

©Jeff Hunter/Getty Images

V 생명의 다양성

WEB 4

생명의 기원과 다양성

- W4.1 지질학적 시간
- W4.2 생명의 기원
- W4.3 초기 생명체에 대한 증거
- W4.4 지구의 변화하는 시스템
- W4.5 생명의 지속적인 변화

도입

모든 생물은 공통 조상으로부터 비롯되었으며 모든 살아 있는 것들은 공통점이 많다. 하나 이상의 세포로 구성되어 있으며, 대사 작용을 하고, ATP를 이용하여 에너지를 전환하며, DNA에 유전 정보를 암호화한다. 그러나 생물종들은 세균에서 아메바, 대왕고래, 세쿼이아에 이르기까지 무척 다양하다. 위의 사진과 같은 산호초는 많은 생명체로 구성되어 있고 다양한 생물체들을 보호하는 다양성의 소우주라고 할 수 있다. 지구상의 생명의 기원과 역사는 지구상의 지질, 기후, 대기의 변화와 연결되어 있다. 생명의 다양성을 이해하기 위해서는 지질학적 시간 규모에서 지구의 역사와 생물이 지구 시스템에 어떤 영향을 미쳤는지에 대해 물음을 던질 필요가 있다.

W4.1 지질학적 시간

학습 목표

1. 지구의 역사를 기술할 수 있다.
2. 지질학적 사건과 생명의 진화의 관계에 대해 이해할 수 있다.

지구는 지질학적 시간에 걸쳐 변화했다

지구의 역사에 관한 근본적인 질문 중 많은 것들이 지질학적인 것이다. 수십 억 년에 걸친 생명의 기원과 다양화에 관해 탐구하기 위

해서 지질학적 시간을 이해하는 것이 중요하다. 지질학적 시간은 4개의 이언(eon)으로 나뉜다(그림 W4.1). 이언은 또한 대(代, era)로 나뉘고, 대는 기(紀, period)로 세분화된다.

지구가 형성된 이래 많은 변화가 일어났기 때문에 첫 화석이 나타나기 전 5억~7억 년 동안(하데스이언)은 어떤 암석도 존재하지 않는다. 지구 초기의 모습을 확실히 아는 것은 불가능하지만, 지질학적 증거에 의하면 46억 년 전 유성이 지구와 충돌하여 그 파편이 달을 형성하였다는 것을 알 수 있다. 지구의 암석으로 된 맨틀은 말 그대로 녹아 있어 온도가 2000°C를 넘는다.

또한 하데스이언 시기의 지구는 소행성과 충돌했는데, 이는 잠재적으로 전체 해양을 증발시킬 수도 있었다. 불 같은 지구와 때로는

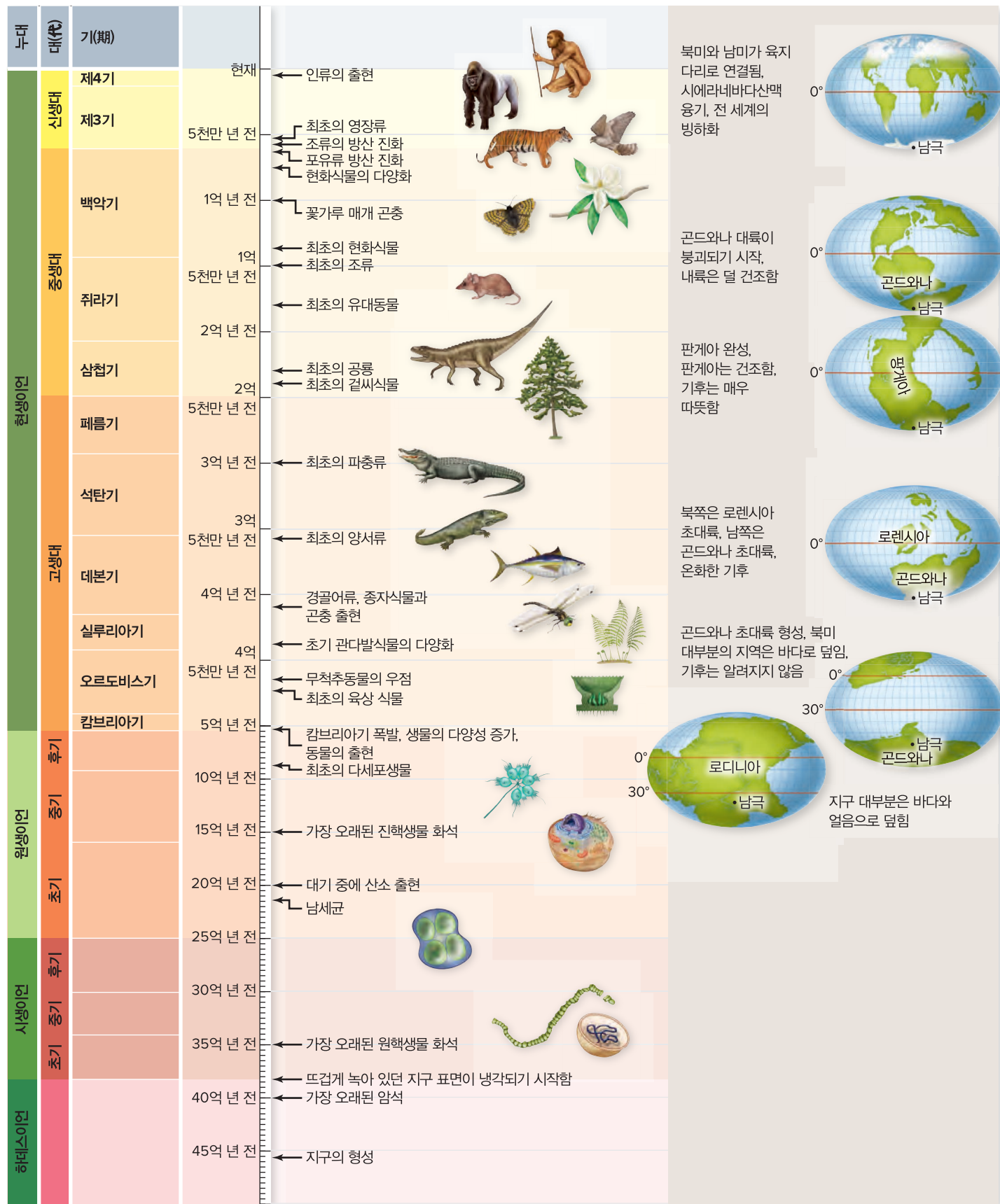
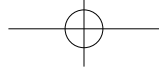
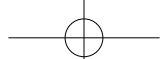


그림 W4.1 지질학적 연대와 지구상의 생명의 진화.

2 WEB 4 생명의 기원과 다양성



얼어붙은 지구 사이를 왔다 갔다 하는 매우 역동적인 환경에서는 생명체가 나타나기 힘들었다.

이산화탄소 농도의 변화가 온도에 영향을 미쳤다

초기 대기에는 이산화탄소 농도가 높았고, 물은 녹아 있는 암석으로부터 서서히 증발했다. 지구는 200만 년에 걸쳐 차가워졌다. 온도가 내려감에 따라 규산염으로 구성된 구름이 대기에 응축되었고, 비가 내려 이산화탄소 대기하에 따뜻한 바다가 형성되었다. 이산화탄소의 농도는 떨어졌고, 지구는 식었고, 오랜 시간에 걸쳐 바다는 얼었다.

이산화탄소의 감소는 대기에 흡수되는 복사 에너지의 감소로 인해 온도 하강으로 이어졌다. 그렇다면 무엇이 대기 중 이산화탄소의 감소를 가져왔을까? 이산화탄소의 농도의 관점에서 보면 대양과 대기는 평형 상태에 있었다. 화산 폭발이 대기과 대양에 이산화탄소를 보냈고, 암석의 풍화에 의해 이산화탄소의 농도가 감소했다.

풍화는 차고, 건조한 환경에 비해 덥고, 습도가 높은 환경에서 더 빨리 일어났다. 풍화는 규산염 암석을 토양으로 바꾸어 놓았다. 그것은 대기 중 이산화탄소가 물(H_2O)과 결합하여 탄산(H_2CO_3) 빗물을 형성할 때 일어났다. 탄산은 암석과 반응하여 중탄산 이온(HCO_3^-)과 칼슘 이온으로 분해되었다. 풍화된 용질은 강물과 바다를 통해 이동하여 탄산칼슘($CaCO_3$)을 형성하였고, 이 탄산칼슘은 대양에 침전되어 이산화탄소를 분리시켰다(그림 W4.2).

대륙은 지질학적 시간에 걸쳐 이동한다

지구의 지각은 대륙과 대양 아래의 판(plate)이라고 불리는 단단한 암석 조각을 형성한다. 판구조론(plate tectonics)에 따르면, 이 거대한 암석은 해마다 몇 cm씩 이동한다. 여기서 구조(tectonics)라는 용어는 '건축(build)' 또는 '건축업자(builder)'라는 뜻의 그리스어에서 유래하는데, 판의 이동을 통해 지구의 지질학적 특성이 구축되었고, 지금도 구축되고 있다. 대부분의 주요 지진과 화산 활동은 판들이 움직일 때 판의 가장자리에서 발생한다.

판은 천천히 움직이지만, 오랜 지질학적 시간에 걸쳐서 누적된 효과는 놀라운 정도다. 지구 역사에서 여러 차례 모든 대륙이 하나의 초대륙을 형성하였다(그림 W4.1). 로디니아(Rodinia, 모든 대륙)과 곤드와나(Gondwana, 현재의 남반구의 대륙으로 구성)라는 2개의 초대륙은 서로 다른 시기에 존재했으며, 둘 다 남반구를 차지했었다. 곤드와나는 초대륙인 판게아(Pangea)를 형성했는데, 이 판게아는 225만 년 전에 완전히 형성되었다가 25만~50만 년 전후에 분리되기 시작했다. 지질학자들은 판게아의 해체로부터 비롯된 지난 2억 년 동안의 판구조론의 증거에 대해 확신하고 있다.

