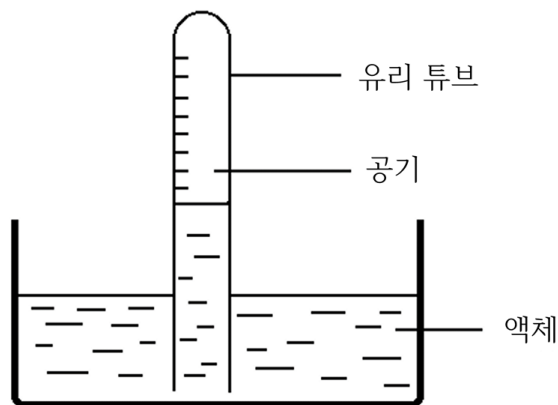


온도는 어떻게 정의하고 측정하는가?

일상 생활과 과학 기술에서 “온도”라는 단어는 굉장히 흔하게 사용된다. 일기예보에서는 온도가 가장 중요하면서도 간단한 지표이고, 연구 노트에서는 항상 연구를 수행한 시점의 온도를 기록한다. 그렇다면 온도는 어떻게 정의하고, 어떻게 값이 매겨지는가?

온도에 관한 현상 이해와 온도를 정의하고 측정한 방법은 짧은 기간에 완성되지 않았다. 온도의 본질을 이해하기 훨씬 전에 온도계가 만들어져서 사용되었고, 본질을 이해한 다음에 다시 온도를 정의하는 방법이 결정되기도 했으며, 거기에 따라서 온도를 측정하는 방법이 개선되었다. 따라서 이런 과정들을 논리적이면서도 역사적인 순서로 설명하기는 어려우며, 이 글에서는 역사적인 순서를 넘나들면서 설명하도록 하겠다.

표준국어대사전에서 “온도”를 찾으면 먼저 “따뜻함과 차가움의 정도. 또는 그것을 나타내는 수치”라는 설명이 나온다. 즉, 온도의 정성적 본질은 따뜻함과 차가움의 정도이고, 정량적으로 그것을 값으로 표현할 수 있다는 설명이다. 인간은 아마 아주 오래전부터 따뜻함과 차가움을 느껴왔을 것이며, 그것에 대해서 적응하는 방법을 알았고, 때로는 적극적으로 활용하면서 살았을 것이다. 역사가 기록되기 전부터 따뜻하거나 시원한 곳을 찾아서 이동해 왔으며, 옷을 만들어 입었고, 집을 지었고 불을 이용하여 음식을 만들었다. 온도에 대한 경험적인 이해가 없었다면 불가능했을 일이다. 오랜 관찰을 통해서 많은 물리 현상들이 온도에 의존한다는 것을 알고 있었을 것이다. 물 (정확하게 말하면 4 °C 이상의 물)이나 공기가 온도가 높아지면 부피가 늘어난다는 것을 알고 있었을 것이다. 온도에 따라서 바뀌는 물리량이 있으면, 그 물리량의 변화를 온도를 측정하는데 이용할 수 있다. 사실, 온도뿐만 아니라 거의 모든 물리량을 측정하는 센서가 이런 원리로 우리가 측정하고 싶은 물리량을 측정한다. 갈릴레이는 이 원리를 이용하여 간혀 있는 공기가 온도가 높아지면서 물을 밀어내면 물과 공기의 경계 위치가 바뀌면서 온도를 측정하는 최초의 온도계를 만들어냈다. (그림 1)



[그림1] 최초의 갈릴레이 온도계

그런데 이런 온도 측정은 인간의 경험과 연결되어야 측정의 가치를 가진다. 이 온도계의 눈금의 위치는 기체가 위치해 있는 구 (bulb)의 부피, 액체와 기체가 공존하는 가느다란 기둥의 내경, 구 안에 기체가 갇힐 당시의 평균 온도 등에 의존해서 결정되며, 사용자가 특정한 온도계에서 액체와 기체의 경계면 위치만으로 알아낼 수 있는 정보가 거의 없다. 예를 들어 경계면이 어느 위치에 왔을 때가 물이 어느 정도의 차가움이고, 어느 위치에 있을 때가 유럽의

