

수증기와 대기 안정도

제4장

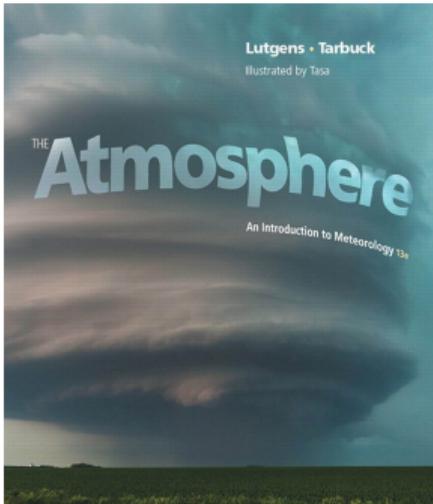
대기과학 및 실험 (2022)



박 기 현 (Kiehyun.Park@gmail.com)

과학영재학교 경기과학고등학교

2022년 10월 17일



ISBN-13: 978-0321984623

ISBN-10: 0321984625

This work is licensed under a Creative Commons “Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International” license.

- 이 문서는 오른쪽의 교재를 이용하여 경기과학고등학교의 대기과학및실험 강좌 수업을 위해 제작되었습니다.
- 그림의 저작권은 원저작자에게 있으며, 이를 교재로 사용하는 수업을 하는 경우에 한하여 이용할 수 있습니다.





지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기
수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

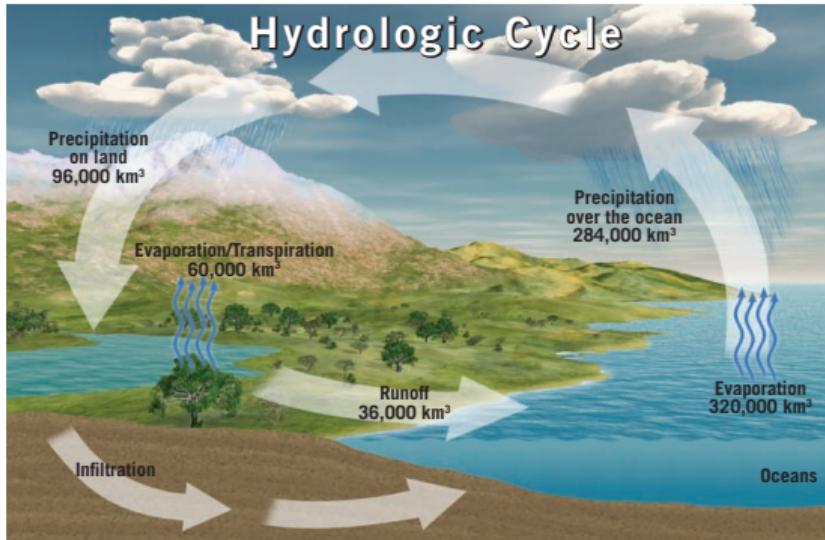
6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

8 안정도와 날씨

물순환(hydrologic cycle)

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정
날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨



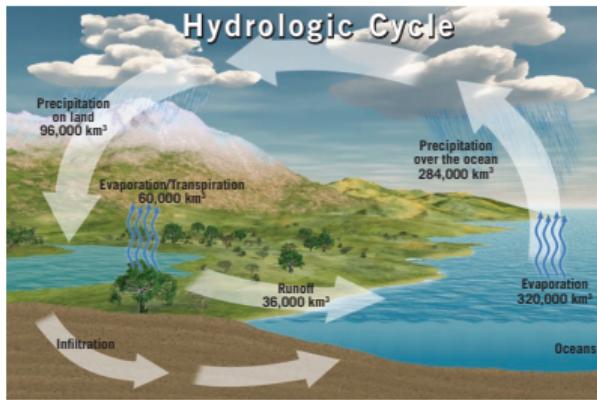
▲ SmartFigure 4.1 Earth's hydrologic cycle



<http://goo.gl/F4cdm>

- 바다, 대기, 대륙 사이의 연속적인 물 교환
- 침투(infiltration) : 육지에 내린 비가 땅 속으로 스며드는 것
- 유출(runoff) : 육지에 내린 비가 지표면을 따라 흐르는 것
- 증발산(evapotranspiration) : 수면과 토양에서 증발과 식물의 증산을 합친 것

물순환(hydrologic cycle)



▲ SmartFigure 4.1 Earth's hydrologic cycle



<http://goo.gl/F4cdm>

Q) 주어진 그림을 참고하여 물순환 과정을 설명하시오.

Q) 해양에서는 증발에 의해 감소되는 물의 양이 강수량과 같지 않다. 그런데도 해수면이 낮아지지 않는 이유는 무엇인가?

Q) 물 순환의 의의에 대해 설명하시오.

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

물의 특성

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

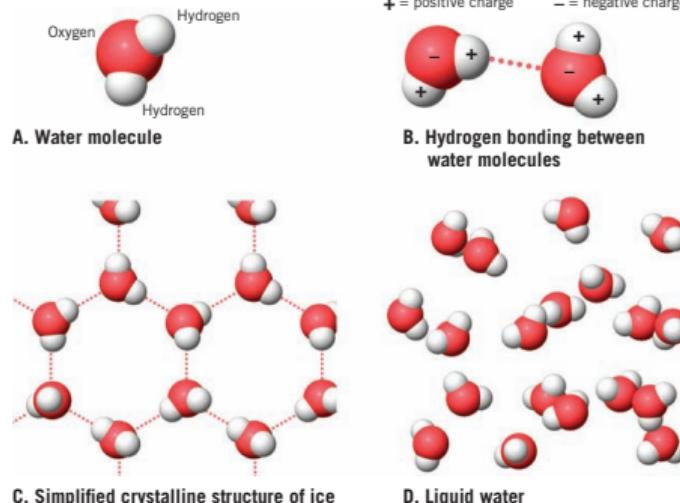
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



▲ Figure 4.2 Hydrogen bonding in water A. A water molecule consists of one oxygen atom and two hydrogen atoms. B. Water molecules are joined together by hydrogen bonds that loosely bond a hydrogen atom on one water molecule with an oxygen atom on another. C. Crystalline structure of ice. For simplicity, the illustration is two-dimensional rather than the actual three-dimensional structure. D. Water in the liquid state consists of clusters of water



- 지구 표면에서 대량으로 발견되는 유일한 액체
- 한 상에서 다른 상(고체, 액체, 기체)으로 변환 가능함
- 고체 상태인 얼음은 액체 상태인 물보다 밀도가 작음
- 비열이 커서 온도 변화를 위해 많은 에너지가 요구됨
- 대다수의 특성은 물이 수소결합을 하는 특성의 결과임

Q) 얼음이 물보다 밀도가 작은 이유를 설명하시오.



지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

8 안정도와 날씨

잠열

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

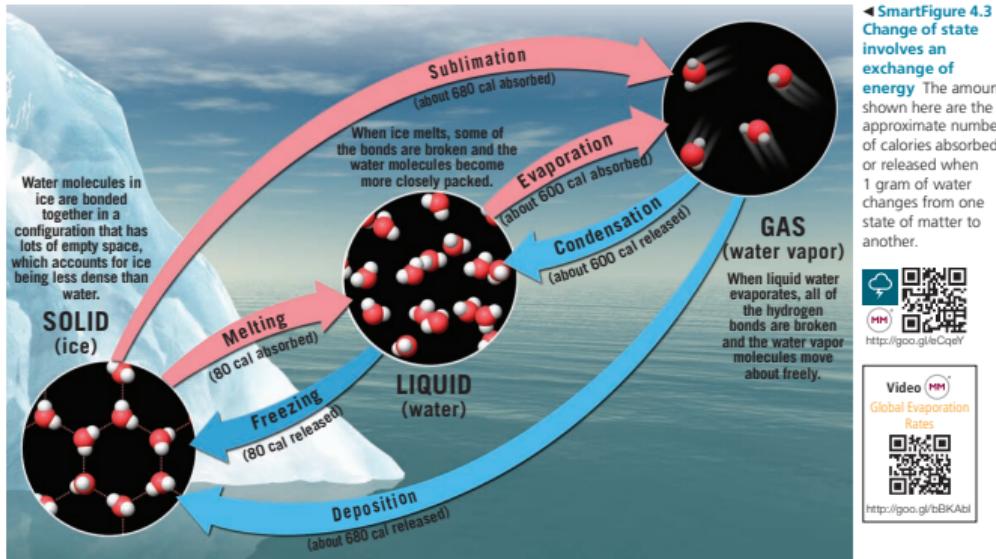
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



- 융해 잠열: 0°C 의 얼음(고체)이 물(액체)로 변할 때 약 80 cal/g의 열을 흡수함.

