04

지구환경변화와 극지미생물

극지환경에서의 진화 메커니즘을 밝힌다

글 | 이홍금 _ 극지연구소 책임연구원 hklee@kopri.re.kr

미생물은 맨눈으로는 명확하게 볼 수 없는 보통 지름 1㎜ 이하의 작은 생물체를 지칭하는데 세균, 바이러스, 미세조류, 곰팡이, 일부 원생동물을 포함한다. 미생물은 지구 생물량의 약 60%를 차지하며 지구상의 어떤 환경에서도 존재한다. 다른 생물은 살 수 없는 혹한의 남극 얼음 속에도, 뜨거운 온천수나 심해저의 열수구에서도, 엄청나게 높은 압력이 미치는 심해저에서도, 빛이 전혀 없는 바다 속에도 미생물은 살고 있다. 높은 방사능에 노출되어도, 오존층에 노출되어도, 산소가 전혀 없어도, 고농도의 염분이나 강산 또는 강알칼리 용액에서도, 무기물만이 유일한 영양공급원인 환경에서도 꿋꿋하게 살아가는 미생물이 있다.

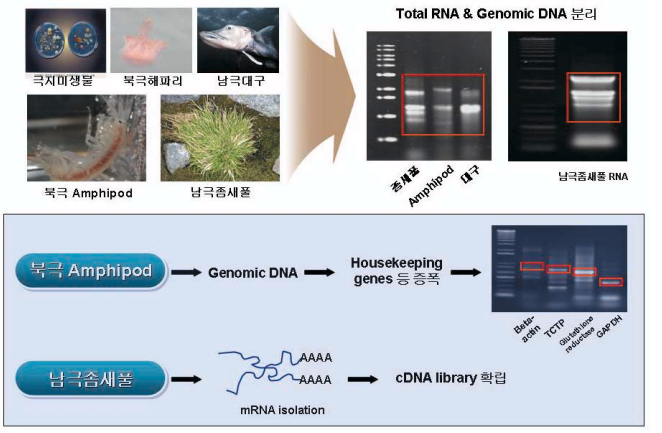
미생물, 주변 환경에 적응하며 스스로 발전

생명체에 이르는 과정은 약 40억 년 전 유용한 정보가 들어 있는 작은 분자들 간의 상호용과 함께 시작되었다. 탄수화물, 지질, 단백질, 핵산 같이 모든 생명체에서 발견되며 비슷한 기능을 갖는 큰 분자들이 만들어지고 약 38억 년 전에는 막으로 둘러싸인 공간 속에 갇히게 되면서 세포가 되었다. 세포내의 분자들이 세포외 환경과 유입, 유출을 할 수 있고 세포내에서 화학반응의 조절도 가능하게 되었다. 이러한 세포는 에너지를 만들고 자신을 복제할 수 있는 생명체의 가장 큰 두 가지의 기본적인 특징을 가진 생명체의 단위가 되었다. 20억년 동안 세포는 분자들이 한 개의 막으로 둘러싸인 원핵세포들로 각각 다른 세포들과 서로 분리된 채로 스스로 번식하면서 살았다. 이들 세포는 해양에만 존재하며 이를 통하여 치명적인 자외선으로부터 보호받았다. 현재 지구 표면으로부터 1천m 이상의 암석층 사이에 생겼던 연못물에서 발견된 '암석을 파먹는 세균'의 일종인 원핵세포 중 어떤 것은 최초에 지구상에 나타났던 원핵세포와 비슷할 것으로 추측된다.

약 25억 년 전에는 태양에너지를 이용해서 살아갈 수 있는 생물이 생겨나기 시작했다. 이들 생물들이 에너지를 얻는 과정, 즉 광합성은 오늘날 지구상에 존재하는 거의 모든 생물체의 물질순환, 먹이사슬 등의 근본이 되고 있다. 남세균이라 불리는 광합성을 하는 원핵생물은 막대한 양의 산소를 대기 중으로 방출시키면서 지구의 대기를 급격하게 변화시키고 산소로부터 형성된 오존이 성층권에 축적되기 시작했다. 오존은 서서히 밀도 높은 층을 형성하여 태양으로부터의 치명적인 자외선의 대부분을 차단하는 보호막으로서의 역할을 하게 되었다. 이 보호막의 존재로 생물들은 해양이란 보호구역을 벗어나 지구의 육상에서도 보금자리를 틀고 새로운 생활방식으로 살아갈 수 있게 되었다. 시간이 지나면서 단세포성 생물에서 다세포성 세포가 진화하고 더 복잡한 생물이 출현하고 종 분화가 계속 일어나 현재 지구상의 다양한 생명체가 형성되었다.

