



아문젠해 서남극 빙붕 용융과 영향에 대한 고찰: 연구동향 및 과학적 질문

윤승태*

경북대학교 자연과학대학 지구시스템과학부
(41566) 대구광역시 북구 대학로 80

Review of the Melting of West Antarctic Ice Shelves in the Amundsen Sea and Its Influence: Research Issues and Scientific Questions

Seung-Tae Yoon*

School of Earth System Sciences, College of Natural Sciences, Kyungpook National University,
Daegu 41566, Korea

Abstract : The collapse of ice shelves is a process that can severely increase the rise of global sea-levels through the reduction of the buttressing effect of ice shelves and the consequent acceleration of the ice flow of ice sheets. In recent years, the West Antarctic ice shelves in the Amundsen Sea, whose buttressing effect is essential for a great part of the West Antarctic ice sheet, have been experiencing the most rapid melting and thinning in the world. The melting of the West Antarctic ice shelves is caused primarily by heat transported by Circumpolar Deep Water (CDW). For this reason, it is important to investigate ice-ocean interactions that could influence the melting of ice shelves and evaluate the stability of West Antarctic ice shelves. A lot of researchers have been actively investigating the West Antarctic ice shelves in the Amundsen Sea. High-impact journals have recognized the importance of and published studies on ice-ocean interactions occurring near and under the ice shelves as well as the connections among ice shelves. However, *in situ* observations are limited due to extreme weather and sea-ice conditions near the ice shelves; therefore, many scientific questions remain unanswered. This study introduces the characteristics of the Amundsen Sea and investigate the past and latest research issues in this region. This study also gives suggestions regarding important scientific questions and directions for future research that should help early-career scientists take the lead in future research on the melting dynamics of the West Antarctic ice shelves in the Amundsen Sea.

Key words : Amundsen Sea, ocean-ice interaction, Circumpolar Deep Water, ice shelves melting

1. 서론

최근 이산화탄소를 비롯한 온실가스 저감 노력에도 불구하고 지구온난화 속도는 늦춰지지 않고 있으며(산업화 이후 지구 표면 온도 1.1°C 증가), 현재 추세가 유지된다면 2100년에는 산업화 이전 시대와 비교해 지구 표면 온도가 2°C 이상 증가할 것으로 예상된다(IPCC 2023). 지구의 온난

화는 지구 기후의 주요 조절자인 해양 및 빙권(cryosphere)의 급격한 변화를 야기하며, 해수면 상승, 해양 열파(marine heatwave) 증가, 북극 그린란드 빙하 용융 증가, 남극 용융 증가 등은 근미래에 인류에게 큰 피해를 줄 것으로 예측된다(IPCC 2019, 2023). 그러나, 서남극의 경우, 서남극 빙상(West Antarctic Ice Sheet)이 가지는 잠재적 불안정성으로 인해 서남극 빙상 용융으로 인한 얼음 질량 손실이 어느 수준의 영향과 피해를 줄 지에 대해서 예측이 불확실한 상황이다(IPCC 2023).

*Corresponding author. E-mail: styoon@knu.ac.kr

서남극 빙상은 남극횡단산맥(Transantarctic Mountain)을 기준으로 남극 서쪽에 위치한 대륙 빙하로, 해양으로 향하는 서남극 빙상의 흐름은 서남극 연안에 위치한 빙붕(ice shelf)의 지지 효과(buttressing effect)에 의해 억제되고 있다(Joughin and Alley 2011; Gudmundsson et al. 2013; Reese et al. 2018). 그러나, 기후변화 영향으로 아문젠해(Amundsen Sea) 대륙붕 해역으로 환남극 심층수(Circumpolar Deep Water, CDW) 유입이 활발해지고, 서남극 해역에 고기압 편차 발생으로 저위도의 따뜻한 공기가 서남극으로 유입되면서 아문젠해 서남극 빙붕은 매우 빠른 속도의 용융(melting)과 분리(calving)를 경험하고 있다(Rignot et al. 2008; Shepherd et al. 2012; Pritchard et al. 2012; Holland et al. 2019; Jun et al. 2020; Smith et al. 2020; Greene et al. 2022). 그 중 얼음 바닥이 해수면보다 깊은 수심에 위치한 스웨이트스 빙하(Thwaites Glacier; Fretwell et al. 2013)에서는 최근 20년간 남극에서 가장 큰 질량 감소가 발생했다(Rignot et al. 2014; Joughin et al. 2014; Scambos et al. 2017; Yu et al. 2019; Smith et al. 2020). 아문젠해 서남극 빙붕의 두께가 얇아지거나 분리 현상으로 인해 빙붕이 후퇴할 경우 버팀 효과가 약화되므로 서남극 빙상이 해양으로 쏟아져 나올 가능성이 높아지며(Pritchard et al. 2012; Greene et al. 2022), 이는 엄청난 해수면 상승을 유발할 것으로 예측된다(스웨이트스 붕괴 시: 0.65m, 서남극 전체 빙상: 3 m; Feldmann and Levermann 2015; Scambos et al. 2017; Morlighem et al. 2020). 따라서, 서남극 빙상의 운명은 서남극 빙붕의 안정도에 의해 결정되며, 서남극 빙상 용융의 전지구적 영향을 정확히 예측하기 위해서는 빙붕 용융 기작을 파악하고 빙붕의 안정도 평가를 위한 지속적인 해양-빙붕 모니터링이 매우 중요하다.

아문젠해 서남극 빙붕의 용융이 가속화 된 1990년대 후반부터 빙붕 용융 기작 분석 및 안정도 평가를 위해 아문젠해 대륙붕 해역과 빙붕 인접 해역에서 쇄빙연구선과 계류(mooring) 등을 활용한 해양 관측이 활발히 수행되었다. 약 20년 기간의 해양 관측 자료와 아문젠해 지역 모델링을 통해 아문젠해 외해에서 빙붕까지의 환남극 심층수 유입 특성(예, Walker et al. 2007; Thoma et al. 2008; Jacobs et al. 2012; Dutrieux et al. 2014a; Nakayama et al. 2014, 2018, 2019), 빙붕 근처 해양 순환 형성과 변동(예, Thurnherr et al. 2014; Heywood et al. 2016; Zheng et al. 2022), 빙붕 하부 순환 및 열 유입 특성(예, Schodlok et al. 2012; Dutrieux et al. 2014a; Nakayama et al. 2014, 2019; Wählin et al. 2010, 2021), 빙붕 용융의 시간 규모별 변동 및 원인 기작(예, Dutrieux et al. 2014a; Webber et al. 2017; Davis et al. 2018; Jenkins et al. 2018; Adusumilli et al. 2020), 용빙수 순환 및 퇴적(예, Heimbach and Losch 2012;

Biddle et al. 2017, 2019; Yoon et al. 2022; Dotto et al. 2022) 등이 확인되었다. 특히, 2018년부터는 ITGC (International Thwaites Glacier Collaboration; <https://thwaitesglacier.org>) 프로젝트가 미국-영국 주도로 수행되어, 스웨이트스 빙하 주변 및 얼음 공동(ice cavity)에서 최신 해양 관측 기법(예, 수중글라이더, 무인잠수정)을 활용한 관측이 이루어졌으며, 해당 관측 결과들은 네이처/사이언스 및 관련 저널에 보고되었다(예, Holland et al. 2020; Wählin et al. 2021; Yoon et al. 2022; Dotto et al. 2022; Davis et al. 2023; Schmidt et al. 2023).

그러나, 아문젠해 연안은 극한 기상과 높은 해빙 농도로 접근성이 떨어져 제한적인 관측 자료와 여러 가정이 포함된 모델을 활용한 연구가 주로 수행되었기 때문에, 서남극 용융의 불확실성 해소를 위해서는 더 많은 관측과 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 현재까지 밝혀진 아문젠해와 서남극 빙붕 용융의 특징 및 변동을 정리하고 최신 연구 동향을 살펴봄으로써 국내 연구자들에게 아문젠해 및 서남극 빙붕 연구의 의미와 중요성을 환기시키고자 한다. 나아가 앞으로 해결해야 할 과학적 질문들과 향후 연구 방향 등을 제시함으로써 국내 젊은 연구자들이 미래에 아문젠해 연구를 주도할 수 있도록 도움을 주고자 한다.

2. 아문젠해의 특징

지리적 특징

아문젠해는 로스해(Ross Sea)와 벨링스하우젠해(Bellinghshausen Sea) 사이에 위치한 바다로 서남극의 매리 버드랜드(Marie Byrd Land) 앞에 위치해 있고, 대략적인 위도 및 경도 범위는 각각 76°–68°S, 130°–100°W 이다. 로스해 및 벨링스하우젠해와의 정확한 구분 경계는 각각 사이플섬(Siple Island)에 위치한 다르트 곶(Cape Dart)과 서스틴섬(Thurston Island) 북서쪽 끝에 위치한 날치 곶(Cape Flying Fish)에 해당한다(Fig. 1a). 아문젠해는 로스해 및 웨델해(Weddell Sea)와 유사하게 해저에 발달해 있는 대륙 사면(continenta shelf slope)을 기준으로 수심이 2,000 m 이상인 외해와 수심이 1,000 m 이하인 대륙붕 해양으로 나뉘며, 대륙붕 지역은 로스해 만(Ross Sea Embayment), 웨델해 만(Weddell Sea Embayment)와 함께 서남극 빙상 유출의 3대 분지로서 아문젠해 만(Amundsen Sea Embayment)로 불린다.

아문젠해 만에는 대륙붕단에서부터 연안에 위치한 빙붕까지 500 m 보다 깊은 수심의 골(trough) 지형이 만을 가로지르는 형태로 발달해 있다(Fig. 1a). 크기는 총 3개의 골이 존재하며 골 지형이 도달하는 빙붕의 이름을 붙여 각각 닷슨-겟츠 골(Dotson-Getz Trough, DGT), 파인 아이

랜드-스웨이츠 골(Pine Island-Thwaites Trough, PITT), 아봇-코스그로브 골(Abbot-Cosgrove Trough, ACT)이라 부른다(Fig. 1a). 빙봉 앞에서만 골 지형이 두 갈래로 나뉘는 닷슨-갯츠 골, 아봇-코스그로브 골과 달리, 파인 아일랜드-스웨이츠 골은 대륙붕단에서 각각 서쪽 골, 동쪽 골 두 갈래로 발달해 있고, 대륙붕 중간 지점(73°S)에서 하나의 골 지형이 되었다가 위도 74.5°S 부근에서 다시 두 갈래(스웨이츠 빙하와 파인 아일랜드 빙봉 방향)로 나뉘는 모습을 보이는 것이 특징이다(Fig. 1). 상대적으로 깊은 수심을 가지는 골 지형은 환남극 심층수의 유입 경로와 아주 밀접한 연관이 있으며, 환남극 심층수 순환과 관련해서는 아래 섹션에서 자세히 기술하였다.

아문젠해 만 연안에는 길이가 500 km가 넘는 갯츠 빙봉(Getz Ice Shelf), 콜러 빙하(Kohler Glacier), 스미스 빙하(Smith Glacier), 포프 빙하(Pope Glacier), 헤인스 빙하(Haynes Glacier)를 지지하고 있는 닷슨 빙봉(Dotson Ice Shelf)과 크로슨 빙봉(Crosson Ice Shelf), 스웨이츠 빙하를 지지하고 있는 스웨이츠 빙설(Thwaites Ice Tongue)과

동편 빙봉(Eastern Ice Shelf), 파인 아일랜드 빙하(Pine Island Glacier)를 지지하고 있는 파인 아일랜드 빙봉(Pine Island Ice Shelf), 그리고 아문젠해 만 오른쪽에 코스그로브 빙봉(Cosgrove Ice Shelf), 아봇 빙봉(Abbot Ice Shelf)이 위치하고 있다(Fig. 1). 아문젠해 해역 빙상의 지반은 해수면 높이보다 낮은 곳에 위치하기 때문에 해양의 영향을 많이 받아(Orsi et al. 1995; Pritchard et al. 2012; Schmidtke et al. 2014) 동남극 빙상에 비해 안정도가 떨어지며, 아문젠해 연안에 위치한 빙봉은 다른 남극 빙봉에 비해 용융 속도가 매우 빠르다(Shepherd et al. 2012; Rignot et al. 2013, 2014, 2019; Adusumilli et al. 2020; Smith et al. 2020). 특히, 스웨이츠 빙하의 경우 지반선이 해수면보다 낮은 곳에 위치할 뿐 아니라 내륙으로 갈수록 지반의 위치가 더 깊어지기 때문에(Fretwell et al. 2013), 용융에 매우 취약해 지반선 후퇴 속도도 빠르다(Pritchard et al. 2012; Rignot et al. 2014; Paolo et al. 2015). 또한 아문젠해 서남극 빙봉에서 유출되는 많은 양의 용빙수 영향으로 아문젠해 만 해역에는 생성된지 얼마 안된 얇은 두께의

