

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

Poles & Globe

극지와 세계

2023 DECEMBER
Vol. 04

**기후변화로
병드는 남극식물**

이정은
극지연구소

**빙하기 북극 심층수
환경 복원을 통한 기후변화 이해**

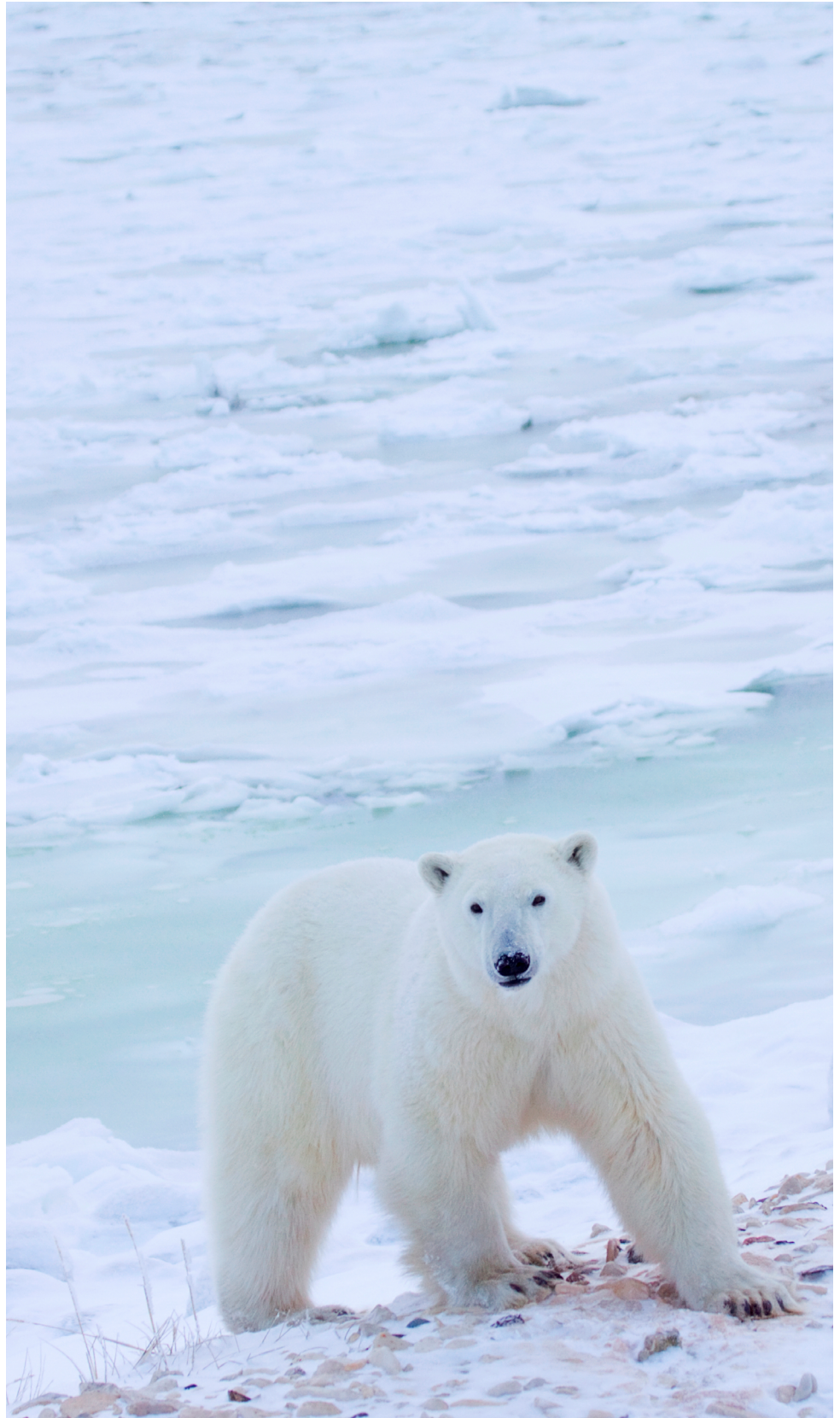
장광철
연세대학교

**도전받는 남극,
변화하는 남극 거버넌스와 이슈**

최영준
극지연구소 前 정책개발실장
서원상
극지연구소 전략기획부장

**2023년 국가남극사업
운영자위원회(COMNAP)
연례회의의 결과**

최선웅
극지연구소 기지운영실장



DECEMBER

Vol. 04

03p 이정은 극지연구소

기후변화로 병드는 남극식물

남극은 지구상에서 극한 환경 중 한 곳으로, 자연 조건이 열악한 상태에서 생명이 어떻게 존속할 수 있는지와 급격한 기후변화에 생물들이 대응하는 방법을 연구하기에 매우 이상적이다. 이끼를 비롯한 남극식물은 독특한 적응 전략을 갖추고 있으며, 휴면과 세포보호전략을 활용하여 극한 환경에서도 살아남았다. 한편 지구온난화 등 기후변화 영향으로 식물개체군의 폭발적인 증가와 함께 병원균의 출현 위험이 높아지는 등 남극 생태계가 급격히 변화하고 있다. 남극의 식물 연구는 남극 고유의 생물들이 극한 환경과 기후변화, 그리고 알려지지 않은 질병에 어떻게 적응하고 대응하는지를 연구함으로써 지구의 다양한 생태계에서 환경과 기후의 영향을 종합적으로 평가하는 데 중요한 역할을 한다.

