

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

POLES & GLOBE

극지와 세계

2024 JUNE
VOL. 02



남극해 '잔물' 생성 정밀 관측을
통한 전 지구 해양 변화 예측
능력 향상

윤승태
경북대학교

극한환경 생존의 대명사,
완보동물을 통한 극지연구

김지훈
극지연구소 빙하지각연구본부

아라온호, 성과와 미래

김춘식
극지연구소 쇄빙선운영실



SNAPSHOT

03p 윤승태 경북대학교

남극해 '잔물' 생성 정밀 관측을 통한 전 지구 해양 변화 예측 능력 향상

남극해에서는 지구상에서 가장 무거운 '잔물'인 고염대륙붕수가 생성된다. 이 해수는 전 지구 해양 순환의 핵심 중 하나인 남극저층수의 특성을 결정하는 '마중물' 같은 존재이다. 최근 급격해진 기후변화의 영향으로 표층에서 만들어지는 '잔물' 고염대륙붕수와 '잔물'의 영향을 받는 남극저층수의 특성 변화가 꾸준히 관측되고 활발하게 보고되고 있다. 지구상에서 가장 무거운 해수인 남극저층수의 특성 변화로 인해 무게(밀도)가 변하게 된다면 전 지구 해양 순환 변화 및 해수면 변동까지 초래할 수 있다. 따라서 전 지구 해양 순환 및 해수면 변동 예측 능력을 향상하기 위해서는 남극해 고염대륙붕수의 생성 기작과 과정을 면밀히 파악하는 것이 매우 중요하다. 하지만 남극의 극한 환경 조건으로 인해 현장 관측이 매우 제한적이었기 때문에 지금까지는 하계 선박 관측 자료에서 확인된 고염대륙붕수 특성 변화를 통해 간접적으로 해수의 생성 정도와 분포 특성 등을 규명해왔다. 그러나 최근 경북대학교, 극지연구소, 미국 컬럼비아대학교, 뉴질랜드 국립수문대기연구소 등으로 구성된 국제 공동연구팀은 도전적 관측 시도로 약 1년 동안 연속 모니터링에 성공하여 고염대륙붕수의 생성 과정을 상세히 규명하고, 정량적인 수치를 기반으로 고염대륙붕수 생성에 영향을 미치는 주요 요소들을 밝혀냈다. 겨울철 고염대륙붕수 생성 과정을 직접 관측하여 해수 생성량과 그 영향 요소를 정량적으로 제시한 것은 이번이 처음이며, 본 연구는 향후 전 지구 해양 순환 변화와 해수면 변동 예측 연구에 크게 기여할 것으로 기대한다.

07p 김지훈 극지연구소 빙하지각연구본부

극한환경 생존의 대명사, 완보동물을 통한 극지연구

완보동물은 극한의 환경조건에서 살아남는 능력을 가졌지만 눈에 보이지 않을 정도로 크기가 작은 동물로 알려져 있다. 이러한 적응 능력을 토대로 전 세계 어디에서든 다양한 종이 발견되며, 특히 남극과 북극의 육상 생태계에서 주요 구성원으로 자리 잡고 있다. 극한의 조건에서 살아남는 생물의 대표 종으로 인식되는 완보동물은 동물계에서 종 수로 가장 큰 분류군인 탈피동물군에 속하는데, 이 분류군의 진화사를 밝히는 데 중요한 역할을 한다. 또한 잘 알려진 모델 종들을 이용해 실험한 결과, 상당수의 육상 완보동물이 열에 취약한 것으로 밝혀져 기후변화로 인한 극지 생태계의 충격과 변화를 알려주는 지표 역할도 할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 생리학적, 생태학적, 진화생물학적 중요성에도 불구하고 국내에서는 한동안 연구 활동이 없었지만, 극지연구소가 그린란드의 완보동물 연구를 시작한 이래로 점차 세계적 수준의 연구 역량을 갖추어 가고 있다. 지속적인 연구를 통해 극지에서의 생물의 적응과 지구온난화에 따른 생태계의 변화, 그리고 동물 진화에 있어서 완보동물이 중요한 과학적 기여를 할 수 있으리라 기대한다.

