

빙상동역학 모델 기반 동남극 빙하 미래변화
시나리오 산출의 주요 요소 규명

Investigation of key elements in future projections
of East Antarctic Ice Sheet using ice sheet model



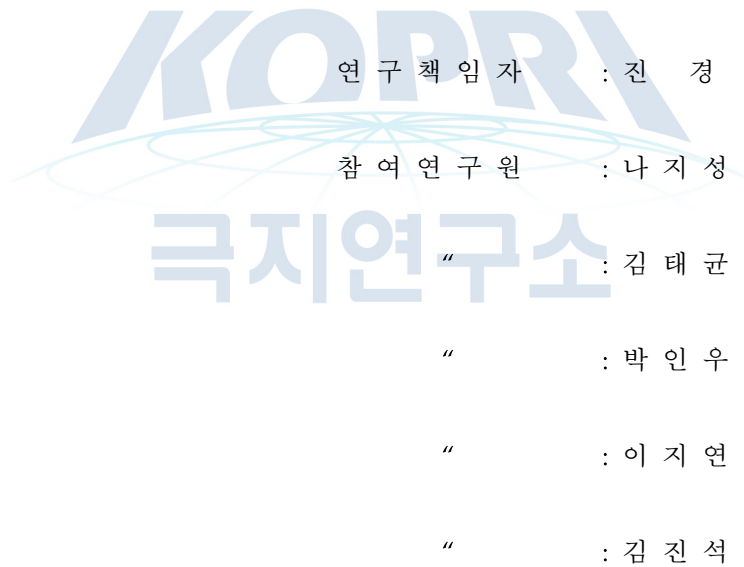
한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “빙상동역학 모델 기반 동남극 빙하 미래변화 시나리오 산출의 주요 요소 규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 12. 31.



보고서 초록

과제관리번호	PE19410	해당단계 연구기간		단계 구분	(해당단계) / (총단계)
연구사업명	중 사업명	연구정책지원사업			
	세부사업명	신진연구원 지원과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	빙상동역학 모델 기반 동남극 빙하 미래변화 시나리오 산출의 주요 요소 규명			
연구책임자	진 경	해당단계 참여연구원수	총 : 6 명 내부 : 6 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 해수면변동예측사업단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약					보고서 면수
<p>50</p> <p>- 전 지구 온난화로 인해 가속화된 극지역 융빙이 해수면 상승의 주요인이므로, 연안 침수등 재해에 관한 대책 및 신기후체제 선제적대응 정책 수립을 위해 극지 빙상의 미래변화 예측이 시급한 배경에서 빙상 미래변화를 예측하는 핵심 기술인 빙상동역학모델 개발·운용 능력을 확보하는 것이 필수적</p> <p>- 본 연구에서는 빙상동역학모델 시스템을 구축하고 이를 이용하여 산출되는 동남극 빙하 미래변화 시나리오 결과에 큰 영향을 미치는 주요 요소를 규명함으로써, 지구 온난화에 따른 동남극 빙하 변동 기작에 대한 이해 증진 및 빙상동역학 모델의 예측 신뢰도 향상을 도모</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 및 안정화 <ul style="list-style-type: none"> · 소내 전산시스템에 ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 · 최신 현장 탐사자료를 포함하는 모델 개발·운용 위한 자료 및 검증자료 확보 · 규준실험 및 테스트베드 구축 및 이를 활용하여 다른 지역 및 시기에 대한 연구 확장성 확보로 빙상동역학모델 활용도 제고 ○ 빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 주요 요소 규명 및 신뢰도 개선 <ul style="list-style-type: none"> · 초기화, 경계조건, 물리과정 모수화 및 매개변수, 앙상블, 기후변화 강제력 등 모델 결과에 영향을 주는 주요 요소 분석 · 주요 요소들에 대한 민감도 실험 수행 및 결과 분석 ○ 지구 온난화에 따른 동남극 빙하 변동성의 특성 및 기작 이해 증진 <ul style="list-style-type: none"> · 이상화된 강제력, IPCC 시나리오 등을 활용하여 다양한 미래변화 시나리오 산출 · 미래변화 시나리오 실험에서 주요 요소들에 대한 임계점 도출 · 미래 빙하변화 및 해수면 상승 예측에 핵심 기술로 사용되는 빙상동역학모델 결과 신뢰도 향상 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	빙상동역학 모델, 동남극 빙하, 미래기후 시나리오 산출, 기후변화 예측, 해수면 상승			
	영 어	Ice sheet model, East Antarctica, climate change scenario, climate change projection, sea level rise			

요 약 문

I. 제 목

빙상동역학 모델 기반 동남극 빙하 미래변화 시나리오 산출의 주요 요소 규명

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 목적

- 빙상동역학모델 시스템을 구축하고 이를 이용하여 산출되는 동남극 빙하 미래변화 시나리오 결과에 큰 영향을 미치는 주요 요소를 규명함으로써, 지구 온난화에 따른 동남극 빙하 변동 기작에 대한 이해 증진 및 빙상동역학 모델의 예측 신뢰도 향상

○ 필요성

- 전 지구 온난화로 인해 가속화된 극지역 용빙이 해수면 상승의 주요인이므로, 연안 침수 등 재해에 관한 대책 및 신기후체제 선제적대응 정책 수립을 위해 극지 빙상의 미래변화 예측이 시급
- 최근 관측기반 연구에서 용융이 가속화하고 있는 서남극 뿐만 아니라 동남극의 빙하 용융 또한 꾸준히 진행되고 있으며 향후 변화를 주목해야 한다는 연구가 발표됨에 따라, 동남극 지역 빙하 미래 변화예측 또한 주요한 이슈로 부각되고 있음
- 따라서 빙상 미래변화를 예측하는 핵심 기술인 빙상동역학모델 개발·운용 능력을 확보하는 것이 필수적. 뿐만 아니라 빙상동역학모델 시스템을 개선하여 극지역 빙하 질량·속도 변동 예측성을 제고하는 것이 극지역 미래 예측 정확성 향상의 핵심 요소
- 한반도 주변 해역의 해수면 상승은 평균 이상으로 가속화하고 있으며 특히 연안에 밀집되어 있는 인구 및 사회·경제적 이용도를 고려하였을 때, 극지역 용빙에 따른 해수면 상승으로 발생하는 연안침수 등 대형재난 대응에 필요한 예측기술 확보로 피해예방 및 비용 절감이 가능
- 본 연구는 향후 심각한 침수가 예상되는 국내 연안지역 재해대응정책 수립의 과학적 근거 제공하여 대형 재난관련 불안요소 해소에 기여 가능하며, 이는 제4차 과학기술기본계획, 제2차 국가기후변화적응대책, 제3차 남극연구활동진흥 기본계획에서 명시된 기후변화 대응 위한 예보시스템 구축 및 한국형 기후 시나리오 개발에 부합

III. 연구개발의 내용 및 범위

- ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 및 안정화

- 소내 전산시스템에 ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축
- 최신 현장 탐사자료를 포함하는 모델 검증자료 확보
- 빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 주요 요소 규명 및 신뢰도 향상
 - 초기화, 경계조건, 물리과정 모수화 및 매개변수, 앙상블 기법, 기후변화 강제력 등 모델 결과에 영향을 주는 주요 요소에 대한 민감도 실험 수행 및 분석
 - 모델 개선 기반 빙상동역학모델 시스템의 신뢰도 향상
- 동남극 빙하 변동성의 특성 및 기작 이해 증진
 - 이상화된 강제력, IPCC 시나리오 등을 활용하여 다양한 미래변화 시나리오 산출
 - 미래변화 시나리오 실험에서 주요 요소들에 대한 임계점 도출

IV. 연구개발결과

- ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 및 안정화
 - 빙상동역학모델 개발·운용 위한 자료 및 기술 확보
 - 규준실험 및 테스트베드 구축 및 이를 활용하여 다른 지역 및 시기에 대한 연구 확장성 확보로 빙상동역학모델 활용도 제고
- 빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 주요 요소 규명 및 신뢰도 향상
 - 초기화, 경계조건, 물리과정 모수화 및 매개변수, 앙상블 기법, 기후변화 강제력 등 모델 결과에 영향을 주는 주요 요소들 민감도 실험 수행
- 동남극 빙하 변동성의 특성 및 기작 이해 증진
 - 주요 강제력 요소별 이상화된 미래변화 시나리오 구축 및 시나리오별 빙속 및 빙하 질량의 시공간 변동 특성 분석
 - IPCC에서 산출된 CMIP5 전지구 모델 앙상블 실험의 RCP 시나리오 자료 확보 및 빙상동역학모델 시스템 강제력으로 변환
 - 주요 요소별 채택된 시나리오에 따른 앙상블 실험 수행 및 동남극 빙하 미래변화 실험 기반 현실성 있는 동남극 미래변화 시나리오 산출
 - 빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 시나리오 결과를 좌우하는 강수량(표면질량수지), 빙붕하부용융률, 빙붕끝부분 후퇴(ice front retreat) 강제력의 임계값 산출
 - 미래 빙하변화 및 해수면 상승 예측에 핵심 기술로 사용되는 빙상동역학모델 결과 신뢰도 향상

V. 연구개발결과의 활용계획

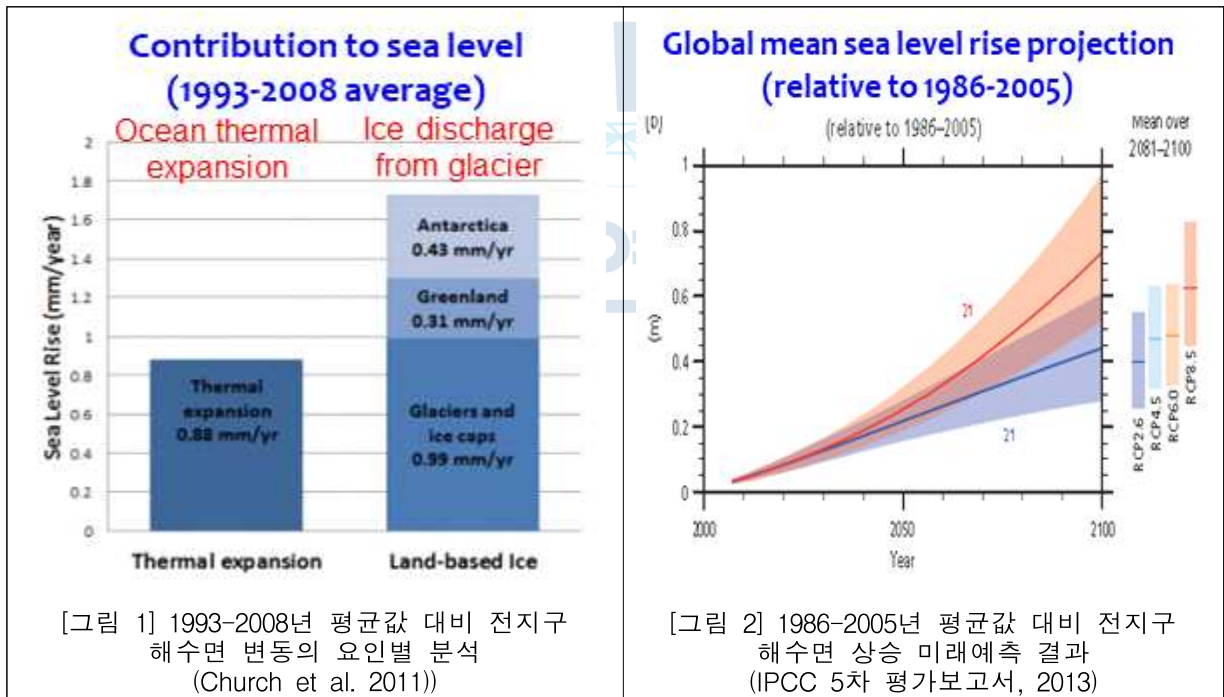
- 구축된 빙상동역학모델 시스템은 다양한 극지역 빙하 기작 이해 및 미래예측에 적용 가능
- 동남극 해당 빙하 지역에서 새로운 현장 탐사자료 추가 및 모델 업데이트에 대한 민감도 평가가 용이해지므로, 동남극 빙하 기작 이해에 효율적으로 활용 가능
- 서남극 스웨이츠 등 다른 지역에 대한 연구로 확장하여 서남극, 그린랜드 등 다양한 극지역 빙하 기작 이해 및 미래 예측에 적용 가능

목 차

제 1 장 연구개발의 목적, 필요성	6
제 2 장 국내외 기술개발 현황	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	14
제 1절 ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 및 안정화	14
1. 빙상동역학모델 시스템 구축	14
2. 최신 현장 탐사자료를 포함하는 최신 검증·입력자료 확보	15
3. 빙상동역학 모델 시스템 안정화	16
제 2절 빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 주요 요소 규명 및 신뢰도 향상	19
1. 빙상동역학모델 시스템의 주요 요소에 대한 민감도 실험 수행	19
2. 모델개선 기반 빙상동역학모델 시스템의 신뢰도 향상	23
제 3절 동남극 빙하 변동성의 특성 및 기작 이해 증진	28
1. 다양한 미래변화 시나리오 산출	24
(1) 이상화된 강제력 기반 미래변화 시나리오 산출	24
(2) IPCC 미래 기후변화 시나리오 적용 미래변화 시나리오 산출	25
2. 미래변화 시나리오 실험에서 주요 요소들에 대한 임계점 도출	29
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	37
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	38
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	40
제 7 장 참고문헌	43

제 1 장 연구개발의 목적, 필요성

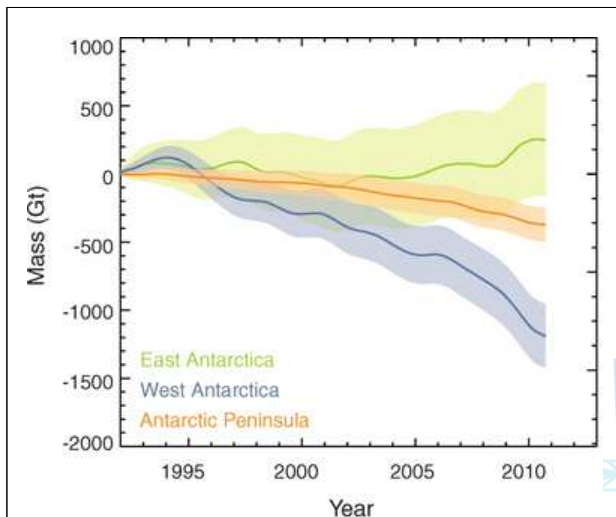
지구 온난화 영향 하에서 남극 지역의 빙상 붕괴는 그 규모와 질량을 고려하였을 때 급격한 전지구 해수면 상승을 초래할 수 있는 잠재적 위험 요소이므로, 이러한 현상을 재현·예측할 수 있는 도구인 빙상동역학 수치모델을 개발·운영하는 기술을 확보하여 구동하는 것이 필수적이다. 2014년부터 최신 관측자료와 모델 실험 기반으로 서남극 스웨이츠 빙하 지역의 빙상붕괴가 가속화되고 있으며 이미 티핑포인트를 지났을 수도 있다는 연구결과들이 발표되고 있다 (Favier et al. 2014; Joughin et al. 2014; Rignot et al. 2014; Paolo et al. 2015; Feldmann and Levermann 2015; DeConto and Pollard 2016). Rignot et al. (2019)은 최신 관측자료를 분석한 결과 장기적으로 용융이 진행되고 있는 서남극 뿐만 아니라 동남극의 빙하 용융 또한 최근 가속화하고 있어 향후 변화를 주목해야 한다는 연구를 발표하였다. 또한, IPCC 해양 및 빙권 특별보고서(2019)에서도 서남극 아문센만(Amundsen Sea Embayment) 지역과 함께 동남극 윌크스랜드(Wilkes land) 지역에서 빙하의 유입 및 후퇴가 가속화되어 해수면에 영향을 주고 있다고 보고하였다. 이에 동남극 지역 빙하 미래 변화예측 또한 주요한 이슈로 부각되고 있다.



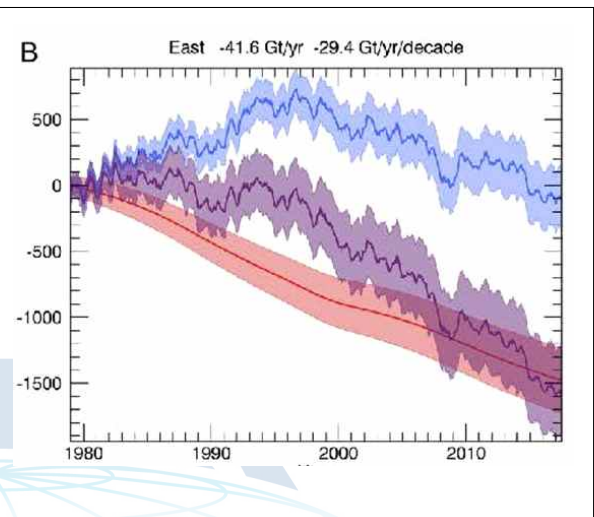
이러한 배경에서 빙상동역학모델 시스템을 개선하여 극지역 빙하의 질량·속도 변동 예측성을 제고하는 것은 극지역 미래 예측 정확성 향상의 핵심 요소일 뿐만 아니라, 연안 침수 등 재해에 관한 대책 및 신기후체제 선제적 대응정책 수립을 위해서도 극지 빙하의 미래변화 예측이 시급하다.

지구 평균해수면은 지난 110년간(1901~2010) 약 19cm 높아졌는데, 우리나라에서는 1989년부터 2017년까지 최근 29년간 매년 2.9mm 상승률을 보여 지구 평균에 비해 다소 빠른 상승 추세를 보이고 있으며 지역적으로는 제주부근(4.44mm)이 가장 높고 동해안(3.70mm),

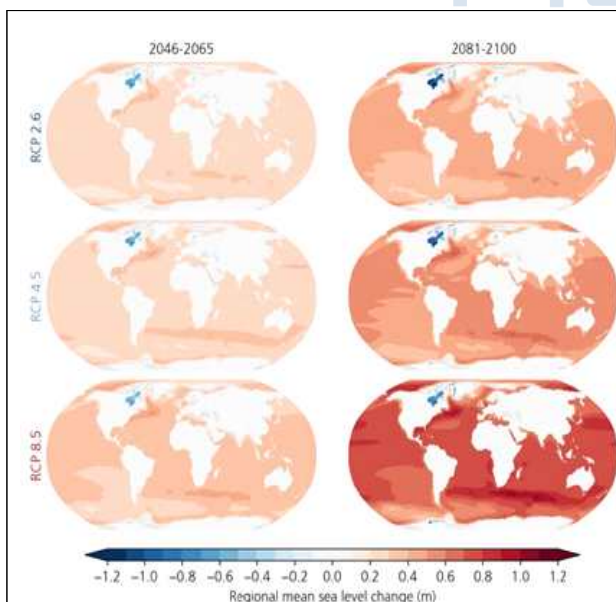
남해안(2.41mm), 서해안(2.07mm) 순으로 나타났다 (국립해양조사원, 2018). 지역 해수면 변동은 육빙이 녹는 양상, 해양 온난화 및 순환에 따라 30%정도 편차를 가지고 나타나게 된다 (IPCC 해양 및 특별 보고서, 2019). 특히 연안에 밀집되어 있는 우리나라의 인구 및 사회·경제적 이용도를 고려하였을 때 극지역 용빙에 따른 해수면 상승으로 발생하는 연안침수 등 대형재난 대응에 필요한 예측기술을 확보하면 피해예방 및 비용 절감이 가능할 것이다. 또한 이러한 기술의 확보로 제4차 과학기술기본계획, 제2차 국가기후변화적응대책, 제3차 남극연구활동진흥 기본계획에서 명시된 기후변화 대응 위한 예보시스템 구축 및 한국형 기후 시나리오 개발에 보탬이 될 것이다. 나아가 향후 심각한 침수가 예상되는 국내 연안지역 재해대응정책 수립의 과학적 근거를 제공하여 대형 재난관련 불안요소 해소에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.



