

다중위성자료를 활용한 서남극해 빙하 특성 분석



울산과학기술원

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 원격탐사 연구” 과제의 위탁연구 “다중위성자료를 활용한 서남극해 해빙/빙하 특성 분석” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. 01. 26

(본과제) 총괄연구책임자	: 김 현 철
위탁연구기관명	: 울산과학기술원
위탁연구책임자	: 임 정 호
위탁참여연구원	: 김 미 애
“	: 심 성 문
“	: 이 상 균
“	: 박 서 희



보고서 초록

위탁연구과제명	다중위성자료를 활용한 서남극해 해빙/빙하 특성 분석				
위탁연구책임자	임정호	해당단계 참여연구원 수	5	해당단계 연구비	40 (백만원)
연구기관명 및 소속부서명	울산과학기술원 도시환경공학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약				보고서 면수	66
○ 남극 빙붕(Ice shelf)의 기저 용융은 빙하와 해양의 열역학적 안정성에 영향을 끼치고, 지구 열균형에 영향을 주어, 구체적인 관측이 필요함. ○ 기저 용융 변화 관측을 위해, 빙하 질량 균형에 의거, 플릭스 질량균형과 표면 질량균형, 총 질량 균형을 산출함. ○ 플릭스 질량균형 산출을 위해 Landsat-7 ETM+와 Landsat-8 OLI 영상자료의 피쳐트래킹 방법을 통해 빙하의 흐름 속도를 산출하였고, Cryosat-2 고도계 자료를 이용하여 빙붕의 두께를 산출함. ○ RACMO 모델을 이용하여 해당 지역의 적설/승화에 의한 질량 균형을 구하였고, 총 질량균형은 두께변화를 통해 산출함. ○ 기저용융에 의한 질량균형 분석 결과, 2014년에서 2015년까지는 질량 소실이 주로 나타났고, 2015년에서 2016년에는 질량누적이 나타남. 이는 여름철 빙붕 표면의 녹음으로 인한 관측오류로 판단함. ○ 고착빙을 탐지하기 위해서 광학 영상을 이용한 기존의 기법은 기상조건에 영향을 많이 받았으나 본 연구에서는 SAR 영상을 이용하여 서남극해 해역에 따라 고착빙 기준 자료를 구축하여 고착빙 분류 모델을 개발함으로써 기술적인 한계를 극복함. ○ ALOS-1 PALSAR 자료를 이용하여 영상 분할과 영상 간 상관도 변수를 포함하는 다양한 입력자료들을 사용하였으며 기준 고착빙 지역 탐지 지역과 비교한 결과 성능이 우수함. ○ 기존의 SAR영상을 이용한 고착빙 탐지 연구는 제한된 연구 지역에 대해서 수행된 반면 이 연구는 서남극 해역 별 고착빙 연구 지역에 대해서 고착빙 분류 모델을 검증 수행하였고 고착빙 탐지에 ALOS-1 PALSAR와 적용된 기법의 정확도와 활용성을 확인함.					
색인어 (각 5개 이상)	한글	남극 빙권, 빙붕, 기저용융, 고착빙, SAR, 영상 분할			
	영어	Antarctic cryosphere, ice shelf, basal melt, landfast sea ice, synthetic aperture radar, image segmentation			



요 약 문

I. 제 목

다중위성자료를 활용한 서남극해 해빙/빙하 특성 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

<Mass balance 연구>

- 남극 빙붕(Ice shelf)은 육지 빙하가 해양으로 유출되며 생기는 것으로, 남극 해안선의 75%를 차지하고, 그 면적 역시 1.561 million km²에 육박하는 큰 비율을 차지함.
- 빙붕의 기저 변화는 빙하와 해양의 열역학적 안정성에 영향을 끼치고, 이는 저위도와의 해양에너지 순환에 영향을 주어 지구 전체 에너지 균형에 영향을 끼치게 됨. 따라서 빙붕의 기저 변화에 대한 구체적 파악이 중요함.
- 빙붕의 기저는 접근성이 낮아, 질량균형 계산을 통해 간접적으로 그 변화를 계산해낼 수 있고, 이는 표면 기상현상에 의한 변화, 흐름 발산에 의한 변화, 두께 변화를 통해 계산해낼 수 있음.
- 기존에 진행된 2008년까지의 빙붕의 기저 변화연구와 2013년까지 진행된 빙하 흐름 속도 연구에 이어, 작은 규모 빙붕에 대한 최근의 빙하 유출속도 및 기저 용융의 동향을 파악하여 해양 및 극지 환경 변화를 파악하는 것이 중요함.
- 본 연구의 목적은 2012년 이 후의 Crosson 빙붕 지역의 빙하 유출 속도와 빙붕의 두께, 기저 용융 변화 산출임.

<고착빙 연구>

- 겨울철 남극 해안 지역을 따라 만연하게 분포된 고착빙은 수백 킬로 떨어진 먼 바다까지 확장될 수 있으며, 고착빙의 면적은 전체 남극 해빙 면적의 작은 부분을

차지하지만 그 부피는 전체 해빙 부피의 50% 이상을 차지할 수 있음.

- 고착빙의 분포는 해빙 생성에 영향을 미칠 수 있는 폴리냐(polynya)의 모양과 크기에도 영향을 미치며 남극저층수 형성과 그에 따른 전 지구적인 열염순환에 영향을 미칠 수 있음.
- 다년생 고착빙은 빙붕이나 빙설의 안정화에 기여함으로써 분리 빙하(calving) 현상을 지연시켜 이는 결국 빙상의 질량 균형(mass balance)에도 영향을 미칠 수 있음.
- 고착빙은 남극 포유류에 광범위한 서식지와 번식지를 제공하므로 생물학적으로 매우 중요한 역할을 하며, 극항로나 연안 탐사 등에 영향을 미치며 특히 다년생 고착빙 지역에서의 베이스 캠프 운영에 중요함.
- SAR 영상을 이용하여 서남극해 해역에 따라 고착빙 기준 자료를 구축하였고, 다양한 통계 변수들을 이용하여 고착빙과 비 고착빙 지역을 기계학습 기법을 적용해 고착빙 분류 모델을 개발하였으며, 서남극해 해역별 고착빙 모델을 적용하여 고착빙 탐지를 수행함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

<Mass balance 연구>

- 빙하의 이동속도 파악을 위해 Sentinel-1A IW모드 SAR영상을 입력자료로 하여 InSAR방법을 이용한 속도 추출을 시도하였으나, 위성영상의 slant range resolution인 2.5m/12day보다 빠른 흐름속도로 인해 속도 추출이 불가함.
- 피쳐트래킹(feature tracking) 방법을 통해 속도 추출을 하고자, Landsat7 ETM+와 Landsat-8 OLI 영상을 CIAS 소프트웨어를 통해 속도 추출을 하였음.
- 빙하 두께는 Cryosat-2 고도계 정보와 해수 및 얼음의 밀도를 통해 연산을 하였고, Kriging 내삽법을 이용하여 1km해상도의 격자자료를 추출하였음.

- 표면 침식 및 승화 작용에 의한 두께변화는 연구지역의 해당시기의 RACMO 모델을 통해 산출.
- 기저질량균형은 두께변화에서 흐름 발산에 의한 두께변화와 표면 침식 및 승화에 의한 두께변화를 빼어 산출함.

<고착빙 연구>

- 주요 입력 자료로 Level 1.5 geo-referenced ALOS-1 PALSAR(Advanced Land Observing Satellite-1 Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) SAR 영상을 이용함.
- ASF에서 제공하는 MapReady 소프트웨어를 이용하여 구축된 영상을 전처리하였고 전처리된 영상은 서로 겹쳐지는 고착빙 지역에 대해 영상을 마스킹하고 영상 분할을 위해서 합성(composite)함. 영상 분할은 eCognition 소프트웨어를 사용함.
- 합성 영상 내의 각 영상에 대한 평균, 표준편차, 비대칭도와 해안선으로부터의 거리, 해빙 속도, 두 날짜의 영상 사이의 객체 상관 변수(OCI; Object Correlation Images)인 correlation, slope, intercept의 총 12개의 입력 변수를 분할된 영상의 각 객체로부터 추출함.
- 고착빙과 비고착빙 지역에 대한 기준 자료를 구축하기 위해서 전처리된 SAR 영상을 이용하여 육안 판독을 이용함.
- 고착빙과 비 고착빙의 두 클래스에 대해서 입력 변수들을 추출하고 기계학습(random forest)의 훈련자료와 테스트 자료로 활용하여 각각 고착빙 분류 모델을 개발하고 이 모델의 성능 평가를 위해 이용함.
- 서남극 해역 별 다양한 지역(웨델해의 동 웨델해 고착빙 지역, 아문센해와 로스해 사이의 Nickerson 빙봉 지역, 벨링스하우젠해의 Stange 빙봉 지역, 아문센해 Cape dart 고착빙 지역)에 대해서 고착빙 분류 모델 검증을 수행함.
- 사용된 입력자료를 다양한 조합에 대해서 고착빙 탐지 모델을 구축하여 다양한

지역에 대해서 모델 결과를 비교 평가함.

IV. 연구개발결과

<Mass balance 연구>

- 2차년도 선행 연구의 Pine island 빙하와 달리, 규모가 작은 Crosson 빙붕에 대한 흐름 속도 및 기저 용융을 파악함.
- 피쳐트래킹을 통한 빙하 이동 속도 추출 결과, 평균 2km/a 의 속도를 보이며 전체적으로 흐름 속도가 증가한 경향을 보임.
- 2013년에서 2014년 사이의 경우 Landsat-7 영상을 사용하였고, 이의 줄무늬 현상에 의해 타년에 비해 속도 추출이 되지 않은 지역이 있음.
- 기저 용융에 의한 두께 변화 추출 결과, 2014년에서 2015년까지는 용융이 많이 일어난 경향을 보이나, 2015년에서 2016년까지는 용융이 줄어든 것으로 보임. 이는 남극의 여름철 표면의 녹음으로 인한 표면 속도 및 고도의 오류에 의해 발생한 것으로 보임.

<고착빙 연구>

- 5일 간격의 SAR 영상 세트를 구축하였으며 모든 영상은 ScanSAR(400×400 km) 촬영 모드, 하향(descending)의 비행 방향, 100 m의 화소크기(range 및 azimuth 방향)를 가지며 영상 간 입사각 차이는 거의 없음.
- 육안 판독을 기반으로 한 기준 자료 구축 방법에 대해서 타당성을 부여하기 위해서 해당 날짜의 시계열 MODIS 광학 영상(MOD02QKM 산출물)을 이용하여 육안 판독으로 추출된 고착빙 기준 지역이 실제로 고착빙 지역이 맞는지 확인함.
- 웨델해의 동 웨델해 고착빙 연구지역은 다양한 조합을 이용한 결과들이 서로 큰 차이를 보이지 않았으나, 거리 변수가 제외되었을 때 지역의 서쪽 부분에서 고착빙이 과대탐지되는 경향을 보임.

