

양

배추, 미역, 돼지 족발 그리고 심지어 과일박쥐(서태평양 일부 섬에 사는)를 포함해 한때 살아 있는 모든 것으로 수프를 만들 수 있다. 미국의 화학자 스탠리 밀러 Stanley Miller는 살아 있는 모든 것으로 수프를 만들 수 있다는 것을 뒤집어 모든 생

명체가 수프에서 시작되었을지도 모른다는 생각을 하게 되었다.

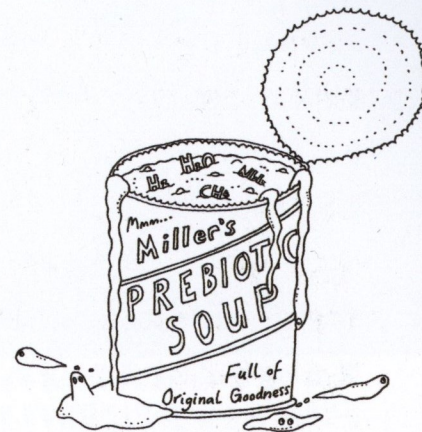
20세기에 행해진 가장 중요한 과학 실험 중 하나라고 할 수 있는 밀러의 '원시 수프' 실험은 무기물을 이용하여 생명 물질을 조리해내는 생명체의 조리법 실험이라고 할 수 있을 것이다. 그는 초기의 따뜻했던 지구에 있었을 것으로 추정되는 화학물질로 생명 물질 분자들을 포함하고 있는 따뜻한 수프를 만들어냈다. 이 실험을 통해 만들어진 분자들은 오늘날 살아 있는 생명체 안에도 존재한다. 그것은 우리에게까지 연결되는 진화의 여정이 40억 년 전에 원시 수프 안에 떠다니던 생명 물질에서 시작되었다는 것을 의미한다. 1953년에 당시 스물두 살이었던 밀러는 생명의 기원을 밝혀내는 중요한 첫발을 내디딘 실험 결과를 발표했다. 하지만 밀러가 생명의 기



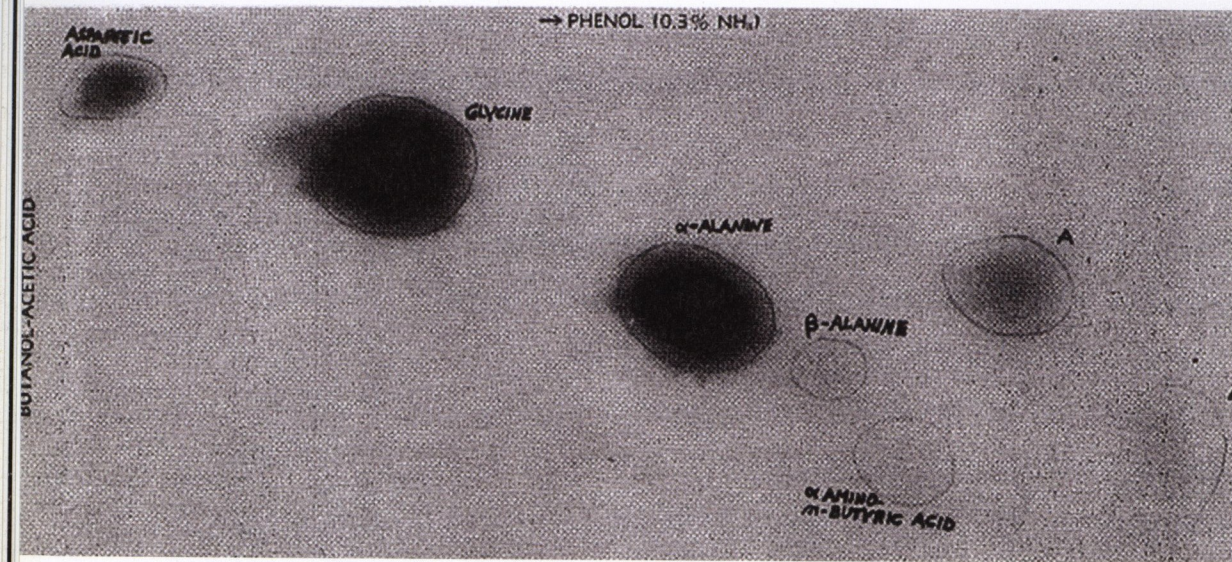
1953년 5월 16일에 찍은 이 사진은 생명의 기원에 관한 고전적인 논문이 출판된 다음 날, 시카고 대학 실험실에 있는 젊은 스탠리 밀러의 모습이다.

원을 모두 밝혀냈다고 할 수는 없다. 실제로 지구 초기에 어떤 일이 일어났는지를 직접 본 사람은 아무도 없다. 또 원시 수프에서 생명이 시작될 때 일어났던 일들에 대해서는 아직 많은 부분이 의문으로 남아 있다.

