SI 기본단위 재정의

DOI: 10.3938/PhiT.27.005

Redefinition of the SI Base Units

Ho Seong LEE

The International System of Units (SI) was established in 1960. It has been revised from time to time in response to advances in science and technology. However, the most significant revision is going to be done in November 2018 by the 26th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM). New definitions of four base units (kilogram, kelvin, ampere, and mole) are going to be derived from exactly fixed values of four fundamental physical constants (Planck constant, Boltzmann constant, elementary charge, and Avogadro constant), respectively. In this paper, the historical background for the revision of the SI and the scientific principle of redefinition are explained. The procedure used to redefine the meter from the speed of light in vacuum is used to as an example.

들어가는 말

단위는 측정에서 기준을 제공한다. 측정이 없는 과학기술은 없다. 그러므로 단위는 과학기술의 기준이자 기반을 이룬다. 기반이 탄탄해야 그 위에 짓는 구조물이 안정한 것처럼 단위가 변하지 않아야 그것으로 측정한 값들을 믿을 수 있다. 그런데 단위는 약속에 의해 정해진다. 과학기술이 발전함에 따라 단위를 더욱 정밀하게 구현할 수 있게 되었고, 마침내 자연의 법칙에서 나오는 기본물리상수(플랑크 상수, 기본전하, 볼츠만 상수, 아보가드로 상수)를 기반으로 정의할 수 있게 되었다.

저자약력

이호성 박사는 KAIST 물리학과에서 박사학위(1986)를 한 후 1986년부터 한국표준과학연구원 시간표준센터에 근무하고 있다. 한국연구재단 나노융합단장(2007-2008)과 KIST유럽연구소장(2012-2014)을 역임했다. 저서로는 “기본상수와 단위계”(2016)가 있다. 현재는 시간눈금(time scales)에 관해 연구하고 있다.(hslee@kriss.re.kr)

이 호 성

이번 SI 기본단위 재정의 특집에서는 4개 기본단위(킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰)의 재정의에 관한 총 5편의 해설서를 준비했다. 이 글에서는 4개 기본단위에 공통으로 적용되는 SI(국제단위계)의 역사, 단위 재정의의 원리, 기본물리상수 등에 관해 설명한다. 이어서 각각의 기본물리상수와 그에 연결된 기본단위의 정의 및 구현 방법 등이 소개된다.

SI 발전의 배경 및 역사

국제적으로 통일된 단위를 사용하자는 국제 조약인 ‘미터 협약’은 1875년에 17개국이 참여하여 체결되었다. 이 협약에 의해 도량형 관련 국제기구인 CGPM(국제도량형총회), CIPM(국제도량형위원회), BIPM(국제도량형국)이 설립되었다. 이 중 CIPM은 매년 개최되며 국제도량형에 관한 결의안 및 권고안을 만드는 일을 주로 한다. 그 산하에는 단위 전문가들의 모임으로서, 총 10개의 CC(자문위원회)가 구성되어 있다. BIPM은 인력과 건물을 갖추고 사무국 역할을 하면서 도량형 관련 여러 회의들을 개최한다. 또한 일부 단위에 대해서는 전문 인력이 직접 연구를 수행한다. CGPM은 미터 협약 회원국으로 구성되며, 대개 매 4년마다 개최되는데, 도량형 관련 결의안 등에 대해 최종 승인을 내리는 최상위 기구다.

1889년에 개최된 제1차 CGPM은 길이와 질량의 단위로서 국제미터원기(IPM)와 국제킬로그램원기(IPK)를 승인했다. 이 원기들은 미터와 킬로그램의 단위이면서 동시에 그 단위를 구현하는 인공물이다. 이에 앞서 미터는 지구의 북극에서 자오선을 따라 적도까지 거리를 1 천만 미터라고 정해놓고 결정되었다. 미터 결정을 위해 1792년부터 1798년까지 파리 천문대를 통과하는 자오선을 따라 육지에서 실제 3각 측량이 이루어졌었다. 전체 자오선의 10분의 1에 해당하는 약 1000 킬로미터를 측정 후 1 미터의 길이를 결정했다. 1960년에 미터의 정의는 크립톤 원자에서 발생하는 복사선의 파장에 의해 다시 정의되었고, 이에 따라 IPM은 원기로 지정된 지 70년 만에 폐기되었다. 1983년에 미터는 현재와 같이 진공에서의 빛의 속력에 기반하여 재정의되었다. 미터 정의가 이렇게 변천된 과정에서 우리는 다음과 같은 사실을 확인할 수 있다. 미터라는 단위

