

# 표 지(주요사업)

(뒷면)

(측면)

(앞면)

<p>주 의</p>	<p>B S P E 2 2 3 2 0 - 0 1 4 - 1 2</p> <p>휨 정 도 를 활 용 한 남 극 빙 붕 안 정 성 평 가 방 안 연 구</p> <p>한 국 해 양 연 구 원 부 설 극 지 연 구 소</p>	<p>BSPE22320-014-12</p> <p>휨 정도를 활용한 남극 빙붕 안정성 평가 방안 연구</p> <p>Stability Assessment of Anatarctic Ice Shelves Using Deflection</p> <p>2022. 12. 31</p> <p>한 국 해 양 과 학 기 술 원 부 설 극 지 연 구 소</p>
------------	--	---

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “휩 정도를 활용한 남극 빙붕 안정성 평가 방안 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 12. 31

연구 책임자 : 김 승 희



보고서 초록

과제관리번호	PE22320	해당단계 연구기간	2022.03.01~12.31	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사업명	연구정책사업			
	세부사업명	신진연구원 지원과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	휨 정도를 활용한 남극 빙붕 안정성 평가 방안 연구			
연구책임자	김승희	해당단계 참여연구원 수	총 : 1 명 내부 : 1 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 원격탐사빙권정보센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	33
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연구 목표 : 간단하고 쉬운 남극 빙붕 안정성 평가 방안 도모</li> <li>• 연구 방법 : 빙붕 표면에서 휨 특성 도출 및 유효두께 계산             <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 오일러-베르누이 빔 공식 기반 지반접지선 이후 발생하는 휨 파장 길이 산출</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 산출된 파장 길이로부터 휨 정도를 야기하는 유효두께 계산</li> </ul> </li> <li>• 연구 결과 : 남극 빙붕 4곳 적용             <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Conger Glacier : 유효두께 298m, 측정두께 2,742m, 두께비율 0.11</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Mertz Glacier : 유효두께 293m, 측정두께 1,123m, 두께비율 0.26</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Drygalski Ice Tongue : 유효두께 315m, 측정두께 1,152m, 두께비율 0.27</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Thwaites Glacier : 최소 두께비율 0.06, 최대 두께비율 0.17</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 남극 빙붕 안정성 평가 방법 특허 출원 : ‘극지역의 빙붕 안정성 평가 방법 및 이를 위한 장치’</li> </ul> </li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	남극, 빙붕, 두께, 휨, 안정성, 평가			
	영 어	Antarctica, Ice Shelf, Thickness, Flexure, Stability, Assessment			

# 요 약 문

## I. 제 목

휨 정도를 활용한 남극 빙붕 안정성 평가 방안 연구.

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

빙붕의 물리적 특성인 휨 정도를 이용하여 신속하고 직관적인 남극 빙붕의 안정성을 평가할 수 있는 방안을 제안하고자 함.

최근 다양한 연구 결과로 남극 빙붕 붕괴 위험의 증가를 확인하였으나 장기간 관측 자료 확보 및 분석이 필요하여 남극 전 지역을 조사하기엔 현실적으로 불가능한 상황임. 최근 기후/환경 변화의 신속한 대응을 필요하기에 직관적이고 간단한 안정성 평가 방안 필요함.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 빙붕의 휨 정도 특성 이해
2. 빙붕의 유효두께 산출
3. Test site 선정 및 적용

## IV. 연구개발결과

Flexure, deflection 등 빙붕의 휨과 관련된 기존 연구들을 분석하고 오일러-베르누이 빔 공식을 활용하여 휨 특성 이론 정리.

휨 정도를 도출 가능한 물리 특성 중 지반접지선 이후의 최저/최고 점 사이 거리를 활용하여 휨 정도를 야기하는 유효두께 산출 식 확보.

NASA의 Operation IceBridge 현장관측 자료를 활용하여 총 4 곳의 빙붕의 유효두께를 산출하고 Bedmap2에서 제공하는 측정두께와 비교.

안정성 평가 방법 관련 특허 출원.

## V. 연구개발결과의 활용계획

빙붕 휨 특성 활용 유효두께 산출 공식의 고도화.

남극 전역의 빙붕 유효두께 계산 및 측정두께와 비교를 통한 안정성 평가 지수 제안.

다양한 변수들의 유효두께에 끼치는 영향성 평가

# S U M M A R Y

## **I. Title**

Stability Assessment of Antarctic Ice Shelves Using Deflection

## **II. Purpose and Necessity of R&D**

The objective is to introduce a simple and novel method to assess the stability of Antarctic ice shelves based on surface deflection.

## **III. Contents and Extent of R&D**

1. Understand the characteristics of surface deflection of Antarctic ice shelves
2. Develop an equation to calculate the effective thickness which causes the surface deflection
3. Select test sites in Antarctica, calculate the effective thickness and compare it with the measured thickness

## **IV. R&D Results**

Previous research regarding ice shelf deflection were analyzed.

Euler-Bernoulli beam theory was exploited to derive the relationship between the surface deflection and physical property of ice shelf.

The location and distance of local minimum and maximum in the vicinity of the grounding line, related to the buoyancy length scale, was used to calculate the effective thickness.

The relationship was applied to NASA's Operation IceBridge dataset, collected from four different ice shelves in Antarctica. Finally, the effective thickness was compared with the measured thickness extracted from Bedmap2.

## **V. Application Plans of R&D Results**

Improving the calculation for effective thickness by incorporating ice shelf deflection properties.

Evaluating the correlation between calculated and measured thicknesses of ice shelves in Antarctica to suggest a stability index.

Assessing the effects of various factors on the determination of effective thickness.

# 목 차

## 제 1 장 서론

- 1 절 연구개발 목적
- 2 절 연구개발 필요성

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1 절 국외 기술개발 현황
- 2 절 국내 기술개발 현황

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 1 절 빙붕의 휨 정도 특성 정리 및 도출 방안 분석
- 2 절 휨 정도 활용 빙붕 유효두께 산출
- 3 절 Test Site 선정 및 실제두께와 유효두께 비교
- 4 절 특허 출원

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

## 제 6 장 참고문헌

연구 정책 지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

# 제 1 장. 서론

## 1 절. 연구개발 목적

빙붕의 물리적 특성인 휨 정도를 이용하여 신속하고 직관적인 남극 빙붕 안정성 평가 방안 제안

## 2 절. 연구개발 필요성

### □ 기술적 측면

- 인공위성과 항공기를 활용한 원격탐사 기술의 발전으로 남극 빙붕 붕괴 위험 증가 확인함.
- 원격탐사 해상도 및 센서 기술 개발로 미시 관측 및 극지 현장 접근성이 매우 높아졌으나, 방대한 자료와 종합적인 분석이 요구됨.
- 인공위성의 장기간 관측 및 분석 결과와 최근 확보된 자료들의 정리 및 통합을 보완할 수 있는 기준이 필요함.

### □ 경제.산업적 측면

- 기술 발전과 관심 증가로 남극 기지, 수중 드론, 헬기, 쇄빙선 등 다양한 인프라를 활용한 현장조사가 남극에서 진행되고 있음.
- 남극 전 지역을 조사하기엔 현실적으로 불가능한 상황이며, 기후 변화의 선제적 대응 및 현장 조사 비용 절감을 위해 적제적소의 현장 조사 지역 선정 및 투입 필요함.
- 극지연구소가 선점할 수 있는 적절한 현장 조사 지역 선정을 위한 기준이 필요함.

### □ 과학적 측면

- 남극 빙붕 안정성은 원격탐사를 활용한 장기 모니터링과 분석 결과에 의존하고 있음.
- 최근 기후/환경 변화에 의한 급격한 빙붕 붕괴 위험성이 대두되고 있으며, 따라서 장기적인 관측보다 신속한 대응이 가능할 수 있는 빙붕의 물리적 이해가 필요함.

### □ 사회.문화적 측면

- 두께, 속도, 지반선후퇴 등 현재 사용되고 있는 분석 결과는 역학과 피드백의 이해가 필요한 부분으로 직관적인 설명이 어려움.
- 세계적으로도 기후변화 대응을 위한 정책 입안과 대중 이해를 위해 IPCC 평가보고서 내 'Summary for Policymakers' 처럼 직관적이고 쉬운 언어를 사용한 설명의 필요성이 증가함.
- 간단하고 쉬운 설명을 위해 새롭고 간단한 결과 필요함.

## 제 2 장. 국내외 기술개발 현황

인공위성, 항공기, 무인잠수정 등을 활용한 원격탐사 기술은 지속적으로 발전되어 왔다. 기술 개발은 위성이나 항공기 영상들의 해상도 발전 및 다중센서 기술 개발로 인하여 미시적인 관측과 극지 현장 접근성이 매우 높아지는 성과를 나타냈다. 최근 획득된 자료의 분석 결과는 남극 빙붕, 특히 서남극 빙붕들의 안정성을 경고하고 있다. 주로 빙붕의 지반접지선 위치 추정 및 해저지형의 특성으로 인하여 Circumpolar Deep Water가 유입됨으로 인하여 발생하는 지반접지선 후퇴에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 지반접지선 후퇴로 인하여 빙하의 이동속도가 증가하고 따라서 빙붕의 두께가 감소하는 현상을 탐지하는 원격탐사 연구들이 진행 되었다. 하지만, 이러한 연구 및 분석 결과들은 장기간 관측으로 인한 방대한 자료의 종합적인 분석이 요구된다. 또한 최근 다양한 센서들로부터 확보된 데이터들의 정리 및 통합이 이루어져야 과거 결과의 보완 및 빙붕의 미래 안정성을 평가할 수 있을 것으로 보인다.

### 1 절. 국외 기술개발 현황

#### □ 레이더 고도계 자료를 활용한 남극 빙붕 부피 손실 가속화 분석

○ 레이더 고도계 위성은 약 20년동안 여러 위성 시리즈 운영을 통하여 시공간 자료를 축적하였으며 레이더 고도계 위성 자료의 시계열 분석을 통해 남극 빙붕의 표면 고도 변화를 분석하여 빙붕의 질량 감소 속도가 최근 빨라지고 있는 것을 확인함 (Paolo et al., 2015).

#### □ 영상레이더 위성자료를 활용한 남극 빙붕 지반접지선 후퇴 분석

○ 영상레이더 위성영상의 차분간섭기법(Interferometry)를 활용하면 빙붕의 지반접지선 위치를 추정할 수 있으며 시계열 분석을 통해 서남극에 위치한 빙붕들의 지반접지선 후퇴 경향을 분석함 (Milillo et al., 2022).

#### □ ICESat 레이저 고도계를 사용한 남극 빙붕 얼음 평원 분석

○ ICESat 레이저 고도계 자료의 중첩하여 남극 Filchner-Ronne 빙붕의 지반접지선 추정함 (Brunt et al., 2011).

