

Review

해양포유류 부착 CTD 관측 자료의 품질 관리 방법에 관한 고찰 및 사례 연구

윤승태^{1*} · 이원영²

¹경북대학교 자연과학대학 지구시스템과학부
(41566) 대구광역시 북구 대학로 80

²한국해양과학기술원부설 극지연구소 생명과학연구부
(21990) 인천광역시 연수구 송도미래로 26

Quality Control Methods for CTD Data Collected by Using Instrumented Marine Mammals: A Review and Case Study

Seung-Tae Yoon^{1*} and Won Young Lee²

¹*School of Earth System Sciences, College of Natural Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea*

²*Division of Life Sciences, Korea Polar Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Incheon 21990, Korea*

Abstract : ‘Marine mammals-based observations’ refers to data acquisition activities from marine mammals by instrumenting CTD (Conductivity-Temperature-Depth) sensors on them for recording vertical profiles of ocean variables such as temperature and salinity during animal diving. It is a novel data collecting platform that significantly improves our abilities in observing extreme environments such as the Southern Ocean with low cost compared to the other conventional methods. Furthermore, the system continues to create valuable information until sensors are detached, expanding data coverage in both space and time. Owing to these practical advantages, the marine mammals-based observations become popular to investigate ocean circulation changes in the Southern Ocean. Although these merits may bring us more opportunities to understand ocean changes, the data should be carefully qualified before we interpret it incorporating shipboard/autonomous vehicles/moored CTD data. In particular, we need to pay more attention to salinity correction due to the usage of an unpumped-CTD sensor tagged on marine mammals. In this article, we introduce quality control methods for the marine mammals-based CTD profiles that have been developed in recent studies. In addition, we discuss strategies of quality control specifically for the seal-tagging CTD profiles, successfully having been obtained near Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica since February 2021. It is the Korea Polar Research Institute’s research initiative of animal-borne instruments monitoring in the region. We anticipate that this initiative would facilitate collaborative efforts among Polar physical oceanographers and even marine mammal behavior researchers to understand better rapid changes in marine environments in the warming world.

Key words : instrumented marine mammals, CTD data quality control, temperature, salinity, southern ocean

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

1. 서 론

해양 및 빙권은 지구의 주요 기후 조절자로 기후변화에 매우 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있으며, 최근 급격해진 기후변화의 영향으로 ‘빙하 및 빙상의 용빙’, ‘해양의 온난화 및 탈산소화’, ‘해수면 상승’등을 경험하고 있다(IPCC 2021). 이와 같은 현상들은 지구 환경과 인류를 위협하고 있고, 해양 및 빙권 변화에 따른 피해는 앞으로 더욱 가속화될 것으로 예상된다(IPCC 2021). 따라서 현재와 미래 기후변화 위협에 시의적절한 대응을 위해서는 해양 및 빙권을 지속적으로 모니터링하고 이들의 변동 원인을 이해하는 것이 무엇보다 중요하다.

과거에는 관측용 선박과 해양 계류선 등 전통적인 해양 관측 방식을 주로 활용하여 해양 및 빙권 모니터링을 수행하였다. 그러나 최근 로봇공학(robotics) 및 인공지능(artificial intelligence)과 같은 과학기술의 눈부신 발전으로 무인잠수정(autonomous underwater vehicle), 수중글라이더(ocean glider), 무인항공기(unmanned aerial vehicle) 등이 등장하여 해양 및 빙권 모니터링에 적극 활용되고 있다(Biddle et al. 2015; Carvalho et al. 2016; Wählin et al. 2021). 특히, 무인 관측장비 활용으로 전통적 해양 관측 방식으로는 접근이 어려웠던 극한 해양 환경(예, 극지 해양, 해빙이 많은 해역, 빙봉 하부 등) 관측이 가능해져 그동안 이해가 부족했던 해양-빙권 상호작용 연구가 활발히 진행되고 있다(Biddle et al. 2015; Carvalho et al. 2016; Wählin et al. 2021). 그러나 무인 해양관측 방식은 전통적인 방식에 비해 고가의 장비 확보, 장비 운용 전문 인력 및 탐사활동 전반의 중앙제어를 위한 관측 선박 등이 필요하여 진입장벽이 높다는 어려움이 있다.

최근에는 기존 무인 관측장비 활용의 단점을 일부 보완할 수 있는 해양포유류(기각상과, *Pinnipeds*)를 활용한 해양관측 방법이 새롭게 제안되었다(Fedak et al. 2002; Boehme et al. 2009). 도입 시기에는 해양포유류의 생태 자체를 연구하기 위하여 해당 방법을 활용했으나, 해양포유류가 최대 2,000 m 이상의 수심까지도 다이빙을 한다는 특징(남방코끼리물범(Southern Elephant seal, *Mirounga leonina*)의 경우 최대 2,149 m; McIntyre et al. 2010)에 착안하여 보다 폭넓은 해양 환경 관측에도 활용하기 시작하였다. 관측은 해양포유류 머리에 위치, 압력, 수온, 염분 등을 측정할 수 있는 소형의 장비를 부착(tagging)하여 수직 프로파일을 얻고 해양포유류가 호흡을 위해 표층에 올라왔을 때 아르고스(Argos) 위성을 통해 획득 자료를 전송하는 방식으로 이루어진다(Boehme et al. 2009). 무인 장비 활용 해양 관측과는 달리, 상대적으로 저렴한 장비의

단 한 번 부착만으로 포유류가 활동하는 해양 환경을 약 7개월 동안 준 실시간으로 관측할 수 있다는 큰 장점이 있어 극지 순환의 계절변화 연구, 해양-빙봉 상호작용 연구(Zhou et al. 2014; Williams et al. 2016; Piñones et al. 2019; Boehme and Rosso 2020; Zheng et al. 2021) 등에 효과적으로 활용되고 있다.

그러나 부착 장비의 무게가 해양포유류의 활동에 제한을 주지 않을 정도로 가벼워야 하기 때문에, 해양포유류 활용 해양 관측 방식은 펌프 없이 CTD (Conductivity-Temperature-Depth)만을 부착하여 수온 염분 자료를 획득하는 방식으로 고안되었다. 펌프가 없을 경우에는 CTD의 수온, 염분 센서가 부착 포유류의 수직 이동에 따른 해수 성질 변화에 빠르게 반응하지 못하기 때문에(예, 열 관성 효과), 수온 및 염분 변화가 큰 수심 구간(예, 수온약층)의 자료는 관측 오차를 많이 포함할 수 있다. 또한, 다른 전도성 혹은 절연 특성을 지닌 포유류에 전기전도도 센서를 부착하는 것이므로 염분 자료에 대한 더욱 정밀한 품질 관리가 요구된다. 이러한 이유로 해양포유류 활용 관측 자료는 선박 관측 CTD (펌프가 있는 경우)와는 다른 품질 관리 과정이 적용되며, 자료 획득 간격 및 해역, 부착에 이용하는 포유류종 등에 따라라도 자료 품질 관리 방식이 다르게 적용된다(Roquet et al. 2011, 2014; Siegelman et al. 2019b).

그동안 국내에서는 해양포유류를 활용한 센서 부착 연구가 매우 드물게 수행되었다. 사육 시설에 있는 물범의 꼬리 부위에 압력 센서를 부착하여 단기간의 움직임을 기록한 사례가 있고(Kim et al. 2021), 러시아와 국내 연구진이 협력 연구를 통하여 동해 표트르 대제만(Peter the Great Bay)에 서식하는 점박이물범(Spotted seal, *Phoca largha*)에 아르고스 장비를 부착하여 이동 경로를 관측한 사례(Trukhin et al. 2021) 등이 있다. 문헌 조사에 따르면, 본 연구진이 2021년 2월 남극 장보고과학기지 부근에서 웨델물범(Weddell seal, *Leptonychotes weddellii*) CTD 부착에 성공한 것이 해양포유류에 센서를 부착하여 행동과 해양 환경을 동시에 관측한 국내의 첫 사례로 파악되고 있다. 이처럼 해양포유류 활용 해양 관측의 높은 효율성에도 불구하고 국내에서는 이에 대한 관심도가 여전히 낮지만, 잠재 가능성을 고려할 때 향후 더 많은 활용이 기대된다. 이에 본 연구에서는 해양포유류 부착 관측 자료의 특징과 국외 관측 사례, 그리고 최근 연구에서 제안된 품질 관리 방법들을 소개하고자 한다. 더불어 2021년 2월부터 국내 최초로 얻어진 웨델물범 부착 CTD 자료의 관측 정보에 관해 요약하고 기존의 품질 관리 방법들을 기초로 자료 품질 관리 전략에 관해서도 제안하고자 한다.

2. 해양포유류 부착 자료의 획득

해양포유류 활용 관측

해양포유류를 활용한 해양 관측을 위해선 현장에서 동물을 안정적으로 포획하고 장비를 부착하는 작업이 선행되어야 한다. 포획에 그물을 사용하는 경우 해양포유류에 큰 스트레스를 줄 수 있고 인간에게도 위험하기 때문에 일반적으로는 블로우건(blowgun) 등을 활용하여 해양포유류를 마취하여 포획하는 방법을 사용한다(해양포유류 관측 네트워크 MEOP (Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole, <http://www.meop.net/>). 안정적인 마취가 이뤄지면 순간 접착 에폭시(epoxy) 및 순간접착제를 사용하여 해양 관측 장비를 포유류에 부착하는데, 동물이 호흡을 위해 표층에 머무르는 동안 자료 송신 가능 시간을 증가시키기 위하여 정수리 부위 혹은 목과 등이 연결되는 부위에 부착한다. 가장 널리 쓰이는 장비는 영국의 세인트 앤드류스 대학(Saint Andrews University)의 SMRU (National Environment Research Council Sea Mammal Research Unit)에서 제작한 CTD-SRDL (Satellite Relay Data Loggers)이다(SMRU; <http://www.smrु.st-andrews.ac.uk/>).

