Journal of the Korean Institute
of Industrial Engineers
Vol.24, N0.4, December, 1998

CNC공작기계의 온도차보정을 위한 Pre-Processor개발

Development of CNC machine Pre-processor for temperature compensation

신현명* · 임문혁*

Hyun-Myung Shin* · Moon-Hyuk Im*

Abstract

The machining accuracy of CNC machine tools will decrease the production lead time because the coordinate compensation of the tool path will be unnecessary to meet design specifications. Improving the accuracy of machined parts enhances the reliability and functionality of the assembly as well as the life of the product. Among various factors affecting the accuracy of machined parts, the ambient temperature is the major factor that refers to the temperature surrounding the machine and workpiece.

In this study, an experiment was conducted to confirm the dimensional variations caused by changes in the ambient temperature. The ambient temperature resulted in overcutting when it increased. A developed pre-processor converts the CNC program to compensate the dimensional variations caused by temperature changes. This methodology can be used to determine the machining accuracy and improve the positioning accuracy of a machine tool.

1. 서론

제조방법은 소비자의 제품 구매 선호도에 따라 단순한 다량생산체제에서, 품질을 지향하는 생산체제를 거쳐, 이제는 고품질과 유연성을 요구하는 다품종 소량생산방식을 요구하는 생산체제로 바뀌었다.

CNC공작기계는 다품종 소량생산에 가장 적합한 공작기계로 등장하여 현재 국내의 많은 공장에서 폭넓게 사용되고있다. 부품을 정밀하게 가공할수록 소형화 및 경량화를 달성할 수 있고, 조립 및 작동정밀도를 향상할 수 있다. 절삭가공의 정밀도에 영향을 미치는 인자는 공작기계의 구조, 공작기계 고정(seating)방법 및 기초(foundation), 절삭 모수(parameter), 공구의 종류와 형상, 가공물을 공작기계에 고정(holding)하는 방법, 절삭유 사용유무, 정비상태 및 마모정도, 가동환경 등 다양하다[1,2,3,4,5].

위에 나열한 여러 가지 인자 중에서 인위적으로 조절이 가장 힘든 것이 가동환경이다. 특히 공작기계가 가동되는 공장내의 실내 온도는 외부의 온도에 영향을 받으며 그 온도에 따라 기계에 구조적 변형이 일어나고 이에 따라 가공 정밀도는 떨어지게 된다. 한 예로 베아링 생산공장에서는 오전과 오후에 가공오차가 발생하여, 샘플을 채취하여 진구도, 진원도 오차 등 정밀도를 측정한 뒤 필요에 따라 NC 프로그램을 하루에 수회 수정하여 사용하기도 한다.

1000mm 길이인 항공기 부품의 정밀도가 프로그래밍 당시의 길이와 비교하여 0.43mm정도의 오차가 발생한 것

* 계명대학교 기계공학과

으로 보고된 사례가 있는데 이는 공구의 마모에 의해 발생할 수 있는 오차를 능가한 것이었으며 주된 원인으로 온도차이가 지적되었다. 고정밀도를 요하는 항공기부품을 제작할때 공작기계가 상온에서 작동되도록 온도를 유지시키는 것도 이러한 이유 때문이다.

또한 가공시 발생하는 절삭저항에 의해서 공구변형이 발생하는데 깊은 홈을 가공 할 때 엔드밀에 공구변형이 발생하는 것이 그 한 예이다. 이로 인하여 가공물의 기하학적인 형상을 따라 작성된 NC program으로 가공할 때 공구변형에 의한 오차가 발생하게된다. 정밀한 가공을 위해서는 이와 같은 가공오차도 보정하여야 한다.

특히 공장의 내부 온도를 조절하는 것은 경제적으로 부담이 되며 온도차이에 따라 생산되는 부품의 정밀도가 달라져 부품의 가공용 프로그램을 수정하는 것이 문제가 된다. 가공오차의 보정은 공작기계의 동작을 제어하는 컨트롤러의 가장 중요한 기능으로서, CNC 공작기계에 온도보상기능이 포함된 컨트롤러도 개발되어 있으나 그 기능이 만족스럽지는 못하며 이미 보급된 많은 CNC 공작기계에는 장착되어 있지 않다.

Kiridena와 Ferreira[6]는 5축 CNC머시닝센터에서 발생하는 가공오차를 기구학적 체인으로 모형화하여 작업공간에서 공작기계의 체적오차(volumetric error)을 최소화하여 공작기계의 정밀도를 최적화하는 방법을 연구했다. Srivastava[7] 등은 5축 CNC머시닝센터에서 발생하는 오차를 보정하여 체적오차를 최소화하는 방법을 모사(simulation)하여 그 가능성을 밝혔다.

