

서브미크론 진직도 측정장치 개발

박천홍*, 정재훈**, 김수태***, 이후상*

Development of a Submicron Order Straightness Measuring Device

Chun Hong Park*, Jae Hoon Chung**, Soo Tae Kim*** and Husang Lee*

ABSTRACT

For measuring out the submicron order straightness, a precision measuring device is developed in this paper. The device is constructed with a hydrostatic feed table and a capacitive type sensor which is mounted to the feed table. Straightness is acquired as subtracting the motion error of feed table from the measured profile with probe. Motion error of feed table is simultaneously compensated upto $0.12\mu\text{m}$ of linear motion error and 0.20arcsec of angular motion error using the active controlled capillary. Reversal method and straight-edge is used for estimating the measuring accuracy and from the experimental result, it is verified that the device has the measuring accuracy $0.03\mu\text{m}$. Also, through the practical application on the measurement of ground surface, it is confirmed that the device is very effective to measure the submicron order straightness.

Key Words : Submicron straightness(서브미크론 진직도), Hydrostatic table(유정압테이블), Motion error(운동오차), Compensation(보정), Capacitive type sensor(용량형 센서), Direct method(직접법)

1. 서론

정밀기계를 구성하는 핵심부품의 가공정밀도를 측정, 검사하는 공정은 제품의 성능을 안정화하고 향상시키기 위해 필수 불가결하다고 할 수 있다. 이러한 검사를 위한 대표적인 장비가 3차원측정기라고 할 수 있으며 고정밀부품의 품질검사의 중추적인 역할을 수행하고 있다. 그러나 최근들어 각종 산업용 핵심부품의 요구정밀도가 엄격해지면서 3차원측정기 등으로는 검사가 불가능한, 서브미크론대의 가공정밀도가 요구되는 고정밀부품의 수요가 급증하고 있다. 이러한 서브미크론대의 진직도를

측정하기 위한 방법으로 이전부터 테이블 회전식 진원도측정기에서 반전법을 이용하여 측정하는 방법 등이 일반적으로 사용되어 왔으나 측정기 자체가 고가이며 프루브 컬럼의 고유오차가 측정오차보다 크고 각운동오차등의 영향을 배제할 수 없어 측정결과에 신뢰도 다소 떨어진다는 단점이 있다. 보다 고정도의 진직도를 측정하기 위한 방법으로 2개 이상의 변위센서를 이용한 축차다점법, 또는 개량형 축차3점법에 의한 측정 등이 최근 활발히 연구되고 있으나 알고리즘상에 불감주파수가 존재하는 등의 어려움이 있어 아직 본격적으로 실용화되지 못하고 있는 실정이다^{[1][2]}.

* 한국기계연구원 자동화연구부
** 창원대학교 대학원
*** 창원대학교 기계공학과

본 논문에서는 서브미크론대의 진직도를 측정하기 위한 한 가지 방법으로, 고정밀 유정압테이블 상에 용량형센서를 프루브로 탑재시켜 피측정물의 표면을 측정하고, 측정된 신호로부터 이송테이블의 운동오차를 제거함으로써 상대적으로 간단히 서브미크론대의 진직도를 측정(이하 직접법)할 수 있는 고정밀 진직도측정장치를 개발하고자 하였다.

직접법을 이용하여 진직도를 측정하기 위해서는 이송테이블의 운동정도를 미리 정확히 알고 있어야 하며 측정용 프루브의 설치위치에 따른 측정오차를 최대한 억제할 필요가 있다. 본 논문에서는 측정장치의 정밀도를 검증하기 위해, 먼저 기지의 진직도를 갖는 고정밀 스트레이트지를 참조면으로 사용하고 반전법을 적용하여 이송테이블의 운동오차 및 반복오차를 얻었으며, 프루브 설치위치에 따른 측정오차를 감소시키기 위해 능동제어모세관을 이용한 운동오차 보정법¹³⁾을 적용하고 이에 따른 개선효과를 평가하였다. 또한 이로부터 얻어진 운동오차 프로파일을 이용하여 임의의 가공면에 대한 진직도를 측정하고 반전법에 의한 측정결과와 비교, 분석함으로써 측정장치의 유용성을 확인하고자 하였다.

