

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.



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

윤승태 경북대학교

남극해에서는 지구상에서 가장 무거운 '짠물'인 고염대륙붕수가 생성된다. 이 해수는 전 지구 해양 순환의 핵심 중 하나인 남극 저층수의 특성을 결정하는 '마중물' 같은 존재이다. 최근 급격해진 기후변화의 영향으로 표층에서 만들어지는 '짠물' 고염대륙붕수와 '짠물'의 영향을 받는 남극저층수의 특성 변화가 꾸준히 관측되고 활발하게 보고되고 있다. 지구상에서 가장 무거운 해수인 남극 저층수의 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.

## 남극해 남극저층수<sup>1)</sup>와 고염대륙붕수<sup>2)</sup>

최근 급격해진 기후변화 영향으로 표층에서부터 수심이 깊은 해양까지 전달되는 저온, 고염의 해수[그림 1] 특성이 큰 변화를 보이고 있으며, 이를 이해하기 위하여 남극해 연구가 활발히 진행되고 있다.

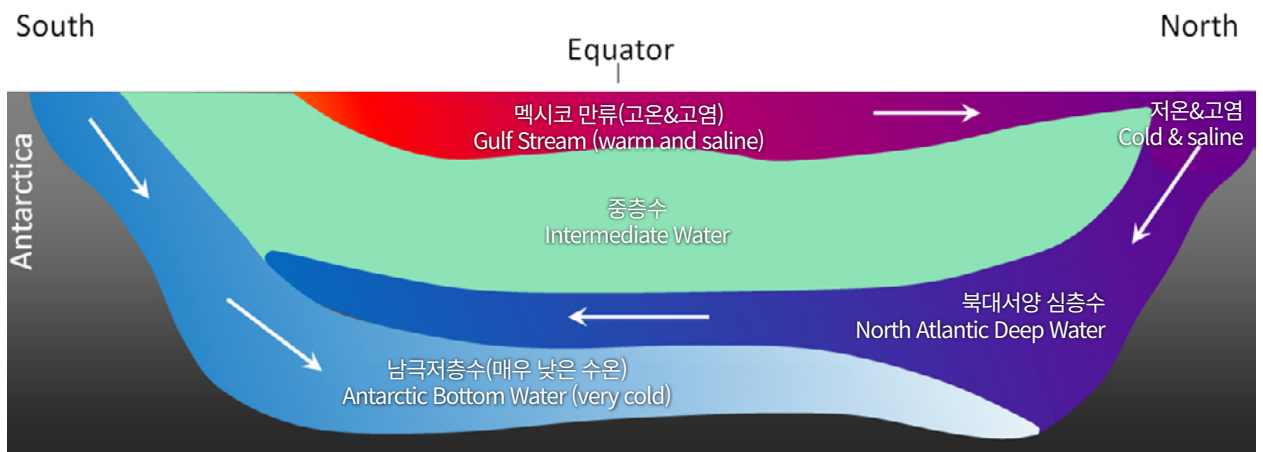
남극해의 해양 순환은 전 지구 기후와 해양 및 생지화학적 순환, 그리고 남극 용융 변화에 중대한 영향을 미치고, 특히 남극해에서 생성되는 남극저층수는 전 지구 해양 순환에서 가장 무거운 해수로 전 지구 해양 순환의 세기 결정에 주요한 역할을 한다. 또한 남극저층수의 물성 및 생성률 변화는 전 지구 해수면과 해수의 열량 변화에도 큰 영향을 미친다.

남극의 로스해는 웨델해와 더불어 남극저층수를 생성하는 대표적인 해양 중 하나로 남극저층수의 약 25%를 생성하는 곳이며, 로스해 연안 폴리냐(Polynya; 해빙이 없는 해양)에서

