

CT법을 이용한 직직도 및 직각도 측정에 관한 연구

이승수*, 김민주*, 박정보**, 전언찬***

A Study on the Measurement for Straightness and Orthogonality Using CT Method

Seung Soo Lee*, Min-Ju Kim*, Jung-Bo Park**, Eon-Chan Jeon***

Abstract

As high-precision parts are needed with manufacturing techniques improved, the demand of high-precision machine tools has been increasing. They are made to develop the precision measuring skill to maintenance the accuracy of themselves as a matter of course.

We on the paper measured straightness and orthogonality of the square to verify that it is possible for CT(circular test) method by 2-dimensional probe and the square to measure orthogonality. Furthermore, we compared the result of the study with the computer simulation's to prove its possibility, and made an improvement of measuring method.

Key Words : Accuracy(정확도), Straightness(직직도), Orthogonality(직각도), Two-dimensional probe(2차원 프로브)

1. 서론

최근 각광받고 있는 NC 공작기계에 의한 정밀 가공분야에서는 직선운동 및 원호보간운동 등 이송에 따른 운동 정밀도 및 주축의 회전정도가 가장 문제가 되며, 따라서 운동정밀도 측정기술의 확립과 이것을 기초로 한 정밀 이송운동기구 및 운동 제어기술의 개발요구가 증대되고 있다. 공작기계의 정적 정밀도 오차 발생요인은 기하학적 오차, 열변형 오차 및 NC구동시스템에서 발생하는 오차 등이 있는데,

이러한 정적정밀도의 측정은 정기적으로 기계성능 유지 검사 및 오차 보정 검사의 수단으로 실시된다.¹⁾ 또한 가공된 부품의 정밀도는 그것을 가공한 공작기계의 정밀도에 의해 좌우되므로 고정밀도의 부품 가공을 위해서는 공작기계의 정밀도를 미리 평가하여 그 결과를 설계에 반영시킬 필요가 있다.²⁾

국제 표준화 기구(ISO)나 일본 공업규격(JIS)에서는 공작기계의 정밀도 시험에 관한 내용을 규정해 놓고 있는데 그 중 정적정밀도 시험의 하나로서 직선운동의 기하학적인

* 동아대학교 대학원 기계공학과
(이승수 matisses@lycos.co.kr)

** 삼지대학교 기계·정밀·자동제어공학부

*** 동아대학교 기계·산업시스템공학부

정밀도, 즉 진직도, 직각도, 평행도 및 평면도 등을 측정하도록 규정하고 있다.^{3),4)} 그러나 공작기계의 이송의 고속화와 제품의 고정도 요구로 각 운동축의 단순한 기하학적 정밀도 측정 뿐 아니라 보간운동 정밀도까지 평가할 필요가 있다. 직선보간운동 정밀도의 측정에는 특별한 전용측정기가 없으며 ISO에서는 직각정규(square), 다이얼 게이지, 전기 마이크로 미터 및 레이저 간섭계 등을 측정기로 규정해 놓고 있다. 특히 레이저 간섭계 시스템은 일반 공작기계에 널리 사용되고 있는 광전자형의 엔코더 변위계에 비해 길이 표준에 직접 소급되어 나노 미터 단위의 높은 정확도를 보장할 수 있으며, 레이저 간섭계 시스템의 응용이 산업적인 용도로 다양화됨에 따라 레이저 간섭계 시스템 자체의 절대 측정 불확실성을 낮추기 위한 제반 연구가 활발히 진행되고 있다.⁵⁾ 하지만 이러한 측정장비를 사용하는 데는 숙련된 기술자와 많은 셋팅 시간뿐만 아니라 고가의 장비라는 단점이 있다. 그러므로 저가이면서 레이저가 가지는 정밀성을 보장할 수 있는 측정방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 써클러 테스트(circular test, CT) 법에 의한 진직도 및 직각도 측정 가능성을 확인하기 위하여 진원도 측정에 사용되는 2차원 프로브와 직각정규를 이용하여 직각정규 내측면의 진직도 및 직선의 방향 변환부의 직각도를 측정하였다. 그리고 그 결과를 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과와 비교하여 그 유효성을 검증하며, 나아가 측정 방법상의 개선점을 찾고자 한다.

