

NC 선반가공에서 자동공구보정시스템의 개발

주상윤*, 강병필**

Development of an Automatic Tool Compensation System in NC Lathe Machine

Sang-Yoon Ju*, Byeung-Phil Kang**

ABSTRACT

Tool wear is one of major causes occurring defectives in NC machining. In this paper we developed an automatic tool compensation system for the NC lathe machining. The system compensates machining error without any help of operators whenever the specification of a part is out of a tolerance. The configuration of the automatic compensation system consists of a NC lathe, an autoloader, a sensor, and a PLC. The system is operated as follows. A workpiece loaded by the autoloader is machining on the NC lathe. Once the workpiece is machined to be turned to a part, it is moved onto the sensor to be measured. If the sensor detects a part out of tolerance, a tool compensation is made in the NC controller. The system gives a help in increasing the productivity by reducing occurrence of defective parts as well as by eliminating time for the tool compensation. Besides the productivity increase, the system calculates cumulative usage time of the tool and notices the tool replace time to a worker by an alarm signal. A case is introduced to show that the system can be applied effectively in a shop.

Key Words : Tool Compensation(공구보정), Tool Wear(공구마모), NC Lathe Machining(NC 선반가공), NC Controller(NC 컨트롤러), Tool Compensation Line(공구보정선)

1. 서론

절삭가공에서는 공구의 마모로 인하여 작업물의 치수가 변화하며 특히 자동생산설비에서는 이러한 가공오차로 말미암아 대량의 불량품이 발생하기도 한다. 일반적으로 가공오차는 소재의 불량, 공작기계의 결함, 공구의 불량이나 공구의 파손 혹은 마모와 같은 원인에 의하여 발생하며, 생산공정이 안정되었을 경우 가공오차는 거의 대부분

공구의 마모에 의하여 발생한다. 따라서 가공오차로 말미암은 불량품들의 발생을 방지하기 위해 공구마모를 감시하기 위한 여러 방법들이 제안되었다. 공구마모에 관한 연구는 비디오카메라 등으로 공구의 마모상태를 측정하는 직접적인 방법과 주축 모터의 전류, 음향방출 신호, 가공면의 온도 등과 같이 절삭과정 중에 발생하는 물리적 인자들을 이용하여 절삭력을 추정하고 그에 따라 공구의 마모량을 추정하는 간접적인 방법이 있다¹⁻⁵⁾. 공구마모에 따른 공구보정주기에 대한 경제적인 설계에

* 울산대학교 산업공학과

** 울산대학교 산업공학과 대학원

관련 연구는 Arcelus^[6]와 Drezner^[7]에 의하여 이루어졌으며, 이들은 선형적으로 공구의 마모가 이루어질 때 공구의 보정주기와 초기가공조건을 설정하였다. 또한 배문택 등^[8]은 NC 선반가공에서 공구의 마모상태를 확률적으로 예측하여 공구의 보정주기를 결정하고 공구보정비용을 최소화하였다.

지금까지 이루어진 공구보정에 관한 연구들은 공구의 마모에 따른 오차보정을 수동으로 수행하는 경우에 대한 것들 뿐이다. 그에 반하여 본 논문에서는 가공된 기계부품의 측정데이터로부터 공구의 마모에 따른 오차보정을 자동적으로 수행하는 자동보정시스템을 개발하고 또한 자동보정시스템을 효율적으로 운영하는 방법을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 자동으로 공구보정을 수행하는 절차를 소개하고, 3 절에서는 자동공구보정시스템을 운영하기 위하여 필요한 공구보정선과 공구보정량을 설정한다. 또한 4 절에서는 자동공구보정과 공구교체신호를 위한 매크로프로그램을 기술한 다음, 5 절에서는 자동공구보정시스템의 적용사례를 소개한다.