- 기화 잠열: 물이 수증기로 변할 때는

540 cal/g (100°C) ~
600 cal/g (0°C)의 열을 흡수함.

- 반대의 과정은 동일한 양의 열을 방출하는 것이 필요!

상태 변화

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

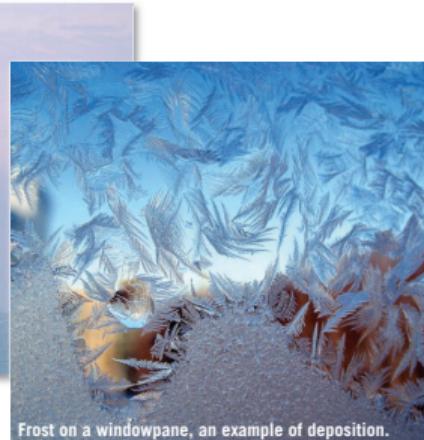
날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

Condensation of water vapor generates phenomena such as dew, clouds, and fog.



A.
▲ Figure 4.4 Examples of condensation and deposition



B.
Frost on a windowpane, an example of deposition.

- 증발: 액체 → 기체, 응결: 기체 → 액체
- 수증기가 구름을 형성할 때, 응결 잠열이 방출되며, 그 열이 주위 공기를 가열하여 공기 덩이에 부력을 주어 구름 성장에 도움을 줌
- 승화: 고체 → 기체, 침적: 기체 → 고체
- 승화에는 드라이아이스가 사라지는 현상이 대표적인 예이며, 침적은 수증기가 잔디나 창문 등에 얼음으로 침적되는 것 (서리)이 예시임.



지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

8 안정도와 날씨

공기 중의 수증기

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

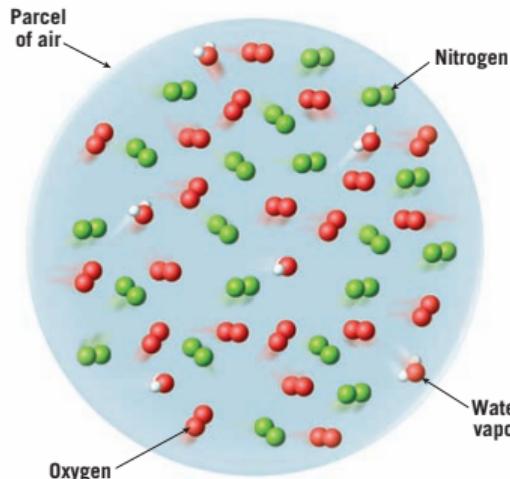
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



▲ Figure 4.5 Meteorologists use several methods to express the water-vapor content of air

- 기상학자들은 대기 중의 수증기량을 표현하기 위해 여러 방법들을 사용

Q) 달톤의 법칙을 설명하시오.

Q) 공기 중의 수증기량을 나타내는 네 가지는 무엇인가?

수증기압과 포화

지구상의 물
물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

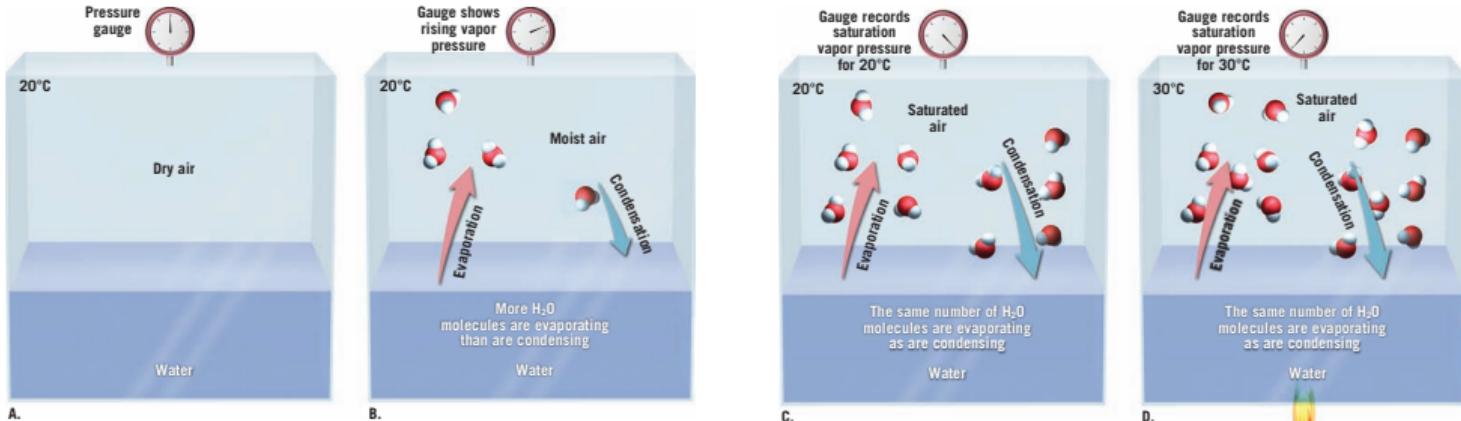
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



Q) 수증기압이란 무엇인가?

- 포화 : 증발 속도 = 응결 속도
- 포화 수증기압: 포화되었을 때 수증기에 의해
가해진 압력

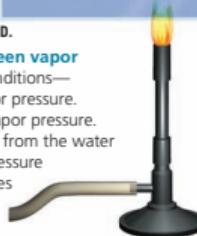
▲ **Figure 4.7 The relationship between vapor pressure and saturation**

A. Initial conditions—dry air at 20°C with no observable vapor pressure.

B. Evaporation generates measurable vapor pressure.

C. As more and more molecules escape from the water surface, the steadily increasing vapor pressure forces an increasing number of molecules to return to the liquid. Eventually, the number of water-vapor molecules returning to the surface will balance the number leaving—at which point the air is said to be saturated.

D. When the air is saturated at 30°C, the same number of H₂O molecules are evaporating as are condensing.





기체 법칙

대기 상태의 기본 변수는 부피, 압력, 온도이다.

부피는 주로 비부피(specific volume) 또는 밀도(density)로 나타낸다.

$$\nu = \frac{\Delta V}{\Delta M} [L^3 M^{-1}] \rho = \frac{\Delta M}{\Delta V} [ML^{-3}]$$

$\nu \rho = 1$ 의 관계가 있다.

압력은 단위면적당 힘으로 정의되며,

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

지구상의 물
물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



이상기체 상태방정식

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

온도 T 와 압력 p 에서 이상기체의 단위질량 당 부피인 비부피를 ν 라 하자. 그러면 보일의 법칙과 샤를의 법칙으로부터 보일-샤를의 법칙을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p\nu(T, p) = p_0\nu(T, p_0), \quad \frac{\nu(T, p_0)}{T} = \frac{\nu(T_0, p_0)}{T_0}$$

$$p\nu(T, p) = \frac{p_0\nu(T_0, p_0)}{T_0} T$$

비기체상수(specific gas constant) R 을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p\nu = RT$$

질량이 분자량 M 과 같은 기체의 시료가 있다면 부피는 $V = M\nu$ 이다.

$$pV = MRT$$

경험 법칙인 아보가드로의 법칙은 동일한 압력과 온도에서 같은 부피 안에 같은 수의 분자수를 지니므로 $\bar{R} = MR$ 의 양은 모든 기체에서 상수가 되며 이를 보편기체상수라 한다.

$$MR = \frac{pV}{T}, \quad p\nu = \frac{\bar{R}}{M}T$$

$$\bar{R} = MR = 8.3144 \text{ (J mol}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$$

비기체상수(specific gas constant)는 보편기체상수를 기체의 분자량으로 나누어 구할 수 있다.

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

이상 기체 상태방정식은 아래와 같이 쓸 수도 있다.

$$p = \rho RT$$



절대습도(absolute humidity)

절대습도: 혼합공기 1 m³에 들어있는 수증기의 양을 g으로 나타낸 것

$$\text{절대습도} = \frac{\text{수증기 질량 (g)}}{\text{공기 부피 (m}^3)}$$

이상기체 상태방정식으로 밀도를 구하면

$$e = \rho RT, \quad \rho = \frac{e}{RT}$$

와 같다. 수증기의 밀도(ρ_w)는

$$\rho_w = \frac{e}{R_w T}$$

$$\begin{aligned} R &= M\bar{R} = 8.3144 (\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) \\ &= 8.3144 (\text{Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) \end{aligned}$$

특별기체상수(specific gas constant)는 보편기체상수 (\bar{R})를 기체의 분자량(M)으로 나누어 구할 수 있다.

