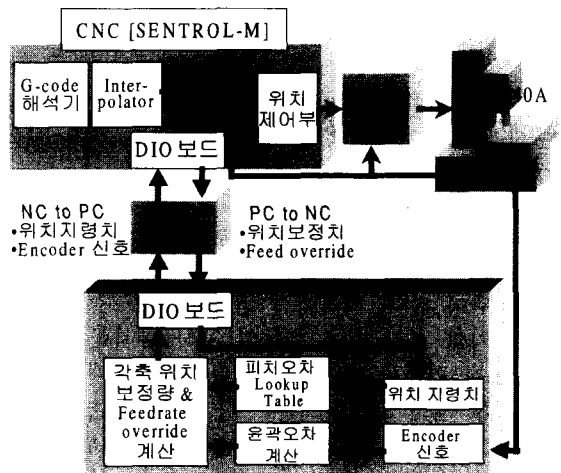


Fig. 1 Configuration of 'SKY-PACS'

2. 온라인 실시간 위치오차 보정시스템 : SKY-PACS

2.1 시스템의 하드웨어

‘SKY-PACS’는 Fig.1 에 나타나 있는 것과 같이 CNC 측 DIO 보드, PC 측 DIO 보드, 릴레이보드, PC 측 인코더 보드, 주연산제어기의 5 가지로 구성되어 있다. 주연산 제어기와 CNC 에 부착되어 있는 DIO 보드는 CNC 의 위치 지령치를 PC 로 보내고, 위치 보정치와 이송속도 오버라이드(override)신호를 PC 로부터 받는 기능을 수행한다. 주연산 제어기에서 CNC 로 받아들여지는 신호는 57 점점(bit) 이며 CNC 에서 주연산제어기로 보내어지는 신호는 97 점점이다. 고속으로 신호를 송수신하기 위하여 병렬 연결구조로 되어 있다.

CNC 의 DIO 보드와 주연산 제어기의 DIO 보드 사이의 신호를 변환시켜 주는 릴레이보드(relay board)는 포토커플러(photo-coupler)를 이용하여 CNC 와 주연산 제어기의 전원을 분리시키는 구실과 함께, CNC 의 최대 24V 디지털 신호레벨과 주연산 제어기의 최대 5V TTL 신호레벨을 상호변환시키는 기능을 수행한다. 인코더 보드는 머시닝센터 각축의 서보모터에 부착되어 있는 인코더로부터 인코더신호를 받아들여 현재 위치값을 받아들이는 역할을 한다. 주연산 제어기는 INTEL 486DX-66 마이크로 프로세서가 탑재된 컴퓨터로 구성하였으며, 위치 보정치를 계산하여, CNC 로 출력하는 기능을 수행한다. 또한 주연산제어기는 레이저간섭계로부터 입력되는 실제 위치값을 별도의 인터페이스 보드를 이용하여 저장하는 기능을 수행한다. 시스템을 통해 CNC 와 주연산제어기 사이에 주고 받는 데이터는 각축의 1 스텝 앞의 위치지령치, 인코더 신호로부터 계산되는 현재위치, CNC 의 피치오차와 백래쉬오차 보정량, CNC 와 주연산 제어기의 동기화를 위해 보내지는 1 점점의 펄스(pulse)로 이루어져 있으며, 주연산제어기에서 CNC 로 주어지는 보정신호는 각축의 보정량과 이송속도 오버라이드(feedrate override)신호로 이루어져 있다.

2.2 시스템의 구성

보정시스템의 성능을 평가하기 위하여 통일중공업의 수직형 범용 머시닝 센터 TNV-40A 에 보정시스템을 적용하였다. TNV-40A 는 통일 중공업

CNC 인 SENTROL-M 를 장착하고 있으며 각축의 최대 이송거리는 X 축 560mm, Y 축 410mm, Z 축 510mm 이다.

