

### 원자의 정의

화학원소로 규정지을 수 있는 가장 작은 입자. 원자는 Z개의 양성자를 가져 양 전하를 띠고 있는 원자핵(전체 질량의 99.9% 이상을 차지함)과 원자의 크기를 결정하는 Z개의 전자들로 구성돼 있음.

위 IUPAC의 정의에서 핵심은 원자가 화학원소로 규정지을 수 있는 가장 작은 입자라는 점입니다. 이미 원자가 가장 작은 입자가 아니라는 것은 잘 알려져 있습니다. 원자는 양성자, 중성자, 전자와 같은 더 작은 입자로 구성되고, 양성자와 중성자는 그보다 더 작은 쿼크 입자로 이뤄져 있습니다.

하지만 화학원소로서 규정할 수 있는 가장 작은 입자는 바로 원자입니다. 이와 같이 원자는 원소라는 집합 개념에 속하는 구체적인 일원이라고 생각할 수 있습니다. 즉, 어떤 원자는 원자 그 자체로 존재할 수도 있고, 홑원소 물질 안에 존재할 수도 있으며, 화합물의 구성 입자로 존재할 수도 있습니다. 이렇게 다양하게 존재하는 원자를 모두 포괄하는 개념이 바로 원소입니다.



코발트, 니켈의 원자량은 왜 주기율표 순서와 맞지 않나요?

14

A



차상원 교수가 답하다

현재의 주기율표는 원소를 원자번호 순서대로 나열하고 있습니다. 원자번호가 클수록 원자핵 안의 양성자 수가 증가하기 때문에, 원자량(atomic weight)도 원자번호가 커짐에 따라 대체로 증가하는 추세를 갖고 있습니다.

하지만 주기율표를 좀 더 자세히 살펴보면, 원자번호와 원자량 순서가 역전된 원소 쌍들을 찾을 수 있습니다. 대표적인 예로 질문에서 언급된 원자번호 27번 코발트( $_{27}\text{Co}$ )의 원자량은 58.933194인데, 28번 니켈( $_{28}\text{Ni}$ )의 원자량은 이보다 작은 58.6934입니다.

멘델레예프가 원자량 순서대로 나열하는 본인의 원칙을 깨면서까지 화학적 성질에 맞춰 순서를 바꿨던 52번 텔루륨( $_{52}\text{Te}$ , 원자량 127.60)과 53번 아이오딘( $_{53}\text{I}$ , 원자량 126.90)도 원자번호 순서와 원자량 순서가 맞지 않습니다. 그 이유가 무엇일까요?

### 원자의 ‘평균’ 질량을 비교해야

질문의 답을 찾기 위해서는 먼저 현재 원소의 원자량을 어떻게 정의하고 계산하는지에 대해 이해해야 합니다. 원소의 원자량은 역사적으로 특정 원소의 질량을 기준삼아 상대 질량을 표시해 왔습니다. 오늘날 사용하는 원자량 또는 상대 원자 질량(relative atomic mass)의 기준은 바닥상태로 존재하는 탄소-12( $^{12}\text{C}$ ) 원자의 질량입니다. 좀 더 정확히 말하면 탄소-12 원자 질량의 12분의 1에 해당하는 질량을 원자 질량 단위(unified atomic mass unit·u 또는 Da)로 정의하고, 원소의 평균 원자 질량과 이 원자 질량 단위의 비율을 원자량으로 정하고 있습니다.

여기서 핵심은 바로 ‘평균’ 원자 질량을 사용한다는 점입니다. 달리 표현하면 한 원소에 속하는 원자들은 서로 다른 질량을 가질 수도 있다는 뜻입니다. 이렇게 원자번호는 같으나 질량이 다른 원자들을 한 원소의 동위원소(isotopes)라고 합니다. 동위원소들은 자연계에 존재하는 비율이 다르기 때문에 원소의 평균 원자량을 구할 때 동위원소들의 존재 비율을 고려해서 계산해야 합니다.

