양자현상을 이용한 전기 측정표준

DOI: 10.3938/PhiT.19.028

김 규 태

Electrical Measurement Standards Based on Quantum Physics

Kyu-Tae KIM

Electrical measurements, which are daily experienced in our modern life and indispensable for most of industrial process will be reliable as well as meaningful only with the help of SI-traceable quantum standards, the Josephson voltage standard and quantum Hall resistance standard. This important role of the two quantum standards as a scientific infrastructure of the modern society is specially highlighted along with recent innovative proposals of SI redefinition. In this article, we will review the principles of the Josephson and the QHR standard, and discuss the role of the two quantum standards in relation to SI redefinition of ampere and kilogram in the future.

서 론

우리 가정의 전력 요금을 매기기 위한 적산전력량계에서부터 지능화된 최첨단 제어시스템의 고정밀 다채널 AD변환기에 이르기까지 현대사회에서 전기측정은 없어서는 안 될 필수 요소가 되었다. 그런데 이들 측정결과들을 얼마나 신뢰할 수 있을까? 언제 어디서나 측정결과들의 정확성을 보증하기 위해서 국제적으로 통일된 표준 단위를 이용하여 측정이 이루어지도록 관리하는 것이 중요하다. 이를 위해서 모든 국가는 국제단위계의 암페어의 정의에 부합하는 국가 전기표준을 반드시 갖추어야 하는데, 이를 위해 양자효과가 쓰이고 있다는 것을 아는 사람은 그리 많지 않은 것 같다. 양자효과를 이용한

Fig. 1. An example of practical traceability of electrical standards.

기본 전기 표준기인 조셉슨 전압표준기와 양자홀 저항 표준기가 실용적으로 볼트(V) 및 옴(Ω)을 구현하는 최정상의 국가 전기표준기로 쓰이고 있고 이를 바탕으로 암페어(A)를 비롯한 다양한 전기 단위 표준의 소급체계를 가장 정확하고 효율적으로 구축할 수 있는 것이다. 그림 1은 한국표준과학연구원서 유지하고 있는 전기단위의 실용 소급체계를 보여주고 있다. 이러한 국가 전기표준체계 덕분에 우리가 매달 납부하는 전력요금의 측정값을 서로 의심없이 믿을 수 있고, 전기전자시스템의 부품이나 모듈을 교환하더라도 본래 성능을 유지할 수 있도록 표준화시킬 수 있는 것이다. 이뿐 아니라 우리나라의 전기전자 제품을 해외에 수출할 때에 우리가 제시하는 제품 사양이나 규격을 해당 수입국에서도 인정받으려면 국제적으로 공인된 인증이 필요한데 이를 위해 국제단위계에 부합하는 국가 전기표준의 확보는 무엇보다 중요한 기본 요건이 되고 있다. 그럼 먼저 어떠한 원리로 조셉슨전압표준과 양자홀저항표준을 구현하는지 살펴보고, 향후 전기표준의 발전 방향으로 이야기를 이어 나아가기로 한다.

저자약력

김규태 박사는 한국과학기술원 박사(1989)로서, 독일 연방 물리 기술청 Physikalisch-Technische Bundesanstalt 박사후 연수(1992-1993) 과정을 거쳐, 1989년부터 현재까지 한국표준과학연구원 책임연구원으로 재직 중이다. (ktkim@kriss.re.kr)

조셉슨 전압표준기

전기저항이 없는 초전도체(superconductor)에서는 전자들이 쿠퍼페어(Cooper pair)라고 하는 전자쌍을 형성하여 집단

Fig. 2. Josephson voltage standard under operation after development at KRISS.

