

ISSN 2733-7529 (Print)
ISSN 2733-7537 (Online)

Poles & Globe

극지와 세계

2023 MARCH
Vol. 01

북극발 중위도 기상재해 예측의 중요성

김주홍
극지연구소 대기연구본부

과거에서 해답을 얻기 위한 북극해 해저 심부 시추

남승일
극지연구소 빙하환경연구본부

극지활동 선도국으로의 길 - 제1차 극지활동 진흥 기본계획 수립 -

서민정
해양수산부 해양개발과
극지정책팀장

중앙북극해 해양생태계 보전의 주역으로 부상하는 대한민국

신형철
극지연구소 부소장



MARCH

Vol. 01

03p 김주홍 극지연구소 대기연구본부

북극발 중위도 기상재해 예측의 중요성

최근 북극의 온도는 전 지구 평균 대비 4배 정도까지 빠르게 상승한 것으로 보고되었는데, 이러한 북극의 온도 상승은 중위도의 날씨와 기후를 조절하는 제트기류를 요동치게 하여 기상재해를 빈번하게 하는 원인으로 지목되고 있다. 그러나 북극 온도 변동과 중위도 기상재해 발생은 해마다 큰 차이가 있어 다가올 계절의 변동성이 어떨지 예측하는 것은 어려운 문제이다. 북극 온도 예측력은 지구 시스템 요소인 대기-해양-해빙-지면 등의 상호작용을 잘 표현하는 예측 모델을 통해 향상시킬 수 있다. 그리고 북극 온도 변화 예측력이 제트기류 반응을 통한 기상재해 예측력으로 연계되려면 좀 더 종합적인 예측 모델에 포함된 대기 모델 내의 역학 및 물리 과정의 개선을 위한 연구, 좋은 품질의 관측을 확보할 수 있게 하는 관측 네트워크 강화 노력, 관측을 모델에 안정적으로 입력되게 할 수 있도록 하는 향상된 자료동화 기술, 예측 시작 조건에 조금씩 변화를 주어 여러 번 반복 수행하여 그 평균을 취함으로써 예측 성공 확률을 높일 수 있는 앙상블 기법 등이 필수적이다. 이러한 광범위한 예측 기술 개발이 장기적인 계획을 통해 달성될 때 북극 온난화로 인한 기상재해의 중장기 예측력도 향상될 수 있을 것이다.

06p 남승일 극지연구소 빙하환경연구본부

과거에서 해답을 얻기 위한 북극해 해저 심부 시추

얼음으로 덮여 냉각 기능을 하면서 전 지구적 기후 시스템을 조절하는 등 지구의 심장과 같은 역할을 하는 북극해는 생성 이후 지구조운동을 거치면서 현재 모습으로 진화된 과정이 대부분 알려지지 않은 대양이다. 특히 해저 지형 탐사는 심해저나 달 또는 화성의 표면 탐사보다도 미진해 지구의 마지막 미답지로 남아 있다. 현재 지구온난화가 가속화되면서 극지 빙하는 물론 여름철 북극해 해빙 면적과 두께도 빠르게 감소하고 있다. 앞으로 지구 평균 기온이 1.5°C를 넘어 2~3°C까지 상승되면 빙하의 급속한 용해로 해수면 상승이 가속화되면서 전 지구적으로 기후가 어떻게 반응할지 예측하기조차 어려운 실정이다. 따라서 현재보다 대기 온도도 높고 더 많은 양의 빙하가 녹으면서 해수면이 높았던 과거의 최대 간빙기 해저 퇴적물에 보존된 기후변화 기록으로부터 현재 진행되고 있는 기후패턴을 좀 더 잘 이해하고 불확실한 미래에 대한 해답을 얻기 위해 북극해에서 해저 심부 시추를 추진하고 있다.

