

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**

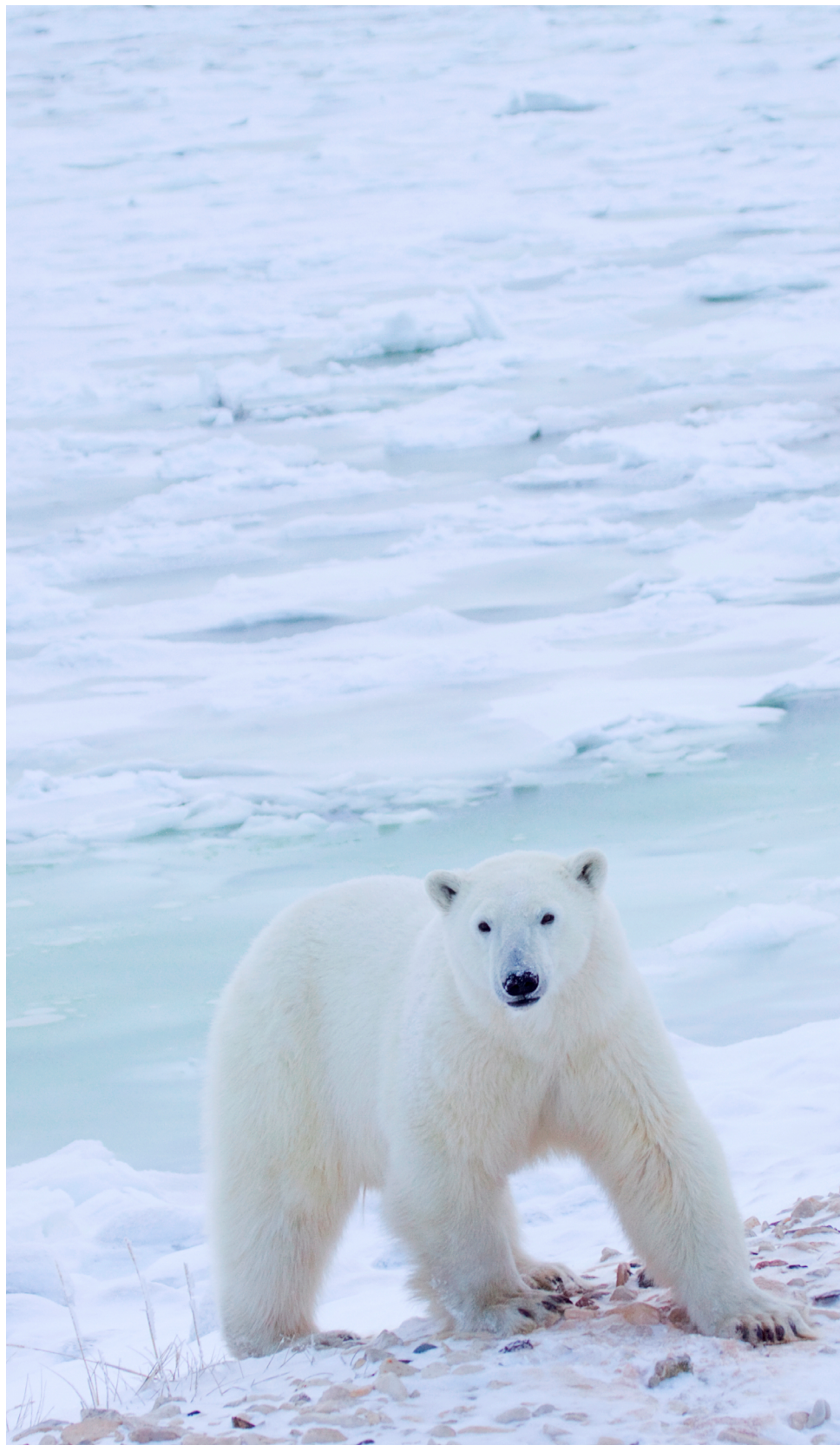
장광철
연세대학교

**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 남극조약협약당사국회의(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 쇄빙연구선 아라온 인도, 2014년 남극장보고과학기지 준공, 그리고 남극과학인프라를 바탕으로 한 국제협력과 과학연구성과 등을 통해 남극 국제사회에서 주요 협력국가 중 하나로 자리 매김하고 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 남극학계 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.

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.