생명체가 무기물로 이루어진 수프에서 시작되었다는 생각을 처음 한 사람은 진화론을 제안한 자연주의자 찰스 다윈 Charles Darwin이었다. 그는 1971년에 친구인 식물학자 조지프 후커 Joseph Hooker에게 보낸 편지에서 '따뜻한 작은 연못'에 대해 이야기했다. 다윈은 빛, 열 그리고 전기에 의한 효과가 초기 지구에 존재하던 기본적인 화학물질을 이용해 음식을 소화하고, 근육을 움직이게 할 뿐 아니라 다양한 작용을 하는 생명 분자인 단백질을 합성했다고 설명했다. 하지만 다윈은 후에 따뜻한 작은 연못 이야기는 과학적 근거 없이 생명의 기원에 대해 생각하다가 떠오른 '부질없는 생각'이었다고 했다.



밀러에게 영향을 준 사람은 러시아의 생화학자인 알렉산드르 이바노비치 오파린 Aleksandr Ivanovich Oparin이었다. 오파린은 1920년대에 원시 생명 수프에 대한 생각을 시작해 1924년 《생명의 기원》을 통해 발표했다. 그는 지구도 한때 목성과 비슷한 상태의 대기를 가지고 있었을 것이라고 가정했다. 따라서 당시 알려졌던 목성의 대기 상태를 기초로 하여 초기 지구 대기가 수증기, 메테인, 암모니아 그리고 수소 기체로 이루어졌지만 산소는 거의 포함하지 않은 상태일 것이라고 생각했다. 그는 이 단순한 성분들이 반응하여 탄소를 기반으로 하는 간단한 분자를 합성했고, 이 분자들이 바다에서 결합하여 후에 세포 안에 포함된 생명 물질이 되었다고 믿었다. 오파린의 이런 제안으로 수프에서 생명체가 탄생했다는 생각이 시험을 통해 확인해볼 수 있는 구체적인 이론이 되었다. 이것은 진화론을 연구하던 다윈의 추종자들을 고무시켰다. 오파린의 주장은 시카고 대학에서 교육 조교로 있던 열정적인 젊은 밀러에게까지 알려지게 되었다. 밀러는 노벨 화학상 수상자였던 그의 박사 학위 지도 교수 해럴드 유리 Harold Urey를 설득하여 오파린의 이론을 확인하는 실험을 할 수 있도록 허락받았다. 실험 장치는 몇 개의 플라스크와 오파린이 제안했던 원시 지구 성분 물질들이 전부였다.



수프의 점들. 밀러는 크로마토그래피를 이용하여 실험에 사용된 원시 수프에서 여러 가지 성분을 분리해냈다. 원으로 표시된 아미노산들은 그의 원시 수프에서 복잡한 생명 분자들이 형성되었음을 보여주고 있다.

밀러는 두 개의 플라스크를 연결하고 아래쪽 플라스크를 끓는 '바닷물'로 채웠다. 끓는 바닷물에서 증발한 기체 혼합물이 두 번째 플라스크로 들어갔다. 이 고전적인 실험의 절정은 초기 지구에서의 번개를 대신하기 위해 테슬라 코일을 이용하여 전기불꽃을 만든 것이었다.

며칠 후 수프 위에 떠다니는 물질을 분석한 밀러는 복잡한 생명 물질이 단순한 화학반응을 통해 무기물에서 만들어질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 크로마토그래프에 나타난 얼룩얼룩한 점들 중에는 아메바에서 얼룩말에 이르기까지 모든 생명체 안에서 단백질을 합성하는 데 사용되는 아미노산의 존재를 확인해주는 점들이 포함되어 있었다.

그러나 밀러가 생명의 시작을 발견한 것은 아직 아니었다. 밀러가 시험하고자 했던 오파린의 초기 지구 상태에 대한 가정에는 문제가 있었다. 이 분야에서 연구를 계속하고 있는 대부분의 과학자들은 이산화탄소와 질소가 초기 지구의 중요한 구성 성분이었다는 것에 동의하지만 밀러의 목록에 포함되어 있던 다른 성분들에 대해서는 동의하지 않고 있었다. 아무리 복잡하고 탄소를 많이 포함하고 있다 해도 화학물질만으로는 생명체가 만들어지지 않는다. 그렇다면 수프 다음에는 무엇이 나올까?

