

북극 극 소용돌이(Arctic polar vortex) 이해하기

2021.03.05.자 NOAA Climate.gov 게재 글

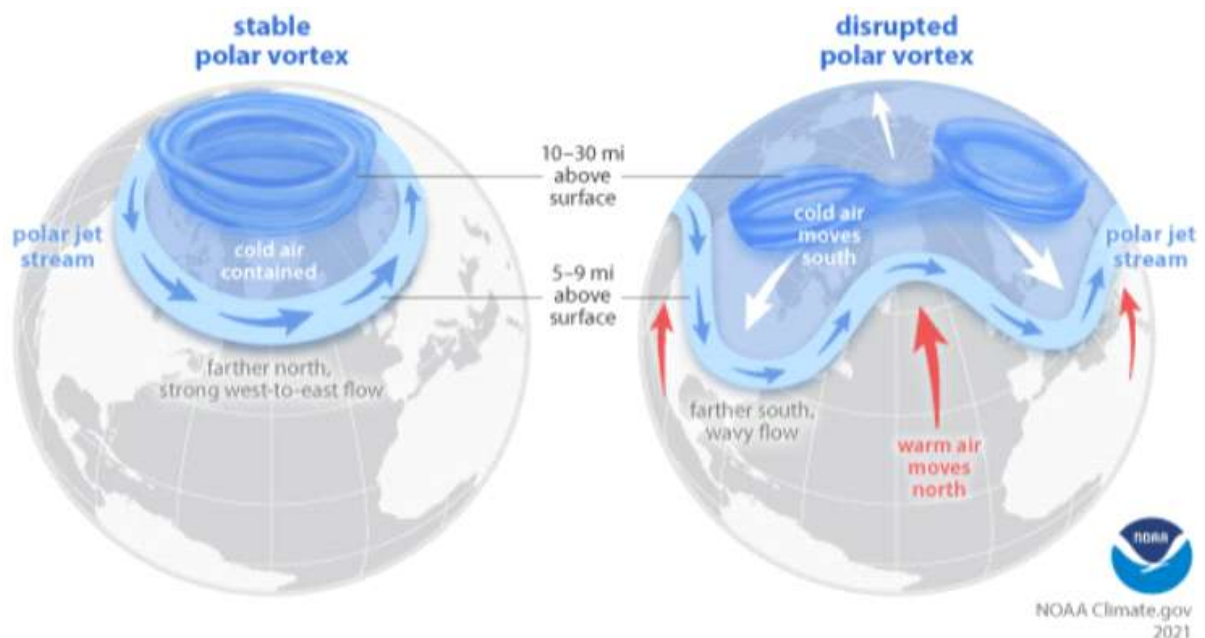
저자: 레베카 린제이

번역: APCC 전문위원 김세원

금년 2월 말, 미국의 남부평원과 걸프 해안이 비정상적인 겨울 폭풍을 겪으면서 날씨에 관한 토론의 주제가 극 소용돌이 그리고 이번의 극한의 추위가 지구온난화와 어떻게 연관되어 있는 지에 주로 집중되었다. 이번 기사는 극한의 겨울 폭풍 현상, 극 소용돌이, 그리고 지구 온난화와의 잠재적인 연관성에 대해 두 명의 NOAA 전문가들과 나눈 대화를 기반으로 작성되었다.

극 소용돌이 대 극 제트기류

북극 극 소용돌이는 매년 겨울이 되면 북극 상공 약 10~30 마일 높이의 성층권에 형성되는 강한 편서풍 띠이다. 이 바람 띠는 극도로 차가운 커다란 공기 웅덩이를 가둬놓게 된다. (남극의 겨울에 형성되는 성층권 극 소용돌이는 훨씬 더 강력). 바람이 강할수록 가둬진 공기는 상대적으로 따뜻한 위도와 더욱 격리되고 더욱 차가워진다.



북극 극 소용돌이가 특히 강하고 안정적인 때는(좌측 그림), 대류권에 형성되어 있는 극제트기류의 위치가 북쪽으로 올라가며, 가장 차가운 극기단은 북극에 머물러 있게 된다. 극 소용돌이가 약해지거나 이동하거나 쪼개질 경우(우측 그림), 극 제트기류는 그림처럼 극단적인 물결 모양을 띠며 한쪽에서는 따뜻한 공기가 북극으로 올라가고 다른 한쪽에서는 차가운 북극 공기가 중위도로 흘러내리는 현상이 벌어진다.

