

피오르드 지역 담수 유출로 인한 해류 특성 변화 Changes in Ocean Current Characteristics Due to Freshwater Discharge from Fjord Regions

송윤지* · 우승범** · 김종욱*** · 김정현****

Yun Ji Song*, Seung-Buhm Woo**, Jong Wook Kim*** and Jung-Hyun Kim****

요지 : 피오르드 지역의 담수 유출이 해류 패턴에 미치는 변화를 분석하기 위해, 본 연구에서는 고해상도 모델 도메인을 구성하고 Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM)을 2007년 콩스피오르드 지역에 적용하였다. 기존 연구들보다 해상도가 높은 비구조 격자를 사용하여 수치모델을 구성하였고, 해당 모델은 조위, 계절별 수온 및 염분의 시간적 변동성을 높은 수준으로 재현하였다. 또한, 모델은 북쪽으로 향하는 고수온의 West Spitsbergen Current (WSC) 특성을 나타내고 있으며, 용빙수 유출 시 나타나는 저층 유속 증가 현상도 구현하였다. 구축한 수치모형을 바탕으로, 용빙수 유출이 적용된 시나리오와 그렇지 않은 시나리오 간의 해류 변화를 비교하여 담수 유출의 영향을 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 조수병하 용빙수 유출량이 증가할 경우 여름철(7~8월) 콩스피오르드 저층에 강한 상류 방향의 해류가 발달하였다. 이와 함께 피오르드 입구에서는 회전성 흐름이 형성되고, 유출된 담수로 인해 해당 해역을 중심으로 강한 성층 구조가 생성되었다. 반면, 용빙수가 유출되지 않은 경우에도 유사한 회전 흐름이 나타났지만, 흐름의 강도가 약하고 저층 유속 강화는 뚜렷하지 않았다.

핵심용어 : 담수 유출, 피오르드, FVCOM, 해류패턴

Abstract : To investigate how meltwater runoff affects current patterns in the fjord, a high-resolution numerical model was developed for the Kongsfjorden region in 2007 using Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM). Compared to previous studies, the model adopted a higher-resolution grid, resulting in improved simulation performance. The results showed strong agreement with observations, effectively capturing the temporal variations in water temperature and salinity driven by tidal fluctuations and seasonal changes. The model successfully reproduced the characteristic high water temperatures associated with the West Spitsbergen Current (WSC) and captured the intensification of bottom currents following runoff events. The impact of meltwater was quantitatively assessed by comparing simulations with and without the runoff. The results revealed that during the summer (July~August), increased glacier meltwater runoff induces a strong upstream current near the seabed in Kongsfjorden. A rotational circulation forms near the fjord mouth, and the seawater-meltwater mixing at the surface enhances vertical stratification in this area. In contrast, in the absence of meltwater, the rotational current still develops, albeit more weakly, with minimal enhancement of the bottom-layer flow.

Keywords : freshwater runoff, fjord, FVCOM, current pattern

1. 서 론

용빙수 담수 유출은 지구 온난화로 인해 빙하와 빙상이 녹아 바다로 흘러가는 대표적인 극지방에서의 물리 현상이다. 기후 변화에 의한 용빙수 유출량 증가는 해수면을 상승시키고(van den Broeke et al., 2016), Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)를 약화시키는(Golledge et

al., 2019) 등 전 지구 해양 환경에 영향을 미친다. 용빙수 유출은 해류뿐만 아니라 밀도 경사 또한 변화시켜, 특히, 얇은 입구와 깊은 sill을 가진 피오르드에서 밀도 경사에 의해 유도되는 대륙붕과 피오르드 사이의 물질교환(Aure and Stigebrandt, 1990; Arneborg et al., 2004)에도 영향을 미친다. Cowton et al.(2015)은 이상실험을 통해 300 m³/s 이상의 용빙수 유출량이 발생했을 때, 상층의 해류강도가 3배 이상 강하게 발생

*인하대학교 해양과학과 대학원생(Graduate Student, Department of Ocean Sciences, Inha University)

**인하대학교 해양과학과 교수(Corresponding author: Seung-Buhm Woo, Professor, Department of Ocean Sciences, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea, Tel: +82-32-860-7710, Fax: +82-32-862-5236, sbwoo@inha.ac.kr)

***인하대학교 인공지능융합센터 연구교수(Research Professor, Artificial Intelligence Convergence Research Center, Inha University)

****극지연구소 빙하지권연구본부 책임연구원(Principal Research Scientist, Division of Glacier and Earth Sciences, Korea Polar Research Institute)

했을 뿐만 아니라 하층에서 유입되는 유속이 2배 강화됨을 제시하였다. Bendtsen et al.(2015) 또한 이상 실험을 통해 용빙수 유출량 증가가 피오르드 입구 저층에서 유입되는 해수량과 열량을 약 2배 증가시키고 열 유입 또한 약 2배 증가시키는 것을 보여주었다. 외해로부터의 열 유입의 증가는 피오르드 내 해수 수온을 증가시켜 조수빙하의 용해를 증가시킨다(Motyka et al., 2013; O'Leary and Christoffersen, 2013). 따라서, 용빙수 유출의 영향을 이해하는 것은 극지 연안 환경 변화를 예측하고 관리하는 데 필수적이다.

스발바르의 서쪽 연안(Figs. 1(a) and (b))은 프람 해협에 맞닿아 있어 대서양 수가 분포해 있으며, 이러한 고수온의 해수는 해안선에 위치한 피오르드들 내부로 유입되어 열을 공급한다(Cottier et al., 2005; Inall et al., 2014; Promińska et al., 2017). 해당 지역에 위치한 피오르드들 중 하나인 콩스피오르드에서, 조수빙하의 용해량은 해수 수온과 높은 상관관계($R^2 = 0.66$)를 가지고 있다(Holmes et al., 2019). 콩스피오르드 내 용빙수 유출량은 지속적으로 증가해 왔으며(Pramanik et al., 2018), 이러한 용빙수 유출이 콩스피오르드의 수리학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 다양한 수치모델 연구들이 수행되어 왔다. Sundfjord et al.(2017)은 용빙수 표층 유출로 인해 피오르드 북쪽 해안선을 따라서 외해를 향하는 표층 흐름이 약 7.5 cm/s로 발생했으나, 용빙수 유출이 없을 시, 이 흐름들이 측정되지 않는다고 제시하였다. 또한, 용빙수에 의해 콩스피오르드 외부에서 내부로 유입되는 해수 부피가 10% 증가하였다고 언급했다. 2007년 하계 기간(6~9월)을 대상으로 진행된 모델 연구에서, 조수빙하의 후퇴로 인해 용빙수 유출 위치가 변경될 시, 해수 흐름 특성의 변화가 야기될 수 있음이 제시되었다(Torsvik et al., 2019). 해당 연구에서, 피오르드 입구 근처의 semi-persistent cyclonic eddy는 용빙수가 sub-surface에서 유출될 때 -10~0 m 수층에서 평균 6 cm/s 이상의 강한 유속을 보였으나, 유출 수심이 상층으로 변경되면서 유속이 80% 이상 감소하여 약 1 cm/s의 유속을 보였다. 또한, 유출이 상층에서 발생했을 때, 하층에서 발생했을 때보다 내부 피오르드에서 조수빙하 전면으로 수송되는 순 해수 수송량은 50% 감소했고 내부로 유입되는 열에너지는 또한 53% 감소했다.

콩스피오르드에 관한 기존의 수치모델링 연구는 용빙수 유출 영향보다 조수빙하의 전진과 후퇴에 의한 변화가 주로 분석되었다(Torsvik et al., 2019). 정방격자 기반의 Regional Ocean Modeling System (ROMS)가 사용되었으나(Sundfjord et al., 2017), 격자해상도로 인해 조수빙하 인근 국소적인 지역에 대한 용빙수 유출 및 수직확산을 고려하는데 제한이 있었다. 용빙수 담수 유출과 관련된 조수빙하 인근의 용승과 성층 구조를 더 정확하게 재현하기 위해서는 피오르드의 해안선 및 수심 분포를 반영하는 고해상도 비구조 격자 기반 모델링이 필요하다.

본 연구의 주요 목표는 조수빙하 담수 유출이 콩스피오르

드 내 해류 구조에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것으로, 이를 위해 고해상도 수치모형을 구축하였다. 스발바르 북서쪽 연안 지역을 대상으로 최대 70 m의 공간해상도를 가지는 비구조 삼각 격자 기반 모델 도메인을 구성하였으며, Finite Volume Community Ocean Model(FVCOM)을 적용하였다. 2007년 하계기간을 대상으로 수치모델링을 수행하였으며, 조수빙하 담수 유출 유무에 따른 시나리오 실험 결과를 비교하여 용빙수의 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한, 구축된 모델 결과들을 공공데이터포털(SIOS Knowledge Center, <https://sios-svalbard.org>)에서 제공하는 관측자료와 비교하여 검증하였다.

2. 연구 지역

스발바르 제도는 북대서양과 북극해 사이 관문인 프람 해협 동쪽에 위치해 있어 북대서양과 북극해의 영향을 모두 받는 지역이다(Fig. 1). 프람 해협을 통해 고염(> 34.65 psu), 고온(> 3.0°C)의 북대서양 수(Atlantic Water, AW)를 북쪽으로 수송하는 West Spitsbergen Current(WSC)가 존재한다. 상대적으로 저염(34.3~34.8 psu), 저온(-1.5~1.0°C)의 수괴인 북극수(Arctic Water, ArW)가 Spitsbergen Polar Current(SPC)에 의해 스발바르 서쪽 대륙붕(West Spitsbergen Shelf, WSS)에서 북쪽으로 흐른다. WSS의 대륙붕단에서 프람 해협으로 이어지는 대륙 사면에서는 수심이 -1000 m에서 -500 m로 가파르게 변화한다.