06p 장광철 연세대학교

빙하기 북극 심층수 환경 복원을 통한 기후변화 이해

화석연료 사용으로 대기 중 이산화탄소가 증가하면서 지구는 유례없는 온난화를 겪고 있다. 정확도가 높은 예측을 기반으로 한 대책 마련이 시급하지만 수십 년에 불과한 관측자료로는 면밀한 현상 이해조차 어렵다. 과거의 환경 복원 연구가 필요한 이유이다. 과거의 기록에 따르면, 대기 중 이산화탄소 증감에 있어 해양심층수의 역할은 매우 중요하다. 빙하기 해양심층수에 저장되는 탄소량의 증가가 대기 중 이산화탄소 감소를 견인한다는 설명이다. 이와 관련하여 북극해의 역할은 증거 부족으로 그동안 배제되었으나, 최근 극지연구소가 주관한 연구에서 마지막 빙하기 동안 북극 심층수에 다량의 탄소가 저장되었음이 밝혀졌다. 대기 중 이산화탄소 변동에 대한 북극해 역할의 중요성이 처음으로 강조된 것이다. 이러한 역할을 보다 체계화 및 수치화하기 위해서는 북극해 내 다양한 지역 및 수심을 포괄하고, 보다 먼 과거를 대변할 수 있는 시료를 대상으로 한 후속 연구가 반드시 필요하다. 서북극해 분지지역 및 동북극해 전반에 대한 시료 확보가 요구되는 바, 해당 지역을 대상으로 한 신규 탐사 기획 혹은 대상 시료를 보유하고 있는 해외 연구 기관과의 협력이 필요하다 사료된다.