생명은 시생이언에 출현했다

지질학적 시가노이 어느 시점에 생명이 출현했다. 하테스이언에 이은 시생이언(Archean eon)에 몇몇 화석 증거가 존재한다. 지구 역사에서 20억 년이 지나고 원생이언(Proterozoic eon, '초기 생명체'를 의미)이 시작되었다. 이 시기부터 6억 5천 만 년 전 현생이언(Phanerozoic eon, '눈에 보이는 생명체'를 의미)이 시작되기 전에는 여러 개의 대륙으로 쪼개진 초대륙 로디니아가 존재했다. 전체적으로 하테스이언, 시생이언, 원생이언은 선캄브리아기(Precambrian)로 불린다. 캄브리아기 중에서도 첫 시기인 현생이언의 고생대가 시작되면서 놀랄 만한 다양성을 지닌 다세포 생물이 생겨났다. 지질학자들과 생물학자들은 현생이언으로부터 시작하여 기(紀)와 그보다 더 짧은 기간의 순서에 따라 시간의 덩어리들을 나누기 시작한다.

현생이언은 지구 역사에서 단 12%만을 차지하지만, 다세포 생물의 다양성과 관련한 생물학적 역사의 대부분을 차지한다(그림 W4.1 참조). 조류와 포유류들은 지구 역사의 4% 동안 존재하였고, 인간은 지구 역사의 0.2% 동안만 존재했다.

핵심 요약 W4.1

지구의 역사는 46억 년에 이르지만 생명체가 나타나기 전 하테스이언 시기의 지질학적 기록은 제한적이다. 처음에 지구의 환경은 생명체에 적대적이었지만, 환경이 바뀌에 따라 30억 년 전쯤 생명체가 출현하였다. 다세포 생물은 최근의 십 억 년 이내에 나타났다.

- 화석기록으로부터 생물의 다양성을 연구할 수 있는 기회가 주어지면 어느 이언(eon)을 택해야 할까? 그렇게 선택한 이유는 무엇일까?

W4.2 생명의 기원

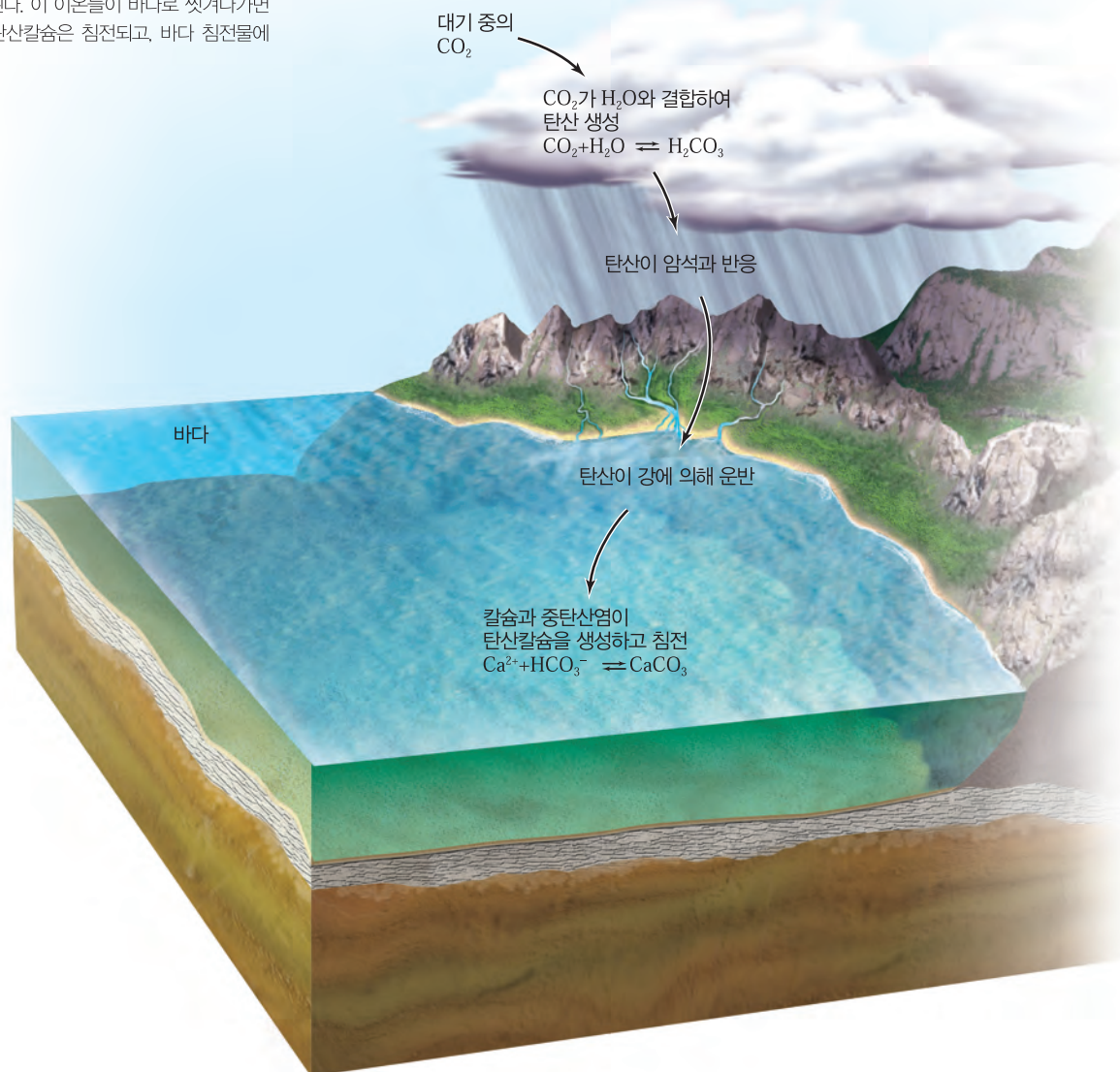
학습 목표

1. 현재의 대기와 하테스이언 말기의 대기 상태를 비교할 수 있다.
2. 생명체가 나타나기 위해 필요한 주요 단계를 기술할 수 있다.

우리는 생명체가 지구에서 어떻게 시작되었는지 정확히 모른다. 우리가 그 과정을 재현할 수 없기 때문에, 초기 지구의 지질학으로부터

그림 W4.2 풍화작용은 대기로부터 이산화탄소를 가져온다.

대기 중의 H_2O 와 CO_2 가 결합하여 탄산(H_2CO_3)이 생성되고, 이 탄산이 암석과 반응하여 HCO_3^- 와 Ca^{2+} 가 방출된다. 이 이온들이 바다로 씻겨나가면서 탄산칼슘(CaCO_3)을 형성한다. 이 탄산칼슘은 침전되고, 바다 침전물에 존재하는 탄소를 분리한다.



터 시작하여 생명의 기원에 관한 퍼즐을 하나로 모으기 위해 다양한 과학적 탐구를 시도해야 한다. 46억 년 전 하데스이언 시기의 지구는 암석이 녹아 있는 뜨거운 덩어리였다. 지구가 냉각됨에 따라 많은 양의 수증기가 화학적으로 풍부한 해양의 표면에서 액체 상태의 물로 응축되었다. 생명의 기원에 관한 하나의 시나리오는 암모니아, 폼알데하이드, 폼산(formic acid), 시안화물, 메테인, 황화수소, 유기탄화수소가 농축되어 있는 뜨겁고 냄새나는 수프에서 비롯되었다는 것이다. 바다의 가장자리, 심해열수공이나 다른 곳에서 생명체가 자발적으로 생겨났을 가능성이 있다. 이런 일이 어떻게 일어났는지에 관해서는 여전히 수수께끼이지만, 우리는 결국 지구상에 존재하는 모든 생명체의 기원이 된 초기 생명체의 기원에 관한 호기심을 피할 수 없다. 초기 바다의 소용돌이치는 유기물 복합체로부터 어떻게 생

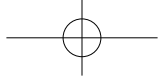
명체가 진화했을까?

생명의 성질을 갖는 세포가 존재하기 오래 전, 탄소 기반의 유기 분자가 무기 물질로부터 형성되었다. 단백질, 핵산, 탄수화물, 지질의 형성이 필수적이긴 하지만, 생명에 대해서는 그것들로만 충분한 것은 아니다. 세포가 진화하기 위해서는 기능적이고, 상호의존적인 단위로 조립되는 유기 분자들이 필요했다.

초기 유기 분자들은 다양한 방법으로 형성되었을 것이다

유기 분자는 지구 밖에서 기원했을 수 있다

유기 분자들은 모든 살아 있는 생명체의 기본이다. 첫 유기 분자가 어떻게 생겨났는지에 대해서는 알려진 바가 없는데, 일부는 지구



밖에서 왔을 수 있다. 수십 만 개의 운석과 혜성들이 초기 지구에 떨어진 것으로 알려져 있으며, 최근의 연구에 따르면 이들 중 일부는 유기 물질을 포함하고 있었을지도 모른다. 예를 들어, 2000년 브리티시 컬럼비아의 타기시호(Tagish Lake)에 떨어진 운석을 화학적으로 분석한 결과, 전체 무게의 3%가량이 유기 물질인 것이 밝혀졌다. 운석에는 미량의 아미노산과 함께 카복실산과 설키프산(sulfonic acid)과 같은 수용성 유기 분자가 포함되어 있었다. 글리신은 운석에서 가장 풍부한 아미노산이고, 탄소 동위원소 비율이 지구에서 발견되는 암석과 일치하지 않아 이들 유기 분자들이 지구 밖에서 기원했을 수 있다는 주장을 뒷받침한다.

유기 분자는 초기 지구에서 기원했을 수 있다

초기 대기의 정확한 조성에 관해서 지구화학자들 사이에 의견이 일치하지 않는다. 가장 인기 있는 견해로는 초기 대기가 주로 많은 양의 수증기(H_2O)와 이산화탄소(CO_2), 질소 가스(N_2)로 구성되어 있었다는 것이다. 어떤 시나리오에서는 초기 대기에 수소 가스(H_2)와 수소 화합물이 황, 질소, 탄소와 같은 가벼운 원소들과 결합하여 황화수소(H_2S), 암모니아(NH_3), 메테인(CH_4)을 형성하고 있었다고 본다. 이 대기 구성은 수소 원자와 전자를 사용할 수 있기 때문에 이른바 환원성 대기라 불린다. 환원성 대기는 화학 반응을 일으키기 위해 많은 에너지가 필요하지 않아 생명체가 진화한, 탄소가 풍부한 분자를 만들기 더 쉬웠을 것이다.

