

CT법을 이용한 진원도 측정 방법의 개선에 관한 연구

주만식*, 김민주, 장성화, 손영지(동아대 대학원), 전연찬(동아대)

A Study on the Improvement of Circularity Measurement Using Circular Test Method

M. S. Joo, M. J. Kim, S. H. Jang, Y. J. Son, E. C. Jeon

Abstract

A study for the roundness of machining center is classified into two ways. one is the way that progresses the roundness amending the parameter of machining center based on the measured value after the measurement of the roundness of machining center by means of a existing measuring device, another is the way that measures the roundness by remodeling the existing measuring device.

The former is studied by pack hei jae team in Seoul university, the latter is studied by TSUTSUMI. Especially TSUTSUMI measures the roundness according to circular compensation after the insertion of developed measuring device using a rotary encoder to the spindle of machining tool.

we study how regulation velocity occurring with circular motion of machining center table influences the roundness after measuring the roundness using Circular Test method by a 2 dimation probe and a standard discus in this experiment.

Key words : roundness(진원도), machining center(머시닝 센터), compensation(보정), rotary encoder(회전량 검출기), 2 dimation probe(2차원 프루브), standard discus(기준원반)

1. 서론

머시닝 센터의 진원도 측정에 관한 연구는 크게 두 부류로 나눌 수 있는데 하나는 기존의 측정기를 이용하여 머시닝 센터의 진원도를 측정하고 측정된 결과를 토대로 머시닝 센터의 파라미터를 수정하여 진원도를 향상시키는 방법이 있고, 그리고 또 하나는 기존의 측정기를 개조 혹은 특수 제작하여 진원도를 측정하는 형태가 그것이다. 전자의 방법은 서울대학교 박희재 교수팀에 의해 진행되고 있고^{1,2)} 후자의 경우는 日本 東京農工大 堤正臣 교수팀에 의해 진행되고 있으며³⁾ 어느 정도의 성과를 거두고 있다. 특히 日本 東京農工大 堤正臣

교수팀의 연구에서는 로타리 엔코더를 이용하여 공작기계의 스피들에 개발된 측정기를 삽입하여 원호보간에 따른 진원도를 측정하고 있다.

ISO에서 규정해놓고 있는 진원도 측정에 관한 방법은 1차원 프로브에 의한 방법, 2차원 프로브와 기준원반에 의한 Circular test법⁴⁾ 및 동적 Ball bar법(MBB법⁵⁾ 또는 DBB법이라 한다)등 세가지가 있다. 그리고 일본의 堤正臣교수가 개발한 $r\theta$ 법이 진원도 측정에 사용되고 있다.

1차원 프로브에 의한 방법은 주축에 고정시킨 Test bar를 중심으로 하고, arm에 부착된 변위계를 회전시켜 arm과 Test bar의 상대변위를 검출하는 방법이다. 이것은 측정방법이 간단하여 범용변

위계를 이용한다는 장점이 있으나 회전각의 검출이 어렵다. 그리고 Circular test법은 주축에 고정시킨 2차원 프로브를 기준원반에 접촉·회전시켜 X, Y방향의 변위를 검출하는 것으로서 임의의 직경을 측정할 수 있는 장점이 있다. 한편 MBB법은 양단에 강구(steel ball)를 접착시킨 신축이 자유로운 bar와 강구를 지지하기 위하여 영구자석이 내장된 소켓으로 구성된다. 두 개의 강구 사이에 생기는 상대거리의 변화를 bar에 내장된 변위계로 검출한다. 이 방법은 X-Y 평면뿐만 아니라 Y-Z 평면 및 Z-X 평면도 측정가능한데 측정반경에 제한이 있는 단점이 있다. 이것을 보완하기 위하여 최근에는 bar를 연장할 수 있도록 하였다. 그리고 $r\theta$ 법은 1차원 프로브에 의한 측정방법을 개량한 것으로서 축에 로타리 엔코더를 부착시켜 회전각을 검출할 수 있게 하였다.

본 연구에서는 2차원 프로브와 기준원반을 이용한 Circular Test법을 이용하여 기존 진원도 측정법과 다른 새로운 측정법에 대하여 연구하고, 그 유효성을 검증하고자 한다.

