



6

기압과 바람

미네소타의 4월에 내린 눈보라

(사진 : Jim Brandenburg/Minden Pictures)

기상과 기후의 다양한 요소 중에서 기압의 변화는 다른 요소와는 달리 몸으로 쉽게 느껴지지 않는다. 일기에 보를 들을 때에 습도, 강수(또는 강설), 온도, 바람 등의 요소에 큰 관심을 가지는 사람은 많지만, 아마 기압에 관심을 가지는 사람은 매우 드물 것이다. 시시각각 변하는 기압은 우리 인간에게는 쉽게 느껴지지 않지만, 날씨를 변화시키는 중요한 하나의 요인이다. 예를 들면, 기압이 장소에 따라 변하면 바람이 발생하게 되고, 이러한 바람은 온도와 습도를 변화시킨다(그림 6-1). 기압은 일기예보에 있어서 매우 중요한 기본적 요소 중의 하나이다. 뒤에서 알게 되겠지만 기압은 다른 기상 요소와 밀접히 관계되어 있으며, 서로 인과관계를 형성한다.

기압의 이해

제1장에서 기압은 단지 공기 무게에 의해 가해진 압력이라는 것을 배웠다. 평균 해면기압은 약 1cm^2 당 1kg , 또는 1in^2 당 14.7lb 에 해당한다. 이것은 높이 약 10m 의 물기둥에 의해 만들어지는 압력과 같다. 이것을 기준으로 계산해 보면, 교실의 작은 책상(가로 100cm , 세로 50cm) 위에 가해지는 기압은 $5,000\text{kg}(11,000\text{lb})$ 이 넘는다는 것을 알 수 있는데, 이는 50인승 버스의 무게와 같다. 왜 이와 같은 큰 압력에도 책상은 부서지지 않는 것일까? 그 이유는 간단히 말해서, 기압은 아래로, 위로, 옆으로 모든 방향으로 작용하기 때문이다. 따라서 위에서 아래로 누르는 기압은 아래서 위로 누르는 기압과 정확하게 균형을 유지한다.

이러한 현상을 좀 더 알기 쉽게 이해하기 위하여, 수족관에서 볼 수 있는 높은 수조(앞에서 예로 든 책상과 같은 면

| 그림 6-1 | 2002년 2월의 강한 바람에 의해 발생한 파도가 영국의 블랙풀 연안을 침수시키는 모습(사진 : John Giles/NewsCom).



적)를 생각해 보자. 이 수조가 10m의 물로 채워져 있을 경우에, 수조 바닥에 가해지는 수압은 1기압이 된다. 만일 이 수조가 책상 위에 놓이게 되어 모든 수압이 아래쪽으로 작용하도록 한다면 어떻게 될까? 이것과 책상을 수조 안에 집어넣어 가라앉힐 경우와 비교해 보자. 후자의 경우에, 수압은 모든 방향으로 작용하기 때문에 책상은 전혀 부서지지 않고 그 형태를 그대로 유지할 것이다. 책상은 우리의 몸처럼 1기압에 견딜 수 있도록 제작되어 있다. 비록 우리가 비행기나 엘리베이터를 타고 상하로 운동하는 경우를 제외하고서는 우리 몸에 가해지는 기압을 느끼지 못한다 하더라도, 기압은 항상 작용하고 있는 것이다. 우주 유영을 하는 우주비행사가 입고 있는 내압성 우주복은 우주비행사가 항상 지상기압(약 1기압)을 느낄 수 있도록 특수하게 제작되어 있다. 이러한 몸을 보호하는 우주복이 없으면, 우주비행사는 몸이 산산이 분해되면서 순식간에 사망할 것이다.

기압의 개념은 기체의 운동을 조사해 보면 더욱 쉽게 이해할 수 있다. 액체나 고체의 분자와는 달리 기체 분자는 서로 강하게 묶여져 있지 않고 자유롭게 운동할 수 있으며, 빈 공간이 있을 경우에는 그쪽으로 이동해 간다. 보통의 대기 조건에서 항상 관찰되는 것처럼, 기체 분자가 충돌할 때에는 탄성 있는 공처럼 서로 튕겨져 나오게 된다. 만일 기체가 어떤 용기 안에 갇혀 있으면, 기체의 운동은 벽에 의해 제한을 받게 된다. 기체 분자가 벽에 충돌할 때 기체 분자에 의해 바깥으로 향하는 압력을 가하게 되는데, 이를 우리는 기압이라고 부른다. 비록 대기에 벽은 없지만, 공기의 운동은 아래쪽으로는 지표면과 위쪽으로는 대기 상단 사이에 국한된다. 왜냐하면 중력이 공기의 지구 탈출을 막기 때문이다. 여기서 우리는 기압이란 기체 분자가 연속적으로 충돌함으로써 표면에 가하는 힘으로 정의할 수 있다.

기압의 측정



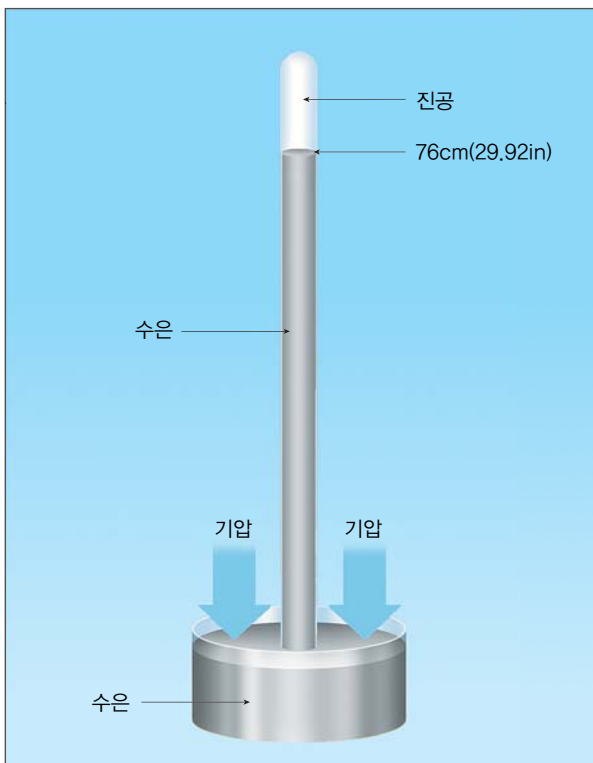
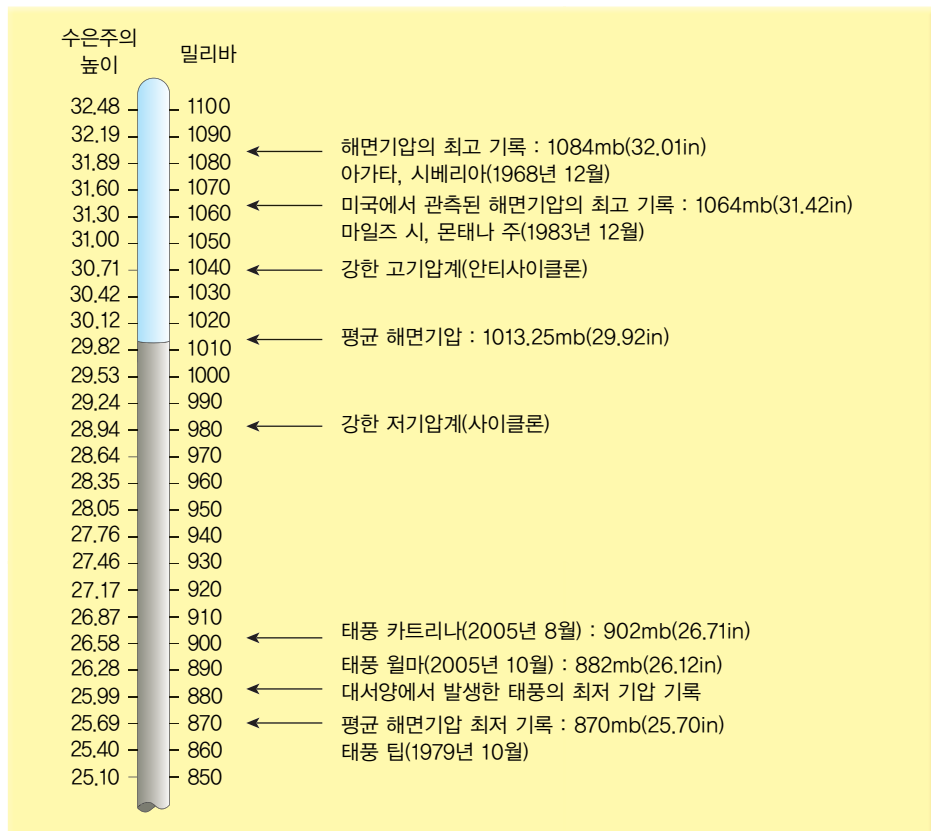
기압을 나타내는 단위로서 일반적으로 뉴턴을 사용한다. 1 뉴턴은 1kg의 물체가 1m/s^2 의 가속도를 가지게 하는 힘에 해당한다. 평균 해수면에 대해서 대기는 1m^2 당 101,325뉴턴의 힘을 가한다. 이러한 큰 숫자를 간단히 나타내기 위해 미국 국립기상청에서는 밀리바(mb)를 채택하는데, 이는 1m^2 당 100뉴턴에 해당한다. 따라서 표준 해면기압은 1013.25mb로 나타내진다(그림 6.2 참조).* 밀리바 단위는 1940년 4월부터 미국에서 발행되는 모든 일기도에서 채택되어 왔다.

기압단위는 밀리바가 가장 일반적으로 사용되기는 하지만, 마스크에서 종종 사용하는 수은주의 높이로도 나타낼 수 있다. 이것의 사용은 1643년 갈릴레오의 제자인 토리첼리가 수은기압계를 발명하면서부터 시작되었다. 토리첼리는 대기가 공기로 꽉 차 있으며, 우리 몸과 모든 물체에 압력을 가하고 있다는 것을 알았다. 이 힘을 측정하기 위해 긴 유리관에 수은을 채워서 한쪽 끝을 막은 뒤, 수은이 가득 담긴 통에 거꾸로 세웠다(그림 6-3). 토리첼리는 실험을 통하여, 수은기둥의 무게가 수은 표면에 작용하는 기압과 같아질 때까지 수은이 유리관 아래로 내려간다는 것을 알았다. 다른 말로 하면, 단면적을 같이 했을 때 수은주의 무게는 지표면에서 대기층 상단까지의 공기기둥의 총 무게와 같은 것이다.

토리첼리는 기압이 증가하게 되면 유리관의 수은기둥이 올라가고, 기압이 감소하면 반대로 내려간다고 설명하였다. 이런 원리에 의하여 수은기둥의 높이는 기압의 척도로서 사용되기 시작되었다. 그 뒤로 정밀하게 다소 변형되기는 했

* SI계의 기압의 표준단위는 1N/m^2 (뉴턴/제곱미터)로 주어지는 파스칼이다. 따라서 표준대기는 101,325파스칼 또는 101.325킬로파스칼로 나타낼 수 있다. 미국 국립기상청이 기압단위를 변경한다고 하면, 이 단위를 채택할 것이다.

| 그림 6-2 | 기압단위로 사용되는 수은주의 높이와 밀리바의 비교



| 그림 6-3 | 수은기압계. 수은기둥 안 수은의 무게는 기압과 평형을 이루고 있다. 기압이 상승하면 수은주가 올라가고, 기압이 감소하면 내려가게 된다.

지만, 토리첼리가 고안한 기압계는 지금도 표준적인 기압 측정기기로 널리 사용되고 있다. 표준대기의 해면기압은 760mmHg(29.92inHg)에 해당한다. 미국 국립기상청은 일상 생활과 항공기의 운항을 위하여 밀리바를 수은주의 높이 (mmHg)로 환산하여 제공한다.

작고 간편한 기압계의 필요성에 의하여 **아네로이드 기압계**(aneroid barometer)가 개발되었다(아네로이드는 액체를 사용하지 않는다는 의미). 아네로이드 기압계는 수은주를 사용하는 대신 부분적으로 진공을 가진 금속관을 사용한다(그림 6-4). 기압 변화에 매우 민감한 진공금속관은 기압이 상승하면 압축되고, 기압이 감소하면 팽창하게 된다. 진공 금속관의 변화는 몇 단계의 신호전달 과정을 거쳐 최종적으로는 밀리바 또는 수은주 높이의 기압단위로 변환된다.

그림 6-4에서 알 수 있듯이, 아네로이드 기압계의 표면은 가정에서도 쉽게 사용할 수 있도록 맑음, 비, 폭풍 등과 같은 문자가 새겨져 있다. 여기서 맑음은 고기압에 해당하고 비

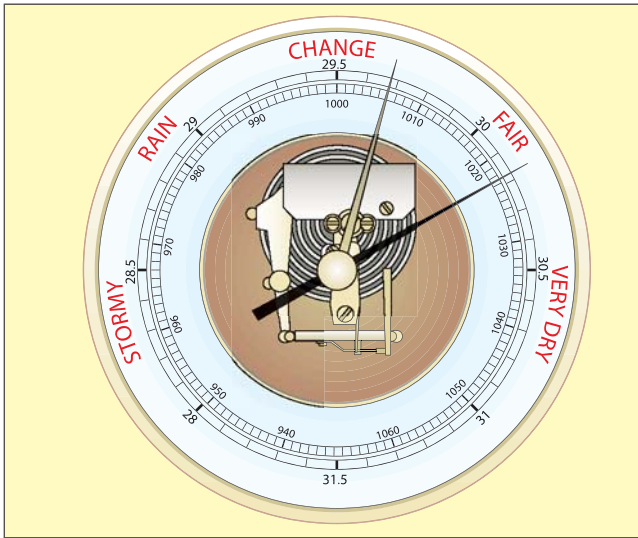


그림 6-4 | 아네로이드 기압계. 아네로이드 기압계는 부분적으로 진공을 가진 금속판으로 구성되는데, 진공금속판은 기압이 상승하면 압축되고, 기압이 감소하면 팽창하게 된다.

는 저기압에 해당한다. 기압은 현재의 날씨와 관계가 있기는 하지만, 반드시 그렇지는 않다. 때로는 비오는 날에 기압계의 바늘이 ‘맑음’을, 맑은 날에 ‘비’를 가리키는 경우도 있다. 만일 어떤 지역에서 날씨 변화를 알고 싶다면, 현재의 기압보다는 수시간 전부터 현재까지 기압이 어떻게 변화하고 있는지가 더욱 중요하다. 흔히 기압이 떨어지면 구름이 증가하게 되고 강수 확률이 높아지는 반면, 기압이 상승하면 날씨가 맑아지게 된다. 그러나 일반적으로 기압의 변화만으로는 특정한 기상 현상을 예측하는 것은 불가능하다.

아네로이드 기압계의 장점 중의 하나는 기록을 남길 수 있다는 기계적 원리를 가진다는 것이다. 이러한 원리에 의해 고안된 것이 자기기압계인데(그림 6-5), 이것은 기압의 변화를 연속적으로 기록할 수 있다. 아네로이드 기압계의 원리는 항공기, 등산가, 지도제작자 등에게 필수품인 고도계에서 응용되고 있다(글상자 6-1 참조).

나중에 보게 되겠지만, 기상학자들은 기압 그 자체보다도 기압의 공간적 분포에 더 관심이 많다. 그래서 그들은 많은 지역에 기압계를 설치하여 자료를 수집한다. 여러 기상 관측소로부터 수집된 기압 자료를 동일 조건에서 비교하기 위해서는 고도보정을 해야 한다. 즉, 모든 관측 지점의 기압을

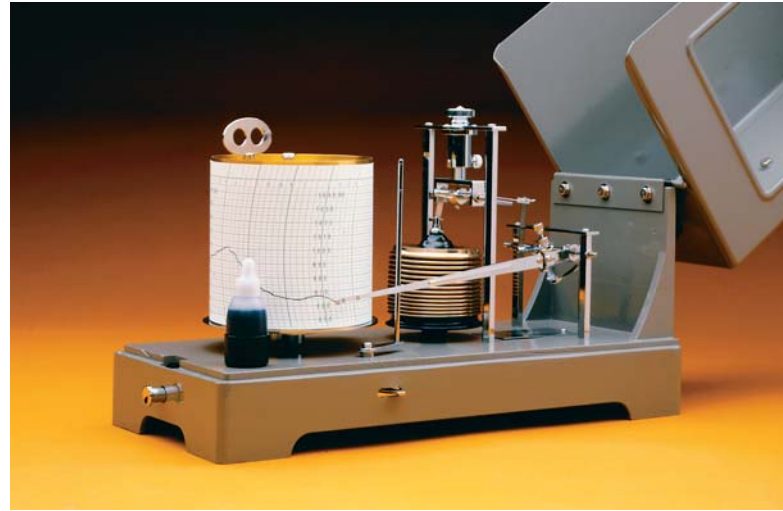


그림 6-5 | 연속적인 기압 변화를 기록하고 있는 아네로이드 자기기압계 (사진 : Qualimetrics, Inc., Sacramento, California 제공)

평균 해수면의 기압으로 환산해야 한다(그림 6-6). 이를 위해서는 관측 지점과 평균 해수면 사이에 가상적인 공기기둥이 있다고 가정하고, 이 공기기둥에 의한 압력을 관측된 기압에 더해 준다. 공기의 밀도는 온도에 영향을 받으므로, 이 계산 과정에서 공기의 온도를 반드시 고려해야 한다. 이렇게 보정된 기압은 동일한 조건에서 기압이 평균 해수면에서 측정된 값을 나타낸다.* 전 지구 관측소에서 수집된 자료를 보면 기압의 공간 분포는 의외로 작다는 것을 알 수 있다. 평균 해수면의 평균 기압보다 30mb보다 큰 경우는 흔치 않으며, 60mb보다 작은 경우도 매우 드물다(그림 6-2).

고도에 따른 기압의 변화

제1장에서 언급한 고도에 따른 기압의 변화를 생각해 보자. 기압과 밀도의 관계를 알면 고도에 따른 기압의 변화를 쉽게 알 수 있다. 예를 들어, 그림 6-7에 있는 것처럼 실린더와 피스톤을 생각해 보자. 만일 온도가 일정하게 유지되도록 하고 피스톤 위에 무거운 추를 올려놓으면, 중력에 의하여 피

* 기압계 보정의 방법에 대해서는 부록 D에서 설명함.



