

# 지구를 따뜻한 물의 행성으로 만드는 ‘대기’

글 | 김경렬 \_ 서울대학교 지구환경과학부 교수 krkim@snu.ac.kr

**우** 리들은 매순간 대기 속에서 숨을 쉬고 살면서 이의 존재를 자연스럽게 받아들이고 있지만, 막상 대기란 무엇일까라는 질문을 받으면 그리 쉽게 답을 할 수 없는 것이 또한 사실이다. 실제 대기에 대한 어느 정도의 실체감을 가질 수 있게 된 것은 온도, 압력 또는 공기의 운동을 직접 측정하려는 노력을 통해서 이루어진 것이며, 대기를 연구한 역사를 살펴보면 이에 대한 궁금증이 이미 오래전부터 끊임없이 있어왔던 것을 알 수 있다.

## 물 어는점과 끓는점 100등분해 섭씨체계 제안

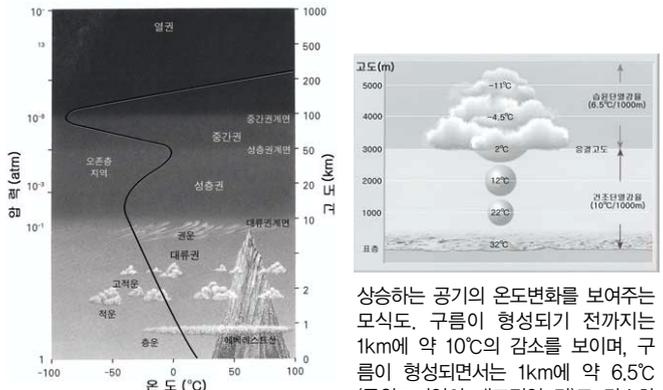
1597년 갈릴레오는 온도에 따라 부피가 변하는 것을 이용한 온도측정기를 제작하여 온도를 측정할 수 있음을 처음으로 보였고, 1641년 투스카니의 페르디난드 2세 궁전에서 액체가 들어있는 밀 봉된 유리관을 이용한 공기 온도계가 처음으로 제작되었다. 그러나 온도계의 눈금보정은 논란거리였으며, 1714년 파렌하이트가 처음으로 수은을 사용한 온도계를 제작하면서 소금물과 사람의 체온을 두 기준점으로 하여 이를 96등분하는 화씨온도자태(°F)를 제시하였고(96등분 법은 길이측정법에도 아직 남아있다), 마침내 1742년 셸시우스가 물의 어는점과 끓는점을 100등분하는 섭씨 체계(°C)를 제안함으로써, 오늘날 우리들이 흔히 사용하는 온도 측정의 기본이 마련되었다. 압력의 경우는 1643년 토리첼리가 공기의 압력으로 수은주를 76cm나 올릴 수 있음을 밝히면서 압력계를 제작하였는데, 실제 이 시기부터 압력의 측정이 이루어진 기록이 남아 있다.

지표 근처의 기압은 고기압·저기압 등의 다소 차이가 있지만 대체로 1기압에 가깝다. 그렇지만 높은 산 위에 올라가면 기압이 낮아지며 온도도 내려간다는 것은 흔히 체험하는 일이다. 17세기 중엽 실제 고도가 증가하면서 압력이 낮아지는 것을 확인한 파스칼의 실험 기록이 남아 있기도 하지만, 18세기 후반 기구가 본격적으로 개발되고 나서야 사람이 직접 상공에 올라 이를 확인할

수 있었다. 1783년 8월 27일 샤를은 파리에서 수소기구를 처음으로 시운전하여 약 910m 고도까지 올리는 데 성공하였다. 이어 그 해 12월 1일 샤를은 로베르와 함께 약 600m 상공으로 올라가 약 40km를 비행하는 최초의 시험비행에 성공하였고, 이어서 기구를 지면으로 내려 동행자를 내려놓은 후 가벼워진 기구로 단독 비행을 시도하여 약 2천700m까지 올라갈 수 있었다. 이로써 샤를은 고도가 올라가면서 공기가 희박해지며 온도가 내려감을 최초로 확인한 과학자가 되었다. 그런데 고도가 높아지면서 왜 온도와 압력이 내려가는 것일까?