2. 이론적 해석

2.1 진원도에 관한 이론적 해석

스위스의 W. Knapp에 의하여 제안된 Circular Test법은 2차원 프로브와 기준원반에 의하여 진원도를 측정한다. 하지만 이 방법은 회전각의 검출이 되지 않는 것과 초기 변위(보통 $40\ \mu\text{m}$) 보다도 큰 변위가 생기면 기준원반과 스타일러스(stylus)가 떨어져 버리는 결점이 있다.

2차원 프로브에 의한 일반적인 측정시스템은 Fig. 1과 같다. 즉, 기준 원반에 접촉한 프로브의 변위는 차지 앰프라이어로 증폭된 다음 Low pass filter를 거쳐서 A/D 컨버터로 변환시킨 후 컴퓨터에 입력되어 데이터가 처리된다. 이 후 측정 결과는 CRT화면에 나타나고 프린터로 출력이 가능하다. 여기서 문제가 되는 것은 이송운동과 data sampling의 동기(同期)를 어떻게 행하느냐는 것이다. 동기 타이밍이 맞지 않으면 원호형상이 원주 방향으로 치우쳐서 그려진다는지, 상한변환시에 일어나는 stick motion의 위치가 한쪽으로 기울어져서 그려진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 limit switch를 사용하여 이송운동의 개시와 종료

시간을 정기적으로 검출하여 동기시킨다. 그런데 이 방법은 프로브의 스타일러스와 기준원반이 접촉한 상태에서 limit switch가 ON으로 되는 사이의 데이터는 입력되지 못한다. 따라서 이것이 오차에 포함되어 정확한 데이터를 얻지 못한다.

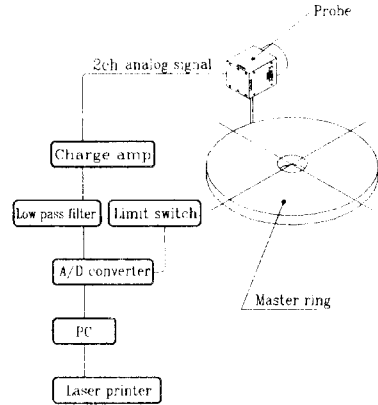


Fig. 1 Measuring system

2.2 레이저를 이용한 거리-속도 측정의 원리

레이저 측정기에 의한 미소거리의 측정원리를 Fig. 2에 나타내었다. 기준 비트신호를 얻기 위하여 광속분리기(beam splitter) BS로 광속의 일부분을 반사시키고 이를 광검출기 D1에 입사시켜 두 주파수차이($f_1 - f_2 = 2.204\ \text{MHz}$)의 비트신호를 검출하고, 간섭계와 반사경을 거친 주파수는 반사경의 전후운동에 따라 도플러 효과로 위상차를 가진 채로 D2에 입사되어 거리를 구할 수 있다.

그런데 Δf_1 은 도플러 효과에 따라 발생한 변조량이므로 도플러 효과에서의 주파수와 속도에 대한 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\Delta f_1 = \frac{2Vf_1}{c} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도(beam speed)이다. 그리고 미소거리 L 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \int_0^t V dt = \int_0^t \frac{c}{2f_1} \Delta f_1 dt \quad (2)$$

위 식들에서 구해지는 미소거리 L 을 시간으로 나누어 속도를 구할 수 있으며, 이를 미분하여 가속도 역시 구할 수 있다.

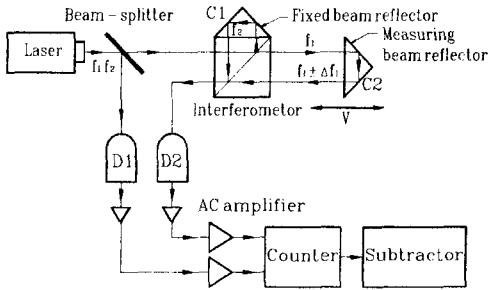


Fig. 2 Principle of a laser interferometer for the measurement of differential distance