글상자 6-1

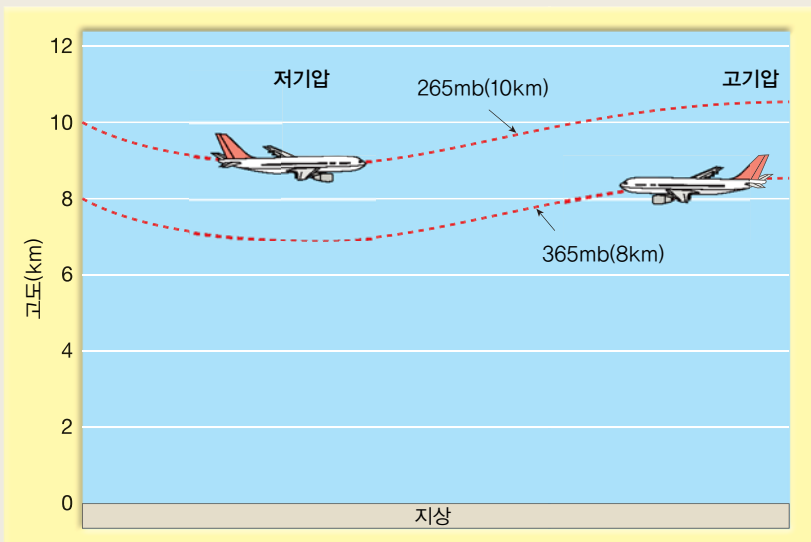
기압과 비행

모든 항공기의 조종실에는 항공기의 비행 고도를 측정하기 위한 기압고도계가 장치되어 있다. 기압고도계는 기본적으로는 아네로이드 기압계로서 기압의 변화에 따라 반응한다. 기압은 고도가 증가함에 따라 감소하고 있으며, 고도의 함수로 잘 나타내진다. 고도계로 사용되기 위해서 아네로이드는 밀리바 대신에 고도로 표시해 주어야 한다. 예를 들면, 표 6-1에서 795mb는 보통 고도 2,000m에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 기압이 795mb로 기록되면, 고도계는 2,000m임을 표시한다.

고도에 따른 온도의 변화와 이동하는 기압계로 인하여 실제적인 조건은 이러한 표준적인 분포와는 다르다. 그 결과, 항공기의 고도는 고도계가 가리키는 고도와는 다소 다를 수 있다. 상공의 기압이 표준기압보다 낮을 경우 항공기는 고도계가 나타내는 고도보다 낮은 고도를 비행하고 있는 것이다. 이것은 시정거리가 작은 상태에서 소형 항공기로 복잡한 산악지형을 비행하는 조종사에게 특히 큰 위험을 초래할 수 있다. 이러한 오류를 보정하기 위해서 조종사는 이착륙 시에 고도보정을 하는데, 어떤 경우 고도보정은 비행 도중에도 이루어진다.

상업용 항공기가 비행하는 5.5km 이상의 고도에서는 기압의 변화가 매우 완만하기 때문에 저고도를 비행할 때보다 고도보정이 정확하게 되지 않는다. 따라서 그러한 항공기는 고도계를 표준대기 상태로 맞추어 놓고, 일정한 고도보다는 일정한 기압면을 따르도록 비행경로를 택한다(그림 6-A). 달리 설명하면, 항공기가 일정 고도를 비행하도록 계기를 설정해 둘 경우 기압이 변하기만 해도 고도가 변하는 비현실적인 결과를 가져온다. 비행 경로를 따라, 기압이 증가하면 항공기는 고도를 높이고 기압이 감소하면 반대로 하강한다. 모든 항공기가 같은 방법으로 고도계를 설정해 두기 때문에 상공에서 항공기가 충돌할 가능성은 매우 작다.

대형 상업용 항공기는 지형으로부터의 높이를 재기 위하여 무선 고도계도 사용하고 있다. 항공기로부터의 전파가 지상에 도달한 뒤 반사되어 돌아오는 시간을 재서 정확한 고도를 산출한다. 이러한 장치 또한 단점이 없는 것은 아니다. 무선고도계는 해면으로부터의 고도를 제공하는 것이 아니기 때문에 정확한 지형의 분포를 미리 알고 있어야 한다.



| 그림 6-A | 5.5km 이상의 고도를 비행하는 항공기는 일반적으로 일정한 고도가 아니라 일정한 기압면을 비행경로로 택한다.

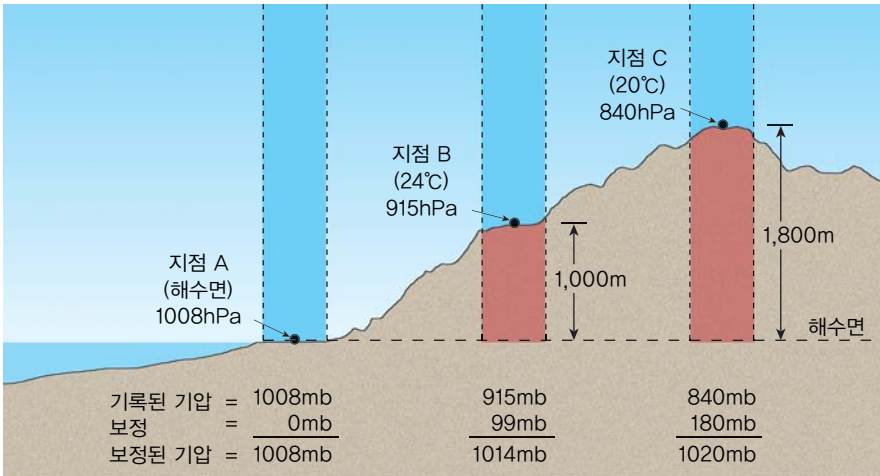


그림 6-6 기압을 비교하기 위해서는 측정된 기압을 해면기압으로 보정한다. 즉, 지형과 평균 해수면 사이에 공기가 있다고 가정하고(붉은색으로 표시), 이 공기기둥이 해수면에 가하는 압력을 관측기압에 더해 준다.

학생들이 자주 하는 질문

수은은 독성이 있어서 중독될 위험이 있는데 왜 기압계에 수은이 사용되는가?

사실이다. 수은중독은 매우 심각하다. 그러나 기압계의 수은은 밀폐용기에 들어 있어서 새어 나올 가능성이 매우 희박하다. 기압계는 물은 물론 어떤 액체로도 만들 수 있다. 물로 만들 경우는 크기가 문제가 된다. 물은 수은에 비해 13.6배나 가볍기 때문에, 물을 사용한 기압계로 1기압을 나타내려면 수은 기압계보다 13.6배나 높아야 한다. 즉, 물을 사용한 기압계는 약 10m의 높이로 제작되어야 한다.

스톤 안의 공기는 압축된다. 이 결과 공기의 밀도는 물론 실린더 벽과 피스톤에 충돌하는 공기 분자의 수도 증가한다. 따라서 밀도의 증가는 기압의 증가를 가져온다.

피스톤은 아래로 향하는 중력이 실린더 안의 기압과 평형을 이룰 때까지 계속 공기 분자를 압축하게 된다. 평형 상태에서 추를 더 올려놓게 되면 새로운 평형이 이루어질 때까지 공기는 더욱 압축된다.

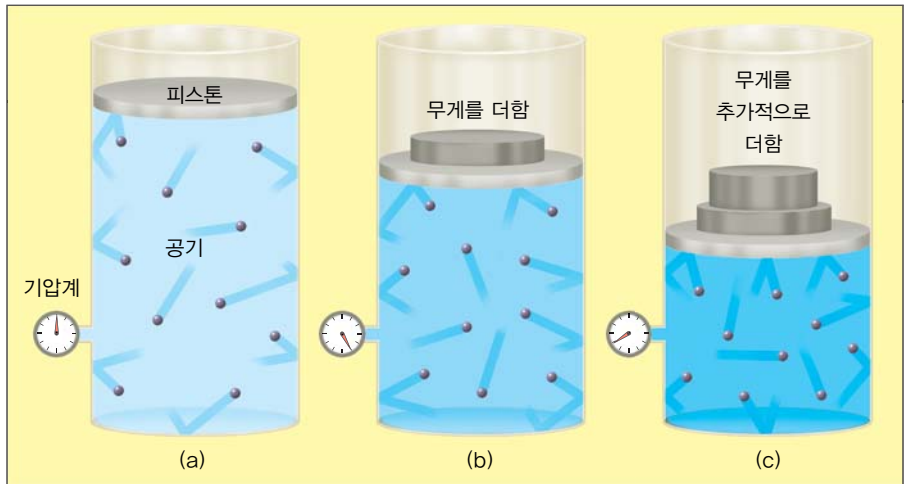
마찬가지로 어떤 고도에서의 기압은 그 위의 공기의 무게와 정확히 같게 된다. 해수면에서 공기기둥의 무게는 제곱센티당 1.01325kg(제곱인치당 14.7lb)이 되기 때문에 그만큼의 기압을 해면에 가하게 되는 셈이다. 위로 올라갈수록 기압이 낮아지기(즉, 위에서 누르는 힘이 작기) 때문에 공기

는 희박해진다. 따라서 고도가 커질수록 기압이 낮아지게 되는 것이다.

산악지형에서 기압이 낮게 되는 것은 위로 갈수록 공기밀도가 감소하는 것과 연관이 있다. 세르파(토착 네팔인)족을 제외하고선 에베레스트 정상(8,852m)을 등정한 대부분의 산악인들은 고산지대에서의 산소 부족을 해결하기 위하여 보조 산소통을 사용하였다. 보조 산소를 사용하는 경우에도 방향감각 상실 등의 혼미한 상태를 흔히 경험하게 된다. 고도에 따른 기압의 감소는 물의 비등점(해면에서는 100℃)에도 영향을 미친다. 예를 들면, 콜로라도 주 덴버(고도 약 1.6km)에서는 물이 95℃에서 끓는다. 비등점 하강으로 인하여 비록 물이 샌디에이고보다 덴버에서 더 빨리 끓기는 하지만, 스파게티를 요리하는 데는 덴버가 더 오래 걸린다.

제1장에서 배운 기압이 고도에 따라 일정하게 감소하지는 않는다는 것을 상기해 보자. 기압이 높은 지상에 가까울수록 감소 비율이 크고, 반대로 상공에서는 감소 비율이 낮다. 고도에 따른 기압의 정상적인 감소는 표 6-1의 표준대기에 나와 있다. **표준대기**는 기압(또한 기온과 밀도)의 이상적인 연직 분포를 제시해 주는데, 실제 대기의 평균적인 상태를 나타낸다. 표 6-1에서 보듯이 대체적으로 5km 올라가면 기압이 반으로 줄어든다. 따라서 5km 고도의 기압은 해면기압의 약 반으로 줄어들고, 10km에서는 약 1/4로, 15km에서는 약 1/8로 줄어들게 된다. 상업용 항공기는 보통

| 그림 6-7 | 기압과 밀도의 관계를 나타내는 모식도. 실린더(a)의 공기의 윗부분은 피스톤으로 차단되어 있음. 피스톤 위에 무거운 추를 더해 줄수록(b와 c) 단위부피당 분자의 개수가 증가하여 실린더 벽과 바닥에 가해지는 압력이 증가한다.



10km 고도를 비행하는데, 여기서는 기압이 해면기압의 약 1/4밖에 되지 않는다.

높이(km)	기압(mb)	온도(°C)
50.0	0.798	-2
40.0	2.87	-22
35.0	5.75	-36
30.0	11.97	-46
25.0	25.49	-51
20.0	55.29	-56
18.0	75.65	-56
16.0	103.5	-56
14.0	141.7	-56
12.0	194.0	-56
10.0	265.0	-50
9.0	308.0	-43
8.0	356.5	-37
7.0	411.0	-30
6.0	472.2	-24
5.0	540.4	-17
4.0	616.6	-11
3.5	657.8	-8
3.0	701.2	-4
2.5	746.9	-1
2.0	795.0	2
1.5	845.6	5
1.0	898.8	9
0.5	954.6	12
0	1013.2	15

학생들이 자주 하는 질문

상공을 비행할 때 왜 귀가 아플까?

비행기가 이착륙할 때, 기내의 기압 변화로 인하여 귀의 통증을 경험하는 사람들이 더러 있다(물론 상업용 항공기는 기내의 기압이 거의 일정하게 유지되도록 설계되어 있으나, 약간의 기압 변화는 발생한다). 유스타키오관은 귀와 목을 연결해 주기 때문에, 귀 내부의 기압은 외부의 기압과 같도록 유지된다. 그러나 감기에 걸리면 유스타키오관이 막히게 되어 목과 중이 사이의 공기 흐름을 차단하게 된다. 이에 따른 기압의 차이로 인하여 귀가 멍멍함, 심한 경우에는 통증을 느끼게 된다. 이 통증은 내외부의 기압이 같게 되는 순간 사라진다.

기압의 수평 방향의 변화

고도에 따른 기압의 변화가 중요하기는 하지만, 기상학자들은 수평 방향의 기압 변화에 큰 관심을 가지고 있다. 여러 관측 지점의 기압을 비교하기 위해서는 기압의 고도보정을 해주어야 한다(그림 6-6 참조). 각 지점에서 보정된 기압은 평균 해수면기압이 된다.*

지구 표면의 여러 지점에서 기압을 측정해 보면, 수평 방

* 여기서, 기압, 온도, 밀도 간의 상호관계는 이상기체법칙을 따름. 이상기체법칙을 나타내는 수식은 부록 D를 참조할 것.

향의 기압 변화는 비교적 작은 편이다. 기압이 높은 경우에도 평균 해수면보다 30mb 이상 높은 것은 매우 드물며, 저기압의 경우 평균 해수면기압에 비해 60mb 이상 낮은 것도 드물다. 태풍이나 강한 폭풍의 경우에는 이보다 훨씬 큰 기압차를 보인다(그림 6-2). 나중에 알게 되겠지만, 이러한 작은 기압차는 강한 바람을 일으키는 데는 충분하다.

온도와 수증기가 기압에 미치는 영향

어떻게 기압 차이는 발생하는 것일까? 이것을 이해하기 위하여 겨울철의 북부 캐나다를 생각해 보자. 눈으로 덮인 부분은 태양 복사 에너지의 대부분을 대기 밖으로 반사시키고 그중 일부분만 대기 중에 남게 된다. 차가운 얼음 표면에 의하여 대기는 냉각되는데 -34°C 의 찬 기온은 흔히 관측되며, 심한 경우는 -46°C 까지도 떨어진다.

온도라는 것은 물질의 분자의 평균 운동 상태를 나타내는 척도이다. 따라서 추운 캐나다 지방의 공기는 비교적 분자 운동이 덜 활발한 공기 분자들로 이루어져 있는데, 이들은 온도가 높은 공기에 비해 분자가 거리가 가깝고 밀도가 높다. 밀도가 증가함에 따라서 지표면에 미치는 기압도 커지게 된다(그림 6-8). 이 결과 캐나다로부터 미국 서부로 흘러 들어 오는 찬 공기는 밀도가 상당히 높아지게 되는데, 이를 일기도에서는 고기압(또는 간단히 H)으로 표시한다.

반대로, 1월의 멕시코 만의 공기는 비교적 따뜻하다. 따뜻한 공기는 운동 에너지를 많이 가지고 있기 때문에, 분자 간의 거리는 찬 공기에 비해 상대적으로 멀다(밀도가 낮다). 이러한 기압이 낮은 따뜻한 공기는 일기도에서 저기압(또는 간단히 L)으로 표시된다.

온도 이외에도 기압의 높고 낮음에 관계된 요소가 있다는 것을 잊으면 안 된다. 예를 들면, 공기 중에 포함된 수증기의 양은 공기의 밀도에 영향을 미친다. 흔히 알고 있는 것과는 달리 수증기는 공기의 밀도를 감소시킨다. 습도가 높은 날은 공기의 밀도가 높은 것처럼 느껴지는데, 사실은 그렇지 않다. 그 이유는 원소의 주기율표에서 알 수 있듯이, 질소(N_2)와 산소(O_2)의 분자량은 수증기(H_2O)보다 크기 때문이

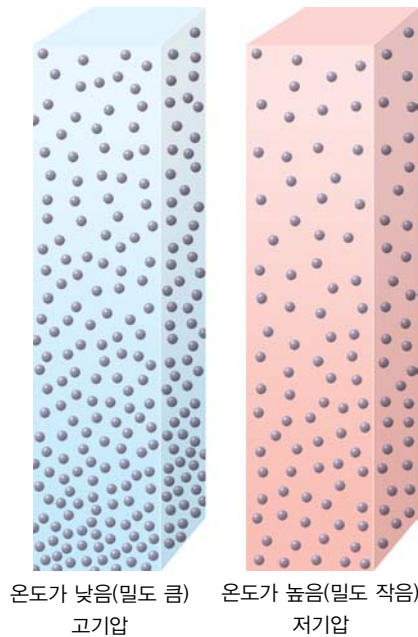


그림 6-8 찬 공기와 따뜻한 공기의 밀도의 비교. 다른 조건이 모두 같다면, 차고 밀도가 큰 공기는 따뜻하고 가벼운 공기에 비해 더 큰 압력을 가하게 된다.

다. 공기 중에는 이들 여러 분자가 서로 섞여 있는데, 각 분자가 차지하는 부피는 거의 같다. 수증기의 양이 증가할수록 상대적으로 무거운 질소와 산소의 양이 줄어들게 된다. 따라서 습한 공기는 건조한 공기에 비해 가볍다. 그럼에도 불구하고 수증기 의한 밀도 차이는 매우 작은데, 온도가 같은 경우 아주 습한 공기와 건조공기의 밀도 차이는 약 2% 정도에 불과하다.

지금까지 설명한 것으로부터, 차고 건조한 공기는 따뜻하고 습한 공기에 비해 밀도가 높아서 고기압을 형성한다고 결론을 내릴 수 있다. 따라서 거대한 기단은 지상기압의 공간적 분포와 관련이 깊다고 할 수 있다.