10p 김춘식 극지연구소 쇄빙선운영실

아라온호, 성과와 미래

아라온호는 우리나라 극지연구의 활동 범위 확장과 독자적인 연구 진행을 위해 건조된 아라온 쇄빙연구선으로 2009년 11월 2일 첫 항해를 시작해 지금까지 15년간 전 세계 바다를 누비고 있다. 총톤수는 7,507t으로 길이가 111m에 달한다. 항해 속력은 12노트(22.2km)로 결빙 지역에서 1m의 해빙을 시속 3노트(약 5.6km)의 속력으로 깨뜨리며 항해할 수 있는 국내 최초의 쇄빙연구선이다. 아라온호는 음향음심장치(Mui-beam echo sounder), 탄성파장비(Seismic system), 해수분석장비(CTD) 및 해저퇴적물채취장비를 비롯한 60여 종의 연구 장비를 장착하고 있다. 또한 15년 동안 남극과 북극 간 총 69만 마일을 오가며 “아라오나의 발견” 및 2023년 “남극 빙하 녹이는 바닷물 계절 변동성 최초 규명” 등 총 204건의 연구 활동을 지원하였다. 그뿐만 아니라 남극해에서는 조난 어선과 인명을 구조하여 “남극산타”라는 별명을 얻기도 했다. 아라온호는 남극과 북극에서 연구 활동을 지원하여 우리나라 극지연구의 위상 제고를 견인하는 핵심 인프라일 뿐만 아니라 차세대 쇄빙선이 인도되기 전까지 국내외 연구자들의 다양한 연구 수요를 수용하여 우수한 연구 성과가 도출될 수 있도록 지속적인 지원을 하고 있다. 지구온난화 현상으로 갈수록 어려워지는 극지에서의 남극과학기지 보급 업무를 성공적으로 지원하여 극지연구의 미래를 함께하고자 한다.

극한환경 생존의 대명사, 완보동물을 통한 극지연구

김지훈 극지연구소 빙하지각연구본부

완보동물은 극한의 환경조건에서 살아남는 능력을 가졌지만 눈에 보이지 않을 정도로 크기가 작은 동물로 알려져 있다. 이러한 적응 능력을 토대로 전 세계 어디에서든 다양한 종이 발견되며, 특히 남극과 북극의 육상 생태계에서 주요 구성원으로 자리 잡고 있다. 극한의 조건에서 살아남는 생물의 대표 종으로 인식되는 완보동물은 동물계에서 종 수로 가장 큰 분류군인 탈피동물군에 속하는데, 이 분류군의 진화사를 밝히는 데 중요한 역할을 한다. 또한 잘 알려진 모델 종들을 이용해 실험한 결과, 상당수의 육상 완보동물이 열에 취약한 것으로 밝혀져 기후변화로 인한 극지 생태계의 충격과 변화를 알려주는 지표 역할도 할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 생리학적, 생태학적, 진화생물학적 중요성에도 불구하고 국내에서는 한동안 연구 활동이 없었지만, 극지연구소가 그린란드의 완보동물 연구를 시작한 이래로 점차 세계적 수준의 연구 역량을 갖추어 가고 있다. 지속적인 연구를 통해 극지에서의 생물의 적응과 지구온난화에 따른 생태계의 변화, 그리고 동물 진화에 있어서 완보동물이 중요한 과학적 기여를 할 수 있으리라 기대한다.

“우리들은 (달에) 완보동물이 생존했을 가능성이 있으며, 매우 높다고 믿는다.” -노바 스피박(Nova Spivack)