#### □ AUV(Autonomous Underwater Vehicle)를 활용한 남극 빙붕 지반접지선 후퇴 분석

○ Thwaites 빙붕 하단에서 확보된 AUV자료를 바탕으로 해수온도와 염분 등을 분석하였으며 서남극에 위치한 빙붕들의 안정성에 가장 크게 영향을 끼치는 요소로 알려진

Circumpolar Deep Water의 해저지형에 따른 이동 경로를 분석함 (Wåhlin et al., 2021).

## 2 절. 국내 기술개발 현황

□ 다중위성 원격탐사를 활용한 A-68 빙하 붕괴 모니터링 및 분석

○ 남극 반도에 위치한 Larsen C 빙붕으로부터 2017년에 분리된 A-68 빙산의 위치, 면적, 회전과 붕괴의 시계열 분석을 위해 Sentinel-1 영상레이더 위성과 CryoSat-2 레이더 고도계 위성자료를 종합적으로 활용함 (Han et al., 2019).

□ 남극 Thwaites Glacier 고해상도 수치고도모델 제작 기술 개발 및 지반선 추정

○ TanDEM-X/TerraSAR-X 영상레이더 위성과 CryoSat-2 레이더고도계 자료를 융합하여 지속적으로 변화하는 남극 빙하 표면의 고해상도 수치고도모델을 제작하였으며 이를 활용하여 Thwaites Glacier의 지반선 추정 및 변화 모니터링 함 (Kim and Kim, 2017).

□ 남극 빙붕의 국부 접지 (local grounding) 으로 인한 표면 변형 연구

○ 해수에 떠 있는 빙붕이 얇은 수심에 위치한 해저산과 국부 접지하는 정도에 따라 빙붕 표면 변형(deformation)과 빙붕의 흐름 속도가 변경됨. 화산 마그마 실의 크기에 따라 발생하는 표면 변형 모델을 활용하여 접지 위치 및 변화량 추정함 (Kim et al., 2018).

□ 북극 보퍼트해 해빙 상태에 따른 영상레이더 후방산란 특성 분석

○ 영상레이더 후방산란계수를 활용해 해빙 표면 거칠기 및 수분함류량 등을 추정할 수 있으며 지속적으로 움직이는 해빙을 부이를 이용하여 추적 및 시계열 분석함 (Kim et al., 2020).

## 제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

### 1 절. 빙붕의 휨 정도 특성 정리 및 도출 방안 분석

#### ○ 남극 빙붕 휨 (flexure, tidal deflection 등) 관련 기존 연구 분석

빙붕의 휨은 크게 두 가지 환경에서 발생할 수 있다. 첫 번째 환경은 빙붕이 해저 지반과 만나는 지반 접지 상태에서 해수 부력의 영향을 받는 상태로 변하는 과정에서 발생하며 두 번째 환경은 빙붕이 해수 부력에 의해 떠 있는 상태에서 조수 차이로 인한 위-아래 움직임이 발생하며 발생한다. 두 가지 환경 모두 얼음이 지반에 접지한 상태에서는 수직 방향 변화가 없다가 접하지 않은 상태에서는 수직 변위가 발생하기 때문에 휨이 발생한다. 첫 번째 환경은 stationary 한 상태로써 수십~수km 두께의 얼음이 부력으로 인하여 떠 있으며 시간에 따른 변화가 거의 없다. 두 번째 환경은 periodic movement를 갖는 elastic 한 성격을 갖으며 수cm에서 수m 조수 간만 차이로 인하여 미세한 수직 변위 (tidal displacement)을 갖는다.

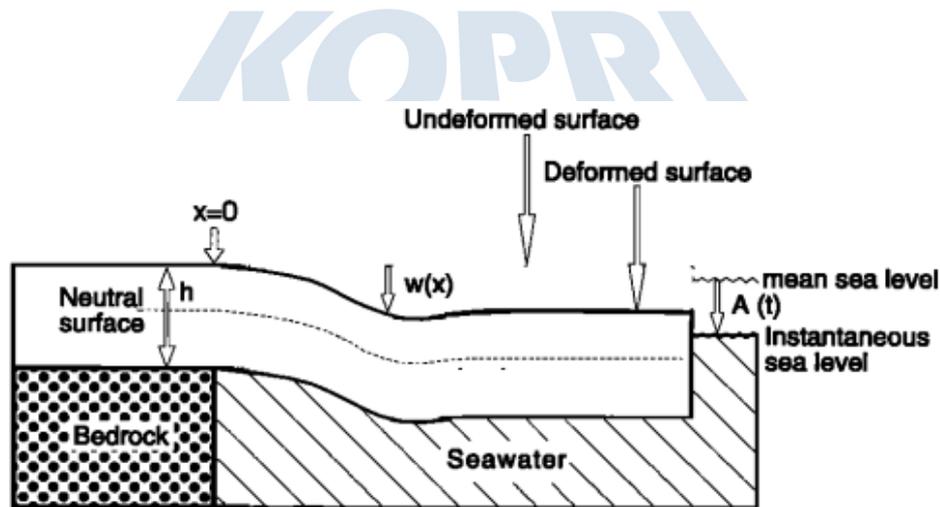


그림 2 조수 간만 차이로 인하여 발생하는 수직 변위

기존 연구들은 대부분 조수 간만 차이로 인하여 발생하는 미세한 움직임을 관측하고 이를 활용하여 빙붕의 지반접지선 추적에 사용하였다. 먼저 Vaughan (1995)은 조수 차이로 인하여 발생하는 남극 빙의 수직 변위와 관련된 연구들의 기준으로서 Rutford Ice Stream과 Ronne Ice Shelf 표면에 GPS 장비들을 설치하여 조수 높이에 따라 지반접지선 이후의 표면 고도 변화를 처음으로 관측하고 분석하였다. 관측된 표면 고도 변화는 탄성 빔 모델(elastic beam model)을 이용하여 설명이 가능한 것이 밝혀졌으며 다른 남극의 빙붕과 그린란드의 Jakobshavns Glacier에도 적용되는 것을 확인하였다. 마지막으로 탄성 빔 모델에 사용되는 탄성 계수(elastic modulus)는 0.88 GPa가 적절하다고 결론지었다.

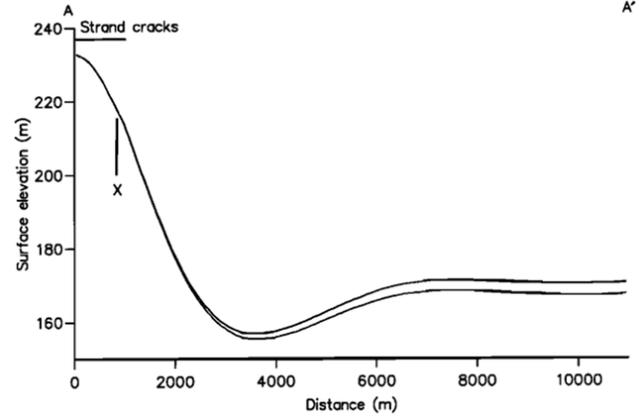
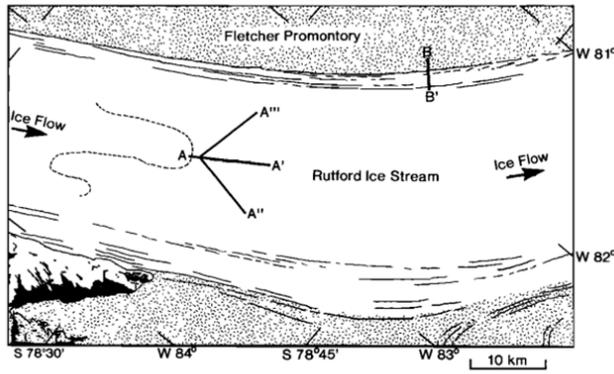


그림 3 (좌) Rutford Ice Stream 에 설치된 GPS 위치 (우) 조수 간만에 따른 표면 고도 프로파일 변화

이후 빙봉의 수직 변위는 주로 위성고도계(altimeter)와 영상레이더(synthetic aperture radar)를 각각 사용한 두 가지 방법으로 관측 및 분석되었다. Fricker and Padman (2006)은 ICESat 위성고도계를 사용하여 빙봉의 표면을 연속 관측하고 조수 간만의 차이로 인하여 발생한 수직 변위를 측정하였다. 그 결과 지반접지선 근처 빙봉 표면 고도 프로파일에서 4 개의 주요특성을 확인할 수 있었다.

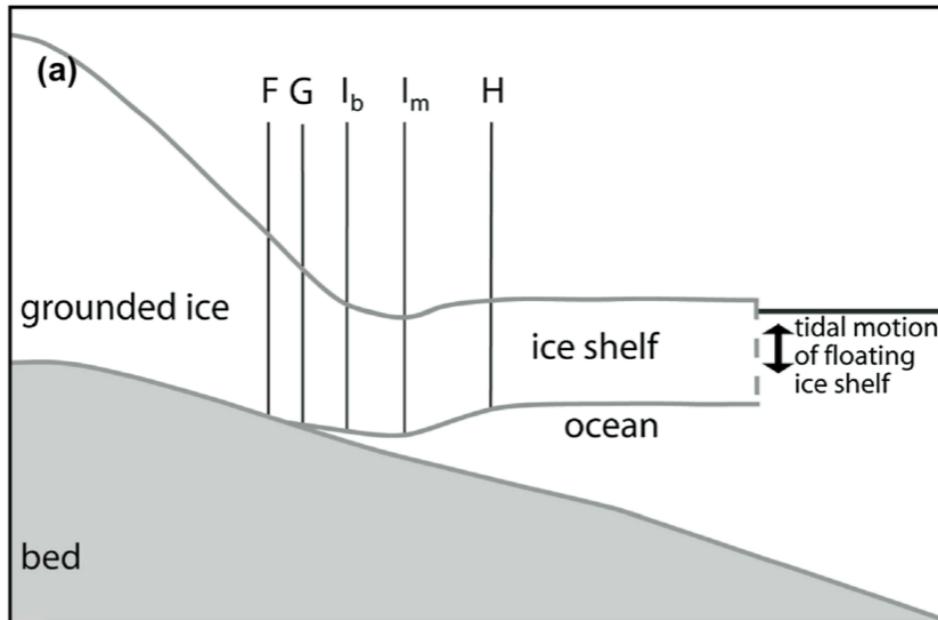


그림 4 지반접지선 근처 얼음의 단면과 표면 고도 프로파일에서 확인할 수 있는 특성 위치 (Fricker 외, 2009)

먼저 지반접지선 근처 얼음 표면 고도의 프로파일에서 확인할 수 있는 특성들은 다음과 같다. 그림4의 F와 H는 각각 수직 변위 변화의 시작과 끝점을 나타내며 점 사이 공간은 hinge zone으로 불린다. I<sub>b</sub>와 I<sub>m</sub>은 표면 고도 프로파일의 변곡점과 최소점을 나타낸다. G는

수직 변위 변화 시작점과 변곡점 사이에 위치하는 지반접지선을 나타낸다.