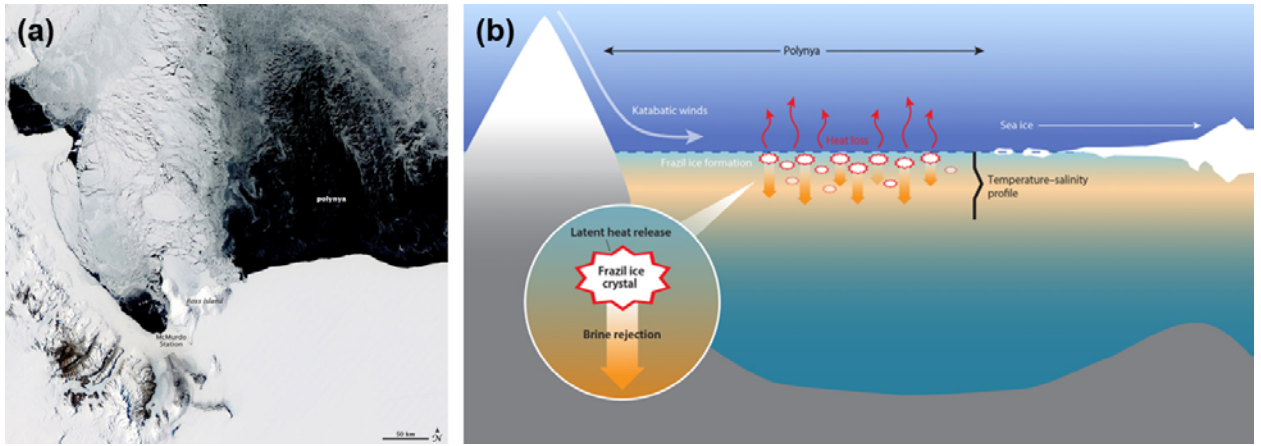
생성되는 고염대륙붕수가 남극저층수의 기원으로 알려져 있다. 기존 연구들에 따르면 고염대륙붕수는 남반구 겨울철 남극 대륙에서 발생하는 활강바람(Katabatic wind)에 의해 생성되며, 활강바람의 세기 및 지속 시간에 따라 해양-대기 간 열속 및 해빙(sea-ice) 생성량이 변화하고 그에 따라 고염대륙붕수의 특성도 결정된다. 그러나 관측 자료의 한계로 활강바람 세기, 폴리냐 발달 정도, 해빙 생성량, 고염대륙붕수 생성량 간의 정량적(Quantitative) 관계에 대해서는 밝혀진 바 없었다.

## 기후변화 영향에 따른 고염대륙붕수 특성 변화

최근 급격해진 기후변화에 따른 전 지구 해양 순환의 변동을 이해하기 위하여 로스해 고염대륙붕수 특성의 변화는 장기간 관측되어 왔다. 하계 기간 획득된 선박 관측 자료에 따르면 1950년대부터 2010년대까지는 기후변화 영향에 따른 서남극



[그림 1] 전지구 해양 순환 중 대서양 순환 모식도. 수심이 가장 깊은 곳에 남극저층수가 존재 (출처: Physical Geology book by Karla Panchuk and Steven Earle (2015))



[그림 2] (a) 남극해 로스해 연안에서 발달하는 폴리나 위성 사진(출처: NASA) (b) 활강바람에 의한 고염대륙붕수 형성 모식도 (출처: Thompson 등(2020)의 figure 1)와 남극해 내 로스해의 위치 지도(출처: 윤(2022)의 figure 1)

아문센해 빙붕 용융 증가로 인해 얼음 녹은 물이 로스해로 흘러들어오면서 고염대륙붕수 염분이 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 이와 연계하여 남극저층수 염분 역시 감소하는 추세였고 미래 전 지구 열염 순환 세기의 약화 가능성도 함께 제기되었다. 그러나 2010년대 중반부터 고염대륙붕수 및 남극저층수 염분이 2000년대 초반과 유사한 수준으로 회복되었음이 새롭게 관측됨으로써 일명 ‘염분 재증가(Salinity rebound)’ 현상이 보고되었다. 이는 2015~2018년에 유지되었던 전례 없는 대기 환경조건에 의한 것(서풍 강화 현상)으로, 아문센해에서 로스해로의 해빙 이동이 억제되면서 평년보다 로스해 연안 폴리나 활동이 활발해졌기 때문이다. 이처럼 로스해 고염대륙붕수와 남극저층수의 특성은 최근 급격해진 기후변화에 매우 민감하게 반응하고 있다. 따라서 향후 기후변화에 따른 전 지구 해양 순환[그림 1] 변화 예측 능력을 향상하기 위해서는 고염대륙붕수의 염분 특성 변화뿐 아니라 고염대륙붕수 생성 기작 및 생성량에 대한 명확한 이해가 요구된다.

