1542 大韓機械學會論文集 第14卷 第6號, pp. 1542~1551, 1990.

〈論 文〉

NC 선반가공에 있어서 가공오차의 자동 보정에 관한 연구

박 천 경*·박 동 삼**

(1990년 8월 7일 접수)

A Study on the Automatic Compensation of Machining Error in NC Turning

Chun Kyung Park and Dong Sam Park

Key Words: NC Turning(NC선삭), Machining Error(가공오차), Error Measurement(오차측정), Error Compensation(오차보정), NC Part Program(NC프로그램), Measurement Path(측정경로)

Abstract

This paper shows how to measure the machining error in diameter of cylindrical workpiece and compensate the measured machining error in NC turning. Machining error is measured by the electric micrometer mounted on the tool post with the NC part program for probe location path analyzed. Correct NC-part program for finish turning is automatically generated to compensate the measured machining error. These concepts have been effectively introduced to a newly developed software for error compensation. In turning experiments with the developed error compensation system, machining error was almost within the specified tolerance, which reveals the effectiveness of the developed system.

1. 서 론

기계가공의 고능률화와 자동화의 수단으로 NC 선반이 널리 사용되고 있다. 그러나, NC 선반가공시 공작기계 자체의 운동정밀도 오차와 실제 절삭과정 중에 일어나는 공구의 마멸, 공작물의 열변형과 탄성변형, 공구의 열변형과 탄성변형등의 여러 원인으로 인하여 상당한 가공오차가 발생하고 있어 고정밀가공 및 무인화 가공의 실현에 큰 장애요소가 되고 있다.

따라서, NC 선반가공에 있어서 가공전, 가공도중 혹은 가공후에 가공오차를 예측 또는 측정하고 이를 보정할 수 있도록 NC part 프로그램을 수정하지 않으면 안된다.

지금까지 제시되고 있는 오차보정 방법은 크게 2가지로 분류할 수 있다[1,2]. 즉, 가공후 실제 가공오차를 여러가지 방법으로 직접 측정하여 NC 프로그램을 수정하는 실험적 방법과, 공작물과 공구의 형상과 물리적 성질 및 절삭조건으로부터 공구마멸, 열변형 및 탄성변형을 계산할 수 있는 수학적 모델을 세워 이로부터 계산된 가공오차를 가공을 하기 전에 미리 고려하여 NC 프로그램을 작성하는 해석적 방법이 있다.

실험적 방법은 공작물 형상이 복잡할 경우 측정경로의 결정 및 적절한 오차 측정장치의 선택이 문제가 되나 가공오차의 정확한 보정이 이루어질 수 있다는 장점이 있는 반면 해석적 방법은 실험을 생략할 수 있는 장점이 있으나 여러 가지 절삭 환경을 고려한 정확한 수학적 모델을 세우기가 어려운 단점이 있어 공구의 열변형 등에 의한 오차의 보정 등 제한된 범위 내에서만 사용되고 있는 실정이다.

* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과
** 서울대학교 대학원

Shiraishi[3], Rundqvist[4], Novak[5], Loewen[6] 등은 NC 선삭시 비접촉식 in-process 방법으로 가공오차를 측정하는 방법을 제안하였으며 특히 Shiraishi는 이를 이용하여 공작물의 직경을 적응제어하는 방법을 제시하고 있다.

그러나, 이 방법은 절삭칩의 배출과 진동 등에 의한 영향이 크게 나타날 우려가 있으며 실험 장치도 고가일 뿐만 아니라 현재의 기술수준과 적절한 센서의 부족 등으로 인하여 생산현장에서 사용하기에는 부적절하다고 판단된다.

다른 한 방법으로서 Takeuchi 등[7,8]과 Szafarczky 등[9]은 접촉식 측정기를 이용 혹은 고안하여 절삭도중 주축 정지상태에서 직경오차를 직접 측정하는 방법을 이용하여 직경오차를 보정할 수 있다는 가능성을제시하였다.

한편, Sata 등[2]과 Takeuchi 등[8]은 선반가공시 직경오차의 주 원인을 공구의 열팽창으로 보고 이를 이론적으로 해석하여 가공오차를 보정하고자 하였다. 그러나, 이러한 연구들의 주 내용은 대부분 가공오차의 측정법에 관한 것으로 가공오차의 보정과 이를 위한 NC프로그램의 자동수정에 관한 체계적 해석은 수행되지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 직경오차를 최종 다듬질 가공 직전에 선반의 주축 정지 상태에서 공구대에 부착시킨 전기마이크로미터로 측정하는 방법을 이용하여, 어떠한 공작물 형상에 대해서도 오차 측정경로를 NC 프로그램으로 자동 생성하고 이를 이용하여 직경오차를 측정, 보정하는 알고리즘을 제안함과 동시에 수정된 최종 다듬질 가공용 NC프로그램을 자동적으로 생성하는 시스템을 개발하고자 한다.

2. 가공오차의 측정경로 해석

NC 선반가공에 있어서 공작물 형상이 복잡한 경우 가공오차 측정의 자동화가 필수적이다. 만약 NC 선반의 공구이송대에 오차측정기를 부착한 상태로 공작물을 따라 이송시키면서 오차를 측정할 때 그 측정경로의 해석이 가능하다면 이를 공구의 가공경로 NC 프로그램 형태로 나타낼 수 있어 측정의 자동화가 가능해진다. 측정경로의 해석을 위한 제한조건은 공작물과 측정 probe의 충돌 및 간섭방지 뿐이므로 이들 형상에 대한 해석이 선행되어야 한다.