표면 고도 프로파일에서 확인할 수 있는 주요 특성들은 얼음이 지반접지선을 지나며 해수의 부력으로 인하여 뜨기 시작하며 발생하는 휨 정도이며 시간에 따른 변화가 거의 없다.

Fricker and Padman (2006)은 Ronne Ice Shelf에 위치한 Institute Ice Stream의 지반접지선을 관통하는 ICESat 위성고도계 연속 자료를 수집하고 평균 고도에서 이상값(anomaly)을 추출하여 hinge zone사이에 발생하는 수직 변위를 관측하였다. 그 결과 관측된 수직 변위 값이 위성관측시간에 예측된 CATS2008 조석모델 값과 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 특히 모든 고도계 프로파일 자료에서 표면 특성들을 관측할 수 있었으며 MODIS 광학 영상과 동시 판독을 통해 지반접지선의 위치를 파악하였다.

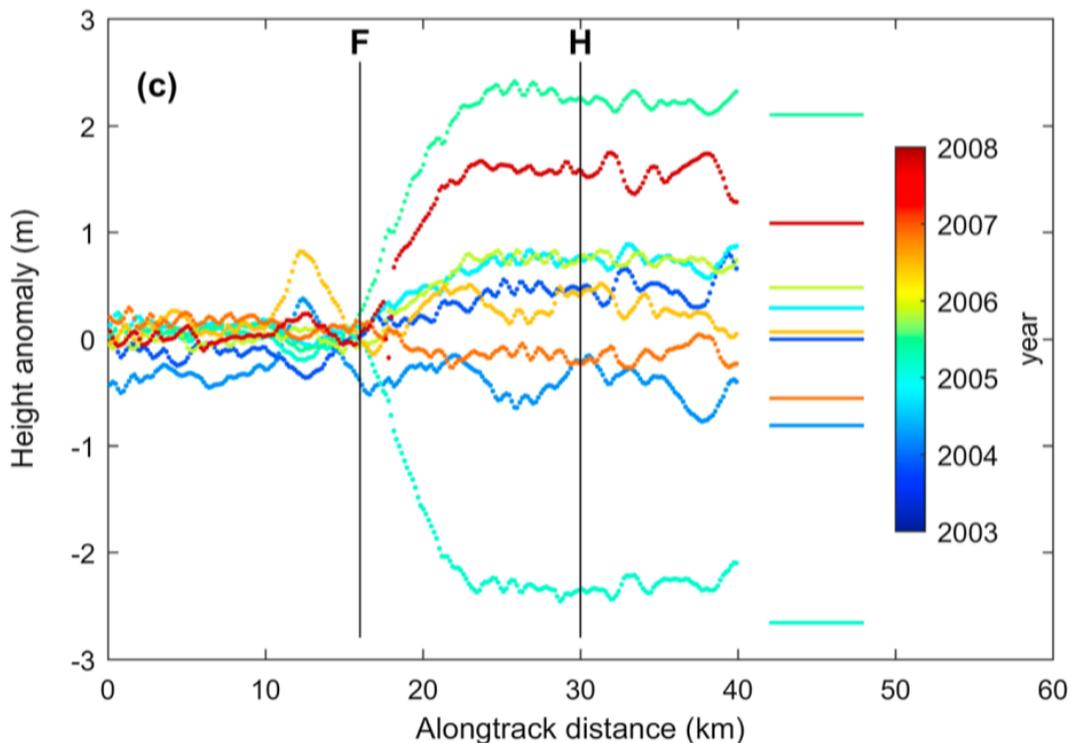


그림 5 연속으로 관측된 ICESat 고도계 자료에서 추출한 표면 고도 이상값 (anomaly) (Fricker and Padman, 2006)

영상레이더의 간섭기법(Interferometry)은 얼음의 흐르는 속도와 수직 변위 등 표면 변형을 mm단위까지 관측 가능한 방법이다 (Goldstein 외, 1993). 특히, 간섭영상 간 차이를 구하는 차분 간섭 기법(Differential Interferometry)을 활용하면 조수 간만의 차이로 인하여 발생하는 수직 변위 간 차이가 hinge zone에서 간섭무늬(fringe) 형태 발생하여 매우 정확하게 관측할 수 있다 (Rignot 외, 2011). 간섭무늬(fringe)의 시작과 끝점은 위 F와 H 위치와 근접하며 보통 무늬의 시작점을 지반접지선으로 정의하고 있다. 이를 활용하여 남극 전역에 위치한 빙봉의 지반접지선을 제작하였다 (Rignot 외, 2016)

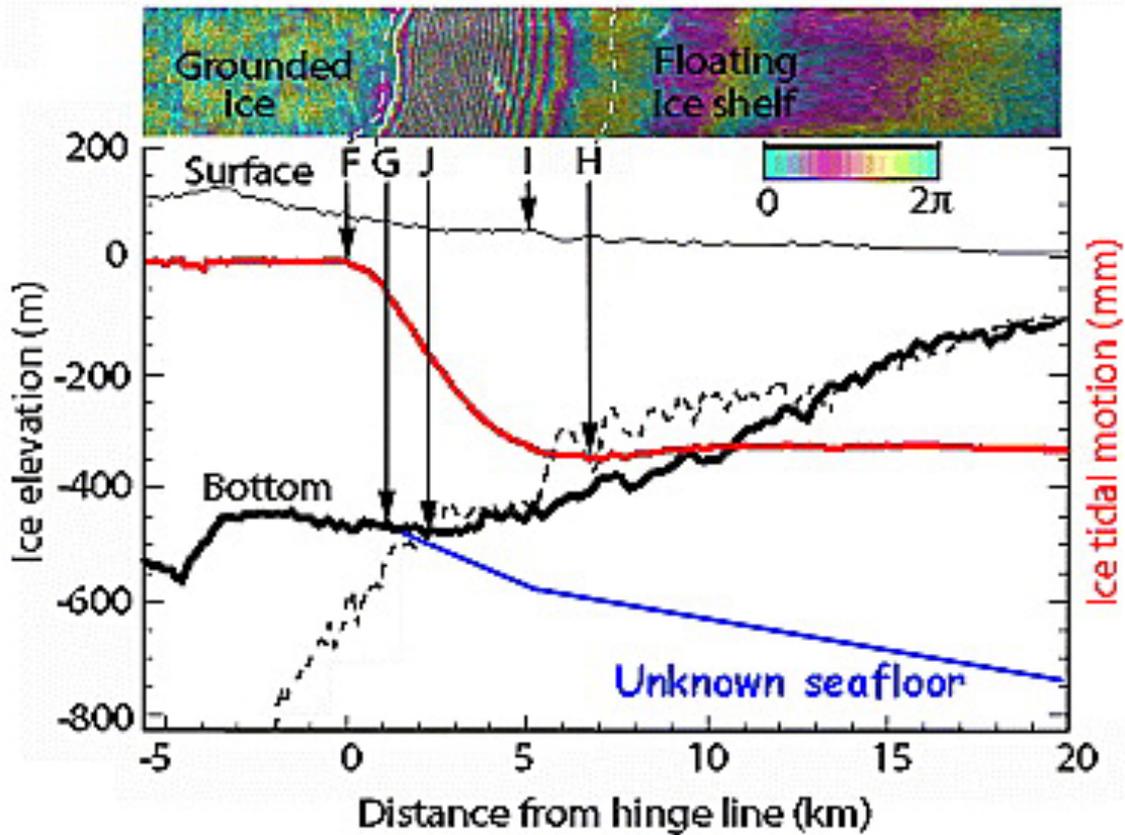


그림 6 영상레이더 간섭기법을 활용한 빙붕의 힘 특성 및 지반접지선 추정 (Rignot 외, 2011)

이처럼 남극 빙붕 발생하는 힘 특성은 지반접지선 위치 및 얼음 특성을 결정하기 위해서 사용되어왔다. 하지만 얼음의 실제 유동학적 특성은 점탄성(viscoelastic)하기 때문에 선형 탄성 빔 모델(elastic beam model)과는 차이가 있다. Rosier 외(2017)는 McMurdo Ice Shelf 지역에서 영상레이더의 차분 간섭 기법과 점탄성모델(full-Stokes viscoelastic model)을 사용하여 얼음의 밀도, 크레바스, Young's Modulus 값을 분석하였다. 그 결과 얼음에 존재하는 크레바스로 인하여 Young's Modulus 값이 최대 200% 차이를 보일 수 있다는 것을 밝혀냈다. 하지만 실제로 얼음의 Young's Modulus 값이 변하지는 않기 때문에 크레바스로 인한 얼음의 밀도 변화 및 강성 변화를 고려해야 한다고 주장하였다. 또한 선형 탄성 빔 모델이 실제 물리와는 거리가 있음에도 점탄성모델과 비슷한 결과를 도출함을 확인하였다.

## 2 절. 힘 정도 활용 빙붕 유효두께 산출

### ○ 힘 정도 특성 관련 이론 정리

힘 정도를 설명하기 위해 얼음이 linear elastic material 선형탄성물질의 성격을 갖는 것으로 가정하였다. 즉, 하중이 제거된 후에 원래 모양으로 돌아가는 탄성 거동을 한다는 것을 의미

한다. 또한 얼음의 길이가 두께에 비해 매우 큰 상황을 가정하였다. 얼음의 변형 (휨) 정도를 설명하기 위해 처짐 선도(deflection diagram)로 나타낼 수 있으며 얼음 단면의 중립축에서의 힘을 나타낸다. 흔히 탄성 곡선(elastic curve)라고도 한다. 모멘트의 부호가 변하는 지점을 변곡점(inflection point)이라 한다.

오일러-베르누이 보 이론(Euler-Bernoulli Beam)은 이러한 선형탄성물질의 휨 정도를 아래 식으로 설명한다 (Vaughan, 1995).

$$Dw'''' = p(x) = -\rho_i gh + \rho_w g(T/2 - w) \quad (1)$$

여기서  $p(x)$ 는 물질에 가해지는 힘의 크기를 나타내며 지반 위에서는 지반이 떠받고 있는 힘이 얼음 무게에 의한 중력과 발란스를 이루고 있다가 바다로 얼음이 나오며 수면 아래로 들어가는 얼음의 부피에 해당되는 부력으로 인하여 힘의 크기가 달라진다.  $\rho_{i,w}$  는 각각 얼음과 해수의 밀도를 나타내며,  $g$ 는 중력가속도,  $T$ 는 얼음 두께,  $D$ 는 얼음의 강성(rigidity)를 나타내며 아래와 같이 두께에 비례한다.

$$D = \frac{ET^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

$E$ 는 Young's Modulus로 주로 남극의 빙봉은 1.5 GPa 또는 0.88 GPa 로 알려져 있으며  $\nu$ 는 팽아송 비율(Poisson's Ratio)이다.

4차 선형미분방정식(1)을 풀기 위해서 아래의 경계조건들이 필요하다.