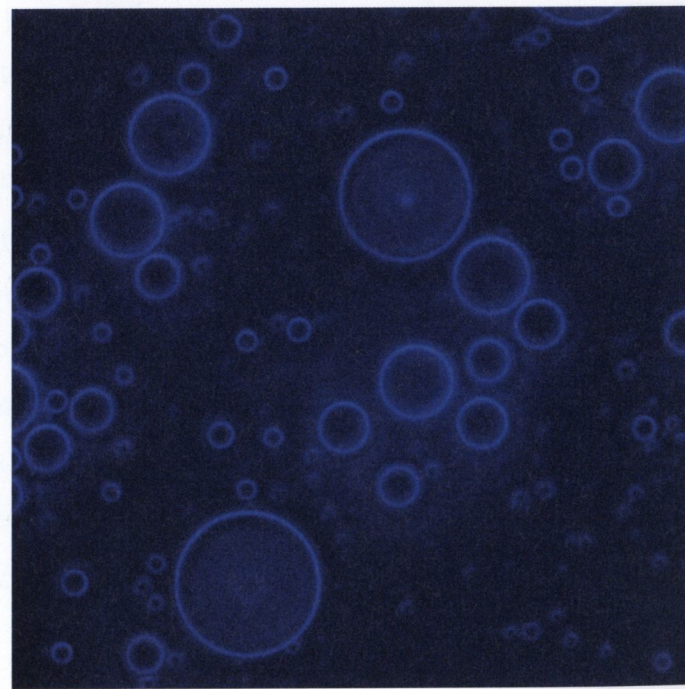
수프 다음에 나오는 것은 세포가 틀림없다. 생명체가 하나의 거대하고 복잡한 분자로 이루어

져 있는 것이 아니라 수많은 세포로 이루어져 있다는 사실은 생명체가 만들어지는 첫 단계에서는 생명체를 이루는 세포가 만들어져야 한다는 것을 쉽게 짐작할 수 있도록 한다. 생명체는 외부와 격리하는 경계가 필요하다. 세균과 같이 하나의 세포로 이루어진 생명체에서는 세포를 둘러싸고 있는 지방층이 생명체를 외부의 화학적 환경과 구별하는 경계 역할을 한다. 사람과 같이 수백만 개 또는 수십억 개의 세포로 이루어진 생명체에서도 세포와 세포 사이의 경계는 각각의 세포들이 특정한 역할을 하기 위해 꼭 필요하다. 과학자들은 생명체를 구성하는 세포가 수프 다음의 어느 시점에 나타났을 것이라고 믿고 있다. 그러나 생명체가 나타나기 위해서는 먼저 해결되어야 할 문제들이 있다. 세포는 자신과 똑같은 분자를 만들어낼 수 있는 자체 복제 능력을 가지고 있다. 세포가 분열할 때는 유전자 안에 들어 있던 정보가 복제되어 새로운 세포에 전달된다. 따라서 세포분열로 만들어진 딸세포는 모세포와 같은 유전정보를 가진 세포가 된다. 세포는 많은 분자들로 이루어져 있다. 따라서 자체 복제 능력을 가진 세포가 만들어지기 위해서는 먼저 자신과 똑같은 분자를 만들어낼 수 있는 분자가 만들어졌어야 한다. 세포가 가지고 있는 것과 같은 정보 전달을 도와줄

복잡한 기관들을 가지고 있지 않았던 원시 수프 위에 떠다니던 분자들 중에는 자신과 같은 분자를 만들어낼 수 있는 자체 복제 기능을 가진 분자가 있었을 것이다.

과학자들은 원시 수프에서 간단한 화학반응으로 만들어질 수 있을 정도로 충분히 단순하면서도 스스로 완벽한 복제가 가능한 분자를 찾고 있다. 세포에서 중요한 일들을 하는 단백질이 그런 분자였을까?

밀러가 시카고에서 수프를



실험실에서 만든 '원시세포'는 초기 생명체와 같은 간단한 형태를 하고 있다. 그러나 이 원시세포는 새로운 형태의 생명체를 만들어내는 데 사용될 수 있다.

끓이고 있을 때 영국 케임브리지 대학의 캐번디시 연구소에서는 두 명의 생물학자가 생명의 수수께끼를 푸는 또 다른 열쇠를 찾고 있었다. 1953년에 밀러가 원시 수프 실험 결과를 발표하기 몇 주 전 제임스 왓슨<sup>James Watson</sup>과 프랜시스 크릭<sup>Francis Crick</sup>이 생명의 청사진을 담고 있는 DNA 분자의 이중나선 구조를 밝혀냈다. 이들의 발견 이후에 이루어진 유전학 연구를 통해 하나의 사슬로 이루어진 작은 DNA의 사촌인 RNA가 최초로 자체 복제 기능을 가지고 있던 생명의 기원 분자 후보로 떠올랐다.

