

Redefinition of the SI Base Units with Fundamental Constants

Ho Seong Lee[†]

Center for Time and Frequency Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science,
267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

(Received May 7, 2019; Revised June 4, 2019; Accepted June 4, 2019)

Revision of the International System of Units (SI) in terms of fundamental constants was achieved by the 26th General Conference on Weights and Measures (CGPM) in November 2018. Four base units (kilogram, ampere, kelvin, and mole) of SI were redefined by fixing the values of the Planck constant h , elementary charge e , Boltzmann constant k , and Avogadro constant N_A respectively. In this paper the scientific principle for redefining the kilogram from the Planck constant with the Kibble balance is explained as an example. The revised SI takes effect on May 20, 2019.

Keywords: SI, Fundamental constants, Kilogram, Planck constant, Kibble balance

OCIS codes: (000.2690) General physics; (000.3110) Instruments, apparatus, and components common to the sciences; (120.3940) Metrology

기본상수를 이용한 SI 기본단위의 재정의

이호성[†]

한국표준과학연구원 시간표준센터
Ⓞ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

(2019년 5월 7일 받음, 2019년 6월 4일 수정본 받음, 2019년 6월 4일 게재 확정)

기본상수를 이용한 국제단위계 개정이 2018년 11월에 개최된 제26차 국제도량형총회에서 채택되었다. 국제단위계에 속한 4개의 기본단위(킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰)가 각각 그 값이 고정된 플랑크 상수 h , 기본 전하 e , 볼츠만 상수 k , 아보가드로 상수 N_A 를 기반으로 재정의되었다. 이 논문에서는 킬블 저울을 이용하여 플랑크 상수로부터 킬로그램을 재정의한 원리를 설명한다. 개정된 국제단위계는 2019년 5월 20일부터 발효된다.

Keywords: 국제단위계, 기본상수, 킬로그램, 플랑크 상수, 킬블 저울

OCIS codes: (000.2690) General physics; (000.3110) Instruments, apparatus, and components common to the sciences; (120.3940) Metrology

I. 서 론

‘측정한다’는 것은 어떤 물리량을 그 기준과 비교하여 비율을 알아내는 일을 말한다. 여기서 기준으로 보통 사용되는 것이 ‘단위’이다. 현재 국제적으로 널리 통용되는 ‘국제단위계(약칭: SI)’에는 7개의 기본단위가 있는데, 그것은 미터(기호: m), 킬로그램(kg), 초(s), 암페어(A), 켈빈(K), 몰(mol), 칸델라(cd)이다. 이 단위들은 각각 다음과 같은 7개 물리량을 나타낼 때 사용한다: 길이, 질량, 시간, 전류, 열역학 온도, 물질량, 광도.

기본단위 중에서 킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰이 2018년 11월에 개최된 제26차 국제도량형총회(CGPM)에서 기본상수를 기반으로 재정의되었다. 각 단위에 대응되는 기본상수는 다음과 같다. 킬로그램은 플랑크 상수(기호: h), 암페어는 기본 전하(e), 켈빈은 볼츠만 상수(k), 몰은 아보가드로 상수(N_A)이다.

이에 앞서 1983년 CGPM에서는 길이의 단위인 미터가 진공에서의 빛의 속도(이하: 빛의 속도)를 기반으로 재정의된 바 있다. 이를 위해 1975년 CGPM에서는 빛의 속도(기호: c)의 수치를 다음과 같이 고정시켰다: $c = 299\,792\,458$ m/s.

[†]E-mail: hslee@kriss.re.kr, ORCID: 0000-0001-6416-2162

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

1983년에 채택된 미터의 새 정의는 이렇게 고정된 빛의 속력에서 유도되어 나온 결과이다. 다시 말해 위 식을 m 에 대해 쓰면, $m = c \cdot 1/299\,792\,458 \cdot s$ 이고, 이것을 말로 풀어 쓴 것이 바로 미터의 정의이다: “미터는 빛이 진공에서 1/299 792 458 초 동안 진행한 경로의 길이이다.” 이것이 가능한 이유는 빛의 속력 값이 불확도(uncertainty) 없이 고정된 수치이기 때문이다. 미터를 이렇게 재정의하면서 ‘미터의 정의’와 ‘미터의 구현’이 분리되었다. 미터를 구현한다는 것은 새로 정의된 미터 단위로 길이를 측정하고 표현한다는 뜻이다. 이에 대해서는 다른 글에서 이미 소개한 바 있다¹²⁾.

이번 단위 재정의는 미터 재정의 과정을 따라서 하는 것이다. 이 논문에서는 빛의 또 다른 속성, 즉 빛의 양자인 광자와 관련된 플랑크 상수로부터 킬로그램이 재정의된 원리와 그것을 구현하는 장치에 대해 설명한다.

킬로그램은 1889년에 ‘국제킬로그램원기(IPK)’라고 불리는, 백금과 이리듐의 합금으로 만든 분동에 의해 정의되어 질량의 단위로 사용되어 왔었다. 그런데 IPK는 같은 물질로 만들어 같은 금고 속에 보관되어 있던 6개의 공식 복사본과 비교했을 때, 또 여러 나라에서 국가킬로그램원기로 사용하던 여러 표준분동들과 비교했을 때 100년 동안 평균적으로 약 50 μg (상대적인 값으로는 5×10^{-8})이 변했다는 것이 밝혀졌다³⁾. 그래서 이것을 대체할 새로운 정의를 찾고 있었는데, 2018년에서야 플랑크 상수에 기반하여 킬로그램의 정의를 바꾸게 된 것이다.

이 논문 II장에서는 플랑크 상수 값을 구하는 두 가지 방법, 즉 �블 저울을 이용한 방법과 XRCd (엑스선 결정 밀도) 방법에 대해 설명한다. III장에서는 플랑크 상수 값을 고정시키는 조건과 과정에 대해 설명한다. IV장에서는 기본상수 값을 고정하고, 그것으로부터 SI 기본단위를 재정의하는 방법에 대해 설명한다. V장에서는 4개 기본상수들의 불확도가 없어짐으로써 다른 기본상수들에 미치는 영향을 알아본다. 그리고 이번 단위 재정의가 과학기술계 및 산업계에 미칠 영향과 미래를 전망해본다.

II. 플랑크 상수 값의 측정 실험

플랑크 상수(h)는 막스 플랑크가 1900년에 그의 흑체 복사 공식을 유도하면서 처음으로 도입했다. 그 무렵 과학자들은 흑체에서 발생하는 복사의 주파수 별(또는 파장 별) 빛의 세기에 대한 연구를 수행하고 있었다. 독일의 빌헬름 빈은 온도에 따라 달라지는 복사의 주파수(또는 파장)에 대한 빛의 세기를 실험적으로 구했다. 그의 공식은 오늘날 ‘빈의 변위 법칙’이라고 부르는데, 그 내용은 다음과 같다: 어떤 온도(T)에서 가장 강하게 방출되는 빛의 주파수(또는 파장)를 ν_{max} (또는 λ_{max})라 할 때, $\nu_{\text{max}}/T = \text{constant}$ (또는 $\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{constant}$)이다.

