KCS 대한화학회 KOREAN CHEMICAL SOCIETY

2021년 75주년을 맞은 대한화학회는 화학 분야의 학문적, 기술적 토대를 마련하고, 화학교육 활동을 통해 화학의 올바른 가치를 알리고자 1946년 설립됐습니다. 현재 7000여 명의 회원들이 전국 대학, 연구소, 산업체, 초·중·고등학교에서 활동하고 있습니다. 대한화학회는 우리나라 화학계를 대표해 국제순수·응용화학연합(IUPAC), 아시아화학회연합(FACS) 등 국제 학술기관의 회원으로 적극적인 국제교류 사업을 진행하고 있습니다. 또 국제화학올림피아드에 참가하고 과학발명대회를 지원하는 등 과학 대중화 사업에도 앞장서고 있습니다.

www.kcsnet.or.kr

KRICT 한국화학연구원 Korea Research Institute of Chemical Technology

한국화학연구원은 1976년 설립된 이래 화학 및 관련 융·복합 분야 기술을 개발하고, 화학 전문인력을 양성하며, 다양한 화학 인프라를 지원하는 데 힘써왔습니다. 이를 통해 우리나라 화학 산업의 경쟁력을 강화하고, 각종 사회 문제를 해결하는 것을 목표로 하고 있습니다. 기후 및 환경 변화에 대비해 에너지 자립 기술을 개발하고, 미래 사회에 필요한 첨단 화학 소재를 연구하는 등 풍요롭고 지속가능한 사회를 실현하기 위해 노력하고 있습니다.

www.krict.re.kr

한국화학회관

1967년 건립위원회가 구성된 한국화학회관은 1970년까지 건립사업을 구체화했고, 그 뒤 기공식을 거쳐 마침내 1971년 건물이 준공됐습니다. 지난 2006년에는 2개 층을 추가로 증축했습니다. 현재 대한화학회와 한국화학공학회가 한국화학회관에 입주해 활동하고 있으며, 지금까지 양 학회의 지속적인 발전에 일익을 담당해 왔습니다. 최근에는 한국화학관련학회연합회의 활동을 지원하고 있으며 앞으로도 화학과 화학공학 분야의 학술 진흥과 기술 발전에 이바지하고자 합니다.

대 한 화 학 회 창 립 7 5 주 년 기 념

지구를 더 푸르게 만들어 줄

녹색 화학의 미래

20세기는 진정 '화학의 세기'였습니다. 많은 사람이 가장 풍요롭고, 더욱더 건강하고, 훨씬 안전한 삶을 누릴 수 있었습니다. 물질의 확인과 변환에 대한 지식을 담은 화학은 언제나 인류 문명과 함께 발전해 왔습니다. 그런 화학이 위기를 맞이하고 있습니다. 인구가 늘어나면서 에너지의 소비도 걷잡을 수 없이 늘어나는 부작용 때문입니다. 화학물질에 대해 지나치게 화려한 주장은 멀리하는 것이 좋습니다. 무슨 질병이든 깨끗하게 고쳐준다는 만병통치약은 세상 어디에도 없습니다. 21세기 과학기술 시대를 사는 우리가 과거 시골 장터 약장수의 왁자지껄한 노랫가락 수준의 주장에 현혹될 수는 없는 일입니다. 플라스틱이 500년이 지나도 썩지 않아 문제라는 주장도 경계해야 합니다. 우리가 필요해서 만든 플라스틱은 우리 스스로 폐기까지 책임을 져야 한다는 사실을 외면했던 것이 문제였습니다.

이제 우리의 비겁한 생각을 바꿔야 합니다. 공연히 온실가스·미세 플라스틱·독성 화학물질을 탓할 이유가 없습니다. 우리의 무지와 무관심에 의한 오용, 남용이 더 용서받을 수 없습니다. 우리가 사용해야 할 화학물질을 안전하고 깨끗하게 합성하고, 더욱 안전하고 깨끗하게 활용한 뒤, 가장 안전하고 깨끗하게 폐기하겠다는 확실한 '녹색 화학(green chemistry)'의 자세가 필요합니다.

물론 유용하게 사용하고 난 화학물질을 재활용하는 노력도 필요합니다. 그것이 진정으로 우리 자신과 자연 생태계를 지키는 길이고, 지구를 푸르게 만드는 길입니다. 오히려 화학물질과 적극적으로 친해지는 지혜가 필요합니다. 녹색 화학이 더욱 화려한 인류의 미래를 활짝 열어줄 수 있는 유일한 대안입니다.

에필로그 중에서

공동기획
KCS 대한화학회 KOREAN CHEMICAL SOCIETY
KRICT 한국화학연구원 Korea Research Institute of Chemical Technology
한국화학회관

비매품

청소년이 묻고, 화학자가 답한다 진짜 궁금했던 화학과 미래 질문 30 이덕환·석원경 지음 과학동아

공동기획
대한화학회
한국화학연구원
한국화학회관

청소년이 묻고
Q
화학자가 답한다
A

진짜 궁금했던 화학과 미래 질문 30

이덕환 · 석원경 지음

핵융합으로 금을 만들 수 있을까요?
투명인간이 될 수 있을까요?
미래 자동차의 연료는 수소가 될까요?

과학동아

이덕환 교수

서울대 화학과를 졸업하고 같은 대학원 화학과에서 석사 학위를 받았습니다. 이후 미국 코넬대에서 화학과 박사 학위를 받고, 미국 프린스턴대 화학과에서 연구원을 역임한 뒤 1985년 서강대 교수로 부임해 34년 동안 화학과 과학커뮤니케이션을 강의했습니다. 2012년에는 대한화학회 회장을 역임했고, 현재는 대한화학회 탄소문화원 원장으로 있습니다. 그동안 각종 언론 매체에 2500여 편의 칼럼을 발표했고, '같기도 하고 아니 같기도 하고' '거의 모든 것의 역사' 등 20여 권의 역서와 저서를 발간했습니다. 대한민국 과학문화상(2004), 닮고 싶고 되고 싶은 과학자상(2006), 과학기술훈장 웅비장(2008), 과학과 사회 소통상(2011), 옥조근정훈장(2019), 유미과학문화상(2020) 등을 받았습니다.

duckhwan@sogang.ac.kr

석원경 교수

서울대 화학과를 졸업하고 KAIST 화학과에서 석사 학위를 받은 뒤 1981년부터 1984년까지 동아대 화학과에 재직했습니다. 미국 채프힐의 노스캐롤라이나대 화학과에서 박사 학위를 받고, 미국 노스웨스턴대 화학과 박사후연구원을 거쳐 1990년부터 2020년까지 동국대 화학과 교수로 재직했으며, 미국 펜실베이니아대와 독일 뮌헨대 화학과에서 방문 교수를 지냈습니다. 동국대에서 자연과학연구원 원장과 중앙도서관 관장, 대한화학회에서 학술 부회장, 조직 부회장을 역임했습니다. 지금은 동국대 명예교수 그리고 한국화학회관 이사로 있습니다. 촉매, 전이금속화학, 염료-감응형 태양 전지 등이 전공 분야이며 이와 관련한 학술 논문 100여 편을 발표했습니다. '전이금속 화합물의 반응과 메커니즘' '세상의 시작, 118개의 원소 이야기' '진짜 궁금했던 생활화학 질문 30' 등의 저서를 발간했고, '무기화학' '멘델레예프와 주기율표' 등을 번역했습니다. 2020년에는 녹조근정훈장을 받았습니다.

wonkseok@dongguk.edu

2021. 10. 17. 오전 11:42

진짜 궁금했던 화학과 미래 질문 30

Q A

청소년이 묻고

화학자가 답한다

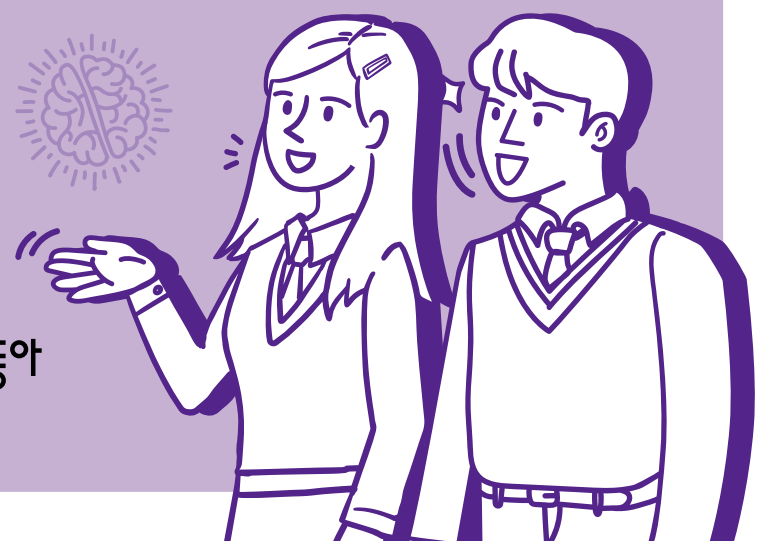
Q

A

진짜 궁금했던 화학과 미래 질문 30

지은이 이덕환, 석원경

공동기획 대한화학회, 한국화학연구원, 한국화학회관



과학동아

Contents

Chapter 1. 지구와 환경

01 눈에 보이지 않는 종이를 만들 수 있을까요 007
02 공기 중 산소만 흡수할 수 없을까요 015
03 주기율표의 119번 원소가 발견될 수도 있을까요 021
04 아무리 온도가 높아도 녹지 않는 물질을 만들 수 있을까요 029
05 멸종된 공룡을 복원할 수 있을까요 035
06 공기 중의 온실가스를 없앨 수 있을까요 041
07 핵융합으로 금을 만들 수 있을까요 049
08 지진과 같은 자연재해를 에너지원으로 쓸 수 있을까요 057
09 원전에서 발생하는 오염수와 폐기물에서 방사성 물질만 없앨 수 있을까요 065
10 입자의 움직임을 눈으로 볼 수 있을까요 073

Chapter 2. 의학과 생명

11 냉동인간이 될 수 있을까요 079
12 몸속 장기를 모두 인공 장기로 만들 수 있을까요 085
13 새치나 흰머리가 안 나게 만들 수 있을까요 093
14 투명 인간이 될 수 있을까요 101
15 인간의 수명을 200살까지 끌어 올릴 수 있을까요 107
16 사람도 먹지 않고 배터리처럼 충전기로 충전할 수 있을까요 115
17 첨단 화학으로 생물체를 만들 수 있을까요 123
18 생명체의 DNA를 데이터 저장 장치로 활용할 수 있을까요 129
19 대뇌 피질을 발달시켜서 천재로 만들 수 있을까요 135

Chapter 3. 미래의 삶

20 인조고기인 대체육을 만들 수 있을까요 141
21 식물의 성장을 조절할 수 있을까요 147
22 인공 아가미를 이용하면 산소통 없이 물속에 들어갈 수 있을까요 153
23 낮에 빛을 저장해 뒀다가 밤에 쓸 수 있을까요 159
24 미래 자동차의 연료는 수소가 될까요 167
25 석탄과 석유가 사라진 후에는 어떻게 될까요 175

Chapter 4. 우주와 인간

26 달과 화성에 인공 도시를 만들 수 있을까요 183
27 국제우주정거장과 지표면을 연결하는 승강기를 제작할 수 있을까요 189
28 영화 승리호의 나노봇이 가능할까요 197
29 빛의 속도로 날아가는 우주선을 만들 수 있을까요 203
30 우주 관광이 가능해질까요 211

에필로그 218

이나윤 대전 둔산초 3
이은석 서울 갈현초 6
이하랑 경기 판곡중 1

01

눈에 보이지 않는 종이를 만들 수 있을까요

A

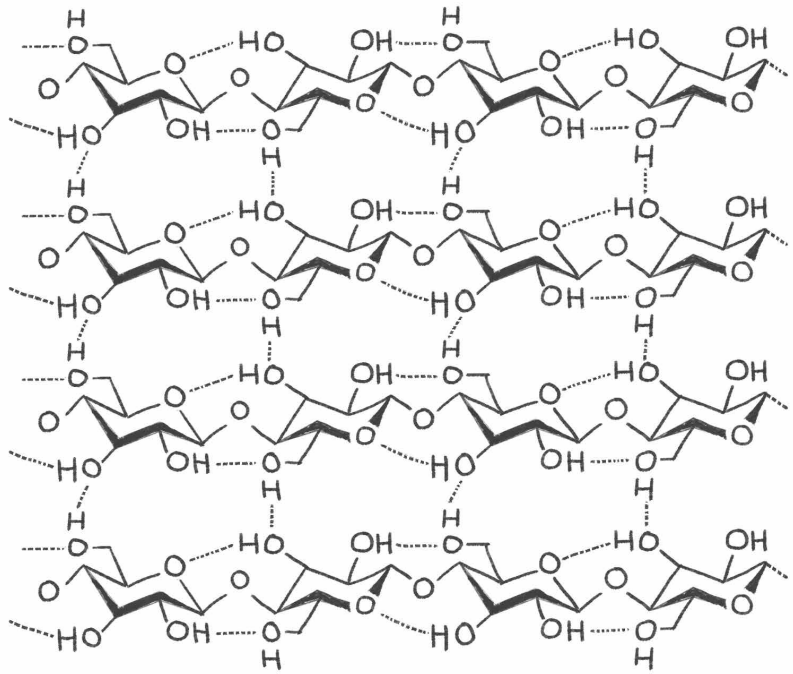
이덕환 교수가 답하다

종이는 식물성 섬유를 압착해서 만든 얇은 부직포입니다. 섬유의 주성분은 셀룰로오스로 화학식은 $(C_6(H_2O)_5)_n$입니다. 셀룰로오스는 긴 사슬 형태로 연결된 탄수화물로, D-포도당 단위체 수백~수천 개가 글리코사이드 결합으로 연결돼 선형 사슬을 이루고, 이 사슬들이 중첩돼 격자형 모양을 형성합니다. 가시광선을 흡수하지 않아 투명한 소재로 쓰입니다.

하지만 식물성 섬유에서는 셀룰로오스 사슬 사이의 빈틈이 가시광선을 산란시켜 불투명하게 보입니다. 종이 역시 섬유의 올이 제멋대로 배열돼 있어 불투명하지요. 종이의 질감을 부드럽게 만들고, 표면을 매끄럽게 하기 위해서 넣어주는 고령토와 같은 충전재도 종이를 불투명하게 만드는 데 일조합니다.

하지만 투명한 종이가 필요한 순간이 있습니다. 똑같은 그림을 여러 개 그려야 할 때가 대표적이지요. 지금은 똑같은 그림을 여러 장 찍어내고 싶을 때 복사기를 이용하면 됩니다. 하지만 복사기가 일반화되기 전에는 그림을 직접 따라 그리는 수밖에 없었습니다. 이때는 반투명한 '트레이싱 용지(기름종이)'를 사용했습니다. 복제할 그림 위에 기름종이를 올려놓으면 그림이 비쳐서 기름종이에 똑같이 따라 그릴 수 있지요. 건축 설계나 디자인 작업을 할 때 많이 사용했습니다. 기름종이는 대부분 면이나 마에서 분리한 셀룰로오스 섬유를 가느다란 극세사로 가공해서 만들었습니다. 새끼 양이나 송아지의 가죽을 가공해서 만든 독피지(벨럼)를 투명한 종이의 대용품으로 사용하기도 했습니다.

최근에는 새로운 기술을 이용해 종이를 투명하게 만듭니다. 셀룰로오스 섬유를 나노미터(nm·1 나노미터는 10억분의 1m) 길이로 가공한 나노 소재를 사



수소결합으로 연결된 셀룰로오스 분자

용하는 게 대표적입니다. 나노 섬유 사이에 만들어지는 빈틈이 가시광선을 산란시키지 못하도록 만드는 기술이 핵심입니다. 이런 방법으로 만든 투명한 종이는 유리보다 훨씬 가벼우면서도 표면이 매끄럽고, 열에도 안정합니다. 또 일반적인 종이와 마찬가지로 말거나 접을 수도 있습니다. 셀룰로오스는 친수성이 좋고 강도가 커서 필름으로 제작해 다양한 곳에서 이용됩니다.

투명한 셀룰로오스 종이를 사용하면 앞으로 다양한 형태의 플렉서블 전자소자를 개발할 수 있을 것으로 기대됩니다. 특히 무겁고 딱딱한 유리로 만든 태양광 소자의 단점도 극복할 수 있습니다.

현대 종이를 탄생시킨 화학 기술

종이는 문자, 인쇄술 등과 함께 인류의 위대한 발명품 중 하나로 꼽힙니다. 현대 종이의 시초는 2세기 초 중국 후한의 환관이었던 채륜이 당시 포장용으로 사용하던 전통 종이를 개량해서 만든 '채륜지(蔡倫紙)'입니다. 이 채륜지가 식물 섬유를 이용해 만든 종이의 기원이라는 뜻입니다. 얇고 가벼우면서도 아주 질기고, 심지어 값이 싼 채륜지는 글자를 쓰거나 인쇄하는 용도로도 사용되기 시작됐습니다.

채륜지가 중국을 넘어 전 세계로 널리 퍼지면서 파피루스, 양피지, 비단, 대나무의 시대가 막을 내리게 됐습니다. 이후 문자 기록과 학문 연구는 획기적으로 발전하게 됐습니다. 중국의 종이 제조 기술은 4세기 무렵 국내에 전해졌고, 8세기 무렵에는 중국 당나라에서 이슬람을 거쳐 서양에도 전해졌습니다.

오늘날 우리가 사용하는 종이는 목재에서 생산한 셀룰로오스 섬유인 펄

프를 이용해서 만듭니다. 종이를 생산하는 과정에는 다양한 화학 기술이 사용됩니다. 원목을 잘게 쪼갠 칩을 섭씨 150도의 아황산 소듐(Na_2SO_3) 수용액에 넣은 뒤 오랜 시간 훈증시켜서 '아황산 펄프(sulfite pulp)'로 만듭니다. 수산화 소듐(NaOH)과 황화 소듐(Na_2S)을 넣은 수용액을 이용해서 '크라프트 펄프(Kraft pulp)'로 만들기도 합니다.

오늘날 종이는 일상생활에 없어서는 안 되는 필수품입니다. 종이는 글을 쓰기 위한 용도만으로 쓰이는 것이 아닙니다. 포장, 인쇄, 장식지와 벽지, 화장지 등으로 주로 많이 쓰이지만, 지폐와 증권의 발행에 사용되는 종이의 양도 무시할 수 없을 정도로 많습니다.

정보화 사회가 빠르게 진행되면서 '종이 없는 세상'을 만들어야 한다는 목소리도 있습니다. 그러나 현실은 그렇게 만만치 않습니다. 컴퓨터와 프린터가 등장하면서 오히려 고급 인쇄용 종이의 소비는 늘었습니다. 택배, 배달 등 비대면 소비가 생활화되면서 포장에 이용되는 종이 소비량도 늘고 있지요.

셀룰로오스 기반 종이를 대체할 미래 소재

삶의 질이 개선되면서 전 세계적으로 종이의 사용량이 빠르게 늘어나고 있습니다. 매년 4억 t(톤) 이상의 종이가 생산돼 소비되고 있습니다. 2016년 한국제지연합회 통계에 따르면 세계 지류 생산량은 중국(1억 919만 t), 미국(7267만 t), 일본(2622만 t), 독일(2260만 t) 순으로 많았고, 한국은 세계 5위로 매년 1160만 t의 종이를 생산했습니다. 전 세계에서 생산된 종이의 59%는 포장용지로, 29%는 인쇄용지로 사용됩니다. 신문용지로 사용되는 비율도 4.5%나 됩니다.

종이를 생산하는 제지 산업이 극복해야 할 과제는 만만치 않습니다. 천연 목재와 에너지의 소비를 줄이는 일이 무엇보다 중요합니다. 고급 펄프를 생산하는 과정에서 활용하는 화학 공정에 의한 환경오염 문제도 해결해야 합니다. 종이의 소비를 줄이는 것이 가장 시급하지만, 말처럼 쉬운 일은 아닙니다.

결국 종이 재활용에 더 많은 신경을 써야 하지만, 현재 종이의 재활용 비율은 56% 수준입니다. 국제적으로 폐지의 수출입도 활발하게 이뤄지고 있습니다. 폐지를 재활용하기 위해서는 사용한 종이에 묻어있는 잉크와 염료를 제거하고, 깨끗한 펄프를 회수해야 합니다. 물론 이 모든 과정은 화학 공정으로 이뤄집니다.

종이를 대체할 수 있는 소재를 개발하는 노력도 중요합니다. 인류가 언제까지나 식물이 어렵사리 합성해 놓은 셀룰로오스에만 의존할 수는 없는 일입니다. 골판지와 같은 포장용 종이를 대체할 수 있는 새로운 소재를 만들어야 합니다. 더 가볍고 질긴 인쇄용 종이도 개발해야 합니다. 동시에 재활용이 가능한 소재여야 합니다.

현재 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스타이렌, 폴리에스터 등으로 만든 새로운 유형의 플라스틱 합성 종이가 빠르게 발전하고 있습니다. 이들은 종이와 필름의 역할을 모두 할 수 있습니다.

미국의 화학기업 듀폰은 1967년부터 합성 종이 '타이벡(Tyvek)'을 판매하고 있습니다. 고밀도 폴리에틸렌(HDPE·high density polyethylene)을 얇고 가늘게 만든 부직포입니다. 화학물질에 의해 쉽게 훼손되지 않으며 방수성이 뛰어나고, 잘 찢어지지 않는 장점이 있습니다. 타이벡은 건축 소재, 의료용 포장재, 우편용 봉투, 우주선 소재, 개인용 방호복, 화폐 등 다양한 용도로 사용되고 있습니다.

미국의 특수 소재 기업인 PPG 인더스트리즈가 1984년에 개발한 '테슬린(Teslin)'도 종이의 훌륭한 대체 소재입니다. 테슬린은 다양한 두께로 생산되며 물에 젖지 않으면서도 매우 질깁니다. 일반 프린터로 인쇄를 할 수 있어 이용이 편리하며 면허증, 주차증 등의 다양한 용도로 쓰이고 있습니다.

강태린 경기 성남여수초 5

02

공기 중 산소만 흡수할 수 없을까요

A

이덕환 교수가 답하다

공기 중의 산소는 쉽게 분리할 수 있습니다. 공기를 영하 183℃(절대 온도 90도) 이하의 온도로 냉각시키면 산소 분자가 액체 상태로 응축됩니다. 화학 실험실에서 쉽게 구할 수 있는 영하 196℃(절대 온도 77도)의 액체 질소를 사용하면 공기 중의 산소를 액체로 모을 수 있습니다. 산소 분자의 전자들이 삼중항(triplet·2개의 전자를 갖는 계에서 보통은 서로 다른 스핀 방향의 일중항(singlet) 상태가 안정하지만, 산소는 서로 같은 스핀 방향의 삼중항이 더 안정함) 상태에 있는 옅은 푸른색의 액체 산소는 자석에 달라붙는 독특한 상자성(paramagnetic)을 나타냅니다. 액체 산소는 상온에서 곧바로 기체 상태로 기화합니다.

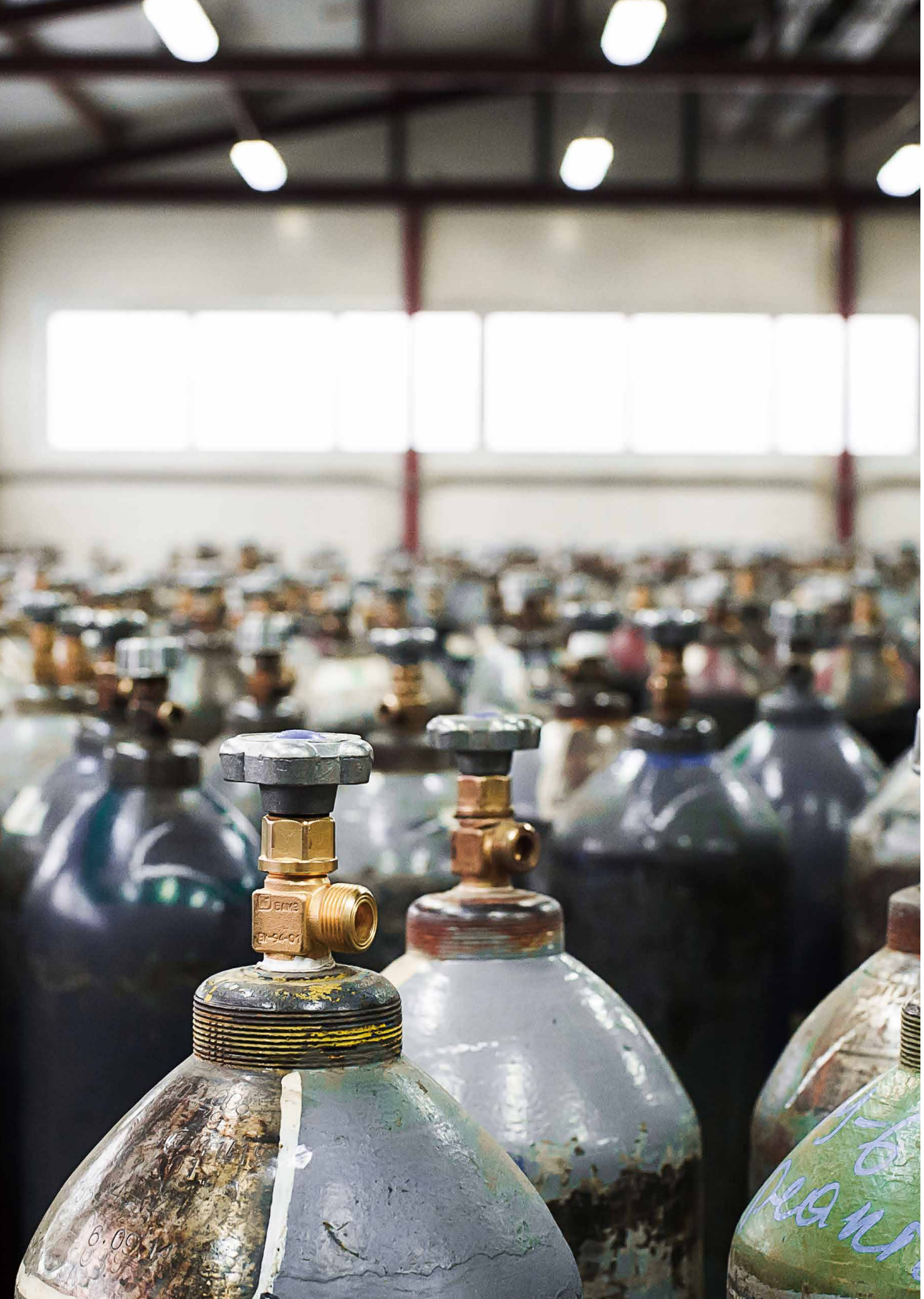
냉매를 사용하는 방법으로 생산할 수 있는 산소의 양은 제한적일 수밖에 없습니다. 많은 양의 산소가 필요한 경우에는 압축 공기를 생산하는 공장에서 사용하는 대형 냉각기가 필요합니다. 원리는 엔탈피가 일정한 상태에서 기체의 압력이 줄어들면 온도가 함께 떨어지는 줄-톰슨 효과(Joule-Thomson effect)를 응용합니다. 열의 출입이 차단된 단열 파이프에 다공성 격막을 설치하고 높은 압력의 압축 공기를 밀어 넣으면 파이프의 반대쪽으로 빠져나오는 기체의 온도가 떨어집니다.

미세먼지 때문에 숨쉬기가 어려웠던 때 유행하던 '산소 발생기'라는 가전제품은 사실 제올라이트와 같은 다공성 물질이나 고분자 분리막을 이용해서 공기 중의 산소를 부분적으로 농축하는 장치입니다. 공기 중의 산소와 질소가 제올라이트에 흡착되거나 분리막을 통과하는 속도에 약간의 차이가 있다는 사실을 이용한 장치입니다. 그렇게 실내 공기를 압축해서 통과시키는 과정을 반복하면 산소를 농축시킬 수 있습니다.

그러나 그런 가전제품을 사용한다고 실내의 산소 농도가 크게 높아질 것으로 기대하기는 어렵습니다. 더욱이 산소의 농도가 낮아진 부분을 반드시 실외로 배출시켜야 한다는 사실도 잊지 말아야 합니다. 외부로 연결된 관이 없는 산소 발생기는 단순한 공기 정화기일 가능성이 더 큽니다. 자칫하면 아무 효과도 없이 아까운 전기만 낭비하는 어리석은 일이 될 수도 있습니다.

생명의 원소

산소는 지구상에서 가장 흔한 원소입니다. 지구의 46.1%가 산소입니다. 두 번째로 흔한 원소인 실리콘(규소)이 28.2%이고, 공기의 78%를 차지하는 질소는 지구의 0.002%를 차지할 뿐입니다. 산소는 화학적 반응성이 매우 큰 원소입니다. 그래서 지구에 남아있는 산소는 대부분 물(산화 이수소)·녹(산화 철)·실리카(산화 규소)·석회석(탄산 칼슘)·이산화 탄소처럼 다른 원소와 단단하게 결합한 화합물의 형태로 존재합니다.



지구의 대기 중에 21%를 산소가 차지하고 있는 것은 매우 특이한 일입니다. 땅속의 산소 화합물에서 분해한 산소가 그렇게 많을 수는 없습니다. 사실 공기 중의 산소는 녹색식물의 엽록소에서 일어나는 광합성에서 만들어지는 부산물입니다. 공기 중의 이산화 탄소와 뿌리를 통해 흡수한 물이 결합해 탄수화물이 생성되는 과정에서 산소가 공기 중으로 방출됩니다.

녹말과 셀룰로오스가 광합성으로 만들어지는 대표적인 탄수화물입니다. 30억 년 전 지구상에 처음 등장한 시아노박테리아(남세균)라는 단세포 생물이 처음 시작한 신기한 화학 반응입니다.

녹색식물이 부산물로 공기 중에 방출하는 산소가 지구 생태계를 살아 움직이도록 만들어주는 원동력이 되고 있습니다. 대부분의 다세포 생물의 세포에 들어 있는 미토콘드리아(mitochondria)라는 세포기관이 핵심입니다. 녹색식물이 광합성으로 합성한 탄수화물을 다시 산소와 결합해서 생물학적 에너지 전달물질인 아데노신삼인산(ATP)이 만들어지는 과정을 '호흡'이라고 부릅니다.

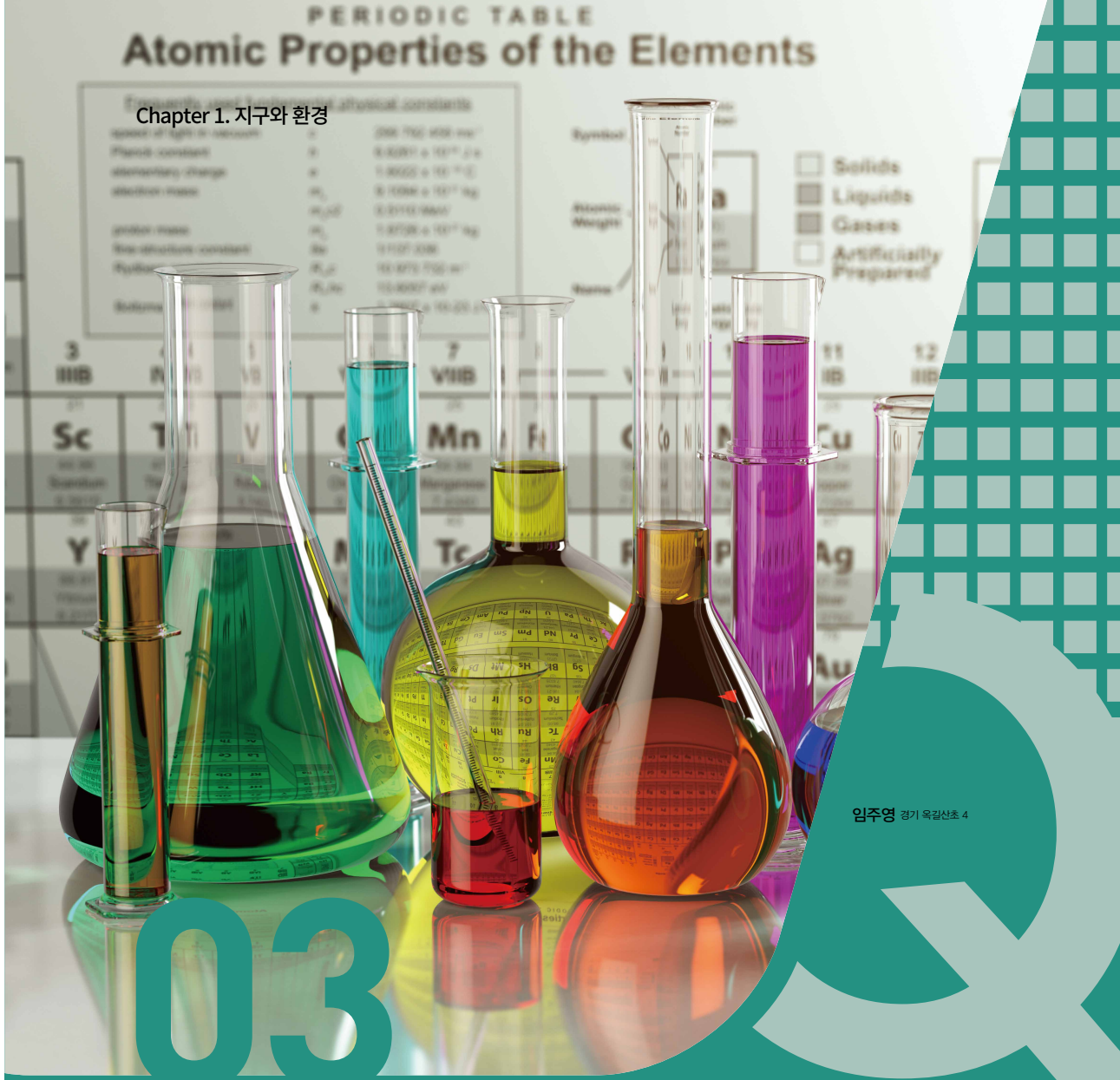
산소는 우리의 일상생활에서도 중요합니다. 인류가 50만 년 전부터 사용하기 시작했던 불은 산소에 의해서 일어나는 '연소' 반응입니다. 주로 장작·숯·석탄·석유·천연가스와 같은 화석연료가 산소와 결합하는 반응에서 많은 양의 빛과 열이 방출됩니다. 인간은 지구 생태계에서 불을 무서워하기는커녕 적극적으로 활용하는 지혜와 용기를 가진 유일한 존재입니다. 오늘날 인류가 만물의 영장이라고 뽐낼 수 있게 된 것도 불을 사용하는 기술 덕분입니다.

우리가 산소의 존재를 처음부터 알고 있었던 것은 아닙니다. 오히려 연료가 연소하는 이유가 '플로지스톤'(phlogiston)이라는 신비의 물질이 존재하

기 때문이라고 믿었던 적도 있었습니다. 스웨덴의 카를 셸레가 1772년에 산화 수은(HgO)과 다양한 질산염을 가열해서 '불 공기'(fire air)가 생성된다는 사실을 처음 알아냈습니다. 1774년 영국의 조지프 프리스틀리가 유리관에 넣어둔 산화 수은이 햇빛에 의해 분해되면서 방출되는 기체를 '탈(脫)플로지스톤 공기'라고 불렀습니다. 프리스틀리는 자신이 발생시킨 기체가 촛불을 더 밝게 빛나게 만들고, 쥐를 더 활동적으로 만든다는 사실도 발견했습니다.

1774년 프랑스의 화학자 앙투안 라부아지에가 산소의 정확한 정체를 처음으로 알아냈습니다. 그는 라부아지에는 최초의 정량적인 실험을 통해서 연료의 연소 반응에 필요한 원소의 존재를 확인했습니다. 그런 원소가 바로 '생명의 공기(vital air)'이고, 동시에 신맛을 내는 물질인 산(酸, acid)을 만들어주는 원소라는 뜻에서 '산소(酸素, oxygen)'라고 불렀습니다. 라부아지에는 생물을 질식시키는 원소인 '질소(窒素, nitrogen)'의 존재도 함께 발견했습니다.

산소가 생명의 원소라고 해서 무조건 좋아할 이유는 없습니다. 공기 중에 산소가 19% 이하로 떨어지면 호흡이 어려워져서 질식하게 되는 것은 사실입니다. 그러나 공기 중의 산소가 너무 많아도 건강에 해로울 수 있습니다. 실제로 세포 속에서 산소의 반응성이 너무 커서 만들어지는 '반응성 산소 종'(Reactive Oxygen Species, ROS)은 건강에 도움이 되지 않습니다. 흔히 '활성 산소'로 알려진 물질입니다. 우리는 오랜 진화의 과정을 통해서 산소가 21% 수준이 유지되는 대기에 적응한 생물입니다.



03

주기율표의 119번 원소가 발견될 수도 있을까요

임주영 경기 옥길산초 4

석원경 교수가 답하다

원자번호 119의 원소는 국제순수·응용화학연합(IUPAC)이 1979년에 제정한 명명법에 따라 '운운엔늄(Ununennium)'이라고 부르고, 원소기호로 'Uue'로 표시합니다. 러시아의 화학자 드미트리 멘델레예프의 명명법에 따라 '에카 프랑슘'이라고 부르기도 하죠. 리튬(Li)과 소듐(Na), 포타슘(K), 루비듐(Rb), 세슘(Cs), 프랑슘(Fr)에 이어 7번째 알칼리 금속인 운운엔늄의 화학적 성질은 다른 알칼리 원소와 비슷할 수도 있지만, 세슘·프랑슘보다 포타슘·루비듐에 더 가까울 것이라는 주장도 있습니다. 그러나 수명이 수 μs(마이크로초·1μs는 100만 분의 1초) 수준으로 예상되기 때문에 물리적 성질은 큰 의미가 없습니다.

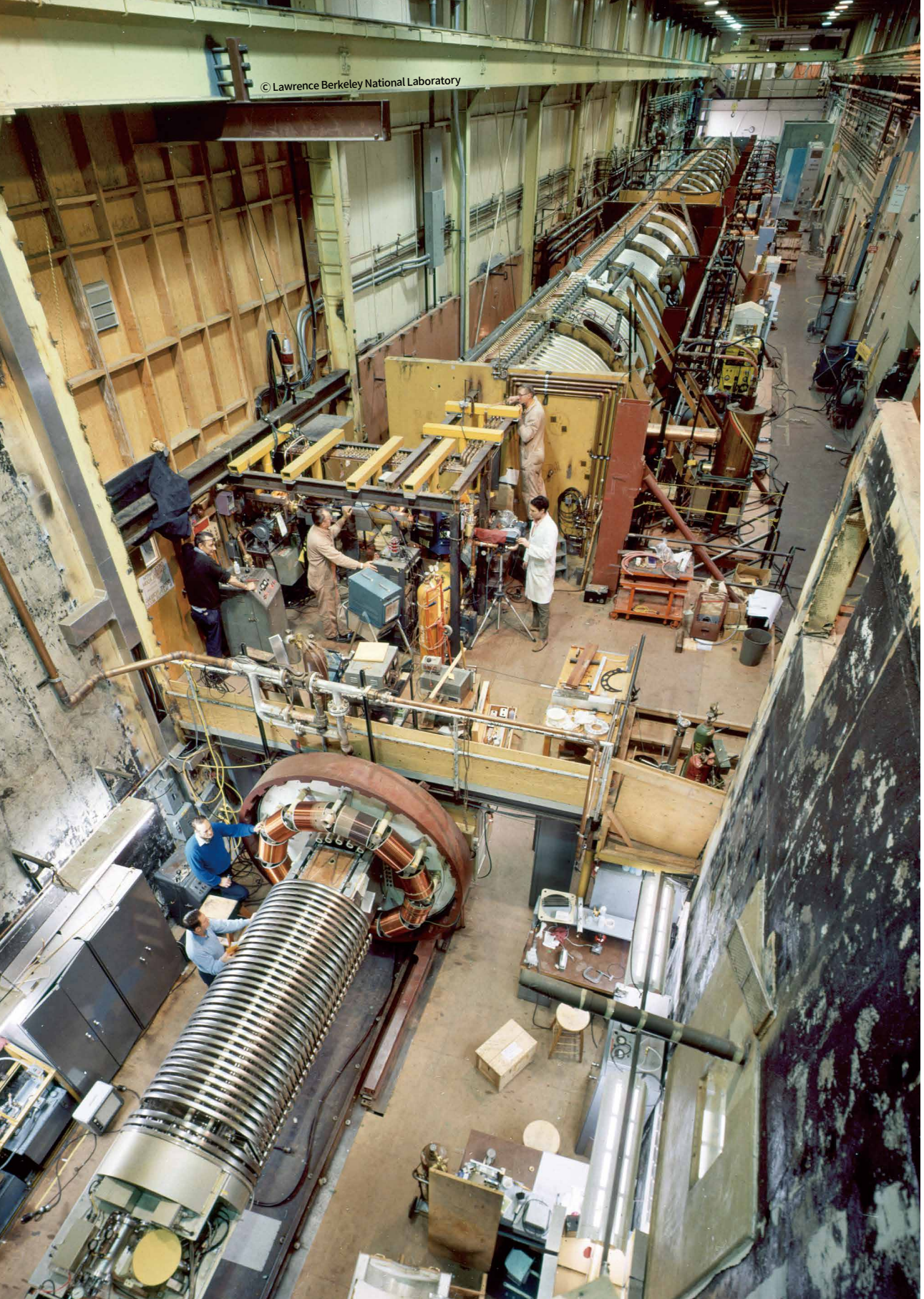
중이온 가속기를 이용해서 운운엔늄을 합성하는 실험은 1985년 미국 로렌스버클리국립연구소(LBNL)에서 처음 시작했습니다. 아인슈타이늄(Es)에 칼슘(Ca)을 충돌시켰지만, Uue의 합성에는 실패하고 말았습니다. 독일 GSI 헬름홀츠 중이온연구소, 러시아 두브나합동원자핵연구소(JINR), 일본 이화학연구소(RIKEN)에서도 다양한 시도를 했으며, 지금도 활발하게 진행되고 있습니다. 특히 일본은 2022년에는 결과를 얻을 수 있다고 밝히고 있습니다. 운운엔늄의 합성이 공식적으로 확인이 되면 이름과 원소기호는 합성에 성공한 연구진의 제안을 고려해 IUPAC에서 다시 결정하게 됩니다.

원소와 인공원소

세상을 구성하고 있는 물질을 향한 관심은 원초적이었습니다. 동양에서는 수메르의 천문학 전통에서 시작된 '음양오행설'이 있고, 서양에서는 플라톤의 기하학에서 시작된 '4원소설'이 있습니다. 세상이 어떻게 구성됐는지 설명하는 고대의 이론이지만, 이를 자연과 인간의 존재를 설명하는 철학이나 질병을 예방하고 치유하는 의술, 인간에게 요구되는 도덕과 윤리의 근거로 활용하기도 했습니다.

원소의 현대적 정의는 18세기 후반 '화학의 아버지'로 알려진 프랑스의 앙투안 라부아지에가 정립했습니다. 라부아지에는 정교한 실험과 놀라운 통찰력으로 산소(O)와 수소(H), 질소(N), 탄소(C), 황(S), 인(P)을 비롯한 55종의 원소가 자연에 존재한다는 사실을 밝혀냈습니다. 1869년 멘델레예프가 처음 만들었던 주기율표에는 63종의 원소가 포함됐습니다. 원소의 물리·화학적 성질이 반드시 주기적으로 반복될 것이라고 확신했던 그는 자신의 주기율표에 앞으로 발견될 원소의 자리를 남겨두는 예지력도 갖추고 있었습니다.

