

기압과 바람

제6장

대기과학 및 실험 (2021)

박 기 현

과학영재학교 경기과학고등학교

2021년 10월 1일





기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

1 기압과 바람

2 기압은 왜 변하는가

3 바람에 영향을 미치는 요소

4 상층과 지상의 바람

5 수평바람에 의한 연직운동의 발생

6 바람의 측정

7 추가 내용

기압

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

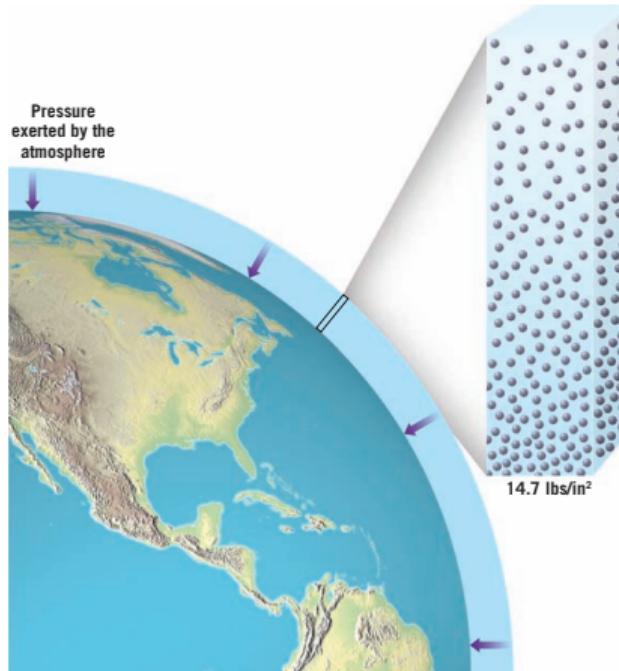
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



▲ Figure 6.1 Average air pressure at sea level is about 14.7 pounds per square inch

바람은 기압의 수평방향 차이에 의한 결과 기압은
공기의 무게에 의하여 받는 단위 면적당의 힘

과거에는 milibar 단위를 사용했으나 최근에는
hPa 단위를 사용 ($1 \text{ mb} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ N/m}^2$)

**Q) 해수면에서의 대기압을 hPa 단위로 계산하
시오.**

기압의 측정

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

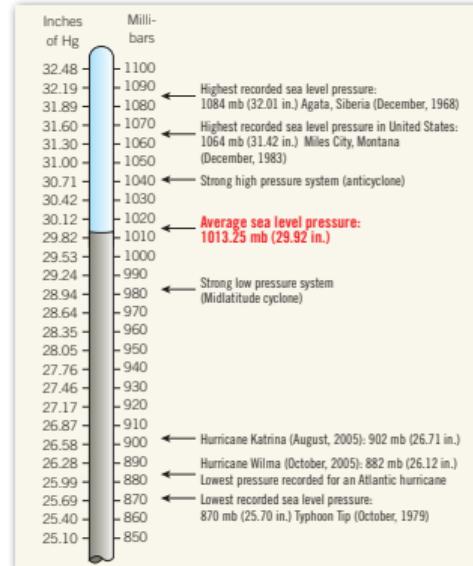
수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

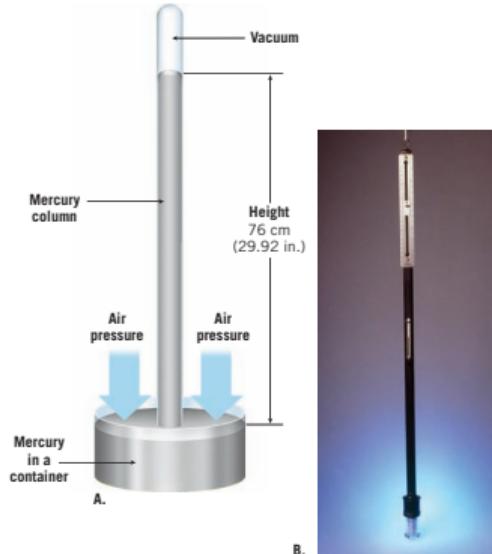
추가 내용



<http://goo.gl/DH6pb>



▲ SmartFigure 6.2 A comparison of atmospheric pressure in inches of mercury and in millibars



▲ Figure 6.3 Mercury barometer A. The weight of the column of mercury is balanced by the pressure exerted on the dish of mercury by the air above. If the pressure decreases, the column of mercury falls; if the pressure increases, the column rises. B. Image of a mercury barometer.

수은기압계: 토리첼리가 발명한 것으로 수은을 사용

기압의 측정

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

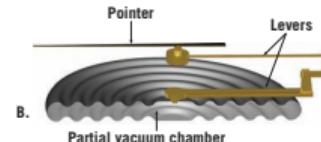
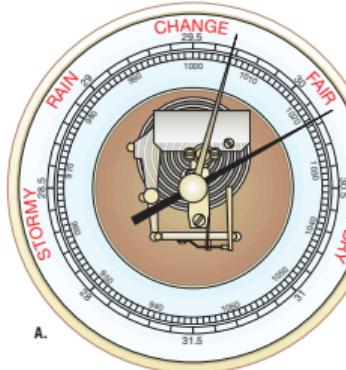
상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

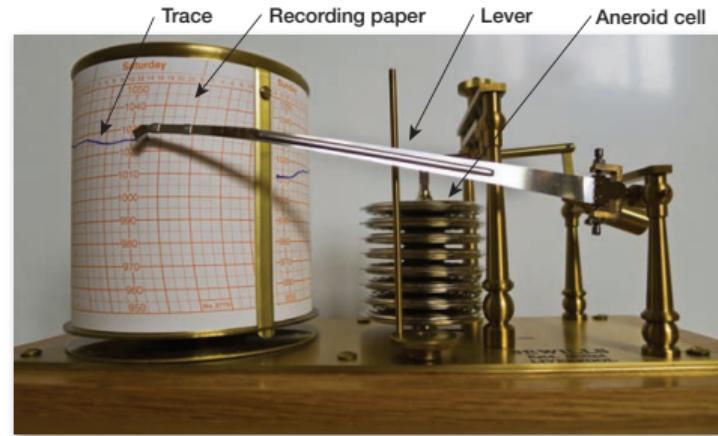
바람의 측정

추가 내용

아네로이드 기압계 : 진공의 금속관을 사용하
여 기압의 증감에 따라 수축하거나 팽창하면서
진공관의 형태가 바뀌게 됨.



▲ Figure 6.4 Aneroid barometer A. Illustration of an aneroid barometer. B. The aneroid barometer has a partially evacuated chamber that changes shape, compressing as atmospheric pressure increases and expanding as pressure decreases.



▲ Figure 6.5 Aneroid barograph This instrument makes a continuous record of air pressure changes.

아네로이드 기압 기록계: 연속적으로 기압 값을 기록함.

기압의 해면 경정

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

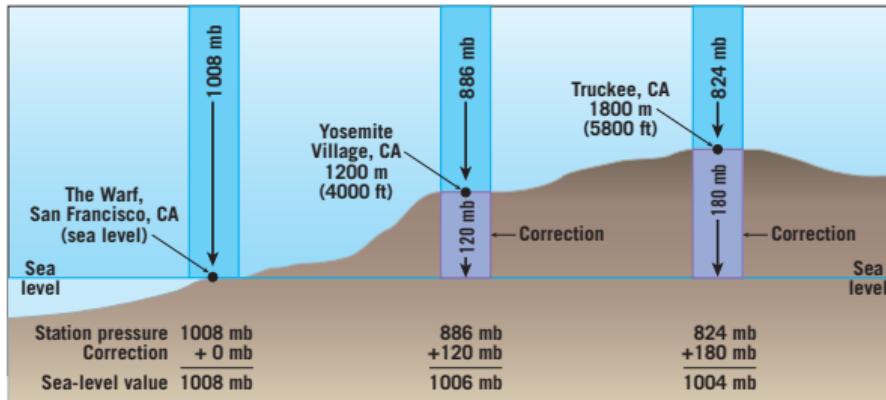
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



▲ **Figure 6.6 Correcting pressure readings to sea-level equivalence** This is done by adding the pressure that would be exerted by an imaginary column of air to the station's pressure reading. The higher the recording station's elevation, the greater the correction.

고도에 따른 기압의 변화를 보정하기 위해 해수면에서의 값으로 관측값을 환산해야 함.

일반적으로 해수면 근처에서는 10 m 상승시 1 hPa 감소.

