

지구상의 물의 기원

Origin of Water on the Earth

이민성 (Min-Sung Lee)*

1957년 인류중 처음 외계로부터 지구를 바라본 소련의 우주비행사 가가린은 "지구는 푸르다"라고 말했다. 이 우주에는 무수한 행성이 있지만 그중에서 단 하나 지구만이 그 표면에 가득히 물을 저장하고 있다. 따라서 지구를 물의 행성이라고도 한다. 그런데 어찌서 지구에만 물이 존재하며, 그 물의 기원은 무엇인가? Table 1에 지구 수권에 있어서의 물의 분포가 표시되어 있다. 이를 보면 지구상의 물의 중요도는 해양, 만년빙 또는 빙하 그리고 지하수의 순임을 알 수 있다. 따라서 우리들은 육지에 있어서 지하수의 중요성을 다시 인식해야 할 것이다.

Table 1. 수권에 있어서의 물의 분포 (USGS).

위 치	수량 / l	전체의 물에 대한 백분율
담수호	125×10^{15}	0.009
염수호 및 내륙해	104×10^{15}	0.008
하천수	1.1×10^{15}	0.0001
주수(토양 습기를 포함)	66.6×10^{15}	0.005
깊이 800 m보다 얇은 지하수	$4,200 \times 10^{15}$	0.31
깊이 800 m보다 깊은 지하수	$4,200 \times 10^{15}$	0.31
만년빙 또는 빙하	$29,000 \times 10^{15}$	2.15
대기	12.9×10^{15}	0.001
해양	$1,319,800 \times 10^{15}$	97.2

(B. J. Skinner, 1969)

1. 지구상에 물이 어떻게 해서 존재할 수 있는가?

지구표면의 2/3는 해수로 덮여 있고 그 평균 심도는 2,700 m이다. 태양계에 있어서의 유일한 물의 행성인 지구의 존재에 대한 이해를 돕기 위해서 금성, 지구, 화성의 태양으로부터의 거리, 질량, 기온, 대기의 화학 조성들을 Table 2에 나타내었다. 이 표에서

Table 2. 금성, 지구, 화성, 질량 및 대기조성.

	금 성	지 구	화 성
태양으로부터의 평균거리/ 10^6 km	107	148.8	277
질량/g	4.87×10^{27}	5.98×10^{27}	6.40×10^{26}
질량비(지구를 1로함)	0.815	1.00	0.107
비중	5.21	5.52	3.94
대기압/atm	90	1	1/132
표면온도/ $^{\circ}$ C	500	20	60
대기조성(%)			
CO ₂	97	0.03	95
N ₂	3	78.1	2~3
Ar	-	0.93	1~2
O ₂	-	21.0	1.1~0.3
H ₂ O	구름위 1,000 ppm 해수를 수증기로 보면 구름밑 1,00~1 ppm	400 atm	빙관

*서울대학교 지구과학교육과

보면 첫째, 지구는 액체의 물이 존재할 수 있는 태양으로부터의 매우 적절한 거리에 위치해 있음을 알 수 있다. 태양으로부터는 끊임없이 지구를 비롯해 복사에너지가 쏟아져오고 있다. 지구보다 태양에 가까운 금성에서는 수증기가 금성의 중력권 밖으로 날아가 버리기 때문에 대기의 주요성분은 이산화탄소(CO₂)로 되어 있어 그 온실효과가 평균기온을 500℃로 만들고 있다. 따라서 이러한 상태로는 액체 상태의 물이 존재할 수가 없다. 한편 화성과 같이 태양으로부터 멀리 위치하고 있으면 설빙은 존재할 수 있지만 액체인 물의 존재는 있을 수 없다. 지구는 태양으로부터의 적절한 거리에 존재하므로해서 수증기도 액체의 물도 그리고 고체의 눈과 얼음도 공존할 수 있는 것이다.