공기의 흐름과 기압

공기의 이동은 기압의 변화에 영향을 미치는 또 하나의 요인이 된다. 예를 들어, 어떤 지역으로 공기가 수렴하게 되면 공기기둥의 높이는 증가한다. 다시 말해, 공기의 양이 일정할 때 공기가 모여 들면 그 공기가 차지하고 있던 수평 면적은 줄어들게 된다. 이러한 수렴과 공기기둥의 증가는 기압의 증가를 가져온다. 이와는 반대로, 어떤 지역의 공기가 수평

방향으로 빠져나가게 되는 경우도 있는데, 이런 현상을 **발산**이라고 하며 지상기압을 감소시키게 된다.

실제 대기에서 일어나는 여러 과정 중에는 앞에서 언급한 것보다 훨씬 복잡한 요소가 관련되어 있다. 때때로 하층 대기의 발산은 상층 공기의 수렴을 동반한다. 이 경우에는 수렴량이 발산량보다 많을 때만 지상기압이 증가하게 되고 적을 때는 감소하게 된다. 고기압과 저기압의 분포를 가져오는 이러한 메커니즘에 대해서는 이 장의 뒷부분에서 다시 다루기로 하자.

요약하면, 차고 건조한 공기는 밀도가 높으며 고기압을 형성하게 되고, 반대로 따뜻하고 습한 공기는 밀도가 낮으며 저기압을 형성한다. 또한 연직 방향으로 평균하였을 때 공기의 수렴이 있으면 지상기압이 증가하고, 발산이 있으면 지상기압이 감소하게 된다.

날씨의 변화에 있어서 기압의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 곧 알게 되겠지만, 기압의 차이는 전 지구적인 규모의 바람을 발생시키며, 이러한 바람은 각 지역의 날씨 변화를 가져온다. 따라서 이 장의 나머지 부분은 온도와 기압의 관계, 기압이 바람에 미치는 영향 또는 바람이 기압에 미치는 영향을 중점적으로 다룰 것이다.

바람에 영향을 미치는 요소



기압과 바람

▶ 바람에 영향을 미치는 요소

앞에서 연직 방향의 운동과 구름형성에 있어서의 연직운동의 중요성을 다루었다. 연직운동이 중요한 만큼, 흔히 **바람**이라고 부르는 수평운동도 중요하다. 우리는 공기가 따뜻해지면 주변 공기보다 부력이 커지게 되어서 연직 방향으로 상승하게 된다는 것은 잘 알고 있다. 그렇다면, 공기를 수평으로 이동하게 하는 원인은 무엇일까?

간단히 말하면, 바람은 수평 방향의 기압 차이의 결과로 발생한다. 바람은 고기압에서 저기압으로 분다. 여러분들은

진공 처리된 캔 커피의 뚜껑을 열 때 이러한 것을 직접 경험한 적이 있을 것이다. 뚜껑을 열 때 소리가 나는데, 이것은 고기압의 캔 내부로부터 상대적으로 저기압인 캔 외부로 공기가 갑자기 빠져나올 때 나는 것이다. 바람은 기압의 불균일을 해소하려고 하는 자연의 현상이다. 지구 표면의 열적 불균일은 끊임없이 기압의 불균일을 발생시키므로, 바람의 궁극적인 원인은 태양 복사 에너지이다.

만일 지구가 자전하지 않고 마찰이 없다면, 바람은 고기압에서 저기압의 방향으로 향할 것이다. 그러나 실제로는 다음의 여러 종류의 힘에 의하여 바람의 크기와 방향이 큰 영향을 받는다.

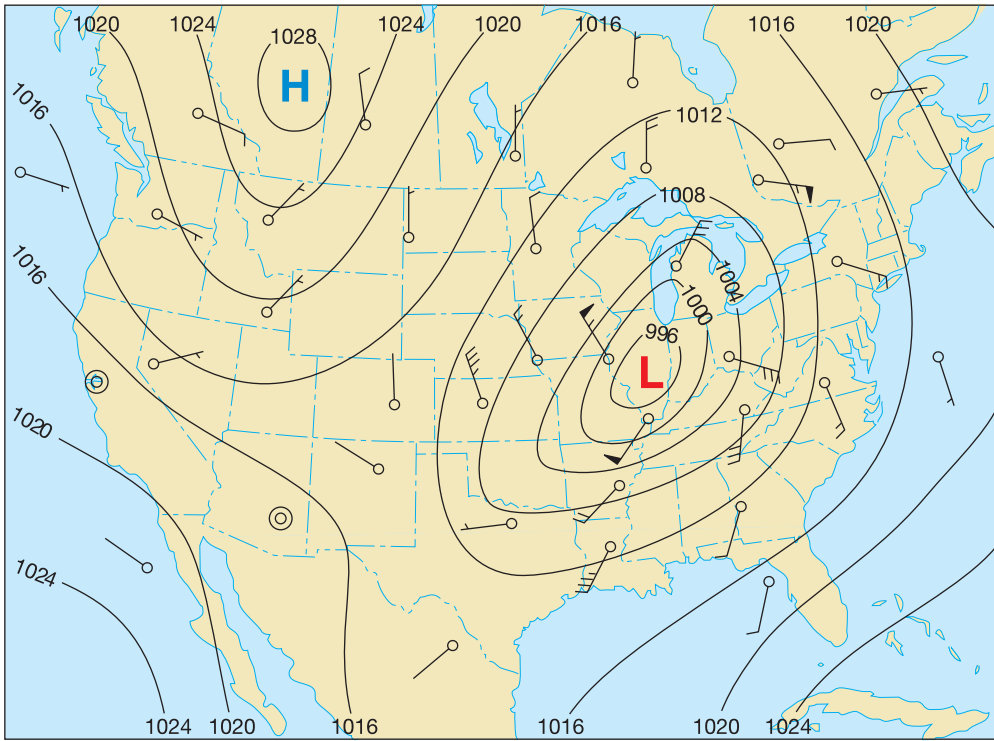
1. 기압경도력
2. 전향력
3. 마찰

기압경도력

운동의 속도나 방향을 바꾸기 위해서는 한 방향으로 힘의 불균형이 필요하다. 바람을 일으키는 힘은 기압의 차이이다. 한 곳의 기압이 다른 곳보다 클 경우 기압이 큰 쪽에서 작은 쪽으로 향하는 힘이 공기에게 작용하게 된다. 이로 인해서 바람이 생기는 것이고 기압차가 클수록 바람이 강해진다. 지표면의 기압 분포는 많은 지역의 기압 관측을 통하여 알 수 있다.

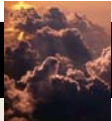
기압 분포는 관측된 기압을 일기도에 등압선으로 표시함으로써 알 수 있다. **등압선(isobars)**은 그림 6-9에서 보듯이 같은 기압을 가지는 지점을 연결한 선이다(*iso* = 같다는 의미, *bar* = 기압). 등압선의 간격은 주어진 두 지점 간의 기압차와 관계가 있고 **기압경도**라고 불린다. 기압경도력의 수학적 표현은 글상자 6-2에 제시하였다.

기압경도의 개념은 산의 높이를 표시한 등고선도를 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 높은 기압경도는 낮은 기압경도에 비해, 마치 산이 가파를수록 물이 빨리 흘러내리듯이 공기에게 더 큰 가속도를 발생시킨다. 등압선이 조밀하면 기



ff	풍속 (시간당 마일)
⊙	무풍
—	1~2
—	3~8
— —	9~14
— — —	15~20
— — — —	21~25
— — — — —	26~31
— — — — — —	32~37
— — — — — — —	38~43
— — — — — — — —	44~49
— — — — — — — — —	50~54
— — — — — — — — — —	55~60
— — — — — — — — — — —	61~66
— — — — — — — — — — — —	67~71
— — — — — — — — — — — — —	72~77
— — — — — — — — — — — — — —	78~83
— — — — — — — — — — — — — — —	84~89
— — — — — — — — — — — — — — — —	119~123

| 그림 6-9 | 등압선은 해면기압이 같은 지점을 연결한 선으로서 기압 분포를 알려 준다. 등압선이 직선인 경우는 매우 드물며 대개는 곡선으로 되어 있다. 중심원의 등압선은 고기압 또는 저기압을 나타낸다. 등압선과 함께 표시되는 바람 기호는 바람의 방향과 크기를 알려 준다. 위의 일기도에서는 저기압 주변의 등압선이 고기압에 비해 상당히 조밀하고 바람도 강한 것을 알 수 있다.



글상자 6-2

기압경도력

Gregory J. Carbone*

기압경도력의 크기는 두 지점의 기압차와 밀도의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{PG} = \frac{1}{d} \times \frac{\Delta p}{\Delta n} ; \text{where}$$

F_{PG} = 단위질량당 기압경도력

d = 공기의 밀도

p = 두 지점의 기압차

n = 두 지점의 거리

간단한 예를 들어 보자. 아칸소 주 리틀록 5km 상공의 기압이 540hPa이고, 미주리 주 세인트루이스 5km 상공의 기압이 530hPa이라고 하자. 두 지점의 거리는 450km이고 5km 고도에서의 공기의 밀도는 $0.75(\text{kg})\text{m}^{-3}$ 이다. 위의 기압경도력 공식을 적용하려면, 물리적 단위

를 통일해야 한다. 먼저 hPa을 파스칼로 변환하면, $(\text{kg})\text{m}^{-1}\text{s}^{-2}$ 이 된다. 여기서 두 지점 사이의 기압경도력은 1,000파스칼(Pa)이므로,

$$F_{PG} = \frac{1}{0.75} \times \frac{1000}{450,000} = 0.0029 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

뉴턴의 제2법칙에서 힘은 가속도와 질량의 곱으로 나타난다($F = m \times a$). 이 예에서 우리는 단위질량당 기압경도력을 고려했으므로 위에서 계산한 것은 가속도가 된다($F/m = a$, $F_{PG} = a$). 단위를 CGS단위로 바꾸면, $a = 0.296\text{cms}^{-2}$ 이 된다.

* Gregory J. Carbone 교수는 사우스캐롤라이나 대학의 교수로서 지리학을 전공하고 있다.

압경도가 커서 바람이 강하고, 등압선의 간격이 멀수록 기압경도가 작아서 바람이 약하다. 그림 6-10은 등압선의 간격과 바람의 크기의 상호관계를 나타낸다. 기압경도력은 등압선에 직각으로 작용한다는 것을 기억해 두기 바란다.

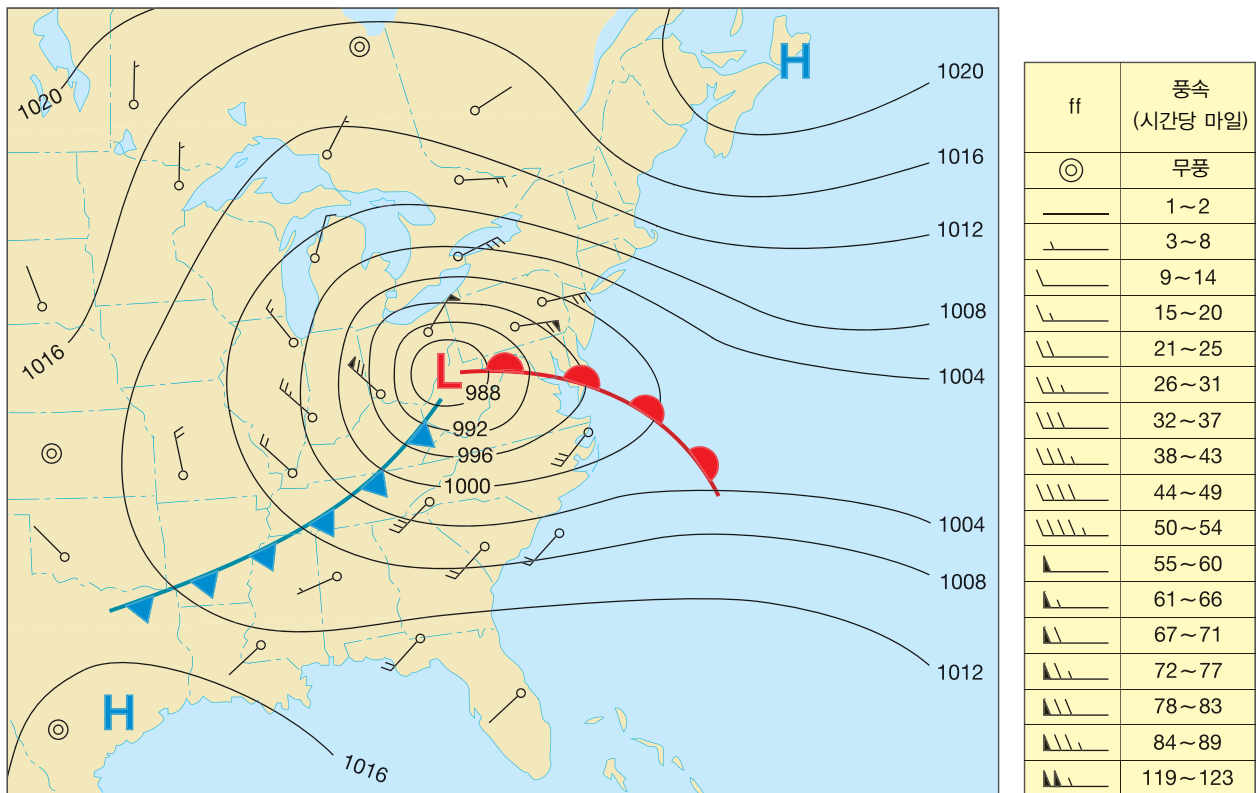
일기도상의 기압 차이는 여러 가지 복잡한 요소에 의하여 결정된다. 그러나 궁극적으로는 지표면의 부등가열에 그 원인이 있다.

수평기압경도력과 바람 어떻게 온도 차이가 수평기압경도와 이에 따른 바람을 발생시키는지 알아보기 위하여 해풍의 예를 살펴보자. 그림 6-11a는 일출 직전 해안 지역의 연직단면을 나타낸다. 이 시점에서는 온도와 기압이 수평 방향으로 변하지 않는다고 가정하자. 즉, 그림 6-11a에서 같은 고도에서는 기압과 온도가 같다고 하자. 기압차가 없으므로 이때는 당연히 바람이 없다.

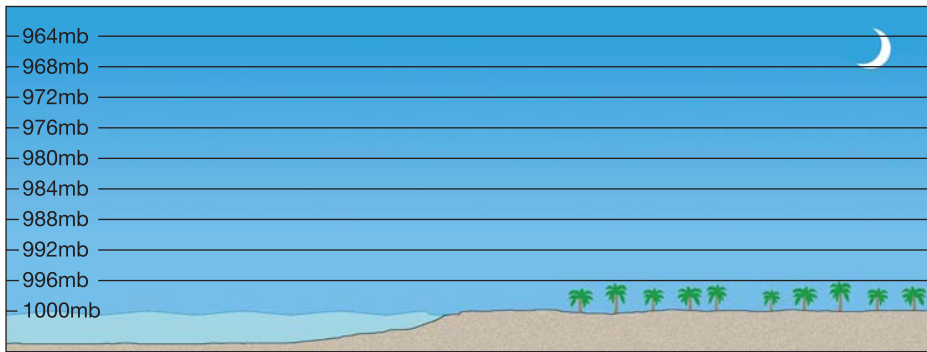
해가 떠서 육지와 바다를 불균일하게 가열하면 기압차가 발생하고 바람이 불게 된다(그림 6-11b). 제3장에서 배운

것처럼 바다 표면 온도의 하루 변화폭은 작다. 반면에, 육지 위 공기 온도의 하루 변화폭은 상당히 크다. 공기가 데워지면 팽창하게 되고 밀도가 낮아진다. 이 결과 그림 6-11b에서 볼 수 있듯이 육지 쪽의 등압선은 위로 휘게 된다. 공기 온도의 상승 그 자체로는 지상기압의 변화가 생기지 않는다 하더라도, 등압선이 위로 휘게 되면 같은 고도에서 육지 쪽의 기압은 바다 쪽보다 높아지게 된다.

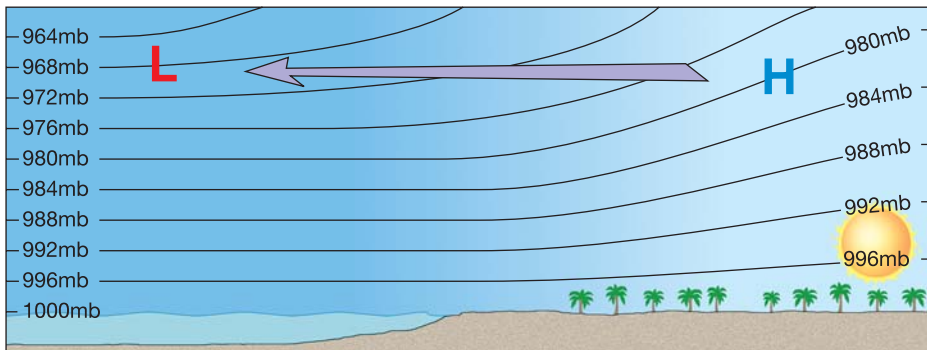
상층에서의 기압차는 하층보다 큰데, 수평기압차로 인하여 상층에서는 육지에서 바다 쪽으로 바람이 불게 된다. 그림 6-11c에서 보듯이 상층에서 바다 쪽으로 바람이 불면, 바다 쪽에는 공기가 많이 쌓이게 되어 지상기압이 높아지고 육지 쪽은 지상기압이 낮아진다. 따라서 지상 근처에서는 바다에서 육지 쪽으로 바람이 불게 된다. 이를 해풍이라고 한다. 즉, 상층과 하층에서는 서로 반대 방향으로 부는 바람이 형성된다. 하나의 완전한 순환계를 이루기 위해서는 연직 방향의 공기 이동, 즉 상승 및 하강운동이 존재해야 한다



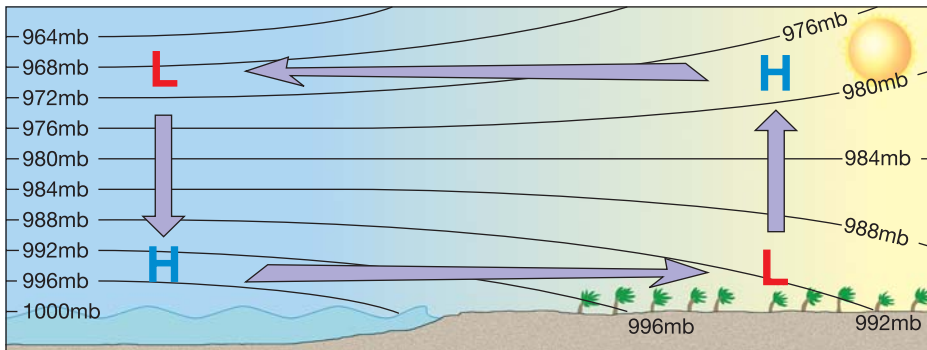
| 그림 6-10 | 기압경도력. 조밀한 등압선은 큰 기압경도력과 강한 바람을 의미하며, 등압선의 간격이 넓은 것은 약한 기압경도력과 바람을 의미한다.