09p 최영준 극지연구소 前 정책개발실장, 서원상 극지연구소 전략기획부장

도전받는 남극, 변화하는 남극 거버넌스와 이슈

전 지구적 온난화에 따라 남극의 환경도 변화하고 있으며, 그 회복력 또한 약화되고 있다. 환경적으로 도전받고 있는 남극은 남극조약체계 안에서 논의되는 이슈에도 변화를 주고 있다. 본 원고는 2023년 핀란드 헬싱키에서 개최된 제45차 남극조약협약 당사국회의(ATCM) 논의의 주제를 통해 변화의 최전선에 있는 남극 이슈를 담아내고자 하는 남극 거버넌스 체계의 변화를 전달하고자 한다. 급격한 기후변화로 ATCM 내에서 기후변화 대응과 남극 환경보호 이슈가 주요한 논의 주제로 부상했으며, 글로벌 기후변화 대응을 위한 논의가 남극 거버넌스 체계에서도 자연스럽게 이어졌다. 이로 인해 남극조약 당사국들은 이번 ATCM에서 ‘헬싱키 선언’을 채택하여 기후변화 대응을 위한 노력과 남극의 변화가 초래하는 지구 환경 변화에 대한 공동의 이해와 대책을 촉구했다. 또한 남극의 변화를 촉진하는 남극 관공 규제에 대한 요구가 몇몇 당사국들에 의해 강하게 제기되고, 더 나아가 남극광물자원활동을 금지하는 남극조약 환경보호의정서 제7조의 정확한 이해를 촉구하는 결의안을 채택하기도 했다. 또한 불안정한 국제 정세가 남극조약 체계뿐만 아니라 남극 거버넌스 체계에도 계속 영향을 주고 있는 실정이다. 우리나라도 이러한 국제적 노력에 동참하고 대책을 마련하기 위해 과학연구뿐만 아니라 다양해진 남극 이슈에 대응할 수 있는 전문가 양성과 참여 지원 체계 구축, 국민적 공감과 인식을 위한 교육과 홍보 등 다각적인 해결책을 모색해야할 시점이다.

12p 최선웅 극지연구소 기지운영실장

2023년 국가남극사업운영자위원회(COMNAP) 연례회의의 결과

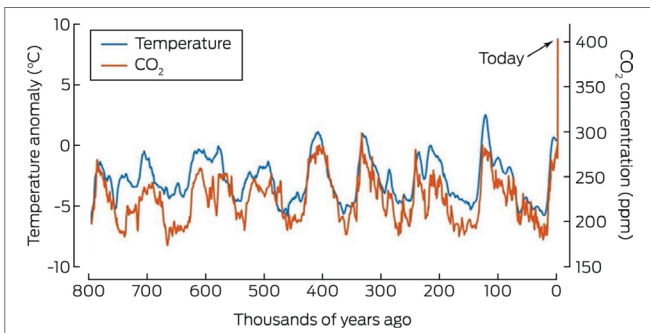
국가남극사업운영자위원회(이하 COMNAP)는 남극과학연구활동과 인프라 운영 등 보급지원 분야의 전문가 그룹으로 시작하였다. 현재 COMNAP은 남극조약체계(Antarctic Treaty System)에서 남극과학연구를 지원하는 탄탄한 버팀목 역할과 남극연구국가들 간의 정보와 협업을 위한 교류 창구로서 중추적인 역할을 하고 있다. 우리나라는 1988년부터 COMNAP 회원국으로 참여해 왔으며, 2009년 쇠빙연구선 아라온 인도, 2014년 남극장보고과학기지 준공, 그리고 남극과학인프라를 바탕으로 한 국제협력과 과학연구성과 등을 통해 남극 국제사회에서 주요 협력국가 중 하나로 자리매김하고 있다. 2023년 COMNAP에서는 코로나19 팬데믹 이후 남극과학연구활동의 정상화와 이에 따른 도전에 대응하기 위한 회원국 간의 다양한 협력 방안 모색과 논의가 이뤄졌다. 우리나라는 미국, 이탈리아, 독일 등 주요 협력국가들과 2023/24 남극하게 기간 중 상호 협력 분야에 대한 실무협의를 시행하였다. 이외에도 남극 혁신사례와 협력이라는 주제로 남극 현장에서 우리나라의 가상현실(XR)이동형 로봇 등 첨단기술을 활용한 남극과학연구에 대한 발전가능성을 제시함으로써 타 국가들로부터 높은 호응과 관심을 얻을 수 있었다.