두번째, 지구의 질량도 지구에 물이 존재하기 위해서는 매우 적당한 것이다. 만일 지구의 질량이 현재의 그것과 달랐었다면 지구 대기의 화학조성은 어떤 것이 될 것인가. 지구가 만들어졌을 당시의 지구대기(1차 대기)는 다른 행성에서도 그랬듯이 단순한 원자

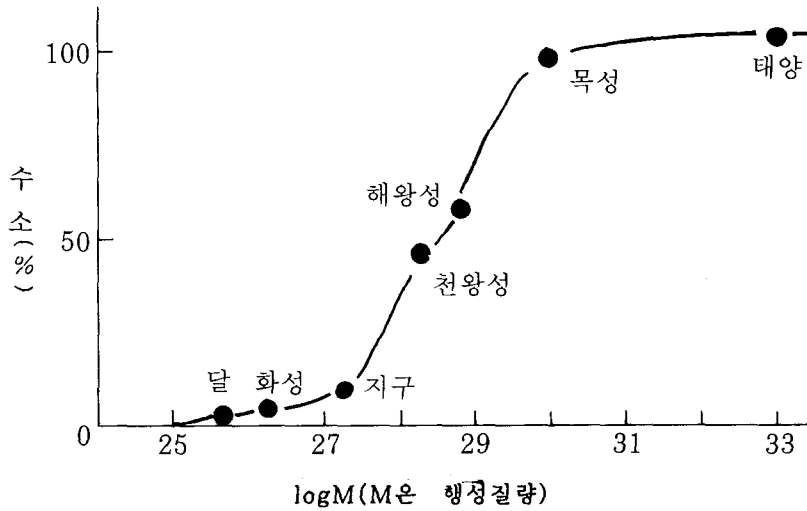


Figure 1. 행성의 질량과 그 대기중의 수소량과의 관계.

핵의 수소나 헬륨이 주성분이었다고 생각된다. 질량이 클수록 인력은 크다. Figure 1을 보면, 태양계를 구성하는 질량이 큰 태양이나 목성은 가벼운 수소(분자량 2)나 헬륨(분자량 4) 등을 그 표층부에 끌어들이어 날려보내지 않고 있어 그들의 대기는 지금도 가벼운 원소인 수소나 헬륨으로 차 있다. 그러나 지구의 질량은 그다지 크지 않기 때문에 수소와 헬륨을 대기권에 끌어들이어 보유하고 있을 수가 없어서 지구권 밖으로 날려보냈을 것으로 생각된다. 지구의 질량은 현재 지구대기에서 보여지는 분자량이 좀더 큰 질소(분자량 28), 산소(32), 아르곤(40), 이산화탄소(44), 수증기(18) 등을 그 중력권에 끌어들이어 놓고 지구 대기권 밖으로 날려보내지 않고 있다. 만일 지구의 질량이 더 작았다면 수증기는 지구로부터 달아나서 지구는 메마르게 되었을 것이다. 반면 질량이 컸더라면 지구대기는 수소나 헬륨 가스로 충만되어 있었을 것이다. 그런데 Table 2를 다시 보면 금성과 화성의 대기 조성은 매우 유사한데 지구의 그것만은 전혀 다름을 알 수 있다. 이것은 매우 이상스러운 현상이다. 그리고 Table 3은 지구상의 탄소의 분포를 나타낸 것이다. Table 3에서 알 수 있듯이 지구상에 있어서의 이산화탄소의 큰 저장고는 바다에서 생성되는 탄산염과 퇴적물 등에 포함되는 유기물질이다.

Table 3. 지구권에 있어서의 탄소의 분포

(단위는 CO₂로 환산해서 10²⁰ g)

(W. W. Rubey)		(A. Poldervaart)	
대기	0.0233	"	"
해양수, 육수	1.30	"	"
생물과 분해하지않는생물	0.145	"	"
탄산염	670	2.240	2.490
퇴적물중의 유기탄소	250	250	
석유, 석탄	0.27	0.27	

탄산염이나 유기물은 물이 있어야만 생성되는 것으로, 이들은 물의 존재하에서 이산화탄소를 고체 상태로 고정시키고 있는 것이다. 만일 이들 탄소를 이산화탄소의 형태로 대기중에 방출시킨다면 지구 대기 중의 이산화탄소와 질소의 농도의 비는 금성이나 화성의 값과 비슷하게 된다. 즉 원래의 지구의 대기조성은 금성이나 화성과 같았으나 지구에는 액체의 물이 존재했기 때문에 대기 중의 이산화탄소는 대부분이 고화되어 대기중으로부터 제거되어 현재의 지구대기의 화학조성만이 다른 것으로 된 것이다. 그리고 그 대기조성이 지구 생물의 탄생과 생존을 가능하게 한 것이다.

그러나 지구상에 있어서 대량의 물의 존재를 이해하기 위해서는 다음 몇 가지 사항이 중요하다.