콩스피오르드는 Spitsbergen 북서쪽 해안에 위치한 대표적인 피오르드 중 하나로, 대륙붕단으로부터 콩스피오르드 입구까지 -200 m 이하의 수심을 가지는 해곡인, Kongsfjordrenna로 연결되어 있다. 콩스피오르드 내부에서, Blomstrand의 서측에는 수심이 -200 m에서 -100 m로 변화하는 급격한 수심경사가 존재한다. 이 지역은 5개의 주요 조수빙하인 Kongsvegen(Kov), Kronebreen(Krb), Kongsbreen(Kbr), Conwaybreen(Conw), 그리고 Blomstrandbreen(Bbr)가 존재하기 때문에(Fig. 1(c)) 해류 패턴과 물질 분포는 용빙수 유출에 크게 영향을 받는다.

조수빙하는 붕괴와 용해를 통해 용빙수를 유출시켜 피오르드 내 담수 공급에 기여한다. 이 외에도 피오르드 내 담수 공급은 대기로부터의 강우, 강설, 빙하가 없는 육상에서의 용설, 그리고 지하수에 의해 발생할 수 있다. 용빙수 유출은 콩스피오르드의 담수 공급의 절반 이상을 차지하며(Svendsen et al., 2002) 주로 7월과 8월에 발생한다. 특히, 5대 조수 빙하에서 피오르드 내부 바다로 유입되는 용빙수 유출량은 콩스피오르드 내부에서 발생하는 총 유출량의 50% 이상을 차지한다.

유출된 용빙수와 대륙붕으로부터 내부로 유입되는 AW, ArW는 피오르드 내부에 존재하는 수괴와 혼합되어 다양한 특성을 가진 수괴를 형성한다. 겨울철 표층에서의 냉각과 해빙 형성으로 인해 저층에 수온이 낮은 Winter-Cooled Water

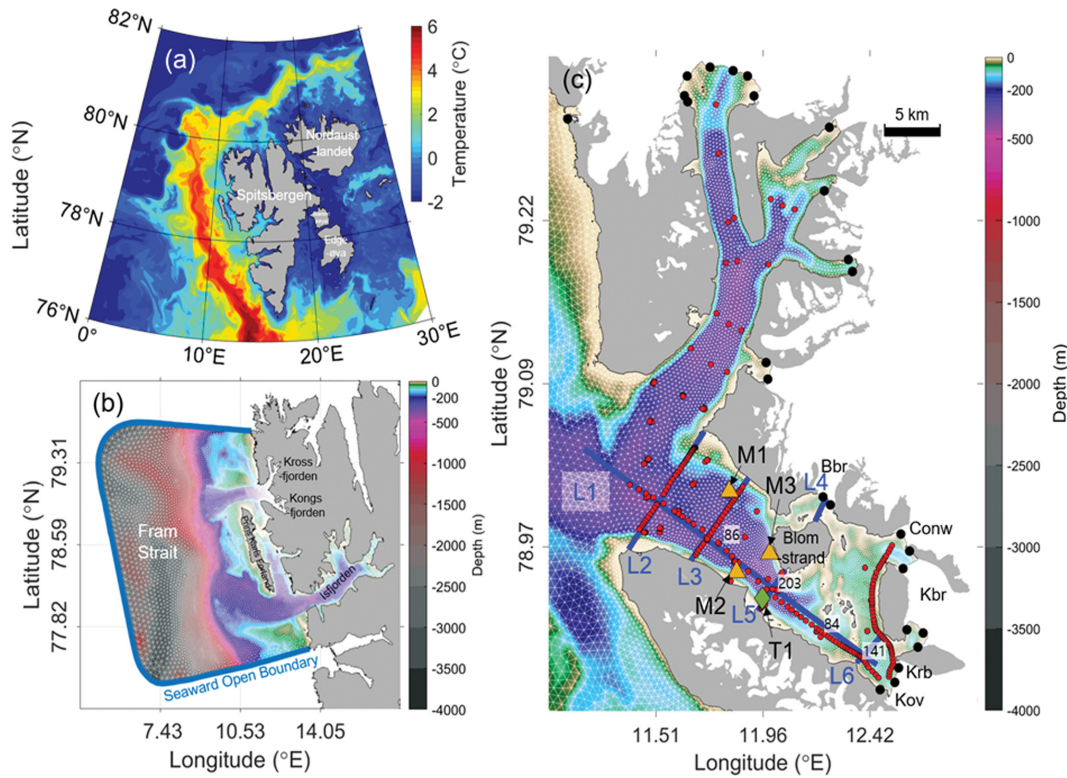


Fig. 1. Map showing the Spitsbergen and Kongsfjorden.

(WCW, $< -0.5^{\circ}\text{C}$, 34.40~35.0 psu)와 Local Water(LW, $-0.5 \sim 1.0^{\circ}\text{C}$, 34.30~34.85 psu)가 형성된다. 여름철 AW는 대륙붕에서 ArW와 혼합되어 Transformed Atlantic Water(TAW, $1.0 \sim 3.0^{\circ}\text{C}$, > 34.65 psu)로 피오르드 내부에 유입되기도 하며, AW와 TAW는 피오르드 내부 중-저층에서 WCW와 LW가 혼합되어 약 1.0°C 이상의 수온과 34.00~34.65 psu 염분을 가진 Intermediate Water(IW)를 형성한다. 또한, 여름철 유출된 용빙수는 해수와의 혼합 및 대기로부터의 가열로 인해 표층

에서 1.0°C 이상의 수온과 34.0 psu 이하의 염분을 가지는 Surface Water(SW)를 표층에 형성해 IW와의 경계에서 성층을 형성한다.

3. 연구 방법

3.1 관측자료 수집

콩스피오르드와 크로스피오르드 지역에서 2007년 7월 19

Table 1. The observed positions, periods, survey water, instruments and variables of mooring data used in this study

Points	Positions	Periods	Survey water (m)	Instruments	Variables	Reference
M1	79° 01.19'N 11° 46.41'E	2006. 06. 06 ~ 2007. 08. 25	-16 -198	SBE37 MicroCAT	Temperature, Salinity	Cottier et al. (2022a)
			-32	SBE16+ logger 5181		
M2	78° 57.44'N 11° 49.36'E	2007. 08. 30 ~ 2008. 08. 18	-34 -167	SBE 37-SMP MicroCAT		Cottier et al. (2022b)
M3	78° 58.40'N 11° 57.59'E	2006. 09. 18 ~ 2007. 09. 09	-30	RCM-7	Temperature, Salinity, Velocity	SIOS Knowledge Center
		2007. 09. 11 ~ 2008. 09. 12	-80 -200			

일부터 9월 16일까지의 기간 동안 271개 지점(red dots in Fig. 1(c))에서 관측된 염분 및 수온 프로파일 데이터(Skogseth et al., 2019, <https://data.npolar.no/dataset/074a215c-d1df-47a9-bea7-e0fcc37273c6>)를 사용하였다. 해당 프로파일 데이터는 1994년부터 2014년까지 스발바르 대학센터(Universitetsenteret på Svalbard AS, UNIS), 베르겐 대학(University of Bergen, UiB), 노르웨이 극지연구소(Norwegian Polar Institute, NPI), 폴란드 해양학 연구소(Institute of Oceanology Polish Academy of Sciences, IOPAS) 그리고 노르웨이 북극 대학(Arctic University of Norway, UiT)에서 수집되었다. M1 및 M2의 계류 데이터는 Cottier et al.(2022a and 2022b, <https://archive.sigma2.no>)를 사용하였으며, M3의 데이터는 SIOS Knowledge Center에서 수집하였다(yellow triangles in Fig. 1(c)). M3에서는 수심 -30 m, -80 m, -200 m에서 계류 관측된 해류 데이터 또한 활용하였다. 해당 자료는 2006년 9월 18일부터 2007년 9월 9일까지, 그리고 2007년 9월 11일부터 2008년 9월 12일까지 관측된 해류 시계열이며, 본 연구의 수치모형 검증 및 분석에 사용하였다. 수온, 염분, 해류 계류 관측 자료의 세부 수집 정보는 Table 1에 제시하였다.

모델의 수위 결과를 검증하기 위하여, T1 지점에서 관측된 수위 자료를 수집하였다(green triangle in Fig. 1(c)). 해당 자료는 University of Hawaii Sea Level Center(UHSLC)와 National Center for Environmental Information(NCEI), National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA) 산하 World Data Center for Oceanography가 공동으로 구축한 Joint Archive for Sea Level (JASL) Research Quality Data Set에 포함된 자료이다. 자료 기간은 2004년부터 2017년까지 1시간 간격으로 제공되었으며, 2007년 1월 1일부터 12월 31일까지의 데이터를 본 연구에 사용하였다.

3.2 Model configuration

본 연구는 Finite Volume Community Ocean Model(FVCOM)을 사용하였다. FVCOM은 미국 매사추세츠 공과대학(University of Massachusetts Dartmouth, UMASSD)과 우즈홀 해양학 연구소(Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI)에서 개발한 3차원 해양순환 모델이다(Chen et al., 2013). 삼각형 격자를 사용하며, 연속방정식, 운동방정식, 열-염 보존방정식, 그리고 밀도 방정식으로 원시방정식이 구성되어 있다. FVCOM과 관련된 상세한 지배방정식은 Chen et al.(2013)에 기술되어 있다.

