켈빈의 재정의와 열역학적 온도

DOI: 10.3938/PhiT.27.007

양 인 석

Thermodynamic Temperature and Redefinition of the Kelvin

Inseok YANG

The redefinition of the kelvin, the unit of thermodynamic temperature, will take effect in May 2019. The thermodynamic temperature is defined based on the thermodynamic equations of physics. The current definition of the kelvin uses the state of the triple point of water by assigning 273.16 K to the value of the thermodynamic temperature of that state. The new definition uses the Boltzmann constant by assigning $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ to its value. With the continuing use of the International Temperature Scale of 1990, the impact of the new definition of the kelvin on scientific and industrial measurements of temperature will be minimized. In this paper, we will review the aspects of the current and the new definitions of the kelvin and the scientific and technical impacts of the redefinition.

들어가는 말

우리는 국제단위계(The International Systems of Units, SI)에서 정한 단위를 쓰고 있다. SI 단위계에서 온도의 단위인 켈빈을 포함한 네 개의 기본 단위의 정의가 바뀌어 2019년 5월부터 새 정의가 적용된다. 바뀌는 정의의 과학적 의미와 영향을 이야기하기 위해서는 지금 사용하고 있는 정의와 앞으로 사용될 정의를 충분히 이해해야 한다. 지금 사용하고 있는 국제단위계에서는 온도의 단위 켈빈을 아래처럼 정의한다.

저자약력

양인석 박사는 KAIST 물리학과에서 학사학위(1999), 미국 University of Chicago 물리학과에서 박사학위(2005)를 한 후 2005년부터 한국표준과학연구원에서도 근무하고 있다. 저온 온도표준과 열역학적 온도 측정을 연구하고 있다. 책임연구원이며 물리표준본부 열유체표준센터 센터장을 맡고 있다. (iyang@kriss.re.kr)

열역학적 온도의 단위인 켈빈은 물의 삼중점에 해당하는 열역학적 온도의 1/273.16이다.

이 정의를 이해하고 사용하려면 일상생활에서 익숙하지 않은 몇 가지를 이해해야 한다. ‘열역학적 온도’,^{a)} ‘물의 삼중점’이라는 용어의 뜻, 그리고 온도를 어떻게 숫자 273.16으로 나누는가 하는 것이다.

먼저 ‘열역학적 온도’ 국제단위계에 온도를 나타내는 물리량이 왜 한 단어인 ‘온도’가 아닌 두 단어인 ‘열역학적 온도’인가를 이해하려면 약간의 역사적인 접근이 필요하다. 과학자들이 온도의 본질을 이해하기 훨씬 전에 사람들이 이미 감각적으로 온도를 알았으며, 과학자들은 자연 현상을 이용하여 온도를 정밀하게 측정해 왔다. 일상생활의 편의를 위하여 차갑고 뜨거운 정도를 나타내는 척도가 필요했으며, 몇 가지 온도계가 반복성 좋게 온도를 잘 측정할 수 있다는 것을 알아냈다. 그 중 현재에도 익숙한 수은 온도계를 생각해 보자.

수은이 가득 찬 작은 공간의 윗부분에 좁고 속이 빈 기둥을 만들어서 온도 변화에 따른 수은의 부피 팽창을 관찰하기 쉽게 한 수은 온도계를 생각하자. 이 온도계가 1기압에서 물의 어는점의 온도일 때 수은 기둥 꼭대기 위치에 눈금을 하나 그어 0 °C라고 표시하고, 1기압에서 물의 끓는점의 온도일 때 마찬가지로 눈금을 하나 더 그어 100 °C라고 표시하자. (사실 지금의 온도 눈금에서 1기압에서 물의 끓는점은 100 °C가 아니라 99.974 °C^[1]이다. 그러나 논의를 쉽게 하기 위해서 이 차이는 지금 무시하자.) 그 다음 정확한 길이 측정 표준을 이용

REFERENCES

- [1] R. E. Bedford, G. Bonnier, H. Maas and F. Pavese, Metrologia 33, 133 (1996).

a) 이 글에 걸쳐서 ‘열역학적 온도’와 ‘열역학적 방정식’이라는 말이 수차례 등장한다. ‘열역학적’은 영문 ‘thermodynamic’의 번역으로서 ‘적(的)’을 빼고 ‘열역학’으로 바꾸어도 의미가 통하고 더 좋은 우리말 표현이 된다는 의견이 있다. 그러나 SI brochure 8판의 공식 번역본에 ‘열역학적’으로 번역했으므로, 의견을 종합하여 9판의 번역을 바꾸기 전까지 현재의 공식 번역을 따르는 것으로 하였다.

