

## Grid Encoder를 이용한 NC공작기계 동적정밀도 측정에 관한 연구

이찬호\*, 이방희\*\*, 김성청\*\*\*

### A Study on Measurement of Dynamic Accuracy Using Grid Encoder in NC Machine Tools

Chan Ho Lee\*, Bang Hee Lee\*\*, Sung Chung Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

Efficient development of method on a performance evaluation for machine tools has been regarded as the most important work for accuracy and quality enhancement to every user and manufacturer. A evaluation method of accuracy for machine tools has been studied recently according to the rapid increase of interest in precision machine tools. To this point of view, the circular interpolation test of machine tools is recognized as the most useful method to distinguish a dynamic accuracy of NC machine tools by ISO and ANSI/ASME, etc.

In this paper, we have studied and developed the form measurement system with grid encoder to analyse the final accuracy of NC machine tools. we have analyzed the servo system error and geometric error of NC machine tools through measuring a dynamic error signal by this system. and then we verified the experimental result and enhanced the reliability by means of comparing the characteristics of the developed system with the kinematic ball-bar system.

**Key Words** : Circular interpolation test (원호보간시험), Dynamic accuracy (동적정밀도), Form measurement system (형상측정시스템), Grid encoder (그리드 엔코더), Kinematic Ball-bar (기구학적볼바)

#### 1. 서론

최근 산업계에서는 기계요소의 크기가 마이크로 미터( $\mu\text{m}$ ) 단위를 가지며, 크기의 소형화와 더불어 가공정밀도의 향상에 대한 요구가 한층 증가되고 있다. 이러한 요구에 부응하여 CNC 수치제어장치의 정밀도는 비약적으로 향상되어 왔다. 대표적으로 CNC 공작기계의 2축 동시 제어 윤곽가공 정밀도는 기계, 드라이버, 제어시스템의 역학적 편차에 의해 결정된다. 윤곽가공 정밀도를 평가하는 방법으로는 ISO/DIN 230-4에 기술되어 있는 원호보간 테스트가 기계의 상태와 서보제어 시스템의 특성, 드라이브의 파라미터 셋팅 등에 따른 오차를 측정할 수 있는 기본적이고, 간단한 방법으로 알려져 왔다. 이러한 원호보간 테스트를 수행할 목적으로 기구학적 볼바

(kinematic ball-bar)는 그 구조와 사용의 간편함으로 인해 널리 사용되었다. 그러나 일반적으로 서보특성에 따른 동적오차는 작은 반경에 높은 각속도를 가진 원호보간 테스트에서 가장 잘 보이는 것으로 알려져 있다.

기구학적 볼바는 구조적으로 이러한 작은 반경의 원호보간 테스트를 원활히 수행할 수 없으므로 CNC 공작기계가 포켓가공 등을 수행할 경우에 발생하는 동적오차의 근원을 제대로 밝혀낼 수 없다. 또한 정밀한 기계는 통상 소형이고, 스트로크가 짧은 경우가 많은데 이런 경우 기구학적 볼바와 같은 측정 장치로는 측정이 어렵다. 따라서 현재로서는 윤곽가공 정밀도에 관하여서는 실제로 가공되었던 공작물을 3차원측정기(CMM), 형상측정기 등을 사용하여 측정하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법으

\* 충북대학교 대학원

\*\* NC공작기계연구조합

\*\*\* 충북대학교

로는 가공에 따른 공구변형 오차를 제거한 실제 CNC 공작기계의 윤곽가공 오차를 효율적으로 측정하는 데에 많은 어려움이 있음으로 인해 비접촉식의 높은 분해능을 가진 새로운 형태의 윤곽가공 측정 장치의 필요성이 대두되었다.

최근 개발된 그리드 엔코더(Grid Encoder)는 공작기계의 매우 빠른 추가속도를 가진 아주 작은 원의 동적 정밀도를 측정하기에 적합한 비접촉식 측정 장치이다. 본 연구에서는 그리드 엔코더를 사용하여 CNC 공작기계의 실장성능평가를 위한 가공정밀도를 측정하고 평가하는 시스템을 개발하였다. 원호보간 정밀도 시험은 가공정밀도를 평가하기에 가장 적합한 시험이라 할 수 있다.

개발된 시스템은 원호보간 테스트를 통해 각종 정밀도 항목을 평가/분석하고, 오차요인들에 따른 오차항목들을 추출하여 가공정밀도 개선을 용이하게 하였다. 또한 이송속도에 따른 코너가공 이송정밀도를 평가 및 분석하는 시스템도 구축하였다.