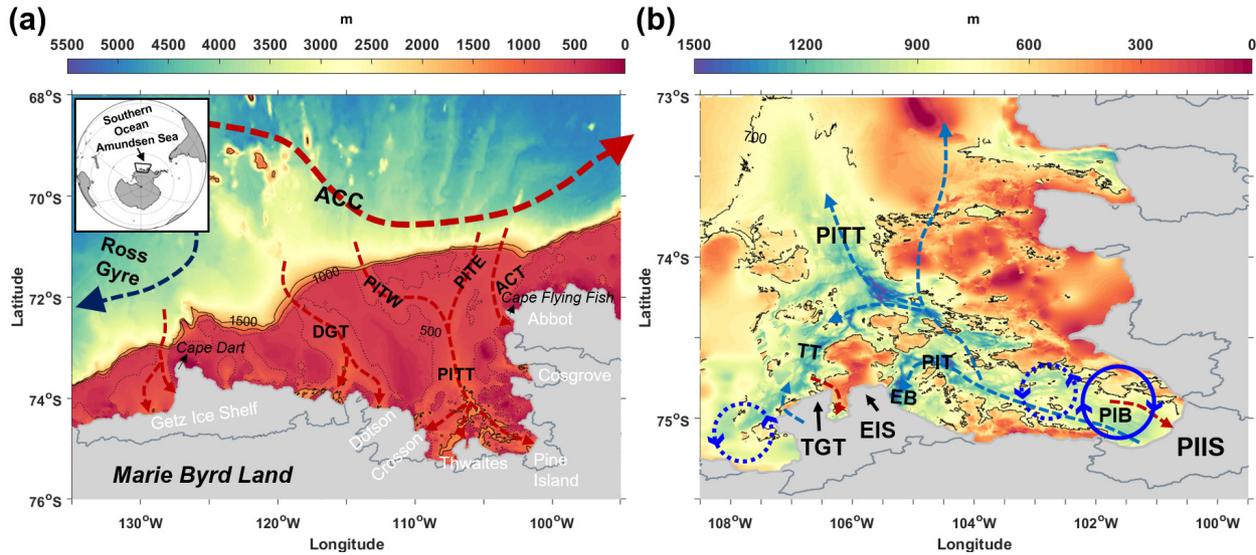


Fig. 1. (a) A topographic map of the Amundsen Sea with a schematic pattern of ocean circulation. There are the location and feature of Antarctic Circumpolar Current (ACC) and Ross Gyre (Nakayama et al. 2018), and expected pathways of Circumpolar Deep Water (CDW) intrusion onto the continental shelf (red arrows) (Jacobs et al. 2012). The gray line denotes positions of grounding line. The upper-left panel indicates a location of the Amundsen Sea in the Southern Ocean. The abbreviations DGT, PITW, PITE, ACT, and PITT indicate Dotson-Getz Trough, Pine Island-Thwaites West trough, East trough, Abbot-Cosgrove Trough, and Pine Island-Thwaites Trough, respectively. (b) A detailed topographic map near the Thwaites Glacier (TG) and Pine Island Ice Shelf (PIIS) (Hogan et al. 2020). Blue arrows indicate schematic circulation pattern of glacial meltwater flowing out from the PIIS and TG suggested by Biddle et al. (2017, 2019), Wählin et al. (2021), Yoon et al. (2022), and Dotto et al. (2022). Red arrows denote main pathways of CDW intrusion into the PIIS and TG (Dutrieux et al. 2014a; Wählin et al. 2021; Yoon et al. 2022). The solid (dotted) blue circle denotes the approximate size and position of the cyclonic (anticyclonic) gyre found in Yoon et al. (2022) and Zheng et al. (2022). The abbreviations TT, TGT, EIS, EB, PIT, and PIB mean Thwaites Trough, Thwaites Glacier Tongue, thwaites Eastern Ice Shelf, Eastern Basin, Pine Island Trough, and Pine Island Bay, respectively

해빙(fast ice)이 넓은 범위로 분포하고(Bintanja et al. 2013), 기상 조건과 남극 내륙 접근성도 좋지 못해 아문젠해 연안에는 과학 기지가 없다.

아문젠해의 해양 순환

아문젠해는 해빙의 영향으로 접근이 쉽지 않아 상층 순환 관측은 연안 폴리나(polynya) 해역 등에서만 제한적으로 이루어지며, 주로 빙붕 용융과 관련하여 대륙붕 해역내에서의 환남극 심층수 순환 특성 파악을 위한 골 지형 및 골 지형 부근에서의 중층 수심(약 300 m) 이하 관측이 많이 수행된다.

아문젠해 외해에는 남반구 중위도(60°S 부근) 편서풍대 영향에 의해 발달된 남극 순환류(Antarctic Circumpolar Current, ACC)가 동향 해류의 형태로 넓게 발달하며(Barker et al. 2007; Talley et al. 2011), 시계 방향으로 회전하는 로스 환류(Ross gyre)의 동쪽 및 남쪽 경계 해류가 아문젠해 저기압(Amundsen Sea Low)의 세기 및 위치에 따라 아문젠해 외해까지 확장되기도 한다(Wählin et al. 2012; Dotto et al. 2018). 기존 연구에서 2008년 12월부터 2009년 1월 기간 동안 닷슨-갯즈 골(DGT) 및 파인 아일랜드스웨이츠 서쪽 골(PITW)과 가까운 대륙붕단 해역에서 서향 해류와 동향 해류가 각각 관측되었는데, 서향 해류는 로스 환류의 영향, 동향 해류는 남극 순환류의 영향으로 보고된 바 있다(Wählin et al. 2012).

아문젠해 대륙붕단 해역의 해류는 2008-2009년 사례처럼 로스 환류 및 남극 순환류의 영향으로 수직적으로 한 방향의 해류가 관측되기도 하지만, 일반적으로는 상하층 수심에 반대 방향의 해류가 발달하며(Fig. 6 in Jenkins et al. 2016), 이는 아문젠해 저기압의 세기 변화 및 이동에 따른 바람장 변화와 빙붕에 평행하게 부는 동풍 계열 바람의 세기 변화에 의해 변동한다. 평균적으로 아문젠해 저기압 중심이 아문젠해 외해 중심에 위치하고 연안에서는 동풍 계열 바람이 부는데 해당 바람 조건에서는 대륙붕단 및 대륙붕 해역 모두에서 동풍 계열 바람에 의한 극방향 에크만 수송이 발생하며, 연안에서 하강현상(downwelling)이 일어나 대륙붕 해역내 등밀도선 수심이 외해에 비해 깊게 발달한다(Jenkins et al. 2016). 이와 같은 등밀도선 경사(isopycnal slope)로 인해 대륙붕단 해역에서는 남극 경사 전선(Antarctic Slope Front)이 형성되며, 전선역에서는 수심 약 300 m를 기준으로 상층 및 하층에 각각 서향 지형류(westward geostrophic current)와 동향 잠류(eastward undercurrent)가 발달한다(Walker et al. 2013; Fig. 6 in Jenkins et al. 2016).

해양 모델링 통해 제안된 바에 따르면, 남반구에서 연안 혹은 대륙사면에 평행하게 흐르는 동향 해류는 좁고 깊은 협곡이나 골 지형을 만나게 되면 극방향 혹은 대륙

붕 방향으로 회전하는 특성을 보인다(Klinck et al. 1998; St-Laurent et al. 2013). 모델링 결과와 동일하게 현장 관측 결과에서도, 아문젠해 대륙붕 해역 하층 수심에 발달한 동향 잠류는 대륙사면에 평행하게 흐르다 상대적으로 수심이 깊은 골 지형 입구에서 대륙붕 방향으로 회전하며(Walker et al. 2013), 이 과정을 통해 외해에 존재하는 환남극 심층수가 대륙붕 해역으로 유입된다(Fig. 1a; Walker et al. 2013; St-Laurent et al. 2013; Jenkins et al. 2016). 따라서, 동향 잠류의 발달 정도는 대륙붕 해역 및 빙붕으로의 환남극 심층수 유입량을 결정하는 대표적 요인으로 여겨진다(Walker et al. 2013; Jenkins et al. 2016). 예를 들어, 연안 및 대륙붕단 해역에서 동풍 계열 바람이 강화될 경우에는 대륙붕 해역에서의 하강현상이 활발해지면서 등밀도선 경사가 커져 상층 서향류는 유속이 더 빨라지지만, 남극 경사 전선의 강화로 하층의 동향 잠류는 약화되 환남극 심층수 유입이 억제된다(Thoma et al. 2008; St-Laurent et al. 2015; Kim et al. 2016; Fig. 6a in Jenkins et al. 2016). 반면, 연안 동풍이 약화되고 대륙붕단 해역에서 동풍 약화 혹은 서풍 계열 바람이 불 경우에는 상층 서향류는 약화되지만 하층의 동향 잠류 유속은 빨라지고 수직 발달 범위도 확장되어 환남극 심층수가 잘 유입된다(Thoma et al. 2008; Fig. 6b in Jenkins et al. 2016; Holland et al. 2019). 이외에도 대륙붕 해역에서 순압성 동향 해류가 발달할 경우 바닥 에크만 층에서 극방향으로의 에크만 수송이 발생해 대륙붕 해역으로 환남극 심층수가 유입되는 기작(Wählin et al. 2012), 로스 환류가 아문젠해로 확장되면 대륙붕 해역으로 환남극 심층수가 유입되는 기작(Nakayama et al. 2018; Gómez-Valdivia et al. 2023) 등이 추가적으로 제안된 바 있다.

외해에서 골 입구를 통해 대륙붕 해역으로 유입된 환남극 심층수는 골 지형을 따라 빙붕까지 순환한다(Fig. 1a; Jacobs et al. 2012, 2013; Ha et al. 2014; Nakayama et al. 2014; Heywood et al. 2016; Jenkins et al. 2016; Boehme and Rosso 2021). 골 지형을 따라 환남극 심층수를 빙붕까지 운반하는 빙붕 방향 해류는 일년 내내 유지되며(Arneborg et al. 2012), 전향 효과(coriolis effect) 영향으로 골 지형의 동쪽으로 치우쳐 발달한다(Assmann et al. 2013; Kalén et al. 2016). 골 지형 서쪽에서는 빙붕 바깥 방향으로의 해류가 발달하는데 이는 빙붕 용융으로 생성된 용빙수 유출과 연관된다(Fig. 1b; Kalén et al. 2016; Biddle et al. 2019). 골 입구에서의 환남극 심층수 유입량과 그에 따른 열 유입량은, 닷슨-갯즈 골에서 각각 0.3-0.4 Sv, 1.2-3.3 TW (Wählin et al. 2010; Ha et al. 2014), 파인 아일랜드스웨이츠 서쪽 골에서 각각 0.2-0.3 Sv, 2.2-3.4 TW (Walker et al. 2007; Assmann et al. 2013)로 확인되지만, 해당 수치는 관측 시기에 따라 변동한다(Jacobs et al.

2012; Assmann et al. 2013; Dutrieux et al. 2014a; Webber et al. 2017). 파인 아일랜드-스웨이트 동쪽 골(PITE) 부근에서는 해빙의 영향으로 환남극 심층수 및 열 유입량의 직접 관측 결과는 부족하지만, 해당 골을 따라 스웨이트 빙하 및 파인 아일랜드 빙붕까지 가장 두껍고(상층 경계 수심 약 450 m) 따뜻한($> 0.5^{\circ}\text{C}$) 환남극 심층수가 관측되기 때문에 환남극 심층수의 주요 유입 경로로 여겨진다(Jacobs et al. 2012; Dutrieux et al. 2014a; Heywood et al. 2016; Mallett et al. 2018; Nakayama et al. 2019; Boehme and Rosso 2021).

아문젠해 연안에서는 해빙 분포와 연안 바람 변동, 그리고 빙붕 용융으로 유출된 용빙수 등의 영향으로 다양한 순환 구조가 확인된다(Fig. 1b). 평균적으로 아문젠해 연안에는 연안에 평행한 동풍계열 바람이 불지만, 스웨이트 빙설 서쪽에서는 연안 해역 및 크로슨 빙붕 주변에 가득 찬 해빙의 영향으로 동풍계열 바람의 응력이 약화된다(Zheng et al. 2022). 이로 인해, 스웨이트 빙설 서쪽 해역에는 반시계 방향의 바람 응력 순환(wind stress curl)이 발달하고 이는 반시계(anticyclonic) 방향의 스웨이트 환류(Thwaites gyre) 형성에 기여한다(Fig. 1b; Zheng et al. 2022). 스웨이트 환류는 두께 약 400 m, 반지름 약 13 km 규모로 2019년 선박 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 관측에서 처음 발견되었으며, 0.2 Sv의 해수를 수송한다(Zheng et al. 2022). 스웨이트 환류와 반대로 파인 아일랜드 빙붕 앞에서는 시계 방향(cyclonic)의 파인 아일랜드 만 환류(Pine Island Bay gyre)가 발달한다(Fig. 1b; Thurnherr et al. 2014; Yoon et al. 2022; Zheng et al. 2022). 파인 아일랜드 만 환류는 바람 응력 순환 영향 없이 파인 아일랜드 빙붕에서 유출되는 용빙수에 의한 와도(vorticity) 공급만으로도 형성되지만, 용빙수 유출로 형성된 순환이 수송하는 해수는 0.4–0.7 Sv로 관측에서 얻어진 수송량 1.2–1.5 Sv보다 작은 수준이다(Heimbach and Losch 2012; Thurnherr et al. 2014; Yoon et al. 2022). 파인 아일랜드 빙붕 앞에서는 폴리냐(polynya) 발달(Macdonald et al. 2023)로 인해 해빙 영향이 적어 연안 동풍계열 바람에 의한 시계 방향의 바람 응력 순환이 발달하기 때문에(Zheng et al. 2022), 파인 아일랜드 만 환류는 용빙수 유출에 의해 형성된 뒤 바람 응력 순환에 의해 그 세기가 강화되는 것으로 판단된다. 파인 아일랜드 만 환류는 두께 약 700 m, 반지름 약 20–25 km 규모를 가지며(Thurnherr et al. 2014; Yoon et al. 2022), 북쪽 경계의 동향 해류에 의해 환남극 심층수가 파인 아일랜드 빙붕 하부로 유입되고 남쪽 경계의 서향 해류에 의해 용빙수가 파인 아일랜드 만으로 유출된다(Fig. 1b; Dutrieux et al. 2014a).

최근에는 파인 아일랜드 만 환류가 파인 아일랜드 빙붕 후퇴(Jeong et al. 2016)에 의해 확장된 연안 해역으로 이

동하면서, 파인 아일랜드 만 환류 원편에 반시계 방향 환류(anticyclonic gyre)가 새롭게 발견되었고(Fig. 1b; Yoon et al. 2022), 해당 환류 역시 용빙수에 의한 와도 공급으로 형성된다(Yoon et al. 2022). 반시계 방향 환류는 두께 약 700 m, 반지름 약 16 km 규모를 가지며, 약 0.4 Sv의 해수를 수송한다(Yoon et al. 2022). 이외에도 스웨이트 빙설 오른쪽으로 극방향 해류에 의해 환남극 심층수가 유입되고, 원편에서는 적도방향 해류에 의해 용빙수가 유출된다(Fig. 1b; Wählin et al. 2021). 이와 같은 빙붕 주변에서의 해양 순환은 빙붕 하부로의 열 유입량 조절에 매우 중요한 역할을 하며 관련해서는 아래 3번 섹션에서 자세히 설명하였다.