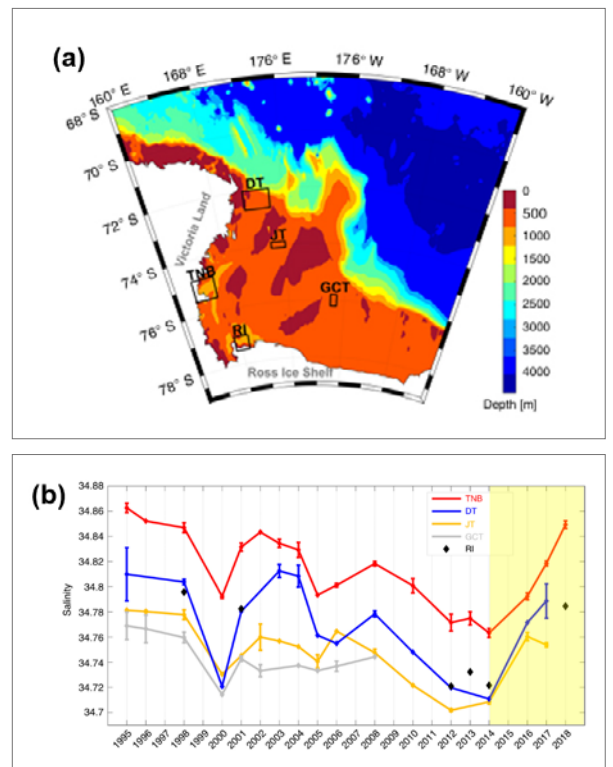
**고염대륙붕수 생성 과정 및 기작발견**

로스해 서부의 테라노바만(Terra Nova Bay)은 연안 폴리나가 발달하는 해역으로, 로스해 고염대륙붕수 중 약 33%가 테라노바만 폴리나 활동으로 생성되는 것으로 알려져 있다. 따라서 고염대륙붕수 특성 및 생성량 변화를 명확히 파악하기 위해서는 겨울철 테라노바만 관측이 필수적이다. 하지만 겨울철 극한 환경조건에 따른 현장 관측의 한계로 그동안은 여름철 선박 기반 관측 자료나 해양 모델링 결과에 의존하여 고염대륙붕수의 생성과 특성 변화를 추정하였다. 이에 2017년 경북대학교, 극지연구소, 미국 컬럼비아대학교, 뉴질랜드 국립수문대기연구소 등으로 구성된 국제 공동연구팀은 겨울철 고염대륙붕수 생성 과정과 생성량을 직접 확인하기 위해 매우 도전적인 관측을 시도하였다.

일반적으로 남극에서는 빙산을 피해 수심 400m 아래에 장비들을 설치하지만, 본 연구팀은 난센빙붕으로부터 불어오는 활강바람이 가장 집중적으로 영향을 미치는 위치를

파악하고 해당 위치의 수심 47~360m 구간에 정밀 관측망을 구성하였고, 1년 연속 관측에 성공해 고염대륙붕수 생성 과정을 직접 확인하였다.

또한 정밀 관측망을 통해 겨울철 난센빙붕에서 테라노바만으로 불어오는 활강바람에 의해 표층에 해빙이 생성되고 해빙 생성 과정에서 방출된 염(brine rejection)이 47m 수심의 염분부터 360m 수심의 염분까지 서서히 증가시키는 것을 직접 관측하였다. 또한 기존에는 겨울철 활강바람 이벤트가 발생하는 시기에 항상 표층 해빙 생성으로 염이 방출되어 고염대륙붕수가 생성되는 것으로 여겨졌으나 본 정밀 관측에서 활강바람 이벤트보다 폴리나 면적의 확장이 고염대륙붕수 생성량 결정에 더 중요한 요소임을 확인하였다. 다시 말해,



