


진짜
궁금했던
생활화학
질문 30

The graphic features two overlapping speech bubbles, one containing the letter 'Q' and the other containing 'A', positioned above the main text.

청소년이 묻고

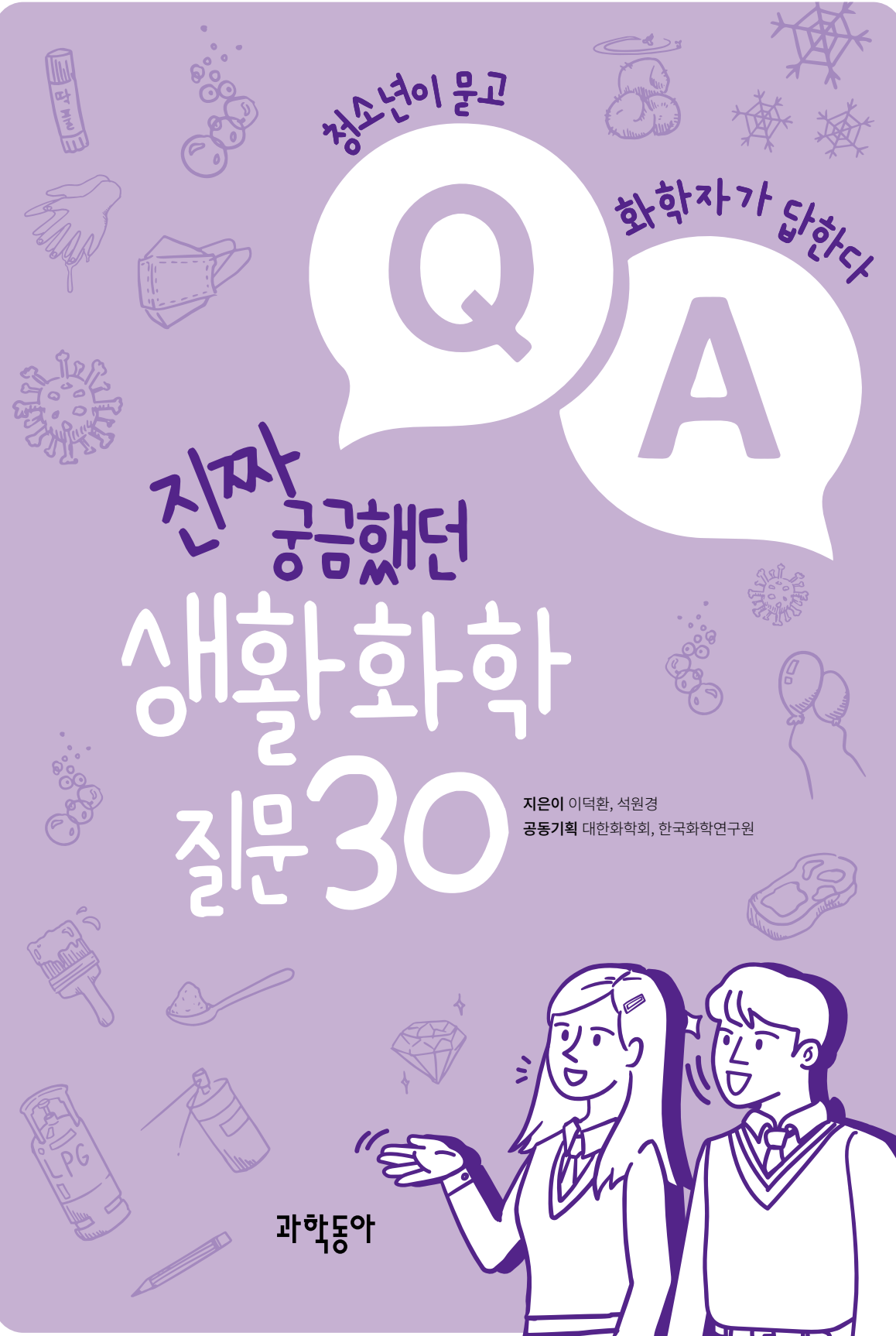
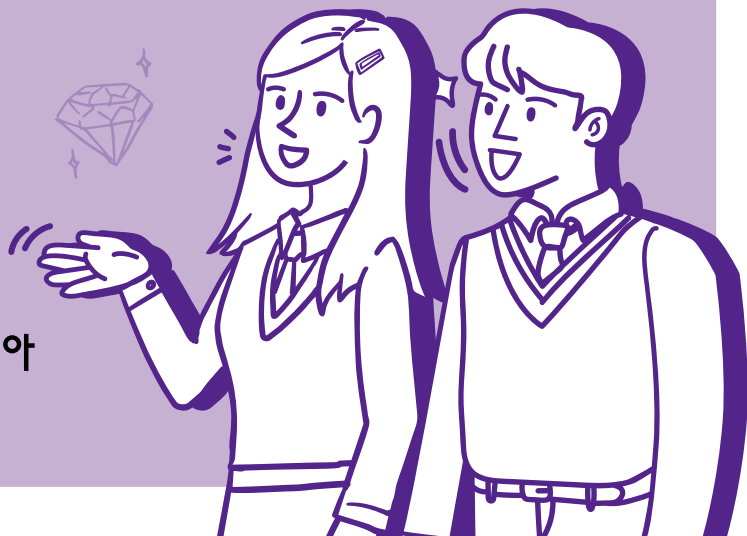
화학자가 답한다



진짜 궁금했던 생활화학 질문 30

지은이 이덕환, 석원경
공동기획 대한화학회, 한국화학연구원

과학동아



Contents

Chapter 1. 몸속에서

01	캡사이신이 많이 든 음식, 건강에 해로울까요?	007
02	코끼리처럼 채소를 많이 먹으면 똥으로 종이를 만들 수 있을까요?	015
03	술은 어떻게 사람을 취하게 하나요?	023
04	사람마다 땀과 침 냄새가 다른 이유는 뭔가요?	029
05	왜 손바닥의 피부는 다른 곳보다 두꺼울까요?	035
06	DNA는 어떻게 후세에 정보를 전달하나요?	043
07	음식에 대한 알레르기는 왜 생기나요?	051
08	바이러스는 어떻게 세포를 감염시키나요?	059
09	손 소독제는 어떻게 바이러스와 세균을 죽이나요?	067
10	마스크는 어떻게 비말과 바이러스를 막나요?	073

Chapter 2. 집·학교에서

11	고기는 익히면 왜 색깔이 변할까요?	081
12	즉석식품의 유통기한이 긴 이유는 뭔가요?	087
13	라면 수프는 왜 어떤 요리에 넣어도 맛있을까요?	095
14	생분해성 플라스틱은 자연에서 어떻게 분해가 될까요?	103
15	아이스팩의 성분은 무엇인가요?	111
16	공기청정기에서 나오는 공기는 정말 깨끗한가요?	119
17	비누를 물에 녹이면 왜 거품이 생기나요?	127
18	연필심을 가공하면 다이아몬드를 만들 수 있을까요?	133
19	물감과 페인트는 어떤 차이가 있나요?	141
20	딱풀은 무엇으로 만들어졌나요?	149

Chapter 3. 공장·지구에서

21	네온사인 대신 아르곤사인, 헬륨사인을 만들 수는 없나요?	157
22	수소 풍선은 왜 위험한가요?	165
23	스프레이는 왜 LPG 가스를 쓰나요?	171
24	액화 질소는 어떻게 영하 196°C를 만드나요?	177
25	만약 세상에 산과 염기가 없다면 어떤 일이 생길까요?	185
26	눈은 어떻게 결정을 이루나요?	191
27	동요 '초록바다'처럼 바다에도 녹조가 생길 수 있나요?	199
28	기후변화가 위험하다고 하는 이유는 뭔가요?	207
29	우주에서 가장 가벼운 물질은 무엇인가요?	215
30	원소들은 어떻게 자신만의 스펙트럼을 가지나요?	223

질문별 키워드	229
---------	-----

에필로그	230
------	-----

Chapter 1. 몸속에서



1

캡사이신이
많이 든 음식,
건강에
해로울까요?



A



석원경 교수가 답하다

식물에는 질소를 함유한 화합물인 알칼로이드라는 물질이 들어있습니다. 식물 종류에 따라 다양한 알칼로이드가 있습니다. 식물을 통해 섭취한 알칼로이드는 우리 몸속에서 여러 가지 생리작용을 일으킵니다.

캡사이신은 고추 속으로 분류되는 고추, 후추, 칠리 등의 씨앗 안쪽에 들어 있는 ‘캡사이시노이드’라는 알칼로이드 계열의 화합물입니다. 캡사이신을 먹으면 입안 세포가 매운맛을 느끼고, 교감신경이 활성화돼 부신에서 아드레날린 호르몬을 분비합니다.

아드레날린은 호흡을 촉진하고 흥분을 일으켜 기분을 좋게 만드는 물질입니다. 매운 고추를 먹으면 심장 박동과 혈액 순환이 빨라지면서 땀을 흘리게 되지만, 자꾸 찾아 먹게 되는 이유입니다. 하지만 무엇이든 지나치게 많이 섭취하면 문제가 생기는 법입니다. 캡사이신을 지나치게 많이 먹으면 어지러움, 구토, 복통, 급성 설사가 발생할 수도 있습니다.

고추의 화학무기, 캡사이신

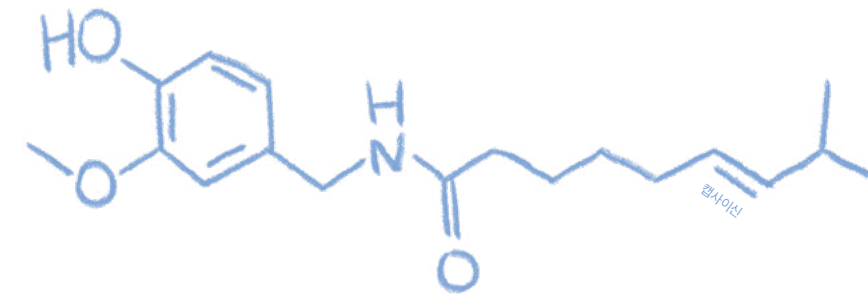
캡사이신은 고추가 씨앗을 망가뜨리려는 포유동물을 물리치기 위해 사용하는 화학무기입니다. 고추는 전략적으로 씨앗의 안쪽에 캡사이신을 잔뜩 모아놨습니다. 사람처럼 어금니가 있는 포유동물이 고추의 씨앗을 씹으면 씨앗에서 매운 캡사이신이 나와 포유동물의 입안 세포를 자극합니다. 얼굴이 후끈해질 정도로 매운 고추 맛을 경험한 포유동물은 다시는 고추 열매를 따 먹을 생각을 하지 못하게 됩니다.

이처럼 포유동물에게는 무시무시한 무기이지만, 새들은 고추 열매를 잘만 따먹습니다. 이빨이 없는 새는 열매를 그냥 삼켜버리기 때문입니다. 고추 속에 들어 있는 고추씨의 질긴 껍질은 새의 소화효소에도 녹지 않기 때문에 보통으로 고생할 일도 없습니다.

새의 위와 장을 무사히 통과한 고추의 씨앗은 온전한 모습을 유지한 채 새똥으로 배설됩니다. 땅에 떨어진 새똥은 흙 속에서 거름이 되고, 이듬해 고추나무 싹을 틔우게 되죠. 고추는 새가 열매를 먹고 배부를 수 있도록 기꺼이 자신을 희생하며, 대신 새가 고추의 자손을 널리 퍼뜨리도록 하는 전략을 씁니다. 거름이 된 새똥 속 캡사이신은 고추의 성장을 저해하는 붉은 곰팡이 등의 생리작용을 방해해 고추가 건강하게 자라게 합니다.

매운맛은 맛이 아닌 ‘통증’

분명 캡사이신은 음식을 통해 섭취한 물질인데, 먹은 사람은 맛이 아닌 통증을 느낍니다. 우리 혀가 캡사이신을 매운 ‘맛’으로 감지하지 않기 때문입니다.



인간의 혀는 미뢰(맛 돌기)를 통해 단맛, 짠맛, 신맛, 쓴맛, 그리고 감칠맛(우마미)을 느낍니다. 음식이 입안으로 들어오면 미뢰에 있는 G(구아닌)단백질 결합 수용체(GPCR)가 작동해서 우리는 맛을 느끼게 됩니다. 로버트 레프코위츠 미국 듀크대 의대 교수와 브라이언 코빌카 스탠퍼드대 의대 교수는 GPCR의 구조와 작동원리를 밝혀낸 공로로 2012년 노벨생리의학상을 받았습니다.

그런데 캡사이신의 매운맛 분자는 GPCR이 감지하지 않습니다. 혀에서 온도나 통증을 느끼는 감각수용체에 들러붙기 때문이죠. 혀의 세포에는 온도를 감지하면 활성화되는 단백질 수용체가 있는데, 캡사이신은 이런 온도 수용체를 자극합니다.

항온동물은 체온을 일정하게 유지하기 위해 온도에 따라 다양한 수용체를 활용합니다. 가령 17°C 이하에서는 TRPA1이 활성화되고, 22~26°C 에서는 TRPM8이 활성화됩니다. 또 23~39°C 사이에서는 TRPV3, 43°C 이상에서는 TRPV1이 작동합니다.

고추 속에 있는 캡사이신은 그중 43°C 이상의 고온을 감지하는 TRPV1 수용체를 자극합니다. 캡사이신이 입안에 들어와 TRPV1에 달라붙으면 이온 통로가 열리고, 여기서 칼슘 이온이 방출돼 통증을 감지하는 신경세포가 활성화됩니다.

이런 일련의 과정에서 뇌는 고추의 매운맛을 뜨거운 온도로 착각합니

다. 매운 음식을 먹으면 나면 땀이 나고, 차가운 물을 찾게 되는 것도 이런 이유 때문입니다. 캡사이신이 통증을 유발할 때 몸에선 진통 효과를 내는 호르몬 엔돌핀이 분비됩니다. 한때 경주마의 기록을 높이기 위해 캡사이신을 먹이기도 했죠. 국제승마연맹은 2008년 베이징올림픽부터 캡사이신을 금지약물로 정했습니다.

매운맛의 최강자를 가리는 ‘스코빌 척도’

매운맛의 세기는 ‘스코빌 척도(SHU·Scoville heat unit)’로 나타낼 수 있습니다. 스코빌 척도는 1912년에 미국의 화학자 윌버 스코빌이 고안한 방법입니다. 고추와 식물의 매운맛을 느낄 수 없도록 하려면 그 농도를 얼마나 묽게 만들어야 하는지를 수치로 나타냈습니다. 따라서 스코빌 척도 숫자가 클수록 매운맛이 강합니다.

스코빌 척도에 따르면 단 고추는 0, 피망은 1정도입니다. 한국의 매운 고추인 청양고추는 스코빌 척도 수치가 1만에 달합니다. 이렇게 스코빌 척도 값이 큰 청양고추도 사실 매운맛으로는 세계 10위 안에도 들지 못합니다. 훨씬 더 매운, 캡사이신이 풍부한 고추가 많기 때문입니다.

인도 고추 품종인 나가 졸로키아를 개량해 만든 부트 졸로키아는 스코빌 척도가 100만, 중국 고추 식물의 재배 품종인 캐롤라이나 리퍼는 220만, 2017년에 만들어진 신품종 페퍼 X는 318만이나 됩니다. 캡사이신노이드에 속하는 노르디하이드로캡사이신은 스코빌 척도가 910만이고, 순수 캡사이신은 1600만이나 됩니다.

놀랍게도 이보다 더 강력한 매운맛을 내는 화합물도 있습니다. 모로코에서 발견되는 선인장 식물 유포르비아 레시니페라에서 추출한 레시니페라

톡신은 스코빌 척도가 160억입니다. 순수 캡사이신의 무려 1000배입니다.

이처럼 맛을 넘어 통증을 유발하는 캡사이신에 사람들이 열광하게 된 데는 문화적인 배경이 있습니다. 대부분의 사람들은 원래 매운 고추를 싫어했습니다. 먹으면 입안이 얼얼해지고 땀이 줄줄 흐르니 굳이 고생하며 먹을 필요가 없었죠.

그런데 남들이 쉽게 먹지 못하는 매운 고추를 아무렇지 않게 씹어 삼키는 ‘용감한 사람’이 등장하기 시작했습니다. 세월이 흐르면서 이런 사람들이 점점 늘어났죠. 그러다 보니 어느새 캡사이신은 ‘양념’의 한 자리를 당당히 꿰차게 됐습니다. 세계적으로 고추를 양념으로 사용하는 전통은 약 5000년 전 시작된 것으로 알려져 있습니다.

매운맛 음식, 몸에 주는 영향은?

본래 전통김치는 배추를 소금에 절여 발효시킨 흰색 김치였습니다. 오늘날 고춧가루가 한가득 들어가 새빨간 색을 띠는 매운 김치는 17세기 무렵 일본을 통해 고추가 한국으로 전해지면서 등장했습니다.

이후 본격적으로 한국인들이 매운맛에 빠지게 된 것은 1960년대입니다. 전통적으로 농업사회였던 한국이 산업화를 통해 경제 성장을 시작할 무렵, 사람들은 유행처럼 매운맛을 즐겼습니다. 1970년대에는 정신이 번쩍 들 정도로 매운 무교동 낙지볶음이 젊은 사람들의 입맛을 사로잡았습니다. 토종 고추보다 훨씬 매운 청양고추의 재배도 많이 늘었습니다.

최근에는 인터넷 ‘떡방’이 유행하며 매운 음식에 대한 관심이 뜨겁게 달아올랐습니다. 매운 떡볶이, 매운 볶음면, 불닭 등을 찾는 사람들이 폭발적으로 늘어났죠. 경기 불황이 계속되고 사회적 스트레스가 누적되며 사

람들이 자극적인 매운 음식을 찾게 됐습니다.

매운 음식을 자주 먹으면 우리 몸에서 통증을 느끼는 능력은 점점 퇴화할 수 있습니다. 뇌가 캡사이신에 의한 자극을 느낄 수 없게 된다는 뜻입니다. 의학에서 이런 캡사이신의 효과를 질병 치료에 이용하기 위해 연구 중이기도 합니다. 캡사이신으로 온도 수용체를 퇴화시키면 대상포진이나 말초 신경증 등 치료에 효과를 낼 수 있기 때문이죠.

그러나 캡사이신의 생리적 효능에는 여전히 이견이 많습니다. 혈액 순환을 원활하게 해 피부 미용, 스트레스 해소에 도움이 되고, 신경통과 관절염 등의 예방에 좋다는 연구가 있습니다. 2007년 연세대 의대 연구팀은 캡사이신이 헬리코박터 파일로리균에 감염된 위의 점막의 염증을 억제해 준다는 연구 결과를 발표했습니다.

반면 정반대의 의견도 있습니다. 2014년 울산대 의대 서울아산병원 연구팀은 매운 음식을 너무 많이 먹으면 암세포를 제거하는 면역 세포인 NK 세포의 기능을 떨어뜨려 암 발생률이 더 높아질 수 있다는 연구 결과를 발표했습니다.

따라서 캡사이신이 든 어떤 음식이 특정 질병에 도움이 된다는 주장은 경계해야 할 필요가 있습니다. 실제로 의학적 효능을 확인하기 위한 실험은 매우 엄격하게 통제됩니다. 식품 등의 표시·광고에 관한 법률에 따르면 식품에는 '질병의 치료, 예방 효능'과 같은 의약품으로 인식될 수 있는 표시나 광고를 할 수 없습니다.

Chapter 1. 몸속에서

Q

2

코끼리처럼
채소를 많이 먹으면
똥으로 종이를
만들 수 있을까요?



A



이덕환 교수가 답하다

코끼리가 싸는 똥은 생물들에 귀한 존재입니다. 젖을 떼는 아기코끼리가 대표적이죠. 아기코끼리는 태어나자마자 어미 코끼리의 똥을 먹습니다. 어미 몸속 미생물을 먹어야만 아기코끼리가 비료소 풀을 소화할 수 있는 능력을 갖출 수 있기 때문입니다.

코끼리의 똥 밑에서 사는 개구리도 있습니다. 코끼리 똥에서 피어나는 버섯도 있고요. 코끼리의 똥은 식물의 열매를 퍼뜨려주는 역할도 해서 인기가 많습니다.

문제는 그들이 싸는 똥의 양이 많아도 너무 많다는 겁니다. 거대한 몸집을 유지하기 위해서 많이 먹고 많이 싸는 건 이해하지만, 매일 수북하게 쌓이는 코끼리 똥은 처치 곤란입니다. 이런 코끼리 똥을 처리하기 위해 스리랑카와 태국에는 코끼리 똥으로 종이를 생산하는 사회적 기업이 있을 정도입니다.

코끼리 하루 배설량, A4 660장 만들어

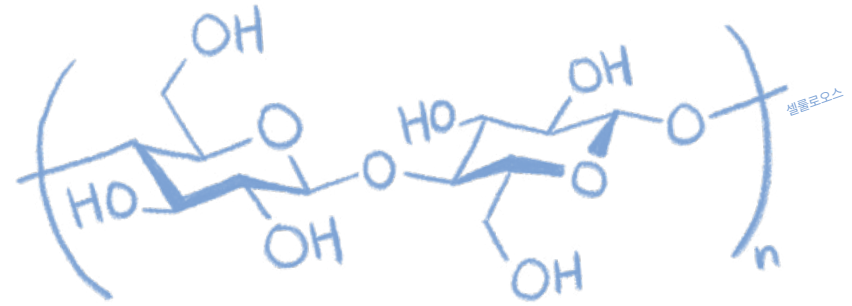
코끼리는 풀, 과일, 나뭇잎 등을 먹고 삽니다. 그래서 똥의 성분 대부분이 종이의 원료로 쓰이는 섬유소입니다. 섬유소가 풍부한 코끼리 똥으로 종이를 만드는 일은 비교적 간단합니다.

먼저 코끼리 똥을 깨끗한 물로 씻고, 오랜 시간 충분히 삶습니다. 그 다음 높은 온도로 가열하면 코끼리 똥 속 섬유소가 풀어지는데, 이 섬유소를 체에 얇게 펴서 말리면 완성입니다. 종이의 품질을 높이기 위해 코코넛, 옥수수, 바나나, 파인애플 등에서 채취한 섬유소를 추가로 넣어주기도 합니다.

코끼리 한 마리에게 하루 동안 얻을 수 있는 똥의 양은 100kg이 넘습니다. 코끼리는 하루에 18시간을 먹기만 합니다. 풀 종류만 하루에 300kg가량을 먹습니다. 그리고 하루에 16번 정도 배설을 하니 똥의 양도 어마어마합니다. 코끼리 한 마리의 하루 배설량 100kg으로 A4 용지 660장을 만들 수 있을 정도니까요.

소, 말, 양, 낙타와 같은 초식동물의 배설물에는 공통으로 섬유소가 잔뜩 들어있지만, 코끼리만큼 많은 양을 배설하는 경우는 찾아보기 어렵습니다. 코끼리는 거대한 몸집을 유지하기 위해 유독 많이 먹고, 많이 싸입니다. 이유는 코끼리의 소화력이 실망스러울 정도로 좋지 않기 때문입니다. 코끼리는 어금니도 4개뿐이고, 되새김질도 못 합니다.

70L나 되는 거대한 위도 소화에는 도움이 되지 않습니다. 몸속에 음식이 들어가도 스스로 소화효소를 분비하지 않거든요. 길이가 19m나 되는 소장이 소화 기능의 상당 부분을 담당해서 애써 먹은 풀의 절반도 소화하지 못합니다.



종이를 만드는 비장의 재료 '셀룰로오스'

코끼리가 싸는 똥 속 섬유소는 '셀룰로오스'라는 탄수화물입니다. 셀룰로오스는 지구상에서 가장 흔한 유기물입니다. 면, 마, 목재, 풀 등 식물의 줄기와 잎의 주성분으로 면섬유의 90%, 건조된 삼의 57%, 목재의 절반 가량이 셀룰로오스입니다. 광합성을 하는 녹색식물이 매년 1000억t(톤)의 셀룰로오스를 생산합니다.

셀룰로오스의 존재는 1833년 프랑스 화학자 앙셀름 파옌이 처음 발견했습니다. 이후 독일 화학자 헤르만 슈타우딩거는 셀룰로오스의 화학적 구조를 밝힙니다. 탄소 6개가 육각형 고리로 연결돼 D-글루코스(포도당) 단위체를 만들고, 이 단위체가 사슬 모양으로 결합해서 $(C_6H_{12}O_6)_n$ 이라는 화학적 구조를 이룹니다.

셀룰로오스를 구성하는 수천 개의 포도당은 매우 단단한 글리코사이드 결합으로 연결됩니다. 단위체 포도당에는 수산화기(-OH)가 매달려 있는데, 이 하이드록시기는 주변 포도당의 육각형 고리에 자리 잡은 산소 원자와 단단한 수소결합을 이룹니다. 셀룰로오스가 쉽게 늘어나지 않는 이유입니다.

셀룰로오스의 물리적, 화학적 특성은 셀룰로오스를 구성하는 포도당

단위체의 수와 사슬의 길이에 따라 달라집니다. 나무의 줄기에서 채취한 목재 펄프는 300~1700개의 포도당 단위체를 갖습니다. 면화나 세균은 8000~1만 개의 포도당 단위체로 이뤄져 있어 물이나 유기 용매에 쉽게 녹지 않습니다. 셀룰로오스가 짧은 사슬로 분해된 셀로덱스트린은 물에 잘 녹습니다.

사람 똥으로 종이를 만들 수 있을까?

인간도 코끼리처럼 셀룰로오스를 좋아합니다. 채소와 곡물의 껍질에 있는 셀룰로오스를 보통 식이섬유라 부르죠. 거칠고 딱딱한 껍질이 남아있는 현미와 통밀이 건강에 좋다는 이유는 이런 식이섬유가 많이 함유되어 있기 때문입니다.

심지어 인간의 주식은 녹말이 잔뜩 들어 있는 쌀, 밀, 감자, 옥수수 등입니다. 인간에게 필요한 3대 영양소 중 탄수화물이 녹말(전분)이기도 하죠. 녹색식물이 광합성으로 만든 D-글루코스를 글리코사이드 결합으로 길게 연결한 다당류(폴리사카라이드)를 곡물이나 덩이줄기에 저장해둔 것이 바로 녹말입니다.

그러나 안타깝게도 인간의 소화기에는 코끼리처럼 셀룰로오스 소화에 필요한 효소를 만들어줄 미생물이 없습니다. 셀룰로오스를 질기게 만드는 글리코사이드 결합을 분해하기 위해서는 섬유소 분해효소인 ‘셀룰레이스’와 알파 글루코시데이스 가수분해효소인 ‘글리코데이스’가 반드시 필요합니다. 셀룰레이스는 되새김질하는 소나 양, 낙타의 위나 흰개미의 몸속에서 기생하는 세균이 분비하는 효소죠.

코끼리의 소장에도 이런 미생물이 살고 있어 셀룰로오스 가득한 코끼리

똥으로 종이를 만들 수 있는 겁니다. 반면 사람의 장 속에 사는 대장균은 셀룰로오스 소화에는 전혀 관심이 없습니다.

무엇보다 인간의 똥 속에 든 섬유소의 양은 코끼리의 그것에 훨씬 못 미칩니다. 성인 1명이 하루에 섭취하는 섬유소는 평균 30g 정도로 알려져 있습니다. 섬유소를 소화하지 못하고 고스란히 배출해봤자 똥 속에 든 섬유소는 고작 30g이라는 뜻입니다. A4 용지 0.2장을 만들겠다고 고약한 냄새를 풍기는 사람의 똥을 뒤적일 수는 없죠. 채소를 아무리 많이 먹어도 사정은 달라지지 않을 겁니다.

인간이 셀룰로오스를 소화하는 방법

비록 몸속에 셀룰로오스를 소화할 효소는 없지만, 지능이 뛰어난 인간은 1만 2000년 전부터 정착 생활을 하며 곡물을 재배하고, 이때부터 다양한 조리 방법을 개발해 녹말을 소화시킬 방법을 찾았습니다.

동양에서는 단단한 쌀을 삶아서 말랑말랑한 밥을 지어 먹었고, 서양에서는 딱딱한 밀을 갈아서 부드러운 빵을 만들어 먹었습니다. 모두 단단한 녹말 사슬을 풀어헤쳐서 소화가 잘되게 하려는 시도였습니다. 녹말을 발효시켜서 술까지 만들어 마시죠.

물론 음식을 조리하는 과정만으로 소화가 다 되는 것은 아닙니다. 침에 들어 있는 α (알파)-아밀레이스나 프티알린을 비롯해서 췌장에서 분비되는 아밀롭신과 소장의 말테이즈와 같은 소화효소가 필요합니다. 그래야만 녹말을 우리가 에너지원으로 사용하는 포도당으로 분해해서 흡수할 수가 있습니다.

포도당이 세포 속에 있는 미토콘드리아라는 세포기관에서 물과 이산화

탄소로 분해되면 ATP라는 에너지 전달물질이 만들어집니다. 우리 몸은 충분히 흡수한 포도당을 간이나 근육에 글리코젠으로 만들어서 저장해두고 필요할 때마다 이용하고 있습니다.

Chapter 1. 몸속에서

Q

3

술은
어떻게 사람을
취하게 하나요?



A



석원경 교수가 답하다

술은 에탄올(에틸알코올· $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)이 들어 있는 음료입니다. 탄화 수소에 친수성의 수산화기가 결합한 유기 화합물이어서 물과 잘 섞입니다. 각종 물질을 녹이는 성질이 있어 용매, 미생물을 제거하는 소독제로 이용합니다.

한편 가장 단순한 형태의 알코올인 메탄올(CH_3OH)은 술에 들어 있는 에탄올과 화학적으로 비슷한 특성이 있습니다. 그러나 에탄올과 달리 사람에게 강한 독성을 나타내기 때문에 절대 섭취하면 안 됩니다. 메탄올을 마시면 시신경이 마비돼 시력을 잃게 되고 목숨도 잃을 수 있습니다.

알코올 만드는 단세포 효모

술을 마시는 전통은 누군가가 자연 상태에서 지나치게 익은 과일에 에탄올이 생성된 걸 발견하며 시작된 것으로 추측합니다. 1만 2000년 전 인류

가 농경 생활을 시작한 뒤부터 포도당이 많이 들어 있는 과일과 곡물을 의도적으로 발효시켰습니다. 포도당이 글리코사이드 결합으로 길게 연결된 탄수화물을 발효시키면 술이 되죠. 발효 과정에는 균류에 속하는 단세포의 진핵생물, 효모가 핵심적인 역할을 합니다.

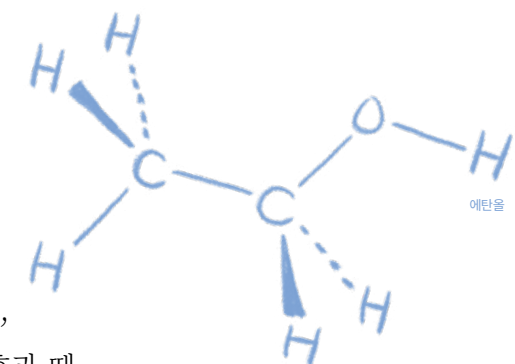
이 효모의 존재는 1680년 네덜란드의 미생물학자 안토니 판 레이우엔훅이 처음 알아냈습니다. 당시 미생물에 대한 지식이 없었던 그는 효모를 살아있는 생물이라고 여기진 않았습다. 이후 1859년, 프랑스 생화학자 루이 파스퇴르가 드디어 효모가 전분을 알코올로 전환해주는 발효균이라는 사실을 밝혔습니다. 지금까지 알려진 효모의 종류는 약 1500종입니다.

효모는 산소가 충분히 있는 곳에서는 유산소호흡을 하지만, 산소가 결핍된 환경에서는 포도당을 에탄올과 이산화 탄소 기체로 분해하는 무산소호흡을 합니다. 이 효모의 무산소호흡을 알코올 발효라고 하죠.

알코올 발효로 만들어진 발효주의 에탄올 함량 비율은 1~18%입니다. 발효주를 증류하면 알코올의 농도가 높아집니다. 위스키, 브랜디 등 증류주의 알코올 농도는 40~70% 정도입니다. 한국 전통 술인 소주도 발효주를 가공하고 희석한 증류주의 일종입니다.

뇌를 자극하는 에탄올

술을 마시면 에탄올은 위와 장의 점막을 통해 몸속 세포로 흡수돼 여러 가지 생리현상을 일으키죠. 먼저 뇌에서는 도파민이나 세로토닌과 같은 신경전달물질을 분비 시켜 중추신경을 자극합니다. 이는 진정제나 약한 마취제와 같은 효과를 나타냅니다. 술을 마시면 마음이 편안해지고, 쾌감이 느껴지는 이유입니다.



에탄올은 뇌의 시상하부를 자극해 교감 신경을 활성화하기도 합니다. 아민과 아드레날린과 같은 호르몬 분비가 촉진되죠. 얼굴이 붉어지고 몸에 땀이 나며, 심장 박동이 빨라집니다. 에탄올의 삼투 효과 때문에 신장(콩팥)에서 소변이 더 많이 배출되기도 합니다.

여기서 술을 좀 더 마시면 상황이 또 달라집니다. 감각이 무뎠지거나 방향 감각을 잃어버리고, 감정의 통제가 어려워집니다. 흥분 또는 공격적인 행동을 하거나 잠에 빠져버리는 사람도 있습니다. 심한 경우 말이 어눌해지다가 의식을 완전히 잃어버릴 수도 있습니다. 자칫하면 치명적인 심실세동, 호흡 마비 등으로 사망할 가능성도 있습니다. 몸속의 에탄올이 간에서 알코올 탈수소 효소에 의해 분해되는 과정에서 강한 독성을 띠는 아세트알데하이드(CH₃CHO)가 만들어지기 때문입니다.

장기적으로는 에탄올을 분해하는 간의 기능이 떨어지면서, 결국 간경화나 간암 등의 질병을 초래할 수 있습니다. UN 산하의 국제암연구소에서는 1988년부터 술과 에탄올을 모두 인체 발암성이 과학적으로 확인된 '1군 발암물질'로 분류하고 있습니다. 세계보건기구(WHO)에 따르면 전 세계적으로 술 때문에 조기에 사망하는 사람이 매년 100만 명이 넘습니다.

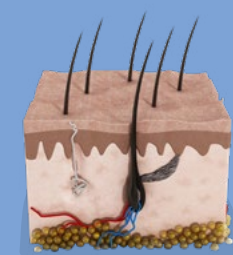
또 술을 자주 마시면 몸에서 알코올에 대한 내성이 생기면서 술을 마시는 양이 점점 늘어납니다. 알코올이 모르핀처럼 쾌감을 강화해주는 테트라하이드로 아이소퀴놀린계 화합물의 분비를 촉진하기 때문입니다.

심해지면 알코올 중독증에 빠집니다. 알코올 중독증에 걸린 사람은 술을 마시지 못하면 오한이나 무력감 등을 느낍니다. 때론 구토나 경련을 일으키기도 하죠. 맥박과 혈압, 호흡이 증가하며 의식도 흐려지고, 망상



4

사람마다
땀과 침 냄새가 다른
이유가 뭔가요?



에 빠져 헛소리를 하는 등의 섬망, 우울증, 불안 장애 등의 증상이 나타나기도 합니다. 따라서 알코올 중독증을 겪는 사람은 적절한 시점에 알코올 대사를 차단해주는 약물이나 음주 욕구를 줄여주는 약물을 처방받아야 합니다. 정신과 치료도 필요합니다.

음주 측정기는 어떻게 알코올 분자를 감지할까?

만취한 상태로 운전대를 잡는 것은 매우 위험한 행동입니다. 술에 취한 상태에서 운전하면 돌발 상황을 인식하는 능력과 반응속도가 맨정신일 때보다 현저히 떨어집니다. 경찰에서는 이런 음주 운전 사고를 미연에 방지하기 위해 음주 운전을 단속합니다. 국내에서는 혈액 100mL에 들어 있는 알코올의 질량을 mg(밀리그램) 단위로 표시한 '혈중알코올농도'를 단속의 기준으로 사용합니다.

도로에서 운전자의 혈액을 채취해 알코올의 농도를 분석하기란 쉽지 않습니다. 그래서 단속 현장에서는 전기화학적 원리를 이용해 운전자의 날숨에서 알코올의 농도를 추정하는 방법을 사용합니다. 우선 소형 분석기로 날숨에 알코올이 들어 있는지를 판단합니다. 알코올 반응이 나오면 정밀 분석기로 알코올 농도를 측정합니다. 정밀 분석기는 음주 운전자의 날숨에서 나온 알코올 분자가 백금 전극의 표면에서 산화 반응을 일으킬 때 흐르는 전류의 양을 측정합니다. 알코올 분자가 많으면 그만큼 전류의 세기가 증가합니다.

혈중알코올농도가 0.03%가 넘으면 음주 운전자는 형사 책임을 져야 합니다. 국내에서는 음주 운전으로 사망 사고를 일으키면 무기징역 또는 3년 이상의 징역을 처벌받게 됩니다.

A



이덕환 교수가 답하다

몸에서 나는 각종 냄새는 은근히 신경이 많이 쓰이는 존재입니다. 흔히 ‘암내’라고 불리는 겨드랑이에 땀이 나서 생기는 냄새, 책상 위에 엎드려 자다가 책 위로 흥건히 흘러버린 침에서 나는 냄새, 신종 코로나바이러스 감염증(코로나19) 여파로 마스크를 쓰는 시간이 길어지면서 웬지 더 심해진 것 같은 입 냄새까지.

사람들은 오래전부터 이런 냄새를 숨기기 위해 각종 향을 개발해왔습니다. 서양에서는 향수 산업이 발달했고, 동양에서는 향주머니를 지니고 다니는 풍속이 있었습니다.

요즘 개발되는 화장품, 비누, 샴푸, 치약 등에도 향기 성분이 들어있습니다. 땀 냄새를 방지해주는 탈취제도 있고, 입 냄새 제거에 쓰는 구강청결제도 있습니다. 그러니 냄새에 대한 걱정을 너무 과하게 할 필요는 없습니다. 악취가 너무 심하면 의사의 도움을 받아야겠지만요.

냄새를 가진 땀의 출처는 ‘아포크린샘’

땀샘은 에크린샘과 아포크린샘 2종류가 있습니다. 에크린샘은 몸 전체에 230만 개 정도가 분포합니다. 에크린샘에서 분비되는 땀은 화학적으로 묽은 식염수에 가깝습니다. 수소이온농도지수(pH)가 5~7 정도인 약한 산성입니다. 여기엔 염화 소듐(NaCl·소금)을 비롯한 각종 미네랄 성분이 아주 미량 들어있습니다. 땀 속 염화 소듐 농도는 혈액의 30% 수준으로 비교적 낮습니다. 에크린샘에서 분비되는 땀은 보통 색깔, 냄새, 맛이 모두 없습니다. 오래 신은 운동화에서 고약한 발 냄새가 나는 건, 이런 땀이 운동화에서 부패했기 때문입니다.

아포크린샘은 겨드랑이, 귓구멍 등에 집중적으로 분포합니다. 여기서 분비되는 땀은 에크린샘에서 나오는 땀과 달리 다양한 화학적 성분을 가지고 있습니다. 땀샘 표피에 해당하는 세포체가 떨어져서 땀과 함께 분비되기 때문이죠. 그뿐만 아니라 모낭(진피 속 모근을 둘러싸고 있는 피부 기관)과 연결된 피지선에서 분비되는 피지 성분이 함께 섞여 나오기도 합니다. 외부의 불순물이 섞이는 경우도 있습니다. 사람마다 이런 생리현상은 다르게 일어나기 때문에 아포크린샘의 분비물 냄새도 사람마다 다릅니다.

아포크린샘에서 분비되는 땀은 간혹 땀의 양이 너무 많거나 냄새가 강할 경우 고민거리가 됩니다. 겨드랑이처럼 통풍이 잘 안 돼 땀이 쉽게 증발하지 못하는 부위는 세균이 쉽게 증식하는데요. 세균이 땀 속 유기물을 분해하는 과정에서 암내가 더 심해집니다. 세균은 땀으로 물러진 각질층에서도 증식할 수 있습니다. 의학에서는 이를 ‘액취증’이라고 부릅니다.

액취증을 해결하는 가장 쉬운 방법은 잘 씻는 것입니다. 그럼에도 사회생활이 어려울 정도로 증상이 심한 경우엔 의사의 처방을 받아 약물치료

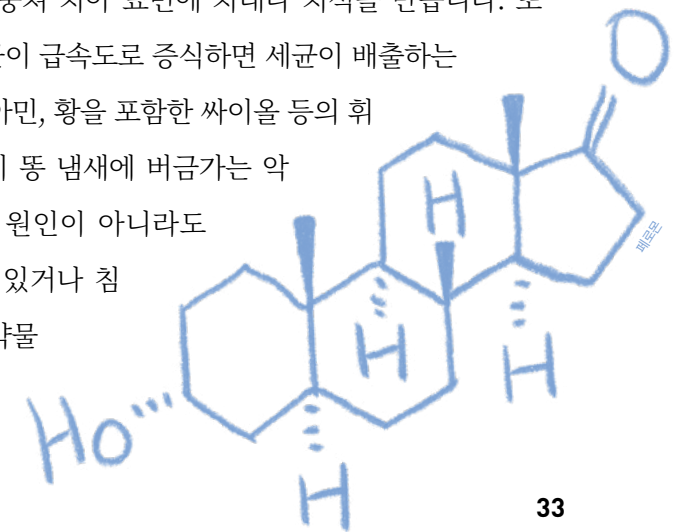


를 해야 합니다. 네오마이신이나 겐타마이신과 같은 국소 항생제나 보툴리눔 독소를 사용해 치료하고, 필요에 따라 땀샘조직을 제거하는 외과적 수술을 하기도 합니다.