NOAA 성층권 전문가 에이미 버틀러에 따르면, 사람들은 종종 극 소용돌이를 극 제트기류와 혼동하는데, 둘은 완전히 분리된 대기층에 존재한다. 극 제트기류는 대류권에 형성되며 그 고도는 지표면으로부터 5-9마일 사이에 있다. 극 제트기류는 더 따뜻한 중위도 공기와 더 차가운 극지방 공기를 분리하는 두 기단 사이의 경계 표시이다. 중위도에서 우리가 매일매일 경험하는 겨울 날씨를 직접 크게 좌우하는 것은 극 제트기류이지 극 소용돌이가 아니다.

극 소용돌이와 겨울 날씨

극소용돌이가 중위도의 겨울 날씨에 항상 영향을 미치는 것은 아니다. 영향을 미치는 경우는 그 효력이 극단적일 수 있다. 예를 들어 극 소용돌이가 특별히 강한 성층권 안정 상태일 때 극 제트기류는 더욱 북쪽에 치우쳐 머무르게 되고 구불구불한 정도가 거의 없는 직선에 가까운 흐름을 보인다. 이 경우 북극진동은 양이며, 이때 보통 북극권은 평상시보다 더욱 춥고 중위도 지역은 평상시보다 더욱 온화한 날씨가 나타난다.

다른 극단의 경우로서, 극 소용돌이가 가끔씩 힘을 잃는 경우가 있는데, 대류권 내의 특별히 강력한 대기 파동이 위 성층권 안으로 들어가 부서질 때 나타난다. 이때 소용돌이는 느려지며, 비틀거리거나 극에서 벗어나기도 하며, 여러 개의 로브로 나뉘거나, 가장 극단적인 경우는 일시적으로 소용돌이 방향이 반전되기도 한다. 나타나는 양상에 관계 없이 이러한 붕괴 현상에는 한 가지 공통점이 있다. 즉, 극 성층권 온도의 급등인데, 이것을 소위 “sudden stratospheric warmings(성층권의 돌연 온난화)”이라 한다.

성층권 온도의 돌연 상승 이후 몇 주 동안 극 제트기류는 종종 깊은 물결 모양으로 발달하며 물결의 골과 능이 며칠 동안 거의 정체될 수 있다. 그런데 두 시스템 간 상호 작용의 정확한 특성, 즉 극 제트가 극 소용돌이의 붕괴와 어떤 식으로 관련되어 있고 그렇게 반응하는 이유에 대해 완전한 파악이 이뤄지지 않았다. 고기압능이 지배하면 따뜻한 공기가 북극지방의 일부로 밀려들어가 종종 극심한 해빙을 일으키며, 그 반면 고 극기단이 저기압골을 채우는 상황이 되면 겨울 조건이 보통 때보다 더 남쪽으로 내려간다. 이때 북극진동은 종종 음의 단계로 떨어진다.