는 자오선 길이로부터 먼저 정의되었다. 과학기술이 발전함에 따라 그 길이를 새로운 방법으로 더 정밀하게 측정할 수 있게 되었고, 그에 따라서 미터 정의를 바꾸어 왔다.

IPM에서 시작된 미터 단위가 걸어난 길과 달리, IPK는 오늘날까지도 킬로그램의 단위로서, 또 단위의 구현(MeP=Mise-en-Pratique)으로서 사용되고 있다. 그런데 마지막 인공물인 IPK는 2018년 11월에 개최되는 제26차 CGPM에서 퇴임할 것이다. 질량의 원기로 취임한 후 129년만에 그 정의가 바뀌는 것이다.

미터와 킬로그램으로 출발했던 “미터계”는 시간의 단위 초(s)와 함께 MKS(미터, 킬로그램, 초)계가 되었다. 1948년에는 전기 단위들과 광측정 단위들이 정의되고 채택되었는데, 전류의 단위 암페어를 포함하여 MKSA 단위계라고 불렀다. 1954년에는 열역학적 온도의 단위 켈빈이 정의되면서 총 6개의 기본단위들이 채택되었다. 1960년에 CGPM은 이 6개의 기본단위를 바탕으로 만들어진 단위계를 “국제단위계”라고 부르고, 약칭으로 “SI”라고하기로 결정했다. 미터 협약이 체결된 후 85년 만인 1960년에서야 국제단위계가 공식적으로 만들어진 것이다. 1971년에 물질량(=물질의 양)의 단위인 몰이 마지막 7번째 SI 기본단위로 채택되었다. SI는 지속적으로 발전하고 진화하는 단위계이다. 새로운 과학적 사실이 발견되거나 기술적 발전이 있으면 그것을 반영하여 단위의 정의를 수정하거나 보완해 왔다. 이 SI가 2018년에 대대적인 변화를 맞게 되었다. 바로 4개 기본단위(킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰)가 4개 기본물리상수(플랑크 상수, 기본 전하, 볼츠만 상수, 아보가드로 상수)를 기반으로 그 정의가 바뀌는 것이다.

SI는 미터계의 연장선상에서 만들어진 단위계이다. 2018년 3월 현재, 미터 협약에는 59개 국가가 회원으로, 43개 국가 및 경제주체가 준회원으로 참여하고 있다.^[1] SI는 명실 공히 국제적인 단위계가 되었다. 그런데 과학 선진국인 미국과 영국은 회원국이고 또 CIPM 산하의 여러 CC와 작업반(Working Group)에서 활발히 활동하지만 SI를 사용하지 않는다(일부 단위만 사용한다). 그리고 북한은 현재 준회원국도 아닌데, 아마도 회비를 지불하지 않아서 자격을 잃은 것 같다.

SI 기본단위 재정의의 원리

7개 SI 기본단위 중에서 미터는 2018년 SI 개정 방식으로 이미 재정의된 경험이 있다. 즉 기본물리상수의 하나인 “진공에서의 빛의 속력”을 기반으로 재정의된 것을 말한다. 미터가 재정의될 수밖에 없었던 당시의 상황과 방법을 이해하면 다른 SI 기본단위들을 재정의하려는 이유와 방법을 이해할 수 있다.