빙하기 북극 심층수 환경 복원을 통한 기후변화 이해

화석연료 사용으로 대기 중 이산화탄소가 증가하면서 지구는 유례없는 온난화를 겪고 있다. 정확도가 높은 예측을 기반으로 한 대책 마련이 시급하지만 수십 년에 불과한 관측자료로는 면밀한 현상 이해조차 어렵다. 과거의 환경 복원 연구가 필요한 이유이다. 과거의 기록에 따르면, 대기 중 이산화탄소 증감에 있어 해양심층수의 역할은 매우 중요하다. 빙하기 해양심층수에 저장되는 탄소량의 증가가 대기 중 이산화탄소 감소를 견인한다는 설명이다. 이와 관련하여 북극해의 역할은 증거 부족으로 그동안 배제되었으나, 최근 극지연구소가 주관한 연구에서 마지막 빙하기 동안 북극 심층수에 다량의 탄소가 저장되었음이 밝혀졌다. 대기 중 이산화탄소 변동에 대한 북극해 역할의 중요성이 처음으로 강조된 것이다. 이러한 역할을 보다 체계화 및 수치화하기 위해서는 북극해 내 다양한 지역 및 수심을 포괄하고, 보다 먼 과거를 대변할 수 있는 시료를 대상으로 한 후속 연구가 반드시 필요하다. 서북극해 분지지역 및 동북극해 전방에 대한 시료 확보가 요구되는 바, 해당 지역을 대상으로 한 신규 탐사 기획 혹은 대상 시료를 보유하고 있는 해외 연구기관과의 협력이 필요하다.

대기 중 이산화탄소 농도에 따른 기후변화

오늘날 지구는 급격한 온도 상승에 따른 변화를 겪고 있다. 산업화 이후 화석연료 소비 증가와 함께 급증한 온실가스를 주범으로 꼽는다. 온실가스의 상승이 우주로 방출되는 적외선 복사열을 흡수하여 지구가 더워진다는 것이다. 실제로 대표적인 온실 가스인 이산화탄소의 대기 중 농도는 과거 수십만 년 동안 180~280ppm 수준에서 유지되었지만, 급증한 화석연료 사용과 함께 20세기 초에는 300ppm을, 그리고 21세기 초에는 400ppm을 돌파며 오늘날 급격한 온도 상승을 견인한 것으로 보인다.



[그림 1] 지난 80만년 동안의 지구 평균 온도와 이산화탄소 농도 변화 (출처: Hanna and McIver (2018)의 figure 1)

지구 평균 온도와 대기 중 이산화탄소 농도의 높은 상관성은 과거 기후 복원 기록에서도 확인된다. 기록에 따르면 지구는 지난 80만 년 동안 약 10만 년 주기로 반복적인 온도 상승과 하강을 겪었다. 빙하기-간빙기로 대변되는 이러한 온도 변화 양상은 과거 이산화탄소농도 증감 추세와 매우 닮았는데, 따뜻했던 간빙기 동안의 대기

중 이산화탄소 농도는 최대 280ppm까지 높았던 반면에 빙하기 동안에는 그 농도가 180ppm까지 떨어지며 30% 이상 감소했다. 빙하기의 이산화탄소 농도 감소가 온실효과를 저해하며 추운 기후에 일조한 것이다¹⁾. 빙하기 동안 감소한 대기 중 이산화탄소는 어디로 사라졌을까? 탄소 화합물인 이산화탄소(CO₂)는 빙하기 동안 다양한 탄소 화합물(유기물, 용존무기탄소 등)의 형태로 지구 곳곳에 저장됐다. 먼저, 빙하기 동안 혹독한 추위와 함께 폭넓게 확산하는 빙하에 원인이 있다. 빙하 생성 시 이산화탄소 등 기체가 얼음에 직접 갇히기도 하고, 빙하 확장 과정에서 기저면에 유기물들이 다량으로 포획되며 대기 내 이산화탄소 농도를 간접적으로 낮출 수 있기 때문이다²⁾. 이와 유사한 이유로 육상의 역할 또한 고려될 수 있다. 빙하기 동안 널리 확장되는 영구동토층 등에 유기물이 대량 포획되면서, 육상에서 대기로의 이산화탄소 방출이 상당 부분 통제되기 때문이다. 그러나 오늘날 과학자들은 빙하기 이산화탄소의 주요 저장소로 깊은 바다, 즉 해양심층수를 꼽는다. 해양에 저장될 수 있는 탄소량이 빙하와 육상에 비해 압도적이고 지속 가능하기 때문이다.