그 당시 백열전구를 생산하는 산업체에서는 이 공식을 유용하게 사용했다. 하지만 이 공식이 나오게 된 근본적인 이

유는 아무도 설명하지 못했다. 왜냐하면 그 무렵에는 맥스웰의 전자기학이 널리 알려져 있었고, 맥스웰 방정식에 의하면 복사파(또는 전자파)의 에너지는 연속적이다. 그런데 플랑크는 그의 흑체 복사 공식에 에너지가 불연속이라는 가정을 도입했다. 즉 에너지가 양자화되어 있다는 가설($E = h\nu$)을 도입하고, 그것을 기반으로 그의 흑체 복사 공식을 만들었는데 실험결과와 잘 일치하였다. 1905년에 아인슈타인의 광양자설이 나온 이후 빛은 양자(즉 광자)로 구성되어 있다는 것이 과학계에서 받아들여지기 시작했다. 오늘날 $E = h\nu$ 는 ‘플랑크-아인슈타인 관계식’이라고 부른다. 플랑크 상수 h 는 양자역학에서 없어서는 안되는 상수이다. 그래서 막스 플랑크를 양자역학의 효시라고 부른다.

2.1. �블 저울을 이용한 방법

현대에 와서 플랑크 상수의 값은 전기적 상수와 관련된 양을 측정한 후 그 값으로부터 계산으로 구한다. 구체적으로 말하면, 조셉슨 상수(K_J)와 폰클리칭 상수(R_K), 그리고 그들의 곱($K_J^2 R_K$)의 값을 실험을 통해 측정하고, 그들과의 관계식에서 h 를 구한다. 여기서는 K_J 와 R_K 그리고 $K_J^2 R_K$ 값을 측정하는 원리 및 방법에 대해 간략히 소개한다⁴⁾.

조셉슨 상수는 조셉슨 효과에서 나타나는 상수를 말한다. 조셉슨 효과는 조셉슨 접합, 즉 두 개의 초전도체 사이에 부도체가 있는 접합을 약 4.2 K으로 냉각시키면 양자 터널링에 의해 초전도 전류가 흐르는 현상을 말한다. 이런 접합들을 수만 개 직렬연결하여 만든 조셉슨 소자에 마이크로파 주파수(10~100 GHz)를 주입하면 전압이 양자화되어 전압의 계단들이 생긴다. 전압의 계단에서는 전류나 주파수가 어떤 범위에서 변해도 전압은 일정하게 유지된다. 입력되는 마이크로파 주파수를 f 라 하고, 조셉슨 소자에 생성된 양자화된 전압을 U_J 라고 할 때 이 둘 사이에는 다음 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$U_J(n) = nf/K_J \tag{1}$$

여기서 n 은 전류 대 전압 곡선에 나타난 n 번째 계단을 의미하는 정수인데, 이것은 연결된 조셉슨 접합의 개수에 해당한다. 조셉슨 상수는 $K_J = 2e/h$ 의 관계를 가지는데, 그 단위는 Hz/V이다. K_J 값은 조셉슨 전압 $U_J(n)$ 을 SI 단위인 볼트(기호: V) 단위로 측정함으로써 결정한다. 이렇게 만든 양자 전압표준기는 오늘날 상용화되어 널리 사용되고 있다.

K_J 로부터 h 를 구하기 위해 미세구조 상수 α 와의 관계를 이용한다. 다시 말해, $\alpha = \mu_0 c e^2 / 2h$ 이므로 $h = 8\alpha / \mu_0 c K_J^2$ 의 관계가 성립한다. 이 식으로부터 h 를 구할 수 있다. 이런 간접적인 방법을 사용하는 이유는 α 값은 h 보다 대략 100배 더 정확하게(불확도가 작게) 구할 수 있기 때문이다. 위 식에서 μ_0 는 진공 투자율(또는 자기 상수)인데, 2018년 11월 이전에는 그 불확도가 0인 기본상수였다. 하지만 현재는 불확도를

가지게 되었는데 자세한 내용은 V장에서 설명한다. 결론적으로, 이렇게 구하는 h 값의 불확도는 K_J 의 불확도에 의해 결정된다.

양자 홀 효과란 홀(Hall) 효과의 양자역학적 버전을 일컫는다. 즉 GaAs-AlGaAs와 같은 이종결합구조의 소자나 MOSFET와 같은 반도체 소자가 온도 ~ 1 K으로 냉각되고, 자기전속밀도 $B \sim 10$ T의 환경에 놓여 있을 때 소자 내의 2차원 전자 기체가 양자화되는 현상을 말한다. 소자에 흐르는 전류 I 가 고정되어 있을 때 B 가 일정 범위에서 변해도 홀 전압 U_H 가 일정한 구간이 생긴다. 이 평평한 구간(plateau)은 저항이 양자화된 영역인데, B 가 증가하면 계단식으로 저항이 변한다. i 번째 평평한 구간의 저항을 $R_H(i)$ 라고 할 때 그 관계는 다음 식 (2)와 같다.

$$R_H(i) = U_H(i)/I = R_K/i \quad (2)$$

여기서 R_K 는 폰클리칭 상수이며 $R_K = h/e^2$ 의 관계를 가진다. i 는 정수이며, $i=1$ 일 때 양자홀 저항이 바로 폰클리칭 상수이다. R_K 의 단위는 옴(기호: Ω)인데, 이미 알려진 저항 값과 직접 또는 간접적인 방법으로 비교하여 그 값을 구할 수 있다.

$K_J^2 R_K$ 의 값을 측정하고 $h = 4/K_J^2 R_K$ 관계로부터 h 를 구하는 것은 영국 국립물리연구소(NPL)의 브라이언 키블이 1975년에 처음 제안했다. 이것을 측정하는 장치를 한동안 ‘와트 저울’이라고 부르다가 2017년부터 발명자 이름을 따서 ‘키블 저울’이라고 부른다. 키블 저울은 처음에는 h 값을 구하는 데 사용되었지만 2018년 11월(CGPM에서 단위 재정의 이후)부터는 질량을 측정하는 1차 표준기(primary standard)로 사용되고 있다.