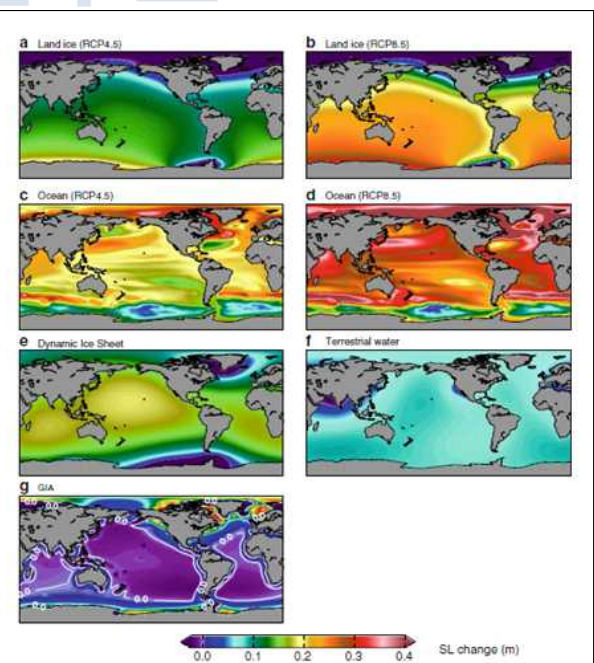
[그림 3] 동남극, 서남극 그리고 남극반도가 각각 전지구 해수면 상승에 기여하는 질량 변화 시계열 (Shepherd, 2012)



[그림 4] 최신 심층적 자료분석을 통해 산출된 동남극 표면질량수지(파랑), 얼음방출(빨강), 전체 질량(보라) 시계열 (Rignot et al. 2019)



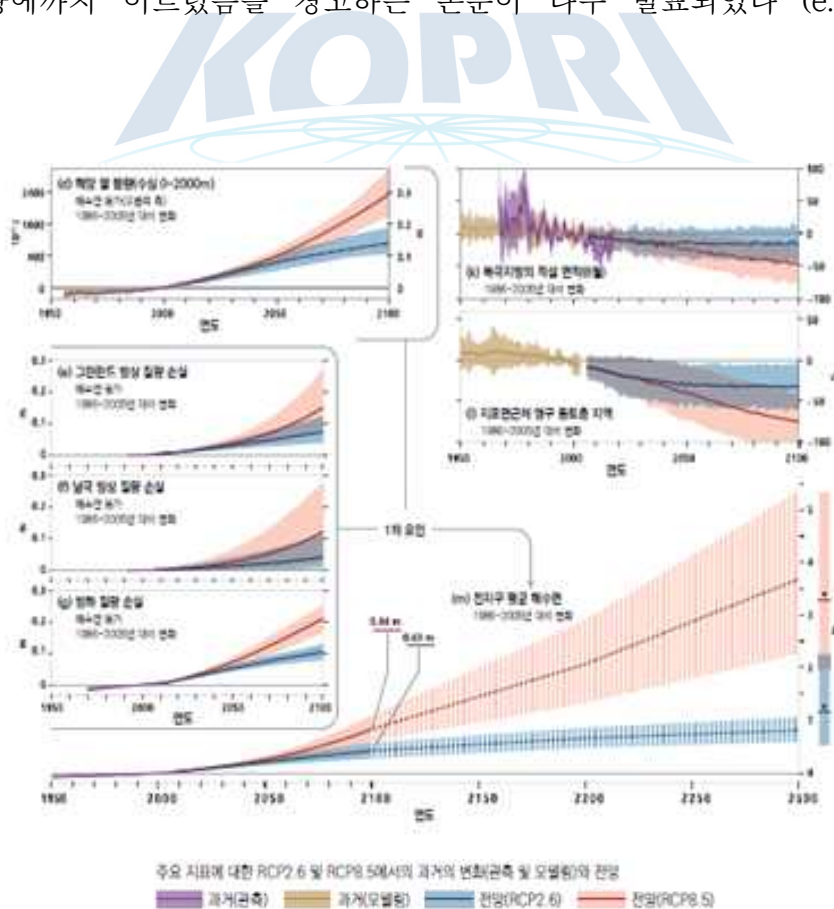
[그림 5] 기후변화 시나리오별 미래 전지구 해수면 변동의 지역적 분포 (IPCC 해양 및 빙권 보고서, 2019)



[그림 6] 원인별 전지구 해수면 변동의 지역적 분포 (Slagen et al. 2014)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

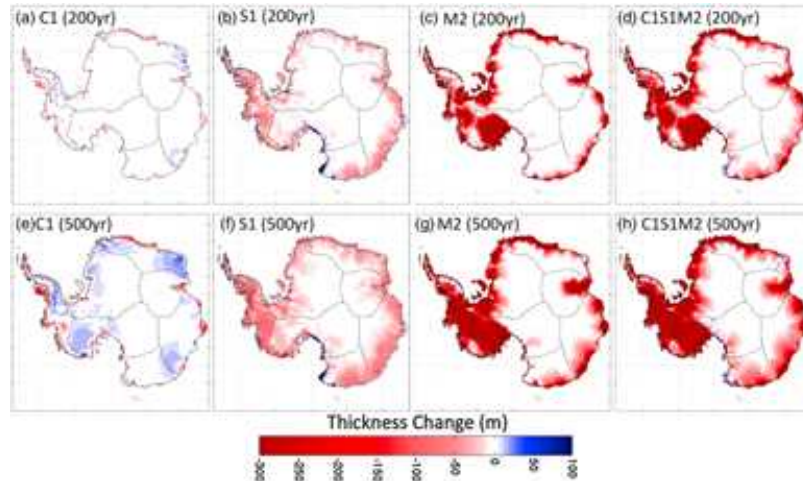
제4차 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change; 기후변화에 관한 정부 간 협의체) 평가보고서(2007)에서 당시의 동역학빙상모델 또는 육빙모델이 빙하의 최근 급격한 부피·속도 변화를 재현하지 못하는 기술 수준을 고려하여 미래 해수면 상승 예측에서 육빙 용융의 정확한 기여도를 반영하지 못하고 있는 현상이 보고되었으며, 빙상모델이 미래 해수면 상승 예측 불확실성을 높이는 주요 원인이라고 기술되었다. 이후 미국과 유럽을 중심으로 SeaRISE(Sea-level Response to Ice Sheet Evolution, Nowiki et al. 2013), ice2sea, COMBINE(Comprehensive Modelling of the Earth System for Better Climate Prediction and Projection) 등의 국제공동연구를 통하여 동역학빙상모델을 이용한 그린랜드와 남극 빙하 용융 및 미래 해수면 변화 예측 실험이 체계적으로 수행되어 왔다. 특히 남극은 넓은 면적 (모두 용융하면 전지구 해수면을 56.6m 상승)과 낮은 온도로 지구온난화의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 여겨졌으나 최근 연구결과에 의하면 서남극의 빙상용융이 가속화되어 ‘돌이킬 수 없는’ 상황에까지 이르렀음을 경고하는 논문이 다수 발표되었다 (e.g. DeConto and Pollard 2016).



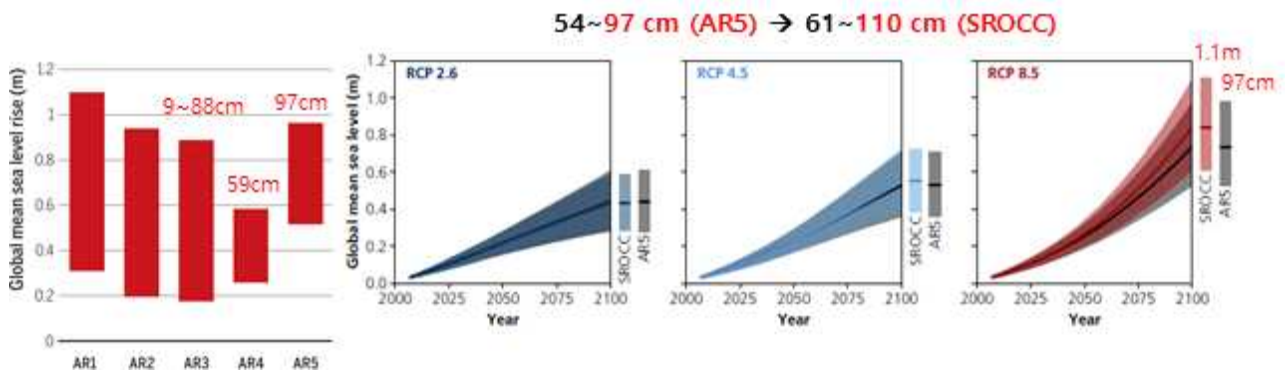
[그림 7] 과거 및 미래 전지구 해수면 변동 시계열 및 영향을 주는 주요 요소 분석

이러한 노력들이 ISMIP6로 수렴되면서 11개국 24개 기관이 참여하여 동역학빙상모델뿐 아니라 동역학빙상모델-지구시스템모델 접합시스템을 이용한 그린랜드와 남극 빙하 용융 및

미래 해수면 변화 예측 실험이 계획되어 2022년 출간될 IPCC AR6 보고서를 위한 CMIP6의 구성요소로 채택되었다 (Nowiki et al. 2016). 최근에는 해양빙상 붕괴가 주요 이슈로 대두됨에 따라 빙하의 장기적 지표질량 변화 뿐만 아니라 빙상-해양 경계에서 발생하는 물리 과정들에 중점을 두는 MISMIP+(Marine Ice Sheet MIP third phase), MISOMIP(Marine Ice Sheet-Ocean Model Intercomparison Project) 등의 빙상동역학 모델링 국제공동연구가 진행 중이다.



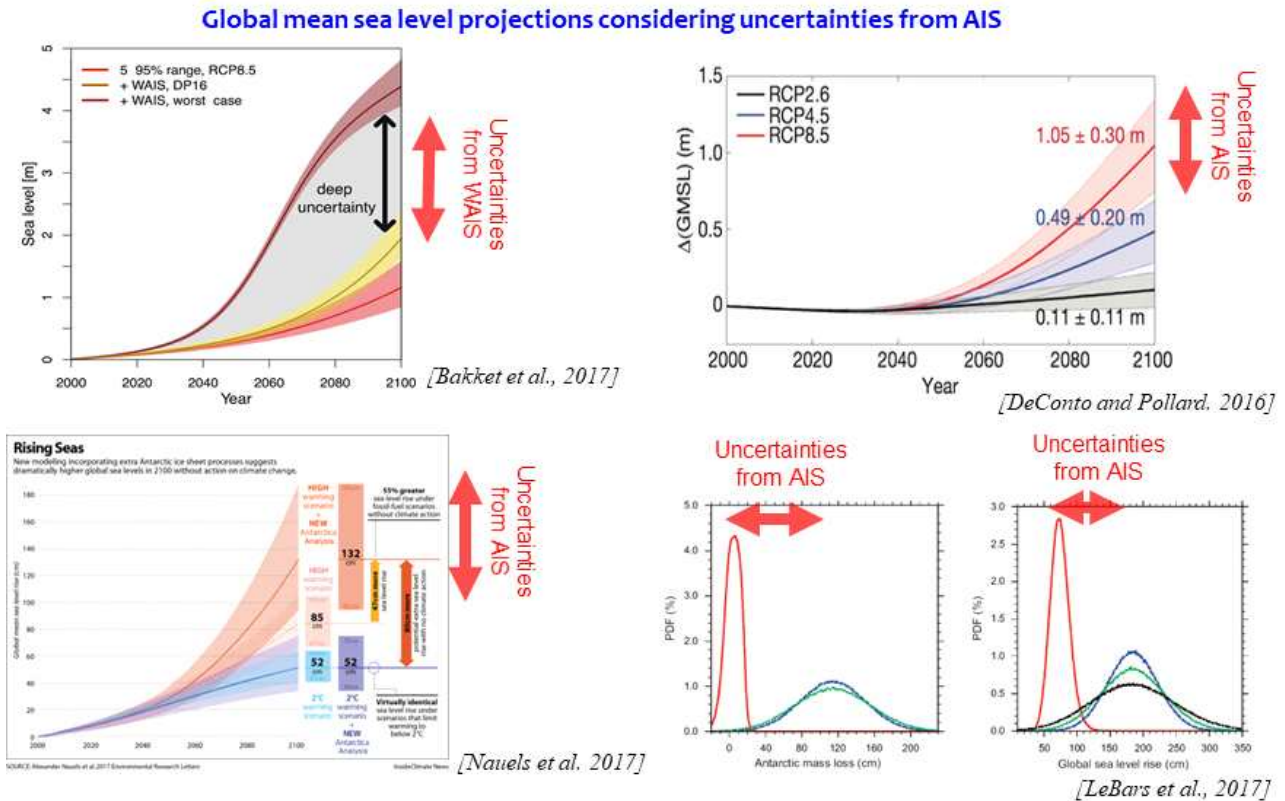
[그림 8] 서로 다른 8개의 미래기후 시나리오로 강제된 6개 빙상동역학 모델 평균의 200-500년 후 남극 빙상 용융 예측 결과 상호 비교 (Nowiki et al. 2013)



[그림 9] 1986-2005년 평균값 대비 전지구 해수면 변동 미래 예측의 최신 결과와 불확실성 범위 (Oppenheimer and Alley, 2016; IPCC SROCC, 2019)

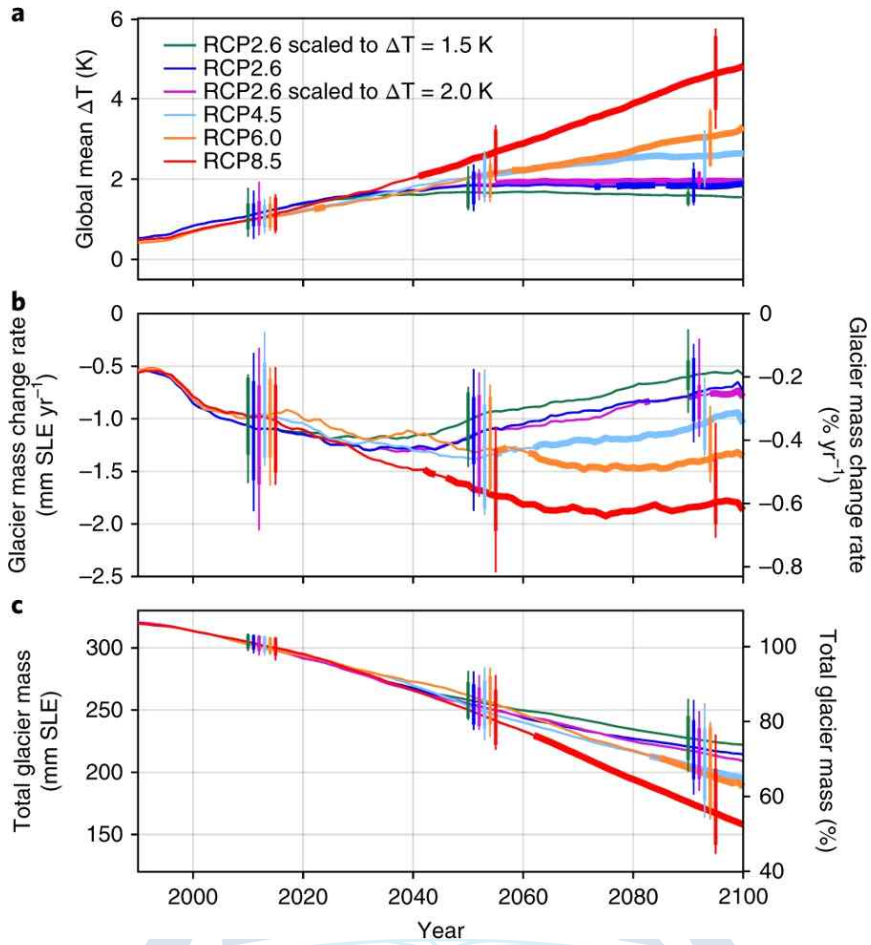
빙상 붕괴로 인한 해수면 상승 및 전지구에 미치는 영향의 정량적 예측·전망은 매우 중요한 주제임에도 불구하고 극지역 관측자료 부족으로 인하여 복잡한 빙상역학 및 관련된 물리 기작에 대한 이해가 부족하고, 빙상동역학 모델과 지구시스템 모델 개발활동 간 교류가 활발하지 않았으며, 그리고 대기·해양 강제력과 빙하·빙상의 상호작용에 대한 불확실성이 크기 때문에 빙상동역학 모델링의 기술 수준은 뒤쳐져 있다. 특히 해양빙상에서 주요한 기반선 움직임·흐름, 빙붕 분리(calving), 수압파쇄(hydrofracturing), 빙벽 불안정(ice cliff instability), 기저마찰(basal friction), 빙저수(subglacial water) 등 복잡한 물리 과정을

현실적으로 구현하기 위한 빙상동역학 모델의 개선이 시급하다. 이에 미국 NASA(우주항공국)은 향후 100~200년 전지구 해수면 상승 예측성 향상을 위한 빙상동역학 수치모델 및 빙상-해양 접합모델 개발 및 개선 연구를 수행지원하고 있다. 국가적인 지원 하에서 CISM(Community Ice Sheet Model), ISSM(Ice Sheet System Model), PISM(Parallel Ice Sheet Model) 등 다수의 빙상동역학 모델이 개발되었으며 빙상-해양, 빙상-기후 접합모델로 확대 개발 중이다.

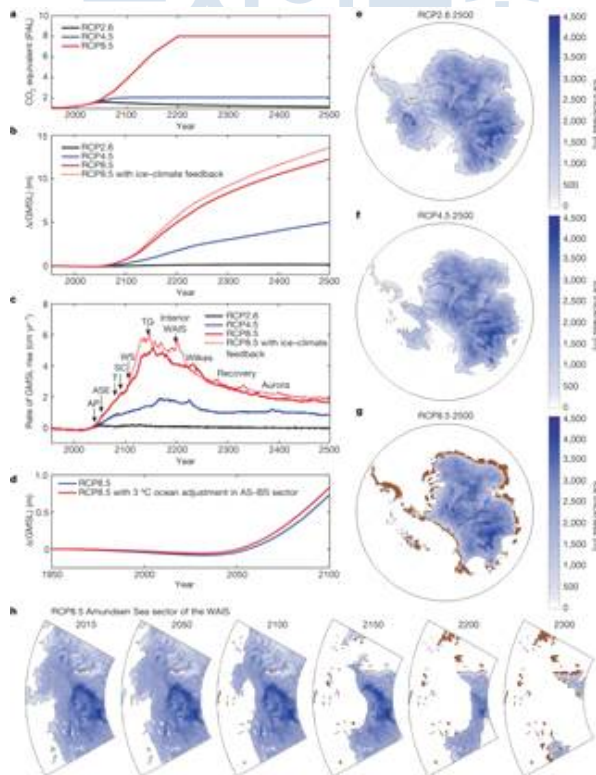


[그림 10] 수치모델 실험 기반 전지구 해수면 변동 미래 예측의 최신 결과들과 남극빙상 변동 예측 불확실성에 의한 미래 예측의 차이 범주

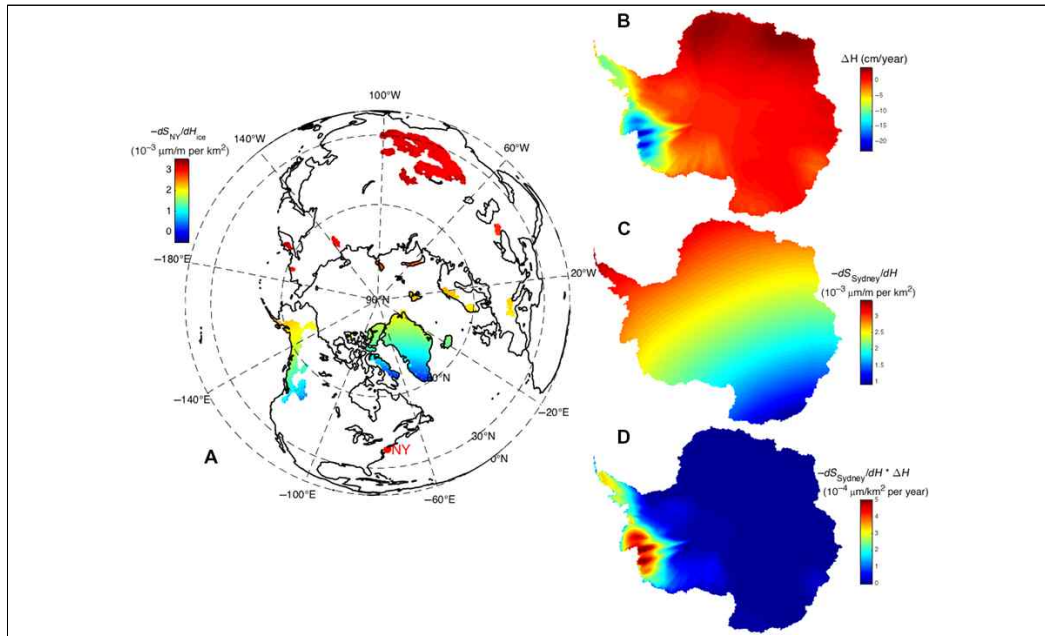
그러나 국내에서 극지 빙상 및 해수면 변동 예측기술 개발 인력 부족으로 독자적인 예측 모델 개발이 불가능하며, 빙상동역학 모델 또는 기후모델-빙상동역학 접합모델을 이용하여 수행된 빙상변화 예측연구도 전무하다. 이러한 배경에서 IPCC에서 주도적으로 수행하고 있는 일련의 모델상호 비교연구가 성공적으로 안착한 이후 모델 개발을 스크래치부터 시작하는 것 보다는 안정화된 모델을 공유 후 효율적으로 개선하여 사용하는 것이 일반적인 전략이다. 모델의 초기 개발 자체보다는 새로운 관측·이론 기반 획기적인 모델 개선 및 활용 결과 산출된 연구를 지향하는 추진체계를 구축하여 수행하는 효율적인 전략 수립이 필요하다.



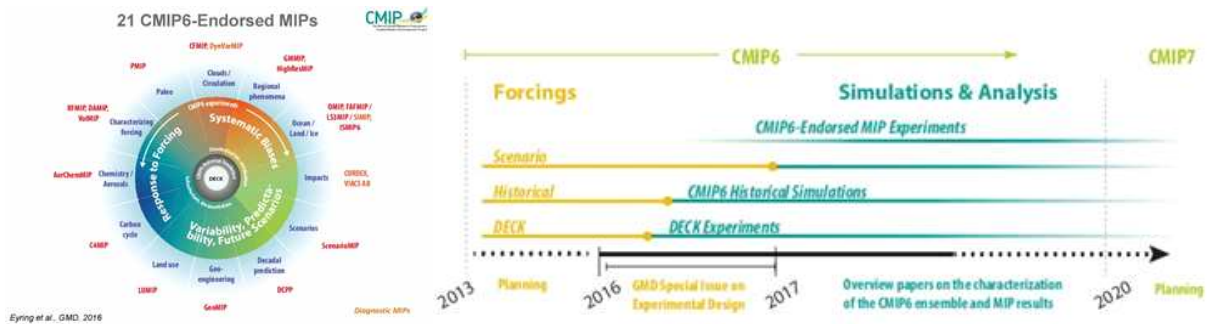
[그림 11] CMIP5 모델 결과로부터 산출된 RCP 시나리오에 따른 전지구 빙하 질량 손실 추세 및 손실량 예측 및 신뢰도 (Marzeion et al. 2018)



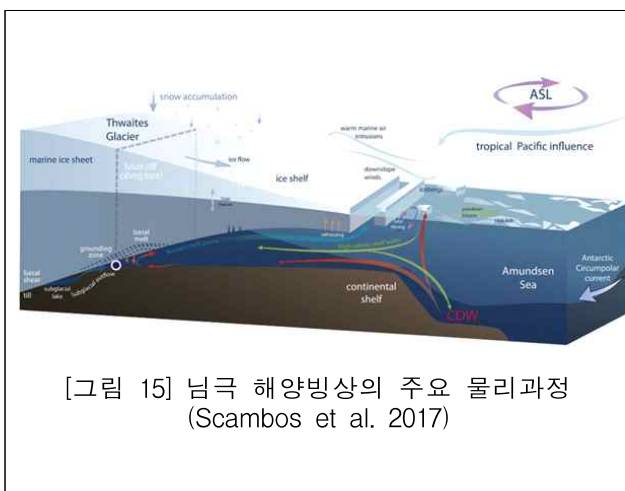
[그림 12] RCP 시나리오에 따른 남극 빙상 소멸 예측 결과 (DeConto and Pollard, 2016)



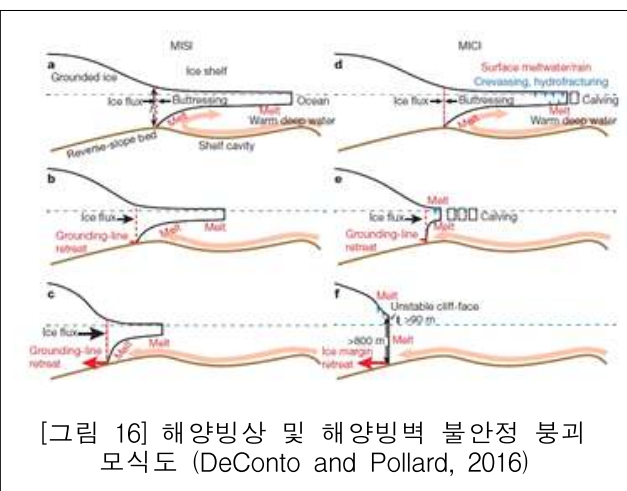
[그림 13] 관측 기반 남극 빙하 소멸에 의한 해수면 상승 핑거프린트 (Larour et al. 2017)



[그림 14] CMIP6 구성요소 및 일정



[그림 15] 남극 해양빙상의 주요 물리과정 (Scambos et al. 2017)



[그림 16] 해양빙상 및 해양빙벽 불안정 붕괴 모식도 (DeConto and Pollard, 2016)

최근 WCRP(World Climate Research Program)에서 얼음 용융의 전지구적 영향 및 지역 해수면 변동이 해안지역에 미치는 영향을 다가오는 10년 동안 해결해야 할 주요 연구 과제로

선정하였으며, IPCC에서는 해양 및 빙권 특별보고서(SROCC, Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)를 2019년 발간하였다. 이러한 남극빙하 관련 최신 연구결과 집약과 더불어 동역학빙상모델 상호비교연구가 완료되는 IPCC 6차 보고서 출간 이후 새로운 발견 및 자료 공유로 인해 빙상동역학모델 개선 및 사용이 가속화 될 것으로 사료된다.

