

## 분동교환기를 이용한 고체밀도기준물의 질량측정

이용재\*(한국표준과학연구원 질량팀), 장경호(한국표준과학연구원 질량팀), 오재운(전북대학교),  
정상덕(전북대학교)

### Mass measurement of solid density standard using weight exchanger

Y. J. Lee(Mass and Force, KRISS), K. H. Chang(Mass and Force, KRISS), C. Y. Oh(Chonbuk university),  
S. D. Jung(Chonbuk university)

#### ABSTRACT

The mass measurement of solid density standards using weight exchanger is described. KRISS(Korea Research Institute of Standards and Science) has several solid density standards. Their mass have been measured manually only using a mass comparator(Mettler, 1 kg - 0.01 mg). However, the uncertainty of the manual mass measurement is up to 300 microgram much more than 32 microgram of advanced NMIs(National Metrology Institutes) for 1 kg silicon sphere which is primary density standards due to an eccentric error and buoyancy correction error. The new system with a weight exchanger is designed and built to improve the measurement accuracy. It comprises a weight exchanger, a mass comparator, air density instruments, and application program for automatic measurement. It is evaluated by measuring several elements in an air tight chamber to verify the performance of it.

**Key Words :** Mass measurement (질량측정), Solid density standard(고체밀도표준물), Uncertainty(불확도), Weight exchanger(분동교환기), Air density(공기밀도), Silicon sphere(실리콘구)

#### 1. 서론

실리콘으로 만들어진 밀도표준구의 질량측정은 아보가드로상수의 측정 및 밀도표준확립을 위하여 세계 주요 국가의 측정연구기관에서 수행되어 오고 있다<sup>1</sup>. 대부분 중진국 수준의 측정연구기관에서 밀도표준구의 질량을 측정하기 위해 분동교환치가 설치된 질량비교기의 값이 수억대에 달하기 때문에 수동으로 측정하고 있다. 국가측정연구기관을 대상으로 하는 현재 최고의 성능을 가진 상용장비는 SWISS, METTLER-TOLEDO company, model M1 의 질량 비교기이다. 가격이 약 3 억원대의 고가로서 분동교환장치와 air-tight chamber 까지 구비되어 있다. 국제도량형국, 독일연방물리기술청, 일본계측표준종합연구소, 영국물리표준연구소등 선진국의 측정연구기관에서는 독자적으로 개발된 질량비교기를 사용하고 있으나 점점 장비의 노후 및 개발비 문제로 상용장비를 구입하여 연구하고 있는 추세이다. 현재 1 kg 밀도표준구의 질량측정의 세계 최고의

수준은 약 32  $\mu\text{g}$ ( $k=2$ , 95.5 %)이다<sup>2</sup>. 이 값은 분동교환장치와 더불어 BA(Buoyance Artifact)를 이용한 공기밀도의 직접측정측정으로 얻어진 값이다. 그러나 대부분의 국가측정기관의 수준은 약 70  $\mu\text{g}$  이상으로서 BIPM 공기밀도식 이용한 질량측정 시스템에서 얻어 지고 있다. 그러나 KRISS(한국표준과학연구원)의 밀도표준구의 질량측정불확도는 약 300  $\mu\text{g}$  ( $k=2$ , 95.5 %) 으로서 수동 측정에 의하여 수행되어 왔다. 본 연구에서는 우리나라의 밀도측정표준을 국제적 수준으로 확립하기 위해 밀도표준구의 질량측정불확도를 현재 300  $\mu\text{g}$ 에서 국제적 수준인 70  $\mu\text{g}$ 에 접근하는 밀도표준구의 질량측정 시스템을 구축하도록 하였다. 구체적으로, 기존의 사람의 손을 도구로한 질량측정과정에서 발생하는 질량측정불확도, 즉 질량측정의 표준편차, 부력보정을 위한 공기밀도측정의 불확도를 줄이기 위하여 자동으로 분동의 위치를 교환하기 위한 분동교환기와 측정자동화시스템을 개발하고 그 성능을 평가하고 밀도표준물의 질량을 측정한다.

## 2. 시스템 제작

Fig.1 은 본 연구를 수행하기 위한 밀도표준구 질량을 측정하는 시스템의 구성을 보여주는 개략도이다. 밀도표준구 질량측정시스템의 주요 장치로서 질량비교기(mass comparator), 표준분동과 밀도표준구 그리고 감도분동을 순차적으로 질량비교기 팬(pan)위에 로딩(loading)하도록 하는 분동교환장치, 분동교환장치의 모터를 동작하도록 하는 모터구동기(motor controller), 공기밀도를 측정하기 위한 측정장비 즉, 온도계, 습도계, 기압계, 측정시스템을 자동화하기 위한 컴퓨터등으로서 구성된다. 보조장치로서 로딩할 때 질량비교기의 눈금지시값의 안정성을 위한 공기흐름(air flow) 차단용의 air tight chamber 와 질량측정시스템을 외부 및 스텝모터로부터 발생하는 진동을 방지하기 위한 석정받침대를 설치하였다.