Fig.2 에서 나타나 있는 것과 같이 실시간 위치오차 보정시스템은 SENTROL-M 과의 인터페이스를 통하여 구성되었으며, 주연산제어기와 CNC 가 통신할 수 있도록 대상 CNC 의 제작사인 통일중공업의 협조를 얻어 CNC 측의 프로그램 일부를 수정하여, CNC 의 각 이송축의 위치지령치와 CNC 내부의 보정알고리즘을 이용한 위치보정치를 CNC 에 부착된 DIO 보드로 출력하고 CNC 내부의 오차를 기억하고 있는 업다운 카운터(Up-down counter)의 값을 외부의 주연산 제어기에서 수정할 수 있도록 하였다.

보정 시스템은 CNC 의 제어주기인 10ms 마다 보정값을 각 축의 위치제어부에 보내어 보정을 수행하며, 보정 최소단위는 CNC 의 최소 제어 단위인 0.5 μ m이다. CNC 로 보내진 보정치는 현재 위치오차값이 기억되어 있는 업다운 카운터의 값을 가감함으로써 보정을 수행하며 머시닝센터 각축의 인코더로부터 받아들인 현재위치와 레이저와 DBB 측정을 통해 측정된 실제위치를 이용하여 각 축의 보정량을 계산한 후 CNC 로 보정신호를 보내어 보정을 수행한다.

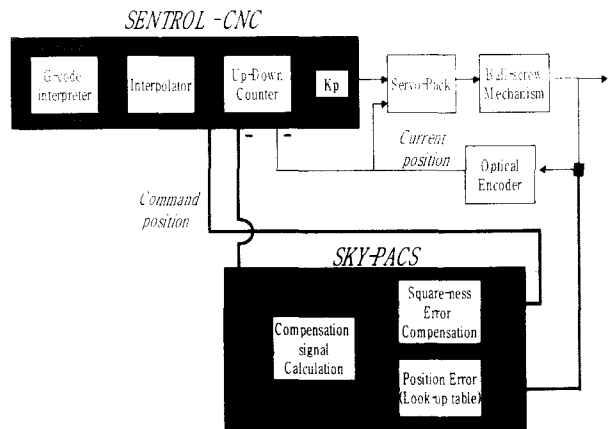


Fig. 2 Block diagram of ‘SKY-PACS

CNC 외부의 주연산 제어기에서 CNC 와 통신하는데 있어서 현재의 위치지령치를 입력으로 받아 보정값을 출력하는 경우 보정값 계산을 위한 시간 지연이 발생하게 된다. 본 시스템에서는 이러한 시간지연을 제거하기 위해 Fig.3 에 나타나

바와 같이 CNC 의 다음 제어주기에서의 위치지령치를 미리 주연산 제어기에서의 입력으로 받아 이 값을 기준으로 보정치를 계산하고 이 보정치를 CNC 로 출력하여 보정을 수행한다.

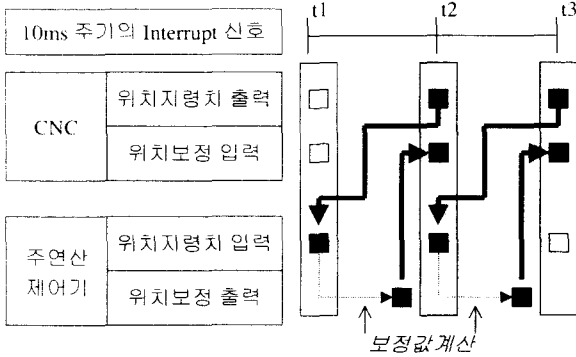


Fig. 3 Timing Chart of Compensation signal for SKY-PACS

위치보정을 위한 업다운 카운터의 가감 외에도 SKY-PACS 에서는 이송속도 오버라이드도 CNC 외부의 주연산 제어기에서 조절할 수 있도록 하였다. 이것은 SKY-PACS 의 보정 수단을 최대화 하기 위해 설계되었으며, 절삭력에 의한 공구 처짐의 보상에 있어서 이송속도를 변화시킴으로써 절삭력의 크기를 일정하게 하여 모델에 의한 공구의 처짐의 예측과 보정을 수행하기 위해 사용된다.

