



어, 바람이 약해졌네.
북극진동이 마이너스로 내려가고 있어.

이제 여기는 따뜻한 바람이 불겠네.
어휴, 어떻게 해.
저 아래 한국은 이제 엄청 추워지겠는걸.

북극 바람이 약해지면,
저 먼 곳까지 찬 공기가 가다니, 참 신기하지?

그만 내려와. 오존구멍 난 곳을 지나다가
자외선에 화상 입으면 어쩌려고 그래.

관찰아. 오존구멍은 남극에 있는 거야.
북극에는 없다고.

정말 그럴까?



KOPRI
극지연구소



1 회전하는 지구 그리고 지균풍

지구의 대기는 다양한 형태와 크기의 소용돌이로 가득 차 있다. 작게는 육조 속 마개로 빨려 들어가는 물 소용돌이나 동네 운동장에서 때때로 마주치는 먼지 회오리도 있지만, 크게는 우리에게 심각한 피해를 주는 토네이도나 태풍 등 거대한 규모의 소용돌이도 있다. 일기예보에서 우리가 자주 접하는 저기압이나 고기압도 지구유체역학의 관점에서 보면, 반경이 3000~5000킬로미터나 되는 거대 소용돌이로 볼 수 있다. 이들은 우리 일상 생활에서 하루의 날씨를 결정하기도 하고, 강하게 발달하는 경우 폭우나 홍수, 가뭄 등의 심각한 기상 재해를 가져 오기도 한다. 우리는 매일 이렇게 다양한 소용돌이와 더불어 살고 있는 것이다.

그렇다면 이런 소용돌이의 근본 원인은 무엇일까? 간단히 말하면, 바로 지구가 회전(자전)하기 때문이다. 우리가 일상 생활에서는 느끼지 못하지만, 지구상에서 일어나는 크고 작은 소용돌이의 대

부분은 지구의 회전과 직·간접적으로 관련돼 있다. 예를 들어, 육조 속에 물을 담아놓고 한두 시간 가만히 두었다가 배수 마개를 열어 물이 빠져 나가는 것을 관찰해 보면 시계 반대 방향으로 소용돌이가 생기며 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 만약 북반구가 아닌 남반구였다면 시계 방향으로 도는 소용돌이가 생겼을 것이다. 이렇게 남반구와 북반구에서 소용돌이의 회전 방향이 달라지는 것은, 미세하지만 북반구의 경우 회전하는 지구에 대해 상대적으로 움직이는 모든 물체는 시계 반대 방향으로 도는 지구 회전을 느끼기 때문이다. 반대로 남반구에서는 시계 방향으로 도는 지구 회전을 느낀다. 여기서 지구에 상대적으로 움직인다는 것은 어떤 물체가 지구의 회전 방향이나 속도와 다르게 움직이는 것을 말한다.

이런 지구의 회전은 공기나 바닷물과 같은 유체의 흐름에 매우 중요한 역할을 한다. 지구의 반경에 비해 규모가 작은 운동일 경우에는 지구의 회전을 무시해도 좋을 정도로 그 영향이 미미하다. 하지만 규모가 큰 흐름일수록 지구의 회전은 상당히 중요한 역할을 한다. 지구의 반경은 약 6400킬로미터다. 지구가 하루에 한 바퀴를 돌고 있으니, 우리는 항상 시속 약 1500킬로미터의 어마어마한 속도로 움직이고 있는 셈이다. 하지만 일상 생활에서 지구가 이렇게 빠르게 돌고 있다는 걸 느끼면서 살고 있는 사람은 아무도 없다. 즉, 지구 규모에 비해 짧은 거리를 이동하는 물체는 지구의 회전을

잘 느끼지 못한다는 얘기다. 그러나 실제로는 항상 지구 회전의 영향을 받으며 우리는 살아가고 있다. 특히, 그 영향은 지구 반지름에 버금가는 긴 거리를 이동하는 물체의 경우, 북반구에서는 그 경로가 이동하고자 하는 방향의 오른쪽으로 휘는 현상으로 나타난다. 남반구에서는 그 반대인 왼쪽으로 휘게 된다. 즉, 마치 마술과도 같이 어떤 가상의 힘이 항상 물체를 오른쪽(왼쪽)으로 밀어내는 것과 같은 현상이 나타난다. 우리는 이 가상의 힘을 코리올리의 힘이라고 부른다. 이제부터 이런 현상이 왜 나타나는지 알아보자.



우선 물체가 특정 위도에서 동서 방향으로 움직이는 경우를 생각해보자(그림 4-1(a)). 지구상의 모든 물체는 지구와 같은 속도로 회전하고 있다. 그런데 이 물체가 동서 방향으로 움직인다면, 아주 조금이지만, 이 물체는 지구보다 빠른 속도로 움직이는 것이 된다. 따라서 물체는 지구에 대해 상대속도 차이가 나게 되고, 이로 인해 지구 밖으로 튀어 나가려는 원심력을 받게 된다(그림 4-1(a) 오른쪽). 원심력은 그림과 같이 지구의 회전축에 수직 방향으로 작용한다. 이 힘은 다시 지표면에 수직인 성분과 수평한 성분으로 분해되고, 수평 성분의 힘에 의해 북반구에서는 오른쪽으로, 남반구에서는 왼쪽으로 휘게 된다. 물론 지표면에 수직인 성분에 의해 약간 떠오르는 효과가 있지만 그 크기는 무시할 수 있을 정도로 아주 작다.

