Q
A
진짜 궁금했던
원소 질문
30

※ **편집자 주**

국제단위계(SI) 표기 규정에 따르면 여러 자리 숫자를 표시할 때는 소수점을 중심으로 세 자리씩 묶어서 사이를 띄어 씁니다. 이 책에 등장하는 수식에는 SI 표기 규정을 적용했으며, 본문에 등장하는 숫자에는 가독성을 위해 SI 표기 규정을 적용하지 않았음을 알려드립니다.

청소년이 묻고

Q

화학자가 답한다

A

진짜 궁금했던 원소 질문 30

지은이 장홍제, 차상원
공동기획 대한화학회, 한국화학연구원

과학동아

Contents

01 원소의 이름은 어떻게 정하나요? 006
02 연금술이 화학의 발전에 어떤 영향을 줬나요? 013
03 우리 몸에 가장 많은 원소는 무엇인가요? 019
04 생명현상에 필요한 물질은 왜 탄소로 이뤄졌나요? 025
05 외계생명체를 찾으려면 어떤 원소에 주목해야 할까요? 031

06 수은은 왜 우리 몸에 위험한가요? 037
07 리튬처럼 약으로 쓰이는 원소가 있나요? 043
08 빅뱅 후 원소는 어떻게 생겨났나요? 049
09 철보다 무거운 원소는 어떻게 나왔나요? 055
10 원소는 앞으로 몇 개까지 나올 수 있나요? 061

11 아스타틴은 실제로 만들어진 적이 있나요? 069
12 미지의 원소가 새로운 원소인지 어떻게 알 수 있나요? 075
13 원소와 원자는 어떻게 다른가요? 081
14 코발트, 니켈의 원자량은 왜 주기율표 순서와 맞지 않나요? 089
15 원소의 동위원소는 어떻게 측정하나요? 097

16 원소의 질량을 어떻게 그렇게 정확히 재나요? 103
17 소립자가 아닌 원소를 물질의 기본 단위로 정의하는 이유가 무엇인가요? 111
18 150년 전 멘델레예프가 만든 주기율표를 계속 사용하는 이유가 뭔가요? 117
19 수소는 1족인가요, 17족인가요? 123
20 란타넘족과 악티늄족이 주기율표에서 분리된 이유가 무엇인가요? 131

21 연금술처럼 싸게 희토류 원소를 만들 수 있을까요? 137
22 아이언맨처럼 팔라듐으로 소형 원자로를 만들 수 있나요? 143
23 수소와 산소로 물을 만들어 쓸 수 있을까요? 149
24 비활성 기체가 실생활에 어떻게 쓰이나요? 155
25 오비탈 이름은 어떻게 정했나요? 163

26 원자끼리 사중결합을 형성할 수 있나요? 169
27 화학자에게 없어서는 안 될 원소 세 가지는 무엇인가요? 177
28 세상에서 가장 위험한 원소는 무엇인가요? 183
29 인류 역사에 가장 큰 영향을 준 원소는 무엇인가요? 189
30 화학 전공자가 할 수 있는 이색 직업은 무엇인가요? 195

강민지(강원 대룡중 2)
권부겸(경남 무지개초 4)
김지호(경기 평택여고 1)
김하늘(경기 평택여고 2)
박신영(대전지족중 2)
박제민(경기 서현중 1)
장희운(경남 무지개초 5)
정지호(서울 명일중 1)
최아영(서울 송파구)

Q

원소의 이름은 어떻게 정하나요?

01

장홍제 교수가 답하다

원소의 이름은 다양한 유래를 갖습니다. 초기에 발견된 원소들의 경우 이들이 만들어 낼 수 있는 일상적이거나 유용한 물질을 기준으로 명명했습니다. 대표적으로 물(hydro-)을 만든다(genes)는 의미의 수소(H), 산(oxy-)을 만든다(genes)는 의미의 산소(O), 숯(carbo)을 의미하는 탄소(C) 등을 꼽을 수 있습니다.

한편 원소를 얻을 수 있었던 물질이나 광석, 혹은 매장된 지역으로부터 이름을 따오기도 했습니다. '어디서 온 누구'와 같은 식으로 자연스럽게 명명이 이뤄진 거죠. 그리스 마그네시아(Magnesia) 지방에서 채굴된 광석에서 발견된 마그네슘(Mg), 그리스 키프로스(Kypros·현 사이프러스Cyprus)가 최대 생산지였던 구리(Cu), 부싯돌을 뜻하는 라틴어(silex)에 기원을 둔 규소(Si)가 그 예시입니다.

이처럼 오래 전 발견된 원소들의 경우 그리스어나 라틴어 어원을 사용하는 경우가 많았습니다. 대부분이 고대 철학의 근원지이자 다양한 탐구의 중심인 지중해 유럽 지역에서 발견됐기 때문입니다.

생물학 분야에서도 과거부터 현재까지 동식물이나 균류와 같은 생명체의 학명(學名·scientific name)을 지정하는 데 그리스어나 라틴어를 사용하고 있습니다. 학명은 새로운 생명체를 발견하거나 분석한 후, 이들이 기존의 어떤 생명체와 연관관계가 있는지 간단하고 효과적으로 표현하기 위해 분류에 따라 지정합니다.

그런데 이명법(속명+종명의 구조로 된 학명을 만드는 방법)을 확립한 스웨덴의 박물학자 칼 폰 린네(Carl von Linné)가 '자연의 체계'를 출판했을 당시 서유럽에서 일반적으로 사용하던 언어가 라틴어였습니다. 자연스럽게 그리스어와 라틴어가 명명법의 중심에 자리잡게 된 거죠.

원소든 생명체든 이름을 짓는 가장 핵심적인 목표는 편의성과 범용성입니다. 이름이 적절한 정보를 내포해 전달해야 하고, 누구나 부르기 쉽고 기억하기 편해야 한다는 뜻입니다. 당시에는 그리스어와 라틴어가 통용됐기 때문에 여기에 뿌리를 둔 이름들이 많을 수밖에 없었습니다.

소듐? 나트륨? 어떤 이름으로 불러야 할까

실제로 근대 이후 발견된 원소들의 이름은 반드시 그리스어나 라틴어에 국한돼 있지 않습니다. 원소는 그 자체로 각각 구분되는 특성을 가지고 있고, 생물계처럼 종과 속, 강과 문 등으로 분류상 복잡하게 연관된 형식이 존재하는 것도 아니기에 과학적 명명법을 반드시 따를 필요가 없어진 겁니다. 결국 근대 이후로는 원소의 이름을 짓는 방법이 대략 두 종류로 갈라졌습니다. 구체적인 제약이나 조건이 있는 것은 아니지만 대개 발견

QR코드를 스캔하면
소듐의 특징과 숨은 이야기를
다룬 대한화학회의 영상을
볼 수 있습니다.

소듐(Na)
인간의 생명 유지에 꼭 필요한 원소. 포타슘과 함께 뇌로 신경 자극을 전달하고, 세포들의 삼투압을 유지하는 역할을 한다. 물과 만나면 수소가스와 높은 열을 발생시키며 폭발하는 대표적인 알칼리 금속 원소다. 생산량의 대부분은 지하 암염에서 얻는다. '나트륨'이라는 이름으로도 통용된다.

자가 개인적인 성향이나 관심, 의도에 따라 신화나 구전설화, 고대어에 기반을 두느냐, 혹은 학자의 이름이나 국가명, 지역명 같은 현존하는 이름에 기반을 두느냐로 나뉩니다.

전자의 사례로는 산(acid)에 부식되지 않는 특성을 가진 원소를 그리스 신화 속 탄탈로스(Tantalus) 왕의 이름을 따 탄탈럼(Ta)이라고 명명한 경우가 있습니다. 또 거의 모든 광석에서 탄탈럼과 함께 존재하며 성질 또한 유사한 원소의 이름을 탄탈로스 왕의 딸 니오베(Niobe)에서 유래한 나이오븀(Nb)으로 정한 사례도 있죠. 독성을 가진 원소 코발트(Co)의 이름은 요괴를 뜻하는 독일어 코볼트(Kobold)로부터 유래했습니다.

한편 현대로 오면서 학자의 이름이나 국가명 등 현존하는 이름을 기반으로 명명하는 후자의 사례도 늘고 있습니다. 우라늄(U)이라는 이름은 천왕성(Uranus)에서 유래했고, 해왕성(Neptune)의 이름을 딴 넵투늄(Np), 명왕성(Pluto)의 이름을 딴 플루토늄(Pu), 소행성 세레스(Ceres)와 팔라스(Pallas)에서 각각 이름을 딴 세륨(Ce)과 팔라듐(Pd) 등도 있습니다.

국가명에서 유래한 이름도 찾아보면 많습니다. 프랑슘(Fr·프랑스·France), 폴로늄(Po·폴란드·Poland), 아메리슘(Am·미국·America), 저마늄(Ge·독일·Germany) 등이 대표적입니다. 이와 유사하게 스칸듐(Sc·스칸디나비아·Scandinavia)이나 하프늄(Hf·덴마크 코펜하겐의 옛이름·Hafnia) 등은 지역명에서 유래했고요. 사람의 이름에서 출발한 원소 이름도 있습니다. 가돌리늄(Gd·요한 가돌린), 퀴륨(Cm·마리 퀴리), 아인슈타이늄(Es·알베르트 아인슈타인), 멘델레븀(Md·드미트리 멘델레예프)을 예로 들 수 있습니다.

원소의 명칭에 원소를 발견한 국가, 지역, 인명의 이름이 점점 더 많이 반영되는 이유는 원소의 발견이 하나의 과학적 사실의 발견에 그치지 않고, 발견자의 명예나 발견한 국가의 과학기술력 및 정치력을 나타나는 수

단이 됐기 때문입니다. 소듐(Sodium)과 나트륨(Natrium), 포타슘(Potassium)과 칼륨(Kalium)이 혼동돼 쓰이는 현상은 이런 사실을 잘 설명해주고 있습니다. 소듐과 포타슘은 1807년 영국의 화학자 험프리 데이비 경(Sir Humphry Davy)이 바닷가에서 서식하는 식물인 퉁퉁마디를 태운 재(Soda)와 일반적인 식물을 태운 재를 물에 녹여 증발시켜서 얻어지는 고체(Potash)를 전기분해 해 분리한 원소들입니다. 영국은 발견된 원소의 명칭을 그것의 근원에 기반해 소듐과 포타슘으로 각각 발표했습니다.

하지만 당시 유럽에서 강한 국력을 자랑하던 독일과 독일을 필두로 한 독어권 국가들이 소듐을 나트륨으로 바꿔 부르기 시작했습니다. 소듐이 주성분인 광석이 나트론(Natron)인 데서 착안한 명칭입니다. 포타슘은 해조회(해조류를 태운 재)의 다른 명칭인 칼리(Kali)에 기반해 칼륨이라고 바꿔 사용했습니다. 결국 같은 원소가 영어권에서는 소듐과 포타슘, 독일어권에서는 나트륨과 칼륨이라고 불리게 된 겁니다.

소듐과 나트륨, 포타슘과 칼륨은 오늘날에도 전 세계적으로 혼용되고 있습니다. 대한화학회의 화학 용어 기준은 영어를 기준으로 하기 때문에, 우리나라에서는 소듐과 포타슘이 공식적인 학술 용어입니다. 하지만 국립국어원의 표준어대사전은 소듐과 나트륨, 포타슘과 칼륨을 모두 기재하고 허용해 사회적으로는 둘 다 쓰이고 있습니다.

1900년대 초중반까지는 발견된 원소를 각 나라에서 다른 명칭으로 부르는 일이 종종 있었습니다. 그러나 오늘날에는 1919년 설립된 화학 분야 국제 학술기관인 국제순수·응용화학연합(IUPAC)이 원소명을 포함한 화학 술어와 용어를 모두 정의하고 있어 혼란의 여지가 많이 사라졌습니다. 원소 이름의 유래를 알면 화학의 매력이 더 크게 느껴질 겁니다.

김하늘(경기 평택여고 2)
이경수(서울 송설고 2)

Q

연금술이 화학의 발전에 어떤 영향을 줬나요?

02

장홍제 교수가 답하다

많은 사람들이 연금술을 단순히 '납을 금으로 바꾸는 학문'이라고 생각합니다. 영화나 소설 같은 대중 매체에서 연금술을 흥미 위주로만 다룬 것을 보고 연금술이 물질만능주의적 시도라는 선입견을 갖곤 하죠. 하지만 연금술은 현대 과학, 특히 화학의 기초를 이루는 데 중추적인 역할을 한 학문입니다. 그 이유를 차근차근 들려드리겠습니다.

수은, 황, 비소… 원소의 성질 최초로 밝혀

연금술(鍊金術)이라는 용어는 '금(혹은 귀금속)을 정련하는 기술'이라는 뜻을 갖고 있습니다. 조금 더 확대해서 이해한다면 우리에게 납(Pb)으로 대표되는 저렴하고 흔한 금속들을 금(Au)과 같은 귀한 금속으로 바꾸는 기술을 의미합니다. 연금술은 여러 가지 금속들이 주기율표상의 금속으로 자리잡기 훨씬 전부터 이뤄지고 있었습니다.

초기 연금술은 고대 그리스를 근간으로 한 '4원소설'이나 동양의 '오행'과 같은 '원소론'을 바탕으로 철학적 관점에서 세상의 이치를 밝혀내고자 하는 탐구와 수련의 방법이었습니다. 물질과 그 구성 원리를 파고드는 방법론을 찾기 위해 많은 시도들이 이어졌고, 납과 같이 무가치한 정신을 정련해 금과 같이 고귀하게 만드는 정신적 함양을 목표로 발전하게 됐습니다.

이런 숭고한 가치는 시간이 흐르면서 점차 물질적인 가치로 대체됐습니다. 연금술이 탐욕스럽고 집착적인 학문으로 여겨진 것도 이때부터입니다. 그러나 연금술의 모든 것을 부정적으로 볼 수만은 없습니다. 연금술이 현대 화학의 기초를 쌓는 데 중대한 영향을 미쳤음은 부인할 수 없는 사실이니까요.

첫째로 연금술은 우리가 알고 있는 수많은 원소들을 발견하는 데 기여했습니다. 누가 발견했는지 알 수 없는, 인류가 오래 전부터 사용해 온 구리(Cu), 주석(Sn), 철(Fe), 탄소(C) 등을 비롯한 원소들이 연금술사들에 의해 밝혀졌습니다. 연금술사들은 광석, 식물 등 세상을 이루는 물질들이 어떤 성질의 요소로 구성돼 있는지 수없이 많은 실험을 했습니다.

그리고 이런 노력은 연금술이 물질적 가치에 중점을 두게 되면서 더욱 가속화됐습니다. 귀금속이라는 명확한 목적과 부의 축적이라는 구체적인 동기가 생기면서 다양한 물질의 성질이 밝혀졌습니다. 대표적인 예로, 흐르는 액체로 여겨지던 수은(Hg)이나, 불타는 돌로 불리던 황(S), 독약으로 잘 알려진 비소(As)와 같은 여러 원소들의 성질이 확인됐습니다. 이런 원소들은 온도계나 기압계의 발견, 화약 제조, 심지어는 정치, 종교적인 사안에도 활용됐습니다.

QR코드를 스캔하면 금의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

금(Au)
연금술의 목표가 돼 화학의 진보를 이끈 금속. 반응성이 작아 변질되지 않고 특유의 노란 광택을 가져 기원전 3000년 전부터 귀중품으로 사랑을 받았다. 전기전도성과 연성이 매우 뛰어나고 부식성이 없어 현재 반도체 전자회로 등에 요긴하게 쓰인다. 원소기호 'Au'는 '태양의 빛'을 뜻하는 라틴어 '아우룸(aurum)'에서 따왔다.

연금술사들이 원소기호를 애용한 이유

연금술이 현대 화학에 기여한 부분은 이뿐만이 아닙니다. 물질에 대한 탐구와 변화를 중점적으로 연구한 연금술은 실험 중심적 철학을 갖고 있었습니다. 연금술사들은 각종 실험방법과 실험기구 및 장비, 과학적인 해석 방법 등을 고안해냈습니다. 물론 당시 천문이나 물리, 수학 등 다른 과학 분야에서도 실험을 통해 이론을 정립하고 검증하는 과정이 존재했습니다. 하지만 하나의 물질이 다른 물질과 만났을 때 혹은 분리될 때 일어나는 상호작용과 그 결과를 확인하기 위한 연금술은 실험의 중요성이 극단적으로 높았습니다.

연금술사들은 안전하고 정밀한 실험을 수행하기 위해 맞춤형 실험기구들과 장비를 만들었습니다. 오늘날 실험실에서 사용하는 비커나 플라스크, 거치대, 증류기 등 유용한 실험기구의 대다수가 그들의 실험 설계 과정에서 개발된 것들입니다.

연금술사들은 실험을 통해 얻은 어마어마한 분량의 데이터를 분석하는 과학적인 사고와 접근법도 탄생시켰습니다. 그들은 실험을 수행하면서 날씨나 온도, 습도와 같은 환경적인 조건과, 실험 중 관찰한 사항들을 기록했습니다. 이렇게 실험 결과를 체계화하고 보편화할 수 있는 기록 방식은 현재에도 활용되고 있습니다.

또한 연금술사들은 원소의 기호를 탄생시킨 장본인들이기도 합니다. 솔직히 그들이 원소기호를 사용한 목적은 오늘날 화학 연구자들의 목적과는 조금 달랐습니다. 오늘날 전 세계 화학자들이 정보 전달과 표현을 용이하게 하기 위해 원소기호를 사용하는 반면, 연금술사들은 자신의 기술을 남에게 알리지 않으려는 암호화 목적으로 사용했습니다. 연금술사들

은 원소기호를 그림이나 도형 등으로 다양하게 표기했다고 합니다. 그것을 근대 원자론의 창시자인 존 돌턴(John Dalton)이 원형 기호로 정리했고, 이후 옌스 야코프 베르셀리우스(Jöns Jacob Berzelius)가 알파벳 기반으로 표현한 결과물이 지금의 원소기호입니다.

물질의 구조가 상세하게 밝혀질수록, 물질을 구성하는 원소의 종류가 많아질수록 원소를 간결하게 표현하는 일은 중요합니다. 그런 의미에서 분자식, 구조식 등에 간단하게 활용할 수 있는 원소기호를 개발한 것은 대단한 혁신입니다. 초기 의도는 조금 달랐지만, 여기에는 연금술이 크게 기여했다고 생각합니다.

마지막으로 연금술은 화학이 융합적인 학문으로 발전하는 밑거름이 됐습니다. 연금술의 본질이 다양한 철학적 학문의 융합과 진보였다는 점, 중동 지방을 중심으로 태동한 연금술이 실크로드를 통한 문명 교류를 바탕으로 꽃피웠다는 점 등이 이런 사실을 뒷받침합니다. 오늘날 현대 화학이 점차 분야를 넘나드는 공동 융합 연구로 이뤄지고 있다는 사실을 생각해 보면, 초기 연금술이 추구했던 실험주의적 탐구와 융합적인 사고 방식은 미래를 살아가는 데에도 여전히 중요한 가치가 아닐까 생각합니다.

동경호(경남 무지개초 5)
심현서(경남 무지개초 4)
최규연(경기 안양여고 1)

Q

우리 몸에 가장 많은 원소는 무엇인가요?

03

차상원 교수가 답하다

‘인간은 별의 먼지’라는 말을 한 번쯤 들어보셨을 겁니다. 우리 몸을 이루는 원소들이 우주의 별들이 탄생과 죽음을 반복하며 흩뿌린 먼지로부터 왔음을 강조한 말이죠. 사람의 몸에는 약 60가지 원소가 존재한다고 알려져 있습니다. 그렇다면 그중 가장 많은 원소는 무엇일까요?

우리 몸의 99.5%를 차지하는 6가지 원소

우리 몸속 60여 가지의 원소는 각각 다른 비율로 존재합니다. 어떤 원소의 비율이 특히 높은지에 대한 답은 우리가 평소 섭취하는 음식에서 실마리를 찾을 수 있습니다. 우리가 매일 가장 많이 섭취하며 사람의 몸에서도 가장 많은 부분을 차지하고 있는 물질은 물(H_2O)입니다. 따라서 수소(H)와 산소(O)가 우리 몸에서 가장 많은 개수를 차지하고 있는 원소인 셈입니다.

그 다음으로 많이 존재하는 원소는 우리가 섭취하는 3대 영양소인 단백질, 탄수화물, 지방의 구성 원소로 유추해 볼 수 있습니다. 단백질의 뼈대를 이루는 아미노산은 탄소(C), 수소, 산소, 질소(N), 황(S)으로 이뤄져 있습니다. 탄수화물과 지방은 탄소, 수소, 산소로 구성돼 있고요. 여기에 공통으로 포함된 탄소도 주요 원소 중 하나임을 예상할 수 있습니다.

실제로 3대 원소(수소, 산소, 탄소)의 원자 개수는 우리 몸 전체 원자 개수의 약 98%를 차지합니다. 3대 원소 중에서도 원자 개수가 가장 많은 것은 수소입니다. 물 분자 한 개당 두 개의 원자가 존재하기 때문입니다. 수소는 몸 전체 원자 개수의 약 62%를 차지하고, 산소와 탄소가 각각 24%와 12%를 차지하고 있습니다.

하지만 이 3대 원소가 우리 몸에서 차지하는 무게 순위는 조금 다릅니다. 각 원소의 원자량이 다르기 때문입니다. 3대 원소의 무게는 몸 전체 무게의 약 93%를 차지하는데, 이중 가장 원자량이 큰 산소가 우리 몸 전체 무게의 약 65%를 차지합니다. 그 다음으로 무거운 탄소가 약 18.5%를 차지하고요. 개수로는 우리 몸의 62%를 차지하지만 가장 가벼운 원소인 수소는 몸 전체 무게의 9.5%를 차지하고 있습니다. 정리하면, 우리 몸에서 원자 개수가 가장 많은 원소는 수소, 가장 무게를 많이 차지하는 원소는 산소라 할 수 있겠습니다.

3대 원소 외에도 우리 몸에는 다양한 원소들이 존재합니다. 대표적인 것이 3대 영양소 중 단백질에 포함된 원소인 질소와 황인데요. 두 원소의 존재량은 상당히 다를 수 있습니다. 질소는 단백질을 구성하는 20개의 아미노산 모두에 포함된 반면, 황은 아미노산 중 오직 시스테인(cysteine)과 메티오닌(methionine)에만 포함돼 있기 때문입니다. 질소는 유전정보를 담고 있는 DNA와 유전정보 해석 및 전달을 담당하는 RNA를 구성하는 필

질소(N)
동물의 몸을 구성하는 아미노산의 핵심 원소. DNA, RNA를 구성하는 주요 원소이기도 하다. 수소, 산소, 탄소에 이어 우리 몸에서 네 번째로 존재감이 크다. 표준 상태에서 질소는 원소 두 개가 삼중결합으로 강하게 연결된 기체 분자다. 지구 대기에서 가장 많은 비중(약 78%)을 차지한다. 공기 중의 질소가 생물권과 유기화합물로 이동하고, 다시 대기 중으로 배출되는 순환 과정은 지구 생태계 유지에 매우 중요한 역할을 한다.

QR코드를 스캔하면 질소의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

수 원소이기도 합니다. 실제로 질소는 우리 몸을 구성하는 원소 중 원자 개수 측면(1.1%)으로나, 무게 측면(3.2%)으로나 네 번째로 존재감이 큰 원소입니다.

질소 다음으로 풍부한 원소는 우리 몸을 지탱하고 있는 골격, 즉 뼈의 대표적인 구성 원소인 칼슘(Ca)입니다. 칼슘은 몸무게의 약 1.5%를 차지하며, 원자 개수로는 약 0.22%를 차지하는, 우리 몸에서 다섯 번째로 풍부한 원소입니다. 뼈에는 칼슘만 존재하는 것이 아닙니다. 물을 제외한 뼈의 약 30%는 콜라겐 단백질 및 유기물이며, 약 70%가 뼈 미네랄입니다. 뼈 미네랄의 대부분은 수산화인회석(Hydroxyapatite)의 변형된 형태로, 수산화인회석에는 수소와 산소 외에 칼슘과 인(P)이 약 1.4~1.7대 1의 비율로 존재하고 있습니다. 따라서 인 역시 우리 몸에 굉장히 풍부할 것으로 예상할 수 있습니다.

인은 질소처럼 DNA와 RNA를 구성하는 주요 원소이기도 합니다. 그리고 단백질이 체내에서 제 기능을 하려면 '번역 후 변형(post-translational modification)'이라는 과정을 거쳐야 하는데, 이 과정 중 하나인 인산화에 기여하는 원소죠. 체내 에너지 전달에 중요한 역할을 담당하는 ATP(Adenosine triphosphate)에도 인이 포함돼 있습니다. 인은 우리 몸을 구성하는 원소 중 원자 개수 측면(0.22%)이나, 무게 측면(1.0%)에서 여섯 번째로 풍부한 원소입니다. 다시 정리하면, 산소, 수소, 탄소, 칼슘, 질소, 인 등 6대 원소가 우리 몸무게의 약 99%를 차지하고, 이는 우리 몸을 구성하는 전체 원자 개수의 약 99.5%에 해당하는 양입니다.

무게로만 보면 6대 원소 이외에 비교적 풍부한 원소들은 포타슘(K, 0.4%), 황(S, 0.3%), 소듐(Na, 0.2%), 염소(Cl, 0.2%), 마그네슘(Mg, 0.2%) 등이 있습니다. 특히 포타슘과 소듐은 몸의 이온 항상성을 유지하는 데 필수적인

원소입니다. 세포 내 이들의 농도는 '소듐-포타슘 펌프'라 불리는 소듐-포타슘-ATP가수분해효소 막 단백질에 의해 조절됩니다. 황은 수용성 비타민인 티아민(thiamine·비타민 B_1)과 바이오틴(biotin·비타민 B_7)을 구성하는 원소입니다. 염소는 우리가 매일 섭취하는 소금의 주성분이며, 위액을 구성하는 주요 원소입니다. 염소는 몸속에서 음이온으로 존재해 삼투압 및 수분 평형을 유지하는 데 중요한 역할도 하고 있습니다. 마그네슘은 칼슘, 인과 함께 뼈 미네랄의 주요 성분 중 하나입니다.

우리 몸에는 총 몇 개의 원자가 있을까

이렇게 다양한 원소로 이뤄진 우리 몸에는 모두 몇 개의 원자가 존재할까요? 이 질문에 정확한 답을 하려면 인체에 존재하는 모든 원소들의 원자 개수를 더해야 합니다. 불가능한 일이죠.

하지만 문제를 단순화해 근접한 답을 찾아 볼 수는 있습니다. 가령 몸무게가 72 kg인 성인이 우리 몸에서 압도적으로 많은 양을 차지하고 있는 물(H_2O)로만 이뤄져 있다고 가정해봅시다. 물분자 1몰(mol), 즉 약 6×10^{23}개에 해당하는 질량은 18 g입니다. 다시 말해 72 kg인 사람이 물로만 이뤄져 있다면 4000몰, 즉 2.4×10^{27}개의 물 분자가 존재하는 셈이며, 물 분자 한 개는 수소 2개, 산소 1개 등 총 3개의 원자로 이뤄져 있으므로 총 1만2000몰, 즉 7.2×10^{27}개의 원자가 존재하는 셈이 됩니다. 주요 원소들의 인체 내 존재 비율을 고려해 좀 더 복잡한 계산을 하더라도 물로만 계산을 했을 때와 결과는 크게 달라지지 않습니다.

최형서(경남 동진여중 1)

Q

생명현상에 필요한 물질은 왜 탄소로 이뤄졌나요?

04

차상원 교수가 답하다

우리 몸이 호흡과 물질대사를 통해 에너지를 만들고 유전정보를 전달하는 과정을 보면 수없이 많은 탄소화합물이 관여하고 있습니다. 생명체는 왜 하필 탄소(C)를 골격으로 가진 화합물들을 일꾼으로 고용했을까요?

태초의 지구 환경에서 간단한 유기화합물이 생성될 수 있는지, 그 가능성을 연구한 미국의 화학자 스탠리 밀러(Stanley L. Miller)는 다음과 같은 실험을 고안했습니다. 환원성 대기 성분인 수소(H_2), 메테인(CH_4), 암모니아(NH_3)를 물(H_2O)과 함께 밀폐된 용기에 넣고 전기방전을 가했습니다. 그 결과, 간단한 유기물인 글리신, 알라닌 등의 아미노산이 생성됨을 확인했습니다.

이러한 밀러의 실험이 정말 지구 태초의 환경을 재현했는지에 대해서는 논쟁이 있을 수 있습니다. 그러나 현재 생명체와 우주에서 발견되는 원소의 비율 등에 비춰볼 때 밀러의 실험에 사용된 원소들, 즉 수소(H), 탄소(C), 질소(N), 산소(O)가 생명현상에 관여하는 물질의 골격을 이룰 후보였음은 분명해 보입니다.

생명물질이 될 수 있는 세 가지 조건

그렇다면 네 가지 원소들 중 가장 적합한 원소는 무엇일까요? 일단 생명현상에 필요한 물질의 골격을 이루는 원소가 되기 위해서는 다양성이 뒷받침돼야 합니다. 원소끼리 결합하는 경우의 수가 많으면 많을수록 생명현상에 필요한 물질을 다양하게 만들어 낼 수 있기 때문입니다.

원소들이 각각 몇 개의 결합을 할 수 있는지는 미국의 물리화학자 길버트 루이스(Gilbert N. Lewis)가 1916년에 발표한 '옥텟 규칙(Octet rule)'을 보면 예상할 수 있습니다. 옥텟 규칙에 따르면 1주기 원소인 수소를 제외하고, 어떤 원소가 몇 개의 결합을 할 수 있는지는 원소가 몇 개의 전자를 받아 최외각 껍질에 전자 8개를 완성할 수 있는지에 달려있습니다. 즉, 최외각 전자가 각각 4개, 5개, 6개인 탄소, 질소, 산소는 각각 최대 4개, 3개, 2개의 같거나 다른 원소와 결합을 이룰 수 있습니다.

수소는 전자를 1개만 갖고 있지만, 최외각 전자가 2개만 되면 안정해지는 1주기 원소이기 때문에 단일결합밖에 이룰 수 없습니다. 반면 탄소는 4개의 팔을 벌려 4개의 원소를 맞이할 수 있습니다. 실제로 4개의 팔을 이용해 사슬형, 가지형, 고리형 등 다양한 분자의 골격을 만듭니다.

두 번째 조건은 강인함입니다. 같은 원소가 길게 여러 개 결합돼도 안정적이어야 한다는 뜻입니다. 장난감 블록에 비유하면 이해하기 쉽습니다. 블록의 표면에는 요철이 있어 블록끼리 다양한 형태로 결합할 수 있습니다. 이때 요철끼리 결합하는 이음새가 헐겁거나 엉성하면 구조물을 얼마

쌓기도 전에 무너져 버립니다.

다시 원소로 돌아와봅시다. 만약 질소간의 단일결합(-N-N-)이 탄소간의 단일결합(-C-C-)보다 훨씬 강하고 안정하다면, 다양성은 다소 떨어져도 질소가 생명물질의 골격이 됐을지도 모르겠습니다. 하지만 실제로는 탄소간의 단일결합이 질소간 또는 산소간의 단일결합보다 2배 이상 강합니다.

이러한 차이는 원소마다 '전자 욕심'이 다르기 때문에 발생합니다. 같은 주기의 원소들을 비교하면 이미 전자를 다 채워 안정한 상태인 비활성 기체 원소들은 제외하고, 최외각 껍질에 채워야 할 전자의 개수가 적은 원소일수록 전자에 대한 욕심이 더 강합니다. 즉, 세 원소 중 전자를 2개만 받으면 안정해질 수 있고 양성자 수 또한 가장 많아 전자를 끌어당기는 힘이 가장 센 산소가 전자 욕심이 가장 많습니다. 탄소는 산소나 질소에 비하면 전자 욕심이 아주 적은 편이고요.

화학에서는 원소끼리 공유한 전자에 대해 욕심을 보이는 정도를 '전기음성도(electronegativity)'라고 말합니다. 전기음성도가 높은 원소들끼리 단일결합을 하면 서로 전자쌍을 끌어가려고 하기 때문에, 힘센 두 사람이 고무줄을 양쪽으로 팽팽하게 당기는 것처럼 결합이 약해집니다. 하지만 탄소처럼 전기음성도가 적당하면 팔가마를 만들 때 팔목과 팔목을 서로 겹쳐 잡는 것처럼 강한 단일결합을 만들 수 있습니다. 실제로 탄소 골격은 분자량이 10만이 넘는 고분자도 거뜬히 만들 정도로 튼튼합니다.

마지막으로 생명물질의 골격을 이루는 원소가 되기 위해서는 유연해야 합니다. 역동적인 생명현상에 참여하는 생체분자는 다양하게 구조를 바꾸거나, 분해되거나, 다른 분자와 합쳐질 수 있어야 한다는 뜻입니다. 이런 면에서도 전기음성도가 원소들 중 중간 정도여서 어느 원소든 받아들일 준비가 돼있으며 최대 4개의 원소와 결합할 수 있는 탄소가 제격입니다.

같은 14족 규소는 안될까?

이쯤 되면 한 가지 의문이 생길 수 있습니다. '주기율표상 탄소 바로 밑에 있으면서 비금속인 규소(Si)도 생명의 원소가 될 수 있지 않을까?'하는 질문이죠. 물질의 다양성 조건만 놓고 보면, 탄소처럼 최외각 전자가 4개인 규소도 생명체를 이루는 원소가 되지 말라는 법은 없으니까요.

하지만 규소는 탄소보다 훨씬 크기 때문에 탄소와 아주 다른 특성을 보입니다. 우선 강인함의 측면에서 봤을 때, 규소간의 단일결합(-Si-Si-) 힘은 탄소간의 단일결합의 힘의 60%에 불과합니다. 대신 규소-산소간의 결합(-Si-O-)은 탄소간의 결합보다 훨씬 강합니다. 따라서 규소는 자기들끼리만 길게 결합하는 대신, 산소를 중간중간에 연결시켜 거대한 네트워크를 형성합니다. 대표적인 예가 생명체가 생명을 영위할 수 있는 기반인 지각입니다.