- 아문센해와 로스해 사이의 Nickerson 빙봉 고착빙 연구 지역은 해빙속도에 대해서 normalization을 적용할 시 더 좋은 탐지 결과를 보여주었으며, 거리 변수가 제외되었을 때 약간의 과대탐지 경향을 보이지만 동시에 기준지역을 정확히 탐지함.
- 벨링스하우젠해의 Stange 빙봉 고착빙 연구 지역은 다양한 조합의 연구결과가 서로 큰 차이가 없었고, 아문센해 Cape dart 고착빙 지역은 표준화 하지 않은 해빙속도를 이용하고(original) 거리 변수를 제외하였을 때 탐지 결과가 매우 좋지 않음.

V. 연구개발결과의 활용계획

<Mass balance 연구>

- 본 결과를 통해 서남극해 빙봉의 흐름 및 기저 용융의 최근 동향을 파악할 수 있었음.
- 2013년까지만 진행된 남극 전역의 빙하 흐름 및 기저 용융 동향 연구를 연장하여 최근까지의 동향을 파악할 수 있는 가능성을 보여줌.

<고착빙 연구>

- 본 연구과제의 결과를 통해 서남극 고착빙 지역을 정확히 탐지하고 이를 통해 향후 남극 빙권의 해양환경 변화 예측을 위한 기초자료를 제시할 수 있음.
- 본 연구과제에서 적용된 자료와 기법을 통해 서남극 고착빙 지도화가 가능하다면 고착빙 면적의 시공간적인 분포를 분석하고 향후 서남극 고착빙의 두께 및 체적 변화를 추정하는데 활용될 수 있음.
- 고착빙 면적이나 두께 등의 정보는 향후 해양순환모델이나 기후변화 모델링 분석에 활용되어 기존의 기후변화 역학 모델링의 불확실성을 줄이는데 도움이 될 수 있음.
- 기존 서남극 고착빙 연구는 거의 수행된 바가 없으며 본 연구 개발 결과는 서남

극 고착빙 지역에 대한 적용 가능한 방법을 제시하며 향후 서남극 해빙 연구에 활용될 수 있음.



S U M M A R Y

I. Title

Characterization of sea ice and glaciers in the West Antarctica using multi-sensor data

II. Purpose and Necessity of R&D

<Mass balance research>

- Antarctic ice shelf is the land ice into the ocean that 75% of the Antarctic coastlines and 1.561 million km² area, and having leaked.
- Ice shelf thermodynamic affecting the stability of the glacier and ocean, that influences energy cycle with low latitudes. Thus, the basal change of ice shelf will affect earth's total energy balance, for the change in concrete view of importance.
- The base of ice shelf is not accessible and the change can be calculated indirectly through mass balance calculation, which can be calculated by subtracting the change due to the surface accumulation/ablation, the change due to the flow divergence from the change in ice shelf thickness.
- Previously, the base and flow velocity change was estimated in the ice shelf up to 2008 and 2013, thus providing information of small ice shelves useful for understanding changes in the ocean and polar environments by understanding recent trends in glacier runoff velocity and basal melting as follows previous studies.
- The objective of this study is to calculate the changes of flow velocity, thickness, and basal melting on the Crosson ice shelf.

<Fast ice research>

- Fast ice is prevalent around the Antarctic coastal zones during the Austral winter season and can extend offshore up to hundreds of kilometers. Although the extent of fast ice is a small portion of Antarctic sea ice extent, its volume can go up to 50 % of the total sea ice volume.
- The distribution of fast ice has an influence on the shape and size of polynya related with sea ice production, affecting the formation of Antarctic Bottom Water and global oceanic thermohaline circulation.
- As multi-year fast ice contributes to stabilization of ice shelves or ice tongues, it can delay glacier calving and even affect mass balance of ice sheet.
- Fast ice is important for mammals in Antarctica, providing vast habitats and breeding places and for polar route and coastal exploration
- Fast ice reference data were constructed using ALOS-1 PALSAR SAR data over West Antarctic coastal zones. With various input variables including statistical ones, fast ice classification models were developed using machine learning algorithms. The developed models were applied to fast ice regions over West Antarctic ocean sectors.

III. Contents and Extent of R&D

<Mass balance research>

- Flow velocity extraction was tested using the InSAR methods with the Sentinel-1A IW mode SAR images as input data, but the extraction was not successful because the flow speed exceeds 2.5m/12day which is the slant range resolution of the satellite image that used.
- Flow velocity was extracted using feature tracking with Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI images by the CIAS software.

- Ice thickness was extracted by the Cryosat-2 altitude data with the density of ice and ocean. Extracted thickness points were gridded to 1km using Kring interpolation.
- Thickness change from the surface ablation was provided by the RACMO model.
- Basal mass balance was calculated by extraction surface mass balance and flux mass balance from the total mass balance.

<Fast ice research>

- Level 1.5 geo-referenced Advanced Land Observing Satellite-1 Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS-1 PALSAR) data were used as the main input data in the mass balance study.
- SAR image pairs were preprocessed using MapReady software provided by Alaska Satellite Facility (ASF). The preprocessed images containing fast ice regions overlapped were masked and composited for image segmentation. Image segmentation was implemented in eCognition software.
- A total of 12 input variables including mean, standard deviation, skewness, and ice velocity of master (earlier date) and slave (later date) images, distance from coastline, Object Correlation Images (correlation, slope, intercept)
- The preprocessed SAR images were used to construct fast ice and non-fast ice reference data based on visual inspection.
- Input variables were extracted for fast and non-fast ice classes, and training data were used to develop fast ice classification models. The test data was used to evaluate the performance of the models.
- The fast ice classification models was validated over various ocean sectors including East Weddell site over Weddell Sea, Nickerson Ice Shelf over

between Amundsen Sea and Ross Sea, Stange Ice Shelf over Bellingshausen Sea, Cape Dart sites over Amundsen Sea.

- Fast ice detection models constructed with various combinations of input variables were compared over the validation ocean sectors.

IV. R&D Results

<Mass balance research>

- Unlike the Pine island glacier in the second year of previous study, the flow velocity and basal melt for small-scale Crosson ice shelves were determined.
- As a result of extracting the glacier moving velocity through the feature tracking, the average speed of 2km/a tendency to increase the flow rate.
- Landsat-7 images were used for the period from 2013 to 2014, and there were region where the velocity extraction was not performed due to the stripe.
- An increasing pattern was identified in basal melting from 2014 to 2015, but an accumulating trend from 2015 to 2016. The different pattern could be caused by inaccurate surface velocity and ice thickness by the surface melting.

<Fast ice research>

- SAR image pairs with a 5-day interval were constructed. All the images are in the ScanSAR observation mode (400×400 km), descending direction, and 100 m resolution in range and azimuth directions. There is a little difference in the incidence angle between SAR image pairs.
- For validity of reference regions based on visual inspection, time series of MODIS visible images (MOD02QKM product) were examined.

- Results with various combinations of input variables over the East Weddell site were similar, but in the west parts of the site fast ice was overestimated when the distance variable was excluded from the models.
- Over Nickerson Ice Shelf site between Amundsen and Ross Sea, using ice velocity with normalization produced better detection results. Overall, reference regions were well detected when the distance variable was excluded from the models.
- Fast ice detection results with various combinations of input variables over Stange Ice Shelf site in Bellingshausen Sea were similar. Over Cape Dart site in Amundsen Sea, using original ice velocity and excluding the distance variable from the models produced worst performance.

V. Application Plans of R&D Results

<Mass balance research>

- The mass balance modeling result could be used to understand a recent trend of basal melting on the west Antarctica.
- This result has potential to expand the mass balance trend from the previous research in the second year.

<Fast ice research>

- Based on the results of this research, West Antarctic fast ice regions can be detected with high accuracy, providing preliminary data for predicting the changes in oceanic environment over Antarctica.
- Using data and techniques used in this project, West Antarctic fast ice maps can be utilized for analysis of the spatiotemporal distribution of fast ice extent and for prediction of changes in thickness and volume of fast ice.
- The information of the extent and thickness of fast ice can be used for

ocean circulation models and climate change modeling, contributing to the decrease in uncertainties of climate dynamic models.

- West Antarctic fast ice research has been rarely conducted until now. This research provided a method that can be applied in West Antarctic fast ice regions and used for future fast ice or sea ice over Antarctica research.



<목 차>

제 1 장 서론	21
제 2 장 국내외 기술개발 현황	23
제 1 절 국내 기술개발 현황	23
제 2 절 해외 기술개발 현황	28
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	37
제 1 절 서남극해 빙봉 기저 질량변화 탐지 연구	37
1. 흐름속도	38
2. 빙봉 두께	41
3. 질량균형	42
제 2 절 서남극해 고착빙 탐지 연구	45
1. 서남극해 고착빙 기준자료 구축 및 서남극 해역별 고착빙 탐지	45
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	57
제 1 절 연구개발목표의 달성도	57
제 2 절 관련 분야에의 기여도	58
1. 학술적 파급효과	58
2. 경제적 파급효과	58
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	61
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	63
제 7 장 참고문헌	65

<표 차례>

표 2. Crosson 지역 가용영상 및 사용 영상 (회색).	40
표 3. 본 연구에 사용된 ALOS-1 PALSAR SAR 영상 정보.	46
그림 1. Campbell 빙하 흐름 속도 지도. 흰 선은 빙하의 grounding line을 의미.	23
그림 2. K-means 알고리즘을 이용한 분류 결과. (a) ASAR와 PALSAR, (b) Radarsat-2와 PALSAR, (c) Radarsat-2, ASAR, PALSAR, (d) ASAR, PALSAR texture, (e) Radarsat-2, PALSAR texture, (f) Radarsat-2, ASAR, PALSAR texture 영상을 이용한 결과.	25
그림 3. 최대 우도법 알고리즘을 이용한 분류 결과. (a) ASAR와 PALSAR, (b) Radarsat-2와 PALSAR, (c) Radarsat-2, ASAR, PALSAR, (d) ASAR, PALSAR texture, (e) Radarsat-2, PALSAR texture, (f) Radarsat-2, ASAR, PALSAR texture 영상을 이용한 결과.	26
그림 4. COSMO-SkyMed InSAR 긴밀도 영상을 이용한 2010년 12월부터 2012년 1월 테라노바 만의 고착빙 면적의 시계열 변화.	27
그림 5. 테라노바 만의 고착빙(Land-fast ice), 유빙(Pack ice), 전체 해빙 면적에 대한 시계열 변동성.	28
그림 6. 2009년의 남극해 빙붕에 대한 기저 용융 속도 지도. 용융 속도(m/yr 단위, 빨강-파랑), 기저질량소실(Gt/yr 단위, 원형 도표).	30
그림 7. 2003년과 2008년 사이의 남극 빙붕의 두께 변화. 해저 온도(분홍-파랑), 기저 깊이(m 단위, 회색 색표), 빙붕 두께변화 (m yr ⁻¹ 단위, 파랑-빨강), 육지빙하 유출 (Gt yr ⁻¹ 단위, 원형 도표).	31
그림 8. Campbell 빙하 지역의 기저 용융에 의한 두께 변화 속도. 흰 실선은 grounding line, 점선은 hinge line.	32
그림 9. Pine island 빙하의 흐름 속도 지도. (e) 2000년도의 빙하 흐름 속도 및 방향 (f) 2014년도의 빙하 흐름 속도 및 방향. 가는 검은 선은 1999년의, 굵은 검은 선은 2009년의 grounding line.	33
그림 10. 각 년도에 따른 고착빙 가장자리의 위치 (Mahoney 외 2007).	34
그림 11. MODIS 20일 영상 합성 결과(위)와 AMSR-E 해빙농도 합성 결과(아래).	35
그림 12. 기저 질량 균형 추출 모식도.	37
그림 13. CIAS software 작업화면.	39
그림 14. Landsat 피쳐트래킹을 이용한 Crosson 지역 빙하 속도 추출 결과. (a) 2012년에서 2013년까지, (b) 2014년에서 2015년까지, (c) 2015년에서 2016년까지. 화살표는 빙하 흐름 방향.	41
그림 15. Crosson 빙붕 지역의 2012년에서 2016년까지의 연간 빙붕의 두께.	42
그림 16. Cryosat-2 고도계 자료를 이용한 Crosson 지역 빙하의 연간 두께 변화 속도. (a)	

