

1. 서론

최근 질량계기의 혁신을 가져온 전자저울은 국내외를 막론하고 모든 산업, 실험실, 문화생활, 무역 및 상거래 등에 널리 보급되어 있으며 종래의 기계식마저도 전자저울로 대체되어가고 있다. 전자저울은 내장된 마이크로프로세서의 우수한 기능에 의하여 정밀하고 신속할 뿐 아니라 전기적 신호를 사용하여 출력을 자동 프린트하거나 다른 컴퓨터에 연결하여 자동 운영될 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 그의 활용 및 응용분야가 지속적으로 확대될 전망이다.

전자저울은 무게를 감지할 수 있는 힘센서 즉 전자력 평형방식 센서, 전기저항선식 무게센서, 정전용량식 무게센서, 진동식 무게센서 등의 어느 한 힘센서를 바탕으로 만들어진 것이며, 대체로 주종을 이루는 전자저울의 보급형태를 보면 전자력 보상원리의 경우 상대정밀도가 약 $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-8}$ 인 수킬로그램 이하의 용량을 가지고 있으며 전기저항선식의 경우 약 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 수준의 상대정밀도에 수킬로그램에서부터 대용량에 이르고 있다.

저울의 교정내용은 저울의 표준편차, 직선성, 편심오차 등을 들 수 있으나 저울의 특성상 교정을 한 후 저울을 이동하면 교정의 의미가 상실되기 때문에 사용현장에서 교정을 하는 것이 원칙이다. 또한 검정대상이 아닌 실험실용 정밀저울은 현장에서 교정하였다 할지라도 시간의 흐름에 따라 가끔 저울의 성능을 시험하여 사용해야 하며 이 경우는 저울의 성능이 어느 수준에 드는가 하는 판단의 의미가 크다고 볼 수 있다. 이러한 의미로 볼 때 전자저울의 교정은 앞으로 성능시험이라는 형태로 이름지어질 전망이다.

2. 질량과 무게(Mass and Weight)

○ Newton의 제 2법칙

$$F = m \times a$$

m : 관성질량 (Inertial Mass) → 관성 크기의 척도

○ Newton의 만유인력법칙

$$F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

m_1, m_2 : 중력질량 (gravitational mass) → 중력 크기의 척도

○ 무게(Weight)

W : 물체에 작용한 지구의 중력, N

$$W = \left(G \cdot \frac{M}{R^2} \right) \cdot m$$

$$= mg$$

지구의 질량 $M = 5.97 \times 10^{24}$ kg

지구의 반경 $R = 6.4 \times 10^6$ m

만유인력 상수 $G = 6.6720 \times 10^{-11}$ m³/kg · s²

지역 중력 가속도 : g ,

* 표준 중력가속도(북위 45°의 평균 해면)

$$g_s = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

* 지역 중력가속도(KRISS 질량표준실)

$$g_l = 9.7983 \text{ m/s}^2 \quad \begin{array}{l} \text{북위 } 36^\circ 22' 58'' \\ \text{동경 } 127^\circ 22' 30'' \\ \text{고도 } 78.788 \text{ m} \end{array}$$

○ 무게와 질량의 관계

$$\text{무게(N)} = \text{질량(kg)} \times \text{중력가속도(m/s}^2\text{)}$$

(힘) (불변량) (지역, 고도, 시간에 의존)

○ 무게의 혼용

$$\text{몸무게} = 60 \text{ kg} \quad \leftarrow \text{용어의 혼용문제}$$

$$588 \text{ N} = 60 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$0 \text{ N} = 60 \text{ kg} \times 0 \text{ m/s}^2 \leftarrow \text{측정목적이 아님}$$

○ 1901년 제3차 CGPM 결의사항

- Kilogram : 질량단위이며 국제킬로그램원기의 질량

- 무게 : 힘의 성질을 나타내는 양 : $W = m \cdot g$

○ 무게의 구분

- 질량측정 목적 → 질량 (kg)
- 힘측정 목적 → 무게 ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$) → 힘 (N)

SI단위 (국제단위계)

○ 기본단위

길이의 단위	미터 (m)
질량의 단위	킬로그램 (kg)
시간의 단위	초 (s)
전류의 단위	암페어 (A)
열역학적 온도의 단위	켈빈 (K)
물질량의 단위	몰 (mol)
광도의 단위	칸델라 (cd)

○ 유도단위 : m^2 , kg/m^3 , N, N/m^2 , J, V, 등

○ 보충단위 : rad, sr

접두어

곱 할 인 자	접 두 어	기 호
10^{12}	테 라	T
$1\,000\,000\,000 = 10^9$	기 가	G
$1\,000\,000 = 10^6$	메 가	M
$1\,000 = 10^3$	킬 로	k
$100 = 10^2$	헥 토	h
$10 = 10^1$	데 카	da
$0.1 = 10^{-1}$	데 시	d
$0.01 = 10^{-2}$	센 티	c
$0.001 = 10^{-3}$	밀 리	m
$0.000\,001 = 10^{-6}$	마이크로	μ
$0.000\,000\,001 = 10^{-9}$	나 노	n
10^{-12}	피 코	p

질량 단위

- 질량의 기본단위
단위 : 킬로그램
기호 : kg

- 십진 배수 및 분수 : “그램” 에 접두어 사용

단 위	기 호	기본단위 관계
나노그램(Nanogram)	ng	$1 \text{ ng} = 10^{-12} \text{ kg}$
마이크로그램(microgram)	μg	$1 \mu\text{g} = 10^{-9} \text{ kg}$
밀리그램(milligram)	mg	$1 \text{ mg} = 10^{-6} \text{ kg}$
그램(gram)	g	$1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}$
킬로그램(kilogram)	kg	기본단위

예) $10^{-6} \text{ kg} = 1 \text{ mg}$, $\neq 1 \mu\text{kg}$

- 사용을 피해야 할 단위

1 ct (= 200 mg), 1 kgf (= 9.806 65 N)

3. 질량표준

3.1 국제 킬로그램원기

1795년 질량의 기본단위가 gram (0℃ 때 물 1 cm³ 에 해당하는 질량)이 었으나 1 g은 질량이 너무 작아 높은 정밀도를 얻기가 어렵다고 판단되어 1798년 킬로그램 (4℃ 때 물 1 dm³에 해당하는 질량)으로 바뀌었으며 1799 년 백금원기 (Kilogram of the Archives 라고 부름)가 등장하게 되었다.

그 후 원기의 물리적 안정성이 높은 새로운 재료가 논의 되었으며 이에 따라 1878년 영국 런던에 있는 Johnson Matthey and Co. 에서 새로운 원 기용 재료로 Pt 90 % - Ir 10 % 합금을 제조하고 킬로그램 cylinder 3개 (KI, KII, KIII)를 만들어 프랑스 파리에서 표면연마 및 질량조정을 하였다. 이 가운데 KIII가 Kilogram of the Archives와 가장 가까운 질량으로 확인

되어 1883년 국제도량형국(BIPM)에서 KIII가 현재의 국제 킬로그램 원기로 선정 되었고 1889년 제 1차 국제도량형총회(CGPM)에서 비준되었다.

3.2 BIPM 및 국가의 원기

1882년 BIPM에서는 국제원기가 결정된 후 BIPM 자체 및 각 국가에 보급하기 위한 질량표준 보급용 킬로그램원기를 국제원기와 똑같은 규격(Pt 90 % - Ir 10 % 합금의 원기둥 모양으로 직경=높이=39 mm임)으로 40개를 만들었다. 이 원기들은 1884년 밀도가 결정되었고 표면연마 후 질량이 약 ± 1 mg 이내로 조정되었으며 원기둥의 표면에 원기의 국제적 일련 고유번호를 No. 1부터 No. 40 까지 숫자만 가볍게 새겨 넣어 원기를 구별하였다. 1929~1974년에는 23개의 킬로그램원기(No. 41~No. 63)가 더 제작되었다. 최근에는 single crystal diamond tool을 이용한 새로운 가공공정에 의하여 No. 64~No. 75(1994년 현재 최종번호)의 원기가 만들어져 보급되었다. 지금까지 만들어진 국가원기들 가운데 한국의 원기는 초창기 때의 No. 39와 최신의 No. 72이다.

