

# SGS6833: 대기과학

---

5주 차 강의자료

# 지난 시간: 온도 / 습도

---

- 안정도
  - 건조단열감율
  - 습윤단열감율
  - 절대불안정 / 절대안정 / 조건부 불안정
- 구름
  - 대류 / 지형

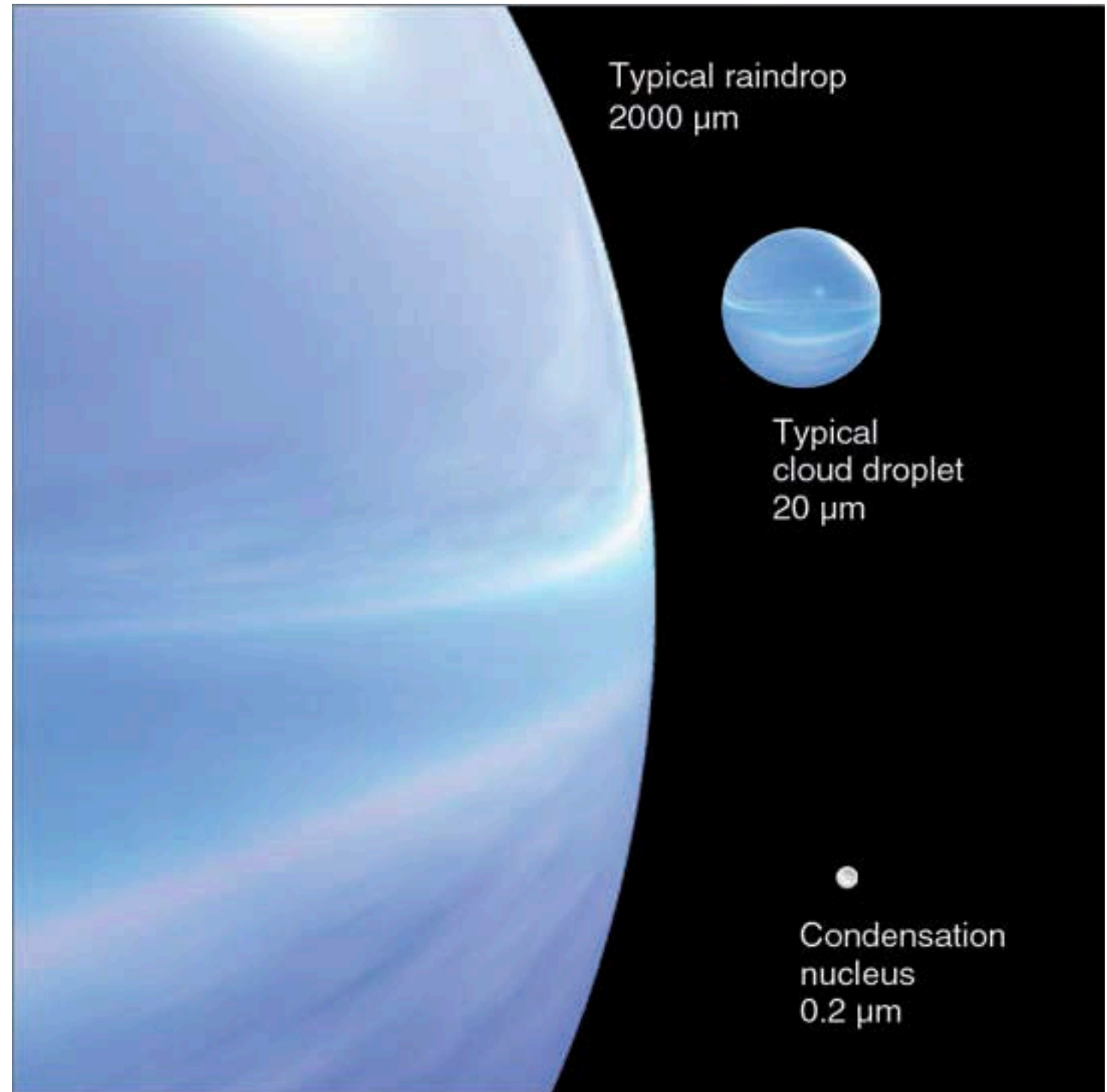
# 오늘의 내용

---

- 강수
- 기압과 바람

# 강수 과정

- 구름입자  $\sim 0.002$  cm
- 빗방울  $\sim 0.2$  cm
- 구름입자는 어떻게 빗방울로 커질 수 있을까?



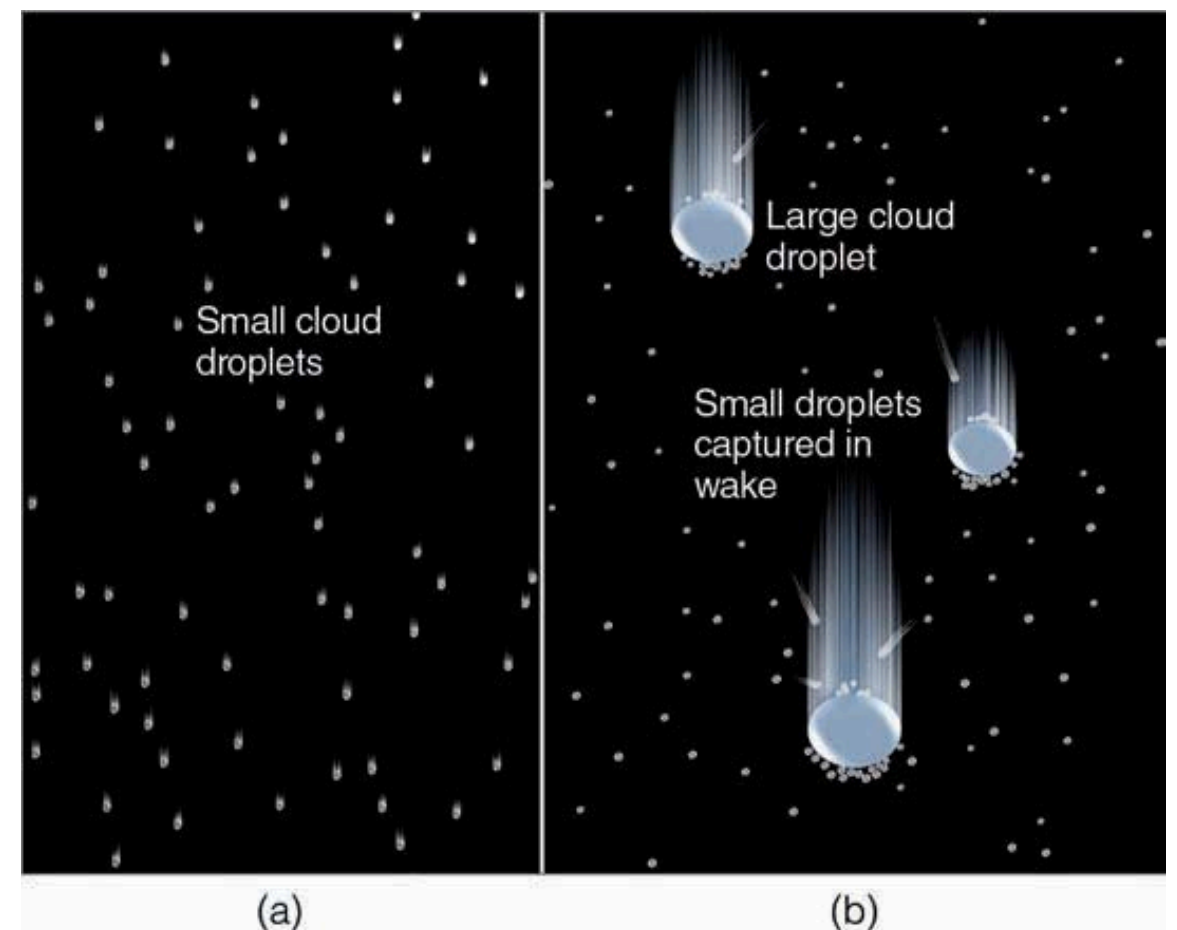
## 강수 과정: 1. 응결에 의한 성장

---

- 응결핵(소금, 에어로졸, 박테리아 등)이 존재할 때 구름입자가 응결핵에 응결을 함
- 상대습도가 100%가 아니더라도 응결이 일어남
- 구름입자에 응결이 일어나면 구름입자가 커지게 됨
- 땅 위에서는 응결핵이 많아 응결한 구름입자도 많지만, 크기는 작음
- 바다위에서는 응결핵이 적어 응결한 구름입자도 적지만 큼.
- 하지만, 지금이 응결로 100배 이상 커 지려면 며칠이 소요될 것임

## 강수 과정: 2. 충돌/병합에 의한 성장

- 상대적으로 따뜻한 구름 ( $>-15^{\circ}\text{C}$ )에서 충돌에 의해 구름입자가 성장함
- 구름입자들은 terminal velocity에 도달하게 되는데, 이 속도는 크기에 비례함 (면적이 상대적으로 적으므로 마찰이 적음)
- 구름입자 크기가 모두 같다면 terminal velocity 가 같아 충돌을 기대하기 어려움
- 구름입자 크기가 다르면 큰 구름입자가 빨리 떨어지며 작은 구름입자와 충돌



## 강수 과정: 2. 충돌/병합에 의한 성장

---

- 하지만, 충돌이 항상 병합으로 이어지지 않는음
- 구름입자들의 극성이 다를 때 병합이 더 잘 일어남
- 구름입자가 구름 속에서 보내는 시간이 길 수록 더 잘 일어남
  - 구름이 두꺼울 때:
    - 200  $\mu\text{m}$ 의 구름입자가 500 m 두께의 구름 속 : 12분 정도
    - 200  $\mu\text{m}$ 의 구름입자가 2500 m 두께의 구름 속 : >1시간
- 상승공기가 있을 때 (예: 높은 구름)

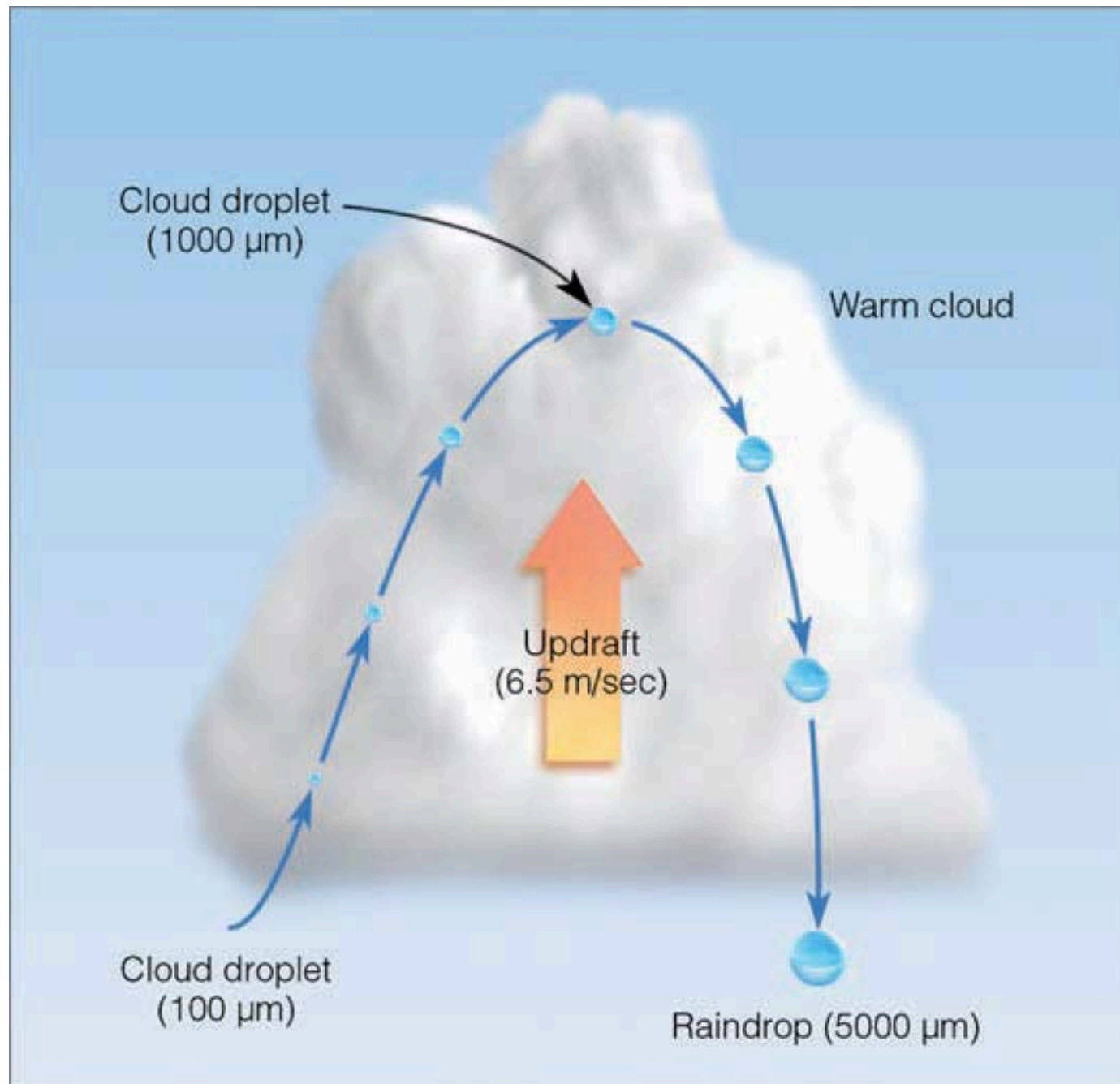
## 강수 과정: 2. 충돌/병합에 의한 성장

---

- 상대적으로 따뜻한 구름은 보통 두께가 얇음 ( $< 500$  m)
- 상대적으로 따뜻한 구름은 상승기류도 약함 ( $< 0.1$  m/s)
- 이와 같은 환경에서는 구름입자가  $200\text{ }\mu\text{m}$  정도까지 성장 가능
- 이럴 때 내리는 비는 주로 drizzle
- 열대 지방에서는 구름의 전 층이 어느점 보다 높은, 높고 따뜻한 구름이 생길 수 있음
- 이런 구름은 두껍고, 강한 상승기류가 있어서 구름입자가 크게 발달할 수 있음



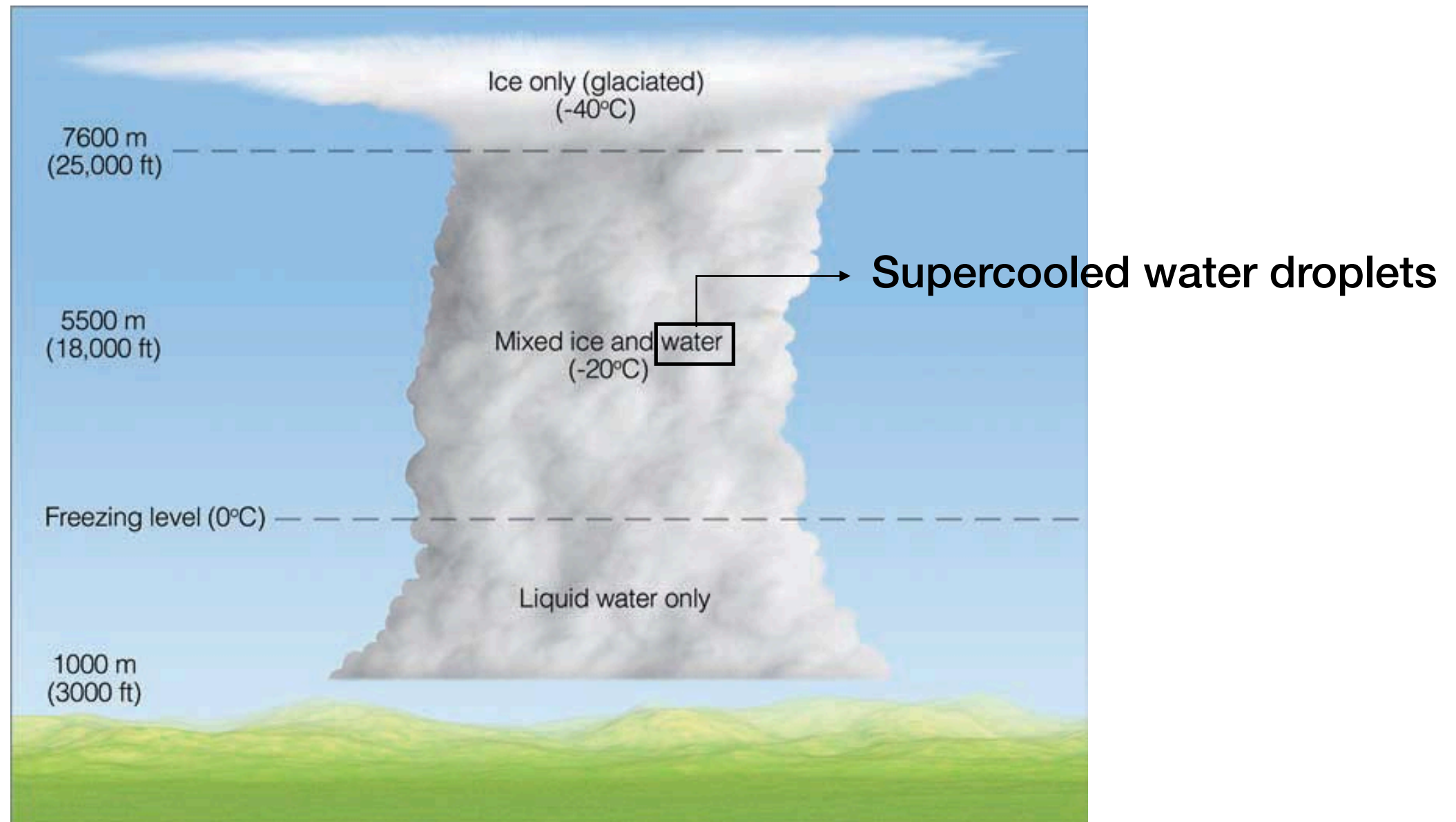
## 강수 과정: 2. 충돌/병합에 의한 성장



- 상승 및 하강을 하며 따뜻한 적운 안에서는 구름 입자가 큰 빗방울이 되어 떨어질 수 있음.
- 빗방울은 보통 5 mm보다 작음. 이 보다 더 크면 하강할 때 갈라지기 때문
- 진동에 의해 갈라지기도 함

## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

- 구름이 어느 점 보다 상당히 낮은 곳에서 존재할 때 일어남



거대적인 안에서 볼 수 있는 얼음과 물의 분포

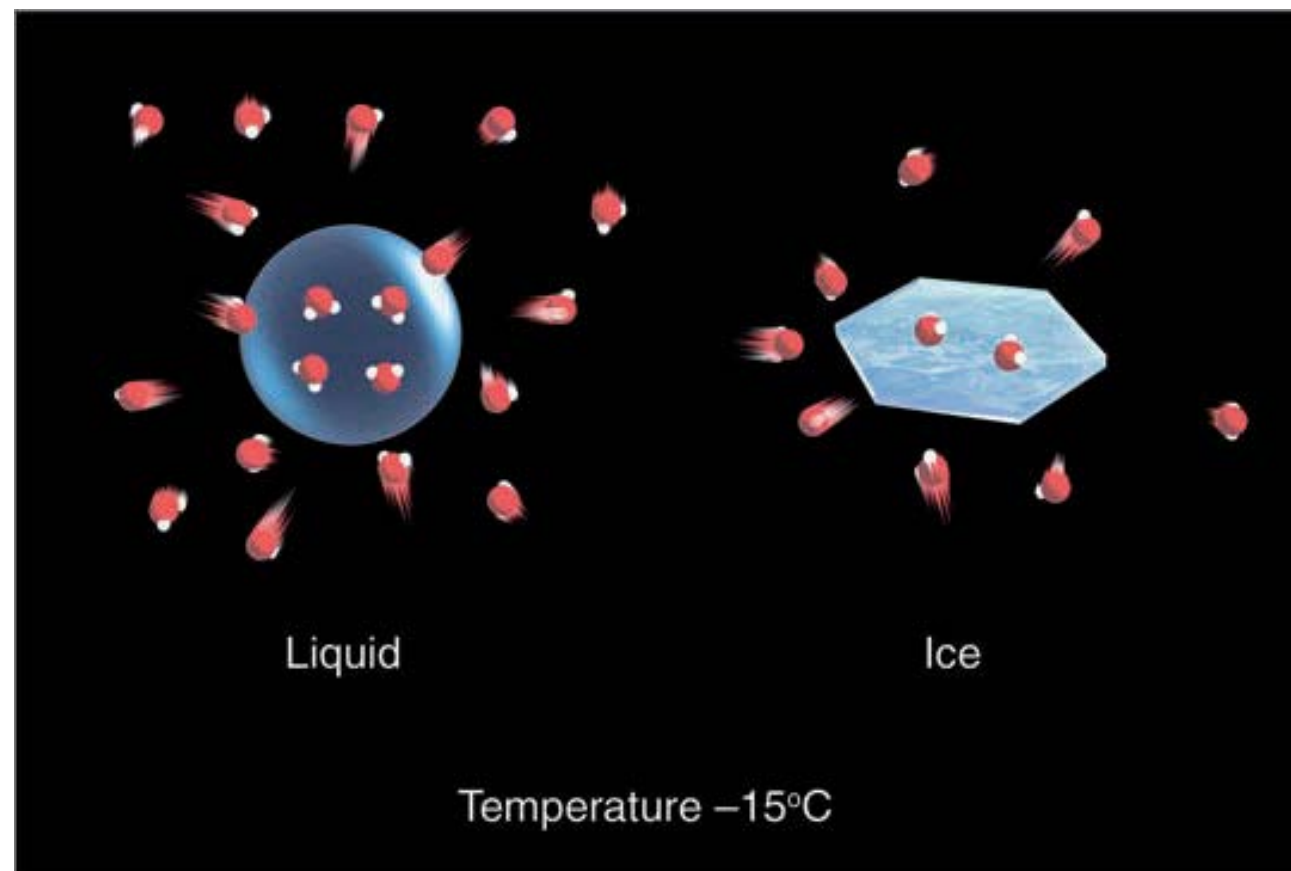
## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

---

- 구름이 어느 점 보다 상당히 낮은 곳에서 존재할 때 일어남
- Ice crystal 이 응결핵 역할을 할 수 있음 → 얼음핵 (ice nuclei)
  - 응결되는 법 #1: 수증기가 얼음핵에 바로 얼음으로 붙음
  - 응결되는 법 #2: supercooled 입자가 얼음핵에 붙어 얼음
- 어떻게 ice crystal 이 충분히 자라서 강수가 될 수 있을까?

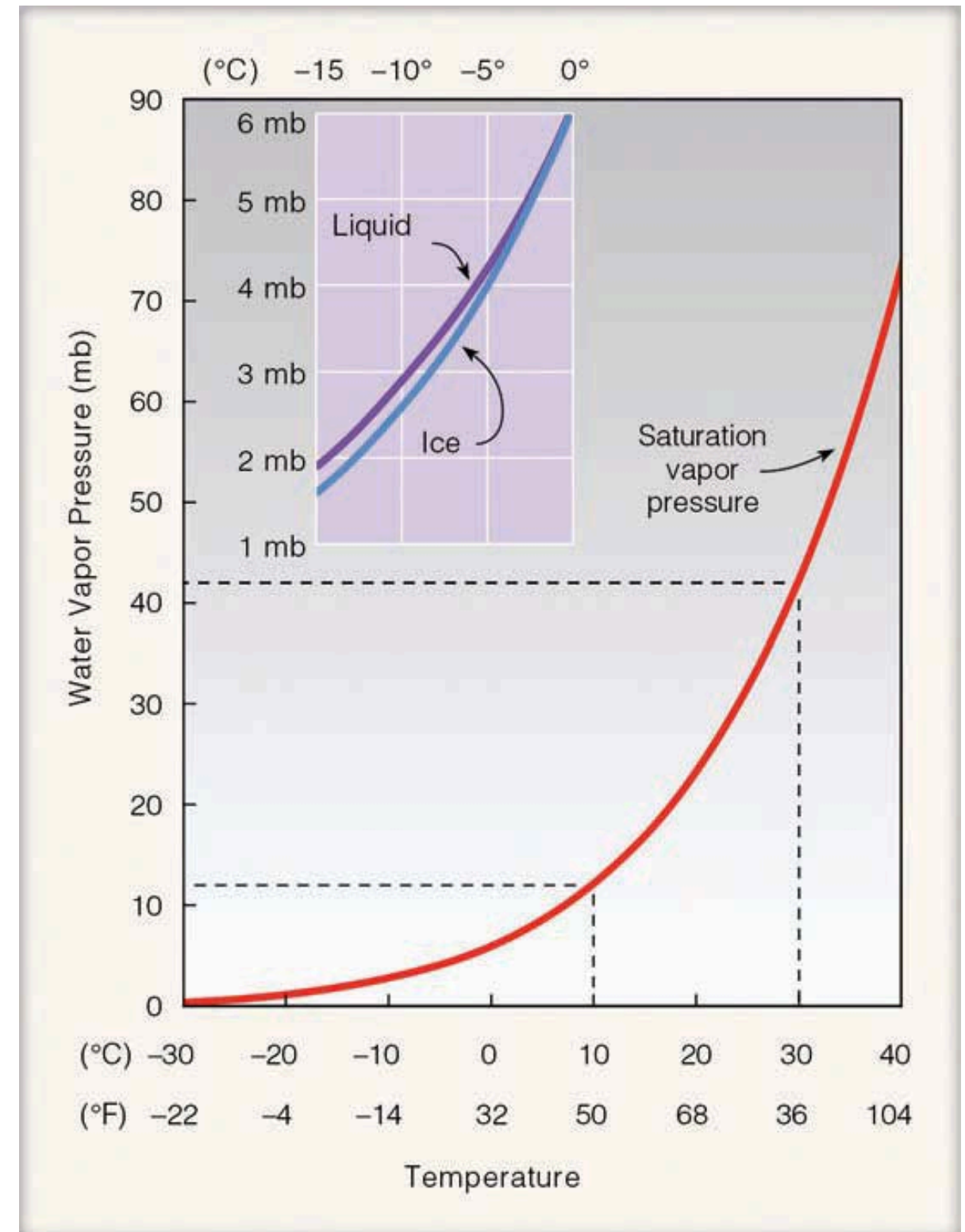
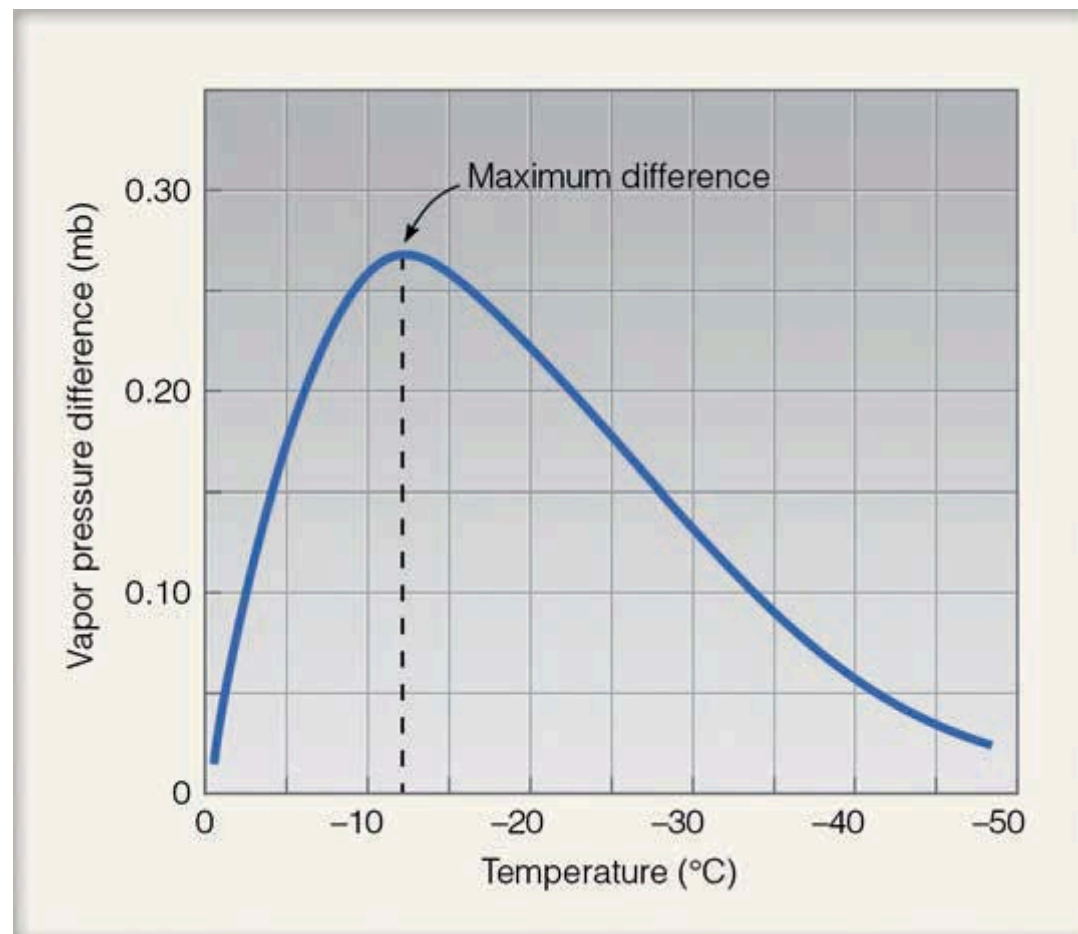
## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

- 구름에 ice crystal과 물방울이 동시에 존재할 때 (물방울이 있으므로 포화상태),
  - 물방울과 ice crystal 주위에 수증기들이 존재.
  - 포화상태이므로 응결과 증발이 동시에 일어남



## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

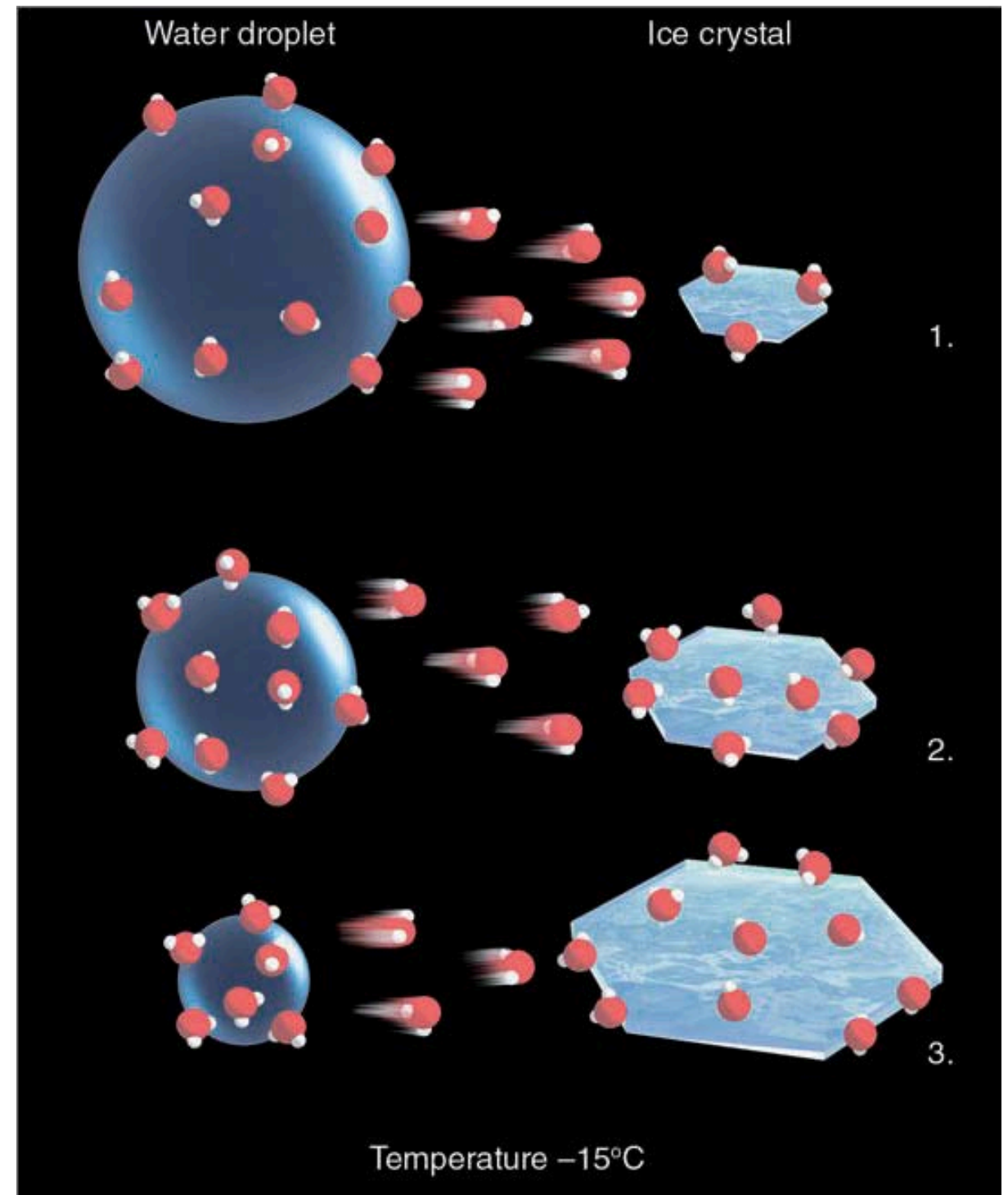
- 하지만, 얼음에서 증발이 되는 것은 물방울보다 어려움
- 얼음과 물방울의 포화수증기압 차이에서 확인할 수 있음





## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

- 따라서, 시간이 지나면 물방울에서 ice crystal로 수증기들이 옮겨지는 효과 발생
- 물방울은 작아지고, ice crystal은 커짐
- Ice crystal이 충분히 커지면 하강을 시작
- Bergeron process (ice crystal process)



## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

- Ice crystal이 떨어지며, supercooled 입자들과 충돌
- Supercooled 입자들은 ice crystal 표면에 붙어 얼며, ice crystal이 더 성장할 수 있음
- 이를 accretion 이라고 함



(a) Falling ice crystals may freeze supercooled droplets on contact (accretion), producing larger ice particles.

## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

- 큰 ice crystal들은 하강할 때 작게 부서지기도 함
- 이를 graupel (싸락눈)이라고 함
- 이는 ice crystal의 수를 증가시키는 효과가 있음



(b) Falling ice particles may collide and fracture into many tiny (secondary) ice particles.



## 강수 과정: 2. Ice-crystal 과정

- 떨어지는 ice crystal은 다른 작은 ice crystal과 충돌
- Ice crystal이 서로 붙어가며 성장
- 이를 aggregation이라고 부름
- aggregation의 과정을 통해 눈송이로 발전
- 여름에도 눈이 생성 (하지만 땅에 도달하기 전에 녹음)



(c) Falling ice crystals may collide and stick to other ice crystals (aggregation), producing snowflakes.

# 인공강우

---

- 구름속에 응결핵을 투입하여 응결을 촉발하려는 목적
- 인공강우가 일어나기 위해서는
  - 당연히 구름이 있어야 함
  - Bergeron process를 통해 진행되므로 구름이 차갑고 supercooled 입자가 있어야 함
- 물방울:빙정 의 최적의 비율 (100000:1) 이 유지될 정도로 투입

# 인공강우

---

- 첫 실험은 1946년 Vincent Schaefer 가 드라이아이스를 이용하여 진행
- 1947년 Bernard Vonnegut은 드라이아이스 대신 빙정의 형태를 닮은 요오드화 은 (silver iodide)를 사용하여 실험
- 현재, lead iodide, cupric sulfide 와 같은 인공응결핵을 쓰지만, 요오드화 은이 아직도 많이 쓰임

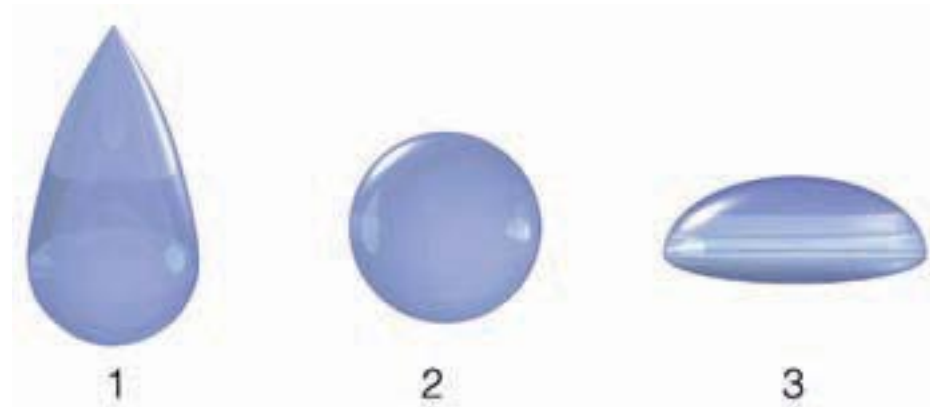
## 2019년 1월 25일 서해상 인공강우 실험

- 기상항공기를 이용하여, 요오드화 은을 살포
- 기상항공기에 장착된 측정장비에서는 강수입자의 크기가 증가함이 관측
- 강수로 관측되지는 않음

# 강수의 형태: 비

---

- 비: 물방울의 지름이 0.5 mm 이상일 때
- 지름이 0.5 mm 보다 작으면 drizzle
- 떨어지는 빗방울은 어떤 모양일까?

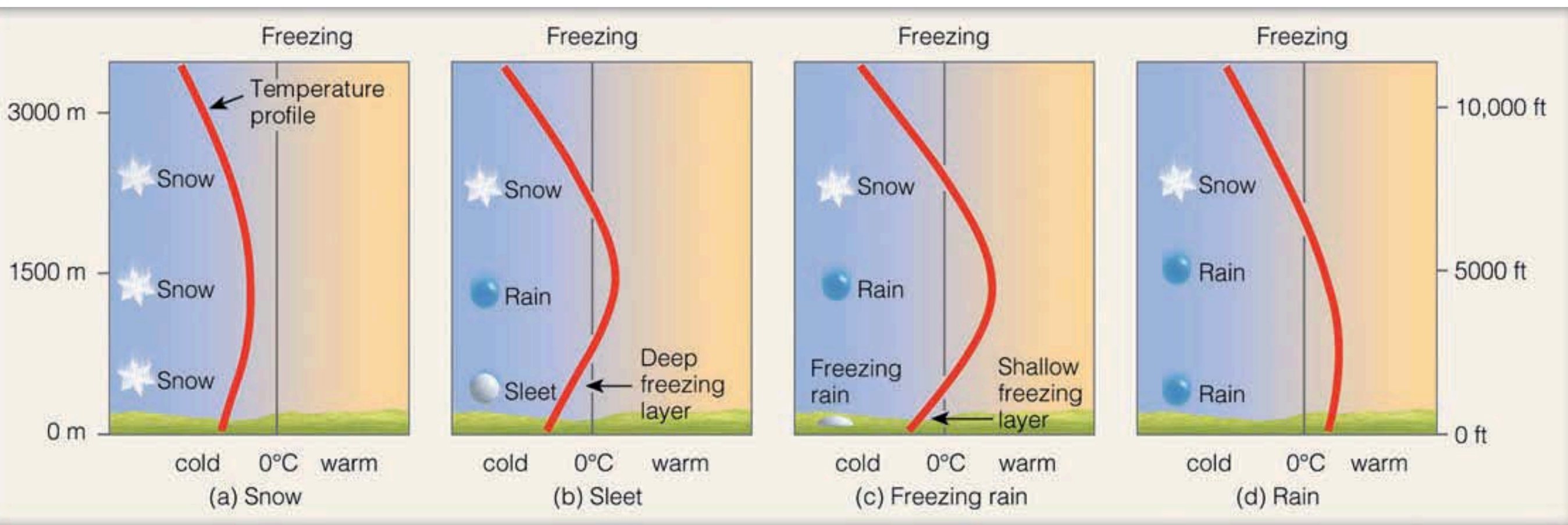


지름이 2 mm 이상일 때

지름이 2 mm 이하일 때

# 강수의 형태: 눈

- 눈: 중위도/고위도 지역에서 강수의 시작은 보통 눈



- Sleet : tiny ice pallet, 눈이 녹았다가 다시 얼음이 되어 떨어짐. 땅에 떨어질 때 소리가 남
- Freezing rain : 다시 얼음이 되기에는 떨어지는 시간이 부족하지만, 땅에 떨어져 얼음



# 강수의 형태: 우박

- 강한 적운에서 발생
- 빗방울이 되기 위해서는 백만개 구름 입자들이 필요 하지만, 우박이 되기 위해서는 백억개의 구름 입자 필요.
- 구름속에서 최소 5~10 분 이상 머물러야 우박의 크기로 자랄 수 있음



지금이 17.8 cm

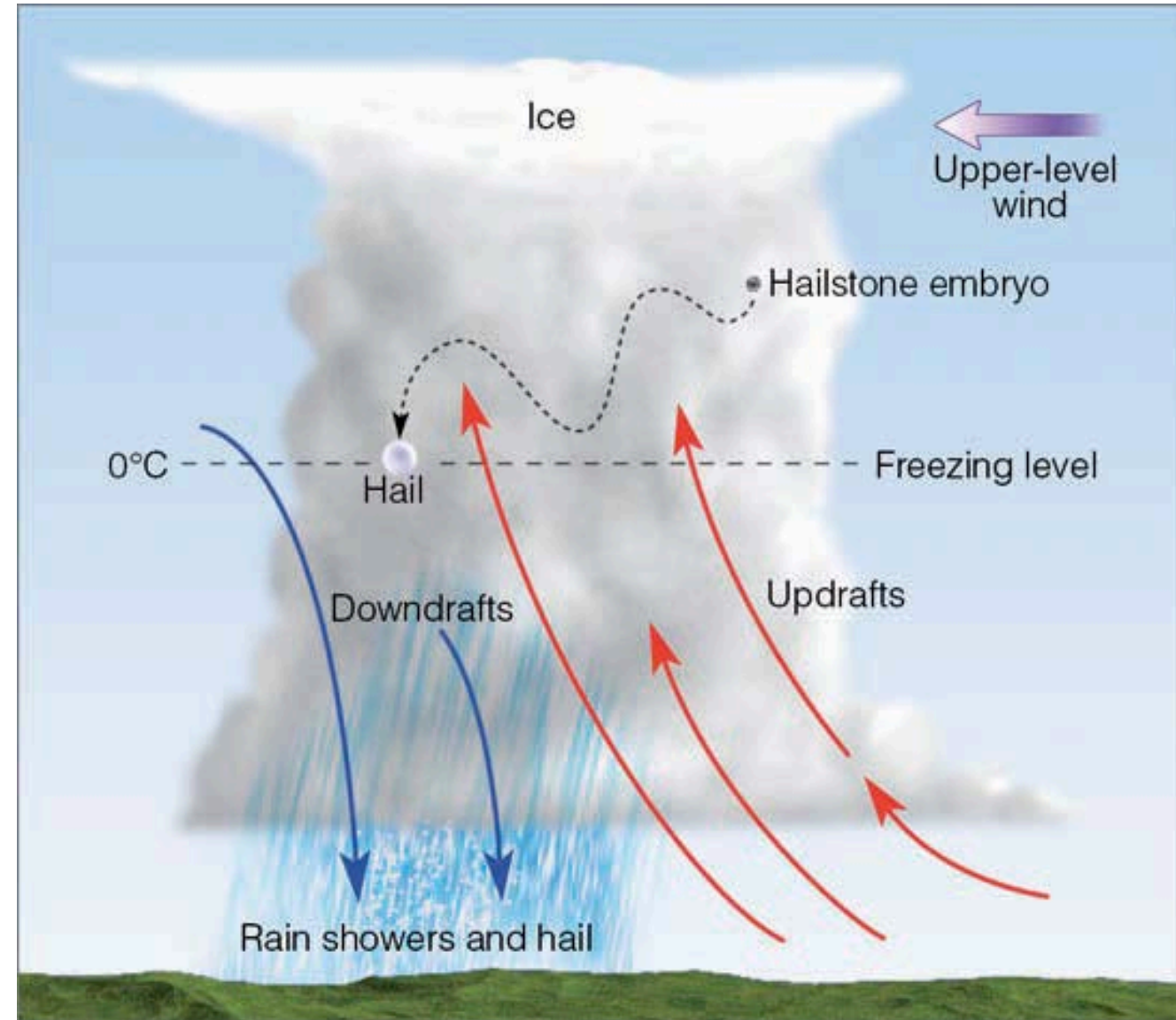






# 강수의 형태: 우박

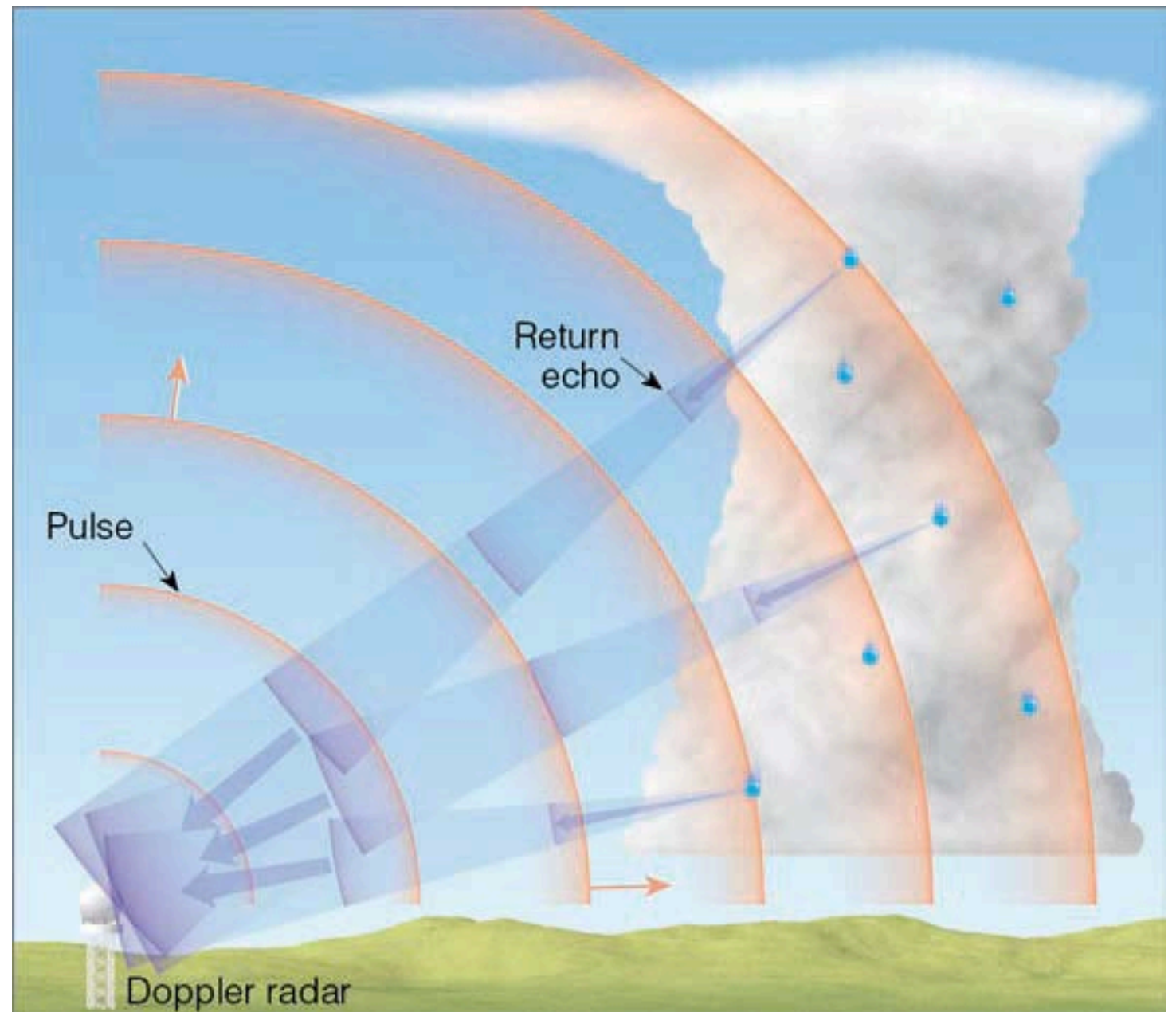
- 강한 상승기류가 작은 얼음 입자를 supercooled 입자가 있는 곳까지 보냄
- 구름내에서 크기가 커지면서 우박으로 자람
- 상승기류가 무거워진 우박이 떨어지지 않고 계속 자라도록 함
- 상층 바람으로 인해 우박이 상승기류에서 멀어지면 하강



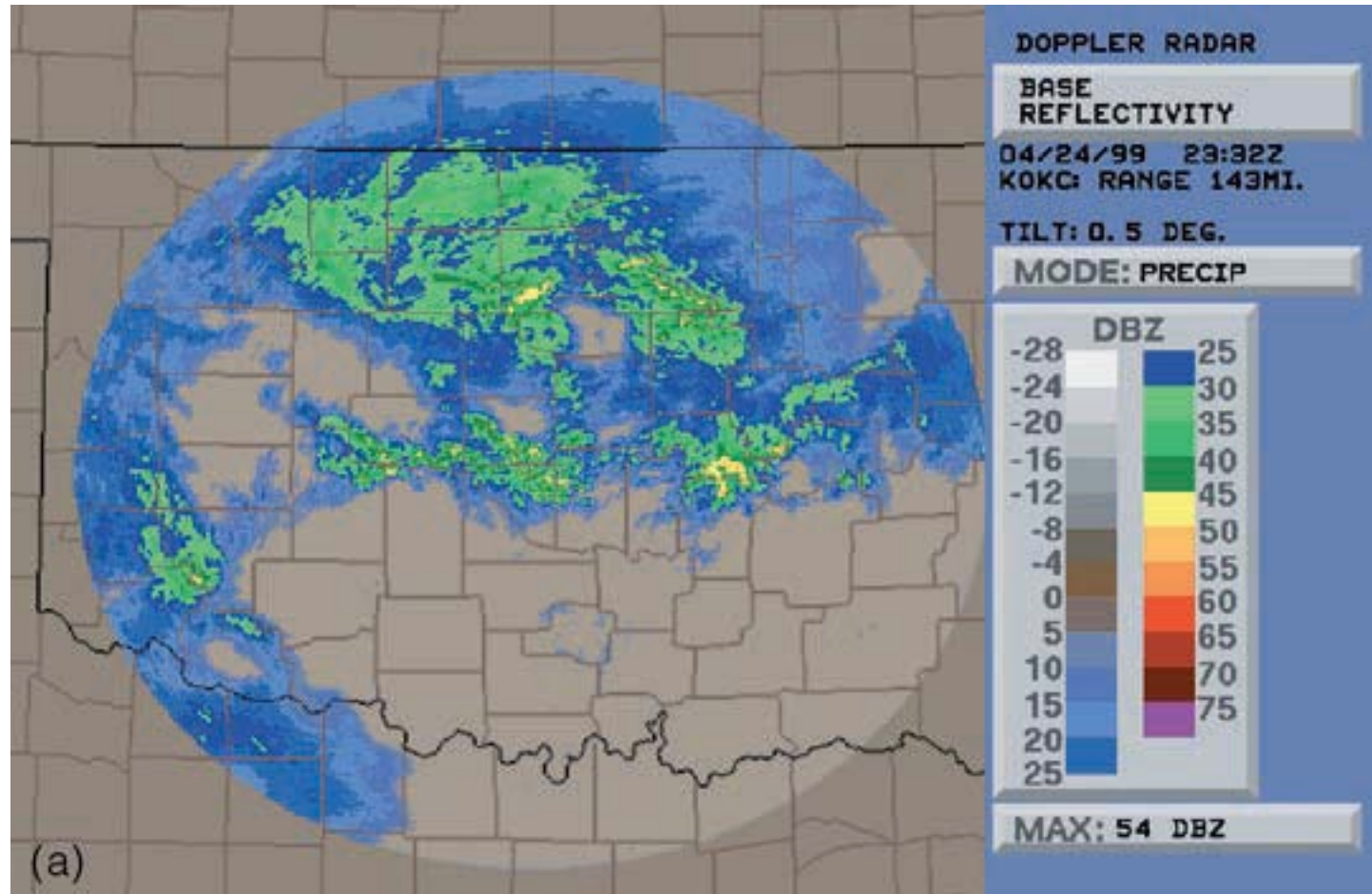


# 강수의 측정: 도플러 레이더

- 마이크로웨이를 이용하여 구름 및 강수 관측
- 다양한 파장을 이용
  - 작은 물체는 짧은 파장만 분산
  - 큰 물체는 짧고 긴 파장을 분산
- 이를 통해 강수 지역 및 강수세기를 관측
- 도플러 시프트를 이용하여 강수시스템의 움직임도 관측