적으로 동일한 양자상태에 있게 됨으로써 그 상태를 하나의 파동함수로 기술할 수 있고 그것의 양자역학적 특성을 거시적으로도 쉽게 관측할 수 있게 된다. 1962년 조셉슨(Brain Josephson)은 두 초전도체 사이에 얇은 장벽이 삽입되어 구성되는 조셉슨 접합에서 조셉슨위상-전류-전압의 관계 방정식 $I = I_c \sin \phi$, $V = \frac{h}{2e} \frac{d\phi}{dt}$ 을 유도하였다.^[1] 여기서 조셉슨위상 ϕ 는 두 초전도체를 각각 기술하는 두 파동함수의 위상차이로 정의된다. 이 방정식에 예측하는 현상 가운데 하나는, 접합에 바이어스전류를 흘려서 직류전압 V 가 나타나면 조셉슨 접합에는 전압 V 에 비례하는 주파수를 갖는 전자파 진동이 발생한다는 것이다. 역으로 조셉슨 접합에 외부 전자파가 가해지면 어떻게 될까? 주파수에 비례하는 일정 전압이 나타나는 것을 예상할 수 있을 것이다. 조금 다른 각도에서 설명하면, 조셉슨 접합은 전자파의 진동에 작동하는 자속양자 펌프로 해석할 수 있는데 외부 전자파 매 주기마다 자속 양자의 정수배에 해당하는 자속덩어리가 접합을 통과한다. 그런데 자속의 시간변화율이 전압에 해당하므로 접합에는 $(n\Phi_0)f$ 의 직류 전압이 발생하게 된다. 따라서 외부 전자파 즉 마이크로파의 주파수만 일정하게 유지하면 물리상수에 직접 소급하는 직류 조셉슨 전압 $V_J = n f \Phi_0 = n f \frac{h}{2e}$ 을 얻을 수 있다. 여기서 h 와 e 는 각각 플랑크 상수(Planck constant)와 기본 전하량(elementary charge)이다. 이 식은 조셉슨 접합이 외부마이크로파의 n 고조파인 $n f$ 에 반응하여 직류전압을 만들어 내는 것을 표현하고 있다. 그러면 조셉슨 접합에서 이 고조파

$$f_J = \frac{2e}{h} V$$

$$V_n = n f_J / (2e/h)$$

Fig. 3. Current-voltage characteristics (above) and layout (below) of Josephson junction array device.

차수 n 은 어떻게 제어할 수 있을까? 조셉슨 접합에 주파수 f 의 마이크로파가 가해진 상태에서 동시에 바이어스전류를 흘려서 원하는 조셉슨전압 양자수 n 을 선택할 수 있다. 즉 n 번째 마이크로파 고조파에 의한 조셉슨 전압과 바이어스에 의한 접합 전압이 서로 일치되도록 바이어스전류를 잘 조절해 주면 조셉슨접합 내부진동이 외부 마이크로파의 해당 n 고조파에 동조되어 위상이 잠기는(phase lock) 현상이 나타난다. 일단 위상이 잠기면 외부 바이어스 전류가 변화해도 접합의 내부진동은 외부 주파수와 동조화된 상태를 유지하려 하므로 전류-전압 곡선 상에서 전류가 변해도 전압이 일정한 전압스텝들(이것을 Shapiro step이라 함)이 나타난다. 그림 3의 오른쪽 상단의 오실로스코프 사진은 $n=-6$ 에서 $n=+6$ 범위의 샤피로스텝들을 명확히 보여준다. 이 샤피로스텝은 오직 자연의 기본상수(fundamental constant)만을 통하여 시간(진동수)과 전압의 관계를 규정한다. 단지 발생된 전압 표시 값의 통일을 위해 조셉슨 상수 $2e/h$ 를 무엇으로 쓰느냐가 문제될 뿐이다. 1990년 1월 1일 이래로 조셉슨 상수 값으로는 국제도량형위원회(CIPM)가 권고한 값 $2e/h = 483\,597.9 \text{ GHz/V}$ 를 사용함으로써 모든 나라에서 국제단위계에 부합하는 전압 표준을 구현한다. 일반적으로 절연장벽 조셉슨 접합(SIS, superconductor-insulator-superconductor)이 많이 사용되

REFERENCES

- [1] B. D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962).