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

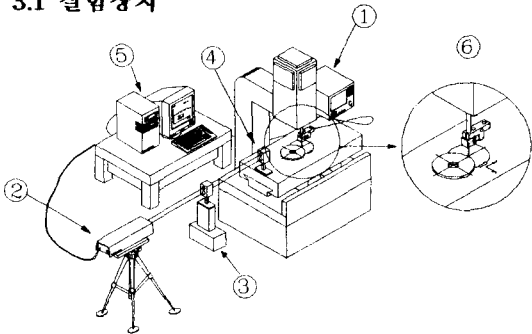


Fig. 3 Schematic of measurement system

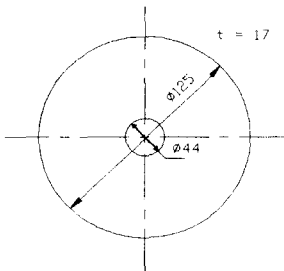


Fig. 4 Master ring

본 실험의 실험장치는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. ①은 측정 대상인 머시닝센터로서 일본 도시바의 것을 사용하였고, ②는 테이블의 가감속을 측정하기 위한 휴렛 팩커드사의 HP5529A 레이저, ③은 측정 킷트인 레이저 인터페로메터 및 ④는 리니어 리트로리플렉터(Linear retroreflector)이다. 그

리고 ⑤는 측정된 데이터를 분석, 저장, 디스플레이 할 수 있는 컴퓨터 시스템, ⑥은 진원도를 측정하는 장비로서 기본적으로 Circular test법을 이용하였다.

진원도 측정에 사용된 기준원반은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 내경 $\phi 44$, 외경 $\phi 125$, 그리고 두께 $t = 17\text{mm}$ 로 셋팅하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서는 기계의 이송운동의 시작과 측정 개시의 동기를 리미트 스위치를 사용하지 않고 2차원 프로브에서 나오는 아날로그 신호를 trigger에 이용하여 동기 시켰다.

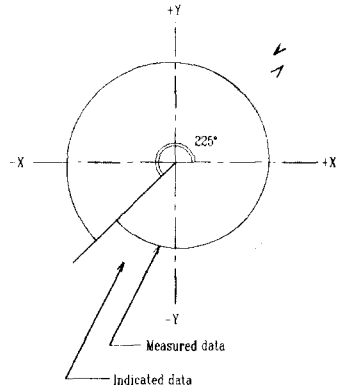


Fig. 5 Visual indication of measuring method

그리고 가감속에 의한 원호 형상의 일그러짐을 없애기 위하여 2차원 프로브를 720° 회전시켰다. 그 가운데 가감속의 영향을 받지 않을 것으로 생각되는 360° 분의 데이터를 표시하는 프로그램을 작성하였다. 이 때 상반변환에 따른 backlash의 영향이 있을 것으로 생각되어 Fig. 5에서와 같이 45° 의 위치에서 2차원 프로브를 접촉시켜 측정을 시작하고 225° 의 위치에서 360° 분의 데이터를 표시하는 방법을 취하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 새로운 시스템의 적용

본 측정시스템은 2차원 프로브에서 검출된 아날로그 신호를 트리거 신호로 이용하였다. 그렇기 때문에 Fig. 6에 나타낸 주축에 부착시킨 2차원 프로브는 NC프로그램에 의해 초기변위량이 $50\mu\text{m}$ 변위

하고 나서 원운동을 행하도록 하였으며, 2차원 프로브의 변위가 $20\mu\text{m}$ 가 넘으면 트리거가 걸리며 측정을 하도록 하였다. 그 이후는 기계가 등속도 운동을 하고 있다고 가정하여 일정시간마다 데이터를 샘플링하였다.

그런데 기계의 이송운동은 가속을 하기 때문에 가속할 때와 감속할 때는 등속도 운동을 한다고 할 수 없다. 그러나 기존의 CT법에서는 기계는 등속도 운동하고 있는 것으로 가정하고 샘플링 시간을 설정하였다. 그러나 실제 이송운동은 가속의 영향에 의해 산출된 시간보다 짧은 시간이 걸리므로 Fig. 7에 나타난 바와 같이 여분으로 걸린 시간의 데이터는 없애버린다. 이와 같이 없애버린 데이터를 보충하기 위하여 데이터를 연장하여 360° 로 전개한다. 따라서 동기는 정확하게 이루어지지만 상한변환에 따른 stick motion의 표시위치가 약간 뒤쪽으로 나타나며, 원호형상이 조금은 일그러져서 나타난다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 측정시스템에서는 원운동을 720° 시켜 그 가운데 가속도의 영향을 받지 않을 것으로 생각되는 부분에서 360° 분의 데이터를 취하는 것으로 하였다.