위와 같이 구성된 SKY-PACS 시스템은 위치오차, 열변형 오차, 절삭력에 의한 공구처짐 오차등을 보정하는 데 사용된다. 열변형의 경우 공작기계 각부의 온도 신호를 측정하고 이때의 각 이송축과 주축의 오차를 레이저나 비접촉식 센서를 통하여 측정후 온도와 오차사이의 모델을 이용하여 각부의 온도 신호에서 각 오차를 예측하고 이를 보정하게 된다. 절삭력에 의한 공구처짐으로 인한 오차의 보정의 경우 절삭력을 측정할 수 있는 공구동력계나 스트레인 게이지를 이용한 측정기구로부터 얻어지는 신호와 이에 따른 가공물의 오차를 이론적으로 모델링하고 이 모델링을 이용하여 절삭력 신호로부터 가공오차를 예측하고 이를 보정값으로 적용하게 된다.

3. 무부하시 위치결정정밀도 오차보정실험

3.1 1 축이송시 오차의 측정 및 보정

위치결정정밀도는 한국 공업규격에 의해 다음과 같이 정의된다. 머시닝센터의 각 축을 한 방향으로 이송하여 정지시키고, 그 위치를 기준으로 하여 같은 방향으로 일정한 간격으로 차례로 이송시킨 후, 각각의 위치에서 기준위치로부터 실제로 이동한 거리와 이동해야 할 거리의 차이 중에서 최대 차이를 위치결정정밀도라고 정의한다⁷⁾.

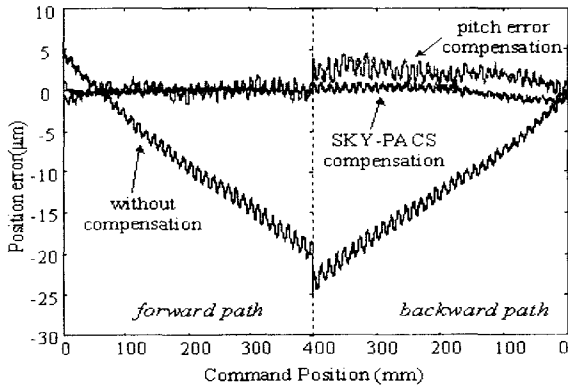
현재 상용 CNC 는 레이저간섭계나 요철형 기준스케일(Solid scale)등을 기준으로 슬라이드 부를 일정거리만큼 이송시키고, 이때의 각 위치에서의 오차를 CNC 의 피치오차표에 입력하여, 이송시 위치제어기에서 지령치를 내보낼 때 이 오차만큼을 가감해 줌으로써 위치결정정밀도 오차를 보정하고 있다. 그러나, 이 방법은 전진과 후진시에 위치오차의 모양이 같고, 전구간에 대하여 백래쉬 값이 일정하다는 가정이 성립할 때만 정확한 보정이 이루어지게 된다. Fig.4 에서 알 수 있는 바와 같이 일반적으로 위치오차의 모양은 전진방향과 후진방향에 대하여 차이가 있는 것을 알 수 있다. 따라서, CNC 피치오차 보정 방법은 정밀한 위치보정이 힘들며, 또한 열변형으로 인한 위치결정정밀도의 변화는 보정할 수 없는 단점이 있다.

각 위치에서의 위치보정값을 결정하기 위하여 동적측정 및 보정방법⁸⁾을 이용하여 위치오차를 측정하였다. 측정대상축을 300mm/min 으로 이송시키고 15kHz 의 속도로 레이저간섭계에서 얻은 실제위치값과 인코더로부터 얻은 CNC 의 기준위치값을 측정하여 오차보정 표를 만들고 머시닝센터 각 축의 피치오차와 백래쉬를 계산하였다. 기준오차표는 전진방향과 후진방향을 각각 X 축의 경우 270 점, Y 축의 경우 236 점을 선정하였으며, 그 사이값에 대해서는 선형 보간을 이용하여 각 위치에서의 보정값을 만들었다. 기존 보정 방법과의 차이를 비교하기 위하여 기존의 피치오차표를 이용하여 보정을 수행하였을 때의 경우도 함께 실험하였으며, 보정실험은 추적오차의 영향을 제거하기 위하여 1mm 씩 이송후 정지시켰을 때의 위치결정 오차를 측정하였다.