환경변화에 대한 적응은 생물체가 가진 가장 특징적인 현상 중에 하나이다. 환경은 끊임없이 변하기 때문에 변이가 있는 자식을 생산하는 생물들이 유전적 동일계를 생산하는 생물보다 유리하다. 다시 말하면 자신들이 존재하는 환경에 더 잘 적응할 수 있는 자손을 생산할 가능성이 높은 생물이 살아남고 번창할 수 있기 때문이다. 지금까지 살았던 종의 99% 이상이 멸종되었다. 생명의 역사에 걸쳐 어떤 종은 멸종해 왔지만 멸종률은 시기에 따라 극적으로 변동하여 어떤 집단은 높은 멸종률을 보이는 반면에 다른 집단은 번식하였다.

미생물은 식물이나 동물과 달리 세포크기에 비해 외부와 접촉되는 표면 면적이 상대적으로 크다. 그러다 보니 외부환경에 빨리 적응하면서 진화해 왔다. 리보솜 RNA 유전자의 경우 사람과 생쥐의 유전자 변이도는 0.7% 밖에 안 되지만, 미생물 중 세균은 같은 종 내의 두 개체 사이의 변이도가 3%나 된다. 이렇게 동물이나 식물에 비해 미생물의 유전적 변이가 매우 큰 것은 미생물의 환경에 대한 적



극지 동물프랑크톤, 현화식물(좀새풀) 및 이끼류를 대상으로 환경변화에 따른 유전자 연구

응력과 밀접한 관계가 있다.

고온성 세균이나 고세균은 핵산에 구아닌과 사이토신의 함량이 비교적 높아 결합이 안정된 편이고 세포막도 고온에서 성장할 수 있도록 적응이 되어있다. 고압성의 심해 세균은 세포막의 불포화지방산이 높아 탄력적으로 세포를 지지할 수 있게 도와주기도 한다. 강한 방사선과 자외선에 DNA가 파괴될 경우 즉시 수선하는 능력도 있다. 아주 낮은 산도에서도 세포 안은 중성 pH를 유지하게 할 수 있는 능력도 있다. 극저온 환경에서는 세포내의 거대분자, 특히 효소가 저온에도 안정적이고, 얼음 형성을 저해하는 생체부동액을 스스로 만들면서 다양한 생명현상을 가진 미생물들은 자신의 주변 환경에 적응하면서 스스로를 발전시켜왔다.

진화 메커니즘 밝힐 인류 공동의 타임캡슐

지구의 양극에 위치한 극지는 북극해와 남극대륙이 차지하고 있는 거대한 환경공간이다. 남극은 남극조약에 의거 남위 60도 이남의 바다와 대륙을 포함하는 공간으로 지구상에서 가장 춥고 건조하며 바람이 강한 지역이다. 면적은 한반도 60배에 달하는 약 1천360만 ㎢의 거대한 대륙으로 평균 2천m의 빙하로 덮여 있으며 지구상 담수의 70%를 보존하고 있다. 연평균 영하 23도이며 대부분 얼음에 덥혀 있고 땅이 노출된 곳은 겨우 2% 정도에 불과하다.

남극점에서 1천260km 떨어진 러시아의 보스톡 기지 근처에는 3천700m 얼음아래에 전라남도 보다 면적이 큰 평균 수심 130m의 호수가 있다. 지금까지는 3천500m 까지만 굴착된 상태로 호수를 오염시키지 않고 물을 채취할 수 있는 굴착기술을 찾고 있는데, 이 보스톡 호수는 적어도 500만 년 전의 생존했던 생물들에 대한 정보를 줄 수 있는, 그리고 그동안 어떻게 그 환경에서 진화해왔는지를 밝혀줄 인류 공동의 타임캡슐이다. 남극대륙에서 얼지 않은 부분은 단지 2%인데 미국 멕머도 기지 주변의 드라이밸리는 남극 대륙에서 얼지 않은 면적에서 가장 넓은 지역이다. 우주와 유사할 것이라 판단되는, 즉 춥고 빈영양상태이며 바위로 구성되어 있는 사막 환경인 드라이밸리에서 오랜 세월을 적응하며 진화해온 생명체들은 우주생물학 연구의 시발점이 될 수 있다.