모델 격자는 이스피오르드, 크로스피오르드 및 콩스피오르드가 위치한 Spitsbergen 서해안의 북쪽 연안을 대상으로 구축되었다(white solid line in Figs. 1(b) and 1(c)). 피오르드 외부와 내부의 상호 작용을 고려하기 위해, 모델의 영역을 WSS와 프람 해협까지 확장하여 WSC와 ESC를 포함하였다. 모델 격자의 해안선은 NPI에서 제공하는 100 m 해상도의 해안선 데이터(<https://data.npolar.no>)를 사용해 구성되었으며,

격자 내 총 52,743개의 삼각형 요소와 28,020개의 절점을 가지고 있다. 수평 해상도는 격자의 외해 개방 경계 인근에서 약 5,300 m의 수평 해상도를 가지며 연안으로 인접할수록 세밀한 해상도를 가지며 콩스피오르드 내측에서는 최소 70 m의 해상도를 가진다. 수직 격자구조는 terrain-following sigma coordinate를 사용하며 35개의 층으로 구성되었다. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean(IBCAO)(Jakobsson et al., 2020)의 200 m 수평 해상도를 가지는 수심데이터를 비구조격자에 보간하여 전체 영역에서 -3,500~5 m의 범위를 가지는 격자의 수심을 구성하였다. 이러한 비구조 격자는 지형의 수심경사에 따라 적합한 해상도를 설정할 수 있어 대륙 봉단과 Blomstrand 해안을 따라 존재하는 급격한 수심경사가 고려되었다. 또한, 복잡한 피오르드의 해안선이 모델에 반영되었다.

모델 모의 시, 10 m 상공에서의 바람, 평균 해수면 기압, 그리고 열 속이 모델 표층 경계 조건으로 고려되었다. 표층 경계 입력자료 구성을 위해, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 수평 해상도와 1 시간 간격을 갖는 5세대 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF) 재분석장(ERA5)의 기상 자료가 사용되었다.

ROMS를 사용해 모의된 800 m 공간 해상도를 가진 스발바르 해역 모델인 S800 모델의 수온 염분 데이터(Hattermann et al., 2016)가 NPI로부터 제공되어 외해 개방 경계입력 조건과 초기 조건으로 사용되었다. 해당 모델은 여름철 북극해에서 최대 1°C 의 저온 편향을 보인다. 그러나, 본 연구의 모델 격자에 포함된 CTD 단면 및 계류 시계열 관측자료와 비교하였을 때, 현실적인 수괴와 등밀도 경사를 반영하고 있다(Hattermann et al., 2016).

외해 개방경계의 수위 조건은 오리건 주립대학교에서 개발된 Inversed 조석 모델과 TOPEX/Poseidon 위성 고도계 데이터를 자료동화한 TPXO8-atlas 데이터(Egbert and Erofeeva, 2002)를 기반으로 구성하였다. 주요 분조인 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 및 콩스피오르드에서 우세하게 나타난 반일주조 성분인 N_2 (Tverberg et al., 2019)에 해당하는 조석 성분을 TPXO8-atlas 자료로부터 추출하여 경계 조건으로 적용하였다. 유속의 초기조건은 0으로 일정하게 설정되었다.

FVCOM에서는 육상 빙하에 기원하는 강과 조수 빙하로부터의 용빙수 유출량을 유출 위치에 해당하는 육상 경계 격자 절점에서 부피 플럭스로 입력한다. S800에서 사용된 용빙수 유출량과 위치 정보를 NPI로부터 제공받아 FVCOM 입력 데이터로 활용하였다. 육상 빙하 기원 surface runoff는 수직 격자의 최상위 층(1번째 층)에만 적용하였다. 조수빙하에 기인한 sub-surface runoff는 각 조수빙하에 해당하는 격자 절점(black dots in Fig. 1(c))의 31~35번째 수직층에 입력하였다. 순수 담수인 용빙수의 염분과 수온은 0 psu와 0°C 로 간주되나, 빙하 저면의 수로 및 강 하구에서 해수와의 혼합됨에 따라 이 값은 변동할 수 있다. 본 연구에서는 노르웨이 연구팀

에서 개발한 K160 입력자료를 기반으로, FVCOM에서 용빙수 염분은 1 psu로 일정하게 설정되었다. 그리고, sub-surface runoff 용빙수의 온도는 0.5°C로 일정하게 설정하였다.

용빙수 유출의 영향을 분석하기 위하여 두 가지 수치 모형 시나리오를 설정하였다. Case1은 용빙수 유출이 포함된 실험이며, Case2는 이를 포함하지 않은 대조 실험이다. 용빙수 유출의 효과는 두 시나리오 간의 모형 결과를 비교함으로써 분석되었다.

4. 연구 결과

4.1 수치모형 검증

정량적인 모형 검증을 위해 조위, 수온, 염분, 그리고 유속에 대한 관측치와 모델치 사이의 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, *RMSE*), Index of Agreement (*IOA*) 및 Pearson 상관계수(*R*)가 다음과 같이 계산되었다:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right) \quad (2)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M_i - O_i|^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

여기서, *M*과 *O*는 각각 모델 데이터와 관측 데이터를 나타내

며, *N*은 관측 데이터의 총 개수, *i*는 1부터 *N*까지의 개별 데이터를 의미한다. Bar 기호는 평균값, σ 는 표준편차를 의미한다. *RMSE*는 백분율로 표현되며, 값이 낮을수록 분산이 작고, 모형의 예측 성능이 우수함을 의미한다(Williams and Esteves, 2017). *R*의 값은 -1부터 1까지의 범위를 가지며, 양의 값은 양의 상관관계, 음의 값은 음의 상관관계를 의미한다. *R*은 모형 결과와 관측 값 간의 일치도를 정량적으로 평가하기 위해 사용되었다. *IOA*는 모형과 관측값 간의 평균 제곱 차이를 기준으로 모형 정확도를 평가하는 지표로, 값의 범위는 0에서 1 사이이다. *IOA* 값이 클수록 모형 결과가 관측 값에 더 잘 일치함을 의미한다.

T1 지점의 관측자료를 통해 나타난 조위의 일반적인 특징이 모형 결과를 통해 파악되었다(Figs. 2(a) and 2(c)). 관측된 조차(black lines in Figs. 2(a) and 2(c))는 약 1 m이고, Case1 조위 결과(red lines in Figs. 2(a) and 2(c))는 관측된 조차의 8%에 해당하는 0.08 m의 *RMSE*를 보인다. 조위에 대한 관측과 모형 결과 사이의 *R*은 0.97, *IOA*는 0.99다. 이는 용빙수 유출이 적용된 시뮬레이션 결과가 조위에 대해 높은 정확도를 가지고 있음을 나타낸다. 이 지역의 장기적인 해수면 변동 경향성을 보기 위해 관측자료와 모형 결과에 48시간 Low Pass Filter를 적용하여 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 2(b)에 도시되었다.

콩스피오르드의 염분과 수온은 계절에 따라 시간 및 공간적인 변동성을 가진다(Fig. 3). M1에서, 6월 22일경 수온이 2°C에서 4°C로 급격하게 상승하였다(black dots in Fig. 3(a)). M3에서, 7월부터 8월까지 4°C 이상의 수온이 지속되었으며, 7월 20일부터 8월 20일까지 수온이 상승하여 최대 수

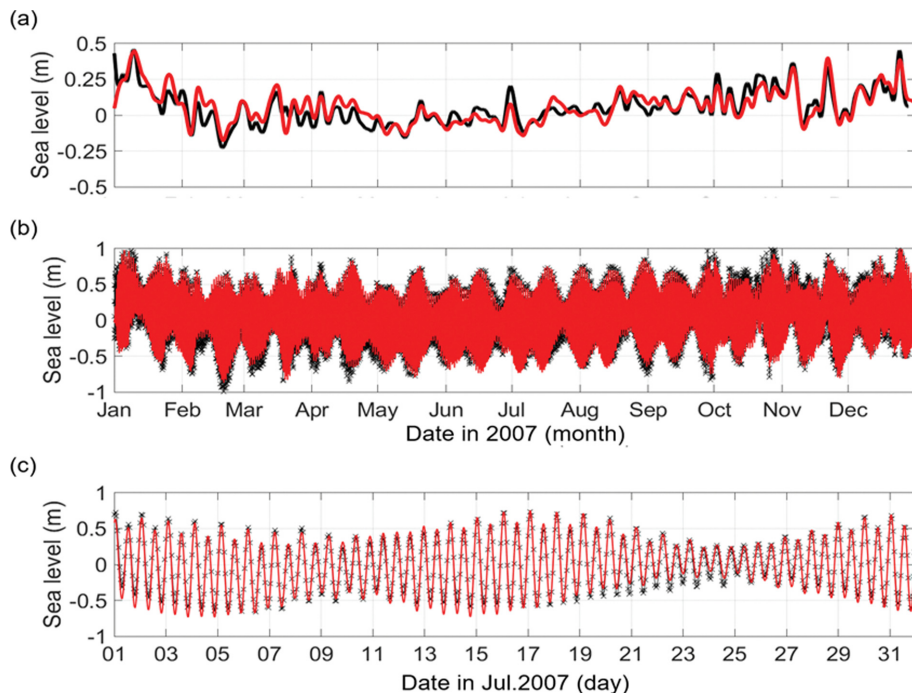


Fig. 2. The time series of surface elevation at T1 in 2007.