09p 서민정 해양수산부 해양개발과 극지정책팀장

극지활동 선도국으로의 길 - 제1차 극지활동 진흥 기본계획 수립 -

우리나라는 2021년 세계 최초로 남극과 북극을 포괄하여 국가 차원의 체계적 진흥을 목적으로 하는 「극지활동 진흥법」을 제정하였다. 또한 법령에 따라 남-북극을 포괄하여 우리나라 극지활동의 미래비전 설정과 달성을 위한 향후 5년간 세부 실천과제를 담은 우리나라 최초의 법정기본계획으로서 「제1차 극지활동 진흥 기본계획(2023~2027년)」을 수립하였다. 이번 기본계획에는 그동안의 우리나라 극지활동 수준을 진단하고, 극지에 대한 국민들의 인식과 전문가 정책 수요조사를 바탕으로 북극점에서 남극 내륙까지 인류 미지의 영역에 도전하고, 기후변화 등 글로벌 현안에 대응하며, 극지 신기술 선도를 통해 대한민국이 극지활동 주도국으로 나아가기 위한 비전과 전략을 담고 있다.

12p 신형철 극지연구소 부소장

중앙북극해 해양생태계 보전의 주역으로 부상하는 대한민국

얼어붙은 북극 바다가 열리면서 커지는 수산자원 수확에 대한 기대를 엄격하게 관리하고 합리적으로 만족시킬 수 있도록 과학을 우선으로 하며 최소 16년간 상업 조업을 잠정 금지하는 중앙북극해 협정이 합의되고 발표되었다. 이 협정은 국제공해역 생태계 보전과 자원관리에 대한 파격적인 선제대응이며 비북극권 국가가 대등한 위상으로 북극 거버넌스에 참여하게 하는 중요한 의미를 지닌다. 코로나 감염증의 대유행과 심화된 지정학적 갈등을 비롯한 난제를 슬기롭게 헤치고 첫 번째 당사국 총회가 대한민국의 극지연구소에서 성공적으로 개최되었다. 이 과정에서 우리나라는 협정 이행에 필요한 동력을 유지하고 진전시키는데 크게 기여하였다. 과학기구가 공식 설치되고 공동과학연구 및 모니터링 프로그램과 데이터 공유 프로토콜을 완성하기 위한 작업반을 가동하게 된 것은 우리나라가 유치하고 마무리한 창립총회의 대표적 성과였다. 우리는 이제 우리의 기반시설과 과학역량을 심분 활용한 실질적 지식 기여로 미담의 북극해 수산자원을 환경친화적으로 수확하고 활용하기 위한 초석을 놓을 것이다. 네트워크를 다지고 위상을 강화하며 북극해 거버넌스 의사결정에 주도적으로 참여하는 것은 우리가 놓칠 수 없는 과제이다.

김주홍 극지연구소 대기연구본부



북극발 중위도 기상재해 예측의 중요성

최근 북극의 온도는 전 지구 평균 대비 4배 정도까지 빠르게 상승한 것으로 보고되었는데, 이러한 북극의 온도 상승은 중위도의 날씨와 기후를 조절하는 제트기류를 요동치게 하여 기상재해를 빈번하게 하는 원인으로 지목되고 있다. 그러나 북극 온도 변동과 중위도 기상재해 발생은 해마다 큰 차이가 있어 다가올 계절의 변동성이 어떨지 예측하는 것은 어려운 문제이다. 북극 온도 예측력은 지구 시스템 요소인 대기-해양-해빙-지면 등의 상호작용을 잘 표현하는 예측 모델을 통해 향상시킬 수 있다. 그리고 북극 온도 변화 예측력이 제트기류 반응을 통한 기상재해 예측력으로 연계되려면 좀 더 종합적인 예측 모델에 포함된 대기 모델 내의 역학 및 물리 과정의 개선을 위한 연구, 좋은 품질의 관측을 확보할 수 있게 하는 관측 네트워크 강화 노력, 관측을 모델에 안정적으로 입력되게 할 수 있도록 하는 향상된 자료동화* 기술, 예측 시작 조건에 조금씩 변화를 주어 여러 번 반복 수행하여 그 평균을 취함으로써 예측 성공 확률을 높일 수 있는 앙상블 기법* 등이 필수적이다. 이러한 광범위한 예측 기술 개발이 장기적인 계획을 통해 달성될 때 북극 온난화로 인한 기상재해의 중장기 예측력도 향상될 수 있을 것이다.