- (i)  $w(x_g) = w'(x_g) = w''(x_g) = w'''(x_g) = 0$
- (ii)  $w(x_t) = h/2 - Sx_t$
- (iii)  $w''(x_t) = w'''(x_t) = 0$

$x_g$ 는 지반접지선 위치를 나타내며  $x_t$ 는 빙봉의 끝단을 나타낸다. 위 경계조건들은 지반접지선을 지나는 빙봉 표면 고도, 기울기, 휨 모멘트, 전단력이 연속적이라는 점과 지반접지선의 위치에서는 얼음이 접지한 상태라는 것, 마지막으로 빙봉 끝단은 무한하다는 것을 의미한다. 경계조건들이 적용된 미분방정식의 해는 homongeous와 particular식의 합으로 풀이된다.

$$w(x) = w_h(x) + w_p(x) \quad (3)$$

$$w_p = 1/2 - \rho_{iw} \text{ where } \rho_{iw} = \rho_i / \rho_w \quad (4)$$

$$w_h = 1/2 - \rho_{iw} + e^{-\gamma_1(x-x_g)} \quad (5)$$

$$[(\rho_{iw} - Sx_g/T)\cos(\gamma_1(x-x_g)) - \frac{\sin[\gamma_1(x-x_g)]}{1+\gamma_1/\gamma_0} [\frac{\gamma_0^2 \rho_w g}{\gamma_1^2 k_0} + \frac{\gamma_1}{\gamma_0} (\rho_{iw} - Sx_g/T)]]$$

여기서  $k_0$ 은 지반의 반응계수를 나타내며 딱딱할수록 높은 값을 갖는다.  $\gamma_i$ 는 지반접지상태(1)와 물에 떠 있는 상태(2)의 계수들을 나타내며 아래 식으로 표현한다.

$$\gamma_0 = 1/\sqrt{2}(k_0/D)^{1/4} \quad (6)$$

$$\gamma_1 = 1/l\sqrt{2} \quad (7)$$

여기서  $l$ 은 빙붕의 강성과 부력에 기초한 bending-buoyancy length scale 파장을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$l = (\frac{D}{\rho_w g})^{1/4} \quad (8)$$

식(4)는 물에 자유롭게 떠 있는 얼음을 나타내며 식(5)는 빙붕의 끝단이 무한대로 변할수록 기하급수적으로 감소하는 진동 성분을 뜻한다. 즉 식(5) 진동 성분으로 인하여 지반접지선 근처에서 힘 특성이 발생하며 지반접지선에서 멀어질수록 힘 특성이 사라지는 것을 의미한다.

빙붕 두께 변화에 따른 힘 정도 변화를 시뮬레이션 하였다 (그림7). 빙붕의 두께는 100 ~ 2000m 사이로 가정하였으며 해수 밀도와 중력 가속도는 각각  $1,027\text{kgm}^{-3}$ 와  $9.81\text{ms}^{-2}$ 를 사용하였고 Young's Modulus는 1.5 GPa로 적용 하였다. 뺨아송 비율은 0.3 값을 적용하였다.

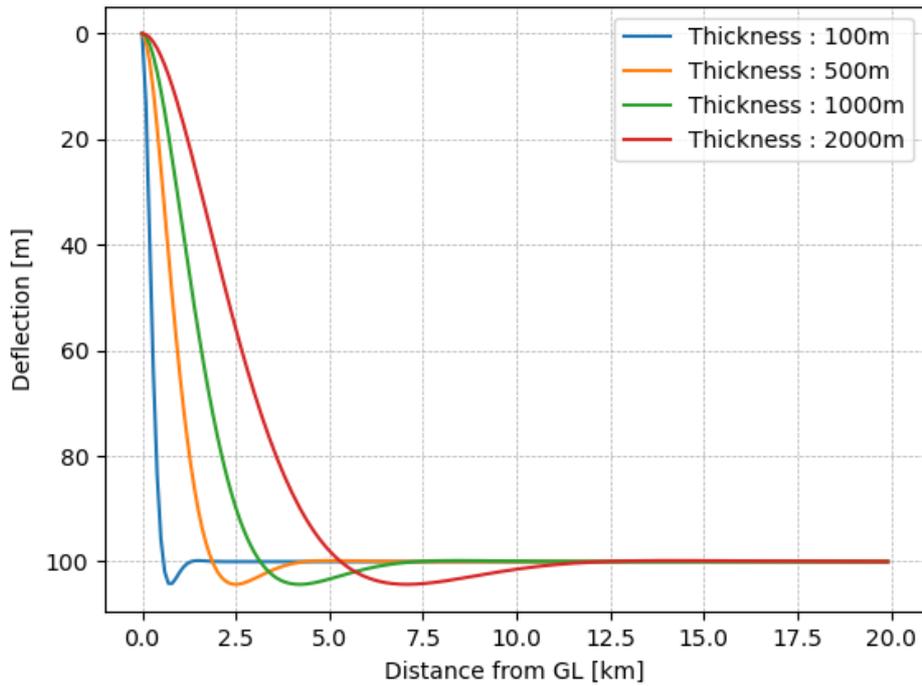


그림 7 빙붕 두께 변화에 따른 휨 정도 변화

빙붕의 두께가 변함으로 bending-buoyancy length scale, 즉 휨 정도의 파장이 길어지는 것을 확인하였다. 또한 파장이 길어짐에 따라 최대 휨 크기(amplitude)의 위치도 지반접지선으로부터 멀어지는 것을 확인하였다. 하지만 최대 휨 크기는 두께 변화로부터 독립적이었다. 이는 이전 조수간만의 높이 차이와 영상레이더 차분간섭기법이나 위성고도계에서 확인할 수 있는 빙붕의 높이 변화가 거의 일치하는 결과에서도 확인할 수 있다. 따라서 휨 특성차이를 지표면이 빙붕을 받치는 힘과 부력으로 인하여 얼음이 뜨는 힘의 차이를 계산한다면 최대 휨 크기도 확인할 수 있을 것으로 기대한다.

지반접지선 근처에서 발생하는 휨 특성을 나타내는 식(5)로부터 물리적 성격을 도출하고자 하였다. 식(5)의 진동은 bending-buoyancy length scale인  $l$ 과 밀접한 관계를 갖고 있으며 식(5)의 국소 최소값과 최대값을 구하고 그 사이의 거리( $d_{mm}$ )는 다음의 식으로 표현된다.

$$d_{mm} = l\sqrt{2}\pi \quad (9)$$

위 식들을 유효 두께( $T_{eff}$ )에 대한 식으로 풀어쓰면 다음과 같다.

$$T_{eff} = \left[ \frac{12(1-\nu^2)}{E} \rho_w g \left( \frac{\sqrt{2}d_{mm}}{2\pi} \right)^4 \right]^{1/3} \quad (10)$$

즉, 유효 두께( $T_{eff}$ )는 해수에 의해 부력을 갖는 빙봉의 표면 굴곡인 휨 정도에 따라 산출될 수 있다.

### 3 절. Test Site 선정 및 실제두께와 유효두께 비교

앞서 산출된 빙봉의 유효 두께( $T_{eff}$ )는 관측 장비에 의해 측정된 빙봉의 측정 두께( $T_{mea}$ )에 기초하여 빙봉의 안정성을 평가할 수 있는 지수를 제안할 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구에서는 아래처럼 간단하게 빙봉의 유효 두께를 측정 두께로 나눈 값을 안정성 지수로 정하고 남극 전역에서 4개의 연구 지역을 선정하여 계산하였다.

$$ASS = \frac{T_{eff}}{T_{mea}} \quad (11)$$

첫 번째 지역인 Conger 빙봉은 동남극에 위치한 Shackleton Ice Shelf 동쪽에 위치한 미국의 Los Angeles 정도의 면적을 갖는 작은 빙봉으로 2022년 3월에 갑자기 붕괴하였다 (Ramirez et al., 2022). 붕괴를 야기한 원인으로는 평균보다 약 섭씨 40도 정도 높았던 기온 때문에 Larsen Ice Shelf 붕괴때처럼 표면이 급격하게 녹았기 때문으로 보인다. 풍속 또한 높았기 때문에 빙봉 주변에 해빙이 형성되지 않은 것도 원인 중 하나로 보인다.

두 번째 지역은 동남극 George V Coast 에 위치한 Mertz Glacier (67°30'S 144°45'E)로 약 80km 길이를 갖는 빙설(ice tongue)이 형성되어 있다. 지반접지선부터 약 80km 정도 길이를 갖지만 피오르드 지형의 특성으로 인하여 약 20km 정도만 바다로 돌출되어 있다. 2010년에 calving이 일어나 약 70km 길이의 C-28로 명명된 대형 빙산이 생성되었다. 빙봉이 바다 방향으로 전진하는 속도가 약 1km임은 감안하였을 때 70년 정도 안정적으로 빙봉이 전진한 것으로 유추할 수 있다.

세 번째 지역은 남극 장보고 기지가 위치한 테라노바만(Terra Nova Bay)의 Drygalski Ice Tongue(또는 Drygalski Glacier Tongue)로 약 70km 길이를 갖는다. 특별한 이벤트가 없으며 주기적으로 calving이 발생하는 비교적 안정적인 빙하로 알려져 있다. 주변에 정착빙이 매년 형성되며 강한 활강풍으로 인하여 폴리냐도 매년 형성된다.

마지막 지역은 서남극에 위치한 Thwaites Glacier로 현재 가장 위험한 빙봉으로 분류되고 있으며 2000년대 후반부터 많은 연구자들의 관심을 받고 있기 때문에 다양하고 방대한 현장 자료가 확보 되어있다. 빙하가 바다로 흘러들어 형성된 빙설은 동쪽과 서쪽으로 나뉘어지며 2000년 후반 대비 2022년에는 서쪽 지역은 대부분 붕괴가 된 상태이다.

