

무인 선삭 셀에서의 측정/검사 시스템

김 선호* 김 선호**

Inter-Process Inspection System Suitable for Unattended Turning Cells

Sun Ho Kim* Sunn Ho Kim**

Abstract

In a transfer line with mass production capability, calibration systems are included in the process as a separate dedicated station. However, this method is not appropriate in an unattended FMC with flexibility. As the FMC produces versatile parts with small batch sizes, more flexible calibration systems are required. In this paper, a calibration/inspection system suitable for an unattended turning cell is introduced. The system has functions of dimensional calibration of parts by touch probes, tool wear compensation, and quality monitoring of parts. Furthermore, characteristics of errors in the system are identified and corresponding compensation methodology is suggested. An operation software is developed for efficient use of the system.

1. 개 요

생산자동화는 크게 설계, 가공 검사공정으로 분류되고 있으며 설계는 CAD의 발전에 영향을 받아 장족의 발전을 이루었고, 가공분야에 있어서도 생산성 향상을 위해 FMS 나 FMC 등의 도입이 활발한 추세에 있다. 그러나 검사공정은 그 역할의 중요성에 비추어 다소 등한시되는 경향이 있어 많은 투자를 한 자동화 시스

템이 제 구실을 해 내지 못하는 경우가 있다. 불량품을 방지하기 위해 대량생산을 위한 트랜스퍼 라인에서는 측정 및 검사공정을 별도로 설치하고 있으나 FMS나 FMC에서는 이러한 방식이 적합하지 않다. FMS나 FMC의 특성은 다품종 소량생산체제이므로 부품이 자주 바뀌어 별도의 검사공정을 설치할 경우 비경제적일 수 있다. 이에 따라 FMS나 FMC에 적합한 측정 및 검사 또는 감시기능이 필요하다.

* 한국기계연구소 자동화 연구부

** 명지대학교 산업공학과

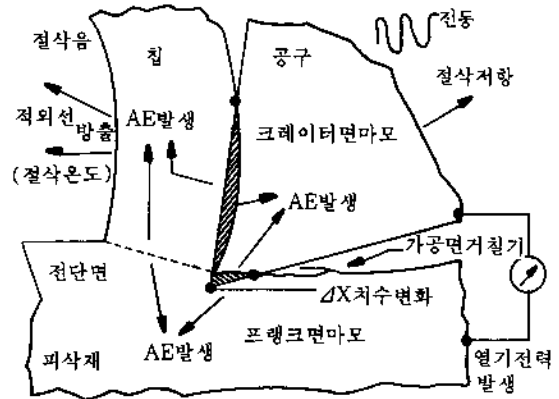
필요한 감시 항목으로서는 시스템 이상, 공구마모, 가공품의 치수 등이 있겠으나 여기서는 가공품의 치수와 공구마모에 국한된 FMC용 감시 시스템을 소개한다. 이것은 자동선삭 FMC에 적합하도록 터치 프로브(Touch Probe)를 이용하여 구성된 감시시스템으로서, CNC 선반2대, 부품 착탈 로봇트 1대, 주변장치로 구성되어 있으며 측정을 위한 터치 프로브 시스템, 정보수집을 위한 PC가 NC제어장치와 결합되어 있다.

터치 프로브는 가공이 완료된 후 부품이 선반 척에 고정된 상태에서 측정위치나 측정점수에 구애받지 않고 부품의 치수 측정이 가능한 인터프로세스(Inter-Process)측정의 특징을 가지고 있다. 그러나 이 방식은 측정의 오차를 수반하는 여러가지의 인자들을 갖고 있어 실제 현장에 있어서는 다소 정확도 및 정밀도가 낮은 측정장치로 인식되고 있다[1,7]. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 터치 프로브의 특성을 최대한 살린 유연한 감시 시스템을 소개한다.