2. 자동공구보정의 절차

개발하고자 하는 자동공구보정시스템은 NC 선반과 측정기기, 그리고 PLC를 구성요소로 한다. 일단 선반에서 가공된 부품은 측정기기로 이동되어 작업물의 길이 혹은 폭과 같은 부품의 특성치가 지정된 규격을 벗어나는지 여부를 조사한다. 측정기기는 마이크로 인디케이터나 공기 마이크로미터와 같은 계측용 센서를 사용하여 부품이 지정된 규격을 벗어나는지 여부에 대한 판정만 내릴 뿐이며 부품의 실제 치수는 측정하지 못한다. 하지만 이들 계측용 센서는 가격이 저렴하고 사용이 간편하다는 장점으로 인하여 산업현장에서 널리 사용되고 있다.

본 자동공구보정시스템에서 측정기기를 사용하는 일차적인 목적은 부품의 불량 여부를 판정하는 것이 아니라 공구의 보정 여부를 판정하기 위한 것이다. 따라서 부품을 측정할 결과치가 지정된 규격을 벗어나는 경우 즉시 공구의 보정이 이루어진다. 일반적으로 공구의 마모는 가공되는 제품의 규격을 지속적으로 증가시키거나 혹은 감소시키므로 공구보정 여부를 판별하기 위하여 설정

되는 공구보정선((Tool Compensation Line:TCL)은 상한선 혹은 하한선으로만 존재하게 된다. Fig.1에서는 공구보정선이 상한선으로 존재하는 경우를 보여주고 있으며 양품/불량품의 판정을 위한 관리한계선($S \pm tol$) 보다 엄격하게 설정되었다. 따라서 만약 측정된 부품의 규격이 공구보정선보다 작아진다면 해당부품은 당연히 양품으로 판정된다. 반면에 부품의 규격이 공구보정선을 벗어난 경우에는 가공된 부품이 관리한계선을 벗어날 수도 있으므로 불량품의 여부를 확인할 필요가 있다. 부품의 규격이 공구보정선을 벗어나는 원인은 공구마모 외에도 공구파손이나 부품이나 공구의 잘못된 셋팅 등으로 말미암을 수도 있다. 특히 공구마모 이외의 다른 원인들로 인하여 부품 규격이 공구보정선을 벗어나는 경우에는 부품규격의 오차가 크게 증가하므로 불량품이 발생할 가능성이 매우 커진다. 따라서 가공된 부품의 규격이 공구보정선을 벗어나는 경우에는 공구보정을 수행할 뿐만 아니라 해당부품은 불량품여부를 확인하기 위한 별도의 검사를 실시해야 한다.

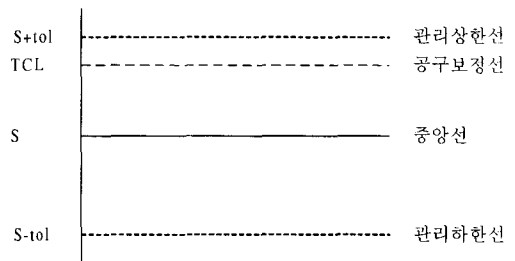


Fig. 1 Lines in the automatic tool compensation system

자동공구보정시스템에서 공구보정은 다음의 절차를 따라 이루어진다. NC 기계에서 가공이 완료된 부품은 측정기기로 옮겨져 품질특성치에 대한 측정이 이루어진다. 만약 측정된 부품의 규격이 공구보정선을 초과하는 경우, 측정기기는 PLC를 통하여 NC 컨트롤러에 공구보정신호를 발생한다. NC 컨트롤러는 공구보정신호가 전달될 때마다 매크로프로그램에 의하여 저장된 공구보정값을 갱신하게 되며, 따라서 그 이후에 가공되는 부품들은 자동적으로 공구보정이 이루어진다. 자동공구보정이 이루어지는 과정을 흐름도로 도시하면 Fig.2 와 같다.