CTD-SRDL 장비는 대기에서 무게가 약 0.5 kg로 매우 가볍고 크기가 11(가로)*7(세로)*4(높이) cm로 매우 작아 물범에 부착하기에 적합한 장비이다(Fig. 1 참고). CTD-SRDL 장비에는 압력, 수온, 전기전도도를 측정할 수 있는 Valeport Limited (Devon, UK) 업체의 CTD 센서 이외에, 아르고스 위성과의 통신을 위한 안테나, 해양의 표층을 감지할 수 있는 해수용 습도 스위치(wet/dry saltwater switch),

내부 저장 메모리 등이 부착 또는 포함되어 있다(<http://www.smrु.st-andrews.ac.uk/>). 해당 장비는 D형 건전지 한 개 배터리만으로 운용 가능하다(Fig. 1). CTD-SRDL 장비에 부착되어 있는 CTD 센서의 샘플링 간격은 1Hz로 설정되어 있다(초당 1번 관측; <http://www.smrु.st-andrews.ac.uk/>). Cochran (1980) 연구 결과에서는, 포유류에 물체를 부착하는 경우 해양포유류의 먹이 활동에 영향을 주지 않기 위해서, 부착 물체 무게가 포유류 몸무게의 2% 이내여야 함을 권장하고 있다. 이러한 이유로 해양포유류 움직임에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 최소 25 kg (2%가 0.5 kg에 해당) 이상 무게의 해양포유류에게 CTD-SRDL을 부착해야 한다(Boehme et al. 2009). 참고로, 본 논문에서 주로 언급하는 웨델물범의 경우는 평균 무게가 400 kg이 넘는 것으로 알려져 있다(Proffitt et al. 2007).

CTD-SRDL에서 기록된 수직 프로파일 자료는 보통 6시간에 한 번씩 아르고스 위성과의 통신을 통해 전송하도록 설정되어 있는데, 이 때 전송되는 프로파일은 6시간 동안 부착 포유류의 상승 운동을 통해 기록된 수직 프로파일들 중 가장 깊은 수심에서 기록된 것에 해당한다. SMRU에서 제공하는 CTD-SRDL 설정법에 따르면, 부착 포유류가 다이빙을 통해 도달한 수심이 앞서 저장되어 있는 기존 프로파일의 수심보다 20% 만큼 더 깊으면 샘플링 모드(sampling mode)로 전환되어, 부착 포유류가 상승하는 동안 프로파일을 기록하게 되며, 이는 저장되어 있던 기존 프로파일을 대체하게 된다. 이 과정을 통해 6시간 내에서 가장 깊은 수심에서 기록된 프로파일이 선별되는 것이다. 해당 설정을 유지하면, 포유류가 얕은 수심으로 다이빙을 할 때에는 장비에서 프로파일을 기록하지 않기 때문에 배

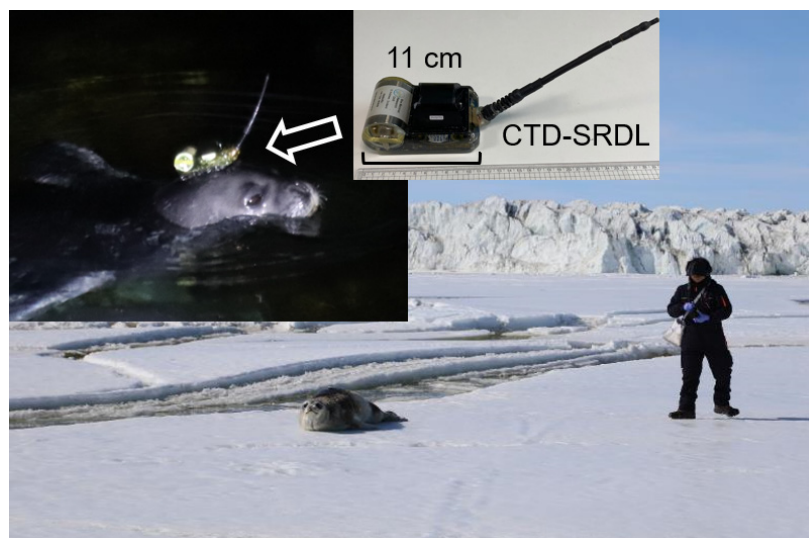


Fig. 1. Example pictures for CTD-SRDL deployment and seal-tagging at near Jang Bogo Station in Terra Nova Bay, Antarctica in 2021

터리 소모를 최소화할 수 있다. 만약, 부착 포유류의 평균 다이빙 수심을 1,000 m로 보고 하루에 네 번 수직 프로파일 기록한다고 가정하면, 이론적으로는 12개월 동안 CTD-SRDL 관측이 가능한 것으로 알려져 있지만(Boehme et al. 2009), 실제 관측 사례에 따르면 부착 CTD는 최대 6-7개월(200일) 정도 운용이 가능한 것으로 파악된다(Roquet et al. 2011; Sutherland et al. 2013). 최근에는, 장비 소형화와 위성 원격 측정 분야의 발전과 함께 부착 포유류의 다이빙에서 얻어지는 모든 상승 프로파일뿐 아니라 하강 프로파일까지도 기록하고 획득하는 사례도 보고되고 있다(Siegelman et al. 2019a, 2019b).

부착 CTD 자료 특징

CTD-SRDL 장비는 아르고스 위성 시스템을 통해 지정된 서버로 자료를 전송하도록 설정되어 있다(Boehme et al. 2009). 이는 부착 포유류의 다이빙을 통해 기록된 압력, 수온, 전기전도도 수직 프로파일 자료에 연구자가 준실시간으로 접근해 활용할 수 있도록 하기 위함이다. 다만, 부착 포유류가 표층에 머무는 시간에만 아르고스 위성과의 통신이 가능하기 때문에, 자료의 전송 효율은 부착 포유류가 표층에 머무르는 시간에 의존한다. 그러나, 부착 포유류가 표층에 머무는 시간은 하루의 10% 이내라고 알려져 있다(Boehme et al. 2009). 따라서, 1 Hz 샘플링 간격으로 얻어진 수직 프로파일 자료 전체를 아르고스 위성을 통해 전송하기 위해서는 많은 제약 사항이 따른다. 또한 소수점 아래 유효 숫자가 많은 전기전도도 값은 전송 용량을 많이 차지하기 때문에, 전기전도도 값보다는 염분 값으로 변환한 후 전송하는 것이 효율적이다. 이러한 이유로 선별된 대표 수심 16개에서의 수온, 염분 값이 수직 프로파일 자료에 포함되며, 여러 관측 사례에 따르면 하루에 2.05~4.01 개의 수직 프로파일이 아르고스 위성 시스템을 통해 전송되는 것으로 알려져 있다(Roquet et al. 2011, 2014). SMRU에서 제공하는 CTD-SRDL 설정법에 따르면, 대표 수심 16개는 고정 수심 8개(예, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000 m; 최대 수심에 따라 달라짐), 최대 수심, 최소 수심, 그리고 단절 지점 선택 알고리즘(broken-stick point selection algorithm)(Fedak et al. 2002; Boehme et al. 2009)을 통해 계산된 6개의 수심으로 이루어진다. 따라서, 연구자가 부착 포유류로부터 준 실시간으로 제공받는 CTD 자료는 일반적으로 압력 4 dbar 이상 간격의 수온과 TEOS-10(Thermodynamic Equation of Sea Water-2010) 방정식을 통해 계산된 염분 수직 프로파일이며 특정 부착 포유류부터 관측된 프로파일 간의 평균적인 시간 간격은 6시간이다. 참고로 품질관리 과정이나 연구 과정에서 TEOS-10 방정식과 수온, 염분, 압력 값을 이용해 다시 전기전도도 값을 계산할 수 있다.

부착 CTD자료 획득 사례

국내에서는 아직 해양포유류 활용 관측 방법을 활용한 CTD자료 획득 사례가 보고된 바 없으나, 해양포유류 부착 장비의 자료 기록 및 위성 통신 능력 향상(Fedak et al. 2002)과 함께, 국외에서는 2000년대부터 본격적으로 해양포유류 활용 관측 방법을 해양 관측에 활용하기 시작했다. 특히, 운용 비용이 적게 들고 추가 인력이나 선박이 필요하지 않다는 장점 덕분에 북극해, 남극해 등 극한 해양 환경 관측에 많이 활용되었으며, 그 결과 2000년부터 현재까지 다양한 극지 해역에서의 부착 CTD 자료 획득 및 연구 사례가 약 60여편의 논문을 통해 보고되었다.