2. 공구마모의 측정

부품의 치수변화의 주요 원인 중의 하나는 공구마모로서 무인화의 장애가 되고 있다. 이에 대처하기 위해 가공시스템에서 우발적인 공구 손상이 아닌 정상마모의 경우에는 공구교환 시간을 정해놓고 공구를 교환하는 방법이 사용된다. 그러나 이러한 방법을 이용할 때는 수명이 다 하지 않은 공구를 교환하거나 교환전에 가공기능을 상실한 경우가 많다. 두경우 모두 생산성 저하 및 비용상승의 중대한 요인이 된다.

공구가 마모될 때 발생하는 신호는[그림1]에서와 같이 온도, 절삭음, 절삭저항, 표면조도,



[그림 1] 공구 마모에 의해 발생하는 신호

치수변화 등으로 분류된다. 이러한 변화 요소를 이용한 공구 마모 측정 방법에는 직접 측정 방법과 간접 측정방법이 있다[1,4].

직접 측정방법으로는

- a) 광반사 또는 TV 카메라를 이용한 광학식 방법,
- b) 마이크로 메타, 터치 프로브를 이용한 소재 치수 변화로부터 공구 마모를 계속 계속하는 방법,
- c) 마이크로 메타를 이용해 공구와 소재간의 이격량으로부터 측정하는 방법이 이용되고 있다.

간접 측정방법으로는

- a) 공구 동력계를 이용한 절삭 저항의 시간적 변화로부터 마모를 예측하는 방법,
- b) AE센서를 이용한 절삭음의 주파수 분석을 통해 마모를 예측하는 방법,
- c) 가속도계를 이용한 공구와 공구대의 진동으로부터 마모를 예측하는 방법,
- d) 공구인선의 온도변화로부터 공구 마모를 예측하는 방법,
- e) 동작기계 주축 및 이송 모터의 전력 소비량으로부터 공구마모를 예측하는 방법이 있다.

그러나 어떤 방법이든 측정상에 문제가 많아 실제 현장에서 많이 이용되지 않고 있다[1].

그중에서도 현실적으로 볼 때 간접 측정에 의한 방법보다는 직접 측정에 의한 방법이 정확도에 있어서는 대단히 우수한 것으로 판단된다.

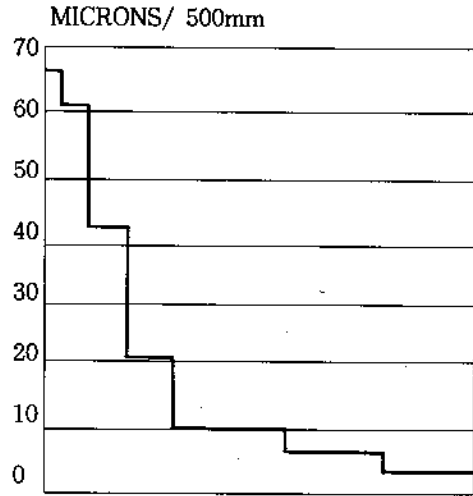
직접 측정에 의한 방법 중, 소재 치수의 변화로부터 공구 마모량을 구하는 방법으로는 터치 프로브를 이용하여 소재 치수를 측정하는 접촉식 방법, 레이저 광선 또는 초음파를 이용하여 소재 치수를 측정하는 방법이 연구되고 있다[4]. 레이저 광선을 이용한 적층 계어로서는 0.001mm까지 측정할 결과도 발표된 바 있다[1]. 그러나 후자의 두 경우는 연구실 차원에서 연구가 진행 중에 있으나 실용화는 요원한 실정이며, 자동화된 시스템에의 적용은 설치 문제와 더불어 많은 어려움이 뒤따른다. 이러한 여러 문제점으로 인하여 측정의 동향은 과거 접촉방식 대 비접촉 방식의 비율이 37 : 63이었으나 최근에는 44 : 56으로 접촉방식이 널리 활용되고 있는 추세이다[8].