이런 종류의 환원성 대기를 가정했을 때, 그렇다면 자연적인 과정에 의해 어떤 종류의 유기 분자가 형성될 수 있을까? 이에 관해 미국의 화학자 밀러(Stanley L. Miller)와 유리(Harold C. Urey)가 처음으로 실험했다. 이제는 고전이 된 실험을 통해 그들은 환원성 대기에서 지구의 원시 해양 상태를 재현하려고 시도했다. 비록 그들의 가설이 틀린 것으로 판명되더라도(아직 판결은 내려지지 않았다) 이 실험은 생물 발생 이전의 화학 분야를 선도했다는 점에 매우 중요한 실험이다.

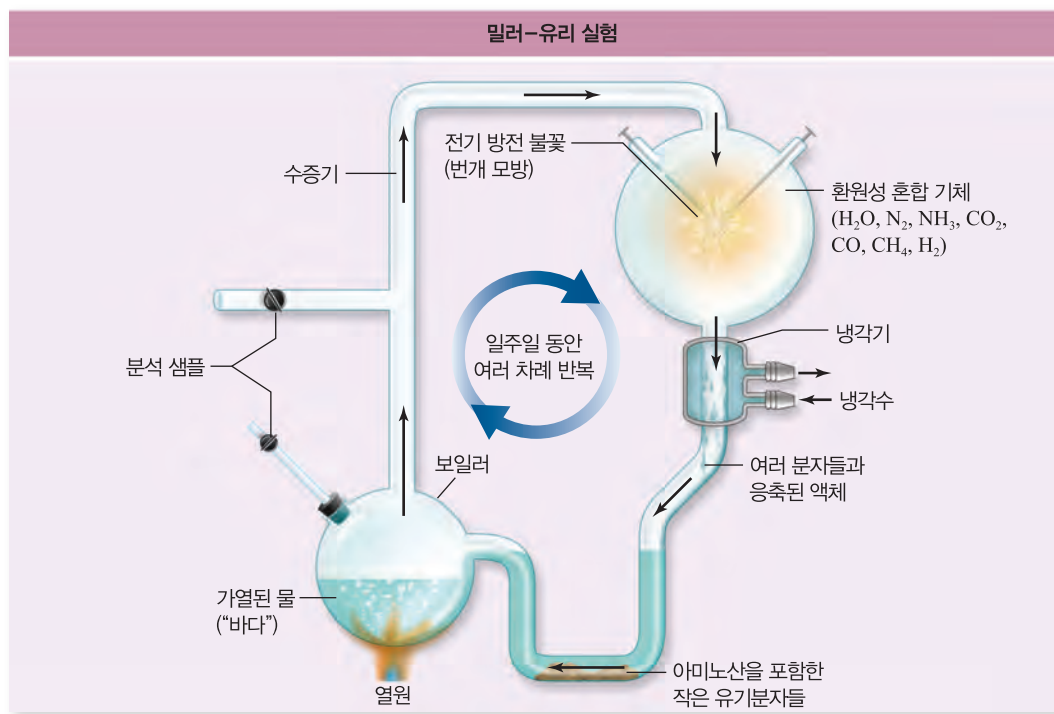
밀러와 유리는 수소가 풍부한 환원성 대기를 산소가 없는 액상의 물과 혼합시켰다. 이 혼합물을 $100^\circ C$ 이하의 온도에서 유지하면서 번개를 모방하여 방전의 형태로 에너지를 공급하였다(그림 W4.3).

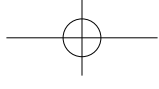
그들은 일주일도 안 되어 원래 메테인 CH_4 (가스)에 포함되어 있던 탄소의 15%가 단순한 탄소 화합물로 변환되었다는 것을 발견했다. 이 혼합물에는 포알데하이드(CH_2O)와 시안화수소(HCN)가 포함되어 있었다. 이 혼합물들은 다시 결합하여 폼산($HCOOH$)이나 요소(NH_2CONH_2)와 같은 간단한 분자를 비롯하여, 글리신이나 알라닌 아미노산을 포함하는 탄소-탄소 결합을 갖는 좀 더 복잡한 분자를 형성하였다.

이후 다른 과학자들은 비슷한 실험을 통해 글리신과 알라닌을 비롯하여 글루탐산, 발린, 프롤린, 아스파르트산등의 아미산을 포함하여 30종류 이상의 탄소화합물을 발견하였다. 또 다른 생물학적으로 중요한 분자들 역시 이들 실험에서 형성되었다. 예를 들어, 시안화수소

그림 W4.3 밀러-유리 실험.

이 장치는 2개의 용기를 연결하는 막힌 관으로 이루어져 있다. 위쪽 용기에는 초기 지구 대기의 성분으로 추정되는 혼합 기체로 채워져 있다. 전기 방전 불꽃은 번개를 모방한 것이다. 냉각기는 기체를 냉각시켜 액체가 되도록 하여 두 번째 용기인 “바다”로 떨어지도록 한다. 대기를 모방한 용기에서 형성된 분자들은 이 액체에 녹아 바다 용기로 이동하고, 이를 분석하게 된다.





는 DNA와 RNA에 존재하는 염기의 하나인 아데닌(adenine)과 같은 복잡한 고리 모양 분자를 형성한다. 따라서 생명체의 주요 분자들은 초기 지구의 환원성 대기로부터 형성될 수 있는 것이다.

대사의 진화에서 중요한 이정표를 확인할 수 있다

핵심적인 대사의 초기 진화에 관하여 독립영양 기원과 종속영양 기원이라는 2개의 기본적인 시나리오가 있다. 독립영양 시나리오에서는 무기 화합물의 산화로부터 나오는 에너지를 이용하여 시트르산을 환원시킨다(6장 참조). 종속영양 시나리오는 밀러-유리 실험을 기반으로 하는데, 이 실험은 생명체가 진화한 원시 수프의 근거를 제시한다. 이 두 모델을 구분하는 것은 사실상 불가능하며, 이 두 모델의 결합 역시 가능하다.

아마도 지구상의 살아 있는 시스템의 진화에 있어서 어떤 것이 이정표에 해당할지 생각해보는 것이 매우 유익할지 모르겠다. 그런 이정표에 해당하는 사건들은 산소 광합성, 탄소고정, 질소고정과 같은 것들이다. 이 대사 과정들은 핵산과 단백질을 포함하는 정보 저장 및 발현 시스템의 진화와 더불어 중요한 과정들이다.

광합성의 기원을 명확히 알아내기는 어렵지만, 산소 광합성의 출현은 대기 중 산소 분자의 존재에 의해서라는 것은 추정할 수 있다. 현재 이용 가능한 모든 산소 분자는 광합성에 의해 물이 산화된 결과로 생성된 것이다. W4.4절에서 자세히 설명하고 있듯이, 대기에 산소가 포함된 2개의 시기가 있다. 한 시기는 후기 시생이언이고, 또한 시기는 후기 원생이언이다. 이는 산소 광합성이 후기 시생이언에 널리 퍼졌다는 것을 의미한다.

환원된 질소는 생명체에 필수적이기 때문에 질소고정은 중요하다. 이는 현재 육상 생태계에서 제한적 영양소이다. 질소는 화산 활동이나 대기 중의 번개에 의해 생물학적으로 이용 가능한 형태로 '고정'될 수 있다. 그러나 이는 매우 큰 생명체 개체군을 유지하기 위해 충분한 고정 질소를 만들어내지 못한다. 생물학적 질소고정이 이러한 한계를 없애는데, 이 과정에 필요한 효소를 질소고정효소(nitrogenase)라고 하며, 이 효소는 원핵생물에서만 발견된다. 게놈 분석 결과 질소고정효소의 기원은 22억~15억 년 전으로 거슬러 올라간다. 최근에는 질소 동위원소를 분석한 결과 그보다 더 일찍, 즉 시생이언 후기(27억~25억 년 전)에 기원했을지도 모른다고 한다.

정보 저장과 발현의 측면에서 인기 있는 모델에 따르면 RNA 세계가 현재의 DNA-기반 세계에 선행한다. 이는 RNA가 화학 반응을 촉매하면서(5장 참조) 화학 정보를 저장할 수 있다는 관찰 결과에 근거를 둔다. 이 시나리오에서는 DNA가 아니라 RNA가 생명에 이르는 중요한 단계인 자기복제를 하는 첫 핵산이었다. 나중에 RNA보

다 안정적인 DNA가 정보 저장 기능을 대신하게 되었고, 분자적 다양성이 큰 단백질이 효소 기능을 담당하게 되었다.

초기 RNA 세계를 뒷받침하는 많은 증거가 있긴 하지만, 몇 가지 문제점도 있다. 그중 하나는 초기 지구에서 리보스(ribose)의 원천이다. 현재에는 이를 잘 설명하지 못한다. 그러나 어떤 연구는 생물 발생 이전 지구의 그럴듯한 조건에서 순수한 리보스 없이도 RNA 뉴클레오타이드가 합성될 수 있다는 걸 보여주었다. 또 다른 문제는 RNA 뉴클레오타이드의 긴 사슬을 형성하는 방법에 관한 것이다. 이를 설명하는 하나의 모델은 점토 표면이 이 과정에 관여한다고 제안한다. 점토 표면은 뉴클레오타이드를 농축할 뿐만 아니라 그것들이 연결되기 위해 필요한 금속 촉매도 제공할 수 있다.

단세포가 최초의 생명체였다

대사와 더불어 세포에는 세포막이 필요하다. 지질 또는 단백질 거품 내의 물리적 공간에 유기 분자를 가둬둠으로써 특정 분자의 농도를 증가시킬 수 있다. 그렇게 함으로써 이들 분자와 관련한 반응의 속도가 증가한다.

