

2차원 프로브에 의한 NC공작기계의 운동정밀도 측정 - 제 1보 원호보간운동 정밀도 측정-

전 언 찬*, 小山田 重德**, 堤 正臣***

Measurement of Motion Accuracy by Two-dimensional Probe on NC Machine Tools

- 1st Report, Measurement of the Circular Motion Accuracy-

Eon-Chan JEON*, Shigenori OYAMADA **, Masaomi TSUTSUMI***

ABSTRACT

This paper presented a new measuring system to improve circular motion accuracy by using two-dimensional probe and master ring for NC machine tools. This measuring system reduced the circular motion error conspicuously by eliminating the influence of the acceleration/deceleration range and compensating the friction force whose influences were significant while measuring the motion. Experimental results show that this system had enough accuracy to measure a circular motion for NC machine tools, compared with the circular test method and the $r\theta$ method.

Key Words : Circular Motion Accuracy (원운동정밀도), Two-dimensional Probe(2차원 프로브), Master Ring (기준원판), NC Machine Tools (수치제어공작기계), Motion Error (운동오차), Acceleration/deceleration (가감속), Friction Force (마찰력)

1. 서 론

최근의 생산시스템은 수요자의 요구에 맞추어 다종소량화 경향이 뚜렷해지고 부품 또는 제품의 다기능화 및 소형화가 급속하게 진전되고 있으며, 여기에 보조를 맞추어 제품의 고정밀도화가 그 어느때보다 강하게 요구되고 있다. 공작기계의 정밀도는 공작물에 그대로 반영되기 때문

에 국제표준화기구(ISO)에서는 공작기계의 정밀도시험에 관한 내용을 점차 보강하여 공작기계의 성능을 평가하고 있다. ISO에서 규정한 공작기계의 정밀도시험⁽¹⁾에는 공작기계의 직선보간운동 및 원호보간운동 정밀도시험의 측정방법과 측정기에 관한 내용이 규정되어 있으며, 수치제어공작기계-원운동시험방법 통칙이 국제규격으로서 제정단계에 있다⁽²⁾. 그리고 일본⁽³⁾ 등 각국에서도 여기에 관

* 東亞大學校 工科大学 機械工學科

** 東京農工大學 大学院 機械SYSTEM工學科

*** 東京農工大學 工學部 機械SYSTEM工學科

한 논의가 활발하게 진행되고 있다.

동시에 두축을 제어하는 보간운동 정밀도의 측정에는 1차원 프로브(probe)에 의한 방법⁽¹⁾, 2차원 프로브와 기준원판에 의한 방법⁽⁴⁾ 및 동적 불바법(MBB 법⁽⁶⁾) 또는 DBB법⁽⁷⁾ 이라고도 한다.) 등 현재 ISO에 규정되어 있는 시험방법과 그 외 $r\theta$ 법⁽⁸⁾이 개발되어 있다. 이와 같은 방법들은 원호보간운동 정밀도만을 측정할 수 있는 것으로서 각도검출이 되지 않거나 측정반경의 제한을 받는다. 그리고 직선보간운동 정밀도나 직선운동의 방향변환에 따른 정밀도 측정은 되지 않는다. 그렇기 때문에 이미 개발된 방법을 응용하여 측정범위를 다양화 시키거나⁽⁹⁾ 새로운 방법의 개발이 필요하다고 생각되며 이에 관한 최근의 연구로서는 오차를 요소별로 분리하여 운동정밀도를 평가할 수 있는 새로운 측정방법을 제시한 것이 보고되고 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 아직 해결해야할 과제가 많으며 여기에 관하여 좀 더 많은 연구가 진행되어야 한다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 ISO에서 규정하고 있는 원운동 정밀도 측정방법 가운데 하나인 2차원 프로브와 기준원판에 의한 방법을 응용하여 원호보간운동 정밀도 및 직선 보간운동 정밀도를 신뢰성 높게 측정하고자 한다. 또한 본 측정시스템을 이용하여 위에서 열거한 몇가지 방법과 그 성능을 비교, 검토하여 본 측정시스템의 유효성을 확인하고자 한다.

