

남극 탐사 자료 활용 기반  
빙저 하천망 변동성 모델 체계 구축 연구

Modelling subglacial water flow evolution  
based on Antarctic observation data



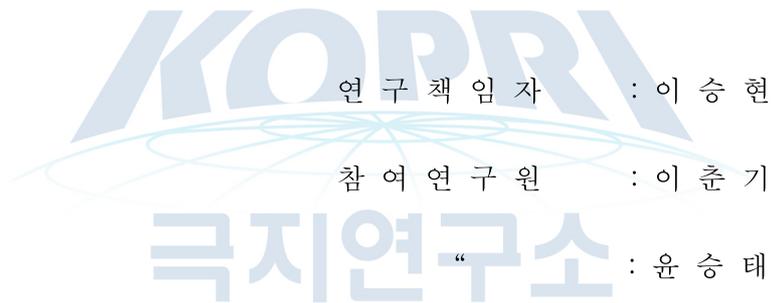
한 국 해 양 과 학 기 술 원  
부 설 극 지 연 구 소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 탐사 자료 활용 기반 빙저 하천망 변동성 모델 체계 구축 연구”과제의 연구결과 보고서로 제출합니다.

2020. 02. 25.



연구책임자 : 이 승 현  
참여연구원 : 이 춘 기  
극지연구소 : 윤 승 태  
“ : 김 진 석  
“ : 김 병 훈  
“ : 박 인 우

보고서 초록

과제관리번호	PE19400	해당단계 연구기간	2019.04.01. - 12.31.	단계 구분	1/1
연구사업명	중 사업명	연구정책지원사업			
	세부사업명	신진연구원지원과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	남극 탐사 자료 활용 기반 빙저 하천망 변동성 모델 체계 구축 연구			
연구책임자	이 승 현	해당단계 참여연구원수	총 : 6 명 내부 : 6 명 외부 :    명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업:        천원 계:        천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 해수면변동예측사업단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	60
<p>○ 최근 빙원 탐사 기술의 발달로 양질의 남극 빙상 관측자료가 축적되고 있으며, 이를 이용한 빙상 하부의 수문 흐름 예측 가능성이 증대되고 있음</p> <p>○ 본 연구에서는 빙저수문망의 진화를 시공간적으로 구현할 수 있는 Glacial Drainage System(GlaDS) 모델을 활용하여, 남극 관측기반의 현장 자료를 활용하여, 모델에 실질적으로 활용하고 모델의 신뢰도를 높이는 방안에 대해서 고찰하였음</p> <p>○ GlaDS 모델을 활용하여 구현된 빙저 수문망 진화 예측 결과 경우 다양한 남극의 실제 유역규모(캠벨 빙하, 데이비드 빙하, 스웨이츠 빙하 등)의 빙상 하부 수문흐름, 지반선으로의 유출량을 다양한 남극 실제 관측자료(인공위성 고도계 자료, GPS시계열 자료, 빙하레이더 탐사자료 등)을 입력자료로 혹은 검증자료로 활용하여 구현할 수 있었음</p> <p>○ 남극 현장 탐사 자료를 빙저 수문망 진화모델의 입력 및 검증 인자로 활용 할 경우 관측 자료의 한계점 및 모델의 불확실성을 상호 보완하여 더욱 더 신뢰도 있는 수문 진화 구현이 가능 할 것으로 사료됨</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	빙저수문망, 분산흐름, 채널흐름, 수문 모델, 남극 관측			
	영 어	subglacial hydrological network, distributed flow, channelized flow, hydrology model, Antarctic observation			

# 요 약 문

## I. 제 목

남극 탐사 자료 활용 기반 빙저 하천망 변동성 모델 체계 구축 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 빙원 탐사 기술의 발달로 양질의 남극 빙상의 시공간 관측 자료가 축적되고 있으며 이를 활용한 빙상 하부 수문 흐름의 예측능 향상이 이루어지고 있다. 이러한 빙저 수문망 흐름은 기후변화에 따른 남극 빙상이동 가속화의 주 원인 중 하나로 빙권-암권의 수문 경계 조건이 매우 중요하다. 하지만, 기존 관측자료 및 검증자료 부족으로 모델의 가상 입력인자가 많아서 결과물의 신뢰도가 낮다. 빙저수문망 모델이 개선되고 관측을 기반으로 한 정확한 입력인자가 반영된다면 남극 빙상하부의 시공간적 수문흐름을 비용 효율적으로 예측 가능하기 때문에 장기적인 측면에서 해당 연구를 수행하여 모델의 신뢰성을 개선할 필요가 있다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

남극 빙저 수문망 변동성 해석 연구는 주로 인공위성 고도계 및 GPS 관측자료, 빙하 레이더 탐사 자료의 복합적 해석을 통하여 수행되어 왔으나, 모델을 통한 연구는 개념적인 측면에서 이루어져 왔다. 수문망 모델은 단순한 수리수두(hydraulic potential)에 의한 선형적인 흐름을 가정한 모델로부터 시작하여 복합적인 시공간적 수문 변동성을 구현할 수 있는 모델의 형태로 발전하고 있으며, 모델 영역 또한 단순한 빙상의 형태 가정한 모델에서 시작하여 현장 유역 규모의 지형을 반영하고 있다. 입력 및 출력인자 또한 단일 상수값에서 좀 더 현실에 근접한 입력값을 이용하여 현장과 유사한 수문흐름을 구현하기 위해 노력 중이다. 본 과제에서는 빙저 하천망 모델을 활용하여 남극 현장 관측자료 활용기반의 빙상하부 하천망의 변동성 구현 모델 체계를 구축하고 수문망모델 내에 현장 관측값들을 활용하여 신뢰도 있는 흐름을 모의하기 위한 방법을 제시하고자 한다.

## IV. 연구개발결과

본 연구에서는 두 가지 빙저수 흐름 시스템인 분산흐름(distributed flow)와 채널흐름(channelized flow)를 복합하여 빙저수문망 진화를 구현 할 수 있는 GlaDS 모델을 구동하였다. 이 때 남극 관측기반의 현장자료를 입력, 검증인자로 적용하였을 때 모델의 실질적인 활용도 및 신뢰도를 높일 수 있어, 모델의 불확실성을 보완할 수 있었다. 인공위성 고도계, 레이더 탐사, GPS 및 탄성과 탐사 등을 기반으로 생산된 간접 수문 관측 인자들을 극지연구소에서 탐사하고 있는 다양한 빙하들(캠벨 빙하, 데이비드 빙하, 스웨이트 빙하 등) 하부의 수문망 모델의 입력, 보정, 검증인자로 활용할 경우 더욱 신뢰도 있는 시공간적 수문망 변화를 구현 가능 할 것으로 사료된다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 제시된 모델의 활용 및 관측 자료와의 융합은 기후변화에 따른 빙저 수문망의 변화가 빙하 소멸에 기여하는 역할의 정량화, 빙저호에서의 수문 흐름 및 수량 변화, 지반선을 따라 유출되는 담수량 및 위치의 정량화 등 전반적인 남극 수문망 변화 연구에 활용되어 다양한 해양, 빙권 분야와 자료 공유 및 공동연구가 가능할 것으로 판단된다.

# 목 차

제 1 장 서론.....	5
제1절 연구개발의 필요성.....	5
제2절 연구개발의 목적.....	8
제 2 장 국내외 관련 연구 현황.....	10
제1절 관측기반 남극 수문망 연구.....	10
제2절 빙저수문망 모델 관련 연구 현황.....	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과.....	21
제 4 장 연구개발 결과의 활용 계획.....	40
제 5 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보.....	43
제 6 장 참고문헌.....	44

# 제 1 장 서론

## 1. 연구개발의 필요성

- 최근 빙원 탐사 기술의 발달로 양질의 남극 빙상 관측 자료가 축적<sup>1)</sup>되고 있으며, 이를 활용한 빙상 하부 수문의 흐름 예측 가능성 증대
- 기후변화에 따른 남극의 빙상이동 가속화의 주원인 중 하나로 빙권-암권의 수문 경계 조건이 매우 중요하나 관측, 검증자료 부족으로 신뢰도가 매우 낮음
- 빙저수문망 모델이 개선되고 정확한 입력인자가 반영된다면 남극 빙상하부 시공간적 수문흐름을 비용효율적으로 예측 가능하므로 장기적인 측면에서 연구하여 모델의 신뢰성을 개선할 필요

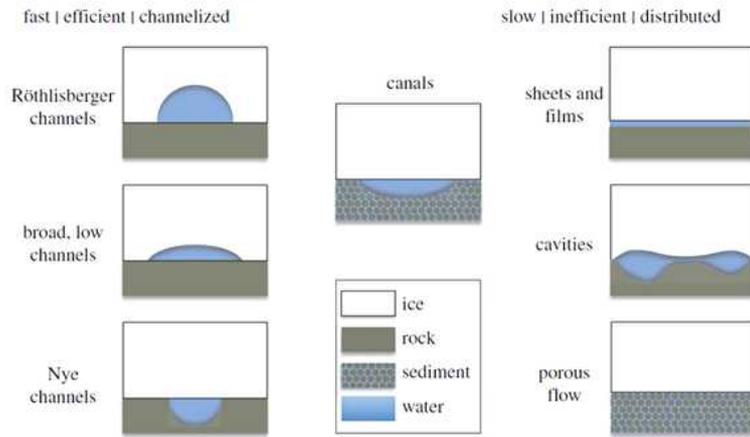
### ○ 남극 빙상하부 수문 흐름

극 지방의 빙권 아래의 물(빙저수)의 흐름을 관측하는 것은 오랫동안 도전적인 영역이었다. 특히, 남극 지역과 같은 경우 지표에서 빙저면으로 물의 유입이 거의 없고 빙상의 두께가 최대 4km에 달하며, 빙봉 지역 두께 또한 수백미터에 달해 매우 제한된 관측만이 가능하다 (그림 1). 빙상 및 빙하하부에서 어떠한 형태로 물이 흐르는지는 상부에 누르고 있는 빙상의 압력, 빙권과 암권사이의 지열 및 마찰로 인한 빙저 용융으로 인한 물의 생성, 하부 매질의 형태(암반, 미고결층) 등에 연관이 있다. 빙저면의 용융으로 생성된 물은 내부 압력 등의 조건에 따라 빠르게 배출되는 채널흐름(Channelized flow), 넓고 얇은 형태로 천천히 배출되는 분산흐름 (distributed flow), 그의 중간 형태로 알려진 canal flow 형태의 흐름이 동적으로 변하며 나타난다(Flowers et al., 2015). 이런 경계조건에 따른 수리적 흐름 변동성은 상부 빙상의 미끄러짐 현상과도 밀접하게 관련되어 있어 기후변화에 따른 빙하의 붕괴와 밀접한 관련이 있어 매우 중요하다 (그림 2)

1) Ice radar 빙상하부 지형자료, GPS 시계열 표면고도, 빙하이동속도자료, ApRES 하부 용융량 관측자료, 지진계 관측자료 등을 기반으로 경계조건 자료 및 검증자료를 축적하여 모델을 개선 가능



[그림 1] 남극의 두꺼운 빙상 하부에 빙저 수문망의 존재



[그림 2] 빙상 하부에서 매질 및 압력 조건에 따라서 나타날 수 있는 다양한 흐름 형태들. 크게 빠르게 물이 배출되는 채널흐름형태(좌)와 얇고 넓은 형태로 물이 천천히 배출되는 분산흐름형태(우)로 나누어 짐(Flowers et al., 2015)

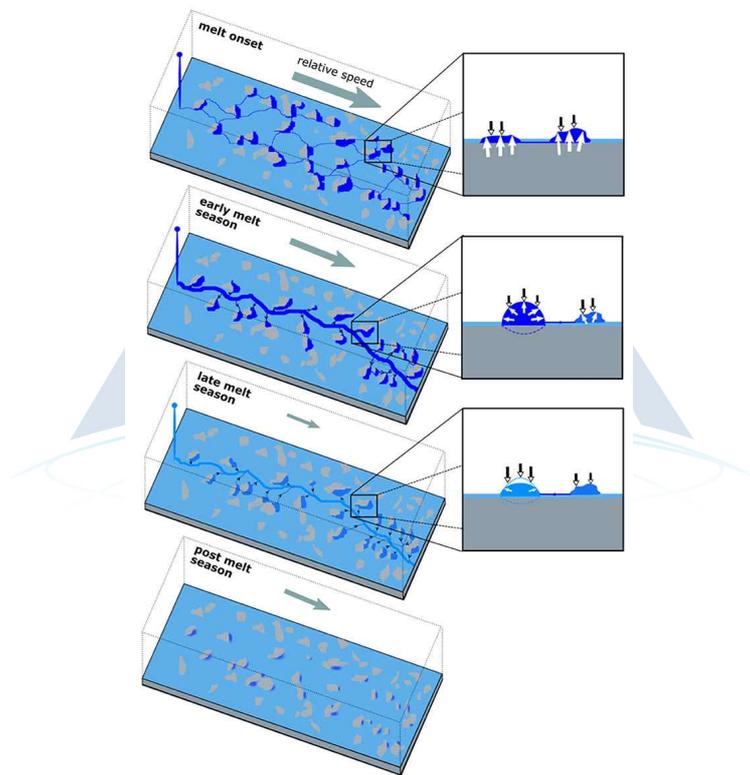
### ○ 남극 빙상하부 수문 흐름 기반 빙저하천망 모델 체계 구축의 필요성

빙저 하천망을 통한 물의 흐름은 정적이기보다는 동적인 변동을 보이며 빙하 하부를 이동한다. 수문 변동성이 활발한 그린란드 지역의 경우 moulin을 통한 빙상표면수의 하부 유입으로 계절적 변동성을 보이거나 (그림 3), 남극 지역과 같은 경우 빙하 하부에서 생성된 유량 및 지형 조건에 따라 다년(수 년 - 수 십 년)의 주기성을 보일 수도 있으며 주기성이 존재하지 않을 수도 있다.

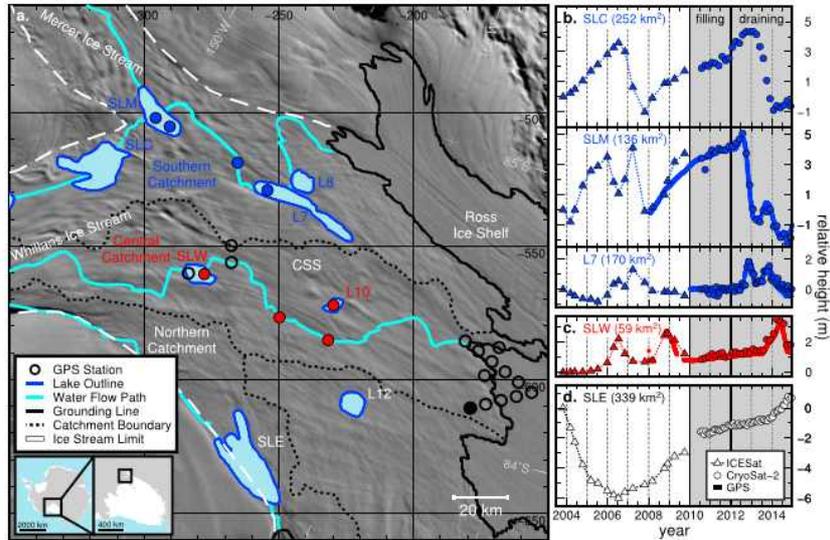
남극 빙상과 매질과의 경계에서의 물의 흐름 규명은 항공레이더 탐사 및 인공위성 고도계 기법 등 간접적인 추정 방법이 주를 이루고 있다. 남극 지역의 경우 빙상 하부에서의 용융된 물이 고립되어 고여 있다고 오랫동안 여겨져 왔으나, 활동성 빙저호와 같이 빙상의 아래에서도 유동 채널이 열고 닫히며 물이 동적으로 흐르는 것이 발견되었다 (Carter et al., 2009; Fricker et al., 2014,

Smith et al., 2017) (그림 4).

현장 관측/ 인공위성 탐사 만으로 이러한 포괄적인 시공간적인 변동성을 규명하는 데는 한계가 있다. 하지만, 빙상하부의 관측 자료가 점차 고도화 됨에 따라 **수문망 모델의 필요성**도 더해지고 있고 모델 또한 정교화 되고 있다. 빙저수문망 모델 구축 및 해석은 주로 개념모델을 위주로 비교되고 있으며, **현장규모의 모델의 경우 아직까지는 흐름기작과 정량적인 측면에서 신뢰도가 미진하다.** 최근 남극 탐사를 통한 시공간적 관측자료와 경계조건 자료가 누적됨에 따라 **장기적인 측면에서 빙저수문모델 또한 어느 정도 신뢰성 있는 모델 구현이 가능 할것으로 생각되므로, 이의 적극적인 활용방안 모색이 필요하다.**



[그림 3] 그린란드 지역 수문 변동성 기작 및 이와 빙상 거동가속화의 상관성. 분산흐름이 우세할 때 하부 압력 증가로 빙상 속도가 증가하며, 채널을 통한 급격한 유량 배수시 빙권-암권 접촉면의 증가로 다시 속도가 감소하는 계절적 변동성을 보임.