IPM에는 1 미터(m)의 길이를 나타내는 2개의 눈금이 그어

져 있다. 이 두 눈금 사이의 간격이 1 미터라는 뜻이다. 그런데 실제 어떤 물체의 길이를 재려면 이보다 작은 눈금이 필요하다. 똑같은 간격으로 작은 눈금을 매길 수 있어야 실제로 길이 측정에 사용할 수 있다. 예를 들어 다음과 같이 만든다고 상상해보자. 똑같은 두께를 갖는 블록 100개를 만들어 겹쳤을 때 IPM의 1 미터 간격과 같다면 이 블록 하나의 두께는 1 센티미터(cm)일 것이다. 만약 더 작은 눈금으로 1 밀리미터(mm) 두께의 똑같은 블록 1000개를 만들 수 있다면 1 cm 블록만 가지고 있을 때보다 더 정확한 길이 측정이 가능해질 것이다. 그런데 이 블록들이 어느 정도로 똑같은 두께를 가지는지 알아내는 것은 그 당시의 길이 측정 능력에 의해 결정된다. 또한 이 블록들과 IPM은 온도에 따라 길이가 변할 수 있기 때문에 항상 같은 온도에서 측정해야 한다는 조건이 따른다. 이런 이유 등으로 IPM으로 정의된 1 미터를 정확히 구현하는 것은 쉽지 않다. 뿐만 아니라 IPM이 망가지거나 분실되는 경우, 길이의 국제적 기준이 없어진다는 위험이 항상 있다.

그래서 1960년에 빛의 파장을 이용하여 미터를 재정의했다. 과학자들은 크립톤-86 원자가 들어있는 방전관에서 방출되는 주황빛의 파장을 약 165만(정확히 말하면, 1 650 763.73) 배 곱하면 1 미터가 된다는 것을 알았다. 이로부터 이 빛의 파장이 605.7 nm임을 알 수 있다(단, 1 nm=1×10⁻⁹ m). 이것은 606.7 nm 두께의 블록을 약 165만 개 겹치니 1 미터가 되는 것과 같다. 여기서 165만에 해당하는 숫자는 소수점 둘째 자리까지 나와 있다. 이것은 빛의 한 파장을 적어도 100분의 1까지 측정할 수 있어야 한다는 것이다. 이 숫자를 구하기 위해 그 무렵 세계적으로 길이 측정기술이 앞서 있던 다섯 개 연구기관(독일 PTB, 영국 NPL, 캐나다 NRC, 호주 NSL, BIPM)이 크립톤-86 방전관을 이용하여 독자적으로 실험을 수행했다. 그들의 측정값은 10⁹ 중에서 5 이내에서 서로 일치했다.^[2] 다른 말로 하면, 파장 측정의 상대불확도는 ±5×10⁻⁹ 수준이었다. 여기서 상대불확도가 의미하는 바는 앞에서 말한 100개 또는 1000개 블록의 두께가 서로 일치하는 정도를 상대적으로 나타낸 것과 같은 개념이다.

미터 단위를 크립톤-86 방전관의 주황빛을 이용하여 정의한다는 것은 숫자 1 650 763.73을 고정시킨다는 뜻이다. 이 숫자를 구할 때 상대불확도가 ±5×10⁻⁹ 수준이었지만 이것을 0으로 둔다는 의미이다. 이렇게 정의된 미터 단위를 구현한다는 것은 결국 크립톤-86 방전관에서 나오는 605.7 nm 파장을

REFERENCES

- [1] <https://www.bipm.org/en/about-us/member-states/>.
- [2] K. M. Baird and L. E. Howlett, Applied Optics 2, 455 (1963).

기준으로 사용한다는 것이다. 이 시기에 “1차 길이표준”은 크립톤-86 방전관이다. 1970년대 초에 미터 구현의 불확도는 대략 $\pm 3.5 \times 10^{-9}$ 수준이었다.

한편, 시간의 단위 초의 정의는 1967/68년에, 세슘-133 원자의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위 사이의 전이에 대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간으로 정해졌다. 이 초의 정의를 구현하는 장치가 세슘원자시계인데, 그 무렵 실험실형 세슘원자시계는 정확도(=상대불확도)가 10^{-12} 수준이었다. 미터를 구현하는 정확도보다 약 1000배 우수했다.