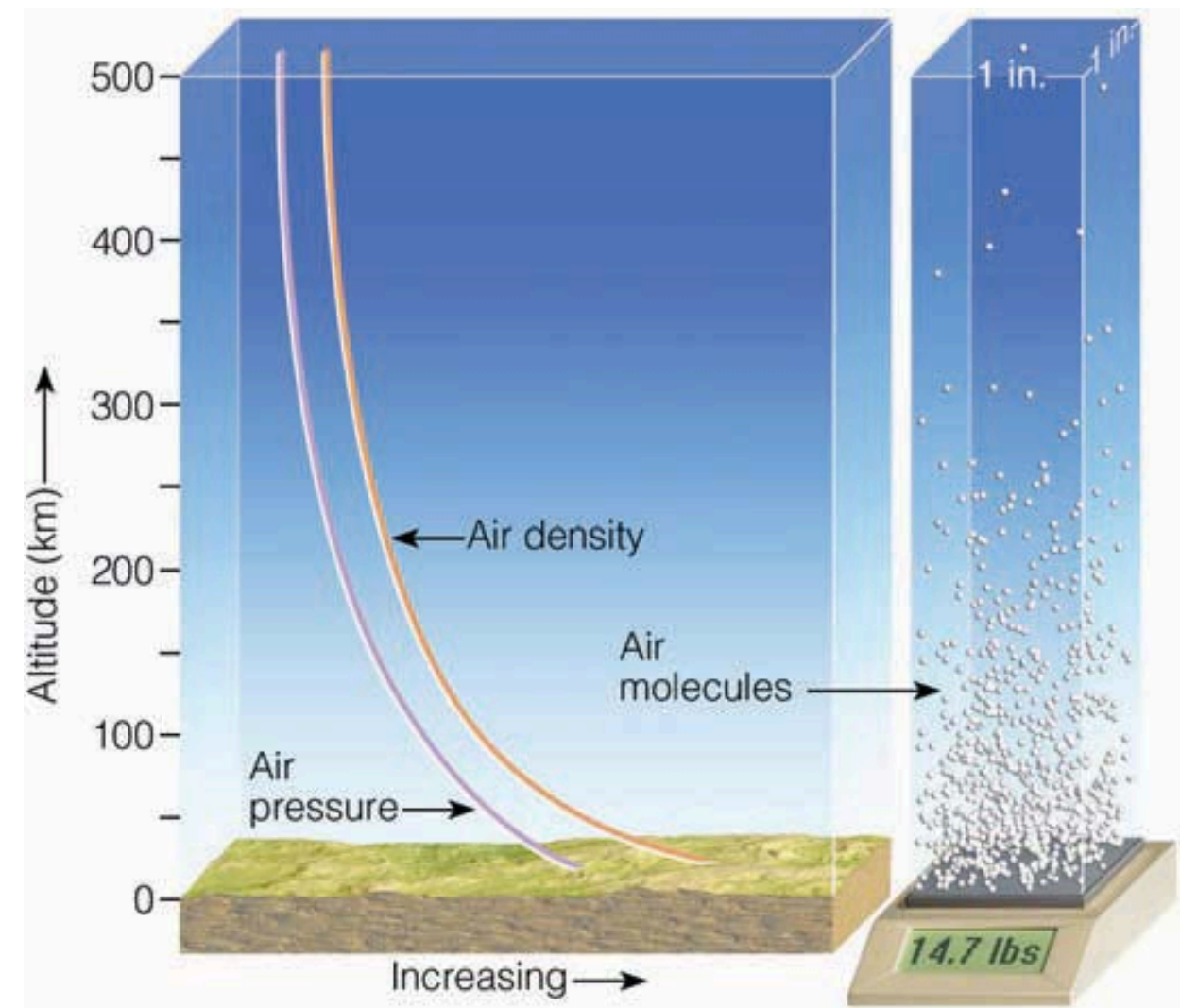
# 강수의 측정: 도플러 레이더



<https://youtu.be/gfqFBNF1ze4>

# 기압과 바람

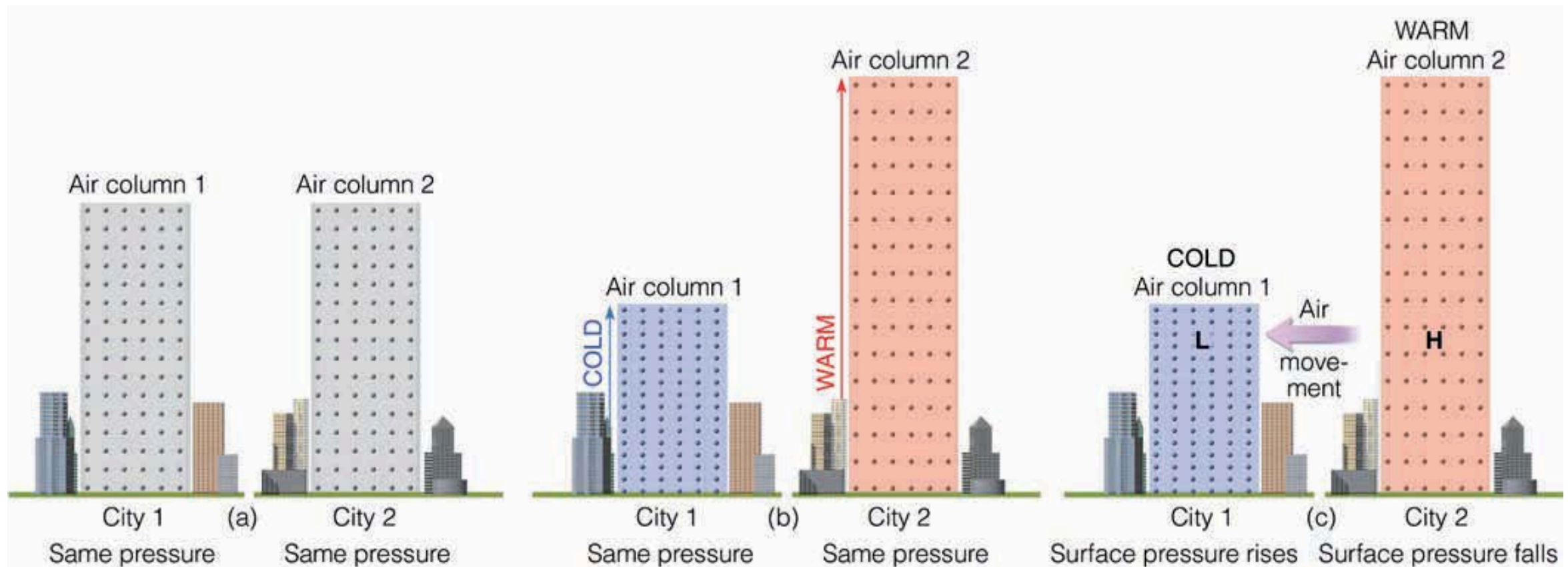
- 압력이란?
  - 단위 면적에 가해지는 힘 ( $p = F/A$ )
  - SI 단위 :  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2} = \text{Pa}$
  - $1 \text{ mb} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa}$





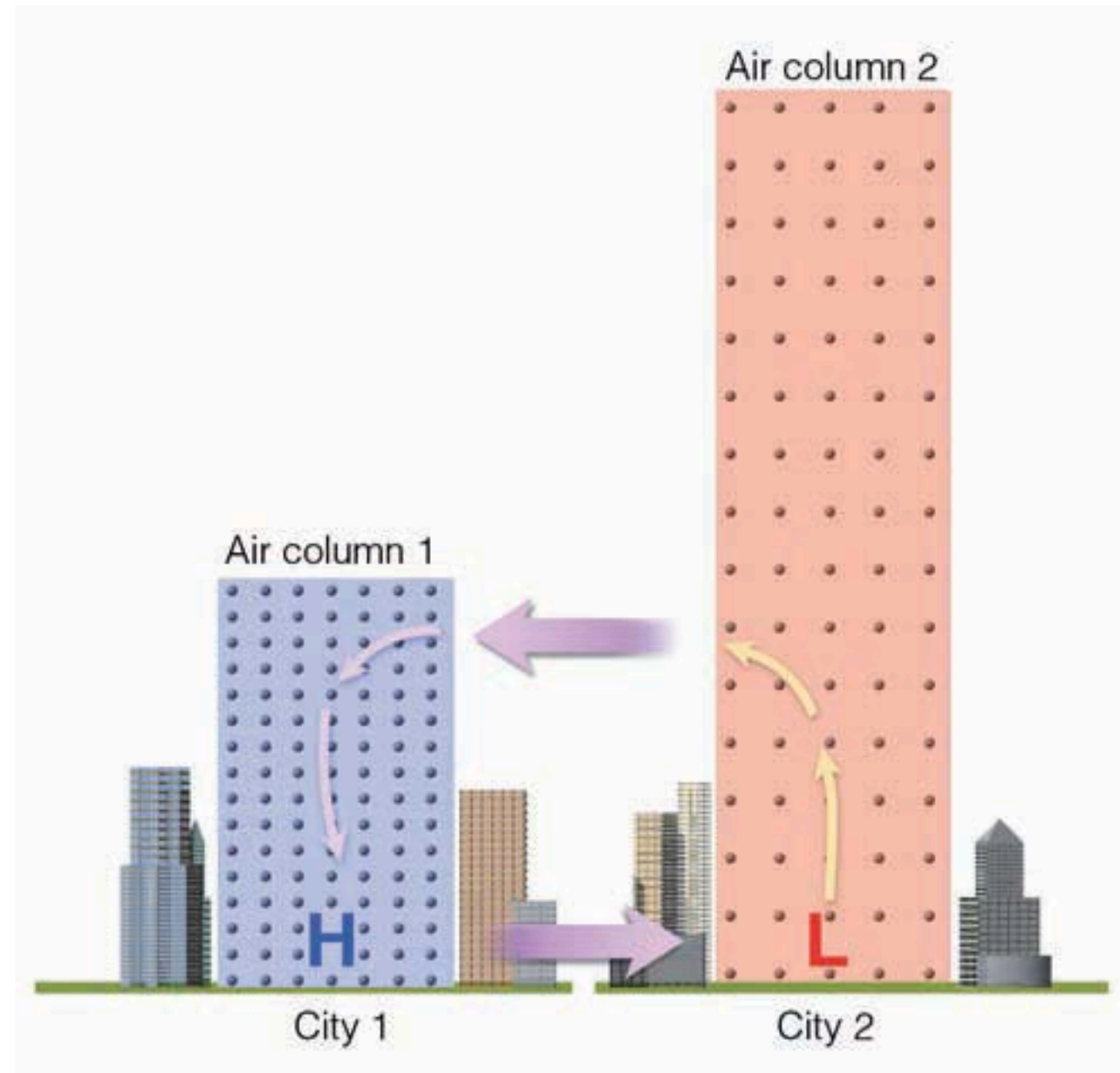
# 기압과 바람

- 기압은 공기의 압력 = 단위면적에 가해지는 공기의 힘
- 공기의 힘 = 공기의 무게 x 중력  
= 공기의 밀도 / 공기의 부피 x 중력
- 이상 기체 방정식:  $P = \rho RT \rightarrow$  온도가 증가하면 밀도가 낮아짐



# 기압과 바람

- City 2 상층에서 공기가 city 1으로 이동
- 지표면에서 압력 차이 발생: city 1의 압력이 더 큼
- 하층에서는 city 1 에서 city 2로 공기가 이동
- 기압차이로 생기는 힘을 기압경도력이라고 함



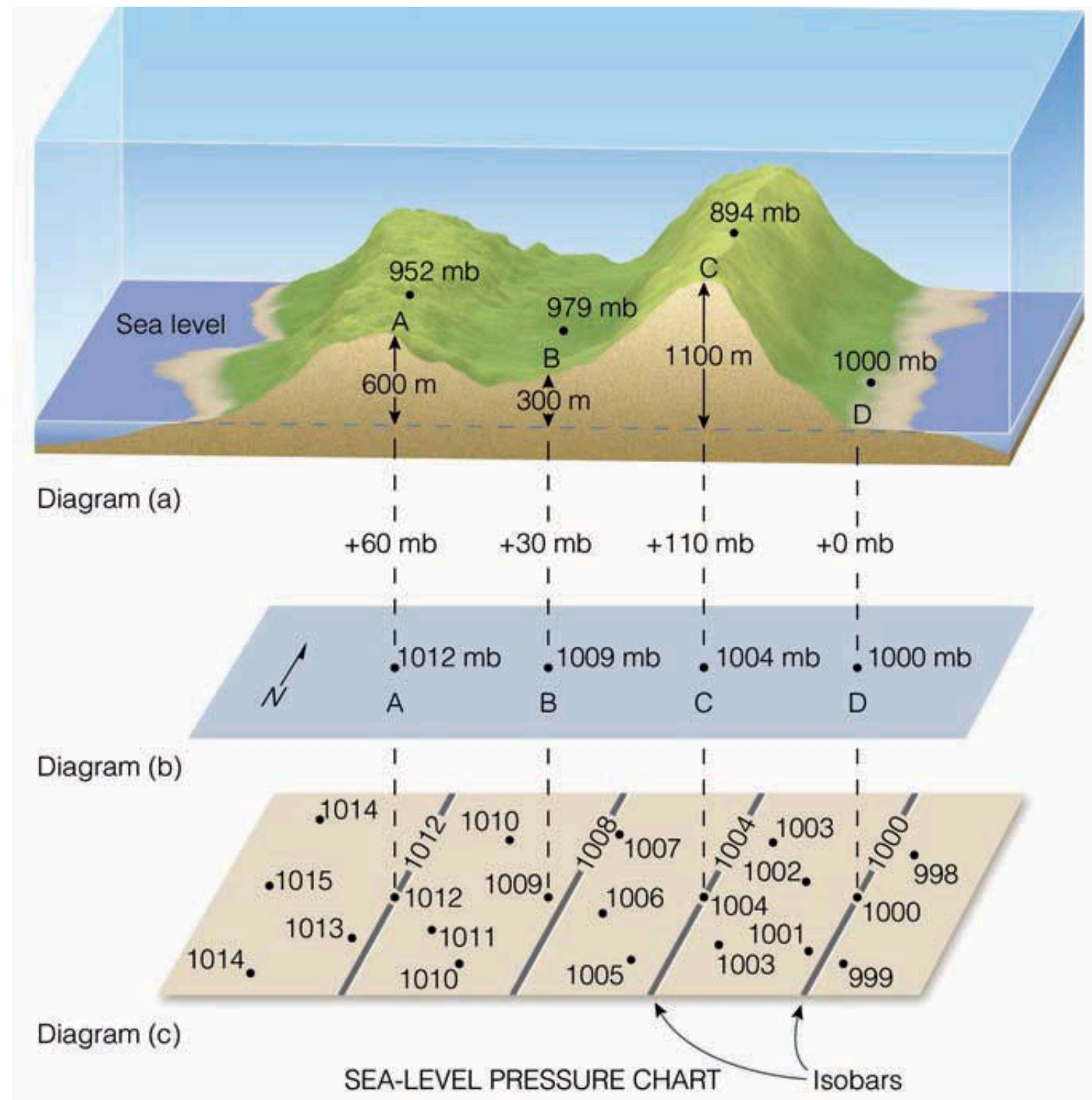
# 기압과 바람

---

- 수평 기압 차이가 일어난 이유는?
- 온도의 차이가 공기 밀도를 변화시키고, 기압차가 수평으로 발생하게 함
- 즉 수평 기압 경도력 발행
- 수평 기압 경도력으로 공기가 이동하며 바람이 생성
- 대류와의 차이는?