2. 2차원 프로브에 의한 기존의 측정방법

2.1 2차원 프로브와 기준원판에 의한 방법

이 방법은 스위스의 W.Knapp가 고안한 것⁽⁴⁾으로서 원운동 시험법(circular test method, 이하 CT법이라 한다.)이라 하며 그 측정시스템은 Fig.1에 나타난 바와 같다. 즉 테이블 위에 기준원판(master ring)을 고정시키고 주축에 2차원 프로브를 고정시켜 프로브가 기준원판의 축면과 접촉한 상태에서 원판을 따라 원호보간한다. 프로브에는 X방향 및 Y방향의 변위를 검출할 수 있는 변위센서가 내장되어 있으며 이들의 출력을 차지 앰프로 증폭시켜 XY 레코더에 실시간(real time)으로 기록하도록 되어 있다.

CT법은 임의의 크기의 기준원판만 있으면 어떠한 직경의 원도 측정할 수 있는 특징이 있다. 그러나 이 방법은 변위계의 스타이러스(stylus)가 기준원판과 마찰을 일으켜 그것이 측정결과에 영향을 미침에도 불구하고 그에 대한 보정방법이 제시되어 있지 않다. 그리고 고속이송이

되면 프로브의 궤적을 웬이 추종하기 어렵기 때문에 정확한 데이터를 얻기 어려우며 기계의 이송운동개시와 측정개시를 수동으로 행하기 때문에 개시시간의 차에 의하여 실제의 궤적과 다른 형태가 나타날 수 있다.

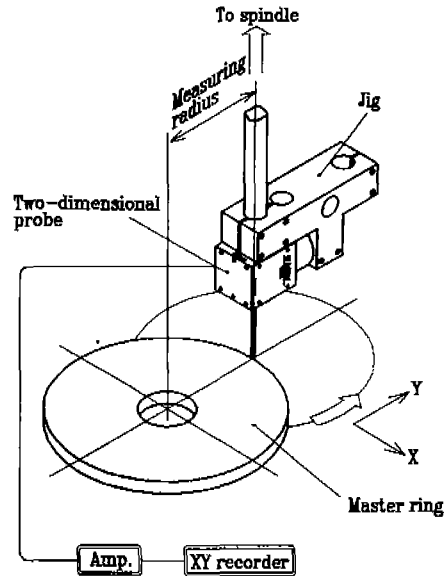


Fig. 1 Circular test method

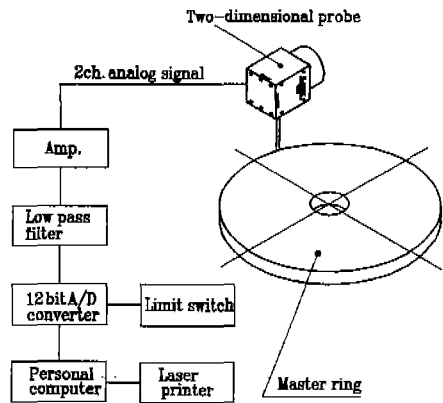


Fig. 2 Experimental apparatus of two-dimensional probe

2.2 2차원 프로브와 근접 스위치를 이용한 방법

Kakuta⁽¹¹⁾는 Fig.2에서와 같이 2차원 프로브와 기준원판에 근접스위치(limit switch)를 부착시켜 측정시스템을 구성하였다. 즉, 2차원 프로브에서 출력된 아날로그 신호를 A/D 변환시켜 컴퓨터에서 데이터를 처리하였다. 그리고 Y축 테이블에 근접스위치를 부착시켜 여기서 나

은 신호를 트리거를 이용하여 데이터를 샘플링할 수 있도록 하였다.

위의 방법은 기계의 이송운동개시점과 데이터의 측정개시점을 일치시킬 수 있기 때문에 CT법에서와 같이 펜의 추종지연에 따른 오차의 발생을 줄일 수 있다. 그러나 이 방법 역시 마찰력에 관한 보정방법이 언급되어 있지 않으며, 근접스위치가 반응하는 거리와 감도를 설정하는데 상당한 시간이 걸리고 또한 속련을 필요로 하기 때문에 범용성이 부족하다고 생각된다.