2. 물의 성질

물은 지구의 표층의 온도와 압력 환경하에서 기체의 수증기, 액체의 물 그리고 고체의 얼음이나 눈의 세 종류의 상태로 존재할 수 있다.

물분자의 분자량은 18이다. 이 정도 가벼운 분자라면 매우 움직이기 쉽기 때문에 적어도 지구 환경하에서는 움직이기 쉬운 기체의 수증기로서만 존재하는 것이 당연한 것이다. 그러나 물분자는 그 매우 특이한 분자구조 즉 쌍극자 능률(雙極子 能率)이 매우 크기 때문에 상온상압 하에서도 액체의 물이 존재할 수 있고 또한 0°C 이하에서는 얼음이나 눈의 고체 상태로서 존재할 수 있는 것이다.

물분자(H₂O)는 수소원자(H) 두개와 산소원자(O) 한개로 되어 있으며 수소원자측은 +로 산소원자측은 -로 대전하고 있다. 물분자는 분자 전체로서는 전하는 0이지만 그 분자 속에 +와 -의 전기의 양극(쌍극자)을 가지고 있어 그 양극간의 거리가 다른 분자에 비해 훨씬 크다. 그 거리가 클수록 하나의 분자속의 +와 -의 각각의 전하가 나타내는 특성이 강해진다. 그 거리는 앞에 말한 쌍극자 능률이라고 하며 물은 그 쌍극자 능률이 매우 크며 물분자는 그 분자내에 매우 강한 +와 -의 전하가 강하게 서로 당기고 있

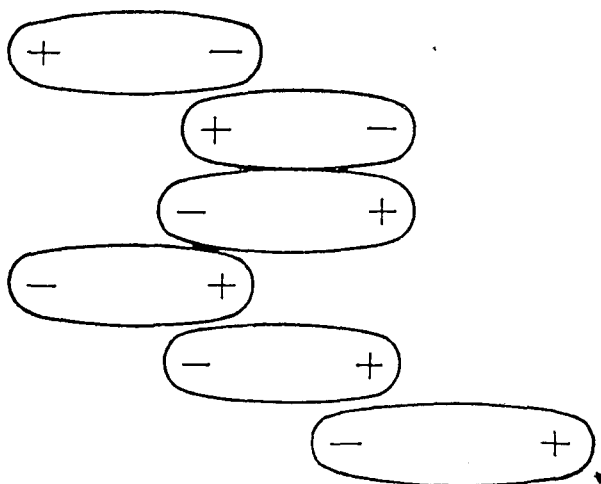


Figure 2. 물 분자간의 인력.

다(Figure 2). 가령 100개의 물분자가 그 결합력에 의해서 스크럼을 짠다면 그 겹보기의 분자의 무게는 1800으로 된다. 이 물분자끼리의 결합(이것을 수소결합이라고 함) 때문에 물의 비등점이나 융점이 비슷한 분자량을 갖는 분자에 비해서 훨씬 높아지며, 액체나 고체로 되기가 매우 쉬운 것이다.

우리들은 물이나 얼음 등이 지구상에 흔하게 분포하고 있기 때문에 아무런 특성이 없는 평범한 것으로 여기고 있지만 사실상 물은 매우 이상한 것으로 쌍극자 능률이 매우 큰 특이한 분자구조와 그에 따른 특이한 성질을 갖는 특별한 물질인 것이다.

3. 지구의 원재료 물질과 물의 성인

어떻게 해서 지구에 물이 등장하여 존재하게 되었는가에 대해서는 지구의 원재료 물질이 물을 충분히 가지고 있었다는 사실을 이해하여야만 한다. 이를 위해서는 약 46억년 전의 원시 태양계 성운으로부터 태양계의 생성과 진화과정을 이해해야 하지만 여기서는 얘기를 간단하게 하기 위해서 지구의 시원적인 물질인 탄소질 콘드라이트의 하나인 CI 콘드라이트에 대해서만 간단히 설명하기로 한다.