남극의 계절 변화와 고유한 식물 생태계

남극 대륙은 태양 입사량의 양이 매우 적고 주변을 둘러싼 차가운 해류로 연중 매우 낮은 온도를 유지하고 있다. 그러나 이곳 역시 나름의 계절 변화를 겪고 있다. 겨울에는 두꺼운 얼음이 대륙 전체를 덮는 반면에 겨울이 지나고 온도가 상승하면 눈이 녹기 시작한다. 서남극에 위치한 남극반도의 끝에 세종과학기지가 자리 잡고 있다. 이 세종과학기지의 주변은 여름이 되면 얼음이 없는 지역이 해안가를 중심으로 드러나는데, 빙하가 녹은 물은 남극생태계의 생물들에게 수분을 공급하고, 겨우내 동면하고 있던 생물들의 생장을 재개시킨다. 남극의 여름은 매우 짧지만 남극의 생물들은 이 시간 동안 생명 활동을 분주히 하게 된다. 두꺼운 눈얼음 아래에서 겨울을 지낸 이끼와 식물은 다시 파릇파릇해지고 광합성을 시작하며, 펄관과 바다표범은 해안가에서 새끼를 출산하고 키운다. 그러나 기온은 여전히 영하를 넘나들고 있고, 강한 바람과 UV(Ultraviolet Ray: 자외선)가 지속해서 유출되기 때문에 일반적인 식물이 씨앗을 받아시키고 열매를 맺기는 어렵다. 이로 인해 남극의 식물 생태계는 극히 제한적이며, 이끼와 균류인 지의류가 주를 이룬다. 꽃을 피우는 식물은 남극좁새풀과 남극개미자리 두 종이 전부이다.

이끼는 남극에서 가장 흔하게 볼 수 있는 식물이다. 서남극 지역에서는 인간의 개입 없이 수백 년간 자라온 이끼 군락을 관찰할 수 있다. 이 이끼들은 포자로 유성생식을 할 수도 있지만 다수는 잎이나 줄기 조각으로부터 자라나는 무성생식 전략을 통해 번식하는 것으로 알려져 있다. 이들은 남극의 여름 동안 잠시 성장한 후 겨울에 다시 두터운 눈에 덮이는 주기를 반복하며 살아가고 있다. 2014년에는 1,400년 동안 얼음 속에서 보존된 이끼 조직이 실험실로 옮겨진



[그림 1] 남극의 대표적 식물인 남극좁새풀, 남극개미자리, 남극낫깃털이끼
[사진: 이정은]

후 새로운 줄기를 생성한 것이 보고되었다. 마치 죽은 것처럼 보였던 조직에서 생명이 재생된 것이다. 이러한 식물들은 얼음 속에서 휴면 상태로 모든 생장과 대사를 중지하다가 환경이 호전되면 다시 생명 활동을 시작하는 전략으로 극한 환경에서도 생존할 수 있는 것으로 보인다. 이렇듯 이끼는 극한 환경에서 휴면조절능력이 매우 발전된 것으로 생각된다. 즉, 이끼를 비롯한 남극식물의 대부분은 최적의 환경 조건이 되기 전까지는 생장을 중지하고 기다리는 전략을 취하는데, 이는 식물의 씨앗이나 나무의 줄기에서 나타나는 계절성 휴면 과정과 상당히 유사하다. 식물의 종자는 성숙한 후 즉시 발아하지 않으며 나무의 줄기도 겨울이 되면 생장을 멈춘다. 즉, 식물은 휴면 상태에서 겨울을 보내며 봄을 기다린다. 최근 극지식물 연구팀은 남극의 오랜 겨울 기간에 이들 식물이 어떻게 생존하는지, 세포 내에서 무슨 일이 일어나는지를 파악하기 위해 세종기지의 월동 연구대원들에게 매월 채집한 남극의 식물에서 유전자 발현을 조사하도록 했다. 그 결과, 놀라게도 어두운 극야의 얼음 아래에서 캐낸 얼어붙은 식물들이 생명을 유지하기 위한 유전자들을 여전히 강하게 발현하고 있었다. 이렇듯 극지식물의 유전자들은 계절에 따라 다르게 발현된다. 다시 말해 짧은 초록의 여름 동안에는 생장을

위한 유전자를, 눈이 내리고 바다가 얼기 시작하는 겨울에는 세포 내에서 휴면을 위한 성장 억제 유전자를 활성화시킬 것이다. 그러면서 긴 겨울이 끝나면, 식물들은 또다시 생장을 시작할 준비를 한다.