남극에는 꽃이 피는 식물이 두 종류가 있을 뿐이며 남극에 있는 대부분의 식물은 이끼류나 지의류이다. 50종의 우산이끼, 104종의 선태류, 그리고 대략 427종의 지의류 등이 보고되었다. 미세조류를 포함하여 대형갈조류 등 700여종에 달할 정도로 다양한 해조류들이 남극바다에 서식하고 있다. 남극대륙에 서식하는 동물은 해안가의 물개류와 펭귄을 포함한 새가 주종을 이룬다. 펭귄은 황제펭귄, 아델리 펭귄, 젠투펭귄, 턱끈1 펭귄 등 7종에서 18종이 있는 것으로 알려져 있다. 갈매기, 제비갈매기류, 스쿠아, 페트렐류, 가마우지류, 알바트로스 등이 텃새로서 남극에서 서식하고 있다. 여름에는 고래가 간혹 해안가까지 찾아오기도 한다. 남극대륙을 둘러싸고 있는 거대한 바다인 남빙양에는 흔히 남극새우로 알려진 크릴(난바다곤쟁이류)이 있는데, 이 크릴은 남극해에 서식하는 식물 플랑크톤에서 고래까지 이어지는 먹이망의 중심으로서 매우 중요한 역할을 한다.

총면적 2천600만㎢, 지구의 5%를 차지하는 북극은 일반적으로 7월 평균 기온이 10℃ 이하인 지역으로 정의되며, 북위 66.5° 이북으로 나무의 성장 한계선과 일치한다. 이곳은 전체 면적에서 30%만이 육지이고 나머지는 바다이다. 즉 유라시아와 아메리카 대륙의 북쪽 끝과 그린랜드, 그리고 이들로 둘러 싸여 있는 북극해로 구성되어 있다.

북극해는 면적이 1천400만㎢로 지중해의 4배이며 전 세계 바다의 3.3%를 차지한다. 이곳은 평균 수심이 1천200m이고 연중 두꺼운 얼음으로 덮여 있는데, 이 얼음은 크기가 다양하며 바람과 해류의 영향으로 끊임없이 이동하고 있다. 전 세계를 순환하며 거대한 열을 전달해주는 심층해수는 전 세계 기후에 지배적인 영향을 미치는데 고위도의 북극해가 심층수 순환에 발원지이다. 영화 투모로우를 연상한다면 심층해수의 영향을 상상할 수 있을 것이다. 북극해는 기상, 기후, 해류의 순환 등 지구 환경변화에 커다란 역할을 하여서 북극은 흔히 지구 기후변화의 산실이라고 불린다.

다산기지가 위치한 노르웨이령의 스발발드 군도에는 북극 생물로서 160여종의 새를 비롯하여 170종 이상의 다양한 지의류와 육상생물, 1천800종의 무척추동물과 북극곰, 북극여우, 산록, 바다표범, 고래, 해마와 같은 포유류가 서식한다. 세균, 곰팡이를 포함한 미생물의 경우 극지의 열악한 빛과 온도, 수분에 적응해 온 새로운 다양한

04

미생물이 발견되고 있다.

극지에 사는 어류와 미세조류나 세균 같은 미생물은 낮은 온도에 적응하기 위해 결빙방지물질을 만들어 낸다. 결빙방지단백질은 얼음결정을 에워싸 얼음을 더 이상 커지지 못하게 하거나 얼음을 둥글게 만들어 온도가 올라가 해동될 때 얼음결정이 세포 조직을 상하지 못하게 한다. 성게 같은 생물은 아미노산을 많이 축적해 결빙온도를 낮추기도 한다. 북극해 넙치가 생산하는 결빙방지제는 1g에 7천달러 정도의 초고가여서 현재 극지 생물을 이용한 대량생산 연구가 관심을 끌고 있다.

지구 생태계 변화에 따른 생물체 반응 대변

'2004년 북극기후영향평가서'에 의하면 급격한 환경변화로 21세기 말엽에는 극지고유 동식물과 미생물이 사라질 전망이라고 한다. 앞으로 수십 년이 지나면 지구환경변화에 적응하면서 혹독한 환경에서에서도 씩씩하게 살아왔던 수백 수천만 종의 생물들을 더 이상 지구에서 찾아 볼 수 없다는 것은 참으로 슬픈 미래가 아닐 수 없다. 최근까지 인간에 의한 멸종은 주로 대형 척추동물에게만 영향을 미쳤지만 일차적으로 지구 식생의 변화에 의해 일어난 작은 종의 멸종이 늘어남에 따라 이제 그 피해가 누적되고 있다.