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

수증기의 기체상수는

$$R_w = \frac{R}{M_w} = \frac{8.3144}{18} = 0.461 (\text{J g}^{-1} \text{ K}^{-1})$$

$$A.H. = \rho_w = \frac{e}{R_w T} = 217 \frac{e}{T} (\text{g m}^{-3})$$

단, 여기에서 e : hPa, T : K 단위이다.

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

공기의 평균 분자량

공기의 부피를 V , n 번째 기체의 질량을 m_n , 분자량을 M_n 이라고 하자

$$p_n = \frac{\bar{R}}{M_n} \frac{m_n}{V} T$$

달톤의 법칙을 적용하면

$$p = \sum p_n = \frac{\bar{R}T}{V} \sum \frac{m_n}{M_n}$$

$$p\nu = \bar{R}T \frac{\sum \frac{m_n}{M_n}}{\sum m_n}$$

$$p\nu = \frac{\bar{R}}{\bar{M}} T$$

량은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{\bar{M}} \equiv \frac{\sum \frac{m_n}{M_n}}{\sum m_n}$$

혼합 기체인 공기의 평균 분자량은 질량 가중값을 사용하는 조화 평균으로 구할 수 있다.

계산된 건조 공기의 평균 분자량은 $28.966 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$ 이다.

건조 공기의 비기체상수는

$$R = \frac{\bar{R}}{\bar{M}} = 2.8704 \times 10^2 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

혼합비와 비습

혼합비(Mixing Ratio): 건조 공기 1 kg에 들어 있는 수증기의 양을 g으로 나타낸 것

$$\text{혼합비} = \frac{\text{수증기 질량 (g)}}{\text{건조 공기 질량 (kg)}}$$

$$M.R. = \frac{m_w}{m_d} = \frac{\rho_w}{\rho_d} = 622 \frac{e}{p - e} (\text{g/kg})$$

이상기체 상태방정식을 이용해 구해볼 수 있다.

$$p = \rho RT, \quad \rho = \frac{p}{RT}$$

$$e = \rho_w R_w T, \quad \rho_w = \frac{e}{R_w T}$$

$$M.R. = \frac{\rho_w}{\rho_d} = \frac{\frac{e}{R_w T}}{\frac{(p-e)}{R_d T}} = \frac{M_w}{M_d} \frac{e}{p - e}$$

비습(Specific Humidity): 수증기와 혼합되어 있는 1 kg에 들어 있는 수증기의 양을 g으로 나타낸 것

$$\text{비습} = \frac{\text{수증기 질량 (g)}}{\text{습윤 공기 질량 (kg)}}$$

$$S.H. = \frac{m_w}{m_d + m_w} = \frac{\rho_w}{\rho_d + \rho_w} = 622 \frac{e}{p} (\text{g/kg})$$

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

공기 중의 수증기

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

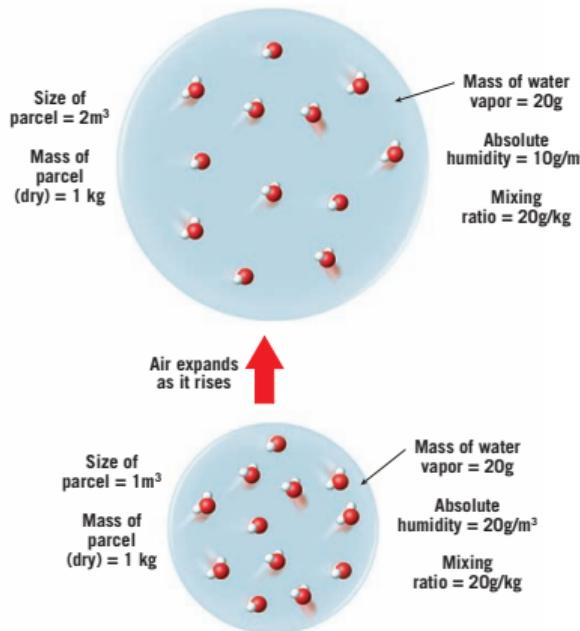
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



▲ Figure 4.6 Comparison of absolute humidity and mixing ratio for a rising parcel of air Notice that the mixing ratio is not affected

Q) 절대습도와 혼합비는 어떤 공통점과 차이점을 가지는가?

Q) 상대 습도와 이슬점은 절대 습도, 혼합비와 어떻게 다른가? 상대 습도와 이슬점을 사용하는 이유는 무엇인가?

포화 혼합비 곡선

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기
수증기량

상대습도와
노점온도

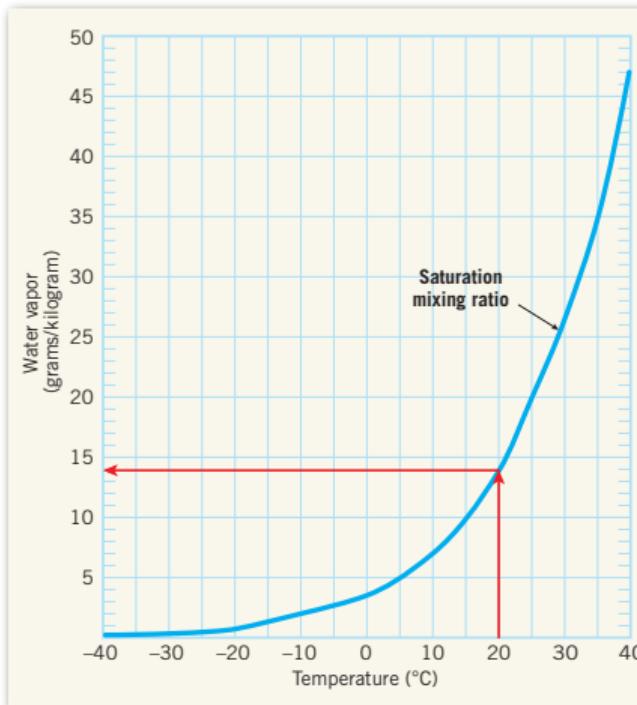
단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

Q) 공기를 포화 시키는데 필요한 수증기량과 온도의 일반적인 관계를 기술하라.



포화 혼합비

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

Table 4.1 | Saturation Mixing Ratio (at Sea-Level Pressure)

Temperature, °C (°F)	Saturation Mixing Ratio, g/kg
-40 (-40)	0.1
-30 (-22)	0.3
-20 (-4)	0.75
-10 (14)	2
0 (32)	3.5
5 (41)	5
10 (50)	7
15 (59)	10
20 (68)	14
25 (77)	20
30 (86)	26.5
35 (95)	35
40 (104)	47

Q) 이슬점이 24°C인 공기덩이는 이슬점이 4°C인 공기덩이 보다 얼마나 많은 수증기를 포함하고 있는가?



지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

8 안정도와 날씨



상대습도와 이슬점

- 상대습도(Relative Humidity) : 특정 온도에서 포화되기 위해 필요한 수증기량과 실제 수증기량의 비율을 나타낸 것

Q) 서리점은 무엇인지 설명하시오.