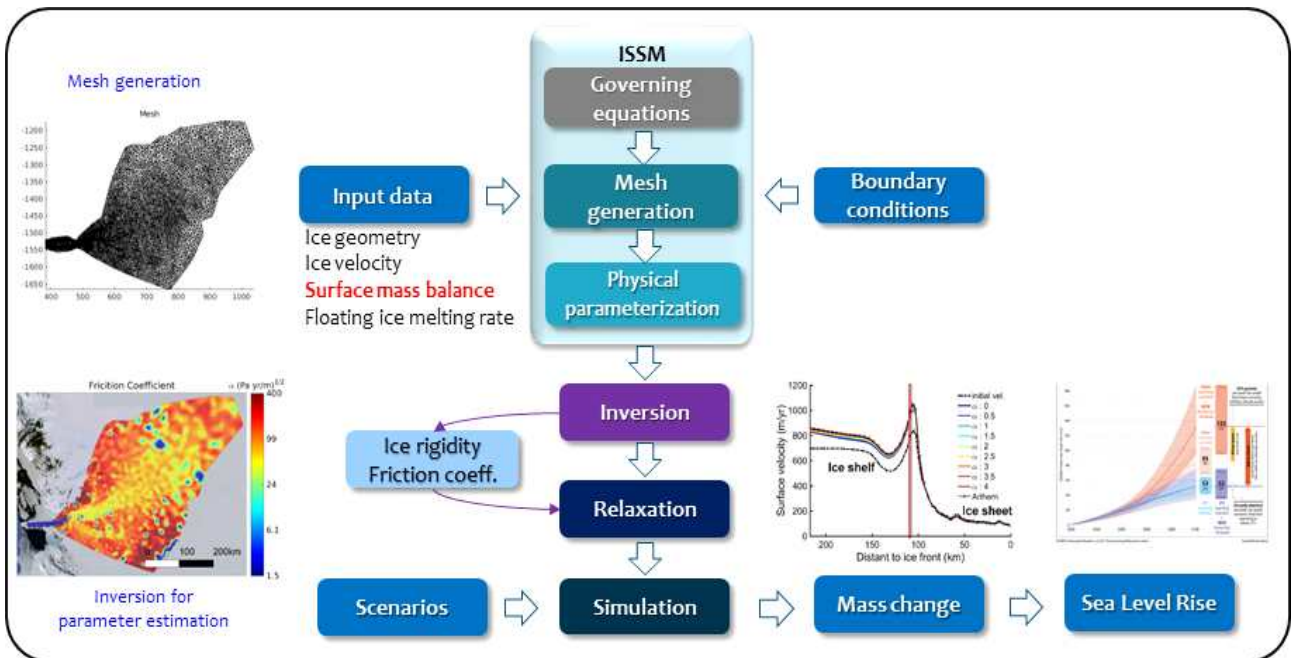


제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 및 안정화

1. 빙상동역학모델 시스템 구축

본 연구에서는 NASA/JPL과 UCI에서 공동 개발된 ISSM(Ice Sheet System Model, Larour et al. 2012) 빙상동역학 모델을 활용하여 소내 전산시스템에 빙상동역학모델 시스템을 구축하였다. 이 모델은 2차원 얇은빙붕 가정(2-D shallow shelf approximation, macAyeal, 1993) 기반 유한요소법을 사용하여 스토크스(Stokes) 방정식을 이산화하여 풀어낸다. 구축된 모델시스템의 모식도는 그림 17과 같다.

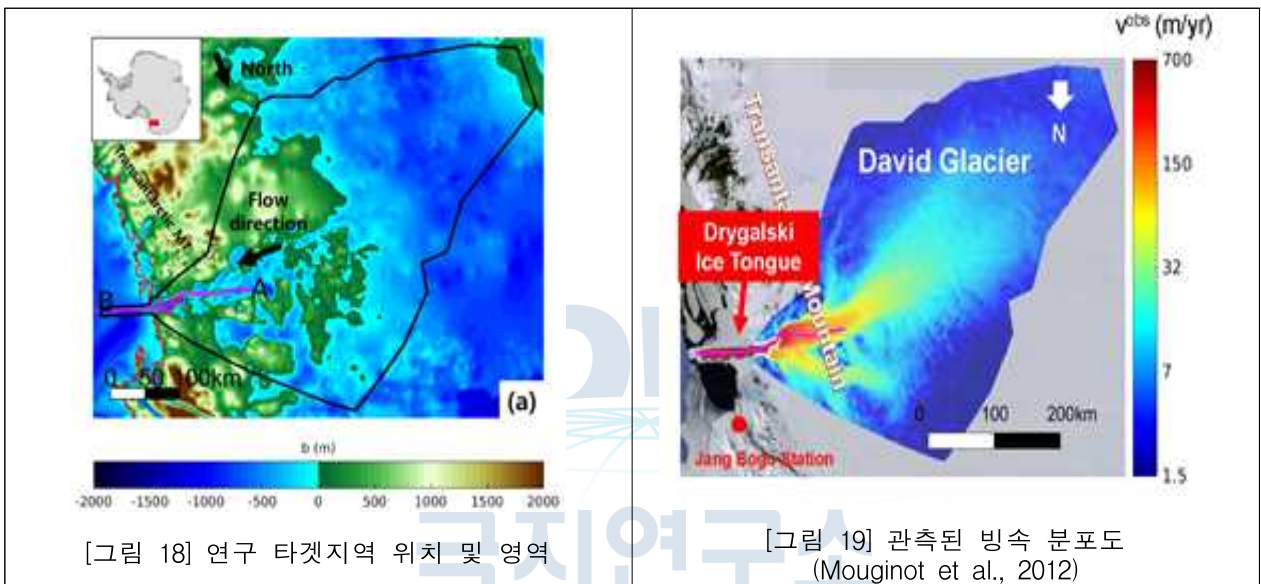


[그림 17] 구축된 빙상동역학모델 시스템 모식도

우선적으로 모델 영역은 다년간의 현장 탐사활동으로 최신 관측자료 획득 및 활용이 가능한 동남극 장보고 기지 부근 위치한 북빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설(David Glacier-Drygalski Ice Tongue) 지역으로 선정하였다. 동남극 북빅토리아랜드에서 가장 큰 데이비드 빙하의 내부 얼음은 피오르드 지형 계곡을 따라 기저능을 지나 빙폭(ice fall) 형태로 드라이갈스키 빙설을 형성하며 테라노바만(Terra Nova Bay)로 배출되는 독특한 지형적 특성을 오랜 기간 동안 안정적으로 유지하고 있어 학문적 연구 가치가 높은 지역이며, 80년대부터 현장 탐사자료 및 위성 자료를 기반으로 관측적 특성을 분석한 논문들이 발표되어 왔다 (eg. Frezzotti and Mabin, 1994; Tabacco et al.,

2000; Wuite et al. 2009). 연구소에서도 2014년 이래로 꾸준히 현장 지질 탐사를 수행하여 왔으며, 최근에는 데이비드 빙하 내륙 및 기반선 부근을 집중적으로 항공탐사 하였다.

데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설을 포함하는 모델 영역은 그림 16과 같이 정의되었으며 모델 격자는 계산 효율성을 높이기 위하여 빙속이 빠른 지역에서는 450 m, 느린 지역에서는 8 km 까지 격자요소 크기가 변화하는 적응망(adaptive mesh) 격자 생성기법에 기반하여 구성되었다. 특히 안정도가 중요한 빙설의 가장자리 영역은 450 m 고해상도 격자로 설정하며 울퉁불퉁한 모양을 다듬어 모델이 보다 안정적으로 구동하도록 하였다. 이처럼 생성된 모델 영역의 전체 격자 개수는 59,000개이다.

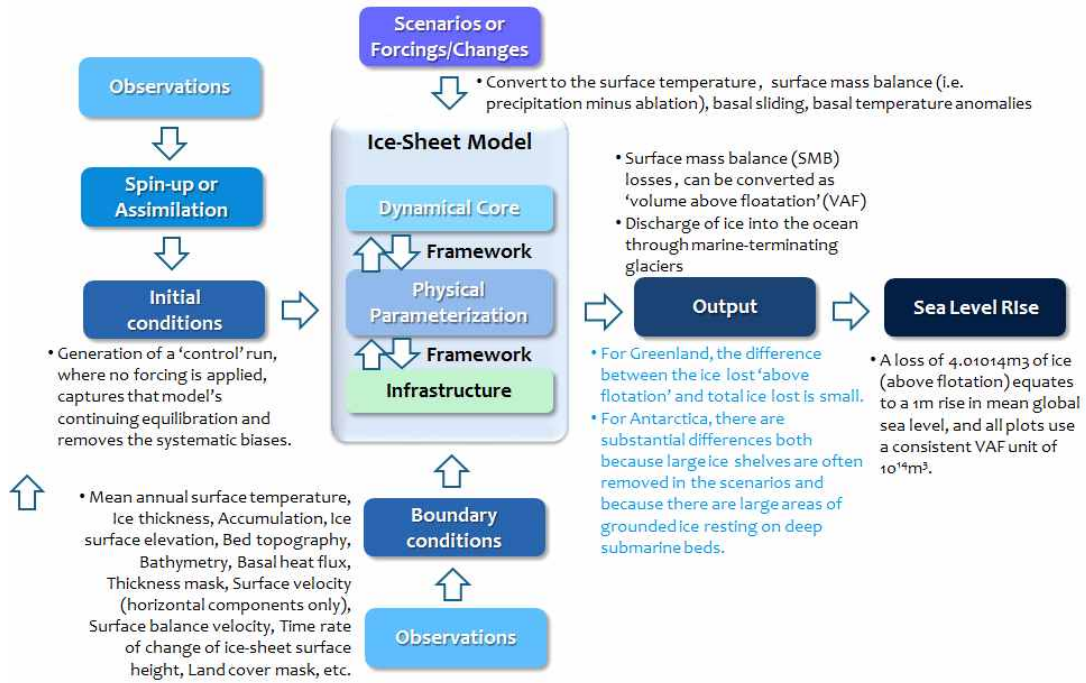


[그림 18] 연구 타겟지역 위치 및 영역

[그림 19] 관측된 빙속 분포도 (Mouginot et al., 2012)

2. 최신 현장 탐사자료를 포함하는 최신 검증·입력자료 확보

모델 구동을 위하여 초기 입력값 및 경계조건으로 사용되는 동남극 지역 최신 위성 및 현장 탐사자료 기반으로 도출된 최신 빙속, 지표고도, 온도 자료를 확보하고 최신 고해상도 극지역 모델 RACMO(Regional Climate Model)에서 산출된 표면질량수지(surface mass balance), 지열속 등 최신 자료 확보하였으며, ApRES 관측으로부터 빙붕하부용융률 자료를 확보하고, 일반적으로 널리 사용되는 Bedmap2 기저지형 자료와 함께 연구소에서 주도적으로 실시한 해당 지역 항공레이더 관측으로부터 가공된 최신 기저지형 자료 BedMachine(Morlighem et al. 2020)을 국제협력을 통해 확보하였다.



[그림 20] 빙상동역학 모델 시스템 모식도 및 활용되는 관측 요소들

[표1] 빙상동역학 모델시스템에 사용되는 초기조건 및 보조자료

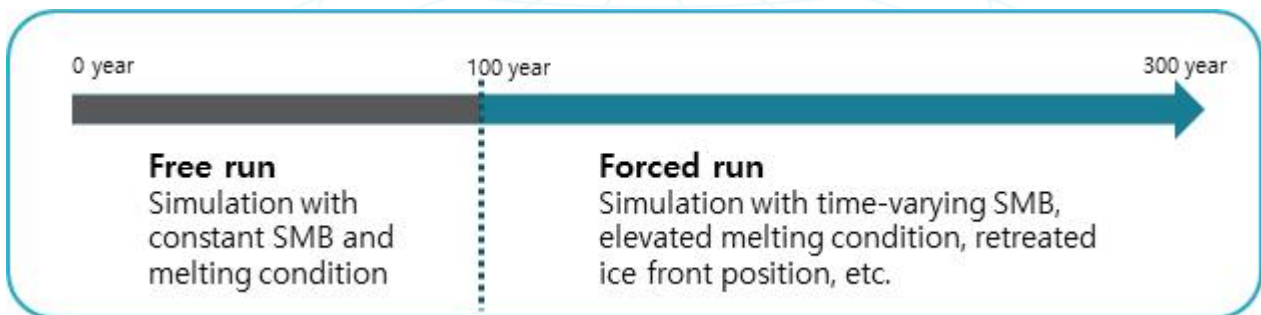
변수	자료
표면고도	REMA (Howat <i>et al.</i> , 2018)
빙속	Mouginot <i>et al.</i> (2012)
표면질량수지	RACMO2.3 (Lenaerts <i>et al.</i> , 2012)
대기온도	Cosimo (2000)
지열속	Shapiro <i>et al.</i> (2004)
기저지형자료	Fretwell <i>et al.</i> (2013), Morlighem <i>et al.</i> (2020)

3. 빙상동역학 모델 시스템 안정화

ISSM 빙상동역학모델 시스템은 모델 영역에 대한 격자생성 후 초기값을 입력하고 역산 과정을 거치게 되는데, 이는 모델 구동에 필요한 기저마찰계수와 빙붕의 얼음강성은 관측되지 않는 값이기 때문에 관측과 모델 빙속의 손실계수를 최소화 하는 역산(inversion) 모델을 이용하여 먼저 계산하여 산출하기 때문이다. 이후 산출된 기저마찰계수와 얼음강성값을 처방하여 모델을 구동하면서 표면질량수지와 빙붕내 용융비(sub-ice shelf melting) 등을 강제력으로 처방하면 질량보존법칙 기반 유도된 질량이동모델(mass transport model) 내에서 강제력들이 얼음의 유동과 상호작용하며 빙속을 산출하게 된다. 표면질량균형값은 강설량에서 증발산량을 감한 값으로 나타낸다.

초기 빙하부용율을 분포는 지반선에서 약 20.91 ± 9.6 m/yr이며 해양으로 갈수록 감소하는 기존 연구에서 제시된 분포(Wuite et al., 2009)에 기반하여 생성되었다. 이후 시간에 따른 빙하부용율의 변화는 모델의 안정성을 보장하기 위하여 얼음 두께에 비례하여 감소하는 방식을 사용하여(Seroussi et al., 2014b) 해면 아래 1200 m 두께의 빙하에서는 15 m/yr, 200 m 지점에서는 0으로 설정하였다. 초기 빙하부용율은 6.8 Gton/yr이며 이는 기존 관측기반 문헌인 Rignot et al.(2013)에서 산출된 7.6 Gton/yr보다는 낮고 Wuites et al.(2009)에서 산출된 3.12 Gton/yr보다는 높다.

빙상동역학 모델은 초기자료 변수들을 획득한 시기 차이, 눈에 보이지 않아 부정확한 빙하 밑 기저암(bedrock) 고도, 그리고 모델에 변수를 입력하기 위해 사용하는 보간법 등에 의해 초기에 수치적 발산(numerical shock)이 존재한다. 이와 같은 초기자료 오류에 의한 모델 오차의 증가를 최소화하고 모델을 안정화시키기 위하여 RACMO2.3 지역기후 모델에서 산출된 표면질량균형값과 얼음 두께에 비례하는 빙하부용율을 처방하여 빙속과 얼음 두께의 공간분포가 관측값과 유사해지고 얼음속 발산(ice flux divergence)이 최소값이 될 때 까지 100년 간 적분하여 모델을 완화(relaxation)하였다. 이를 활용한 미래기후 시나리오 산출의 경우, 완화를 위한 100년 간의 자유적분(free run) 이후 기후변화 시나리오를 강제력으로 처방하여 100~300년 간 미래예측 실험을 수행하여 얻었다.



[그림 21] 빙상동역학 모델시스템 규준실험 모식도

이처럼 최신 자료들을 활용하여 입력자료와 경계조건을 설정하고 및 동남극 지역을 구현하는 모델을 구동 테스트 하였다. 먼저 자료별 관측기간에 따른 차이 분석 및 특징을 파악하였다. 그리고 모델 역산, 초기화 및 모의과정 장기적분 테스트를 통하여 모델 수렴여부 확인하였으며 최종적으로 최신 검증자료와 비교하여 모델 오차 최소화·안정화 하였다. 이를 기반으로 모델 성능 향상 또는 변화의 추적을 보다 효율적으로 수행하기 위하여 모델 영역, 초기자료, 경계조건, 보조자료, 적분기간, 그리고 모델성능 검증 자료로서 사용할 관측 자료를 정의하여 규준실험을 설정하였다 (그림 21). 빙상동역학모델에서 산출되는 가장 중요한 변수인 빙속 및 빙하 두께에 대하여 검증자료와 비교하여 모델 영역 평균 오차가 최소로 산출되는 조합(모델 방정식, 가정, 모수화, 입력 자료, 완화기간 등)을 추출하여

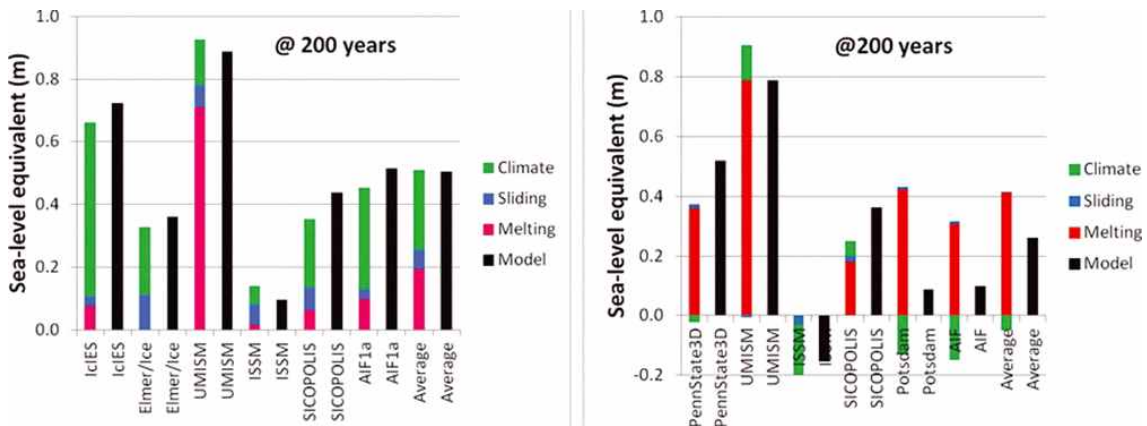
기준모델 실험으로 정의하고, 이를 기반으로 기준실험 프로토콜에 따라 여러 강제력을 바꾸어가며 실험들을 반복하여 수행하고 그 결과들을 상호 비교하여 모델 성능향상 연구를 수행하였다. 특히 모델 성능의 변화 추이를 한 눈에 판단하기 위해서 모델 영역 평균 빙속 및 빙하 두께를 모델 성능 평가의 지수로 정의하여 사용하였으며, 위성기반 관측자료와 상호 비교하여 오차값을 산출하고 성능 개선을 분석하였다.



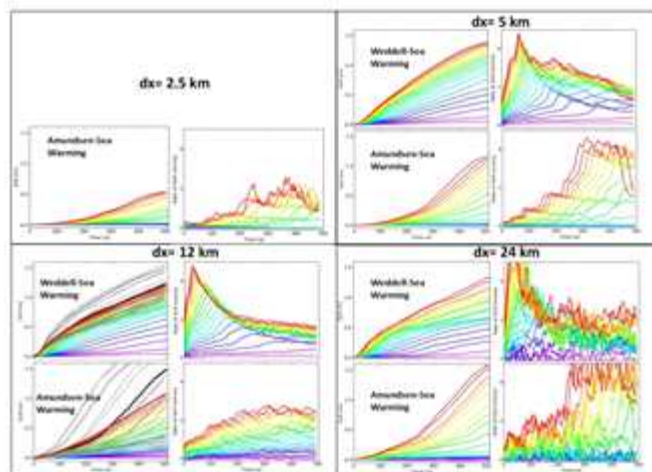
제 2절 빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 주요 요소 규명 및 신뢰도 향상

1. 빙상동역학모델 시스템의 주요 요소에 대한 민감도 실험 수행

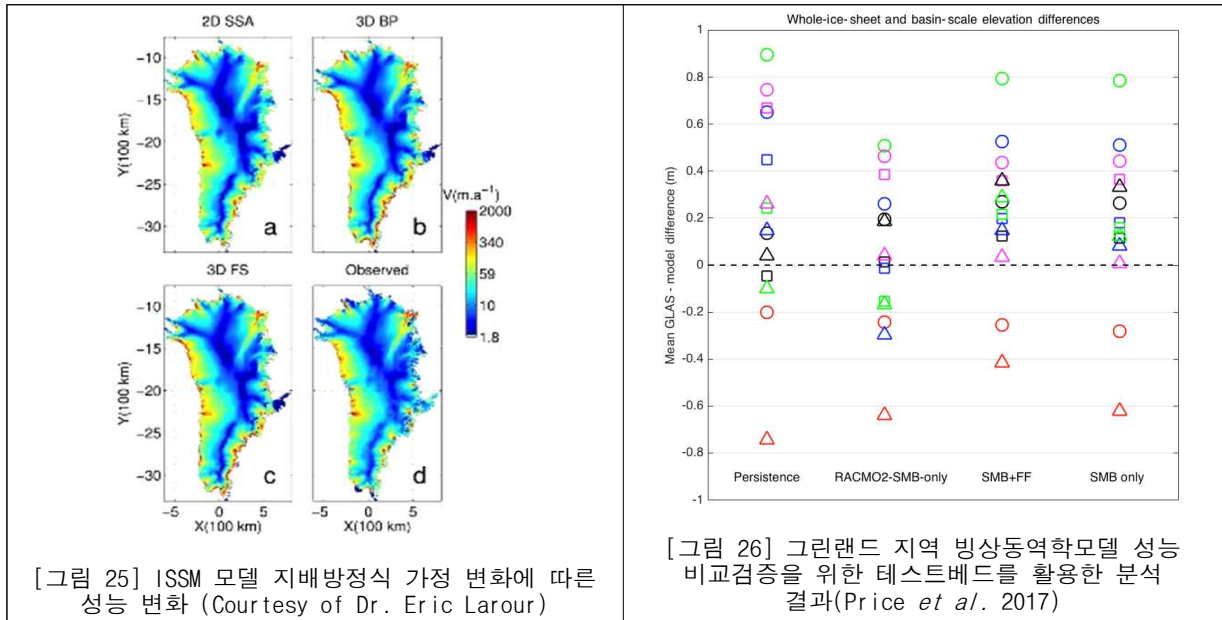
빙상동역학 모델의 주요 요소를 규명하기 위하여 다양한 외부강제력에 대한 민감도 실험이 수행되어져 왔으며 (Huybrechts and Payne, 1996; Payne et al. 2000; Bindshadler et al. 2013; Parizek et al. 2013; Eyring et al. 2016), 그 결과를 통계적으로 정량화하기 위한 기법들도 개발되어져 왔다 (MacAyeal, 1993; Lin et al., 2012)