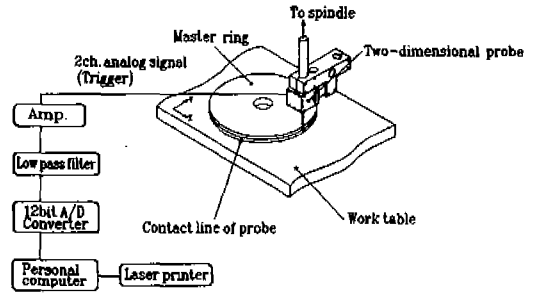


Fig. 3 Improved measuring system

3. 본 연구에서의 측정 시스템

3.1 측정방법 및 시스템

본 측정 시스템의 구성은 Fig.3 과 같다. 측정원리는 CT 법 또는 Kakuta에 의한 방법과 비슷하지만 앞에서 언급한 단점을 보완하기 위하여 측정프로그램을 개발하였다. 그림에서 2차원 프로브는 머시닝 센터의 주축에 고정시키고 기준원판은 테이블 위에 고정시켰다. 프로브에서 얻어진 아날로그 신호는 차지 앰프로 증폭시키고 저대역 필터를 거쳐 A/D 변환시킨 다음 컴퓨터로 데이터를 처리하고 레이저 프린터로 출력시켰다.

본 실험에서 사용한 기준원판의 재질은 SM45C이며 그 크기는 Table 1에 나타난 바와 같으며 진원도는 0.5 μ m 이내에 든다. 또한 2차원 프로브(모델명, BIDIM-K)의 각종 사양은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 1 Dimensions of master ring in used

Item	Dimension
Inner diameter	44 mm
Outer diameter	250 mm
Thickness	20 mm
Circularity	< 0.5 μ m

Table 2 Specifications of 2-dimensional probe

Item	Specification
Model	BIDIM-K
Measurement range	± 1 mm
Measurement pressure	12 g
Styrus material	Ruby
Styrus diameter	6 mm
Repeating accuracy	< 0.1 μ m

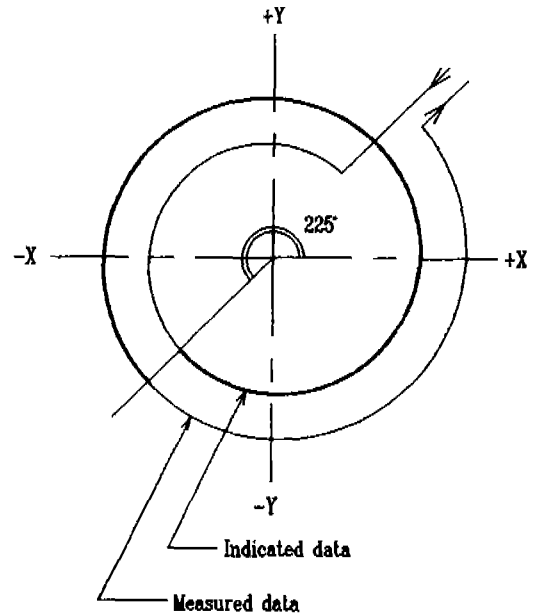


Fig. 4 Visual indication of measuring method

Kakuta의 측정시스템에서는 근접스위치를 사용하여 일치시켰지만 본 연구에서는 이것을 사용하지 않고 2차원 프로브에서 나온 아날로그 신호를 트리거에 의하여 일치시켰다. 그리고 가속과 감속에 의한 영향을 없애기 위하여 프로브를 720° 회전시켰다. 여기서 가속속의 영향을 받지 않을 것으로 생각되는 360° 분의 데이터를 표시하는 프로그램을 작성하였다.

이때 상한변환(quadrant change)에 따른 백래시의 영향이 있을 것으로 생각하여 Fig.4에 나타난 바와 같이 프로브를 원판과 45°의 위치에서 접촉시키고 225°의 위치에서부터 360° 분의 데이터만을 샘플링하여 분석하였다.