# 기압과 바람

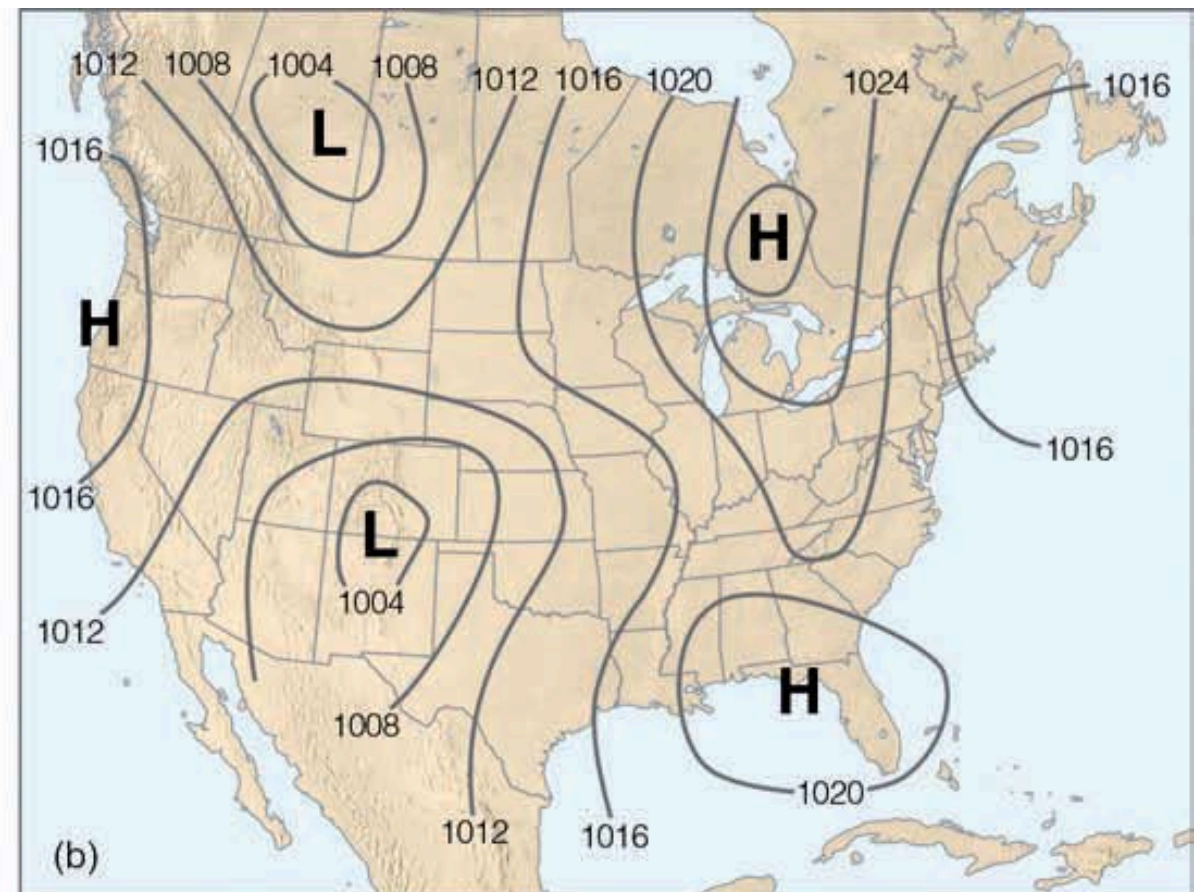
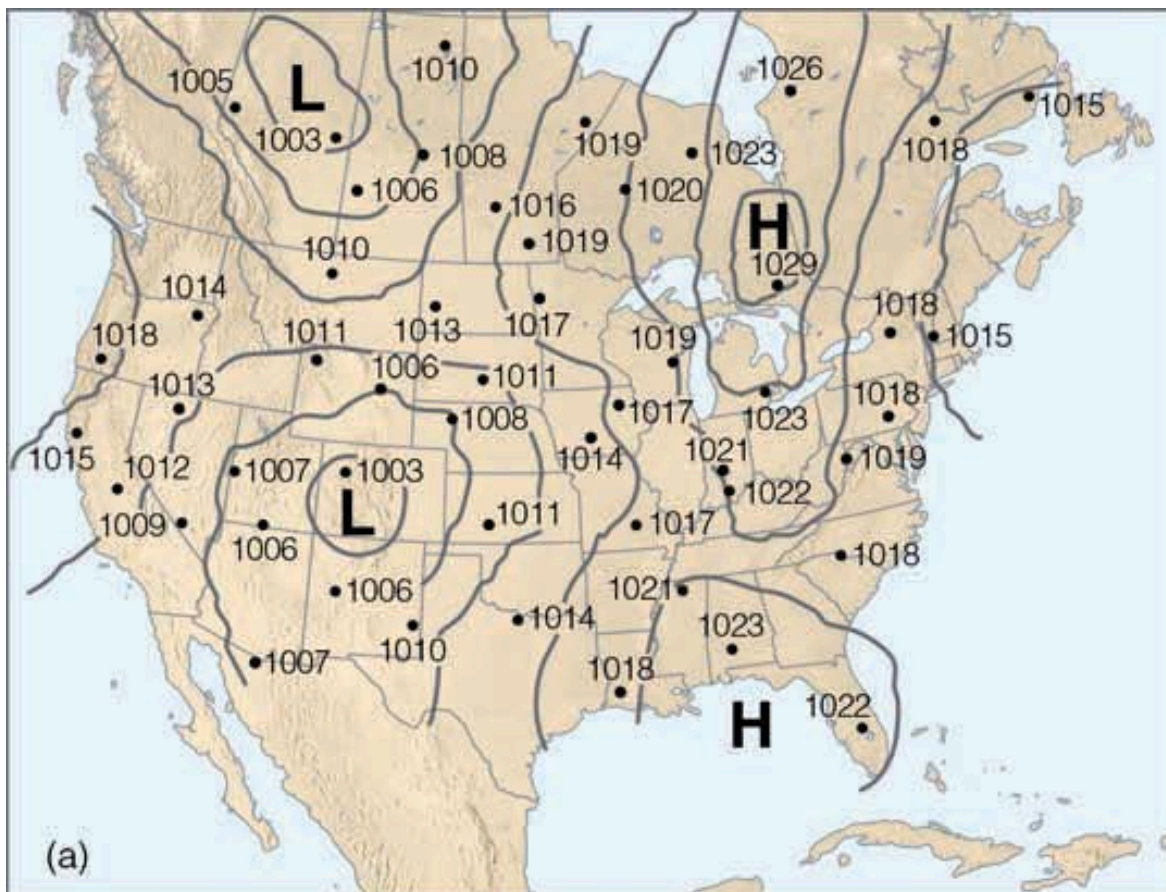
- 해수면 기압: 기압은 고도에 따라 급격하게 변하므로, 측정소의 고도를 고려해 줌
- 보통 100 m 고도가 증가할 때 마다 10 mb 씩 기압이 떨어짐
- 해수면 기압도는 측정소의 고도를 고려한 그림





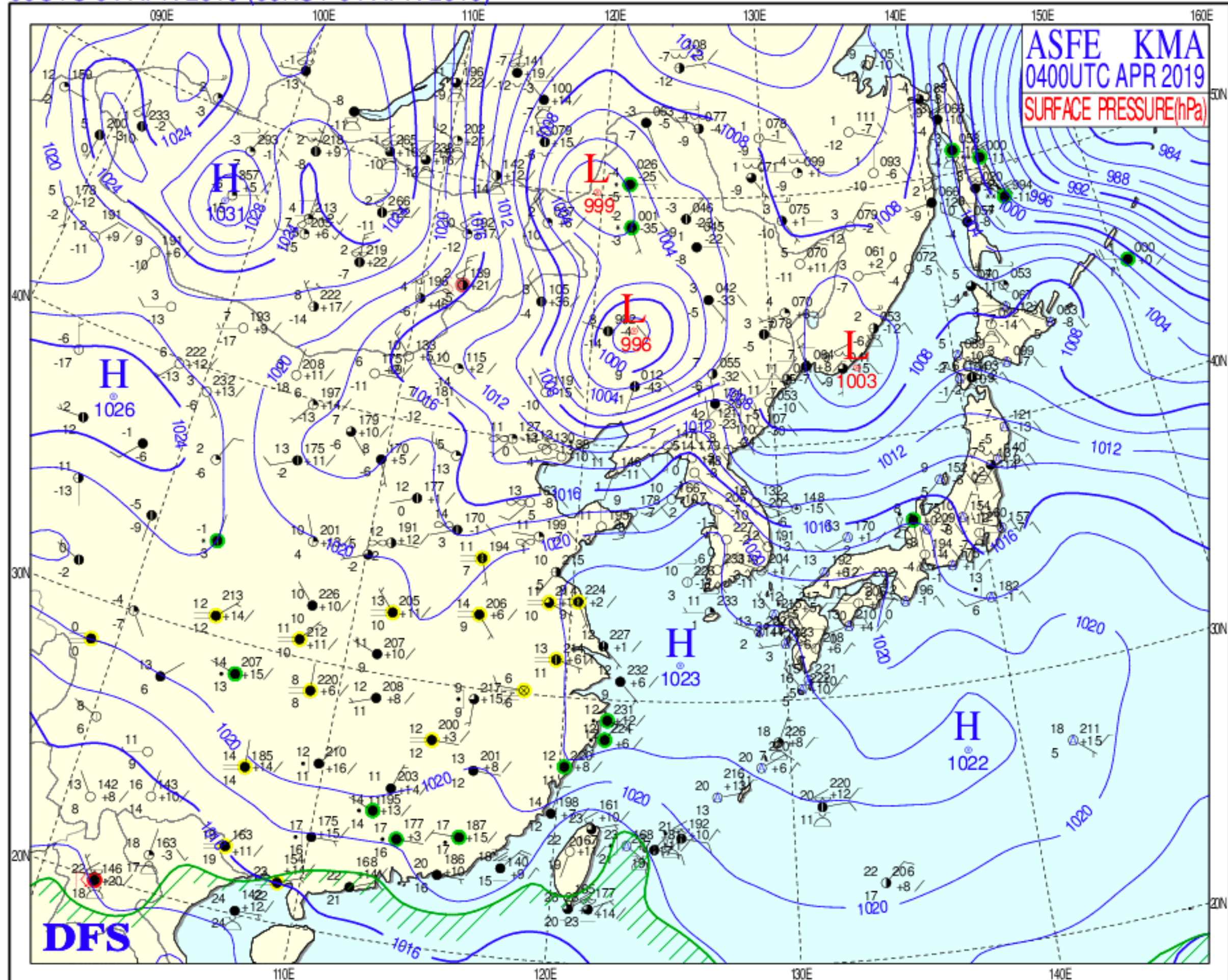
# 기압과 바람

- 등압선 : 같은 기압을 연결하여 그린 그림
  - 저기압, 고기압의 위치를 알 수 있음
  - 등압선의 간격으로 기압경도력을 예상해 볼 수 있음





00UTC 04 APR 2019 (09KST 04 APR 2019)



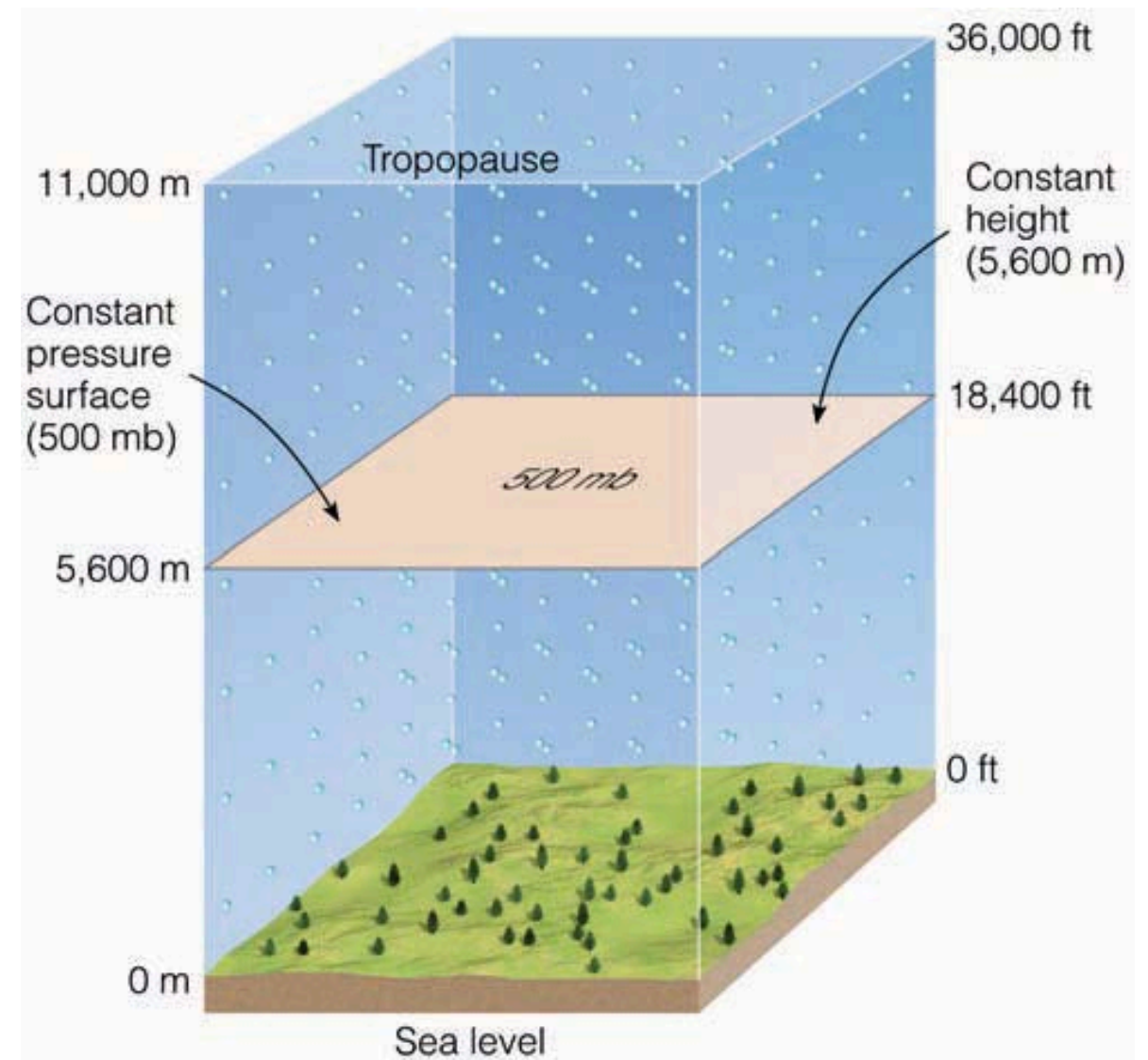
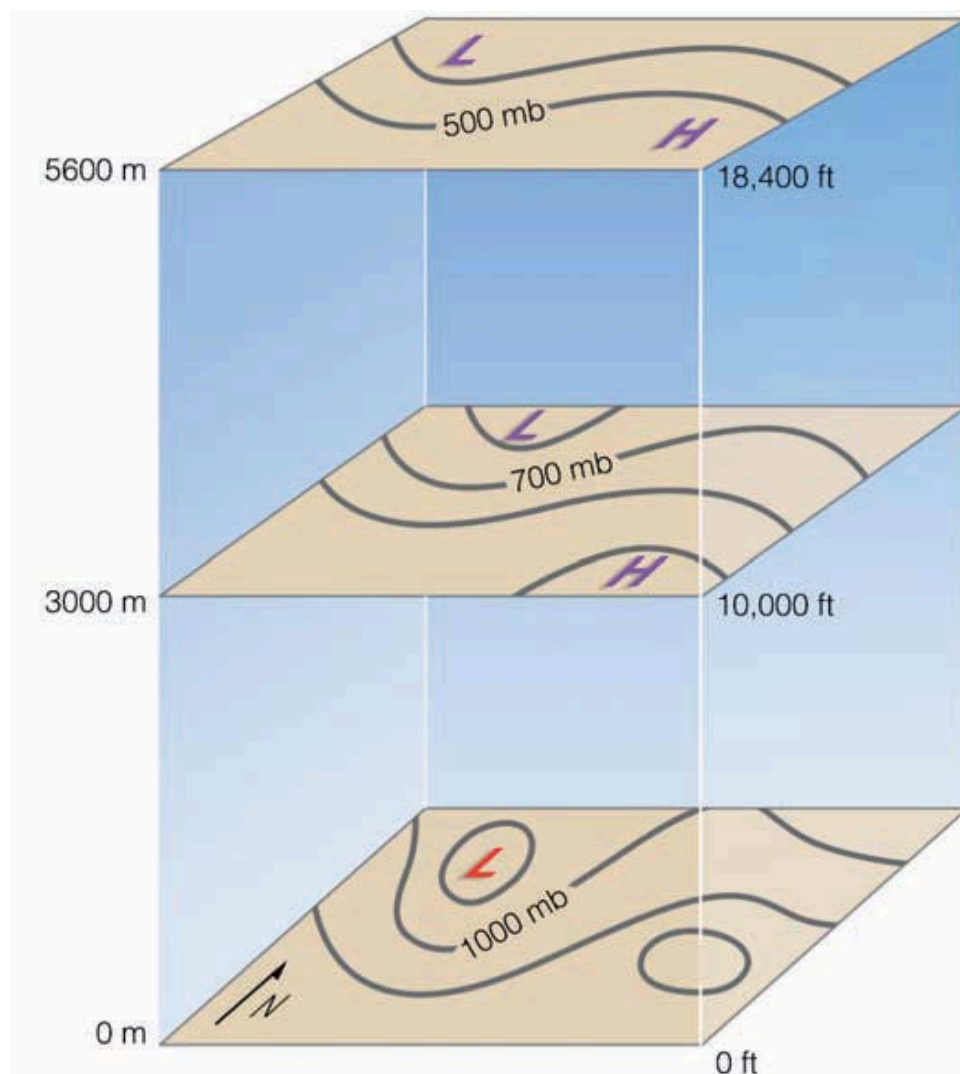
Korea Meteorological Administration(KMA)