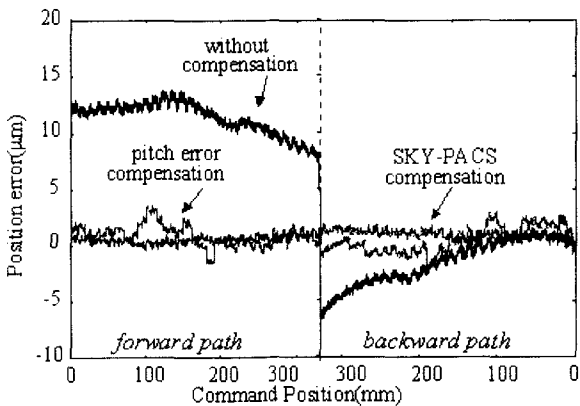
X 축에 대하여 위치결정정밀도 오차를 기존 CNC 의 피치오차표와 백래쉬보정 방법을 이용하여 보정한 결과와 SKY-PACS 를 이용하여 보정한 결과가 Fig.4(a)에 제시되었다. CNC 로 보정을 수행한 경우 원점으로부터 목표위치 400mm 까지 이송시킨 전진방향 이송시에는 선형오차성분은 보정된

반면 볼스크류의 가공오차인 사인파형의 오차부분은 보정이 되지 않아 $\pm 1 \mu\text{m}$ 의 오차 성분이 남아 있는 것을 볼 수 있으며, 위치결정오차는 $-1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 의 범위를 가진다. 또한 피치오차 보정 방법을 이용한 보정결과가 일정한 오프셋 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이것은 백래쉬가 각 위치에 따라 변화하며 지령위치 400mm 일때의 백래쉬값이 지령위치 0mm 일때 보다 $2 \mu\text{m}$ 이 작기 때문이다.

SKY-PACS 로 보정한 경우 사인과 형태로 나타나는 위치오차와 선형오차가 동시에 보정되었다. 이 경우 정방향과 역방향에 대하여 각각의 오차보정표를 적용하였기 때문에 각 위치에 따른 백래쉬값도 함께 보정되었으며, 최종 위치결정정밀도 오차는 $-1.5 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ 의 범위를 가진다.



(a) X axis



(b) Y axis

Fig. 4 Positioning error of X,Y axes before and after compensation

Y 축의 경우, 0mm 에서 330mm 까지 이송시켜

각 위치에서의 위치결정정밀도오차를 측정하였다. CNC 보정을 사용하여 보정을 수행했을 경우, $-3.5 \mu\text{m} \sim 4.0 \mu\text{m}$ 의 오차를 가지며, 330mm 에서 방향이 변화할 때 위치결정 정밀도오차가 일정한 오프셋을 가지는 것을 볼 수 있다. SKY-PACS 를 이용한 보정일 경우에는 이 오프셋량이 $1.0 \mu\text{m}$ 로 줄어들었으며, 보정후 위치결정 정밀도오차의 범위는 $-0.5 \mu\text{m} \sim 1.5 \mu\text{m}$ 가 된다.

3.2 2축 동시이송시의 오차의 측정 및 보정

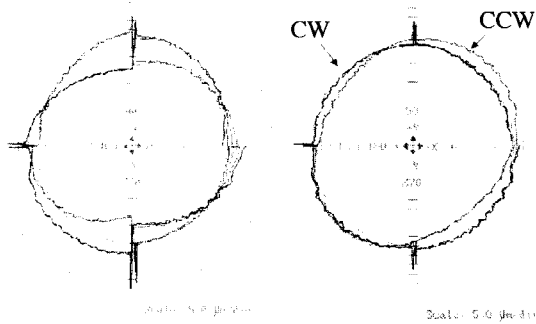
2축에서의 보정량을 결정하기 위하여 DBB (Double Ball Bar)를 이용하여 반지름 150mm 로 원호 보간시켜 500mm/min 로 시계방향과 반시계 방향으로 이송시키면서 반지름의 변화를 측정하였다. 이 결과로부터 X,Y 축의 백래쉬와 볼스크류 피치오차 성분(Lateral play)과 주기오차(Cyclic error), 서보게인 불일치, 직각도 오차, 각축 스케일 오차성분을 계산하였다⁹⁾. 이들 오차들 중에서 백래쉬와 스케일 오차성분은 CNC 의 피치오차표와 백래쉬 보정으로 보정이 가능하지만 다른 오차들은 기존의 방법으로는 보정이 불가능하다.