2. 진직도 측정장치

2.1 진직도 측정원리

그림 1에 진직도 측정장치의 구성을 나타내었다. 피측정물을 이송테이블의 측면에 고정하여 설치하고 이송테이블 상면 중심부에 설치된 프루브가 이동하면서 피측정면의 프로파일을 측정하도록 하였다. 측정방향은, 피측정면의 탄성변형에 의한 오

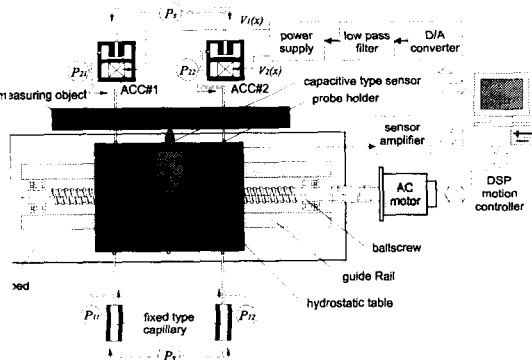


Fig. 1 Configuration of straightness measuring system

차의 영향을 배제하고 반전법의 적용이 가능하도록, 수평방향으로 하였다. 따라서 실제로 측정된 프로파일 $R(x)$ 에는 측정하고자 하는 피측정면의 진직도 $E(x)$ 와 이송테이블의 수평방향 운동오차 $D(x)$ 가 중첩되어 나타나게 되며 테이블의 수평방향 운동오차가 기지일 경우, 각 프로파일의 부호방향이 동일하도록 설정하면, 피측정면의 진직도 $E(x)$ 는 식(1)과 같이 간단히 얻어질 수 있다.

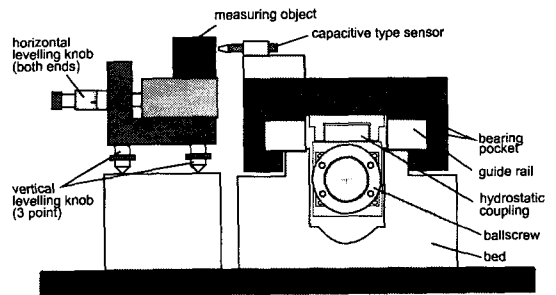


Fig. 2 Structure of feed table and levelling jig

$$E(x) = R(x) - D(x) \quad (1)$$

2.2 진직도 측정장치의 구성

그림 2는 피측정물 고정용 치구 및 이송용 유정압테이블의 구조를 나타낸 것으로 먼저 3점지지방식으로 피측정물의 수직방향 레벨을 조정된 후 치구 측면 양단에 설치된 두 개의 레벨조정용 손잡이를 이용하여 수평방향 레벨을 조정하도록 하였다.

이송테이블은 양면지지방식 유정압베어링으로 되어 있고 볼스크류와 AC서보모터에 의해 구동되며 측정가능 스트로크는 250mm이다. 유정압베어링에 공급되는 윤활유의 온도는 오일컨디셔너(Daikin, AKZ206)를 이용하여 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 제어되도록 하였다. 또한 볼스크류의 설치오차 및 편아웃오차가 이송테이블에 미치는 영향을 제거하기 위해 볼스크류와 이송테이블 사이에는 그림 2에서와 같은 유정압베어링과 탄성천지를 결합한 복합형 커플링을 설치하였다¹⁴⁾. 한편 프루브로는 용량형 센서(Micro Sense 3401, $0.25\mu\text{m}/\text{V}$)를 사용하여 나노미터 단위의 측정분해능을 갖도록 하였으며 프루브 고정부의 열변형이나 고유진동수에 의한 오차요인을 최소화하기 위하여 프루브고정용 홀더는 직육면체 형상으로 제작하여 사용하였다. 한편 프루브에 의해 측

정된 신호는 하드웨어 필터, A/D컨버터를 거쳐 PC로 전달된다. 이 때 측정신호내에 포함되어 있는 측정면의 설치오차(레벨조정후 남아있는 이송테이블과 피측정면간의 평행도오차)는, 각각의 측정 프로파일에 대해, 최소자승법을 이용하여 소프트웨어상에서 제거되도록 하였다. 또한 각각의 측정 데이터는 5회 반복측정을 통해 얻어진 프로파일의 평균값을 구해 나타내었으며 반복오차는 3σ 를 구해 나타내었다. 실험에 사용된 이송테이블의 이송속도는 2mm/s, 필터링 주파수는 10Hz로 설정하였다.