급변하는 남극생태계

한편 서남극 지역은 지구상에서 가장 온난화 속도가 빠른 곳이다. 최근에는 기온의 상승으로 눈보다 비가 오는 날이 더 많아지면서 대륙을 덮고 있던 빙하는 점점 더 빠른 속도로 줄어들고 있다. 빙하가 사라진 땅에는 천이가 활발히 일어나고 있다. 빙하에 의해 부서진 암석더미에는 지의류와 이끼, 그리고 육상 조류와 같은 다양한 생물들이 정착하게 되고, 그들의 군락이 발달하여 두터운 매트 형태를 형성한다. 이렇게 오랫동안 쌓인 유기물 층 위에는 뿌리와 줄기로 꽃을 피우는 현화식물들이 자라면서 토양이 형성된다. 이 과정에는 식물뿐만 아니라 그들과 공생하는 박테리아와 곰팡이도 중요한 역할을 수행한다.

이러한 천이 과정은 최근의 기후변화에 따라 더욱 가속화하고 있다. 특히 현화식물의 개체 수는 최근 10년간 크게 증가하는 추세이다.



[그림 2] 세종기지 주변 바톤반도의 식생천이 모습. (왼쪽부터) 빙하 후퇴 직후의 물리적 풍화상태인 암석 → 이끼매트의 형성과 발달 → 이끼 부식질로 구성된 유기질 토양이 형성, 현화식물 정착 [사진: 이정은]

온도가 올라감에 따라 식물은 눈에 덮여 있는 날이 점점 줄어들게 되었다. 이전에는 극한 환경을 견뎌내기 위해 에너지를 사용했다면, 이제는 생장과 번식에 더 많은 에너지를 쓸 수 있게 되었다. 이러한 현상은 비단 식물에서만 일어나는 일이 아니다. 그전에는 얼음 속에 갇혀 최소한의 에너지대사를 하던 미생물들도 깨어나기 시작했다. 그렇다면 이들은 과연 생태계에 어떤 영향을 미칠까? 어떤 종들은 토양의 생물학적 풍화를 촉진시켜 식물 생장에 이로운 역할을 하는가



[그림 3] 남극 킹조지섬 현화식물 군락의 폭발적 확장 모습 (좌: 남극좀새풀, 우: 남극개미자리) [사진: 이정은]

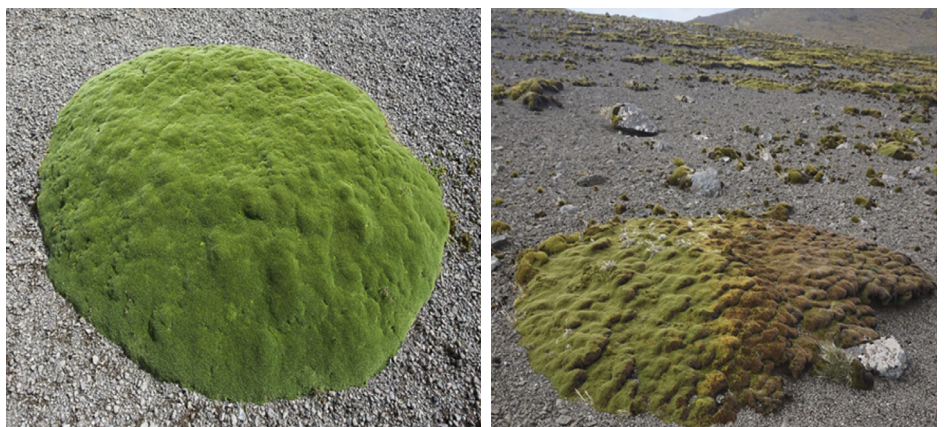
하면, 또 어떤 종들은 식물병원균으로서 기능을 할 수도 있다. 극지 식물과 미생물의 상호관계는 극지생태계의 핵심 기능이지만 이에 대해서는 알려진 바가 거의 없으며, 향후 온난화에 의한 환경 변화가 이들 상호관계에 어떤 영향을 줄지에 대해서도 아직 연구가 미비한 실정이다.

남극식물, 병들다.