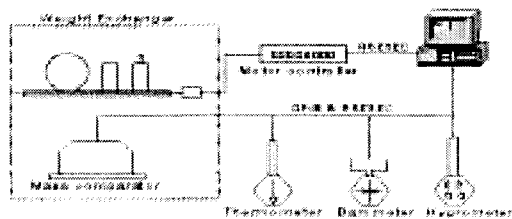


Fig. 1 Schematic of the system for mass measurement

Fig.2 는 본 연구의 주요 수행부분으로서 스텝모터를 장착한 분동교환장치와 질량비교기, 그리고 측정물체로서 실리콘구, 표준분동, 감도분동의 모습을 보여주고 있다.

분동교환장치는 질량비교기에 장착하여 시험물체와 표준분동을 자동으로 비교하기 위하여 사용된다. 일반적으로 질량비교기는 분동교환장치없이 판매되고 있다. 그러나 손에 의하여 시험물체와 표준분동을 질량비교기의 팬 위에 교환하여 로딩함으로써 발생하는 공기밀도의 불규칙한 변화와 공기흐름에 의한 질량비교기 지시값의 변화에 의한 질량측정오차 요인이 발생된다. 따라서 이런 오차 요인을 제거하기 위해 대부분의 국가측정연구기관에서 고가의 분동교환장치를 제작사에 주문 제작하여 사용하게 된다. 본 연구에서 제작된 분동교환장치는 제작사의 20% 정도의 저렴한 비용으로 밀도표준구와 표준분동을 자동으로 교환할 수 있도록 제작되었다. 분동교환장치는 X 축, Y 축으로 구성된 2 축 이송장치, 구/분동 안착부(saddle for objects), 2 축

을 움직이는 2 개의 스텝모터, 모터를 구동하는 모터제어기로 구성된다.

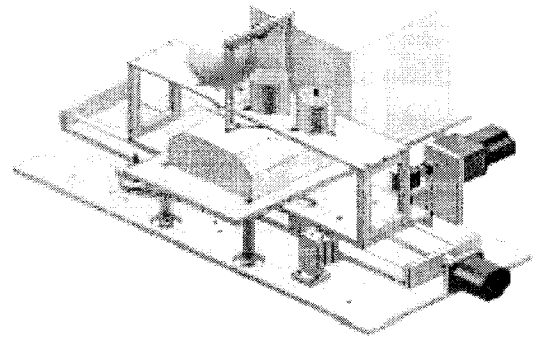


Fig. 2 Weight exchanger with a mass comparator

X 축인 수평방향 이송부는 밀도표준구와 표준분동 그리고 감도분동을 질량비교기 팬의 중심에 이동시키는 역할을 담당하는 장치이다. 이것은 이송나사(feed screw)와 이와 평행한 위치에 설치해 놓은 안내축(bar-guide), 이송나사와 안내축을 연결하여 일정한 위치로 움직일 수 있도록 안내해 주는 이송블럭(feed block)으로 구성된다. 특별히 바닥부분의 금속판(plate)의 좌우 부분에 이동거리(stroke)를 제한하여 프로그램의 오류로 인한 기계장치를 보호하고, 초기위치 설정(setting)을 위한 기준점을 잡기 위해 위치센서인 광단속기(photo interrupter)를 설치하였다. X 축 이동거리는 200 mm 로서 좌우 운동의 진위치도가 직경 0.05 mm 이하로 제작 조립되어 질량측정의 편심오차 요인을 최소화하도록 하였다.

Y 축인 수직방향 이송부는 수평방향 이송부를 상하로 이동하여 질량측정물체를 질량비교기에 로딩(loading), 언로딩(unloading)하는 역할을 담당한다. 주요 부품은 감속기어가 부착된 스텝모터, 수평방향 스텝모터의 회전방향을 수직방향으로 전환하기 위한 기어박스(gear box), 수평방향 이송부를 상하로 이동하기 위하여 백래쉬(back rash)와 마찰저항이 극히 적은 볼나사(ball screw), 볼나사의 회전 운동을 두 개의 LM block(Linear motion block)에 동시에 전달하기 위한 타이밍벨트(timing belt)로 구성된다. 여기서 LM block 은 수평방향 이송부의 상하운동의 진위치도 즉, 직각도, 평행도의 일정한 유지를 위하여 대각방향으로 두 개를 설치하였다. 특별히 감속기어를 사용한 것은 질량비교기의 센서에 측정물체를 천천히 올려놓아 안정된 측정값을 얻기 위함이다. 한편 프로그램의 오류로 인한 기계장치를 보호하기 위하여 LM block 의 상

하 부분에 위치센서인 광단속기를 설치하여 이동거리를 제한하였다. Y 축의 이동거리는 35 mm 로서 상하운동의 진위치도가 직경 0.03 mm 이하로 제작조립되어 질량측정의 편심오차 요인을 최소화하도록 하였다.