Fig. 1. The difference between the “mercury expansion temperature scale” and the current temperature scale.

하여 두 눈금 사이의 간격을 측정하고 그것을 100 등분하여 99개의 작은 눈금을 표시한다. 그러면 0 °C부터 100 °C까지 잘 정의된 온도 눈금이 완성된다.

과학자들이 온도의 본질을 이해하기 전까지 위의 수은 팽창 온도계와 비슷한 형태의 온도계로 온도를 정의했으며 측정했다. 이것은 역사적인 의미의 “썰매 눈금”과 같은 것이다. 지금 일상생활에서 사용하기에 큰 무리가 없는 이 온도 눈금은 분명 몇 가지 장점이 있다. 우선 물질의 열팽창을 이용하기 때문에 직관적이고 사용하기 쉽다. 또 하나의 장점은 이 온도 눈금에서는 수은의 열팽창이 0 °C에서 100 °C 사이에서 정확하게 선형적으로 (즉, 열팽창계수가 상수로) 된다는 것이다. 온도 눈금이 그렇게 정의된 것이니 당연한 것이다.

그러나 이 수은팽창 온도 눈금은 여러 가지 단점이 있다. 우선 0 °C보다 낮은 온도와 100 °C보다 높은 온도에서 온도를 정의하는 것이 어렵다. 많은 도시들이 겨울에 기온이 0 °C보다 낮게 내려가므로, 이것은 상당히 큰 문제이다. 눈금 간격을 외삽해서 쓰면 일정한 구간까지 확장할 수 있겠지만, 수은이 어는 -39 °C보다 낮은 온도나 수은이 끓는 357 °C보다 높은 온도에서는 원리적으로 사용이 불가능하다.

이 온도 눈금의 더 큰 문제는 수은의 열팽창보다 더 근원적인 물리 현상을 설명할 때 (예를 들어 이상기체에 가까운, 밀도가 낮은 기체가 일정한 압력에서 부피와 온도의 관계를 설명할 때) 이상한 형태의 비선형성이 항상 관찰된다는 것이다. (그 정도는 그림 1에 나타내었다.) 또, $2 \times 1 \text{ °C} = 2 \text{ °C}$ 와 같은 온도 값들끼리의 연산이 물리적 의미를 갖지 못하고, -1 °C 와 1 °C 가 연산에서 어떤 관계를 갖는지가 명확하지 않다.

수은 온도계를 포함한 유리 온도계가 아직까지 쓰이고 있지만, 지금 사용하는 온도 눈금은 위와 같은 방법으로 정해진 눈금이 아니다. 지금은 수은의 부피 팽창보다 더 근원적인 물리 현상을 이용하여 정의된 온도 눈금을 쓰고 있고, 이 온도 눈금을 써서 수은 열팽창 계수의 온도에 따른 변화를 관측할 수 있다. 수은 열팽창보다 훨씬 더 근원적인 물리현상이 무엇인지를 살펴보기에 앞서, 현재 사용하고 있는 온도 눈금 t 와 앞서 정의한 가상의 수은팽창 온도 눈금 $t_{\text{Hg expansion}}$ 이 얼마나 차이 나는지 알아보기로 하자.

현재 사용하고 있는 온도 눈금을 써서 수은 밀도의 온도에 따른 변화를 측정한 결과는 다음과 같다.^[2]

$$\rho = \rho(t_0) [1 + (a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) \times t]^{-1} \quad (1)$$

여기서 $\rho(t_0)$ 은 온도 0 °C, 압력 101 kPa에서 수은의 밀도이며 그 값은 $13\,595.076 \text{ kg m}^{-3}$ 이다. 계수 a_0, a_1, a_2, a_3 은 실험으로 알아낸 값이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_0 &= 1.815\,868 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1} \\ a_1 &= 5.458\,43 \times 10^{-9} \text{ °C}^{-2} \\ a_2 &= 3.498\,0 \times 10^{-11} \text{ °C}^{-3} \\ a_3 &= 1.5558 \times 10^{-14} \text{ °C}^{-4}. \end{aligned} \quad (2)$$

계수 a_1, a_2, a_3 가 0이 아닌 것이 이미 t 와 $t_{\text{Hg expansion}}$ 이 다르다는 것을 말해주고 있다. 그림 1은 $t - t_{\text{Hg expansion}}$ 을 보여 준다. 그림에서 알 수 있듯이 두 눈금 사이에는 54 °C 부근에서 0.15 °C 만큼 차이가 나는데, 이것은 요즘 사용하고 있는 대부분의 온도계로 측정할 수 있을 정도의 큰 차이이다.