2.1 공작물 형상의 모델링

보통 NC 선반에서의 좌표계는 Fig. 1과 같이 정의하다. 선반에서 가공할 수 있는 공작물은 주로 원통부, 원추부 및 원호부로 구성되며 Z축을 중심으로 회전대칭형이 되므로 그 단면형상을 좌표계 (z, x)상에서 2차원 도형으로 표현할 수 있다. Fig. 2의 (a)는 공작물의 한 예를 나타낸 것으로 이를 Fig. 2의 (b)와 같이 모두 직선으로 된 형태로 모델링 할 수 있다. 이때 각 직선의 교점 P_i를 공작물 형상을 표현하는 형상입력점으로 정의한다.

그러나, 이와 같이 모델링할 경우 원호부에 관한 정보가 없으므로 형상입력점 P_i에 Fig. 3과 같이 8가지의 형상형태를 정의하여 이를 부가시킨다. 일반 NC 선반가공의 경우 각 형상입력점에서 나타날 수 있는 형상형태는 직선과 원호를 조합한 이 8종류로 대표되며 원호부의 반지름만 알면 모든 형상입력점 P_i에서의 형상이 정의될 수 있다. TY_i=7은 TY_i=5와 TY_i=6의 조합이 되며 TY_i=8은 마무리 가공후에 처리하므로 형상입력 단계에서 지정할 필요는 없다.

이와 같이 모든 공작물 형상에 대하여 컴퓨터로

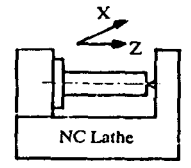


Fig. 1 Coordinate system

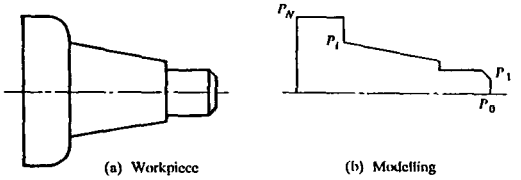


Fig. 2 Modelling of workpiece

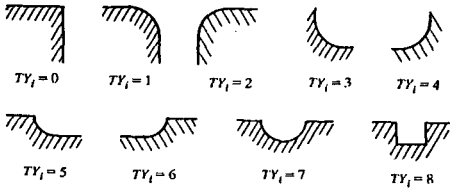


Fig. 3 Shape type

인식할 수 있는 형상모델링이 가능해지며 Fig. 2의 (b)에서와 같이 선반의 척(chuck)이 공작물과 접촉하는 부분을 최종입력점 N으로, 공작물이 심압대와 접촉하는 부분을 초기입력점 0으로 하여 P_0부터 P_N까지의 좌표(z_i, x_i)와 형상종류 TY_i, 원호반경 R_i가 형상입력점 P_i에서의 입력 데이터가 된다. 즉 P_i점에 대한 형상입력 데이터는

$$P_i : (z_i,\ x_i,\ TY_i,\ R_i)$$

과 같은 형태가 되며 좌표값 z_i, x_i는 척의 오른쪽 끝단면을 원점으로 절대 좌표계로 표시한다.

2.2 측정기 Probe의 형상

공작물 형상으로부터 가공오차 측정경로를 NC 프로그램 형태로 자동적으로 생성하기 위해서는 공작물과 측정 probe의 충돌 및 간섭을 방지하는 probe구의 원호중심 경로를 구해야 한다. 본 연구의 경우 측정 probe를 Fig. 4와 같은 형상을 가지도록 설계하였으므로 측정기와 공작물이 충돌하지 않도록 하는 제한조건은 구의 직경 d, 접촉경사각 θ, 몸체의 직경 D가 된다.

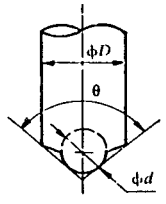


Fig. 4 Probe spec

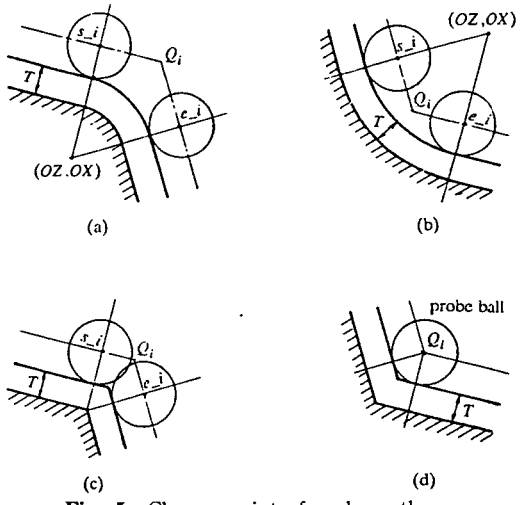


Fig. 5 Change point of probe path

2.3 측정경로의 해석

공작물 형상과 측정 probe의 형상이 주어지면 이들이 충돌 간섭을 일으키지 않는 조건을 만족하도록 측정구의 중심을 기준으로 하는 측정경로를 생성시킬 수 있다. 오차의 측정은 심압대측으로부터 척 단면부까지 공작물 표면을 따라 이루어지며 본 연구의 경우 원호부의 직경 측정은 고려하지 않은 것으로 하였다. 측정경로의 해석은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

(1) 기준 측정경로 변경점의 결정

측정경로 생성의 첫 단계로서 측정경로의 기준이 되는 기준 측정 변경점을 구한다. 곡선 구간에서는 측정 자체에 많은 오차를 포함하고 있으므로, 이 부분은 측정에서 제외되고 직선 구간에서만 측정을 한다. 곡선부분의 오차는 곡선 양끝의 직선부분 오차와 관계가 있다고 가정하여 선형적으로 보정한다. 따라서 기준 측정변경점은 각 직선 구간의 양 끝점이 된다.