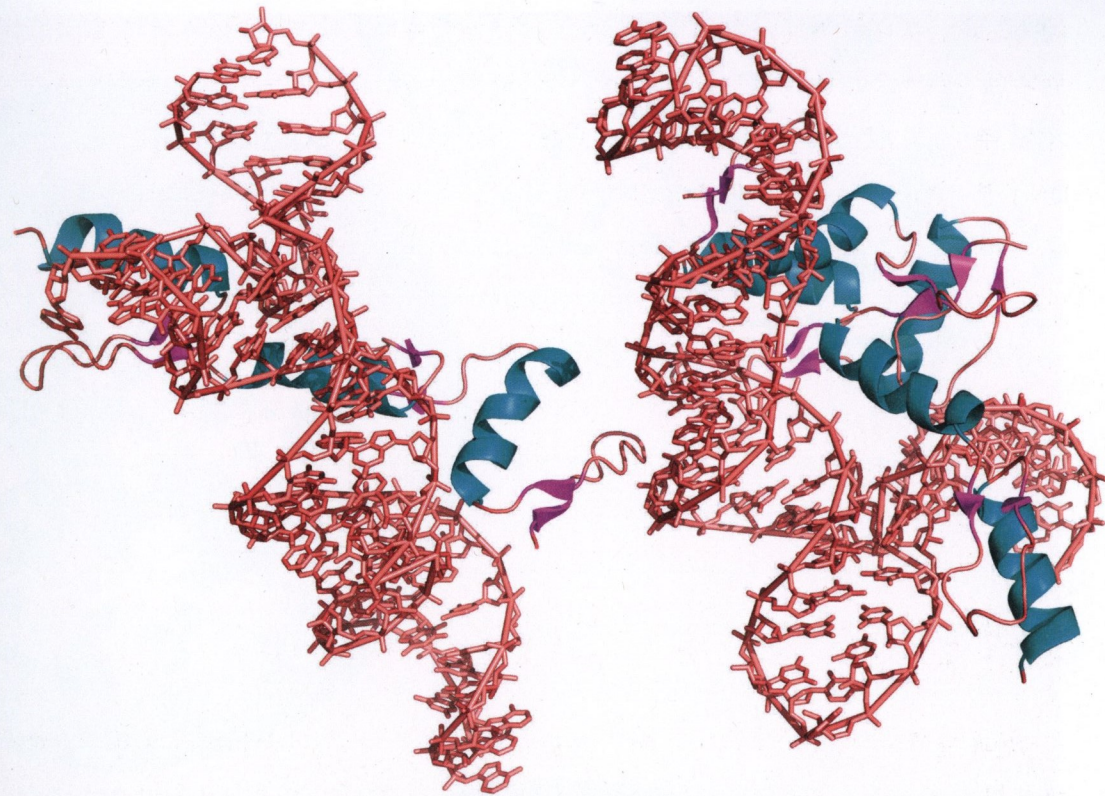
오늘날에는 단백질을 합성하는 데 필요한 유전정보를 가지고 있는 두 가지 핵산인 DNA와 RNA가 단백질과 누가 먼저였느냐를 놓고 경쟁을 벌이고 있다. 모든 것을 시작하도록 한 분자는 단백질 합성 정보를 가지고 있는 핵산일까 아니면 단백질일까?

## 닭이 먼저냐 아니면 달걀이 먼저냐?

핵산과 단백질은 풀 수 없을 만큼 서로 복잡하게 얽혀 있어 '어느 것이 먼저냐' 하는 문제의 답을 찾는 것은 쉽지 않다. DNA의 사촌이라 할 수 있는 RNA도 염기 서열 형태의 유전정보를 가지고 있는 길고 복잡한 분자다. RNA는 DNA에서 복제한 유전정보를 세포 내에 있는 단백질 합성 기관에 전달한다. 오늘날 우리 몸 안에서 다양한 기능을 하는 10만 종이 넘는 단백질은 DNA와 RNA에 포함된 유전정보가 없었다면 존재할 수 없었을 것이다. 그러나 핵산이 없으면 단백질이 있을 수 없는 것과 마찬가지로 단백질이 없으면 핵산도 존재할 수 없다. 단백질이 하는 중요한 일 중 하나가 새로운 DNA와 RNA를 만드는 일이기 때문이다. 이는 닭과 달걀 중 어느 것이 먼저냐를 따지는 것과 같다. 그렇다면 최초 자체 복제 분자의 경쟁에서 RNA가 단백질을 이겼다고 주장하는 과학자들은 어떤 근거로 결론을 내린 것일까?

원시 수프에서 RNA와 같이 복잡한 분자가 먼저 등장했다고 생각하는 것은 어려운 일이다. 특히 밀러가 기체와 수증기를 채운 플라스크 안에서 단백질 구성 분자들이 쉽게 만들어진다는 것을 보여주었다는 것을 감안하면 더욱 그렇다.