3. 터치 프로브에 의한 측정

터치 프로브에 의한 측정은 1960년대 CMM에 적용된 이래 꾸준히 정확도가 개선되어 왔다. 최근에 와서는 선형 정확도가 그림2에서와 같이 약 3~4 μ m까지 개선되었다[3]. 이를 내용상으로 볼 때, 프로브에 의한 오차의 원인은 동일 방향정밀도(Unidirectional Repeatability)가 0.1~3 μ m정도이며, 프리 트래블 변화(Pre-travel variation)에 의한 오차가 3 μ m정도, 히스테리시스(Hysteresis)에 의한 오차가 0.1~3 μ m정도인 것으로 알려져 있다[6].

터치 프로브에 의한 측정의 장점으로는

- 소재가 흠이나 단차를 가진 복잡한 형상의 측정도 용이하다.



1962 1967 1972 1977 1982 1987 1992 년도

[그림 2] 터치 프로브에 의한 측정정도의 개선 추이

- 내경 측정이 용이하다.
- 전기 회로가 간단하므로 설치 비용이 저렴하고, 유지 보수가 쉽고 수명이 반 영구적이다.
- 전원전압, 온도 변화 등에 따른 영향을 받지 않는다.
- 운용 프로그램을 NC프로그램에 내장하거나 서브 프로그램화를 통해 간단해지고 준비 시간을 요하지 않는다.

단점으로는

- 터치 프로브의 오차 외에 기계 오차 즉 기계의 진동, 열적 변형, 역학적 변형 등이 측정 오차에 포함된다.

일반적으로 터치프로브를 이용하여 공구마모를 측정할 경우 공구를 이동시켜 선반의 몸체에 고정된 터치프로브를 접촉시키는 직접적인 방법과 선반 척에 고정된 터치프로브를 이동시켜 가공 완료된 소재의 치수를 측정하여 산출하는 간접적인 방법이 이용된다. 이러한 방법을 이용할 경우 소재의 열적 팽창 및 공작기계가 구동 오차 문제는 보상해 주지 않으면 안된

다. 또한 이러한 방법은 공구 파손 형태를 알지 못한다는 결점이 있다. 즉, 인선 마모와 플랭크 마모를 구별할 수는 없다.

4. 인터프로세스감시시스템

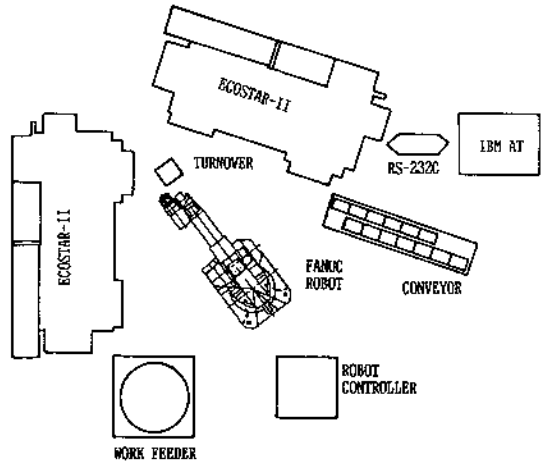
4.1. 시스템구성

터치프로브를 이용한 감시 시스템을 선삭가공 FMC에 장착하여 완성하였다. 이 FMC는 자동차 부품인 기어 블랭크(Gear Blank)를 가공하기 위한 2개의 공정을 갖는 시스템으로서 선반 2대(화천ECOSTAR-II), 부품 착탈 로봇(FANUC S-10), 소재공급장치, 소재 이송 팔레타이징(Palletizing)용 컨베이어, 2개의 공정간 연계를 위한 반전장치(Turnover)등으로 이루어져 있다. 감시기능을 추가하기 위해 2차 공정 선반에 컴퓨터(IBM-AT)를 연결하였다. 시스템 구성도가 그림3에 나타나 있다.