$$\text{상대 습도} = \frac{\text{현재 수증기압 (hPa)}}{\text{포화 수증기압 (hPa)}} \times 100 (\%)$$

$$\text{상대 습도} = \frac{\text{혼합비(g/kg)}}{\text{포화 혼합비(g/kg)}} \times 100 (\%)$$

- 이슬점 : 포화되기 위해 냉각되어야 할 온도를 나타낸 것

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

상대습도

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

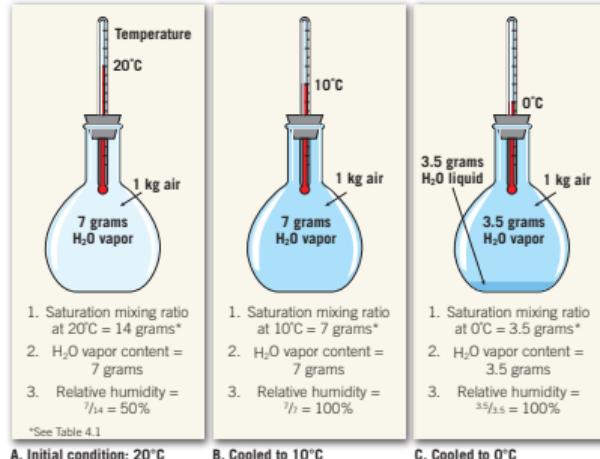
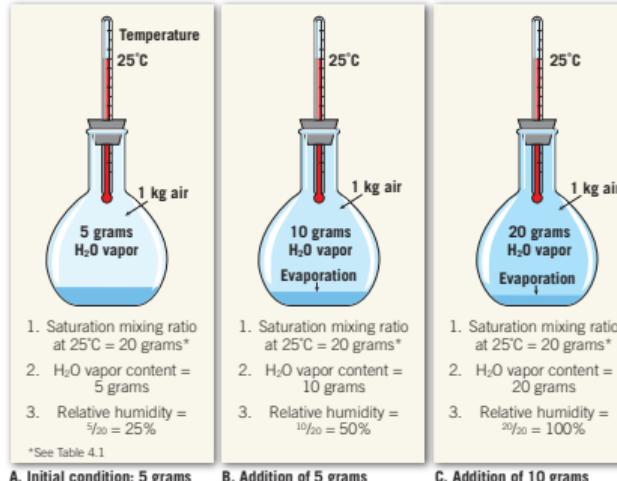
단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

▼ Figure 4.9 At a constant temperature (in this example, it is 25°C), the relative humidity will increase as water vapor is added to the air. The saturation mixing ratio for air at 25°C is 20 g/kg (see Table 4.1). As the water-vapor content in the flask increases, the relative humidity rises from 25 percent in A to 100 percent in C.



▲ Figure 4.10 Relative humidity varies with temperature. When the water-vapor content (mixing ratio) remains constant, the relative humidity will change when the air temperature either increases or decreases. In this example, when the temperature of the air in the flask was lowered from 20°C in A to 10°C in B, the relative humidity increased from 50 to 100 percent. Further cooling from 10°C in B to 0°C in C causes one-half of the water vapor to condense. In nature, when saturated air cools, it causes condensation in the form of clouds, dew, or fog.

Q) 상대습도를 변화시키는 요인은 무엇인지 설명하시오

상대습도

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기
수증기

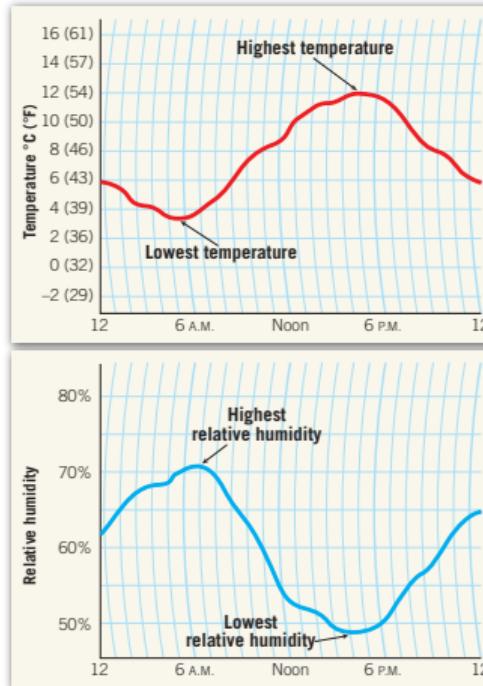
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



Q) 하루 중 상대습도가 가장 높았을 때와 가장 낮을 때는 언제인가?

Q) 하루 중 이슬이 생기기 쉬운 시간은?

Q) 기온의 변화와 상대습도의 변화와의 일반적인 관계를 기술하라.

Q) 온도가 일정하고 혼합비가 감소한다면 상대습도는 어떻게 변하는가?

상대습도와 수증기

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



Q) 데스 밸리는 기온이 25°C , 상대 습도는 20% 이고, 시카고는 기온이 -10°C , 상대 습도는 100% 일 때, 두 지역에 포함된 수증기의 양을 비교하시오.

상대습도와 수증기

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



Q) 건습계의 원리를 설명하라.

Q) 모발 습도계의 원리는 무엇이며, 단점과 장점은 무엇인가?



지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

8 안정도와 날씨

단열 변화

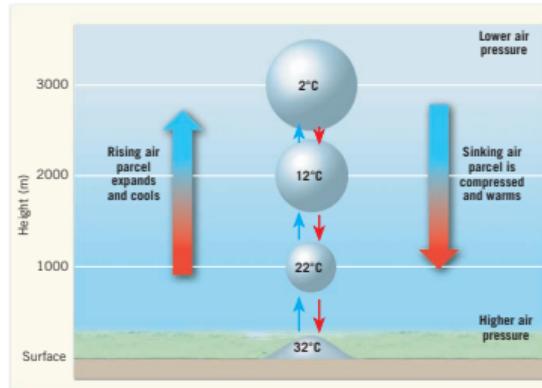
지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



▲ Figure 4.15 Dry adiabatic rate of cooling and heating Whenever an unsaturated parcel of air is lifted, it expands and cools at the dry adiabatic rate of 10°C per 1000 meters. Conversely, when air sinks, it is compressed and heats at the same rate.

Q) 공기가 대기를 통하여 위쪽으로 상승하는 동안 공기는 왜 팽창하는지 설명하시오.

Q) 공기가 하강할 때는 왜 가열이 되는지 설명하시오.

Q) 휴대용 부탄가스를 사용할 때 용기가 차갑게 느껴지는 이유는?

단열 변화

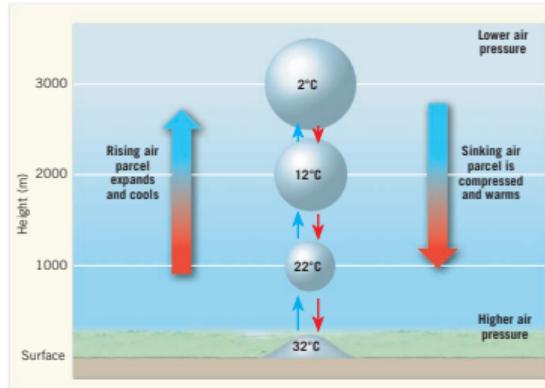
지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



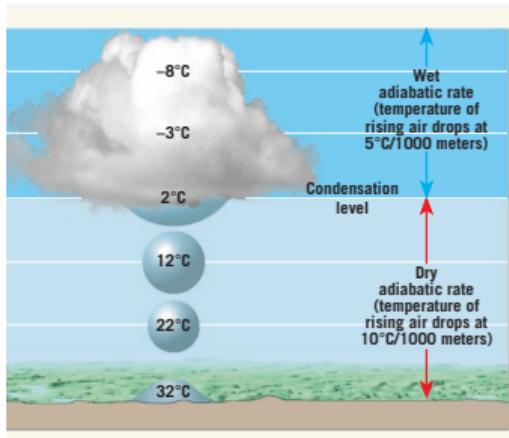
▲ Figure 4.15 Dry adiabatic rate of cooling and heating Whenever an unsaturated parcel of air is lifted, it expands and cools at the dry adiabatic rate of 10°C per 1000 meters. Conversely, when air sinks, it is compressed and heats at the same rate.

- 단열 변화 : 열의 출입이 없는 상태에서 일어나는 온도변화
- 건조단열감률 : 연직으로 이동하는 불포화된 공기덩어리에 적용하는 온도감률 $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$
- 습윤단열감률 : 연직으로 이동하는 포화된 공기덩어리에 적용하는 온도감률 보통 수분함유량에 따라 약 $5 \sim 9^{\circ}\text{C}/\text{km}$
- 이슬점감률 : 공기덩어리가 연직으로 이동하여 단열팽창하면 수증기의 밀도가 감소하여 수증기압도 낮아져서 이슬점이 내려감. 불포화 공기에서는 $2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이며, 포화 공기에서는 해당 습윤단열감률과 동일함.

상승 응결 고도

✓ Concept Checks 4.5

- ① What name is given to the processes whereby the temperature of air changes without the addition or subtraction of energy?
- ② Why does air expand as it moves upward through the atmosphere?
- ③ At what rate does unsaturated air cool when it rises through the atmosphere?
- ④ Why does the adiabatic rate of cooling change when condensation begins?
- ⑤ Why is the wet adiabatic rate not a constant figure?