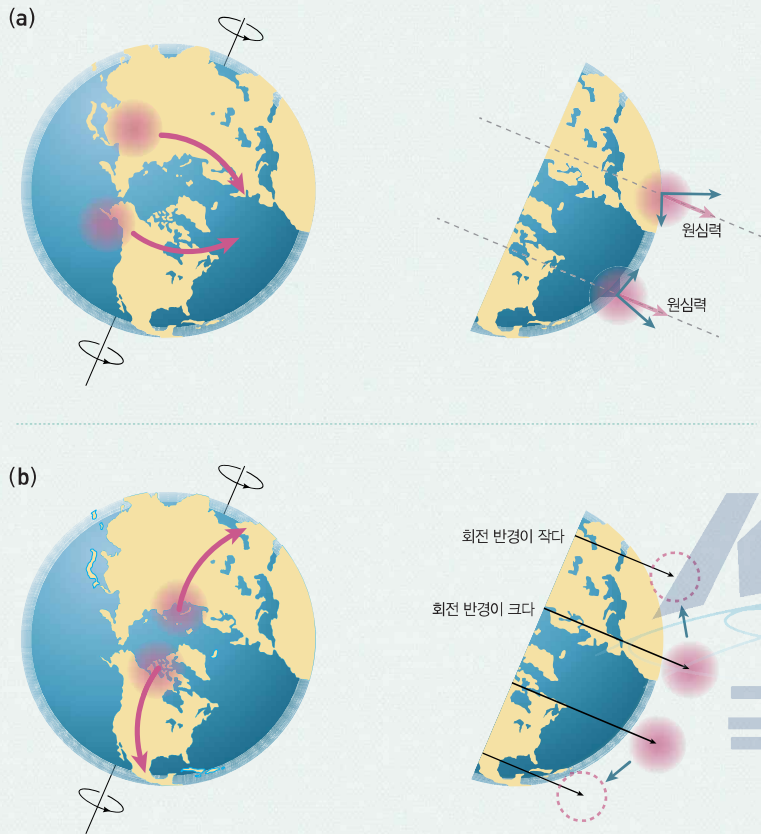


그림 4-1

코리올리의 힘을 설명하는 그림이다. (a) 왼쪽 |북반구(남반구)에서 위도선과 평행하게 이동하는 물체의 경우, 운동 방향의 오른쪽(왼쪽) 직각 방향으로 휘게 된다. 오른쪽 |이 경우 회전하는 물체는 회전축에 수직 방향으로 원심력을 받는다. (b) 왼쪽 |북반구(남반구)에서 경도선에 평행하게 이동하는 경우에도 역시 운동 방향의 오른쪽(왼쪽) 방향으로 휘게 된다. 물체가 고위도 지역으로 이동하면서 회전 반경이 작아져 회전 속도가 빨라진다.

이번에는 물체가 남북 방향으로 이동하는 경우를 생각해 보자 (그림 4-1 (b)). 이 때 주의해야 할 것은 물체가 남북 방향으로 이동하게 되면 물체와 지구 회전축과의 거리(물체의 회전 반경)가 달라진다는 점이다. 하지만 회전 반경이 달라지더라도 운동 중에 이 물체의 각운동량은 보존되어야 한다(용어설명 참조). 각운동량은 회전 반경이 커질수록, 회전 속도가 클수록 커지는 양으로, 회전 반경과 회전 속도의 곱으로 나타낼 수 있다. 외부에서 회전에 영향을 주는 힘, 즉 토크가 가해지지 않는 한, 각운동량은 보존되어야 한다. 따라서 회전 반경이 큰 적도 부근에서 회전 반경이 작은 극 지역으로 물체가 이동하게 되면 물체의 회전 반경이 줄어들면서 각운동량을 보존하기 위해 회전 속도가 빨라진다.

양팔을 쭉 편 채 회전하고 있는 피겨스케이팅 선수를 생각해 보자. 아마도 텔레비전에서 피겨스케이팅 선수가 제자리에서 돌면서, 마지막으로 갈수록 속도를 높이기 위해 바깥으로 쭉 폈던 팔을 안으로 접거나, 두 팔을 모아 머리 위로 쳐드는 모습을 본 적이 있을 것이다. 바로 조금 전 설명과 같은 원리다. 피겨스케이팅 선수가 팔을 접으면 회전 반경이 작아지고, 각운동량 보존 법칙에 의해 회전 속도는 훨씬 빨라지게 되는 것이다(그림 4-2).

이 원리를 그림 4-1 (b)에 적용해 보면, 적도 지역에서 극 지역으로 이동하는 물체의 경우 지구 회전축과의 거리, 즉 회전 반경이

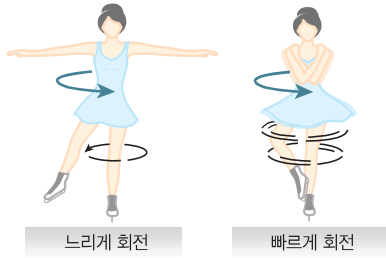


그림 4-2

각운동량이 보존되는 상황에서 피겨스케이팅 선수의 회전 속도 차이. 팔을 폈을 때 보다 팔을 접었을 때의 회전 속도가 빠르다. 팔을 접으면 회전 반경이 작아지고, 각운동량을 보존하기 위해 회전 속도는 빨라진다.

작아지고 각운동량 보존 법칙에 따라 회전 속도는 빨라져야 한다. 그래서 지구보다 빨리 회전해야 하니, 똑바로 올라가지 않고 속도가 빨라져 오른쪽으로 먼저 가게 되는 것이다. 결과적으로 북반구에서는 오른쪽, 남반구에서는 왼쪽으로 휘게 된다.

이제까지 이야기를 한 번 정리해보자. 북반구에서 직선 운동을 하는 물체는 항상 그 운동 방향의 오른쪽 직각 방향으로 휘게 되며 남반구에서는 왼쪽 직각 방향으로 휘어진다. 이는 지구가 회전하기 때문에 생긴다. 이 현상을 마치 가상의 힘을 받는 것처럼 기술하면 쉽게 설명할 수 있다. 이 가상의 힘을 운동 방향을 바꾸는 힘이라는 의미로 전향력轉向力 혹은 코리올리의 힘이라고 부른다.

코리올리의 힘의 특징은 아래와 같다.

① **방향** | 북반구(남반구)에서 유체 흐름의 오른쪽(왼쪽) 수직 방

향으로 작용

- ② **크기** | 극 지역으로 갈수록 강해진다.
- ③ **크기** | 움직이는 속도가 빠를수록 강해진다.