2. 진직도와 직각도

써클러 테스트법에서 직각도의 측정은 직각정규를 Fig. 1과 같이 CNC 테이블 위에 X축과 Y축에 나란하게 설치하고 여기에 2차원 프로브를 직각정규의 내측면에 접촉시켜 내측면의 진직도와 방향변환부의 직각도를 측정한다. 이렇게 프로브를 통해서 받아들인 X, Y축의 두 채널의 아날로그 신호를 차지 앰프리파이어를 통하여 증폭시킨 다음, 저대역필터를 통해서 기준치 이하의 데이터를 제거하고, A/D에서 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜 컴퓨터에 입력시켜 그 결과를 출력한다.

또한 측정방향을 Fig. 2에서의 방법 A, B와 같이 두 가지 방식으로 다르게 실험하였다. 즉 Fig. 2 (a)에서와 같이 직각정규의 수직방향의 끝에서 방향변환부를 지나 수평방향의 끝으로 측정하는 방법과 Fig. 2 (b)에서와 같이 수직방향의 끝에서 방향변환부를 향해서 측정하고, 수평방향의 끝에서

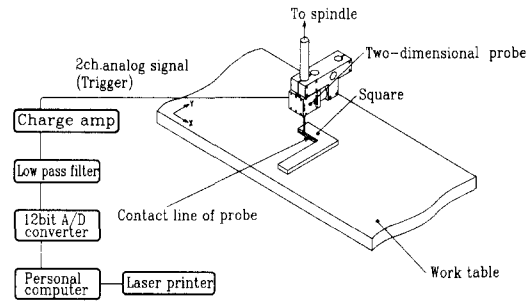


Fig. 1 Measuring system of circular test



Fig. 2 Measuring direction of square

방향변환부를 향해서 측정하는 두 가지 다른 방법을 사용하여 실험함으로써 실험의 오차를 줄일 수 있는 방법을 알아낼 수 있을 것으로 판단된다.

3. 데이터 처리방법

측정길이를 L (mm), 이송속도를 F (mm/min), 그리고 샘플링 수를 N 이라 하면 샘플링 시간 Δt 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta t = \frac{L}{F/60} \times \frac{1}{N} \text{ (sec)} \quad (1)$$

이와 같이 하여 데이터의 샘플링 시간 Δt 를 산출하여 이것을 샘플링 시간(sampling clock)으로 하고 트리거가 걸린 다음부터는 Δt 시간마다 한 점씩 샘플링하도록 하였다.

이후의 데이터 처리방법은 원호보간운동의 데이터 처리방법과 같이 프로브를 통해서 얻어진 X, Y방향의 신호 DX

및 DY는 다음과 같이 1차원의 변위 D로 변환시킨다.

$$D_n = \sqrt{DX_n^2 + DY_n^2} \quad (2)$$

여기서 D : 프로브의 변위

DX : X방향의 프로브의 변위

DY : Y방향의 프로브의 변위

n : 데이터의 번호

이다. 이렇게 하여 프로브의 변위를 구할 수 있으며, 데이터 수와 변위와의 관계를 그래프로 나타낼 수 있다.

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험 장치는 이전의 원호보간운동 정밀도 측정에 사용한 것과 같으나 기준원반 대신 직각정규를 사용하여 직선보간운동 정밀도 및 방향변환부의 직각도를 측정하였다. 실험에 사용한 2차원 프로브(모델명 BIDIM-K)의 각종 사양을 Table 1에 나타내었으며, 모양과 치수는 Fig. 3과 같다. 스틸러스(stylus)의 재질은 루비이며 전체길이 55.5mm, 시험편과 접촉하는 부분의 구의 직경은 6mm인 것을 사용하였다. 그리고 앰프는 프리앰프로써 본 실험에서의 증폭율은 약 24배로 하였으며, X방향 및 Y방향의 분해능은 양쪽 모두 0.1 μ m이다. 또한 저대역 필터는 2채널 짜리로서 차단주파수는 30Hz이다. 그리고 A/D변환기는 컴퓨터 확장 슬롯 내장형으로서 2채널 12비트의 것을 사용하여 데이터 처리용 IBM 32비트 컴퓨터에 연결하였다.

그리고 실험에 사용한 직각정규의 형상과 크기는 Fig. 4에 나타내었다.