Chen[8]은 다축 CNC머시닝센터의 정밀도를 향상시키는 방안으로 공작기계 슬라이드 연결부위의 오차를 신경망조직모형을 통해 보완하는 방법을 개발하였다. Yang[9] 등은 공작기계의 온도에 따른 가공오차를 신경망조직으로 모형화하여 수평머시닝센터 및 CNC선반에 적용시켰다. 여기서 열에 의한 변형을 감지하는 센서의 위치에 따라서 결과에 많은 차이가 나타나는 것으로 알려졌다. 또한 Chen[10]은 software error를 보정하는 thermal error model을 개발하여 air cutting 실험을 하였으며 실제 가공조건하에서의 열변형상태도 연구하였다. 여기서 air cutting 실험과 실제 절삭조건과는 많은 차이가 있다는 결론을 내렸다. 이 연구에서 장시간 가동시킨 공작기계에 변형이 발생하여 수치의 보정이 필요하다고 주장했다.

Mou[11]는 다축정밀가공의 정밀도 및 기능을 향상시키기 위하여 네 단계의 절차를 제시하였다. 첫째, 다축가공기계의 특성을 조속히 파악하는 방법, 둘째는 기계의 상태를 감지하고 분석하는 방법, 셋째는 가공 후 검사와 자료분석을 통해서 공정 및 기계에 관련된 오차를 보정하는 방법, 마지막으로 넷째는 적응제어(adaptive control)를 이용한 정밀가공 보정 방법을 소개하였다.

위와 같은 연구가 진행된 주된 이유는 범용공작기계와 CNC공작기계는 운영방법에 차이가 있기 때문이다. 그 운영방법의 차이는 때로는 장점이 되기도 하지만 단점이 되는 경우도 있다. 즉 범용공작기계의 운영식에는 그림 1과

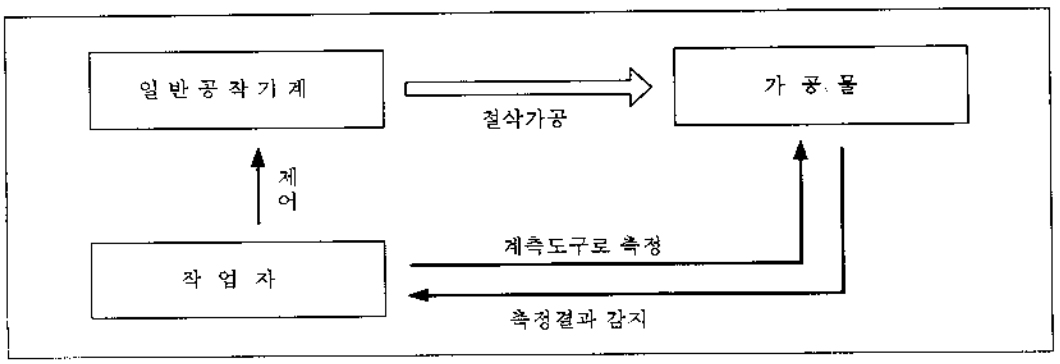

그림 1. 일반공작기계의 제어방식

같은 흐름에 따라 작업자가 가공도중에 수시로 가공물을 측정하면서 공구의 위치 및 동작을 조절하여 가공된 부품의 정밀도를 향상시킨다. 작업 중에 조정, 측정 및 수정이 여러 단계에 걸쳐서 실시되기 때문에 사실상 공작기계, 가공물, 작업자간에 폐쇄형제어(closed-loop control)가 이루어진다. 설계자가 원하는 기하학적 형상을 가공하기 위해 작업자가 목표치와 실제치의 오차를 수정하여 가공하기 때문에 숙련된 기능이 있으면 보다 정밀한 부품을 가공할 수 있다. 그러나 작업자가 달성할 수 있는 최소 오차는 공작기계 성능에 따라 결정된다.

CNC공작기계에서는 그림 2에 나타낸 것과 같이 작업자가 공정 초기인 준비과정에서 공구와 가공물의 상대위치를 입력시키는 과정에서는 폐쇄형제어(closed-loop control)로 작업이 이루어지지만, 일단 NC 프로그램을 실행시키면 컴퓨터(machine control unit, controller)가 공작기계를 제어하기 때문에 사실상 개방형제어(open-loop control)가 된다. NC 프로그램은 가공물의 재질, 공구의 재질, 가공방법, 공구의 형상, 가공절차, 공구의 궤적, 절삭 모수 등을 많은 사항들을 고려하여 생성된다. 그러나 일단 공작기계의 동작을 제어하는 컨트롤러에 프로그램을 입력시켜 실행시키면 가공물이 완성될 때까지 작업자가 제어에 관여하지 않아도 된다. 물론 이 경우에도 CNC공작기계의 성능에 따라 가공물의 정밀도가 결정된다. 본 연구에서는 최소 오차 이상일 때 제어가 가능한, 즉 오차를 줄일수 있는 한계 내에서 온도차 보정을 위한 NC프로그램의 수정을 연구한다.