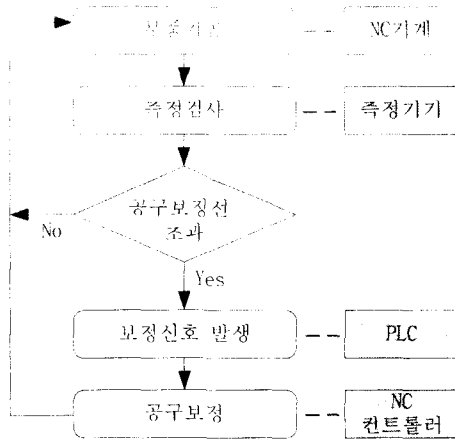


Fig. 2 A flowchart of the automatic tool compensation

3. 공구 보정선 및 보정량 결정

공구보정시스템에서 공구를 보정하는 방법에는 대공구보정과 소공구보정의 두 종류가 있다. 대공구보정은 부품의 측정치가 공구보정선을 벗어날 때마다 이루어지는 공구보정으로 이 때 적용되는 공구보정량을 대공구보정량(Big Tool Compensation Size: BTCS)이라고 부르기로 한다. 또한 소공구보정은 부품을 가공할 때마다 공구의 마모량을 예측하여 공구를 보정하는 것을 가리키며, 이 때 공구의 보정량을 소공구보정량(Small Tool Compensation Size: STCS)이라고 부른다. 공구의 마모에 따라 공구를 보정할 때마다 가공된 부품의 규격은 지속적으로 커지거나 혹은 작아지게 된다. 본 연구에서는 편의상 공구마모가 진행됨에 따라 제품의 규격이 커진다고 가정하고 내용을 전개하고자 한다. 이 경우 공구보정선(TCL)은 Fig.1에서와 같이 부품특성의 기준이 되는 중앙선(S)과 관리상한선(S + tol) 사이에 존재하게 된다. 만약 반대로 공구마모에 따라 제품의 규격이 작아진다면 공구보정선(TCL)은 중앙선(S)과 관리하한선(S - tol) 사이에 존재한다.

3.1 공구보정선(TCL)의 설정

부품의 가공이 진행됨에 따라 부품규격은 점차 증가하며, 부품규격이 공구보정선을 벗어나면 자동적으로 대공구보정량(BTCS)만큼 공구보정이 이루어진다. Fig.3은 이와 같은 대공구보정이 이루

어지는 과정을 보여주고 있으며, 이 때 실선은 중앙선(S)을, 가는 실선은 관리한계선(S±tol), 그리고 굵은 점선은 공구보정선(TCL)을 나타낸다. 검은점 ●으로 표시된 부품의 측정치가 설정된 공구보정선을 벗어나면 즉시 대공구보정량 (BTCS)만큼 공구보정이 이루어지며 이를 그림 상에서는 흰점 ○으로 표시하고 있다. 공구보정선을 벗어난 2개의 부품 가운데 왼편의 부품은 양품이고 오른편의 부품은 불량품에 해당된다.

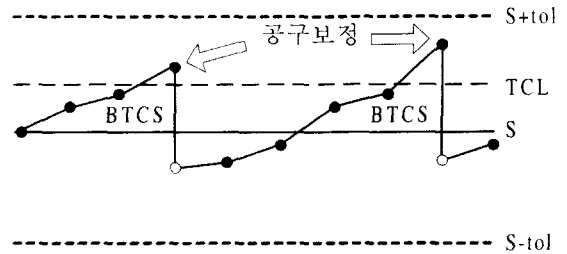
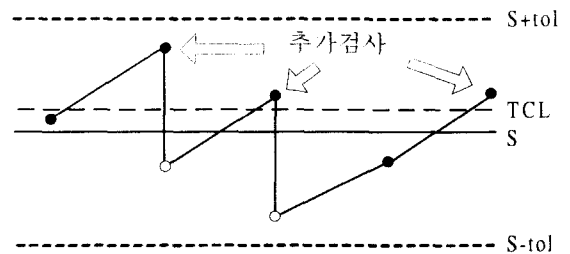


Fig. 3 Big tool compensation

공구보정선은 자동공구보정시스템의 운영과 성능에 큰 영향을 미친다. 만약 공구보정선이 중앙선(S)에 근접하여 설정되면 Fig.4(a)와 같이 가공된 부품들은 빈번히 공구보정선을 초과하게 되어 불량품을 제거하기 위한 추가검사를 자주 수행해야 한다. 반면에 이와 반대로 공구보정선이 관리상한선(S + tol)에 가까이 위치할 경우에는 Fig.4(b)에서와 같이 공구보정선을 벗어나는 부품이 관리상한선을 쉽게 벗어나게 되어 불량품이 될 가능성이 커진다. 따라서 본 연구에서는 공구마모로 인한 불량품을 최소화하면서 아울러 추가검사의 회수를 줄일 수 있도록 공구보정선을 설정하고자 한다.