이 대목에서 '규소가 그렇게 산소와 결합하길 좋아한다면, 이산화탄소(CO_2, O=C=O)처럼 단일 기체 분자를 만들어 식물의 생명과정 중 가장 중요한 광합성에 참여할 수 있지 않을까?'하는 좀 더 고차원적인 질문을 하는 분들도 있을 겁니다. 답은 '그럴 수 없다'입니다. 규소는 산소와 이중결합해 이산화탄소 구조와 같은 화합물(O=Si=O)을 이루지 못합니다. 2주기 원소인 산소와 3주기 원소인 규소의 크기 차이가 커서 이중결합을 이루려면 너무 많은 에너지가 필요하기 때문입니다. 이에 반해 탄소는 산소와 크기가 비슷해 전자의 겹침이 용이합니다. 이중결합을 쉽게 이룰 수 있고, 단일 기체분자인 이산화탄소를 쉽게 만들 수도 있는 거죠. 결국 생명체에게 '팔방미인' 같은 원소가 바로 탄소라 할 수 있겠습니다.

동경호(경남 무지개초 5)
심현서(경남 무지개초 4)
최규연(경기 안양여고 1)
최형서(경남 동진여중 1)

Q

외계생명체를 찾으려면 어떤 원소에 주목해야 할까요?

05

차상원 교수가 답하다

미국항공우주국(NASA)은 2018년 4월 태양계 밖을 탐사하려는 목적으로 'TESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite)' 우주망원경을 발사했습니다. 그리고 2019년 7월, NASA 연구팀은 31광년 떨어진 위치에서 왜성(dwarf star) 주위를 공전하고 있는 세 개의 행성을 발견했습니다. 이 중 'GJ 357 d'로 명명된 행성은 '거주할 수 있는 지역(habitable zone)'에 위치하고 있는, 이른바 잠재적인 '슈퍼지구(super-Earth)'로 화제를 모았습니다.

GJ 357 d는 지구보다 약 6배 크고, 화성이 태양으로부터 받는 에너지와 비슷한 양의 에너지를 받고 있어, 밀도 높은 대기가 존재할 경우 표면에 액체 상태의 물이 존재할 수 있습니다. 인류는 1990년대 초부터 이와 같이 생명체가 존재할 수 있는 행성을 탐색해 왔는데요. 1995년 태양계 밖 행성을 처음으로 발견한 미셸 마요르(Michel Mayor)와 디디에 켈로즈(Didier Queloz)는 이러한 공로로 2019년 노벨물리학상을 수상하기도 했습니다.

외계생명체의 제1 조건, 탄소를 찾아라

슈퍼지구의 자격 조건은 지구 생명체가 생명을 유지하기에 필요한 조건에 기반을 두고 있습니다. 이는 외계생명체를 찾을 때의 요건과도 일맥상통합니다. 물론 무한히 드넓은 우주에서, 우리와 매우 유사한 조건에서만 생명체가 존재할 수 있다고 가정하는 것은 편협한 생각일 수 있습니다. 하지만 현재까지 인류가 축적해 온 생명에 대한 지식이 외계생명체 탐사에 좋은 출발점인 것은 확실합니다.

그런 의미에서 외계생명체를 찾을 때 단서가 되는 첫 번째 원소가 탄소(C)입니다. 탄소는 생명활동에 필요한 물질의 골격입니다. 탄소 원자 한 개는 최대 4개의 원자와 결합할 수 있어 매우 다양한 화합물을 만들어낼 수 있고, 탄소간의 단일결합(-C-C-)은 분자량이 매우 큰 고분자를 만들 수 있을 정도로 튼튼합니다. 또한 탄소는 여러 가지 다양한 원소들과 결합했다가 분해될 수 있는 유연성도 갖추고 있습니다(자세한 내용은 25쪽 4번 질문 참조).

일각에서는 탄소와 많은 성질을 공유하고 있는 규소(Si)를 뼈대로 한 생명체가 우주에 존재할 수 있다는 주장도 나옵니다. 하지만 규소는 지구와 유사한 환경에서 탄소 순환의 핵심 물질인 이산화탄소(CO_2)와 같은 대기 성분을 만들지 못하기 때문에 현재로썬 가능성이 매우 낮습니다.

그렇다면 외계생명체의 단서인 탄소는 어떻게 찾을 수 있을까요? 과학자들은 외계행성의 대기 성분에 주목하고 있습니다. 우주에 존재하는 복잡한 탄소화합물, 즉 유기물을 직접 관측할 수 있다면 좋겠지만 아쉽게도 현재 기술로는 불가능하니까요. 대기 중에 광합성의 재료이자 동물의 호흡으로부터 배출되는 이산화탄소(CO_2)나 원시 대기 성분인 메테인(CH_4)이 존재하는지를 조사해 간접적으로 연구하고 있습니다.

산소와 물이 함께 발견되면 존재 가능성 높아

외계생명체를 찾기 위해 주목해야 할 두 번째 원소는 산소(O)입니다. 좀 더 정확히 말하면, 행성 대기에 산소기체(O_2)가 존재하는지 여부가 중요한 단서가 될 수 있습니다. 산소기체는 동물의 호흡에 필수적일 뿐만 아니라, 식물의 광합성을 통해 다량 배출됩니다. 따라서 어떤 행성에 지구의 동식물과 같은 고등 생물이 존재한다면 산소기체가 존재할 가능성이 매우 높습니다. 산소기체는 지구 대기의 20%정도를 차지할 정도로 안정적이지만, 산화와 에너지 생성으로 대표되는 수많은 화학적 변화의 중심이 될 정도로 반응성이 높기도 합니다. 즉 산소기체의 존재는 한 행성에서 생명체 출현을 위한 화학적 진화가 일어나고 있음을 확인하는 중요한 지표가 될 수 있습니다.

산소 원소는 우주에서 세 번째로 풍부한 원소이지만 분자인 산소기체는 우주에 훨씬 희박하게 존재할 것으로 예상됩니다. 실제로 우주먼지(stardust)나 얼음에 잡혀있는 산소 원자는 예상보다 훨씬 강하게 결합돼 있어, 산소가 단일 기체분자로 우주에 존재하기는 어려울 수 있다는 연구 결과가 있습니다.[doi: 10.1088/0004-637X/801/2/120] 게다가 산소기체는 생명현상 이외에 물질의 광분해 등을 통해서도 생성될 수 있기 때문에 외계생명체 탐사에서 산소기체만을 추적하면 오류의 소지가 있습니다.

반면 액체 상태의 물(H_2O)과 산소기체가 외계행성에서 함께 발견된다면 외계생명체의 존재 가능성은 매우 높아집니다. 무언가에 의해 산소기체가 지속적으로 생성되지 않으면, 물과 광물이 존재하는 행성에서 대기 중 산소기체의 농도가 유지될 수 없기 때문입니다. 액체 상태의 물은 그 자체만으로도 생명체의 강력한 증거가 될 수 있습니다. 2018년 유럽과 미

비소(As)
산소와 결합하면 강한 독성을 가지는 원소. 약간 단맛이 날 뿐 무색무취해 과거 독약으로 많이 쓰였다. DNA의 핵심 원소인 인(P)과 같은 15족 원소로 화학적 성질이 유사하다. 때문에 최근에는 새로운 외계생명체의 존재 가능성을 밝힐 단서로 주목받았다. 산업적으로는 13족 원소들과 혼합해 반도체, 발광다이오드(LED) 등을 제조하는 데 쓰인다.

QR코드를 스캔하면 비소의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

국의 화성 탐사팀은 '화성 심층부 및 전리층 음향탐사 레이더(MARSIS·Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding)'를 이용해 화성 표면으로부터 약 1.5 km 깊이에 액체 상태의 물이 호수처럼 존재함을 간접적으로 확인했습니다.[doi: 10.1126/science.aar7268] 2019년 9월에는 외계행성 'K2-18 b'의 대기에서 수증기가 처음 관측되기도 했습니다. 하지만 이 행성이 슈퍼 지구의 자격을 갖추고 있는지에 대해서는 여전히 논쟁 중입니다.[doi: 10.1038/s41550-019-0878-9]

비소를 이용해 살아가는 박테리아 발견?

인(P)의 기원과 우주에서의 분포를 탐구하는 것도 중요한 단서가 될 수 있습니다. 인은 에너지를 저장하고 운반하는 데 필수적인 ATP와, 유전정보를 담고 있는 DNA의 핵심 구성 원소이기 때문입니다. 세포막과 신경조직을 구성하는 인지질의 주요 구성 원소이기도 하고요.

최근에는 일부 과학자들이 인과 화학적 성질이 유사한 비소(As)도 외계 생명체의 단서로 보고 있습니다. 사실 과거에는 비소가 크게 주목받지 못했습니다. 비소가 세포 소기관 작동에 장애를 일으키고 질병을 유발하는 생명체에 해로운 원소로만 알려져 있었기 때문입니다.

그런데 2010년 NASA 연구팀이 DNA 같은 생체분자에 인 대신 비소를 쓰는 박테리아인 'GFAJ-1'을 발견했다고 주장하면서 비소 기반 생명체의 가능성이 새롭게 조명됐습니다. 비록 19개월만에 반박 연구가 나와 비소 박테리아 발견은 해프닝으로 끝났지만, 이는 단순히 탄소 기반 생명체에만 초점을 맞춰 외계생명체를 찾는 것이 매우 좁은 시야일 수 있음을 일깨워줬습니다.

장나라(경남 삼현여고 1)

Q 수은은 왜 우리 몸에 위험한가요?

06

장홍제 교수가 답하다

상온에서 액체 상태로 존재하는 유일한 금속 원소인 수은(Hg)은 인체와 환경에 미치는 유해성을 제외한다면 굉장히 매력적인 원소입니다. 수은의 영어 이름은 '머큐리(Mercury)'로 태양계 행성인 수성의 이름과 같은데요. 수은이 상온에서 흐르는 특성과 공전 속도가 태양계 행성 중 가장 빠른 수성의 특성이 유사하다고 해서 붙여진 이름입니다. 원소기호인 Hg는 라틴어 '하이드라기룸(Hydragyrum·빠르게 흐르는 은이라는 뜻)'에서 왔습니다.

수은은 화학이라는 학문 분야가 기틀을 잡기 전인 고대와 중세시대부터 많은 사람들의 흥미와 관심을 끌었습니다. 대표적인 인물이 중국 대륙을 최초로 통일한 진시황입니다. 진시황은 수은을 불로장생을 이뤄줄 약으로 믿고 과도하게 복용했다가 수은 중독으로 숨진 것으로 알려져 있습니다. 당시에는 수은의 안정성 기준이나 인체 영향이 체계적으로 밝혀지지 않았던 탓입니다.

유기수은, 중추신경계에 문제 일으켜

과거 중국에서 불로장생의 약인 '단'을 제조하는 연단술을 탐구하던 도교 도사들은 진사(cinnabar)라고 불리는 붉은 빛의 황화 수은(HgS) 광석을 처리하면 액체 금속인 수은을 얻을 수 있다는 사실을 알고 있었습니다. 붉은 광석으로부터 은백색의 흐르는 금속이 얻어진다는 사실은 당시 화수목금토 다섯 가지 근원으로 세상이 이뤄졌다고 구분하던 오행 기반 사상에 다양성을 부여하는 계기로 작용했습니다. 불로장생을 갈망하던 진시황을 비롯한 통일 중국의 황제들은 매력을 느낄 수밖에 없었죠.

게다가 수은 화합물은 피부에 바르면 빠르게 흡수되면서 부분적인 근육 경직과 미백 효과를 보여 마치 회춘한 듯한 착각을 일으켰습니다. 때문에 초기 중국 황제들은 수은을 먹거나 바르는 행위를 반복했습니다. 진시황릉에 수은이 흘렀을 것으로 추정되는 연못이 건설된 사실만으로도 진시황이 수은에 얼마나 집착했는지 알 수 있습니다.

하지만 이는 수은 중독이라는 비참한 결과를 가져왔습니다. 수은이 인체에 중독 증상을 일으키는 과정은 수은의 형태에 따라 몇 가지로 나뉩니다. 금속 상태의 수은인지, 염 형태의 수은인지, 유기수은 화합물인지에 따라 차이가 있습니다.

금속 상태의 수은은 피부에 접촉하는 것만으로는 급속도로 흡수되거나 중독을 일으키지는 않는다고 알려져 있습니다. 기화돼 호흡을 통해 체내로 유입되는 빈도가 더 높기 때문에 금속 수은에 노출되더라도 빠르게 대처하면 심각한 중독이 발생하지는 않습니다.

반면 염 형태의 수은은 체내에 빠르게 유입돼 위험합니다. 수은은 인체의 필수 무기질 중 하나인 셀레늄(Se)의 대표적인 길항(antagonism·두 가지 약

QR코드를 스캔하면
수은의 특징과 숨은
이야기를 다룬 대한화학회의
영상을 볼 수 있습니다.

수은(Hg)
상온에서 액체 상태로 존재하는 유일한 금속. 인체에 중독 증상을 일으켜 납(Pb), 카드뮴(Cd)과 함께 대표적인 유해 중금속으로 꼽힌다. 표면장력, 전기전도성 등이 독특해 과거에는 무기약품, 온도계, 치아 치료용 합금, 전지 등에 다양하게 쓰였다. 최근에는 독성 때문에 다른 원소로 대체되는 추세다.

물 또는 물질이 서로 효과를 소멸시키는 현상) 물질입니다. 수은이 체내에 들어가면 셀레늄이 포함된 효소의 기능성이 사라져버리죠. 셀레늄이 핵심 역할을 하는 효소들은 대표적인 항산화 물질인 아스코르브산(비타민 C)이나 토코페롤(비타민 E)의 재생에 관여합니다. 즉, 이것들이 사라지면 체내에 활성산소가 쌓입니다. 활성산소는 매우 높은 반응성을 갖는 산소로, 주위의 세포나 유전물질 등 다양한 핵심 유기질에 돌연변이나 변성을 유발해 급격한 노화나 암, 세포 사멸을 일으킵니다. 특히 산소 소모가 많은 뇌와 같은 장기는 복구 불가능한 손상을 입을 수 있습니다.

유기화합물에 수은이 포함된 상태인 유기수은은 더욱 즉각적인 문제를 유발합니다. 신경세포의 핵심 요소인 미엘린(myelin)에 면역 작용을 유발해 신경계에 문제를 일으킵니다. 이로 인해 감각 이상이나 가려움, 통증, 피부박리가 발생하며 후천적인 장애나 뇌 장애도 일으킬 수 있습니다.

수은 대체할 액체 금속 나올까?

수은의 인체 및 환경에 대한 위험성이 점차 밝혀지면서 오늘날에는 인체와 수은의 직접 접촉을 금지하고 있습니다. 하지만 불과 몇십 년 전까지만 해도 수은으로 인한 사고가 지속적으로 발생했습니다. 수은이 한편으로는 다른 원소로는 대체할 수 없는 유용한 특성들을 가지고 있기 때문입니다. 가령 상온에서 액체로 존재한다는 특징은 기압계나 온도계를 비롯한 측정 기기를 만드는 데 유용하게 쓰입니다.

실제로 산업혁명 시대에는 수은 화합물을 사용하다가 중독된 사람이 많았습니다. 또한 1950년대 후반 일본 구마모토현 미나마타시에서는 유기수은의 한 종류인 메틸수은(Methylmercury)이 농축된 어패류를 섭취하고

수천 명이 집단적으로 '미나마타병(Minamata disease)'에 걸리는 사고도 있었습니다. 인근 화학 공장에서 메틸수은을 바다로 무단 방류해 빚어진 결과였습니다.

과학자들은 수은을 대체할 수 있는 물질을 개발하기 위해 노력하고 있습니다. 갈륨(Ga), 인듐(In), 주석(Sn)을 섞어 수은과 유사한 액체 금속 특성을 보이면서도 인체 독성은 없도록 만든 갈린스탄(Galinstan) 합금이 대표적인 사례입니다. 환경보전과 인류 미래를 위한 화학자들의 노력은 계속되고 있습니다.

신정민(경기 평택여고 2)

Q

리튬처럼 약으로 쓰이는 원소가 있나요?

07

장홍제 교수가 답하다

인류의 평균 수명이 지금처럼 증가한 데는 예방과 진단, 치료라는 의학기술의 발전이 큰 기여를 했습니다. 병마와의 싸움은 오랜 과거부터 인류가 맞닥뜨려온 과제였습니다. 인류는 병마를 효과적으로 극복하기 위한 치료제를 계속 찾아왔습니다.

그중 많은 치료제들은 유기화합물을 근간으로 만들어졌습니다. 여기에는 탄소(C), 산소(O), 질소(N)와 같은 기본적인 유기화합물 구성 원소뿐만 아니라 할로젠(Halogen)과 같이 그 자체로는 유독성을 띠지만 화합물에 포함되면 우수한 효과를 나타내는 원소도 있습니다.

흔히 금속 원소로 구분되는 다양한 원소들도 결정성이 높아 먹는 약으로 사용하기 어려울 것 같지만, 과거 사례들을 살펴보면 의외로 쓰이는 곳이 많다는 걸 알 수 있습니다. 원소에 대한 이해가 깊어질수록 이렇게 의학 분야에 활용할 수 있는 원소는 점점 더 많아질 겁니다.

양극성 장애 완화제로 쓰이는 리튬

원자번호 51번인 15족 5주기 원소 안티모니(Sb)는 과거 금속 형태의 알약으로 소화계 질환 증상을 완화하는 데 사용됐습니다. 현재도 화합물의 형태로 기생충의 일종인 리슈마니아 감염증(Leishmaniasis)을 치료하는 데 쓰이죠. 사실 안티모니 금속 자체는 인체에 독성이 있는 원소로 알려져 있습니다. 정확히는 치명적인 암이나 염증을 유발하기보다는 구토감이나 설사를 유발하는 부작용이 있습니다. 과거 기록을 보면 사람들은 알약 형태의 안티모니 금속을 삼켜 의도적으로 설사를 유발, 변비를 해결하는 용도로 사용했다고 합니다. 소화가 되지 않고 그대로 배출되기에 다시 세척해 재사용할 수 있어 '영원의 알약(Everlasting pill)'이라 불리기도 했다고요. 중세시대 사람들은 안티모니로 만든 컵에 용액을 담아 마셔 구토를 유발해 위세척을 하는 용도로도 사용했습니다.

오늘날 금속 원소로 만든 치료제는 대부분 물에 용해돼 섭취가 손쉬운 염 형태입니다. 대표적인 사례가 질문에서도 언급된 리튬(Li)입니다. 1족 알칼리 금속 원소인 리튬은 가장 낮은 밀도를 갖는 금속 원소로, 물과 반응해 수소기체와 열을 발생시킵니다. 왠지 섭취하면 몸속에서 큰 문제를 일으킬 것 같지만, 사실은 그렇지 않습니다. 과거에는 탄산음료를 비롯한 다양한 기호식품에도 첨가했던 원소입니다.

리튬으로 만든 약은 정신적인 안정 효과를 낸다고 알려져 있습니다. 흔히 조울증으로 알려진 양극성 장애를 완화시키는 약으로도 사용되고 있죠. 리튬이 중추신경계에 퍼져 다양한 신경전달물질과 그 표적체에 작용해 신경전달물질인 세로토닌 합성을 증가한다고 하는데, 구체적인 작용기작은 아직 밝혀지지 않았습니다.

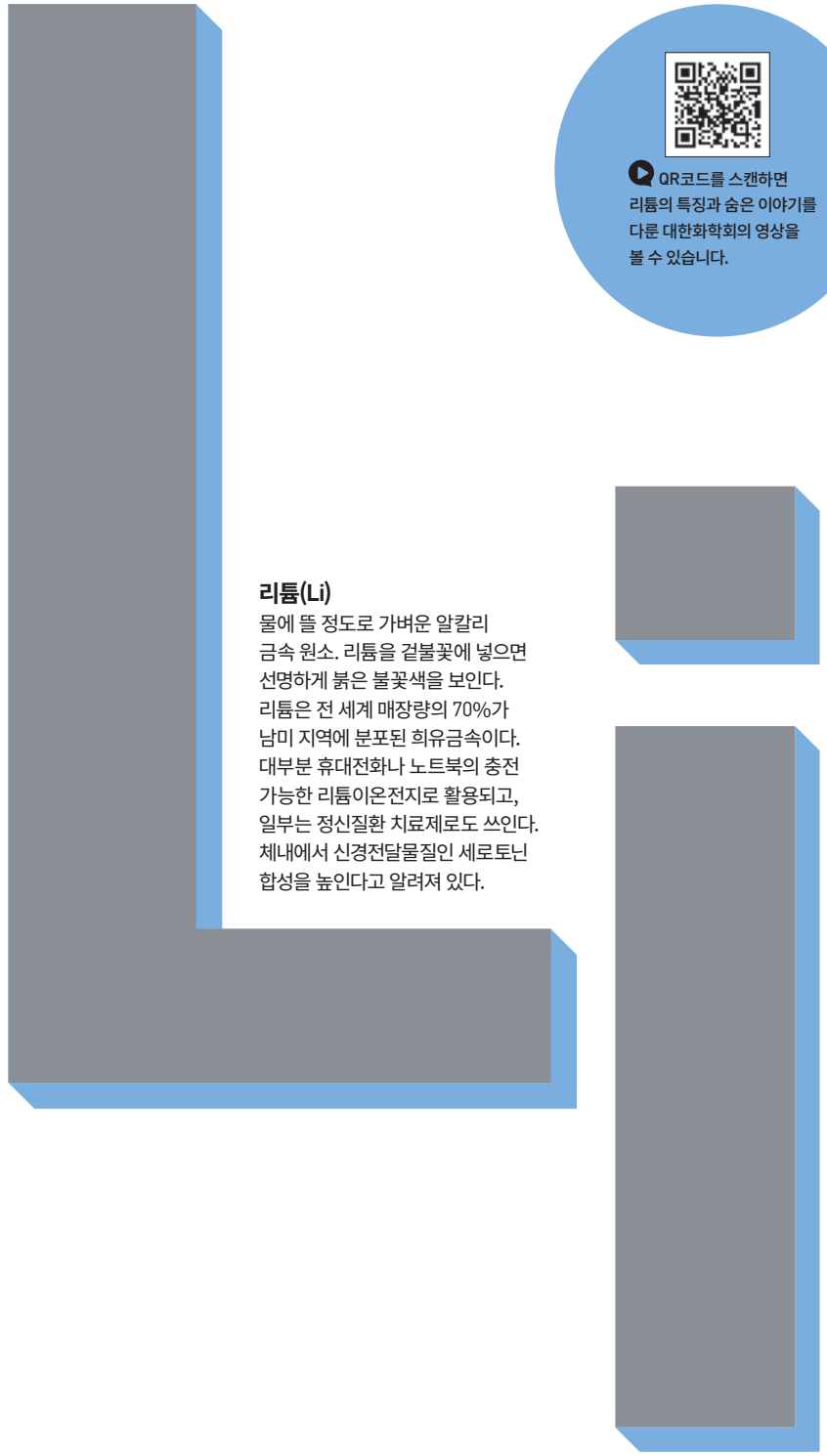
그런가 하면 '엡솜 염(Epsom salt)'이라 불리는 황산 마그네슘($MgSO_4$)도 역사가 오래된 금속염 의약품 중 하나입니다. 황산 마그네슘은 17세기 영국의 한 마을 샘물에서 발견됐습니다. 이름에 '황산'이 들어있어 자칫 유독해 보이기도 하는데, 강산의 형태로 존재하는 황산(H_2SO_4)이 아닌 음이온의 형태(SO_4^{2-})는 일반적으로 여러 염에 포함된 안전한 물질입니다. 황산 마그네슘은 직접적인 치료 효과보다는 피부병을 완화하거나 통풍 같은 관절 질환을 완화하는 데 효과가 있다고 알려졌습니다. 목욕물에 넣어 가려움증을 줄이고 근육의 피로를 회복하는 용도로 사용하기도 하고요. 혈압 조절이나 근육, 신경 기능 조절에도 긍정적인 영향을 준다고 합니다. 마그네슘은 인체에 꼭 필요한 무기질 중 하나니까요.

중금속, 귀금속 원소도 신약 재료로 주목

약으로 사용되는 원소는 이뿐만이 아닙니다. 매우 높은 원자번호를 갖는 중금속 원소들 중에서도 의약품으로 사용돼온 원소가 있습니다. 바로 원자번호 83번인 15족 6주기 원소 비스무트(Bi)입니다.

비스무트는 중금속이지만 인체에 대한 독성이 비교적 낮은 편이어서 다양한 의약품에 사용됩니다. 대표적인 예로 차살리실산 비스무트(Bismuth subsalicylate)라는 금속화합물이 1900년대 초부터 제산제 또는 항염증제로 쓰이고 있습니다. 차살리실산 비스무트는 분홍빛을 띠기 때문에 '핑크 비스무트'라고도 불리는데요. 먹으면 소량의 비스무트가 체내 미생물을 살균하고, 화합물이 염증 감소 효과를 냅니다.

그밖에도 비브로카톨(Bibrocathol)이라는 유기 비스무트 화합물은 눈 감염병을 치료하고 눈에 수분을 공급하는 약으로, 차시트르산 비스무트



QR코드를 스캔하면
리튬의 특징과 숨은 이야기를
다룬 대한화학회의 영상을
볼 수 있습니다.

리튬(Li)
물에 뜰 정도로 가벼운 알칼리 금속 원소. 리튬을 겉불꽃에 넣으면 선명하게 붉은 불꽃색을 보인다. 리튬은 전 세계 매장량의 70%가 남미 지역에 분포된 희유금속이다. 대부분 휴대전화나 노트북의 충전 가능한 리튬이온전지로 활용되고, 일부는 정신질환 치료제로도 쓰인다. 체내에서 신경전달물질인 세로토닌 합성을 높인다고 알려져 있다.

(Bismuth subcitrate)는 위와 십이지장 궤양을 유발하는 세균인 헬리코박터 파일로리(*Helicobacter pylori*) 감염을 치료하는 항생제로 쓰이고 있습니다. 비스무트 의약품의 부작용은 혀와 대변이 검게 변색되는 것인데, 인체에 유해하지는 않다고 합니다.

이처럼 금속 원소는 대부분 유기화합물 또는 무기화합물의 형태로 활용됩니다. 티타늄(Ti)이 들어간 항암제 부도타이테인(Budotitane), 인슐린 유사체로 당뇨 조절에 사용되는 바나듐(V) 화합물, 철(Fe)의 유기금속화합물인 말라리아 치료제 페로퀸(Ferroquine) 등을 예로 들 수 있습니다. 백금(Pt)이 들어간 시스플라틴(Cisplatin)은 다양한 종양 치료에 널리 쓰이는 항암제로 유명합니다. 최근에는 루테늄(Ru)이나 이리듐(Ir) 등 귀금속 원소의 화합물을 이용한 신약도 개발되고 있습니다.

머지 않은 미래에는 단순한 전이금속 외에 란타넘족 원소와 전형원소들 역시 의약 분야에 적극적으로 활용될 것으로 보입니다. 매우 높은 방사선을 방출하는 원소와 화합물 형성이 어려운 비활성 기체를 제외한 거의 모든 원소들에 대해 연구가 이뤄지는 중입니다. 과거에는 원소에 대한 이해나 약물 효과에 대한 연구가 부족해 의약품으로 사용하지 못했던 원소들도 유기 및 무기화합물을 만들면 우수한 치료 효과를 낼 수 있다는 사실이 지속적으로 밝혀지고 있습니다. 신약 개발 분야에서 화학의 역할이 앞으로 더 중요해질 것으로 기대됩니다.

구민희(경기 용인한빛중 2)
정해찬(경기 매현초 3)
정현욱(경기 구미중 2)
이영록(충북 증평군)

Q

빅뱅 후 원소는 어떻게 생겨났나요?

08

차상원 교수가 답하다

인간을 포함한 지구에 존재하는 모든 것들과 지구 밖 광활한 우주는 극도로 응축된 한 점에서 시작했습니다. 이 점이 약 138억 년 전 '빅뱅(Big Bang·대폭발)'을 일으키며 우주를 탄생시켰죠.

빅뱅이 일어나고 10^{-12}~10^{-6}초 뒤, 우주에는 네 가지 힘(강한 핵력, 약한 핵력, 전자기력, 중력)을 매개하는 4가지 입자(게이지 보손)와 물질을 이루는 6가지의 쿼크 입자, 쿼크보다 가벼운 6가지의 렙톤 입자가 생겼습니다. 함께 생성된 힉스(Higgs) 입자는 앞서 말한 기본 입자들에게 질량을 부여하고 사라졌고요. 이후 빅뱅 후 1초에 이르기까지 쿼크들은 모여서 다양한 입자를 생성했습니다. 대표적인 입자가 양성자와 중성자입니다. 양성자는 전하가 $+\frac{2}{3}$인 업 쿼크(up-quark) 2개와 전하가 $-\frac{1}{3}$인 다운 쿼크(down-quark) 1개로 이뤄져 전체 전하가 +1입니다. 중성자는 업 쿼크 1개와 다운 쿼크 2개가 모여 전체 전하가 0입니다.

쿼크들이 모여 탄생한 양성자가 바로 원소의 빌딩블록인 수소 원자핵입니다. 그리고 수소 원자핵들은 다시 헬륨을 합성했습니다. 양성자끼리는 정전기적 반발력이 너무 크기 때문에 양성자끼리 합쳐지는 일은 일어나기 어렵습니다. 그래서 헬륨은 단계적으로 만들어졌습니다. 우선 양성자와 중성자가 만나 강한 핵력으로 결합하는 중수소(수소-2, ^{2}H)의 원자핵이 만들어졌고, 이 중수소 원자핵에 중성자가 결합해 삼중수소(수소-3, ^{3}H)를 만들거나, 양성자가 결합해 헬륨-3(^{3}He)을 만들었습니다. 그리고 중수소 2개가 합쳐지거나, 또는 삼중수소에 양성자가 더해지거나, 헬륨-3에 중성자가 더해지는 방식으로 헬륨-4(^{4}He)가 최종 생성됐습니다.

헬륨 합성은 빅뱅 후 3분 정도가 지났을 시점에 멈췄습니다. 우주가 팽창하면서 온도가 약 9억 K(켈빈)가량으로 떨어졌고, 입자 사이의 거리도 멀어졌기 때문입니다. 이 시점에 우주를 구성하는 원소들은 아주 극소량의 리튬(Li)과 베릴륨(Be)을 제외하고는 모두 수소(H)와 헬륨(He)이었습니다. 수소와 헬륨의 질량비는 3 대 1 정도. 이렇게 태초의 3분 동안 원자핵이 생성되는 과정을 우리는 빅뱅 핵합성이라고 부릅니다.

원소를 만들어내는 핵융합 공장, 별

빅뱅 후 한참의 시간이 흘러 우주의 나이가 약 38만 년 정도 됐을 때 우주의 온도는 3000 K까지 떨어졌습니다. 음전하를 가진 전자의 운동에너지가 수소나 헬륨 원자핵에 끌려 잡힐 만큼 낮았고, 그 결과 중성원자가 생성됐습니다. 전자의 에너지는 불연속적이어서 전자가 양성자에 부딪혀 방전되는 일이 없고, 양성자와 전자가 일정한 간격을 유지하며 중성원자를 이룰 수 있습니다.

중성원자가 생긴 후 약 1억 년 동안은 우주에 별다른 일이 없었습니다. 팽창에 의해 온도는 더 내려가고 물질들은 퍼져 나갔죠. 그러다 어느 날 별이 생겨났습니다. 물질이 퍼질 때 물질의 밀도가 높아지는 부분이 생기는데, 이 부분으로 더 많은 물질들이 중력 작용에 의해 모였고, 그럴수록 밀도가 상승해 중력수축이 더 활발해지면서 별이 탄생했습니다.

중력수축이 계속되자 별의 중심부 온도는 약 1500만 K까지 상승했습니다. 그 결과 별 안에서는 수소 핵융합이 일어났습니다(이러한 별을 주계열성이라고 합니다). 별의 중심에서 헬륨이 생성되는 과정은 빅뱅 직후 헬륨이 만들어지는 과정과는 조금 다릅니다. 수소의 원자핵에 약한 핵력이 작용해 4개의 양성자가 2개의 양성자와 2개의 중성자로 바뀝니다.

이때 중성자가 양성자보다 무겁기 때문에 자칫 핵융합 과정에서 별의 질량이 증가하는 것이 아닐까 생각할 수도 있겠는데요. 예상과 반대로 양성자와 중성자가 결합할 때에는 오히려 질량 결손이 발생합니다. 헬륨 원자핵의 질량이 양성자 질량 4개의 합보다 적어지는 거죠. 이런 질량 차이만큼 에너지가 발생해($E=\Delta mc^2$) 별이 빛을 냅니다.

별이 만든 탄소가 우리 몸에 오기까지

핵융합을 할 수소를 전부 소진한, 중심부에 헬륨만 남은 별은 크기와 질량에 따라 다른 길을 걷습니다. 질량이 태양 질량의 절반에 못 미치는 작은 별은 헬륨으로 구성된 백색왜성(white dwarf)으로 별의 생애를 마칩니다.

반면 태양보다 큰 주계열성은 다릅니다. 수소 핵융합이 중단되면서 중심에서 바깥으로 향하는 에너지 발산은 없어지고 별의 질량에 의해 중심으로 향하는 중력수축은 계속 진행되는 바람에 중심부의 온도가 다시 상

수소(H)
빅뱅 후 핵합성을 통해 가장 먼저 만들어진 원소. 우주를 구성하는 입자의 90%를 차지하고, 우리 몸의 70%를 이루는 물의 구성 원소이기도 하다. 밀도가 공기보다 낮고 불에 타기 쉬운 성질을 가지고 있다. 수소자동차, 수소폭탄 등에 쓰인다. 프랑스의 화학자 앙투안 라부아지에가 물(hydro)을 만들어내는(genes) 원소라는 뜻에서 '수소(hydrogen)'로 명명했다.

QR코드를 스캔하면 수소의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

승합니다. 이전보다도 훨씬 높은 약 1억 K까지요. 그러면 헬륨이 다시 핵융합을 시작해 탄소(C)를 만듭니다. 그리고 1억 K의 헬륨 코어 바깥쪽에 온도가 1500만 K 정도 되는 부분에서는 다시 수소 핵융합이 시작됩니다. 이로 인해 별이 팽창하고 표면부 온도가 약 3000 K 정도가 되면서 붉은색을 띱니다. 이러한 별을 적색거성(red giant)이라고 합니다.

별이 진화하는 동안 이 과정은 계속 반복됐습니다. 헬륨 다음으로는 탄소가 중심부에 점점 축적되고 헬륨의 핵융합이 중단되면서 중력수축에 의해 별의 중심부 온도가 상승했습니다. 중심부가 약 8억 K에 이르렀을 때 탄소의 핵융합, 즉 탄소 연소과정이 별 중심에서 일어났습니다. 이 과정에서 산소(O), 네온(Ne), 소듐(Na), 마그네슘(Mg) 등이 만들어졌습니다. 탄소 연소과정 이후에는 네온-산소-규소(Si) 순으로 연소가 일어났습니다.