(a) 일출 직전



(b) 일출 후



(c) 해풍형성

그림 6-11 | 해풍형성을 나타내는 모식도의 연직 단면도. (a) 일출 직전, (b) 일출 후, (c) 해풍이 형성됨.

(연직기압경도에 대해서는 다음에 다루기로 한다).

앞에서 언급했듯이 온도와 기압 사이에는 중요한 상호관계가 존재한다. 온도 변화는 기압차를 발생시키고 결과적으로는 바람을 생성시킨다. 즉, 온도 변화가 크면 또 바람이 강함을 의미하게 된다. 온도와 기압의 일변화는 주로 고도 수 킬로미터 이하에서만 발생한다. 그러나 지구 전체를 보면, 태양 고도가 위도에 따라 변하므로 훨씬 큰 기압경도가 발생하고 이는 전구적인 규모의 대기 순환을 일으킨다. 이것은 다음 장에서 다루기로 하자.

만일 바람을 일으키는 원인이 오로지 기압경도력밖에 없

다면, 바람은 등압선에 직각인 방향으로 고기압에서 저기압으로 향하게 되고, 바람과 더불어 저기압 지역은 곧 기압이 높아지고 기압경도력은 사라질 것이다. 따라서 일기도상의 잘 발달된 고기압 및 저기압은 그리 오래가지 않을 것이다. 대기는 매우 약하고 짧은 수명의 기압계를 유지할 것이다. 그 결과 기압경도력만 있다면 지구 표면의 대부분은 거의 바람이 없는 상태로 장시간 지속되고, 때때로 약한 바람의 요란이 있을 뿐이다.

다행스럽게도, 다양한 날씨 변화를 바라는 우리에게 이런 현상은 일어나지 않는다. 일단 기압경도력에 의해 바람이

불기 시작하면 전향력, 마찰력 이외에도 여러 가지 힘이 작용하게 된다. 물론 이러한 힘들은 중력을 제외하고는 바람을 생성시키지는 못하지만, 바람에 지대한 영향을 미친다. 이렇게 함으로써 바람을 더 강하게 하거나 또는 지속적인 기압계 형성을 가져온다.

연직기압경도력 앞에서 배운 것처럼 바람은 고기압에서 저기압으로 분다. 또한 기압은 지상에서 가장 크고 위로 갈수록 감소하며, 바람은 이 기압차를 해소시킨다는 것을 배웠다. 여러분들은 이 두 가지 사실로부터 왜 공기가 연직 방향으로 급격히 가속되지 않으며 또한 우주 공간으로 사라지지 않는지 의아해할 것이다. 사실은, 만일 연직기압경도력과 반대 방향으로 작용하는 중력이 없다면 이러한 일이 벌어질 것이다. 이와 같이 서로 연직의 반대 방향으로 작용하는 중력과 기압경도력이 균형을 이루고 있는 상태를 **정역학평형**(hydrostatic equilibrium)이라고 한다.

일반적으로 대기는 거의 정역학평형 상태에 있다. 중력이 기압경도력보다 약간 클 때는 연직 하강운동이 발생한다. 이러한 현상은 찬 공기가 하강하면서 수평으로 퍼지는 북극기단 내에서 볼 수 있다. 대부분의 대규모 대기운동에 있어서 연직운동은 매우 약해서 평균 수 cm s^{-1} 정도이다. 그러나 작은 규모의 연직운동은 이보다 훨씬 강하다. 예를 들면, 강한 뇌우에서는 한 시간에 수백 킬로미터 정도의 강한 상승 및 하강운동이 관측된다. 전체적으로 보면, 대기는 기압경도력과 중력이 평형을 이루는 정역학평형 상태에 가깝다.

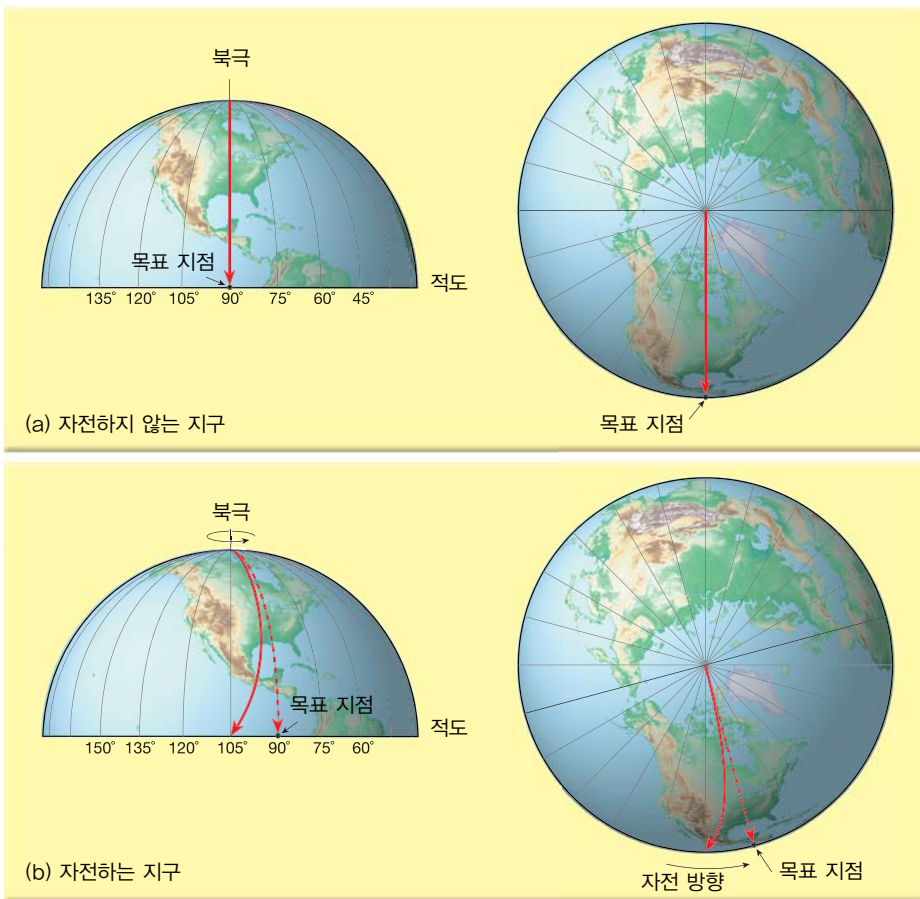
요약하면, 수평기압경도는 바람을 일으키는 힘이다. 이것은 크기와 방향을 가지고 있다. 이것의 크기는 등압선의 간격에 의해서 결정되며, 방향은 고기압에서 저기압으로 향하는 직각 방향으로 작용한다. 이와는 반대로, 연직기압경도는 일반적으로 중력과 평형을 이루거나 평형 상태에 가깝다. 이 때문에 연직운동의 크기는 수평운동에 비해 상대적으로 약하다(소규모의 강한 상승 및 하강운동은 예외).

전향력

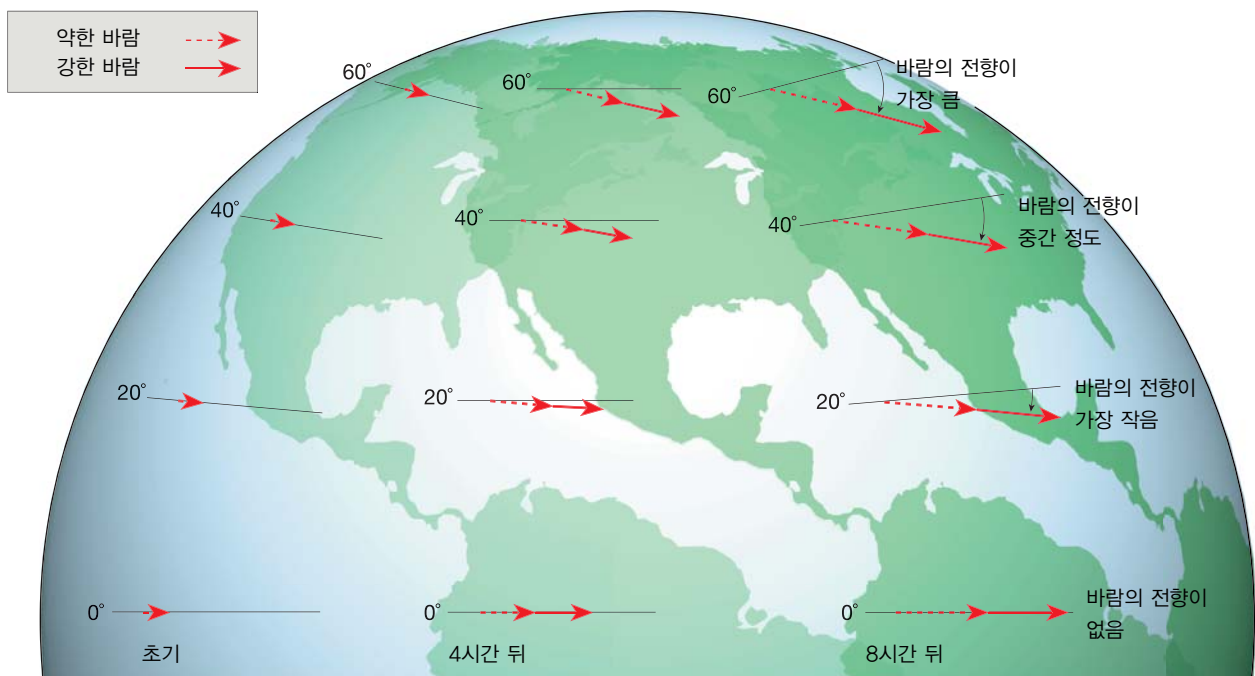
그림 6-9의 일기도는 고기압과 저기압에 관련된 전형적인 공기의 운동을 보여 준다. 예상대로 공기는 고기압에서 저기압으로 이동한다. 그러나 바람은 정확하게 등압선에 직각인 방향(기압경도력의 방향)으로 불지는 않는다. 직각인 방향으로부터 편차가 생기는 것은 지구 자전의 효과인 전향력 때문이다. 전향력은 **코리올리힘**(Coriolis force)으로도 불리는데, 이는 전향력의 크기를 수학적으로 제시한 프랑스의 과학자 Gaspard Gustave Coriolis의 이름을 따서 붙인 것이다.

북반구(남반구)에서 바람을 포함하여 모든 운동하는 물체는 나아가는 방향의 **오른쪽(왼쪽)**으로 휘게 된다. 이렇게 휘는 이유는 북극에서 적도로 발사된 로켓의 예를 들면 쉽게 이해할 수 있다(그림 6-12). 만일 로켓이 목표 지점에 도착하는 데 한 시간 걸렸다면, 그동안 지구는 서에서 동으로 15° 자전할 것이다. 지구상에서 있는 사람에게 로켓은 곡선 궤도를 그리면서 목표 지점의 15° 서편에 떨어지는 것으로 보일 것이다. 우주에서 보고 있는 관측자에게는 로켓의 실제 비행 경로가 직선으로 나타난다. 로켓이 휘어진 경로를 가는 것처럼 보이고 목표의 서편으로 떨어지는 것은 지구가 자전하기 때문이다. 시계 반대 방향으로 자전하는 지구 자전 때문에 로켓은 비행하면서 운동하는 오른쪽으로 휘어졌다는 것을 기억해 두기 바란다. 남반구에서도 이러한 휘는 경로가 관측되는데, 운동하는 왼쪽으로 휘다.

물체가 북에서 남으로 운동할 때는 앞의 예에서 본 것처럼 전향력을 이해하기가 비교적 쉬우나, 동서 방향으로 운동하는 경우에는 그리 쉽지 않다. 그림 6-13은 서로 다른 위도에서 운동하는 물체의 예를 들어 동서 방향으로 운동하는 물체에 작용하는 전향력을 설명한다. 몇 시간 뒤에 북위 20° , 40° , 60° 의 위도선을 따라 부는 바람은 남쪽으로 휘어져 위도선을 벗어남에 주목하기 바란다. 그러나 우주에서 관측하면 경로가 직선으로 나타난다. 휘어지게 보이는 것은 지구가 자전함으로 인해 지표면의 기하학적인 방향이 시간



| 그림 6-12 | 북극에서 적도에 발사된 로켓에게 작용하는 전향력의 예. 로켓은 발사 1시간 후에 목표 지점에 도착했다고 가정. (a) 지구가 자전하지 않는 경우 로켓은 직선 경로를 거쳐 적도에 도착함. (b) 1시간 동안 지구는 15° 자전함. 따라서 로켓이 직선 경로를 비행한다 하더라도 로켓의 경로를 지구 표면에 그리면 목표의 서쪽에 도착(운동하는 오른쪽으로 휘어진 결과)하는 것으로 나타난다.



| 그림 6-13 | 서로 다른 위도에서 부는 동풍의 바람에 작용하는 전향력. 몇 시간 뒤에 20°N, 40°N, 60°N의 위도선을 따라 부는 바람은 남쪽으로 휘어져 위도선을 벗어난다(적도에서는 휘어지지 않음). 이러한 경로의 휘어짐(전향)은 지구의 자전 때문에 발생한다. 전향되는 방향은 바람이 불고 있는 지표면의 방향에 따라 바뀐다.

에 따라 변하기 때문이다.

그림 6-13을 보면 60°N에서 전향되는 거리는 40°N보다, 40°N은 20°N에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 더욱이, 적도에서는 휘어지지 않음도 알 수 있다. 이로부터 전향력은 위도에 따라 변한다는 결론을 내릴 수 있다. 전향력은 극에서 가장 크고 적도 쪽으로 갈수록 작아지고 적도에서는 작용하지 않는다. 또한 전향되는 거리는 바람의 크기에도 의존한다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 바람이 강할 때는 약할 때보다 같은 시간에 이동한 거리가 크기 때문이다. 전향력의

수학적인 표현은 글상자 6-3에 제시되어 있다.

자유운동하는 물체도 이와 같은 운동 경로의 휘어짐(전향)이 나타난다는 것은 매우 흥미롭다. 이러한 현상은 2차 세계대전 시 발견되었다. 전투함에서 장거리포 포탄 발사 연습을 하던 중 포탄이 목표 지점을 수백 야드 정도 벗어나는 것을 발견하고 목표물의 위치를 보정해야 했다. 짧은 거리를 운동하는 경우에 전향력은 비교적 중요하지 않다. 그림에도 불구하고 중위도 지역에서 이러한 전향력은 야구경기에 있어서 상당히 영향을 미친다. 약 100m를 날아가는 공



글상자 6-3

속도와 위도의 함수인 전향력

Gregory J. Carbone*

그림 6-13은 바람의 속력과 위도가 전향력의 크기에 영향을 준다는 것을 나타낸다. 서로 다른 네 위도(0°, 20°N, 40°N, 60°N)에서 부는 서풍을 생각해 보자. 시간이 경과하면, 적도를 제외한 다른 위도에서는 지구의 자전 때문에 위도와 경도의 방향이 바뀌게 되어 바람의 방향이 위도선의 오른쪽으로 향하게 된다. 이때 바람의 방향이 위도선과 이루는 각은 고위도일수록 커지고, 또한 같은 시간에 운동한 거리가 커지기 때문에 바람이 강할수록 커진다. 위도와 바람의 세기가 전향력에 미치는 중요성은 다음 식으로부터 알 수 있다.

$$F_{CO} = 2v \Omega \sin \phi$$

여기서 F_{CO} 는 단위질량당 코리올리힘, v 는 바람의 속력, $\Omega(= 7.29 \times 10^{-5})$ 는 지구의 자전각 속도, ϕ 는 위도를 나타낸다. ($\sin 0^\circ = 0, \sin 90^\circ = 1$)

여기서, 초속 10m로 부는 바람에 작용하는 코리올리힘의 예를 들어보자.

$$\begin{aligned} F_{CO} &= 2\Omega \sin \phi v \\ &= 2\Omega \sin 40^\circ \times 10\text{ms}^{-1} \\ &= 2(7.29 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}) = 0.64(10\text{ms}^{-1}) \\ &= 0.00094\text{ms}^{-2} \end{aligned}$$

$$= 0.094\text{cms}^{-2}$$

여기서 계산한 결과는 가속도의 차원(0.094cms⁻²)을 갖는데 그 이유는 단위질량에 대한 힘을 계산했기 때문이다.

앞의 식을 이용하면 어느 위도나 풍속에 대해서도 전향력을 계산할 수 있다. 표 6-A에 몇 가지 경우에 대하여 전향력을 계산해 두었다. 단위는 가속도(cms⁻²)로 나타내었다. 지균 균형을 이루고 있는 상태에서는 기압경도력과 전향력은 거의 같은 크기를 가지고 있기 때문에, 글상자 6-2에 예시한 기압경도력 0.296cms⁻²은 비교적 강한 바람을 일으킬 수 있을 것으로 생각할 수 있다.

* Gregory J. Carbone 교수는 사우스캐롤라이나 대학의 교수로서 지리학을 전공하고 있다.

표 6-A 위도와 풍속에 따른 전향력의 변화

풍속		위도			
(m/s)	(kph)	0°	20°	40°	60°
		전향력(cm/s ²)			
5	18	0	0.025	0.047	0.063
10	36	0	0.050	0.094	0.126
25	90	0	0.125	0.235	0.316

은 전향력에 의해 약 1.5cm 정도나 휘게 된다. 이 정도면 홈런이 될 수 있는 타구가 파울볼로 나타날 수 있다.