2019년 2월 21일 지구에서 출발한 이스라엘의 민간 달 착륙선 베레시트(Beresheet)는 두 달간의 긴 여행 끝에 마침내 달 궤도에 무사히 진입하였으며, 4월 12일 ‘고요의 바다’ 지역에 착륙을 시도하였다. 하지만 불운하게도 착륙 과정 중 엔진에 문제가 발생하며 베레시트는 달 표면에 추락하며 파괴되었다. 이 탐사는 실패로 끝나면서 아쉬움만 남기고 세간의 관심에서 점차 멀어지는 듯했다. 그런데 같은 해 8월 5일 아치미션 재단(Arch Mission Foundation) 의장 노바 스피박의 인터뷰가 세계 유수의 여러 언론을 통해 소개되며 베레시트가 다시 한번 화제의 중심에 서게 되었다. 베레시트 임무에 참가 하였던 아치미션 재단은 지구를 포함한 태양계 곳곳에 인간의 기록이 담긴 도서관을 세우는 것을 목표로 설립된 비영리 단체로, 베레시트 내부에 지구를 대표하는 동물로 선정된 완보동물 수천 마리를 넣었다고 전해진다. 이 단체의 대표인 노바 스피박이 베레시트 안에 실린 완보동물이 추락 과정에서 죽지 않고 살아남았을 가능성을 제기한 것이었고, 이 이야기는 ‘인간 활동에 의한 달 표면 오염이 옳은가?’에 대한 주제로까지 확장되기도 하였다. 이후 영국의 한 연구팀이 탄환 속에 완보동물을 넣고 쏘아보는 실험을 통해 아마도 완보동물이 베레시트의 추락 과정에서 모두 죽었을 것으로 추정된다는 실험

결과를 발표하면서 이 논란은 일단락되었다. 완보동물이 대체 어떤 동물이길래 달에서의 생존 가능성에 관한 이야기까지 나오는 것일까.

작고 느리지만 강한 동물, 완보동물

완보동물은 완보동물문(Phylum Tardigrada)에 속하는 동물로 4쌍의 다리를 가지고 있으며 다리 끝에 발톱이 있는 것이 특징이다. 길이가 0.1~1.2mm 정도이기 때문에 현미경으로 보아야 관찰이 가능하며, 현재까지 약 1,500여 종이 공식적으로 보고되었다. 몸길이가 1mm에 달하는 대형 육식완보동물인 *Milnesium tardigradum*을 이용한 실험에 따르면 이 동물은 한 시간에 평균 25mm 정도를 이동하였으며 최대 속도는 1166.4mm/h에 달했다고 한다. 이처럼 매우 천천히 걸어 다니기에 연구자들은 완보동물(緩步動物)이라는 이름을 붙였으며, 곰 같은 느낌 때문에 물곰(water bear)이라고도 부른다. 필름 형태의 아주 적은 양의 물만 있어도 살 수 있어 심해, 고산 지대, 극지에 이르기까지 지구상 거의 모든 환경에서 발견된다. 머리 안쪽에 한 쌍의 문침(stylet)을 가지고 있으며 먹이를 먹을 때 주로 이 침을 이용하여 먹이에 구멍을 뚫고 새어 나오는 세포액이나 체액을 먹는다. 완보동물은 일생에 걸쳐 여러 번의 탈피 과정을 겪기 때문에 탈피를 하는 무척추동물들의 모임인 탈피동물군(Ecdysozoa)³⁾에 속한다. 특히 그중에서도 거미나



[그림 1] 남극 완보동물 *Acutuncus antarcticus*의 활성상태와 가사상태에서의 형태 변화

곤충 같은 절지동물, 유조동물과 가까워 이들과 함께 범절지동물군(Panarthropoda)을 형성한다.

이렇게 작고 단순해 보이는 완보동물이 부각된 것은 이 동물이 가지고 있는 특별한 생존능력 때문이다. 완보동물은 주변 환경이 나빠지면 몸 안의 모든 신진대사를 멈추고 가사상태(cryptobiosis)에 들어간다. 이후 주변 환경이 개선되면 다시 활성상태로 돌아가 생명활동을 재개한다. 가사상태에 들어가는 능력은 바닷속에 사는 해양 완보동물에는 없고, 조간대나 육상에 서식하는 완보동물에만 있는 것으로 알려져 있다.