[그림 4] GPS 고도변화 및 인공위성 고도계 자료를 활용한 남극지역 수문 변동 주기 연구 사례 (Fricker et al., 2014)

## 2. 연구개발의 목적

### ○ 연구개발의 최종목표

- 빙저하천망 모델을 활용하여 남극 현장 관측자료 활용 기반의 빙상하부 하천망의 변동성 구현 모델 체계를 구축하고 지역적 특성이 하천망 진화에 미치는 영향을 규명

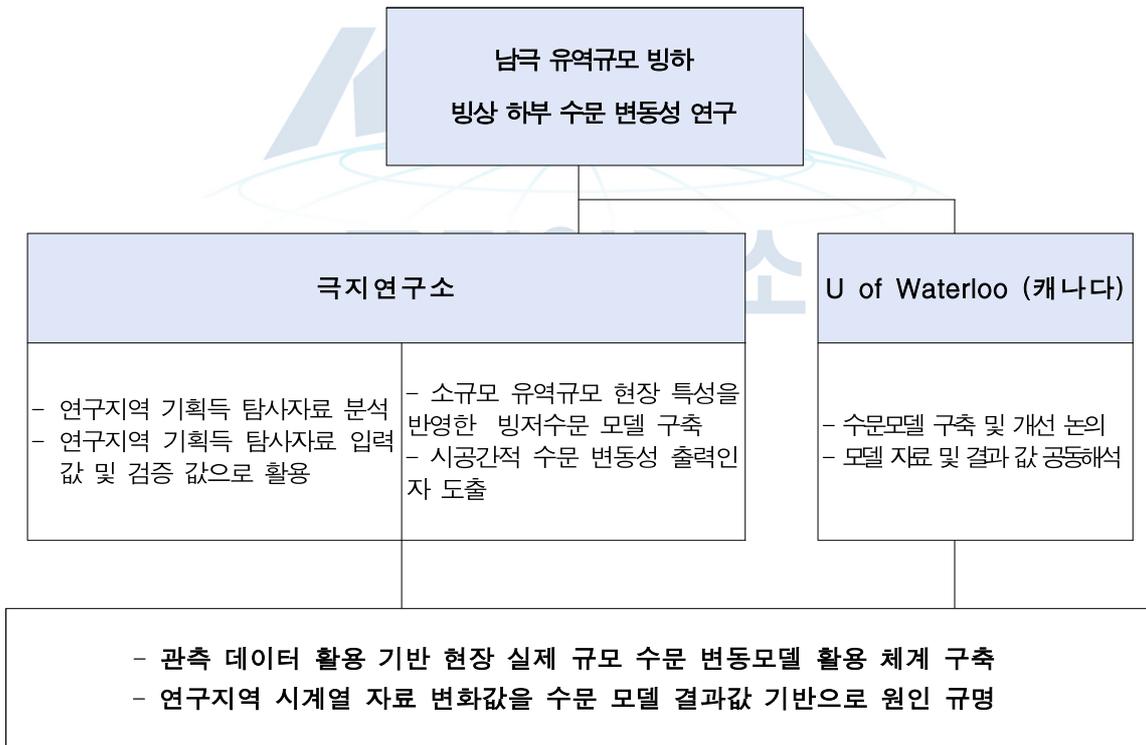
### ○ 연구개발의 목표 및 내용

구분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위	추정연구비 (단위: 천원)
1차년도 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 빙저하천망 모델을 활용하여 남극 현장 관측자료 활용 기반의 빙상하부 하천망의 변동성 구현 모델 체계를 구축하고 지역적 특성이 하천망 진화에 미치는 영향을 규명</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기 획득 관측자료 기반 지역 빙저 하천망 모델 구축</li> <li>- 주요 입력 변수에 따른 빙저 하천망 진화 민감도 분석</li> <li>- 빙상-암권 경계면 지열, 마찰 등으로 생성된 빙상 하부 용융수가 수문 진화에 미치는 영향 분석</li> </ul>	30,000

○ 연구개발의 추진 전략 및 방법

연구개발 목표		월별 추진 일정 (2019)								
		4	5	6	7	8	9	10	11	12
실제 유역 규모 단위의 수문 변동성 모델 구축 및 해석 체계 구축	모델 구축	남극 빙하 지역 유역규모 (catchment scale) 빙저하천망 모델 구축								
	민감도 분석				주요 입력 변수에 따른 빙저하천망 진화 민감도 분석					
	수문망 진화 원인 규명							빙상 하부 용융수가 수문 진화에 미치는 영향 분석		

○ 연구개발 추진 체계



## 제 2 장 국내외 관련 연구 현황

### 1. 관측기반 남극 수문망 연구

#### ○ 국내 연구현황

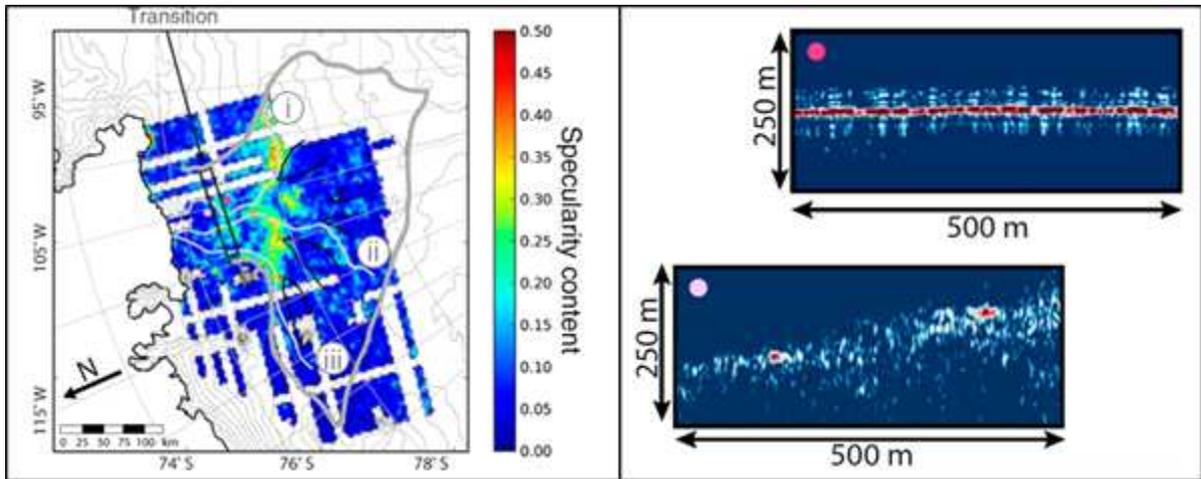
극지연구소에서는 해양수산부 R&D 사업인 장보고 기지 주변 빙권변화 진단, 원인 규명 및 예측(2014. 9. - 2019.6) 과제를 통하여 장보고 기지 주변 테라노바베이 및 데이비드 빙하 지역에 다학제 빙권 종합 관측망을 구축하여 장기적으로 시공간 탐사자료를 축적 해오고 있다. 또한, 소규모 활동성 빙저호 탐색을 위한 원격탐사 기법 연구 과제를 통하여, 인공위성 고도계 자료를 활용하여 소규모 활동성 빙저호의 변동성을 탐지하는 연구가 수행된바 있다. 현재는 해양수산부 R&D 과제인 서남극 스웨이츠 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구(2019. 6. - 2023. 5.)를 시작하여, 빙권의 변화가 매우 빠르게 일어나는 지역의 빙권 변동기작을 연구하고 있다.

빙권-암권 경계면에서 물이 흐르는 **빙저하천망은 빙상거동과 연관된 하나의 핵심원인 인자**로 알려져 있으나 국내에 연구 인력 부족, 관련 연구기관과 교류 및 연구 수행을 통하여 기술격차를 좁힐 필요성이 있다. 현재, 남극 지역에서 다양한 빙상지역 **종합 관측망 자료** GPS, 지진관측, ApRES 관측, 빙상 하부지형 개선)가 축적, 정교화 되고 있는 시점에서 해당자료의 **적극적 활용 기반의 수문 해석 기술이 필요하다.**

#### ○ 관측기반 빙저 수문망 흐름 기작 규명 연구

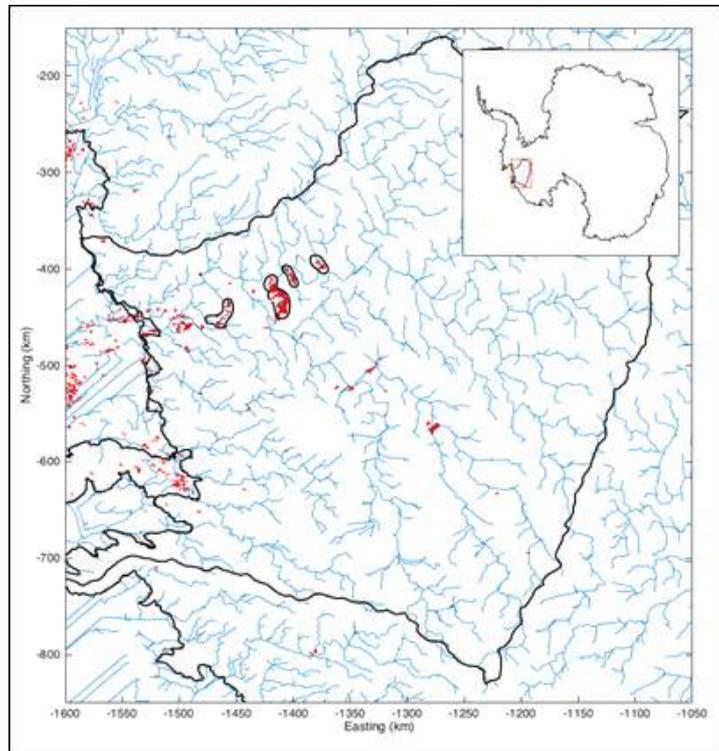
남극 빙저 수문망 규명의 경우 직접적으로 두꺼운 빙상을 직접적으로 시추하기에는 빙상의 두께가 두껍고 비용 효율적이지 못하기 때문에 지구물리탐사나 측지학적인 접근을 통하여 간접적인 방법으로 물의 흐름이 규명되고 있다.

- (레이다 탐사 기반 수문 연구) 레이다 탐사의 경우 전자파를 펄스 형태로 지하에 전파시킨 후 물리적 성질이 다른 경계면에 반사되어 나오는 전자파를 수신하는 방법으로 남극 지역에서 주로 빙권과 암권의 경계면을 규명하고, 이를 통하여 빙하 하부의 지형 정밀도를 개선시키는데 활용되어 왔다. 빙하 하부의 물의 탐지와 관련하여서는 이러한 반사면의 형태가 밝고 편평한 부분에 두꺼운 얼음 밑에 물이 존재할 확률이 높다는 것을 지시해주며, 또한 레이다의 반사형태와 관련된 specularity값의 경우 물의 흐름 형태 또한 지시해 주는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 항공레이다 기반의 관측자료의 경우 공간적인 물의 분포 가능성과, 물의 흐름형태(분산 흐름 혹은 채널흐름)를 간접적으로 추정할 수 있는 관측 자료이다.



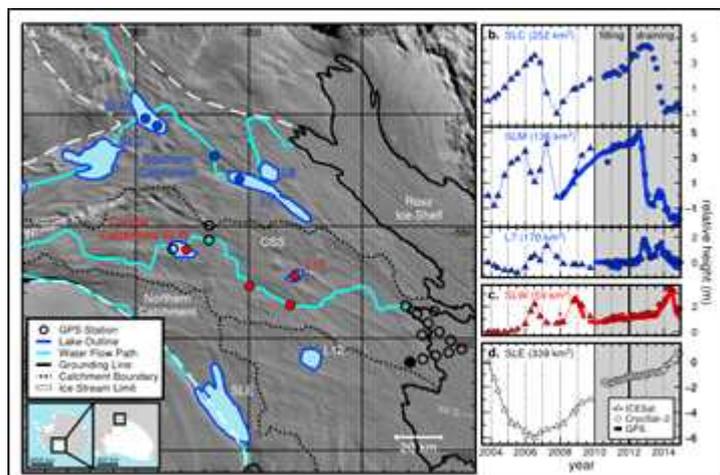
[그림 5] 스웨이츠 빙하 구역의 항공 레이더 반사자료 분석 기반의 빙저면 specularity (Schroeder et al., 2013). 연구결과에 따르면 지반선으로부터 상류 70km 정도의 지역을 기준으로 상류 지역은 얇고 넓은 면적을 천천히 흐르는 분산흐름이, 하류지역은 채널을 통하여 물이 빠르게 배수되는 채널흐름이 지배적인 것으로 보고되었음

- (인공위성 관측기반 수문연구) 활동성 빙저호 탐지와 관련하여 ICESat 등 laser altimeter를 기반으로 한 빙상 표면의 고도의 변화를 분석하여 남극 전역에서 활동성 빙저호 인벤토리가 구축되어 왔다. 최근 들어서는 스웨이츠 빙하 구역과 같이 기상이 좋지 않고 구름이 많이 끼는 지역에서 radar 기반의 altimeter 인 Cryosat2 인공위성을 활용하여, 새로운 빙저호들이 발견되고 있다. 스웨이츠 빙하의 경우 Cryosat2 기반의 빙상 표면 고도 주기적 변동성을 분석하여 주 흐름선을 따라 4개의 주 활동성 빙저호가 정의되었으며(Smith et al., 2017), 최근 추가적인 분석을 통하여 새로운 빙저호들이 정의되었다(Kim et al., in prep)



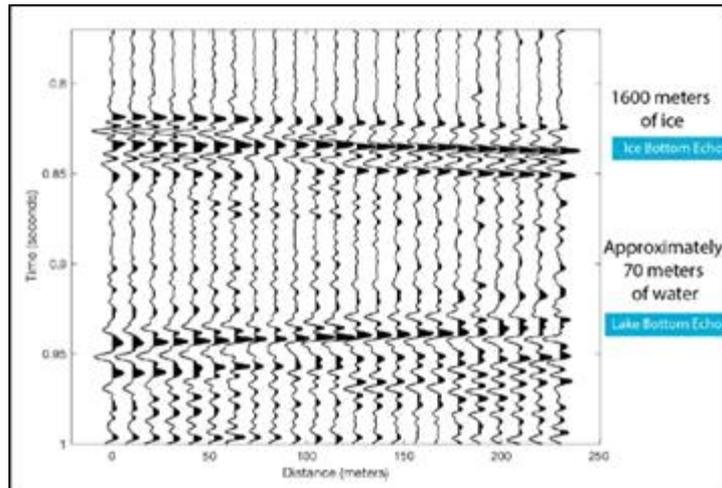
[그림 6] 스위스의 주 흐름지역에서 Smith et al., 2017에서 정의된 빙저호 4개(검정선) 및 Cryosat2 인공위성 고도계 기반의 추가적인 빙저호의 발견(붉은 점) (Kim et al., in prep)

- (GPS 관측기반 수문연구) 빙저호 위치에서 GPS 시계열 자료와 같은 경우도 해당지점에서 상세한 물의 유입 및 배수기작을 규명하기 위해 활용되고 있다. 빙저호로 추정되는 위치에 GPS를 현장에 설치한다면 해당 지점의 빙상 표면 고도의 시계열 변동성 자료를 획득할 수 있다. 활동성 빙저호의 경우 호수 내에 물이 축적되면 표면 고도가 상승하고, 배수되면 표면 고도가 하강하는 특성을 이용하여, 호수 내의 유량 변동성 주기를 규명할 수 있다.



[그림 7] GPS를 활용한 filling and drainage cycle 분석(Fricker et al., 2014)

- (탄성과 탐사기반 수문연구) 앞서 기술한 레이더 탐사 방법의 경우 빙상하부와 빙저수 표면사이에서의 반사파를 이용하여 물의 존재를 확인할 수 있으나, 호수의 두께를 규명할 수는 없다. 소규모 폭약을 활용한 탄성과 탐사를 실시할 경우 각기 다른 층에서 반사되는 음파 들을 빙하 표면을 따라 설치된 지오폰을 활용하여 탐지할 수 있다. 이를 활용하면, 빙상 하부의 물의 존재 뿐만 아니라, 해당 빙저호의 두께 및 빙저면 매질의 특성도 추정이 가능하여 좀더 자세한 빙저호의 특성을 유추할수 있다는 장점이 있다.



[그림 8] 토튼 빙하에서의 탄성과 탐사를 활용한 빙저면-호수표면 경계 및 호수바닥-암권 경계 특성 규명 사례<sup>2)</sup>

이와 같이 각각의 방법이 빙저면의 물의 존재 및 흐름을 지시해주는 하지만, 방법별로 장점 및 한계점이 존재한다. 예를 들어 ice radar 의 반사파 자료를 가지고 수문을 해석할 때는, 얼음내의 불순물의 포함정도나, 온도의 영향을 받아 데이터의 신뢰도가 낮아질 수 있으며, 호수 내 물의 변동성이 심한 소규모 빙저호의 경우 본 방법으로는 잘 감지되지 않는 한계성도 있다. 그리고, 방법별로 모든 시공간적인 변동성을 확인 할 수 없다는 한계점도 존재한다. 따라서, 각 접근법별 장단점을 이해하고 좀 더 통합적인 관점에서 자료를 해석했을 때 신뢰도 있는 수문흐름 결과물을 도출할 수가 있을 것이다. 이를 위해서는 앞서 기술한 관측 자료들을 입력, 검증 자료로 활용하여 빙저수문망 모델을 통하여 시공간적인 변동 흐름을 구현한 후 얼음 하부의 수괴가 어떻게 진화하는지를 규명하는 것이 중요하다.

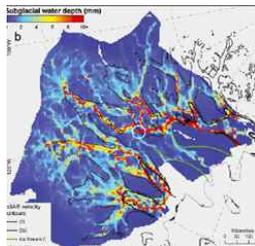
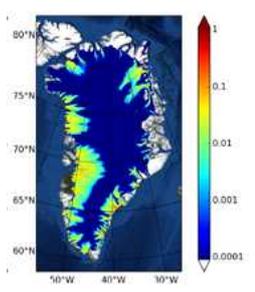
2) <http://www.antarctica.gov.au/magazine/2016-2020/issue-36-june-2019/science/seismic-survey-sees-beneath-totten-glacier>

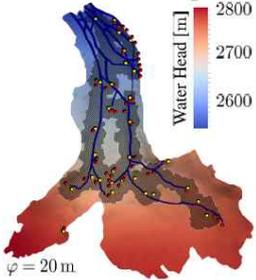
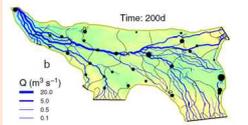
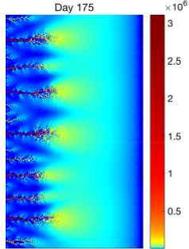
## 2. 빙저수문망 모델 관련 연구 현황

### ○ 빙저수문망 모델 연구 현황

남극 지역 빙저 수문 변동성 해석 연구는 인공위성고도계 및 GPS 관측자료, 빙하 레이더 탐사 자료의 복합적 해석을 통하여 수행되어 왔으나 모델을 통한 연구는 개념적인 측면에서 이루어져 왔다. 빙저수문망의 경우 빙상동역학의 기저미끄러짐과 관련하여 매우 중요한 역할을 하여 다양한 모델이 제시되어 있으나 그 신뢰도와 검증도는 매우 낮은 편이다. 모델은 갈수록 정교화되고 있으며, 인위의 개념 모델에서 **빙저수문 모델의 상호 비교 프로젝트인 SHMIP(Subglacial Hydrology Model Intercomparison Project, 2018)**가 수행되면서 **상호 모델간의 검증이** 수행되기 시작하였다. 모델의 변화는 단순한 수리수두(hydraulic potential)에 선형적인 흐름을 가정한 모델부터 시작하여 그림 2, 그림 3에 나타나는 **복합적인 시공간적 수문 변동성을 구현할수 있는 모델로 발전**되고 있다. 모델 도메인 또한 단순한 빙상형태를 가정한 빙저하천모델(synthetic model)로 시작하여 **현장 지형을 반영**하고 입력 및 출력인자 또한 단순한형태(homogenous/constant)에서 **현실적인 관측값들(heterogeneous/time variable)**을 적용하며 **현실과 유사한 수문흐름을 구현**하기 위해 진화하고 있다.