북극해에서는, 대표적으로 스발바르 제도(Svalbard)에 위치한 스토르피오르덴(Storfjorden) 해양에서의 흰고래(White whale, *Delphinapterus leucas*) 부착 CTD 관측(Lydersen et al. 2002), 콩스피오르덴(Kongfjorden) 해양에서의 고리무늬물범(Ringed seal, *Pusa hispida*) 부착 CTD 관측(Everett et al. 2018), 북극 그린란드 빙하 앞바다에서의 코주머니물범(Hooded seal, *Cystophora cristata*) 부착 CTD 관측(Sutherland et al. 2013; Grist et al. 2014) 사례가 보고된 바 있으며, 해당 관측에서 획득된 부착 CTD 자료를 통해, 콩스피오르덴 해양에서의 빙저수 거동(Everett et al. 2018), 북대서양에서 북극해로 따뜻한 대서양 해수(warm Atlantic water)가 유입되는 모습들이 새롭게 발견되었다(Lydersen et al. 2002; Sutherland et al. 2013; Grist et al. 2014).

남극해에서는, 대표적으로 웨델해에서의 남방 코끼리물범 부착 CTD 관측(Zhou et al. 2014)과 웨델물범 부착 CTD 관측(Labrousse et al. 2021), 서남극 반도 대륙붕 해역에서의 게잡이물범(Crabeater seal, *Lobodon carcinophagus*) 및 레오파드표범(Leopard seal, *Hydrurga leptonyx*) 부착 CTD 관측(Costa et al. 2008), 아문젠해에서의 남방 코끼리물범 및 웨델물범 부착 CTD 관측(Boehme and Rosso 2020; Zheng et al. 2021), 로스해에서의 웨델물범 부착 CTD 관측(Piñones et al. 2019), 동남극 주변 케르켈렌 고원(Kergelen Plateau)에서의 남방 코끼리물범 부착 CTD 관측(Williams et al. 2016; Siegelman et al. 2019a, 2019b) 사례가 보고된 바 있다. 남극해에서 얻어진 부착 CTD 자료들도 각 관측 해역의 계절 변화, 빙봉 융융 과정과 융융수의 거동 및 영향을 살펴보는데 매우 유용하게 활용되고 있으며(Zhou et al. 2014; Williams et al. 2016; Piñones et al. 2019; Boehme and Rosso 2020; Zheng et al. 2021), 최근에는 부착 CTD 자료가 5년 이상 축적되면서, 남극해 전체의 변화를 살펴보는 연구에도 활용되고 있다(Roquet et al. 2013; Foppert et al. 2019; Haumann et al. 2020).

3. 해양포유류 부착 CTD 자료 처리 방법

해양포유류 활용 관측 방법이 해양 관측 특히, 극지 해양에서의 관측에 활발히 활용되면서 부착 CTD 자료 처리 및 품질 관리 방법 역시 지속적으로 개발 및 개선되어왔다(Boehme et al. 2009; Roquet et al. 2011; Siegelman et al. 2019b). 아래에서는 부착 CTD 자료가 가진 오류와 그 원인이 무엇인지 살펴보고 현재까지 정립된 품질 관리 방법들 중 압력 효과 보정, 지연 모드 보정, 고해상도 부착 CTD 자료 보정 방법에 대해 살펴보겠다(Fig. 2 참고).

관측 자료 오차의 원인

CTD-SRDL 장비에서 사용하는 CTD 센서들의 사양은, 압력 센서의 경우, 측정 범위는 0~2000 dbar, 정확도는 2 dbar, 해상도는 0.05 dbar이고, 수온 센서의 측정 범위는 -5~35°C, 정확도는 $\pm 0.005^\circ\text{C}$, 해상도는 0.001°C 이며, 전기전도도 센서의 측정 범위는 0~80 mS/cm, 정확도는 ± 0.01 mS/cm, 해상도는 0.002 mS/cm이다(http://www.smru.st-andrews.ac.uk/). 해양에서의 물성 변화 연구를 위해서는 일반적으로 정확도가 $O(10^{-2})$ 정도인 수온, 염분 센서가 필요하기 때문에, 각 센서들의 사양과 검교정 결과를 고려하면 CTD-SRDL은 해양 관측에 적합한 장비임을 확인할 수 있다. 또한 CTD-SRDL 장비는 보통 1년 이하의 기간 동안 관측에 사용된 후 포유류에서 떨어져 자동 폐기되기 때문에 센서 자체의 편향 문제 역시 크게 고려할 필요가 없다.

그러나 센서들의 높은 관측 성능과 낮은 관측 오차에도 불구하고 선박 기반 CTD 관측과는 다른 품질 관리 방법

이 적용되어야 하는데, 이는 관측 과정에서 외부 관측 요인들(external field effect)에 의해 추가적인 관측 오차가 발생하기 때문이다(Boehme et al. 2009; Roquet et al. 2011, 2014; Siegelman et al. 2019b). 일례로, Boehme et al. (2009)에서는 CTD-SRDL 장비 전기전도도 센서의 물탱크 실험을 통해, 벽과 같은 장애물과 CTD 센서의 거리가 가까워질수록 큰 염분 관측 오차(10 cm 이내일 경우, 0.05 이상)가 발생할 수 있음을 제안하였다. 현장에서 CTD-SRDL을 해양포유류에 부착할 때 추가적인 판을 사용하거나 이를 케이블 타이 등으로 묶는 등의 작업을 수행하게 되는데, 위 실험실 결과는 장비 외부 물체가 물탱크 벽과 같은 역할을 할 경우 추가적인 전기전도도 관측 오차를 발생시킬 수 있음을 보여준다. 만약, 장비 부착시에 판과 케이블 타이 등을 사용하지 않았더라도, 장비 부착 각도에 따라서 전기전도도 센서와 포유류 몸과의 거리가 가까워질 수 있기 때문에 결과적으로 장비 부착과 연관된 전기전도도 오차가 발생되며 이를 보정할 필요가 있다. 또한 포유류의 털을 포함하여 포유류 몸에 포함된 다른 전도성 혹은 절연 특성을 가진 신체 조직들 및 부착 포유류가 가진 열에 의해서도 추가적인 전기전도도 관측 오차가 발생될 수 있다. 이와 더불어 서론에서도 언급한 바와 같이 펄프가 없이 CTD 관측이 수행되기 때문에 해양 물성이 급격히 변화하는 층에서의 센서 적응 속도가 더더 자료에서 열관성 효과 등에 의한 관측 오차도 발생될 수 있다.

이에 해양포유류 관측 네트워크 MEOP에서는 해양포유류 활용 관측에서 발생하는 관측 오차를 보정하기 위해 다음과 같은 CTD 자료 처리 및 품질 관리 과정 적용을 권장하고 있다: 부착 포유류 별 자료 시각화(tag-by-tag

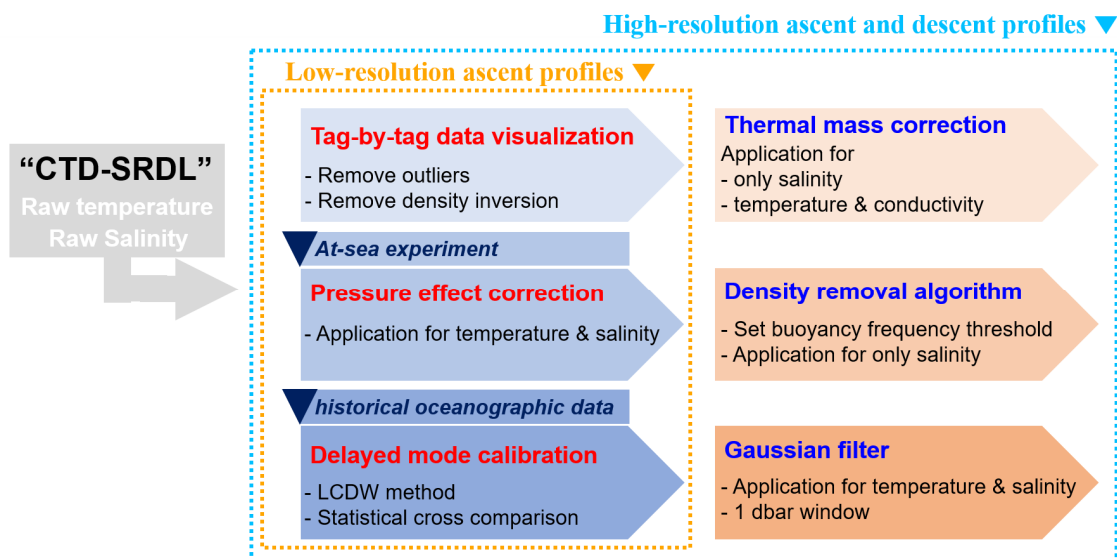


Fig. 2. Schematic procedures for quality control of two cases' CTD-SRDL data

data visualization); 염분 프로파일 자료 보정(adjustment of salinity profile data); 수온 프로파일 자료 보정(adjustment of temperature profile data); 열관성 효과 보정(thermal cell effect correction); 밀도 역전 제거 알고리즘 적용(density inversion removal algorithm); 과거 자료와의 비교를 통한 자료 품질 관리 완료(quality control of the adjusted data set, <http://www.meop.net/>). 일반적으로 해양 포유류 활용 관측시에는 여러 부착 포유류로부터 자료를 획득하게 되는데, 각 CTD-SRDL 장비들이 서로 다른 관측 오차를 포함하고 있으므로 개별적으로 처리 및 품질 관리 과정을 적용해야 한다.