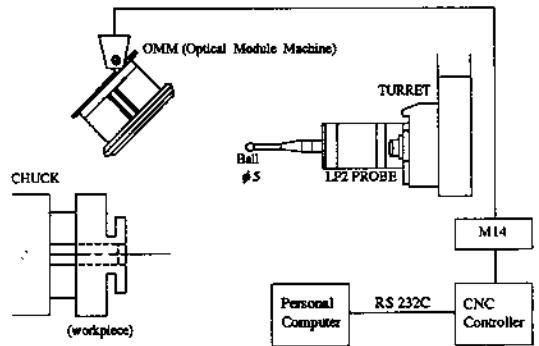
부품 측정을 위한 터치프로브는 2개 공정을 완료한 후 부품의 치수를 측정하기 위해 2차 공정 선반에 설치하였다. 터치프로브 시스템과 FMC와의 결합관계는[그림4]에 나타나 있다. 여기에 사용한 터치 프로브는 레니쇼유(Renishaw)제품으로서 규격은 다음과 같다.

- Trigger probe : LP2
- Interface unit : MI 4
- Stylus extension : 50mm
- Ruby ball stylus : 5mm
- Optical data transmission

터치 프로브는 척에 물려져 있는 가공 완료된 소재의 치수를 측정하며 측정치를 광학방식(Optical transmission)으로 OMM(Optical Modular Machine)과 MI 5 Interface unit를 통하여 NC 콘트롤러로 전달된다. NC 콘트롤러 내에서는 커스텀 매크로 (Custom macro)를 이용하여 측정위치로의 터렛의 이동, 데이터의 전송



[그림 3] 선삭 자동화 셀 구성도



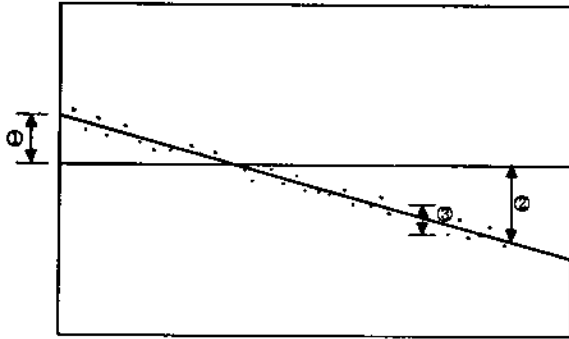
[그림 4] 터치 프로브의 설치도

및 공구마모량을 측정하여 공구의 오프셋량을 보정해 부고 그 데이터를 RS-232C를 통해 퍼스날 컴퓨터로 전송한다. 퍼스날 컴퓨터에서는 이 데이터를 그래프로 나타내며 공구의 마모 정보와 부품에 대한 치수정보를 저장하여 공구 교체시기와 부품에 대한 품질을 관리 할 수 있게 되어 있다.

4.2. 감시시스템의 오차 특성

터치프로브를 이용하여 측정할 경우[그림 5]에서와 같이 3가지 오차가 존재한다.

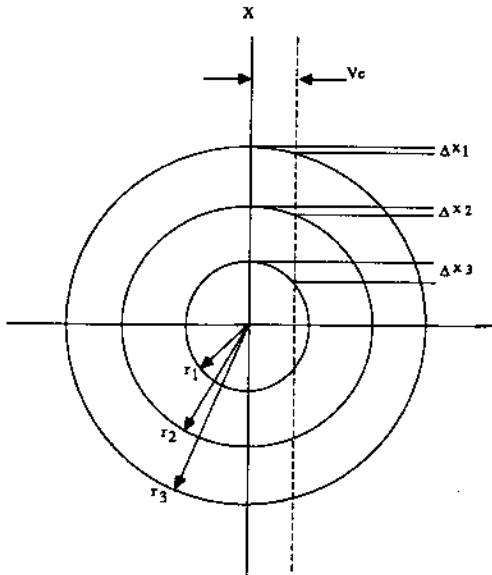
- 1)터치프로브를 설치시의 위치 오차(Position error)



- ① 위치오차(position error)
 - ② 정확도 오차(accuracy error)
 - ③ 반복 정밀도 오차(repeatability error)
- [그림 5] 터치 프로브의 오차의 종류

치 프로브의 볼이 X축 중심으로부터 V_e 만큼 편심이 되어 있다고 한다면, 터치 프로브 볼의 직경을 무시한다 하더라도 V_e 의 편심량에 대해 소재의 반지름 r 이 변함에 따라 측정 결과는 $\Delta x_i = r_i - \sqrt{r_i^2 - V_e^2}$ 만큼의 오차가 발생하게 된다.