“빙하 속 좀비 바이러스”라는 용어를 접해본 적이 있을 것이다. 이는 지구온난화로 빙하 속에서 휴면 상태의 바이러스, 박테리아, 곰팡이 등이 활성화할 수 있다는 이론을 방증한다. 실제로 빙하가 녹으면서 빙하 속이나 주변 지역에서 다양한 내한성 미생물들이 발견되고 있다. 2016년에 발생한 시베리아의 탄저균 감염 사례는 이러한 미생물의 위험성을 명확히 보여준다. 이는 단순히 인간이나 동물에 영향을 미칠 뿐만 아니라 극지의 식생에도 영향을 준다는 사실이 최근 밝혀지고 있다.

호주의 태즈메이니아 지방의 매쿼리섬은 남위 54도에 걸쳐 있는 작은 섬으로 아남극권에 해당한다. 이 섬에는 애조렐라라는 현화 식물이 섬 전역에서 자라고 있는데, 이 식물은 강한 바람과 온도 변화로부터 생물들을 보호하는 생태계의 은신처로서 기능을 해왔다. 그러나 이 식물 역시 2000년 초반부터 원인 모를 마름병의 영향을 받아 그 군락이 급속히 망가지고 있다.

남극 세종기지 인근에서도 유사한 사례들이 관찰되고 있다. 최근에는 여러 남극개미자리 개체가 곰팡이병에 감염되었음을 확인 하였다. 남극개미자리는 남극에서 꽃을 피우는 2종의 현화식물



[그림 4] 아남극지역인 호주 매쿼리섬의 애조렐라의 정상 군락(좌)과 마름병이 발병한 군락(우) [사진: wikicommon (좌), Flora Values Assessment and Monitoring Report (2019) (우)]

중 하나로, 위도 60도 이상 남극의 이끼류에서 병원균이 확인된 적은 있지만 자연 상태에서 현화식물이 병든 사례가 학계에 보고된 것은 이번이 처음이다. 2020년 남극 세종과학기지 인근에서 병원균에 감염돼 고사된 남극개미자리 개체들을 확인하고, 해당 개체에서 곰팡이 균주들을 분리해서 이들의 병원성을 확인하였으며, 이들의 생리활성 및 유전자 분석이 한참 진행 중이다. 이 균주들은 빙하나 식물내생균으로서 분리되어 보고된 바가 있던 균주들이다. 그렇다면 우리는 어떻게 해서 이러한 곰팡이병을 관찰하게 된 것일까? 사실 오래전부터 균학자들은 식물내생균은 식물의 상태나 환경에 반응하여 생활사 동안 생태 내에서 다른 기능을 할 수 있다고 주장해왔다. 병든 식물에서 분리한 남극 곰팡이들의 최적 생장온도는 극지의 기온보다는 다소 높는데, 이러한 사실은 곰팡이의 생태적 역할이 온도에 따라 달라질 수 있음을 의미한다. 한편 병든 남극개미자리 개체가 발견된 2020년 당시 남극엔 전례 없는 폭염이 있었고, 최고 기록은 18.3도로 기록되었다. 이러한 남극의 이상고온현상이 토양 및 내생곰팡이의 성장과 발달에 영향을 주었으리라 생각된다. 즉, 과거에는 식물에 위해를 가하지 않는 범위에서 공생균으로서 기능을 하였으나, 기후변화의 영향으로 따뜻해진 남극에서는 생장이 촉진되면서 병원성이 활성화한 것으로 추정할 수 있다. 현재 극지연구팀은 극지식물병원균의 병원성 활성 기작과 남극식물의 질병에 대한 면역 기작에 대한 연구를 진행하고 있다.