00UTC 04 APR 2019 (09KST 04 APR 2019)



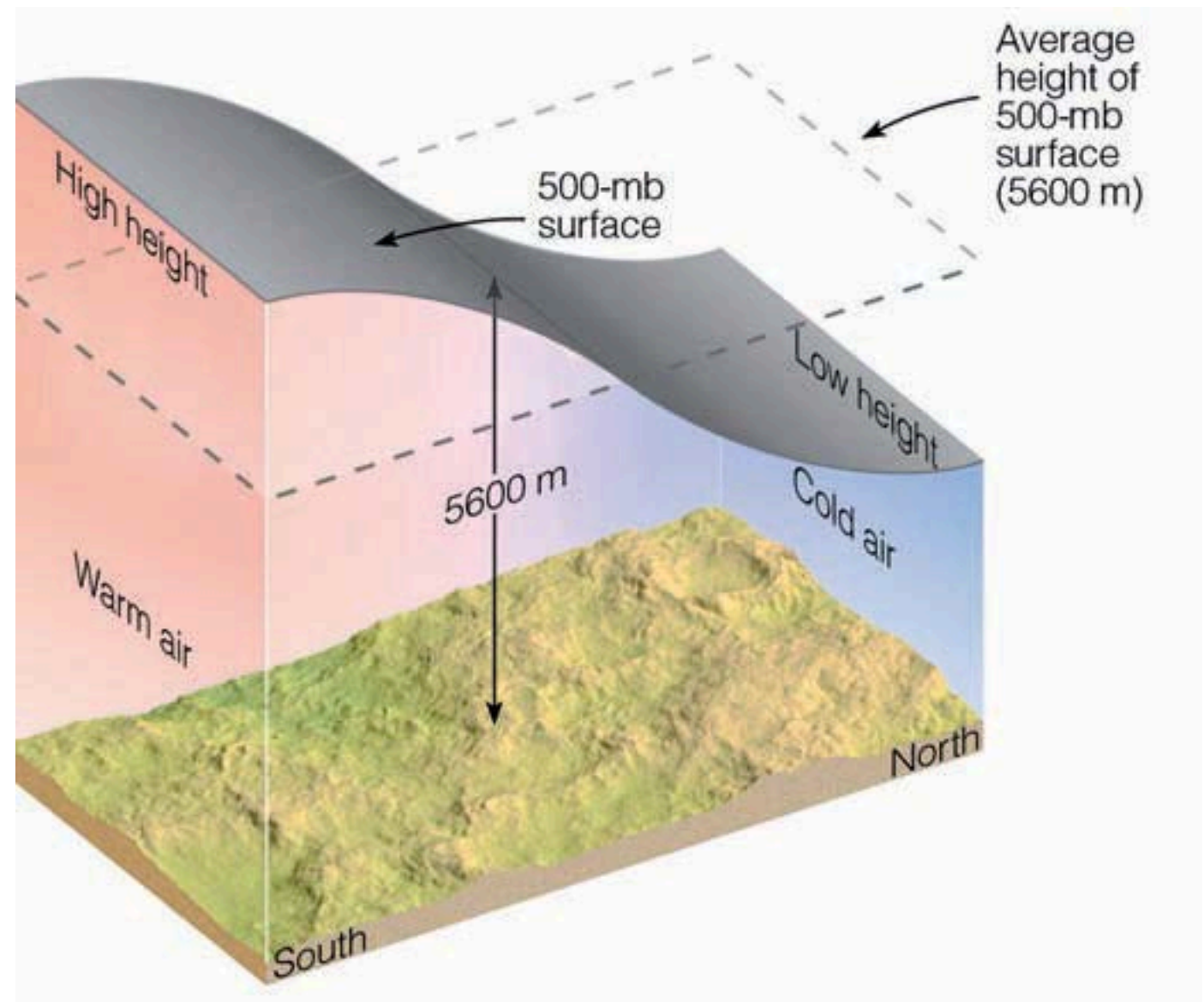
# 기압과 바람

- 고도에 따라서도 등압선을 그릴 수 있지만, 등압선의 고도를 그릴 수도 있음



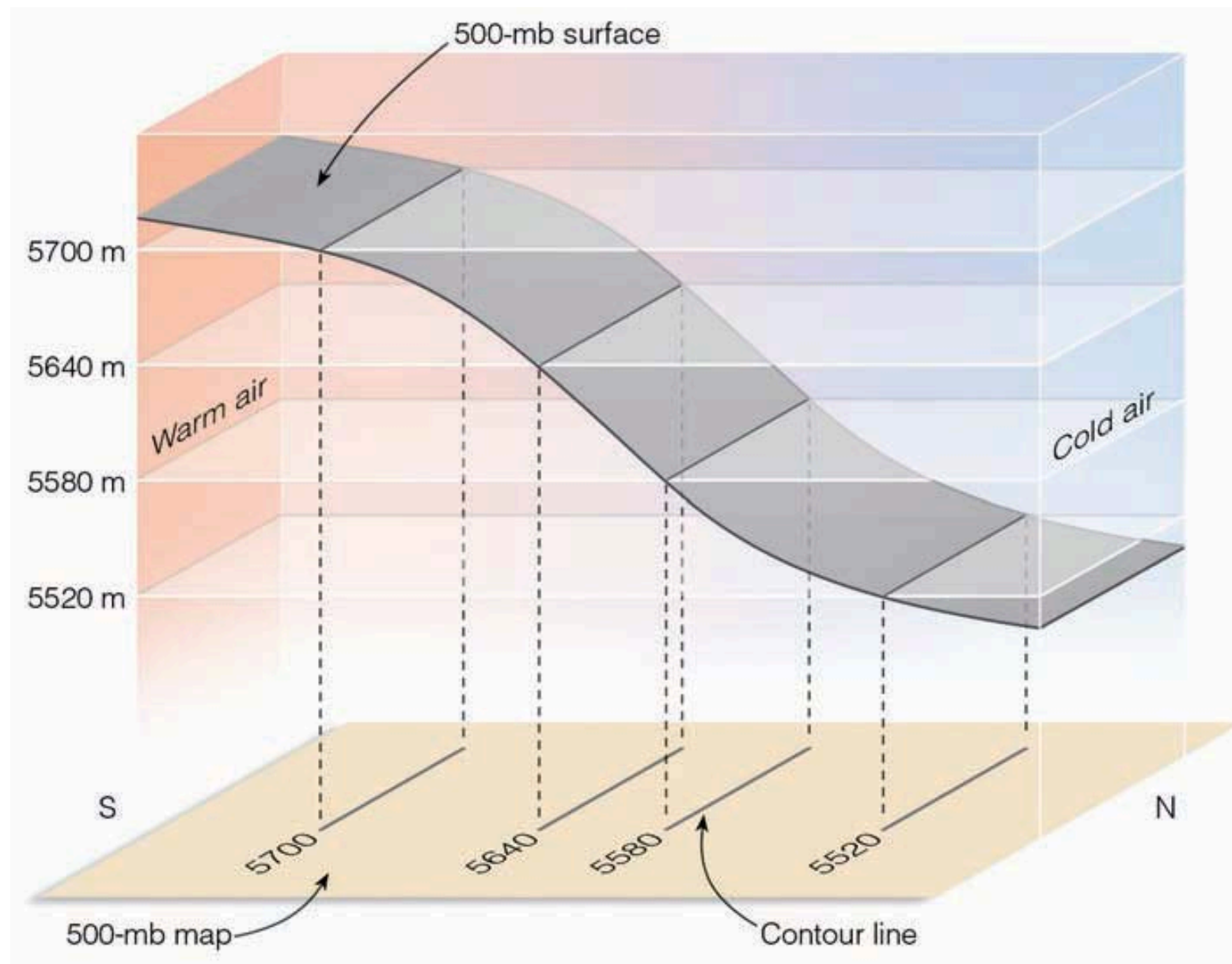
# 기압과 바람

- 앞에서 본 것 처럼, 수평방향으로 온도의 차이가 발생하면 기압이 변함
- 등압면의 고도가 달라짐
- 따뜻한 지역의 500 mb 고도는 높음
- 차가운 지역의 500 mb 고도는 낮음



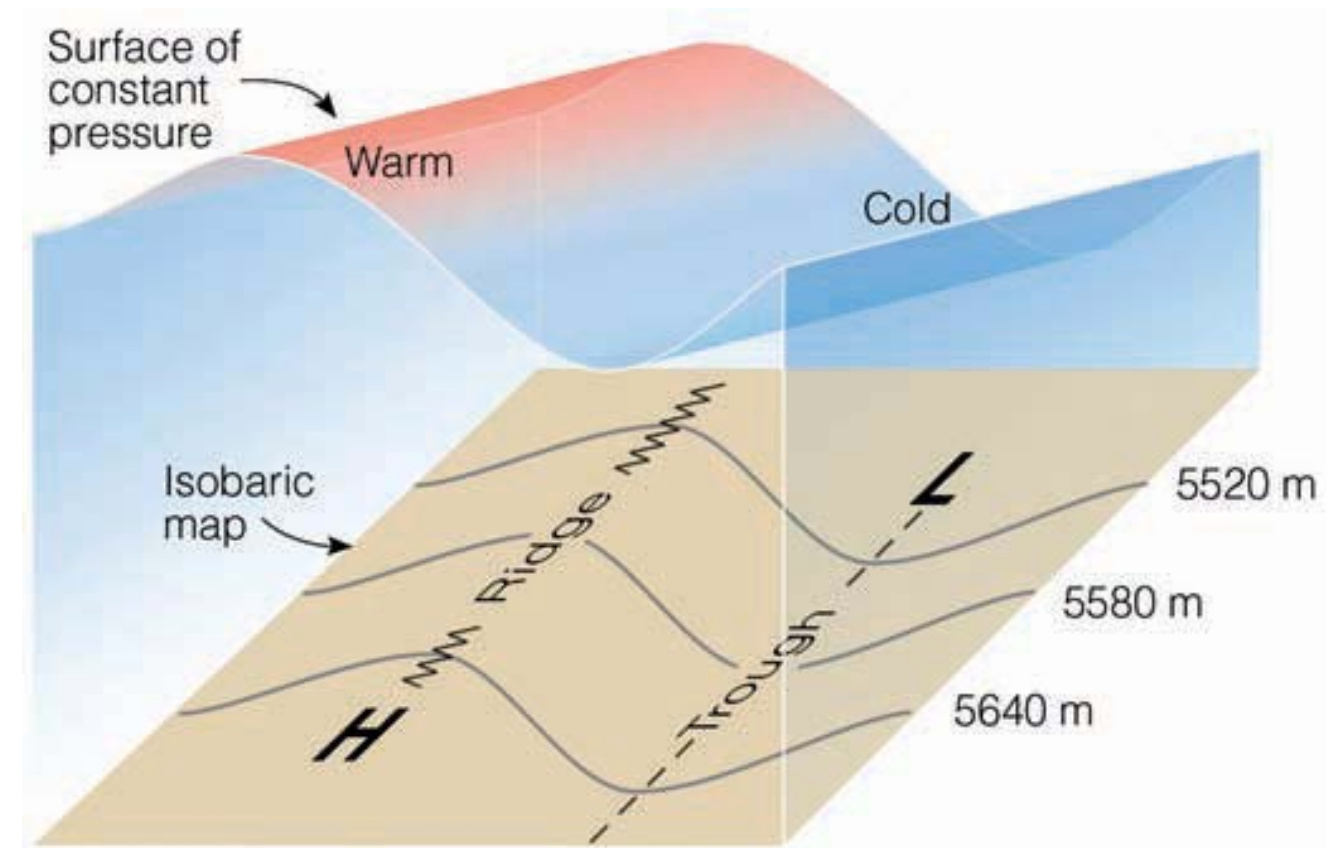
# 기압과 바람

- 등압면의 고도를 기압 대신에 그려서 분석할 수 있음
- 등압면의 고도를 보고 공기의 온도를 짐작할 수 있음



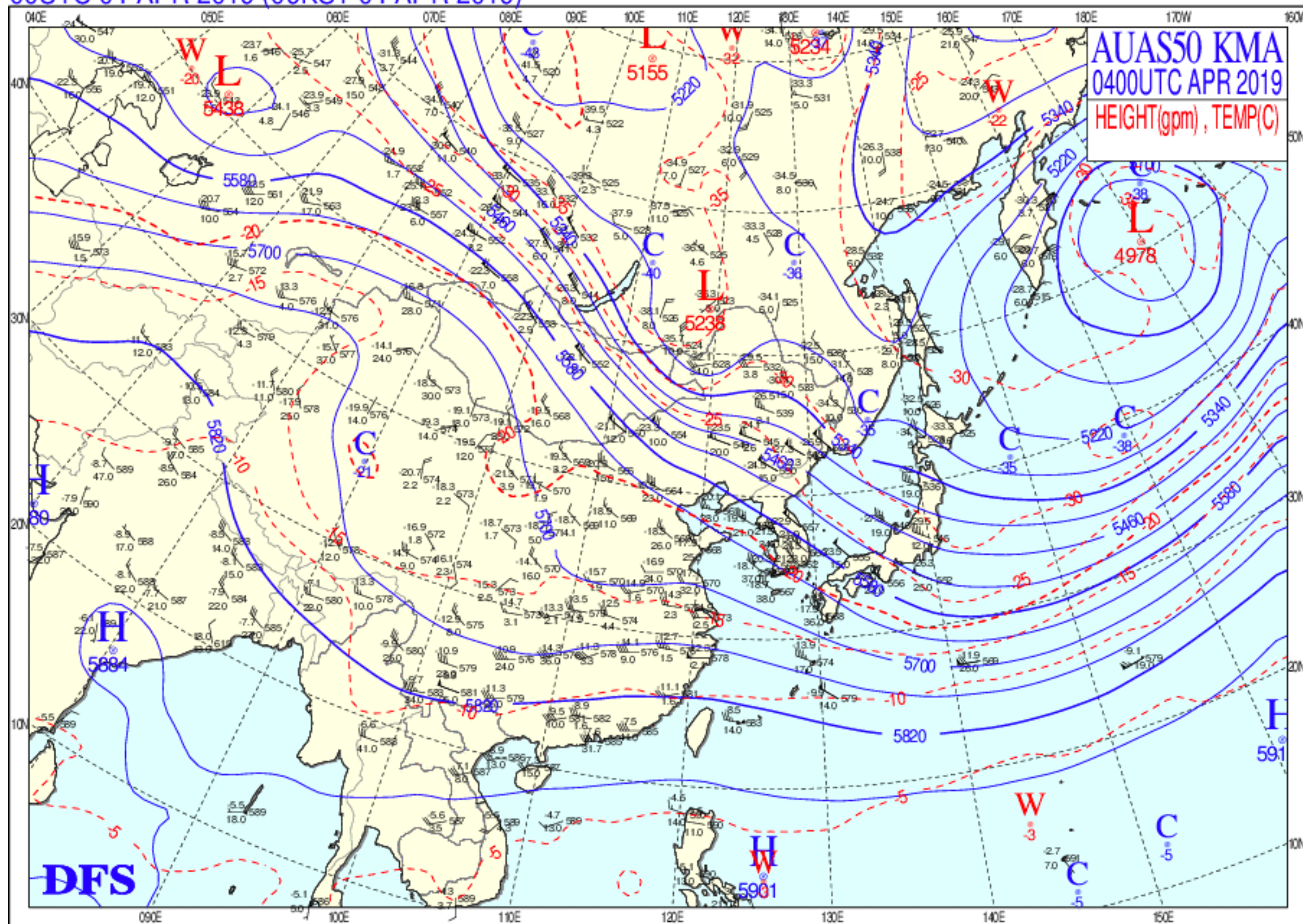
# 기압과 바람

- 차갑고 따뜻한 공기가 두 방향으로 분포할 때 등압면 고도는 파동형태로 표현됨
- 기압골 (Troughs): 차가운 공기
- 기압마루 (Ridges): 따뜻한 공기





00UTC 04 APR 2019 (09KST 04 APR 2019)