압력 효과 보정(Pressure-effect correction)

압력 효과 보정은 위에서 언급한 수온과 염분 프로파일 자료 보정 과정에 적용하는 방법 중 하나로 CTD-SRDL 장비에서 얻어진 수온, 염분 값과 선박 CTD 관측에서 얻어진 수온, 염분 값 차이의 압력에 따른 변화를 활용하여 해양포유류 관측 수온, 염분 프로파일 자료를 보정하는 것을 의미한다(Roquet et al. 2011; Siegelman et al. 2019b). 수온 및 염분이 급격하게 변하는 수심대(예, 수온약층)는 열관성 효과의 추가적인 영향 때문에 압력 효과만을 구분하여 보정할 수 없어 해당 방법 적용에서는 제외된다(Roquet et al. 2011). 해양포유류 부착 CTD 관측이 주로 수행되고 있는 극지 해양은 대양에 비해 수온약층의 발달 정도가 약하기 때문에 수온약층 포함 여부가 압력 효과 보정에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다(Roquet et al. 2011, 2014).

선박 CTD 자료를 보정의 기준으로 활용하기 때문에, 해당 방법을 적용하기 위해서는 현장에서 CTD-SRDL 장비를 해양포유류에 부착하기 이전에 선박 CTD 프레임에 먼저 부착하여 선박 CTD와 함께 실험용 관측을 수행하여야 한다. 보통 1 m 간격의 선박 CTD와 CTD-SRDL 프로파일을 비교하여 압력 효과를 보정하기 때문에, 실험용 관측에서는 선박 CTD 프레임을 1 m/s로 내리도록 권장한다(Roquet et al. 2011). 참고로 실험용 관측에서는 CTD-SRDL 장비에 기록된 프로파일을 아르고스 위성과의 통신이 아닌 블루투스 통신을 통해 선상에서 획득하기 때문에, CTD-SRDL 장비가 CTD 프레임과 함께 상승하면서 1 Hz로 샘플링 한 수온, 전기전도도 수직 프로파일을 직접 얻을 수 있다(<http://www.smru.st-andrews.ac.uk/>). 기존에 현장에서 수행되었던 실험용 관측 결과들에 따르면, 선박 CTD 자료와 CTD-SRDL 자료 간의 차이는 압력과 근사적으로 (1), (2) 형태의 선형 관계식으로 표현할 수 있다(A, B, C, D는 상수; Roquet et al. 2011, 2014).

$$T_{SRDL} - T_{CTD} = A \times Pressure + B + \epsilon_T \quad (1)$$

$$S_{SRDL} - S_{CTD} = C \times Pressure + D + \epsilon_S \quad (2)$$

따라서 수온의 경우는 식(3)과 같은 형태로 압력 효과를 압력과 수온 차이 간의 선형 관계식을 활용하여 보정한다.

$$T_{Correction} = T_{SRDL} - A \times Pressure - B \quad (3)$$

반면, 염분의 경우 염분 오프셋이 압력효과와 외부 관측 요인에 영향으로 발생하지만 외부 관측 요인에 의한 영향이 더 주요하기 때문에, 염분 오프셋은 다음 아래에서 소개하는 지연모드보정 방법을 통해 보정하고 염분 오차에서의 압력효과는 압력과 염분 차이 간의 경사만을 활용하여 보정한다(Roquet et al. 2011, 2014).

$$S_{Correction} = S_{SRDL} - C \times Pressure \quad (4)$$

압력효과 보정에 활용하는 선형 관계식의 경사(slope)나 오프셋(offset)은 CTD-SRDL 장비별로 다르게 계산되기 때문에, 압력효과 보정 정도 역시 장비별로 다르게 나타난다(Roquet et al. 2011). 따라서 여러 대의 CTD-SRDL 장비를 관측에 활용하고자 할 경우에는 각 장비별로 실험용 관측을 수행하여 압력 효과 보정식을 계산해 두어야 하며, 실제 관측을 통해 각 장비에서 수직 프로파일을 획득하였을 때에도 각각의 보정식을 통해 압력 효과를 제거해 주어야 한다. 또한, 압력 효과 보정과는 별개로, 실험용 관측을 통해 현장에서 CTD-SRDL 센서 자료의 품질을 확인해 볼 수 있기 때문에 해당 과정에서 각 CTD-SRDL 장비의 상태를 파악하고 부착 여부를 결정해야 한다.

지연모드 보정(Delayed-mode calibration)

지연 모드 보정은 염분 자료 보정 과정에 적용하는 방법 중 하나로, 압력 효과 보정 방법으로 보정하지 못하는 외부 관측 요인에 의한 염분 오프셋을 보정하는 방법이다(Roquet et al. 2011, 2014; Siegelman et al. 2019b). 아르고플로트(Argo float) 자료 보정에 활용하는 지연모드 보정 방법(Wong et al. 2003)과는 별개로 CTD-SRDL 자료를 위한 지연모드보정 방법이 개발되었으며, 하층 환남극심층수 방법(The Lower Circumpolar Deep Water Method, LCDW), 통계적 상호비교 방법(a statistical cross-comparison method) 등이 이에 해당한다(Roquet et al. 2011, 2014). 참고로 지연모드보정 방법 적용을 위해서는 현장에서의 선박 CTD 자료가 필요하지는 않으나 관측 해역에

서 과거에 관측된 해양 자료들(선박 CTD, 해양 계류선 등)이 필요하다.

우선, 하층 환남극심층수(LCDW) 방법은 해양포유류 관측 자료가 얻어진 해역의 가장 안정된 심층 해수의 이름을 붙여 만든 방법으로, 심층 해수의 염분값을 기준으로 염분 오프셋을 보정하는 것이다(Roquet et al. 2011). 이 방법은 심층 해수의 염분이 상대적으로 변화 범위가 적고, 일년 내내 염분 값이 거의 유지된다는 특성을 활용한 것으로, 해당 해수가 존재하는 수심에서의 부착 CTD 염분과 심층 해수의 염분 차이를 활용하여 부착 CTD 염분 프로파일 전체를 보정하는 방식이다. 하층 환남극심층수 방법은 동남극 해양에서 획득된 남방 코끼리물범 부착 CTD 자료 일부의 염분 오프셋 보정 과정에서 처음 제안된 것으로(Roquet et al. 2011, 2014; Siegelman et al. 2019b), 하층 환남극심층수가 해당 관측이 수행된 해양에서 가장 안정적인 심층 해수에 해당하기 때문에 염분 오프셋 보정에 활용될 수 있었다. 그러나 이외 해역에서 얻어진 해양 포유류 부착 CTD 자료의 경우, 하층 환남극심층수가 가장 안정적인 심층 해수가 아닐 수 있으므로 해당 방법을 그대로 적용하여 염분 오프셋을 보정할 수 없으며, 각 해역별로 안정적인 수괴들을 활용한 방법들을 추가적으로 개발할 필요가 있다. 이와 관련해서는 4번 섹션에서 좀 더 토의하도록 하겠다.

다음, 관측 해역 상층의 염분 변화량이 심층 해수의 염분 변화량보다 작게 나타날 경우 혹은 관측 해역에 안정적인 심층 해수가 없어 하층 환남극심층수 방법과 같은 보정 방법을 적용하지 못할 경우에는 염분 오프셋 보정을 위해 통계적 상호비교 방법을 활용한다(Roquet et al. 2011, 2014; Siegelman et al. 2019b). 즉, 한해동안 상층 염분의 변화 범위가 작고, 안정적인 해수라는 가정이 가능할 때 해당 방법을 염분 오프셋 보정에 효과적으로 활용할 수 있다. 통계적 상호비교 방법은 인접한 위치에서의 해양포유류 부착 자료와 과거 관측 자료를 비교하여, 관측 기간 동안 평균한 상층 염분값 간의 차이를 최소화하는 형태로 염분 오프셋을 보정하는 방식이다(Roquet et al. 2011). 심층 해수 활용 방법과는 달리, 상층의 염분 오프셋 보정을 통해 전체 염분 수직 프로파일을 보정하기 때문에 얕은 수심에서 획득된 해양포유류 부착 CTD 자료도 염분 오프셋 보정이 가능하다는 이점이 있다. 다만, 통계적 상호비교 방법 적용을 위해, 관측 해역의 상층 염분 계절 변화 범위를 파악할 수 있는 장기 해양 계류선 자료를 확보해야 한다는 단점이 있다. 통계적 상호비교 방법 역시 남극 해 동부의 얕은 수심에서 획득한 남방 코끼리물범 부착 CTD 자료 일부의 염분 오프셋 보정에 적용한 사례가 있으며(Roquet et al. 2011, 2014; Siegelman et al. 2019b), 이 경우에는 동남극 해양 표층에서 얻은 염분 시계열 자

료를 활용하였다(Roquet et al. 2011, 2014).

고해상도 부착 CTD 자료 보정(High resolution CTD data correction)

이처럼 해양포유류 부착 CTD 자료는 선박 CTD 자료와 달리 부착 포유류가 상승하는 동안 기록된 프로파일이며 넓은 수직 간격(> 4 dbar)의 특징을 가지므로 주로 압력 효과 보정과 지연모드 보정 방법을 통해 수온, 염분의 관측 오차를 보정한다. 그러나 최근에는 장비 소형화와 위성 원격 측정 분야의 발전 등으로 부착 포유류의 다이빙 자료를 모두 획득하는 것이 가능해져 선박 CTD 자료와 유사한 수준의 고해상도 부착 CTD 자료가 획득되고 있다(Siegelman et al. 2019a, 2019b). 이 고해상도 부착 CTD 자료의 수직 간격은 약 1 dbar이며, 부착 포유류가 하루 60회 이상의 다이빙을 통해 기록한 상승, 하강 프로파일을 모두 사용 가능하다. 이외에 높은 해상도의 부착 CTD 자료를 획득하기 위해, 아르고스 위성을 활용하지 않고 부착 CTD를 회수(이 경우, 고주파수 송신기를 CTD-SRDL에 추가 부착)하여 CTD-SRDL 내부 메모리에 저장되어 있는 짧은 수직 간격 프로파일 자료를 직접 획득하는 경우도 있다. 이처럼 부착 포유류가 상승 및 하강시에 기록한 고해상도 CTD 자료를 모두 활용 가능할 경우에는, 선박 CTD와 유사하게 열관성 효과 보정(thermal cell effect correction), 밀도역전제거(density-inversion removal) 방법 등을 통해 추가적인 관측 오차 보정을 적용할 수 있다(Siegelman et al. 2019a, 2019b).