극 소용돌이와 미국 중남부의 2021년 2월 극심한 추위

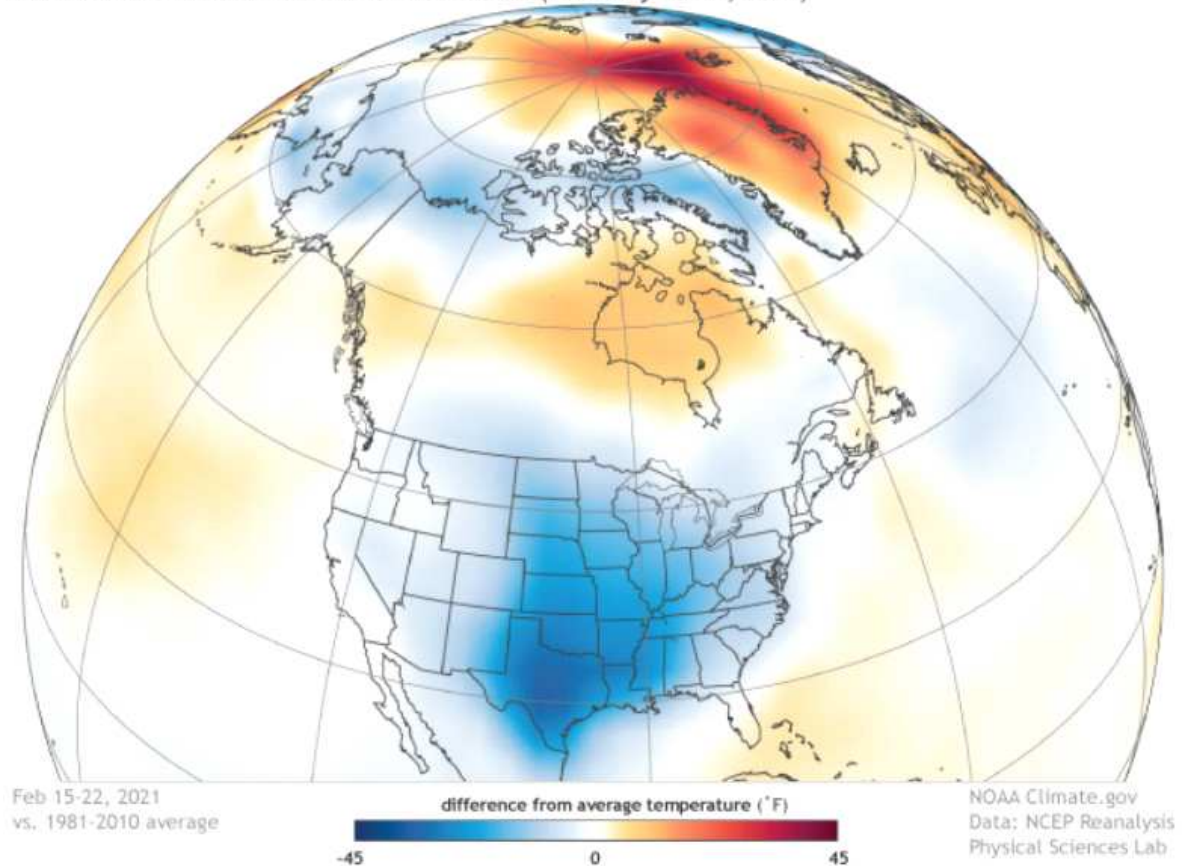
버틀러에 따르면, 2월 말 미국 남부 평원을 강타한 극심한 겨울 날씨에 극 소용돌이가 한 몫 했다고 보는 것이 합리적이다. 몇 주가 지난 후 부터 성층권 극소용돌

이의 붕괴와 미국이나 유라시아의 중위도에서의 극심한 한파 발생 간의 관련성에 관해 많은 연구가 이뤄지고 있다.

버틀러는 다음과 같이 설명한다.

“1월에 성층권이 갑자기 온난화 되면서 극 소용돌이가 약해졌고, 모양이 무너지면서 극을 벗어나 남쪽으로 퍼져 내려갔습니다. 이런 일이 발생하는 대부분의 경우(북극에서 평균 2년에 한 번씩 발생) 중위도 일부 지역은 결국 한파를 경험하게 됩니다. 극 소용돌이의 붕괴로 극제트기류는 수 주 동안 파형이 심화된 형태가 되었고, 그것이 다른 기상 패턴과 결합되어 미국 중부에 극심한 한기가 발생하기에 유리한 조건을 만들었습니다.”

Extreme cold in south-central United States (February 15-22, 2021)



1981~2010년 평균 대비 2021년 2월 15~22일간 북반구 전역의 지표면 근처 평균기온. 극 제트기류는 미국 중남부로 깊이 침투하여 남부 평원에 극심한 추위(질은 파란색)를 가져왔다. 한편, 북극의 일부 지역은 평균보다 훨씬 더 따뜻했다(주황색과 빨간색).

다른 한편으로, 그녀는 겨울에 따라 극 소용돌이의 도움이 없어도 북극 냉기가 흘러내리는 경우는 많다고 말한다. 말할 것도 없이, 극 소용돌이는 종종 붕괴되는데, 그것이 지표면의 날씨에 미치는 영향은 거의 없을 때도 있다. 따라서 극심한 추위가 온 경우 그 원인이 오로지 극 소용돌이에만 있다고 하는 것은 과한 해석이다.

극 소용돌이와 지구온난화

독자들이 던지는 질문 중 하나는 지구온난화가 극 소용돌이에 영향을 미쳐 역설적이게도 중위도에서 심한 겨울 날씨 발생 가능성을 더욱 높이는 지 여부이다.