경우에 따라서 프로그램에서 공작기계를 멈추게 하고 간단한 측정을 하거나 공구의 파손 또는 마모정도를 확인하는 과정을 포함시킬 수 있으나 공구의 교환이나 가공표면의 확인 정도일 뿐 공구의 가공경로를 보정하거나 바꾸는 일은 없다고 가정한다.

범용공작기계와 CNC공작기계간의 운영방식에 따른 차이를 보인바와 같이 CNC공작기계에서는 주변온도의 변화와 같은 외부의 영향이나 공구의 변형(휨) 등 가공정밀도에 영향을 주는 인자에 반응을 못한 채 가공이 이루어진다. 따라서 NC 프로그램을 주변환경, 해당 공작기계의 특성 및 기타 인자를 고려하여 사전에 수정할 필요가 있다. 일반적으로 시행착오를 겪으면서 NC 프로그래머가 수정하는 과정을 제거하거나 줄이기 위해 pre-processor를 통해 사전에 프로그램을 수정함으로써 가공정밀도를 향상시키고 불량률을 감소시킬 수 있다.

본 연구의 목적은 먼저 공작기계 주변온도의 차이와 공작기계구조의 특성이 실제로 가공정밀도에, 특히 가공치수의 변화에 영향을 미치는지 확인하고, 연구대상인 CNC공작기계에 NC 프로그램의 사전보상기능을 갖는 pre-processor를 개발하여 적용시킴으로써 가공조건에 따라 NC프로그램을 자동으로 바꾸어 가공정밀도 향상을 이룰 수 있는 방안을 모색하였다.

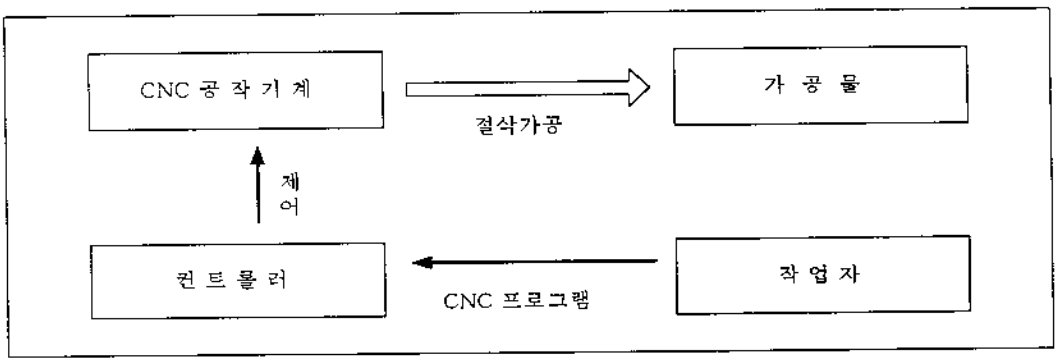

그림 2. CNC공작기계의 제어방식

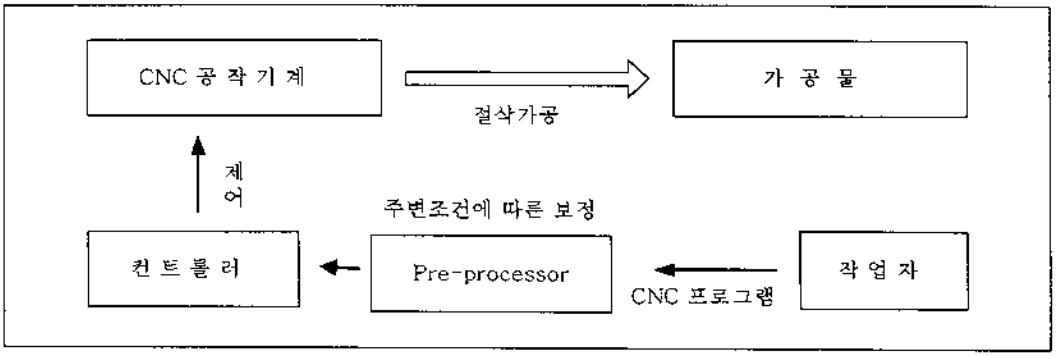

그림 3. Pre-processor를 이용한 CNC공작기계의 프로그램 보정

2. 연구방법 및 범위

본 연구는 자동공구교환장치가 부착된 DYNA3000 CNC 선반에서 가공할 수 있는 축 대칭 부품을 이용하여 주변온도에 따른 CNC선반의 가공치수 정밀도에 차이가 실제로 발생하는지를 실험으로 확인하고 오차를 줄이기 위한 pre-processor를 개발하여 NC 프로그램의 변화를 확인한다.

2.1 실험절차

공장내부와 CNC공작기계 주변의 온도에 차이가 나는 시점에 일정한 형상 패턴을 따라 4개의 시편을 가공한다. 매 실험마다 공운전(dry run; 가공물이 없는 상태에서 NC 프로그램을 실행하는 것)을 한번 시키고 새 절삭공구를 이용하여 가공한다. 실험 절차는 동일한 CNC선반(DYNA3000)으로 다음과 같은 순서에 따라 진행하였다.