예를 들어, 원자번호 17번인 염소(Cl)는 질량수 35와 37인 두 개의 동위원소가 존재합니다.  $^{35}\text{Cl}$ 은 전체 염소의 약 75.77%를 차지하고 있으며,  $^{37}\text{Cl}$ 은 나머지 24.23%를 차지합니다.  $^{35}\text{Cl}$ 와  $^{37}\text{Cl}$ 의 질량은 원자 질량 단위(u)로 각각 34.9688527과 36.9659026이므로 염소의 평균 원자량은 다음과 같이 계산합니다.

$$\text{Cl의 평균 원자량} = (34.968\ 8527 \times 0.7577) + (36.965\ 9026 \times 0.2423) = \mathbf{35.45}$$



**니켈(Ni)**  
 단단하고 광택이 나는 은백색 금속 원소. 전이금속 중 하나로 팔라듐(Pd), 백금(Pt)과 같은 10족에 속한다. 연성과 전성이 있어 가공이 쉽다. 스테인리스강, 니켈실버, 쿠프로니켈 등 고성능 합금을 만드는 데 주로 쓰인다. 천연 상태의 니켈은 5가지 동위원소를 가진다.



원자량을 어떻게 정하게 되는지 알게 됐으니, 이제 다시 질문으로 돌아가 니켈과 코발트를 살펴보겠습니다. 자연계에 존재하는 안정한 코발트(Co)는 오직 한 종류로, 질량수 59를 갖고 있습니다. 즉, 원자번호 27번인 코발트의 원자량은  $^{59}\text{Co}$ 의 질량인 58.933194 u만으로 결정됩니다.

다양한 코발트의 동위원소가 핵 반응기에서 합성됐으며, 대표적인 코발트 방사성 동위원소인  $^{60}\text{Co}$ 는 식품 보존처리, 방사선 치료 등 다양한 산업 현장에서 사용됩니다. 하지만 합성된 방사성 동위원소들은 원자량 계산에 포함되지 않습니다. 코발트와 달리 원자번호 28번인 니켈(Ni)은 무려 5 종류의 안정한 동위원소들이 다음과 같이 자연계에 존재합니다.

동위원소	상대 원자 질량 (u)	존재비율 (%)
$^{58}\text{Ni}$	57.935342	68.0769
$^{60}\text{Ni}$	59.930785	26.2231
$^{61}\text{Ni}$	60.931055	1.1399
$^{62}\text{Ni}$	61.928345	3.6345
$^{64}\text{Ni}$	63.927966	0.9256

위의 표에서 보듯이 니켈은 코발트보다 무거운 동위원소를 4개나 갖고 있지만, 이들은 전체 니켈의 약 32%밖에 되지 않습니다. 반면 코발트보다 가벼운, 질량수 58인 니켈은 전체 니켈의 약 68%를 차지하고 있습니다. 따라서 안정한 동위원소들의 존재비율을 고려해 구한 니켈의 평균 원자량이 원자번호가 작은 코발트의 원자량보다 더 작게 계산되는 것입니다. 코발트는 왜 안정한 동위원소가 1개뿐이고 니켈은 5개나 될까요? 원자핵의 안정성에 대한 경향성은 알려져 있지만 명확한 이유는 아직 밝혀지지 않았습니다.

## 왜 하필 탄소가 원자량 기준이 됐을까?

오늘날 과학자들이 탄소-12 원자를 원자량의 기준으로 삼게 된 데에는 역사가 있습니다. 어떤 한 원소를 기준으로 삼아 원자량을 정하는 것은 1800년대 초반에 존 돌턴(John Dalton)이 원자설을 발표하면서부터 시작됐습니다. 돌턴은 당시 알려진 20개의 원소에 기호를 부여하고, 가장 가벼운 원소인 수소(H)의 상대 원자량을 1로 정해 다른 원소들의 원자량을 계산했습니다. 그가 제시했던 표를 보면 현재 알려진 원소들의 원자량과는 사뭇 다릅니다. 예를 들어 산소(O)의 원자량을 7, 지금의 질소에 해당하는 아조트(azote)의 원자량을 5라고 제시했습니다. 실제 산소 원자량(15.999), 질소 원자량(14.007)과 2배가량 차이가 납니다.