또한 실험 장치는 Fig. 5와 같고, 본 실험에서 사용한 X-Y테이블은 반 폐 루프(semi-closed loop)제어와 폐 루프(closed loop)제어를 모두 할 수 있는 구조이다. 그리고 X

축 및 Y축의 행정(stroke)은 각각 400mm 및 300mm이고, 볼 스크류의 리드는 10mm이며, 제어축의 기본이송단위

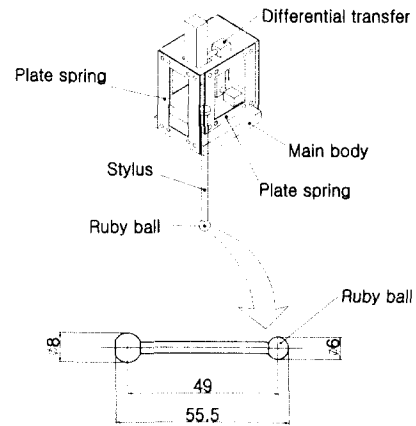


Fig. 3 Structure of 2-dimensional probe and shape of stylus

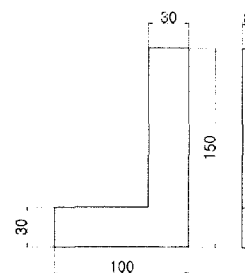


Fig. 4 Shape and dimensions of square

Table 1 Specifications of 2-dimensional probe

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

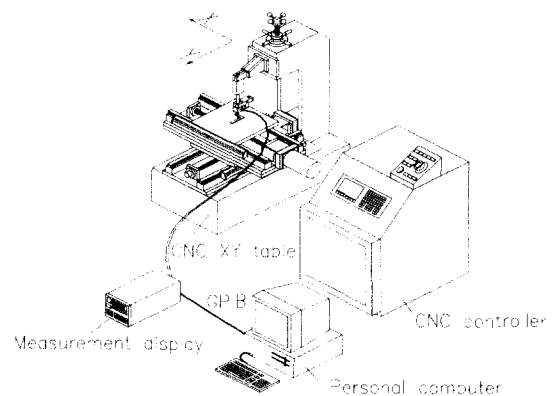


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

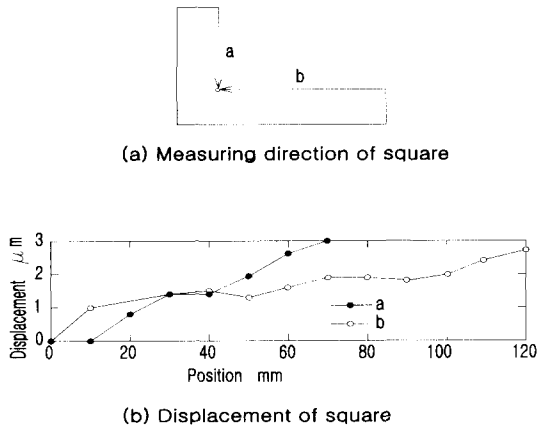


Fig. 6 Measuring direction and displacement of square

(BLU, basic length unit)는 $1 \mu\text{m}$ 이다.

4.2 실험방법

2차원 프로브의 선단을 측정 대상물인 직각정규의 측면에 접촉시키고 직선보간운동시켰을 때 나타난 신호를 GPIB가 내장된 컴퓨터에 입력시킨 다음 이것을 다시 AutoCAD 상의 스크립트 파일(script file)로 변환시켜 그 결과를 레이저 프린터로 출력시켰다.

직각도의 측정은 진원도의 측정과 마찬가지로 2차원 프로브의 변위 DX , DY 를 식(7)을 사용하여 1차원의 변위 D 로 변환하여 직선상에 등간격으로 전개한다. 양단의 평균값을 직선(평가직선)으로 연결하고 각도 α (e : 변의 번호)를 구한다. 평가직선상에 전개된 프로브의 변위와 평가직선과의 차를 운동오차성분으로 하고 그 최대치를 진직도라 한다. 그리고 각 변위 시점에서 기준이 되는 변에 대하여 직각인 변의 기준 직선을 구하여 이들과 운동계적과의 최대차를 직각도로 하였다.

본 연구에서는 직각정규의 내측면을 전기 마이크로미터를 이용하여 Fig. 6의 (a)와 같이 측정하였다.