빙하기 이산화탄소 감소에 대한 북극 심층수의 역할

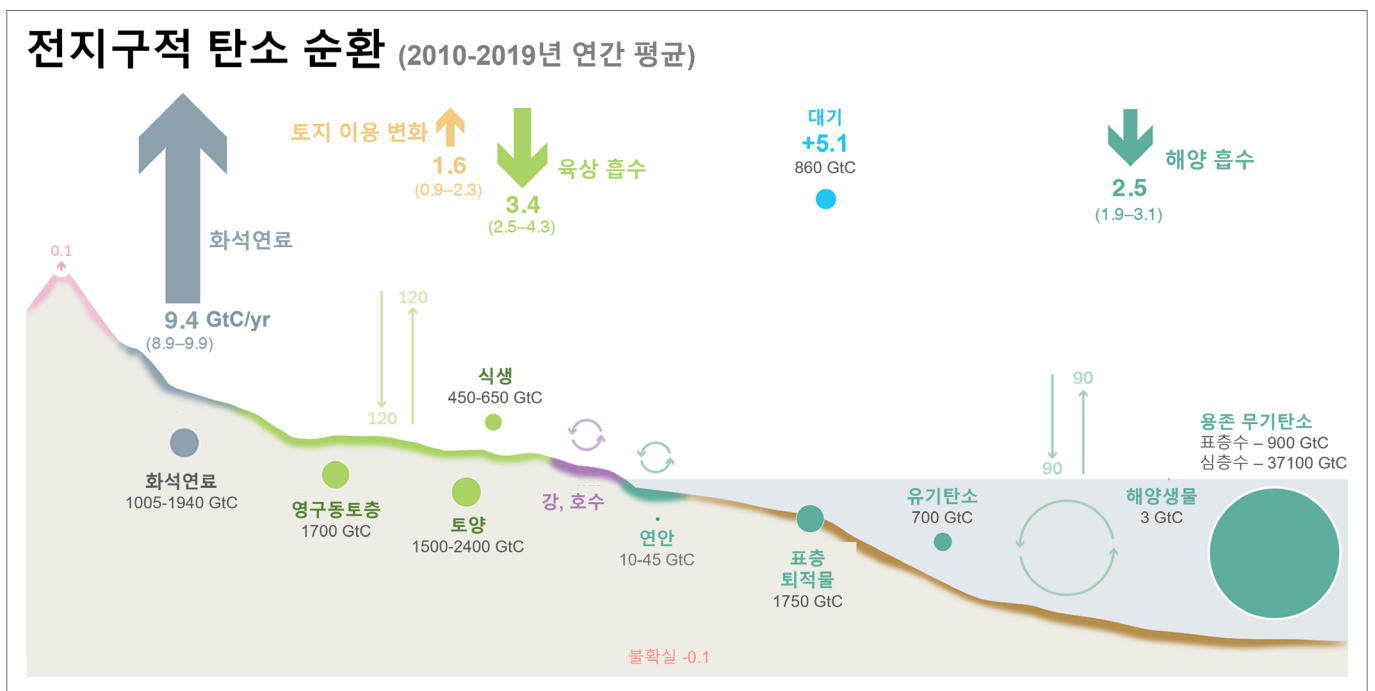
오늘날 해양심층수에는 37,000기가톤(Gt)에 가까운 막대한 양의 탄소가 저장되어 있다. 대기에 저장된 탄소량(860Gt)의 40여 배, 식생, 토양 및 영구동토층을 포함한 육상 내 총 탄소량에 비해서도 10배에 가까운 양이다. 이는 탄소 순환에 있어 해양심층수 내 소소한 변화가 전 지구적인 변화로 이어질 수 있음을 말한다. 빙하기 동안 해양심층수 내 탄소량 변화는 매우 중대했을 것으로