지상 일기도

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

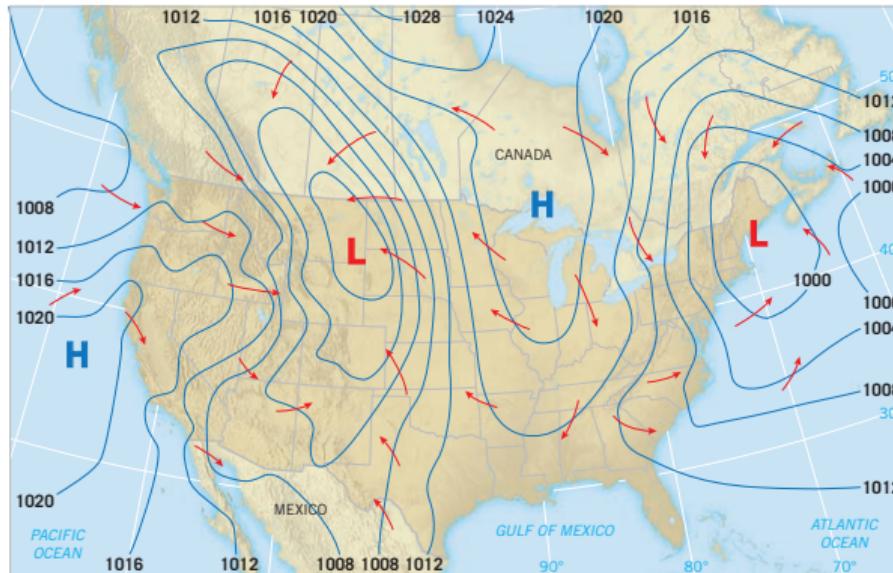
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



▲ Figure 6.7 Surface weather map This simplified surface weather map uses isobars to show high-pressure (anticyclones) and low-pressure (cyclones) systems. The idealized wind patterns associated with these pressure systems are shown with red arrows.

지상 일기도에는 해면 기압이 같은
지점을 연결한 등압선을 표시함.

붉은색 화살표는 바람을 나타냄.

Q) 고기압, 저기압의 수평적 크기는 얼마나 되는가?

상층 일기도

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

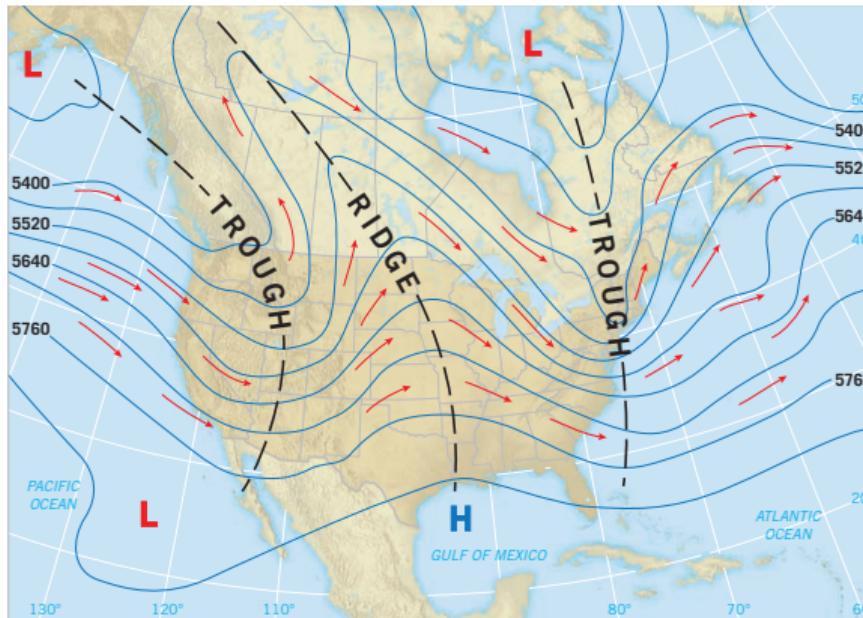
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



▲ Figure 6.8 Upper-air weather chart This upper-air weather chart shows the height contours at the 500-millibar level. Rather than show variations in pressure at fixed heights, upper-level charts are similar to topographic maps in that the contour pattern reveals the "hills" (ridges) and "valleys" (troughs) of a constant-pressure surface. Therefore, *higher-elevation* contours indicate *higher pressures*, and *lower-elevation* contours indicate *lower pressures*. The idealized wind patterns associated with these pressure systems are shown with red arrows.

상층 일기도는 등압면에 대한 등고선으로 나타냄

기압이 높은 곳은 기압마루(ridge),
기압이 낮은 곳은 기압골(trough)

붉은색 화살표는 바람을 나타냄.

Q) 기상청에서 제공하는 상층 일기도의 종류와 대략적인 고도는?



기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

1 기압과 바람

2 기압은 왜 변하는가

3 바람에 영향을 미치는 요소

4 상층과 지상의 바람

5 수평바람에 의한 연직운동의 발생

6 바람의 측정

7 추가 내용

고도에 따른 기압의 변화

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

고도가 높아질수록 위에서 누르는 공기의 무게가 줄어들기 때문에 기압이 감소한다.

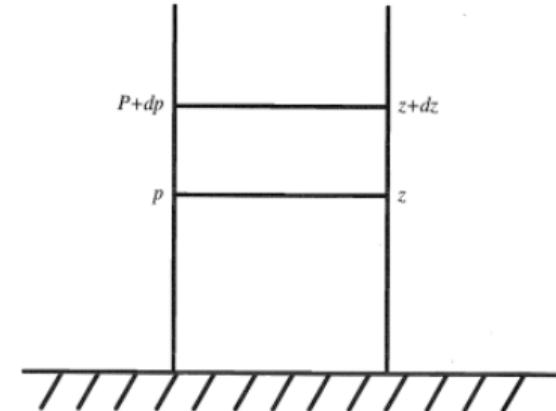
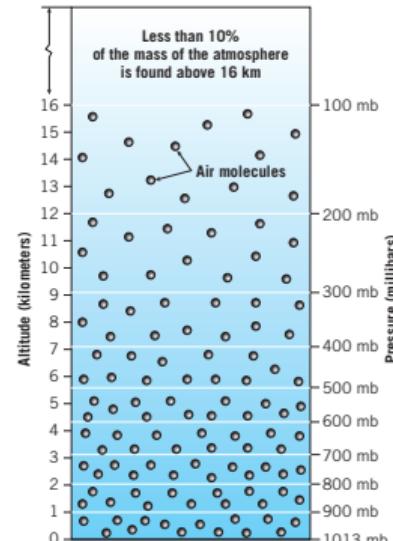


그림 2.2 고도에 따른 기압의 변화

기압의 감소율은 로그 스케일로 지상에 가까울수록 감소율이 크고, 상공에서는 작다.

$$-\nu \frac{dp}{dz} = g \quad \frac{dp}{dz} = -\rho g$$

기온에 따른 기압의 변화

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

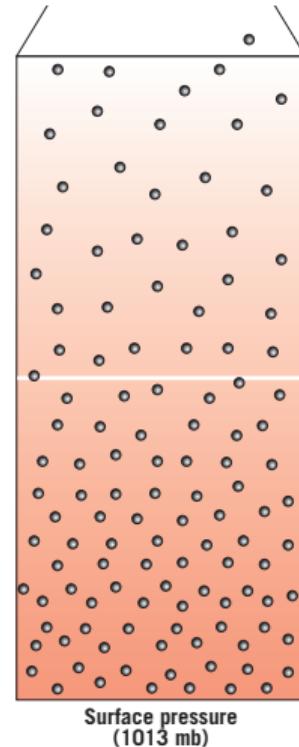
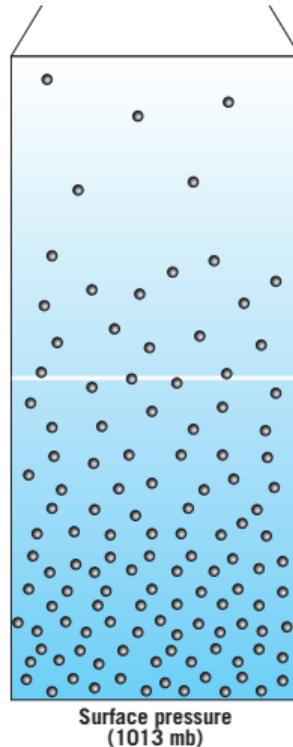
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



기온이 높을수록 분자운동이 더 활발하여 입자간 거리가 멀고 밀도가 작다.

밀도가 증가하면 지표면에 미치는 기압이 커지게 된다.

다른 조건이 모두 같다면, 차가운 공기는 지상의 고기압, 따뜻한 공기는 지상의 저기압이 된다.

찬 공기(밀도가 큰 공기)의 경우 따뜻한 공기(밀도가 작은 공기)에 비하여 고도에 따른 기압 감소가 크다.

높은 고도에서는 따뜻한 지역이 찬 지역 보다 더 높은 기압을 갖게 된다.



기압의 변화

Q) 기압이 변하는 요인 네 가지를 설명하시오.

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

기압의 변화

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

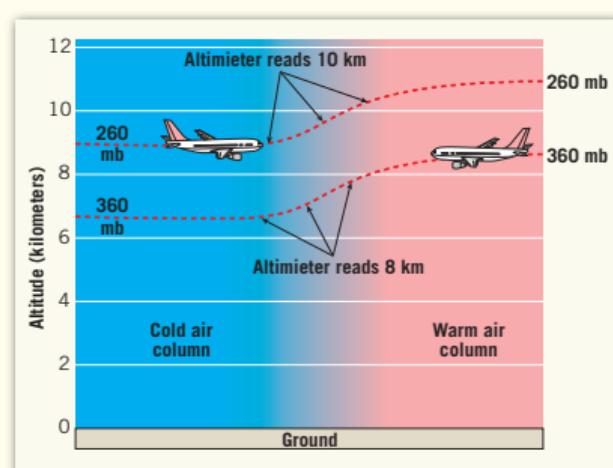
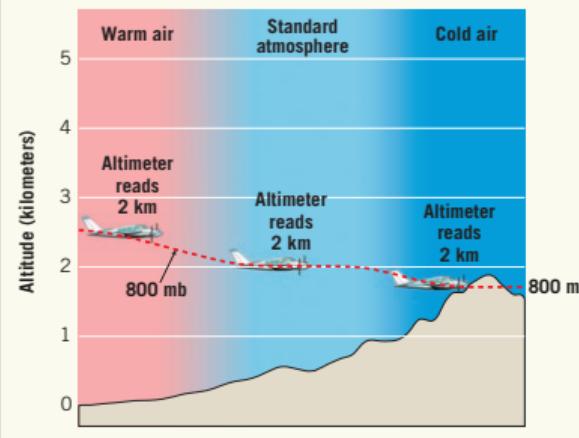
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



Q) 산악 지형을 비행하는 경우 위험한 결과를 초래할 수 있는 이유는?