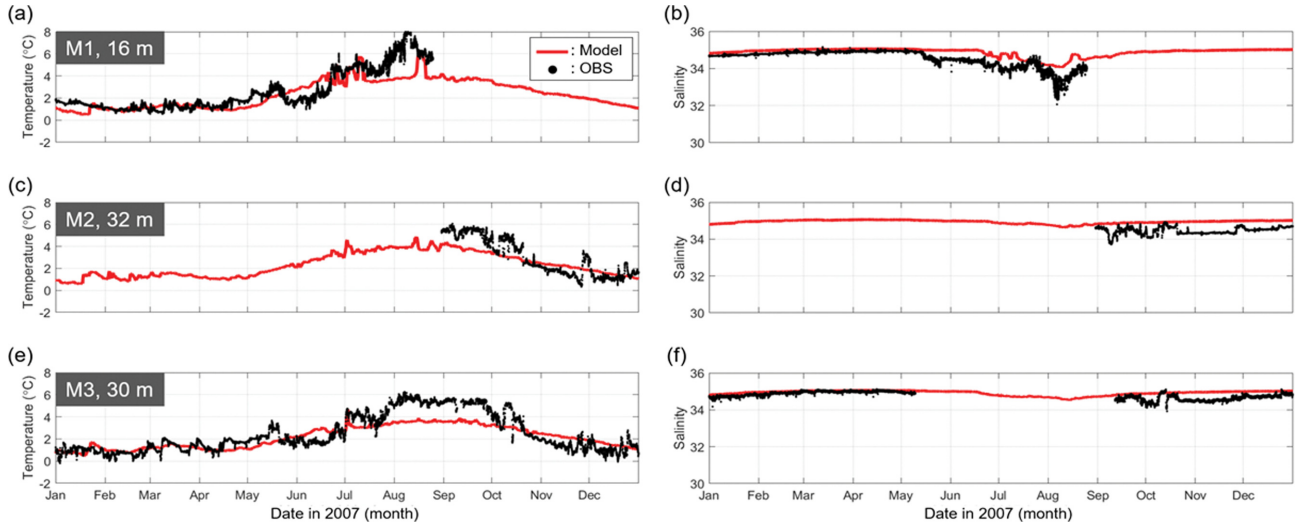


Fig. 3. The time series of the temperature and salinity at M1~M3.

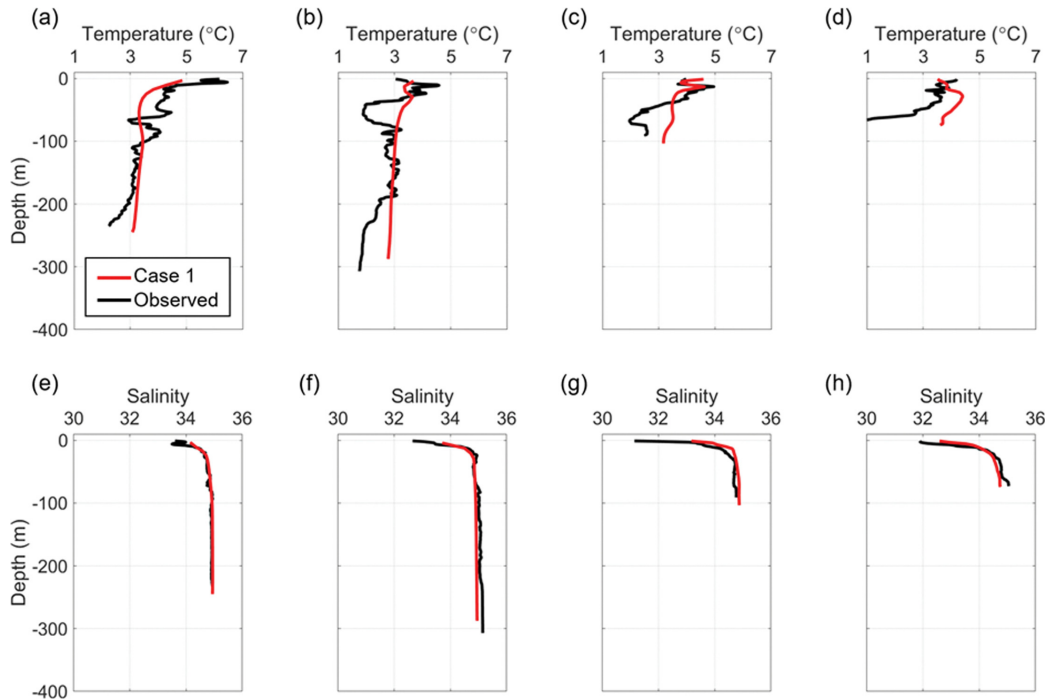


Fig. 4. Model-data comparisons on the vertical profile of water temperature (upper panels) and salinity (lower panels) at CTD points number (a and e) 86, (b and f) 203, (c and g) 84, and (d and h) 141.

온이 약 8°C 였다. 이후 겨울로 바뀌면서 수온의 감소가 발생했다. 수온에 대한 모델 결과(red lines in Figs. 3(a), 3(c), and 3(e))는 IOA가 0.85로 관측된 수온과 같은 급격한 상승은 없었으나, 5월부터 수온 상승이 지속되어 6~9월 동안 3°C 이상의 수온이 모의되었다. 또한, 급격한 수온 상승이 발생한 6월 22일부터 모델 결과의 수온 변동 폭이 증가하였다.

여름철 염분이 감소하는 현상이 M1의 수심 16 m에서 관측된 계류 자료(black dots in Fig. 3(b))와 모델 결과(red line in Fig. 3(b)) 모두 나타났다. 동일한 지점에서 8월 관측 염분의 최소값은 약 32 psu인 반면, 모델 염분의 최소값은 약 34 psu이다. 1~4월 기간동안 M1과 M3 지점의 염분 변동성

은 거의 없으며, 관측 값과 모델 결과에서 모두 약 35 psu의 값을 보인다. 9~10월 기간동안 관측된 염분은 약 34 psu까지 감소하지만, 모델 결과의 염분의 변동성은 상대적으로 관측 결과에 비해 크지 않았다. 모델의 염분 값은 IOA가 0.65로 관측치에 비해 다소 과소평가되었지만, 차이가 2~3 psu 범위에 존재했다. 과소평가된 모델 결과는 모델에 입력되는 용빙 수 유량이 실제 현상 보다 적거나 추가적인 담수 공급원이 고려되지 않아서 발생할 수 있다.

L1 정선의 네 개 정점(86, 203, 84, 141)에서 관측된 수온 및 염분 프로파일은 Fig. 4에서 검은 선(black lines)으로 표시되었으며, 이에 대한 수치모형 결과는 같은 그림의 빨간 선

(red lines)으로 함께 제시되었다. Blomstrand 서측에 위치한 정점 86에서는 표층 수온이 6°C 이상으로 관측되었으며, 피오르드 내측 정점들의 표층 수온은 주로 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 범위에 분포하였다. 수심 -200 m 보다 깊은 해역에서는 -200 m 에서 -100 m 사이에 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 의 수괴가 형성된 양상이 나타났다(Figs. 4(a) and 4(b)). 반면, 수심 -100 m 보다 얕은 정점들에서는 표층 수온과 유사하거나 더 높은 수온의 수괴가 -50 m 에서 -10 m 사이에 분포하였다(Figs. 4(c) and 4(d)). 수온에 대한 모델 결과와 관측값을 비교한 결과, IOA는 0.65로 계절 변동에 대한 재현성보다는 낮았으나, 피오르드 내부 정점일수록 중층($-50\text{ m}\sim -10\text{ m}$)에서 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 수괴가 형성되는 경향은 모델에서도 유사하게 재현되었다.

86번 정점의 염분 프로파일에서는 표층 염분이 약 33.5 psu로 관측되었다(Fig. 4(e)). 피오르드 내부로 갈수록 표층 염분은 점차 감소하는 경향을 보였으며, L5 동측에 위치한 정점 84와 141에서는 표층 염분이 32 psu 이하로 낮아졌다(Figs. 4(g) and 4(h)). 모델 결과와 관측값을 비교한 결과, 수직 염분 분포에 대한 IOA는 0.80으로 비교적 높은 재현성을 나타냈으며, 표층의 저염수가 피오르드 내부로 갈수록 두드러지게 나타나는 경향이 모델에도 반영되었다. 또한, 모델에서는 표층에 저염수가 분포하고 수심 -25 m 이하에서는 약 35 psu의 고염수가 안정적으로 유지되는 등, 피오르드의 전형적인 수직 염분 구조가 적절히 재현되었다.

M3의 수심 -30 m , -80 m , 그리고 -200 m 에서 2007년 한 해 동안 관측된 유속 자료(black dots in Fig. 5)와 모델의 유

속 결과(red dots in Fig. 5)를 비교하였다. 관측 및 모델의 유속 성분을 IOA 기준으로 평가한 결과, U 방향 유속은 0.50, V 방향 유속은 0.53으로 계산되었다. 이는 수온과 염분에 비해 낮은 정확도를 나타낸다. 한편, 관측 값과 모델 결과 모두에서 V 성분의 유속이 U 성분보다 약 두 배 이상 강하게 나타났다. 유향의 차이는 수심별로 -30 m 에서 7.50° , -80 m 에서 6.38° , -200 m 에서 5.32° 로 분석되었다.