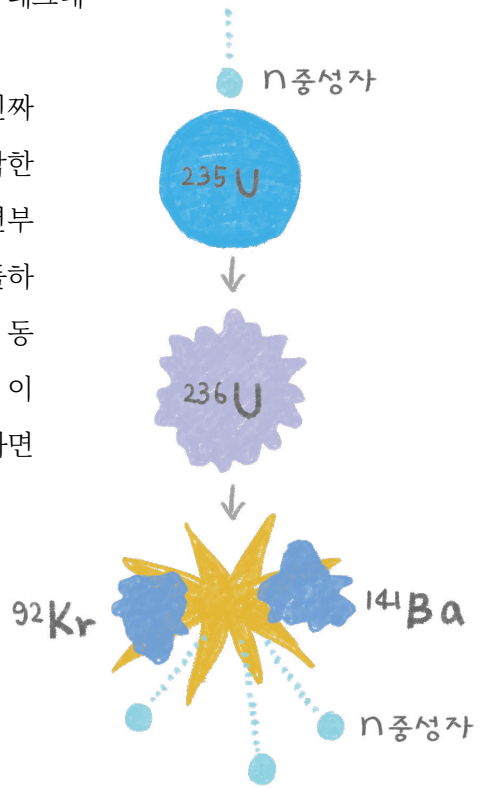
지금까지 확인된 원소는 모두 118종입니다. 원자번호 1인 수소에서 원



자번호 94인 플루토늄(Pu)까지의 원소 중에서 방사성 붕괴로 지구상에서 모두 사라져버린 프랑슘과 넵투늄(Np)을 제외한 92종의 원소가 오늘날 지구에 존재하는 천연 원소입니다. 나머지 26종의 원소는 모두 핵반응이 일어나는 원자로나 무거운 이온을 빠르게 만드는 가속기에서 인위적으로 합성한 인공원소입니다.

1937년 에밀리오 세그레가 로렌스버클리국립연구소의 사이클로트론 가속기를 이용해서 원자번호 43번의 테크네튬(Tc)을 인공적으로 합성했습니다. 멘델레예프가 '에카 망가니즈'라고 불렀던 테크네튬은 그동안 자연에서 그 존재를 확인할 수 없었습니다. 1962년에 들어서야 벨기에령 콩고에서 채굴한 우라늄 광석에서 극미량의 테크네튬이 발견됐습니다.

과학자들이 자연에 존재하지 않은 진짜 인공원소를 본격적으로 합성하기 시작한 것은 제2차 세계대전 중이었던 1944년부터였습니다. 우라늄(U)이 중성자와 충돌하면 크립톤(Kr)과 바륨(Ba)으로 분열하면서 동시에 2~3개의 중성자를 다시 내놓는데, 이때 나온 중성자는 다시 우라늄과 충돌하면서 분열을 유도합니다. 이렇게 시작한 핵분열은 연쇄적으로 일어나면서 엄청난 에너지를 발생시키게 되는데, 원자폭탄은 이 원리를 이용합니다.



핵분열 반응

원자폭탄을 개발하는 맨해튼 프

로젝트에 참여했던 미국의 글렌 시보그와 앨버트 기오소는 핵분열의 역반응인 핵융합으로 플루토늄에 알파 입자(원자번호 2번인 헬륨의 원자핵. 전자를 모두 잃어버린 상태를 의미함)를 충돌시켜 원자번호 96번인 퀴륨(Cm)을 합성했습니다. 원자번호 95번인 아메리슘(Am)에서 원자번호 100의 페르뮴(Fm)까지의 인공원소는 대부분 우라늄이나 플루토늄에 싱크로트론 가속기로 중성자를 충돌시켜서 합성했습니다. 그보다 더 무거운 인공원소는 표적 원소의 원자핵에 가속한 헬륨(He), 붕소(B), 탄소, 질소, 철(Fe), 크로뮴(Cr) 등의 이온을 충돌시켜 만들었습니다.

118번까지 채워진 현재의 주기율표가 완성된 것은 2016년이었습니다. 2016년 한 해 동안 4개의 원소가 새롭게 등록됐죠. 원자번호 113은 일본의 국호를 반영한 니호늄(Nh), 115번은 두브나합동원자핵연구소가 있는 러시아 수도의 지명을 딴 모스코뷤(Mc), 117번은 미국 오크리지국립연구소가 위치한 주 이름에 근거한 테네신(Ts), 118번은 러시아의 핵물리학자 유리 오가네시안을 기린 오가네손(Og)으로 결정했습니다. 1898년 퀴리 부부가 7주기의 라듐(Ra)을 처음 발견한 후 118년 만에 7주기의 원소 32종이 모두 채워진 것입니다.

세상에서 가장 무거운 원소 찾는 여정

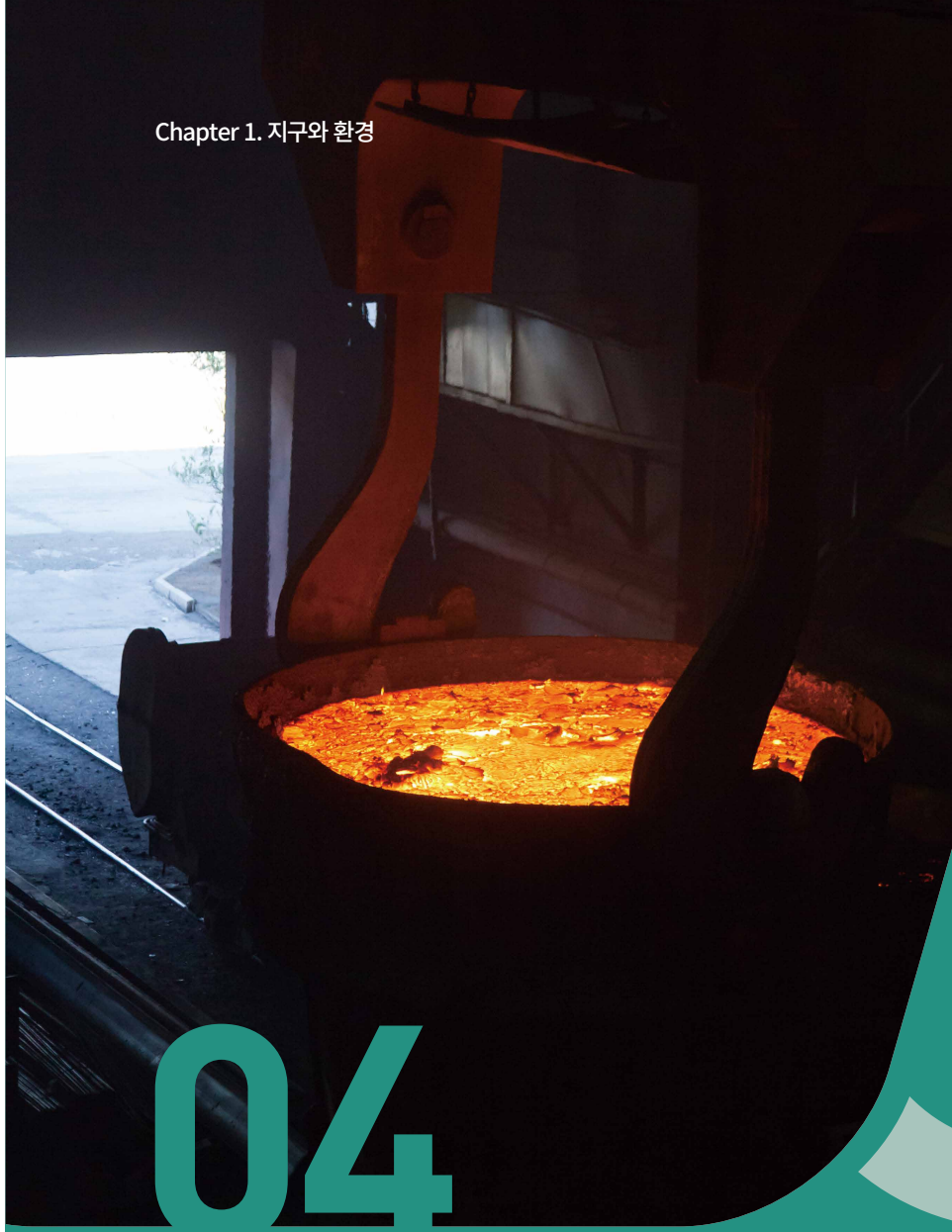
과학자들의 노력에도 이보다 더 큰 원자번호의 원소가 아직 발견되지 않는 이유는 원자번호가 커질수록 원자핵이 불안정해지며 순식간에 붕괴하기 때문입니다. IUPAC에서는 수명이 10^{-14}초보다 긴 경우에만 원소로 인정하고 있어 아무리 큰 원소를 합성한다고 하더라도 반감기가 짧다면 주기율표상에 이름을 올릴 수 없습니다. 그렇기에 현재 기술로 합성할 수 있을 것으로 생각되는 인공원소는 원자번호 126번까지입니다. 주기율표의 8주기를 완전히 채우려면 원자번호 164번까지의 원소가 필요합니다.

1940년 미국의 물리학자 리처드 파인만은 전자기 상호작용의 크기를 결정하는 미세구조 상수를 근거로 원자번호 137보다 큰 원소는 존재할 수 없을 것이라고 주장했습니다. 그래서 원자번호 137 원소를 파인마늄(Fy)이라고 부르기도 합니다. 파인만이 이같이 주장한 근거는, 디랙 방정식에 따르면 파인마늄보다 큰 원자의 가장 안쪽 껍질의 전자는 0보다 큰 실수의 에너지 값을 가질 수 없다는 것이었습니다(이는 전자의 속도가 광속을 추월한다는 것과 같은 의미입니다). 양자역학의 정립에 핵심적인 역할을 했던 닐스 보어도 비슷한 주장을 했습니다. 그러나 파인만의 주장은 원자핵을 부피가 없는 점으로 가정한 결과였습니다. 원자핵의 부피를 고려하면 원자번호의 한계는 173까지 확장될 수 있을 것으로 추정됩니다.

118번 이후의 원소를 찾기 위한 과학자들의 노력은 여전히 이어지고 있습니다. 2019년 러시아에서는 슈퍼헤비엘리먼트팩토리(SHEF)라는 이름의 중이온가속기를 구축했습니다. 119번과 120번 원소를 찾는 것이 목적이죠. SHEF를 이용해 원자번호 114번의 플레로뷤 동위원소를 합성한 실험에서는 그간 안정적일 것이라고 예상했던 플레로뷤이 사실은 불안정한 핵을 갖고 있다는 점이 밝혀졌습니다. 대신 아직 밝혀지지 않은 120번 원소가 안정적인 구조를 갖고 있어 합성이 가능할 것이라는 분석이 나오기도 했습니다.

앞에서 언급한 연구소를 포함한 다른 나라의 연구소에서도 원자번호 119번 이후의 인공원소를 만들고자 노력하고 있습니다. 프랑스는 우라늄과 니켈(Ni)의 충돌로 원자번호 120의 운비닐륨(Unbinilium, Ubn)을 합성했지만, 수명이 10^{-18}초에 불과하고 외부의 중성자 공급 없이도 자발적으로 핵분열

하기에 새로운 원소로 인정받지 못했습니다. 퀴륨과 철, 플루토늄과 니켈, 우라늄과 저마늄(Ge)의 충돌 실험으로 원자번호 122의 운비븀(Unbibium, Ubb) 인공원소를 얻고자 하는 시도도 있었지만, 역시 이 원소의 자발적 핵분열을 확인했을 뿐입니다. 이와 같은 충돌 실험 결과는 두 원소의 핵이 충돌하며 생성되는 복합 핵(compound nucleus)이 매우 불안정하기 때문입니다. 그렇기에 이런 문제를 극복하고 원자번호 119번과 그 이후 원소를 찾기 위해서는 충돌하는 핵 사이에 양성자와 중성자를 교환할 수 있게 하는 핵 전달 반응이 필요하다는 이론이 제기되고 있습니다.



홍준용 충남 천안서당초 3

04

아무리 온도가 높아도 **녹지 않는 물질**을 만들 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

고체의 녹는점은 물질의 종류에 따라 크게 다릅니다. 금속 중에서도 녹는점이 3422℃로 가장 높은 텅스텐(W)을 비롯해 레늄(Re) · 탄탈럼(Ta) · 몰리브데넘(Mo) · 니오븀(Nb)은 내화 금속(refractory metal)으로 분류됩니다. 하지만 온도가 6000℃가 넘는 지구 내부의 맨틀에는 모든 것이 녹아버립니다. 온도가 높아지면 물질을 구성하는 원자의 열운동이 심해져서 결국에는 모든 화학결합이 끊어지면서 녹아버리거나 분해돼 버립니다.

쉽게 녹지 않는 물질의 개발

잘 녹지 않는 내화 금속은 밀도가 대단히 높고, 화학적으로 반응성이 매우 낮은 특성이 있습니다. 금속 상태의 원자가 서로 밀집해서 단단하게 달라붙어 있기 때문에 쉽게 녹지 않는다는 뜻입니다. 내화 금속은 고온에서 사용하는 공구를 만들기에는 더없이 좋은 소재입니다. 이는 다른 금속을 성형하는 주형(casting mold)이나 부식성이 강한 화학물질의 반응 용기를 만드는 데에 매우 유용합니다. 그러나 내화 금속 자체를 생산하고 가공하는 데에는 상당한 기술력이 필요합니다. 그래서 내화 금속을 본격적으로 활용하기 시작한 것은 고작 100여 년 전부터였습니다.

잘 녹지 않는 물질을 만드는 일은 생각보다 훨씬 어렵습니다. 서로 다른 두 물질을 물리적으로 섞어서 만든 혼합물은 오히려 더 낮은 온도에서 녹게 됩니다. 혼합물이 녹아서 액체가 되면 혼합 엔트로피가 증가해 열역학적으로 더 안정해지기 때문입니다. 소금이 섞여 있는 간장독이 잘 얼지 않게 되는 '어는점 내림'의 원리가 바로 그것입니다.

혼합물이 더 낮은 온도에서 녹는 현상은 인류 역사를 획기적으로 발전시켰습니다. 구리(Cu)에 주석(Sn)을 10% 정도 섞어주면 구리가 녹는 1085℃보다 130℃나 낮은 온도에서도 쉽게 녹아서 쇳물이 만들어집니다. 장작이나 숯을 사용할 수밖에 없던 과거에 매우 유용한 사실이었습니다.

구리와 주석을 섞어서 녹인 쇳물을 식히면 구리나 주석과는 완전히 다르게 단단하면서 독특한 색감까지 가진 '청동'이라는 합금이 만들어집니다. 대략 6000년 전 메소포타미아 지역의 사람들이 우연히 청동을 만드는 방법을 알아냈습니다. 인류 최초의 금속 소재인 청동기의 등장은 돌도끼를 사용하던 석기 시대 사람들의 삶을 완전히 바꿔놓았습니다. 우리가 '놋쇠'라고 알고 있는 '황동'은 구리와 아연(Zn)을 섞어서 만든 합금입니다.

청동을 녹여서 가공하기 위해서는 뜨겁게 녹은 쇳물을 넣어도 녹거나 타버리지 않는 주형이 필요했습니다. 다행히 자연에는 그런 소재가 지천으로 널려 있습니다. 모래와 진흙의 기본 골격 역할을 하는 실리카(SiO_2)·알루미나(Al_2O_3)·산화 철(Fe_2O_3)이 대표적입니다. 실리카는 1710℃, 알루미

나는 2072℃, 산화 철은 1565℃로 가열해야 녹습니다. 청동은 고령토와 같은 점토로 만든 주형으로도 가공할 수 있습니다.

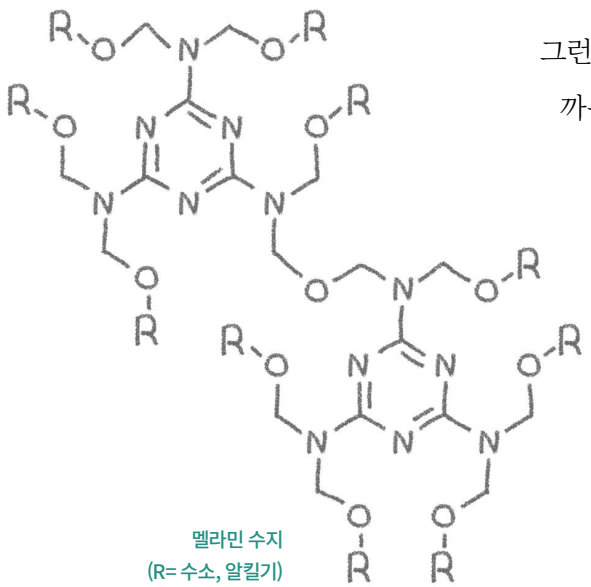
1565℃에서 녹는 철을 가공하기 위해서는 더 어려운 기술이 필요합니다. 석탄처럼 훨씬 더 화력이 센 연료를 안전하게 연소시키는 기술을 개발해야 합니다. 석탄을 잘못 사용하면 맹독성의 일산화 탄소가 발생하기 때문입니다. 쇳물을 녹일 수 있는 용광로나 가마도 필요합니다. 점토를 1400℃ 이상에서 구운 '세라믹'이나 내화 벽돌도 만들어야 합니다.

쉽게 녹지 않는 세라믹은 지금도 일상생활과 산업용으로 다양하게 활용되고 있습니다. 특히 우주 왕복선이 지구 대기권으로 재진입할 때는 온도가 1600℃까지 치솟을 수 있습니다. 자칫하면 왕복선의 동체가 녹거나 불타서 흔적도 없이 사라져버릴 수도 있습니다. 미국항공우주국(NASA)은 재진입하는 우주 왕복선의 동체에 실리카로 특수 제작한 세라믹 타일과 탄소 섬유로 강화한 흑연 복합소재를 사용했습니다.

금속에 탄소를 혼합해서 만든 내화 세라믹도 있습니다. 탄화 탄탈럼(TaC)과 탄화 하프늄(HfC)으로 만든 세라믹은 4000℃까지 녹지 않습니다.

불에 타지 않는 난연 소재

숯 · 석탄 · 장작은 온도가 너무 높아지면 녹아서 액체로 변하는 대신 공기 중의 산소와 반응을 일으켜서 연소해 버립니다. 이러한 연소 반응이 일어나는 과정에서 발생하는 빛과 열은 어둠을 밝히거나 난방, 음식 조리에 사용할 수 있습니다. 인류는 50만 년 전부터 화석연료를 활용하는 기술을 개발했습니다. 인간은 지구상에서 불을 적극적으로 이용하는 유일한 동물입니다.



멜라민 수지
(R= 수소, 알킬기)

그런데 불을 잘못 다루면 재앙에 가까운 화재로 번져서 심각한 피해가 발생하기도 합니다. 화재에 취약한 목조 건물을 사용할 수밖에 없었던 조선 시대의 한성도 예외가 아니었습니다. 창덕궁에서 남산에 이르는 대규모 소방 도로를 건설하고, 경복궁 앞에는 재앙을 물리친다는 대형 해태상을 세웠지만 역부족이었습니다.

불연재(fire resistant material)와 난연재(fire retardant material)는 화학을 이용해서 화재의 피해를 최소화하기 위해 널리 사용하는 물질입니다. 석고 · 시멘트 · 섬유 등을 넣은 소석고(plaster)는 소방관이 화재 현장에서 착용하는 방화복, 건축 등에 많이 사용되는 불연재입니다. 아라미드 섬유는 심각한 석면증과 폐암을 유발하는 것으로 확인돼 전 세계적으로 사용이 금지된 석면을 대체할 목적으로 개발됐는데, 군용 · 산업용 · 건축용으로 사용되는 대표적인 난연재입니다. 난연성 멜라민 수지는 주방 용기로 사용되고 있습니다.

물론 불연재나 난연재도 매우 높은 온도로 가열하면 연소하거나 분해됩니다. 유기물은 이산화 탄소와 물로 변해서 날아가 버리고, 광물질 성분만 재로 남게 됩니다.

곽다영 경기 오마중 2
박준후 경기 샘모루초 4
최은서 경기 마산초 4

05

멸종된 공룡을 복원할 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

1993년 개봉한 스티븐 스필버그 감독의 SF 영화 '쥬라기 공원'은 공룡을 현재로 소환했습니다. 영화에서는 호박 속에 갇힌 모기에서 공룡의 DNA를 추출하고 유실된 DNA는 개구리의 것으로 보완해 공룡을 복원해 냅니다. 영화가 흥행한 이후 DNA를 이용한 생명공학 기술에 대한 관심이 폭발적으로 증가했습니다. 하지만 영화가 곧바로 현실이 되는 일은 흔치 않습니다. 공룡 복원이 대표적인 예죠. 현재의 생명공학 기술로는 공룡이 복원될 가능성은 거의 없어 보입니다.

공룡의 멸종은 돌이킬 수 없는 일

공룡은 대략 2억 5000만 년 전에 등장해서 6000만 년 전에 멸종했습니다. 인류의 조상 중 하나인 오스트랄로피테쿠스(Australopithecus)가 처음 등장한 것은 고작 400만 년 전입니다.

한 번도 마주한 적 없는 고생물을 복원하는 것은 불가능에 가깝습니다. 현재 이 시점에서 고생물에 대해 알 수 있는 정보가 극히 제한적이기 때문입니다. 뼈나 발자국 등의 화석을 통해 짐작하는 것이 전부죠.

기술 문제를 차치하더라도 공룡을 복원해야 할 뚜렷한 명분이 없습니다. 호기심은 충분한 명분이 되지 못합니다. 한 종을 복원하는 데 성공한다고 해서 나머지 종의 복원도 성공한다는 보장이 없죠. 공룡의 먹잇감, 공룡과 공존하던 미생물까지 복원할 가능성은 '제로'입니다. 즉 인류는 결코 당시의 생태계를 그대로 재현해낼 수 없다는 말입니다.

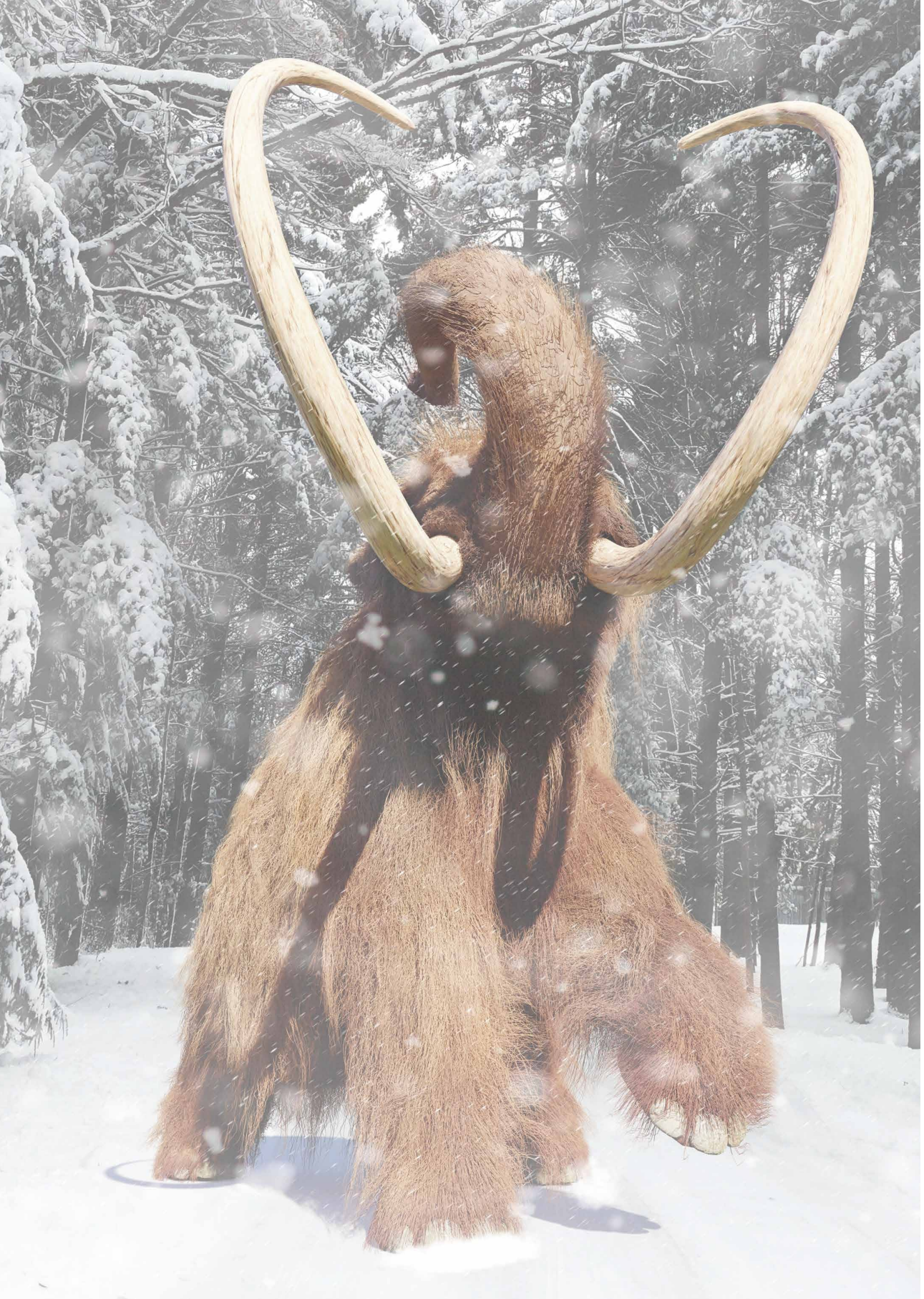
게다가 2억 년 전 환경과는 완전히 다른 세상에서 태어난 복원 공룡은 결코 정상적으로 살아가지 못할 것입니다. 후손을 남기게 될 가능성도 희박하죠. 복원된 공룡이 지구 생태계에 미칠 영향도 고려해야 하지만, 현재의 기술로는 어떤 영향을 미칠지 짐작하기 어렵습니다.

공룡의 시간은 이미 끝났습니다. 지나간 시간을 되돌리겠다는 시도는 부질없습니다. 이런 관점에서 현재 활발히 연구하고 있는 매머드 복원도 마찬가지라고 생각합니다.

현재로서 공룡에 대한 호기심을 충족할 기회는 자연사박물관의 공룡 전시물 정도죠. 하지만 앞으로 정보기술(IT)이 발전하면 가상 세계에서 걷고, 달리고, 날아다니는 실제 같은 공룡을 만날 수 있을 것입니다.

현재 기술로 동물 복제는 충분히 가능

영화 쥬라기 공원의 설정이 완전히 허무맹랑한 것은 아닙니다. 체세포 내 DNA로 동물을 복제(cloning)하는 기술은 20여 년 전부터 있었습니다.



1996년 7월 영국 로즐린 연구소에서 세계 최초의 복제 동물인 '돌리(Dolly)'가 태어났습니다. 핵을 제거한 난자에 암컷 양의 젖샘에서 얻은 체세포를 이식해 수정란을 만들었습니다. 돌리의 겉모습은 '생명공학적 부모'인 체세포를 제공한 암컷과 똑같았습니다. 돌리는 6년 6개월 만에 폐 질환으로 생을 달리했지만, 현대 생명공학 기술의 발전을 분명하게 확인시켜 준 사건이었습니다. 돌리의 탄생 직후 영화 쥬라기 공원의 기적이 곧 실현될 것이라는 환상이 번지기도 했죠.

이후 동물 복제 기술은 상당한 성과를 거뒀습니다. 개, 소, 들소, 말, 돼지, 사슴, 원숭이, 고양이, 낙타, 염소 등의 동물을 복제하는 데 성공했습니다. 심지어는 반려견을 복제해 주는 회사도 등장했습니다.

하지만 동물 복제에 대한 지나친 환상은 경계해야 합니다. 현재 동물 복제 기술의 성공률은 종마다 약간씩 차이가 있지만, 대체로 10%에 미치지 못합니다. 가축이 아닌 야생동물 복제 성공률은 1% 미만입니다. 쇠고기 생산을 위한 육우 복제 기술도 상업적으로 활용하기에는 턱없이 낮은 수준입니다.

복제 동물이 체세포를 제공해준 개체와 완벽하게 닮을 것이라는 기대도 섣부릅니다. 실제로 경찰견 복제는 성공적인 평가를 받지 못했습니다. 체세포를 제공한 경찰견의 탁월한 능력을 빼닮은 복제 경찰견은 없었습니다. 이런 이유로 우수한 경찰견을 탄생시키기 위해 교배와 훈련에 의존하고 있습니다.

복제 동물의 겉모습은 체세포, 엄밀히 말하면 DNA 정보가 담긴 '핵'을 제공한 부모와 닮았습니다. 하지만 복제 동물의 모든 것이 '핵 부모'와 같진 않습니다. 복제 동물의 미토콘드리아에 들어 있는 DNA는 핵 이식에 사용된 난자를 제공한 '난자 부모'의 것입니다. 핵 부모와 난자 부모, 복제

동물을 잉태한 '출산 부모'까지 복제 동물 한 개체를 만드는 데 여러 개체가 영향을 미칩니다. 복제 동물의 건강 상태를 완벽히 장담할 수 없는 이유죠. 핵 부모와 난자 부모, 출산 부모 중 어떤 개체를 부모로 정할지를 두고도 문제가 불거질 수 있습니다.

이처럼 극복해야 할 한계도 존재하지만, 여전히 동물 복제 기술이 무한한 가능성을 지니고 있는 것은 분명합니다. 멸종위기종을 보존하기 위한 최후의 수단으로 활용될 수 있고 생물의 발생 과정을 연구하기 위한 유용한 수단으로도 쓰일 수 있습니다.

화학 분야는 동물 복제 기술이 한계를 극복하는 데 도움이 될 수 있습니다. 이미 복제에 필요한 난자를 얻기 위해 융모성 생식선 자극호르몬(hcg), 키스펩틴(kisspeptin) 등과 같은 배란 촉진제를 합성해 사용합니다. 유전자의 손상을 복구하기 위한 유전자 편집 기술도 앞으로 유용하게 활용될 것입니다. 이러한 기술의 혁명을 가져온 크리스퍼(CRISPR) 유전자 가위를 개발한 제니퍼 다우드나(Jennifer A. Doudna)와 에마뉘엘 샤르팡티에(Emmanuelle M. Charpentier)는 2020년 노벨화학상을 받았습니다.

부유진 제주 아라중 3
채준석 강원 원주중 3

06

공기 중의 온실가스를 없앨 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

공기 중의 온실가스를 모두 없애는 것은 현실적으로 가능하지 않습니다. 아무리 큰 공기 정화기를 사용하더라도 42억 km^3에 이르는 지구의 공기를 화학적으로 처리할 수는 없기 때문입니다. 그런 일이 바람직한 것도 아닙니다. 온실가스가 모두 사라져버리면 기온이 밤낮으로 너무 심하게 변하고, 녹색식물의 광합성도 불가능해집니다. 지구상에 어떤 생물도 살 수 없게 된다는 뜻입니다. 전 세계가 걱정하는 기후변화는 인류가 배출하는 온실가스의 양이 너무 많아서 발생하는 것입니다. 지구를 푸른 행성으로 만들어주는 온실가스를 무작정 탓할 일이 절대 아닙니다.

온실가스 배출에 따른 기후변화

기후가 심하게 변하고 있는 것은 사실입니다. 북극해에서는 1980년 이후 해마다 한국 면적에 해당하는 크기의 해빙이 녹고 있고, 전 세계 해수면은 1993년 이후 연평균 9.8cm씩 상승하고 있습니다. 그 결과 태평양과 대서양 해류의 흐름이 바뀌면서 전 세계적으로 폭염·한파·폭우·폭설·태풍과 같은 극한 기상 현상이 부쩍 잦아지고 있습니다.

한국도 예외가 아닙니다. 겨울이 따뜻해지면서 눈이 내리는 날도 크게 줄어들고 있고, 상대적으로 여름은 견디기 어려울 정도로 더워지고 있습니다. 대구 남쪽에서만 생산되던 사과가 휴전선 근처에 있는 철원의 특산물이 돼버렸습니다. 남해안에서 아열대 작물을 재배하는 농가도 늘어나고 있습니다. 동해에서는 한류성의 명태가 사라지고, 난류성의 전갱이류가 많이 잡히고 있습니다.

실제로 지구의 평균 기온이 계속 올라가고 있습니다. UN의 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)에 따르면, 18세기 말에 일어났던 산업혁명 이후 지구의 평균 기온은 2020년까지 1.2℃ 올라갔습니다.

21세기에 들어서면서 변화는 더욱더 빨라지고 있습니다. 인구의 급격한 증가, 산업화, 경제 성장에 의해서 대기 중으로 배출되는 온실가스가 늘어난 결과입니다. 그래서 산업혁명 이후의 지질 시대를 '인류세(Anthropocene)'라고 불러야 한다는 주장도 있습니다. 만약 지구의 평균 기온이 6℃ 이상 올라가면 전 지구적으로 대량 멸종과 같은 재앙이 벌어질 것이라고 합니다.

국제 사회가 기후변화에 적극적으로 대응하고 있습니다. 2015년에는 196개국이 지구의 평균 기온을 산업화 이전보다 2℃ 이상 올라가지 않도록 하겠다는 '파리협정'에 합의했습니다. 2018년 인천 송도에서는 더욱 강력한 '1.5℃ 보고서'를 채택했습니다. 전 세계적으로 평균 기온을 1.5℃ 이상 올라가지 않도록 만들기 위해서 2030년까지 온실가스 배출량을

2010년 대비 45%까지 감축하고, 2050년에는 탄소 순 배출량을 0으로 만드는 '탄소 중립'을 달성해야 한다는 극약 처방을 내놨습니다.

쉽지 않은 탄소 중립의 꿈

지구 대기의 78%를 차지하는 질소(N_2)와 21%를 차지하는 산소(O_2)는 가시광선과 적외선을 흡수하지 않기 때문에 우리 눈에는 투명하게 보입니다. 그러나 대기 중에는 수증기(H_2O)·이산화 탄소(CO_2)·메테인(CH_4)·산화 이질소(N_2O)·오존(O_3)처럼 온기를 느끼도록 해주는 적외선을 흡수하는 '온실가스' 성분도 포함돼 있습니다. 냉장고와 에어컨의 냉매로 사용하던 염화 플루오린화 탄소(CFC), 수소화 플루오린화 탄소(HFC) 등도 온실가스로 분류됩니다.

온실가스는 햇빛과 지표면에서 반사되는 복사열의 적외선을 흡수해서 대기의 온도 증가에 기여합니다. 특히 기상 조건에 따라서 대기의 최대 3%까지 차지하는 수증기의 온실 효과는 날씨 변화에 매우 큰 영향을 미칩니다. 온실가스는 해가 지고 난 후에 지표면의 복사열 방출을 차단해서 낮과 밤의 일교차를 줄여주는 역할을 합니다. 습도가 높은 여름철에 열대야가 나타나는 것도 수증기의 온실 효과 때문입니다. 건조한 사막에서 일교차가 큰 것도 습도가 낮아서 나타나는 현상입니다. 수증기는 증발이나 응축 과정에서 열을 흡수·방출해서 날씨 변화에 영향을 주기도 합니다.

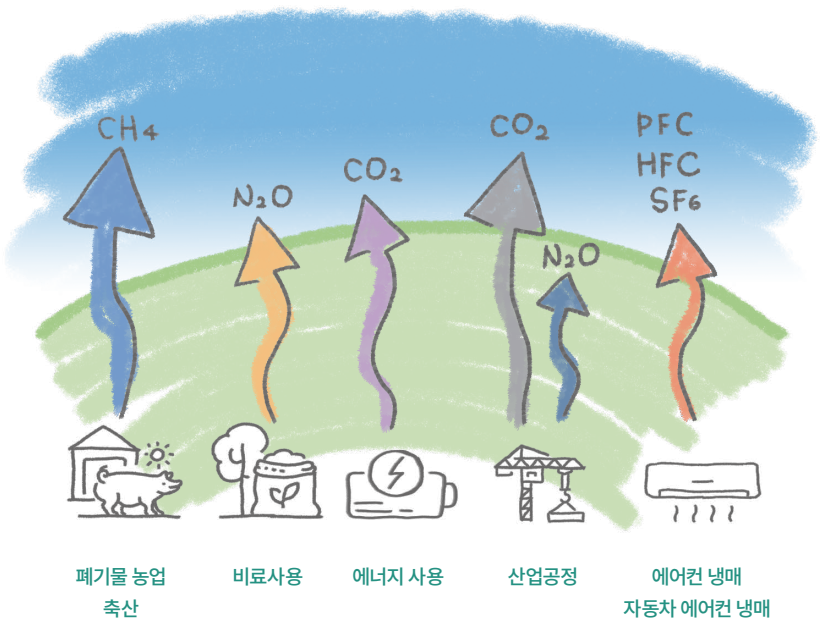
급격한 기후변화를 일으킨 온실가스는 에너지원으로 사용하는 화석 연료의 연소 과정에서 배출되는 이산화 탄소, 유기물의 부패나 가축으로 사육하는 소·양·말과 같은 초식동물의 소화 과정에서 배출되는 메테인입니다. 선진국에서는 에너지의 소비가 많아서 이산화 탄소를 많이 배출하고

있지만, 일부 국가에서는 화석 연료를 비효율적으로 소비하면서 불필요하게 많은 이산화 탄소를 배출하고 있습니다.

오늘날 우리는 장작(숯)·석탄·석유·천연가스(LNG)와 같은 '1차 에너지'와 다양한 방법으로 생산하는 전기와 같은 '2차 에너지' 활용하고 있습니다. 소비자 관점에서 깨끗하고 안전한 에너지인 전기는 사실 생산 방법에 따라서 이산화 탄소 배출량이 크게 다릅니다.

석탄 화력과 LNG 화력에서는 많은 양의 이산화 탄소가 배출되지만, 원자력이나 태양광·풍력에서는 이산화 탄소를 직접 배출하지는 않습니다. 그러나 태양광·풍력은 전기 생산을 통제할 수 없어서 LNG 화력을 보조 발전원으로 사용해야 합니다.

한국의 사정은 더욱더 어렵습니다. 우리의 에너지 소비 중 2차 에너지



가 차지하는 비율은 아직도 20% 수준에 지나지 않습니다. 정유·철강·비료·시멘트와 같은 에너지 집약 산업에서는 여전히 많은 양의 화석 연료를 사용하고 있습니다. 국제 사회의 탄소 중립 노력에 동참하기 위해서는 산업구조와 생활환경을 획기적으로 개편해야 하고, 원자력처럼 이산화 탄소를 배출하지 않는 전력 생산 기술을 적극적으로 개발해야만 합니다.

IPCC를 중심으로 국제 사회가 적극적으로 추진하고 있는 '탄소 중립'은 에너지 소비 과정에서 배출되는 이산화 탄소의 양을 대폭 줄이고, 대기 중에 배출된 이산화 탄소를 적극적으로 포집·저장하는 CCS(carbon capture and storage) 기술을 적극적으로 활용하겠다는 것입니다. CCS는 원유를 채굴할수록 지층 내 압력이 낮아지기에, 그 지층에 파이프로 화석 연료를 태울 때 배출되는 이산화 탄소를 주입해 그 압력으로 원유를 더 산출하게 하고, 동시에 이산화 탄소도 없애는 기술입니다.

이산화 탄소를 직접 빨아들이는 DAC(direct air capture) 기술도 있습니다. 큰 팬으로 밀어낸 공기를 여과기에 통과시킨 뒤 알칼리 용액으로 이동시키면, 공기 속 이산화 탄소가 흡수돼 안정한 탄산염으로 침전됩니다. 이 침전물을 900℃의 열로 가열하면 순수한 이산화 탄소를 회수하여 보관할 수 있습니다.

알칼리 용액 대신에 유기-무기 하이브리드 흡착제 혹은 음이온 교환 고분자 수지를 사용하기도 합니다. 그러나 공기 중에 배출된 이산화 탄소의 농도는 400ppm, 즉 0.04% 수준으로 매우 낮아서 CCS와 DAC는 모두 매우 도전적인 과제일 수밖에 없습니다.

최근 바닷가 부근의 해양 생태계를 이용해 이산화 탄소를 줄이려는 시도도 있습니다. 푸른 바다가 이산화 탄소를 흡수한다고 해서 이를 '블루 카본(blue carbon)' 프로젝트라고 부릅니다.

특히 해안가 맹그로브 숲의 이산화 탄소 흡수량은 같은 면적의 육상삼림에 비해 최대 10배 이상 많으며, 갯벌이나 해초의 흡수 속도는 육지의 삼림보다 최대 50% 더 빠릅니다. 삼림은 가지, 뿌리, 잎 등에 이산화 탄소를 저장하지만, 해안가의 숲은 흡수한 이산화 탄소를 물속 토양에 저장합니다. 해저 퇴적층에는 탄소가 쌓이기에 더 많이 저장할 수 있고, 탄소 배출을 일으키는 박테리아도 적습니다. 호주 정부는 이런 해초 군락지를 인공적으로 조성하기 위해 어떤 나라보다 적극적으로 노력하고 있습니다.

이도윤 인천 송도 미송초 5
설하준 서울 밀알킨더가든 푸른하늘반
최명현 인천 청람중 2

07

핵융합으로 금을 만들 수 있을까요

석원경 교수가 답하다

작고 가벼운 원소의 원자핵을 뭉쳐서 더 크고 무거운 원소로 만드는 것을 핵융합(nuclear fusion)이라고 합니다. 실제로 우주에 존재하는 모든 원소는 138억 년 전 처음 등장한 수소의 핵융합으로 만들어진 것입니다. 값비싼 장신구와 반도체 등 첨단 산업에 쓰이는 금(Au)도 예외가 아닙니다. 오늘날 우리가 땅속에서 캐내는 금은 수십억 년 전 우주 공간에서 일어난 핵융합으로 만들어진 것입니다.

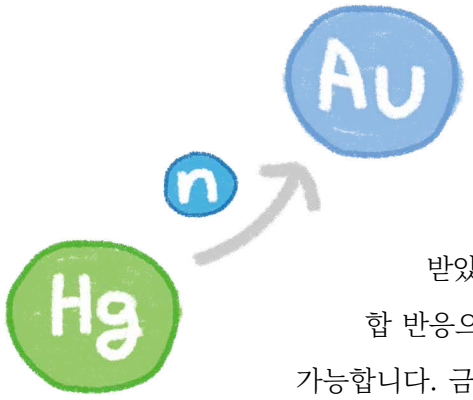
그렇다고 크리소포에이아(chrysopoeia·금(khrusos)과 만들다(poiēin)의 합성어)라고 부르던 '황금 합성'을 인공적 핵융합으로 성취하는 꿈이 절대 불가능한 것은 아닙니다. 입자 가속기와 원자로 등을 이용해 핵반응으로 금을 합성할 수는 있습니다. 물론 우주 공간에서는 일상적으로 일어나는 핵융합을 인공적으로 일으키기는 쉽지 않습니다. 너무나 많은 에너지가 필요하기 때문입니다.

원소 변환의 꿈 좇는 과학자들

신비한 효능을 가진 물질을 만들려는 시도는 어제오늘 시작된 것이 아닙니다. 동양에서는 모든 질병을 깨끗하게 치료해 주는 불로장생과 만병통치의 영약을 만드는 것이 간절한 소망이었습니다. 고대 중국에서 시작된 '연단술(鍊丹術)'이 그런 시도였죠. 서양에서도 수은이나 납처럼 주변에서 쉽게 구할 수 있는 평범한 비금속(卑金屬)을 누구나 갖고 싶어 하는 금이나 백금과 같은 귀금속(貴金屬)으로 변환시키려는 연금술(鍊金術)이 관심의 대상이던 시절이 있습니다.