2.3 반전법의 원리

측정결과의 검증률 위해 사용한 반전법의 원리를 그림 3에 나타내었다.

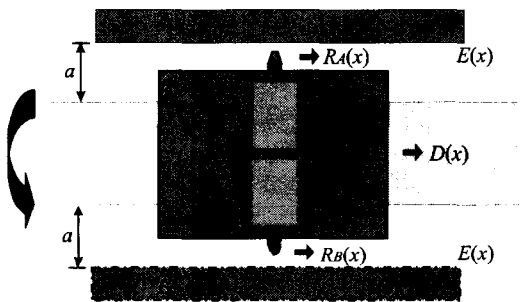


Fig. 3 Measuring principle of reversal method

측정용 프루브를 탑재한 이송테이블의 한 쪽 측면에 피측정면을 고정시키고 프루브를 이송시켜 측정된 진직도 프로파일을 $R_A(x)$ 라고 하고 피측정면을 이송테이블에 대해 대칭이 되도록 다른 측면으로 이동하여 고정시킨 뒤 역시 프루브를 이송시켜 측정된 진직도를 $R_B(x)$ 라고 하면 각 프로파일은 식(2)와 같은 특성을 갖으므로 피측정면의 진직도 프로파일 $E(x)$ 및 이송테이블의 운동오차 $D(x)$ 를 식(3)과 같이 구할 수 있으며 여기서 $R_A(x)$ 와 $R_B(x)$ 는 각각의 측정상태에서 $E(x)$ 와 동일한 부호방향을, $D(x)$ 는 $R_A(x)$ 와 동일한 부호방향을 갖는다.

$$\begin{aligned} R_A(x) &= E(x) + D(x) \\ R_B(x) &= E(x) - D(x) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E(x) &= (R_A(x) + R_B(x))/2 \\ D(x) &= (R_A(x) - R_B(x))/2 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 프루브이송용 테이블의 운동오차

3.1 이송테이블의 운동오차 및 반복오차

본 측정장치에서 직접법에 의해 진직도를 측정하기 위해서는 측정된 프로파일로부터 이송테이블의 오차 프로파일을 제거해야 하므로 이송테이블의 고유 운동오차를 가능한한 정확히 측정하여 미리 데이터베이스화할 필요가 있다.

그림 4는 이송테이블로 사용되는 유정압테이블의 운동오차와 반복오차의 측정결과를 나타낸 것으로 레이저간섭계(HP5528)와 GPIB보드를 이용하여 연속(time-based)측정하였으며 데이터 획득간격을 거리로 환산하면 약 0.43mm가 된다. 또한 반복오차를 같이 나타내기 위해 테이블 중심위치에서의 직선운동오차와 각운동오차를 각각 5회 측정하여 중첩하여 나타내었으며, 이하 레이저간섭계에 의한 측정시에는 동일한 측정조건을 이용하였다. 그림 4로부터 이송테이블은 250mm의 스트로크에 대해 직선운동오차 1.36 μ m, 각운동오차는 0.76arcsec를 보이고 있으며 5회 측정치에 대한 반복오차는 각각 0.16 μ m, 0.06arcsec를 보이고 있다.

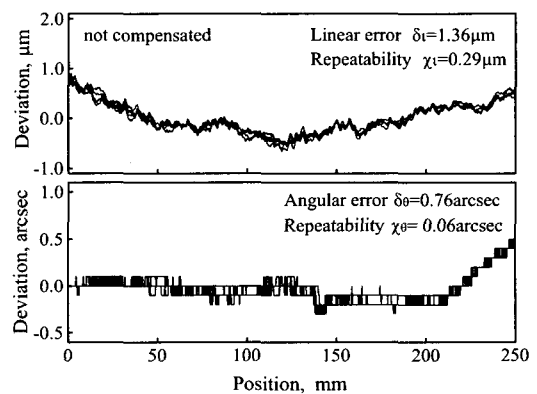


Fig. 4 Motion error of feed table measured by laser interferimeter (not compensated)

3.2 오차보정에 따른 운동정도향상

본 논문에서 구성한 측정장치는 서브미크론대의 진직도 측정을 목표로 하고 있으나 앞 절에서의 이송테이블 측정결과에 의하면, 측정하고자 하는

진직도범위에 비해 이송테이블 자체의 운동오차 및 반복오차가 너무 크므로 양호한 측정정도를 기대하기 어렵다. 또한 각운동오차에 의해, 측정용 프루브의 테이블상의 위치에 따라 측정값이 변할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 측정장치의 측정정도를 향상시키기 위한 방법으로 저자등이 이미 제안한 바 있는 능동제어모세관을 이용한 유정압테이블의 운동오차 보정법^[3]을 적용하였다.