4. 질량표준의 보급

4.1 질량표준 보급체계

질량표준은 유일한 국제킬로그램원기로 정의되어 있기 때문에 BIPM 에서는 국제원기의 질량이 잘 보존되도록 유지하면서 질량표준을 세계 각 국에 보급하기 위하여 BIPM 자체의 참조용 원기(official copy) 6개, 점검용 원기(occasional use standard) 1개, 그리고 교정용원기(working standard) 3개에 의한 질량표준보급 체계를 가지고 있으며 여기서 교정용 원기를 사용하여 각 나라의 국가원기를 교정해 주고 있다.

참조용 원기들은 국제원기와 함께 상호비교되어 국제원기의 질량안정성을 상호 점검하는 참고 역할을 한다. 교정용 원기 No. 9와 No. 31은 5년마다 점검용 원기 No. 25와 비교된다. No. 67은 새로운 기술로 만들어져 그 표면특성이 다른 원기와 차이가 있기 때문에 최근 교정용 원기에 추가되었다.

BIPM에서 역사 이래 지금까지 Pt-Ir 킬로그램원기들을 비교하는데 사용한 저울은 3가지 뿐이며 이와 별도로 최근 flexure-strip balance(용량 : 1

kg, 해독도 : $0.1 \mu\text{g}$)가 개발되었다. 1870년대 처음에는 양팔길이(20cm) three-knife타입에 정밀도가 $5 \sim 10 \mu\text{g}$ 수준인 Bunge balance와 Rueprecht balance(진공 챔버를 갖추)가 사용되어 오다가 약 100년 후인 1970년에 세 번째 저울인 NBS-2가 개발되어 현재 이 저울이 사용되고 있다.

NBS-2 원기용 저울은 single-pan two-knife 타입이며 특수하게 1 kg Pt-Ir의 fixed counterweight가 설치되어 있고 6개의 원기를 자동으로 교환할 수 있으며 광간섭계로 beam의 진동을 자동으로 읽는다. NBS-2의 표준 편차는 $1 \mu\text{g}$ 수준으로서 바로 이 저울의 고성능 덕분에 현재 문제시되어 있는 원기의 표면오염 영향이 질량으로 측정될 수 있었다.

한국에서는 국제원기와 같은 규격으로 만들어진 킬로그램국가원기 No. 72를 주원기로 그리고 No. 39를 부원기로 정하여 질량의 국가표준을 유지하고 있으며 스텐레스 강으로 만든 여러 등급의 킬로그램 표준분동을 통하여 질량표준을 보급하고 있다. 따라서 분동은 질량표준보급의 핵심 매개체이며 저울은 분동의 질량을 비교해 주는 역할을 한다.

KRISS에서 사용하는 원기용 저울은 용량 1 kg이고 밀도 8 g/cm^3 으로 똑같은 스텐레스 강 분동을 비교할 때 정밀도가 약 $2 \mu\text{g}$ 이다.

킬로그램원기와 스텐레스 강 1 kg 분동 규격을 보면, 원기는 밀도가 21.5 g/cm^3 이고 스텐레스 강 분동은 8.0 g/cm^3 이므로 1 kg 에 대한 부피는 각각 46.5 cm^3 및 125 cm^3 이다. 여기서 두 1 kg 사이에 부피 차이는 약 80 cm^3 에 달하여 부피차이로 인한 부력의 영향이 심각함을 보여주고 있다. 따라서 원기를 사용하는 국가측정표준대표기관은 부력보정 기술을 원기급 수준으로 갖추어야 한다.

표 1. 질량표준 보급체계

질량표준	상대정밀도
<u>BIPM</u>	
국제킬로그램원기 K	기본단위
↕	
참조용 원기 K1,7, 8(41), 32, 43, 47	
↓	
점검용 원기 25	
↓	
교정용 원기 9, 31, 67	
↓	
<u>KRISS</u>	
한국킬로그램원기 72	2.3×10^{-9}
↓	
킬로그램부원기 39	2.3×10^{-9}
↓	
1차 표준분동 St. St.	3×10^{-8}
↓	
2차 표준분동 St. St.	1×10^{-7}
↓	
교정기관 표준분동 St. St	1×10^{-6}
↓	
작업용 표준분동 St. St., Brass, Cast Iron	1×10^{-5}

4.2 분동세트의 구성

하나의 분동은 그 분동 자체의 고유한 질량인 하나의 질량값을 가지므로 모든 질량값을 나타내기 위해서는 질량이 다른 여러 종류의 분동을 만들어 조합함으로써 원하는 분동의 질량값을 만들 수 밖에 없다. 분동의 조합에 적합한 분동의 세트(set)는 표준보급 및 제작에 적합하도록 분동의 표기량을 시리즈(series)로 구성하여 최소의 분동 수로서 모든 질량값을 나타내도록 만든다. 분동세트에 대하여 현재 국제적으로 권고된 사항을 보면 분동세트는 다음 시리즈 가운데 하나로 구성될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & (1; 1; 2; 5) \quad \times 10^n \text{ kg} \\
 & (1; 1; 1; 2; 5) \quad \times 10^n \text{ kg} \\
 & (1; 2; 2; 5) \quad \times 10^n \text{ kg} \\
 & (1; 1; 2; 2; 5) \quad \times 10^n \text{ kg}
 \end{aligned}$$

여기서 n 은 $+$ 혹은 $-$ 의 정수 혹은 영(zero)을 나타낸다. 예를 들어 (1; 1; 2; 5) 시리즈의 경우 5 kg; 2 kg; 1 kg; 1 kg; 500 g; 200 g; 100 g; 100 g 등의 분동으로 구성된다.

또한 시리즈를 구성하고 있는 각 분동의 질량단위 들은 분동의 호칭으로 사용되고 있으며 예를 들어 1 kg 분동이라고 부를 때 이 분동은 1 kg 용으로 만들어진 분동을 의미하며 이 1 kg 을 그 분동의 이름값(nominal value) 혹은 표기량이라고 한다.

4.3 질량의 분량 및 배량

분동세트에서 1 kg 의 배수 및 배량을 이루는 분동들은 1 kg 표준분동으로부터 질량이 유도되어야 한다. 일반적으로 보급되어 있는 분동 5-2-2-1 시리즈의 예를 들면 1 kg ~ 100 g 사이에는 이름값(nominal value)이 500 g, 200 g, 200 g, 100 g인 분동으로 되어 있다. 이러한 분량분동들의 모르는 질량(unknown mass)을 처음에 아는 질량(known mass) 1 kg과 비교측정하고 다음과 같이 측정단계를 거친다.

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kg} - (500 \text{ g} + 200 \text{ g} + 200 \text{ g}' + 100 \text{ g}) &= e_1 \\
 500 \text{ g} - (200 \text{ g} + 200 \text{ g}' + 100 \text{ g}) &= e_2 \\
 200 \text{ g} - 200 \text{ g}' &= e_3
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 1 kg, 500 g, 200 g, 200 g', 100 g은 각 분동의 질량이고 e_1 , e_2 , e_3 은 저울로 읽은 질량차이를 나타낸다.

이와 같이 아는 질량으로부터 모르는 질량의 분량분동 시리즈의 질량을 비교해 나갈 때 질량의 크기가 가장 작은 분동(여기서는 100 g)은 그 다음 단계의 분동 시리즈(50 g ~ 10 g)에 상호비교의 연관성, 즉 질량 소급성을 유지해 나가야 한다. 상기의 식(1)은 모르는 질량수보다 비교측정 식의 수가 적다. 여기에 100 g' 분동을 첨가하면 상호비교측정수가 모르는 질량의

분동보다 많아진다. 따라서 분동의 분량이나 배량에는 측정 디자인 (weighing design)을 만들어 교정에 사용한다.

5. 표준분동

5.1 분동의 등급

분동은 상용질량(conventional mass) 값이 얼마나 정확하도록 만들어져 있느냐에 따라 등급이 있다. 분동의 등급은 정확도가 높은 쪽에서부터 볼 때 $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_2, M_3$ 의 기호로 나타내어진다. 분동의 등급에 맞는 상용질량의 정확도는 표 2에 주어진 최대허용오차(maximum permissible errors)의 범위내에 들어야 한다. 예를 들어 E_2 급 1 kg 분동은 그의 상용질량값이 ± 1.6 mg 이내에 들도록 정확하고 정밀하게 만들어져야 한다.