똥 냄새에 버금가는 입 냄새 원인은

한편 입속 침샘에서 분비되는 침은 하루 평균 1.5L입니다. 침의 99.5%는 약한 산성을 띠는 물입니다. 침은 기본적으로 땀과 같은 성질의 분비액이지만, 땀보다는 훨씬 다양한 성분이 함유돼 있습니다. 점액질 성분의 당단백질인 뮤신, 소화 효소인 α -아밀레이스와 프티알린 등이죠. 심지어 치아 표면의 에나멜을 강화해주는 성분도 들어있습니다. 게다가 침에는 라이소자임, 락토페린, 면역 글로블린 A 등의 항균 물질도 있습니다. 개인마다 침의 성분은 조금씩 다르기 때문에 침 냄새 역시 다를 수밖에 없습니다.

사실 우리가 걱정하는 것은 침 냄새가 아닌 입 냄새입니다. 입안은 세균이 살기 딱 좋은 장소입니다. 침이 끊임없이 분비되며 입안을 세척하고, 침 속엔 항균 물질이 들어있지만 역부족입니다. 입안에 남아있는 음식물 찌꺼기, 혈액, 구강 점막 세포 등이 세균에게 영양분을 제공하기 때문입니다. 세균은 단단하게 뭉쳐 치아 표면에 치태나 치석을 만듭니다. 또 충치가 생길 정도로 세균이 급속도로 증식하면 세균이 배출하는 유기산, 질소를 포함한 아민, 황을 포함한 싸이올 등의 휘발성 유기화합물(VOCs)이 똥 냄새에 버금가는 악취를 풍깁니다. 세균이 원인이 아니라도 간혹 황 성분이 포함돼 있거나 침 분비 기능을 억제하는 약물



을 먹는 사람은 남들보다 입 냄새가 심한 경우가 많습니다. 이처럼 입 냄새는 구강의 상태나 먹는 음식, 약물에 따라 달라질 수 있습니다.

입 냄새를 제거하기 위해선 평소 양치질을 꼼꼼하게 하고, 치아나 잇몸을 꾸준히 관리하는 것이 가장 중요합니다. 땀 냄새와 침 냄새도 마찬가지로 냄새를 풍기는 물질을 근본적으로 생성되지 않게 할 수는 없습니다.

동물의 냄새, 생존 필수 기능

인간과 달리 동물은 체취를 없애기 위해 애쓰지 않습니다. 오히려 동물들은 대부분 그들의 체취를 생존 수단으로써 요긴하게 이용합니다. 가령 스킹크, 호저는 의도적으로 몸에서 포식자가 싫어하는 냄새를 풍겨 그들을 물리칩니다. 개와 멧돼지 등은 나무 밑동치에 체취를 남기며 영역을 표시하기도 합니다. 개미는 항문에 있는 분비샘에서 페로몬을 분비해 동료들에게 먹이가 있는 곳을 알려주고, 페로몬을 이용해서 동료들에게 위험한 상황을 알려주는 곤충도 있습니다.

체취는 자손 번식을 위한 짝짓기에도 중요한 역할을 합니다. 동물의 암컷은 특유의 냄새를 가진 페로몬과 유사한 물질을 체외로 분비해 발정을 드러냅니다. 여왕벌이나 암컷 나방은 외분비선에서 휘발성 페로몬을 분비해 짝짓기 할 수컷을 유인하죠.

한편 인간은 두 발로 걷는 직립보행을 시작하면서 냄새를 맡고 감지하는 후각이 상대적으로 약화된 것으로 보입니다. 물론 인간도 냄새만으로 자식을 인식하고 냄새를 통해 부모와 형제자매를 구분할 수 있다고 하지만, 냄새를 직접적인 의사소통 수단으로 사용하지는 않습니다. 냄새는 무의식적으로 작용할 뿐이죠. 앞으로 밝혀야 할 내용이 많은 연구 주제입니다.

Chapter 1. 몸속에서

Q

5

왜 손바닥의
피부는
다른 곳보다
두꺼울까요?



A



이덕환 교수가 답하다

두 발로 서서 걷는 인간에게 손은 매우 중요합니다. 손은 다양한 크기, 모양의 물체를 쥐고 던지는 물리적 기능을 합니다. 촉감을 느끼는 기능도 합니다. 손으로 어떤 물체가 뜨거운지 차가운지, 또는 부드러운지 거칠거칠한지를 알 수 있죠. 시각에 문제가 생기면 손의 촉감은 더욱 중요해집니다. 눈에 보이지 않기 때문에 촉감으로 많은 부분을 파악해야 하기 때문이죠. 외부 화학물질이나 병원체를 막는 것도 손의 중요한 역할입니다.

몸에서 가장 두꺼운 피부, 손바닥

피부의 두께는 인종, 성별, 나이 등에 따라 제각각입니다. 대체로 동양인은 서양인보다 얼굴의 표피가 2배가량 두껍고 탄력이 있어 더 팽팽합니다. 그리고 보통 남성이 여성보다 피부가 더 두껍습니다. 피부는 사람 개

개인에 따른 차이도 상당하고, 한 사람의 몸에서도 부위별로 두께가 상이하게 나타납니다. 그중에서도 손바닥과 발바닥의 피부는 다른 피부에 비해 유난히 두껍습니다. 성인 기준 손바닥 피부의 두께는 약 6mm입니다. 몸 전체의 피부 두께 평균이 1.2mm이니, 손바닥은 평균보다 5배나 더 두꺼운 셈입니다. 인체에서 가장 얇은 피부인 눈꺼풀의 두께는 고작 0.5mm 정도입니다. 손바닥 두께는 눈꺼풀보다 무려 12배나 두껍습니다.

우리 몸에서 손바닥 피부가 두꺼운 이유는 분명히 있습니다. 철저하게 기능적인 이유죠. 물체를 만지는 과정에서 손바닥이 쉽게 손상되지 않도록 손바닥은 물리적으로 단단하고 잘 닳지 않는 구조여야 합니다. 또 화학 물질이나 병원체가 쉽게 드나들 수 없을 정도로 조직이 조밀해야 합니다.

손바닥 피부가 지나치게 두꺼운 것도 사실 좋지않은 않습니다. 손으로 물건을 쥐는 것이 불편해지기 때문입니다. 손을 구성하는 섬세한 관절들도 모두 무용지물이 됩니다. 또 감각이 둔해져 물체를 정확히 인지하지 못하는 문제도 있습니다.

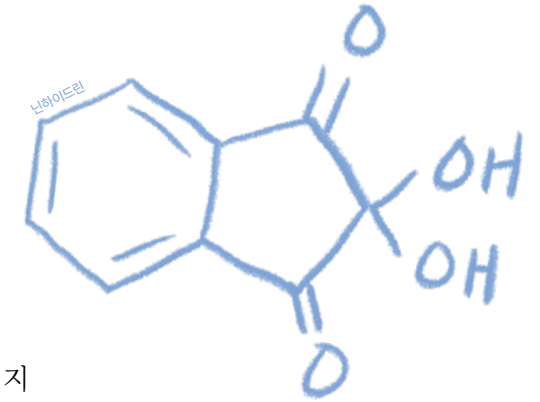
그렇게 손바닥은 끊임없이 변화하는 자연과 생태 환경에 적응하는 과정에서 기능을 극대화할 수 있는 두께와 독특한 구조를 갖게 됐습니다. 다른 피부와 달리 손바닥에는 털이 없는 것도 진화의 산물입니다. 털이 솟아있는 모낭이 외부 이물질이 침투하는 경로가 되거나, 촉감을 느끼는 데 걸림돌이 될 수 있기 때문입니다.

생존에 최적화된 손바닥 구조

손바닥 가장 바깥 부분인 표피는 바깥쪽부터 각질층, 투명층, 과립층, 유극층, 기저층 등으로 이뤄져 있습니다. 외부에 노출된 각질층과 과립층 사



이에 긴 투명층은 물에 쉽게 녹지 않는 케라틴 단백질로 구성돼 있어, 손바닥으로 수분이 스며드는 것을 막아줍니다. 이런 표피는 생리적 기능을 상실한 죽은 세포로 구성돼 있습니다. 대략 28일 정도가 지나면 자연스럽게 떨어져 나가고, 그 자리를 새로운 표피가 채웁니다. 참고로 우리 몸에서 변하지 않고 평생 유지되는 세포는 많지 않습니다. 대부분 표피처럼 끊임없이 교체됩니다.



손바닥은 손금이라는 굴곡진 선을 따라 쉽게 접히는 특징도 있습니다. 손금은 손을 이루고 있는 뼈 27개의 상대적인 크기와 위치로 결정됩니다. 비슷하게 발도 26개의 뼈로 이뤄져 있으며, 이들에 따라 발바닥 주름이 잡힙니다. 양손(54개)과 양발(52개)에 있는 뼈만 106개로, 이는 인체를 구성하는 전체 뼈(206개)의 51%를 차지합니다. 이는 그만큼 두 손으로 물체를 잡는 행동, 두 발로 땅 위를 걷는 행위가 우리의 생존에 매우 중요하다는 증거입니다.

한편 손바닥 피부색은 다른 부위의 피부보다 눈에 띄게 열립니다. 손바닥의 색깔은 인종에 상관없이 비슷합니다. 그래서 피부색이 짙은 인종일수록 손바닥이 더 희게 보이는 것이죠. 원숭이, 고릴라, 침팬지 등 인간 외 다른 영장류도 모두 손바닥 피부색이 유난히 열립니다. 이런 손바닥 피부색은 놀랍게도 햇볕에 오래 노출돼 있어도 까맣게 변하지 않습니다. 검은색 또는 짙은 갈색 색소인 멜라닌을 합성하는 멜라닌 세포가 적기 때문입니다. 멜라닌은 햇빛에 들어 있는 자외선(UV)을 집중적으로 흡수해 자외선에 의한 피부 손상을 막아주고, 우리 몸의 체온 조절을 돕습니다.

손바닥에는 신경 말단이 집중적으로 분포합니다. 손바닥 면적 1cm²에 들어 있는 신경 말단의 개수가 1000개가 넘습니다. 특히 손가락의 끝부분에 신경이 굉장히 많이 밀집돼 있습니다. 이는 촉각 정보를 수집하는 역할을 합니다. 손바닥 피부가 상대적으로 두꺼워도 손바닥을 통해 압력, 열, 통증 등을 예민하게 느낄 수 있죠. 손바닥의 촉각은 눈을 통한 시각이나 귀를 통한 청각만큼 인간의 생존에 꼭 필요한 역할을 합니다.

지문선이 분포하는 이유

흔히 손금이라 불리는, 손바닥 전체에 퍼져 있는 가느다란 지문선(용선)은 우리 일상에서 알게 모르게 엄청난 영향력을 떨치고 있습니다. (운명을 점칠 수 있어서가 결코 아닙니다.) 습기가 제거된 종이 장갑을 끼고 물건을 집으려면 물건이 미끄러져 잡기 힘들습니다. 종이와 물체 사이에 마찰이 없기 때문입니다. 적당한 탄성을 가진 손바닥 지문선은 우리가 물건을 떨어뜨리지 않고 쥌 수 있게 돕습니다.

지문선 끝부분에는 땀샘의 한 종류인 에크린샘이 집중적으로 분포하고 있습니다. 손바닥 면적 1cm²마다 최대 340개의 땀샘이 밀집돼 있습니다. 에크린샘에서 분비되는 땀 때문에 손바닥은 항상 살짝 축축하게 젖어있죠. 이런 땀은 체온을 조절하는 역할을 합니다. 또 손바닥에서 분비되는 땀은 손바닥의 신경을 더욱 민감하게 만듭니다. 긴장하거나 흥분하면 손바닥에서 땀이 분비되는 것도 촉감을 강화하기 위한 정상적인 생리적인 반응입니다. 지나치게 많은 땀이 분비돼 불편을 느낀다면, 이는 다한증이라는 질환으로 의학적 치료가 필요하지만요.

손가락의 끝에 있는 지문선의 무늬를 우리는 특별히 지문이라고 부릅니

다. 지문의 모양은 사람마다 제각기 다릅니다. 평생 변하지도 않습니다. 그래서 지문은 오래전부터 개인을 식별하는 수단으로 활용됐습니다. 중요한 문서에 서명 대신 지문을 찍기도 하죠.

지문은 과학수사에서 범인의 정체를 밝히는 수단으로 쓰이기도 합니다. 범인의 손이 닿은 물체에 남겨진 지문은 손바닥의 땀샘에서 분비된 지방과 단백질 성분이 굳은 것입니다. 완전히 건조되지 않은 상태에서는 활성탄 분말을 이용해서 지문을 채취할 수 있습니다. 시간이 지나 굳어버린 지문도 닐하이드린과 같은 물질을 사용해서 확인할 수 있습니다. 이 물질이 아미노산과 반응하면 청자색으로 변하는 성질을 이용합니다.

세균과 바이러스의 1차 방어벽

피부는 우리가 부모로부터 물려받은 선천면역 중에서도 가장 강력한 효력을 가진 1차 방어 체계입니다. 인체에 독성을 가진 유해물질이나 질병을 유발하는 세균(박테리아), 바이러스, 곰팡이 등의 유입을 차단하는 역할을 합니다.

젖산, 라이소자임, 락토페린 등의 항균 성분이 들어 있는 땀도 피부의 면역 작용에 도움이 됩니다. 땀 덕분에 인체에 해로운 물질이 피부에 쉽게 달라붙지 못하죠. 식도, 위, 장 같은 소화기, 기관지 같은 호흡기 등의 표피 세포는 또 다른 방법으로 보호를 받습니다. 표피를 덮고 있는 점막에서 강력한 항균 기능을 하는 ‘뮤신’이라는 당단백질을 포함한 점액질을 분비해, 이것이 소화기와 호흡기의 표피 세포를 보호합니다.

손바닥은 언제나 가혹한 환경에서 손상될 위험에 노출돼 있습니다. 그래서 손바닥의 피부가 손상되지 않도록 깨끗하게 관리하는 게 중요합니

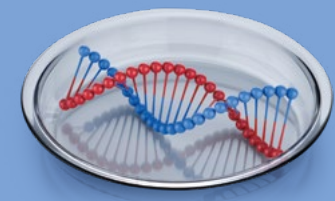
다. 특히 손바닥이 건조해지지 않도록 신경 써야 합니다. 손바닥이 건조할 땐 글리세린과 같은 보습제가 도움이 될 수 있습니다. 그러나 피부를 관리한다는 핑계로 화장품과 의약품을 지나치게 사용하는 것은 결코 바람직하지 않습니다. 피부는 자연적인 회복 기능을 가지고 있기 때문입니다. 인간의 몸은 현대 과학으로도 설명하기가 쉽지 않지만, 지금 이 순간에도 생존에 유리한 방향으로 끊임없이 진화하고 있습니다.

Chapter 1. 몸속에서

Q

6

DNA는
어떻게 후세에 정보를
전달하나요?



A



이덕환 교수가 답하다

DNA는 생물의 유전 정보를 담고 있는 유전물질인 ‘데옥시리보핵산 (deoxyribonucleic acid)’입니다. DNA 덕분에 자식이 부모로부터 유전 형질을 물려받고 부모의 외모, 성격, 취향 등을 닮게 되죠. 또 인간의 몸속에서는 다양한 생리 현상이 일어납니다. 이를 관리하는 단백질이 존재하는데, DNA에 이런 단백질을 만드는 정보가 담겨 있습니다. 그래서 DNA를 생명에 관한 모든 정보를 담고 있다는 뜻으로 ‘생명의 책’이라고도 부릅니다.

DNA의 화학적 구조는 매우 독특합니다. 우선 데옥시리보스라는 당과, 음료수에 많이 들어 있는 인산 이온(PO_4^{3-})이 반복적으로 연결된 뉴클레오타이드 사슬이 있습니다. 그리고 이 사슬 2개는 염기라고 부르는 분자들에 의해 단단히 연결된 상태로 꼬여 있습니다. 정확히는 오른나사 방향으로 감겨있죠. 마치 사다리 2개를 꼬아놓은 모습입니다. 실제 DNA를 구성하는 두 가닥의 뉴클레오타이드는 아주 단단하게 연결돼 있고, 구조적으

로 안정합니다. 바깥쪽에서는 사다리의 발판에 해당하는 염기를 들여다 볼 수도 없을 정도입니다.

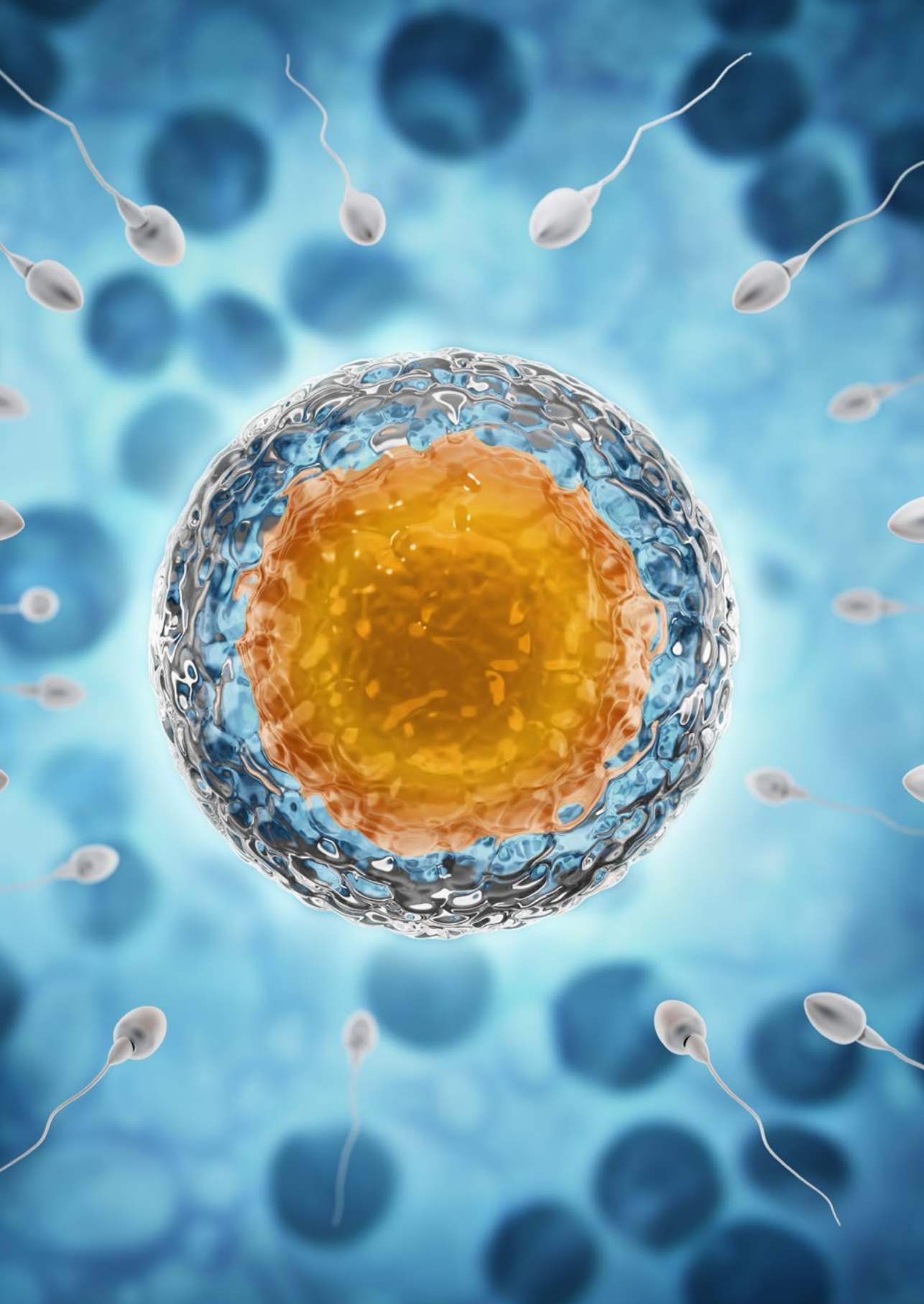
이런 DNA 이중 나선 구조는 1953년 영국 케임브리지대 케번디시 연구소에서 함께 연구하던 제임스 왓슨과 프랜시스 크릭이 처음으로 밝혔습니다. 이 둘은 DNA 구조를 밝힌 공로를 인정받아 1962년 노벨생리의학상을 받았습니다.

인간 유전체 32억 8900만 개, 유전자는 2만 개

지구상에 사는 모든 생물은 이런 DNA를 가지고 있습니다. 하나만 있는 게 아닙니다. 세포마다 한 묶음의 DNA가 들어 있죠. DNA는 현미경으로 관찰할 수 있는 크기인데, 평소에는 국수 가락처럼 풀어져 있어서 보기 힘들습니다. DNA는 세포가 2개로 분열할 때 덩어리로 뭉쳐집니다. 분열하기 직전 세포에 염료를 넣으면 현미경으로도 DNA 덩어리의 모습을 볼 수가 있습니다. 이 DNA 덩어리를 바로 ‘염색체(chromosome)’라고 부릅니다.

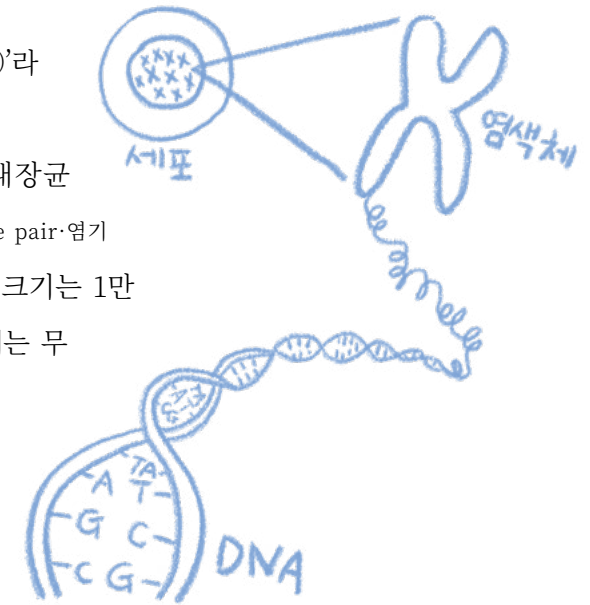
인간의 염색체는 2개씩 짝을 짓고 있으며, 세포마다 총 23쌍 존재합니다. 염색체를 한 줄로 쪽 이어 연결하면 그 길이가 무려 1.8m나 되죠. 23쌍 중 한 쌍은 성염색체로서 성별을 결정하는 데 관여합니다. X염색체만 2개가 쌍을 이루면 여성, X염색체 하나와 Y염색체 하나가 쌍을 이루고 있으면 남성입니다.

우리 몸속에는 체세포가 약 37조 2000억 개 있습니다. 체세포의 핵에는 모두 똑같은 염색체가 들어 있습니다. 부모에게 각각 반씩 물려받은 염색체입니다. 한편 생식 과정의 결과 세포 속 미토콘드리아에는 어머니에게서 물려받은 염색체만 들어 있습니다. 염색체를 구성하는 DNA의 염기 서



열을 모두 합쳐서 ‘유전체(genome·게놈)’라고 합니다.

유전체의 크기는 다양합니다. 대장균의 유전체는 약463만 9675bp(base pair·염기 쌍), 인간의 미토콘드리아 유전체의 크기는 1만 6569bp입니다. 인간의 전체 유전체는 무려 32억 8900만 bp입니다. 만약 인간의 유전체를 종이에 인쇄하려면 한 장에 5000자씩, 60만 장이 필요한 셈입니다. 식물은 인간보다 훨씬 더 큰 유전체를 가



지고 있습니다. 가령 일본 희귀 꽃인 ‘파리스 자포니카(*Paris japonica*)’의 유전체 크기는 무려 1500억 bp입니다. 물론 유전체가 크다고 더 뛰어난 생물이라고 할 수는 없습니다.

유전체 중에서 단백질 합성에 필요한 정보에 해당하는 부분을 ‘유전자(gene)’라고 합니다. 현재 인간의 유전체에서 확인된 유전자는 2만 개 정도입니다. 유전체에서 유전자 외에 다른 부분의 역할은 아직 분명하게 밝혀진 바가 없습니다.

A-T-G-C... 단백질 만드는 DNA 정보 코드

DNA가 소중한 유전 정보를 담고 있는 책이라면 뉴클레오타이드는 책 속에 담겨 있는 정보가 훼손되지 않도록 보호해주는 책 표지입니다. 인산, 데옥시리보스, 염기 등 3가지로 이뤄져 있죠. 뉴클레오타이드 사슬들

은 염기들의 수소결합으로 서로 연결돼 있습니다. 그중 DNA의 유전 정보는 아데닌(A·Adenine)과 티민(T·Thymine), 구아닌(G·Guanine)과 사이토신(C·Cytosine) 이렇게 4종류 염기로 표현됩니다. 사다리의 발판에 알파벳을 써놓았다고 생각하면 이해하기 쉽습니다. 이 4가지 염기는 두 뉴클레오타이드를 단단히 연결하면서 유전 정보를 표현합니다. 이때 A는 반드시 T와 결합하고, G는 반드시 C와 결합합니다. 뉴클레오타이드에 연결된 염기를 순서대로 나열한 것을 ‘염기 서열’이라고 합니다.

DNA의 유전 정보는 몸을 구성하고 생명활동에 필요한 단백질을 적재적소에 만들기 위한 정보를 담고 있습니다. 염기 서열에 따라 여러 종류의 단백질이 만들어지죠. 즉, 단백질을 구성하는 아미노산의 연결 순서는 DNA의 염기 서열에 따라 달라집니다.

그래서 염기 서열이 바뀌는 돌연변이가 일어나면 단백질을 구성하는 아미노산에 문제가 생겨 몸속 생리작용에 문제가 발생합니다. 암과 같은 치명적인 질병이 발생할 수도 있습니다.

한편 A, T, G, C 4종류의 염기에서 알파벳 3개를 골라 묶은 것을 ‘코돈’이라고 합니다. 코돈은 마치 알파벳을 나열해서 단어를 만드는 것과 같은 방식입니다. 즉, 4개의 알파벳을 3개씩 나열하면 총 $64(=4^3)$ 종류의 코돈을 만들 수 있습니다. 코돈은 아미노산을 나타내는 암호입니다. 가령 GAA, GAG가 감칠맛을 내는 글루탐산(MSG)을 뜻하고, GCU, GCC, GCA, GCG는 알라닌을 뜻합니다. 단어를 나열해서 문장을 만들 듯, 코돈을 나열하면 단백질을 합성하는 암호가 만들어집니다.

단백질 합성은 리보솜이라는 세포 기관에서 진행됩니다. 몸에 필요한 단백질을 만들려면 누군가 DNA 유전 정보를 ‘해석’한 뒤, 단백질을 만드는 곳에 ‘전달’해야 합니다. 이 역할을 바로 RNA가 합니다. RNA는 리보

핵산(Ribonucleic Acid)의 약자이고, 리보핵산은 리보스라는 당 분자에, 인산과 염기가 붙은 구조입니다.

DNA를 후손에게 전달하는 2가지 방법

생물의 유전 정보는 DNA를 통해서만 후손에게 전달됩니다. DNA를 후손에게 남기는 방식에는 단성 생식과 유성 생식이 있습니다. 단성 생식을 하는 대표적인 생물은 세균입니다. 세균은 DNA를 통째로 복사합니다. 부모와 자식이 완전히 똑같아지죠. DNA의 이중 나선을 묶어주는 염기들 사이의 수소결합이 끊어지면, 동시에 양쪽 뉴클레오타이드 가닥에 서로 보완적인 새로운 가닥이 다시 만들어집니다. 완전하게 닮은 DNA 두 개가 만들어지고, 그중 하나가 새로운 생명체로 탄생합니다.

그런가 하면 사람처럼 유성 생식을 하는 경우는 훨씬 복잡한 과정을 거칩니다. 우선 유전체가 절반으로 줄어드는 감수 분열이 일어나고, 이때 생식 세포가 만들어집니다. 암컷은 난자가, 수컷은 정자가 만들어지겠죠. 난자와 정자가 수정되면 감수 분열로 줄었던 DNA가 다시 온전한 DNA로 완성되면서 마침내 후손이 탄생합니다. 유성 생식으로 탄생한 후손은 부모의 유전 정보를 절반씩 물려받았기 때문에 자식이 부모를 닮기도 하고, 닮지 않기도 합니다.

이는 유성 생식의 가장 중요한 특징이기도 합니다. 환경이 안정적일 때는 부모를 닮은 자식이 적응하기 쉽지만, 환경이 급격하게 변화할 때는 부모를 닮지 않은 자식에게도 기회가 생기게 됩니다. 유성 생식으로 환경 변화에 대응하는 능력이 강화되는 셈입니다. 다세포 생물 대부분이 유성 생식의 길을 선택한 것도 이런 이유입니다.

물론 유성 생식이 무조건 좋은 것만은 아닙니다. 유성 생식을 하는 경우는 암컷과 수컷이 모두 더 나은 짝을 찾기 위해 엄청나게 많은 에너지를 소비하게 됩니다. 실제로 자연 생태계에서는 짝을 차지하기 위해 목숨을 걸고 싸우는 일은 심심치 않게 벌어지죠. 자신의 유전자를 퍼뜨리기 위해 어린 새끼를 의도적으로 죽여 버리는 일도 있습니다. 자연에서의 삶은 만만치 않습니다.

Chapter 1. 몸속에서

Q

7

음식에 대한
알레르기는
왜 생기나요?



A



이덕환 교수가 답하다

우리 주위에는 종종 음식을 가려먹는 사람이 있습니다. 맛있는 반찬만 골라 먹는 ‘편식쟁이’가 있고, 먹는 양이 적은 사람도 있습니다. 그런 사람은 크게 걱정할 필요가 없습니다. 하지만 특정 음식을 먹기만 하면 몸이 가려워 긁고, 온몸에 두드러기가 돋고, 구토와 설사를 하고, 심지어 숨이 가빠지고 혈압이 떨어진다면 사정이 달라집니다.

이런 증상이 나타나는 사람들은 특정 음식에 알레르기(알러지)가 있기 때문입니다. 그래서 음식을 먹을 때마다 언제나 긴장하고, 늘 조심해야 합니다. 자칫 쇼크로 진행되는 전신 면역반응(아나필락틱 쇼크)으로 목숨을 잃을 수도 있기 때문입니다.

국내 알레르기 환자는 급속도로 늘고 있습니다. 특히 어린 연령대의 알레르기 환자 수가 많은데, 청소년 알레르기 환자의 비율은 세계 10위권 안에 들 정도입니다.

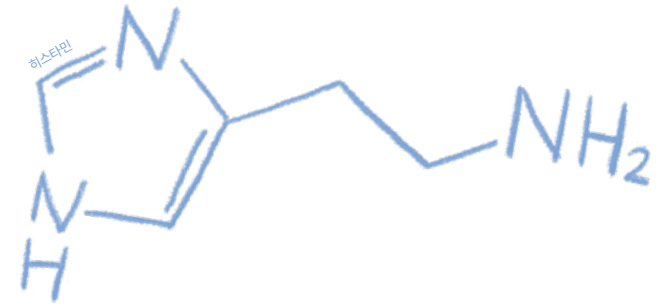
알레르기, 독성 반응과는 달라

특정 사람에게만 알레르기를 유발하는 식품은 모두에게 해로운 독성 물질과는 다릅니다. 독성 물질은 우리 몸에 유입되면 사람을 가리지 않고 중독 증상을 나타내죠. 대표적으로 일산화 탄소가 있습니다. 일산화 탄소는 몸속 혈액에서 산소를 운반해 주는 단백질인 헤모글로빈에 단단하게 달라붙어서 세포의 호흡을 불가능하게 합니다. 또 세균이나 곰팡이를 죽이는 살균제나 방부제도 인체의 조직을 망가뜨립니다. (그러나 살균제나 살충제를 밀폐된 실내에 마구 뿌리는 일은 절대 해서는 안 됩니다.) 자연산 복어의 혈액이나 내장 속 테트로도톡신도 자율신경을 통째로 마비시켜 버립니다. 독성 물질에 의한 중독은 질병이 아니라 사고입니다.

알레르기를 유발하는 물질은 이런 독성 물질과는 전혀 다릅니다. 일반적으로 건강에 좋은 화학물질이 일부에게 골치 아픈 증상을 일으키기 때문이죠. 알레르기를 일으키는 식품이 따로 있지도 않습니다. 알레르기 환자마다 알레르기 반응을 하는 식품이 다릅니다. 심지어 인류의 주식으로 자리 잡은 쌀, 밀, 옥수수에 알레르기를 일으키는 사람도 있습니다.

이수영 아주대병원 소아청소년과 교수팀은 2008년 2월부터 2018년 3월까지 식품 알레르기 진단을 받은 환자 2733명을 대상으로 알레르기 첫 발생 연령과 원인 식품 등을 분석했습니다. 그 결과 국내에서 알레르기를 가장 많이 유발하는 식품은 달걀이었습니다. 다음으로 우유, 밀, 갑각류, 생선, 호두, 돼지고기, 땅콩, 조개, 복숭아 순으로 나타났습니다. 그밖에 콩, 사과, 닭고기, 들깨, 오징어 등도 있었습니다.

이 교수팀에 따르면 알레르기 환자의 절반 정도(45.3%)는 2살 미만일 때부터 증상이 시작된 것으로 나타났습니다. 물론 성인이 된 뒤에 알레르기



가 나타나기도 합니다. 잘 먹지 않던 낯선 식품뿐만 아니라 평소 멀쩡하게 잘 먹던 식품에서도 갑자기 알레르기 증상이 나타날 수 있습니다.

알레르기 반응은 면역 체계가 지나치게 민감해서 생기는 일입니다. 면역 체계가 정상적으로 이뤄진다면 인간에게 질병을 일으키는 병원체만 선별적으로 골라내서 이에 대응합니다. 하지만 면역 체계가 민감하면 멀쩡한 화학물질까지 병원체로 잘못 인식하게 되죠. 건강에 이로운 화학물질이 알레르기 환자에게만 심각한 증상을 유발한다는 점에서 독성 물질에 의한 중독과는 확실하게 구분이 됩니다.

현재 알레르기를 유발할 가능성이 있는 성분이 포함된 가공식품에는 제품 성분을 정확히 표시하도록 하고 있습니다. 알레르기를 일으키는 글루텐 성분을 제거한 밀가루를 판매하는 등의 시도도 있습니다. 만약 음식을 잘못 먹어 알레르기 증상이 심하게 나타나면 항히스타민제를 복용해야 합니다.

발생 원인 여전히 미궁 속

사람에게 알레르기를 일으키는 물질을 ‘알레르기 유발 항원’ 또는 ‘알레르겐(allergen)’이라고 부릅니다. 알레르겐이 면역글로불린 E(IgE)라는 면역 단백질에 달라붙으면, 히스타민을 대량으로 분비시킵니다. 히스타민은 몸속에서 발생하는 염증을 관리하는 신경전달 물질입니다. 몸속에 히스타

민이 매우 많아지면 코와 기관지의 점막에서 끈적끈적한 점액이 분비됩니다. 이때 기관지의 평활근이 수축하면서 기관지가 좁아지고, 신경 말단에서 가려움과 통증이 시작됩니다. 천식이나 아토피성 피부염도 넓은 의미로 알레르기입니다.

알레르겐이라고 해서 특별한 화학물질은 아닙니다. 오히려 우리의 생활 주변에서 흔히 볼 수 있는 물질입니다. 사람들이 즐겨 먹는 식품, 꽃가루, 화장품 등에 들어 있습니다. 사람에 따라 금속으로 만든 반지, 목걸이가 알레르겐이 되기도 합니다. 몸에 장신구를 착용하면 발진이 일어나고 몸을 긁는 사람들을 생각하면 됩니다.

심지어 병을 치료하기 위해 사용하는 약품도 문제가 될 때가 있습니다. 약품에 알레르기가 있는 사람은 그 성분을 잘 기억해 뒀어야 합니다. 다른 질병으로 병원에 가면 알레르기 반응을 일으키는 성분을 확인하고 이를 빼 약으로 처방받아야 합니다. 그래서 병원에서 새로운 의약품을 처방해 줄 때 알레르기 검사를 하기도 합니다.

우리 몸속에 들어오더라도 그리 치명적일 것 같지 않은 꽃가루와 먼지에도 콧물을 흘리고 재채기를 하는 것을 보면 인간은 특별히 예민한 면역 체계를 가지고 있는 것 같습니다.

문제는 어떤 물질이 문제를 일으키는지, 누구에게 어떤 종류의 알레르기가 있는지 알 수 없다는 점입니다. 병원의 알레르기 검사를 해도 일부만 알 수 있습니다. 화장품의 경우 피부에 직접 발라보고 반응이 있는지 알아보는 것이 유일한 확인 방법입니다.

알레르기 발생 원인은 아직 정확히 밝혀지지 않았습니다. 유전적 요인이 작용하기도 하지만 같은 유전자를 공유한다고 반드시 같은 알레르기 반응을 겪는 것도 아닙니다. 음식의 조리법, 비타민 D의 합성 능력, 장내

미생물, 이유식을 시작한 시기, 항생제 사용 빈도도 영향을 미친다고 알려져 있습니다.

알레르기, 너무 깨끗해서 생긴다?

현대화가 진행되면서 알레르기 환자가 급격하게 늘자, 일각에선 인간이 과거에 없던 새로운 화학물질을 더 많이 사용하기 때문이라는 주장도 나옵니다. 하지만 역설적으로 인간의 생활환경이 너무 깨끗해진 것이 문제라는 ‘위생 가설’도 있습니다. 이는 1989년에 제기된 새로운 이론인데, 실제로 알레르기 환자는 통계적으로 소득이 높은 국가일수록, 대도시일수록, 자녀의 수가 적은 사회일수록 많습니다.

인간의 면역 체계는 엄마 몸속에서 태어날 때 완성된 것이 아닙니다. 우리는 태어난 뒤 인생을 살아가면서 수없이 많은 병원체를 새로 마주합니다. 세균, 곰팡이, 바이러스뿐만 아니라 몸속 생리작용을 방해하는 독성 물질과도 싸워야 하죠. 병원체의 종류는 실로 무궁무진합니다.

결국, 인간의 선천성 면역 체계도 성장하면서 환경에 적응하기 위한 훈련이 필요합니다. 이런 훈련은 생활환경에서 유입될 수 있는 병원체를 확인하고, 적절한 항체를 생산하는 경험을 통해 이뤄집니다. 반면 지나치게 깨끗하고 위생적인 환경에서 성장한 사람들은 역설적이게도 면역 체계를 완성하기 위한 훈련이 부족해집니다. 병원체가 거의 없는 상태에서 병원체가 소량이라도 유입되면 면역 체계가 제대로 작동할 수 없다는 것이 위생 가설의 핵심이죠.

우리 사회에도 위생 가설이 작동하고 있습니다. 2015년 국민건강영양조사에 따르면, 50대 이상에서는 A형 간염에 대한 항체 보유율이 97%입

니다. 국민 대부분이 어린 시절 A형 간염 바이러스에 감염된 경험이 있다는 뜻입니다. 그런데 위생 환경이 크게 개선된 후에 어린 시절을 보낸 30대의 항체 보유율은 31%이고, 20대의 항체 보유율은 12%입니다.

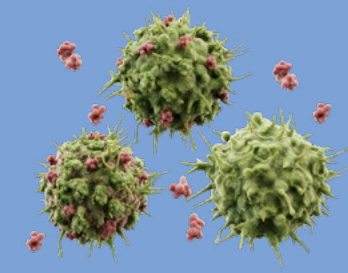
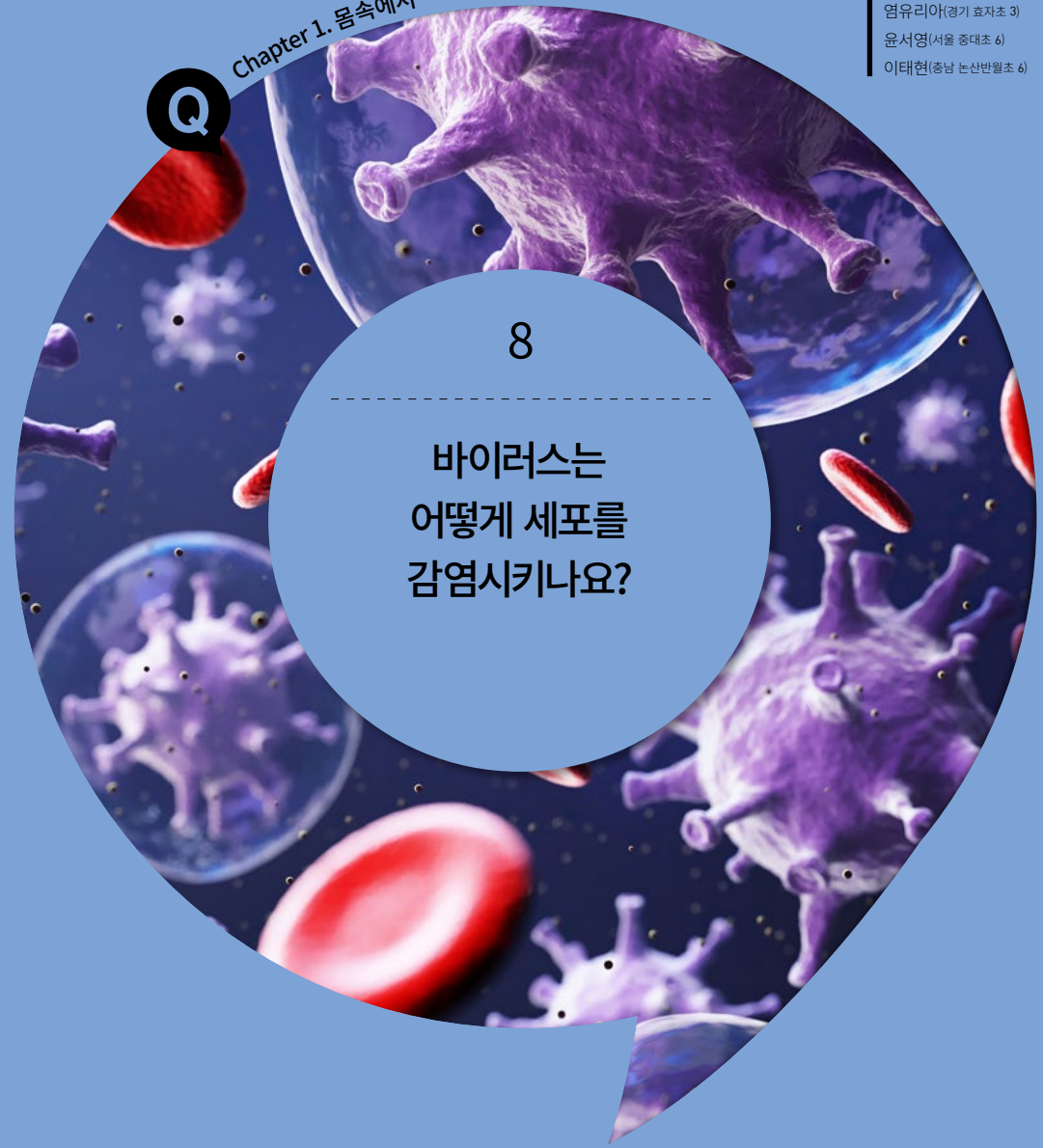
그렇다고 면역력을 키우기 위해 아이들을 의도적으로 비위생적인 환경에 노출해야 하는 것은 아닙니다. 하지만 위생에 지나치게 집착하는 것도 좋지 않습니다. 과도한 위생 결벽증이 오히려 알레르기의 위험을 증폭시킬 수도 있기 때문입니다. 살균과 멸균만 강조하는 광고를 경계해야 하는 이유입니다. 무엇이나 넘치면 모자란 것만 못 할 수 있는 법입니다.