에이미 버틀러의 말:

“예를 들어, 극 소용돌이가 그 아래 대류권에서 움직이는 대규모의 대기 파와 부딪힐 경우 극소용돌이 붕괴가 발생합니다. 파동은 항상 존재하지만 해빙 손실로 인한 표면 온도 및 기압 변화를 포함하여 파의 강도나 위치에 변화를 일으키는 어떤 것도 잠재적으로 극 소용돌이에 영향을 미칠 수 있습니다. 따라서 전체적으로 온난화 추세이더라도 지역에 따라 혹한의 겨울 날씨를 더 많이 경험할 수도 있다는 게 제 생각입니다.”

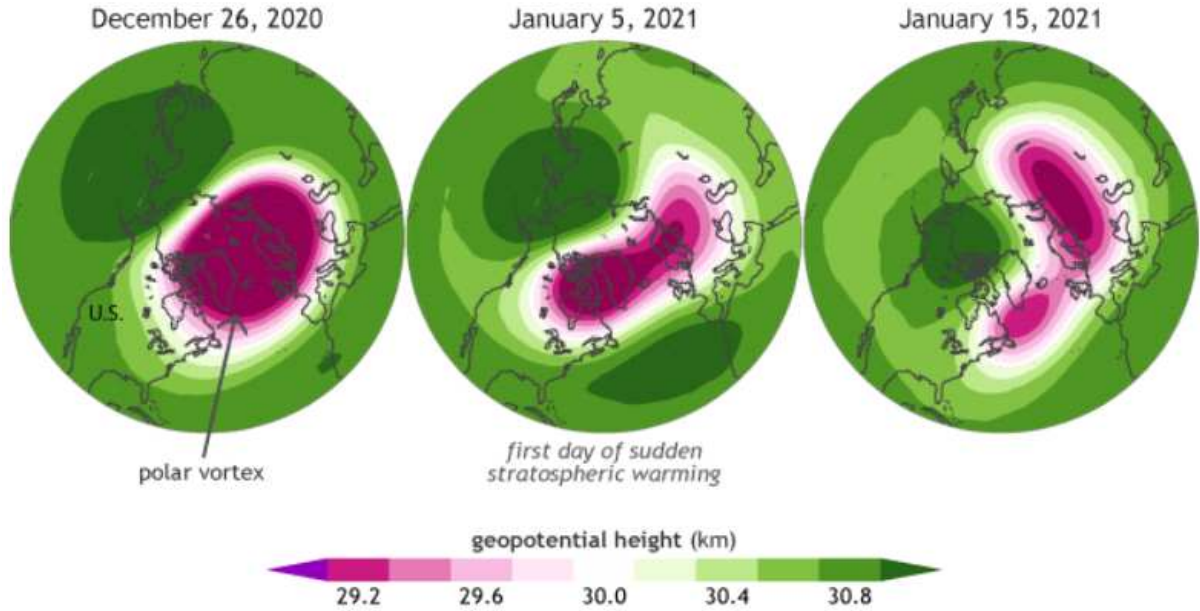
가능성 중 하나는 극 소용돌이가 주로 자리잡는 위치가 해빙 커버의 지역적 변화에 민감할 수 있다는 것이다. 예를 들어, 한 연구에서는 북극 동부의 바렌츠 해와 카라 해의 2월 해빙면적이 평균보다 작아졌는데, 이것을 1980년대와 2000년대 사이에 극 소용돌이가 유라시아로 이동된 사실과 연관시켰다. 극 소용돌이의 위치 이동으로 말미암아 시베리아와 중앙 유라시아 중위도 지역은 예년보다 추운 겨울을 겪게되었다.

추세도 명확치 않고, 해당 데이터도 제한적

다만 가설은 그럴듯하다며 버틀러는 다음과 같이 말한다. 극 소용돌이의 장기적인 추세를 단정하는 어떤 증거도 없다고 생각합니다. 기록에서 보면 1990년대에 어느 기간 동안 흥미롭게도 북극에서 성층권의 돌연 온난화 현상이 관측되지 않았었습니다. 다시 말하면, 극 소용돌이가 강하고 안정적이었던 것입니다. 그러나 1990년대 후반에 원래 모습으로 돌아가기 시작했고, 그 다음 10년 동안은 성층권 돌연 온난화가 거의 매년 한 번씩 나타났습니다. 그러다가 2010년대 들어 초기 몇 년 동안 북극의 극 소용돌이가 좀 더 약해지거나 더 쉽게 붕괴되는 경향, 혹은 더욱 위치 불안 경향을 보였습니다. 그러나 그 현상이 지속되진 않았는데, 이 같은 모습이 여러 번 반복되다 보니 마치 새로운 트렌드가 시작하는 것처럼 보였는데, 이는 그저 자연 변동일 수도 있고 아니면 1990년대의 고요함을 깨고 다시 반등하는 것일 수도 있습니다.”