지구상에 낙하한 운석은 여러가지 기준으로 분류되고 있지만 요즘은 Table 4에서와 같이 콘드라이트 운석인 미분화된 운석과 에이콘드라이트 및 석천운석과 철운석등 분화된 운석으로 대별하고 있다. 콘드라이트는 다시 탄소질 콘드라이트와 보통 콘드라이트

로 나뉘는데 지구의 시원물질이라고 생각되는 탄소질 콘드라이트는 다시 주구성 원소비로부터 CI, CM, CO, CV의 네 그룹으로 나뉜다. 그런데 이 중 CI 콘드라이트는 휘발성 원소의 손실이 다른 탄소질 콘드라이트에 비해 가장 작으며 또한 Figure 3에서 보여지는 바와 같이 태양 대기의 원소 존재도와 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 CI 콘드라이트를 원시 태양계의 잔존물질을 대표하는 즉 지구의 시원물질로 생각하고 있다. CI 콘드라이트는 Figure 4에서 보는 것처럼 다른 콘드라이트와는 달리 콘드롤을 가지고 있지 않으며 대체적으로 저온 물질인 기질로 되어 있다. 이들 기질 물질은 크기가 100에서 1000Å 정도의 극히 미립인 함수 규산염이 주체이며 물이 존재하는 환경하에서의 변질 작용을 받고 있다. 그리고 유기질 물질이 풍부하다는 특징을 지니고 있다. 이러한 조직과 산상은 원시 태양계 성운에서 일어났던 일들을 반영하고 있다고 생각되고 있다.

Table 4. 운석의 분류.

Undifferentiated meteorites		Differentiated meteorites	
Chondrites	Carbonaceous chondrites	CI (Ivuna type) CM (Mighei type) CO (Ornans type) CV (Vigarano type)	Achondrites Howardites Eucrites Diogenites Ureilites Aubrites SNC (Martian) meteorites Shergottite Nakhlites Chassignite Lunar meteorites
	Enstatite chondrites	EH (Metal+troilite > 20%) EL (Metal+troilite < 15%)	Stony-irons Mesosiderites Pallasites
	Ordinary chondrites	H (high iron chondrites) L (low iron chondrites) LL (low iron & low metal chondrites)	Irons IAB, IC IIAB, IIC, IID, IIE, IIF IIIAB, IIICD, IIIE, IIIF IVA, IVB, other irons

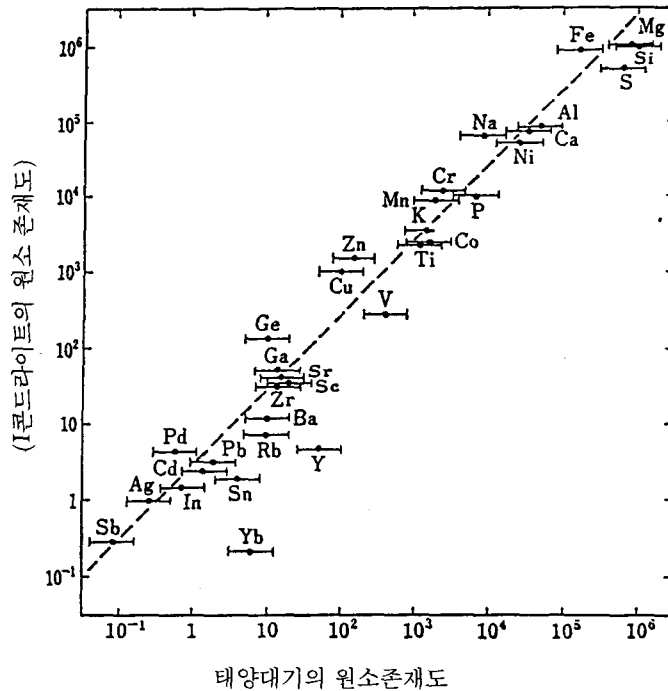


Figure 3. 태양대기와 CI콘드라이트의 원소 존재도 (Ringwood, 1966).