## 고도 높아질수록 온도와 압력 내려가

압력이란 단위면적 당 우주를 향하는 공기기둥 내에 있는 공기 분자들이 누르는 힘이다. 그런데 대기는 수축이 가능한 유체이므로 위에서 누르는 압력이 누적된 결과로 공기분자는 지표가까이에 훨씬 뽁뽁하게 쌓이게 된다. 따라서 고도가 증가함에 따라 단위 부피 속에 들어있는 공기분자수가 빠르게 줄어들며, 압력은 고도에 따라 급격하게 감소한다. 고도에 따른 기압의 변화는 수학적으로 지수



대기의 구조

상승하는 공기의 온도변화를 보여주는 모식도. 구름이 형성되기 전까지는 1km에 약 10°C의 감소를 보이며, 구름이 형성되면서는 1km에 약 6.5°C(중위도지역의 대표적인 값)로 감소하는 모습을 보여준다.

함수  $P(z) = P_0 e^{-z/7.5}$  (z: 고도(km),  $P(z)$ : 고도 zkm에서의 압력,  $P_0$ : 해수면의 압력)로 근사할 수 있으며 대략 5.2km씩 높아질 때마다 절반으로 줄어든다. 세계 산악인의 꿈인 8천800여 m 높이의 에베레스트산 정상에서의 대기압은 0.3기압밖에 되지 않는다!

고도에 따라 온도가 낮아지는 것은 무슨 이유일까? 그 배경에는 ‘우주의 에너지는 일정하게 보존된다. 즉, 에너지는 새로이 창조되지도, 소멸되지도 않으며, 단지 변환만이 가능하다’는 열역학 제1법칙이 자리 잡고 있다. 소위 제1종 영구기관이라는 이름의 스스로 에너지를 창조할 수 있는 기계를 지구상에 만들 수가 없다는 것을 우리에게 분명히 알려주는 열역학 제1법칙은 먹고살기 위해서는 그만큼 땀을 흘리며 수고를 해야 한다는 조물주의 심오한 뜻이 함축되어 있을 것 같기도 한 법칙이다.

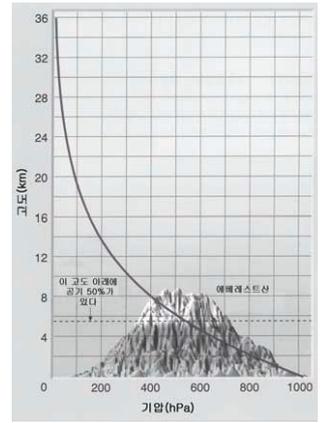
지표에서 더워진 공기 덩이는 수직적으로 상승하는 대류운동을 시작한다. 그런데 기압이 낮은 상공으로 오르면서 내부와 외부의 압력차 때문에 공기덩이의 부피가 팽창할 수밖에 없다. 줄을 놓친 풍선이 올라가면서 점점 부푸는 것이 바로 이를 잘 보여준다. 이 때 상승하는 공기는 부피가 팽창하기 위한 에너지를 필요로 하게 된다. 그런데 공기덩이가 주위에서 에너지를 공급받을 수 없는 빠른 속도로 상승하면(단열 과정) 팽창에 필요한 에너지를 스스로 융통해낼 수밖에 없다는 것이 열역학 제1법칙의 결론이다.