X축과 Y축의 측정방향은 그림에서와 같이 a, b방향으로 하였다. 그 결과는 Fig. 6의 (b)에 나타난 바와 같다. 즉, 직각정규의 내측면의 진직도는 X방향과 Y방향 모두 $3 \mu\text{m}$ 이내로 들어왔다. 따라서 Fig. 8에 나타난 돌기부(projection)의 오차는 직각정규의 형상오차에 의한 것이 아님을 알 수 있다.

그리고 본 측정시스템은 2차원 프로브에서 검출된 아날로그 신호를 트리거 신호로 이용하였다. 하지만 이전 연구

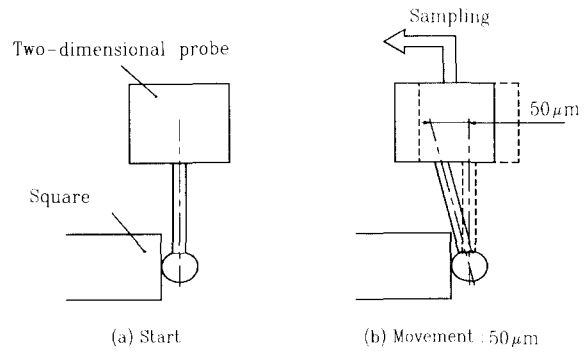


Fig. 7 Movement of stylus

의 진원도 측정과 달리 직각정규를 사용하기 때문에 Fig. 7에 나타난 주축에 부착시킨 2차원 프로브는 NC프로그램에 의해 초기 변위량이 $50 \mu\text{m}$ 가 넘으면 트리거가 걸리며 테이블이 운동하는 동시에 측정을 하도록 하였다. 그 이후는 기계가 등속도 운동을 하고 있다고 가정하여 일정시간마다 데이터를 샘플링 하였다. 그리고 측정 방법은 먼저 프로브가 직각정규의 내측면에 수직 방향으로 접촉하도록 하고 변위가 $50 \mu\text{m}$ 될 때까지 테이블을 이송한 후, 직각정규면의 평행한 방향으로 직각정규의 끝까지 후퇴시킨다. 그런 다음 직각정규의 내측의 원점 방향으로 이송시키면서 측정을 시작하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 진직도 및 직각도의 측정

Fig. 8에 직각정규를 이용하여 측정한 내측면 방향변환부의 직각도를 나타내었다. 그림에서 Point는 20씩, 변위는 $20 \mu\text{m}$ 단위씩 각각 분할하여 표시하였다. 또한 그림(a)에서는 테이블의 이송속도 200 mm/min 의 측정결과를 나타내었으며, 그림(b)에서는 이송속도 500 mm/min 의 측정결과를 나타내었다. 그리고 그래프에서 X, Y로 표시한 것은 각각 X축방향과 Y축방향을 표시한 것이다. 측정결과 그래프를 살펴보면 그림에서와 같이 직각정규의 내측면을 Y축에서 원점을 향해서 측정했을 때, 전반부의 X축방향의 변위는 크게 나타나고, Y축방향의 변위는 마찰에 의해 2차원 프로브와 지연되어 상대적으로 적은 변위를 나타냄을 알 수 있다.