2000년도 Committee Draft 국제법정계량기구(OIML)/2nd CD R111에 의하면 비교측정에 있어서 상위급 표준분동이 확장불확도 $U(k=2)$ 를 가질 때 상용질량 m_c , 이름값 m_0 , 그리고 최대허용오차 δ_m 의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$| m_c - m_0 | \leq \delta_m - U \quad (2)$$

여기서 상용질량의 확장불확도(expanded uncertainty) U 는 최대허용오차 δ_m 의 1/3 이하가 되어야 한다. 단 E_1 급 분동의 경우 U 가 δ_m 에 비하여 극히 작아 무시될 수 있어야 한다.

분동의 교정이나 검정에 있어서 표준분동은 시험분동보다 정확도 등급이 한 단계 이상 높아야 한다.

표 2. 분동의 등급별 최대 허용 오차
(Maximum Permissible Error)

이름값	$\pm\delta_m(\text{mg})$						
	E ₁ 급	E ₂ 급	F ₁ 급	F ₂ 급	M ₁ 급	M ₂ 급	M ₃ 급
5000 kg			25000	85000	250000	850000	1250000
2000 kg			10000	33000	100000	330000	1000000
1000 kg		1600	5000	16000	50000	160000	500000
500 kg		800	2500	8000	25000	80000	250000
200 kg		300	1000	3000	10000	30000	100000
100 kg		160	500	1600	5000	16000	50000
50 kg	25	80	250	800	2500	8000	25000
20 kg	10	30	100	300	1000	3000	10000
10 kg	5	16	50	160	500	1600	5000
5 kg	2.5	8	25	80	250	800	2500
2 kg	1.0	3	10	30	100	300	1000
1 kg	0.5	1.6	5	16	50	160	500
500 g	0.25	0.8	2.5	8	25	80	250
200 g	0.1	0.3	1.0	3	10	30	100
100 g	0.05	0.16	0.5	1.6	5	16	50
50 g	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
20 g	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5	8	25
10 g	0.02	0.06	0.2	0.6	2	6	20
5 g	0.016	0.05	0.16	0.5	1.6	5	16
2 g	0.012	0.04	0.12	0.4	1.2	4	12
1 g	0.01	0.03	0.1	0.3	1.0	3	10
500 mg	0.008	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5	
200 mg	0.006	0.020	0.06	0.20	0.6	2.0	
100 mg	0.005	0.016	0.05	0.16	0.5	1.6	

5.2 분동의 재료

분동의 재료는 내식성(corrosion resistance), 경도, 취성, 비자성 등이 분동조건에 맞아야 하고, 재료구입이 용이해야 하고, 재료의 질은 정상적인 활용조건에서 분동의 질량변화가 정확도의 허용된 최대오차에 비하여 무시될 수 있어야 한다. 이러한 점들을 고려하여 현재 보편화 되어 있는 분동은 스텐레스 강(stainless steel), 놋쇠(brass), 회주철(gray cast iron)등의 재료로 보급되어 있다.

E₁ 및 E₂급 분동의 재료는 그의 재질이 스텐레스 강이나 그와 비슷한 수준의 것이며, F₁ 및 F₂급 분동의 재료는 적어도 놋쇠의 수준이며, 10 kg 이

하의 원기둥형 M₁, M₂, M₃급 분동은 늦쇠나 그보다 우수한 재질이며, 기타의 사각형 M₁, M₂, M₃급 분동의 재질은 회주철이다.

분동은 비자성이어야 하나 재질이나 제작영향에 따라 자기적 성질을 가질 수 있기 때문에 분동의 자화율(magnetic susceptibility), χ , 은 정밀도 수준에 따라 아래의 허용한계 이내에 들어야 한다(예 : 100 g 이상).

$$E_1\text{급 분동 } \chi \leq 0.01$$

$$E_2\text{급 분동 } \chi \leq 0.02$$

$$F_1\text{급 분동 } \chi \leq 0.07$$

$$F_2\text{급 분동 } \chi \leq 0.21$$

5.3 분동의 밀도

분동은 공기중에서 사용되므로 같은 질량이라도 분동의 밀도에 따라 부력이 달라지기 때문에 국제법정계량기구의 국제권고(OIML IR No. 33)에서는 공기중의 질량측정 결과의 상용질량에 대한 기준을 정하고 이에 관련된 분동의 밀도 및 조정과 저울의 운영에 관한 조건도 정하였다. 이에 따른 상용질량(Conventional Mass)은

기준온도 : 20 °C

20 °C 때 표준분동의 밀도 : 8,000 kg/m³

공기 밀도 : 1.2 kg/m³

에 맞춘 질량이며, 분동의 밀도 범위는 공기밀도가 0.0012 g/cm³로부터 10 % 차이가 날 때 분동의 오차가 최대허용오차의 1/4 을 초과하지 않아야 한다. 즉 분동의 교정에 있어서 정밀도 수준에 맞는 부력보정을 하기 위해서는 분동의 밀도값이 분동의 정밀도 수준에 맞는 밀도범위에 들어야 한다.

5.4 분동과 추의 구분

분동은 질량과 이름값(nominal value)이 같게 만들어지며 하나의 분동은 하나의 질량값 만을 나타낸다. 추는 저울의 지렛대와 결합해서 사용되므로 추의 질량은 이름값과 같지 않고 결합장치에 따라 송추(이동추)와 증추로 분류된다. 송추는 지레대의 눈금위치에 맞추어 이동시켜 가면서 사용되는

것으로서 하나의 추로 지레대의 비율만큼 여러 질량을 나타낼 수 있다. 증추는 지레대의 힘 작용점이 고정되어 있고 추의 위치도 일정하게 되어 있기 때문에 추의 수를 증가시켜 가면서 질량을 맞추어 사용한다. 증추는 또 정량증추와 부정량증추로 나누어진다. 정량증추는 저울의 지레대 비율이나 추 자체가 각각 규격화되어 있어서 규격품끼리 호환성이 보장된 것이다. 반대로 부정량 증추는 규격화되어 있지 않아 호환성이 없다.

6. 분동의 질량값

6.1 부력보정

공기중의 모든 물체는 아르키메데스 원리에 의하여 공기의 부력을 받는다. 표준분동 S 가 저울에 작용하는 겉보기 무게는 부력과 관련하여 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{aligned} M^*g &= M_s g - \rho V_s g \\ &= M_s \left(1 - \frac{\rho}{d_s}\right) g \end{aligned} \quad (3)$$

M_s, V_s, d_s : 각각 분동 S의 질량, 부피, 밀도

M^* : 분동 S의 겉보기질량

ρ : 공기밀도

g : 중력가속도

여기서 괄호항은 부력 보정항이다. 분동의 비교교정에 있어서 부력보정을 적용해 보자. $X = S - T$ 에서 부력보정을 가하여 시험분동 T의 질량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$M_t = \frac{M_s \left(1 - \frac{\rho}{d_s}\right) - \Delta m_X \left(1 - \frac{\rho}{d_\Delta}\right)}{\left(1 - \frac{\rho}{d_t}\right)} \quad (4)$$

M_s, d_s : 표준분동의 질량, 밀도

M_t, d_t : 시험분동의 질량, 밀도

$\Delta m_x, d_{\Delta}$: 저울에서 측정된 값(S-T), 감도분동의 밀도

ρ : 공기밀도

6.2 상용질량

국제법정계량기구(OIML)에서는 질량표준보급의 기본 매개체인 분동이 국제적 보편성을 가지도록 하기 위하여 분동과 관련한 국제권고사항을 정해 놓고 있다. OIML IR(2000 입안) " E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₂, M₃ 급 분동 "에서는 표준분동의 정확도등급, 모양, 치수, 재료, 밀도, 자화율, 분동의 불확도 등의 규격을 정해 놓았으며, 또 OIML IR 33 " 공기 중 질량측정 결과의 상용값"에서는 온도 20 ℃ 때 밀도 0.0012 g/cm³ 인 공기중에서 밀도 8.0 g/cm³ 인 기준분동의 질량을 상용질량(conventional mass)라고 정의하였다. 여기서 분동의 기준밀도 8.0 g/cm³는 분동재료로 보편화되어 있는 스테레스강(stainless steel)과 회주철(gray cast iron)의 밀도에 근거를 둔 것이다. 따라서 공기 중에서 사용하는 일반적인 저울의 눈금은 상용질량값으로 교정되어 있다.