- 불포화 상태인 공기가 상승 하여 포화에 도달해 구름이 형성되기 시작하는 고도

- 상승응결 고도를 H , 지상기온을 t , 지상 이슬점을 t_d 라고 하면 건조 단열 감률은 $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 이슬점 감률은 $0.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 이므로,

$$t - \left(H \times \frac{1^{\circ}\text{C}}{100\text{m}} \right) = t_d - \left(H \times \frac{0.2^{\circ}\text{C}}{100\text{m}} \right)$$

$$H[m] = 125(t - t_d)$$

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



정적 비열과 정압 비열

비열은 어떤 물질 1g의 온도를 1°C 올리는데 필요한 열량이다.

정적비열 (C_v): 부피를 일정하게 유지하면서 가열했을 때 물질이 나타내는 비열

정압비열 (C_p): 압력을 일정하게 유지하면서 가열했을 때 물질이 나타내는 비열

내부에너지 U 는 사실상 온도와 부피의 함수이며 압력과는 무관하다.

따라서 $U(T, V)$ 로 나타낸다.

엔탈피는 온도와 압력에 관한 함수로 $H(T, P)$ 로 나타낼 수 있는데, 정의는 $H = U + PV$ 이다.

정적 비열과 정압 비열을 각각 내부에너지와 엔탈피를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

$$\begin{aligned} C_p &= \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial(U + PV)}{\partial T} \right)_p \\ &= \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p + P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \\ &= C_v + P \left(\frac{\partial \left(\frac{RT}{P} \right)}{\partial T} \right)_p = C_v + P \left(\frac{R}{P} \right) \\ &= C_v + R \end{aligned}$$

따라서 정압 비열과 정적 비열사이의 관계는 $C_p = C_v + R$ 로 정리할 수 있다.

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



열역학 제1법칙

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

열역학 제 1법칙을 이용하여 $\Delta q = c_v \Delta T + p \Delta \nu$ 을 설명하면

어떤 공기덩이에 열량 ΔQ 를 가하면 이중 일부는 ΔW 만큼의 일을 하는데 사용되고, 나머지는 ΔU 만큼의 내부에너지를 변화시키는데 사용된다.

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

각 항을 공기덩이의 질량으로 나누어 단위 질량에 대해 다음과 같이 소문자로 나타내면

$$\Delta q = \Delta u + \Delta w$$

이상기체라고 가정하면

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

여기에서 c_v 는 정적비열이고, ΔT 는 온도 변화량이다.

일의 물리학적 정의는

$$\Delta W = F \Delta S$$

반지름 R 인 공 모양의 공기덩이의 압력을 p , 그 표면 적을 A 라 하면

$$\Delta W = pA\Delta R = p\Delta V$$

단위 질량의 공기덩이인 비부피에 대해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta w = p\Delta\nu$$

이를 대입하면 $\Delta q = c_v \Delta T + p \Delta \nu$ 이다.



열역학 제1법칙

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

$\Delta q = c_v \Delta T + p \Delta \nu$ 을
표현하자면

공기덩이의 압력이 $p \rightarrow p + \Delta p$, 비부피가 $\nu \rightarrow \nu + \Delta \nu$, 온도가 $T \rightarrow T + \Delta T$ 로 변화했다면
나중 상태의 상태방정식은

$$(p + \Delta p)(\nu + \Delta \nu) = R(T + \Delta T)$$

$$p\nu \left(1 + \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta \nu}{\nu} + \frac{\Delta p \Delta \nu}{p\nu} \right) = RT \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right)$$

$p\nu = RT$ 를 사용하고, $\frac{\Delta p}{p}$, $\frac{\Delta \nu}{\nu}$ 가 1보다 훨씬 작은
양으로 취급하여 $\frac{\Delta p \Delta \nu}{p\nu}$ 항을 무시하면

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta \nu}{\nu}$$

우변에 RT 를 곱하고, 좌변에 $p\nu$ 를 곱하면

$$\begin{aligned} R\Delta T &= \nu\Delta p + p\Delta\nu \\ p\Delta\nu &= R\Delta T - \nu\Delta p \\ \Delta q &= c_v \Delta T + p\Delta\nu \\ &= (c_v + R)\Delta T - \nu\Delta p \end{aligned}$$

$c_p = c_v + R$ 이므로

$$\Delta q = c_p \Delta T - \nu\Delta p$$



건조단열감률

열역학 제1법칙 $\Delta q = c_p \Delta T - \nu \Delta p$ 을 미분형으로 쓰면

$$dq = c_p dT - \nu dp$$

단열 변화에서는 $dq = 0$ 이고, 대기의 정역학적 평형 $dp = -\rho g dz$ 을 고려하면

$$0 = c_p dT - \nu dp$$

$$0 = c_p dT + gdz$$

식을 정리하면

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} = \Gamma_d$$

지구상의 물
물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

습윤단열감률

지구상의 물
물의 상태변화
속도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

포화 공기는 수증기 응결로 인해 잠열이 방출되므로 $dq \neq 0$ 이다.

포화혼합비를 W_s 라고 하고, 응결 숨은열을 L 이라고 하면 응결에 의해 단위 질량의 건조 공기가 흡수하는 열량은 $-Ldw_s$ 이다.

$$-Ldw_s = c_p dT + gdz$$

양변을 $c_p dz$ 로 나누고 항을 정리하면

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{L}{c_p} \frac{dw_s}{dz} - \frac{g}{c_p}$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{L}{c_p} \frac{dw_s}{dT} \frac{dT}{dz} - \frac{g}{c_p}$$

$$\frac{dT}{dz} + \frac{L}{c_p} \frac{dw_s}{dT} \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p}$$

$$\frac{dT}{dz} \left(1 + \frac{L}{c_p} \frac{dw_s}{dT} \right) = -\Gamma_d$$

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{\Gamma_d}{1 + \frac{L}{c_p} \frac{dw_s}{dT}} = \Gamma_s$$

$\frac{dw_s}{dT}$ 가 항상 양의 값을 가지므로 $\Gamma_s < \Gamma_d$ 임을 알 수 있다.

$\frac{dw_s}{dT}$ 의 값이 큰 온난 다습한 공기는 습윤단열감률이 작고, 대류권계면 부근에서는 습윤단열감률이 건조단열감률과 비슷하다.



지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

8 안정도와 날씨

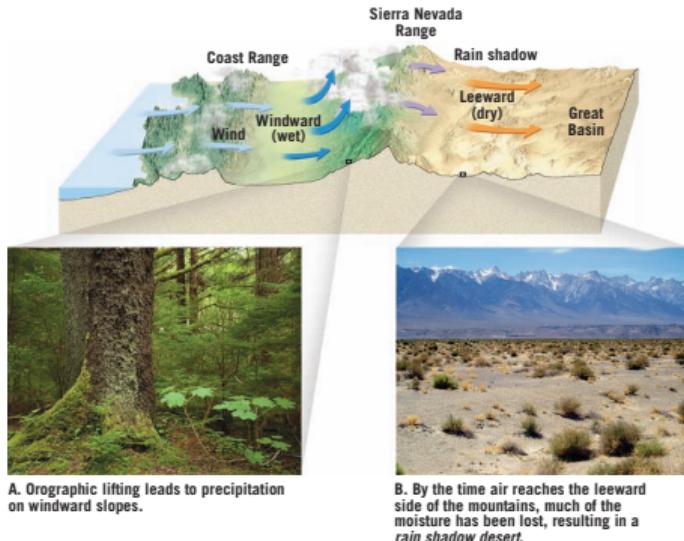
지형성 상승

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨



- 공기덩이가 산악 장애물에 의해 강제 상승
- 띤 현상(높새 바람)
- 풍상측 경사면은 강수 유발
- 풍하측은 비그늘 사막(rain shadow desert)

Q) 겨울철에 강릉 지역이 왜 건조한지 설명하라.

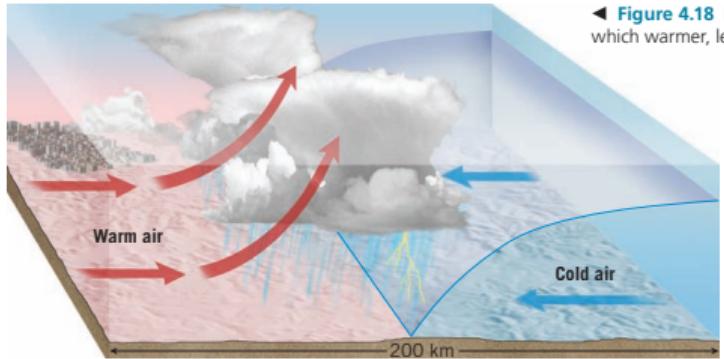
전선 치올림

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



◀ Figure 4.18 F
which warmer, less dense air is forced upward by a denser air mass moving across it.