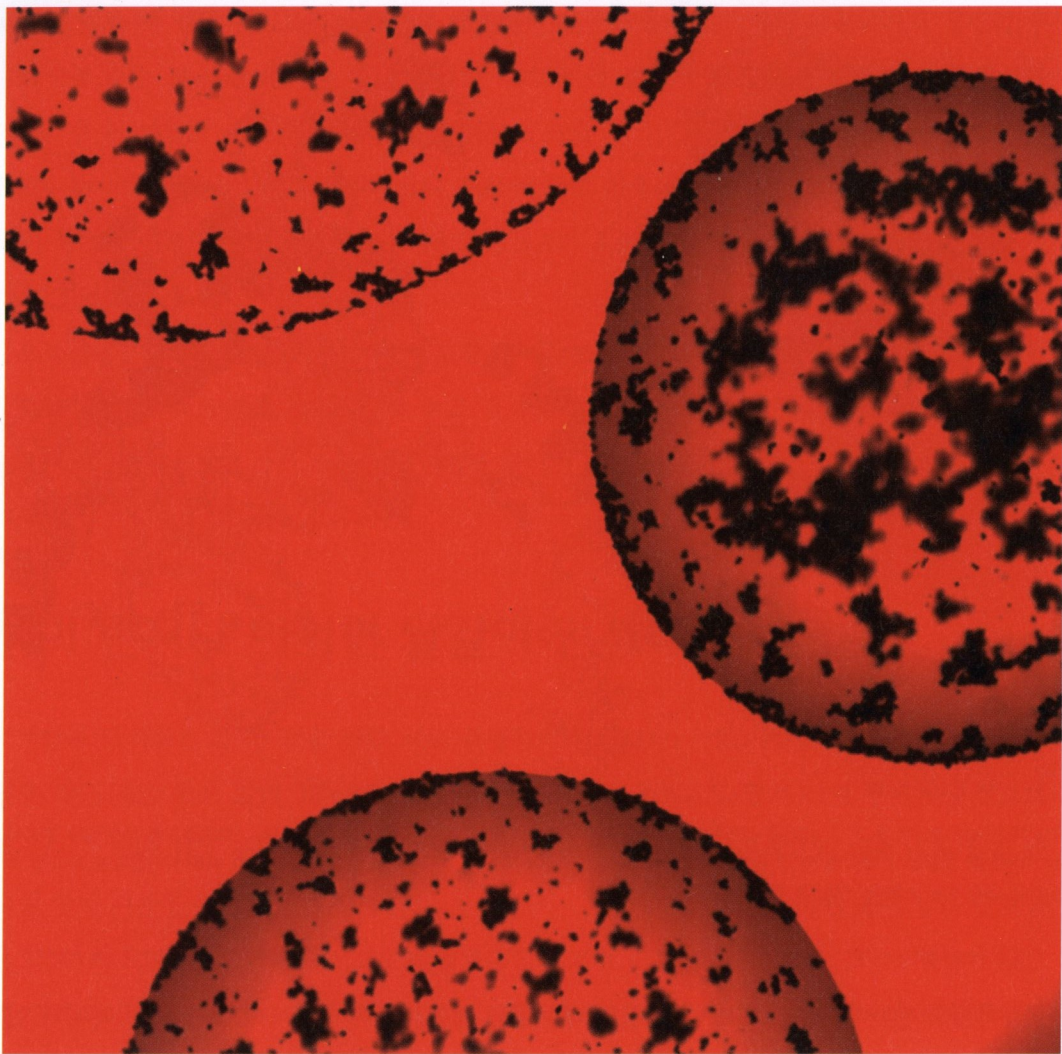
수프와 세포 이야기에는 하버드 대학에서 화학과 물리학을 공부하고 후에는 분자생물학자가 된 월터 길버트<sup>Walter Gilbert</sup>가 등장한다. 이 이야기는 길버트의 연구에 큰 영향을 준 제임스 왓슨



리보핵산(RNA)(핑크색)은 지구 상에서 생명체를 시작한 분자의 후보이다. 세포 안에서 RNA는 DNA의 유전정보를 단백질을 합성하는 기관으로 전달하는 역할을 한다. 단백질을 합성하는 기관에서 RNA 분자는 새로운 단백질을 만들기 위해 유전정보를 사용할 것 인지를 결정하는 '스위치' 역할 분자(푸른색)와 상호작용한다.

과 길버트의 만남에서부터 시작된다. 길버트는 영국 케임브리지 대학에서 박사 학위 과정에 있을 때 왓슨을 처음 만났다. 그러나 1950년대 말에는 두 사람 모두 미국으로 돌아와 하버드 대학에서 연구하고 있었다. 하버드 대학에서 왓슨의 관심은 DNA에서 RNA로 바뀌어 RNA에 대한 연구를, 길버트는 이론물리학을 가르치고 있었다. 그런데 왓슨이 하고 있던 실험에 크게 매료된 길버트가 왓슨의 실험에 동참하기로 결정하고 1960년 여름을 핵산 연구로 보냈다. 그는 분자생물학 연구를 계속하여 핵산 연구로 프레더릭 생어<sup>Frederick Sanger</sup>, 폴 버그<sup>Paul Berg</sup>와 함께 1980년 노벨상을 공동 수상했다. 그리고 1986년에는 《네이처》에 발표한 논문을 통해 'RNA 세상' 이론을 제안했다.

길버트가 제안한 RNA 세상 이론에 의하면, 단백질이 아니라 RNA가 생명의 선구자다.