<표 1> 대표적인 빙저수문망 모델 특성 비교

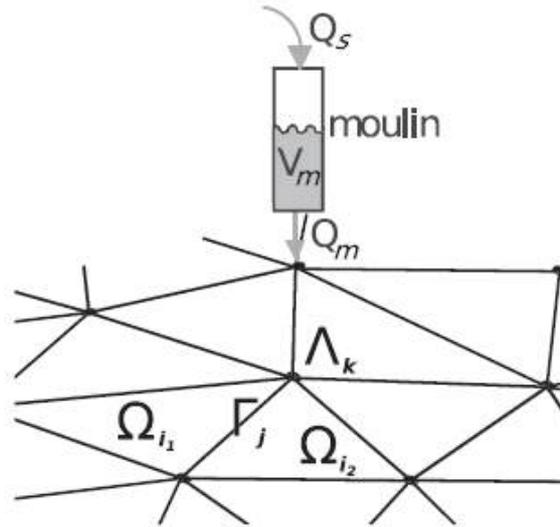
빙저수문 모델	모델명	관련논문	모델 특성 (장단점)	모델 사례
1	water film model	(Le brocq et al., 2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 빙상하부 물의 흐름이 얇은 필름 형태의 흐름임을 가정한 모델</li> <li>- 단순하나 동적인 변동성을 표현하기 어려움</li> </ul>	
2	two layer (sheet-till) model	(Buelor et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 물의 흐름이 가능한 layer와 물을 저장하는 till layer를 가정한 두 개의 층의 흐름을 구현</li> <li>- PISM 모델에 탑재</li> </ul>	

3	double-continuum model	(de Fluerian et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fast (efficient) flow 와 slow (inefficient) flow 시스템의 유량 교환을 상대적으로 적은 계산 비용으로 구현</li> <li>- Elmer-ICE 탑재</li> <li>- 개별 채널의 생성 및 변화를 구현하지는 못함</li> </ul>	
4	GlaDS model	(Werder et al., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 모델의 요소(element)에서는 sheet flow를 모델의 격자(edge)에서는 channel flow를 구현함으로써 수문 변동성을 가장 현실적으로 구현</li> <li>- 현장 실측 규모 연구 적용에 적합</li> <li>- Elmer-ICE 탑재, ISSM 탑재예정</li> </ul>	
5	SHaKTI model	(Sommers et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 하나의 지배방정식으로 2가지(sheet, channel) 흐름을 모두 구현하도록 설계</li> <li>- Reynolds number에 따른 laminar to turbulent regime 구현</li> <li>- ISSM 탑재</li> </ul>	

## 극지연구소

### ○ Glacier Drainage System (GlaDS) 모델 (Werder et al., 2013)

위에서 본 사례와 같이 유역규모의 수문망을 모사하기 위하여 다양한 모델들이 개발되어 왔으나, 수문 변동을 구현하는 기작, 입력 상수 등이 단순화 되어 있어 실제 지형 하부에서의 빙저수문 흐름 수치 모델 결과를 신뢰하기에는 어느 정도 한계가 있다. 하지만, GlaDS(Glacier Drainage System) 모델의 경우 현재까지 개발되어 있는 모델 중 수문의 변동성 모의의 측면에서 가장 현실적으로 모사할 수 있도록 개발된 모델이다 (Werder et al., 2013). GlaDS 모델은 앞서 기술했던 분산 흐름(distributed flow)를 모델 격자의 요소(element)에서 구현하고 주변 격자의 모서리(edge)에서 채널 흐름(channelized flow)의 생성 소멸을 구현함으로써 빙상 하부의 빙저호 진화 및 수문망의 생성 소멸 흐름을 비교적 잘 구현 할 수 있다. 물의 유입이 낮을 때는 수리전도도가 낮고 전체적인 빙저면을 얇고 넓은 범위로 흐르는 분산흐름이 주를 이룬다. 하지만, 수리포텐셜이 낮고 빙저수의 유입량이 많은 위치에 물이 축적되게 되면 빙저수의 압력이 증가되게 되고 빙저호가 생성되며, 축적된 물의 압력을 해소하기 위하여 모서리에 채널흐름이 활성화되어 물이 배수되면서 해당지점의 빙저수의 압력이 낮아지게 되는 원리이다.



[그림 9] GlaDS 모델의 격자망: sheet flow의 경우 요소(element)에서, channel flow의 경우 주변의 모서리(edge)에서 흐름이 구현되며 두 개의 흐름 성분은 압력조건에 따라 상호 유량을 교환함

모델의 분산흐름(distributed flow or sheet flow)의 질량 보존식과 같은 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

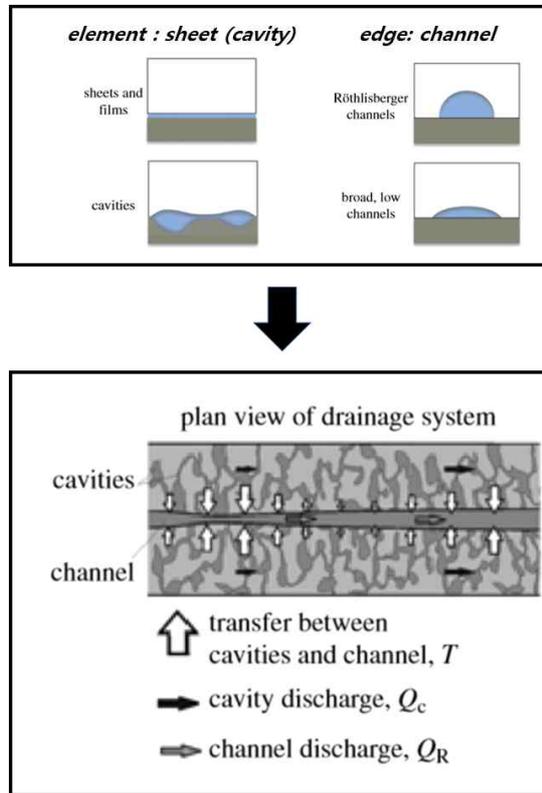
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h_e}{\partial t} + \nabla \cdot q = M$$

$h$  : 빙저수문의 두께(water layer thickness)(m),  $h_e$  : 유효저장층의 두께(effective storage thickness)(m),  $q$ : 유량(discharge)(m<sup>2</sup>/s),  $M$ = 빙저용융량(basal melting)(m/s),  $t$  : 시간(s)

모델의 채널 흐름과 같은 경우 반구의 R-채널이 얼음의 용융에 의한 열림과 얼음의 변형에 의한 닫힘을 모사한다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = \frac{\Xi - \Pi}{\rho_w L} + m_c,$$

$S$ : 채널단면 면적(m<sup>2</sup>),  $Q$ : 채널을 통해 흐르는 유량(m<sup>3</sup>/s)  $s$ : 채널 방향을 따른 수평거리 (m)  
 $L$ : 잠열(latent heat)(J/kg)  $m_c$ : 분산흐름으로부터 채널흐름으로 전달되는 유량  $\Xi$ : 에너지 소산(W/m)  $\Pi$ : 현열(W/m)



[그림 10] 빙저 수문망 흐름에서 두가지 흐름요소의 상호작용을 보여주는 모식도

Table 1. Parameters and Values Used in Synthetic Model Runs<sup>a</sup>

Description	Symbol	Value	Units
Acceleration due to gravity	$g$	9.81	$\text{m s}^{-2}$
Latent heat	$L$	$3.34 \times 10^5$	$\text{J kg}^{-1}$
Ice density	$\rho_i$	910	$\text{kg m}^{-3}$
Water density	$\rho_w$	1000	$\text{kg m}^{-3}$
Pressure melt coefficient	$c_i$	$7.5 \times 10^{-8}$	$\text{K Pa}^{-1}$
Heat capacity of water	$c_w$	$4.22 \times 10^3$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
First sheet flow exponent	$\alpha$	5/4	
Second sheet flow exponent	$\beta$	3/2	
First channel flow exponent	$\alpha_c$	5/4	
Second channel flow exponent	$\beta_c$	3/2	
Sheet conductivity <sup>b</sup>	$k$	0.01	$\text{m}^{7/4} \text{kg}^{-1/2}$
Channel conductivity <sup>c</sup>	$k_c$	0.1	$\text{m}^{3/2} \text{kg}^{-1/2}$
Glen's $n$	$n$	3	
Ice flow constant cavities	$\tilde{A}$	$5 \times 10^{-25}$	$\text{Pa}^{-n} \text{s}^{-1}$
Ice flow constant channels	$\tilde{A}_c$	$5 \times 10^{-25}$	$\text{Pa}^{-n} \text{s}^{-1}$
Basal sliding speed	$u_b$	$10^{-6}$	$\text{m s}^{-1}$
Sheet width below channel <sup>d</sup>	$l_c$	2	m
Cavity spacing	$l_r$	2	m
Bedrock bump height	$h_r$	0.1	m
Englacial void ratio	$e_v$	$10^{-3}$	
Moulin cross-sectional area	$A_m$	10	$\text{m}^2$
Bed elevation	$B$		m
Ice thickness	$H$		m
Sheet input	$m$		$\text{m s}^{-1}$
Moulin input	$Q_s$		$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

<sup>a</sup>First section lists physical constants, second section lists model parameters, some of which may be spatially varying, and third section lists spatially varying model inputs.

<sup>b</sup>The stated units are for  $\alpha = 5/4$ ,  $\beta = 3/2$ , in general  $\text{m}^{2\beta-\alpha} \text{s}^{2\beta-3} \text{kg}^{1-\beta}$ .

<sup>c</sup>The stated units are for  $\alpha_c = 5/4$ ,  $\beta_c = 3/2$ , in general  $\text{m}^{2\beta_c-2\alpha_c+1} \text{s}^{2\beta_c-3} \text{kg}^{1-\beta_c}$ .

<sup>d</sup>This contributes to channel melt.

**Table 2.** Variables and Units<sup>a</sup>

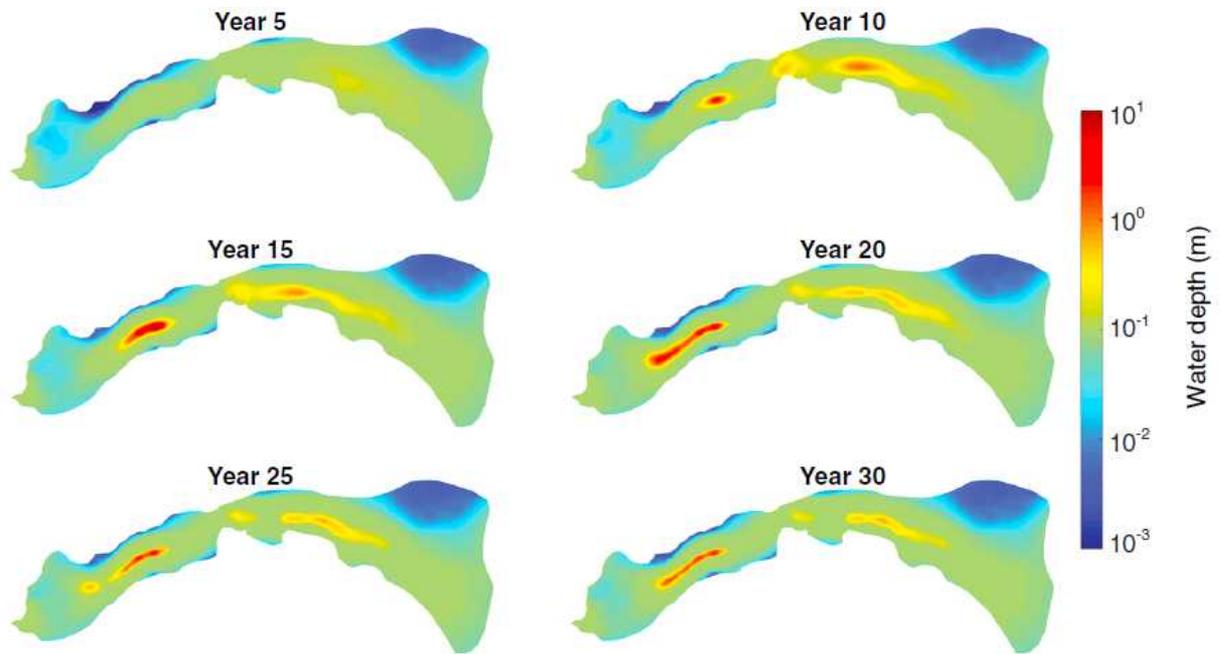
Description	Variable	Units
Hydraulic potential	$\phi$	Pa
Channel discharge	$Q$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Channel cross-sectional area	$S$	$\text{m}^2$
Sheet discharge	$q$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Sheet thickness	$h$	m
Time coordinate	$t$	s
Along edge coordinate	$s$	m
Normal vector	$\mathbf{n}$	m
Test function	$\theta$	Pa
Englacial storage	$h_e$	m
Hydraulic potential of bed	$\phi_m$	Pa
Overburden hydraulic potential	$\phi_0$	Pa
Effective pressure	$N$	Pa
Cavity opening rate	$w$	$\text{m s}^{-1}$
Cavity closure rate	$v$	$\text{m s}^{-1}$
Channel dissipation	$\Pi$	$\text{W m}^{-1}$
Channel press-melt	$\Xi$	$\text{W m}^{-1}$
Channel closure rate	$v_c$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Sheet flow beneath channel	$q_c$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Water volume in moulin	$V_m$	$\text{m}^3$

<sup>a</sup>First section lists dependent variables, second section lists coordinates and miscellaneous variables, third section lists variables of derived quantities.

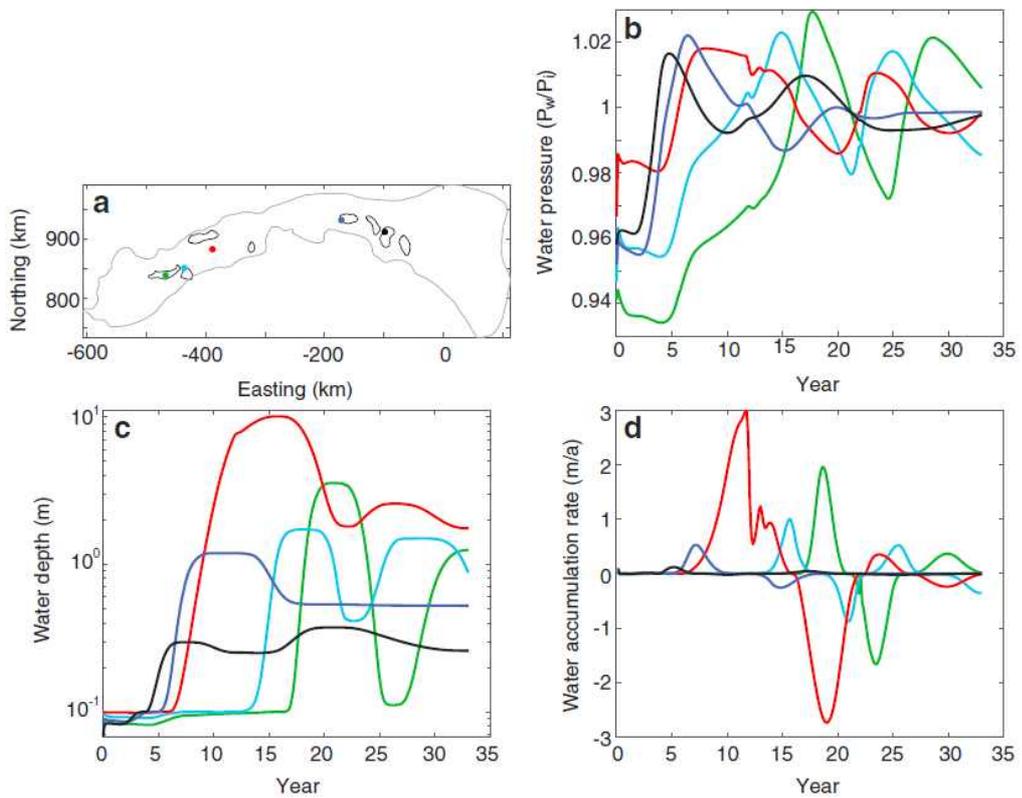
[그림 11] 빙저수문망 진화모델에 활용되는 수많은 입력 인자 및 관련 출력 변수들

GlaDS 모델과 같은 경우 두 가지 흐름요소를 가지고 빙저수문망 변동을 구현하기 위해 위와 같은 수많은 입력인자 및 이에 따른 변수들을 필요로 한다. 하지만, 직접적으로 측정이 불가능한 흐름관련 수리전도도, 빙저면 미끄러짐 속도, 암반의 돌출지형 높이(bedrock bump height) 및 그의 간격 등 다수 가상의 인자들을 포함하므로 모델 결과값의 정량적 신뢰성을 보증할 수는 없다. 또한, 입력인자가 전체적인 모델 도메인에 균질한 상수 값으로 반영이 될 경우 실제적인 현장상황의 반영과는 거리가 있다. 따라서, 현재 모델은 민감도 분석을 통한 정성적인 흐름 규명으로 제한되게 활용될 수 있다. 하지만, **기존의 빙권종합관측망의 관측자료를 활용**한다면 이를 기반으로 공간적 불균질성(heterogeneity)을 반영한 입력인자 반영, 보다 향상된 빙저지형 및 표면 고도를 입력자료로 활용 할수 있으며, 모델 결과에 대한 검증, 보정 자료로도 활용하여 모델의 신뢰도를 증진시킬수 있다.

수문 변동성 모델과 같은 경우 연주의 변동성을 보이는 그린란드 지역과는 달리 관측 부재로 남극 지역에서는 적용 사례가 적다. 모델을 통한 연구는 시공간적 진화의 측면에서 모든 지역에서 시간에 따른 산출값을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 남극빙저 수문망과 같이 직접 관측자료가 부족하고, 대표적인 입력인자(빙저용융량 및 수리전도도 등)에 대한 신뢰성 있는 값들을 산정하는 것이 불가능하므로 신뢰를 담보하기 힘들다. 이러한 이유로 남극에서의 수문변동성 모델의 적용 결과들은 제한되게 보고되고 있다.



[그림 12] 남극 Recovery Ice stream에서 시공간적 수문 두께 변동성 모의 사례 (Dow et al., 2018)



[그림 13] 빙저수문망 모델을 활용한 빙저호 추정지역에서의 빙저수 두께 변동성 모의 사례 (Dow et al., 2018)

본 연구 결과 보고서에는 기존의 남극지역 수문 변동성을 구현한 현장 적용 사례를 포함하여, 기존 극지연구소에서 기 획득한 남극 빙권종합관측망 관측자료, 혹은 앞으로 획득

할 관측자료등을 기반으로 하여 지역규모 수문망 모델의 예비구축 사례를 기술하고, 신뢰도 있는 수문망 모델 규명을 위한 관측-모델 연계 수문망 해석 적용방안에 대하여 기술하고자 한다.



### 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

본 연구 개발에서는 과거 남극 탐사 기반의 종합관측망을 통하여 기 생산된, 혹은 앞으로 생산될 것이라고 예측되는 남극 관측 자료들을 어떻게 수문 모델에 활용할 것인지에 대해 고찰하였다. 이를 위해서 기존에 남극탐사를 통해 생산된 자료를 기반으로 빙저수문망 예비모델을 구축하여 예비 결과를 분석하였으며, 직접 모델을 구축하지 않은 지역과 같은 경우 최근에 수행된 연구들을 분석하여, 앞으로 해당 관측 자료를 활용하여, 어떻게 모델에 활용 및 검증에 활용할지를 논의하였다.