Chapter 1. 몸속에서



8

바이러스는
어떻게 세포를
감염시키나요?



A



이덕환 교수가 답하다

전 세계가 코로나19 확산 여파로 긴 시간 힘겨운 나날을 보내고 있습니다. 한국은 그나마 사정이 낫습니다. 세계 최초로 개발한 ‘신속 진단키트’, 신용카드나 폐쇄회로(CC)TV 등으로 감염자를 추적하는 첨단 기술 덕분입니다. 그러나 여전히 마음 놓고 자유롭게 돌아다닐 수 없는 위험한 상황입니다.

바이러스는 라틴어로 ‘독’이라는 뜻입니다. 이름의 뜻대로 바이러스는 인간의 몸속에 들어오면 면역 체계 등에 문제를 일으킵니다. 가령 코로나 19를 유발하는 신종 바이러스인 사스코로나바이러스-2(SARS-CoV-2)는 호흡 곤란, 가슴 통증 등의 증상을 유발하고, 악성 폐렴을 유발할 수 있습니다. 또 뇌를 감염시켜서 심각한 뇌졸중을 일으키기도 합니다. 고위험군 환자는 심하면 사망에 이르게 되죠. 완치된다고 해도 심한 후유증에 시달릴 수 있습니다.

침투부터 복제까지, 바이러스 세포 감염

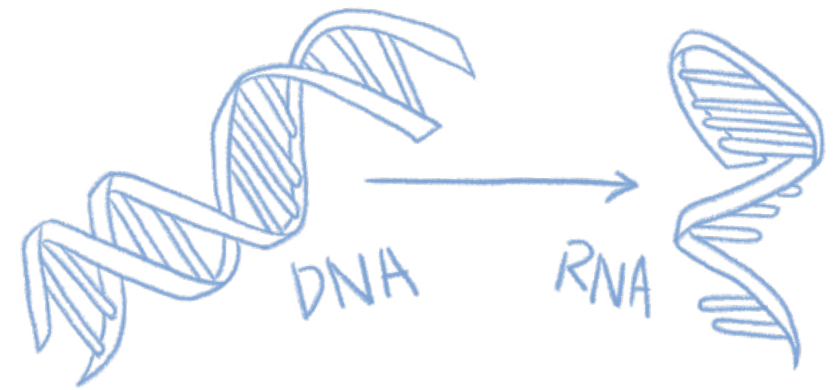
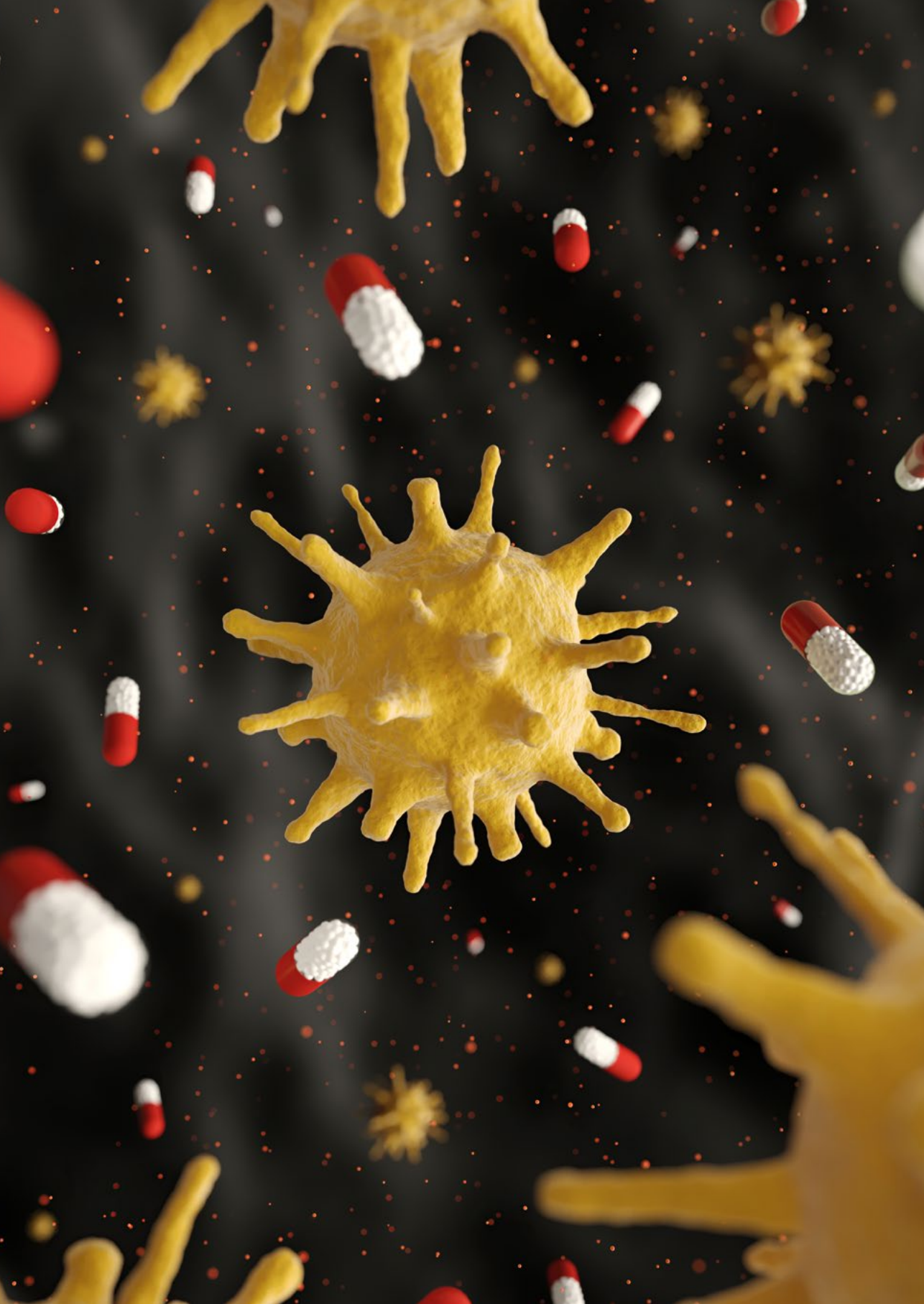
바이러스의 존재는 19세기 말 처음 알려졌습니다. 프랑스의 생화학자 루이 파스퇴르는 세균 필터를 개발했는데, 이것으로도 걸러낼 수 없는 작은 감염성 병원체가 존재한다는 사실을 밝혔습니다.

바이러스는 크기가 세균보다 10분의 1에서 100분의 1 수준으로 작아, 전자현미경을 동원해야만 그 모습을 볼 수 있었습니다. 1935년, 미국의 생화학자 웬델 스탠리가 마침내 처음으로 바이러스를 관찰합니다. 이때 그가 눈으로 확인한 바이러스는 담배 모자이크 바이러스(TMV·tobacco mosaic virus)였습니다.

바이러스는 세포의 기본적인 구조조차 제대로 갖추지 못한 존재입니다. 스스로 영양분을 섭취해 활용하는 능력도 없고, 생명체라면 당연히 갖춰야 할 번식 능력도 없습니다. 세균이나 곰팡이처럼 인간의 몸에 해로운 독소를 배출해 공격하지도 못합니다. 그래서 현대 생명과학에서는 바이러스를 생물과 무생물의 경계에 있는 기묘한 존재로 보고 있습니다.

바이러스는 숙주의 생리현상을 적극적으로 활용해서 살아갑니다. 숙주의 몸에 들어간 뒤, 세포벽을 통해 세포 안으로 침투합니다. 이때 사스코로나바이러스-2는 표면에 붙어있는 뾰족한 돌기를 이용합니다. 바이러스가 세포 안으로 들어가면 단백질로 만들어진 세포 껍질이 부서집니다. 세포 안에 있던 유전 정보를 담고 있는 핵산(RNA, DNA)이 쏟아져 나오게 되죠. 그러면 바이러스는 숙주 세포의 단백질과 핵산의 합성 기능을 이용해서 자신의 유전물질을 복제합니다.

복제된 유전물질에 껍질이 생겨 온전한 바이러스가 만들어지면, 바이러스는 세포의 세포막을 뚫고 나와서 새로 서식할 세포를 또다시 찾아 나섭니다.



니다. 바이러스는 이렇게 자신의 유전물질을 복제하는 과정에서 우리 몸의 세포를 숙대발로 만들어 버립니다. 사스코로나바이러스-2는 폐와 뇌의 세포를 망가뜨리고, 후천성면역결핍증후군(AIDS)을 일으키는 인간면역결핍바이러스(HIV)는 백혈구를 파괴해 버립니다.

그러나 모든 바이러스가 문제를 일으키는 것은 아닙니다. 인간의 몸속에서 아무 문제 없이 존재하는 바이러스가 90종이 넘습니다. ‘유익균(프로박테리아)’과 마찬가지로 ‘유익바이러스(프로바이러스)’도 있다는 뜻입니다.

또한 숙주에 큰 피해를 준다고 바이러스가 더 잘 사는 것은 아닙니다. 숙주가 죽어버리면 바이러스도 더 이상 서식처를 확대할 수 없게 되죠. 그래서 독성이 너무 강하면 바이러스도 생태계에서 선택받기 어렵습니다. 1918년 스페인 독감으로 전 세계적으로 5000만 명 이상을 희생시킨 강력한 인플루엔자 A형 바이러스(H1N1)는 10개월 만에 사라졌습니다. 치료제와 백신 없이 말이죠.

과유불급, 사이토카인 폭풍

바이러스는 인간의 면역 체계에도 문제를 일으킵니다. 일반적으로 병원성 바이러스가 침입하면 면역 체계에는 비상이 걸립니다. 사스코로나바

이러스-2처럼 낮은 바이러스가 들어오면 상황이 더욱 심각해집니다. 한시라도 빨리 침입한 바이러스의 정체를 정확하게 파악해서 항체를 만들어야 하나 쉬운 일은 아닙니다. 시간도 상당히 많이 필요합니다. 인간의 몸은 대개 체온을 올리는 방법으로 이에 대응합니다. 체온이 올라가면 모든 생리작용이 느려지기 때문이죠.

체온이 올라가면 침입한 바이러스가 증식되는 속도도 함께 느려집니다. 시간을 벌기 위한 보편적인 전략입니다. 이는 인간 외에 다른 동물에서도 발견할 수 있는 현상입니다. 예를 들어 박쥐는 날아다니는 습성으로 에너지 소모가 커 체온이 40°C 이상으로 매우 높게 유지됩니다. 그 결과 박쥐 몸속에서는 바이러스가 살아남기 힘듭니다.

면역 반응의 최전선에 있는 백혈구도 바빠집니다. 백혈구는 바이러스 등 병원균이 몸속에 침입하면 항체 형성에 필요한 정보를 담은 단백질 ‘사이토카인’을 분비합니다. 사이토카인에 의해 순조롭게 항체가 형성되면 바이러스의 증식이 중단되고, 고약한 증상은 사라지게 됩니다.

하지만 과유불급이라는 사자성어가 있듯이, 사이토카인이 너무 많이 분비되면 ‘사이토카인 폭풍’이라는 증상이 나타납니다. 과다 분비된 사이토카인이 바이러스 외에 정상 세포까지 공격하기 때문이죠. 우리 몸이 스스로 만들어낸 사이토카인이 바이러스보다 더 심각한 상황을 만드는 아이러니입니다.

바이러스의 생존 전략은 ‘변신’

주로 미움을 받지만, 바이러스도 지구 생태계의 당당한 구성원입니다. 지구상에 존재하는 동물, 식물, 세균, 곰팡이 등 모든 생물의 세포에 기생해

살아갈 뿐이죠. 혹자는 바이러스가 지구상의 모든 생명체의 원조라고도 말합니다. 실제로 바이러스가 생태계에서 악동 역할만 하는 것도 아닙니다. 사실 바이러스는 서로 다른 생물 종 사이에 유전자를 옮겨줘 생물 종의 다양성을 높여주는 고마운 존재이기도 합니다.

인간도 바이러스에서 유래된 유전자를 많이 가지고 있습니다. 박테리오파지(살균 바이러스)처럼 인간에게 해로운 세균을 먹어 치워주는 바이러스도 있습니다. 이는 인간의 코, 잇몸, 눈꺼풀, 소화기 등을 덮고 있는 점액 속에 서식합니다. 인체에서 선천성 면역을 활성화하는 등 면역작용에 중요한 역할을 합니다.

바이러스는 변신이 매우 자유롭습니다. 한 예로 RNA 바이러스는 숙주에 자신의 유전자를 끼워 넣기만 하면 변종이 지속해서 발현되죠. 코로나19의 원인인 사스코로나바이러스-2도 가벼운 감기를 일으키는 코로나바이러스의 한 종류입니다. 뾰족한 돌기로 뒤덮인 왕관(코로나) 모양의 껍질 속에 염기 3만 473개로 구성된 RNA가 들어있습니다.

사스코로나바이러스-2는 2003년 중국에서 시작된, 중증급성호흡기 증후군(SARS)을 일으키는 사스코로나바이러스(SARS-CoV)와 염기 서열이 78.9%나 비슷합니다. 야생박쥐에 기생하는 코로나바이러스와는 최대 96.1%나 일치합니다.

그래서 전문가들은 박쥐에 기생하는 코로나바이러스가 다른 바이러스와의 재조합을 통해 사스코로나바이러스-2라는 새로운 변종이 됐고, 뱀, 새, 멍크 등을 매개체로 인간에게 전파된 것으로 봅니다.

이처럼 바이러스는 언제나 새로운 서식처를 찾아다닙니다. 우리가 새로운 땅을 개척하고, 신도시를 만드는 것과 다르지 않습니다. 그래서 바이러스가 생물 종을 가로질러 전파된다는 사실이 크게 놀라운 일이 아닙니다.

가축이나 야생동물이 인간에게 바이러스를 옮기는 일도 어제오늘 시작된 게 아닙니다. 흔한 질병인 감기도 인류가 가축을 기르면서 시작된 대표적인 인수공통 감염병입니다. 인수공통 감염병은 동물과 사람 간 전파 가능한 질병을 뜻합니다.

Chapter 1. 몸속에서



9

손 소독제는
어떻게
바이러스와 세균을
죽이나요?



A



이덕환 교수가 답하다

코로나19가 전 세계로 확산되고 그 여파가 1년 넘게 이어지며 손 소독제는 현대인의 생활 필수품이 되었습니다. 마트, 승강기, 은행, 병원 어느 장소를 가든 손 소독제가 갖춰져 있습니다. 물과 비누로 손을 씻기 어려운 상황에서 손 소독제만으로 손에 묻은 바이러스와 세균을 죽일 수 있어 편리하기 때문입니다.

손 소독제의 70%는 살균력 강한 에탄올

손 소독제는 젤 상태의 용액에 살균 성분을 넣은 제품입니다. 이때 살균 성분으로는 피부 소독제로 사용하는 에탄올을 가장 많이 씁니다. 에탄올은 오래전부터 세균이나 곰팡이를 제거하는 용도로 널리 쓰였습니다. 물론 바이러스도 죽일 수 있죠. 에탄올은 특히 피부에 생긴 상처를 소독하

거나 의료용 도구를 살균하기 위해 많이 이용합니다. 지금도 병원에서는 주사를 놓을 때, 해당 부위를 에탄올 적신 솜으로 먼저 소독합니다. 세계 보건기구(WHO)는 손 소독제를 만들 때 100% 순수한 에탄올보다 에탄올의 양이 전체의 60~80%인 것이 살균에 효과적이라고 보고 있습니다.

살균력 강한 에탄올이 고농도로 포함된 만큼, 손 소독제를 사용할 때는 각별한 주의가 필요합니다. 그렇지 않은 경우 뜻밖의 사고가 일어납니다. 실제로 2020년 6월 대구에서는 한 어린이가 승강기 버튼 옆에 비치된 손 소독제를 사용하다가 각막에 화상을 입는 사고를 당했습니다. 어린이는 손 소독제를 쓰기 위해 까치발을 들고 소독제 뚜껑을 눌렀습니다. 그 순간 뿜어져 나온 소독제가 어린이 눈에 튀어 각막에 화상을 입힌 것이죠. 미국에서도 한 시민이 소독제를 쓴 후에 촛불을 켜다가 화상을 입는 등 끔찍한 사고를 겪은 사례가 있습니다.

손 소독제의 주성분인 에탄올은 미생물의 인지질 막을 파괴하고 단백질을 변성시킵니다. 또 삼투 현상으로 미생물에게 탈수 현상을 일으키기도 합니다. 이는 바이러스나 세균을 탈수 현상으로 죽일 수 있다는 뜻이기도 하지만, 동시에 손 소독제가 우리 몸속 세포도 파괴할 수 있다는 뜻도 됩니다. 다행히도 인간의 피부 표면에는 외부 유해물질의 침입을 차단해주는 강력한 면역 조직 표피층이 있어 세포를 보호합니다만, 손 소독제를 너무 자주 쓰면 피부도 한계에 다다릅니다. 특히 에탄올은 휘발성이 강해 지나치게 많이 쓰면 피부가 건조해 갈라집니다.

피부도 이러한데, 입이나 눈 속에 에탄올이 닿는 것은 매우 위험한 일입니다. 도수가 강해 독주로 불리는 위스키나 고량주에도 에탄올이 40~60% 들어있습니다. 손 소독제는 그보다 훨씬 더 강한 술인 셈입니다. 실수로라도 입에 넣었다간 입과 소화기에 심한 화상을 입을 수 있습니다.



마찬가지로 눈에 들어가면 각막에 화상을 입게 되죠.

한편 손 소독제를 만들 때 에탄올만 사용하지는 않습니다. 이산화 염소(ClO₂)를 이용하기도 합니다. 이산화 염소는 연한 적갈색의 물질로, 섭씨 11°C에서 기화하는 특징이 있습니다. 이산화 염소는 강한 산화력을 가진 살균제로 다양한 분야에서 활용됩니다. 종이를 만드는 펄프 공장에서 표백제로 사용하기도 하고, 정수장과 수영장에서 살균제로도 이용하거나 상처를 소독하는 약품에 쓰이기도 합니다.

항균 필름, 자외선 소독기... 효과 있을까

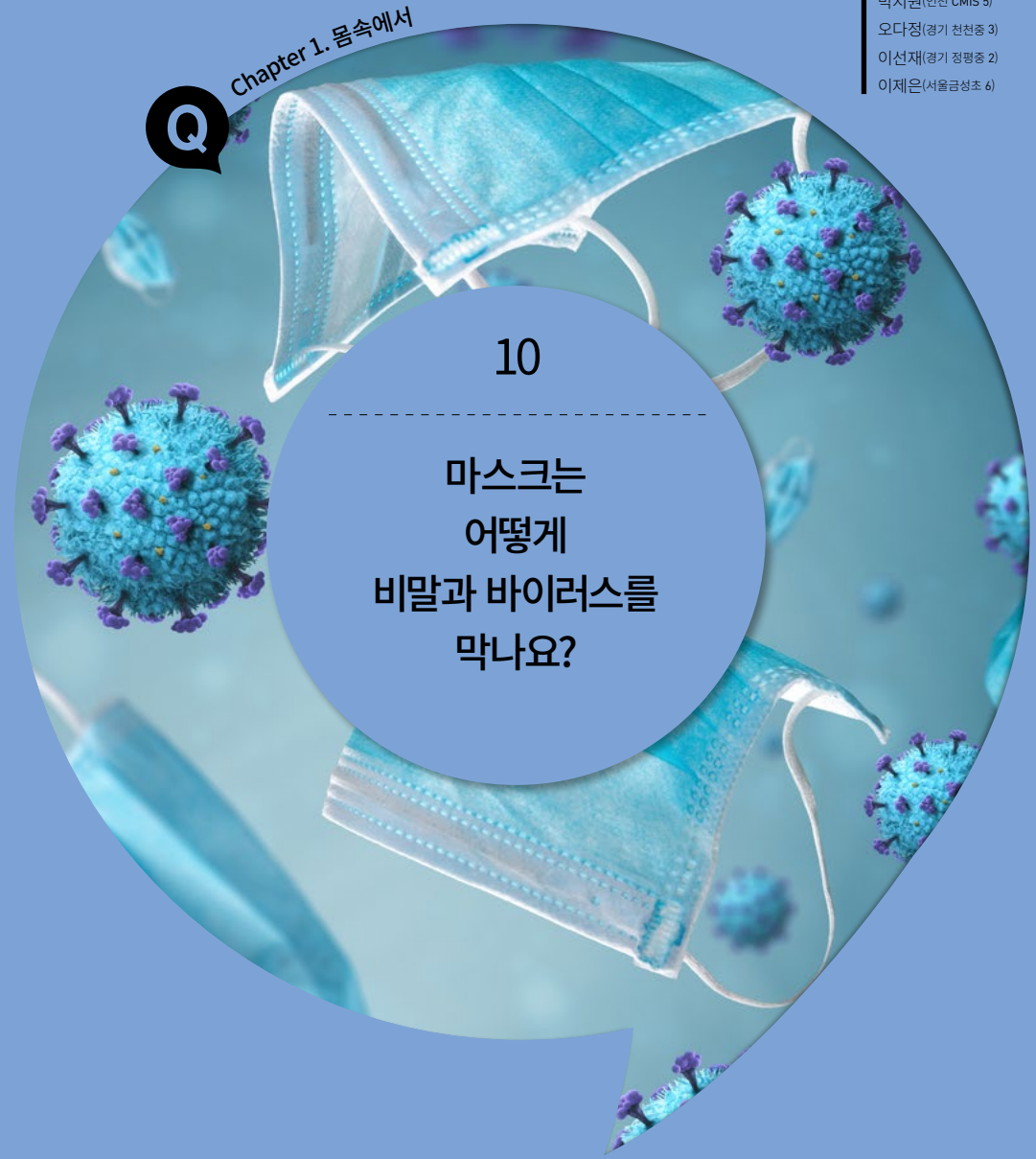
코로나19를 유발하는 사스코로나바이러스-2는 작은 침방울을 뜻하는 비말을 통해 확산합니다. 실내 공간에서 비말은 약 2m 정도 날아갑니다. 에어컨을 켜놓은 실내에서는 비말이 더 멀리까지 날아갑니다. 가능성은 비말보다 낮지만, 에어로졸에 의한 감염 사례도 있습니다. 그렇다고 실내에 함부로 살균제를 뿌리는 행동은 위험합니다. 특히 염화에톡시에틸구아니딘(PGH), 폴리헥시메틸렌구아니딘(PHMG), 메틸아이소싸이아졸리논(MIT), 클로로메틸아이소싸이아졸리논(CMIT) 등의 살균 성분이 함유된 살균제는 특히 조심해야 합니다. 살균제를 분무한 실내에 장시간 머무르지도 말아야 합니다. 실내 공기가 오염됐을까 염려된다면 창문을 열어 환기하세요.

건물 바닥, 외벽, 복도 등에는 다량의 살균제를 뿌려봤자 효과가 없습니

다. 지하철, 자가용 바닥에 뿌린 살균제도 마찬가지입니다. 출입문 손잡이, 테이블 표면, 승강기 버튼 등 직접 손이 닿는 곳을 소독해야 합니다. 그리고 이땀 살균제를 뿌리는 것보다 형겔에 살균제를 적셔 닦아내는 게 가장 확실한 방법입니다.

과학적으로 근거 없는 제품은 사용을 주의해야 합니다. 가령 플라스틱 항균 필름 속 살균 성분이 필름 표면에 묻은 바이러스를 제거해준다는 주장은 과학적으로 설득력이 없습니다. 사스코로나바이러스-2가 파괴되면 바이러스가 살균 효능이 있는 살균제와 직접 닿아야 하거든요. 또 과거에 은나노 입자를 넣어 살균력이 높다는 ‘은나노 젓병’이 유행한 사례가 있었습니다만, 이는 공정거래위원회와 소비자원이 효과를 확인할 수 없다는 이유로 생산과 판매를 금지했습니다. 마찬가지로 이산화 염소를 방출하는 목걸이를 하면 얼굴 주변의 사스코로나바이러스-2가 제거된다는 주장도 함부로 믿지 마세요. 과학적으로 효과가 밝혀진 바가 없습니다.

손 소독제와 함께 자외선 소독기를 이용하는 곳도 많습니다. 실제로 자외선이 바이러스를 파괴할 수 있기 때문이죠. 그러나 자외선램프에 한 번 스친다고 바이러스가 모두 죽는 것은 아닙니다. 자외선을 직접 쬐어야 바이러스를 파괴할 수 있는데, 꽤 오랜 시간이 걸립니다. 자외선의 세기도 강해야 합니다. 병원 전문가들처럼 특수한 목적으로 사용하는 경우가 아니라면 큰 효과를 기대하기 어려울 수 있습니다. 당연히 자외선도 눈에 쬐면 위험하니 주의해야 합니다.



A



이덕환 교수가 답하다

마스크의 역사는 매우 깁니다. 기원전 7000년경에도 사용했다는 기록이 남아있습니다. 다만 당시에는 현재와 달리 의례용으로 사용했습니다. 실제로 마스크는 전쟁, 변장, 축제, 오락, 스포츠 등에서 다양하게 이용됐죠. 이런 마스크는 19세기 말부터 의료 목적으로 사용되기 시작했습니다. 오늘날 외과 수술에서 마스크는 필수품으로 자리를 잡았죠. 특히 감염병 환자를 돌보는 의료 종사자는 반드시 마스크를 착용합니다.

최근에는 코로나19 여파로 의료 종사자뿐만 아니라 전 세계인이 마스크를 착용합니다. 마스크는 착용한 사람의 입이나 코에서 배출되는 비말(작은 침방울)이 다른 사람에게 튀지 않도록 막아줍니다. 반대로 다른 사람 입에서 배출된 비말이 마스크를 착용한 사람에게 튀지 못하게 막기도 합니다. 또 비말이 묻은 손으로 얼굴을 만지지 않게 가리는 역할도 합니다. 이처럼 마스크는 나와 남을 모두 지켜주는 훌륭한 방역 수단입니다.

올바른 마스크 착용법

마스크의 효과를 높이려면 올바른 방법으로 마스크를 착용해야 합니다. 가령 마스크를 귀에 걸고 입술 밑으로 쪽 내린 상태로 착용해 코와 입이 노출되게 만드는 이른바 ‘턱스크’는 마스크를 쓴 효과가 전혀 없으며, 어떤 경우에도 절대 허용되지 않습니다.

마스크를 착용할 때는 먼저 얼굴에 닿는 안감과 외부에 노출되는 걸감을 반드시 구분해야 합니다. 마스크에 주름이 있는 경우에는 접힌 부분이 바깥쪽을 향하도록 만들어 착용하는 것이 원칙입니다.

그리고 마스크는 손을 물과 비누로 씻거나 손 세정제로 소독 후 착용하는 것이 좋습니다. 손이 마스크의 안감에 닿지 않도록 양 끈을 조심히 귀에 걸고, 면 부분은 코와 입을 완전히 가리도록 합니다. 마지막에는 손가락으로 마스크 윗부분의 금속을 눌러서 콧등에 완전히 밀착시켜 고정합니다.

마스크를 제대로 착용한 상태에서는 들숨과 날숨이 모두 마스크를 통해서만 드나들어야 합니다. 마스크와 얼굴 사이의 틈을 통해서 공기가 드나들도록 착용하면 마스크 차단 효과를 충분히 기대할 수 없습니다. 물론 차단 효과가 큰 방역용 마스크를 착용하면 호흡에 어려움이 발생할 수 있습니다. 호흡기가 약한 어린이와 노약자의 경우에는 이런 마스크를 쓰는 것이 오히려 악영향을 줄 수 있습니다.

마스크는 어쩔 수 없이 날숨에 포함된 습기에 노출될 수밖에 없습니다. 장시간 사용한 마스크는 세균이나 곰팡이가 증식할 확률이 높으니 다시 사용해선 안 됩니다. 혹시라도 마스크에서 퀴퀴한 냄새가 난다면 반드시 빨아 쓰거나 바로 폐기해야 합니다.



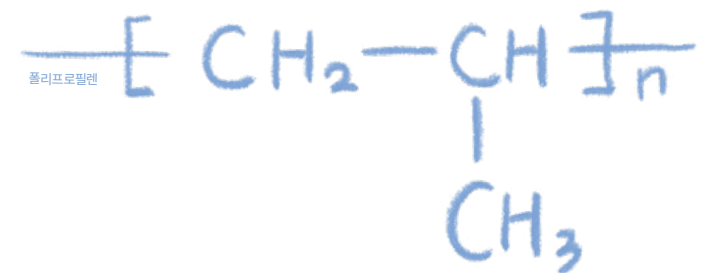
면 vs. 일회용, 제조 방식 달라

마스크는 다양한 종류가 있습니다. 크게 면섬유를 씨줄(가로줄)과 날줄(세로 줄)로 짜서 만든 천을 이용한 '면 마스크'와 폴리에틸렌(PE) 등의 저밀도 플라스틱으로 부직포 필터를 만들어 장착한 '일회용 마스크'로 구분할 수 있습니다.

면 마스크는 세탁 후 재사용이 가능해 경제적이지만, 비말이나 먼지를 차단하는 효과가 약하다는 단점이 있습니다. 이를 보완하기 위해서 면 마스크에 폴리프로필렌(PP)에 열, 바람, 압력 등을 가해 녹인 부직포 필터를 넣어 사용하기도 합니다. 부직포 필터를 만드는 과정에서 폴리프로필렌에 직류 전기를 흘려주며 고체화시키면 양전하와 음전하가 분리된 정전기 필터를 만들 수도 있습니다.

이런 필터를 사용하면 먼지나 비말을 차단하는 효과가 훨씬 더 높아집니다. 단, 수분이 닿거나 너무 오래 착용하면 정전기 필터의 효과가 떨어지니 재사용은 바람직하지 않습니다.

그런가 하면 일회용 마스크는 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 폴리프로필렌 등의 플라스틱으로 만든 부직포 안감과 겉감 사이에 마스크용 필터를 끼워 만듭니다.



결국 일회용 마스크는 전체가 합성 플라스틱인 셈입니다. 마스크의 끈도 탄성이 있는 합성 고무를 사용합니다. 그 결과 일회용 마스크는 폐기하면 환경에서 썩지 않고 남아 있다가 미세 플라스틱으로 분해됩니다.

일회용 마스크도 한 번 착용한 뒤 바로 폐기해야 합니다. 본래 일회용 마스크는 질병 감염 확률이 높은 의료 현장에서 사용할 목적으로 생산했습니다. 의료진이 아닌 경우 감염 가능성과 환경에 미치는 부작용을 고려해서 일회용 마스크 사용 여부를 결정해야 합니다.

식품의약품안전처(식약처)에서는 특정 기준을 두고 일회용 마스크의 미세먼지 차단 효율을 구분합니다. 먼지 입자를 걸러주는 분진 포집 효율, 숨을 들이마실 때 마스크 내부에서 느껴지는 저항인 얼굴 흡기 저항, 마스크와 얼굴의 틈새로 새는 공기의 누설률 등 3가지를 측정합니다.

흔히 크기가 0.4 μm (마이크로미터·1 μm 는 100만분의 1m)인 입자를 99% 이상 걸러주는 마스크를 'KF99', 94% 이상 걸러주는 마스크를 'KF94', 크기가 0.6 μm 인 입자를 80% 이상 걸러주는 마스크를 'KF80', 50% 이상 걸러주는 마스크를 'KF-AD'로 분류합니다. KF99와 KF94는 의료 현장에서 쓰이는 방역용 마스크이고, KF80은 미세먼지 대응 목적으로 만든 마스크입니다. KF-AD는 코로나19가 유행하면서 추가로 제작한 '비말 차단용(AD·anti-droplet)'입니다.

그밖에 외과 수술용으로 사용하는 '덴탈 마스크'도 있습니다. 마스크 겉면에 방수층이 있어서 비말은 차단하지만, 미세먼지 등 작은 입자를 차단하는 효과는 미약합니다. 얼굴과 밀착력이 약하지만, 호흡기가 약하거나 다른 사람과 밀접 접촉 가능성이 낮은 환경에서 장시간 착용할 때 유용합니다. 시중엔 식약처의 기준을 충족하지 않은 마스크도 유통되고 있으니 주의가 필요합니다.

0.1 μm 보다 작은 바이러스, 막을 수 있을까?

마스크 종류가 다양하다 보니, 마스크 차단 기능에 대한 오해도 있습니다. 먼저 입자의 크기가 2.5 μm 정도인 미세먼지는 씨줄과 날줄 사이의 간격이 매우 큰 면 마스크로는 차단되지 않습니다. 원칙적으로는 적어도 KF80 수준의 마스크를 착용해야만 합니다. 바이러스 입자는 보통 크기가 0.1 μm 보다 작아 이론적으로는 KF99나 KF94 등의 방역용 마스크로도 차단 불가능합니다.

하지만 너무 크게 걱정할 필요는 없습니다. 바이러스로 오염된 비말이나 에어로졸(지구 대기 중을 떠도는 미세 고체 입자나 액체 방울)은 면섬유에 잘 달라붙는 특성이 있기 때문입니다. 그래서 KF80이나 KF-AD는 물론, 면 마스크로도 상당한 차단 효과를 기대할 수 있죠.

더욱이 코로나19와 같은 바이러스성 감염병의 경우 손을 통해 감염될 확률이 상당히 높다는 점에서 면 마스크로도 충분한 차단 효과를 기대할 수 있습니다. 출입문 손잡이, 승강기 버튼, 테이블 등에 떨어진 비말이나 에어로졸이 손을 통해 입이나 코로 전달되는 것을 면 마스크로도 충분히 막을 수 있습니다. 실제로 올해 초 미국은 합성 플라스틱으로 만든 일회용 마스크는 의료진에게 공급하고, 의료진이 아닌 경우 면 마스크를 착용할 것을 권장했습니다.

코로나19와 같은 감염병은 가까운 거리에서 밀접 접촉이 위험합니다. 특히 환기가 잘 안 되는 밀폐된 실내 공간은 더욱 위험합니다. 따라서 불특정 다수와 밀접 접촉할 확률이 높은 실내 공간이나 대중교통 안에서는 반드시 마스크를 착용해야 합니다. 만약 미세먼지를 차단하려는 목적이 라면 반대로 실내보다 실외에서 마스크를 더 꼼꼼히 착용해야겠죠.

물론 마스크는 100% 완벽한 방역 수단일 수 없습니다. 마스크의 비말 차단 효과가 완벽하다고 장담할 수도 없죠. 하지만 마스크를 착용하는 것이 바이러스를 막을 수 있는 간단하지만 가장 효율적인 방법인 것은 분명합니다.

Q

11

고기를 익히면
왜 색깔이
변할까요?



A



이덕환 교수가 답하다

지금지글, 치이익. 뜨겁게 달궈진 프라이팬에 1등급 도장이 찍힌 선홍빛 쇠고기를 올려놓자 순식간에 익기 시작합니다. 그런데 쇠고기가 익으면서 붉은빛이 사라지고 회갈색으로 변합니다. 공기 중 산소와 결합해 붉은 색을 내는 혈액 속의 헤모글로빈, 근육 속의 미오글로빈과 같은 단백질이 변성을 일으키기 때문입니다. 하지만 너무 오래 두진 마세요. 지나치게 익히면 캐러멜화와 열분해가 일어나서 검게 변해버릴 수도 있으니까요.

인간이 만물이 영장이 된 비결, 요리

음식을 익혀서 먹는 것은 우리 인간만의 독특한 특징입니다. 인간이 만물의 영장으로 우뚝 서게 된 것이 음식을 익혀 먹는 기술, 즉 요리 덕분이라는 말도 있죠. 물론 인간도 처음에는 야생동물처럼 자연에서 채취한 열

매, 줄기, 뿌리를 먹거나 사냥한 동물을 날것 그대로 먹었습니다. 날것의 음식이니 금방 상해버려 날고기를 먹고 식중독에 걸리기 일쑤였습니다. 애써 구한 먹거리가 썩어서 버려야 하는 경우도 많았고요.

그런데 음식을 익혀서 먹으며 이런 상황이 달라지기 시작했습니다. 우리의 핵심은 불을 다루는 기술입니다. 불은 화학적으로 정의하면 높은 온도로 가열된 연료와 공기가 일으키는 산화 반응입니다. 약 200만 년 전 등장한 호모 에렉투스는 처음으로 불을 쓰는 기술을 터득했습니다. 호모 에렉투스는 최초로 완전한 직립보행을 한 종입니다. 현생 인류인 호모 사피엔스보다 체구가 더 크고, 건장했죠.

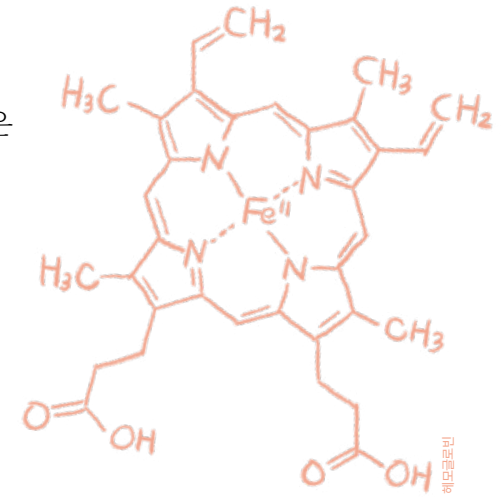
음식을 조리하려면 불뿐만 아니라 숟과 냄비도 필요합니다. 호모 에렉투스는 불을 직접 이용하는 대신 뜨겁게 달군 자갈로 요리했습니다. 지금도 이런 전통이 남아있는 곳이 있습니다. 양 한 마리를 통째로 불에 달군 돌로 익혀 먹는 몽골의 전통 요리 ‘허르헷’이 대표적입니다.

불을 쓰고 음식을 익히면서 인류는 날것에서는 즐길 수 없는 독특한 맛, 향, 질감을 즐길 수 있게 됐습니다. 향료와 같은 양념으로 음식의 품격을 높일 수도 있고요. 무엇보다 건강에 큰 도움이 됐습니다. 요리하는 과정에서 건강을 위협하는 미생물을 제거할 수 있어 식중독 등 음식과 관련된 질병이 확연히 줄었습니다. 불로 날것을 익힐 때 단단하게 뭉쳐진 전분이 풀어져 소화도 잘되기 시작했습니다. 연하고 부드러운 음식 덕분에 소화해야 하는 생물학적 에너지도 크게 절약할 수 있게 됐습니다. 절약한 만큼 뇌가 더 많은 에너지를 소비할 수 있었죠. 실제로 우리 몸무게의 2% 정도를 차지하는 뇌는 우리 몸에서 에너지를 가장 많이 소비하는 기관으로, 뇌가 소비하는 에너지는 우리 몸이 소비하는 전체 에너지의 20%를 차지합니다.



요리의 기본은 화학

청동과 철을 쓰기 시작하며 요리 기술은 급속도로 발전했습니다. 현재는 국가별, 지역별로 다양한 조리법과 음식이 개발돼 있죠. 오늘날의 요리는 과거에 비해 수많은 재료를 이용합니다. 탄수화물, 지방, 단백질 외에 비타민과 미네랄 성분 등의 영양분이 충분히 함유된 기본 재료가



쓰입니다. 포도당의 단맛을 내는 꿀과 설탕, 아세트산의 신맛을 내는 식초, MSG의 감칠맛을 내는 육류, 캡사이신의 매운맛을 내는 고추 등을 추가해 음식의 맛을 더욱 업그레이드시키기도 하고요. 짠맛의 소금, 쓴맛의 타닌, 후추, 강황, 계피, 마늘 등의 향신료로 간을 맞춥니다.

단순히 재료를 물리적으로 섞는다고 음식이 되지 않습니다. 재료를 삶고, 굽고, 튀기는 과정에서 화학 반응이 제대로 일어나야 비로소 맛있는 음식이 탄생합니다. 때로는 단백질과 같은 화학성분을 추출해서 요리에 활용하기도 합니다. 발효균을 이용해 음식을 숙성시키면 새로운 화학물질이 만들어집니다. 해조류, 콩, 우유에서 추출한 유화제를 이용해서 독특한 질감의 젤을 만들기도 합니다. 우리가 좋아하는 음식의 맛과 색, 향, 질감이 모두 요리 과정에서 일어나는 화학적 변환의 결과인 셈입니다.

최근에는 요리할 때 이용하는 화학적 현상을 이용한 ‘분자요리(Molecular gastronomy)’도 등장했습니다. 이는 음식의 질감과 조직, 요리 과정을 과학적으로 분석하고, 새로운 맛과 질감 등을 개발하는 요리법입니다.