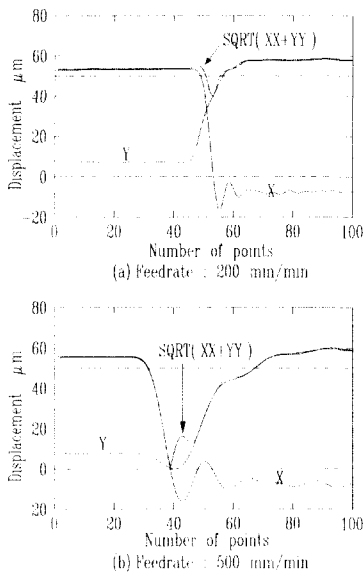


Fig. 8 Relation between number of points and displacement for inside square

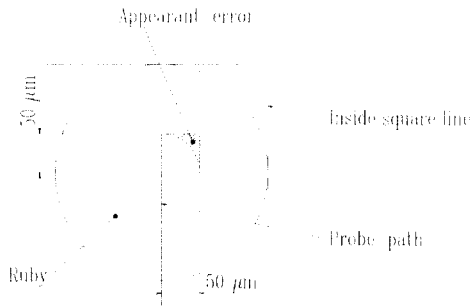


Fig. 9 Visual indication of apparent error

본 측정시스템에서는 2차원 프로브에 초기 변위량 $50 \mu\text{m}$ 을 주고, 이와 같은 상태에서 직각정규를 따라가며 측정하도록 하였다. 따라서 $50 \mu\text{m}$ 부터의 변위량을 기계의 오차로 표시하기 위하여, 데이터 처리 프로그램을 초기 변위량이 항상 $50 \mu\text{m}$ 이라고 가정하여 데이터를 처리하였다. 그러나 실제의 움직임은 Fig. 9의 빗금친 부분에 나타난 바와 같이 방향변환부에서 초기 변위량이 $50 \mu\text{m}$ 이상 되어 있다. 따라서 이 위치에서는 실제 기계의 움직임에 의한 오차에 외관상의 오차가 포함되어 나타난다고 생각된다. 방향변환부에 나타난 돌기 모양의 오차에 외관상의 오차가 포함되어 있다면 초기변위량을 크게 하면 외관상의 오차도 크게

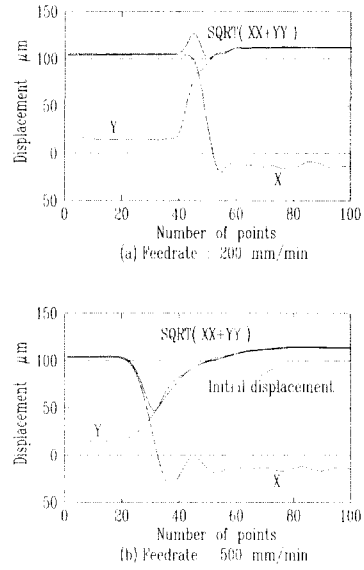


Fig. 10 Displacement of X-Y direction for number of points

되며 돌기모양의 오차도 커질 것이다. 그래서 초기변위량을 $100 \mu\text{m}$ 및 $200 \mu\text{m}$ 으로 설정하여 같은 실험을 하였으며 그 결과를 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타내었다.

이송속도가 200 mm/min 의 경우, 초기변위량이 $50 \mu\text{m}$ 일 때에는 약 $10 \mu\text{m}$ 의 돌기가 아래쪽으로 나타났으나 초기 변위량을 $100 \mu\text{m}$ 으로 하였을 때는 약 $25 \mu\text{m}$ 의 돌기가 위쪽으로 나타나 있었다. 더욱이 초기변위량을 $200 \mu\text{m}$ 으로 하였을 때에는 위쪽에 나타난 돌기의 크기가 $70 \mu\text{m}$ 정도 되었다. 이것은 외관상의 오차의 크기에 따라서 돌기가 크게 나타남을 의미한다. 여기서 외관상의 오차가 나타나는 위치는 방향변환부임을 알 수 있었다. 이송속도가 500 mm/min 의 경우, 초기변위량이 $50 \mu\text{m}$ 일 때에는 방향변환위치에서 2차원 프로브가 직각정규와 떨어져 있기 때문에 측정이 되지 않는다. 그러나 초기 변위량이 $100 \mu\text{m}$ 일 때 2차원 프로브는 방향변환부에서도 직각정규와 접촉하고 있기 때문에 측정이 가능하였지만 초기변위량이 $200 \mu\text{m}$ 이 되면 2차원 프로브가 직각정규에 항상 접촉해 있음에도 불구하고 다른 측정결과와 경향이 다르게 나타났다. 이것은 초기변위량이 커짐에 따른 외관상 오차도 크게 되어서 이와 같이 표시된 것으로 생각된다.

본 측정시스템에서 얻어진 변위 벡터는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 기계의 오차벡터, 초기변위량의 벡터 및 마찰벡

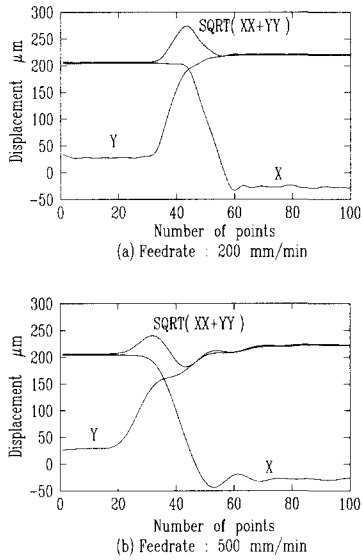


Fig. 11 Displacement of X-Y direction
(Initial displacement : 200 μ m)