지구상의 물의 기원

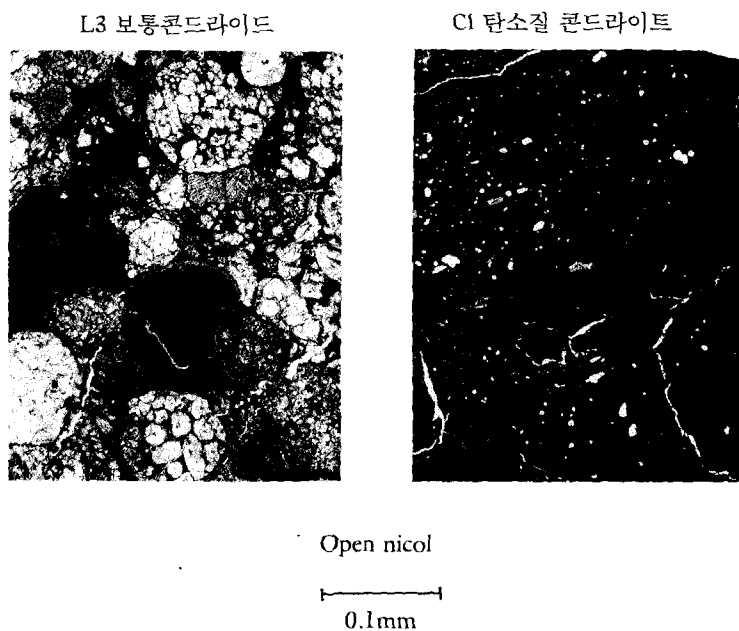


Figure 4. 보통 및 탄소질 콘드라이트의 현미경사진.

Table 5. CI, 보통 콘드라이트 및 Ringwood형 지구의 화학조성.

	CI 콘드라이트	보 통 콘드라이트	Ringwood형 지구
SiO ₂	20.56	38.04	29.84
TiO ₂	0.07	0.11	
Al ₂ O ₃	1.50	2.50	2.69
MnO	0.17	0.25	
FeO	21.62	12.45	6.38
MgO	14.42	23.84	26.29
C ₂ O	1.12	1.95	2.57
Na ₂ O		0.98	1.23
K ₂ O	0.07	0.17	
P ₂ O ₅	0.26	0.21	
Cr ₂ O ₃	0.33	0.36	
NiO	0.13	0	
CoO	0.06	0	
FcS	0	5.73	
S	[SO ₃ 8.97 S 1.76]	0	
H ₂ O	19.13	+	
C	2.83	+	
Org · compd	6.35	0	
Fe	0	11.73	25.87
Ni	0	1.34	1.66
Co	0	0.08	
Si	0	0	3.47

Table 5에 CI 콘드라이트, 보통 콘드라이트 및 Ringwood가 추정한 지구의 화학조성이 표시되어 있다. 이 표를 보면 CI 콘드라이트는 금속철을 포함하고 있지 않지만 보통 콘드라이트는 그것을 가지고 있으며 지구는 더 많은 금속철을 핵에 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 지구의 가장 시원적인 물질이라고 생각되는 CI 콘드라이트로부터 지구를 만들기 위해서는 CI 콘드라이트 중의 산화철을 금속철로 환원해야 한다. 환원반응이란 흡열 반응이기 때문에 외부로부터 열이 가해져야만 한다. 이 열원은 지구 생성 초기 무수한 운석(소행성이나 그 파편 등)의 낙하 충돌 등을 들 수 있다. 이러한 과정에 의해서 열이 가해지면 지구의 1차 대기의 휘발성을 포함한 휘발성 물질은 날아가게 된다.

그런데, 지구의 질량은 6×10^{27} g이며 지구의 고체 부분이 CI 콘드라이트질 물질로 되어 있다고 생각하면 그 질량은 10×10^{27} g이다. 이 차는 4×10^{27} g으로서 이 질량은 휘발성 물질로서 기체로 될 물질인 것이다. 만일 이만한 양의 기체가 지구의 증력권내에 보존되었다고 하면 그 기체의 압력은 10^6 기압에 달하게 되고 그러한 농후한 대기는 현재의 지구에서는 도저히 생각할 수 없다. 현재 지구의 휘발성 물질의 양은 10^{24} g 정도이다. 따라서 CI 콘드라이트질 물질로부터 지구가 만들어졌다면 그 물질이 가지고 있던 휘

발성 물질의 99%는 지구의 중력 밖으로 날려보내지 않으면 안된다.

다음은 휘발성 원소중 회가스에 대해서 알아보기로 한다. 회가스라는 것은 그 원소 자체로서 단독의 기체로 존재하며 다른 원소와 결합을 잘 하지 않는 전형적인 휘발성 원소이다. 따라서 휘발성 물질의 거동을 알기 위해서는 회가스가 매우 유용하다. 현재 지구 대기중의 회가스 상호의 상대 존재도는 CI 콘드라이트의 그것에 대체적으로 유사하다. 비휘발성 원소인 규소(Si)를 기준으로 취하여 규소에 대한 지구의 휘발성 원소가 CI 콘드라이트의 그것에 비해 어느 정도 작게 되었는가를 계산한 값이 Table 5에 실려 있다. 단, 이 가운데 ⁴⁰K의 방사성 붕괴에 의해 생성된 ⁴⁰Ar과 가볍기 때문에 지구의 대기권 밖으로 날아가버린 Hc은 제외하였다.