버틀러는 계속해서 말한다. “뭐라고 딱히 정의하기 어렵습니다. 성층권에 대한 관측 역사가 그리 길지 않기 때문입니다. 1950년대 들어서면서부터 관측을 시작했

DISRUPTION OF STRATOSPHERIC POLAR VORTEX IN EARLY JANUARY 2021



2021년 1월 북극 극 소용돌이의 붕괴. 위 세 그림을 보면 10 hPa 지위고도에서 극 소용돌이가 2020년 12월 26일 약해지기 시작(맨 왼쪽 그림)하고 2021년 1월 5일 성층권 바람에 반전이 일어나고(가운데 그림) 이 극 소용돌이가 약해지기 시작(중간), 2021년 1월 15일에 성층권의 돌연 온난화 현상이 나타났다. 가 갑작스런 성층권 온난화가 발생했을 때 성층권 바람이 부호를 반전시켰을 때 (오른쪽). 이미지 출처 : Laura Ciasto, NOAA CPC.

거든요. 극 소용돌이가 어떤 형태로 자연 변동할 수 있는지에 대해 이해하는 데는 그리 오래 걸리지 않습니다. 한 연구자가 북대서양 진동(NAO) 지수와 극 소용돌이 기록이 겹치는 부분을 상호 연관시킨 다음 NAO 지수를 사용하여 시간을 거슬러 올라가 극 소용돌이 기록을 외삽함으로써 역사적 재구성을 수행했습니다. 결과적으로 장기적인 경향성은 드러나지 않았고, 최근 수십 년과 그 앞선 수십 년에 대해 비교해봐도 별반 차이가 없었습니다.”

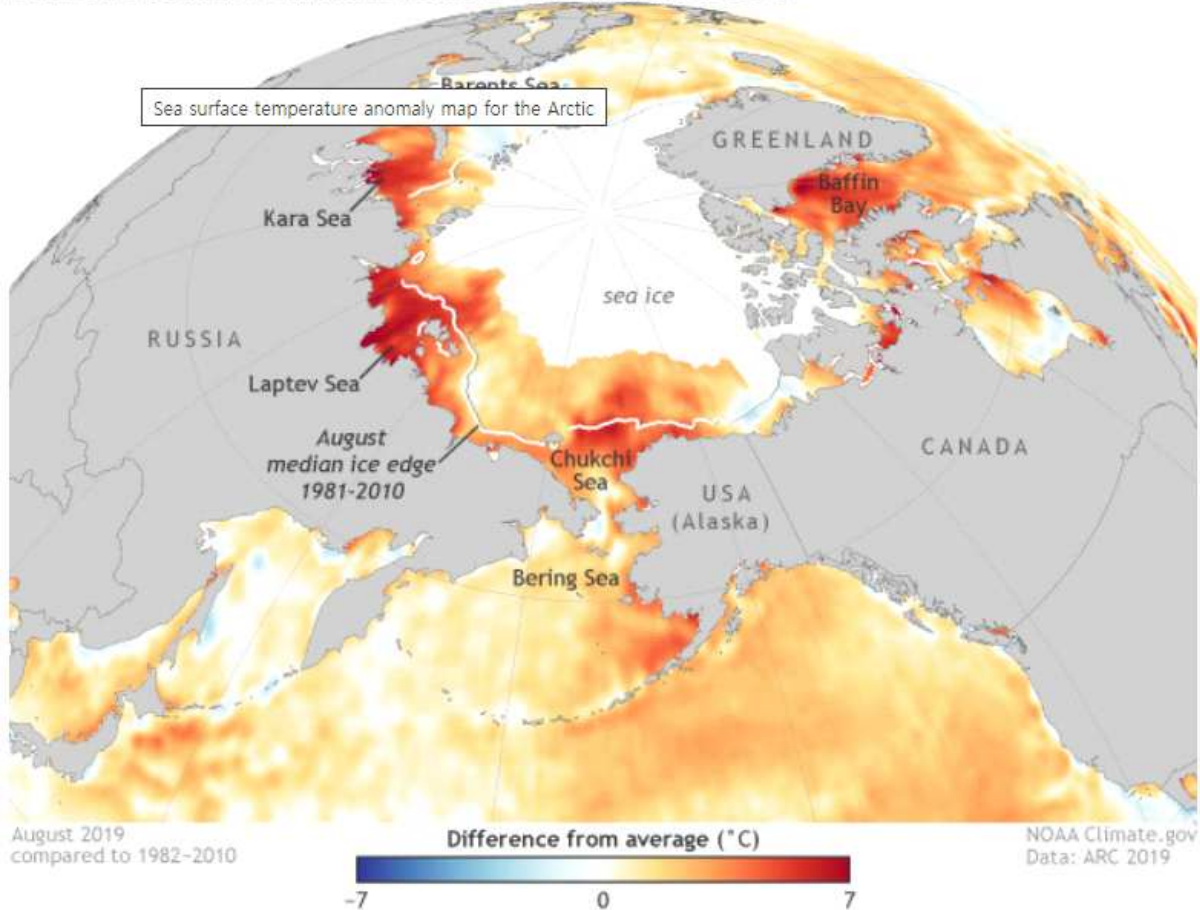
극 소용돌이의 변동에 대해 여전히 가능하다고 생각되는 것은 아직 잘 이해가 되지 않는 부분이지만 극 소용돌이의 위치가 바뀌었을 수도 있고 지표면의 영향으로 인한 결과일 수도 있다는 것이다.

