

태양계의 물: 기원과 진화

최변각*, 최혜림
서울대학교 지구과학교육과

요약

지구는 현재 태양계에서 액체 상태의 물이 표면에 존재하는 유일한 천체이다. 하지만, 고체 또는 기체 상태의 물은 태양계의 다른 행성이나, 위성, 소행성, 혜성 등에도 풍부하게 존재하고 있다. 풍부한 액체 상태의 물은 지구 표면에서 일어나고 있는 기후의 변화, 해류의 이동, 퇴적 및 침식 작용, 화산활동과 같은 여러 지구과학적 현상에 밀접하게 관여하고 있을 뿐 아니라 생명의 탄생과 진화에도 매우 중요한 역할을 하였다. 현재 지구 표면에 액체 상태의 물이 존재할 수 있는 이유는 태양으로부터의 거리, 지구의 조성 및 크기 등과 관련된 지구 표면의 물리-화학적 조건이 액체 상태의 물이 존재할 수 있는 조건과 일치하고 있기 때문이다. 이와는 달리 지구보다 태양에 더 가깝게 위치하고 있고, 두터운 이산화탄소 대기를 갖고 있어 표면의 온도가 매우 높은 금성의 경우 H₂O는 기체 상태로 존재하며, 지구보다 더 멀리 떨어져 있고 희박한 대기를 갖고 있는 화성의 경우에는 현재 H₂O가 고체 즉 얼음의 형태로 존재한다.

태양계를 탄생시킨 태양계 성운에서는 압력이 너무 낮아 액체 상태의 물이 존재할 수 없으며, 고온에서는 기체 상태로 매우 낮은 저온에서는 얼음의 형태, 또는 함수 광물 내에 포함되어 존재할 수 있다. 지구와 같은 규모의 행성은 비교적 중력이 작아 태양계 성운의 기체를 거의 끌어들이지 못했다. 따라서 현재 지구에 존재하는 물은 대부분은 고체 상태로 지구에 집적되었을 것이다. 하지만 지구가 탄생한 위치에서 초기 태양계의 온도는 얼음이 형성되기에는 너무 높았기 때문에 좀 더 먼 곳에서(현재의 목성 위치보다 바깥쪽)에서 생성된 얼음 즉, 혜성이 태양계 안쪽으로 들어와 지구에 물을 공급했거나 함수광물을 포함하고 있는 소행성(예를 들어 CI chondrites와 같은 조성의)이 물을 가져왔을 것으로 생각되고 있다.

1. 서론

물(H₂O)은 지구에서 생명체 뿐 아니라 광물과 암석, 해양, 대기 등 모든 지구과학 연구 대상의 성인과 진화 경로에 관여하고 있는 매우 중요한 화학 성분 중에 하나이다. 물은 상압(1기압)에서 각각 약 273K(0oC) 및 373K(100oC)의 녹는점과 끓는점을 가지고 있어 지구상의 폭넓은 조건에서 고체, 액체, 기체 상태로 공존할 수 있으며, 많은 종류의 화학성분과의 반응에 활발히 참여하고 있는 성분이다.

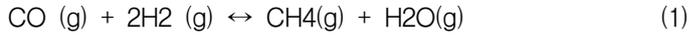
물을 구성하고 있는 두 원소인 수소(H)와 산소(O)는 태양계에서 각각 첫 번째와 세 번째로 풍부한 원소이므로 물은 지구 뿐 아니라 태양계의 다양한 장소와 시간을 통해 풍부하게 존재하고 있는 성분이다. 그럼에도 불구하고 액체 상태의 물은 극히 제한적으로 존재하며, 현재까지는 지구만이 태양계에서 유일하게 액체 상태의 물을 가지고 있다.

최근에 이루어지고 있는 여러 태양계 탐사를 통해 지구 외 태양계의 행성, 위성, 소행성, 혜성의 물의 존재 확인에 많은 노력이 이루어지고 있어, 이들 천체에서의 물에 대해 많은 새로운 정보들이 확인되고 있다. 현재 미국의 NASA, 유럽의 ESA 등을 중심으로 이루어지고 있는 태양계 탐사 계획 중 상당 부분은 태양계 내 다른 천체들의 과거와 현재의 물을 찾는 데 초점을 맞추고 있다. 예를 들어 2004년 전반기를 통해 활발히 활동한 화성의 두 탐사 로봇 Opportunity와 Spirit은 화성 표면에 과거에는 풍부한 양의 액체 상태의 물이 존재했었다는 증거를 수집하였다. 최근에 토성 궤도로 진입한 Cassini 토성 탐사선과 토성의 위성인 Titan에 착륙한 Huygens호는 초기 지구의 모습과 매우 유사한 것으로 추측되는 Titan 표면에 대한 여러 가지 새로운 정보들을 보내 오고 있다. 액체 상태의 물은 생명체 탄생에 매우 중요한 조건 중에 하나이므로 태양계 행성의 물 대한 연구는 궁극적으로 태양계의 다른 천체들에도 생명체가 존재하고 있는지 또는 과거 한때 존재했었는지에 대한 연구로 이어질 것이다.