겉보기 질량은 환경조건 및 겉보기 밀도를 어떻게 주느냐에 따라 달라지게 된다. 이에 관하여 OIML IR 33에서는 국제적으로 협정된 특별한 조건에서의 겉보기 질량을 상용질량(conventional mass)이라는 용어로 정의하였다. 이 정의에 따라 공기 중에서 물체의 질량 측정결과에 대한 상용질량값(m_c)은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} m_c &= \frac{m_x(1 - \frac{1.2}{d_x})}{(1 - \frac{1.2}{8000})} \\ &= m_x \left\{ 1 - 1.2 \left(\frac{1}{d_x} - \frac{1}{8000} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 상용질량은 겉보기질량의 특별한 경우라고 볼 수 있다. 이상에서 분동의 질량값은 두 가지 형태로 표현되고 있음을 알 수 있다. 그의 하나는 물체의 부력을 정확히 맞추어 보정한 물체고유의 질량값(상대적인 구별을

위하여 순수 질량 혹은 참 질량이라고 부르기도 함)을 나타낸 경우이고 다른 하나는 환경 및 물체의 밀도를 가상적인 기준밀도값으로 가정한 상용질량값이다.

7. 질량의 비교측정

7.1 저울의 역감도(Reciprocal Sensitivity)

저울의 감도(sensitivity)는 질량변화를 감지하는 정도를 말하며 질량변화에 대한 눈금변화의 비율로 나타내어진다. 역감도(reciprocal sensitivity)는 말 그대로 감도의 역수이며, 질량차이를 저울의 눈금 차이로 읽은 후 이 눈금차이를 질량으로 환산할 때 역감도가 사용되므로 교정에 있어서 역감도의 의미는 매우 중요하다.

역학저울의 경우 역감도 계산에 사용되는 감도분동은 스케일의 $1/4 \sim 1/2$ 정도에 해당하는 분동이 사용된다.

최근의 전자저울 혹은 질량비교기들은 저울의 성능에 맞는 표준분동을 내장하고 전자프로그램에 의하여 저울의 스패를 자동교정하는 모델로 발전하여 보급되고 있다. 이러한 경우는 분동의 교정 전에 저울의 사용설명에 따라 저울의 내부분동에 의한 스패를 확인함으로써 역감도를 판단할 수 있고 의심이 가면 교정 이 끝날 때 스패를 검사하면 된다. 또 내부분동이 의심스러우면 표준분동을 사용하여 저울의 디지털 스케일의 변화를 시험함으로써 간단히 스패를 검사할 수 있다. 요즈음 전자저울에 의한 분동의 교정은 과거 역학저울에 비하여 훨씬 신속하고 간단하다.

내부분동이 있는 역학저울은 다이얼 구간과 스케일 구간이 합하여 있으나, 전자저울은 전 구간이 하나의 디지털 스케일로 되어 있기 때문에 역감도에는 내부분동에 의한 스패교정값, 혹은 표준분동에 의한 스패교정값이 사용될 수 있으며, 측정 도중에 역감도를 확인해 보려면 대략 다음과 같은 크기의 감도분동(역감도의 측정에 이용되는 분동을 역감도분동이라고 할 수 있으나 일반적으로 감도분동이란 말로 통용되고 있다)을 이용하면 된다.

저울의 최소 단위의 디지털이 1 mg 이하 일 때는 50 mg ~ 500 mg 사이의 분동을 감도분동으로 사용할 수 있으며, 최소단위의 디지털이 10 mg 이상일 때는 500 mg 이상의 분동을 감도분동으로 사용할 수 있다.

7.2 전위법(Transposition Method)

이 방법은 양팔이 같은 맞저울에만 적용되며 양팔의 기계오차를 제거하는 원리로서 일명 Gauss법이라고도 한다. 이중전위법은 저울의 드리프트를 보상할 수 있으며 순서에 따라 4 개의 정지점을 측정한다.

7.3 치환법 (Substitution Method)

이 방법은 반지시맞저울, 전기식 지시저울, 등비맞저울 등 단일접시저울(single pan balance) 및 쌍접시 저울(double pan balance) 모두에 적용할 수 있으며, 일명 Borda법이라고도 한다. 이중치환법은 한쪽 접시만 사용하므로 기계오차가 적고 이중으로 측정하여 드리프트를 보상할 수 있는 방법이다. 현재 대부분의 질량표준실에서 치환법을 사용하고 있다.

그림 2.2는 이중치환법을 맞저울로 설명하고 있는데 보조분동(counter weight) m_t 는 항상 일정하게 놓여 있으므로 저울의 내부분동으로 간주해도 된다. 분동 S를 표준분동이라 하고 분동 T를 시험분동이라 할 때 치환법의 측정단계는 다음과 같다.

- 1단계 : 먼저 분동 S 를 접시에 올려 놓고 첫번째 정지점 O_1 을 읽는다.
- 2단계 : S 대신에 T 를 올려 놓고 두번째 정지점 O_2 를 읽는다.
- 3단계 : 두번째 상태에서 감도분동을 더하여 세번째 정지점 O_3 를 읽는다.
- 4단계 : 세번째 상태에서 T 대신에 S 를 올려 놓고 네번째 정지점 O_4 를 읽는다.

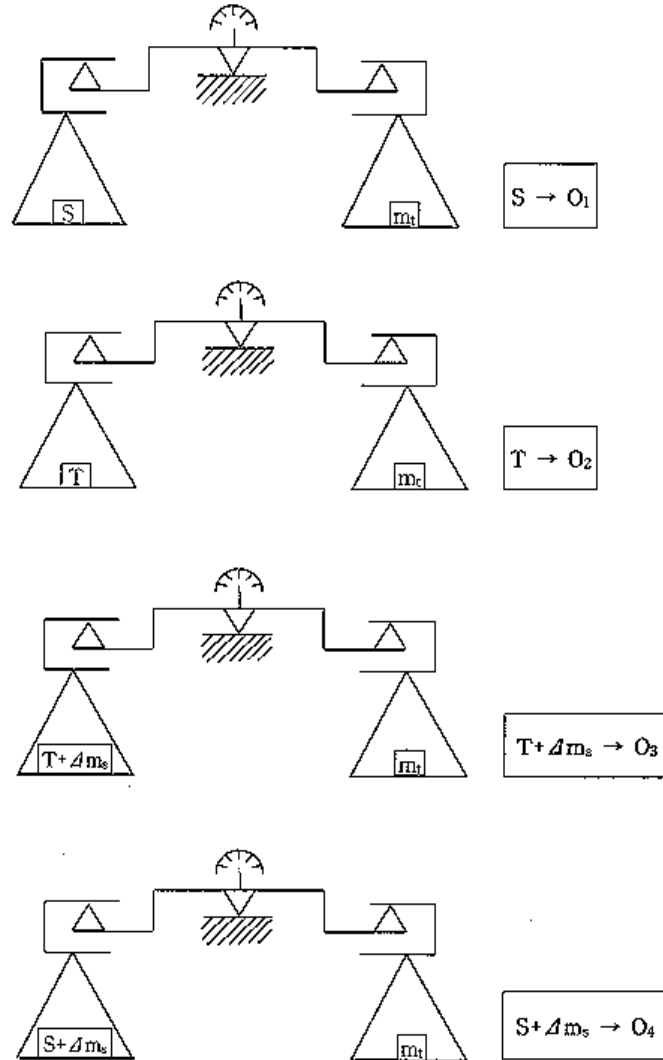


그림 1. 정밀질량비교의 치환법

이상의 정지점 읽기로부터 이중치환법 및 단일치환법의 계산식이 성립하며, 지시값의 차 $X = S - T$, 편의상 부력보정을 생략한 상태에서 저울에 의한 두 분동의 겉보기 질량차이, $\Delta m_X = M_S - M_T$ 라고 하면 구하는 식은 다음과 같다.

$$X = \frac{(O_1 - O_2 + O_4 - O_3)}{2} \quad (6)$$

이중치환법 계산식 :

$$\Delta m_X = \frac{\Delta m_s}{O_3 - O_2} \left(\frac{O_1 - O_2 + O_4 - O_3}{2} \right) \quad (7)$$

여기서 Δm_s 는 사용한 감도 분동의 참질량값이다.