기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

1 기압과 바람

2 기압은 왜 변하는가

3 바람에 영향을 미치는 요소

4 상층과 지상의 바람

5 수평바람에 의한 연직운동의 발생

6 바람의 측정

7 추가 내용

기압경도력(PGF, Pressure Gradient Force)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

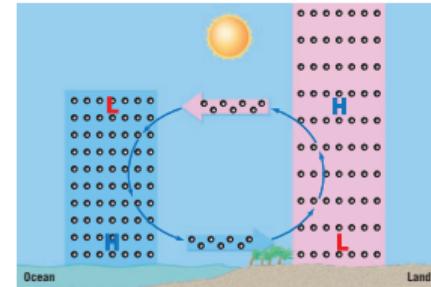
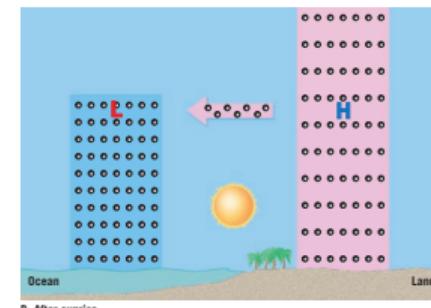
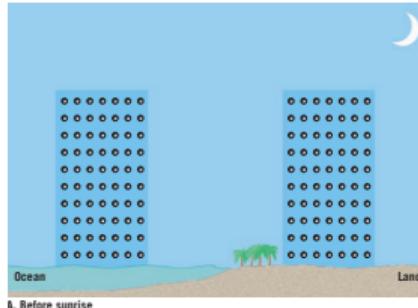
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



▲ Figure 6.12 Cross-sectional view illustrating the formation of a sea breeze A. Just before sunrise; B. after sunrise; C. sea breeze established.

Q) 온도 차이가 수평 기압 경도와 이에 따른 바람을 생성하는 과정을 '해풍'의 예로 설명하시오.

기압경도력(PGF)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

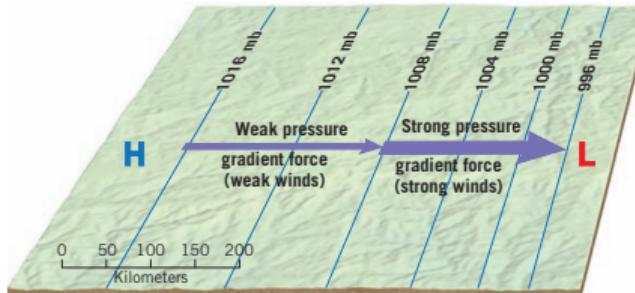
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

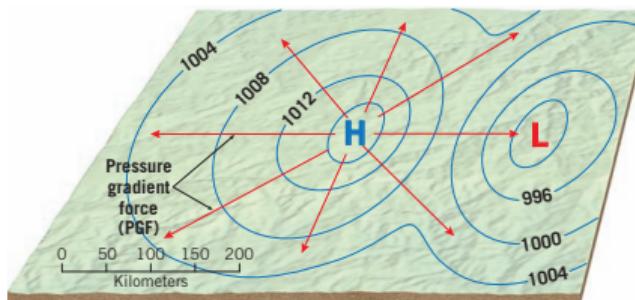
수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

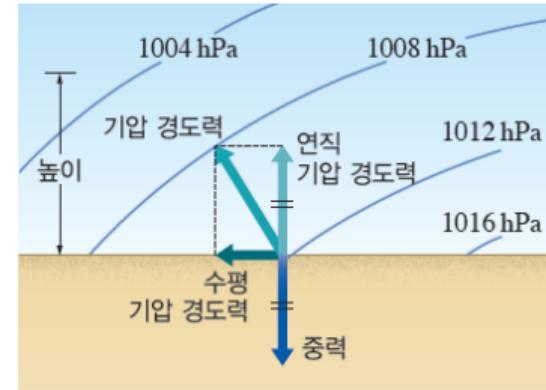
추가 내용



A. Pressure gradient force when the isobars are nearly straight.



B. The pressure gradient force when the isobars are curved or form nearly concentric circles.



등압선의 간격이 좁을수록, 기압경도력이 크고, 바람이 강하다.

기압경도력은 등압선에 직각 방향으로 기압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 작용함

연직 기압경도력은 중력과 상쇄되므로, 바람을 일으키는 근본적인 힘은 수평 기압 경도력임.

기압의 차이에 의해 작용하는 힘으로 주로 수평 방향의 바람을 일으키는 근원적인 힘이다.

기압경도력(PGF)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

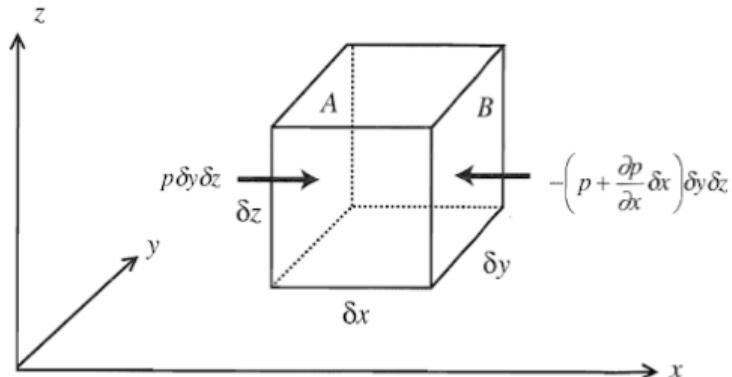


그림 6.1 미소한 부피에 미치는 기압 경도력의 x 성분

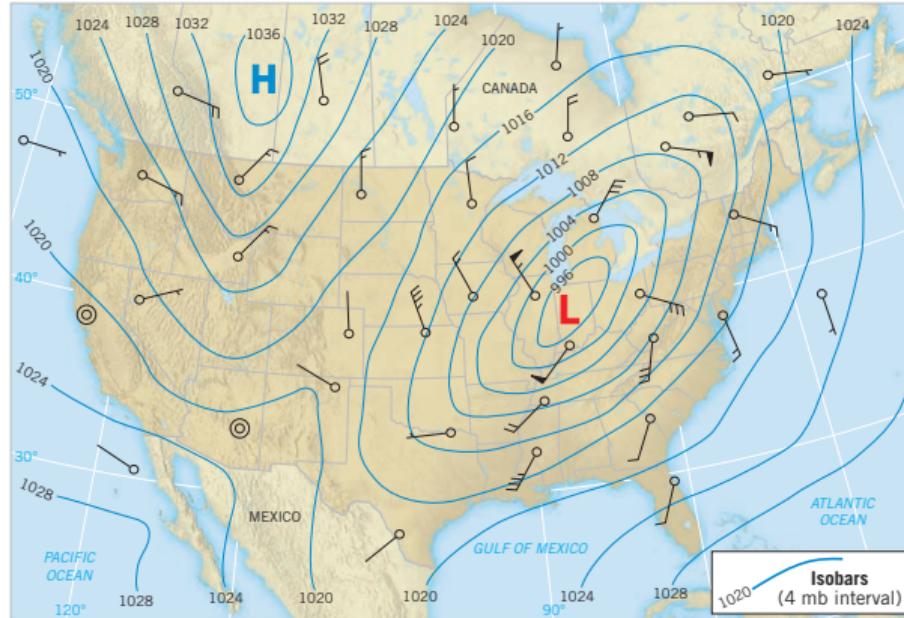
압력은 단위 면적에 수직으로 작용하는 힘으로 정의되므로 정육면체 공기덩이에 작용하는 힘은 기압과 힘을 받는 면의 넓이의 곱으로 표현할 수 있다.

단위 질량 당 기압경도력을 x, y, z 각 성분별로 단위 벡터 $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ 로 기압경도력을 표현하면

$$\frac{F_{PGF}}{m} = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$$

지상일기도에 표출된 등압선



Wind speed symbols	Miles per hour
◎	Calm
—	1-2
+	3-8
L	9-14
LL	15-20
LLL	21-25
LLLL	26-31
LLLLL	32-37
LLLLL	38-43
LLLLL	44-49
LLLLL	50-54
LLLLL	55-60
LLLLL	61-66
LLLLL	67-71
LLLLL	72-77
LLLLL	78-83
LLLLL	84-89
LLLLL	119-123

지상 일기도에서 등압선은 대개 완만한 곡선으로 나타남.

