

# 접촉식 측정시스템에 의한 공작물의 자동인식 및 오차보상

신 동 수 \* (한양대 대학원), 정 성 중 (한양대 공대)

D.S. Shin \* (Graduate School of Hanyang Univ.), S-C. Chung (Hanyang Univ.)

**Key Words :** Modification Rule by Indexing Table (인덱싱테이블 수정론), Modification Rule by NC Program (NC 프로그램 수정론), Touch Trigger Probe (접촉식센서), Probe Calibration (프로브 보정), User Macro (유저마크로)

**ABSTRACT :** In order to minimize fixing error of workpieces, prismatic and cylindrical types, Modification Rule by Indexing Table and Modification Rule by NC Program are developed for machining centers by using touch trigger probes. The Modification Rule by Indexing Table means the alignment of workpiece to NC program through degree of freedoms of indexing table. The Modification Rule by NC Program is the alignment of NC program to workpiece set-up condition via the generation of NC program. A postprocessing module is also developed for generating NC-part program (User Macro) to compensate for machining errors in end milling and boring processes. Developed methods are verified by experiments.

## 1. 서론

산업의 발전으로 정밀가공기술의 개발에 대한 요구가 급증하고 있으며, 특히 고정대 (Jig & Fixture) 에 의한 공작물의 위치선정 (Location) 문제는 가공후 생산품의 정밀도와 직접 관계되는 중요한 요인이기 때문에 가공전 공작물의 장착정도 (Fixing Accuracy) 를 정확하게 규명할 필요가 있다.<sup>(1,2)</sup>

본 논문에서는 공작물의 설치면, 구멍, 평면, 원통, 구면 및 자유곡면 (Sculptured Surface)<sup>(3)</sup> 등에 가장 기본이 되는 형상인 직육면체와 원통의 인식 및 위치오차 보정에 관하여 연구하였다. 공작물의 잘못된 장착위치를 인덱싱테이블 (Indexing Table) 의 조절이나 NC 프로그램의 변경을 통하여 수정할 수 있는 인덱싱테이블 수정론과 NC 프로그램 수정론을 개발하였다. 또한, 엔드밀 작업이나 보링 작업시에 올바른 NC 프로그램을 생성할 수 있는 포스트프로세싱 (Postprocessing) 방법론을 개발하였고 실험을 통하여 그 타당성을 증명하였다.

## 2. 본론

### 2.1 기하학적 오차의 수학적 모형화

공작기계 상의 장착된 공작물의 위치를 인식하기 위하여는 공작기계의 기구학적 연쇄기구들의 수학적인 모형화가 필요하다.<sup>(4)</sup> 본 논문에서는 수평 머시닝센터를 대상 공작기계로 하였고, 모형화를 위하여 공작기계의 각 요소에 좌표축을 설정하여 좌표계에 대한 동차변환행렬을 구축하였다.<sup>(5)</sup> Fig.1 은 대상 공작기계와 그의 좌표계의 정의를 보여준다. Fig.2 는 공작기계 각 요소들 사이의 기구학적 연쇄 (Kinematic Chain) 를 보여준다. 형상치수는 TABLE. 1 에 나타내었다.

TABLE 1. Shape Dimensions

l <sub>t1</sub>	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	l <sub>4</sub>	l <sub>5</sub>	l <sub>p</sub>
152.4	203.2	254.	254.	127.	-127.	101.6

Fig.2 에서 공작물의 이상적인 위치는 식 (1) 이 되고, 공작물의 실제적 위치행렬은 식 (2) 가 된다.

$${}^wC[WP]_{ideal} = [PAL] [MNT] [PART] \quad (1)$$

$${}^wC[WP]_{act} = [PAL] [MNT] [PART] [ERR] \quad (2)$$

가공오차를 줄이기 위한 공작물의 이상적인 보정행렬은 식 (3) 이 된다.