모델들의 독자적 행보

단지 상대적으로 짧은 관측 역사로 인한 불확실성 때문에 전문가들이 극 소용돌이와 함께 뭔가 있을 가능성을 묵살 못하는 것은 아니다. 일부 기후 모델 실험 결과를 보면 계속되는 온난화가 극 소용돌이의 약화로 이어질 것이라고 예측한다. “현실의 성층권과 현실의 해빙 층을 반영한 고해상도 기후 모델을 실행할 때 해

빙 커버를 줄여 실행하면, 극 소용돌이가 더 약해질 것으로 예측하는 것이 사실입니다.” 라고 버틀러는 말한다. 그리고 모델 값과 관측 값을 결합한 일부 연구에서는 북극 동부의 바렌츠 해 및 카라 해의 작아진 해빙 면적과 성층권의 돌연 온난화 현상 간의 관련성 그리고 그것이 북미의 겨울 혹한을 불러 일으킨 것과 관련 있다는 것을 보여주었다.

EXTREME SUMMER WARMTH IN MOST ARCTIC SEAS IN 2019



여름 해빙 손실은 북극 연해의 극심한 따뜻함으로 이어진다. 그 과도한 열은 가을철 얼음 동결을 지연시켜 겨울 날씨에 영향을 미칠 수 있다. 이 지도는 1982-2010년 평균과 비교한 2019년 8월의 해수면 온도를 보여준다.

이와 동시에, 다른 모델들의 시뮬레이션을 보면 온난화와 해빙 손실이 더 강한 극 소용돌이를 만들 것으로 예측하고 있다. 모델들끼리 서로 다르게 예측하는 이유 중 하나는 북극 표면 온난화 및 해빙손실이 극 소용돌이를 붕괴시킬 수 있는 대기 파동에 미치는 영향의 정도가 해빙 손실 발생 위치와 시기에 따라 매우 민감하게 달라지는데, 모델 시뮬레이션들 사이에서는 이 부분이 제각각이었던 것이다.

버틀러는 다음과 같이 설명한다.

“따라서 어떤 때는 해빙 손실이 가끔 건설적이기도 합니다. 해빙 손실이 파도의 기본 또는 평균 상태를 강화하고 증폭시켜 주거든요. 그러나 다른 때는 모델에서 표현되는 해빙손실 및 온난화가 일어나는 시기와 장소가 정확히 언제이고 어느 곳이냐에 따라, 기존의 대기파와 파괴적 간섭이 일어나면서 이를 사라지게 할 수도 있습니다.“

그런데 해빙손실의 시기와 위치에 대한 민감도는 문제를 복잡하게 하는 한 부분에 불과하다. 북극의 극 소용돌이를 강화시킬 수 있는 기후변화 과정과 오히려 소용돌이를 약화시킬 수 있는 과정이 서로 줄다리기를 하고 있는 것으로 보인다. 버틀러는 Climate.gov의 ENSO 블로그에 최근 이 주제에 대해 다음과 같은 글을 올렸다.