풍속의 단위로 노트(kn)를 많이 사용함. 1 kn는 1 시간에 1 해리(1852 m)를 달리는 속도 ($1 \text{ kn} = 0.51 \text{ m/s}$)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

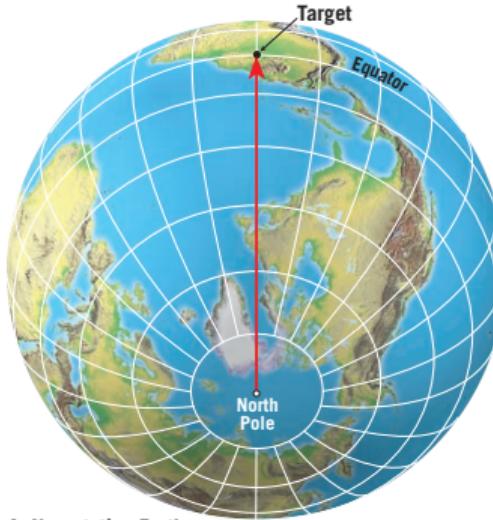
상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

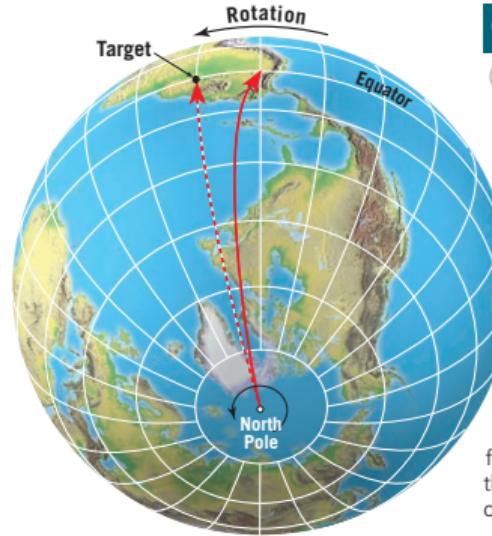
바람의 측정

추가 내용

전향력(Coriolis force)



A. Nonrotating Earth



B. Rotating Earth



http://

roc
N
€

v
pi
on
follow
that v
of the

코리올리 힘 자체는 바람을 발생시키지 못하고, 대신 바람의 방향을 변화시킨다.
지구의 자전 때문에 북반구에서는 진행방향의 오른쪽 90도 방향으로 작용한다.
지구상에 서있는 관측자가 로켓을 관찰하면 목표지점의 서편에 도착하는 것을 보게 된다.

전향력

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

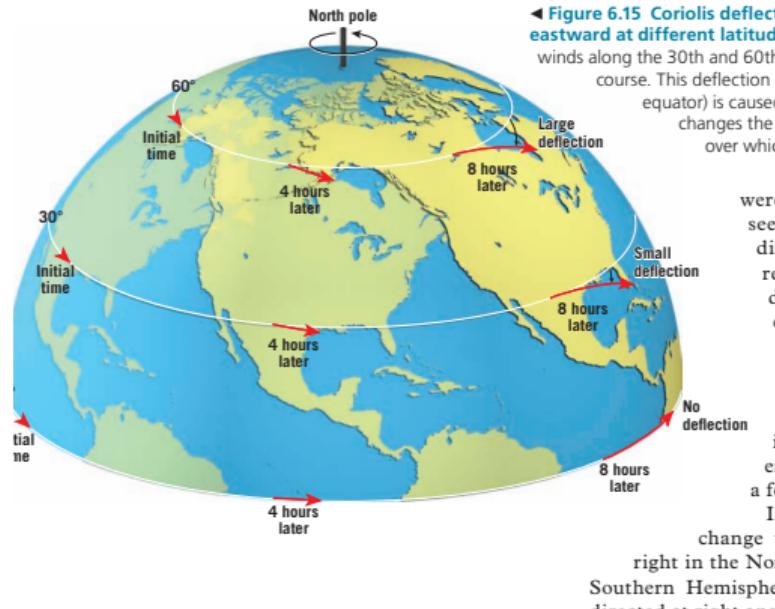
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



단위 질량당 작용하는 전향력은

$$\frac{F_{Cor}}{m} = 2v\Omega \sin \varphi = fv$$

여기에서 $f = 2\Omega \sin \varphi$ 는 코리올리 인자이다.

고위도일수록 전향력은 강하게 작용하며, 적도에서는 작용하지 않는다.

전향력

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

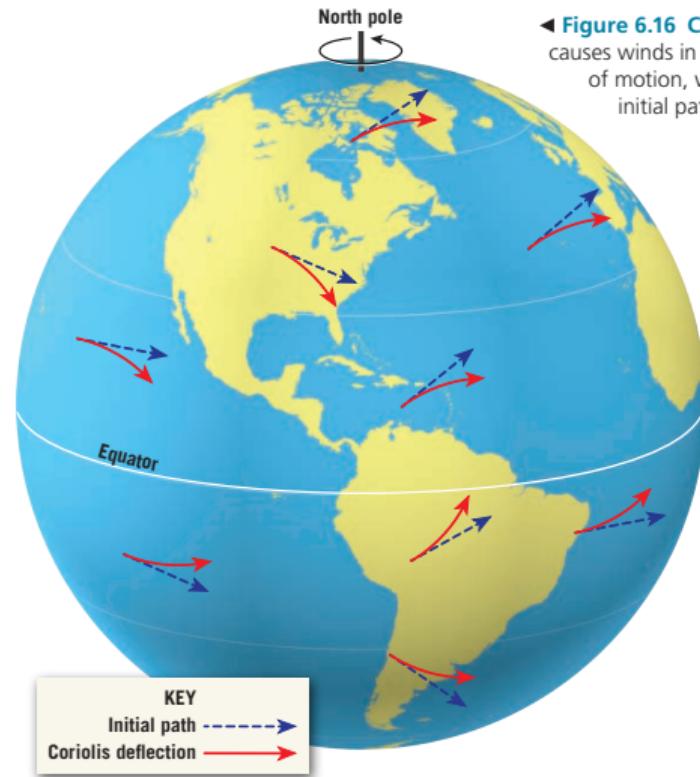
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



남반구에서는 전향력의 방향이 진행방향의 왼쪽 방향이 된다.

◀ **Figure 6.16 Corio**
causes winds in the l
of motion, wher
initial path.

마찰력

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

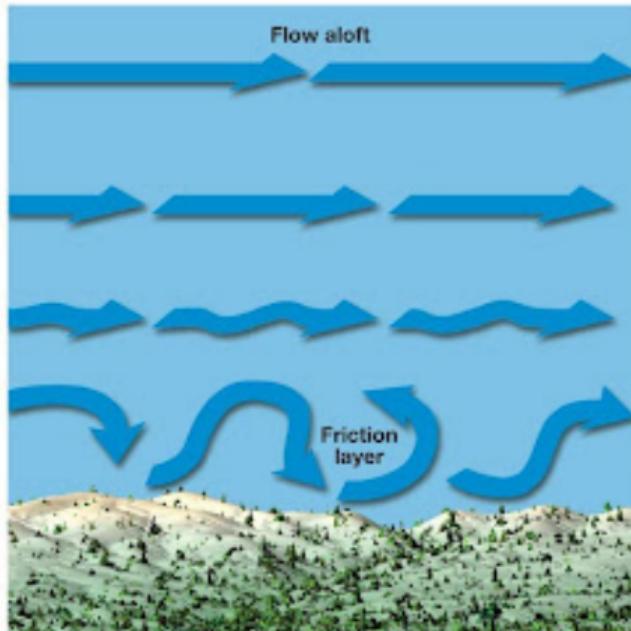
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



(a)

마찰력이 존재하기 때문에 바람이 무한히 강하게 발달하지 않는다.

지표 근처에서는 매우 중요하지만, 고도가 높아지면 무시 가능

경계층(약 고도 1.5km)에서만 중요



기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

1 기압과 바람

2 기압은 왜 변하는가

3 바람에 영향을 미치는 요소

4 상층과 지상의 바람

5 수평바람에 의한 연직운동의 발생

6 바람의 측정

7 추가 내용

상층 일기도

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

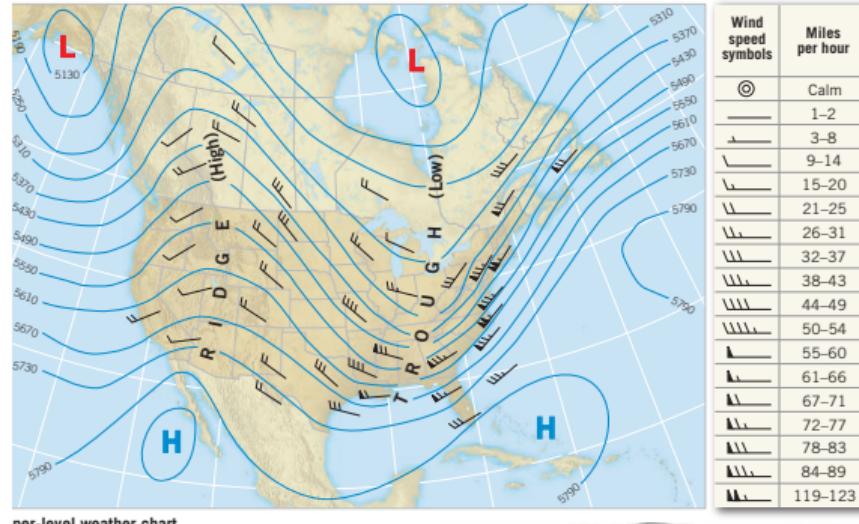
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



◀ Figure 6.17 Simplified upper-air weather chart This simplified weather chart shows the direction and speed of the upper-air winds. Note from the flags that the airflow is almost parallel to the contours. Like most other upper-air charts, this one shows variations in the height (in meters) at which a selected pressure (500 millibars) is found instead of showing variations in pressure at a fixed height, like surface maps. Places experiencing 500-millibar pressure at higher altitudes (toward the south on this map) are experiencing higher pressures than places where the height contours indicate lower altitudes. Thus, higher-elevation contours indicate higher pressures, and lower-elevation contours indicate lower pressures.