2012년에서 2013년까지, (b) 2013년에서 2014년까지, (c) 2014년에서 2015년까지, (d) 2015년에서 2016년까지.	43
그림 17. 빙하의 이동 중 발산에 의한 두께 변화인 플릭스 질량 균형 결과. (a) 2012년에서 2013년, (b) 2014년에서 2015년, (c) 2015년에서 2016년.	44
그림 18. 빙하 두께변화, 빙하 이동 속도, 표면 적설/승화 자료를 이용한 Crosson 빙붕 지역 기저용융 변화 추출 결과 (a) 2012년에서 2013년까지, (b) 2014년에서 2015년까지, (c) 2015년에서 2016년까지 (단위 m/a).	45
그림 19. 웨델해, 벨링스하우젠해, 아문센해, 로스해의 고착빙 연구 지역에 대한 ALOS-1 PALSAR 영상. 웨델해의 고착빙 지역(파란색 글자)은 훈련 및 테스트 자료로 사용되었고 다른 해의 고착빙 지역(빨간색 글자)은 모델 검증 자료로 사용함.	47
그림 20. 동웨델해 연구 지역에 대한 SAR 영상 분할 결과(좌) 및 각 객체로부터 계산한 입력 변수(평균 및 표준편차) 예시(우). 오른쪽 그림에서 검은색 선은 유빙, 흰색 선은 고착빙 지역을 의미함.	48
그림 21. 아문센해의 고착빙 지역에 대한 (a) SAR 영상, (b) 이른 날짜에 대한 MODIS 영상들(2010년 10월 31일), (c) 이후 날짜에 대한 MODIS 영상들(2010년 11월 5일). 빨간선은 고착빙 기준지역을 의미함.	49
그림 22. 웨델해의 동 웨델해 고착빙 연구 지역에 대한 객체기반 random forest 모델의 예측 결과. (a) 기본 입력 자료를 모두 사용한 결과, (b) normalization 해빙 속도를 이용한 결과, (c) standardization 해빙 속도를 이용한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.	50
그림 23. 웨델해의 동 웨델해 고착빙 연구 지역에 대한 객체기반 random forest 모델의 예측 결과. (a) 거리 입력 변수를 제외한 결과, (b) 거리 제외 및 normalization 해빙속도 이용 결과, (c) 거리 제외 및 standardization 해빙 속도 이용 결과, (d) 해빙 속도 변수 제외한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.	51
그림 24. 아문센해와 로스해 사이 해역에 Nickerson 빙붕 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 기본 입력 자료를 모두 사용한 결과, (b) normalization 해빙 속도를 이용한 결과, (c) standardization 해빙 속도를 이용한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.	52
그림 25. 아문센해와 로스해 사이 해역에 Nickerson 빙붕 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 거리 입력 변수를 제외한 결과, (b) 거리 제외 및 normalization 해빙속도 이용 결과, (c) 거리 제외 및 standardization 해빙 속도 이용 결과, (d) 해빙 속도 변수 제외한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.	53
그림 26. 아문센해 Cape dart 고착빙 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 기본 입력 자료를 모두 사용한 결과, (b) normalization 해빙 속도를 이용한 결과, (c)	

standardization 해빙 속도를 이용한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.	54
그림 27. 아문센해 Cape dart 고착빙 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 거리 입력 변수를 제외한 결과, (b) 거리 제외 및 normalization 해빙속도 이용 결과, (c) 거리 제외 및 standardization 해빙 속도 이용 결과, (d) 해빙 속도 변수 제외한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.	55



제 1 장 서론

남극의 빙붕(Ice shelf)은 해상에 떠있는 얼음으로, 육지 빙하의 유출로이다. 빙붕은 남극 해안선의 75%를 차지하고, 그 면적 역시 1.561 million km²에 육박하게 되며, 표면으로는 대기 상태에 영향을 주고 기저로는 빙하와 해양의 열역학적 안정성에 영향을 끼치는 중요한 역할을 한다 (Pritchard 등 2012., Rignot 등, 2013.). 해양의 열역학적 안정성은 저위도와의 에너지 순환에 영향을 끼쳐, 지구 전체 에너지 균형에 영향을 주게 되므로, 그 구체적 파악이 중요하다. 빙붕의 표면 변화와는 달리, 기저 변화는 접근성이 떨어져, 직접적인 관측이 어렵다. 따라서 빙붕의 기저용융에 의한 질량 손실은 빙하질량균형(glacier mass balance)에 의거해, 표면 기상 현상에 의한 변화, 흐름 발산에 의한 변화, 총 두께 변화를 통해 간접적으로 계산을 해내어 살펴볼 수 있다.

고착빙(landfast sea ice 또는 fast ice)이란 해안가를 따라서 형성이 되는 해빙의 한 종류이다. 고착빙은 ice wall, ice front, 빙산 등에 고착되어 움직임이 거의 없이 수일에서 수년간 지속된다. 겨울철 남극 해안 지역을 따라 만연하게 분포된 고착빙은 고정점(anchor point)의 역할을 하는 빙산의 도움으로 수백 킬로 떨어진 먼 바다까지 확장될 수 있다(Massom 등, 2001). 비록 고착빙의 면적(extent)은 전체 남극 해빙 면적의 작은 부분을 차지하지만, 고착빙의 부피는 전체 해빙 부피의 50% 이상을 차지할 수 있다(Giles 등, 2008). 고착빙의 분포는 해빙 생성에 영향을 미칠 수 있는 폴리냐(polynya)의 모양과 크기에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Massom 등, 2001). 다년생 고착빙은 빙붕(ice shelves)이나 빙설(glacier tongues)의 안정화에 기여함으로써 분리 빙하(calving) 현상을 지연되게 하여 이는 결국 빙상(ice sheet)의 질량 균형(mass balance)에도 영향을 미칠 수 있다(Massom 등, 2010). 또한 고착빙은 남극에서 거주하는 미생물체나 웨델해, 황제 펭귄 등의 포유류들에게 광범위한 서식지와 번식지를 제공하기 때문에 생물학적으로 매우 중요한 역할을 한다(Massom 등, 2009). 고착빙의 분포는 극항로나 연안 탐사 등에 영향을 미치며 특히 다년생 고착빙 지역에서의 베이스 캠프 운영에 매우 중요하다. 본 과제에서는 SAR 영상을 이용하여 서남극해 해역에 따라 고착빙 기준 자료를 구축하였고, 다양한 통계 변수들을 이용하여 고착빙과 비 고착빙 지역을 기계학습 기법을 적용해 고착빙 분류 모델을 개발하였으며, 서남극해 해역별 고착빙 모델을 적용하여 고착빙 탐지를 수행하였다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

<Mass balance 연구>

국내에서는 극 지역 빙봉의 기저 용융에 대한 연구가 수행되지 않고, 빙하의 유출 속도를 추적하는 연구가 있었다. 한향선 등 (2013)에서는 COSMO-SkyMed SAR 영상을 통하여 동남극 Campbell 빙하의 연간 면적 변화 및 유속을 측정하였다. Campbell 빙하는 1990년 이 후로 연구가 거의 수행되지 않은 지역으로, 당 연구에서는 2010년 6월부터 2012년 1월까지 기간에 취득된 59장의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 획득하였고, 피쳐트래킹 방법을 이용하여 변위 추적 및 속도, 면적을 산출하였다. Campbell 빙하설에서의 유출량은 $0.58 \pm 0.12 \text{ km}^3/\text{yr}$ 로 추정되었고, 이는 1989년에 측정된 양보다 증가한 양이었다. Campbell 빙하설의 흐름 속도는 181-268 m/yr로서 1988-1989년에 측정된 속도보다 빠르며, 이는 빙하의 유출량 증가에 영향을 주었다고 해석이 되었다(그림 1).



그림 1. Campbell 빙하 흐름 속도 지도. 흰 선은 빙하의 grounding line을 의미 (한향선 등 2013).