$${}^wP[ALIGN]_{des} = [ERR]^{-1} [PART]^{-1} [MNT]^{-1} [PAL]^{-1} [ZCAR] [XCAR] [HEAD] [TOOL] [TILT] \quad (3)$$

식 (3) 을 역기구학적 방법론<sup>(6)</sup> 을 이용하여 식 (4) ~ (9) 를 구한다.

$$\theta_{21} = \tan^{-1} [-a_y/a_z] \quad (4)$$

$$\theta_{22} = \tan^{-1} [a_y/-a_z] \quad (4)$$

$$\theta_{11} = \tan^{-1} [ -a_x / (-S_2a_y + C_2a_z) ] \quad (5)$$

$$\theta_{12} = \tan^{-1} [ a_x / (S_2a_y - C_2a_z) ] \quad (5)$$

$$\theta_{31} = \tan^{-1} [ (C_2n_y + S_2n_z) / (C_2o_y + S_2o_z) ] \quad (6)$$

$$\theta_{32} = \tan^{-1} [ -(C_2n_y + S_2n_z) / -(C_2o_y + S_2o_z) ] \quad (6)$$

$$Y = C_2p_y * S_2p_z - l_5 C_2 + l_4 S_2 + l_2 + l_p \quad (7)$$

$$X = S_1 (-S_2p_y + C_2p_z + S_2l_5 + C_2l_4) + C_1 (p_x - l_3 + l_1) \quad (8)$$

$$Z = C_1 (-S_2p_y + C_2p_z + S_2l_5 + C_2l_4) - S_1 (p_x - l_3 + l_1) + l_{t1} \quad (9)$$

여기서,  $n_x, n_y, n_z$  : [ALIGN]의 X 축 회전벡터성분  
 $O_x, O_y, O_z$  : [ALIGN]의 Y 축 회전벡터성분  
 $a_x, a_y, a_z$  : [ALIGN]의 Z 축 회전벡터성분

식 (4) ~ (9) 에 의하여 6 개의 변수 ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, X, Y, Z$ ) 를 구한다. 식 (4) ~ (9) 는 인덱스테이블 수정론을 적용하기 위한 것으로 Fig. 1 에 제시된 좌표계에 대한 6 개 자유도 성분을 나타낸다.

## 2.2 인덱스테이블 수정론

인덱스테이블 수정론은 기하학적 오차의 수학적 모형화를 토대로 공작물의 잘못된 장착조건을 식 (4) ~ (9) 로 구한 변수를 이용하여 작업자가 인덱스테이블의 장착조건을 수정하여 기계자체의 운동으로 가공오차를 줄이기 위한 방법론이다.

## 2.3 NC 프로그램 수정론

NC 프로그램 수정론은 인덱스테이블을 수정하지 않고 장착위치 오차를 갖는 실제 기계 좌표계와 공작물 좌표계사이의 관계를 통하여 NC 프로그램을 수정하는 방법론이다. Fig. 1 에서 공작물 좌표계와 기계 좌표계사이의 관계는 식 (10) 으로 나타난다.

$$\begin{Bmatrix} X_{mc} \\ Y_{mc} \\ Z_{mc} \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{matrix} mc \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{Bmatrix} \\ WP \\ \\ \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{wp} \\ Y_{wp} \\ Z_{wp} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기에서, 식 (1) 과 식 (2) 에서

$$\begin{aligned} mc[WP]_{ideal} &= [PAL] [MNT] [PART] \\ mc[WP]_{real} &= [PAL] [MNT] [PART] [ERR] \end{aligned} \quad (11)$$

[PAL] 은  $\theta_1$  의 함수이고, [MNT] 는  $\theta_2$  의 함수이다.