그림 1은 키블 저울의 작동원리를 보여준다. 키블 저울은 두 번의 실험(weighing mode와 moving mode)을 통해서 질량 값을 알아낼 수 있다⁵⁾. 양팔 저울(또는 천칭)은 일반적으로 두 팔에 각각 측정하려는 질량과 표준 분동을 올려서 서로 비교하여 질량 값을 알아내는 장치이다. 다시 말해 양쪽 팔에 놓인 두 질량에 작용하는 중력을 비교하는 것이다. 하지만 키블 저울은 한쪽에는 중력($F_m = mg$)이 작용하고, 다른 한쪽에는 전자기력이 작용한다. 이 전자기력은 흔히 로렌츠

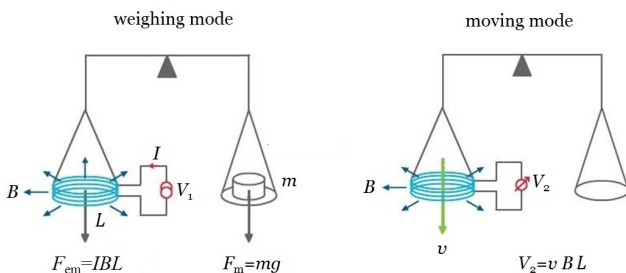


Fig. 1. Operational principle of the Kibble balance: F_{em} and F_m mean an electromagnetic force and a mechanical force, respectively. When the two forces are balanced, we can find out the mass through two operational modes.

힘이라고 부르는데, 자기전속밀도 B 가 방사형으로 형성되어 있는 공간에 길이 L 인 코일을 두고 전류 I 를 흘리면 코일은 중력 방향으로 힘($F_{em} = IBL$)을 받는다. 여기서는 키블 저울에서 질량 m 과 플랑크 상수 h 사이의 관계와 질량 측정의 원리를 알아본다.

로렌츠 힘과 중력이 균형을 이룬다는 것($F_{em} = F_m$)을 수식으로 표현하면 $IBL = mg$ 이다. 그런데 코일에 흘리는 전류 I 를 직접적인 방법으로 정확히 알아내지 못한다. 그래서 앞에서 설명한 양자전압표준기와 양자홀저항표준기를 이용하여 옴의 법칙으로 구한다. 다시 말해, 그림 1의 weighing mode에서 V_1 으로 표시된 전압과 그 전압이 걸린 저항 R 를 정확히 재고, 그 사이의 옴의 법칙 $V_1/R = I$ 에서 I 를 구한다. 따라서 질량 m 은 다음 식으로 표현할 수 있다: $m = IBL/g = V_1 BL/Rg$.

앞의 식에서 BL 역시 정확히 측정하기 어려운 양이다. 그래서 양팔 저울에서 질량 m 을 제거한 후, 코일을 일정한 속도 v 로 움직일 때 생성되는 전압 V_2 으로부터 BL 를 구한다. 다시 말해 $V_2 = vBL$ 이 성립하므로 이 관계로부터 $BL = V_2/v$ 를 구한다. 이 식을 질량 m 을 나타내는 앞의 식에 대입하면 $m = V_1 V_2 / Rg v$ 가 된다. 전압 V_1 과 V_2 를 양자전압표준기로 측정했을 때 이 값들은 식 (1)과 같은 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다: $V_1 = n_1 f_1 / K_J$, $V_2 = n_2 f_2 / K_J$. 여기서 n_1 과 n_2 는 정수이며 각각의 전압 측정에 사용된 조셉슨 접합의 수를 나타낸다. 그리고 f_1 과 f_2 는 양자전압표준기를 여기시키는 데 사용된 마이크로파의 주파수이다. 저항 R 을 양자홀 저항표준기로 측정했을 때 식 (2)와 같은 형태로 표현할 수 있다: $R = R_K/i$. 따라서 이 식들을 전부 m 을 나타내는 수식에 대입하고, $K_J^2 R_K = 4/h$ 의 관계를 이용하면 다음 식 (3)과 같이 된다.

$$m = \frac{i n_1 n_2}{K_J^2 R_K} \frac{f_1 f_2}{g v} = h \left(\frac{i n_1 n_2}{4} \right) \left(\frac{f_1 f_2}{g v} \right) \quad (3)$$

여기서 주파수 f_1 과 f_2 는 질량 측정에 비해 10^5 배 이상 아주 정확히(불확도가 작게) 측정할 수 있는 양이다. g 는 키블 저울이 동작하고 있는 지점에서의 중력가속도인데, 절대 중력계와 상대 중력계를 이용하면 질량 측정의 상대표준불확도보다 약 10배 정확한, $\sim 10^{-9}$ 수준으로 측정할 수 있다. 그리고 코일 이동 속도 v 는 레이저 간섭계로 잴 수 있는데, 이것 역시 질량보다 훨씬 정확히 잴 수 있다. 따라서 식 (3)에서 h 값과 m 값의 상대표준불확도는 서로 직접적으로 영향을 미친다. 다시 말하면, h 값을 m 값의 상대표준불확도만큼(또는 그보다 더) 정확히 구할 수 있다면 h 값을 고정시키고 그것을 기준으로 m 을 측정하는 데 키블 저울을 사용하는 것이 가능하다는 뜻이다.

2.2. XRCD 방법

플랑크 상수 h 를 구하는 또다른 방법으로 XRCD (X-ray crystal density) 실험을 적용하는 방법이 있다. XRCD란 X-

선 간섭계를 이용하여 결정의 격자상수를 구하는 실험을 말한다. 이 방법으로 고농축 실리콘 결정으로 만든 1 킬로그램의 구로부터 아보가드로 상수 N_A 를 먼저 구하고, N_A 와 h 의 관계로부터 h 값을 계산해낸다. 이 실험을 위해 2004년에 IAC (International Avogadro Coordination)라는 국제적인 연구단이 구성되었고, ‘아보가드로 프로젝트’라는 이름으로 공동연구를 수행했다.

XRCD 방법을 간단히 설명하면 실리콘 구 속에 들어있는 실리콘 원자의 개수를 세는 것이다⁶⁾. 1 몰의 실리콘 구에 포함된 실리콘 원자의 수가 바로 아보가드로 상수이다. 이것을 식으로 표현하면 $N_A = 8M/\rho a^3$ 이다. 여기서 M 은 실리콘의 몰 질량, 즉 실리콘 원자 1 몰의 질량이고, ρ 는 실리콘 구의 밀도이며, a 는 실리콘의 격자상수이다. 격자상수란 결정을 구성하는 최소 단위인 정육면체 셀의 한 변의 길이를 말한다. 실리콘 셀 하나는 실리콘 원자 8개로 구성되어 있다. 따라서 $a^3/8$ 은 실리콘 원자 하나가 차지하는 부피에 해당한다. 부피에 밀도를 곱하면 질량이므로, $\rho a^3/8$ 은 실리콘 원자 하나의 질량에 해당된다. 1 몰의 실리콘 질량 M 을 실리콘 원자 하나의 질량으로 나눈 값이 곧 아보가드로 상수 N_A (단위: mol⁻¹)이다. 여기서 M 과 a 는 실리콘 구에서 직접 측정하는 것이 아니라 샘플을 채취하여 간접적인 방법으로 결정한다. ρ 는 실리콘 구의 부피와 질량을 측정한 후, [질량/부피]로부터 구한다. 실리콘 구의 부피는 광학 간섭계로써 직경을 측정하여 구하는데, 길이 측정의 불확도는 약 0.3 nm이다. 실리콘 구의 질량은 질량 비교기로 측정하되, 기준으로는 이미 그 값과 불확도를 알고 있는 표준분동을 사용한다. ρ 와 a 는 온도에 민감하므로 똑같은 온도에서 측정해야 하는데, 20°C에서 1 mK 이내로 안정화한 상태에서 측정한다.