지구 역사의 대부분 기간 동안 지구의 기후는 현재보다 상당히 따뜻했으며 극지방으로 갈수록 기온이 더 적게 떨어졌다. 우리는 현재 지구의 역사상 추운 편에 속하는 기간에 살고 있다. 보통 기후는 천천히 변화하지만 주요 기후 변동이 5천 년에서 1만 년 정도의 기간 동안 일어나기도 했는데, 태양을 도는 지구의 궤도가 바뀐 결과였다. 몇몇의 기후 변동은 더 빠르게 일어난 것으로 보인다. 예를 들면, 제 4기 간빙기 동안 남극해는 100년도 채 되지 않은 기간 동안 빙하로 덮인 상태에서 거의 빙하가 없는 상태로 바뀌었는데 그러한 빠른 변화는 대양 해류의 갑작스런 변화에 의한 것으로 알려져 있다. 기후는 때때로 너무나 빠르게 바뀌어 이로 인해 생긴 멸종이 화석 기록상으로는 순간적인 현상으로 보이기도 한다. 오르도비스기, 데본기, 페름기, 삼첩기 백악기, 제 3기에 각 각 해양생물체의 대멸종 시기가 나타났었는데 대부분 해수면이 낮아졌을 때 일어났다.

생물이 죽으면 그 생물의 DNA는 보통의 경우 생물 내부의 뉴클레아제의 작용으로 인해 분해되지만, 빠른 건조, 낮은 온도, 그리고 높은 염도 등의 조건은 DNA 구조가 훨씬 오랫동안 보존되며, 극지환경 속에 갇힌 생물의 잔재가 남극 얼음과 영구동토층에서 발견되고 있다. 이러한 DNA는 지구 과거 생물의 역사, 그리고 진화의 열쇠를 쥐고 있다. 어디서 새로운 유전자가 오는지, 그리고 개체들의 지놈 진화 탐구의 소재로서 어떻게 지구에 생존하게 되었는지 등을 포함하는 생물학적 문제를 해결하는데 도움을 줄 것이다.

지의류는 곰팡이와 미세조류가 공생하는 생명체이다. 진화와 대사물질 연구대상인 지의류 모습들

그동안 인간의 활동으로부터 고립된 채 춥지만 깨끗하고 안정되게 살아온 극지의 생명체들이기에 지구온난화나 환경오염에 지구상의 어느 생명체보다 민감하게 반응해서 그런 것일까. 그렇다면 전 지구적 환경 변화가 가져다올 지구 생태계 변화와 생태계의 구성원인 다양한 생물들의 반응을 극지 생물만큼 대변해 줄 생명체도 지구상에는 없을 것이다.

우리나라는 국제협약인 '환경보호에 관한 남극조약의정서'와 국내법인 '남극활동 및 환경보호에 관한 법률'에 따른 실천이나 남극조약협의당사국회의(ATCM), 남극연구과학위원회(SCAR), 남극국가운영자대표회의(COMNAP), 국제북극과학위원회(IASC) 등의 국제기구 활동을 통하여 극지에서의 지속적인 활동 보장과 기득권 확보를 위하여 극지 생물다양성과 극지생태계 구조와 기능, 극지환경 모니터링 등의 연구하고 있다.

미국은 2003년 '지놈시대의 극지생물학 프론티어' 보고서를 내고 극지생물의 유전체 연구를 적극 지원하고 있으며, 유럽 연합은 산업체와 'MICROMAT'라는 컨소시엄을 구성하여 새로운 미생물을 탐색해 이미 극지 미생물 2종의 유전체 분석을 완료하였다. 이 유전체 분석 결과를 토대로 마이크로칩을 제작하여 저온 환경에서만 발현이 증가하거나 감소하는 저온 적응 관련 유전자의 연구가 시도되고 있다.

앞으로 마이크로어레이와 이차원적 전기이동과 질량분석을 통한 단백질 변환에 대한 연구, 전사 프로파일링, 단백질체, 그리고 메타볼로믹스와 같은 새로운 실험 기법이 적용되면서 지구환경변화가 극지 미생물 종과 군집구조에 미치는 효과의 이해, 자외선이 생태계에 미치는 효과, 극단적 극지 환경조건에 적응하는 진화의 메커니즘 파악 등의 연구가 활성화될 것으로 기대된다. ST

글쓴이는 서울대학교 미생물학과, 독일 브라운슈바이크대학을 졸업하였다.