Highly a straight line and parallel to the isobars. This phenomenon, called geostrophic balance, is generated when a balance is reached between the Coriolis force (CF) and the pressure gradient force (PGF).

수 km 상층에서는 마찰력은 무시할 수 있다.

지균풍(Geostrophic wind)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

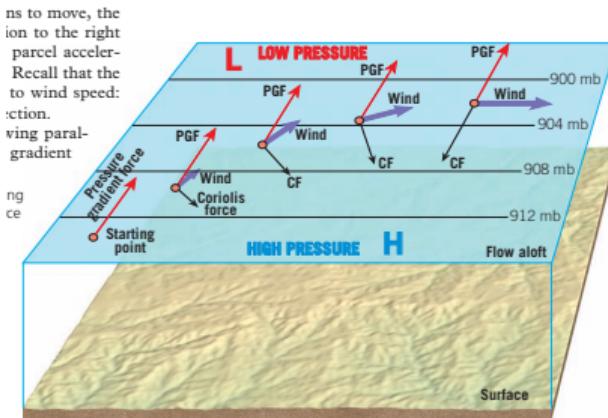
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



상층에서 등압선이 직선일 때 구심력(원심력)이 작용하지 않는 경우에 기압경도력과 전향력이 균형을 이루어 등압선에 나란하게 바람이 분다.

기압경도력에 의해 고기압 \Rightarrow 저기압 방향으로 공기가 움직이기 시작하면 북반구에서는 전향력의 작용으로 공기의 운동방향이 오른쪽으로 휘어짐

기압경도력이 계속 작용하므로 공기의 속도는 더욱 빨라지며, 이에 따라 전향력도 더욱 커져서 공기의 운동방향이 더욱 오른쪽으로 휘어짐

결국, 기압경도력과 전향력이 균형을 이루어 등압선과 나란한 바람(지균풍)이 불게 됨.

Buys Ballot's Law(보이스 발로트의 법칙) : 북반구에서 바람을 등지고 있는 경우 왼쪽에 저기압이, 오른쪽에 고기압이 있음

지균풍(Geostrophic wind)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

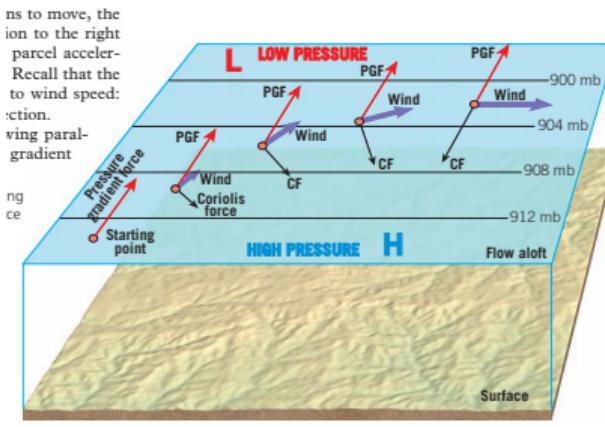
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



지균풍의 풍속 (V_g)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$fV_g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad V_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n}$$

$$f = 2\Omega \sin \varphi$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{23^h 56^m} = 7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

지균풍의 속력은 위도가 낮을수록, 등압선의 간격이 좁을수록 (기압경도력이 클수록) 빠름.

Q) 북반구 30°지역에서 4 hPa 차이로 그린 등압선 간격이 400 km이다. 공기의 밀도가 1 g m^{-3} 일 때, 지균풍의 풍속을 구하시오.

경도풍(Gradient wind)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

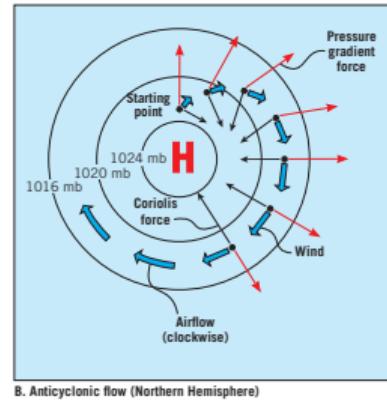
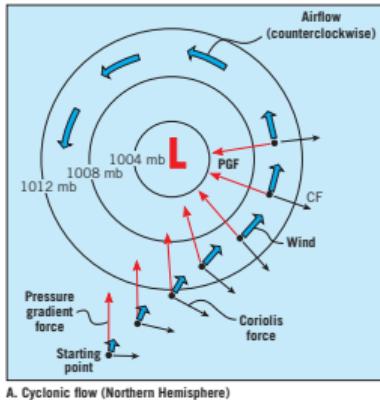
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



상층에서 곡선의 등압선을 따라 일정한 속력으로 부는 바람으로, 기압경도력과 전향력의 차이가 구심력으로 작용한다.

고기압성 경도풍의 경우

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - fv = \frac{v^2}{r}$$

$$fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - \frac{v^2}{r}$$

저기압성 경도풍의 경우

$$fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{v^2}{r}$$

$$fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{v^2}{r}$$

경도풍(Gradient wind)

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

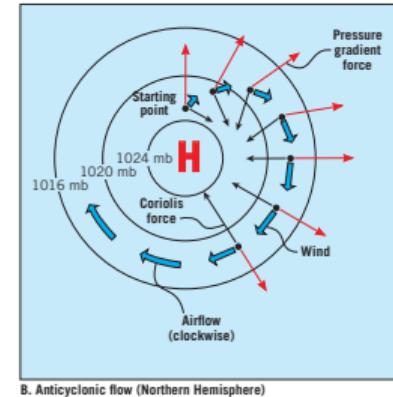
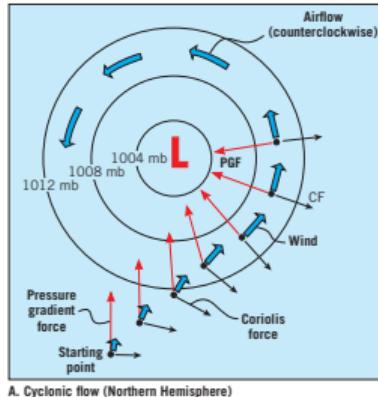
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



Q) 저기압성 경도풍과 고기압성 경도풍의 풍속 및 지균풍의 풍속을 비교하고, 차이가 발생하는 이유는 무엇인지 경도풍의 힘의 균형을 이용하여 설명해 보자.

지상풍

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

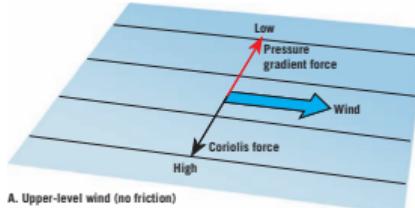
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

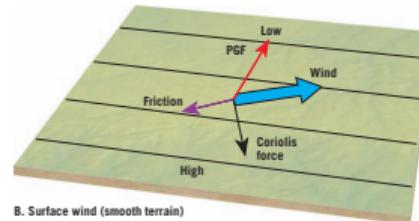
수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

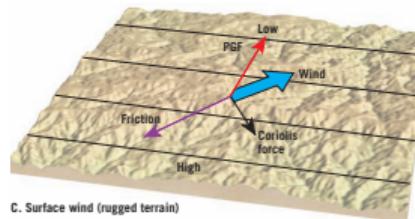
추가 내용



A. Upper-level wind (no friction)



B. Surface wind (smooth terrain)



C. Surface wind (rugged terrain)

to the left and reverses the direction of flow (Fig. 6.21B). Regardless of hemisphere, however, friction causes a net inflow (convergence) around a cyclone and a net outflow (divergence) around an anticyclone.

✓ Concept Checks 6.4

- Explain the formation of geostrophic wind and describe how geostrophic winds blow relative to isobars.

Video  Winds During iDrought

<http://goo.gl/Bz2C>

지표에서 높이 약 1 km까지는 마찰력이 작용하여 풍속이 느려지고 전향력도 줄어든다.

이에 따라 전향력이 기압 경도력과 평형을 이루지 못하기 때문에 바람은 등압선을 가로질러 고기압에서 저기압으로 불게 됨.

지표 부근에서 기압경도력, 전향력, 마찰력이 균형을 이루어 부는 바람을 지상풍이라고 함.