학생들이 자주 하는 질문

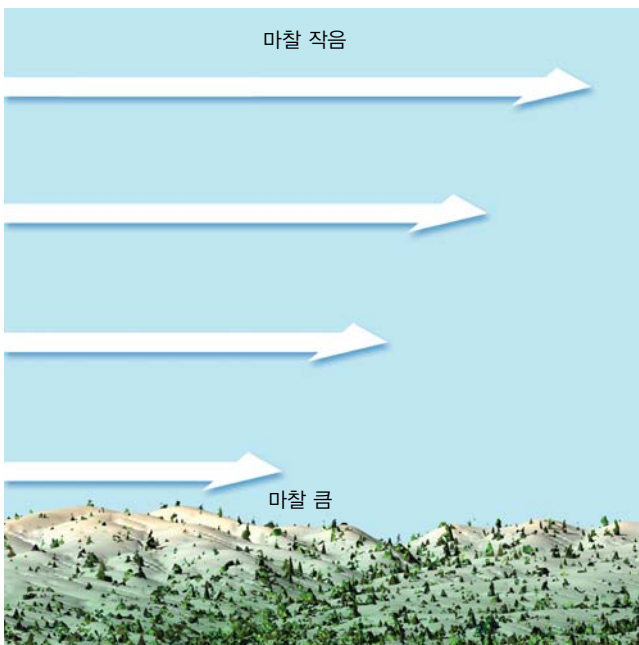
싱크대의 물이 빠져나갈 때 북반구에서는 어느 한쪽 방향으로만 회전하고, 남반구에서는 그 반대 방향으로 회전한다고 하는데 사실인가?

아니다! 이러한 잘못된 상식은 과학적 법칙을 옳지 않은 곳에 적용한 데서 오는 것이다. 북반구의 중관 규모 저기압계에서는 바람이 반시계 방향으로, 남반구에서는 시계 방향으로 분다는 것은 사실이다. 싱크대에서 물이 빠질 때도 이와 같은 어느 한 방향으로의 회전이 일어난다고 (검증 없이) 생각하는 사람이 있다. 그러나 저기압은 1,000km 이상이나 되는 규모를 가지고 있으며 수명 또한 수일 정도이다. 반면에 싱크대는 기껏해야 1m 정도의 크기를 가지며, 물이 빠지는 것도 불과 수초 정도에 끝이 난다. 이러한 작은 규모의 운동에 작용하는 전향력은 거의 무시할 정도로 작다. 따라서, 싱크대의 물이 빠질 때 나타나는 회전 현상은 전향력과는 무관하다.

요약하면, 자전하는 지구에서 전향력은 운동하는 물체를 북반구에서는 오른쪽으로, 남반구에서는 왼쪽으로 휘게 한다. 전향력은 (1) 운동을 하는 방향에 대해 항상 직각 방향으로 작용하며 (2) 바람의 크기에는 영향을 미치지 않고 (3) 바람이 강할수록 커지고 (4) 고위도일수록 강하게 작용하며 적도에서는 작용하지 않는다.

마찰

앞에서 기압경도력은 바람을 일으키는 첫 번째 요인이라고 말한 적이 있다. 다른 힘과 균형을 이루고 있지 않을 때, 기압경도력은 공기가 고기압 쪽에서 저기압 쪽으로 운동하도록 가속도를 가한다. 따라서, 다른 힘과 균형을 이룰 때까지 바람은 점차 가속되어 강해진다. 그러나 우리는 경험적으로 바람의 속력이 무한히 커지지는 않는다는 것을 알고 있다. 어느 정도 수준에서 바람이 더 이상 가속되지 않기 위해서는 기압경도력에 맞서는 다른 힘이 있어야 한다. 일상생활의 경험에서 우리는 마찰력은 운동하는 물체의 속력을 감소시



(a)



(b)

| 그림 6-14 | (a) 상층으로 갈수록 지표면에 의한 마찰력이 작아지므로 바람은 강해진다. (b) 산 위의 나무에 덮인 눈이 왼쪽에 많이 있는 것으로 보아 바람의 영향을 받았음을 알 수 있다.(사진 : E. J. Tarbuck)

키는 것을 알고 있다. 마찰력은 지상 근처의 바람에는 매우 큰 영향을 미치지만, 상층의 바람에 대해서는 그다지 중요하지 않다(그림 6-14). 이것을 고려하여, 이제부터 바람을 상층과 지상 근처로 나누어서 살펴보기로 하자.

상층의 바람과 지균풍

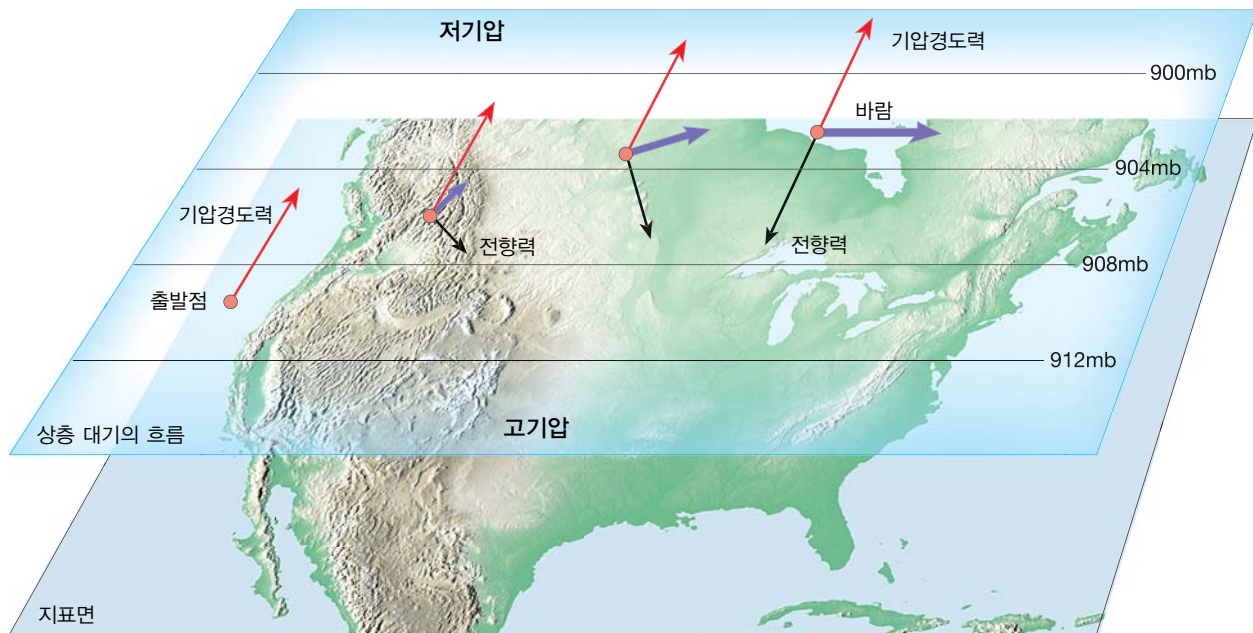
여기서는 마찰력이 거의 무시할 수 있을 정도로 작게 작용하는 고도 수 킬로미터 이상에서 부는 바람에 대하여 살펴보기로 하자.

상층의 바람에 대해서, 전향력은 기압경도력과 균형을 이루고 있으며 바람의 방향을 결정짓는 중요한 요인이다. 그림 6-15는 두 힘이 어떻게 서로 균형을 이루어 가는지를 보여 주고 있다. 간단히 하기 위해서, 초기에 정지하고 있는 공기덩어리를 고려하자(사실 대기가 움직이지 않는 경우는 매우 드물다). 초기엔 정지하고 있으므로 전향력은 아무런 영향도 미치지 않고, 오로지 기압경도력만 작용한다. 항상 고

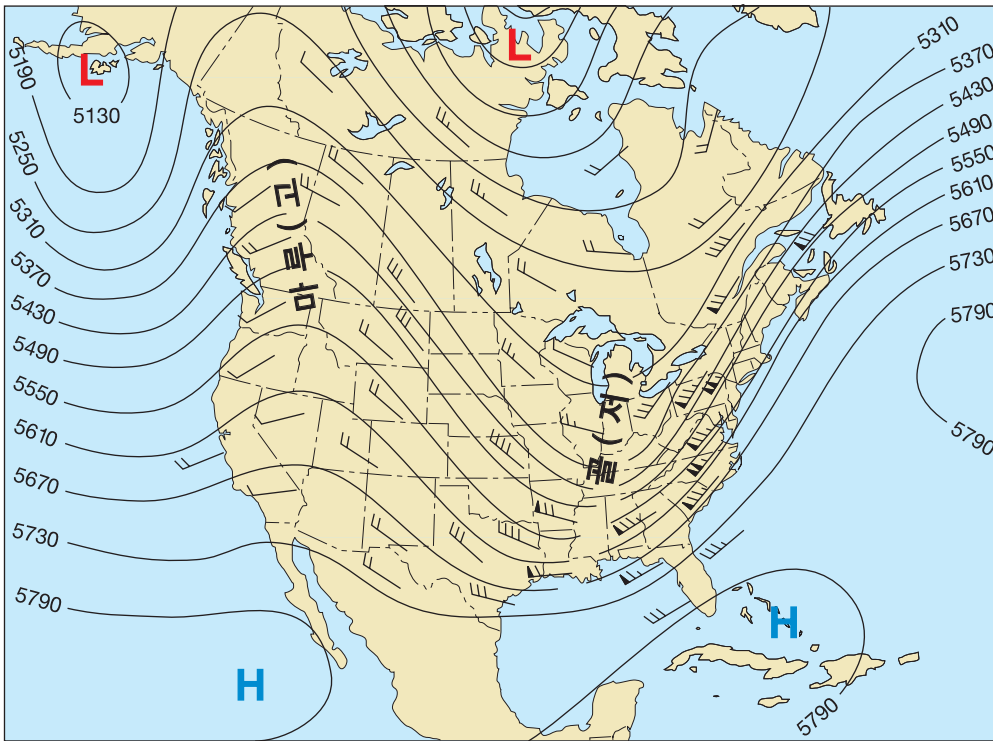
기압에서 저기압으로 작용하는 기압경도력에 의하여 공기는 저기압 쪽으로 운동하도록 가속을 받는다. 운동이 시작되면, 전향력이 작용하게 되어 운동 방향을 북반구에서는 오른쪽으로 휘게 한다. 공기가 가속됨에 따라 전향력도 강해진다(전향력은 운동의 속력에 비례함). 따라서, 속력이 커질수록 더욱 오른쪽으로 휘게 된다.

마지막엔 바람이 등압선과 나란한 방향으로 불게 된다. 이렇게 되면 그림 6-15에서 볼 수 있듯이 기압경도력은 전향력과 균형을 이루게 된다. 균형이 유지되는 한 바람은 일정한 속력으로 등압선에 나란한 방향으로 분다. 다른 말로 하면, 가속하지도 감속하지도 않는 상태로 등압선을 따라 운동한다.

이와 같이 기압경도력이 전향력과 균형을 이루며 서로 반대 방향으로 작용하는 상태를 지균 균형이라고 한다. 이런 균형 상태의 바람을 **지균풍**(geostrophic wind)이라고 한다 (geostrophic은 '지구에 의하여 방향을 바꾼다.'라는 의미). 지균풍은 등압선을 따라 직선으로 불며, 속력은 기압경도력

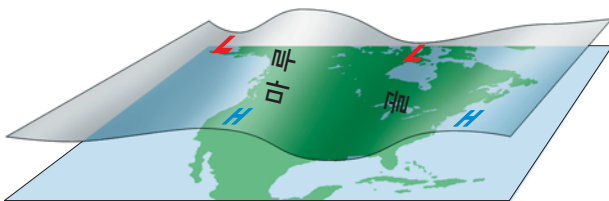


| 그림 6-15 | 지균풍. 공기가 정지해 있을 때 작용하는 힘은 기압경도력뿐이다. 일단 운동이 시작되면, 전향력이 작용하게 되어 운동 방향을 북반구에서는 오른쪽으로 휘게 한다. 바람의 속력이 커질수록 전향력이 더욱 강해져서 바람은 더욱 오른쪽으로 휘게 되고 최종적으로는 등압선과 나란하게 된다. 이때 기압경도력은 전향력과 균형을 이루게 되는데, 이러한 바람은 지균풍이라고 불린다. 실제 대기에서 바람은 시시각각 변하는 기압장에 균형을 이루기 위하여 계속 변한다. 그 결과 지균 평형을 이루는 과정은 여기서 보여진 것보다는 훨씬 불규칙하다.



ff	풍속 (시간당 마일)
⊙	무풍
—	1~2
—	3~8
—	9~14
—	15~20
—	21~25
—	26~31
—	32~37
—	38~43
—	44~49
—	50~54
—	55~60
—	61~66
—	67~71
—	72~77
—	78~83
—	84~89
—	119~123

(a) 상층 일기도



(b) 상층 일기도의 표현

|그림 6-16| 상층 일기도. (a) 간략한 일기도에서 상층 바람의 방향과 크기를 읽을 수 있다. 바람 기호의 방향이 등압선과 거의 나란하다. 다른 상층 일기도와 마찬가지로, 일정한 고도(예 : 평균 해수면)에 대한 기압을 표시한 것이 아니라 같은 기압(여기서는 500hPa)이 나타나는 고도의 자료를 표시한 것이다. 이와 같은 방법을 사용해도 기압과 고도는 함수관계가 있으므로 혼동을 초래할 가능성은 없다. 고도가 높게 나타나는 지점은 기압이 높고, 낮게 나타나는 지점은 기압이 낮다는 것을 의미한다. 따라서, 고도가 큰 값을 연결하는 등치선은 기압이 높은 곳을 연결한 것과 같다. (b) 위 그림의 500hPa 등압면 고도장을 나타낸 것

에 비례한다. 등압선이 조밀할수록 지균풍은 강하고, 등압선의 간격이 멀수록 약하다.

중요한 것은, 지균풍은 실제 대기의 바람을 근사적으로 나타낸 것으로서 앞에서 설명한 이상적인 조건에서 존재한다는 것이다. 실제 대기에서 바람은 지균풍과 정확히 일치하지는 않는다. 그럼에도 불구하고, 지균풍 모델은 상층의 바람에 대한 매우 유용한 근사로 사용된다. 기상학자들은 상층의 기압장을 측정함으로써(등압선의 방향과 간격), 바람의 방향과 크기를 알아낼 수 있다(그림 6-16).

지균풍근사는 바람이 등압선과 나란하고 속력은 등압선

의 간격에 의존한다는 것을 나타내고 있다. 즉, 등압선이 조밀할수록 바람이 강하다(그림 6-16). 또 중요한 것은 지균풍 모델을 이용하면 바람으로부터 기압을 계산할 수 있다는 것이다. 이러한 기압과 바람의 상호연관성은 관측 자료의 균형(기압과 바람)을 검토함으로써 상층 일기도의 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다. 게다가 이것은 상층의 직접 관측 자료의 수를 최소화하도록 해 주는데, 상층의 정밀한 자료는 수집하기도 힘들고 많은 비용이 든다.

앞에서 본 것처럼, 풍향은 기압 패턴과 직접적으로 관련되어 있다. 그러므로, 바람의 방향을 알면 대체적인 기압 패

턴을 추정할 수 있다. 바람과 기압의 직접적인 관련성은 네덜란드의 기상학인 Buys Ballot에 의해 1857년에 최초로 제시되었다. Buys Ballot의 법칙에 의하면 북반구에서 바람을 등지고 서 있는 경우, 저기압은 왼쪽에 고기압은 오른쪽에 위치하고 있다. 남반구에서는 이와 정반대가 된다.

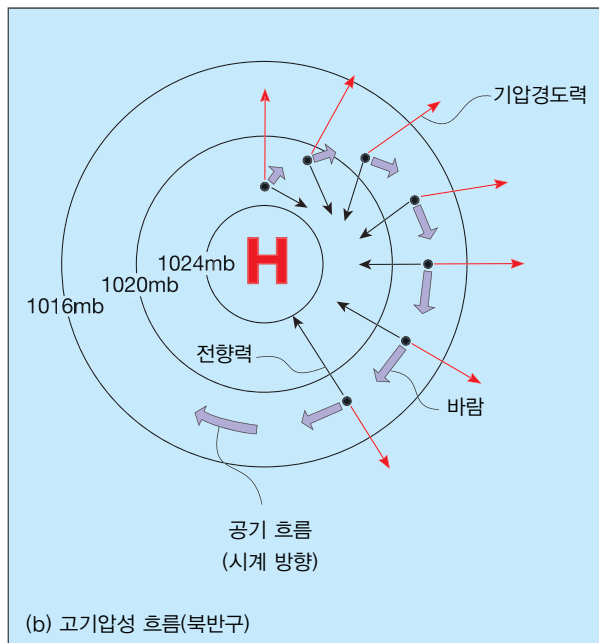
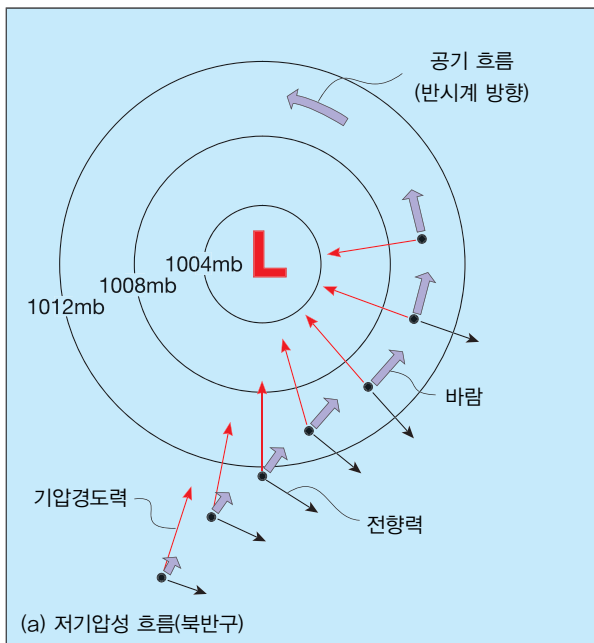
비록 Buys Ballot의 법칙이 상층의 대기에 잘 적용이 된다 하더라도, 지상 근처의 바람에 적용할 때는 주의가 필요하다. 지상에서는 마찰력과 지형이 있기 때문에 이러한 이상적인 법칙은 수정되어야 한다. 지상에서는 바람을 등지고 서 있을 경우 시계 방향으로 30° 회전을 해야만, 저기압이 왼쪽에, 고기압이 오른쪽에 위치하게 된다.