그렇다면 지금 사용하고 있는 온도 눈금의 바탕이 된, 수은의 열팽창보다 훨씬 더 근원적인 물리 현상은 무엇을 말하는 것일까? 그것은 (당연하게도) 열역학적 현상과 그것을 기술하는 열역학적 방정식이다.

열역학적 방정식과 열역학적 온도

온도에 대한 경험적인 정의와 측정이 시작된 후 몇 백 년 지나서 과학자들은 온도가 분자 운동 에너지의 평균값이라는 것을 알아냈고, 비로소 다른 물리량과 온도를 연결 짓는 법칙

REFERENCES

- [2] K.-D. Sommer and J. Poziemski, Metrologia 30, 665 (1993).

Table 1. List of primary thermometers and corresponding thermodynamic equations.

Primary thermometer	Thermodynamic equation
Gas thermometer	$PV = nRT = NkT$
Total radiation thermometer	$L = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4$
Spectral band radiation thermometer	$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} [\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1]^{-1}$
Acoustic thermometer	$c_s^2 = \frac{\gamma kT}{m} = \frac{\gamma RT}{M}$
Noise thermometer	$\overline{V_T^2} = 4kT \operatorname{Re}(Z) \Delta f$
Dielectric constant gas thermometer	$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = A_\epsilon \frac{p}{N_A kT}$

들을 찾아냈다. 이 법칙들을 ‘열역학적 방정식’이라고 한다. 열역학적 방정식 중 가장 간단한 것은 ‘이상기체의 상태 방정식’이라고 부르는 다음과 같은 것이다.

$$PV = nRT = NkT \quad (3)$$

여기서 P 는 기체의 압력, V 는 부피, n 은 몰 수, N 은 분자 수, R 은 기체 상수, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도이다. 이렇게 열역학적 방정식을 이용해 정해지는 온도를 그 이전에 경험적으로 정의했던 온도와 구분지어 ‘열역학적 온도’라고 부르며, 그 단위는 켈빈(kelvin, 기호 K)이다. 역사적인 과정을 무시하고 이야기하자면, 우리가 ‘온도’라고 부르는 것은 ‘열역학적 온도’의 줄임말이거나, ‘열역학적 온도’를 근사한 온도 눈금을 일컫는다. 켈빈은 절대 영도로 부르는 0 K부터 실험적으로 도달할 수 있는 어떤 높은 온도까지도 열역학적 방정식을 이용하여 정의할 수 있다. 또, 열역학적 방정식을 이용하여 200 K = 2×100 K와 같은 연산도 물리적으로 의미를 갖는다. 따라서 열역학적 방정식을 실험적으로 구현할 수 있는 장치는 온도계의 역할을 하며 이것을 일차온도계(primary thermometer)라 부른다. 예를 들어, 이상기체의 압력과 부피를 측정하고, 그때의 온도를 T_1 이라고 할 때, 부피를 그대로 두고 압력을 두 배로 늘였을 때의 온도는 상태방정식에 의해서 T_2 가 된다. 따라서 압력을 측정하면 온도를 측정하거나 온도값을 정의하는 것이 가능하며, 이런 장치를 정적(定積)기체온도계(constant volume gas thermometer)라고 한다. 물론, 모든 기체는 이상기체에서 어느 정도 벗어나 있으므로, 이 과정에서 여러 가지 보정이 필요하다. 보정 과정 때문에 일차온도계는 만들기 어렵

고 결과를 해석해 내는데 많은 물리 이론의 적용이 필요하다. 이런 점을 보완하기 위해 과학자들은 열역학적 온도와 가까우면서 좀 더 사용하기 쉬운 온도 눈금을 정의하여 사용하고 있다. 이에 대해서는 ‘국제온도눈금-1990’절에서 좀 더 자세히 기술한다.