(a)

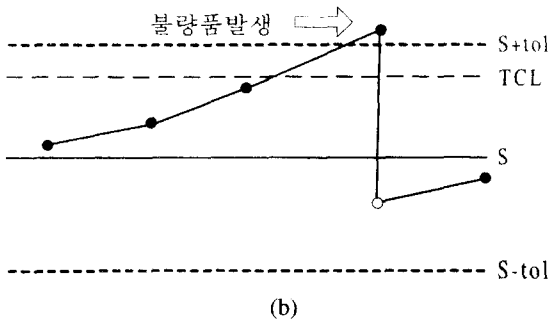


Fig. 4 Problems occurred by positions of TCL in the tool compensation

일반적으로 선반가공에 사용되는 공구는 Fig.5에서와 같이 마모한도를 넘어서면 마모가 급격히 일어나므로¹⁹⁾, 하나의 부품을 가공하는 동안 발생하는 공구의 마모량은 공구를 폐기하기 직전에 최대값을 가진다. 따라서 과거에 이루어진 가공데이터를 참조하거나 아니면 실제 부품을 가공함으로써 하나의 부품을 가공할 때 발생하는 공구마모량의 최대치 W 는 쉽게 추정될 수 있다.

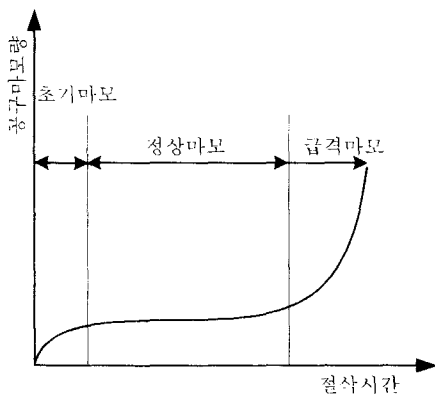


Fig. 5 A tool wear curve on the lathe machining

가공된 부품의 규격이 관리상한선을 벗어나지 않게 한다면 불량품의 발생을 예방할 수 있게 된다. 이는 공구보정선(TCL) 과 관리상한선($UCL = S + tol$) 간의 차이 $D = UCL - TCL$ 를 최대단위공구마모량 W 보다 크게 정하면 가능해진다. 하지만 D 의 값이 커지면 추가검사의 회수가 많아지므로 $D=W$ 되도록 공구보정선을 설정하는 것이 바람직

하다. 따라서 공구보정선은 다음 식과 같이 결정된다.

$$TCL = (S + tol) - W \quad (1)$$

여기서

W : 하나의 부품을 가공할 때 발생하는 최대 공구마모량

3.2 공구보정량의 결정

공구마모로 인하여 부품의 규격이 공구보정선을 초과할 때마다 자동적으로 대공구보정은 이루어진다. 이때 공구마모에 의한 가공오차는 부품을 가공할 때마다 지속적으로 증가하므로 보정된 규격이 관리하한선 $S - tol$ 을 벗어나지 않으면서도 가능한 가깝게 위치하도록 다음 식과 같이 대공구보정량(BTCS)을 정하는 것이 바람직하다.

$$BTCS = TCL - (S - tol) = 2 \times tol - W \quad (2)$$

여기서

W : 하나의 부품을 가공할 때 발생하는 최대 공구마모량

이제 소공구보정량(STCS)을 결정해 보자. Fig.5에 의하면 일반적으로 공구의 마모량은 가공시간이 커짐에 따라 그 크기가 증가하므로 대공구보정이 이루어질 때마다 앞서 발생한 공구마모량과 가공된 부품의 수를 이용하여 식(3)과 같이 정할 수 있다.