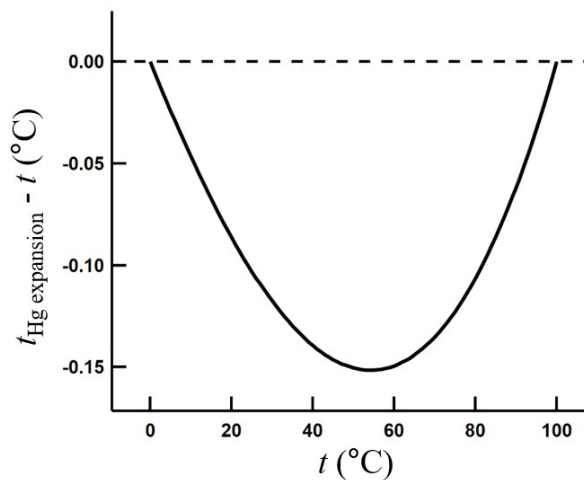
가장 더운 여름날에 해당하는 따뜻함이라는 등의 기존의 경험과의 연결이 있어야 한다.

이제 좀 더 현대인이 알고 있는 온도계와 비슷한 셀시우스의 온도계로 넘어가보자. 셀시우스는 수은이 온도가 올라가면 팽창하고 온도가 내려가면 수축하는 현상을 이용하여 온도계를 만들었으며, 이것은 지금 우리가 “온도계”라고 했을 때 떠오르는 전형적인 이미지와 외형적으로나 원리적으로 크게 다르지 않은 온도계다. 셀시우스는 이 온도계의 눈금을 사람들의 경험과 연결시키기 위해서 다음과 같은 방법을 썼다. 물이 얼 때의 수은 기둥의 꼭대기에 큰 눈금을 하나 긋고, 물이 끓을 때 꼭대기에 큰 눈금을 하나 더 긋는다. 두 눈금을 각각 0과 100으로 표시한다. 두 눈금 사이의 거리를 자로 재서 그 거리를 100등분하여 작은 눈금을 만들어서 (즉, 이 눈금은 길이 표준에 소급해서 내삽된다고 할 수 있다.) 1에서 99까지의 숫자를 표시한다. 이렇게 해서 셀시우스 온도 0에서 셀시우스 온도 100까지가 만들어졌으며, 이것은 우리가 지금 사용하고 있는 0 °C, 100 °C와 크게 다르지 않다.

여기서 역사를 좀 많이 앞으로 감아 현재로 와서, 이렇게 만들어진 “수은 부피 팽창 온도계”가 제공해주는 눈금과 지금 사용하고 있는 온도 눈금이 얼마나 차이 나는지 계산해보자. 수은이 현재 정해져 있는 온도 눈금으로 측정된 온도의 변화에 대해서 부피 팽창이 얼마나 일어나는지를 정밀하게 측정한 연구 결과로는 Sommer and Poziemski의 1993년 논문 [K-D Sommer and J Poziemski 1994 Metrologia 30 665]을 사용하였다. 해당 논문에 의하면, 수은의 밀도는 온도의 변화에 따라 아래와 같이 변한다.

$$\rho = \rho(t_0)[1 + (a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3) \times t]^{-1}$$

여기서 $a_0 = 1.815\ 868 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $a_1 = 5.458\ 843 \times 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$, $a_2 = 3.4980 \times 10^{-11} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$, $a_3 = 1.5558 \times 10^{-14} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$ 이다. 계수 a_1, a_2, a_3 가 0이 아니라는 것은 수은의 팽창이 0 °C에서 100 °C 사이에서 선형적이 아니라는 것이고, 따라서 셀시우스의 방법으로 선형적인 눈금을 매기면 오차가 생긴다는 것이다. 이 오차의 크기를 그림 2에 나타내었다. 그 차이는 50 °C와 60 °C 사이에서 0.15 °C 정도로 가장 큰데, 이는 사람이 감각으로 느끼기에는 너무 작은 차이이고, 현대적인 정밀 온도계로 측정하면 아주 쉽게 측정될 수 있는 큰 차이이다. 하지만 근원적으로는 슬쩍 언급된 “지금 사용하고 있는 온도 눈금”이 수은 팽창 눈금은 아니라는 데에 주목할 필요가 있다. 만약, 지금 사용하고 있는 눈금이 수은 온도팽창 눈금이라면 a_1, a_2, a_3 가 모두 0이 되어야 할 것이다. 당연히 지금 사용하고 있는 눈금은 수은의 온도 팽창보다는 더 근본적인 물리 현상을 기반으로 하며, 역으로 이야기하면 수은의 부피 변화와 같은 복잡한 물리 현상은 온도에 대해 간단한 선형 함수로 표현될 수 없다.