3.2 데이터 처리방법

본 실험에서 데이터를 처리함에 있어서 샘플링 시간은 다음과 같이 된다.

$$\Delta t = \frac{2\pi R}{F/60} \times \frac{1}{N} \quad (1)$$

여기서, Δt = 샘플링 시간
 R = 측정반경
 F = 이송속도
 N = 샘플링 수

본 측정 시스템에서는 샘플링 개시시에 소프트 트리거를 이용하였으며 2차원 프로브에서는 1 μ m의 변위가 발생되면 10mV의 전압을 출력하도록 되어 있다. 이것을 이용하여 A/D 컨버터에 입력된 아날로그 신호가 200 mV를 넘으면, 즉 프로브가 20 μ m만큼 변위가 발생하면 그때부터 샘플링을 개시하여 Δt (s)시간마다 데이터가 입력되도록 하였다.

2차원 프로브에서 검출되는 X, Y방향의 독립된 신호 D_x 및 D_y 는 다음과 같이 1차원의 변위 D 로 변환시킨다.

$$D_n = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (2)$$

여기서, $D_{n=n}$ 번째의 변위량
 $D_{x=x}$ 방향의 변위
 $D_{y=y}$ 방향의 변위

이렇게 하여 얻어진 1차원의 변위를 $(\gamma + D_n, \theta_n)$ 의 극좌표로 표시한다. 여기서 $\theta_n = 2\pi/n$ 이다.

프로브의 변위에 포함된 기계의 운동오차는 전체 데이터의 평균치와의 차로 나타내면 상대표시가 되며 이것은 원호형상을 판별하기 쉬우며 초기변위량과의 차로 나타내면 절대표시가 되며 이것은 반경감소량을 판별하기 쉽다.

3.3 실험방법

2차원 프로브의 선단에 고정된 스타이러스를 기준원판의 중심부근에 이동시켜 공작물 좌표를 (0,0,0)으로 한다. 그리고 기준원판의 중심과 원호보간운동의 중심을 일치시키기 위하여 Y축의 정방향으로 스타이러스를 이동시켜 기준원판의 내경에 50 μ m 접촉시킨다. 이때의 공작물 좌표를 표시한다. 다음은 Y축의 부방향으로 스타이러스를

이동시켜 50 μ m 접촉한 상태에서 공작물 좌표를 나타낸다. 이 두개의 공작물좌표의 중심점이 X축방향의 중심이 된다.

X축에 대해서도 위와 같은 방법으로 하여 Y축방향의 중심을 구한다. 기준원판의 중심과 원호보간운동의 중심이 일치되면 머시닝 센터 및 측정 프로그램을 가동시켜 데이터를 얻는다. 그리고 이송속도는 1000,2000,4000, 및 8000 mm/min으로 변화시켰다.

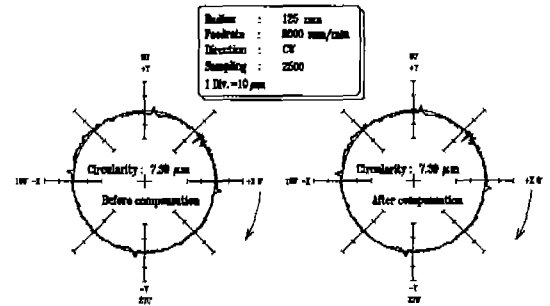


Fig. 5 Results of before and after compensation on trigger

4. 실험결과 및 고찰

4.1 트리거에 의한 영향

본 측정시스템에서는 프로브가 20 μ m 변위하면 트리거가 작동하여 샘플링을 시작하도록 되어 있다. 그런데 이 경우 트리거가 작동하고 나서 프로브가 초기변위량 50 μ m에 도달하기까지 30 μ m 구간에서 데이터를 샘플링하는데, 이때 데이터의 샘플링수는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$n = \frac{t_o \cdot N}{L} F \quad (3)$$

여기서,

- n = 초기변위량 30 μ m 구간에서의 데이터 수
- t_o = 이송속도 100mm/min으로 30 μ m 이동하는데 걸리는 시간(sec)
- N = 샘플링 수
- L = 기준원판의 원주의 길이(mm)
- F = 이송속도(mm/min)

이와같이 트리거의 영향을 받은 상태에서 입력된 데이터 수는 이송속도에 관한 1차식으로 된다. 여기서 입력된

데이터는 원호보간운동하기 이전에 취한 데이터이다. 따라서 N개의 데이터의 최초부터 n개의 데이터를 빼고 나서 360° 분에 해당하는 데이터만을 표시하도록 보정을 하였다.