음식은 문화의 산물...과학적 평가 주의해야

요리는 과학이지만 음식은 문화의 산물입니다. 대부분의 전통 음식은 현대 화학적 지식을 근거로 만들어진 게 아니라, 오랜 경험, 우연한 발견, 별난 상상력이 절묘하게 결합해 탄생했습니다. 따라서 전통 음식이 오랜 세월을 거치며 안전성을 검증받았을 것이라는 주장은 비판적으로 받아들일 필요가 있습니다. 대표적인 전통 음식이며, 미네랄과 아미노산이 풍부하다고 알려진 젓갈도 너무 많이 먹으면 문제가 생길 수 있으니까요.

음식에 대한 과학적 평가는 매우 조심해야 합니다. 음식에 특정 화학성분이 들어있어 건강에 영향을 준다는 말에 쉽게 현혹되면 안 됩니다. 카페인이나 콜레스테롤은 흔히 몸에 좋지 않다고 알려진 성분들입니다. 그러나 과학적 증거는 아직 정확하게 밝혀지지 않았습니다. 음식에 들어 있는 화학성분이 인체에 미치는 영향은 파악하기가 매우 까다롭기 때문입니다. 안전하다고 알려진 화학성분도 인체를 대상으로 실험하는 것은 쉬운 일이 아닙니다. 대부분 국가에서 화학성분에 대한 인체 실험을 제도를 통해 엄격하게 규제하고 있으며, 이는 우리나라도 예외가 아닙니다.

그러니 음식을 과학적으로 ‘좋은 음식’과 ‘나쁜 음식’으로 구분하는 시도는 무의미합니다. 좋은 음식도 나쁜 방법으로 섭취하면 심각한 부작용이 나타나고, 나쁜 음식도 충분히 절제해서 잘 먹으면 의외의 편익을 얻을 수 있는 법입니다. 자급자족으로 직접 먹을 음식 재료를 생산하고, 음식을 요리해 먹는 시대는 빠르게 막을 내리고 있습니다. 현대에는 상업적으로 생산한 먹거리를 소비할 수밖에 없습니다. 우리 땅에서 생산한 식품이 건강에 좋다는 ‘신토불이(身土不二)’만을 고집하는 것도, 식품공장에서 대량으로 생산한 가공식품을 거부하는 분위기도 이제는 바뀌어야 할 때입니다.

Chapter 2. 집·학교에서

Q

12

즉석식품의
유통기한이 긴 이유는
뭔가요?





이덕환 교수가 답하다

전자레인지, 에어프라이어, 팔팔 끓는 뜨거운 물 등을 이용해 곧바로 먹을 수 있는 즉석식품(간편식)이 많아지고 있습니다. 즉석식품은 간단하게 조리해 먹을 수 있을 뿐 아니라, 오랫동안 저장해 두고 먹을 수 있죠. 실제로 즉석식품의 유통기한은 꽤 깁니다. 컵라면은 6개월, 즉석밥은 9개월이며 냉동만두는 1년이 넘습니다. 요구르트, 식빵이 각각 10일, 18일 정도인 것에 비하면 지나칠 정도로 긴 것 같습니다.

상온에서 9개월간 썩지 않는 즉석밥의 비밀

즉석식품이 ‘방부제 덩어리’라는 말은 오해입니다. 즉석식품에는 미생물 증식과 화학적 변화로 인한 부패를 방지하는 방부제가 아닌, 독성이 충분히 약해 사람이 먹어도 문제가 없는 보존제를 사용합니다. 정부가 보존제

의 사용을 엄격하게 규제하기 때문에 이를 함부로 넣을 수도 없습니다. 보존제를 허용기준치보다 많이 넣으면 법적으로 판매할 수 없습니다. 즉석식품도 예외가 아니죠.

즉석식품의 유통기한이 유난히 긴 데는 다른 이유가 있습니다. 즉석식품은 가공, 포장, 운송, 유통 등 모든 과정에서 첨단 기술을 사용하기 때문입니다. 제조사가 생산 과정에 더 많은 돈을 쓰고, 더 큰 노력을 기울인다는 뜻입니다. 물론 그 비용은 고스란히 소비자가 부담하죠. 즉석식품이 같은 품질의 일반 가공식품보다 언제나 비쌀 수밖에 없습니다.

실제로 즉석밥을 9개월이나 유통할 수 있게 하는 건 쉬운 일이 아닙니다. 밥을 짓기 전에 고압 증기로 완벽하게 살균하는 기술, 무균 진공 포장 기술 등 고도의 기술이 여러 가지 필요합니다.

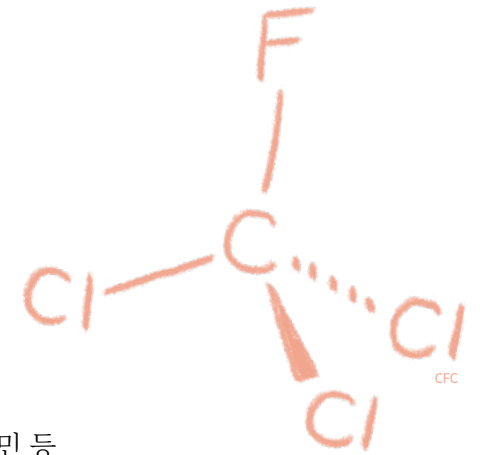
또 용기도 특별하게 만들어야 하죠. 특히 외부 산소가 즉석밥 내로 스며들어 가는 것을 완전하게 차단해야 합니다. 그래서 즉석밥의 용기와 뚜껑에는 모두 3중, 4중으로 만든 특수 재질의 플라스틱을 사용합니다. 그 덕에 즉석밥은 상온에서 유통할 수 있고 유통 비용도 상대적으로 절약할 수 있습니다.

그런가 하면 냉동만두는 포장보다 유통 과정에 더 많이 투자합니다. 만두의 속 재료를 즉석밥처럼 모두 고압 증기로 살균하면 맛이 엉망이 돼 버리기 때문에 하지 않습니다. 그 대신 냉동만두는 만두 공장에서 생산될 때부터 소비자가 포장을 뜯어서 먹을 때까지 줄곧 냉동 상태를 유지하도록 만듭니다. 냉동 탑차를 이용해서 운송하고, 상점에서는 냉동고에 꽂꽂 얼린 상태로 보관합니다. 유통 과정 중 단 한 번이라도 녹았던 제품은 반드시 폐기 처분합니다. 즉, 냉동만두의 유통기한 1년은 냉동 상태에서 최초 개봉을 하지 않은 경우라야 유효합니다.



절임, 발효는 전통적인 보존 기술

식품의 부패와 변질은 숙명과도 같은 일입니다. 아무리 정성을 들여서 조리한 음식이라도 시간이 지나면 먹을 수 없게 상해버립니다. 화학물질이 서서히 분해되기 때문입니다. 그 결과 음식의 색깔도 바뀌고, 맛과 향도 달라집니다. 비타민 등 영양 성분도 파괴됩니다.



공기 중에 떠다니는 세균이나 곰팡이 포자가 달라붙어서 부패하기도 합니다. 음식이 부패하면 보기 흉하게 변해버리고 악취를 풍깁니다. 심지어 고약한 독소가 생기기도 합니다. 누룩곰팡이가 만들어내는 아플라톡신이 대표적입니다. 아플라톡신이 들어 있는 음식을 장기간 섭취하면 간암에 걸릴 수도 있습니다. 부패하고 변질된 음식을 먹기만 해도 식중독에 쉽게 걸립니다.

이를 막기 위해 식품의 생물학적 부패와 화학적 변질을 예방하는 기술은 오래전부터 다양하게 개발됐습니다. 습기를 제거하는 건조 기술이 핵심입니다. 수분이 없는 상태에서는 세균이나 곰팡이가 자랄 수 없고, 화학적 변질도 크게 줄어듭니다.

연기를 이용한 훈제 기술도 있습니다. 훈제 과정을 통해 식품에 연기가 배어들면서 습기가 제거되고 독특한 풍미가 생겨납니다. 소금, 꿀, 설탕, 식초, 술 등에 절이는 방법도 부패를 늦추는 방법입니다. 또 발효균을 이용한 발효도 식품의 부패와 변질을 막아주는 훌륭한 전통 기술입니다. 이런 기술로 부패를 늦춘 식품으로는 간장, 된장, 김치, 장아찌 등이 있습니다.

첨단 포장재와 보존제의 합작품

냉장고는 우리 식탁에 형명을 가져왔습니다. 1928년 미국의 화학자 토머스 미즐리가 발견한 염화플루오린화 탄소(CFC·프레온) 가스는 가정용 냉장고가 보편화하는 데 결정적인 역할을 했습니다. 사람들은 냉장고를 이용해 식품 대부분을 냉장고 표준 온도인 섭씨 4°C 이하에서 긴 시간 동안 보관할 수 있게 됐습니다. 채소를 1주일 이상 싱싱하게 유지할 수 있게 됐고, 지나치게 짜고 신 음식으로부터도 벗어날 수 있게 됐습니다. 실제로 냉장고의 등장은 우리나라 전통 음식인 김치의 염도를 크게 낮췄습니다.

가공식품, 즉석식품은 이런 냉장고에 버금가는 또 다른 혁명입니다. 가공식품은 농산물, 축산물, 수산물 등 각종 자연식품을 여러 방법으로 처리해 맛과 저장성을 높였습니다. 즉석식품은 가공식품의 한 부류죠.

가공식품의 시작은 1800년대로 거슬러 올라갑니다. 1804년 프랑스의 발명가 니콜라 아페르가 최초로 통조림을 만드는 기술을 고안해냈고, 통조림을 이용한 식품 보존 기술이 가공식품으로 확대됐습니다. 공장에서 식품을 대량으로 생산하고, 소비자들이 원하는 식품을 편리하게 구매하는 게 가능해진 겁니다.

이후 식품을 가공해 보존하는 기술은 더욱 다양해졌습니다. 가령 감자칩 처럼 기름에 튀긴 과자류 등은 비닐로 산소를 차단하는 것만으로는 충분하지 않습니다. 포장지 안에 남아있는 산소가 감자를 튀긴 기름과 반응하면, 기름이 산패돼 특유의 썩든 냄새가 나기 때문입니다. 이에 화학자들은 비닐 포장지 안에 공기 대신 질소를 가득 채우는 방법을 고안해냈습니다.

공기와 수분을 차단해 가공식품의 보존성을 높일 수 있는 특수한 포장재도 다양하게 개발됐습니다. 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌과 같은 비닐, 폴

리에틸렌테레프탈레이트(PET)로 만든 플라스틱병, 알루미늄 캔 등을 이용한 특수한 포장 소재를 상점에서 누구나 쉽게 만나볼 수 있습니다.

다양한 보존제의 개발도 가공식품의 발전에 혁혁한 공을 세웠습니다. 보존제는 가공식품을 부패시키는 세균이나 곰팡이의 성장을 억제합니다. 주로 벤조산(안식향산), 구연산(시트르산), 소르빈산, 젖산과 같은 천연 유기산으로 만듭니다. 이산화 황, 아황산 염, 질산 염, 아질산 염 등의 무기물도 보존제로 사용됩니다.

이런 보존제는 수분이 조금이라도 남아있는 가공식품에는 반드시 들어 있습니다. 정체를 알 수 없는 세균이나 곰팡이가 증식할 가능성을 없애기 위해 보존제를 사용하기 때문입니다. 이때 보존제의 종류와 사용량은 식약처가 관리하는 ‘식품첨가물공전’을 통해서 엄격하게 규제합니다. 등록되지 않은 보존제를 사용하거나, 필요 이상으로 많은 양을 사용하면 엄한 법적 처벌을 받게 됩니다. 또 지자체, 경찰, 검찰에서도 가공식품의 품질을 관리합니다. 간혹 가공식품이 ‘보존제 범벅’이라고 주장하거나, 햄버거가 썩지 않는 이유가 보존제 때문이라고 말하는 사람이 있는데 모두 근거 없는 주장입니다. 가공식품도 결국 식품이기에 포장을 뜯은 상태로 놓아두면 기름과 산소가 반응하고, 미생물이 번식해 썩는 것이 당연합니다.

유통기한이 지나면 반드시 버려야 할까?

가공식품에 적힌 유통기한은 제품을 소비자에게 판매할 수 있는 기한입니다. ‘식품 등의 표시·광고에 관한 법률’에 따라 모든 가공식품에는 반드시 유통기한을 표시해야 합니다. 유통기한을 넘긴 제품은 소비자에게 판매할 수 없습니다.

이런 유통기한은 제조사가 결정합니다. 정확히는 제조사가 식약처가 고시한 방법에 따라 ‘유통기간 설정 실험’을 수행한 뒤, 그 결과를 식약처에 신고하고 허가받아야만 합니다. 소비자가 걱정하는 방부제, 보존제 등으로 유통기한을 무작정 늘릴 수도 없습니다. 즉석식품을 비롯한 모든 가공식품의 유통기한은 법에서 정한 실험을 근거로 식약처의 허가를 받아서 정해지니까요.

가공식품을 사용하는 식당에서는 유통기한이 지난 제품을 보관하는 것이 법으로 금지돼 있습니다. 부패와 변질이 진행되지 않은 멀쩡한 제품이라도 유통기한이 지났으면 반드시 폐기해야만 하죠. 하지만 유통기한이 지났다고 가공식품이 반드시 먹을 수 없을 정도가 된 것은 아닙니다. 제품의 상태에 따라 섭취가 가능한 경우도 많습니다. 그래서 ‘유통기한’과 함께 ‘품질 유지기한’ 또는 ‘소비기한’을 표시해야 한다는 주장도 있습니다. 먹을 수 있는 가공식품을 무작정 폐기하는 것이 경제적으로, 윤리적으로 바람직한 일은 아니니까요. 품질 유지기한, 소비기한 표시에 대한 여러 분들의 생각은 어떤지 궁금합니다.

Chapter 2. 집·학교에서

Q

13

라면 수프는
왜 어떤 요리에
넣어도
맛있을까요?



A



이덕환 교수가 답하다

한 예능 프로그램에 유명한 셰프가 나와 닭볶음탕을 만듭니다. 그런데 이 셰프가 맛의 비결이라며 꺼낸 재료의 정체는 바로 ‘라면 수프’입니다. 이외에도 어설픈 요리 만든 찌개 요리에 라면 수프를 넣은 뒤 음식 맛이 좋아져 눈이 휘둥그레지는 장면을 TV에서 종종 볼 수 있습니다.

예능 프로그램의 단골 소재로 쓰일 만큼 라면의 인기는 실로 대단합니다. ‘2015 가공식품 세분화 현황 면류 편’ 보고서에 따르면 한국 국민 1인당 라면 소비량은 1년 평균 76개입니다. 한 달에 약 6개꼴, 즉 일주일에 라면 1~2개를 먹는 셈이죠. 무게로 환산하면 약 9.15kg으로, 국수 소비량(2.76kg)의 약 3.3배입니다. 엄청난 양입니다.

한국의 라면은 해외에서도 인기가 좋습니다. 중국, 미국, 일본, 대만, 태국, 호주 등에서도 한국 라면 수입량이 늘고 있습니다. 한국농수산식품유통공사(aT) 농식품 수출정보에 따르면, 2020년 1~5월 라면 수출액은 2

억 4930만 달러(약 3000억 원)로 지난해 같은 기간 수출액(1억 8385만 달러)보다 35.6% 늘었습니다. 중독성 강한 라면의 맛이 세계인의 입맛까지 사로잡았다는 뜻입니다.

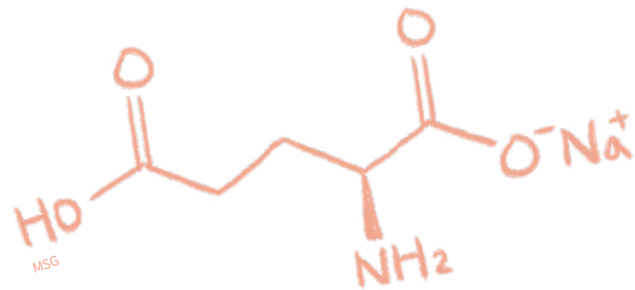
이처럼 누구나 좋아하는 라면의 맛은 라면 수프에 들어 있는 화학조미료 글루탐산 소듐(MSG·monosodium glutamate)에 따라 결정됩니다. MSG는 음식에 감칠맛이 나게 해주는 만능 조미료로, 음식에 넣으면 음식 맛이 좋아집니다. MSG의 맛은 흔히 ‘우마미(うま味)’라고 부릅니다. 즉 MSG는 간편하게 우마미를 즐길 수 있도록 해주는 식품입니다. 1908년 이케다 기쿠나에 일본 도쿄대 화학과 교수가 ‘감치다(うまい)’란 말과 ‘맛(味)’이라는 단어를 조합해서 ‘좋은 맛(旨味)’이라는 뜻의 이름을 지었습니다. 이후 1985년, 우마미(Umami)는 전 세계에서 인정한 용어가 됩니다.

미국의 대표적인 영어 사전인 메리엄-웹스터(Merriam-Webster) 사전에도 우마미를 ‘글루탐산이나 아스파르트산의 맛’으로 정의합니다. 한국에서는 우마미를 감칠맛이라고 부릅니다. 국어사전에서 감칠맛을 찾아보면 ‘음식물이 입에 당기는 맛’이라고 설명돼 있습니다.

건강에 꼭 필요한 아미노산, MSG

이처럼 어떤 음식과도 잘 어울리는 MSG는 아미노산의 일종인 L-글루탐산의 음이온을 소듐 양이온과 결합해서 물에 잘 녹도록 만든 것입니다. 글루탐산은 인간에게 생리적으로 필요한 성분입니다. 우리가 MSG의 우마미를 좋아하는 것이 우연은 아닌 셈이죠.

인간은 생리작용에 필요한 아미노산 20종을 모두 골고루 먹어야 건강을 유지할 수 있습니다. MSG는 이런 아미노산의 한 종류입니다. 우리 몸



은 다른 아미노산에 비해 MSG를 3배 더 필요로 합니다. 따라서 우리가 MSG의 우마미를 좋아하는 것은 진화적 적응의 결과입니다. 참고로 산모의 모유에 담긴 아미노산의 절반이 MSG입니다.

실제로 MSG는 몸속 다양한 곳에서 유용하게 쓰입니다. 기본적으로 MSG는 세포에서 일어나는 대사 작용에 꼭 필요한 성분입니다. 몸속에서 쓸모가 없게 된 질소를 제거하는 일에도 참여하죠. 뇌의 중요한 흥분성 신경전달물질로도 쓰이고, 학습이나 기억과 같은 뇌인지 기능에도 영향을 줍니다. 특히 뇌의 해마나 신피질에서 일어나는 장기 기억 기능에 결정적인 역할을 합니다.

물론 부작용도 있습니다. 뇌에 MSG가 너무 많아지면 신경독소로 작용하기도 합니다. 다행히도 뇌로 통하는 대동맥에는 뇌혈관 장벽(BBB)이라는 작은 기관이 작동해 이런 문제를 차단하는데, 여기에 문제가 생기면 심각한 증상이 나타날 수도 있습니다.

MSG의 감칠맛을 얻는 여러 가지 방법

MSG는 쇠고기, 돼지고기, 해조류, 생선, 토마토, 견과류, 버섯, 콩, 우유 등 일상에서 흔히 섭취하는 식품에 풍부하게 들어있습니다. 다만 식품에는 MSG가 다른 아미노산과 단단하게 연결된 단백질 형태로 들어있습니다. 그래서 식품으로 MSG의 감칠맛을 즐기려면 단백질을 아미노산으로

분해하는 특별한 노력이 필요합니다.

우마미라는 이름을 처음으로 만든 기쿠나에 교수는 해물 육수 ‘다시(出汁)’를 간편하게 만들어서 일본 사람도 유럽 사람처럼 큰 체격을 가질 수 있게 하고픈 바람이 있었습니다. 그러나 처음에는 다시마 40kg를 끓여서 겨우 30g의 MSG를 얻는 수준이었죠. 그러니 다시마를 원료로 생산한 MSG는 값이 비쌀 수밖에 없었습니다. 지금과 달리 당시에는 형편이 넉넉한 가정에서나 맛볼 수 있는 고급 조미료였습니다.

우리나라에 MSG가 소개된 것은 일제강점기입니다. 이 시기 우리나라 신문에서 MSG에 대한 광고를 발견할 수 있습니다. 해방 이후에도 MSG의 감칠맛을 잊지 못하는 소비자가 많았습니다. 여러 중소기업이 단백질이 30% 정도 들어 있는 밀을 염산으로 분해하는 산 분해 공법으로 MSG를 생산해 판매했습니다.

그러다 1973년, 코리네박테리움(Corynebacterium)이라는 발효균을 이용해서 사탕수수나 카사바 전분인 타피오카를 발효시키는 새로운 공법이 개발됐습니다. 이는 된장, 김치, 치즈를 만드는 것과 똑같은 방법입니다. 오늘날 우리가 소비하는 MSG는 대부분 동남아시아에서 재배되는 사탕수수를 발효시켜 만듭니다.

이 밖에도 MSG의 감칠맛은 전통적인 방법으로도 낼 수 있습니다. 된장, 어장(魚醬), 치즈, 김치 등 발효균을 이용해서 식품을 발효시키거나, 찌개 육수를 내는 것처럼 MSG를 함유한 식품을 오랜 시간 끓이면 됩니다. 생선이나 육류를 장기간 숙성시키는 방법도 있습니다. 그러나 많은 재료가 필요하고 오랜 시간과 정성을 들여야 하는 힘든 일이며, 연료비도 만만치 않습니다. 유명 맛집에서 자랑하는 ‘72시간 푹 고아낸 국물’의 맛의 비결은 결국 강화된 감칠맛이라고 할 수 있겠습니다.

MSG에 대한 오해와 진실

한때 사람들은 MSG에 대한 거부감이 상당히 컸습니다. 시작은 미국이었습니다. 1968년 미국 보스턴에서 일하던 중국계 의사 로버트 콕이 지극히 개인적인 경험을 근거로 MSG가 많이 든 중국 음식을 먹으면 머리가 아프고 속이 불편한 증상이 나타난다고 주장했죠. 그는 이를 ‘중국음식점 증후군(CRS)’이라고 불렀습니다. 물론 그의 주장은 이후에 과학적 근거가 없는 것으로 밝혀졌습니다.

국내에서는 1990년대 말부터 MSG에 대한 부정적인 인식이 퍼지기 시작했습니다. MSG가 건강에 나쁜 영향을 주는 ‘화학조미료’, 또는 ‘인공조미료’라는 광고 때문이었습니다. MSG와 똑같은 맛을 내는 이노신산이나 구아닐산과 같은 핵산계 조미료를 생산하는 기업의 부당한 광고였죠. 당시 정부가 곧바로 광고를 금지했지만 한번 굳어진 사람들의 인식을 바꾸는 건 쉬운 일이 아니었습니다.

그러다 2008년 한 방송에서 MSG에 대한 왜곡된 설명을 보도하면서 사태는 더욱 심각해졌습니다. 결국 식약처가 인정하는 ‘식품첨가물’이 모두 인공적으로 만든 화학물질이라는 잘못된 인식이 사회 전체에 퍼져버렸죠. 현대 사회에서 포기할 수 없는 가공식품에 대한 불신도 커졌습니다.

다행히 식약처의 적극적인 노력으로 현재는 상황이 많이 나아진 편입니다. 식약처는 MSG를 인체에 위협하지 않은 ‘향미증진제’로 인정하고 있고, 사용량도 특별히 규제하지 않고 있습니다. 미국, 일본, 유럽의 식품안전관리기구들도 같은 입장이며, 세계보건기구(WHO)도 MSG의 안전성을 인정하고 있습니다.

사실 MSG는 인체에 위협하기는커녕 건강을 위해 매일 일정량을 먹어

야 하는 중요한 영양소입니다. 천연 글루탐산과 발효 공정으로 생산한 MSG가 다르다는 주장도 과학적 근거가 없습니다. 과도한 불안은 떨치고, 과학적 근거로 판단하는 합리적인 소비자가 되길 바랍니다.

김윤서(대전 삼천중 2)
김지후(인천박문초 2)
유현찬(경북 양덕중 2)
이수연(경기 광주광남중 1)
이정원(서울 잠실초 3)
장진(경남 무지개초 4)
최형서(경남 반송여중 2)

Chapter 2. 집·학교에서

Q

14

생분해성 플라스틱은
자연에서 어떻게
분해가 될까요?



A



석원경 교수가 답하다

생분해성 플라스틱은 자연에서 세균이나 다른 유기 생물에 의해 저절로 분해되는 플라스틱을 말합니다. 합성 플라스틱과 합성섬유 등은 썩는 데만 수백 년이 걸려 골치 아픈 환경오염 문제를 일으키는데요, 생분해성 플라스틱은 이런 문제를 해결해줄 것으로 기대되는 새로운 소재입니다. 최근 논쟁거리가 된 미세플라스틱 문제도 생분해성 플라스틱이 해결할 수 있죠. 하지만 이를 위해선 아직 가야 할 길이 많이 남아있습니다. 지금부터 차근차근 설명해보겠습니다.

100% 완전 생분해 플라스틱 가능할까?

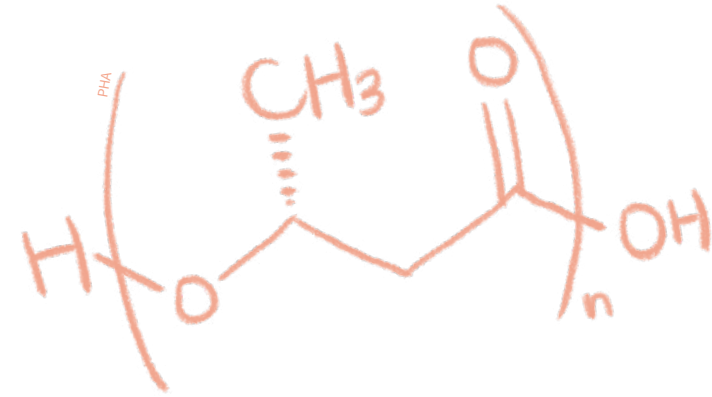
생분해는 유기물이 세균과 같은 미생물, 벌레 등에 의해 작은 분자로 분해되는 것을 말합니다. 햇빛에 의한 ‘광분해’, 공기 중 산소에 의한 ‘산화

분해’, 물에 의한 ‘가수분해’ 등을 포함합니다. 부러진 나무와 떨어진 낙엽이 썩고, 죽은 동물의 사체가 부패해 흙이 되는 것도 생분해입니다. 생분해는 자연 생태계에서 영양성분의 순환을 가능케 하는 중요한 역할을 합니다.

인류가 생분해를 연구한 역사는 상당히 깁니다. 2세기경 로마 시대의 의사 갈레노스는 외과 수술을 할 때 양의 장에서 빼낸 콜라겐 힘줄을 봉합사로 처음 사용했습니다. 양 외에 염소, 소 등의 장이나 힘줄로 만든 생분해성 봉합살도 있었죠. 이 봉합살은 수술 부위를 꿰매고 나서 며칠이 지나면, 몸에서 분비되는 단백질 분해 효소에 의해 천천히 분해되어 사라진다는 엄청난 장점이 있었습니다. 덕분에 봉합살을 제거하기가 어려운 부위를 수술할 때 주로 사용했죠. 오늘날엔 폴리글리콜산(PGA), 폴리락트산(PLA), 폴리카프로락톤(PCL) 등의 합성중합체(polymer)로 만든 생분해성 봉합살을 사용하고 있습니다.

그런가 하면 식당에서 흔히 볼 수 있는 연두색 이쑤시개도 생분해성 소재입니다. 이 이쑤시개는 주로 밀, 감자, 고구마에서 추출한 전분을 이용해서 만들었기에 생분해됩니다. 문제는 목재 이쑤시개보다 단단하지 않아 잘 부러지며, 물에 담그면 가수분해로 전분이 풀어지면서 물렁물렁하게 변한다는 점입니다.

그러한 이쑤시개의 단점을 보완하기 위해 전분에 PLA, PCL 등을 섞어 100% 분해되는 생분해 플라스틱을 만들 수 있습니다. ‘옥수수 전분 빨대’는 바로 이 방법으로 만들었습니다. 한편 ‘쌀 빨대’는 PLA, PCL 등 플라스틱 없이 쌀 70%에 타피오카 30%를 섞어 만들었습니다. 쌀 빨대는 3시간가량 사용하면 물렁물렁해지는 것이 단점이지만, 자연에서 150일만 지나면 완전히 분해된다는 장점이 있습니다.



이외에 천연 고분자를 이용해 다양한 생분해성 플라스틱이 개발되고 있습니다. 전분으로 만든 일회용 주방 용기와 포장용 발포제가 대표적입니다. 그 밖에 목재에서 추출한 셀룰로오스, 펙틴, 리그닌 그리고 게 껍데기에서 추출한 키토산 등도 생분해성 소재로 많이 이용됩니다. 한 예로 2019년 한국화학연구원에서는 목재 펄프에서 추출한 셀룰로오스에 게 껍데기에서 추출한 키토산을 첨가해서 잘 찢어지지 않는 생분해성 비닐봉지를 개발했습니다. 이 비닐봉지는 사용 후에 땅에 묻으면 6개월 안에 완전히 생분해됩니다.

미생물을 이용해 만든 합성 고분자 화합물도 있습니다. 생명공학적인 방법으로 합성한 세균을 이용하면 생분해성 플라스틱 ‘폴리하이드록시알카노에이트(PHA)’를 만들 수 있습니다. 미생물을 배양할 때 질소, 산소, 인 등의 일부 영양성분의 공급을 차단하는 대신 탄소 성분을 넉넉하게 공급해 줘서 만듭니다. 폴리하이드록시부티레이트(PHB), 폴리하이드록시발레레이트(PHV), 폴리하이드록시헥사노에이트(PHH) 등이 PHA로 분류되는 대표적인 생분해성 플라스틱입니다. 그러나 일반 플라스틱보다 가격이 30% 정도 더 비싸서 아직 쉽게 활용하지는 못하고 있습니다.

플라스틱, 개발 단계에서 재활용 생각해야

플라스틱은 합성섬유와 함께 현대 화학이 고도로 발달한 20세기에 들어 본격적으로 생산하기 시작한 합성 고분자 소재입니다. 이는 인류 문명에서 놀라운 전환점이었습니다. 문명 생활에 필요한 소재를 자연에 의존하지 않고, 인공적으로 만들어 쓸 수 있는 능력을 갖추게 됐기 때문입니다. 특히 플라스틱은 목재 소비를 대체했고, 합성섬유는 목화 재배, 누에치기, 양치기 등 천연섬유 생산에 필요한 일들을 줄여줬습니다. 마침내 1970년대에는 플라스틱의 소비가 목재보다 많아졌습니다. 숲 훼손이 크게 줄어드는 성과를 거뒀습니다.

그런데 합성 플라스틱과 합성섬유의 폐기량이 늘어나기 시작하며 새로운 환경 문제가 생겼습니다. 사람들이 사용하고 버린 폐플라스틱과 폐섬유의 80%가 자연환경에 무분별하게 버려진 겁니다. 이 중 재활용되는 양은 고작 7% 정도입니다.

폐플라스틱을 처리하는 문제는 간단치 않았습니니다. 소각하자니 독성 오염물질이 발생해 대기가 오염됐고, 땅에 매립하면 토양과 수질이 오염됐습니다. 사람들이 아무 곳이나 버린 플라스틱 쓰레기는 산과 강, 그리고 바다를 오염시켰죠. 바다로 흘러간 플라스틱 쓰레기는 거대한 ‘쓰레기 섬’을 만들고 있습니다.

실제로 2014년 스페인, 칠레 등 국제 공동연구팀이 미국국립과학원회보(PNAS)에 발표한 논문에 따르면, 해양의 88%가 플라스틱 쓰레기로 오염돼 있습니다. 앞선 연구가 나온 뒤 3년 후인 2017년, PNAS에 실린 또 다른 국제 공동연구팀에 따르면 매년 바다로 흘러가는 플라스틱 쓰레기는 최대 1270만t입니다. 이렇게 배출된 많은 양의 플라스틱은 야생동물의

목숨을 위협합니다.

그래서 각 분야의 과학자들은 폐플라스틱을 손쉽게 분해할 수 있는 새로운 기술을 개발하고 있습니다. 한 예로 합성 플라스틱을 먹고 사는 미생물을 찾아내는 연구가 활발합니다. 슈도모나스라는 균은 인공 연골이나 콘택트렌즈에 많이 사용되는 폴리비닐알코올(PVA)을 먹어 치우는 능력이 있습니다.

PVA를 먹고 사는 곰팡이도 있죠. 한국생명공학연구원 세포공장연구센터에서는 생분해가 안 되는 것으로 알려진 합성 플라스틱이나 합성섬유를 분해하는 식물성 플랑크톤도 개발 중입니다. 연구팀은 유전자 형질 전환 기술을 사용해서 개발한 식물성 플랑크톤이 플라스틱 분해 효소를 만들어내도록 합니다.

이런 기술이 상용화될 때까지 당장은 우리가 사용한 플라스틱을 최대한 재활용하는 노력이 필요합니다. 현재 우리나라는 수거한 폐플라스틱을 다른 나라에 판매하고 있습니다. 한국보다 생활수준이 낮은 개발도상국에서는 상대적으로 가격이 저렴한 폐플라스틱을 이용하기 때문입니다. 그러나 이런 재활용은 윤리적으로 바람직한 것이 아니죠. 우리가 해야 할 일을 남에게 떠넘겨버렸을 뿐입니다.

생분해성 플라스틱을 개발하는 노력은 매우 중요합니다. 그러나 생분해 플라스틱 개발이 모든 문제를 해결해줄 수는 없습니다. 아무리 생분해성 소재라고 해도 지나치게 많은 양의 플라스틱을 함부로 버리면 문제가 생깁니다. 이제는 플라스틱의 사용에 대한 우리의 인식을 획기적으로 바꿔야 할 때입니다.

제품의 개발 단계에서부터 재활용을 고민해야 합니다. 재활용을 어렵게 만드는 과대 포장과 접착제는 최대한 사용을 자제하는 등 생산자가 재활

용까지 책임지는 제도가 필요할 수도 있습니다. 아울러 생산과 소비의 모든 과정에서 자연환경에 미치는 영향을 고민해야 합니다. 우리가 쓰는 것을 우리 스스로 만드는 수준을 넘어, 쓰고 버리는 것도 우리가 책임지겠다는 각오가 필요한 시점입니다.

강지혜(서울 신사중 2)
김상현(경기 대평고 2)
염유리아(경기 효자초 3)
이예화(서울 길음중 1)
임영민(서울목문초 4)
최준형(서울 동성고 1)
홍종익(서울 목문중 3)
황나운(경기 평촌중 1)

Chapter 2. 집·학교에서

Q

15

아이스팩의
성분은
무엇인가요?



A



석원경 교수가 답하다

오늘날 우리는 더운 여름에도 냉장식품과 냉동식품을 마음껏 즐길 수 있습니다. 제주 바다에서 막 잡아 올린 생물 갈치를 무려 454km 떨어진 서울에서 싱싱한 상태로 배달받아 먹을 수 있습니다. 또 여름철 야구장, 캠핑장 등에 놀러 갈 때 미리 얼린 얼음물을 아이스팩과 함께 담아 가면 바람 한 점 없는 곳에서도 시원한 얼음물을 마실 수 있지요. 이게 다 아이스팩 덕분입니다.

아이스팩 속 분말, 300배의 물 흡수

아이스팩의 장점은 가정에서도 편리하게 사용할 수 있다는 점입니다. 가정용 냉장고의 냉동실에 넣어두기만 하면 차가운 얼음덩어리로 변하기 때문이죠. 상온에 오랫동안 뒤셔 녹더라도 아이스팩 밖으로 물이 흘러내

리지 않기 때문에 더욱 유용합니다. 이런 아이스팩이 개발되기 전에는 사람들이 물을 넣은 비닐봉지나 플라스틱 통을 얼려서 아이스팩처럼 썼습니다. 얼마 안 돼 금방 녹아버리고, 얼음이 녹을 때 물이 너무 많이 흘러나오는 단점이 있었죠. 요즘 사람들이 사용하는 진짜 아이스팩은 이것과 다릅니다.

아이스팩은 얼리면 딱딱하고, 녹이면 말랑말랑해지는 신기한 성질이 있습니다. 이런 현상이 일어나는 이유는 아이스팩은 속에 고흡수성 고분자(SAP·super absorbent polymer)라는 독특한 물질이 들어있기 때문입니다.

SAP 분말은 물에 넣어두면 엄청난 양의 물을 빨아들입니다. 자체 무게의 무려 300배나 되는 물을 흡수합니다. 부피로 치면 60배 부피의 물을 빨아들이는 셈이죠. 실제로 500g짜리 아이스팩에 들어있는 SAP는 고작 4g이라고 합니다.

물론 수건, 휴지 등도 물을 빨아들이는 능력이 대단합니다. 셀룰로오스나 섬유소 같은 식물성 고분자로 만든 면, 펄프를 흡습성 섬유로 이용하죠. 이 식물성 고분자는 6개의 탄소로 된 당 분자가 길게 사슬처럼 연결된 구조입니다.

물 분자는 극성을 띠고 있어 이런 고분자와 잘 결합합니다. 고분자에는 친수성 작용기인 수산화기가 있기 때문이죠. 그래서 물 분자들은 섬유 틈새로 잘 끼어듭니다. 그러나 식물성 고분자로 만든 섬유는 흡수할 수 있는 물의 양이 한정돼 있습니다. 그리 많지도 않습니다. 자체 무게의 11배 정도가 최대입니다. 그마저도 외부에서 압력이나 열을 가하면 쉽게 흘러나와 버립니다.

과거에는 콜라젠이라는 단백질 성분으로 만든 해면도 천연 흡수제로 사용했습니다. 해면은 뚜렷한 기관이나 조직이 없는 바다 동물입니다. 또 천



연고무나 합성고무의 원액이나 폴리우레탄과 같은 합성수지에 공기를 불어 넣어서 만든 스펀지도 흡수성 재질이죠. 합성수지로 만든 스펀지가 대량으로 생산되면서 천연 해면의 소비는 크게 줄어들었습니다. 합성물질 덕분에 바다동물 해면이 목숨을 건질 수 있다는 뜻입니다.



기저귀, 슬라임에도 쓰이는 아이스팩 성분 SAP는 주로 폴리비닐알코올($[(CH_2CH(OH))_n]$)이나 폴리아크릴레이트($[(CH_2CH(CO_2R))_n]$)와 같은 고분자로 만듭니다.

3차원 그물 구조이고, 수산화기나 에스터기($-CO_2R$) 등 친수성 작용기를 많이 가지고 있는 것이 SAP의 특징입니다. 이는 여러 개의 바늘을 주렁주렁 달아놓은 긴 낚싯줄로 만든 주머니 형태의 망을 상상하면 됩니다. SAP가 빨아들인 물은 낚싯바늘에 해당하는 친수성 작용기와 단단하게 수소 결합을 합니다. 그렇게 만들어진 물 덩어리를 '수화젤'이라고 부릅니다.

SAP의 그물망 속에 갇혀버린 물 분자는 외부에서 압력이나 열을 가해도 쉽게 빠져나오지 못합니다. SAP 수화젤은 빨래처럼 쥐어짜도 물이 새어 나오지 않고, 바람이 잘 통하는 곳에 놓아둬도 쉽게 마르지 않습니다. 아이스팩의 냉기가 오래가는 것도 바로 이런 이유 때문입니다. 물에 적신 수건을 얼렸을 때보다 냉기가 5~7배나 더 오래 유지됩니다.

물을 많이 빨아들이는 SAP는 아이스팩에만 쓰이지 않습니다. 아기들의 대소변을 받아주는 일회용 기저귀, 여성들이 이용하는 생리대 등을 만들 때도 사용합니다. 1980년대에는 SAP로 작은 공 모양의 알갱이로 만들어

흡습제로 사용했습니다. 1990년대에 접어들자 미국 기업 아르코(ARCO)는 솜털 모양의 섬유로 가공한 SAP를 개발했습니다. 섬유 형태의 SAP는 수분의 흡수 속도가 빠른 것이 장점입니다. 그래서 일회용 기저귀와 생리용품 등의 발전에 큰 도움을 주게 됐죠.

그런데 아무리 좋은 것도 지나치면 문제가 되는 법입니다. 젖어도 곁으로는 물기가 없어 젖은 줄 모르고 지나치는 경우가 생긴 것이죠. 더욱이 기저귀와 생리대는 방수 기능까지 뛰어납니다.

이는 교체를 제때 하지 않으면 세균이 빠르게 증식할 수 있고, 이로 인해 피부가 짓무를 수 있다는 뜻입니다. SAP로 만든 일회용 기저귀와 생리용품은 가능하면 자주 교체해 줘야 합니다.

SAP에 소량의 붕사($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)를 섞으면 장난감 ‘슬라임’이 만들어집니다. 물론 폴리비닐알코올이 들어 있는 딱풀에 붕사를 넣어서 만들 수도 있습니다. 화학적으로는 붕사 분자에 친수성 작용기가 달린 SAP 사슬 여러 개가 붙어있는 구조입니다.

슬라임은 미국 완구회사 마텔이 1976년에 개발해 플라스틱 통에 담아 팔던 제품입니다. 이후 전 세계적으로 인기를 얻은 장난감이 됐죠. 국내에는 뒤늦게 들어와서 ‘액체괴물’이라는 다소 듣기 거북한 이름으로 알려졌습니다. 슬라임은 부드럽고, 독특한 질감으로 어린이의 손 감각 발달에 도움이 되는 훌륭한 장난감으로 알려져 있습니다.

꽃집에서도 SAP를 사용합니다. 화분의 물이 마르지 않도록 하거나, 화환의 꽃이 시들지 않게 하는 용도로 사용합니다. 실내용 방향제에 SAP를 사용하면 휘발성 유기화합물의 불쾌한 냄새를 걱정할 필요가 없어집니다. SAP의 능력을 생각해보면 아마 사막처럼 건조한 지역에서 식물을 재배할 때도 사용할 수 있을 겁니다.