는데 이 경우 플라스마 진동(plasma frequency)이라고 하는 접합의 고유 진동 영역보다 충분히 높은 70 GHz에서 90 GHz의 주파수로 구동한다.^[2] 그런데 조셉슨 접합 1개가 출력할 수 있는 전압은 0.1 mV~1 mV 수준에 불과하므로 실용상 중요한 수 V 수준의 표준전압을 얻기 위해서는 수많은 접합을 직렬로 연결하여 접합 어레이를 제작하여야 한다. SIS 접합에서 발생하는 스텝들은 영(zero) 전류 축을 지난다 하여 zero-crossing step이라고 불리우며 이 zero crossing step들은 전류 영역이 모두 비슷하기 때문에 SIS 접합은 높은 표준전압을 얻기 위해 많은 수의 접합을 직렬로 연결하는 데 유리하다. 연결된 접합의 수가 많을수록 더 높은 전압을 얻을 수 있는데 보통 1 V 어레이는 약 2,500개의 접합을 가지며, 10 V 어레이는 그 10배의 접합 개수를 갖는다. 이 조셉슨 어레이의 전압은 어떠한 전압 발생장치보다 정확할 뿐만 아니라 표준전지(standard cell)나 제너 다이오드(Zener diode)와 같은 인공 소자에서 나타나는 온도의존성, 경년변화 등이 나타나지 않는다. SIS 접합 어레이의 또 다른 장점은 전압 출력 시 바이어스 장치로부터 회로를 분리시킬 수 있기 때문에 그 만큼 잡음의 유입을 막을 수 있다는 것이다. 그러나 임의의 전압 값을 설정하는 데에 약간의 숙련이 필요하며 안정된 전압 출력을 유지하기 위해서는 항상 외부 잡음의 완벽한 차단이 필요하다. 현재 한국표준과학연구원을 비롯한 많은 표준기관에서는 절연장벽 조셉슨 접합을 이용하여 10 V 이하 범위에서 전압단위 볼트의 표준을 확립하고 있다.

우리나라에서 조셉슨 전압 표준은 선진국 수준으로 자리매김을 하고 있다. KRISS는 이미 20년 전 조셉슨 소자를 이용한 전압 소급체계를 도입하였을 뿐만 아니라,^[3] 1995년과 2008년에는 국제도량형국에서 주관하는 1 V 및 10 V 국제 비교에 참여하여 선진국 수준인 10^{-10} 수준에서 일치하는 결과를 도출한 바가 있다. 작년에는 말레이시아 국가 표준기관에 KRISS가 개발한 조셉슨 전압표준기 시스템이 수출되었다. 이밖에도 조셉슨 소자를 이용한 표준 교류 전압 합성에 관한 연구를 약 4년간 진행해오고 있는데,^[4] 프로그래머블 표준 전압(programmable voltage standard) 소자로 불리우는 금속 장벽 조셉슨접합(SNS, superconductor-normal metal-superconductor) 어레이 소자를 이용하고 있다. 최근에는 국제적인 수준의 교류 합성기의 개발에 성공하였으며 앞으로 미세한 전압이나, 전력 신호에 수반되는 고조파 등을 10^{-7} 이하의 불확도로 측정할 수 있게 될 것으로 기대된다.

양자화 저항표준기

우리의 일상생활에 사용되는 각종 전자기기의 구성 부품

Fig. 4. Drift of 1 ohm standard resistors owned by National Metrology Institutes. ASMW, BI, ETL, IEN, IMM, LCIE, NBS, NPL, NRC, PTB represents NMIs of, respectively (Former) East Germany, BIPM, Japan, Italy, Russia, France, USA, Canada and (Former) West Germany.

중에서 저항은 빼놓을 수 없는 핵심부품 중의 하나이다. 현재 사용되고 있는 저항은 수 $\mu\Omega$ ($10^{-6} \Omega$)에서 수십 $P\Omega$ ($10^{-15} \Omega$)에 이른다. 이러한 저항들의 값을 요구 수준에 맞도록 정확하게 줄 수 있는 것은 바로 국가의 저항표준 소급체계가 있기 때문이다. 1990년 이전에는 망가닌(Manganin)선을 감아서 만든 권선형 1 Ω 저항을 3~10개 정도로 묶어서 하나의 그룹형태로 저항표준으로 유지했었다. 그러나 이러한 권선형 저항은 저항체인 망가닌의 물리적 특성이 온도나 측정환경에 따라서 변할 뿐만 아니라 또한 시간에 따라서도 변화한다. 그림 4는 세계 각국의 표준기관에서 유지되고 있는 표준저항의 값이 시간에 따라서 어느 정도 변화해왔는지 잘 보여준다. 이와 같은 표준저항기의 정확도를 높이기 위해 저항표준을 불변의 자연현상 또는 양자현상으로 대체하는 것이 필요하였다. 미시적인 양자세계에서 i 개의 전자들이 어떤 외부주파수 f 의 매 주기마다 어떤 장벽을 통과해 지나갈 때 전류 I 는 단위시간당 전자의 흐름 즉 ief (i 는 전자의 개수, f 는 주파수)로 주어지고, 전체 전자의 양자에너지는 ihf (h 는 플랑크상수)로 놓을 수 있다. 만일 이 전류가 장벽저항 R 을 만나 소모되는 에너지변화율과 양자 에너지변화율을 같다고 놓으면 $I^2 R = ihf^2$ 로부터 저항은 $R = h/(ie^2)$ 으로 표시된다. 즉 저항의 양자화 현상이 자연스레 예측될 수 있는 것이다. 저항의 양자화 현상