간단한 화학물질을 포함한 이 기름방울은 최초의 세포와 비슷할지 모른다. 안에 들어 있는 검은색 화학물은 화학반응을 통해 원시 세포에 동력을 제공하는 시안화수소 고분자이다.

RNA는 자체 복제 기능을 가진 첫 번째 분자로 많은 RNA를 만들어내 진화의 긴 여정을 시작한 분자가 되었다. 그러나 길버트의 기대와 달리 이 이론은 생명의 기원을 연구하는 다른 과학자들에게 널리 받아들여지지 않고 있다. 이 이론은 경쟁 관계에 있는 다른 이론들보다 더 많은 지지를 받고 있지만 그것은 마지못한 선택으로, 못마땅한 많은 이론들 중 그나마 가장 그럴듯하다는 정도의 지지였다. 2012년에 뉴질랜드의 생화학자 해럴드 번하트 Harold Bernhardt는 RNA 세

상 이론을 “다른 모든 이론을 제외하면 생명의 초기 진화에 관한 최악의 이론”이라고 평가했다.

초기 생명체 진화와 관련된 일들은 40억 년 전에 있었던 일들이어서 길버트의 이론을 직접 시험해볼 수는 없다. 그뿐만 아니라 과학자들은 자체 복제 기능을 가진 RNA를 발견하지 못했고, 그런 기능을 가진 다른 분자도 찾아내지 못했다. 과학자들은 자체 복제 기능을 찾아내기 위해 수조 개의 RNA 염기 서열을 조사했다. 그 결과 유전정보 일부를 자체 복제한 분자를 찾아내는 했지만 유전정보 전체를 복제한 분자를 찾아내지는 못했다.

RNA가 생명체의 선구자라는 실험적 증거가 부족하지만 생명의 선구자 자리를 놓고 경쟁을 벌이는 단백질의 경우에도 더 나올 것은 없다.

과학자들이 최근에 사용하는 전략은 RNA와 단백질의 진화 역사를 비교하여 어느 것이 더 오래되었는지를 알아내는 것이다. 유전자에 포함된 정보를 통해 악어가 고양이보다 먼저 진화했다고 말할 수 있는 것처럼 분자 구조에 숨어 있는 정보를 비교하면 핵산과 단백질 중 어느 것이 먼저였는지를 알아낼 실마리를 찾아낼 수 있을 것이다. 하지만 이러한 접근의 어려운 점은 RNA의 조상보다 단백질의 조상을 알아내는 게 어렵다는 것이다. 현대의 세포에서 RNA가 단백질 합성에 관한 정보를 가지고 있기 때문이다.

이것이 왜 문제가 되는지를 이해하기 위해 잠시 핵산이 아니라 단백질이 최초의 자체 복제가 가능한 분자였다고 가정해보자. 자체 복제가 가능한 단백질이 원시 태양 아래 자체 복제를 통해 많은 단백질을 만들어내던 것은 40억 년 전의 일이었다. 그다음에 RNA가 등장해 전체 시스템을 새롭게 바꾸어놓았다. 새로운 시스템에서는 단백질이 RNA에 포함된 정보를 이용해 세포 내에서만 만들어지기 시작했다. 이런 경우 새로운 RNA 시스템이 등장하기 전에 일어났던 일을 추적하는 것은 가능하지 않다. 오늘날 모든 세포 안의 단백질은 새로운 시스템에 바탕을 둔 것이기 때문이다.

단백질과 핵산 중 어느 것이 생명의 선구 분자인지의 문제를 옆으로 밀어두고 결국에는 단백질과 핵산 분자가 함께 공동 작업을 하여 분자의 복제가 가능해졌다는 것을 인정한다 해도 이것으로 생명의 기원을 밝혀내는 일이 크게 진전될 수는 없을 것이다. 복제 기능을 가진 분자는 생명체의 단위가 되는 세포가 아니기 때문이다. 따라서 생명의 기원을 밝혀내기 위해 답해야 할 문제들이 아직 많이 남아 있다. 예를 들면 다음과 같은 질문들이 답을 기다리고 있다.

최초의 세포는 어디서 왔으며, 언제 처음 나타났는가? 처음에 세포는 무엇으로 이루어졌을

까?('전문가 노트: 최초의 세포는 어떤 모양이었을까?' 참조) 이런 질문들의 답을 찾기 위해서는 초기 세포인 원시세포를 흉내 낸 단순한 생물학적 시스템을 만들어내는 실험을 해야 한다. 현재는 DNA를 합성하여 세포와 비슷하게 막으로 감싸게 하는 것도 가능하다. 가까운 장래에 과학자들은 자체 복제가 가능한 원시세포를 만들어낼 것이다. 그렇게 되면 과학자들은 실험실에서 생명을 창조했다고 주장할 것이다. 하지만 여전히 생명의 기원을 밝혀냈다고 주장할 수는 없을 것이다. 실험실에서 세포를 만들어낸 방법으로 초기 지구에서 최초 세포가 만들어졌다고 단정할 수 없기 때문이다. 생명의 기원과 관련된 비밀은 초기 지구로 여행할 수 있는 시간 여행자만 밝혀낼 수 있을 것이다('시간 여행은 가능한가?' 참조).