이렇게 지구가 회전하기 때문에 생겨나는 독특한 움직임을 다루는 역학을, 일반적인 유체역학과 구분하여 지구유체역학geophysical fluid dynamics이라고 한다. 즉, 지구유체역학은 지구의 회전을 느낄 정도로 큰 규모의 흐름에 적용되며, 이로 인해 매우 흥미로운 현상들이 생기게 된다. 예를 들어, 바람은 항상 고기압에서 저기압으로 분다는 상식에 어긋나는 흐름이 생겨나게 된다. 그림 4-3을 보자.

우선 그림 4-3 (a)의 경우는 상식적이다. 바람이 고기압에서 저기압으로 불고 있다. 물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것과 마찬가지로 공기도 기압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르지 않을까? 하지만 지구 규모의 큰 흐름에서는 이런 상식이 통하지 않는다. 지구상에서 실제로 부는 바람은 그림 4-3 (b)와 같다. 왜 그럴까? 이 질문에 대한 근본적인 답은 지구의 회전에서 찾을 수 있고, 앞에서 언급한 코리올리의 힘이 바로 그 원인이다. 그림 4-3 (b)의 경우, 바람은 등압선과 평행하게, 저기압을 왼쪽에 두고 불어나가고 있다. 이런 바람을 지균풍Geostrophic wind이라 한다.

바람은 저기압을 왼쪽에 두고 등압선을 가로지르지 않고 나란히

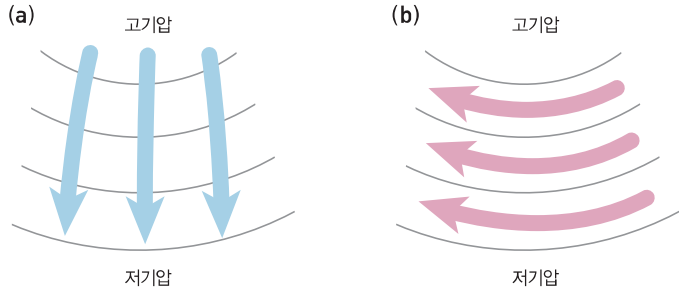


그림 4-3

(a) 규모가 작은 고기압과 저기압이 유도하는 바람 (b) 지구 규모의 고기압과 저기압이 유도하는 바람. 유체 흐름의 규모가 커져 코리올리의 힘이 중요하게 작용하면 바람의 방향이 상식과 다르게 움직인다.

분다. 지균풍은 북반구에서는 언제나 저기압을 왼쪽에 두고 불고, 남반구에서는 저기압을 오른쪽에 두고 분다. 그럼 지균풍은 왜 이렇게 상식과 다르게 엉뚱한 방향으로 부는 걸까?

지균풍이 등압선과 나란히 부는 이유는 힘의 균형 관점에서 생각하면 이해할 수 있다. 먼저 바람은 기압차에 의해 불게 된다. 즉, 기압차가 존재하면 유체에는 힘이 작용한다. 유체를 고기압에서 저기압으로 움직이게 만드는 힘, 이 힘이 바로 기압경도력이다. 만약 기압경도력만 존재한다면 당연히 공기 덩어리는 고기압에서 저기압으로 움직일 것이다. 다시 말해 기압경도력이 존재하는데도, 공기가 등압선을 가로지르지 않고 평행하게 움직인다는 것은 역학

적으로 이를 상쇄하는 다른 힘이 존재하다는 얘기다. 기압경도력을 상쇄하는 또 다른 힘, 그것이 바로 코리올리의 힘이다.

그림 4-4는 기압경도력과 코리올리의 힘이 시간이 흐르면서 평형을 찾아가는 과정을 나타내고 있다. 그림의 맨 왼쪽을 보자. 남쪽에 저기압이 있고, 북쪽에는 고기압이 있다고 가정한다. 그 사이에 있는 공기 덩어리는 기압경도력에 의해 고기압에서 저기압으로 움직이려는 힘을 받게 되어, 바람은 남쪽에서 북쪽으로 불게 된다. 앞에서 살펴본 것처럼, 이렇게 지구상에서 유체가 움직이게 되면, 북반구에서는 움직이는 방향의 오른쪽 직각 방향으로 코리올리의 힘이 작용하기 시작한다.*

즉, 처음에는 기압경도력에 의해 바람이 남쪽에서 북쪽으로 불지만, 곧 여기에 오른쪽으로 휘게 하는 코리올리의 힘이 작용해, 결과적으로는 약간 오른쪽(동쪽)으로 휘면서 바람이 불게 된다.

기압경도력은 힘이다. 우리가 잘 아는 뉴턴의 운동 법칙에 의해 힘은 질량과 가속도의 곱으로 나타낼 수 있다. 기압경도력이 일정하다고 하면, 같은 질량의 공기에서 가속도 역시 일정하다. 가속도가 일정하기 때문에, 시간이 지날수록 공기 덩어리의 속도는 커진

* 정지해 있는 물체에는 코리올리의 힘이 작용하지 않는다. 코리올리의 힘은 가속도 운동을 하는 물체에 작용한다.

다. 코리올리의 힘은 앞에서 살펴본 것처럼 속도에 비례하여 커지는 힘이므로(위 '코리올리의 힘의 특성' 참조), 이제 일정한 기압경도력에 의해 공기 덩어리가 가속되어 바람이 세게 불수록 코리올리의 힘 역시 커지게 된다.