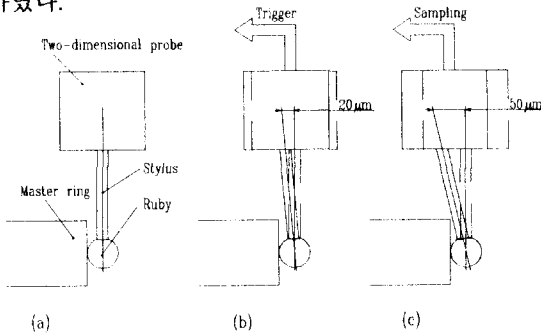


Fig. 6 Movement of stylus

본 측정시스템에 의한 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 stick motion의 위치가 각 좌표축에서 약간씩 벗어나서 원주방향으로 치우쳐있다.

따라서 stick motion의 위치가 각 좌표축과 일치하지 않는 원인으로서는 트리거의 영향, 가속도의 영향 등을 열거할 수 있으며 이들에 대한 해석과 그 보정방법에 대하여 논하였다.

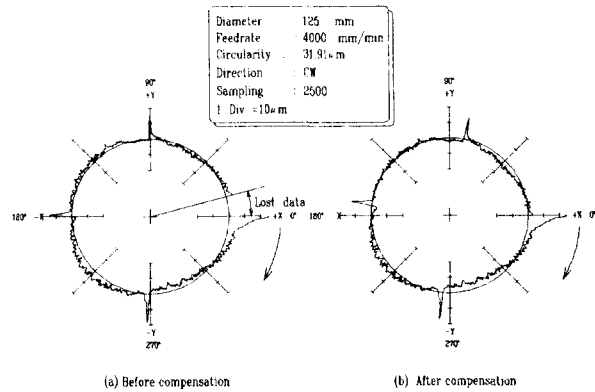


Fig. 7 Lost data by acceleration

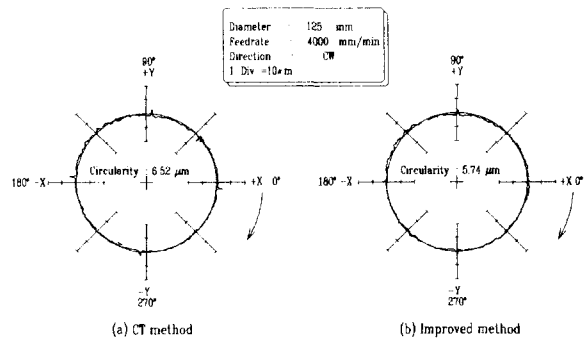


Fig. 8 Comparison of CT method and improved method

4.2 트리거의 영향

본 시스템은 2차원 프로브가 $20\mu\text{m}$ 변위하면 트리거가 걸려서 샘플링을 시작한다. 그런데 이 경우 트리거가 걸리고 나서 2차원 프로브가 초기변위량 $50\mu\text{m}$ 에 도달할 때까지의 $30\mu\text{m}$ 구간에서 이미 데이터를 샘플링하고 있다. 이 구간에서 샘플링한 데이터는 버려야 하므로 이 때 샘플링한 갯수는 알아야 한다.

n 을 트리거에 의해 잃어들인 데이터의 수라고 하면

$$n = \frac{t_0 \cdot N}{L} F \quad (3)$$

여기서 n : 트리거의 영향으로 잃어들인 데이터의 수
 t_0 : 프로브가 $30\mu\text{m}$ 이동하는 동안의 시간 (s)
 N : 샘플링 수
 L : 기준원판의 원주길이 (mm)

F : 이송속도 (mm/min)

식 (3)과 같이 트리거의 영향으로 읽어들이는 데이터의 수는 이송속도에 관한 1차식으로 되며, 이것은 원호보간 운동하기 이전의 데이터이다. 따라서 측정에 의해서 얻어진 N개의 데이터 가운데 처음부터 n개까지의 데이터를 없애고 360° 분에 해당되는 데이터를 표시하도록 보정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서와 같이 트리거에 의한 영향은 원호형상이 원주방향으로 치우치는데 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