과학자들은 아직도 생명의 요람이 된 환경에 대해 논쟁하고 있다. 과학자들 중 일부는 밀러의

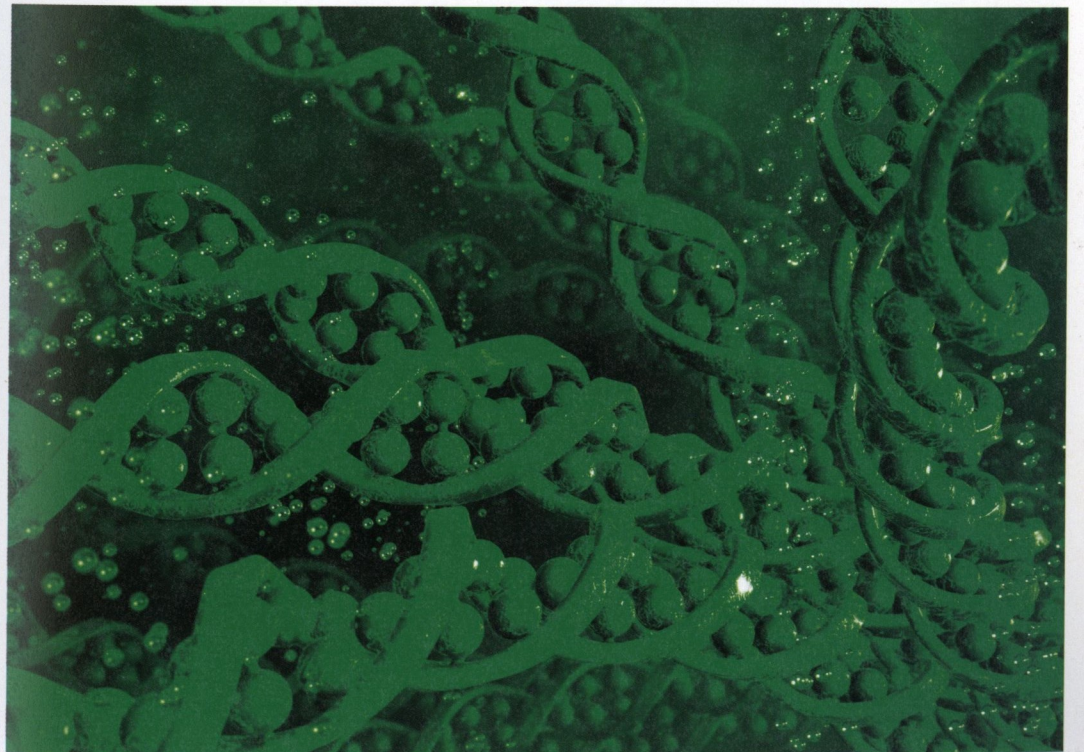


40억 년 전에 지구의 평균온도는 지금보다 훨씬 높아 70℃나 되었다. 널리 받아들여지는 이론에서는 생명체가 화산 주변의 샘이나 수증기 안에서 처음 나타났다고 설명한다. 오늘날에도 열을 좋아하는 세균(호열균)들이 온천에 번성하고 있다.

뜨거운 원시 수프가 실제로는 차게 먹는 수프인 가스파초처럼 차가웠을 것이라 믿고 있고, 일부는 비네그레트소스로 무친 요리처럼 산성이었을 것이라고 주장하며, 마요네즈 같이 기름기를 많이 포함하고 있었을 것이라고 주장하는 사람들도 있다.

어디에서 생명이 시작되었는지에 대해서도 의견의 일치가 이루어지지 않고 있는 실정이고 보면 생명이 어떻게 시작되었는지에 대해서는 말할 것도 없다. 일부 과학자들은 바다에 충돌한 운석으로 인해 생명이 시작되었다고 주장하는가 하면, 운석이 다른 행성으로부터 지구로 생명체를 가져왔다고 주장하는 과학자들도 있다. 생명이 외계에서 왔다는 주장은 지구에서 생명이 어떻게 시작되었는가 하는 문제의 답을 자신의 기원에 대해 고민하고 있을지도 모르는 먼 은하의 외계인에게 떠넘기는 것이다.

좀 더 그럴듯한 이론은 생명이 화산 부근에서 시작되었다는 것이다. 수십억 년 전의 지구는



데옥시리보핵산(DNA)의 유전 코드가 복제되어 유전정보가 세포에서 세포로 전달된다. 그러나 DNA는 모든 진화의 씨앗이라고 하기에 너무 복잡한 분자이다. 따라서 과학자들은 DNA의 사촌이라고 할 수 있는 RNA가 생명을 시작한 분자일 것이라고 생각하고 있다.