바람의 방향은 처음에는 남쪽에서 북쪽으로 불지만, 코리올리의 힘이 작용하여 오른쪽(동쪽)으로 약간 휘고, 다시 그렇게 약간 오른쪽으로 휘 바람에, 기압경도력은 남쪽에서 북쪽으로, 코리올리의 힘은 바람의 오른쪽 직각 방향으로 작용한다. 그래서 또 약간

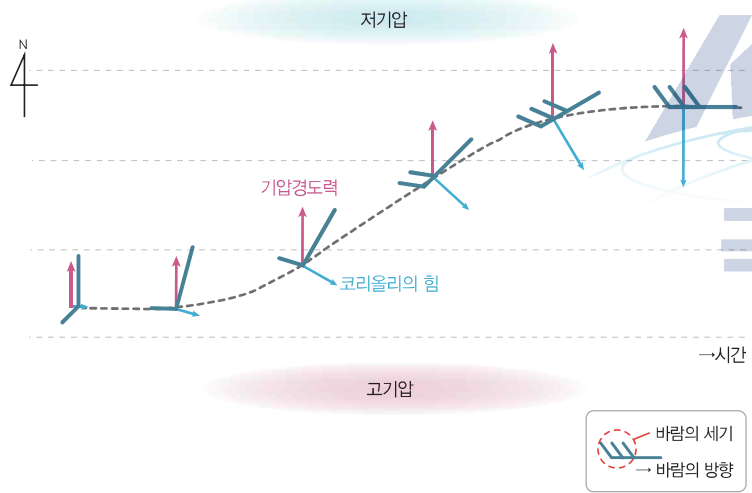


그림 4-4
기압차에 의해 생기는 바람이 시간이 흐르면서 코리올리의 힘에 의해 방향이 휘어진다. 결국 바람은 기압경도력과 코리올리의 힘이 평형을 이루는 방향으로 불게 된다.

극지연구소

오른쪽으로 휘게 된다. 이렇게 시간이 지날수록 방향은 계속 오른쪽으로 휘면서 코리올리의 힘은 바람의 속도에 비례해 점점 강해진다. 결국 그림의 맨 오른쪽처럼, 아래에서 위로 작용하는 기압경도력과 코리올리의 힘이 평형을 이루는 바람의 방향, 즉 기압 배치의 방향과 평행하게, 왼쪽(서쪽)에서 오른쪽(동쪽)으로 바람은 불게 된다. 그래서 북반구에서 바람은 언제나 저기압을 왼쪽에 두고 불게 되는 것이다. 이렇게 등압선에 나란하게 부는 바람이 바로 앞에서 살펴 보았던 지균폭이다.

이제 실제 일기도에서 저기압 주변의 바람장을 한번 살펴보자.

그림 4-5를 자세히 살펴보면, 저기압을 왼쪽에 끼고 바람이 등압선에 평행하게 불고 있음을 알 수 있다. 이렇게 규모가 매우 큰 대기운동의 경우, 바람은 지구 회전의 영향으로 기압차에 평행한 방향으로 분다는 점을 기억하자.



그림 4-5

실제 일기도에 나타난 기압 배치와 바람의 방향이다. 검은색 선은 기압이 같은 곳을 연결한 등압선이고, 화살표가 바람의 방향을 나타낸다. 그림 오른쪽 중간에 있는 저기압을 왼쪽에 두고 바람이 등압선에 나란하게 불고 있다. 이 그림은 상층일기도다. 지상에서는 바람이 지표면과의 마찰에 의해 지균풍 형태를 유지하기 어렵기 때문에 등압선을 가로지르는 흐름이 생겨나기 쉽다.

2 극지를 감싸고 있는 거대한 소용돌이, 극소용돌이

이제 다시 극지 이야기다. 앞에서 길게 전향력과 지균풍을 설명한 이유는 이 개념들이 지구상에 존재하는 가장 큰 소용돌이인 극소용돌이를 이해하는데 중요하기 때문이다. 남극과 북극 상공에는 지구상에서 가장 규모가 큰 소용돌이가 항상 꿈틀대고 있다. 이 소용돌이는 매우 변화무쌍하여 수일에서 수주일의 간격으로 팽창과 수축을 끊임없이 반복한다. 바로 극소용돌이다. 이 소용돌이는 중심에 차잡고 기압이 낮은 공기 덩어리가 있어, 극저기압이라 불리기도 한다. 그림 4-6을 보자.

북극 상공에 떠있는 거대한 저기압 덩어리가 바로 북극소용돌이다. 그림 4-6 (b)의 극소용돌이 단면도처럼 북극 주변 지역은 늘 차잡고 밀도 높은 공기가 떠 있다. 따라서 단단하게 압축된 북극의 대류권은 최상단부인 대류권계면의 높이가 약 8킬로미터 밖에 되지 않는다. 그에 반해 밀도가 낮고 팽창되어 있는 적도 지역에서는 대류권계면의 높이가 약 15킬로미터나 되어 북극에 비해 2배나 두터운 공기 덩어리를 형성하고 있다.

밀도가 크고 상대적으로 차가운 공기는, 밀도가 작은 공기에 비해 위로 올라갈수록 기압이 더 빨리 떨어진다. 그래서 밀도가 큰 차가운 공기로 구성된 북극의 공기는 상층으로 올라갈수록 적도