터의 세 가지로 합성되어 있다. 2차원 프로브가 방향변환위치에 있을 때에는 스타일러스는 직각정규의 X축과 Y축에 동시에 접촉하고 있으므로 정지상태가 되며, 이 때 마찰벡터는 0이다. 그리고 프로브가 X축과 Y축에 평행하게 이동하고 있을 때에는 Fig. 8, Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 변위의 크기를 알 수 있고 방향도 알 수 있다. 그러나 본 시스템은 위치에 대한 정확한 오차를 알 수 없으므로 이것을 보정하는 것은 곤란하며 여기에 관해서는 향후 보완해야 할 과제이다. 만약 위치에 대한 오차를 알면 2차원 프로브의 궤적을 기준으로 하여 그 선상에 데이터를 전개하면 실제 기계의 운동궤적을 알 수 있으며 이것으로 NC제어계의 오차를 평가할 수 있을 것이다.

5.2 유효성의 검증

본 측정시스템이 직각정규의 방향변환부에서 측정한 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 머시닝 센터의 시뮬레이션을 행하는 소프트웨어를 이용하여 직선보간운동 시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 시뮬레이션에 관한 결과는 NC지령치에 대한 기계의 지연, 즉 추종지연을 나타내고 있다. X방향 및 Y방향의 1차원의 변위는 지령치에 대한 지연량을 나타내고 있다. 이것은 본 측정시스템의 결과에서 X방향 및 Y방향의 변위와는 다르기

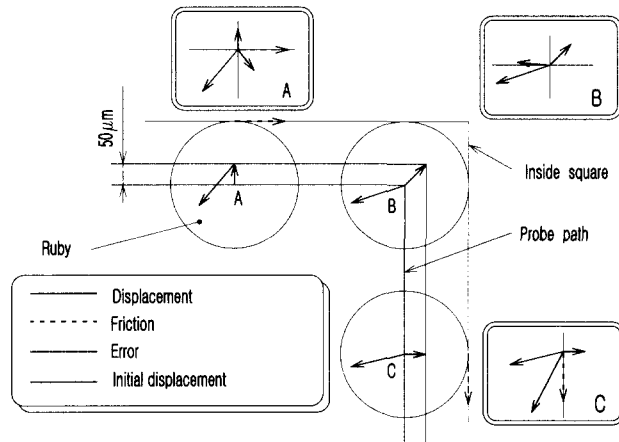


Fig. 12 Visual indication of error vector

때문에 이것을 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해서는 2차원의 변위로 변환시켜야 하며 그 결과를 Fig. 13에 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 의한 결과는 본 시스템에 의한 실험 결과와 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

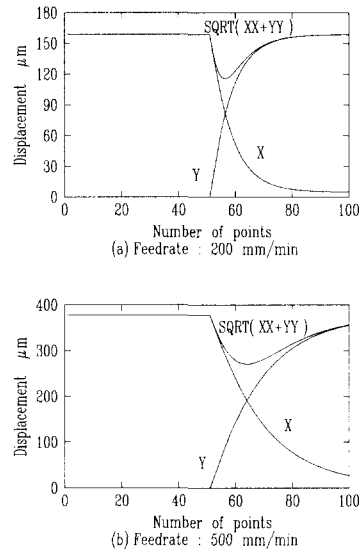
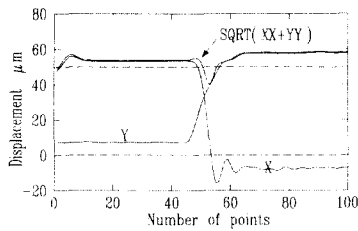
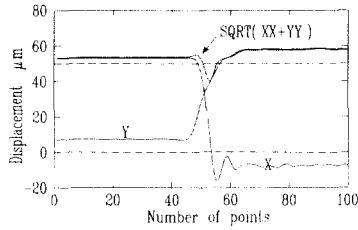


Fig. 13 Simulation of displacement for linear motion



(a) Previous Method (Limit Switch)



(b) Advanced Method (Trigger)