1. 공작기계의 보호덮개에 부착한 온도계에서 주변온도를 측정하여 기록한다. 가공할 실린더를 공작기계 옆에 보관함으로써 가공물의 온도가 공작기계의 시험 전 온도와 동일하게 유지하도록 한다.
2. 주어진 패턴을 가공할 NC프로그램을 이용하여 CNC 선반을 공운전한다. 그림 4에 가공물의 형상을 나타냈다. 공구의 궤적은 실린더의 외부로부터 0.05"깊이로 우측에서 좌측으로 단계적으로 선삭 가공하면서 시편의 모양으로 가공한다. 단 DYNA300의 컨트롤러에서는 1"를 25.4mm로 환산한다.
   가. 직경이 25.4mm, 길이가 약 220mm인 6065알루미늄합금(마그네슘 0.7%, 실리콘 0.4% 함유) 봉을 양단에 면 가공과 센터드릴(center drill)한 후 주축대의 만능척과 심압대의 활심(live center) 사이에 고정 지지한다. 만능척과 활심간의 부품의 길이가 직경의 12배를 넘지 않았기 때문에 방진구와 같은 추가적인 지지 없이도 부품이 휘어 가공 정밀도에 미치는 영향이 최소화되도록 했다.
   나. 절삭공구는 Kennametal사의 Chip breaker가 있는 Ti-N코팅 초경 합금바이트를 사용했으며 매 시편마다 새 공구로 교체하였다.
   다. 절삭속도는 500rpm(130.8sfpm), 이송은 0.005ipr (회전당 0.005")로 고정했다.
   라. 가공물 우측 끝에서 축방향으로 5"길이로, 외경에서 0.1"(0.05" 깊이) 선삭가공한다.
   마. 연속적으로 각각 4, 3, 2, 1"길이로 매번 외경을 0.1"씩 줄여가면서 선삭 가공시켜 그림 4와 같은 형상의 시편을 만든다.
3. NC프로그램을 실행하여 가공물을 절삭한다. 절삭유를 사용하지 않으면서 가공 상태를 관찰한다. 절삭유를 사용하지 않은 이유는 재료의 가공성 및, 표면조도가 좋고, 절삭유에 의해 시계가 가려지지 않아 관찰이 용이했기 때문이다.
4. 가공이 완료된 시편을 기계에서 탈착시켜 20℃와 습도60%의 환경에서 측정하여 그 제원을 기록한다.
5. 주변온도가 3℃ 이상 차이가 나는 다른 시점들을 4

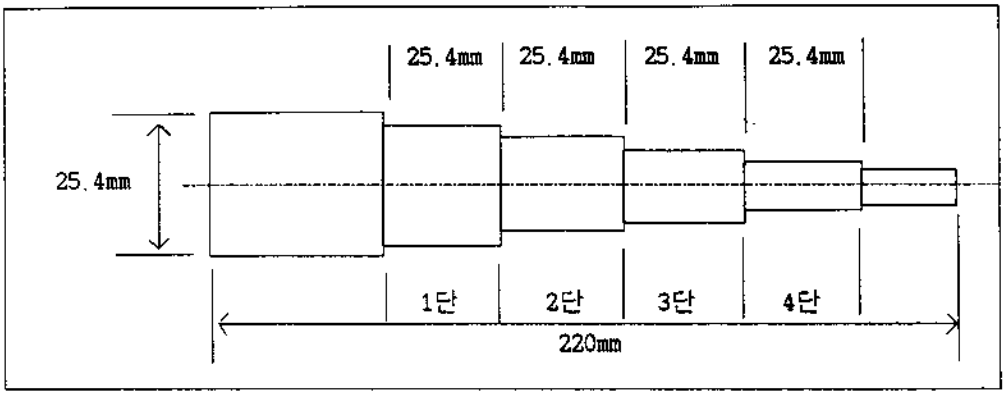

그림 4. 가공시편의 형상

개 택하여 단계 1에서 4까지의 절차를 반복한다.

6. 실험 결과를 토대로 자료를 분석하고 Turbo-PROLOG 언어를 사용하여 pre-processor를 개발하여 pre-processor에 의하여 온도차가 보정된 NC프로그램을 본래의 온도차 보정이 안된 NC프로그램과 비교한다.

시편 4개를 온도차이 3℃ 이상 나는 4개의 다른 시점에서 치수변화와 직경변화를 측정한바 총 16회의 실험횟수로 정하였다.