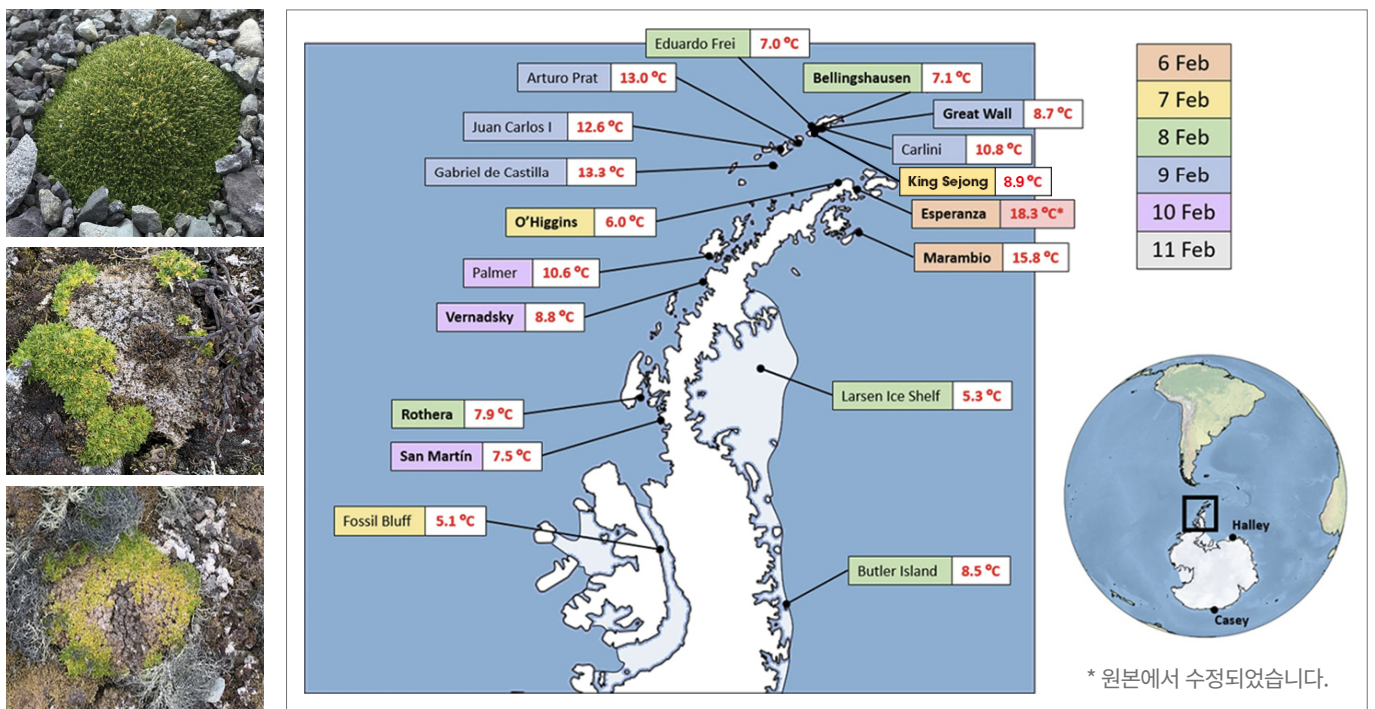
남극의 식물병역학 연구의 중요성과 전망

남극생태계에서 식물과 병원균 간의 질병 역학을 철저히 조사하고 이해하는 것은 매우 중요하다. 이러한 연구는 온난화로 인한 생태

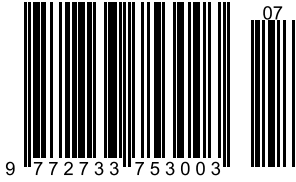
네트워크의 변화와 이로 인한 다양한 영향을 밝히며, 생태계 내 복잡한 상호작용과 질병 역학에 미치는 영향을 추적하는 데 필수적이다. 특히 극지역과 고산지역 등 저온 생태계에서 유래한, 그동안 알려지지 않았던 미지의 질병들은 전 세계 다양한 생태계와 농업, 식량 안보에 잠재적 위협 요인이 될 수 있다. 관련 연구 결과들은 저온 유래 식물 병원체의 역학을 이해함으로써 관련 위험을 조절하고 관리할 수 있는 과학적 근거를 제공할 수 있다. 이로써 기후변화가 생태계에 미치는 영향과 질병 유발 가능성을 보다 세밀하게 이해하고, 새로운 생태계 관리 방법과 정책 제안의 기반을 마련할 수 있을 것이다.

※ 일러두기

1. 본고의 내용 중 일부는 다음의 원고와 기사에서 발췌하였음.
 - 극지과학자가 들려주는 똑똑한 유전자이야기 (이정은 저)
 - 남극에 피는 꽃, 온난화에 병들다 (KBS 뉴스, 2023.05.23. 기사)
 2. 본고의 내용에는 해양수산부(극지연구소 기관주요사업)의 연구비 지원을 받아 수행된 연구 결과가 포함되어 있음.
- ※ 본문에 사용된 사진의 경우 무단사용을 금지합니다.



[그림 5] 남극 세종기지 주변에서 발견된 곰팡이병에 감염된 남극개미자리 개체 (좌)와 2020년 남극반도지역에서 관측된 이상고온 (우) [사진: 이정은 (좌), Commun Earth Environ, 2022 (우)]



9 772733 753003
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