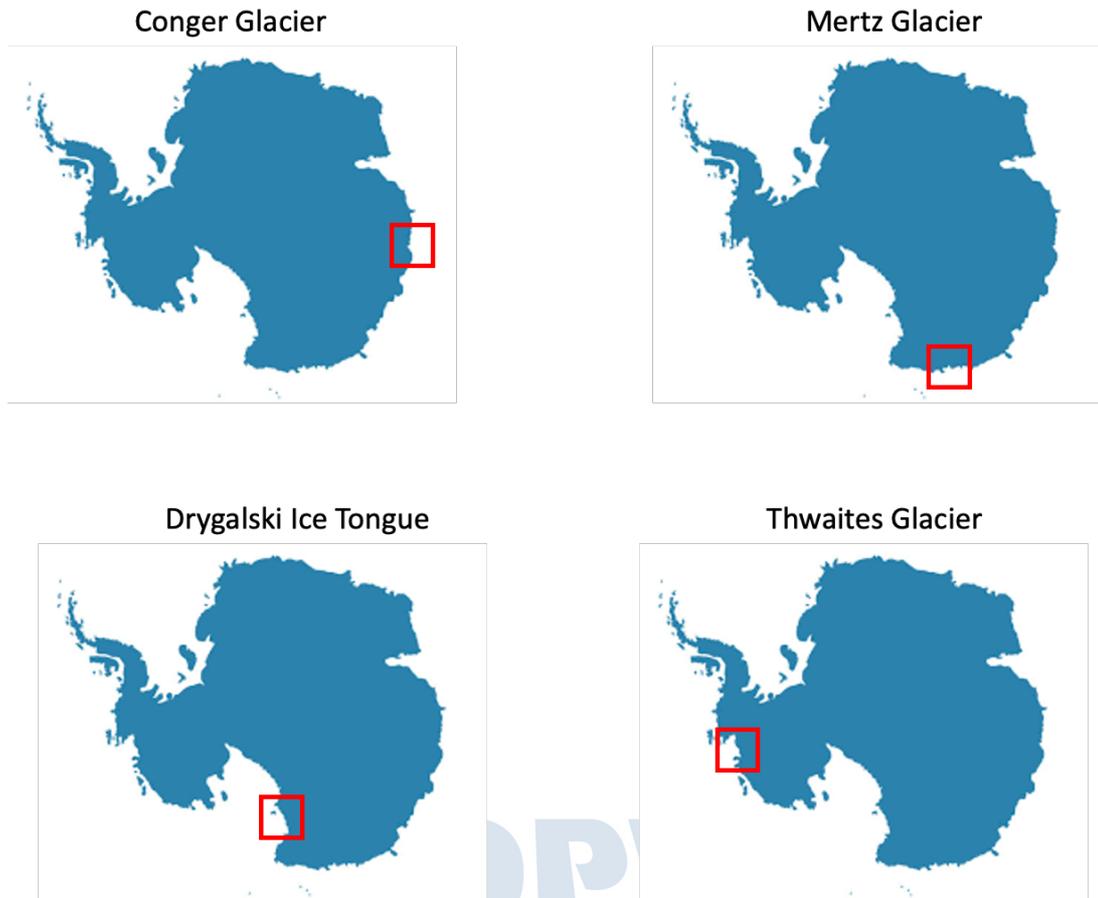


그림 8. 연구지역

본 연구에서는 Operation IceBridge에서 항공기를 통해 확보한 얼음 표면 자료를 사용하여 굽힘정도를 추출하였다. 지역에 따라 두 종류의 자료를 사용하였으며 먼저 Hi-Capability Airborne Radar Sounder (HiCARS 2 L2 Geolocated Ice Thickness, Version 1) 자료는 Conger Glacier, Mertz Glacier, Drygalski Ice Tongue에서 확보되었다. 항공자료 확보는 2010년부터 2012년 사이에 주로 10월부터 2월 사이에 진행되었다. 비행방향 샘플링 주파수는 4 Hz로 약 23m의 공간해상도를 갖으며 비행 직각 방향 공간해상도와 고도 해상도는 각각 400m 와 8m 다.

항목	값
항공기	DC-8
관측 센서	HiCARS2
비행 방향 샘플링 주파수 (Hz)	4
비행 방향 공간해상도 (m)	23
수직 방향 공간해상도 (m)	400
고도 오차 (m)	8

표 3 IceBridge HiCARS 2 L2 Geolocated Ice Thickness, Version 1 Specifications

앞선 지역과 달리 Thwaites Glacie 지역에서는 HiCARS L2 Geolocated Ice Thickness 자료가 부재하기 때문에 항공라이다 센서에서 빙하 표면 고도를 관측한 Airborne Topographic Mapper(ATM Icessn Elevation, Slope, and Roughness V002, ILATM2) 자료를 사용하였다 (Studinger, 2014). ATM L2 자료의 비행 방향, 수직 방향 공간해상도는 각각 30m 와 80m로 수직 방향 공간해상도가 사운드보다 높다. 특히 수직 방향으로 5개의 다른 각도에서 관측된 표면 높이와 nadir(진저)방향 정보를 추가로 제공하는데 본 연구에서는 진저 방향 정보만을 사용하였다.

항목	값
항공기	DC-8
관측 센서	Lidar
비행 방향 샘플링 주파수 (kHz)	5
비행 방향 관측 리샘플 길이 (초)	0.5
수직 방향 관측 Block 개수, T3 scanner	5
비행 방향 픽셀 크기 (m)	~ 30 m
천저 방향 픽셀 크기 (m)	~ 80 m

표 4 IceBridge ATM L2 Icessn Elevation, Slope, and Roughness, Version 2 Specifications

남극 빙붕 두께는 Bedmap2 자료를 사용하였다 (Fretwell, et al., 2013). Bedmap2 자료는 Operation IceBridge와 같은 현장 자료들을 모두 모아서 남극 대륙 지형 및 얼음 두께를 그리드화를 시킨 자료로써 초기 2500만개 이상의 자료로 제작된 Bedmap1보다 수배 이상 많은 자료로 다시 제작된 후속 자료이다. 현장 조사가 남극 전체에서 진행된 것이 아니기 때문에 지역적으로 정확도 차이가 발생한다는 특징을 갖고 있다. 공간해상도는 1km 로 제작되었다. 두께 비율 계산을 위해 측정두께는 비행경로와 지반접지선이 만나는 지점의 값을

사용하였다. 지반접지선은 NSIDC에서 제공하는 MEaSURES 자료를 사용하였다 (Rignot et al., 2011). MEaSURES에서 제공하는 지반접지선은 다양한 종류의 Synthetic Aperture Radar 영상레이더 자료에 레이더 간섭기법을 활용한 결과를 모아놓은 자료로 1994년부터 2014년 사이의 지반접지선 정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 2011년 기준 지반접지선 위치를 사용하였다.

실제 남극 빙붕 현장에서 확보된 표면 고도 자료를 활용하여 힘 굴곡 영역의 저점과 고점간 거리를 추출하기 위해서 표면의 crevasse나 레이저, 레이더 등 관측 장비의 특성 때문에 발생하는 노이즈들을 제거해야 한다. 노이즈를 제거하기 위해서 Butterworth(버터워스) 저주파 통과(low pass)필터를 사용하였으며 필터 차수와 cut-off 주파수는 각각 2차와 0.02~0.04 Hz 를 사용하였다. 항공기 센서와 지역별 특성에 따라서 local min/max 신호가 crevasse 신호로 오인되어 가려질 수 있는 상황이 발생한다. 다만 최고/저점의 거리나 buoyancy length scale은 crevasse나 crack 이 보통 발생하는 거리보다 훨씬 클 것으로 기대되기 때문에 추후 필터차수와 cut-off 주파수를 자동으로 구현할 수 있는 방안이 필요하다. 이러한 문제점은 특히 항공기나 드론을 사용할 때 해당 문제점이 발생할 가능성이 높을 것으로 고려된다.

○ Operation IceBridge 현장 관측 자료 확보 가능한 지역 중 변화가 급격한 빙붕과 변화가 거의 없는 빙붕을 각각 선정하여 안정성 지수 도출 및 검증

연구지역 #1 : Conger Glacier

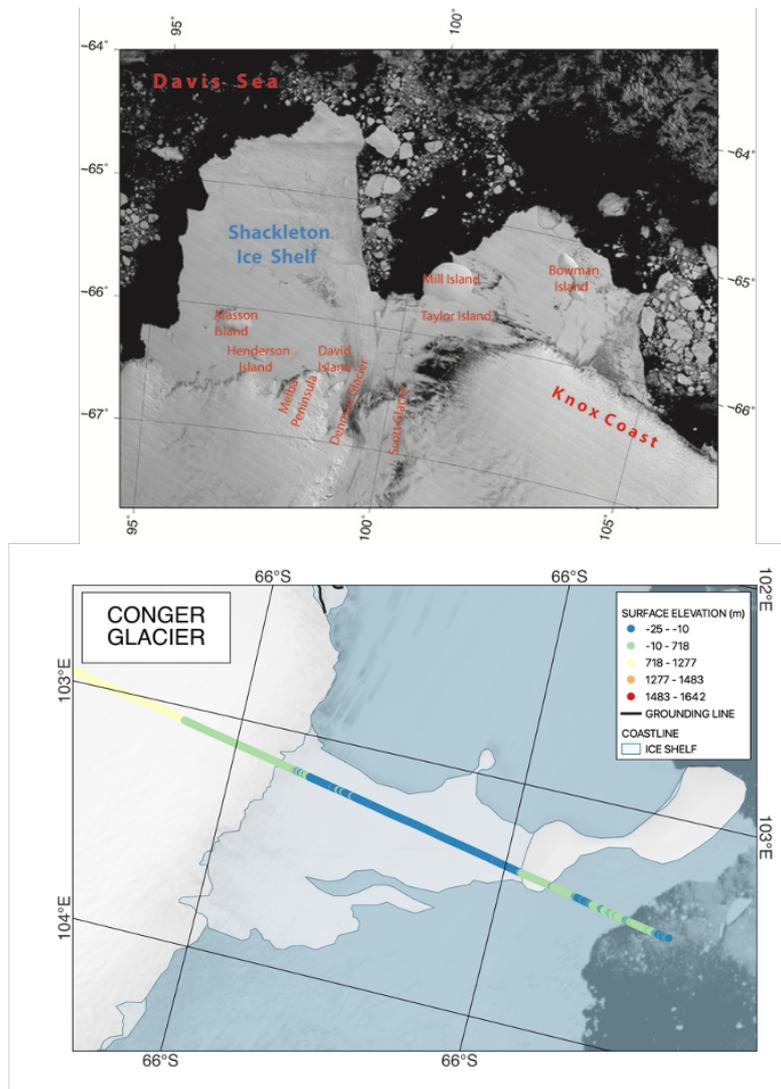


그림 9 연구지역. (위) Shackleton Ice Shelf (아래) Conger Glacier

HiCARS 센서를 활용한 Conger Glacier 표면 관측은 2011년 1월 18일에 진행 되었다. Conger Glacier의 지반접지선을 직각으로 지나는 비행경로에서 빙하와 빙붕 표면 높이 관측이 진행되었다.