아문젠해의 해수 분포

아문젠해는 대표적인 따뜻한 대륙붕(Warm continental shelf) 해역으로 아문젠해에 분포하는 해수는 차가운 대륙붕(Cold continental shelf) 해역인 로스해에 분포하는 해수에 비해 상대적으로 수온이 높고 밀도가 낮다(Fig. 2a; Silvano et al. 2018; Yoon et al. 2020). 로스해에서 가장 밀도가 높은 해수는 대륙붕 해역에서 생성된 고염분 대륙붕수(High Salinity Shelf Water, HSSW)인 반면, 아문젠해에서는 외해에서 유입된 환남극 심층수가 가장 밀도가 높은 해수에 해당한다(Fig. 2a). 대륙붕단 부근 골 지형 입구에서 관측되는 환남극 심층수는 중성 밀도(neutral density, γ^n) 28.00 kg/m^3 또는 28.03 kg/m^3 에서 28.27 kg/m^3 까지 범위를, 온위(potential temperature)는 1°C 이상, 염분은 34.7 정도의 특성을 가진다(Whitworth et al. 1998; Walker et al. 2007; Wählin et al. 2010). 환남극 심층수는 대륙붕 해역으로 유입되는 과정에서 온위와 염분이 약간 감소되거나(Thoma et al. 2008; Wählin et al. 2012; Assmann et al. 2013; Wählin et al. 2013; Walker et al. 2013), 빙붕 인근에서도 여전히 1°C 이상의 수온 특성을 가지며, 표층 어는 점에 비해 약 3°C 가 높아서 빙붕 용융의 주요 열 공급자 역할을 한다(Fig. 2a; Dutrieux et al. 2014a; Jacobs et al. 2012; Heywood et al. 2016). 참고로 대륙붕 해역 내 환남극 심층수를 외해에 존재하는 환남극 심층수와 구분하기 위해 별도로 변형 환남극 심층수(modified Circumpolar Deep Water, mCDW)라 정의하기도 하지만, 본 연구에서는 환남극 심층수를 외해 환남극 심층수와 변형 환남극 심층수를 모두 포함하는 해수로 정의하였다.

앞 섹션에서 언급한 바와 같이 환남극 심층수의 유입은 파인 아일랜드-스웨이트 골을 통해 가장 활발하게 이루어지며, 그에 따라 환남극 심층수의 상층 경계 수심도 스웨이트 빙하 및 파인 아일랜드 빙붕 근처에서 가장 얕게 분포하며, 환남극 심층수의 수온 역시 가장 높다(Jacobs et al. 2012). 빙붕 부근 및 하부에서 관측되는 환남극 심층수

의 수온은 보통 대륙붕단에서 유입된 환남극 심층수 수온 특성에 따라 주로 결정되지만(예, 닷슨-갯츠 빙봉)(Nakayama et al. 2018; Dotto et al. 2019), 스웨이크 빙하와 파인 아일랜드 빙봉으로 유입되는 환남극 심층수의 수온 특성은 주로 바람 및 지역 해수 순환에 의한 환남극 심층수 상층 경계 수심 변화에 영향을 받는다(Dutrieux et al. 2014a; Webber et al. 2017; Kimura et al. 2017; Dotto et al. 2019; Yoon et al. 2022). 또한, 파인 아일랜드-스웨이크 동쪽 골을 따라서 관측되는 환남극 심층수는 두께와 수온 모두 뚜렷한 계절 변동 특성을 보이며, 남반구 여름철에 환남극 심층수 층의 두께가 얇고 수온이 낮으며, 남반구 겨울철에 환남극 심층수 층의 두께가 두껍고 수온이 높다(Assmann et al. 2013; Boehme and Rosso 2021; Mallett et al. 2018).

환남극 심층수 위 대략 100–300 m 수심 범위에는 겨울

철 해수(Winter Water, WW)가 존재하며(Fig. 2; Dutrieux et al. 2014a), 남반구 겨울철 강한 남동풍 혹은 동풍이 불 때 닷슨-갯츠 폴리냐를 비롯한 연안 폴리냐(coastal polynya)에서 해빙 생성과 염수 방출 과정을 통해 생성된다(Dutrieux et al. 2014a; Biddle et al. 2017; Macdonald et al. 2023). 겨울철 해수는 생성되는 겨울철 대기 조건과 표층 해수 물성 등에 따라 특성이 결정되는데(Silvano et al. 2018), 평균적으로 온위 -1.5°C 이하, 염분 34–34.4의 특성을 가지며(Fig. 2a), 표층에서 생성되었기 때문에 용존산소 농도가 6–8 mL/L로 높다(Dutrieux et al. 2014a; Jenkins et al. 2018; Yoon et al. 2022). 겨울철 해수는 연안 폴리냐에서 생성됨에도 불구하고 로스해 연안 폴리냐에서 생성되는 염분 34.7 이상의 대륙붕수(shelf water)보다 염분이 낮는데(Fig. 2a), 이는 아문젠해 서남극 빙봉에서 유출되는 용빙수 영향 때문이다(Silvano et al. 2018).

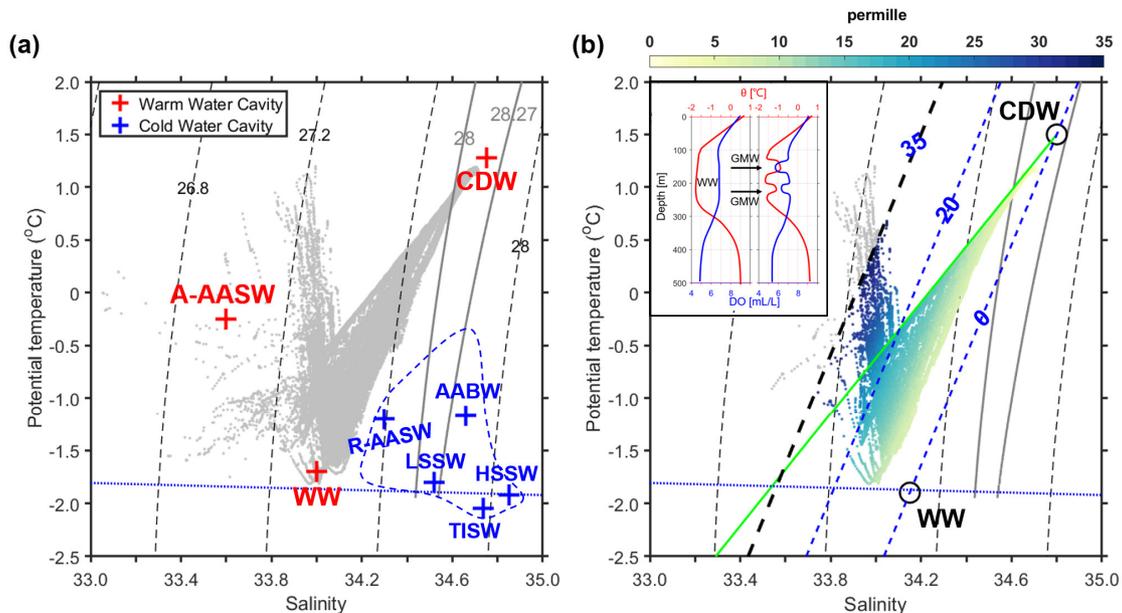


Fig. 2. (a) Examples of θ -S diagram in the Warm and Cold Water Cavities. The gray dots show seawater properties observed near the Thwaites Glacier and Pine Island Ice Shelf in 2009 (Jacobs et al. 2011) and 2014 (Heywood et al. 2016). The closed area by the dashed blue line indicates general range of θ -S in the Ross Sea (Orsi and Wiederwohl, 2009; Budillon et al. 2011; Yoon et al. 2020). The red (blue) plus symbols denote mean properties for water masses observed in the Warm (Cold) Water Cavity. A-AASW, CDW, and WW represent Amundsen Sea-Antarctic Surface Water, Circumpolar Deep Water, and Winter Water. R-AASW, AABW, LSSW, TISW, and HSSW mean Ross Sea-Antarctic Surface Water, Antarctic Bottom Water, Low Salinity Shelf Water, Terra Nova Bay Ice Shelf Water, and High Salinity Shelf Water. The surface freezing point depending on the salinity is shown by the dotted blue line. Isopycnals (kg/m^3) are represented by the dashed black lines, and 28 and 28.27 kg/m^3 (γ^n (neutral density) surfaces are denoted by solid gray lines. (b) A example of meltwater fraction estimated near the Thwaites Glacier and Pine Island Ice Shelf in 2009 (Jacobs et al. 2011; Yoon et al. 2022). The black circles indicate end-members for Circumpolar Deep Water (CDW) and Winter Water (WW). The green line links CDW and ice water properties. The blue (black) dashed lines denote meltwater fraction of 0 and 20 (35) permille. The upper-left panel represents a schematic figure for changes in profiles of potential temperature (red) and dissolved oxygen (blue) when glacial meltwater (GMW) is intruded into WW layer

즉, 아문젠해 연안 폴리나 주변에는 스웨이츠 빙하, 파인 아일랜드 빙봉 등 용융율이 높은 빙봉이 위치하며, 얼음 용융으로 유출된 용빙수가 수층의 성층화를 강화하여 남반구 겨울철 혼합층 발달 및 고염분(고밀도) 해수 형성을 방해하는 것이다(Silvano et al. 2018). 추가로, 겨울철 해수의 활발한 생성은 빙봉 앞에서 두꺼운 혼합층 발달과 수온약층이 깊어지는 변동하고 연관되기 때문에, 빙봉 하부로의 환남극 심층수 유입을 방해하는 기작으로도 제안되는데(St-Laurent et al. 2015; Nakayama et al. 2017; Webber et al. 2017) 이 역시 아래 3번 섹션에서 자세히 설명하였다.

겨울철 해수가 존재하는 수심대에서는 빙봉 용융으로 유출된 용빙수가 관측된다(Fig. 2b; Biddle et al. 2017, 2019; Yoon et al. 2022). 얼음 녹은 물(ice water)이 가지는 낮은 수온 특성에도 불구하고 아문젠해 서남극 빙봉 용융으로 유출된 용빙수는 환남극 심층수 영향 때문에 겨울철 해수에 비해 수온이 높으며(차이 $O(10^{-1})^{\circ}\text{C}$), 용존산소 역시 낮다(차이 $O(10^{-1})$ mL/L) (Fig. 2b; Dutrieux et al. 2014a). 그러나 해당 특성만으로는 용빙수 유출 정도를 정량적으로 파악하기 힘들며 수층 내에서의 용빙수 영향을 정량하기 위한 용빙수 분율 계산법이 추가적으로 활용된다(Jenkins 1999). 용빙수 분율 계산법은 아문젠해 대륙붕 해역에서 관측되는 해수 특성은 세 가지 해수 - 환남극 심층수, 겨울철 해수, 얼음 녹은 물 - 의 혼합에 의해 결정된다는 가정 하에 제안된 방법이다(Jenkins 1999). 용빙수 분율 계산을 위해서는 먼저 세 가지 해수 특성 중 온위, 염분, 용존산소의 극값을 각각 설정하고(Jenkins et al. 2018), 이를 활용하여 온위-염분, 온위-용존산소, 염분-용존산소 세 가지 짝에 대한 용빙수 분율을 수심별로 계산한다. 이후 세 가지 용빙수 분율 계산 결과를 비교하여 차이가 많이 나는 수심대(일반적으로, 표층에서 100 m 수심)는 제외하고, 세 가지 용빙수 분율을 평균하여 수심별 최종 용빙수 분율 값(단위: ‰(permille))을 얻는다(Jacobs et al. 2012; Jenkins et al. 2018; Yoon et al. 2022). Fig. 2b는 온위-염분 짝만을 활용하여 계산한 용빙수 분율의 분포 예시로서, 온위-염분 특성이 겨울철 해수에서 멀리 위치할수록, 환남극 심층수 얼음 녹은 물의 혼합 선(초록색 선)에 가까울수록 용빙수 분율이 높게 나타난다. 일반적으로 용빙수 분율이 10% 이상이면 용빙수 영향이 큰 것으로 간주한다(Yoon et al. 2022). 참고로, 물범 부착(seal-tagging) 관측 자료의 활용도를 높이기 위해서, 온위-염분 짝을 활용한 용빙수 분율 계산 결과만을 활용하기도 한다(Zheng et al. 2021).

상층 수심대에서 세 가지 용빙수 분율의 차이가 크게 나타나는 이유는 해수의 특성이 환남극 심층수, 겨울철 해수, 얼음 녹은 물 뿐만 아니라 추가적으로 대기의 영향을

받았기 때문이며, 용빙수 분율 계산법의 가정을 적용할 수 없어 분석에서 제외된다(Jacobs et al. 2012; Biddle et al. 2017; Jenkins et al. 2018; Yoon et al. 2022). 또한 이론적으로 계산될 수 있는 최대 용빙수 분율은 일반적으로 표층 어느점과 환남극 심층수 얼음 녹은 물의 혼합 선이 만나는 지점의 분율로 설정하지만(검정색 파선), 실제 분석에는 환남극 심층수 얼음 녹은 물의 혼합 선(초록색 선), 용빙수 분율 0 permille 선(가장 오른쪽 파랑색 파선), 염분별 표층 어느점(파랑색 점선) 내부 범위에 존재하는 해수에서 계산된 용빙수 분율만을 활용한다(Fig. 2b). 아문젠해 빙봉에서 유출되는 용빙수는 아문젠해 만의 지역 순환 및 빙봉의 용융, 그리고 나아가 환남극의 해수 순환 및 해수면 상승에까지 영향을 미칠 수 있어 정량적인 용빙수 유출 정도와 순환 특성을 파악하는 것은 매우 중요하며, 용빙수 영향 관련해서는 아래 4번 섹션에서 자세히 기술하였다. 최근에는 용빙수 분율 계산의 오차를 줄이기 위해, 온위, 염분, 용존산소 뿐 아니라 불활성 기체(예, 네온, 아르곤, 크립톤, 크세논) 및 산소 동위원소 분석 값을 추가로 활용하여 용빙수 함량(meltwater content, 단위 g/kg)을 계산하는 OMPA (Optimum Multi-Parameter Analysis) 방법을 적용하기도 한다(Biddle et al. 2017, 2019).