그러다 안정한 철 원소가 별 중심부에 축적되면서부터는 핵융합이 더 이상 일어나지 않고 중력수축만 발생했습니다. 그 결과 별의 중심부 온도가 급격히 상승하고 이는 폭발로 이어졌습니다. 우리가 흔히 아는 초신성(supernova) 폭발입니다. 초신성 폭발은 중심부에서 생성된 원소들을 우주 공간 전체로 퍼뜨렸습니다. 그중 일부는 지구, 그리고 우리 몸에도 자리 잡았고요.

그렇다면 마지막으로 궁금해지는 한 가지가 있습니다. 원자번호 2번 헬륨과 6번 탄소 사이에 존재하는 리튬(Li), 베릴륨(Be), 붕소(B)는 어떻게 생겨났을까요? 베릴륨과 붕소 대부분은 탄소 같은 무거운 원소가 우주선(cosmic ray)이라 불리는 고에너지 입자에 의해 파쇄되면서 생성된 결과물입니다. 다 같은 우주 초기의 가벼운 원소들이지만, 생성 과정과 순서가 조금씩 다르다는 것이 재미있지 않나요?

구민희(경기 용인한빛중 2)

Q

철보다 무거운 원소는 어떻게 나왔나요?

09

차상원 교수가 답하다

온도가 높고 중력이 센 별의 중심부에서 핵융합을 통해 만들어낼 수 있는 원소는 탄소(C)부터 철(Fe)까지입니다. 철 원소가 별 중심에 축적되면서부터는 핵융합이 더이상 일어나지 않죠(자세한 내용은 49쪽 8번 질문 참조). 그렇다면 과연 철보다 무거운 원소는 어떻게 만들어지는 걸까요?

핵의 양성자수를 높이는 2가지 방법

정말 단순하게 생각하면 철 원자핵에 양성자가 더해지면 됩니다. 양성자수 또는 원자번호가 증가하면서 철보다 무거운 원소가 만들어지니까요. 하지만 양성자가 모든 정전기적 반발력을 이기고 큰 양전하를 가진 원자핵과 결합하는 일은 불가능합니다.

자연이 철보다 무거운 원소를 만들기 위해 택한 방법은 양성자 대신 중성자를 더하는 방법이었습니다. 철 원자핵이 중성자를 포획한 후 베타붕괴를 거치게 한 거죠. 전기적으로 중성인 중성자가 양전하를 가진 핵에 무리 없이 접근해 결합하고, 그 뒤에 음의 베타붕괴(β^-) 과정을 거치면 원자핵의 중성자 하나가 양성자로 바뀌면서 원자번호 또는 양성자수가 증가하는 참으로 영리한 방법입니다.

베타붕괴
원자핵 안에서 약한 상호작용에 의해 중성자가 양성자로 변환되거나 역으로 변환되는 핵붕괴 과정. 중성자가 양성자로 바뀌면서 전자를 방출하는 과정을 음의 베타붕괴(β^-)라고 일컫는다.

중성자를 더하는 방식은 두 가지로 생각할 수 있습니다. 첫째는 중성자가 원자핵에 하나씩 더해지고, 그때마다 베타붕괴가 일어나서 중성자가 양성자로 바뀌며 전자가 방출되는 과정을 반복하는 겁니다. 이 과정은 오래된 별에서 수백만 년에 걸쳐 아주 천천히 일어납니다. 때문에 '느린(slow)'이라는 단어의 앞글자를 따서 's-과정'이라고 부릅니다.

만약 s-과정을 통해 생성된 핵이 안정하다면, 중성자를 추가로 포획해 원자번호는 같고 질량수가 다른 동위원소(isotope)를 생성할 수 있습니다. 반면 s-과정을 통해 생성된 핵이 안정하지 않고 방사성을 띤다면 다른 핵으로 바뀔 수 있습니다. 예를 들어, s-과정을 통해 생성된 원자번호 28번 니켈-64(^{64}Ni, 양성자 28개 중성자 36개)가 중성자 한 개를 포획하면 니켈-65(^{65}Ni, 양성자 28개 중성자 37개)가 되는데, 니켈-65는 방사성을 띠기 때문에 이후에 베타붕괴를 통해 안정한 구리-65(^{65}Cu, 양성자 29개 중성자 36개)로 전환됩니다.

두 번째 방법은 원자핵에 중성자 여러 개가 동시에 붙는 겁니다. 여러 개의 중성자가 동시에 붙은 핵은 방사성을 띠고 불안정해져 0.01초 내에 베타붕괴를 일으킵니다. 이때 일부 중성자들이 양성자로 바뀝니다. 이렇게 양성자수 또는 원자번호가 늘어나면 원자핵에 더 많은 중성자가 붙을

수 있고 앞의 과정이 반복됩니다. 이와 같은 두 번째 방법은 온도가 매우 높고 중성자가 풍부한 상태에서 빠르게 일어나기 때문에, '빠른(rapid)'의 앞글자를 따서 'r-과정'이라 부릅니다. r-과정에서는 원자번호 26번 철이 원자번호 92번 우라늄(U)이 되는 데 1초가 채 걸리지 않습니다.

초신성 vs. 중성자별, 무거운 원소 기원 60년째 논쟁 중

우리가 태양계에서 접하는 대부분의 무거운 원소들은 r-과정을 통해 생성된 원소들입니다. 이런 r-과정이 일어나기 위해서는 굉장히 짧은 시간 내에 다량의 자유로운 중성자가 공급돼야 합니다. 에너지도 충분해야 하고요.

과학자들은 초신성(supernova)이 폭발하는 상황에서 이것이 가능할 것이라고 추측했습니다. 적색거성 또는 초거성의 중심부에 철이 축적되면 더 이상 핵융합은 일어나지 않고 순간적으로 핵붕괴가 일어납니다. 이 급격한 수축에 대한 반발력이 폭발로 나타나는 것이 바로 초신성 폭발입니다. 자유로운 중성자는 중력수축이 일어날 때 전자가 주변 원자핵에 포획되며 다량으로 확보됩니다. 관건은 초신성 폭발 중 무거운 원소가 만들어질 수 있을 만큼 충분한 중성자가 빠르게 공급될 수 있는가입니다.

여기에 대해 일부 과학자들은 중성자별 충돌이 일어날 때 발생하는 폭발인 킬로노바(kilonova) 환경에서 r-과정이 일어날 수 있다고 주장했습니다. 이때부터 철보다 무거운 원소가 초신성 폭발과 중성자별 충돌(후 폭발) 중 어느 것에서 비롯됐는지 논쟁이 시작됐죠. 논쟁은 60년째 이어져오고 있습니다.

중성자별은 초신성 폭발 후 남은 잔해의 한 형태입니다. 잔해로 남은 별 중 상대적으로 가벼운 별들이 밀도가 높고 작게 수축돼 중성자별이 됩니

다(상대적으로 무거운 별들은 계속 중력수축을 일으켜 블랙홀로 변합니다). 킬로노바는 바로 이런 중성자별 두 개가 서로의 주변을 돌다가 충돌하면서 발생하는 폭발입니다. 킬로노바는 태양계로부터 약 1억4000만 광년 떨어진 'NGC 4993' 은하에서 2017년 처음으로 관측됐는데요. 'GW170817'이라고 명명된 이 발견은 국제학술지 '사이언스'가 선정한 '2017 올해의 과학 연구 성과' 중 1위로 뽑히기도 했습니다.

다시 본론으로 돌아와, 최근에는 이런 중성자별 충돌, 즉 킬로노바로부터 무거운 원소가 탄생했다는 가설을 지지하는 연구 결과가 속속 나오고 있습니다. 한 예로 지구 대양 바닥에 존재하는 불안정한 동위원소이자 8100만 년의 반감기를 가진 무거운 플루토늄-244(^{244}Pu)의 기원을 조사한 연구를 들 수 있습니다.[doi: 10.1038/nphys3574]

이스라엘 연구팀은 지각의 플루토늄-244 존재량을 통해 초신성 폭발로 무거운 원소가 얼마나 만들어졌는지를 알 수 있을 것으로 보고 존재량을 측정했습니다. 그러나 초신성 폭발로 만들어졌다고 하기에는 플루토늄-244의 존재량이 너무 적었습니다. 이는 초신성 폭발보다 훨씬 드문 이벤트인 중성자별 충돌 등에 의해 무거운 원소가 생성됐음을 시사합니다.

2019년 10월 국제학술지 '네이처'에는 2017년 관측한 킬로노바 자료를 분석한 결과, 중성자별 충돌 과정에서 중성자 포획을 통해 원자번호 38번 스트론튬(Sr)이 만들어졌음을 밝힌 연구도 실렸습니다. 이는 중성자별이 중성자로 이뤄졌으며 r-과정이 중성자별에서 일어날 수 있음을 확인한 결과입니다.[doi: 10.1038/s41586-019-1676-3] 아직 확신할 수는 없지만 무거운 원소의 탄생을 설명하는 패러다임이 조만간 크게 바뀔 수도 있음을 조심스럽게 예측해 봅니다.

구민희(경기 용인한빛중 2)
김동현(서울 경희고 2)
유준혁(경기 철산중 3)
민제원(경기 상현중 3)
조영준(서울 송문중 2)
주영현(부산 용수초 6)
지민서(용인한국외대부설고 2)
최무현(대전 보문중 1)
김경민(서울 노원구)
최재학(서울 성북구)

Q

원소는 앞으로 몇 개까지 나올 수 있나요?

10

장홍제 교수가 답하다

지금까지 발견된 원소는 모두 118개입니다. 원자번호 1번 수소(H)에서 118번 오가네손(Og)까지 118개 원소 중에는 자연에 존재하는 원소들도 있고 인간이 실험실에서 만들어 낸 원소들도 있습니다. 이런 원소들은 앞으로 몇 개까지 더 나올 수 있을까요?

멘델레예프가 예측한 원소를 만들다

자연에 존재하는 원소들을 하나둘씩 발견한 인류는 원소를 인공으로 합성하는 데에도 관심을 가졌습니다. 새로운 원소를 찾아내면 원소의 이름을 제안할 수 있는 큰 기회가 주어지기 때문에 과학기술력과 국력을 자랑하고자 하는 나라들이 앞다퉈 인공원소 연구에 뛰어들었습니다.

인류가 첫 번째로 만들어 낸 인공원소는 원자번호 43번인 테크네튬(Tc)입니다. 1937년 이탈리아 연구팀이 몰리브데넘(Mo)에 가속된 중수소의 원자핵(중양성자)을 충돌시키는 과정에서 우연히 발견했습니다. 재밌게도 이 원소는 러시아의 화학자 드미트리 멘델레예프가 주기율표를 만들 당시 예언했던 원소였습니다. 멘델레예프는 족과 주기로 나열되는 주기율표를 만들면서 당시까지 발견된 원소들을 채워 넣었는데, 그 과정에서 6족 몰리브데넘과 8족 루테늄(Ru) 사이에 존재해야만 하는 원소가 있다는 사실을 깨달았습니다. 멘델레예프는 이 원소의 성질을 7족의 망가니즈(Mn)를 통해 예측하고, '에카-망가니즈(Em·Eka-manganese)'라는 임시 이름을 붙여 주기율표상의 자리를 비워뒀습니다.

새로운 원소는 바로 이런 에카-망가니즈와 유사한 여러 가지 성질을 가지고 있었습니다. 과학자들은 인류가 만들어낸 첫 번째 인공원소라는 의미를 기리기 위해서 그리스어 '테크네토스(technetos·'인공'이라는 뜻)'에서 이름을 따 테크네튬이라고 명명했습니다.

우라늄보다 무거운 초우라늄 원소들에 주목

테크네튬의 발견은 과학자들에게 앞으로 어떤 방식으로 새로운 원소를 찾아낼 수 있을지 실마리를 줬습니다. 같은 방식으로 과학자들은 주기율표로부터 존재가 예상되지만 아직 발견되지 않은 원소, 또는 자연계에 존재하지 않는 초우라늄 원소들을 탐색해 나갔습니다.

덕분에 플루토늄(Pu), 아메리슘(Am), 퀴륨(Cm), 오가네손 같은 다양한 새로운 원소가 밝혀졌고, 2016년에는 일본 연구팀이 발견한 원자번호 113번의 인공원소가 니호늄(Nh)이란 이름으로 주기율표에 공식 등록됐습니다. 그리고 대중에게 공식적으로 알려지지는 않았지만, 118번 오가네손

테크네튬(Tc)
인류가 인공적으로 만든 최초의 원소. 그리스어 '테크네토스(technetos·'인공'이라는 뜻)'에서 이름을 따왔다. 원자번호 43번인 테크네튬은 멘델레예프가 1871년 예측한 에카-망가니즈에 해당한다. 자연에서는 우라늄 광석에 극미량 존재한다. 강철 합금 제조나 방사선 의료 진단에 활용된다.

QR코드를 스캔하면 테크네튬의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

바로 다음 원소인 119번 우눈에늄(Ununennium)에 대한 연구가 일본 이화학연구소(RIKEN), 러시아 합동원자핵연구소(JINR) 주도로 최근 시작됐습니다.

그렇다면 인류는 앞으로 새로운 원소를 얼마나 더 찾아낼 수 있을까요. 새로운 원소를 발견하는 일은 갈수록 더 높은 수준의 기술을 필요로 합니다. 원자번호가 높아질수록 원소는 극도로 불안정해 짧게는 수 μs(마이크로초·1 μs는 100만분의 1초)도 안 되는 시간 동안만 존재하고, 이내 붕괴해 다른 원소로 바뀌어버리기 때문입니다.

과학자들은 초악티늄 원소에 집중하고 있습니다. 초악티늄 원소는 초우라늄 원소 중 일부입니다. 초우라늄 원소는 자연 상태에 존재하는 원소들 중 가장 무거운 원소인 우라늄(U)을 기준으로 그 보다 높은 원자번호를 갖는, 원자번호 93번 넵투늄(Np)부터 118번 오가네손까지의 원소들을 말합니다. 초악티늄 원소는 그중 원자번호가 104번 이상(혹은 정의에 따라 원자번호 110번 이상)인 원소들입니다.

우라늄보다 무거운 원소라고 해서 지구상에 존재할 수 없는 것은 아닙니다. 다만, 원자량이 높을수록 원소의 불안정성이 커져서 방사성 붕괴를 통해 존재량이 절반으로 감소하는 시간인 반감기가 짧아집니다. 초악티늄 계열 원소들은 반감기가 극도로 짧아 녹는점이나 결정구조와 같은 기본 특성들조차 아직 밝혀지지 않았습니다.

원자번호 높을수록 불안정한 이유

원소의 방사성 붕괴 현상, 나아가 새로운 원소를 얼마나 더 찾을 수 있을지를 이해하기 위해서는 조금 어렵지만 원자의 구조를 이해해야 합니다.

테크네튬이 발견되기 전인 1900년대 초기에는 수많은 화학적 개념의 혁명이 일어났던 시기였습니다. 어니스트 러더퍼드의 알파입자 산란 실험을 통해 원자핵의 존재가 관찰됐고, 닐스 보어의 원자 구조와 양자이론 등 원자의 구조와 상태에 대한 분석도 이 시기에 이뤄졌습니다.

원자의 구조와 거동을 조금씩 이해하게 되면서 원소 발견의 한계를 예상할 수 있는 몇 가지 단서도 나왔습니다. 원자의 구조상 중심에 존재하는 원자핵에는 양전하를 띠는 양성자와 이들 간의 반발력을 억제하고 매우 좁은 공간에 하나로 뭉쳐 있도록 돕는 중성자가 존재합니다. 이들 주변을 전자가 구름과도 같은 분포로 둘러싸며, 전자가 존재할 수 있는 특정한 에너지 조건을 만족하는 위치가 정해집니다. 이것을 우리는 전자껍질이라고 이해하며, 연속적이지 않은 위치들에 전자가 자리 잡고 있다고 설명합니다.

이런 구조로부터 우리는 원자핵에 가까운 전자와 멀리 위치한 전자들 간의 차이점을 예상할 수 있습니다. 원자핵 근처에 있는, 강한 양전하에 단단히 결합된 가장 안쪽의 전자들은 정전기적 인력에 의해 원자핵에 충돌하지 않도록 광속에 가까운 속도로 궤도를 그리며 공전합니다. 이런 안쪽 전자가 알베르트 아인슈타인의 특수상대성 이론에 따라 물체에 질량을 부여합니다.

결국, 안쪽 전자가 바깥쪽 전자보다 무거워지며 바깥쪽 전자에 의해 원소의 화학적 특성(전자의 출입에 따른 이온의 생성 등)이 결정됩니다. 원자번호가 높아지면 원자핵의 양전하가 증가함에 따라 이런 경향은 더 강해집니다. 원자번호가 높을수록 원소의 안정성이 감소해 방사성 붕괴 등의 현상이 발생하는 것입니다.

여기에 또 한 가지 흥미로운 사실이 존재합니다. 18족 원소인 비활성 기체처럼 원자 구조에서 전자껍질에 전자가 가득 채워져 있는 경우, 원소가 높은 안정성을 보인다고 알려져 있는데요. 각각의 전자껍질 상태에서 원자핵의 양성자 수와 중성자 수에 따라서도 원소의 안정성이 달라집니다. 전자껍질과 원자핵의 안정성 '궁합'이 가장 잘 맞는 헬륨(He·원자번호 2번), 산소(O·원자번호 8번), 칼슘(Ca·원자번호 20번), 니켈(Ni·원자번호 28번), 주석(Sn·원자번호 50번), 그리고 납(Pb·원자번호 82번) 등은 유독 안정적입니다.

현재 가장 발견이 유력한 122번 운비늄(에카-토륨) 역시 원자핵의 안정성이 기대되는 원소입니다. 하지만 앞으로 발견될, 원자번호가 119 이상인 원소들은 모두 8주기에 해당하는 무거운 원소들이기 때문에 앞서 말한 이론들이 모두 그대로 적용되지는 않을 가능성이 높습니다.

이론상 가장 높은 원자번호는 137번? 173번?

어쨌든 이렇게 전자껍질과 원자핵의 형태를 고려하면 앞으로 원자번호가 몇 번까지 높아질지 예상할 수 있습니다. 미국의 물리학자 리처드 파인만은 가장 안쪽 전자껍질에 위치한 전자가 원자핵의 높은 양전하로 인해 안정적인 궤도를 갖는 것이 불가능하다는 계산을 통해서 137개의 양성자를 가진 원자, 즉 원자번호 137번이 한계조건이라고 언급한 바 있습니다.

반면 이는 핵의 크기가 0이라는 가정 하에 계산한 결과로 좀 더 정확하게 계산하면 원자번호가 173번까지 존재 가능할 것이라는 의견도 존재합니다. 조금은 복잡한 이야기이지만 원자핵의 양전하가 그 이상으로 높아지면 전자의 반물질인 양전자를 유발해 전자가 소멸할 수 있는 불안정한 상태가 될 수 있기 때문입니다.

이처럼 새로운 원소의 발견은 주먹구구식 시도가 아닌, 철저한 계산과

예측에 의한 실험으로 이뤄지고 있습니다. 화학자뿐만 아니라 수학자, 물리학자도 힘을 합쳐 미개척지를 향해 도전하고 있습니다. 비록 새로운 원소가 안정성이 낮고 존재 가능성이 희박하더라도, 그래서 실생활에 활용할 기회가 아주 적더라도 인공원소 연구가 높은 가치를 인정받는 이유가 바로 여기에 있습니다.

심현서(경남 무지개초 4)
양호연(세종 새움초 5)

Q

아스타틴은 실제로 만들어진 적이 있나요?

11

장홍제 교수가 답하다

‘지각에 가장 미량 존재하는 원소’. 17족 할로젠에 속해 있는 6주기 원소 아스타틴(At)을 칭하는 말입니다. 아스타틴은 지구 대기 중에 오직 0.0000087% 존재하는 제논(Xe)보다도 찾아내기가 더 힘들었습니다. 결국 과학자들은 아스타틴을 직접 만들어 아스타틴이 실제로 존재할 수 있는지를 밝혔습니다.

아무도 본적 없는 원소

주기율표상의 원소를 모두 찾아낸 화학자들은 지각에 존재하는 원소들 가운데 가장 무거운 우라늄(U)보다 더 무거운, 더 높은 원자번호를 갖는 원소를 찾아내고자 했습니다. 원소를 인위적으로 만들어내는 것은 그중 하나의 방법이었습니다.

인류가 첫 번째로 만들어낸 인공원소는 테크네튬(Tc)입니다. 테크네튬은 모든 동위원소가 방사성 붕괴를 하는 원소로, 가장 긴 반감기가 약 420만 년에 불과합니다. 지구가 탄생한지 오랜 시간이 흘렀기 때문에 거의 모두 붕괴돼 지각에서는 발견하기 힘든 원소죠.

그리고 인류가 두 번째로 만들어낸 인공원소는 넵투늄(Np)이었습니다. 1940년 미국 연구팀은 우라늄에 중성자를 충돌시켜 우라늄보다 더 무거운 원소를 만들어냈습니다. 천왕성(Uranus)에서 이름을 딴 우라늄보다 하나 더 뒤에 있는 원소라는 의미에서 해왕성(Neptune)에 착안한 이름을 지었습니다. 우라늄보다 더 큰 원자번호를 갖는 원소들을 초우라늄 원소라 칭하는데, 넵투늄은 첫 번째 초우라늄 원소입니다.

그리고 세 번째 인공원소가 바로 아스타틴입니다. 아스타틴 역시 존재량이 극히 적어 자연계에서는 발견되기 힘든 원소입니다. 과학자들은 아스타틴과 유사한 성질을 가지는 원소가 있을 것이라 예상하고, 주기율표상 아이오딘(I)의 바로 아래 빈칸에 자리를 비워놨습니다.

그렇게 한참의 시간이 흘러 아스타틴은 1940년 미국 연구팀이 비스무트-209(^{209}Bi)에 고에너지 알파입자(원자번호 2번인 헬륨의 원자핵. 전자를 모두 잃어버린 상태를 의미함)를 충돌시키는 과정에서 처음으로 발견됐습니다. 가장 안정한 동위원소의 반감기가 단 8.1시간에 불과한 아스타틴은 눈 깜짝할 사이에 사라져 버렸습니다. 아스타틴의 이름은 ‘불안정함’을 뜻하는 그리스어 ‘astatos’에서 유래했습니다.

아스타틴은 그 양이 굉장히 적어서 이제까지 만들어진 원소를 모두 합쳐도 0.000001 g에 불과할 것이라고 합니다. 밀도, 녹는점, 끓는점 등의 물리적 성질들도 아직 완벽하게 분석하지 못해 추정값만 존재합니다. 외형은 금속성을 보이는 검은색 고체 형태일 것으로 예상되나 아직 눈으로

관찰한 사람은 아무도 없습니다. 아스타틴이 실제로 만들어졌다는 사실도 간접 실험을 통해 알아낸 것이 전부입니다. 합성된 아스타틴을 동물에게 주입했을 때 아이오딘과 유사하게 갑상선에 누적되는 독특한 현상이 일어나는 것을 보고 그 존재를 간접적으로 확인했을 뿐입니다.

아스타틴은 생산량이 매우 적고, 반감기가 짧으며(빨리 사라지며), 붕괴할 때 방사선을 내뿜어 사용 분야가 극도로 제한적이지만, 화학자들은 아스타틴의 방사선을 이용해 병을 진단하거나 항암 치료에 활용할 방법을 열심히 찾고 있습니다.

지구에 존재하는 아스타틴은 단 25 g

테크네튬, 넵투늄, 아스타틴 등 인간이 만들어낸 3가지 원소는 매우 극소량이지만 자연계에도 존재합니다. 검출이 어려울 뿐이죠. 테크네튬의 경우 1952년 적색거성의 선 스펙트럼(원소의 종류에 따라 특정한 파장의 빛이 관찰되는 특성)에서 그 존재가 밝혀졌습니다. 지구상에서도 역청우라늄석(pitchblende)을 들여다보면 암석 내부 우라늄이 핵분열을 일으켜 생겨난 테크네튬이 함유돼 있습니다.

넵투늄 역시 우라늄을 이용하는 원자력 발전의 부산물에서 찾아볼 수 있습니다. 테크네튬과 마찬가지로 역청우라늄석에 자연적으로 생성된 넵투늄이 존재한다는 사실이 1952년 확인됐습니다. 넵투늄은 원자력 전지로 사용하기 위한 플루토늄-238(^{238}Pu) 재료나 중성자 검출 장치에 쓰입니다.

아스타틴은 또한 우라늄과 토륨(Th)의 방사성 붕괴 과정에서 생성되기 때문에 매우 적은 양이지만 지각 속에 자연적으로 존재하고 있습니다. 하지만 지구에 존재하는 아스타틴을 전부 모아도 약 25 g에 불과할 것으로

아스타틴(At)
지각에 가장 미량 존재하는 원소. 대부분 비스무트에 헬륨 원자핵을 충돌시켜 인공적으로 만든다. 매우 불안정해 30여 개 동위원소가 모두 방사성 붕괴를 한다. 이때 가장 안정한 동위원소의 반감기가 8.1시간에 불과하다. 질병 진단용 방사선 치료 등에 활용될 전망이다.

추정됩니다.

이렇게 광석에 포함된 초우라늄 원소를 검출하는 것은 사실상 불가능한 일입니다. 극미량 존재하고 반감기가 짧기 때문입니다. 미지의 원소를 찾으려는 관심과 열정은 원소를 새롭게 합성하고 분석하는 연구 분야를 열었습니다. 지금 이 순간에도 새로운 원소의 존재 가능성과 의미를 찾는 노력은 계속되고 있습니다.

김한슬(경남 무지개초 6)
박제민(경기 서현중 1)
이민서(경기 평택여고 2)
정현석(경북 포항중 3)
황세현(서울 강남구)
윤미수(경기 김포시)

Q

미지의 원소가 새로운 원소인지 어떻게 알 수 있나요?

12

장홍제 교수가 답하다

인공원소 하나를 만들어내기 위해서는 많은 시간과 투자가 필요합니다. 핵화학 반응으로 인공원소를 합성하는 데 어마어마한 노력이 들고, 인공원소를 합성한 이후에도 그 원소가 이전에는 없던 새로운 원소인지, 새로운 원소라면 이름은 무엇으로 할 것인지 정하는, 만만찮게 복잡한 절차가 기다리고 있습니다.

새로운 원소 발견, 실험으로 증명돼야

'새로운 화학 원소의 발견은 존재하지 않았던 원자번호(Z)를 갖는 핵종의 10^{-14}초 이상 동안의 존재에 대해, 합리적 의심의 여지 없이 이뤄진 '실험적인 증명'이다.'

국제순수·응용화학연합(IUPAC)은 새로운 원소로 인정하는 기준을 이와 같이 정해놨습니다. 그리고 상세한 추가 규정들이 이어집니다. 첫째로, 미지의 원소의 수명(형성 이후 실제로 존재한 시간)은 형성된 원자핵이 외부 전자를 획득하는 데 걸리는 시간에 대한 합리적인 추정치로 선택됩니다. 둘째, 미지의 원소 발견은 화학적 방법이나 물리적 방법(원자물리나 핵물리)에 의한 것을 기준으로 합니다. 셋째, 존재하지 않았던 원자번호란 정확히 결정된 원자번호일 필요가 없으며, 이전에 관찰된 적 있던 모든 원소의 원자번호들과 다르기만 하면 합리적입니다. 이는 새로 형성된 원소일수록 다양한 동위원소를 가질 수 있기에 이론상 목표로 한 원자번호가 아니더라도 알려진 바만 없다면 새로운 원소로 인정된다는 의미입니다. 마지막으로, 미지의 원소의 질량에 대해서도 정확한 값을 알 필요가 전혀 없습니다.

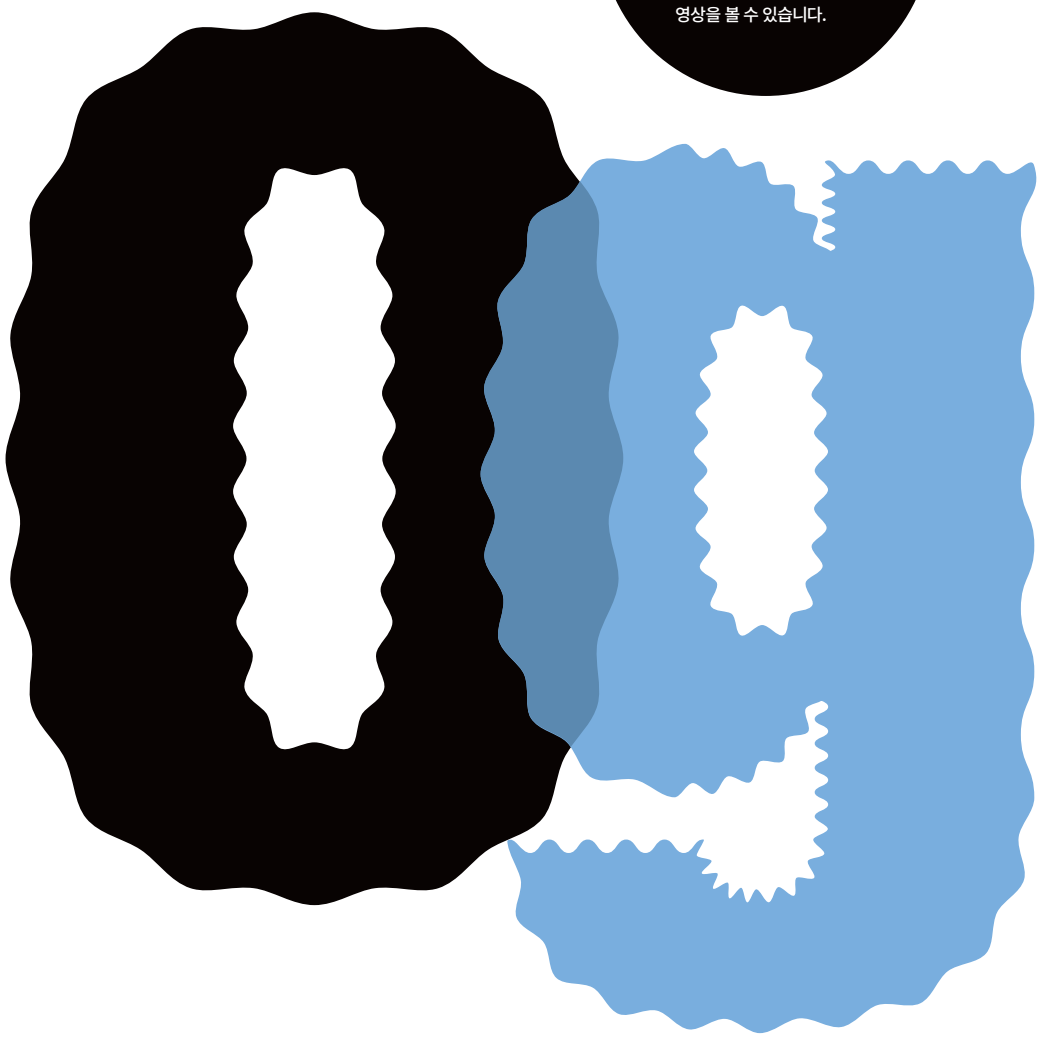
어떤 연구팀이 새롭게 발견한 원소가 앞서 말한 미지의 원소 기준을 충족한다면, 그 다음은 발견한 과정이 올바르게 이뤄졌는지 확인하는 절차로 넘어갑니다. 발견(discovery)을 확인하기 위해서는 보통 존재하는 무언가를 관찰하는 과정을 거치지만, 인공원소는 조금 다릅니다. 초우라늄 원소 이후부터는 존재하는 시간이 매우 짧고 방사성 붕괴를 하기 때문에 일반적인 측정 방식은 사용하기가 어렵습니다.

그래서 오늘날 과학자들은 생성된 원소가 알파붕괴(알파입자, 즉 헬륨 양이온 원자핵을 방출하는 붕괴)나 베타붕괴(전자나 양전자를 방출하는 붕괴), 또는 중성자 붕괴(중성자를 방출하는 붕괴)하는 과정에서 나타나는 입자나 에너지를 관측해 이를 토대로 존재 여부를 확인합니다.

또 질량분석법을 이용해 미지의 원소의 대략적인 질량 범위를 파악하고, 이것을 핵종에 따라 예상되는 결과와 비교해 확인하는 방법을 주로 사용합니다. 이런 화학적 식별 기준은 노벨륨(No)을 비롯한 모든 초우라늄 원소 발견에 중요한 역할을 해왔습니다.

오가네손(Og)
지금까지 밝혀진 원소 중 원자번호가 가장 큰 원소.
가장 마지막 초우라늄 원소로 비활성 기체와 성질이 유사할 것으로 추정된다. 국제순수·응용화학연합(IUPAC)은 2015년 12월 오가네손의 발견을 공식적으로 인정했다. 1999년 합성에 실패하고 2006년 재시도 끝에 발견된 지 9년 만이다. 발견이 확정되기 전에는 우눈옥튬(Uuo)이라는 임시 명칭으로 불렸다.

QR코드를 스캔하면 7주기 원소들의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.



한동안 임시 명칭으로 불려

새로운 원소의 발견이 최종적으로 확정되기 전, 원소들은 임시 명칭을 가집니다. 임시 명칭은 원자번호를 읽는 발음으로 정해집니다. 일반적으로 과학 용어를 세는 그리스어 셈법(1=mono, 2=di, 3=tri 등)과 라틴어 셈법(1=unus, 2=duo, 3=tres 등)과 혼동이 생기지 않도록 정해진 셈법(1=un, 2=bi, 3=tri 등)을 사용하게 됩니다.

예를 들어 현재 니호늄(Nh)으로 명명된 113번 원소의 경우 과거 우눈트륨(Un-un-trium)으로 불렸고, 가장 최근에 확정된 원소인 원자번호 118번 오가네손(Og)은 우눈옥튬(Un-un-octium)이라고 불렸습니다. 아직 미확정 상태이지만 가장 유력한 후기 원소인 122번 원소는 같은 방식으로 운비븀(Un-bi-bium)으로 불립니다.

최종적으로 원소의 발견이 확정되면 정식 명칭을 정합니다. 이 과정은 두 학술기관의 규정을 기반으로 이뤄집니다. 1919년 설립된 화학자들의 국제 학술기관인 국제순수·응용화학연합(IUPAC)과 1922년 설립된 국제순수·응용물리학연합(IUPAP)입니다. IUPAC은 역사적으로 대부분의 유기 및 무기화합물의 명명법에 대한 국제 표준과 규정을 만들어온 곳입니다.