각 기준 변경점은 Fig. 5와 같이 형상입력점의 앞뒤에서 시작과 끝이 정해진다. 즉 i지점에서 Z_{s-i}, Z_{e-i}, X_{s-i}, X_{e-i}를 구한다. (OZ, OX)는 각 형상입력점에서 원호의 중심이다. 단 Fig. 5의 (c)에서 공작물 원호부의 반경이 probe의 반경보다 작은 경우는 Fig. 5의 (d)와 같이 처리한다.

또 측정경로 생성의 판단 근거를 마련하기 위하여 형상입력점과 같은 형태의 교점 Q_i를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{zi}=\frac{b_{i-1}-b_i+s(\sqrt{a_{i-1}^2+1}-\sqrt{a_i^2+1})}{a_i-a_{i-1}}$$

$$Q_{xi}=\frac{b_{i-1}-b_i+s(\sqrt{a_{i-1}^2+1}-\sqrt{a_i^2+1})}{a_i-a_{i-1}}a_i+b_i+s\sqrt{a_i^2+1}$$

$$a_i=\frac{X_{i+1}-X_i}{Z_{i+1}-Z_i}\quad b_i=X_i-\frac{X_{i+1}-X_i}{Z_{i+1}-Z_i}Z_i$$

$$s=R_p+T$$

여기서, Z_i, X_i : i번째 형상입력점의 좌표

R_p : 전기 마이크로미터 probe구의 반경

T : 다듬질 절삭깊이

(2) 측정 가능 구간의 결정

실제로 앞에서 구한 측정경로 변경점의 모든 구간은 측정경로가 될 수 있다. 하지만 probe형상의 제한으로 인하여 측정이 불가능한 구간이 있다. 따라서 앞에서의 기준 측정 변경점 구간을 기본으로 사용하되 측정이 불가능한 부분은 빼거나, 측정이

일부만 가능한 경우에는 새로운 경로 변경점을 산출하여 측정경로를 생성한다.

기본적으로 공작물에서 기울기의 절대값이 tan $(\pi-\theta)/2$보다 큰 경우는 측정이 불가능하다. 또, probe폭의 반$(D/2)$이 공작물 모서리 부분에서 변경점까지의 거리보다 큰 경우에는 이 거리가 $D/2$와 같게 변경점을 산출한다.

공작물의 기울기가 급하여 측정이 불가능한 구간은 이미 구한 기준 측정 변경점을 무시하며 측정이 가능한 구간에서는 시작점과 끝점을 다음과 같이 구한다.

(3) 측정 시작점의 결정

점 i이전의 모든 $Q_j(0<j<i)$에서 Fig. 6과 같이 기울기 $\tan[(\pi-\theta)/2]$의 직선을 구하고 이 직선과 i구간에서 probe 이송직선과의 교점 $Z_{i-1}, Z_{i-2}, \cdots\cdots Z_1$을 구한다. 이때, Z_{min}을 다음과 같이 구한다.

$$Z_{min}=\mathrm{Min}(Z_{i-1}, Z_{i-2}, \cdots Z_1)$$

이 값을 이용하여 아래식과 같이 측정 시작점의 Z좌표 Z_{starti}를 구한다.

$$Z_{starti}=\begin{cases} Z_i & (Z_{min}>Z_i) \\ Z_{min} & (Z_i>Z_{min}>Z_i-\frac{D}{2}) \\ Z_i-\frac{D}{2} & (Z_i-\frac{D}{2}>Z_{min}) \end{cases}$$

(4) 측정 끝점의 결정

시작점을 구하는 방법과 동일하지만 비교 방향이 반대가 된다. 점 i이후의 모든 $Q_j(i<j<N)$에서 기울기 $-\tan((\pi-\theta)/2)$의 직선을 구하고 probe의 이송 직선과의 교점 Z_{i+1}, $Z_{i+2}, \cdots\cdots Z_{N-1}$을 구한다.

이때, Z_{max}을 다음과 같이 구한다.

$$Z_{max}=\mathrm{Max}(Z_{i+1}, Z_{i+2}\cdots\cdots, Z_{N-1})$$

이 값을 이용하여 아래식과 같이 측정 끝점의 Z좌표 Z_{endi}를 구한다.

$$Z_{endi}=\begin{cases} Z_i & (Z_{max}<Z_i) \\ Z_{max} & (Z_i<Z_{max}<Z_i+\frac{D}{2}) \\ Z_i+\frac{D}{2} & (Z_i+\frac{D}{2}<Z_{max}) \end{cases}$$

(5) Probe 위치의 보정

공작물의 형태는 원통부, 원추부 및 원호부로 구성되나 본 연구에서는 원통부와 원추부의 측정 가능 구간만을 측정하게 된다. 원통부의 경우는 probe 중심위치의 Z좌표값과 그 곳에서의 가공오차를 그대로 읽으면 되지만 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 원추부의 경우 probe 중심위치 Z_0좌표에 대하여 오차의 측정치는 Z_1위치에서의 값이 되므로 이를 아래와 같이 보정한다. Fig. 7에서 Z_1은

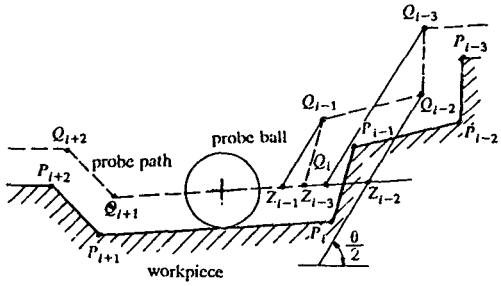


Fig. 6 Principle of probe path generation

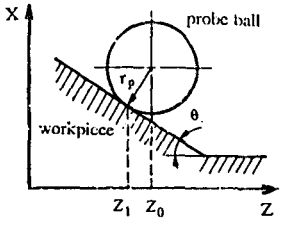


Fig. 7 Compensation of probe location

$$Z_1=\begin{cases} Z_0-r\sin\theta & (a_i<0) \\ Z_0+r\sin\theta & (a_i\geq 0) \end{cases}$$