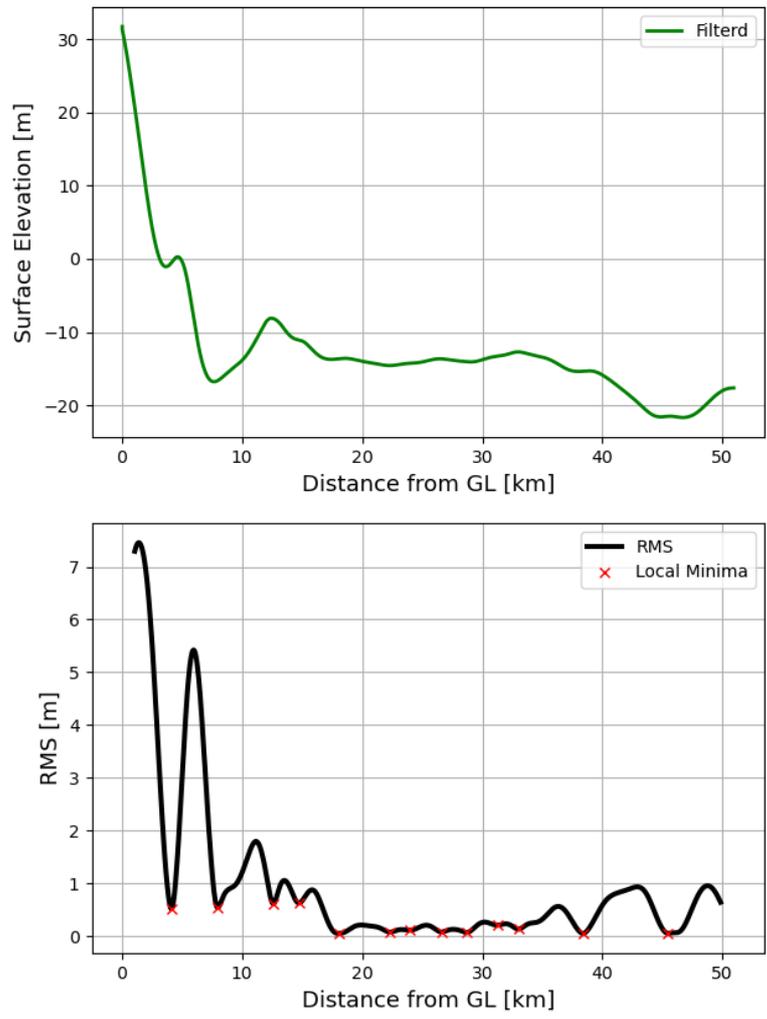


그림 10 (위) HiCARS 표면 고도 정보 (아래) RMS 정보

그림10은 지반접지선 기준으로 빙하 표면 고도, 계산된 RMS 높이, 그리고 RMS의 최저점들을 나타낸다. 지반접지선 이후 RMS 최저점 간 거리는 3.86 km 였으며 이를 야기할 수 있는 유효 두께는 298m 로 계산되었다. 지반접지선과 비행경로가 만나는 지점에서의 측정 두께는 2742m로 비율은 0.11로 계산되었다.

Test Site #2: Mertz Glacier

Operation IceBridge는 2011년 11월 30일에 지반접지선을 가로지르는 비행을 하였으며 12월 3일에는 Mertz Glacier의 동쪽에 위치한 Fisher Bay 지역의 빙봉을 관측하였다.

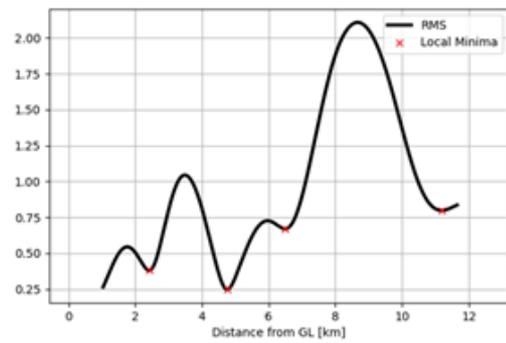
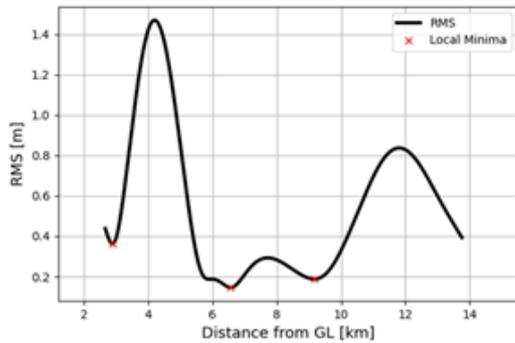
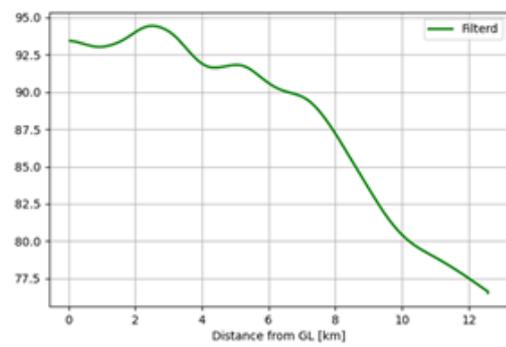
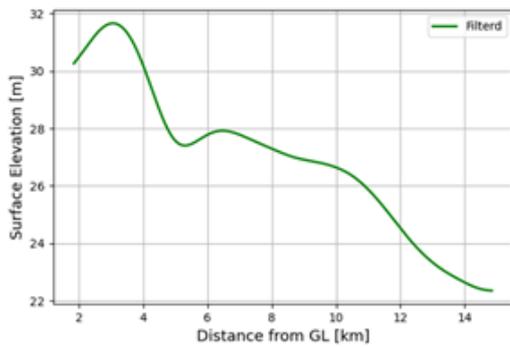
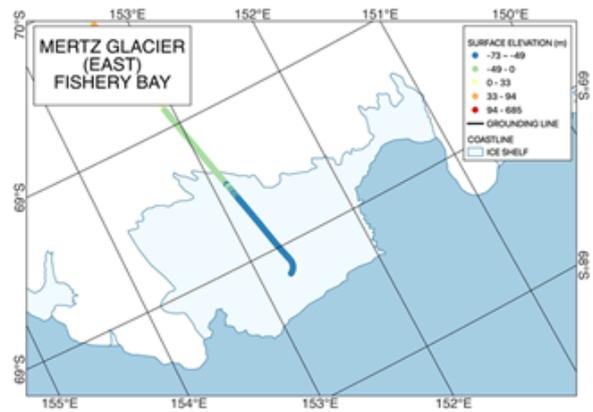
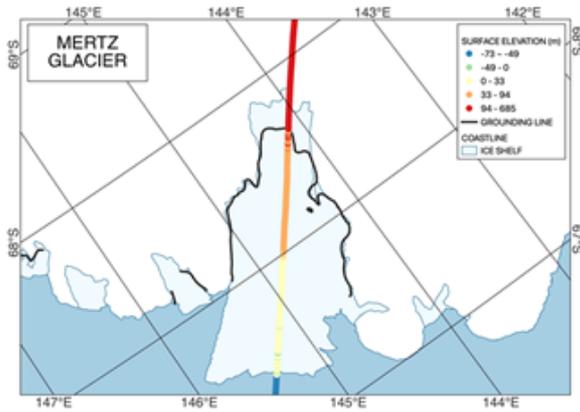


그림 11 (위) Mertz Glacier 및 동쪽에 위치한 Fisher Bay에서 진행된 항공 관측 경로 (아래) HiCARS 표면 고도와 RMS 정보

그림11은 지반접지선 기준으로 빙하 표면 고도, 계산된 RMS 높이, 그리고 RMS의 최저점들을 나타낸다. 지반접지선 이후 Mertz Glacier와 Fisher Bay 빙붕의 유효 두께는 각각 293m, 278m 로 두께 비율은 0.26, 0.36 으로 계산되었다.

### Test Site #3: Drygalski Ice Tongue

Operation IceBridge는 2011년 11월 28일에 지반접지선을 가로지르는 비행을 하였다. 지반접지선 기준 Bedmap2에서 제공하는 빙설의 두께는 1,152m 였으며 HiCARS 센서에서 측정된

표면 정보를 활용하여 계산된 유효두께는 315m 였다. 두 두께간 비율은 0.27로 계산되었다.

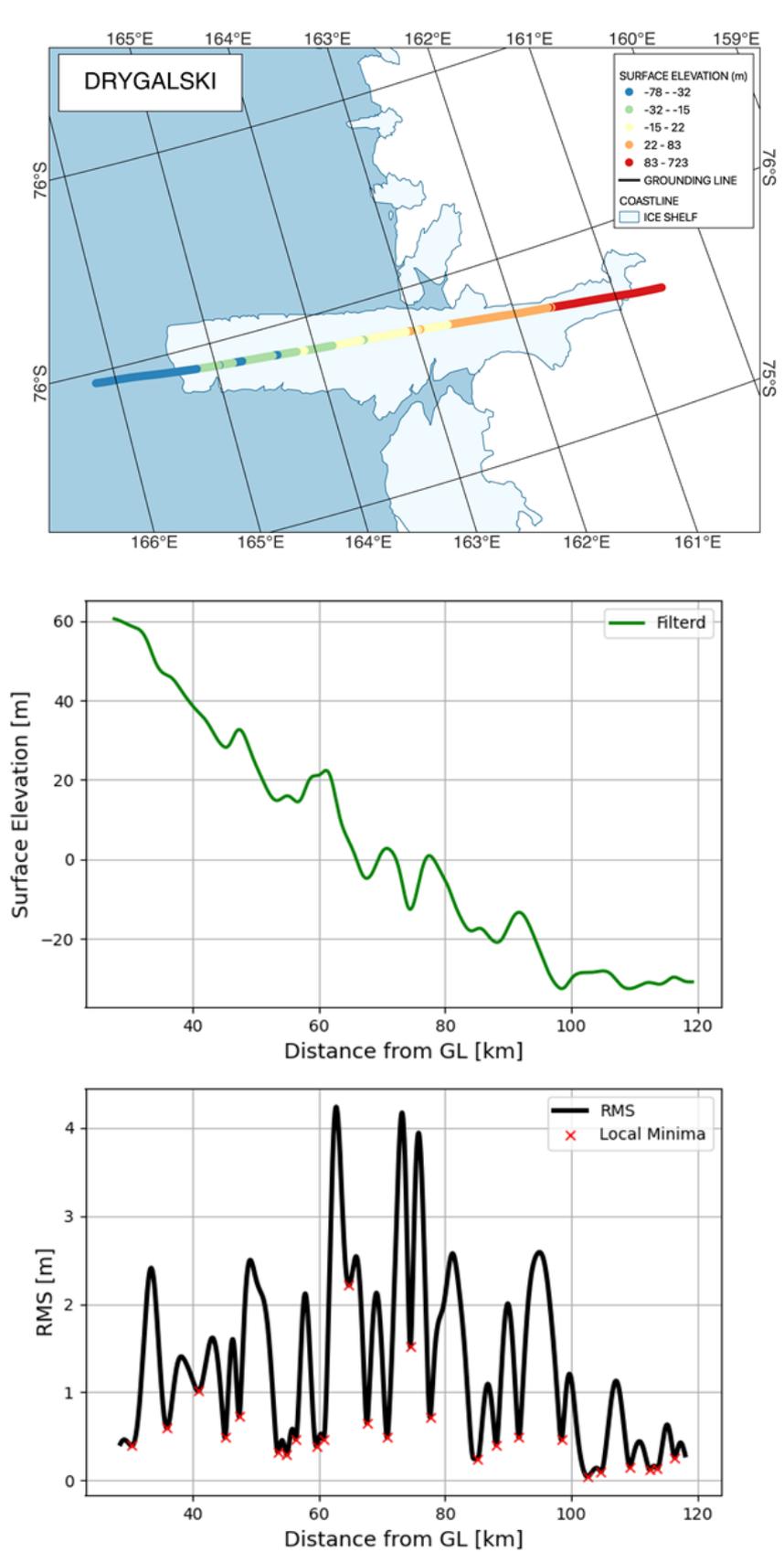


그림 12 (위) Drygalski Ice Tongue 경계 및 항공 관측 경로 (아래) HiCARS 표면 고도 정보 및 RMS 정보

연구 지역 #4 : Thwaites Glacier, West Antarctica

ATM L2자료는 2009년 11월 18일에 DC-8항공기를 활용하여 현장 관측이 진행되었으며 Thwaites Glacier의 지반접지선을 직각으로 가로지르는 수개의 비행경로 중 서쪽(L4-6)과 동쪽(L1-3) 빙설을 관측한 경로를 추출하여 안정성 평가에 사용하였다.