가사상태의 종류에는 현재까지 건조(anhydrobiosis), 삼투압 변화(osmobiosis), 동결(cryobiosis), 질식(anoxymbiosis), 화학물질(chemobiosis) 등 다섯 가지가 알려져 있다. 자극의 종류에 따라 가사상태로 들어가는 완보동물의 형태가 달라지는데, 예를 들어 산소 농도가 낮아져 질식 가사상태(anoxymbiosis)로 들어가는 완보동물은 몸이 부풀며 완전히 팽팽하게 퍼지는 데 반해 건조로 인한 가사상태(anhydrobiosis)는 눌린 아코디언처럼 몸이 완전히 찌그러들게 된다. 이는 각각의 자극마다 각기 다른 유전자들이 발현하기 때문으로 생각된다. 다섯 가지의 가사상태 중 가장 유명하고 연구가 많이 된 것은 건조 가사상태이다. 주변의 물이 말라 없어지면 완보동물은 체내 수분의 95% 이상을 몸 밖으로 배출하여 몸을 수축시켜 부피가 활성상태의 10% 이하로 줄어들게 된다. 이 형태가 마치 술통(tun)과 유사하다고 하여 '통 상태(tun state)'라고 부른다. 통 상태로 들어간 완보동물은 일반적으로 동물이 살 수 없다고 생각되는 환경조건에서도 생존할 수 있게 된다. 건조 상태로 20년 이상, 151°C의 고온에서 15분, 영하 272°C에서 8시간, 진공에 가까운 저압, 대기압의 74,000배에 해당하는 고압, X선, 감마선, 자외선 등의 방사선, 유독한 유기용매 등 극악의 조건에서도 버텨내다가 물을 넣어주면 활성상태로 돌아가 다시 생명활동을 시작한다. 물이 계속 들어왔다 나갔다 하는 조건대에 서식하는 특정 종의 경우에는 수 초 안에 통 상태로 들어갈 정도로 가사상태 반응이 빠르게 일어나기도 한다.

이렇게 완벽해 보이는 건조 가사상태에도 약점이 존재한다. 자외선과 열이 바로 그 약점인데, 이것은 가사상태의 특징과 연관되어 있다. 가사상태에 들어가면 체내의 모든 반응이 멈추기 때문에 DNA 손상이나 단백질 변형에 대응하는 세포 내 수리기구도 모두 멈추게 된다. 가사상태 동안 자외선이나 열이 가해져 생기는 손상이 바로 회복되지 못하기 때문에 계속 누적되어 어느 수준을 넘어서면 더는 깨어나지 못하게 되는 것이다. 이 때문에 짧은 시간의 열이나 자외선 충격은 견뎌 내지만 가해지는 시간이 길어지면 죽음에 이르게 된다.

또 다른 유명한 가사상태로는 동결 가사상태(cryobiosis)가 있다. 주변에 물이 얼면 완보동물이 동결 가사상태에 들어가는데, 이 경우에는 동물의 형태가 활성상태와 거의 유사하거나 약간 찌그러지는 정도로 통 상태보다 덜 극적으로 변한다. 동결 가사상태와 관련된 가장 유명한 연구는 일본

극지연구소(NIPR)에서 2015년 발표한 실험이다. 일본 연구자들은 1983년 남극 Dronning Maud Land에서 채집한 이끼 표본을 영하 20°C에서 30년간 냉동고에서 얼렸다가 2014년 꺼내 확인하였다. 이들은 해동 이끼 표본에서 *Acutuncus antarcticus*라는 완보동물의 성체 두 마리와 알 한 개를 무사히 깨우는 데 성공하였다. 아쉽게도 성체 한 마리는 사망할 때까지 알을 낳지 않았지만, 나머지 성체와 알은 번식에도 성공하여 현재까지 그 혈통이 세계 여러 실험실에 분양되어 살아 가고 있다.

극지 완보동물 연구의 중요성

극지 육상 완보동물 중 많은 종이 매우 뛰어난 건조 가사상태와 동결 가사상태 능력을 갖추고 있는 것으로 생각된다. 이 능력을 이용하여 가혹하고 긴 극지의 겨울 동안 다른 동물들이 얼어 죽을 때 살아남아 버티다가 여름이 오면 다시 활성상태로 전환하여 모두 죽어 텅 빈 공간을 빠르게 점유하는 식의 전략을 사용한다. 육상 완보동물 중 상당히 많은 종류가 짝짓기 없이 자신과 똑같은 알을 낳는 처녀생식이라는 번식 방식을 택했기에(때문에 종 전체가 모두 암컷이다), 극지의 짧은 여름 동안에도 순식간에 종이 번성할 수 있다. 그 덕분에 육상 완보동물은 극지 육상 생태계에서 다양한 생태적 지위를 차지하며 매우 중요한 구성원이 되었다.