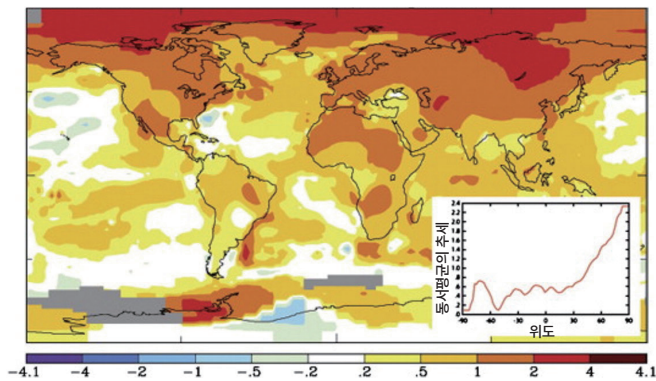
북극의 급격한 온난화

기후변화와 관련하여 지구상에서 관심을 크게 받는 지역을 꼽으라면 단연코 눈과 얼음으로 덮여 있는 극 지역일 것이다. 극 지역 중 하나인 북극의 기후변화는 그린란드 빙하, 대륙의 영구 동토층, 그리고 바다 얼음으로 덮인 북극해에 걸쳐 뚜렷하게 나타나고 있다. 그린란드 빙하의 연간 유실량은 21세기 들어 눈에 띄게 증가하는데, 현재 지속되는 온난화 추세로 지구 평균온도 상승이 산업혁명 이전 대비 2°C 이하로 제한되지 못하면 빙하가 모두 녹아 해수면이 약 7m 상승할 수 있다고 예측한다. 이는 여의도 면적의 960배에 달하는 약 2,800km² 정도의 국토를 수면 아래로 잠기게 할 수 있는 변화이다. 대륙의 영구 동토층의 변화도 감지되고 있는데, 오랫동안 얼어 있어 단단했던 동토가 온도 상승에 따라 탄소 저장 능력이 약해지고

대기로 온실가스가 빨리 방출되고 있어 온난화의 시한폭탄으로 여기고 있다.

좀 더 고위도로 눈을 돌리면 바닷물이 얼어서 생기는 해빙(sea ice)이 녹아 줄어들고 있는 북극해가 있다. 북극 바다의 해빙은 햇빛을 반사하고, 해양과 대기 간 열교환을 효과적으로 차단하며 북극을 춥게 유지하는 기후 조절의 역할을 하는데, 장기적으로 북극 해빙의 감소가 뚜렷하여 우려가 커지고 있다. 백야의 여름에 바다는 얼음보다 햇빛을 더 잘 흡수하여 수온이 높아지고, 흑야로 진입하는 가을~겨울에 바다가 완전히 해빙으로 덮이지 않은 북극 해역에서 수온이 높아진 바다로부터의 수증기 증발은 대기에 구름을 더 많이 만든다. 겨울에 구름이 증가하면 이불을 덮은 것과 같아 온도가 크게 떨어지는 것을 막는다. 즉, 북극 해빙의 감소는 지구상에서 북극의 온도가 유난히 빨리 상승하고 있기 때문이다.

연평균 지상 온도의 장기 추세 (1960-2009)



[그림 1] 1960년 이후 전 지구 기온의 경향: 지구상에서 북극 지역의 온난화가 가장 빠름을 알 수 있다. (출처: Serreze and Barry (2011)의 그림 1)

북극 온난화와 중위도 기상재해의 연결고리

기후변화에 따른 온도 상승이 북극에서 가장 빠르다고 하지만 멀리 떨어진 한반도에 사는 우리는 그 영향이 어떨지 상상하기는 쉽지 않다. 그러나 최근 연구들을 통해 그 연관성이 점점 밝혀지고 있다. 북극과 중위도 간 연결고리는 중위도의 날씨를 조절하는 제트기류의 운동이 북극의 빠른 온도 상승에 영향을 받는다는 점에 있는데, 제트기류의 운동이 어떤 모습인가에 따라 중위도의 날씨는 평온한 상태와 극단적 상태로 나뉜다. 그렇다면 제트기류가 북극의 빠른 온도 상승에 영향을 받는 이유는 무엇일까? 이는 제트기류 흐름을 만들어내는 에너지원이 열대 쪽의 따뜻한 공기와 극 쪽의 찬 공기 간 온도 기울기(temperature gradient)이기 때문이다. 남북 온도