추정된다. 먼저, 빙하기 바닷물에는 평소보다 많은 이산화탄소가 녹았을 것이다. 차가운 콜라에 탄산이 풍부하듯, 바닷물이 차가워져 기체 포화도가 상승하기 때문이다. 반면에 해양심층수에서 대기로 방출되는 이산화탄소는 감소했을 것이다. 빙하기 동안 해류 순환 약화로 인해 해양심층수가 물리적으로 고립되며, 외부에서 해양 심층수로 유입된 탄소의 재방출이 제한되기 때문이다. 결과적으로 빙하기 해양심층수에는 평소보다 많은 탄소가 저장되었을 것으로 예상된다. 실제로 빙하기 해양심층수에 저장된 탄소량은 증가했을까? 과거 해수의 탄소량을 직접 측정하는 것은 아쉽게도 불가능하다. 그렇기 때문에 과학자들은 해수 내 탄소량을 대변하는 간접 증거로서 해수의 산소 농도를 추정하여 이 문제를 해결하고자 하였다. 해수 내 탄소량이 증가하면 일반적으로 산소 농도는 감소하기 때문이다. 2016년 영국 옥스퍼드대학 연구진은 해양퇴적물 내 자생성 우라늄³⁾ 농도 변화를 바탕으로, 남빙양(Southern Ocean) 심층수의 산소 농도가 빙하기 동안 크게 줄었음을 밝혔다. 이와 유사한 방식을 통해 대서양, 태평양, 그리고 인도양 지역에서도 빙하기 동안 심층수의 산소 농도가 감소된 사실을 확인했다. 대다수의 대양(大洋) 심층수가 빙하기 탄소 저장소로 작동한 것이다. 반면에 북극해는 빙하기 산소 감소, 즉 탄소 저장과는 무관한 것으로 여겨졌다. 자생성 우라늄 농도 상승 등 산소 감소와 관련된 유의미한 증거가 발견되지 않았기 때문이다. 그러나 빙하기 탄소 저장소로서 북극해의 역할이 최근 다시 조명되었다. 과거 빙하기 동안 북극 심층수의 산소 농도가 매우 낮았다는 증거가 극지연구소 연구팀에 의해 제공된 것이다. 연구팀은 가설 입증을 위해 해양퇴적물에서 골라낸 자생성 탄산염 결정체⁴⁾를 분석하는 새로운 방법을 적용했다. 결과에 따르면, 빙하기 북극해는 산소 농도가 0에 가까운 정도로 산소 결핍 환경이었을 뿐 아니라, 오늘날에 비해 염분도도 최대 40% 가까이