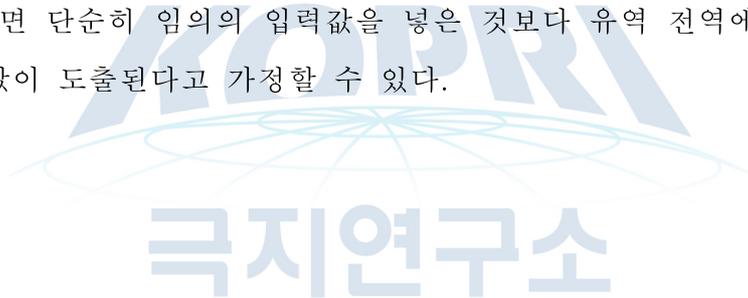
<표 2> 관측자료 - 수문망 모델 구축 활용 연구주제 발굴

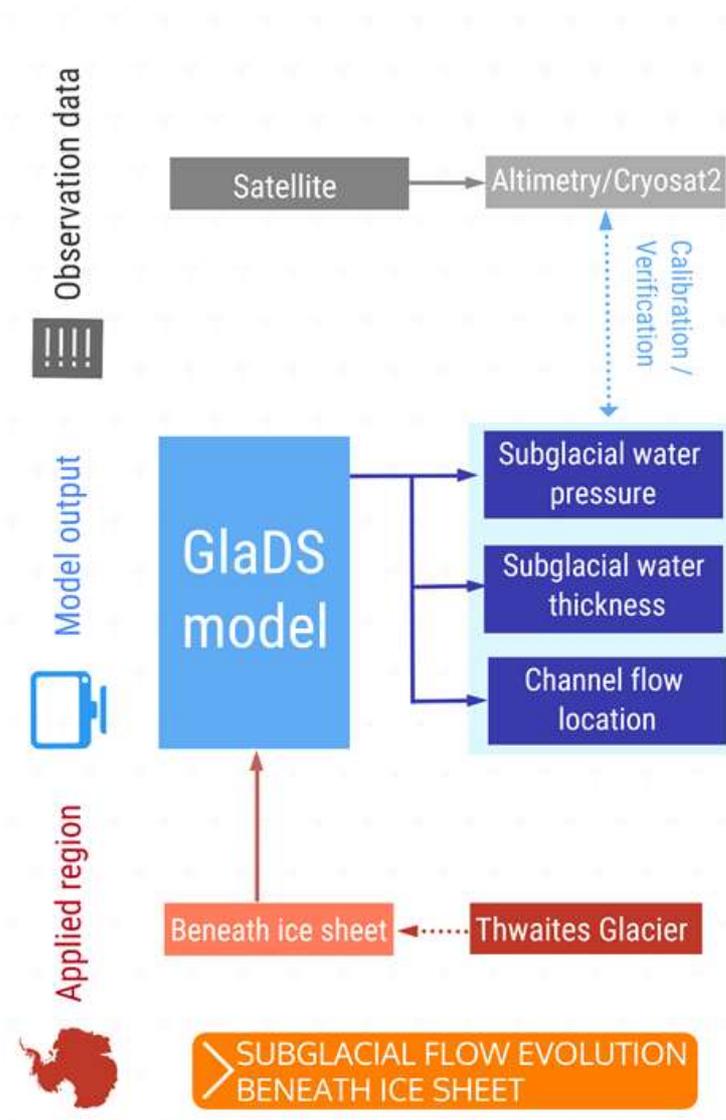
연구 유역	중점 분석 지역	수문망 진화 모델 연구 가능 주제	진행 상황	현장 관측 자료 및 타 모델 연계 방법
스웨이츠 빙하	빙하 유역 하부 수문망 구조 전반	스웨이츠 빙하 하부 빙저 수문망 연결구조 규명	예비모델 구축	???
		고환경 DEM 및 빙저지형 기반의 과거 수문망 연결구조 규명	잠재적 연구주제	
	지반선 주변	지반선부근 빙저수 배출 지역 및 유량 연구	잠재적 연구주제	
캠벨 빙하	빙하 유역 하부 수문망 구조 전반	빙저 용융량 분포에 따른 빙상 하부 수문망 진화	예비모델 구축	
데이비드 빙하	빙하 유역 하부 수문망 구조 전반	데이비드 빙하 하부 빙저 수문망 연결구조	기존 연구 분석	
	단일 활동성 빙저호	단일 빙저호내 고해상도 흐름 구조 규명	잠재적 연구주제	

본 표에 제시된 연구 유역 및 중점 분석 지역을 토대로 관측-수문망 진화 모델 관련 연구주제를 발굴하고, 남극 관측 자료를 기반으로 한 빙저 수문망 수치 모델 구동을 통하여 관측-모델 상호 검증을 목적으로 다양한 활용법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 위와 같이 연구지역 및 가능 주제들을 분류하여, 어떠한 관측자료를 활용하여 구축된 빙저 수문망 모델과 연계하여 현장 수문망 해석에 활용할 수 있는 지를 고찰하고자 한다.

## ○ 스웨이트츠 빙하 - 빙하 하부 수문망 연결 구조 규명

스웨이트츠 빙하의 경우 서남극에서 현재 가장 빠르게 붕괴되고 있는 빙하로 해양 쪽에서는 환남극 심층수가 유입되어 빙붕의 지지력을 약화시키는 한편 빙상 하부에서는 높은 지열 및 마찰로 인해 빙저면의 미끄러짐 현상이 발생하기 때문에 이 또한 빙상 붕괴에 중요한 요인이 된다. 이렇게 빙상하부에서 일어나는 수문의 흐름의 진화 및 물의 유동량의 정량적 규명을 위해서는 모델 입력인자의 신뢰성이 중요하나, 남극 빙상의 하부 물의 흐름을 직접 관측 하기는 힘들다. 빙권 관측 분야에서는 활동성 빙저호를 발견하기 위해 인공 위성 고도계를 활용한 표면 고도 변화의 주기성을 분석하여 활용해왔다. 활동성 빙저호의 경우 빙저호 내에 물이 유입될 때는 하부 빙저수의 압력이 증가하면서 표면 고도가 상승하고, 압력을 해소하기 위해 채널흐름이 활성화되었을 경우 빙저수의 압력이 감소하면서 표면 고도가 하강한다. 인공위성 고도계는 이러한 표면고도의 주기성을 활용하여, 활동성 빙저호를 감지할 수 있다. 따라서, 이러한 이를 통해 정의된 빙저호의 위치를 빙저 수문망 모델에서부터 입력인자를 보정해가며 도출된 빙저호의 위치와 비교, 검증을 통하여 모델의 출력값을 도출한다면 단순히 임의의 입력값을 넣은 것보다 유역 전역에 걸쳐 더욱 신뢰도 있는 수문망 결과값이 도출된다고 가정할 수 있다.

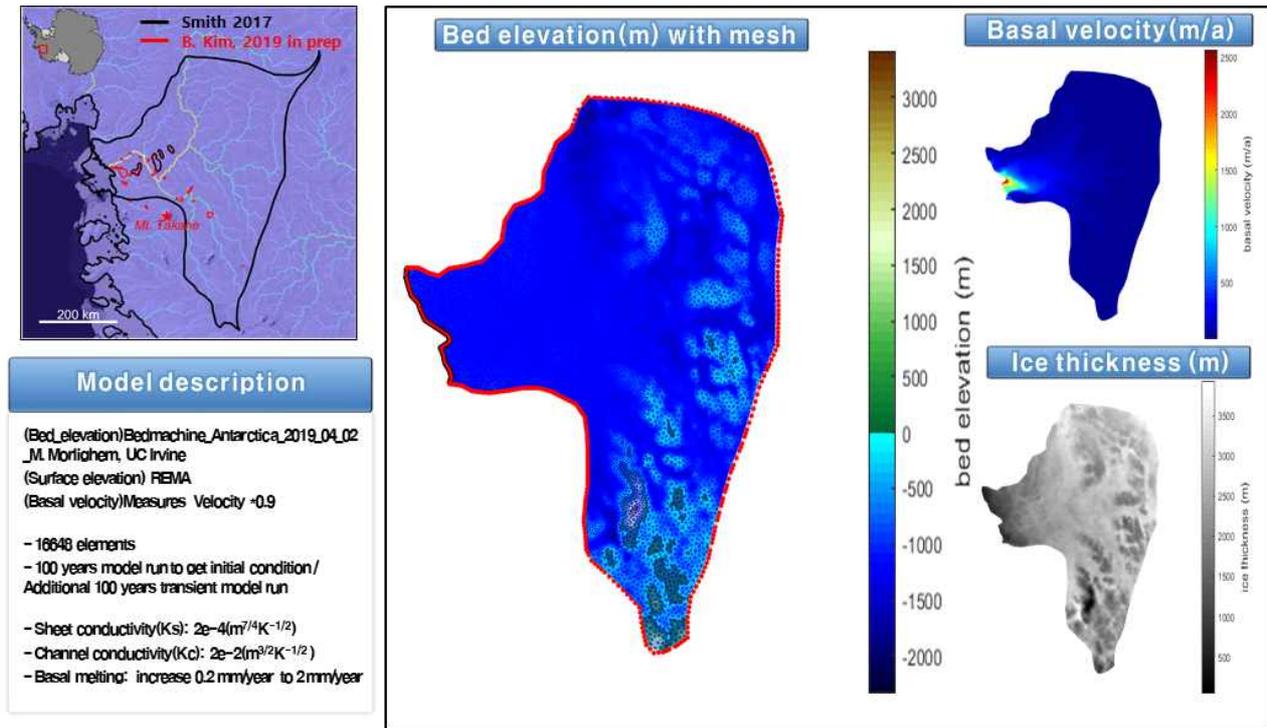




[그림 14] 스웨이크 빙하지역 관측-모델 연계 수문망 연구 체계: 스웨이크 빙하 유역 빙상 하부 수문망 변동 규명을 위한 GlaDS 모델 연구 및 검증에 위한 인공위성 고도계 자료의 활용

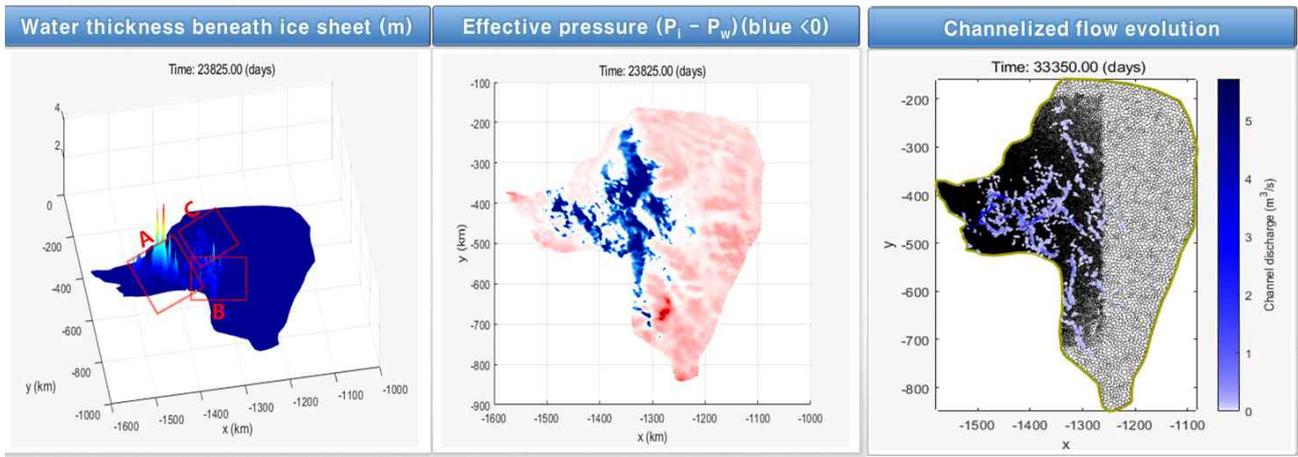
아래 그림은 GlaDS 모델을 활용하여 스웨이크 빙하 유역의 예비모델을 구축한 예이다. 예비모델에서는 모델의 구현능력을 알아보기 위해 분산수리전도도(distributed hydraulic conductivity), 채널 수리전도도(channel hydraulic conductivity), 빙저용융량(basal melting) 값을 균질한 상수 값을 기반으로 입력값을 채택하였으며 표면고도와 빙저지형 고도의 경우 REMA와 Bed\_machine 데이터를 기반으로 추출된 정보를 활용하여 도메인을 구축하였다. 모델 도메인은 아래의 그림처럼 실제 유역의 지형 입력정보를 반영한 도메인이다. 스웨이크 빙하에서 존재하는 활동성 빙저호의 경우 과거 ICESat과 같은 레이저 기반 인공위성 고도계의 경우 구름이 많은 스웨이크 지역의 고도 시계열 정보를 유의미하게 추출하기 힘들어 빙저호를 탐지하기 힘들었으나 Smith et al., 2017의 연구 결과에 따

르면 Cryosat2의 altimeter를 활용한 고도변화 분석을 통하여 스웨이크 빙하 주 흐름라인을 따라 4개의 빙저호를 정의한 바 있다. 최근에는 이를 기반으로 하여 스웨이크 빙하 전반에 걸쳐 새로운 활동성 빙저호를 추가로 정의한바 있다(Kim et al., in prep)



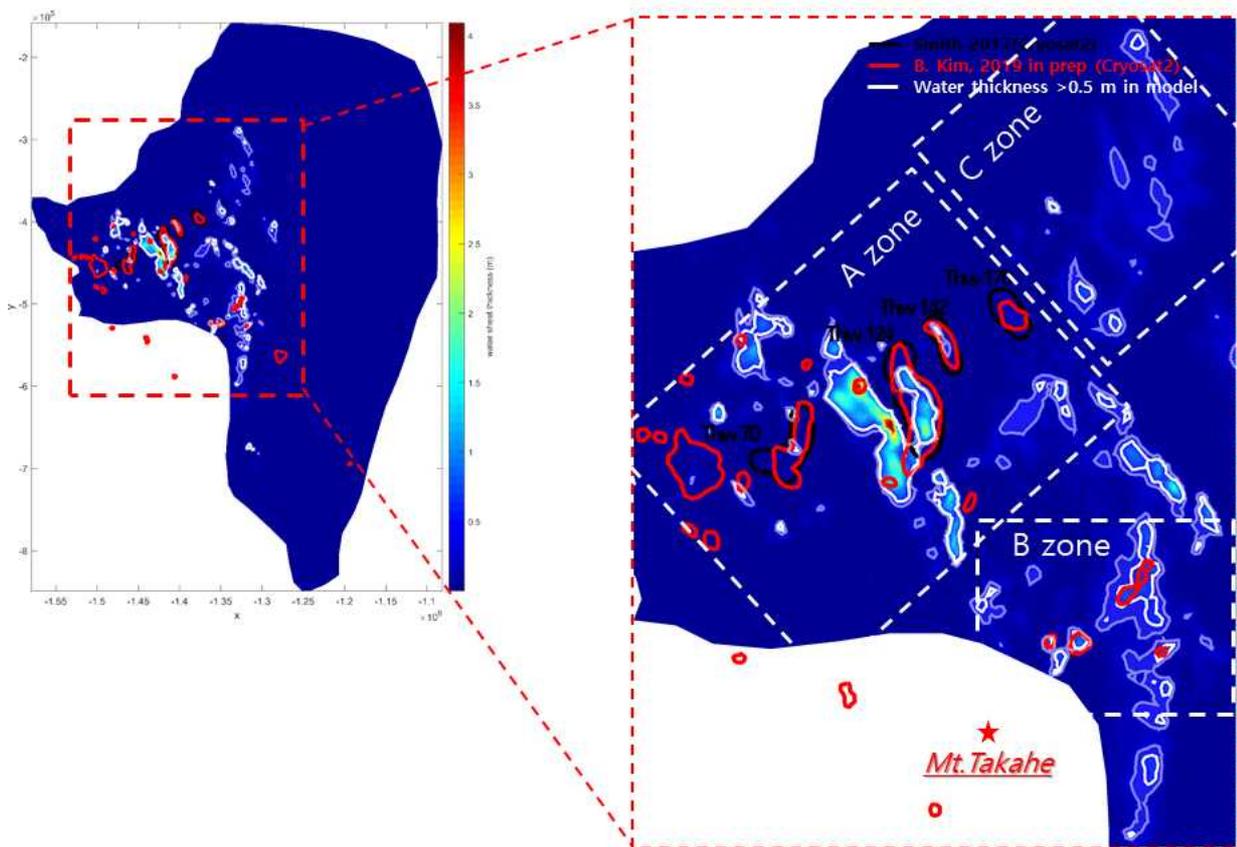
[그림 15] 스웨이크 빙하 하부 수문망 규명을 위한 예비모델 구축. 빙저 지형 및 표면고도는 현장의 조건을 반영하였으며 분산 수리전도도, 채널 수리전도도, 빙저용융량 값은 전 모델 영역에 걸쳐 균질한 상수 값으로 반영하였음

빙저수문망 변동성 모델인 GlaDS 모델의 핵심 출력인자는 아래와 같다. 모델 구동 시 빙저면 하부에 수문두께(water thickness) 분포를 구현할 수 있는데, 이러한 분포는 빙저 호수가 존재하는 위치 및 영역을 제시해 준다. 또한, 빙저면에 물이 축적됨에 따라 압력이 높아져 상부빙상의 압력과 빙저수 압력의 차인 유효압력이 낮은 지역을 보면 어느 지역에서 물이 축적되어 물의 압력이 높아지는지를 추정이 가능하다. 수리포텐셜이 낮은 지역에는 물이 모이게 되는데 이렇게 빙저수가 모여서 물의 압력이 높아지는 지역은 물을 배수시켜 압력을 완화시켜야 하므로 빠르게 물이 배수되는 채널흐름이 형성되게 되는데 모델에서는 그림처럼 채널의 연결성 분포의 규명이 가능하다.



[그림 16] 대표 모델 출력값: 빙저수문 두께, 유효압력(effective pressure), 시공간적 채널 진화

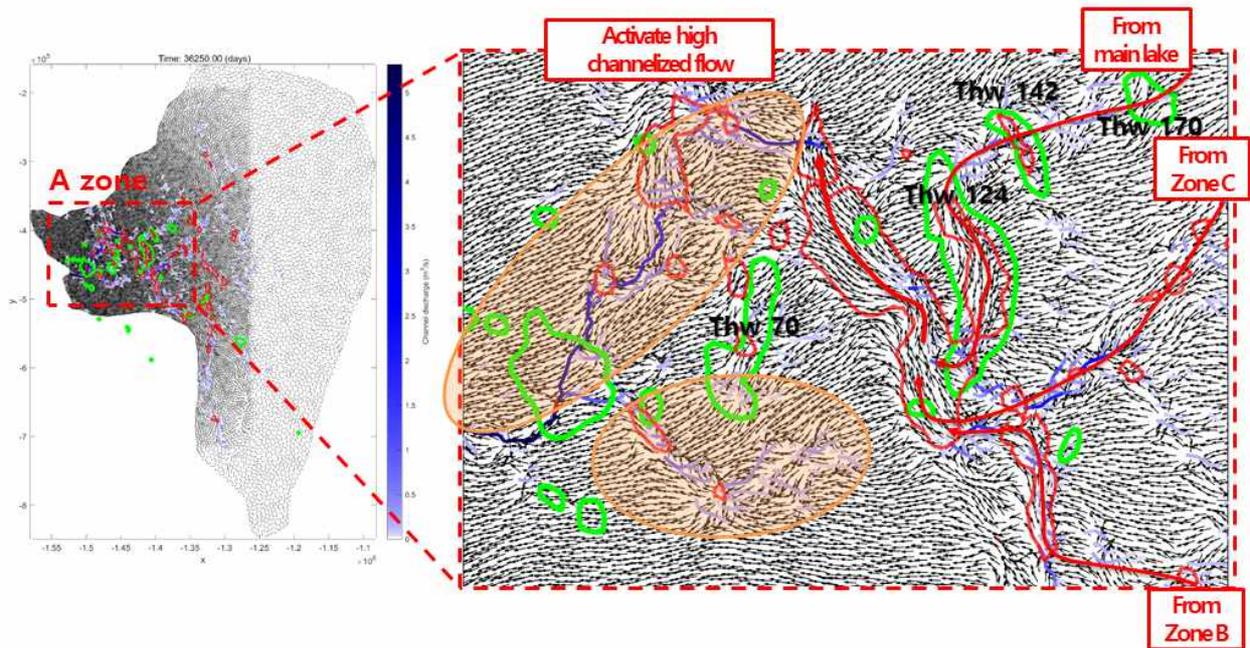
관측-모델 연계 기반으로 모델의 결과값의 신뢰도를 확보하기 위해서 인공위성 고도계 기반의 활동성 빙저호 위치를 비교 분석할 수 있다. 아래 그림은 예비모델의 결과이다. 앞서 기술했던 것처럼 GlaDS 모델과 같은 경우 3가지 출력값(빙저수문두께, 빙저유효압력, 채널 진화분포)을 시공간적으로 도출이 가능하다. 모델에서 도출된 빙저수문의 두께의 경우 모델의 결과값으로 생성되는 하나의 출력값인데 이를 인공위성 고도계 자료로 추정된 빙저호의 위치와 상호 비교검증이 가능하다. 그림에서, 인공위성 기반으로 정의된 빙저호의 위치와 GlaDS 수치모델 기반으로 정의된 빙저호의 위치를 비교해보면 크게 스웨이츠 빙하를 3구역으로 나누어 구분해 보았을 때(A - C 지역), A 지역과 같은 경우 주요 핵심 빙저호들을 모델에서 비교적 잘 모사할 수 있었으나, 모델과 관측이 일치하는 지역도 존재하였고, 불일치 하는 지역이 혼재되어 있음을 알 수 있다. 활화산인 Mt.Takahe 주변 지류에 위치한 B 지역의 경우 빙저면의 고지열류량으로 인한 빙저용융량이 많을 것이라 예측 되는 지역으로서 해당지역의 경우 빙저수문망 모델이 관측값을 매우 잘 모사하는 것으로 나타났다. 반면, C 지역과 경우 모델에서는 몇몇 빙저호들이 모사되는 것으로 나타났으나 인공위성 고도계 관측결과에서는 정의된 빙저호를 찾을 수 없었다.