열관성 효과는 CTD 센서 본체에 저장된 열로 인해 전기전도도 센서에서 열 지연 현상이 발생하여 염분이 실제와는 다르게 계산되는 것을 의미한다(Morison et al. 1994). 예를 들어, CTD 센서가 따뜻한 해수에서 찬 해수로 이동할 경우, 따뜻한 해수에 있을 때 전기전도도 센서가 가지고 있던 열로 인해 찬 해수로 이동하더라도 주변 해수에 비해 상대적으로 높은 전기전도도 값을 측정하게 된다. 열관성 효과는 주로 수온, 염분 변화가 크게 나타나는 수온 약층에서 수온, 염분의 측정 오차를 야기하기 때문에 극지 해양에서는 그 효과가 적을 수 있으나(Roquet et al. 2011, 2014) 더욱 정밀한 수온, 염분 값을 얻기 위해서는 열관성 효과를 추가적으로 보정해 줄 필요가 있다. 선박 CTD 자료의 경우, 열관성 효과 보정을 위해 상승 하강 프로파일 간의 차이를 최소화하는 변수를 찾는 CellTM 과정(Lueck and Picklo 1990; Lueck 1990)이 적용되는데, 부착 CTD 자료에서도 열관성 효과 보정을 위해 CellTM 과정의 원리를 동일하게 따른다. 초기에는 Mensah et al. (2018)에서 부착 포유류가 하강하는 동안 기록한 고해상도 염분 프로파일과 상승하는 동안 기록한 염분 프로파일 간의 차이를 최소화하는 염분 초기 에러(initial error, α), 완화 시간의

역수(inverse relaxation time, β)를 계산하여, 염분 값에서 직접 열관성 효과를 보정하는 방식을 개발하였다. 이후 Siegelman et al. (2019b)에서 수온과 전기전도도 프로파일 각각에서 상승과 하강 프로파일 차이를 최소화하기 위한 수온 초기 에러(temperature initial error, α_T), 전기전도도 초기 에러(conductivity initial error, α_C), 완화 시간의 역수(inverse relaxation time, β)를 계산하여 열관성 효과를 보정하는 방식을 추가적으로 제안하였다. 열관성 효과 보정 계수는 CellTM 과정과 동일하게 SRDL 장비별, 관측 해역별로 계산해야 한다.

마지막으로, 밀도역전제거 방법은 수직 프로파일 상의 밀도 역전 구간을 제거하여 프로파일이 안정화된 수층 구조를 가지도록 보정하는 것을 의미한다. 해양 관측 프로파일에서 밀도 역전은 흔히 볼 수 있는 모습이며 이는 실제 해양 현상이 아닌 관측 센서 자체의 오류 혹은 염분 스파이크 등 여러 요인들에 의해 발생할 수 있다. 고해상도 부착 CTD 자료가 아닌 경우에는 단순히 부착 포유류 별 자료 시각화 과정에서 밀도 역전 수치를 제거하지만, 고해상도 부착 CTD 자료의 경우에는 조밀한 수직 간격의 부력 진동수(buoyancy frequency, N^2)의 계산이 가능하기 때문에 추가적인 밀도역전제거 알고리즘 적용이 가능하다. 밀도역전제거 알고리즘은 일반적으로 고해상도 프로파일에서 계산된 N^2 값이 설정한 N^2 의 최소 임계값을 넘지 않도록 염분 프로파일을 보정하여 밀도역전을 제거해주는 형

식이다(Siegelman et al. 2019b).

열관성 효과 보정과 밀도역전제거가 완료된 고해상도 부착 CTD 자료는 1 dbar 가우시안 필터(Gaussian filter)를 활용한 수온, 염분 프로파일 스무딩 작업을 마지막으로 자료의 품질 관리를 완료한다(Siegelman et al. 2019b; MEOP 홈페이지 참고).

4. 2021년 웨델물범 부착 CTD 관측

관측 정보

2021년 2월과 3월, 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 연구진은 남극대륙 빅토리아 랜드(Victoria Land) 북부에 위치한 남극 장보고 과학기지 인근 해빙에서 서식하는 웨델물범 23마리에 CTD-SRDL을 부착하여 국내에서는 처음으로 해양포유류를 활용한 CTD 관측을 수행하였다(Fig. 3). 해당 관측에서는 남극의 여름, 웨델물범이 털갈이를 마치고 이동을 준비하는 시기에 장비를 부착하고, 남극의 겨울 기간(동지: 2021년 6월 21일)에 걸쳐 자료를 획득하는 것을 목표로 하였다. 따라서 본 연구에서는 장비 부착이 시작된 2021년 2월 15일부터 6월 13일까지 획득된 자료를 선별하여 분석에 활용하였다. Table 1에서 확인할 수 있듯이, 총 23대의 CTD-SRDL 장비를 웨델물범에 각각 부착하였고, 23대의 장비에서 총 6057개의 수온, 염분 프로파일이 성공적으로 전송되어 기록되었다. 부착 개

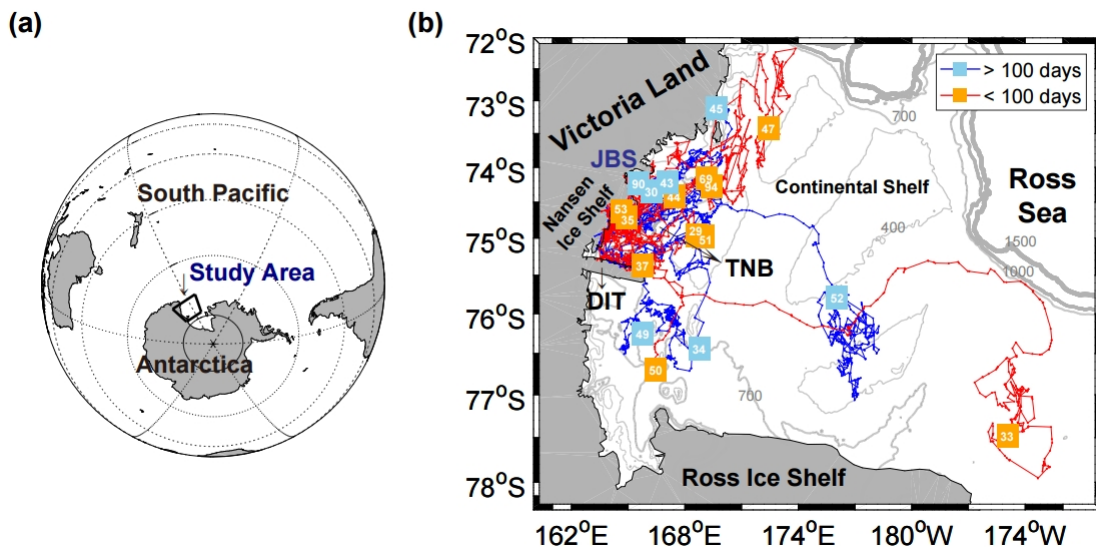


Fig. 3. (a) Location of the study area (a black box) in the global map. (b) Spatial distribution of profiles recorded by the 23 tagged-seals in the western Ross Sea from February to June 2021. Blue (red) lines with numbers in sky-blue (orange) box represent records of more (less) than 100 days. The positions of numbers indicate the last record position of each tagged-seal. The records of less than 10 days are excluded in this figure. JBS, DIT, and TNB represent Jang Bogo Station, Drygalski Ice Tongue, and Terra Nova Bay, respectively. Gray contours are for 400, 700, 1000, and 1500 m depth

체 별로 약간의 차이는 보이나, 하루에 평균 4.1개(표준편차 1.5개) 프로파일이 기록된 것으로 나타났다. 참고로 해당 통계수치는 기본 설정(하루에 4회 관측)보다 더 많은 프로파일이 기록되었음을 보여주는데, 이는 장비에서 간헐적으로 6시간보다 짧은 시간 간격(1시간 이내) 동안 프로파일을 2회 이상 기록한 경우가 존재하기 때문이다. 실제로 2회 이상 관측된 프로파일들은 수심이 얕은 경우(50 m 이내)가 대부분이었고, 기록된 프로파일들 중 50 m 보다 깊은 수심의 프로파일만을 고려할 경우, 하루에 평균 3.6개(표준편차 1.6개) 프로파일이 기록된 것으로 나타났다. 해당 현상이 나타난 원인은 아직 불분명하나 추후 관측에서는 장비 설정 변경 등을 통한 개선이 필요할 것으로 사료된다.