트리거의 영향을 받을 때와 받지 않을 때의 원호보간운동 정밀도의 측정결과를 기준원상에 전개한 것이 Fig.5이며 그림에서와 같이 보정전과 후의 스틱 모션(stick motion)의 위치가 좌표축과 일치하지 않고 어느정도 기울어져 있다. 또한 진원도도 양쪽 모두 같게 나타나서 트리거의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

4.2 가속과 감속에 의한 영향

일반적으로 원호보간운동이나 직선보간운동의 정밀도 측정시 기계가 등속도 운동을 하고 있다는 가정하에서 행한다. 그러나 실제 이송운동에서는 가속과 감속이 있기 때문에 원호형상이 타원의 형태로 나타난다. 기계가 등속 운동을 하고 있다고 가정하였을 경우의 이동거리와 실제의 이동거리에는 차가 생기므로 이것을 보정해야 한다. 본 측정시스템에서는 이것을 기계가 이동하는 사이에 입력된 데이터 수로서 구하였다. 그리고 입력된 데이터의 최초부터 225° 사이에 있는 데이터를 제외시키고 나서 360° 분에 해당하는 데이터만을 표시하도록 보정하였다.

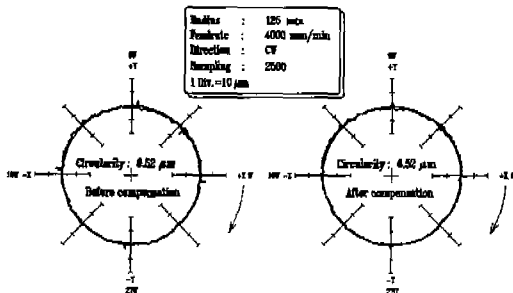


Fig. 6 Results of before and after compensation by acceleration and deceleration

Table 3 Number of compensative data for acceleration time

F(mm/min)	X axis		Y axis	
	Δt (s)	n	Δt (s)	n
2000	54.95	3	54.95	3
4000	89.66	10	89.66	10
8000	172.57	37	172.57	37

이송속도를 2000, 4000, 8000 mm/min 으로 변화시켰을 때 가속구간의 시간과 보정해야할 데이터 수를 Table 3 에 나타내었다.

가속과 감속을 제외시킨 상태에서 원호보간운동 정밀도를 측정하여 기준원판에 나타내면 Fig.6과 같이 되며 스틱모션의 위치가 각 좌표축과 거의 일치하고 있다. 따라서 가속과 감속을 고려하지 않는 일반적인 측정방법에서는 그 영향이 강하게 미치고 있음을 알 수 있다.

4.3 마찰에 의한 영향

본 측정시스템은 2차원 프로브가 기준원판과 접촉한 상태에서 원호보간운동을 하기 때문에 기준원판과 프로브 사이에는 마찰력이 존재한다. 이 때문에 프로브가 원호보간운동을 할 때 스타이어스가 주축의 위치에 비하여 약간 지연되어 이동하고 있다고 생각된다. 여기서 2차원 프로브의 X, Y축 방향의 독자적인 움직임을 알아보기 위하여 X, Y방향의 변위를 1차원의 변위로 변환시키지 않고 나타내었다. 그 결과는 Fig.7과 같으며 이것은 X 및 Y축 방