연금술의 이론적인 배경은 중세에 이르기까지 서양의 과학적 사고를 지배했던 아리스토텔레스의 자연관에서 비롯했습니다. 그는 물질이 서로 다른 것은 구성하는 원소의 비율이 다르기 때문이기에 물질은 상호변환이 가능하다고 주장했습니다. 그런 변환의 촉매 역할을 하는 '철학자의 돌'을 찾아내는 것이 모든 연금술사의 꿈이었습니다. 불과 공기 원소에서 얻은 황, 물과 흙 원소에서 얻은 수은에 철학자의 돌을 넣어주면 금으로 변환할 수 있다고 연금술사는 생각했습니다. 만유인력의 법칙을 발견한 영국의 아이작 뉴턴도 연금술에 빠져있었습니다.

실제로 원소 변환의 꿈이 이뤄지기 시작한 것은 20세기에 들어서였습니다. 1919년 뉴질랜드 출신의 영국의 물리학자 어니스트 러더퍼드가 질소에 알파 입자를 충돌시키는 실험에서 양성자가 방출된다는 사실을 발견했습니다. 그는 알파 입자에 충돌한 질소의 원자핵이 더 작은 원자핵으로 부서졌다고 추정했습니다. 그러나 그의 해석은 잘못된 것이었습니다. 사실은 질소가 오히려 더 큰 원소인 산소로 변환된다는 사실이 확인됐습니다.



최초로 원소 변환의 정체를 밝혀낸 영국의 물리학자 패트릭 블래킷은 핵물리학에 이바지한 공로로 1948년 노벨 물리학상을 받았습니다. 이 과정을 이용한다면 핵융합 반응으로 금을 만드는 것도 이론적으로는 가능합니다. 금보다 가벼운 원소에 양성자와 중성자를 하나씩 붙여가다 보면 언젠간 금으로 변환될 테니 말입니다.

핵융합이 아닌 핵분열 반응을 이용하는 방법도 있습니다. 실제로 중성자 빔을 이용해 금을 만든 실험도 있죠. 1941년 미국의 물리학자 케네스 베인브리지가 처음으로 수은(Hg)에 중성자 빔을 쪼여서 금을 만들 수 있다는 사실을 공식적으로 발표했습니다. 수은의 원자핵에서 한 개의 양성자가 방출되면서 원자번호 79인 금의 원자핵이 만들어지는 것이죠.

하지만 수은의 다른 동위원소를 이용해서 같은 반응을 수행하면 원자번호 81의 탈륨(Tl)으로 바뀝니다. 그런데 1924년에도 똑같은 실험을 했던 물리학자가 있었다고 합니다. 러더퍼드의 실험보다 7년 앞선 1904년에 원자의 행성 모형을 제안했던 일본의 나가오카 한타로가 바로 그 사람이었습니다.

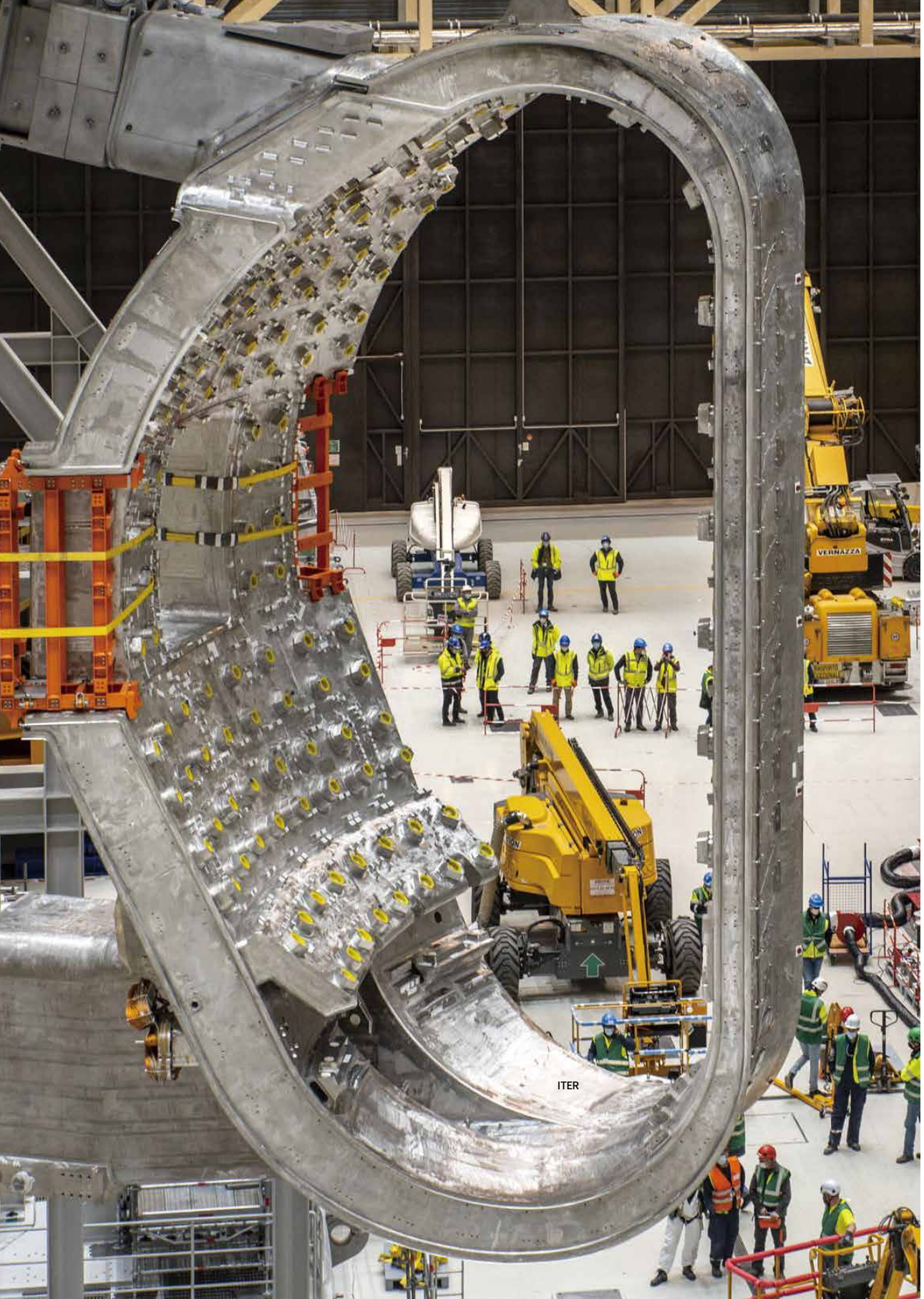
1980년에는 미국의 물리학자 글렌 시보그도 원자로에서 비스무트(Bi)를 이용해 새로운 방법으로 금을 만들었습니다. 그러나 고작 수천 개의 금 원자를 만들 수 있었을 뿐입니다. 장신구 하나를 만들기에는 턱없이 모자라는 양이었습니다. 더욱이 그렇게 합성한 금은 방사선을 내뿜는 방사성 동위원소였습니다.

금보다 소중한 깨끗하고 안전한 에너지

원자핵을 서로 융합시키는 핵융합을 일으키는 일은 간단하지 않습니다. 우선 단단한 고체로 존재하는 금속의 경우에는 높은 온도로 가열해서 원자핵과 전자가 분리된 플라스마 상태로 만들어야 합니다. 이렇게 해야 원자핵끼리 충돌시켜 더 무거운 원소를 만들 수 있습니다. 온도를 5000°C 이상으로 높여야 하는 경우도 있습니다. 이온 상태의 원자핵을 빠르게 가속하는 기술도 필요합니다. 플라스마 상태의 양전하를 가진 원자핵들은 서로 거리가 가까워지면 정전기적 반발 에너지가 급격하게 증가해서 서로 밀치기 때문입니다. 핵융합 반응에는 엄청나게 많은 양의 에너지가 필요하다는 뜻입니다.

핵융합 반응은 주로 태양과 같은 붙박이별(항성)에서 일어납니다. 비교적 작은 붙박이별인 태양은 표면 온도가 6000°C를 넘고, 내부의 온도는 수억°C에 이를 정도로 뜨겁습니다. 태양에서는 수소의 원자핵 4개가 차례로 핵융합을 일으켜서 헬륨을 만듭니다. 그런 과정에서 아인슈타인의 질량-에너지 등가 이론($E=mc^2$)에 따라서 엄청난 양의 에너지가 밝은 빛의 형태로 방출됩니다. 태양에서 일어나는 핵융합에서는 탄소가 촉매 역할을 합니다. 그런 '탄소 사이클'을 처음 밝혀낸 미국의 한스 베테는 1967년 노벨 물리학상을 받았습니다.

베테가 정립한 핵합성 이론에 따르면, 붙박이별에서 일어나는 핵융합으로는 철까지의 원소들이 만들어집니다. 철보다 더 무거운 원소의 합성에는 더 많은 에너지가 필요합니다. 그래서 거대한 붙박이별의 진화에서 마지막 단계에 해당하는 초신성 폭발이나 몹시 무거운 중성자별이 서로 충돌하는 격렬한 환경에서만 철보다 무거운 원소들이 만들어집니다. 지구



에서 발견되는 가장 무거운 원소인 플루토늄도 그렇게 만들어진 것입니다. 핵융합으로 금이 만들어지는 것도 이 정도의 조건이 필요하다는 의미죠.

$$^{1}H + ^{3}H(T) \rightarrow ^{4}He$$

융합반응

그렇다고 인공적인 핵융합이 불가능한 것은 아닙니다. 1951년 에드워드 텔러가 수소의 핵융합을 이용한 수소폭탄을 처음 설계했습니다. 핵융합을 평화적으로 이용하기 위한 노력도 진행되고 있습니다. 한국핵융합에너지연구원에서는 초전도 전자석을 이용하는 토카막 방식의 한국형초전도핵융합연구장치(KSTAR)로 핵융합을 연구하고 있습니다. 핵융합을 이용해서 전기를 생산할 수 있는 기초 기술을 확보하려는 목적입니다. 미국·유럽연합(EU)·러시아·일본·중국·인도와 함께 한국이 공동으로 추진하는 '국제핵융합실험로(ITER·International Thermonuclear Experimental Reactor)' 개발 사업도 있습니다. 이를 통해 실제 발전이 가능할 정도의 핵융합 반응을 재현하는 것이 목표입니다.

에너지를 얻기 위한 핵융합 반응에서도 새로운 원소가 만들어집니다. 핵융합 에너지를 연구하는 과학자들은 수소와 삼중수소를 핵융합해 에너지를 얻는 방법을 연구하고 있습니다. 이 과정에서 헬륨이 만들어집니다. 첨단산업에서 헬륨은 금만큼이나 중요한 원소입니다. 끓는점이 낮아 초저온 환경이 필요한 자기공명영상장치(MRI)나 초전도 자석은 물론 입자가속기나 중이온 가속기 등에도 사용됩니다. 실제로 헬륨은 지구상에 희귀한 원소로 일부 국가에서는 전략물자로 취급하기도 합니다. 금은 아니지만, 금처럼 귀한 원소를 핵융합으로 만들 수 있는 셈이죠.

흔히 '인공태양'이라고 알려진 핵융합 발전에서는 상대적으로 위험도가

낮고 반감기가 짧아 쉽게 분해돼 사라지는 저준위 폐기물이 발생합니다. 체르노빌이나 후쿠시마의 핵분열 원자로에서 일어났던 폭발 사고도 걱정할 필요가 없습니다. 핵분열에서는 연쇄반응이 일어나 한번 시작된 반응이 다음 반응을 유도합니다. 핵분열 반응이 유도되면 이를 멈추는 것이 쉽지 않다는 의미죠. 하지만 핵융합 반응은 연쇄반응이 아닙니다. 또 핵융합 반응을 일으키기 위해 극한의 조건이 필요한 만큼 핵융합로가 고장나면 반응은 절대 일어날 수 없습니다.

인공적인 핵융합으로 금을 만들기는 어렵겠지만, 그보다 더 소중한 지구를 지킬 수는 있을 것입니다. 핵융합 발전이 안전하고 깨끗한 미래의 청정 에너지원이 될 것으로 기대하는 이유이기도 합니다.

민제원 경기 상현고 2

08

지진과 같은 자연재해를 에너지원으로 쓸 수 있을까요

A

석원경 교수가 답하다

지진은 땅속 깊은 곳의 진원에서 거대한 지층이 움직여 발생합니다. 2011년 3월 11일, 일본 동북부 도호쿠 지역 오사카반도에서 동쪽으로 70km 떨어진 바다의 수심 29km 지점에서 지진이 시작됐습니다. 규모 9.0의 기록적인 지진으로서 이후 '동일본 대지진'으로 명명됐습니다.

당시 발생했던 지진의 에너지를 전력량으로 환산하면 무려 5500억 kWh에 달합니다. 10만 MW 규모의 발전 설비를 총동원해 230일 동안 쉬지 않고 가동해야 생산할 수 있는 전력량입니다.

지진에너지에는 코일보단 압전 소자가 적합

에너지양은 어마어마하지만, 결론부터 말하면 지진은 에너지원으로 적합하지 않습니다. 진앙에서 방출된 에너지가 모든 방향으로 퍼져나가기 때문에 지표면의 특정한 위치에 도달하는 에너지의 양은 총 에너지와 비교해 미미한 수준입니다.

게다가 지진은 대개 지속 시간이 매우 짧습니다. 동일본 대지진도 고작 6분 정도 지속했습니다. 지진의 발생 위치와 시각을 정확하게 파악하는 일도 만만치 않습니다. 육지보다 바다에서 더 자주 발생하기 때문에 발전 장비를 설치하기도 어렵습니다.

지진은 비나 눈처럼 일상적인 자연 현상이 아닙니다. 지진이 발생하지 않는 대부분의 시간 동안 값비싼 발전 장비가 쓸모없는 상태로 방치돼 있어야 합니다. 이러한 사업은 타당성을 설득하기 쉽지 않습니다.

그런데도 지진 에너지를 활용해 발전해야겠다면 우선 새로운 발전기부터 개발해야 합니다. 현재 발전기 대부분은 1831년 마이클 패러데이가 실험으로 증명해낸 전자기 유도 원리를 이용합니다. 강력한 영구 자석 안에서 금속 도선을 감은 코일을 회전 시켜 유도 전기를 만들어냅니다. 수력, 화력, 원자력, 풍력, 조력 발전기 모두 패러데이의 원리를 이용합니다. 하지만 지진으로 발생하는 땅의 움직임은 불규칙적이고 운동 방향이 계속 바뀌기 때문에 무거운 코일을 회전시키기에 적합하지 않습니다.

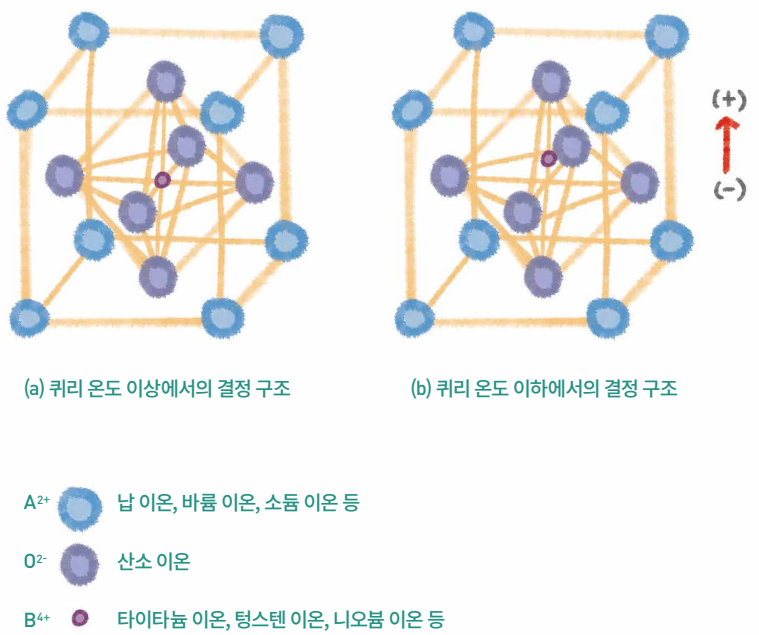
코일 대신 압전(piezoelectric) 소자를 활용하면 지진을 이용한 전기 생산도 가능성은 있습니다. 압전 소자는 외부의 진동을 전기 신호로 바꿔주는 물질로 이뤄져 있습니다. 압전 효과는 1880년 프랑스의 화학자 피에르 퀴리와 그의 형이었던 자크 퀴리가 처음 발견했습니다. 석영, 황옥(토파즈), 설탕 등의 결정에 일정한 방향으로 압력을 가하자 온도가 높아지고, 전기가 발생했습니다. 그들은 이 현상이 단순히 열역학적으로 흥미로운 현상이라고 생각했습니다.

이후 압전 효과는 결정 구조를 이루는 분자의 쌍극자 모멘트(극성의 정도

를 나타내는 물리량. 화학결합에서는 결합한 두 원자 사이에서 전자의 분포 차이가 만드는 극성의 정도)가 변화하면서 나타나는 현상으로 밝혀졌습니다. 또 퀴리 온도(자성을 잃는 온도. 물질마다 다르다) 이하에서 자성을 띠는 물질인 강자성체의 결정에서 이온이 비대칭적으로 배열돼 양전하와 음전하로 대전돼도 압전 효과가 나타납니다.

과학자들은 압전 효과가 일어나는 원리를 토대로 자연에 존재하는 결정보다 훨씬 더 큰 압전 효과를 내는 물질도 합성했습니다. 타이타늄산 바륨($BaTiO_3$), 지르코늄 타이타늄산 납($PbZr_xTi_{1-x}O_3$), 텅스텐산 소듐(Na_2WO_3), 니오븀산 포타슘(K_2NbO_3) 등이 대표적입니다.

압전 소자는 다양한 용도로 사용됩니다. 가스레인지나 라이터의 발화장치나 음파와 전자파의 생성과 탐지장치, 마이크로 저울 등이 있습니다. 원



자 수준의 분해능을 갖춘 투사터널링현미경(STM)이나 원자힘현미경(AFM)에서 탐지 바늘을 이동시키는 용도로도 압전 소자를 사용합니다. 압전 소자로 지진파의 에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치를 개발하기 위해서는 다양한 연구가 필요할 것입니다.

지진으로 발생하는 마찰을 이용하는 방법도 있습니다. 울산과학기술원(UNIST)에서는 마찰전기 발전기를 개발하는 연구를 하고 있습니다. 이 발전기는 두 물체가 스칠 때 만들어지는 전하 불균형을 이용해 전기를 만듭니다.

서로 다른 물체가 접촉하면 각 물체에 있는 음전하와 양전하가 이동해 두 물체가 분리될 때 각 물체에 전하 불균형이 생깁니다. 이러한 불균형을 상쇄하기 위해 전자가 이동하며 전류가 형성되죠. 마찰전기 발전기는 이 전류를 수확하는 장치입니다.

2017년 UNIST 연구팀이 개발한 마찰전기 발전기는 금속 전극으로 양전하를 모으고, 고분자 유전체로 음전하를 모읍니다. 이 발전기는 당시 기존 기술보다 출력이 20배 높아 주목받았죠.

마찰전기 발전기는 비구름 속에서 마찰로 번개가 발생하는 것과 같은 원리입니다. 번개는 1~10억 V의 전압이 흐르지만, 지속 시간이 100분의 1초로 매우 짧아 저장하기 어려운 데다 벼락이 칠 위치를 예측하기가 어렵기에 에너지원으로 활용하기는 쉽지 않습니다.

세상에 공짜는 없다

자연의 에너지를 활용하려다가 오히려 지진을 일으키는 경우도 있습니다. 2017년 11월 15일 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진도 이에 해당하는 사례입니다. 포항 시내를 강타한 지진으로 무려 9조 원에 이르는 피해가 발생했습니다.

원인은 포항에 건설하고 있던 지열발전소였습니다. 지열발전은 지하 깊숙이 물을 주입해 지열로 160~180℃까지 가열시키고 이때 만들어진 수증기로 발전을 하는 원리입니다. 배출된 수증기는 응축시켜 다시 지하로 내려보내죠.

포항지열발전소는 800억 원의 사업비가 투입돼 4000가구가 사용할 6.2MW의 전기를 생산하는 것이 목표였습니다. 지하 4km 깊이까지 물을 주입하는 '주입정(injection well)'과 수증기를 뽑아내는 '생산정(production well)'이 각각 설치됐죠.

포항지열발전소에서는 2016년 1월부터 2017년 9월까지 1만 3000여 m^3의 물을 주입하고 다시 5841m^3의 물을 뽑아 올렸습니다. 그런데 지열 발전을 위해 주입정으로 밀어 넣은 고압의 물 가운데 일부가 토양으로 스며들었습니다. 오랜 세월 동안 외부와 철저하게 차단돼 있던 땅속의 지질 환경에 상당한 변화가 나타날 수밖에 없었겠죠.

특히 지반이 연약한 퇴적층에서 영향이 더 컸습니다. 퇴적층에 뜨거운 물이 스며들어 포항 지진 당시 땅이 진흙처럼 변하는 액상화 현상이 나타났습니다. 실제로 포항 지진의 진앙은 건설 중이던 지열발전소에서 겨우 1.1km 떨어진 곳이었습니다.

인류는 자연의 에너지를 활용하기 위해 오래 전부터 부단히 노력해왔습니다. 하지만 1979년 노벨 물리학상을 받은 미국의 물리학자 스티븐 와인버그가 남긴 '우주에는 공짜 점심이 없다'라는 말처럼 인류가 자연의 에너지를 손해 없이 안전하게 활용할 수 있다는 기대가 어쩌면 섣부른 것일 수도 있습니다.

최근 친환경 에너지로 각광받고 있는 태양광, 풍력, 조력 발전도 예외는 아닙니다. 자연을 무분별하게 이용하면 대가를 치를 수 있다는 점을 경계해야 합니다.

이태현 전북 논산대건중 1

09

원전에서 발생하는 오염수와 폐기물에서 방사성 물질만 없앨 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

2011년 동일본 대지진으로 발생한 지진과 쓰나미로 후쿠시마 제1 원자력 발전소에서 폭발사고가 일어나 원자로 4기가 파괴됐습니다. 그 결과 방사성 물질이 누출돼 주변 지역을 오염시키고 있습니다. 후쿠시마 원전 사고의 여파는 10년이 지난 오늘날까지도 지속되고 있습니다.

최근에는 후쿠시마 원전의 노심에서 흘러나온 오염수의 태평양 방류 문제로 국제 사회가 떠들썩합니다. 오염수 내에는 대부분의 방사성 오염 물질과 달리 쉽게 제거할 수 없는 방사성 물질인 삼중수소(Tritium, T)가 들어 있기 때문입니다. 결국, 일본 정부는 앞으로 30년에 걸쳐서 삼중수소가 남아있는 오염수를 400배 이상 묽힌 후에 태평양으로 방류하기로 했습니다.

원전을 가동하는 과정에서 발생하는 폐기물을 처분하는 일이 불가능한 건 아닙니다. 방사성 폐기물에서 방사성 동위원소를 분리하는 기술로는 증발, 화학적 침전, 이온교환, 역삼투, 전기투석, 정밀여과 등 다양한 기술이 개발돼 있습니다. 방사선이 많이 나오지 않는 중준위 폐기물은 드럼통에 넣어서 콘크리트 구조물에 넣어둡니다. 사용 후 핵연료를 포함한 고준위 폐기물은 사용 기간이 50년 정도인 건식 저장시설을 이용하거나 지하 500m 깊이에 묻어야 합니다.

묽힘이 최선의 방법

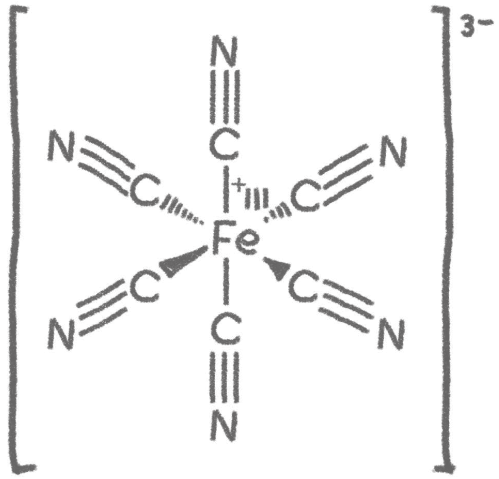
일본은 후쿠시마 사고 현장에서 발생한 오염수를 모아 대형 저장 탱크에 보관 중입니다. 보관된 양이 무려 125만 t(톤)에 이릅니다. 지금도 후쿠시마 원전에서는 오염수가 하루 140t씩 흘러나오고 있습니다. 오염수를 저장 탱크에 무한정 넣어둘 수는 없습니다. 저장 탱크가 사고로 파손될 수도 있고, 부식에 의해 누출될 가능성도 있습니다.

파괴된 핵연료에서 흘러나온 지하수가 방사성 물질로 심하게 오염돼 있는 건 사실입니다. 후쿠시마 원전 오염수에서는 세슘(Cs)-137을 비롯한 200여 종의 방사성 핵종이 검출되고 있습니다. 앞으로도 오염수는 계속 흘러나올 수밖에 없습니다. 일본 정부가 파괴된 핵연료를 수거해서 안전하게 관리하는 기술을 서둘러 마련해야 합니다.

오염수에 들어 있는 방사성 물질 중에서 삼중수소를 제외한 나머지는 이온교환수지를 이용하는 다핵종처리설비(ALPS)로 제거할 수 있습니다. 오염수가 ALPS 속 이온교환수지를 통과하면, 오염수에 녹아있던 방사성 핵종이 이온교환수지에 붙어있던 수소 이온이나 수산화 이온과 교환되는 식입니다. ALPS를 거친 처리수에 남아있는 방사성 물질은 삼중수소 이외엔 모두 국제적으로 허용되는 기준을 넘지 않습니다. 이는 국제원자력

기구(IAEA)도 인정하는 사실입니다.

ALPS 외에도 흡착제를 활용해 오염수 속 방사성 물질을 없앨 수 있습니다. 제올라이트와 같은 점토, 실리카, 알루미나, 산화 소듐으로 만든 흡착제, 친수성 하이드로젤에 프러시안 블루(페로시아닌화 철)를 고정한 흡착제 등이 개발되고 있습니다.



프러시안 블루

오염수 내의 세슘은 체내의 주요 전해질 중 하나인 포타슘과 화학적 성질이 비슷합니다. 이 때문에, 인체에 쉽게 흡수돼 포타슘을 대체하고 방사선을 내뿜는 매우 위험한 물질입니다. 원전 사고로 세슘을 흡입했을 때 치료제로 사용하는 프러시안 블루는 세슘과 빠르게 결합해 체외 배출을 촉진해 줍니다.

최근 세슘과 같은 방사성 핵종을 걸러내는 페로시아닌화 구리를 입힌 수 μm(마이크로미터·1μm는 100만 분의 1m) 크기의 수중 나노봇도 등장하고 있습니다. 니켈로 만들어진 이 로봇을 외부에서 원격으로 조정할 수 있어 방사성 폐기물을 원하는 위치로 옮길 수 있습니다. 작업자의 방사선 노출도 없습니다.

현재 저장 탱크에 들어 있는 오염수의 삼중수소 오염도는 리터당 58만 Bq(베크렐)입니다. 일본의 배출 기준 6만 Bq를 훌쩍 넘어서는 수준입니다. 처리수에서 삼중수소는 물 분자의 수소 자리를 대체해 T_2O 형태로 존재합니다. 삼중수소수와 물 분자는 화학적·물리적 성질이 매우 비슷하기 때

문에 걸러내는 일이 쉽지 않습니다.

오염수를 ALPS로 제거한 처리수 속 삼중수소 문제를 해결할 방법이 전혀 없는 것은 아닙니다. 처리수를 충분한 양의 바닷물로 묽히는 방법입니다. 처리수를 400배 이상 묽히면 삼중수소의 오염도를 일본 정부가 약속한 1500Bq 이하로 낮출 수 있습니다. 독성 물질에 의한 오염을 해결하는 가장 일반적인 방법은 오염 물질의 농도가 충분히 낮아지도록 묽히는 것입니다. 원전 오염수의 경우도 예외가 아닙니다.

물론 처리수를 바닷물로 묽히더라도 삼중수소의 총량은 변하지 않고 그대로 남아있습니다. 그렇다고 걱정할 이유는 없습니다. 방사성 오염 물질의 위험성은 '총량'이 아니라 '농도'에 비례하기 때문입니다. 1L의 처리수를 400배로 묽힌 부피에 들어 있는 삼중수소를 모두 마시는 것은 현실적으로 가능하지 않습니다.

후쿠시마 오염수에 들어 있는 삼중수소의 총량은 3g 수준으로 파악되고 있습니다. 한없이 넓은 태평양의 바닷물을 모두 심각하게 오염시키기에는 턱없이 적은 양입니다. 참고로 우리나라 동해에 한 해 동안 내리는 빗물에 들어 있는 삼중수소의 양이 대략 5g 정도입니다. 우주에서 날아오는 높은 에너지의 우주선(cosmic ray)에 의해서 자연적으로 만들어진 삼중수소입니다.

고준위 폐기물의 처분

사용 후 핵연료를 비롯한 고준위 폐기물에 들어 있는 방사성 동위원소 중에는 물에 잘 녹는 수용성 물질과 그렇지 않은 물질이 있습니다. 물에 녹지 않는 비수용성 동위원소는 지층에서 쉽게 이동하지 못하는 특징이 있습니다. 35cm 두께의 점토층에 묻어 두면 환경을 오염시킬 걱정을 할 필요가 없습니다. 방사성 핵종의 원자수가 처음의 절반으로 줄어드는 데 걸리는 시간을 반감기라고 합니다. 반감기 430년의 아메리슘-241은 점토층을 통과하는 데에 19만 년이, 그리고 반감기 2만 4360년의 플루토늄은 31만 년이 걸립니다.

하지만 물에 잘 녹는 수용성 동위원소는 지하수에 녹아서 멀리까지 이동할 수 있어서 철저한 관리가 필요합니다. 다행히 수용성 동위원소는 반감기가 매우 짧습니다. 스트론튬(Sr)-90은 반감기가 29년이고, Cs-137은 30년에 지나지 않습니다. 그런 동위원소는 부식이 잘 안 되는 구리 용기에 넣어서 지하에 묻어두면 최대 300년까지 안전하게 관리할 수 있습니다.

방사성 폐기물을 유리 격자에 넣어두는 유리화 기술도 있습니다. 이온 교환 수지를 이용해 방사성 원소를 추출한 뒤 용광로에 넣어서 가열해 유리로 만드는 기술입니다. 실제로 미국 오하이오주 신시내티 남서쪽에 위치한 페르나드 보존장에서 사용하는 기술입니다.

사용 후 핵연료의 양이 엄청나게 많은 것도 아닙니다. 한국이 운영하는 25기의 원전에서 발생하게 될 사용 후 핵연료의 양은 모두 합쳐도 약 5만 t을 넘지 않습니다. 석탄 화력 발전소에서 발생하는 폐기물의 양과는 비교할 수도 없을 정도로 적습니다. 더욱이 사용후 핵연료에서 방사성 물질만 분리하는 기술을 개발하면 방사성 폐기물의 양을 5% 수준으로 줄일 수도 있습니다.

반감기는 방사성 동위원소가 붕괴하면서 방출되는 방사선의 양에 반비례합니다. 반감기가 길어지면 방출되는 방사선의 양은 오히려 줄어들게 됩니다. 우라늄 등 반감기가 긴 동위원소를 무작정 무서워할 이유가 없다

는 뜻입니다. 실제로 화강암과 같은 화성암에는 반감기가 매우 긴 우라늄이나 토륨(Th)과 같은 방사성 동위원소가 들어 있습니다. 그렇다고 화강암이 우리에게 심각한 피해를 줄 것이라고 걱정할 필요는 없습니다.

권윤규 서울 불암초 5
최명현 인천 청람중 2

10 입자의 움직임을 눈으로 볼 수 있을까요

석원경 교수가 답하다

사람들은 오래전부터 물체의 움직임에 주목해왔습니다. 별의 움직임에서 우주의 근본 원리를 알아내려고 노력했고, 주변 사물의 움직임에서 물체 운동의 기본 법칙을 도출하려 애썼습니다. 그러나 물체의 움직임을 정확하게 파악하기는 쉽지 않았습니다. 갈릴레오 갈릴레이가 지동설을 주장할 때까지 우주는 지구를 중심으로 움직이는 것으로 여겨졌습니다. 아이작 뉴턴이 관성의 법칙을 알아내기까지는 정지 상태가 물체의 본성이라는 아리스토텔레스의 주장을 믿었습니다.

원자의 존재를 밝혀준 꽃가루

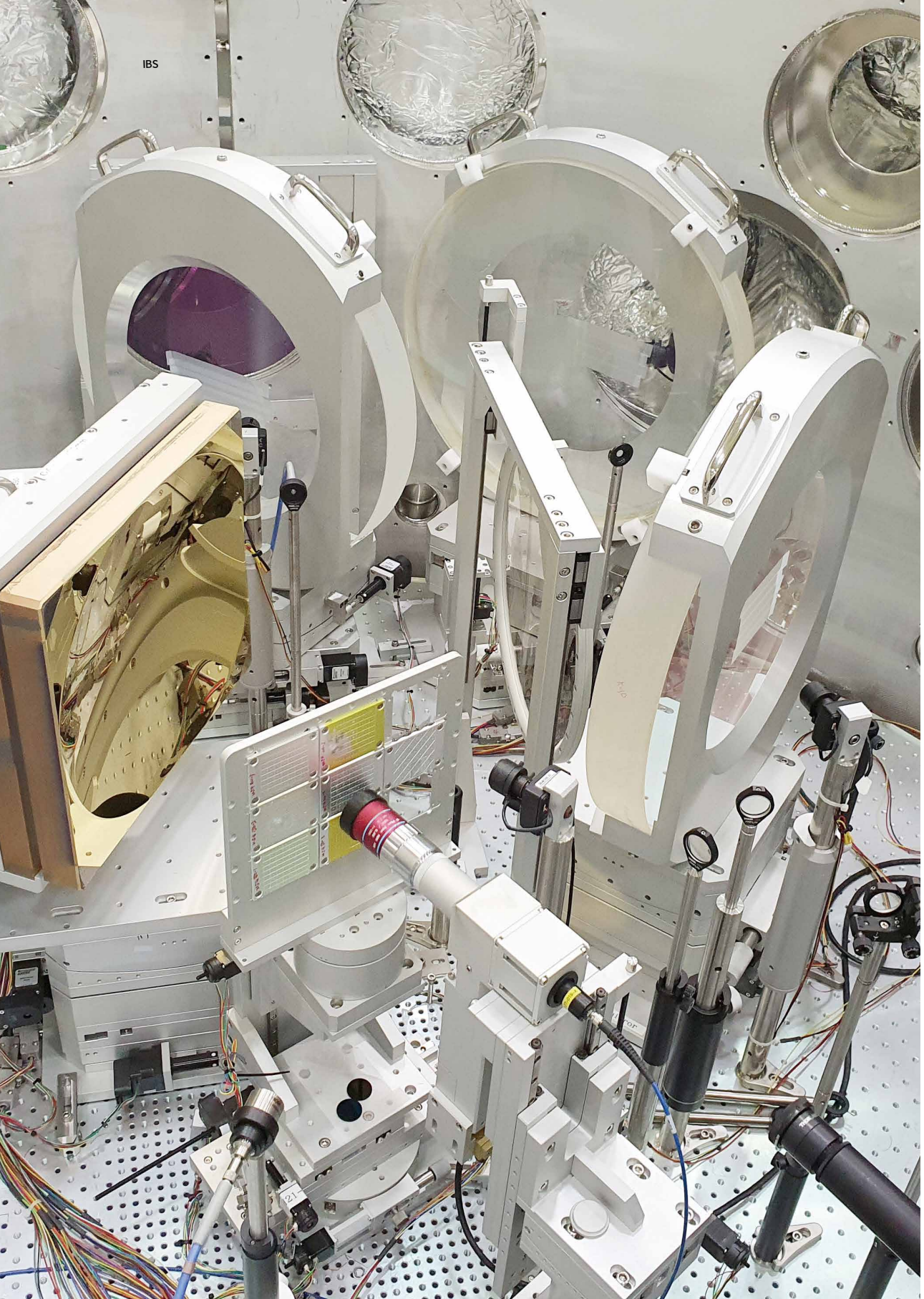
1827년 스코틀랜드의 식물학자 로버트 브라운은 물에 떨어진 꽃가루를 현미경으로 관찰하다 꽃가루가 마치 살아있는 생물처럼 활발하게 움직이는 모습을 목격했습니다. 처음에 브라운은 꽃가루가 불규칙적으로 움직이는 이유가 그 속에 숨어있는 작은 정령 때문이라고 추측했습니다.

브라운은 자신의 추측을 검증하기 위해 유리, 금속 등 무기물을 곱게 간 가루를 준비했습니다. 그리고 이 가루를 액체에 뿌렸을 때, 입자가 꽃가루와 똑같이 움직인다는 사실을 확인했습니다. 더욱이 액체의 온도가 높아지면 입자의 움직임이 더욱 활발해졌습니다. 브라운은 이를 통해 입자의 운동이 열에 의한 액체의 대류가 보여주는 현상이라고 짐작했습니다.

이러한 브라운 운동에 대한 정확한 해석은 1905년 물리학자인 알베르트 아인슈타인에 의해서 제시됐습니다. 그는 브라운 운동이 발생하는 원인이 꽃가루가 주변의 액체 분자와 충돌하며 움직이기 때문이라고 설명했습니다. 또 입자의 확산 모형을 이용해서 꽃가루 입자가 불규칙적으로 움직이도록 만든 물 분자의 크기와 질량을 추정했습니다.

액체 분자가 꽃가루에 부딪혀 꽃가루를 움직인다는 것은 액체가 분자, 더 나아가 원자라는 작은 입자로 구성돼 있다는 사실을 증명합니다. 물질이 더 쪼갤 수 없는 원자로 구성되어 있다는 고대 그리스 시대 데모크리토스의 '원자론'은 사실 과학적 근거를 제시하지 못했던 막연한 추론이었습니다.

1808년 영국의 존 돌턴이 제시했던 '원자설' 역시 다양한 화학 반응을 설명하기 위한 유용한 수단에 그쳤습니다. 19세기 말 원자의 존재를 근거로 통계 열역학 이론을 정립했던 오스트리아의 물리학자 루트비히 볼츠만이 원자설을 거부하는 에른스트 마흐를 비롯한 물리학자들의 격렬한 반대에 절망해 스스로 목숨을 포기한 일도 있습니다. 아인슈타인이 제대로 파악한 브라운 운동에 대한 해석은 물질을 구성하는 원자의 존재를 가장 확실하게 입증해 준 이론입니다.



빠르게 움직이는 입자

분자 세계에서 움직임은 상상을 넘어설 정도로 빠릅니다. 수소 기체의 경우 상온에서 초속 1700m의 엄청난 속도로 날아다닙니다. 분자 사이의 화학 반응도 펨토초(femtosecond, 1펨토초는 10^{15}분의 1초) 단위로 빠르게 진행됩니다. 얼음이 녹는 과정은 외부에서 충분한 에너지가 전달된 후에 느린 속도로 진행되는 것처럼 보입니다. 그러나 펨토초 단위로 관찰한 결과에 따르면, 에너지가 얼음에 제대로 전달되기도 전부터 얼음을 이루는 물 분자 사이의 결합이 깨지기 시작하는 것으로 밝혀졌습니다.

빠르게 움직이는 입자를 관찰하기 위해서는 짧은 시간 동안에만 작동하는 초고속 펄스 레이저가 필요합니다. 입자와 충돌해 발생한 펄스는 충돌 순간의 정보를 갖고 있어 이를 분석하면 충돌 시 입자의 상태를 파악할 수 있습니다. 미국의 화학자 아흐메드 즈웨일은 펨토초 레이저를 이용해서 화학 반응의 중간 과정을 관찰하는 '펨토 화학'을 개척한 공로로 1999년 노벨화학상을 받았습니다. 펨토 화학 덕분에 우리는 녹색 식물의 엽록소에서 일어나는 광합성 과정을 관찰할 수 있었습니다. 우리 눈의 망막에서 물체의 영상이 전기 신호로 바뀌어 시신경으로 전달되는 과정도 펨토 레이저로 찍어서 영화처럼 느린 속도로 살펴볼 수 있게 됐습니다.

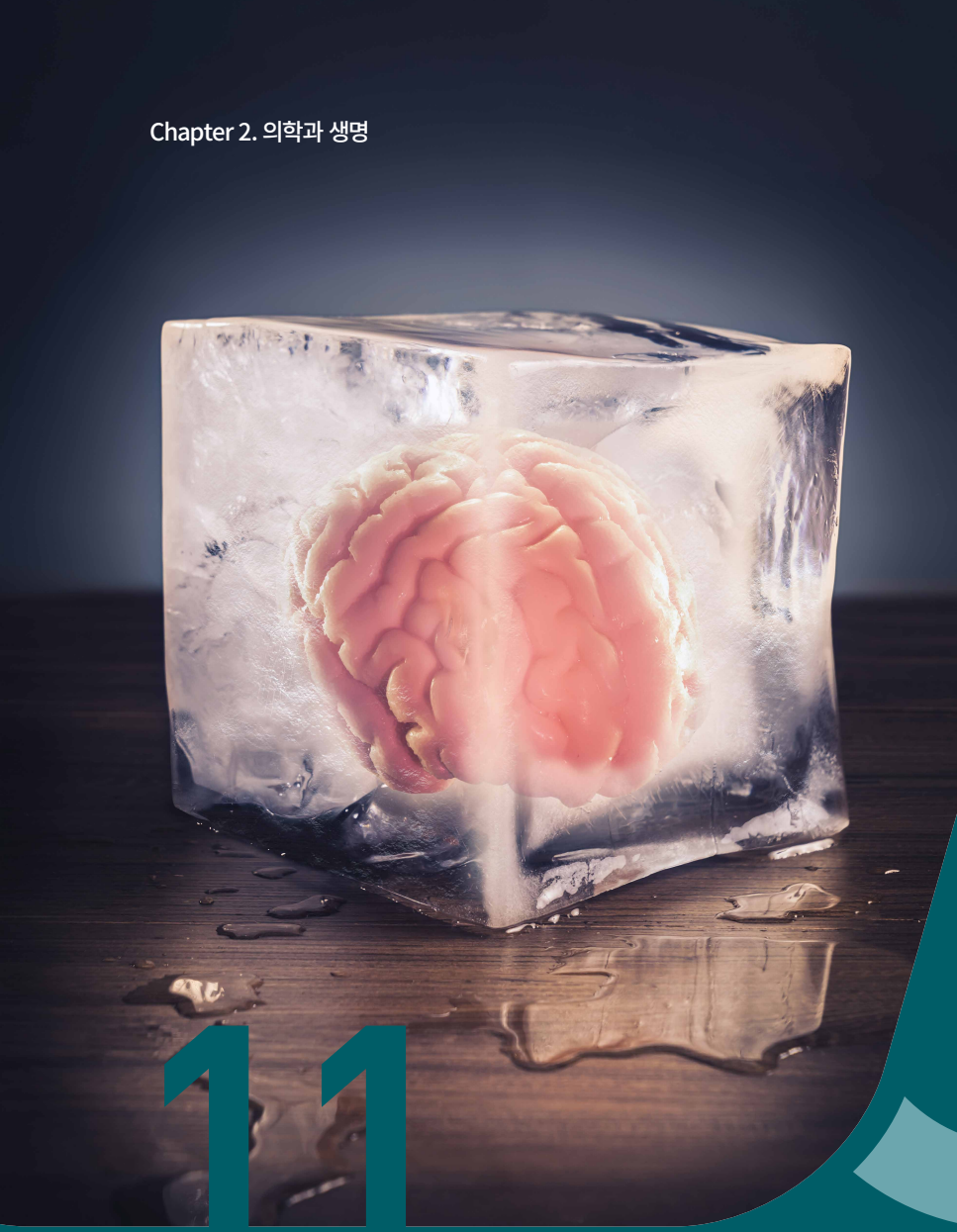
한국의 기초과학연구원(IBS)에서도 펨토 화학을 연구하고 있습니다. X선 영역의 전자선이 펨토초 펄스를 만들어 내는 자유전자 레이저를 이용한 회절 실험에서 금 원자 3개가 결합하는 과정을 실시간으로 촬영했습니다. 그 결과 35펨토초 동안 2개의 금 원자가 먼저 결합하고, 세 번째 금 원자가 결합하기까지는 350펨토초가 걸린다는 사실을 확인했습니다. 서로 화학적으로 결합한 3개의 금 원자가 대칭 진동하는 모습도 관찰했습니다.