따라서 동일 Z위치에 서로 다른 직경을 하나의 보정치로 보정한다면 직경이 작아질수록 그 오차는 상대적으로 커진다. 따라서 터치프로브를 운용할 경우에는 각 측정 위치에 대한 터치프로브의 보정치를 각각 설정해야 한다. 일반적으로 가공완료된 소재를 척에 물린 상태에서 터치프로브로 반복적으로 한 점을 측정 후 평균치와 실제치의 차이를 보정치로 사용한다.



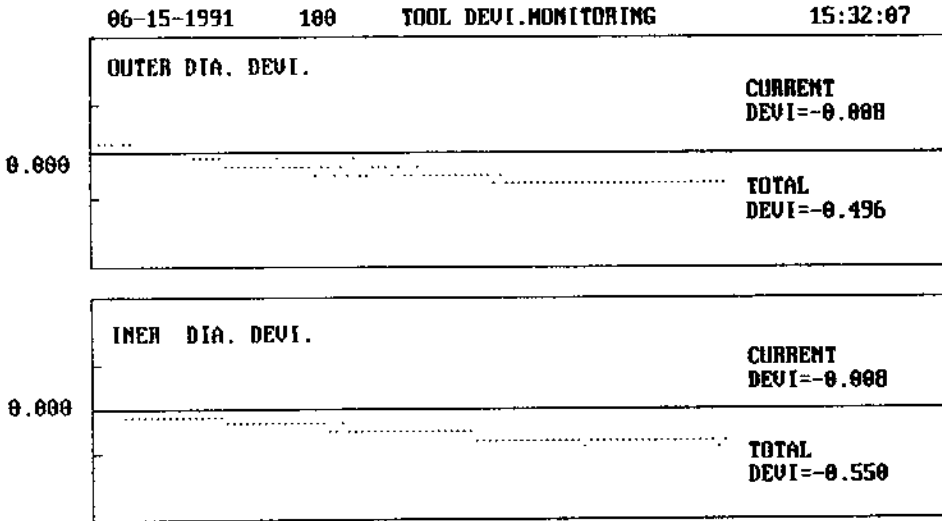
[그림 6] 소재직경 변화에 따른 위치 오차 (Position error)의 영향

- 2) 열변형 및 기계특성에 의한 정확도오차 (Accuracy error)
- 3) 터치프로브에 의한 정밀도오차 (Repeatability error)

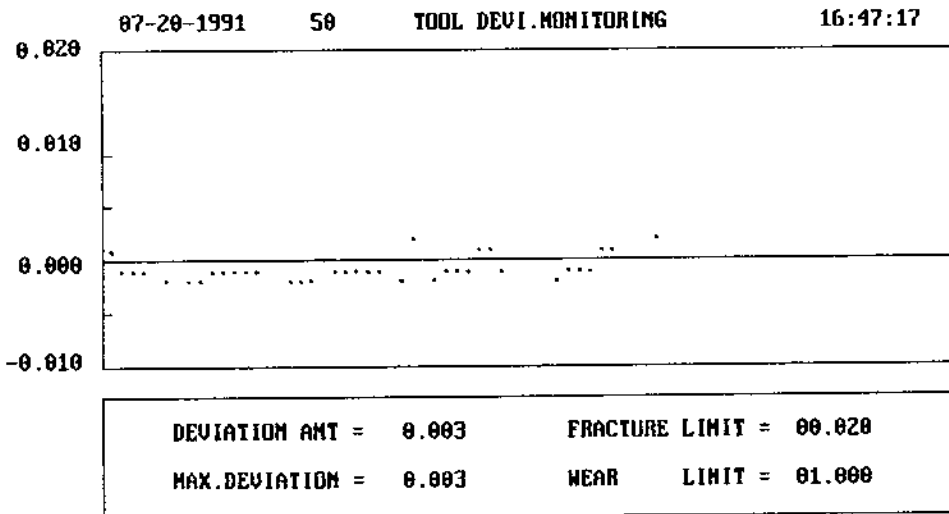
터치프로브는 선반의 터렛에 설치하기 때문에 이로 인한 위치 오차(Position error)가 있을 수 있다. 예를 들어, [그림6]에서와 같이 터