지상풍

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

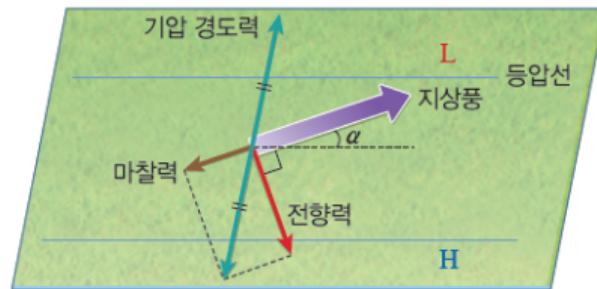
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

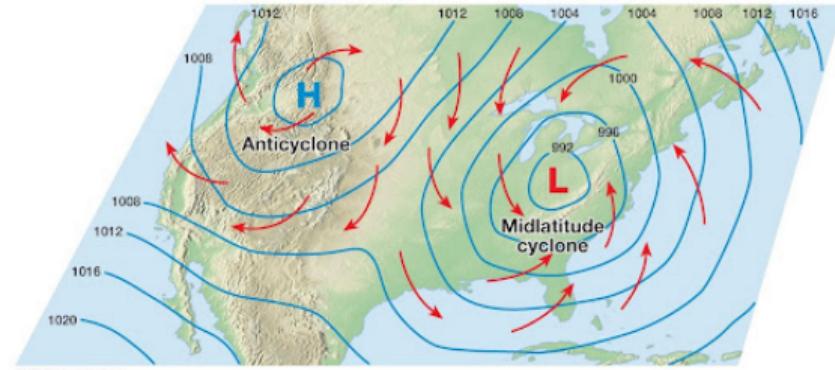


등압선과 이루는 각(경각)을 α 라고 하면

$$\text{기압경도력} + \text{마찰력} + \text{전향력} = 0$$

$$\text{전향력} = \text{기압경도력} \times \cos \alpha$$

$$\text{마찰력} = \text{기압경도력} \times \sin \alpha$$



마찰이 클수록 마찰을 극복하기 위해 α 가 크게 되어 등압선을 가로질러 바람이 불게 된다.

사이클로닉 순환

A. This satellite image shows a large low-pressure center in the Gulf of Alaska. The cloud pattern clearly shows an inward and counterclockwise spiral.



B. This satellite image shows a strong cyclonic storm in the Southern Hemisphere. The cloud pattern shows an inward and clockwise circulation.



Q) 대기의 운동에서 마찰력의 역할은 무엇인가?

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

1 기압과 바람

2 기압은 왜 변하는가

3 바람에 영향을 미치는 요소

4 상층과 지상의 바람

5 수평바람에 의한 연직운동의 발생

6 바람의 측정

7 추가 내용

사이클론과 안티사이클론에 관련된 연직운동

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

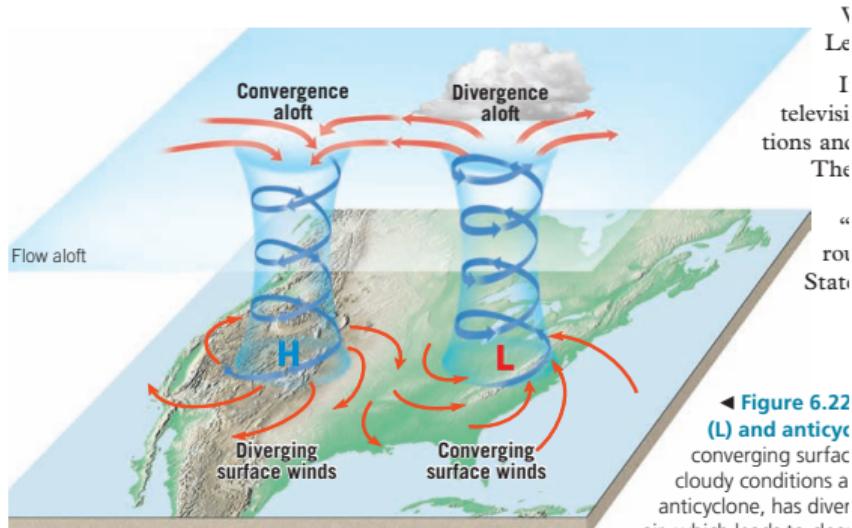
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



◀ Figure 6.22
(L) and anticyclones. Air converges at the surface in a cyclone, creating cloudy conditions as air rises. An anticyclone, has diverging air which leads to clear skies.

지상 저기압 중심 주변에 공기가 몰려들면 저기압 차지 수평 면적이 줄어들며, 상층 발산과 하층 수렴이 같은 비율로 일어나야 저기압이 유지될 수 있다.

상층의 발산이 하층의 수렴보다 크면 지상 저기압이 더욱 강해지고 상승류의 속력도 증가 한다.

기압과 날씨

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정
추가 내용



A.

저기압은 대체로 구름 낀 날씨 및 강수와 관련이 있으며, 고기압은 맑은 날씨를 예상할 수 있다.



B.



카르만 볼텍스

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



Questions

- Based on the orientation of the cloud streets, what direction is the

유체 역학에서 나타나는 것으로 둥그런 물체 둘레에 있는 유체가 불완전하게 분리되는 기류를 발생하는 소용돌이의 반복 패턴이다.

유체 역학자 테오도르 폰 칼만(Theodore von Kármán)의 이름을 따온 것이다.

이런 현상의 원인으로 전화기나 전선에서 윙윙 소리가 나고, 어떤 속도에서 자동차의 안테나가 진동한다.



마찰력

Q) 마찰력은 수직방향의 유동에 영향을 줄 수 있다. 육풍과 해풍은 연안 지역의 날씨에 어떤 영향을 미치는가?

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

1 기압과 바람

2 기압은 왜 변하는가

3 바람에 영향을 미치는 요소

4 상층과 지상의 바람

5 수평바람에 의한 연직운동의 발생

6 바람의 측정

7 추가 내용

풍속계

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

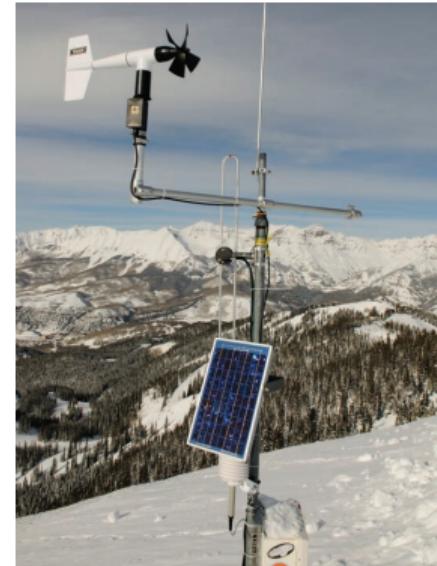
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



▲ Figure 6.24 Wind measurement A. Wind vane (right) and cup anemometer (left). The wind vane shows wind direction, and the anemometer measures wind speed. B. A wind sock is a device for determining wind direction and estimating wind speed. Wind socks are common sights at small airports and landing strips.

풍향계(wind vane)와 컵 풍속계(cup anemometer)를 이용해 측정
바람 풍선은 끝이 뚫려 있다.

프로펠러식 풍속계(Aerovane)은 풍향과 풍속을 함께 측정

바람 장미

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

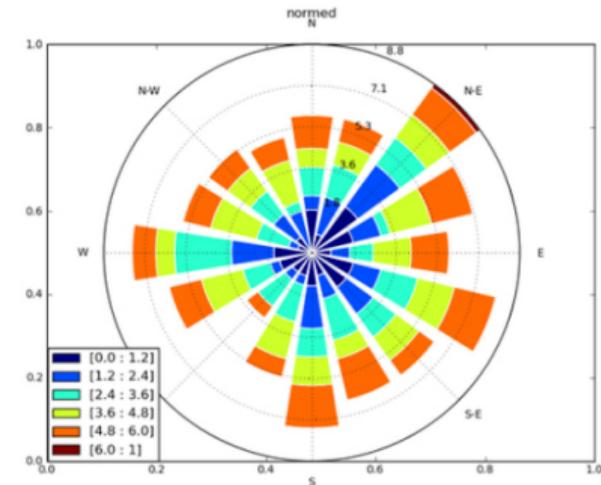
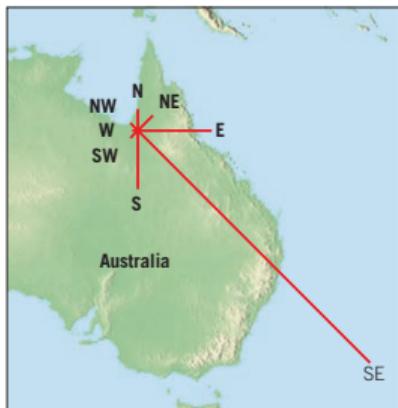
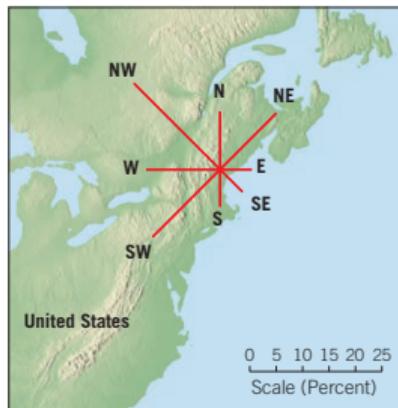
바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



특정 관측 지점에서 해당 기간동안 관측된 바람의 방향을 빈도와 함께 표기
최근에는 풍향별 풍속계급 빈도도 그래프로 함께 나타냄

풍력 발전

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



▲ Figure 6.C Modern wind farm These wind turbines are operating near Tehachapi Pass, Kern County, California. California was the first state to develop significant wind power, although it has now been surpassed by Texas.