식 (10) 을 이용하여 식 (12) 를 유도한다.

$$\begin{Bmatrix} X_{wp} \\ Y_{wp} \\ Z_{wp} \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{matrix} mc \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{Bmatrix} \\ WP \\ \\ \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} X_{mc} \\ Y_{mc} \\ Z_{mc} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

식 (11) 의 관계를 이용하여, 실제의 기계 좌표계와 공작물 좌표계와의 관계를 구하면 식 (13) 과 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} X_{wp}(n) \\ Y_{wp}(n) \\ Z_{wp}(n) \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{matrix} mc \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{Bmatrix} \\ WP \\ \\ \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{mc}(n) \\ Y_{mc}(n) \\ Z_{mc}(n) \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

따라서 식 (12) 와 식 (13) 을 종합하면 식 (14) 가 된다

$$\begin{Bmatrix} X_{mc}(n) \\ Y_{mc}(n) \\ Z_{mc}(n) \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{matrix} mc \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{Bmatrix} \\ WP \\ \\ \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} X_{wp}(n) \\ Y_{wp}(n) \\ Z_{wp}(n) \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

식 (14) 는 NC 프로그램 수정론을 표현한 것이다.

## 2.4 실험

본 논문에서는 육면체와 원통의 인식 및 위치오차보정을 위한 실험을 하였다. 사용된 실험장비는 수평형 머시닝센터 (화천기공, HMC-500), 터치프로브 (Renishaw, LP2), IBM-PC/386 및 RS232C 인터페이스 장치 등을 사용하였고, 측정에 사용된 터치프로브는 400 mm/min 의 측정속도와 95% 신뢰구간에서  $\pm 0.5 \mu m$  의 측정정도를 가진다.<sup>[6]</sup> Fig. 3 은 실험을 위한 전체적인 개략도를 나타낸다.

### 2.4.1 프로브 시스템의 구성

평면 측정과 원통측정으로부터 원하는 위치정보를 검출하기 위하여 터치프로브를 사용하였다. 프로브의 동작은 측정침이 어떤 물체에 접촉하면 유도형 인터페이스를 거쳐서 NC 장치로 트리거링 (Triggering) 신호가 전달되고, 이 트리거링 신호가 전달되면 NC 장치의 시스템 변수 #5061, #5062, #5063 의 장소에 측정된 X, Y 및 Z 축 위치정보가 저장된다. 저장된 정보는 COMMON 변수로 전환된 뒤 RS232C 를 통하여 컴퓨터로 전송된다.<sup>[7]</sup>

### 2.4.2 스타일러스 보정

공작기계상에서 터치 프로브로 측정된 결과, 얻어진 데이터는 여러개의 스타일러스를 사용할때 그들사이의 기하학적 관계로 인하여 원하는 데이터값을 측정하지 못한다. 이러한 오류를 없애기 위하여 프로브 보정 (Probe Calibration) 이 필요하게 된다. 본 논문에서는 직경 30 mm 의 마스타구 (Master Ball) 를 이용하여<sup>[6]</sup> Fig. 4 에 보여지는 측정침 1 에 대한 2, 3, 4, 5 측정침의 상대적인 위치를 Fig. 4 와 같이 정의하였다. 프로브 보정후, 육면체와 원통의 위치인식과 위치오차 보정에 관한 실험을 수행하였다.

### 2.4.3 세개의 평면 측정

머시닝센터의 테이블에 놓여있는 직육면체 면들이 정밀하게 가공되었다고 가정한다. Fig. 4 에서 측정침 1, 4, 5 를 사용하여 측정하였다. 측정을 위하여 직육면체 (151 x 97 x 95) 에 격자 (Grid) 를 각 평면에 대하여 (20 x 10) 200 개를 자르고, 각각의 데이터를 RS232C 케이블로 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 데이터는 3 차원을 2 차원으로 바꾸는 알고리즘에 넣어 그리픽과 식 (15) 를 이용하여 최소 자승법으로 각각의 기계 좌표계에 대한 회전각을 제시하였다.