그림 5는 오차보정을 위해 사용한 능동제어모세관의 구조를 나타낸 것으로 압전소자의 변위를 이용하여 원관형 모세관의 간극을 제어하면 유정압테이블 포켓의 압력을 조절할 수 있으며 이에 의해 테이블의 측정방향(이송방향에 대한 직각방향)에 대한 변위를 제어하는 원리를 갖는다. 테이블의 변위를 제어하기 위해서는 먼저 유정압테이블 수평방향 포켓 양단 두 곳(그림 1 참조)에 능동제어모세

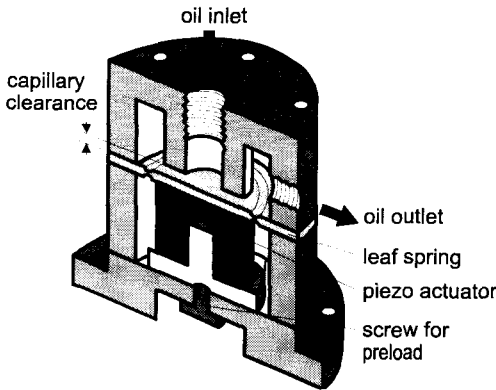


Fig. 5 Active controlled capillary

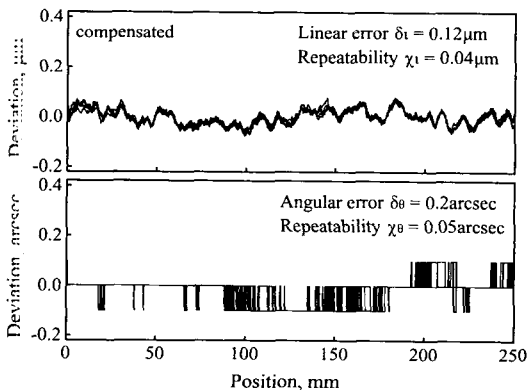


Fig. 6 Motion error of feed table measured by laser interferometer (compensated)

관을 설치하고 레이저간섭계로 직선운동오차와 각운동오차를 측정한 후 측정 결과로부터 두 운동오차를 동시에 보정할 수 있는 변위값을 구해 해당하는 능동제어모세관의 개인을 고려한 전압을 압전소자에 인가하게 된다. 이 경우 한 번의 보정만으로는 운동정도의 개선이 어려우므로 반복제어법을 이용하여 최소한의 오차로 수렴되도록 하였다. 그림 6은 이와 같은 과정을 통해 보정된 이송용 유정압테이블의 운동정도를 나타낸 것으로 직선운동오차 0.12 μm , 각운동오차 0.20arcsec까지 향상되었으며 반복오차도 각각 0.04 μm , 0.05arcsec로 향상되는 결과를 얻었다.

4. 측정장치 정밀도의 실험적 검증

4.1 스트레이트이지와 반전법을 이용한 이송테이블의 운동오차 및 측정정밀도 검증

구성된 측정장치의 측정정도를 검증하기 위하여, 측정장치로 기지의 값을 갖는 고정밀 스트레이트이지의 진직도를 측정하여 비교하였으며 이송테이블의 운동오차 보정에 따른 효과를 알아보기 위해 보정하지 않은 경우와 보정한 경우에 대한 측정 결과도 비교하였다. 한편 그림 7은 스트레이트이지의 제작사가 제공한 프로파일(이하, 참조 프로파일)을 나타낸 것으로 평균 0.03 μm 의 진직도를 갖고 있으며 폭방향 측정위치에 따라 0.04 μm 의 오차분포를 갖고 있음을 알 수 있다.