[그림17] 스위스 빙하에서 인공위성 기반으로 도출된 빙저호 위치와 GlaDS 모델기반으로 도출된 빙저호의 추정 위치 비교: 검은선은 Smith et al., 2017에서 정의된, 붉은 선은 Kim et al., 2020, in prep)에서 정의된 빙저호의 위치를 나타내며 흰색 선은 GlaDS 모델에서 정의된 빙저호의 추정 위치를 나타냄

빙저수문 두께 외에 빙저수문망 모델을 활용하면, 채널 흐름의 생성, 유량, 위치 및 분산흐름 분포 벡터를 통하여, 전반적인 수문 흐름 구조의 파악이 가능하다. 본 예비 모델 결과에서는 두 개의 빙저호 사이에 trough에 집중적으로 물이 모이는 지역이 발생하는 것으로 모의되며, 해당 지역의 압력이 집중적으로 높아지면서, 하류지역에 채널이 형성되고 채널을 통해 많은 유량이 배출되어 지반선으로 빠져나가는 형태로 모의됨을 알 수 있다. 빙저수문망 모델을 통해서 넓은 유역규모에서 어디로 물이 흘러들어가고 어디로 물이 빠져나가는 지를 시공간적으로 모의가 가능하기 때문에 이러한 모델의 결과값을 인공위성 관측값과 비교를 통하여 모델을 tuning 했을 때 모델 결과의 신뢰도를 높일 수 있다. 해당 모델 결과값의 경우 모델 입력값을 단순화 시킨 예비 모델에서 나온 결과 값이며, 다양한 현장 실측기반 dataset을 활용하여 도출한 수문망 결과들을 비교하여 향후 연구결과를 비교 정리 할 예정이다.

Sheet flow distribution(vector) vs channel flow distribution(blue) vs Lake\_model(red) vs Lake\_B. Kim(green)

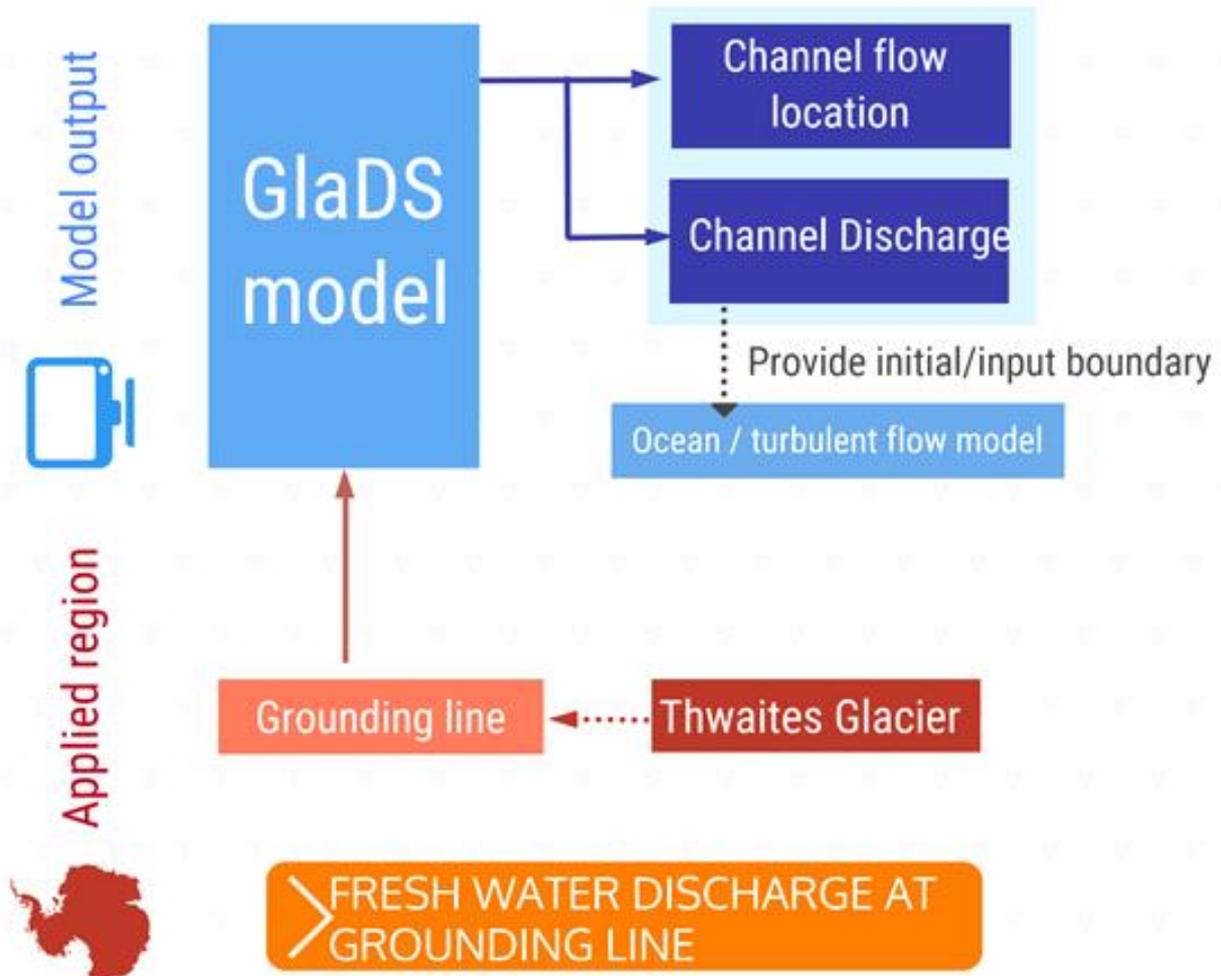


[그림 18] 스위츠 빙하 주하천 흐름지역 내에 분산흐름, 채널흐름, 모델기반 빙저호 위치 및 인공위성 기반 고도계 위치의 상호 비교: 활동성 빙저호 Thw 124와 Thw 70 사이의 trough 지역에 상부지류의 흐름이 모이는 것으로 보이며, 해당 지역에 높은 빙저수압력으로 인해 하류지역에 채널흐름이 형성되어 지반선으로 흘러나가는 것으로 추측됨.

극지연구소

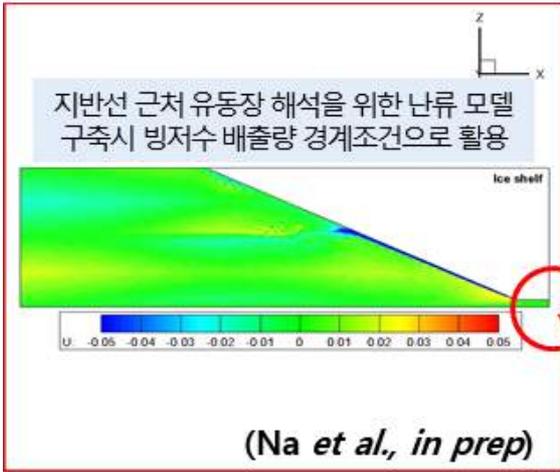
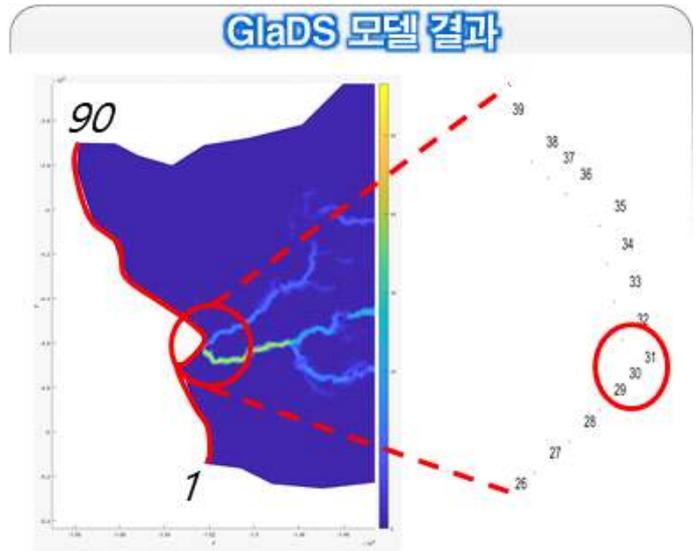
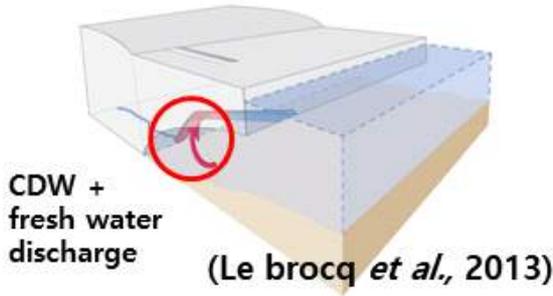
### ○ 스위츠 빙하 - 수문모델 활용 기반 난류/해양모델 연계를 위한 지반선 부근 빙저수 배출 지역 및 배출량 정량화

빙저수문망 모델을 활용하면 지반선 부근에서 빙저수의 유출기작, 유출 위치 및 유출량 연구가 가능하다. 기존 빙저수 배출기작 연구에 따르면 해양에서 고온의 환남극 심층수가 지반선으로 유입이 되고, 빙상의 하부에서 담수의 채널 유출이 있을 경우 두 흐름이 만나는 지점에서 빙붕 하부를 녹여 빙붕의 불안정도를 야기한다는 연구결과가 보고 되고 있다(Le brocq et al., 2013). 이러한 빙저수의 유출과 같은 경우, 직접적으로 현장 관측이 힘든 지역에서 나타나는 현상으로 확인하기 어려운 결과이기 때문에 정확한 입력값 기반으로 빙저수문모델 구축 시 모델의 결과값을 활용하여, 지반선에서 빙저수가 바다로 배출되는 위치 및 채널의 크기, 배출 유량에 대한 정량적 평가의 수행이 가능하다. 이런 모델 결과값의 경우, 다음 모식도와 같이 빙붕 하부 지반선 근처에서 기작을 연구하기 위한 난류모델이나 해양모델 등 타 모델에 활용되어 연계 연구가 가능하다.

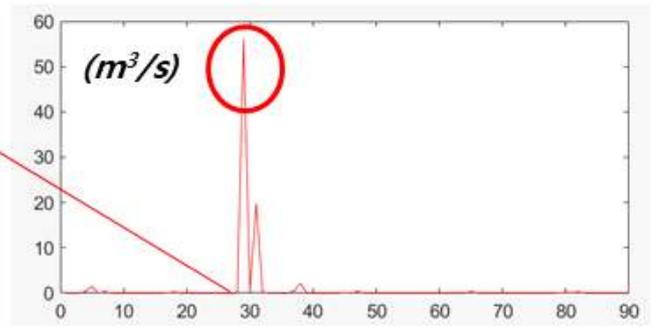


[그림 19] 스웨이크 빙하지역 관측-모델 연계 수문망 연구 체계: 스웨이크 빙하 유역 기반선 지역 수문 배출기작 연구 및 타 모델(해양모델 및 난류모델) 연계를 위한 GlaDS 모델 출력값의 활용

아래의 그림처럼 GlaDS 모델에서는 스웨이크 빙하의 하부에서 모델 유역 전역에서 생성되는 채널 흐름의 위치 및 기반선 어느 지역에서 집중적인 채널흐름의 배출이 예상되는 지 모의가 가능하다. 입력값을 단순화한 예비 모델의 경우 주 흐름지역에서 약  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 배출유량이 모의되는 것으로 예측 되었으며 이는 앞으로 다양한 현장 관측기반 dataset을 적용하여 보완될 계획이다. 해당 모델 출력값은 빙붕 하부 및 근처에서의 흐름 진화 메커니즘을 알기 위한 난류 모델에서 빙저수 유출량 경계조건 자료로 활용될 수 있어 이러한 활용을 통하여 좀 더 신뢰도 있는 빙저수문 흐름 모의가 가능할 것으로 생각된다.



[모델 유역에 생성되는 채널 위치 및 배출 유량]



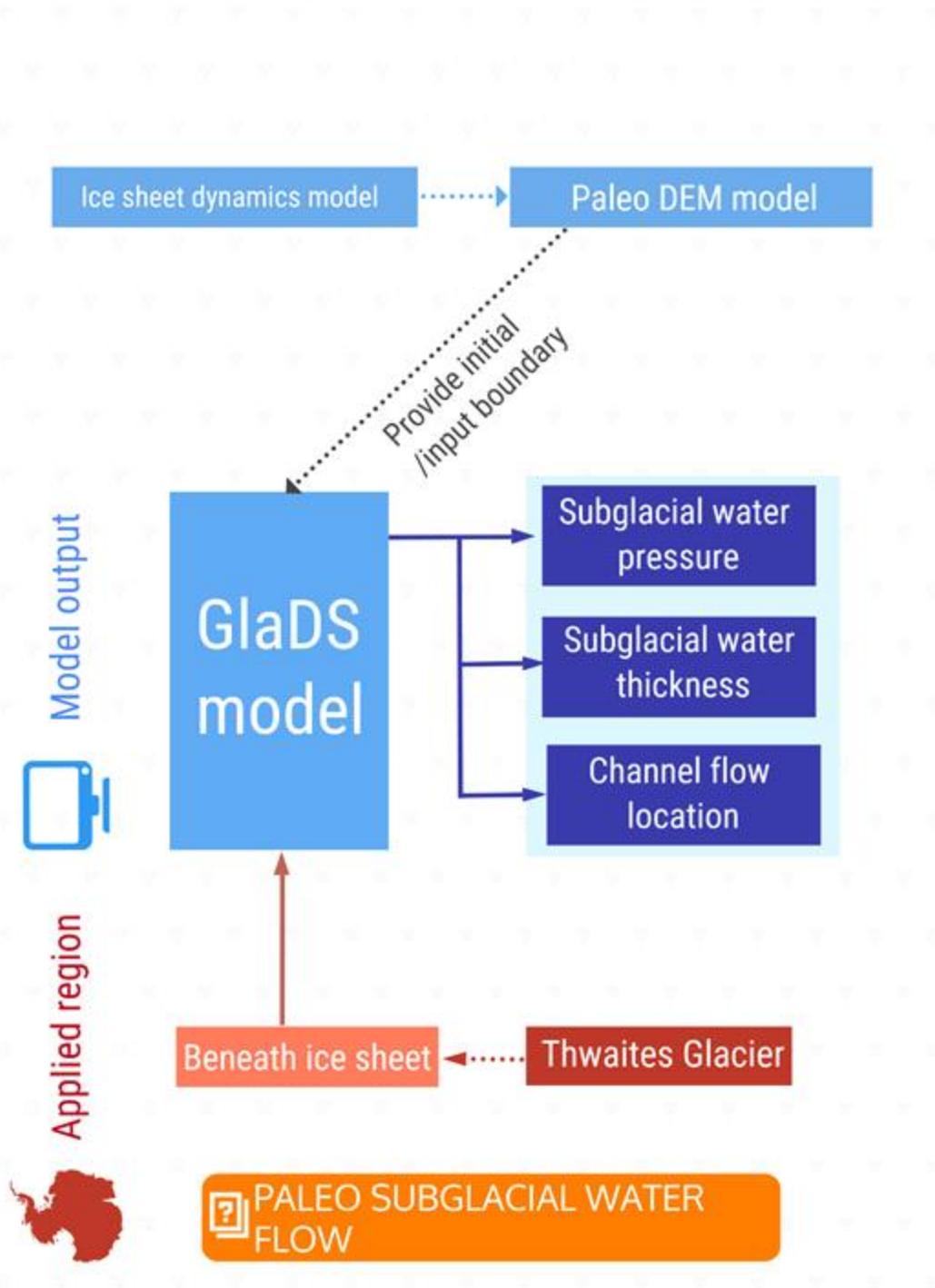
[지반선 근처 노드별 배출 유량]

[그림 20] 스웨이크 빙하지역 지반선 근처 노드별 채널 배출 위치 및 유량 출력값을 기반으로 한 지반선 근처 유동장 해석을 위한 난류모델 구축 연계방안