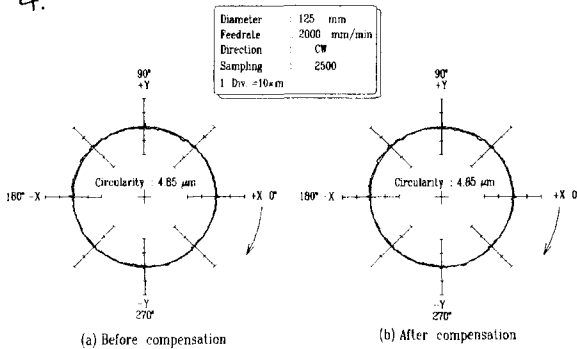


Fig. 9 Result of compensation

4.3 가감속에 의한 영향

기존의 CT법에서는 기계가 등속도운동을 하고 있다고 가정하였으나 실제 기계의 이송운동에는 가감속이 있으므로 원호형상이 일그러진 형태로 나타난다. 이것을 조사하기 위하여 머시닝 센터의 X축과 Y축에 관한 직선운동의 속도와 가속도를 측정하였으며 그 측정방법은 Fig. 3과 같다. 즉, 머시닝 센터의 테이블에 간섭계를 부착시키고 주축에 반사경을 부착시켜 1축만을 20mm씩 직선보간운동시켜 시간에 대한 거리를 측정하였다. 얻어진 데이터는 시간에 대하여 미분하여 속도를 구하고, 이렇게 하여 얻은 결과를 Fig. 10 과 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서와 같이 기계는 가감속하는데 시간이 걸리므로 등속운동이라고 가정한 것과는 차이가 나며 이 차이가 보정해야 할 값이다.

이송속도에 따른 보정해야 할 데이터의 수는 Table 1에 나타낸 바와 같으며 측정하여 얻어진 데이터 수에 여기서 구한 데이터 수를 빼면 가감속에 의한 영향을 배제시킨 결과가 된다. 가감속에

의한 영향을 배제한 결과를 기준원상에 전개하면 Fig. 12와 같다. 그림에서와 같이 stick motion의 위치가 각 좌표축에 거의 일치하고 있다. 따라서 진원도의 측정결과가 원주방향으로 회전하여 그려지는 원인은 가감속에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 축의 단위시간당 이동량을 알고 기계의 속도와 가속도를 구하면 가감속의 영향을 줄일 수 있다고 생각된다.

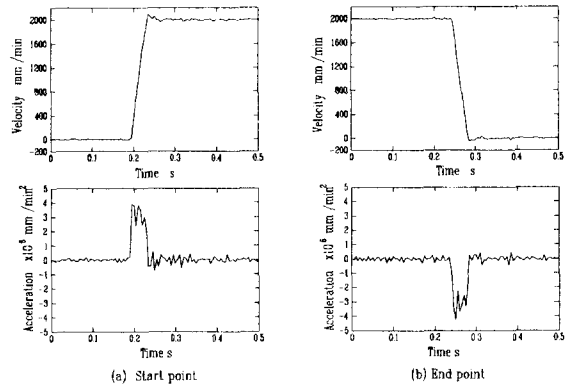


Fig. 10 Velocity and acceleration in linear motion (Feedrate : 2000 mm/min, X axis)

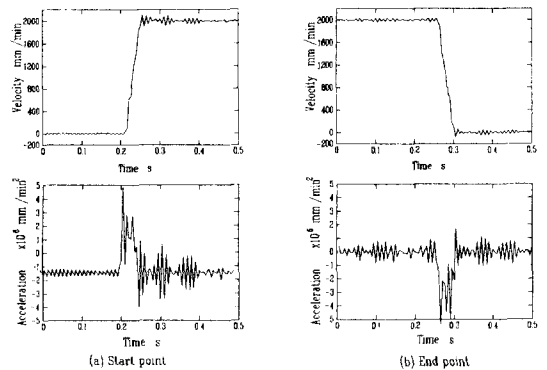


Fig. 11 Velocity and acceleration in linear motion (Feedrate : 2000 mm/min, Y axis)

Table 1 가속시간과 가감속에 의한 보정데이터수

F(mm/min)	X		Y	
	$\Delta t(s)$	n	$\Delta t(s)$	n
2,000	54.95	3	54.95	3
4,000	89.66	10	89.66	10

F : 이송속도(mm/min)

