

과학자 집단이 서로 다른 원자량을 사용하는 문제를 발생시켰습니다.

이를 해소하기 위해 1950년대 말부터 새로운 원자량 기준에 대한 논의가 시작됐습니다. 그 결과로 현재의 원자량 기준인 탄소-12( $^{12}\text{C}$ )를 1961년부터 사용하기 시작했습니다. 단일 동위원소 즉, 산소-16( $^{16}\text{O}$ )을 원자량 기준으로 사용하던 물리학자들은 역시나 단일 동위원소인 탄소-12( $^{12}\text{C}$ )를 사용하는 것에 큰 불만이 없었습니다. 또 화학자들도 산소-16( $^{16}\text{O}$ )과 달리 탄소-12( $^{12}\text{C}$ )를 사용해 계산한 원자량이 기존에 본인들이 사용했던 원자량과 매우 작은 오차를 보였기 때문에 불만 없이 받아들일 수 있었습니다.



원소의 동위원소는  
어떻게 측정하나요?

# 15



차상원 교수가 답하다

1808년 존 돌턴(John Dalton)은 그가 주장한 원자설에서 동일한 원소의 원자는 질량이나 성질이 같다고 했고, 이 생각은 19세기 말까지 바뀌지 않았습니다. 하지만 20세기 들어 원자번호는 같으나 질량이 다른 동위원소(isotopes)가 발견됨에 따라 이런 생각에 대전환이 일어나게 됩니다.

동위원소의 발견은 전자, 원자핵 및 양성자의 발견과 더불어 원자 구조에 대한 지식을 비약적으로 발전시켰습니다. 이후 중성자의 발견에도 초석이 됐고요. 이를 방증하듯 방사성 물질과 동위원소의 기원을 연구한 영국 화학자 프레더릭 소디(Frederick Soddy)와, 질량분석기를 이용해 비방사성 동위원소를 발견하고 정수법칙을 발표한 영국 화학자 프랜시스 애스턴(Francis W. Aston)은 각각 1921년과 1922년에 노벨화학상을 수상했습니다.

동위원소란 원자번호는 같으나 질량수가 다른 핵종(nuclide)들입니다. 여기서 핵종은 원자핵을 이루는 양성자수, 중성자수 및 그 에너지 상태로

구분되는 원자 또는 원자핵의 종류를 의미합니다. 원자번호는 양성자수와 같고, 질량수는 양성자수와 중성자수의 합과 같기 때문에 동위원소들은 양성자수는 같지만 중성자수가 다릅니다. 예를 들어, 원자번호가 6번인 탄소(C)에는 질량수가 각각 12와 13인 두 개의 안정한 동위원소가 존재합니다. 이때 탄소-12( $^{12}\text{C}$ ) 원자핵에는 양성자 6개와 중성자 6개가 있는 반면, 탄소-13( $^{13}\text{C}$ ) 원자핵에는 양성자 6개와 중성자 7개가 있습니다. 동위원소의 개수나 그들의 존재비율은 원소별로 제각각입니다.

모든 원소가 여러 개의 동위원소를 갖고 있는 것은 아닙니다. 대표적인 예로 원자번호 9번 플루오린( $^{19}\text{F}$ ), 25번 망가니즈( $^{55}\text{Mn}$ ), 27번 코발트( $^{59}\text{Co}$ ) 등은 한 가지 질량수를 가진 원자만이 안정한 동위원소로 존재합니다. 이 원소들은 평균 원자량을 계산할 필요 없이 단일 동위원소의 질량이 곧 원자량이 됩니다.

그리고 여러 개의 동위원소를 갖는 원소의 경우에는 대체로 한 동위원소의 존재비율이 나머지 동위원소의 존재비율에 비해 월등히 높습니다. 물론 원자번호 47번인 은( $^{107}\text{Ag}$ 와  $^{109}\text{Ag}$ )처럼 조금 특이한 원소들은 질량수가 2만큼 차이나는 동위원소가 자연계에 거의 1대 1로 존재합니다.

동위원소의 존재와 그 존재비율을 측정하기 위해서는 질량분석법(mass spectrometry)이란 기술을 사용합니다. 현재의 질량분석법은 1919년 애스턴이 네온(Ne)의 동위원소를 발견했을 당시 사용했던 방법과 크게 다르지 않습니다. 일반적인 질량분석법의 과정은 다음과 같습니다. 우선 전기적으로 중성인 원자 또는 분자를 이온화해 전하를 띠도록 만들고, 생성된 이온을 다양한 형태의 전기장과 자기장에서 운동하도록 하고 이를 관찰합니다. 그리고 이온의 비행시간, 진동수, 회전반경 등과 같은 관찰값을 바탕으로 이온의 질량 대 전하비(mass-to-charge ratio,  $m/z$ )를 구합니다. 이러

한 과정을 성공적으로 진행하기 위해서는 무엇보다도 이온이 운동하는 관의 진공상태를 잘 유지해야 합니다. 그 이유는 이온들이 기체분자와 충돌하지 않고 오직 전기장 또는 자기장에 의해서만 운동을 해야 정확한 이온의 거동을 관찰할 수 있기 때문입니다.