단일치환법 계산식 :

$$\Delta m_X = \frac{\Delta m_s}{O_3 - O_2} (O_1 - O_2) \quad (8)$$

만일 저울의 감도가 일정하다고 볼 때는 S, T, S, T, S, T, S, T, S, T, S, S+ Δm_s , S 의 순서로 측정할 수 있다. 이 경우의 $\Delta m_X = S - T$ 의 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta m_X = \frac{\Delta m_s}{O_{12} - O_{11}} \left(\frac{O_1 + O_3 - 2O_2}{2} \right) \quad (9)$$

식(9)에서 만약 X 가 5 회 반복측정 될 경우에는 괄호항만 5 개 구하여 평균한 값에 역감도항을 곱한다.

전기식 지시 저울의 교정절차

1. 용어의 정의

1.1 최대용량(maximum capacity)

저울의 최대 눈금이 표시하는 질량

1.2 해독도(readability)

저울에 지시되어 읽을 수 있는 측정값의 가장 작은 값

1.3 보정값(correction)

저울의 지시값에 대한 보정식은 다음과 같다.

$$m_{cor.} = m_c - m_d \quad (1)$$

여기서 $m_{cor.}$: 상용질량 보정값

m_c : 분동 상용질량값

m_d : 저울 지시값

1.4 감도(sensitivity)

저울의 감도는 단위 질량에 의한 지시값의 변화량으로 나타낸다.

$$S = \Delta L / \Delta m \quad (2)$$

여기서 ΔL : 지시값의 변화량

Δm : 질량 변화량

1.5 상용질량(conventional mass)

상용질량은 국제법정계량기구의 권고(OIML R33)에 의하여 공기밀도가 1.2 kg/m^3 인 대기 중에서 밀도가 8000 kg/m^3 인 표준분동과 평형을 이루었을 때 표준분동의 질량과 같은 값으로 정의되었으며 기준온도는 20°C 이다. 이때 밀도 d 이고 질량이 m 인 분동의 상용질량 m_c 는 다음과 같이 표시된다.

$$m_c = \frac{m(1 - 1.2/d)}{(1 - 1.2/8000)} \quad (3)$$

1.6 표준편차(standard deviation)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

X_i : i 번째 측정값

$\bar{X}$: X_i 의 평균값

n : 측정회수

1.7 불확도(uncertainty)

측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터.

1.7.1 A 형 표준불확도(u_A)(type A standard uncertainty)

일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 구한 불확도.

1.7.2 B 형 표준불확도(u_B)(type B standard uncertainty)

일련의 관측값이 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 구한 불확도.

1.7.3 합성 표준불확도(combined standard uncertainty)

측정 결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정 결과의 표준불확도

$$\text{합성 표준불확도}(u_c) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5)$$

여기서 u_A 와 u_B 는 같은 신뢰수준을 갖아야 한다.

1.7.4 확장 불확도(expanded uncertainty)

측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정 결과 주위의 어떤 구간을 정의하는 양

$$\text{확장 불확도}(U) = k \cdot u_c \quad (6)$$

1.7.5 포함인자(k)(coverage factor)

확장 불확도를 구하기 위하여 합성 표준불확도에 곱하는 수치인자

2. 비교정기기의 교정 방법(교정 내용)

교정 항목	교정 방법
2.1 감도	해독도의 10 배 표준분동 사용
2.2 편심 오차	최대용량의 1/4 이상 표준분동 사용
2.3 직선성	최대용량의 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % 표준분동을 사용하여 지시값과 비교
2.4 정밀도	최대용량의 1/2 혹은 최대용량의 표준분동 사용하여 반복도 측정

3. 필요기기 명세 및 최저 요구 성능

분해능	표준 장비명	수량	최저 요구사항
10^{-6}	표준 분동 시리즈	1 set	저울 교정에 적합한 표준 분동
10^{-5}	"	"	
10^{-4}	"	"	

3.3 부대장비 및 시설

장비명	수량	최저 요구사항
온도계	1 대이상	최소눈금 : 0.1 ℃
습도계		최소눈금 : 1 %R.H.
압력계		최소눈금 : 200 Pa
무진동 실험대		진동이 없고 견고한 것으로서 저울을 설치할 수 있을 만큼 갖출 것

4. 준비사항

4.1 일반적 주의사항

- 4.1.1 수평이 맞았는지 확인해야 한다.
- 4.1.2 측정하기 적어도 30 분 전에 저울의 전원을 켜 놓는다.
- 4.1.3 물체를 손으로 잡지 말고 핀셋을 이용한다.
- 4.1.4 편심오차를 줄이기 위하여 팬의 중앙에 측정 물체를 위치시킨다.
- 4.1.5 저울과 팬을 청결하게 유지해야 한다.
- 4.1.6 지시값이 안정되면 즉시 결과를 읽거나 기록한다.
- 4.1.7 저울의 자체 calibration을 다음과 같은 경우에는 실시한다.
 - ① 처음으로 저울을 작동시킬 때
 - ② 위치의 변화가 있을 때
 - ③ 주위 환경의 변화가 심하게 생겼을 경우(온도, 습도, 기압)

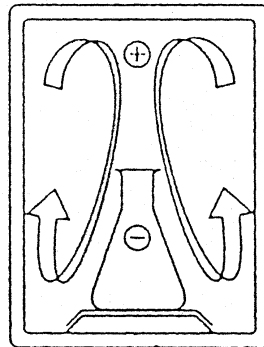
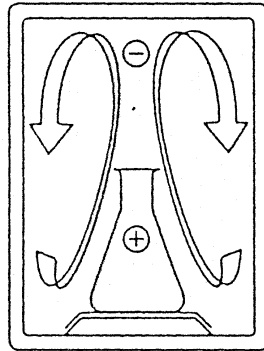
4.2 측정 장소의 조건

- 4.2.1 측정 탁자는 외부의 진동이 전달되지 않아야 한다.
- 4.2.2 측정 탁자는 비자성체이어야 한다.
- 4.2.3 가능한 저울이 설치되는 방에는 하나의 출입구만을 만들어 놓는 것이 좋다.
- 4.2.4 가능한 방의 구석에 설치하는 것이 좋다.
- 4.2.5 저울은 air conditioner 혹은 송풍기 가까이에 설치해서는 안 된다.
- 4.2.6 저울을 교정하는 환경은 가능한한 온도는 $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, 습도는 $(50 \pm 5) \% \text{R.H.}$ 로 유지되어야 한다.

5. 질량 측정에 미치는 물리적 영향

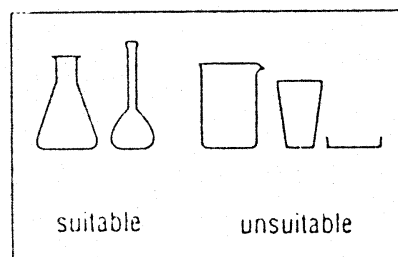
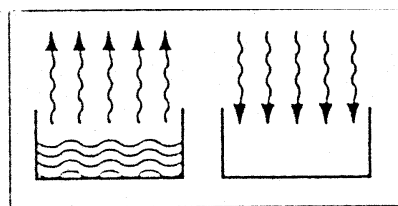
5.1 온도 영향

측정 물체와 주위 환경의 온도 차이에 의해서 공기의 흐름이 생긴다. 이로 인하여 지시값이 한 방향으로 일정하게 변화한다. 이런 현상을 막기 위해서는 측정 물체를 저울과 똑같은 환경에서 평형시켰다가 측정을 하면 된다.



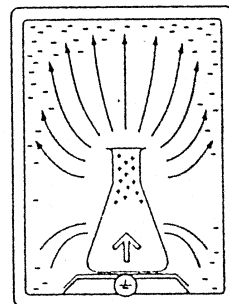
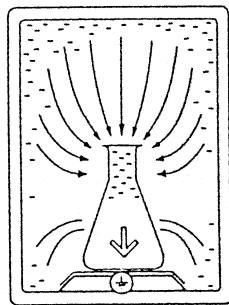
5.2 습도 영향

측정물체의 표면에 수분이 흡탈착 됨으로 인하여 측정 물체의 지시값이 서서히 증가하거나 감소한다. 따라서 이 영향을 줄이려면 습도를 일정하게 유지시켜야 한다.