다음, 각각의 수직 프로파일은 최대 16개 수심에서의 수온, 염분 값으로 구성되어 있고 시작 수심은 4 m, 자료

의 평균 수심 간격은 16 m인 것으로 확인되었다. 하루 동안 수직 프로파일 자료를 전송한 뒤 통신이 끊긴 #46과 #48 SRDL을 제외하고, 부착 개체의 최대 다이빙 수심은 997 m였으며, 평균 관측 수심은 219 m (표준편차 66 m)로 나타났다. 가장 긴 관측 기간은 118일(~4개월), 평균 관측 기간은 66일(표준편차 41일)로 SRDL에 따라 관측 기간에 큰 차이를 보였으며, 총 7대의 CTD-SRDL이 100 일 이상 관측을 수행하였다(Fig. 3). 부착 개체의 최장 이동 거리는 2816 km, 평균 이동 거리는 1407 km (표준편차 954 km)로 확인되었고 관측 기간이 긴 경우라도 먼 해역까지 이동하지 않은 경우까지 확인할 수 있었다(Fig. 3b). 부착 개체들이 이동한 위경도 범위는 각각 77.96°~72.17°S, 163.24°~187.43°E로 테라노바만 뿐 아니라 빅토리아 랜드 북부 해역, 드라이갈스키 빙설(Drygalski Ice Tongue) 남부 해역, 로스 빙붕(Ross Ice Shelf) 근처 해역까지도 이

Table 1. Basic information on the CTD-SRDLs deploying in the western Ross Sea on 23 Weddell seals in February and March 2021

CTD SRDL	No. of profiles	2021 Starting date	2021 Ending date	Travel duration (days)	No. of profiles per day	Travel distance (km)	Deepest depth (m)	Mean depth (m)
15329	192	19 Feb.	9 Apr.	50	3.84	813	447	149
15330	248	15 Feb.	11 Jun.	118	2.10	1174	788	305
15333	335	17 Feb.	21 Apr.	64	5.23	2287	591	243
15334	501	18 Feb.	6 June.	110	3.55	2330	542	199
15335	177	18 Feb.	27 Mar.	39	4.54	523	378	90
15337	370	19 Feb.	5 May	76	4.87	2138	660	206
15343	506	19 Feb.	13 Jun.	116	4.36	2034	549	222
15344	91	19 Feb.	11 Apr.	53	1.72	539	607	262
15345	551	20 Feb.	12 Jun.	113	4.88	2215	794	240
15346	1	22 Feb.	22 Feb.	1	1.00	0	1564	1564
15347	414	22 Feb.	8 May	77	5.38	2816	553	210
15348	8	22 Feb.	23 Feb.	1	8.00	48	314	209
15349	640	23 Feb.	13 Jun.	112	5.71	2341	741	206
15350	140	24 Feb.	22 Mar.	28	5.00	820	619	187
15351	179	24 Feb.	1 Apr.	37	4.84	989	623	207
15352	566	24 Feb.	11 Jun.	109	5.19	3126	597	188
15353	62	25 Feb.	9 Mar.	13	4.77	539	619	279
15354	9	26 Feb.	28 Feb.	3	3.00	11	660	339
15369	352	26 Feb.	17 May	82	4.29	1845	609	226
15378	7	5 Mar.	6 Mar.	2	3.50	25	231	57
15394	317	7 Mar.	7 Jun.	92	3.45	1743	668	219
15393	18	9 Mar.	17 Mar.	9	2.00	93	522	305
15390	373	2 Mar.	11 Jun.	102	3.66	1144	997	254

동하여 다이빙을 통해 수직 프로파일을 기록한 것으로 나타났다(Fig. 3). 다만, 부착 개체의 위치 자료는 관측 오차를 포함하고 있으므로(최대 1 km 이내; Vincent et al. 2002), 추후 부착 개체의 구체적인 이동 경로와 잠수행동 생태 연구를 위해서 위치 자료의 추가적인 품질 관리를 수행 예정이다.

Fig. 4는 수직 프로파일을 기록, 전송한 23대의 CTD-SRDL 장비들 중 테라노바만(#43), 드라이갈스키 빙설 남부(#34), 로스 빙봉 앞 해양(#52)에서 각각 100일 이상 관측된 수온 염분 원자료의 호브몰러 다이어그램(Hovmöller diagram)을 나타낸다. 우선, 세 가지 기록 모두에서 관측이 시작된 2월부터 4월 중순까지는(남반구 여름 및 초가을 시기) 부착 개체들이 400 m 이상 수심까지 다이빙한 경우가 많아 4월 중순 이후(남반구 가을 및 겨울 시기)에 비해 전반적으로 수직 프로파일 수심이 깊게 나타나는 특징을 보였다. 또한 원자료 상에서는 기록 중간에 오류값을 확인할 수 있는 시기가 존재하나(특히, 염분), 남반구 여름철 시기(2월-3월 중순) 수온과 염분이 겨울철로 가면서(5월 이후) 각각 낮아지고 높아지는 특징은 확인이 되며, 이

는 테라노바만(#43) 및 드라이갈스키 빙설 남부 해역에서 두드러진다(Fig. 4a-d). 향후 상세 분석이 필요한 상황이나, 이러한 계절 변화는 겨울철 테라노바만 폴리나(polynya)와 로스 빙봉 폴리나에서 발생하는 고염분 대륙붕수(High Salinity Shelf Water, HSSW) 생성과 연관이 있을 것으로 판단된다(Budillon et al. 2011; Yoon et al. 2020). #52 SRDL에서는 5월 이후 오히려 염분이 확연히 낮아지는 모습을 보이는데 이는 부착 개체가 테라노바만 외해로 이동하여 로스해 대륙붕에 존재하는 상대적으로 낮은 염분 수괴(예, 변형 대륙붕수(Modified Shelf Water, mSW))의 영향을 받은 것으로 여겨진다(Budillon et al. 2011; Piñones et al. 2019) (Figs. 3 and 4e, f). 참고로 해당 부착 관측 이전에는 실험용 관측을 수행하지 못했기 때문에, 2021년 부착 CTD 자료는 시기와 상관없이 수온 및 염분 오프셋 보정만이 가능할 것으로 판단된다. 이 경우, 보정 과정 동안, 각 CTD-SRDL 장비에서 기록된 프로파일들이 모두 평행 이동하는 형태로 절대값만 바뀌기 때문에, 앞서 원자료에서 확인한 시기별 변화 모습은 그대로 유지될 것으로 예상된다. 따라서, 2021년 웹툰물범 부착 CTD 자료는 테

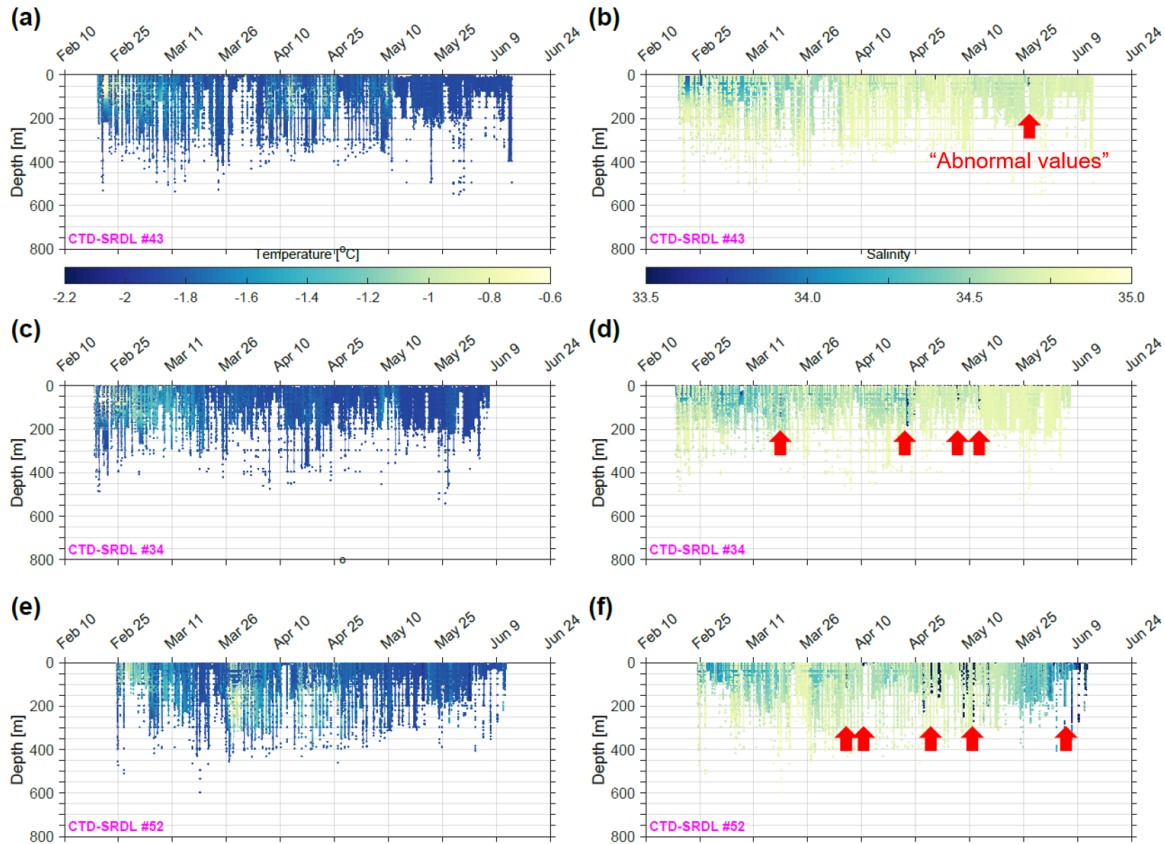


Fig. 4. (a), (c), (e) Hovmöller diagram of raw temperature data collected by #43, 34, and 52 tagged-seals (Fig. 3b and Table 1). (b), (d), (f) The same as Fig. 4 (a), (c), (e), but for raw salinity data. Red arrows indicate the periods when abnormal values are found in salinity profiles

라노바만 및 주변 해양 수층의 계절변화와 해역 간의 차이를 살펴보는 데 매우 유용한 자료가 될 것이다.