아문젠해 표층수(Antarctica Surface Water, AASW)의 특성은 계절에 따라 변동할 것으로 예상되지만, 아문젠해 만에 분포하는 해빙 및 두꺼운 빙산의 영향으로 표층수 특성 변동 연구를 목적으로 한 관측 사례는 없으며, 여름철 아문젠해 연안 폴리나 해역에서 관측한 표층수는 용빙수 영향으로 인해 차가운 대륙붕 해역 표층수보다 염분(밀도)이 상대적으로 낮은 특성을 보인다(Fig. 2a).

3. 아문젠해 서남극 빙봉 용융의 특징과 변동

아문젠해 서남극 빙봉 용융의 특징

해양 기인 빙봉 용융 과정은 총 세 가지 모드(mode)로 제안된다(Fig. 1 in Jacobs et al. 1992; Fig. 3 in Jenkins et al. 2016). 모드 1 용융과정은 대륙붕 해역의 연안 폴리나에서 생성된 대륙붕수가 주요 열 공급원 역할을 하여 빙봉 용융을 발생시키는 것으로, 대륙붕수의 수온이 표층 어느점에 가깝기 때문에 유출되는 용빙수 수온 역시 표층 어느점보다 낮고(약 -2.1°C), 용빙수가 빙봉 기저면을 따라 부력에 의해 상승하면서 일부 재결빙(refreezing)되는 것이 특징이다(Robinson et al. 2014; Fig. 3a in Jenkins et al. 2016; Yoon et al. 2020). 모드 2 용융과정은 외해에서 유입된 환남극 심층수가 주요 열 공급원 역할을 하여 빙봉 용융을 발생시키는 것으로, 해당 과정에서는 유출되는 용빙수의 수온이 표층 어느점보다 높아 재결빙이 발생하지 않는 것이 특징이다(Fig. 3b in Jenkins et al. 2016).

모드 3 용융과정은 빙봉 앞에 존재하는 남극 표층수가 주요 열 공급원 역할을 하여 빙봉 용융을 발생시키는 것으로, 해당 과정에서는 남극 표층수가 가지는 특성에 따라서 유출되는 용빙수의 재결빙 여부가 결정된다(Fig. 3c in Jenkins et al. 2016; Malyarenko et al. 2019).

아문젠해 서남극 빙봉은 해양에 잠겨 있는 얼음의 두께가 대략 400–600 m로 환남극 심층수 상부 경계 수심과 빙봉의 기저면 수심이 유사하다(Jacobs et al. 2011; Davis et al. 2023). 따라서, 지반선 부근을 포함한 빙봉 하부에 존재하는 해수의 대부분은 골 지형을 따라 빙봉에 도달한 환남극 심층수가 차지하며(따뜻한 공동, warm water cavity; Fig. 2b in Holland et al. 2020), 아문젠해 서남극 빙봉에서는 해당 환남극 심층수에 의한 열 공급으로 모드 2 용융과정이 주로 발생한다(Dutrieux et al. 2014a; Fig. 3a in Jenkins et al. 2016; Wählin et al. 2020, 2021). 앞서 아문젠해 대륙붕 해역 순환 분포에서 살펴보았듯이(Fig. 1b), 주로 빙봉의 오른쪽으로 환남극 심층수에 의한 열이 유입되어 빙봉 용융이 유발된다(Dutrieux et al. 2014a; Wählin et al. 2020). 닷슨 빙봉, 겐츠 빙봉, 스웨이츠 빙하, 파인 아일랜드 빙봉 부근에서 환남극 심층수에 의한 열 유입량은 약 50–160 Gt/year의 빙봉 용융율을 발생시킬 수 있는 0.5–1.5 TW 수준으로 관측되는데(Wählin et al. 2020, 2021; Yoon et al. 2022), 열 유입량 변동 범위는 관측 시기에 따라 이보다 크게 나타날 수 있다(Dutrieux et al. 2014a; Webber et al. 2017; Jenkins et al. 2018). 또한, 해양에 잠겨 있는 빙봉의 모양에 따라 순압성 해류에 의한 열 유입량은 빙벽(ice front)에서 차단될 수 있기 때문에, 빙봉 앞에서 관측되는 열 유입량 중 경합성 해류에 의한 열 유입량만이 빙봉 하부 용융에 기여할 가능성이 있다(Wählin et al. 2020).

모드 2 용융 과정에 의해 아문젠해 서남극 빙봉의 기저 용융(basal melting)은 다른 남극 빙봉의 용융에 비해 빠른 속도로 발생한다(Shepherd et al. 2012; Rignot et al. 2013, 2014; Paolo et al. 2015; Adusumilli et al. 2020; Smith et al. 2020). 시기별로 차이는 있지만 아문젠해 서남극 빙봉의 평균적인 기저 용융율은 약 7 m/year로 다른 남극 빙봉의 기저 용융율에 비해 3배 이상 높으며(Adusumilli et al. 2020), 환남극 심층수 유입이 가장 활발한 파인 아일랜드 빙봉과 스웨이츠 빙하에서는 가장 빠른 기저 용융(약 16 m/year)이 발생한다(Rignot et al. 2013). 기저 용융율은 동일 빙봉 내에서도 공간적으로 차이를 보이는데, 이는 주로 빙봉 하부에 위치한 해저 능선과 같은 해저 지형에 의해 열 유입 경로와 열 유입량이 결정되기 때문이며(De Rydt et al. 2014; De Rydt and Gudmundsson 2016; Goldberg et al. 2020), 해저 지형이 기저 용융율에 미치는 영향은 빙봉 별로 다양하게 나타난다(Goldberg et al. 2020). 해저

지형 효과와는 별개로, 기저 용융율은 가장 무거운 환남극 심층수가 영향을 미치는 지반선 부근과 빙봉 기저에 존재하는 균열 내부(예, 크레바스)에서 높게 나타난다(Dutrieux et al. 2014b; Schmidt et al. 2023). 참고로, 모드 2 용융과정 이외에 빙저수문(subglacial channel)에서 유출되는 담수도 아문젠해 서남극 빙봉 용융에 일부 기여한다(Schroeder et al. 2013; Le Brocq et al. 2013; Wei et al. 2020).

아문젠해 서남극 빙봉은 빠른 기저 용융과 더불어 빠른 지반선 후퇴 경향을 보인다(Rignot et al. 2014; Milillo et al. 2019). 빠른 속도의 기저 용융이 지반선 후퇴의 주요 원인으로 제안되었는데, 이는 기저 용융으로 빙봉 두께가 감소하고 빙봉 하부 영역이 확장됨으로써 더 많은 양의 열이 빙봉 하부로 유입될 수 있기 때문이다(Arthem and Williams 2017). 그러나 모델링 예측 결과와 달리 기저 용융율의 증가는 많은 양의 용빙수 유출을 야기하고 빙봉 하부 성층화를 강화시켜 오히려 지반선 용융율을 감소시키는 것으로 관측되었으며(Davis et al. 2023), 해당 기작 이외에 빙상 동역학적 원인, 즉, 빙봉 두께 감소로 인한 지반선 항력(drag force) 및 빙봉 후면 응력(back stress) 약화가 빠른 속도의 지반선 후퇴를 발생시킬 수 있음이 밝혀졌다(Davis et al. 2023).

아문젠해 서남극 빙봉 용융 변동과 원인

과거 1900년대 초반 아문젠해 대륙붕단 해역에는 외해에 위치한 아문젠해 저기압(시계방향 순환)의 영향으로 동풍 계열 바람이 우세하게 발달하였고, 그 영향으로 외해에서 대륙붕 해역으로의 환남극 심층수 유입이 저조하여 빙봉 용융율도 현재의 절반 수준에 불과했다(Holland et al. 2019). 그러나, 1950년대 이후 기후변화가 급격해짐에 따라 아문젠해에 발달한 고기압성 편차(Jun et al. 2020) 영향으로 아문젠해 저기압이 약화되었고, 대륙붕단 해역에서도 동풍 계열 바람의 약화 뿐 아니라 서풍 계열 바람의 발생 빈도도 크게 증가하였다(Holland et al. 2019). 앞서 아문젠해 해양 순환 섹션에서 살펴보았듯이, 아문젠해 대륙붕단에서 서풍 계열 바람이 불 경우에는 환남극 심층수가 대륙붕 해역으로 활발히 유입되기 때문에, 아문젠해 서남극 빙봉 용융율도 1950년대 이후 지속적으로 증가하여 현재의 수준(-100 Gt/year)에 이르게 됐다(Holland et al. 2019). 해당 과정은 100년에 가까운 시간 규모의 아문젠해 서남극 빙봉 용융 변동을 야기한 원인으로 여겨지며(Holland et al. 2019), 아문젠해가 남극의 대표적인 따뜻한 대륙붕 해역으로 불리게 된 원인이기도 하다.

급격한 기후변화 영향으로 약 한 세기에 걸쳐 따뜻한 공동 특성이 강화된 아문젠해 서남극 빙봉은 환남극 심층수 변화에 민감하게 반응하여 다양한 시간 규모의 용융율 변동 특성을 보인다. 아문젠해 서남극 빙봉의 용융은 십년

(decadal)–수 십년(multi-decadal) 규모의 장주기 변동 특성을 보이며, 이는 동일 시간 규모를 가지는 해양 기인 열 유입량 변동이 주요 원인으로 제안된다(Jenkins et al. 2018). 해수 수온의 수 십년 변동 영향에 따라, 2000년대 중반은 따뜻한 시기(warm phase)로 아문젠해 서남극 빙붕이 높은 용융율을 보이며(2009년 최대), 2010년대 이후는 차가운 시기(cool phase)로 아문젠해 서남극 빙붕이 낮은 용융율을 보였다(2012년 최소)(Jenkins et al. 2018). 참고로, 빙붕의 용융율은 빙붕 하부로 유입되는 해수 절대 온도의 제곱에 비례(비선형 반응)하기 때문에, 따뜻한 시기 혹은 차가운 시기 동안의 평균적인 해수 특성보다는 각 시기 동안 극한(extreme)의 해수 특성이 나타난 때에 더 급격한 빙붕 용융 변동이 발생한다(Jenkins et al. 2018). 추가적으로, 대륙붕 해역에 부는 바람에 의한 에크만 펌핑(Ekman pumping)이 골 지형 부근에서의 수온 약층 수심 및 빙붕 하부로의 환남극 심층수 유입량을 조절해 아문젠해 서남극 빙붕 용융의 수 십년 주기 변동을 유발하기도 한다(Webber et al. 2019).

아문젠해 서남극 빙붕 용융은 연간(interannual) 규모 변동 특성도 보이며, 2000년대 들어 아문젠해 서남극 빙붕에서 최대 용융률이 관측된 2009년과 최소 용융률이 관측된 2012년은 빙붕 용융의 연간 변동을 보여주는 대표적인 시기로 여겨진다(Jacobs et al. 2011; Dutrieux et al. 2014a; St-Laurent et al. 2015; Webber et al. 2017; Adusumilli et al. 2020). 빙붕 앞 연안 폴리나에서의 수온약층 수심 변화 및 대기 원격 상관(atmospheric teleconnection)에 의한 대륙붕 해역 바람 변화 등이 연간 변동의 원인으로 제안되었는데, 2012년의 경우, 2011년 발생한 강한 라니냐(La-Niña) 이벤트 영향으로 아문젠해 저기압이 강화되고 대륙붕 해역에 강한 동풍 계열 바람 발달하면서 환남극 심층수 유입이 현저하게 감소했다(Dutrieux et al. 2014a). 이에 더하여, 빙붕 앞 연안 폴리나에서 대기로의 열 손실이 평년보다 크게 발생해 겨울철 해수가 활발히 형성되었으며, 이 중 일부가 직접 빙붕 하부로 유입되기도 하고(St-Laurent et al. 2015), 강한 대류 현상(deep convection)으로 수온약층 수심도 깊어져 환남극 심층수 유입량이 줄었다(Webber et al. 2017). 다시 말해, 원격과 지역 요인 모두 2012년 아문젠해 서남극 빙붕 용융의 현저한 감소에 기여했다. 반면, 2009년에는 원격과 지역 요인 모두 환남극 심층수 유입을 증가시키는 방향으로 작용하였으며, 결과적으로 표층 어느점에 비해 약 4°C 높은 수온 특성을 가진 환남극 심층수가 빙붕 하부로 유입된 높은 빙붕 용융을 야기했다(Jacobs et al. 2011; Dutrieux et al. 2014a).

추가로, 빙붕 근처 해양에서의 해빙 분포 및 바람 변화에 의한 수온약층 수심 변화, 환남극 심층수 특성 및 두께의 계절 변동 등은 아문젠해 서남극 빙붕 용융의 계절 변

동도 야기하며(Wählin et al. 2013; Kimura et al. 2017; Mallett et al. 2018; Boehme and Rosso 2021; Yang et al. 2022), 심지어 빙벽 바로 앞에서의 바람에 의한 에크만 펌핑은 수 주–수 개월 짧은 주기의 용융 변동을 유발하기도 한다(Davis et al. 2018). 이처럼 수 주–수 십년 주기까지 다양한 시간 규모의 빙붕 용융 변동을 야기하는 기작들이 연구되어 왔고, 해당 기작들 이외에도 조석과 조류에 의한 난류성 열 유입(Jourdain et al. 2019), 해역별 심층수 특성 차이로 인한 혼합 강화(Wählin et al. 2021), 빙붕 하부 지형 조건 변화 및 빙벽과 지반간 거리 감소를 야기하는 빙붕 분리 현상에 의한 빙붕 후퇴 등도 아문젠해 서남극 빙붕 용융을 증가 요인들로 여겨진다(Christianson et al. 2016; De Rydt et al. 2021; Yoon et al. 2022; Bradley et al. 2022; Greene et al. 2022). 또한, 앞서 서술한 바와 같이 빙붕 용융으로 유출된 용빙수도 빙붕 용융 변동에 영향(빙붕 용융 되먹임)을 주는 것으로 알려져 있으나(Dutrieux et al. 2014a; Yoon et al. 2022), 용빙수가 어떤 시간 규모의 용융 변동을 야기하는지에 대해서는 추가적인 관측 및 연구가 더 필요하다. 이와 관련해서는 아래 용빙수 영향 섹션에서 설명하였다.