$$STCS_{i+1} = STCS_i + BTCS / N_{i+1}, \quad (3)$$

단, $i = 1, 2, 3, \dots, STCS_1 = 0$

여기서

$STCS_i$: $i-1$ 번째 대공구보정이 일어난 이후부터 i 번째의 대공구보정이 일어나기 직전까지의 구간에서 적용된 소공구보정량

N_i : $i-1$ 번째 대공구보정이 일어난 이후부터 i 번째의 대공구보정이 일어나기 직전까지 가공된 부품의 수

식(3)에서 i 번째 보정구간에서의 소공구보정량

STCS_i은 i-1 번째 보정구간에서 발생한 부품당 평균 공구마모량에 해당한다. Fig.6은 대공구보정과 소공구보정을 함께 적용하여 공구보정을 수행한 것을 나타내고 있다. 소공구보정을 도입하면 공구마모에 따른 가공오차의 증가를 둔화시킬 수 있으므로 공구보정선에 도달하기까지 보다 많은 부품을 가공할 수 있다.

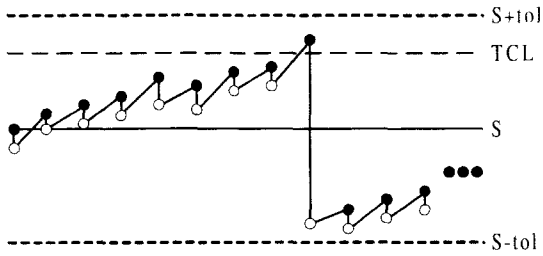


Fig. 6 The big tool compensation and the small tool compensation

부품의 가공오차는 공구마모 뿐만 아니라 공구파손이나 작업물의 위치설정의 잘못 등의 원인에 의해서도 발생한다. 이런 경우에는 대공구보정을 실시하여도 곧바로 가공된 부품의 규격이 공구보정선을 벗어나게 된다. 따라서 대공구보정들 간의 간격이 비정상적으로 짧은 경우에는 비상신호를 발생하여 작업을 중단하고 이상원인을 찾아 수정해야 한다.

4. 공구교환시기의 결정

공구를 보정하는 것은 공구가 보정량만큼 마모되었다는 것을 의미하므로 공구의 보정된 값들을 누적하면 공구의 교환시기를 결정할 수 있다. 대공구보정이 k번 수행되었다고 할 때 누적된 공구마모량 Y는 다음과 같이 계산된다.

$$Y = k \times BTCS + \sum_{i=1}^k STCS_i \times N_i \quad (4)$$

여기서

BTCS : 대공구보정량

STCS_i : i-1 번째와 i 번째 대공구보정 사이에 가공된 부품에 적용된 소공구보정량

N_i : i-1 번째와 i 번째 대공구보정 사이에 가공된 부품의 수

일단 누적공구마모량 Y가 계산되면 사전에 설정된 공구마모한계치와 비교하여 누적공구마모량이 공구마모한계치를 벗어나면 공구를 교환하도록 신호를 발생시킨다. 공구마모한계치는 공구의 종류와 재질에 따른 경험적 데이터나 혹은 공구제작 회사에서 추천하는 마모한계값을 근거로 하여 추정할 수 있다. Fig. 7에서는 공구누적마모량을 이용하여 공구의 교환시기를 결정하는 과정을 흐름도로 나타내고 있다.

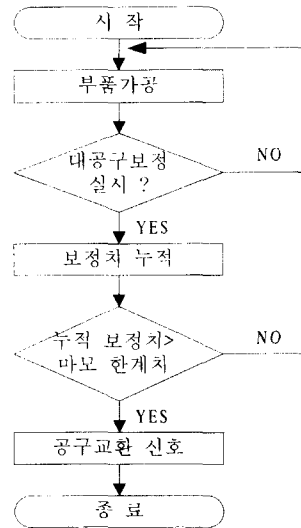


Fig. 7 Determination of tool replacement

5. 적용사례

Fig.8은 본 연구의 적용을 위한 자동보정시스템의 구성도를 보여주고 있다. 자동보정시스템은 autoloader, 측정기기, conveyor, PLC, NC 선반기계로 구성되었다. 작업물을 자동으로 loading/unloading 하기 위한 autoloader는 실린더, 모터, 리미트스위치 등을 이용하여 자체 제작되었으며, 측정기기는 공압센서(Air Gauge)를, PLC는 LG산전의 Master-K500H를, 그리고 NC 공작기계의 컨트롤러는 통일중공업의 SENTROL-M을 사용하였다.