기울기가 클 때는 동서 방향으로 더 곧고 빠른 제트기류가 나타난다는 점을 생각해보면, 북극의 빠른 온도 상승에서 빚어지는 불균등한 온난화 속도는 남북 온도 기울기를 약화시켜 제트기류가 느슨해지고 남북으로 굽이치는 흐름이 커지는 데 좋은 조건을 제공함을 이해할 수 있다. 이렇게 제트기류가 남북으로 크게 굽이쳐 흐르고 느린 상태에서 따뜻한 공기는 극 쪽, 찬 공기는 중위도 쪽으로 제 위치를 크게 벗어나 한파, 폭설 등 기상재해가 발생할 확률이 높아진다.

대류권 상공 제트기류의 흐름이 곧고 빠른 상태와 굽이치고 느린 상태 간의 전이는 북극진동이라 불리는 극 소용돌이(polar vortex)가 성층권에서 주기적으로 강해지고 약해지는 현상과도 직접적으로 연계되어 있다. 제트기류 흐름이 곧고 빠른 상태는 북극진동이 양(+)의 위상에 있고 성층권의 극 소용돌이가 극 주변에 중심을 둔 원형으로 강하게 흐르는 반면에 굽이치고 느린 상태는 북극진동이 음(-)의 위상에 있어 성층권 극 소용돌이의 중심이 극 주변에서 벗어나고 땅콩 모양으로 변형되거나 심하게는 둘로 쪼개지기도 한다. 따라서 북극의 온난화는 제트기류 흐름의 변화와 더불어 북극진동의 위상 변화와 성층권 극 소용돌이의 이상 거동을 통해서도 중위도 날씨에 영향을 준다고 할 수 있다.

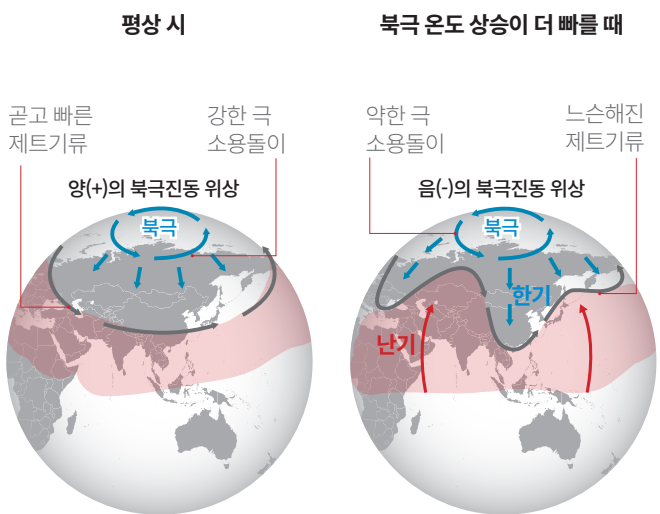
북극발 중위도 기상재해 예측

북극에서 더 빠른 온도 상승은 제트기류의 흐름, 북극진동의 위상, 극 소용돌이의 운동에 영향을 주어 중위도 기상재해를 빈번히 발생시킬 수 있음을 설명하였다. 그러나 북극에서 매년 전년도 기록을 경신하며 온도가 상승하는 것은 아니며 온도의 변동성이 크게 나타나며 서서히 상승한다고 보는 것이 타당하다. 일례로 최근인 2020~2021년 겨울에는 북극 온도 상승과 성층권 극 소용돌이의 급격한 변형이 동반되어 2000년대에 가장 강력한