몰 질량 M 을 구할 때 실리콘의 동위원소, 즉 질량수가 28, 29, 30의 비율을 반영해야 한다. 이들의 구성 비율은 자연 상태에서 대략 92 : 5 : 3이다. 이 중 질량수 28인 것을 고농축 시켜서 단일 결정으로 성장시키면 실리콘 28의 비율은 약 99.996%에 이른다. 이렇게 함으로써 몰 질량 M 의 측정 불확도를 크게 줄일 수 있다.

실리콘 구는 공기 속 산소와 반응하여 표면에 SiO₂ 막이 형성되어 있고, 이외에도 탄화막, 수분층, 금속층 등이 둘러싸고 있다. 그래서 이런 표면층을 제외하고 그 속에 들어있는 순수한 실리콘 코어의 질량(m_{core})과 부피(V_{core})로부터 밀도(ρ)를 구한다. 따라서 아보가드로 상수는 $N_A = 8MV_{core}/m_{core}a^3$ 으로 표현된다.

실리콘 구의 전체 질량(m_{sphere})은 코어 질량(m_{core})과 표면층 질량(m_{sl})으로 나눌 수 있다. 즉 $m_{sphere} = m_{core} + m_{sl}$ 이다. 구의 전체 질량은 진공 질량 비교기(일명, 양팔 저울)로 측정한다. 구의 부피는 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저 간섭계로써 측정하는데, 실리콘 구의 직경은 약 93.7 mm이다. 실리콘 격자 간격은 X-선 간섭계와 광학 간섭계로 측정하는데 실리콘의 {220} 격자 간격은 $d_{220} = a/\sqrt{8} \approx 192$ pm이다⁷⁾. 구의 표면층은 X-선 광전자 분광법과 타원 편광 분석법으로

그 성분과 두께 등을 알아낼 수 있다. 이 외에도 표면의 결합, 예를 들면, 불순물 또는 결손 등의 영향을 질량 분석에 반영해야 한다. 그 결과, 실리콘 코어의 질량은 다음 식 (4)로 표현할 수 있다⁸⁾.

$$m_{core} = \frac{M}{N_A} \frac{8V_{core}}{a^3} = \frac{2R_{\infty}h}{c\alpha^2} \frac{M}{M(e)} \frac{8V_{core}}{a^3} \quad (4)$$

여기서 R_{∞} , c , α , $M(e)$ 는 각각 리드베리 상수, 진공에서의 빛의 속력, 미세구조 상수, 전자의 몰 질량을 나타낸다. 위 식에서 h 를 N_A 에 대해 표현하면 다음 식 (5)와 같다.

$$h = \frac{c\alpha^2 M(e)}{2R_{\infty}N_A} \quad (5)$$

CODATA-2014에 의하면⁹⁾, 리드베리 상수 R_{∞} 와 미세구조 상수 α , 그리고 전자의 몰 질량 $M(e)$ 의 상대표준불확도는 각각 5.9×10^{-12} , 2.3×10^{-10} , 2.9×10^{-11} 이다. 다시 말해서, 식 (5)에 포함된 기본상수들의 상대표준불확도는 모두 플랑크 상수 h 나 아보가드로 상수 N_A 보다 훨씬 작다. 따라서 플랑크 상수의 상대표준불확도는 아보가드로 상수의 상대표준 불확도에 의해 결정되고, 그 역도 성립한다.

III. 플랑크 상수 값의 결정

CODATA (Committee on Data for Science and Technology)는 국제학술연합회의 산하에 있는 위원회로서 1966년에 창립했다. CODATA의 특별작업반(Task Group on Fundamental Constants)은 전 세계적으로 기본상수와 관련된 측정값 및 계산값들을 모아서 조정한 후 “CODATA 권고값”이라는 이름으로 대략 4년마다 발표한다. 특별작업반은 이 데이터들을 처리할 때 최소제곱법(least square method)과 가중 평균으로 권고값을 구하는데, 불확도가 작은 데이터에 더 큰 가중치를 부여한다¹⁰⁾.

플랑크 상수에 대한 여러 데이터들, 즉 키블 저울과 XRCD 방법으로 측정한 값들을 CODATA가 처리/조정된 후 권고값으로 발표한 것이 표 1에 나와 있다. 이 표에는 1998년부터 2014년까지의 플랑크 상수 값만 보였다. 초기에는 조셉슨 상

Table 1. The CODATA recommended values and relative standard uncertainties for the Planck constant from 1998 to 2014

Year	The Planck constant h (unit: J s)	Relative standard uncertainty u_r
1998	6.626 068 76(52) $\times 10^{-34}$	7.8×10^{-8}
2002	6.626 0693(11) $\times 10^{-34}$	1.7×10^{-7}
2006	6.626 068 96(33) $\times 10^{-34}$	5.0×10^{-8}
2010	6.626 069 57(29) $\times 10^{-34}$	4.4×10^{-8}
2014	6.626 070 040(81) $\times 10^{-34}$	1.2×10^{-8}

수(K)로부터 구한 h 값도 권고값의 결정에 사용되었으나 최근에는 대부분 킬볼저울과 XRCD 방법으로 구한 값들이 권고값 결정에 크게 기여했다. 플랑크 상수 값에서 마지막 괄호 속의 숫자는 바로 앞의 두 자리 수의 표준불확도를 나타낸다. 예를 들어 1998년의 경우, (52)는 76 ± 52 를 의미하는데, 마지막 두 자리 숫자는 24에서 128 사이에 있다는 뜻이다. 52를 평균값 6.626 068 76으로 나눈 것이 상대표준불확도 7.8×10^{-8} 이다. 상대표준불확도는 세월이 흐름에 따라 - 과학기술이 발전함에 따라 - 대체적으로 줄어든다.

국제도량형위원회(CIPM) 산하에 있는 질량 및 관련량 자문위원회(CCM)에서는 킬로그램 재정의의 위한 요건으로 2010년과 2013년에 권고안을 제시했었다^[11,12]. 요점은 다음과 같다.

- 킬볼저울과 XRCD 실험을 포함한, 적어도 3개의 독립적인 실험을 수행하여 플랑크 상수의 상대표준불확도가 5×10^{-8} 이내에서 일치해야 한다.
- 위 결과 중 적어도 하나는 상대표준불확도가 2×10^{-8} 보다 작아야 한다.