요약하면, 수 킬로미터 이상의 상층에서는 바람이 지균풍형을 이루고 있다. 즉, 바람은 등압선과 나란한 방향으로 불고 바람의 크기는 기압경도력으로부터 계산할 수 있다. 지균풍에 이어, 바로 다음에서 직선이 아닌 곡선을 따라 흐르는 바람에 대하여 살펴보자.

곡선류와 경도풍

일기도를 열핏만 보아도 등압선은 직선이 아니라는 것을 알 수 있다. 넓고 둥그런 곡선인 경우가 많다(그림 6-9). 때때로 등압선은 저기압 또는 고기압의 닫힌 둥그런 곡선을 이룰 때도 있다. 따라서 직선으로 부는 지균풍과는 달리 고기압 또는 저기압 주위의 바람은 곡선의 등압선을 따라 분다. 이처럼 곡선의 등압선을 따라 일정한 속력으로 부는 바람을 **경도풍**(gradient wind)이라고 한다.

기압경도력과 전향력이 어떻게 경도풍을 만들어 내는지 알아보자. 그림 6-17a는 저기압 중심 근처에서의 경도풍을 나타낸다. 바람이 불기 시작하면 코리올리힘이 바람의 방향을 휘게 한다. 북반구에서는 코리올리힘이 바람을 오른쪽으로 휘게 하는데, 그 결과 저기압에서는 시계 반대 방향으로 바람이 불게 된다(그림 6-17a). 그 반대로 고기압 주변에서는 바깥쪽으로 향하는 기압경도력이 안쪽으로 향하는 코리올리힘에 의해 어느 정도 상쇄되어 결과적으로는 시계 방향의 바람이 발생한다(그림 6-17b).



| 그림 6-17 | 상층의 저기압과 고기압 중심 근처 바람 구조를 보여 주는 모식도. 실제 대기에서는 풍향과 풍속은 시시각각 변하는 기압장에 따라 변화한다. 그 결과 경도풍 균형을 이루는 과정은 이보다 훨씬 복잡하다.

글상자 6-4

덴버 쿠어스 야구장에서는 볼이 더 멀리 날아갈까?

1995년 건립 이후 쿠어스 야구장은 홈런타자에게 유리한 야구장으로 불려 왔다(그림 6-B). 이러한 별명은 개장 이후 첫 8시즌 중 7시즌에서 최다 홈런 수와 최고 홈런타율이 이 구장에서 기록되어 붙여진 것이다.

이론적으로 보면, 쿠어스 구장(고도 5,280ft)에서 잘 맞는 타구는 다른 구장보다 약 10% 정도 더 멀리 날아가게 되어 있다. 이러한 거리의 증가는 쿠어스 구장의 공기 밀도가 낮기 때문이다. Robert Adair(예일 대학의 물리학 교수)에 의하면, 유체역학적인 측면에서 볼 때 정확한 것은 아니지만, 애틀랜타에서 400ft를 날아갈 공이라면 덴버에서는 425ft 정도 날아갈 수 있다는 것이다.

덴버 콜로라도 대학의 연구 그룹은 최근 공기가 희박한 쿠어스 야구장에서 공이 더 멀리 날아간다는 가설을 검증하였다. 그들이 내린 결론에 의하면, 지대가 높은 것 때문에 공이 더 멀리 날아가는 효과가 지나치게 과장되어 있다는 것이다. 그들은 타자에게 유리한 이유는 지대가 높은 것 때문이 아니라, 로키 산맥에 의한 유리한 기상 조건과 낮은 공기 밀도가 투구에 미치는 영향 때문이라고 하였다.

예를 들면, 바람은 홈런이 아닌 타구를 홈런으로 만들 수도 있고, 반대로 홈런이 될 수 있는 타구를 평범한 장타로 만들 수도 있다. Adair 교수에 의하면, 만일 타자의 뒤쪽에서 시속 10mile의 바람이 분다면 400ft 날아갈 수 있는 공을 약 430ft나 날아가는 홈런으로 만들 수 있다고 한다. 그 반대로 바람이 같은 속도로 타자의 앞쪽에서 불어온다면 그 공은 약 30ft 정도 더 짧게 날아갈 것이다. 여름철에 쿠어스 구장이 있는 덴버에서는 남풍 또는 남서풍의 바람이 주로 분다. 이 풍향은 쿠어스 구장의 타석에서 외야 쪽으로 부는 방향에 해당하므로 투수보다는 타자에게 유리하다. 공기의 밀도는 투수가 던진 투구의 속력에도 크게 영향을 미친다. 특히 변화구의 휘는 정도는 더욱더 공기 밀도에 민감하다. 지대가 높은 곳에서는 변화구의 휘는 정도가 줄게 되어 타자는 쉽게 볼을 칠 수 있다.

요약하면, 쿠어스 야구장이 타자의 낙원으로 불리는 데는 지대가 높은 것 이외에도 공기 밀도와 바람의 방향 등 여러 요인이 작용하고 있다.



그림 6-B | 콜로라도 로키 팀의 홈구장인 덴버 쿠어스 야구장은 해발고도 약 1.6km에 위치하고 있다. 이 구장은 타자에게 유리한 야구장으로 알려져 있다.(사진 : Ronald Martinez/Getty Images)

남반구에서는 코리올리힘이 바람을 왼쪽으로 휘게 하기 때문에 위에서 설명한 바람의 방향이 북반구와는 반대가 된다. 즉, 저기압 주변에서는 시계 방향, 고기압 주변에서는 시계 반대 방향의 바람이 형성된다.

흔히 저기압 중심을 **사이클론**이라 부르고 그곳에서 형성되는 바람을 **저기압성 바람**(cyclonic flow)이라 한다. 저기압성 바람은 지구의 자전 방향과 같은 방향이다. 북반구에서는 반시계 방향, 남반구에서는 시계 방향의 바람이 분다. 고기압 중심은 흔히 **안티사이클론**(anticyclone)이라 불리고, **고기압성 바람**(anticyclonic flow, 지구 자전의 반대 방향)이 분다. 등압선과 직각인 방향으로 기압이 낮은 부분을 **기압골**이라 하고, 기압이 높은 부분을 **기압마루**라 한다(그림 6-16). 기압골 근처에서의 바람은 저기압성 바람이고, 기압마루에서는 고기압성 바람이 분다.

이제부터 저기압성과 고기압성의 경도풍을 일으키는 힘에 대해서 생각해 보자. 바람이 곡선을 이루고 있게 되면 바람을 일으키는 힘에 의해 풍속은 일정하게 유지되더라도 바람의 방향은 바뀌게 된다. 이것은 직선운동하는 물체는 힘을 받지 않는 한 계속 직선운동을 하려 하는 관성의 법칙(뉴턴의 제1법칙) 때문이다. 여러분들은 누구나 자동차가 급회전을 할 때 몸이 계속 곧바로 앞으로 나아가려고 하는 것을 경험했을 것이다(부록 E 참조).

그림 6-17a에서 보면, 저기압 중심에서 안쪽으로 향하는 기압경도력은 바깥쪽으로 향하는 전향력에 의해 상당 부분 상쇄되는 것을 알 수 있다. 그러나 바람 경로를 등압선과 나란히 곡선으로 유지하기 위해서는, 안쪽으로 향하는 기압경도력이 코리올리힘에 비해 훨씬 커야 한다. 그래야만 공기가 결국 안쪽으로 운동하게 된다. 공기가 안쪽으로 향하게 하는 힘을 구심력이라 한다. 다른 말로 하면 기압경도력은 직선운동을 하려는 공기를 중심 쪽으로 운동하게 하는 코리올리힘보다 훨씬 강해야 한다.*

고기압성 바람의 경우에는 위에서 이야기한 정반대 현상이 벌어진다. 즉, 안쪽으로 향하는 전향력이 바깥쪽으로 향하는 기압경도력과 균형을 이루어야만 공기에게 중심 쪽으로 향하는 힘을 가하게 하여 궁극적으로는 동심원 방향으로 회전하도록 한다(바깥쪽으로 나가지 않고). 그림 6-17에서 보면, 지균풍과는 달리 코리올리힘은 정확히 기압경도력과 균형을 이루고 있지는 않다(화살표의 길이가 서로 다르다). 이러한 불균형은 곡선운동을 유지하게 하는 힘(구심력)을 제공한다.

상층에서는 곡선궤도로 부는 바람을 형성하는 데 구심력이 중요하지만, 지상 근처에서는 마찰력이 커서 이러한 구심력을 상당히 약화시킨다. 결과적으로 토네이도와 태풍과 같이 강한 회전을 동반하는 폭풍을 제외하고는 구심력의 효과는 거의 무시할 정도로 작기 때문에 지상 근처의 대기 순환에 있어서는 중요하게 여겨지지 않는다.

지상풍

지상으로부터 1~2km 정도의 고도에서는 바람에 영향을 미치는 마찰력은 상당히 중요하다. 우리는 마찰이 공기운동 속도를 낮추는 작용을 한다는 것을 알고 있다(그림 6-18). 마찰력에 의해 운동 속도가 감소되면, 풍속에 비례하는 특성을 가진 전향력 또한 감소하게 된다. 기압경도력은 풍속의 영향을 받지 않기 때문에, 전향력과의 균형이 깨져서 바람의 방향이 바뀌게 된다(그림 6-19). 이 결과, 공기는 등압선을 가로질러 저기압 쪽으로 운동하게 된다.

지표의 거칠기는 등압선을 가로지르는 각도와 풍속에 영향을 미친다. 비교적 평활한 해양 표면에서는 마찰이 비교적 작으며, 공기는 등압선과 약 10° 내지 20°의 각도를 이루는 방향으로 운동하고 풍속은 지균풍의 약 2/3 정도가 된다. 지표가 거친 곳에서는 마찰력이 크며, 등압선을 가로지르는 각은 약 45° 정도나 되고 풍속은 지균풍의 반 정도로 감소한다.

* 원운동을 할 때 바깥쪽으로 작용하는 힘을 원심력이라 한다.



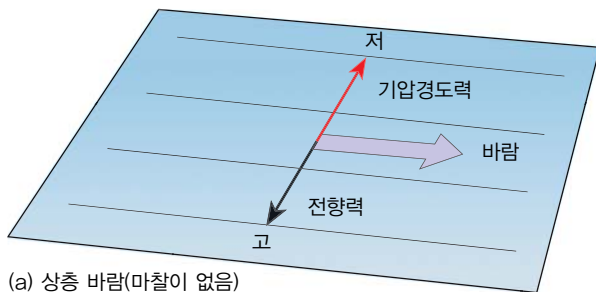
| 그림 6-18 | 방설책은 바람을 약화시킴으로써 눈의 수송 능력을 감소시킨다. 그 결과 방설책 앞쪽(바람을 맞는 쪽)에 눈이 많이 쌓이게 된다.(사진 : Stephen Trimble)

지표 근처에서 마찰력은 공기운동의 방향을 바꿈으로써 공기의 재분배(혼합)에 중요한 역할을 한다. 이러한 현상은 지상 일기도에서 가장 흔하게 볼 수 있는 고기압, 저기압 주변에서 특히 잘 알 수 있다.

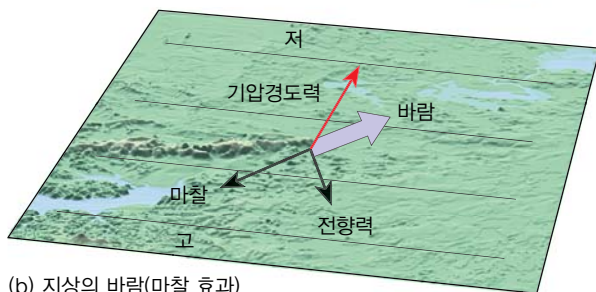
앞에서 배운 바에 의하면 마찰력이 약한 상층에서는 북반

구의 저기압은 시계 반대 방향으로, 고기압은 시계 방향으로 등압선과 나란한 방향으로 분다. 마찰력이 작용하게 되면 공기는 등압선을 가로질러서 운동하는데, 등압선과 이루는 각도는 지표의 거칠기에 따라 변하지만, 분명한 것은 항상 고기압에서 저기압 쪽으로 운동한다는 것이다. 따라서 저기압의 경우, 마찰의 영향으로 공기는 중심 쪽으로 흘러 들어 가게 된다(그림 6-20). 고기압의 경우는 저기압과 반대의 현상이 일어난다. 중심에서 바깥쪽으로 갈수록 기압이 낮아지며 공기도 중심에서 바깥쪽으로 흘러 나가게 된다. 그러므로 지상 저기압의 경우 공기는 시계 반대 방향으로 불어 들어가게 되며(그림 6-21), 지상 고기압의 경우 시계 방향으로 불어 나가게 된다. 물론 남반구에서는 전향력이 바람을 왼쪽으로 휘게 하는 성질이 있으므로 북반구와는 반대의 현상이 일어난다. 지상 고기압의 경우 시계 반대 방향으로 불어 나간다.

북반구와 남반구에서 공통적으로 저기압 주변에서는 바람이 불어 들어오고(수렴), 고기압의 경우 발산이 생긴다. 이러한 고기압과 저기압에 관련된 발산과 수렴에 대해서는 나중에 다시 다루도록 하겠다.

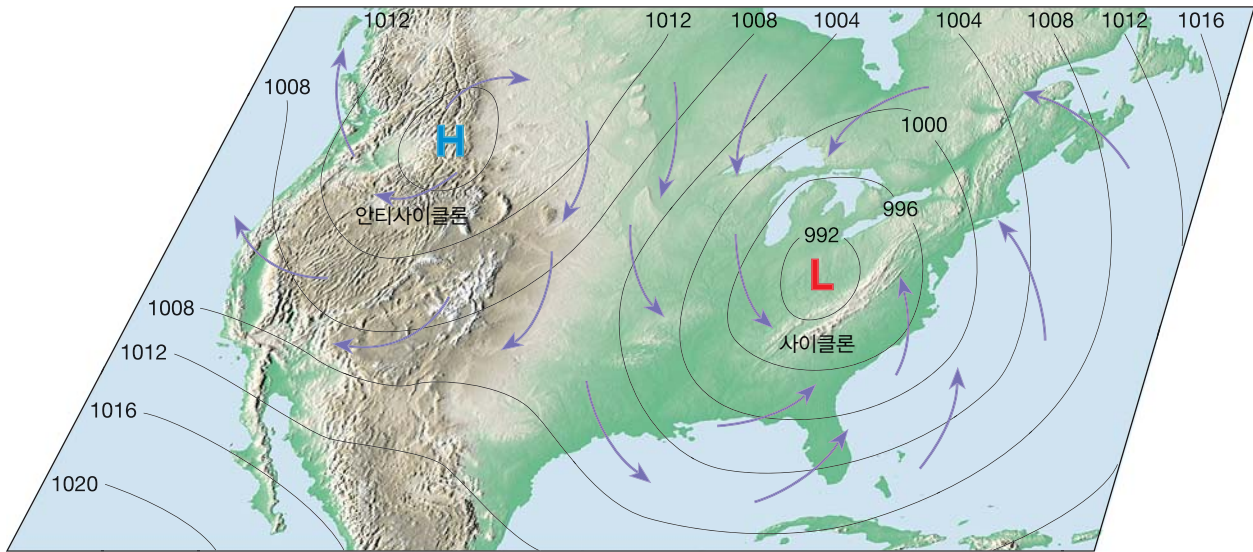


(a) 상층 바람(마찰이 없음)



(b) 지상의 바람(마찰 효과)

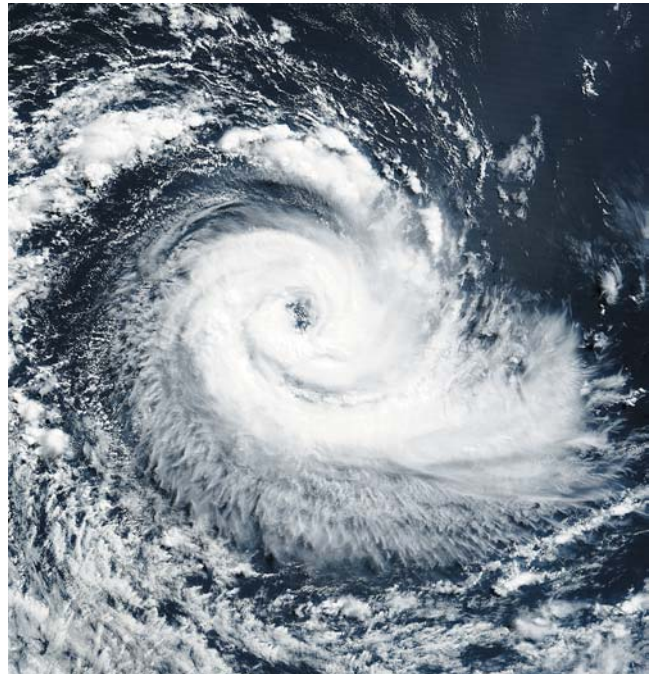
| 그림 6-19 | 상층과 지상 근처의 바람의 비교. 마찰력은 풍속을 감소시키는데, 이것은 전향력을 감소시키게 되고 결국은 바람이 등압선을 가로지르는 방향으로 불게 한다.



| 그림 6-20 | 북반구의 고기압과 저기압의 예. 화살표는 바람의 방향을 나타내는데 저기압 주변에서는 시계 반대 방향으로 불어 들어가고, 고기압 주변에서는 시계 방향으로 불어 나온다.



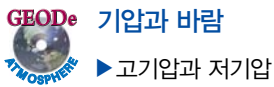
(a)



(b)

| 그림 6-21 | 북반구와 남반구의 저기압성 순환. 구름의 패턴으로부터 하층 대기 흐름의 방향을 짐작할 수 있다. (a) 2004년 8월 17일 알래스카 만에 위치한 대형 저기압계의 위성 구름 사진. 구름 패턴으로부터 바람이 시계 반대 방향으로 흘러들어 가는 것을 알 수 있다. (b) 2004년 3월 26일 브라질 연안 지역 근처의 남대서양에서 관측된 강한 저기압성 폭풍. 바람이 시계 방향으로 불어 들어가는 것을 알 수 있다.(사진 : NASA 제공)

수평바람에 의한 연직운동의 발생



지금까지 우리는 한 지역의 바람이 다른 지역에 어떻게 영향을 미치는가에 대해서는 전혀 고려하지 않았다. 저명한 과학자에 의하면, 남아메리카의 나비의 날개짓이 미국에서 토네이도를 발생시킬 수 있다고 한다. 물론 이것은 과장된 표현이지만 한 지역의 대기운동이 시간이 지남에 따라 다른 지역의 기상에 얼마나 큰 영향을 미치는가를 암시한다.