[그림 3] (a) 로스해 대륙붕 해양 내 관측 자료 위치 (b) 로스해 대륙붕 해양 내 고염대륙붕수 염분의 최근 20년간 변화 (출처: Castagno 등(2019)의 figure 1, 2)



[그림 4] 남극 로스해 테라노바만 관측장비 설치 위치(노란색 원) (출처: Miller 등(2024)의 figure 1)

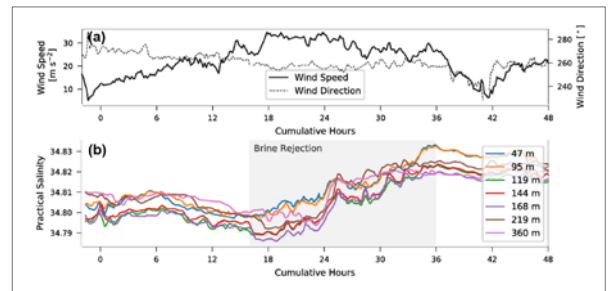
활강바람 이벤트가 발생하더라도 테라노바만 외해역에 발달한 두꺼운 얼음 등으로 인해 폴리냐가 넓게 확장되지 못한다면 고염대륙붕수 생성량은 크게 증가하지 않는다는 것을 의미한다.

정밀 관측 자료를 활용함으로써 궁극적으로 기존 연구들과 비교해 더욱 유의미한 고염대륙붕수 생성량 수치를 계산하였다. 또한 이를 기반으로 표층 순열속<sup>3)</sup> 자료를 활용하여 고염대륙붕수 생성량 추정식을 수정 및 개선하였다. 이어 연간 고염대륙붕수 생성량 변화도 기존 연구에 비해 작은 표준편차 범위로 재산출하여 고염대륙붕수 생성 과정, 생성 기작, 생성량 규명에 최종적으로 성공하였다.

### 연구 중요성과 미래 고염대륙붕수 변화 전망

본 연구팀은 세계 최초로 고염대륙붕수 생성 과정을 직접 관측하고, 이로써 고염대륙붕수 생성량 추정 방법을 개선하여 과거 연구들보다 정확한 고염대륙붕수 생성량을 도출했다는 점에서 큰 의의가 있다. 특히 국내 연구진이 관측 및 자료 분석에 참여해 해당 성과를 공동으로 이루어냈다는 점에서 향후 전 지구 해양 순환과 해수면 상승 예측 연구 등에서도 국내 연구진들의 활약이 기대된다.

본 연구에서 추정된 연간 고염대륙붕수 생성량 변화에 따르면 최근 10년간 염분 재증가 현상과 일치하게 테라노바만 고염대륙붕수 생성량도 2배 이상 증가했음이 확인되었다. 이는 기후변화 영향으로 예측되는 염분 감소 및 생성량 감소와는 반대되는 결과이며, 2018년 이후 확인되는 고염대륙붕수 생성량 증가는 2015~2018년에 유지되었던 전례 없는 대기



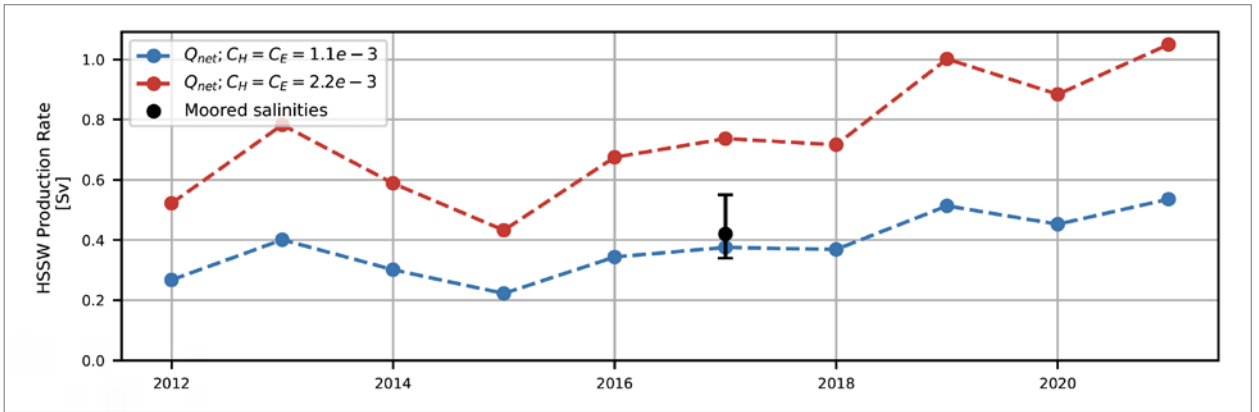
[그림 5] 겨울철 활강바람 이벤트와 염분 증가 관측 모습 (출처: Miller 등(2024)의 figure 3 일부 발췌)