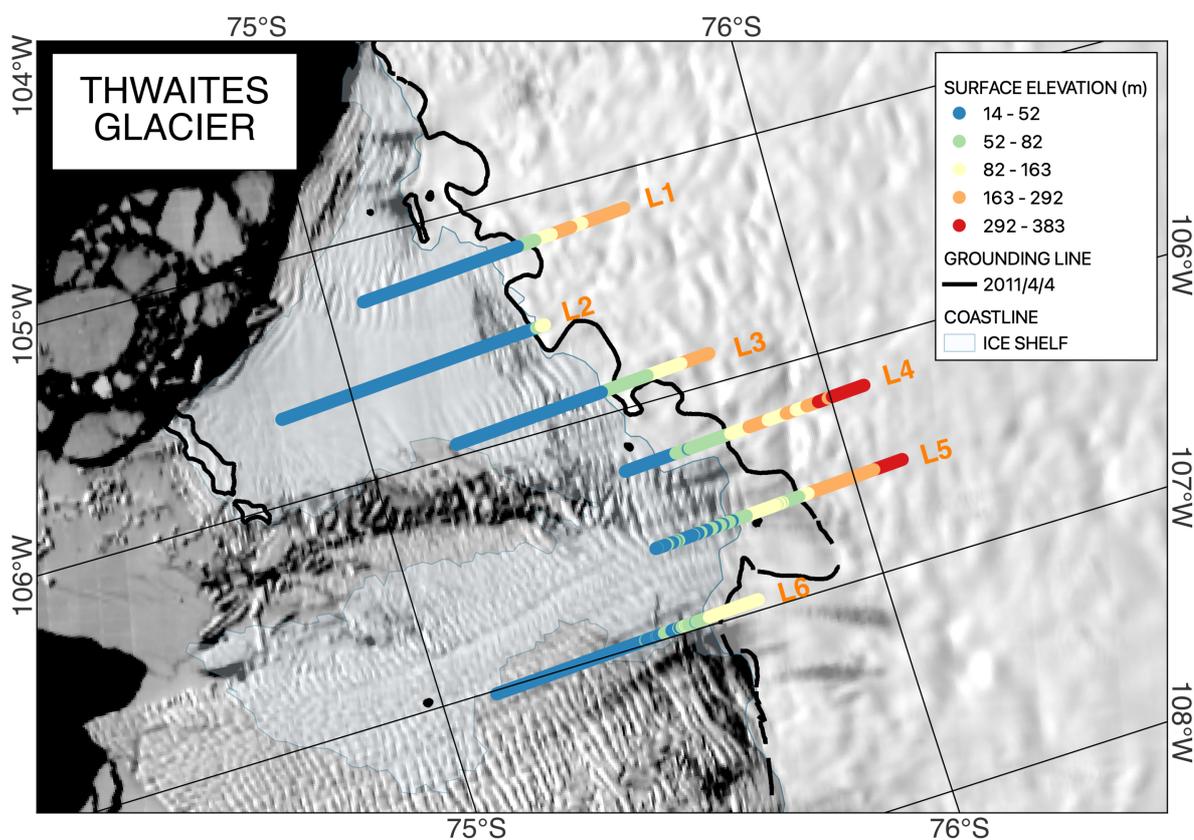


그림 13. 2009년 11월 18일에 Thwaites Glacier에서 진행된 Operation IceBridge ATM L2 비행경로. 지반접지선은 MEaSUREs 자료에서 추출하였으며 2011년 4월 4일 기준 지반접지선을 나타냄. 바탕영상: 2009년 11월 17일에 촬영된 MODIS 영상.

30m 비행방향 해상도를 갖는 ATM 자료의 특성상 작은 crevasse 의 신호는 이미 대부분 필터되어 있었기 때문에 기존 low-pass filter의 cutoff frequency와 RMS 높이 계산을 위한 픽셀 개수를 각각 0.06 Hz와 30개로 수정하였다.

그림13은 각 비행경로에서 지반접지선 기준으로 빙하 표면 고도, 계산된 RMS 높이, 그리고 RMS의 최저점들을 나타낸다. 각 비행경로에서 RMS 최저점 간 거리를 활용하여 계산된 유

효 두께, 비행경로와 지반접지선이 만나는 지점의 측정 두께, 그리고 유효 두께와 측정 두께의 비율을 표에 나타냈다.

동쪽 빙설에 위치한 L1-3은 모두 0.10 보다 높은 값을 보였다. 그중 L2가 가장 낮은 0.13 비율을 보였으며 MODIS 영상에서 지반접지선 근처에 crevasse가 많이 형성되어 광학영상에서 비교적 어둡게 보이는 것을 확인하였다. Crevasse로 인하여 유효두께가 감소한 것으로 의심할 수 있었다.

L4는 모든 비행경로 중 가장 낮은 비율값(0.06)을 보였다. L4는 동쪽과 서쪽 빙설 사이에 위치하나 측정두께를 기반으로 서쪽 빙설의 가장자리에 해당하는 것으로 유추할 수 있다. 동쪽과 서쪽 빙설 사이는 각 빙설의 흐름속도가 다르기 때문에 전단변형이 발생하는 지역으로 MODIS영상에서 지반접지선 근처부터 빙설이 조각으로 깨지는 것을 확인할 수 있었다. 많은 변형으로 인하여 유효두께가 감소한 것으로 의심되는 지역이었다.

L5는 서쪽 빙봉의 메인 지류의 정가운데에 위치한 비행경로이며 모든 비행경로 중 가장 높은 비율값(0.20)을 보였다. MODIS영상에서는 L4와 같이 지반접지선 근처에서 붕괴가 이뤄지고 있었으며 crevasse가 매우 많이 형성된 것으로 확인할 수 있었다. 다만 MEaSUREs 지반접지선으로부터 약 7km 떨어진 지점에서 부분적으로 접지된 영역이 존재하며 이는 ice rumple인 것을 확인하였다. 빙봉이 부분적으로 접지(pinning)되어있을 경우 얼음의 흐름속도가 감소하며 안정성이 높아지는 것으로 알려져있으며 이로 인하여 L5 경로에서 두께 비율이 높게 계산된 것으로 유추할 수 있었다.

마지막으로 L6지역은 지반접지선부터 빙봉이 붕괴되고 있는 지역으로 유효 두께를 계산할 수 없었다.

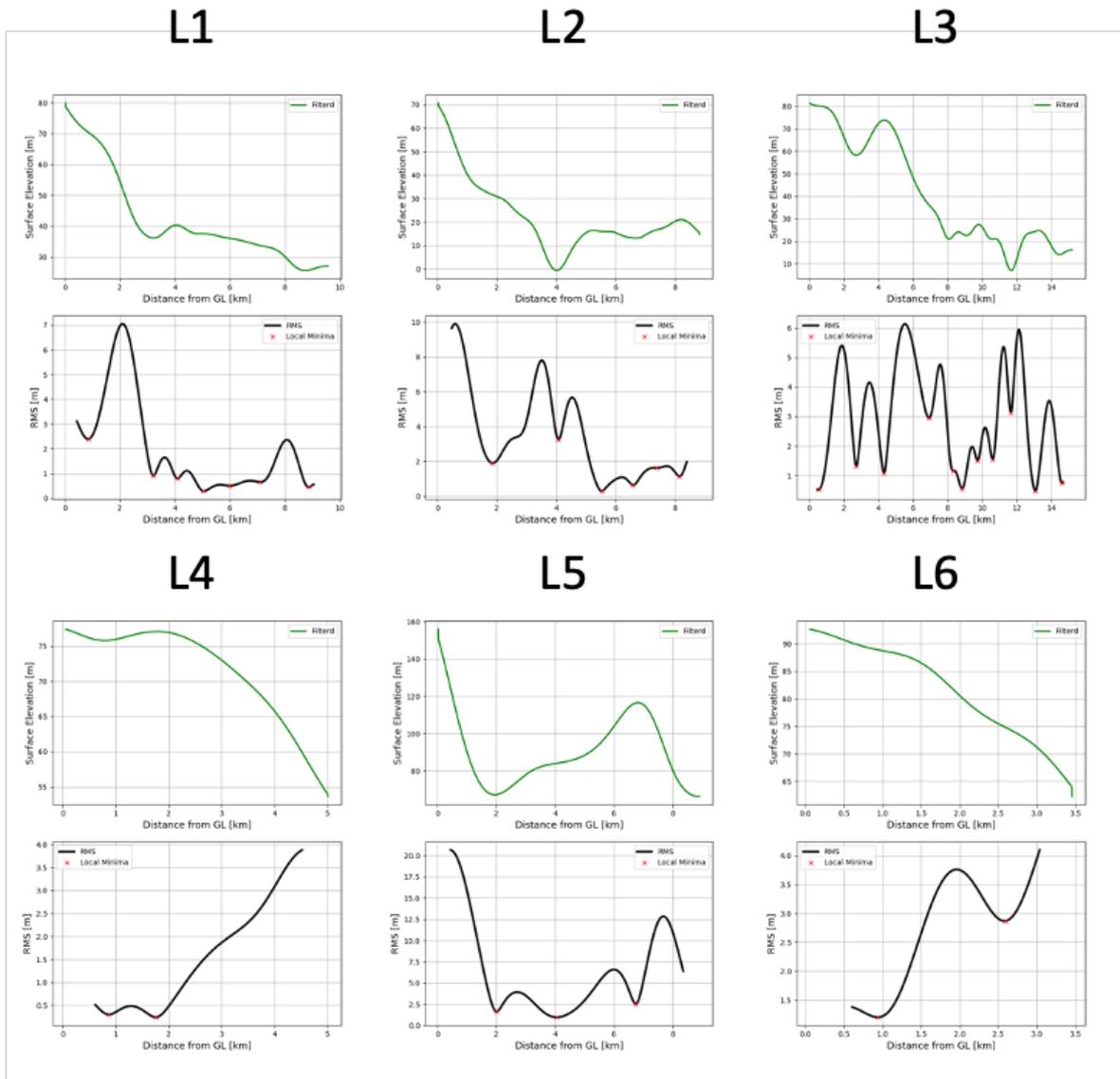


그림 14 Operation IceBridge ATM L2에서 확보된 표면 고도와 RMS.