REFERENCES

- [2] R. L. Kautz, J. Appl. Phys. **51**, 3528 (1981).
- [3] K.-T. Kim *et al.*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **317** (1991).
- [4] K.-T. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **88**, 62501 (2006).

Fig. 5. (a) Structure of GaAs/AlGaAs QHR device, (b) Illustrated picture of QHR device (c) $R_H(B)$ curve measured at 1.42 K with 50 μ A current. R_{xx} is longitudinal component. $i = 1, 2, 3, \dots$ (integer).

은 1980년 홀저항 시스템에서 Klaus von Klitzing에 의하여 최초로 발견되었으며 양자홀효과(quantum Hall effect)라 불린다.^[5] 홀저항은 반도체 재료의 전하운반자의 특성과 농도를 측정하는데 사용되기도 하는데, 홀 전압을 바이어스 전류로 나누어 준 것으로 정의된다. 일반적으로 홀 전압이 바이어스 전류 및 가해진 자기장(전류 및 반도체면에 수직)에 비례하므로 홀저항은 외부 자기장에 비례하므로 저항 대 자기장의 그래프가 원점을 지나는 직선형태가 된다. 그런데 열요동이 적은 극저온(1.5 K 이하)에서 전하이동도가 큰 특수한 반도체에 강한 자기장을 수직으로 가해 주면 홀 저항이 양자화되는 현상이 나타난다(그림 5(c)). 이것을 양자홀 효과라고 하는데 보통 2차원 실리콘 MOSFETs(Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors)나 반도체 이종접합(GaAs/AlGaAs) 등의 경계면에 나타나는 2차원 전자가스(그림 5(a))를 이용하여 구현한다. 이때 홀저항의 값이 외부자기장에 비례하는 고전적인 홀효과와는 다르게 불연속적으로 증가하면서 계단(plateau)들이 형성되는데 이 영역(plateau)에서 전류방향의 저항 R_{xx} 는 최소값을 보여준다(그림 5(c)). 이때 발생된 불연속적인 plateau에서의 홀저항 값은 h/e^2 의 정수(i) 비율로 나타내지며 정수 $i=1$ 일 때 h/e^2 을 von Klitzing 상수 R_K 로

Fig. 6. QHR system under operation after development at KRISS: Precision current source (left), Cryogenic current comparator (right).

정의한다. 즉 $R_H = \frac{R_K}{i} = \frac{h}{e^2 \cdot i}$, $i=1, 2, 3, \dots$ 여기서 양자 홀 저항값이 오직 물리 기본상수(fundamental constant) e 와 h 만으로 표시된다는 것을 알 수 있다. 그렇기 때문에 양자홀 효과는 저항표준에 응용될 뿐만 아니라 물리기본상수인 미세구조상수 $\alpha = \frac{\mu_0 c}{2} \cdot \frac{h}{e^2} = \frac{\mu_0 c}{2} (R_K)^{-1}$ 의 값을 결정하며 양자전기역학에도 기여한다. 여기서 μ_0 는 진공투자율 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m이며 c 는 진공 중의 빛의 속도이다. 1988년 국제표준제정을 위한 전기 자문 위원회에서 von Klitzing 상수 R_K 를 25 812.807 Ω 로 정의하고 1990년 1월 1일부터 저항표준의 기준값으로 사용하도록 권고하였다.^[6] 실제로 세계 각국 표준기관들은 정수 $i=1$ 의 경우 요구되는 자기장의 크기가 14 T 이상 되어야 하는 어려움이 있기 때문에 정수 $i=2$ 의 값 12 906.4035 Ω 을 저항 단위인 Ω 을 구현하는 기준값으로 사용하고 있다. 양자홀 저항은 반도체 소자의 종류와 무관하게 이차원 전자가 형성되는 반도체 소자를 일정한 온도로 유지하면서 자기장만 가해 주면 상대 불확도가 수 10^{-9} 정도의 재현성을 보여줄 정도로 우수하다.