Table 6. 일반의 휘발성물질과 회가스의 잔존율

지구의 질량	6×10^{27} g	(회가스/Si) 지구대기 (회가스/Si)CI콘드라이트
CI 콘드라이트 (차)	10×10^{27} g 4×10^{27} g	
지구의 휘발성물질	2.5×10^{24} g	²⁰ Ne 1.4×10^2
휘발성물질의 잔존율		³⁶ Ar 2.3×10^2
$2.5 \times 10^{24} \times 100 / 4 \times 10^{27}$		⁸⁴ Kr 2.2×10^2
		¹³² Xe 1.0×10^3

알려진 바에 의하면 지구의 칼슘이나 마그네슘과 같은 비휘발성원소는 규소에 대한 존재량비가 CI 콘드라이트의 것과 같다. 그런데 Table 6에서 알 수 있듯이 회가스의 지구에의 잔존율은 CI 콘드라이트의 불과 0.1%에서 2%, 더욱이 일반 휘발성 물질에서는 약 0.06%에 불과하다. 따라서 CI 콘드라이트가 가지고 있는 휘발성 물질과 현지구가 가지고 있는 그것과는 다르다고 할 수 있다.

지금까지 고찰한 바와 같이 CI 콘드라이트로부터 지구를 만들기 위해서는 CI 콘드라이트가 가지고 있는 휘발성 물질, 즉 지구가 생성된 당시 가지고 있던 1차 대기는 지구 대기로부터 날려보내지 않으면 안된다.

천연수의 근원은 대기인 것이다. 그런데 지구생성 당시의 1차 대기는 앞서 설명한 바와 같이 지구가 가열되어 온도가 상승하는 과정중에 거의다 지구권 밖으로 날아가버리고 지구 자체는 용융상태가 되어 지구 물질이 녹게 되고 이에 따라 무거운 원소인 철이나 니켈등은 중심부에 가라앉아 핵을 만들었고 가벼운 규소같은 원소들은 부상하여 보다 가벼운 규산염이나 산화물로 된 맨틀로 분리되었다. 그 후 상부 맨틀에서 부분 용융이 일어나 마그마가 발생하여 화산 활동이 일어났고 이것이 화산활동에 의해 지구 표면에 분출하여 가벼운 금속원소를 포함하는 규산염 광물로 된 지각을 만들게 되었다.

현재 존재하는 대기는 화산 활동에 의해서 분출된 마그마에 녹아 있던 기체로부터 유래되었다고 생각된다. 이들은 수증기(H₂O), 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂)를 주로 하고, 여기에 소량의 메탄(CH₄)이나 암모니아(NH₃)를 포함하고 있었다고 생각되는데 이것이 원시 대기(2차 대기)이다. 그 후, 지구는 점점 식어가고 지구표층이 물의 임계온도(375°C) 이하로 식어서 수권이 형성되기 시작한다. 수증기는 자외선에 의해 분해되어 산소를 만들었으며, 또한 액화되어 강수현상이 일어나 지구 표면의 분지와 같은 낮은 장소에 물이 고이게 되었다. 이에 따라 원시 대기 중의 이산화탄소는 바다로 녹아들어가고 이것이 바다 속에서 칼슘이온과 반응하여 석회암으로 침전하는 등 대기 중의 이산화탄소의 농도는 낮아지게 되었다. 이러한 대기 중의 이산화탄소의 감소는 지구 표면온도를 적절히 유지할 수 있게 되었고 또한 생물이 발생·생존할 수 있는 환경이 이루어지게 되었다. 이 낮은 장소는 지각 중 밀도가 큰 부분에 생겼으며, 이와 같이 해서 만들어진 대규모의 물이 고이게 된 것이 원시 대양이라고 생각하고 있다.

4. 지구상의 물의 순환

태양 복사에너지는 대기층을 통과하여 지구상에 떨어지게 된다. 그런데 지구표면의 2/3는 해양이기 때문에 그 대부분은 대양상에 떨어지게 된다. 그 에너지 가운데 물의 표면에서 반사되는 양은 극히 적으며 나머지는 직접 해수의 표층 수 mm에서 흡수되어 열로 변화한다. 바닷속으로 들어온 모든 에너지는 흡수되어 열로 바뀐다. 바다는 대류와 전도에 의해서 열을 효율적으로 전달하기 때문에 두께 100 m까지의 층은 태양에 의해 데워지고 이 효율적인 혼합과 물의 큰 비열이 해양, 특히 열대의 해양은 태양에너지를 받아들여 열로서 재분배하는 거대한 역교환기가 된다.