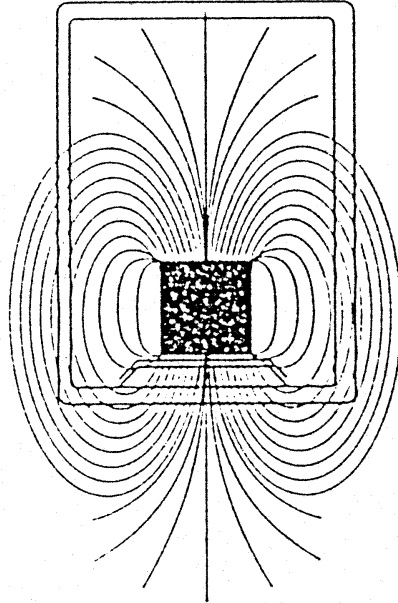
5.3 정전기 영향

공기가 건조하면 측정물체의 표면에 정전기가 발생하기 쉬우며 측정물체값이 측정할 때마다 다르게 나타나 정밀도가 떨어진다. 이런 현상을 막기 위해서는 적절한 습도 유지와 될 수 있으면 절연 물체를 사용하지 않고 저울 자체를 접지시키면 가능하다.



5.4 자장의 영향

자장을 띤 측정 물체의 값은 팬 위에 놓는 위치에 따라 값이 변한다. 자력은 거리가 증가하면 약해지기 때문에 비자성 물체의 보조물을 사용하여 측정하면 자장의 영향을 줄일 수 있다.



5.5 부력의 영향

저울은 상용 질량값을 가진 분동으로 교정하므로 밀도가 다른 물체의 질량을 측정할 때는 공기 부력의 영향을 받는다. 모든 micro 저울이나 정밀을 요하는 저울은 측정 환경 즉 온도, 습도, 기압을 측정하여 공기밀도를 계산하여 보정해 주어야 한다. 물체의 정밀 측정을 위한 부력 보정은 다음과 같이 한다.

$$m_d' = \frac{m_x(1 - \rho/d_x)}{(1 - \rho/8000)} \quad (7)$$

여기서 m_x , d_x 는 물체의 질량값 및 밀도이고 m_d 는 물체의 저울 지시값이며 공기밀도는 식(8, 9)으로 계산한다.

5.5.1 공기밀도 계산

부력 보정을 위해서는 공기밀도의 정밀한 측정이 요구된다. 그리하여 1981 년 국제도량형국(BIPM)에서 상대정밀도 10^{-4} 수준으로 새로 개발하여 발표한 공기밀도 공식을 사용한다. 이 BIPM 공기밀도 공식은 현재까지 가장 정밀한 것으로 되어 있으며 다음과 같다.

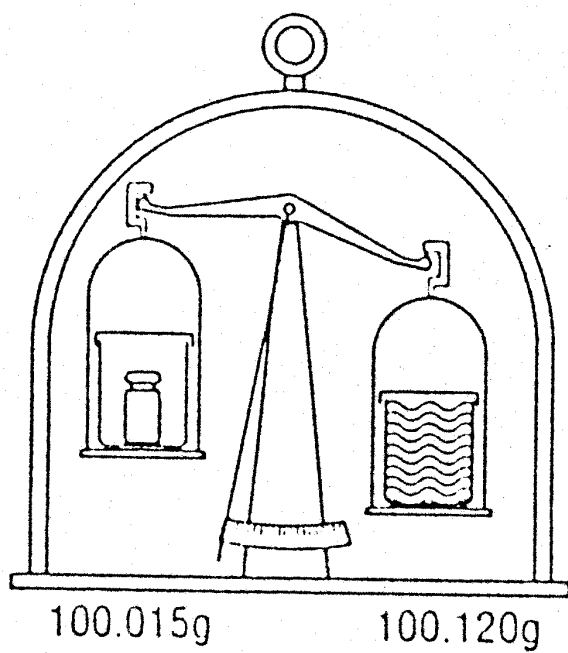
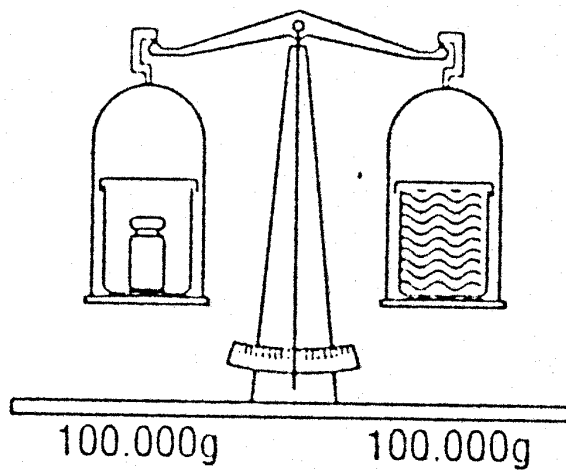
$$\rho = [0.0348349 + 1.444583 \times 10^{-9} (X_{co_2} - 400)] \times \frac{P}{ZT} (1 - 0.3780 X_v) \quad (8)$$

P : 기압(Pa), T : $273.15 + t$ (K), ρ : 공기밀도, kg/m^3
 X_{co_2} : 공기중 CO_2 의 몰 분율, 정상 조건일때 400 임, ppm

또 다른 방법은 NIST(구NBS) 공식이 식(9)와 같이 주어진다.

$$\rho = \frac{0.00348444 \times P - H \times (0.00252 \times t - 0.020582)}{(273.15 + t)} \quad (9)$$

여기서 ρ : 공기밀도(kg/m^3), P : 압력(Pa),
 H : 습도(%R.H.), t : 온도, $^{\circ}\text{C}$

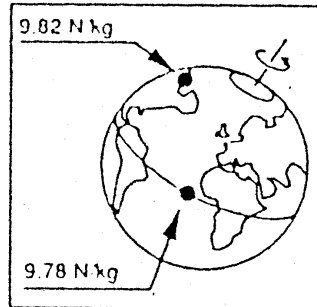
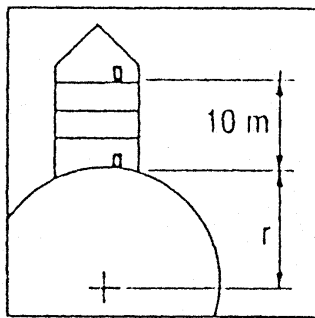


5.6 중력의 영향

중력은 그림 1과 같이 해발 고도와 지역의 위도에 따라 다르다. 중력 보정식은 식(10)과 같다.

$$g = 9.80632 - 0.02586 \times \cos 2\psi + 0.00003 \times \cos 4\psi - 0.00000293 \times h \quad (10)$$

여기서 g : 중력 가속도, ψ : 위도, h : 해발고도



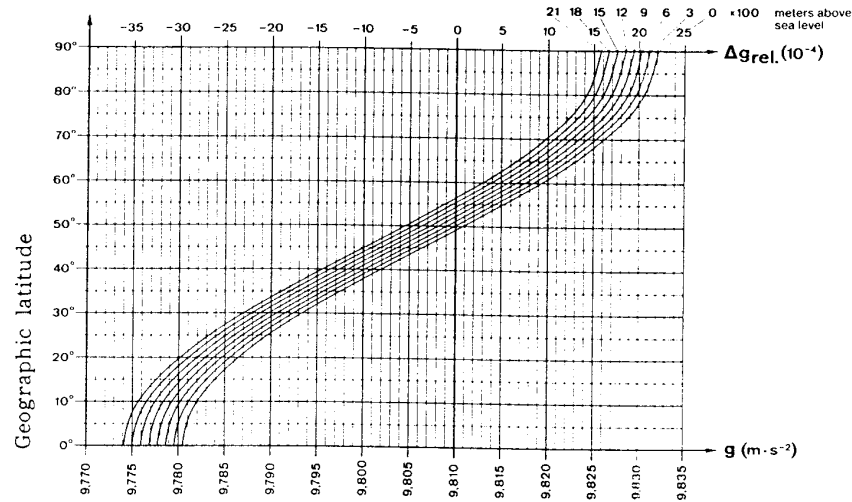


그림 1. 위도와 해발고도에 따른 중력 가속도의 값

6. 준비물

- 6.1 저울의 교정에 필요한 표준분동
- 6.2 환경 측정용 온도계, 습도계, 기압계
- 6.3 장갑, 시계, 분동집게, 먼지 제거 솔, 기록도구 등

7. 스펜(span) 교정

저울 교정에 앞서서 저울의 스펜 교정이 제대로 되어 있는지를 확인해야 한다. 외부에서 스펜 교정이 가능한 저울은 정확한 값을 알고 있는 표준분동을 가지고 스펜을 교정하고 내부에 자체 calibration 분동을 가지고 있는 저울은 사용 설명서에 따라 스펜을 교정하면 된다.