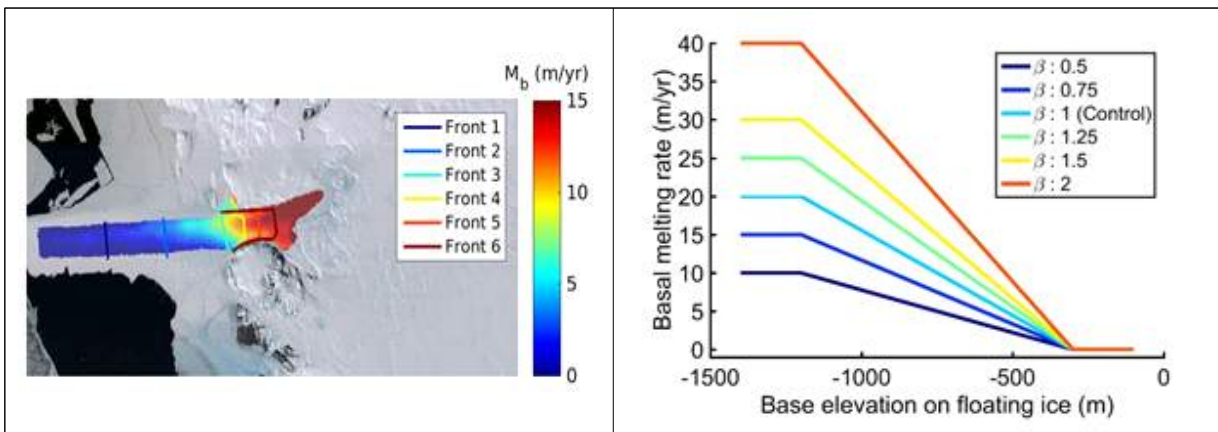
[그림 23] 다양한 외부강제력에 대한 그린랜드 및 남극 용융에 따른 해수면 상승치 모델 상호비교 연구 결과 (Bindshadler et al. 2013)



[그림 24] PISM 빙상동역학 모델 해상도에 따른 해수면 변동값 민감도 분석 (Martin et al. 2015)



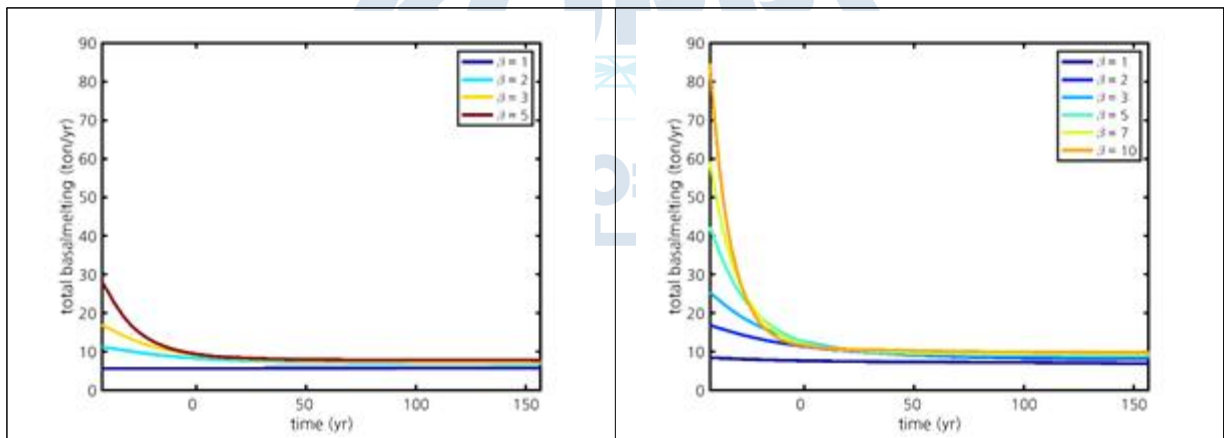
이를 기반으로 본 연구에서는 구축된 빙상동역학모델 시스템의 입력자료 및 경계조건 자료 중 모델 성능에 비교적 큰 영향을 미칠 수 있는 표면질량수지(강설량), 빙붕하부용융률, 빙붕끝부분 후퇴(ice front retreat), 그리고 기저지형에 따른 민감도 실험을 수행하여 각 실험 간 차이 분석 및 예측성의 특징을 파악하였다. 안정화된 ISSM 빙상동역학 모델을 사용하여 기준실험 설계에 따라 100년간의 완화실험 후 200년 간 이상화된 미래 기후변화 시나리오에 대한 민감도를 평가하고 해수면 상승 예측 결과를 산출하였다.



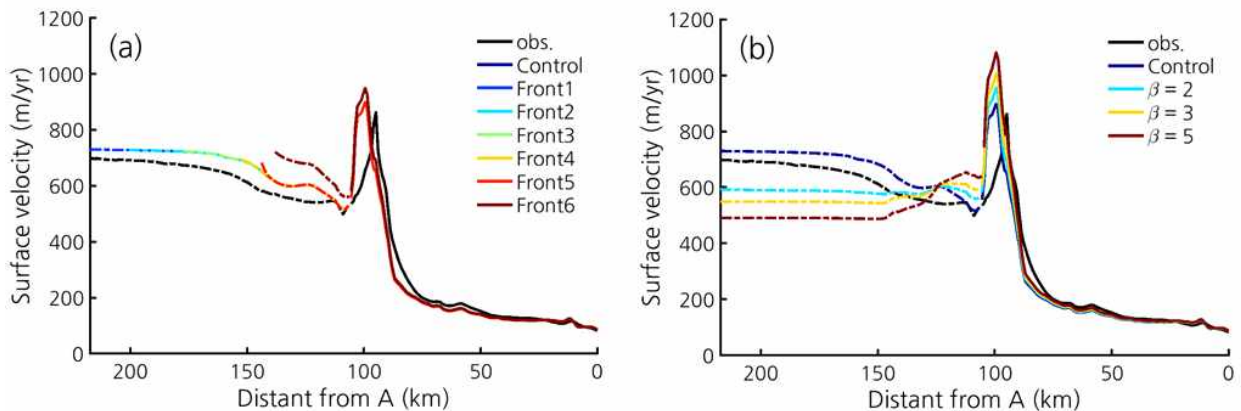
먼저 드라이갈스키 빙설의 지지 역할에 대한 민감도를 평가하기 위하여 칼빙에 의한 빙붕끝부분 위치 후퇴에 대한 여섯 가지 시나리오를 수립하여 빙상동역학 모델 미래변화 실험을 수행하였다. 빙붕끝부분이 빙설, 빙설과 지반선 사이 측면 빙하에 맞닿은

지역, 그리고 지반선 부근 협곡으로 둘러싸인 내륙에 위치해 있는 경우를 각각 두 가지 씩 가정하였다. 빙붕하부용융률의 경우 서남극 파인 아일랜드 빙하에서 관측된 100 m/yr (Payne et al., 2007)에 기반하여 기준 실험의 값의 5배를 최대값으로 설정하고 이에 이를 때까지 특정 승수(specific multiplier) β 를 적용하여 β 가 5일 때 75 m/yr 값이 되도록 조정하였다 (그림 27).

모델에서 사용하는 용융 모수화에서는 일반적으로 역행적 지형을 가정하기 때문에 빙붕하부가 얇아져 기저 고도가 상승하게 되면 용융률이 서서히 감소하게 된다. 따라서 데이비드 빙하와 같이 지반선으로 갈수록 높아지는 기저지형의 빙하에서는 지반선에서의 용융이 실제와 달리 약화되는 결과를 초래할 수 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 극한 빙붕하부용융률 시나리오를 가정하여 빙붕 두께가 1m 이내로 감소하는 경우 기저지형 고도가 상승하는 지역에서 빠른 빙붕하부용융이 발생하는 사례로 추정하여 빙붕 두께와 무관하게 최대 β 가 10일 때 빙붕하부용융률이 150 m/yr까지 증가하도록 설정하여 강제력 증가에 따른 지반선의 이동 및 빙상의 역학적 변화를 실험하였다. 실험 기간 내 빙붕하부용융률의 시간적 변화는 그림 28에서 보여주고 있다.

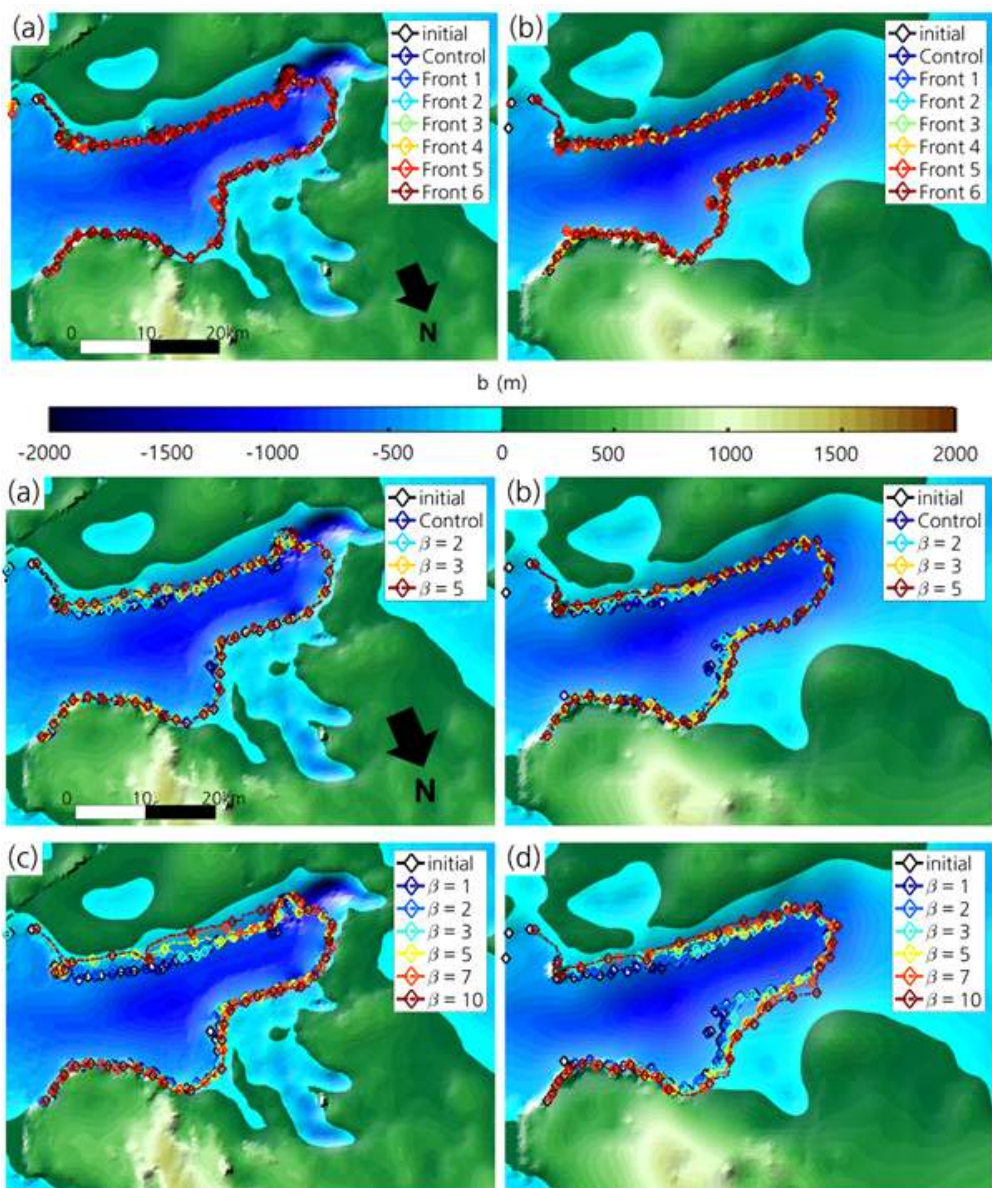


[그림 28] 모델 강제력으로 처방된 빙붕하부용융률(좌) 및 극한 빙붕하부용융률(우)의 시간에 따른 변화



[그림 29] 200년 간의 빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률(우) 강제력 실험 결과 산출된 빙속. 검정색은 관측, 실선은 실험, 점선은 빙붕에서의 빙속을 나타냄

200년 간 강제력 실험 결과 산출된 빙속 단면도를 보면 (그림 29) 빙하 말단부 위치 변동에 의한 빙속의 변화는 뚜렷이 나타나지 않다가 빙하 말단부가 지반선 부근 협곡 지역까지 후퇴하여야 빙설 지역 빙속의 증가가 나타나는 것으로 모의되었다. 이는 칼빙 강제력에 대한 빙속 변화의 임계점이 존재한다는 것을 보여주는 결과이다. 이는 기존 연구에서 일부 빙설 지형이 역학적으로 빙상 지지 역할을 하지 않으며, 빙하에 둘러싸인 지역에 이르러서야 빙상 역학적 변화에 영향을 미친다는 사실에 부합하는 결과이다 (Serrousi et al., 2014b; Fürst et al., 2016). 빙붕하부용융률의 경우 용융률이 증가할수록 지반선 근처에서의 빙하 이동 속도는 증가하는 반면 빙설의 두께를 감소시키고 더욱 평평하게 만들어 빙설에서의 속도는 감소하는 것으로 나타났다.

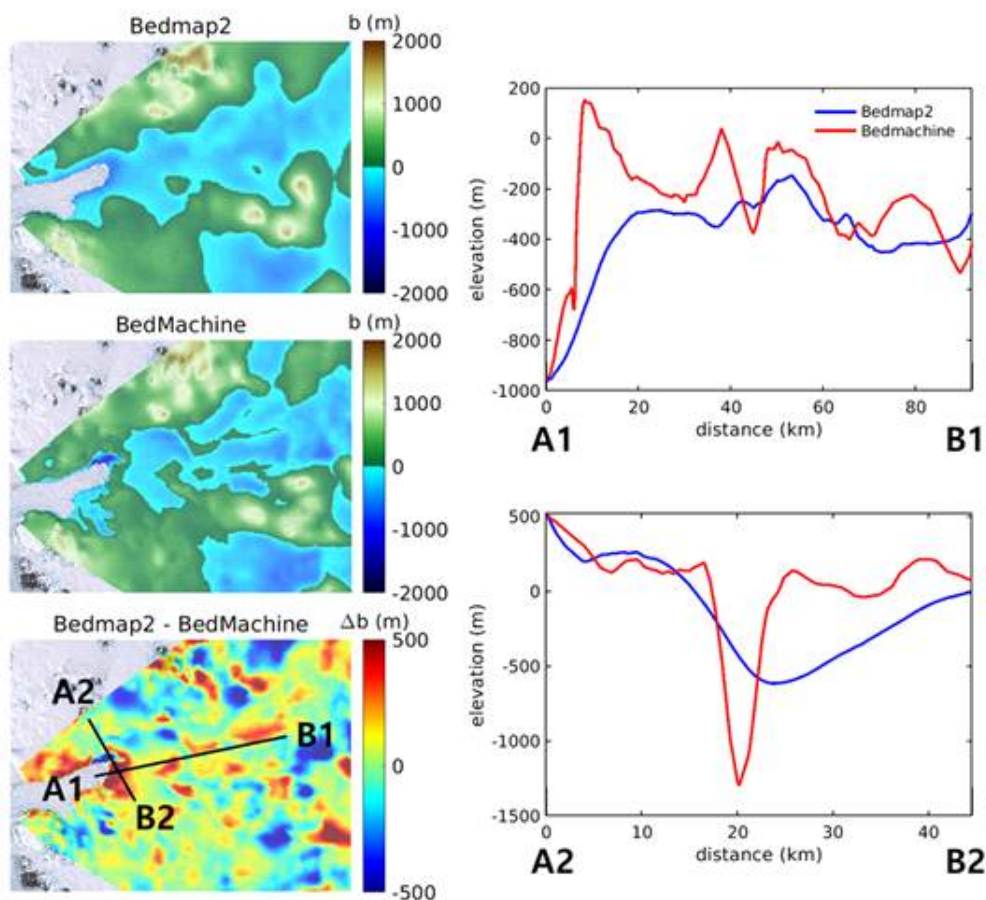


[그림 30] 200년 간의 빙하끝부분 후퇴(위) 및 빙붕하부용융률(중간)과 극한 빙붕하부용융률(아래) 강제력 실험 결과 산출된 지반선 이동

200년 간의 강제력 실험 결과 산출된 지반선 이동 위치를 보면 (그림 22) 빙붕끝부분 후퇴에 의한 지반선 이동은 거의 나타나고 있지 않으며, 빙붕하부용융률의 경우 극한 사례의 경우 β 가 3 이상일 때 임계점을 가지고 나타나는 것으로 보여진다. 이는 외부 강제력에 의한 빙하의 역학적 변화가 특별한 임계점을 가지고 돌발적으로 발생할 수 있다는 사실을 내포하는 결과이다.

2. 모델개선 기반 빙상동역학모델 시스템의 신뢰도 향상

연구소에서 수행된 항공레이더 현장관측 자료에서 산출된 얼음 두께 자료를 기반으로 질량보존법칙 기법을 활용하여 새로운 기저지형자료 BedMachine가 산출되었으며 (Morlighem et al., 2020), 이 자료는 기존의 Bedmap2 자료(Fretwell et al., 2013)와 비교하였을 때 특히 데이비드 빙하 지반선 부근 기저능의 고도가 500 m 정도 더 높다는 사실을 밝혀주었다 (그림 31). 이 두 기저지형자료를 빙상동역학 모델시스템에 각각 처방하여 모델 실험을 수행하여 기저지형자료가 빙상동역학 모델 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.



[그림 31] 지반선 부근 Bedmap2와 BedMachine 기저능 고도 비교

먼저 현장 관측자료 기반 기저지형자료 개선에 따른 빙상동역학모델 성능 변화를 빙속과 빙하 표면고도 모의 성능을 기준으로 평가하였다. 모델 성능 검증을 위하여 RMSE(Root Mean Square Error, 평균제곱근편차) 방법과 면적 가중치 오차(misfit) 산출 방법을 적용하여 시간에 따른 모델의 예측성을 평가하였다. RMSE를 산출하는 방법은 다음과 같다.

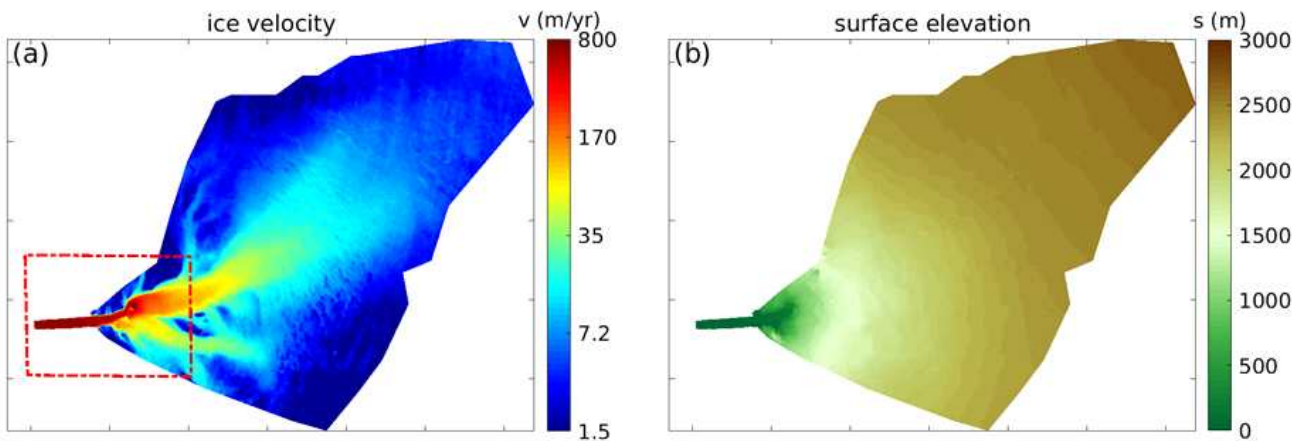
$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(v_i^{mod} - v_i^{obs})^2}{N}}$$

위 식에서 v 은 변수, i 은 격자의 꼭지점, N 은 총 꼭지점의 개수, mod은 모델의 약자이며, obs은 관측의 약자이다. 다음으로 면적 가중치 오차 계산 방법은 다음과 같다.

$$w_e = \frac{area_e}{total\ area}$$

$$misfit = \sum_{e=1}^M (w_e \times |v_e^{mod} - v_e^{obs}|)$$

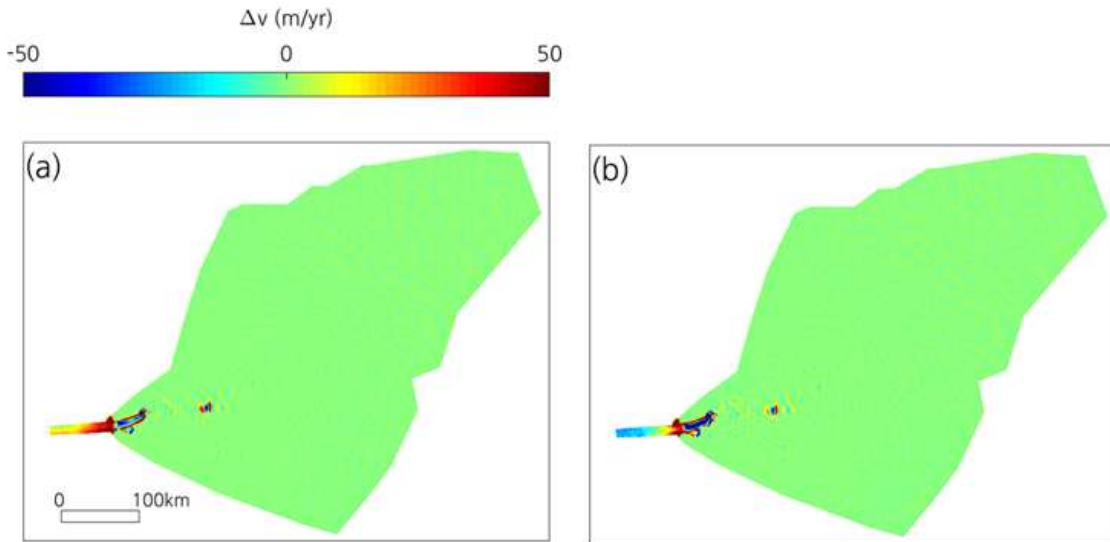
위 식에서 w_e 은 격자들로 구성하는 요소의 면적을 전체 면적으로 나눈 것이다. 위 방정식들에 기반하여 RMSE는 격자의 꼭지점들의 값을 기반으로 계산되며, 면적 가중치 오차는 격자들로 구성되는 요소들의 면적값을 기반으로 계산된다. 그림 32는 모델 영역에서 초기 조건 빙속 분포 및 빙하의 표면 고도를 보여준다. 이 값들이 RMSE 및 면적 가중치 오차의 기준값으로 산정되었으며, 전체 모델 영역 및 변수 변동성이 큰 영역(그림 32(우)의 빨간색 상자)에서 값을 산출하였다.