정확도오차(Accuracy error)와 정밀도오차(Repeatability error)는 기계의 진동, 온도변화, 역학적 변형에 의한 오차와 프로브자체의 오차로 복합되어 나타난다. 프로브의 오차는 전술한 바와 같이 0.1~3 μ m 정도로 알려져 있으나 기계오차는 구성되는 시스템에 따라 달라진다.

그림 7은 소재의 외경과 내경을 반복 측정한 결과이다. 그림을 살펴 보면, 횡수가 증가할수록 측정치가 감소하는 정확도오차를 갖는 경향이 나타나며, 약 60회 이후부터는 8 μ m로서 안정되어 가는 것을 알 수 있다. 이의 원인은 터치 프로브가 설치되어 있는 터렛을 구동시키는 X이송축의 구조에 있다. 즉 X축의 이송 구조는 한 부분은 볼 베어링과 트러스트 베어링이 조합되어 있으나 다른 한 부분은 볼 베어링만으로 된 종축으로서 자유단으로 구성되어 있다. 따라서 볼 나사와 너트 사이에 구동 발열 때문에 볼 나사는 선행창을 일으켜 한 쪽 방향으로 늘어나게 되는 것이다. 그러므로 터치 프로브의 운용시 이러한 경향은 반드시 보상해 주어야 한다. 실험 결과 [그림7]에 나타난 오차



[그림 7] 기계적 특성 및 작업환경에 의한 측정치의 변화 예



[그림 8] 보상을 행한 후의 측정 결과

의 주요 원인이 터렛 구동부의 발열에 의한 것으로서 기계가동 후라도 3분 정도의 운전 중지 후에는 이러한 경향이 다시 나타난다는 것이 확인되었다.

이러한 정확도 오차를 보상하는 방법으로서 [그림7]에 나타난 측정 데이터를 회귀분석(Regression)을 통해 함수화하여 이를 터치 프로브 측정치 분석시에 반영하였다. 측정 데이터가 회수가 반복될 수록 한 값으로 접근하는 경향을 보이므로 비선형인 지수함수로 Curve fitting 하였다. Gauss-Newton 방식[5]을 이용하여 얻은 함수는 $Y = -0.01447\{1 - \text{EXP}(-0.00942X)\}$ 이다. 여기서 X는 반복횟수, Y는 위치 오차를 나타낸다. 표1에 나타난 바와 같이 이 함수의 ANOVA table과 Correlation matrix는 추정 함수가 유의함을 보여주고 있다. 이 방법을 이용해 보정한 결과[그림8]과같이 4 μm 이내의 정밀도 오차가 도출되었다.

표1. Gauss-Newton 방식에 의한 회귀분석 결과
ANOVA Table

구분	자유도	Sum of Squares	Mean Spueare
Regression	2	0.003359	0.001679
Residual	99	0.000113	0.000001
Total	101	0.003472	

Asymtotic Correlation Matric
[$Y = B0\{1 - \text{EXP}(-B1 \cdot X)\}$]