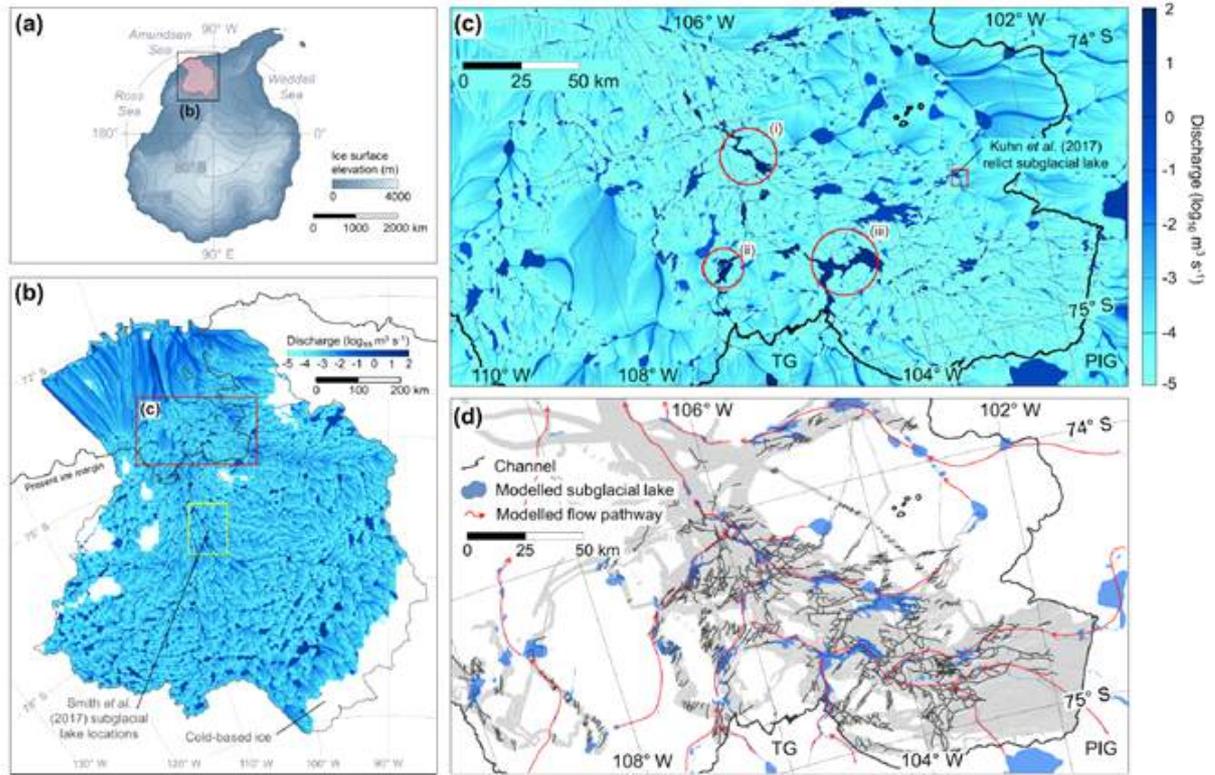
### ○ 스웨이크 빙하 - 고환경 DEM 및 빙저지형 복원을 통한 과거 최대 빙하기 때의 수문망 연결 구조 규명

GlaDS 모델을 활용시 고환경에서의 빙저수문망 진화 연구의 수행이 가능할 것으로 생각된다. 지역규모 빙저수문망 모델의 주요 경계조건은 과거 빙상표면 고도와 빙저 지형의 복원이다. 지각 반등 모델을 통하여 과거의 최대 빙하기 때의 빙저 지형을 복원하고, 이를 기반으로 PISM 등의 빙상동역학 모델을 활용하여 당시의 표면고도의 복원 및 데이터화가 가능하다. 이러한 과거 지형의 복원이 가능하다면, 이를 경계조건으로 GlaDS 모델에 입력 값으로 적용하여, 과거 해당 빙하 조건 내에서 빙저수문망 모델의 출력값을 도출할 수가 있으므로 공간해상도 자료가 부족한 과거의 빙저수문망 규명에 해당 모델이 적극 활

용되어 과거 빙저수 흐름 규명이 가능할 것으로 사료된다.



[그림 21] 스웨이크 빙하지역 관측-모델 연계 수문망 연구 체계: 빙상 동역학 모델 및 지각 반등모델을 기반으로 한 고환경 빙상 표면고도 및 지형 자료 복원 및 이를 활용한 고 빙저 수문망 진화 연구 활용



**빙상동역학모델 기반 고환경  
DEM 및 빙저지형 복원**

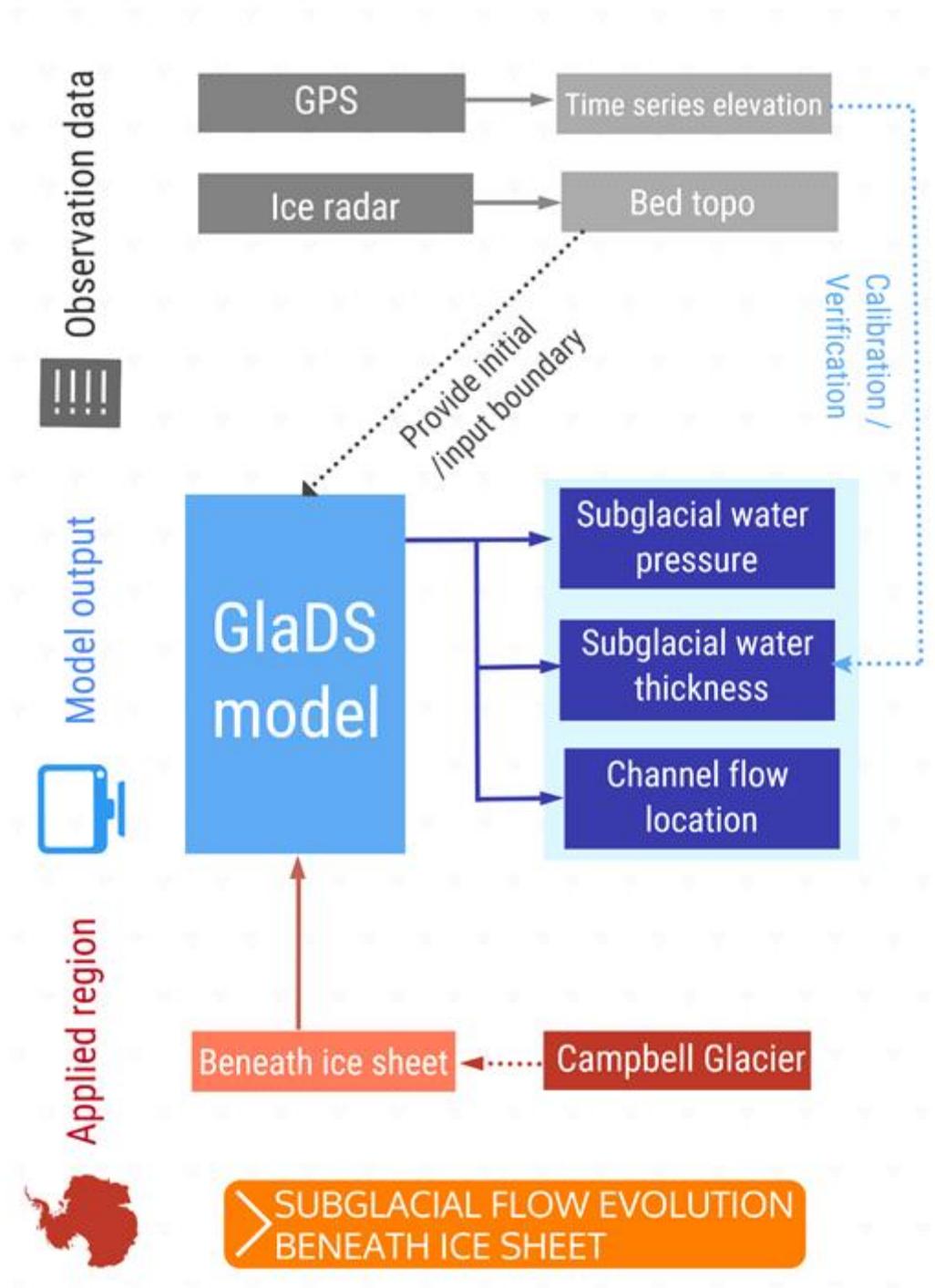


**빙저하천망 모델에 적용하여  
고환경 빙저수문망 복원**

[그림 22] PISM 등 빙상 동역학 모델을 활용하여, 고환경 빙저지형 및 표면고도를 복원하고, 해당지형을 기반으로 과거 빙저호의 위치 및 연결성 등 고 빙저수문망을 연구한 연구 사례(Kirkham et al., 2019)

○ 캬벨 빙하 - 항공레이다 기반 빙저지형 개선 - 빙저 용융량 분포에 따른 빙상 하부 수문망 진화 연구

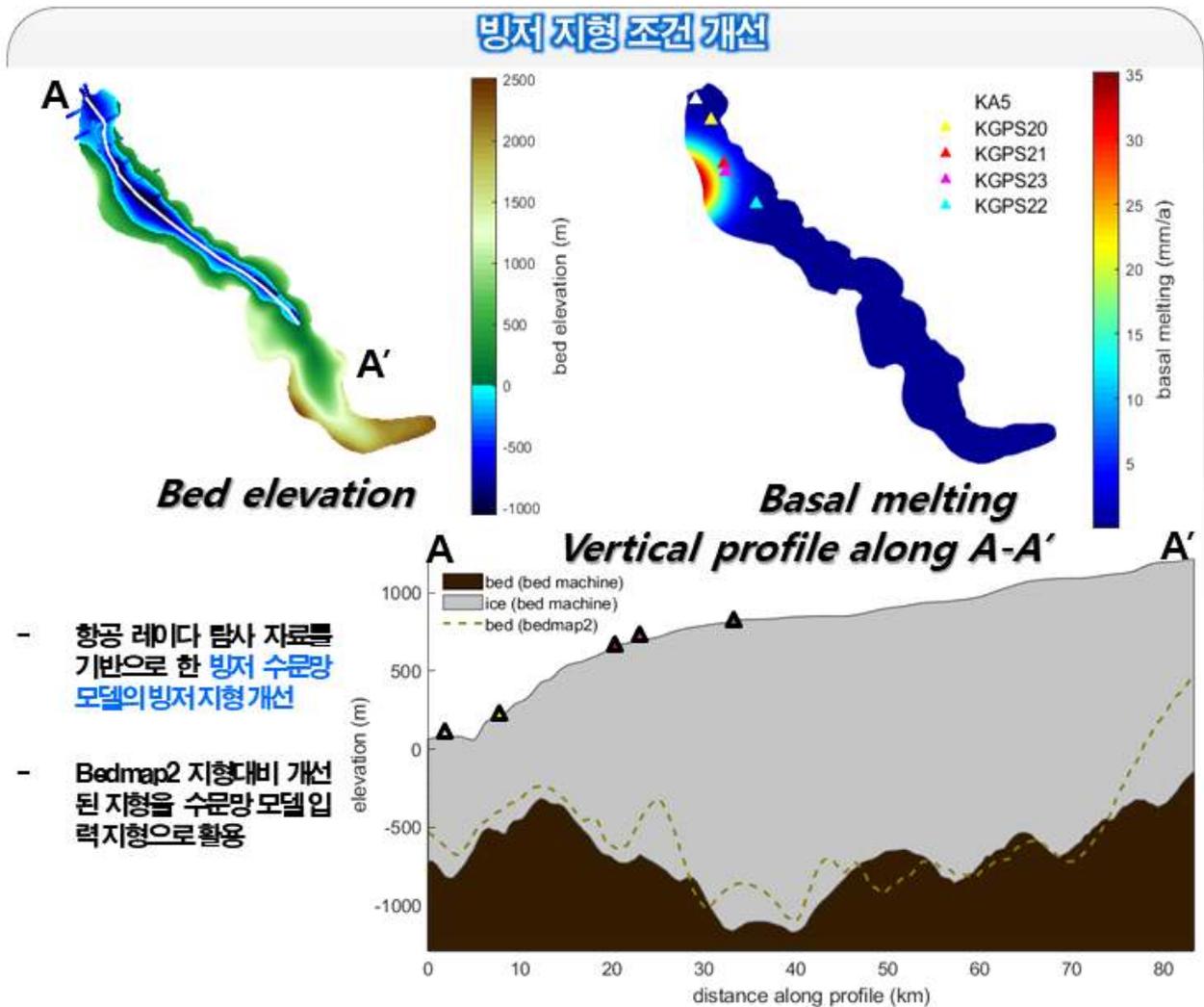
다음은 캬벨빙하에서 획득한 현장 관측 자료를 빙저수문망 모델에 활용한 예이다. 2017-18 남극 하계 탐사 시즌에 이루어진 KOPRI-UTIG 항공 탐사에서는 장보고 기지 주변 소규모 빙하인 캬벨빙하에서 항공레이다 탐사 자료를 획득 한 바 있다. 캬벨빙하는 소규모의 좁고 긴 형태의 빙하로서 기존에 발간된 Bedmap2 지형자료의 경우 탐사측선이 주 흐름선을 따라 하나의 측선만이 존재하였고, 이는 빙저수문망 모델의 수리포텐셜 구배의 중요한 역할을 하는 정확한 빙저지형 요소의 반영을 어렵게 하였다. 이 때 획득된 항공레이다 탐사 자료를 이용해서 해당 측선에서 얻어진 측선 지형 및 mass conservation 알고리즘을 활용한 새로 도출된 빙저지형의 경우, 기존 bedmap2 지형 대비하여 개선된 지형 결과를 얻을 수 있었다.



[그림 23] 캠벨 빙하지역 관측-모델 연계 수문망 연구 체계: 항공 레이더 탐사 기반 지형 자료 개선 및 GPS시계열 자료와 GlaDS 모델의 출력값 상호 비교를 통하여 신뢰도 있는 빙저수문망 출력값 도출에 활용

신뢰성 있는 빙저수문망 흐름을 모사하기 위해서는 정확한 수리포텐셜 분포의 반영을 위한 빙저지형의 적용이 매우 중요하므로, 기존대비 향상된 빙저지형을 구축하여 수문망

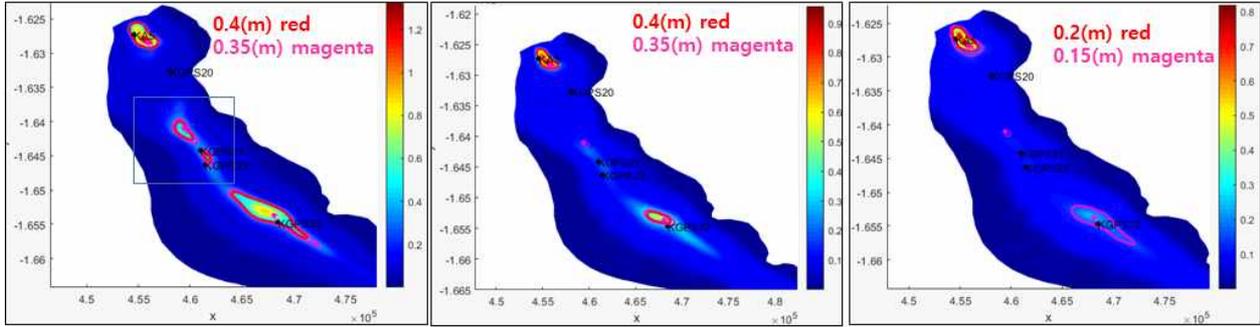
모델에 적용할 경우 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이다. 캄벨빙하 수문량 예비모델의 경우 개선된 지형과 기존 bedmap2 지형을 비교해 보았을 때, 빙하천의 하류지역에는 기존 bedmap 대비 지형고도가 낮아진 것을 확인 할 수 있었으며 지반선으로부터 약 25km 상류 지역에 돌출된 형태의 지형이 새로운 지형도에서는 제거되어 있음을 알 수 있었다.



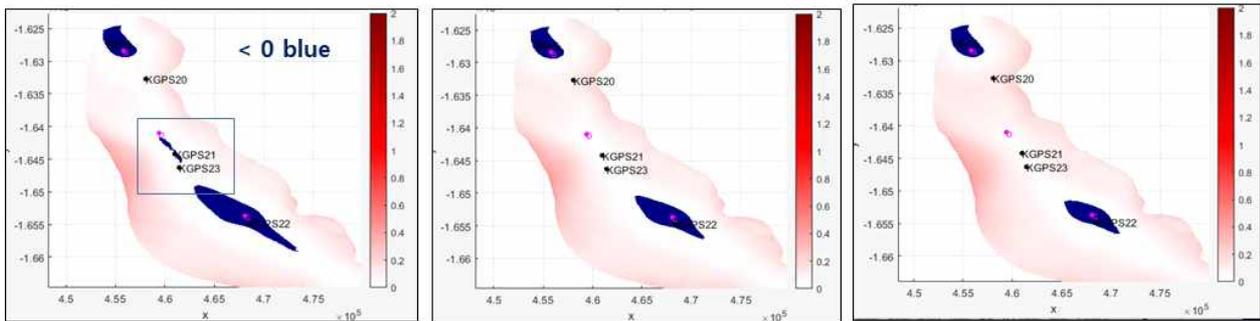
[그림 24] 항공레이더 탐사 자료를 이용한 기존 빙저지형의 개선. 그림의 노란색 점선의 경우 기존 Bedmap2에서의 빙저면 지형을 나타내며, 갈색경계의 경우 극지연구소에서 획득한 항공레이더 탐사기반 지형자료를 반영한 현장 지형 자료를 나타냄

CASE A ( $K_c(1e-3)$ )CASE B ( $K_c(7e-3)$ )CASE C ( $K_c(2e-2)$ )

모델 기간 동안 빙저수문 최대 두께 (m)

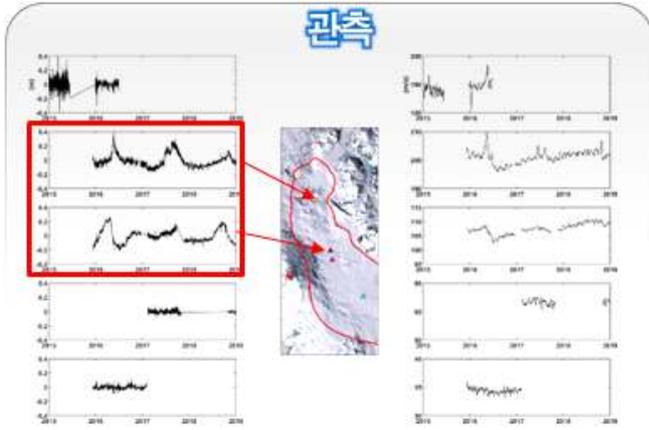


유효압력 (Effective pressure) (MPa)

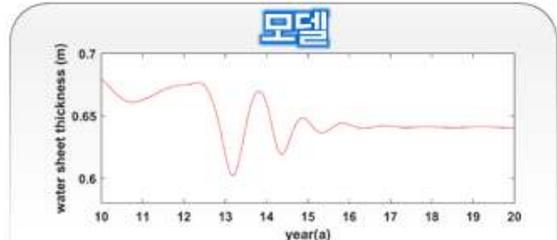


[그림 25] 채널 수리전도도에 따른 캠벨빙하 지역 빙저수문 및 유효압력 분포 민감도 분석 예시: 모델의 입력인자에 따라서, 빙저호의 위치에 대한 분포가 달라짐을 확인할 수 있다. KGPS22 주변의 경우 채널 수리전도도의 크기에 관계없이 높은 빙저수압력 및 두꺼운 수문두께가 존재하였으나 KGPS21 주변과 같은 경우 채널수리전도도에 따라서, 빙저호의 생성 여부가 달라짐을 확인할 수 있음.