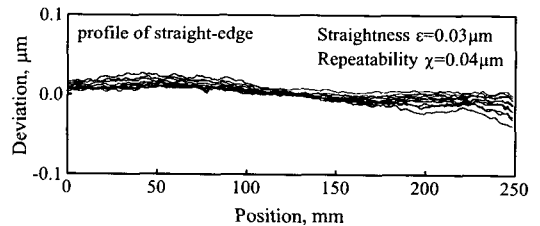


Fig. 7 Known profile of straight edge(by maker)

4.1.1 이송테이블의 운동오차 비교

측정장치에서 반전법을 이용하여 스트레이트이지를 측정한 후 이송테이블의 직선운동오차를 산출한 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림은 운동오차 미보정상태 및 보정상태에서 5회 측정한 직선운동오차의 평균값과 반복오차의 범위를 각각 나타낸 것이며 레이저간섭계로 측정

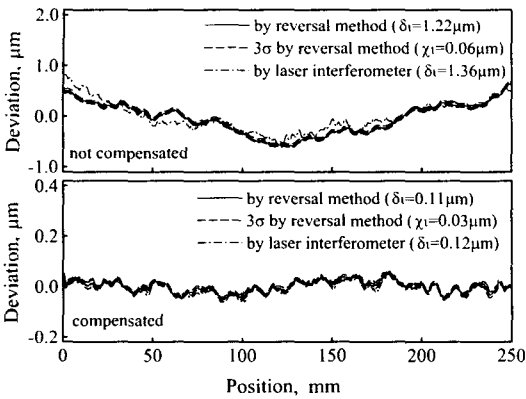


Fig. 8 Motion error of feed table measured by reversal method using straight edge

직선운동오차(그림 4 및 그림 6의 평균값)도 비교를 위해 함께 나타내었다. 운동오차 미보정상태인 위 그림의 경우, 반전법에 의한 측정시 반복오차는 $0.06\mu\text{m}$ 로 레이저간섭계에 의한 측정시의 반복오차 $0.16\mu\text{m}$ 에 비해 향상되는 결과를 보이고 있으며 이것은 레이저간섭계의 분해능이 $0.01\mu\text{m}$ 이고 측정환경, 특히 공기의 유동에 대해 민감한 반면, 용량형 센서는 분해능이 $0.001\mu\text{m}$ 으로 레이저간섭계에 비해 높으며 측정환경에 대한 안정성도 갖고 있기 때문으로 추정된다. 한편 측정된 직선운동오차 프로파일의 전체적인 경향은 레이저간섭계에 의해 측정된 프로파일과 잘 일치하고 있으나 국부적으로는 위치에 따라 최대 $0.3\mu\text{m}$ 의 차이를 나타내고 오차값도 $0.14\mu\text{m}$ 의 차이를 보이고 있는 데 이것은 레이저간섭계의 경우 반사경의 위치가 테이블중앙이고 측정장치의 경우 프루브의 폭방향 위치가 그림 2와 같이 테이블측면이므로 이송테이블의 각운동오차가 측정값에 영향을 미치기 때문이다. 한편 아래 그림은 능동제어모세관을 이용하여 이송테이블의 직선, 각운동오차를 동시보정했을 때의 측정결과를 나타낸 것으로 미보정시와는 달리 프로파일의 형상이 레이저간섭계에 의한 측정결과와 매우 잘 일치하고 있어 위 그림에서의 프로파일의 차이가 각운동오차에 의한 영향임을 확인할 수 있다. 또한 반복오차의 경우에는 $0.03\mu\text{m}$ 로 레이저간섭계에 의한 보정시의 반복오차 $0.07\mu\text{m}$ (그림 6)에 비해 향상됨을 보이고 있어 용량형 센서에 의한 측정값이 상대적으로 안정적임을 확인할 수 있다.

이송방향으로의 프루브 위치의 따른 측정값의

변화를 보기위해 프루브위치를 그림 1의 측정점 1, 2, 3으로 변화시켰을 때의 측정결과를 그림 9에 나타내었으며 이 때의 측정점 1, 3은 이송방향 중앙부인 측정점 2로부터 좌, 우로 각각 50mm의 떨어져 있다. 그림으로부터 미보정상태의 경우 전체적인 운동오차값은 최대편차 $0.04\mu\text{m}$ 이내로 잘 일치하고 있으나 각각의 프로파일을 보면 0-100mm구간에서 최대편차 약 $0.3\mu\text{m}$ 의 큰 차이를 보이고 있다. 한편 운동오차를 보정한 경우에는 세 점에서의 측정프로파일의 최대편차가 약 $0.04\mu\text{m}$ 를 나타내고 있어 이송방향으로도 각운동오차의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