1972년에 미국 NBS의 이벤슨 등이 수행한 빛의 속력(c)을 측정하는 실험은 빛의 주파수(ν)와 파장(λ)을 동시에 측정한 후, $c = \nu \cdot \lambda$ 의 관계식에서 빛의 속력을 구했다. 그는 $3.39 \mu\text{m}(=88 \times 10^{12} \text{ Hz}=88 \text{ THz})$ 레이저의 파장과 주파수를 동시에 측정했다. 그 당시, 파장은 레이저 간섭계를 사용하여 쉽게 측정할 수 있었다. 이때 기준광원으로 미터를 정의하는 크립톤-86 방전관이 사용되었다. 그런데 주파수는 88 THz를 여러 단계를 거쳐서 마이크로파 영역인 GHz($=10^9 \text{ Hz}$) 수준으로 낮추어야만 측정할 수 있었다. 이를 위해 이른바 “주파수 체인”을 형성했다. 이런 방식으로 측정한 레이저 주파수의 상대불확도는 $\delta\nu/\nu = \pm 6 \times 10^{-10}$ 이었다. 이에 비해 레이저 파장 측정의 불확도는 $\delta\lambda/\lambda = \pm 3.5 \times 10^{-9}$ 이었는데, 이것은 미터 단위를 구현하는 불확도와 동일하다. 이 두 식으로부터 구한 빛의 속력의 상대불확도는 $\delta c/c = \pm 3.5 \times 10^{-9}$ 으로, 전적으로 파장 측정 불확도에 의해 결정되었다.

진공에서 빛의 전파 속력이 일정하다는 것은 전자기 이론을 종합적으로 정리한 맥스웰이 1864년에 이론적으로 증명했다. 그리고 아인슈타인은 1905년에 특수상대성 이론에서 진공에서의 빛의 속력은 어느 관성계에서나 일정하다는 것을 밝혔다. 그런데 빛의 속력(단위: m/s)의 측정 불확도가 크립톤-86 방전관에 의한 미터 구현 불확도에 의해 결정된다는 것은 이 미터 단위로는 빛의 속력을 더 이상 정확하게 측정할 수 없다는 것을 뜻한다. 다른 말로 하면, 빛의 속력을 측정하는데 있어서 그 당시 기술로서는 최고의 정확도에 도달했다는 뜻이다. 이 시점에서 빛의 속력 값을 불확도 없이 고정시키기로 했다. 1975년에 개최된 제15차 CGPM에서 진공에서의 빛의 속력은 299 792 458 m/s라고 공고했다. 맥스웰이 빛의 속력은 일정하다는 이론을 정립한 이후 111년 만에, 아인슈타인이 광속 불변의 원리를 발표한 지 70년 만에 그 값이 불확도가 없는 고정된 값으로 확정된 것이다.

진공에서의 빛의 속력(c)이라는 양의 값(quantity value)을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (1)$$

(1)식은 하나의 방정식으로서, m 에 대해 다시 쓸 수 있다.

$$m = c / 299\,792\,458 \times s \quad (2)$$

(2)식이 의미하는 것은 미터에 대한 정의인데, 1983년 CGPM에서 다음과 같이 결정되었다.

“미터는 빛이 진공 중에서 1/299 792 458 초 동안에 진행한 경로의 길이이다.”

1960년 미터의 정의에는 1차 길이표준(크립톤-86 원자의 복사선)이 정의 속에 포함되어 있었지만 1983년 미터의 정의에는 구체적인 것이 나타나 있지 않다. 그래서 미터 정의를 구현하는 방법(MeP)으로 여러 가지가 가능하다. 다시 말하면, 미터의 정의와 미터의 구현이 분리된 것이다. 이처럼 정의와 구현을 분리하면 과학기술이 발전함에 따라 새로운 방법이 나왔을 때 정의를 바꾸지 않고도 “1차 방법”(Primary method)으로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