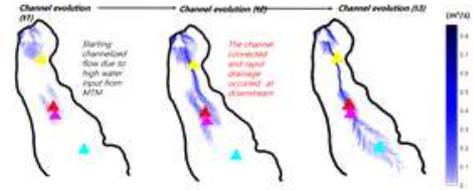
또한, 캠벨빙하에서 2016년부터 현재까지 얻어진 GPS 시계열 관측 자료의 경우 멜번 화산을 기점으로 하여 상류지역과 하류지역에서 빙상표면고도 변화의 주기성이 차이가 보임을 알 수 있었다. 이러한 차이의 원인을 규명하기 위하여 해당지역에 빙저하천망 모델을 적용해 본결과 캠벨빙하에 위치한 멜번화산에서 높은 지열류량으로 인한 빙저수의 유입이 있다고 가정할 경우 멜번화산을 기점으로 상류 지역과 하류지역의 수문두께의 변동성이 차이가 있음을 모델로 확인할 수 있었다. 멜번화산의 하부에서 다량의 빙저수유입을 가정할 경우 주변의 빙저수 압력이 증가되어 채널흐름이 활성화되면서 물이 빠르게 배수되면서 수문의 변동성이 나타날 가능성을 모델로부터 확인하였다. 이와 같이 관측자료 만으로 원인을 해석하는 것보다 이와 같이 신뢰도 있는 경계조건 반영 및 모델의 출력값과 상호 비교 검증을 통하여 변동성 원인 규명을 할 경우 좀더 믿을 수 있는 결과 값을 제시해 줄 수 있을 것이다.



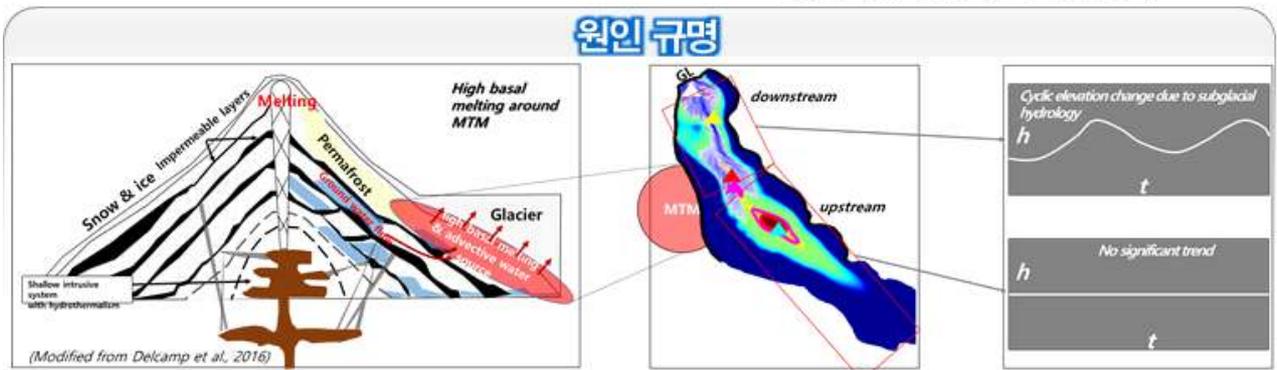
GPS 시계열 자료에서 고도 변화의 주기성 발견



시간에 따른 관측 지점 수문 두께 변동

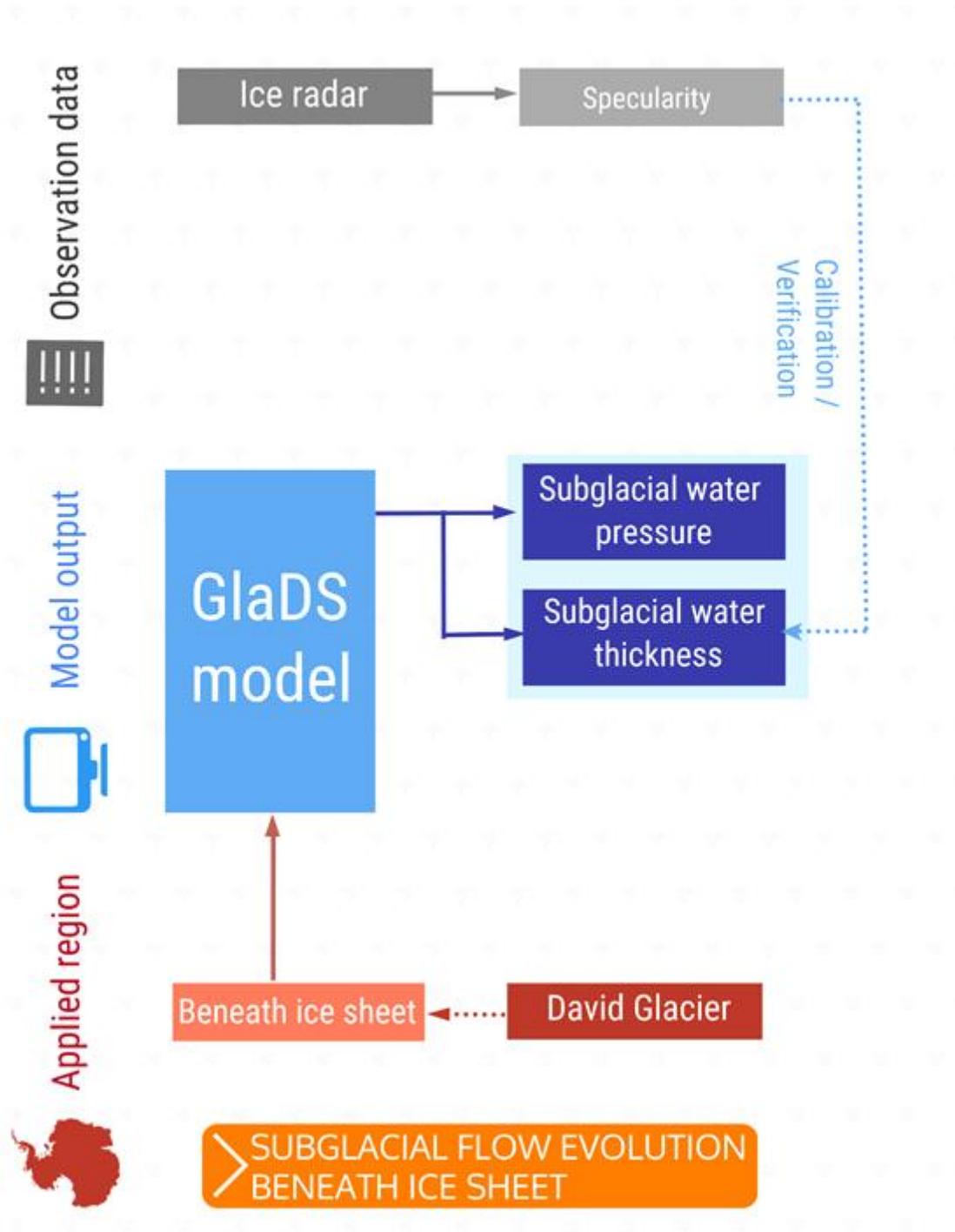


멜번 화산 부근 채널 흐름 진화



[그림 26] GPS 관측자료의 고도변화에서 주기성 발견 및 이를 규명하기 위하여 캠벨빙하 하부 멜번 화산에서의 고 지열류량으로 인한 빙저수 유입이 있다고 가정했을 경우의 모델 결과 비교. 멜번화산에서 빙저수 유입 가정시 하천 상류 및 하류의 고도변화가 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있음.

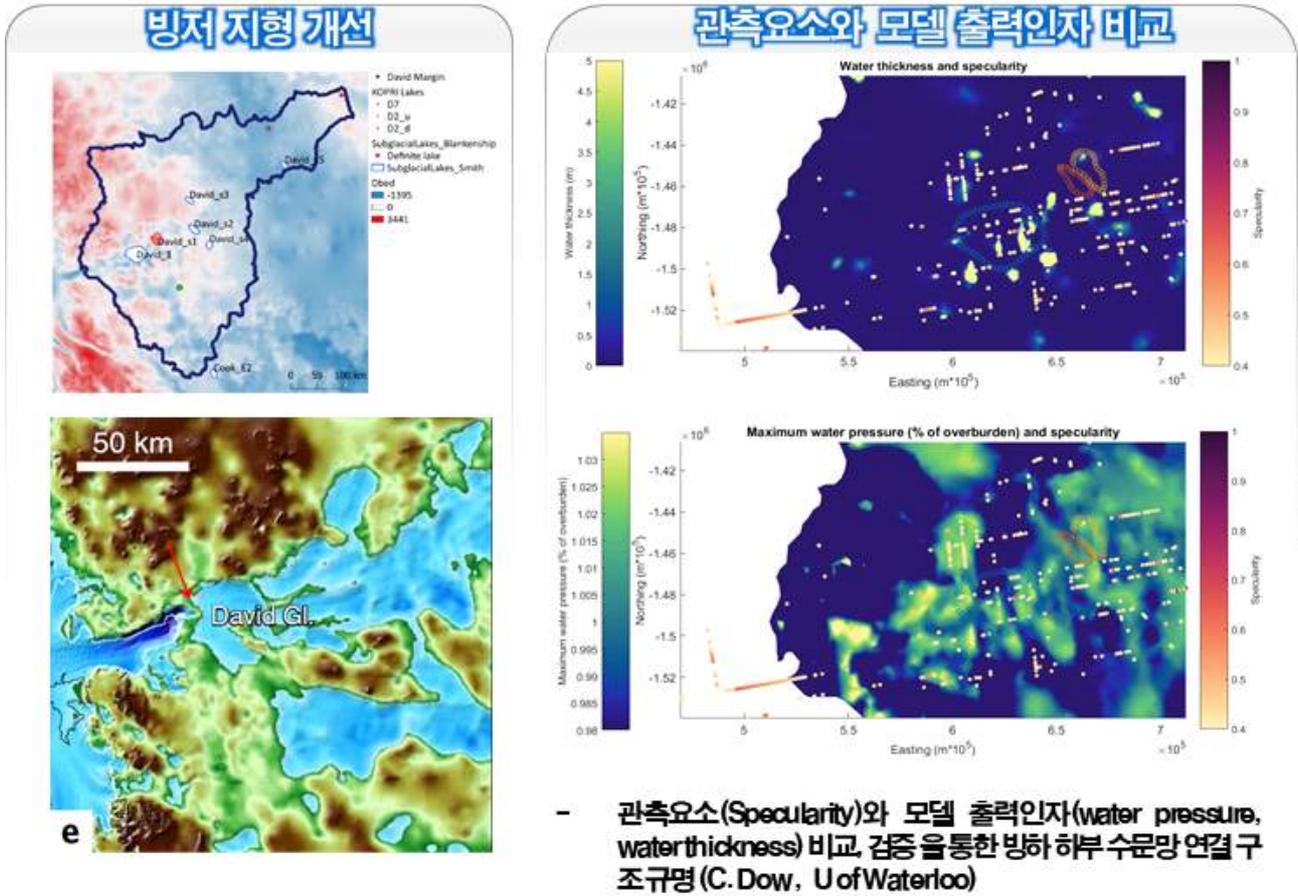
○ 데이비드 빙하 - 항공레이다 기반 specularity 값 활용 기반 유역규모 수문망 전반 연구



[그림 27] 데이비드 빙하 관측 자료- 모델 출력인자 연계 방안: 물의 존재 및 흐름 형태를 지시해주는 항공레이다 탐사기반 specularity 자료와 모델 출력값인 빙저수 압력 및 빙저수 두께 값 비교검증을 통한 수문망 연구 체계

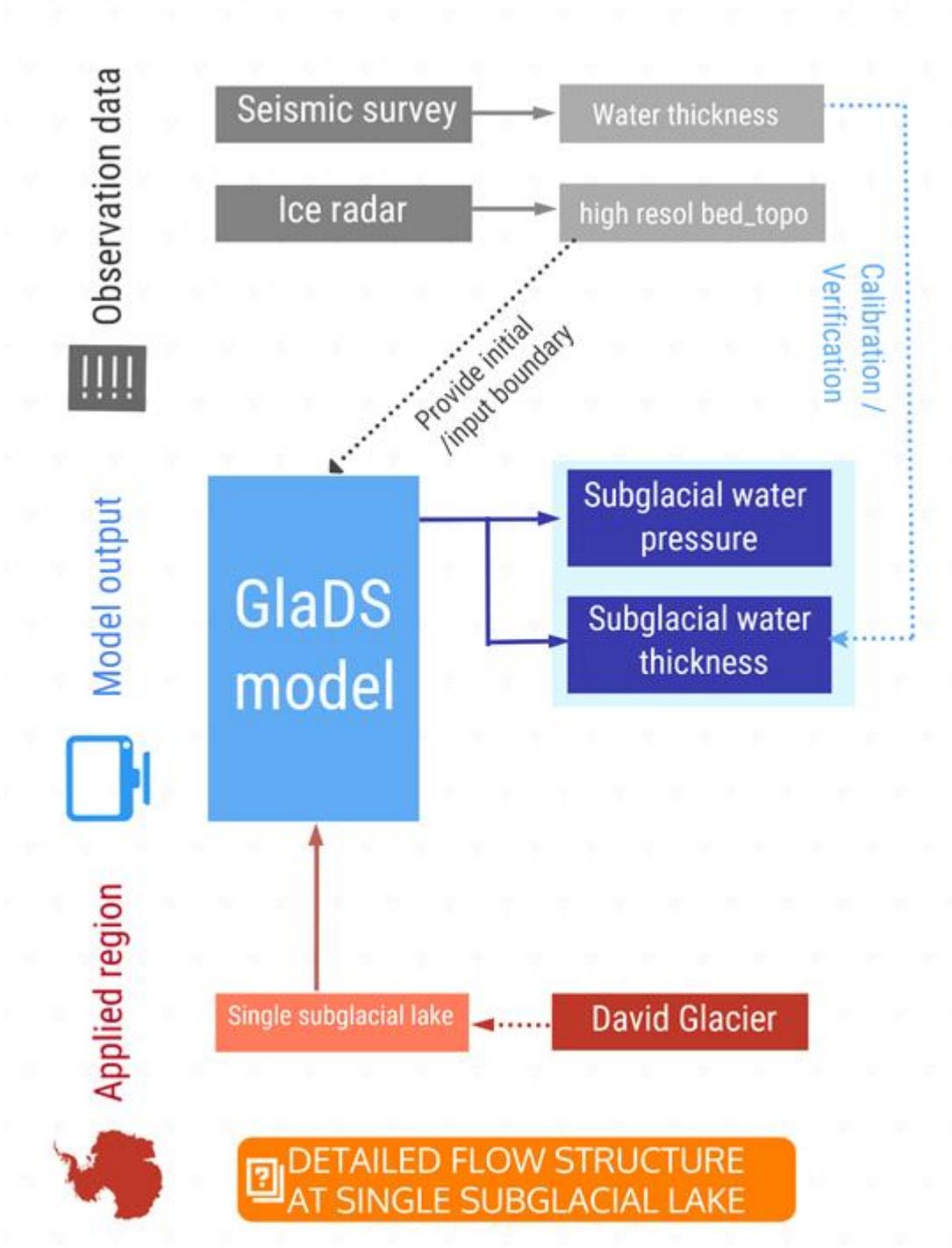
데이비드 빙하의 경우도 항공레이다 탐사자료로부터 도출된 specularity 값을 GlaDS 수문망 모델의 출력값과 상호 비교하여, 빙저수문 해석결과에 대한 신뢰도를 높일

수 있다. 일반적으로 항공 레이더 탐사의 반사 강도로 알려진 specularity 값의 경우 0.4 이상일 경우 해당위치의 빙상하부의 물의 존재가능성이 있다는 것을 지시해준다고 알려져 있다. 하지만, 이 해석에 불확실한 변수들(빙하 온도 및 화학조성 등)이 많기 때문에 모델 출력값인 빙저수문 두께나 빙저압력요소와 비교, 검증할 경우 수문구조 연구에서 좀 더 신뢰도 있는 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 28] 데이비드 빙하 지역의 빙저호 위치 및 항공레이더 탐사기반 관측요소인 specularity 값과 모델 출력인자인 빙저수문두께, 빙저수 압력 분포와의 상호 비교: 관측값과 모델결과값이 둘 다 빙저수의 존재를 가리킬 때 그 지역에서 물의 존재 확률이 더욱 높다는 것을 지시해 줌

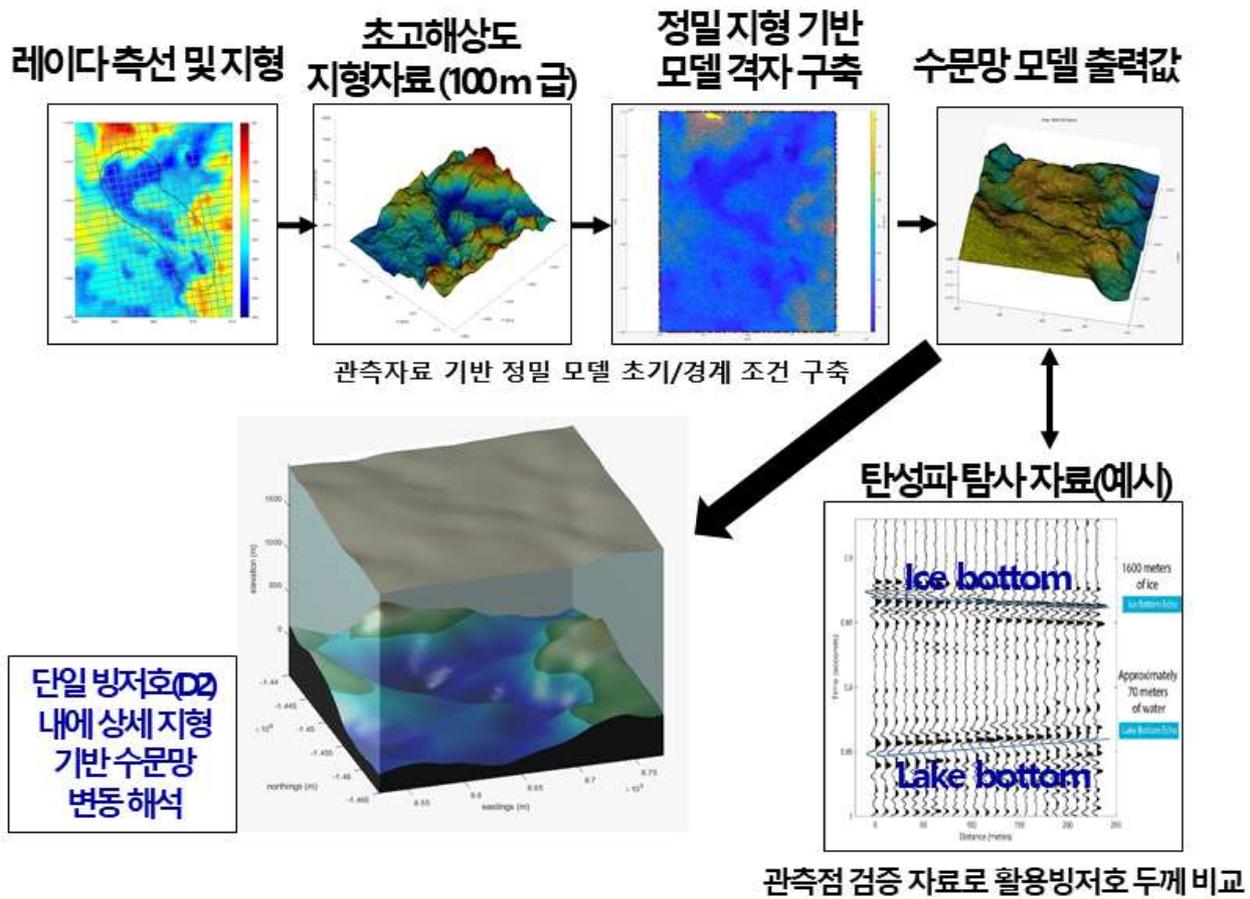
○ 데이비드 빙하 - 항공레이다 활용 고해상도 지형 기반 단일 빙저호 내 고해상도 흐름 구조 규명



[그림 29] 단일 빙저호 내 상세 빙저수문 유동 상세 연구를 위한 관측-모델 자료 연계방안

단일 빙저호 관련 고해상도의 지형자료의 확보가 가능하다면, 유역규모가 아닌 단일 빙저호 규모 내에서 좀 더 상세한 유동양상에 대한 연구에도 GlaDS 모델이 활용이 가능할 것으로 판단된다. 극지연구소에서는 18-19 남극 하계 탐사 시즌에서 데이비드 빙하 지역 빙저호

후보지인 D2 지역에서 고해상도로 항공 레이다 탐사를 수행한바 있다. 기존에 500m 혹은 1000m 급 해상도의 자료로는 단일 빙저호 규모에서 흐름 구조 연구에 활용하기에는 해상도가 부족하므로 극지연구소에서 수행한 자료를 활용하여 고해상도 정밀지형 기반 모델을 수행한다면 기존에 간과했던 수십미터급 수문 구조에 대해서 어느 정도 해석이 가능할 것으로 생각한다. 이 때 특정 포인트에서 탄성과 탐사 관측 자료가 존재한다면 이를 기반으로 해당 관측점의 빙저호의 두께를 대략적으로 추정할 수 있고, 이를 보정자료로 활용하여 모델을 보정하여 빙저호 내 전반적인 수문 두께를 규명할 수 있을 것이다. 이러한 형태의 관측-모델 연계 연구 체계는 빙저호 내에 상세지형기반 수문망 변동 해석에 신뢰도를 높여 줄 수 있을 것이다.