7.1 내부 분동에 의한 스펜 교정

저울의 내부에 자체 calibration 분동이 내장되어 있어 사용설명서에 따라 스펜을 교정한다.

7.2 표준 분동에 의한 스펜 교정

저울의 내부에 calibration 분동이 없고 외부에서 표준분동을 올려 놓고 스펜을 조정한다. 이 경우에는 분동의 상용질량값으로 교정한다.

7.3 내부 분동 교정(내부 분동이 있는 경우)

내부 분동으로 스펠을 교정한 후 내부 분동에 상응하는 표준 분동을 이용하여 내부 분동값을 비교한다.

8. 교정 방법 및 세부 교정 절차

8.1 감도

빈 접시와 최대용량 부근의 각각의 평형점에서 감도분동을 놓아 지시값의 변화를 본다. 시험 분동은 저울의 해독도의 약 10배에 해당하는 분동을 사용한다. (해독도가 1 mg 미만의 것에 대해서는 1 mg으로 한다.) 여기서 구해진 저울 감도에 의한 불확도(u_s)는 분동 교정시 사용될 수 있다.

8.2 편심오차

저울의 편심오차는 저울의 팬의 중앙으로부터 벗어난 위치에 물체를 올려놓았을 때 저울의 역학적인 힘의 균형이 벗어남으로써 나타나는 현상으로 저울의 역학적인 구조가 대칭적으로 조립되지 않았을 때 이러한 현상은 크게 나타난다. 최대용량의 1/4 이상의 분동을 팬 중앙에 놓고 지시값을 읽고 그림 2와 같이 중앙으로부터 반경의 1/2 만큼 벗어난 곳의 전, 후, 좌, 우에 놓고 각각의 지시값을 읽는다. 전, 후, 좌, 우에 놓았을 때 지시한 값과 중앙에 놓았을 때 지시한 값과의 차이를 구한 값이 편심오차이다.

$$\text{편심오차} = (\text{전, 후, 좌, 우}) \text{ 지시값} - \text{중앙 지시값}$$

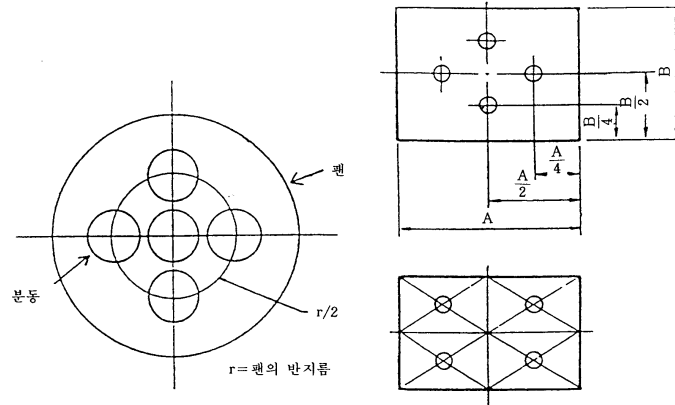


그림 2. 편심오차 시험시 분동의 위치

8.3 직선성

저울의 직선성 시험은 그림 3과 같이 저울의 지시값과 분동의 상용질량값과 직선성 정도를 검사하는 것이다. 최대용량의 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %에 해당되는 분동을 저울에 놓고 지시값을 읽은 후 분동의 상용질량값과 비교하여 차이를 구한다.

요령은 다음과 같다.

8.3.1 0에서 최대용량까지 앞에서 말한 분동을 0 %→25 %→50 %→75 %→100 %의 순으로 올려놓고 각각의 지시값을 읽는다.

8.3.2 역으로 100 %→75 %→50 %→25 %→0 %의 순으로 분동을 내리면서 각각의 지시값을 읽는다.

8.3.3 8.3.1, 8.3.2에서 구한 지시값과 분동의 상용 질량값을 식(1)에 대입하여 보정값을 구한다.

8.3.3에서 구한 값은 저울의 최소 digit가 시험분동의 최대허용 오차의 $\frac{1}{4}$ 보다 클 경우에 해당되며 만일 작을 경우에는 분동의 질량을 이용하여 공기부력을 보정하여 저울의 지시값과 비교하여야 한다. 질량이 m_x 이고, 밀도가 d_x 인 분동으로 공기밀도가 ρ 인 상태에서 저울접시 위에 올려 놓았을 때 m_d 의 값을 지시하였다면 보정값은 식(11)과 같다.

$$\text{보정값} = \frac{m_x(1 - \frac{\rho}{d_x})}{(1 - \frac{\rho}{8000})} - m_d \quad (11)$$

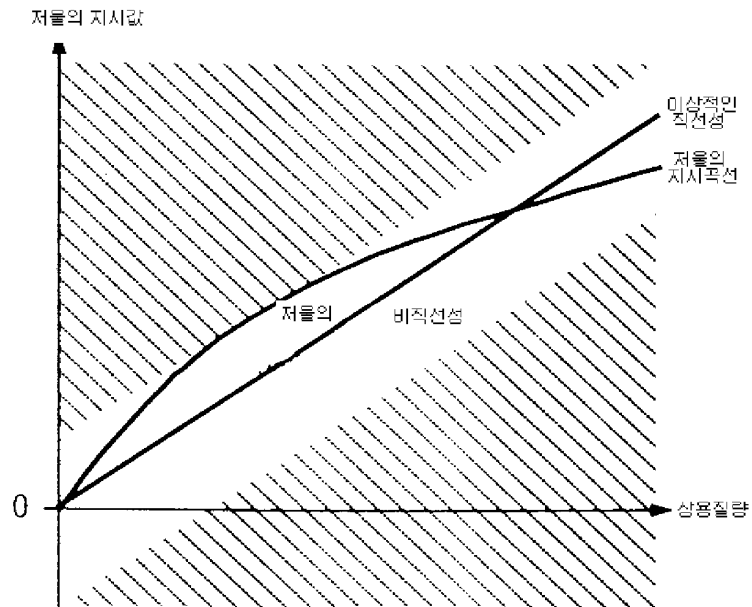


그림 2. 저울의 직선성

8.4 정밀도

최대용량 혹은 그의 1/2 분동을 사용하여 반복적으로 약 10회 정도 저울에 올려놓고 그 지시값을 읽는다. 이 지시값들로부터 표준편차(s)를 구한다.

9. 교정 데이터의 처리

9.1 불확도

측정결과에 대한 불확도는 정밀도 시험에 나타난 표준편차(s)와 사용된 분동의 불확도로부터 다음과 같이 구한다.

9.1.1 A형 표준불확도

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

여기서 s : 정밀도 시험에서 얻은 표준편차,

n : 정밀도 시험시 측정횟수

만약 반복성이 좋아 표준편차가 0이 나오면 그대로 적용한다.

9.1.2 B형 표준불확도

B형 표준불확도는 사용한 분동과 저울의 감도, 분해능, 편심오차에 의한 불확도로 이루어져 있다.

$$\begin{aligned} u_B &= \sqrt{u_N^2 + u_{ba}^2} \\ &= \sqrt{u_N^2 + u_s^2 + u_d^2 + u_E^2} \end{aligned} \quad (13)$$

9.1.2.1 표준분동의 불확도(u_N)

$$u_N = \frac{U}{k} \quad (14)$$

여기서 U : 성적서에 주어진 표준분동의 확장불확도

k : 성적서에 주어진 표준분동의 확장불확도에 대한 포함 인자

표준 분동과 관련된 확장불확도 U 가 없는 경우에 표준 분동의 정확도 등급에 따라 가정되어야 한다. 만약 성적서에 표준분동의 등급만 주어지고 확장 불확도가 주어지지 않았을 경우 확장불확도 U 는 $(1/3)\delta_m$ 이내이어야 하고 $k=2$ 일 때 값이기 때문에 $u_N=(1/6)\delta_m$ 의 값을 적용하면 된다.

사용한 분동들의 공분산이 알려지지 않았다면 상관계수가 1로 가정될 수 있기 때문에 여러 개의 분동을 조합하여 사용하였을 경우에는 다음과 같이 주어진다.

$$u_N = \sum u_{N_i} = \text{사용된 분동들의 불확도의 합}$$

단 중복하여 사용한 분동의 불확도는 1회만 적용한다.