2017년 6월말까지 CODATA 특별작업반에 제출된 데이터, 즉 CODATA-2017 특별 조정에 사용된 주요 데이터들이 그림 2에 나와 있다^[13]. 그림에서 IAC는 국제아보가드로 공동연구단을 의미하고, NIST, NRC, NMIJ, LNE는 각각 미국, 캐나다, 일본, 프랑스의 측정표준연구기관들이다. 그림 왼쪽의 KB는 킬볼저울로 얻은 데이터를 뜻하는 것으로, NIST, NRC, LNE의 데이터가 이에 해당한다. 이에 비해 IAC와 NMIJ는 XRCD로 얻은 결과이다. 가운데 점선을 중심으로 안쪽 밴드는 재정의 요건에 나온 상대표준불확도 $\pm 2 \times 10^{-8}$ 영역을 나타내고, 바깥쪽 밴드는 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 영역을 나타낸다.

그림에서 NIST-15 데이터, 즉 NIST에서 2015년에 킬볼저울로 얻은 데이터는 평균값이 기준 영역에서 한참 벗어나 있다. 이 데이터는 초전도 자석을 이용하여 만든 NIST-3 킬볼저울로 얻은 것이다. 2015년까지만 하더라도 재정의 요건을 만족시키는 결과는 IAC와 NRC-14 (그림에는 없음) 데이터 밖에 없었다. 3번째 독립적인 실험 결과를 얻기 위해 NIST는 영구자석을 이용한 NIST-4 킬볼저울을 새로 만들었고, 그것으로부터 NIST-17의 결과를 얻었다. 결론적으로, 4대의 킬볼저울에서 얻은 데이터가 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 영역에 포함되었고, NRC-17과 IAC 데이터는 $\pm 2 \times 10^{-8}$ 영역에 포함됨으로써 킬로그램 재정의의 위한 요건이 충족되었다. CODATA-17 권고값은 그림에 나온 데이터들을 조정하여 얻은 것이다. 불확도가 작은 값이 권고값에 더 큰 영향을 미치므로 NRC-17의 결과에 가장 가깝다.

CODATA 특별작업반은 플랑크 상수 외에도 3개의 기본상수의 값과 상대표준불확도를 발표했다. 그것을 정리한 것이 표 2에 나와 있다. 플랑크 상수 값과 그 상대표준불확도는 표 1의 2014년 결과에 비해 소수점 아래 7째 자리에서 달라졌는데, 이것이 그림 2에 표시된 CODATA-17에 해당한다.

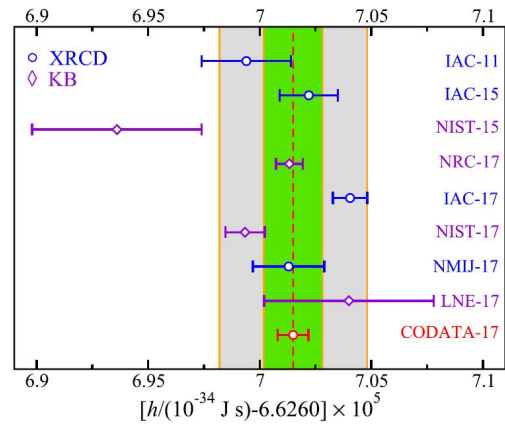


Fig. 2. Values of the Planck constant h and the CODATA 2017 value. The inner band is $\pm 2 \times 10^{-8}$ and the outer band is $\pm 5 \times 10^{-8}$ (KB: Kibble balance; XRCD: x-ray-crystal-density)^[13].

Table 2. The CODATA 2017 adjusted values of h , e , k , and N_A ^[13].

Quantity	Value	Relative standard uncertainty u_r
h	$6.626\ 070\ 150(69) \times 10^{-34}$ J s	1.0×10^{-8}
e	$1.602\ 176\ 6341(83) \times 10^{-19}$ C	5.2×10^{-9}
k	$1.380\ 649\ 03(51) \times 10^{-23}$ J K ⁻¹	3.7×10^{-7}
N_A	$6.022\ 140\ 758(62) \times 10^{23}$ mol ⁻¹	1.0×10^{-8}

IV. 기본상수 값의 고정과 SI 단위 재정의

플랑크 상수를 포함한 4개 기본상수들을 측정한 결과는 국제도량형위원회(CIPM) 산하의 각 단위자문위원회(CC)에서 제시한 재정의 요건들을 충족시켰다. 국제도량형총회(CGPM)의 요청에 따라 CODATA 특별작업반에서는 국제단위계(SI) 개정을 위해 4개 기본상수들의 값을 고정시켰는데, 그 결과가 표 3에 나와 있다. 표에서 보는 것처럼 각 기본상수들은 불확도가 없어지고 고정된 값을 갖게 되었다. 이에 따라 2018년 11월에 프랑스 베르사유에서 개최된 제26차 CGPM에서는 미터 회원국 59개국의 대표들이 “국제단위계 개정 결의안”을 만장일치로 채택하였다^[14].

아래는 국제단위계 개정 결의안의 주요 내용을 우리말로 정리한 것이다. 결의안의 주요내용은 표 3에 있는 4개의 기본상수 외에 나머지 3개의 기본단위와 관련된 기본상수의 값을 고정시키는 것이다. CGPM은 이 7개의 기본상수들에게

Table 3. The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI^[13].

Quantity	Value
h	$6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s
e	$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
k	$1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J K ⁻¹
N_A	$6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol ⁻¹

별도의 명칭을 부여했는데, 단위를 정의하는 상수라는 의미로 “정의상수(defining constants)”라고 부른다.

- 세슘-133 원자의 섭동이 없는 바닥상태의 초미세 전이 주파수 $\Delta\nu_{Cs}$ 는 9 192 631 770 Hz이다.
- 진공에서의 빛의 속력 c 는 299 792 458 m/s이다.
- 플랑크 상수 h 는 $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s이다.
- 기본 전하 e 는 $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C이다.
- 볼츠만 상수 k 는 $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K이다.
- 아보가드로 상수 N_A 는 $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹이다.
- 주파수가 540×10^{12} Hz인 단색광의 시감효능 K_{cd} 는 683 lm/W이다.
- 여기서 헤르츠(기호: Hz), 줄(J), 쿨롱(C), 루멘(lm), 와트(W)는 각각 초(기호: s), 미터(m), 킬로그램(kg), 암페어(A), 켈빈(K), 몰(mol), 칸델라(cd)의 단위들과 다음과 같은 관계가 있다: Hz=s⁻¹, J=kg m² s⁻², C=A s, lm=cd m² m⁻²=cd sr, W=kg m² s⁻³.

7개 정의상수의 단위들은 몰(기호: mol)을 제외하고는 모두 유도단위들이다. 이 유도단위들과 기본단위와의 관계가 맨 아래 줄에 나와 있다. 몰을 제외한 나머지 유도단위들 속에는 모두 시간의 단위 초(기호: s)가 포함되어 있음을 알 수 있다. 초는 SI 단위 중에서 가장 정확하게 구현할 수 있다. 그래서 단위를 정의할 때 가능하면 초를 포함하는 것이 해당 단위를 구현할 때 유리하다.