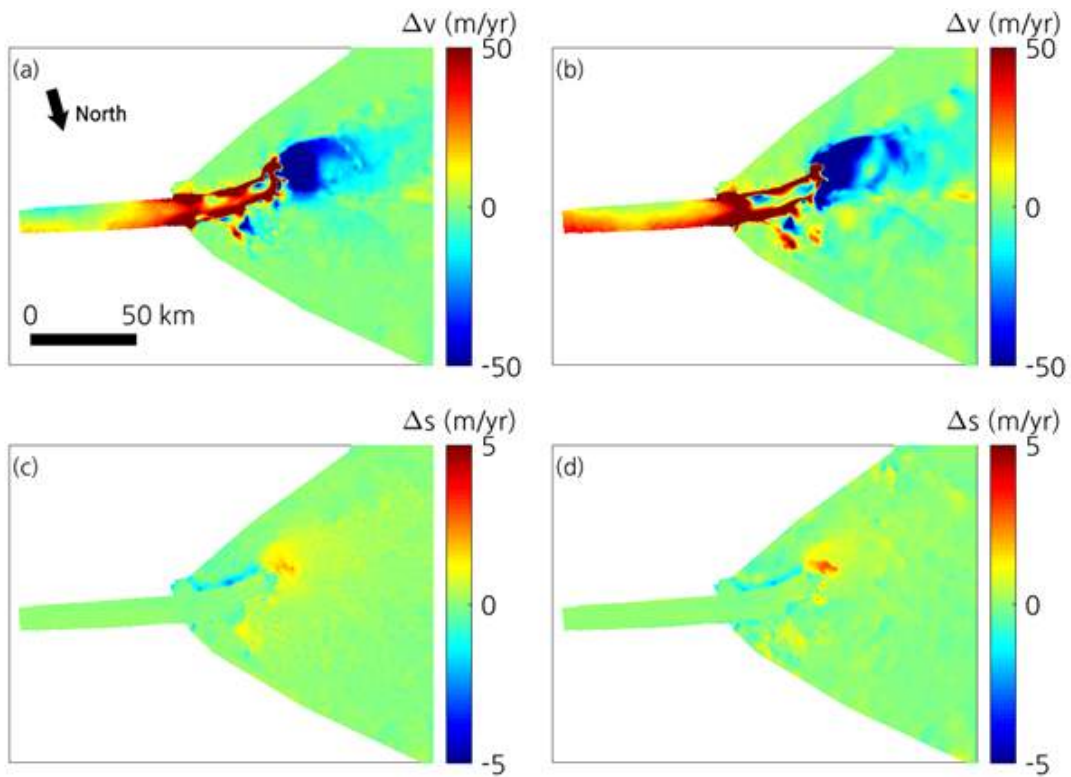
[그림 32] 데이비드 빙하 빙속 분포(좌, Mouginit *et al.* 2012) 및 빙하의 표면 고도(우, Howat *et al.*, 2018) 분포. 좌 그림에서 빨간색 상자 지역이 변수들의 변동성이 큰 영역

먼저 역산 후 산출한 모델의 빙속의 면적 가중치 오차값은 Bedmachine을 사용하였을 때 0.96 m/yr 반면 Bedmap2를 사용하였을 때 1.14 m/yr로 나타나, 기저지형 자료 개선에 따른 모델 성능 향상이 뚜렷하다 (그림 33). 이와 같이 개선된 초기 자료는 지반선 부근 초기 얼음속 발산값도 300 m/yr에서 100 m/yr로 감소시켜 주어, 이후 100년 간 완화를 위한 적분을 수행한 후 산출된 빙하 지표고도를 비교하여 보면 (그림 34) Bedmachine 기저지형 자료를 사용하여 개선된 실험에서 500m 이상 빙하 두께 오차가

감소하였음을 알 수 있다.



[그림 33] Bedmachine(좌)과 Bedmap2(우)를 사용한 실험 역산 결과 모델 영역에서 빙속 면적 가중치 오차값 분포

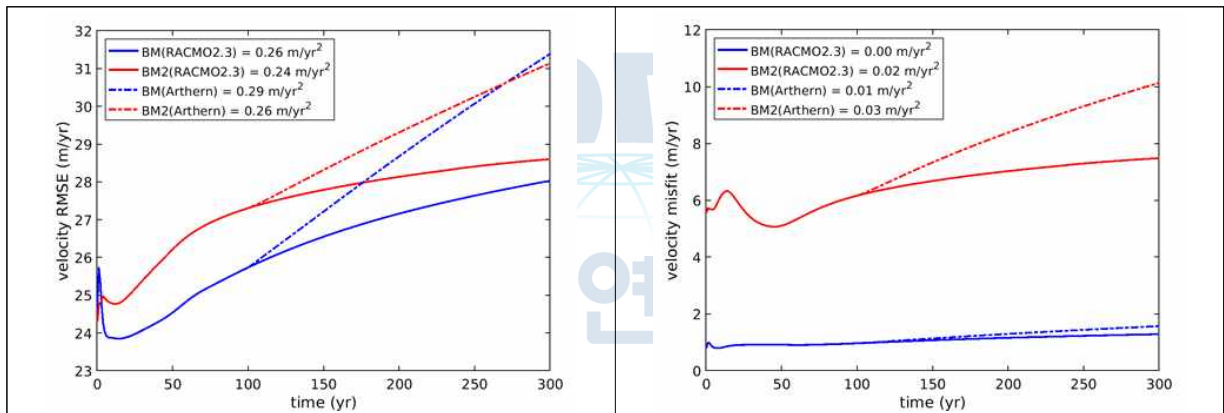


[그림 34] Bedmachine(좌)과 Bedmap2(우)를 사용한 실험 역산 결과 모델 영역에서 빙속(위)과 빙하 표면고도(아래) 면적 가중치 오차값 분포

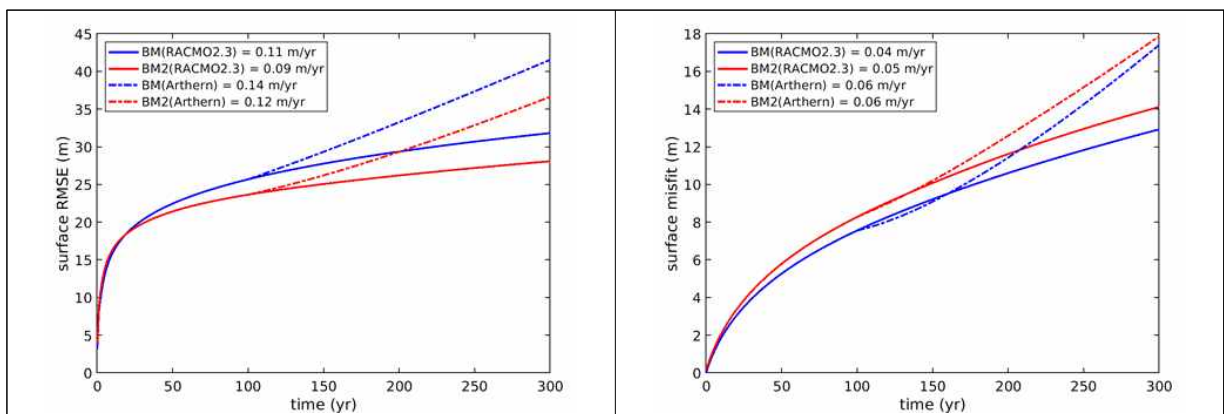
초기화, 역산, 그리고 100년 간의 완화 적분을 기반으로 모델을 안정화시킨 후 200년 동안 빙하하부용융률 및 빙하 말단부(ice front) 위치 등의 모델 강제력을 변화시키지 않는 모델 기준 실험을 수행하였다. 이 때 날려쌓인눈(snow drift) 물리과정을 포함하는 지역

기후 모델인 RACMO2.3에서 산출된 표면질량균형값을 위성관측 자료를 현장 관측자료로 보정한 Arthern 표면질량균형값 (Arthern et al., 2006)과 비교하기 위하여 두 자료를 각각 모델 강제력으로 처방하였다. 모델영역 평균 표면질량균형값은 RACMO2.3이 5.4 Gton/yr인 반면 Arthern은 20.93 Gton/yr으로 나타나며, 일반적으로 RACMO2 값이 남극 지역 표면질량균형값을 잘 대표하는 것으로 알려져 있다 (Lenaerts et al., 2012).

모델 적분 시간에 따른 빙하 이동속도(그림 35) 및 빙하 표면 고도(그림 36)의 RMSE 및 면적 가중치 오차값의 변화를 산출한 결과, RACMO2.3 그리고 Arthern 표면질량균형값을 사용하는 경우 모두 초기 조건에 비해 빙속은 연간 0.5 m/yr 이내로 변하며, 빙하의 표면고도는 연간 0.2 m/yr 이내로 변화하였다. 그리고 Bedmap2를 사용하였을 때보다 Bedmachine을 사용하였을 때 특히 변동성이 큰 지역에서 빙속의 RMSE와 면적 가중치 오차값 모두 연간 0.01~0.03 m/yr 감소하는 것으로 나타나, 기저지형 자료 개선에 따른 모델 성능 향상이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 반면 빙하 지표고도 모의성능은 면적 가중치 오차로 산출하였을 때에만 개선 결과가 나타났다.



[그림 35] 빨간색 박스 영역에서 RMSE(좌) 및 면적 가중치 오차값(우)를 적용한 시간에 따른 표면 빙속 변화. 각 선 설명의 숫자는 평균 기울기이며, BM은 BedMachine, BM2은 Bedmap2를 나타냄

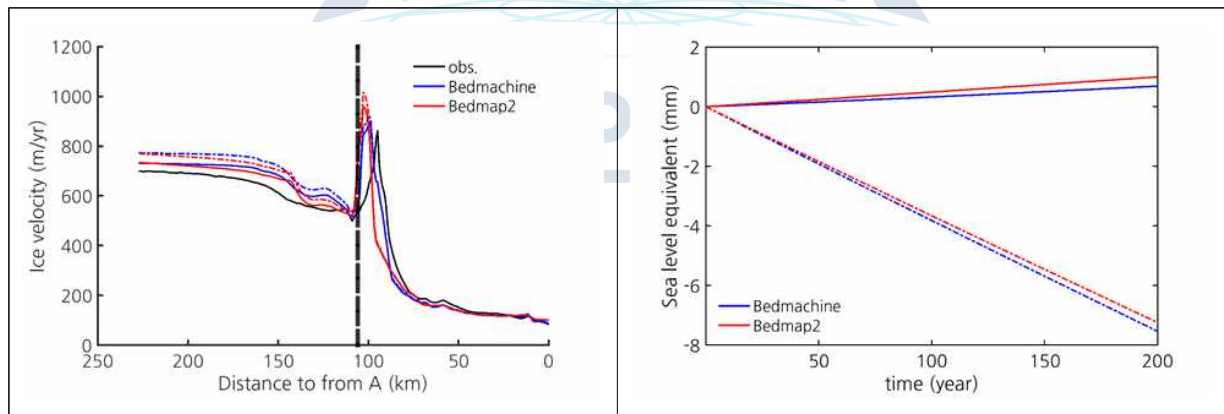


[그림 36] 모델 전체 영역에서 RMSE(좌) 및 면적 가중치 오차값(우)를 적용한 시간에 따른 빙하 표면고도 변화. 각 선 설명의 숫자는 평균 기울기이며, BM은 BedMachine, BM2은 Bedmap2를 나타냄

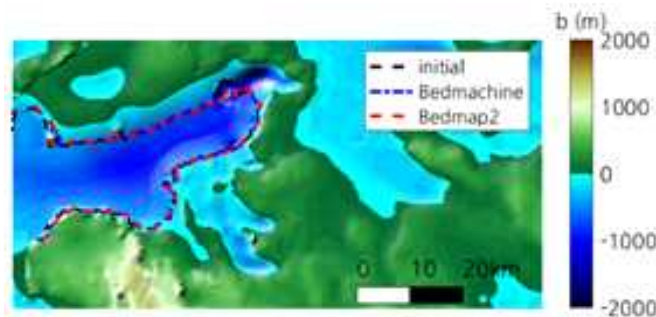
빙하의 표면고도 변화의 RMSE와 면적 가중치 오차값의 증가 경향을 살펴보면

RACMO2.3보다 Arthern을 사용하였을 때 100년 이후 오차가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모델 전체 영역에 대해 표면질량균형값의 평균이 RACMO2.3가 0.04 m/yr인데 반해 Arthern은 0.15 m/yr이므로 Arthern이 빙하에 유입시키는 표면질량균형값이 RACMO2.3보다 많아 유출량보다 유입량이 많아지기 때문에 빙하 표면의 고도가 지속적으로 상승하기 때문으로, 이처럼 시간의 흐름에 따라 RMSE와 면적 가중치 오차가 증가하는 요인이 표면질량균형 강제력에 기인한 것임을 알 수 있다.

200년 간의 적분실험 후 결과를 분석하면 (그림 37) 빙속의 경우 Bedmachine 기저지형 자료를 RACMO2.3 표면질량균형값을 함께 사용하였을 때 관측과 가장 유사한 지반선 근처 최대값의 위치 및 값을 모의하는 것을 알 수 있다. Bedmap2의 경우 빙속을 과대모의하고 최대값의 위치를 다소 빙설 쪽으로 그릇되게 모의하는 것으로 나타난다. 또한 Bedmachine 기저지형 자료를 사용하였을 때 RACMO2.3 실험의 경우 1.3 Gton/yr의 빙하 질량 감소 및 Arthern 실험의 경우 13.9 Gt/yr의 빙하 질량 증가가 있었으며 이는 각각 0.7 mm의 전지구 해수면 상승 및 7.5 mm의 전지구 해수면 하강에 상응하는 질량 변화이다. Bedmap2를 사용하였을 때에는 RACMO2.3 실험의 경우 1.8 Gton/yr 질량 감소 및 Arthern 실험의 경우 13.4 Gt/yr의 질량 증가가 있었으며, 이는 각각 1.0 mm의 전지구 해수면 상승 및 7.2 mm의 전지구 해수면 하강에 상응하는 질량 변화이다.



[그림 37] 200년 기준실험 결과 산출된 빙속(좌) 및 전지구 해수면 상승값 (우). 검정색은 관측, 파란색은 BedMachine, 붉은색은 Bedmap2를 나타내며, 실선은 RACMO2.3, 점선은 Arthern을 나타냄



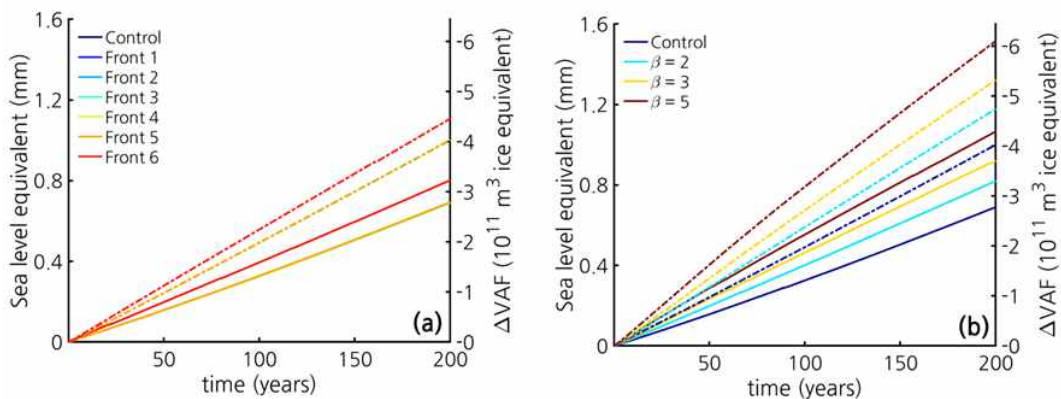
[그림 38] 200년 기준실험 결과 산출된 지반선 위치 공간 분포. 검정색은 관측기반 초기값, 파란색은 BedMachine, 붉은색은 Bedmap2 실험 결과임

제 3절 동남극 빙하 변동성의 특성 및 기작 이해 증진

1. 다양한 미래변화 시나리오 산출

(1) 이상화된 강제력 기반 미래변화 시나리오 산출

앞장에서 기술된 것처럼 표면질량수지, 빙붕하부용융률, 빙붕끝부분 후퇴에 대한 이상화된 시나리오를 설정하여 미래변화 실험을 수행하였다. 빙상동역학 모델에서 산출된 얼음의 질량 변화는 전지구 해수면 변동값으로 변환되어 나타날 수 있다. 따라서 해수면 변동에 영향을 미치게 되는 부력 이상의 빙하 질량(VAF, volume above flotation)을 해수면 변동값으로 변환하여 산출한다. 그림 39는 빙붕끝부분 후퇴 및 빙붕하부용융률 강제력에 대한 200년 미래변화 실험 결과 산출된 해수면 변동값을 보여주고 있다. RACMO2.3 표면질량균형값을 사용하고 다른 강제력을 처방하지 않은 기준실험에서도 이 지역의 빙상 질량 감소와 해수면 상승이 모의되었다. 빙붕끝부분 후퇴 강제력의 경우 빙하 말단부가 기반선 부근 협곡 지역까지 후퇴하는 임계점 이상의 강제력이 존재할 때 해수면 상승이 뚜렷이 나타나는 것으로 보여진다. Bedmachine의 경우 Bedmap2 기저지형 자료를 사용하는 경우보다 해수면 상승값이 작게 나타나는데, 이는 기반선 부근 위치한 기저능의 고도가 Bedmachine 자료에서 500 m 이상 높게 나타나며, 특히 해면고도 이상으로 높기 때문에 빙하의 후퇴를 저지하는 역할로 작용하여 빙하의 후퇴를 더디게 저지하는 것으로 해석할 수 있다.



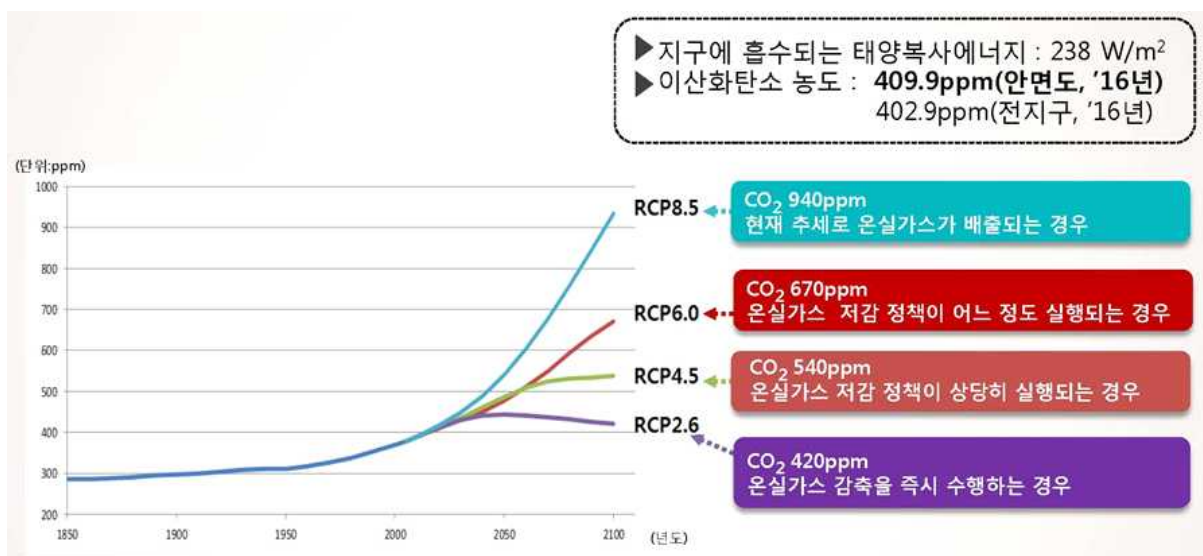
[그림 39] 빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률(우) 강제력에 대한 200년 미래변화 실험 결과 산출된 해수면 변동값. 실선이 Bedmachine, 점선이 Bedmap2 기저지형자료 실험.

따라서 현장 관측자료 기반 개선된 기저지형 자료 활용으로 인한 모델 정확도 향상이 이 지역의 미래변화 시나리오에서 기후변화 강제력에 의한 해수면 상승이 더욱 서서히 나타나는 방향으로 작용하였음을 알 수 있다. 빙붕하부용융률 강제력의 경우 강제력 승수에 비례하여 200년 동안 서서히 전지구 해수면이 증가하는 방향으로 작용하고

있으며, 빙붕끝부분 후퇴의 사례와 마찬가지로 Bedmachine의 경우 Bedmap2 기저지형 자료를 사용하는 경우보다 해수면 상승값이 작게 나타난다.

(2) IPCC 미래 기후변화 시나리오 적용 미래변화 시나리오 산출

IPCC RCP 온실가스 배출 시나리오에 따라 미래 기후변화를 모의한 CMIP5(Couple Model Intercomparison Project 5) 전지구 모델들의 자료를 20세기 기후재현 실험, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, 그리고 RCP8.5 시나리오별로 확보하였다. 미래 시나리오는 그림 40과 같이 나타난다. 각 시나리오가 대표하는 사용된 모델 및 시나리오에 따른 앙상블 개수는 표 2와 같다.