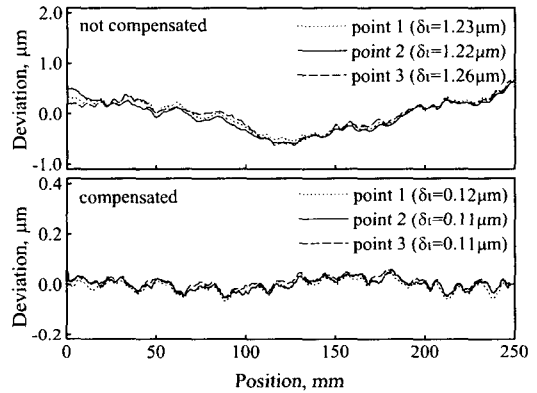


Fig. 9 Motion error of feed table according to measuring point

4.1.2 스트레이트지의 진직도 비교

앞 절에서의 반전법에 의한 측정결과를 이용하여 스트레이트지의 진직도를 산출한 결과를 그림 10에 나타내었으며 비교를 위해 참조 프로파일도 함께 나타내었다.

그림으로부터 운동오차를 보정하지 않은 경우의 스트레이트지의 진직도 측정값은 참조 프로파일의 진직도에 비해 다소 큰 $0.06\mu\text{m}$ 의 평균값을 가지며 반복오차도 $0.06\mu\text{m}$ 를 나타내고 있다. 한편 오차를 보정했을 때의 진직도 측정값은 $0.05\mu\text{m}$, 반복오차는 $0.04\mu\text{m}$ 로 미보정시와 큰 변화가 없으나 실제로 프로파일을 살펴보면 미보정시와는 달리 참조 프로파일이 반복오차의 범위내에 모두 포함되어 있고 프로파일의 형태도 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 한편 측정 프로파일과 참조 프로파일간의 미소한 차이는 그림 7에서 보는 바와 같이 스트레이트지의 끝부분이 폭방향으로 큰 반복오차를 가지고

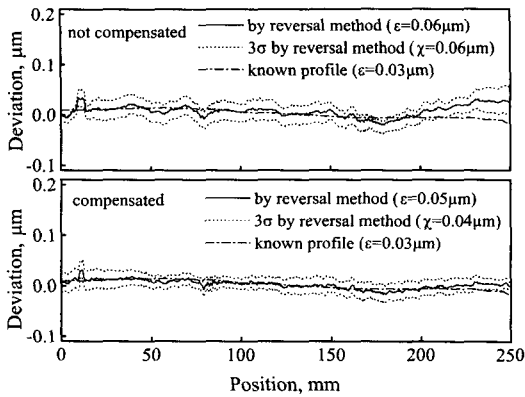


Fig. 10 Profile of straight edge measured by reversal method

있어 측정되는 부위에 따라 다소 다른 프로파일을 나타내게 됨에 따른 영향으로 추정되며 측정 프로파일에서 스트레이트에지 표면의 미세한 스크래치에 의해 나타나는 초기 15mm부근의 피크값을 무시할 경우 반복오차도 이송테이블의 운동오차 산출시와 같은 0.03 μm 를 갖게 된다.

이상으로부터 반전법을 이용하여 이송테이블의 운동오차를 측정된 결과, 오차를 보정했을 경우의 이송테이블의 운동오차는 0.11 μm 이고 이 때의 반복측정에 대한 측정정밀도는 0.03 μm 임을 알 수 있으며 측정된 스트레이트에지의 프로파일도 참조 프로파일과 잘 일치하고 있어 반전법에 의해 구해진 데이터가 매우 유효함을 확인할 수 있다.

4.2 연삭가공면을 이용한 측정정밀도 검증

연삭가공된 250mm길이의 임의의 평면을 직접법 및 반전법으로 각각 측정하여 비교함으로써 본 측정장치의 측정정도를 검증하였다.