4. 아문젠해 서남극 빙붕 용융이 미치는 영향

대륙붕 해양에서의 영향

환남극 심층수에 의한 아문젠해 서남극 빙붕 용융으로 지반선 부근에서 유출된 용빙수는 부력에 의해 상승하며, 빙붕 하부에서의 해수 간 밀도 구배(density gradient)를 증가시켜 시계 방향 순환 발달을 야기한다(Heimbach and Losch 2012; Dutrieux et al. 2014a). 그리고 용빙수가 연안 해양으로 유출된 이후에는 연안에 발달한 해양 순환으로부터 운동 에너지를 얻어 원심 역전 불안정(Centrifugal overturning instability)을 유발하며(Garabato et al. 2017), 원심 역전 불안정에 의해 강화된 수평 방향 이동과 난류 혼합 영향으로 용빙수가 특정 수심대(등밀도선)에 정착해 외해로 순환한다(Fig. 1b; Biddle et al. 2017, 2019; Garabato et al. 2017; Zheng et al. 2021). 이와 같은 연안 해양에서의 용빙수 유출 특성은 수층의 성층화가 강한 남반구 여름철(1–3월)에 수심대별로 고루 분포한 용빙수 함량 값을 통해 잘 확인되며, 남반구 겨울철(7–9월)에는 겨울철 해수 형성과 관련한 깊은 대류 현상 영향으로 주로 표층 및 겨울철 해수의 하부 경계에서만 용빙수 유출이 발생한다(Zheng et al. 2021).

빙붕 하부에서와 마찬가지로 연안으로 유출된 용빙수는 해수 간 밀도 구배를 증가시켜 빙붕 인근 해역에서의 수평 순환과 수직 역전 순환(overturning circulation) 세기를 모두 강화시킨다(Webber et al. 2019; Yoon et al. 2022).

특히, 아문젠해 서남극 빙봉 중 용빙수 유출량이 많은 파인 아일랜드 빙봉에서 해당 현상이 두드러지며, 파인 아일랜드 빙봉에서 유출된 용빙수는 스웨이트 빙봉 하부, 아봇 빙봉이 위치한 대륙붕단 부근까지도 순환하여 대륙붕 해양 전역에 걸친 해수 환경에 영향을 미치는 것으로 확인된다(Biddle et al. 2017, 2019; Dotto et al. 2022). 이와 같은 용빙수 영향으로 아문젠해 대륙붕 해역 내에 해수는 전체적으로 낮은 밀도 특성을 보이며(Fig. 2), 앞서 언급했듯이 연안 폴리나에서도 대륙붕수가 아닌 겨울철 해수가 형성된다(Silvano et al. 2018).

또한, 용빙수 영향으로 유발된 해양의 변화는 다시 아문젠해 서남극 빙봉 용융 변동을 야기한다. 우선, 용빙수 유출에 의해 강화된 빙봉 하부 순환 및 빙벽 앞 수평, 수직 순환은 모두 환남극 심층수 유입을 강화시켜 빙봉 용융을 증가시킨다(Dutrieux et al. 2014a; Jourdain et al. 2017; Webber et al. 2019; Yoon et al. 2022). 해당 과정은 빙봉 용융 증가가 해양 순환을 강화시켜 빙봉 용융을 더 크게 증가시키는 양의 되먹임(positive feedback) 현상으로 여겨지며(Yoon et al. 2022), 2009년 및 2012년 빙봉에서 관측된 용융률 변동을 일부 설명하는 기작으로 제안되었다(Jacobs et al. 2011; Dutrieux et al. 2014a; Webber et al. 2017; Yoon et al. 2022). 양의 되먹임 현상 이외에도, 파인 아일랜드 빙봉에서 유출된 용빙수는 스웨이트 동편 빙봉 하부로 직접 유입되어 스웨이트 빙하 용융을 증가시키는 역할을 하기도 한다(Dotto et al. 2022). 반면, 최근에는 중심부에 용빙수 함량이 높은 파인 아일랜드 만 반시계 방향 환류(Fig. 1b; Biddle et al. 2017)가 파인 아일랜드 빙봉 하부로 유입되는 열량을 감소(전체 유입 열량의 12% 이상)시킨다는 사실이 새롭게 밝혀졌다(Yoon et al. 2022). 앞서 언급했듯이, 반시계 방향 환류는 용빙수 유출에 의해 형성된 것이므로, 해당 과정은 빙봉 용융 증가가 반시계 방향 환류 및 용빙수의 환류 중심부 수렴을 강화시키고, 환남극 심층수에 의한 유입 열량을 감소시켜 빙봉 용융 속도를 느리게 하는 일명 음의 되먹임(negative feedback) 현상으로 여겨진다. 참고로, 2020년 파인 아일랜드 빙봉 용융율은 2012년과 유사한 수준이었으며, 빙봉 용융의 음의 되먹임 현상이 2020년 빙봉 용융률 변동에 일부 기여한 것으로 제안되었다(Yoon et al. 2022).

용빙수는 다량의 영양소를 포함하고 있어 아문젠해 대륙붕 해역의 1차 생산성 변동 및 생지화학 순환 등에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데(Arrigo and van Dijken, 2003; Arrigo et al. 2012; Planquette et al. 2013; Miles et al. 2016), 해당 영향은 본 연구에서 다루는 해양 물리 내용과는 연관성이 떨어져 설명에서 제외하였다.

외해로의 영향

서남극 매리 버드 랜드 연안을 따라서는 아문젠해에서 로스해 방향으로 흐르는 서향 해류가 발달하며(Orsi and Wiederwohl 2009; Dotto et al. 2018), 빙봉에서 대륙붕 해양으로 유출된 용빙수는 이 연안 해류에 의해 로스해 및 동남극 해양으로 수송된다(Jacobs et al. 2002; Nakayama et al. 2014, 2020). 특히, 로스해로 수송되는 용빙수의 경우 로스해 대륙붕 해역 표층 염분 감소 및 대륙붕수 형성에 영향을 줄 수 있는데, 실제 1950년대부터 2000년대 초반까지 발생한 대륙붕수 및 남극저층수(Antarctic Bottom Water) 염분 감소의 원인으로 서남극 용빙수 유입이 제안되었다(Jacobs et al. 2002; Jacobs and Giulivi 2010; Purkey and Johnson 2013; Nakayama et al. 2014). 수치 모델 결과에 따르면, 서남극 용빙수가 동남극 해양의 남극저층수 형성 해역인 턴리 곶(Cape Darnley)까지 수송되는데는 약 5-10년 정도 시간이, 웨델해까지는 10-15년 정도 시간이 소요되는 것으로 확인되었기 때문에(Nakayama et al. 2020), 아문젠해 서남극 빙봉에서 유출된 용빙수가 로스해에 미치는 영향이 가장 클 것으로 예상된다. 참고로, 2010년대 중반부터 로스해에서는 대륙붕수 및 남극저층수 염분의 재증가가 발생했는데, 이는 아문젠해로부터 유입되는 용빙수 양의 감소가 아닌 해빙 유입 감소에 의한 것으로 제안되었다(Castagno et al. 2019; Yoon et al. 2020; Thomas et al. 2020; Silvano et al. 2020).

또한, 남극 빙봉에서 유출된 용빙수에 의해 환남극 표층 해수 온도가 하강하고 남극 주변으로 더 넓은 범위에서 해빙이 발달하는데(Bintanja et al. 2013), 아문젠해 서남극 빙봉에서 유출된 용빙수도 해당 경향에 일부 기여할 것으로 여겨진다. 참고로, 이는 지구 온난화 영향에 의한 해빙 감소 현상과는 상반되는 결과이다. 그리고, 서남극 빙봉을 포함해 남극 빙상 및 빙봉에서 유출된 용빙수는 대기 원격 상관을 통해 적도수렴대(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)의 북쪽 이동 및 북서태평양에서 발생하는 대류 현상 억제에 기여해 동아시아 온난화에도 영향을 미칠 수 있다(Oh et al. 2020). 더 나아가, 아문젠해 서남극 빙봉에서 지속적으로 유출된 용빙수는 전지구 해수면 상승에도 기여한다(Shepherd et al. 2012; Rignot et al. 2013). 전지구 해수면 변동 수치 예측 모델 결과들에 의하면, 21세기 이후 서남극 빙상 및 빙봉 용융에 따른 해수면 상승 속도는 2 mm/year 이상일 것으로 예측되며(Scambos et al. 2017), 이 중 스웨이트 빙하의 용융률 변동에 따라 작게는 0.1 mm/year 크게는 0.5 mm/year 속도의 매우 급격한 해수면 상승을 유발한다(Joughin et al. 2014). 2006-2018년 기간 동안 전지구 해수면 상승률이 약 3.7 mm/year (IPCC 2023)인 것을 고려하면, 스웨이트 빙하를 포함해 서남극 빙상 및 빙봉에서 유출되는 용빙수가 전지구 해수면 상승

에 매우 큰 기여를 함을 알 수 있다. 그리고 서론에서 서술한 바와 같이, 서남극 스웨이츠 빙하의 완전한 붕괴로 용빙수가 유출될 경우 전지구 해수면이 0.65m 상승하며, 서남극 주요 빙봉의 완전한 붕괴로 용빙수가 유출되면 전지구 해수면의 3m 이상 상승에 기여한다(Feldmann and Levermann 2015; Scambos et al. 2017; Morlighem et al. 2020).

5. 과학적 질문과 관측 및 연구 전략

지금까지 아문젠해의 특징, 연안에 위치한 빙봉의 용융과 변동 원인, 그리고 용빙수가 미치는 영향에 관해 살펴 보았다. 특히, 연구자들이 수행한 다년간에 걸친 해양 관측과 모델링 결과를 통해, 환남극 심층수의 대륙붕 해역 순환 및 유입 기작, 빙봉 용융 과정과 변동 등이 대기-해양-빙봉-지형 간의 복잡한 상호작용에 의해 결정됨을 확인하였다. 이는 아문젠해 서남극 빙봉 용융의 재현 및 변동 예측이 쉽지 않은 작업임을 의미하며, 대기 강제력, 해양 순환, 빙봉 구조, 지반선 변화, 지형 등의 고해상도 관측 및 이들의 시공간적 변화 확인을 위한 장기적인 모니터링이 요구됨을 보여주는 결과이다. 서론에서 서술한 바와 같이, 기저 용융에 따른 빙봉 두께의 감소는 빙봉의 안정도 감소 그리고 서남극 빙상의 안정도 감소로 직결된다. 따라서, 기후변화에 따른 전지구 변화 예측에 있어서 서남극 빙상이 가지는 불확실성을 해소하기 위해서는, 아문젠해 대륙붕 해역과 빙봉 인근 및 하부 해역 관측이 지속적으로 수행되어야 하며, 이를 통해 빙봉 용융 변동의 새로운 원인들을 찾아낼 뿐 아니라 기존 연구에서 제안된 기작들을 재확인하고 보완, 수정할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 기존 연구에서 제안한 여러 빙봉 용융 기작을 토대로 추가적으로 해결이 필요한 과학적 질문과 관측 및 연구 전략 몇 가지를 아래와 같이 제안하고자 한다.

첫 번째 과학적 질문은 ‘빙봉 용융 되먹임이 빙봉 용융에 어떤 시공간적 규모의 영향을 미치는가?’ 이다. 빙봉 용융에 의해 유출된 용빙수가 빙봉 용융의 증가 혹은 감소에 다시 영향을 미치는 되먹임 과정은 관측 및 모델링을 통해 일부 확인(Dutrieux et al. 2014a; Yoon et al. 2022) 되었고, 해당 기작은 빙봉 용융 재현 및 변동 예측 모델 정확도 향상에 기여할 것으로 판단된다. 그러나 되먹임 기작이 어느 정도 시공간 규모의 빙봉 용융을 야기하는지는 정확하게 밝혀지지 않았으며, 빙봉 하부에서 관측된 해류 속도를 고려하면(Wählin et al. 2021; Davis et al. 2023), 한달 이내의 빙봉 용융 변동을 유도할 것으로 예측된다. 따라서, 빙봉에는 열수시추 계류(borehole mooring), 빙봉 앞에는 해양 계류선을 설치하고 쇄빙선을 활용하여 1달 기간 동안 빙봉 하부 및 연안 폴리냐 해역을 집중 관측한

다면 용빙수 되먹임이 빙봉 용융에 미치는 시공간 규모를 파악할 수 있을 것이다. 추가로, 빙봉 용융 되먹임 기작이 빙봉 용융 재현 및 변동 예측 모델에 구현될 수 있도록, 빙봉-해양 접합 모델을 활용한 용빙수 영향 실험과 모델 및 관측 결과간 비교 분석을 통해 모델 성능 향상에도 관심을 기울여야 한다.