예를 들어, 열대 상부 대류권은 더 따뜻해질 것으로 예상되는데, 이로 인해 권계면(대류권과 성층권을 분리하는 대기층)의 적도에서 극까지의 온도 경도를 강화시킬 가능성이 높으며, 이는 양 반구 각각의 극 소용돌이의 회전 속도를 모두 가속시킬 것이다. 그러나 하부 지면은 중위도에 비해 북극의 온난화가 상대적으로 강하게 일어나기 때문에 이것이 지표면 온도 경도를 감소시키고, 상부와는 반대로 북반구 극 소용돌이를 약화시키는 작용을 할 수도 있다.

다른 기후 요인들은 그대로인데, 극 소용돌이가 더욱 자주 붕괴될 정도로 더 약해지면, 이로 인해 북극의 온난화가 가속될 수 있고 중위도의 겨울은 온화 속도가 늦어질 수 있다. 이와 반대로 극 소용돌이가 붕괴가 잘 일어나지 않을 정도로 더욱 강할 경우 북극 온난화는 늦춰지고 그 대신 중위도의 겨울 온난화는 더욱 빠르게 진행될 것으로 예상할 수 있다.

버틀러의 말:

“일부 사람들은 모델들을 최대한 세계 밀어붙였죠. 기간도 가장 길게 하고 온난화도 가장 극단적으로 일어나게 한 시나리오들을 살펴보면서 각 시뮬레이션에서 일관된 신호가 나오는지 확인하기 위해서 말입니다. 하지만 모델들은 여전히 조금씩 차이가 있더군요.“

“개인적으로는 지구 온난화가 [극 소용돌이에 미치는] 영향이 자연 변동성의 노이즈에 비해 현재는 작다고 생각하며, 미래 역시 겨울 날씨에 미치는 어떤 영향도 온실가스가 갖는 전체 온난화 영향에 비해 작을 것입니다.”

북극과 중위도 겨울 날씨 간의 연관성

북극 기후 전문가 짐 오버랜드는 그 두 가지 포인트가 주장하는 바를 잘 알고 있다. 넓게 퍼져있는 가설 즉 빠른 북극 온난화가 여러 면에서 중위도 겨울 날씨에 영향을 미칠 수 있다는 것에 근거하여 펼친 주장인데, 오버랜드는 이에 동의조차하지 않는다. 최근 논문에서, 오버랜드와 여러 공동저자들은 만일 북극 온난화가 중위도에 극단적인 날씨를 일으키고 있다면, 이는 배경대기 조건이 이미 그러한 날씨가 발생하기에 유리할 때이고 그것이 극단적으로 증폭하는 것은 바로 대기조건과 날씨가 간헐적으로 들어맞았을 때라는 점을 주장했다.

한 예로서, 그가 제시하는 한 논문을 보면, 2017년에 베링해와 축치해에서 11월 해빙 면적이 역대급으로 작았던 것은 대기의 강 이벤트가 태평양 북극 상공의 고기압 능력을 강화시켰기 때문이라고 주장한다. 발달된 고기압능의 풍상 풍하 양쪽에서 극 제트기류가 깊은 기압곡을 발달시켰고, 그로 인해 초겨울에 차가운 극지방의 공기가 남쪽으로 흘러내리면서 동아시아와 북미로 유입되었던 것이다.

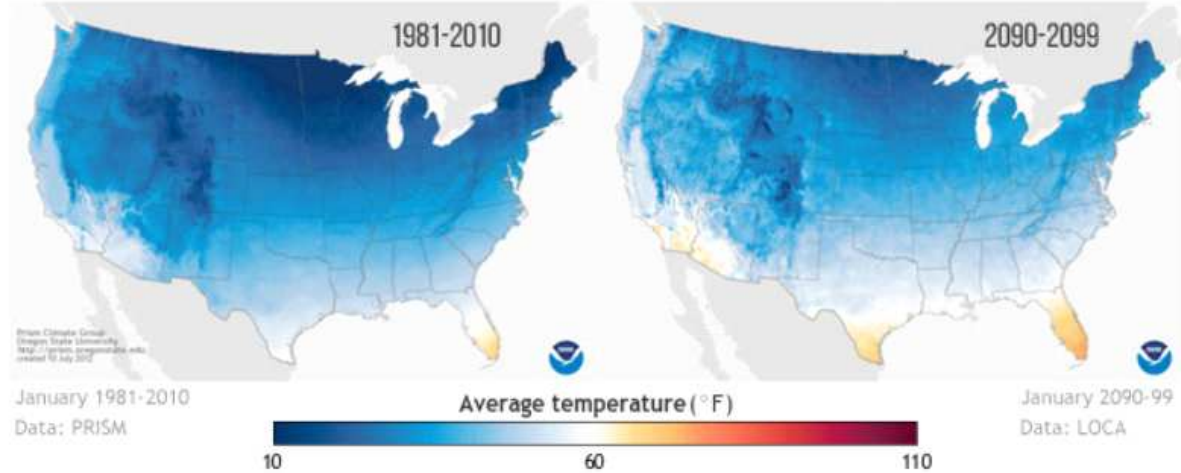
오버랜드는 “바다 얼음 부족만으로는 사건이 발생하지 않습니다. 그러나 일단 배경 조건이 만들어지면 얼음이 없는 바다로부터 대기로 흐르는 열속(Heat flux)이 저위도부터 유입되는 따뜻한 공기와 함께하여 제트 기류 고기압 영역을 강화시킵니다. 아마도 이 때문에 풍하측 지역에 나타난 추위가 그 어느 때보다 더 오래 지속되었고, 조금 더 극단적이고, 더욱 넓은 지역을 덮게 된 것이 아닌가 합니다.”