<고착빙 연구>

국내에서는 고착빙 탐지 연구에 대해 많은 연구가 수행되지 않았다. 황도현 등 (2013)은 다중 주파수 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상을 이용하여 북극해 그린란드의 고착빙을 분류하는 연구를 수행하였다. 이 연구는 고해상도의 SAR 영상을 이용하여 그린란드의 고착빙 분류 정확도를 향상시키고자 하였다. 그린란드 북쪽의 고착빙 부근에서 2009년 5월 1일부터 6일까지 진행된 현장 관측을 통해 FYI(First Year Ice), HDI(Highly Deformed Ice), MDI(Moderately Deformed Ice), ridge의 4개의 해빙 유형에 대한 현장자료를 수집하였다. SAR 영상 자료는 현장 관측이 이루어진 지역과 시기를 고려하여 5장의 PALSAR와 Radarsat-2, ASAR 영상을 사용하였다. 전처리가 끝난 영상에 대해서 SAR 영상을 GLCM(Grey Level Co-occurrence Matrix) 알고리즘을 이용하여 텍스처 영상을 생성하여 분류에 이용하였다. 그 결과로서 K-means 알고리즘, 즉 무감독 분류를 이용한 해빙 분류 결과는 SAR 영상만을 이용했을 때보다 텍스처 영상으로 분류한 경우 전체 정확도가 높았고, 최대 우도법(maximum likelihood) 알고리즘, 즉 감독 분류를 사용했을 경우 텍스처 영상의 전체 정확도는 때에 따라서 높게 나타났다. 그림 2는 K-means 알고리즘을 사용했을 때 다중 영상을 이용하는 것이 전체 정확도가 높았고, 그림 3의 최대우도법 알고리즘을 사용했을 경우 다중 영상을 사용했을 때 클래스별 분류 정확도 차이가 있어 단일 영상과 다중 영상을 적절하게 사용해야 한다고 해석되었다. 결론적으로 텍스처 영상을 함께 사용했을 때 전체 정확도 향상에 도움을 주었다. 클래스별 분류 결과 분석은 단일 SAR 영상은 1년빙과 ridge의 분류가 잘 되었고, 다중 SAR 영상으로 분류했을 때는 MYI 혼합 영역인 HDI와 MDI가 잘 분류되었다. 한향선 등 (2015)은 InSAR 긴밀도 영상을 이용하여 남극 장보고기지 인근 고착빙의 연간 변화를 분석하였다. 이 연구는 2010년 12월부터 2012년 1월까지 테라노바 만 지역에 대해서 총 62개의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 이용하여 1~9일의 시간적 기선거리를 가지는 38개의 간섭쌍을 구축하여 각 간섭쌍에 대해 긴밀도 분석을 수행하였다. 그 결과로써 테라노바 만에서 고착빙의 시기별 면적 변화를 긴밀도 영상에 도시하였으며(그림 4), 각각의 긴밀도 영상과 SAR 영상으로부터 추출된 고착빙, 유빙, 전체 해빙의 면적을 시계열적으로 나타내었다(그림 5). 2010년 12월 테라노바 만의 고착빙은 장보고 과학기지가 위치한 피비우스 곳부터 이탈리아의 마리오 주켈리 기지가 위치한 게를라흐 만 사이에 분포했다. 고착빙 면적은 남극의 여름철이 끝나는 3월까지 감소했고 게를라흐 만의 일부에만 존재하였다. 고착빙의 증가는 남극 가을이 시작되는 3월부터 겨울인 7월까지 증가하였고, 봄이 시작되는 10월부터 면적이 감소하는 것으로 나타났다.

본 과제에서 수행된 연구결과는 국내 기술개발과는 다른 접근 방법을 이용하여 보다 향상된 결과를 보여주었다. 먼저 제한된 지역에 대해서 고착빙 탐지가 수행된데 비해 본 과제에서는

서남극 전체에 대해서 고착빙 탐지가 수행되었다. 또한 InSAR 기법을 적용하기 위해서는 지표면의 긴밀도가 유지되어야 하는 제한을 가지고 SAR의 좁은 촬영범위에 의해서 광역적인 고착빙 탐지가 어려울 수 있다. 하지만 본 과제에서는 ScanSAR 모드의 SAR 영상을 이용하여 서남극해 지역에서 광역적으로 자료를 수집하였고 다양한 시간 간격을 가지는 SAR 영상 세트에 대해서 적용이 가능하여 기존 연구의 한계점을 극복하였다.

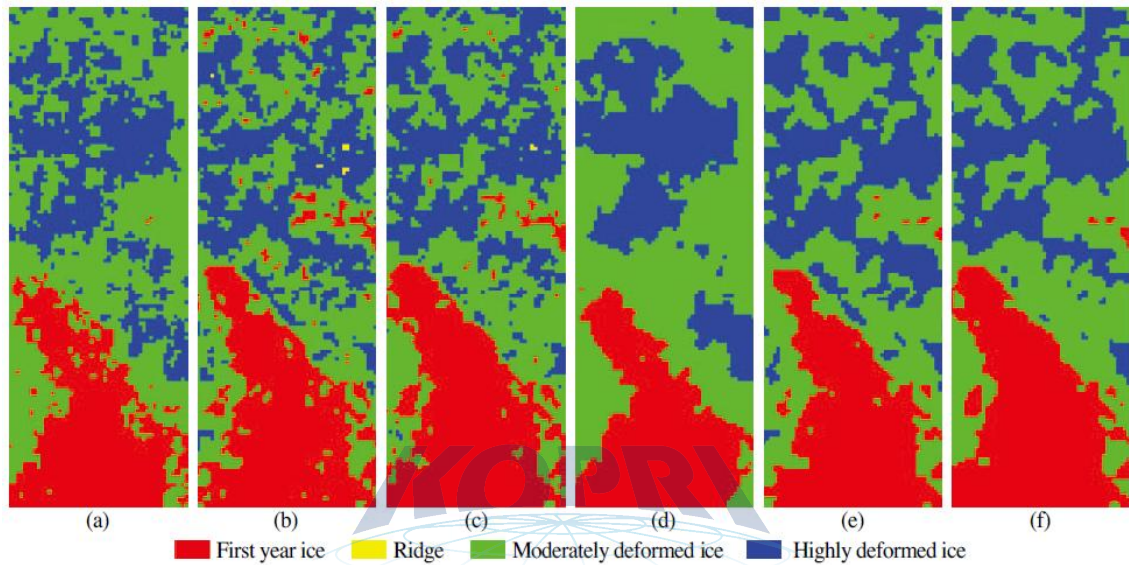


그림 2. K-means 알고리즘을 이용한 분류 결과. (a) ASAR와 PALSAR, (b) Radarsat-2와 PALSAR, (c) Radarsat-2, ASAR, PALSAR, (d) ASAR, PALSAR texture, (e) Radarsat-2, PALSAR texture, (f) Radarsat-2, ASAR, PALSAR texture 영상을 이용한 결과 (황도현 외 2013).

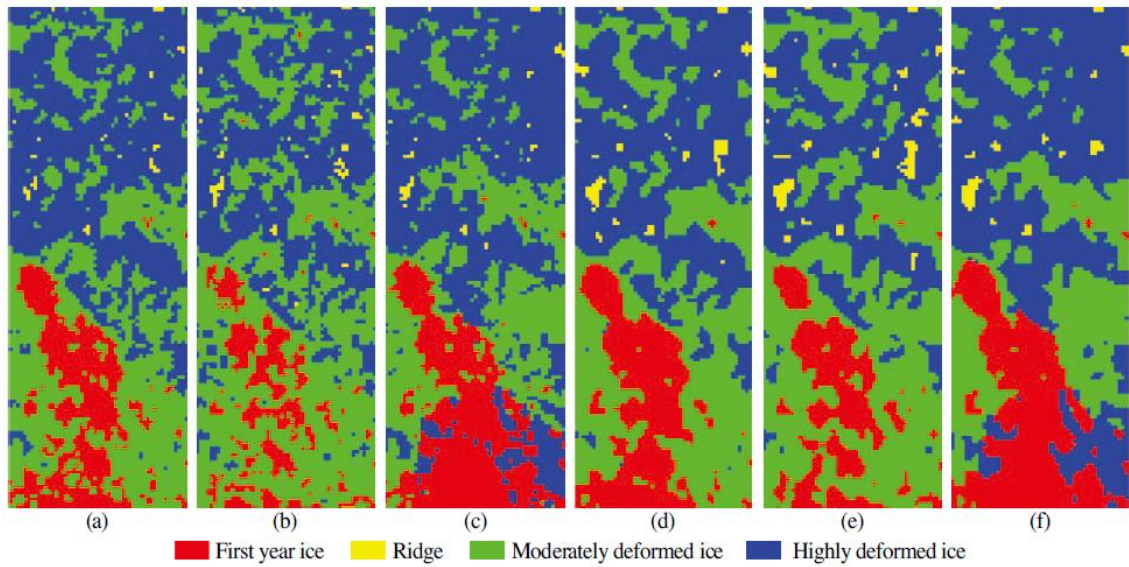


그림 3. 최대 우도법 알고리즘을 이용한 분류 결과. (a) ASAR와 PALSAR, (b) Radarsat-2와 PALSAR, (c) Radarsat-2, ASAR, PALSAR, (d) ASAR, PALSAR texture, (e) Radarsat-2, PALSAR texture, (f) Radarsat-2, ASAR, PALSAR texture 영상을 이용한 결과 (황도현 외 2013).



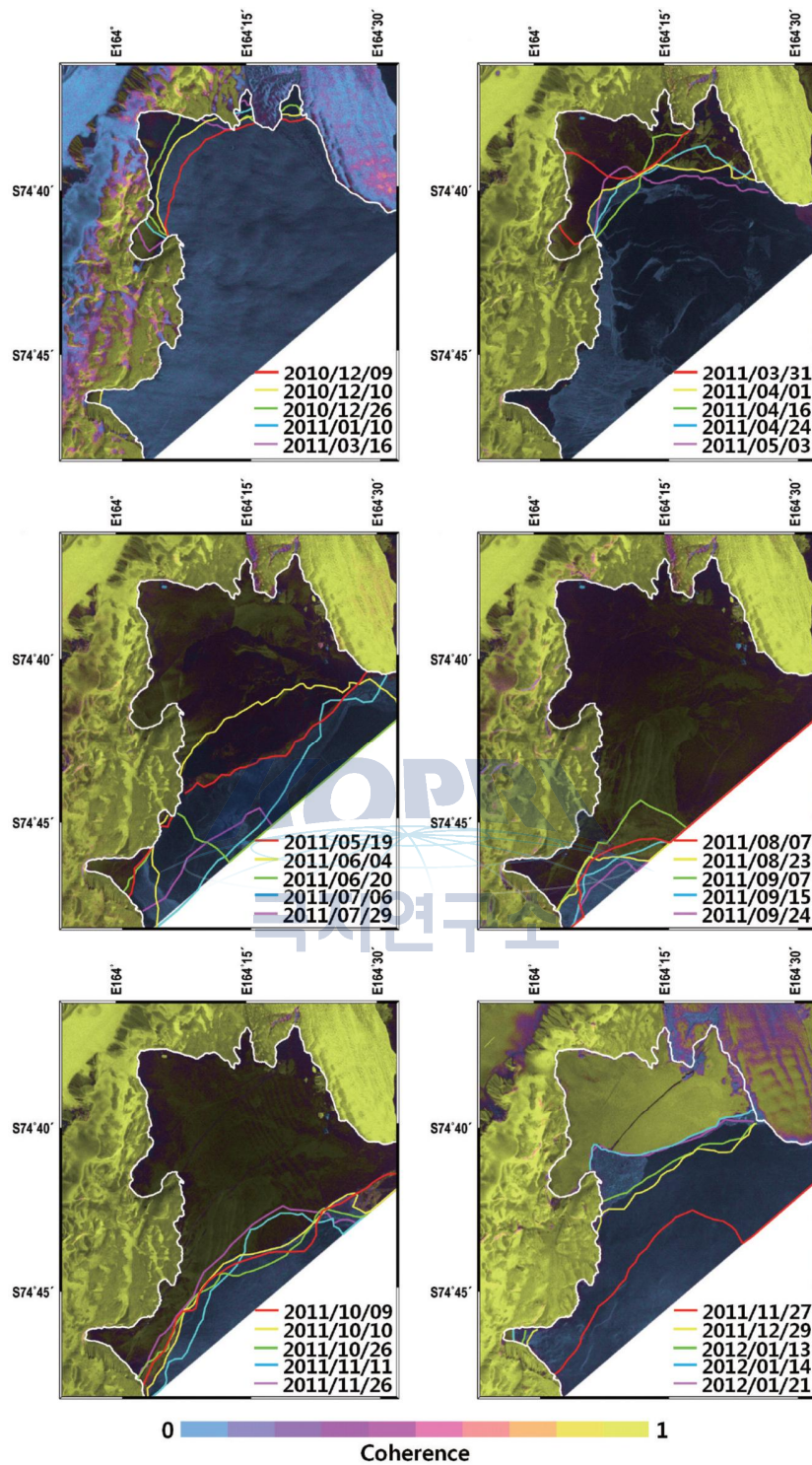


그림 4. COSMO-SkyMed InSAR 긴밀도 영상을 이용한 2010년 12월부터 2012년 1월 테라노바 만의 고착빙 면적의 시계열 변화 (한향선 외 2015).