2.2 실험결과

앞서 서술한 순서에 따라 주변온도가 다른 시점에 가공한 4개의 시편을 측정한 결과는 표 1과 같다. 직경의 차이는 공구의 초기 위치에 따라 차이가 나기 때문에 중요성이 없다. 실제로 중요한 것은 각 단에서의 측정할 수 있는 직경 및 길이의 차이인데 순수하게 공작기계의 정확도와 가공물의 주변 온도에 따른 변화로 인하여 발생했다고 볼 수 있다. 따라서 DYNA300의 가공정확도는 0.001"이며 반복정밀도는 0.0005"이다. 가공물에 대한 절삭공구의 초기의 위치는 가공물의 최종 형상에 영향을 미친다. 본 실험에서는 시편 형상의 치수 자체를 측정하여

표 1. 실험결과 측정치

	실험온도	17.0℃	20.0℃	26.0℃	30.5℃
길이 관련 치수	1단길이	25.40mm	25.37mm	25.38mm	25.37mm
	2단길이	25.37mm	25.39mm	25.36mm	25.38mm
	3단길이	25.37mm	25.36mm	25.39mm	25.38mm
	4단길이	25.40mm	25.40mm	25.39mm	25.36mm
	총길이	101.54mm	101.52mm	101.52mm	101.49mm
직경 관련 치수	직경1	15.77mm	15.63mm	15.47mm	15.42mm
	직경2	18.33mm	18.18mm	18.02mm	17.96mm
	직경3	20.87mm	20.71mm	20.55mm	20.48mm
	직경4	23.41mm	23.25mm	23.10mm	23.03mm
	직경 1-2 차이	2.56mm	2.55mm	2.55mm	2.54mm
	직경 2-3 차이	2.54mm	2.53mm	2.53mm	2.52mm
	직경 3-4 차이	2.54mm	2.54mm	2.55mm	2.55mm

비교한 것이 아니라 형상간 동일한 부위에서 나타나는 차이를 비교한 것이다.

공구의 휨에 따른 오차는 동일한 가공물 소재, 공구 및 NC프로그램에 의해 가공된 시편이기 때문에 가공한 시편간에 공구의 휨에 따른 오차는 동일하다고 가정하였다.

주변온도에 따른 각 단 마다의 길이를 그림 5에 나타내었다. 주변온도가 상승하면 가공한 단의 길이가 짧아진다는 점을 관측할 수 있다. 다만 시편의 측정시에는 마이크로메타 및 높이게이지를 사용하면서 측정기의 조작오차가 발생할 수도 있다. 예를 들어 직경을 측정하기 위해 래체트(rachet)가 부착된 마이크로미터로 시편을 조일 때 가한 속도에 따라 0.01mm 정도의 오차가 발생할 수도 있기 때문에 수 회 측정하여 빈도수가 많은 것을 실험 결과 측정치로 사용했다.

17℃와 30.5℃에서 가공한 단의 길이에 최대 0.04mm까지 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 가공한 시편의 전체 길이도 주변온도의 차이에 따라 101.54mm에서 101.49mm로 0.05mm가 줄어들었다(그림 6 참조). 0.05mm의 오차는 경우에 따라서 조립이 불가능하거나 부품의 유격이 커서 제품의 수명이 단축되거나 작동 정밀도가 떨어지게 된다. 이는 공작기계와 가공물의 온도에 따른 팽창 따라 더 많은 재료가 가공물에서 절삭되었다는 의미로 볼 수 있다.

가공물의 경우에는 온도의 증감에 따라 팽창 또는 수축을 하게 된다. 수축 또는 팽창의 정도는 가공물의 재질에 따른 열 팽창계수에 따라 달라진다.

$$\delta = \alpha \times \Delta t \times l \qquad (1)$$

여기서

δ : 온도의 차이에 따른 길이의 변화(mm)

α : 재료의 열팽창계수(1/℃)

Δt : 온도의 차이(℃)

l : 단의 본래 길이(mm)

절삭가공에서 주변온도에 따라 시편의 직경이 감소하는 경향을 표 1에서 볼 수 있다. 즉 가공물의 팽창에 따라 더 많은 양의 재료가 절삭되었음을 의미한다. 팽창된

