

기본단위 이야기

사람은 사회적 동물이다. 인류가 다른 종들을 압도하고 지구를 지배하게 된 것은 집단의 힘과 지성을 활용할 수 있었기 때문이다. 집단이 커질수록 구성원 간의 소통은 중요한 문제가 된다. 소통은 의사 전달만을 의미하지 않기 때문이다. 물질이나 노동의 거래에는 그 양을 재는 것이 필요하고 많은 사람이 분쟁 없이 거래하려면 시간, 길이, 무게 같은 것에 대한 공통된 기준이 있어야 한다. 그래서 모든 문명사회에서는 '단위'라고 부르는 이런 기준들이 정해지게 되었다. 문제는 무엇을 기준으로 삼는가이다.

정밀한 시간 단위 수립을 위한 과학자들의 노력

시간 단위 이야기부터 해보자. 다행히 시간은 모든 사람들이 수긍하는 기준이 있다. 지구의 자전으로 모든 곳에서 일정하게 낮과 밤이 반복되기에 '일'이라는 단위는 자연스럽게 정해진다. 1일이 긴 시간이다 보니 이후 더 작은 시간 단위를 만들게 되었는데, 이 작은 단위들은 지역과 시대에 따라 달랐다. 현재 쓰이는 작은 시간 단위에는 오랜 전통인 60진법이 여전히 남아 있다. 1시간을 60 등분 한 시간을 '1분', 1분을 60 등분 한 시간을 '1초'로 정했다. 즉, 1일을 86,400 등분 한 시간이 1초인 것이다.

자연스럽게 정해진 시간 단위에 불만을 제기한 사람들이 과학자들이다. 이들은 자연을 세세하게 들여다보고 그것을 바탕으로 이론을 만들고 실험을 통해서 확인하는 사람들이다. 측정기술이 발달하면서 과학자들이 소통하는 데는 거래에 필요한 것보다 훨씬 더 높은 정밀도가 필요하게 되었고, 정밀한 시계들이 등장하면서 시간 단위를 정하는 데 썼던 1일이 일정하지 않다는 것이 알려졌다.

달과 주변 행성들의 영향으로 지구의 자전주기는 하루하루가 조금씩 달랐던 것이다. 그래서 1일을 반복 측정할 끝에 그 평균값인 '1평균태양일'로 시간 기준을 삼았다.

하지만 여전히 문제가 남아 있었다. 이어진 정밀측정에 의하면 1평균태양일도 달의 기조력에 의해 조금씩 길어지고 있었다. 시간의 기준이 시간에 따라 변하는 것을 용납할 수 없는 과학자들은 변하지 않는 기준을 원했다. 결국 (당시에) 시간을 가장 정밀하게 측정할 수 있는 세슘-133 원자의 바닥 상태의 초미세 전이에서 나오는 전자기파의 진동주기의 9,192,631,770배를 1초로 정했다. 기존의 1초와 맞추기 위해서 복잡한 숫자가 등장했고, 숫자의 자릿수는 측정의 정밀도를 나타낸다.

측정정밀도는 독립적인 여러 실험 통해 확립되어야

반면 길이 단위에는 누구나 수긍하는 기준이 없었다. 사람들은 손, 발, 팔의 길이나 걸음폭 등 쉽게 활용할 수 있는 신체와 관련된 길이 단위를 많이 썼다. 어림잡기 쉽다는 장점이 있지만, 사람마다 제각각이니 기준이 모호했다. 필요에 따라 표준 자를 만들었지만, 기준 자체가 모호하니 보편성이 없었다.

보편적인 길이 단위는 1799년에 프랑스의 '미터제'에서 시작됐다. 지구의 둘레를 기준으로 삼아 파리를 지나는 자오선의 북극에서 적도까지의 거리를 천만 미터가 되도록 '1m'를 정했다. 시간의 기준이 지구의 자전이니 길이의 기준을 지구의 둘레로 삼은 것은 그럴듯하다. 그렇지만 실제로 길이를 잴 때마다 지구와 비교할 수는 없으니, 실용성을 위해 바르셀로나에서 파리 사이의



글_김형배 | 한양대학교 물리학과 교수 hbkim@hanyang.ac.kr

서울대학교 물리학과 졸업 후 동대학원에서 입자물리학 이론으로 박사학위를 받았다. 입자물리학 현상론, 우주론, 암흑 물질, 우주선 등의 주제로 다수의 논문을 발표했으며, 입자천체물리학과 우주론에 대한 연구를 하고 있다.

1,000km를 실측하여 1m에 해당하는 표준 자를 만들었는데, 이를 ‘미터원기’라 한다. 이후 1875년의 미터협약에서 지구의 둘레를 대신해서 미터원기 자체가 길이의 기준으로 채택되었다.