Δt : 가속시간(s)

n : 보정 데이터 수

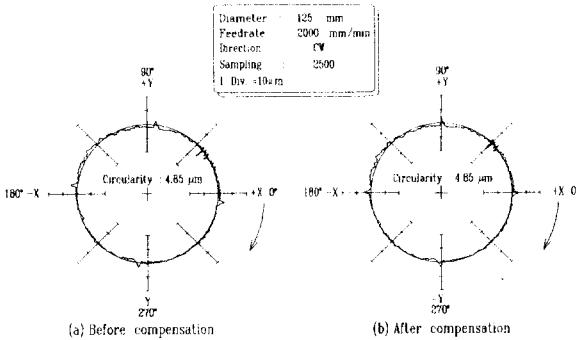


Fig. 12 Result of compensation

4.4 다른 방법과의 비교

Fig. 13은 일반적인 Circular Test법에 의한 것과 본 측정시스템을 이용한 결과를 비교한 것이다. 진원도의 크기가 일반 CT법에서는 8.39 μ m인데 비하여 본 측정시스템을 이용한 것은 4.25 μ m로서 작다. 그리고 일반 CT법은 stick motion의 위치가 원주방향으로 치우쳐있으며, 측정개시 위치에 생긴 돌기가 진원도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

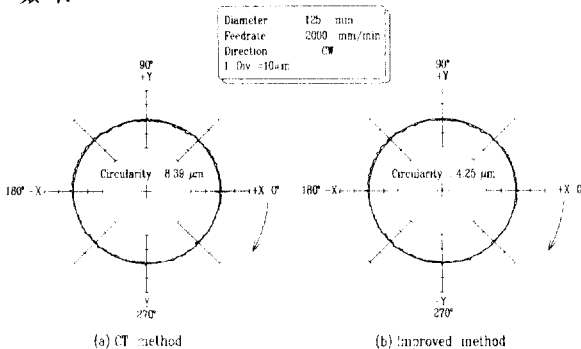


Fig. 13 Comparison of CT method and improved method

Fig. 14는 $r\theta$ 법과 본 측정시스템에 의한 결과를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 진원도의 형상과 크기가 비슷하게 나타났다. 따라서 진원도의 측정에서는 본 시스템과 $r\theta$ 법이 거의 유사한 성능을 가지고 있다고 할 수 있다.

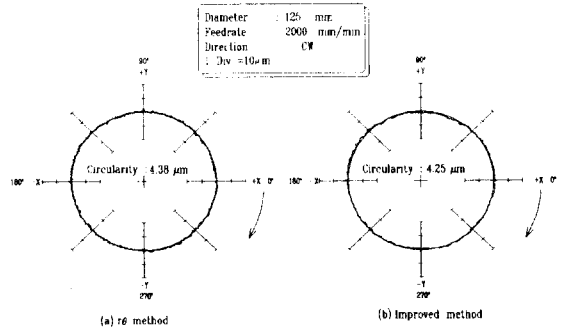


Fig. 14 Comparison of $r\theta$ method and improved method

5. 결론

Circular Test법을 기준으로 하여 머시닝센터의 진원도 측정방법에 대하여 새로운 측정방법을 연구하였으며, 여기서 연구된 측정방법을 이용하여 진원도에 관한 측정을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 CT법에서 아날로그 신호를 트리거 신호로 이용함으로써 진원도를 정확하게 측정가능하다.
- 2) 원호보간운동을 720° 시킨 가운데 360° 분의 데이터만 취하는 것에 의해 가속도의 영향에 의한 진원도 형상의 변형을 막을 수 있었다.
- 3) 본 측정시스템은 다른 측정시스템과 비교하여 동등 이상의 신뢰도를 얻을 수 있었다.

6. 참고문헌

- 1) Heujae Pakh, Jonghoo Kim, "Application of Microcomputer for Assessing the Probe Lobing Error and Geometric Errors of CMMs Using Commercial Ring Gauges", Int. J. of Adv. Manuf. Tech., Vol. 10, pp. 208-218, 1995
- 2) 박희재, "정밀도 성능 평가를 위한 3차원 측정기 수치 모델 개발", 대한기계학회논문집, 1996
- 3) 堤正臣, NC工作機械の運動の新しい測定方法, 日本機械學會論文集, Vol. 58, No. 545, pp. 271~276, 1992
- 4) W. Knapp, "The Circular Test for Testing NC-Machine Tools" Zurich, Switzerland, 1986
- 5) J. B. Bryan, "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part I : Principles and Application", Precision Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 61~69, 1982