DBB 를 이용하여 아무런 보정이 없을 경우의 X-Y 축의 위치결정 오차를 측정한 그림이 Fig.5(a)에 제시하였다. 실험결과를 정량적으로 계산해보면, X 축 백래쉬는 방향에 따라 $4.3 \mu\text{m}$, $6.5 \mu\text{m}$ 이며 Y 축 백래쉬는 각각 $17.3 \mu\text{m}$, $14.9 \mu\text{m}$ 이며, 직각도 오차는 $-51 \mu\text{m}/\text{m}$ 이다. 또한 주기오차(Cyclic error)는 X 축의 경우 최대 $1.3 \mu\text{m}$, Y 축은 $1.9 \mu\text{m}$ 로 레이저 측정시의 볼스크류 가공오차에 의해 사인파형 오차의 진폭과 일치한다. 또한 X,Y 축의 백래쉬값 또한 레이저로 측정한 값과 일치한다.

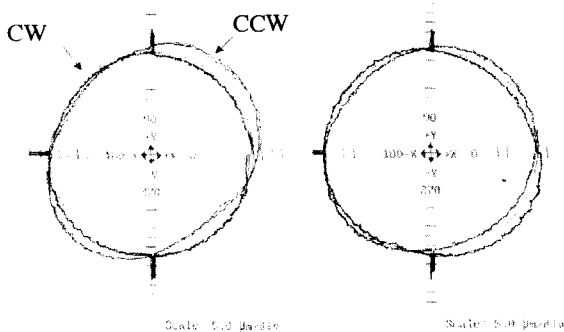
레이저 간섭계로 측정한 각축의 위치오차표를 기준으로 CNC 에서 제공하는 백래쉬 보정과 피치오차 보정을 이용하여 보정한 결과가 Fig.5(b)에 있다. 이 경우 가장 크게 오차를 발생시키는 오차는 공작기계의 마찰력 때문에 생기는 역방향 스파이크(Reversal spike)를 제외하면 차례대로 직각도 오차 $-41.1 \mu\text{m}/\text{m}$, 서보게인 불일치오차 0.48ms , 그리고 X 축의 백래쉬 잔량 $2.2 \mu\text{m}$ 이다. 이 결과 백래쉬오차와 스케일오차는 많이 줄어 든 것으로 볼 수 있지만 직각도 오차와 서보게인 불일치 오차가 그대로 남아 있는 것을 알 수 있다. 직각도 오차가 무보정시의 값과 CNC 보정시의 값이 틀린 것은 오차 분석 프로그램에서 백래쉬 오차와 같은 큰

오차의 영향을 완전히 제거하지 못했기 때문으로 보인다.

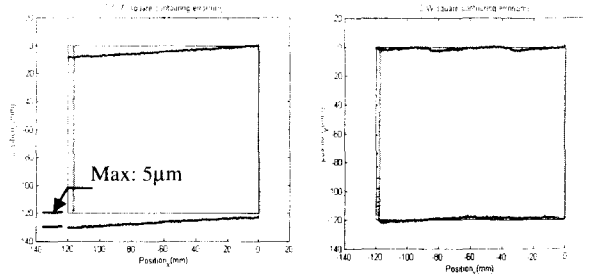
새롭게 구성된 SKY-PACS 를 이용한 경우의 보정결과가 그림 Fig.6(a),6(b)에 나타나 있다. 결과에서 보듯 Fig.5(b)와 Fig.6(a)의 두 결과는 비슷한 모양을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, CNC 의 백래쉬와 피치오차만으로 보정한 결과에 비해 SKY-PACS 로 보정한 경우는 볼스크류의 가공오차에 의해 생긴 피치오차까지 보정하여 위치결정 정밀도 오차를 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 이하로 낮추었기 때문에 CNC 보정에 의한 결과인 Fig.5(b)에서 보이던 주기오차가 보정되었음을 볼 수 있다. 그러나, 이 경우에도 직각도 오차와 서보게인 불일치오차는 줄어들지 않았다