현재의 세포막은 인지질 2중층으로 구성되어 있지만(4장 참조), 초기의 세포막은 지방산으로 구성되어 있었을 것이다. 이는 인지질보다 단순한 분자이면서 생명 발생 이전의 조건에서 쉽게 형성될 수 있었다. 그리고 인지질처럼 친수성 머리와 소수성 꼬리가 있어 2중층 및 밀폐된 세포와 같은 구조를 형성할 수 있다.

어느 시점에 이 거품들은 세포막과 함께 도입부에서 기술한 생명체의 모든 특징을 갖는 살아 있는 세포가 되었다. 지구에서 대부분의 생명체 역사에서 이 단세포 생물은 유일한 생명체였다. 우리는 이러한 과정을 재현할 수 없기 때문에 세포가 어떻게 형성되었는지 정확히 알 수 없지만, 어느 시점에 단순한 생명체가 진화했다는 것만큼은 분명하다.

핵심 요약 W4.2

생명체에 필요한 유기 분자들이 지구상에서 형성되었는지, 지구 밖에서 형성되어 유성에 의해 지구로 왔는지의 여부는 여전히 의문이다. 초기 지구의 조건을 완벽하게 재구성할 수는 없지만, 온도가 극단적이며 대기가 지금과는 다른 조성이어서 이런 조건에서 유기 분자, 대사 경로, 세포가 진화할 수 있었을 것이다.

- 초기 지구로 여행했다 생물 발생 이전의 샘플을 가지고 돌아올 수 있다면, 초기 생명체의 기원을 이해하기 위해서 어떤 형태의 분자를 찾아봐야 할까? 예측한 분자에 기초하여 생명의 기원에 대해 논증해 보자.

W4.3 초기 생명체에 대한 증거

학습 목표

1. 생명체의 기원에 관한 화석 증거를 평가할 수 있다.

우리가 지구의 초기 역사에 대해 더 많이 알면 알수록, 지구상의 첫 생명체는 매우 높은 온도에서 발생했고, 살았다는 것을 알게 된다. 약 38억 년 전까지 해양의 온도는 $49^{\circ}\text{C}\sim 88^{\circ}\text{C}$ 까지 떨어졌다. 약 38억 년 전, 지구가 살 만해졌을 때 첫 생명체가 나타났다. 오늘날의 우리가 참을 수 없을 것 같은 초기 지구의 지옥 같은 온도 때문에 생명체가 탄생할 수 있었다. 이제 우리는 38억~32억 년 전으로 거슬러 올라가 생명에 대한 증거를 찾아본다.

화석 증거는 생명이 적어도 32억 년 전에 기원했다는 것을 보여준다

초기 생명체는 시생이언에 출현했을 것이지만, 미세화석 형태의 생명체의 증거는 발견하기도 힘들고 해석하기도 어렵다. 비생물학적 과정이 미세화석과 같은 구조를 만들 수 있고, 생성된 지 30억 년이 넘는 화석이 시간이 지남에 따라 지질학적 작용에 의해 변하지 않고 남는 경우는 거의 없다. 남아프리카의 카프발 대륙괴(Kaapvaal craton)와 호주 서부의 필바라 대륙괴(Pilbara craton)에서 거의 손상되지 않은 채로 남아 있는 35억~38억 년 된 암석으로 발견되었다 [대륙괴(craton)란 손상되지 않은 대륙 지각의 암석층이다]. 이 암석들에서 생물학적 기원으로 해석되는 구조가 발견되었다. 비록 논쟁의 여지가 있는 해석이긴 하지만, 시간이 지남에 따라서 축적되는 증거는 이 구조가 진짜 화석 세포라는 것을 지지한다.

미세화석은 현미경으로 봐야 보일 정도의 생명체가 화석화된 것이다. 많은 미세화석은 작고(지름 $1\sim 2\ \mu\text{m}$), 단세포이고, 외부 부속지가 없으며, 내부 구조는 거의 없는 것처럼 보인다. 따라서 미세화석은 현재의 원핵생물을 닮았다.

현재 가장 오래된 미세화석은 35억 년 전 것이다. 이러한 미세화석이 생명체의 잔재라는 주장은 동위원소 데이터와 복잡한 탄소 분자를 포함하고 있다는 분광 분석 결과에 의해 뒷받침된다. 이 미생물학적 구조가 진짜 화석인지는 논란이 있고, 어떤 원핵생물 그룹이 다양한 미세화석과 관련이 있는지는 여전히 불분명하다.

더 강력한 증거는 직경 $300\ \mu\text{m}$ 의 미세화석에서 나왔다. 이 미세화석은 32억 년 전의 남아프리카공화국의 얇은 해양 환경에 존재하

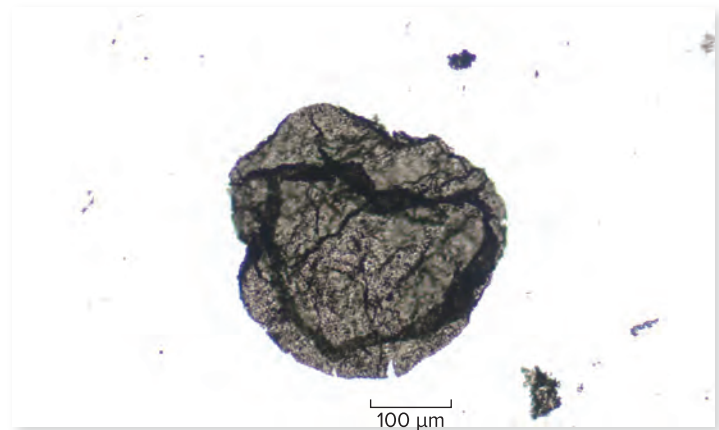


그림 W4.4 남아프리카에서 발견된 32억 년 전의 미세화석.

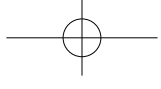
는 미생물 매트的一部分이다(그림 W4.4). 주사전자현미경을 통해서는 탄소질 구조를 둘러싸고 있는 주름진 유기질 벽(두께 $160\ \text{nm}$)을 볼 수 있고, 투과전자현미경을 통해서는 압축된 벽 사이에 있는 속이 비어 있고 유기질 벽으로 된 소낭들(vesicles)을 볼 수 있다. 이러한 벽의 구조는 생물학적 기원을 갖는다고 보고된 원생이언의 미세화석에서 발견된 것과 유사하다. 32억 년 전 미세화석의 크기는 진핵세포와 일치하지만, 이들은 남세균(cyanobacteria)일 가능성이 높다(이에 대해서는 곧 논의한다).

이러한 미세화석과 더불어, 오래된 생명체에 대한 간접적인 증거는 스트로마톨라이트(stromatolites)라고 불리는 퇴적물의 형태에서 찾아볼 수 있다(그림 W4.5). 이 구조물은 일반적으로 미생물 매트에 의해 고정되어 있는 퇴적물과 침전된 물질의 혼합물로 간주된다. 매트를 구성하는 미생물은 남세균으로 생각된다. 스트로마톨라이트는 27억 년 전쯤 형성되었다. 상대적으로 최근의 스트로마톨라이트 역



그림 W4.5 스트로마톨라이트.

세균 세포의 매트가 미네랄 침전물을 포획하여 보이는 것과 같이 돔 모양을 형성한다.



시 알려져 있기 때문에, 이러한 구조물의 형성과 생물학적 특성에 관해서는 논란이 덜하다.

동위원소 자료는 탄소고정이 오래된 과정임을 보여준다

생명이 언제 시작되었는지에 대한 해답을 구하는 또 다른 방법은 지질학적 기록에서 생명 시스템의 신호를 찾아보는 것이다. 살아 있는 시스템은 환경을 변화시키며, 때로는 이러한 변화를 간파할 수 있다. 가장 분명한 변화는 살아 있는 시스템은 선택적으로 탄소 동위원소를 사용한다는 점이다. 살아 있는 생명체는 다른 탄소 동위원소보다 먼저 ^{12}C 를 세포 속으로 포함시키고, 따라서 대기 중의 탄소 동위원소의 비율을 변화시킬 수 있다. 또한 화석화된 몸은 그 주위의 비유기적인 암석보다 ^{12}C 의 비율이 높다.

생명의 신호를 찾기 위하여 가장 오래된 암석의 탄소 화합물의 연대를 측정하고 분석하는 연구가 많이 이뤄져 왔다. 탄소 신호에 대한 분석 결과 탄소고정, 즉 무기 탄소를 유기 형태로 동화시키는 과정이 38억 년 전에 이미 활발했다는 것이 밝혀졌고, 이는 가장 오래된 미세화석의 연대와 일치한다.

오래된 탄소고정 과정은 두 가지 주요 경로를 통해 일어났다. 가장 흔한 탄소고정 과정은 캘빈회로이다(7장 참조). 이 과정은 2개의 광계를 이용하여 산소 광합성을 수행하는 남세균과 조류, 현대 육상 식물에서 이용된다. 캘빈회로는 또한 1개의 광계를 이용한 무산소성 광합성을 수행하는 녹색 및 홍색 황세균에서도 나타난다. 초기의 탄소고정은 이 무산소성 광합성에 의한 것이었을 것이다.

캘빈회로의 주요 효소가 원핵생물의 한 그룹인 고세균의 몇몇 종에서 확인되지만, 현재까지 전체 캘빈회로는 고세균에서는 발견되지 않았다. 대신 일부 고세균은 시트르산회로의 환원성 버전을 이용한다(6장 참조). 이러한 탄소고정 경로는 또한 일부 무기 영양 세균에서도 이용되는데, 녹색 황세균은 무기 화합물을 산화시킴으로써 에너지를 얻는다. 2개의 경로 역시 무기 영양 세균인 고세균과 녹색 비황세균에서 나타난다. 이는 탄소를 고정시키는 능력이 여러 차례 진화했다는 증거이다.

고대 암석에서 발견된 탄화수소가 생물학적 기원을 갖기도 한다

오래된 생명체의 증거를 찾는 또 다른 방법은 명백하게 생물학적 기원을 갖는 유기 분자를 찾는 것이다. 이러한 분자를 **바이오마커(biomarker)**라고 한다. 쉽게 들리지만, 그런 바이오마커를 찾는 것은 어려운 일이다. 지질의 지방산 꼬리에서 유래한 탄화수소는 그러한 바이오마커 중 하나이다. 이것들의 탄소 동위원소 비율을 분석함

으로써 생물학적 기원을 확인할 수 있다. 호주의 필바라 지대에서 추출할 수 있는 탄화수소를 분석한 결과, 27억 년 된 남세균 흔적을 찾을 수 있었다. 아주 오래된 암석과 운석에서 결정적인 화학적 표지자를 찾는 일은 아주 중요한 분야이다.