[그림 30] 단일 빙저호에서의 상세 모델 격자 구축을 통한 수문모델 출력값도출 및 탄성과 탐사 등의 관측기반 수문두께 자료의 보정 기반 단일 빙저호 내에 상세지형기반 수문망 변동 해석 연구 체계

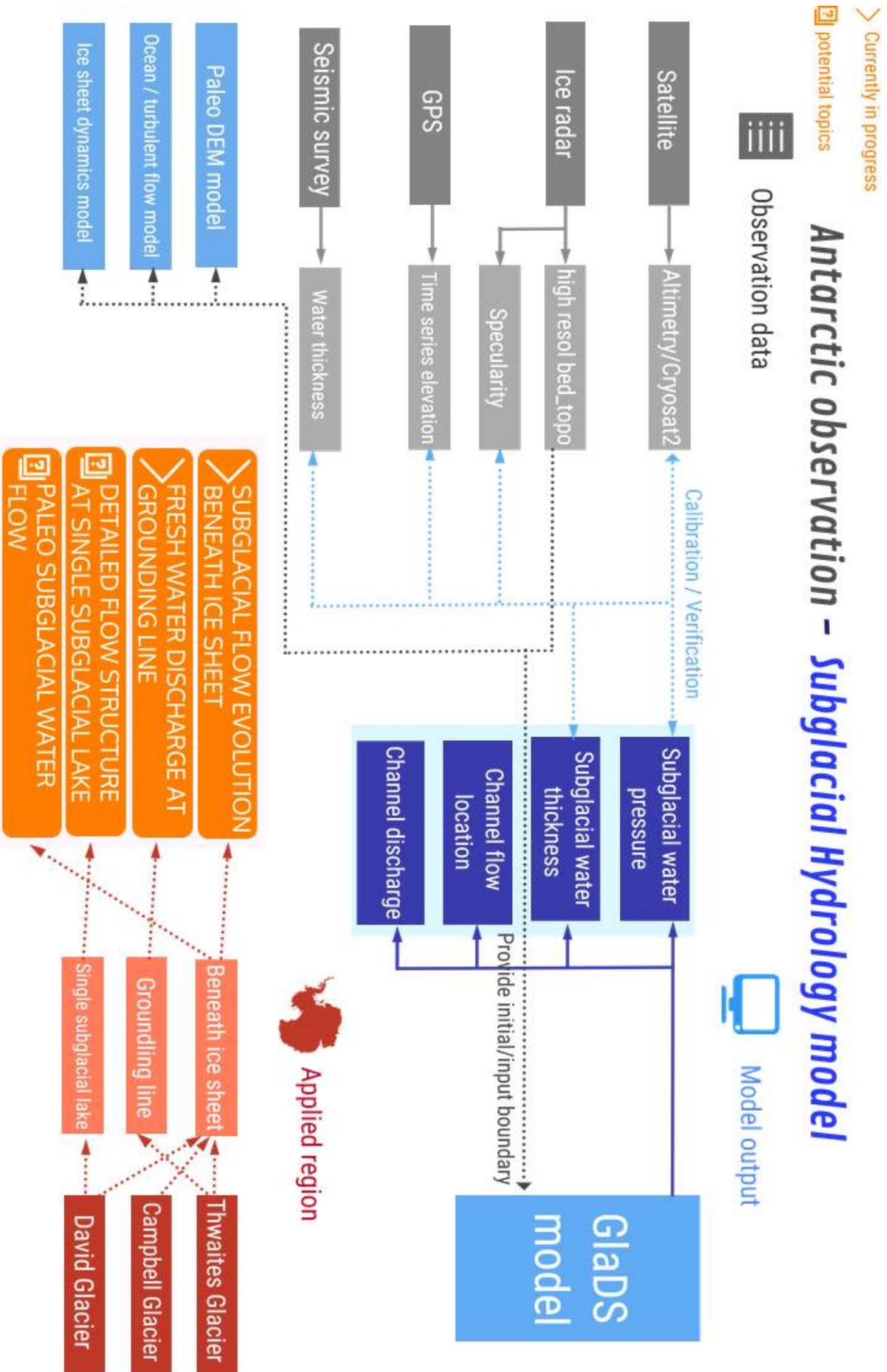
## 제 4장 연구개발 결과의 활용 계획

- 빙저하천망은 빙상거동과 연관된 하나의 핵심원인 인자로 알려져 있으나 국내에 연구 인력 부족. 관련 연구기관과 교류 및 연구 수행을 통하여 기술격차를 좁힐 필요성이 있음
- 현재, 남극 지역에서 다양한 빙상지역 **종합 관측망 자료** GPS, 지진관측, ApRES 관측, 빙상 하부지형 개선)가 축적, 정교화 되고 있는 시점에서 해당자료의 **적극적 활용 기반의 수문 해석 기술이 필요**
- 빙저수문망 모델은 그린란드 지역의 경우 빙상 표면에서 여름에 moulin 등을 통한 빙상 하부로 물의 유입되는 등 직접관측값 획득이 용이하여 활용되어 왔음.
- 남극지역의 경우 빙저수문망 모델은 향후 빙상 동역학 모델 및 지반선 담수유출 가능성 추정 등에 활용될 여지가 있으나 입력 변수값의 불확실성으로 인해 모델의 불확실성 또한 매우 큼
- 하지만, 빙저수문망 모델이 계속해서 발전되는 중이며, 남극 빙상동역학 모델에도 점점 현실적인 빙저수문 요소의 반영이 시작되는 추세. 반영요소 또한 점점 더 정교화 될 것으로 생각되므로 **극지연구소의 관측 자료를 기반으로 빙저수문망 모델 GlaDS를 적극 활용하여 수문 연구에 적용할 경우 아래와 같은 수문망 해석 연구의 발전을 이룰 것으로 기대함**

**<표 3> 변동성 빙저수문망 모델 체계 구축시 기대 성과 및 활용 방안**

	모델 체계 구축전	모델 체계 구축후
빙저 지형 조건 반영	- 개념 모델(synthetic model) 위주 - Bedmap2 지형 등 기존 자료활용	- 최신 관측 기반의 향상된 빙저 지형 반영으로 모델의 예측성 증대
시간적 수문 흐름 구현	- 해당 위치의 수리 포텐셜 (hydraulic potential) 구배에 따른 정적인 수문 흐름 구현	- 해당 관측점의 시계열 수문 변동성 구현으로 관측점의 유량의 변동성 구현 가능
공간적 수문 흐름 구현	- 인공위성, GPS 관측 지점, 시간에 따른 제한된 수문 흐름 구현	- 모델 도메인 전역에 시공간적 수문 흐름 구현
모델 신뢰도	- 모델에서 나오는 출력 값들의 신뢰도를 검증할 방법 부족	- 직접적인 관측값들을 검증/보정 자료(GPS 시계열 변동성 자료/ ApRES 용융량 추정 자료 등) 로 활용하여 모델의 신뢰도 증대
빙상동역학과의 연계	- 빙권-암권 미끄러짐 경계조건으로 고정된 마찰계수	- 수문 변동성 모델 기반의 빙권-암권 경계조건 반영시 향상된 빙상동역학 모델 결과값 도출 가능
남극 관측의 전반적 활용	- 관측자료에 기반한 수문 흐름 해석	- 기존 관측자료와 빙저수문망 흐름의 복합적 해석, 혹은 탐사 위치 결정 예비 자료 등으로 전반적활용 가능

○ 최종 빙저수문망 연구 관측-모델 연계 체계



본 연구 보고서에서는 직접 관측 데이터를 얻기 어려운 남극에서의 현장 관측 자료와의 불확실성을 보완하기 위한 모델의 활용을 수행하여 남극 탐사 자료 활용 기반 빙저하천 망 변동성 모델 체계를 구축하는 것에 초점을 두었고, 해당 연구의 결과물로 위와 같은 최종 모식도를 제시하였다. 해당 모식도는 연구 내용에서 서술한 다양한 관측-모델 연계 검증방법들을 종합적으로 도시한 내용들이다. 현재 남극에서는 다학제 관측기반의 현장 자료들이 축적되고 있고 특히 지구물리기반이나 측지학을 기반으로 하여 현장에서의 다양한 결과물들이 도출되고 있다. 인공위성 고도계 및 GPS를 활용한 시공간적인 표면고도의 주기적 변동성 기반의 빙저하 연구 및, 항공 레이더 기반의 빙저지형 개선자료를 통하여 초기입력조건을 개선하거나, 반사강도 자료를 해석하여 물의 존재를 간접적으로 추정하는 기법, 그리고 탄성과 탐사를 통하여 물의 존재 및 두께, 빙저매질의 특성 연구 등은 남극에서 빙저수문망을 연구하기 위한 필수적인 접근법임과 동시에 각기 이루어졌을 때 한계점이 명확한 접근법들이다. 하지만, 이러한 연구결과물들이 빙저수문망 변동성 모델인 GlaDS 모델에서의 출력값인 빙저수압력, 빙저수두께, 채널의 진화관련 출력인자 들과 복합적으로 해석되어 비교 검증 되어 다양한 관측-모델 인자들이 물의 존재를 지시해준다면, 결과값의 신뢰도를 훨씬 더 높여 줄 수 있다. 또한, 다양한 타 모델들(빙상동역학모델, 해양모델, 난류모델) 등과 입력값과 출력값을 연계하여 좀더 확장성 있는 연구 주제 발굴이 가능하다. 유역규모의 전반적인 수문망 연구 뿐만 아니라, 지반선 근처에서의 흐름기작, 혹은 단일 빙저하에서의 상세 유동 메커니즘 등 다양한 시공간적 규모에서 연구 수행 또한 가능하다.

본 과제를 수행하기 위하여 해당 모델을 남극에 처음 적용한바 있는 워털루 대학에 C. Dow 교수 연구팀을 방문하여 관측-모델의 연계를 위한 다양한 미래 연구계획을 수립하였다. 스위츠 빙하 지역과 같은 경우, 기 획득한 혹은 향후 미래에 획득가능한 인공위성 고도계 자료 및 항공레이더 자료를 활용하여 GlaDS 모델을 구현하여 현재 수문망 구조를 구현하는 한편 향후 지구온난화로 인하여 빙하가 소실되었을 때 수문망 구조가 어떻게 진화하는 지에 대하여 공동연구를 수행할 계획이다. 또한, 캠벨빙하 및 단일 빙저하 규모 연구에 대해서도 다양한 입력인자 데이터셋을 활용하여 수문모델의 반응도를 분석하여 국제 협력기반 공동연구를 통하여 좀 더 완성도 있는 연구결과들을 도출할 계획이다. 현재, 모델에서 시공간적인 출력값들을 도출이 가능하지만 가장 취약한 모델의 약점은 그 출력값들을 믿을 수 있느냐이다. 따라서, 민감도 분석을 통한 출력값의 반응정도를 도출하는데 그치고 있지만, 관측자료를 모델의 보정자료로 적극 활용한다면, 정량적인 측면에서 좀더 의미 있는 연구결과들의 도출이 가능 할 것이라고 생각된다.

## 제 5 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 빙저수문양 모델 GlaDS model 의 matlab 소스 코드
- 입력인자 관련, 빙상동역학 모델(ISSM) 기반 빙저 용융량 및 빙저면 속도 관련 후 처리 자료 획득



## 제 6 장 참고문헌

- Blankenship, D.D., Carter, S.P., Holt, J.W., Morse, D.L., Peters, M.E. & Young, D.A. (2009). Antarctic subglacial lake classification inventory. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center.
- Carter, S. P., Blankenship, D. D., Peters, M. E., Young, D. A., Holt, J. W., & Morse, D. L. (2007). Radar based subglacial lake classification in Antarctica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(3).
- Dow, C. F., Werder, M. A., Babonis, G., Nowicki, S., Walker, R. T., Csathó, B., & Morlighem, M. (2018). Dynamics of Active Subglacial Lakes in Recovery Ice Stream. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), 837–850.
- Dow, C. F., Werder, M. A., Nowicki, S., & Walker, R. T. (2016). Modeling Antarctic subglacial lake filling and drainage cycles. *The Cryosphere*, 10(4), 1381–1393.
- Fleurian, B., Gagliardini, O., Zwinger, T., Durand, G., Le Meur, E., Mair, D., & Raback, P. (2014). A double continuum hydrological model for glacier applications. *The Cryosphere*.
- Fleurian, B., Morlighem, M., Seroussi, H., Rignot, E., Broeke, M. R., Kuipers Munneke, P., ... & Tedstone, A. J. (2016). A modeling study of the effect of runoff variability on the effective pressure beneath Russell Glacier, West Greenland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(10), 1834–1848.
- de Fleurian, B., Werder, M. A., Beyer, S., Brinkerhoff, D. J., Delaney, I., Dow, C. F., ... & Seguinot, J. (2018). SHMIP The subglacial hydrology model intercomparison Project. *Journal of Glaciology*, 64(248), 897–916.
- Flowers, G. E. (2015, April). Modelling water flow under glaciers and ice sheets. In *Proc. R. Soc. A* (Vol. 471, No. 2176, p. 20140907). The Royal Society.
- Fretwell, P.; Pritchard, H. D.; Vaughan, D. G.; Bamber, J.; Barrand, N.; Bell, R.; Bianchi, C.; Bingham, R.; Blankenship, D.; Casassa, G. & others (2013) Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, 7, 375–393
- Fricker, H. A., Carter, S. P., Bell, R. E., & Scambos, T. (2014). Active lakes of Recovery Ice Stream, East Antarctica: a bedrock-controlled subglacial hydrological system. *J. Glaciol*, 60(223), 1015–1030.
- Kim, B. H., Lee, C. K., Seo, K. W., Lee, W. S., & Ted, S. (2016). Active subglacial lakes and channelized water flow beneath the Kamb Ice Stream.
- Mouginot, J., Scheuchl, B., & Rignot, E. (2012). Mapping of ice motion in Antarctica using synthetic-aperture radar data. *Remote Sensing*, 4(9), 2753–2767.
- Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl (2011), Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet, *Science*, 333(6048), 1427 - 1430.
- Schroeder, D. M., Blankenship, D. D., & Young, D. A. (2013). Evidence for a water system transition beneath Thwaites Glacier, West Antarctica. *Proceedings of the National Academy of*

Sciences, 110(30), 12225-12228.

Smith, B. E., Fricker, H. A., Joughin, I. R., & Tulaczyk, S. (2009). An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003-2008). *Journal of Glaciology*, 55(192), 573 - 595. <http://doi.org/10.3189/002214309789470879>

Sommers, A., Rajaram, H., & Morlighem, M. (2018). SHAKTI: Subglacial Hydrology and Kinetic, Transient Interactions v1. 0. *Geoscientific Model Development*, 11(7), 2955-2974.

Werder, M. A., Hewitt, I. J., Schoof, C. G., & Flowers, G. E. (2013). Modeling channelized and distributed subglacial drainage in two dimensions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(4), 2140-2158.



## 연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

창의연구사업 구분	신진연구원지원과제		
과제명	남극 탐사 자료 활용 기반 빙저 하천망 변동성 모델 체계 구축 연구(계정번호: PE19400)	연구기간	2019.04.01. ~ 2019.12.31.
연구책임자	이승현 선임연구원	연구비(직접비)	30백만원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제목적</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 빙저하천망 모델을 활용하여 남극 현장 관측자료 활용 기반의 빙상하부 하천망의 변동성 구현 모델 체계를 구축하고 지역적 특성이 하천망 진화에 미치는 영향을 규명</li> </ul> <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다양한 현장 규모에서 빙저하천망 모델을 구축하여 향후 입력인자 및 초기조건 변환을 통하여 모델 구동을 가능하게 하였음</li> <li>○ 관측자료가 절대적으로 부족한 남극지역에 현장관측자료를 빙저하천망 모델과 연계하여 신뢰도 있는 수문망 연구를 할수 있는 방법에 대해서 제시하였음</li> </ul> <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 극지연구소의 관측 자료를 기반으로 빙저수문망 모델 GlaDS를 적극 활용하여 수문 연구에 적용할 경우 수문망 해석 연구의 신뢰도를 크게 증진 시킬수 있을 것으로 기대함</li> <li>○ 다양한 타 모델들(빙상동역학모델, 해양모델, 난류모델) 등과 입력값과 출력값을 연계하여 좀더 확장성 있는 연구 주제 발굴이 가능</li> </ul> <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
평가의견	반영사항	비고	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 신진연구자 지원과제의 목적인 연구 결과를 활용하기 위해 도출된 기대성과를 추후 창의적인 극지연구 주제 발굴을 위한 가능성을 충실하게 보고서에 기술 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 최종 모식도를 도출하여 관측-모델 연계하여 어떠한 연구를 수행할수 있는지 도출하였음</li> </ul>	연구보고서 p.41참조	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 국내 관련 전문가 부족으로 캐나다 대학 자문 출장을 제시했는데, 출장 성과, 면담자, 향후 연구협력 지속성에 대한 결과를 정리해서 반영 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 3가지 이상의 연구주제에 관하여 공동 연구를 수행하기로 연구하였음</li> </ul>	연구보고서 p.42 참조	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 발표 시 하지 못했던 연구개발 내용 및 범위에 해당하는 모델구축, 민감도 분석, 용융수가 수문에 미치는 영향분석에 대한 기술 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 채널 수리전도도 값에 따라 어떻게 반응 하는지 반영하였음</li> </ul>	연구보고서 p.33 참조	

※ 본 양식은 필요시 작성하여 최종결과보고서에 포함하여 제출



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.