지역명	관측일자	측정두께 [m]	유효두께 [m]	비율	현재 상태	비고
Conger	2011.01.18	2,742	298	0.11		Disintegrated in 2022
Mertz	2011.11.30	1,123	293	0.26		Calving in 2010, C-28 length of 70 years
Fishery Bay (Mertz)	2011.12.03	765	278	0.36		East of Mertz
Drygalski	2011.11.28	1,152	315	0.27		Terra Nova Bay
Thwaites Line #1	2009.11.18	513	84	0.16		Eastern
Thwaites Line #2		601	77	0.13		Eastern
Thwaites Line #3		542	90	0.17		Eastern
Thwaites Line #4		837	49	0.06		Western
Thwaites Line #5		887	179	0.20		Western, Ice Rurple Profile too
Thwaites Line #6		877	N/A	N/A		short, disintegrated

표 5

Operation IceBridge가 진행된 2009년과 2011년에 계산된 두께 비율과 현재 상태를 고려하였을 때 0.20이 빙붕의 안정성을 평가할 수 있는 임계값으로 고려되며 추후 많은 다양한 빙붕 사례들을 기초한다면 비교적 정확한 임계값을 설정할 수 있을 것으로 기대된다.

# 4 절. 특허 출원

발급번호 : 5-5-2023-007168111



## 출원사실증명원 CERTIFICATE OF APPLICATION

출원인 Applicant	성명 Name	한국해양과학기술원 Korea Institute of Ocean Science & Technology	주민번호 Residence No	131471-0*****
	주소	부산광역시 영도구 해양로 385(동삼동)	전화번호	051-664-9090
발명자 Inventor	성명 Name	김승희 KIM, Seung Hee	주민번호 Residence No	860124-1*****
	주소	인천광역시 연수구 송도미래로 26 (송도동)	전화번호	
대리인 Agent	성명	특허법인 남앤남	대리인 번호	9-2012-100182-6
	주소	서울특별시 중구 서소문로95(서소문동, 정안빌딩3층)		
출원번호 Application Number		특허-2022-0093262 PATENT-2022-0093262	출원일자 Filing Date	2022년 07월 27일 JUL 27, 2022
발명(고안)의 명칭, 디자인을 표현할 물품, 상품(서비스업)류 구분  Title of Invention, Product(s) Embodied in Design, or Classification of Mark		극지역의 빙붕 안정성 평가 방법 및 이를 위한 장치 APPARATUS AND METHOD FOR EVALUATING ICE SHELF STABILITY IN POLAR REGION		
용도	확인용	IPC 분류	G01M 5/00	
최종처분상태		최종처분일		
심사청구유무	Y	심사청구일자	2022년 07월 27일	
<p>위 사실을 증명함. This is to certify that the above applicant has filed as stated in this certificate at the Korean Intellectual Property Office</p> <p>2023년 02월 07일</p> <p>특 허 청 COMMISSIONER</p> 				

◆ 본 증명서는 인터넷으로 발급되었으며, 특허청 홈페이지(www.kipo.go.kr)의 '특허로-증명서 발급' 메뉴를 통해 발급번호 또는 문서하단의 바코드로 내용의 위·변조 여부를 확인해 주십시오. 단, 발급번호를 통한 확인은 90일까지 가능합니다.



## 제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

연구 개발 목표	연구 개발 내용 및 범위	달성도
빙붕의 힘 정도를 이용하여 남극 빙붕 안정성 지수 산출	<ul style="list-style-type: none"> <li>빙붕의 힘 정도 특성 정리 및 도출 방안 분석</li> </ul>	100%
	<ul style="list-style-type: none"> <li>힘 정도 활용 빙붕의 유효두께 (effective thickness) 산출</li> </ul>	100%
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Test Site 선정 및 실제두께와 유효두께 비교</li> </ul>	100%



## 제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

본 연구는 기존 단기-장기 시계열 모니터링 분석에 의존하던 안정성 평가 방법보다 간편하고 신속하게 남극 전역을 평가할 수 있는 가능성을 확인한 연구로서 다양한 후속 연구 및 활용이 가능할 것으로 기대된다.

- 빙봉 유효 두께 산출 방법의 고도화
- Euler-Bernoulli 미분방정식 풀이를 위한 boundary condition 변화에 따른 결과 분석
- 유효두께에 영향을 줄 수 있는 crevasse나 얼음의 밀도 등 다양한 변수들의 종합 분석
- 유효두께 산출에 최적화된 항공 고도계 자료 필터링 기법 개발
- TanDEM-X PolarDEM (90m 해상도) 활용하여 남극 전역 빙봉 유효두께 산출 및 안정성 평가를 위한 기준 자료로 사용
- ICESat 위성고도계 활용하여 준실시간 유효두께 산출 및 시계열 자료 확보하여 추세 분석
- 유효두께 및 추후 안정성 평가 결과를 활용하여 남극 빙봉 현장 조사 지역 선정
- 남극 빙봉 안정성 관련 극지연구소 고유 산출물 제작 및 공유
- 기후변화 관련 국내외 정책 개발 시 참고자료로 활용

극지연구소

## 제 6 장. 참고문헌

- Brunt, Kelly M., Helen A. Fricker, and Laurie Padman. "Analysis of ice plains of the Filchner-Ronne Ice Shelf, Antarctica, using ICESat laser altimetry." *Journal of Glaciology* 57.205 (2011): 965-975.
- Fretwell, Peter, et al. "Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica." *The cryosphere* 7.1 (2013): 375-393.
- Fricker, Helen Amanda, and Laurie Padman. "Ice shelf grounding zone structure from ICESat laser altimetry." *Geophysical Research Letters* 33.15 (2006).
- Fricker, Helen Amanda, et al. "Mapping the grounding zone of the Amery Ice Shelf, East Antarctica using InSAR, MODIS and ICESat." *Antarctic Science* 21.5 (2009): 515-532.
- Goldstein, Richard M., et al. "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream." *Science* 262.5139 (1993): 1525-1530.
- Han, Hyangsun, et al. "Changes in a giant iceberg created from the collapse of the larsen c ice shelf, Antarctic Peninsula, derived from Sentinel-1 and CryoSat-2 data." *Remote Sensing* 11.4 (2019): 404.
- Kim, Seung Hee, and Duk-jin Kim. "Combined usage of tandem-x and cryosat-2 for generating a high resolution digital elevation model of fast moving ice stream and its application in grounding line estimation." *Remote Sensing* 9.2 (2017): 176.
- Kim, Seung Hee, Duk-jin Kim, and Hyun-Cheol Kim. "Progressive Degradation of an Ice Rumples in the Thwaites Ice Shelf, Antarctica, as Observed from High-Resolution Digital Elevation Models." *Remote Sensing* 10.8 (2018): 1236.
- Kim, Seung Hee, et al. "Evolution of Backscattering Coefficients of Drifting Multi-Year Sea Ice during End of Melting and Onset of Freeze-up in the Western Beaufort Sea." *Remote Sensing* 12.9 (2020): 1378.
- Milillo, P., et al. "Rapid glacier retreat rates observed in West Antarctica." *Nature Geoscience* (2022): 1-6.
- Paolo, Fernando S., Helen A. Fricker, and Laurie Padman. "Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating." *Science* 348.6232 (2015): 327-331.
- Ramirez, Rachel, and Hafsa Khalil. "Antarctic Ice Shelf Nearly the Size of Los Angeles Collapsed as Temperatures Soared to 40 above Normal." *CNN, Cable News Network*, 25 Mar. 2022, <https://edition.cnn.com/2022/03/25/world/antarctic-conger-ice-shelf-collapse->

climate/index.html.

Rignot, Eric, Jeremie Mouginot, and B. Scheuchl. "Antarctic grounding line mapping from differential satellite radar interferometry." *Geophysical Research Letters* 38.10 (2011).

Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl. MEaSURES Antarctic Grounding Line from Differential Satellite Radar Interferometry, Version 2. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (2016): <https://doi.org/10.5067/IKBWW4RYHF1Q>. Date Accessed 01-15-2023.

Studinger, M. 2014, updated 2020. IceBridge ATM L2 Icessn Elevation, Slope, and Roughness, Version 2. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/CPRXXK3F39RV>.

Vaughan, David G. "Tidal flexure at ice shelf margins." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100.B4 (1995): 6213-6224.

Wählin, A. K., et al. "Pathways and modification of warm water flowing beneath Thwaites Ice Shelf, West Antarctica." *Science Advances* 7.15 (2021): eabd7254.



## 연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

과제 구분	신진연구원 지원과제		
과제명	휩 정도를 활용한 남극 빙붕 안정성 평가 방안 연구 (계정번호: PE22320)	연구기간	2022.3.1.~2022.12.31
연구책임자	김 승 희	연구비(직접비)	30,000 천원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제목적</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 남극 빙붕 표면에서 관측 가능한 휩 정도를 활용한 유효두께 산출</li> <li>○ 유효두께를 활용한 안정성 평가 가능성 확인</li> </ul> <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 오일러-베르누이 빔 공식을 활용한 휩 특성 이론 정리</li> <li>○ 지반접지선 근처에서 휩 특성 추출 및 유효두께 산출 방법 제안</li> <li>○ NASA의 Operation IceBridge현장 관측 자료에 적용하여 유효두께 산출 및 안정성 평가 가능성 확인</li> <li>○ ‘극지역의 빙붕 안정성 평가 방법 및 이를 위한 장치’ 특허 출원</li> </ul> <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 빙붕의 휩 특성과 안정성을 연결시킨 최초의 연구로서 향후 남극 현장연구 선정, 빙붕 거동 예측, 빙붕 변동 예측 등에 활용될 것으로 기대</li> <li>○ 유효 두께 산출 방법 고도화 및 빙붕의 휩 정도에 영향을 미치는 요인들에 대한 후속 연구 진행</li> </ul> <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
평가의견	반영사항	비고	
○ 연구개발결과의 활용계획을 구체적으로 명시 요망	○ 빙붕 유효 두께 산출 방법의 고도화, 유효두께에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들의 분석, 항공 고도계 자료 필터링 기법 개발, 남극 전역 빙붕 유효 두께 산출 및 안정성 평가를 위한 기준 자료 제작, 위성고도계 활용 준수 시간 유효두께 산출 및 시계열 자료 확보, 연구소 남극 빙붕 현장 조사 지역 선정, 남극 빙붕 안정성 관련 극지 연구소 고유 산출물 제작 및 공유, 기후변화 관련 국내외 정책 개발 시 참고자료로 활용 추가	연구보고서 p.3, 30 참조	

## 주 의

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