핵심 요약 W4.3

최초의 세포에 대한 증거는 미세화석에 있다. 최초의 미세화석은 논란의 여지가 있긴 하지만, 적어도 35억 년 전의 것이다. 초기 생명체에 대한 증거로는 생물학적 활동으로 변형된 동위원소 비율이 있다. 캘빈회로와 시트르산회로의 환원 버전은 다른 경로와 더불어 고대 생명체에서 탄소고정을 가져온 것으로 보인다. 일부 탄화수소는 바이오마커로 보이고, 따라서 고대 생명체의 증거가 될 수 있다.

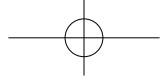
- 당신은 초기 세균 세포일 수도 있는 화석을 발견했다. 이것이 진짜 초기 세균 세포인지를 확신하기에 충분한 증거는 무엇일까?

W4.4 지구의 변화하는 시스템

학습 목표

1. 이산화탄소의 농도와 빙하 작용 사이의 관계에 대해 설명할 수 있다.
2. 판구조론이 지구상의 생명체의 진화에 영향을 미쳤다는 것을 주장할 수 있다.

기후(온도와 수분 이용 가능성)와 대기(이산화탄소와 산소의 농도 포함)는 생물이 살아가고 번식하는 데 영향을 미치는 많은 요소들 중 하나다. 지구 역사를 볼 때, 이러한 요소들의 반복적이고 극적인 변화가 대멸종으로 이어지거나, 진화 과정에 영향을 미쳐왔다(대멸종 현상에 대한 내용은 20장에서 설명). 지각판이 이동하면 단순하게는 태양 광선을 차단하는 것을 포함하여 대기를 변화시키는 화산 폭발로 이어진다. 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 지구에서 방출되는 열을 가둬서 온실 효과를 발생시키기 때문에 지질학적 시간에 걸친 이산화탄소 농도의 요동은 지구의 온도 변화와 관련이 있다(WEB6장 참조). 기후와 대기에 영향을 주는 일부 변화는 엄밀하게는 지질학적인 것이지만, 살아 있는 생물 역시 이러한 변화의 원인이 된다. 예를



들어, 광합성의 진화는 대기 중의 산소 농도를 증가시켰다. 이번 절에서는 기후와 대기의 변화가 지질학적 시간에 걸쳐 어떻게 지구상의 생명체에 영향을 주었는지를 탐구한다.

지구의 기후는 끊임없이 변화해 왔다

지구 역사에서 온도와 강우량의 범위는 놀라울 정도다. 초기 지구의 기온은 어떤 시기에는 2000°C가 넘거나 평균 기온이 -50°C에 이르기도 했다. 온도 변화는 육상 생물, 수생 식물, 해양 식물에 즉각적으로 영향을 미친다. 좀 더 오랜 시간으로 보면, 해수면에 영향을 주어 생명체를 파괴시키기도 한다.

지구는 형성 이후로 냉각되어 왔지만, 원생이언 초기와 후기에 예외적으로 일어난 급작스런 세 차례의 온도 하락을 포함하여 여러 차례의 온도 하락으로 생물들이 파괴되었다. 이러한 극단적인 온도 하강으로 인하여 빙하가 온 지구를 덮는, 이른바 ‘눈덩이 지구(Snowball Earth)’라는 현상이 나타났다(그림 W4.6). 이러한 조건에서는 지구 표면을 덮은 얼음이 태양으로부터 복사되는 에너지를 반사시키기 때문에 낮은 기온이 유지된다. 적도에서조차 기온은 현재의 남극 기온에 해당되는 -20°C를 넘지 못했을 것이다. 바다가 얼어붙어 기온 조절도 잘 되지 않아 온도의 변화가 오늘날의 지구보다 더 컸었다.

빙하는 종의 대규모 멸종을 가져온다. 생명체가 극지의 빙하에서 살아남는 것은 상상하기 힘들지만, 마지막 눈덩이 지구 현상이 일어난 지 8000만 년 이후, 좌우대칭 동물이 화석 기록에 나타난다.

지질학적 변화와 살아 있는 생명체에 의해 대기가 변화한다

지질학적 변화로 대기 조성 변화 전부를 설명할 수는 없지만 많은 것을 설명할 수 있다. W4.5절에서 논의하는 것처럼 살아 있는 생물체 역시 대기를 실질적으로 변화시켰다. 여기에서 우리는 O₂, N₂, CH₄를 포함한 다른 대기 가스의 농도 변화가 지구의 생명 진화에 영향을 미쳤다는 것을 염두에 두면서 이산화탄소에 초점을 맞추어 설명하고자 한다.

원생이언 후기 마지막 두 차례의 눈덩이 지구 사건 당시, 대부분의 대륙은 열대 지방에 있었다(그림 W4.1 참조). 평상시에 덥고 습한 열대 지방의 기후는 앞서 설명한 풍화 작용을 가속화시켜 대기 중의 이산화탄소 농도의 감소를 가져왔다. 기온이 함께 낮아지면서 풍화 작용을 늦추고 이산화탄소의 농도가 안정화된다. 풍화 작용은 원생이언 후기의 빙하로 이어진 것으로 추측된다.

덥고 습한 기후와 더불어 판 구조 역시 풍화 작용과 대기 중 이산화탄소 수준에 영향을 줄 수 있다. 커다란 대륙이 작은 대륙으로 쪼개지면서 더 많은 지역이 해안선으로 바다에 노출되어 더 습해졌다.

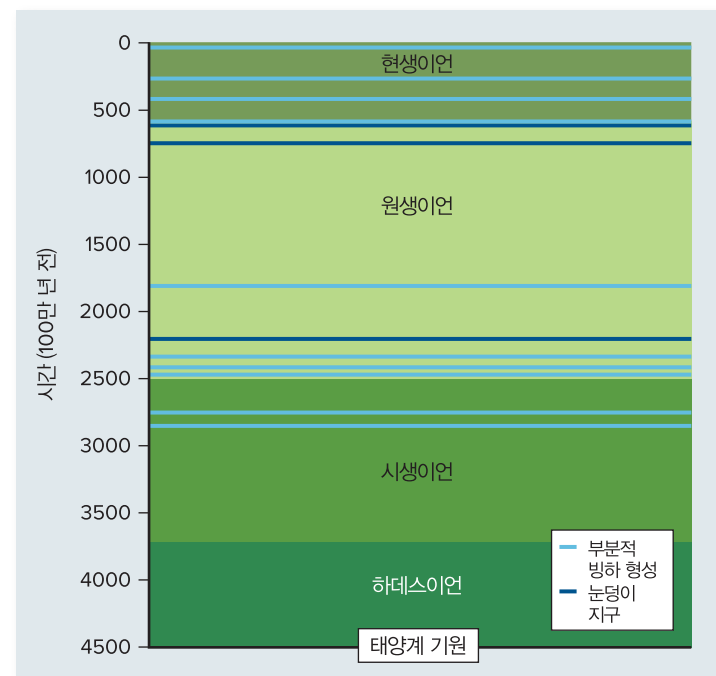


그림 W4.6 원생이언 기간에 일어난 세 차례의 전 지구적인 빙하 작용.

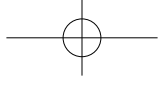
습기가 증가하면서 풍화 작용이 증가하고, 대기 중 이산화탄소 농도가 감소했다. 따라서 원생이언 후기의 대륙 이동에 따른 풍화 작용의 증가 역시 빙하 형성에 기여했다.

대륙 이동이 진화에 영향을 미쳤다

이동하는 판이 대기와 기후 변화에 기여하지만, 또한 개체군들을 생식적으로 격리시키거나 격리되었던 개체군들이 교배할 수 있도록 함으로써 진화에 영향을 미친다(20장 참조). 대륙은 움직이는 판에 잠겨 있는 상태로 있었다. 원생이언 시기 모든 육지는 로디니아라는 하나의 초대륙 형태로 존재했고, 이 초대륙은 7억 년 전쯤 작은 대륙으로 쪼개지기 시작했다. 이러한 대륙의 이동은 지구의 역사 동안 지속되었다(그림 W4.1 참조).

고생대는 캄브리아기 생물의 폭발적인 다양화와 대륙의 분리와 함께 시작되었다. 그러나 고생대가 끝나가면서 지구는 다시 한번 판게아라는 초대륙을 가지게 되었다. 고생대의 석탄기와 페름기 동안 북아메리카 동부와 아프리카 북서부가 충돌하면서 북아메리카의 애팔래치아 산맥(Appalachian mountains)이 만들어졌다. 판게아는 1억 년 동안 지속되었다가 중생대 후기 트리아스기 후기와 쥐라기 초기에 쪼개지기 시작했다.

신생대는 6600만 년 전에 시작되었다. 그란란드와 북아메리카처럼 호주와 남극이 분리되었다. 대서양은 대서양 중부의 판이 확장되면서 계속 커졌다. 백악기의 온실 상태로 인하여 해수면이 상승하고



대륙의 많은 지역이 물에 잠겼다.

지난 200만 년 동안은 추운 시기로, 빙하가 만들어지고 해수면은 낮아졌다. 그 결과 아시아와 북아메리카 사이에 육교가 형성되기도 했다. 이로 인해 인간과 다른 동물들이 분리되었던 두 대륙 사이를 이동하였다. 호주와 동남아시아가 연결되어 이동이 가능했다. 언제 육지가 연결되고 그 당시 어떤 종들이 존재했는지를 아는 것은 지구상의 생물 다양성의 진화를 설명하는 데 중요한 사항이다.

생물이 지구를 변화시킨다

산소 발생 광합성이 대기 중 산소를 만들었다

초기 대기에는 이산화탄소가 포함되어 있었지만, 현재의 대기와는 달리 산소는 부족했다. 광합성이 진화함으로써 산소가 바다와 대기에 추가되어 세포 호흡이 진화하는 데 필요한 환경이 만들어졌다 (그림 W4.7).