원소의 발견이 최종 확정되면 IUPAC은 발견자에게 원소의 이름과 기호를 선정할 것을 요청합니다. 최근 발견되는 원소들은 두 곳 이상의 공동연구팀의 연구결과인 경우가 많은데, 이처럼 최초 발견자를 하나로 특정하기 어려운 경우 IUPAC은 연구팀들이 이름과 원소기호를 협의해서 6개월 내로 확정하길 요청합니다.

만약 이 기간 내에 합의를 이루지 못한다면 IUPAC이 제안된 원소명과 원소기호 중 하나를 선택해 정식 명칭으로 공표합니다. 물론 이에 대해

발견국들이 동의하지 못하고 각자의 명칭을 고수하는 사례도 종종 발생합니다. 원자번호 104번 러더포듐(Rf) 사례가 대표적입니다. 이 원소는 옛 소련이 1964년, 미국이 1969년 발견해 각각 쿠르차토븀(Ku)와 러더포듐이라고 명명했습니다. 그러나 냉전시대라는 당시 여건상 양측은 의견 일치를 보지 못했고, 30년 동안이나 각 언어권에서 다른 이름으로 불려왔습니다.

지금은 IUPAC의 중재를 통해 104번 원소를 러더포듐으로, 그리고 105번 원소를 러시아의 합동원자핵연구소(JINR)가 위치한 도시인 두브나(Dubna)에서 이름을 따 더브늄(Db)로 확정하며 타협을 이룬 상태입니다. 새로운 원소의 발견은 이처럼 시작부터 마지막 명명까지 치열한 경쟁 속에 이뤄져 왔습니다. 현재도 새로운 원소의 발견은 물리 및 화학 분야의 최첨단 연구를 이끌며 기초과학의 토대를 더욱 굳건히 다지고 있습니다.

권부경(경남 무지개초 4)
김나영(제주대사범대부설고 2)
정지유(경남 무지개초 3)
최무현(대전 보문중 1)
임진경(세종 도담동)

Q

원소와 원자는 어떻게 다른가요?

13

차상원 교수가 답하다

‘원소(元素·element)’와 ‘원자(原子·atom)’라는 용어는 화학 분야뿐만 아니라 다양한 자연과학 분야를 공부할 때 처음 접하는 용어 중 하나입니다. 하지만 이 두 용어의 의미와 차이점을 이해하는 데 많은 사람들이 어려움을 겪습니다. 그런 이유 때문인지, ‘원소와 원자’라는 주제는 여러 교양과학 서적이나 온라인 콘텐츠의 단골 메뉴이기도 합니다.

원소와 원자의 차이를 설명할 때 자주 등장하는 구분법은 ‘종류’와 ‘개별 입자’입니다. 이러한 구분법에 기초해서 원소와 원자의 차이점을 과일바구니라는 화합물(compound)에 빗대 설명해 보겠습니다.

한 과일바구니에 사과 3개, 배 2개, 오렌지 5개가 들어 있다고 가정해 봅시다. 이 경우 원소의 개수는 몇 종류의 과일이 있는지에 해당하고, 원자의 개수는 전체 과일의 개수에 해당합니다. 즉, 과일바구니 화합물은 3종류의 원소로 이뤄져 있고, 총 10개의 원자로 구성돼 있습니다.

또 다른 비유로 일본의 무기화학자 사이토 카즈오는 원자를 개인, 원소를 민족에 비유해 설명하기도 했습니다. 즉, 원소는 어떤 한 종류 또는 집합을 나타내는 추상적인 개념이며, 원자는 실제로 존재하는 물리적 입자라고 정리할 수 있습니다.

화학자들조차 논쟁하는 원소의 정의

과일바구니 화합물 비유는 원소와 원자의 차이점을 직관적으로 이해하기에는 좋은 사례지만, 원소와 원자 자체가 의미하는 바를 설명하기에는 부족합니다. 지금부터는 원소와 원자의 의미에 대해 좀 더 자세히 얘기해 보겠습니다.

원소는 화학 분야에서 기본 중의 기본인 개념으로 당연히 아주 명확하고 혼동되지 않는 정의가 있을 것이라고 보통 생각합니다. 하지만 2019년 주기율표 탄생 150주년이 되는 해를 기념해 영국 왕립화학회(Royal Society of Chemistry)가 발표한 ‘원소란 무엇인가’라는 제목의 인터뷰 특집기사를 보면, 화학을 전공하는 교수나 연구자조차 원소에 대한 정의를 두고 논쟁하고 있음을 알 수 있습니다(QR코드 참조). 심지어 2013년에는 ‘화학자가 원소에 관해 말할 때 그 의미가 무엇인가’라는 논문이 출간되기도 했습니다.[doi: 10.1021/ed3004275]

QR코드를 스캔하면 영국 왕립화학회에서 ‘원소란 무엇인가’라는 주제로 화학자들을 인터뷰한 영상을 볼 수 있습니다.

원소라는 개념은 ‘만물의 근원은 무엇인가’라는 고대 그리스의 철학적인 질문으로부터 시작됐다고 볼 수 있습니다. 철학자 탈레스(Thales)가 만물의 근원은 물이라고 주장한 이래로, 아낙시메네스(Anaximenes)와 헤라클

레이토스(Heraclitus)가 물질의 근원으로 각각 공기와 불을 언급했으며, 엠페도클레스(Empedokles)는 이를 종합해 흙, 물, 공기, 불의 4원소설을 주창했습니다. 그리고 이를 계승한 아리스토텔레스(Aristoteles)는 이 4원소가 건조함, 습함, 뜨거움, 차가움 등의 성질을 서로 무한히 교환하면서 물질이 만들어진다고 주장하며, 우주에는 가장 완전한 제5원소(ether)가 존재한다고 설명했습니다.

18세기 다소 극단적인 경험론자였던 프랑스 화학자 앙투안 라부아지에(Antoine-Laurent de Lavoisier)는 이러한 철학적 이치로서의 4원소설을 부정했습니다. 라부아지에는 원소가 추상적인 개념이 아니라, 분리정제가 가능하고 화학적으로 더 이상 분해되지 않는 간단한 물질(simple substance·현대 과학에서는 홑원소 물질이라 해석함)이라고 규정했습니다.

하지만 이 시대에는 원소에 대한 형이상학적 또는 철학적 개념이 여전히 공존하고 있었습니다. 19세기 멘델레예프의 원소에 대한 주장에도 이런 철학적 개념이 남아있습니다. 멘델레예프는 원소란 라부아지에가 주장한 간단한 물질보다 훨씬 더 본질적인 것으로, 원소의 정체성은 원자량에 의해 결정되며 이 정체성은 화학적 변화에서도 유지된다고 주장했습니다.

이를 뒷받침하는 예로 멘델레예프는 다음과 같은 기록을 남겼습니다. "산화 수은은 두 개의 간단한 물질을 포함하고 있지 않지만, 두 개의 원소는 포함하고 있다. (중략) 즉, 산화 수은은 금속 형태의 수은과 기체 형태의 산소를 담고 있는 것이 아니라, 두 개의 '원소'를 담고있는 것이다."

O와 O_2를 모두 산소라 부르는 이유

원소의 정의에 대한 논의는 원자론이 발표된 후 20세기까지도 지속됐습니다. 1930년대 방사화학(방사성 물질의 화학적 및 물리화학적 성질을 연구하는 분야) 선구자인 프리드리히 파네트(Friedrich Adolf Paneth)는 원소라는 용어는 '기본 물질(basic substance)'과 '간단한 물질(simple substance)'이라는 두 가지 다른 개념을 포함하고 있다고 설명했습니다. 여기서 '간단한 물질' 개념은 라부아지에의 원소 개념에 바탕을 둔 것이고, '기본 물질' 개념은 멘델레예프가 주장한 원소의 개념과 일맥상통합니다. 하지만 파네트는 '기본 물질'이 멘델레예프가 언급한 원자량이 아닌, 원자번호로 구분된다고 주장했습니다.

그 이후 원소의 개념은 어떻게 변했을까요? 20세기 동안 눈부신 과학 발전으로 원소의 개념이 많이 다듬어졌지만, 현재까지도 국제순수·응용화학연합(IUPAC)에서 정한 원소의 정의는 앞서 언급한 두 개념을 모두 담고 있습니다.

원소의 정의

① 원자들의 종류로, 원자핵에 같은 수의 양성자를 가진 모든 원자들을 일컬음.

② 원자핵에 같은 수의 양성자를 가진 원자들로 이뤄진 순수한 화학물질. 때때로 정의①과 구분하기 위해서, 정의② 개념에 해당하는 용어로 '(홑)원소 물질(elementary substance)'을 사용하기도 함. 하지만, '화학원소'란 개념은 두 정의에 대부분 통용됨.

이렇게 원소는 이중적인 의미를 가지고 있기 때문에 용어를 사용할 때 자주 혼동이 발생합니다. 보통 화학자들은 원소가 어떤 의미로 사용됐는지 문맥상 또는 연구 내용을 바탕으로 파악하기 때문에 크게 혼동하지는 않습니다. 예를 들어, '탄화수소는 산소와 반응해 물과 이산화탄소를 생성

한다’고 말할 경우, 여기서 산소는 정의②에 해당하는 산소, 즉 O_2를 일컫습니다. 물론 혼동을 피하기 위해서는 ‘산소분자’ 또는 ‘산소기체’라고 표현하는 것이 더 바람직하겠죠.

또 다른 예로 ‘탄소의 동소체(allotrope)로는 흑연, 다이아몬드, 그래핀 등이 있다’고 말할 경우, 여기서 탄소는 정의①에 해당하는 탄소입니다. 개인적으로는 두 정의 중 대중적으로 통용되는 원소의 개념은 정의①, 즉 같은 원자번호 또는 양성자수를 가진 원자핵의 집합이라고 생각합니다. 만약 정의②만이 원소의 의미로 받아들여질 경우, 매우 불안정하고 수 ms(밀리초)만 존재하는 인공원소를 과연 원소라 부를 수 있을까요? 한 번 생각해 볼 문제입니다.

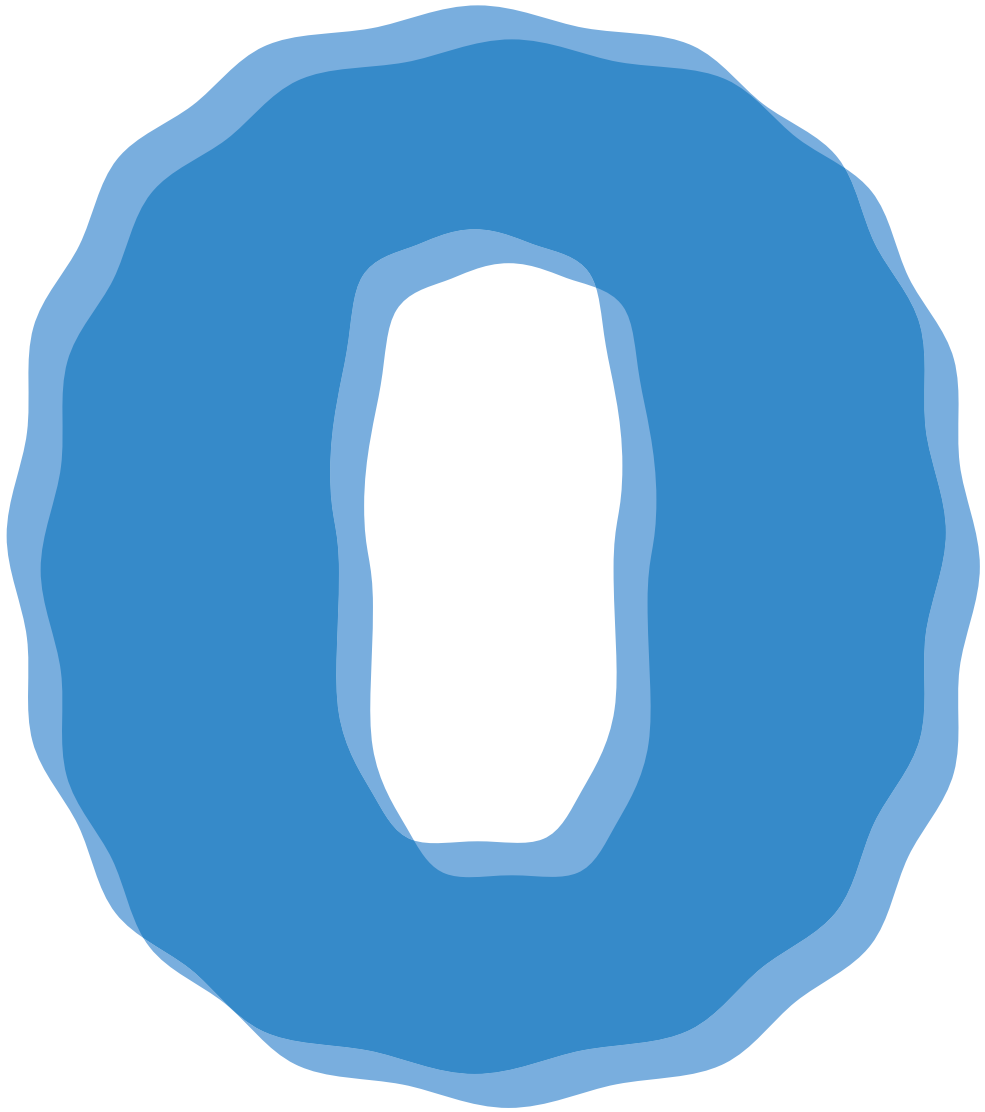
원자, ‘화학원소’로 규정지을 수 있는 가장 작은 입자

지금까지 원소의 개념에 대해 역사적 배경과 함께 설명했는데요. 마지막으로 원자의 개념을 살펴보며 원소와 원자의 차이를 되짚어 보겠습니다. 원자의 영어 단어인 ‘atom’은 부정접두어(a-)와 쪼개다는 의미(tomos)가 합쳐진 ‘atomos’로부터 유래했습니다. 즉 원자는 ‘더 이상 쪼갤 수 없다’라는 뜻을 가지며, 기원전 5세기 고대 그리스 철학자 데모크리토스(Democritus)가 처음 제시했습니다.

그리고 19세기 초 영국의 화학자 존 돌턴(John Dalton)이 제시한 원자설을 계기로 근현대 과학에서 원자의 개념이 받아들여지기 시작했습니다. 현재 IUPAC에서는 원자를 다음과 같이 정의하고 있습니다.

QR코드를 스캔하면
산소의 특징과 숨은 이야기를
다룬 대한화학회의 영상을
볼 수 있습니다.

산소(O)
원자번호 8번인 산소는 지각에서 가장 풍부한 원소다. 우주에서도 수소와 헬륨 다음으로 가장 많다. 산소는 상온에서 이원자 분자 상태(O_2)로 존재하며 반응성이 커서 거의 모든 원소와 산화물을 만든다. 흔히 ‘산소’라고 하면 산소 원자(O)와 산소기체(O_2)를 통칭한다.



원자의 정의

화학원소로 규정지을 수 있는 가장 작은 입자. 원자는 Z개의 양성자를 가져 양전하를 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.

민제원(경기 상현중 3)

Q

코발트, 니켈의 원자량은 왜 주기율표 순서와 맞지 않나요?

14

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($_{27}$Co)의 원자량은 58.933194인데, 28번 니켈($_{28}$Ni)의 원자량은 이보다 작은 58.6934입니다.

멘델레예프가 원자량 순서대로 나열하는 본인의 원칙을 깨면서까지 화학적 성질에 맞춰 순서를 바꿨던 52번 텔루륨($_{52}$Te, 원자량 127.60)과 53번 아이오딘($_{53}$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}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}Cl은 전체 염소의 약 75.77%를 차지하고 있으며, ^{37}Cl은 나머지 24.23%를 차지합니다. ^{35}Cl와 ^{37}Cl의 질량은 원자 질량 단위(u)로 각각 34.9688527과 36.9659026이므로 염소의 평균 원자량은 다음과 같이 계산합니다.

Cl의 평균 원자량 = (34.968 8527 × 0.7577) + (36.965 9026 × 0.2423) = **35.45**

QR코드를 스캔하면 니켈의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

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}Co의 질량인 58.933194 u만으로 결정됩니다.

다양한 코발트의 동위원소가 핵 반응기에서 합성됐으며, 대표적인 코발트 방사성 동위원소인 ^{60}Co는 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 5종류의 안정한 동위원소들이 다음과 같이 자연계에 존재합니다.

동위원소	상대 원자 질량 (u)	존재비율 (%)
^{58}Ni	57.935342	68.0769
^{60}Ni	59.930785	26.2231
^{61}Ni	60.931055	1.1399
^{62}Ni	61.928345	3.6345
^{64}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_2O라는 것을 알고 있지만, 화학식에 대한 개념이 없던 돌턴은 증기 또는 물이 수소와 산소가 가장 간단한 비율로 합쳐진 HO일 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 설명하려 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 돼야 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 돼야 한다고 주장했습니다. 1900년대 초반까지 이에 대한 다양한 논쟁과 투표가 진행됐고, 1905년부터 비로소 산소가 원자량의 기준으로 받아들여졌습니다.

하지만 1929년 윌리엄 지오크(William F. Giauque) 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}C)를 1961년부터 사용하기 시작했습니다. 단일 동위원소 즉, 산소-16(^{16}O)을 원자량 기준으로 사용하던 물리학자들은 역시나 단일 동위원소인 탄소-12(^{12}C)를 사용하는 것에 큰 불만이 없었습니다. 또 화학자들도 산소-16(^{16}O)과 달리 탄소-12(^{12}C)를 사용해 계산한 원자량이 기존에 본인들이 사용했던 원자량과 매우 작은 오차를 보였기 때문에 불만 없이 받아들일 수 있었습니다.

최형서(경남 동진여중 1)

Q

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}C) 원자핵에는 양성자 6개와 중성자 6개가 있는 반면, 탄소-13(^{13}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}F), 25번 망가니즈(^{55}Mn), 27번 코발트(^{59}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}Ag와 ^{109}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.

애스턴이 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 애스턴은 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/z에서 측정됩니다. 그리고 각 m/z에서 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}Cl와 ^{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 화합물은 경도가 매우 높다. 천연 상태의 텅스텐은 4가지 동위원소를 가지고 있다. 텅스텐 동위원소들의 존재비율을 측정해 지구형 행성의 연대를 측정할 수 있다.

QR코드를 스캔하면 텅스텐의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

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.

김지후(제주중앙중 1)
현유지(제주 한라초 3)
손진(경기 안양시)

Q

원소의 질량을 어떻게 그렇게 정확히 재나요?

16

차상원 교수가 답하다

원소의 평균 원자량은 동위원소들 각각의 원자 질량 단위(u) 값과 존재비율을 고려해 계산합니다. 이 때문에 원자번호가 28번인 니켈의 평균 원자량이 원자번호가 27번인 코발트의 원자량보다 더 작게 나오기도 하죠(자세한 내용은 89쪽 14번 질문 참조). 이 과정을 자세히 들여다보면 한 가지 의문이 생깁니다. 과학자들은 어떻게 동위원소들의 질량을 소수점 이하 다섯째 자리 또는 그 이하까지 정확하게 측정할 수 있었을까요?

수소 원자핵 질량, 소수점 12자리까지 구해

원자량을 아주 정밀하게 측정할 때에는 동위원소의 존재와 그 존재비율을 측정할 때와 마찬가지로 질량분석법을 이용합니다(자세한 내용은 97쪽 15번 질문 참조). 다만 좀 더 정밀한 측정을 위해 '페닝 이온트랩(Penning ion trap)'이라는 특정한 형태의 질량분석기를 사용합니다.

페닝 이온트랩 장치는 우리나라 타악기 중 하나인 장구와 비슷하게 생겼습니다. 허리가 잘록한 나무통처럼 생긴 링(ring) 전극과, 장구의 양쪽 가죽처럼 생겨 링 전극 양쪽을 덮는 두 개의 엔드캡(end cap) 전극으로 이뤄져 있습니다. 이 세 전극에 전압을 걸어 불균일한 전기장을 형성한 상태에서 세 전극 중앙을 관통하는 균일한 자기장을 걸어주면, 장구 나무통 속과 같은 전극 사이 빈 공간에 이온들을 잡아 둘 수 있습니다. 잡혀 있는 이온들은 작은 원을 그리는 동시에 큰 원운동을 하는 사이클로트론(cyclotron) 운동을 하게 됩니다. 스프링의 양쪽 끝을 이어 하나의 큰 원을 만든 모양을 상상해 보면 이해하기가 쉬울 겁니다.

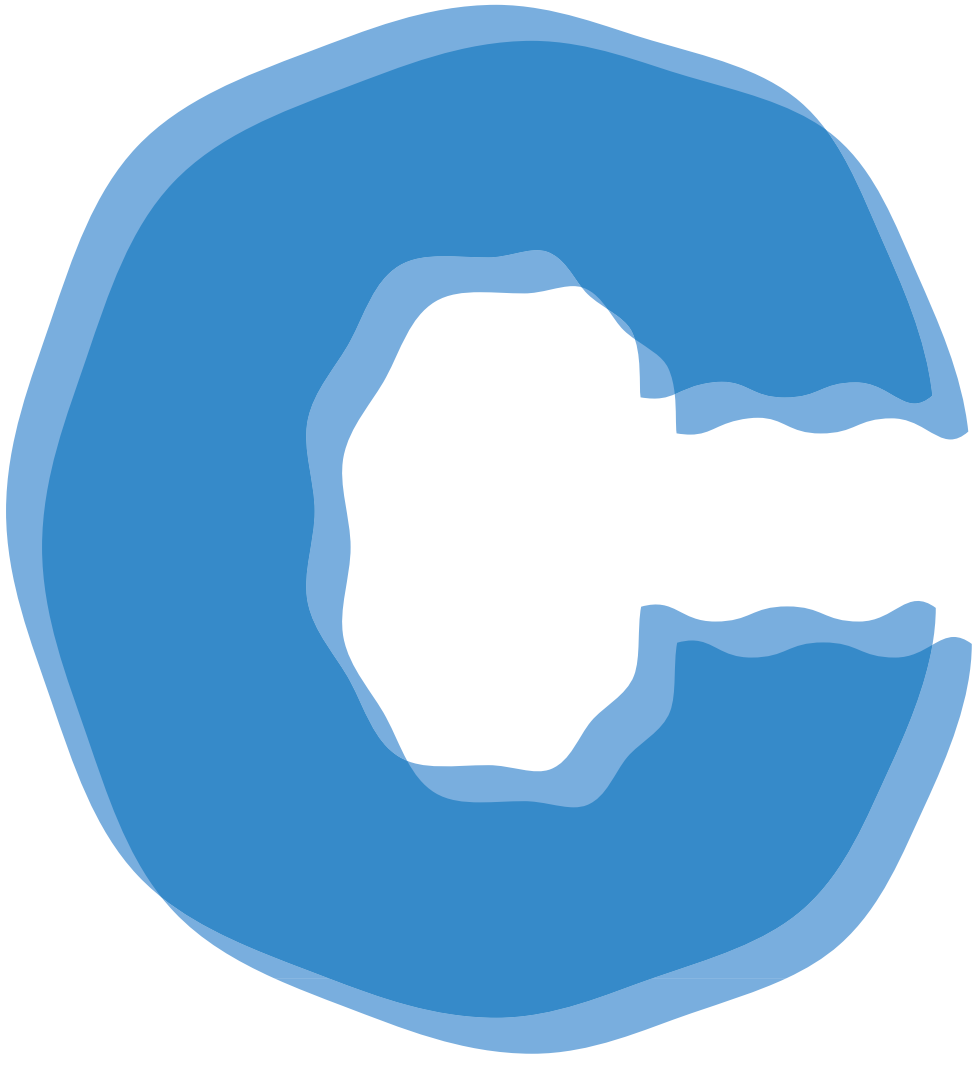
사이클로트론 운동의 진동수, 즉 이온이 트랩 안에서 얼마나 빨리 돌고 있는지는 이온의 질량 대 전하비(mass-to-charge ratio, *m/z*)와 반비례합니다. 진동수는 매우 정밀하게 측정할 수 있기 때문에, 이를 변환해 얻은 이온의 질량 또한 매우 정밀합니다. 페닝 이온트랩 장치를 발명한 한스 데멜트(Hans Georg Dehmelt)는 그 공로를 인정받아 1989년 노벨물리학상을 수상했습니다.

페닝 이온트랩 장치를 이용해 정밀하게 원자량을 결정할 때는 이미 원자량 또는 분자량이 잘 알려진 이온과 원자량을 측정하고자 하는 이온을 이온트랩 장치에 같이 주입합니다. 이때 두 이온들은 서로 다른 진동수로 원운동을 하고 있으며, 우리가 측정하는 신호는 각 이온에 의해 유도된 전류들이 겹쳐진 신호입니다.

다행히도 푸리에 변환(Fourier transform)이란 수학적 기법을 사용하면 겹쳐진 신호를 각 이온의 진동수 성분으로 분해할 수 있습니다. 이렇게 얻어진 진동수를 이용해 두 이온의 진동수 및 질량 비율을 구하고, 전자 질

탄소(C)
원자량을 측정할 때 기준이 되는 원소. 1961년 바닥상태로 존재하는 탄소-12(^{12}C) 원자 1개 질량의 12분의 1에 해당하는 질량이 원자 질량 단위(u)로 정의됐다. 질량분석기에 측정 대상과 함께 넣으면 둘의 질량비를 통해 측정하려는 원자의 질량을 정확하게 잴 수 있다.

QR코드를 스캔하면 탄소의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.



량 및 이온화 에너지 등을 고려해 원자량을 계산합니다.

페닝 이온트랩을 이용해 이온의 질량을 정밀하게 측정한 대표적인 사례는 2017년에 보고된 양성자 질량 측정입니다.[doi: 10.1103/PhysRevLett.119.033001] 양성자는 수소 1가 양이온($^{1}H^{+}$)이자 수소 원자핵이며, 다른 원자핵의 빌딩블록입니다.

독일 연구팀은 이 양성자와 함께 원자량의 기준이 되는 탄소-12의 6가 이온($^{12}C^{6+}$)을 페닝 이온트랩에 주입해 두 이온의 질량비를 측정했습니다. 이를 통해, 1조(10^{12})분의 32의 정밀도로 양성자의 질량을 측정할 수 있었습니다. 연구팀은 원자 질량 단위(u)로 소수점 이하 열두 번째 자리까지 양성자 질량을 보고했습니다. 그들이 보고한 양성자 질량(1.007276466583 u)은 당시 받아들여졌던 양성자 질량 값보다 현저히 작은 값이었습니다.

전자는 양성자보다 얼마나 가벼울까

원자량을 정밀하게 측정하면 원자 1개의 질량도 정확하게 알 수 있습니다. 이온의 질량 대 전하의 비를 측정할 수 있기 때문에, 이온 또는 전자가 가진 전하량을 알면 원자 1개의 질량을 계산할 수 있습니다. 국제과학협의회(International Science Council)의 위원회 중 하나인 과학기술데이터위원회(CODATA)가 2019년 6월에 공표한 기본 전하량과 전자 질량의 값은 다음과 같습니다.

기본 전하량 (e): $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C

전자 질량 (m_e): $9.109\ 383\ 7015(28) \times 10^{-31}$ kg

전자의 전하량과 질량을 알고자 했던 시도는 1897년 조지프 톰슨(Joseph John Thomson)이 전자를 발견하면서부터 시작됐다고 할 수 있습니다. 톰슨은 음극선이 전기장과 자기장에서 휘어진다는 사실을 토대로 오늘날 전자(electron)라 불리는 음으로 하전된 미립자(corpuscle)들이 음극선을 이룬다고 주장했습니다. 그리고 일련의 실험을 통해 전자의 전하 대 질량비(charge-to-mass ratio, e/m)를 계산했고, 다음과 같은 중요한 사실들을 알게 됩니다.

첫째, 전자의 전하 대 질량비는 어떤 물질에서 방출되는지와 관계없이 일정했습니다. 둘째, 전자의 전하 대 질량비는 전하를 띤 수소 원자의 전하 대 질량비보다 1700배 정도 컸습니다. 셋째, 전자의 전하량은 전하를 띤 수소 원자의 전하량과 같았습니다.

톰슨은 이 사실들을 토대로 음으로 하전된 미립자, 즉 전자의 질량이 수소 원자 질량의 약 1700분의 1이며, 약 6×10^{-31} kg이라고 결론지었습니다. 톰슨은 전자 발견에 대한 공로를 인정받아 1906년 노벨물리학상을 수상했습니다.

톰슨이 계산한 전자 질량과 현재 알려진 전자 질량의 차이는 대부분 전하량 측정 오차로부터 기인한 것입니다. 1909년 로버트 밀리컨(Robert A. Millikan)이 기름방울 실험을 통해 기본전하(e·elementary charge)를 좀 더 정확히 측정함에 따라 이 오차는 크게 줄어들게 됩니다.

밀리컨은 증기압이 매우 작은 기름을 분무기로 뿜어내 기름방울을 생성하고 X-선을 이용해 이온화시킨 뒤 중력에 의해 낙하하도록 했습니다. 이때 전기장을 걸어 기름방울이 중력과 반대 방향으로 힘을 받아 두 전극 사이에 떠 있도록 하고, 떠 있는 각 기름방울의 크기를 측정했습니다. 이를 통해 각 기름방울이 가진 전하량을 계산할 수 있었습니다.

밀리컨의 실험에서 '신의 한 수'는 증기압이 매우 낮은 기름을 사용했다는 점입니다. 물 또는 알코올을 사용할 경우 증발에 의해 발생하는 측정 오차가 기름을 사용함으로써 현저하게 줄어들었기 때문입니다. 실험 결과, 밀리컨은 각 기름방울이 가진 전하량이 어떤 최소 전하량의 정수배임을 밝혀냈습니다. 이 최소량이 바로 기본 전하량이며, 밀리컨이 발표한 기본 전하량 값을 국제표준단위인 쿨롱(C)으로 환산하면 1.592×10^{-19} C입니다. 이는 현재 알려진 기본 전하량(1.602×10^{-19} C)과 분명히 차이는 있으나, 1% 오차 이내로 근접한 수치입니다.

밀리컨은 기본전하와 광전효과 연구에 대한 공로를 인정받아 1923년 노벨물리학상을 수상했습니다. 하지만 밀리컨 사후에 그가 연구 결과에 유리한 데이터만 선별적으로 사용했다는 의혹과 반론이 제기되면서, 기름방울 실험은 실험 결과 측면뿐만 아니라 연구윤리 측면에서도 크게 주목을 받은 연구로 남아있습니다.

양성자 vs. 중성자, 무엇이 더 무거울까

지금까지 전하를 띤 입자 또는 원자의 질량을 어떻게 측정할 수 있는지 알아봤습니다. 기본전하 및 원소 관련 기본 상수들을 통해 계산해 보면 원자 1개의 질량은 원소에 따라 10^{-27}~10^{-25} kg이 됩니다. 그렇다면 전기적으로 중성인 중성자의 질량은 어떻게 알아낼 수 있을까요?

한 가지 방법은 중성자를 포함한 이온과 그렇지 않은 이온의 질량 차이를 측정하는 것입니다. 예를 들어, 양성자만 갖고 있는 수소이온($^1H^+$)과 양성자와 중성자로 이뤄진 중수소 이온($^2H^+$)의 질량 차이를 측정하면 중성자의 질량을 알아낼 수 있습니다. 단, 중성자와 양성자가 강한 핵력에 의해

결합할 때 발생하는 질량 결손 등을 고려해 보정해야만 정확한 중성자의 질량을 구할 수 있습니다. 중성자와 양성자의 질량은 거의 같지만, 중성자가 아주 조금 더 무겁습니다.

최무현(대전 보문중 1)
최별(경기 고양시)

Q

소립자가 아닌 원소를 물질의 기본 단위로 정의하는 이유가 무엇인가요?

17

장홍제 교수가 답하다

‘물질은 무엇으로 이뤄져 있는가’는 대답하기 쉬운 것 같으면서도 은근히 까다로운 질문입니다. 조건에 따라 답이 달라질 수 있기 때문입니다. 이 질문에 가장 보편적이면서 오류가 적은 답은 ‘물질은 하나 혹은 여러 가지 종류의 원소로 이뤄져 있다’라고 생각합니다. 소립자처럼 물질을 구성하는 더 작은 입자가 발견됐지만, 현재 통용되는 물질의 기본 단위는 여전히 원소이기 때문입니다.

더 이상 나눌 수 없는 원자가 깨지다

원자와 원소에 대한 최초의 기본적인 개념은 자연과학의 뿌리라 할 수 있는 철학에서 시작됩니다. 통상 철학의 시조로 일컬어지는 밀레토스 학파의 철학자들은 세상의 근원에 대해 탐구하며 원자와 원소에 대한 개념을 발전시켰습니다. 공기를 근원으로 생각한 아낙시메네스(Anaximenes), 흙을 근원으로 삼은 크세노파네스(Xenophanes), 그리고 불을 근원으로 정의한 헤라클레이토스(Heraclitus)를 거쳐 레우키포스(Leucippus)와 그 제자 데모크리토스(Democritus)는 모든 것을 이루는 가장 작고 기본적인 원자라는 객체가 존재한다는 원자설을 완성했습니다.

데모크리토스는 앞서 언급된 물, 공기, 흙, 불 네 가지 원소를 기본으로 한 더 이상 분할할 수 없는 원자와 공허로 세상이 이뤄져 있다는 4원소설을 주창하며, 원자는 생겨나거나 소멸하지 않는다는 이론을 만들었습니다. 하지만 데모크리토스는 유물론(Materialism)과 유신론(Theism)의 중간적인 관점에서, 원자가 세상을 물질적으로 구성하고 있으나 원자의 운동은 신에 의해 예정된 필연적 거동으로 해석했습니다. 이후 에피쿠로스(Epicurus)와 루크레티우스(Lucretius)가 원자의 운동이 무작위적으로 이뤄져 있음을 주장하며 근대 원자론의 기틀이 마련됐습니다.

이후의 원자설은 우리에게 익숙한 존 돌턴(John Dalton)의 이론입니다. 돌턴은 물질이 더 이상 분해할 수 없는 원자로 이뤄져 있다고 설명했습니다. 이 개념은 조지프 톰슨(Joseph John Thomson)이 음극선관 실험을 통해 전자를 발견하고, 어니스트 러더퍼드(Ernest Rutherford)가 알파입자 산란 실험을 통해 원자핵을 발견하면서 와장창 깨져버리고 맙니다. 원자가 단순히 동그랗고 단단한, 작은 기본 입자가 아니라는 사실이 밝혀진 것입니다. 중앙에 높은 밀도로 뭉쳐있는 원자핵이 존재하고, 그 주위에 전자가 자리잡고 있는 세부적인 구조를 상상할 수 있게 된 것이죠.