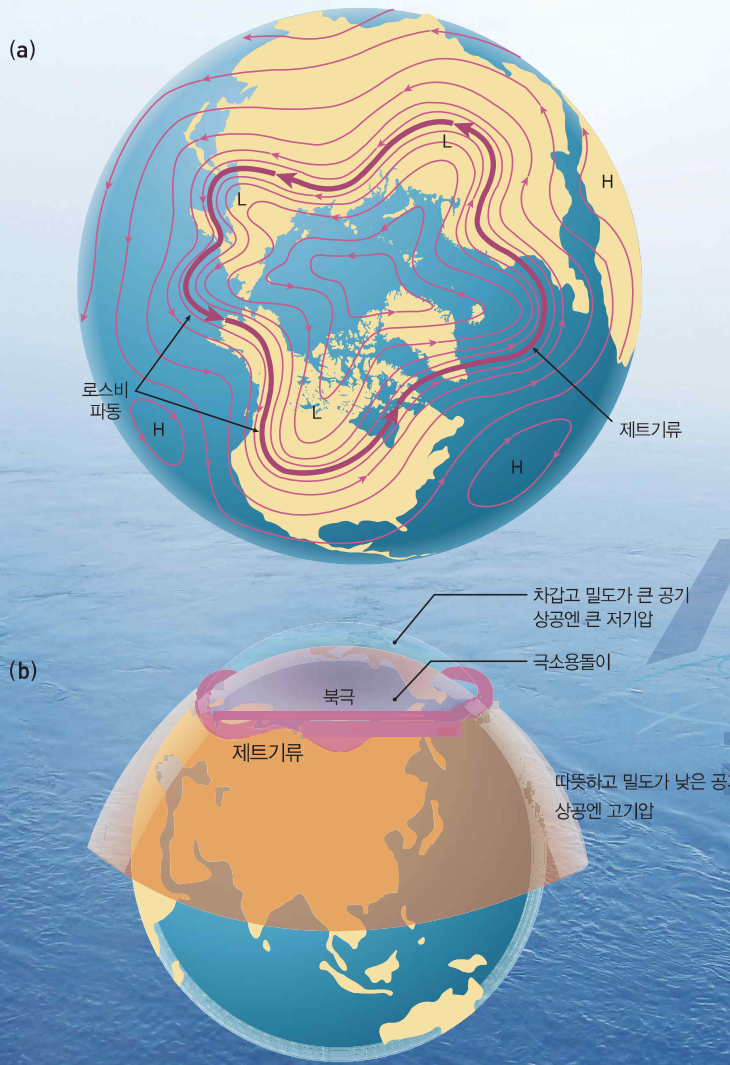


그림 4-6
 (a) 기압의 높낮이 패턴으로 살펴본 북극소용돌이의 구조. Lutgens and Tarbuck(1995)의 그림을 수정.
 (b) 북극소용돌이의 단면도. 북극을 중심으로 차갑고 밀도 높은 공기 덩어리가 지상 부근에 있고, 북극의 대기 상층부에는 저기압이 존재한다. 적도와 중위도 지역에는 상당히 높은 고도까지 따뜻한 고기압이 존재한다.

지역보다 기압이 훨씬 빨리 떨어진다. 똑같은 높이에서 북극의 기압과 적도 지역의 기압을 측정해 보면 북극의 기압이 훨씬 낮다. 그림 4-6 (a)처럼 북극의 대기 상층부에 거대한 저기압이 존재하는 이유가 바로 여기에 있다.

그럼 바람은 어느 방향으로 불까? 북극에 규모가 매우 큰 저기압이 대기 상층부에 자리잡고 있어, 바람은 저기압을 중심으로 등압선에 평행하게 불게 된다. 다시 말해, 북극 한가운데 자리잡은 매우 차갑고 기압이 낮은 공기 덩어리(저기압)를 남쪽의 따뜻하고 기압

극지의 거대한 저기압 공기 덩어리 주변으로 끊임없이 소용돌이치는 제트기류가 극소용돌이이다.

이 높은 공기 덩어리(고기압)가 감싸고 있고, 그 경계에 지구상에서 가장 강한 바람인 제트기류(화살표)가 부는 것이다. 눈에 보이지는 않지만, 북극의 찬 공기와 남쪽의 따뜻한 공기를 경계로 강한 제트기류가 지나고 있다는 사실은 이미 1930년대에 밝혀져 있었다. 그러나 그 형상이 지역적으로 매우 복잡한 양상을 띠고 있어 이를 예측하는 일은 결코 쉽지 않았다. 한 가지 중요한 사실은 제트기류의 세기는 북극의 찬 공기 온도가 낮을수록 더 강해진다는 점이다. 즉, 온도가 낮을수록 공기가 아래에서부터 압축되어 더 강력한 저기압이 상공에 형성되며, 이로 인해 지균풍의 세기도 더 강해져 강력한 제트기류가 형성된다.

반대로 만약 어떤 요인에 의해 북극의 온도가 올라간다고 하면

어떤 일이 일어날까? 당연히 북극 대기 상층부의 저기압이 약해지면서 지균풍 또한 힘을 잃어 약화된 제트기류가 불게 된다. 제트기류는 약해지면 약해질수록 힘을 잃고 남북 방향으로 뱀처럼 구불 구불 흐른다. 거대한 저기압 덩어리 주변으로 끊임없이 소용돌이치는 제트기류를 다른 말로 극소용돌이(polar vortex)라고 부른다. 극소용돌이는 수일에서 수주 간격으로 매우 불규칙하게 제트기류의 세기를 바꿔 놓는다. 그리고 이런 제트기류의 변화가 우리가 살고 있는 중위도 지역의 기상 현상과 기후를 조절한다.

그럼 이렇게 극소용돌이가 복잡하고 변화무쌍하게 변하는 이유는 무엇일까? 그 이유는 근본적으로 제트기류 남쪽의 따뜻한 공기와 북극의 차가운 공기가 대치하고 있는 경계면, 즉 전선에 항상 로스비 파동이 생겼다 사라졌다를 반복하기 때문이다. 그림 4-6(a)를 다시 한번 살펴 보자. 강한 제트기류를 따라 작은 파동들(L로

표시된 부분)이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 개별 소용돌이들을 로스비 파동이라 한다. 이 파동은 스웨덴 출신 미국의 대기과학자 칼 구스타프 로스비가 처음으로 발견하였다.

로스비는 제트기류와 대규모 대기운동을 유체역학 관점에서 체계적으로 정립하여 근대 대기과학의 아버지로 불린다. 그는 지구의 자전에 의해 로스비 파동이 나타난다는 것을 보였고, 이 로스비 파동이 지구 기상 현상의 기본이 된다는 것을 밝혔다.