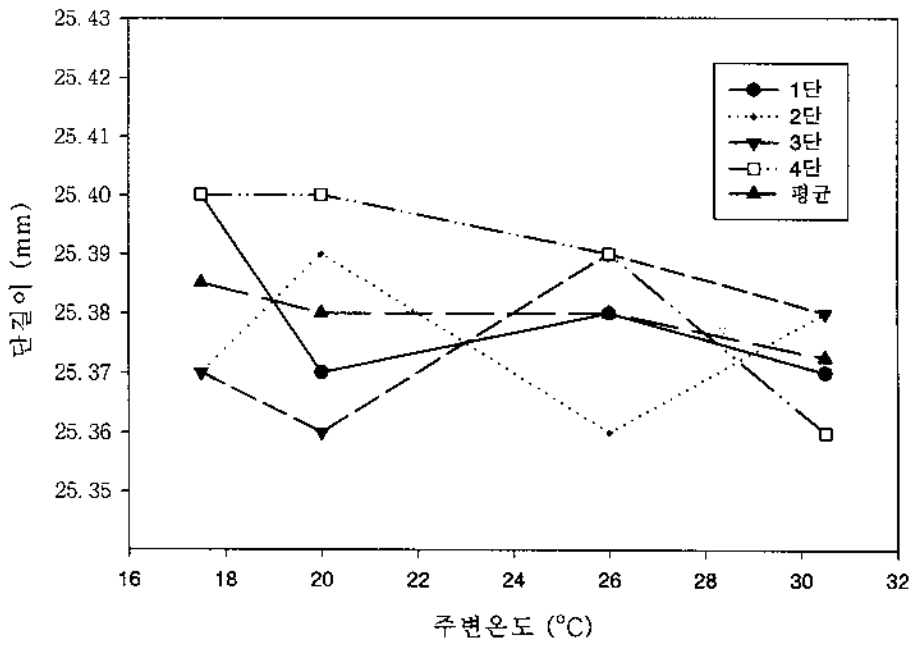

그림 5. 주변온도에 따른 각 단의 길이 변화

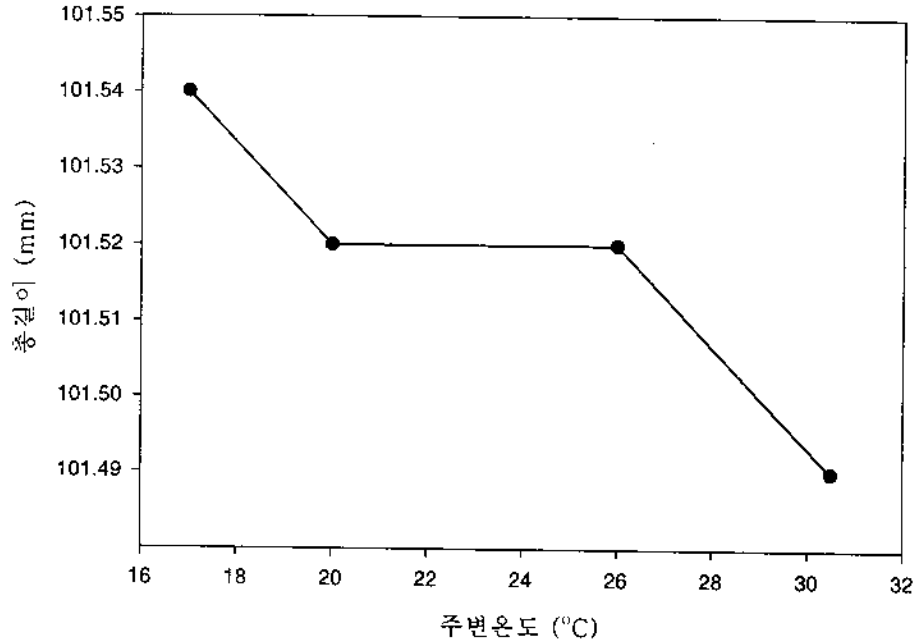

그림 6. 주변온도에 따른 가공 길이 변화

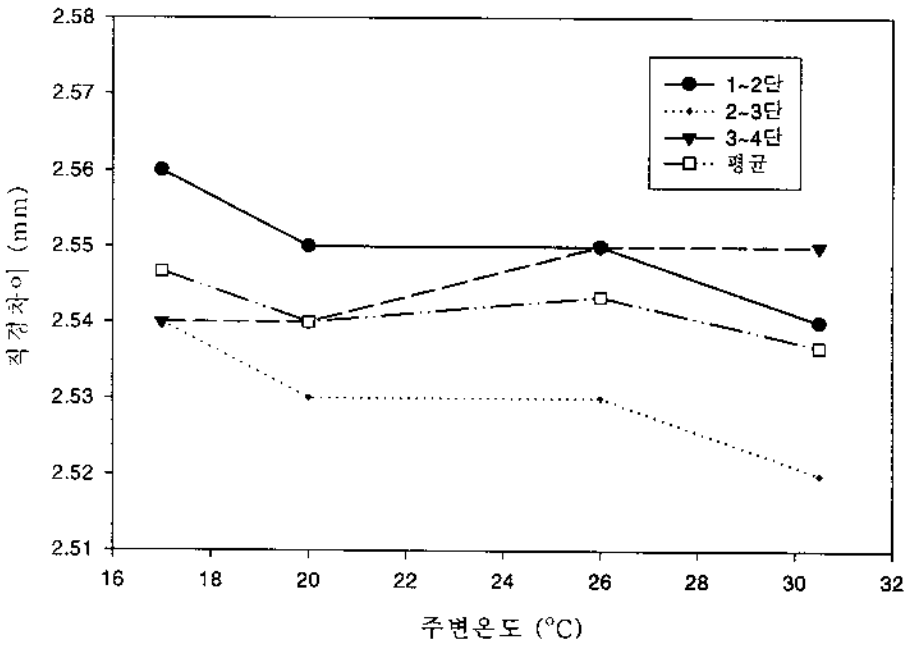

그림 7. 주변온도에 따른 직경의 변화

상태에서 가공한 후 일정 시간이 지나 수축된 또는 원상 복귀한 상태에서 측정하면 당연히 더 작은 치수로 측정된다.