하지만 완보동물은 추위에 강한 것과 달리 상대적으로 열에 취약한 동물인 것으로 보인다. 코펜하겐대 연구팀은 덴마크에 서식하는 완보동물 *Ramazzottius varieornatus*을 이용하여 이 동물이 온도에 얼마나 강한지에 대한 생존도 실험을 하였다. 이 종은 여러 종류의 가사상태 능력이 매우 뛰어난 종임에도 불구하고, 활성상태의 완보동물 *Ramazzottius varieornatus*은 37.1°C에서 절반이 죽는 것으로 나타났다. 2022년 코펜하겐 최고온도는 35.6°C였는데 코펜하겐이 온난화로 조금만 더 따뜻해진다면 많은 완보동물이 죽게 될 것으로 예상된다. 극지 완보동물은 이보다 더 취약할 것이다. 앞서 언급한 남극종 *Acutuncus antarcticus*는 남극대륙 전역에 걸쳐 대부분의 해안가에 널리 서식하는 것으로 알려진 종으로, 실험실 내 배양 결과로는 25°C에서 전부 죽었다고 알려져 있다. 현재 남극대륙의 최고온도 기록은 2020년 아르헨티나의 남극기지인 Esperanza Station에서 관측된 18.3°C로, 치사 온도까지 얼마 남지 않은 것으로 보인다. 아직 실험 결과는 안 나왔지만 그린란드 서식 완보동물도 마찬가지로 일 것으로 생각된다. 따라서 극지 육상 완보동물 연구는 지구 온난화가 극지 생태계 파괴에 얼마나 영향을 주는지에 대한 지표로 활용될 수 있다.

또한 진화에 대한 연구를 통해 완보동물의 여러 특징에 대한 의문점을 해결할 수 있다. 앞서 이야기하였듯 완보동물은 절지동물, 유조동물과 함께 범절지동물군을 형성하고 있으며 이들은 5억 년 전 캄브리아기에 살던 엽족동물(Lobopodia)로부터 갈라져 나왔을 것으로 생각된다. 엽족동물은 여러



[그림 2] 극지연구소의 그린란드 완보동물 연구지역: Sirius Passet, Midsommer Sø, Ella Island

개의 몸통마디와 다리를 가진 벌레 형태의 해양동물로 그 크기가 1~10cm에 달했지만 전부 멸종하여 현재는 존재하지 않는다. 하지만 현생 완보동물은 소형화(miniaturization)²⁾를 거치며 그 크기가 엽족동물의 100분의 1로 줄어들고 호흡계, 순환계 관련 장기들을 잃어버렸다. 완보동물 진화 연구는 어떻게, 그리고 왜 조상보다 훨씬 작고 단순한 모습을 가지게 되었는지에 대한 실마리를 제공해 줄 수 있을 것이다. 여기에 더해 진화 연구는 해양 완보동물은 가지고 있지 않은 가사상태 능력을 육상 완보동물이 언제, 어떤 과정을 거치며 얻게 되었는지, 이를 통해 어떻게 육지로 올라올 수 있게 되었고, 어떤 경로로 극지로 퍼져나가 어떻게 적응하며 현재 극지역에서 번성하게 되었는지에 대한 궁금증도 풀어 줄 것이다.