REFERENCES

- [5] K. von Klitzing, G. Dorda and P. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980).
- [6] B. N. Taylor and T. J. Witt, Metrologia **26**, 47 (1989).

한국표준과학연구원도 양자화 저항을 바탕으로 하는 국가 저항표준 소급체계를 이루기 위한 연구를 수행해왔다. 현재 한국표준과학연구원에서는 $100 \mu\Omega (10^{-4} \Omega)$ 에서 $100 T\Omega (10^{14} \Omega)$ 까지 저항표준을 확립하여 유지하고 있다. 최근에는 5년의 연구 끝에 자체 개발한 저온전류비교기를 이용하여 독일표준기관인 PTB와 이동용 저항표준기 100Ω (Tegam SR 102)에 대한 국제비교를 수행하였다. 이때 측정 상대 불확도 4.7×10^{-9} (신뢰도 95 %, $k=2$)은 스위스와 독일에 이은 세계 최고 수준의 측정 불확도에 해당된다. 현재는 양자화 저항 발생기의 온도를 0.3 K까지 냉각 가능한 He-3 냉동고를 설치하고 있으며 이를 통하여 더욱 안정되고 불확도가 향상된 양자화저항 표준 시스템을 갖추게 될 것이다(그림 6). 이와 같은 표준 시스템이 확립되면 국제도량형국(BIPM)에서 주관하는 이동용 $10 k\Omega$ 저항에 대한 국제비교를 할 예정이며 말레이시아와 태국과 같은 아시아 지역 표준국가의 저항표준 확립을 지원할 예정이다. 뿐만 아니라 전기표준 분야 관련자의 최대 관심사인 Ohm의 법칙을 표준 불확도인 10^{-8} 수준에서 검증하기 위한 quantum metrology triangle의 구현을 위한 연구도 할 예정이다. 즉 조셉슨 전압과 양자화 저항에 의한 전류를 단전자 펄스에서 발생시킨 전류와 CCC를 통한 상대 불확도 10^{-8} 이하로 직접 비교함으로써 전기분야의 가장 기초적이고 핵심 법칙인 Ohm의 법칙을 증명하게 되는 것이다.

전기단위의 정의 및 구현 기술의 발전

그러면 우리가 매일 접하는 전기단위들은 어떻게 그 크기가 정의되고 구현되며 보급되는 걸까? SI 단위계는 m, kg, s, A, K, cd, mol의 7개 기본단위(base unit)를 정의하고 있는데 이 중 전류의 단위 암페어(A)는 1948년 제11차 국제도량형총회(CGPM)에서 “무한히 길고 무시할 수 있을 만큼 작은 원형단면적을 가진 두 개의 평행한 직선도체가 진공 중에서 1미터 간격으로 유지될 때, 두 도체 사이에 매 미터당 2×10^{-7} 뉴턴(N)의 힘을 생기게 하는 일정한 전류”로 정의되었다.^[7] 이 정의를 암페어의 법칙에 적용하면 진공의 유전율(permittivity) 및 투자율(permeability)이 불확도가 없는 상수가 됨을 쉽게 확인할 수 있다. 즉 현재의 SI 정의는 진공의 전자기 특성을 기반으로 전기단위를 정의한 것이다. 일단 전기의 SI 기본단위인 암페어가 만들어지면 다른 모든 전기단위들은 암페어와 나머지 SI 기본단위들로부터 유도하여 만들 수 있게 된다. 예를 들어 전압의 단위 볼트(V)는 $\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{s}^3\cdot\text{A})$ 를 나타내는 유도단위이다. 그러나 SI 암페어를 정의된 이론대로 구현하는 일은 첨단기술을 보유한 세계 선진 측정표준