이후 인류는 원자핵과 전자보다 더 기본적인 입자인 소립자(elementary particle)의 존재를 확인하게 됩니다. 머리 겔만(Murray Gell-Mann)과 조지 츠바이크(George Zweig)는 원자핵이 $+\frac{2}{3}$만큼의 양의 전하를 갖는 업 쿼크(up-

quark)와 $-\frac{1}{3}$만큼의 음의 전하를 갖는 다운 쿼크(down-quark)로 이뤄져 있다는 사실을 알아냈습니다. 이들이 각기 다른 비율로 3개씩 모여서 양성자(업 쿼크 2개, 다운 쿼크 1개)와 중성자(업 쿼크 1개, 다운 쿼크 2개)를 이루고 있으며 이들이 원자핵을 구성한다는 좀 더 심층적인 영역으로 들어갈 수 있게 됐습니다. 또 쿼크는 이들 외에도 4가지가 더 있어 총 6가지가 존재한다는 것과, 전자를 포함해 총 6가지 종류로 렙톤(Lepton)이라는 소립자가 존재한다는 사실까지 밝혀지면서 세상을 이루는 기본 입자에 대한 개념은 더 작고 상세하게 쪼개졌습니다.

물질의 '성질'을 설명하는 기본 단위, 원소

그렇다면 원소는 더 이상 물질의 기본 단위가 될 수 없는 걸까요? 질문에 대한 답은 물질의 기본 단위를 어떻게 정의하느냐에 따라 결정될 수밖에 없습니다. 물질은 다양한 사전적 정의가 존재하지만, 가장 대표적으로 '물체의 본바탕'으로 정의합니다. 물체의 본바탕을 보여주는 기본 단위가 작고 기본적인 소립자인지, 혹은 제각각의 특성을 갖는 원소인지 생각해볼 필요가 있습니다.

쉬운 예로 설명해 보겠습니다. 건물을 짓거나 살펴볼 때 우리가 생각하는 기본 구성 요소는 철골, 유리, 대리석 등입니다. 이것을 철가루, 규소화합물, 모래 등으로 더 작게 쪼개지 않습니다. 철골, 유리, 대리석이 기본적인 재료의 특성과 기능을 갖고 있기 때문입니다. 마찬가지로 물(H_2O)을 설명할 때도 물의 특성을 만들어내는 수소와 산소의 조합으로 설명합니다. 즉, 작고 가벼우며 분자 상태로는 폭발성과 생체 독성을 보이는 수소라는 원소와, 안정하지만 반응성이 높고 분자로서 물질대사와 생체 반응의 핵

QR코드를 스캔하면
라돈의 특징과 숨은 이야기를
다룬 대한화학회의 영상을
볼 수 있습니다.

라돈(Rn)
라듐 방사성 붕괴로 처음 발견된 18족 비활성 기체 원소. 색, 냄새, 맛이 없는 기체로, 모든 동위원소들이 강한 방사선을 내고 반감기가 짧다. 영국의 핵물리학자인 어니스트 러더퍼드는 라듐이 알파붕괴를 통해 라돈으로 변하고 알파입자를 방출하는 현상을 연구해 내부에 원자핵이 있는 새로운 원자 모형을 제시했다.

심이 되는 산소라는 원소가 2:1의 비율로 배열돼 형성했다고 말하죠. 그로 인해 높은 비열을 가지고, 수소결합을 할 수 있는 극성 용매라는 관점에서 물을 이야기하지, 그것을 형성하고 있는 쿼크와 렙톤의 산술적인 집약으로 이야기하지 않습니다. 핵분열 또는 핵융합 반응도 쿼크와 렙톤으로 설명하기는 너무나 힘이 듭니다.

물질을 소립자 단위로 이해하느냐, 원소 단위로 이해하느냐는 물리적 접근법과 화학적 접근법의 차이라고 생각합니다. 물질의 성질과 배열을 다루는 화학적 관점에서는 원자핵이 더욱 작은 소립자의 형태까지 분해되는 일은 일어날 수 없는 사건입니다.

반대로 입자물리학이나 양자물리학적 관점에서 물질을 살펴본다면 그 본질적인 기본 단위는 다양한 소립자나 그보다 더 작은 단위로 통용될 수 있겠죠. 그런 의미에서 저는 화학 분야에서 모든 물질의 기본 단위는 원소라는 점이 여전히 유효하며, 원소에서 출발한 표현인 원소기호, 금속 원소, 비금속 원소 등이 사람들간의 이해와 소통을 돕는 적절한 표현이라고 생각합니다.

정지호(서울 명일중 1)
황나윤(경기 평촌중 1)

Q

150년 전 멘델레예프가 만든 주기율표를 계속 사용하는 이유가 뭔가요?

10

장홍제 교수가 답하다

러시아의 화학자 드미트리 멘델레예프(Dmitri Ivanovich Mendeleev)가 주기율표를 처음으로 만들어 세상에 공개한 지 150년이라는 시간이 흘렀습니다. 내용의 정밀성이나 포함된 원소의 개수는 지속적으로 개량됐지만, 주기율표의 기본적인 틀은 150년 동안 꾸준히 유지돼왔죠.

멘델레예프 이후 새로운 관점으로 만든 '대안 주기율표(Alternative periodic tables)'가 수백 종류 넘게 등장했지만, 오늘날 널리 사용되며 일반적으로 통용되는 주기율표는 여전히 멘델레예프의 주기율표 틀을 따르고 있습니다. 그 이유가 무엇인지는 꼭 한번 생각해 볼 만한 주제인 것 같습니다.

원소를 화학적 성질에 따라 줄세우다

주기율표는 이름 그대로 세상을 구성하고 있는, 세상에 존재하고 있거나 존재할 수 있음이 부분적으로나마 확인된 원소들을 일정한 규칙에 따라 나열한 한 페이지의 도표를 의미합니다. 다양한 서적이나 온라인 매체, 학습자료를 통해서 다들 한 번쯤 주기율표를 본 적이 있을 겁니다. 명칭에서도 알 수 있듯 주기율표는 원소들을 주기적으로 배열하고 있습니다. 단순하게는 가로로 나열된 원소들의 배열인 '주기(period)'와 세로로 나열된 '족(group)'의 구성으로 이뤄진 2차원 배열입니다. 하지만 우리는 이런 형태적인 모습보다는 이 같은 배열이 나오게 된 과정, 즉 원소를 줄세운다는 것 자체의 의미에 주목할 필요가 있습니다.

멘델레예프의 주기율표는 1829년 독일의 화학자 요한 되베라이너(Johann Wolfgang Döbereiner)가 화학적 성질이 비슷한 원소들을 세 개씩 묶어 원자량 순서대로 나열했을 때, 첫 번째와 세 번째 원소의 물리적 성질의 평균값이 두 번째 원소와 유사하다는 '세 쌍 원소(Triad)'를 발견한 데 기반을 두고 있습니다. 1865년 존 뉴랜즈(John Alexander Reina Newlands)가 발표한 '옥타브 이론', 즉 원자량 순서대로 원소를 배열하면 여덟 번째마다 동일한 화학적 성질이 나타난다는 이론도 큰 영향을 미쳤습니다.

멘델레예프는 당시까지 확인이 가능했던 총 63가지 원소를 원자량의 순서대로 배열해 최초의 주기율표를 만들었습니다. 원자량의 순서와 화학적인 성질의 유사성이 일치하지 않는 경우, 그는 화학적 성질을 우선해서 배열을 수정했습니다. 원소라는 물질의 기본 요소는 각자의 특성을 갖는다고 보고, 물리적인 요건보다 화학적 요건에 기반해 공통점을 이끌어낼 수 있도록 접근했습니다. 개인적으로 이 점이 성공적인 주기율표를 탄생시키는 데 핵심적인 역할을 했다고 생각합니다.

멘델레예프는 당시 밝혀지지 않았으나 존재가 예상되는 원소들에 대해 주기율표상에 빈 공간을 남겨두고 이에 대한 물리·화학적 성질을 예측하

갈륨(Ga)
원자번호 31번 갈륨은 녹는점이 약 30도 정도로 낮아 손으로도 녹일 수 있다. 온도계, 반도체, 파란색 발광 다이오드 등에 다양하게 활용된다. 1871년 멘델레예프는 갈륨의 존재를 예측해 주기율표상에 빈칸을 남겨뒀다. 4년 뒤 프랑스 화학자가 갈륨을 분리해내는 데 성공했다.

QR코드를 스캔하면 갈륨의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

기까지 했습니다. 이는 후대 화학자들이 꾸준한 도전을 통해 주기율표의 완성도를 높일 여지를 제공했다고 볼 수 있겠습니다.

150년 동안 화학자들의 길 밝힌 '지도'

사실 멘델레예프의 주기율표가 완벽했던 것은 아닙니다. 멘델레예프가 주기율표를 발표한 1869년 3월 6일까지도 헬륨(He)을 제외한 대부분의 18족 비활성 기체의 존재가 밝혀지지 않았습니다. 비활성 기체는 매우 낮은 반응성을 가지며 대기 중 존재량이 극도로 적은 원소들입니다. 또 란타넘족과 악티늄족이라는 별도의 원소들이 발견되고, 동위원소의 존재가 확인되며 원자량 순서에 문제가 발생하는 등 해결해야 할 요소들이 지속적으로 발견돼왔습니다.

우리가 현재 사용하는 주기율표는 멘델레예프 이후 헨리 모즐리(Henry Gwyn Jeffreys Moseley)가 원자번호를 다시 수정한 결과물입니다. 모즐리는 각각의 원소가 서로 다른 파장의 X선을 흡수한 후 다시 방출하는 2차 X선의 에너지 순서대로 원자번호를 지정했습니다. 이를 통해서 원자번호 순서와 화학적 성질의 순서가 정정됐고, 란타넘족과 악티늄족의 배치까지 해결됐으니, 현재 주기율표가 멘델레예프의 주기율표 그 자체라고 해석할 수는 없습니다.

하지만 원소의 화학적 특성을 기반으로 주기율표를 설정하고자 한 멘델레예프의 시도는 후대 화학자들에게 큰 도움을 줬습니다. '주기'와 '족'이라는 구성이 도입돼 주기가 의미하는 전자의 껍질, 그리고 족이 의미하는 최외각 전자 수(가장 바깥쪽 껍질에 존재하며 화학적 특성에 기여하는 전자의 개수)가 표현됐으며, 이로부터 각 원소들의 공통적인 화학적 특성, 선호하는 이온의

형태, 가능한 결합의 종류 등을 예측할 수 있게 됐기 때문입니다.

멘델레예프가 선물한 주기율표는 원소와 반응, 그리고 화학을 연구하고 사용하는 많은 사람들에게 지도가 돼줍니다. 지하철이나 버스 같은 대중교통 노선도나 산, 하천, 산책로 등이 표시된 지도처럼 어떤 요소를 파악하기 위해서는 이에 적합한 정보가 요약된 문서가 필요합니다. 이런 자료가 있으면 목적지를 가장 빠르고 효과적으로 찾아갈 수 있고, 설사 길을 잃더라도 금방 바로잡을 수 있습니다.

마찬가지로 비슷한 성질, 전자의 개수, 가능한 화합물의 형태 등 주기율표에 집약된 정보들은 화학자들이 연구를 설계하고 확장하는 데 지도와 같은 도움을 줍니다. 주기율표 덕분에 첨단재료를 개발하고 현대 화학을 빠르게 발전시킬 수 있었다고 해도 과언이 아닙니다.

물론 화학을 직접적으로 공부하거나 연구하지 않는 사람에게는 복잡한 알파벳들이 답답하게 나열돼있는 지극히 불친절한 도표에 불과할 수도 있습니다. 이 때문에 여러 종류의 대안 주기율표가 필요한 사람들에 맞게 지속적으로 개발되고 있습니다. 지질이나 자원을 연구하는 사람에게는 지각 내 매장량을 기준으로 칸의 넓이를 다르게 만든 주기율표가, 원소간의 연관관계를 들여다 보고 싶은 사람에게는 원형으로 배치돼 연관성 있는 족들끼리의 관계선을 추가한 주기율표가 유용할 수 있습니다.

대안 주기율표를 만드는 기준은 복잡할 수도, 아주 간단할 수도 있습니다. 물질의 안정성을 기준으로 만들 수도, 발견된 시점이나 주로 활용되는 분야 등의 정보로 만들 수도 있죠. 중요한 점은 이 모든 대안 주기율표 역시 멘델레예프가 생각하고 제안한 큰 틀을 기반으로 구성돼 있다는 점입니다. 전 세계가 주기율표 탄생 150주년을 성대하게 축하한 이유도 바로 여기에 있습니다.

이창섭(대전동신과학고 2)

Q 수소는 1족인가요, 17족인가요?

장홍제 교수가 답하다

118개의 원소들이 일정한 규칙에 의해 배열된 주기율표에서 첫 번째 가로줄에 위치하는 1주기 원소들, 그중에서도 특히 원자번호 1번 수소(H)는 그 다음부터 이어지는 원소들과는 다른 표현상의 모호함을 가지고 있습니다. 실제로 주기율표의 종류에 따라 수소를 1족에 배치하기도, 17족에 배치하기도 합니다.

잉여 전자 한 개가 남는 1족 알칼리 금속

수소가 1족과 17족 중 어디에 더 적합한지 판단하기 위해서는 먼저 주기율표에서 1족과 17족, 그리고 18족의 특징을 이해해야 합니다. 18족은 비활성 기체라는 명칭에 걸맞게 여러 개의 동일 원자가 홀로 안정한 상태로 존재할 수 있는 원소들의 집합입니다. 비활성 기체 원소들이 안정한 이유는 전자의 배치에서 찾을 수 있습니다. 전자가 배치될 수 있는 원자의 유효한 오비탈(Orbital)이 전자로 가득 차 있는 상태라, 자신이 보유 중인 전자를 외부로 내보내거나, 외부로부터 부족한 전자를 받아와 이온을 만들 일 없이 홀로 안정하게 존재할 수 있는 겁니다.

같은 비활성 기체라도 안정한 상태는 주기(period)에 따라 다릅니다. 1주기에 해당하는 헬륨(He)은 s오비탈만 관여하기 때문에 2개의 전자만 채우면 안정해집니다. 반면 2주기와 3주기에 각각 속한 네온(Ne)과 아르곤(Ar)은 s와 p오비탈이 동시에 관여하기에 총 8개의 전자를 채워야 합니다. 그보다 높은 주기의 원소들은 d오비탈 혹은 f오비탈이 관여하기 때문에 그보다 더 많은 전자가 필요합니다. 우리가 수소에 대해 혼란을 겪는 이유는 수소가 안정한 상태로 가기 위해 필요한 전자의 최대치가 매우 낮은 1주기에 속하기 때문입니다.

알칼리 금속(alkali metal)이라 불리는 1족은 (논란의 여지가 있는) 수소를 제외한 리튬(Li), 소듐(Na), 포타슘(K), 루비듐(Rb), 세슘(Cs), 그리고 프랑슘(Fr) 등 6개 원소의 집합입니다. 알칼리(alkali)라는 이름은 아라비아어 'al-qaly'로부터 유래했습니다. al-qaly는 물에 녹여 염기성 용액을 만드는 데 사용되던 퉁퉁마디를 태운 재를 의미합니다. 이름에서도 알 수 있듯, 알칼리 금속은 물과 반응했을 때 염기성 수용액을 형성한다는 공통적인 특징을 가지고 있습니다.

또한 1족 원소들은 공통적으로 이미 전자가 가득 차 있는 내부의 오비탈을 제외하고도, 한 개의 전자를 추가로 가지고 있습니다. 알칼리 금속의 화학적 성질 대부분은 바로 이런 전자 한 개의 영향을 받습니다. 같은 족의 원소들이 유사한 특성을 가진다는 주기율표의 의미는 이렇게 최외각에 존재하는 잉여 전자들의 개수로부터 기인합니다. 1족 원소들은 앞서

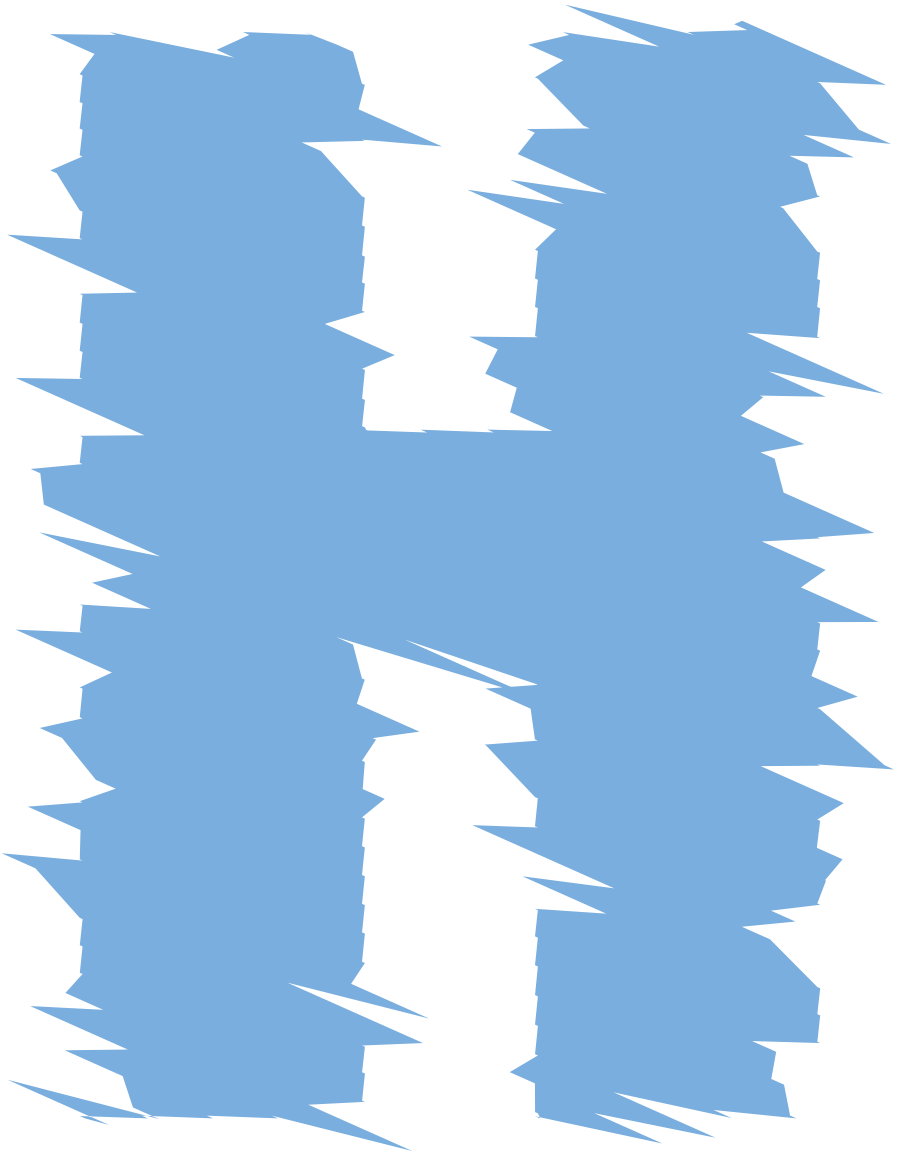
소개한 18족 원소처럼 모든 오비탈을 가득 채우는 전자 배치를 갈구하기에, 자신들이 보유하고 있는 한 개의 잉여 전자를 외부로 내보내며 1가 양이온의 형태(대표적으로 Na^+)를 형성하게 됩니다.

이때 모든 물질들은 양이나 음의 전하를 띠고 있는 상태보다는 중성 상태로 존재하는 것을 선호하기 때문에, 알칼리 금속 양이온들은 손쉽게 만날 수 있는 비금속 음이온들과 결합해 화합물을 이룹니다. 앞서 살펴본 소듐 양이온이 염화 이온(Cl^-)과 함께 염화 소듐($NaCl$) 화합물을 형성하는 결과를 생각하면 쉽게 이해할 수 있습니다.

전자가 딱 하나 모자란 17족 할로젠

그런가하면 17족 원소들의 명칭은 할로젠(halogen)입니다. 염(halo)을 만든다(genes)라는 그리스어로부터 유래한 용어죠. 다른 물질과 반응해서 물질을 형성하려는 성질이 매우 센, 한마디로 반응성이 극도로 높은 원소들입니다. 오죽하면 홀로 안정하게 존재하며 다른 원소와 반응하지 않는다는 의미로 비활성 기체라 불리는 18족 원소들조차 네온을 제외하고는 모두 할로젠과 반응해서 화합물을 만들 정도니까요. 테트라플루오린화 제논(XeF_4)이나 다이플루오린화 크립톤(KrF_2) 등과 같은 화합물이 대표적입니다.

할로젠의 높은 반응성 역시 보유 중인 전자의 배치로 설명할 수 있습니다. 모든 할로젠 원소는 공통적으로 목표로 하는 비활성 기체보다 최외각 전자껍질의 전자 개수가 하나 부족합니다. 때문에 외부로부터 전자를 하나 가져와서 안정한 상태를 만들려는 의지가 확고하죠. 이온의 형태로는 전자가 하나 추가된 1가 음이온(대표적으로 Cl^-)을 형성하고, 금속 원소들과



수소(H)
주기율표에 첫 번째로 등장하는 원소. 최외각 전자껍질에 전자 1개를 가지고 있어 수소 양이온(H^+)과 수소 음이온(H^-)이 모두 될 수 있다. 1족 알칼리 금속의 특징과 17족 할로젠의 특징을 동시에 가진다. 최근 극고압 환경에서 금속성 수소로 존재한다는 사실이 밝혀지면서 1족의 성질에 한 걸음 더 가까워졌다.

QR코드를 스캔하면 수소의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

화합물을 이루는 경향성이 두드러집니다. 앞서 말한 염화 소듐($NaCl$)을 기억하고 계실 겁니다.

할로젠 원소들은 다른 원자와 결합해 안정해지고 싶은 성질을 이기지 못하고 같은 종류의 원자끼리 둘씩 모여 이원자 분자를 형성하기도 합니다. 염소(Cl_2), 브로민(Br_2), 아이오딘(I_2) 등이 대표적입니다. 이들은 상온에서 각각 기체, 액체, 고체의 상태를 이루지만 1족 원소처럼 금속 상태는 결코 될 수 없는 원소들입니다.

초고압에선 수소가 금속성을 띤다?

그렇다면 수소는 이들 중 어디에 더 가까울까요? 먼저 수소가 최대 2개의 전자를 갖게 된다면, 같은 주기에서 가장 안정한 18족 원소인 헬륨과 같은 전자 배치를 이룰 수 있습니다. 수소는 최외각에 전자 1개를 가지고 있기 때문에 가지고 있는 전자를 외부로 내보내서 1가 수소 양이온(H^+)을 이루거나, 혹은 외부로부터 전자 하나를 가져와서 1가 수소 음이온(H^-)을 이루는 두 방향 모두 가능합니다.

실제로 이 두 이온들은 여러 화학 실험에서 유용하게 쓰입니다. 수소 양이온은 비금속 음이온과 화합물을 만들 수 있으며(염화 수소(HCl), 암모니아(NH_3), 물(H_2O) 등), 수소 음이온은 금속 양이온과 화합물을 형성할 수 있습니다(수소화 리튬(LiH), 수소화 마그네슘(MgH_2), 수소화 알루미늄(AlH_3) 등). 이처럼 수소는 주기율표상의 1족과 17족의 성질을 공통적으로 보이는 흥미로운 원소입니다.

반응성이 아닌 수소 그 자체의 특성은 1족과 17족 중 어디에 더 어울릴까요? 먼저 수소는 단일 원소로 안정하게 존재하기 위해 부족한 하나의 전자를 충족시고자 같은 종류의 원자와 결합합니다. 온도가 25도, 기압이 1기압인 지구 표면 조건에서 이원소 분자(H_2)의 기체로 존재합니다. 이는 17족 원소의 성격과 비슷합니다.

또 수소는 산소나 질소와 같은 다른 기체들처럼 매우 낮은 온도에서 액화돼 액체 상태로 상변화를 일으킵니다. 영하 252.87도의 극저온에서 액체 수소(liquid hydrogen)로 물질의 상태가 바뀝니다. 액체 수소는 1981년 미국의 우주왕복선 컬럼비아호를 비롯한 여러 추진체의 극저온 액체 연료로 사용됐죠. 1족 원소들은 저온에서 보통 금속 상태로 존재하는데, 수소가 저온에서 액체 상태로 변한다는 점은 1족보다는 17족에 가까운 것이 아닌가 생각하게 만들었습니다.

그런데 2016년 이것을 다시 뒤집는 연구 결과가 나왔습니다. 미국 하버드대 연구팀이 영하 267도 극저온 환경에서 수소에 약 489만 기압의 압력을 가하면 금속성 수소(metallic hydrogen)가 된다는 사실을 처음으로 확인한 겁니다. 투명한 수소는 초고압 환경에서 검은빛의 광택을 보이는 물질로 서서히 변했습니다. 17족 원소들은 온도를 아무리 낮춰도 금속 원소는 될 수 없는데 말입니다.[doi: 10.1126/science.aal1579]

금속성 수소가 존재할 가능성은 1935년에 이미 제기됐습니다. 고압 조건에서 수소가 알칼리 금속과 같은 금속성을 보일 것이라는 점, 금속성 액체 수소가 존재할 수 있다는 점, 수소가 초전도성 수소 등 다양한 방식으로 존재할 수 있다는 점 등이 지속적으로 관심을 받아 왔습니다. 미국 항공우주국(NASA)은 실제로 목성이나 토성과 같은 행성의 내부가 금속성 수소로 이뤄져 있을 것이라는 예측을 내기도 했고요. 2016년 금속성 수소의 존재가 실험으로까지 입증되면서 수소가 1족이라는 생각은 다시 힘을 얻었습니다.

수소가 어떤 족에 소속돼야 하는지 정확한 판단을 내리려면 앞으로 추

가 연구를 이어나가는 것이 중요합니다. 그리고 그렇게 결과에 다가가는 과정에서 수많은 과학적 발견이 이어질 겁니다. 과거에 빛이 파동인지, 입자인지를 구분하기 위해 많은 과학적 논쟁과 연구가 이뤄졌던 것과 어느 정도 비슷하다고 볼 수도 있겠네요. 앞으로 얼마나 더 흥미로운 수소 연구가 나올지 함께 지켜보면 좋겠습니다.

최형서(경남 동진여중 1)

Q

란타넘족과 악티늄족이 주기율표에서 분리된 이유가 무엇인가요?

20

장홍제 교수가 답하다

범용 주기율표는 가로로 주기(period)가, 세로로 족(group)이 나열된 구조적인 특징을 가지고 있습니다. 여기에 부가적으로 상온에서 기체, 액체, 고체로 구분되는 원소의 상태를 표현하기도 하고, 금속과 비금속, 그리고 준금속이라는 특성을 기반으로 원소를 구분하기도 하죠.

그렇게 주기율표를 훑어보다 보면 독특한 구성 하나가 눈에 띕니다. 하단에 길게 두 줄로 분리된 원소들입니다. 원자번호 57번부터 71번까지에 해당하는 란타넘족(Lanthanoids)과 원자번호 89번부터 103번까지에 해당하는 악티늄족(Actinoids)이 그 주인공들입니다.

자연 원소 란타넘족, 방사성 원소 악티늄족

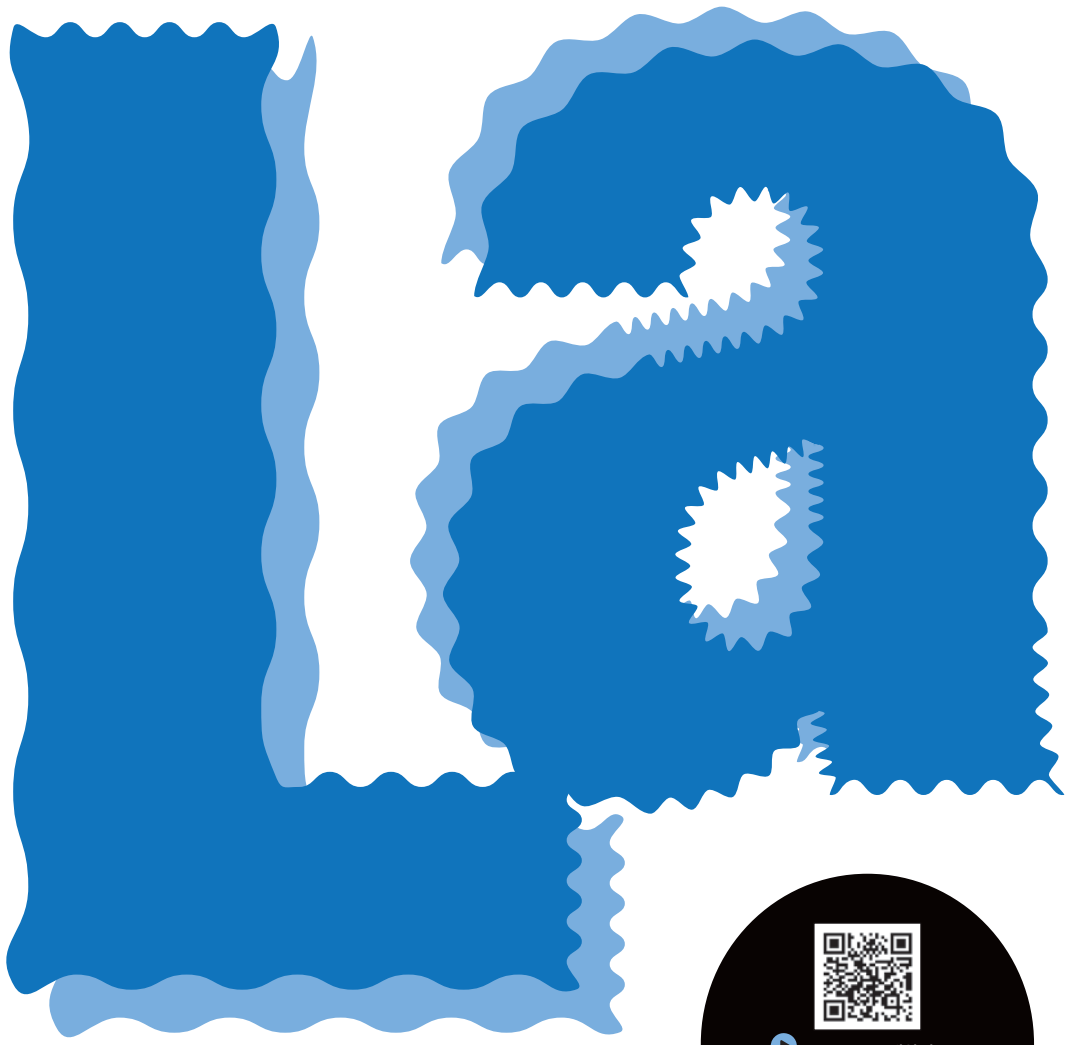
란타넘족 원소들은 흔히 '희토류(rare earth element)'라 불리는 금속 원소들의 일종입니다. 희토류라는 이름은 지구상에 희귀하게 소량 존재해서라기보다는 한정적인 지역에서 주로 출토된다고 해서 붙여진 이름입니다. 절대적인 존재량만을 고려한다면 백금을 위시한 귀금속 원소들에 비해 지각 내에 상당히 풍부하게 존재하고 있습니다.

란타넘족 원소들은 광석에서 발견됐는데요. 신기하게도 란타넘족 원소 중 프로메튬(Pm)을 제외한 모든 원소가 가돌리나이트(Gadolinite)와 세라이트(Cerite)라는 두 종류의 광석에서 발견됐습니다. 스웨덴의 광산 마을이었던 위테르비(Ytterby) 지역의 탄광에서 다른 광석에 비해 높은 밀도와 무게를 보이는 검은색 돌이 나왔는데, 이 광석에 함유된 성분이 다양한 란타넘족 원소들이었던 거죠. 따라서 란타넘족 원소는 (프로메튬만 빼고) 전부 지각 내에 매우 안정하게 존재하는 자연 원소들입니다. 프로메튬은 란타넘족 원소 중 유일하게 방사성 붕괴를 합니다.

반면 악티늄족 원소들은 대부분의 원소들이 방사성 원소들입니다. 지구상에 자연적으로 존재하는 원소들 중 가장 무거운 원소인 우라늄(U) 이후의 인공원소들이 대부분 악티늄족 원소에 속해 있습니다.

멘델레예프가 주기율표를 만들었던 시기, 즉 인공원소들에 대한 개념이 성립되지 않았던 시기의 과학자들은 자연에 존재하는 모든 원소들을 수학적으로 해석하고자 했습니다. 특히 에드먼드 밀스(Edmund Mills)라는 학자는 수소를 제외한 모든 자연 원소의 원자량 경향성을 하나의 수식으로 표현한 '밀스의 공식(Mills' formula)'을 만들었습니다. 과학자들은 밀스의 공식에 다양한 수를 대입하는 과정에서 원자량이 240 이상인 원소는 표현이 불가능하다는 결론을 얻었습니다. 물론 이는 초우라늄 원소들이 존재할 가능성을 배제한 학설이었지만, 당시엔 높은 지지를 얻어 지구상에 존재 가능한 가장 무거운 원소가 우라늄이라는 인식을 만들었습니다.

란타넘(La)
원자번호가 57~71번인 15개 란타넘족 원소 중 첫 번째 원소. 대표적인 희토류 금속 원소다. 지각에 안정적으로 존재하는 자연 원소로 세라이트 같은 특별한 광석에서 추출·분리한다. 란타넘은 금속 자체로는 거의 사용되지 않고, 대부분 합금과 화합물 형태로 사용된다. 니켈수소 전지, 특수 유리 등에 쓰인다.



QR코드를 스캔하면 란타넘족 원소들의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

이후 닐스 보어(Niels Bohrs)가 양자적 예측을 통해 원자핵의 전하량이 92 이상인 원소는 관찰될 수는 있으나 안정하게 존재할 수 없다고 발표하면서, 여기에 해당하는 대부분의 악티늄족 원소가 모두 방사성 원소임이 다시금 확인됐습니다.

f오비탈에 전자를 가진 원소들

란타넘족과 악티늄족은 족마다 공통적인 물리화학적 성질을 보입니다. 그리고 이런 특성은 다른 족 원소들과 마찬가지로 방출이나 유입이 가능한 전자의 개수로부터 결정됩니다. 쉽게 말해 최외각 전자껍질의 전자 배치가 화학적 성질을 결정하고, 이런 전자 배치가 유사한 원소들끼리는 비슷한 화학적 성질을 띤다는 뜻입니다.