펨토초 기술을 이용하면 화학 반응이 일어날 때 원자 속 전자구름의 모양에 대한 정확한 정보도 얻을 수 있을 것입니다.

초고속 전자 회절 기술을 이용해서 원자의 움직임을 연속적으로 관찰할 수 있는 전자 카메라도 개발됐습니다. 원자의 순간적 움직임을 관찰하기 위해서는 특별한 방법을 사용해야 합니다. 레이저 펄스를 쪼여 원자가 움직이게 한 뒤 전자빔을 이용해서 이를 관찰하는 방식입니다. 전자 카메라의 해상도는 전자빔의 세기에 비례합니다. 하지만, 서로 반발하는 성질을 가진 전자를 좁은 공간 속에 모아 빔 형태로 쏘아 보내기는 어렵습니다. 빔 속에 있는 전자가 서로 반발해 빔이 퍼지면서 전자빔의 밝기가 약해지는 문제도 있었습니다. 이를 극복하기 위해 전자빔이 90도 각도로 돌아 나와서 시료에 도달하는 '90도 휨' 구조를 만들었습니다. 전자가 모여 있는 시간이 아주 짧기에 촬영 속도와 밝기 문제를 해결할 수 있습니다.

이제는 아토초(attosecond, 1아토초는 10^{18}분의 1초) 단위의 시간 분해능을 가진 전자 카메라도 개발되고 있습니다. 한국과학기술연구원(KIST)에서는 고출력의 펨토초 레이저를 아르곤 기체에 쬐는 방식으로 아토초 펄스를 만들어 헬륨 원자가 이온화하는 과정을 관찰했습니다. 아토초 카메라를 사용하면 원자, 분자, 나노 물질의 내부에서 전자가 어떻게 움직이는지도 관찰할 수 있을 것으로 기대하고 있습니다.

플라스마 내의 전자가 상대적으로 가속되거나 느려지면서 생성되는 아토초 펄스를 제어해 더욱더 짧은 젭토초(zeptosecond, 1젭토초는 10^{21}분의 1초) 펄스를 만드는 기술도 개발되고 있습니다. 젭토초 펄스가 등장하면 원자핵의 운동도 연구할 수 있게 될 것입니다.



박준후 경기 샘모루초 4

11

냉동인간이 될 수 있을까요

A

석원경 교수가 답하다

냉동인간은 현대 의학으로 치료가 불가능한 병에 걸린 환자를 영하 196°C(절대온도 77.15도)의 액체 질소로 냉동시킨 뒤, 의학이 충분히 발전한 미래에 되살려보겠다는 창의적인 아이디어에서 탄생했습니다. 냉동인간은 호흡과 혈액 순환이 중단된 뒤에도 괴사하지 않도록 저온에서 세포를 냉동 보존하게 되는데, 이를 온전하게 회생시키는 기술이 필요합니다. 또 얼리는 과정에서 세포를 파괴해 버릴 수 있는 혈액과 세포액을 몸을 냉동하기 전 모두 동결 보호액으로 교체해야 합니다.

국부적인 저온 치료법

대부분의 화학 반응은 온도가 내려가면 속도가 느려집니다. 따라서 몸속에서 일어나는 생리 작용도 느려지며, 감각도 둔화하고, 움직임도 더뎌집니다. 영양 섭취를 위한 먹이 활동도 어렵게 되지요.

그래서 개구리·뱀·도마뱀·악어와 같은 변온동물은 날씨가 너무 추워지면 아예 깊은 겨울잠에 빠져버립니다. 그렇다고 몸 전체가 완전히 얼어버리게 두는 것은 아닙니다. 혈액 속의 포도당 농도를 매우 높게 유지해서 체액이 얼지 않도록 합니다. 어는점 내림 현상을 동물이 활용하는 것입니다. 결국, 심장이나 폐와 같은 몸속의 주요 생체 기관은 겨울잠을 자는 동안에도 계속 작동할 수 있게 됩니다.

36.5℃의 체온을 유지해야만 하는 사람의 경우는 사정이 다릅니다. 체온이 2℃ 이상 내려가거나 올라가면 감각·호흡·혈액순환 등이 어려워지고, 자칫하면 목숨을 잃을 수도 있습니다. 그래서 사람을 비롯한 항온동물은 체온을 일정하게 유지해 주는 복잡한 생리 구조를 갖추고 있고, 실제로 체온 유지에 많은 에너지를 소비합니다. 날씨가 덥거나 운동을 많이 하면 땀을 흘리는 것도 그런 이유 때문입니다.

질병을 치료하기 위해 국부적으로 온도를 낮추기도 합니다. 체온이 떨어지면 혈관이 축소해 혈액 공급이 줄어들고 염증이 진행되는 속도도 느려지기 때문입니다. 근육통을 풀거나 부기를 빼주는 목적으로 사용하는 얼음찜질은 그런 원리를 이용하는 것입니다.

몸 전체의 체온을 일정한 시간 동안 정상보다 2~4℃ 정도 떨어뜨리는 저체온 요법도 있습니다. 수술이나 질병 등의 이유로 멈췄던 심장 박동이 다시 회복되는 과정에서 뇌와 장기에 발생하는 손상을 예방하기 위한 시도로, 심장이 정지됐던 환자의 생존율을 어느 정도 높일 수 있습니다.

신체의 일부 조직을 완전히 냉동시키는 치료법도 있습니다. 조직을 액체 질소로 냉동시키면 혈액과 세포액이 얼어서 부피가 늘어나고, 이 과정에서 세포가 파괴되거나 괴사하게 됩니다. 사람유두종 바이러스(human

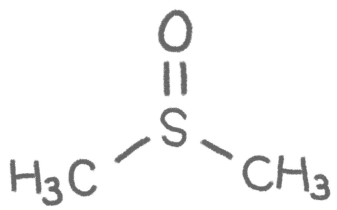
papilloma virus·HPV)에 의해서 발생하는 사마귀는 냉동 치료법으로 간단하게 치료할 수 있습니다.

인체 냉동 기술에 화학이 필요하다

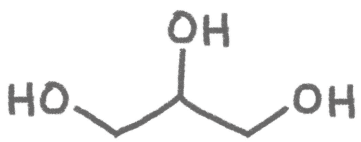
아주 짧은 시간 동안 액체 질소에 넣었던 금붕어를 다시 물에 넣어두면 되살아나기도 합니다. 그러나 액체 질소에 더 오래 넣어둬서 체액과 혈액이 완전히 얼어버린 금붕어는 사정이 다릅니다. 몸이 어는 과정에서 몸속의 주요 장기와 신경계에 심각한 손상이 발생하기 때문입니다. 생리적인 조직 구조가 훨씬 더 복잡한 포유류의 경우에는 냉동시킨 뒤 소생시키는 것이 훨씬 더 어렵습니다. 2005년 미국 피츠버그대 연구팀이 개의 혈액을 특수 제작한 차가운 용액으로 대체하고 상당한 시간이 흐른 후에 소생시키는 실험에 성공한 사례가 있습니다. 같은 해 독성이 강한 황화 수소(H_2S)를 채운 상자에 가둬 쥐의 체온을 13℃까지 떨어뜨린 뒤 6시간 지난 후에 소생시키기도 했습니다.

과연 사람을 액체 질소로 냉동시켰다고 다시 소생시킬 수 있을 것인지는 아무도 알 수 없습니다. 그런 실험은 윤리적인 이유로 절대 허용되지 않습니다. 자칫하면 생명을 잃어버릴 위험도 있기 때문입니다. 더욱이 한국에서는 냉동인간과 관련한 모든 실험이 법률적 · 제도적으로 엄격하게 금지돼 있습니다.

더 이상의 치료가 불가능한 임종 직전의 환자에 한해 동정적 치료(compassionate therapy)로 인체의 냉동을 허용하는 경우가 있습니다. 동결 보호제를 넣어 세포의 내부에서 얼음 결정이 성장하면서 세포막을 파괴하는 것을 막습니다. 인체의 모든 세포와 조직을 동시에 급속 냉각시키는 기술



다이메틸 설폭사이드

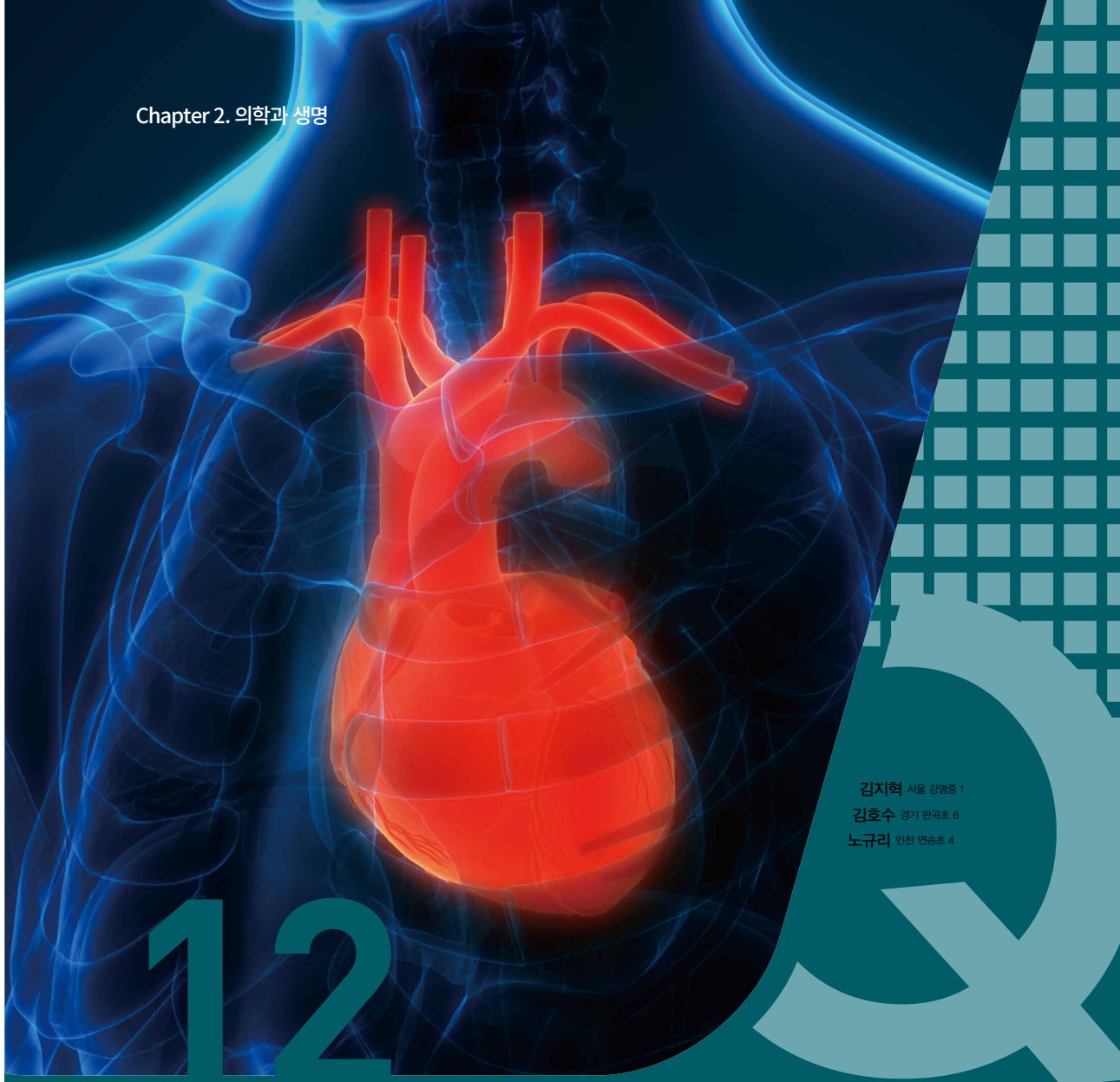


글리세린

이 필요합니다. 냉동시킨 시신은 현재 동결 보호제로 사용하고 있는 다이메틸 설폭사이드(dimethyl sulfoxide) 혹은 글리세린(glycerin) 대신에 세포에 독성이 없는 부동액으로 교체한 후에 액체 질소 탱크에 넣어 보존해야 합니다.

냉동시켰던 시신을 소생시키는 일도 만만치 않습니다. 지금까지도 냉동 상태의 세포나 조직을 복구하는 기술은 개발하지 못하고 있습니다. 특히 냉동 상태의 뇌를 소생시킬 수 있을 것인지는 매우 어려운 과제입니다. 인간 냉동 전문 업체는 액체 질소에서 뇌를 보존하면 뇌 속 정보도 그대로 보존된다고 주장합니다. 하지만 어떤 방식으로 그 정보를 되살려낼 수 있는지는 알지 못합니다. 소생한 냉동 인간이 과거에 알고 있는 언어와 기억을 모두 잃어버린다면 그저 다른 사람으로 태어났다고 볼 수밖에 없기에, 냉동 인간을 치료의 수단으로 이용하겠다는 아이디어는 의미를 찾기 어려워집니다.

냉동 인간을 완벽하게 소생시키더라도 상황은 간단하지 않을 것입니다. 냉동 인간에게 죽은 사람 이상의 법적 지위를 인정해 줄 수 있느냐 역시 문제가 될 것입니다. 소생한 냉동 인간이 과연 의미 있는 삶을 계속할 수 있을 것인지는 아무도 장담할 수 없습니다.



김지혁 서울 강명중 1
김호수 경기 판곡초 6
노규리 인천 연송초 4

12 몸속 장기를 모두 인공 장기로 만들 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

인공 장기는 기계적 그리고 생리적 기능을 상실한 심장 · 폐 · 신장 · 팔 · 다리 · 혈관 · 피부 · 치아 등의 인체 '장기(organ)'를 대체하기 위해서 인공적으로 만든 것입니다. 수술로 인체에 넣어 주지만, 신체의 외부에 장착하기도 합니다. 인공 장기의 역사는 짧지 않습니다. 그러나 아직도 대부분의 인공 장기는 이식이 급박한 환자에게 제한적으로 사용되고 있습니다. 현재 기술로는 여전히 다른 사람의 장기를 이식하는 것이 더 안전하기 때문입니다. 하지만 기술이 계속 발전하면 인공 장기도 실제 장기처럼 안전하게 사용될 것으로 기대됩니다. 몸속의 주요 장기를 모두 인공으로 바꾼 인간을 사이보그(cyborg)라고 부릅니다. SF 소설이나 영화에 많이 등장하지요. 사이보그의 수준을 넘어선 인조인간을 트랜스휴먼(transhuman) 또는 포스트휴먼(posthuman)이라고 부릅니다. 우리가 인조인간의 등장을 앞으로 경험하게 될 것인지는 분명하지 않습니다.

인공 장기 개발, 어디까지 왔나

사람의 몸을 구성하는 약 60조 개의 세포 중에서 비슷한 형태와 기능을 가진 세포가 모여 '조직(tissue)'을 이룹니다. 근육, 신경, 상피, 연골, 뼈, 혈관, 림프와 같은 다양한 조직 세포들이 모여서 특정한 생리적 기능을 수행하는 장기가 만들어집니다. 감각, 소화, 순환, 생식 등에서 다양한 기능을 수행하는 장기들이 우리의 일상적인 생활을 가능하게 해주고 아울러 건강을 지켜주는 역할을 합니다. 그런 장기의 작동에 문제가 생기면 신체 장애가 발생하게 되고, 자칫하면 목숨이 위태로워질 수도 있습니다.

인공 장기 개발에서 가장 널리 알려진 사례는 인공 심장입니다. 1937년 소련의 블라디미르 데미코프가 최초의 인공 심장을 개발해 개에게 이식했습니다. 미국 웨인주립대에서는 1952년 심장 수술을 하는 동안 처음으로 인공 심폐기를 사용했습니다. 1982년 미국 유타대의 로버트 자빅이 인체에 이식할 수 있는 완벽한 인공 심장을 개발했습니다. 첫 이식 환자는 112일을, 두 번째 환자는 620일을 생존할 수 있었습니다. 자빅이 개발한 인공 심장은 지금까지 1350명에게 이식됐습니다. 하지만 18개월 이상 생존한 경우는 없었습니다.

뇌, 위, 그리고 일부 내분비 기관을 제외한 거의 모든 인공 장기가 개발되고 있습니다. 의족과 의수는 현대 의학이 정립되기 전부터 개발되기 시작했습니다. 아주 가볍고 튼튼하게 만들 수는 있지만, 사용자의 의지에 따라 자유롭고 편리하게 움직이도록 만드는 일은 여전히 어렵습니다. 하지만 최근에는 직접 신경에 접속된 전극에서 신경 전위를 계측하고 훈련해 자신의 팔과 같이 조작할 수 있다고 합니다. 인공 치아(임플란트)도 널리 사용되고 있습니다. 물리적으로 강도가 매우 높은 인공 치아를 만들 수는

있지만, 음식을 씹을 때의 감각을 정확하게 느낄 수 없기에 자칫 턱뼈에 문제가 생기는 부작용이 나타나기도 합니다.

인공 적혈구도 개발하고 있습니다. 인체의 헤모글로빈에 합성 고분자를 코팅한 산소 운반체(HBOC·hemoglobin based oxygen carrier)를 사용합니다. 고분자 코팅은 헤모글로빈이 혈액 속에 들어 있는 일산화 질소(NO)와 반응하지 않도록 하고, 혈액의 수소 이온 농도 지수(pH)에 따라서 산소를 포획하거나 방출하도록 만들어줍니다. HBOC는 혈액형에 상관없이 누구에게나 사용할 수 있고, 실온에서 3년 동안 안전하게 보관할 수도 있습니다. 그러나 심장 발작의 부작용이 나타나기도 해서 현재는 동물에게만 사용하도록 제한돼 있습니다.

인공 장기 개발은 결코 쉬운 일이 아닙니다. 지금까지 성능과 안전성이 확실히 검증되지 않은 인공 장기는 함부로 사용할 수 없도록 엄격하게 규제를 해왔습니다. 인공 심장을 개발하기 위해서는 광범위한 동물 실험이 필요하고, 인체에 적용하기 위해서도 상당한 제약이 있습니다. 인공 장기의 안전성을 확인할 수 있는 새로운 기술이 절실하게 필요합니다.

바이오 소재의 개발

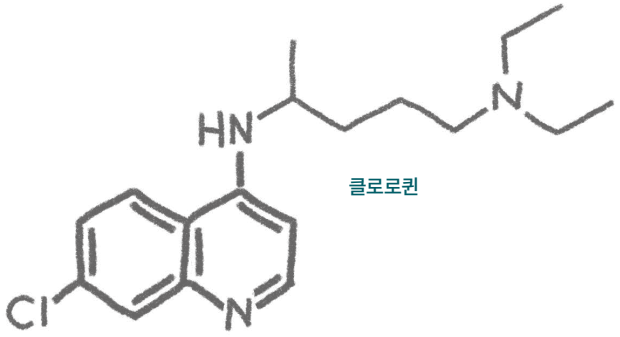
몸속의 장기는 다양한 기능을 수행합니다. 혈액을 기계적으로 순환시키기도 하고, 화학적으로 걸러주기도 합니다. 혈액을 순환시키면서 혈액에 산소를 공급해주는 기계 장치를 만들 수는 있습니다. 실제로 병원의 수술실에서는 심폐기(pump-oxygenator)를 사용합니다. 그러나 그런 장비를 사람의 심장 정도로 작게 만드는 일은 쉽지 않습니다. 더욱이 몸 상태에 따라 자동으로 혈액의 순환 속도를 조절하도록 만들어야 합니다. 절대 고장이 나

지 않도록 만드는 일도 쉽지 않습니다.

인공 장기 개발에서 가장 어려운 일은 그런 장기가 몸속의 다른 조직과 물리적, 화학적, 생리적으로 조화를 이루는 생체 적합성(biocompatibility)이 있어야 한다는 점입니다. 인공 장기에서 유해물질이 녹아 나오거나, 인공 장기와 접촉하는 조직이나 혈액이 굳어버리거나, 인체의 면역계가 인공 장비와 거부반응을 일으키는 소재는 절대 사용할 수가 없습니다. 지나치게 딱딱하거나 무거운 소재도 인공 장기에 사용하는 바이오 소재(biomaterial)가 될 수 없습니다.

가장 흔하게 사용되는 바이오 소재는 역시 고분자 물질입니다. 폴리카보네이트(PC), 폴리염화비닐(PVC), 폴리에틸렌(PE) 등의 고분자는 쉽게 휘어지는 특성이 있고, 원하는 기계적 성질을 가지도록 다양하게 변화시킬 수 있다는 장점이 있습니다. 인공 뼈나 인공 치아의 경우에는 수산화 인회석과 같은 광물질, 키토산과 같은 다당류, 또는 타이타늄 합금 등을 사용하기도 합니다. 바이오 소재의 개발은 미래 화학의 중요한 과제 중 하나입니다.

인공 장기의 개발이 어려운 경우에는 동물의 장기를 이식하기도 합니다. 이를 이종 장기 이식이라고 부릅니다. 물론 무턱대고 아무 동물의 장기나 이식할 수 있는 것은 아닙니다. 이종 장기 이식에 쓰이는 동물의 장기가 사람의 장기와 비슷해야 하고 면역반응도 억제할 수 있어야 합니다. 인체의 면역계는 외부의 이물질에도 반응하지만 다른 생명체의 조직과 세포를 공격하는 역할도 합니다. 그렇기에 이종 장기 이식을 하기 위해서는 면역세포가 동물의 장기를 공격하지 않도록 해야 합니다. 그렇기에 사람의 장기와 크기, 기능이 비슷한 돼지를 유전학적으로 개량하는 연구가 현재 활발히 진행되고 있습니다.



클로로퀸

어떠한 조직으로도 분화가 가능한 줄기세포를 이용해서 인공 장기를 만드는 '오가노이드(organoid)'에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있습니다. 배아줄기세포는 물론이고 체세포에서 만들어낸 유도만능줄기세포를 이용할 수 있습니다. 인체의 장기와 크기 및 기능이 유사한 미니 돼지의 장기를 이용하기도 합니다. 오가노이드는 뇌나 장의 기능을 연구하는 목적으로도 활용되고 있습니다. 특히 임상 시험 비용과 시간을 상당히 줄이는 역할도 할 수 있습니다.

오가노이드는 바이러스의 감염과 치료를 연구할 때에도 유용하게 쓰입니다. 미국의 스탠퍼드대 연구팀은 허파꽈리 오가노이드를 이용해 신종 코로나바이러스 감염 시 바이러스가 세포 표면의 ACE2 수용체뿐만 아니라 기관지의 곤봉 세포(club cell)와 결합한다는 사실을 밝혔습니다. 최근에는 신종 코로나바이러스 감염증(코로나19) 치료제의 효능 시험 연구에 오가노이드를 사용했습니다. 말라리아 치료제 클로로퀸은 원숭이 신장 암세포를 배양한 실험에서는 코로나19 치료에 효과를 보여 한때 바이러스 특효약으로 알려졌지만, 사람을 대상으로 하는 임상 시험에서는 실패했습니다. 네덜란드의 휘브레흐트 오가노이드 연구소는 장 오가노이드를 이용해 코로나19에 감염되면 소화 이상, 설사, 구토가 발생하는 이유를 알아냈으며, 아울러 클로로퀸이 바이러스 감염증 치료에 효과가 없음을 나중에 확인했습니다. 오가노이드로 먼저 실험했더라면 세상을 잠시나마 혼란에 빠뜨리지는 않았을 것입니다.

이렇듯 인공 장기의 쓰임새는 무궁무진하며 인공 장기 기술은 빠르게 발전하고 있습니다. 인공 장기가 우리 몸을 대체할 시기가 언제 올지는 확실하지 않습니다. 다만 머지않은 미래에 우리 몸에 필요한 모든 장기를 인공적으로 만들어 내는 기술을 기대해 볼 만합니다.

마지훈 경기 부흥초 2

13

새치나 흰머리가 안 나게 만들 수 있을까요

석원경 교수가 답하다

검은 머리카락이 파 뿌리처럼 희게 변하는 흰머리(백발)는 노화의 가장 대표적인 현상입니다. 노화된 모낭 세포가 흑색·갈색·적색의 멜라닌(melanin) 색소를 충분히 생성하지 못하면 머리카락은 주성분인 케라틴(keratin)이라는 단백질 때문에 흰색으로 보이게 됩니다. 흰머리는 인종에 상관없이 누구에게나 나타날 수 있습니다. 흰머리는 대체로 30대 이후부터 나타나기 시작합니다. 50대를 넘어서면 대부분 검은 머리를 그리워하게 됩니다.

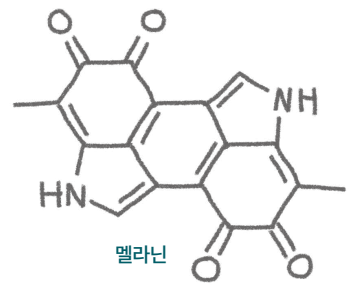
흰머리가 시작되는 나이와 모양은 주로 유전으로 결정됩니다. 물론 질병이나 약물에 의해 일시적으로 흰머리가 나타나기도 합니다. 특정 부위의 머리카락만 부분적으로 희게 변하는 것은 '새치'라고 합니다. 스트레스를 많이 받으면 머리카락이 갑자기 하얗게 센다고 하지만, 의학적 근거는 확실하지 않습니다. 하지만 스트레스 때문에 생성되는 활성 산소가 노화를 촉진하는 것은 분명하기에, 흰머리가 빨리 생긴다는 정황은 있습니다. 사람은 대부분 흰머리에 거부감을 많이 느낍니다. 그렇지만 흰머리나 새치를 잘못 뽑으면 자칫 모낭이 손상돼 머리카락이 아예 나지 않을 수도 있기에, 모발 건강을 생각한다면 흰머리는 뽑지 않고 자르는 것이 좋습니다.

정체성·신분의 상징에서 패션으로

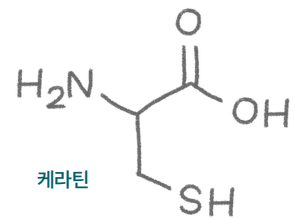
모낭에서 가늘게 자라는 모발은 포유류의 독특한 신체적 특징입니다. 사람의 경우에는 머리를 비롯한 일부 신체 조직 외에서의 모발은 가는 솜털 수준으로 퇴화했습니다. 체온 유지에 도움을 주면서 동시에 직사광선을 막아주는 생리적 기능을 지닌 머리카락이 집중적으로 남아있습니다.

헤어스타일은 미용이나 패션의 매우 중요한 수단이며, 의복과 함께 시대와 지역에 따라 변화해왔습니다. 거의 모든 문화권에서 머리 모양은 집단의 정체성과 사회적 신분을 상징하는 중요한 수단이었습니다. 전통적으로 우리는 머리를 자르지 않았습니다. 어릴 때는 긴 머리를 땋았고, 성인이 되면 상투를 짜거나, 쪽을 지었습니다. 머리를 짧게 잘라야 한다는 단발령은 민족정신을 훼손하려는 야만적인 시도로 인식됐습니다. 오늘날 자유 민주주의 사회에서 헤어스타일은 사회적 신분이 아니라 개성을 드러내는 패션 수단으로 활용됩니다.

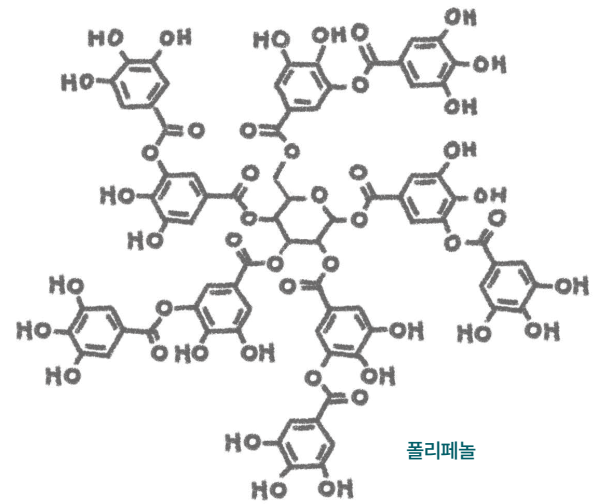
머리카락은 두피에 있는 모낭(hair follicle)의 케라틴으로 만들어지는 모간(hair shaft)에 해당합니다. 모낭의 특성에 따라 머리카락의 특징이 달라집니다. 머리카락의 수는 대략 12만 개 정도이지만, 개인에 따라 상당한 차이가 있습니다. 머리카락은 하루에 0.3mm 정도 성장하고, 2~6년 정도 지나면 성장을 멈추고 탈모가 진행되고, 모낭에서는 새로운 머리카락이 자라



멜라닌



케라틴



폴리페놀

게 됩니다.

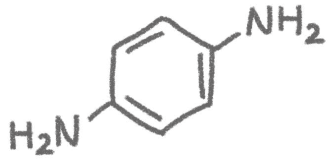
지름이 50~70μm 정도인 머리카락은 3개의 층으로 구성돼 있습니다. 가장 내부의 모수질(medulla)과 가장 바깥의 모표피(cuticle) 사이에 있는 모피질(cortex)이 머리카락의 특성을 결정합니다. 머리카락의 색깔은 모피질에 들어 있는 멜라닌 입자의 수·형태·분포에 의해서 결정됩니다. 멜라닌은 타이로신(tyrosine)이라는 아미노산에서 합성되는 폴리페놀(polyphenol) 중합체로서 열·화학물질·자외선에 내성이 있습니다. 멜라닌은 검은색이나 갈색을 띠는 유멜라닌(eumelanin)과 붉은색을 띠는 페오멜라닌(pheomelanin)으로 구분하기도 합니다. 멜라닌의 종류와 양에 따라서 머리카락이 금발이나 노란색이 되기도 합니다.

멜라닌 색소는 머리카락을 화학적으로 보호해 주는 역할을 합니다. 특히 고온, 중금속·산화제, 자외선을 차단해 주는 역할을 합니다. 멜라닌의 화학적 보호 능력은 카복시기(-COOH) 혹은 하이드록시기(-OH)가 금속 이온과 단단히 결합한 상태인 킬레이트가 되기 때문입니다. 그런 멜라닌은 머리카락에서만 발견되는 것이 아닙니다. 피부색도 멜라닌에 의해서 결정됩니다. 백인의 피부에는 멜라닌이 거의 없고, 흑인의 피부에는 다량의 멜라닌이 들어있습니다. 눈의 홍채와 속귀(內耳)의 혈관에서도 멜라닌이 발견됩니다. 몸에서 멜라닌을 합성하지 못하면 백색증(albinism)이 나타나기도 합니다.

화학적 염색이 대안

흰머리 자체가 건강에 문제가 되는 것은 아닙니다. 그러나 흰머리 때문에 자존감이 떨어진다고 느끼는 사람들이 적지 않습니다. 최근에는 모근에서 자라는 머리카락을 원하는 색깔로 만들어주는 새로운 방법이 시도되기는 합니다. 사과와 같은 과일의 색을 갈색으로 변화시키는 폴리페놀과 같은 화학물질을 이용합니다. 폴리페놀에 있는 하이드록시기가 공기 중의 산소와 만나 산화하면 케톤기로 바뀌면서 색깔이 변하기 때문입니다. 그러나 아직은 의학적으로 흰머리를 검게 만들 수 있는 만족스러운 방법은 없는 것이 현실입니다.

그렇다고 포기할 이유는 없습니다. 희게 변한 머리카락을 화학적으로 염색하는 방법이 있기 때문입니다. 현대적 염색은 두 단계로 진행됩니다. 먼저 수산화 암모니아(NH_4OH)와 같은 염기성 물질로 모표피를 부풀어 오르게 만든 후 과산화 수소(H_2O_2)와 같은 산화제를 이용해서 모피질에 남아있는 멜라닌 색소를 분해합니다. 그런 후에 원하는 색깔을 가진 염색제 성분을 모피질 속에서 중합해 색을 낼 수 있게 합니다. 염색제 성분이 충분히 스며든 후에 남아있는 성분을 깨끗한 물로 씻어내면 염색이 끝납니다. 다만 머리카락이 자라면 흰머리가 다시 나타나기 때문에 주기적으로 염색을 해야 하는 불편함을 견뎌내야 합니다.



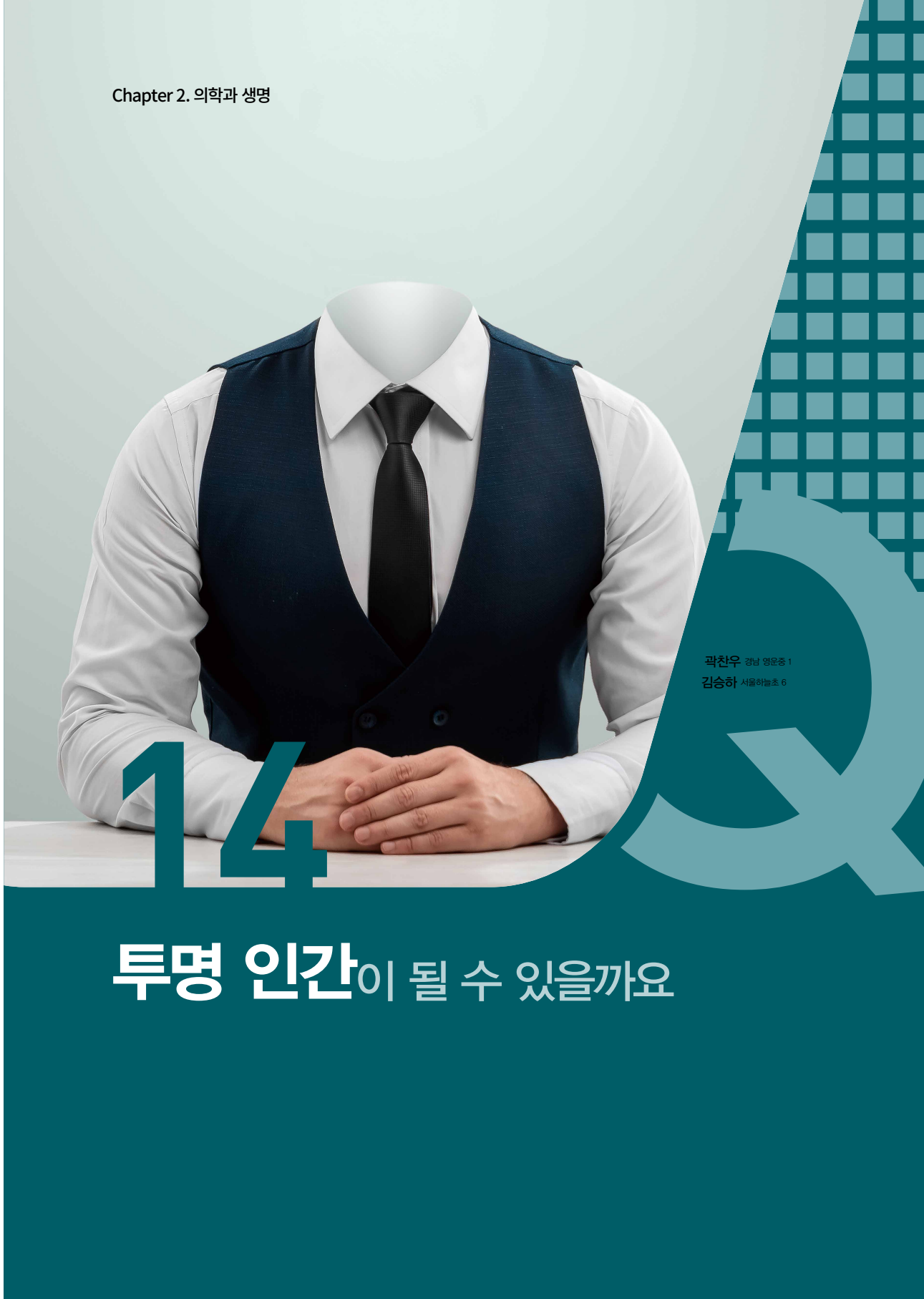
PPD

염색의 역사는 생각보다 훨씬 오래되었습니다. 켈트 인이 금발 염색을 좋아했다는 그리스 역사학자의 기록도 있습니다. 고대 이집트와 로마에서도 천연염료를 이용해서 머리를 염색했다고 합니다. 열대의 관목인 로소니아 이너미스(Lawsonia inermis)의 잎을 말려서 빻은 '헤나(henna)'라는 초록색의 천연염료가 가장 널리 알려져 있었습니다. 제조 방법에 따라서 머리카락을 오렌지·적갈색·암적색으로 염색할 수 있었습니다. 헤나는 지금도 널리 사용되고 있는 천연 염색제입니다. 대체로 부작용이 없지만, 색조를 조절하기 위해서 넣는 첨가제 때문에 부작용을 경험하는 경우도 있습니다.

1860년대에 프랑스에서 처음 개발된 검은색의 합성 염색제인 PPD(para-phenylenediamine)도 널리 사용됐습니다. 그러나 PPD에 다양한 알레르기 증상을 호소하는 소비자도 많습니다. 국내에서는 PPD의 농도를 3% 이하로 제한하고 있지만, 아예 사용을 금지하는 국가도 있습니다. 최근에는 다양한 색상의 염색제가 사용되고 있습니다. 화학적으로 합성해서 저렴하고 피부 독성이 약한 합성 염색약도 많이 개발됐습니다.

염색약을 사용하는 과정에서 발생하는 피부 알레르기가 사회적으로 문제가 되기도 합니다. 화장품과 마찬가지로 머리 염색약도 사용하기 전에

반드시 알레르기 테스트를 통해 안전성을 확인해야만 합니다. 아울러 천연 염색제가 인공적으로 합성한 염색제보다 더 안전하다는 주장은 과학적으로 분명한 근거를 찾기 어렵습니다.



곽찬우 경남 영운중 1
김승하 서울하늘초 6

14 투명 인간이 될 수 있을까요

석원경 교수가 답하다

누구의 눈에도 띄지 않는 투명 인간은 판타지 소설의 단골 소재입니다. 판타지 소설 '해리 포터'에서는 마법이 걸린 망토를 둘러서, 그리고 '반지의 제왕'에서는 반지를 착용해서 투명 인간이 되죠. 영국의 소설가 허버트 웰스의 SF 소설 '투명 인간'에서는 신비한 합성 물질을 이용합니다.

그런데 소설이 아닌 현실 세계에서도 투명 인간을 만들 수 있는 물질이 개발되고 있습니다. '초월하다'라는 의미의 접두어 '메타(meta-)'가 붙은 새로운 소재, 메타 물질(metamaterial)입니다.

오묘함을 만드는 빛의 광학 효과

투명성은 빛과 관련 있는 성질입니다. 빛이 물질의 원자 사이를 그대로 통과하면 투명하게 보입니다. 고체와 액체, 기체를 각각 살펴보죠. 고체는 원자 사이의 거리가 짧고 제멋대로 배열돼 있기 때문에 빛이 통과하지 못합니다. 반면 액체나 기체는 원자 사이의 거리가 빛의 파장보다 길어서 그 사이를 빛이 통과합니다. 그래서 대부분의 고체는 불투명하고, 대부분의 액체나 기체는 투명합니다.

하지만 모든 고체가 불투명한 것은 아닙니다. 결정성 고체는 원자가 규칙적으로 배열돼 있기 때문에 그 틈으로 빛이 통과할 수 있습니다. 유리는 주원료인 석영을 액체 상태가 될 때까지 높은 온도로 가열했다가 빠르게 식혀 만듭니다. 그 결과 액체와 비슷한 원자 배열을 하게 되고 빛이 그대로 통과해 투명합니다.

빛이 그대로 직진하지 못하고 다른 매질을 만나면 반사, 굴절, 회절과 같은 다양한 광학 현상이 나타납니다. 푸른 하늘, 불타는 저녁노을, 화려한 무지개는 모두 광학 현상 때문에 나타나는 자연 현상입니다. 강바닥이 실제보다 얕게 보이는 것도 마찬가지입니다. 우리 눈에 보이는 세상의 모습에는 언제나 광학 효과가 포함돼 있습니다. 세상의 진짜 모습을 보려는 철학자들의 고민이 더 깊어집니다.

거울과 렌즈, 프리즘은 광학 현상이 적극적으로 활용하는 기구입니다. 자신의 모습을 비춰볼 수도 있고, 멀리 있는 물체를 자세하게 살펴보거나 작은 물체를 확대해서 관찰할 수도 있습니다. 덕분에 우리는 우주와 생명의 신비를 한 꺼풀 벗겨낼 수 있었죠.

광학 현상을 결정하는 가장 중요한 성질은 매질의 굴절률입니다. 굴절률은 진공에서의 빛의 속도를 매질에서 빛의 속도로 나눈 값으로 정의합니다. 굴절률은 매질을 구성하는 원자핵이나 전자 등 전하를 가진 입자들이 빛의 진행을 방해하는 정도를 가리킵니다. 빛의 속도가 25% 줄어드는 물(액체)의 굴절률은 1.33, 공기는 1.000293, 유리는 1.54, 다이아몬드는

2.42입니다. 매질의 밀도가 높으면 방해하는 입자들이 많아 굴절률도 높아집니다. 굴절률은 빛의 파장에 따라서도 달라집니다. 파장이 짧아질수록 굴절률이 높아집니다. 그래서 상대적으로 파장이 짧은 푸른색이 붉은색보다 더 많이 휘어집니다.

음수의 굴절률을 가진 메타 물질

과학자의 상상력에는 한계가 없습니다. 1960년대 러시아의 이론물리학자 빅토르 베세라고는 굴절률이 음수인 물질을 탐구했습니다. 바로 메타물질입니다. 광학 이론상으로는 굴절률이 반드시 양수여야 할 이유가 없습니다. 다만 자연에서는 굴절률이 음수인 경우가 관찰되지 않았기 때문에 과학자들의 관심을 끌지 못했을 뿐입니다.

베세라고의 이론적인 분석 결과는 놀라웠습니다. 지금까지 우리가 알고 있던 대부분의 광학 현상이 거꾸로 뒤집어졌습니다. 메타 물질 프리즘을 통과한 빛은 기존 방향과 정반대로 휘어지고, 붉은색 빛이 푸른색 빛보다 더 많이 휘어집니다. 메타 물질을 헤엄치는 물고기는 수면 위에 떠서 헤엄치는 것처럼 보이게 됩니다. 도플러 효과(Doppler effect) 역시 기존과는 반대로 나타납니다. 우주 팽창의 도플러 효과로 더 붉게 보이던 별들이 메타 물질의 세계에서는 더 푸른색으로 보이게 됩니다.

메타 물질은 판타지 소설에서나 볼 수 있을 것 같았던 투명 망토를 실현할 수 있습니다. 망토의 뒤편에 있는 물체에서 반사된 빛이 마치 투명 망토를 통과한 것처럼 보이기 때문입니다. 이외에도 메타 물질이 쓰일 수 있는 분야는 다양합니다. 이론적으로 굴절률이 양수인 기존의 광학 현미경으로는 빛의 파장보다 작은 물체는 볼 수 없습니다. 그래서 크기가 마

이크로미터보다 더 작은 바이러스를 관찰하려면 광학 현미경 대신 전자 현미경을 사용해야 했습니다. 그런데 메타 물질로 만든 '슈퍼 렌즈'를 사용하면 빛의 파장보다 작은 물체를 볼 수 있게 됩니다. 바이러스는 물론이고 나노미터 크기의 분자들도 직접 관찰할 수 있습니다.