풍력 발전은 잠재적 가치가 높은 대체 에너지

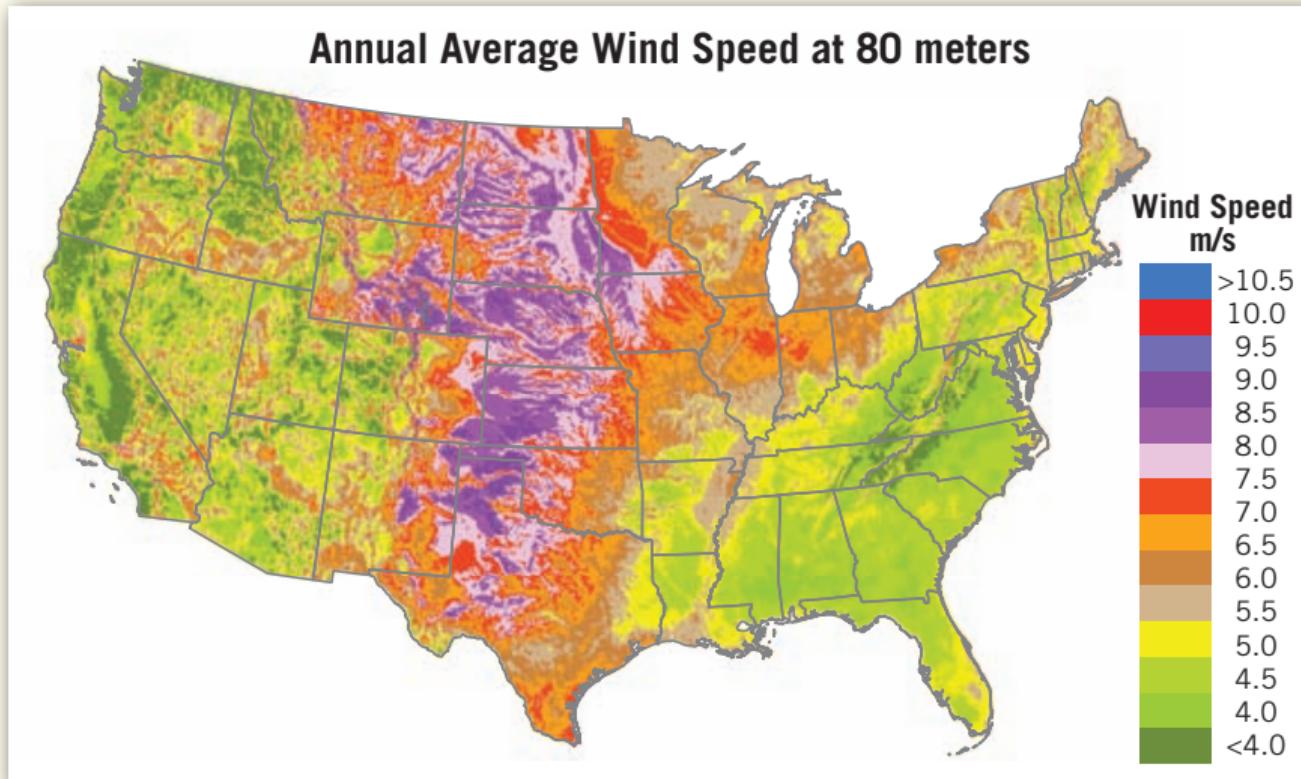


▲ Figure 6.D Global cumulative installed wind capacity, 2003–2013

Q) 풍력발전과 연관된 잠재적 환경问题是 무엇인가?

풍력 발전

기압과 바람
기압은 왜
변하는가
바람에 영향을
미치는 요소
상층과 지상의
바람
수평바람에
의한
연직운동의
발생
바람의 측정
추가 내용





기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

1 기압과 바람

2 기압은 왜 변하는가

3 바람에 영향을 미치는 요소

4 상층과 지상의 바람

5 수평바람에 의한 연직운동의 발생

6 바람의 측정

7 추가 내용

기압경도력(PGF)

기압과 바람
기압은 왜
변하는가
바람에 영향을
미치는 요소
상층과 지상의
바람
수평바람에
의한
연직운동의
발생
바람의 측정
추가 내용

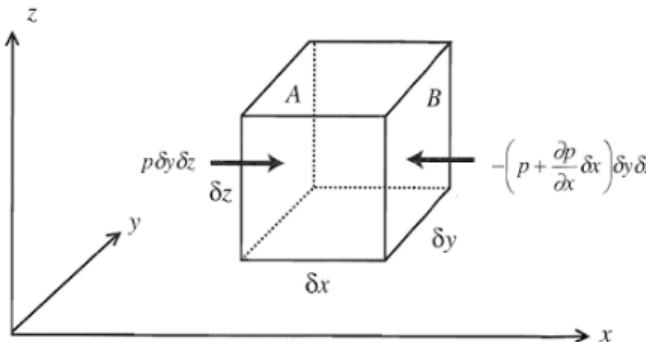


그림 6.1 미소한 부피에 미치는 기압 경도력의 x 성분

압력은 단위 면적에 수직으로 작용하는 힘으로 정의되므로 정육면체 공기덩이에 작용하는 힘은 기압과 힘을 받는 면의 넓이의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= p\delta y \delta z - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \right) \delta y \delta z \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \end{aligned}$$

$m = \rho \delta x \delta y \delta z$ 이므로 단위 질량당 받는 힘은 각각

$$\frac{F_x}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{F_y}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad \frac{F_z}{m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

x, y, z 각 성분별로 단위 벡터 $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ 로 기압경도력을 표현하면

기압경도력(PGF)

기압과 바람
기압은 왜
변하는가
바람에 영향을
미치는 요소
상층과 지상의
바람
수평바람에
의한
연직운동의
발생
바람의 측정
추가 내용

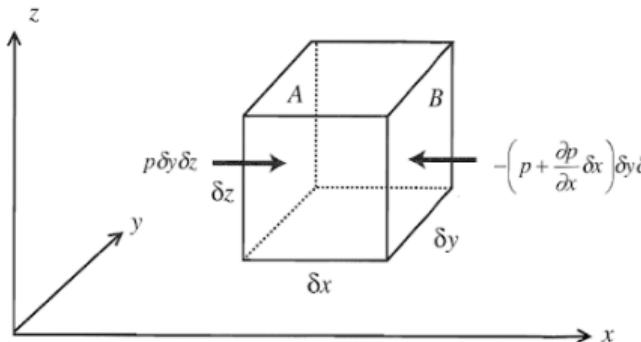


그림 6.1 미소한 부피에 미치는 기압 경도력의 x 성분

$$F_{PGF} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}$$

$$F_{PGF} = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \hat{k} \right) \delta x \delta y \delta z$$

단위 질량당 기압경도력은

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$$

$$\frac{F_{PGF}}{m} = - \frac{1}{\rho} \nabla p$$

운동방정식

대기의 운동에서 다루어지는 대부분의 현상에 사용되는 기본적인 운동방정식을 벡터로 표현한 것

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -2\Omega \times \vec{U} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + \vec{F}_r$$

단, $\vec{U} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ 로 3차원 속도 벡터이다.

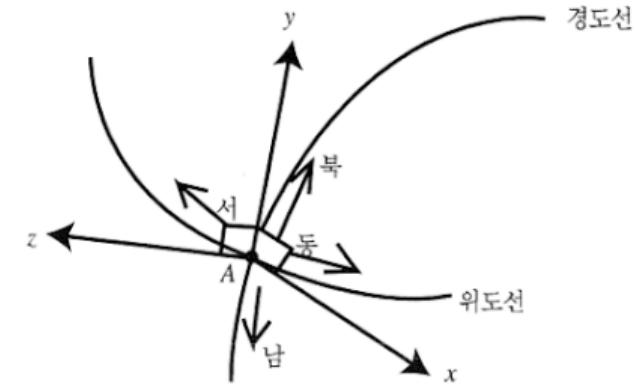


그림 6.6 원점 A에서 지구표면에 접하는 직교 좌표계의 모습

회전좌표계에서의 운동방정식을 카테시안 좌표계에서 각 성분별로 나타내 보자.

각각의 힘을 성분별로 나타내기 위해 지표 상의 원점 A에 접한 평면 내에서 x 축은 동쪽, y 축은 북쪽, z 축은 천정을 향하도록 정하자.