미터를 위와 같이 재정의한 바탕에는, 진공에서의 빛의 속력이 일정하다는 물리적 사실과 함께 정의 속에 포함된 시간의 단위 초(s)를 아주 정확하게 (=아주 작은 상대불확도로) 구현할 수 있기 때문이다. 2018년 현재 초의 정의를 구현하는 가장 정확한 원자시계는 세슘원자분수시계로서, 2×10^{-16} 수준이다. 초를 정확히 측정할 수 있다는 것은 곧 주파수(단위: Hz)를 정확히 측정할 수 있다는 뜻이다. 재정의된 미터의 구현으로 가장 널리 사용되고 있는 것은 요오드($^{127}\text{I}_2$) 안정화 헬륨-네온 레이저(633 nm)이다. 요오드 분자에서 특정 전이 파장의 측정 상대불확도는 2×10^{-11} 인데, 여기에 안정화된 헬륨-네온 레이저 파장의 상대불확도는 이와 비슷한 수준이 된다. 이 외에 “초의 2차 표현”(SRS=Secondary Representation of the Second)에 사용되는 여러 가지 원자나 이온의 전이 주파수가 BIPM 홈페이지에 공개되어 있다.^[3] 그 중 최고 정확도는 5×10^{-16} 으로 알려져 있는데, 이 전이 주파수에 안정화된 레이저는 모두 미터를 구현하는데 사용될 수 있다. 한 종류의 1차 표준에 의존하던 1960년대에 비하면 훨씬 다양하고 정확한 방법을 사용할 수 있게 되었다. 이것이 바로 기본물리상수를 바탕으로 단위를 재정의하려는 목적이다.

2018년에 완전히 새로 정의되는 기본단위(기호)는 킬로그램(kg), 암페어(A), 켈빈(K), 몰(mol)이다. 이 4개 단위들은 각각 플랑크 상수(h), 기본 전하(e), 볼츠만 상수(k), 아보가드로 상

REFERENCES

- [3] <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>.

Fig. 1. SI illustration with defining constants.

수(N_A)와 연결된다. 나머지 3개 단위, 미터(m), 초(s), 칸델라(cd)도 정의의 표현 방식을 앞의 4개 단위와 같도록 맞추었다.^[4] 이 3개 단위들은 현재의 정의 속에 포함된 기본물리상수(또는 기술상수)를 명확히 나타낸다. 기본단위를 정의하는 상수들을 “정의 상수”(defining constants)라고 부른다. 초(s)에 대한 정의 상수는 “세슘의 초미세 전이 주파수” $\Delta\nu$ 이고, 칸델라(cd)에 대한 정의 상수는 “시각 효능”(luminous efficacy) K_{cd} 이다.

그림 1은 이처럼 서로 연결되는 기본단위와 정의 상수를 보여준다.

기본물리상수 값과 불확도의 변화

진공에서의 빛의 속력(c) 값을 불확도 없이 고정된 값으로 확정할 수 있었던 배경에는 이론적으로 빛의 속력은 일정하다는 것이 이미 알려져 있었고, 또 그 당시(1970년대 초)에 과학 기술의 수준이 미터를 재정의하더라도 그것을 구현하는 것이 가능했기 때문이다. 이에 비해 2018년 기본단위 재정의는 인공원기에 의해 정의되는 킬로그램을 좀 더 과학적인 것으로 바꾸어야 한다는, 오랜 숙원에서 시작되었다고 해도 과언이 아니다. 그리고 암페어는 현재 “암페어의 힘의 법칙”에 기반하여 정의되어 있는 반면, 실제 구현은 이와 무관한데 이 문제를 해소할 필요도 있었다. 그렇지만 재정의될 4개 기본단위와 관련된 기본물리상수 값을 불확도 없이 고정시키기 위해선 어떤 판단 기준이 필요하다. 그 기준은 기본단위를 재정의하더라도 측정값의 연속성(continuity)이 보장되어야 한다는 것이다. 즉, 이전에 측정된 값을 새로 정의된 단위로 나타낼 때 그 값을 보정하지 않고 계속 사용할 수 있어야 한다. 이것은 SI 개정 후의 단위가 개정 전 단위에 비해 더 정밀하게 (최소한 동등하게) 측정값을 나타낼 수 있어야 가능하다.

Table 1. The CODATA recommended values and relative uncertainties of h , e , k , and N_A in recent years.