과학의 세계에서는 상상이 곧 현실이 되기 마련이죠. 메타 물질도 마찬가지였습니다. 2006년 미국 듀크대 데이비드 스미스 교수는 메타 물질을 실제로 만들어냈습니다. 구리 속에 유리 섬유를 넣어 만든 이 물질은 마이크로파를 그대로 통과시킵니다. 물론 데이비드 교수의 메타 물질로는 상상 속 투명 망토를 완벽하게 실현할 순 없었습니다. 가시광선은 파장이 수백 나노미터이기 때문에 실제로 투명하게 보이려면 메타 물질이 통과시키는 파장이 더 짧아야 합니다. 현재 한국을 포함한 여러 나라의 물리학자들이 투명 망토 소재를 개발하고 있습니다.

물론 실용적인 투명 망토가 개발될 수 있을지는 분명하지 않습니다. 게다가 천처럼 바람에 휘날리는 물질은 굴절률을 일정하게 유지할 수 없습니다. 외부의 영향을 받지 않는 금속 재질이 되어야 할 것입니다.

메타 물질은 슈퍼 렌즈, 다양한 초소형 광학 소자를 개발하는 플라스모닉스(plasmonics) 분야에서도 연구가 진행되고 있습니다. 광학 필터, 의료 기기, 초음파 센서 등으로도 활발하게 활용될 것으로 예상됩니다.

메타 물질은 균일한 조성을 가진 순물질이 아닙니다. 대부분 두 가지 이상의 물질로 만들어진 나노 구조물입니다. 내부의 구조가 빛의 파장보다 훨씬 작아야만 독특한 광학적 특성이 나타나기 때문입니다. 앞으로 나노 과학이 발달하면 더욱 다양한 메타 물질이 개발될 것이라 기대합니다.

민제원 경기 상현고 2
배추니 서울 언주초 6
이태현 전북 논산대건중 1

15 인간의 수명을 200살까지 끌어 올릴 수 있을까요

A

석원경 교수가 답하다

인간이라면 누구나 건강하게 오래 살고 싶어 합니다. 사람의 수명은 다양한 요인에 의해서 결정되는데, 특히 개인의 생활 습관이나 환경이 절대적으로 중요합니다.

깨끗하고 위생적인 환경에서 충분한 영양소를 섭취해야 하고, 질병을 예방하고 치료하기 위한 보건과 의료 환경도 필요합니다. 이처럼 충분한 양의 식량을 생산하고, 보건·의료·위생 환경을 개선하기 위해서는 화학에 대한 이해와 더불어 적절한 화학적 기술이 필요합니다.

물론 적절한 운동도 중요하고, 사고와 재해의 피해를 막아주는 기술과 사회제도도 무시할 수 없습니다. 심지어 부모에게 물려받는 유전적 요인도 수명에 20~30%의 영향을 미치는 것으로 알려져 있습니다.

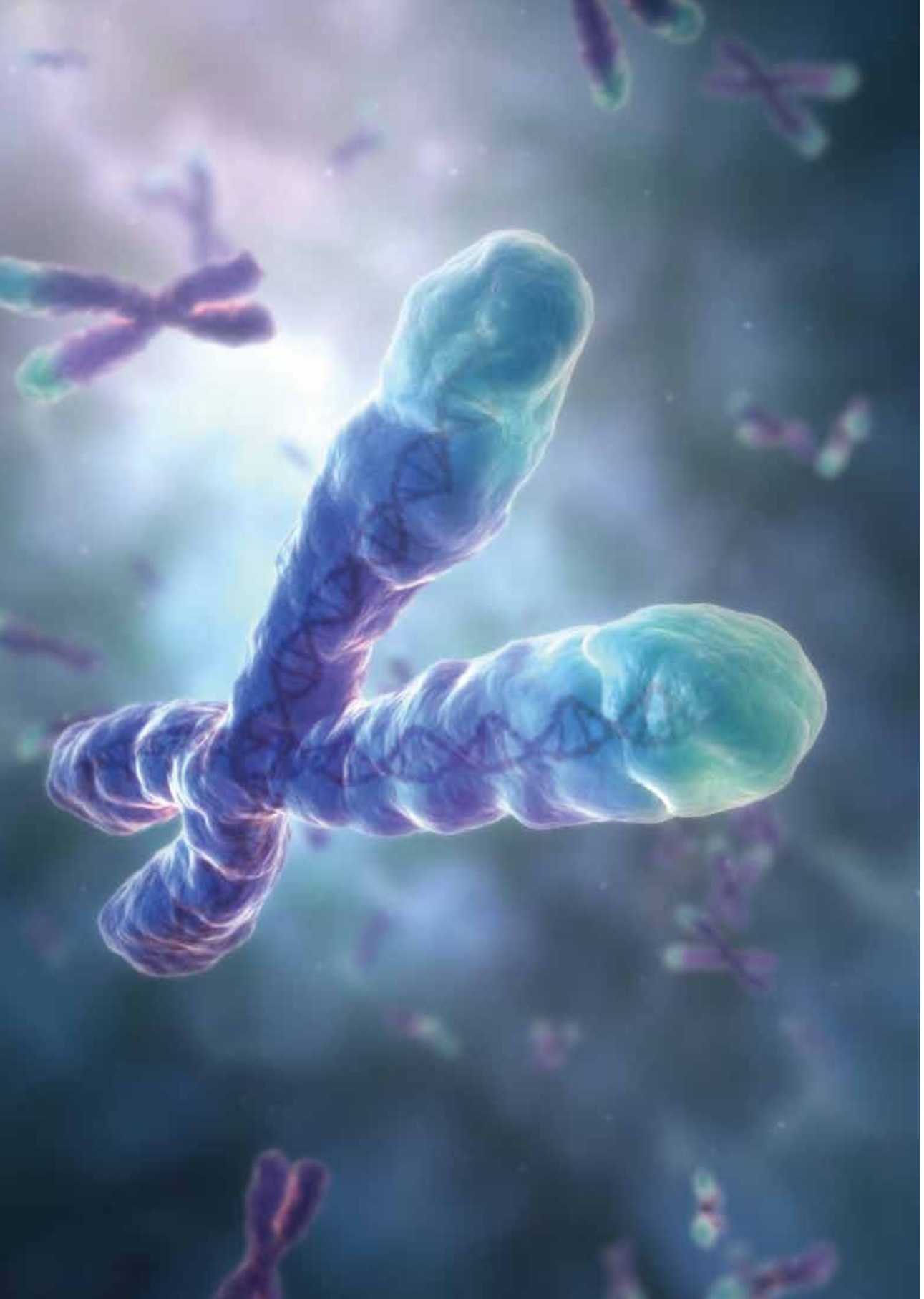
수명과 관련된 것으로 밝혀진 유전자는 200여 개에 이릅니다. 수명에 미치는 유전적 그리고 생리적 요인을 정확하게 파악하는 노력에도 화학이 필요합니다. 아울러 인간의 수명을 200살까지 끌어올리기 위한 노력은 절대 포기할 수 없습니다.

문명 발달과 함께 늘어나는 평균수명

통계청의 인구조사에 따르면, 2019년 한국인의 평균(기대)수명은 83.3세입니다. 남성은 80.3세이고, 여성은 86.3세입니다. 같은 해 UN에서 발표한 전 세계의 평균수명은 72.8세였습니다. 우리는 홍콩(84.9)·일본(84.6)·스위스(83.8)·싱가포르(83.6)·스페인(83.5) 등과 함께 세계 최고의 장수 국가에 살고 있습니다. 그렇다고 한국이 처음부터 그런 국가였던 것은 아닙니다. 1969년만 해도 우리의 평균수명은 60세에 지나지 않았지만, 지난 반세기 동안 대략 2년에 1년씩 늘어났습니다. 미국·영국·일본·독일·프랑스 등의 선진국보다 2배 이상 빠른 증가세였습니다.

인류의 평균수명은 문명의 발달과 함께 늘어났습니다. 인간이 자연에서 짐승을 잡아먹고 식물의 열매·줄기·뿌리를 채취하면서 살던 때에는 평균수명이 17세에 지나지 않았습니다. 특히 다른 동물들과 마찬가지로 새로 태어나는 아기의 사망률이 놀라울 정도로 높았습니다. 농작물을 재배하고, 가축을 기르기 시작하면서 평균수명은 40세까지 늘어났습니다. 사실 평균수명이 급격하게 늘어나기 시작한 것은 화학비료와 농약의 개발로 식량 생산이 획기적으로 증가하고, 항생제를 비롯해 화학적으로 합성한 의약품이 본격적으로 개발되기 시작한 20세기 후반부터였습니다. 화학적인 살균·소독제의 개발도 우리의 보건과 위생 환경을 몰라보게 개선해줬습니다.

단순히 화학적 의료 기술만으로 수명이 무한히 연장될 것으로 기대하기



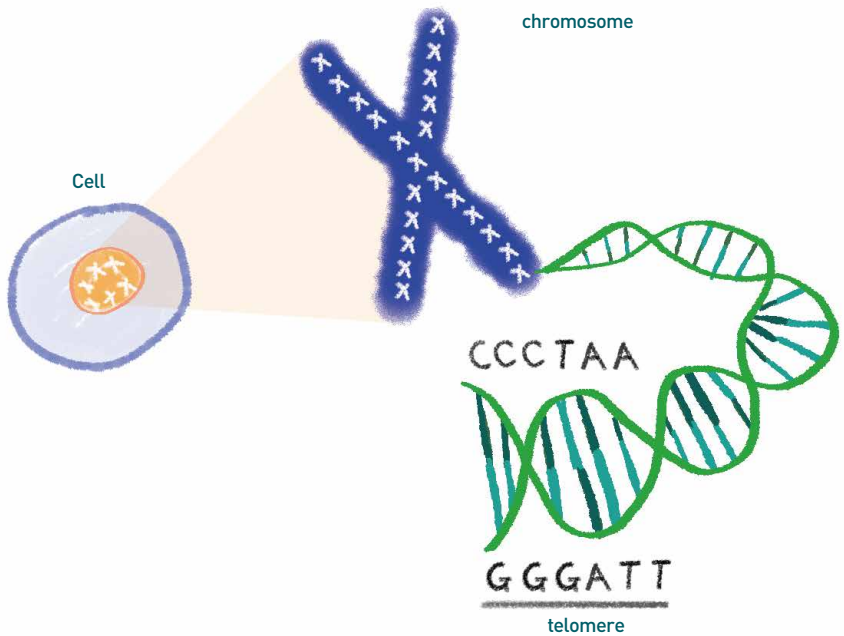
는 어렵습니다. 고혈압 등의 심장질환을 치료할 수 있게 되더라도 인간의 평균수명은 고작 1.5살이 늘어날 것이고, 암을 완전히 정복하게 되더라도 평균수명이 2.1년 더 늘어날 뿐이라는 연구 결과도 있습니다. 과학이 바꿔놓을 미래의 세계를 그린 SF 소설에서도 인간의 수명 연장을 다룬 이야기는 많지 않습니다. 2만 년 후의 은하계를 배경으로 하는 아이작 아시모프의 소설 '파운데이션'에서도 60세를 노인 취급하고, 80세를 넘기는 등장인물은 찾아보기 어렵습니다.

노화에 대한 과학적 이해

죽음은 지구에 사는 모든 생물에게 숙명과도 같은 일입니다. 자연에서는 뜻하지 않은 사고나 질병에 의한 사망이 대부분을 차지했습니다. 실제로 자연 생태계를 구성하는 대부분의 생물은 지금도 사고와 질병에 의해서 목숨을 잃어버리고 있습니다. 하지만 고도의 문명 생활을 하는 인간의 경우에는 상황이 다릅니다. 사고와 질병에 의한 죽음보다 '노화'에 의한 죽음에 더 많은 관심을 두는 이유입니다.

인간의 수명을 연장하기 위해서는 노화에 대한 과학적 이해가 필요합니다. 1960년대까지는 유전물질인 DNA의 복제 과정에서 발생하는 돌연변이에 의한 오류가 누적되는 것을 노화라고 이해했습니다. 그러나 실제로 DNA에서 발생하는 돌연변이가 노화의 직접적인 원인인지는 아직도 분명하게 확인하지 못하고 있습니다.

생물의 노화를 결정하는 '노화 유전자'가 따로 있을 것이라는 주장도 있습니다. 노화 유전자를 찾아내 제거하면 영원히 늙지 않게 된다는 주장입니다. 그러나 유전자를 널리 퍼트리고 싶어 하는 이기적 유전자의 입장에



서는 노화 유전자를 용납할 수 없을 것이라는 주장도 있습니다. 어쨌든 지금까지도 노화 유전자는 발견하지 못했습니다. 노화 역시 질병이기에 고칠 수 있으며, 반대로 장수 유전자 또는 세포의 생존율을 높여주는 '생존 회로'가 있을 것이라는 주장도 있습니다. 지금까지 수명과 관련된 것으로 알려진 유전자는 200여 개에 이르지만, 수명에 결정적인 영향을 미치는 유전자는 찾아내지 못하고 있습니다.

최근에는 노화가 단순한 유전자나 생존 회로 때문이 아니라 우리 몸에서 일어나는 복합적인 요인에 의해서 진행된다는 주장이 더 설득력을 얻고 있습니다. 몸의 생리적 상태를 일정하게 유지하는 단백질이 기능을 상실하거나, 대사 과정에서 영양소를 감지하는 능력이 퇴화하거나, 세포의 활동에 필요한 에너지 물질인 아데노신 삼인산(ATP)을 생산해주는 미토콘드리아의 기능에 문제가 생기는 등의 복합적인 요인이라는 것입니다.

노화 세포의 축적, 줄기세포의 소진, 세포 내의 소통 변형, 염증 분자의 생성, 유전자를 조절하는 단백질로 구성된 후성 유전체(epigenome)의 변화도 노화를 일으키는 복합적인 요인으로 관심을 받고 있습니다.

이중나선 구조를 가진 DNA의 말단에 위치한 텔로미어(telomere)가 노화의 원인이라는 주장도 있습니다. DNA의 복제 과정에서 유전 정보의 손상을 막아주는 텔로미어의 길이가 복제를 거듭할수록 짧아지기 때문입니다.

반복된 복제로 텔로미어가 지나치게 짧아져서 더 이상의 복제가 불가능해진 세포는 세포 자살 과정을 통해 기능을 상실합니다. 그렇다고 걱정할 필요는 없습니다. 세포의 복제 과정에서 텔로미어의 길이를 일정하게 유지하는 텔로머레이스(telomerase)라는 효소가 존재한다는 사실이 밝혀졌기 때문입니다.

우리의 신체는 수많은 세포로 이뤄져 있기에 텔로미어와 텔로머레이스가 인간 노화와 그 해결의 핵심이라고 단언할 수는 없습니다. 하지만 세포 복제 과정에서 텔로미어의 주형으로 작용하는 RNA 분자와 단백질로 구성된 텔로머레이스를 통해서 세포의 죽음과 노화를 이해할 수 있을 것으로 기대하고 있습니다. 텔로머레이스 효소의 존재와 기능을 밝혀낸 엘리자베스 블랙번과 잭 쇼스택, 캐럴 그라이더는 2009년 노벨 생리의학상을 받았습니다.

아직도 많은 나라에서 60~65세 혹은 그 이전에 직장에서 은퇴하고 있습니다. 세계적인 유전체 연구자는 2040년쯤이면 인간이 200세를 살 수 있는 시대가 온다고 했다지만, 앞으로 20년 사이에 현재보다 두 배 혹은 그 이상 일을 할 수 있고, 은퇴 후 여유 있는 생활을 할 수 있는 사회적 여건이

조성될지는 불투명합니다. 엄청나게 늘어난 수명이 건강한 삶을 연장한 게 아니라 죽음을 늦춘 것에 불과하다면, 그런 삶을 아무도 원하지 않을 것입니다.

배추니 서울 언주초 6

16 사람도 먹지 않고 배터리처럼 충전기로 충전할 수 있을까요

A

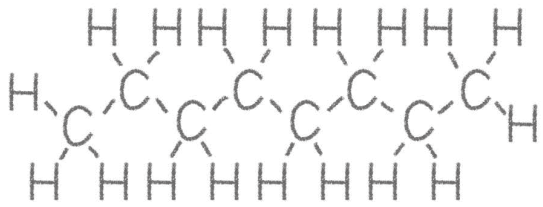
이덕환 교수가 답하다

우리는 식사로 하루 2000kcal 이상의 에너지를 섭취합니다. 이렇게 얻은 에너지는 숨을 쉬고 혈액을 순환시키며 근육을 움직이고 머리로 생각하는 등 생리 활동에 사용됩니다. 고열량의 식품을 섭취하면 활동하고 남은 많은 에너지가 몸에 축적됩니다.

인체가 에너지를 축적할 수 있고 이를 나중에 활용할 수 있다는 사실은 배터리의 작동 원리와 비슷한 면이 있습니다. 배터리를 활용해 사람이 먹지 않고 충전을 통해 살 수 있을지 궁금해하는 것도 무리는 아닙니다.

모든 움직임에는 에너지가 필요하다

하지만 우리가 매일 먹는 세 끼의 식사는 배터리 충전과 완전히 같지는 않습니다. 식사는 단순한 에너지 충전 외에 다양한 기능과 의미를 갖습니다. 생리 현상에 필요한 영양분을 섭취하는 기회가 되기도 하고, 우리의 사회적 유대성과 문화적 정체성을 확인시켜주는 활동이기도 합니다. 우리가 본능적으로 같은 음식을 즐기는 사람에게 호감을 느끼는 것도 바로 그런 이유 때문입니다.



옥테인

자동차는 다릅니다. 에너지원은 오로지 에너지를 공급하는 기능만 합니다. 전통적인 자동차는 휘발유와 같은 연료가 있어야 움직입니다. 휘발유는 옥테인(octane, $CH_3(CH_2)_6CH_3$)을 주성분으로 하는 여러 탄화 수소의 혼합물입니다.

옥테인이 공기 중의 산소와 만나 산화 반응을 일으키면 이산화 탄소와 물이 만들어지면서 많은 양의 빛과 열이 방출됩니다. 자동차는 연료의 산화 반응에서 나오는 열을 이용해서 움직이는 내연 기관입니다. 그래서 자동차를 운행하려면 충분한 양의 휘발유를 넣어야만 합니다.

내연기관 자동차와 달리 전기 자동차(전기차)는 충전이 가능한 2차 전지인 리튬 이온 배터리에 저장된 전기로 움직입니다. 충전된 배터리의 산화전극(anode·음극)에는 리튬 양이온(Li^+)이 저장돼 있습니다. 방전이 시작되면 리튬 양이온은 전해질을 통해 환원전극(cathode·양극)으로 흘러갑니다. 동시에 전자가 외부 도선을 통해 산화전극에서 환원전극으로 이동합니다. 이를 전류가 흐른다, 혹은 전기가 통한다고 말합니다. 이 전기로 모터를 회전시키면 자동차를 움직일 수 있습니다. 이 반응은 음극에 저장된 리튬 양이온이 모두 사용될 때까지 이뤄질 수 있습니다.

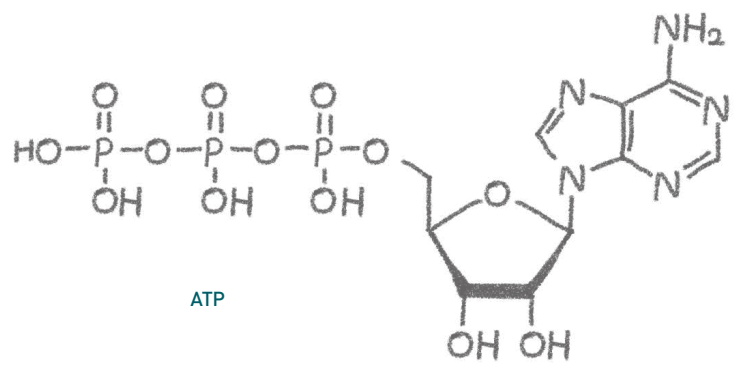
음극의 리튬 양이온이 바닥나 전류가 흐르지 않는 리튬 이온 배터리는

충전해서 다시 사용할 수 있습니다. 교류를 직류로 전환하는 정류 기능을 가진 충전기의 높은 전압을 이용해서 환원전극으로 흘러갔던 리튬 양이온을 다시 산화전극으로 되돌려 보내면 됩니다. 충전이 가능한 리튬 이온 배터리의 역사는 길지 않습니다. 1970년대에 미국의 존 굿이너프와 스탠리 휘팅엄, 일본의 요시노 아키라가 처음 개발했습니다. 세 사람은 그 공로로 2019년 노벨 화학상을 받았습니다.

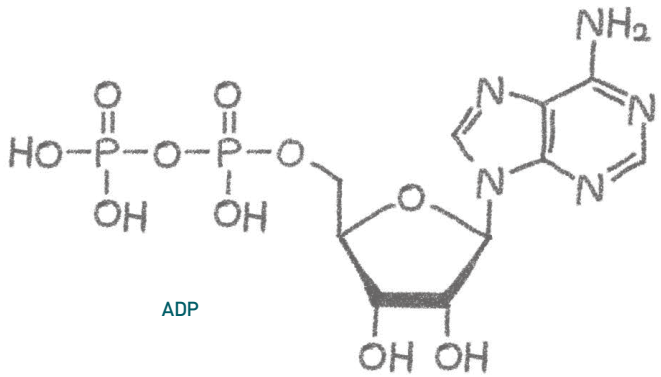
생명체의 충전용 배터리, ATP

사람을 비롯한 생물도 생존을 위해서 에너지를 사용하며, 이를 배터리처럼 저장해 체내 필요한 곳에 전달하기도 합니다. 지구상에 사는 모든 진핵생물이 이용하는 배터리는 아데노신 삼인산(ATP)이라는 에너지 전달 물질입니다. 1몰(mol)의 ATP에서 인산기(phosphate)가 떨어져서 아데노신 이인산(ADP)으로 변화되는 과정에서 약 10kcal의 에너지가 방출됩니다. 우리 몸에서는 하루에 약 200몰의 ATP가 만들어져서 소비되는 셈입니다.

ATP는 리보스(ribose)라는 당 분자에 아데닌(adenine)이라는 염기와 함께 3개의 인산 분자가 결합해 있는 분자입니다. 미토콘드리아라는 세포기관



ATP



ADP

에서 만들어집니다. 그래서 미토콘드리아를 '세포의 발전소'라고 부르기도 합니다. 인체의 기관·조직·세포의 기능에 따라서 세포의 미토콘드리아 수는 크게 다릅니다. 적혈구에는 미토콘드리아가 전혀 들어있지 않지만, 간을 구성하는 세포에는 2000개가 들어있습니다.

미토콘드리아는 음식으로 섭취한 포도당을 폐에서 적혈구로 운반해 온 산소로 산화시킵니다. 그리고 이 때 나오는 에너지로 ADP에 인산기를 붙여 다시 ATP로 만듭니다. 미토콘드리아에서 일어나는 포도당의 산화 반응은 셀룰로오스와 같은 탄수화물의 연소 반응과 본질적으로 똑같습니다. 세포 속에서 일어나는 포도당의 산화 반응은 효소에 의해 정교하게 통제됩니다.

포도당을 분해하는 '해당 과정'과, 호흡을 통해 단백질과 지방, 탄수화물을 분해해 얻은 아세틸 조효소A(아세틸-CoA)를 분해하는 '크렙스 회로(TCA 회로)', 해당 과정과 크렙스 회로에서 생성된 니코틴아마이드아데닌디이뉴클레오타이드인산(NADH)을 산화시키는 '산화적 인산화' 등에서 이 반응이 이뤄집니다. 마치 방전된 배터리를 충전하는 것처럼 우리 몸이 에너지를 충전하는 과정이라고 말할 수 있습니다.

우리는 끊임없이 새로 태어난다

자동차의 배터리는 에너지만 공급해주면 대체로 기능을 수행합니다. 하지만 사람은 그렇지 않습니다. 생존을 위해서 에너지원뿐만 아니라 다양한 영양물질이 필요합니다. 특히 탄수화물·지방·단백질은 특별히 많은 양이 필요해서 '3대 영양소'라고 부릅니다. 그 밖에도 철·칼슘·비타민 등의 다양한 미량 영양소도 다양하게 섭취해야 합니다. 우리 몸에서 일어나는 생리 작용을 정교하게 관리하는 소모품인 효소와 호르몬 등을 만드는 데에 필요하기 때문입니다.

우리 몸을 구성하는 세포도 끊임없이 새로 만들어져야 합니다. 실제로 우리 몸을 이루는 세포의 나이는 매우 젊습니다. 대뇌 피질을 구성하는 세포를 제외하면 10살 이상 된 세포를 찾아보기 어렵습니다. 특히 쉽게 손상되는 피부는 거의 2주마다 완전히 새로워집니다. 소장의 내피세포도 5일 정도 쓸 수 있을 뿐입니다. 혈관 속을 끊임없이 돌아다녀야 하는 적혈구도 4개월 정도만 지나면 더 기능을 수행하기 어려울 정도로 망가져 버립니다. 우리 몸에서 독성 성분을 제거하는 기능을 담당하는 간세포는 1년에서 2년 정도 지나면 더 쓸 수가 없게 됩니다. 그나마 골격 세포는 10년 정도 견뎌냅니다. 우리의 몸은 끊임없이 새로 탄생하고 있던 셈입니다.

세포를 교체하는 일은 간단치 않습니다. 세포의 핵에 있는 DNA를 완벽하게 복제해야 하고, 미토콘드리아나 리보솜과 같은 세포기관도 똑같이 만들어야만 합니다. 게다가 DNA를 복제하는 과정에서 오류로 돌연변이가 발생하기도 합니다. 절차와 과정도 복잡하지만, 세포의 복제에 사용되는 재료를 모두 확보해야만 합니다. 우리가 과식과 편식을 피하고 적당한

양의 음식을 골고루 섭취해야 하는 것도 그런 이유 때문입니다.

물질적인 부분 외에 정신적인 에너지 충전도 중요합니다. 바쁘게 움직이는 현대 사회에서 일부는 에너지 소모가 극심해 극도의 피로 상태를 겪고, 급기야 무기력해져 완전히 방전된 상태인 번아웃 증후군(burnout syndrome)을 경험합니다. 이런 경우 물질적 에너지를 주입해서는 몸을 회복하기 쉽지 않습니다. 오히려 충분한 휴식으로 정신적 에너지를 충전해주면 정상 생활로 쉽게 돌아올 수 있습니다.

배시후 서울 태릉중 1
오정원 충남 신풍초 3
정다연 전주 비전국제학교 5

17 첨단 화학으로 생물체를 만들 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

합성생물학(synthetic biology)이라는 새로운 분야가 빠르게 성장하고 있습니다. 생물체를 만드는 정보를 담은 '생명의 책'인 DNA에 대한 지식을 이용해 온전한 인공 생물체를 만드는 것이 이 분야의 궁극적인 목표입니다. 이를 위해서 실험실에서는 무기물로부터 DNA 혹은 RNA와 같은 유전물질을 합성하고, 기본적인 생리 기능을 갖춘 인공 세포를 만들어내려는 연구가 계속되고 있습니다.

합성생물학은 우주에 생명이 등장한 과정을 구체적으로 알아낼 방법으로도 기대를 모으고 있습니다. 물론 코로나19와 같은 질병을 진단하고 치료하는 데 사용할 의약품이나 생물학적 장치를 개발하는 등의 실용적인 연구에도 활용할 수 있습니다. 이런 연구에 있어서 화학은 큰 역할을 차지합니다. DNA, RNA 등 유전물질 그리고 생명체를 이루는 세포는 모두 화학물질이기 때문입니다.

유전자 변형의 기적

1996년 복제로 만들어진 양 돌리의 탄생은 많은 사람에게 충격적인 일이었습니다. 정상적인 생식 과정을 거치지 않고, 체세포에 들어있는 DNA를 복제해서 어미를 닮은 복제 양을 탄생시키는 생명공학 기술의 발전을 반가워하는 사람도 많았습니다. 그러나 현대 과학이 생명의 탄생마저 건드렸다는 사실에 분노하는 사람도 많았습니다. 생물체를 만드는 건 인간이 함부로 해서는 안 되는 신의 영역이라고 믿었기 때문이었습니다.

그런데 사실 우리는 1만 2000년 전부터 자연에 사는 식물과 동물의 유전자를 변형해 왔습니다. 우리가 원하는 특성을 가진 동물이나 식물을 서로 교배시켜서 더 좋은 품종을 개발하는 육종이 바로 그런 기술입니다. 인류는 거친 야생에서 살아남기 위해서 다른 식물과 동물의 유전자를 변형시키는 일을 마다할 수 없었습니다.

맛있고 영양가가 높은 먹거리를 자연에서 쉽고 넉넉하게 구할 수 있을 것이라는 생각은 순진한 착각입니다. 오히려 우리 주위에는 치명적인 독을 가진 열매와 줄기가 훨씬 더 많습니다. 인류는 먹거리를 마련하기 위해서 육종이라는 유전자 변형 기술을 활용해야만 했습니다. 육종 덕분에 약한 짐승을 사냥하고 식물의 열매, 줄기, 뿌리를 채집하는 생활을 하던 인류가 가축을 사육하고 농작물을 키울 수 있게 됐습니다.

육종은 지금도 농작물과 가축의 품종 개량을 위해 중요하게 활용되고 있습니다. 고질적인 식량 부족에 시달리던 한국은 1970년대에 육종을 통해 개발한 통일벼를 보급해 쌀 자급의 꿈을 이뤘습니다. 하루 20L의 우유를 생산하는 얼룩 젖소도 육종으로 품종을 개량한 것입니다.

일각에서 우려의 목소리를 표하기도 하는 유전자변형작물(GMO)은 생

명공학 기술을 이용해 육종보다 훨씬 더 효율적으로 품종을 개량한 것입니다. GMO는 농작물의 DNA를 변형시킨다는 점에서 전통적인 육종 기술로 개발한 품종과 크게 다르지 않습니다. 육종으로 유전자를 변형한 농작물과 축산물의 안전성을 걱정하는 경우는 찾아보기 어렵습니다. 물론 GMO의 안전성에 대해서도 소비자의 우려를 극복하기 위해 적극적인 노력이 필요합니다.

생명의 신비에 대한 갈증

'생명이란 도대체 무엇인가. 어디에서, 어떻게 등장했을까.' 누구나 간절하게 알고 싶어 하는 가장 심오하면서도 오래된 의문입니다. 생명에 대한 현대 과학적 이해는 1953년 영국의 프랜시스 크릭과 미국의 제임스 왓슨이 DNA의 이중 나선 구조를 밝혀낸 업적으로부터 시작됐습니다.

DNA는 디옥시리보스라는 당과 인산, 그리고 염기가 연결된 단위체 '뉴클레오타이드'가 길게 연결된 사슬입니다. 이 사슬은 A(아데닌) · T(티민) · G(구아닌) · C(사이토신)이라는 4종류의 염기 부분에서 두 가닥씩 연결돼 이중나선 구조를 이룹니다. 염기 4종류가 배열되는 서열은 생명의 신비를 담고 있는 열쇠입니다. 우리가 부모를 닮거나, 또 닮지 않거나 하는 것은 모두 DNA의 염기서열이 만들어내는 유전 현상입니다. 핵심은 4종류의 염기가 3개씩 연결돼 한 단어를 만드는 64진법의 암호, 코돈입니다. 세포는 이 코돈에 담겨있는 암호를 해석해 아미노산을 연결합니다. 아미노산은 생명 현상을 조절하는 단백질을 이룹니다.

현대 생명과학은 DNA에 숨겨진 암호를 읽어내는 화학 기술에 의해 눈부시게 발전했습니다. DNA를 빠르게 증폭시키는 중합효소연쇄반응(PCR)

이 대표적입니다. 코로나19 방역에 핵심 역할을 하는 진단법에도 사용되는 기술입니다. DNA를 복제하는 유전자 클로닝(cloning) 기술도 개발했습니다. 최근에는 DNA에서 원하는 부분이나 손상된 부분을 마음대로 편집하는 기술마저 개발되고 있습니다.

합성생물학을 활용하면 또 다른 유전물질인 RNA도 만들 수 있습니다. 코로나19의 확산을 막아주는 전령 RNA(mRNA) 백신은 화학적으로 합성되었습니다. 백신 속 합성 mRNA가 체내에서 코로나바이러스의 특징인 스파이크 단백질을 만듭니다. 그러면 스파이크 단백질로 인해 자극된 면역체계가 코로나바이러스와 싸울 항체를 미리 만들어 둡니다. 이론적으로는 합성 mRNA의 염기서열만 변경하면 변이 바이러스에도 효과적인 백신을 제조할 수 있습니다. mRNA 구조를 안정시켜주는 나노 지질 입자도 화학적으로 합성한 인공 물질입니다. 아울러 DNA와 RNA의 기본 구조인 뉴클레오타이드가 사슬 형태로 수십 개씩 이어진 올리고뉴클레오타이드를 화학적으로 합성할 수 있으며, 이미 자동화에도 성공했습니다.

합성 생물학은 생체에서 일어나는 화학반응을 모방하는 생체모방화학의 발전에도 활용될 것으로 기대됩니다. 녹색식물의 잎에서 일어나는 광합성은 매우 유용한 화학반응입니다. 그러나 이 반응은 전통적인 화학기술로는 실험실에서 흉내 낼 엄두조차 내기 어려울 정도로 복잡합니다. 이산화 탄소와 물이 결합해서 탄수화물을 만드는 여러 단계마다 정교한 관리가 필요하기 때문입니다. 이를 위해 미래에는 생물체의 몸속 화학반응을 정교하게 관리하는 효소를 활용할 가능성도 있습니다. 효소, 엽록소, 헤모글로빈 등과 같이 물질 속 활성 자리에서 금속의 역할을 연구하는 생무기화학은 이미 화학의 주요 분야 중 하나로 자리 잡았습니다.

민제원 경기 상현고 2

18 생명체의 DNA를 데이터 저장 장치로 활용할 수 있을까요

이덕환 교수가 답하다

유전 정보를 담고 있는 DNA를 저장 장치로 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있습니다. DNA를 구성하는 4개의 염기인 A, T, G, C을 이용하면 1개 비트에 4개의 정보를 저장할 수 있습니다. 디지털 정보를 4진법으로 저장할 수 있는 셈입니다. 오늘날 전자기기에서 사용하는 2진법의 실리콘 기반 반도체보다 훨씬 더 많은 정보를 저장할 수 있게 될 것입니다. 이 경우 DNA를 저장 장치로 활용하는 기기도 완전히 새로 개발해야 합니다. 앞으로 적지 않은 투자와 노력이 필요하다는 뜻입니다.

정보를 기록하는 유일한 생물

자연에 사는 모든 생물은 생존을 위해 정보를 활용합니다. 먹이를 찾고 번식하는 등 모든 일에는 정보가 필요합니다. 정보를 정확하게 파악하고 분석해야만 생명을 이어갈 수 있습니다. 사람도 예외가 아닙니다. 피부를 통한 촉각, 눈을 통한 시각, 귀를 통한 청각, 코를 통한 후각, 그리고 혀의 맛 돌기(미뢰)를 통한 미각을 이용해서 정보를 파악합니다.

정보를 기억하는 능력을 갖춘 생물은 많습니다. 거칠고 위험한 야생에서 생존하는 데 그게 도움이 되기 때문입니다. 인간은 정보를 기억해두는 것을 넘어 기록으로 남기는 능력이 있습니다. 수렵 채취 생활을 하던 구석기 시대의 인류는 기억을 동굴 벽화로 남겼습니다. 이들은 쉽게 지워지거나 변색되지 않는 화학 안료를 이용해 기록했습니다.

문명이 발달하면서 기록에 대한 욕구는 더욱 커졌습니다. 정보를 기록하기 위해 기록 매체가 필요했고, 이를 위한 문자도 고안했습니다. 최초의 문자 기록은 기원전 3000년경 고대 메소포타미아의 수메르인이 점토판에 새긴 쐐기 문자입니다. 2021년 8월 미국이 이라크에 반환해 언론에 떠들썩하게 소개된 고대 유물 '길가메시의 꿈' 점토판은 그런 기록물 중 하나입니다. 길가메시는 초기 수메르 왕조인 우루크의 전설적인 왕으로, 길가메시의 꿈은 현존하는 가장 오래된 서사시입니다.

우리도 자랑스러운 기록 문화를 가지고 있습니다. 8세기 통일 신라 시대에 제작된 것으로 추정되는 '무구정광대다라니경'은 세계에서 가장 오래된 목판 인쇄물입니다. 14세기 고려시대에 금속활자로 인쇄한 '직지심체요절'도 있습니다. 금속활자로 만든 현존하는 가장 오래된 문서입니다.

21세기는 정보화 시대입니다. 더 정확한 정보를 남보다 더 빠르게 많이 확보하고, 제대로 분석하고 기록하며 활용하는 기술이 무엇보다 중요한 시대입니다. 정보화 시대의 정보는 모두 디지털로 변환시켜서 다양한 매체에 기록합니다. 보통 자기 기록 장치나 광 기록 장치, 반도체 메모리 소자에 정보를 기록합니다. 많은 사람이 대용량의 기록 장치를 공유하는 클

라우드 시스템과 대규모의 데이터를 저장해 두는 데이터 센터도 빠르게 늘어나고 있습니다. 이제는 이런 센터가 소비하는 전기를 값싸게 공급하는 것이 인류의 새로운 과제로 떠오르는 실정입니다.

DNA 저장 장치가 매력적인 이유

현재 지구상의 생물이 사용하고 있는 DNA는 A, T, G, C의 4진법으로 정보를 저장할 수 있습니다. DNA에 저장해둔 유전 정보는 쉽게 훼손되지 않습니다. 상보 관계에 있는 염기가 서로 수소결합으로 단단하게 결합해 이중나선 구조가 쉽게 풀리지 않습니다. 더욱이 디옥시리보스와 인산이 연결돼 만들어지는 DNA의 바깥 골격이 내부의 염기를 외부의 화학적 환경으로부터 완벽하게 차단해주는 역할을 합니다. 정보를 담고 있는 염기 서열이 제멋대로 바뀌게 될 가능성을 걱정할 이유가 없습니다.

정보를 저장하는 DNA의 길이도 실리콘 반도체 소자보다 훨씬 짧게 만들 수 있습니다. 염기 사이 간격은 고작 0.34nm에 지나지 않습니다. 반도체 회로 선폭이 10nm인 최첨단 실리콘 반도체보다 정보 저장 용량이 훨씬 큰 메모리 소자를 만들 수 있다는 뜻입니다.

지난 반세기 동안 DNA 속 염기 서열을 읽어내는 기술이 눈부시게 발전했습니다. 32억 개의 염기 서열을 읽어 유전자 지도를 그리는 '인간 유전체 프로젝트(HGP·Human Genome Project)'는 1990년에 공식적으로 시작돼 2003년 4월에 완료됐습니다. 13년 동안 미국, 영국, 일본, 프랑스, 독일, 중국 등 6개국의 과학자가 참여했고, 30억 달러(약 3조 5000억 원) 이상의 연구비가 사용됐습니다. 그런데 이제 인간의 유전체를 읽어내는 일은 몇 시간 만에 해결할 수 있게 됐습니다. DNA를 복제, 증폭, 편집하는 기술까지 개

발됐습니다.

그러나 DNA를 정보 기록 장치로 사용하려면 더 복잡한 첨단 기술이 필요합니다. 디지털 정보가 기록된 인공 DNA를 신속하게 합성하는 기술, DNA에 기록된 염기 서열을 빠르게 읽어내는 기술 등이 필요합니다. 정보를 저장하는 DNA를 안전하게 보관하고, 활용하는 기술도 개발해야 합니다.

DNA를 정보 기록 장치로 쓰는 아이디어는 1959년 미국의 이론물리학자 리처드 파인만이 처음 제시했습니다. DNA의 이중나선 구조가 밝혀지고 6년이 지났을 당시에는 허황한 꿈과 같은 아이디어였습니다.

그런데 약 60년이 지난 2019년 파인만의 아이디어가 실현됐습니다. 미국의 스타트업 카탈로그(Catalog)는 위키피디아의 모든 영문 텍스트를 하나의 DNA에 저장하는 성과를 거뒀습니다. 무려 16GB 분량이었습니다. 카탈로그는 데이터를 저장하기 위해 DNA 가닥을 합성해 사용했으며, 당시 초당 4메가비트(Mb)로 데이터를 기록했습니다.

같은 해 스위스 취리히연방공대(ETH Zürich) 연구팀은 '사물 DNA(DoT·DNA of Things)'의 가능성도 제시했습니다. 거의 모든 물체를 데이터 저장 장치로 바꾸는 방법을 발견한 것입니다. 연구팀은 서로 연결된 컴퓨터로 구성되는 사물 인터넷과 달리 사물 DNA는 정보를 저장한 DNA로 생물체에 직접 삽입할 수 있어서 암호 저장 장치로도 사용할 수 있다고 밝혔습니다.

DNA 사슬을 이용해서 복잡한 연산 작업을 수행하는 DNA 컴퓨터도 개발되고 있습니다. 이미 1994년에 레오나르드 아델만이 처음 제시했던 DNA 컴퓨터의 아이디어는 정보 저장, 나노 이미지 구현, 반응 네트워크 및 합성 관리 등의 다양한 용도로 개발되고 있습니다.

구자윤 캐나다 CCS 6-7학년
배시후 서울 태릉중 1
이태현 전북 논산대건중 1

Q19

대뇌 피질을 발달시켜서 천재로 만들 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

뇌의 가장 많은 부분을 차지하는 대뇌는 오른쪽과 왼쪽으로 나누어져 있습니다. 대뇌의 표면에 해당하는 회백색의 피질(cortex, 겉질)은 두께가 2.5~3.0mm입니다. 뇌 무게의 40%를 차지하는 대뇌 피질은 많은 주름 때문에 표면적이 매우 넓으며 사람의 경우 침팬지를 비롯한 유인원보다 훨씬 커서 그 면적이 보통 신문지 한 면 정도입니다.