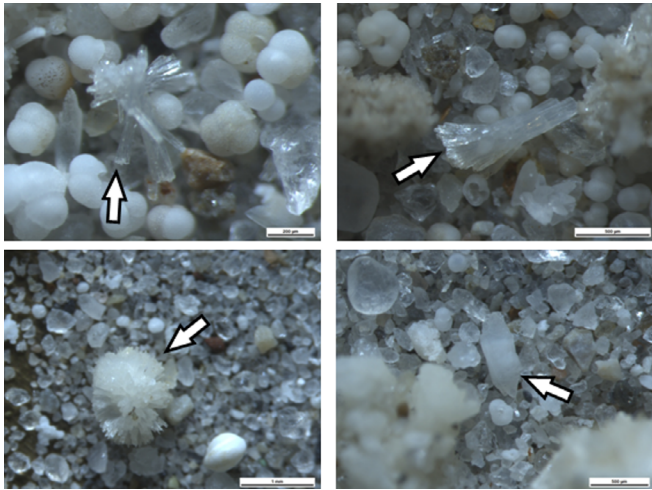
떨어졌던 것으로 확인된다. 민물과 바닷물이 섞인 독특한 환경 때문에 자생성 우라늄 등 기존 방식을 활용한 과거 산소 농도 추적이 북극해에서는 통하지 않았던 것으로 추정된다. 즉, 북극 심층수 환경 복원을 위해서는 자생성 탄산염 결정체 분석법이 현재까지는 유일한 해결책이다. 2023년 초에 발표된 해당 연구는 서(西)북극해 수심 1800m 깊이의 해양퇴적물(독일 알프레드-베게너 해양극지연구소 시료 제공)에서 분석된 결과로 해당 깊이의 해양 환경을 일차적으로 대변한다. 하지만 만약 1800m 깊이 이하의 서북극해 심층수가 모두 산소 결핍되었음을 가정한다면, 서북극해는 빙하기 대기 중 이산화탄소 감소에 10% 이상 기여한 것으로 해석될 수 있다. 전 세계 해수 부피의 1% 미만을 차지하는 서북극해의 규모를 고려하였을 때 북극해의 탄소 조절 능력이 여타의 대양에 비해 매우 크다 할 수 있다.

북극 심층수 환경 복원 연구가 나아갈 길

앞으로의 연구 과제는 명확하다. 빙하기 북극 심층수의 산소 결핍 가설을 시공간적으로 검증하여 대기 중 이산화탄소 거동에 대한 해양의 역할을 면밀히 이해하는 것이다. 극지연구소 연구팀에 의해 개발된 자생성 탄산염 활용법은 현재까지 북극해 산소 농도 복원에 적용될 수 있는 유일한 방법으로, 서북극해를 넘어 동북극해까지 북극해 전(全) 지역에서 획득한 퇴적물에 적용될 수 있다면, 탄소 저장소로서 북극해, 나아가 해양의 역할을 이해하는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 이를 위한 첫 번째 발걸음은 북극해 내 각 분지(캐나다, 마카로프, 아문센, 난센 분지 등) 및 각 수심(1000m, 2000m, 3000m 등)을 대표할 수 있는 퇴적물 시료 확보로부터 시작될 수 있다. 우선적으로 고려될 사항은 극지연구소 코어보관소에 저장된 퇴적물 시료를 활용하는 것이지만 그동안

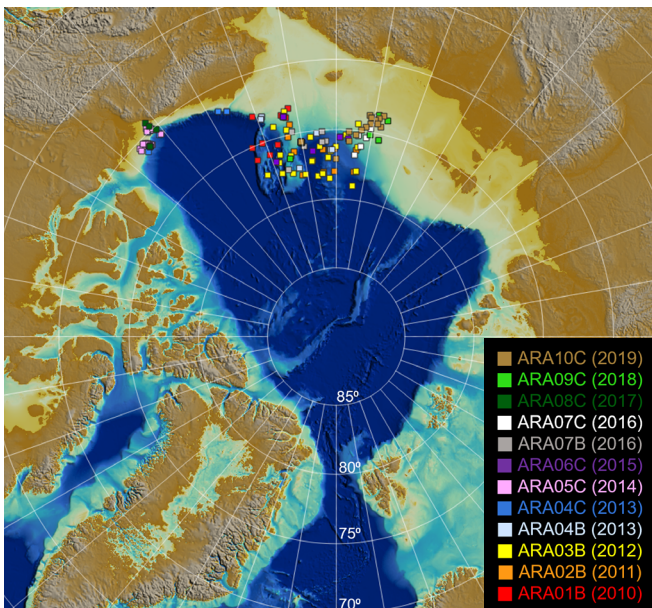


[그림 2] 전 지구적 탄소 저장량 및 연간 탄소 이동량(출처: Friedlingstein et al. (2020)의 figure 2를 수정함)