## 2. 공작기계 동적특성에 따른 오차해석

### 2.1 서보파라메타에 따른 영향

Poo 등에 의하면 이론적으로 공작기계의 기하학적 영향을 배제하고 원호보간 운동을 고려할 경우 2축의 서로 다른 주파수응답이 상대적인 위상차를 가짐으로 인해 주축에 대해 45°기울어진 형상의 타원 궤적을 보인다.<sup>[1]</sup> 이러한 특성은 서보불일치 오차로서, 각속도에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다. 공작기계 서보시스템 해석에 의하면 원호보간 운동 시 반경감소량은 각속도의 제곱에 비례하고, 위치계인의 제곱에 반비례함을 알 수 있다.

$$\Delta R = (1 - \alpha^2) \times R \omega^2 / (2 \times P G^2) + T^2 \times R \omega^2 / 24 \quad (1)$$

여기서  $\alpha, P G$ 는 앞먹임계수(feed-forward coeff.)와 위치계인(positional gain)을 각각 의미한다. 공작기계 파라미터와 각속도 및 운동반경이 원호보간 정밀도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 파라미터의 변화에 따른 원호보간 윤곽정밀도를 평가해 보았다. Fig. 1에 이송속도의 변화에 따른 반경의 감소량을 나타내었다. 전술한 이론에 따라 반경감소량은 각속도가 증가할수록, 반경이 커질수록 그리고 위치계인이 감소할수록 커짐을 확인할 수가 있다.

이러한 측정결과는 기구학적 불비의 측정으로는 얻기가 힘든 결과들이다.

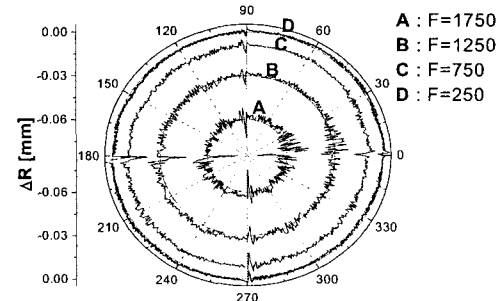


Fig. 1 Radius reduction volume according to change of feed rate

### 2.2 원호보간 이송정밀도 평가항목

#### Radial Deviation

Radial Deviation은 원호보간 정밀도 중에서 한방향 윤곽오차를 나타내는 평가항목의 하나로 실제 경로와 공정경로 사이의 변위로 정의되며, 중심오차 즉 set-up 오차가 포함될 수 있다. 공정경로의 중심은 측정 장치의 centering이나 완전원의 경우에는 최소자승원 해석을 통하여 얻는다.<sup>[2]</sup>

#### Circular Deviation

Circular Deviation이란 원호보간 정밀도 중 Radial Deviation과 함께 한방향 윤곽정밀도를 나타내는 항목으로 실제 경로를 둘러싸는 두 개의 동심원의 반경방향으로의 최소 변위로 정의된다. 이는 최소자승원 주위로의 반경방향으로의 최대변위로 정의할 수도 있다. 단 Circular Deviation은 측정장치의 중심오차 즉 set-up 오차를 포함하지 않는다.<sup>[2]</sup>

#### Hysteresis

Hysteresis는 원호보간 정밀도 중 양방향 윤곽정밀도를 나타내는 항목으로 양방향으로 이동하는 두 개의 실제 경로사이에서 반경방향으로의 최대변위로 정의되고 있다.<sup>[2]</sup> 이때 두 개의 실제 경로의 최소자승원 중심이 기준이 된다.

### 2.3 코너가공 이송정밀도 평가

공작기계가 코너를 가공하는 경우의 운동정밀도를 평가하는 것도 시스템 정확도를 판단하는 중요한 기준이 된다. 지금까지 공작기계의 코너가공 정밀도를 평가하는 방법으로는 절삭가공 후 공작물 표면형상을 측정함으로써 평가하는 방법이 일반적이었으나 이러한 측정결과는 가공 중 발생한 공구변형오차를

포함한 결과이므로 서보성능을 포함한 공작기계 자체만의 윤곽정밀도를 평가하기에는 많은 어려움이 있다. 그리드 엔코더는 2차원상의 임의궤적에 대한 정밀도 평가가 가능한 시스템이므로 코너가공 정밀도를 평가하는 데에도 적절한 장치라 할 수 있다. Fig. 2는 동일한 이동경로를 서로 다른 이송속도로 코너 이송한 결과를 나타낸 것이다. 코너가공 정밀도 시험에서는 수치제어장치가 코너 경로를 이동 제어할 때 실제 공구의 이동 궤적과 명령 궤적의 일치 정도를 평가한다.