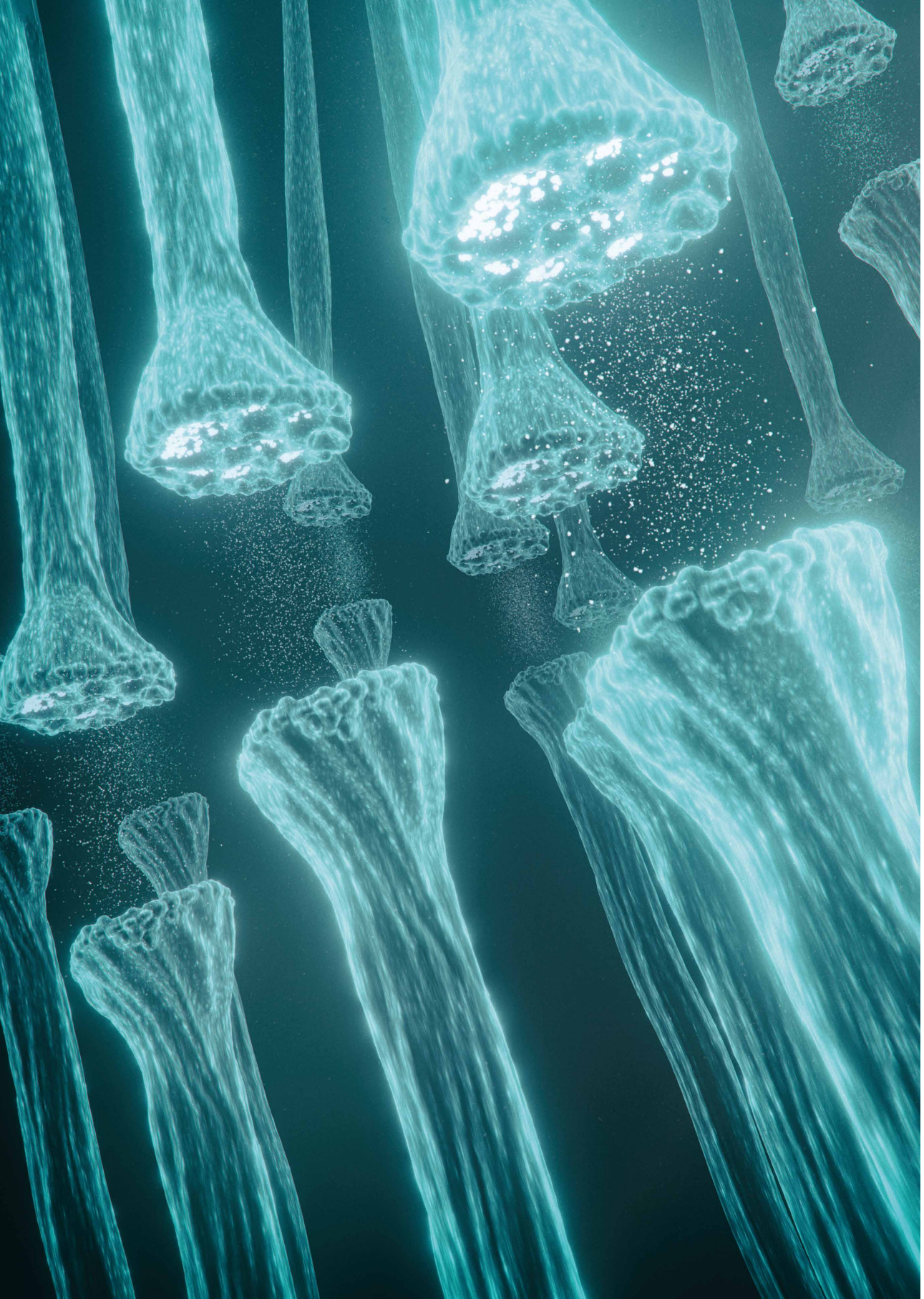
대뇌의 피질은 위치에 따라서 고유한 생리적 기능을 수행합니다. 19세기 프랑스의 해부학자 피에르 브로카가 처음으로 밝혀낸 사실입니다. 측두엽에서 언어의 발성을 담당하는 브로카 중추의 위치를 알아내기도 했습니다. 브로카 영역과 연결돼 있으면서 언어 중추에서 단어의 입력을 담당하는 영역은 1874년 독일의 카를 베르니케가 발견했습니다. 20세기 초 독일의 신경학자 코르비니안 브로드만은 대뇌 피질을 고유한 기능에 따라 52개의 영역으로 구분했습니다.

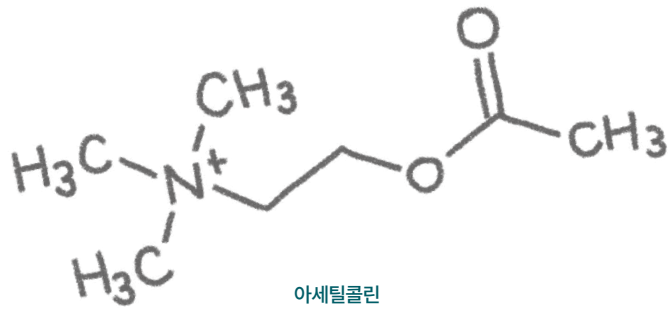
대뇌 피질은 전두엽(이마엽), 측두엽(관자엽), 두정엽(마루엽), 후두엽(뒤통수엽)으로 구분합니다. 뇌의 앞쪽에 가장 넓은 부위에 해당하는 전두엽은 운동을 관장하는 운동 중추가 위치하고, 주로 위험을 인지하는 기능이 있습니다. 전두엽은 주의를 집중하게 만들고, 미래를 위한 계획을 세우거나, 의사를 결정하는 등의 목표 지향적인 행위를 주관하고, 인간성과 도덕성을 관장합니다.

머리 옆쪽의 측두엽에는 우표 크기만 한 청각 중추가 있고, 나머지 부분에서는 언어, 인지, 기억 등의 기능을 조절합니다. 뇌의 중간에서 뒤쪽으로 내려가는 두정엽은 외부로부터 전달되는 정보를 조합하는 곳이고, 문자를 언어로 조합해서 의미가 있는 것으로 만들고, 통각, 촉각, 온도 등의 감각 정보를 종합해서 인체의 각 부위로 보내는 역할을 합니다. 뇌 뒤쪽의 후두엽에는 시각중추가 있어서 시각 피질이라고 부르기도 합니다. 뇌는 20세까지 서서히 성장합니다. 유아 시절에 전두엽이 발달하고 나이가 들수록 뒤로 이동해 후두엽이 발달합니다.

대뇌 피질의 구체적인 기능은 오늘날 빠르게 발전하고 있는 뇌과학의 핵심 과제입니다. 과거에는 사고나 질병으로 뇌를 다친 사람을 통해서 뇌의 기능을 추정할 수밖에 없었습니다. 뇌의 손상 부위와 임상을 통해서 확인한 증상 사이의 관계를 분석하는 방법입니다. 당연히 연구할 기회가 많지 않았고, 연구의 범위도 지극히 제한적일 수밖에 없었습니다. 이제는 달라졌습니다. 질병 진단에 사용하는 고해상도의 기능성 자기공명영상(fMRI)이나 양전자방출 단층촬영 등을 이용해서 대뇌 피질의 기능을 자유롭게 연구하고 있습니다.

대뇌 피질은 서로 복잡하게 연결된 대략 1000억 개의 뉴런(neuron, 신경세포)을 통해 다양한 기능을 수행합니다. 뉴런은 말단에 있는 축삭돌기 사이





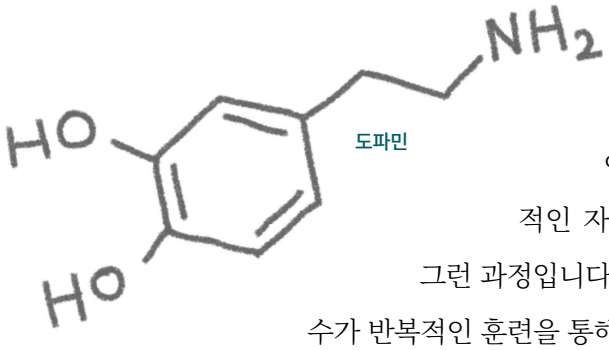
아세틸콜린

의 시냅스(synapse)를 통해서 전달되는 아세틸콜린 등 40여 종의 신경전달물질을 이용해 다른 뉴런과 정보를 주고받습니다. 뉴런의 끝부분에 있는 소포체에 저장된 신경전달물질이 20nm 정도의 간격을 가진 시냅스를 건너서 다른 뉴런으로 전달됩니다. 하나의 뉴런이 수천 개의 다른 뉴런과 신호를 주고받습니다. 신체의 여러 부분에서 대뇌 피질로 입력되는 감각 신호와 대뇌 피질에서 여러 부분으로 출력되는 운동 신호가 신경전달물질을 이용한 전기 신호의 형태로 전해집니다.

뉴런 연결망과 재능

대뇌 피질의 기능은 뉴런으로 구성되는 시냅스의 연결 구조에 의해서 결정됩니다. 전기 신호가 전달되는 시냅스의 연결 구조는 고정된 상태가 아닙니다. 뇌의 활동에 따라 끊임없이 새로운 시냅스가 활성화되고, 쓸모가 없어진 시냅스는 비활성화됩니다. 시냅스를 통한 연결 구조에 문제가 생기면 심각한 질병이 발생하기도 합니다. 조현병, 우울증, 뇌전증, 자폐증, 주의력결핍 과잉행동장애(ADHD)와 같은 신경 정신계 질환은 특정한 신경전달물질의 기능이 지나치거나 모자라서 발생합니다. 예를 들어 도파민(dopamine)이라는 신경전달물질을 사용하는 뉴런에 문제가 생기면 도파민과 관련된 운동 기능이 상실되기도 합니다.

시냅스 연결망이 변화하려면 적절한 수준의 자극을 통한 지속적인 훈련



도파민

이 필요합니다. 새로 태어난 신생아가 주위의 반복적인 자극을 통해서 학습하는 것도 그런 과정입니다. 학교에서 공부하고, 운동선수가 반복적인 훈련을 통해 역량을 키우는 것도 뉴런의 연결망 변화를 유도합니다. 대부분의 사회는 개인의 재능을 길러주기 위해 전통적인 교육이나 훈련에 의존합니다. 재능을 길러주기 위한 시도가 사회적으로 거부감을 불러일으키는 경우도 있습니다. 정체가 분명하지 않은 약물(화학물질)을 이용해서 뇌의 기능을 강화하겠다는 시도는 과학적으로 합리적인 근거를 찾기 어려운 경우가 대부분입니다.

어릴 때부터 수학, 음악, 미술, 스포츠 등의 특정한 분야에서 특별한 재능을 가진 천재의 뇌 구조에 관한 관심도 대단합니다. 과연 천재의 뇌가 타고난 것인지, 아니면 성장 과정에서의 훈육을 통해 길러지는 것인지는 여전히 분명하지 않습니다. 그중 도파민이 천재성과 연관이 있다는 주장이 많습니다. 도파민이 많아지면 창조 활동은 촉진되지만, 어떤 불확실한 원인으로 신경전달물질 사이의 균형이 깨져 기능 장애로 정신 분열을 일으킬 수 있습니다. 그런데도 탁월한 재능을 가진 천재나 영재에게는 맞춤형 영재 교육이 필요하다는 주장이 상당한 설득력을 발휘하고 있습니다.

뉴런 연결망은 적절한 수준의 휴식도 필요합니다. 어릴 때의 과도한 조기 교육으로 시냅스가 지나치게 활성화되면 스트레스가 누적돼 과잉학습 장애 증후군과 같은 장애가 발생할 수도 있습니다. 일상생활에서의 스트레스가 건강에 도움이 되지 않는 것도 마찬가지입니다.

김경복 서울 영훈국제중 1
조현우 경기 청명중 1

20 인조고기인 대체육을 만들 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

대체육은 동물성이 아닌 재료를 가공해서 고기의 맛과 향기, 식감을 흉내 냅니다. 콩이나 밀을 이용해 만든 식물성 고기가 대표적이죠. 1960년대부터 본격적으로 개발돼 새로운 식품으로 소비자들의 호기심을 끌었습니다. 특히 채식주의자들의 선택권을 넓혔다는 측면에서 긍정적인 평가를 받았습니다. 최근에는 동물 세포로 만든 배양육과 곤충을 활용한 대체육 연구도 활발합니다.

한계에 도달한 가축 사육

한국의 식탁은 과거와 완전히 달라졌습니다. 농촌경제연구원의 '2018 식품소비행태조사 통계보고서'에 따르면, 지난 반세기 동안 1인당 식품 소비량은 50% 이상 늘어났습니다. 상다리가 휘어질 정도는 아니지만, 풍성하게 먹고 있다는 의미입니다. 단순히 소비하는 식품의 양만 많아진 것이 아닙니다. 식품의 구성도 완전히 달라졌습니다. 채식을 즐기던 우리의 식생활이 육류와 수산물을 중심으로 완전히 바뀌었습니다.

그 결과 50년 사이 한국의 육류 소비량은 10배 이상 늘어났습니다. 2018년 한국은 1인당 연간 쇠고기 12.7kg, 돼지고기 27kg, 닭고기 14.2kg을 소비했습니다. 한국은 아시아에서 가장 많은 양의 육류를 소비하는 국가입니다.

한국은 수산물도 소비량이 많은 편입니다. 유엔 식량농업기구(FAO)가 2017년 발표한 '세계수산양식현황 통계'에 따르면, 한국의 1인당 연간 수산물 소비량은 58.4kg으로 세계 1위에 올랐습니다. 심지어 수산강국으로 알려진 노르웨이보다 5kg 이상 많은 양을 소비하고 있습니다.

'밥심'은 옛말이 되었습니다. 2020년 1인당 연간 쌀 소비량은 57.7kg으로 30년 전보다 51.8%나 줄었습니다. 채식을 즐기던 과거의 식탁은 쌀밥, 김치, 된장 등이 주요 재료였지만 이제는 육류와 생선이 식탁을 점령했습니다.

늘어난 수요를 충당하기 위해 축사에서 사육하고 있는 가축의 수도 폭발적으로 늘어났습니다. 통계청의 가축동향조사 결과에 따르면 1983년 한국에서 사육하던 한우와 육우는 97만 1000마리, 돼지는 53만 9000마리였습니다. 2020년 같은 조사 결과, 한우와 육우는 336만 4000마리, 돼지는 1107만 8000마리로 엄청나게 성장했습니다. 전 세계에서 약 15억 마리의 소, 10억 마리의 돼지를 키우고 있습니다.

가축 사육의 규모가 이처럼 커지면서 여러 문제가 발생했습니다. 유엔 식량농업기구에 따르면 현재 전 세계 토지 중 26%가 가축 사육에 쓰이고 있습니다. 사육장의 전체 면적이 넓어졌지만, 가축 1마리당 면적은 여전

히 턱없이 좁아 밀집 사육에 대한 윤리적인 거부감도 심각해지고 있습니다. 아울러 사육하는 가축이 늘어나면서 농사를 지을 토지는 줄어들었습니다. 그렇다고 사육을 포기하면 육류와 낙농 제품의 가격이 올라갈 수밖에 없기에 소비자의 반발이 심해질 것입니다.

가축 사육은 환경 문제도 일으킵니다. 가축을 기르기 위해서는 많은 양의 사료와 물을 소비해야 합니다. 쇠고기 1kg을 생산하기 위해서 사용해야 하는 물의 양은 1만 5000L에 달합니다. 더욱이 소와 양을 비롯한 초식동물은 이산화 탄소보다 온실효과가 큰 메테인을 대량으로 방출합니다. 전 세계에서 배출되는 온실가스의 14.5%가 초식동물 사육으로 방출됩니다.

대체육이 지구를 구원할까

육류는 3대 영양소 중 단백질과 지방을 섭취할 수 있는 가장 효율적인 수단입니다. 한국인은 몸에 필요한 단백질의 25%를 육류를 통해 얻습니다. 육류에는 철, 칼슘, 비타민 등의 미량 영양소도 포함돼 있습니다.

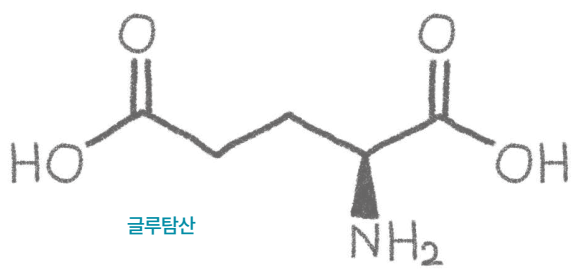
육류를 섭취하지 않는 채식주의자는 단백질과 지방, 여러 미량 영양소들을 별도로 신경 써야 하는 번거로움이 있습니다. 어릴 때부터 익숙해진 육류의 고소한 맛에 대한 애착도 육류 식습관을 버리지 못하는 이유입니다.

대체육은 가축의 대규모 사육에 의한 여러 문제를 해결하고, 채식주의자가 균형 잡힌 식생활을 하도록 도와주는 새로운 기술이며, 그 핵심은 단백질입니다. 생물의 생리작용을 조절해 주는 호르몬과 효소 역시 단백질이죠. 단백질은 저마다 독특한 맛과 식감을 가지고 있습니다. 식자재에

들어 있는 단백질은 생물의 DNA에 저장된 염기서열에 따라 20종의 아미노산을 연결해서 만들어집니다. 단백질이 미생물에 의해 분해돼 만들어진 글루탐산(glutamic acid)과 같은 아미노산이 풍부하게 들어 있는 된장은 건강한 영양 섭취에 도움이 됩니다.

전 세계의 식품과학자들은 점점 육류의 단백질과 가장 비슷한 맛과 식감을 내는 단백질을 찾아 나가고 있습니다. 콩고기의 원료로 사용하는 대두분리단백질(isolated soy protein), 밀의 글루텐을 활용해 닭고기 맛을 내는 세이탄(seitan), 버섯의 마이코단백질(mycoprotein) 등이 대표적이죠.

환경과 동물윤리에 대한 관심이 높아지면 가축 사육은 점점 축소될 것입니다. 이런 시점에서 대체육은 소비자에게 필요한 단백질원을 공급하는 대안이 될 것이라 기대합니다.



글루탐산

이금성 대전 유성중 1

21 식물의 성장을 조절할 수 있을까요

A

석원경 교수가 답하다

식물의 성장을 좌우하는 요인은 다양합니다. 물과 함께 질소, 인, 황 등 땅속 영양분이 있어야 제대로 성장합니다. 물론 따뜻한 햇볕과 공기 중의 이산화 탄소도 필요합니다. 식물 성장의 가장 중요한 열쇠인 탄수화물은 광합성을 통해 태양 빛으로 물과 이산화 탄소를 반응시켜 만듭니다. 뿌리와 공생하는 다양한 곰팡이(균류)와 박테리아도 필요합니다.

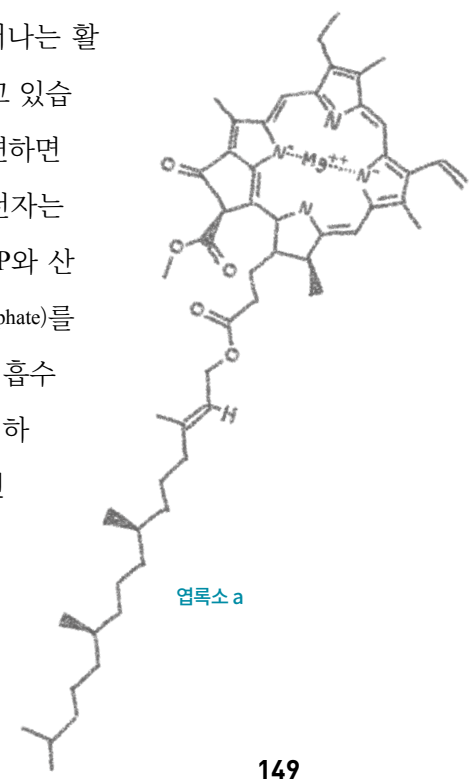
식량 생산에 필요한 농작물을 재배할 때는 성장 속도를 조절하는 기술이 중요합니다. 물 외에도 퇴비나 화학비료를 뿌려줘야만 농작물의 성장이 빨라지고 수확량도 늘어납니다. 농작물의 성장을 방해하는 잡초도 제거해야 하며, 토양을 비닐로 덮어주는 멀칭(mulching) 기술도 필요합니다. 햇볕이 잘 드는 따듯한 온도의 환경을 유지하기 위해 비닐하우스도 사용합니다. 최근에는 농작물의 성장에 최적인 환경을 제공하는 수경재배, 에어로팜 등의 스마트팜 기술도 빠르게 발전하고 있습니다.

녹색식물의 광합성

식물의 잎을 구성하는 세포에는 엽록체라는 세포 소기관이 잔뜩 들어 있습니다. 엽록체는 광합성이 일어나는 장소입니다. 엽록체의 조상은 남세균(Cyanobacteria)입니다. 아득한 옛날 자연에서 스스로 광합성을 하며 독립적으로 살고 있던 남세균은 원핵세포 속으로 들어가 엽록체의 형태로 공생하기 시작했습니다. 남세균이 원핵세포가 필요로 하는 탄수화물을 만들어 주는 대신 원핵세포로부터 안전한 서식처를 받는 식입니다. 이렇게 서로 다른 성질을 가진 세포가 생존을 위해 공존하는 진화방식을 내부공생이라고 부릅니다. 우리 인간의 세포 속에 들어 있는 미토콘드리아 역시 내부공생의 예시입니다.

광합성은 엽록체에 들어 있는 엽록소라는 색소 분자에 의해서 일어납니다. 엽록소의 기본 뼈대는 평면 사각형 구조의 포르피린이라는 화합물입니다. 화학반응이 일어나는 활성 자리 중심에 마그네슘 금속 이온이 자리하고 있습니다. 엽록소가 햇볕을 흡수해서 들뜬 상태로 변하면 높은 에너지를 가진 전자를 내보냅니다. 이 전자는 물을 분해하고, 생물학적 에너지 전달물질 ATP와 산화효소 NADPH(Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate)를 만들어냅니다. ATP와 NADPH는 공기 중에서 흡수한 이산화 탄소를 환원시켜서 탄수화물을 합성하는 데 사용됩니다. 이 화학반응을 통틀어 '캘빈 회로' 또는 '암반응'이라고 부릅니다.

광합성이 원활하게 일어나기 위해서는 적



엽록소 a

당한 양의 이산화 탄소가 필요합니다. 식물의 잎에는 반달 모양의 공변세포가 이산화 탄소 흡수량을 조절합니다. 마주 보고 있는 한 쌍의 공변세포 사이에는 '기공'이라고 불리는 구멍이 있습니다. 식물은 기공을 통해서 엽록체가 필요로 하는 이산화 탄소를 흡입하거나, 엽록체에서 배출한 산소를 내보냅니다. 뿌리에서 빨아올린 물을 증발시키는 증산작용도 기공을 통해 일어납니다. 공변세포의 발달을 유전적으로 조절해 농작물의 수확량을 늘릴 수 있는 기술이 개발되고 있습니다.

광합성에 필요한 가시광선의 세기를 조절하는 일도 중요합니다. 식물의 잎에서는 피토크롬이라는 단백질이 빛을 흡수하는 역할을 맡고 있습니다. 동물의 눈에 있는 홍채나 카메라 렌즈의 조리개처럼 피토크롬에도 빛의 흡수량을 조절하는 정교한 생화학적 조절 메커니즘이 있습니다. 남홍길 대구경북과학기술원(DGIST) 교수는 포스텍 재직 중이었던 2005년 인산화 반응을 조절해서 피토크롬의 활성을 조절하는 'PAPP5'라는 유전자의 존재를 밝혀냈습니다. 이 유전자의 기능을 강화하면 햇볕이 잘 들지 않는 환경에서도 식물이 잘 자라도록 할 수 있을 것입니다.

엽록체에서 일어나는 광합성을 실험실에서 흉내 내는 인공 광합성 연구도 활발하게 이뤄지고 있습니다. 인공 광합성의 목적은 대기 중 이산화 탄소를 포집하고 수소나 물과 결합해서 연료로 사용할 수 있는 탄화 수소나 메탄올 등을 생산하는 것입니다.

이산화 탄소와 같은 온실가스로 생기는 기후변화 문제를 해결할 새로운 기술로 기대를 모으고 있습니다. 인공 광합성에는 값싸고 효율적이며 오래 사용할 수 있는 금속 촉매가 필요합니다. 이를 위해 망가니즈, 타이타늄, 이리듐과 같은 금속을 포함하는 착화합물인 광촉매 연구가 활발하게 이뤄지고 있습니다.

미래의 농업

최근에는 화학·생명공학과 정보통신기술(ICT)을 융합시켜서 농업효율을 극대화하기 위한 새로운 기술이 개발되고 있습니다. 농작물이 효율적으로 광합성할 수 있도록 온도, 습도, 밝기를 유지하고, 공기 중의 이산화 탄소 농도를 조절해 주는 스마트팜입니다. 사물 인터넷(IoT)을 이용해서 원격으로 스마트팜을 관리하는 일도 가능해지고 있습니다.

스마트팜은 농지에 농작물을 심는 대신 영양성분을 녹인 물로 농작물을 재배하는 수경재배에서 시작됐습니다. 그러나 재배 과정에서 낭비되는 물의 양이 너무 많습니다. 이제는 공기 중에서 농작물을 재배하는 에어로팜 기술을 이용해 필요한 자원을 최소화하면서 수확을 극대화하고 있습니다.

에어로팜은 작물을 공중에 매달고 정해진 시간에 맞춰서 분무기로 수분과 영양분을 뿌려가며 키우는 기술입니다. 뿌리가 공기에 노출돼 있다 보니 뿌리가 외부 온도 변화에 취약한 문제가 있습니다. 이를 해결하기 위해 특수 제작한 천으로 농작물의 뿌리를 덮고, 그 아래에 물과 영양성분을 분사시켜 주는 방법이 사용되고 있습니다. 물의 낭비를 줄이면서 뿌리에도 산소를 공급해 줄 수 있는 것이 장점입니다. 농작물의 성장을 어렵게 만드는 잡초나 해충에 대한 걱정도 해결됩니다.

에어로팜 기술을 한 단계 높여 햇볕에 의존하지 않는 스마트팜도 등장하고 있습니다. 수명이 길고, 전기 소비가 적은 LED를 사용하면 수확량을 75%까지 높일 수 있습니다. 재배 기간을 단축해 농장 단위의 생산량을 무려 약 400배까지 높일 수 있을 것으로 기대됩니다. 그러나 아직은 시설을 갖추는 단계라서 많은 투자가 필요합니다.

최민 서울 영도초 5

22

인공 아가미를 이용하면 산소통 없이 물속에 들어갈 수 있을까요

A

이덕환 교수가 답하다

지구의 모든 생명은 물속에서 시작됐습니다. 그리스 철학자 탈레스가 물을 '만물의 근원'이라고 했던 것도 그런 뜻입니다. 그런 우리가 이제는 물속에서 1분도 견디기 어려운 형편이 돼 버렸습니다. 과연 우리가 아득히 먼 옛날 조상의 안식처였던 물로 돌아갈 수 있을까요?

산소가 생명력이다

사람이 소비하는 산소의 양은 적지 않습니다. 휴식 중 우리가 한 번 호흡할 때 들이마시는 호흡량은 0.5L 정도입니다. 보통 1분에 12회 정도 호흡해 6L의 공기를 흡입하지만, 실제로 폐에서 활용하는 공기의 양은 4L 정도입니다. 나머지 2L는 기관지 등에 머물다가 고스란히 날숨으로 되돌아나오죠. 들숨에 들어 있는 산소의 농도는 약 21%이며, 이 중 6% 정도가 실제 허파꽈리를 통해서 몸속으로 흡수됩니다. 결국, 우리는 휴식 중에도 1시간에 약 21g, 즉 하루에 약 500g의 산소를 소비한다는 뜻입니다. 몸을 움직이면 산소 소비량은 최대 20배 이상 늘어날 수 있습니다.

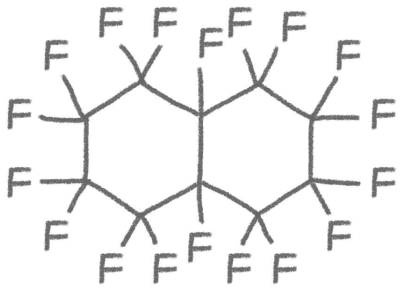
산소를 충분히 흡입하지 못하면 목숨이 위태롭게 됩니다. 높은 산에 올라가도 산소의 농도는 여전히 약 21%로 유지가 됩니다. 그러나 공기의 압력이 낮아지기 때문에 호흡으로 흡입할 수 있는 산소의 양은 줄어듭니다. 그래서 대부분의 사람은 4500m 이상의 산에 올라가면 숨이 가빠지면서 고산병을 경험하게 됩니다. 7500m 이상의 산에 올라갈 때는 산소통이 꼭 필요한 것도 마찬가지 이유 때문입니다. 고산 지대에 사는 사람은 그런 환경에 적응하기 위한 특별한 유전자를 가지고 있어서 적혈구의 수가 약 30% 이상 많습니다.

처음부터 지구 대기에 산소가 들어있던 것은 아닙니다. 산소가 땅속에서 뿜어져 나오는 것도 아닙니다. 사실 산소는 화학적 반응성이 매우 큰 원소입니다. 지구에 남아있는 산소는 수소와 결합한 물, 탄소와 결합한 탄산염, 철, 규소, 구리 등의 산화물로 존재합니다. 대기 중에 들어 있는 산소는 대부분 녹색식물, 식물성 플랑크톤이 이산화 탄소를 이용해 유기물을 만들어내는 광합성 과정에서 생산하는 부산물입니다.

35억 년 전 바다에 등장한 스트로마톨라이트(stromatolite)가 광합성을 했던 최초의 시아노박테리아였던 것으로 알려져 있습니다. 당시 대기를 가득 채우고 있다가 바닷물에 녹아 들어간 이산화 탄소를 이용했습니다. 호주 서쪽 끝, 여러 섬에 둘러싸여 있는 샤크만에는 아직도 스트로마톨라이트가 살고 있고, 강원도 영월에도 그 화석이 남아있습니다. 대기 중의 이산화 탄소가 지나치게 줄어들어서 광합성이 어려워지면 산소도 같이 사라져 버릴 수 있습니다. 이산화 탄소가 지구 온난화를 일으키는 온실가스

라고 무조건 나쁜 것만은 아닙니다.

물론 물에도 산소가 녹아있습니다. 물고기를 비롯한 수중 생물이 번성할 수 있는 것도 그 덕분입니다. 그러나 우리 입장에서 보면 물에 녹아있는 용존 산소의 양은 절대 많지 않습니다.



퍼플루오르데칼린

보통 지표면에 있는 상온의 깨끗한 물에는 용존 산소가 대략 7~10ppm 수준으로 녹아있습니다. 우리가 1시간에 필요한 산소를 흡입하려면 무려 2t의 물을 처리해야 합니다. 매시간 2L 생수 1000병에 넣을 수 있는 만큼의 물에 들어 있는 산소를 모두 활용해야 한다는 뜻입니다. 물속에서 물을 필터로 걸러내고 녹아있는 산소만 인체에 공급한다는 인공 아가미의 필터 성능이 제아무리 좋아도 우리는 물에 녹아있는 산소로는 살아남을 가능성이 없습니다.

산소 용해도를 45%까지 증가시킬 수 있는 용매가 있기는 합니다. 퍼플루오르데칼린(perfluorodecalin)이 그런 물질입니다. 원래 폐 기능이 원활하지 않은 조산아가 잠시 숨을 쉬게 할 용도로 개발됐는데, 큰 도움을 기대하기는 어렵습니다. 물이나 혈액과 잘 섞이지 않고, 혈압에도 문제가 생길 수 있기 때문입니다.

더 나은 삶을 향한 모험

지구상의 생물은 물에서 살기 시작했습니다. 물에 녹아있는 영양 성분과 용존 산소를 이용했습니다. 그러나 산소의 양이 제한적일 수밖에 없는

물속에서의 생존은 쉽지 않습니다. 아가미를 통해서 호흡할 수 있는 산소로 만족할 수밖에 없습니다. 몸집을 키울 수도 없고, 영양물질과 산소 소비량이 많은 뇌의 크기와 기능에도 한계가 있습니다. 수중에서의 생존 경쟁도 생각보다 훨씬 치열합니다. 대체로 수중 생물이 몸집과 뇌가 작은 것은 그런 이유 때문입니다.

수중에서 생활하던 생물이 육지로 올라간 데는 분명한 이유가 있었습니다. 녹색식물은 광합성에 필요한 이산화 탄소와 햇빛을 훨씬 더 쉽게 확보할 수 있었습니다. 생리작용에 필요한 산소를 구하는 일도 훨씬 쉬워졌습니다. 물론 적은 양의 용존 산소를 흡수하기 위해 아가미 대신 대기 중의 고농도 산소를 활용할 수 있는 폐 등 새로운 기관도 필요했습니다.

육지 생활에 적응한 생물은 뇌와 몸집을 키울 수 있는 화학적 여유가 생겼습니다. 실제로 코끼리 · 하마 · 들소와 같은 대형 포유류가 등장한 것이 그 결과입니다.

그렇다고 육지에서의 삶이 쉽기만 한 것은 아니었습니다. 사실 수중 생활에 익숙해진 생물에게 육지 생활은 상당한 모험이었습니다. 영양 성분을 섭취하기 위한 전혀 새로운 전략이 필요했고, 시시각각으로 변화하는 대기 환경에 적응하는 일도 쉽지 않았습니다. 산소의 과도한 화학적 반응성에 의한 부작용도 감수해야만 했습니다. 물론 세포에서 반응성 산소 종의 피해를 예방하기 위한 기능도 필요했습니다.

대기 중의 산소를 호흡하는 장점을 누리면서도 수중 생활을 포기하지 못하는 생물도 등장했습니다. 고래와 물개가 그에 해당합니다. 물론 육상 생물보다 훨씬 큰 폐가 필요하고, 주기적으로 호흡하는 불편함을 극복해야만 합니다.

곽찬우 경남 영운중 1

23

낮에 빛을 저장해 뒀다가 밤에 쓸 수 있을까요

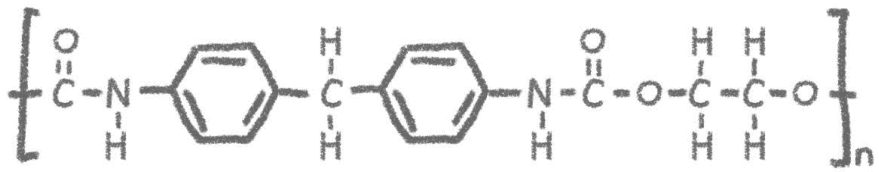
A

이덕환 교수가 답하다

낮을 환하게 밝혀주던 빛을 밤에 사용하려는 시도가 언제나 어려운 것은 아닙니다. 1980년대에 많은 사람이 지붕 위에 설치했던 검은색의 집열판이 바로 그것입니다. 집열판은 태양으로부터의 빛을 열에너지로 전환하는 기술을 이용합니다. 낮 동안에 뜨거운 햇빛 에너지를 모아서 온수로 만들어 뒀다가 필요할 때 사용했지요.

지금은 태양 빛을 훨씬 더 적극적으로 이용하는 기술이 개발되고 있습니다. 빛을 구성하는 광자를 저장했다가 사용하는 다양한 양자(quantum) 기술이 대표적입니다.

빛은 광자(photon)라는 기묘한 양자이기도 하면서 동시에 고전적인 전자기파이기도 합니다. 이런 빛의 입자-파동 이중성을 적극적으로 이용한 기술이지요. 이를 이용한 양자 컴퓨팅과 양자 메모리 등의 새로운 미래 기술도 등장하고 있습니다.



폴리우레테인

열을 이용하는 화학 기술

빛 에너지를 열에너지로 전환하는 것은 그렇게 어렵지는 않습니다. 빛을 효율적으로 흡수하는 흡광체만 있으면 되며, 흡광체는 빛을 완전히 흡수하거나 일부만 통과시키는 물질입니다. 우리 눈에 검은색으로 보이는 모든 물체는 훌륭한 가시광선 흡광체입니다.

흡광체는 빛 에너지를 원자나 분자의 진동 에너지로 저장합니다. 이때 고체와 액체 사이의 상전이를 이용하면 더 많은 양의 열을 저장했다가 활용할 수 있습니다. 고체는 열을 흡수하면서 녹아 액체가 되고, 액체는 열을 방출하면 다시 딱딱한 고체가 되기 때문이지요.

하지만 문제가 있습니다. 높은 온도의 액체에 저장된 열이 외부로 빠져나가지 않도록 가둬두는 일이 만만치 않기 때문입니다. 폴리우레테인(polyurethane)을 비롯한 다양한 보온재와 단열재가 개발돼 있지만, 한계가 있습니다. 특히 저장해 둔 열에너지의 양이 많아지면 많아질수록 효율적인 보온과 단열은 더욱 어려워집니다.

저장해 둔 열에너지를 사용하는 것도 간단한 문제가 아닙니다. 열적 접촉을 통한 전통적인 열전달 기술만으로는 만족하기 어려울 수 있습니다. 특히 액체의 온도가 충분하게 높지 않을 때는 에너지를 회수하는 데 여러 가지 현실적인 어려움이 발생합니다.

이에 서로 다른 파장의 빛에 민감하게 반응해서 상전이를 방지하거나 촉발하는 물질을 활용하는 기술이 개발되고 있습니다. 그런 기술을 사용하면 현재 10시간 정도에 지나지 않는 축열 기술의 한계를 극복할 수 있을 것입니다.

기묘한 광자의 이중성

진공 속에서 빛은 초속 30만 km의 엄청난 속도로 진행합니다. 정확한 빛의 속도(c)는 초속 299,792,458m로, 2018년에 개정한 국제표준단위의 기준이 되는 보편상수입니다. 둘레의 길이가 약 4만 km인 지구의 적도를 1초에 7바퀴 반을 돌 수 있고, 지구에서 1억 5000만 km나 떨어져 있는 태양에 8분 20초 만에 도달할 수 있습니다.

세상에서 빛을 구성하는 입자인 광자보다 더 빨리 움직일 수 있는 물질은 없습니다. 1905년 알베르트 아인슈타인이 특수 상대성 이론으로 밝혀낸 놀라운 과학적 진실입니다. 특허사무소의 하급 심사원이었던 아인슈타인이 스위스 베른의 기차역에 설치된 벽시계를 보면서 얻은 힌트를 이용한 사고 실험의 결과였습니다. 빛이 광자로 돼 있다는 생각은 17세기 아이작 뉴턴의 아이디어이기도 했습니다.

빛은 전기장과 자기장이 서로 수직으로 진동하면서 직진하는 전자기파이기도 합니다. 19세기 말 영국의 물리학자 제임스 맥스웰이 밝혀낸 사실입니다. 그런 빛은 물질이 가득 채워진 매질을 지나갈 때는 속도가 느려집니다.

빛의 전기장과 자기장이 물질을 구성하는 전자, 양성자와 상호작용하기 때문입니다. 인파가 가득한 시장이나 지하철 플랫폼 안에서 수많은 사람

들을 비집고 걸어가기가 어려운 것과 같은 상황입니다. 그래서 매질을 지나가는 빛의 속도는 매질의 굴절률에 반비례합니다.

빛을 정지시키는 실험들

놀라운 속도로 질주하는 광자를 거의 정지 상태에 가까울 정도로 감속시키는 기술이 개발되고 있습니다. 전자기 유도투과(EIT·electromagnetically induced transparency)로 굴절률을 매우 증가시키는 방법입니다. 이는 원자에 강한 빛에 쏘아 특정 파장을 통과시키는 현상으로 1990년 미국 스탠퍼드대 연구팀이 제안했습니다.

이후 1999년 미국 하버드대와 스탠퍼드대 공동연구팀은 초저온으로 냉각시킨 고체에 전자기 유도투과 기술을 이용해 빛의 속도를 초속 17m까지 낮추는 실험에 성공했습니다. 국내에서는 2018년 기초과학연구원(IBS)과 KAIST 연구팀이 그래핀과 이온 겔 층을 결합한 메타 물질을 이용해서 빛의 속도를 능동적으로 조절하는 장치를 개발했습니다.

광자를 한정된 공간에 가둬버리는 기술도 개발됐습니다. 2001년 미하일 루킨 미국 하버드대 물리학과 교수는 진공상태에서 빛을 완전히 정지된 상태로 저장했다가 놓아주는 기술을 개발했습니다. 붉은 레이저 펄스를 뜨거운 루비듐 증기가 들어 있는 유리 상자에 넣었다가 원할 때 다시 꺼내는 실험에 성공한 것이었지요.

레이저 펄스는 유리 상자에 기체 상태로 존재하는 루비듐 원자와 강하게 상호작용을 해서 빛과 전자의 성질을 모두 지닌 입자인 폴라리톤(polariton)을 만들어 냅니다. 레이저 펄스의 세기를 충분히 약하게 만들면 유리 상자에 쪼여준 레이저 펄스의 광자가 모두 루비듐 원자 속에 갇혀버리게 됩니다. 세상에서 가장 빠른 속도로 움직이던 광자를 0.3nm 크기의 원자 속에 가둬버린 것입니다.

유리 상자에 조절 레이저(control laser)를 쪼여주면 루비듐 원자에 폴라리톤의 상태로 갇혀 있던 광자를 방출시킬 수 있습니다. 지금은 상온에서 상당히 긴 시간 동안 광자를 가둬두는 다양한 기술이 개발돼 있으나, 당시에는 매우 놀라운 실험 결과였습니다.

같은 해, 미국 하버드대의 또다른 실험실에서 렌 하우 교수도 빛을 정지시키는 기술을 개발합니다. 다만 실험에 이용한 화학 물질이 달랐지요. 하우 교수는 극저온 상태에서 냉각된 소듐 기체를 이용해 빛을 정지시키는 데 성공했습니다.

레이저를 고체 속에 가둬두는 기술도 있습니다. 2002년 한국전자통신연구원(ETRI) 연구팀은 미국 연구팀과 협력해 빛을 저장장치로 이용할 수 있는 기술을 개발했습니다. 연구팀은 세계 최초로 빛을 고체 속에 정지시켜 가뒀다가 원래 상태로 되돌리는 실험에 성공했습니다.

오르토규소산 이트륨(Y_2SiO_5)에 프라세오디뮴(Pr) 이온을 도핑한 비균일 고체에 레이저를 몇 시간 동안 가둬두는 실험이었습니다. 레이저빔을 사용해 빛의 속도를 늦추고, 결정체에 가뒀다가 일정시간 뒤에 다른 레이저를 사용해 재생했습니다. 현재는 미국의 여러 실험실에서도 비슷한 연구가 활발하게 진행되고 있습니다.

빛의 기묘한 양자역학적 특징인 입자-파동 이중성은 실용적으로도 다양하게 활용될 것으로 기대하고 있습니다. '0'과 '1'의 이진법을 기반으로 하는 전자 컴퓨터 대신 '양자 중첩'이 가능한 빛의 편극을 기반으로 하는 '큐비트(qubit)'를 이용하는 양자 컴퓨터에서도 빛을 가둔 뒤 상태를 바꿔 다시 전송하는 기술이 필요합니다.

양자 컴퓨터의 미래는 짐작하기도 어렵습니다. 광자의 양자 이중성을 적극적으로 활용하는 양자 암호, 양자 통신, 양자 메모리 기술도 빠르게 발전하고 있습니다.

곽찬우 경남 영운중 1
김호연 광주 유촌초 6
조현우 경기 청명중 1

24

미래 자동차의 연료는 수소가 될까요

A

석원경 교수가 답하다

오늘날 우리가 배출하는 온실가스의 14%가량이 수송 분야에서 발생합니다. 휘발유와 경유, 액화천연가스(LNG), 압축천연가스(CNG) 등의 화석연료를 사용하는 자동차가 기후변화의 주범으로 알려진 것도 그런 이유 때문입니다. 탄소 중립 달성을 위해 온실가스 배출량을 줄이려면 화석연료를 사용하지 않는 새로운 자동차의 개발이 절실하게 필요합니다.

이런 관점에서 수소는 매력적인 에너지원으로 보입니다. 수소를 연소시키면 순수한 물이 만들어지고, 다른 오염 물질이 발생하지 않습니다. 수소가 같은 질량의 석유보다 3배나 많은 에너지를 가지고 있는 것도 장점이죠. 그래서 수소가 청정에너지라는 주장이 상당한 설득력을 얻고 있습니다. 수소를 연료로 사용하는 '수소 전기차(수소차)' 역시 환경을 오염시키지 않는 친환경 자동차로 꼽힙니다.

하지만 문제가 있습니다. 아직 수소를 마음 놓고 사용할 수 있는 수준의 기술을 확보하지 못했습니다. 수소차는 여전히 더 많은 연구와 투자가 필요한 미래의 자동차라는 뜻입니다. 특히 수소를 생산·운반·저장하는 일이 생각처럼 쉽지 않습니다. 무엇보다, 수소는 자연에서 쉽게 채취할 수 있는 1차 에너지원이 아닙니다. 수소를 생산하려면 상당한 양의 화석연료나 전기를 사용해야 합니다. 수소차가 도로 위를 가득 채우려면 여러 가지 도전적인 문제를 해결해야만 합니다.