[그림 3] 서북극해 퇴적물에서 관찰된 자생성 탄산염 결정체의 현미경 사진

극지연구소 아라온 탐사를 통해 획득한 퇴적물은 대부분 서북극해, 그 중에서도 연안 지역에 편중되어 활용성이 상대적으로 크지 않다. 이에 대한 보완책으로 아라온 혹은 앞으로 건조되는 차세대 쇄빙 연구선을 활용하여 서북극해 분지 지역 및 동북극해 전반을 대상으로 하는 신규 탐사를 기획할 수 있다. 상당한 탐사 비용 및 기간 확보 등 정부·기관 차원에서 지원이 요구되겠지만, 순수한 국내 기술 및 자본에 기반한 빅사이언스 성과를 기대할 수 있을 것이다. 마지막으로 고려될 수 있는 방안은 해외 선진기관과의 협업을 통한 시료 확보이다. 본 글에서 소개된 사례와 같이 다양한 퇴적물 시료를 보유한 독일 알프레드-베게너 해양극지연구소와의 협업 연구를 통해 부족한 시료를 보완할 수 있다. 성공적인 국제공동연구 수행은 극지 연구에 대한 국가 브랜드 가치를 제고하는 지름길로서, 앞으로 북극해에서 진행 예정인 국제해양시추프로그램(International Ocean Discovery Program) 등 거대 지구과학 프로그램에 선제적으로 참여할 수 있는 당위성을 제공하는 면에서 장려된다.



[그림 4] 2010-2019년 아라온 탐사를 통해 획득한 퇴적물 시료 위치

- 1) 빙하기 간빙기 사이클은 근본적으로 지구의 공전궤도 및 자전축 변화 - 등에 따라 지구 표면으로 도달하는 계절별/공간별 일사량(insolation) 변화에 기인한다. 하지만 이에 따른 미미한 연평균 일사량 변화가 대규모의 전 지구적 기후변화로 이어지기 위해서는 지구 기후시스템 내 되먹임(feedback)에 의한 증폭작용이 동반되어야 하는 데, 과거 복원 기록(paleorecords) 및 모델 시뮬레이션 결과에 기반한 하나의 유력한 시나리오는 대기 중 이산화탄소 변화가 주요 증폭기(amplifier)로서 대규모의 기후 변동을 이끌었다는 것이다.
- 2) 유기물(organic matter)은 탄소를 포함하는 물질로, 일반적으로 분해 과정에서 산소를 소모하고 이산화탄소를 생성한다. 유기물을 포획하는 빙하 기저면은 일반적인 육상 환경과 비교했을 때 온도가 낮고 분해 과정에 필요한 산소가 부족하여 유기물 분해가 매우 늦게 일어나기에, 결과적으로 육상으로부터의 이산화탄소 방출을 저해하는 효과를 야기한다.
- 3) 자생성 우라늄은 퇴적 이후 침전된 우라늄을 의미한다. 자생성 우라늄 침전은 일반적으로 산소가 부족한 환경에서 이루어지므로, 퇴적물 내 자생성 우라늄 농도 상승은 전통적으로 산소가 부족한 환경을 가리키는 지표로 활용되어 왔다.
- 4) 자생성 탄산염은 퇴적물 주변 수괴(water mass)로부터 침전되며 형성되는 광물로, 형성 당시 주변 수괴의 화학성분을 잘 반영하는 것으로 알려져 있다. 극지연구소 연구팀은 북극해 해양퇴적물에서 발견된 자생성 탄산염 결정체가 해양심층수와 퇴적물 경계부에서 형성된 것으로 추정하였으며, 이를 근거로 자생성 탄산염의 화학성분이 북극해 해양 심층수의 그것을 대변하는 것으로 여겼다.



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



발행일 : 2023년 12월
발행처 : 극지연구소 정책개발실 Tel. 032-770-8428
주소 : 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 극지연구소 (www.kopri.re.kr)

Copyright© 2014 KOPRI, All rights reserved.
Cover pages photo credit© KOPRI