현재의 SI 브로셔(제8판)에서 섭씨 단위 °C는 “특별한 이름과 기호를 갖는 SI 단위”로 분류되어 있으므로, 켈빈과 동일하게 SI 단위의 지위를 가지며, 물의 어는점인 273.15 K와의 차이로 정의된다. 즉, 어떤 온도를 켈빈으로 나타낸 것을 T , 섭씨로 나타낸 것을 t 라고 할 때,

$$t / ^\circ\text{C} = T / \text{K} - 273.15 \quad (4)$$

가 된다. 역사적인 의미의 섭씨 단위가 셀시우스가 했던 것처럼 물의 어는점과 끓는점 사이를 100등분해서 정해졌지만, 현재의 섭씨 단위 정의는 켈빈의 정의에 종속하는 것으로 봐야 한다.

열역학적 방정식은 이상기체의 상태방정식처럼 온도를 파라미터 중 하나로 갖는 물리 법칙(실험으로 얻는 경험식이 아닌)을 말하며, 각각의 열역학적 방정식을 구현하면 일차온도계를 만들 수 있다. 대표적인 열역학적 방정식과 그것에 해당하는 일차온도계는 표 1에 나타났다.

위 표에 사용한 물리량의 기호는 일반적으로 많이 사용하는 표시법으로 쓴 것이다. 각 열역학적 방정식에 대해서 여기서 자세히 다루지 않을 것이기 때문에 기호의 정의를 일일이 설명하지 않는다. 그러나 모든 열역학적 방정식에서 (열역학적) 온도 T 는 항상 볼츠만 상수 k 와 곱한 형태로 등장한다는 것

은 매우 중요하다.^{b)} 엔트로피를 이용하여 온도를 정의하는 다음의 식에서도

$$\frac{1}{kT} \equiv \beta \equiv \frac{\partial \ln \Omega}{\partial E} \quad (5)$$

k 와 T 가 곱해진 형태로 등장한다. (여기서 Ω 는 계의 가능한 상태수, E 는 계의 에너지)

따라서 온도를 다른 물리량과 같이 연산이 가능하도록 잘 사용하기 위해서는 (A) 0 K이 아닌 어떤 잘 알려지고 반복도가 높은 열적 평형 상태에 온도값을 지정하거나 (B) 볼츠만 상수의 값을 지정하거나 해야 한다는 것을 알 수 있다. 즉, 이상기체를 이용하여 어떤 잘 정의된 열적 평형 상태를 만들었을 때, 그 온도를 100 K이라고 지정한다면 이상기체의 상태 방정식을 이용하여 다른 온도(예를 들어 50 K, 200 K 또는 101 K 등)를 구현하고 측정할 수 있다. 켈빈을 정의하기 위해서는 오직 한 점만 필요하며, 두 점 이상 온도값을 지정하면 켈빈이 유일하게 정의되지 않는다. 예를 들어 물의 어는점을 273.15 K이라고 지정하면서 동시에 물의 끓는점을 373.15 K으로 지정해서는 안 된다. 왜냐하면 물의 어는점에 지정한 값과 열역학적 방정식을 사용하면 물의 끓는점은 ‘측정’해야 하는, 즉 불확도를 갖는, 물리량이기 때문이다. 반면에 0 K 이외의 어떤 열적 평형 상태도 온도값으로 정의하지 않고, 볼츠만 상수의 값을 지정하면 같은 효과를 볼 수 있다. 이 경우 이상기체로 잘 알려진 열적 평형 상태를 만들었을 때, 그 기체의 압력과 부피를 측정하고, 아보가드로의 알려진 값과 볼츠만 상수로 지정한 값을 이용하면 식 (3)에 따라 온도를 계산, 즉 측정할 수 있다.

현재는 (A)의 방법으로 켈빈을 정의하고 있고, 2019년 5월 이후에는 (B)의 방법으로 켈빈을 정의한다.

물의 삼중점을 이용한 현재의 켈빈 정의

그렇다면, 현재 켈빈의 정의에 이용되는, 잘 알려지고 반복도가 높은 열적 평형 상태는 무엇일까? 정답은 물의 삼중점이다. 물의 삼중점은 물이 액체, 기체, 고체의 세 가지 상태로 동시에 존재하는 상태이다. 그림 2는 물의 상태도를 보여준다. 기압에 따라 변하는 물의 어는점과 달리, 물의 삼중점 상태는

b) 어떤 경우에는 kT 가 아닌 RT 의 형태로 등장한다. 그러나 $R = N_A k$ (N_A 는 아보가드로 수)이고, N_A 측정의 상대불확도가 k 측정의 상대불확도보다 매우 낮으므로 온도와 관련된 실질적인 모든 문제에서 N_A 는 불확도가 없는 상수라고 봐도 무방하다. 따라서 RT 는 언제나 (상수) $\times kT$ 로 치환할 수 있다.