지질학적 증거에 의하면 광합성의 기원과 산소 농도의 분명한 증가 사이에는 2억 년가량의 지체가 있었다. 이러한 지체 현상을 설명하는 한 가지는 대양에서 철 산화물의 형성과 침전이다. 첫 2억 년 동안 바다에서 배출된 많은 양의 산소는 철 원소와 반응하여 산화철을 형성함으로써 대기 중의 산소 농도 증가를 억제했다.

산소가 대기 중에 증가함에 따라, 일부는 태양으로부터의 자외선(UV)과 반응하여 오존(O_3)을 형성했다. 오존층은 자외선으로부터 육상생물을 보호하여 돌연변이 속도를 늦추고, 육상에서 생명체가 살아가는 것을 가능하게 했다.

식물이 빙하기 형성에 기여했을까?

식물이 두 차례의 빙하기에 기여했다는 증거가 증가하고 있다. 식물의 초기 육상 정착 이후 4억 8800만~4억 4400만 년 전 오르도비스기의 지속적인 냉각과 갑작스런 빙하기가 뒤따랐다. 냉각 직전의

이산화탄소 수준은 현재 농도보다 20배 이상 높았고, 기후 모델에 따르면 빙하기를 유발하기 위해서는 이산화탄소 수준이 50%가량 감소해야 했을 것으로 예측된다. 지질학적 풍화 작용으로 이산화탄소 감소에 따른 냉각을 설명할 수는 있지만, 그러한 감소가 빙하기를 가져온 충분조건은 아니다.

초기 육상 식물은 뿌리가 없었지만, 현존하는 근연종들을 연구한 결과, 암석의 풍화를 증가시킬 수 있는 유기산을 방출하는 것으로 나타났다. 식물에 의한 추가적인 풍화 작용은 이산화탄소와 온도의 감소를 가속화했지만, 여전히 빙하기를 유발하기에는 충분하지 않았을 것이다. 가장 확실한 것은 식물 성장을 위한 필수 영양소인 인(phosphorus)이 풍화 작용을 통해 바다로 유입됨으로써 광범위한 조류(algae) 성장을 가져왔다는 제안이다. 광합성 조류의 급속한 증가는 광합성을 위한 이산화탄소의 흡수 증가로 이어졌고, 이는 대기 중 이산화탄소의 감소와 빙하 형성을 촉발했다. 그 당시의 퇴적암에서 인의 증가는 이러한 결론을 뒷받침한다. 인의 초기 방출 이후 전체 시스템은 평형을 이루게 되었고, 식물이 토양에서 인을 재사용하기 시작함으로써 수중 환경으로의 엄청난 유출을 막게 되었다.

두 번째 빙하기는 데본기 동안 4억 년~3억 6000만 년 전 관다발 식물의 다양화와 함께 일어났다. 관다발 식물의 뿌리는 암석의 풍화 작용을 증가시켰고, 이는 대기 중 이산화탄소 수준을 낮추었다. 식물 뿌리는 뿌리가 없는 초기 육상 식물에서 방출되어 암석을 풍화시킨 것과 같은 유기산을 방출했다. 관다발 식물이 지구상에 정착하면서 전 지구적인 냉각과 극지에서의 빙하 형성이 뒤따랐다.

식물에 의한 빙하기는 지구를 변화시켰을 뿐만 아니라 다른 생명체에도 영향을 미쳤다. 빙하로 인해 종종 해수면이 낮아졌다. 이는 많은 해양 생물종의 멸종으로 이어졌다.

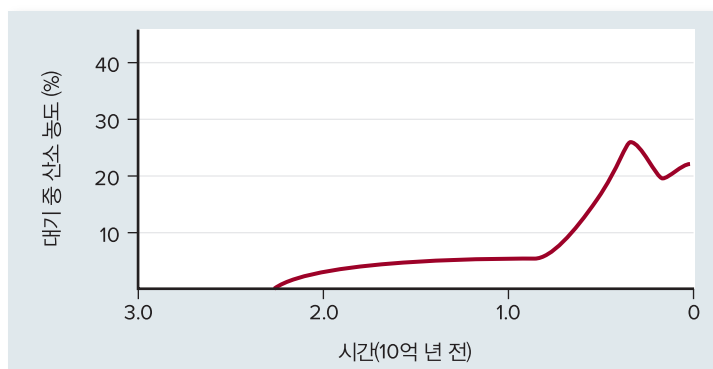


그림 W4.7 시간에 따른 대기 중 산소 농도.

핵심 요약 W4.4

기후, 대기, 대륙 위치의 변화는 빙하 형성으로 인해 생물의 다양화와 멸종을 초래했다. 생물은 함께 육지, 물, 대기 등의 지구 시스템을 변화시켜 왔다. 비생물적 요소와 생물적 요소 모두 이산화탄소의 수준을 낮추었고, 이는 빙하 형성으로 이어질 수 있었다.

- 원생이인 말기의 빙하 형성을 촉발한 사건을 오르도비스기 초기의 빙하 형성과 비교해 보자.

W4.5 생명의 지속적인 변화

학습 목표

1. 세포내막과 미토콘드리아의 진화를 비교하고 대비할 수 있다.
2. 다세포성에 필요한 세포 특화의 형태를 설명할 수 있다.

생명체는 시생이던 시기 하나의 세포에서 시작해서 역(domain)이라 불리는 진정세균, 진핵생물, 고세균과 같은 3개의 단계통 분기군으로 진화했다. 진핵생물에는 엑스카바타(Excavata, 전형적인 미토콘드리아가 없는 생물), 크로말베올라타(Chromalveolata, 2차 내부공생을 통해 얻어진 엽록체가 있는 생물), 원시색소체생물(Archaeplastida, 광합성을 위한 엽록체가 있는 생물), 근족충류(Rhizaria, 가느다란 이동용 위족을 갖는 생물), 아메바류(Amoebozoa, 이동을 위해 뭉툭한 이동용 위족을 갖는 생물), 후편모생물(Opisthokonta, 균류, 동물의 조상, 동물) 등 6개의 대집단(supergroup)이 있다(그림 W4.8). 여기에서 우리는 끊임없이 변화하는 환경에 대응하여 진화하는 생명의 이 놀라운 다양성을 뒷받침하는 주요 진화적 사건들에 대해서 알아볼 것이다.

세포의 구획화는 진핵생물의 출현을 가능하게 했다

적어도 10억 년 동안은 세균과 고세균이 지구를 지배했다. 다른 형태의 생명체들은 그것들을 먹을 수도 없었고, 경쟁할 수도 없었다.

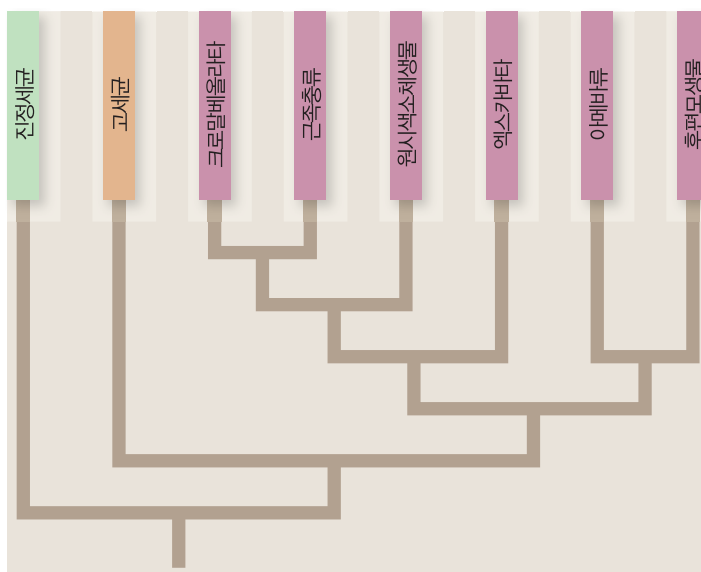


그림 W4.8 진핵생물 역 내에 6개의 대집단이 확인되었다.

그들의 작은 세포들은 가장 오래된 화석을 형성했다. 고세균은 진핵생물과 밀접하게 관련되어 있고, 고온, 고압, 고염분 등 오늘날의 기준으로 극한 환경에서 발견된다. 세균과 고세균은 세포내의 구획화가 되어 있지 않다는 점에서 진핵생물과 다르다.

생명체의 세 번째 영역인 진핵생물의 화석 기록은 훨씬 나중인 약 15억 년 전에 나타난다. 그러나 진핵세포와 원핵세포 사이에 대사적으로 유사성이 있음에도 불구하고 진핵세포의 구조와 기능은 세포들을 더 크게 만들 수 있었고, 결국 다세포 생물로 진화할 수 있었다.

세포내막 시스템의 진화

진핵세포의 특징은 핵을 포함하여 세포를 기능적으로 구획화하는 광범위한 세포내막 시스템이 인상적인 복잡한 세포 조직이다(그림 W4.9; 4장 참조). 세균과 고세균에서 발견되지 않는 핵막의 진화는 진핵생물의 복잡성의 증가를 설명한다. 진핵생물에서는 핵 DNA로부터 RNA 전사가 일어나고 핵막을 통해 번역이 이뤄지는 세포질로 이동한다. 진핵생물에서 전사와 번역의 공간적 분리로 인해 유전자 발현 과정의 조절이라는 부가적인 효과를 가져왔다.