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

운동방정식

기압과 바람
 기압은 왜
 변하는가
 바람에 영향을
 미치는 요소
 상층과 지상의
 바람
 수평바람에
 의한
 연직운동의
 발생
 바람의 측정
 추가 내용

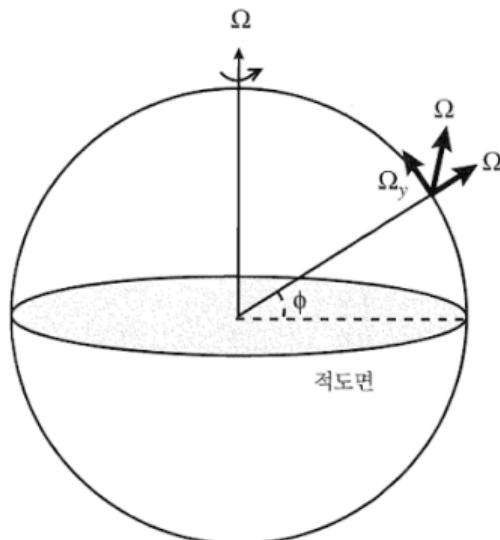


그림 6.7 지구 각속도 Ω 의 성분

1) 전향력 : $-2\Omega \times \vec{U}$

먼저 자전 각속도를 Ω 라고 할때 이를 각각 x, y, z 성분으로 나누면, $\Omega_x = 0, \Omega_y = \Omega \cos \varphi, \Omega_z = \Omega \sin \varphi$ 이다.

$$\vec{U} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \text{이므로}$$

$$\begin{aligned} -2\vec{\Omega} \times \vec{U} &= -2 \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & \Omega \cos \varphi & \Omega \sin \varphi \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= -2(\Omega w \cos \varphi - \Omega v \sin \varphi)\hat{i} - 2\Omega u \sin \varphi \hat{j} + 2\Omega u \cos \varphi \hat{k} \end{aligned}$$



운동방정식

1) 전향력 : $-2\Omega \times \vec{U}$

먼저 자전 각속도를 Ω 라고 할때 이를 각각 x, y, z 성분으로 나누면,

$\Omega_x = 0, \Omega_y = \Omega \cos \varphi, \Omega_z = \Omega \sin \varphi$ 이다.

$\vec{U} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ 이므로

$$-2\vec{\Omega} \times \vec{U} = -2 \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & \Omega \cos \varphi & \Omega \sin \varphi \\ u & v & w \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} &= -2(\Omega w \cos \varphi - \Omega v \sin \varphi)\hat{i} \\ &\quad - 2\Omega u \sin \varphi \hat{j} + 2\Omega u \cos \varphi \hat{k} \end{aligned}$$

2) 기압경도력

$$-\frac{1}{\rho} \nabla p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \hat{i} + -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \hat{j} + -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \hat{k}$$

3) 중력

$$\vec{g} = -g\hat{k}$$

4) 마찰력

$$\vec{F}_r = \hat{i}F_x + \hat{j}F_y + \hat{k}F_z$$

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



운동방정식

1) ~ 4)의 경우를 대입하여 카테시안 좌표계의 각 성분으로 나누어 표현하면

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - 2(\Omega w \cos \varphi - \Omega v \sin \varphi) + F_x$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \varphi + F_y$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + 2\Omega u \cos \varphi + F_z$$

코리올리 인자 $f = 2\Omega \sin \varphi$ 로 나타내고, 값이 작은 항을 무시하면

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega v \sin \varphi = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \varphi = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

자연좌표계

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용

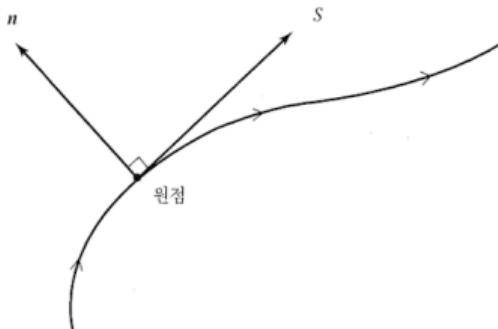


그림 6.8 자연 좌표계

대기운동은 매우 복잡하지만, 기압과 속도 분포는 다소 간단한 근사적인 힘의 균형에 의해 서로 연결되어 있다.

수평적인 힘의 균형을 이해하기 위해 상황을 이상화 시켜 보자.

- 마찰이 없음
- 시간에 관계없이 일정한 공기 흐름 유지(시간에 독립적임)
- 속도에 연직 성분 없음(수평 운동만 있다고 가정)

자연좌표계는 x 축(공기가 흐르는 방향)을 s 축, y 축(흐르는 방향의 왼쪽으로 수직한 방향)을 n 축, 연직 방향을 z 축으로 정의하고, 자연좌표계 상에서 좌표(s, n, z)의 방향을 각각 단위 벡터 $\hat{t}, \hat{n}, \hat{k}$ 로 정의하면, 이런 체계에서 수평속도는 비음수 스칼라이며

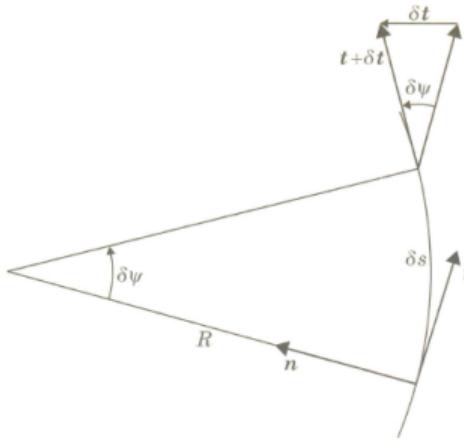
$$\vec{V} = V\hat{t}$$

따라서 운동을 따르면서 측정한 가속도는

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{D(V\hat{t})}{Dt} = \hat{t}\frac{DV}{Dt} + V\frac{D\hat{t}}{Dt}$$

자연좌표계

기압과 바람
기압은 왜
변하는가
바람에 영향을
미치는 요소
상층과 지상의
바람
수평바람에
의한
연직운동의
발생
바람의 측정
추가 내용



$$\delta\psi = \frac{\delta s}{|R|} = \frac{|\delta\hat{t}|}{|\hat{t}|} = |\delta\hat{t}|$$

$\delta s \rightarrow 0$ 이 되도록 극한을 취하면 $\delta\hat{t}$ 는 \hat{n} 과 평행한 방향이므로

$$\frac{D\hat{t}}{Ds} = \frac{\hat{n}}{R} \quad \frac{D\hat{t}}{Dt} = \frac{D\hat{t}}{Ds} \frac{Ds}{Dt} = \frac{\hat{n}}{R} V$$

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \hat{t} \frac{DV}{Dt} + V \frac{D\hat{t}}{Dt} = \hat{t} \frac{DV}{Dt} + \hat{n} \frac{V^2}{R}$$

전향력은 운동방향에 대해 연직으로 작용하므로 $-f\hat{k} \times \vec{V} = -fV\hat{n}$
기압경도력을 두 방향으로 분해하면, $-\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \hat{t} + \frac{\partial p}{\partial n} \hat{n} \right)$ 이므로,

$$\frac{DV}{Dt} \hat{t} + \frac{V^2}{R} \hat{n} = -fV\hat{n} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \hat{t} + \frac{\partial p}{\partial n} \hat{n} \right)$$

각 성분별로 나타내면

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s}, \quad \frac{V^2}{R} + fV = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}$$

경도풍의 풍속

경도풍은 지압경도력과 전향력의 차이가 구심력으로 작용하여 부는 바람으로 자연 좌표계를 이용하여 표현하면,

$$\frac{V^2}{R} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - fV$$

V 에 관한 2차 방정식으로 정리하여 근의 공식으로 근을 구하면,

$$V^2 + fRV + \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

$$V = -\frac{fR}{2} \pm \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}}$$

자연좌표계에서 V 는 음수가 나올수 없으며, 루트 안에는 항상 양수이어야 실근을 가지므로

근을 분류하여 먼저

$$V = -\frac{fR}{2} + \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}}$$

$$(1) R > 0, -\frac{\partial p}{\partial n} > 0$$

$$\sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} > \frac{f|R|}{2}$$

V 는 항상 0 보다 크므로 정상 저기압

$$(2) R > 0, -\frac{\partial p}{\partial n} < 0$$

$$0 < \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} < \frac{f|R|}{2}$$

V 는 항상 0 보다 작으므로 물리적으로 의미 없다.

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



경도풍의 풍속

$$(3) R < 0, -\frac{\partial p}{\partial n} > 0$$

$$0 < \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} < \frac{f|R|}{2}$$

V 는 항상 $\frac{f|R|}{2}$ 보다 크므로 이상한 고기압

$$(4) R < 0, -\frac{\partial p}{\partial n} < 0$$

$$\sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} > \frac{f|R|}{2}$$

V 는 항상 $\frac{f|R|}{2}$ 보다 크므로 이상한 저기압

이제 아래의 근에 대하여 살펴보자.

$$V = -\frac{fR}{2} - \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}}$$

$$(5) R > 0, -\frac{\partial p}{\partial n} > 0$$

$$\sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} > \frac{f|R|}{2}$$

V 는 $-f|R|$ 보다 작으므로 물리적으로 의미 없다.

$$(6) R > 0, -\frac{\partial p}{\partial n} < 0$$

$$0 < \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} < \frac{f|R|}{2}$$

V 는 $-\frac{f|R|}{2}$ 보다 작으므로 물리적으로 의미 없다.

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용



경도풍의 풍속

(7) $R < 0, -\frac{\partial p}{\partial n} > 0$

$$0 < \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} < \frac{f|R|}{2}$$

V 는 항상 0 보다 크고 $\frac{f|R|}{2}$ 보다 작으므로 정상
고기압

(8) $R < 0, -\frac{\partial p}{\partial n} < 0$

$$\sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} > \frac{f|R|}{2}$$

V 는 항상 0보다 작으므로 물리적으로 의미 없다.

기압과 바람

기압은 왜
변하는가

바람에 영향을
미치는 요소

상층과 지상의
바람

수평바람에
의한
연직운동의
발생

바람의 측정

추가 내용