전자의 배치와 가용 전자 개수는 원소의 오비탈을 보면 알 수 있습니다. 오비탈은 원자핵 주변에서 전자가 발견될 확률이 90% 이상인 영역을 의미하는데요. s, p, d, f, g 등 그 종류가 다양합니다.

1족과 2족의 원소들은 s오비탈에 전자를 가지고 있습니다. s오비탈은 하나의 에너지 준위에 총 두 개의 전자가 배치될 수 있는 오비탈이죠. 그런가하면 13족부터 18족 원소들은 p오비탈에 전자를 가지고 있습니다. p오비탈은 3개의 에너지 준위에 총 6개의 전자가 배치될 수 있습니다. 우리가 흔히 전형원소(typical element)와 전이금속(transition metal) 원소로 구분하는 3족부터 12족까지의 원소는 d오비탈을 가지고 있습니다. d오비탈은 5개의 에너지 준위에 총 10개의 전자가 배치될 수 있습니다.

이번 글의 주인공인 란타넘족과 악티늄족 원소들은 f오비탈에 전자를 가지고 있습니다. f오비탈은 7개의 에너지 준위에 총 14개의 전자가 배치

될 수 있는 오비탈입니다. f오비탈이 텅 비어있는 원소부터 전자 14개가 꽉 차 있는 원소까지 총 15개의 원소가 나올 수 있습니다.

그렇다면 왜 주기율표는 f오비탈을 가지는 란타넘족과 악티늄족 원소를 따로 분리해 표기하고 있을까요? 너무 싱겁게 들릴 수 있지만, 란타넘족과 악티늄족 원소를 모두 주기율표에 포함시키면 주기율표가 가로로 너무 길어지기 때문입니다. 즉, 주기율표를 보는 편의성을 높이기 위함입니다. 원소의 성질을 결정짓는 전자의 개수 정보를 일목요연하게 알아볼 수 있으려면 현재와 같이 1족부터 18족까지 구분하는 방식이 편리하거든요.

한편 란타넘족과 악티늄족을 대표하는 원소로 각각 란타넘과 악티늄이 꼽히는데요(주기율표상에 대표로 써있는 경우가 많습니다). 이들이 대표 원소인 데는 특별한 이유가 없습니다. 란타넘과 악티늄은 둘 다 f오비탈에 전자가 비어있는 원소입니다. 필요하다면 f오비탈에 전자가 꽉 차있는 루테튬(Lu)과 로랑슘(Lr)을 각각 란타넘족과 악티늄족을 대표하는 원소로 정할 수도 있습니다.

이처럼 주기율표는 정보를 최대한 효율적으로 전달하기 위해 고민한 결과물입니다. 주기율표의 내용뿐만 아니라 배열에도 과학적 사고가 들어있는 셈입니다. 여러분은 앞으로 점점 더 다양한 주기율표를 보게 될 텐데요. 각각의 주기율표에 녹아있는 과학적 사고를 파악하면 주기율표를 더 쉽고 빠르게 이해할 수 있을 거라 생각합니다.

최정현(경기 평택여고 2)
최형서(경남 동진여중 1)

Q

연금술처럼 싸게 희토류 원소를 만들 수 있을까요?

21

장홍제 교수가 답하다

원소의 종류를 바꾸는 게 가능할까요? 불가능하다고 생각하는 분들이 많을 것 같지만, 답은 '바꿀 수 있다'입니다.

일반적으로 원소들이 다양한 화합물을 형성하는 것은 전자의 거동에 따른 화학적인 반응 때문입니다. 여러 가지 원소들의 배열 형성이나 교환, 추가나 제거 과정의 조합을 통해 다양한 화학 반응이 일어납니다. 하지만 이것이 원소가 다른 종류의 원소로 바뀌는 물리적인 반응까지 연결되지는 않습니다.

원소의 종류를 바꾸는 물리적인 반응은 과거 연금술을 연구하는 사람들에게 꿈같은 목표였습니다. 그 꿈은 과학이 발전하면서 실제로 이뤄졌습니다. 중성자나 알파입자 또는 베타붕괴와 같은 핵반응을 통해 원자핵의 양성자 수와 중성자 수를 조절해 인공원소를 합성할 수 있게 된 겁니다.

덕분에 납(Pb)을 금(Au)으로 바꾸는 연금술사들의 꿈만 같던 원소 변환이 현실에서 가능해졌습니다. 1951년 노벨화학상을 수상한 글렌 시보그(Glenn Theodore Seaborg)는 납보다 원자번호가 하나 더 높은 비스무트(Bi)로부터 금을 만들 수 있음을 1980년 실험으로 증명했습니다. 그러나 이 방법은 현재 금과 같은 귀금속을 생성하는 데 쓰이지 않습니다. 이유는 단 하나, 채굴하거나 구입하는 것보다 훨씬 큰 비용이 들기 때문입니다.

그렇다면 희토류 원소(rare earth element)는 어떨까요? 원소를 변환해 희토류를 저렴하게 만들 수 있을까요?

희귀한 원소? 납보다 매장량 많아

희토류 원소를 화학적으로 생성할 수 있는지 생각하기 전에 정확히 희토류가 무엇인지 알아볼 필요가 있습니다. 희토류는 그 명칭 때문에 백금(Pt)이나 로듐(Rh) 같은 귀금속 원소처럼 지각 내 매장량이 매우 적고 희귀한 원소일 것이라는 오해를 많이 받습니다.

하지만 희토류 원소들은 매장량이 풍부한 편에 속합니다. 흔하고 값싸다고 여겨지는 납보다도 더 많이 매장돼 있으니까요. 대신 희토류 원소들은 매장 지역이 극히 한정적입니다. 현재는 중국이 전 세계 희토류 생산의 95%를 담당하고 있습니다.

희토류는 토금속(earth metal)으로 구분되는 3족 원소인 스칸듐(Sc)과 이트륨(Y), 그리고 그 밑에 별도로 표기된 란타넘족 원소 15종까지 총 17개의 원소를 의미합니다. 프로메튬(Pm)을 제외한 나머지 14종의 란타넘족 원소들은 모두 가돌리나이트(Gadolinite)와 세라이트(Cerite)라는 두 광석에서 발견된 형제 원소들입니다. 이런 발견 과정만 봐도 희토류 원소가 특정한 지각에서만 함께 존재하는 원소들이라는 점을 쉽게 떠올릴 수 있습니다.

희토류는 지각 내 풍부하게 매장돼 있지만 수요가 공급을 초과하는 수급불균형 상황이 심각합니다. 가장 큰 이유는 희토류가 현대 과학기술 및 산업 분야에서 활용가치가 매우 높기 때문입니다. '기술의 씨앗' 또는 '기술 금속'이라 불릴 만큼 소형 전자기기, 의약, 친환경 에너지, 통신과 국방 기술 등 다양한 첨단 기술 분야에 활용되고 있습니다.

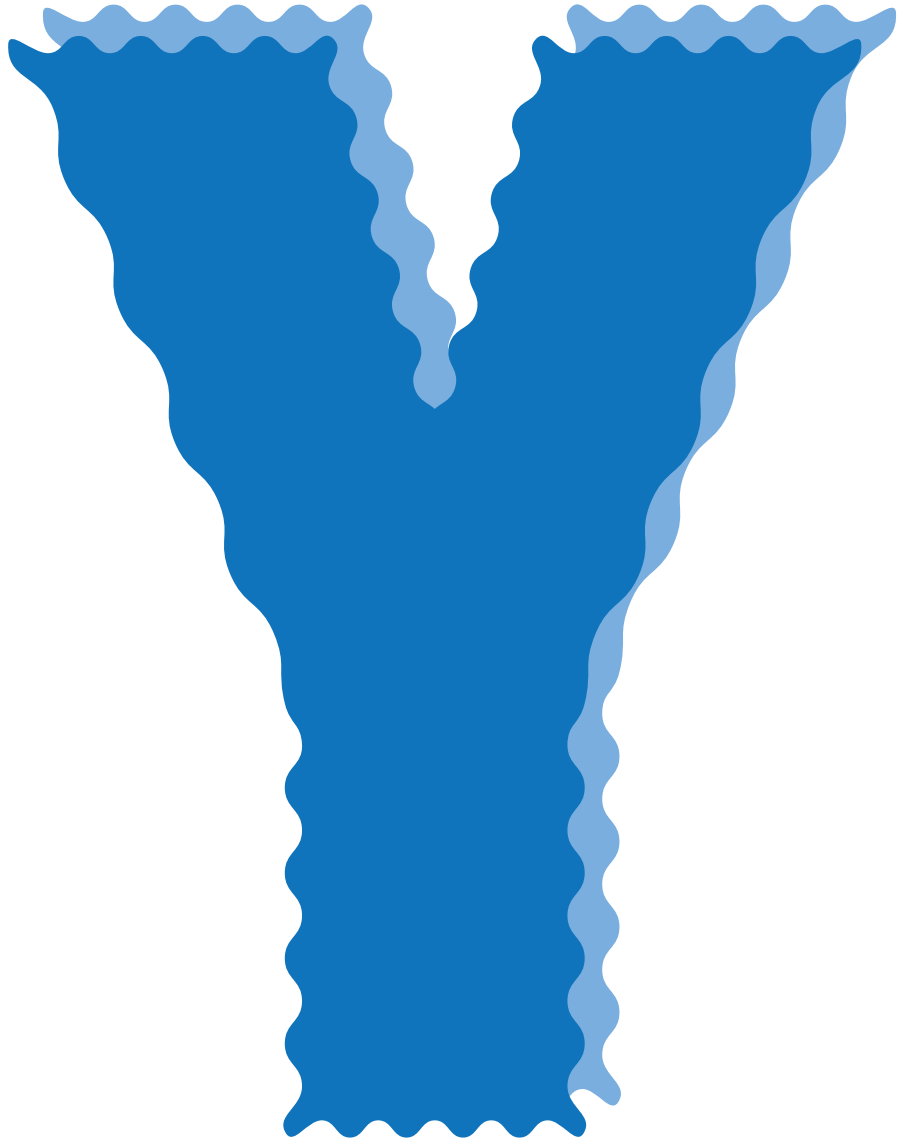
불을 만들어 낼 때 사용하는 미시메탈(Mischmetal) 속 란타넘(La), 세륨(Ce), 네오디뮴(Nd) 원소나, 매우 강한 자석을 만드는 데 사용하는 네오디뮴, 사마륨(Sm), 가돌리늄(Gd) 등의 원소들은 서로 조합하면 기능성이 더욱 높아집니다.

스마트폰에만 희토류 8가지 사용돼

유용한 희토류를 얻을 가장 단순한(?) 방법은 시보그의 실험처럼 핵화학 반응으로 희토류를 생성해내는 것일 수 있습니다. 하지만 금 생성 실험과 마찬가지로 희토류를 생성해내는 것은 희토류를 구매하는 것보다 압도적으로 비용이 많이 듭니다. 실효성이 매우 떨어지죠.

결국 희토류를 얻는 현실적인 방법은 아껴 사용하고, 폐기물로 버려진 원소를 재활용하는 것입니다. 대표적인 예로 인광석(Phosphate rock)에서 비료로 사용하기 위한 인산(Phosphoric acid)을 생산하면 인산석(Phosphogypsum)이 남는데, 여기서 희토류 원소를 추출할 수 있습니다. 현재 전 세계 비료 산업에서 매년 약 2억5000만t(톤)의 인광석을 채굴하고 있습니다. 인광석의 단 0.1%만이 희토류 원소라고 알려져 있지만, 채굴량을 고려할 때 결코 적은 양이 아닙니다.

또 다른 주요한 희토류 회수처는 자석 폐기물과 하드디스크 등의 전자



이트륨(Y)
최초로 발견된 희토류 원소. 무른 은백색 금속으로 다른 금속에 소량 첨가해 강도, 내열성 등을 높인다. 제트 엔진, 고체 레이저, 스마트폰 스크린 등에 다양하게 활용된다. 흰색 가루로 된 산화 이트륨(Y_2O_3)을 LED 내부에 발라 붉은색, 백색 빛을 내도록 한다. 희토류 원소 중에서도 비교적 흔하고 생산량이 많은 원소다.

QR코드를 스캔하면 이트륨의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

부품 폐기물입니다. 철(Fe)이나 코발트(Co), 니켈(Ni) 등으로 만들어지는 일반 자석과 달리, 작지만 매우 강한 자기장을 형성할 수 있는 특수 자석에는 반드시 희토류 원소가 들어갑니다. 때문에 폐기물에 자석을 대는 것만으로 남아있는 희토류 원소를 회수할 수 있습니다.

하드디스크나 집적회로 등의 다양한 전자 부품은 귀금속과 희토류의 집합체입니다. 특히 전자회로는 높은 전도율로 전기가 흘러야 하고 산소와 접촉해도 녹이 슬지 않아야 하기 때문에 보통 귀금속인 금으로 만듭니다. 현재 폐기되고 있는 전자제품의 양을 고려한다면 폐기물 속에 어마어마한 양의 금이 묻혀 있는 상황입니다.

뿐만 아니라 하드디스크 속 자석은 30%가량이 희토류 원소들로 이뤄져 있고, 자동차 전기모터의 영구자석에는 약 1 kg의 네오디뮴이 들어있습니다. 우리가 사용하는 스마트폰의 스크린, 전자부품, 배터리와 외형을 만드는 데에도 8가지 희토류와 3가지의 귀금속 등 총 25가지 이상의 원소가 사용됩니다.

이러한 희토류를 회수해 재사용하는 노력은 환경을 위해서도 중요합니다. 희토류 생산 방식은 엄청난 양의 독성 물질과 산성 오염 물질을 발생시킵니다. 주위 환경이 급속도로 오염되죠. 희토류 원소를 포함한 제품들이 지속적으로 폐기되는 현실을 생각하면, 단순히 고갈이나 수급 불안정의 이유가 아니더라도 안정적이고 친환경적인 희토류 생산법을 개발해낼 필요가 있습니다. 또한 일상에서 우리가 편하게 사용하는 제품들의 재료와 가치를 생각하며 소중하게 사용해야겠습니다.

조윤진(서울 풍납중 2)

Q

아이언맨처럼 팔라듐으로 소형 원자로를 만들 수 있나요?

22

장홍제 교수가 답하다

영화 ‘아이언맨(Iron Man)’에 등장하는 히어로 아이언맨은 ‘아크 리액터(Arc Reactor)’라 불리는 소형 에너지 발생장치를 가슴에 달고 엄청난 힘을 발휘합니다. 아크 리액터는 팔라듐(Pd)을 원료로 하는 소형 원자로라는 게 영화의 설정이죠. 과연 팔라듐으로 핵반응을 유도할 수 있을까요?

팔라듐은 원자번호 46번에 해당하는 전이금속 원소로, 10족 5주기에 자리잡고 있습니다. 구조로 보면 d오비탈에 배치된 전자가 핵심적 역할을 하는 원소입니다. 은백색의 광택을 띠며 안정성이 뛰어납니다.

팔라듐은 ‘백금족 원소’로 귀한 대접을 받습니다. 수많은 금속 원소들 중, 귀금속으로 분류되는 원소는 7족의 레늄(Re), 8족의 루테늄(Ru)과 오스뮴(Os), 9족의 로듐(Rh)과 이리듐(Ir), 10족의 팔라듐과 백금(Pt), 11족의 구리(Cu), 은(Ag), 금(Au), 12족의 수은(Hg) 등 총 11개입니다. 이중 7, 8, 9족의 원소 6가지가 백금족 원소로 구분됩니다. 이들은 공통적으로 화학 반응이 좀 더 쉽게 일어날 수 있도록 도와주는 촉매로서의 기능이 뛰어납니다.

이 같은 이유로 팔라듐은 촉매, 축전지 등의 전자 부품, 장신구 등을 만드는 데 널리 활용되고 있습니다. 자동차 배기가스를 무해하게 변환시키는 3원 촉매 변환기의 핵심 원소 중 하나이고, 2010년에는 팔라듐을 촉매로 유기화합물을 쉽게 합성할 수 있는 ‘교차결합 반응’을 발견한 과학자들이 노벨화학상을 수상했습니다.

최고의 촉매, 하지만 핵반응에는 부적합

팔라듐은 이처럼 촉매로서의 기능성과 안정성이 뛰어나지만 이것만으로 팔라듐이 핵분열(Nuclear fission)이나 핵융합(Nuclear fusion) 반응에 적합한 대상이라고 판단하기에는 어려움이 있습니다. 영화 속 아크 리액터에서 ‘아크(Arc)’는 기체가 초고온 상태로 가열돼 임계점을 넘었을 때 양전하를 띤 이온과 전자로 분리돼 존재하는 플라스마(Plasma)를 뜻합니다. 리액터는 핵분열 또는 핵융합이 일어나는 반응로를 의미한다고 생각할 수 있습니다. 즉 영화 속 아크 리액터를 현실로 만들려면 초고온의 핵반응이 일어나는 소형 원자로를 사람 가슴 중앙에 박아 넣을 수 있을 정도의 작은 크기로, 게다가 안전하게 만들어야 합니다. 사실상 불가능합니다.

아크 리액터의 크기나 안전 문제를 차치하고서도 이는 쉬운 일이 아닙니다. 가장 큰 이유는 팔라듐이 방사성 붕괴를 하지 않는 안정한 원소이기 때문입니다. 핵분열 반응으로 에너지를 내기 위해서는 우선 자연적으로 어느 정도 핵분열이 가능한, 쉽게 말해 핵분열 반응을 선호하는 원소를 핵연료로 사용해야 합니다. 대표적인 핵연료가 우라늄-233(^{233}U), 우라늄-235(^{235}U), 플루토늄-239(^{239}Pu) 등입니다. 이들에 중성자가 충돌하게 되

팔라듐(Pd)
주기율표 10족에 속하는 '백금족' 원소. 은백색 광택이 있는 무른 금속으로, 백금과 화학적 성질이 유사해 촉매로 활용된다. 6개의 안정한 동위원소가 존재한다. '아이언맨'은 팔라듐을 재료로 사용하는 소형 원자로를 가슴에 달아 에너지를 얻지만, 실제로는 팔라듐이 핵반응을 일으키기에는 안정한 원소여서 한계가 있다.

면 핵연료는 에너지를 방출하며 분열합니다. 정확히는 두 개의 분열된 원소와 세 개의 중성자를 생성합니다. 이때 생성된 중성자는 또 다른 핵연료에 충돌하고, 이렇게 연쇄적으로 핵분열 반응이 계속됩니다. 핵분열 반응을 조절할 수 있도록 설계한 경우 원자력 발전을 위한 원자로가 되는 것이고, 그렇지 않으면 핵무기로 작동하는 거죠.

하지만 팔라듐은 6가지 동위원소(^{102}Pd, ^{104}Pd, ^{105}Pd, ^{106}Pd, ^{108}Pd, ^{110}Pd)가 모두 매우 안정한 원소들입니다. 플루토늄-238(^{238}Pu), 스트론튬-90(^{90}Sr), 프로메튬-147(^{147}Pm)과 같은 방사성 원소들이 자발적으로 붕괴해 소량의 핵에너지를 발생시키는 원자력 전지 같은 것을 팔라듐으로는 만들기가 어렵습니다. 원자력 전지에 팔라듐과 같은 족 원소인 니켈-63(^{63}Ni)을 사용하는 것처럼(니켈-63처럼 합성된 인공 동위원소는 방사성 붕괴가 가능하기 때문입니다), 지구상에 극소량 존재하며 베타붕괴를 하는 팔라듐의 방사성 동위원소인 팔라듐-103(^{103}Pd)을 넣을 수는 있지만 극도로 비효율적입니다.

상온 핵융합 기술이 가능해진다면?

팔라듐으로 핵융합을 일으킬 순 없을까요? 핵융합은 현재 지속적으로 연구가 이뤄지고 있는 차세대 분야입니다. 유출 시 어마어마한 재난을 유발할 수 있는 핵분열 발전과 달리, 환경을 위해할 만한 요소가 적어 많은 관심을 받고 있습니다. 핵융합의 기본 원리는 두 원자가 충돌해 합쳐지는 과정에서 발생하는 질량 손실로 에너지를 발생시키는 것입니다. 태양이 빛과 열을 내는 과정이 수소의 핵융합이라는 사실을 생각해 볼 때, 만약 지구에서 핵융합을 실현하기만 한다면 태양에너지와 같은 엄청난 에너지를 확보할 수 있다는 장점이 있습니다.

문제는 이런 수소 핵융합 반응이 태양과 같은 매우 높은 온도와 압력 조건에서만 일어난다는 점입니다. 지구상에 상온 상압으로 존재하는 수소들이 서로 부딪히며 핵융합 반응을 일으킬 리는 만무하죠. 팔라듐을 원료로 한 아크 리액터가 실현되기 위해서는 실내온도(상온)에서 핵융합 발전을 일으키는 '상온 핵융합(Cold fusion)' 기술이 뒷받침돼야 합니다.

상온 핵융합이 가능할까요? 여기에 대한 생각은 과학자들마다 다르지만 상온 핵융합 연구는 전 세계적으로 꾸준히 진행되고 있습니다. 1989년에는 미국 유타대 연구팀이 팔라듐을 이용해 상온 핵융합 실험에 성공했다는 사실을 전 세계 언론에 발표했습니다. 연구팀은 중수(D_2O)에 팔라듐으로 구성된 전극을 넣고 전류를 흘러보내 전기분해로 중수소(^2H) 분자를 발생시키는 실험에서 상온 핵융합 반응이 일어나 며칠 동안 용액의 온도가 상승한 채로 유지됐다고 주장했습니다. 하지만 다른 연구자들이 실험을 재현했을 때 같은 결과가 나오지 않아 해프닝으로 끝났죠.

그해 북한 김일성종합대에서도 백금과 팔라듐 전극으로 중수를 전기분해 해서 상온 핵융합에 성공했다고 보도했으나 역시 검증에 실패했습니다. 이후로도 상온 핵융합에 대한 여러 시도가 이어졌지만 수소와 헬륨 같은 가벼운 원소를 융합하려는 연구가 주를 이뤘습니다.

결론적으로 팔라듐을 사용해 소형 원자로를 구현하는 것은 현재 기술로는 불가능합니다. 아주 소량 존재하는 방사성 팔라듐(^{103}Pd)을 통해 에너지를 얻을 수는 있으나, 원자로를 제작하고 발전시키는 목적이 적은 비용으로 많은 에너지를 얻기 위함임을 고려할 때, 현실적으로 의미가 없습니다. 이쯤되면 아이언맨 시나리오를 쓴 작가에게 물어보고 싶어집니다. 왜 팔라듐인지, 왜 하필 핵반응과 관계없는 화학 분야 최고의 촉매 원소를 골랐는지 말입니다.

김하늘(경기 평택여고 2)

Q 수소와 산소로 물을 만들어 쓸 수 있을까요?

23

차상원 교수가 답하다

물(H_2O)은 지구상에 가장 풍부한 액체 상태 화합물 중 하나입니다. 지구 생명체가 생명현상을 영위하는 데 필수 불가결한 물질이죠. 그럼에도 지구 인구의 약 10%에 이르는 약 7억8000만 명은 제대로 된 식수를 공급받지 못하고, 이중 1억4000만 명은 지표수에 의존해 식수를 해결하고 있습니다. 그들에게 수소와 산소로 물을 '생산'해 공급할 수는 없을까요?

수소와 산소가 만나면 폭발한다?

참으로 훌륭한 아이디어이지만 현실적으로 어렵습니다. 수소와 산소로 물을 직접 생산하지 않는 가장 큰 이유는 수소기체의 폭발성 때문입니다. 수소기체의 연소반응에서는 다음과 같이 두 개의 수소 분자와 하나의 산소 분자가 결합해 두 개의 물 분자를 생성합니다.

2H-H + O=O → 2H-O-H

수소기체와 산소기체를 단순히 섞는다고 해서 위의 반응이 일어나지는 않습니다. 하지만 작은 불꽃같은 에너지를 주면 수소가 원자 상태로 바뀌면서 산소와 폭발적으로 반응하게 됩니다. 위의 반응을 보면, 2개의 H-H 결합과 1개의 O=O 결합이 끊어지고, 4개의 O-H 결합이 생성됩니다. 결합을 끊기 위해서는 에너지가 필요하고, 결합이 생성될 때는 에너지가 방출됩니다. 전자를 쉽게 내어주는 수소와 전자에 대한 욕심이 많은 산소와의 결합이기 때문에, 생성되는 O-H 결합은 매우 안정합니다.

다르게 표현하면, 수소 원자와 산소 원자가 만나 O-H 결합을 형성할 때 많은 에너지가 방출됩니다. 2개의 수소 분자와 1개의 산소 분자의 모든 결합을 끊는데 필요한 에너지는 안정한 4개의 O-H 결합이 생성될 때 방출되는 에너지 보다 훨씬 적기 때문에 반응 시 열이 발산되며, 이러한 반응을 발열반응이라고 합니다. 발생된 열은 다른 수소 분자의 결합을 끊어 수소를 원자 상태로 바꾸며, 이 수소 원자들이 다시 연쇄적으로 폭발적인 반응을 일으키게 됩니다. 따라서 식수를 생산할 정도로 큰 규모로 수소기체와 산소기체를 반응시키는 것은 매우 위험합니다.

또 다른 이유로 식수를 생산할 정도로 많은 양의 수소기체를 저장할 공간을 구축하는 것도 결코 쉽지 않습니다. 물론 수소기체를 고압용기에 저장하면 부피를 줄일 수 있습니다. 수소 자동차의 50L 정도 되는 수소연료탱크는 700기압까지 견딜 수 있도록 탄소섬유를 이용해 제작합니다. 하지만 이 정도의 압력을 견디는 대용량 저장탱크를 제작하는 것은 기술적, 비용적인 면에서 아직 한계가 있습니다. 또한 실제 기체는 압력에 비례해 부피가 줄어드는 데 한계가 있습니다. 기체 분자간 상호작용이 없다고 가

정하는 이상기체와 달리, 실제 기체분자들은 압력이 매우 높은 상태에서 상호작용을 하고, 이를 무시할 수 없기 때문입니다.

우주에 가장 많은 수소, 그러나 대기엔 희박해

위에서 언급한 수소기체의 폭발성 문제나 저장 문제 등을 모두 해결한다고 하더라도, 더욱 근본적이고 현실적인 문제점이 남아있습니다. 바로 수소기체를 어떻게 확보해 공급할 것인가 하는 문제입니다. 산소기체는 대기의 약 21%를 차지할 정도로 지구상에 풍부하게 존재하기 때문에 공급을 걱정할 필요가 없습니다. 하지만 수소기체는 지구의 중력에 의해 잡혀 있을 수 없을 정도로 매우 가볍기 때문에 지구 대기에 매우 희박하게 존재합니다. 수소는 우주에 가장 풍부하게 존재하는 원소임에도 불구하고 수소기체는 지구 대기의 약 0.00005%에 불과합니다. 따라서 우리는 암모니아 제조나 석유 정제 제품에서 황(S)을 제거하는 공정을 위해서나, 수소연료전지의 연료로 사용하기 위해서 수소기체를 생산하고 있습니다.

수소기체를 생산하는 방법은 여러 가지이나 산업적으로 활용되는 방법은 크게 세 가지입니다. 석유화학 제조 공정에서 발생하는 부생가스에서 수소기체를 분리하는 방법과 천연가스나 화석연료에 고압의 뜨거운 수증기를 가해 수소기체를 발생시키는 방법, 그리고 물을 전기분해 해서 얻는 방법입니다. 세계적으로는 가장 경제적인 방법인 천연가스와 수증기를 이용한 방법을 주로 사용하며, 이것이 수소 생산의 약 절반을 차지하고 있습니다. 반면, 석유화학 산업이 발달한 우리나라에서는 전체 생산량의 95%를 부생가스로 생산하고 있습니다. 물을 전기분해 해서 수소를 생산하는 방식은 전 세계 생산량의 4%에 불과합니다.

물(H_2O)
생명을 유지하는 데 없어서는 안 되는 물질. 두 개의 수소 원자와, 하나의 산소 원자가 공유결합 한 물질이다. 물 분자는 극성을 띠고 있어 전하를 띠고 있는 이온성 물질과 극성 물질을 잘 녹인다. 표준 온도와 압력에서 무색투명하고 무미무취하다. 지표면의 70%를 덮고 있을 만큼 지구상에 풍부하다.

이 세 가지 방법은 모두 장단점이 있습니다. 부생가스를 이용하는 방법은 사용하지 않는 부산물을 활용한다는 점에서 경제적이나, 석유화학 산업과 맞물려 있기 때문에 생산량을 확대하기가 어렵습니다. 고압 수증기를 이용하는 방법은 대량 생산이 가능하고 경제적이나, 공정에서 온실가스인 이산화탄소(CO_2)를 많이 발생시킵니다. 물을 전기분해하는 방법은 친환경적이나, 전기가 필요하며 생산 단가가 높습니다.

그럼 물을 '생산'하는 측면에서는 이 세 가지 수소 생산 방법 중 어떤 방법을 사용할 수 있을까요? 우선 고압 수증기를 사용하거나 물을 전기분해하는 방법으로 수소를 생산하고 그것으로 물을 만든다면, 물을 사용해서 물을 만드는 꼴이 돼 전혀 실효성이 없습니다. 남은 방법은 부생가스로부터 수소를 정제해서 사용하는 방법뿐인데, 이를 위해서는 석유화학 산업의 인프라가 해당 지역에 구축돼 있어야 합니다. 물론 우리나라에서 부생가스를 이용해 생산한 수소를 물 부족 국가가 수입해 사용할 수도 있겠지만, 운반 비용 및 효율을 고려하면 경제적 이치에 전혀 맞지 않습니다. 대량의 물을 생산하는 방법으로 수소기체와 산소기체를 반응시키는 것은 한계가 분명하다고 보는 이유입니다.

하지만 실망할 필요는 없습니다. 당장 물을 화학적으로 합성해 식수 문제를 해결하긴 어렵지만, 이미 존재하고 있는 물을 마실 수 있는 상태로 바꾸는 기술, 즉 정수 기술, 해수 담수화 기술, 대기 중 수증기를 수집하는 기술 등이 발전하고 있으니까요. 미래 세대인 청소년들이 이런 분야에 관심을 갖고 노력한다면 가까운 미래에 분명 식수 문제를 해결할 수 있을 것이라고 생각합니다.

이승규(서울 동작구)

Q

비활성 기체가 실생활에 어떻게 쓰이나요?

24

차상원 교수가 답하다

비활성 기체 원소는 주기율표 가장 오른쪽 18족에 위치한 원소들입니다. 인공적으로 합성한 원자번호 118번 오가네손(Og)을 제외한 여섯 원소들, 즉 헬륨(He), 네온(Ne), 아르곤(Ar), 크립톤(Kr), 제논(Xe), 라돈(Rn)은 모두 기체로 자연계에 존재합니다.

1주기 원소인 헬륨은 최외각 전자가 2개, 나머지 비활성 기체 원소들은 최외각 전자가 8개로 모두 안정한 상태이기 때문에 다른 원소와 전자를 공유할 필요가 없습니다. 따라서 비활성 기체 원소들은 반응성이 극히 낮으며, 특히 네온은 현재까지 알려진 다른 원소와의 화합물이 없을 정도로 반응성이 낮습니다.

그렇다보니 이렇게 반응성도 없는 비활성 기체 원소들은 과연 실생활에 쓸모가 있을까 궁금해 하는 분들이 많은데요. 알고 보면 의외로 다양한 산업분야에서 사용되고 있어서 깜짝 놀라실 겁니다.

낮은 반응성? 오히려 장점으로 활용

비활성 기체 원소들은 단원자 상태로 안정하며, 상온에서 모두 기체 상태로 존재합니다. 모두 기체로 존재하는 이유는 비활성 기체 원소 모두 원자간 상호 인력이 낮아 끓는점이 매우 낮기 때문입니다. 비활성 기체의 끓는점은 원자가 커질수록 높아지는데, 가장 큰 라돈의 끓는점도 영하 62도(211 K)에 불과합니다. 가장 작은 헬륨의 끓는점은 영하 269도(4 K)로 더 낮죠. 일반적인 압력에서 아무리 온도를 낮춰도 헬륨을 고체로 만들 수 없습니다.

이렇게 낮은 끓는점으로 인해 액화된 비활성 기체 원소들은 극초저온 냉매제로 사용됩니다. 특히 액체 헬륨은 초전도 자석을 냉각하는 데 주로 사용되며, 전체 헬륨 생산량의 약 20% 이상이 영상의학에서 필수불가결한 장치 중 하나인 자기공명영상(MRI) 장치의 자석을 냉각하는 데 쓰입니다. 헬륨만큼 낮은 온도까지 도달하진 못하지만, 액화 네온도 우수한 냉장 용량을 가진 냉매제입니다.

앞서 언급했듯이, 비활성 기체의 낮은 반응성은 산업적 효용성 측면에서 다른 기체들과 차별되는 매우 유용한 특징입니다. 헬륨은 풍선, 기구, 비행선 등을 띄우기 위한 부양용 기체로, 그리고 기체의 확산속도가 중요한 기체크로마토그래피에서 물질을 운반하는 기체로 주로 사용됩니다. 물론 수소기체가 헬륨보다 더 가볍고 확산속도도 빠르지만, 수소기체의 높은 폭발성 때문에 반응성이 낮고 안정한 헬륨이 더 많이 쓰입니다.

또한 비활성 기체 원소의 낮은 반응성은 산소가 없는 주변 환경을 만드는 데 유용합니다. 예를 들어 현재 가장 많이 쓰이는 용접법인 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW·gas tungsten arc welding)에서는 공기 중 산화를 방지하기

네온(Ne)
비활성 기체 중 반응성이 가장 낮은 원소. 어떤 물질과도 화학반응을 일으키지 않는다. 무색무취무미하며 공기보다 가볍다. 비활성 기체는 저압방전 시 다양한 색의 빛을 내는데, 네온은 붉은색을 낸다. 헬륨과 혼합해 만든 헬륨-네온 레이저는 레이저 포인터, 광디스크 기록, 의료용 레이저 등에 활용된다.

QR코드를 스캔하면 네온의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.