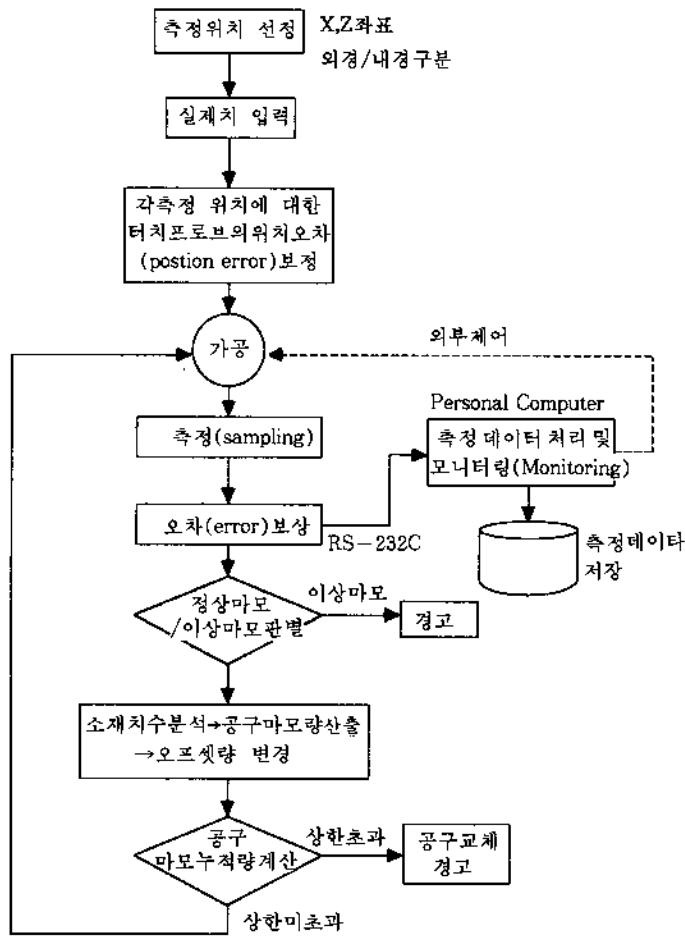
	B0	B1
B0	1	0.9937
B1	0.9937	1

4.3. 감시시스템의 운용 소프트웨어

본 감시시스템에서 사용되는 소프트웨어는 [그림9]에서와 같은 정보의 흐름으로 구성되어 있다. 커스텀 매크로 측정 프로그램에 측정하고자 하는 위치 정보(측정위치의 X,Z좌표, 외, 내경 구분) 및 측정횟수를 입력하고 나면 자동으로 터치 프로브의 각 측정위치에 대한 위치 오차를 보정해 준다. 즉, 우선 1개의 부품을 가공한 후 척에 고정시킨 상태에서 입력된 측정 위치를 여러번 측정하여 평균값을 구한다. 본 모듈에서는 측정횟수를 10회로 하였다. 측정이 끝나면 가공된 부품의 측정위치에 대한 실제치를 측정하여 이를 입력시킨다. 측정 평균값과 실제치와의 차이를 터치프로브의 위치보정량으로 정한다.

터치프로브의 위치오차 보정이 끝나면 가공에 들어간다. 가공 후 검사가 이루어지는데 이때 이 감시시스템은 전량을 검사 하는 것이 아니라 주기적인 샘플링 검사를 하게된다. 검사 횟수가 적으면 불량 발생 가능성이 높아지고 치수관리가 어려워진다. 검사횟수가 많아지면 사이클 타임(cycle time)이 증가해 비경제적이 된다. 실험결과 하나의 치수를 검사하는데 약 12-15초가 소요되었다. 검사횟수를 정하는 것은 소재 및 공구의 특성, 부품의 허용공차, 생산비용 등을 고려하여 결정하여야 할 것이다.

이렇게 측정된 데이터는 정확도 오차를 앞에서 추정한 함수를 이용하여 보정한후 이를 PC에 전송하여 그래픽으로 보여준다. 이와 동시에 가공물의 각 측정위치에 대한 측정 데이터를 데이터 파일로 저장함으로써 각 가공물에 대한 치수이력을 보존한다.[그림8]은 컴퓨터 화면에 나타난 보상된 데이터의 예를 보여주고 있다. DEVIATION AMT는 마지막 측정치의