구/분동 안착부는 밀도표준구, 표준분동, 감도분동의 질량측정동안에 안정된 위치로 올려놓는 받침대 역할을 담당한다. X 축과 Y 축의 제어에 따라 측정 전에 안착부에 놓여 있는 시험물체가 질량비교기의 팬과 안착부에 각각 교번 하여 내려앉는다. 안착부는 길이 426 mm, 폭 88 mm, 높이 143 mm 의 크기로서 안착부의 상면은 3 개의 측정물체를 놓을 수 있는 직경 40 mm 의 세 개 구멍(hole)이 85 mm 간격으로 가공되어 있다. 각 구멍은 원주방향으로부터 120 도 간격에 길이 15 mm, 폭 10 mm 가진 세 부분의 공간을 가공하였다. 이 공간들은 질량비교기의 팬 위에 설치된 받침대가 안착부에 간섭되지 않도록 충분히 통과될 수 있는 크기이다. 밀도표준구와 표준분동은 밀면이 각각 구와 평면이기 때문에 표준분동과 감도분동은 안착부의 평면에 올려놓을 수 있지만, 구는 안정되게 올려놓을 수 없으므로 구를 올려놓을 수 있는 볼(ball)을 직경 50 mm 원주방향의 120 도 간격의 3 부분에 설치하였다. 볼은 테프론 재질로 만들어져 구의 질량측정시 표면 손상을 방지하도록 하였다.

### 3. 시스템평가 및 밀도표준물의 질량측정

개발된 밀도표준구의 질량측정시스템 성능은 분동교환장치의 운동에서 발생하는 편심오차(eccentric loading error), 표준분동과 밀도표준구의 반복도에 의한 질량측정의 정밀도(accuracy)를 시험하여 평가하였다.

편심오차는 질량비교기의 측정물체가 팬의 중앙에 로딩되는 위치에 따라 발생하는 오차이다. 즉, 편심오차는 분동교환장치의 구/분동 안착부의 좌우운동과 상하운동의 좌표설정 및 기계적 오차에서 발생할 수 있다. 편심오차 시험은 구/분동 안착부의 좌측과 중앙에 각각 다른 2 개의 표준분동을 설치하여 질량비교기에 로딩하여 두 분동의 사이의 지시값의 차이( $\Delta I_1$ )를 측정하고, 그 위치를 서로 바꾸어 그 지시값의 차이( $\Delta I_2$ )를 측정하여 계산하여 평가하였다. 본 시스템의 편심오차를 시험하기 위하여 질량이 1 kg 인 두 개의 표준분동과 이 두 개의 표준분동 사이의 질량차이를 주기 위한 1 g 의 표준분동을 사용하였다. Fig.3 에서 보여주는 바와 같이 안착부의 좌측에 1 kg, 우측에 1 kg 및 1 g 을 설치하여 10 회 반복측정을 하였다. Fig. 4 는 10 회 반복 측정의 결과를 보여준다. Fig. 4 로

부터 질량차이값을 구하여 다음식을 이용하여 계산한 편심오차는 8.7  $\mu$ g이었다.

$$U_E = \frac{|\Delta I_1 - \Delta I_2|}{\sqrt{3}}$$

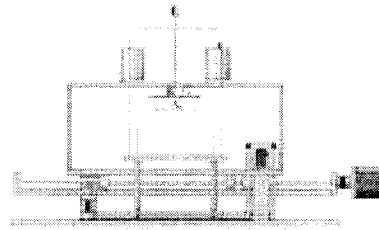


Fig. 3 Analysis results according to beam offset

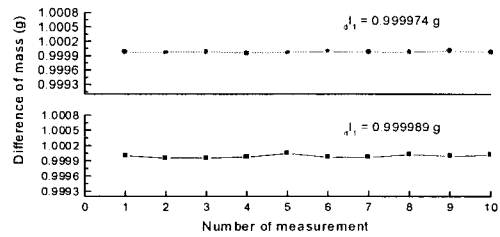


Fig. 4 Results of eccentric loading error

개발된 질량측정시스템의 정밀도를 측정하기 위해 2 개의 각각 다른 1 kg 의 표준분동의 질량차이를 측정하였다. Fig. 5 에서 보여주는 바와 같이 자동측정의 표준편차는 17  $\mu$ g이었다. 이것은 수동측정의 36  $\mu$ g보다 2 배 이상의 좋은 정밀도를 얻었다.