위해 헬륨이나 아르곤을 보호가스(shield gas)로 사용합니다. 그래서 이 용접법을 텅스텐 비활성 기체(TIG·tungsten inert gas) 용접이라 부르기도 합니다. 또 역사적으로 중요한 고문서의 산화를 방지하기 위해 고문서를 아르곤 환경에 보관하기도 합니다.

제논은 마취제나 조영제로 사용되는데, 제논의 낮은 반응성 덕분에 인체에 부작용이 적다는 장점을 갖고 있습니다. 단점은 아직 너무 비싸서 사용이 제한적입니다. 아르곤은 백열등 전구에 질소와 함께 채우면 필라멘트가 끊어지는 것을 지연시킬 수 있습니다. 크립톤은 아르곤보다 전구의 수명과 효율을 향상시키는 효과가 더 우수하며, 할로젠 램프에도 사용됩니다.

비활성 기체는 그 자체로도 다양한 빛을 내 훌륭한 광원이 됩니다. 일명 '네온사인'이라 불리는 기체 방전 램프에 네온뿐만 아니라 다양한 비활성 기체의 혼합물을 주입하면 여러 가지 색깔의 빛을 낼 수 있습니다. 크립톤 램프는 아주 밝은 흰색 빛을 내 공항 활주로의 표시등으로 사용됩니다. 제논 램프도 다른 비활성 기체에 비해 훨씬 밝은 빛을 내기 때문에 자동차 전조등, 카메라 플래시, 영화 영사기 램프, 내시경의 광원 등 고강도 램프로 사용됩니다.

비활성 기체나 비활성 기체와 할로젠 원소를 섞은 혼합물은 레이저의 매질로도 사용됩니다. 헬륨과 네온이 혼합된 헬륨-네온 레이저는 붉은 빛을 내며 레이저 포인터, 광디스크 기록, 의료용 레이저 등 다양한 분야에 활용됩니다. 청록색 빛을 내는 아르곤 레이저는 가장 강력한 가시광선 영역의 레이저로 레이저 쇼, 피부 치료를 위한 레이저 시술 등에 쓰입니다. 비활성 기체 원소와 할로젠 원소를 섞은 엑시머(excimer·들뜬 전자에너지 준위에서 생성된 이합체) 레이저는 주로 집적회로를 매우 얇게 깎아내는 공정이나 안과 수술에 사용됩니다.

단열 효과 내는 아르곤, 핵 실험 감지하는 크립톤

지금까지는 비활성 기체 원소들의 공통된 특징을 바탕으로 산업 현장에서 어떻게 응용되는지를 살펴봤는데요. 비활성 기체 원소들이 각각의 개성을 살려 산업 현장에서 활용되는 경우도 많습니다.

먼저 비활성 기체 원소 중 물과 지질에 대한 용해도가 특히 낮은 헬륨은 스쿠버다이빙 같은 높은 압력조건에서 질소기체를 대체하는 호흡기체로 사용합니다. 질소기체는 다이버가 수면으로 올라와 압력이 급격히 낮아질 때 폐를 통하지 않고 혈관에서 바로 기체 방울로 나와 잠수병을 유발하지만, 헬륨은 이런 현상을 일으키지 않습니다.

열전도율이 매우 낮은 아르곤은 이중창 유리 사이에 채우면 탁월한 단열 효과를 냅니다. 그리고 크립톤과 제논의 방사성 핵종인 ^{85}Kr과 ^{135}Xe은 핵분열 시 대기 중으로 방출되는 핵종으로, 핵 실험 감지에 활용됩니다. 제논은 인공위성이 우주에서 궤도를 유지할 수 있도록 돕는 이온 추진 엔진의 추진제로도 활용됩니다.

자연계에 존재하는 가장 무거운 비활성 기체 원소인 라돈은 앞서 언급했던 다섯 비활성 기체 원소들과 전혀 다른 측면에서 중요합니다. 라돈은 방사성 원소 중 유일하게 기체로 존재하며 공기보다 훨씬 무거워 환기가 안 되는 곳에 쉽게 쌓일 수 있습니다. 호흡 과정에서 인체에 유입될 가능성이 높죠. 현재 폐암을 일으키는 1급 발암물질로 규정돼 있습니다.

라돈은 우라늄 붕괴로 생성돼 자연계 어디에나 존재하긴 하지만, 절대 일부러 사용해서는 안 됩니다. 최근 우리나라에서 일명 '라돈 침대' 사고가 있었는데, 이는 라돈을 발생시키는 모나자이트(monazite) 광물 가루를 침대에 사용했기 때문입니다. 단순히 음이온이 몸에 좋다는 비과학적인 생각으로 모나자이트 돌가루를 사용했다가 발생한 황당한 사고였습니다.

비활성 기체 원소의 아버지, 윌리엄 램지 경

반응성이 매우 낮은 18족 비활성 기체 원소들은 다른 족 원소들에 비해 늦게 발견됐습니다. 이런 비활성 기체를 산업에 응용하기까지는 비활성 기체를 발견하고 그 특성을 밝혀낸 화학자들의 노력이 컸습니다. 특히 비활성 기체 원소들을 얘기할 때 우리가 꼭 기억해야 할 사람이 영국의 화학자 윌리엄 램지 경(Sir William Ramsay)입니다. '공기 중 비활성 기체 원소의 발견과 이 원소들의 주기율표상 위치 결정'의 공로로 1904년 노벨화학상을 수상한 분이죠.

램지 경은 1894년 아르곤의 존재를 발견했습니다. 존 레일리 남작(Lord Rayleigh)이 공기 중 질소와 화학적으로 생성된 질소 사이의 밀도 차이를 발견해내자, 램지 경은 그와 함께 공기 중 질소를 제거하고 남은 기체를 분광분석해 아르곤을 찾아냈습니다.

램지 경은 헬륨을 처음으로 발견한 사람은 아니었지만, 우라늄 광물의 일종인 클레베석으로부터 헬륨을 분리해내 지구 지각에 존재하는 헬륨의 실체를 밝혔습니다. 또한 헬륨과 아르곤의 원자량 차이가 큰 것을 인지하고, 이 두 원소 사이에 같은 성질의 다른 원소가 존재할 것이라는 아이디어를 냈습니다. 이에 램지 경은 그의 조수와 액체 공기 분별증류 실험을 통해 네온을 발견합니다. 같은 방법으로 아르곤보다 무거운 비활성 기체 원소 크립톤과 제논도 발견하죠.

램지 경은 방사성 원소 라듐이 붕괴하면서 나온 기체가 다른 비활성 기체 원소와 비슷한 스펙트럼을 갖는다는 점에 착안해 이 기체가 비활성 기

체 원소임을 확인하고 '니톤(Nt)'이라 명명했습니다. 이 원소가 오늘날 라돈이라 불리는 원소입니다. 이렇게 비활성 기체 원소 4개를 직접 발견하고 나머지 두 원소의 발견에도 깊이 관여한 램지 경은 명실상부 '비활성 기체 원소의 아버지'라 할 수 있습니다.

이인준(서울 성북구)

Q

오비탈 이름은 어떻게 정했나요?

25

장홍제 교수가 답하다

오비탈이라는 개념은 원자의 구조와 전자 배치, 결합의 종류의 특성, 화학 반응의 형태와 입체적인 분자 구조 등 수많은 현대 화학의 핵심을 관통하는 개념입니다. 영국의 물리학자 조지프 톰슨(Joseph John Thomson)이 음극선관 실험을 통해 원자 구조에 대한 인식을 바꾼 뒤 현재 정설로 받아들여지는 슈뢰딩거 원자 모형에 이르기까지, 원자 모형의 논리적 오류를 극복하기 위한 노력은 끊임없이 이어져 왔습니다.

결과적으로 오늘날 확립된 원자 모형은 높은 밀도와 질량을 갖는 원자핵이 있고, 그 주변에 전자가 확률적으로 존재하고 있습니다. 전자의 발견 확률이 90% 이상인 영역이 바로 오비탈입니다.

오비탈의 이름은 s, p, d, f 등 매우 다양합니다. 자칫 오비탈의 모양 때문에 이런 이름이 붙었다고 오해하기 쉬우나(마침 s오비탈은 구형(sphere)을, p오비탈은 양극성(polar) 형태를 갖습니다), 그 이상은 설명하기 힘들다는 것을 알 수 있습니다. 사실 오비탈의 이름은 이보다 더 근본적인 이유에 기반을 두고 있습니다.

4가지 선 스펙트럼의 형태 구분에서 출발

오비탈의 종류와 차이에 대한 연구는 빛의 반응을 연구하는 분광학에서 시작됐습니다. 오스트리아의 물리학자 루트비히 볼츠만(Ludwig Eduard Boltzmann)을 중심으로 소리를 파장과 주기적인 반복으로 표현하는 연구가 시작됐죠. 이들은 알칼리 금속에서 얻은 선 스펙트럼을 관찰하며 강도와 형태에 따라 날카로운(sharp), 주요한(principal), 확산된(diffuse), 그리고 근본적인(fundamental)이라는 4개의 기본적인 스펙트럼 형태를 정의했습니다.

닐스 보어(Niels Bohr)는 이후 원자에 에너지 준위가 존재함을 설명하면서 원자의 선 스펙트럼을 고성능의 분광기로 관찰한 결과를 증거로 활용했습니다. 하나의 선으로 보이던 스펙트럼이 2개 이상의 선으로 갈라지면 이것은 같은 전자껍질에 있지만 에너지가 서로 다른 전자를 의미했습니다. 이렇게 전자가 들뜬 상태가 되거나 에너지를 방출하는 현상을 설명하기 위해 오늘날 우리가 아는 s, p, d, f오비탈이 만들어졌습니다.

현재 중·고등학교 교육과정에는 s, p, d, f오비탈 각각의 명칭과 개략적인 형태에 대해서만 나옵니다. 그런데 사실 오비탈의 의미를 명확히 이해하기 위해서는 양자수(quantum number)라고 하는, 원자 내에서 전자가 가질 수 있는 특정한 조건에 대해 알아야 합니다.

원자 내 전자의 양자수는 총 네 가지 종류로 나뉩니다. 원자핵으로부터의 거리와 에너지 준위를 의미하는 주 양자수(n), 전자의 궤도와 각운동량

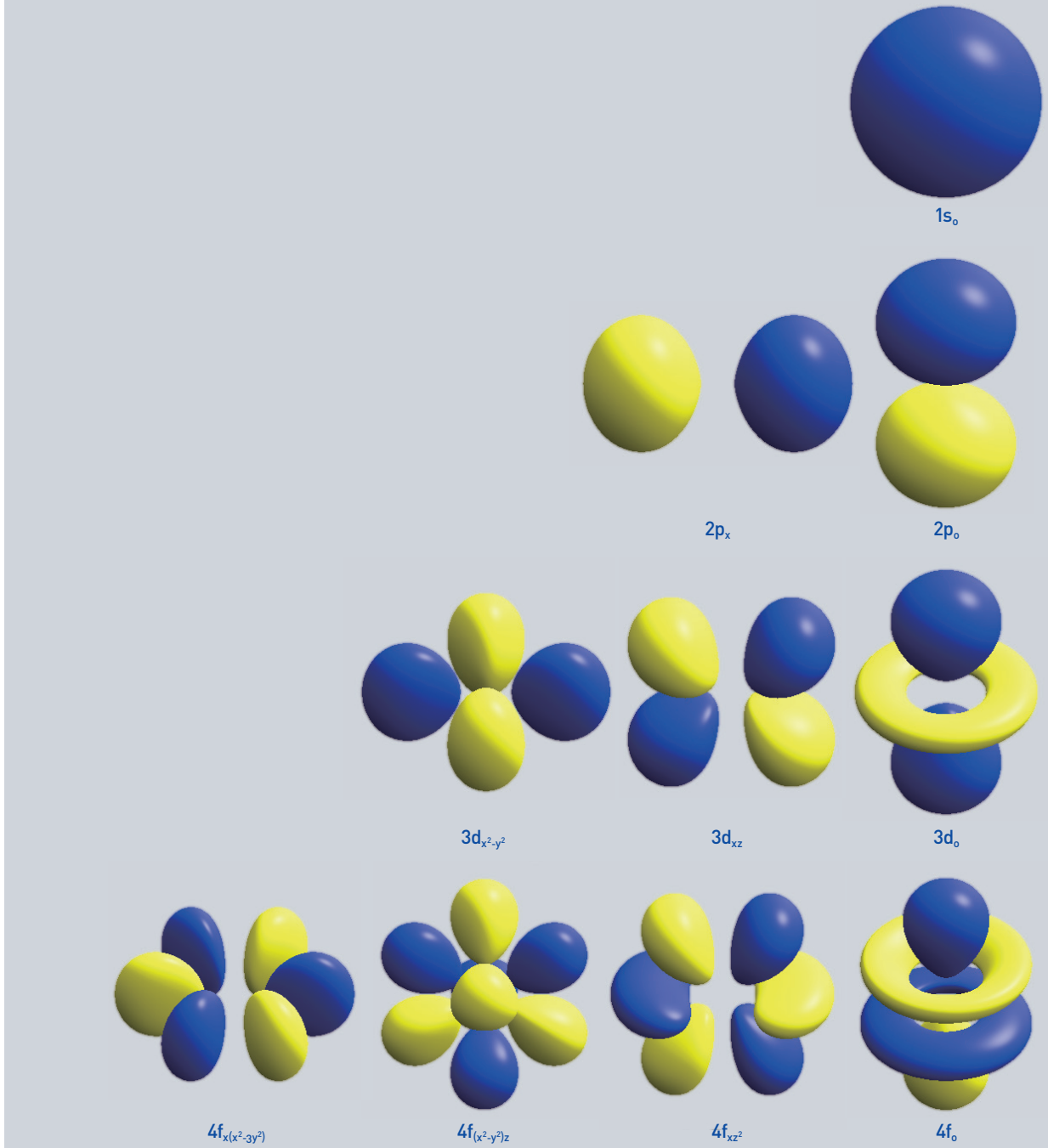
을 의미하는 각운동량 양자수(l·부 양자수, 궤도 양자수, 방위 양자수 등 다양한 명칭이 있습니다), 각운동량의 방향을 나타내는 자기 양자수(m_l), 이 세 가지는 슈뢰딩거 방정식의 해로 얻어지는 항목입니다. 나머지 한 가지는 실험적으로 얻어진 전자의 자전에 대한 정보를 의미하는 스핀 양자수(s)입니다.

전자의 상호작용, 오비탈 모양 변화시켜

이중 각운동량 양자수와 스핀 양자수는 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)이라는 상호작용을 일으킵니다. 이로 인해 선 스펙트럼이 몇 개로 나눠지는 미세구조가 형성됩니다. 전자가 원자 내부의 궤도를 공전하는 상황을 전자의 입장에서 상상해보면, 멈춰 있는 전자의 주위를 양전하를 띠는 핵이 공전하며 전류 고리로 형성된 자기장을 특정한 방향으로 구현하고 있는 것처럼 보일 수 있습니다. 이 경우 각운동량과 스핀 사이의 상호작용에 의해 전자의 위치에너지가 커지거나 작아지는 두 가지 선택지가 발생합니다. 그 결과로 전자의 선 스펙트럼이 갈라지게 됩니다. 스핀-궤도 결합에 의해 시각적으로 달라진 선 스펙트럼을 보고 그것의 강도와 폭에 따라 s, p, d, f오비탈 중 어떤 오비탈인지를 판단내립니다.

오비탈들의 각운동량 양자수에 기반한 스펙트럼이 자기장과 전기장에 의해 스핀-궤도 결합 갈라짐이 발생하면, s오비탈은 두 개의 선으로 갈라져 날카롭고 강하게 관찰됩니다. p오비탈은 6개, d오비탈은 10개, 그리고 f오비탈은 총 14개의 선으로 갈라져 점차적으로 넓게 분포하는 형태를 보입니다. 이는 각 오비탈에 들어갈 수 있는 총 전자의 개수와 동일합니다.

그 다음은 g오비탈입니다. g오비탈이라는 이름은 어떻게 지어진 걸까요? 현재까지 발견된 어떠한 원소도 g오비탈에 전자가 포함된 유효한 구



Geek3(Wikipedia)

조를 가진 경우는 없습니다. 당연히 내부 전자들의 선 스펙트럼이 관측된 적도 없습니다. 다만 한 가지 예상은 가능합니다. g오비탈이 f오비탈보다 더 많이 갈라져서 보다 넓은 영역에 퍼져있는 형태로 확인될 것이라는 점입니다.

아직 관찰된 적 없는 원소의 이름을 미리 정하지 않듯 g오비탈 역시 특별한 사유나 근거로부터 이름이 정해지지 않았습니다. 단순히 알파벳 순으로 나열한다면 f 다음에 g가 나오기 때문에, f오비탈의 다음 오비탈이라는 의미로 g오비탈이라고 부르고 있습니다. 앞으로 발견될 원자번호 118번 이상의 원소들은 바로 이 g오비탈이 유효하게 작용할 것입니다.

g오비탈 다음에 오는 오비탈의 이름은 아마도 h오비탈이 될 가능성이 높습니다. 보통 원자가 보유한 전자의 상태를 집약적으로 표현하기 위해 '항 기호(Term symbol)'라는 기호 표현 방식을 사용하는데, 여기서 이미 오비탈과 맞춰 S, P, D, F의 기호를 사용하고 있고, G, H, I 등 이후의 기호들도 알파벳 순으로 이미 사용하고 있기 때문입니다.

고현빈(서울 양정중 2)

Q

원자끼리 사중결합을 형성할 수 있나요?

26

장홍제 교수가 답하다

원자들이 모여 화합물을 만드는 과정에서 어떤 방식으로 얼마나 강하게 서로 연결될 수 있는가는, 그 물질의 안정성과 특성을 결정짓는 매우 중요한 요소 중 하나입니다. 이를 예측하기 위해 우리는 원자의 종류(원소)에 따른 특성들을 판단하며, 이를 정성적 혹은 정량적으로 구분해 가능한 결합의 종류들과 성분을 파악합니다.

원자 혹은 분자에 작용하는 힘은 가장 대표적으로 주위에 존재하는 전자들의 순간적인 편향으로부터 발생하는 정전기적 인력인 판데르발스 힘(van der Waals force)이 있습니다(적은 양의 양전하와 음전하 간의 약한 인력을 상상해보세요!). 원자나 분자가 전자를 끌어당기는 능력인 전기음성도(electronegativity)에서 유래하는 이온결합과 공유결합이 주는 힘도 작용합니다.

이온결합은 중성 원자가 전자를 잃어버려 형성되는 양이온과, 반대 기작으로 형성되는 음이온이 결합해 만들어지는 매우 강한 결합의 한 종류입니다. 대표적인 예로 소듐 양이온(Na^+)과 염화 이온(Cl^-)이 형성하는 염화소듐(소금)이 있습니다. 공유결합은 원자들이 전자를 서로 일정한 개수씩 공유하며 형성하는 단일 혹은 다중 결합입니다. 공유결합을 통해서 수많은 유기 및 고분자화합물들이 형성됩니다.

공유결합은 단일결합(single bond), 이중결합(double bond), 삼중결합(triple bond) 등으로 세분화 돼 있습니다. 그렇다면 자연스럽게 궁금증이 생기죠. 사중결합이나 오중결합, 또는 그 이상도 가능할까요?

최외각 전자 8개로 사중결합 가능할까

이에 대한 충분한 답을 구하기 위해서는 오비탈(orbital)이라는 개념에 대해서 조금 더 자세히 들여다봐야 합니다(자세한 내용은 163쪽 25번 질문 참조). 이온이 아닌 원자의 형태로 공유결합을 하는 원소들의 경우 수소를 제외하고는 대부분이 13~17족의 전형원소(typical element)에 해당합니다. 이들이 만든 대표적인 분자가 암모니아(NH_3), 이산화탄소(CO_2), 메테인(CH_4), 물(H_2O) 등입니다.

또 중심에서 다른 원자들과 결합을 이루고 있는, 소위 중심 원자를 살펴보면 가장 바깥쪽 전자껍질에 8개의 전자를 채우며 가장 안정한 형태의 결합을 만드는 '옥텟 규칙(Octet rule)'을 만족시키고 있다는 사실도 알 수 있습니다. 이때 전자가 8개여야만 하는 이유는, 전형원소가 주기율표상에서 s오비탈이 핵심을 이루는 1족과 2족, p오비탈이 핵심을 이루는 13~18족에 배열돼 있기 때문입니다. s오비탈에 1개의 양자 상태가 존재하고, p오비탈에 3개의 양자 상태가 존재하는 점을 고려하면 4개의 양자 상태를 가득 채우는 상황, 즉 8개의 전자를 선호하게 됩니다. 이처럼 옥텟 규칙을

기반으로 공유결합의 한계를 추산한다면, 전자 2개가 하나의 결합을 형성한다는 기준 하에 사중결합까지 기대할 수 있습니다.

물론 8개의 전자를 가장 안정한 상태로 규명하고 그 이상의 전자를 금지하는 옥텟 규칙의 한계를 넘는다면 삼중결합 이상의 공유결합에 대한 기대감은 조금 더 높아질 것입니다. 이를 위해서는 더 많은 오비탈 종류와 개수를 가질 수 있는, 주기율표에서 조금 더 아래쪽 주기에 있는 원소들이 필요합니다.

실제로 2주기에 위치한 질소(N)나 산소(O)의 경우 옥텟 규칙을 만족시켜야한다는 강요를 받지만, 같은 족 3주기 원소인 인(P)이나 황(S)의 경우 더 많은 전자를 보유하는 상태가 에너지적으로 허용됩니다. 이를 '확장된 옥텟 규칙(expanded Octet rule)'이라고 칭하며, 중심 원자가 10개 또는 12개의 전자를 보유한 오염화 인(PCl_5)이나 헥사플루오린화 황(SF_6)과 같은 분자들이 이에 해당합니다.

하지만 이처럼 더 많은 전자를 가질 수 있는 가능성이 생겨난 분자들의 경우에도 실제적인 결합은 단일, 이중 또는 삼중결합의 한계를 벗어나지 못합니다. 아무리 큰 원소라도 전형원소의 경우에는 말입니다.

탄소-탄소 오비탈 결합의 한계는?

우리에게 익숙하며 수많은 유기화합물의 기본이 되는 탄소(C)로 돌아와 사중결합이 존재하지 않는 이유에 대해 다시 생각해보겠습니다. 전자 발견 확률이 90% 이상인 영역을 표현한 형태를 의미하는 오비탈이 종류에 따라 크기와 형태가 다르다는 사실에서부터 모든 것은 시작됩니다.

탄소는 s오비탈과 p오비탈을 보유하고 있고, 실제로 사용할 수 있습니다. s오비탈은 모든 방향에 대해 대칭적인 형태를 갖는 구형의 오비탈이고, p오비탈은 x, y, z로 대표되는 서로 직교하는 세 방향으로 이뤄진 3차원 좌표(카르테시안 좌표)의 아령 모양 오비탈입니다.

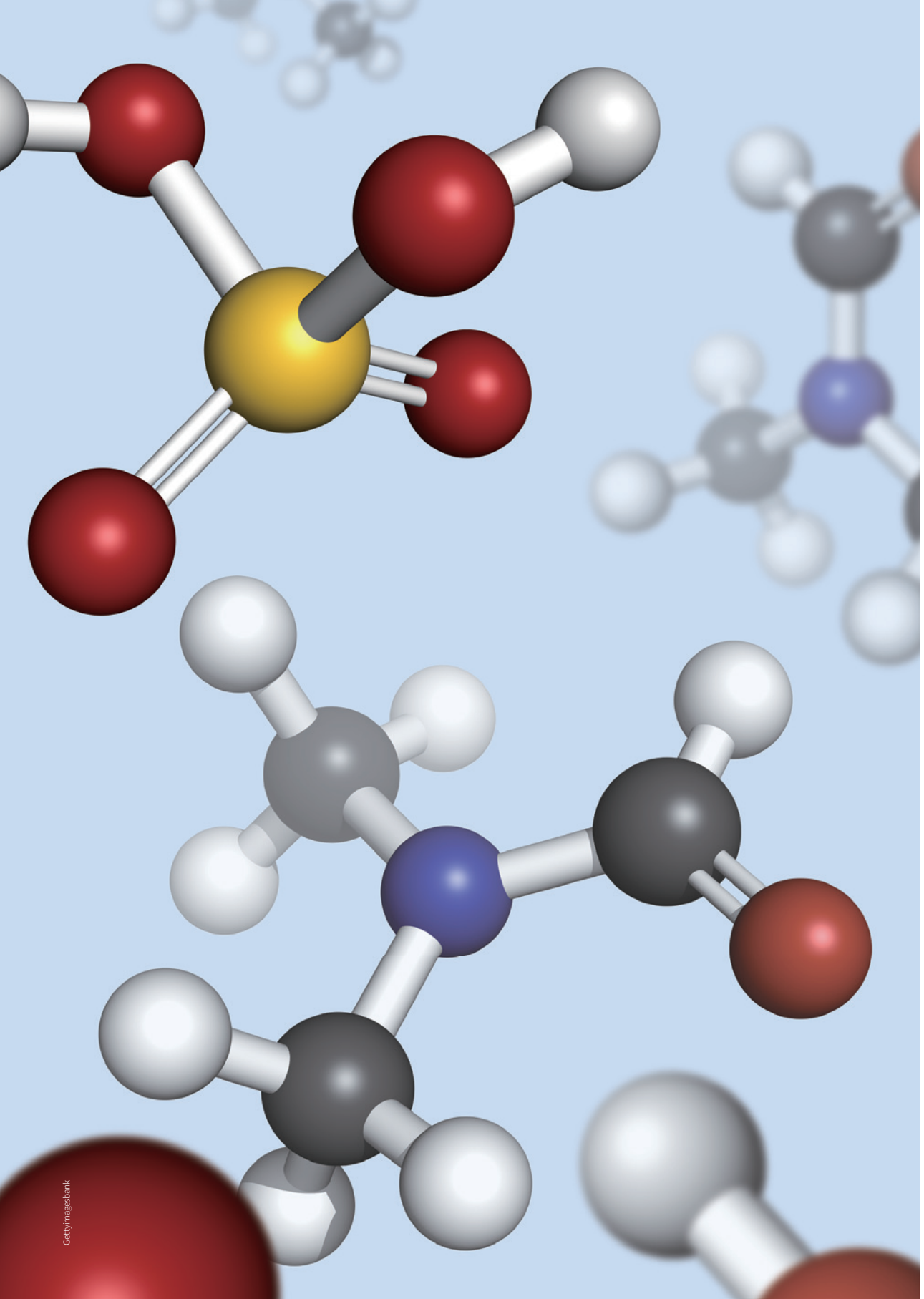
여기서 실제로 사용할 수 있는 오비탈로 한정 지은 것은, 탄소에 더 다양하고 많은 오비탈들이 양자화학적으로 존재하고 있으나, 실제로 탄소가 보유 중인 전자의 개수를 고려할 때 이들은 너무 높은 에너지 준위에 자리잡고 있어서 결합이나 화학반응에 참여하는 것이 불가능하기 때문입니다.

결국 탄소가 다른 탄소와 만나 결합을 이룰 때에는 각각 s오비탈 하나와 세 개의 p오비탈만을 가지고 모든 결합을 만들어 내야 합니다. 이렇게 원자와 원자가 만나 분자를 형성하면서 조금 더 복잡하고 다양한 오비탈들의 조합을 구성한 것을 '분자 오비탈(molecular orbital)'이라고 합니다.

문제는 이 오비탈들의 조합이 주먹구구식으로 짝지어 지는 것이 아니라 오비탈들의 대칭성과 형태에 따른 접근성을 고려해 이뤄진다는 사실입니다. 이로부터 두 가지 종류의 결합을 정의할 수 있는데, 직접적으로 오비탈들이 겹쳐져서 만들어지는 시그마(σ) 결합과 서로 평행으로 위치한 두 오비탈이 간접적으로 상호작용해서 만들어지는 파이(π) 결합이 대표적입니다.

두 개의 탄소 원자들은 결합과 같은 방향에 위치한 각각의 p오비탈끼리 직접 중첩해서 만들어낸 하나의 시그마 결합과, 이와 직교하고 있는 다른 두 개의 p오비탈들간의 간접적 상호작용에 의해 만들어진 두 개의 파이 결합으로 삼중결합까지 형성할 수 있습니다.

만약 하나의 결합을 더 형성하기 위해서는 탄소 원자의 남아있는 s오비탈들이 직접적인 결합을 통해 또 하나의 시그마 결합을 형성해야 합니다.



Gettyimagesbank

하지만 이 경우 결합의 차수가 증가함에 따라 결합의 세기 역시 강해져 두 탄소 원자가 너무나 가까운 위치에 자리 잡게 되며, 그 결과 원자와 원자 사이 공간에 존재하는 전자들끼리 반발력이 발생합니다. 결국 사중결합인 '탄소::::탄소'는 불안정해져 존재할 수 없게 됩니다.

탄소는 이와 같은 에너지 상태를 감당하기에 부적합한 원소라 판단할 수 있으며, 우리가 접하는 많은 유기 및 고분자화합물들은 탄소를 기반으로 이뤄져 있기에 그동안 삼중결합이 공유결합의 한계라고 여겨왔던 겁니다.

육중결합 넘어 칠중결합 나올까

혹시 전형원소가 아닌 오비탈을 더 다양하게 많이 가지고 있는 원소들, 즉 전이금속(transition metal) 원소의 경우에는 어떨까요? 전이금속 원소들은 주기율표에서 3~12족에 해당하며, s와 p오비탈을 넘어선 d오비탈이 핵심적인 역할을 하는 원소들의 집단입니다.

총 5개의 양자 상태를 갖는 d오비탈이 추가됐기 때문에, 안정한 형태를 위해 선호되는 최대 전자의 개수 역시 옥텟 규칙의 8개(s와 p오비탈로부터 2+6=8)가 아닌 18개(s, p, d오비탈로부터 2+6+10=18)로 증가하게 됩니다.

원자의 크기와 사용 가능한 오비탈이 증가했으니 원자 사이에 더 많은 결합이 가능해질 겁니다. 이를 통해 삼중결합의 한계를 넘는 화합물들도 손쉽게 만들어질 수 있습니다. 대표적으로 크로뮴(Cr), 몰리브데넘(Mo), 텅스텐(W), 레늄(Re)과 같은 6족과 7족 원소들이 사중결합을 형성하곤 합니다. d오비탈의 네 개의 로브(lobes)의 중첩으로부터 형성되는 델타(δ) 결합이 추가돼 사중결합 이상의 다중 결합도 형성할 수 있습니다.

그렇다면 다중 결합은 어디까지 가능할까요? 6족 원소인 크로뮴, 몰리브데넘, 텅스텐은 오중결합(quintuple bond), 육중결합(sextuple bond)까지 형성할 수 있다고 알려져 있습니다. 이를 넘어선 칠중결합(septuple bond)의 경우 원자번호 100번 이하의 원소들에 대해서는 성립할 수 없다는 연구 결과가 있습니다.

물론 원자번호 100번 이후의 원자들의 경우에는 아직 연구가 많이 이뤄지지 않았기 때문에 이 같은 연구 결과를 단정 지을 수는 없습니다. 칠중결합의 발견 시기와 가능성은 예측할 수 없지만, 실제로 존재한다면 또 다른 흥미로운 사실이 아닐 수 없습니다.

김윤서(대전 삼천중 1)

Q

화학자에게 없어서는 안 될 원소 세 가지는 무엇인가요?

27

차상원 교수가 답하다

2019년 주기율표 탄생 150주년을 기념해 아주 흥미로운 주기율표가 발표됐습니다. 바로 '젊은 화학자들의 주기율표(periodic table of younger chemists·QR코드 참조)'입니다. 젊은 화학자들의 주기율표는 현재 알려진 118개 원소의 위치에 각각의 원소를 중점적으로 연구하는 젊은 화학자들의 얼굴을 나열했습니다. 이를 보면서 전 세계 화학자들이 참으로 다양한 원소를 연구하고 있음을 새삼 느끼게 됐습니다.

QR코드를 스캔하면 국제순수·응용화학연합(IUPAC)에서 만든 '젊은 화학자들의 주기율표'를 보실 수 있습니다.

'화학자에게 없어서는 안 될 원소는 무엇인가'라는 질문을 보고 이 젊은 화학자들의 주기율표가 떠올랐습니다. 이 주기율표처럼 각자의 연구 분야에 따라 화학자 개개인들에게 중요한 원소는 모두 다를 겁니다. 그렇기 때문에 화학 연구에서 대체로 중요한 원소 3개를 꼽는 것은 그리 간단한 일이 아니라는 생각이 들었습니다.

그래서 그 전에 우선 한 명의 화학자로서 필자에게 없어서는 안 될 원소 3가지를 꼽아봤습니다. 필자는 다양한 화학물질의 특성이나 농도를 알아내기 위한 분석법 또는 분석장치를 개발하는 분석화학자입니다. 특히 원소나 화합물의 질량 및 존재량을 측정할 수 있는 질량분석법(mass spectrometry)을 주로 활용합니다. 필자는 질량분석법을 활용해 다양한 유기물질과 무기원소를 측정하는데, 다루는 원소의 종류를 주기율표에서 세어보니 생각보다 많은 31가지였습니다.

이들 원소의 질량을 분석할 때 가장 중요한 원소는 수소(H)입니다. 질량분석기를 이용해 분자를 관찰하기 위해서는 전기적으로 중성인 분자를 이온으로 만들어야 하는데, 수소이온(H^+)을 분자에 결합시켜 양이온을 만들거나, 분자로부터 수소이온을 떼어내 음이온을 만드는 것이 가장 대표적인 방법이기 때문입니다. 물론 원소는 아니지만, 전자의 역할도 매우 중요합니다. 분자에 전자가 결합돼 음이온이 되기도 하고, 분자로부터 전자가 떨어져 나가 양이온이 될 수도 있습니다.

수소 다음으로 필자에게 중요한 원소는 소듐(Na)입니다. 수소이온과 잘 결합하지 않는 분자들을 양이온으로 만들 때 소듐이온(Na^+)이 제 역할을 해주기 때문입니다. 그리고 세 번째 원소는 탄소(C)입니다. 탄소를 선택한 것은 지극히 개인적인 이유로, 오랫동안 흑연 같은 탄소 동소체(allotrope)를 이용한 질량분석법 개발을 주된 연구 주제로 삼아 왔기 때문입니다.