자동보정시스템은 다음의 단계에 따라 공구보정을 자동으로 수행하게 된다.

- 단계 1: Autoloader 가 소재를 NC 기계에 loading 한다.
- 단계 2: NC 기계에서 소재를 가공하여 부품을 제작 한다.
- 단계 3: Autoloader 는 가공이 끝난 부품을 unloading 하여 컨베이어로 옮긴다.
- 단계 4: 컨베이어에 의하여 부품은 게이지센서로 이송된다.
- 단계 5: 게이지센서로 부품을 측정한다.
- 단계 6: 측정치가 공구보정선을 초과한 경우 게이지센서는 보정선초과신호를 PLC 에 전달한다.
- 단계 7: PLC 에서는 공구보정신호를 공작기계의 컨트롤러에 있는 PMC 에 전달한다.
- 단계 8: PMC 는 공구보정신호를 입력받아 공구보정량을 수정하여 공구보정이 이루어지도록 한다.

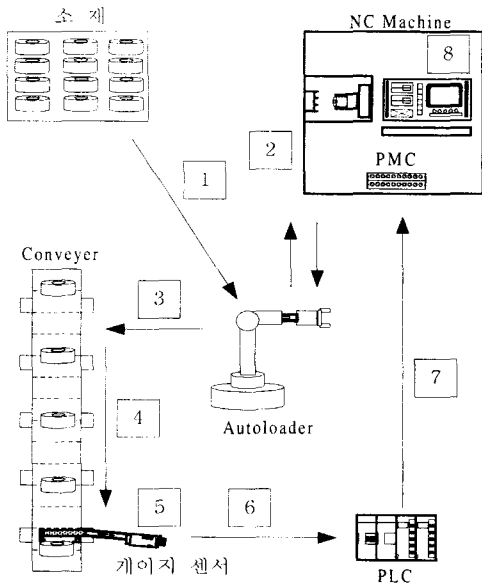


Fig. 8 Configuration of the automatic tool compensation system

Fig.9 는 사례대상 부품으로 그 명칭은 Generator Core 이며 소재의 재질은 SM45C 이다. 부품의 외경을 선반에서 가공하기 위하여 주축회전 속도는 300rpm, 절삭속도는 0.3mm/rev, 절삭깊이는

0.2mm 로 주어졌으며, 절삭공구는 Turning Tool Holders, 절삭날은 Insert Tip TNMG220404 가 사용되었다.

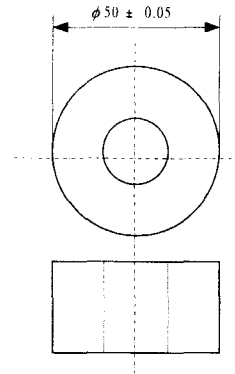


Fig. 9 A mechanical part for an experiment of the automatic tool compensation

부품의 공칭치수는 $S=50.0mm$, 허용오차는 $tol \pm 0.05mm$ 로 주어졌으며, 단위부품의 최대공구마모량은 과거의 가공데이터로부터 $W = 0.021mm$ 로 결정되었다. 따라서 식(1)에 의하여 공구보정선은 $TCL= 50.029mm$ 이며, 식(2)에 의하여 대공구보정량은 $BTCS= 0.079mm$ 이다.