Fig. 2. Phase diagram of water.

Fig. 3. Triple point of water cell.

압력과 온도가 유일하게 정해진 상태이므로 원리적으로 더 안정하다.

그림 3은 물의 삼중점이 실현된 상태를 찍은 사진이다. 물의 삼중점은 안정도와 재현성이 매우 높다. 물의 삼중점의 실현과 측정에 대한 국제비교에서 여러 나라의 국가측정표준기관에서 측정한 결과가 표준편차 45 μ K 이내로 일치하는 것으로 나왔다.^[3]

물의 삼중점은 1기압에서 물의 어는점에 비해서 10 mK 높기 때문에, 단위의 연속성을 위해서 273.16 K으로 지정되었

REFERENCES

- [3] M. Stock, Metrologia (Tech. Suppl.) **43**, 03001 (2006).

다. 이렇게 정의하면 물의 삼중점은 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 가 되고, 1기압에서 물의 어는점은 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 가 되어 과거의 섭씨온도에서 어는점을 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 정했을 때 측정된 값을 연속성을 갖고 계속 쓸 수 있다. 온도의 단위에 대한 문서에는 273.15와 273.16이 모두 등장하여 둘 중 하나가 오타인 것으로 생각하는 사람이 많은데, 이것은 물의 어는점과 삼중점이 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 차이 나기 때문이며 틀리지 않도록 주의 깊게 써야 한다.

다시 현재의 켈빈의 정의를 서술하면서 지금까지 설명한 내용을 정리해 보자.

열역학적 온도의 단위인 켈빈은 물의 삼중점에 해당하는 열역학적 온도의 $1/273.16$ 이다.

요약하자면, 열역학적 온도의 단위를 정의하기 위하여 잘 정해진 물리현상에 온도값을 지정하는 것이 필요한데, 그것이 물의 삼중점이며 273.16 K 으로 지정되었다. 이 정의에 따라서 1 K 은 물의 삼중점에 해당하는 온도를 273.16 으로 나눈 값이다. 온도를 273.16 으로, 혹은 어떤 수치로 나누거나 곱하는 것은 표 1에 있는 열역학적 방정식, 혹은 어떤 열역학적 방정식인든 물리 법칙을 실현하는 장치를 제작하여 구현할 수 있다.

켈빈의 재정의

위에서 설명한 켈빈의 정의는 2019년 5월을 기점으로 볼츠만 상수에 값을 지정함으로써 켈빈을 정하는 정의로 바뀐다. 현재의 정의도 충분히 재현성이 좋은데 켈빈의 정의를 바꾸는 이유는 무엇일까?

첫째, 기본상수를 이용한 SI 단위 재정의에 발맞추려는 것이다. 2019년에는 온도의 단위인 켈빈뿐만 아니라 질량의 단위인 킬로그램, 전류의 단위인 암페어, 물질량의 단위인 몰의 정의가 바뀐다. 각각 플랑크 상수, 기본 전하, 아보가드로 상수에 값을 지정함으로써 정의하는 것으로 바뀌는 것이다. 온도의 단위를 이와 같이 정의하려면 그에 대응하는 기본 상수는 볼츠만 상수이고, 볼츠만 상수를 이용한 정의로 바꾸는 것이 국제단위계 개정의 방향과 일치한다. 물은 지구표면의 71%의 면적을 덮고 있고, 성인 인간의 몸의 60% 이상의 질량을 차지하고 있지만, 과학적으로는 기본 입자도 아니며, 근원적인 성질을 갖고 있는 것도 아니다. 켈빈을 정의하기 위하여 특정한 물질(물)의 특성을 이용하는 것보다 거시적 에너지와 미시적 에너지를 연결해주는 기본 물리상수인 볼츠만 상수를 이용하는 정의가 과학적으로 더 아름답다고 할 수 있다.