아이스팩 어떻게 버려야 할까?

이처럼 SAP를 이용한 물건은 인간의 삶에 매우 유용합니다. 그런데 SAP가 들어 있는 물건들을 함부로 버려 문제가 되고 있습니다. 물론 SAP가 미세 플라스틱이라서 폐기하기 어려운 것은 사실입니다. 그렇다고 아이스팩 속에 들어 있는 SAP를 하수구나 변기에 넣어 버리면 절대 안 됩니다. 흡습성이 좋아 자칫 파이프가 막힐 수도 있고, 하수종말처리장에서 문제를 일으킬 수도 있습니다. 아이스팩은 여러 번 얼려 쓰는 방식으로 재활용해야 합니다.

물론 장난감으로 쓴 슬라임은 어쩔 수 없이 생활 쓰레기로 버릴 수밖에 없습니다. 슬라임은 SAP에 붕사가 단단하게 결합해 건조하는 일이 쉽지 않기 때문이죠. 일회용 기저귀와 생리용품도 재활용이 안 됩니다. 어쩔 수 없이 매립 뒤, 소각해야 합니다. 이는 환경에 적지 않은 부담이 되고 있습니다. 일회용 기저귀의 온실가스 배출량은 천 기저귀보다 3배 많고, 폐기물은 10배 더 많이 발생합니다. 그렇다고 천을 사용하던 과거로 돌아갈 수 없는 것도 현실입니다.

한편 SAP를 사용하는 제품에는 보존제가 들어 있습니다. 수분이 있는 제품에서는 언제나 세균이나 곰팡이가 증식할 수 있기 때문입니다. 보존제는 미생물의 증식을 예방하기 위해서 사용하는 살균물질입니다. 구연산이나 개미산과 같은 식물에서 유래된 보존제도 있고, 메틸이소치아졸리논(MIT) 혹은 메틸클로로이소치아졸리논(CMIT)와 같은 합성 보존제도 있습니다. 보존제는 방부제보다 살균력이 훨씬 약하기 때문에 자주 쓰는 물건에 들어 있다고 걱정할 이유는 없습니다.

실제로 2017년에는 생리대 유해물질 파동이 있었습니다. 일회용 기저

귀나 생리용품에서 인체에 해로운 휘발성 유기화합물이 검출된 것이죠. 이후 식약처는 생리대별 유해물질을 조사해 발표하고, 전 성분 표시제를 실행했습니다. 또 휘발성 유기화합물을 저감하는 방안을 추진하는 등 일회용 기저귀와 생리용품의 품질을 엄격하게 관리하고 있습니다.

Q

16

공기 청정기에서
나오는 공기는
정말 깨끗한가요?



A



석원경 교수가 답하다

공기 청정기는 실내 공기 중에 있는 오염 물질을 걸러내는 가전제품입니다. 공기 중에 떠다니는 먼지나 애완동물의 털을 걸러주는 역할을 합니다. 불쾌한 냄새를 풍기는 곰팡이 포자, 세균, 휘발성 유기화합물도 제거합니다. 그러니 당연히 공기 청정기에서 나온 공기는 실내 공간에 원래 있던 공기보다 더 깨끗해야 합니다. 하지만 공기 청정기를 처음 켜올 때, 또는 바람의 세기를 변화시킨 직후에는 아닐 수도 있습니다. 필터에 쌓인 먼지가 떨어져 나올 수 있기 때문입니다.

공기 청정기의 핵심은 필터

공기 청정기의 구조는 비교적 간단합니다. 선풍기처럼 실내의 공기를 순환시켜주는 ‘팬’과 먼지나 유해물질을 걸러주는 ‘필터’가 전부입니다. 공

기 청정기의 품질은 팬의 소음과 필터의 성능에 따라 결정됩니다. 따라서 공기 청정기를 사용할 땐 오염 물질을 걸러주는 필터를 자주 청소하거나 교체해주는 일이 매우 중요합니다. 아무리 좋은 공기 청정기라도 필터를 제대로 관리해 주지 않으면 제 기능을 발휘할 수 없기 때문입니다.

공기 청정기는 흔히 헤파 필터를 사용합니다. 헤파(HEPA)는 고효율 먼지 제거(high-efficiency particulate air)의 줄임말입니다. 유리 섬유나 플라스틱을 열로 녹인 뒤, 합성 섬유 방사용 노즐을 통과시키면 미세 섬유가 만들어 집니다. 이 미세 섬유를 이용해 만든 헤파 필터를 활용해 섬유 조직과의 충돌로 먼지를 차단하거나, 먼지를 중력에 의해 침강시키거나, 정전기에 의해 흡착시키는 등의 방법으로 먼지를 포집합니다.

공기 청정기가 보급되기 전, 헤파 필터는 공기 중에 떠다니는 방사성 오염 물질을 걸러내는 용도로 쓰였습니다. 물론 반도체 공장의 청정실(클린 룸), 병원이나 생명공학 연구실의 무균실, 감염병 환자를 치료하는 음압병실 등에서도 이용합니다. 헤파 필터에는 등급이 있습니다. 각국마다 등급 기준은 조금씩 다릅니다. 공기 청정기나 에어컨에는 주로 0.3 μ m보다 큰 입자를 99.97%까지 제거해주는 헤파 필터를 사용합니다. 당연히 2.5 μ m 크기의 초미세 먼지도 충분히 걸러낼 수 있죠.

유해 가스 완전 제거는 힘들어

가정에서 사용하는 공기 청정기의 공기 청정 효과가 만족스럽지 못할 수 있습니다. 탈취 효과가 떨어지고 유해 가스 제거 기능이 부족하다고 생각할 수도 있죠. 일반적으로 유해 가스의 제거 효율은 암모니아, 아세트알데하이드, 폼알데하이드, 아세트산, 톨루엔 등을 기준으로 표시합니다. 그런



데 유해 가스의 종류에 따라 제거 효율이 크게 다릅니다. 이는 공기청정기로 악취나 건강에 해로운 유해 가스를 모두 제거하는 것이 매우 어렵다는 뜻입니다. 산업 현장에서는 일반적으로 활성탄과 같은 흡착제를 이용하거나, 유해 가스를 물에 녹이는 방식을 이용합니다.

한편 흡연실의 담배 냄새를 제거할 때나 식기나 의료기기를 소독할 때, 진열대 안 육류의 부패를 막고자 할 때는 산화력이 강한 오존을 사용하기도 합니다. 주로 푸른색 형광등처럼 보이는 자외선램프나 전기 방전(스파크)을 이용해 만든 오존입니다. 고농도의 오존은 무균실이나 살균, 탈취 작업을 하는 산업 현장에서 쓰이는데, 이때 작업자는 반드시 방호복을 입어야 할 정도로 산화력이 굉장히 강합니다.

일부 공기 청정기도 오존 발생 장치를 사용합니다. 탈취, 살균 효과를 내기 위해서죠. 공기 청정기에 들어 있는 오존 발생 장치는 대부분 뽕죽한 탐침에서 전기 방전을 일으켜 오존을 만들어 냅니다. 정확히는 탐침의 끝에서 방출된 전자가 공기 중의 산소를 분해해서 오존을 만듭니다. 이때 오존의 양면성을 주의해야 합니다. 분명 살균과 탈취 효과가 있는 물질이지만, 동시에 인체에 해로운 영향을 미치기 때문입니다.

오존에 노출되면 맥박과 혈압이 낮아질 수 있고, 흡입했을 때 폐가 손상될 수 있습니다. 피부에 액체 상태의 오존이

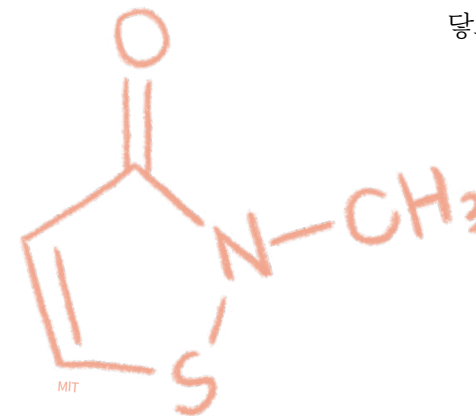
닿으면 화상을 입을 수도 있습니다. 만

약 오존을 발생시키는 공기 청정기

를 사용한다면 기기에서 나오는

바람이 얼굴에 직접 닿도록 하는 일은 피해야 하겠죠.

사실 오존을 이용한 살균과



탈취는 가정용 공기 청정기나 에어컨에는 적절하지 않습니다. 공기 청정기의 사용 시간이 길어지면 오존이 밀폐된 실내에 누적될 수밖에 없기 때문이죠. 실제로 환경부는 다중이용시설의 실내 공기 중 오존 농도를 0.06ppm(100만분의 1이란 뜻으로, 농도를 나타내는 단위) 이하로 관리할 것을 권고하고 있습니다.

밀폐된 실내에 누적된 오존은 가슴기 살균제처럼 심각한 피해를 일으킬 수 있으며, 특히 어린이와 노약자에게는 큰 문제가 됩니다. 미국의 환경보호국(EPA)도 공기 청정기에서 방출된 오존은 실내 공기의 살균과 탈취에 도움이 되지 않는다고 분명히 밝히고 있습니다. 캘리포니아주에서는 오존을 방출하는 공기 청정기에는 ‘오존 발생기’를 표시하도록 법제화되어 있습니다.

한때 일부 업체는 음이온이 기적의 공기 청정 기능을 가진 물질이라는 엉터리 주장으로 소비자를 현혹하기도 했습니다. 1905년 음극선 연구로 노벨물리학상을 받은 독일의 물리학자 필리프 레나르트가 제시했던 ‘광전 효과’를 들먹이기도 하고요.

광전 효과는 빛이 금속 표면에 부딪힐 때 음극선이 생기는 현상입니다. 일부 광고에서처럼 폭포에서 음이온이 자연적으로 생성된다는 이론이 아닙니다. 심지어 그런 음이온이 사람의 건강에 긍정적인 효능을 가지고 있다는 주장은 더욱 근거가 없습니다.

울창한 숲속 공기 1mL에 음이온이 2000개 이상 있다는 주장도 황당한 이야기입니다. 보통 상온과 상압에서 공기를 비롯한 기체 1mol(몰·원자, 이온 등 매우 작은 입자를 세는 단위, 1몰은 6.02×10^{23} 개의 입자)은 대략 20L의 부피를 차지합니다. 1mL에 들어 있는 공기 분자의 수가 무려 3000경 개에 이르는 뜻입니다. 숲속 공기에서 음이온을 찾는 일은 모래사장에서 바늘 찾기

보다 훨씬 더 어려운 일일 겁니다. 숲에 들어갔을 때 쾌적하게 느껴지는 것은 음이온이 많아서가 아니라 먼지와 소음이 없기 때문입니다.

공기 정화 최선의 방법은 환기

공기 청정기가 유용한 가전제품인 것은 사실이지만 만능일 순 없습니다. 특히 벽지, 단열재, 접착제, 페인트에서 천천히 지속해서 방출되는 벤젠, 아세트, 톨루엔, 폼알데하이드 등은 공기 청정기로 해결할 수 없습니다. 이는 곧 공기 청정기를 가동하는 것보다 창문을 열어두고, 반복적으로 환기 시설을 가동하는 것이 더 효과적일 수 있다는 뜻입니다. 휘발성 유기화합물을 방출하는 유기 용매 대신 물을 용매로 사용하는 수성 접착제나 페인트를 쓰는 것도 대안이 될 수 있습니다.

실내의 나쁜 냄새를 제거하기 위해 사용하는 방향제의 역할도 매우 제한적입니다. 방향제는 근원적으로 냄새를 제거하는 방법이 아닙니다. 방향제의 강한 냄새로 악취를 느낄 수 없도록 만들어줄 뿐입니다. 더욱이 방향제에 포함된 휘발성 유기 용매가 실내 공기를 오염시키는 원인이 되기도 합니다. 밀폐된 실내에서 방향제를 지속해서 분무하면 호흡기와 눈에 심각한 문제가 발생할 수 있습니다.

같은 이유로 향초도 악취를 제거하는 해결책이 될 수 없습니다. 향초가 연소할 때 실내 공기 중의 산소를 소비하고, 이산화 탄소를 방출합니다. 연소 과정에서 미세 먼지가 나올 수도 있습니다. 무엇보다 향초를 피워두고 외출해 화재가 발생하는 일도 빈번합니다.

실내 공기를 깨끗하게 만들기 위해서는 나쁜 냄새의 원인을 정확하게 찾아내고, 가능한 한 완벽하게 제거하는 노력이 필요합니다. 가령 곰팡이

가 핀 벽지를 제거하고, 악취를 풍기는 쓰레기를 치우는 식입니다. 주기적으로 환기를 해주는 일도 잊지 말아야 합니다. 특히 밀폐된 실내 공간에서는 충분한 산소를 확보하고, 호흡으로 배출된 이산화 탄소를 내보내야 하므로 환기가 더욱 중요합니다.

김은성(전북 화정초 6)
김주아(충북 형석고 1)
박현영(충북 형석고 1)
오다정(경기 천천중 3)
이예화(서울 김음중 1)
장희운(경남 무지개초 6)
황나운(경기 평촌중 1)

Chapter 2. 집·학교에서



17

비누를
물에 녹이면 왜 거품이
생기나요?





석원경 교수가 답하다

비누 거품은 비눗물로 만들어진 얇은 막 속에 공기가 채워져 있는 거품입니다. 순수한 물에서는 거품이 잘 만들어지지 않습니다. 물은 표면장력이 매우 커서 비누 거품처럼 얇은 막으로 퍼지는 대신, 작고 동그란 물방울로 뭉쳐지기 때문입니다. 비누는 이런 물의 표면장력을 줄여줍니다. 물방울이 넓게 퍼져서 거품 막이 만들어지도록 해주죠. 사실 거품 발생 여부는 세척력과 직접적인 연관이 없습니다. 거품이 잘 나면 세척력도 좋은 것이 아니라는 뜻입니다.

유럽 평균 수명 20년 늘린 비누

과거에는 지금처럼 비누가 흔하지 않았습니다. 동물의 기름이나 올리브유 등으로 비누를 만들었는데, 이렇게 만든 비누는 귀족들이나 쓰는 귀한

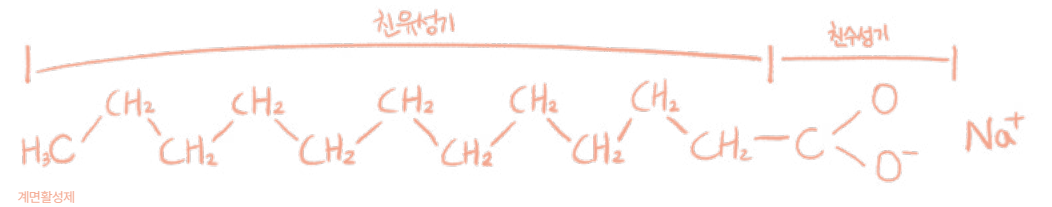
사치품이었습니다. 보통 사람은 짚이나 풀을 태운 재를 물에 넣어 우려낸 잿물로 씻어야 했습니다. 창포가 무성하게 자라는 음력 5월 단오 무렵에 창포물로 목욕을 하고, 머리를 감았던 전통도 비누가 귀했기 때문입니다. 하지만 잿물이나 창포물의 세척력은 실망스러운 수준이었습니다.

비누가 본격적으로 생산된 것은 18세기 후반부터입니다. 1790년 프랑스의 화학자이자 의사였던 니콜라스 르블랑이 처음으로 현대식 비누를 발명했습니다. 르블랑은 식물이나 동물에서 채취한 기름 성분인 유지와 수산화 소듐(NaOH) 등을 반응시켜서 비누를 만들었습니다.

이런 비누가 대량으로 생산되며 인류의 위생 수준은 놀라울 만큼 좋아졌습니다. 염소 소독법으로 깨끗한 수돗물까지 공급되면서 누구나 깨끗한 물과 비누로 몸을 씻을 수 있게 됐고, 깨끗하게 세탁한 옷을 입을 수 있게 됐죠. 비누 덕분에 유럽인의 평균 수명이 20년 이상 늘었다는 주장도 있습니다.

현대에는 지방산 에스터($\text{RCO}_2\text{R}'$)를 수산화 소듐이나 수산화 포타슘(KOH)과 반응하는 ‘비누화 반응’을 이용해 비누를 만듭니다. 비누 공장에서는 식용으로 못 쓰는 식물성, 동물성 기름을 원료로 값싼 비누를 대량으로 생산합니다. 얼굴을 닦는 비누에는 피부의 수분을 유지해주는 보습 성분과 소비자들이 좋아하는 향기, 색소 성분을 추가하기도 합니다.

비누화 반응은 누구나 쉽게 따라서 해 볼 수 있습니다. 그러나 수제 비누를 만들려면 요리에 사용하는 식용유와 독성이 강한 수산화 소듐을 사용해야 합니다. 수제 비누를 만들고 남은 찌꺼기를 처리하는 일도 쉽지 않습니다. 수제 비누의 품질을 확인하는 일도 만만치 않습니다. 어설픈 수제 비누에는 피부 건강에 좋지 않은 강한 알칼리 성분이 남을 수도 있고, 보습 성분이나 향기 성분을 추가하는 일도 쉽지 않습니다.



비누가 물에 녹으면 무슨 일이?

지방산의 소듐 염에 해당하는 비누는 화학적으로 매우 독특한 물질입니다. 긴 사슬 모양의 구조로 이뤄진 것부터 흥미롭습니다. 탄소와 수소가 길게 연결된 알킬기(-R)의 끝에 카복실기(-CO₂H)라고 부르는 작용기가 붙어 있죠. 화학적으로 알킬기는 물보다 기름 성분과 잘 섞이는 소수성(친유성)이고, 반대로 카복실기는 기름보다 물 성분과 잘 섞이는 친수성입니다. 비누가 물에 잘 녹는 이유는 바로 이런 친수성의 카복실기 덕분입니다.

비누가 물에 녹으면 더 신기한 일이 벌어집니다. 소수성의 알킬기가 안쪽으로 들어가고, 친수성의 카복실기가 바깥으로 노출된 작은 공이 만들어집니다. 이런 공을 ‘마이셀(micelle)’이라고 합니다. 이 마이셀 덕분에 비누가 물에 잘 녹고, 기름 성분의 때를 씻어낼 수 있습니다. 물을 싫어하는 기름 성분의 때는 마이셀의 내부에 남아있게 되죠. 반대로 비누가 유기 용매에 녹으면, 마이셀이 안팎이 뒤집힌 역마이셀이 만들어집니다.

20세기 들어 석유화학 산업에서 대량으로 생산되는 알킬카복실산이나 알킬벤젠설포산(ABS)을 원료로 하는 다양한 합성세제가 개발됐죠. 이런 합성세제는 세탁기, 식기 세척기, 주방용 세제 등 용도에 따라 알맞은 세척력을 갖게 만드는 것은 물론, 액체나 분말 형태로도 생산하고 있습니다.



18

연필심을 가공하면
 다이아몬드를
 만들 수 있을까요?



산업 현장 팔방미인, 계면활성제

비누는 물속에 들어가면 끈끈하게 결합하고 있는 물 분자 사이를 방해합니다. 즉, 물의 표면장력을 약하게 변화시킵니다. 이런 물질을 계면활성제라고 합니다. 계면활성제는 물과 기름처럼 전혀 다른 화학적 성질을 가진 두 물질이 서로 만나는 ‘계면’에서 화학적 활성을 나타낸다는 뜻입니다.

소수성 부분에는 길이가 긴 탄화 수소 사슬로 구성된 알킬기가 주로 사용됩니다. 친수성 부분에는 음전하를 가진 카복실기나 설펜기($-SO_3^-$)를 사용하는 음이온성 계면활성제가 쓰입니다. 양전하를 가진 4급 암모늄기($-R_4N^+$)를 사용하는 양이온성 계면활성제도 있습니다. 알킬기의 양쪽에 양이온과 음이온을 모두 가지고 있는 ‘비이온성 계면활성제’도 있죠.

계면활성제는 물과 기름이 잘 섞이도록 해주는 물질로 세제로만 쓰이지 않습니다. 산업 현장에서는 이를 유화제, 습윤제, 분산제 등으로 부릅니다. 가공식품, 화장품, 의약품이 대표적입니다. 영양, 보습, 의약 물품에는 기름 성분이 많이 들어 있습니다. 거품을 만드는 용도로 사용하는 기포제도 계면활성제입니다. 반대로 거품을 제거해 주는 계면활성제도 있죠.

사람만 계면활성제를 사용하는 것은 아닙니다. 식물이나 동물도 다양한 계면활성제를 만들어 씁니다. 생물의 몸속에서 일어나는 모든 생리작용이 물속에서 일어나기 때문이죠. 종종 광고에서 천연 계면활성제를 사용했다는 문구가 나오는데, 이는 계면활성제 성분을 식물이나 동물에서 추출해 사용했다는 뜻입니다. 하지만 천연 계면활성제가 무조건 건강에 이롭다는 주장은 잘 살펴봐야 합니다. 자연에 서식하는 식물이나 동물이 사람을 위해서 어렵게 계면활성제를 만들 이유가 없습니다. ‘자연산’이나 ‘천연’이 무조건 좋다는 주장은 늘 경계할 필요가 있습니다.

A



석원경 교수가 답하다

연필심에 사용되는 시커먼 흑연과 투명하게 반짝이는 귀한 보석 다이아몬드는 전혀 다르게 보이지만 사실은 모두 같은 탄소 덩어리입니다. 두 물질은 모두 탄소로만 이뤄져 있어 서로의 모습으로 변신할 수 있습니다. 육각형 고리가 그물처럼 연결된 연필심의 탄소 원자를 뜯어내서 정사면체 모양으로 다시 꿰맞추면 다이아몬드를 만들 수 있죠. 심지어 값비싼 보석으로 쓸 수 있을 정도로 큰 다이아몬드를 만들 수도 있습니다.

인조 다이아몬드 생산량, 연간 50만 캐럿

천연 다이아몬드는 지하 120~250km 부근의 암석권 맨틀 하부에 묻혀 있으며, 화산이 분출할 때 함께 땅 위로 솟아 올라 발견됩니다. 전세계에서 연간 1억 캐럿(1캐럿은 보석 200mg의 질량) 이상 생산됩니다. 다이아몬드는 투

명하고, 반짝이고, 단단한 특별한 물성을 가지고 있습니다. 고체의 단단한 정도를 상대적으로 나타내는 모스 굳기는 10으로 광물 중 가장 큰 값을 갖죠. 4개의 탄소가 정사면체 모양으로 연결된 독특한 결정 구조가 이런 물성을 만들어 냅니다.

단단한 덕분에 다이아몬드는 산업용으로도 유용하게 사용됩니다. 주로 유리, 철근 콘크리트 기둥, 석재 등을 절단하는 칼로 사용하고, 물체의 표면을 매끈하게 만드는 연마제나 반도체 제조용 공구나 수술용 도구에도 쓰입니다. 이런 산업용 다이아몬드의 98%는 비교적 저렴하게 얻을 수 있는 인조 다이아몬드입니다.

역사상 최초의 인조 다이아몬드는 1955년에 만들어졌습니다. 미국 제너럴일렉트릭(GE)의 연구소에서 흑연을 섭씨 1500°C로 가열하고, 5만기압의 압력을 가해서 인조 다이아몬드를 탄생시켰습니다. 하지만 최초의 다이아몬드는 크기가 1mm도 안 되는 작은 알갱이였습니다.

현재는 탄소 원자를 기체 상태로 만든 뒤 응집시켜 기판 표면에 탄소 원자를 붙이는 화학기상증착법(CVD·Chemical Vapor Deposition)을 사용합니다. 이외에 다이아몬드 ‘모루 셀(anvil cell)’이라는 고압 장치 속에서 1400°C 이상으로 가열한 탄소를 압축하는 고온고압법(HPHT·High Pressure High Temperature)도 있습니다. 또 탄소가 들어 있는 폭약이나 초음파를 이용해 인조 다이아몬드를 만드는 기술도 개발되고 있죠.

이런 방법으로 전 세계적으로 생산되는 보석용 인조 다이아몬드의 양은 매년 500만 캐럿 정도 됩니다. 천연 다이아몬드 생산량과 비교하면 턱없이 적은 양이지만, 인조 다이아몬드는 천연보다 훨씬 더 순도 높은 다이아몬드로 만들 수 있다는 장점이 있습니다. 가격도 천연 다이아몬드보다 20%가량 저렴합니다.

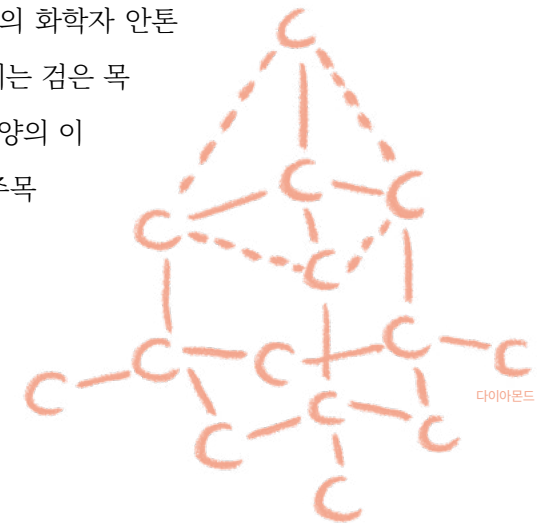


다이아몬드는 영원하다?

흔히 다이아몬드는 영원히 반짝거린다고 생각합니다. 다이아몬드 반지를 주고받으며 ‘영원한 사랑’을 약속하는 것도 이런 이유에서죠. 하지만 탄소로 이뤄진 물질 중 가장 안정적인 물질이 다이아몬드인 것은 아닙니다. 그리고 세월이 충분히 흐르고 나면 다이아몬드 역시 열역학적으로 더 안정한 흑연으로 변하게 됩니다.

다이아몬드를 구성하는 탄소는 생명의 근원이고 문명의 핵심입니다. 지구상에서 번성하는 모든 생물은 탄소를 이용해서 살아가죠. 3대 영양소인 탄수화물, 단백질, 지방이 모두 탄소의 화합물입니다. 유전정보를 담고 있는 DNA 역시 탄소의 화합물입니다. 심지어 ET라고 알려진 외계 생명체도 마찬가지로 탄소를 이용한다는 것이 현대 화학의 거부할 수 없는 결론입니다. 밤하늘의 별도 탄소가 촉매 역할을 하므로 신비롭게 반짝이는 빛을 낼 수 있습니다. 오늘날 우리는 ‘탄소 문화’의 시대를 살고 있습니다.

이런 탄소의 존재는 1772년 프랑스의 화학자 안톤 라부아지에가 밝혔습니다. 라부아지에는 검은 목탄과 다이아몬드를 각각 태우면 같은 양의 이산화 탄소가 만들어진다는 사실에 주목했죠. 그리고 마침내 목탄과 다이아몬드가 모두 순수하게 탄소만으로 이뤄진 탄소의 ‘동소체’라는 사실을 알아냈습니다. 한 종류의 원소로만 구성돼 있지만, 겉으로는 전



혀 다르게 보이는 물질을 동소체라고 합니다. 라부아지에는 탄소가 세상 만물을 구성하는 기본 단위인 원소라는 사실을 알아냈고, '석탄과 목탄의 원소'라는 뜻의 라틴어 'carbo'를 이용해 'carbon'이라고 이름 붙였습니다. 한글 '탄소(炭素)'도 같은 뜻입니다.

다이아몬드가 흑연으로, 그리고 흑연이 다이아몬드로 변할 수 있는 이유는 다이아몬드와 흑연이 모두 탄소로만 이뤄진 동소체이기 때문입니다. 특히 탄소는 흑연, 다이아몬드 외에도 여러 가지 동소체가 존재하는 유별난 원소죠. 대표적으로 탄소 원자 60개가 축구공 모양으로 뭉쳐진 '풀러렌'과 흑연에서 한 겹의 육각형 그물을 벗겨낸 '그래핀'이 있습니다. 육각형의 탄소 고리가 둥근 튜브 모양으로 연결된 '탄소 나노튜브'도 존재합니다. 물론 석탄이나 목탄처럼 탄소 원자들이 제멋대로 모여있는 비정질 탄소도 있습니다. 이런 탄소의 동소체들은 저마다 독특한 용도로 사용됩니다.

탄소 동소체, 인류의 문명을 이끌다

흑연은 탄소 원자가 3개의 다른 탄소 원자와 연결된 6각형 고리가 그물처럼 겹겹이 쌓여있는 구조입니다. 각 그물 층 사이의 거리는 0.335nm(나노미터·1nm는 10억분의 1m)이고, 서로 느슨하게 연결돼 잘 미끄러집니다. 이런 특성 때문에 흑연은 연필심 외에 윤활제로 사용되기도 합니다. 또 불에 잘 타지 않는 내화재로도 쓰입니다. 인조 흑연은 용광로에서 사용하는 코크스에 실리카를 넣고 2500°C로 가열해 만듭니다. 인조 흑연은 도가니, 전지, 전기 분해조의 전극을 만드는 데 주로 사용됩니다.

'꿈의 신소재'라 불리는 그래핀은 이런 흑연에서 육각형 그물 한 층을

벗겨낸 것을 말합니다. 러시아 출신의 영국 물리학자 안드레 가임과 콘스탄틴 노보셀로프가 스카치테이프를 흑연에서 그래핀을 떼어 내는 방법을 개발해 2010년 노벨물리학상을 받았죠. 2차원 구조로 이뤄진 그래핀은 마음대로 접거나 말 수 있는 플렉시블 디스플레이, 태양전지, 의료용 진단 소자를 만드는 데에 유용하게 활용될 것으로 보입니다.

축구공 모양의 풀러렌과 죽부인 모양의 탄소 나노튜브 역시 흑연과 같은 탄소로 만들어집니다. 풀러렌과 탄소 나노튜브는 '나노화학'이라는 새로운 연구 분야를 열었습니다.

나노미터 크기의 작은 공이라는 뜻에서 '0차원 물질'이라고 부르기도 하는 풀러렌은 사실 가마솥 밑 검댕에도 들어 있는 물질입니다. 풀러렌은 전극, 전달체 등의 분야에서 활발하게 활용되고 있습니다. 영국의 화학자 해럴드 크로토와 미국의 화학자 리처드 스몰리, 로버트 컬은 풀러렌을 처음으로 발견한 공로를 인정받아 1996년 노벨화학상을 받았습니다.

탄소 나노튜브의 장래도 매우 밝습니다. 철사보다 100배나 더 질기고, 열과 전기 전도도가 매우 높은 특성이 있기 때문입니다. 반도체의 특성을 가진 탄소 나노튜브도 만들 수 있습니다. 그래서 단단한 케이블이나 전극 소재로 사용되고, 향후에는 생명공학이나 의학에서도 다양하게 활용될 것으로 전망하고 있습니다.

마지막으로 석탄이나 목탄과 같은 비정질 탄소도 인류 문명의 발달에 크게 기여했습니다. 석탄은 전 세계 어디에서나 쉽게 채취할 수 있는 연료입니다. 그러나 석탄을 안전하게 태우는 일은 쉽지 않습니다. 산소의 공급이 충분하지 못하면 맹독성의 일산화 탄소가 발생하기 때문이죠. 그런 석탄을 안전하게 연소시키는 기술을 개발한 덕분에 18세기 산업혁명이 일어났습니다.

오늘날엔 석탄과 같은 화석 연료를 무분별하게 쓰는 바람에 이산화 탄소에 의한 기후 변화가 우리의 생존을 위협하게 됐습니다만, 탄소로 이뤄진 다양한 물질들이 인류 문명을 이끌어왔고, 앞으로도 그럴 것이라는 점은 부인할 수 없는 사실입니다.

곽다연(대구 강북중 3)
김윤서(대전 삼천중 2)
이선재(경기 정평중 2)
이예화(서울 김음중 1)
이제은(서울금성초 4)
조은호(대구 고산중 2)
한지율(서울초당초 5)
홍종익(서울 목문중 3)

Chapter 2. 집 학교에서



19

물감과
페인트는
어떤 차이가
있나요?



A



석원경 교수가 답하다

물건에 색깔을 입히는 방법은 다양합니다. 낡은 계단 손잡이에 페인트를 칠하면 새것처럼 멀끔해집니다. 또 오래 신어 지겨워진 신발에 물감으로 그림을 그리면 나만의 새 신이 탄생하죠. 이처럼 페인트와 물감은 둘 다 색깔을 내지만 쓰임새는 다릅니다. 둘의 화학 성분이 다르기 때문입니다.

염료와 안료, 색을 내는 방식 달라

페인트는 물체 표면에 발라 색을 내는 동시에 표면을 보호하는 역할도 합니다. 그래서 흔히 ‘도료’라고 부릅니다. 반면 물감은 섬유, 옷감 등을 물 들여 염색하는 재료입니다. 그림을 그릴 때 주로 사용하죠. 우리말에서는 이를 분명하게 구분하지 않아 헷갈리기도 합니다. 하지만 화학에서는 ‘안료(pigment)’와 ‘염료(dye)’를 명확히 구분합니다. 안료는 고체 분말로, 기름,

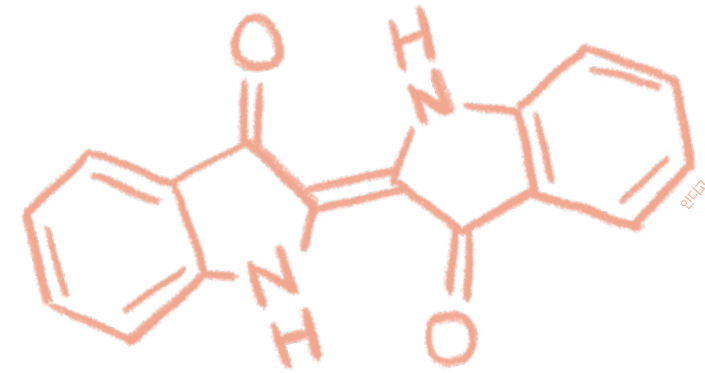
단백질, 바니시 등을 이용해서 물체 표면에 불투명한 막을 만듭니다. 대부분 금속이 포함된 무기 화합물이고 페인트, 잉크, 유약, 미술용 물감 등에 많이 쓰입니다.

그런가 하면 염료는 염료의 분자가 섬유에 단단하게 결합해 색을 나타냅니다. 물감이 이에 해당하죠. 염료는 탄소 원자를 갖는 화합물인 유기화합물을 사용하는 경우가 많습니다. 생물에서 추출한 색소는 염료에 가깝고, 광물 색소는 안료와 유사합니다.

안료와 염료에는 모두 발색단(chromophore)이라는 독특한 구조의 분자가 들어 있습니다. 주로 탄소 이중결합이나 금속 결합이 포함돼 있고, 양자역학적인 이유로 특정한 파장의 가시광선을 흡수합니다. 실제로 발색단에 백색광을 쬐이면 특정 파장 범위의 빛은 흡수되고, 나머지는 다 반사됩니다. 우리 눈에는 물체가 발색단이 흡수한 빛의 보색으로 보이는 것이죠. 예를 들어 빨간색을 흡수하는 물질은 청록색으로 보이고, 노란색을 흡수하면 남색으로 보입니다. 마찬가지로 발색단이 가시광선을 모두 흡수하면 검은색으로, 모두 반사하면 흰색으로 보입니다.

동양의 빨강 꼭두서니, 서양의 빨강 깍지벌레

안료의 역사는 구석기 시대까지 거슬러 올라갑니다. 역사 자료를 찾아보면 이미 구석기 시대에도 현대의 화장품처럼 얼굴에 안료를 바르는 문화가 있었습니다. 천연 안료로 고대 유물이나 벽화도 그렸죠. 한 예로 프랑스의 라스코 동굴에는 기원전 1만5000년 전에 빨강, 노랑, 갈색, 흑색 등으로 그려진 벽화가 남아 있습니다. 지금도 벽화를 칠한 알록달록한 색깔이 선명하게 남아 있습니다. 수천 년 전 만들어진 이집트 피라미드에서도



아름답게 채색된 유품들이 발굴됐죠. 동양 문화권에서는 먹을 이용해 색을 표현했습니다. 지금까지 사용되는 먹은 인디아 잉크, 또는 중국 잉크라고도 부릅니다. 접착제에 뻘나 타르를 태운 검댕을 섞어서 만든 짙은 검은색을 띠는 안료입니다.

국내에도 고구려, 백제, 신라, 가야, 발해 등의 고분 벽화를 종종 찾아볼 수 있습니다. 그중에서도 고구려 벽화가 특히 많은데, 무용총 수렵도, 각저총의 씨름도, 강서대묘의 사신도가 대표적입니다. 이때 안료로 주로 사용한 물질은 무기 화합물이었습니다. 탄산 칼슘(CaCO₃), 황산 칼슘(CaSO₄), 산화 납(Pb₂O₃) 등은 흰색 안료로, 산화 철(Fe₂O₃)은 갈색 안료로 이용했습니다. 또 카드뮴(Cd)이나 바나듐(V)의 화합물도 안료로 쓰였죠. 요즘은 그림물감, 화장품, 페인트 등을 만들 때 인체에 해를 입히지 않는 백색의 이산화 타이타늄(TiO₂)을 사용합니다.

그런가 하면 염료의 역사도 4000년이 넘습니다. 전 세계 곳곳에 자연에서 채취한 재료를 이용해 만든 천연염료를 사용했던 흔적이 남아 있습니다. 여전히 현대 문명의 손길이 닿지 않은 오지에서 사는 사람들은 천연염료를 사용하고 있죠.

아쉽게도 우리나라에는 염료로 쓸 수 있는 자원이 많지 않았습니다. 색

을 낼 수 있는 치자, 잇꽃, 오가피, 모과, 석류, 산수유 등은 비교적 쉽게 구할 수 있었지만, 이를 이용한 염색은 쉬운 일이 아니었습니다. 그래서 과거의 사람들은 흰색의 무명옷으로 만족할 수밖에 없었죠. 부유한 임금과 고관대작들은 중국에서 수입한 비싼 염료를 사용했습니다.

인도, 페르시아, 이집트 등에서는 꼭두서니라는 식물로 빨간색을 내는 방법이 알려져 있었습니다. 꼭두서니 뿌리에 있는 알리자린이라는 유기 화합물을 염료로 이용한 것이죠. 다만 꼭두서니 뿌리에 쇠똥과 섞은 올리브유를 섞는 등 무려 17단계의 공정을 거쳐야만 빨간색을 얻을 수 있었습니다. 본래 고대 터키인의 비법이었으나 10세기경에는 중국까지 제조 방법이 알려졌습니다.

유럽에서는 다른 방식으로 빨간색 염료를 생산했습니다. 열대 선인장에 기생하는 깍지벌레, 브라질 곤충인 깍지진디 등을 이용했습니다. 두 곤충에서는 안트라퀴논 계통의 빨간색 염료인 코치닐 색소와 케르메스 색소를 만들어낼 수 있기 때문입니다. 고대 로마에서는 이런 케르메스 색소를 승전 장군에게 줬습니다. 중세에는 지주들이 토지세 명목으로 받기도 했죠. 케르메스 색소는 지금도 립스틱 등 화장품의 염료로 쓰이고 있습니다.

색이 만든 신분 차이, 화학으로 부수다

로마 시대의 짙은 자주색 ‘티리언 퍼플’의 제조 방법은 비교적 자세하게 기록으로 남아 있습니다. 지중해에 사는 바다 소라인 무렉스 브란다리스(Murex brandaris)는 아가미 샘에서 맑은 체액을 분비하는데, 로마인들은 이를 원료로 사용했습니다. 바다 소라의 분비액을 공기 중 산소에 노출시킨 뒤, 햇볕을 쬐어주면 시간에 따라 색이 몇 차례 변합니다. 충분히 시간

이 지나면 곧 모직물, 견직물을 물들일 수 있을 정도로 아름다운 자주색 염료가 만들어집니다.

티리언 퍼플은 매우 귀한 염료였습니다. 바다 소라 1만 개로 고작 1g을 얻을 수 있었으니까요. 왕, 귀족, 성직자 등만 이용할 수 있어 ‘로열 퍼플’, ‘비브리칼 퍼플’ 등의 이름으로 불렸습니다. 심지어 티리언 퍼플 색소를 제조하는 방법은 국가 비밀이었습니다. 아무리 전쟁에서 승리하고 돌아온 군인이라도, 하급 장교는 제복 소매에 붙일 작은 천을 티리언 퍼플로 염색하는 데 만족해야 했습니다. 이는 전통처럼 남아 현대의 군인이나 경찰의 제복에서도 티리언 퍼플 색을 찾아볼 수 있습니다.

이후 식물성 원료가 개발되면서 천연염료의 생산량이 크게 늘었습니다. 특히 인도에서 자라는 콩과 식물로 ‘인디고 페라’, ‘티리언 퍼플’ 등의 염료를 기존보다 많이 생산할 수 있게 됐죠. 당시 영국 식민지였던 인도는 사치를 부리는 영국 귀족들을 위해 엄청난 양의 인디고 페라 염료를 생산해야만 했습니다. 당장 인도 국민에게 필요했던 식량 생산까지 포기하면 서요. 1897년 인도에서 염료 생산에 쓰인 경작지는 무려 200만 에이커(약 81억m²)에 달했습니다. 하지만 영국은 이에 만족하지 못하고 새로 개척한 신대륙에서도 식민지국 사람들에게 대청잎을 재배하게 해서 염료를 생산했습니다.

현대 화학 기술은 이렇게 색이 만든 신분을 부수는 중요한 역할을 했습니다. 19세기에는 누구나 원하는 색깔의 옷을 입을 수 있게 됐습니다. 기술의 발전이 자유와 평등, 그리고 인권을 핵심으로 하는 현대 민주주의를 가능하게 만든 셈이죠.