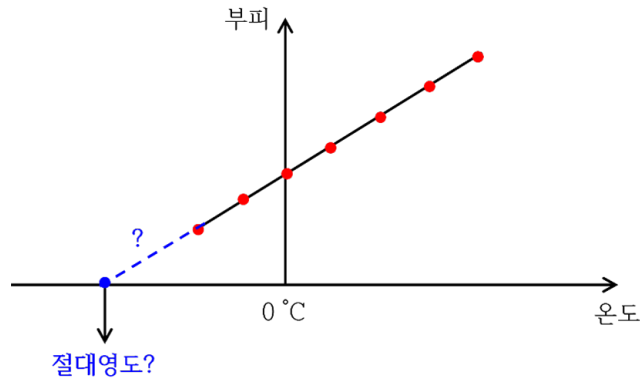
[그림 2] “수은 부피 팽창 온도” 눈금과 현재 사용하고 있는 온도 눈금과의 차이

다시 셀시우스가 만든 섭씨 온도 눈금으로 돌아가보자. 측정학적으로 이런 온도 눈금을 간격척도(interval scale)라고 한다. 0 °C와 10 °C의 차이의 크기가 10 °C와 20 °C의 차이의 크기가 동일하다는 것이다. (그런데, 뭐가

“동일”하다는 것인지에 대한 논쟁을 할 수 있다. 여기서는 0 °C에서 10 °C로 온도가 올라갈 때 높아진 수은 기둥의 길이가 10 °C에서 20 °C로 올라갈 때 높아진 수은 기둥의 높이와 동일해서 “동일”하다고 주장할 수 있다. “수은 부피 팽창 온도계”의 관점에서 그렇게 설명할 수 있다는 말이다.) 하지만 셀시우스의 섭씨 온도 눈금은 비율 척도 (ratio scale)가 아니다. 누구도 10 °C가 1 °C의 10배라고 말할 수 없으며, 과연 1 °C가 -1 °C의 -1배인지를 묻는다면, 온도의 -1배가 무엇인지에 대해서 새롭게 정의 내려야 할 것이다. 누가 봐도 10 kg이 1 kg의 10배이며 (1 kg 분동을 10개 모으면 10 kg이 된다.), 1 s를 10배하면 10 s가 되는 것과 대조적인 것이다.

이것은 간격척도인 섭씨 온도 눈금에서 0 °C가 임의로 정한 영점이기 때문이다. 0 °C를 물의 어는점으로 정하기는 했으나, 이는 완전히 임의적인 지정이며, 사실 어떤 물리현상도 0 °C로 지정할 수 있다. 온도에 있어서 절대적인 0점은 질량이나 시간에 비하면 직관적으로 알아내기가 힘들다. 2 kg이나 1 kg을 관찰하면 0 kg을 쉽게 상상할 수 있으며, 2 s와 1 s에 대해 알고 있다면 0 s가 의미하는 바 역시 쉽게 알 수 있다. 유럽의 겨울 온도가 0 °C보다 더 낮은 온도로 내려가기는 하지만, 이것이 끝도 없이 내려가는지, 어떤 하한이 있는지를 알아내는 것은 쉽지 않았을 것이다.

그런데, 프랑스의 과학자 샤를은 온도가 올라감에 따라서 기체의 부피가 일정한 비율로 증가한다는 것을 알게 되었다 (샤를의 법칙). 반대로 온도가 내려감에 따라 기체의 부피는 일정한 비율로 감소하며, 이 경향은 그림 3과 같이 온도가 0 °C 아래로 내려가도 계속된다. 따라서 이 경향이 계속되었을 때 어떤 온도에서 기체의 부피가 0이 되는 지점이 있을 것이라는 것을 상상할 수 있게 되었다. 음의 부피는 물리적으로 없기 때문에, 기체의 부피가 0이 되는 그 상상의 온도가 (실험실에서 쉽게 도달할 수는 없으나) 가장 낮은 온도라고 추측할 수 있을 것이고, 이 온도가 절대 영도 (0 K)가 되고, 이것이 절대 온도의 영점이다. 물론, 지금 우리는 이상기체에 대해서 잘 알고 있고, 온도가 아주 낮아지면 어떤 기체도 이상기체로 남아있지 못하기 때문에 이것은 엄청나게 단순화한 논리이다.