4.2 용빙수 유출 적용 시(Case1), 월평균 유속변화

용빙수 유출이 피오르드 내 해류 패턴에 미치는 영향을 분석하기 위해 Case1의 월평균 표층 해류 분포를 제시하였다(black vectors and contours in Fig. 6). 콩스피오르드 내부에서의 용빙수 유출량은 5월에 평균 $0.3\text{ m}^3/\text{s}$ 로 가장 낮게 나타났다. 이 시기 L2 단면의 표층 중앙에서는 외부로부터 약 7 cm/s 의 유입 흐름이 시뮬레이션되었다. 해당 흐름은 L3를 통과한 후 피오르드 내부로 향하다가, 유향이 전환되어 북측 해안선을 따라 L2 북측 구간에서 약 3 cm/s 의 유속으로 유출되는 반시계 방향의 흐름 패턴을 형성하였다. 한편, 외부로부터 유입된 흐름의 일부는 L5 북측 구간을 따라 약 5 cm/s 의 유속으로 Krb 방향으로 이동하는 경로가 모사되었다. 6월에는 용빙수 유출량이 평균 $72.1\text{ m}^3/\text{s}$ 로 크게 증가하면서, Krb에서 북쪽으로 Conw를 향하는 약 12 cm/s 의 표층 해류가 수심 0 m 에서 계산되었다. 이 흐름은 10 cm/s 이상의 유속으로 L4 단면을 통과하여 L2 북측 구간에서 약 7 cm/s 로 유출되었다. 반면, L2 남측 구간을 통한 유입 흐름은 5월에

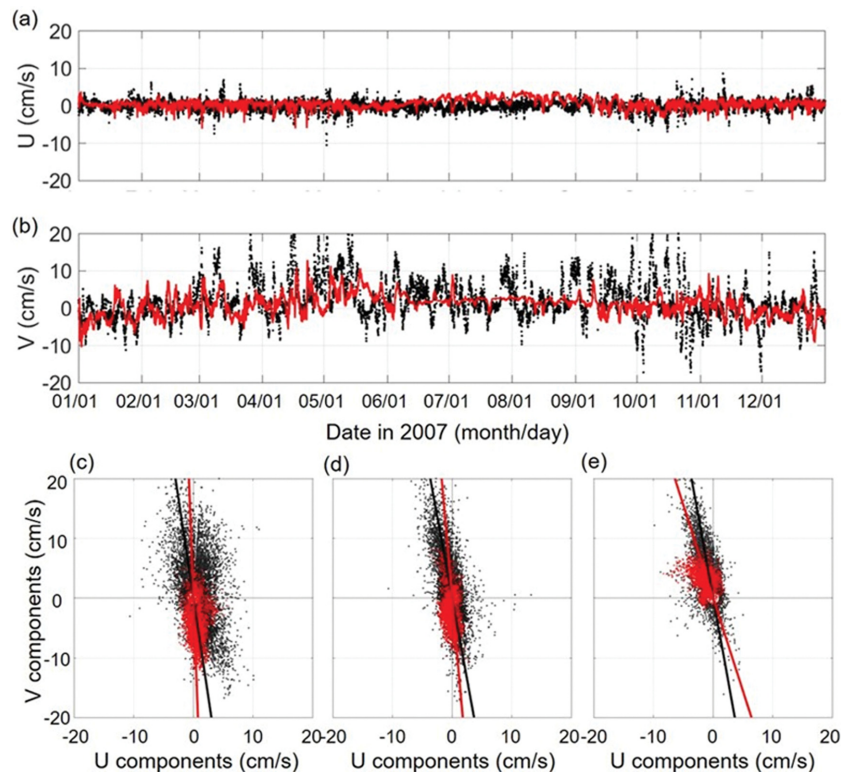


Fig. 5. Model-data comparisons on the temporal variations of current velocity and direction by layer in M3.

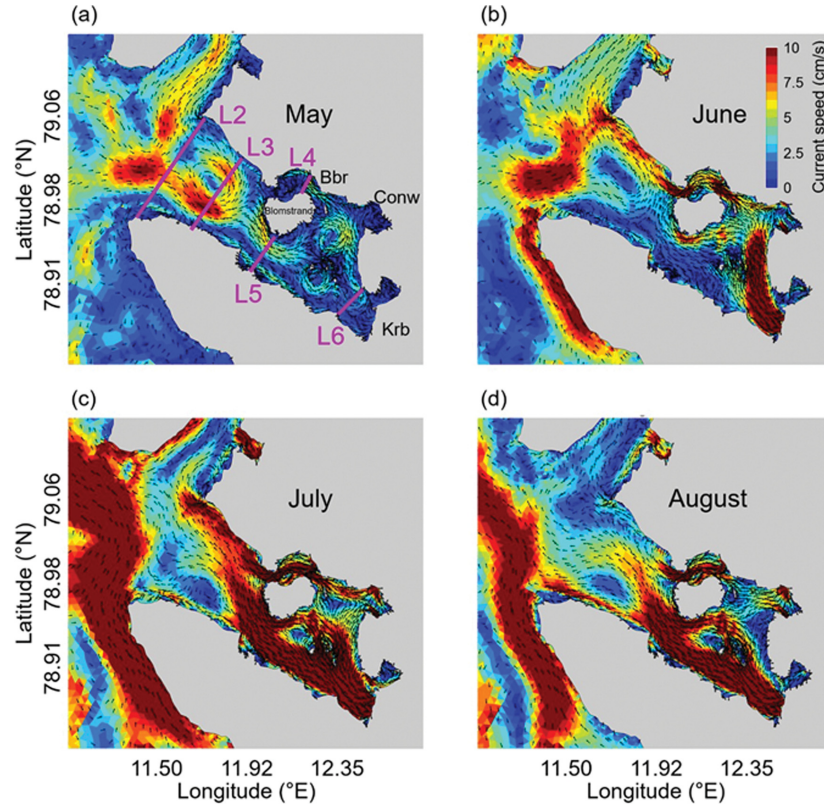


Fig. 6. Seasonal variability of spatial velocity changes for Case1.

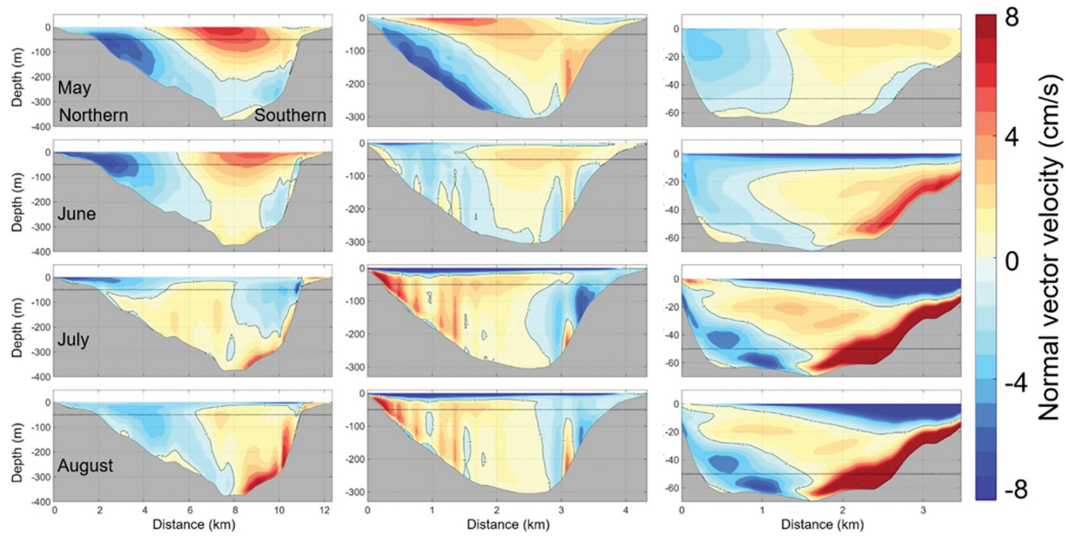


Fig. 7. The monthly mean normal current speed distribution of Case1 in May, June, July, and August at L2 (left panels), L5 (middle panels), and L6 (right panels).

비해 절반 이하 수준으로 약화되었다. 또한, L5 구간에서는 5월과 반대 방향인 피오르드 외부를 향하는 흐름이 최대 8 cm/s의 유속으로 계산되었다.

Fig. 7은 L2, L5, 그리고 L6 단면에서의 월평균 법선 방향 유속변화를 보여준다. 음의 법선 방향 유속값은 단면에서의 유출, 양의 유속값은 유입을 의미한다. 세 단면 모두 5월에는 표층에 인접하여 유입되지만, 7월과 8월에는 저층에서 유입되는 흐름이 나타난다. 5월에 Krb과 인접한 L6 단면 남측 1.5~

3.5 km 구간의 수심 0~20 m 수층에서 약 2 cm/s로 유입되는 흐름이 발생했다. 같은 기간 L6의 북측 구간에서는 약 3 cm/s로 유출이 계산되었다. 용빙수 유량이 증가하는 6월부터 표층에서 8 cm/s 이상의 유출이 나타났으며, 남측 해저면 인근에서 약 5 cm/s의 유입이 발생하였다. 7월과 8월에는 L6 단면의 0.5~3.5 km 구간의 표층에서부터 수심 -20 m까지 8 cm/s 이상의 유속으로 유출되었으며, 단면의 남측 해저면으로부터 약 10 m 두께의 수층에서 8 cm/s 이상의 유입이 계산되었다.