지구를 포함한 태양계 행성들의 물의 기원에 대해 생각해보고, 최근에 이루어진 탐사 자료를 중심으로 태양계 행성, 위성, 소행성, 혜성에 존재하는 과거와 현재의 물에 대한 증거들을 살펴보기로 하자.

2. 태양계의 물의 생성과 진화

물을 구성하고 있는 원소인 산소와 수소는 각각 태양계에서 첫 번째와 세 번째로 풍부한 원소이다(그림 1). 초기 태양계 성운에서 산소를 포함하고 있는 상(phases) 중 가장 안정한 것은 기체 상태의 CO와 H₂O이며, 이 두체의 상대적인 비율은 아래 화학 반응에 의해 결정된다.



화학 반응식 (1)과 반응에 참여한 상들의 열역학적 성질, 그리고 초기 태양계의 화학 조성을 이용하면 다양한 온도 조건에서 CO(g)와 H₂O(g)의 분압을 구할 수 있다. 산소를 포함하는 분자 중 매우 희박한 압력에서는 CO가 가장 안정하다. 따라서 성운의 C/O 비율이 1보다 큰 경우에는 거의 모든 산소는 CO를 형성하므로 H₂O나 산화물이 존재할 수 없다. 태양계의 경우에는 C/O가 약 0.5이므로 잉여의 산소가 H₂O와 산화물이나 규산염 광물을 형성하게 된다.

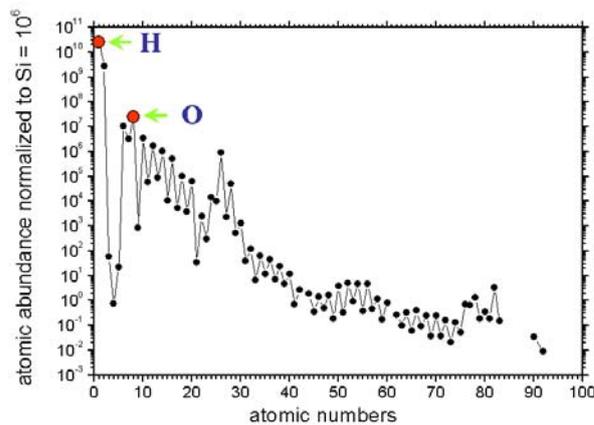


그림 1. 태양계의 평균 조성(Si = 10⁶). 물을 구성하고 있는 산소와 수소는 각각 태양계에서 첫 번째와 세 번째로 풍부한 원소이다.

태양계 성운은 압력이 매우 낮기 때문에 물이 액체 상태로는 존재할 수 없으며, 고온에서는 기체상태로, 저온에서는 함수광물 내 OH로서 또는 고체(얼음)의 형태로 존재하게 된다(그림 2). 하지만, 행성이나 소행성 등 현재의 태양계를 구성하고 있는 대규

모 천체가 생성되던 당시 소행성대 안쪽의 성운의 온도는 얼음이 생성되기에는 너무 높았을 것으로 추정된다. 따라서 지구나 화성 등의 물은 함수광물에서 방출되었거나, 바깥쪽의 얼음이 혜성 충돌 등에 의해 공급되었을 것으로 생각된다(그림 3).

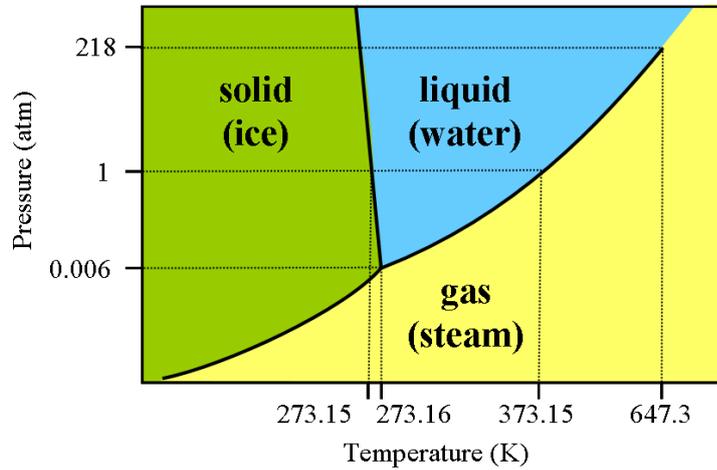


그림 2. 물의 상평형도. 압력이 0.006atm이하에서는 액체 상태의 물이 존재할 수 없다.