그림 3은 7개 정의상수와 7개 기본단위 사이의 관계를 보여준다. 앞에서 설명한 것처럼 몰(기호: mol)은 다른 단위들과 무관하게 아보가드로 상수에 의해서만 정의된다. 초(s)에서는 5개의 화살표가 나온다. 이에 비해 켈빈(K), 칸델라(cd), 암페어(A)는 모두 화살표를 받아들이기만 하고 내보내는 것은 없다. 이 단위들은 다른 단위들에 의해 단위의 정의와 구

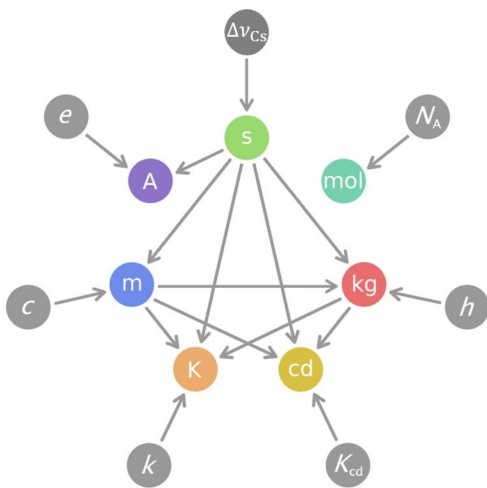


Fig. 3. Relationship among the seven defining constants and the seven SI base units: the unit from which an arrow starts is included in the definition of the unit which the arrow indicates.

현에 많은 영향을 받는다는 뜻이다. 암페어의 경우는 초를 구현하는 세슘원자시계의 불확도가 아주 작기 때문에 시간 측정은 암페어 구현에 전혀 문제가 되지 않는다. 암페어 구현의 불확도는 이동하는 전자의 개수를 세는 것에 의해 결정되는데, 현재는 이동시킬 수 있는 전자의 개수가 너무 적다 (즉 전류의 양이 작다)는 것이 해결해야 할 문제이다¹⁵⁾.

각 정의상수로부터 그 속에 포함된 기본단위를 유도해낼 수 있다. 이 중 플랑크 상수로부터 킬로그램을 유도하는 것을 예로 보인다. 플랑크 상수의 단위 J s에서 J=kg m² s⁻²이므로 플랑크 상수는 다음 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$h = 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

이 식을 kg에 대해 다시 쓰면, $\text{kg} = h \text{ m}^2 \text{ s} / 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ 이 된다. 여기서 m과 s는 각각 진공에서의 빛의 속력 c 와 세슘원자의 전이주파수 $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 다음과 같이 유도할 수 있다: $m = c \text{ s} / 299\ 792\ 458$, $s = 9\ 192\ 631\ 770 / \Delta\nu_{Cs}$. 이것을 kg를 나타내는 식에 대입하면 다음 식 (7)과 같이 된다.

$$\text{kg} \approx 1.475\ 5214 \times 10^{40} h \Delta\nu_{Cs} / c^2 \quad (7)$$

결론적으로, 킬로그램은 3개의 정의상수, h , $\Delta\nu_{Cs}$, c 에 의해 정의된다. 이것을 말로 풀어 쓰면 다음과 같다.

- 킬로그램(기호: kg)은 질량의 SI 단위이다. 킬로그램은 플랑크 상수 h 를 J s단위로 나타낼 때 그 수치를 $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ 으로 고정함으로써 정의된다. 여기서 J s는 $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ 과 같고, 미터(기호: m)와 초(기호: s)는 c 와 $\Delta\nu_{Cs}$ 를 통하여 정의된다.

나머지 6개 단위들도 킬로그램을 정의하는 것과 동일한 방식으로 정의된다. 중요한 것은 기본단위에 해당하는 정의상수의 값을 고정시킨 것이고, 기본단위는 그것에서 유도되어 나온다는 사실이다.

V. SI 단위 재정의의 영향과 전망

국제단위계(SI)는 1960년에 처음 만들어졌다. 1971년에 물 질량의 단위인 몰이 추가되면서 SI 기본단위는 현재와 같이 7개가 되었다. 국제단위계의 가장 큰 특징은 기본단위보다 큰 단위나 작은 단위를 나타낼 때 공통된 접두어를 사용함으로써 단위를 사용하는 방법에서 일관성을 가진다는 것이다. 그런데 이번 단위 재정의의 통해서 각 기본단위와 연결되는 정의상수를 채택하고, 그 값을 고정시킨 후 그것으로부터 기본단위를 유도해낸다는 점에서 새로운 일관성을 갖게 되었다. 정의상수들은 시간이 흘러도 변하지 않는 것, 즉 물리학의 법칙에 포함되어 있는 기본상수들이다. 하지만 칸델라의 경우는 좀 다르다. 칸델라의 정의에는 사람 눈의 ‘시감효능

(luminous efficacy)’이라는 모형이 들어 있다. 칸델라는 빛의 세기, 즉 조명을 나타내기 위해 도입된 단위였기에 가시광선에 국한될 수밖에 없었다. 오늘날 적외선 및 자외선도 과학기술계 및 산업체에서 많이 사용하고 있지만, 조명은 인간 생활에서 여전히 중요한 역할을 담당하고 있기 때문에 칸델라는 앞으로도 기본단위로 남아 있을 것으로 예상된다.

단위 재정의의 위한 요건들을 설정하고 그것을 충족시키도록 한 것은 단위의 연속성을 유지하기 위한 것이다. 이는 지금까지 사용하던 단위와 새로 정의된 단위 사이에 움푹이 생기지 않도록 하기 위한 것이다. 새 정의에서도 해당 단위를 보정 없이 그대로 사용할 수 있으려면 재정의 시점에서 정의상수의 값을 최고의 정확도(해당 시점에서 더 이상 정확히 측정할 수 없는 상태)에 도달해야 한다. 그래야만 정의상수의 값을 고정시킬 수 있다. 단위의 연속성과 사용자들의 편의성을 위해 지난 30여 년 동안 측정과학자들은 많은 노력을 기울였고 드디어 그 결실을 보게 된 것이다. 이런 노력의 결과로서 측정기기를 생산하거나 단위를 사용하는 산업체, 과학기술계나 일반인들은 단위 재정의 이후에 특별히 유의해야 할 사항은 없다. 단지 국가측정표준기관에서는 새 정의를 구현하는 1차 표준기를 만들어서 미래의 고정밀 측정 수요자들의 요구에 부응할 수 있도록 준비해야 할 것이다.