연구 목록	활용 자료	추정 기간	테라노바만 고염대륙붕수 생성량*
Miller 등 (2024)	현장 정밀 관측	7~10월 2017	0.43 Sv; 95% 신뢰구간 [0.34, 0.55]
Miller 등 (2024)	매개변수화된 표층 순열속	2012~2021	0.38~0.74 Sv; 표준편차 [0.10~0.20]
Fusco 등 (2009)	매개변수화된 표층 순열속	1990~2006	1.2 Sv; 표준편차 [0.3]
Jendersie 등 (2018)	해양 모델 실험	해당 없음	0.28 Sv

[표 1] 고염대륙붕수 생성량 추정 결과 비교 (출처: Miller 등(2024)의 Table 1)

\* 테라노바만 표층에서 추정 기간에 평균적으로 생성되는 고염대륙붕수 양을 의미함.

※ 1Sv는 1초에 100만 m<sup>3</sup>의 해수가 수송되는 것을 의미하며, 1Sv는 아마존강 수송량의 약 5배임.



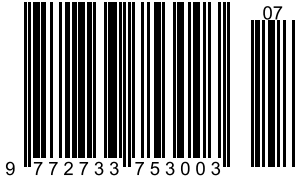
[그림 6] 2012년부터 2021년까지(10년) 표층 순열속 자료로 추정한 고염대륙붕수 생성량 연간 변동(빨강: 최대 추정치; 파랑: 최소 추정치) 및 정밀 관측을 통해 추정한 2017년 고염대륙붕수 생성량 수치(검은색 점; 검은색 선은 오차 구간) 비교(출처: Miller 등(2024)의 figure 5)

환경조건과도 관련이 없을 것으로 예상된다. 따라서 향후 테라노바만 고염대륙붕수가 남극저층수 특성 변동에 미치는 영향을 파악하고, 전 지구 해양 순환 및 해수면 상승 예측 능력을 향상하기 위해 테라노바만 폴리냐 해역 및 로스해 대륙붕 해역에서의 도전적인 관측이 꾸준히 시도되어야 할 것이다. 해당 목표를 달성하기 위해 국내에서는 지속적인 국제 협력형 연구과제의 기획 및 개발이 추진되어 안정적인 연구 지원 환경이 구축될 수 있기를 기대한다.

※ **일러두기**

본고의 내용에는 해양수산부 ‘급격한 남극 빙상 용융에 따른 근미래 전 지구 해수면 상승 예측기술 개발’의 연구비 지원을 받아 수행된 연구 결과가 포함되어 있으며, 해당 연구 결과는 국제저명학술지 네이처커뮤니케이션즈紙에 2024년 1월 16일 게재됐다 (<https://doi.org/10.1038/s41467-023-43880-1>).

- 1) 남극저층수는 일반적으로 AABW(Antarctic Bottom Water)로 정의되며, 전 지구 해수 중 가장 무거운 해수이다.
- 2) 고염대륙붕수는 일반적으로 HSSW(High Salinity Shelf Water)로 정의되며, 남극 연안에서 생성되고 AABW의 마중물에 해당한다.
- 3) 순열속(Net heat flux)은 해양 표면에서 발생하는 해양-대기 간 열교환량을 수치로 표현한 값(단위: Watt/m<sup>2</sup>)을 의미한다.



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](http://www.kopri.re.kr))

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