이런 차이는 당시 돌턴이 원소들이 합쳐질 때 가장 간단한 비율로 합쳐진다고 생각하고 원자량을 구했기 때문에 발생했습니다. 예를 들어 지금은 누구나 물의 화학식이  $H_2O$ 라는 것을 알고 있지만, 화학식에 대한 개념이 없던 돌턴은 증기 또는 물이 수소와 산소가 가장 간단한 비율로 합쳐진  $HO$ 일 것이라 생각했습니다. 같은 시대에 화학식과 분자 개념의 근간이 된 조지프 게이뤼삭(Joseph Louis Gay-Lussac)의 ‘기체 반응 법칙’과 아메데오 아보가드로(Amedeo Avogadro)의 ‘분자 가설’이 발표됐습니다. 하지만 돌턴은 기체 반응 법칙을 자신의 원자설을 수정하지 않는 방식으로 설명하려고 했고, 아보가드로의 분자 가설은 인정하지 않았습니다.

이후 원자량 측정은 옌스 야코브 베르셀리우스(Jöns Jacob Berzelius)에 의해 커다란 진전을 이루게 됩니다. 베르셀리우스는 수소 대신에 금속들과 훨씬 반응을 잘하는 산소를 기준으로 삼았고, 다른 원소들의 상대 원자량을 측정했습니다. 베르셀리우스는 1810년부터 다양한 원소의 원자량을

측정하기 시작해 1828년 54개에 이르는 원소의 원자량을 발표했습니다. 베르셀리우스가 발표한 원자량은 현재 알려진 값에 놀랍도록 가까웠습니다. 그리고 베르셀리우스의 원자량 측정을 시작으로 1800년대 중반 여러 과학자들이 원자량 측정의 정밀도를 향상시킨 결과 원자량이 더 이상 딱 떨어지는 정수가 아니라는 사실을 알게 됐습니다.

베르셀리우스가 산소를 원자량의 기준으로 삼긴 했지만, 19세기에는 여전히 원자량의 기준으로 수소를 사용하는 것이 지배적이었습니다. 하지만 19세기 말이 되자 과학자들 사이에서 원자량의 기준 원소를 수소(H=1)로 할 것인지, 아니면 산소(O=16)로 할 것인지에 대한 논쟁이 일기 시작했습니다.

수소를 지지하는 측은 수소가 가장 가벼운 원소이자 다른 원소의 빌딩 블록이기 때문에 기준이 되어 하며, 수소를 기준으로 삼는 것이 교육적으로 직관적이며 돌턴의 원자설을 계승하는 것이라 주장했습니다.

반면 산소를 지지하는 측은 수소는 단지 형식적인 기준이 될 수밖에 없으며, 실험적으로는 산소가 다른 원소들과 더 많은 조합을 이룰 수 있는 원소이기 때문에 원자량의 기준이 되어 한다고 주장했습니다. 1900년대 초반까지 이에 대한 다양한 논쟁과 투표가 진행됐고, 1905년부터 비로소 산소가 원자량의 기준으로 받아들여졌습니다.

하지만 1929년 윌리엄 지오크(William F. Giaque) 교수와 그의 제자 헤릭 존스톤(Herrick L. Johnston)이 산소-16( $^{16}O$ ) 외에 산소-17( $^{17}O$ )과 산소-18( $^{18}O$ )이라는 동위원소의 존재를 발견하면서 원자량 기준에 대한 논의는 새로운 국면을 맞게 됩니다. 물리학자들은 단일 동위원소인 산소-16( $^{16}O$ )을 원자량의 기준으로 써야한다고 주장했고, 화학자들은 산소의 평균 원자 질량( $O=16$ )을 원자량의 기준으로 사용할 것을 주장했습니다. 이런 대립은 두

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