$$\begin{Bmatrix} \sum X^2 & \sum XY & \sum X \\ \sum XY & \sum Y^2 & \sum Y \\ \sum X & \sum Y & \sum 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ d_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sum XZ \\ -\sum YZ \\ -\sum Z \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Fig. 5 는 측정결과이다. 이 회전량은 고정대의 원에 의한 장착위치 오차에서 비롯되었다. 결과에서 식 (15) 를 이용, 공작물의 위치인식을 수행하였고, 식 (11) 을 이용하여 위치오차 보정을 하였다. 식 (14) 를 이용하여 NC 프로그램을 생성하였다. 결과인 오차행렬과 NC 프로그램을 TABLE. 2 에 나타내었다.

#### 2.4.4 실린더 면 측정

실린더의 고정 부분과 만들이 정밀 가공되었다고 가정한다.  $\phi$  70, 길이 170 mm인 실린더를 사용하였다. Fig. 3 에서 측정칩 2, 3, 4, 5 를 사용하여 측정하였다. 실린더 모델의 Explicit 해를 구하기 위해 공간상의 실린더 좌표축을 식으로 나타내면 식 (16) 이 된다.<sup>[2]</sup>

$$\frac{X-x_0}{a_1} = \frac{Y-y_0}{a_j} = \frac{Z-z_0}{a_k} \quad (16)$$

$z_0 = 0$  이고  $\gamma$  가 0 에서 5 도 사이라고 가정한다면  $a_k > 0$  이고, 간략하게 식 (17) 이 된다.

$$\begin{aligned} X &= a_1 Z + x_0 \\ Y &= a_2 Z + y_0 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,  $a_1 = a_1 / a_k$   
 $a_2 = a_j / a_k$   
 $\gamma$  는 X 축 회전각

식 (17) 을 식 (18) 과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} e_{x,i} &= (X_i - a_1 Z_i - x_0) \\ e_{y,i} &= (Y_i - a_2 Z_i - y_0) \\ T_e &= \sum_{i=1}^n (e_{x,i}^2 + e_{y,i}^2) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18) 을 최소자승법을 이용하여 해를 구하면 식 (19) 가 된다.

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{n \sum X Z - \sum X \sum Z}{n \sum Z^2 - (\sum Z)^2} \\ x_0 &= \frac{\sum X - a_1 \sum Z}{n} \\ a_2 &= \frac{n \sum Y Z - \sum Y \sum Z}{n \sum Z^2 - (\sum Z)^2} \\ y_0 &= \frac{\sum Y - a_2 \sum Z}{n} \end{aligned} \quad (19)$$

Fig. 6 은 측정한 결과이다. 공작물 좌표계가 기계 좌표계에 대해 회전량을 가지고 있음을 알 수 있다. 결과에서 식 (15) 를 이용, 공작물의 위치인식을 수행하였고, 식 (11) 을 이용하여 위치오차 보정을 하였다. 식 (14) 를 이용하여 NC 프로그램을 생성하였다. 결과인 오차행렬과 NC 프로그램을 TABLE. 3 에 나타내었다.

#### 2.5 소프트웨어의 구성

주 프로그램은 인터페이스, 평면데이터 처리, 실린더

데이터 처리, 그래픽, 포스트프로세싱 작업으로 구성 되어 있다.

##### 2.5.1 인터페이스 (Interface)

평면과 실린더를 측정하기 위한 NC 프로그램 전송, 터치프로브에서 측정된 데이터를 마이크로 컴퓨터 ( $\mu$ -computer) 로 수신하고, 필요한 파라미터와 프로그램 통신하는 데 이용한다.<sup>[10,11]</sup>

##### 2.5.2 포스트프로세싱 (Postprocessing)

알기 쉬운 명령어로 구성되어 NC 코드를 전혀 모르는 비전문가도 손쉽게 화일처리만 하여주면 NC 프로그램을 생성할 수 있도록 하였다. 공작물의 장착위치 인식으로 데이터를 만들고, 방향벡터를 이용하여 가공공정에 필요한 함수를 생성시킨다. 이러한 변환과정을 거쳐 원하는 가공물을 생산하기 위한 유저마크로 (User Macro) NC 프로그램을 형성시킨다.