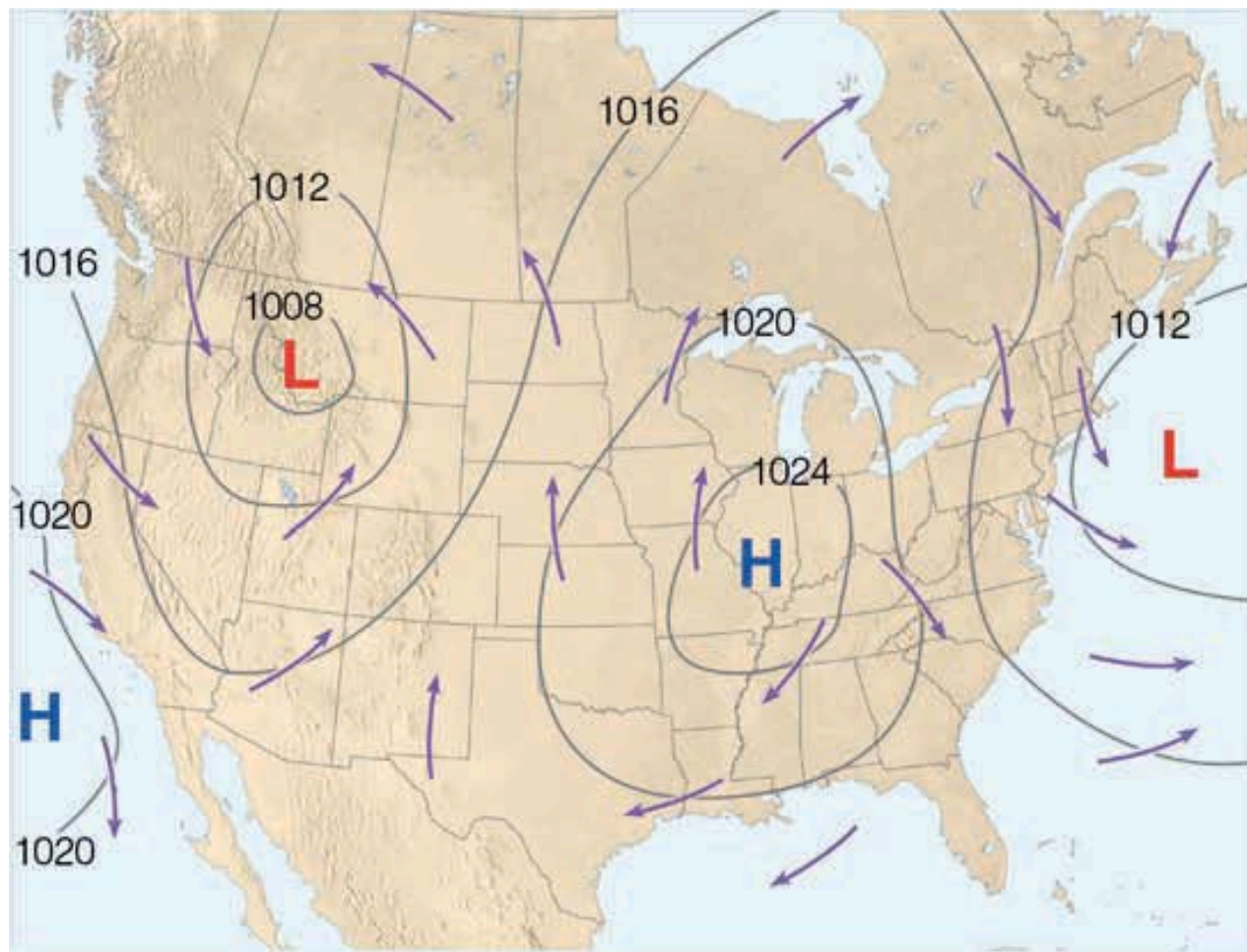
Korea Meteorological Administration(KMA)

00UTC 04 APR 2019 (09KST 04 APR 2019)

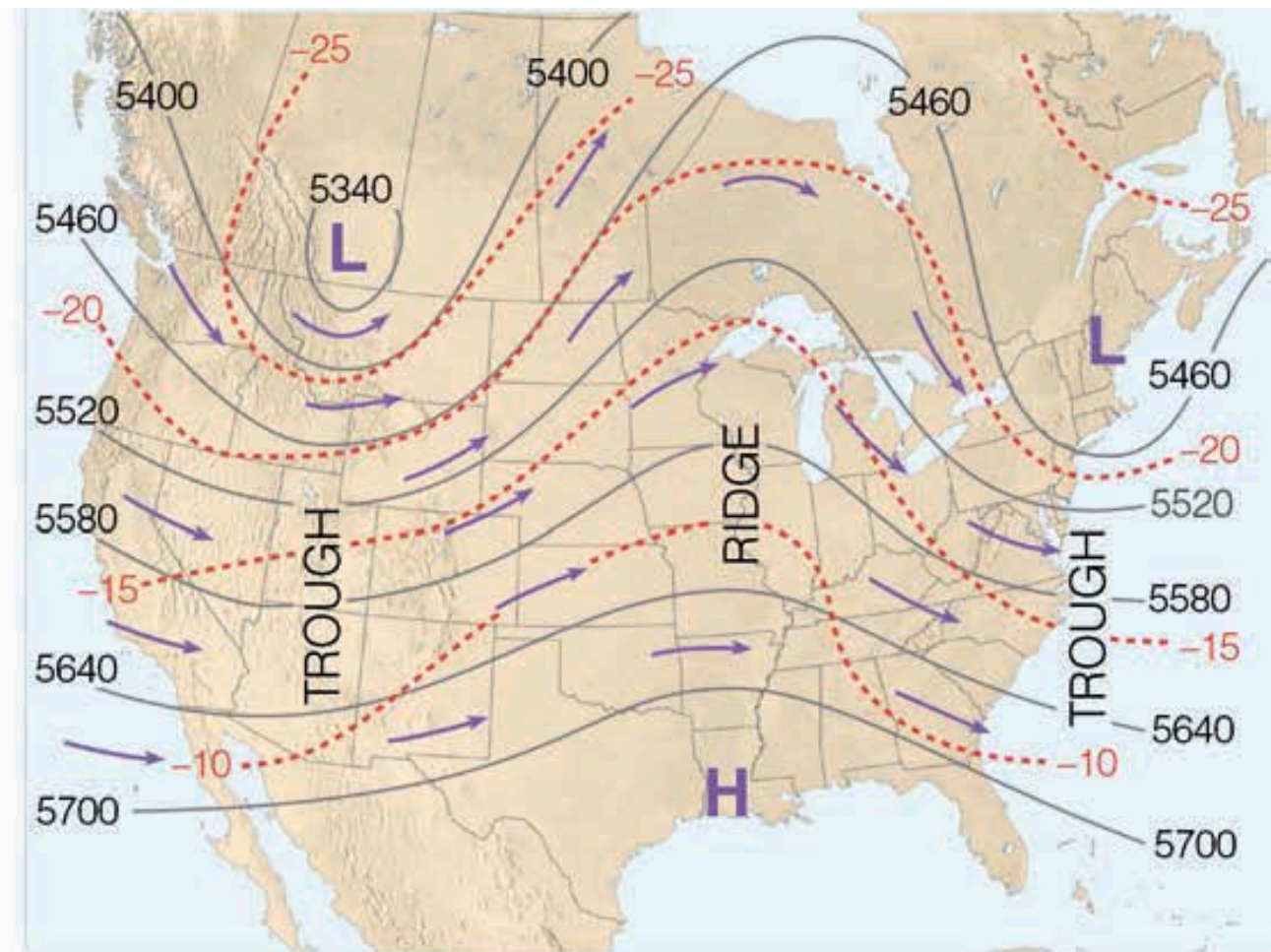


# 기압과 바람

- 바람이 부는 방향이 화살표로 표현되어 있음
- 지상과 상층에서 등압선과 등압면 고도를 보고 어떻게 바람을 알 수 있을까?



(a) Surface map



(b) Upper-air map (500 mb)

# 기압과 바람

---

- 바람은 곧 공기의 움직임
- 뉴턴의 제 2 법칙:

$$F = ma$$

- 공기에 작용하는 힘을 알면 공기의 가속도를 알 수 있음
- 가속도가 있다면 공기를 가속되거나, 감속되고, 혹은 방향을 바꾸며 움직이게 된다.
- 즉, 공기에 작용하는 힘을 알면 공기의 움직임을 알 수 있음



# 기압과 바람

---

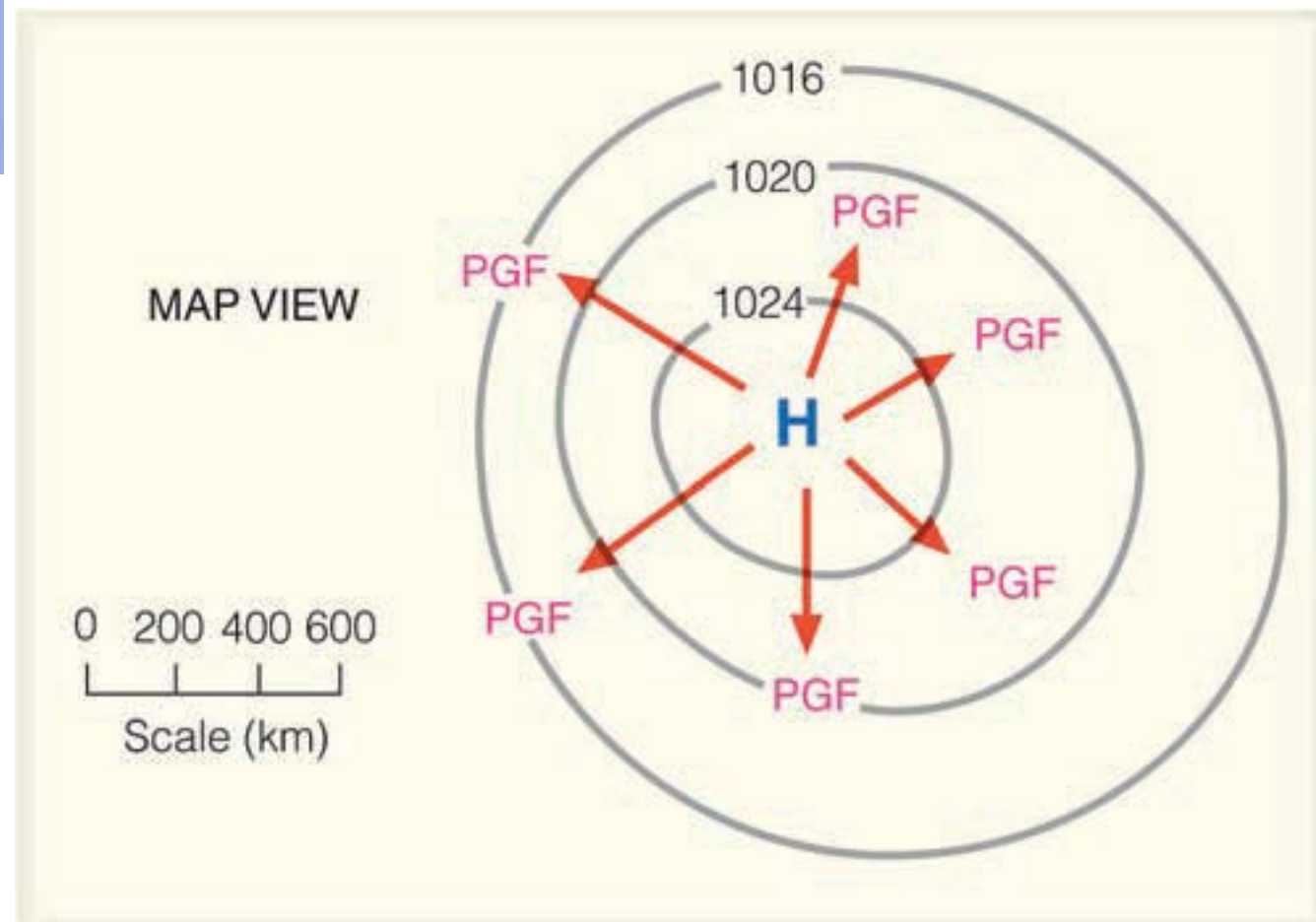
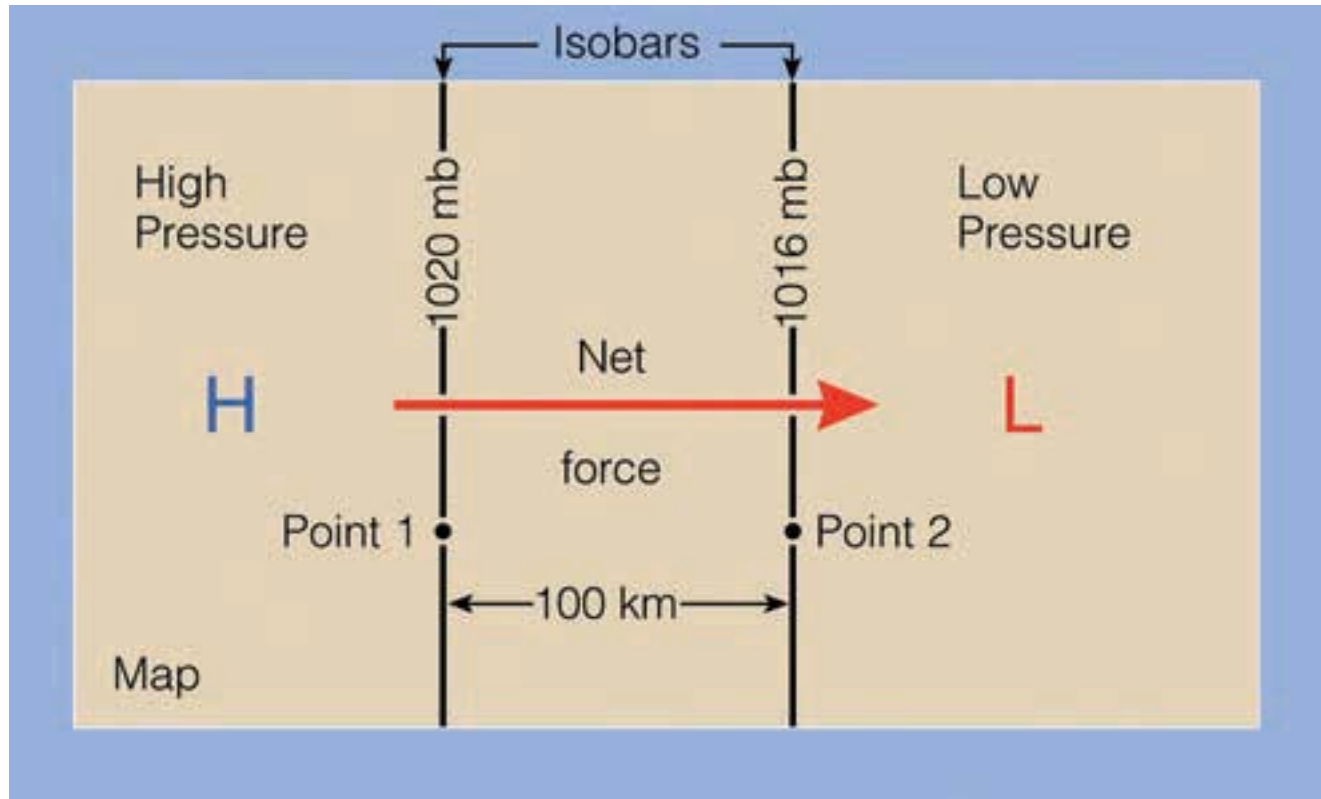
- 공기에 작용하는 힘
  - 기압경도력
  - 중력
  - 마찰력
  - 지구가 회전하기 때문에 발생하는 힘
    - 원심력
    - 코리올리 힘