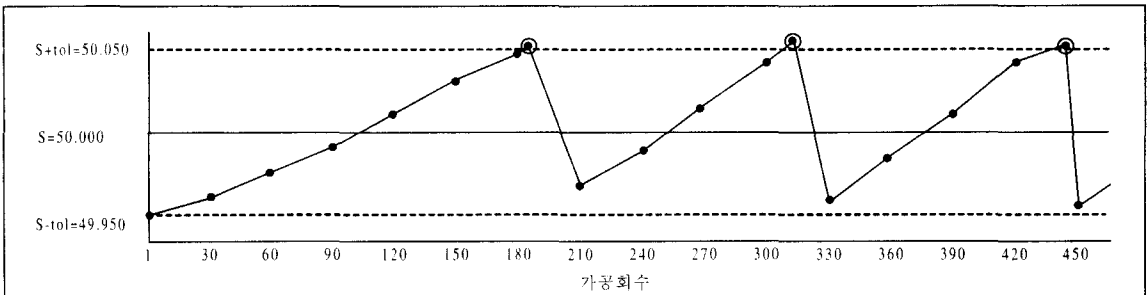
NC 기계의 컨트롤러에서는 PLC 로부터 공구보정신호가 전달될 때마다 공구보정을 수행하게 된다. 이때 대공구보정량은 상수값으로 저장되지만 소공구보정량은 대공구보정이 실시될 때마다 그 값이 갱신된다. 소공구보정량의 갱신은 NC 컨트롤러 내의 PMC(Programmable Machine Controller)와 커스텀매크로 프로그램에 의하여 이루어진다. 매크로프로그램은 Fig.10 과 같이 작성되며 부품을 가공하기 위한 NC 데이터의 시작부분에서 호출된다. 외부의 PLC 로부터 전달되는 보정신호는 매크로프로그램에서 시스템변수 #1001 에 의하여 입력된다. 만약 보정신호가 전달된 경우 시스템변수 #1001 은 1 의 값을 갖게 된다. 매크로프로그램을 통하여 계산된 대공구보정량과 소공구보정량은 각각 공구보정량 변수인 #2001 에 저장되어 부품을 가공할 때마다 자동적으로 공구를 보정하게 된다.

선반의 공구보정은 X 축 외에 Z 축에서도 이루어지지만 본 경우와 같은 외경의 가공에서는 공구의 마모가 주로 X 축 방향으로 이루어지므로 매크로프로그램에서는 X 축 방향의 보정만을 실시하였

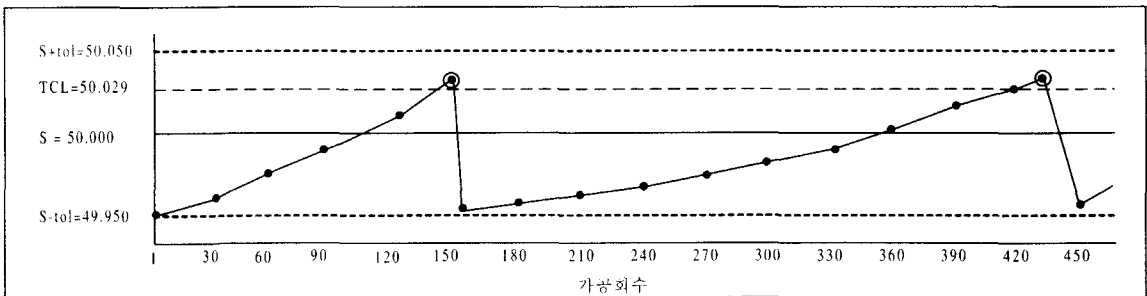
```

O1234
N0001 #502 = #502 + 1           (가공회수의 누적)
N0002 IF[#1001 EQ 1] GOTO4      (보정신호 입력시 대공구보정으로 분기)
N0003 IF[#503 EQ 1] GOTO 9      (소공구보정으로 분기)
N0004 #2001 = 0.079             (공구보정량변수에 대공구보정량=0.079 저장)
N0005 #501 = #501 + 0.079/#502 (소공구보정량 계산)
N0006 #503 = 1                  (소공구보정을 위한 flag 변수)
N0007 #502 = 0                  (대공구보정까지 가공한 부품의 개수 초기화)
N0008 GOTO 10                   (대공구보정 후 종료)
N0009 #2001 = #501              (공구보정량변수에 소공구보정량 저장)
N0010 M99                       (매크로프로그램 호출 종료)
    
```

Fig. 10 A custom macro-program for the tool compensation



(a)



(b)

Fig. 11 Measured data in (a) manual compensation system and (b) automatic compensation system

다. Fig.11에서는 수동으로 공구보정을 실시한 경우와 자동보정시스템에서 공구보정을 실시한 경우를 비교하고 있다. Fig.11(a)에서 보는 바와 같이 수동으로 공구를 보정할 때는 부품 규격이 관리상한선 $S + tol$ 을 벗어날 때마다 $BTCS=2tol$ 만큼 공구를 보정하였다. 이 때 185 번째, 312 번째, 442 번