둘째, 물의 동위원소 함량에 따른 삼중점 온도의 차이이다. 물 분자를 구성하는 수소는 자연 상태에서 두 가지 동위원소,

산소는 자연 상태에서 세 가지 동위원소를 갖는 원소이다. 삼중점 셀을 만드는데 사용한 물을 채취한 지역과 계절에 따라 물의 동위원소 함량이 다르게 나온다. 동위원소 함량에 따라 물의 삼중점 온도가 다르기 때문에 켈빈의 정의가 불완전하게 된다. 이 점을 해결하기 위하여 2005년에 국제도량형위원회는 켈빈의 정의에 사용되는 물의 동위원소 함량을 지정하고^[4] 이에 따라 지정된 함량을 벗어났을 때 어떻게 온도 보정을 할 것인지를 정하였다.^[5] 그러나 이 보충에 의하여 켈빈의 정의는 훨씬 더 복잡해졌으며 이것은 첫째항에서 이야기한 '과학적으로 아름다운 정의'에서 멀어진 것이다.

셋째, 켈빈이 특정한 온도인 273.16 K 에서 정의된 문제이다. 그 이외의 온도는 이 온도를 기준으로 열역학적 방정식을 이용하여 구현하거나 측정해야 한다. 대부분의 일차온도계는 넓은 온도 구간에서 하나의 법칙을 적용해서 작동하기 힘들기 때문에 273.16 K 에서 작동한 일차온도계는 아주 낮은 온도나 아주 높은 온도에서 작동하지 않거나 불확도가 매우 크다. 즉, 273.16 K 이외의 온도를 구현하거나 측정하는 것은 273.16 K 을 구현하는 것에 비해 언제나 상대 불확도가 크며, 273.16 K 은 현재의 켈빈 정의가 특별하게 선호하는 온도이다. 물리적으로 0 K 이외의 어떤 온도도 특별하지 않기 때문에 이런 상황은 바람직하지 않다.

볼츠만 상수를 이용한 새 켈빈의 정의는 위 세 문제를 해결한다. 켈빈의 새 정의는 다음과 같다.

켈빈(기호 K)은 열역학적 온도의 SI 단위이다. 그 크기는 볼츠만 상수의 값을 단위 $\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ 으로 표현할 때 정확히 1.380649×10^{-23} 으로 고정시킴으로써 정한다.

물의 삼중점을 이용하는 현재의 켈빈의 정의에서 볼츠만 상수를 이용한 새로운 켈빈의 정의로 바꾸기 위해서는 현재의 켈빈 정의를 적용해서 최대한 정확하게 볼츠만 상수를 측정하는 것이 필요하다. 만약 현재의 정의에서 볼츠만 상수를 백만분의 2만큼 잘못 측정하여 지정했다고 가정해보자. 미래에 측정기술이 발전하면 “잘못 지정한” 볼츠만 상수 때문에 물의 삼중점의 열역학적 온도가 273.16 K 에서 0.55 mK 만큼 벗어나게 측정된다. 따라서 정의를 바꾼 시점 전후에 켈빈 정의가 273.16 K 에서 0.55 mK 만큼의 불연속이 발생한 것이 나중에

REFERENCES

- [4] <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/CIPMOOutcomes/CI-2005-Recommendation-2.pdf>.
- [5] https://www.bipm.org/utls/en/pdf/MeP_K_Technical_Annex.pdf.

밝혀지는 것이다. 이것은 정밀 온도 측정에서는 큰 차이이며 바람직하지 않다.

그렇기 때문에 각국의 측정표준기관의 온도측정표준 연구그룹은 지난 10여 년 동안 현재의 켈빈 정의를 적용할 때 볼츠만 상수를 최대한 정확하게 측정하기 위해 노력을 기울여 왔다. 2017년 7월 1일을 마감으로 측정 결과에 대한 논문을 심사하고 종합한 결과 과학기술데이터위원회(The Committee on Data for Science and Technology, CODATA)는 볼츠만 상수의 최종 조정값을 $k = (1.380\,649\,03 \pm 0.000\,00051) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ (상대불확도 3.7×10^{-7})로 발표하였다.^[6] 이 조정값에는 세 종류의 일차온도계인 음향기체온도계, 유전상수기체온도계, 존슨잡음온도계에서 측정된 결과가 기여하였다. 이 정밀 측정에 대한 자세한 요약은 다른 리뷰에서 다루었다.^[7]