여기서, a_i는 i번째 구간의 기울기이며 원추부 경사각 θ는

$$\theta=\begin{cases} -\arctan a_i & (a_i<0) \\ \arctan a_i & (a_i\geq 0) \end{cases}$$

이 두 식으로부터

$$Z_1=Z_0+r\sin(\arctan a_i)$$

따라서, PC로 오차를 입력시킬 때 probe 위치 Z_0를 Z_1으로 수정하여 저장하게 한다.

(6) 측정 probe의 이송속도

이상과 같이 측정경로 변경점과 측정 가능 경로를 구하여 비 이송은 급속이송으로, 측정경로의 측정경로의 이송속도는 data acquisition system(이하 DAS라 칭함)의 신호 처리속도와 측정기의 response속도 등을 고려하여 결정한다.

3. 가공오차의 보정과 NC프로그램화

앞에서 사용 공구와 절삭조건이 주어지면 공작물

형상에 따라 가공경로의 NC 코드가 작성되나 공구의 열변형, 공구마멸, 공구와 공작물의 탄성변형으로 인하여 가공 오차가 발생하므로 실제 가공된 제품은 치수 오차가 존재하게 된다. 만약 직경오차가 NC공작기계의 최소 이송단위인 1 BLU 이내이면 오차를 보정할 수 있는 방법이 없으나 그 이상일 경우에는 1 BLU 단위로 최종 가공시에 가공오차를 고려하여 NC 코드를 수정해야 한다.

본 연구는 이미 작성된 NC 코드로부터 오차가 존재하는 부분만을 사용자가 원하는 BLU단위로 보정하도록 프로그램을 작성하였으며 그 방법은 아래와 같다.

오차의 보정은 최종 마무리 가공시 앞서 측정한 오차양을 원래의 NC 코드에 가감해 주는 것을 기본 원리로 하고 있다. 이때, NC제어기의 1 BLU가 1μm일 경우 실제 1μm 단위로 보정을 하는 것이가장 이상적이나 초정밀 공작기계가 아닌 경우 이러한 단위까지의 이송은 거의 불가능할 뿐만 아니라, 만약 1 BLU 단위로 보정하더라도 보정 NC 코드가 너무 많이 생기기 때문에 비실용적이라 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 직경오차를 $\pm5\mu$m이내로 줄이는 것을 목적으로 하였으며 측정오차는 10μm 단위로 보정된다.

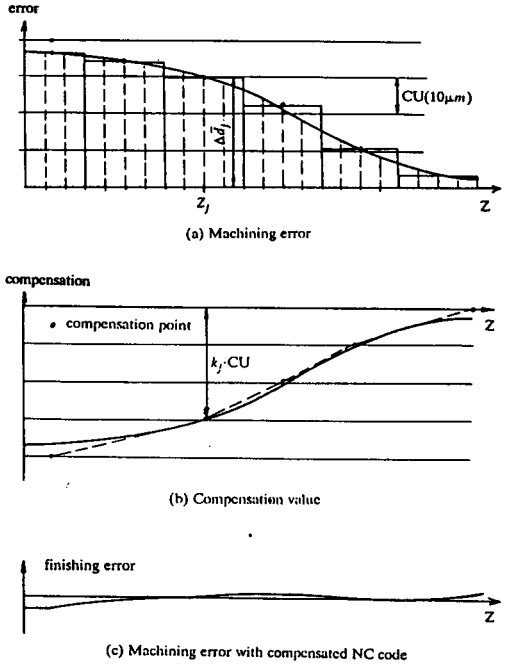


Fig. 8 Compensation of machining error

한편, 측정오차는 Z축 방향으로 일정한 간격으로 저장이 되어 있으므로 이러한 데이터를 바로 이용할 수도 있지만 표면 거칠기나 잡음 등에 의해 비정상적인 부분이 나타나므로 이를 선형화 할 필요가 있다. 그러나 probe 자체의 관성에 의해 이러한 비정상적인 부분은 크지 않으므로 몇개의 데이터를 평균하는 것으로 이를 대신한다.

Fig. 8은 NC 코드의 보정과정을 나타낸 것으로 Fig. 8(a)는 실제 측정한 오차를, Z축 위의 각 눈금은 측정이 이루어진 지점을 나타낸다. 보정에 쓰이는 오차는 측정 데이터(Δd_i)를 N개씩 묶어 이것을 평균하여 얻으며($\Delta \bar{d}_j$), 이때의 Z_j값은 이 N개 데이터의 가운데 값을 취한다. $\Delta \bar{d}_j$는 아래와 같이 얻어진다.

$$\Delta \bar{d}_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta d_i$$

이렇게 얻은 $\Delta \bar{d}_j$ 값을 이용하여 보정단위(여기서는 $CU=10\mu$m)의 정수배의 값을 이용하여 최종 마무리가공 NC코드를 보정하게 된다.