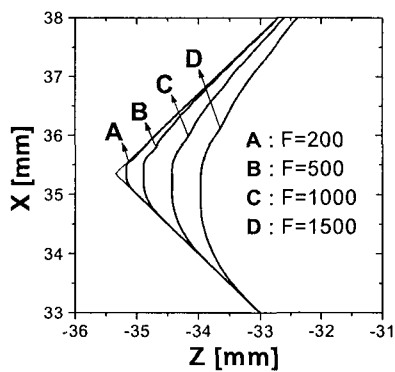


Fig. 2 Moving accuracy of corner working

### 3. Grid Encoder 측정시스템

본 연구에서 사용된 Heidenhain사의 KGM182 Grid Encoder는 마운팅 베이스에 고정된 Waffle 형태의 눈금이 있는 230mm 지름의 격자형 원판과 비접촉 스캐닝 헤드로 구성되며, Fig.3은 Grid Encoder 구조를 보여준다. 측정장치는 최대속도 80,000mm/min에서 측정반경 범위가 최대 115mm에서 최소 1μm까지 가능하다. 이 Grid Encoder는 광원으로 단일 LED를 사용하는 초정밀 격자간섭계(interferometer)의 일종으로 이러한 측정시스템은 레이저 인터페로미터와 같은 측정장치와 비교하여 온도·습도변화 등과 같은 주변환경의 변화에 덜 민감하여 보다 정밀한 측정이 가능하며, 전자기식의 스케일과 비교하면 노이즈에 강한 것으로 알려져 있다.

그리드엔코더를 공작기계에 설치했을 때 엔코더의 2축과 측정되는 기계 2축이 정확히 일치하지 않는 설치오차가 필연적으로 발생한다. 이 경우 현재 위치  $P$ 를 센서로부터 읽어 들인 좌표값  $(x_0, y_0)$ 를 회전변환을 통하여 기계좌표에 대한 값  $(x', y')$ 로 아래식과 같이 변환시킴으로써 이러한 설치오차를 보상할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Fig. 4는 수직형 머시닝센터에 설치된 Grid Encoder와 실험장치를 나타내었다.

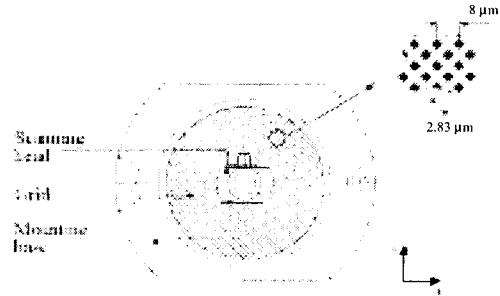


Fig. 3 Structure of Grid Encoder

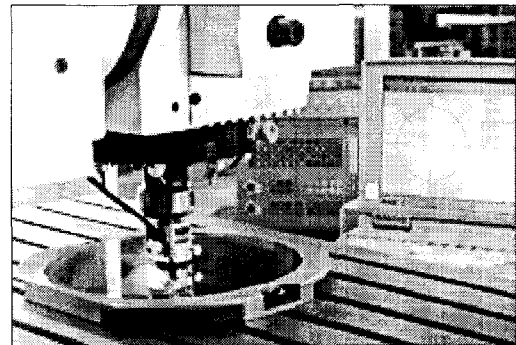
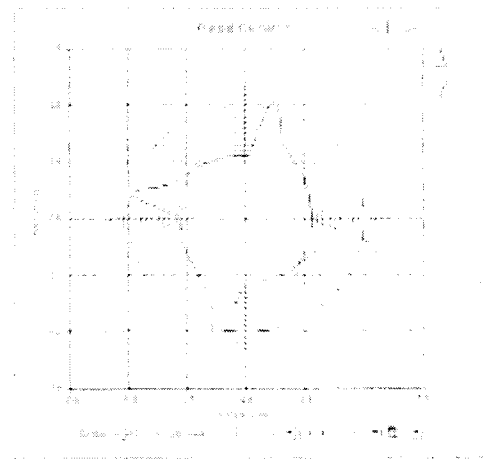


Fig. 4 Schematic diagram of Grid Encoder System

### 4. 측정시험 및 결과

Fig. 5, Fig. 6은 반경 10mm, 50mm에서 이송속도 1000mm/min로 원호보간 이송정밀도 테스트를 수행한 결과, 개발된 시스템에서 측정 및 분석한 오차데이터와 오차진단 분석결과를 보이고 있다.