골지체와 소포체는 세포내 수송과 세포내 특정 영역에서 단백질을 국한시킨 중요한 혁신이다(3장 참조). 핵막과 함께, 이러한 막 시스템은 세포막이 접힘으로써 생겼다. 그러나 모든 세포 구획이 세포

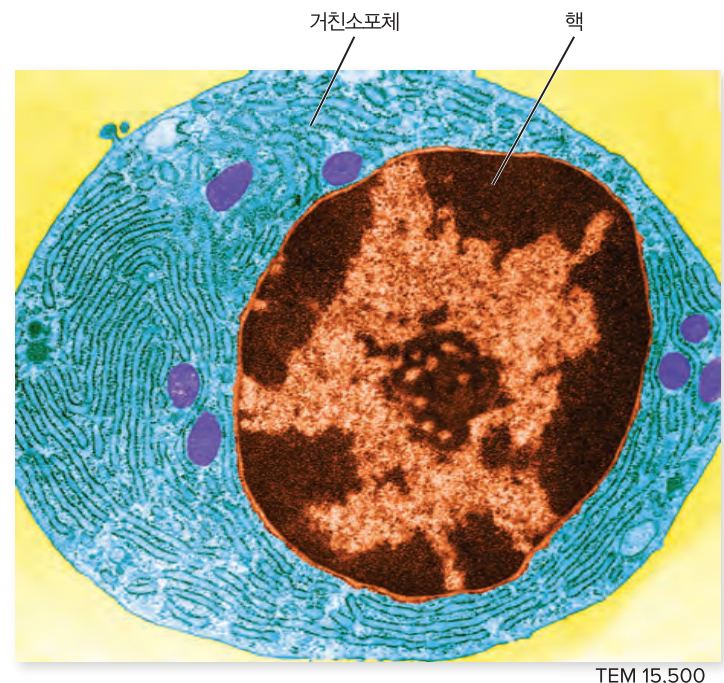


그림 W4.9 세포 구획화.

파라메시아(paramecia)라고 불리는 이 복잡한 단세포 생물체는 원생생물로 분류된다. 이 사진에서 보라색으로 염색된 효모가 포획되어 소화액포라 불리는 막으로 둘러싸인 주머니 안에 갇혀 있다.

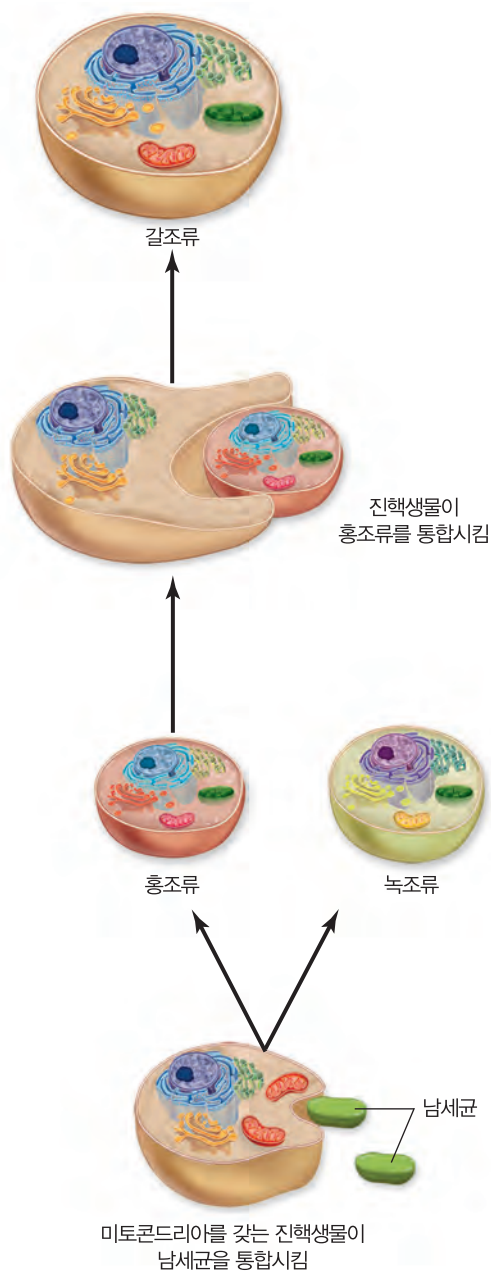
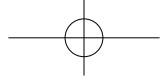


그림 W4.10 모든 엽록체는 단계통이다.

진화적으로 동일한 남세균이 현재의 홍조류와 녹조류의 조상이 되는 여러 속주에 통합되었다. 갈조류는 동일한 조상 엽록체 DNA를 공유하지만, 홍조류가 통합시킨 엽록체로부터 기원하는 것으로 보고 있다.

내막 시스템으로부터 파생된 것은 아니다.

내부공생과 진핵생물의 기원

몇 가지 예외를 제외하고 현재의 진핵세포는 **미토콘드리아**(mitochondria)라 불리는 에너지 생성 소기관을 갖고, 광합성 진핵생물은 에너지 수확 소기관인 **엽록체**(chloroplast)를 갖는다. 미토콘드리아와 엽록체는 모두 **내부공생**(endosymbiosis)이라는 과정에 의해 초

기 진핵세포에 포함된 것으로 여겨지며, 이는 WEB5장에서 더 자세히 논의된다.

미토콘드리아는 홍색 황세균과 **리케차**(Rickettsia)의 후손으로 이 그룹의 역사 초기에 진핵세포에 편입되었다. 엽록체는 남세균으로부터 유래했다. 홍조류와 녹조류가 남세균을 받아들임으로써 엽록체를 만들었다. 갈조류는 홍조류를 받아들임으로써 엽록체를 얻게 되었을 가능성이 높다(**그림 W4.10**).

분자계통학 자료에 의하면 진핵생물은 원생이언 초기에 나타났고, 그 이후에 다양해졌다. 원생이언의 미세화석 증거는 진핵생물이 15억 년 전에 존재했다는 것을 보여준다.

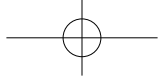
다세포성은 세포의 특화로 이어졌다

단세포 체제는 단세포성 원핵생물과 진핵생물이 지구상의 생물 총량의 약 절반을 차지할 정도로 엄청나게 성공적이었다. 그러나 단일 세포는 진핵생물에서 구획화에 의한 세포내 특화의 측면에서 한계가 있다. 다세포성의 진화로 인해 생물체는 조직과 기관으로 분화함으로써 새로운 방법으로 환경을 다룰 수 있게 되었다.

개별 세포의 활동이 조정되고 세포들끼리 서로 접촉하는 진정한 다세포성은 진핵세포에서만 나타나고, 진핵세포의 주요 특징 중 하나이기도 하다. 세균과 많은 단세포성 진핵생물들에서도 많은 세포들이 군체 집단을 이루지만, 그 집단 내의 세포들은 거의 분화된 상태가 아니며, 기능의 통합도 이뤄지지 않는다(**그림 W4.11**).



그림 W4.11 점진류인 *Dictyostelium discoideum*이 응집하여 군체를 형성한다.



3 mm

그림 W4.12 캄브리아 대폭발 시기의 화석.

브리티시 컬럼비아의 요호 국립공원(Yoho National Park) 내 버지스 셰일(Burgess Shale)에서 발견된 *Marrella splendens* 화석처럼 부드러운 신체 부위를 가진, 유난히 많은 화석들은 이 기간 동안 동물들이 급속도로 다양해졌다는 증거를 제시한다.

다세포성은 여러 진핵생물의 대집단에서 독립적으로 발생했다. 예를 들어, 다세포성은 홍조류, 갈조류, 녹조류에서 서로 독립적으로 발생했다. 다세포성 녹조류의 한 계통은 식물의 조상이기도 하다(WEB5장 참조). 후편모생물의 다세포성 조상의 경우는 다세포성 동물이 되었다.

다세포성은 세포들이 서로 연결되어 의사소통할 필요가 있었다. 각각의 세포는 동일한 유전 정보를 갖지만, 유전자 발현에 있어서는 세포마다 달라서 특화가 이뤄진다. 유전자 발현과 세포 분화를 조정하기 위한 메커니즘이 진화했다.

유성생식은 유전적 다양성을 증가시킨다

하나의 집단으로서 진핵생물 중의 또 다른 주요 특징은 유성생식이다. 비록 세균 사이에 유전적 교류가 일어나기도 하지만, 이는 진핵생물에 존재하는 성(性)과 같은 의미의 규칙적이면서 예상 가능한 메커니즘은 명백히 아니다. 12장에서 배웠듯이, 유성생식은 감수분열과 교차라는 과정을 통해서 더 많은 유전적 다양성이 일어나도록 한다.

어떤 진핵생물의 대집단에서는 유성생식이 가끔씩만 일어난다. 첫 진핵세포는 아마도 반수체였을 것이다. 2배체는 서로 별개의 경우들에서, 반수체 세포들이 융합하여 생겼을 것이며, 이는 결국 체세포분열(mitosis)에 의해 증식한다.

캄브리아기에 빠르게 다양화가 일어났다

세포의 진화적 혁신은 생명체가 주로 수생이었을 때 일어났고, 오늘날 지구상 생명체의 엄청난 다양성으로 나아가는 기초를 확립했다. 세 번째 눈덩이 지구가 마감되면서 원생이언이 끝나자 5억 4200만~4억 8800만 년 전에 이르는 캄브리아기와 함께 고생대가 시작되었다. 이 시기는 캄브리아기 폭발이라고 일컬어지는 생명의 엄청나게 빠른 팽창기였다. 생물의 단단한 부분만 아니라 부드러운 부분이 브리티시 컬럼비아, 그린란드, 중국에서 발견된 화석기록에 잘 보존되어 있기 때문에 우리는 이 시기에 대해 많은 것을 알고 있다(그림 W4.12).

30억 년 동안 조류의 몇 개 그룹을 제외하고는 생명체는 단세포였다. 캄브리아 방산(radiation)이 일어난 시기에 최초의 다세포 동물이 나타났다. 그 후 이어진 5000만 년 동안 거의 모든 동물의 조상이 진화했다.

육상으로의 진출을 위한 주요 혁신이 있었다

캄브리아 방산은 대양에만 국한되었다. 얼마 후 식물, 곤이여 동물이 육상 환경에 정착했다. 광합성의 진화는 산소가 풍부한 대기를 만들었고, 오존층을 만들어 지구 표면의 생명체가 자외선으로부터 보호받게 되었다.

물에서 육상 환경으로 성공적으로 이전하기 위해서는 건조를 방지해야 하고 물을 확보해야 하는 혁신이 필요했다. 가스 교환 역시 새로운 전략이 필요했다. 동물의 경우 폐가 축축한 피부나 아가미를 통한 가스 교환보다 더 효과적이었다. 식물에서는 가스 교환을 쉽게 하고 물 손실을 방지하기 위해서 식물 표면에서 조절되는 개구부인 기공이 진화했다. 이것들과 또 다른 중요한 혁신들에 관해서는 24장과 29장에서 논의한다.