3. Pre-processor 개발

Pre-processor의 개발에 사용한 프로그래밍언어는 Turbo PROLOG이다. Turbo PROLOG의 장점은 object-oriented language와 유사하며 프로그램의 실행 순서도 필요에 따라 쉽게 바꿀 수 있다는 점이다. 이러한 특징을 이용하여 프로그램의 기본적인 틀만 갖추면, 이후에 새로운 컨트롤러용으로 개발하거나 새로운 규칙이나 사양을 추가할 때 편리한 모듈성(modularity)을 갖는 장점이 있다.

개발된 pre-processor는 주변온도와 가공재료의 팽창계수를 사용자에게 물어보고, 사용자가 입력한 내용을 토대로 NC 프로그램을 보정한다. 그 간단한 예는 아래와 같다.

NC 프로그램 예제

N001	G91	G92	X0.0	Z0.0	F120	
N002	G00		X100.0	Z10.0	T3	
N003	G01		X-2.5	Z-50.0	S2500	
N004	G02		X2.5	Z-55.0	I5.0	K0.0
N005	G01			Z-70.0		
N006	G00		X100.0	Z10.0		

Pre-processor를 거치면 위의 프로그램은 온도 30.5도, 열팽창계수 0.0021로 가정할 때 아래와 같이 자동으로 바뀐다.

N001	G91	G92	X0.0	Z0.0	F120	
N002	G00		X102.21	Z10.22	T3	
N003	G01		X-2.56	Z-51.10	S2500	
N004	G02		X2.56	Z-56.21	I5.11	K0.0
N005	G01			Z-71.54		
N006	G00		X102.21	Z10.22		

이 예에서 X, Z축의 열팽창계수를 동일한 것으로 간주하였으나 실제로 가공물의 형상에 따라 차이가 있을 수 있다.

4. 결론

주변온도의 차이에 따라 기생성된 NC프로그램에 의한 치수와 실제 가공 치수사이에 오차가 발생한다. 절삭가공할 때 주변의 온도가 측정시의 온도보다 높으면 열팽창에 의하여 더 많은 양의 재료가 절삭되어 오차가 발생하게 되는 것이다. 이 오차를 보정하는 방안으로 pre-processor를 제안하고 이에 따라 치수 정밀도를 증가시킬 수 있다.

공작기계별로 개발된 pre-processor를 일반화시킬 수 있는데 이 때에는 CNC공작기계의 종류에 따라 그 가공 특성을 나타낼 수 있는 시편의 형상을 고안해서 실험을 거치고, 절삭깊이 및 가공물 재질의 특성에 따른 공구의 휨 정도를 예측하는 모듈(module)의 개발을 필요로 한다. 즉 실험을 통해서 기계의 가공구간별 가공특성을 파악하여 pre-processor에 따라 사전 보완을 하면 가공정밀도를 증가시킬 수 있는 것이다.

Pre-processor가 모듈성을 필요로 하는 이유는 온도 이외의 다른 조건에 대해서도 손쉽게 pre-processor를 보완할 수 있기 때문이다. 예를 들어 새로운 모듈들, 즉 공구의 휨 보정 모듈, 절삭속도, 공구의 재질 및 직경, 길이, 가공시 절삭깊이, 공구와 가공물의 접촉길이에 따른 가공오차 모듈등을 추가하여 기타 다른 정밀도에 영향을 주는 인자를 고려한 프로그램 보정 시스템을 개발하여 활용할 수 있다. 아울러 본 연구는 온도차이의 자동보정을 위한 pre-processor의 개발에 초점이 맞추어져 있지만 추후 절삭 인자들의 영향에 대한 유의성검증등 실험결과에 대한 통계처리 및 분석도 수행되어야 한다.

참고문헌

[1] Reshetov, D. N., Portman, V. T., Accuracy of Machine Tools, 1988, ASME Press, New York, Chapters 1 & 2.

[2] Yoram Koren, Computer Control of Manufacturing Systems, 1983, McGraw Hill, Chapter 2.

[3] Vasilash, G. S., Machining Centers on the Move, *Mfg. Eng.*, Vol. 86, No. 3, pp. 94-97, Sept. 1980.

[4] Matsubara, T., Yamamoto, H., Mizumoto, H., Study in End Mill Operations(1st Report) - Stiffness of End Mill and Machining Accuracy in Side Milling, Bull. JSPE, Vol 21, No 2, pp. 99-100, 1987.

[5] Tlusty, J., Elbestawi, M., Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills, Ann. of CIRP, Vol 28, No 1, pp. 253-255, 1979.

[6] Kiridena, V., Ferreira, P.M., Mapping the Effects of Positioning Errors on the Volumetric Accuracy of Five-Axis CNC Machine Tools, Int. J. Mach. Tools Mfg. Vol. 33. No. 3, pp. 417-437, 1993.