Fig. 7. Structure of Watt Balance - example of NIST USA.^[8]

기관들에게도 힘겨운 도전과제였다. 초창기에는 두 개의 솔레노이드 코일 사이에 발생한 힘을 정밀 측정하는 전류천칭(Ampere Balance)이 시도되었다. 전류천칭에 있어 가장 큰 문제는 솔레노이드 코일에서 발생한 자기장을 정확히 알기 어렵다는 점이었다. 이러한 문제점이 1983년경에 영국에서 전력천칭(Watt Balance: 그림 7)이 등장함으로써 일대 혁신이 이루어지게 된다. 그 후 약 20년 후 미국에서 전력천칭 장치가 성공적으로 완성되었고 현재는 높은 정확도로 SI 와트가 구현되고 있으며, 프랑스, 스위스 등에서도 전력천칭의 정확도 향상을 위한 노력이 활발히 경주되고 있다. 와트(W)는 암페어의 제곱 곱하기 오옴($\text{A}^2\Omega$)인데 크로스 커패시터(Cross Capacitor)와 쿼드브리지(Quadrature Bridge)를 이용하여 길이단위 m로부터 오옴을 구현하는 기술이 이미 알려져 있으므로 SI 와트를 구현할 수 있음은 곧 SI 암페어를 구현할 수 있음을 의미하게 되는 것이다. 이와 같이 SI 전기단위를 구현하기 위한 천칭기반 연구가 진행되던 중 다른 한편에서는 양자물리학의 등장으로 전기 측정표준에 새로운 변화의 흐름이 밀려오게 된다. 조셉슨 효과와 양자화 효과의 발견은 전기 측정표준이 인공물(artefact)이 아닌 자연현상에 의해 구현될 수 있음을 성공적으로 보여주었다. 더구나 조셉슨효과에 의해 구

REFERENCES

- [7] SI - 8th ed, "The International System of Units", www.bipm.org/en/si (2006).
- [8] R. Steiner, D. Newell and E. Williams, J. Res. NIST **110**, 1 (2005).

현한 전압의 표준과 양자홀 효과에 의해 구현한 저항의 표준은 재현 정확도가 전력전칭에 비해 매우 뛰어나고, 일단 적절히 구현만 되면 온도, 압력, 시간 등에 무관하게 항상 일정한 표준을 제공하는 등 실용적인 장점이 풍부하였다. 이러한 이유로 실제의 국가표준에서는 전기의 국가표준으로 조셉슨 효과 전압표준 측정장치와 양자홀효과 저항표준 측정장치를 지정하고 있다. 이들 두 장치들의 표준값은 모두 플랑크상수(h)와 기본전하상수(e)에 의해 표현되는데 이에 대해서는 앞서 자세히 소개한 바 있다. 이제 전기단위의 미래 발전 전망에 관한 이야기로 SI 단위에 대한 설명을 마무리하기로 한다. SI 단위계는 당연히 단위 하나당 하나의 정의만을 허용하고 이미 잘 정의된 암페어로서 모든 전기 유도단위들이 명확히 표현되었는데, 나중에 양자효과와 발견으로 등장한 조셉슨 전압표준과 양자홀 저항 표준은 기존 SI 표준과 모순은 없는 것일까? 이러한 문제는 조셉슨 전압표준과 양자홀 저항표준에 간여하는 두 물리상수인 플랑크상수(h)와 기본전하상수(e)의 지위와 관련된다. 현재의 SI에서는 이 두 물리상수는 측정을 통해 그 값이 정해지는 값이다. 다시 말하면 불확도를 갖는 상수이며, 이에 따라 조셉슨 전압표준 및 양자홀 저항표준은 아무리 완벽하게 구현한다 해도 기본적으로 SI에 대한 불확도를 내포하게 되는 것이다. 예컨대 전압의 경우 현재 이것에 의한 기본 불확도는 4×10^{-7} 에 이르고 있다. 그러나 SI에 의해 부여된 법정 불확도를 제외하면, 조셉슨 장치의 재현 불확도는 보통 1×10^{-10} 수준이어서, 마치 펜티엄 급 컴퓨터에 구식 DOS 운영체제만을 사용하도록 규정해 놓은 것에 비유할 수 있을 것이다. 더구나 최근 하이테크 산업은 매우 빠르게 진보하고 있어서 심지어 상용 전압계의 분해능이 이미 1×10^{-8} 에 이르고 있을 정도이다. 향후 기존 암페어의 정의로는 이러한 초정밀 산업계 사용자를 충분히 만족시키기 어려운 한계에 부딪칠 가능성도 배제할 수 없다. 다행스러운 점은 최근 국제도량형 위원회를 중심으로 SI 단위들의 재정의에 관한 논의가 최근 활발히 전개되고 있다는 점이다.^[9] 사실 SI 재정의에 대한 필요성은 kg과 관련하여 훨씬 이전부터 제기되어 오던 것이었다. SI 기본단위 중 유일하게 오직 인공물체(artefact)만으로 표준이 정의된 kg은 국제도량형국(BIPM)이 보관하고 있는 실린더모양의 작은 귀금속 덩어리의 질량이다. 이 kg 국제원기가 플랑크 상수나 기본전하상수와 같은 자연상수를 표현하거나 암페어를 구현하는 데 지대한 영향이 미치고 있다. 만일 kg 원기의 질량이 변하면 우리가 사용하는 플랑크 상수의 값은 물론 거의 모든 전기단위가 변하게 되는 것이다. 이러한 불합리성을 개선하고자 kg도 즉 플랑크 상수 또는 아보가드로 상수와 같은 자연상수를 기초로 재정의하자는 주장이 설득력을 얻고 있다. 예컨대, 앞서 소개한 전력전