1845년 독일의 화학자 아우구스트 빌헬름 폰 호프만은 골치 아픈 산업 폐기물이었던 ‘콜타르’에서 아닐린과 벤젠을 분리하는 기술을 개발했습

니다. 영국의 유기화학자 윌리엄 퍼킨은 호프만의 연구실에서 말라리아 치료제인 키니네를 합성하는 연구자였죠. 퍼킨은 연구 과정에서 우연히 짙은 보라색 염료를 개발하게 됩니다. 1856년에는 모브 염료를 최초로 합성했으며, 훗날 빨간색의 알리자린 염료도 합성해 영국의 섬유 염색 산업에 크게 이바지했습니다.

화학 기술의 발전으로 합성염료와 안료가 대량으로 생산되기 시작하면서 옷의 색깔로 사람들의 사회적 신분을 구분하던 낡은 전통은 사라졌습니다. 대신 사람들이 염료와 안료를 함부로 사용해 부작용이 발생하기 시작했습니다. 합성염료와 합성안료를 생산하는 과정에서 심각한 환경오염이 발생한 겁니다. 화학자들은 이제 친환경적으로 염료와 안료를 생산할 수 있는 기술, 염료와 안료의 무절제한 낭비를 막을 수 있는 기술에 주목하고 있습니다.

Chapter 2. 집·학교에서

Q

20

딱풀은
무엇으로
만들어졌나요?





가위, 손톱깎이, 물컵에는 공통점이 있습니다. 어느 집에나 있는 물건이라는 것입니다. 이런 물건이 또 하나 있습니다. 바로 딱풀입니다. 없다고 말하기 전에 집안 구석을 찾아보세요. 어디선가 원기둥 모양의 오래된 딱풀이 굴러 나올 겁니다.

딱풀은 나사를 돌려서 편리하게 사용할 수 있는 고체형 접착제, 즉 고체 풀입니다. 접착력이 뛰어나게 강하지는 않지만, 학습용이나 사무용으로 쓰기에는 충분합니다. 딱풀은 약 50년 전인 1969년, 독일에서 처음 개발됐습니다. 현재는 주로 폴리비닐알코올, 폴리아크릴 수지 등의 합성 고분자를 이용해 만들고 있죠.

이 같은 고체 접착제의 품질은 단순히 접착력으로만 평가할 수 없습니다. 접착제의 성분들이 균일하게 잘 섞여야 하고, 종이 위에 바를 때 잘 미끄러지며 발려야 합니다. 또 풀에 함유된 수분이 너무 빨리 증발하지 않

아야 합니다. 이런 특성은 화학 성분을 얼마나 넣는지에 따라 크게 달라집니다. 제조사마다 최적의 성분 조합이 있는데, 각 회사는 이런 노하우를 철저하게 비밀로 숨겨 놓습니다.

쌀, 밀, 민어로 만든 전통 접착제

일반적으로 접착제는 끈적끈적한 고분자 접착 성분이 녹아 있는 액체입니다. 접착제가 공기 중에 노출된 뒤 시간이 지나 용매가 기화하면, 접착 성분이 고체로 딱딱하게 굳습니다. 그 결과 접착제로 붙인 물체들이 서로 단단하게 결합하게 되죠.

이런 합성 기술이 없던 과거에는 식물, 동물 등 자연에서 구할 수 있는 재료로 접착제를 만들어 썼습니다. 옥수수, 감자, 밀, 쌀 등에 많이 포함된 녹말을 이용해 만든 풀이 대표적입니다. 녹말은 포도당이 여러 개 결합해 형성된 고분자입니다. 밀이나 쌀을 물에 풀어 끓이면 끈적거리는 전통 풀을 만들 수 있습니다. 가정에서 벽지를 바를 때, 한지로 책 표지를 만들 때, 표구할 때 이 풀을 사용했죠. 다른 나라에서도 녹말풀을 이용했습니다. 미국에서는 1847년부터 우표를 사용했는데, 우표를 편지지에 붙일 때 녹말로 만든 풀을 사용했습니다.

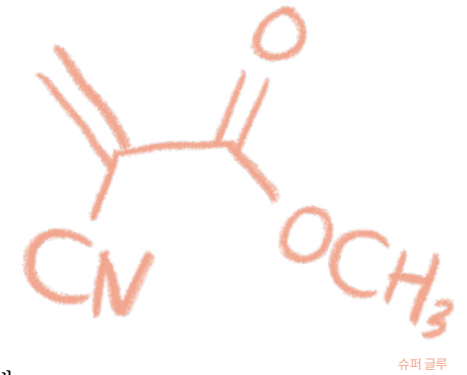
녹말을 가수분해한 덱스트린을 접착제로 이용하기도 했습니다. 이외에도 우유 단백질의 80% 이상을 차지하는 카제인, 달걀흰자에서 추출한 난백 단백질, 일벌이 분비하는 노란색 천연 왁스인 밀랍 등을 이용해 접착제를 만들었습니다.

접착제의 역사는 무려 20만 년 전으로 거슬러 올라갑니다. 당시에는 주로 돌맹이끼리 붙이거나 돌도끼에 자루를 고정하는 용도로 접착제를 이



용했습니다. 나무껍질에서 채취한 송진 등의 수액이나 진흙을 이용해 접착제를 만들기도 했습니다. 원유의 끈적한 성분인 역청을 채취해 접착제로 쓰기도 했죠.

전통적인 목공예에서는 동물이나 어류에서 녹여낸 젤라틴 성분을 접착제로 사용했습니다. 동물의 가죽, 힘줄, 창자, 뼈를 고아 만든 접착제를 ‘아교’라고 합니다. 대구나 민어 등 어류의 공기주머니인 부레를 말린 뒤, 물에 넣고 끓여 만든 접착제는 ‘부레풀’이라고 부릅니다. 접착력이 더 좋은 부레풀은 조개껍질을 붙여서 만드는 나전칠기 제작에도 쓰였습니다. 전통 활의 몸체를 만들 때도 부레풀을 사용했습니다.



본드, 글루건, 포스트잇... 접착제의 화려한 변신

합성 기술이 발달한 현대에는 훨씬 더 다양한 종류의 접착제를 만들어 사용하고 있습니다. 식물이나 동물로 만든 접착제와 비교할 수 없을 정도로 접착력이 강해졌죠. 금속, 고무, 유리, 세라믹, 석재, 플라스틱 등을 붙일 때 쓰는 본드가 대표적입니다. 본드는 비스페놀 A처럼 산성 수산화기를 가진 성분을 에피클로로하이드린(ECH)과 반응시켜서 얻은 에폭시에 경화제를 추가로 섞어 만든 열경화성 에폭시 수지입니다. 접착력이 매우 뛰어나고, 기계적 강도나 전기 절연성이 우수해 자동차, 자전거, 보트 등의 부품 접착에 쓰입니다. 그러나 시간이 지나면 누렇게 변하는 황변 현상이 일어난다는 단점이 있습니다. 접착제가 단단하게 굳어지기까지 걸리는

경화 시간도 깎습니다. 휘발성이 강한 톨루엔과 같은 용매가 필요한 문제도 있습니다.

한편 건축물 바닥의 마루판을 붙일 때 쓰는 접착제는 유기용매에 강한 접착력을 가진 합성 고분자를 녹여 만듭니다. 가구나 내장용 목재로 사용하는 합판에는 페놀 수지를 이용해 만든 접착제를 사용하죠. 이런 접착제는 마루판 틈, 가구 틈에서 유기용매가 느린 속도로 새어 나오며 ‘새집 증후군’을 일으키는 단점이 있습니다. 그래서 요즘에는 유기용매 대신 물을 용매로 사용한 수성 접착제를 이용하기도 합니다.

경화 시간을 대폭 줄인 ‘순간접착제’도 있습니다. ‘슈퍼 글루’라고도 부르죠. 이 물질은 액체 상태인 메틸-2-시아노아크릴레이트가 공기 중의 수분과 빠르게 반응해서 만들어지는 폴리아크릴레이트 고분자의 강한 접착력을 이용합니다. 순간접착제는 뚜껑을 확실하게 닫아두지 않으면 공기 중 수분 때문에 용기의 입구가 막혀버릴 수 있습니다. 증기의 독성이 매우 강하고, 피부에도 강하게 접착되기 때문에 사용 과정에서 세심한 주의가 필요합니다. 반면 피부에 달라붙기 때문에 출혈을 막아줄 수 있어 응급치료에 쓰이기도 합니다.

열을 가해주면 부드럽게 변하는 열가소성 플라스틱을 접착제로 쓸 수도 있습니다. 글루 건의 글루가 대표적입니다. 플라스틱이 식으면 곧바로 굳어버려 ‘신속건성 접착제(핫멜트)’라고 부릅니다. 에틸렌 비닐아세테이트(EVA), 폴리에틸렌, 폴리아마이드(PA), 폴리에스터, 폴리우레탄(PU) 등의 소재가 사용됩니다. 물론 이를 접착제로 사용하려면 늘 열가소성 플라스틱을 뜨겁게 달궈줄 전열 기구가 필요합니다. 용매가 건강에 유해하지 않다는 장점이 있으며, 목재, 금속, 천 등의 소재로 만들어진 물체의 접착에 주로 이용합니다.

모든 접착제가 반드시 강한 접착력이 필요한 것은 아닙니다. 1979년 미국의 3M사가 개발한 ‘포스트-잇(Post-it)’에 적용된 접착제는 강력 접착제를 개발하려다 실수로 합성한 엉터리 접착제였습니다. 에스터 고무, 페놀 수지 등에 폴리아이소부틸렌을 섞은 이 접착제는 접착력이 매우 약했지만, 재사용이 가능하다는 장점이 있었습니다. 이후 포스트-잇은 가장 독창적인 발명품으로 평가받게 됐죠.

석회 덩어리 시멘트는 건축용 접착제

놀랍게도 일상에서 흔히 보는 시멘트도 건축용 석재에 사용하는 접착제입니다. 시멘트는 석회(CaO)에 규산(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 산화 철 등을 혼합한 물질입니다. 주로 모래나 자갈과 같은 건축용 골재들을 서로 접착시키는 용도로 사용됩니다. 시멘트는 고대 이집트에서 피라미드를 만들 때도 쓰였습니다. 당시 이집트인들은 석회, 석고(CaSO₄) 등의 혼합물을 높은 온도로 가열한 후에 분쇄해서 만든 시멘트를 썼습니다. 로마 시대에도 소석회(Ca(OH)₂)와 석회를 실리카가 주성분인 화산재, 모래와 섞은 포졸라나 시멘트가 있었습니다.

오늘날 우리가 가장 많이 사용하는 시멘트는 1824년 영국의 벽돌공 조셉 애스프딘이 개발한 것입니다. 석회석과 점토를 섞어서 고운 가루로 분쇄하고 대형 회전 가마에서 1500°C의 높은 온도에서 구웠죠. 여기에 약간의 석고를 넣고 다시 가루 형태로 분쇄해 시멘트 가루를 만들었습니다. 이는 영국 포틀랜드섬에서 생산되는 천연 석회와 비슷하다고 해서 ‘포틀랜드 시멘트’라는 별명이 붙었습니다. 이 시멘트를 물로 반죽한 후에 한동안 가만히 놓아두면, 석회 성분이 물과 반응해서 굳으면서 상당한 강도를

갖게 되죠. 물론 시멘트에 혼합된 석회와 규산 등의 혼합 비율에 따라 굳는 속도와 강도가 달라지고, 발생하는 열의 양도 달라집니다.

시멘트로 최적의 접착력을 내기 위해서는 시멘트를 양생하는 과정에서 온도와 습도를 적절하게 유지하는 것이 굉장히 중요합니다. 최근에는 다양한 화학 성분을 첨가해 특수 목적용 시멘트를 생산하기도 합니다. 이외에 물이 스며들지 않는 방수 시멘트, 양생 속도가 매우 빠른 특수 시멘트 등도 있습니다. 이런 시멘트를 모래나 자갈과 같은 골재나 철근과 함께 사용하면 다양한 구조물을 만들 수도 있습니다.

이처럼 접착제는 일상생활이나 산업에서 매우 중요하게 활용되고 있습니다. 접착제를 사용하지 않는 제품을 찾아보기 어려울 정도죠. 실제로 오늘날 접착제 시장은 500억 달러(약 56조 원)에 이르는 엄청난 규모이고, 계속해서 빠른 속도로 커지고 있습니다.

Q

21

네온사인 대신
아르곤사인, 헬륨사인을
만들 순 없나요?

Neon

A



석원경 교수가 답하다

네온사인은 유리 진공관에 기체를 넣은 뒤, 유리관 양쪽 끝 전극에서 수백~수만V(볼트) 전류를 방전시켜 빛을 내는 장치입니다. 도시의 밤거리를 환하게 밝히는 네온사인은 실은 네온(Ne)만으로 만든 것이 아닙니다. 주황 빛을 내는 원소인 네온뿐만 아니라, 분홍빛을 내는 아르곤(Ar), 진한 붉은 빛을 내는 헬륨(He)으로도 만들죠. 사람들이 이를 구분하지 않고 모두 네온사인이라고 부르지만요. 문명이 발전하면서 네온사인의 역할은 발광다이오드(LED)가 빠르게 대체하고 있습니다.

네온사인 화려한 색을 내는 비활성 기체

네온사인은 1910년 프랑스의 발명가 조지 클로드가 처음 발명한 뒤, 그해 12월 프랑스 파리에서 개최된 자동차 박람회 ‘파리 모터쇼’에서 처음 소개

됐습니다. 이는 영국의 J. J. 톰슨이 1897년 전자를 발견할 당시 사용했던 방전관인 ‘가이슬러관’을 일상생활에서도 쓸 수 있도록 발전시킨 것입니다. 네온사인의 원리는 간단했습니다. 진공 유리관 속에 남아있는 기체가 음극에서 나온 전자와 충돌하면 빛을 내는 현상을 이용한 겁니다.

유리관에 담긴 기체는 종류와 양에 따라 색깔이 달라집니다. 질소는 노란색, 산소는 주황색, 이산화 탄소는 흰색을 냅니다. 형광 물질이 포함된 도료를 유리관에 칠한 뒤 극저압의 수은을 넣어주면 온갖 색깔의 빛을 내도록 만들 수도 있습니다. 형광등과 같은 원리죠.

클로드는 공기를 액화한 뒤 저온에서 증류해 유리관에 넣을 네온 기체를 분리하고, 네온사인이 오랜 시간 동안 빛을 낼 수 있도록 다양한 기술을 개발했습니다. 네온 기체를 유리관에 넣었을 때 새어나가지 않도록 단단하게 밀봉하는 기술을 개발했고, 동시에 유리관 속 음극이 손상되지 않도록 만드는 기술도 찾아냈습니다.

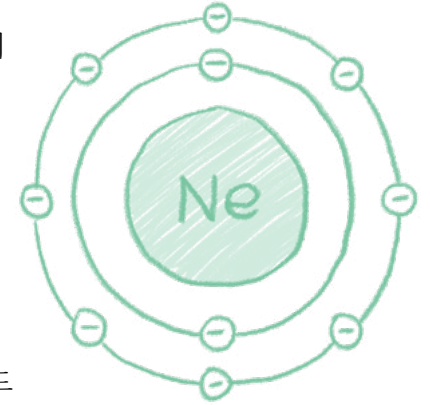
이런 기술을 토대로 클로드는 다양한 모양의 네온사인을 만들었습니다. 얼마 지나지 않아 미국 뉴욕시의 타임스 스퀘어는 번쩍이는 네온사인으로 채워졌습니다. 네온사인을 이용한 독창적인 예술 작품도 등장했고요. 네온사인은 제2차 세계대전 이후 본격적으로 발전한 화려한 미국 대중문화의 상징으로 자리를 잡았습니다.

네온사인에 넣는 헬륨, 네온, 아르곤 등의 물질은 주기율표 18족에 있는 비활성 기체입니다. 비활성 기체란 다른 원소와 화학적으로 반응을 하지 않는 기체라는 뜻입니다. 헬륨, 네온, 아르곤을 비롯해 크립톤(Kr), 제논(Xe), 라돈(Rn), 오가네손(Og) 등이 18족 비활성 기체에 속합니다.

19세기 말 영국의 화학자 윌리엄 램지는 액화 공기를 분별 증류 실험에서 비활성 기체인 네온, 아르곤 등을 처음으로 발견했습니다. 네온은 ‘새



로운 원소'라는 뜻을 그리고 아르곤은 '게으른 비활성 원소'라는 뜻을 담아 이름을 지었습니다. '오가네손'은 러시아의 핵물리학자 유리 오가네시안의 이름에서 따온 것인데, 현재 알려진 원소 중 질량이 가장 무겁습니다. 이런 비활성 기체를 두고 러시아의 화학자 드미트리 멘델레예프는 마치 귀족을 닮았다면서 '고귀한 기체(noble gas)'라고 불렀습니다.



지구에서 희소한 '고귀한 기체'

실제로 18족 비활성 기체 원소들은 지구상에서 구하기가 어렵습니다. 비교적 귀에 익숙한 헬륨도 지구에서 처음 발견한 원소가 아닙니다. 1868년 프랑스의 천문학자 쥘 앙센이 햇빛의 스펙트럼에서 헬륨의 흔적을 처음 찾아냈죠. 헬륨은 그리스의 태양의 신 '헬리오스'라는 뜻입니다. 헬륨은 특히 가볍고 폭발 위험이 없다는 장점이 있어 다양한 곳에 이용됩니다. 대표적으로 액체 헬륨을 사용해서 절대 영도에 근접한 매우 낮은 온도를 만듭니다. 질병 진단에 쓰는 자기공명영상(MRI) 장치, 화학 연구실에서 쓰는 핵자기공명(NMR) 분광기, 그리고 질량분석기(MS) 등에 들어 있는 강력한 초전도 전자석에도 헬륨이 쓰입니다.

헬륨은 우주가 탄생할 때 수소의 핵융합으로 만들어졌습니다. 지금도 태양과 같은 항성에서 핵융합으로 엄청난 양의 헬륨이 만들어지고 있습니다. 우주의 일반물질 중 24%는 헬륨, 73.89%는 수소, 약 2%는 나머지

원소입니다.(참고로 우주는 일반물질이 5%, 암흑물질이 26%, 암흑에너지가 69%를 차지하고 있습니다.) 태양과 같은 항성들이 모두 수소와 헬륨 덩어리인 셈이죠.

하지만 지구는 사정이 전혀 다릅니다. 우주와 달리 지구에는 수소가 거의 없습니다. 너무 가벼워서 모두 우주 공간으로 날아가 버리고, 우라늄(U)과 같은 무거운 원소의 방사성 붕괴로 생긴 일부 헬륨만 조금씩 남아있습니다. 현재 사용하는 헬륨은 대부분 미국의 캔자스주 지역의 암반층에서 채취한 겁니다.

과학자들이 처음 비활성 기체를 발견했을 당시에는 화학적으로 쓸모없는 원소라고 생각하기도 했습니다. 그러나 집요한 연구 끝에 비활성 기체들의 유용한 쓰임새가 속속들이 밝혀졌죠. 그래서 오늘날 비활성 기체는 함부로 낭비하면 안 되는 소중한 자원으로 취급됩니다. 지구에서 구하기 어렵고, 쓰고 난 뒤엔 공기 중으로 흩어져버리고, 우리가 쉽게 만들어서 쓸 수도 없는 고귀한 원소이기 때문이죠.

네온사인, 디스플레이 시대를 열다

현재 우리는 TV, 컴퓨터, 스마트폰 등으로 수많은 영상을 봅니다. 모든 기기에는 디스플레이가 달려 있는데, 이 덕분에 영상 속 인물과 배경의 실제 색을 사용자가 거의 유사하게 볼 수 있죠. 전기로 만든 빛으로 정보를 전달한다는 면에서, 네온사인은 현대식 디스플레이의 시초로 볼 수 있습니다.

1897년 독일의 물리학자 카를 페르디난트 브라운은 텔레비전과 컴퓨터 모니터로 사용할 수 있는 브라운관을 개발했습니다. 브라운관은 전자총에서 방출된 전자를 형광 물질이 칠해진 스크린의 원하는 곳에 충돌시켜

서 빛을 내도록 만든 장치였습니다. 전자를 스크린에 충돌시킬 때 발생하는 전기장과 자기장을 이용했죠. 물론 당시에는 흑백 영상만 송출했습니다. 브라운관을 이용한 TV 방송은 제2차 세계대전이 끝난 뒤 본격적으로 시작됐습니다. 적색(R), 녹색(G), 청색(B) 형광 물질을 이용한 컬러 브라운관도 개발됐습니다. 이는 20세기 대중문화 확산에 결정적인 역할을 했습니다. 또 디지털 컴퓨터의 모니터로도 사용되며 정보화 혁명을 가능하게 만들었습니다.

이후 디스플레이는 더 빠른 속도로 발전했습니다. 브라운관의 거추장스러운 전자총 대신 반도체를 이용해 부피를 획기적으로 줄인 평평한 플라즈마 디스플레이 패널(PDP)이 등장했고, 평면 디스플레이의 출현은 가정과 디지털 산업에 혁명적인 발전을 가져왔습니다.

이어서 오늘날 대세를 이루고 있는 LED 디스플레이도 개발됐습니다. LED 디스플레이는 두 개의 반도체 전극 사이에 걸리는 전압이 특정한 값을 넘어서면, 정공(hole)과 전자가 결합하면서 특정한 색깔의 빛이 방출되는 현상을 사용합니다.

LED는 전기 사용량이 형광등보다 매우 적고, 불필요한 열이 발생하지 않습니다. 무엇보다 소형화가 가능하고, 소자의 수명이 긴 게 장점입니다. 그래서 TV, 컴퓨터 모니터뿐만 아니라 가정용 전구, 교통 신호등, 대형 전광판 등 다양한 곳에 쓰입니다. 높은 해상도와 색 순도를 자랑하는 유기발광다이오드(OLED)가 개발되면서 스마트폰의 발전에도 큰 역할을 했습니다.

최근에는 황화 납(PbS)이나 셀레늄화 납(SeS)으로 만든 nm크기의 결정을 이용하는 ‘양자점(quantum dot)’ 디스플레이도 개발되고 있습니다. 연구자들은 색상이 더욱 선명하고, 수명이 길고, 가격이 저렴한 디스플레이를

생산하는 것이 목표입니다. 디스플레이는 초연결과 초지능의 4차 산업혁명 시대의 핵심 기술이기 때문입니다. 네온사인이 문을 연 디스플레이 기술이 양자점 디스플레이로 이어지기까지, 기술의 눈부신 발전 속도를 새삼 느끼는 요즘입니다.

권용일(충북 형석고 1)
김상현(경기 대평고 2)
노완섭(서울 불암중 1)
민제원(경기 상현고 1)
이준우(서울 송파중 1)
장슬기(경남 문산중 1)

Chapter 3. 공장·지구에서



22

수소 풍선은
왜
위험한가요?



A



석원경 교수가 답하다

대기오염과 기후변화 문제가 주목받으면서 청정에너지원인 수소에 대한 관심이 부쩍 높아졌습니다. 수소가 화석 연료를 대체할 수 있는 깨끗하고 안전한 연료로 알려져 있기 때문이죠. 실제로 수소는 기후변화의 주범이라는 온실가스를 배출하지도 않고, 미세먼지와 질소 산화물도 만들지 않습니다. 화학적 독성도 걱정할 필요가 없습니다.

수소 폭발, 전투기보다 더 큰 충격파 일으켜

그렇다고 수소를 무작정 쓸 수는 없습니다. 상온에서 기체 상태로 존재하는 수소는 끓는점이 영하 252.9°C로 매우 낮아 액체로 만들기가 어렵습니다. 그래서 보통 700기압 이상의 초고압 상태로 압축해 저장합니다. 압축된 가스는 가볍고 냉각과 단열 과정이 필요 없다는 장점이 있지

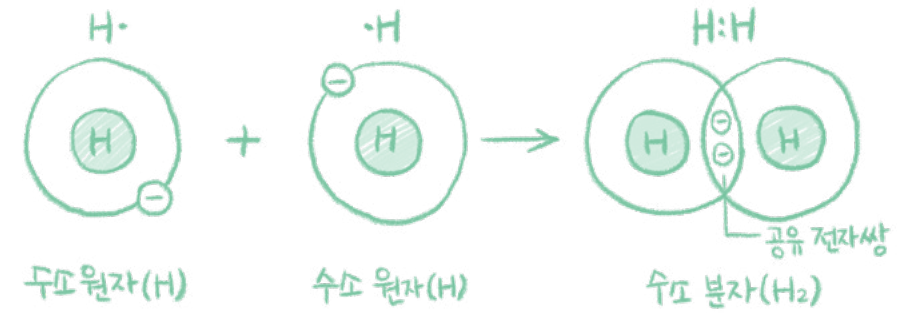
만 사고 시 폭발 위험이 있습니다. 대도시에서 운행되는 압축천연가스(CNG-Compressed Natural Gas) 버스에는 약 200기압의 고압 연료탱크가 들어 있는데, 2010년 서울에서 이런 연료탱크가 폭발해서 17명의 승객이 다쳤습니다. 수소 탱크 압력은 이런 CNG 버스 연료탱크 압력의 무려 3.5배입니다. 폭발 시 끔찍한 피해를 일으킬 수 있다는 뜻입니다.

수소 연료탱크를 탄소 섬유로 제작하면 폭발 사고의 위험을 크게 줄일 수 있습니다. 또 수소를 주입 후 배출하는 과정에서 가스가 누출되지 않도록 연료탱크와 연료 파이프를 연결하는 기술 그리고 수소가 공기와 섞이지 않도록 관리하는 기술이 점점 더 발전하고 있습니다.

수소와 공기를 분리하는 기술은 특히 중요합니다. 수소는 공기에 닿으면 쉽게 폭발하기 때문입니다. 순수한 수소는 거의 폭발하지 않지만, 공기 중 수소 농도가 4~75%일 때는 사정이 달라집니다. 정전기와 같은 작은 불씨로도 엄청난 폭발이 일어납니다. 이런 폭발 과정에선 강력한 열이 발생하는데, 이는 휘발유나 천연가스의 폭발과는 차원이 다릅니다. 수소가 폭발하면 전투기가 음속을 돌파할 때 발생하는 충격파보다 더 큰 충격파를 일으킵니다. 공기보다 훨씬 더 가벼운 수소가 초음속으로 날아가기 때문입니다.

수소의 폭발력 때문에 발생한 끔찍한 사고도 잦았습니다. 2019년에는 강원도 강릉시에 있는 과학산업단지에서 높이가 2m 정도 되는 철제 수소 연료탱크가 터지는 사고가 발생했습니다. 이 폭발로 수백 미터 떨어진 건물까지 형체를 알아볼 수 없을 정도로 파괴됐습니다. 물을 전기분해해서 연료용 수소를 생산하는 기술을 개발하던 중에 산소를 충분히 제거하지 않았던 것이 문제였습니다.

2011년 일본 후쿠시마 원전사고도 수소 폭발이 사고 규모를 키웠습니



다. 당시 규모 9.0의 동일본대지진으로 지진 해일(쓰나미)이 발생했고, 이로 인해 후쿠시마 원전으로 냉각수 공급이 중단돼 원자로의 노심이 뜨겁게 달아올랐습니다. 이때 노심과 바로 연결된 증기 발생기의 물이 열분해 되면서 엄청난 양의 수소가 발생했고 그대로 폭발해버렸습니다. 1937년 유럽에서는 길이가 245m인 독일의 거대 비행선 힌덴부르크호가 미국 뉴저지의 해군 기지에 착륙하던 중 공중에서 폭발했습니다. 비행선 용도로 실었던 수소가 폭발한 것이었죠.

이런 역대 사고들을 보면 수소 풍선이 얼마나 위험천만한 것인지 실감할 수 있습니다. 한때 우리나라 놀이공원에서 어린이들에게 팔던 은박 풍선에 헬륨 대신 가격이 훨씬 싼 수소를 넣어서 팔기도 했습니다. 만약 수소가 폭발하기라도 했다면 끔찍한 사고로 이어졌을 겁니다.

수소를 깨끗하게 얻는 방법은?

그렇다고 수소 사용을 포기해야 하는 것은 아닙니다. 수소는 분명 유용한 자원이고, 앞으로 화석 연료가 바닥나면 수소를 쓸 수밖에 없는 것이 현실입니다. 지구(지각)에서 10번째로 흔한 원소가 바로 수소니까요. 다만 당장 연료로 쓸 수 있는 수소(H₂) 기체는 너무 가벼워서 오래전에 우주 공간으로 빠져나가 버리고, 지금 지구에 남아있는 수소는 대부분 다른 원소에



23

스프레이는
왜 LPG 가스를
쓰나요?



단단하게 결합해 있습니다. 산소와 결합한 물(H_2O), 탄소와 결합한 탄화수소(C_nH_m), 그리고 질소와 결합한 암모니아(NH_3)가 대표적입니다. 수소를 연료로 사용하려면 물이나 탄화 수소에서 수소만 떼어내야 합니다. 엄청난 노력과 비용이 필요합니다.

과학자들은 수소를 얻을 수 있는 다양한 기술을 개발해냈습니다. 대표적인 기술로 고온의 수증기를 이용해 천연가스(LNG)를 열분해하는 방법이 있습니다. 열분해로 수소를 생산하는 과정에선 뜨거운 수증기를 만들기 위해 적지 않은 양의 LNG를 연소시켜야 합니다. 이때 각종 온실가스와 질소 산화물이 배출되기 때문에 열분해 수소를 100% 청정 연료라고 부르는 어렵습니다. 게다가 작은 도시에 건설하는 수소 연료전지 발전소에는 LNG를 충분히 공급하기도 쉽지 않고요.

정유공장에서 원유를 정제하는 과정에서, 코크스(화석연료를 정제해 고탄소화시킨 연료)를 사용하는 제철 공정에서도 수소가 생산됩니다. 이를 ‘부생 수소’라고 하는데, 현재 국내에서 생산되는 부생 수소로 연간 50만 대의 수소 자동차를 운행할 수 있습니다.

수소를 얻는 또 다른 기술은 물을 전기분해하는 겁니다. 이를 ‘수전해 수소’라고 하는데요. 태양광이나 풍력으로 생산한 전기로 물을 전기분해하면 수전해 수소처럼 깨끗한 수소를 생산할 수 있습니다. 물론 신재생에너지 발전소 대부분이 수소 연료를 많이 쓰는 대도시에서 멀리 떨어져 있다는 단점이 있지만요. 최근에는 원자로에서 나오는 열을 이용해 물을 열분해하는 방법도 개발되고 있습니다.

수소를 깨끗하게 얻고 안전하게 사용하기 위한 기술은 아직 갈 길이 많이 남아있습니다. 하지만 한 가지 분명한 것은, 수소는 절대 포기할 수 없는 미래의 에너지라는 사실입니다.

A



석원경 교수가 답하다

스프레이의 구조는 비교적 간단합니다. 높은 압력을 견딜 수 있는 병이나 캔에 여닫을 수 있는 작은 구멍의 밸브를 달아놓은 것이 전부입니다. 밸브를 누르면 용기 속 액화 상태의 물질이 작은 구멍을 통해 에어로졸 형태로 분사됩니다. 에어로졸은 100 μ m보다 작은 크기의 액체 방울이나 고체 입자입니다. 구름과 안개는 공기 중 수증기가 뭉쳐져 만들어진 에어로졸이고, 연기는 장작, 낙엽 등의 연소 과정에서 배출된 에어로졸입니다.

스프레이, 전장의 군인을 위해 개발돼

스프레이는 방향제, 살충제, 의약품, 페인트 등 일상에서 자주 볼 수 있습니다. 맑은 화장수를 분사하는 ‘미스트’도 스프레이의 일종이고, 경찰이 거칠게 반항하는 범죄 용의자에게 뿌리는 최루 스프레이나 일반인이 호

신용으로 들고 다니는 스프레이도 있습니다. 이처럼 일상 곳곳에서 이용되는 스프레이는 1927년 노르웨이의 엔지니어 에릭 로테임이 개발했습니다. 그는 자신이 제조한 스프레이로 미국 시장까지 노렸으나, 상업적으로 성공을 거두지는 못했습니다.

이후 제2차 세계대전 중 미국 정부에서 스프레이를 본격적으로 사용하기 시작했습니다. 열대 지역에 주둔하던 군인들을 위해 모기 퇴치제 스프레이를 만든 것이었죠. 열대 지역은 말라리아로 사망한 군인의 수가 상당할 정도로 말라리아를 옮기는 모기가 많았습니다. 1941년 미국 정부는 살충제를 분사하는 스프레이를 개발했습니다. 손에 짚 수 있을 만큼 작은 크기의 철제 캔에 액화 가스를 추진제로 넣어 다이클로로다이페닐트라이클로로에테인(DDT) 등의 살충제를 뿌리는 용도로 사용했습니다. 전장에 있는 군인들에게는 기적과도 같은 제품이었죠. 전쟁이 끝난 뒤에는 민간인들 사이에서도 인기를 끌었습니다. 사람들은 스프레이 방식의 살충제를 ‘벌레 폭탄(bug bomb)’이라고 불렀습니다. 1970년대까지 많이 사용했던 ‘모기약’이 전쟁의 산물이었던 셈입니다.

LPG, 저렴하고 안전한 최적의 추진제

스프레이에 소비자가 만족할 수 있을 정도의 강한 추진제를 넣으려면 스프레이 용기의 압력이 매우 높아야만 합니다. 그런데 기체의 압력이 높아지면 폭발의 위험이 커집니다. 에어로졸이 분사되는 강도도 지나치게 세집니다. 그만큼 용기도 튼튼하게 만들어야 하죠. 이 모든 것을 고려했을 때 강한 추진제를 만들 수 있는 가장 효과적인 방법은 상온에서의 증기압이 대기압보다 조금 높은 물질을 추진제로 사용하는 것입니다. 용기 속에



서 추진제는 대부분 액체 상태고, 일부만 기체로 증발한 상태로 존재합니다. 스프레이를 사용하면 이런 액체 상태로 있는 추진제가 기체로 증발하게 됩니다. 이때 스프레이에서 에어로졸이 분사되는 강도는 추진제의 증기압으로 결정됩니다.

오늘날 스프레이의 추진제로는 주로 액화석유가스(LPG)를 이용합니다. LPG는 정유공장에서 휘발유나 경유를 생산하는 과정에서 부산물로 얻어 집니다. 증기압이 약 21°C에서 8.5기압 정도인 프로페인과 약 10°C에서 1.7기압 정도인 뷰테인의 혼합물이죠. 추진제의 압력은 프로페인과 뷰테인의 비율로 조절합니다. LPG는 값이 싸고, 냄새가 나지 않으며 독성이 없습니다. 또 스프레이의 용기를 부식시키지도 않고, 스프레이를 비교적 안전하게 생산하고 사용할 수 있는 것도 장점입니다. 그래서 페인트, 살충제를 비롯한 스프레이는 LPG를 추진제로 사용합니다. 단, 향수와 같은 화장품, 의료용 스프레이, 식품을 담은 스프레이 용기에는 LPG를 사용하지 않습니다. 건강에 문제를 일으킬 수 있기 때문입니다. 실제로 LPG 성분 중 뷰테인이나 프로페인을 흡입하면 환각 증상, 산소 부족으로 인한 질식 증상 등이 나타나고, 폐렴이나 심장마비를 일으킬 수도 있습니다.

이런 LPG를 대체할 수 있는 물질로 한때 염화플루오린화 탄소가 주목 받은 적이 있었습니다. CFC는 미국의 화학자 토머스 미즐리가 개발한 가스인데요, '프레온'이라는 상품명으로 더 유명합니다. 이는 본래 가정용

냉장고와 에어컨의 냉매로 개발됐습니다. CFC는 화학적으로 매우 안정적인 물질로 건강에 유해하지 않습니다. 색과 냄새가 없고, 혀에 닿아도 아무런 맛이 나지 않습니다. 프레온의 한 종류인 프레온-12는 약 20°C에서 증기압이 4.3기압 정도고, 프레온-11은 상온에서 0.803기압 정도입니다. 가격이 LPG보다 조금 비싸지만, 화장품이나 의약품용 스프레이로는 제격이었죠.

그러나 CFC가 화학적으로 너무 안정한 것이 오히려 문제가 됐습니다. 공기 중에 배출된 CFC는 부서지지 않은 상태로 대기 중에서 50년 이상 떠다닐 수 있습니다. 공기에 떠다니던 CFC가 40km 고도의 성층권으로 올라가면 문제가 됩니다. 성층권에는 오존층이 존재하는데요. 이 오존층은 우주에서 지구로 들어오는 자외선을 흡수해 지구 표면에 도달하는 자외선량을 조절해 줍니다. 이 오존층 덕분에 육상 생물이 출현했죠. 그런데 CFC가 성층권으로 올라가면 아직 오존층이 걸러주지 않은 햇빛 속 강력한 자외선이 CFC를 부숩니다. 그 결과 염소 원자가 방출되죠. 이렇게 떨어져 나온 염소는 성층권에 있는 오존층을 파괴합니다. 1977년 미국은 '청정 대기법 수정법안'을 내놓으면서 대기 중에 CFC가 방출되는 것을 규제하기 시작했습니다. 그리고 1989년 몬트리올 의정서에 의해 CFC는 전 세계적으로 생산, 사용이 금지됐죠.

아직도 LPG, CFC를 대신할 완벽한 스프레이 추진제는 나오지 않았습니다. 일각에선 CFC를 대신해 오존층 파괴를 걱정할 필요가 없는 수소 플루오린화 알케인(HFA) 또는 수소 플루오린화 올레핀(HFO)을 추진제로 사용하기도 합니다만 이 역시 기존 용매에 비해 비싸고, 불에 탈 수 있고, 온실효과가 큰 것이 문제입니다.

Chapter 3. 공장-지구에서

Q

24

액화 질소는
어떻게 영하 196°C를
만드나요?



A



석원경 교수가 답하다

질소는 주로 기체 상태로 존재합니다. 기체 상태의 질소를 모아 섭씨 영하 약 196°C도 까지 온도를 낮추면 액체 상태로 변합니다. 이런 액체 상태의 질소를 액화 질소, 또는 액체 질소라고 부릅니다. 액체 질소는 매우 차가워, 다른 물질을 급속으로 얼릴 수 있습니다. 그래서 매우 다양한 분야에서 이용됩니다.

액체 질소의 놀라운 능력은 장미꽃 실험에서 확인할 수 있습니다. 액체 질소에 장미꽃을 넣으면 순간적으로 쫄쫄 얼어 딱딱해집니다. 그대로 장미꽃을 단단한 바닥에 떨어뜨리면 유리처럼 산산조각이 나버립니다. 이때 더 신기한 일이 발생합니다. 부서져 있는 장미꽃 조각을 온기가 있는 따뜻한 손으로 집으면 언제 그랬냐는 듯이 장미꽃의 본래 부드러운 질감이 되 살아납니다. 유리판에 액체 질소를 부으면 유리판이 순간적으로 깨져버리는 모습도 볼 수 있습니다. 마치 마술을 보는 것처럼 신기한 경험입니다.

액체 질소 주변으로 연기가 나는 이유

액체 질소는 공기를 이용해서 생산합니다. 공기의 78%가 질소이기 때문에 액체 질소의 원료는 어디에서나 쉽게 구할 수 있습니다. 대부분의 액체 질소는 제철 공장에서 사용하는 액체 산소를 만드는 과정에서 부산물로 생산합니다. 만일 액체 질소가 소량 필요하다면 공기를 고압으로 압축한 뒤 ‘줄-톰슨 효과’를 이용해 팽창 시켜 만들 수도 있습니다. 액화된 공기를 ‘초저온 증류법’으로 분리하는 방법도 있습니다. 산소보다 질소가 흡착이 더 잘 되는 제올라이트의 특성을 이용한 ‘압력 스윙 흡착 방법’도 사용합니다.

액체 질소는 대부분 보온병에 넣어둡니다. 보온병 속 액체 질소는 느린 속도로 끓으며 기화돼 사라집니다. 액체 질소가 기화되면 부피가 700배 이상 늘어나니 주의가 필요합니다. 소량의 액체 질소를 담은 보온병의 경우에는 기화된 질소가 쉽게 빠져나가도록 일부러 뚜껑을 덮지 않습니다. 그러나 대량의 액체 질소를 저장하거나, 운반할 때는 단열된 특수 고압 탱크를 사용해야 합니다.

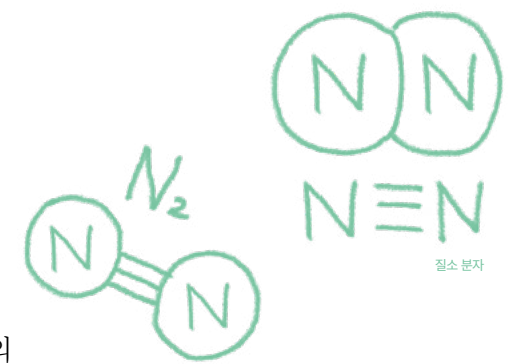
액체 질소가 빠르게 증발하면 주변에 흰 연기가 모락모락 피어오릅니다. 흔히 질소가 응축된 것이라고 오해하기도 하죠. 그러나 이는 액체 질소가 증발하는 과정에서 주위 공기의 온도가 떨어져 공기 중 수증기가 냉각돼 나타나는 현상입니다.

액체 질소는 모든 것을 얼려버릴 정도로 차갑습니다. 액체 질소가 피부에 닿으면 순간적으로 피부가 얼어버립니다. 자칫 동상에 걸릴 수도 있습니다. 그래서 액체 질소 방울이 튀어서 피부나 눈에 닿지 않도록 조심해야 합니다. 액체 질소를 다룰 때는 반드시 단열과 방수가 되는 특수 장갑



을 착용해야 하죠.

액체 질소가 이토록 차가운 건, 바로 질소가 기체로 변하는 끓는 점이 영하 약 196°C로 매우 낮기 때문입니다. 액체와 기체가 함께 존재하는 온도를 뜻하는 끓는점은 물질의 고유한 성질입니다. 액체 상태인 물질이 있을 때 온도를 계속 높이다 보면, 끓는점에 도달합니다. 이때 운동 에너지를 많이 가진 분자는 기체로 변해 공간을 자유롭게 날아다니고, 운동 에너지가 없는 분자만 액체 상태로 남아 있습니다.