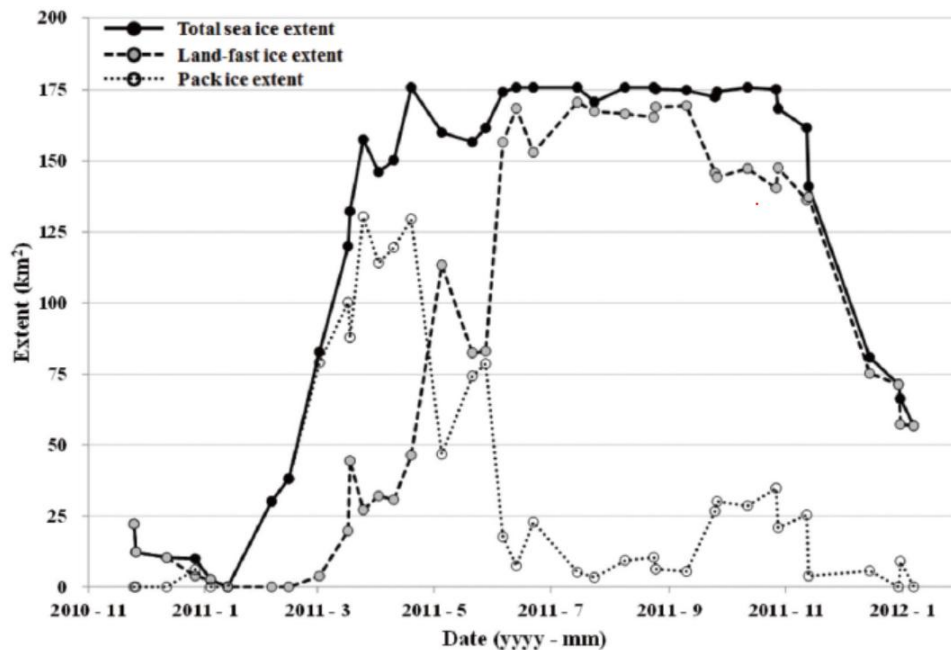


그림 5. 테라노바 만의 고착빙(Land-fast ice), 유빙(Pack ice), 전체 해빙 면적에 대한 시계열 변동성 (한향선 외 2015).

제 2 절 국외 기술개발 현황

<Mass balance 연구>

빙하 기저 질량 변화에 대한 국외 기술 개발 현황은 2012, 2013년도에는 매우 활발하였고, 남극 전 지역에 대한 빙하 흐름 속도 및 기저 용융의 변화가 파악이 되었다. Rignot 외 (2013)에서는 다양한 SAR 영상 자료를 수집하여 InSAR 기법을 통해 표면의 이동 변위 및 속도를 파악하였고, 현장 관측 빙하 두께 자료, 원격탐사자료 등 다양한 자료 기반으로 만들어진 BEDMAP-2 자료를 이용하여 두께 파악을 하였으며, 표면 적설/승화에 의한 두께 변화는 RACMO-2 모델을 통해 산출이 되었다. 이 자료들을 통해 전 남극해 빙봉에 대한 기저 용융 속도를 파악하였다(그림 6).

Pritchard 외 (2012)에서는 빙하 두께와 표면 작용을 토대로 기저 용융의 경향을 파악하였다. 이 연구는 빙하 흐름에 따른 발산을 고려하지 않았으며, 빙봉 두께 변화에서 적설/승화를 뺀 후, 그 변화를 이용해 기저 용융 변화 추이를 판단하였으며, 앞선 Rignot 외 (2012)와는 다르게, 빙하 두께 파악을 위해 ICESat 고도계 자료를 사용하여 시공간적 고해상도의 고도 정보를 얻어, 정밀성을 높였다(그림 7).

한향선 등 (2015)에서는 동남극해 Campbell 빙하의 질량 균형 파악을 통해 기저 용융 속도를 측정하였다. 이 연구는 먼저 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar; 간섭계 합성 구경 레이더) 방법을 이용하여 빙하의 흐름 속도를 파악해 내었다. SAR 영상 자료로는 COSMO-SkyMed 위성 시리즈의 strip-map 모드, 3m 해상도, VV편파의 X밴드 자료를, 2011년 01월 26일부터 2011년 11월 27일까지 1일 간격을 가지는 총 14쌍의 SAR 영상을 이용하였다. 그리고 빙붕의 두께 정보는 2005년에서 2008년까지 취득된 ICESat GLAS 고도계 자료와 빙하 및 해수의 밀도를 통해 추정되었다. 추출된 빙하의 이동속도와 두께의 곱에 대한 발산 정도를 통해 이동에 의한 두께 변화를 계산해 내었고, 다시기 두께의 변화 정도를 통해 총 두께 변화를 추정하였다. 표면 침식에 의한 두께변화는 RACMO(Regional Atmospheric Climate Model)을 통해 계산되었다. 기저 용융에 의한 두께 변화는 총 두께변화에서 이동에 따른 두께 변화와 표면 침식에 따른 두께 변화를 빼어 계산하였고, 그 결과는 그림 8와 같다.

한향선 등 (2016)에서는 위성영상들의 피쳐트래킹 방법을 이용하여 서남극해 Pine island 빙하의 흐름 속도 변화를 측정하였다. Pine island 빙하는 서남극 지역의 대표적인 빙하 유출로 중 하나로, 서남극 해의 아문센 해(Amundesn Sea)로 유입이 되어 남극 빙상의 질량 변화를 일으키게 된다. 당 연구에서는 2000년에서 2014년까지의 Landsat-7 ETM+와 Landsat-8 OLI 영상을 이용하여 속도를 추출 하였는데, 해당 결과를 TanDEM-X를 통해 계산한 빙하 흐름 속도와 비교를 하여, 해당 방법의 정확성을 평가 하였고, 유속이 빠른 지점에서는 4% 안팎의 속도 차이를 나타내었다. 시간에 따른 빙하 흐름 속도는 2000년에 ~ 2.8 km/yr에서 2010년에 ~ 4.3 km/yr로 증가하였으나, 2010-2012년 사이에 ~ 5 km/yr의 속도 감소를 보이고, 이 후 빙하의 흐름 속도는 증가한 것으로 파악이 되었다 (그림 9).

따라서 본 연구에서는 한향선 등 (2016)에서 사용된 Landsat 영상을 이용한 빙하 흐름 속도 추정과 한향선 등 (2015)에서 사용된 빙붕 기저 용융 파악 방법을 이용하여, 서남극해 빙붕 지역에 대한 기저 용융 및 빙하 흐름 속도 변화를 산출하고자 한다. 또한, Pritchard 외 (2012)에 사용된 방법을 Cryosat-2 고도계 자료에 적용하여 보다 정밀한 빙붕 두께 변화를 파악하여, 정확한 질량 변화를 파악하고자 한다.

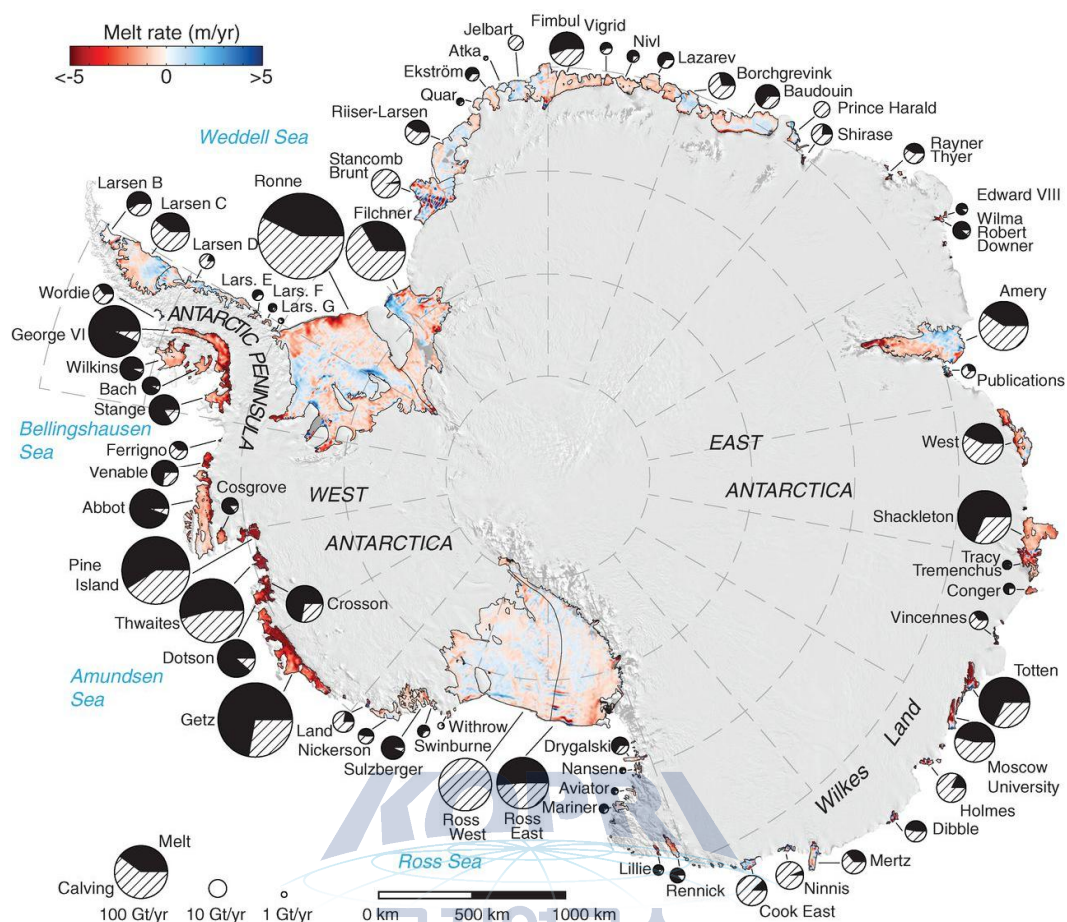


그림 6. 2009년의 남극해 빙봉에 대한 기저 용융 속도 지도. 용융 속도(m/yr 단위, 빨강-파랑), 기저질량소실(Gt/yr 단위, 원형 도표) (Rignot 외 2013).