### 3. 결론

1) 터치 프로브의 기하학적인 보정을 할 수 있는 알고리즘과 인터페이스 프로그램을 개발하였다.

2) 2 개 회전성분에 의하여 장착위치오차를 보정 할 수 있는 인덱스테이블 수정론을 개발하였다.

3) 실험을 통하여 프로브 시스템에 의하여 측정된 데이터로부터 공작물의 장착위치를 인식하고, 인식된 위치 오차의 보정으로 공작물의 장착오차를 정확하게 보상하는 NC 프로그램 수정론을 개발하였다.

그리고 5 축이상의 다른 종류의 공작기계에서도 기하학적 오차의 수학적 모형화를 수정하면 NC프로그램 수정론 적용이 가능하다.

#### 참고 문헌

1. 정성중, "공작기계의 적응제어 기술의 개발동향", 공작기계 자동화 기술 특별 세미나 초록집, 한국 정밀 공학회, pp. 68-76, 1988
2. D.Noller, M.M.Barash and A.L.Sweet, "AUTOMATED DETECTION AND ERROR COMPENSATION OF NC WORKPIECE POSITION", Schools of Industrial, Electrical, and Mechanical Engineering Purdue University West Lafayette, Indiana 47907, March, 1985
3. K.C.Sahoo, Chia-Hsiang Menq, "Localization of 3-D Objects Having Complex Sculptured Surfaces Using Tactile Sensing and Surface Description", Journal of Engineering for Industry, Vol.113/85, February, 1991
4. Placid M.Ferreira, C.Richard Liu, "An Analytical Quadratic Model for the Geometric Error of a Machine Tool", Journal of Manufacturing Systems, Volume 5/No.1/1986
5. Richard P.Paul, "Robot Manipulators", The MIT Press
6. Renishaw Data Sheet
7. Fanuc O-M Series Operator's Manual
8. Karl Zeiss Manual
9. M.S.SHUNMUGAM, "On assessment of geometric errors", INT. J. PROD. RES., VOL.24, NO.2, 413-425, 1986
10. 가남사편집부 편, "RS232C 인터페이스 사용법",

가남사, 1990

11. 가남사편집부 편, " RS232C 인터페이스 응용사례집 ", 가남사, 1990

12. H. Aoyama, Tomakomai National College of Technology/Japan; M. Kawai, Nikon Corporation/Japan; T. Kishinami, Hokkaido University/Japan, " A New Method for Detecting the Contact Point between a Touch Probe and a Surface ", Annals of the CIRP, Vol.38/1/1989

13. N. Anhari, Syria ; Ch. Beck , H. Trumpold, TU Karl-Marx-Stadt, " The Influence of Surface Roughness in Dependence of the Probe Ball Radius with Measuring the Actual Size ", Annals of the CIRP, Vol.39/1/1990