자료 품질 관리 전략 제안

올해 웨델물범 부착 관측이 마무리되면 23대의 SRDL 장비에서 기록한 수직 프로파일들을 위에서 설명한 품질 관리 과정과 방법들을 적용, 수온 염분의 관측 오차를 보정하는 작업이 수행되어야 한다. 이를 위하여 사전에 품질 관리 전략을 구상하고 품질 관리 과정에서 활용 가능한 해양 관측 자료들을 탐색할 필요가 있다. 우선, 앞서 언급했듯이 올해 관측에서는 선박 CTD 프레임에 SRDL 장비를 부착하여 수행하는 실험용 관측이 어려운 상황이었기 때문에 수온 염분 프로파일 상에서 압력 효과를 보정하는 것은 불가능하다. 또한 획득한 수직 프로파일의 수심 간격이 약 16 m이고 부착 개체가 상승시에 기록한 수직 프로파일만을 자료로 획득하였기 때문에 위에서 설명한 열관성 효과 보정과 밀도 역전 제거 알고리즘 적용 역시 불가능한 상황이다. 따라서 이번 웨델물범 부착 CTD 자료는 테라노바만 및 주변 해양에서의 기존 관측 자료들을 활용한 통계적 상호비교 방법 적용을 통해 관측 오차 보정 작업을 수행하여야 할 것으로 판단된다. 실제로 극지연구소에서는 2014년부터 매년 쇄빙연구선 아라온(Araon)을 활용하여 테라노바만 해역을 비롯 남극 장보고 과학기지 주

변 해양에서 선박 CTD 관측을 수행 중에 있고 국외 연구 기관들과의 협력을 통해 해양 계류선 관측도 수행(Yoon et al. 2020) 중에 있으므로 이들 자료들을 관측 오차 보정에 적극 활용할 필요가 있다. 또한 로스해 대륙붕 해양에는 하층 환남극심층수 영향이 적고 오히려 500-600 m 이하 수심에서 고염분 대륙붕수가 균질층(homogeneous layer)을 이루고 있으므로(Yoon et al. 2020), 500 m 이하 수심까지 관측된 염분 수직 프로파일의 경우 하층 환남극심층수 방법이 아닌 해당 연도에 보고된 고염분 대륙붕수 염분에 맞추어 절대값을 보정하는 방법도 추가적으로 고려해야 할 것이다.

본 논문에서는 테라노바만 해양에서 2021년 6월 13일 까지 획득한 수직 프로파일 시각화를 통해, 테라노바만 해양의 수온 염분 범위를 벗어나는 값 제거(수온 2°C 이상, -2.5°C 이하; 염분 34.9 이상), 밀도 역전 구간 자료 제거 및 내삽 처리, 8개 수심 이상의 자료(16개 수심의 50%에 해당)를 포함하지 않는 수직 프로파일 제거, 염분 절대값 -0.1 보정(CTD-SRDL 염분과 과거 염분 관측치 간의 차이 중 빈도수가 가장 많은 값에 해당함(Boehme et al. 2009의 Fig. 5 참고))을 적용하여 1차 보정 온-염분 다이어그램을 얻을 수 있었다(Fig. 5). 그림에서도 확인할 수 있듯이, 부착 개체 별 자료 시각화 과정을 통해 보정된 수온, 염분 값은 원자료에 비하여 테라노바만 해양에서 얻어진 수괴

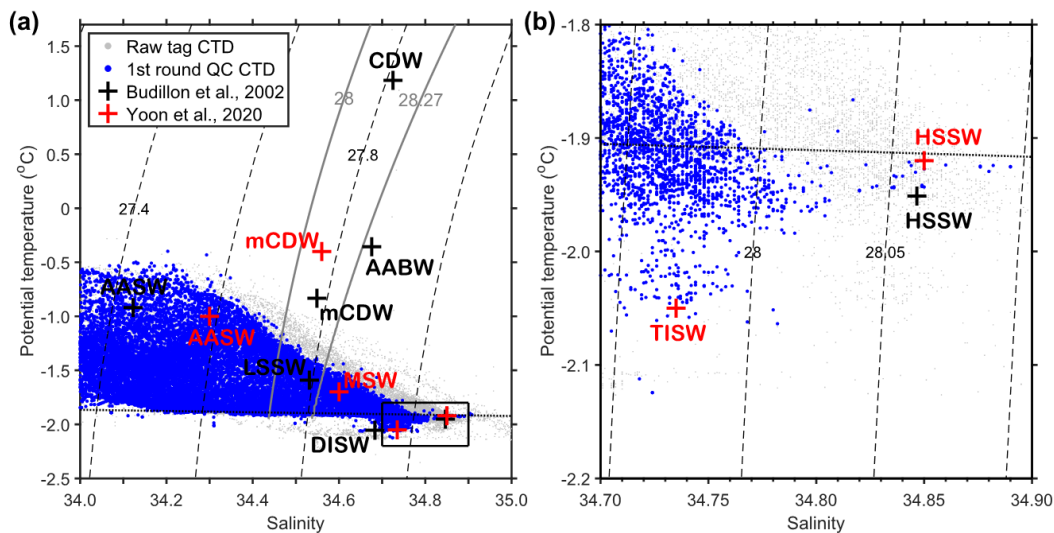


Fig. 5. (a) θ - S diagram for raw CTD-SRDL data collected by 23 tagged-seals (gray) and the first-round quality-controlled data (blue). The dotted black line indicates the freezing point at the surface depending on the salinity, and the dashed black lines indicate isopycnals. The solid dark-gray lines denote 28 and 28.27 kg/m³ neutral density (γ_n) surfaces. The black box indicates the ranges of Fig. 5b. The black (red) crosses indicate water types in Terra Nova Bay reported in Budillon et al. 2002 (Yoon et al. 2020). AASW, CDW, mCDW, AABW, LSSW, MSW, and DISW represent Antarctic Surface Water, Circumpolar Deep Water modified Circumpolar Deep Water, Antarctic Bottom Water, Low Salinity Shelf Water, Modified Shelf Water, and Deep Ice Shelf Water, respectively. (b) The magnified plot of Fig. 5(a). TISW and HSSW represent Terra Nova Bay Ice Shelf Water and High Salinity Shelf Water

구조를 잘 보여주고 있다(Fig. 5; Budillon et al. 2002; Yoon et al. 2020). 따라서 위에서 제시한 전략에 따라 통계적 상호비교 방법을 적용하여 수온, 염분 오차를 추가적으로 보정한다면, 해당 해역에서 그동안 살펴보지 못했던 겨울철 해양 순환 및 계절 변화 등을 기존 관측자료들과 함께 살펴볼 수 있을 것으로 기대한다.

5. 맺음말

지금까지 해양포유류 활용 관측 및 품질관리 방법 그리고 국내 최초로 시도되었던 웨델물범 부착 CTD 관측에 관해 소개하였다. 실제 관측 사례에서도 확인할 수 있듯이, 해양포유류 활용 관측 방식은 전통적 해양 관측 방식과 무인 장비를 활용한 관측 방식의 한계점을 보완해 줄 수 있기 때문에, 미래에도 해양 순환 연구, 특히 부착 가능한 포유류가 많이 서식하고 있는 남극 해양의 순환 연구에 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 최근에는 부착 CTD에 해양의 물리적 특성(수온, 염분)뿐 아니라 생물 및 화학적인 특성을 관측할 수 있는 센서(예, 엽록소 형광 값 측정 센서(fluorescence sensor) 및 용존 산소 측정 센서(dissolved oxygen sensor))들을 추가하는 시도들도 진행되고 있어 그 활용 범위는 더욱 확대될 것으로 보인다(Chung et al. 2021). 그러나 여전히 펌프 없이 부착 포유류의 이동만으로 수직 프로파일이 기록된다는 한계점을 가지고 있기 때문에, 각 변수들의 관측 정확도를 높일 수 있는 품질 관리 방법의 개발, 자료의 높은 수직 해상도와 장기 관측 기간 확보를 위한 부착 센서, 부착 방식, 위성 통신 시스템 개발 등은 여전히 우리가 해결해야 할 과제로 남겨져 있다. 따라서 국내 연구자들 특히, 극지 해양 물리 연구자들 사이에 해양포유류 활용 관측의 효용성을 인식하고 남겨진 과제 해결을 위해 지속적인 관심과 노력이 필요하며, 이 글이 촉매제로 활용되어 극지를 비롯한 여러 해양에서의 해양포유류 활용 관측이 더 활발히 진행될 수 있기를 희망한다.

사 사

이 논문 작성에 유익한 조언을 주신 극지연구소 빙하환경연구본부 이원상 박사님께 감사드립니다. 그리고 현장 조사를 수행한 장보고기지 월동대 박지강 생물대원에게 감사를 표합니다. 이 논문은 서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구(KIMST20190361), 극지연구소 기관고유사업(PE21140)의 지원을 받아 작성되었습니다. 이 논문 작성에는 두 저자가 동일한 기여를 하였습니다.