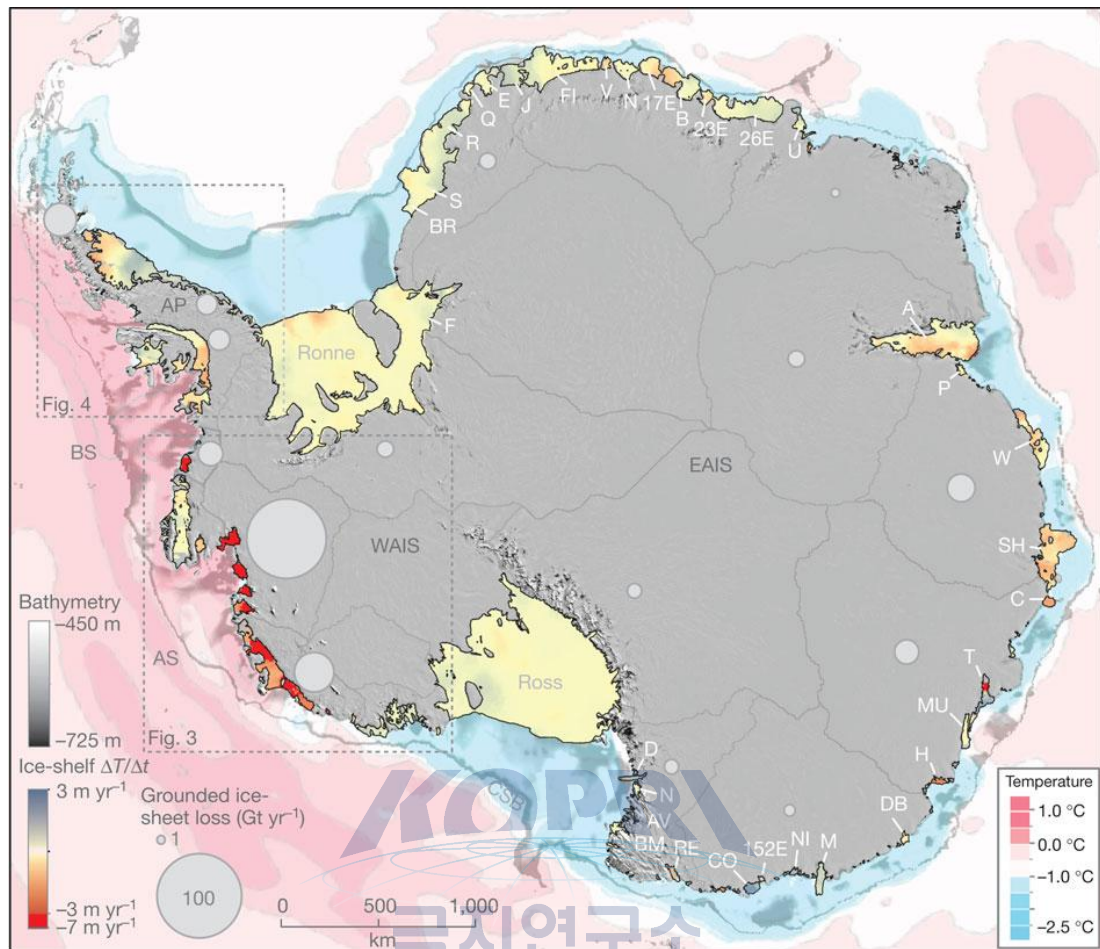


그림 7. 2003년과 2008년 사이의 남극 빙봉의 두께 변화. 해저 온도(분홍-파랑), 기저 깊이(m 단위, 회색 색표), 빙봉 두께변화 (m yr⁻¹ 단위, 파랑-빨강), 육지빙하 유출 (Gt yr⁻¹ 단위, 원형 도표) (Pritchard 외 2012).

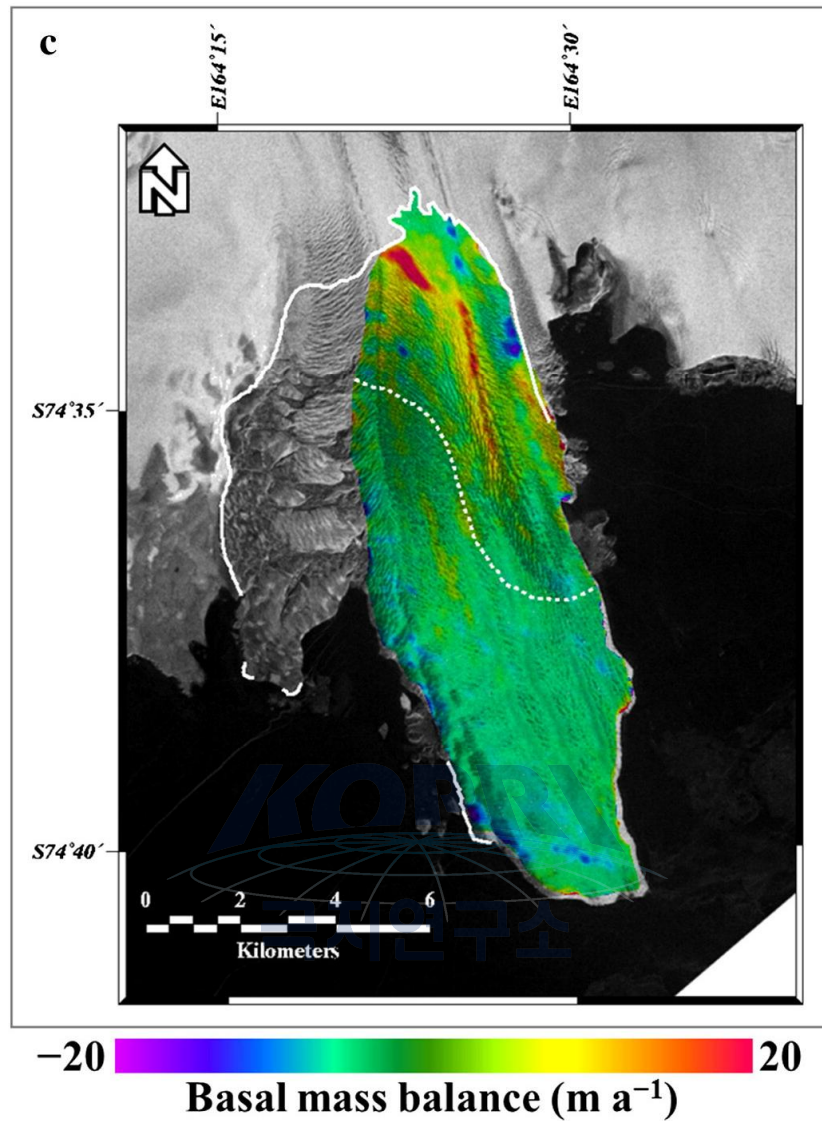


그림 8. Campbell 빙하 지역의 기저 용융에 의한 두께 변화 속도. 흰 실선은 grounding line, 점선은 hinge line (한향선 외 2015).

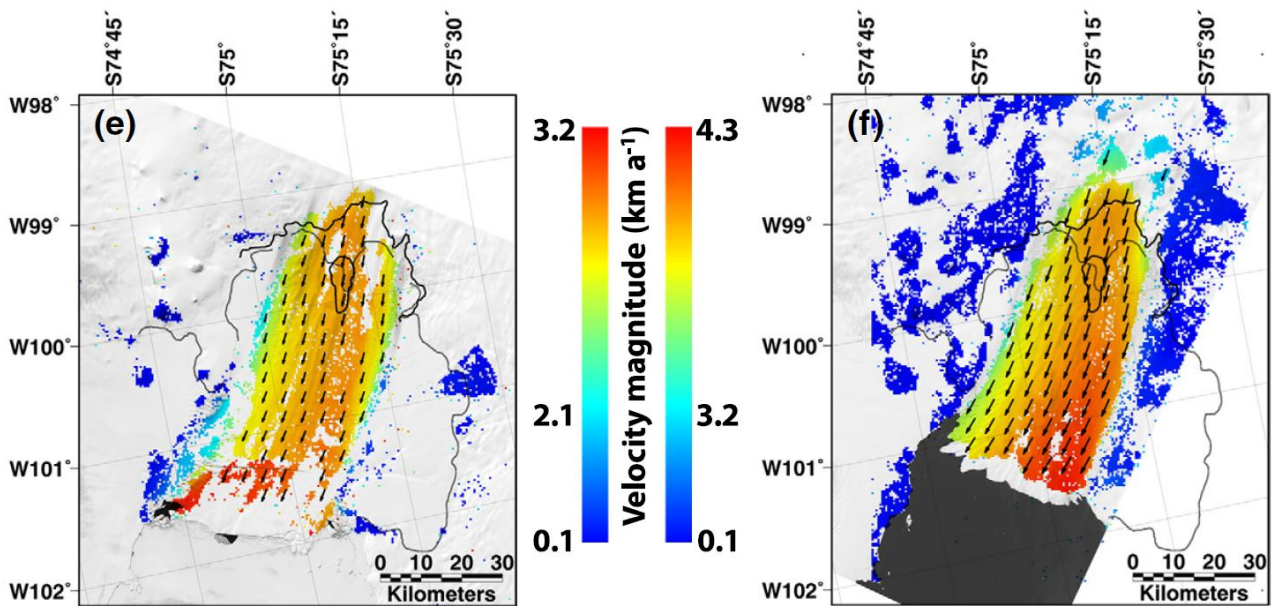


그림 9. Pine island 빙하의 흐름 속도 지도. (e) 2000년도의 빙하 흐름 속도 및 방향 (f) 2014년도의 빙하 흐름 속도 및 방향. 가는 검은 선은 1999년의, 굵은 검은 선은 2009년의 grounding line (한향선 외 2016).

<고착빙 연구>

국외의 기술개발 현황은 국내에 비해서 보다 활발하게 수행되어져 왔다. 고착빙을 탐지하기 위해서는 광학 및 SAR 영상을 사용하여 영상 합성(composite)이나 InSAR 기법이 이용되었다. Mahoney 등 (2007)은 Radarsat SAR 영상을 이용해서 1996년부터 2004년까지의 알래스카 지역의 고착빙을 탐지하였다. 20일의 시간 간격을 가지는 SAR 영상 pair를 이용해서 일정한 후방산란 패턴을 보이는 지역을 고착빙으로 정의하였다. 그 결과로 그림 10은 1996년부터 2004년까지의 매년 탐지된 고착빙 가장자리를 축적한 결과를 보여준다. Meyer 등 (2010)은 ALOS-1 PALSAR의 L-band SAR 자료를 이용하여 InSAR 기법을 최초로 적용하여 고착빙 가장자리를 추출하였다. 하지만 후방산란 값만으로 고착빙을 유빙과 바람에 의해 표면이 거칠어진 개빙 구간과 구분이 어려운 한계를 가지고 InSAR는 지표면의 긴밀도가 유지되어야 하는 제한을 가진다. Fraser 등 (2010)은 TIR(Thermal Infrared)과 가시 영상을 이용하여 동남극 고착빙을 탐지하였다. 20일을 합성한 MODIS 영상으로부터 움직임이 거의 없는 고착빙 지역은 평균한 반사도 및 밝기온도 값이 유지되는 반면 유빙은 합성된 기간 동안 개빙 구간의 값과 혼합되면서 값이 흐려지는 차이를 이용하여 고착빙을 탐지하였다(그림 11). Kim 등 (2015)은 MODIS, AMSR-E, SSM/I의 다중 위성센서를 융합하여 고착빙을 탐지하였다. 하지만 광학영상은 구름 등의 기상조건에 영향을 받기 때문에 기상 조건이 좋지 않은 남극에 적용하기 어려

운 한계를 가진다. 본 과제에서 수행된 연구는 기상조건에 영향이 없는 SAR 영상을 이용하였으며 영상 분할 및 image correlation 기법을 통한 해빙 분류를 수행함으로써 보다 향상된 방법과 결과를 산출하였다. 기존의 후방산란 값을 이용한 고착빙 가장자리 탐지 방법이나 영상 합성을 이용한 기법에 비해 해빙에 대한 추가적인 정보를 이용하여 기존의 한계를 극복하여 보다 향상된 고착빙 탐지 기법을 개발하였다.