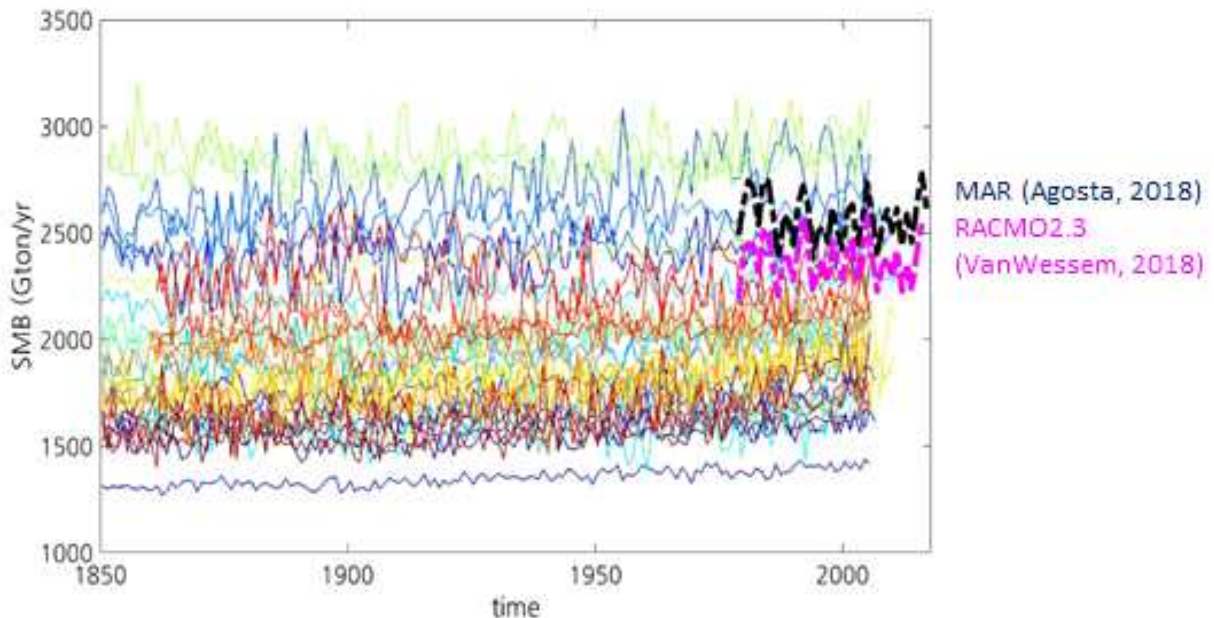
[그림 40] IPCC AR5에서 산출한 2100년까지 온실가스 배출 RCP 시나리오. 2100년에 RCP2.6의 경우 전지구 평균 온도를 산업혁명 시기보다 0.9~2.3°C, RCP4.5는 1.7~3.2°C, RCP6.0은 2.0~3.7°C, 그리고 RCP8.5는 3.2~5.4°C 상승시킬 수 있음

수집된 각 모델 자료의 모델 영역에서의 강수량을 표면질량수지로 치환하여 모델 강제력으로 처방하였다. 1950~2006년까지 현재기후 재현실험에서 산출된 표면질량수지를 사용하였으며, 이후 2006년부터 2106년 (일부 모델은 2306년)까지는 각 시나리오에서 산출된 표면질량수지를 사용하였다. 사용된 CMIP5 모델들은 전지구 모델인 관계로 해상도가 비교적 낮으며 모델 간 성능 차 또한 크게 나타나게 되며, 그 중 고위도 강설량의 모의 정확도는 일반적으로 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 특히 남극의 극히 일부를 포함하는 빙상동역학 모델 영역에서의 강설 정확도 또한 높지 않아, 현재기후 재현실험에서 모델이 모의하는 표면질량수지를 비교적 고해상도의 지역기후모델에서 산출된 값과 비교하여 보면 그 차가 매우 크며 모델 혹은 앙상블 멤버 사이의 모의 성능 또한 매우 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다 (그림 41). 이는 남극지역 강설량을 모의하는 모델 결과의 차가 매우 크기 때문으로 선행

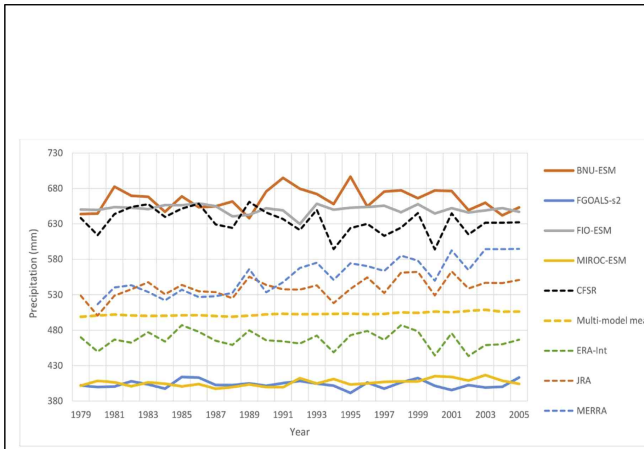
연구들에서도 이러한 특성들이 보고되어져 왔다 (그림 42, 43)

기관	모델	재현실험	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
CCCma	CCCma.CanESM2	5	1	1	0	1
CSIRO-QCCCE	CSIRO-QCCCE.CSIRO-Mk3-6-0	10	10	10	10	10
IPSL	IPSL.IPSL-CM5A-LR	6	4	4	1	4
IPSL	IPSL.IPSL-CM5A-MR	3	1	1	1	1
MIROC	MIROC.MIROC-ESM	3	1	1	1	1
MIROC	MIROC.MIROC-ESM-CHEM	1	1	1	1	1
MIROC	MIROC.MIROC5	5	5	5	5	5
MPI-M	MPI-M.MPI-ESM-LR	3	3	3	0	3
MPI-M	MPI-M.MPI-ESM-MR	3	1	3	0	1
MRI	MRI.MRI-CGCM3	5	1	1	1	1
NASA-GISS	NASA-GISS.GISS-E2-H	18	3	16	3	5
NASA-GISS	NASA-GISS.GISS-E2-R	18	3	17	3	5
NCAR	NCAR.CCSM4	3	1	1	1	1
NIMR-KMA	NIMR-KMA.HadGEM2-AO	1	1	1	1	1
NOAA-GFDL	NOAA-GFDL.GFDL-CM3	5	1	3	1	1
NOAA-GFDL	NOAA-GFDL.GFDL-ESM2G	1	1	1	1	1
NSF-DOE-NCAR	NSF-DOE-NCAR.CESM1-CAM5	1	1	1	1	1
계		91	39	70	31	43

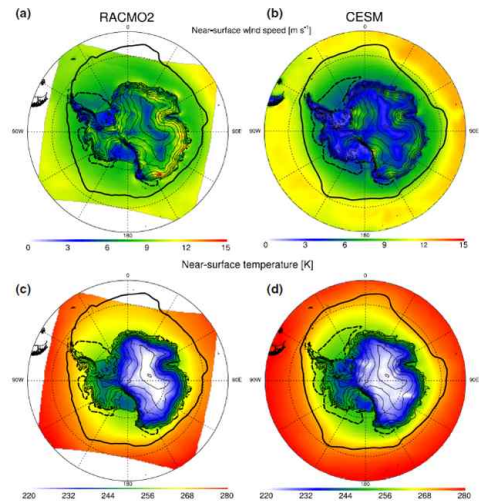
[표 2] 사용된 IPCC CMIP5 전지구 모델 자료



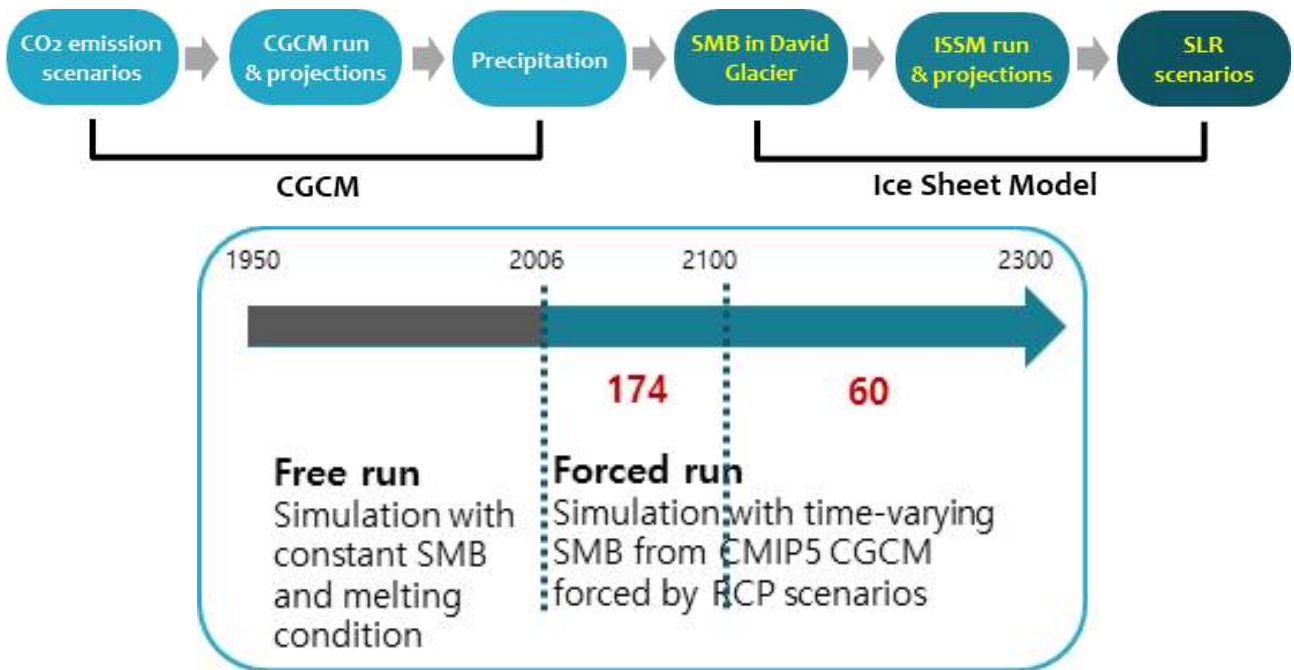
[그림 41] 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역에서 IPCC CMIP5 현재기후 재현실험 결과 산출된 표면질량균형값 및 MAR(Agosta, 2018)과 RACMO2.3(VanWessem, 2018) 지역기후모델에서 산출된 표면질량균형값



[그림 42] IPCC AR5 전지구 모형 및 재분석 자료에서 산출된 1979~2005년 남극지역 강수 자료 (Tang *et al.* 2018)



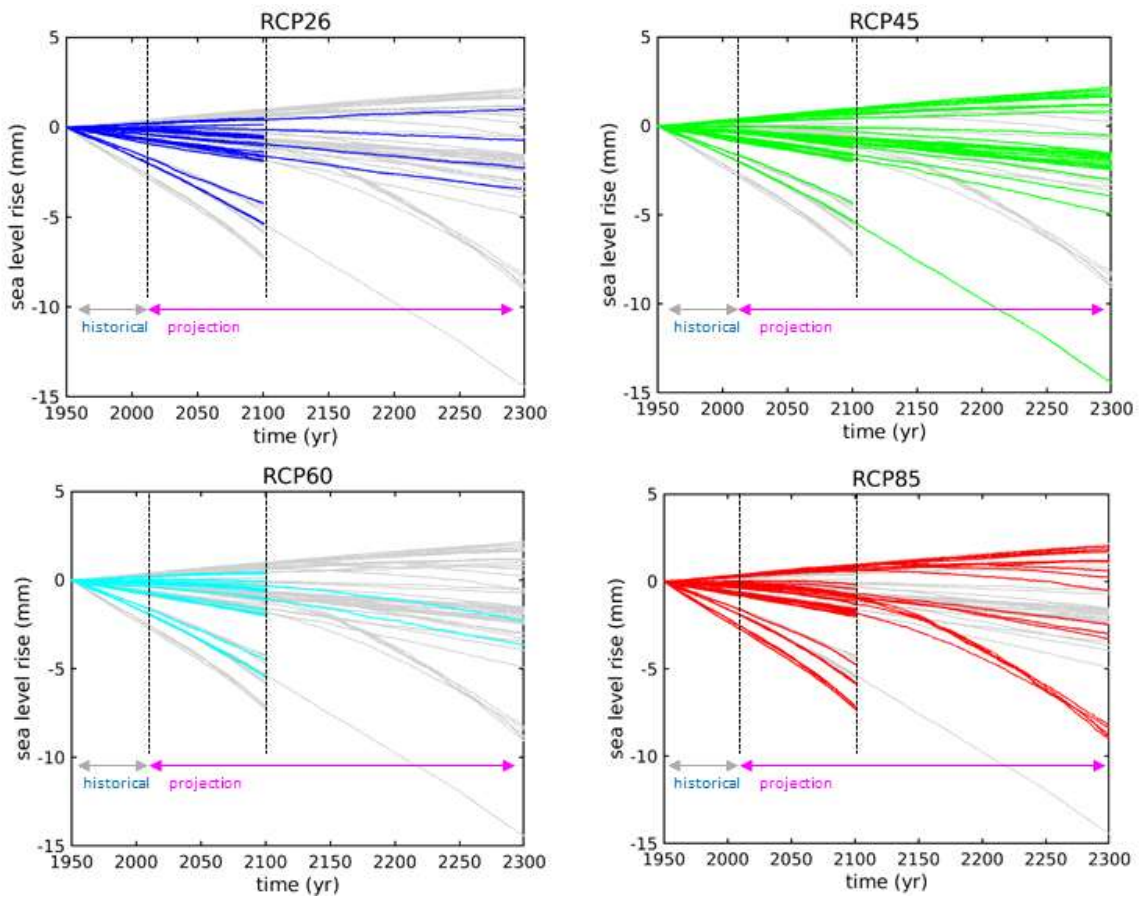
[그림 43] RACMO2 모델과 CESM 전지구 모델의 현재기후 재현실험 결과 산출된 바람장(상) 및 지표온도(하) 성능 비교 (Lenaerts *et al.* 2016)



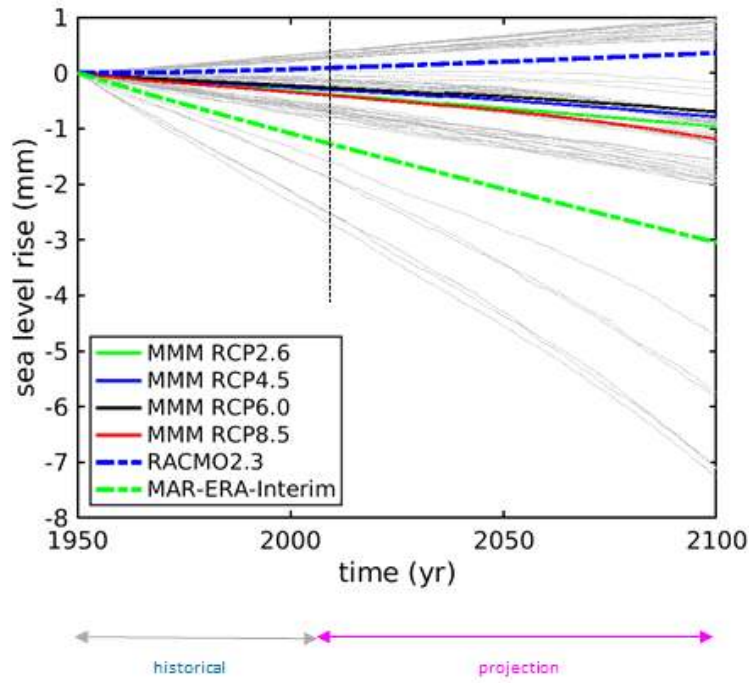
[그림 44] IPCC RCP 시나리오 기반 미래예측 시나리오 산출 실험 모식도

빙상동역학 모델시스템을 이용하여 동남극 북빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 지역에서 IPCC RCP 시나리오 기반 산출된 표면균형질량값을 기후 강제력으로 처방한 미래 예측 실험을 수행하였다 (그림 44). 그림 45는 2300년까지 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, 그리고 RCP8.5 시나리오 예측 결과 산출된 빙하 질량 변동값에서 변환된 해수면 변동값을 보여주고 있다. 그림 46은 각 시나리오별 다중모델 앙상블 평균값을 비교한 결과를 보여준다. 그림 47는 2100년까지 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, 그리고 RCP8.5 시나리오

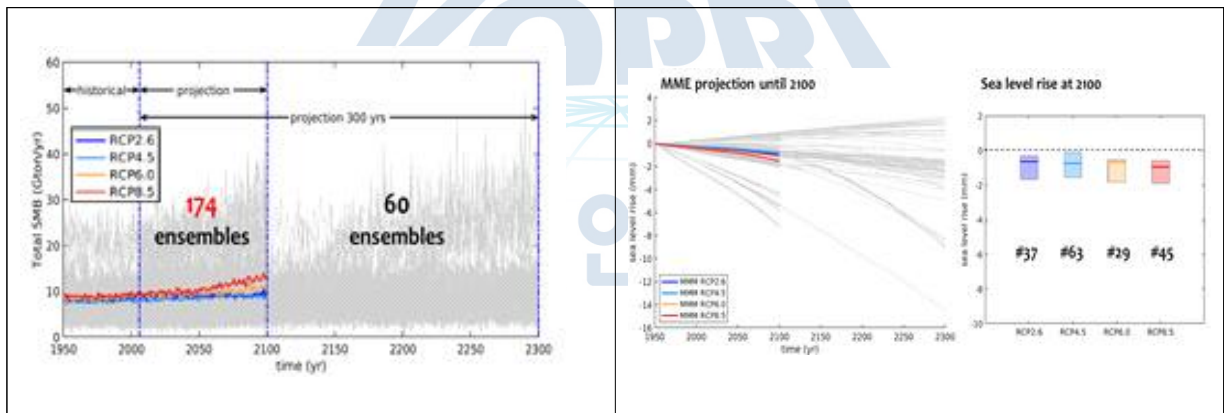
예측 결과 산출된 빙하 질량 변동값 및 해수면 변동값으로 변환된 결과를 보여주며, 그림 48은 2300년까지의 결과를 보여주고 있다. 다중모델 상호비교 결과 모델 간 앙상블 민감도는 다소 넓게 나타나지만, 대부분의 실험에서 온실가스 증가 속도 및 증가량과는 무관하게 이 지역에서는 빙하 질량 증가로 인한 전지구 해수면 하강이 우세할 것으로 예측되었다. 이는 이 지역의 빙하의 안정성이 매우 커서 21세기 내의 지구 온난화 강제력에도 불구하고 빙하 질량 손실이 뚜렷이 나타나지 않는다는 것을 의미한다. 이 지역 지반선에 위치한 해면보다 높은 기저능의 존재가 빙하의 안정성에 큰 영향을 미치고 있다고 해석할 수 있다.



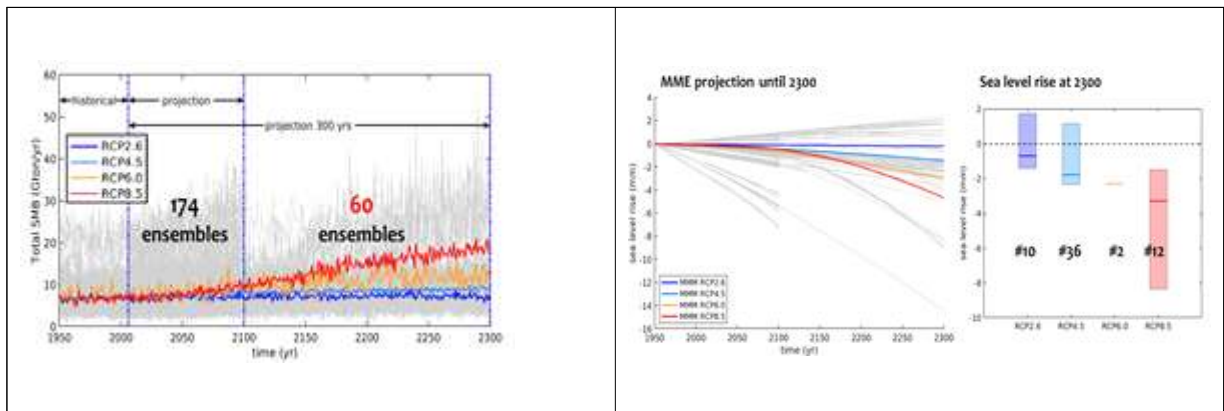
[그림 45] 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역에서 2300년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 해수면 변동값



[그림 46] 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역에서 2100년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 다중모델 앙상블 평균 해수면 변동값



[그림 47] 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역에서 2100년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 (좌) 빙하 질량 변동값 및 (우) 해수면 변동값



[그림 48] 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역에서 2300년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 (좌) 빙하 질량 변동값 및 (우) 해수면 변동값

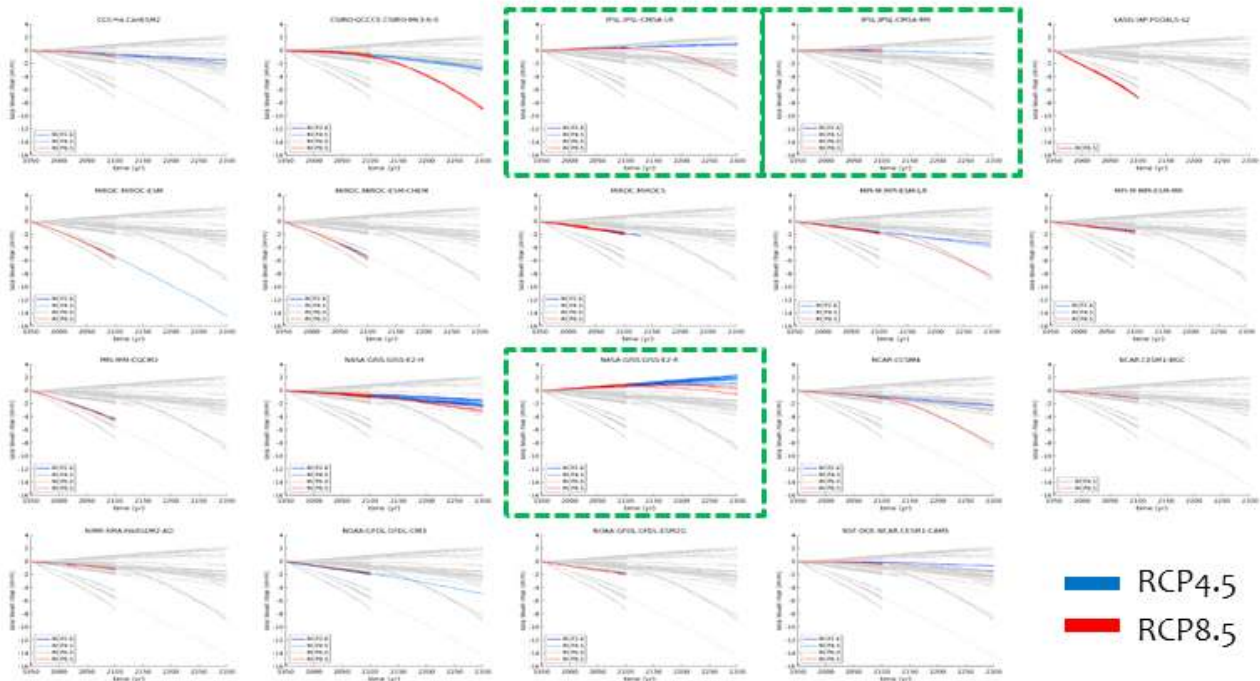
2. 미래변화 시나리오 실험에서 주요 요소들에 대한 임계점 도출

각 시나리오별 다중모델 앙상블 평균값을 보면, 2100년까지 시나리오 간 해수면 변동값의 차는 크지 않지만 RCP6.0 시나리오에서 가장 작은 빙상 질량 증가 및 해수면 하강이 나타나고 RCP8.5 시나리오에서 가장 큰 빙상 질량 증가 및 해수면 하강이 나타난다는 것을 알 수 있다. 다만 시나리오별 모델 및 앙상블 개수가 다르기 때문에 각 시나리오별 특성을 일반화 하는 데에는 한계가 있다고 할 수 있겠다. 또한 CMIP5 전지구 모델들의 경우 빙상동역학 모델이 전지구 모델에 결합되어 있지 않기 때문에 남극 지역 기후모의 성능에 한계가 있다는 사실 또한 이 결과를 해석하는 데 고려해야 할 점이다.