극지 완보동물 연구 성과

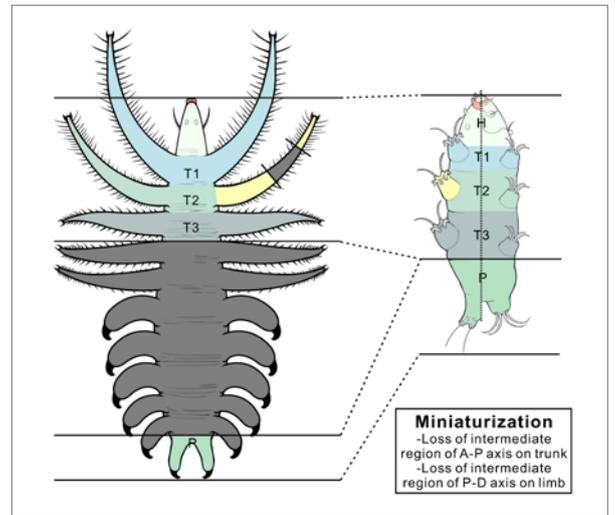
극지연구소는 남북극에 서식하는 육상 완보동물에 대한 다양성, 초미세구조, 생리, 진화 등 여러 방면에서 연구를 수행하고 있다. 서그린란드의 작은 섬인 Disko 섬에서만 현재까지 50종 이상의 완보동물이 서식하는 것으로 알려질 정도로 그린란드는 다양한 완보동물로 유명한 지역이다. 하지만 북/동그린란드는 서/남그린란드보다 접근이 어려워 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다. 특히 북그린란드는 완보동물의 마지막 연구가 1951년이었으며 그 후 60여 년간 연구가 전혀 없었다. 극지연구소는 2016년 캠프를 시작으로, 북그린란드 Sirius Passet, Midsommer Sø, 동그린란드의 Ella 섬 등지에서 현재까지 30종이 넘는 육상 완보동물을 채집하였으며 그중 많은 수는 현재까지 보고된 적 없는 신종으로 파악된다.

또한 극지연구소는 세계적인 캄브리아기 화석산지 북그린란드 Sirius Passet의 화석과 극지 완보동물을 포함한 엽족동물+범절지동물 형태 비교 연구를 통해 완보동물이 Luolishaniid 라는 종류의 엽족동물과 가까우며 어떻게 현재와 같은 몸

기본구조를 가지게 되었는지를 밝혀내었다. 5억 년이라는 시간을 뛰어넘어 같은 공간에서 채집한 캄브리아기 화석과 현생 완보동물을 이용한 연구라는 점에서도 뜻깊은 연구이다. 남극세종과학기지 주변 환경에서도 다양한 완보동물 종이 파악되고 있으며, 이 중 일부 종은 실험실 내 배양이 성공적으로 이루어졌다. 이를 통해 신종 보고 및 새로운 초미세구조 관찰, 분류학적인 문제 제기 등이 이루어지기도 하였다.

향후 전망과 계획

앞서 서술하였듯 완보동물은 극지과학 분야에서 중요한 역할을 할 수 있는 동물이다. 캄브리아기 대폭발이라는 동물계의 대사건으로부터 현생동물이 어떻게 진화해 왔는지를 풀 수 있는 열쇠를 품고 있을 뿐만 아니라 극지의 가혹한 환경에 어떻게 적응하고 번식해왔는지, 또 갈수록 심각해지는 기후 변화에 생물들이 얼마나 심대한 타격을 입으며 어떤 반응을 보이는지를 알려줄 수 있다. 특히 북극 지역 중 최북단에 있는 육지인 북그린란드는 이러한 연구가 가능한 지역이면서 현재 극지연구소만이 지속적인 연구를 수행하고 있는 지역이기도 하다. 북그린란드 연구가 지속된다면 고생물학, 진화학, 생리학, 그리고 환경학 분야가 융합된 세계적인 연구가 이루어질 것으로 생각한다.



[그림 3] 2023년 PNAS에 게재된 캄브리아기 엽족동물과 현생 완보동물의 형태 비교를 통한 진화과정에 대한 그림(Kihm et al., 2023)

- 1) 탈피동물군(Ecdysozoa)은 탈피를 하는 무척추동물의 모임으로, 새예동물(Priapulida), 동문동물(Kinorhyncha), 동갑동물(Loricifera), 선형동물(Nematoda), 유선형동물(Nematomorpha), 절지동물(Arthropoda), 유조동물(Onychophora), 완보동물(Tardigrada)이 여기에 속한다.
- 2) 소형화는 동물의 몸길이가 일반적으로 1mm 이하로 작아지는 현상을 말한다. 완보동물문뿐만 아니라 선형동물문, 윤형동물문, 동갑동물문, 복모동물문 등 동물계의 여러 문에서 나타나는 현상이지만 그 원인이나 메커니즘 등에 대해서는 아직 밝혀진 바가 적다.



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



발행일: 2024년 6월
발행처: 극지연구소 정책개발실 Tel. 032-770-8453
주소: 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 극지연구소 (www.kopri.re.kr)

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