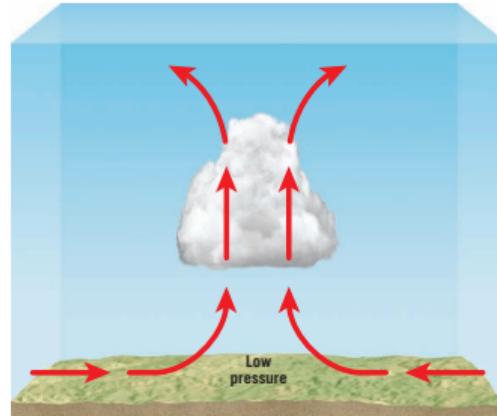
- 따뜻하고 밀도가 작은 공기덩이가 차고
밀도가 큰 공기덩이 위로 강제 상승

Q) 전선 치올림이 공기를 상승시키는 과정을 설명하시오.

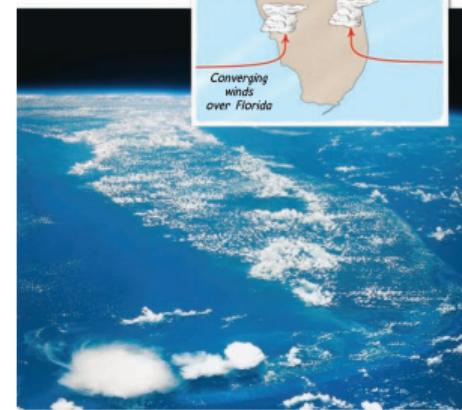
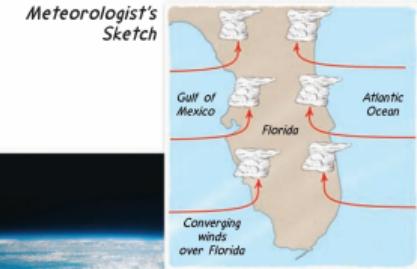
수렴

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨



▲ Figure 4.19 Convergence at the surface causes air to rise When the wind pattern near Earth's surface is such that more air is entering an area than is leaving—a phenomenon called convergence—lifting occurs.



- 수평적 공기 흐름에 의해 쌓인 공기가 상승
- Q) 수렴이 공기를 상승시키는 과정을 설명하시오.

국지적 대류 치올림

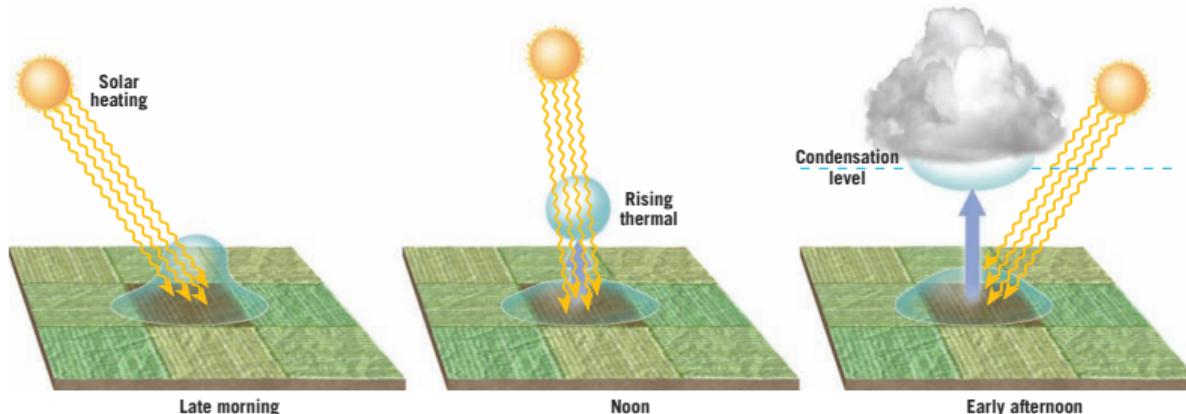
지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



▲ Figure 4.21 Localized convective lifting. Unequal heating of Earth's surface causes pockets of air to be warmed more than the surrounding air. These buoyant parcels of hot air rise, producing thermals, and if they reach the condensation level, clouds form.

Q) 국지적 대류성 치올림은 공기를 상승시키는 원인이 되는 다른 세 과정과 다르다. 어떻게 다른지 설명하시오.



지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

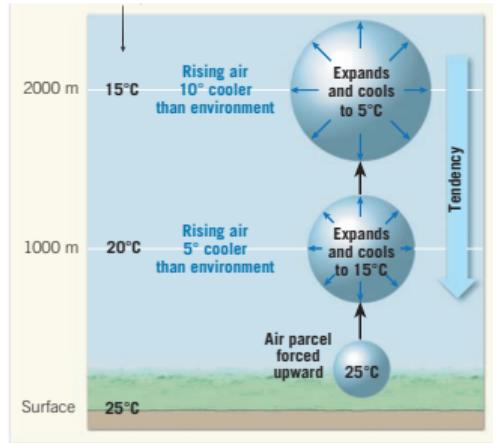
8 안정도와 날씨

대기안정도

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



▲ Figure 4.23 How the stability of the air is determined When an unsaturated parcel of air is lifted, it expands and cools at the dry adiabatic rate of 10°C per 1000 meters. In this example the temperature of the rising parcel of air is lower than that of the surrounding environment; therefore, it will be heavier and, if allowed to do so, will sink to its original position.

Animation  Atmospheric Stability

<http://goo.gl/bc>

Q) 대기안정도의 엄밀한 정의를 설명하시오.

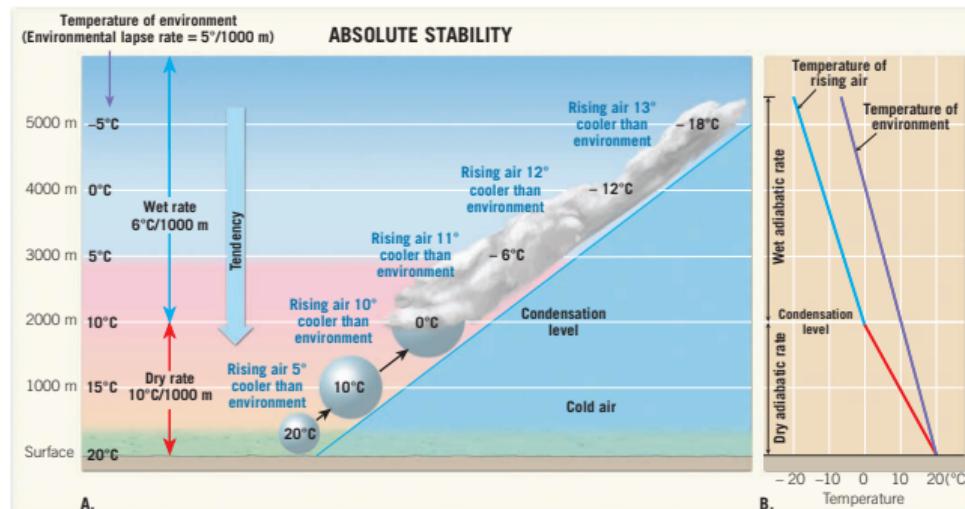
Q) 대기안정도를 결정하는 기준은 무엇인가?

Q) 환경기온감률(environmental lapse rate)과 단열감률의 차이점을 설명하라.

절대 안정

환경기온감률 < 습윤단열감률

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정



▲ SmartFigure 4.24 Atmospheric conditions that result in absolute stability. Absolute stability prevails when the environmental lapse rate is less than the wet adiabatic rate. **A.** The rising parcel of air is always cooler and heavier than the surrounding air, producing stability. **B.** Graphical representation of the conditions shown in part **A**.



https://goo.gl/MbkFfE

공기의 연직방향 이동
이 잘 일어나지 않으
므로 층운형(stratus)의
구름이 형성되고, 흐리
거나 약한 비가 내린다.