(그림 9) 감시 시스템의 흐름도

오차량이며, MAX DEVIATION은 측정치중 가장 큰 오차량이다. FRACTURE LIMIT는 공구의 이상마모로 간주하는 기준으로서 연속 5회 동안의 측정치가 그 전 측정치와 20 μ m이상의 차이를 보이면 공구마모에 이상이 있음을 알려주는 데 이용된다. 이 기준은 경험적으로 설정한 것으로서 더 정확한 기준을 위해서는 공구의 이상마모 실험을 통하여 결정하는 것이 바람직하다. WEAR LIMIT는 공구의 허용마모량을 나타내며 누적된 공구 마모량이 이 수치를 벗어나면 공구를 교체하여야 한다. NC에서는

커스텀 매크로 기능을 이용하여 이러한 측정 데이터로부터 공구 마모량을 산출하여 공구의 오프셋량을 자동적으로 수정한다. 이때 매 측정마다 얻어진 마모량은 누적시킴으로써 누적 마모량이 공구마모 상한치 또는 허용공차에 근접하면 공구 교체 메시지를 보낸다.

5. 결 론

종래의 절삭 가공 시스템에서는 각 동작기에 작업자가 배치되어 있어서 작업자가 동작기

계의 운전, 제어, 공작물의 착탈 등을 하는 고도의 숙련과 풍부한 경험에 의해 공구의 가공기능을 감시, 공구 교환을 행하여 왔다. 자동화가 잘 이루어진 전용라인에서는 부품 종류가 거의 변하지 않아 철저한 가공 실험을 실시해 공구 수명 등의 가공 성능에 관한 데이터를 수정하기가 용이하나 FMS나 FMC에서는 부품의 종류가 자주 바뀌고 룯드 사이즈도 작기때문에 가공실험을 전부 하기에는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 측정환경에 높은 유연성과 다양성 및 가격적인 장점을 가지고있는 터치 프로브를 이용하여 선삭용 FMS나 FMC에 적합한 감시 시스템을 구성하였다. 이러한 측정/검사 시스템을 운용함으로써 공구의 자동 보정은 물론 균일한 치수의 부품가공이 가능해지며 각 가공부품의 치수정보관리를 통해 품질관리가 용이하게 된다.

터치프로브에 의한 측정방식은 측정 오차가 다소 큰 것으로 인식되고 있으나 여기서 제시된 회귀분석을 이용한 정확도 보정 방식을 이용할 경우 상당히 정밀한 측정치를 구할 수 있다. 그러나 정확도 오차의 경우 현장 작업환경에 영향을 받으므로 환경변화에 따른 보정량 예측이 필요하다. 정밀도의 경우, 사용하는 선반의 기계적 특성에 의해 다소 차이가 나므로 이의 허용범위를 설정하여줌이 바람직하다. 일반적으로 측정을 목적으로 사용할 경우 이 정도까지 정밀할 필요는 없다. 이러한 점들에 대해서는 더 연구해야 할 사항으로 남아 있다.

참고문헌

[1] Dan, L., Mathew, J., "Tool wear and failure monitoring techniques for turning—a review," *Int. Mach. Tools Manufact.* Vol. 30, No. 4, PP579~598, 1990.

[2] El Gomayel, J. I., "On-line tool wear sensing for turning operations," *Transactions of the ASME*, Vol. 108, PP44-47, Feb. 1986.

[3] Kreuci, James V., "CMM measurement enhancement using probe compensation algorithms," *SME Technical paper* MS90-09, 1990.

[4] Micheletti, G.F., Koenig, W., Victor, H.R., "In-Process tool wear sensors for cutting operations," *Annals of the CIRP* Vol.25/2, PP483~495, 1976.

[5] Neter, J., Wasserman, W., Kutner, M.H., *Applied Linear Regression Models*, Richard D. Irwin, Inc., 1983.

[6] Traylor, A., "Performance characteristics of touch trigger probes," *SME Technical paper* MS90-266, 1990.

[7] 澤邊雅二, "日本の精密測定技術の動向," *機械技術*, 第35卷, 第13號, PP 5~10, 1987.

[8] 白石昌武, "イソライソ 測定の動向と課題," *機械技術*, 第38卷, 第11號, PP 18~25, 1990.