이번 단위 재정의에 의해 4개 기본상수들(h, e, k, N_A)의 불확도가 없어졌고, 진공에서의 빛의 속력 c 는 1975년에 이미 그 불확도가 없어졌다. 그래서 이 5개 기본상수들의 일부로 구성된 다른 기본상수들 역시 불확도가 없어진다. 불확도가 없어진 기본상수들은 더 이상 측정할 필요가 없다. 표 4는 CODATA-2014에서는 불확도를 가졌지만 앞으로는 불확도가 없어지는 기본상수들을 모은 것이다. 표에서 ‘전도도 양자’ G_0 의 단위는 ‘지멘스’이고 그 기호는 대문자 S이다. 소문자로 쓰면 시간의 단위인 초(기호: s)를 나타내므로, 대문자와 소문자를 반드시 구분해서 사용해야 한다.

조셉슨 상수 K_J 와 폰클리칭 상수 R_K 도 불확도가 없어진다. 그런데 전기측정분야, 구체적으로 말하면 전기 및 자기 자문

위원회(CCEM)에서는 1990년에 합의에 의해 이 두 기본상수의 값을 임시로 다음과 같이 고정시킨 적이 있었다: $K_{J-90} = 483\ 597.9\ \text{GHz/V}$, $R_{K-90} = 25\ 812.807\ \Omega$. 이 두 값을 이용하여 전압과 저항을 나타내는 물리량으로 V_{90} 과 Ω_{90} 을 정의하여 사용했고, 이를 바탕으로 전류와 전력을 나타내는 물리량으로 A_{90} 과 W_{90} 을 사용해 왔었다^[4]. 왜냐하면 기존의 암페어의 정의는 실현하기 어려운 정의였지만 유도단위인 볼트와 옴은 위 두 기본상수 덕분에 꽤 정확히 측정할 수 있었기 때문이다. 그래서 지금까지 측정했던 전기량에 관한 측정값들(V_{90} , Ω_{90} , A_{90} 등으로 측정된 값들)은 이번 단위 재정의에 따라 기본상수의 차이(K_{J-90} 와 K_J , R_{K-90} 와 R_K)에 해당하는 만큼 보정해야만 한다.

한편, 단위 재정의 이전까지는 불확도가 없었지만 새로 불확도를 가지는 양을 정리한 것이 표 5에 나와 있다. 이들이 가지는 불확도는 당분간 단위 재정의 직전에 해당 기본상수들이 가졌던 불확도를 가진다. 하지만 이후에는 실험적으로 새로 결정해야 한다. 예를 들면, 국제킬로그램원기 $m(k)$ 와 물의 삼중점의 열역학 온도 T_{TPW} 는 표 2에서 플랑크 상수와 볼츠만 상수가 가졌던 상대표준불확도를 가지게 된다. 질량의 새 정의를 구현하는 킬로그램과 열역학 온도의 새 정의를 구현하는 음향기체온도계의 정확도가 표 2의 플랑크 상수 및 볼츠만 상수를 측정할 때보다 향상되면 이들을 다시 측정하여 그 값과 상대표준불확도를 새로 결정하게 될 것이다.

표 5에서 진공 투자율 μ_0 과 진공 유전율 ϵ_0 은 고전 전자기학을 대표하는 맥스웰 방정식에 등장하여 진공에서의 빛의 속력과 $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 의 관계를 가진다. 그리고 μ_0 는 1948년에 암페어의 힘의 법칙을 이용하여 전류의 단위 암페어를 정의할 때 그 값을 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{N A}^{-2}$ 으로 고정시켰다. ϵ_0 은 c 와 μ_0 의 관계로부터 유도되어 나오므로 μ_0 와 동일한 불확도를 가진다. 그런데 미세구조 상수 α 는 μ_0 및 ϵ_0 와 다음과 같은 관계를 가진다: $\alpha = \mu_0 c / 2R_K = \mu_0 c e^2 / 2h = e^2 / 4\pi\epsilon_0\hbar c$. 이 관계식에서 세 기본상수를 제외한 나머지 기본상수들은 불확도가 없으므로 세 기본상수들의 상대표준불확도는 동일하다: $u_r(\mu_0) = u_r(\epsilon_0) = u_r(\alpha)$. 표 5에서 상대표준불확도 2.3×10^{-10} 는 단위 재정의 전 CODATA-2014에서 발표한 $u_r(\alpha)$ 에 해당한다. 마찬가지로 ‘탄소-12의 몰 질량’의 상대표준불확도는 ‘몰 플랑크 상수’ $N_A h$ 의 상대표준불확도와 동일하다^[14].

SI 단위 재정의 전에는 기본단위가 먼저 정의되고, 유도단위는 기본단위의 조합에 의해 정의되었었다. 그런데 1990년도에 임시로 정했던 조셉슨 상수(K_{J-90})와 폰클리칭 상수(R_{K-90})의 예에서 보는 것처럼 과학기술이 발전함에 따라 유도단위가 더 정확히 측정할 수 있는 경우가 생겼고, 기본단위인 암페어는 실제로는 유도단위 사이의 관계(옴의 법칙)로 구했다. 이번 단위 재정의에 의해 유도단위들도 정의상수들로부터 바로 정의할 수 있게 되었다. 특히 전하 또는 전기량을 나타내는 유도단위인 쿨롱(기호: C)은 기본 전하 e 의 단위이기 때문에 암페어보다 더 근본적이다. 따라서 암페어는 쿨롱=암페어×초($C=A\cdot s$)의 관계식에서 $A=C/s$ 로 유도된다.

Table 4. Fundamental constants having no uncertainty by the revision of the SI

Quantity	Symbol	Relationship	Unit (symbol)
Magnetic flux quantum	Φ_0	$= h/2e$	Wb
Conductance quantum	G_0	$= 2e^2/h$	S
Josephson constant	K_J	$= 2e/h$	Hz V ⁻¹
Von Klitzing constant	R_K	$= h/e^2$	Ω
Faraday constant	F	$= N_A e$	C mol ⁻¹
Molar Planck constant	$N_A h$	$= N_A h$	J s mol ⁻¹
Molar gas constant	R	$= N_A k$	J mol ⁻¹ K ⁻¹
Stefan-Boltzmann constant	σ	$= (\pi^2/60)k^4/\hbar^3c^2$	W m ⁻² K ⁻⁴
First radiation constant	c_1	$= 2\pi\hbar c^2$	W m ²
Second radiation constant	c_2	$= hc/k$	m K

Table 5. Quantities having new uncertainty by the revision of the SI

Quantity	Symbol	Value	Relative standard uncertainty u_r
Mass of the international prototype of the kilogram	$m(k)$	1 kg	1.0×10^{-8}
Vacuum magnetic permeability	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$	2.3×10^{-10}
Vacuum electric permittivity	ϵ_0	$1/c^2 \mu_0 \text{ F m}^{-1}$	2.3×10^{-10}
Thermodynamic temperature of the triple point of water	T_{TPW}	273.16 K	3.7×10^{-7}
Molar mass of carbon 12	$M(^{12}\text{C})$	0.012 kg mol ⁻¹	4.5×10^{-10}