절대 불안정

환경기온감률 > 건조단열감률

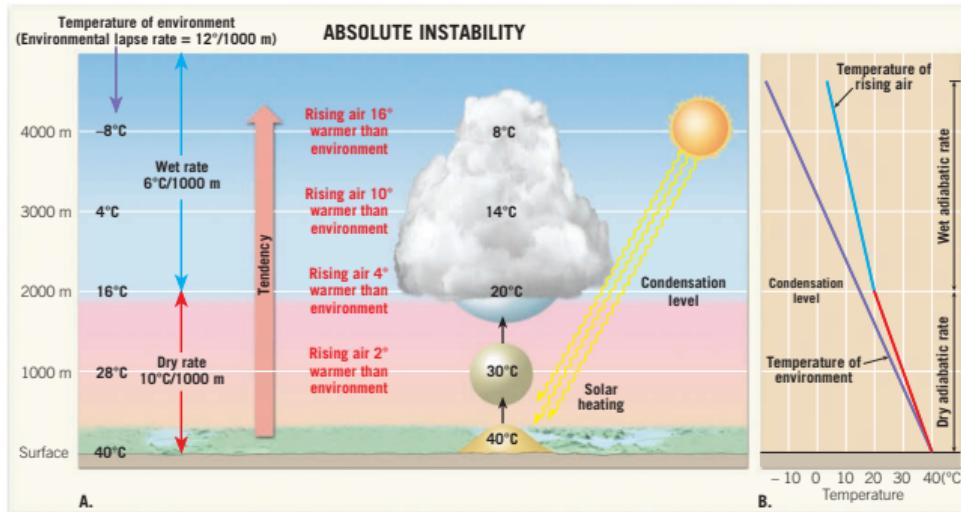


Figure 4.25 Atmospheric conditions that result in absolute instability Absolute instability can develop when solar heating causes the vermost layer of the atmosphere to be warmed to a much higher temperature than the air aloft. The result is a steep environmental lapse rate that renders the atmosphere unstable. **B.** Graphical representation of the conditions shown in part **A**.

공기의 연직방향 이동이 활발하게 일어나므로 적운형(cumulus)의 구름이 형성되고, 소나기가 내린다.

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

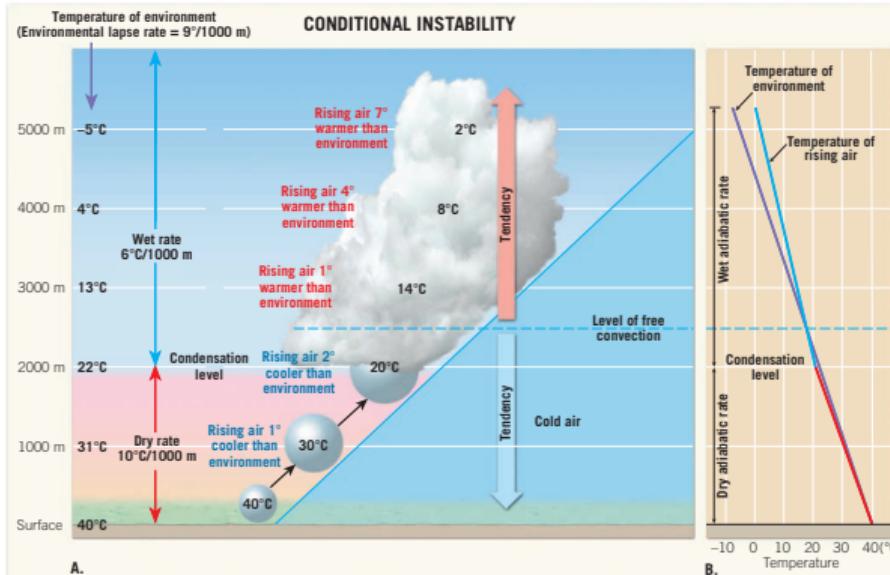
조건부 불안정

습윤단열감률 < 환경기온감률 < 건조단열감률

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨



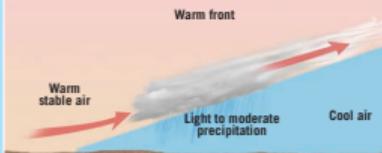
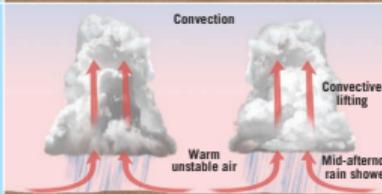
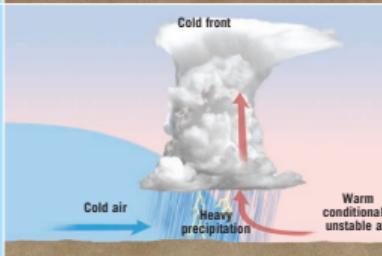
▲ Figure 4.26 Atmospheric conditions that result in conditional instability. Conditional instability may result when warm air is forced to rise along a frontal boundary. Note that the environmental lapse rate of 9°C per 1000 meters lies between the dry and wet adiabatic rates. **A.** The parcel of air is cooler than the surrounding air up to nearly 3000 meters, where its tendency is to sink toward the surface (stable). Above this level, however, the parcel is warmer than its environment and will rise because of its own buoyancy (unstable). Thus, when conditionally unstable air is forced to rise, the result can be towering cumulus clouds. **B.** Graphical

공기의 강제적 상승이 일어나면 층운형 구름이 만들어 지다가 주변의 기온보다 높아지면 스스로 상승하여 적운형 구름이 만들어진다.

대기 안정도

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

ATMOSPHERIC STABILITY			
TYPES	ATMOSPHERIC CONDITIONS	ASSOCIATED WEATHER	ILLUSTRATION
Absolute Stability	Environmental lapse rate is less than wet adiabatic rate	Surface air does not rise unless forcefully lifted. If air is forced aloft such as along a warm front, the clouds that form will be thin and widespread. Precipitation, if any, will be light to moderate.	 <p>Warm front Warm stable air Light to moderate precipitation Cool air</p>
Absolute Instability	Environmental lapse rate is greater than dry adiabatic rate	Occurs on warm, humid summer days when solar heating is intense, causing the lower atmosphere to become much hotter than air aloft. Buoyant lifting may produce midafternoon thunderstorms that usually dissipate after sunset.	 <p>Convection Convective lifting Warm unstable air Mid-afternoon rain showers</p>
conditional Instability	Moist air with an environmental lapse rate between the dry and wet adiabatic rates	A type of instability where the release of latent heat above the condensation level is sufficient to render the air unstable. Usually associated with frontal lifting of humid air to produce strong thunderstorms and occasionally tornadoes.	 <p>Cold front Cold air Heavy precipitation Warm conditionally unstable air</p>



안정도의 변화

Q) 조건부 불안정에서 '조건부'가 의미하는 바는 무엇인가?

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정
날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨

Q) 불안정도를 강화시킬 수 있는 네 가지 방법을 제시하라.

Q) 안정도를 강화시킬 수 있는 세 가지 방법을 제시하라.



지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기
수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

1 지구상의 물

2 물의 상태변화

3 습도: 공기 중의 수증기

4 상대습도와 노점온도

5 단열변화와 구름 형성

6 공기 덩이를 상승시키는 과정

7 날씨 조절 중요인자: 대기안정도

8 안정도와 날씨



대기 안정도

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

안정도와 날씨

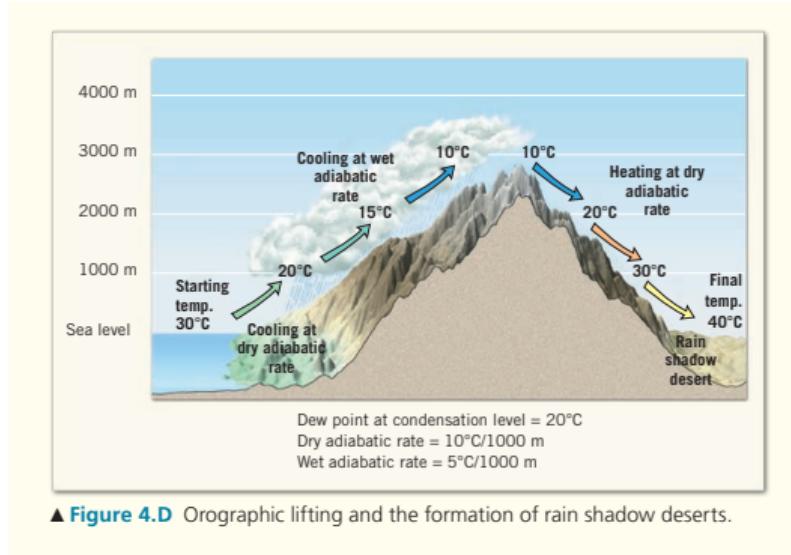


Q) 적운의 상층부를 보고 대기 안정도를 판단하시오.