CODATA는 아울러 켈빈 재정의에 사용할 볼츠만 상수 값으로 소수점 여섯째 자리까지인 $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ 를 추천하였다. 볼츠만 상수의 최종 조정값과 정의에 사용될 값 사이의 상대적 차이는 2×10^{-8} 이며, 이것은 물의 삼중점 부근의 온도로는 5 μK 에 해당한다. 물의 삼중점을 측정할 때 현재 최선의 반복도가 10 μK 정도이므로, 앞으로 영구히 사용될 가능성이 높은 볼츠만 상수의 지정값을 두 자리 수 더 제시하면서 생기는 불편함에 비해서 5 μK 차이로 생기는 효과가 더 작다고 판단했기 때문에 소수점 여섯째 자리까지만 지정한 것이다.

국제온도눈금-1990

앞서 이야기한 대로 열역학적 방정식을 구현하는 일차온도계는 만들기가 매우 어렵고 물리법칙에 의한 보정을 많이 가해야 하기 때문에 측정 결과를 해석하고 사용하기 어렵다. 따라서 온도표준에서는 열역학적 온도를 근사(approximate)하는 온도눈금을 사용하고 있다. 현재 사용하고 있는 온도눈금은 1990년에 발효된 국제온도눈금-1990(International Temperature Scale of 1990, ITS-90)이다. ITS-90은 일차온도계는 아니지만 실제 과학기술과 산업현장의 온도 측정과 더 가까이 있고, 켈빈의 재정의에도 불구하고 앞으로 당분간은 계속 쓰일 것이다.

ITS-90는 열역학적 온도와 가깝도록 정의한 반복도가 매우

좋은 온도 눈금이다. 현재 켈빈의 정의는 물의 삼중점에서만 정확한 온도가 지정되고 다른 온도는 열역학적 방정식과 일차온도계를 이용하여 구현, 측정해야 한다. 따라서 물의 삼중점에서 멀어질수록 상대불확도가 커지게 된다. ITS-90에서는 적당한 온도 간격으로 고정점이 정의되어 있고 고정점의 온도값이 지정되어 있다. 예를 들어 아연의 어는점은 419.527 $^{\circ}\text{C}$ 로 지정되어 있는데, 이것은 ITS-90을 정할 시점에 아연의 어는점의 열역학적 온도에 대한 가장 정확한 측정값이 419.527 $^{\circ}\text{C}$ 였기 때문이다.(물론 지금은 아니다.) 아연의 어는점의 열역학적 온도는 불확도를 갖는 값 419.527 $^{\circ}\text{C}$ 이지만, ITS-90 안에서 아연의 어는점의 온도는 정확히 419.527 $^{\circ}\text{C}$ 로서 불확도를 갖지 않는다. ITS-90는 물의 삼중점을 포함하여 17개의 고정점과 4개의 내삽온도계를 이용하여 열역학적 온도에 가깝도록 약속한 눈금이다. 온도 범위 0.65 K에서 실현 가능한 온도까지 눈금이 지정되어 있으며, ITS-90 눈금으로 측정한 온도를 열역학적 온도와 구분할 필요가 있을 때는 t_{90} , T_{90} 와 같이 아래첨자 '90'을 써서 표현한다.

맺는 말

켈빈 재정의에 의하여 물의 삼중점의 열역학적 온도는 273.16 K으로 정확히 정해진 값에서 0.1 mK의 불확도를 갖는 측정값으로 그 지위가 변한다. 따라서 물의 삼중점 부근의 열역학적 온도 측정은 대부분 그 불확도가 0.1 mK 정도 높아지게 된다. 그러나 과학기술과 일상생활에서는 여전히 ITS-90 온도 눈금을 사용하므로 이런 차이를 전혀 인식하지 못할 것이다. 열역학적 방정식을 구현할 수 있는 일차온도계라면 새로운 켈빈의 정의에 따라 켈빈을 온도 범위에 관계없이 바로 구현할 수 있기 때문에 켈빈의 새 정의는 향후 발전의 기초가 될 수 있다. 특히 아주 낮거나 높은 온도에서 물의 삼중점에 대한 기준을 잡지 않고도 켈빈을 직접 구현할 수 있기 때문에 새롭고 정확한 온도 측정 기술 개발을 가능하게 할 것으로 보인다.

REFERENCES

- [6] D. B. Newell *et al.*, Metrologia 55, L13 (2018).
- [7] Inseok Yang, J. Korean Soc. Precis. Eng. 35, 399 (2018).