그렇다면 왜 차가운 북극의 공기와, 따뜻한 적도와 중위도 지역의 공기 사이에 로스비 파동이 생겨나는 걸까? 그리고 이 로스비 파동은 어떤 역할을 하는 걸까? 이 질문에 대한 답을 처음 이론적으로 밝혀낸 사람은 로스비의 제자인 미국의 기상학자 줄 그레고리 차니다. 그가 밝혀낸 것은, 언뜻 당연해 보이지만, 회전하는 지구의 대기에서 차가운 공기와 따뜻한 공기가 만들어내는 경계면,

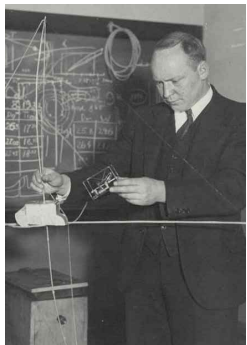


그림 4-7
칼 구스타프 로스비(Carl Gustav Rossby, 1898-1957) : 20세기 기상학을 이끈 스웨덴 출신 미국의 기상학자. 유체역학을 활용하여 처음으로 대기의 대규모 운동을 수학적으로 기술하였다. 로스비 파동을 이론적으로 정리하고, 제트기류의 특징과 이동에 관해서도 큰 공헌을 남겼다. 컴퓨터를 이용하여 날씨를 예측할 수 있는 로스비 방정식을 개발하기도 했다. 1956년 그가 사망하자 《타임》에서는 기상학에 대한 업적을 기려 표지에 그의 사진을 실었다.



그림 4-8
줄 그레고리 차니(Jule Gregory Charney, 1917-1981) : 현대 기상학에 가장 큰 공헌을 한 과학자 중 한 사람으로 경압 불안정(baroclinic instability) 이론을 완성하였다. 경압불안정 이론은 따뜻한 공기와 차가운 공기가 남북으로 대치할 때, 그 자체로 불안정하여 남북 방향의 열교환을 촉진하는 로스비 파동이 생성된다는 것으로 현대 기상학의 근간이다.

즉 전선은 결코 안정하지 못하다는 사실이다. 그림 4-9를 보자. 이 그림은 전선에서 로스비 파동이 생겼다가 소멸되는 과정을 나타내고 있다.

초기에 극소용돌이는 잠잠하다. 이 말은 극소용돌이를 감싸고 부는 강한 바람인 제트기류가 강한 세기는 유지하면서, 남북으로 요동치지 않고 서에서 동으로 불고 있음을 의미한다(그림 4-9 (a)). 차니가 밝혀낸 것이 바로 이런 상태가 그 자체로는 안정하지 않다는 사실이다. 그는 회전하는 유체에서 이런 상태에서는 외력이 작용하지 않더라도 자체적으로 새끼 로스비 파동이 경계면 사이에 태어날 수 있다는 점을 수학적으로 증명하였다(그림 4-9 (b)). 이렇게 로스비 파동이 생겨나게 되면, 파동의 굴곡을 따라 제트기류가 뱀처럼 남북으로 요동치게 되어, 북쪽의 찬공기가 내려오는 지역은 한파와 폭설이, 더운 공기가 북상하는 지역은 온화한 날씨를 맞게 된다.

한편, 이렇게 찬 공기와 더운 공기의 대치로 발생한 로스비 파동을 따라 지균풍이 불게 되고, 이 지균풍은 차가운 공기를 남쪽으로 보내고, 따뜻한 공기를 북쪽으로 보내려고 한다. 이로 인해 로스비 파동 자체의 진폭은 점점 커지게 된다(그림 4-9 (c)). 모든 경우가 다 그렇지는 않지만, 때때로 로스비 파동이 크게 성장해 찬 공기로부터 떨어져 나오는 경우가 발생한다(그림 4-9 (d)). 이 경우 극한

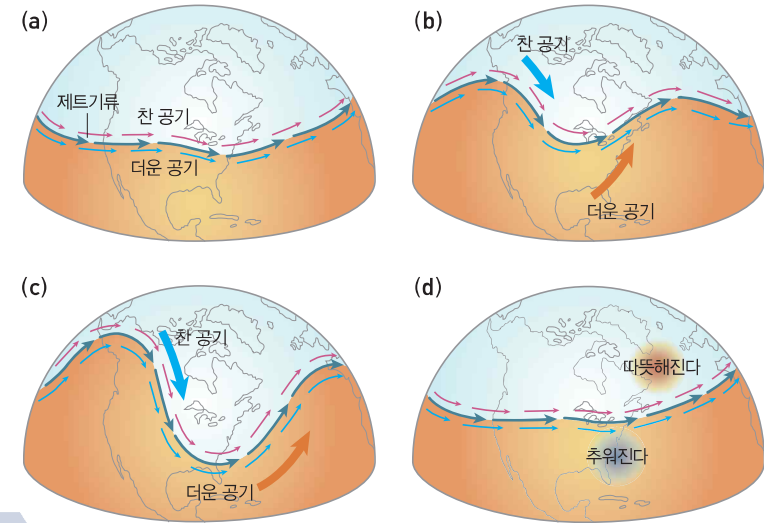


그림 4-9 로스비 파동의 생성, 성장, 소멸 과정을 나타내고 있다. (a) 극소용돌이를 감싼 제트기류가 큰 요동없이 서에서 동으로 불고 있다. (b) 제트기류를 사이에 두고 고위도 지방의 찬 공기와 저위도 지방의 따뜻한 공기가 서로 대치하면서 제트기류에 로스비 파동이 생성된다. (c) 고위도 지방의 찬 공기는 남쪽으로, 저위도 지방의 따뜻한 공기는 북쪽으로 이동하려 하면서 로스비 파동의 진폭이 점점 커지게 된다. (d) 로스비 파동이 크게 성장하다가, 결국 찬 공기가 떨어져 나와 해당 지역에 머물게 된다. 로스비 파동이 소멸되고 제트기류는 다시 큰 요동없이 서에서 동으로 불고 있다. *Tarbuck and Lutgens(1988)의 그림을 수정.