(a) without compensation (b) CNC compensation
Fig. 5 Contouring error profiles measured by Double-Ball-Bar (Scale:5.0 $\mu\text{m}/\text{div}$)



(a) before squareness error compensation (b) after squareness error compensation
Fig. 6 Contouring error profiles compensated by SKY-PACS (Scale:5.0 $\mu\text{m}/\text{div}$)



a) before b) after
Fig. 7 Before and after squareness compensation

직각도 오차는 X 축과 Y 축의 대조립 후에 두 축사이에 직각이 맞지 않아서 발생하는 오차이다. 이 직각도 오차를 확인하기 위해 HeidenHeim 사의 그리드 엔코더(Grid-Encoder)를 이용하여 정사각형 경로를 이송시켰을 때의 결과가 Fig.7에 나타나 있다. 그리드 엔코더는 동작기계의 X,Y 축 이송테이블에 부착하여 각 방향의 이송을 측정할 수 있는 장치이며, 이를 이용하여 측정을 수행하였을 때 Y 축을 기준으로 한 경우 X 축의 직각도오차는 120mm 이송시 약 $-5 \mu\text{m}$ 로 나타나며, 이것은 DBB로 측정한 $-41.1 \mu\text{m}/\text{m}$ 와 일치한다.

이 오차를 보정하기 위해서 SKY-PACS 를 이용하여 X 축 보정량을 Y 축 이송시에 Y 축 위치값에 직각도 오차를 곱하여 보정량에 더해 주었다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta X_{comp} = -eY$$

위와 같이 직각도 오차보정을 수행한 경우 Fig.7(a)의 결과에서 $-41.1 \mu\text{m}/\text{m}$ 로 전체오차의 13%의 오차원인으로 계산되었던 직각도 오차가 Fig.7(b)에서는 $-4 \mu\text{m}/\text{m}$ 로 전체오차의 4%이하로 줄어든 것을 알 수 있다.

4. 절삭가공시 위치결정정밀도 오차보정실험

4.1 절삭가공에서의 원호보간시 오차 보정

ISO10791-7(Accuracy of finished test piece)에 규정된 실험 규격을 사용하여 실제 절삭시의 가공물의 형상오차를 측정하고 이를 보정하는 실험을 수행하였다. 이 실험규격은 정삭 가공에서 기계의 거동에 의한 오차를 가공시편의 측정에 의해 보이는 것이 목적으로 Table 1 과 같은 실험조건이 제시되어 있다.

Table. 1 Cutting conditions in ISO10791-7

Tool	Endmill : 35mm Length, ϕ 30mm
Cutting speed	Cast iron : 50m/min, Aluminum : 300m/min
Feedrate per tooth	0.05~0.1mm/tooth
Cutting depth	Slab milling, Radial depth : 0.2mm, Axial depth : 6mm

ISO 에는 알루미늄과 주철 두가지 종류의 시편 재질에 대한 실험을 규정하고 있는데 주철의 경우 정밀하게 주조하지 않았을 경우 시편 내부에 기공이 발생할 가능성이 크기 때문에 시편의 재질은 알루미늄(AL6061)로 선정하였다. 원호 보간시의 오차를 측정하기 위하여 원호만의 절삭 대상물을 설계하여 절삭시험을 수행하였다. 절삭대상물의 지름은 $\phi 80\text{mm}$ 이며 공구는 $\phi 20\text{mm}$ (HHE2200)의 2날의 초경코팅 엔드밀을 사용하였으며, 이송속도는 $500\text{mm}/\text{min}$ 이다.

ISO10791-7 에서 추천한 공구지름보다 작은 공구를 실험에 사용하였기 때문에 공구동력계를 사용하여 공구에 걸리는 절삭력을 확인하여 가공물에 남는 오차가 대상기계 자체의 오차인지 공구의 처짐에 의해 발생하는 오차인지를 확인하였다. 절삭력 측정결과 가공시 절삭력은 공구동력계의 절삭력 측정 잡음인 15N 이하로 측정됨을 확인하였으며, 따라서 가공물의 오차는 대상 기계 자체의 정밀도오차에 의해 발생하는 것을 알 수 있었다.