4.2 용빙수 유출 미적용 시(Case2), 월평균 유속변화

용빙수를 입력하지 않은 모델 시나리오인 Case2 결과에 대한 월평균 표층 해류의 수평 분포가 제시되었다(black vectors and contours in Fig. 8). 5월, 7월, 그리고 8월 동안 L2 중앙으로 유입된 해류는 L3를 통과한 후 유향이 반시계 방향으로 전환되어 L2의 북측 구간으로 유출되는 패턴을 보였다. 반시계 방향의 해류는 북쪽 해안선 지역보다 남쪽 해안

선 인근에서 5월에 유속 10 cm/s 이상의 더 강한 흐름을 발생시켰다. 7월과 8월 또한 남쪽이 북쪽 보다 더 큰 유속을 보였으나, 유속은 5월에 비해 50% 감소하였다. L5에서 피오르드 내부를 향하는 흐름이 5월에 발생했으며, 이로 인해 Blomstrand 동쪽 지역에서 7월과 8월보다 높은 유속의 해류를 형성하였다.

6월 평균 표층 해류 분포에서는 다른 시기와 달리 L2 지

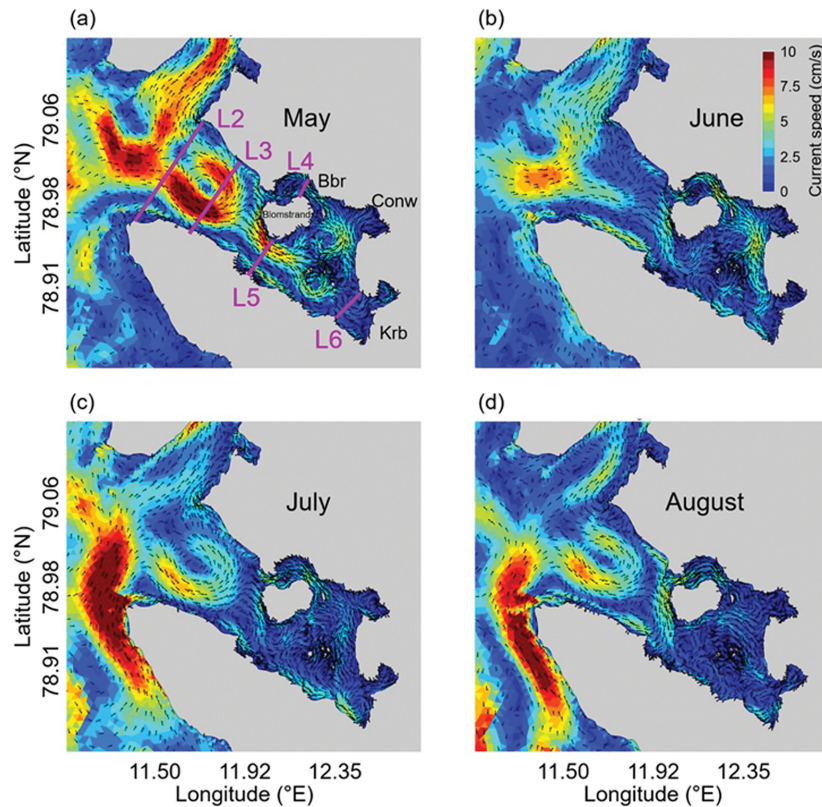


Fig. 8. Seasonal variability of spatial velocity changes for Case2.

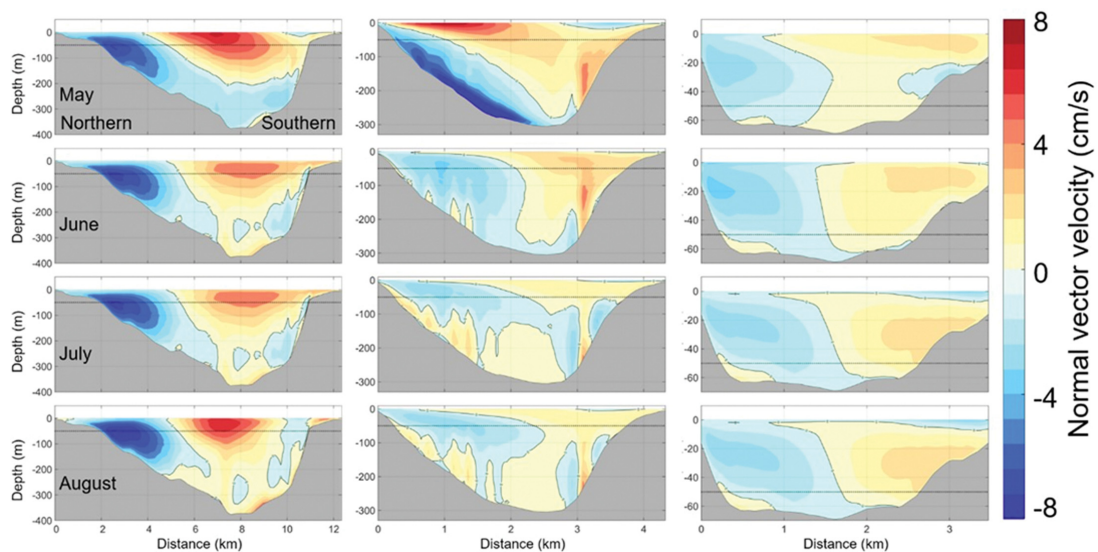


Fig. 9. The monthly mean normal current speed distribution of Case2 in May, June, July, and August at L2 (left panels), L5 (middle panels), and L6 (right panels).

점에서 반시계 방향의 순환 흐름이 모사되지 않았다. L2를 통해 유입된 해류는 Blomstrand 서측 연안을 따라 남하하였으며, 일부는 L5를 경유하여 피오르드 내부로 유입되거나, 수심 -200 m 등심선을 따라 남측 연안을 따라 L3 방향으로 약 3 cm/s의 속도로 흐르는 경향이 시뮬레이션되었다. 이러한 흐름 특성은 8월 평균 해류 시뮬레이션 결과에서도 유사하게 재현되었다.

Case2의 5월부터 8월까지 월평균 법선 해류 분포는 L2와 L6에서 월별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다(Fig. 9). L2에서는 모든 월에서 수심 약 -100 m에서 -50 m(black dotted line in Fig. 9) 구간에 걸쳐 유출을 의미하는 음의 법선 방향 유속값이 나타났으며, 8 cm/s 이상의 유출이 지속적으로 시뮬레이션되었다. 다만, 이러한 유속을 가지는 단면적은 5월에서 8월로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보였다. 한편, 5월에는 단면 중앙의 표층에서 약 8 cm/s의 유입이 시뮬레이션되었으나, 6월과 7월에는 약 4 cm/s로 감소하였고, 8월에는 다시 약 6 cm/s로 증가하는 양상을 나타냈다.

L6에서는 5월부터 8월까지 단면 북측에서의 유출과 남측에서의 유입이 지속적으로 나타났다. 전체 단면에서의 유속은 대부분 3 cm/s 이하로 유지되었으나, 6월에는 수심 -20 m 부근에서 3.2 cm/s 이상의 유출이 확인되었다. 시기적으로는 5월에서 8월로 갈수록 남측 표층에서 유출 흐름을 포함하는 수층 두께가 점차 증가하여 약 5 m까지 확대되었으며, 이에 따라 유입 흐름의 수심도 점차 깊어졌다. 그 결과, 5월에는 표층에서 약 2 cm/s로 유입되던 흐름이 8월에는 수심 -50 m에서 -20 m 사이에서 형성되었다.

5월 평균 법선 해류 분포에서는 L5 남측 표층에서의 유입과 남측 저층 인근 수층에서의 유출이 각각 8 cm/s 이상의 유속으로 시뮬레이션되었다. 그러나, 6월에는 이와 같은 표층 유입 및 저층 유출 흐름이 현저히 약화되어 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이어지는 7월과 8월에는 전체 단면에서 유입 유속이 대부분 2.4 cm/s 이하, 유출 유속은 3.2 cm/s 이하로 낮아진 것으로 분석되었다. 아울러, 유출이 발생하는 수심은 5월에 비해 점차 표층에 가까워지는 경향을 보였다.