핵심 요약 W4.5

지구상의 생명의 역사는 세포와 생물체의 다양화에 대한 역사이다. 진핵세포는 내막 시스템에 의해 고도로 구획화되어 있으며, 내부공생에 의해 미토콘드리아와 엽록체를 획득했다. 다세포성은 세포의 특화로 이어졌고, 감수분열과 유성생식으로 유전적 다양성이 증가했다. 급격하게 빠른 종의 방산과 주기적인 멸종으로 인해 오늘날의 수종, 육상 생물의 다양성이 생겨났다.

■ 캄브리아기 이전의 진화적 혁신이 어떻게 급속한 방산에 기여했을 지에 대해 분석해 보자.

핵심 개념 요약

W4.1 지질학적 시간

■ 지구는 지질학적 시간에 걸쳐 변화했다(그림 W4.1)

46억 년의 지구 생명체 역사 동안, 지구는 이산화탄소 수준의 변화에 상응하는 극한의 온도 변화를 경험해 왔다. 대륙이 형성되고 충돌하여 초대륙이 만들어졌고, 다시 여러 차례 분리되었다. 지구상에서의 생명체의 생물학적 역사는 대부분 지구 역사의 마지막 12%에 일어났다.

W4.2 생명의 기원

■ 초기 유기 분자들은 다양한 방법으로 형성되었을 것이다

일부 유기 분자들의 경우는 외계에서 기원했을지도 모르지만, 대부분은 초기 지구의 환원성 환경에서 형성되었을 가능성이 높다.

■ 대사의 진화에서 중요한 이정표를 확인할 수 있다

생명의 기원은 독립영양일 수도 있고, 종속영양일 수도 있다. 산소 발생 광합성은 시생이언 시기에 진화했고, 질소 고정도 시생이언 초기나 후기에 진화했다. RNA 세계가 먼저 나타났을 것이다.

■ 단세포가 최초의 생명체였다

어느 순간, 막이 형성되고 대사 및 자기복제 활동이 그 안에서 일어나면서 단순한 세포 형태의 생명체가 진화했다.

W4.3 초기 생명체에 대한 증거

■ 화석 증거는 생명이 적어도 32억 년 전에 기원했다는 것을 보여준다

유기 물질을 갖는 미세화석을 전자현미경을 통해 조사해 본 결과 이 화석들의 연대는 32억 년 전까지 거슬러 올라간다. 더 실질적인 증거는 27억 년 된 스트로마톨라이트라는 미생물의 퇴적물에서 나온다.

■ 동위원소 자료는 탄소고정이 오래된 과정임을 보여준다

탄소 연대 측정의 결과 38억 년 전에 이미 광합성의 오래된 형태를 이용하여 탄소를 고정하고 있다는 것이 밝혀졌다.

■ 고대 암석에서 발견된 탄화수소가 생물학적 기원을 갖기도 한다

지질을 포함하여 생물학적 기원이 분명한 유기 분자가 27억 년 전에 형성된 호주의 암석에서 확인되었다.

W4.4 지구의 변화하는 시스템

■ 지구의 기후는 끊임없이 변화해 왔다

지구는 형성 이후 냉각되어 왔지만, 이산화탄소 수준의 변화와 관련된 극단적인 온도 변화는 지구 전체를 덮었던 3개의 빙하 형성과 연관이 있다. 빙하는 대멸종을 초래하고 진화 과정에 영향을 미칠 수 있다.

■ 지질학적 변화와 살아 있는 생명체에 의해 대기가 변화한다

덥고 습한 기후와 초대륙의 붕괴로 인한 습한 지표면적의 증가에 의해 해양에서 이산화탄소 포획이 일어났다. 어떤 경우에는 이산화탄소 농도 감소가 빙하 형성을 유발하기에 충분할 수도 있다.

■ 대륙 이동이 진화에 영향을 미쳤다

판구조론은 기후를 변화시킬 수 있는 점진적인 대륙의 움직임을 설명하고, 개체군들이 서로 섞이고 교배할 수 있는지에 영향을 미친다.

■ 생물이 지구를 변화시킨다

식물은 광합성과 필수영양소인 인을 방출하여 암석의 풍화작용을 도움으로써 대기 중의 이산화탄소 농도를 낮춤으로써 두 차례의 빙하 형성에 기여했다.

W4.5 생명의 지속적인 변화

■ 세포의 구획화는 진핵세포의 출현을 가능하게 했다

막이 합입됨으로써 형성된 세포내막 시스템과 내부공생에 의해 진핵세포는 세포 기능을 할 수 있는 구획화를 이룰 수 있었다(그림 W4.10).

■ 다세포성은 세포의 특화로 이어졌다

다세포성은 여러 진핵생물의 대집단에서 독립적으로 발생했다.

■ 유성생식은 유전적 다양성을 증가시킨다

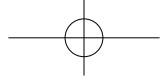
감수분열의 진화는 자연선택을 위한 유전적 다양성을 증가시켰다.

■ 캄브리아기에 빠르게 다양화가 일어났다

구획화, 다세포성, 유성생식의 진화는 캄브리아기(5억 4200만~4억 8800만 년 전)에 동물의 급속한 진화의 토대를 만들었다.

■ 육상으로의 진출을 위한 주요 혁신이 있었다

육상 환경으로 진출하기 위해서는 건조 방지, 물의 확보, 건조한 환경에서의 가스 교환을 쉽게 하기 위한 적응이 필요했다.



연습문제

■ 1단계: 이해력 확인하기

1. 밀러-유리의 실험이 보여주는 것은 무엇인가?
 - a. 생명체가 지구상에서 기원했다는 것
 - b. 유기 물질이 초기 대기에서 나타날 수 있다는 것
 - c. 지구상의 초기 유전 물질이 DNA라는 것
 - d. 초기 대기에 산소가 많이 포함되어 있었다는 것
2. 판 구조는 다음 중 어떤 것에 기여했는가?
 - a. 화산 폭발과 지진
 - b. 초대륙의 형성
 - c. 풍화 작용의 증가와 이산화탄소 포획
 - d. a, b, c 모두 맞다.
3. 다음 중 옳지 않은 것을 고르고 바르게 수정하십시오.
 - a. 갈조류와 홍조류는 계통학적으로 근연종이 아니다.
 - b. 갈조류와 홍조류의 엽록체는 단계통이다.
 - c. 갈조류의 엽록체는 녹조류를 함입하여 생겼다(내부공생).
 - d. 틀린 진술은 없다.
4. 다음 중 진핵세포의 진화에서 가장 먼저 발생한 사건은 무엇인가?
 - a. 내부공생과 미토콘드리아 진화
 - b. 내부공생과 엽록체 진화
 - c. 구획화와 핵의 형성
 - d. 다세포 생물의 형성
5. 화석기록이 보여주는 것은 무엇인가?
 - a. 생명이 40억 년 전에 기원했음
 - b. 생명이 35억 년 전에 기원했는지 모르지만 명확하게 32억 년 전에는 기원했음
 - c. 캄브리아기 대폭발에 의해 생명이 기원했음
 - d. 식물이 빙하 형성에 중요한 역할을 했음

■ 2단계: 적용력 평가하기

1. 전 지구적인 빙하 형성의 조건이 아닌 것은 무엇인가?
 - a. 적도 근처에서 형성된 초대륙과 막대한 강우량
 - b. 수백만 에이커에 달하는 숲의 개간
 - c. 엄청난 양의 인이 해양으로 유입됨
 - d. 해양에서의 조류의 급작스런 증가

2. 초기 생명체가 어떻게 발생했는지는 모르지만, 다음 중 있었음직한 일은 무엇인가?
 - a. 모든 유기 분자들이 유성에 의해 지구로 전달되었다.
 - b. 빙하 형성에 높은 산소 농도가 필수적이다.
 - c. 지질은 세포막으로 조직화되었다.
 - d. 기온이 오늘날 환경에 해당하는 적당한 수준에 도달하면 유기 분자가 형성된다.
3. 생명이 32억 년 전에 발생했다고 확인할 수 있는 증거는 무엇인가?
 - a. 주사전자현미경으로 미세화석을 보면, 세포와 같은 모양을 하고 있다.
 - b. 고품질의 투과전자현미경으로 세포 화석을 보면 핵과 같은 세포 구획화를 관찰할 수 있다.
 - c. 세포로 추정되는 화석에 대해서 칼륨 연대 측정을 하면 32억 년 전의 것으로 나온다.
 - d. 투과 및 주사전자현미경을 사용하였을 때, 동위원소 측정 결과 32억 년 된 화석의 세포벽으로 보이는 데서 탄소 기반 물질의 증거를 찾을 수 있다.
4. 생명의 진화에서 지리적 격리가 특히 중요했을 것이라고 생각되는 시기는 언제라고 예상하는가?
 - a. 캄브리아기
 - b. 고생대 말엽
 - c. 신생대 시작 시점
 - d. a와 c 모두
5. 갈조류의 엽록체의 특징은 다음 중 무엇인가?
 - a. 홍조류의 것과 서로 다른 DNA 염기서열을 갖는다.
 - b. 4개의 막으로 둘러싸여 있다.
 - c. 2개의 막으로 둘러싸여 있다.
 - d. 홍조류의 것과는 비슷한 DNA 염기서열을 갖지만, 녹조류의 것과는 매우 다르다.

■ 3단계: 사고력 함양하기

1. 관다발 식물이 처음 육상 환경으로 확장되었을 때 광합성을 통해 대량의 이산화탄소를 포획하여 빙하를 형성했다. 초기 식물이 육지에 정착했을 때 유사한 빙하 형성이 일어났다는 주장을 평가하십시오. 새로운 종에 의한 광합성만으로 빙하를 형성할 수 있는지 아닌지를 반드시 고려하십시오.
2. 이 장에서 배운 것을 종합하여 2개의 판이 충돌하였을 때 지구상 생명체의 진화에 미칠 수 있는 영향에 대해 분석하십시오.
3. 캄브리아기 폭발에 기여한 요인들에 대해 분석하십시오.