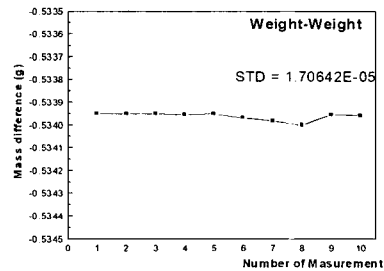


Fig. 5 Results of accuracy of weight vs weight

또한 밀도표준구의 정밀도시험은 Fig. 6 처럼 실리콘 재질로 만들어진 두 개의 1 kg 밀도표준구를 사용하여 반복측정을 수행하였다. Fig.7 에서 보여준 바와 같이 표준편차는 33  $\mu\text{g}$ 이었다. 표준분동의 표준편차 17  $\mu\text{g}$ 보다 큰 것은 밀도표준구의 부피가 표준구의 부피보다 3 배이상 커서 측정중 공기밀도 변화에 대한 질량변화가 크게 나타난 것으로 판단된다.

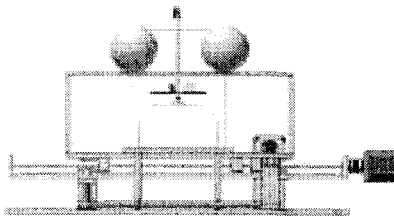


Fig. 6 Results of accuracy of mass measurement

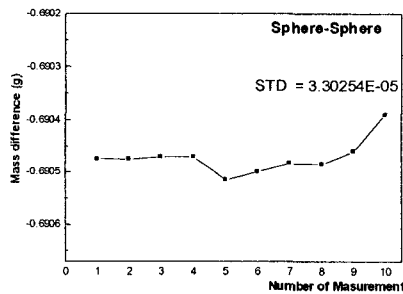


Fig. 7 Results of accuracy of sphere vs sphere

밀도표준구의 질량측정은 KRISS 의 밀도표준구를 측정샘플로서 사용하였다. 질량측정방법은 표준분동과 측정샘플을 질량비교기 팬위에 교번적으로 놓아 질량차이를 구하는 이중치환방법을 적용하였다<sup>3</sup>. 사용된 표준분동은 스텐레스 재질의 원통형 (cylinder type) E1 급(class) 1 kg 과 겉보기질량 차이를 줄이기 위해 E2 급의 미소 표준분동들을 사용하였다<sup>4</sup>. 측정샘플의 질량은 999.839044 g  $\pm$  94  $\mu\text{g}$ (k=2, 95.5 %)를 얻었다. 질량측정의 측정표준편차는 Fig. 8 과 같이 18.7  $\mu\text{g}$ 을 얻었다.

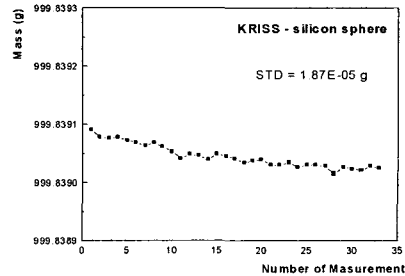


Fig. 8 Results of mass measurement

#### 4. 결론

개발된 질량측정시스템의 성능을 시험한 결과 편심오차 및 질량측정정밀도가 수동으로 측정된 결과값보다 60 %이상의 향상된 성능을 보였다. KRISS 의 밀도표준구를 정밀 측정된 결과 불확도 94  $\mu\text{g}$  (k=2, 95.5 %) 이내로서 수동측정으로 얻어진 300  $\mu\text{g}$ 보다 3 배 이상 향상되었다. 이 값은 국제적 밀도표준구의 질량측정의 평균수준 70  $\mu\text{g}$ 에 접근하는 값으로서 시스템의 안정적 작동을 위한 연구 및 측정환경의 개선을 통해 더 좋은 정확도 향상이 기대된다.

#### 참고문헌

1. Nezu Y, Ikeda S, Uchikawa K, Fujii K and Tanaka M, 1994, "Accurate mass measurement of 1 kg silicon sphere for a determination of the Avogadro constant", Bull. NRLM 43 89-94
2. Kenichi Fujii, Atsushi Waseda and Naoki Kuramoto, 2001, "Development of a silicon density standard and precision density measurement of solid materials by hydrostatic weighing", Meas. Sci. Technol. 2031-2038
3. 도진열, 정진완, 이용재, 1996, "분동의 교정절차", KASTO 96-04-5-88
4. OIML, Weights of classes E1, E2, F2, F2, M1, M3, International Recommendation No. 111(2000)