	CODATA 2010	CODATA 2014	CODATA 2017
h	69 57(29)	70 040(81)	70 150(69)
$u_r =$	4.4×10^{-8}	1.2×10^{-8}	1.0×10^{-8}
e	565(35)	6208(98)	6341(83)
$u_r =$	2.2×10^{-8}	6.1×10^{-9}	5.2×10^{-9}
k	88(13)	8 52(79)	9 03(51)
$u_r =$	9.1×10^{-7}	5.7×10^{-7}	3.7×10^{-7}
N_A	1 29(27)	0 857(74)	0 758(62)
$u_r =$	4.4×10^{-8}	1.2×10^{-8}	1.0×10^{-8}

$$h = 6.626\,069\,57(29) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$e = 1.602\,176\,634(83) \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$k = 1.380\,658\,374(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

$$N_A = 6.022\,140\,76(83) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

기본물리상수의 값들은 매 4년마다 CODATA에서 권고 값을 발표한다.^[5] 과학기술이 발전함에 따라 일반적으로 기본물리상수 권고 값의 불확도는 점점 줄어들고, 어떤 특정 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 4개 기본물리상수(h , e , k , N_A)의 최근 세 번의 CODATA 권고 값과 상대불확도(u_r)가 표 1에 나와 있다. 중복되는 숫자를 생략하고 변하는 숫자만 보이기 위해 표의 하단처럼 네모 칸에 들어가는 숫자를 연도에 따라 정리한 것이다. 단, 괄호 속의 숫자는 기본물리상수 값의 맨 뒤 두 자리 숫자에 대한 절대불확도를 나타낸다. 예를 들어, 70 150(69)는 $70\,150 \pm 69$ 라는 뜻이다. 2017년 CODATA는 맨 오른쪽 칸에 나와 있는데, 2018년 SI 개정을 위해 특별히 4개 기본물리상수에 대해서만 그 값과 불확도를 발표했다.^[6]

표 1에서 보는 것처럼 4개 기본물리상수들의 불확도는 세월이 흐름에 따라 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 플랑크 상수(h)를 측정하는 방법으로 1990년부터 크게 두 가지 방법이 사용되고 있었다. 하나는 키블(Kibble) 저울이고, 다른 하나는 XRCD(X-ray crystal density)이다. XRCD는 아보가드로 상수(N_A)를 구하는 방법으로도 사용된다. 이 두 기본물리상수는 서로 반비례 관계를 갖고 있어서 한 값을 알면 다른 값도 알 수 있다.^[7] 그래서 두 상수 값의 상대불확도는 항상 동일하다. 2017년도

REFERENCES

- [4] Ho Seong Lee, J. Korean Soc. Precis. Eng. **35**, 365 (2018). (in Korean)
- [5] <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>.
- [6] D. B. Newell, *et al.*, Metrologia **55**, L13 (2018).
- [7] Ho Seong Lee, *Fundamental Constants and System of Units*, in Korean (Cheong Moon Gak, 2016), p. 165.

Table 2. The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI.

Defining constant	Symbol	Value
Planck constant	h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Elementary charge	e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
Boltzmann constant	k	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Avogadro constant	N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

상대불확도는 CIPM 산하에 있는 4개 단위의 CC(자문위원회)가 재정의의 위해 제시한 기준을 모두 만족했다. 특히 CCM(질량 및 관련량 자문위원회)이 킬로그램 재정의의 위해 요구한 조건은 독립적인 3개 이상의 실험으로 구한 플랑크 상수 값들이 5×10^{-8} 이내에서 일치하고, 그 중 최소한 하나의 결과는 2×10^{-8} 이하의 상대불확도를 가져야 하는 것이었다. 2015년 말까지 이 조건이 만족되지 않았는데, 마지막까지 문제가 되었던 미국 NIST는 킬볼 저울(NIST-4)을 새로 제작하여 실험한 결과 모두 만족시키게 되었다. 표 1의 2017년 데이터는 그것이 반영되어 얻어진 결과이다.

SI 기본단위 재정의의 위해 조건이 모두 만족됨으로써 기본 물리상수의 값을 불확도 없이 고정시킬 수 있게 되었다. 그 결과가 표 2에 나와 있다.

위 4개 기본물리상수들의 불확도가 0이 되면 이들의 조합으로 구성된 기본물리상수들의 불확도도 0이 된다. 예를 들면, 몰 기체상수 R 과 패러데이 상수 F 는 각각 $N_A k$ 와 $N_A e$ 이다. 그러므로 R 과 F 의 불확도도 0이 된다. 이 외에도 여러 기본 물리상수들의 불확도가 0이 되는데, 자세한 것은 참고문헌 4의 Table 4를 참고하기 바란다.