우선 $\Delta \bar{d}_j$값이 실제 보정에 쓰이는지 판단하기 위하여, 이 값을 보정단위(CU)의 정수배로 나타내며, 이 정수배 값 k_j를 아래와 같이 정의된다.

$$k_j = (INT)\left(\frac{\Delta \bar{d}_j}{CU} + R\right)$$

여기서, R은 사사오입을 위한 것으로

if $\Delta \bar{d}_j \geqq 0$, $R=+0.5$

if $\Delta \bar{d}_j < 0$, $R=-0.5$

다음으로 보정이 일어나는 Z_j 좌표와 보정된 직경좌표 x_j를 구한다. 우선, k_j를 k_{j-1}($k_0=0$)과 비교하여 이 값들이 같은 경우는 보정을 하지 않으며 다음의 k_{j+1}을 같은 방법으로 구하여 비교해 나간다. 다를 경우에는 현재 Z_j에 해당하는 직경좌표 x값을 아래와 같이 보정한다.

$$x_j = x - k_j \cdot CU$$

이와 같이 구한 (Z_j, x_j)를 최종 마무리가공 NC 코드중에 삽입하면 (Z_{j-1}, x_{j-1})에서 (Z_j, x_j)까지의 직선 가공이 이루어진다.

이와 같은 과정을 공작물 전 구간에 걸쳐 되풀이하여 오차보정을 마치게 된다. Fig. 8의 (b)는 위의 알고리즘으로 보정이 이루어지는 경로를, Fig. 8의 (c)는 보정된 NC코드로 최종가공한 후의 직경오차를 나타낸 것으로 $\pm5\mu$m이내로 오차가 나타남을 알 수 있다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

앞의 연구결과들로부터 가공오차의 측정 및 NC 프로그램의 보정을 자동화하기 위한 S/W를 개발하였으며 사용언어는 Turboc 2.0이다. 본 S/W의 유효성을 검증하기 위하여 여러 공작물 형상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며 여기서는 Fig. 9의 공작물 도면에 대한 결과만을 제시한다.

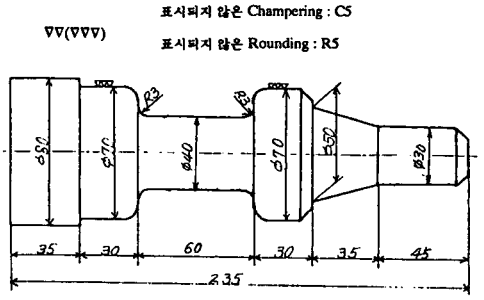


Fig. 9 Drawing of workpiece for simulation

Fig. 10은 개발된 시스템이 수행할 수 있는 작업 종류를 디스플레이한 것으로 모두 8종류의 작업이 가능하며 모든 작업은 pop-up 메뉴방식으로 선택하여 실행되도록 프로그래밍되어 있다.

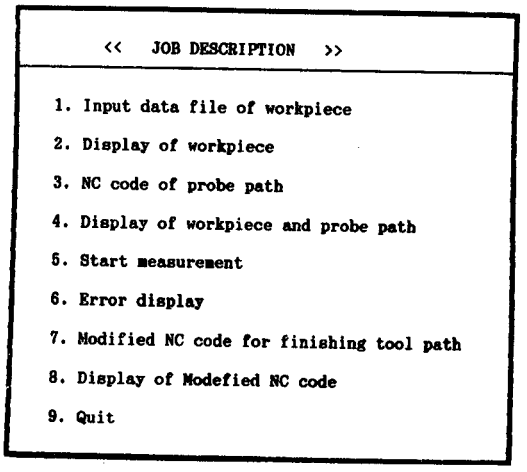


Fig. 10 Main menu

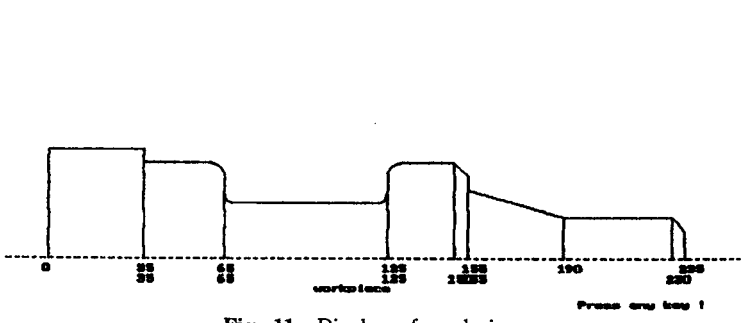


Fig. 11 Display of workpiece

```
N0003 G00 X  43000 Z 230000
N0004 G01 X  41000
N0005 Z 190770
N0006 X  54869 Z 166500
N0007 G00 X 100000
N0008 Z 150000
N0009 X  83000
N0010 G01 X  81000
N0011 Z 130000
N0012 G00 X 100000
N0013 Z 113500
N0014 X  53000
N0015 G01 X  51000
N0016 Z  76500
N0017 G00 X 100000
N0018 Z  60000
N0019 X  83000
N0020 G01 X  81000
N0021 Z  46500
N0022 T40
** end of file **
```

Fig. 12 The part of NC part program of probe path

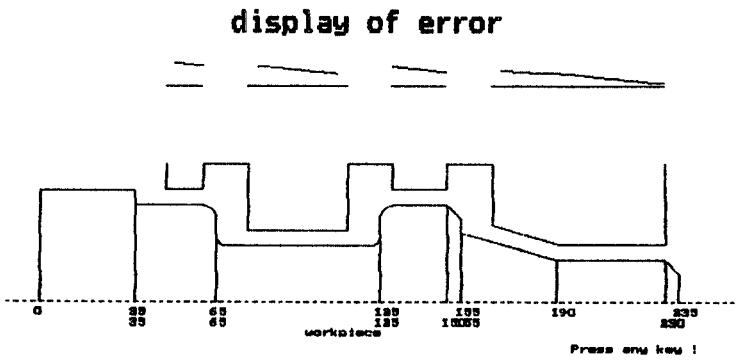


Fig. 13 Display of machining error

```
N0003 G00 Z 236500
N0004 X  20663
N0005 G01 Z 235800
N0006 X  31610 Z 230331
N0007 Z 223000
N0008 X  31620 Z 203000
N0009 X  31600 Z 190112
N0010 X  32827 Z 188000
N0011 X  35684 Z 183000
N0012 X  38541 Z 178000
N0013 X  41408 Z 173000
N0014 X  51217 Z 155800
N0015 X  60663
N0016 X  71620 Z 150331
N0017 Z 148000
N0018 X  71630 Z 143000
N0019 X  71620 Z 130000
N0020 G00 X 100000
N0021 Z  92945
N0022 X  43630
N0023 G01 X  41630
```