에스턴이 전자를 발견한 조지프 톰슨(Joseph John Thomson)의 실험실에 1909년 들어가 가장 먼저 한 일은 바로 톰슨이 개발한 최초의 질량분석기 장치의 진공을 향상시켜 의미있는 이온 신호를 얻어낸 것이었습니다. 이후 에스턴은 진공뿐만 아니라 전기장과 자기장의 배치를 향상시켜 분리능이 높은 이온 신호를 얻을 수 있었습니다. 이를 이용해 1919년부터 네온(Ne)을 포함해 많은 원소들의 동위원소들을 발견하게 됩니다.

앞서 설명했듯 질량분석기는  $m/z$  별로 측정되는 이온의 신호를 기록합니다. 동위원소들의 이온은 화학적 성질이 동일해 같은 전하수를 갖지만 질량은 서로 다르기 때문에 동위원소의 이온들은 서로 다른  $m/z$ 에서 측정됩니다. 그리고 각  $m/z$ 에서 나타나는 신호세기의 비율이 바로 동위원소 자연계 존재비율을 반영합니다. 예를 들어, 염소기체( $Cl_2$ )를 이온화해 질량분석기로 측정하면 분자이온인  $Cl_2^+$ 와 함께 원자 이온인  $Cl^+$ 도 측정됩니다. 염소는 질량수 35와 37인 두 개의 동위원소( $^{35}Cl$ 와  $^{37}Cl$ )가 존재하며 그들의 자연계 존재비율은 약 3:1입니다. 따라서,  $Cl^+$  이온은  $m/z$  35와  $m/z$  37에서 신호세기 비율이 약 3:1로 측정됩니다.

### ‘화학적 지문’으로 주목받는 동위원소비

질량분석기의 기기적 성능이 향상되면서 과학자들은 새로운 사실, 어쩌면 불편한 진실을 마주하게 됐습니다. 바로 동위원소의 존재비율이 측정

### 텅스텐(W)

금속 원소 가운데 녹는점이 가장 높은 원소. 고온에서 강도와 안정성이 뛰어나 드릴 등 공구나 무기의 재료로 쓰인다. 탄소와 섞은 합금물은 경도가 매우 높다. 천연 상태의 텅스텐은 4가지 동위원소를 가지고 있다. 텅스텐 동위원소들의 존재비율을 측정해 지구형 행성의 연대를 측정할 수 있다.



하는 시료마다 조금씩 다르다는 것입니다. 이는 자연계 동위원소의 존재 비율을 고려해 평균 원자량을 결정하는 방식에 혼란을 초래했습니다. 이를 해소하기 위한 방안으로 현재는 몇몇 원소에 대해 원자량을 단일 값이 아닌 구간으로 제시하고 있습니다. 국제순수·응용화학연합(IUPAC)에서 제시한 주기율표를 보면, 수소(H), 탄소(C), 질소(N), 산소(O) 등을 포함한 총 13개 원소의 원자량이 구간으로 표시돼 있습니다.

예를 들어, 원자번호 12번인 마그네슘(Mg)의 원자량은 [24.304, 24.307]이라는 구간으로 표시하고 있습니다. 이는 시료에 따라 마그네슘의 원자량이 24.304와 24.307 사이의 어느 값으로든 측정될 수 있음을 의미합니다. 하지만 통상 무역 등 여러 산업 분야에서는 여전히 단일 원자량 값을 필요로 합니다. 이런 요구에 부응해 IUPAC은 원자량 구간과 함께 관습적으로 사용됐던 단일한 원자량 값도 함께 제시하고 있습니다. 마그네슘의 경우 관습적으로 사용하던 단일 원자량 24.305가 주기율표에 함께 제시돼 있습니다.

한편, 물질마다 다른 동위원소비 정보는 여러 분야에서 유용하게 활용되기도 합니다. 예를 들어 꿀을 생산하는 식물군의 탄소 동위원소비와 설탕의 원료인 사탕수수의 탄소 동위원소비가 다르기 때문에, 동위원소 존재비율을 정밀하게 측정할 수 있는 동위원소비 질량분석법(IRMS)을 통해 천연벌꿀인지 사양벌꿀인지 판별할 수 있습니다. 뿐만 아니라 운동선수에게서 검출한 스테로이드가 체내에서 생성된 것인지 외부 약물로 유입된 것인지도 동위원소비로 판단할 수 있습니다. 이 외에도 고대 인류의 식습관 연구, 유출된 기름의 오염원 추적, 법과학 수사 등 다양한 분야에서 동위원소비가 ‘화학적 지문’으로 요긴하게 쓰이고 있습니다.



원소의 질량을  
어떻게 그렇게 정확히  
재나요?

16