

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 펄펄 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

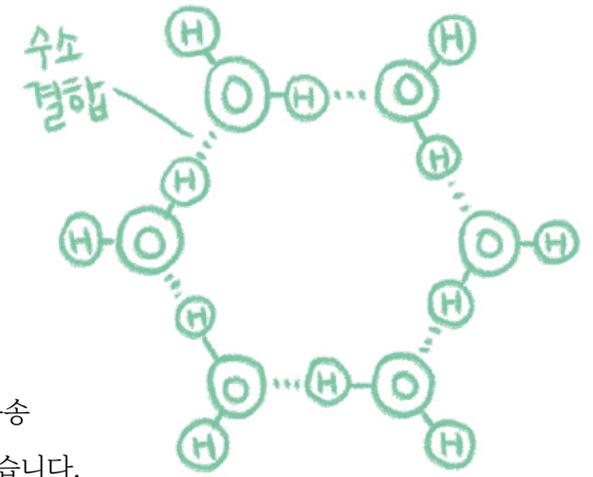
흰 눈을 묘사하라면 사람들은 너도나도 육각형 모양의 눈송이를 그립니다. 수많은 사람이 눈송이를 자기만의 방식으로 다양하게 표현하지만, 사실 진짜 눈송이를 본 사람은 소수입니다. 눈송이를 관찰하는 일이 생각처럼 쉽지 않기 때문이죠. 손바닥에 내려앉은 눈은 순식간에 녹아 사라집니다. 길가에 쌓인 눈을 들여다봐도 육각형 눈송이는 보이지 않습니다.

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 밧밧한 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?