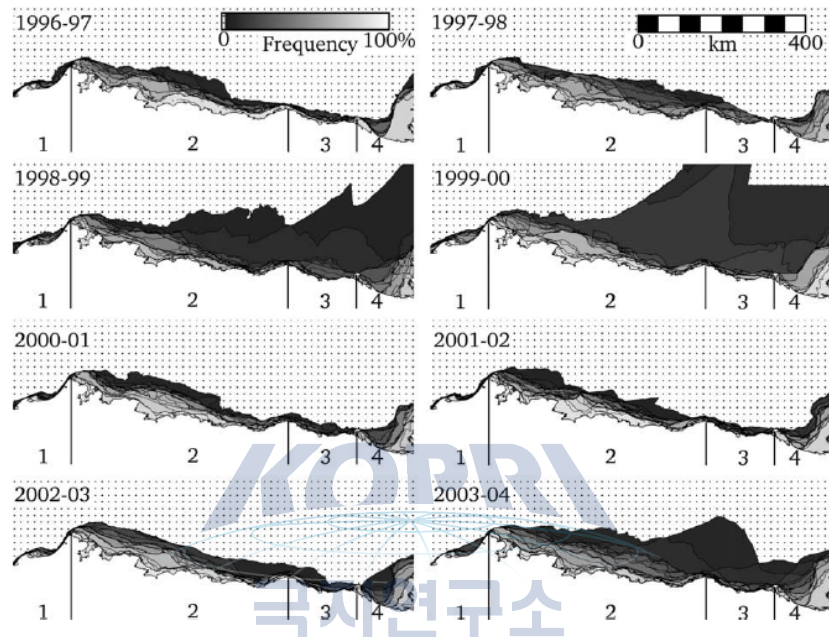


그림 10. 각 년도에 따른 고착빙 가장자리의 위치 (Mahoney 외 2007).

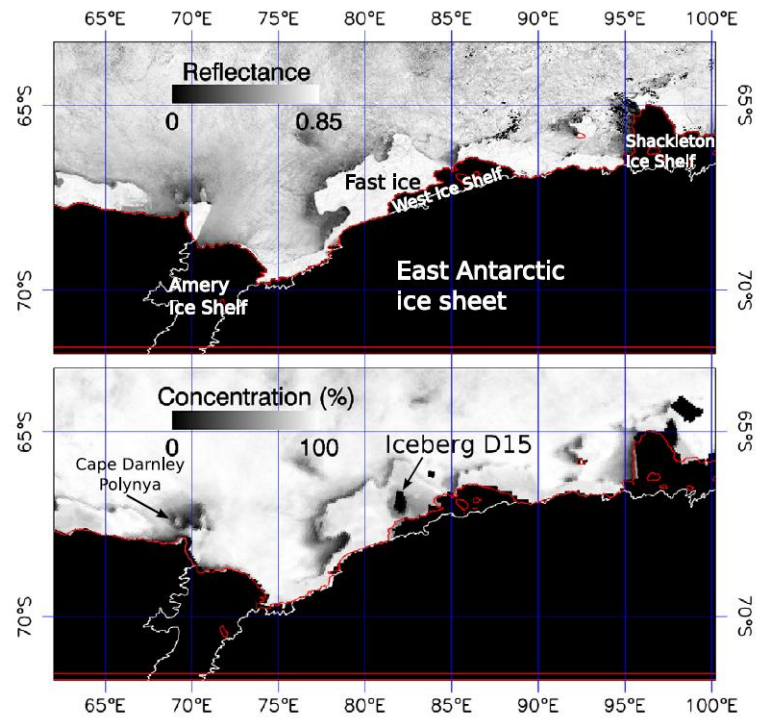


그림 11. MODIS 20일 영상 합성 결과(위)와 AMSR-E 해빙농도 합성 결과(아래) (Fraser 외 2010).





제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 서남극해 빙붕 기저 질량변화 탐지 연구

빙붕의 기저용융에 의한 질량 변화는 낮은 접근성에 의해 직접적 관측이 힘들다. 하지만 이는 표면침식, 흐름의 발산과 함께 빙하의 총 두께 변화를 결정하는 요인으로 작용함으로써, 질량 균형 계산을 통해 간접적으로 계산해 낼 수 있다. 즉, 총 질량 균형 (Total mass balance; TMB) 을 의미하는 빙붕 두께 변화에서 흐름 발산에 의한 두께 변화인 플럭스 질량 균형 (Flux mass balance; FMB)과 적설/승화에 의한 두께 변화인 표면 질량 균형 (Surface mass balance; SMB)을 빼주어 기저 용융에 의한 두께 변화인 기저 질량 균형 (Basal mass balance; BMB)을 구해낼 수 있고, 이를 산출하는 모식도는 그림 12과 같다.

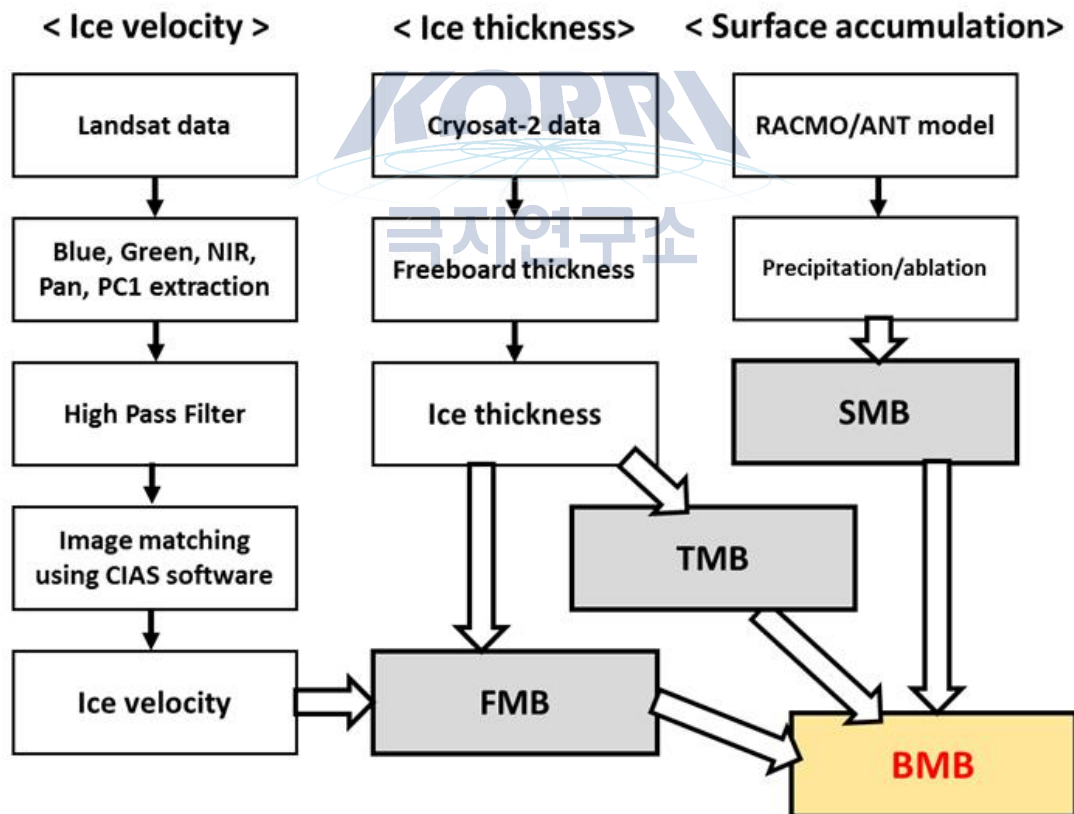


그림 12. 기저 질량 균형 추출 모식도.

1. 흐름속도

먼저 플럭스 질량 균형은 빙하 표면의 이동속도와 당 시점의 두께의 곱에 대한 발산 정도를 통해 계산을 해낼 수 있다. 따라서 빙하의 흐름 속도를 구하여야하는데, 이를 구하는 방법으로는 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar; 간섭계 합성 구경 레이더) 방법과 피쳐트래킹 (feature tracking) 방법이 있다. InSAR 방법은 일정 시간차를 두고 취득된 두 SAR (Synthetic Aperture Radar; 합성구경레이더)영상의 위상차 (Phase difference) 정보를 통해 지점별 이동 변위를 측정하는 방법으로, 고정밀도의 이동 변위를 제공하여 준다. 빙하 이동속도 추출의 경우, 이동변위에 사용된 두 영상의 시간차이를 이동변위 값에 나누어 이동속도를 추출하게 되는데, 본 연구에서는 ESA (European Space Agency)에서 제공하는 Sentinel-1A C 밴드 IW (Interferometric Wide swath) 모드 단일 편파 자료를 취득하여, SNAP (Sentinel Application Platform) 소프트웨어를 통하여 시도를 해보았다. 서남극해 빙봉에 대한 빙하 속도 추출 결과, 테스트 지역 대부분의 영역에서 무효한 값을 가지게 되었는데, 이는 사용한 SAR 영상의 slant range resolution인 2.5m보다 두 영상간의 이동 변위가 더 멀어서 생긴 측정 가용범위 초과에 의한 무효처리였고, 당 연구 지역에는 InSAR 방법을 적용할 수 없음이 밝혀졌다. 이에 따라 InSAR 방법보다 더 긴 이동 변위를 측정할 수 있는 피쳐트래킹 방법을 도입하였다. 피쳐트래킹 방법은 영상 내의 특이 지점들이 다른 시기 영상 내에서 어느 곳에 위치하는지를 파악한 후, 이를 변위로 추출하는 방법이다. 본 연구에서는 USGS (U.S. Geological Survey)에서 제공하는 Landsat-7 ETM+와 Landsat-8 OLI 를 입력 영상으로 사용하였다. Landsat 위성 영상은 Blue, Green, Red, NIR 밴드의 해상도가 30m, Pan 밴드의 해상도가 15m인 고해상도의 광학 영상으로, 광학영상의 특성으로 인해, 구름이 있을 경우, 지표 정보 획득에 어려움이 있어 2012년에서 2016년까지 Crosson 빙봉 지역인 [006, 113] 타일에 대해, 구름이 끼지 않은 영상을 찾아 구축하였으며, 2012년과 2013년에는 Landsat-7 ETM+에서, 2014년에서 2016년까지는 Landsat-8 OLI를 사용하였다 (표 2). 피쳐트래킹 구현을 위해 본 연구에서는 UiO(University of Oslo) 에서 제공하는 CIAS 소프트웨어를 사용하였다 (그림 13). 본 연구에서는 Blue, Green, Red, NIR, Pan 영상과 함께, 주성분 분석의 첫 번째 산출물 (PC1)을 입력 영상으로 사용 하였는데, 각 밴드들을 독립적인 형태로 추출한 뒤, 연구 초점 지역 영역을 자르고, 추출된 입력 영상의 특이점을 부각하기 위해 Gaussian high pass filter처리를 한 후 tiff 포맷으로 맞추어 사용하였다. CIAS에서는 영상 내 값들의 변화 방향을 기반으로 이미지의 유사도를 파악하는 NCC-o (Normalized cross-correction - orientation) 옵션을 통해 흐름 속도를 추출을 진행 하였다. 그림 14는 피쳐트래킹을 이용하여 추출한 Crosson 지역의 빙하 속도를 나타낸 그림이다. 그림 14의 (a)는 2013년에서 2014년까지의, (b)는 2014년에서 2015년까지의, (c)는 2015년에서 2016년까지의 빙하흐름속도를 나타낸다. 2013년에서 2014년의 경