Fig. 14 The part of NC part program of finishing

Fig. 9의 도면에 대한 형상입력으로부터 컴퓨터에 출력된 형상을 Fig. 11에 나타내었다. 이를 Fig. 9의 도면과 비교하면 정확한 형상으로 PC에 인식되었다는 것을 알 수 있다. 이에 대한 가공오차의 측정경로 NC 프로그램은 자동적으로 Fig. 12와 같이 출력되며 측정 probe의 직경은 3.175mm, 접촉각은 89°, 폭은 4.9mm로 하였다.

Fig. 12의 결과로부터 probe의 측정경로를 Fig. 13의 아랫부분과 같이 컴퓨터 화면상에 디스플레이 하였다. 한편 가공오차는 실험결과로부터 측정되어야 하지만 시뮬레이션을 위하여 Fig. 13의 측정경로 윗부분마다 나타낸 바와 같이 임의로 주었으며 척 오른쪽 끝 단면부에서의 최대 직경오차는 28μm이다.

이러한 가공오차가 발생할 때 이를 고려한 수정된 NC 프로그램의 출력결과를 Fig. 14에 나타내었으며 Fig. 15와 같이가공경로를 화면상에 표시하게 된다. 위와 같은 시뮬레이션으로 가공오차의 보정을 위한 NC 프로그램을 자동적으로 생성시킬 수 있다는 것을 확인하였으며 개발 S/W의 수정보완도 완료되었다.

5. 실험 및 결과분석

5.1 실험장치

본 연구에서 개발된 시스템의 전체 구성도를

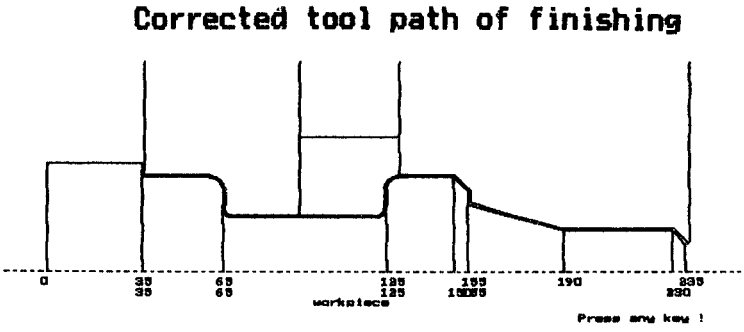


Fig. 15 Display of corrected tool path

Fig. 16에 나타내었다.

실험에 사용된 주요 장비의 제원은 다음과 같다.

(1) CNC선반
- 품명 : FUMA6(대우중공업)
- Controller : System 100M(한글형 : 한국산업전자(주))

(2) 전기마이크로미터
- MINICOM(측정범위 : 0~150μm, 분해능 : 0.5μm)

(3) Data acquisition system
- NANOTEC MODEL NM-7
- A/D, D/A, Digital I/O

(4) 공작물
- 재질 : SM 45C

(5) 절삭공구
- 초경 Tip : P15

5.2 실험방법

Fig. 16에 나타낸 바와 같이 공작물 도면으로부터 형상 데이타화일을 작성한 후 IBM PC/AT에서의 측정경로해석 결과로부터 NC 프로그램을 자동적으로 생성시켜 NC 선반의 공구대를 이송시킨다. 이때 전기마이크로메타의 probe를 공구대에 부착하여 이송도중 공작물 직경의 변화에 따라 전기마이크로메타의 전압변화로 나타나는 가공오차를 측정하며 이 측정 신호를 DAS에서 A/D변환 한 후 컴퓨터로 입력시킨다. 측정기의 probe 위치 z 좌표값은 NC 제어기에서 나오는 디지탈 값을 역시 DAS의 Digital I/O와 컴퓨터를 거쳐 각각의 z 좌표값과 그에 해당하는 가공오차를 화면상에 나타내거나 혹은 데이터 파일에 저장하였다. 측정된 가공오차는 컴퓨터에서 분석되어 보정된 최종 가공용 NC 프로그램을 출력하며 이를 NC 선반에 전송하여 최종 다듬질 가공을 수행한다. 마지막으로 본 연구에서 개발된 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 최종가공오차가 주어진 허용 직경오차이내에 존재하는지를 조사하였다.