각 모델의 특성을 고찰하여 보면 (그림 49) 17개 모델 중 3개 모델만이 전지구 해수면 상승에의 기여를 예측하고 있으며, 대부분은 해수면이 감소하는 방향으로 빙하 질량이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이는 지구 온난화가 심화되면 될수록 이 지역의 해빙이 녹아 수증기가 증가하게 되고 결과적으로 강설량의 증가를 초래한다는 결과가 반영되고 있기 때문이다. 특히 모델의 미래 예측 성능은 현재 기후 모의 성능에 비추어 추론할 수 있는데 그림 50에서 보여주는 현재 기후에서 강설량을 모의하는 모델의 관측대비 오차 결과, 대부분의 모델들이 관측에 비해 강설량을 과대하게 모의하는 모델의 체계적 오차 특성이 뚜렷이 나타나고 있는데 (Agosta et al. 2015; Palermo et al., 2017), 오직 강설량을 많이 모의하는 3개 모델만이 미래예측 실험에서도 빙상 감소와 해수면 상승을 예측하고 있다는 사실은 주목할 만한 부분이다. 즉 모델의 현재기후 모의 성능에서 나타나는 모델의 신뢰도(fidelity)가 궁극적으로 미래예측 결과의 차이로 연결되어 진다고 할 수 있다. 따라서 모델의 성능 개선이 미래예측 정확도 향상과 밀접하게 연관되어지며, 모델을 활용한 미래예측 결과 해석에 모델 예측성능에 대한 분석 및 고려가 반드시 수행되어야 한다는 사실을 보여주고 있는 것이다.

이처럼 이상화된 실험 및 IPCC RCP 시나리오 기반 미래예측 실험에서 이 지역은 대단히 안정하여 지반선의 이동 및 빙하의 역학적 변화는 뚜렷이 나타나지 않았다. 앞서 2장 1절에 보여준 것처럼 빙붕하부용융률이 극한으로 커지는 사례에서만(β 가 3 이상일 때) 지반선이 이동하고 빙하가 후퇴하는 임계점이 나타나는 것으로 보인다. 이는 RCP8.5 시나리오보다 더 급속한 지구 온난화 혹은 지역 해양순환의 돌발적 현상에 의하여 이 지역에 극심한 해수온도 상승이 발생하여야 빙하의 역학적 변화가 임계점을 지나 돌발적으로 발생할 수 있다는 사실을 내포하는 결과이다.

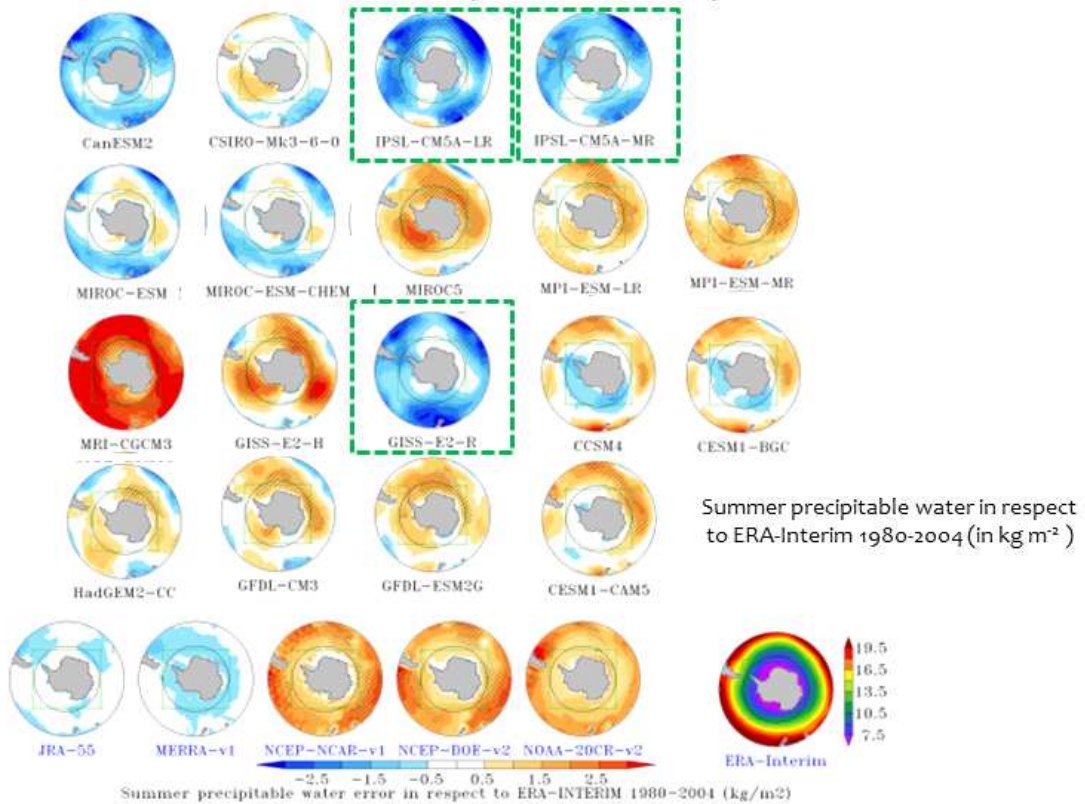
Sea level rise : NASA-GISS.GISS-E2-R/IPSL.IPSL-CM5A-MR/IPSL.IPSL-CM5A-LR



[그림 49] 각 다른 CMIP5 전지구모델의 IPCC RCP4.5(파란색) 및 RCP8.5(붉은색) 시나리오 강제력으로 예측한 2300년까지 해수면 변동값

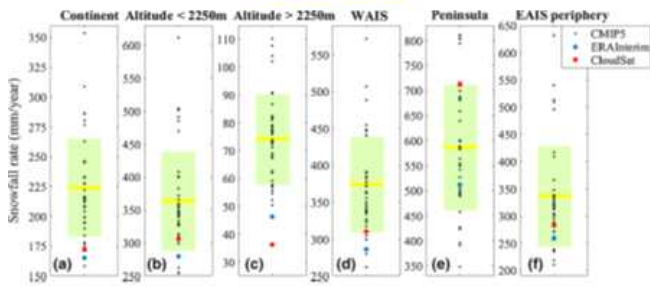
Fidelity of CGCMs: Climatological errors of precipitable water from historical runs (Agosta et al., 2015)

Sea level rise : NASA-GISS.GISS-E2-R/IPSL.IPSL-CM5A-MR/IPSL.IPSL-CM5A-LR



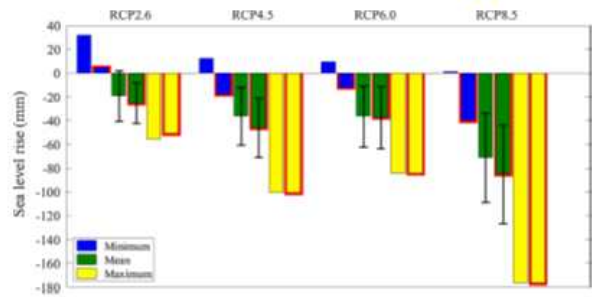
[그림 50] CMIP5 현재기후 재현실험에서 각 다른 전지구모델의 강수량 모의 성능 (Agosta et al. 2015)

Snowfall rate (mm year⁻¹) for 1986-2005 for Antarctica



- In historical runs, CMIP5 CGCMs overestimate the snowfall in Antarctica.

Contribution of Antarctic precipitation changes to sea level between 2006-2099



- Increasing SST in Southern Ocean around Antarctica induces sea ice melting and then increase snowfall in Antarctica for future RCP projections in general.
- As a result, the ice mass changes in Antarctica contribute to decrease global sea level rise under global warming conditions.
- Note that none of CMIP5 CGCMs include the interactive ice sheet mode component.

[그림 51] CMIP5 전지구모델들의 남극 강설량 모의성능 및 미래예측 결과 (Palermo et al. 2017)



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

해당 연도	세부 연구개발 목표	연구내용	성과물
2019	최신 현장 탐사자료를 포함하는 모델 검증자료 확보	빙상동역학모델 개발·운용 위한 자료 및 기술 확보	최신 검증자료
	모델 결과에 영향을 주는 주요 요소 분석	규준실험 및 테스트베드 구축 모델 결과에 영향을 주는 주요 요소 도출	동남극 빙하 변동성 및 기작 이해 증진
	주요 요소들에 대한 민감도 실험 수행	초기화, 경계조건, 물리과정 모수화 및 매개변수, 앙상블 기법, 기후변화 강제력 등 모델 결과에 영향을 주는 주요 요소들 민감도 실험 수행	빙상동역학 모델 민감도 실험 결과
	빙상동역학 모델 예측성의 특성 분석	미래변화 시나리오 결과들을 분석하여 주요 요소별 시나리오별 빙속 및 빙하 질량의 시공간 변동 특성 및 신뢰도 분석	빙상동역학 모델 예측성의 특성
	다양한 미래변화 강제력 시나리오 산출	IPCC에서 산출된 CMIP5 전지구 모델 앙상블 실험의 RCP 시나리오 자료 확보 및 빙상동역학모델 시스템 강제력으로 변환	미래변화 강제력 시나리오
	동남극 빙하 미래변화 실험에서 주요 요소들에 대한 임계점 도출	빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 시나리오 결과를 좌우하는 강수량(표면질량수지), 빙붕하부용융률, 빙붕끝부분 후퇴(ice front retreat) 강제력의 임계값 산출	동남극 빙하 미래변화 시나리오
	보고서 작성	보고서 작성	최종 보고서

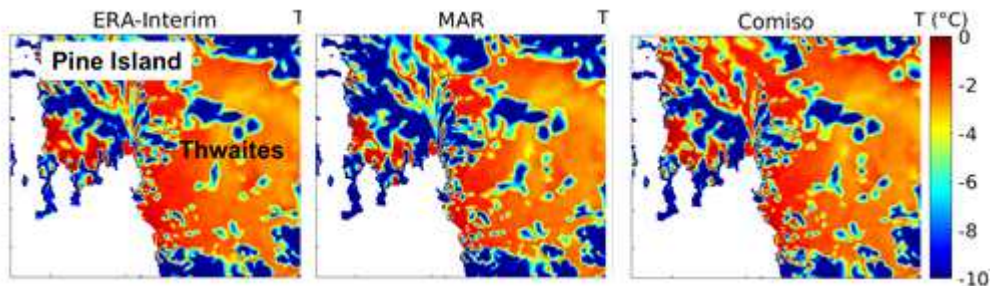
남극 지역빙상 현재 및 미래기후 예측을 목표로 수치모델 기반 ISSM 빙상동역학모델 시스템이 소내 처음으로 구축되었으며, 동남극 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역을 대상으로 고해상도 모델 실험이 최초로 수행되었다. 소내 전산장비에 ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 및 안정화하고, ISSM 개발자들과 향후 유기적 연구개발 가능하도록 국외 네트워크를 구축하여 빙상 미래변화를 예측하는 핵심 기술인 빙상동역학모델 개발·운용 능력을 확보하였다. 또한 다양한 주요 요소별 민감도 실험 및 미래예측 시나리오 산출을 통하여 동남극 빙하 변동성의 특성 및 기작에 대한 이해 증진하였으며, 모델 개선 연구의 결과 극지역 용빙에 따른 해수면 상승 예측성을 제고할 수 있었다.

이와 같은 학문적 성과는 향후 빙상동역학 모델을 활용한 다양한 새로운 연구 기획 및 수행의 밑거름이 될 것이며, 특히 현장 탐사에서 얻어진 관측자료를 모델 연구에 활용하여 모델 성능 개선뿐만 아니라 극지역 빙상 및 빙붕 안정도 평가와 연관된 메커니즘 이해 연구로 확장해 갈 수 있을 것이다.

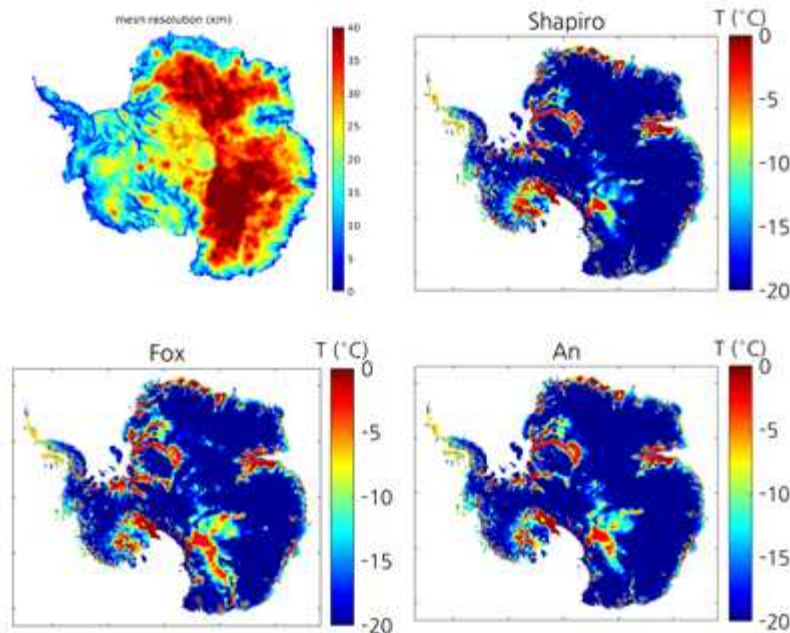
제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 과제에서 구축된 빙상동역학모델 시스템은 다양한 극지역 빙하 기작 이해 및 미래예측에 적용 가능하다. 동남극 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 지역을 대상으로 설정된 규준실험과 테스트베드는 동남극 빙하 기작 이해에 효율적으로 활용될 수 있으며, 특히 새로운 현장 탐사자료 추가 혹은 모델 업데이트에 대한 민감도 평가가 용이하게 활용될 수 있다.

뿐만 아니라 서남극, 그린랜드 등 다양한 극지역 빙하 기작 이해 및 미래 예측에 적용 가능하다. 이 시스템을 활용하여 서남극 스웨이츠 지역에 대한 연구로 확장하고 있으며, 환남극, 동남극 윌크스 분지, 그린랜드 등 다른 지역에 대한 연구로의 확장 또한 고려하고 있다.



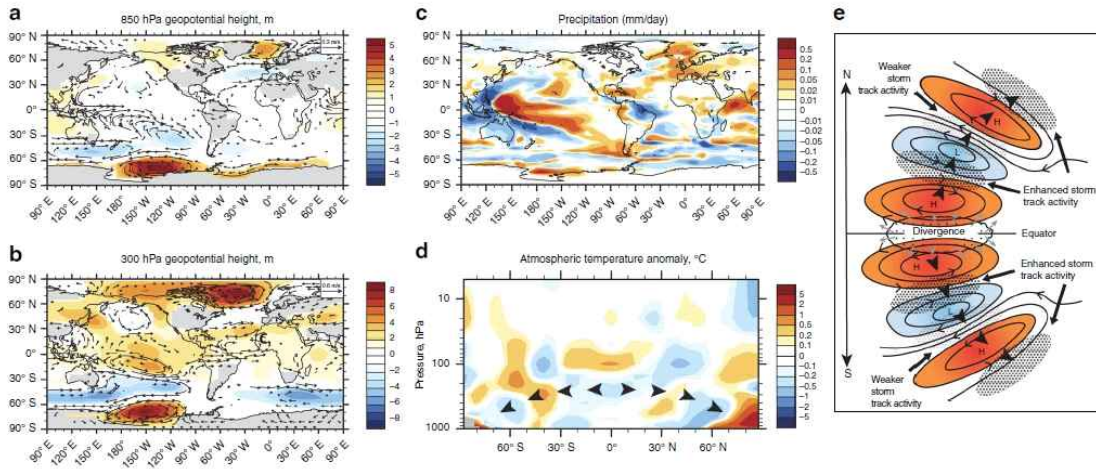
[그림 52] 스웨이츠 빙하 영역 초기온도장에 따른 기저온도 모의 결과



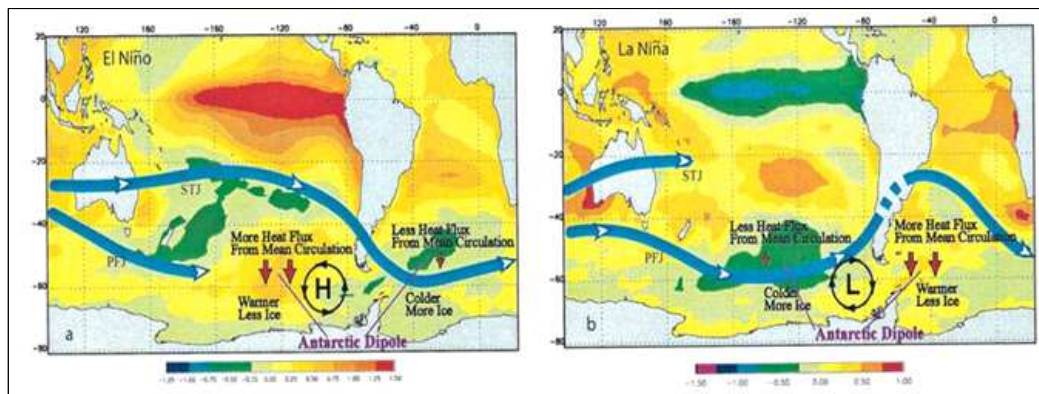
[그림 53] 환남극 영역 열역학 모델에 따른 기저온도 모의 결과

특히 서남극 스웨이츠 관련 서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구에 참여하여 미래예측 부분을 이 모델 시스템으로 구현하여 수행하고 있다.

이렇게 빙상동역학모형을 활용한 빙상-해수면 변동 연구는 전지구 기후시스템모형 등을 활용한 원격상관 연구로도 확장 가능하다. 열대와 중위도의 대기·해양 강제력이 전지구적 규모의 대기·해양 순환 변동을 야기하여 남극 빙권에도 영향을 미친다는 연구는 꾸준히 발표되어 왔으며 (Yuan and Martinson, 2000; Meehl et al. 2016), 최근에는 남극 빙권의 변화가 전지구 해수면 변동 뿐만 아니라 대기-해양 상호과정을 통하여 원격상관으로 지역 기후에도 영향을 미칠 수 있다는 연구가 발표되었다 (Turney et al. 2017). 최근들어 남극 빙권의 급격한 변화가 나타남에 따라 남극지역 변동성을 열대 및 중위도 대기·해양 강제력에 반응하는 결과로서 해석하는 기존 연구에서 나아가 남극 빙권의 변동성이 야기하는 전지구적·지역적 기후 변화 기작을 이해하고 결과를 해석하는 연구도 필요하며, 갑작스런 남극 빙상-빙붕의 붕괴는 시간규모가 긴 해양 순환의 변동 보다는 상대적으로 시간규모가 적은 급격한 대기 변동에 따라 촉발될 가능성이 높다.



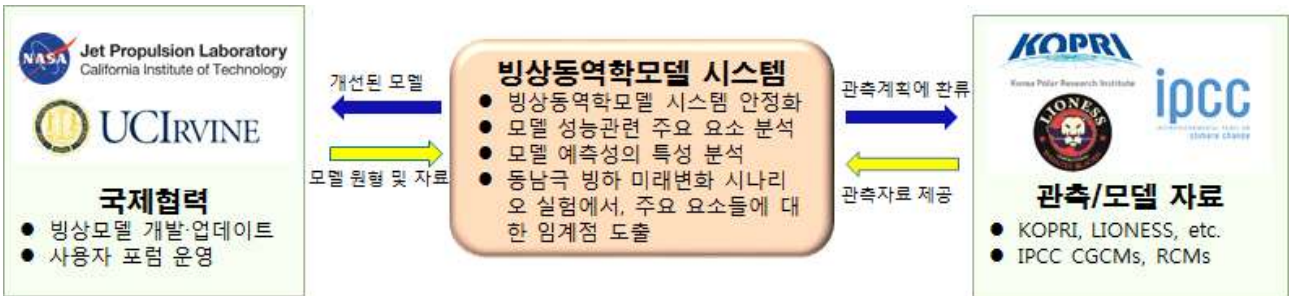
[그림 54] 남극 변화의 전지구적 원격상관관계 분석 (Turney et al. 2017)



[그림 55] 엘니뇨와 라니냐에 따른 남반구 중위도 제트(STJ)와 한대전선 제트(PFJ) 모식도 [Yuan, 2004]

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

빙상동역학모델 시스템에 대한 이해 및 신뢰도 향상을 위해 모델 시스템 구성 요소별·단계별 주요 인자 테스트 및 분석을 수행하는 구체적 계획 수립하고, 접근성이 용이한 기존 자료 및 인적 네트워크를 최대 활용하는 방향으로 추진체계를 구성하여 효율적인 모델코드, 관측자료, 모델자료를 입수하였다.



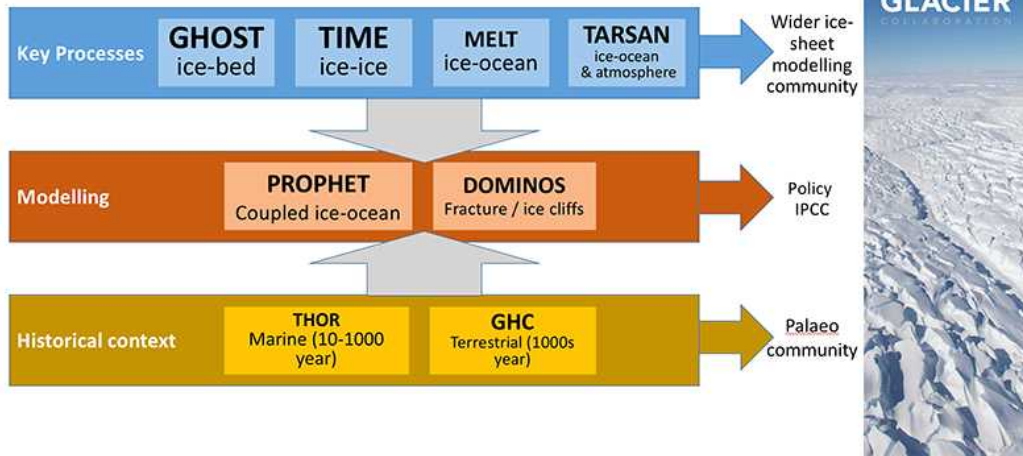
[그림 56] 과제 추진체계 모식도

먼저 KOPRI 최신 자료 및 국제 관측망 네트워크 LIONESS를 최대 활용하여 최신 모델 검증자료 확보로 빙상동역학모델 시스템 안정화 및 테스트베드 구축을 가속화할 수 있었고, 현장 탐사-모델 개선 환류체계를 구축하였다. 그리고 IPCC AR5 CMIP5 자료 등 공인받은 자료를 확보하고 활용하여 효율적으로 미래변화 강제력 시나리오 산출 및 기존 연구들과 비교검증을 통해 연구결과 신뢰도 평가 가능하였다.