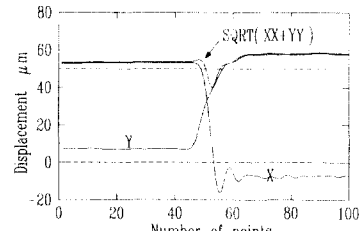
Fig. 14 Comparison of previous method and advanced method

5.3 데이터 샘플링의 동기화

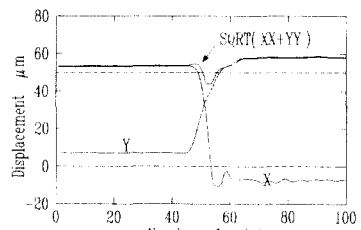
접촉식 프로브의 동기 타이밍을 맞추기 위해서 일반적으로 사용하는 리미트 스위치는 직각정규의 시작부분에 닿으면서 데이터를 바로 읽어 들임으로써 프로브가 직각정규의 면에 접촉하는 부분의 돌출 오차를 포함하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이송운동과 데이터 샘플링의 동기화를 리미트 스위치 대신에 트리거를 이용하여 프로브의 아날로그 신호를 바로 받아들임으로써 Fig. 14에서와 같이 시작부분의 데이터의 오차를 제거할 수 있었다.

5.4 측정방향의 변환

본 실험에서는 실험의 오차를 줄이기 위하여 측정방향을 변환하였다. Fig. 2의 그림(a)에서 나타난 것이 이전의 측정방향인 방법A, 그리고 그림(b)에서 나타난 것이 개선된 측정방향인 방법B이다. 그리고 그 결과 그래프를 Fig. 16에 나타내었다. 일차적으로 Fig. 2의 (a)와 같이 직각정규의 내측면을 따라서 한번에 측정하였고, 그 결과를 나타낸 것이 Fig. 15의 그래프 (a)이다. 그림(a)에서 보는 바와 같이 그래프의 중간에서 약 $10\mu\text{m}$ 의 아래쪽 돌기가 나타났다. 이에 두번째에는 Fig. 2의 (b)와 같이 직각정규의 수직방향의 시작부분에서 방향변환부를 향해서 측정하고, 다시 수평방향의 시작부분에서 방향변환부를 향해서 측정하였다. 그 결



(a) Result of method A



(b) Result of method B

Fig. 15 Comparison of method A and B

과 Fig. 15의 그래프 (b)와 같이 약 $6\mu\text{m}$ 의 돌기가 나타났다. 따라서 측정방향을 변환시킨 개선된 방법으로 실험을 함으로써 약 $4\mu\text{m}$ 정도의 방향변환부 오차를 줄일 수가 있었다.

6. 결론

진원도 측정에 사용되는 2차원 프로브와 직각정규를 이용하여 NC공작기계용 X-Y 테이블의 직선운동과 방향변환부의 직각도를 측정하였으며, 실험결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 씨쿨러 테스트법을 이용하여 직각정규의 진직도 및 직각도를 측정하고 결과에서 나타난 오차를 분석할 수 있었다.
- (2) 본 실험의 결과를 컴퓨터에 의한 시뮬레이션 결과와 비교한 결과 본 측정 시스템에 의한 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.
- (3) 2차원 프로브에서의 아날로그 신호를 트리거로 이용함으로써 직각정규의 진직도 및 직각도를 용이하게 측정할 수 있었다.
- (4) 직각정규의 측정방향을 바꿈으로써 방향변환부에서

발생하는 돌기오차를 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 학국과학재단의 핵심전문연구(과제번호 981-1007-044-1)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) ISO 230-1 "Acceptance Cord for Machine Tools. Part 1, Geometric Accuracy of Machine Operating Under No-load or Finishing Conditions", 1992.
- (2) 中澤 弘, "알기쉬운 정밀공학", 한국경제신문사, pp. 274~281, 1997.
- (3) ISO/DIS 230-4, "Acceptance Code for Machine Tools, Part 4, Circular Tests for Numerically Controlled Machine Tools," 1944.
- (4) JIS B6191, "Machine Tools-Geometric Accuracy Tests and Practical Tests-Test Method", 1993.
- (5) 박정보, 김민주, 전언찬, "레이저를 이용한 테이블 처짐 측정과 시뮬레이션에 관한 연구", 한국공작기계학회, Vol. 8, No. 6, pp. 55~63, 1999.