현상이 발생하기 쉬운데, 그 이유는 떨어져 나온 소용돌이의 경우, 쉽게 사라지지 않고 수 주일에서 길게는 한 달 이상 한 지역에 머물며 그 지역의 날씨에 큰 영향을 주게 된다. 이렇게 떨어져 나온 소용돌이를 제트기류의 흐름을 방해한다는 의미에서 블로킹blocking



남극과 북극 상공에는 지구상에서 가장 큰 소용돌이가 항상 꿈틀대고 있다. 이 소용돌이는 수일에서 수주일의 간격으로 불규칙적으로 수축과 팽창을 반복한다. 바로 극소용돌이다.

이라고 부른다. 한번 발생한 블로킹은 해당 지역에 머물면서 그 지역의 기후에 많은 영향을 준다. 하지만 고립된 소용돌이는 지면과의 계속된 마찰로 운동 에너지를 빼앗기고, 주변 공기와 섞이게 되면서 결국에는 사라진다.

즉, 남쪽과 북쪽의 차갑고 따뜻한 공기 덩어리들이 대치하고 있는 상태는 그 자체가 불안정하여, 지구의 대기는 자연스레 작은 로스비 파동들을 생성해 이 불안정한 대치 상태를 해소하는 것이다.

그럼 로스비 파동은 이런 불안정성을 어떻게 해결하는 걸까?

로스비 파동은 차가운 북쪽 공기와 따뜻한 남쪽 공기를 섞어 대치 상태를 풀어준다(그림 4-9 (b)). 이 섞이는 과정 자체는 대기의 대순환을 이해하는데 매우 중요하다. 지구에서 적도 지역이 따뜻하고, 극 지역이 차가운 이유는 지역에 따라 받게 되는 태양 복사에너지의 양이 다르기 때문이다. 다시 말해 극 지방은 태양 에너지를 적도에 비해 덜 받기 때문에 기본적으로 추운 것이다. 그러나 이런 상태를 지속적으로 해소시키는 것이 바로 로스비 파동이다. 이렇게 차가운 공기와 따뜻한 공기가 섞이는 과정이 없다면, 북극과 적도 지역의 온도차는 지금보다 훨씬 더 커졌을 것이고, 어쩌면 극지와 적도의 열적 불균형을 해소하지 못해 현재 우리가 살고 있는 적절한 기후가 아닌, 다른 기후가 되어 있을지도 모를 일이다.

로스비 파동은 차가운 고위도의 공기와 따뜻한 저위도 지역의 공기를 섞어준다. 로스비 파동이 없다면 북극과 적도 지역의 온도차는 지금보다 훨씬 더 커졌을 것이다.

지금까지 극소용돌이의 기본적인 형태와 성질을 북극소용돌이를 중심으로 살펴보았다. 극소용돌이는 우리가 살고있는 중위도 지역의 날씨를 결정하는 데 매우 중요한 요소다. 특히 오존층 파괴나 이산화탄소 방출과 같은 인간 활동에 의한 기후변화는 극 지역의 온도를 급격히 변화시키고 있다. 극소용돌이는 이런 변화에 민감하게 반응한다. 극 지역의 온도가 올라가면, 극소용돌이가 약해

지고, 반대로 극 지역의 온도가 떨어지면 극소용돌이는 강해진다. 그래서 기후변화에 따른 극소용돌이의 변화 과정을 이해하는 것은 매우 중요하다. 자세한 내용을 이제부터 알아보자.

3 북극진동이 약해지면 한파가 몰아친다

최근 겨울철마다 우리나라에 한파와 폭설이 자주 나타난다. 특히 2009년에는 서울이 기상관측 사상 최대 강설량을 기록하였고, 2011년에는 서울이 영하 16.8도를 기록할 정도의 매서운 한파가 몰아쳤다. 사실 이런 현상은 우리나라에만 국한되지 않는다. 매년 겨울만 되면 서유럽과 북미에도 극심한 한파와 폭설이 계속해서 발생하고 있다. 2012년 1월에는 우크라이나에서 극심한 한파가 한 달 가량 지속되면서 400명 이상의 사상자가 발생했다. 심지어 인도와 같은 열대 지방에서도 한파 피해가 보고되고 있다. 이렇게 극단적인 한파는 단지 우리나라만의 일이 아니라 북반구 전역의 다양한 지역에서 발생하고 있다. 그렇다면 겨울철에 북반구 각지에 한파가 발생하는 이유는 무엇일까? 이렇게 지구 전체에서 관측되고 있는 이상기후 현상을 앞에서 살펴본 극소용돌이 관점에서 해석해보자.



그림 4-10

데이비드 톰슨 David Thompson(왼쪽)과 존 월레스 John M. Wallace, 1940~(오른쪽) 석사과정 대학원생이었던 톰슨과 지도교수 월레스는 극소용돌이의 특징을 단순화하여 정리하고, 이를 북극진동이라 이름 붙였다.

앞에서 살펴본 바와 같이, 극소용돌이는 그 자체가 정적이지 않고 변화가 매우 심하다. 미국의 과학자 데이비드 톰슨과 존 월레스는 복잡한 형태의 극소용돌이라도 그 변동성을 대표할 수 있는 가장 간단한 형태가 있을 수 있다는 점에 주목하였다. 그들은 통계 기법의 하나인 경험적직교함수기법 Empirical Orthogonal Function, EOF을 해면기압* 자료에 적용하여, 그림 4-11과 같이 단순화된 패턴을 얻었다. 이 패턴은 북극에 자리잡은 저기압과 그를 둘러싼 고기압을 바탕으로 한다. 그 후 매일 혹은 매달의 기압 패턴이 이 형태와 얼마나 유사한지를 지수화하여 북극진동 지

복잡하게 변화하는 북극소용돌이도 변동성을 대표할 수 있는 가장 간단한 형태가 있을 수 있다. 이런 대표적 형태와 얼마나 유사한가를 나타낸 것이 극진동 지수이다.

* 해발고도 0m인 해수면의 기압을 말한다. 지표면은 고도에 따라 기압이 달라질 수 있어, 다른 지점과의 비교가 어렵다. 그래서 실제 관측한 기압을 해면기압으로 보정하여 사용한다.