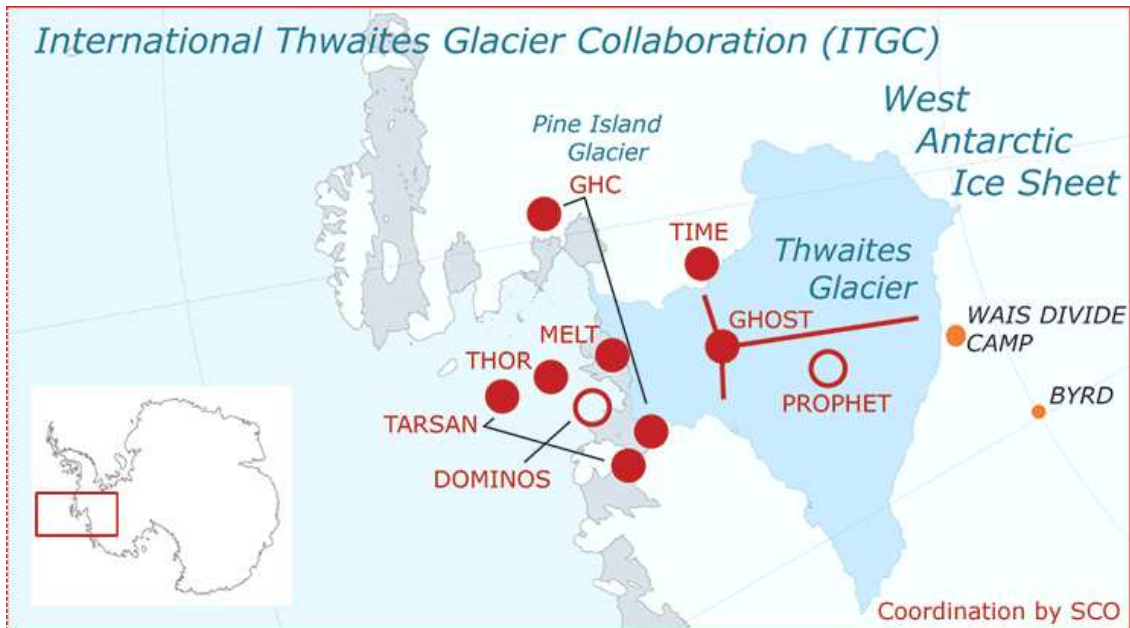
ISSM 빙상동역학모델 개발 기관인 NASA/JPL 및 UCI 개발자들과 상호방문 및 협력연구를 추진하여 문제해결 시간 단축을 통해 빙상동역학모델 구축 및 안정화 가속화하였으며, 산출된 결과 환류를 통해 ISSM 모델 개선에 기여하였다.

그리고 본 연구에서 구축된 빙상동역학모델 시스템 기반 ITGC(International Thwaites Glacier Collaboration) 스웨이트 빙하 국제공동 연구과제에 참여하여, 서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구를 수행하고 있다 (그림 45). 특히 ITGC에 참여하고 있는 과제 중 Processes, drivers, Prediction: modeling the History and Evolution of Thwaites (PROPHET) 역시 빙상동역학 모델 기반 미래예측 연구를 수행하고 있는데, 이 과제는 빙상-해양 접합모델 기반 미래예측 시나리오 산출을 목표로 하고 있으며 이를 위하여 스웨이트 빙하지역을 대상으로 ISSM, Úa and STREAMICE 세 가지 빙상모델을 MITgcm 해양모델과 접합한 시스템을 이용하여 동시에 미래예측 실험을 수행하고 다중모델(multi-model) 상호비교분석을 통해 미래 예측에 주요한 매개변수와 불확실성을 평가하는 것을 목표로 하고 있다.

International Thwaites Glacier Collaboration

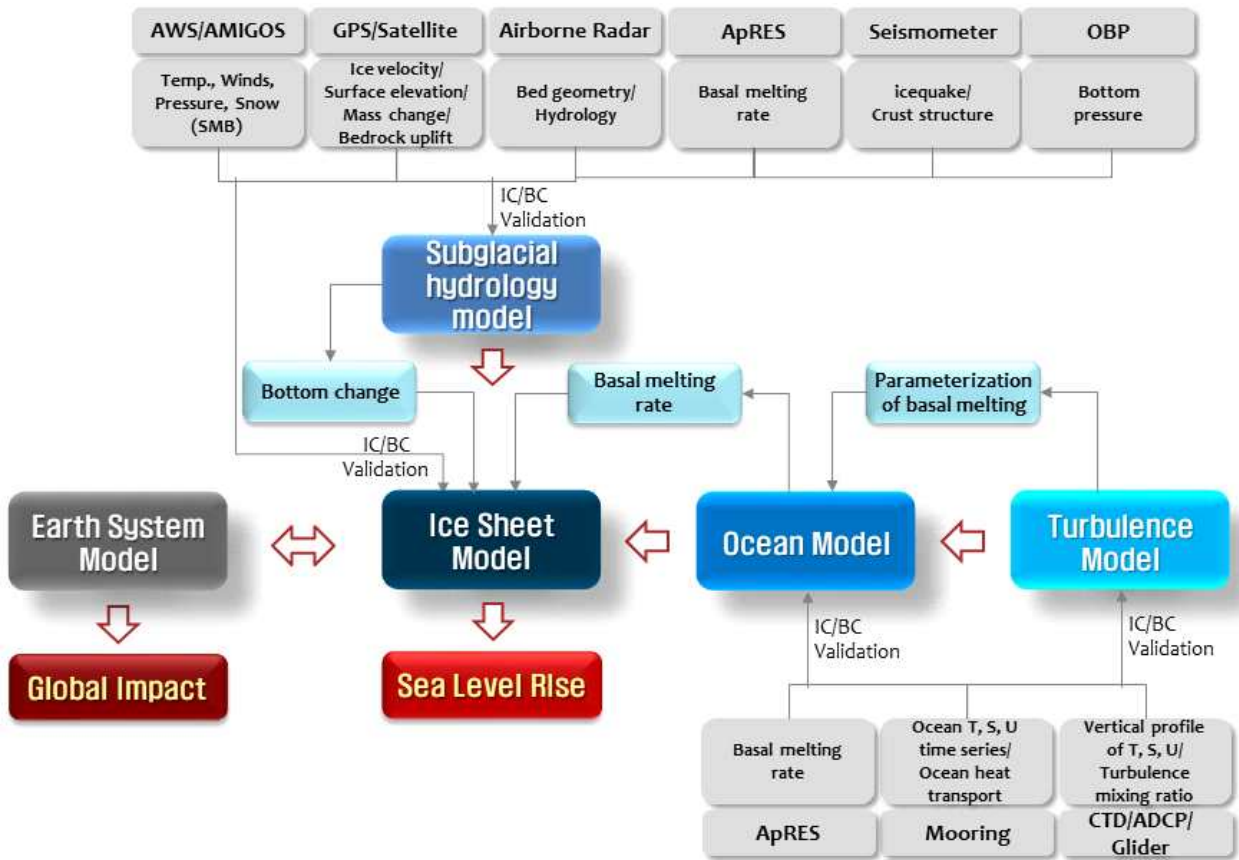


[그림 57] ITGC에 참여하는 과제 상호관계 모식도

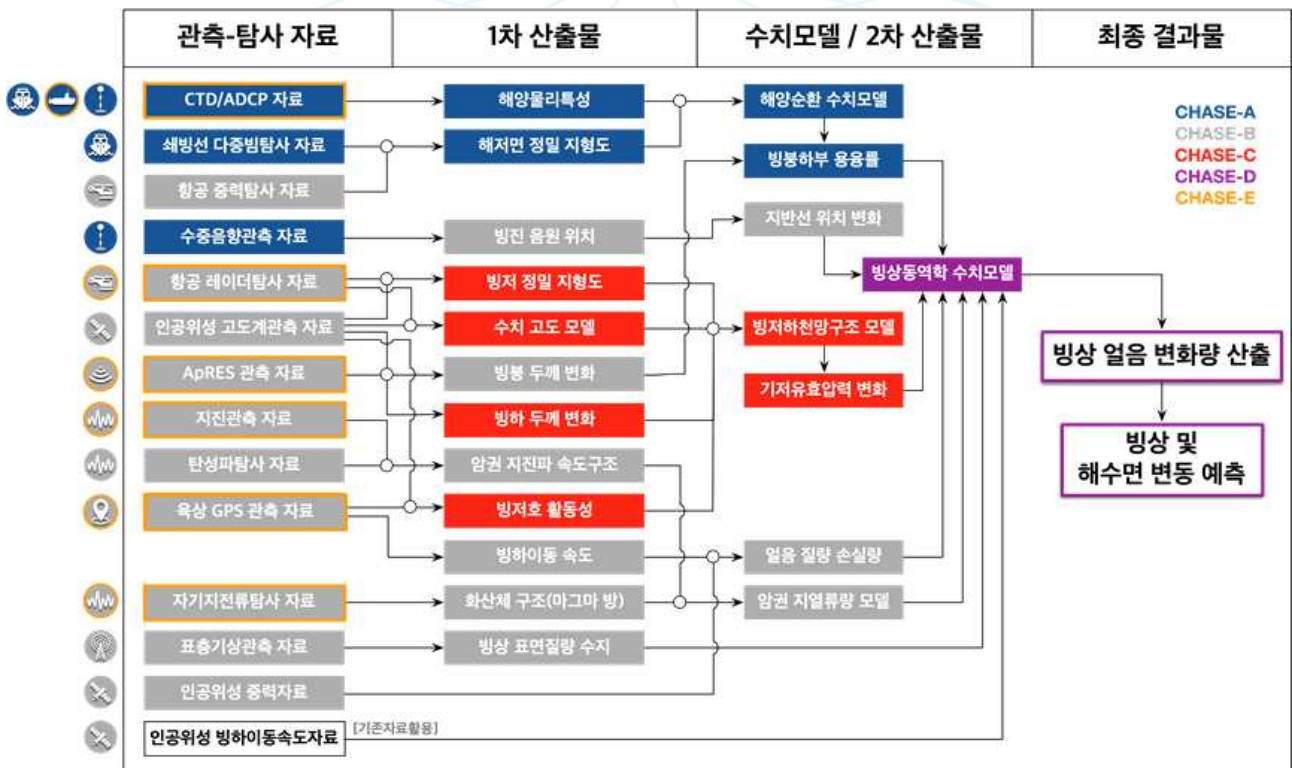


[그림 58] ITGC에 참여하는 과제의 연구 지역

반면, 우리 연구에서는 현장탐사에서 획득한 관측자료, 위성자료, 그리고 빙저하천망 모델 자료 기반 이 지역의 빙상·빙붕 안정도에 대한 이해를 증진하고 ISSM 빙상동역학 모델 시스템의 경계조건 및 강제력인 기저지형, 빙붕하부용융률 및 기저마찰력 미래변화 시나리오를 개선함으로써 예측 틀인 모델 시스템의 신뢰도를 향상시키고 미래예측의 정확도를 제고하는 것을 목표로 한다. 그리고 최종 결과로 스웨이즈 빙하를 중심으로 서남극지역 빙하의 돌발 붕괴 기작을 규명하고 전지구 해수면 상승에 미치는 영향을 평가하며, 스웨이즈 빙하 붕괴에 따른 전 지구 해수면 상승 예측 시나리오를 제시할 것이다.



[그림 59] 빙상동역학 모델 시스템을 활용한 스웨이트 빙하-해수면 변동 연구 모식도



[그림 60] 다학제 과제인 서남극 스웨이트 빙하-해수면 변동 연구 모식도

제 7 장 참고문헌

국립해양조사원, 2018: 해수면 변동 정밀분석 및 예측(10차)

- Arthern, R. J., Winebrenner, D. P., & Vaughan, D. G. (2006). Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(6), 1-10
- Bakker, A. M. R., Wong, T. E., Ruckert, K. L., & Keller, K. (2017). Sea-level projections representing the deeply uncertain contribution of the West Antarctic ice sheet. *Scientific Reports*, 7, 3880. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04134-5>
- Bindschadler, R. A., S. Nowicki, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, C. Kroulev, A. Levermann, W. Lipsomb, M. Martin, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S. Price, D. Ren, F. Saito, T Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker and W. L. Wang (2013) Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project). *Journal of Glaciology* 59 (214), 195-224
- Church, J. A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer, A.S. Unnikrishnan (2013) Sea-level rise by 2100, *Science*, 342 (6165), 1445-1445
- Comiso JC (2000) Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements. *J. Climate*, 13(10), 1674-1696 (doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1674:VATIAS>2.0.CO;2)
- DeConto, R. M. and D. Pollard (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* volume 531, pages 591-597 (31 March 2016) doi:10.1038/nature17145
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization (2016) *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Favier, L., Durand, G., Cornford, S., Gudmundsson, G., Gagliardini, O., Gillet-Chaulet, F., ... Le Brocq, A. (2014). Retreat of Pine Island glacier controlled by marine ice-sheet instability. *Nature Climate Change*, 4(2), 117-121.

- Feldmann, Johannes and Anders Levermann (2015) Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Nov 2015, 112 (46) 14191-14196; DOI: 10.1073/pnas.1512482112
- Fogwill, C. J., C. S. M. Turney, N. R. Golledge, D. M. Etheridge, M. Rubino, D. P. Thornton, A. Baker, J. Woodward, K. Winter, T. D. van Ommen, A. D. Moy, M. A. J. Curran, S. M. Davies, M. E. Weber, M. I. Bird, N. C. Munksgaard, L. Menviel, C. M. Rootes, B. Ellis, H. Millman, J. Vohra, A. Rivera and A. Cooper (2017) Antarctic ice sheet discharge driven by atmosphere-ocean feedbacks at the Last Glacial Termination. *Scientific Reports* volume 7, Article number: 39979 (2017) doi:10.1038/srep39979
- Fretwell P, and 9 others (2013) Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *Cryosphere*, 7(1), 375-393
- Frezzotti, M., and M. C. G. Mabin (1994) 20th century behavior of Drygalski Ice Tongue, Ross Sea, Antarctica, *Ann. Glaciol.*, 20, 397-400
- Fürst JJ, and 6 others (2016) The safety band of Antarctic ice shelves. *Nat. Clim. Change*, 6(5), 479-482
- Howat, I., Morin, P., Porter, C., & Noh, M.-J. (2018). The Reference Elevation Model of Antarctica, VI. *The Cryosphere*, (November), 1-16.
- Huybrechts, P., & Payne, T. (1996) The EISMINT benchmarks for testing ice-sheet models. *Annals of Glaciology*, 23, 1-12. doi:10.3189/S0260305500013197
- IPCC (2013) Summary for policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM), pp. 3- 29. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC (2019) Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.
- Joughin, I., Smith, B. E., & Medley, B. (2014). Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites glacier basin, west Antarctica. *Science*, 344(6185), 735-738.

- Larour, E., Ivins, E. R., & Adhikari, S. (2017). Should coastal planners have concern over where land ice is melting?. *Science Advances*, 3(11), e1700537
- Larour E, Seroussi H, Morlighem M and Rignot E (2012) Continental scale, high order, high spatial resolution, ice sheet modeling using the Ice Sheet System Model (ISSM). *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 117(F1)
- Le Bars D, Drijfhout S, de Vries H (2017) A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. *Environ Res Lett* 12(4):044013
- Lenaerts, J. T. M., Broeke, M. R. Van Den, Déry, S. J., Meijgaard, E. Van, Berg, W. J. Van De, Palm, S. P., & Rodrigo, J. S. (2012). Modeling drifting snow in Antarctica with a regional climate model : 1 . Methods and model evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, 1-17
- Lin, Guang, Engel, David W., & Eslinger, Paul W. (2012) Survey and Evaluate Uncertainty Quantification Methodologies. United States. doi:10.2172/1035732
- MacAyeal, D. (1993) A tutorial on the use of control methods in ice-sheet modeling. *Journal of Glaciology*, 39(131), 91-98. doi:10.3189/S0022143000015744
- Marzeion, B., Kaser, G., Maussion, F., & Champollion, N. (2018). Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(4), 305
- Martin, M. A., A. Levermann, and R. Winkelmann (2015), Comparing ice discharge through West Antarctic Gateways: Weddell vs Amundsen Sea warming, *Cryosphere Discuss.*, 9(2), 1705-1733
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Bitz, C., Chung, C. T. Y. & Teng, H., 2016: Antarctic sea-ice expansion between 2000 and 2014 driven by tropical Pacific decadal climate variability, *Nat. Geosci.*, 9, 590-595
- Morlighem, M., Rignot, E., Binder, T. et al. (2020) Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet, *Nat. Geosci.* 13, 132-137. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0510-8>
- Mouginot, J., Scheuchl, B., & Rignot, E. (2012). Mapping of ice motion in Antarctica using synthetic-aperture radar data. *Remote Sensing*, 4(9), 2753-2767
- Nauels, A., Rogelj, J., Schleussner, C.-F., Meinshausen, M., & Mengel, M. (2017). Linking sea level rise and socioeconomic indicators under the shared socioeconomic

pathways. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114,002

- Nowicki, S. M. J., and Coauthors (2016) Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) contribution to CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 4521-4545
- Nowicki, S., R. Bindshadler, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, E. Bueler, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, C. Kroulev, E. Larour, A. Levermann, W. Lipsomb, M. Martin, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S. Price, E. Rignot, D. Ren, F. Saito, T Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker and W. L. Wang (2013) Insights into spatial sensitivities of ice mass response to environmental change from the SeaRISE ice sheet modeling project I. Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (2), 1002-1024
- Oppenheimer M, Alley R. B. (2016) How high will the seas rise? *Science*, 354, 1375-77
- Palermé, C., Genthon, C., Claud, C., Kay, J. E., Wood, N. B., & L'Ecuyer, T. (2017). Evaluation of current and projected Antarctic precipitation in CMIP5 models. *Climate dynamics*, 48(1-2), 225-239.
- Paolo, F. S., Fricker, H. A., & Padman, L. (2015). Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, 348(6232), 327- 331. <https://doi.org/10.1126/science.aaa0940>
- Parizek, B. R., K. Christianson, S. Anandakrishnan, R. B. Alley, R. T. Walker, R. A. Edwards, D. S. Wolfe, G. T. Bertini, S. K. Rinehart, R. A. Bindshadler and S. M. J. Nowicki (2013) Dynamic (in)stability of 스웨이츠 Glacier, West Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (2), 638-655.
- Payne AJ, Holland PR, Shepherd AP, Rutt IC, Jenkins A and Joughin I (2007) Numerical modeling of ocean-ice interactions under Pine Island Bay' s ice shelf. *J. Geophys. Res.*, 112(C10), C10019 (doi: 10.1029/2006JC003733)
- Payne, A., Huybrechts, P., Abe-Ouchi, A., Calov, R., Fastook, J., Greve, R., . . . Thomassen, M. (2000) Results from the EISMINT model intercomparison: The effects of thermomechanical coupling. *Journal of Glaciology*, 46(153), 227-238. doi:10.3189/172756500781832891
- Price, S. F., Hoffman, M. J., Bonin, J. A., Howat, I. M., Neumann, T., Saba, J., et al. (2017). An ice sheet model validation framework for the Greenland ice sheet. *Geoscientific Model Development*, 10(1), 255-270. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-255-2017>

- Rignot, E., Mouginot, J., Morlighem, M., Seroussi, H., & Scheuchl, B. (2014). Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, west Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters*, 41, 3502–3509
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., van den Broeke, M., van Wessem, M. J., & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(4), 1095–1103.
- Scambos, T. A., Bell, R. E., Alley, R. B., Anandakrishnan, S., Bromwich, D. H., Brunt, K., ... Yager, P. L. (2017). How much, how fast?: A science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites glacier in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 153, 16–34.
- Seroussi H, Morlighem M, Larour E, Rignot E and Khazendar A (2014a) Hydrostatic grounding line parameterization in ice sheet models. *Cryosphere*, 8(6), 2075–2087
- Seroussi H and 6 others (2014b) Sensitivity of the dynamics of Pine Island Glacier, West Antarctica, to climate forcing for the next 50 years. *Cryosphere*, 8(5), 1699–1710 (doi: 10.5194/tc-8-1699-2014)
- Shapiro NM and Ritzwoller MH (2004) Inferring surface heat flux distributions guided by a global seismic model: particular application to Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233(1–2), 213–224
- Shepherd, A., Ivins, E. R., Geruo, A., Barletta, V. R., Bentley, M. J., Bettadpur, S., ... & Horwath, M. (2012). A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, 338(6111), 1183–1189
- Slangen, A. B. A., M. Carson, C. A. Katsman, R. S. W. van de Wal, A. Köhl, L. L. A. Vermeersen, and D. Stammer (2014) Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124, 317–332, doi:10.1007/s10584-014-1080-9
- Tabacco, E., C. Bianchi, M. Chiappini, A. Zirizzotti, E. Zuccheretti (2000) Analysis of bottom morphology of the David Glacier–Drygalski Ice Tongue, East Antarctica, *Ann. Glaciol.*, 30, 47–51
- Wuite J, Jezek K, Wu X, Farness K and Carande R (2009). The velocity field and flow regime of David Glacier and Drygalski Ice Tongue, Antarctica. *Polar Geogr.*, 32(3/4), 111–127 doi: 10.1080/10889370902815499

Yuan, X. (2004a) ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: A synthesis of phenomenon and mechanisms, *Antarct. Sci.*, 16(4), 415-425

Yuan, X., and D. G. Martinson (2000) Antarctic sea ice extent variability and its global connectivity. *J. Climate*, 13, 1697-1717



연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

창의연구사업 구분	신진연구원지원과제		
과제명	빙상동역학 모델 기반 동남극 빙하 미래변화 시나리오 산출의 주요 요소 규명(계정번호: PE19410)	연구기간	2019.04.01. ~ 2019.12.31.
연구책임자	진경 선임연구원	연구비(직접비)	30백만원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제목적</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 빙상동역학모델 시스템을 구축하고 이를 이용하여 산출되는 동남극 빙하 미래변화 시나리오 결과에 큰 영향을 미치는 주요 요소를 규명함으로써, 지구 온난화에 따른 동남극 빙하 변동 기작에 대한 이해 증진 및 빙상동역학 모델의 예측 신뢰도 향상 <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ ISSM 빙상동역학모델 시스템 구축 및 안정화 ○ 빙상동역학 모델을 이용한 동남극 미래변화 실험에서 주요 요소 규명 및 신뢰도 향상 ○ 동남극 빙하 변동성의 특성 및 기작 이해 증진 <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 서남극, 그린랜드 등 다양한 극지역 빙하 기작 이해 및 미래예측에 적용 ○ 동남극 빙하 기작 이해 및 새로운 현장 탐사자료 추가 혹은 모델 업데이트에 대한 민감도 평가에 용이하게 활용 <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
평가의견	반영사항	비고	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 최종 보고서에 본인 연구의 창의성에 대해 구체적으로 기술 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최초로 소내 빙상동역학 모델시스템 구축 및 처음으로 남극 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역을 대상으로 하는 고해상도 ISSM 모델 실험을 수행함. 향후 구축된 시스템을 적극 활용하여 새로운 관측-모델 융합 연구 기획 및 수행 가능 	연구보고서 p.40~42 참조	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 스위트 연구 그룹 중 Prophet과의 차별 내용에 대해 기술 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Prophet은 3 개 빙상-해양 접합모델을 활용한 다중모델 상호비교 기반 산출된 미래 시나리오를 분석하여 미래 불확실성 평가 및 주요 매개변수도출을 위한 연구인데 반해, 우리 과제는 현장탐사 기반 빙상동역학 모델 개선 및 정확도가 제고된 스위트 빙상 붕괴-해수면 상승 미래시나리오 산출이 목표 	연구보고서 p.37 참조	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구 타겟 지역으로 David Glacier를 선택한 이유를 기술 요망 (해당 지역을 대상으로 한 선행연구 존재 여부 기재 필요) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다년간 현장 탐사 기반 획득한 자료를 활용하고자 선정하였음을 명기함 	연구보고서 p.14 참조	

주 의

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