## 최초의 세포는 어떤 모양이었을까?

살아 있는 세포는 생명 과정이 일어나도록 공동 작업을 하는 막으로 둘러싸인 분자들의 체계다. 우리는 어떤 구성 요소, 즉 어떤 분자 체계가 최초의 세포에 포함되어 있었는지는 모르지만 세포막은 최초의 세포에도 이미 있었던 것이 확실하다. 비눗방울과 마찬가지로 세포막은 지질이라고 불리는 분자로 만들어져 있다.

실험에 의하면, 40억 년 전의 지구와 비슷한 조건에서 지질은 스스로 막을 형성할 수 있다. 그런 다음 다른 분자들이 작은 방울이나 지질 소포체 안에 포획되었을 것이다. 이 방울들은 마치 수조 차례의 반복된 실험을 통해 생존하는 방법을 찾아내는 초소형 시험관과 같은 것이었다. 나는 이것이 생명이 시작한 방법이라고 생각한다. 만들어지고 파괴된 수많

은 방울들 중에서 아주 희귀한 소포체가 우연히 에너지와 양분을 획득하고 성장할 수 있는 능력을 가지게 되었을 것이다.

현재 가장 간단한 형태의 생명체는 바이러스와 세균의 중간 성질을 지닌 하나의 세포로 이루어진 미생물인 미코플라스마다. 그러나 이 세포도 수백 개의 유전자를 가지고 있고, 수천 종류의 단백질을 합성한다. 우리는 최초의 생명체가 오늘날 존재하는 가장 간단한 생명체보다 훨씬 더 단순했을 것이라는 것 외에 최초의 생명체에 대해 확실하게 이야기할 수 있는 것이 아무것도 없다.

데이비드 디머(David Deamer),  
생명분자공학자, 캘리포니아 대학, 샌타크루즈

namo tube

지금보다 더 따뜻했고 표면에 많은 화산 분화구가 있었을 것이라는 점은 거의 확실하다. 따라서 원시 수프를 담고 있던 연못은 오늘날의 온천 지역처럼 주변이 온천으로 둘러싸여 있었을 것이라고 쉽게 짐작할 수 있다. 또 최초의 생명체를 해저의 화산활동과 연결시키는 사람들도 있다. 해저화산 주변에는 용융된 암석에 의해 데워진 물이 흘러나오는 '검은 흡연자'로 알려진 열수 배출구가 있고, 이런 열수 배출구 주변에는 진화적으로 볼 때 원시 동물이라고 할 수 있는 생명체들이 많이 살고 있다.

생명의 기원에 대한 새로운 이론들이 등장하면서 밀러의 수프 이론은 진부한 이론처럼 보일 수 있다. 어쩌면 수프 이론 전체를 폐기하고 생명체가 어떻게 시작되었는지는 절대로 알 수 없다는 사실을 받아들이는 것이 현명할지도 모른다. 그러나 밀러는 아직도 자신의 소매를 걷어 붙이고 있다.

2007년 밀러가 사망한 후 밀러의 제자였던 지구화학자 제프리 배더(Jeffrey Bada)는 밀러가 실험실에 남겨놓은 상자들을 발견했다. 이 상자들은 유리병들로 가득 차 있었다. 밀러는 실험에 사용되었던 샘플에 라벨을 붙이고 실험실 일지에 기록하여 보관하고 있었다. 배더는 원시 수프에 관한 논문이 출판된 직후인 1953년과 1954년에 했던 실험과 1958년에 했던 발표되지 않은 연구에 사용되었던 샘플 유리병을 발견하고 놀랐다.

배더는 새로운 분석 장비와 생명체에 대한 새로운 이해를 이용하여 밀러의 샘플에서 생명의 기원에 관해 이미 알려졌던 것과는 다른 것을 발견할 수 있었을까? 50년이 된 밀러의 샘플이 새로운 정보를 가지고 있다면 그것은 밀러의 시대가 아직 끝나지 않았음을 의미하는 것이다.

유리병에 든 내용을 다시 분석한 배더는 화산에서 분출되는 수분을 흥내 낸 (노즐을 이용하여 뜨거운 증기를 플라스크 안으로 불어넣은) 실험 장치의 수프 플라스크에 당시의 밀러가 찾아낼 수 있었던 것보다 좀 더 복잡한 화합물질이 일부 포함되어 있다는 것을 알게 되었다. 이 잊혀진 실험은 화산활동이 초기의 화합물질에서 생물학적 복잡성을 만들어내는 데 중요한 역할을 했다는 것을 보여준다.

화산이 생명의 요람일 것이라고 생각한 사람이 밀러만은 아니지만 그의 연구는 아직도 생명의 기원에 관한 생각에 영향을 주고 있다.