생명체에 없어서는 안 될 질소

액체 질소는 차가울 뿐만 아니라 화학적으로 반응성도 매우 낮습니다. 질소 원자 2개가 삼중 결합으로 워낙 단단하게 결합하고 있기 때문입니다. 그래서 질소 기체만 들어 있는 통 속에서는 촛불도 꺼지고, 생물도 질식해 버립니다. 질소의 본래 뜻도 실은 '질식을 일으키는 원소'입니다. 질소를 뜻하는 독일어 'Stickstoff'도 같은 뜻입니다. 국제적으로 쓰고 있는 'nitrogen'은 질소가 많이 들어 있는 칠레 초석을 나타내는 프랑스어 'nitre'에서 유래된 것입니다.

반응성이 낮다고 질소가 쓸모없는 것은 아닙니다. 질소는 모든 생물이 소중하게 쓰고 재활용하는 매우 중요한 원소입니다. 인간의 건강에 꼭 필요한 단백질을 만드는 아미노산과 유전 정보를 담고 있는 핵산 모두 질소의 화합물입니다. 질소가 없으면 어떤 생물도 목숨을 이어갈 수 없습니다.

액체 질소는 병원에서도 꼭 필요합니다. 가령 병원에서 피부에 불룩하게 돋아난 사마귀를 치료할 때, 액체 질소로 사마귀를 급속 냉동시키면 간단하게 떼어내며 제거할 수 있습니다. 수술 중에 환자의 몸에서 떼어낸 조직이나 환자에게 수혈할 혈액을 임시로 저장해 둘 때도 액체 질소를 사용합니다.

그밖에 병원이나 생명과학연구실에서 세포나 박테리아를 배양한 뒤 보관할 때도 액체 질소를 사용합니다. 액체 질소로 생물 시료를 급속 냉동하면 세포 내 조직이 파괴되지 않습니다. 또 정자와 난자를 연구용으로 장기간 보관할 때도 필요하죠.

차가운 액체 질소는 실생활에서도 유용하게 쓰입니다. 근래에 개발된 ‘분자요리’에서도 액체 질소로 아이스크림을 만들죠. 우유 방울을 액체 질소에 떨어뜨리면 구슬 아이스크림이 만들어집니다. 우유에 액체 질소를 불어 넣어도 아이스크림이 되고요. 아이스크림에 질소가 남는 것을 걱정할 필요는 없습니다. 질소는 금세 공기 중으로 날아가 버립니다.

냉동인간에서 자기부상열차까지… 미래 기술 실현할 질소

살아 있는 개구리를 액체 질소에 5초 동안 넣으면, 개구리도 장미꽃처럼 쫄쫄 얼어버립니다. 그렇다고 개구리가 죽은 것은 아닙니다. 쫄쫄 언 개구리를 차가운 얼음물에 넣어두면 얼마 뒤에 개구리는 정신을 차리고 신나게 헤엄치죠. 변온동물인 개구리는 체온이 떨어지면 겨울잠을 자는 생리적 특성이 있습니다. 개구리의 혈액과 세포액에는 낮은 온도에서도 얼지 않도록 해주는 부동액 성분이 들어 있습니다. 다른 동물로 실험해서는 같은 실험 결과를 얻을 수 없습니다.

그런데 액체 질소로 인간을 급속 냉동시킨 뒤 훗날 복원하는 연구가 현실에서 이뤄지고 있습니다. 즉 냉동인간을 만들려는 것이죠. 이는 개구리 겨울잠 실험과는 차원이 다른 시도입니다. 미국의 알코어 생명연장재단은 현재 액체 질소 탱크 속에 170여 명의 냉동인간을 보관하고 있다고 알려졌습니다. 냉동인간은 우선 죽음을 경험한(?) 특수한 상황의 사람만 가능합니다. 죽은 뒤 몸에 심폐 소생 장치를 연결해 호흡과 혈액 순환 기능을 되살린 사람이죠.

냉동인간을 만들기 위해서는 이런 사람들의 몸속 혈액을 모두 빼내고, 대신 혈관에 동결 억제제 다이메틸설폭사이드(DMSO)를 채워 넣습니다. 그리고 이 상태로 냉동인간이 깨어나길 희망한 날까지 액체 질소 탱크 속에 넣어둡니다. 훗날 실제로 냉동인간을 되살릴 수 있을지는 미지수입니다. 특히 냉동시켰던 뇌를 정상적인 기능을 하도록 복구하는 일은 쉽지 않을 겁니다.

이밖에도 액체 질소는 액체 헬륨을 사용해 온도를 낮추는 초전도체에도 쓰입니다. 초전도 현상은 극저온에서만 이뤄지는데, 액체 질소는 액체 헬륨의 냉기가 빠져나가지 않도록 가둬주는 역할을 하죠. 전기 저항이 없는 초전도체에서는 전류에 의한 열 손실이 발생하지 않기 때문에 많은 양의 전류를 흘려줄 수 있습니다.

이런 초전도체로 코일을 만들면 강한 자기장을 내는 초전도 전자석을 만들 수 있습니다. 초전도 전자석은 병원 정밀검사에 쓰이는 자기공명영상 장치, 단백질 등의 분석에 사용하는 초강력 핵자기공명 장치, 분자의 질량을 측정하는 질량분석기 등에 쓰입니다.

또 초전도체를 사용한 자기부상열차도 개발하고 있습니다. 기차가 선로 위에 떠 있는 상태로 운행할 수 있으면 마찰에 의한 에너지 손실이 줄어

듭니다. 진동과 소음도 사라질 겁니다. 초전도체를 사용한 자기부상열차는 미래의 편안하고 효율적인 교통수단이 될 것으로 예상됩니다. 액체 질소가 미래 기술을 실현하는 데 중요한 ‘키(key)’를 쥐고 있는 셈입니다.

Chapter 3. 공장-지구에서

Q

25

만약 세상에
산과 염기가 없다면
어떤 일이
생길까요?



A



이덕환 교수가 답하다

인간의 몸, 자연과 지구의 필수 요소인 산과 염기가 사라진다면 무슨 일이 일어날까요. 단순하게 생각하면 오렌지, 레몬, 김치, 식초 등 음식에서 새콤한 맛은 더 즐길 수 없습니다. 염기성을 띠는 비누, 샴푸 등의 미끈거림도 더 느끼지 못할 겁니다. 나아가 지구상의 생명체가 모두 사라져버릴 수도 있습니다. 우리 몸에서 일어나는 생리작용이 모두 뒤죽박죽이 돼버리기 때문이죠. 생각만 해도 끔찍한 일입니다. 산과 염기가 없는 세상은 화학적으로 의미가 없는 메마른 곳이 될 것입니다.

산과 염기에 대한 새로운 정의

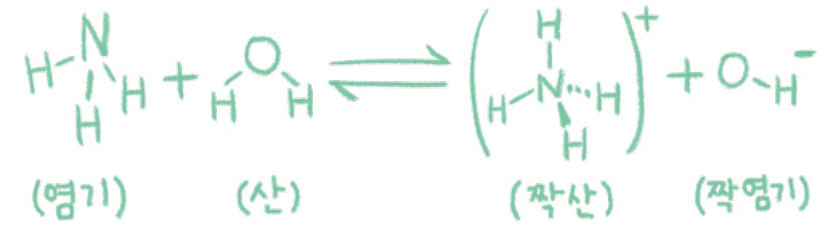
이처럼 강력한 힘을 가진 산과 염기의 정체는 무엇일까요. 본래 ‘산(acid)’은 신맛을 내는 물질, ‘염기(base)’는 쓴맛을 내며 소금과 같은 염을 만드는

물질로 정의했습니다. 그런데 현대 화학에서는 산과 염기를 좀 더 다양하게 정의합니다. 스웨덴의 화학자 스반테 아레니우스는 물에 녹이면 수소 이온(H^+)이 나오는 염산(HCl), 질산(HNO_3), 황산(H_2SO_4), 아세트산(CH_3COOH)과 같은 물질을 산, 수산화 소듐(NaOH)이나 수산화 포타슘(KOH)처럼 수산화 이온(OH^-)이 나오는 물질을 염기라 불렀습니다.

수소 원자에서 전자가 떨어져 나가고 양성자만으로 만들어진 수소 이온은 물속에서 다른 물 분자와 강하게 뭉쳐진 상태로 존재합니다. 이런 덩어리를 하이드로늄 이온(H_3O^+)이라고 합니다. 그런데 산으로 분류되는 아세트산을 암모니아(NH_3) 용액에 넣으면 수소 이온 대신 암모늄 이온(NH_4^+)이 나옵니다. 그래서 덴마크의 화학자 요하네스 브뤼스테드와 영국의 화학자 토머스 로우리는 산이 내놓은 수소 이온을 받아들이는 물질을 염기로 정의했습니다. 그렇다면 위에 얻어진 암모늄 이온은 반대로 수소 이온을 내놓을 수 있기에 이를 짝산이라고 부릅니다. 수용액에서만 적용되는 아레니우스의 이론을 물이 아닌 용매나 기체 상태에도 적용할 수 있도록 확장한 것입니다.

미국의 화학자 길버트 루이스는 수소 이온 대신 전자쌍을 이용해서 산과 염기를 정의했습니다. 중화반응에 필요한 전자쌍을 받아들이는 물질을 산, 전자쌍을 제공해주는 물질을 염기라고 정의했습니다. 중화반응은 화학반응 중에서 가장 빠르게 일어나는 반응입니다.

산과 염기가 정확하게 1대 1로 만나면 염과 물이 만들어지는 중화반응이 일어납니다. 염산과 수산화 소듐은 모두 독성이 강한 물질인데요. 이 둘이 물속에서 만나 반응하면 놀랍게도 강력한 독성이 흔적도 없이 사라집니다. 황당하게도 우리가 반드시 먹어야 하는 소금이 녹아있는 짠물이 만들어집니다. 한편 물 분자도 하이드로늄 이온과 수산화 이온으로 분리



된 상태로 존재할 때가 있습니다.

똑같은 물 분자 중에서 하나는 하이드로늄 이온을 내놓은 산이 되고, 다른 하나는 수산화 이온을 내놓는 염기가 됩니다. 반대로 하이드로늄 이온과 수산화 이온이 만나서 결합하면 중화반응이 일어나 물이 생성되죠. 이를 물의 ‘자기 이온화 반응’이라고 부릅니다.

섭씨 25°C인 순수한 물 1L에는 언제나 수소 이온과 수산화 이온의 양이 각각 10^{-7}M (몰농도·1L당 몰 수)로 일정하게 유지됩니다. 그래서 물속에 들어 있는 수소 이온과 수산화 이온의 농도를 몰 농도로 나타낸 뒤, 그 값을 곱하면 언제나 10^{-14}M 입니다. 입자 수가 일정하게 유지되는 물의 평형은 산과 염기를 넣어도 깨지지 않습니다. 산을 넣어서 하이드로늄 이온의 농도가 커지면, 상대적으로 수산화 이온의 농도는 줄어듭니다.

산성과 염기성, 수소이온농도(pH)로 구분

물속에 수소 이온이 녹아있는 양은 수소이온농도(pH)로 표시합니다. 수소 이온의 농도를 수학적 방법으로 계산해 나타낸 것이 pH입니다. pH는 1~14 사이의 값을 가지며, 산과 염기 모두 넣지 않은 중성 용액의 pH는 7입니다. 이 수치가 7보다 작으면 산성 용액, 7보다 크면 염기성 용액을 뜻합니다. 수용액의 pH는 유리 전극이 달린 ‘pH 측정기’나 여러 지시약을 이용해서 만든 ‘pH 종이’로 확인할 수 있습니다.

우리 몸에서 일어나는 생리작용은 이런 pH에 매우 민감하게 반응합니

다. 혈액과 세포액의 pH는 언제나 약 7.4가 유지돼야 합니다. 그래서 병원에서 환자에게 링거액을 놓을 경우, 환자의 나이, 성별, 인종에 상관없이 링거액의 pH는 모두 7.4입니다. 혈액에는 이산화 탄소가 물에 녹아서 만들어지는 탄산수소 이온(HCO_3^-)과 탄산(H_2CO_3)이 들어있는데, 이들이 pH가 항상 일정한 값을 유지할 수 있도록 도와줍니다.

pH가 0.1이라도 변하면 우리 몸에는 이상이 생깁니다. 높은 산에 올라갈 때 나타나는 고산병이 대표적입니다. 산소가 부족한 고지대에 가면 산소 부족으로 호흡이 가빠지면서 혈액에 녹아있던 이산화 탄소가 다량 빠져나갑니다. 그 결과 혈중 pH가 증가해 고산병 증상이 나타나는 것이죠.

pH는 식물의 색도 결정짓습니다. 가령 수국의 푸른색이나 붉은색, 장미꽃의 붉은색은 모두 안토시아닌(anthocyanin)의 색깔인데, 안토시아닌은 용매의 산도에 따라 색깔이 달라집니다. 산성 용액에서는 붉은색, 중성 용액에서는 보라색, 염기성 용액에서는 푸른색입니다. 크기가 세상에서 가장 작은 원소인 수소 이온이 거대한 분자의 색깔을 바꿔놓는 화학의 신비입니다.

한편 염기는 알칼리라고 부르기도 합니다. 그러나 암모니아처럼 단순히 염기가 많이 들어있는 화합물을 ‘알칼리성’이라고 하는 것은 적절하지 않습니다. 보통 스포츠음료를 ‘알칼리 음료’라고 부르는 이유는 음료의 pH가 7보다 커서가 아니라, 음료에 알칼리 금속의 이온이 들어 있기 때문입니다. 사실 스포츠음료는 산성을 띠는 달콤한 소금물입니다.

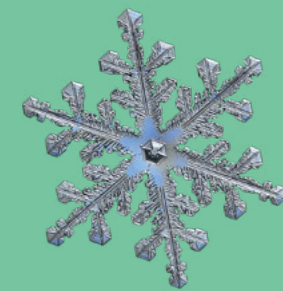
식품을 산성과 알칼리성으로 구분하기도 합니다. 그런데 이는 스위스의 한 의사가 식품을 완전히 태운 뒤, 남은 재로 만든 엉터리 구분법입니다. 실제로 우리가 섭취하는 식품은 몸속에서 완전히 연소하지 않기 때문이죠. 그러니 식품을 알칼리성이라는 하는 말에 현혹되지 마시길 바랍니다.

Chapter 3. 공장 지구에서



26

눈은
어떻게 결정을
이루나요?



A



이덕환 교수가 답하다

추운 겨울 하늘에서 펑펑 쏟아지며 길가에 수북하게 쌓이는 하얀 함박눈은 눈부시게 아름답습니다. 그러나 겉으로 보이는 설경이 아름다움의 전부가 아닙니다. 눈 속을 현미경으로 자세히 들여다보면 육각형 가지 모양이 반복된 눈송이가 보이는데, 이는 설경의 아름다움과는 비교할 수 없을 정도로 아름답고, 매혹적입니다.

<광부>

한 사람이 말했네
산봉우리에 올라도
볼 수 없는 것이 있다고
그 사람은 광부였다네
-로알드 호프만

미국 화학자 로알드 호프만은 이런 눈송이 아름다운 모습을 ‘광부’라는 시로 표현했습니다. 호프만은 1981년 ‘화학반응 경로에 관한 이론’으로 노벨화학상을 받은 뒤, 시인으로 활동해 ‘화학의 시인’이라고 불립니다.

호프만의 시에는 높은 산 정상에 위에서 보는 자연, 설경만으로는 눈의 진짜 모습을 볼 수 없다는, 눈의 진정한 아름다움은 광부처럼 땅속을 깊이 파고 들어가야 비로소 알 수 있다는 의미가 담겨 있습니다. 과학의 눈으로 자세히 보면 더 아름다운 눈송이가 보인다는 뜻입니다.

천문학자가 밝혀낸 눈송이의 속살

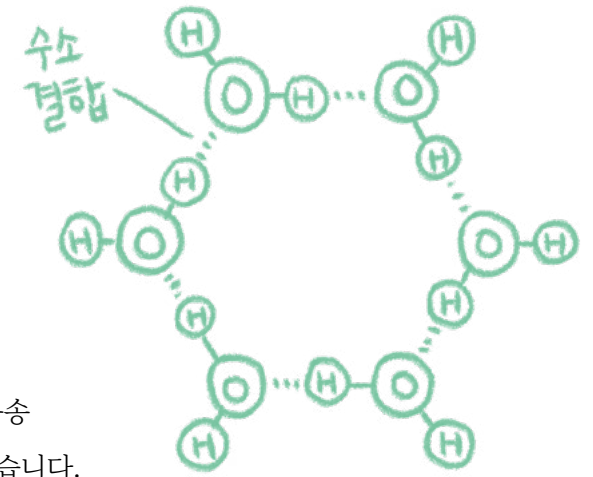
흰 눈을 묘사하라면 사람들은 너도나도 육각형 모양의 눈송이를 그립니다. 수많은 사람이 눈송이를 자기만의 방식으로 다양하게 표현하지만, 사실 진짜 눈송이를 본 사람은 소수입니다. 눈송이를 관찰하는 일이 생각처럼 쉽지 않기 때문이죠. 손바닥에 내려앉은 눈은 순식간에 녹아 사라집니다. 길가에 쌓인 눈을 들여다봐도 육각형 눈송이는 보이지 않습니다.

육각형 모양의 눈송이를 처음 본 사람은 르네상스 시대의 천문학자 요하네스 케플러였습니다. 케플러는 행성의 운동에 대한 ‘케플러의 행성운동법칙’을 발표한 과학자로 유명합니다. 케플러는 돋보기로 육각형 모양의 눈송이를 확인했고, 그 속에서 육각형 모양의 대칭성도 찾아냈습니다.

1611년, 케플러는 마침내 눈송이 연구를 토대로 한 ‘육각형 눈송이에 대하여’라는 논문을 발표했습니다. 물은 작은 알갱이로 구성돼 있고, 이런 알갱이가 모여 독특한 육각형의 눈송이를 만든다는 내용이었습니다. 물질을 구성하는 원소는 물론, 물 분자의 존재도 알지 못했던 시절에 정말 굉장한 통찰력이었죠.



당시 프랑스의 철학자이자 수학자인 르네 데카르트와 영국의 철학자 로버트 훅도 육각형 눈송이에 감춰진 비밀을 밝히기 위해 굉장히 공들였다고 합니다. 특히 수학자였던 데카르트는 눈송이를 12가지 종류로 분류하기도 했습니다.



과학이라는 학문이 없던 시대여서 자연의 원리 등을 밝혀내는 일은 모두 철학자의 역할이었습니다. 다만 사람보다 자연에 관심이 많은 철학자를 ‘자연학자’라고 불렀을 뿐입니다. 눈송이를 연구하던 데카르트 덕에 철학과 과학이 서로 다른 학문으로 분리됐습니다.

별별 눈송이 만드는 핵심, ‘온도’와 ‘바람’

눈송이는 사람의 지문처럼 저마다 고유한 특징이 있어 다양한 모습으로 존재합니다. 같은 모양의 눈송이를 찾는 일이란 사실상 불가능합니다. 눈송이 사진을 최초로 촬영한 사람은 미국 버몬트에 살고 있던 농부 윌슨 벤틀리였습니다. 벤틀리는 직접 제작한 특수 카메라를 이용해 46년 동안 무려 5000장이 넘는 눈송이의 모습을 촬영했습니다. 수천 개의 서로 다른 눈송이 사진에서 눈송이 모양은 모두 고유한 특징이 있다는 사실을 시각적으로 증명한 셈입니다. 이후 미국 기상청의 물리학자 윌리엄 험프리스와 함께 눈송이 사진 2400장을 담은 책 ‘눈 결정’을 출간하기도 했습니다. 하지만 눈송이가 여러 가지 형태로 만들어지는 과정은 알지 못했죠.

1954년 일본 도호쿠대 물리학자이자 수필가인 나카야 우키치로 교수는

벤틀리의 눈송이 결정의 사진을 본 뒤 눈송이 연구를 시작했습니다. 토끼 털을 넣은 상자를 이용한 실험으로 눈송이를 만들어냈죠. 그는 상자 속을 차갑게 만든 뒤, 강한 바람과 다량의 수증기를 불어넣었습니다. 그러자 상자 속에 넣어둔 토끼털 끝에 온갖 형태의 눈송이가 생겼습니다. 토끼털이 눈송이를 만드는 결정핵 역할을 했던 것입니다.

눈송이는 실제로 습도가 매우 높은 저기압에서 상승하다가 차가운 고기압과 부딪힐 때 눈구름 속에서 만들어집니다. 차가운 눈구름 속에서 발생한 작은 얼음 조각이 강한 바람을 만나면, 구름 속 물 분자들이 이 얼음 조각에 달라붙으며 눈송이가 되죠. 특히 물 분자는 얼음 조각의 매끄러운 면보다 얼음 모서리 등 모난 곳에 더 잘 달라붙습니다.

이후 케네스 리브레히트 미국 캘리포니아공대 물리학과 교수는 눈송이가 다양한 형태로 자라는 이유를 밝혀냅니다. 그는 눈송이가 자라는 모양은 공기 중 수증기의 양과 온도, 구름 속 바람의 속도 등에 따라 달라진다는 사실을 알아냈습니다. 온도가 매우 높거나 낮으면 밋밋한 육각형 기둥 모양이 되고, 영하 10~20°C에서는 잔가지가 많이 달린 육각형 눈송이가 된다는 사실도요. 주변 온도와 물이 어는 속도에 따라 육각형 기둥을 이루는 각 면의 성장 속도가 달라지기 때문입니다.

눈송이의 비밀, 물 분자에서 찾아

물 분자가 아름다운 눈송이를 만들 수 있는 이유는 물 분자가 독특한 화학적 특징을 가지고 있기 때문입니다. 눈송이 안에 약 100경 개의 물 분자가 들어 있는 것도 한몫하죠. 물 분자는 중심에 산소 원자 하나를 두고 양쪽에 두 수소 원자가 104.5도의 각도로 결합한 형태입니다. 산소와 수소

는 강력한 공유결합으로 연결돼 있죠. 이때 산소는 전자를 끌어당기는 전기음성도가 매우 크고, 수소는 전기음성도가 매우 작아 공유결합을 만드는 전자의 분포는 산소 쪽으로 치우치게 됩니다.

전자 분포의 치우침 때문에 물 분자에서 산소는 음전하를 띠고, 수소는 양전하를 띠는 극성 분자가 됩니다. 산소와 수소가 전하를 띠다고 하지만, 매우 약해 극성도 약합니다. 이런 물 분자 여러 개가 모이면 물 분자 간 수소결합이 생깁니다. 비록 수소결합은 공유결합의 절반 정도로 약한 결합이지만 물과 얼음의 물리적, 화학적 성질에 상당한 영향을 미칩니다. 가령 1기압에서 물의 녹는점(0°C)과 끓는점(100°C)이 다른 물질에 비해 유난히 높은데, 이는 바로 수소결합 때문입니다. 만약 이 수소결합이 없었다면 물의 끓는점은 영하 80°C 정도로 매우 낮아져, 상온(25°C)에서 물은 수증기 상태로 존재했을 겁니다.

액체인 물이 얼어 고체인 얼음이 되면 부피가 늘어나는데, 이것 역시 물 분자가 수소결합을 하므로 일어나는 현상입니다. 물이 얼음으로 변할 때 물 분자 사이에 빈 공간이 생겨 부피가 커지기 때문이죠. 빙산이 물 위에 떠다니고, 강과 호수의 물이 위쪽에서부터 얼고, 겨울에 장독대와 수도 파이프가 본래 부피를 못 견디고 터지는 것도 같은 이유 때문입니다. 물은 4°C에서 이 수소결합의 효과가 가장 크게 나타나는데, 이때 밀도가 0.99997g/mL로 가장 커집니다.

1.26186차원의 프랙털 도형 ‘코흐의 눈송이’

수학에서도 눈송이가 등장합니다. 수학에는 커다란 육각형 가지 하나에 수많은 잔가지 붙어 있는 눈송이 모양이 있는데, 이를 프랙털 구조라고

부릅니다. 프랙털은 일부 작은 조각이 전체와 유사한 모습을 띠는 기하학적 형태를 뜻합니다. 바닷가 모래알로 만들어지는 해안선도 프랙털 도형입니다.

1904년 스웨덴의 수학자 헬리에 본 코흐는 수학적 방법으로 눈송이 모양을 닮은 프랙털 도형을 만들었습니다. 그리고 그 도형에 ‘코흐의 눈송이(코흐 곡선)’라고 이름 붙였습니다. 코흐의 눈송이는 3단계로 만들어집니다. 우선 정삼각형을 그린 뒤, 각 변을 삼등분합니다. 각 변의 가운데 부분을 밑변으로 다시 정삼각형을 그린 뒤, 가운데 부분은 지웁니다. 이 과정을 반복하면 눈송이 모양이 나옵니다. 코흐의 눈송이는 선으로 둘러싸인 영역의 넓이는 유한한데, 선이 계속 분할되면서 둘레 길이는 무한히 커진다는 점이 특징입니다. 훗날 프랑스와 미국의 물리학자 브누아 망델브로는 이런 도형에 프랙털이라는 이름을 붙였습니다.

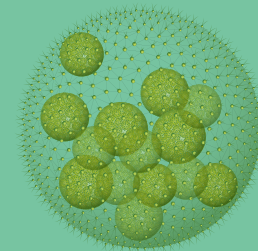
프랙털의 독특한 특징은 차원의 문제가 발생시켰습니다. 기하학에서 점은 0차원, 선은 1차원, 평면은 2차원, 그리고 입체는 3차원이라고 정의합니다. 그런데 코흐의 눈송이는 각 변의 모든 점이 끊임없이 방향 전환을 합니다. 마치 일자로 늘어져 있는 긴 실이 있는데, 실의 여러 부분에서 보풀이 올라온 것 처럼요. 한 변만 보더라도 이를 정상적인 선이라고 부를 수 없습니다. 그렇다고 평면이라고 부를 수도 없고요. 이후 수학자들은 연구 끝에 코흐의 눈송이는 1차원과 2차원의 사이인 1.26186차원이라고 정의했습니다. 눈송이는 이처럼 수학적으로도 독특한 존재감을 뽐내고 있습니다.

Chapter 3. 공장 지구에서

Q

27

동요 ‘초록바다’처럼
바다에도
녹조가 생길 수
있나요?



A



이덕환 교수가 답하다

<초록 바다>

초록빛 바닷물에 두 손을 담그면

초록빛 바닷물에 두 손을 담그면

파란 하늘빛 물이 들지요

어여쁜 초록빛 손이 되지요

누구나 한 번씩은 초등학교 음악 시간에 동요 ‘초록 바다’를 불러봤을 겁니다. 그런데 노래를 부르다 보면 조금 이상한 점이 보입니다. 일반적으로 바닷물은 파란색으로 보이는데, 동요에서는 바닷물의 색을 초록빛으로 표현했죠. 혹시 녹조 현상을 보고 동요를 만든 건 아닐까 하는 의구심이 듭니다.

하지만 과학적으로 초록빛의 녹조는 바다에서는 발생하지 않습니다. 녹

조는 오염된 민물이 고여 있는 강이나 호수에서 나타납니다. 짙물인 바다에서는 초록빛 녹조가 아니라 붉은색 적조가 생깁니다. 동요를 좀 더 진지하게 따져보면, 초록빛 바닷물에 손을 담가도 손이 파란 하늘빛으로 물들 일은 없습니다. 동요는 어디까지나 어린이들에게 상상의 세계를 열어주기 위한 노래이니 파헤치는 건 여기까지만 하겠습니다.

흡수하는 빛의 파장에 따라 바다색 달라

물 분자는 산소 원자 1개에 수소 원자 2개가 수소결합을 이룬 형태입니다. 수소결합으로 분자는 극성을 띠게 되고, 그 결과 수소 핵 주위에 전자구름이 형성됩니다. 빛이 원자나 분자에 닿으면 이 전자구름이 진동하며 빛을 흡수하거나 반사합니다.

물 분자는 흔히 사람의 눈으로 볼 수 있는 무지갯빛, 즉 가시광선을 흡수하지 않습니다. 아주 정확히는 가시광선 중 600~800nm 파장의 붉은빛을 미량 흡수하긴 합니다만, 그 양이 매우 적기 때문에 유리컵에 담긴 물은 투명하게 보입니다.

물 분자를 둘러싼 전자구름의 모양이 바뀌려면 자외선C(UVC) 정도로 매우 짧은 파장의 빛이 필요합니다. 자외선은 파장이 100~400nm로 가시광선보다 짧은 전자기파입니다. 파장 범위에 따라 3개로 나뉘는데, 자외선C가 파장이 가장 짧고 자외선B(UVB), 자외선A(UVA) 순입니다.

하지만 물이 깊어 빛이 지나가는 경로가 길어지면 상황이 달라집니다. 빛이 물을 통과할 때 파장이 긴 붉은빛은 물 안쪽으로 흡수되고, 남은 푸른빛은 표면에서 반사되기 때문입니다. 바닥이 흰색인 수영장 물에서 반사된 빛이 푸르게 보이고, 수심이 깊은 호수가 초록빛으로 보이는 이유



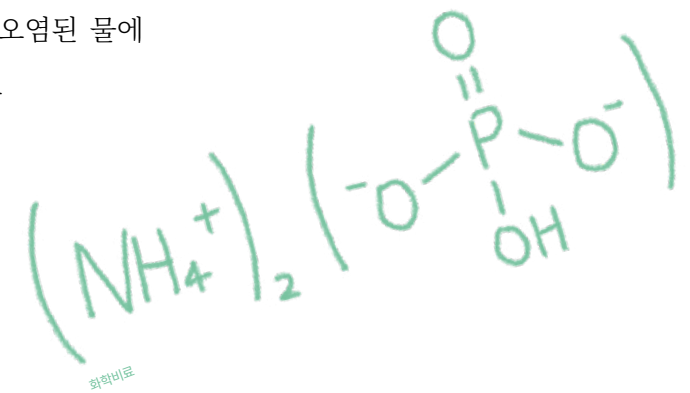
쪼. 바다도 마찬가지로입니다. 햇빛의 방향과 바닷물의 깊이에 따라 바다가 푸른빛으로 보이기도, 초록빛으로 보이기도 합니다. 비슷한 이유로 북극이나 높은 산에 있는 빙하도 신비로운 푸른색으로 보입니다.

한편 수심이 1km 이상인 깊은 물속에는 아예 햇빛이 도달하지 않습니다. 그래서 수심이 깊은 곳에서는 햇빛으로 광합성 하는 수생식물이 생존할 수 없습니다. 깊은 물속은 용존 산소도 적어 어류를 비롯한 수생동물도 찾아보기 어렵습니다. 햇빛, 산소 등에 의존하지 않고 살아가는 심해어종이 있을 뿐이죠.

환경오염이 만든 초록빛 강, 붉은 바다

강, 호수, 바다 등의 색깔은 물 위에 등등 떠 있는 부유물, 식물성 플랑크톤인 조류에 따라서도 달라집니다. 예를 들어 서해 바닷물은 수많은 갯벌 입자들 때문에 회갈색으로 보입니다. 강과 바다의 색을 각각 바꿔놓는 녹조와 적조는 물속에 영양 성분이 과도하게 유입돼 발생하는 부영양화가 원인입니다. 부영양화는 대부분 인간의 활동으로 발생합니다. 질산, 인산 등이 함유된 세제, 농경지에서 발생한 화학비료, 가정에서 배출되는 하수 등이 강이나 바다로 흘러가 부영양화를 일으킵니다.

생활하수나 화학비료로 오염된 물에서 인체는 해로운 독소가 검출됩니다. 식용으로 쓸 수 없는 것은 물론이고, 농업용수, 공업용수 등으로도 사용할 수 없



습니다. 결과적으로 물속에서 서식하는 생물들도 심각한 피해를 봅니다. 특히 유속이 느려 물이 잘 흐르지 않는 호수나 댐에 오염물질이 유입되면 녹조를 일으킵니다. 물에 인(P)과 질소(N) 등의 영양분이 필요 이상으로 공급된 상태로 오랜 시간 머물면 남세균(Cyanobacteria)과 녹조류가 대거 증식해 물을 녹색으로 변화시킵니다.

조류가 너무 많이 증식하면 문제가 커집니다. 물속에서 조류가 견잡을 수 없이 증식하면 걸쭉한 상태로 변해버리죠. 녹차와 우유로 만든 음료 ‘녹차 라떼’에 빗대어 녹조로 오염된 강을 ‘녹조 라떼’라고 부르는 이유입니다. 설상가상으로 조류가 죽으면 사태는 더욱 심각해집니다.

유기물인 조류의 사체가 물속에 사는 세균에 의해 부패하며 악취가 나고, 물속에 녹아있는 용존산소가 고갈됩니다. 그 결과 어류 등 수중에 서식하는 생물이 질식사 죽습니다. 이 사체가 또다시 부패하면서 악순환이 이뤄지죠.

한편 적조는 육지에 가까운 연안에서 일어나는데, 규조류(Bacillariophyceae) 등이 대규모로 번성하는 것이 원인입니다. 국내에서는 코클로디니움(Cochlodinium) 등 170여 종의 조류가 적조를 일으키는 것으로 밝혀졌습니다. 우리나라 대규모 양식장 근처의 연안 바다는 부영양화로 몸살을 앓고 있습니다. 그런가 하면 물색이 분홍색인 경우도 있습니다. 아프리카 세네갈의 ‘장미호수’는 소금물에서 서식하는 살리니박터 루버(Salinibacter ruber) 등의 호염성 세균 때문에 짙은 분홍색으로 보입니다.

부영양화는 인간의 생활과 상관없이 육상의 풍부한 영양분이 강이나 바다로 흘러들어 가며 자연적인 원인으로 발생하기도 합니다. 지구에 인구가 많지 않을 때도 부영양화가 발생했었죠. 지금도 문명의 손길이 닿지 않은 오지나 연안에서도 대규모 부영양화가 관찰됩니다.

견잡을 수 없는 부영양화, 예방이 최선

녹조나 적조를 일으키는 조류가 언제나 생태계를 위협하는 것은 아닙니다. 실제로 남세균은 적어도 30억 년 전에 출현해서 지구상의 거의 모든 지역에서 번성해온 지구 생태계의 터줏대감입니다. 그리고 지금도 조류는 작은 어류의 먹이 역할을 하고 있습니다. 남세균은 광합성을 해서 물속에 산소를 공급해 주기도 합니다. 죽어서 바닥에 가라앉는 조류의 사체는 수생식물의 성장을 도와주는 퇴비입니다.

물론 간 독성을 나타내는 ‘마이크로시스틴’, 신경독소인 ‘아나톡신’ 등을 배출하는 남세균도 있습니다. 녹조류의 사체가 분해되는 과정에서 ‘지오스민’도 배출됩니다. 강물이나 수돗물에서 고약한 흙냄새가 나는 이유는 지오스민 때문이죠. 하지만 대부분의 조류는 적당히만 유지된다면 수중 생태계를 지탱 시켜 주는 기동 역할을 톡톡히 합니다.

부영양화도 아무 때나 일어나지 않습니다. 조류가 급격히 증식할 수 있는 수온과 강한 햇빛 조건이 갖춰졌을 때만 발생합니다. 강물의 유속이나 바닷물의 흐름도 부영양화에 영향을 줍니다. 물이 너무 빠르게 흐르면 증식하던 조류가 모두 흩어집니다. 부영양화는 생태계의 균형이 얼마나 미묘하고, 어려운 것인지를 보여주는 사례죠.

하지만 일단 녹조나 적조가 발생하고 나면 해결이 쉽지 않습니다. 물 순환용 수차를 이용해 물을 뒤섞어 주고 공기를 불어 넣어 수중의 용존산소를 증가시킬 수 있지만, 이 방법은 발생한 지역의 면적이 크고 수심이 깊은 경우엔 적용하기가 쉽지 않습니다. 현재는 적조가 발생한 경우 황토를 뿌리는 방법을 이용합니다. 황토를 뿌리면 황토가 수면에 떠 햇빛을 차단하면서 조류의 번식을 막습니다. 또 황토가 조류와 뒤엉겨 아예 바닥으로

가라앉기도 하죠. 하지만 이 또한 수질오염 때문에 만족스러운 해결책이 될 수는 없습니다. 계절이 바뀌어 수온이 내려가거나, 태풍이 지나가기를 바랄 수밖에 다른 도리가 없습니다.

정리하면, 녹조나 적조는 발생하지 않도록 예방하는 것이 최선입니다. 일단 과도하게 영양분이 강, 호수, 바다 등으로 유입되고 난 뒤에는 문제 해결이 매우 어려워지니 애초에 다량의 유입을 막는 게 중요합니다. 가정에서 배출되는 생활하수나 목축 단지, 공업단지 등의 오수와 폐수에 대한 적극적인 관리가 필요합니다. 농경지에 사용하는 화학비료와 퇴비의 양도 억제해야 합니다. 값이 조금 비싸더라도 무인산 합성세제를 사용해야 하고, 연안의 양식장에 대한 관리도 매우 중요합니다.

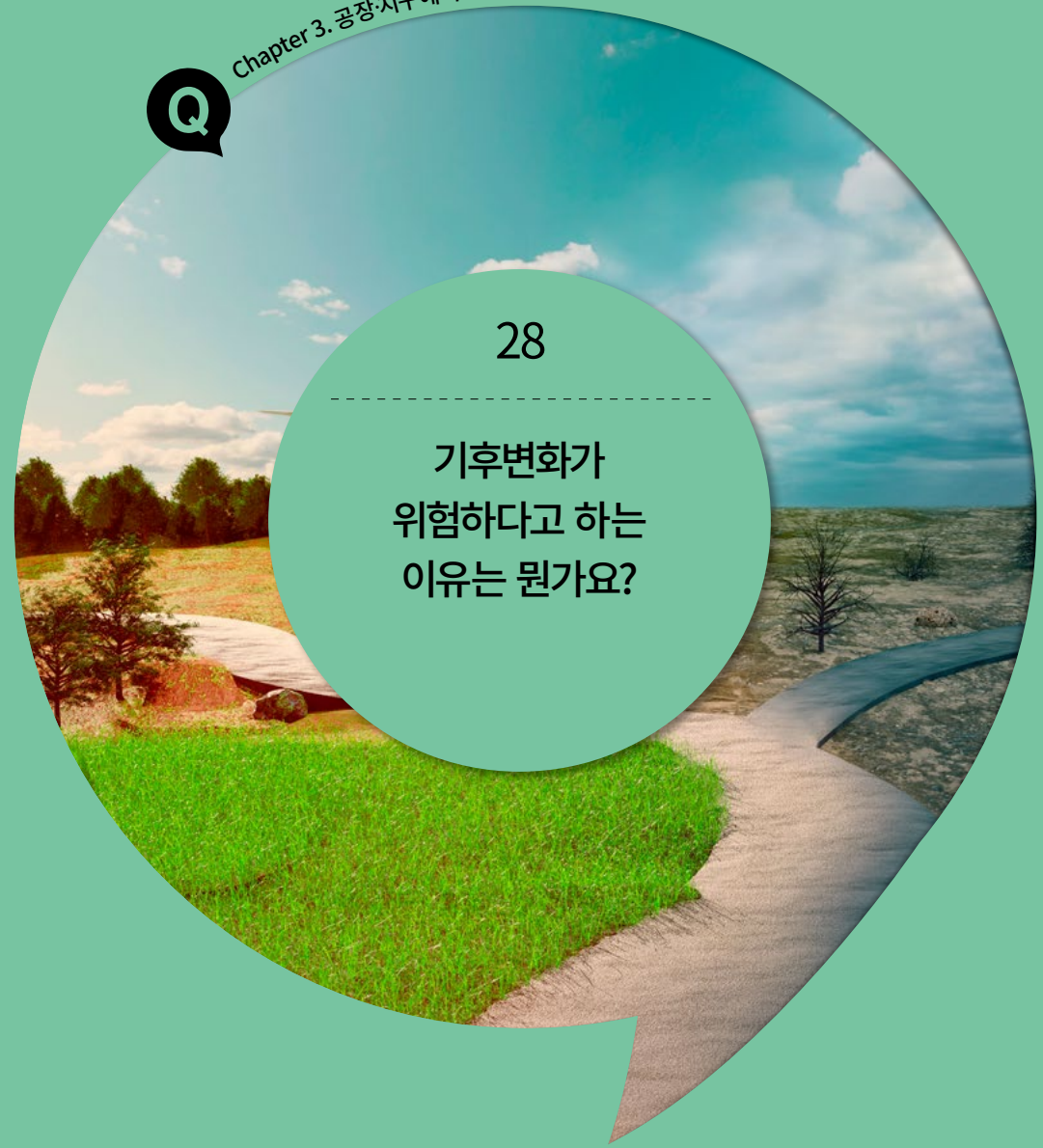
이런 일들은 적지 않은 사회적 투자가 필요한 일이고, 지역 주민들의 적극적인 협조가 있어야만 가능한 일입니다. 초록 강, 붉은 바다를 보지 않기 위해서는 우리 모두의 관심과 노력이 필요합니다.

Chapter 3. 공장-지구에서



28

기후변화가
위험하다고 하는
이유는 뭔가요?



A



이덕환 교수가 답하다

전 세계 기후가 빠르게 변하고 있습니다. 봄, 여름, 가을, 겨울 뚜렷한 4계절을 자랑하던 한국도 봄과 가을이 사라지고 있습니다. 동아시아 온대 지역의 대표적 특징이었던 초여름의 장마와 겨울철의 삼한사온도 찾아보기 어려워졌습니다. 늦여름에 찾아오는 태풍의 횡수와 강도도 종잡을 수 없어졌고요. 짧은 시간 굵게 내렸다 그치는 동남아시아의 국지성 폭우 ‘스콜’을 한국에서도 흔히 볼 수 있게 됐고, 겨울철 폭설도 잦아지고 있습니다. 한국의 기후가 전반적으로 온대에서 아열대성으로 바뀌고 있습니다.