수소가 자동차를 달리게 하는 방법

국내 자동차 기업이 생산하는 수소차는 '연료전지 전기자동차(FCEV, fuel cell electric vehicle)'입니다. 연료전지에서 생산한 전기로 직접 모터를 구동하는 것은 아닙니다. 연료전지의 출력을 실시간으로 정교하게 조절할 수 없기 때문입니다. 그래서 연료전지 전기자동차도 일반 전기 자동차(EV, electric vehicle)와 마찬가지로 리튬 이온 배터리를 사용합니다. 연료전지로 배터리를 충전하고, 배터리의 전기를 이용해 자동차의 모터를 구동시킵니다.

연료전지의 구조와 작동 원리는 비교적 간단합니다. 전해질 용액에 불어넣은 수소(H_2)가 산화 전극(anode)의 표면에서 수소 양이온(H^+)으로 산화되면서 전자가 방출됩니다. 전자는 전기 회로를 통해서 환원 전극(cathode)으로 전달되어서 산소(O_2)를 산소 음이온(O^{2-})으로 환원시킵니다. 이런 과정은 환원 전극에서 산화 전극으로 전류가 흐르게 만들죠. 그리고 전해질에서는 수소 양이온과 산소 음이온이 화학적으로 반응해서 물(H_2O)이 만들어지게 됩니다.

연료전지의 성능은 산화 전극과 환원 전극으로 사용하는 금속과 전해질을 구분해주는 분리막에 의해 결정됩니다. 성능이 뛰어난 전극 물질과 분

리막, 그리고 효율적인 전해질을 개발하는 것이 화학적으로 중요한 과제입니다. 흔들리는 자동차에 사용하기 어려운 액체 전해질 대신 고체 상태인 고분자 전해질도 개발하고 있습니다.

연료전지의 효율은 최대 60% 수준입니다. 연료전지로 얻은 전기를 이용해서 모터를 구동하는 효율은 75%를 넘지 못합니다. 결국 수소 연료전지 전기자동차의 효율은 일반 전기자동차의 45%를 넘기 어렵다는 의미입니다. 연비에 신경을 쓰는 소비자에게는 상당히 실망스러운 것도 사실입니다.

수소가 부피가 큰 기체라는 사실도 걸림돌입니다. 충분한 양의 수소를 쓰려면 높은 압력이 필요합니다. 현재 판매되는 수소차는 700기압의 연료 탱크를 사용합니다. 수소 충전소에서도 같은 압력으로 수소를 공급해야 합니다. CNG 버스의 연료 탱크에서 사용하는 200기압보다도 3.5배나 더 높은 압력입니다. 여기에 폭발 위험을 줄이기 위해서는 탄소 섬유로 특수 제작한 연료 탱크를 사용해야만 합니다.

효율이 만족스럽지 않은 연료전지 대신 수소를 직접 연소시키는 내연기관을 사용하는 자동차도 가능합니다. 그동안 사용해 왔던 화석연료 자동차의 기술을 적극적으로 활용할 수 있다는 것이 장점입니다. 실린더에 기체 상태의 수소와 적정한 양의 공기를 넣은 후에 점화 플러그를 이용해서 폭발시키면 내연기관이 작동하게 됩니다.

문제는 내연기관 온도입니다. 내연기관은 연료가 연소할 때 온도가 높을수록 연비가 좋아집니다. 그런데 연소 온도가 높아지면 공기 중의 질소가 산화돼 질소 산화물(NOx)이 만들어집니다. 결국 수소 내연기관차는 오염 물질 배출량을 줄이기 위해서 더 낮은 온도에서 연소가 일어나도록 만들 수밖에 없습니다. 수소 내연기관 자동차를 찾아보기 어려운 것도 그런

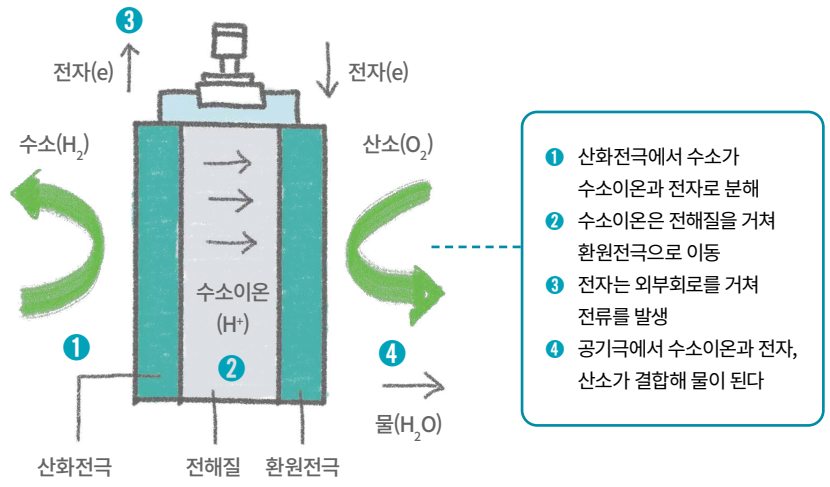
이유 때문입니다.

친환경 수소를 만드는 데 필요한 기술

수소는 세상에서 가장 먼저 만들어진 원소이자 가장 가벼운 원소입니다. 우주의 75%가 수소입니다. 그렇다고 수소가 우주에 지천으로 널려 있는 것은 아닙니다. 대부분 수소는 태양과 같은 항성에 집중적으로 모여 있습니다. 태양까지의 거리는 빛의 속도로도 8분 30초가 걸릴 정도로 멀지요. 더욱이 태양 표면의 온도 6000℃를 넘을 정도로 뜨겁습니다. 결국, 우주에 있는 수소는 우리에게 그림의 떡일 수밖에 없습니다.

물론 수소는 지구상에서도 10번째로 흔한 원소입니다. 지구에도 적지 않은 양의 수소가 있다는 뜻입니다. 그런데 순수한 원소 상태의 수소는 기체로 존재하고, 너무 가벼워 우주 공간으로 모두 빠져나가 버렸습니다. 지구에 남아있는 수소는 대부분 탄소와 결합한 탄화 수소(C_nH_m), 질소와 결합한 암모니아(NH_3), 산소와 결합한 물(H_2O)과 같은 화합물로 존재합니다. 수소를 연료로 사용하려면 화합물로부터 수소를 떼어내야만 합니다. 상당한 에너지가 필요합니다.

수소차의 연료로 사용하는 수소를 생산하는 방법은 크게 세 가지가 있습니다. 첫째는 정유공장의 증류 공정이나 제철공장의 코크스 생산 공정에서 부산물로 얻어지는 부생 수소(by-product hydrogen)입니다. 생산과정에서 많은 양의 온실가스가 발생하기 때문에 수소의 친환경 이미지와는 어울리지 않는 '그레이 수소(grey hydrogen)'라고 부르기도 합니다. 생산량이 제한적인 부생 수소는 대부분 암모니아를 합성하는 비료공장이나 정밀화학 제품 생산에 활용되는 수소화 공정에서 소비되기 때문에 수소차에 사용



하기는 어렵습니다.

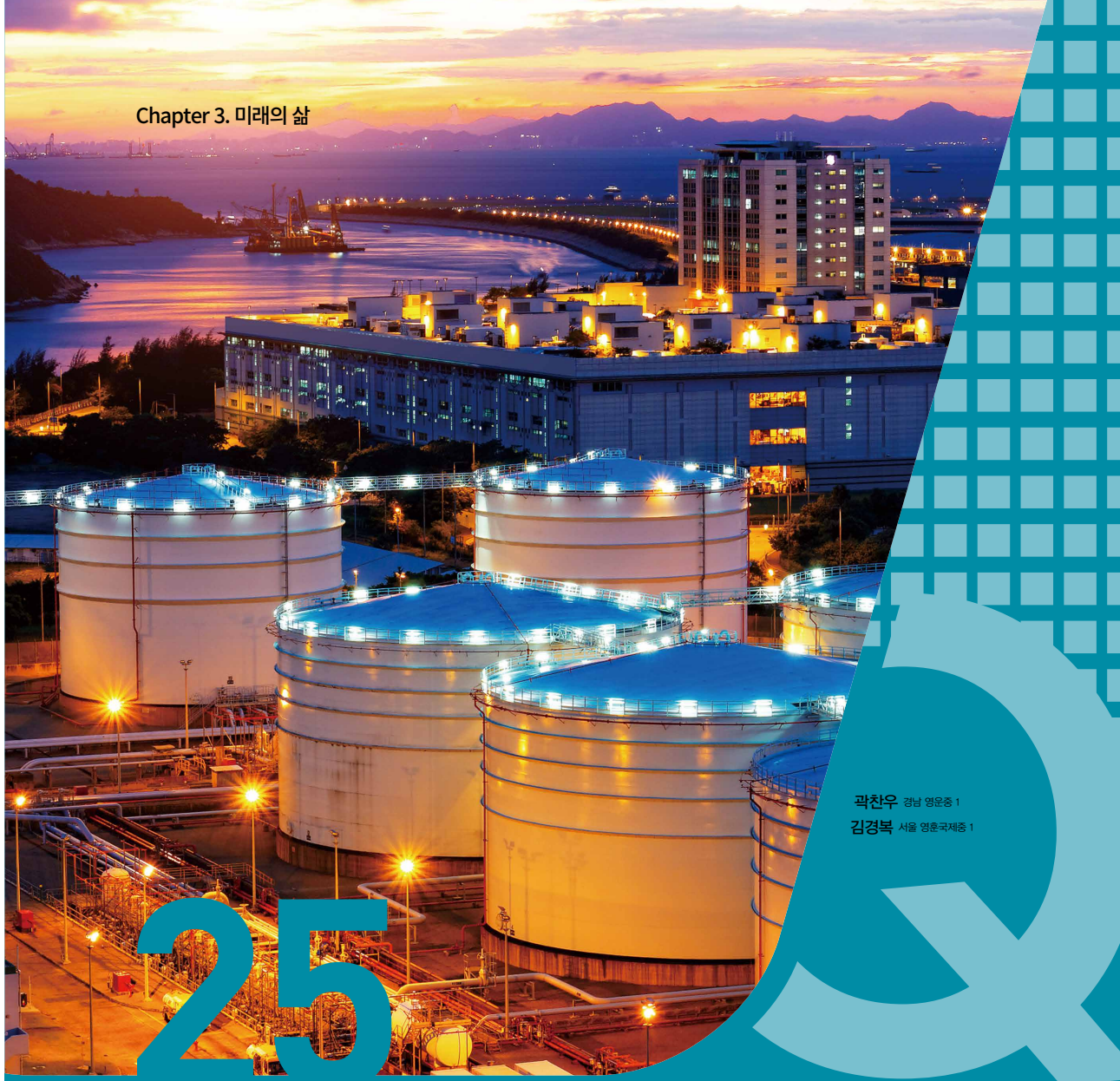
천연가스의 주성분인 메테인에서 뜨거운 수증기를 이용해 수소를 추출하는 '개질 수소(reformed hydrogen)' 또는 '추출 수소(extracted hydrogen)'도 있습니다. 뜨거운 수증기를 만들기 위해 석탄이나 천연가스를 사용하기 때문에 '브라운 수소(brown hydrogen)'라고 부르기도 합니다. 우리나라의 수소 충전소는 대부분 개질 수소를 사용하고 있습니다.

물을 전기분해해서 수소를 생산할 수도 있습니다. 흔히 '수전해 수소(water electrolysis hydrogen)'라고 부릅니다. 상온에서 염기성 전해질을 사용하는 '알칼리 전기분해' 방식도 있고, 섭씨 700도 이상의 고온에서 '양성자 교환 막'이나 '고체 산화물 전기분해'를 사용하는 방식도 있습니다. 온실가스 배출량이 가장 적어 '그린 수소(green hydrogen)'라는 이름이 붙습니다. 하지만 이런 방식들은 여전히 큰 비용과 막대한 양의 전력이 필요한 상황이죠.

기체 상태의 수소를 운반 및 저장하는 일도 쉽지 않습니다. 특히 공기와

혼합돼 수소의 농도가 4~75%의 범위가 되면 정전기와 같은 작은 불씨에 의해서도 폭발이 일어나게 됩니다. 수소를 액화시키면 부피가 800분의 1로 줄어 운반과 저장이 쉽습니다. 그러나 수소는 임계온도가 33K(영하 약 240℃)로 액화가 쉽지 않습니다. 헬륨을 냉매로 사용하는 고성능 냉동기가 필요하고, 단열에도 많은 신경을 써야 합니다. 수소를 팔라듐과 같은 금속의 틈새에 저장하는 기술도 개발하고 있지만, 수소 저장에 사용할 수 있는 금속은 가격이 매우 비싸다는 단점이 있습니다.

수소차가 여러 가지 장점이 있는 것은 사실입니다. 그러나 수소의 생산·운반·저장에 필요한 여러 가지 화학적 기술이 여전히 개발돼야 하는 상황입니다. 이를 위해 수많은 과학자와 공학자가 다양한 방식으로 한계를 극복하려 노력하고 있습니다. 머지않아 수소차가 도로 위를 가득 채울 날을 기다려볼 수 있을 것 같습니다.



곽찬우 경남 영운중 1
김경복 서울 영훈국제중 1

25 석탄과 석유가 사라진 후에는 어떻게 될까요

A

석원경 교수가 답하다

영국의 석유 기업 BP가 발표한 전 세계 에너지 통계 보고서에 따르면 2020년 기준 전 세계 석탄 매장량은 1조 740억 톤이며, 앞으로 생산 가능한 기간은 약 130년으로 추정됩니다. 2025년에는 인구가 81억 명에 이른다고 하니 자칫 21세기가 끝나기 전에 전 세계의 석탄이 고갈될 수도 있는 형편입니다. 석탄은 수억 년 전 지질시대에 살다 죽은 식물이 수중에 퇴적돼 이탄으로 변했다가, 높은 압력과 온도에 의해 습기가 빠져나가고 변질된 흑갈색의 가연성 암석입니다.

석유와 천연가스의 사정도 크게 다르지 않습니다. 석유와 천연가스는 수백만~수천만 년 전에 수중에 가라앉은 식물성 플랑크톤 퇴적물입니다. 앞으로 30년 이내에 석유와 천연가스가 고갈될 것이라는 어두운 전망도 있습니다. 물론 채광, 채굴 기술이 발전하고, 최대한 소비를 억제하도록 노력하면 고갈 시기를 어느 정도 늦출 수는 있겠지요. 어쨌든 석탄과 석유가 고갈된 이후에 대한 적극적인 준비가 절실한 형편입니다.

모든 에너지의 전기화

화석연료의 무분별한 소비에 의한 환경오염도 심각한 문제입니다. 화석연료를 연소할 때 방출되는 온실가스인 이산화 탄소가 지구 온난화를 일으키고, 결국에는 심각한 기후변화로 이어져서 인류의 지속적인 생존을 위협하고 있는 것은 사실입니다.

45억 년 지구의 역사에서 지난 200년은 매우 특별한 시기였습니다. 1760년에서 1820년 사이에 영국에서 일어난 산업혁명으로 생산성이 향상되면서 인구가 빠르게 늘어났습니다. 4억 명 수준에도 미치지 못했던 인구가 이제는 78억 명을 넘어섰습니다. 산업화를 이룩한 인간이 지구의 운명을 바꿔놓을 정도로 막강한 영향력을 발휘하게 됐습니다. 그래서 지질학에서는 산업혁명 이후를 '인류세(Anthropocene)'라고 불러야 한다는 주장이 제기되고 있습니다.

오늘날 고갈을 걱정하고 있는 석탄, 석유, 천연가스는 인류가 매우 다양한 목적으로 활용하고 있는 연료입니다. 가정용 취사와 난방은 물론이고, 자동차, 선박, 항공기의 연료로도 사용합니다. 제철, 제강, 정유, 시멘트, 비료 등의 산업에서도 엄청난 양의 화석연료를 사용하고 있습니다. 당장 가정, 산업, 수송에 사용할 화석연료를 대체할 수 있는 새로운 에너지 공급 수단을 찾아내는 일이 절박합니다.

지금의 기술 수준에서 가장 가능성 큰 대안은 에너지의 소비를 전적으로 전기에 의존하는 것입니다. 간단한 일은 아니지만, 가정의 취사와 난방을 전기로 대체하는 것은 충분히 가능한 일입니다. 주방의 가스레인지를

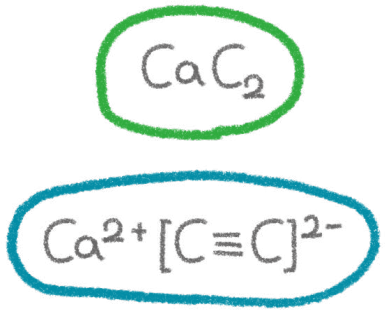
전자레인지와 인덕션 레인지로 바꾸는 일은 어렵지 않습니다. 천연가스를 사용하는 가스보일러는 쉽게 전기보일러로 교체할 수 있으며, 전기를 사용하면 가정의 주거환경이 더욱 쾌적하고 편리해집니다.

산업 부문의 대안은 훨씬 어렵습니다. 전기로(electric furnace)가 개발돼 있지만, 고철을 가공하는 정도로 활용할 수 있을 뿐입니다. 철광석을 녹여야 하는 제철 공장의 용광로, 석회석을 구워야 하는 시멘트 공장의 고로, 원유를 증류해야 하는 정유공장의 정제설비는 전기 에너지로 가동하는 것이 현실적으로 만만치 않습니다. 전기요금도 부담스럽지만, 기술적으로도 쉽지 않은 일입니다.

수송 부문의 문제도 심각합니다. 육상에서 운행하는 자동차의 경우에는 리튬 이온 배터리를 사용하는 전기 자동차로 대체할 수 있습니다. 물론 배터리를 충전하는 데에 오랜 시간이 걸리고, 운행 거리가 충분히 길지 않은 어려움을 극복해야 하고, 배터리의 성능도 개선해야 합니다. 그런데 대형 선박과 항공기의 경우에는 대안이 없습니다. 현재의 기술 수준으로는 배터리의 무게를 감당할 수 없는 형편입니다.

대체 소재의 개발은 더욱 어려워

그동안 인류가 활용해왔던 목재, 섬유, 고무, 염료, 의약품 등의 소재는 자연 생태계에서 생산됐습니다. 천연 소재는 생태계의 식물이나 동물이 자신의 생존을 위해 합성한 다양한 탄소 화합물입니다. 물론 자연에서 생산되는 천연 소재가 매력적일 수 있습니다. 그러나 그 품질이 언제나 우리에게 만족스러운 것은 아닙니다. 천연 소재는 생산량도 지극히 제한적일 수밖에 없습니다. 그런 소재에 의존해야만 했던 과거 인류의 삶은 생각보



칼슘 카바이드는 탄소 원자 2개가 삼중 공유 결합을 한 2- 음이온과 2+ 전하를 띠는 칼슘 양이온이 이온 결합한 물질이다.

다 훨씬 거칠고 힘겨웠습니다.

오늘날 우리가 누리고 있는 물질적 풍요는 대부분 합성 소재 덕분입니다. 19세기 중엽부터 빠르게 발전한 화학 기술 덕분에 우리가 원하는 기능과 품질의 소재를 다량으로 빠르게 생산할 수 있게 됐습니다. 석탄을 연소시키는 과정에서 발생하는 산업 폐기물인 콜타르에서 최초의 합성 의약품인 아스피린을 생산했고, 모브라는 인공 염료도 처음으로 합성했습니다. 콜타르는 약 30~180 ℃ 사이에서 액체로 존재하는, 방향족 탄화수소 고리를 3개 이상 가진 물질입니다.

20세기에는 나일론을 비롯한 합성 섬유도 개발되었습니다. 천연고무에 뒤지지 않은 탄성을 가진 합성 고무와 다양한 특성을 가진 플라스틱도 값싸게 대량으로 생산하기 시작했습니다. 이제는 그런 합성 소재를 원유를 증류해서 생산합니다. 그래서 20세기는 '합성 플라스틱의 세기'라고 부르기도 합니다.

석유가 고갈되면 우리가 활용하고 있는 합성 플라스틱의 생산도 어려워집니다. 대안을 찾는 일도 만만치 않습니다. 흑연 전극을 사용하는 전기 아크로에 석회와 코크스 혼합물을 넣어서 섭씨 2200도에서 생산하는 탄화 칼슘(CaC_2)이 대안으로 소개되고 있습니다. 흔히 카바이드로 알려진 탄화 칼슘을 물과 반응시켜 얻는 아세틸렌으로 원유나 천연가스를 대체할 수도 있을 것으로 기대하고 있습니다.

그러나 카바이드의 생산에도 석탄을 가공한 코크스가 필요하다는 사실은 주목할 필요가 있습니다. 우리가 지금까지 이룩해놓은 탄소 기반의 문명을 이어가기 위해서는 결국은 탄소를 활용하는 다양한 화학 기술을 서둘러 개발해야만 합니다.

미래 준비를 도와줄 원자력발전

현실적인 대안은 아직 없습니다. 많은 사람이 관심을 두는 수소는 아직은 생산, 운반, 저장, 활용 등을 위한 실용적인 기술을 개발하지 못하고 있습니다(24. '미래의 자동차 연료는 수소가 기본이 될까요' 참고). 전기로 포집한 이산화 탄소를 가공해서 메탄올, 휘발유, 경유와 같은 특성을 가진 전기 기반 연료 '이퓨얼(e-fuel)'을 생산하겠다는 주장도 있습니다. 하지만 이 또한 아직은 먼 미래의 아이디어 수준에 지나지 않은 형편입니다.

앞으로 30년 사이에 화석연료에 의존하지 않는 전기를 개발할 수 없다면, 다른 자원을 적극적으로 활용하면서 미래를 준비할 수밖에 없습니다. 이런 면에서 우라늄 원자핵이 반응을 일으킬 때 방출하는 에너지를 이용해 발전기를 돌려 전기를 얻는 원자력발전은 에너지 효율이 매우 높고 온실가스도 배출하지 않기에 아직 매력이 있습니다. 문제는 발전 과정에서 핵 물질 및 방사성 폐기물이 발생하고, 전체 우라늄 가운데 자연에 고작 0.7% 정도 존재하는 우라늄-235를 사용한다는 점입니다. 우라늄-235는 자연에 존재하는 우라늄 동위 원소 중 유일하게 열 중성자 핵분열이 가능합니다.

그렇다면 천연 우라늄의 99.3%를 차지하는 우라늄-238을 이용하며, 원전에서의 폐연료의 활용률을 크게 올려 방사성 폐기물도 적고 핵무기로 전용 가능성도 적다고 알려진 소형모듈원전(SMR·small modular reactor)을 적극

적으로 사용하면 어떨까요?

증기 발생기, 냉각제 펌프, 가압기 등의 장비가 원자로 내에 모두 들어 있는 일체형 SMR을 대형 선박이나 공장과 같이 전기를 많이 쓰는 시설에 일차적으로 설치하게 한다면 전 세계의 전기 사용량은 대폭 줄일 수 있습니다. 앞으로 덩치는 더욱더 작으면서 안전하게 설치할 수 있도록 개발된다면 좋을 것입니다.

박준후 경기 샘모루초 4
이선재 경기 정평중 3

26

달과 화성에 인공 도시를 만들 수 있을까요

석원경 교수가 답하다

우주 탐사 열기가 뜨겁습니다. 달이나 화성에 인간이 살 수 있는 인공 도시를 만드는 데 관심을 갖는 사람도 많아졌습니다. 영국의 물리학자 스티븐 호킹의 행성 이주설이 발단이었습니다. 인간이 화성에 정착하려면 가혹한 우주에서 안전하게 활동할 수 있는 새로운 환경을 만들어야 합니다. 식량, 물, 공기를 공급하는 것은 비교적 쉬운 일입니다. 지구처럼 사람이 살 수 있는 생물학적 환경을 만드는 작업은 훨씬 더 어렵습니다.

인공적으로 만든 생태환경

미국 애리조나주 오라클에 지구의 생태환경을 흉내 낸 '바이오스피어(biosphere)-2'라는 낯선 연구시설이 있습니다. 1만 3000m^2의 부지에 1987년에 건설된 바이오스피어-2는 외부로부터 빗물은 물론이고 바람도 새어 들어가지 못하도록 완전히 단절된 시설로서 세계에서 가장 큽니다. 러시아 시베리아 남부의 크라스노야르스크에도 1972년에 건설된 바이오스-3가 있습니다. 두 연구시설은 모두 지구에서 생물이 서식하는 영역처럼 인간이 살 수 있는 밀폐된 환경을 외계에 만들 수 있는지를 확인하기 위해서 건설됐습니다.

지구상의 수많은 생물은 공생하는 생물군계(biome)를 형성해야만 건강하게 생존할 수 있습니다. 영양을 공급해 주는 식량 역할을 해줄 농작물과 가축도 필요하고, 산소를 공급해줄 녹색식물도 있어야 합니다. 그뿐만이 아닙니다. 대장균을 비롯해 프로바이오틱스(probiotics)와 같은 박테리아도 있어야만 음식물을 소화하는 장의 건강을 유지할 수 있습니다.

오라클의 바이오스피어-2에는 열대우림, 바다, 맹그로브 습지, 사바나 초원, 사막, 농경지, 그리고 사람이 생활하는 공간 등 다양한 생물군계가 갖춰져 있습니다. 태양광 에너지를 이용하는 독립적인 냉난방 시설도 마련돼 있습니다. 다만 시설을 가동하는 데 필요한 전기는 현지에 별도로 마련된 액화천연가스(LNG) 화력발전소에서 생산합니다.

1990년대 초반에 8명의 과학자 부부가 바이오스피어-2에서 생활하는 실험에 참여했습니다. 벼, 밀 등 150여 종의 농작물을 경작하고, 돼지, 닭 등 3000여 종을 키우면서 충분히 자급자족할 수 있을 것으로 기대했습니다. 사람과 동물의 배설물은 세균으로 정화했습니다.

그러나 바이오스피어-2에서의 생활은 쉽지 않았습니다. 햇볕이 충분히 들어오지 않은 탓에 녹색식물이 충분한 양의 산소를 생산하지 못했습니다. 엎친 데 덮쳐 토양 미생물이 왕성하게 번성하면서 실내의 산소는 줄어들었고, 오히려 이산화 탄소는 늘어났습니다. 콘크리트도 생각보다 훨씬 많은 산소를 흡수했습니다. 공기 중의 이산화 탄소가 늘어나면서 바닷

물이 산성화되고, 산호가 녹기 시작했습니다. 불개미는 새로운 환경에 적응했지만, 그렇지 못한 곤충도 많았습니다. 이로 인해 생태계의 균형이 깨지면서 식량 생산도 어려워졌습니다. 결국에는 거주자도 심리적으로 동요하기 시작해서 2년 만에 실험은 중단되고 말았습니다. 1994년에 시작된 2차 실험에서는 식량과 산소 부족의 문제는 해결했지만, 실험 도중 바이오스피어-2를 운영하던 기업이 재정적으로 파산해버렸습니다.

러시아의 바이오스-3는 규모가 훨씬 작은 시설입니다. 지하에 건설한 315㎥ 부피의 철제 구조물에는 최대 3명의 거주자가 살 수 있도록 설계됐습니다. 수력발전소에서 공급해주는 전기를 이용하는 제논 아크램프로 밀과 채소를 재배할 수 있습니다. 다만 소비하는 산소의 75%는 외부에서 공급받아야 합니다. 1984년까지 10여 차례의 실험을 수행했고, 현재는 유럽우주국(ESA)과 공동으로 실험을 하고 있습니다.

독일에서도 유리와 강철로 만든 바이오스피어에서 광합성을 하는 원핵생물인 시아노박테리아를 활용하는 실험을 했습니다. 특히 이 생태환경에서의 시아노박테리아 중 하나인 아나베나(anabaena)가 아미노산을 만드는 것을 확인했습니다. 이외에도 화성의 대기에서 인간의 생존에 필요한 산소와 물, 영양성분을 만드는 생물학적 시스템을 구축하는 연구를 계속하고 있습니다.

거칠고 위험한 달과 화성

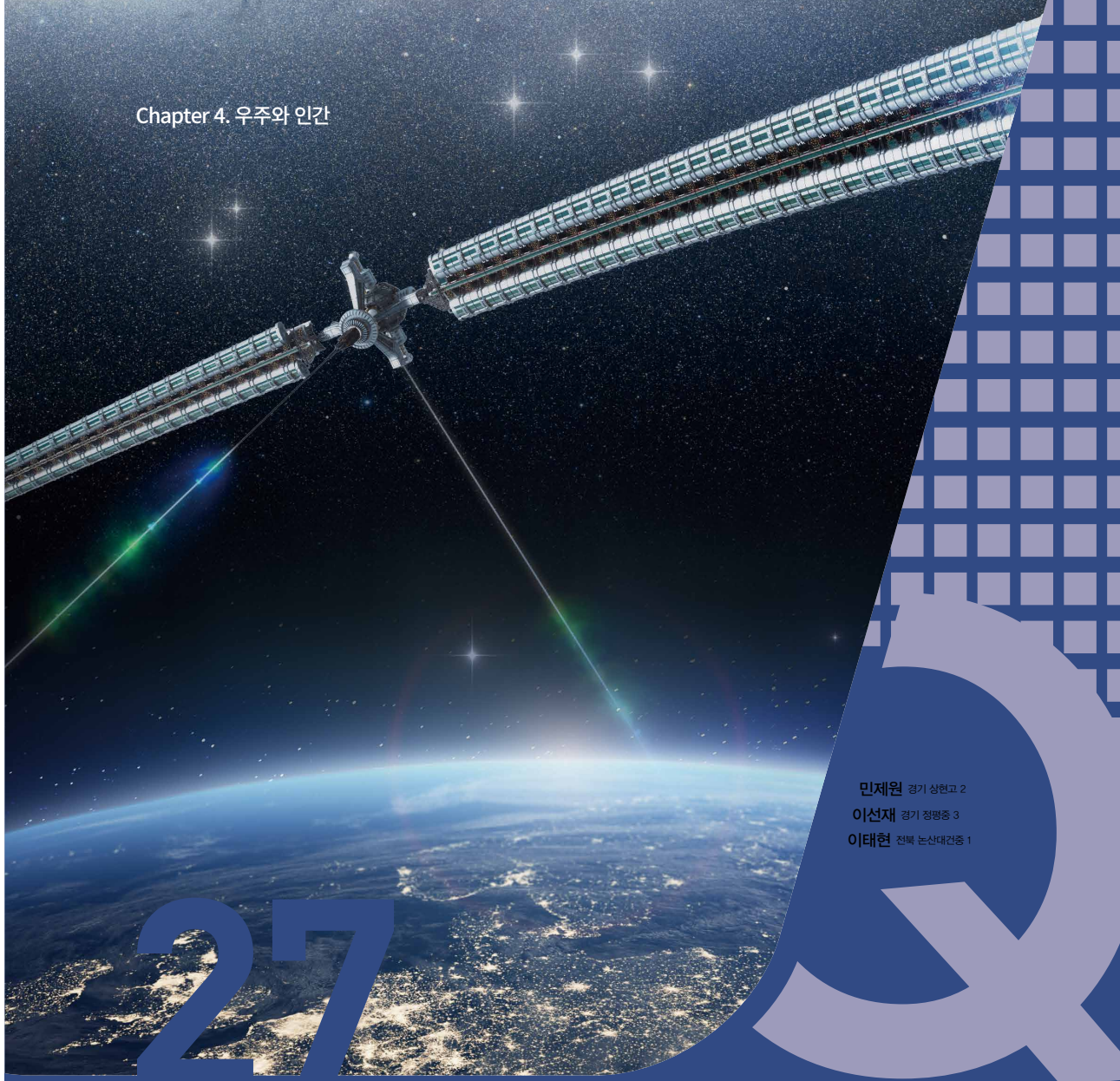
달과 화성의 자연환경은 상상을 넘어설 정도로 거칠고 위험합니다. 지구에서 가장 가까운 위성이지만, 대기가 전혀 없는 달에서는 소리도 전달되지 않고 산소와 이산화 탄소도 구할 길이 없습니다. 달은 지구처럼 자전

하지 않기 때문에 밤과 낮이 따로 없습니다. 태양이 비치는 곳은 130°C를 넘고, 태양이 지구에 가려진 곳의 온도는 영하 17°C로 매우 낮습니다. 또 달의 내부에는 철 성분이 없어 우주선에 속수무책으로 노출됩니다. 그런 곳에 인공 도시를 만들기는 쉽지 않습니다.

화성의 환경은 그나마 나은 편입니다. 화성은 24시간 37분마다 자전을 하고, 자전축도 25도 기울어져 있어서 지구처럼 계절의 변화가 있습니다. 화성에는 96%가 이산화 탄소로 이뤄진 대기가 있지만, 질량이 지구의 0.005% 수준에 불과합니다. 화성의 표면 온도는 최저 영하 140°C와 최고 20°C로 지구보다 훨씬 춥습니다. 더욱이 화성도 달처럼 자기장이 없어 우주에서 날아오는 우주선을 차단할 수 없습니다.

'퍼시'(Percy)라고도 부르는 미국의 탐사선 퍼서비어런스(Perseverance) 2021년 2월 18일부터 본격적인 화성 탐사를 시작했습니다. 자동차 크기의 퍼시는 19대의 카메라와 7종의 실험 장비를 갖추고 있습니다. 화성에 미생물이 살았는지, 화성의 암석과 대기를 이용해서 산소를 생산할 수 있는지도 확인할 예정입니다. 인간이 정착할 수 있는지를 본격적으로 조사하기 시작했다는 뜻입니다.

화성까지 가는 길 역시 멀고도 험합니다. 화성이 지구에 가장 가까이 다가올 때를 이용하더라도 6개월이 넘게 걸립니다. 화성에 화려한 인공 도시를 건설하더라도 화성으로 이주하려면 그 머나먼 여행을 견뎌내야만 합니다. 아름다운 푸른 행성 지구를 떠나 행성으로 이주하는 일은 절대 만만치 않을 것이라는 뜻입니다.



민제원 경기 상현고 2
이선재 경기 정평중 3
이태현 전북 논산대건중 1

27

국제우주정거장과 지표면을 연결하는 승강기를 제작할 수 있을까요

석원경 교수가 답하다

미국, 러시아, 유럽연합(EU), 캐나다, 일본 등 14개국이 공동으로 운영하는 국제우주정거장(ISS·International Space Station)은 무중력과 우주 환경을 안정적으로 연구할 수 있는 곳입니다. 실제로 우주 개발과 관련된 화학과 물리학, 기상학, 천문학, 공학 등의 다양한 연구가 활발하게 이뤄지고 있습니다.

ISS는 1998년 건설이 시작됐습니다. 2000년 11월 2일 미국항공우주국(NASA)의 우주인 빌 셰퍼드, 러시아연방우주국(Roscosmos)의 우주인 세르게이 크리칼레프와 유리 기젠코 등 3명이 ISS에 착륙해 136일 동안 머문 이후 세계 각국의 수많은 우주인이 ISS를 방문했습니다. 2021년 5월 14일 기준으로 약 20년 동안 19개국 243명의 우주인이 방문했습니다. 2008년에는 한국의 우주인 이소연이 국내 최초로 ISS를 방문해 11일간 체류하며 연구를 했습니다.

이처럼 ISS에는 매해 각국의 수많은 우주인이 방문합니다. 그만큼 운영하고 유지하는 데 비용이 많이 듭니다. 연간 운영비는 40억 달러(약 4조 6000억 원)에 이릅니다. 이외에 우주인과 물자를 우주선을 태워 그곳에 실어 나르기까지 과학자, 엔지니어 등 많은 사람의 노력도 필요합니다. 2011년까지는 ISS에 우주인을 실어 나르는 데 아틀란티스호, 인데버호 등 미국의 우주 왕복선이 큰 역할을 했습니다. 지금은 미국의 스페이스 X의 '크루 드래건'과 러시아의 '소유스'가 주로 사용되고 있습니다.

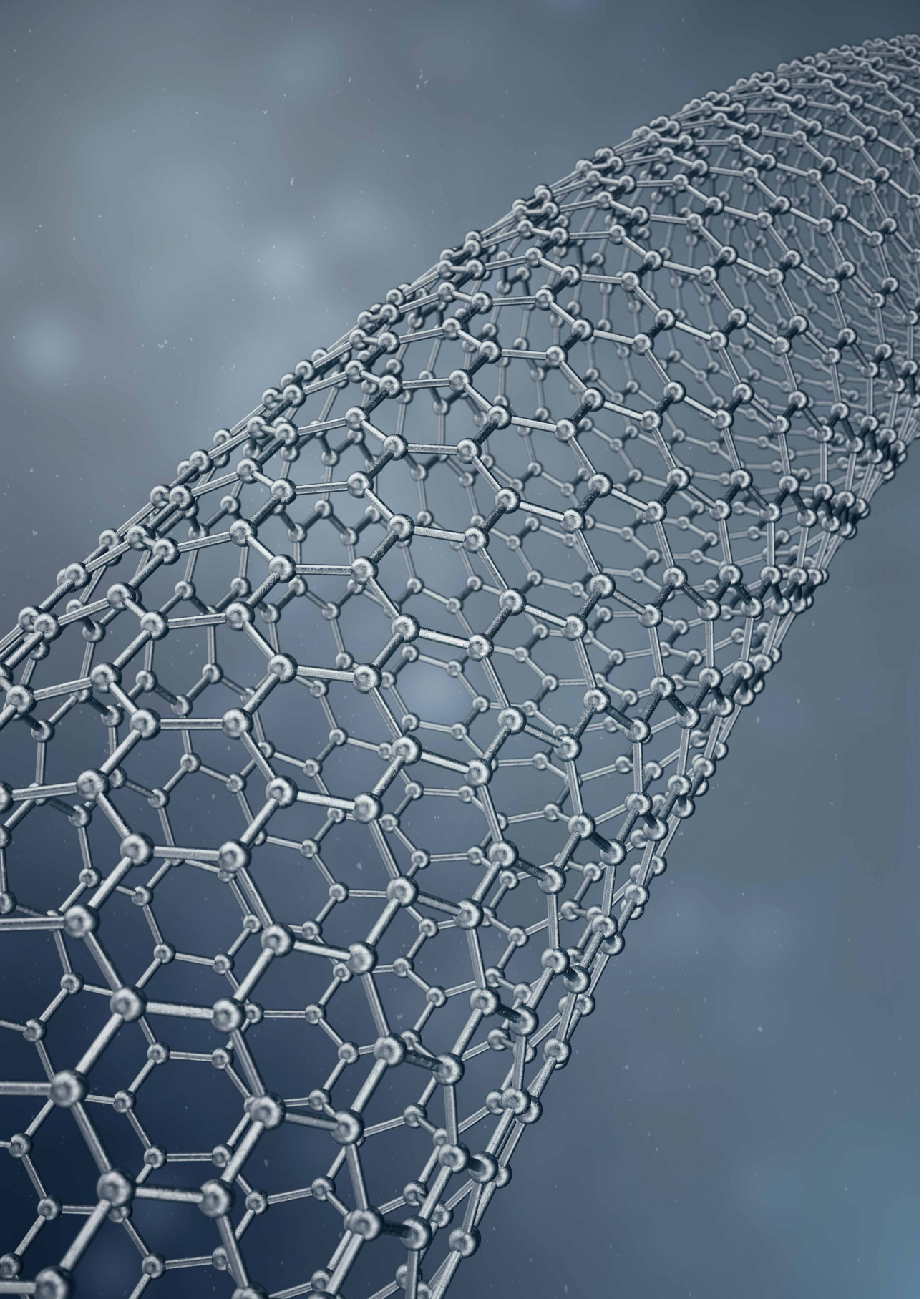
그런데 20년 넘게 사용하다 보니 ISS는 노후화됐고 크고 작은 결함도 나타나기 시작했습니다. ISS는 2024년 운용을 마칠 예정입니다. 운용 시한을 늘리기 위해 노력하고 있으나, 장기적으로 새로운 국제우주정거장 등을 우주로 올라가기 위한 대안이 절실한 상황입니다.

에펠탑에서 떠올린 우주 승강기의 꿈

우주 승강기(엘리베이터)를 처음 구상한 사람은 러시아 로켓 과학의 선구자인 콘스탄틴 치올콥스키입니다. 그는 1895년 프랑스 파리의 에펠탑을 보고 영감을 얻어 하늘에 닿을 만큼 높은 탑을 세워 승강기로 물체를 올리는 방법을 떠올렸습니다. 지상 3만 5786km 높이의 정지 궤도까지 올라가 지구와 같은 속도로 자전하는 거대한 탑을 구상한 것입니다.

물론 비현실적인 공상이었습니다. 정지 궤도 높이에 이르는 거대한 탑의 무게를 견뎌낼 수 있는 화학 소재를 찾지 못했습니다. 당시 프랑스 건축가 알렉상드로 에펠이 1889년에 완공한 에펠탑의 높이는 324m였는데, 이 철탑을 짓는 데만 7300t의 철이 필요했습니다.

거대한 탑을 쌓아 올리는 대신 정지 궤도에서부터 추를 단 튼튼한 케이



블을 지표면까지 늘어뜨려서 승강기로 사용하는 발상이 더 현실적으로 보입니다. 실제로 1960년경 러시아의 과학자 유리 아르추타노프가 이런 아이디어를 생각해냈습니다. 정지 궤도 바깥쪽으로 적절한 크기의 균형추를 달아놓으면 지구의 자전에 의한 원심력 때문에 케이블이 아래로 떨어지지 않고 정지 상태를 유지할 수 있다는 것이었습니다. 케이블 위쪽을 두껍게 만들면 케이블의 무게를 최대한 가볍게 만들 수 있습니다.

그러나 케이블을 타고 오르내릴 승강기를 만드는 과정은 쉽지 않습니다. 승강기를 만들려면 정지 궤도에 세워둔 우주정거장으로부터 아래쪽으로 케이블을 연결하면서, 동시에 위쪽으로도 균형추 구실을 해주는 케이블을 설치해야만 합니다. 이때 승강기 케이블의 무게 중심을 일정하게 유지하지 못하면 우주정거장이 아래로 추락해버리거나 우주 공간으로 날아 가버릴 수도 있습니다. 물론 승강기 케이블에 사용할 소재는 우주선으로 실어 날라야만 합니다.

케이블의 무게를 지탱할 수 있는 화학 소재를 찾기도 쉽지 않습니다. 가벼우면서도 질긴 섬유 소재가 필요합니다. 4960km 길이의 케이블을 만들어도 자체 무게 때문에 끊어지지 않고 지탱할 수 있어야 합니다. 철이나 타이타늄, 또는 알루미늄 합금으로는 고작 30km 길이까지만 만들 수 있습니다.

더 긴 길이를 지탱할 수 있는, 강도가 강하고 가벼운 소재를 만들기 위한 노력도 있었습니다. 미국 화학 기업 듀폰은 1971년 폴리아마이드 계열의 인조 섬유인 '케블라(Kevlar)를' 개발해 출시했습니다. 케블라는 400km 길이까지 길게 만들어도 자체 무게를 견딜 수 있습니다. 1999년 미국의 우주항공국(NASA)은 15t의 물체를 들어 올릴 수 있는 지름 1m, 길이 4800km의 강철 케이블을 설계했습니다.

꿈의 소재, 탄소 나노튜브

1991년 일본의 이이지마 스미오는 전기 방전에 사용한 흑연 음극에서 형성된 탄소 응집체를 분석하던 중 놀라울 정도로 가벼우면서 강철보다 훨씬 더 질긴 새로운 소재를 발견했습니다. 탄소 결합으로 만들어진 육각형이 원통(튜브) 모양을 이루고 있는 '탄소 나노튜브'였습니다. 현재 기술로 굵기는 나노미터 수준이고, 밀도는 1.6g/mL 정도로 작은 탄소 나노튜브를 만들 수 있습니다.