이에 반해 SI 개정 전에는 불확도가 0이었지만 개정 후에 불확도를 가지는 양이나 기본물리상수가 있다. 국제킬로그램 원기(IPK)가 대표적이다. 킬로그램은 플랑크 상수(h)에 의해 재정의되기 때문에 SI 개정 전 플랑크 상수가 갖던 상대불확도를 개정 후에는 IPK가 갖게 된다. 물의 삼중점(T_{TPW})은 볼츠만 상수가 갖던 상대불확도를 갖게 된다. 한편, SI 개정 전 암페어의 정의에 등장하는 자기상수(magnetic constant) μ_0 는 불확도가 0이었지만 새 불확도를 갖게 된다. μ_0 는 미세구조상수 α 와 $\mu_0 = 2h\alpha/c e^2$ 의 같은 관계가 있다. 이 중에서 h , e , c 는 모두 불확도가 0이다. 따라서 μ_0 는 α 와 같은 상대불확도를 가진다. 마찬가지로, 전기상수(electric constant) ϵ_0 는 μ_0 와 $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$ 의 관계가 있다. 따라서 ϵ_0 의 상대불확도는 μ_0 와 동일하다. 이것을 정리한 것이 표 3에 나와 있

Table 3. Quantities which have new uncertainties by the revision of the SI.

Quantity	Relative uncertainty, u_r
International Prototype of Kilogram	1.0×10^{-8}
Triple point of water, T_{TPW}	3.7×10^{-7}
Magnetic constant, μ_0	$u_r(\mu_0) = u_r(\alpha)$
Electric constant, ϵ_0	$u_r(\epsilon_0) = u_r(\alpha)$

다. 한편 CODATA 2014에 의하면 미세구조상수의 상대불확도 $u_r(\alpha) = 2.3 \times 10^{-10}$ 이다.

SI 개정 후의 변화 전망

안정되고 변하지 않는 단위는 과학기술의 발전에 좋은 영향을 미친다. 이런 단위를 만들기 위해 이론적으로 일정하다고 알려져 있던 빛의 속력 값을 고정시키고, 그것으로부터 길이의 단위 미터를 재정의한 역사를 우리는 가지고 있다. 이를 통해 빛은 길이를 재는 기준으로써 오늘날 GPS 항법의 기초가 되었다.

SI 개정에 의해 그 값이 고정되는 4개 기본물리상수들과 그로부터 유도되는 4개 기본단위들은 새로운 과학기술을 창출할 것으로 기대된다. 예를 들면, 어떤 물리량을 측정할 때 4개 기본물리상수와 연결되는 방법이나 방정식을 찾는다면 해당 물리량의 측정 불확도를 줄일 수 있다.

여러 나라의 국가측정표준기관에서는 재정의된 기본단위를 구현하는 1차 측정표준들을 개발할 것이다. 예를 들면, 킬로그램의 경우에는 플랑크 상수 값 측정에 사용된 킬볼 저울 및 XRCd 실험에 사용된 실리콘 구가 질량의 1차 측정표준으로 사용 가능하다. 켈빈의 경우에는 음향기체온도계(AGT)가 가장 널리 개발되고 있고, 암페어의 경우에는 단일 전자 전송(SET) 소자가 개발되고 있다.

기본단위의 정의가 바뀐 것을 과학기술계, 산업계, 교육계 및 관련된 사람들에게 널리 알려야 한다. 이것은 어느 한 나라에 국한된 것이 아니라 국제적으로 필요한 일이다. 그래서 CIPM 산하에 Task Group를 구성하여 효과적인 홍보를 위한 자료 등을 공동으로 개발하여 공개하고 있다. 그림 1의 SI 도해도 그 중 하나이며, 용도에 따라 사용할 수 있도록 다양한 그림을 BIPM 홈페이지(www.bipm.org)에 공개하고 있다.