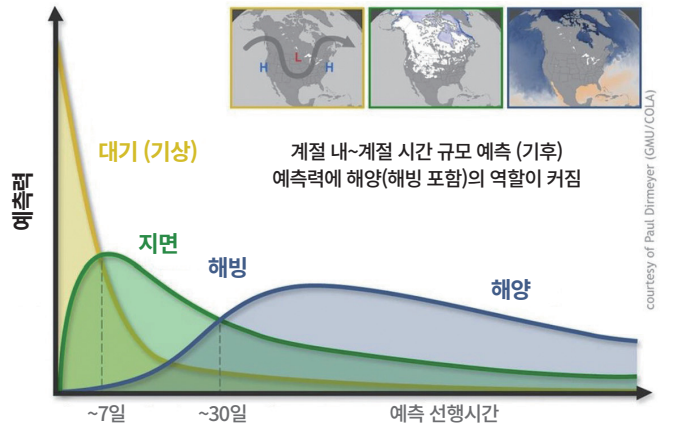
한파가 나타났던 반면에 그 전년도인 2019~2020년 겨울에는 강한 극 소용돌이 안에 북극 한기가 갇히며 한반도의 겨울에 역대 최고 기온이 나타났다. 전자는 온난화의 역설이라 불리는 북극 한기의 급격한 남하의 대표적 사례이고, 후자는 북극 한기가 극에 갇힌 상황에서 겨울철 한반도에 장기적 온난화 추세가 크게 나타난 대표적 사례이다. 그러므로 기후 예측 모델로 다가올 계절에 어떤 유형의 기상재해가 나타날 확률이 높을지 예측하는 데 있어 이러한 변동성의 원인을 예측할 수 있는 기술이 요구된다.

현재 세계적으로 선도적인 기관들에서는 고성능 컴퓨팅 자원을 구축하고 기후시스템 요소(대기, 해양, 해빙, 지면 등) 간의 상호작용을 다룰 수 있는 지구시스템 모델을 기반으로 하는 예측 모델을 기후 예측에 운영하면서 북극의 온도 변화 예측 능력을 향상시키고 있다. 북극해 대기-해빙-해양 간의 상호작용을 잘 표현할 수 있는 예측 모델로 북극권 대기 흐름의 예측 능력을 끌어올릴 수 있다. 물론 지구시스템 모델을 기반으로 예측 모델의 성능을 향상하는 데는 물리적 요소 간 상호작용 표현이 잘 되었는지 다양한 방식의 성능 검증 및 조절 과정이 연구를 통해 충분히 선행되어야 한다.

북극 온도 상승은 제트기류와 성층권 극 소용돌이로 영향을 받지만, 그 반응 강도를 2주부터 1개월 전에 예측할 수 있는가는 현재 기후 예측 분야에서 넘어야 할 큰 걸림돌 중 하나이다. 북극 온도 상승의 예측력이 그대로 중위도 기상재해 예측력으로 이어지기 위해서는 제트기류와 성층권 극 소용돌이와 같은 대기 상공까지 표층 온난화가 대기에 가하는 힘이 전달되는 과정에 대한 모델의 모사 능력이 요구되는데, 이는 대기의 역학 과정과 물리 과정이 포괄적으로 관여하고 있어 대기과학 분야 내 협동 연구개발이 필수적이다. 한편 대기의 과정이라서 예측 시 '나비효과'라 불리는 현재 상태의 미세한 오차가 미래 예측에 큰 오차를 발생시키는



[그림 2] 북극 온도 상승이 더 빠름으로 인한 제트기류와 극 소용돌이 반응의 모식도: (좌) 정상시, (우) 북극 온도 상승이 더 빠를 때(기상재해가 더 빈번하게 발생) (출처: AFP Strait Times Graphics)



[그림 3] 지구시스템 모델을 기반한 예측 모델의 필요성: 예측 시작 후 경과 시간(예측 선행시간)이 길어질수록 대기의 초기 상태가 미치는 예측력의 영향은 급격히 감소하는 반면에 지면, 해빙, 해양 등 비교적 천천히 변하는 인접한 표면 상태와의 상호작용의 영향력이 훨씬 커진다. 즉, 장기 기후 예측에 있어서는 예측 시작 시 표면 상태 정보의 정확성과 예측 수행 중 표면 상태와 대기 간의 적절한 상호작용이 예측력 향상에 더 중요한 요소가 된다. (출처: Mariotti et al. (2018))

문제를 피할 수는 없다. 그러므로 현재 상태의 오차를 줄이기 위한 좋은 품질의 관측 확보를 위한 관측 네트워크 강화와 관측을 예측 모델에 안정적으로 입력하는 기술(자료동화 기술) 개발, 그리고 여러 초기 상태로 예측을 수십 번 반복하여 예측 평균 경로를 찾음으로써 예측 성공 확률을 높이는 기술(양상불 기법) 개발도 필요하다.