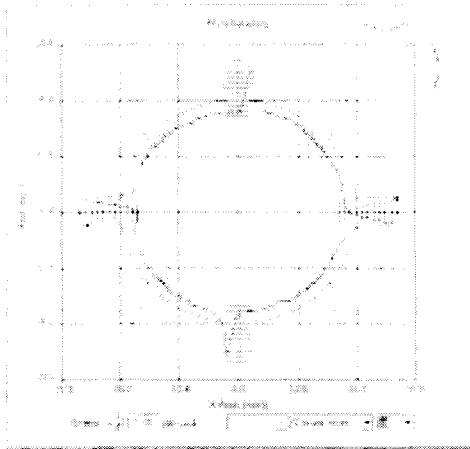


Fig. 5 Test result of circular interpolation

**Diagnosis Results (All)**

Test Name	Value	Test Name	Value
1. Positioning Accuracy	0.01 mm	11. Feed Error	0.01 mm
2. Positioning Accuracy	0.01 mm	12. Feed Error	0.01 mm
3. Positioning Accuracy	0.01 mm	13. Feed Error	0.01 mm
4. Positioning Accuracy	0.01 mm	14. Feed Error	0.01 mm
5. Positioning Accuracy	0.01 mm	15. Feed Error	0.01 mm
6. Positioning Accuracy	0.01 mm	16. Feed Error	0.01 mm
7. Positioning Accuracy	0.01 mm	17. Feed Error	0.01 mm
8. Positioning Accuracy	0.01 mm	18. Feed Error	0.01 mm
9. Positioning Accuracy	0.01 mm	19. Feed Error	0.01 mm
10. Positioning Accuracy	0.01 mm	20. Feed Error	0.01 mm
21. Positioning Accuracy	0.01 mm	22. Feed Error	0.01 mm
23. Positioning Accuracy	0.01 mm	24. Feed Error	0.01 mm
25. Positioning Accuracy	0.01 mm	25. Feed Error	0.01 mm

Fig. 6 Error analysis of circular interpolation

Fig. 7은 개발된 시스템에 의한 코너가공 이송정밀도 온라인 측정화면이며, 코너이송에 있어서 나타나는 형상오차를 분석한 결과를 보이고 있다.

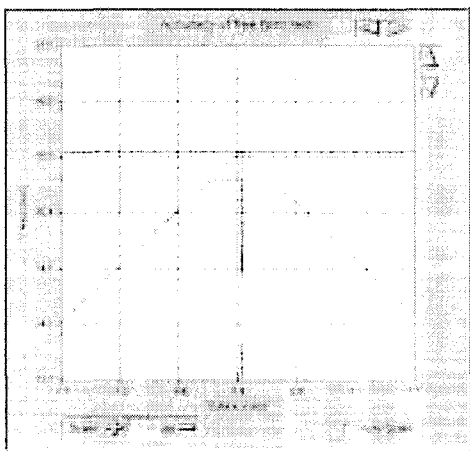


Fig. 7 corner moving accuracy

## 5. 결론

본 연구에서 NC공작기계의 실장성능 시험을 위한 형상측정 시스템을 개발하였다.

개발된 시스템을 사용하면 기존의 측정 장치가 주로 공작기계의 정적 위치정밀도 및 동적 위치정밀도 중 하나의 개념에 제한된 것과 달리 두 개념 모두의 정밀도 측정이 가능하다. 또한 이 장치는 비접촉 방식의 측정이므로 기구학적 불바의 측정에서와 같은 측정 장치의 기구학적 오차가 배제되고, 특히 높은 각속도와 작은 반경의 원호보간 운동 측정이 가능하여 서보 특성에 의한 영향을 잘 파악할 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 개발된 시스템은 자유곡면 이송정밀도 시험에 필요한 윤곽설계가 초보자도 용이하도록 작성되었으며, 원호보간 테스트를 통해 각종 정밀도 항목을 평가/분석하고, 오차 요인들에 따른 오차항목들을 추출하여 가공정밀도를 개선할 수 있으며, 또한 이송속도에 따른 코너가공 등 임의 형상 이송에 따른 정밀도를 평가/분석할 수 있다.

## 후기

본 연구는 산업자원부의 수치제어장치 시험평가에 관한 기술기반조성 사업으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. Poo, A., Bollinger, J., "Dynamic Errors in Typel Contouring System", IEEE Trans. of Industry Application, Vol. 1A-8, No. 4, 1972
2. ISO 230-4 Test code for machine tools - part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools, First edition, 1996
3. Knapp, W., Hrovat, S., "The Circular Test for Testing NC Machine Tools", Swiss, 1987
4. Bryan, J. B., "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools", Part 1: Principle&applications, Precision Engineering, 1982
5. Kakino, Y., "The Measurement of Motion error of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method, Annals of CIRP, Vol. 36, 1987
6. 박준호, "NC공작기계 컨투어운동 정도의 해석", 대한기계학회지 제 32권 제 5호, 1992
7. 박준호, "정밀측정시스템공학" 야정문화사, 1996