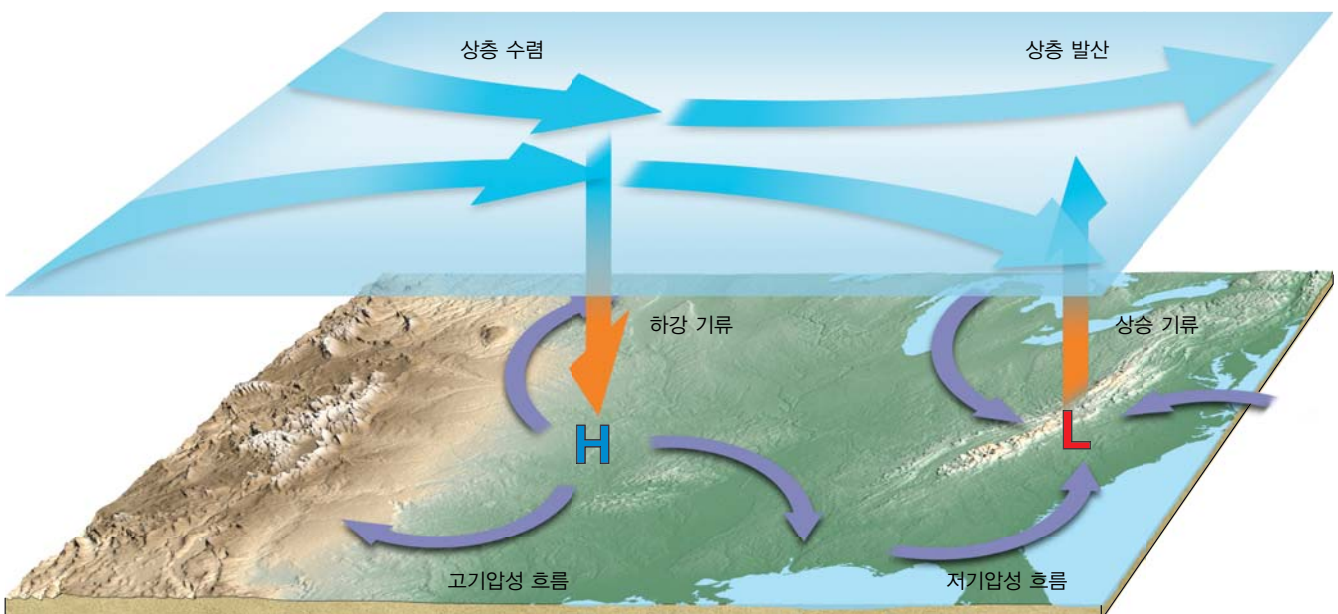
한 가지 중요한 의문은 수평 대기운동과 연직운동의 관계에 관한 것이다. 비록 연직운동이 수평운동에 비하여 작기는 하지만 그것은 기상 현상에 있어서는 매우 중요하다. 상승하는 공기는 구름과 강수 현상을 일으키는 반면, 하강하는 공기는 단열 가열되며 구름을 소산시킨다.

이 절에서는 바람이 어떻게 기압에 영향을 미치고, 또 바람을 어떻게 생성시키는지 알아보기로 하자. 그렇게 함으로써 우리는 수평 및 연직 방향의 대기운동의 상호관계는 물론 그것이 날씨에 미치는 영향을 알게 될 것이다.

사이클론과 안티사이클론에 관련된 연직운동

먼저 공기가 나선 모양으로 안쪽으로 흘러들어 가는 지상 저기압 주변의 대기운동(사이클론)을 고려하자. 안으로 공기가 몰려들면 저기압이 차지하고 있는 수평 면적이 줄어든다. 이것을 수렴수렴이라고 부른다(그림 6-22). 공기가 수렴으로 수렴하면 공기가 쌓이게 되므로 저기압은 위 방향으로 늘어나게 된다. 이러한 역학적 과정은 키가 큰 그리고 무거운 공기기둥을 만들어 낸다. 이렇게 되더라도 윗부분의 공기가 여전히 가볍게 유지되는 한 기압은 낮은 채로 유지된다. 이것은 마치 모순처럼 보이는데, 왜냐하면 공기가 몰려들어 쌓이게 되면 기압이 높아질 것으로 생각되기 쉽기 때문이다. 결과적으로, 캔 커피의 뚜껑을 열었을 때 캔 내부의 진공이 사라지는 것처럼 저기압은 빨리 소멸되어야 한다.

여러분들은 지상 저기압이 오랫동안 수명을 유지하기 위해서는 상층에서 이와 반대의 공기운동이 일어나야 된다는 것을 알게 될 것이다. 예를 들면, 상층의 발산(공기가 퍼져 나감)이 하층의 수렴과 같은 비율로 일어나야만 저기압은 유지된다. 그림 6-22는 지상 저기압을 유지하기 위해서 필요한 하층의 수렴과 상층의 발산의 관계를 모식적으로 나타내



| 그림 6-22 | 지상 사이클론과 안티사이클론에 관련된 대기 흐름. 저기압 또는 사이클론에서는 지상 공기가 수렴 및 상승하여 구름을 형성한다. 고기압 또는 안티사이클론에서는 지상 공기가 발산 및 하강하여 맑은 날씨를 유지한다.



(a)



(b)

| 그림 6-23 | 기압과 관계된 전형적인 날씨의 변화를 보여 주는 사진. (a) 중국 상하이에서 비 오는 날의 우산 행렬. 저기압은 구름형성과 강우와 종종 관련된다.(사진 : Stone/Getty Image, Inc.-Stone Allstock) (b) 고기압일 때는 맑은 날씨가 예상된다. 델라웨어, 헨로펜 해변에서 일광욕을 즐기는 풍경.(사진 : Mark Gibson/DRK Photo)

주고 있다.

상층의 발산이 하층의 수렴보다 클 수도 있다. 이 경우에는 지상 저기압이 더욱 강해지고 상승류의 속력도 증가한다. 따라서 상층의 발산은 폭풍을 유지시키는 것은 물론 강하게 만들기도 한다. 한편, 상층의 발산이 약하게 되면 지상 저기압도 점차 약해진다.

사이클론에 있어서 지상 근처의 수렴이 있게 되면, 공기는 전체적으로 보아 위쪽으로 운동하는 것이 된다. 연직운동 속력은 매우 작아서 보통 하루에 운동하는 거리가 1km보다 작다(뇌우와 관련된 연직 속도는 때때로 시속 100km를 넘을 때도 있다는 것을 기억해 두길 바란다). 그럼에도 불구하고 상승운동은 구름과 비를 형성하기 때문에 저기압 중심이 통과하게 되면 대기가 불안정해지고 강한 바람이 발생한다.

드물기는 하지만 상층의 발산이 하층 저기압을 만드는 경우도 있다. 상층 공기의 발산은 하층 공기가 상승해야 함을 의미하는데, 이것은 다시 하층 대기의 수렴을 초래한다.

사이클론과 마찬가지로 안티사이클론도 상층의 대기운동에 의하여 유지되어야 한다. 지상 근처의 발산은 상층의 수렴과 하강운동에 의하여 발생한다(그림 6-22). 하강공기는 압축되고 가열되기 때문에 안티사이클론에서는 구름과 강수가 형성되지 않는다. 따라서 고기압이 접근하게 되면 일반적으로 날씨가 맑아진다.

기압계 눈금의 가장 아래쪽에는 ‘폭풍’, 가장 위쪽에는 ‘맑음’으로 표시하는 것이 상례이다(그림 6-23). 기압 변화의 경향(상승, 하강 또는 현상 유지)을 조사함으로써 우리는 다가올 기상 상태를 알 수 있다. 그렇게 기압을 보고 판단하는 것(기압 경향이라 불림)은 단기 기상에 매우 유용하다. 사이클론과 안티사이클론을 기상 상태와 연관지어 생각하는 것이 매우 일반적이라는 것은 다음과 같은 시 구절을 보아도 잘 알 수 있다.

When the glass falls low,
Prepare for a blow;
When it rises high,

🌍 학생들이 자주 하는 질문

산멀미를 일으키는 원인은?

3,000m 이상의 고산지대로 운전하거나 걸을 때에 종종 숨이 차고 쉽게 피곤해짐을 느끼는 경우가 있다. 이러한 증상은 해수면보다 공기 중에 산소가 30% 정도나 적기 때문에 발생한다. 이러한 고도에서는 우리 몸이 더 많은 산소를 얻고 혈액 속의 산소 농도를 높이기 위하여 호흡 및 심박 속도가 빨라지게 된다. 증가된 혈액순환은 뇌세포를 팽창시켜서 산멀미 증후군(두통, 불면증, 멀미 증상 등)을 유발하게 된다. 산멀미는 일반적으로 치명적인 것은 아니며 저고도 지역에서 하룻밤 정도 휴식을 취하면 나올 수 있는 증상이다. 종종 고산지대를 등산하다가 고지대 폐부종에 걸려 사망하는 수가 있다. 이러한 치명적인 상태는 폐에 물이 차서 생기는데 신속한 응급처치를 받아야만 한다.

Let all your kites fly.

기압이 떨어지면, 큰 바람이 일 것에 대비하라.

기압이 상승하면, 밖에 나가 연을 날려라.

이제 여러분들은 텔레비전의 일기예보관들이 고기압과 저기압의 위치와 예상 통과 지역을 왜 강조하는지 잘 알았을 것이다. 약천후를 가져오는 것은 늘 저기압이다. 저기압은 대체적으로 서에서 동으로 이동하는데, 그 속도는 미국 대륙을 횡단하는 데 대체적으로 2~3일 걸리는 정도이다. 그들이 지나가는 경로는 매우 불규칙하기 때문에 정확한 예보를 하는 것은 매우 어렵고 단기예보에 있어서 매우 중요한 예보 대상이다. 정확한 예보를 하기 위해서는 상층의 흐름이 폭풍을 강화할 것인가 아니면 억제할 것인지를 파악해야 한다.

연직 속도를 강화시키는 요인

연직 속도와 기상 상태는 매우 밀접한 관계가 있는데, 지금부터는 지표 근처의 수렴(상승운동)과 발산(하강운동)에 어떠한 요인들이 영향을 미치는지에 대해서 자세히 알아보기로 하자.

지상 마찰은 여러 방법으로 발산과 수렴을 일으킬 수 있

다. 비교적 평활한 해양 표면으로부터 육지로 바람이 불어 가게 되면, 마찰력이 증가하게 되므로 풍속은 급격히 감소하게 된다. 풍속이 감소하면 공기는 위로 쌓이게 되고, 따라서 바다 끝쪽에서는 수렴과 상승 기류가 발달하게 된다. 이러한 효과는 육지에서 구름이 발생하기 쉬운 조건을 형성하는데, 이것은 종종 플로리다처럼 습한 지역에서 발생하는 해풍과 관련되어 있다. 그 반대로 바람이 육지에서 바다로 불게 되면, 마찰이 감소하고 풍속이 증가하게 되므로 바다 위에서 발산과 하강 기류가 발달하게 된다(만일 찬 공기가 비교적 따뜻한 지표 위로 불게 되면 지표에서의 가열로 인해 지표 근처의 공기가 불안정해진다).

산악지형도 또한 대기 흐름을 저해하고 발산과 수렴을 발생시킨다. 바람이 산악 지역을 통과하게 되면 연직 방향으로 수축되는데, 이것은 상층에서의 발산을 유도한다. 산악 뒤쪽으로 도달하게 되면 공기는 연직 방향으로 확장하게 되어 수평수렴을 일으킨다. 나중에 알게 되겠지만 이러한 효과는 로키 산맥 동쪽의 날씨에 대단히 큰 영향을 미친다. 바람이 산을 내려가면서 남쪽으로 불게 되면 전향력의 효과가 감소하고 수평발산이 발생한다. 반면에 산을 올라가면서 북쪽으로 불게 되면 전향력의 효과는 증가하고 수렴과 상승운동이 일어나기 쉽다.

지표 조건과 상층 대기 흐름이 밀접하게 연관되어 있기 때문에, 대기운동은 특히 중위도의 상하층을 연관시켜 총체적으로 이해해야 된다는 것이 강조되어 왔다. 다음 장에서 대기 대순환을 알아본 다음, 대기 대순환 관점에서 수평운동과 연직운동의 관계에 대해 다시 한 번 살펴보기로 하자.

바람의 관측

바람의 두 요소인 풍향과 풍속의 관측은 날씨 관측에 있어서 대단히 중요하다. 풍향은 바람이 불어오는 방향을 나타낸다. 북풍은 북에서 남으로 부는 바람이며, 서풍은 서에서 동으로 부는 바람이다. 풍향을 재는 데 흔히 사용되는 것은 풍

향계이다(그림 6-24). 이 기기는 빌딩의 옥상에서도 흔히 볼 수 있는데, 바람이 불어오는 방향으로 화살표가 향하게 된다. 때때로 풍향은 풍향풍속계와 연결된 다이얼에 표시된다. 다이얼은 나침반의 눈금(N, NE, E, SE 등)과 같이 풍향, 또는 0~360°까지의 각도를 나타낼 경우 0°(또는 360°)는 북쪽을, 90°는 동쪽을, 180°는 남쪽을, 270°는 서쪽을 각각 나타낸다.

풍향이 시시각각으로 바뀔 때 빈도가 가장 높은 바람의 방향을 **주풍**(prevailing wind)이라고 한다. 여러분은 중위도에서 탁월한 편서풍은 잘 알고 있을 것이다. 예를 들면, 미국에서는 이러한 편서풍이 날씨 패턴을 서에서 동으로 이동시킨다. 작은 고기압과 저기압(각각 시계 방향과 시계 반대 방향의 흐름을 가짐)은 편서풍에 실려서 서에서 동으로 이동하게 된다. 이와는 대조적으로 그림 6-25에서 볼 수 있는 것처럼 무역풍대의 바람은 훨씬 더 지속적이다.

바람장미(wind rose)는 시시각각으로 방향이 변하는 바람에 대해 각각의 방향에 대한 백분율을 나타냄으로써, 주풍을 표현하는 한 가지 방법이다(그림 6-25). 바람장미에서 선의 길이는 바람이 그 방향으로 분 상대적인 시간(백분율로 표시)을 나타낸다. 어떤 지역에서 바람 패턴을 알고 있으면 매우 유용하게 활용할 수 있다. 예를 들면, 공항을 건설할 때 활주로는 이착륙을 수월하게 하기 위하여 주풍 방향과 나란하게 설계한다. 더욱이 주풍은 지역의 기상과 기후에 매우

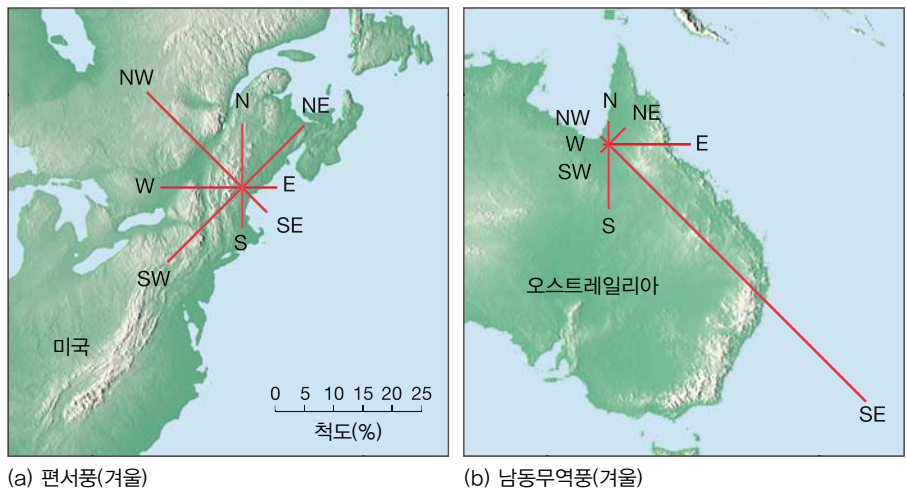


그림 6-24 | 풍향계(오른쪽)와 풍속계(왼쪽). 풍향계는 바람의 방향을, 풍속계는 바람의 속력을 측정한다.(사진 : Belfort Instrument Company)

큰 영향을 미친다. 태평양 북서부의 캐스케이드 산맥처럼 남북으로 뻗은 산맥은 주풍인 편서풍이 산 위를 지날 때 상승 기류를 유발시킨다. 이 결과, 산맥의 서쪽은 비가 많은 반면에 동쪽은 건조하게 된다.