절삭 후 시편의 진원도 측정을 위해 R.T.H 의 진원도 측정기를 사용하였으며 이 기종은 2mm 범위의 진원도를 측정할 수 있으며 최소 해상도는 $0.05\ \mu\text{m}$ 이다. 절삭실험은 절삭력을 측정하기 위해 공구동력계를 설치해야 했기 때문에 건식절삭으로 수행하였으며, 표면에 눌러 붙은 칩을 제거하기 위해 절삭이 끝난 후 같은 경로로 한번 더 절삭을 수행하였다. 이 후처리로 인해 가공정밀도 오차가 변할수도 있으나, 실험목표가 표면조도나 절삭깊이에 따른 가공정밀도보다는 절삭시편의 형상오차를 측정하기 위한 것이어서 크게 무리는 없다고 예상되었으며, 실험결과에서도 검증되었다.

Fig.8 은 기존의 CNC 보정을 이용하여 백래쉬 보정과 피치오차 보정을 적용했을때의 절삭실험 결과이다. 2 사분면과 4 사분면에서의 기준원보다 작아지는 구간을 가지며, DBB 를 이용한 무부하시

의 오차측정결과와 동일하게 직각도오차가 영상오차에서 특성적으로 나타난다.

SKY-PACS 를 이용하여 직각도오차를 보정한 경우의 측정 결과를 Fig.9 에 나타내었다. 그림에서 Fig.8 에서 보이는 직각도오차가 보정된것을 알 수 있다. 표면조도의 영향을 제거하고 보정된 결과를 정량적으로 구하기 위해 그래프의 평균을 구해 대상기계의 X-Y 테이블의 직각도 오차가 진원도에 미치는 영향을 계산해보면 Fig.8 과 Fig.9 의 경우 진원도가 $8\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ 로 계산되며 이 경우 각각 직각도 오차가 $30\ \mu\text{m}/\text{m}$, $5\ \mu\text{m}/\text{m}$ 로 계산된다.

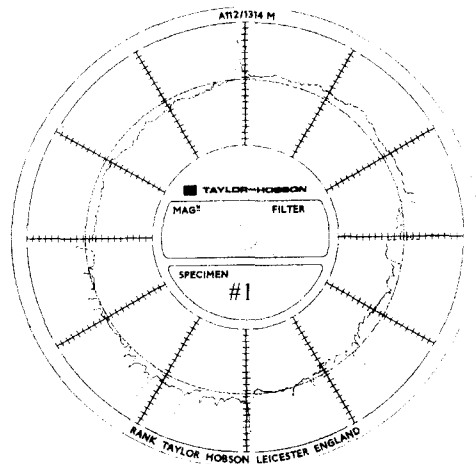


Fig. 8 Roundness profiles of workpiece with CNC compensation (Scale : $2\ \mu\text{m}/\text{div}$)

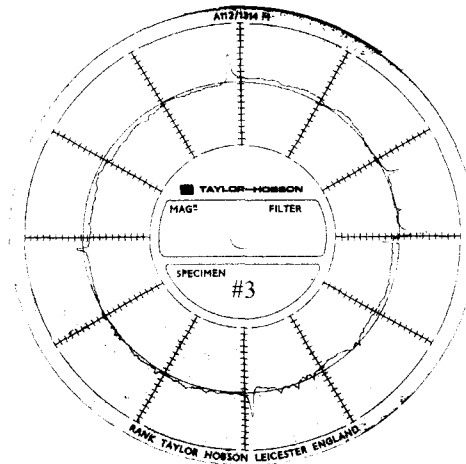


Fig. 9 Roundness profiles of workpiece with SKY-PACS compensation (Scale : $2\ \mu\text{m}/\text{div}$)

5. 결론

‘SKY-PACS’를 위치오차 및 윤곽오차 보정에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열변형, 절삭가공시에 공구와 공작물의 탄성변형과 같은 가공오차 요인을 보정하기 위한 온라인 실시간 위치오차 보정 시스템인 SKY-PACS를 개발하였다. 기존의 보정시스템이 20Hz의 보정 주파수를 가져 주로 열변형에 의한 위치결정 정밀도 오차같은 준정적 오차만을 보정대상으로 삼은 데 비하여 새로운 보정 시스템은 보정 주파수를 CNC 위치제어 주파수인 100Hz로 증가시켜 위치결정정밀도 오차뿐만 아니라 각 축의 추종오차 같은 동적오차까지 보정할 수 있다.