길이측정의 정밀도가 올라가면서 역시 과학자들은 미터원기에 대해서 불만을 제기했다. 미터원기는 온도에 따라 길이에 변동이 있어서 정해진 온도에서만 사용해야 하고, 이것이 정확성을 떨어뜨린다. 또한, 인공물인 미터원기가 손상되거나 분실되면 기준이 사라지는 위험성이 있다. 그래서 1960년대(당시에) 가장 정밀하게 길이를 측정할 수 있었던 빛의 파장을 기준으로 삼아, 크립톤-86 원자에서 방출되는 주황빛의 파장의 1,650,763.73배로 1m를 다시 정의했다. 이렇게 기본단위의 정의는 현재의 기술로 가장 정밀하게 측정할 수 있는 양과 그 방법에 바탕을 두게 되고, 측정정밀도는 독립적인 여러 실험을 통해 확립되어야 한다.

무게·질량 단위는 플랑크 상수 고정하여 구현

무게나 질량의 단위로는 가장 중요한 거래상품인 곡식 씨앗들의 무게를 기준으로 만든 단위들이 많이 쓰였는데, 역시 보편성이 없었다. 보편적인 질량단위도 미터계에서 시작됐는데, 길이 단위인 1m와 사람에게 가장 중요한 물 질인 물을 기준으로 삼았다. 물은 온도에 따라 부피가 변하므로, 처음에는 어는점인 0℃에서 물 1리터(ℓ)(10⁻³m³)를 ‘그라브(grave)’로 정했다가, 밀도가 최대가 되는 4℃에서 물 1cc(cm³)를 ‘그램(g)’으로 다시 정했다. 실용성을 고려한 백금-이리듐 합금으로 지름과 높이가 모두 39mm인 원기둥으로 1kg이 되는 ‘킬로그램원기’가 제작되었다.

시간 단위인 초와 길이 단위인 m의 정의가 몇 차례 바뀔 때도 질량 단위인 kg의 정의는 계속 유지되어 왔는데, 그렇다고 문제가 없는 것은 아니었다. 킬로그램원기도 인공물이라 손상이나 분실의 위험이 있다. 더 심각한 문제는 킬로그램원기의 질량이 산화에 의해 조금씩 증가하고 있다는 것이었다. 킬로그램원기는 많은 수의 복제품이 만들어져 국제도량형국과 각국에 보관되고 있는데, 이들 사이에도 대략 100년 사이에 50μg 정도의 질량 차이가 생겼음을 알게 되면서, 인공물에 의존하지 않

는 kg의 정의가 필요하게 되었다. 이에 길이 단위인 m와 마찬가지로 기본상수를 이용하여 kg을 정의하자는 제안이 있었고, 양자역학의 기본상수인 플랑크 상수를 통해서 구현할 수 있다. 이에 등장한 것이 키블 저울과 실리콘 구 실험으로, 인공물의 질량으로부터(조금 복잡한 과정을 거쳐) 플랑크 상수를 구할 수 있는데, 측정정밀도가 필요한 수준에 도달하면서 플랑크 상수를 고정해놓고 1kg을 구현할 수 있게 되었다.

2019년부터 새롭게 발효되는 국제단위계

새롭게 kg을 정의할 준비가 완료되면서, 2018년에 개최된 국제도량형총회에서는 국제단위계의 기본단위인 거리 단위 m, 질량단위 kg, 전류 단위 A, 온도 단위 K, 개수 단위 mol, 조도 단위 cd를 모두 구체적인 구현방식을 배제하고 기본상수를 이용해서 정의하는 방식으로 바꾸었다. 2019년 5월 20일부터 발효되는 국제단위계는 기본상수들이 다음의 값을 갖도록 기본단위가 정의된다.

1. 세슘-133 원자의 바닥 상태 초미세전이 진동수
 $\Delta\nu_{cs}=9192631770\text{Hz}$
2. 진공에서 빛의 속력 $c=299792458\text{m/s}$
3. 플랑크 상수 $h=6.62607015 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$
4. 기본전하 $e=1.602176634 \times 10^{-19}\text{C}$
5. 볼츠만 상수 $k=1.380649 \times 10^{-23}\text{J/K}$
6. 아보가드로 수 $N_A=6.02214076 \times 10^{23}\text{mol}^{-1}$
7. 진동수가 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 인 단색광의 시감효능
 $K_{cd} = 683\text{lm/W}$

기본상수를 바탕으로 한 단위의 정의는 기본단위를 다양하게 구현할 수 있는 길을 열어주기에 측정과학에 있어서 획기적인 사건이다. 앞으로는 ‘1A는 진공에서 1m 떨어진 무한하고 평행한 두 도선 사이에 작용하는 자기력이 도선 1m당 이 되는 전류의 크기’, ‘K은 물의 삼중점이 273.16K 되도록 등분한 온도 단위’, ‘1mol은 탄소-12 12g에 들어있는 탄소 원자의 수’, 이런 복잡한 정의들을 외우는 대신 앞으로는 바뀌지 않을(?) 기본상수들에 있는 아름다운 숫자들을 외워보도록 하자. (S)