지형 효과

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨



▲ Figure 4.D Orographic lifting and the formation of rain shadow deserts.

Q) 지형성 상승이 공기의 온도를 상승시키는 과정을 설명하시오.

지리적 위치

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정
날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨

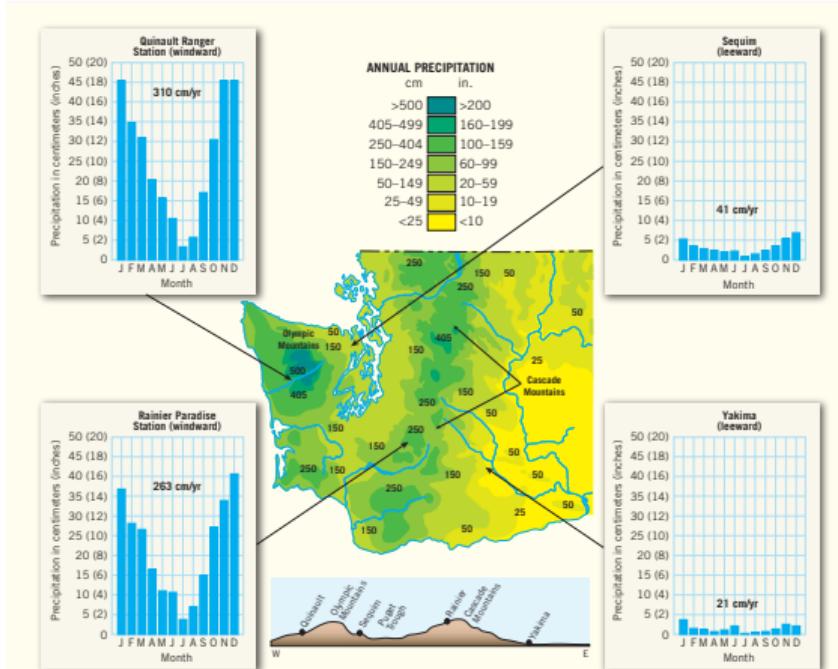


Figure 4.E Distribution of precipitation in western Washington State. Data from four stations provide examples of wetter windward locations and drier leeward rain shadows.

Q) 오른쪽 그림에서 바람은 주로 어느쪽으로 부는지 설명하시오.

Q) 겨울철에 강릉 지역이 왜 건조한지 설명하시오.

기온 역전과 안정도

지구상의 물

물의 상태변화

습도: 공기
중의 수증기

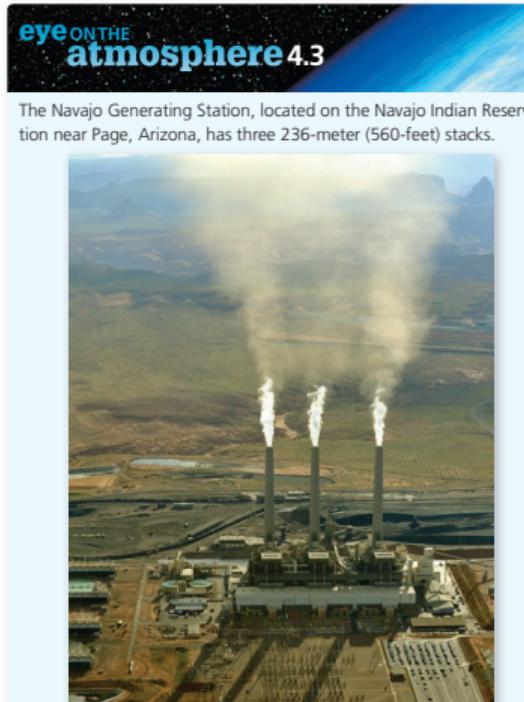
상대습도와
노점온도

단열변화와
구름 형성

공기 덩이를
상승시키는
과정

날씨 조절
중요인자:
대기안정도

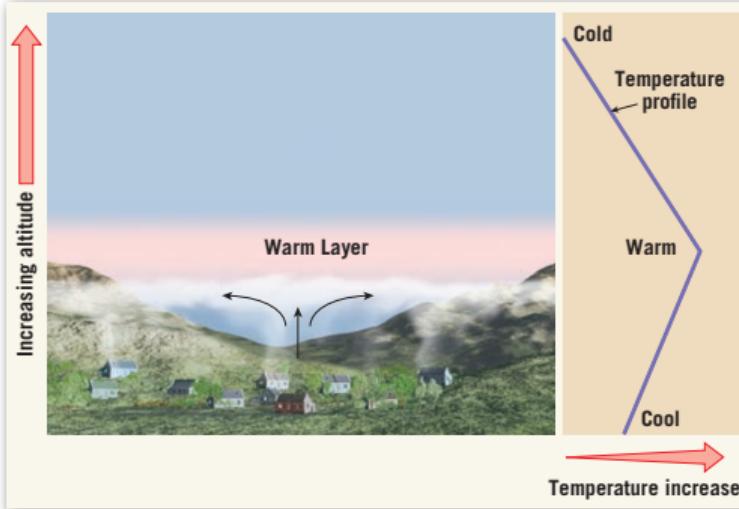
안정도와 날씨



Q) 사진과 같이 발전소의 굴뚝을 높게 설치하는 이유는 무엇인가?

접지 역전

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정
날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨



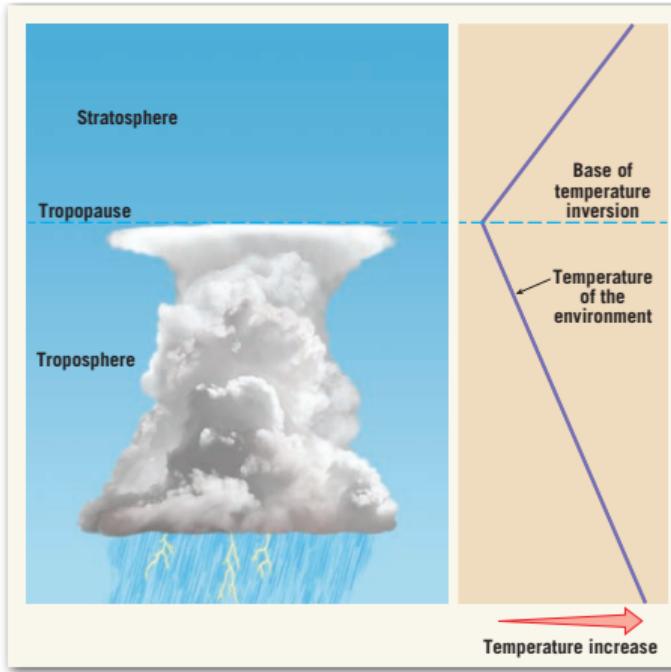
▲ Figure 4.29 Temperature inversions and atmospheric stability

The most stable conditions occur when the temperature in a layer of air increases with altitude, rather than decreases. This type of atmosphere condition is called a *temperature inversion*.

- 지표근처에서 발생하는 역전층
- 복사 역전: 야간동안 지표의 복사냉각으로 인해 지표면에 접한 공기가 상층보다 더 냉각되어 형성
- 이류역전: 따뜻한 공기가 찬 지표 혹은 수면, 설면을 지날 때 기층이 밑에서부터 냉각되어 형성

상층 역전

지구상의 물
물의 상태변화
습도: 공기
중의 수증기
상대습도와
노점온도
단열변화와
구름 형성
공기 덩이를
상승시키는
과정
날씨 조절
중요인자:
대기안정도
안정도와 날씨



▲ Figure 4.31 Temperature inversions aloft tend to inhibit cloud growth In this example, The stratosphere forms a warm inversion layer (caused by solar heating of ozone) and therefore serves as a lid to stop the growth of convective clouds.

- 대기 상층에서 발생하는 역전층
- 침강 역전: 고기압 구역에서 기층 전체가 서서히 침강하면서 단열변화에 의해 역전층 형성
- 전선 역전: 따뜻한 공기가 찬 공기 위를 타고 상승하는 전선면 부근의 전이층(기온 변화가 급격히 일어나는 층)에서 발생
- 해풍 역전: 해풍을 이루는 비교적 찬 공기와 육지의 따뜻한 공기 사이에서 전선면이 뚜렷하게 발생하는데, 이 전선면의 전이층에서도 기온 역전이 발생