두 번째 과학적 질문은 ‘빙봉 분리를 비롯한 연안 환경의 변화가 빙봉 용융에 어떤 영향을 미치는가?’ 이다. 파인 아일랜드 만 반시계 방향 환류의 음의 되먹임 역할이 밝혀지게 된 이유는 2015년부터 지속된 파인 아일랜드 빙봉 후퇴(Jeong et al. 2016)로 반시계 방향 환류가 빙봉 방향으로 이동하면서 빙벽 및 해저 능선과의 거리가 가까워졌기 때문이다(Yoon et al. 2022). 최근 빙봉 분리 현상은 빙봉 두께 감소와 비견될 정도로 많은 양의 얼음 질량 손실을 야기하고 있으며(Baumhoer et al. 2021; Greene et al. 2022), 빙봉 분리 현상은 연안의 경계 조건을 바꾸고 빙봉 하부 지형 환경을 변화시킬 수 있다. 따라서, 연안의 빙벽 변화가 크고 해저 지형이 복잡한(예, 해저 능선 발달) 빙봉을 지속적으로 모니터링하고, 해양 관측 자료를 활용해 해당 빙봉의 용융 기작을 파악해 둔다면, 빙봉 분리가 발생했을 경우 빙봉 분리 전 후 해양 환경 및 빙봉 용융률 비교를 통해 빙봉 분리가 빙봉 용융에 미치는 영향을 살펴볼 수 있을 것이다. 다만, 관측은 수 년 규모의 영향을 살펴보기에 용이하기 때문에, 고해상도 지형 및 빙봉 구조가 구현된 모델을 활용하여 연안 환경 변화가 빙봉 용융에 미치는 긴 시간 규모(> 수십년)의 영향도 추가적으로 살펴볼 필요가 있다(예, De Rydt et al. 2014; De Rydt and Gudmundsson 2016; Bradley et al. 2022).

세 번째 과학적 질문은 ‘아문젠해 서남극 빙봉 인근의 해빙 분포 변화가 빙봉 하부로의 열 유입 경로 및 열 유입량을 변동시킬 수 있는가?’ 이다. 웨델해 연구에서 기후변화 영향으로 해빙 생성이 감소하면 표층 용력이 약화되어 해류의 세기는 오히려 강화될 수 있음이 제안된 바 있다(Hellmer et al. 2012, 2017). 아문젠해 서남극 빙봉 인근은 용빙수 영향으로 표층 수온이 감소해 오히려 해빙이 증가할 가능성이 있으며, 이는 아문젠해 해류 속도의 감소로 이어질 수 있다. 따라서, 골 지형 부근에서의 해빙 발달 정도와 환남극 심층수에 의해 빙봉 하부로 유입되는 열량을 비교해본다면 해빙 분포가 빙봉 하부로의 열 유입에 영향을 미치는지 여부를 파악해 볼 수 있을 것이다. 또한, 아문젠해 지역 모델을 활용해 해빙 발달 정도에 따른 대륙붕 해역 순환 및 환남극 심층수 유입량 변화 민감도 실험을 수행하는 것도 해당 과학적 질문 해결에 큰 도움이 될 것이다.

네 번째 과학적 질문은 ‘아문젠해 서남극 빙봉 용융 변동을 야기하는 지역 및 원격 강제력의 영향 정도를 정량

적으로 제시할 수 있는가?’ 이다. 2012년 아문젠해 서남극 빙봉 용융율이 낮은 값을 보였을 때, 강한 라니냐 이벤트에 의한 대륙붕단 해역에서의 동풍 강화(Dutrieux et al. 2014a)와 연안 폴리나에서의 활발한 겨울철 해수 형성에 따른 수온약층 수심 하강이 제안되었다(Webber et al. 2017). 현재로서는 두 기작 모두 빙봉 용융률 감소에 영향을 미친 것으로 판단되지만, 여전히 어떤 기작이 빙봉 용융률 감소에 더 기여했는지에 대해서는 판단하기 어렵다. 지역 및 원격 강제력에 의한 빙봉 용융의 변동 정도를 정량적으로 파악할 수 있다면 이 역시 빙봉 용융 재현 및 변동 예측 모델 정확도 향상에 기여할 것이다. 따라서, 원격 강제력의 영향은 관측만으로 파악하기에는 한계가 있으므로 원격 강제력 조건이 비슷한 시기에 지역 강제력을 비교 관측하여 어느 정도의 빙봉 용융률 변동을 야기하는지를 살펴본다면 지역 및 원격 강제력의 영향 정도를 정량적으로 제시할 수 있을 것이다. 이와 더불어, 아문젠해 지역 모델의 측면 경계 조건 변화(원격 강제력 변화 영향으로 간주) 실험을 통한 대륙붕 해역 내 수평, 수직 순환 변화 연구를 수행한다면 지역 및 원격 강제력의 영향 정도를 보다 분명하게 파악할 수 있을 것이다.

마지막으로, 다섯 번째 과학적 질문은 ‘용빙수 함량에서 빙봉 용융 영향과 빙저수문 유출 영향을 구분하고 각각이 빙봉 용융에 미치는 영향을 정량적으로 제시할 수 있는가?’ 이다. 앞서 살펴본 바와 같이 빙봉 용융으로 생성된 용빙수, 빙저수문에서 유출된 담수 모두 빙봉 용융에 영향을 미친다(Schroeder et al. 2013; Le Brocq et al. 2013; Dutrieux et al. 2014a; Wei et al. 2020; Yoon et al. 2022). 그러나, 용빙수 분율 계산법(Jenkins 1999) 또는 OMPA (Biddle et al. 2019)를 통해 계산되는 용빙수 분율 또는 함량에는 두 영향 모두가 포함된 것이다. 빙봉 용융으로 생성된 용빙수와 빙저수문에서 유출된 담수가 빙봉 용융에 미치는 기작은 서로 차이가 있을 것으로 판단되며, 각각이 빙봉 용융에 기여하는 정도를 구분할 수 있다면 이 또한 빙봉 용융 예측 모델 향상에 도움이 될 것이다. 따라서, 쇄빙연구선 관측시 용빙수와 빙저수문 담수를 구분할 수 있는 화학 추적자 관측이 함께 수행되어야 하며, 이를 통해 용빙수 내의 각각의 비율이 계산된다면, 첫번째 과학적 질문과 연계하여 빙저수문에서 유출된 담수가 빙봉 용융에 미치는 영향도 함께 파악할 수 있을 것이다. 해당 연구에서는 빙저수문을 통한 담수 유출 영향을 시공간적으로 파악하기 위해 빙저수문망 모델(예) GlaDS (Glacial Drainage System)도 함께 활용할 필요가 있다.

위에서 제안된 다섯가지 과학적 질문들과 관측 및 연구 전략을 통해 아문젠해 연구가 더욱 효과적으로 수행되길 기대하며, 본 논문을 계기로 국내 젊은 연구자들이 아문젠해에 더 많은 관심을 가지고 연구 경력을 쌓아 미래 아문

젠해 연구를 주도하는 세계적인 해양기후학자가 되기를 바란다.

사 사

이 논문은 한국연구재단(NRF-2022R111A3063629)과 급격한 남극빙상 용융에 따른 근미래 전지구 해수면 상승 예측기술개발(RS-2023-00256677)의 지원을 받아 작성되었습니다.

참고문헌

- Adusumilli S, Fricker HA, Medley B, Padman L, Siegfried MR (2020) Interannual variations in meltwater input to the Southern Ocean from Antarctic ice shelves. *Nat Geosci* **13**(9):616-620. doi:10.1038/s41561-020-0616-z
- Arneborg L, Wählin AK, Björk G, Liljebladh B, Orsi AH (2012) Persistent inflow of warm water onto the central Amundsen shelf. *Nat Geosci* **5**(12):876-880. doi:10.1038/ngeo1644
- Arrigo KR, Lowry KE, van Dijken GL (2012) Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II* **71-76**:5-15. doi:10.1016/j.dsr2.2012.03.006
- Arrigo KR, van Dijken GL (2003) Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *J Geophys Res-Oceans* **108**(C8):27-1-27-18. doi:10.1029/2002JC001739
- Arthern RJ, Williams CR (2017) The sensitivity of West Antarctica to the submarine melting feedback. *Geophys Res Lett* **44**(5):2352-2359. doi:10.1002/2017gl072514
- Assmann KM, Jenkins A, Shoosmith DR, Walker DP, Jacobs SS, Nicholls KW (2013) Variability of Circumpolar Deep Water transport onto the Amundsen Sea Continental shelf through a shelf break trough. *J Geophys Res-Oceans* **118**(12):6603-6620. doi:10.1002/2013jc008871
- Barker PF, Filippelli GM, Florindo F, Martin EE, Scher HD (2007) Onset and role of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res Pt II* **54**(21-22):2388-2398. doi:10.1016/j.dsr2.2007.07.028
- Baumhoer CA, Dietz AJ, Kneisel C, Paeth H, Kuenzer C (2021) Environmental drivers of circum-Antarctic glacier and ice shelf front retreat over the last two decades. *Cryosphere* **15**(5):2357-2381. doi:10.5194/tc-15-2357-2021
- Biddle LC, Heywood KJ, Kaiser J, Jenkins A (2017) Glacial meltwater identification in the Amundsen Sea. *J Phys Oceanogr* **47**(4):933-954. doi:10.1175/jpo-d-16-0221.1
- Biddle LC, Loose B, Heywood KJ (2019) Upper ocean distri-

- bution of glacial meltwater in the Amundsen Sea, Antarctica. *J Geophys Res-Oceans* **124**(10):6854–6870. doi:10.1029/2019jc015133
- Bintanja R, van Oldenborgh GJ, Drijfhout SS, Wouters B, Atman CA (2013) Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion. *Nat Geosci* **6**(5):376–379. doi:10.1038/ngeo1767
- Boehme L, Rosso I (2021) Classifying Oceanographic Structures in the Amundsen Sea, Antarctica. *Geophys Res Lett* **48**(5):1–8. doi:10.1029/2020gl089412
- Bradley AT, Bett DT, Dutrieux P, De Rydt J, Holland PR (2022) The influence of Pine Island Ice Shelf calving on basal melting. *J Geophys Res-Oceans* **127**(9):1–27. doi:10.1029/2022jc018621
- Budillon G, Castagno P, Aliani S, Spezie G, Padman L (2011) Thermohaline variability and Antarctic bottom water formation at the Ross Sea shelf break. *Deep-Sea Res Pt I* **58**(10):1002–1018. doi:10.1016/j.dsr.2011.07.002
- Castagno P, Capozzi V, DiTullio GR, Falco P, Fusco G, Rintoul SR, Spezie G, Budillon G (2019) Rebound of shelf water salinity in the Ross Sea. *Nat Commun* **10**(1):5441. doi:10.1038/s41467-019-13083-8
- Christianson K, Bushuk M, Dutrieux P, Parizek BR, Joughin IR, Alley RB, Shean DE, Abrahamsen EP, Anandkrishnan S, Heywood KJ, Kim TW, Lee SH, Nicholls K, Stanton T, Truffer M, Webber BGM, Jenkins A, Jacobs S, Bindschadler R, Holland DM (2016) Sensitivity of Pine Island Glacier to observed ocean forcing. *Geophys Res Lett* **43**(20):10817–10825. doi:10.1002/2016gl070500
- Davis PED, Jenkins A, Nicholls KW, Brennan PV, Abrahamsen EP, Heywood KJ, Dutrieux P, Cho KH, Kim TW (2018) Variability in basal melting beneath Pine Island Ice Shelf on weekly to monthly timescales. *J Geophys Res-Oceans* **123**(11):8655–8669. doi:10.1029/2018jc014464
- Davis PED, Nicholls KW, Holland DM, Schmidt BE, Washam P, Riverman KL, Arthern RJ, Vankova I, Eayrs C, Smith JA, Anker PGD, Mullen AD, Dichek D, Lawrence JD, Meister MM, Clyne E, Basinski A, Rignot E, Queste BY, Boehme L, Heywood KJ, Anandkrishnan S, Makinson K (2023) Suppressed basal melting in the eastern Thwaites Glacier grounding zone. *Nature* **614**(7948):479–485. doi:10.1038/s41586-022-05586-0
- De Rydt J, Gudmundsson GH (2016) Coupled ice shelf-ocean modeling and complex grounding line retreat from a seabed ridge. *J Geophys Res-Earth Surf* **121**(5):865–880. doi:10.1002/2015jef003791
- De Rydt J, Holland PR, Dutrieux P, Jenkins A (2014) Geometric and oceanographic controls on melting beneath Pine Island Glacier. *J Geophys Res-Oceans* **119**(4):2420–2438. doi:10.1002/2013jc009513
- De Rydt J, Reese R, Paolo FS, Gudmundsson GH (2021) Drivers of Pine Island Glacier speed-up between 1996 and 2016. *Cryosphere* **15**(1):113–132. doi:10.5194/tc-15-113-2021
- Dotto TS, Heywood KJ, Hall RA, Scambos TA, Zheng Y, Nakayama Y, Hyogo S, Snow T, Wählin AK, Wild C, Truffer M, Muto A, Alley KE, Boehme L, Bortolotto GA, Tyler SW, Pettit E (2022) Ocean variability beneath Thwaites Eastern Ice Shelf driven by the Pine Island Bay Gyre strength. *Nat Commun* **13**(1):7840. doi:10.1038/s41467-022-35499-5
- Dotto TS, Naveira Garabato A, Bacon S, Tsamados M, Holland PR, Hooley J, Frajka-Williams E, Ridout A, Meredith MP (2018) Variability of the Ross Gyre, Southern Ocean: drivers and responses revealed by satellite altimetry. *Geophys Res Lett* **45**(12):6195–6204. doi:10.1029/2018gl078607
- Dotto TS, Naveira Garabato AC, Bacon S, Holland PR, Kimura S, Firing YL, Tsamados M, Wählin AK, Jenkins A (2019) Wind-driven processes controlling oceanic heat delivery to the Amundsen Sea, Antarctica. *J Phys Oceanogr* **49**(11):2829–2849. doi:10.1175/jpo-d-19-0064.1
- Dutrieux P, De Rydt J, Jenkins A, Holland PR, Ha HK, Lee SH, Steig EJ, Ding Q, Abrahamsen EP, Schroder M (2014a) Strong sensitivity of Pine Island Ice-Shelf melting to climatic variability. *Science* **343**(6167):174–178. doi:10.1126/science.1244341
- Dutrieux P, Stewart C, Jenkins A, Nicholls KW, Corr HFJ, Rignot E, Steffen K (2014b) Basal terraces on melting ice shelves. *Geophys Res Lett* **41**:5506–5513. doi:10.1002/2014GL060618
- Feldmann J, Levermann A (2015) Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin. *Proc Natl Acad Sci USA* **112**(46):14191–14196. doi:10.1073/pnas.1512482112
- Fretwell P, Pritchard HD, Vaughan DG, Bamber JL, Barrand NE, Bell R, Bianchi C, Bingham RG, Blankenship DD, Casassa G, Catania G, Callens D, Conway H, Cook AJ, Corr HFJ, Damaske D, Damm V, Ferraccioli F, Forsberg R, Fujita S, Gim Y, Gogineni P, Griggs JA, Hindmarsh RCA, Holmlund P, Holt JW, Jacobel RW, Jenkins A, Jokat W, Joran T, King EC, Kohler J, Krabill W, Riger-Kusk M, Langley KA, Leitchenkov G, Leuschen C, Luyendyk BP, Matsuoka MK, Mouginito J, Nitsche FO, Nogi Y, Nost OA, Popov SV, Rignot E, Rippin DM, Rivera A, Roberts J, Ross N, Siegert MJ, Smith AM, Steinhage D, Studinger M, Sun B, Tinto BK, Welch BC, Wilson D, Young DA, Xiangbin C, Zirizzotti A (2013)

- Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *Cryosphere* **7**(1):375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013
- Garabato AC, Forryan A, Dutrieux P, Brannigan L, Biddle LC, Heywood KJ, Jenkins A, Firing YL, Kimura S (2017) Vigorous lateral export of the meltwater outflow from beneath an Antarctic ice shelf. *Nature* **542**(7640):219–222. doi:10.1038/nature20825
- Goldberg DN, Smith TA, Narayanan SHK, Heimbach P, Morlighem M (2020) Bathymetric influences on Antarctic Ice-Shelf melt rates. *J Geophys Res-Oceans* **125**(11):e2020JC016370. doi:10.1029/2020jc016370
- Gómez-Valdivia F, Holland PR, Siahann A, Dutrieux P, Young E (2023) Projected West Antarctic Ocean Warming caused by an Expansion of the Ross Gyre. *Geophys Res Lett* **50**(6):e2023GL102978. doi:10.1029/2023gl102978
- Greene CA, Gardner AS, Schlegel NJ, Fraser AD (2022) Antarctic calving loss rivals ice-shelf thinning. *Nature* **609**(7929):948–953. doi:10.1038/s41586-022-05037-w
- Gudmundsson GH (2013) Ice-shelf buttressing and the stability of marine ice sheets. *Cryosphere* **7**(2):647–655. doi:10.5194/tc-7-647-2013
- Ha HK, Wählin AK, Kim TW, Lee SH, Lee JH, Lee HJ, Hong CS, Arneborg L, Björk G, Kalén O (2014) Circulation and modification of warm deep water on the central Amundsen Shelf. *J Phys Oceanogr* **44**(5):1493–1501. doi:10.1175/jpo-d-13-0240.1
- Heimbach P, Losch M (2012) Adjoint sensitivities of sub-ice-shelf melt rates to ocean circulation under the Pine Island Ice Shelf, West Antarctica. *Ann of Glaciol* **53**(60):59–69. doi:10.3189/2012/AoG60A025
- Hellmer HH, Kauker F, Timmermann R, Determann J, Rae J (2012) Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. *Nature* **485**(7397):225–228. doi:10.1038/nature11064
- Hellmer HH, Kauker F, Timmermann R, Hattermann T (2017) The fate of the Southern Weddell Sea Continental Shelf in a warming climate. *J Clim* **30**(12):4337–4350. doi:10.1175/jcli-d-16-0420.1
- Heywood K, Biddle L, Boehme L, Dutrieux P, Fedak M, Jenkins A, Jones RW, Kaiser J, Mallett H, Garabato AC, Renfrew IA, Stevens DP, Webber BGM (2016) Between the devil and the deep blue sea: the role of the Amundsen Sea Continental Shelf in exchanges between ocean and ice shelves. *Oceanogr* **29**(4):118–129. doi:10.5670/oceanog.2016.104
- Hogan KA, Larter RD, Graham AGC, Arthern R, Kirkham JD, Totten RL, Jordan TA, Clark R, Fitzgerald V, Wählin AK, Anderson JB, Hillenbrand CD, Nitsche FO, Simkins L, Smith JA, Gohl K, Arndt JE, Hong J, Wellner J (2020) Revealing the former bed of Thwaites Glacier using sea-floor bathymetry: implications for warm-water routing and bed controls on ice flow and buttressing. *Cryosphere* **14**(9):2883–2908. doi:10.5194/tc-14-2883-2020
- Holland DM, Nicholls KW, Basinski A (2020) The Southern Ocean and its interaction with the Antarctic Ice Sheet. *Science* **367**(6484):1326–1330. doi:10.1126/science.aaz5491
- Holland PR, Bracegirdle TJ, Dutrieux P, Jenkins A, Steig EJ (2019) West Antarctic ice loss influenced by internal climate variability and anthropogenic forcing. *Nat Geosci* **12**(9):718–724. doi:10.1038/s41561-019-0420-9
- IPCC (2019) Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. <http://www.ipcc.ch/srocc/> Accessed 22 May 2023
- IPCC (2023) Sixth Assessment Report (AR6) synthesis report: climate change 2023. <http://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> Accessed 22 May 2023
- Jacobs S, Giulivi C, Dutrieux P, Rignot E, Nitsche F, Mouginot J (2013) Getz Ice Shelf melting response to changes in ocean forcing. *J Geophys Res-Oceans* **118**(9):4152–4168. doi:10.1002/jgrc.20298
- Jacobs S, Jenkins A, Hellmer H, Giulivi C, Nitsche F, Huber B, Guerrero R (2012) The Amundsen Sea and the Antarctic Ice sheet. *Oceanogr* **25**(3):154–163. doi:10.5670/oceanog.2012.90
- Jacobs SS, Giulivi CF (2010) Large multidecadal salinity trends near the Pacific–Antarctic Continental Margin. *J Clim* **23**(17):4508–4524. doi:10.1175/2010jcli3284.1
- Jacobs SS, Giulivi CF, Mele PA (2002) Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science* **297**(5580):386–389. doi:10.1126/science.1069574
- Jacobs SS, Hellmer HH, Doake CSM, Jenkins A, Frolich RM (1992) Melting of ice shelves and the mass balance of Antarctica. *J Glaciol* **38**(130):375–387. doi:10.3189/s0022143000002252
- Jacobs SS, Jenkins A, Giulivi CF, Dutrieux P (2011) Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier Ice Shelf. *Nat Geosci* **4**(8):519–523. doi:10.1038/ngeo1188
- Jenkins A (1999) The impact of melting ice on ocean waters. *J Phys Oceanogr* **29**(9):2370–2381. doi:10.1175/1520-0485(1999)029<2370:Tiomio>2.0.Co;2
- Jenkins A, Dutrieux P, Jacobs S, Steig EJ, Gudmundsson GH, Smith J, Heywood KJ (2016) Decadal ocean forcing and Antarctic ice sheet response: lessons from the Amundsen Sea. *Oceanogr* **29**(4):106–117. doi:10.5670/oceanog.2016.103
- Jenkins A, Shoosmith D, Dutrieux P, Jacobs S, Kim TW, Lee SH, Ha HK, Stammerjohn S (2018) West Antarctic ice

- sheet retreat in the Amundsen Sea driven by decadal oceanic variability. *Nat Geosci* **11**(10):733–738. doi:10.1038/s41561-018-0207-4
- Jeong S, Howat IM, Bassis JN (2016) Accelerated ice shelf rifting and retreat at Pine Island Glacier, West Antarctica. *Geophys Res Lett* **43**(22). doi:10.1002/2016gl071360
- Joughin I, Alley RB (2011) Stability of the West Antarctic ice sheet in a warming world. *Nat Geosci* **4**(8):506–513. doi:10.1038/ngeo1194
- Joughin I, Smith BE, Medley B (2014) Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. *Science* **344**(6185):735–738. doi:10.1126/science.1249055
- Jourdain NC, Mathiot P, Merino N, Durand G, Le Sommer J, Spence P, Dutrieux P, Madec G (2017) Ocean circulation and sea-ice thinning induced by melting ice shelves in the Amundsen Sea. *J Geophys Res-Oceans* **122**:2250–2573. doi:10.1002/2016JC012509
- Jourdain NC, Molines J-M, Le Sommer J, Mathiot P, Chanut J, Lavergne C, Madec G (2019) Simulating or prescribing the influence of tides on the Amundsen Sea ice shelves. *Ocean Model* **133**:44–55. doi:10.1016/j.ocemod.2018.11.001
- Jun SY, Kim JH, Choi J, Kim SJ, Kim BM, An SI (2020) The internal origin of the west-east asymmetry of Antarctic climate change. *Sci Adv* **6**(24):eaaz1490. doi:10.1126/sciadv.aaz1490
- Kalén O, Assmann KM, Wählin AK, Ha HK, Kim TW, Lee SH (2016) Is the oceanic heat flux on the central Amundsen sea shelf caused by barotropic or baroclinic currents? *Deep-Sea Res Pt II* **123**:7–15. doi:10.1016/j.dsr2.2015.07.014
- Kim C-S, Kim T-W, Cho K-H, Ha HK, Lee SH, Kim HC, Lee JH (2016) Variability of the Antarctic coastal current in the Amundsen Sea. *Estuar Coast Shelf Sci* **181**:123–133. doi:10.1016/j.ecss.2016.08.004
- Kimura S, Jenkins A, Regan H, Holland PR, Assmann KM, Whitt DB, Van Wesseem M, Jan van de Berg W, Reijmer CH, Dutrieux P (2017) Oceanographic controls on the variability of ice-shelf basal melting and circulation of glacial meltwater in the Amundsen Sea Embayment, Antarctica. *J Geophys Res-Oceans* **122**(12):10131–10155. doi:10.1002/2017jc012926
- Klinck JM (1998) Heat and salt changes on the continental shelf west of the Antarctic Peninsula between January 1993 and January 1994. *J Geophys Res-Oceans* **103**(C4):7617–7636. doi:10.1029/98jc00369
- Le Brocq AM, Ross N, Griggs JA, Bingham RG, Corr HFJ, Ferraccioli F, Jenkins A, Jordan TA, Payne AJ, Rippin DM, Siegert MJ (2013) Evidence from ice shelves for channelized meltwater flow beneath the Antarctic Ice Sheet. *Nat Geosci* **6**(11):945–948. doi:10.1038/ngeo1977
- Macdonald GJ, Ackley SF, Mestas-Nuñez AM, Blanco-Cabanillas A (2023) Evolution of the dynamics, area, and ice production of the Amundsen Sea Polynya, Antarctica, 2016–2021. *Cryosphere* **17**(2):457–476. doi:10.5194/tc-17-457-2023
- Mallett HKW, Boehme L, Fedak M, Heywood KJ, Stevens DP, Roquet F (2018) Variation in the distribution and properties of circumpolar deep water in the Eastern Amundsen Sea, on seasonal timescales, using seal-borne tags. *Geophys Res Lett* **45**(10):4982–4990. doi:10.1029/2018gl077430
- Malyarenko A, Robinson NJ, Williams MJM, Langhorne PJ (2019) A wedge mechanism for summer surface water inflow into the Ross Ice Shelf Cavity. *J Geophys Res-Oceans* **124**(2):1196–1214. doi:10.1029/2018jc014594
- Miles T, Lee SH, Wählin A, Ha HK, Kim TW, Assmann KM, Schofield O (2016) Glider observations of the Dotson Ice Shelf outflow. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:16–29. doi:10.1016/j.dsr2.2015.08.008
- Milillo P, Rignot E, Rizzoli P, Scheuchl B, Mouginot J, Bello J, Iraola P (2019) Heterogeneous retreat and ice melt of Thwaites Glacier, West Antarctica. *Sci Adv* **5**(1):eaau3433. doi:10.1126/sciadv.aau3433
- Morlighem M, Rignot E, Binder T, Blankenship D, Drews R, Eagles G, Eisen O, Ferraccioli F, Forsberg R, Fretwell P, Goel V, Greenbaum JS, Gudmundsson H, Guo J, Helm V, Hofstede C, Howat I, Humbert A, Jokat W, Karlsson NB, Lee WS, Matsuoka K, Millan R, Mouginot J, Paden J, Pattyn F, Roberts J, Rosier S, Ruppel A, Seroussi H, Simth EC, Steinhage D, Sun B, van den Broeke MR, van Ommen TD, van Wesseem M, Young DA (2020) Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet. *Nat Geosci* **13**(2):132–137. doi:10.1038/s41561-019-0510-8
- Nakayama Y, Manucharyan G, Zhang H, Dutrieux P, Torres HS, Klein P, Seroussi H, Schodlok M, Rignot E, Menemenlis D (2019) Pathways of ocean heat towards Pine Island and Thwaites grounding lines. *Sci Rep* **9**(1):16649. doi:10.1038/s41598-019-53190-6
- Nakayama Y, Menemenlis D, Schodlok M, Rignot E (2017) Amundsen and Bellingshausen Seas simulation with optimized ocean, sea ice, and thermodynamic ice shelf model parameters. *J Geophys Res-Oceans* **122**(8):6180–6195. doi:10.1002/2016jc012538
- Nakayama Y, Menemenlis D, Zhang H, Schodlok M, Rignot E (2018) Origin of Circumpolar Deep Water intruding onto the Amundsen and Bellingshausen Sea continental shelves. *Nat Commun* **9**(1):3403. doi:10.1038/s41467-018-05813-1