태양의 에너지의 대부분은 지구표면상의 열대 내에서 받아들여진다. 그것은 열대의 하늘에는 태양은 어떤 계절에도 고도가 높으며 또 반사율은 표면에 대해 들어오는 복사가 수직일 때 가장 적기 때문이며 또한 열대에서는 해양의 면적이 크므로 물에 의한 열의 흡수에 적합하기 때문이다. 그리고 인접하는 두 위도선 간의 면적은 극에 가까운 곳보다는 적도에 가까운 곳이 더 크다. 그러므

지구상의 물의 기원

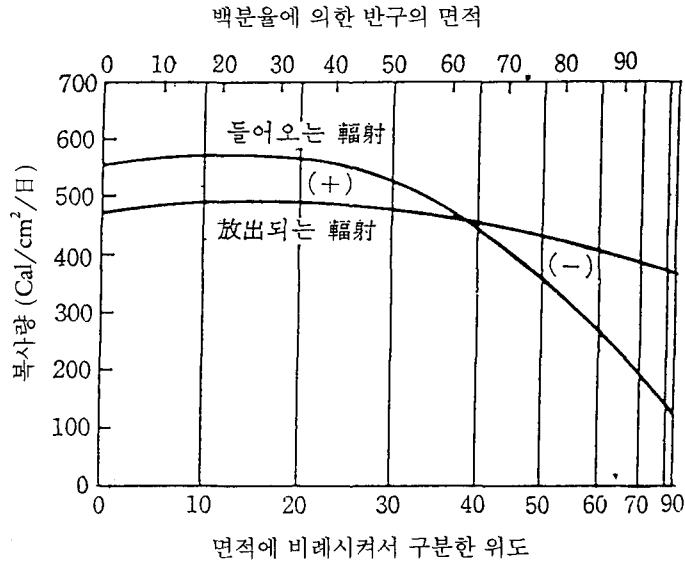


Figure 5. 지구북반구의 복사수지 (Houghton, 1954).

로 지구의 전표면의 2/3 이상이 북위 20°와 남위 20°사이에 있다. 따라서 저위도에서는 우주공간에 역으로 복사하는 것보다는 더 많은 에너지를 태양으로부터 받게 된다. 그러나 극지방은 이와 반대로 전태양복사중 극히 적은 양밖에 받아들여지지 않는다. Figure 5에 북반구에 있어서의 입사되는 복사 및 방출되는 복사의 위도분포를 표시했다. 북위 38°부근에서 지구의 연간 열 수지의 균형이 잡혀진다. 이러한 것으로 미루어볼 때 열대지방에 있어서의 입사에너지의 과잉을 극지방으로 운반하는 수단이 존재하지 않으면 안된다는 것을 알 수 있다. 이 에너지의 재분배가 지구 표면상의 물의 순환이며 이러한 작용은 지형의 형성에 가장 중요한 역할을 하게 된다.

지구표면상에 존재하는 물은 그 중요도순으로 보면 해양, 빙하, 지하수, 호소와 하천, 대기 그리고 생물체이다. 실제로 지표 부근의 물의 총량의 97%가 해양에 존재하고 나머지의 대부분은 빙하 속에 있다. 미국 지질조사소 수자원국의 자료에 의하면 연간 해양의 표면에서 361,000km³의 물, 즉 전해양으로부터 두께 1m의 물이 증발한다. 그런데 바다에 되돌아오는 양은 324,000km³에 해당된다. 따라서 나머지 37,000km³가 다른 곳으로 가지 않으면 안된다. 육지에서 연간 증발하는 물은 62,000km³에 불과하다. 이 양은 육지에 내리는 연간 총유수량인 99,000km³보다 적다. 따라서 육지에서는 증발하는 양보다는 비나 눈으로 되어 내리는 양이 매년 더 많으므로 37,000km³의 물이 매년 육지로부터 바다로 흘러서 되돌아가게 되는데 그 과정에서 육지에서의 지형의 변화를 일으키고 또한 지하수, 하천, 호수 등으로의 여분의 물의 분배가 일어나는 것이다.