5.3 실험 및 결과분석

두번의 실험을 수행하였으며 모든 절삭 조건은 다음과 같다.
- 절삭속도=200m/min
- 절삭깊이=1.0mm
- 이송속도=0.1mm/rev

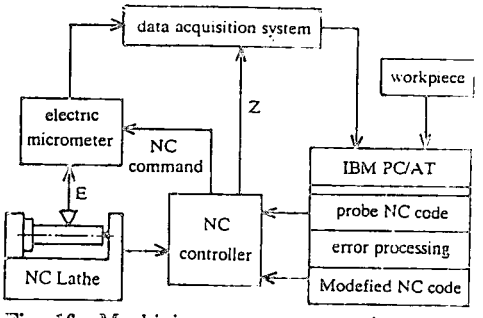
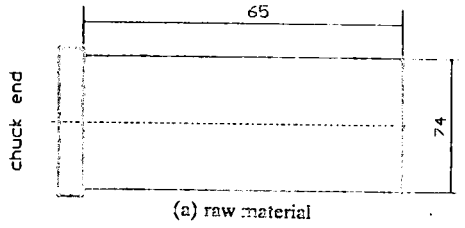
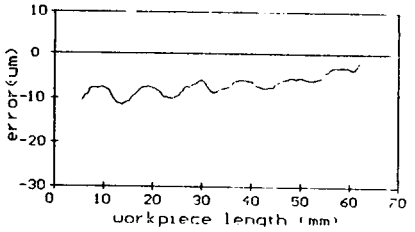


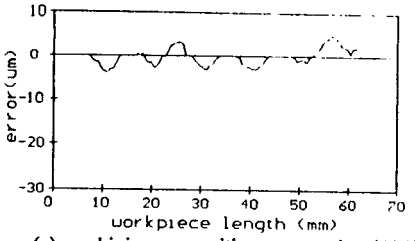
Fig. 16 Machining error compensation system



(a) raw material



(b) machining error after 1st cutting (ϕ74)

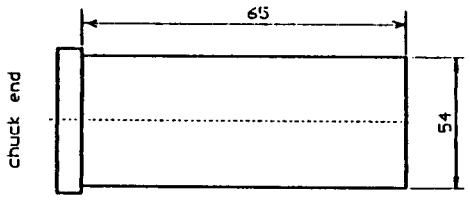


(c) machining error with compensation (ϕ72)

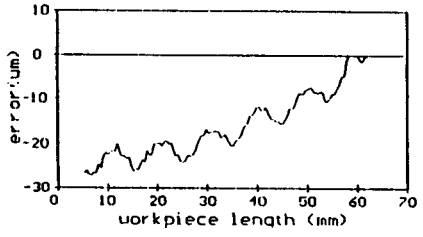
Fig. 17 Results of test workpiece turning

```
;CSS_T/T
N0001 G99
N0002 G97M41
N0003 G4503
N0004 T0101
N0005 G96S200.M3
N0006 G42
N0007 G0X70.Z75.
N0008 G1Z65.F.1
N0009 X70.01Z45.714
N0010 Z0F.10
N0011 X82.
N0012 G40
N0013 G0X100.Z150.
N0014 M30
```

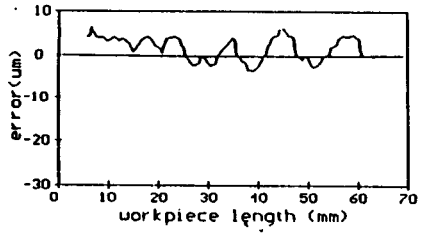
Fig. 18 Compensated NC code



(a) raw material



(b) machining error after 1st cutting (ϕ54)



(c) machining error with compensation (ϕ52)

Fig. 19 Results of test workpiece turning

```
;CSS_T/T
N0001 G99
N0002 G97M41
N0003 G4503
N0004 T0101
N0005 G96S200.M3
N0006 G42
N0007 G0X52.Z75.
N0008 G1Z65.F.1
N0009 X52.01Z56.158
N0010 X52.02Z37.211
N0011 X52.03Z7.211
N0012 X52.02Z0
N0013 X82.
N0014 G40
N0015 G0X100.Z150.
N0016 M30
```

Fig. 20 Compensated NC code

첫번째의 실험은 냉각유를 공급하면서 Fig. 17의 (a)에 나타낸 바와 같이 길이 65mm, 지름 ϕ76의 원재료를 ϕ72로 최종 가공하였다.

1회의 가공을 한 후 ϕ74에서 측정한 직경오차를 Fig. 17의 (b)의 나타내었다. 이 그림으로부터 척 끝단면으로 갈수록 공작물 직경이 줄어들고 있다는 것을 알 수 있으며 최대 약 11μm의 직경오차가 발생하고 있다. 오차의 규칙적 파동 현상은 절삭시 심압대를 사용하지 않은데 따른 Chatter현상의 발생이 그 원인이라고 판단된다. 그리고, 직경이 점점 줄어드는 것은 공구 팁의 마멸보다는 열팽창에 의한 효과가 더 크게 나타났기 때문이라고 판단되며 가공부 길이가 커진다면 가공오차도 더욱 크게 나타날 것으로 예상된다.

한편, 이 가공오차를 고려하여 최종 직경오차를 $\pm$5μm이내로 줄이는 것을 목표로하여 최종가공 NC 프로그램을 생성시켰으며 그 결과를 Fig. 18에 나타내었다. 원래의 NC 프로그램에서 N0009부분이 보정으로 첨가된 Block임을 알 수 있다.

이 NC프로그램을 이용하여 직경 ϕ74에서 ϕ72로 최종가공을 한 후 그 직경오차를 측정한 결과 Fig. 17의 (c)과 같이 나타났다. 직경오차는 최대 $\pm$4.3μm로 크게 줄어들고 있으며 목표치 $\pm$5μm 이내로 가공정밀도를 유지하고 있어 본 시스템에 의한 오차보정의 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

두번째의 실험은 절삭조건은 앞 실험과 동일하나 냉각유를 공급하지 않은 상태로 Fig. 19의 (a)에 나타낸 바와 같은 직경 ϕ56의 공작물을 ϕ52로 가공하는 것을 목표로 하였다. 1회 절삭 후 즉 ϕ54에서 직경오차를 측정한 결과 Fig. 19의 (b)와 같이 나타났다.