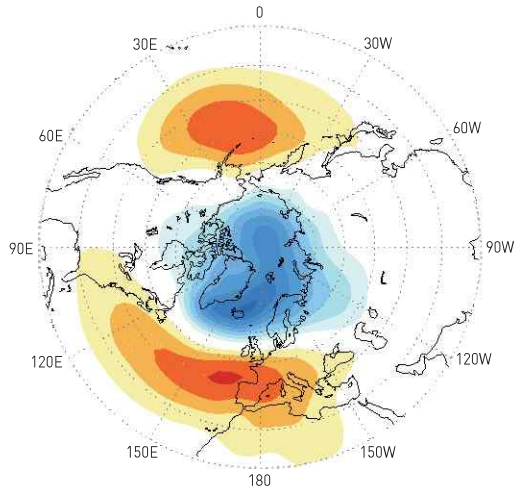


그림 4-11

해면기압 자료로 분석한 북극진동의 패턴. 북극을 중심으로 저기압(푸른색 영역)이 있고, 그 아래 위에 각각 태평양 고기압(노란색 영역)과 대서양 고기압(붉은색 영역)이 보인다. 이 형태가 바로 전형적인 양의 북극진동 패턴이다. • 미국 해양대기국 기후예측센터의 자료를 바탕으로 다시 그림.

수를 만들어냈다.

이렇게 정의된 극진동 지수는 지수가 매우 낮아져 음수가 되면 북극소용돌이가 매우 약화되었다는 것을 의미하고, 양수가 되면 강화된 것을 나타낸다. 남극의 경우에도 이러한 극진동 지수를 정의할 수 있고, 이를 남극진동이라 한다.

그렇다면 극진동 지수가 음의 값으로, 즉 극소용돌이가 약화되면 한반도에 한파가 발생하고 폭설이 내리는 걸까? 사실 항상 그렇지 않다. 극소용돌이는 변화가 매우 심해 극소용돌이가 약화

되면서 나타나는 로스비 파동이 항상 같은 자리에 생기지는 않기 때문이다. 다시 말해, 극소용돌이가 약화되면 찬 공기가 남쪽으로 내려오기는 하지만, 항상 같은 곳으로 내려오지 않고 그 위치를 종잡을 수 없을 정도로 변화무쌍하다는 말이다.

북극진동이 약해지면 찬 공기가 남하한다. 우리나라로 남하하면 한파와 폭설이 몰아친다. 하지만 내려오는 위치는 정해져 있지 않고 항상 변하기 때문에 북극진동이 약해진다고 우리나라에 꼭 한파가 닥치는 것은 아니다

극소용돌이에 의해 한파가 발생하기 위해서는 우선 북극에서 내려오는 찬 공기의 흐름이 필수적이다. 그리고 극소용돌이가 약해질 때 제트기류가 어느 위치에서 뱀처럼 사행을 하느냐에 따라 한파가 발생하는 지역이 결정된다. 그래서 북극진동이 약해졌다고

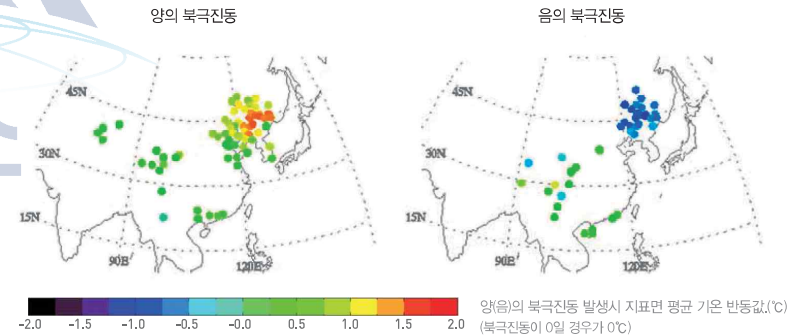


그림 4-12

왼쪽은 양의 북극진동, 오른쪽은 음의 북극진동일 때 한반도를 비롯한 동아시아 지역의 기온 변화를 나타낸 것이다. 음의 북극진동일 경우, 한반도와 동아시아 지역의 기온이 -1~2 정도 낮아져 푸른색으로 표시된 것을 확인할 수 있다. • Jeong and Ho(2005)의 그림을 수정.



그림 4-13
북극진동 지수가 음의 값이 되면, 찬 공기가 남쪽으로 내려와 그 지역이 추워진다. 북극진동 지수가 양의 값일 때는 찬 공기가 북쪽에 그대로 머물러 있다.



KOPRI
극지연구소

한반도에 한파가 몰아친다고 단정할 수 없는 것이다. 하지만 기존 자료를 통계분석한 연구에 따르면, 그림 4-12처럼 음의 북극진동 시기에 우리나라를 비롯한 동아시아 지역에 평균 -1~-2도 정도의 기온 하강이 나타나며, 강력한 한파 발생 빈도가 양의 극진동 시기에 비해 5배 정도 증가했다고 보고되고 있다. 그 이유는 한반도의 경우 극소용돌이의 영향이 아니더라도 겨울철에 시베리아 고기압이 발달하여 찬 공기가 북쪽에서 남하하는 지역에 위치해 있기 때문에, 제트기류의 사행이 나타날 때 차가운 공기가 남하하기 쉽기 때문이다.

그렇다면 이런 극진동 자체는 예측이 가능할까? 아쉽게도 극진동 자체의 위상과 세기는 대기 내부의 비선형성, 성층권과 대류권의 상호 작용, 해양과 해빙의 영향 등 다양한 요인에 의해 결정되기 때문에 장기적인 예측이 쉽지 않다. 하지만 2009년 겨울과 같이 강력하고 오랫동안 유지되는 극진동의 경우는 꾸준한 모니터링을 통해 어느 정도 일기 예보에 응용할 수 있다. 그리고 이런 극진동은 지구 온난화에도 밀접한 관련이 있다.