19세기 열역학이 이룩해낸 중요한 업적의 하나가 바로 온도의 의미를 밝힌 것이다. 온도란 그 물질을 이루는 분자들의 평균운동 에너지(내부에너지)의 척도이며, 절대온도는 바로 내부에너지에 비례하는 양이다(절대온도 0도는 모든 물질이 운동을 그치고 정지하는 극한의 상태). 수직적으로 공기가 잘 섞이는 대류권 내에서 결국 상승하는 공기는 팽창하면서 자신의 내부에너지를 소비할 수밖에 없으며, 이 결과로 공기 온도는 고도가 높아지면서 낮아지게 되는 것이다.

공기의 수직운동이 단열 과정으로 진행될 때, 고도에 따른 온도 변화율(온도감율)을 계산하면 건조한 공기는 1km 오를 때마다 약 10°C(9.8°C)씩 온도가 내려간다. 젖은 대기가 상승할 때는 일단 온도가 이슬점 이하로 내려가면 수증기가 동결하면서 구름이 만들어지고, 이 때 방출되는 잠열이 팽창에 필요한 에너지의 일부를 제공해준다. 중위도 지역에서 젖은 공기의 온도감율은 1km당 약 6.5°C 정도의 값을 가진다. 요즘 비행기를 타면 고도와 외부 온도를 화면에 보여주는데, 착륙을 하기 위해 비행 고도를 낮출 때 이런 온도감율을 직접 확인해볼 수 있는 좋은 기회이다.



1783년 프랑스의 과학자 샤를과 그의 조수 로베르가 600m 상공에서 수소기구를 타고 비행하는 그림



고도에 따른 기압 변화의 모습. 고도가 증가하면서 기압이 지수함수적으로 감소하고 있다.

### 10~50km 성층권에서는 공기 온도 상승

실제 고도에 따른 평균기온의 분포 모습을 보면 위도에 따라 차이가 있기는 하지만 대개 10여km 정도까지는 대기의 대류운동에 의하여 기온이 고도에 따라 감소하고 있다. 이 영역을 대류권이라고 부르며, 구름의 생성, 강우, 저기압, 고기압의 발생 등 기상현상은 모두 이 영역에서 일어난다.

그러나 실제 그 위 약 50km까지는 오존층이 태양의 자외선 에너지를 흡수하면서 공기를 데워 오히려 공기의 온도가 올라간다. 더운 공기가 찬 공기 위에 놓여 있는 열적으로 안정된 하나의 거대한 역전층이 만들어져 있다. 이런 대기의 구조는 생명의 행성 지구 특유의 구조이다. 지구상에 생명이 태어나고 광합성이 시작되며 대기 중의 산소가 증가하면서 오존층이 생성되는 진화 과정을 통하여 지구 생명체가 만들어낸 특별한 구조이다. 이에 대하여는 뒤에 다시 다루어볼 예정이지만 여러 관측을 통하여 자체의 공급원이나 소모원을 가진 수분이나 오존 등을 제외하면 모든 성분들의 상대비가 일정한 것으로 보아, 이 고도에서도 어느 정도 혼합이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 그렇지만 대류권과 같은 활발한 혼합이 일어나지 않는 층이 있다는 것을 처음 확인하였던 프랑스의 과학자 테스랑의 제안에 따라 이를 ‘성층권’이라고 부르고 있다. 물론 오로라 등이 일어나는 고도는 훨씬 상부이기는 하지만 성층권의 제일 상부인 50km에서 0.0013 기압 정도가 되어 거의 지구를 덮는 대기층의 경계로 보아도 큰 무리는 없을 것 같다.

이렇게 지구를 덮고 있는 대기가 우리 지구에게 준 가장 중요한 선물의 하나는 바로 지구를 따뜻한 물의 행성으로 만들어주는 온실효과이다. 다음 글에서는 고마운 대기가 만들어내는 온실효과에 대해서 살펴보기로 한다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 캘리포니아대학 샌디에이고 캠퍼스에서 해양학으로 박사학위를 받았다. 현재 지구환경과학부 학부장 겸 BK21사업단장으로 있으며, 해양연구소장을 겸임하고 있다.