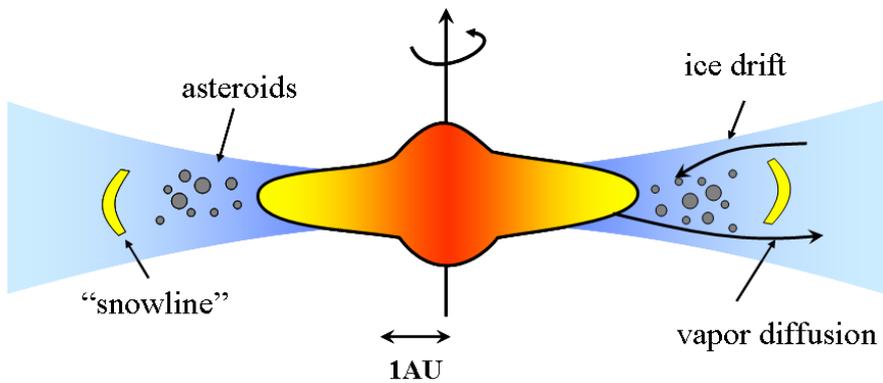


그림 3 초기 태양계의 모식도. 초기 태양계에는 액체 상태의 물이 존재할 수 없으며, 소행성대보다 내부에서는 고체 상태의 물(얼음) 역시 존재할 수 없다. 따라서 지구의 물은 소행성대와 목성 사이에 위치한 소위 'snow line' 바깥쪽에서 생성된 얼음이 내부로 들어와 공급하였거나, 함수 광물에 포함된 물이 방출된 것으로 생각된다.

표 1과 2는 각각 콘드라이트 OH로 포함되어 있는 물의 함량과 혜성의 화학조성을 보여주고 있다. 지표에 존재하는 지구의 물의 총량은 약 1.36×10^{18} 톤으로 추정되며 이는 지구 전체 질량의 약 0.02%에 해당하는 양이다. 따라서 혜성이나 콘드라이트 모두 지구의 물을 설명하기에 충분한 양의 물을 포함하고 있다. 다만, 초기 지구는 생성 당시 매우 고온의 환경을 경험하였으며 소행성 등의 충돌에 의해 지구가 생성될 때 상당량의 물은 증발하여 사라졌을 가능성이 매우 높다. 아마 현재의 물은 지구가 어느 정도 성장한 후 뒤늦게 지구에 충돌한 소행성이나 혜성이 가져왔을 것이다. 소행성이나 혜성 중 어떤 것이 지구의 물의 주요 공급원이었는지에 대해서는 현재 논의가 진행 중이지만, 양을 고려했을 때는 혜성이 좀 더 가능성이 높지만, 동위원소 조성(산소와 수소)을 고려했을 때는 소행성에 좀 더 무게가 실리고 있다.

표 1. 헬리 혜성의 화학조성

Molecule	Ice (wt.%)	Dust (wt.%)	Total (wt.%)
H ₂ O	38.3	0.0	38.3
H-C-O compound	0.0	6.4	6.4
5CO+3CO ₂	5.8	0.0	5.8
H ₁₁₆ C ₅₈ N ₇ S ₄	10.3	10.3	20.6
Silicates	0.0	28.0	28.0
Total	54.4	45.6	100.0

표 2. 콘드라이트의 암석학적 타입에 따른 물의 함량

Petrologic type	1	2	3	4	5	6
Water Content (wt.%)	18-22	2-16	0.3-3	<1.5		

화성은 태양계에서 지구 외에는 생명체가 존재하거나 했었을 가능성이 가장 높은 행성이다. 지구에서 생명체의 탄생과 진화는 물과 매우 밀접한 관련이 있으므로 화성에 액체 상태의 물이 존재했는지에 대해서 매우 다양한 연구가 진행되고 있다. 화성에는 현재 액체 상태의 물이 존재하지 않는 것으로 알려져 있지만, 고체 즉 얼음이나 함유광물 형태로는 상당량의 물이 확인되었다. 그 중 대부분은 화성의 극 지방이나 지하 깊은 곳에 얼어있는 것으로 보인다. 하지만, 최근에 탐사결과는 과거 화성 표면에 상당량의 물이 액체 상태로 존재했던 증거를 보여 주고 있다. 이 중에는 화성 충돌구

에서 흔히 발견되는 액체에 의한 침식 구조, 증발에 의해 생성된 것으로 보이는 광물들, 물의 존재하에서 생성된 것으로 보이는 결핵체, 사층리 구조 등이 포함된다. 이러한 물에 대한 증거는 과거 화성에도 생명체가 탄생했었을 가능성을 배제할 수 없게 한다.

3. 결론

물은 지구와 태양계의 다른 행성들의 성인과 진화 및 생명체의 탄생과 진화에 매우 중요한 역할을 하였다. 지구의 물은 지구 보다 좀 더 태양으로부터 멀리 떨어져 형성된 소행성이나 혜성에 충돌에 의해 공급되었을 것으로 생각되며, 이들 중 어떤 것이 더욱 중요한 역할을 하였는지에 대해서는 아직 논의가 진행 중이다. 지구 외에는 화성이 과거 비교적 풍부한 양의 액체 상태의 물을 표면에 가졌을 것으로 추정되며, 만약 과거 화성에 물이 풍부하게 존재했었다면, 화성에서도 생명체가 탄생했었을 가능성을 배제할 수 없을 것이다.