생태계 혼란 일으키는 기후변화

흔히 기후변화의 원인으로 지구 온난화를 꼽습니다. 지구의 평균 기온이 빠르게 올라가고 있다는 뜻이죠. 오늘날 지구의 평균 온도는 15°C입니다.

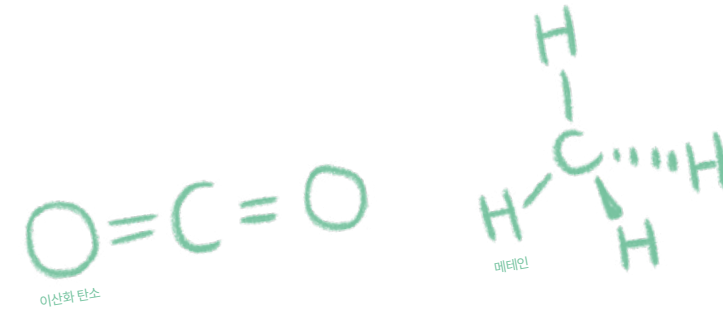
인류가 농사를 짓고, 가축을 기르기 시작했던 1만2000년 전보다 4°C가량 높아졌죠. 3000년에 1°C씩 오른 셈이니 큰 변화는 아닙니다.

그런데 산업화 이후 인류가 본격적으로 석탄을 사용하기 시작하면서 상황이 달라집니다. 약 300년 동안 지구의 평균 온도가 1°C나 올라간 것이죠. 현재 지구의 평균 온도는 더 빠르게 치솟고 있습니다. 유엔 기후변화 정부간협의체(IPCC)에 따르면 10년마다 지구의 온도가 0.2°C씩 오르고 있습니다. 300년 후면 지구는 지금보다 6°C나 더 뜨거워진다는 뜻입니다. 이는 산업혁명 이전과 비교하면 무려 60배나 빠른 속도입니다.

지구 온난화가 농사를 짓는 데는 유리할 수 있습니다. 평균 기온이 올라가고, 비가 많이 내리면 수확량이 늘어나기 때문입니다. 우리나라의 온대 기후가 아열대 기후로 바뀌면 이모작이 가능해질 수도 있습니다. 이모작은 한 경작지에서 서로 다른 작물을 1년에 번갈아 재배하는 농사 방법입니다. 과일이나 채소 재배 양상은 이미 변화하고 있습니다. 사과와 경우 날씨가 추운 곳에서는 생산할 수 없는 과일이라 과거에는 기온이 상대적으로 높은 대구 이남에서만 키웠습니다. 그런데 현재는 사과가 강원도 철원의 특산물이 됐죠. 또 바나나, 파인애플, 망고, 애플 망고 등 아열대성 작물을 우리나라 남부 지방에서도 재배할 수 있게 됐습니다. 연안의 어류 분포도 달라지고 있습니다. 한류성 어류인 명태가 줄어들고, 난류성 어류인 거대 가오리와 오징어가 늘고 있습니다.

지구 온난화, 이상 기온 유발

하지만 지구 온난화가 절대 좋은 변화는 아닙니다. 지구 전체로 보면 피해가 크기 때문입니다. 북극과 남극, 높은 고산 지대의 빙하가 빠르게 녹



고 있는 현상은 지구 온난화의 대표적인 문제입니다. 빙하가 녹으면 바닷물의 양이 늘어나서 해수면이 올라갑니다.

지구 전체의 평균 해수면의 높이는 1993년 첫 측정 이래 89mm나 올랐습니다. 연평균 3.2mm씩 상승하는 셈인데, 심지어 그 속도가 점점 더 빨라지고 있습니다. 이로 인해 남태평양에서는 일부 섬이 바다 밑으로 가라앉고 있습니다. 이미 해안이 침수된 지역도 발생했습니다. 빙하가 녹은 민물이 바다로 유입되면 바닷물의 염도가 낮아지는 것 또한 문제입니다. 바다의 산성도가 변해 수중 생태계에 교란이 발생할 수 있습니다.

잦은 기상 이변도 심각합니다. 폭우, 폭설, 가뭄, 한파, 폭염 등이 수시로 발생합니다. 적도 부근 바다의 균형이 깨지면서 초강력 태풍이나 허리케인이 자주 발생하고 있습니다. 우리나라도 이런 기상 이변에서 벗어날 순 없습니다. 2018년 겨울은 최악이 한파가 몰아닥쳤는데, 그해 여름은 감당하기 어려운 폭염에 시달렸죠. 2020년에는 중부 지방에 57일 동안 장마가 계속되는 이변이 벌어졌습니다. 기상 관측 이후 가장 긴 장마였습니다. 게다가 장마가 끝난 뒤에는 4개의 태풍이 연달아 찾아와서 큰 피해가 발생했습니다.

사실 지구 온난화는 지구를 둘러싸고 있는 대기의 평균 온도가 오르고 있다는 뜻입니다. 지구 자체가 뜨거워지고 있는 것은 아닙니다. ‘지구가 뜨거워져서 신음하고 있다’는 식의 말은 비유적 표현일 뿐입니다. 지구는

멀쩡합니다. 지구 대기를 이용해 숨 쉬며 살아가는 지구 생태계가 신음할 뿐이죠. 지구 대기 온도 변화에 적응하는 일이 쉽지 않기 때문입니다.

지구 온난화 가속되는 원인은?

지구 온난화의 원인이 분명하게 밝혀진 것은 아닙니다. 다만 수많은 연구에 따르면 지구의 평균 온도는 태양의 밝기, 공전 궤도의 크기, 지구 자전축의 기울기 등의 변화에 따라 달라집니다.

그중 전 세계 과학자들이 입을 모아 꼽는 원인은 ‘온실가스’입니다. 온실가스는 지구 대기 중에 떠다니며, 대기 온도를 높이는 데 영향을 주는 기체를 뜻합니다. 이산화 탄소, 수증기(물), 메테인 등이 대표적인 온실가스입니다. 온실가스는 지표면에서 반사되는 복사열 중 적외선을 흡수합니다. 만약 지구의 대기에서 온실가스가 모두 사라진다면, 지구 대기의 평균 온도는 영하 18°C로 떨어집니다.

사실 온실가스 중 수증기는 큰 문제가 되지 않습니다. 오래 남아있지 않고 금방 사라지기 때문이죠. 가령 온도가 높은 여름날, 해가 지고 난 뒤에도 열기가 사라지지 않는 열대야 현상이 나타납니다. 이때 대기 중에 있는 다량의 수증기는 곧 이슬, 안개, 구름으로 뭉쳐지고 비가 돼 땅에 떨어지게 됩니다.

하지만 수증기와 달리 이산화 탄소와 메테인은 큰 문제를 일으킵니다. 이산화 탄소는 화석연료를 연소시키거나 생물의 호흡으로 배출되고, 메테인은 유기물이 부패하거나 초식 동물이 풀을 소화하는 과정에서 발생합니다. 이들은 대기 중 양이 늘어나더라도 수증기처럼 액화되지 않고 그대로 쌓입니다. 그 결과 지표면에서 방출되는 복사열이 우주 공간으로 빠

져나가지 못해 대기의 온도가 계속해서 올라가게 됩니다. 이산화 탄소와 메테인의 농도가 커지면 온실 효과가 일어나고, 지구 온난화 현상이 나타납니다.

특히 산업화 이후 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석 연료의 사용량이 늘어나 대기 중 방출되는 이산화 탄소와 메테인의 양이 크게 늘었습니다. 세계 인구가 78억 명으로 늘어나고, 평균 수명이 70대 후반으로 늘어난 것도 온실가스 증가 원인으로 꼽힙니다. 산업화 이전에는 대기 중 이산화 탄소의 농도가 280ppm 수준이었는데, 2019년에는 415ppm으로 늘어났습니다.

물론 지구의 평균 온도가 언제나 일정하지는 않습니다. 45억 년에 이르는 지구의 역사에서 지구 전체가 뽕뽕 얼어붙은 대빙하기가 적어도 5차례 이상 있었죠. 당시 지구에서 온도가 가장 높은 적도 근처도 뽕뽕 얼어붙었고, 해수면은 지금보다 7m 이상 낮았습니다.

인류는 마지막 대빙하기가 끝나갈 무렵, 본격적인 문명 생활을 시작했습니다. 그리고 17세기 르네상스가 시작되기까지 수백 년 동안 소비하기가 계속돼 어려운 삶을 살았습니다. 1970년대까지도 지구가 다시 추워질까 늘 걱정했습니다.

그런데 1980년 후반부터는 반대로 지구의 대기가 뜨거워져 고민하게 됐습니다. 2018년 미국 매디슨의 위스콘신대 연구팀은 지구 온난화가 현재대로 진행될 경우 2030년에는 지구 기후가 300만 년 전의 플라이오세 중기로 역주행할 것이라는 연구 결과를 국제학술기 미국국립과학원회보(PNAS)에 발표했습니다. 연구팀은 온실가스 배출 감축 노력을 하지 않으면 약 130년 후인 2150년의 기후는 빙하가 거의 존재하지 않았던 5000만 년 전의 에오세와 비슷해질 것이라고 밝혔죠.

IPCC는 이산화 탄소 배출량을 줄이기 위한 협의를 지속해서 진행합니다. 2015년에 체결된 '파리 기후변화 협약'에서는 2100년까지 지구의 온도 상승을 1.5°C 이하로 제한하기로 했습니다. 파리 기후변화 협약에 따라 우리나라도 2030년까지 이산화 탄소 배출량을 37% 감축해야 합니다.

권용일(충북 형석고 1)
김도연(서울 동덕여중 1)
이후민(충남 완서중 1)
정동렬(경남 내동초 6)
정해찬(경기 매현초 4)
조예진(경기 용인신촌초 6)
최나윤(서울 세화여중 1)
최형서(경남 반송여중 2)

Chapter 3. 공장-지구에서

Q

29

우주에서
가장 가벼운 물질은
무엇인가요?



A



석원경 교수가 답하다

원소 중 가장 가벼운 수소(H)는 138억 년 전에 일어난 빅뱅(Big Bang·대폭발)과 함께 만들어졌습니다. 지금도 우주에 존재하는 물질의 74%를 차지하고 있습니다. 이외에 헬륨이 24%를 차지하고, 나머지 무거운 원소들이 차지하는 비율은 고작 2%입니다.

지구의 사정은 다릅니다. 가벼운 수소는 대부분 우주 공간으로 새나가 버렸기 때문이죠. 간신히 지구에 남아있는 수소는 탄소, 질소, 산소 등과 결합해 탄화 수소, 암모니아, 물 등의 형태로 있습니다.

우주를 이루는 118개 원소

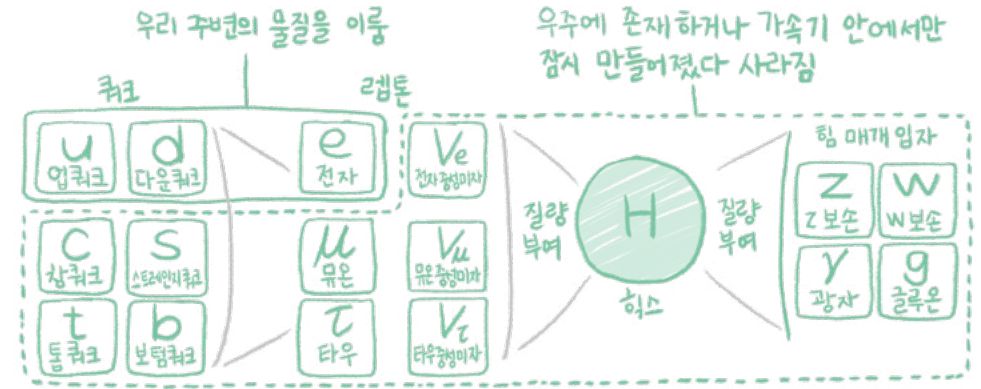
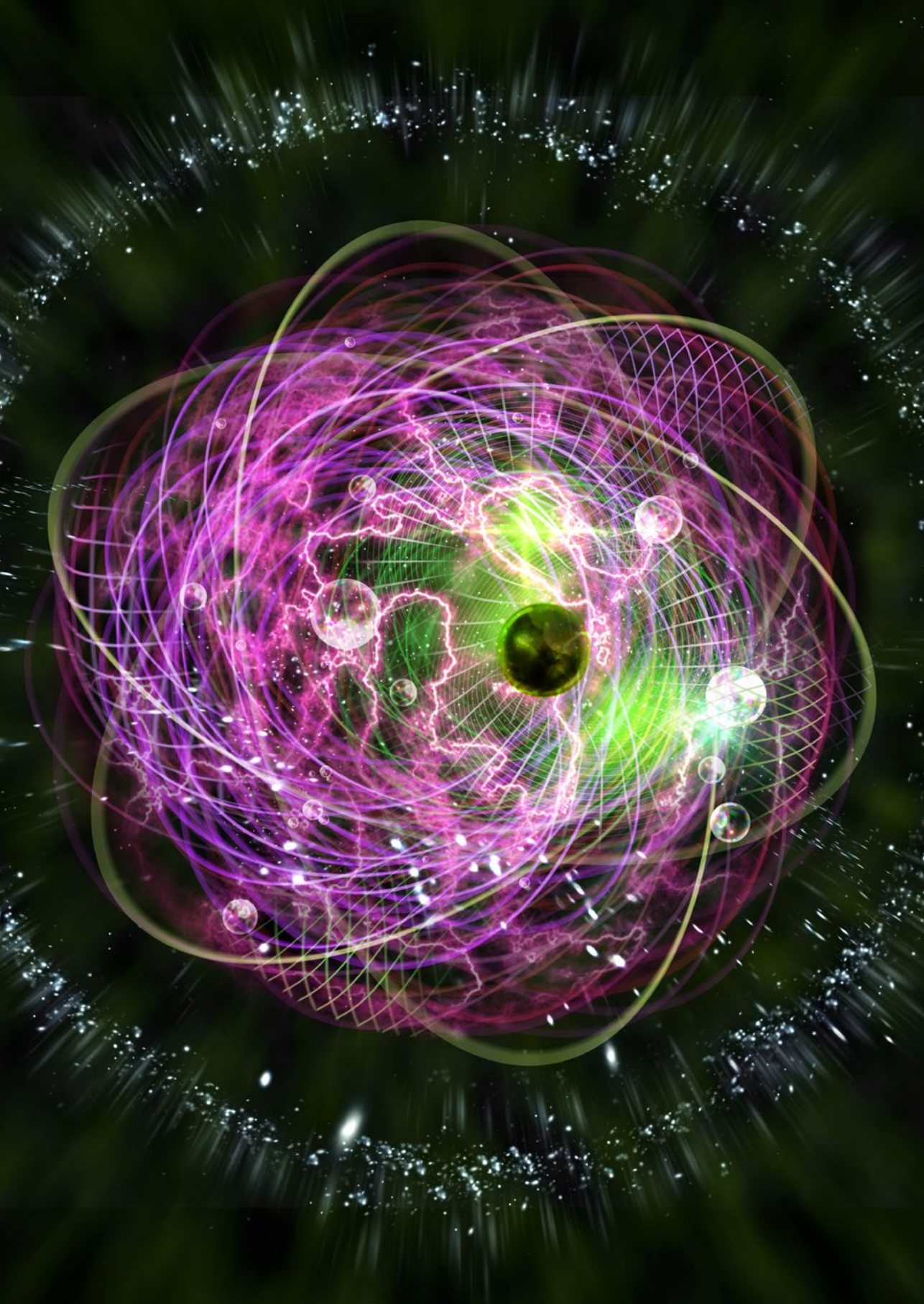
현대 화학에서 세상의 모든 물질은 118종의 원소로 구성돼 있습니다. 모든 원소는 물질의 고유한 화학적 성질을 가지고 있으며, 더 나눌 수 없는

원자로 이뤄져 있습니다. 원소는 고유한 이름이 있습니다. 각 원소는 원자핵에 들어 있는 양성자의 수로 원자 번호를 나타냅니다. 원소 기호는 로마자 알파벳으로 표시합니다. 원소의 원자량은 원자핵에 들어 있는 양성자 수와 중성자 수의 합으로 결정됩니다.

1869년 러시아의 화학자 드미트리 멘델레예프는 이런 원소의 특징을 한눈에 볼 수 있도록 주기율표를 만들었습니다. 주기율표의 가로 방향은 ‘족(group)’, 세로 방향은 ‘주기(period)’로 정했죠. 1족에서 18족에 이르는 족은 최외각 전자껍질에 들어있는 원자가 전자의 수를 나타내고, 1주기에서 7주기에 이르는 주기는 전자껍질의 수를 나타냅니다. 한편 주기율표를 보면 맨 아래쪽에 란타넘족과 악티늄족 원소들을 배열한 별도의 칸도 있습니다.

물론 주기율표는 여전히 미완성 상태입니다. 새로운 원소가 합성되며 주기율표는 계속 확장하고 있습니다. 최근 2년 사이에도 주기율표 7주기 자리에 4개의 원소가 추가로 자리를 잡았습니다. 2018년 국제순수·응용화학연합(IUPAC)은 원자번호 113번 ‘니호늄(Nh)’, 115번 ‘모스코븀(Mc)’, 117번 ‘테네신(Ts)’, 118번 ‘오가네손(Og)’의 합성을 공식적으로 인정하고, 원소 이름과 원소 기호를 확정해 부여했습니다. 1898년 퀴리 부부가 원자번호 88번 ‘라듐(Ra)’을 발견한 이후 120년 만에 비로소 주기율표 7주기에 속하는 원소 32종이 모두 채워진 것입니다.

원자는 양성자와 중성자가 단단하게 뭉쳐져 있는 원자핵 주위에 전자가 구름처럼 퍼져 있는 구조입니다. 원자핵 주위에 전자가 분포하고 있는 모양은 20세기에 정립된 양자역학으로 밝혀졌죠. 전자의 양자역학적 상태는 3개의 양자수로 설명되는 ‘오비탈’에 의해서 정해집니다. 둥근 공 모양의 *s* 오비탈, 아령 모양의 *p* 오비탈, 네 잎 클로버 모양의 *d* 오비탈 등이 있



습니다. 화학결합을 하지 않은 원자는 지름이 100~300pm(피코미터·1pm는 1 조분의 1m) 정도의 둥근 공 모양이 됩니다. 전자 오비탈들이 서로 겹치면 두 원자 사이에 화학결합이 만들어지면서 분자가 생깁니다.

수소의 원자핵은 1개의 양성자로 이뤄져 있습니다. 모든 원소 중 양성자 수가 가장 적죠. 그러나 중성자의 수는 다양합니다. 중성자 없이 양성자 1개만 있는 수소가 있는가 하면, 원자핵에 중성자 1개가 더 들어 있는 ‘중수소(D)’, 중성자 2개가 더해진 ‘삼중수소(T)’도 있습니다. 이처럼 양성자 수는 같은데 중성자 수만 다른 원소들을 ‘동위원소’라고 합니다. 중성자의 수가 많아질수록 원자의 질량수도 커지죠.

중성자는 양성자가 2개 이상인 원소에서 존재감을 더욱 발휘합니다. 가령 헬륨은 일반적으로 원자 크기의 1만분의 1에 해당하는 0.1pm 크기의 원자핵에 양성자와 중성자가 각각 2개씩 들어있는 원소입니다. 양전하를 띤 양성자 2개가 크기가 이렇게 작은 원자핵에 들어가게 되면 정전기적 반발력이 매우 크게 나타납니다. 중성자는 이때 반발력을 완화해주는 역할을 합니다. 한편 헬륨의 동위원소로 양성자 2개, 중성자 1개를 가진 헬륨-3도 있습니다.

핵융합, 원소를 만들어내다

우주에 존재하는 모든 원소는 수소 원자핵의 핵융합 반응으로 만들어졌습니다. 핵융합 반응은 태양과 같은 스스로 빛을 내는 항성에서 일어납니다. 우주 공간에서 먼지처럼 떠돌던 수소와 헬륨이 모여 큰 별이 만들어지면 별은 점점 더 무거워지겠죠. 그러면 별에 중력이 작용하게 되고, 그 중력으로 별은 뜨겁게 달아오릅니다. 태양의 내부 온도는 1500만°C가 넘습니다. 태양의 내부에서는 수소의 핵융합이 이뤄집니다. 그 결과 양성자 2개를 갖는 원소, 헬륨이 만들어지죠. 아인슈타인이 발견한 특수상대성이론 방정식($E=mc^2$)에 따라 핵융합 과정에서 엄청난 양의 열과 빛이 방출됩니다. 햇빛과 별빛은 바로 이런 핵융합의 산물입니다.

한편 인간이 핵융합을 일으키기도 합니다. 러시아의 핵물리학자 안드레이 사하로프와 이고르 탐은 핵융합로인 토카막을 만들었습니다. 토카막은 플라즈마를 가두기 위해 자기장을 이용하는 도넛 모양의 장치입니다. 국제핵융합실험로(ITER)는 국제 토카막 실험로로, 중수소와 삼중수소의 핵융합 반응을 이용해 에너지를 생산하는 방법을 연구, 개발 중입니다.

태양보다 더 큰 별에서는 헬륨보다 큰 네온, 마그네슘, 규소, 황, 철까지 각종 무거운 원소가 만들어집니다. 미국의 물리학자 한스 베테는 이렇게 큰 별에서 탄소, 산소, 질소가 핵융합의 촉매 역할을 한다는 사실을 밝혀 1967년 노벨물리학상을 받기도 했죠. 철보다 더 무거운 원소는 수명을 다하고 죽어가는 초신성 폭발이나 중성자별의 충돌 과정에서 만들어집니다. 그 결과 무거운 원소가 우주 공간으로 뿔뿔이 흩어지는데, 이 무거운 원소가 다시 모이면 지구와 같은 행성이 만들어집니다. 실제로 지구의 외핵과 내핵에는 이렇게 모인 무거운 원소들이 밀집돼 있습니다.

양성자와 중성자보다 작은 기본입자

현대 물리학에서도 물질을 구성하는 입자를 나누는 이론을 제시합니다. 1967년 스티븐 와인버그, 압두스 살람, 셸던 글래쇼가 만든 ‘표준 모형(standard model)’입니다. 표준모형은 우주의 구성과 움직임을 설명하는 정교한 이론으로 평가받습니다. 표준모형에 따르면 세상은 17종의 기본입자들의 상호작용으로 설명할 수 있습니다. 기본입자는 양자역학적으로 매우 다른 특징을 가진 ‘페르미온(fermion)’과 ‘보손(boson)’ 등으로 분류됩니다.

페르미온에는 업(u·up), 다운(d·down), 스트레인지(s·strange), 참(c·charm), 보텀(b·bottom), 톱(t·top)이라는 6종의 ‘쿼크(quark)’와, 전자, 뮤온, 타우 등 3종류의 중성미자(neutrino)를 포함한 6종의 ‘렙톤(lepton·경입자)’이 있습니다. 원자핵을 구성하는 양성자는 2개의 업 쿼크와 1개의 다운 쿼크가 결합한 것이고, 중성자는 반대로 2개의 다운 쿼크와 1개의 업 쿼크가 결합한 것입니다. 업 쿼크는 +2/3에 해당하는 전하를 가지고 있고, 다운 쿼크는 -1/3의 전하를 가지죠. 그래서 양성자는 +1의 양전하를 갖게 되고, 중성자는 전기적으로 중성이 됩니다. 미국의 물리학자 머리 겔만이 양성자와 중성자를 이루는 쿼크의 존재를 이론적으로 밝혔으며, 이에 대한 업적으로 1969년에 노벨물리학상을 받았습니다.

기본입자 중 보손은 힘을 만들어내는 입자입니다. 보손은 총 5종류입니다. 먼저 전자기력과 상호작용하며, 정지 질량이 0인 ‘광자(photon)’가 있습니다. 그리고 핵분열을 가능하게 만들어주는 약한 핵력과 관련된 W 보손과 Z 보손, 쿼크를 결합해서 양성자와 중성자를 만들어주는 글루온(gluon), 물질이 질량을 갖도록 해주는 힉스(Higgs)가 있습니다.

표준모형을 구성하는 기본입자들은 모두 대형 입자 가속기를 통해서만 확인할 수 있습니다. 1968년에 톱 쿼크가 처음 발견되면서, 기본입자를 찾아내기 위한 연구가 활발하게 이뤄지기 시작했습니다. 2012년에 프랑스에 있는 유럽입자물리연구소(CERN)에서 ‘신의 입자’로 알려진 힉스 보손의 존재가 마지막으로 확인됐습니다. 힉스 입자의 존재를 주장했던 영국의 피터 힉스와 프랑스의 프랑수아 앙글레르는 2013년 노벨물리학상을 받았습니다.

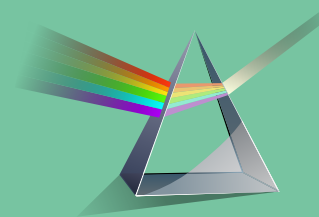
다시 처음 질문으로 돌아와, 모든 물질은 각각 6종의 쿼크와 렙톤 그리고 힘을 만들어내는 5종의 보손으로만 이뤄졌고 이는 논란의 여지가 없는 사실일까요? 현재 과학기술 수준에서 내릴 수 있는 답은 “그렇다”입니다. 지금의 과학으로는 우주에서 이들보다 더 가벼운 물질, 즉 이들을 구성하는 기본입자들의 존재를 확인할 방법이 없습니다.

Chapter 3. 공장-지구에서



30

원소들은 어떻게
자신만의 스펙트럼을
가지나요?





석원경 교수가 답하다

물질은 고유한 색깔을 가지고 있습니다. 물질이 빛을 흡수하고 방출하기 때문이죠. 이를 ‘스펙트럼(spectrum)’이라고 합니다. 그런데 세상의 모든 물질은 저마다 독특한 양자역학적 구조로 돼 있어 각각 고유한 스펙트럼을 가지고 있습니다. 물질을 구성하는 기본 단위인 원소도 예외가 아닙니다.

빛 연구는 17세기에 아이작 뉴턴이 처음 시작했습니다. 뉴턴은 창문으로 들어오는 햇빛을 프리즘에 통과시켰더니 반대쪽 벽에 무지개처럼 다양한 색깔의 연속된 띠가 나타나는 현상을 발견했습니다. 뉴턴은 이 띠를 스펙트럼이라고 불렀습니다. 스펙트럼은 본래 라틴어로 ‘이미지’나 ‘유령’을 뜻하는 말입니다. 뉴턴은 이 빛의 정체를 이해하고 싶었습니다. 그는 햇빛은 다양한 색깔의 ‘빛 알갱이’로 구성돼 있다고 생각했습니다. 이는 오늘날 양자역학의 ‘광자(photon)’와 비슷한 개념이었습니다.

18세기가 되자 독일의 물리학자 요제프 프라운호퍼는 햇빛을 더욱 정

밀하게 분석했습니다. 프리즘 대신 금속 표면에 가는 평행선을 그어서 회절 격자를 만들고, 이를 사용해 빛을 분석하는 프라운호퍼 분광기를 개발했습니다. 놀랍게도 뉴턴이 관찰했던 스펙트럼에는 어두운 선들이 곳곳에 숨겨져 있었죠. 이런 선은 600개가 넘었습니다. 햇빛에서 관찰되는 이 ‘선 스펙트럼(line spectrum)’의 정체는 20세기에 양자역학이 정립된 뒤 명확히 밝혀졌습니다.

이후 독일의 화학자 로베르트 분젠과 물리학자 구스타프 키르히호프는 석탄 가스가 들어 있는 분젠 버너의 불꽃으로 가열한 물질에서 나오는 빛을 프리즘으로 분석했습니다. 여기서 물질마다 독특한 파장의 빛만 선택적으로 방출한다는 사실을 발견했습니다. 한편 금속의 불꽃 색깔은 모두 다릅니다. 소듐(Na)은 진한 노란색, 리튬(Li)은 진홍색, 포타슘(K)은 옅은 보라색, 주석(Sn)은 녹색, 칼슘(Ca)은 주황색, 알루미늄(Al)은 은백색입니다.

그래서 폭약으로 뜨겁게 달군 금속 원소에서 방출되는 불꽃을 이용해서 화려한 불꽃 축제를 즐기곤 합니다. 원소의 고유한 불꽃 반응이 훗날 원자의 양자역학적 구조를 밝혀내는 결정적인 단서가 되기도 했습니다.

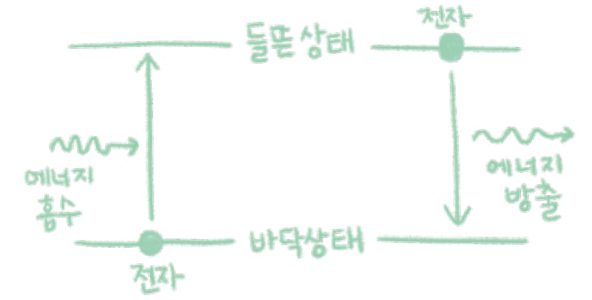
양자역학, 스펙트럼의 정체를 밝히다

19세기 영국의 물리학자 제임스 클러크 맥스웰은 빛이 전기장과 자기장이 서로 수직으로 진동하는 전자기파라고 설명했습니다. 그러나 맥스웰의 전자기 이론으로는 물질의 색깔은 물론 뜨거운 물체가 방출하는 빛의 색깔도 설명할 수 없었습니다.

물질의 스펙트럼을 설명하기 위해선 양자역학 이론이 필요했습니다. 특히 원자와 분자를 구성하는 전자의 상태는 양자역학적으로 정의되는 ‘오



비탈(orbital)로 결정됐죠. 전자는 외부에서 에너지를 흡수하면 더 높은 에너지를 가진 오비탈로 들뜨게 됩니다. 이때 흡수하는 에너지는 두 오비탈 사이의



에너지 차이에 의해 정해집니다. 반대로 높은 에너지 상태의 오비탈에 있는 전자가 빛을 방출하면서 에너지를 잃어버리면 더 낮은 에너지를 가진 오비탈로 내려오게 됩니다. 그때 방출되는 빛의 색깔도 역시 두 오비탈의 에너지 차이에 의해서 결정됩니다.

이를 이용하면, 소듐 금속의 불꽃 반응에서 관찰되는 빛의 색깔을 설명할 수 있습니다. 뜨겁게 가열한 소듐 금속의 들뜬 상태인 $3p$ 오비탈에 들어있던 전자가 에너지를 잃어버리면 바닥 상태인 $3s$ 오비탈로 돌아오게 됩니다. 이때 방출되는 빛은 $3p$ 오비탈과 $3s$ 오비탈의 에너지 차이에 해당하는 589nm 의 파장을 가진 노란색입니다.

분광법이 가져온 과학의 눈부신 발전

‘분광법(spectroscopy)’은 빛을 이용해서 물질의 정체와 양자역학적 특성을 연구하는 수단입니다. 모든 물질은 근본적으로 양자역학적 상태가 서로 다르기 때문에 분광법을 이용하면 물질을 정확히 파악할 수 있습니다. 가령 여러 가지 물질이 섞여 있는 시료에서 특정한 물질의 농도를 알아낼 때 분광법이 유용하게 쓰입니다. 물질이 빛을 흡수하는 정도나 방출하는 빛의 세기 등으로 물질의 농도를 알 수 있기 때문이죠. 스포츠 선수가 금지 약물을 사용했는지를 확인하기 위한 도핑 검사에서도 분광법을 활용

하죠. 또 토양이나 수질의 오염도 분광법을 이용해서 확인합니다. 병원의 병리학 실험실이나 도핑 검사실은 모두 분광학 실험실이라는 뜻입니다.

분광법은 우리 눈으로 볼 수 있는 가시광선 외에 마이크로파, 적외선, 자외선, X-선, 감마선 등도 사용합니다. 파장의 영역에 따라서 얻을 수 있는 정보도 달라지니, 그만큼 다양한 연구에 활용할 수 있습니다. 예를 들어 마이크로파를 이용하면 분자의 회전 운동에 대한 정보를 파악할 수 있습니다. 적외선으로는 진동 운동을 분석합니다. 자외선으로는 분자를 구성하는 화학결합에 대한 정보를 얻고, X-선과 감마선으로는 원자의 종류와 위치를 파악합니다. 강한 자기장을 이용해 물질에 들어 있는 전자의 상태를 변형시킨 뒤, 물질의 정보를 얻는 분광법도 있습니다. 단백질 분석에 많이 사용하는 핵자기공명 분광법입니다. 이는 단백질에 붙어있는 수소 원자의 상태를 정밀하게 파악할 수 있습니다.

1억 5000만km나 떨어진 태양 분석도 가능합니다. 1868년 프랑스의 천문학자 피에르 장센은 개기 일식이 진행되는 동안 관찰한 햇빛에서 새로운 흡수선을 관찰했습니다. 지구에서 확인하지 못했던 헬륨의 정체가 밝혀진 순간이었습니다. 현대 천체물리학자는 망원경으로 관찰한 별빛을 통해 우주의 역사를 읽어내고 있습니다. 한 예로 수소의 핵융합에서 방출되는 별빛의 색깔이 아주 조금 붉게 보이는 분광학적 관찰로 우주가 빠르게 팽창하고 있다는 사실을 알아냈죠. 우주가 138억 년 전의 빅뱅에서 시작했다고 믿게 된 데도 분광학 연구가 중요한 역할을 했습니다.

외계 생명체가 존재하는 ‘골디락스’ 행성을 찾는 일도 별빛에 대한 분광학적 분석을 통해서만 가능한 일입니다. 액체 상태의 물이 있고, 다양하게 산화된 상태의 탄소가 존재한다는 사실은 분광학적 분석으로 알 수 있습니다. 물론 쉬운 일은 아니지만, 그렇다고 포기할 수도 없는 일이죠.

질문별 키워드

1 알칼로이드 캡사이신 캡사이시노이드 아드레날린 GPCR 엔돌핀 스코빌 척도 레시니페라톡신 헬리코박터균	염색제 유전자 유전자 단백질 리보솜 RNA 단성 생식 유성 생식 박테리아 이중 나선	발효 아플라톡신 염화플루오린화 탄소 통조림 보존제 범벅 가공식품	폴리렌 탄소 나노튜브 그래핀 나노화학	하이드로늄 이온 중화반응 수산화 이온 자기 이온화 반응 수소이온농도 안토시아닌 일칼리 음료
2 배설 섬유소 셀룰로오스 포도당 수소결합 셀로덱스트린 셀룰레이스 알파 글루코시데이스 식이섬유 녹말 ATP 글리코겐	7 알레르기 전신 면역반응 일산화 탄소 글루텐 알레르겐 히스타민 위생 가설	13 라면 수프 MSG L-글루탐산 코리네박테리움 중국음식점 중후군 화학조미료 인공조미료	19 물감 페인트 안료 염료 발색단 라스코 동굴 강서대묘 이산화 타이타늄 알리자린 코치닐 색소 케르메스 색소 티리언 퍼플 인디고 페라 모브 염료	26 합박눈 눈송이 전기음성도 프랙털 차원
3 에탄올 수산화기 친수성 메탄올 술 효모 아세트알데하이드 알코올 의존증 알코올 중독증 음주 측정기 혈중알코올농도	8 바이러스 코로나19 사스코로나바이러스-2 박테리아 담배 모자이크 바이러스 핵산 후천성면역결핍증 인간면역결핍바이러스 유리균 유익 바이러스 사이토카인 박테리오파지	14 생분해성 플라스틱 미세플라스틱 콜라겐 옥수수 전분 빨대 쌀 빨대 폴리하이드록시알카노에이트 플라스틱 페플라스틱	코치닐 색소 케르메스 색소 티리언 퍼플 인디고 페라 모브 염료	27 초록 바다 녹조 적조 부영양화 남세균 녹조 라떼 구조류 환경오염 지오스민 용존산소
4 땀 침 아포크린샘 에크린샘 염화 소름 액취증 α-아밀레이스 프티알린 위발성 유기화합물 입 냄새 페로몬	9 소독제 이산화 염소 비말 살균제 항균 필름 자외선 소독기	15 아이스팩 폴리비닐알코올 폴리아크릴레이트 SAP 수화젤 슬라임 일회용 기저귀 생리용품 수산화기	아교 본드 순간접착제 포스트-잇 시멘트	28 기후변화 지구 온난화 온실가스 메테인 파리 기후변화 협약
5 손바닥 발바닥 멜라닌 지문 닌하이드린 세균 바이러스	10 마스크 면 마스크 폴리에틸렌 폴리프로필렌 저밀도 폴리에틸렌 일회용 마스크 덴탈 마스크	16 공기 청정기 필터 헤파 오존 발생 장치 오존 음이온 방향제 이산화 탄소	21 네온사인 비활성 기체 오가네손 헬륨 방사성 붕괴 디스플레이 플라스마 디스플레이 패널 유기발광다이오드	29 빅뱅 원소 양성자 중성자 주기율표 국제순수·응용화학연합 오비탈 동위원소 핵융합 반응 토카막 표준 모형 페르미온 보손 쿼크 중성미자 렙톤 광자 유럽입자물리연구소 신의 입자
6 DNA 데옥시리보핵산 데옥시리보스 인산 이온 뉴클레오타이드	11 해모글로빈 미오글로빈 요리 호모 에렉투스 감칠맛 분자요리 좋은 음식 나쁜 음식	17 비누 젯물 수산화 소듐 지방산 에스터 비누화 반응 카복실기 마이셀 합성세제 계면활성제	20 떡볶이 점착제 덱스트린 카제인 아교 본드 순간접착제 포스트-잇 시멘트	30 스펙트럼 회절 격자 선 스펙트럼 분젠 버너 불꽃 색깔 전자기파 양자역학 분광법 골디락스 행성
	12 즉석식품 방부제 보존제 절임	18 흑연 다이아몬드 연필심 인조 다이아몬드 화학기상증착법 탄소 동소체	22 수소 현대부르크호 천연가스	25 산과 염기 암모늄 이온



에필로그

세상 모든 것을 만드는 화학

우리 몸, 나아가 세상에 존재하는 모든 물질은 화학으로 이뤄져 있습니다. 심지어 밤하늘에서 반짝이는 별과 광활한 우주를 가득 채운 우주 먼지까지도요. 그러니 화학물질이 없는 세상에 살고 싶다는 말은 비현실적인 이야기입니다. 그런 세상에서는 우리 인간들도 존재할 수가 없기 때문이죠.

화학은 세상 모든 물질의 정체와 변환 과정을 밝혀주는 중요한 학문입니다. 현대 화학은 118종의 원소에서 시작합니다. 92종은 지구상에 존재하는 천연 원소이고, 나머지 26종은 20세기에 과학기술이 발전하면서 입자 가속기로 만들어낸 인공 원소입니다.

인공 원소 합성은 각국의 자존심이 걸린 일이기도 합니다. 미국, 러시아, 독일 등이 인공 원소 합성의 종주국이었는데, 21세기 일본이 동양에서는 최초로 113번 원소를 발견했습니다. 일본은 이 원소에 ‘일본의 원소’라는 뜻을 담아 ‘니호늄(Nh)’이라 이름을 붙였습니다. 이에 우리 한국에서도 하루빨리 ‘코리아늄’을 만들어야 한다는 목소리가 나오고 있습니다.

화학의 핵심은 화학물질입니다. 화학물질은 원자들의 화학결합으로 만들어진 분자가 모인 것으로, 종류가 매우 많습니다. 지금까지 알려진 화학물질만 무려 7000만 종이 넘습니다. 그런데도 매년 수천 종의 화학물질이 새로 발견되거나 만들어집니다. 화학이 복잡하게 느껴지는 것도 사실 화학이 다루는 화학물질의 종류가 너무 많기 때문입니다.

화학물질은 종류가 다양한 만큼 물질마다 개성도 독특합니다. 염료 물

질은 낙엽에 물을 들여 가을의 숲을 화려하게 만들고, 요리할 때 넣는 화학조미료는 음식에 감칠맛을 더해줍니다. 포도당, 소금처럼 인간에게 필요한 필수 화학물질도 있지만, 테트로도톡신, 다이옥신처럼 우리 몸속에 들어와 치명적인 독성을 일으키는 물질도 있습니다.

그렇다고 독성을 띠는 모든 물질이 나쁜 것은 아닙니다. 세상에는 ‘좋은 물질’과 ‘나쁜 물질’이 따로 있지 않습니다. 좋은 것도 잘못 사용하면 독이 되고, 나쁜 것도 현명하게 쓰면 오히려 혜택을 누릴 수 있습니다.

한 예로 수산화 소듐과 염산은 맹독성을 띠지만, 두 물질을 섞으면 화학적 변환을 일으켜 물, 소금 등 인간의 건강에 꼭 필요한 물질을 만듭니다. 그리고 세상에 살아 숨 쉬는 모든 생명체가 이런 화학물질의 변환을 이용해서 생존에 필요한 에너지를 얻게 됩니다.

누구에게나 세상은 아는 만큼 보이는 법입니다. 화학을 복잡하고, 어렵다고만 생각하면 화학물질에 숨은 신비로운 사실을 짐작조차 할 수 없습니다. 더욱이 이 세상은 화학물질로 가득 채워져 있으므로 화학 지식은 현대를 사는 모두에게 필수 상식인 셈입니다.

이 책은 국내에서 가장 오랜 역사를 자랑하는 순수 학술단체 ‘대한화학회’의 창립 75주년을 기념해 발간했습니다. 이 책이 우리 사회에 널리 퍼져 있는 화학에 대한 잘못된 인식을 바로잡는 일에 도움이 되기를 바랍니다.

또 책을 통해 더 많은 청소년이 우리 생활을 더욱 편리하고 안전하게 만들어주는 화학을 비롯한 과학 분야에 관심을 두게 되기를 바라는 마음도 있습니다. 화학이 지구를 더 푸르게 만들어준다는 사실을 꼭 기억해주시기 바랍니다.

2020년 12월 10일
저자 일동

청소년이 묻고, 화학자가 답한다
진짜 궁금했던 생활화학 질문 30

1판 1쇄 인쇄 2020년 12월 11일

1판 1쇄 발행 2020년 12월 17일

지은이 이덕환, 석원경
공동기획 대한화학회, 한국화학연구원
편집·디자인 과학동아

퍼넌곳 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