2) SKY-PACS를 이용하여 X, Y축의 위치결정 정밀도 오차의 보정을 수행하였다. 각 위치에서의 위치결정정밀도 오차를 측정된 후 오차기준표(lookup table)로 저장하고 이를 이용하여 보정을 수행하였다. 정방향, 역방향 이송시에 위치결정 오차가 바뀌는 경우에도 사용가능하며, 기존의 피치오차 보정방법보다 더 좋은 위치 결정 정밀도를 보였다. X축의 경우 피치오차가 25 μm , 백래쉬가 4 μm 이었던 것이 기존의 피치오차 보정방법으로 -1 μm ~4 μm 의 보정 후 오차를 가졌으나, SKY-PACS를 이용하여 백래쉬의 위치에 따른 변화와 피치오차를 동시에 보정하여 -1.5 μm ~1.0 μm 의 위치정밀도를 달성하였다. Y축의 경우는 최대 피치오차 7 μm , 백래쉬 12 μm 이던 것을 기존의 피치오차 방법으로는 $\pm 4 \mu\text{m}$ 로 보정후 오차가 계산되었으나 SKY-PACS를 이용한 방법으로는 -0.5 μm ~1.5 μm 의 값을 가지게 되었다.

3) DBB를 이용하여 X, Y축에 대한 위치결정오차와 직각도 오차 보정을 수행한 결과 주기오차가 보정 되었으며 직각도 오차가 51 μm 에서 4 μm 이하로 줄어들었다.

4) ISO 10791-7 정삭시의 가공오차시험을 기준으로 절삭력이 적용될 경우의 위치결정오차 보정을 수행하였으며, 특히 직각도 오차의 보정을 수행하여 가공형상 오차를 줄일 수 있음을 보였다. 같은 가공조건에서 진원도를 보정전 8 μm 에서 5 μm 로 향상시켰다.

본 논문은 산업자원부와 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업의 기술개발결과이며, 연구에 도움을 주신 (주)통일중공업에 감사드립니다.

참고문헌

1. Heui-Jae Pakh, Jong-Hoo Kim and Kyo-II Lee, "Integrated real time compensation system for errors introduced by measurement probe and machine geometry in commercial CMMs," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 9, pp.1045-1058, 1996.
2. V. S. B. Kiridena, P. M. Ferreira, "Computational approaches to compensating quasistatic errors of three-axis machining centers," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 34, No. 1, pp. 127-145, 1994.
3. J. S. Chen, G. Chiou, "Quick test and modeling of thermally induced errors of CNC machine tools," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, No. 7, pp. 1063-1074, 1995.
4. J. S. Chen, J. X. Yuan, J. Ni and S. M. Wu, "Real-time compensation for time variant volumetric errors on a machining center," Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 472-479, 1993.
5. S. Yang, J. Yuan and J. Ni, "Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation," Journal of manufacturing systems, Vol. 15, No. 2, pp. 113-124, 1996.
6. A. K. Srivastava, S. C. Veldhuis and M. A. Elbestawit, "Modelling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tools," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, No. 9, pp. 1321-1337, 1995.
7. 머시닝 센터(직립형)의 시험 및 검사방법, KS B4408, 한국 공업 규격, 1988.
8. S. R. Postlethwaite, D. G. Ford, D. Morton, "Dynamic calibration of CNC machine tools," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, No. 3, pp. 287-294, 1997.
9. Kakino, Ihara, Shinohara, Accuracy Inspection of NC Machine Tools by Double Ball Bar Method, Hanser, New york, 1993.

후 기