맺음말

지구온난화에 따른 북극 지역의 온도 상승과 같은 불균등한 변화가 나타나는 현상은 기후변화의 영향이 단순하지 않다는 점에서 우리에게 시사하는 바가 크다. 지구상 모든 곳이 균등하게 온도가 올라가지 않는다는 것은 지구 대기의 순환이 온도 상승에 대한 반응에 더해 이러한 북극에 증폭된 차등적 가열에 대해 추가적으로 반응한다는 의미이고, 이는 우리나라를 포함한 중위도의 날씨와 기후 조절에 북극의 영향력이 커지고 있다는 것으로도 이해될 수 있다. 따라서 북극 온난화로 인한 기상재해 발생의 중장기 예측력 향상을 위해 기술 개발이 지속적으로 이뤄져야 한다.

지구시스템 모델을 기반한 예측력 기술 개발을 통해 예측 시작 후 1~3개월간의 기후 전망 능력에 더해, 중기 기상 예측(2주 이내)과 장기 기후 예측(1개월 이상) 사이의 공백으로 존재했던 예측 시작 후 2주~1개월 기간(연장 중기 예측)의 예측력 향상을 도모할 수 있다. 그리고 향상된 예측력을 달성하기 위해서는 기술 개발에 더해 실과 바늘처럼 뉘 수 없는 것이 있는데, 이는 향상된 예측 모델을 수행할 수 있는 고성능 병렬 계산 컴퓨터(예: 슈퍼컴)이다. 즉, 지구시스템 모델을 기반한 예측 모델로 정해진 시간 내에 예측을 완료할 수 있는 규모의 계산 자원이 확보되어야 하고, 모델 고도화에 따라 이를 정기적으로 업그레이드할 수 있어야 하므로 지속적인 투자가 필요하다.

※보충 설명

·역학 및 물리 과정

역학 과정은 모델에서 유체(공기, 얼음, 물)의 모델 격자 크기 이상의 큰 규모 흐름을 만들어내는 역할을 하는 과정을 의미하며, 물리 과정은 열 전달, 물의 상변화, 모델 격자 크기 보다 작은 규모의 흐름을 표현하는 부분 등을 총칭한다.

·자료동화

시공간적으로 불규칙하게 분포된 관측 자료를 규칙적 격자로 구성되고 일정한 시간 간격으로 수행되는 모델 생산 자료에 충격 없이 잘 입력하여 현재 상태의 자료를 만들어내는 수학적 기법을 의미한다. 예측 시작 시점(현재 상태)의 대기, 해양, 해빙 등에 대한 정보가 자료동화를 통해 모델이 받아들일 수 있는 자료로 만들어져야 예측을 시작할 수 있다.

·양상불 기법

가용 관측을 모두 모아 자료동화를 잘 수행한다 하더라도 우리는 대기, 해양, 해빙 등의 현재 상태를 정확하게 만들어내는 것은 불가능하여 카오스 이론의 나비효과를 피할 수 없다. 양상불 기법은 현재 상태에 미세한 변화를 주면서 예측을 반복적으로 수행하여 이의 평균 경로를 취함으로써 예측이 크게 벗어날 수 있는 상황을 극복하고자 하는 방법론이다.

·제트기류

평균 11~14km 상공의 대류권 상부에서 서에서 동으로 빠르게 부는 편서풍으로 열대의 난기와 극 지역 한기의 경계를 나누고 있어 중위도 날씨/기후 조절의 핵심 요소이다.



ISSN 2733-7529 (Print)

ISSN 2733-7537 (Online)



발행일 : 2023년 3월

발행처 : 극지연구소 정책개발실 Tel. 032-770-8425

주소 : 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 극지연구소 (www.kopri.re.kr)

Copyright© 2014 KOPRI, All rights reserved.

Cover pages photo credit© KOPRI