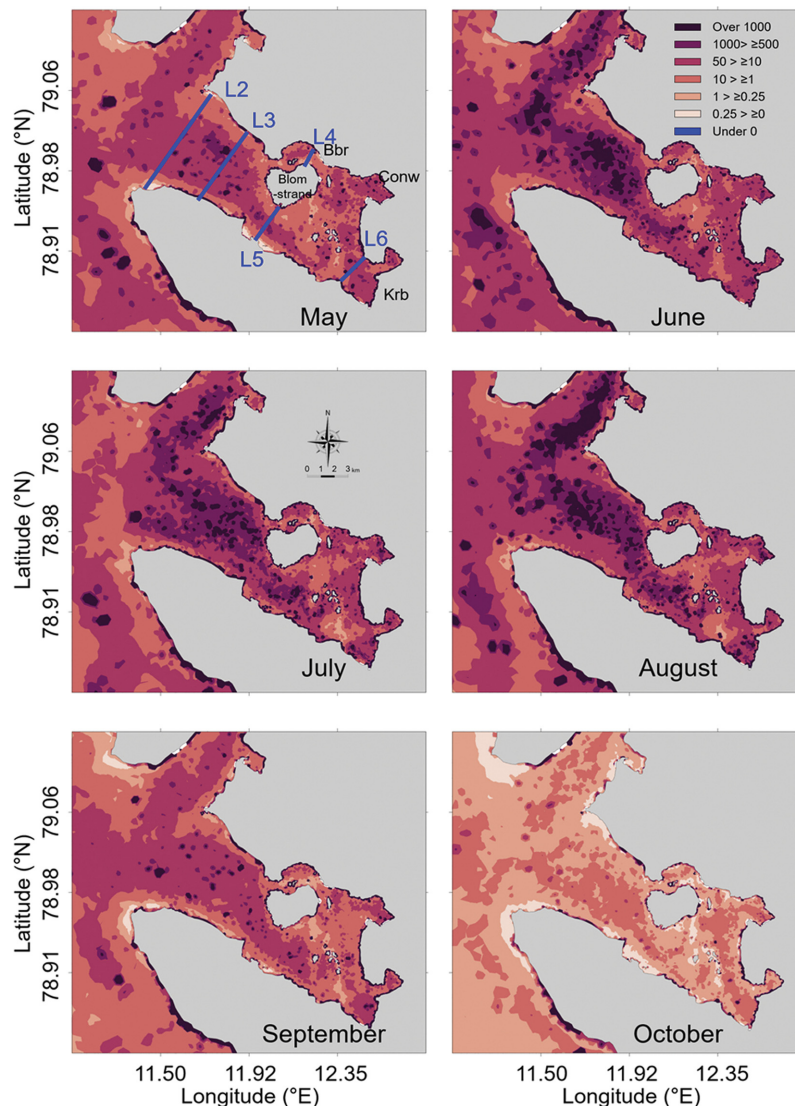


Fig. 10. Monthly mean distribution of depth-averaged Gradient Richardson number (Ri) for Case1 in Kongsfjorden.

5. 고 찰

5.1 콩스피오르드 내부 성층 강도

용빙수에 의해 유도된 연직 전단과 성층 안정성 간의 상호 작용으로 발생할 수 있는 난류 가능성을 정량적으로 평가하기 위하여, 본 연구에서는 Gradient Richardson 수(Ri) (Mack and Schoeberlein, 2004)를 다음과 같이 계산하였다:

$$Ri = \frac{N^2}{S^2} = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\frac{d\rho}{dz}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

여기서, g 는 중력 가속도(9.81 m/s^2), ρ 는 각 수심의 밀도(kg/m^3), ρ_0 는 기준 밀도($1,025 \text{ kg/m}^3$), z 는 수직 좌표(m), u 및 v 는 각각 동서 및 남북 방향 유속(m/s)을 나타낸다. 분모는 수직 밀도 구배로부터 계산되는 부력진동수(N)의 제곱에 해당하며, 분자는 수직 유속 전단(S)의 제곱이다. 분자는 성층 안정성을, 분모는 난류를 유도할 수 있는 속도 전단의 강도를 나타낸다. Ri 는 해수 수층의 안정성을 평가하는 지표로, 일반적으로 $Ri < 0.25$ 인 경우 전단과 관련된 불안정성에 의해 난류가 발생할 가능성이 있고(Howard, 1961), $Ri > 1$ 인 경우에는 수층이 안정된 것으로 간주된다(Abarbenal et al., 1984).

Case1 결과를 통해 계산된 콩스피오르드에서 월평균 수심 평균 Ri 의 공간 분포가 Fig. 10에 제시되었다. 피오르드 내부에서의 평균 Ri 값은 모두 양수로 계산되었다. 5월 평균 Ri 는 수심 -200 m 보다 깊은 지역에서 50 이상이었으며, 수심이 얇은 연안에서 상대적으로 낮은 값을 보였다. 특히, L5와 L2의 남측 끝에 위치한 해안선 인근 지역에서 0.25 이하의 값을 보였다. 6월, L2와 L5 사이 지역에서 5월에 비해 Ri 값이 500 이상인 지역이 증가했고, 콩스피오르드 내부 남측 해안선 연안에서도 1 이상의 Ri 값을 보이며 성층이 강화되었다. 또한, L5에서 L6 사이의 지역에서 5월보다 평균 Ri 값이 10 이상인 영역이 약 2배 증가했다.

7월과 8월 평균 Ri 분포 또한 6월과 유사한 분포를 보였다. 그러나, L3에서 6~7월 Ri 가 500 이상인 지역이 중앙에 위치하였으나, 8월에는 상대적으로 북쪽에 위치하였다. 이후 9월에는 성층의 약화로 인해 L5의 서쪽과 동쪽에서 각각 50 미만, 10 미만의 평균 Ri 값이 우세하였다. 10월에는 1 미만인 평균 Ri 값이 지역이 콩스피오르드 내부의 면적의 약 50%에서 나타나 약한 수직 혼합이 발생할 가능성이 증가했음을 보여준다.

L1 정선에서의 표층 밀도 분포는 7~8월 Ri 가 증가한 시기에 동측이 서측보다 낮은 밀도를 나타내며, 뚜렷한 동-서 방향의 표층 밀도 경사를 형성하였다. L1 양 끝 사이의 표층 밀도 경사는 8월 4일 $1.7 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^4$ 로 최대값을 보였다. 성층이 약화되는 9월 이후, 밀도 경사는 점차 감소하여 10월에는 피오르드 입구 부근과 조수빙하 전면부의 표층 밀도 차이가 거의 나타나지 않았다.

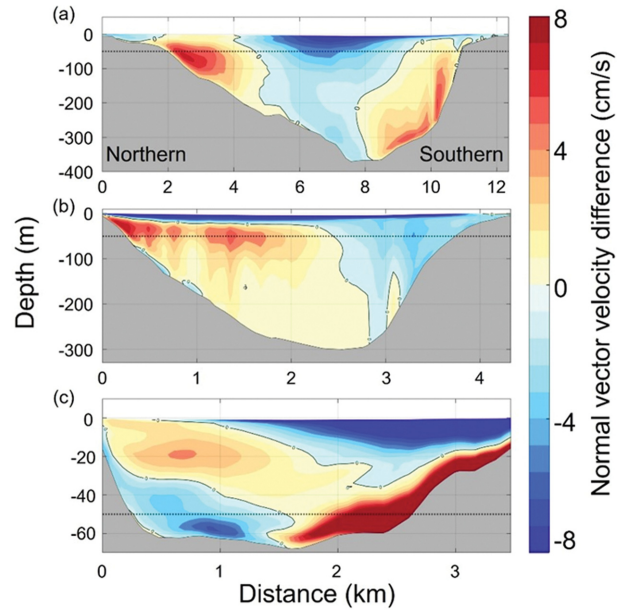


Fig. 11. The normal current speed difference between the monthly mean results of Case1 and Case2 (Case1 minus Case2) for August at (a) L2, (b) L5, and (c) L6.

5.2 여름철 피오르드 입구부 흐름전파 특성

Case1과 Case2의 차이는 Sundfjord et al.(2017)에서 제시되었던 Krb 전면에 위치한 L6의 북측 수심 -20 m 에서 유입되는 흐름들이 용빙수 유출에 의해 유도된다는 것을 보여준다(Fig. 11). 또한, Case1과 같이 surface runoff와 sub-surface runoff의 영향이 함께 고려된 경우, 해저면 인근에서도 유입되는 보상흐름이 용빙수 유출로 인해 발생하였다. 뿐만 아니라, 선행연구에서 사용된 160 m 정방격자 기반 모델(Sundfjord et al., 2017)보다 향상된, 최대 70 m 공간해상도를 갖는 비정형 삼각 격자 기반의 고해상도 모델을 사용함으로써, sub-surface runoff의 영향이 반영된 경우에 조수빙하로부터 10 km 이상 떨어진 L5의 수심 -50 m 에서 또한 유입되는 보상흐름이 발생할 수 있음을 추가로 확인하였다. 같은 정선에서 담수유출로 인해 수직 및 수평적인 성층이 형성되고, 표층의 흐름은 외해방향으로 강화된다. 이러한, 보상흐름 및 성층 형성은 L5 서쪽 지역의 수심 $-200 \sim -100 \text{ m}$ 에 위치한 수온 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ 의 수괴가 L5의 동쪽으로 표층 아래 수심 $-10 \sim -50 \text{ m}$ 수층으로 유입될 수 있도록 한다(Figs. 4(a~d)). 따라서, 용빙수에 의한 저층 유속 강화 및 성층 형성 시기는 고수온 수괴 유입 측면에서 중요하다.

6. 결 론

이 연구에서, 조수빙하 담수 유출이 피오르드 내부 해류 패턴에 미치는 영향이 모델 시뮬레이션 실험을 통해 정량적으로 분석되었다. 2007년 콩스피오르드 연안 대상에 고해상도의 비정형격자 FVCOM이 적용되었으며, 유출 유무에 따른 모델 결과들이 비교 및 분석되었다. 이 논문의 결론은 다

음과 같다:

(1) 콩스피오르드를 포함한 스발바르 북서쪽 연안을 대상으로 고해상도 수치모형이 구축되었다. 기존 연구들에 비하여 고해상도 격자로 구성되었으며, 모델 결과들이 조위와 계절에 따른 수온, 염분의 시간적인 변동성에 대해 높은 재현성($IOA > 0.65$)을 보였다. 또한, 모델은 북쪽을 향하는 고수온의 WSC 특성을 재현하고 있으며, 용빙수 담수 유출 시 발생하는 저층 유속 증가를 뚜렷이 재현하였다.