참고문헌

- Biddle LC, Kaiser J, Heywood KJ, Thompson AF, Jenkins A (2015) Ocean glider observations of iceberg-enhanced biological production in the northwestern Weddell Sea. *Geophys Res Lett* **42**:459-465
- Boehme L, Lovell P, Biuw M, Roquet F, Nicholson J, Thorpe SE, Meredith MP, Fedak M (2009) Technical note: animal-borne CTD-satellite relay data loggers for real-time oceanographic data collection. *Ocean Sci* **5**:685-695
- Boehme L, Rosso I (2020) Classifying oceanographic structures in the Amundsen Sea, Antarctica. *Geophys Res Lett* **48**:e2020GL089412
- 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**:1002-1018
- Budillon G, Cordero SG, Salusti E (2002) On the dense water spreading off the Ross Sea Shelf (Southern Ocean). *J Mar Syst* **35**:207-227
- Carvalho F, Kohut J, Oliver MJ, Schofield O (2016) Defining the ecologically relevant mixed-layer depth for Antarctica's coastal seas. *Geophys Res Lett* **44**:338-345
- Chung H, Lee J, Lee WY (2021) A review: marine bio-logging of animal behaviour and ocean environments. *Ocean Sci J* **56**:117-131
- Cochran WW (1980) Wildlife telemetry. In: Schemnitz SD (ed) *Wildlife management techniques manual*, vol 4. Washington DC, pp 507-520
- Costa DP, Klinck JM, Hofmann EE, Dinniman MS, Burns JM (2008) Upper ocean variability in west Antarctic Peninsula continental shelf waters as measured using instrumented seals. *Deep-Sea Res Pt II* **55**:323-337
- Everett A, Kohler J, Sundfjord A, Kovacs KM, Torsvik T, Pramanik A, Boehme L, Lydersen C (2018) Subglacial discharge plume behaviour revealed by CTD-instrumented ringed seals. *Sci Rep* **8**:13467
- Fedak M, Lovell P, McConnell B, Hunter C (2002) Overcoming the constraints of long range radio telemetry from animals: getting more useful data from smaller packages. *Integ and Comp Biol* **42**:3-10
- Foppert A, Rintoul SR, England MH (2019) Along-slope variability of cross-slope eddy transport in East Antarctica. *Geophys Res Lett* **46**:8224-8233
- Grist JP, Josey SA, Boehme L, Meredith MP, Laidre KL, Heide-Jørgensen MP, Kovacs KM, Lydersen C, Davidson FJM, Stenson GB, Hammill MO, March R, Coward AC (2014) Seasonal variability of the warm Atlantic water

- layer in the vicinity of the Greenland shelf break. *Geophys Res Lett* **41**:8530-8537
- Haumann FA, Moorman R, Riser SC, Smedsrud LH, Maksym T, Wong APS, Wilson EA, Drucker R, Talley LD, Johnson KS, Key RM, Sarmiento JL (2020) Supercooled Southern ocean waters. *Geophys Res Lett* **47**:1-11
- IPCC (2021) Sixth Assessment Report (AR6) Climate change 2021: the physical science basis. <http://www.ipcc.ch/ar6/wg1/> Accessed 1 Sep 2021
- Kim S, Jeong J, Seo SG, Im S, Lee WY, Jin SH (2021) Remote recognition of moving behaviors for captive harbor seals using a smart-patch system via bluetooth communication. *Micromachines* **12**(3):267
- Labrousse S, Ryan S, Roquet F, Picard B, McMahon CR, Harcourt R, Hindell M, Goff HL, Lourenco A, David Y, Sallée JB, Charrassin JB (2021) Weddell seal behavior during an exceptional oceanographic event in the Filchner-Ronne Ice Shelf in 2017. *Ant Sci* **33**(3):252-264
- Lueck RG (1990) Thermal inertia of conductivity cells: theory. *J Atmos Oceanic Technol* **7**:741-755
- Lueck RG, Picklo JJ (1990) Thermal inertia of conductivity cells: Observations with a sea-bird cell. *J Atmos Oceanic Technol* **7**:756-768
- Lyderson C, Nøst AL, Lovell P, McConnell BJ, Gammelsrød T, Hunter C, Fedak MA, Kovacs KM (2002) Salinity and temperature structure of a freezing Arctic fjord-monitored by white whales (*Delphinapterus leucas*). *Geophys Res Lett* **29**(23):34-1-34-4. doi:10.1029/2002GL015462
- McIntyre T, de Bruyn PJN, Ansorge IJ, Bester MN, Bornemann H, Plötz J, Tosh CA (2010) A lifetime at depth: vertical distribution of southern elephant seals in the water column. *Polar Biol* **33**:1037-1048
- Mensah V, Roquet F, Siegelman L, Picard B, Pauthenet E, Guinet C (2018) A correction for the thermal mass-induced errors of CTD tags mounted on marine mammals. *J Atmos Oceanic Technol* **35**:1237-1252
- Morison J, Anderson R, Larson N, Asaro ED, Boyd T (1994) The correction for thermal-lag effects in sea-bird CTD data. *J Atmos Oceanic Technol* **11**:1151-1164
- Piñones A, Hofmann EE, Coast DP, Goetz K, Burns JM, Roquet F, Dinniman MS, Klinck JM (2019) Hydrographic variability along the inner and mid-shelf region of the western Ross Sea obtained using instrumented seals. *Prog Oceanogr* **174**:131-142
- Proffitt KM, Garrott RA, Rotella JJ, Wheatley KE (2007) Environmental and senescent related variations in Weddell seal body mass: implications for age-specific reproductive performance. *Oikos* **116**:1683-1690
- Roquet F, Wunsch C, Forget G, Heimbach P, Guinet C, Reverdin G, Charrassin J-B, Bailleul F, Costa DP, Huckstadt LA, Goetz KT, Kovacs KM, Lydersen C, Biuw M, Nøst OA, Bornemann H, Ploetz J, Bester MN, McIntyre T, Muelbert MC, Hindell MA, McMahon CR, Williams G, Harcourt R, Field IC, Chafik L, Nicholls KW, Boehme L, Fedak MA (2013) Estimates of the Southern Ocean general circulation improved by animal-borne instruments. *Geophys Res Lett* **40**:6176-6180
- Roquet F, Charrassin JB, Marchand S, Boehme L, Fedak M, Reverdin G, Guinet C (2011) Delayed-mode calibration of hydrographic data obtained from animal-borne satellite relay data loggers. *J Atmos Ocean Technol* **28**:787-801
- Roquet F, Williams G, Hindell MA, Harcourt R, McMahon C, Guinet C, Charrassin JB, Reverdin G, Boehme L, Lovell P, Fedak M (2014) A Southern Indian Ocean database of hydrographic profiles obtained with instrumented elephant seals. *Sci Data* **1**:140028
- Siegelman L, O'Toole M, Flexas M, Riviere P, Klein P (2019a) Submesoscale ocean fronts act as biological hotspot for southern elephant seal. *Sci Rep* **9**:5588
- Siegelman L, Roquet F, Mensah V, Riviere P, Pauthenet E, Picard B, Guinet C (2019b) Correction and accuracy of high- and low-resolution CTD data from animal-borne instruments. *J Atmos Ocean Technol* **36**:745-760
- Sutherland DA, Straneo F, Stenson GB, Davidson FJM, Hammill MO, Asvid AR (2013) Atlantic water variability on the SE Greenland continental shelf and its relationship to SST and bathymetry. *J Geophys Res-Oceans* **118**:847-855
- Trukhin AM, Permyakov PA, Ryazanov SD, Lobanov VB, Kim HW, Choi YM, Sohn H (2021) Migrations of young spotted seals (*Phoca largha*) from Peter the Great Bay, Sea of Japan/East Sea, and the pattern of their use of seasonal habitats. *PLoS ONE* **16**(1):e0244232
- Vincent C, McConnell BJ, Ridoux V, Fedak MA (2002) Assessment of Argos location accuracy from satellite tags deployed on captive gray seals. *Mar Mamm Sci* **18**(1): 156-166
- 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**:eabd7254. doi:10.1126/sciadv.abd7254
- Williams GD, Herraiz-Borreguero L, Roquet F, Tamura T, Ohshima KI, Fukamachi Y, Fraser AD, Gao L, Chen H, McMahon CR, Harcourt R, Hindell M (2016) The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay. *Nat Commun* **7**:12577
- Wong APS, Johnson GC, Owens WB (2003) Delayed-mode

calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by θ -S climatology. *J Atmos Oceanic Technol* **20**: 308–318

Yoon ST, 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**:373–388

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 southeastern Amundsen Sea. *Commun* **2**:40. doi:10.1038/s43247-021-00111-z

Zhou Q, Hattermann T, Nøst OA, Biuw M, Kovacs KM, Lydersen C (2014) Wind-driven spreading of fresh surface water beneath ice shelves in the Eastern Weddell Sea. *J Geophys Res-Oceans* **119**:3818–3833

Author's Information

Seung-Tae Yoon

Assistant Professor, Kyungpook National University

Won Young Lee

Senior Research Scientist, Korea Polar Research Institute

Received Sep. 8, 2021

Revised Oct. 25, 2021

Accepted Oct. 25, 2021