앞 실험결과와 마찬가지로 척 단면부로 갈수록 직경이 점점 줄어들고 있으며 최대 직경오차는 약 27μm로 Fig. 17의 (b)와 비교할 때 거의 2배로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 여기서도 마찬가지로 Chatter현상이 발생하고 있으며 오차가 크게 나타나는 것은 냉각수를 사용하지 않은데 따른 공구 팁의 과도한 열팽창에 기인한다고 판단된다.

Fig. 19의 (b)의 가공오차를 고려하여 최종 직경오차를 $\pm$5μm이내로 줄이는 것을 목표로 최종가공 NC프로그램을 생성시킨 결과를 Fig. 20에 나타내었으며 원래의 NC프로그램에서 N0009부터 N0011까지가 보정으로 첨가된 Block임을 알 수 있다.

이 NC프로그램을 이용하여 최종가공을 한 후 그 직경오차를 측정한 결과를 Fig. 19의 (c)에 나타내었다. 직경오차는 $\pm$7μm이내로 줄어들고 있음을 알 수 있으며 본 실험에서도 거의 목표치 이내로 가공오차를 제어할 수 있다는 것을 보이고 있

으나 이를 초과하는 부분이 나타나는 것은 보정 Block이 많은데도 보정부분에서 감속, 가속 등을 고려하지 않았기 때문이라고 판단되며 이를 반영한다면 보다 나은 가공 정밀도를 얻을 수 있으리라 판단된다.

위의 두 실험결과로부터 정밀한 CNC 선반가공에서조차도 상당한 양의 직경오차가 발생하고 있다는 것을 알 수 있었으며, 따라서 이의 보정은 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 개발된 오차보정 시스템을 실제 절삭 실험에 적용한 결과 상당한 효과를 얻을 수 있었으며 앞으로 좀더 보완, 이를 NC 제어기 내부에 H/W로 구축함으로써 실용화시키는 연구가 계속되어져야 한다고 판단된다.

6. 결 론

NC 선반가공시의 가공오차 보정에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제품도면의 자동인식용 S/W, 가공오차의 측정경로 NC 프로그램 생성용 S/W, 가공오차의 자동측정용 S/W, 보정된 최종 가공경로 NC 프로그램 생성용 S/W 등을 종합한 NC선반가공의 가공오차 보정 시스템을 개발하였다.

(2) 임의 형상의 공작물에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 개발된 보정 시스템의 타당성을 검증하였다.

(3) 개발된 가공오차 보정 시스템으로 절삭실험을 수행한 결과 직경오차의 허용치를 $\pm 5\mu$m로 주었을 때 습식 절삭의 경우 최대 약 -11μm의 오차를 $\pm 4.3\mu$m이내로 줄일 수 있었다. 건식 절삭의 경우 최대 약 -27μm의 직경오차를 $\pm 7\mu$m이내로 줄일 수 있었으나 허용치를 넘어선 것은 보정 NC Block이 많았음에도 공구의 가감속을 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단되며 이를 고려한다면 오차를 더욱 줄일 수 있을 것이다.

(4) NC 선반가공시 공작물의 직경은 척 단면부로 갈수록 점점 줄어드는 경향을 나타내었으며 이로부터 오차의 주요 원인이 공구의 열팽창이라는 것을 알 수 있었다.

(5) 본 연구를 통하여 개발된 각종 S/W를 실제 생산과정에서 활용하여 이를 수정보완해 나가는 동시에 NC제어기 내부에 H/W로 구축함으로써 실용도를 높일 수 있도록 하는 연구가 계속 되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 1989년 한국산업전자(주)의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부분으로 관계자 여러분과 실험에 도움을 주신 한국산업전자(주) 직원분들께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Hocken, Robert, J., 1980, "Technolgy of Machine Tools-Machine Tool Accuracy", Vol. 5, Lawrence Livermore Lab., Univ. of California, pp.61~72.

(2) Sata, T., Takcuchi, Y., Sakamoto, M, and Weck, M., 1981, "Improvement of Working Accuracy on NC Lathe by Compensation", Annals of CIRP, Vol. 30, pp.445~449.

(3) Shiraishi,l M., 1979, "In-process Control of Workpiece Dimension in Turning", Annals of the CIRP, Vol. 28, pp.333~337.

(4) Rundqvist, B., 1982, "Indirect Size Control in NC -Turning", Annals of the CIRP, Vol. 31, pp.259~261.

(5) Novak, A., 1981, "Sensing of Workpiece Diameter, Vibration and Out-off-Roundness by Laser-Way to Automatic Quality Control", Annals of the CIRP, Vol. 30, pp.473~476.

(6) Loewen, E. G., 1980, "High Speed Optical Scanning Techniques for Dimensional Measurement", Annals of the CIRP, Vol. 29, pp.513~518.

(7) Takeuchi, Y., Sakamoto, M., Imura, K. and Yoshida, R., 1985, "On the Reconstruction of NC Lathe to DNC by Means of Personal Computer(2nd Report)", JSPE, Vol. 51, No. 2, pp.353~358.

(8) Takeuchi, Y., Sakamoto, M., Asao, T. and Imura, K., 1987, "On the Reconstruction of NC Lathe to DNC by Means of Personal Computer(3rd Report)", JSPE, Vol.53, No. 6, pp.902~907.

(9) Szafarczyk, M., 1983, "Automatic Measurement and Correction of Workpiece Diameter on NC Center Lathe", Annals of the CIRP, Vol.32, pp.305~308.

(10) Nakazawa, H. and Kanayama, K., 1988, "Development of Manufacturing System by Automatic Input of Drawing of Turning Parts", JSPE, Vol.54, No.1, pp.151~156.