(2) 조수빙하 용빙수 유출 증가로 인해 콩스피오르드 여름철(7~8월)에 내부 강한 상류방향 흐름이 발달한다. 피오르드 입구 인근 지역에서 회전성 흐름이 발달하고, 이 지역을 중심으로 유출된 담수로 인해 성층이 강하게 형성된다.

(3) 용빙수 유출이 없을 시에도 회전성 흐름이 발달하나, 그 강도가 약하며, 저층의 흐름강화 현상은 미미하다. 또한, 용빙수 적용 시와 다르게 Blomstrand 남쪽 -50 m 깊이에서 7월과 8월에 3.5 cm/s의 속도로 내부 피오르드 방향으로 해류가 발생했다.

이러한 결과는 2007년 단일 연도를 대상으로 한 시뮬레이션이라는 한계를 가지지만, 하계 기간 조수빙하 담수 유출이 고위도 피오르드 내 해류 및 성층 구조에 미치는 영향을 정량적으로 제시함으로써, 향후 조수빙하 기원 물질의 이동 경로와 해양 환경에 대한 영향을 평가하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(RS-2022-KS221548, 경기·인천씨그라트)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. RS-2022-00155915, 인공지능융합혁신인재양성사업(인하대학교)).

References

- Aure, J. and Stigebrandt, A. (1990). Quantitative estimates of the eutrophication effects of fish farming on fjords. *Aquaculture*, 90(2), 135-156.
- Arneborg, L., Erlandsson, C.P., Liljebladh, B. and Stigebrandt, A. (2004). The rate of inflow and mixing during deep-water renewal in a sill fjord. *Limnology and Oceanography*, 49(3), 768-777.
- Bendtsen, J., Mortensen, J. and Rysgaard, S. (2015). Modelling subglacial discharge and its influence on ocean heat transport in Arctic fjords. *Ocean Dynamics*, 65, 1535-1546.
- Chen, C., Beardsley, R.C., Cowles, G., Qi, J., Lai, Z., Gao, G., Stuebe, D., Liu, H., Xu, Q., Xue, P., Ge, J., Ji, R., Hu, S., Tian, R., Huang, H., Wu, L., Lin, H., Sun, Y. and Zhao, L. (2013). An unstructured-grid, finite-volume community ocean model FVCOM user manual (3rd ed.). SMASST/UMASSD Technical Report-13-0701, University of Massachusetts-Dartmouth.
- Cottier, F., Tverberg, V., Inall, M., Svendsen, H., Nilsen, F. and Griffiths, C. (2005). Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange: The seasonal hydrography of Kongsfjorden, Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C12).
- Cottier, F., Berge, J., Griffith, C., Dumont, E., Kopec, T., Vogedes, D. and UiT The Arctic University of Norway, Scottish Association for Marine Science (2022). Temperature, salinity and fluorescence (CTD) measurements from the Kongsfjorden (Svalbard) marine observatory (mooring) June 2006-August 2007 [Data set]. NIRD RDA.
- Cottier, F., Berge, J., Griffith, C., Dumont, E., Kopec, T., Vogedes, D. and UiT The Arctic University of Norway, Scottish Association for Marine Science (2022). Temperature, salinity, light and fluorescence (CTD) measurements from the Kongsfjorden (Svalbard) marine observatory (mooring) August 2007-August 2008 [Data set]. NIRD RDA.
- Cowton, T., Slater, D., Sole, A., Goldberg, D. and Nienow, P. (2015). Modeling the impact of glacial runoff on fjord circulation and submarine melt rate using a new subgrid-scale parameterization for glacial plumes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2), 796-812.
- Egbert, G.D. and Erofeeva, S.Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183-204.
- Golledge, N.R., Keller, E.D., Gomez, N., Naughten, K.A., Bernales, J., Trusel, L.D. and Edwards, T.L. (2019). Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt. *Nature*, 566(7742), 65-72.
- Hattermann, T., Isachsen, P.E., von Appen, W.J., Albrechtsen, J. and Sundfjord, A. (2016). Eddy-driven recirculation of Atlantic water in Fram Strait. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3406-3414.
- Holmes, F.A., Kirchner, N., Kutteneuler, J., Krützfeldt, J. and Noormets, R. (2019). Relating ocean temperatures to frontal ablation rates at Svalbard tidewater glaciers: Insights from glacier proximal datasets. *Scientific Reports*, 9(1), 9442.
- Howard, L.N. (1961). Note on a paper of John W. Miles. *Journal of Fluid Mechanics*, 10(4), 509-512.
- Inall, M.E., Murray, T., Cottier, F.R., Scharrer, K., Boyd, T.J., Heywood, K.J. and Bevan, S.L. (2014). Oceanic heat delivery via Kangerdlugssuaq Fjord to the south-east Greenland ice sheet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(2), 631-645.
- Jakobsson, M., Mayer, L.A., Bringenspar, C., Castro, C.F., Mohammad, R., Johnson, P., Ketter, T., Accettella, D., Amblas, D., An, L., Arndt, J.E., Canals, M., Casamor, J.L., Chauché, N., Coakley, B., Danielson, S., Demarte, M., Dickson, M.-L., Dorschel, B., Dowdeswell, J.A., Dreutter, S., Fremand, A.C., Gallant, D., Hall, J.K., Hehemann, L., Hodnesdal, H., Hong, J., Ivaldi, R., Kane, E., Klaucke, I., Krawczyk, D.W., Kristoffersen, Y., Kuipers, B.R., Millan, R., Masetti, G., Morlighem, M.,

- Noormets, R., Prescott, M.M., Rebesco, M., Rignot, E., Semiletov, I., Tate, A.J., Travaglini, P., Velicogna, I., Weatherall, P., Weinrebe, W., Willis, J.K., Wood, M., Zarayskaya, Y., Zhang, T., Zimmermann, M. and Zinglersen, K.B. (2020). The international bathymetric chart of the Arctic Ocean version 4.0. *Scientific Data*, 7(1), 176.
- Mack, S.A. and Schoeberlein, H.C. (2004). Richardson number and ocean mixing: Towed chain observations. *Journal of Physical Oceanography*, 34(4), 736-754.
- Motyka, R.J., Dryer, W.P., Amundson, J., Truffer, M. and Fahnestock, M. (2013). Rapid submarine melting driven by subglacial discharge, LeConte Glacier, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 40(19), 5153-5158.
- O'Leary, M. and Christoffersen, P. (2013). Calving on tidewater glaciers amplified by submarine frontal melting, *The Cryosphere*, 7, 119-128.
- Pramanik, A., Van Pelt, W., Kohler, J. and Schuler, T.V. (2018). Simulating climatic mass balance, seasonal snow development and associated freshwater runoff in the Kongsfjord basin, Svalbard (1980~2016). *Journal of Glaciology*, 64(248), 943-956.
- Promińska, A., Cisek, M. and Walczowski, W. (2017). Kongsfjorden and Hornsund hydrography-comparative study based on a multiyear survey in fjords of west Spitsbergen. *Oceanologia*, 59(4), 397-412.
- Skogseth, R., Tverberg, V., Walczowski, W. and Sundfjord, A. (2019). Kongsfjorden Transect CTD data 892 1906-2016 [Data set]. Norwegian Polar Institute.
- Sundfjord, A., Albretsen, J., Kasajima, Y., Skogseth, R., Kohler, J., Nuth, C., Skarðhamar, J., Cottier, F., Nilsen, F., Asplin, L., Gerland, S. and Torsvik, T. (2017). Effects of glacier runoff and wind on surface layer dynamics and Atlantic Water exchange in Kongsfjorden, Svalbard; a model study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 187, 260-272.
- Svendsen, H., Beszczynska-Møller, A., Hagen, J.O., Lefauconnier, B., Tverberg, V., Gerland, S., Ørbøk, J.B., Bischof, K., Papucci, C., Zajaczkowski, M., Azzolini, R., Bruland, O., Wiencke, C., Winther, J.-G. and Dallmann, W. (2002). The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar Research*, 21(1), 133-166.
- Tverberg, V., Skogseth, R., Cottier, F., Sundfjord, A., Walczowski, W., Inall, M.E., Falck, E., Pavlova, O. and Nilsen, F. (2019). The Kongsfjorden transect: seasonal and inter-annual variability in hydrography. In *The Ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard* (pp. 49-104). Cham: Springer International Publishing.
- Torsvik, T., Albretsen, J., Sundfjord, A., Kohler, J., Sandvik, A.D., Skarðhamar, J., Lindbäck, K. and Everett, A. (2019). Impact of tidewater glacier retreat on the fjord system: Modeling present and future circulation in Kongsfjorden, Svalbard. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 220, 152-165.
- van den Broeke, M.R., Enderlin, E.M., Howat, I.M., Kuipers Munneke, P., Noël, B.P.Y., van de Berg, W.J., van Meijgaard, E. and Wouters, B. (2016). On the recent contribution of the Greenland ice sheet to sea level change, *The Cryosphere*, 10, 1933-1946.
- Williams, J.J. and Esteves, L.S. (2017). Guidance on setup, calibration, and validation of hydrodynamic, wave, and sediment models for shelf seas and estuaries. *Advances in Civil Engineering*, 2017(1), 5251902.

Received 27 December, 2024

Revised 18 June, 2025

Accepted 4 July, 2025