칭에서 플랑크 상수를 불변상수로 정의하면 플랑크상수로 표현된 kg을 구현할 수 있게 되는 것이다. (아보가드로 상수를 불변 상수로 정의하여 kg을 재정의할 수도 있으며 이에 대한 연구도 진행되고 있다. 아보가드로상수와 플랑크 상수 사이의 관계는 이미 10^{-9} 정도로 매우 정확히 알려져 있다.) 아직은 기존 kg의 정의에 익숙한 많은 사람들이 새로 제안된 kg 구현방안들을 아직 선뜻 수용하지 못하고 있지만 자연상수에 기초한 kg 구현 기술들이 계속 발전 중에 있으므로 언젠가는 SI 단위들이 재정의될 가능성이 엿보인다. SI 재정의 과정에는 다양한 의견을 가진 여러 구성원들의 국제적 합의가 필요하기 때문에 단기간에 쉽사리 결론에 이를 수 없는 것인 만큼, kg과 이외에, A, mole, K, cd에 대해서도 재정의 논의가 함께 진행되고 있다. 전기단위의 경우 기본전하상수를 고정하는 방향으로 전류의 단위 암페어도 재정의하는 것이 유력한 방안의 하나로 논의 중이다. 만일 kg이 자연상수로 재정의되고 A가 기본전하상수로 재정의되면, 플랑크상수와 기본전하상수로 표현되는 전기 표준도 현재의 법정 불확도의 굴레를 벗어날 수 있을 것이다. 가까운 미래에 펜티엄급의 양자전기 표준에 걸맞는 합리적인 운영체제가 허용되기를 희망해 본다.

결론

몇 해 전 전력 계측에 사용되는 장비를 생산하는 기업에서 수출을 앞두고 KRISS에 긴급히 도움을 요청한 적이 있었다. 해당 장비 제작에 들어가는 어떤 부품의 기준값이 공급업체들마다 제각각 다르게 맞추어져 있어서 어느 부품이 적합한 것인지 알 수 없다는 것이었다. 일반적으로 상용 부품이거나 계측기이면 무조건 그 값이 맞을 것이려니 하고 생각하고 일을 진행하다가 예상치 않은 난관에 봉착하는 경우가 많다. 모든 부품이나 재료, 전자회로들은 온도, 습도, 압력과 같은 외부환경과 사용시간에 따라 계속 변하기 때문이다. 만일 해당 표준이 확립되어 있지 않다면, 멀리 해외 기관에 많은 비용을 주고 측정을 의뢰해야 한다. 시간과 비용 손실뿐 아니라 기술유출의 염려도 생긴다. 국내에서만이 아니라 국제적으로도 통용되는 신뢰성 있고 정확한 측정표준이 가까운 어딘가에 있다면 이러한 문제는 쉽게 극복될 수 있으나, 국제적으로 신뢰성을 인정받는 정확한 측정표준을 확립하는 일은 그리 녹록하지 않다. 전기 단위의 경우만 해도 많은 유도단위들이

REFERENCES

- [9] I. M. Mills, P. J. Mohr, T. J. Quinn, B. N. Taylor and E. Williams, *Metrologia* **43**, 227 (2006).