- Nakayama Y, Timmermann R, Hellmer H (2020) Impact of West Antarctic ice shelf melting on Southern Ocean hydrography. *Cryosphere* **14**(7):2205–2216. doi:10.5194/tc-14-2205-2020
- Nakayama Y, Timmermann R, Schröder M, Hellmer HH (2014) On the difficulty of modeling Circumpolar Deep Water intrusions onto the Amundsen Sea continental shelf. *Ocean Model* **84**:26–34. doi:10.1016/j.ocemod.2014.09.007
- Oh JH, Park W, Lim HG, Noh KM, Jin EK, Kug JS (2020) Impact of Antarctic meltwater forcing on East Asian Climate under greenhouse warming. *Geophys Res Lett* **47**(21). doi:10.1029/2020gl089951
- Orsi AH, Whitworth T, Nowlin WD (1995) On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res Pt I* **42**(5):641–673. doi:10.1016/0967-0637(95)00021-W
- Orsi AH, Wiederwohl CL (2009) A recount of Ross Sea waters. *Deep-Sea Res Pt II* **56**(13–14):778–795. doi:10.1016/j.dsr2.2008.10.033
- Paolo FS, Fricker HA, Padman L (2015) Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science* **348**(6232):327–331. doi:10.1126/science.aaa0940
- Planquette H, Sherrell RM, Stammerjohn S, Field MP (2013) Particulate iron delivery to the water column of the Amundsen Sea, Antarctica. *Mar Chem* **153**:15–30. doi:10.1016/j.marchem.2013.04.006
- Pritchard HD, Ligtenberg SR, Fricker HA, Vaughan DG, van den Broeke MR, Padman L (2012) Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature* **484**(7395):502–505. doi:10.1038/nature10968
- Purkey SG, Johnson GC (2013) Antarctic bottom water warming and freshening: contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets, and global heat gain. *J Clim* **26**(16):6105–6122. doi:10.1175/jcli-d-12-00834.1
- Reese R, Gudmundsson GH, Levermann A, Winkelmann R (2018) The far reach of ice-shelf thinning in Antarctica. *Nat Clim Change* **8**(1):53–57. doi:10.1038/s41558-017-0020-x
- Rignot E, Bamber JL, van den Broeke MR, Davis C, Li Y, Jan van de Berg W, Van Meijgaard E (2008) Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nat Geosci* **1**(2):106–110. doi:10.1038/ngeo102
- Rignot E, Jacobs S, Mouginot J, Scheuchl B (2013) Ice-shelf melting around Antarctica. *Science* **341**(6143):266–270. doi:10.1126/science.1235798
- Rignot E, Mouginot J, Morlighem M, Seroussi H, Scheuchl B (2014) Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophys Res Lett* **41**(10):3502–3509. doi:10.1002/2014gl060140
- Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B, van den Broeke M, van Wessem MJ, Morlighem M (2019) Four decades of Antarctic ice sheet mass balance from 1979–2017. *Proc Natl Acad Sci USA* **116**(4):1095–1103. doi:10.1073/pnas.1812883116
- Robinson NJ, Williams MJM, Stevens CL, Langhorne PJ, Haskell TG (2014) Evolution of a supercooled ice shelf water plume with an actively growing subice platelet matrix. *J Geophys Res-Oceans* **119**(6):3425–3446. doi:10.1002/2013jc009399
- Scambos TA, Bell RE, Alley RB, Anandakrishnan S, Bromwich DH, Brunt K, Christians K, Creyts T, Das SB, DeConto R, Dutrieux P, Fricker HA, Holland D, MacGregor J, Medley B, Nicolas JP, Pollard D, Siegfried MR, Smith AM, Steig EJ, Trusel LD, Vaughan DG, Yager PL (2017) How much, how fast?: a science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites Glacier in the 21st century. *Glob Planet Change* **153**:16–34. doi:10.1016/j.gloplacha.2017.04.008
- Schmidt BE, Washam P, Davis PED, Nicholls KW, Holland DM, Lawrence JD, Riverman KL, Simth JA, Spears A, Dichek DJG, Mullen AD, Clyne E, Yeager B, Anker P, Meister MR, Hurwitz BC, Quartini ES, Bryson FE, Basinski A, Thomas C, Wake J, Vaughan DG, Anandakrishnan S, Rignot E, Paden J, Makinson K (2023) Heterogeneous melting near the Thwaites Glacier grounding line. *Nature* **614**(7948):471–478. doi:10.1038/s41586-022-05691-0
- Schmidtko S, Heywood KJ, Thompson AF, Aoki S (2014) Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science* **346**(6214):1227–1231. doi:10.1126/science.1256117
- Schodlok MP, Menemenlis D, Rignot E, Studinger M (2017) Sensitivity of the ice-shelf/ocean system to the sub-ice-shelf cavity shape measured by NASA IceBridge in Pine Island Glacier, West Antarctica. *Ann Glaciol* **53**(60):156–162. doi:10.3189/2012AoG60A073
- Schroeder DM, Blankenship DD, Young DA (2013) Evidence for a water system transition beneath Thwaites Glacier, West Antarctica. *Proc Natl Acad Sci USA* **110**(30):12225–12228. doi:10.1073/pnas.1302828110
- Shepherd A, Ivins ER, Geruo A, Barletta VR, Bentley MJ, Bettadpur S, Briggs KH, Bromwich DH, Forsberg R, Galin N, Horwath M, Jacobs S, Joughin I, King MA, Lenaerts JTM, Li J, Ligtenberg SRM, Luckman A, Luthcke SB, McMillan M, Meister R, Milne G, Mouginot J, Muir A, Nicolas JP, Paden J, Payne AJ, Pritchard H, Rignot E, Rott H, Sørensen LS, Scambos TA, Scheuchl B, Schrama EJO, Smith B, Sundal AV, van Angelen JH,

- can de Berg WJ, van den Broeke MR, Vaughan DG, Velicogna I, Wahr J, Whitehouse PL, Wingham DJ, Yi D, Young D, Zwally HJ (2012) A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science* **338**(6114):1539–1539
- Silvano A, Foppert A, Rintoul SR, Holland PR, Tamura T, Kimura N, Castagno P, Falco P, Budillon G, Haumann FA, Garabato A, Macdonald AM (2020) Recent recovery of Antarctic Bottom Water formation in the Ross Sea driven by climate anomalies. *Nat Geosci* **13**(12):780–786. doi:10.1038/s41561-020-00655-3
- Silvano A, Rintoul SR, Pena-Molino B, Hobbs, WR, van Wijk E, Aoki S, Tamura T, Williams GD (2018) Freshening by glacial meltwater enhances melting of ice shelves and reduces formation of Antarctic Bottom Water. *Sci Adv* **4**(4). doi:10.1126/sciadv.aap9467
- Smith B, Fricker HA, Gardner AS, Medley B, Nilsson J, Paolo FS, Holschuh N, Adusumilli S, Brunt K, Castho B, Harbeck K, Markus T, Neumann T, Siegfried MR, Zwally HJ (2020) Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes. *Science* **368**(6496):1239–1242. doi:10.1126/science.aaz5845
- St-Laurent P, Klinck JM, Dinniman MS (2013) On the role of coastal troughs in the circulation of warm circumpolar deep water on Antarctic shelves. *J Phys Oceanogr* **43**:51–64. doi:10.1175/JPO-D-11-0237.1
- St-Laurent P, Klinck JM, Dinniman MS (2015) Impact of local winter cooling on the melt of Pine Island Glacier, Antarctica. *J Geophys Res-Oceans* **120**(10):6718–6732. doi:10.1002/2015jc010709
- Talley LD, Pickard GL, Emery WJ, Swift JH (2011) *Descriptive physical oceanography*. Elsevier, London, 543 p
- Thoma M, Jenkins A, Holland D, Jacobs S (2008) Modelling Circumpolar Deep Water intrusions on the Amundsen Sea Continental Shelf, Antarctica. *Geophys Res Lett* **35**(18): L18602. doi:10.1029/2008gl034939
- Thomas G, Purkey SG, Roemmich D, Foppert A, Rintoul SR (2020) Spatial variability of Antarctic Bottom Water in the Australian Antarctic Basin from 2018–2020 captured by deep Argo. *Geophys Res Lett* **47**(23):L089467. doi:10.1029/2020gl089467
- Thurnherr AM, Jacobs SS, Dutrieux P, Giulivi CF (2014) Export and circulation of ice cavity water in Pine Island Bay, West Antarctica. *J Geophys Res-Oceans* **119**(3): 1754–1764. doi:10.1002/2013jc009307
- Wählin AK, Graham AGC, Hogan KA, Queste BY, Boehme L, Larter RD, Pettit EC, Wellner J, Heywood KJ (2021) Pathways and modification of warm water flowing beneath Thwaites Ice Shelf, West Antarctica. *Sci Adv* **7**(15). doi:10.1126/sciadv.abd7254
- Wählin AK, Kalén O, Arneborg L, Björk G, Carvajal GK, Ha HK, Kim TW, Lee SH, Lee JH, Stranne C (2013) Variability of warm deep water inflow in a submarine trough on the Amundsen Sea shelf. *J Phys Oceanogr* **43**(10):2054–2070. doi:10.1175/jpo-d-12-0157.1
- Wählin AK, Muench RD, Arneborg L, Björk G, Ha HK, Lee SH, Alsén H (2012) Some implications of Ekman layer dynamics for cross-shelf exchange in the Amundsen Sea. *J Phys Oceanogr* **42**(9):1461–1474. doi:10.1175/jpo-d-11-041.1
- Wählin AK, Steiger N, Darelus E, Assmann KM, Glessmer MS, Ha HK, Borreguero L, Heuzé C, Jenkins A, Mazur AK, Sommeria J, Viboud S (2020) Ice front blocking of ocean heat transport to an Antarctic ice shelf. *Nature* **578**(7796):568–571. doi:10.1038/s41586-020-2014-5
- Wählin AK, Yuan X, Björk G, Nohr C (2010) Inflow of warm Circumpolar Deep Water in the central Amundsen shelf. *J Phys Oceanogr* **40**(6):1427–1434. doi:10.1175/2010jpo4431.1
- Walker DP, Brandon MA, Jenkins A, Allen JT, Dowdeswell JA, Evans J (2007) Oceanic heat transport onto the Amundsen Sea shelf through a submarine glacial trough. *Geophys Res Lett* **34**(2). doi:10.1029/2006gl028154
- Walker DP, Jenkins A, Assmann KM, Shoosmith DR, Brandon MA (2013) Oceanographic observations at the shelf break of the Amundsen Sea, Antarctica. *J Geophys Res-Ocean* **118**(6):2906–2918. doi:10.1002/jgrc.20212
- Webber BG, Heywood KJ, Stevens DP, Dutrieux P, Abrahamsen EP, Jenkins A, Jacobs SS, Ha HK, Lee SH, Kim TW (2017) Mechanisms driving variability in the ocean forcing of Pine Island Glacier. *Nat Commun* **8**:14507. doi:10.1038/ncomms14507
- Webber BGM, Heywood KJ, Stevens DP, Assmann KM (2019) The impact of overturning and horizontal circulation in Pine Island trough on ice shelf melt in the Eastern Amundsen Sea. *J Phys Oceanogr* **49**(1):63–83. doi:10.1175/jpo-d-17-0213.1
- Wei W, Blankenship DD, Greenbaum JS, Gourmelen N, Dow CF, Richter TG, Greene CA, Young DA, Lee SH, Kim TW, Lee WS, Assmann KM (2020) Getz Ice Shelf melt enhanced by freshwater discharge from beneath the West Antarctic Ice Sheet. *Cryosphere* **14**(4):1399–1408. doi:10.5194/tc-14-1399-2020
- Whitworth T III, Orsi AH, Kim SJ, Nowlin Jr WD (1998) Water masses and mixing near the Antarctic slope front, in ocean, ice and atmosphere: interactions at the Antarctic continental margin, American Geophysical Union, Washington DC, 27 p
- Yang HW, Kim TW, Dutrieux P, Wählin AK, Jenkins A, Ha

- HK, Kim CS, Cho KH, Park T, Lee SH, Cho YK (2022) Seasonal variability of ocean circulation near the Dotson Ice Shelf, Antarctica. *Nat Commun* **13**(1):1138. doi:10.1038/s41467-022-28751-5
- Yoon ST, Lee WS, Nam S, Lee CK, Yun S, Heywood K, Boehme L, Zheng Y, Lee I, Choi Y, Jenkins A, Jin EK, Larter R, Wellner J, Dutrieux P, Bradley AT (2022) Ice front retreat reconfigures meltwater-driven gyres modulating ocean heat delivery to an Antarctic ice shelf. *Nat Commun* **13**(1):306. doi:10.1038/s41467-022-27968-8
- Yoon S-T, Lee WS, Stevens C, Jendersie S, Nam SH, Yun S, Hwang CY, Jang GI, Lee J (2020) Variability in high-salinity shelf water production in the Terra Nova Bay Polynya, Antarctica. *Ocean Sci* **16**(2):373–388. doi:10.5194/os-16-373-2020
- Yu H, Rignot E, Seroussi H, Morlighem M, Choi Y (2019) Impact of iceberg calving on the retreat of Thwaites Glacier, West Antarctica over the next century with different calving laws and ocean thermal forcing. *Geophys Res Lett* **46**(24):14539–14547. doi:10.1029/2019gl084066
- Zheng Y, Heywood KJ, Webber BGM, Stevens DP, Biddle LC, Boehme L, Loose B (2021) Winter seal-based observations reveal glacial meltwater surfacing in the South-eastern Amundsen Sea. *Commun Earth Environ* **2**(1):40. doi:10.1038/s43247-021-00111-z
- Zheng Y, Stevens DP, Heywood KJ, Webber BGM, Queste BY (2022) Reversal of ocean gyres near ice shelves in the Amundsen Sea caused by the interaction of sea ice and wind. *Cryosphere* **16**(7):3005–3019. doi:10.5194/tc-16-3005-2022

Author's Information

Seung-Tae Yoon

Assistant Professor, Kyungpook National University

Received May. 23, 2023

Revised Jul. 4, 2023

Accepted Jul. 9, 2023

Copyright © 2023 Ocean and Polar Research

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.