이번 SI 개정에서 보편적인 기본물리상수에 기반하여 기본단위를 정의한다는 원칙이 적용되지 않은 두 단위가 있다. 하나는 칸델라이고 다른 하나는 초이다. 칸델라의 정의에 포함된

시각 효능(K_{∞})이라는 상수는 사람의 눈이 빛에 대해 느끼는 민감도를 나타내는 것이다. 그래서 이 정의 상수는 기본물리상수라고 부르지 않고 “기술 상수”라고 부른다. 단위는 역사적으로 인간을 배제시키고, 자연 현상과 연결시키려는 방향으로 발전되어 왔다. 그런데 칸델라는 광도(즉 빛의 밝기)의 단위로서 조명에서 유래된 것이다. 가시광선이 중요한 조명에서는 칸델라 단위가 유용하지만 오늘날에는 적외선, 자외선과 같이 여러 종류의 광원이 개발되어 사용되고 있다. 이런 상황에서는 가시광선에 국한된 칸델라보다 광원 중심의 “복사도”(단위: W/sr)를 기본단위로 하는 것이 바람직하다고 생각한다.

이에 비해 초는 세슘이라는 특정 원자에 국한되어 정의되었다. 즉 보편적이지 않다. 초는 처음에 천문현상에 기반한 천문시간(구체적으로 말하면, 역표시 ET)에서 정의되었다. 그 당시의 초의 정의를 바탕으로 세슘원자의 전이주파수를 측정했었는데, 이것이 천문시간보다 더 안정적이고 편리하다는 것을 안 후에 전이주파수를 고정시킨 것이다. 다시 말하면, 세슘원자의 전이주파수 $\Delta\nu$ 는 IPM이나 IPK와 마찬가지로 먼저 정의된 단위를 기반으로 결정된 것이다. 한편, 세슘원자분수시계보다 약 100배 더 정밀한 광원자시계(optical atomic clock)가 발명되어 잘 동작하고 있다. 미래 언젠가 초의 정의는 세슘 대신에 광원자시계에 사용된 원자의 전이 주파수로 바뀔 가능성이 크다.^[8] 이것 역시 특정 원자에 국한된 것으로 보편적이지 않지만, 그 상대불확도가 10^{-18} 수준으로 아주 작기 때문에 채택될 가능성이 높다. 광원자시계의 전이주파수와 관련된 기본물리상수로는 리드베리(Rydberg) 상수 R_{∞} 가 있다. 이 상수 값의 상대불확도는 2014년 CODATA에 의하면 5.9×10^{-12} 으로, 다른 기본물리상수와 비교하면 아주 작지만 광원자시계에 비하면 6

차수나 크다. 그렇기 때문에 보편적 기본물리상수를 기반으로 SI 기본단위를 재정의한다는 원칙을 포기하더라도 높은 정확도를 선택할 것으로 예측된다. 그리고 미래에도 초를 구현하는 정확도는 여전히 다른 기본단위들보다 훨씬 높을 것이다.

맺는 말

국제적으로 동일한 단위를 사용하면 지식과 정보를 공유하기 쉽고, 무역과 상거래에서도 편리하다. 이런 목적으로 길이의 단위 미터를 기반으로 단위계를 만들어 공통으로 사용하자는 미터 협약이 1875년에 체결되었고, 그 연장선상에서 1960년에 SI가 만들어졌다. 그러나 초기 SI 단위들은 특별한 원칙을 가지고 정의된 것이 아니라 관련된 분야에서 편리성 중심으로 정의되었었다. 과학기술의 발전에 따라 그 단위들을 더욱 정교하게 정의하는 것이 필요했고, 그 선두에 서서 재정의된 단위가 바로 미터였다. 1983년에 진공에서의 빛의 속력이라는 기본물리상수를 기반으로 재정의된 것이다. 이와 같은 원리로, 4개의 기본물리상수를 기반으로 4개의 기본단위가 2018년 11월에 제26차 CGPM에서 재정의될 예정이다. 측정과학계에서는 엄청난 역사적인 사건이다. 그런데 단위의 정의가 바뀌더라도 사용자들은 그 변화를 느끼지 못하도록 “연속성” 유지를 위해 지난 20여 년 동안 측정과학자들은 많은 노력을 기울여 왔다. 이제 그 결실을 맺는 것이다. 개정된 SI는 2019년 5월 20일, 세계 측정의 날을 맞이하여 전 세계적으로 발효된다.

REFERENCES

- [8] F. Riehle, Comptes Rendus Physique 16(5), 506 (2015).