[그림 3] 샤를의 법칙과 절대영도의 존재

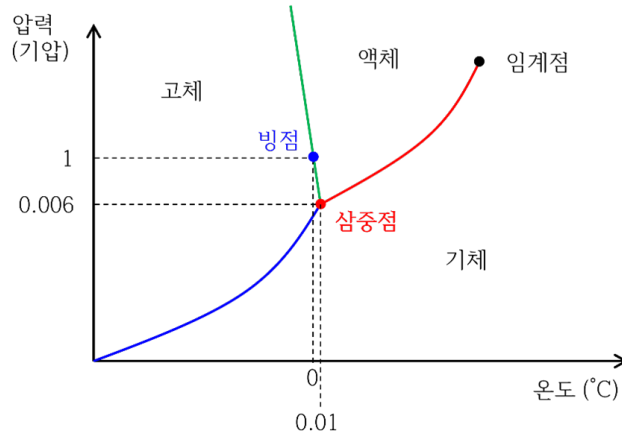
샤를의 법칙이 만들어지고 한 세대쯤 지났을 때 열역학의 발전에 따라서 카르노 엔진의 효율 η 가 다음과 같은 식으로 표현된다는 것을 알게 되었다.

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

여기서 T_H 와 T_C 는 각각 엔진의 열원과 냉각체의 온도이며 절대 온도 단위 (K)로 표현할 때만 의미를 갖는다. (위 식을 어떤 식으로 재가공해도 최소한 하나의 온도는 절대 온도로 표현해야 한다.) 이제 일상생활에서 편리하게 사용해 오던 섭씨온도는 더 이상 과학적으로 사용하기에는 적합하지 않다는 것이 명확해졌다. 즉 간격척도로는 물리, 화학적 현상을 설명하고 예측하기는 부족하며 질량이나 시간처럼 비율척도가 필요하다는 것이다. 절대영도 (0 K)에 대해서 알게 되었으므로, 이제 이전에 질량이나 길이에 대한 단위를 정의했던 것처럼, 하나의 고정점을 이용하면 단위 정의를 할 수 있다. 예를 들어, 정교하게 가공한 금속 분동을 1 kg으로 정의내렸던 것이나 (2019년까지 실제로 킬로그램은 이렇게 정의해서 썼다.) 세슘 원자의 특정한 에너지 준위 변화에서 나오는 빛의 주파수를

얼마로 정하면서 1 s를 정의하는 것처럼, 재현성이 높은 어떤 열역학 상태에 특정한 숫자를 지정하면 과학적인 온도 단위를 만들어낼 수 있다.

오랜 시간동안 이렇게 온도 단위를 정하는데 사용되어 온 것이 물의 삼중점이라는 열역학 상태다. 물의 삼중점은 말 그대로 물이 고체, 액체, 기체로 공존하는 상태로서 그림 4에서 보여주고 있는 압력 대 온도로 표시된 물의 상태도 위에서 빨간색 점으로 표시한 상태이다. 온도 정밀 측정에서 더 흔하게 사용하면서 훨씬 더 만들기 쉬운 빙점은 물의 “이중점”으로서 1기압에서 물과 얼음이 공존하는 상태이다. (그림 4의 파란색 점) 빙점은 삼중점보다 0.01 °C 낮는데, 이는 물이 드물게 압력이 높아질수록 어는점이 낮아지는 물질이기 때문이다. (같은 성질을 갖는 물질로 잘 알려진 것에는 갈륨이 있다.)



[그림 4] 물의 상태도

물의 삼중점을 실현하기 위해서는 우선 용기에 물 (H₂O) 분자 이외에는 아무것도 들어가지 않게 하고 지속적으로 펌핑을 해서 내부에 기체가 없도록 만든 상태로 밀봉한다. 이렇게 하면 용기의 빈 공간이 순간적으로 물의 증기압 만큼의 수증기 (기체 H₂O)로 채워진다. 그림 4의 물의 상태도에서 빨간선 위의 어느 한 점에 놓이게 된다. 온도가 올라가면 내부 압력과 온도가 동시에 올라가고, 온도가 내려가면 내부 압력과 온도가 동시에 낮아지면서 상태도 위의 빨간선을 오르락 내리락 한다. 이 상태에서 셀의 온도를 충분히 낮추면 빨간색 점에 해당하는 상태가 된다. 이 열역학 상태에서 온도는 대단히 안정하고 잘 정의되어 있으므로 오랜 기간동안 (2019년 5월까지) 켈빈을 정의하는 한 점 273.16 K으로 사용되었다.