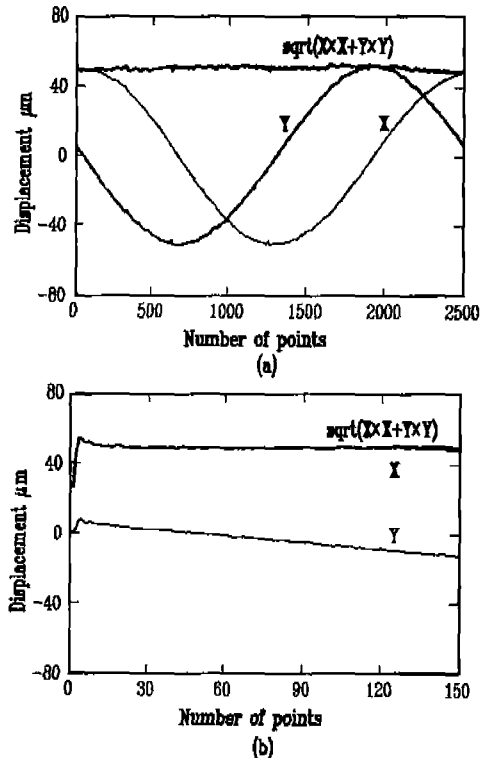


Fig. 7 Displacement of X-Y directions (Feedrate:2000mm/min, Radius:125mm)

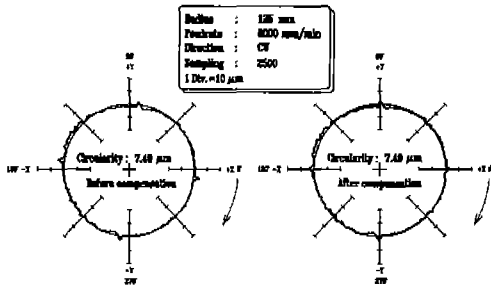


Fig. 8 Results of before and after compensation by friction force (start:0 deg.)

향의 측정개시점의 변위를 알아보기 위하여 0°에서부터 샘플링한 결과이다. 회전방향이 CW(clock wise)의 경우, Y축 방향의 변위는 감소하여야 함에도 불구하고, 처음 약간 증가하였다가 서서히 감소한다. 이는 기계는 원호보간운동을 시작하였지만 기준원판과 스타이러스 사이에는 정지마찰력이 작용하여 아직 움직이지 않고 있다가 동마찰력이 정지마찰력을 이기는 순간부터 스타이러스가 원호보간운동을 시작하기 때문이라고 생각된다. 따라서 Y방향의 변위를 보정해야한다.

Y방향 변위의 보정은 가속 및 감속의 보정방법과 마찬가지로 최초부터 225°까지의 데이터는 버리고 그 이후부터 360°분의 데이터를 취하였으며 그 결과는 Fig.8에 나타낸 바와 같다. 즉, 보정후의 결과는 보정전의 결과에 비하여 상한변환에 따른 스틱모션의 위치가 좌표축과 잘 일치하고 있으며, 본 측정시스템을 이용한 결과 측정개시점의 마찰력을 제외시키면 측정위치를 좌표축과 정확하게 맞출 수 있었다.

4.4 다른 측정방법과의 비교

1) CT방법과의 비교

측정반경 125mm, 이송속도 8000 mm/min으로 CW방향으로 원호보간운동하였을 때 CT법과 본 측정시스템의 측정결과를 비교하면 Fig.9와 같다. 그림에서와 같이 CT법에 의한 결과는 측정개시 직후 큰 돌기가 나타났으며 이것은 트리거가 걸렸을 때 여분의 데이터가 포함되었기 때문이라고 생각된다. 또한 이것은 전체의 진원도에도 영향을 미쳐서 본 측정시스템을 이용한 결과보다 진원도가 15.11μm 높게 나타났다. 따라서 이송속도 8000 mm/min의 고속이송에서의 원호보간운동 측정결과 본 측정시스템이 CT법보다 우수함을 알 수 있다.

2) rθ 법과의 비교

rθ 법은 각도검출기가 부착되어 있기 때문에 기계의 오차에 대한 위치를 정확하게 검출할 수 있지만 본 측정시스템은 이와 같은 설비는 구비되어 있지 않다. 또한 마찰력의 영향을 받기 때문에 고속이송이 되면 작은 오차는 스타이러스가 정밀하게 기록하지 못하는 단점이 있다.