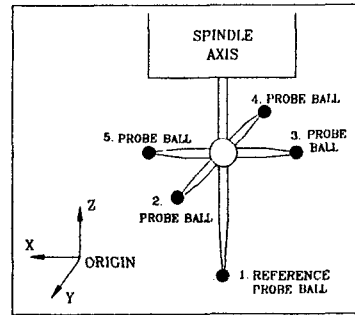


Fig.4 Probe Configuration

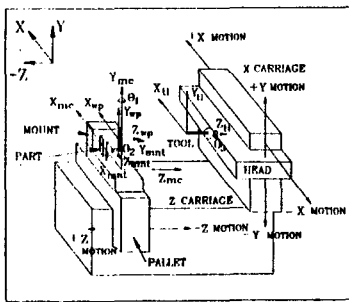


Fig.1 Machine Tool and Definition of Coordinate System

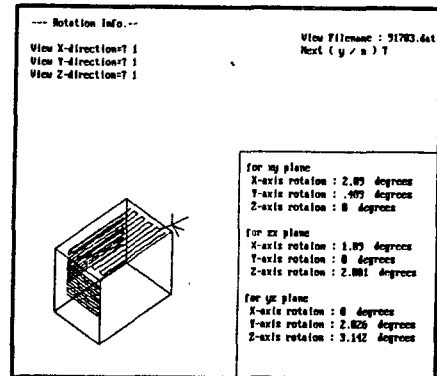


Fig.5 Rotating Value for Prismatic Type Measuring

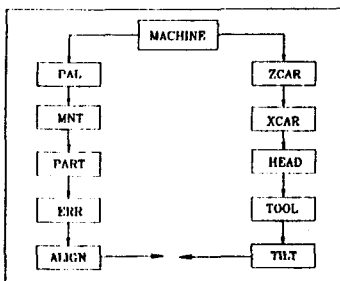


Fig.2 Kinematic Chain of Machine Tool

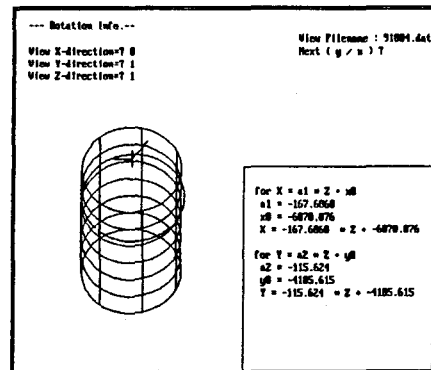


Fig.6 Rotating Value for Cylindrical Type Measuring

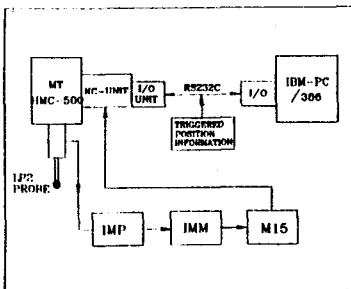


Fig.3 Total Schematic Diagram for Measuring

TABLE 2. Results for Prismatic Measuring

```

The matrix [ERR] =
0.996190 0.000000 -0.087203 0.200930
0.000000 1.000000 0.000000 0.099918
0.087203 0.000000 0.996191 -0.100040
0.000000 0.000000 0.000000 1.000000

: 1
G91G28Y0.
G28Z0.X0.
G01X-469.390Y-240.575F1000
G01Z-280.223F1000
G92X0.Y0.Z0.
G01X6.863Y-8.083Z-13.34F200
G01X75.493Y-8.083Z-12.466F200
G01X137.26Y-16.166Z-11.682F200
. . . . .
G01X89.219Y-72.747Z-13.024F200
G01X123.534Y-80.83Z-11.696F200
G01X54.904Y-80.83Z-12.566F200
G01X6.863Y-80.83Z-13.186F200
G91G28Y0.
G28Z0.X0.
M30
    
```

TABLE 3. Results for Cylinder Measuring

```

The matrix [ERR] =
0.996203 -0.000007 -0.087060 1.561370
0.000000 1.000000 0.000000 -19.000433
0.087060 0.000086 0.996203 0.019115
0.000000 0.000000 0.000000 1.000000

: 2
G91G28Y0.
G28Z0.X0.
G01X-357.696Y-260.464F1000
G01Z-323.035F1000
G92X0.Y0.Z0.
G01X26.823Y24.4Z-36.226F200
G01X33.678Y13.675Z-36.226F200
G01X36.499Y1.975Z-36.226F200
. . . . .
G01X-17.304Y32.739Z-36.23F200
G01X0.729Y36.545Z-36.23F200
G01X11.946Y34.306Z-36.23F200
G01X24.621Y26.611Z-36.23F200
G91G28Y0.
G28Z0.X0.
M30
    
```