9.1.2.2 저울에 의한 B형 표준불확도(u_{ba})

B형 표준불확도는 감도 불확도(u_s), 분해능 불확도(u_d), 편심오차 불확도(u_E)로 이루어진다.

$$u_{ba} = \sqrt{u_s^2 + u_d^2 + u_E^2} \quad (15)$$

- 저울 감도의 불확도(u_s) : 저울의 감도시험에 의해서 얻어진 불확도

$$u_s = \sqrt{u^2(\Delta m_s) + u^2(\Delta I_s)} \quad (16)$$

여기서

$$u(\Delta m_s) = \frac{U(\Delta m_s)}{k}, \quad u(\Delta I_s) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{혹은} \quad u(\Delta I_s) = \frac{d}{4\sqrt{3}} \quad \text{이다.}$$

$u(\Delta m_s)$ 는 감도시험에 사용된 감도 분동의 불확도, $u(\Delta I_s)$ 는 감도 분동에 의한 저울 지시값의 불확도이다.

- 분해능 불확도(u_d) : 저울이 가진 분해능에 기인된 불확도

$$u_d = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (17)$$

여기서 d : 저울 눈금 간격

- 편심오차 불확도(u_E)

$$u_E = \frac{\frac{d_1}{d_2} \times D}{2\sqrt{3}} \quad (18)$$

여기서 d_1 : 편심오차 시험시 분동위치의 간격(전후 혹은 좌우)

d_2 : 저울 팬 중심에서 한쪽 끝까지의 거리

D : 편심오차의 최대값과 최소값의 차이

만약에 저울이 자동 분동 교환 장치를 가지고 있을 경우는 다음과 같다.

$$u_E = \frac{|\Delta I_1 - \Delta I_2|}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

여기서 $\Delta I_1, \Delta I_2$ 는 분동의 위치를 바꾸어 놓았을 때 각각 두 분동의 차이값이다.

9.1.3 합성 표준불확도

이상의 결과로부터 저울의 합성 표준불확도 u_c 는 용어의 정의에서 설명된 바와 같이 A형 표준불확도 u_A 와 B형 표준불확도 u_B 에 의하여 계산된다.

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \\ &= \sqrt{u_A^2 + u_N^2 + u_s^2 + u_d^2 + u_E^2} \end{aligned} \quad (20)$$

9.1.4 확장불확도, U

저울 교정의 확장불확도 U 는 합성 표준불확도 u_c 와 포함인자 k 에 의하여 결정된다.

$$U = k \cdot u_c \quad (21)$$

9.2 교정 데이터 기록 및 계산 방법

9.2.1 일반사항 기록

의뢰 기관		측정일자			
제작 회사		측 정 자			
모 델 명			온 도	기 압	습 도
제조 번호		측정환경	전 :		
최대 용량			후 :		
해 독 도					

9.2.2 스펜 교정

	스펜조정전(g)		스펜조정후(g)
빈접시	1		
	3		
	5		
최대용량	2		
	4		
	6		

9.2.3 감도

감도분동 : 해독도의 10 배 분동

	빈접시 + Δm_s (g)	최대용량 + Δm_s (g)
1		
2		
3		
4		
5		

여기서 Δm_s : 감도 분동

9.2.4 편심 오차(최대 용량의 1/4 분동 이상)

분동 위치	지 시 값(g)	편 심 오 차(g)
중앙		
전		
후		
좌		
우		
중앙		

편심오차 = (전, 후, 좌, 우) 지시값 - 중앙 지시값 평균

9.2.5 직선성 시험

	표준분동의 상용질량값(g)	저울의 지시값(g)		보정값(g)	
		증	감	증	감
0 %					
25 %					
50 %					
75 %					
100 %					
0 %					

보정값 =

표준분동의 상용질량값 - 저울의 지시값

9.2.6 정밀도 시험(최대 용량 또는 그의 1/2 분동)

측정회수	지시값(g)	측정회수	지시값(g)
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	
표준편차			

10. 교정 성적서 작성 방법

교정 방법에 따라 분동을 이용하여 저울의 교정이 끝나면 공기밀도, 표준 편차, 보정값, A형 표준불확도, B형 표준불확도, 합성 표준불확도, 확장불확도 등을 계산하고 그 결과를 토대로 주어진 형식에 맞게 교정성적서를 작성한다.

교정성적서에 포함될 사항은 다음과 같다.

- 10.1 의뢰기관명, 주소
- 10.2 성적서 번호
- 10.3 품명, 제작회사 및 형식, 기기번호
- 10.4 교정일자
- 10.5 교정환경(온도, 습도), 교정장소

- 10.6 교정에 사용한 표준기의 소급성
- 10.7 교정결과(표준편차, 편심오차, 직선성 보정값 등)
- 10.8 불확도(포함인자 포함)
- 10.9 측정자 및 책임자 서명
- 10.10 참고사항 및 기타 의견

부록 1. 교정 성적서 작성 예

교 정 성 적 서 교정기관 주소 명기 교정기관 전화 및 FAX No 명기		성적서번호(Cer. No) : - - (2) 쪽 중 (1) 쪽										
1. 의뢰자 기 관 명 : 한국표준과학연구원 주 소 : 대전광역시 유성구 도룡동 1 2. 측 정 기 품 명 : 전기식 지시저울 제작회사 : ○○○○ 형 식 : ○○○○ 기기번호 : 11111 3. 교정일자 : 2002. 1. 31 4. 교정환경 온 도 : (20±0.3)℃ 상대습도 : (50±5)% R.H. 교정장소 : ■고정표준실 □이동시설 □현장 5. 측정표준의 소급성 교정방법 및 소급성 서술 교정에 사용한 표준장비 명세 <table border="1"> <thead> <tr> <th>사용장비명</th> <th>제작자</th> <th>형식 및 기기번호</th> <th>차기교정일</th> <th>교정기관</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>분동 1 kg- 10 mg (E₂급)</td> <td>Troemner</td> <td>TR05</td> <td>2003. 3. 30</td> <td>KRISS</td> </tr> </tbody> </table> 6. 교정결과 : “교정결과” 참조 7. 측정불확도(신뢰수준 95 %, k=2) : 1.3 mg			사용장비명	제작자	형식 및 기기번호	차기교정일	교정기관	분동 1 kg- 10 mg (E ₂ 급)	Troemner	TR05	2003. 3. 30	KRISS
사용장비명	제작자	형식 및 기기번호	차기교정일	교정기관								
분동 1 kg- 10 mg (E ₂ 급)	Troemner	TR05	2003. 3. 30	KRISS								
확 인	작성자 성 명 : 홍 길 동 (서 명)	승인자 직 위 : 교정책임자 성 명: (서 명)										
위 성적서는 세계시험소인정기구(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국교정시험기관인정기구 (KOLAS)로부터 공인 받은 교정항목의 교정결과입니다. 2002. 02. 01. 산업자원부 기술표준원 인정 교정기관명 (인)												

교 정 결 과
CALIBRATION RESULTS

성적서번호(Certificate No.) : 01-05605-008

(2) 쪽 중 (2) 쪽 (Page of Pages)

■ 장비품명 : 전기식 지시저울
형식및기기번호 : ○○○

- * 용 량 : 1200 g
- * 해 독 도 : 0.001 g
- * 표준편차 : 0.0008 g(500 g)
- * 편심오차 : -0.001 g(전), -0.001 g(우)(500 g)
- * 직 선 성

참 값 (g)	지 시 값 (g)		보 정 값 (g)	
	증 가	감 소	증 가	감 소
300	300.001	300.001	-0.001	-0.001
600	600.001	600.001	-0.001	-0.001
900	900.002	900.002	-0.002	-0.002
1200	1200.001	1200.001	-0.001	-0.001

* 보 정 값 = 참 값 - 지시값
이상 끝.

참고문헌

- [1] "Weights of classes $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_2, M_3$ ", Committee Draft OIML/2nd CD R111(2000).
- [2] 정진완 외 4명, “분동의 표준교정절차”, KASTO 02-04-1050-088, 한국계량측정협회(2002).
- [3] 정진완 외 4명, “전기식 지시저울의 표준교정절차”, KASTO 02-04-1030-075, 한국계량측정협회(2002).
- [4] 도진열, “질량 측정의 기초”, KRISS-94-049-ET, 한국표준과학연구원(1994).
- [5] 측정불확도 표현 지침, KRISS-99-070-SP, 한국표준과학연구원(1999).
- [6] H. Rustishauser, A. Reichmuth, "The New Analytical Balance AT from METTLER", Mettler Instrument AG(1988)