Fig.10은 이송속도 4000 mm/min으로 원호보간운동하였을 때 나타난 rθ 법과 본 측정시스템의 결과를 비교한 것이다. 양쪽 모두 큰 돌기가 없으며 스틱모션의 위치도 각 좌표축과 잘 일치하고 있다. 또한 진원도의 차도 0.26μm 정도로 작게 나타나서 본 측정시스템이 rθ 법과 같은 정도의 신뢰도를 갖고 있다고 판단된다.

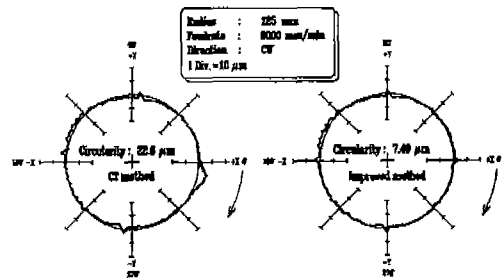


Fig. 9 Comparison of CT and improved method

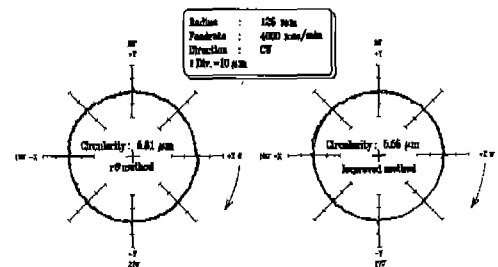


Fig. 10 Comparison of rθ and improved method

5. 결 론

2차원 프로브와 기준원판을 이용하고 여기에 본 연구에서 개발한 측정시스템을 이용하여 가속과 감속에 의한 영향, 마찰에 의한 영향 등을 고려하여 원호보간운동 정밀도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 트리거 신호를 이용함으로써 외부기기를 부착시키

지 않고 원호보간운동 정밀도를 측정할 수 있었다.

2) 가속과 감속에 의한 영향을 배제함으로써 원호보간운동 정밀도의 측정에 관한 신뢰도를 높일 수 있었다.

3) 본 측정시스템을 이용하여 마찰력을 보정함으로써 원호보간운동 정밀도에 미치는 마찰력의 영향을 현저하게 감소시킬 수 있었다.

4) 본 연구에서 사용한 측정시스템은 다른 측정방법과 비교하여 우수한 성능을 가지며, 원호보간운동 정밀도의 측정에 관한 유효성을 확인하였다.

참고문헌

1. ISO 230-1, "Acceptance code for machine tools, part1, Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing condition", 1992.
2. ISO/DIS 230-4, "Acceptance code for machine tools, part4, Circular tests for numerically controlled machine tools", 1994
3. JIS/DIS B6192, "Machine Tool-Test code for accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools", 1994.
4. Knapp, W., "Text of the Three-dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors", Annals of the CIRP, vol.32, No.1, pp.459~464, 1983.
5. Bryan, J.B., "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, part1, Principles and Application", Precision Engineering, vol.4, No.2, pp.61~69, 1982.
6. Bryan, J.B., "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part2, Construction Details", Precision Engineering, vol.4, No.3, pp.125~138, 1982
7. 垣野義昭, 井原之敏, 篠原章翁, "DBB法によるNC工作機械の精度評價法", リアライズ社, 1990.
8. Tsutsumi, M., Sakai, K., Kim, J.S., "A New Measuring Method of Circular Movement of NC Machine Tools (Development of Alternative Method for Standardization)", Journal of the JSME, vol.58, No.545, pp.271~276, 1992.
9. 小山田重徳, "2次元プローブによるNC工作機械の運動精度測定方法", 東京農工大學 卒業論文, 1994
10. 이 상운, 박 준호, 조 선휘, 김 문상, "수치제어 공작기계의 위치 오차 측정 및 보정 시스템 개발", 대한기계학회 논문집, 제17권 제6호, pp.1431~1440, 1993.
11. 角田潤一郎, "2次元プローブを用いたマシニングセンターの補間精度測定", 東京農工大學 卒業論文, 1992.