만약 심화된 북극 온난화가 중위도의 극한의 겨울 날씨에 간간히 영향을 미친다 해도 그 상황을 정확히 꼽아내기는 어려울 것이다. 가을과 초겨울에는 해빙의 동결 지연이 있을 수 있고, 물론 이것이 가장 큰 영향의 결과이며, 늦겨울에는 극 소용돌이 문제가 터질 수 있다. 또는 그 영향으로 한 곳에서는 극한의 추위가 나타나고 다른 곳에서는 극한의 온화한 날씨가 나타날 수 있다.

“사람들이 이 문제를 파악하려고 시도한 모든 방법을 살펴보면 연관이 있다는 쪽과 연관이 없다는 쪽으로 확실히 나뉘게 됩니다.”라고 오버랜드는 말한다. 한 연구진은 북극 해빙 손실이 대기순환을 무너뜨려 중위도에 혹독한 겨울이 나타난다는 쪽으로 결론을 낼 것이고, 다른 연구진은 비정상적인 대기순환 패턴이 먼저 나타나고 그것이 따뜻한 북극과 중위도 대륙의 추운 겨울을 불러일으킨다고 말할 것이다. 오버랜드의 견해로는 지금까지의 가설을 안팎에서 뒷받침할 만한 증거가 아직은 충분치 않다.

온실가스 배출이 높은 상태로 유지된다는 전제로 전망한 기간별 1월 온도 변화

Projected changes in January temperatures with high greenhouse gas emissions



전반적으로 겨울은 온실가스 배출이 계속되는 세계에서 더 따뜻함. 세계가 1981-2010년 (왼쪽)에 비해 높은 온실가스 배출 경로(오른쪽)를 따르는 경우 2090년대 미국 전역의 1월 평균 기온 변화 전망도. (Climate.gov 데이터 스냅 샷 컬렉션의 이미지)

그럼에도 불구하고 전문가들이 겨울 기후를 설명하기 위해 사용하는 대부분의 지표를 기준으로 할 때 오버랜드는 큰 그림은 명확하다는 데 동의한다. 즉 평균적으로 겨울은 더 따뜻하고 극한의 추위는 1세기 전보다 적다는 사실에는 이견이 없다. 이러한 추세는 온실가스 증가와 지구 온난화가 심화되는 한 계속될 것이다. 그런데 중위도에 북극이 간간히 미치는 이러한 영향이 지구온난화 문제를 안고 있는 겨울 기후의 전체 궤적을 근본적으로 변화시키지 않는데도, 이 주제가 여전히 뜨거운 연구 분야인 이유는 무엇입니까?

“NOAA에게 있어서, 이 질문이 중요한 이유는 계절 내 예측 규모 때문입니다.”라고 그는 말한다. 그 예측 규모란 몇 주에서 한 달 정도의 기간을 말한다. 북극과 중위도의 극한의 날씨가 단지 서로 간헐적으로 연관되어 나타날지라도, 그러한 연관 현상이 언제 발생할지 파악하지 못하면 예보자들은 최근 텍사스 겨울 폭풍과 같은 극한 상황 발생시 대비를 위한 통보 선행시간을 늘릴 수 있는 기회를 잃게 된다. 오버랜드는 또한 “북극과 중위도 간의 연계성이 겨울철의 통상적 그림을 바꾸지 않을 수 있지만, 개별 기상이변을 일으키는 원인에 대한 세부 분석은 여전히 중요합니다”라고 말했다.