Table 6. SI derived units with special names and symbols which can be defined by the seven defining constants

Quantity	SI derived unit	Special symbol	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	c	h	e	N_A	k	K_{cd}
Frequency	Hertz	Hz	■						
Force	Newton	N	■	■	■				
Pressure, Stress	Pascal	Pa	■	■	■				
Energy, Work	Joule	J	■	■	■				
Power, Radiant flux	Watt	W	■	■	■				
Electric charge, Quantity of electricity	Coulomb	C				■			
Electric potential difference	Volt	V	■	■	■	■			
Electric capacitance	Farad	F	■	■	■	■			
Electric resistance	Ohm	Ω	■	■	■	■			
Electric conductance	Siemens	S	■	■	■	■			
Magnetic flux	Weber	Wb	■	■	■	■			
Magnetic flux density	Tesla	T	■	■	■	■			
Inductance	Henry	H	■	■	■	■			
Celsius temperature	Degree Celsius	°C	■	■	■			■	
Luminous flux	Lumen	lm	■	■	■				■
Illuminance	Lux	lx	■	■	■				■
Activity (of a radionuclide)	Becquerel	Bq	■						
Absorbed dose, Kerma, Specific energy (imparted)	Gray	Gy	■	■					
Dose equivalent	Sievert	Sv	■	■					
Catalytic activity	Katal	kat	■				■		

또 다른 예로서, 세슘원자의 전이주파수를 나타내는 정의상수 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 의 단위는 헤르츠(기호: Hz)이다. 따라서 시간을 나타내는 기본단위 초(기호: s)는 헤르츠의 역수로 정의된다. 이렇듯 기본단위와 유도단위의 구분이 무의미해지게 되었지만 단위의 연속성을 위해 이 구분은 여전히 사용될 것이다.

표 6은 특별한 명칭과 기호를 가지는 SI 유도단위 22개 중에서 평면각의 단위인 라디안(기호: rad)과 입체각의 단위인 스테라디안(sr)을 제외한 20개 단위가 7개 정의상수의 일부로부터 정의될 수 있음을 보여준다. 다시 말하면, 각각의 유도단위들은 점이 찍힌 정의상수들을 조합하여 정의하는 것이 가능하다. 예를 들면, 힘의 단위 뉴턴(기호: N)을 SI 기본단위로 쓰면 $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ 이다. m, kg, s는 각각 c , h , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 로 정의되므로 N은 c , h , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 의 조합으로 표현할 수 있다. 에너지의 단위 줄(기호: J)은 $\text{N} \cdot \text{m}$ 으로 쓸 수 있으므로 이것 역시 c , h , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 의 조합으로 표현할 수 있다.

VI. 결 론

이번 국제단위계(SI) 개정은 측정과학계뿐 아니라 과학기술계 전반에 걸쳐 역사적인 사건이다. 측정이 없는 과학과 기술은 없고, 측정에는 반드시 단위가 사용되기 때문이다. 지난 130년 동안 질량의 단위인 킬로그램을 정의했던 국제킬로그램원기는 2018년 11월에 개최된 CGPM에서 그 지위를 상실했다. 대신에 플랑크 상수를 기반으로 킬로그램은 재정의되었다. 무한히 긴 두 개의 평행 도선 사이에 작용하는 힘으로 정의되었던 전류의 단위 암페어(기호: A)는 실제로 구현된 적이 없었는데, 이번엔 기본 전하를 바탕으로 재정의되었다. 물의 삼중점(= 273.16 K)이라는 한 점의 온도에서만 정의되었던 열역학 온도의 단위 켈빈(기호: K)은 볼츠만 상수로부터 재정의됨으로써 온도의 전 영역에서(원리적으로) 정확히 구현하는 것이 가능해졌다. 탄소-12 원자의 질량에

의해 정의되었던 몰(기호: mol)은 질량과 무관해졌으며 원자, 분자 등과 같은 입자의 개수로 정의되었다. 결론적으로, SI 기본단위들은 모두 정의상수(또는 기본상수)라고 불리는, 변하지 않는 물리량을 기반으로 재정의된 것이다. 국제단위계 개정은 과학기술의 발전 속도에 맞추어 다가올 미래를 위한 준비이다. 개정된 국제단위계는 2019년 5월 20일, 세계 측정의 날부터 공식적으로 발효되었다.

References

1. H. S. Lee, "Redefinition of the SI base units: its background and principle," *J. Korean Soc. Precis. Eng.* **35**, 365-373 (2018).
2. H. S. Lee, "Redefinition of the SI base units," *Phys. High Technol.* **27**, 2-7 (2018).
3. G. Girard, "The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988-1992)," *Metrologia* **31**, 317-336 (1994).
4. P. J. Mohr and B. N. Taylor, "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998," *Rev. Mod. Phys.* **72**, 351-495 (2000).
5. D. Kim, M. H. Kim, B.-C. Woo, and K.-C. Lee, "New definition of the kilogram by fixing the numerical value of the planck constant," *J. Korean Soc. Precis. Eng.* **35**, 375-383 (2018).
6. B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda, and S. Zakel, "Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition," *Metrologia* **48**, S1-S13 (2011).
7. Y. Azuma, P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, A. Hioki, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, R. Meeß, S. Mizushima, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, S. A. Rabb, O. Rienitz, C. Sasso, M. Stock, R. D. Vocke Jr, A. Waseda, S. Wundrack, and S. Zakel, "Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal," *Metrologia* **52**, 360-375 (2015).
8. N. Kuramoto, S. Mizushima, L. Zhang, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa, S. Okubo, H. Inaba, and K. Fujii, "Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a ^{28}Si -enriched sphere," *Metrologia* **54**, 716-729 (2017).
9. P. J. Mohr, D. B. Newell, and B. N. Taylor, "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014," *Rev. Mod. Phys.* **88**, 035009-1 (2016).
10. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, and E. Tiesinga, "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment," *Metrologia* **55**, 125-146 (2018).
11. M. Gläser, M. Borys, D. Ratschko, and R. Schwartz, "Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination," *Metrologia* **47**, 419-428 (2010).
12. M. J. T. Milton, R. Davis, and N. Fletcher, "Towards a new SI: a review of progress made since 2011," *Metrologia* **51**, R21-R30 (2014).
13. D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandés, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood, and Z. Zhang, "The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI," *Metrologia* **55**, L13-L16 (2018).
14. Resolution 1 of the CGPM (2018): On the revision of the International System of Units (SI), <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>.
15. N. Kim, M.-H. Bae, Y.-H. Ahn, W.-S. Kim, D.-H. Chae, C. Hong, and Y. Chung, "Redefinition and Realization of ampere by Fixing the Numerical Value of the Elementary Charge e ," *J. Korean Soc. Precis. Eng.* **35**, 385-397 (2018).