이렇게 물의 삼중점을 이용해서 한 점을 정의하더라도 다른 온도를 정의하고 측정하는데 여전히 두가지 근원적인 어려움이 남는다. 첫번째 근원적인 문제는 273.16 K이 아닌 다른 온도를 어떻게 정의할 것이냐는 것이다. 만약 1 kg의 원기를 정했다면 어렵지 않게 0.5 kg이나 2 kg을 만들어낼 수 있을 것이다. 1 s를 정했다면 0.5 s나 2 s를 정의하는 것은 어렵지 않을 것이다. 그러나 특정한 열역학 상태를 이용해서 273.16 K을 정의했다고 해서 136.58 K이나 546.32 K을 정의하는 것은 단순하지 않다. 이것은 300 K의 물이 담긴 두 비커의 물을 합했다고 해서 600 K이 되지 않기 때문이라고 단순하게 말할 수 있다. (이 점에서 온도는 질량, 시간, 길이와 다르며, 일반물리학 교과서에서는 intensive quantity와 extensive quantity라는 개념으로 두 종류의 양을 구분한다.)

이런 온도의 특성 때문에 필요한 것이 열역학 방정식이다. 하나의 고정점 (273.16 K)을 이용해서 이보다 더 낮은 온도나 더 높은 온도를 만들어내기 위해서는 잘 정의된 규칙이 필요하다. 그 규칙을 열역학 방정식이 제공해 주는 것이다. (마치 앞의 “수은 부피 팽창 온도계”에서 길이를 측정하는 자가 규칙을 제공했던 것처럼.) 우리가 가장 잘 알고 있는 열역학 방정식은 보일의 법칙과 샤를의 법칙이 결합된 이상기체의 상태방정식이다.

$$PV = nRT$$

위의 열역학 방정식을 구현한 온도계를 정적기체온도계 (Constant volume gas thermometer)라고 한다. 이 온도계를 실제로 구현하여 $T_0 = 273.16$ K에서 다음과 같은 실험을 했다고 하자.

$$P_0V = nRT_0$$

이상적인 조건에서 V 가 일정하고 (정적), 닫힌 계에서 기체의 몰수 (n)가 변하지 않고, R 은 상수 (보편기체상수) 이므로 P 와 T 가 비례한다. 즉, 온도를 T_0 에서 시작해서 내리면 P 도 같이 내려가는데, $P = P_0/2$ 인 열역학 상태를 만들면 그 때의 이상기체의 온도는 $T_0/2$ 라고 할 수 있다. 정해진 T_0 와 위와 같이 열역학 방정식을 구현한 온도계를 이용하여 임의의 온도를 정의하고 구현할 수 있다. 이런 방법으로 눈금을 구현하면 온도 눈금이 압력 측정에 소급한다고 할 수 있다.

물론 이것 역시 지나치게 단순화된 설명이다. 우선 어떤 기체도 정확하게 이상기체가 아니므로 $PV = nRT$ 를 그대로 적용할 수 없다. 따라서 유한한 기체 분자끼리의 상호작용에서 생기는 비리얼 계수 (virial coefficients)를 이용하여 보정해야 한다. 또 이상적으로 V 가 상수라고 가정했지만 온도가 바뀌면 용기의 부피가 팽창하여 V 가 바뀌고, 내부 기체의 압력이 바뀌면 역시 V 가 바뀌므로 보정을 해서 써야한다. 실험 재료에 대한 여러가지 제한 때문에 이 온도계를 전체 온도 범위에서 사용할 수 없는 것도 명확하다. 내부 기체로 헬륨을 사용하더라도 헬륨이 액화하기 시작하는 온도에서는 사용할 수 없을 것이며 (물론, 그 전에 이상기체에서 벗어나는 정도가 너무 커서 보정을 하더라도 사용할 수 없는 지점이 올 것이다.) 너무 높은 온도에서는 기체 용기를 구성하는 재료의 물성 변화나 재료에서 끊임없이 뿜어져 나오는 불순물 때문에 사용할 수 없을 것이다.

두번째 근원적인 문제는 이렇게 구현해 낸 온도를 서로 다른 시스템끼리, 혹은 “바깥 세상”으로 어떻게 가지고 갈 것인가 하는 것이다. 물의 삼중점에서 구현한 273.16 K을 이용하여 어떻게 정적 기체온도계가 정확하게 273.16 K가 되도록 맞출 것인가? 정적 기체온도계로 $P = P_0/2$ 인 상태에서부터 $T=136.58$ K를 만들어냈다고 했을 때 이를 실제 다른 온도를 측정하는데 어떻게 이용할 수 있는가? 정적 온도계를 갖고 다니면서 기온을 측정하기는 매우 어렵고 비현실적이라는 것이 확실하다. 다음 글에서는 이렇게 단위나 눈금에 의해서 정의된 온도를 바깥 세상으로 가져오는데 사용되는 온도계들과, 더 근원적으로 단위와 눈금이 현재는 어떻게 정의되고 있는지를 살펴보도록 하겠다.