[7] Srivastava, A. K., Veldhuis, S. C., Elbestawit, M. A. , Modelling Geometric and Thermal Errors in a Five-Axis CNC Machine Tool, Int. J. Mach. Tools Mfg. Vol. 35. No. 9, pp. 1321-1337, 1995.

[8] Chen, Jenq-Shyong, Computer-Aided Accuracy Enhancement for Multi-Axis CNC Machine Tool, Int. J. Mach. Tools Mfg. Vol. 35. No. 4, pp. 593-605, 1995.

[9] Yang, S., Yuan, J., Ni, J., The Improvement of Thermal Error Modeling and Compensation on Machine Tools by CMAC Neural Network, Int. J. Mach. Tools Mfg. Vol. 36. No. 4, pp. 527-537, 1996.

[10] Chen, Jenq-Shyong, A Study of Thermally Induced Machine Tool Errors in Real Cutting Conditions, Int. J. Mach. Tools Mfg. Vol. 36. No. 12, pp. 1401-1411, 1996.

[11] Mou, J., A Systematic Approach to Enhance Machine Tool Accuracy for Precision Manufacturing, Int. J. Mach. Tools Mfg. Vol. 37. No. 5, pp. 669-685, 1997.

98년 11월 최초 접수, 98년 12월 최종 수정

부록 PROLOG를 이용한 Pre-Processor 프로그램

```
code=2048
domains
  ring = integer
  file = mm
  list = symbol*
  str = real
  codelist = symbol*

database
  interpol(integer), store(codelist), lnum(symbol), hnum(symbol),abel(integer), condition(real,real)

predicates
  preprocess(symbol)
  process(symbol)
  adjust(symbol,symbol)
  string_namelist(string,codelist)
  readcode
  readlist
```

```
    asis(symbol)

  clauses
    readcode:- file_str("TEMP.CNC",N),string_namelist(N,X),
      write("PRE-PROCESSED CNC PROGRAM BY TEMPERATURE"), nl, readlist.

    string_namelist(S,[H|T]):- fronttoken(S,H,S1), !, string_namelist(S1,T).
    string_namelist(_,[]):- write("temp.cnc read"), nl.

    readlist:- store([H|T]),lnum(A),lnum(B), H>=A, H<=B, nl, write(H),
      retract(store(_)),assert(store(T)), !, readlist.
    readlist:- store([H|T]), process(H), retract(store(_)),assert(store(T)), readlist.
    readlist:- store([]), nl, write(" END "), nl, nl.

    process(G):- G="G", store([H|T]), write("  ",H),retract(store(_)), assert(store(T)), asis(G).
    process(X):- X="X", store([H|T]), write(H,"  "),retract(store(_)), assert(store(T)), preprocess(X).
    process(Z):- Z="Z", store([H|T]), write(H,"  "),retract(store(_)), assert(store(T)), preprocess(Z).
    process(I):- I="I", store([H|T]), write(H,"  "),retract(store(_)), assert(store(T)), preprocess(I).
    process(K):- K="K", store([H|T]), write(H,"  "),retract(store(_)), assert(store(T)), preprocess(K).
    process(C):- C="T", store([H|T]), write(H,"  "),retract(store(_)), assert(store(T)), asis(C).
    process(S):- S="S", store([H|T]), write(H,"  "),retract(store(_)), assert(store(T)), asis(S).

    asis(_):- store([H|T]), write(H,"  "), retract(store(_)), assert(store(T)).


    preprocess(U):- U="X", store([H|T]), adjust(x,H), retract(store(_)), assert(store(T)).
    preprocess(U):- U="I", store([H|T]), adjust(x,H), retract(store(_)), assert(store(T)).
    preprocess(U):- U="Z", store([H|T]), adjust(z,H), retract(store(_)), assert(store(T)).
    preprocess(U):- U="K", store([H|T]), adjust(z,H), retract(store(_)), assert(store(T)).

    adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=10.0, condition(TEMP,COEFF),
      NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"  ").
    adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=20.0, condition(TEMP,COEFF),
      NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"  ").
    adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=30.0, condition(TEMP,COEFF),
      NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"  ").
    adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=40.0, condition(TEMP,COEFF),
      NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"  ").
    adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=50.0, condition(TEMP,COEFF).
```

```
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=60.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=70.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(x,X):- str_real(X,XX),XX<=80.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=100.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=50.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=0.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=-50.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=-100.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=-150.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=-200.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=-250.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").
  adjust(z,X):- str_real(X,XX), XX>=-300.0, condition(TEMP,COEFF),
    NX=XX*(1+(TEMP-20)*COEFF), write(NX,"   ").

goal
  write("What is the current temperature?"),readreal(TEMP),
  write("What is the coefficient of expansion?"),readreal(COE),
  assert(condition(TEMP,COE)), openwrite(mm,"LIST.DAT"),
  writedevice(screen), assert(lnum(n000)), assert(hnum(n999)),
  readcode, closefile(mm)
```