산업 현장과 화학 및 생명 등 새로운 측정분야에 쓰이고 있는데 이들 모든 단위의 표준이 환경조건 변동과 시간경과에 따른 영향이 거의 없도록 개발되어서 국제적 수준으로 측정 표준 체계가 확립되어야 한다. 국가측정표준 체계의 확립은 많은 시간과 돈이 드는 일로서 국가에서 투자해서 공공재로 확립하고 여러 산업에서 같이 활용하는 것이 효율적인 일이다. 한국표준과학연구원은 국가의 지원을 받아 측정표준을 선진국 수준으로 확립해 왔고, 교정 및 시험 서비스를 통해 이를 국내 교정기관 및 산업체에 보급함으로써 국가표준체계의 큰 축을 담당하고 있다. 국가 측정표준이 선진국과 동등함을 증명하는 가장 효과적인 방법은 국제비교를 통한 검증이다. 우리나라가 보유한 최고 국가 측정표준이 해외 선진국의 국가 측정표준과 잘 일치함을 비교측정을 통해 검증하는 것이다. 국제도량형위원회는 국제적으로 공인된 비교 프로그램을 운영하고 있는데 KRISS는 전기분야 핵심 비교 프로그램에 다수 참여하여 성공적인 결과를 도출하고 있다. 그 결과는 국제도량형국이 운영하는 웹사이트(kcdb.bipm.org)에 공개되어 전 세계 누구나 열람할 수 있게 되어 있다. 이러한 국제비교에 참여하려면 국제도량형위원회 산하 자문위원회의 정회원국이 되어야 하며 보유하고 있는 측정표준의 정확도 수준이 발전하고 있는 선진국 수준을 유지해야 한다.

얼마 전 국내 모 대기업이 러시아 사할린 에너지 개발 프

로젝트에 쓰일 세계최대규모의 플랫폼 2기를 수주하였으나, 러시아 법에 의해 모든 제어회로들에 대해 러시아 정부관리 입회하에 검정을 받거나 러시아 인정기구의 인증을 받은 기관으로부터 검정을 받아야 할 형편이었다. 이에 대한 해결방안을 요청받은 한국표준과학연구원(KRISS)은 러시아 측정표준 대표기관(VNIIM: 펜텔레에프계량연구소)이 국제도량형위원회가 주관하는 상호인정협약에 KRISS와 함께 가입되어 있는 점에 착안하여, KRISS 측정결과가 VNIIM에서 측정한 것과 동등함을 상호 인정하는 양해각서를 KRISS-VNIIM간에 체결함으로써 납기지연을 예방하고 약 11억 불의 경제적 효과를 거둔 바 있다. 국가측정대표기관으로 국가 측정표준의 수준은 그 나라 기술수준의 척도라는 상징적 중요성을 가질 뿐 아니라, 현실적으로도 우리의 상품이 해외시장을 개척해 나가는데 있어 매우 중요한 역할을 하고 있음을 보여주는 사례이다. KRISS의 측정표준을 선진국 수준으로 지속적으로 향상시켜야 하는 중요한 이유이다. 한국의 측정 결과가 국제적으로 점점 더 널리 통용되는 성과가 나타나는 것을 보는 것은 측정표준 종사자의 입장에서 크게 보람 있는 일이다. 최근에는, 태국, 말레이시아, 인도네시아, 베트남 등 많은 개발도상국이 KRISS에 교정을 의뢰하고 있다. 이러한 해외 교정지원이 앞으로 이들 신흥시장에 우리 기업이 진출하는 데도 큰 힘이 될 것으로 기대해 본다.