째 부품들이 관리상한선을 벗어났으며 이들은 모두 불량으로 처리되었다. 반면에 자동으로 공구를 보정하는 경우는 Fig.11(b)에 도시되어 있으며 부품의 규격이 공구보정선을 벗어날 때마다 대공구보정량만큼 공구를 자동으로 보정하고 있다. 자동공구보정시스템에서는 첫번째 대공구보정이 일어

난 이후부터는 하나의 부품이 가공될 때마다 소공구보정량만큼씩 공구보정이 이루어지고 있으므로 수동으로 공구를 보정하는 경우에 비하여 공구마모로 인한 부품규격의 오차가 작게 증가하고 있다. 가공된 부품들 가운데 143 번째와 437 번째 부품이 공구보정선을 벗어났으며 이들에 대한 추가검사를 실시한 결과 모두 양품으로 판명되었다.

6. 결론

본 연구에서는 NC 선반가공에서 공구마모로 인하여 발생하는 가공오차를 자동으로 보정하기 위한 자동보정시스템을 개발하였다. 본 자동보정시스템은 부품의 형상에 상관없이 측정할 부품의 특성에 따라 측정기기간 바꾸어 주면 어떤 생산 현장에서나 쉽게 적용할 수 있다. NC 선반으로 부품을 가공할 때 자동보정시스템을 도입할 때 다음의 효과들을 얻을 수 있다.

- 1) 작업자의 도움없이 자동으로 공구를 보정할 수 있다.
- 2) 수동공구보정에 따른 작업시간손실이 제거됨으로 작업생산성이 향상된다.
- 3) 작업자가 공구를 보정할 경우 발생할 수 있는 보정량 입력의 과오를 피할 수 있다.
- 4) 허용오차를 벗어난 불량부품들을 줄일 수 있다.
- 5) 공구의 적정한 교체시기를 자동으로 결정하여 작업자에게 알려준다.

본 연구에서는 단지 공구마모로 말미암은 가공오차만을 다루고 있으나 실제로는 공구마모 이외의 다른 요인으로 인하여 가공오차가 발생할 수 있다. 따라서 가공오차를 유발하는 여러 다른 요인들을 함께 고려하여 자동공구보정을 수행하는 시스템에 대한 연구가 추가로 요구된다.

참고문헌

1. 김화영, 안중환, "공작기계 지능화를 위한 다중 감시시스템의 개발," 한국정밀공학회지, 제 10 호, 제 4 호, pp. 142-151, 1993.

2. 김태용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류 감지를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용," 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp. 133-145, 1996.
3. Liang, S., and Dornfeld, D., "Detection of Cutting Tool Wear using Adaptive Time-Series Modeling of Acoustic Emission Signals," Sensor for Manufacturing, M.K.Tse and D.A.Dornfeld Eds., ASME, New York, pp. 27-38, 1987.
4. 김태복, 강신엽, 왕덕현, 김원일, 이윤경, "CNC 선반에서 연속절삭 및 단속절삭 시 공구파손에 대한 음향방출신호 특성 연구," 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 4 호, pp. 136-142, 1996.
5. 한응교, 이범성, 박준서, 김순기, "선삭가공에 있어서 AE 신호와 표면 거칠기에 의한 공구손상에 대한 평가," 한국정밀공학회지, 제 9 권, 제 4 호, pp. 72-77, 1992.
6. Arcelus, F.J. and Banerjee,P.K., "Selection of the Most Economical Production Plan in a Tool-wear Process," Technometrics, 27, pp. 433-437, 1985.
7. Drezner, Z. and Wesolowsky, G.O., "Optimal Control of Linear Trend Process with Quadratic Loss," IIE Transactions, 21, pp. 66-72, 1989.
8. 배문택, 윤원영, 목학수, "NC 선반가공에서 공구 조정주기의 경제적 설계," 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 6 호, pp. 33-39, 1998.
9. 대한중석, "초경공구," 대한중석, pp. 378-389, 1996.