필자가 모든 화학자들의 생각을 알 수는 없지만, 각자의 연구 분야에서 화학자들이 생각하는 중요한 원소들은 대체로 의견이 모아질 것으로 예상됩니다. 유기화합물 합성법을 개발하거나, 유기화합물의 구조 및 특성을 밝혀 응용하는 유기화학자들이라면 유기화합물의 기본 구성 원소라 할

Gettyimagesbank

수 있는 탄소, 수소, 산소(O), 질소(N) 등을 가장 중요한 원소로 꼽지 않을 수 없을 겁니다. 물론 유기화학반응에서 반응물만큼 촉매도 중요하기 때문에, 몇몇 유기화학자들은 팔라듐(Pd), 몰리브데넘(Mo), 텅스텐(W), 루테늄(Ru)과 같은 전이금속 원소를 뽑을 수도 있겠습니다.

그런가하면 생명체에서 일어나는 화학현상을 연구하는 생화학자들에게는 생명체를 이루는 주요 원소인 산소, 탄소, 수소, 질소, 칼슘(Ca), 인(P) 등이 없어서는 안 될 원소일 것입니다. 이외에 몸의 이온 항상성을 유지하는 포타슘(K), 소듐, 염소(Cl) 등도 강력한 후보들입니다.

한편 지각에서 일어나는 화학현상을 연구하는 지구화학자들은 지각에 풍부하게 존재하는 산소, 규소(Si), 알루미늄(Al), 철(Fe) 등을 뽑을 가능성이 높을 것 같습니다. 화합물의 전기적 특성이나 전지 등을 연구하는 전기화학자들의 순위에서는 전극물질로 사용되는 탄소, 산소, 리튬(Li), 코발트(Co), 알루미늄(Al), 망가니즈(Mn) 등이 상위권을 차지할 가능성이 높겠죠. 마지막으로 전자소재, 특히 반도체를 연구하는 화학자들은 탄소, 규소, 산소, 갈륨(Ga) 등을 꼽으리라 추측합니다. 이렇게 관심사가 다양한 화학자들이 대부분 공감할 만한 원소 세 가지는 무엇일까요?

화학자들의 '최애 원소'는?

필자는 수소, 산소, 탄소를 꼽고 싶습니다. 몇몇 독자들은 '어차피 우승은 수소, 산소, 탄소군'이라거나 '역시 예상을 벗어나지 않는군'이라고 생각할 수도 있겠습니다. 수소, 산소, 탄소는 반응성이 적은 헬륨(He)을 제외하고 우주에 가장 풍부하게 존재하는 원소입니다. 하지만 단순히 그 이유 때문에 선정한 것은 아닙니다. 필자가 이 원소들을 '톱 3'으로 선정한 나

름의 이유는, 화학의 정의와 화학이 연구하는 대상의 관점에서 볼 때 이 세 원소가 가장 중심이 되는 원소라 생각했기 때문입니다.

화학을 광범위하게 정의하면, 물질과 그들의 변화에 대해 연구하는 학문입니다. 즉, 화학의 핵심은 '물질'과 '변화'라 말할 수 있습니다. 그렇다면 모든 화학적 변화를 한 데 묶어 한 줄로 요약해야 한다면 어떻게 말할 수 있을까요?

필자는 '화학적 변화는 물질 사이에서 전자나 양성자가 이동하는 변화'라고 말하고 싶습니다. 전자의 이동을 수반한 화학적 변화는 산화-환원 반응이고, 양성자 또는 수소이온이 이동하는 변화는 산-염기 반응입니다. 그리고 이 반응들에 없어서는 안 될 원소가 바로 산소와 수소입니다. 어떤 화학 분야든 산화-환원과 산-염기 반응을 고려하지 않는 분야는 없을 겁니다.

탄소는 화학의 다른 핵심 요소인 '물질'을 대표할 수 있는 원소라고 생각해 꼽았습니다. 다양한 원소 중 딱 하나를 꼽으라면 우주에 매우 풍부할 뿐만 아니라, 네 개의 팔로 어느 원소든 만날 준비를 하고 있는, 유기물질의 뼈대를 이루고 있는 탄소가 그 주인공일 것이라 생각했습니다.

추가로 필자가 올해 여름 다양한 전공을 가진 국내 화학자 20명에게 '화학에서 가장 중요한 5개의 원소가 무엇인가'를 설문조사한 적이 있습니다. 결과는, 한 명도 빠짐없이 탄소를 선택했습니다. 그리고 한 두 명을 제외하곤 대부분이 수소와 산소를 꼽았습니다. 그 다음으로는 질소와 규소가 선택받았고, 철, 우라늄(U), 리튬, 인 등이 뒤를 따랐습니다. 작은 설문조사였지만 화학자들이 생각하는 '최애' 원소가 대체로 유사하다는 걸 확인하는 결과였습니다.

박은주(대전 서구)

Q

세상에서 가장 위험한 원소는 무엇인가요?

28

장홍제 교수가 답하다

원소는 일상생활에서부터 과학 연구까지 쓰이지 않는 곳이 없습니다. 그만큼 원소의 안전성이나 유해성에도 관심이 쏠리죠. 질문하신 '위험한 원소'라는 건 한 가지로 설명될 수 없습니다. 생명에 치명적인 위협을 주는 원소, 환경을 오염시키는 원소, 취급이 어려운 원소 등 다양한 관점에서 생각해볼 수 있습니다.

50 mg만 유입돼도 치명적인 시안화 포타슘

먼저 인체에 미치는 독성 측면에서 생각해보겠습니다. 인체 독성을 측정하는 기준이 되는 화합물은 시안화 포타슘(KCN·potassium cyanide)입니다. '청산가리'라는 이름으로 잘 알려진 독극물이죠. 시안화 포타슘은 독성이 매우 높습니다. 체내에 50 mg 이상 유입되면 치명적인 문제를 발생할 수 있다고 알려져 있습니다. 세계대전 당시 나치 독일이 가스 형태로 사용해 큰 문제를 일으킨 물질이기도 합니다. 시안화 포타슘은 오늘날 다른 독성 물질의 위험을 판단하는 비교 기준이 됩니다. 예를 들어 복어가 가진 독인 테트로도톡신(tetrodotoxin)은 시안화 포타슘에 비해 25배 적은 양으로도 인체에 치명적이라고 설명할 수 있습니다.

인체에 유해한 물질이라면 방사성 물질도 빼놓을 수 없습니다. 원자번호 84번 폴로늄(Po)이 대표적입니다. 폴로늄은 퀴리 부부가 발견해 마리 퀴리의 조국인 폴란드의 이름을 딴 원소입니다. 폴로늄의 가장 대표적인 동위원소는 폴로늄-210(^{210}Po)인데, 이것은 방사성 붕괴를 하며 알파입자(헬륨의 원자핵 형태)를 주위로 방출합니다. 방출된 알파입자는 체내 세포나 기관에 심각한 손상을 유발합니다. 시안화 포타슘보다 독성이 25만 배나 높습니다. 한 가지 다행인 사실은 우리가 자연 상태에서 폴로늄에 노출될 일은 거의 없다는 겁니다. 핵분열 산물에서 아주 소량씩 생성되기 때문입니다. 인체 피폭 우려가 없는 지구 밖에서는 장기간 전력을 얻을 수 있는 가벼운 소형 전지의 재료로 폴로늄을 사용하고 있습니다.

몸속에 서서히 쌓여 중독되는 수은

인체에 미치는 영향은 급성(acute)과 만성(chronic)으로 구분됩니다. 앞서 살펴본 시안화 포타슘이나 테트로도톡신은 급성 독성을 보이며, 폴로늄은 방사성 붕괴라는 특성상 급성과 만성 두 가지 독성을 모두 보입니다. 급성으로 발현되는 독성은 인체에 치명적인 피해를 끼치지만 피해 사실을 인지하기가 쉬워 피해가 주위로 확산되는 일이 적습니다.

그러나 만성 독성은 식품, 토양, 물과 같은 환경적 요인에 장기간 노출

Gettyimagesbank

돼 체내에 누적된 화합물이나 원소에 의해 발현됩니다. 인식하지 못하는 동안 수많은 사람들이 동시에 위험에 빠지기도 합니다. 대표적인 사례가 카드뮴(Cd) 중독으로 인한 이타이이타이병이나, 수은(Hg) 중독으로 인한 미나마타병입니다. 납(Pb)도 대표적인 중독성 중금속 원소입니다. 고대 로마의 멸망 원인이 납중독 때문이라고 보기도 하니까요.

카드뮴, 수은, 납, 비소(As) 등 만성 독성을 보이는 원소는 여러 가지가 있지만 개인적으로는 수은이 가장 치명적인 원소가 아닐까 생각합니다. 수은은 상온에서 액체 상태로 존재하기에 피부를 통해 유입될 수 있으며 기화되면 증기로 유입되기도 합니다. 유입된 수은은 인체의 신경계와 뇌에 치명적인 피해를 줄 수 있습니다. 또 우리가 직접 노출되지 않았더라도 해양 생명체의 몸속에 쌓여 먹이사슬 최종 소비자인 인간의 몸속에 들어올 우려가 있습니다(자세한 내용은 37쪽 6번 질문 참조).

‘순교자’ 별칭 가진 플루오린

원소의 위험성을 반응성 관점에서도 살펴볼 수 있습니다. 반응성이란 한 물질이 화학 반응을 일으켜 다른 물질과 결합하거나, 다른 물질을 변질시키는 등 무언가 변화를 유발할 수 있는 경향성을 의미합니다. 반응성이 높으면 심한 경우 폭발이나 부식을 유발할 수 있죠. 반응성은 같은 족 원소라도 조금씩 다릅니다. 물과 반응해 수소기체와 열을 발생시키는 1족 알칼리 금속의 경우, 리튬(Li)은 물 위에 떠서 약간의 연기와 열을 발생시키는 반면, 소듐(Na)은 큰 불꽃과 폭발을 유발합니다. 알칼리 금속 중 주변의 수분과 반응성이 가장 클 것으로 추측되는 원소는 프랑슘(Fr)입니다. 하지만 프랑슘은 매우 불안정한 원소라 지구상에 존재하는 양이 극히 적

습니다. 가장 안정한 형태(프랑슘-223)의 반감기가 22분이라 금세 사라져 버립니다. 우리가 프랑슘에 직접 노출돼 실제로 위험에 처할 가능성은 적다고 볼 수 있습니다.

한편 할로젠 원소인 플루오린(F)도 높은 반응성 때문에 역사적으로 여러 문제를 일으켜왔습니다. 작고 가벼운 플루오린은 반응성이 낮기로 유명한 18족 비활성 기체와도 반응할 수 있는 원소입니다. 이런 플루오린을 발견하는 과정에서 많은 화학자들이 영문도 모른 채 부상과 질병을 겪었습니다. 때문에 플루오린은 '순교자'라는 별칭을 가지고 있습니다.

플루오린을 포함한 화합물 중에는 반응성이 높아 조심해야 할 것들이 있습니다. 플루오린화 수소산(불산·HF)의 경우 염산(HCl)이나 황산(H_2SO_4)과 같은 강산으로 분류되지는 않지만, 피부에 닿으면 흡수돼 뼈와 이를 녹여버립니다. 물론 실생활에 유용하게 활용되는 플루오린 화합물도 무궁무진합니다. 조리기구에 사용하는 테플론이나 이를 섬유형태로 만든 고어텍스, 그리고 치약, 의약품 등에 모두 플루오린이 사용됩니다.

위험한 원소는 그 외에도 굉장히 많습니다. 핵무기에 사용되는 플루토늄(Pu)이나 살충제에 포함돼 급성 중독을 일으키는 탈륨(Tl), 무기에 사용되는 인(P)의 한 형태인 백린도 만만치 않은 유해성을 가지고 있습니다.

저는 독성, 방사성, 반응성 측면에서 위험한 원소들을 꼽아 봤지만, 여러분이 생각하는 기준은 제 생각과 또 다를 수 있습니다. 중요한 것은 위험하지만 한편으론 유용한 원소들을 어떻게 안전하게 사용할지, 이것을 대체할 원소는 없을지 연구해나가는 것일 겁니다. 과거의 실수와 피해가 반복되지 않도록 모두가 함께 예방책을 마련해나가야 합니다.

정지유(경남 무지개초 3)
정지호(서울 명일중 1)
박은주(대전 서구)

Q

인류 역사에 가장 큰 영향을 준 원소는 무엇인가요?

29

장홍제 교수가 답하다

인간이 숨을 쉬는 데 필요한 산소(O)부터 35만 년 전 네안데르탈인이 불을 피우기 위해 사용한 탄소(C)까지. 원소들은 제각각의 방식으로 인류 역사와 그 진화의 여정에 큰 영향을 미쳐 왔습니다. 그중 가장 큰 영향을 준 원소가 무엇이냐는 질문을 받고 고민이 많이 되더군요. 여러 가지 기준이 있을 텐데요, 저는 인류가 석기, 청동기, 철기시대를 거쳐 지금과 같은 삶을 영위하기까지 진화의 핵심 동력이었던 '재료' 관점에서 영향력이 큰 원소들을 이야기해보려 합니다.

청동기, 철기… 시대를 결정 짓는 원소의 힘

세계 4대 문명(메소포타미아, 이집트, 인더스, 황하)이 번성했던 청동기 시대는 청동이라는 물질이 이끌었습니다. 청동을 만들기 위해서는 당시 제련기술로 다룰 수 있는 두 가지 원소가 필요했죠. 바로 구리(Cu)와 주석(Sn)입니다.

청동의 주된 성분은 둘 중 구리입니다. 잘 알려져 있지는 않지만 사실 청동기 시대 이전에는 구리 시대(Copper age)가 존재했습니다. 구리가 출토되는 지역이 한정적이고, 청동에 비하면 강도나 물성이 좋지 않아 빠르게 지나가 버렸지만 말이죠. 지각에서 금속이 포함된 광석을 채굴하는 기술이나 이로부터 금속을 제련해 내는 기술이 발달하지 않은 초기 인류 문명에서는 땅속에서 금속 형태로 얻을 수 있고, 모닥불 정도의 열로도 녹일 수 있는 구리가 최고의 재료였습니다.

청동은 그런 구리의 활용도를 주석으로 더욱 업그레이드한 재료였습니다. 구리에 주석을 혼합해 만든 청동은 강도가 매우 높고 산화돼도 부서지지 않았습니다. 농기구와 무기, 장신구를 비롯한 다양한 분야에 유용하게 쓰였죠. 덕분에 효율적인 농작이 가능해졌고, 집단 거주가 실현됐습니다. 이후 구성원의 역할 분담이 이뤄지며 계급 사회가 빠르게 자리 잡았습니다.

흔히 이런 청동기 시대가 몰락한 것은 강도와 효율성이 더 우수한 철(Fe)이 사용되면서부터라고 합니다. 그러나 당시 운석에 포함된 철(운철)이나 강에서 얻은 철가루(사철), 철광석을 제련한 철은 청동보다 못한 금속으로 여겨졌습니다. 강도는 높은 편이었지만 탄성이 없어 쉽게 부러졌고, 구리보다 상당히 높은 온도인 약 1500도에서 제련해야 했거든요.

본격적인 철기 시대는 철에 탄소(C)를 포함한 강철(탄소강)을 개발하면서부터 문을 열었습니다. 계속해서 새로운 가설이 나오고는 있지만 현재까지의 연구에 따르면 시리아 북부를 무대로 활동한 히타이트 제국이 우수한 철제 무기로 주변국을 점령하고 철기 문명을 이룩했다고 알려져 있습

Getty Images Bank

니다. 이들은 철을 생활 전반에 사용하기보다는 무기류나 병기를 제작하는 데 사용했고, 이러한 무기는 근대 이전까지 인류 역사 흐름을 좌우하게 됩니다.

그러한 철제 무기의 시대를 저물게 한 것은 화약이었습니다. 원소를 이용해 말 그대로 폭발적인 에너지를 낼 수 있는 기술이 개발되면서부터입니다. 가장 유용했던 화약의 일종인 흑색화약은 질산 포타슘(KNO_3)과 목탄(탄소), 그리고 황(S)의 조합으로 만들어졌습니다. 소독약이나 연금술의 매개체로 사용되던 황이 화약에 활용되기 시작한 겁니다. 그런 의미에서 보면 황도 인류 역사에 적지 않은 영향을 준 원소입니다.

첨단 디지털 사회의 핵심 원소, 규소

철은 현대사회에서도 여전히 막대한 영향을 미치고 있습니다. 자동차, 건물, 기계와 같은 수많은 것들에 철이 사용됩니다. 과학자들은 스테인리스강, 몰리브데넘강 등 철의 기능을 더욱 향상시킨 다양한 금속들을 만들어냈습니다. 덕분에 철은 '산업의 쌀'이라고 불릴 만큼 인류에게 없어서는 안 될 원소로 여겨집니다.

그 밖에 독자 여러분들 중에는 우리 눈에 가장 많이 보이는 플라스틱도 철만큼 인류에게 큰 영향을 미쳤다고 생각하는 분들이 있을 겁니다. 충분히 공감하지만 플라스틱, 수지, 합성섬유 등의 물질들은 '원소'라고 하기에는 너무나 많은 종류가 혼합된 '화합물'이라 고려 대상에서 제외했습니다.

저는 현대사회에 큰 영향을 주는 또 하나의 원소로 원자번호 14번 규소(Si)를 꼽고 싶습니다. 첨단 디지털 시대를 살아가는 데 전자기기는 필수품입니다. 저뿐만 아니라 독자 여러분들도 하루의 많은 시간을 컴퓨터, 휴대

전화, 통신기기 등과 함께 보낼 거라고 생각합니다. 규소는 이런 전자기기를 만드는 데 가장 핵심이 되는 재료입니다. 규소는 전기가 통하는 도체와 전기가 통하지 않는 부도체의 중간적인 특성을 보입니다. 전류가 잘 흐르는 금속과 잘 흐르지 않는 비금속의 중간적인 특성을 보인다고 해서 준금속 혹은 반금속으로 분류되기도 하죠.

특정한 조건이나 방향에 따라 전류의 흐름을 조절할 수 있는 규소의 특성을 잘 활용하면 집적회로(IC·Integrated circuit)를 비롯한 전자 부품들을 만들 수 있습니다. 규소가 없었다면 수많은 전자기기도 개발할 수 없었고, 지금과 같은 첨단 디지털 시대도 오지 않았을 겁니다.

규소는 구하기도 매우 쉽습니다. 규소는 암석과 돌, 모래의 주성분이자 지구 지각의 27.7%를 이루고 있는, 지각에서 두 번째로 풍부한 원소입니다(첫 번째는 46.6%인 산소입니다). 지표 어디서나 쉽게 구할 수 있는 모래로부터 얻죠. 때문에 현대사회를 '제2의 석기시대'라고 부르기도 합니다. 석기를 이루고 있는 재료인 돌, 모래의 시대로 회귀했다는 의미입니다.

이렇게 인류 역사에서 그 시대의 이름을 결정하는 물질이 존재했을 만큼 원소는 문명 발달에 중요한 역할을 해왔습니다. 물론 보는 관점에 따라 인류 역사에 가장 큰 영향을 준 원소는 달라질 수 있을 겁니다. 수많은 화합물과 고분자 물질의 핵심을 이루는 탄소, 연금술과 근대화학의 연구 동기가 됐던 수은(Hg), 양자역학 연구의 시작이자 미래 에너지의 기틀이 되는 수소(H) 등 인류의 과거와 현재를 만들었고, 미래를 만들어나가는 원소들이 수없이 많으니까요. 여러분은 어떤 원소가 인류 역사에 가장 중요한 영향을 미쳤다고 생각하나요? 여러분의 생각이 궁금합니다.

최규연(경기 안양여고 1)

Q

화학 전공자가 할 수 있는 이색 직업은 무엇인가요?

30

장홍제 교수가 답하다

다양한 학문들 중에서 자신이 원하는 전공을 선택하고 공부를 계속해 나가는 것은 단순히 학문에 대한 관심과 흥미 때문인 경우도 있지만 직업적인 선택인 경우도 많습니다. 이공계를 두 가지 계열로 구분한다면, 다양한 산업 분야의 실제적인 생산 기술 개발, 응용에 중점을 둔 공학 계열과 자연 현상의 탐구와 과학적 이론의 발견에 관심을 두는 자연과학 계열로 나눌 수 있습니다. 이중 후자인 자연과학 계열은 미래에 할 수 있는 직업이 한정적이라는 오해가 만연해 있죠.

하지만 수학, 물리학, 화학, 생명과학, 지구과학을 공부한 사람들이 가질 수 있는 직업은 무궁무진합니다. 교육자나 연구원이 될 수도 있고요, 관련 회사에서 전공을 살려 일할 수도 있습니다. 또 최근에는 새로운 학문 분야가 탄생하고 학제간을 넘나드는 연구가 많아지면서 자신이 전공하지 않은 다른 과학 분야에서 일할 수 있는 기회도 많아졌습니다.

하지만 이번 질문은 화학을 공부하고 할 수 있는 '이색 직업'에 대한 것인만큼 화학 전공자가 택할 수 있는 색다른 직업에 초점을 맞춰 이야기해 보겠습니다.

화학이 빛을 발하는 융합 과학 분야

최근 1980년대 온 국민을 공포로 몰아넣었던 화성연쇄살인사건의 피의자가 33년만에 드러났다는 뉴스를 보셨을 겁니다. 미제사건에 실마리를 제공한 건 첨단 과학수사였는데요. 첨단 과학수사 연구원이나 법의학자는 화학을 공부한 사람에게 상당히 유리한 직업입니다.

첨단 과학수사 연구원들은 혈액, 타액, 체모와 같은 생물학적인 시료들과 섬유, 페인트 도료, 분말 등의 비생물학적 샘플을 분석해 육안으로 파악할 수 없는 분자 수준에서의 다양한 정보들을 확보합니다. 이로부터 유전 정보나 혈액형, 지문 등의 개인 정보와 의복이나 신발, 차량 등 현장의 세부 정보들을 파악해 수사에 활용합니다.

이러한 정보는 심리적인 의심이나 추론을 뒷받침할 수 있는 과학적 증거로 작용할 수 있습니다. 수개월 혹은 수년이 지난 뒤에도 기화해 날아가거나 변질되지 않고 남아있는 물질들을 정확하게 분석하기 위해서는 고성능 분석 기술이 필요합니다. 분석화학, 생화학에 대한 전문적인 지식을 가진 사람, 유해물질이나 독극물 등에 대한 폭넓은 이해를 갖춘 사람이 잘 할 수 있는 일입니다.

조향사(perfumer)도 새롭게 떠오르는 이색 직업입니다. 사람의 오감 가운데 가장 민감한 것은 시각이지만, 기분과 생각을 가장 많이 좌우하는 감각은 후각이라고 하죠. 조향사는 여러 향료를 섞어 새로운 향을 만들거

Aza studio

나 제품에 향을 덧입히는 향 전문가입니다. 조향사가 할 수 있는 일은 굉장히 다양합니다. 단순히 향수를 제조하는 것부터 식품, 방향제, 음료 등 향이 소비자의 심리에 중요한 영향을 미치는 제품들을 기획할 수 있습니다. 아로마테라피처럼 건강관리, 치료 분야에서도 조향사의 역할은 중요합니다. 향은 다양한 구조를 갖는 화학물질로부터 유래하는 것이기 때문에, 화학을 전공하고 이를 기반으로 해당 분야에 진출하면 큰 도움이 됩니다.

유기화학, 분석화학, 물리화학 같은 기존 화학 분야가 아닌 다른 분야의 화학을 해보고 싶다는 분들에게는 천문화학(astrochemistry)을 추천합니다. 천문화학자들은 우주에서 전해지는 빛을 광학적으로 분석하는 일을 합니다. 우주는 사람이 직접 가서 연구하기에 제약이 많기 때문에 주로 우주에서 전해지는 신호를 이용해 간접적으로 연구하는데요. 이 신호는 대부분 가장 빠르게 이동하면서 다양한 파장으로 구분될 수 있는 '빛'의 형태입니다. 개기일식 때 태양을 관찰해 헬륨을 발견한 것처럼, 천문화학자들은 우주로부터 오는 빛을 분석해 우주 항성(별)에서의 핵융합 반응, 우주 먼지의 구성 원소 등을 관찰하고, 우주에서 유기물의 존재를 밝히는 데 크게 기여하고 있습니다.

저널리즘, 디자인, 정치로 진출할 수도

한편 요즘에는 화학을 전공하고 저널리즘 분야에 뛰어드는 사람들도 많습니다. 빠른 속도로 발전하는 첨단 과학 사회에서 최신 과학 소식을 빠르게 접하고 이해해 대중에게 전달하는 일을 하는 데 화학을 공부한 경험이 큰 장점이 될 수 있습니다. 실험실에서 직접 연구를 수행하는 것보다

글쓰기나 대화, 커뮤니케이션에 관심이 많은 사람이라면 도전해볼 만한 직업입니다. 이와 유사하게 과학 저술가라는 직업도 글을 집필하고 번역하는 데 해당 분야에 관한 전문지식과 용어, 개념에 대한 이해가 중요하기 때문에 화학을 전공하는 것이 도움이 됩니다.

그림에 관심이 있는 분들에게는 과학 일러스트레이터라는 직업을 추천해 주고 싶군요. 잡지나 책은 물론이고, 디지털 매체에서도 과학 일러스트레이션의 비중은 점점 더 높아지는 추세입니다. 직관적인 삽화나 일러스트를 활용하는 것이 구독자들의 이해를 훨씬 더 높이기 때문입니다. 과학 일러스트레이터가 되기 위해서는 복잡한 과학 개념을 일목요연하게 표현하는 능력, 다양한 이론들간의 상관관계를 도표로 나타내는 능력, 연구 결과의 핵심을 이미지로 표현할 수 있는 능력이 필요합니다. 당연히 화학과 관련된 지식이 많을수록 유리하겠죠. 과학적 지식과 창의적인 표현 능력을 겸비한 사람에게 환상적인 직업이라 할 수 있습니다.

그밖에도 화학을 좋아하는 여러분이 할 수 있는 일은 무궁무진합니다. 심지어 화학을 전공하고 총리가 된 사람도 있는 걸요. 영국의 전 총리였던 마가렛 대처(Margaret Thatcher)는 영국 옥스퍼드대 화학과에서 학사 학위를 취득했습니다. 당시 X선 결정학이라는 분야를 연구하며 항생 물질인 그라미시딘(gramicidin)의 구조를 분석하는 연구를 했죠. 이후 정치 캠페인을 준비할 때에도 회사에 다니며 아이스크림 유화제를 개발했다는 일화가 있습니다.

비슷한 예로 현재 중국의 주석인 시진핑(習近平)은 칭화대 화학공학과에서 학사 학위를 취득했습니다. 독일의 총리인 앙겔라 메르켈(Angela Merkel)은 독일 라이프치히대에서 물리학 석사 학위를 받았고, 탄화수소의 반응속도 상수 계산에 관한 연구로 양자화학 박사 학위를 취득했습니다.

농담처럼 이야기했지만, 저는 여러분들에게 화학을 전공하고 할 수 있는 일, 해야 하는 일이 정해져 있지 않다는 걸 강조하고 싶습니다. 화학 전공자의 직업군은 단순히 교육자와 연구자로 구분되는 것이 아닙니다. 연관 직업과 융합 직업들이 계속해서 생겨나고 있기 때문에 그에 따른 수많은 가능성이 열려 있다는 사실을 꼭 기억하길 바랍니다.

표준주기율표

Periodic Table of the Elements

1																	18
1 **H** 수소 hydrogen 1.008 [1.0078, 1.0082]	2											13	14	15	16	17	2 **He** 헬륨 helium 4.0026
3 **Li** 리튬 lithium 6.94 [6.938, 6.997]	4 **Be** 베릴륨 beryllium 9.0122											5 **B** 붕소 boron 10.81 [10.806, 10.821]	6 **C** 탄소 carbon 12.011 [12.009, 12.012]	7 **N** 질소 nitrogen 14.007 [14.006, 14.008]	8 **O** 산소 oxygen 15.999 [15.999, 16.000]	9 **F** 플루오린 fluorine 18.998	10 **Ne** 네온 neon 20.180
11 **Na** 소듐 sodium 22.990	12 **Mg** 마그네슘 magnesium 24.305 [24.304, 24.307]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 **Al** 알루미늄 aluminium 26.982	14 **Si** 규소 silicon 28.085 [28.084, 28.086]	15 **P** 인 phosphorus 30.974	16 **S** 황 sulfur 32.06 [32.059, 32.076]	17 **Cl** 염소 chlorine 35.45 [35.446, 35.457]	18 **Ar** 아르곤 argon 39.948
19 **K** 포타슘 potassium 39.098	20 **Ca** 칼슘 calcium 40.078(4)	21 **Sc** 스칸듐 scandium 44.956	22 **Ti** 타이타늄 titanium 47.867	23 **V** 바나듐 vanadium 50.942	24 **Cr** 크로뮴 chromium 51.996	25 **Mn** 망가니즈 manganese 54.938	26 **Fe** 철 iron 55.845(2)	27 **Co** 코발트 cobalt 58.933	28 **Ni** 니켈 nickel 58.693	29 **Cu** 구리 copper 63.546(3)	30 **Zn** 아연 zinc 65.38(2)	31 **Ga** 갈륨 gallium 69.723	32 **Ge** 저마늄 germanium 72.630(8)	33 **As** 비소 arsenic 74.922	34 **Se** 셀레늄 selenium 78.971(8)	35 **Br** 브로민 bromine 79.904 [79.901, 79.907]	36 **Kr** 크립톤 krypton 83.798(2)
37 **Rb** 루비듐 rubidium 85.468	38 **Sr** 스트론튬 strontium 87.62	39 **Y** 이트륨 yttrium 88.906	40 **Zr** 지르코늄 zirconium 91.224(2)	41 **Nb** 나이오븀 niobium 92.906	42 **Mo** 몰리브데넘 molybdenum 95.95	43 **Tc** 테크네튬 technetium	44 **Ru** 루테늄 ruthenium 101.07(2)	45 **Rh** 로듐 rhodium 102.91	46 **Pd** 팔라듐 palladium 106.42	47 **Ag** 은 silver 107.87	48 **Cd** 카드뮴 cadmium 112.41	49 **In** 인듐 indium 114.82	50 **Sn** 주석 tin 118.71	51 **Sb** 안티모니 antimony 121.76	52 **Te** 텔루륨 tellurium 127.60(3)	53 **I** 아이오딘 iodine 126.90	54 **Xe** 제논 xenon 131.29
55 **Cs** 세슘 caesium 132.91	56 **Ba** 바륨 barium 137.33	57-71 란타넘족 lanthanoids	72 **Hf** 하프늄 hafnium 178.49(2)	73 **Ta** 탄탈럼 tantalum 180.95	74 **W** 텅스텐 tungsten 183.84	75 **Re** 레늄 rhenium 186.21	76 **Os** 오스뮴 osmium 190.23(3)	77 **Ir** 이리듐 iridium 192.22	78 **Pt** 백금 platinum 195.08	79 **Au** 금 gold 196.97	80 **Hg** 수은 mercury 200.59	81 **Tl** 탈륨 thallium 204.38 [204.38, 204.39]	82 **Pb** 납 lead 207.2	83 **Bi** 비스무트 bismuth 208.98	84 **Po** 폴로늄 polonium	85 **At** 아스타틴 astatine	86 **Rn** 라돈 radon
87 **Fr** 프랑슘 francium	88 **Ra** 라듐 radium	89-103 악티늄족 actinoids	104 **Rf** 러더포듐 rutherfordium	105 **Db** 두브늄 dubnium	106 **Sg** 시보귬 seaborgium	107 **Bh** 보륨 bohrium	108 **Hs** 하슘 hassium	109 **Mt** 마이트너륨 meitnerium	110 **Ds** 다름슈타튬 darmstadtium	111 **Rg** 뢴트게늄 roentgenium	112 **Cn** 코페르니슘 copernicium	113 **Nh** 니호늄 nihonium	114 **Fl** 플레로븀 flerovium	115 **Mc** 모스코븀 moscovium	116 **Lv** 리버모륨 livermorium	117 **Ts** 테네신 tennessine	118 **Og** 오가네손 oganesson

57 **La** 란타넘 lanthanum 138.91	58 **Ce** 세륨 cerium 140.12	59 **Pr** 프라세오디뮴 praseodymium 140.91	60 **Nd** 네오디뮴 neodymium 144.24	61 **Pm** 프로메튬 promethium	62 **Sm** 사마륨 samarium 150.36(2)	63 **Eu** 유로퓸 europium 151.96
89 **Ac** 악티늄 actinium	90 **Th** 토륨 thorium 232.04	91 **Pa** 프로트악티늄 protactinium 231.04	92 **U** 우라늄 uranium 238.03	93 **Np** 넵투늄 neptunium	94 **Pu** 플루토늄 plutonium	95 **Am** 아메리슘 americium

64 **Gd** 가돌리늄 gadolinium 157.25(3)	65 **Tb** 터븀 terbium 158.93	66 **Dy** 디스프로슘 dysprosium 162.50	67 **Ho** 홀뮴 holmium 164.93	68 **Er** 어븀 erbium 167.26	69 **Tm** 툴륨 thulium 168.93	70 **Yb** 이터븀 ytterbium 173.05	71 **Lu** 루테튬 lutetium 174.97
96 **Cm** 퀴륨 curium	97 **Bk** 버클륨 berkelium	98 **Cf** 캘리포늄 californium	99 **Es** 아인슈타이늄 einsteinium	100 **Fm** 페르뮴 fermium	101 **Md** 멘델레븀 mendelevium	102 **No** 노벨륨 nobelium	103 **Lr** 로렌슘 lawrencium

표기법 :

원자 번호
기호
원소명(국문)
원소명(영문)
일반 원자량
표준 원자량

참조 표준 원자량은 2011년 국제순수·응용화학연합(IUPAC)에서 결정한 새로운 형식을 따른 것으로 [ ] 안에 표시된 숫자는 2종류 이상의 안정한 동위원소가 존재하는 경우에 지각 시료에서 발견되는 자연 존재비의 분포를 고려한 표준 원자량의 범위를 나타낸 것입니다.

출처: 대한화학회(2016)

청소년이 묻고, 화학자가 답한다

진짜 궁금했던 원소 질문 30

1판 1쇄 인쇄 2019년 12월 17일
1판 1쇄 발행 2019년 12월 24일

지은이 장홍제, 차상원
공동기획 대한화학회, 한국화학연구원
편집·디자인 과학동아

펴낸곳 동아사이언스
출판등록 제 2013-000081호
주소 (04370) 서울특별시 용산구 청파로 109
전화 02-6749-2002
홈페이지 www.dongascience.com

ISBN 978-89-6286-723-7 43430

이 책에 실린 글의 저작권은 대한화학회 및 과학동아에 있으며,
무단전재와 무단복제를 금합니다.
ⓒ**동아사이언스**