그림 11의 윗 그림은 직접법 및 반전법에 의해 가공면의 진직도를 측정된 결과를 비교한 것으로, 양 방법에 의한 진직도 프로파일은 전체적인 파형이 잘 일치하고 있으며 구체적인 프로파일에서도 대부분의 영역에서 0.03 μm 이내의 오차를 갖고 잘 일치하고 있으나 190mm부근에서 최대 0.06 μm 의 프로파일 오차를 보이고 있다. 아래 그림은 연삭가공면에 대해 반전법을 이용하여 얻은 이송테이블의 운동오차를, 스트레이트에지와 반전법을 이용하여 얻은 운동오차(즉 직접법에서 제거되는 운동오차로 Fig. 8의 아래그림과 동일)와 비교한 것으로 구체적

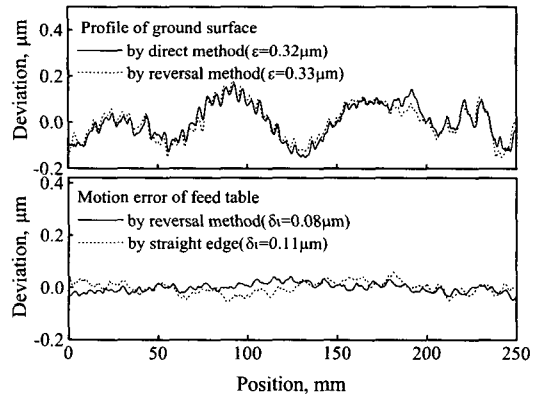


Fig. 11 Measured profile of a ground surface

으로 프로파일을 비교해 보면 몇 구간에서 최대 0.06 μm 오차를 보이고 있다. 이처럼, 측정된 이송테이블의 운동오차 프로파일에서의 오차가 스트레이트에지를 이용했을 때의 반복오차 0.03 μm 에 비해 크게 나타나는 것은, 경면연마된 스트레이트에지의 표면과는 달리 연삭면의 표면은 그림에서와 상대적으로 고주파의 표면거칠기를 갖고 있어 파형의 한 주기가 프루브로 사용된 용량형 센서의 수감부 직경보다 작거나 비슷할 경우 파형의 크기가 평균화하여 측정되기 때문이다. 그러나 실제로 서브미크론의 가공면을 평가하는 경우 이러한 고주파의 파형보다는 저주파의 파형이 대상이 되며 고주파의 파형을 고려하더라도 최대 0.06 μm 이내의 측정오차를 보이고 있어 본 측정장치는 서브미크론의 가공면 측정에 매우 유효하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 서브미크론대의 진직도를 측정하기 위한 한 가지 방법으로, 고정밀 유정압테이블 상에 용량형 센서를 프루브로 탑재시켜 피측정물의 표면을 측정하고 직접법에 의해 간단히 진직도를 측정할 수 있는 고정밀 진직도측정장치를 개발하였으며 개발된 시스템에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유정압 이송테이블의 각운동오차가 측정값에 영향을 미치지 않도록 능동제어모세관을 이용하여 직선운동오차와 각운동오차를 동시에 보정하였으며 그 결과 직선운동오차 0.12 μm , 각운동오차

0.20arcsec 및 그 때의 반복오차 $0.04\mu\text{m}$, 0.05arcsec 의 이송정도를 나타내었다.

2) 스트레이트에지와 반전법을 이용하여 검증한 결과, 보정된 이송테이블을 이용한 측정장치는 프루브의 설치위치에 관계없이 $0.03\mu\text{m}$ 의 측정정도로 진직도를 측정할 수 있음을 확인하였다.

3) 측정장치를 이용하여 서브미크론의 진직도를 갖는 임의의 연삭가공면을 측정한 결과 국부적으로 미세한 고주파의 파형에 대해서는 최대 $0.06\mu\text{m}$ 이 내의 측정오차를 갖으나 진직도를 지배하는 저주파의 형상에 대해서는 $0.03\mu\text{m}$ 의 측정정밀도를 유지하고 있어 측정장치가 서브미크론의 가공면 측정에 매우 유효하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 清野 慧, 高 偉, “多点法によるソフトウェアデータムとその誤差評価,” 日本機械學會論文集(C編) 58- 551, pp. 2262-2267, 1992.
2. 山口城治, “改良逐次3点法による直線運動精度の計測,” 日本精密工學會, 59-5, pp. 773-778, 1993.
3. 박천홍, 송영찬, 김수태, 이후상, “능동제어모세관을 이용한 유정압테이블의 운동정도 향상,” 한국정밀공학회지 제14권 제12호, pp. 114-120, 1997.
4. 박천홍, 김인찬, 정윤교, 이후상, “고정밀이송을 위한 볼스크류용 체결기구에 관한 연구,” 한국정밀공학회지 제14권 제5호, pp. 157-164, 1997.