

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.

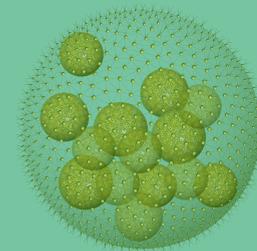
프랙털의 독특한 특징은 차원의 문제가 발생시켰습니다. 기하학에서 점은 0차원, 선은 1차원, 평면은 2차원, 그리고 입체는 3차원이라고 정의합니다. 그런데 코흐의 눈송이는 각 변의 모든 점이 끊임없이 방향 전환을 합니다. 마치 일자로 늘어져 있는 긴 실이 있는데, 실의 여러 부분에서 보풀이 올라온 것 처럼요. 한 변만 보더라도 이를 정상적인 선이라고 부를 수 없습니다. 그렇다고 평면이라고 부를 수도 없고요. 이후 수학자들은 연구 끝에 코흐의 눈송이는 1차원과 2차원의 사이인 1.26186차원이라고 정의했습니다. 눈송이는 이처럼 수학적으로도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



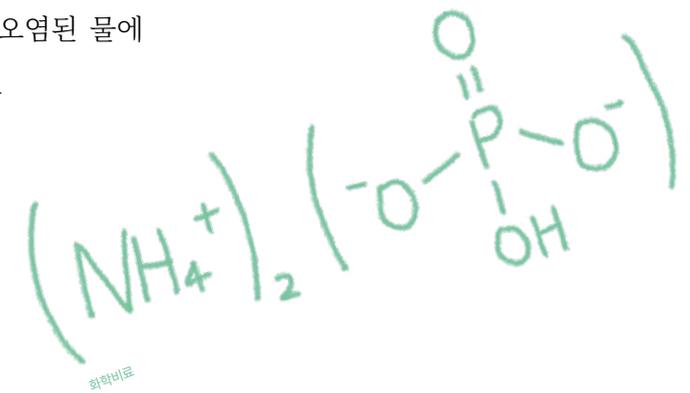
쪼. 바다도 마찬가지로입니다. 햇빛의 방향과 바닷물의 깊이에 따라 바다가 푸른빛으로 보이기도, 초록빛으로 보이기도 합니다. 비슷한 이유로 북극이나 높은 산에 있는 빙하도 신비로운 푸른색으로 보입니다.

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 물에서는 인체에 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



28

기후변화가
위험하다고 하는
이유는 뭔가요?

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.