역시 육각형의 탄소로 만들어진 그래핀(graphene)도 가볍고 질긴 나노 물질입니다. 영국에서 활동한 러시아의 물리학자 안드레 가임과 콘스탄틴 노보셀로프는 투명 테이프를 이용해 흑연 연필심에서 그래핀을 떼어내는 방법을 개발했습니다. 이들은 신소재인 그래핀을 발견한 공로로 2010년 노벨 물리학상을 받았습니다. 그래핀은 얇고 가볍지만, 강철보다 200배 이상 강도가 높습니다. 더욱이 그래핀은 탄성이 좋아서 쉽게 구부리거나 늘릴 수도 있습니다. 이 그래핀을 원통 모양으로 말면 탄소 나노튜브가 만들어집니다.

탄소의 동소체(allotrope)가 강철보다 질기다는 사실이 놀랄 일은 아닙니다. 탄소의 또 다른 동소체인 다이아몬드는 탄소 원자들이 정사면체 구조로 연결된 것으로 굳기(경도)가 10입니다. 세상에서 경도가 가장 큰, 매우 단단한 물질입니다.

탄소 60개가 축구공 모양으로 결합해 만들어진 '풀러렌(fullerene)'도 중요한 탄소 동소체입니다. 탄소로 이뤄진 오각형 12개, 육각형 20개가 서로 연결돼 있습니다. 영국의 해럴드 크로토, 미국의 로버트 컬과 리처드 스몰리는 1985년 풀러렌 합성에 성공한 업적으로 1996년 노벨 화학상을 받았습니다.

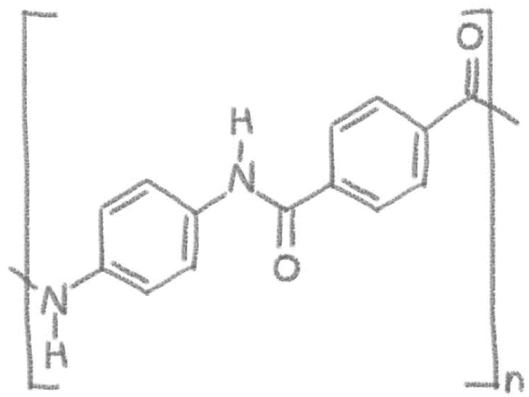
탄소 나노튜브, 그래핀, 풀러렌 등의 발견으로 시작된 나노 과학은 화학에서 빠르게 발전하고 있는 새로운 분야입니다. 나노 과학이 발전하면서 우주 승강기에 대한 관심이 되살아났습니다. NASA는 탄소 나노튜브로 합성한 그래핀 나노 리본으로 10만 km의 높이의 우주 승강기를 개발할 수 있을 것으로 예상했습니다.

실제로 2000년대에 들어서서는 미국과 일본에서 우주 승강기를 제작하겠다는 벤처 기업이 등장했습니다. 그러나 완벽한 구조를 유지하면서 길이가 충분히 긴 탄소 나노튜브를 합성하는 일조차 아직은 어렵습니다. 지금까지 얻은 탄소 나노튜브의 길이는 고작해야 50cm 정도이며 아직은 대량생산하는 기술도 없습니다. 게다가 탄소 나노튜브는 원료에 불순물이 조금만 섞여도 강도가 확연히 감소합니다.

승강기, 개발돼도 문제는 많아

개발을 완전히 포기해버린 것은 아닙니다. 지금도 우주 승강기가 사람들이 생각하는 것보다 일찍 만들어질 것이라는 희망을 버리지 않고 있습니다. 하지만 우주 승강기가 개발된다고 해도 장밋빛 미래가 보장된 것은 아닙니다.

2021년 4월 제8회 우주 쓰레기 온라인 회의에서 유럽우주국(ESA)



케블라

은 1957년 인류 최초로 스푸트니크 1호가 발사된 이후 60여 년 동안 전 세계에서 1만 1370개 인공위성을 쏘아 올렸다고 밝혔습니다. 인공위성 가운데 약 6900개가 여전히 궤도에 남아있는데 이 가운데 4000여 개는 여전히 작동 중이지만, 나머지 2900여 개는 제 기능도 하지 않고 우주 쓰레기로 지구 주변을 떠돌고 있습니다.

특히 저궤도에서 돌고 있는 인공위성은 매우 빠른 속도로 움직이고 있습니다. 지표면으로부터 약 400km 높이의 상공에 있는 ISS도 평균 시속 2만 8000km의 속도로 궤도를 돌고 있습니다. 93분마다 지구를 한 바퀴씩 돌고 있던 셈입니다.

이런 사실들로 미뤄볼 때, 우주 승강기가 개발된다면 지구 궤도를 돌고 있는 인공위성이 우주 승강기의 케이블과 충돌할 가능성이 큽니다. 인공위성만 문제가 아닙니다. ESA에 따르면, 지구의 궤도에 남아있는 우주 쓰레기의 총량은 무려 9300t에 이릅니다. 위성과 부딪혔을 때 치명적인 손상을 주는 크기 10cm가 넘는 파편도 2만 9000개나 됩니다. 게다가 지금의 추세라면 2030년에는 우주 쓰레기의 양이 3배나 늘어날 것으로 보입니다.

대부분의 우주 쓰레기는 지구 중력으로 끌려와 대기권에 진입하면서 마찰력에 의해 불타 사라지지만, 일부는 지상이나 바다에 떨어집니다. 우주 쓰레기가 지구에 추락할 때 정확하게 어디로 떨어질지를 예측하기 어려워 매번 전 세계는 긴장하고 있습니다. 이렇게 우주 쓰레기의 위험성이 커지자 각국은 대형 우주 감시 망원경이나 고성능 레이더를 이용해 이를 추적하고 감시하고 있습니다. 그 외에 우주 공간을 떠돌다가 지구로 떨어지면서 별똥별(유성)이 되는 소행성과 운석도 우주 승강기에 심각한 위협이 될 것입니다.

민제원 경기 상현고 2

28

영화 승리호의 나노봇이 가능할까요

이덕환 교수가 답하다

우주 SF 영화 '승리호'에 등장하는 '나노봇(nanobot)'은 나노미터 크기의 초소형 로봇입니다. 나노미터는 10억 분의 1m로 세상의 모든 물질을 구성하는 원자의 크기에 해당하는 영역입니다. 영화 속에서 나노봇은 자기 복제 능력까지 갖췄고, 나노봇을 만든 사람들조차 이해할 수 없는 신비스러운 기능을 발휘합니다. 몸속에서 뇌 신경과 결합해서 놀라운 초능력을 보이고, 우주를 오염시키는 우주 쓰레기를 먹어 치우며 심지어 유전자를 조작해서 죽어가는 식물을 순식간에 살려내는 신통한 능력도 있습니다.

다양한 작업을 수행하는 로봇

로봇의 시대는 빠르게 진보하고 있습니다. 한국은 전 세계에서 산업용 로봇을 가장 활발하게 사용하는 나라입니다. 산업용 로봇은 외부의 컴퓨터가 지시하는 작업을 수행하지만 최근에는 내장된 컴퓨터로 스스로 상황을 판단해서 작업을 수행하는 자율형 로봇도 속속 등장하고 있습니다.

기업 입장에서 산업용 로봇은 생산성을 높여주는 유용한 기술입니다. 불량률이 낮아지고, 작업 시간에도 제한이 없습니다. 하지만 이점만 있는 것은 아닙니다. 로봇이 인간을 대체하면 일자리가 줄어 심각한 사회 문제가 일어날 수 있다는 주장도 있습니다. 기업이 로봇으로 얻은 이익을 사회에 환원시키는 새로운 제도 등이 필요합니다.

기업 외에도 로봇은 다양한 곳에서 활약합니다. 우선 인간을 대신해 위험한 작업을 수행합니다. 인체에 해로운 페인트를 분사하는 자동차 도색 작업이 대표적인 예입니다.

공기 한 줌 없는 우주 공간에서 우주선을 수리하거나, 잠수부가 들어갈 수 없을 정도로 깊은 바다에서 작업을 수행하는 로봇도 있습니다. 사람이 다루기에는 부품의 크기가 너무 크거나 작은 경우에도 로봇이 유용합니다. 가정이나 매장에서 일상생활을 보조해주는 로봇도 있고, 장애인이나 노약자를 도와주는 로봇도 있습니다.

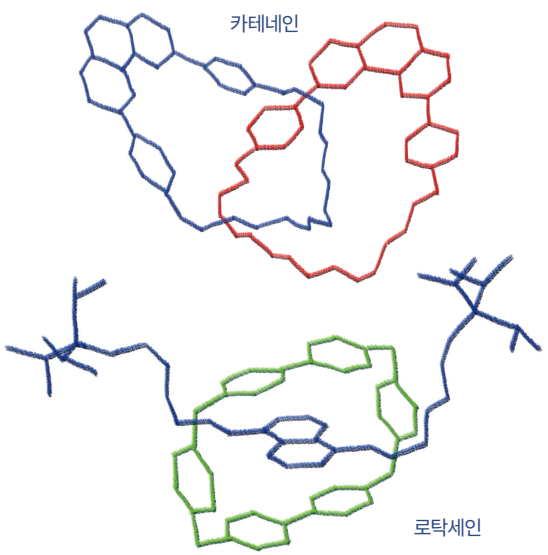
인간과 닮은 로봇 '휴머노이드(humanoid)'도 개발되고 있습니다. 일본 기업 혼다가 2000년에 개발한 '아시모(ASIMO)'는 사람의 얼굴이나 음성을 인식하고, 호출 신호에 반응합니다.

평지는 물론이고 계단과 경사면에서도 시속 3km 정도의 속도로 자유롭게 보행을 할 수 있습니다. 한국에서도 2004년 오준호 KAIST 교수팀이 휴머노이드 로봇 '휴보(HUBO)'를 개발했습니다. 휴보는 장애물을 피해서 걸어 다니고 춤까지 출 수 있습니다. 휴머노이드 로봇은 앞으로 인간의 지능과 감각, 행동까지 묘사해 인간과 협력하며 다양한 역할을 할 것으로 기대됩니다.

분자 세계를 지배하는 나노봇

로봇은 여러 단계의 복잡한 일을 스스로 알아서 수행할 수 있다는 점에서 단순한 작업을 반복적으로 수행하는 기계와 구분됩니다. 나노봇의 역사는 기계에서부터 시작합니다. 나노미터 크기의 '분자 기계(molecular machine)'는 1983년 최초로 등장했습니다. 프랑스의 화학자 장 피에르 소바주는 구리 이온을 이용해 도넛 모양의 탄화수소인 카테네인(catenane) 분자를 기계적인 결합으로 연결했습니다.

1991년 미국의 화학자 프레이저 스토더트는 화합물 로탁세인(rotaxane)으로 피스톤 운동을 하는 분자 기계를 만들었습니다. 이 연구로 분자 기계를 외부 자극에 따라 운동을 조절하는 물리적 스위치로 활용할 가능성이 열렸습니다. 네덜란드의 화학자 베르나르 페링하는 1999년 분자 기계의 결정판 격인 '분자 모터'를 합성했습니다. 화학적으로 연결된 두 개의 평평한 회전날개 분자가 한 방향으로만 회전했습니다. 세 화학자는 가장 작은 기계를 합성한 업적으로 2016년 노벨 화학상을 받았습니다.



승리호의 나노봇은 '폰 노이만 탐사선(von Neumann probe)'의 개념과 유사합니다. 미국의 수학자 존 폰 노이만이 고안한 이 탐사선은 나노 크기 기계가 우주 물질을 이용해 자가 복제를 하고 우주를 탐사합니다.

이론상으로만 존재하던 나노봇은 20세기 후반 생명과학 분

야에서 가능성이 움텄습니다. 생명체는 나노미터 수준에서 원자와 분자를 생체 조직으로 변환시키는 천연 나노 공장입니다. DNA 속 유전정보를 이용해 단백질을 합성하는 세포기관 리보솜(ribosome)이 나노 공장의 핵심이죠.

DNA는 단순히 단백질 합성에 필요한 정보만 가지고 있지 않습니다. 후손에게 유전정보를 물려주는 자기 복제 기능도 있습니다. 이뿐만이 아니죠. 생명체가 끊임없이 변화해 주변 환경에 적응하는 진화도 DNA 덕분에 가능합니다. 영화 승리호 속 나노봇의 신비스러운 자기 복제 능력도 사실은 DNA에서 힌트를 얻었을 것으로 짐작합니다.

실제로 나노봇은 질병을 진단하고 치료하는 의료 분야에서 활용될 가능성이 높습니다. 이미 위장이나 혈관의 내부를 자세하게 살펴보는 나노봇인 캡슐 내시경이 개발되고 있습니다. 캡슐 내시경이 상용화되면 수술을 하지 않고도 질병을 정확하게 진단할 수 있습니다. 약물을 작용 부위에 정확하게 전달해주는 '약물 전달 시스템(drug delivery system)'으로 나노봇을 활용할 수도 있습니다.

나노봇이 실현되면 적은 비용으로 우주 탐사를 할 수 있습니다. 지금까지는 우주를 탐사하기 위해 엄청난 연료를 소비하는 초대형 탐사선만을 제작해 왔습니다. 돌발상황이 생겨 탐사선이 불능이 되면 탐사는 종료되고 말았습니다. 수많은 우주 나노봇을 한꺼번에 발사해 각종 상황을 뚫고 살아남는 몇 대로 탐사를 하면 손실 비용을 줄일 수 있을 것입니다.

나노봇의 에너지원 후보로는 우주의 자기장이 유력합니다. 우주로 나아가면 외부에서 연료를 공급할 필요가 없다는 의미입니다. 하지만 자기장으로 추진하는 나노봇을 실현하려면 예상치 못한 전기장이나 자기장을 만났을 때 항로를 이탈하는 문제를 해결해야 합니다.

권윤규 서울 불암초 5

29

빛의 속도로 날아가는 우주선을 만들 수 있을까요

석원경 교수가 답하다

인공위성이나 우주선에 꼭 필요한 것은 추진력을 제공해 주는 로켓입니다. 지금까지 개발된 로켓은 고체 또는 액체 상태의 연료를 산소 등의 산화제로 연소시켜서 발생하는 기체를 분사해 이때 발생하는 추진력으로 비행합니다.

고체 연료로는 질산 암모늄, 과염소산 암모늄, 질산 포타슘 등이 있고, 액체 연료로는 고순도 등유나 액화시킨 수소, 메테인 등이 사용됩니다. 하이드라진(N_2H_4), 메틸하이드라진($CH_3(NH)NH_2$ 또는 $H_2NN(CH_3)_2$), 사산화 이질소(N_2O_4), 과산화 수소(H_2O_2) 등도 액체 연료로 사용됩니다.

로켓의 역사는 생각보다 훨씬 깁니다. 904년 화약을 이용해서 만들었던 중국의 '불화살'이 로켓의 시초였습니다. 13세기 송(宋)이 몽골의 침략을 물리치기 위해 폭발 관을 장착한 불화살을 제작하기도 했으며, 이를 흉내 낸 몽골이 로켓 기술을 유럽으로 전해줬습니다. 제2차 세계대전 중에 독일의 히틀러는 'V1'이라는 장거리 무인 로켓 2만 발로 영국 런던을 공격해 큰 피해를 줬습니다.

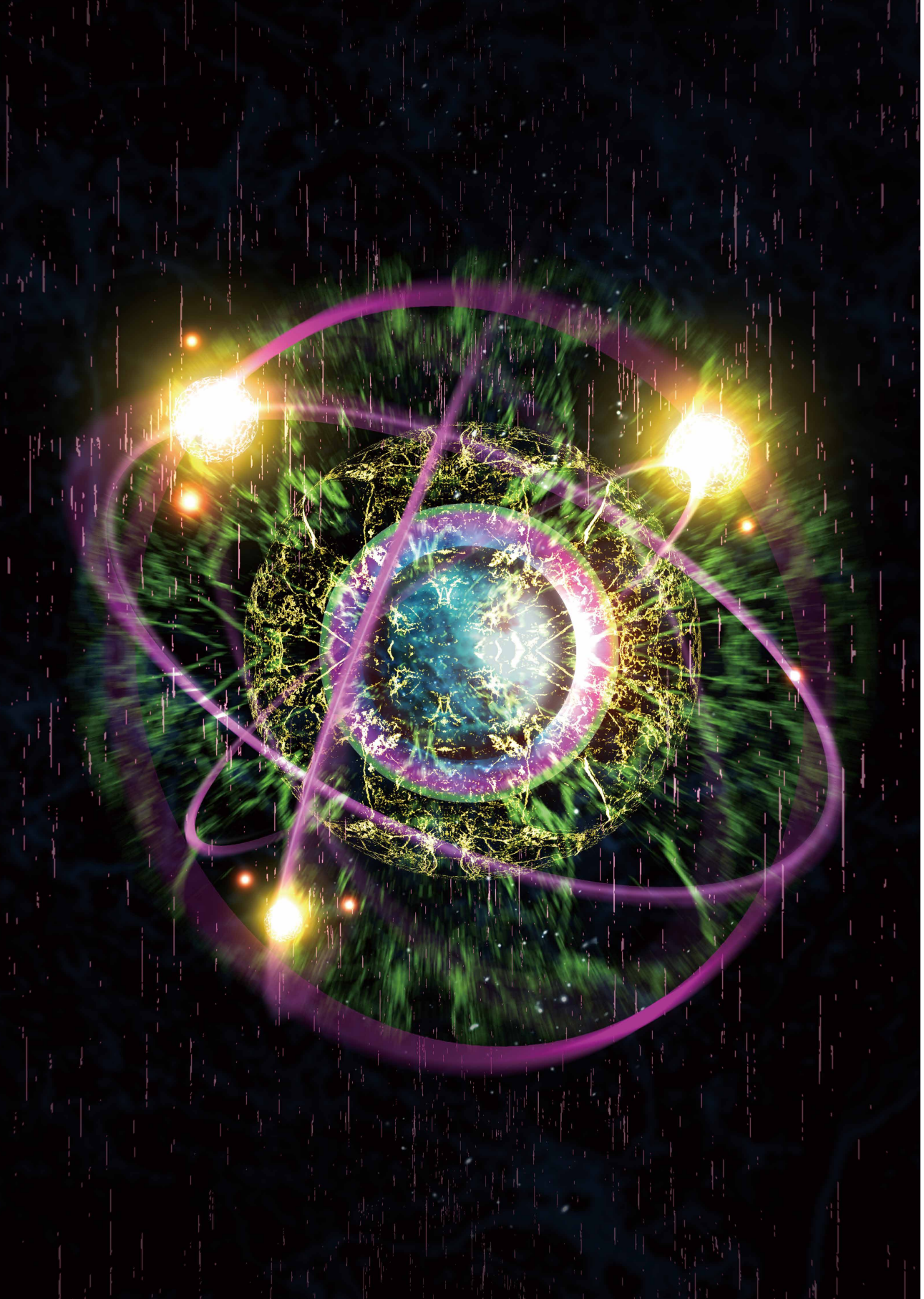
점점 커지는 우주 개발의 꿈

우주 개발의 역사는 1957년 소련이 인공위성 스푸트니크 1호를 발사하면서 시작되었습니다. 미국과 소련은 치열하게 경쟁했습니다. 1961년에는 소련의 보스토크 1호에 오른 유리 가가린이 우주를 비행했고, 1969년에는 미국의 닐 암스트롱이 아폴로 11호를 타고 달에 착륙했습니다. 모두 인류 최초로 기록된 역사적 성과였습니다. 1977년에 미국이 발사한 보이저 1호와 보이저 2호는 지금은 태양계를 벗어나 더 먼 우주로 날아가고 있습니다.

오늘날 우리는 우주 시대를 살고 있습니다. 2020년 4월의 통계에 따르면 지구 궤도에는 2666개의 인공위성이 우리에게 다양한 서비스를 제공하고 있습니다. 그중 1007개는 통신용이고, 446개는 기상·해양 등 지구 관측용입니다. 위성항법시스템(GPS)에 활용되는 인공위성도 97개나 됩니다. 1990년 발사한 허블우주망원경은 31년이 지난 지금도 우주의 신비를 밝힐 소중한 자료를 보내주고 있습니다.

우주에 관한 관심은 여전히 뜨겁습니다. 이제는 미국과 러시아뿐만 아니라 유럽연합·일본·중국·인도·아랍에미리트(UAE)도 우주 개발에 적극적으로 나서고 있습니다. 한국도 예외가 아닙니다. 인공위성을 쏘아 올리기 위한 발사체 개발을 눈앞에 두고 있고, 달 탐사 계획도 추진하고 있습니다.

민간 기업도 본격적으로 우주에 관심을 보입니다. 일반인들도 우주를



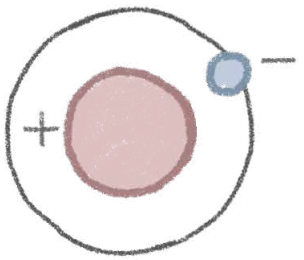
비행할 수 있는 시대가 열리고 있습니다. 2021년 7월 11일에는 영국의 버진그룹 회장인 리처드 브랜슨이 민간 우주선 '유니티22'를 타고 고도 88.5km 상공을 비행했고, 약 열흘 뒤 아마존 설립자 제프 베조스도 블루 오리진의 '뉴셰퍼드'를 타고 성공적으로 우주 비행을 마쳤습니다. 미국의 스페이스X는 재사용 로켓을 이용해 지구 전체에 초고속 인터넷 서비스를 제공하는 사상 최대 규모의 위성 네트워크 구축 사업을 추진하고 있습니다. 인류의 화성 이주가 스페이스X의 궁극적인 목표입니다.

다양한 로켓의 미래

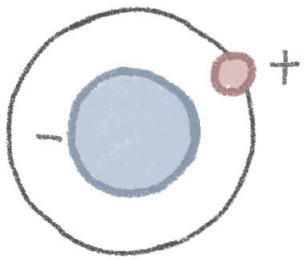
우주선에는 다양한 로켓이 필요합니다. 다양한 방식의 연료를 이용해 로켓의 추진력을 얻을 수 있는 방법이 개발되고 있습니다. 대표적으로 연료의 화학적 연소를 이용하는 화학 로켓은 추진력이 강합니다. 지상에서 발사한 우주선에 지구의 중력을 극복할 추진력을 제공한다는 측면만 고려하면 화학 로켓은 매우 유용합니다. 그러나 화학 로켓에 실을 수 있는 연료와 산화제의 양은 제한적이기 때문에 로켓의 추진 시간이 짧은 것이 단점입니다.

전하를 가진 이온을 이용해 추진력을 발생시키는 이온 엔진도 있습니다. 이온 엔진의 원리는 텔레비전이나 컴퓨터 모니터로 사용하던 브라운관과 비슷합니다. 전기적으로 중성인 기체를 이온화시킨 후에 전기장으로 가속해서 추진력을 발생시킵니다. 이온 엔진은 대기 중에서는 충분한 추진력을 내지 못하지만, 연료 사용량이 많지 않기 때문에 우주 공간에서 우주선의 자세를 교정할 때 특히 유용하게 사용됩니다.

미국항공우주국(NASA)이 1998년 소행성과 혜성을 탐사하기 위해서 발



수소(양성자 주위를 둘러싼 전자)



반수소(반양성자 주위를 둘러싼 반전자)

사했던 '딥스페이스 1호'에 장착된 이온 엔진은 2년 동안 작동했습니다. 소행성대 탐사를 위해 발사했던 '던(Dawn)'에도 3개의 이온 엔진이 장착됐습니다.

아직 개발 중인 로켓도 있습니다. 핵분열 로켓(nuclear thermal rocket)에서는 핵분열 시 발생하는 열을 이용해 액체 수소와 같은 추진제를 가열시킨 후에 노즐을 통해서 분사시켜 추진력을 발생시킵니다. 핵분열 로켓은 NASA가 우주왕복선을 개발하기 시작한 1973년에 시도했던 새로운 유형의 로켓이었습니다.

핵분열에서 생성되는 물질을 직접 노즐을 통해 분사시켜서 추진력을 발생시키는 기술도 가능할 것으로 보입니다. 하지만 문제는 로켓을 발사할 때 발생하는 방사성 물질이 대기를 오염시킬 수 있다는 점입니다. 아울러 발사할 때 매우 강력한 전자기 펄스가 발생해 부근에 있는 전자 장비를 고장 낼 수도 있습니다.

라디오파와 자기장으로 수소 기체를 수백만 ℃로 가열해 얻은 초고온의 플라스마로 강한 추진력을 얻는 플라스마 엔진도 개발됐습니다. 하지만 이 엔진도 다른 별로 가기에는 힘들 것으로 보입니다. 중수소의 핵융합을 이용하는 핵융합 로켓(fusion rocket)도 개발되고 있습니다. 1960년에 처음 제안됐고, 유명한 천체 물리학자 칼 세이건에 의해 널리 알려진 새로운 로켓입니다. 그러나 중수소의 핵융합을 연속적으로 일으키는 기술이 필요합니다.

미국은 입자가속기를 이용해 고에너지 양성자 빔을 표적 시료에 쏘고 여기에 자기장을 걸어 속도가 크게 줄어든 반(反)양성자(antiproton, 양성자에서 다른 성질은 같고 전하가 반대인 입자)를 따로 골라내는 데 성공했습니다.

반양성자를 반전자와 반응시키면 반원자인 반수소를 얻을 수 있는데, 이 과정에서 발생하는 에너지를 이용하면 로켓에 응용할 수 있습니다. 하지만 이 반원자는 진공 상태에서는 영원히 유지되지만, 실제로는 용기 벽의 원자와 충돌할 수밖에 없고, 에너지를 방출하며 사라진다는 단점이 있습니다.

이를 막기 위해서는 반물질을 이온화시켜서 이온 기체로 만든 뒤 자기장 병 속에 가두는 방법을 쓸 수 있습니다. 이 기체가 나선 궤적을 그리면서 움직이게 해 용기 벽에 닿는 것을 막습니다. 반입자를 이용하는 로켓(antimatter rocket)도 개발되고 있습니다. 하지만, 이는 반물질만 생산할 수 있는 입자가속기가 건립되고, 반입자의 대량 생산이 가능해져야 만들 수 있습니다.

질량 지닌 물질은 광속 불가능해

기술이 발전해 아무리 강력한 로켓을 개발하더라도 우주선을 빛의 속도로 날아가도록 만들 수는 없습니다. 사실은 우주선만 그런 것이 아니라 질량을 가지고 있는 어떤 물체도 빛의 속도로 움직일 수 없습니다.

1905년 아인슈타인이 정립한 특수 상대성 이론에 따르면 그렇습니다. 물체가 움직이는 속도가 빨라지면 겉보기 질량이 점점 더 무거워집니다. 그래서 아무리 가벼운 물체라고 해도 빛의 속도로 날아가도록 만들기 위해서는 무한히 큰 힘을 가해줘야만 합니다. 결국 빛의 속도로 움직일 수 있는 입자는 정지질량이 0인 광자(photon)뿐입니다.

현실적으로 추진력을 위해 무거운 연료를 탑재해야 하는 우주선이 빛의 속도로 날아가는 것은 실현되기 어려워 보입니다.

이태현 전북 논산대건중 1

30 우주 관광이 가능해질까요

A

석원경 교수가 답하다

2021년 7월, 세계 최고 부자 중 한 명인 아마존 창업자 제프 베이조스가 82살의 할머니, 18살의 청년, 그리고 남동생과 함께 우주 관광 여행을 성공적으로 다녀왔습니다. 아폴로 11호의 닐 암스트롱과 버즈 올드린이 인류 최초로 달에 착륙한 지 52주년이 되는 날이었습니다. 자신이 설립한 우주기업 블루 오리진이 개발한 '뉴 셰퍼드'라는 재활용 로켓을 타고 미국 텍사스에서 출발해 지상 106km까지 올라갔다가 돌아오기까지의 비행시간은 고작 10분이었습니다.

값싸고 안전한 우주 관광

우주 관광의 가능성을 처음 제시한 사람은 미국 테슬라의 창업자 일론 머스크입니다. 화성으로 이주하는 상품을 내놓겠다면서 2002년 설립한 기업이 바로 '스페이스X'입니다. 2008년에 민간기업으로는 최초로 액체 연료를 사용하는 로켓 '팰컨' 개발에 성공했고, 2016년에는 사용한 로켓을 회수해서 다시 재사용하는 데 성공했습니다. 2023년에는 관광객을 달에 보낼 계획입니다.

다양한 우주 관광 상품도 개발되고 있습니다. 미국의 한 기업은 2022년에 플로리다의 케네디 우주센터에서 출발해서 국제우주정거장(ISS·International Space Station)에 8일간 머무는 상품을 개발하고 있습니다. 그런데 비용이 무려 5500만 달러(약 660억 원)라고 합니다. 뉴멕시코에서 우주왕복선으로 상공 100km에 올라가서 지구의 모습을 보고 5분 동안 무중력 상태를 경험하는 25만 달러짜리 관광 상품도 있습니다. 탑승하겠다는 뜻을 밝힌 사람이 무려 600명이 넘는다고 합니다.

우리가 비행기로 세계 여행을 다닐 수 있게 된 것은 1960년대부터였습니다. 이제는 누구나 원하기만 하면 비행기를 타고 전 세계 어디라도 20시간 이내에 도달할 수 있습니다. 비용도 크게 부담스럽지 않습니다. 민간항공기의 성능이 놀라운 수준으로 개선됐기 때문에 무엇보다도 비행기의 고장이나 사고에 의한 위험을 걱정하는 사람은 찾아보기 어렵습니다. 자동항법장치와 블랙박스 등 안전 기술도 획기적으로 발달했습니다.

우주 관광이 빠르게 발전하려면 무엇보다 비용 절감이 시급합니다. 이에 로켓을 일회용으로 사용하고 폐기하는 게 아니라 재사용하는 기술이 등장하고 있습니다. 우주의 삭막하고 위험한 환경을 극복하는 기술도 필요합니다. 우주에는 태양의 자외선을 흡수해 주는 오존층도 없고, 태양에서 쏟아져 나오는 고에너지 입자로 구성된 우주선(cosmic ray)과 방사능을 차단해 주는 지구 자기장도 없습니다. 게다가 폐기된 인공위성의 파편과 충돌할 위험도 있습니다. 우주에서 마주하게 되는 모든 위험은 화학을 이

용해서 개발한 첨단 우주복을 이용해서 해결해야 합니다.

우주 공간에서 경험하는 무중력 상태도 우리에게는 낯설고 위험한 것입니다. 무중력을 경험한 후 지구로 돌아온 후에는 머리 쪽으로 혈액이 충분히 공급되지 않아서 문제가 생기기도 합니다. 뼈와 근육이 약해지고 심혈관계의 기능이 떨어지며 면역력이 약해지는 부작용도 나타납니다. 함부로 외면할 수 없는 심각한 문제입니다.

우주에 대한 현실적인 관심

우주는 언제나 신비의 대상이었습니다. 세상을 밝게 비춰주는 태양, 날마다 모양이 바뀌는 달, 그리고 수많은 별이 반짝이는 무한한 공간이기 때문입니다. 우주 관광은 하늘을 훨훨 날아보고 싶어 했던 우리의 원초적 본능을 만족하게 해 줄 가장 궁극적인 방법입니다.

그런데 우주 관광은 단순한 호기심으로 끝나는 일이 아닐 수도 있습니다. 우리가 사는 지구의 미래가 확실하게 보장된 것은 아니기 때문입니다. 사실 우주는 지극히 위험한 곳입니다. 지구의 주변에도 수많은 소행성과 운석이 쏜살같이 내달리고 있습니다. 자주는 아니지만, 태양계를 넘나드는 혜성이 날아다니기도 합니다. 실제로 천체끼리 충돌하는 사고가 일어나기도 합니다. 달의 표면에서 볼 수 있는 수많은 분화구도 그런 사고의 흔적입니다.

지구도 그런 위험에서 안전하지 않습니다. 알퐁스 도데의 소설에서 젊은 목동의 눈길을 사로잡은 별똥별(유성)은 지구를 스쳐 지나가는 바윗덩어리가 지구 중력에 이끌려서 떨어지는 동안에 대기와의 마찰로 뜨겁게 달아오르면서 불타는 별입니다. 대부분은 아무런 흔적도 남기지 않고 완

전히 사라져버립니다. 그렇다고 안심할 수는 없습니다. 별똥별이 완전히 타버리지 않고, 상당한 크기의 '운석'으로 땅에 떨어지기도 합니다.

6500만 년 전에는 지름이 10km에 달하는 초대형 운석이 오늘날 멕시코가 있는 유카탄반도에 충돌하며 지름 280km의 거대한 분화구를 만들었습니다. 시베리아·미국·아프리카에도 거대한 운석이 떨어진 흔적들이 많이 남아있습니다. 운석 충돌은 앞으로 계속될 것이 분명합니다.

우주 만물이 그렇듯이 태양도 변화하고 있습니다. 앞으로 10억 년이 지나면 태양은 지금보다 10% 더 밝고 뜨거워집니다. 그리고 50억 년이 더 지나면 태양도 희미하고 거대한 적색거성으로 변해서 세상에서 사라지게 됩니다. 우리의 안식처 지구도 더이상 세상에 존재할 수 없게 되겠죠.

루게릭병으로 몸을 자유롭게 움직이지 못하면서도 블랙홀에 대한 획기적인 이론을 개발한 세계적인 물리학자 스티븐 호킹이 주장했던 '행성 이주설'에 주목하게 됩니다. 그는 2006년 핵전쟁, 바이러스에 의한 감염, 지구 온난화, 운석 충돌 등의 재앙으로 인류가 지구에 더 살 수 없게 될 경우에 대한 준비가 필요하다고 목소리를 높였습니다. 태양계에 있는 화성과 같은 행성은 물론이고, 다른 별에 존재하는 지구형 행성을 식민지화하는 것이 유일한 대안이 될 수도 있을 것이라고 했습니다.

결코 쉬운 일은 아닙니다. 태양에서 가장 가까운 곳에 있는 항성(붙박이별)인 프록시마 센타우리(Proxima Centauri)도 빛의 속도로 가도 4.4년이나 걸립니다. 인류가 개발한 화학 로켓을 사용하면 수천 년이 걸릴 수밖에 없는 엄청난 거리입니다. 그렇다고 포기할 일은 아닙니다. 더욱 강력한 추진력의 로켓과 우주선을 개발하는 노력은 어떤 경우에도 포기할 수 없습니다. 물론 그 중심에는 화학이 자리 잡고 있습니다. 우리의 생존에 필요한 생태 환경을 조성하는 일도 화학으로 해결할 수밖에 없습니다.

EPILOGUE

에필로그

지구를 더 푸르게 만들어 줄 녹색 화학의 미래

20세기는 진정 '화학의 세기'였습니다. 많은 사람이 가장 풍요롭고, 더욱더 건강하고, 훨씬 안전한 삶을 누릴 수 있었습니다. 인류의 평균 수명이 70세를 훌쩍 넘어선 것은 누구도 부정할 수 없는 명백한 사실입니다. 식량 생산이 증가했고, 에너지 소비량도 늘어났습니다. 누구나 원하는 옷을 마음껏 입을 수 있게 됐고, 건강을 지키기 위한 의약품도 넉넉해졌습니다. 반도체가 등장하면서 지구촌 전체가 공동의 번영을 추구할 수 있는 정보화 사회의 기반도 마련했습니다. 모두 '화학'이 만들어낸 기적과도 같은 성과였습니다.

물질의 확인과 변환에 대한 지식을 담은 화학은 언제나 인류 문명과 함께 발전해왔습니다. 불을 피우고, 음식을 조리하고, 도자기·청동기·철기를 만든 것이 모두 화학이었습니다. 농작물을 키우고, 가축을 기르는 일에도 화학이 필요했습니다. 전통음식을 발전시키고, 의약품을 개발하는 것도 마찬가지입니다. 육체적으로 연약한 인류가 야생의 다른 짐승과 차별화된 문명 생활을 시작하게 된 것은 온전하게 화학의 덕분이었습니다.

맹독성의 일산화 탄소를 내뿜는 석탄에 충분한 양의 공기를 불어 넣어서 안전하게 이산화 탄소로 연소시키는 화학 기술이 18세기 산업혁명을 가능하게 만들어 줬습니다. 원소의 존재를 이해하기 시작하면서 고작 귀금속·암브로시아·영약(靈藥)을 꿈꾸던 '연금술'(鍊金術)과 '연단술'(鍊丹術)이 현대의 화학으로 발전하기 시작했습니다. 19세기 후반에 석유를 활용하는 화학 기술이 등장하면서 인류의 생활은 완전히 달라졌습니다.

1981년 노벨 화학상을 받은 로알드 호프만은 오늘날 우리가 누리고 있는 민주주의는 염료·의약품·화학비료를 개발한 화학의 성과였다고 강조했습니다. '과학이 없었으면 민주주의는 불가능했다'라는 영국의 철학자 버트런드 러셀의 주장과 크게 다르지 않습니다.

그런 화학이 위기를 맞이하고 있습니다. 인구가 늘어나면서 에너지의 소비도 걷잡을 수 없이 늘어나는 부작용 때문입니다. 특히 산업혁명 이후 인류가 배출하는 이산화 탄소를 비롯한 온실가스의 양이 부쩍 늘어났습니다. 재앙적인 기후변화가 바로 그 결과라는 국제연합(UN)의 주장은 부정하기 어려운 결론입니다. 온실가스만 문제가 되는 것이 아닙니다. 목재의 사용을 크게 줄여준 플라스틱도 지구촌을 오염시키고 있습니다. 우리가 함부로 버린 플라스틱이 더욱더 잘게 쪼개졌기 때문입니다.

엄청난 양의 화학물질을 생산하고, 소비하는 과정에서 발생하는 대형 화학사고도 걱정스럽습니다. 독성물질에 의한 질병과 중독도 심각한 사회 문제가 됐습니다. 풍성하고 화려한 식탁을 마주하고 있는 우리가 가공식품에 들어 있는 유해물질을 걱정하는 모습이 역설적입니다. 심지어 화학물질이 없는 곳에서 살아가야 한다는 비현실적인 '화학 혐오증'(chemophobia)이 들불처럼 번지고 있습니다.

그렇다고 우리가 화학물질을 멀리하거나 포기할 수는 없습니다. 일상생활에서 화학물질을 무작정 외면할 수는 없는 게 명백한 현실입니다. 우리가 먹는 음식과 숨 쉬는 공기 그리고 입는 옷을 염색하는 염료와 사는 건물에 사용하는 접착제도 화학물질입니다. 심지어 우주를 가득 채우며 밤하늘에 반짝이는 별과 광활한 우주 공간에 떠 있는 성간 먼지 역시 화학물질입니다. 화학물질이 없는 세상에서는 우리 자신도 존재할 수가 없습니다.

인공적으로 합성한 화학물질만 문제가 되는 것도 아닙니다. 사실 자연이 우리에게 안전한 보금자리라는 인식은 현실과 맞지 않는 것이지요. 자연에도 인체에 치명적인 독성 물질이 지천으로 널려있습니다. 독버섯의 무스카린, 야생 감자의 솔라닌, 복어의 테트로도톡신, 오염된 발효식품의 아플라톡신과 바이오제닉 아민 등이 바로 그런 물질입니다.

끔찍한 사고를 일으키는 화학물질이 따로 있는 것은 아닙니다. 물론 연료로 사용하는 화학물질 때문에 대형 화재와 폭발 사고가 일어나기도 합니다. 깨끗한 청정연료라는 수소가 폭발하여 사람이 죽은 사례도 있습니다. 심지어 인체에 아무 독성도 없는 질소와 이산화 탄소가 작업자의 목숨을 빼앗아가기도 합니다. 음식·물·공기에 들어 있는 극미량의 화학물질이 건강을 망쳐버리기도 합니다. 누구나 좋아하는 밀가루·땅콩·복숭아·게·새우·달걀을 절대 먹을 수 없는 사람도 있습니다. 글루텐, 단백질, 갑각류 등에 의한 알레르기 때문이지요.

화학물질의 독성을 지나치게 두려워할 이유가 없습니다. 사실 독성 물질이 따로 있는 것은 아닙니다. 아무리 좋은 화학물질이라도 잘못 사용하면 치명적인 독이 될 수도 있습니다. 반대로 화학물질의 독성을 이용해서 질병을 치료할 수도 있습니다. 전통의학에서는 맹독성의 비상(삼산화 비소)도 약으로 사용합니다. 실제로 우리가 사용하는 의약품은 대부분 치명

적인 독성 물질입니다. 약을 반드시 의사의 처방에 따라 약사가 조제해야 하는 것도 그런 이유 때문입니다. 독성 화학물질의 정체를 정확하게 이해하고, 피해를 예방하거나 해독하는 방법을 알아두면 될 일입니다.

화학물질에 대해 지나치게 화려한 주장은 멀리하는 것이 좋습니다. 무슨 질병이든 깨끗하게 고쳐준다는 만병통치약은 세상 어디에도 없습니다. 영국의 과학철학자 칼 포퍼에 따르면, 만병통치약은 실제로 아무 병도 고칠 수 없는 엉터리 약일 뿐입니다. 21세기 과학기술 시대를 사는 우리가 과거 시골 장터 약장수의 왁자지껄한 노랫가락 수준의 주장에 현혹될 수는 없는 일입니다.

플라스틱이 500년이 지나도 썩지 않아 문제라는 주장도 경계해야 합니다. 자갈과 모래도 썩지 않습니다. 그렇다고 자갈이 환경을 망치고 있다는 주장은 설득력이 없습니다. 오히려 순식간에 썩어버리는 음식물 쓰레기가 환경에 더 큰 부담을 줍니다. 우리가 필요해서 만든 플라스틱은 우리 스스로 폐기까지 책임을 져야 한다는 사실을 외면했던 것이 문제였습니다.

자연에 대한 지나친 기대도 버려야 합니다. 인간에게 안전한 천연 물질을 무한정 만들어줄 생물이 따로 있는 것도 아닙니다. 더욱이 오늘날 우리가 걱정하는 환경과 건강 문제는 화학물질이 일으킨 것이 아닙니다. 오히려 온실가스와 미세 플라스틱의 문제를 충분히 알아차리지 못하고 독성 화학물질을 안전하게 관리하지 못한, 미래의 지구를 위하는 일에 매우 소홀했던 우리 자신의 책임이 훨씬 더 무겁습니다.

이제 우리의 비겁한 생각을 바꿔야 합니다. 공연히 온실가스·미세 플라스틱·독성 화학물질을 탓할 이유가 없습니다. 우리의 무지와 무관심에 의한 오용, 남용이 더 용서받을 수 없습니다. 우리가 사용해야 할 화학물질을 안전하고 깨끗하게 합성하고, 더욱 안전하고 깨끗하게 활용한 뒤, 가장 안전하고 깨끗하게 폐기하겠다는 확실한 '녹색 화학'(green chemistry)의 자세가 필요합니다.

물론 유용하게 사용하고 난 화학물질을 다시 재활용하는 노력도 필요합니다. 그것이 진정으로 우리 자신과 자연 생태계를 지키는 길이고, 지구를 푸르게 만드는 길입니다. 오히려 화학물질과 적극적으로 친해지는 지혜가 필요합니다. 녹색 화학이 더욱 화려한 인류의 미래를 활짝 열어줄 수 있는 유일한 대안입니다.

2021년 9월
저자 이덕환, 석원경

청소년이 묻고, 화학자가 답한다
진짜 궁금했던 화학과 미래 질문 30

1판 1쇄 인쇄 2021년 10월 11일
1판 1쇄 발행 2021년 10월 14일

지은이 이덕환, 석원경
공동기획 대한화학회, 한국화학연구원, 한국화학회관
편집·디자인 과학동아
사진 GIB
일러스트 이명희, 김현숙

펴낸곳 동아사이언스
주소 (04370) 서울특별시 용산구 청파로 109 7층
전화 02-6749-2002
홈페이지 www.dongascience.com

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