풍속은 보통 **컵풍속계**(cup anemometer, 그림 6-24)로 측정하는데, 풍속은 마치 자동차의 속도계와 같은 바늘 눈금으로 표시된다. 간혹 풍향계나 컵풍속계 대신에 **에어로베인**(프로펠러식 풍향풍속계, aerovane)이 사용되기도 한다. 그림 6-26에서 볼 수 있는 것처럼 에어로베인은 풍향계와

그림 6-25 | 여러 방향으로 부는 바람에 대하여 각 방향에 대한 빈도수(시간을 백분율로 나타냄)를 나타내는 바람장미. (a) 미국 동부의 겨울철 바람 방향의 빈도. (b) 오스트레일리아 북부의 겨울철 바람의 빈도. 오스트레일리아 지역에서는 남동 무역풍, 미국 동부에서는 편서풍이 탁월하게 나타난다. (자료 : G. T. Trewartha)



(a) 편서풍(겨울)

(b) 남동무역풍(겨울)



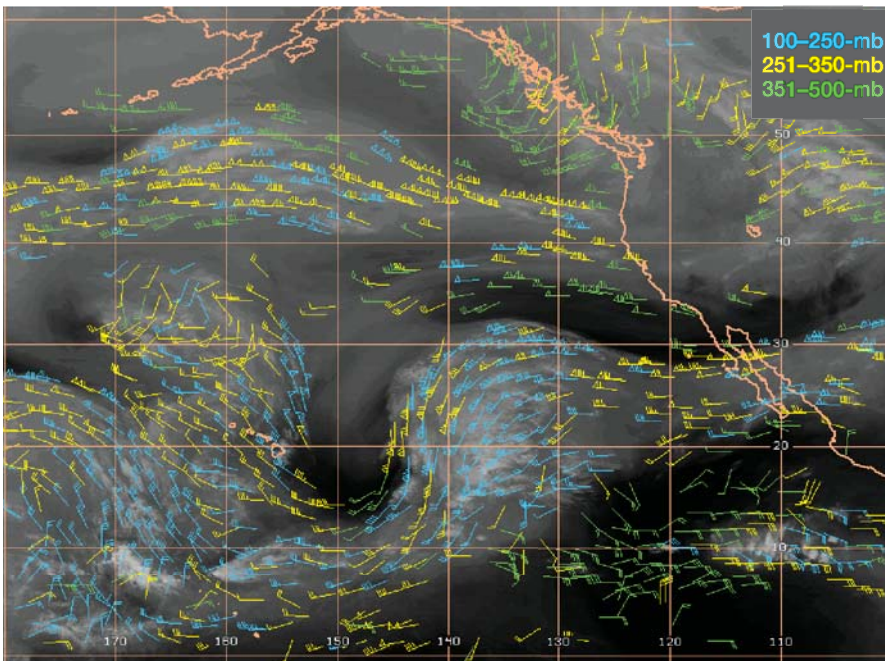
| 그림 6-26 | 에어로베인(사진 : Warren Faidley/Weatherstock)

매우 흡사한데, 한쪽 끝에 프로펠러가 달려 있다. 넓직한 수직판(fin)은 프로펠러가 바람 방향을 향하도록 작용하며 풍속에 비례하여 회전판(blade)이 회전하도록 한다. 이 기기는 풍속과 풍향을 연속적으로 관측하기 위하여 기록계에 부착되어 있다. 바람이 강하고 지속적으로 부는 곳은 풍력 에너

지를 모으기에 좋은 장소가 된다(글상자 6-5 참조).

작은 공항과 같은 곳에서는 종종 바람자루(wind sock)가 이용되기도 한다. 그것은 원뿔 모양의 바람 주머니로 이루어져 있는데, 양 끝이 뚫려 있어서 바람이 자유롭게 통과할 수 있으며 바람 부는 방향으로 길게 늘어지게 된다. 바람 주머니가 얼마나 크게 부풀려져 있는가를 보면 바람의 세기를 대충 짐작할 수 있다.

지구 표면의 70%가 물로 덮여 있기 때문에 위에서 언급한 간단한 방법으로는 풍속을 잴 수 없다. 일부 해상에서 기상 부이나 선박에 의한 풍향 및 풍속의 관측이 가능하기는 하지만, 1990년 이후 일기예보의 향상에 크게 기여한 것은 주로 위성 관측에 의한 풍향 및 풍속 자료 덕분이다. 풍향 및 풍속 자료를 얻는 한 가지 방법은 위성 자료로부터 구름의 이동 경로를 추적하는 것이다. 이것은 약 5분 내지 30분 간격으로 관측한 GOES 영상 자료를 비교함으로써 얻어진다(그림 6-27). 이러한 방법은 특히 태풍의 상륙 시기와 장소를 예측하는데 매우 유용하다.



| 그림 6-27 | GOES 기상위성 관측에 의한 상층 바람의 분포



글상자 6-5

풍력 에너지 : 잠재성이 높은 대체 에너지

공기는 질량을 가지고 있기 때문에 움직이게 되면 운동 에너지를 갖게 된다. 이 운동 에너지는 다른 역학적 에너지나 또는 전기 에너지로 변환될 수 있다(그림 6-C).

바람에 의한 기계적 에너지는 시골 지역의 지하수 인양 등에 흔히 사용된다. 농가의 풍차는 이러한 예의 하나이다. 바람으로부터 변환된 기계적 에너지는 이외의 다른 목적으로도 사용될 수 있는데, 예를 들면 제재소, 제분소, 범선이나 요트 등의 동력으로도 사용될 수 있다. 또는 풍력에 의하여 생산된 전기는 가정과 산업시설 또는 그 외의 여러 곳에 사용된다.

태양 에너지의 약 0.25%가 지구상의 바람을 일으키는

데 사용된다. 비록 이것은 매우 작은 부분이지만 에너지의 절대 양은 굉장히 많은 것이다. 노스다코타 주에서만 생산할 수 있는 풍력발전 전기는 미국 전기 수요량의 약 1/3을 넘는 것으로 추정된다. 풍속은 풍력발전기의 설치에 제일 중요한 요소로 꼽힌다. 일반적으로 연중 평균 풍속이 시속 21km를 넘어야만 풍력발전소 설치의 경제성을 확보할 수 있다.

바람에 의한 풍력 에너지는 풍속의 세제곱에 비례한다. 따라서 평균 풍속이 시속 12mph인 지역은 11mph인 지역에 비하여 33% 정도의 발전량을 더 기대할 수 있다. 왜냐하면 12의 세제곱은 11의 세제곱의 약 1.33배이기 때문이다(실제 발전 증가량은 33%보다는 작다



| 그림 6-C | 캘리포니아 팜스프링스 근처의 풍력발전기. 캘리포니아는 풍력발전의 개발이 가장 활발한 곳이다. 2004년 현재 캘리포니아는 2,043MW의 풍력 에너지를 발전할 수 있는 잠재력을 가지고 있다(전 미국 발전 용량의 1/3). 이것은 50만 내지 60만 가정에 전력을 공급할 수 있는 용량이다.(사진 : John Mead/Science, Library, Researchers, Inc.)

하더라도 9%[(12-11)/11]보다는 더 많다. 중요한 것은 풍속의 작은 차이가 발전량에 있어서는 큰 차이를 가져올 수 있다는 것이다. 또한 풍속이 어느 정도 이하이면 전혀 발전의 효과가 없다는 것이다(풍속이 시속 6mph인 경우는 12mph인 경우에 비해 약 1/8 정도의 에너지 생산이 가능할 뿐이다).*

기술이 발달되면 될수록 다른 발전 방법과 경쟁력을 가질 정도로 풍력 발전의 효율성은 점점 향상된다. 기술 발전에 힘입어 1983년과 2004년 사이에 풍력발전 비용은 85%나 감소되었다. 그 결과 풍력발전량은 극적으로 증가되었다. 전 세계의 풍력발전 총량은 1997년의 7,636MW에서 2004년에는 47,000MW로 증가하여 약 6배의 신장세를 보였다(표 6-B). 47,000MW는 미국의 1,050만 가구에 전력을 공급하기에 충분한 양으로서, 14

개의 대형 원자력발전소의 발전량과 거의 같은 양이다. 2005년 말에 미국의 발전 용량은 약 9,200MW에 달하였다(그림 6-D). 2008년 또는 2009년이 되면 미국의 풍력 발전량은 추가로 3,000MW 이상 늘어날 전망이다.

미국의 에너지관리국은 2020년의 풍력발전량이 전체 발전량의 5% 정도가 되도록 풍력발전량 증가 계획을 발표하였다. 이 계획은 현재의 증가 추세로 보아 매우 타당한 것으로 보인다. 따라서 풍력발전 방법은 대체 방법으로부터 주 에너지 생산 방법으로 위상을 높여 갈 것으로 보인다.

* American Wind Energy Association. "Wind Energy Basics" http://www.awea.org/faq/tutorial/wwt_basics.html

표 6-B 풍력발전 용량이 가장 많은 10개국(2004)

나라	발전량 (MW*)
독일	16,629
스페인	8,263
미국	6,740
덴마크	3,117
인도	3,000
이탈리아	1,125
네덜란드	1,078
영국	888
일본	874
중국	764

* 1MW는 대략적으로 미국의 250~300가구에 공급하기에 충분한 전력에 해당한다. 표에서 제시한 상위 10개국의 풍력 에너지는 전 세계 풍력 에너지의 약 95%를 차지한다.

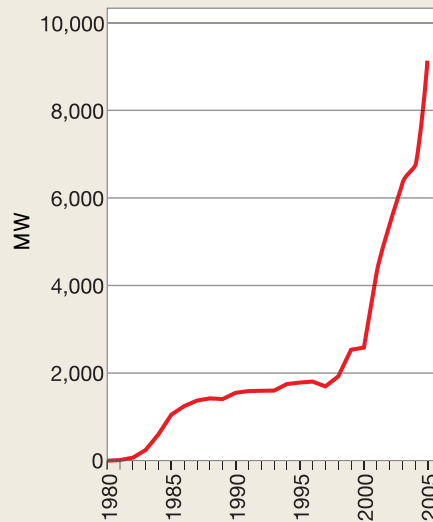


그림 6-D 미국의 풍력발전량의 연 변화(2005년 말, 단위는 MW). 최근의 증가 추세가 두드러지게 나타난다.(자료 : 미국 에너지관리국과 풍력에너지협회)

요약

- 기압은 공기의 무게에 의해 가해지는 압력이다. 해수면의 평균 기압은 $1\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 에 해당한다. 기압은 기체 분자 충돌이 표면에 가하는 힘으로도 정의할 수 있다.
- 뉴턴(N)은 대기압을 나타내는 단위이다. 밀리바(mb)는 100Nm^{-2} 에 해당한다. 표준 해면기압은 1013.25mb이다. 기압의 측정에는 수은기압계와 아네로이드 기압계가 사용된다. 수은기압계는 수은기둥의 높이로 기압을 나타내는데 평균 해면기압은 760mm(29.92in)의 수은기둥에 해당하며, 아네로이드 기압계는 기압에 따라 모양이 바뀌는 부분 진공금속관을 사용한다.
- 어느 고도의 기압은 그 위에 놓인 공기의 무게와 같다. 고도에 따른 기압의 감소는 지표 근처에서 가장 크다. 평균적인 고도에 따른 기압의 변화는 표준대기로 주어지는데, 이상적인 기압의 연직 분포를 제공한다.
- 정지대기에서 기압에 영향을 주는 두 요소는 온도와 습도이다. 차고 건조한 공기는 따뜻하고 습한 공기에 비해 무거워서 기압을 증가시키게 된다.
- 바람은 수평기압차에 의하여 발생한다. 지구의 자전과 마찰력이 없다고 가정하면, 공기는 고기압 지역에서 저기압 지역으로 이동할 것이다. 그러나 이 두 가지 요소가 존재하기 때문에, 바람은 (1) 기압경도력, (2) 전향력, (3) 마찰력의 합력에 의하여 크기와 방향이 정해진다. 기압경도력은 바람을 일으키는 가장 근본적인 힘으로서, 기압 차이에 의하여 발생하며 일기도상의 등압선의 간격과 관련이 있다. 등압선의 간격은 거리의 변화에 따른 기압 변화량, 즉 기압경도력을 나타낸다. 조밀한 등압선은 기압경도력이 크고 바람이 강한 것을 의미한다. 반대로 등압선의 간격이 크면 기압경도력이 작고 바람도 약한 것을 의미한다. 기압은 연직 방향으로도 변화하는데 대체적으로 중력과 균형을 이루고 있다. 이것을 정역학평형이라고 부른다. 중력이 연직기압경도력보다 크면 하강 기류가 발생하게 된다. 전향력은 지구의 자전에 의하여 바람의 방향이 휘어지게 한다(북반구에서는 진행하는 오른쪽 방향으로, 남반구에서는 진행하는 왼쪽 방향으로). 바람의 방향이 영향을 받는 정도는 북극으로 갈수록 크고 적도에서는 0이 된다. 전향력은 풍속이 클수록 강하게 작용한다. 마찰은 지표 근처에서는 바람에 큰 영향을 미치지만, 수 킬로미터 이상의 상층에서는 무시할 수 있을 정도로 작다.
- 수 킬로미터 이상의 상층에서는 마찰력이 매우 작아서 무시해도 좋을 정도이다. 상층에서는 풍속이 증가함에 따라 바람을 휘게 하는 전향력도 강해진다. 전향력이 기압경도력과 크기가 같고 서로 반대 방향으로 작용할 때 부는 바람을 지균풍이라 한다. 지균풍은 곡선이 아닌 직선 경로를 따르고 등압선과 나란한 방향으로 부는데, 풍속은 기압경도력의 크기에 비례한다.
- 곡선의 등압선을 따라 일정한 속력으로 부는 바람을 경도풍이라 한다. 저기압(사이클론이라 불림)의 중심 근처에서 바람은 북반구에서는 시계 반대 방향으로, 남반구에서는 시계 방향으로 분다. 반대로 고기압(안티사이클론) 중심 근처에서는 저기압과는 반대의 바람 방향을 갖게 된다(북반구에서는 시계 방향, 남반구에서는 시계 반대 방향). 등압선이 저기압과 고기압 지역으로 늘어난 지역을 각각 기압골과 기압마루라 한다.
- 지표 근처에서 마찰력은 바람의 방향이 바뀌게 하는데(더 이상 등압선과 나란한 방향이 아님), 이것은 공기(질량)의 재분배에 중요한 역할을 한다. 마찰력이 작용하게 되면, 바람은 등압선을 가로질러 고기압에서 저기압으로 불게 된다. 따라서 북반구의 저기압 중심 근처에서는 바람이 시계 반대 방향으로 불어 들어가며, 북반구의 고기압 중심 근처에서는 시계 방향으로 불어 나오게 된다. 북반구와 남반구에 관계없이, 마찰은 저기압에서는 중심 쪽으로 질량이 이동하게 하고(수렴), 고기압에서는 중심 바깥쪽으로 질량이 이동하게 한다(발산).
- 수평수렴과 관계된 지상 저기압은 상층의 발산에 의하여

유지되거나 강화된다. 상층의 발산이 약할 때는 하층의 저기압이 약화된다. 지상 저기압에서 발생하는 수렴장은 연직 상승류를 동반하므로, 저기압이 통과하게 되면 날씨가 나빠진다(바람이 강해지거나 강수를 동반한다). 그와는 반대로 고기압이 접근하게 되면 날씨가 맑아진다. 이와 같이 날씨는 고기압 또는 저기압과 직접적으로 관련되어 있기 때문에, 기압의 변화 경향(기압변화율)의 산출은 단

기 날씨 예측에 대단히 유용하게 쓰인다.

- 풍속과 풍향의 관측은 기상 관측에 있어서 대단히 중요하다. 풍향은 보통 풍향계(wind vane)에 의하여 측정된다. 바람이 시시각각 방향을 바꾸는 경우, 가장 많은 빈도를 차지하는 방향을 주풍이라 한다. 풍속은 보통 컵풍속계로 측정한다.

핵심용어 ●●●

경도풍(gradient wind)	등압선(isobar)	에어로베인(aerovane)
고기압(high)	밀리바(millibar)	저기압(low)
고기압성 흐름(anticyclonic flow)	바람(wind)	저기압성 흐름(cyclonic flow)
기압(air pressure)	Buys Ballot의 법칙(Buys Ballot's law)	전향력(Coriolis force)
기압골(trough)	발산(divergence)	정역학평형(hydrostatic equilibrium)
기압경도(pressure gradient)	사이클론(cyclone)	주풍(prevaling wind)
기압기록계(barograph)	수렴(convergence)	지균풍(geostrophic wind)
기압마루(ridge)	수은 기압계(mercury barometer)	컵풍속계(cup anemometer)
기압변화 경향(barometric tendency)	아네로이드 기압계(aneroid barometer)	표준대기(standard atmosphere)
뉴턴(newton)	안티사이클론(anticyclone)	풍향계(wind vane)

복습문제 ●●●

- 표준 해면기압은 몇 mb인가? 몇 cm의 수은주에 해당하는가? 1cm²당 몇 kg의 무게에 해당하는가?
- 수은기압계와 아네로이드 기압계의 작동원리를 설명하라. 아네로이드 기압계의 두 가지 장점을 적어라.
- 왜 기압은 상층으로 갈수록 감소하는가?
- 왜 차고 건조한 공기는 따뜻하고 습한 공기보다 높은 기압을 생성하는지 설명하라.
- 발산과 수렴을 비교 설명하라.
- 바람을 일으키는 첫 번째 요인이 되는 힘은 무엇인가?
- 등압선의 간격과 풍속의 관계를 설명하라.
- 온도는 기압을 변화시키고, 기압은 바람을 생성시킨다. 이러한 원리는 해륙풍에 매우 잘 적용된다. 해풍이 형성되는 과정을 설명하라.
- 연직기압경도력은 매우 크지만, 강한 연직운동을 유발시키지는 않는다. 그 이유는 무엇인가?
- 전향력이 어떻게 바람의 방향을 바꾸는지 간단하게 설명하라.
- 전향력의 크기에 영향을 미치는 두 요소는 무엇인가?
- 지균풍이 형성되는 과정을 설명하라.
- 등압선과 거의 나란하게 부는 상층풍과는 달리 지상 근처의 바람은 등압선을 가로지르게 되는데, 왜 이러한 차이가 생기는지 설명하라.

14. 저기압과 고기압에 관련된 풍향·풍속의 분포를 바람 화살표를 이용하여 나타내 보아라. 북반구와 남반구의 두 가지 경우로 나누어 예시하라.
15. 지상의 저기압이 오랫동안 지속되려면 상층에는 어떠한 조건이 필요한가?
16. 만일 지상기압이 증가하는 경향을 가진다면 어떠한 날씨가 예상되는가? 반대로 만일 기압이 감소하고 있다면 어떠한 날씨가 예상되는가?
17. 바다에서 육지로 바람이 불 때 육지에서는 수렴과 상승 운동이 발생하기 쉽다. 반대로 육지에서 바다로 바람이 불 때 육지에서는 발산과 하강운동이 발생된다. 왜 이러한 현상이 생기는지 설명하라.
18. 남서풍은 ()방향으로부터 ()방향으로 부는 바람이다.
19. 풍향이 315° 이다. 어느 방향으로부터 바람이 불어오고 있는가?

과제 ●●●

1. 거리가 500km 떨어진 두 지점의 기압이 각각 1,010mb, 1,017mb이다. 기압경도력을 계산하여라.
 - a. 위도 35° 에서 초속 10m의 바람이 불 때
 - b. 위도 65° 에서 초속 10m의 바람이 불 때
 - c. 위도 35° 에서 초속 15m의 바람이 불 때
2. 다음 세 경우에 대하여 전향력의 크기를 계산하여라.