# 기압과 바람

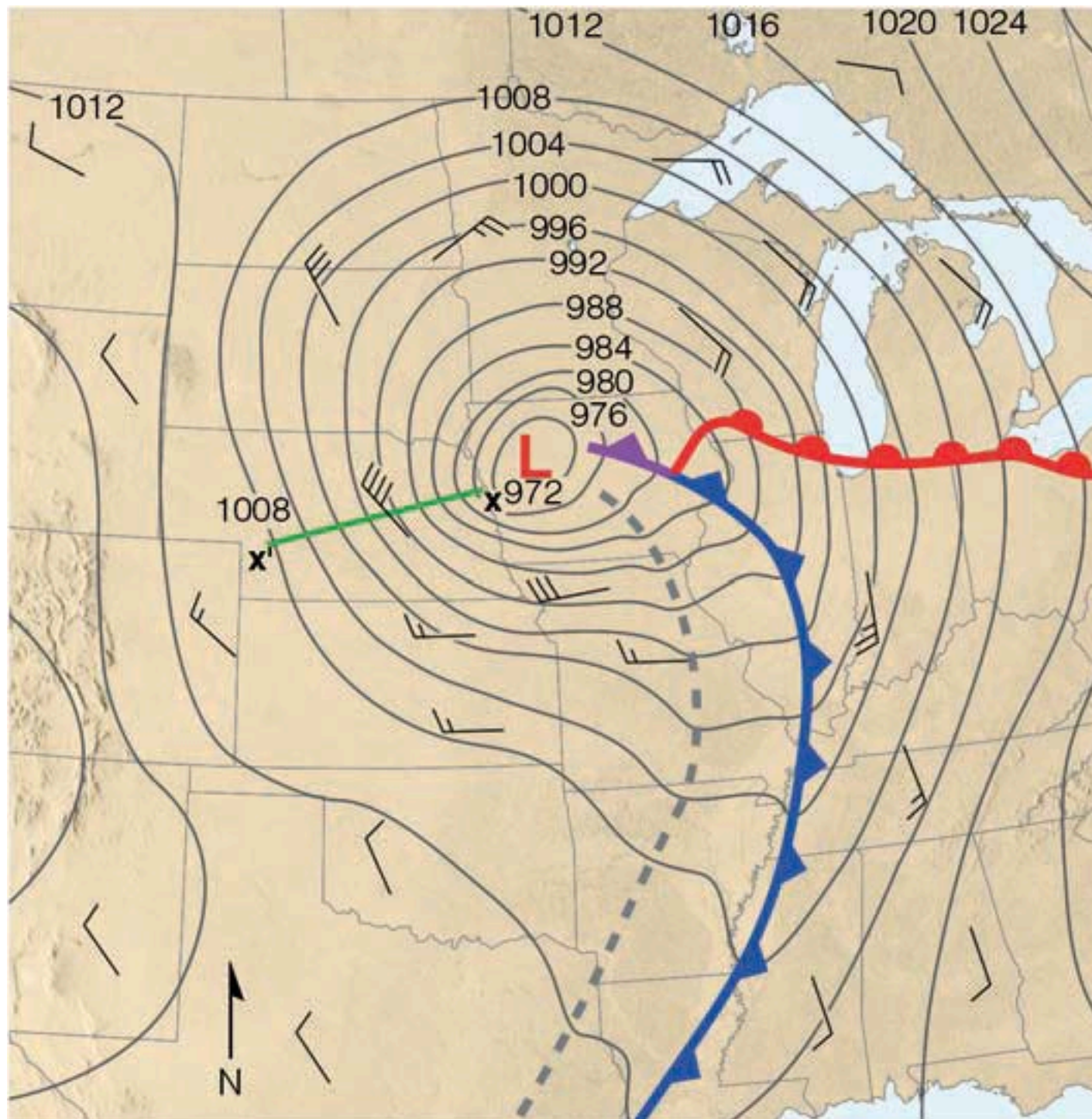
---

- 공기에 작용하는 힘: 기압경도력
  - 기압경도력의 방향은 기압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 향함
  - 기압경도력은 기압경도에 비례
  - 기압경도 = 기압 차이 / 거리
  - 기압경도력은 주어진 거리에서 기압차이가 클 수록, 혹은 주어진 기압차에서 거리가 짧을 수록 커짐

# 기압과 바람



# 기압과 바람



	Miles (statute) per hour	Knots
☉	Calm	Calm
—	1-2	1-2
—	3-8	3-7
—  	9-14	8-12
—    	15-20	13-17
—      	21-25	18-22
—        	26-31	23-27
—          	32-37	28-32
—            	38-43	33-37
—              	44-49	38-42
—                	50-54	43-47
—                  	55-60	48-52
—                    	61-66	53-57
—                      	67-71	58-62
—                        	72-77	63-67
—                          	78-83	68-72
—                            	84-89	73-77
—                                	119-123	103-107

바람의 세기  
바람의 방향

# 기압과 바람

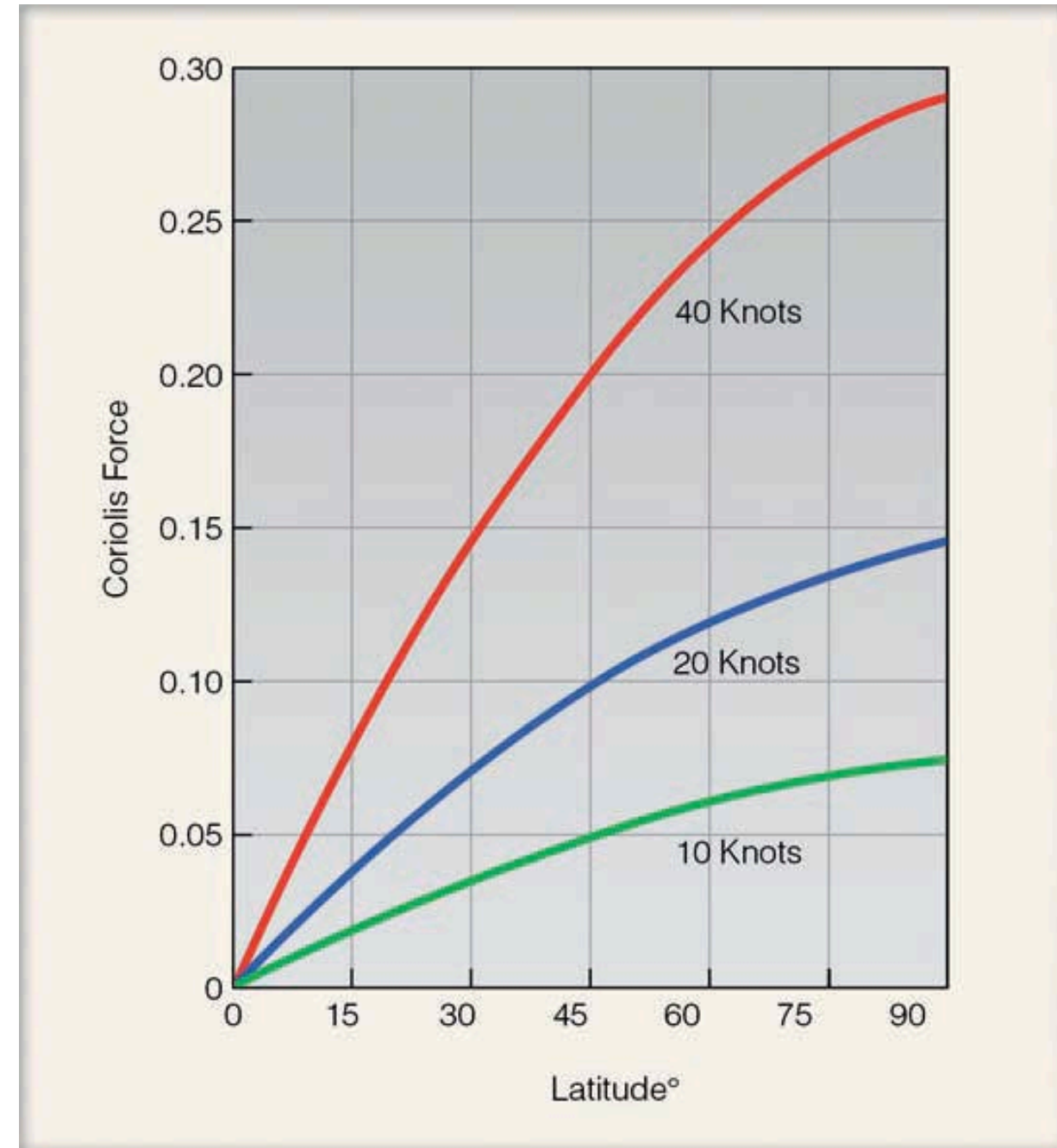
---

- 공기에 작용하는 힘: 코리올리 힘
- 지구가 회전하기 때문에 생기는 힘
- 각운동량 보존으로 이해할 수 있음
- 혹은 비디오로 이해할 수도 있음
  - <https://youtu.be/RrWKSOvqV-0>
- 북반구에서는 움직이는 물체의 오른쪽으로, 남반구에서는 왼쪽으로 작용

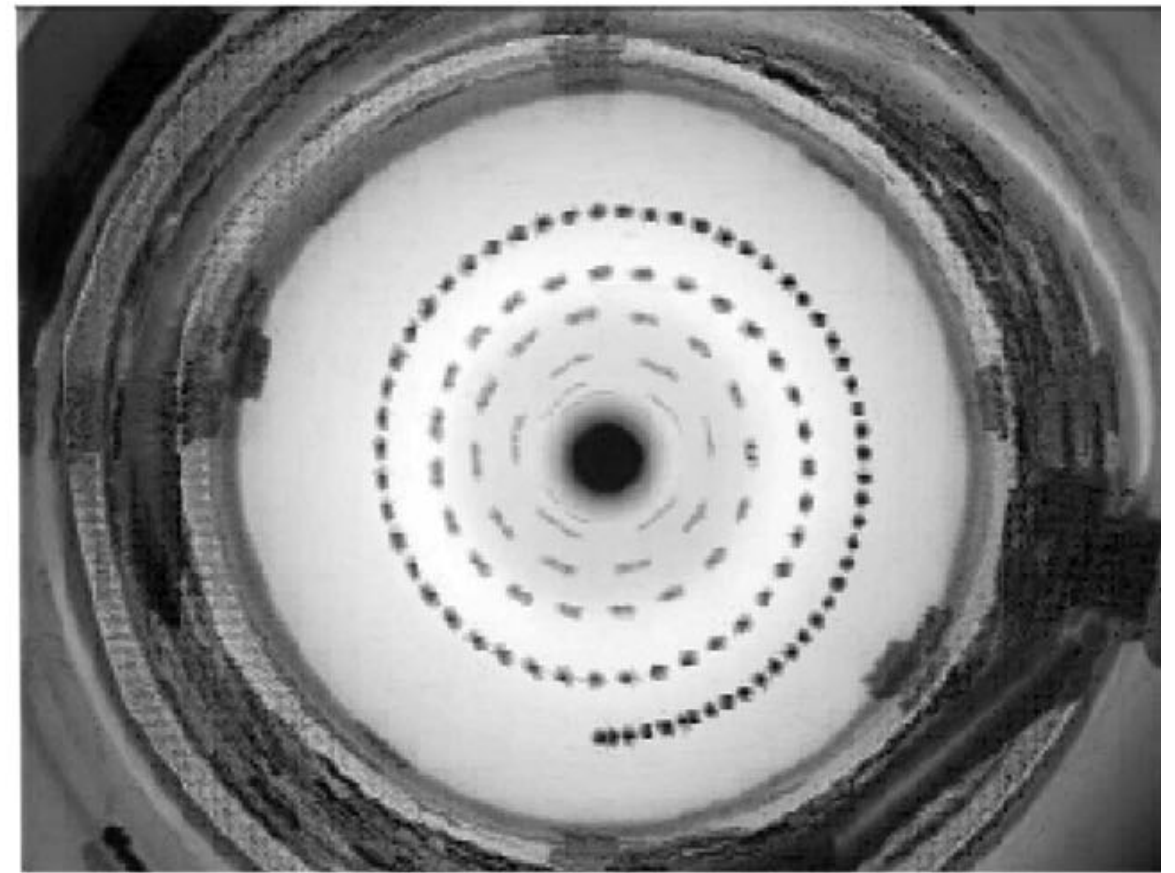
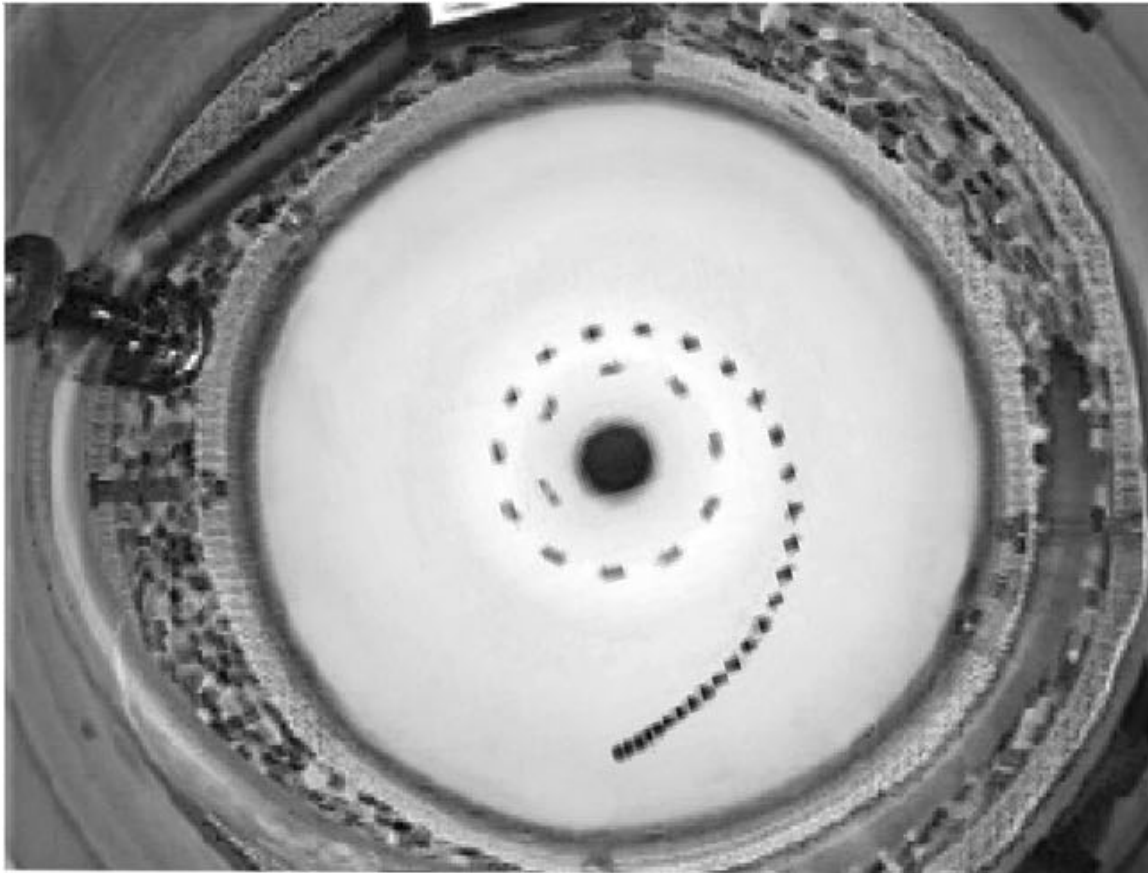


# 기압과 바람

- 공기에 작용하는 힘: 코리올리 힘
- 코리올리 힘은 :
  - 위도가 높아질 수록 강해짐
  - 움직이는 물체의 속도가 빠를 수록 강해짐
  - 지구의 자전속도가 빨라지면 강해 질 것임
- 우리도 느낄 수 있을까?



# 기압과 바람



Trajectories of particles in the radial inflow experiment viewed in the rotating frame. The positions are plotted every  $1/30$  s. On the left  $\Omega = 5$  rpm (revolutions per minute). On the right  $\Omega = 10$  rpm. Note how the pitch of the particle trajectory increases as  $\Omega$  increases, and how in both cases the speed of the particles increases as the radius decreases.



## PHYSICS

### The Bath-Tub Vortex in the Southern Hemisphere

IT has long been thought that water draining from a tank would rotate counter-clockwise in the northern hemisphere and clockwise in the southern hemisphere, provided other influences were kept small compared with the influence of the rotation of the Earth. This idea has only recently been tested, by Shapiro in Watertown, Massachusetts, as part of a film on vorticity<sup>2-4</sup>, and later by Binnie in Cambridge, England<sup>1</sup>. Shapiro and Binnie both acquired confidence, after surmounting difficulties in their early experiments, that the counter-clockwise rotations observed in their later experiments were due to the rotation of the Earth.

Magnetic latitude (deg.)

Fig. 1. Plot of spread- $F$  variation with sunspot number versus magnetic latitude

range of 40-120. It is found that the slopes of these linear portions vary widely from latitude to latitude, giving both positive and negative values. Positive slopes are obtained for the stations which show positive correlation of mean percentage occurrence of spread- $F$  with sunspot numbers,

One of us (V. R. J. K.) thanks the Indian Council of Scientific and Industrial Research for financial support of this investigation.

V. R. JAGATH KUMAR  
B. RAMACHANDRA RAO

Radio Physics and Electronics Laboratory,  
Andhra University,  
Waltair.

Wells, H. W., *J. Geophys. Res.*, **59**, 66 (1954).  
Singleton, D. G., *Austral. J. Phys.*, **10**, 60 (1957).  
Kotadia, K. M., *Proc. Ind. Acad. Sci.*, **A**, **50**, 259 (1959).  
Lyon, A. J., Skinner, N. J., and Wright, R. W. H., *J. Atmos. Terr. Phys.*, **19**, 145 (1960).  
Rangaswamy, S., and Kapasi, K. B., *J. Atmos. Terr. Phys.*, **25**, 721 (1963).

## PHYSICS

### The Bath-Tub Vortex in the Southern Hemisphere

IT has long been thought that water draining from a tank would rotate counter-clockwise in the northern hemisphere and clockwise in the southern hemisphere, provided other influences were kept small compared with the influence of the rotation of the Earth. This idea has only recently been tested, by Shapiro in Watertown, Massachusetts, as part of a film on vorticity<sup>2-4</sup>, and later by Binnie in Cambridge, England<sup>1</sup>. Shapiro and Binnie both acquired confidence, after surmounting difficulties in their early experiments, that the counter-clockwise rota-