우, Landsat-7 ETM+의 stripe에 의해 무효한 값들이 많음을 볼 수 있다. 그리고 2014년에서 2015년까지의 속도가 2015년에서 2016년까지의 속도보다 상대적으로 빠른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

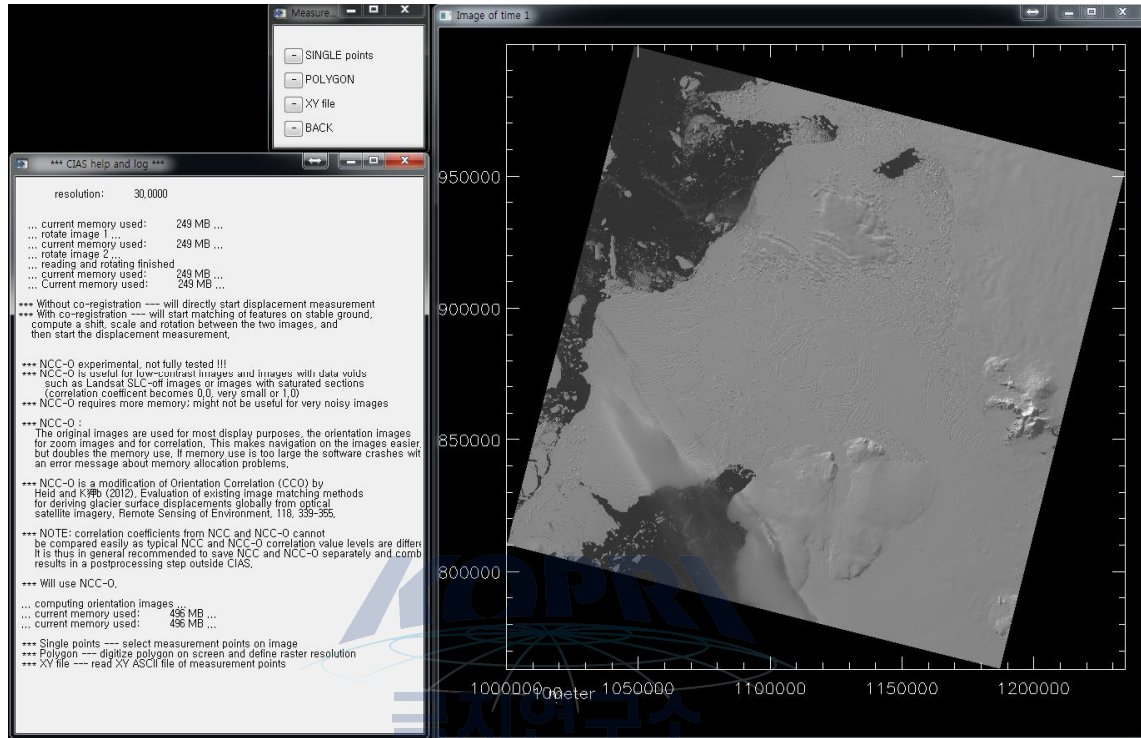


그림 13. CIAS software 작업화면.

year	date	satellite	Cloud fraction
2012	01/22	Landsat-7 ETM+	30%
	11/22	Landsat-7 ETM+	18%
2013	02/09	Landsat-7 ETM+	5%
2014	02/04	Landsat-8 OLI	7%
	02/20	Landsat-8 OLI	26%
	03/24	Landsat-8 OLI	17%
	09/16	Landsat-8 OLI	9%
	10/02	Landsat-8 OLI	4%
	11/03	Landsat-8 OLI	3%
	11/19	Landsat-8 OLI	25%
	12/05	Landsat-8 OLI	2%
2015	02/23	Landsat-8 OLI	7%
	03/11	Landsat-8 OLI	21%
	03/27	Landsat-8 OLI	1%
	09/19	Landsat-8 OLI	3%
2016	01/09	Landsat-8 OLI	2%
	03/13	Landsat-8 OLI	21%
	09/21	Landsat-8 OLI	19%

표 2. Crosson 지역 가용영상 및 사용 영상 (회색).

극지연구소

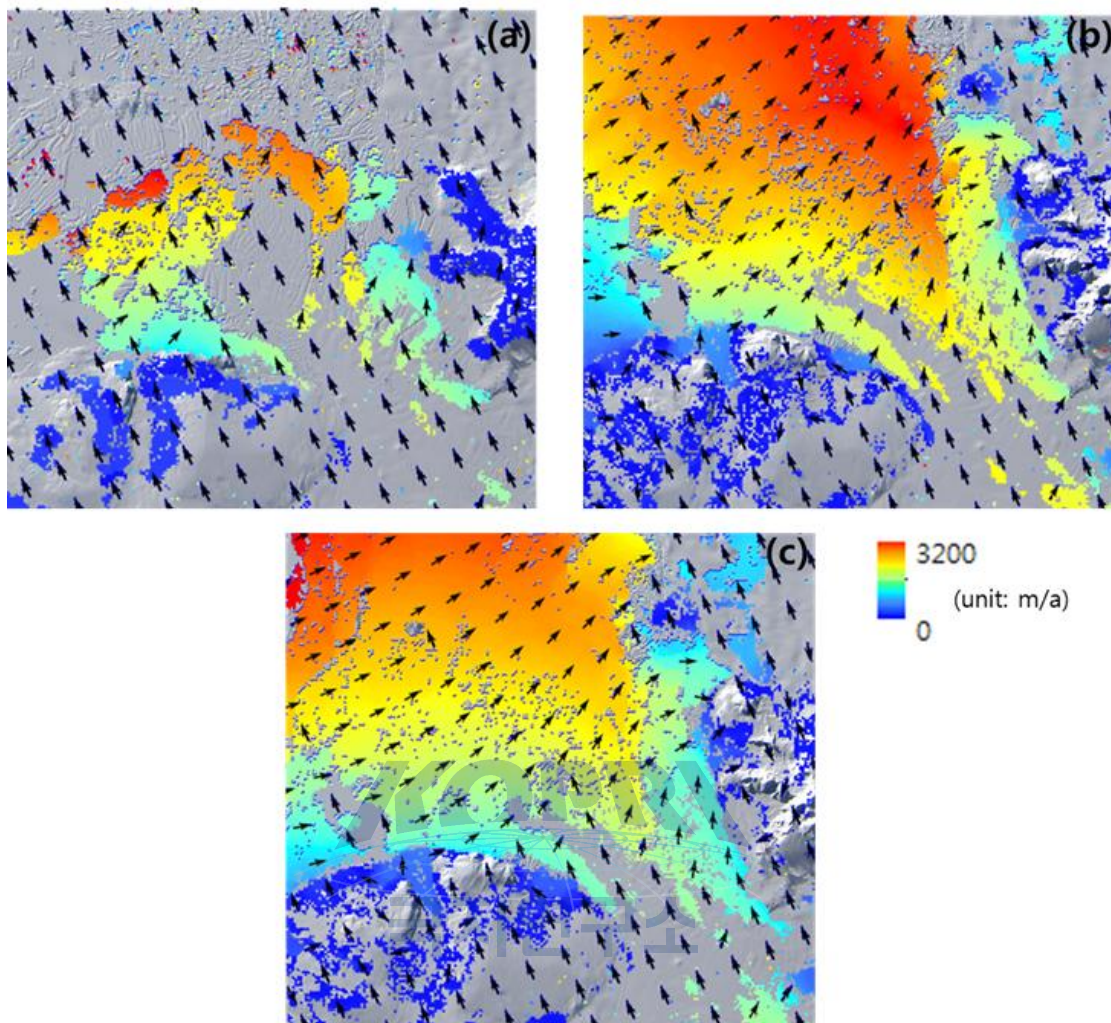


그림 14. Landsat 피쳐트래킹을 이용한 Crosson 지역 빙하 속도 추출 결과. (a) 2012년에서 2013년까지, (b) 2014년에서 2015년까지, (c) 2015년에서 2016년까지. 화살표는 빙하 흐름 방향.

2. 빙붕 두께

빙붕의 두께는 현장관측 또는 고도계 자료를 이용하여 구할 수 있는데, 현장관측의 경우 측정 시기와 공간의 연속성이 낮아, 본 연구에서는 고도계 자료를 이용하여 빙붕의 두께를 측정하였다. 빙붕의 두께를 구하기 위해서는 먼저 빙붕의 고도가 해수면으로부터 얼마나 높이 위치해있는지를 파악하여야 하는데, 이는 평균 해수면 고도 (mean sea surface elevation)와 빙붕의 고도 차를 이용해 산출해낼 수 있다. 그 다음 서남극해 평균 눈의 깊이인 22.6m를 빼내서 얼음의 두께를 구한 뒤, 해수의 평균 밀도(1024kg/m^3)와 얼음의 밀도(916.7kg/m^3)를 이용하여 해수면 아래에 위치하고 있는 빙붕의 두께를 계산해낼 수 있다. 고도 추출은 ESA에서 제공하

는 Cryosat-2의 고도계 자료를 사용하여 진행을 하였고, 추출된 포인트 기반의 정보를 Kriging 보간법을 통해 1km의 빙붕 두께 격자기반 지도로 만들었다(그림 15).

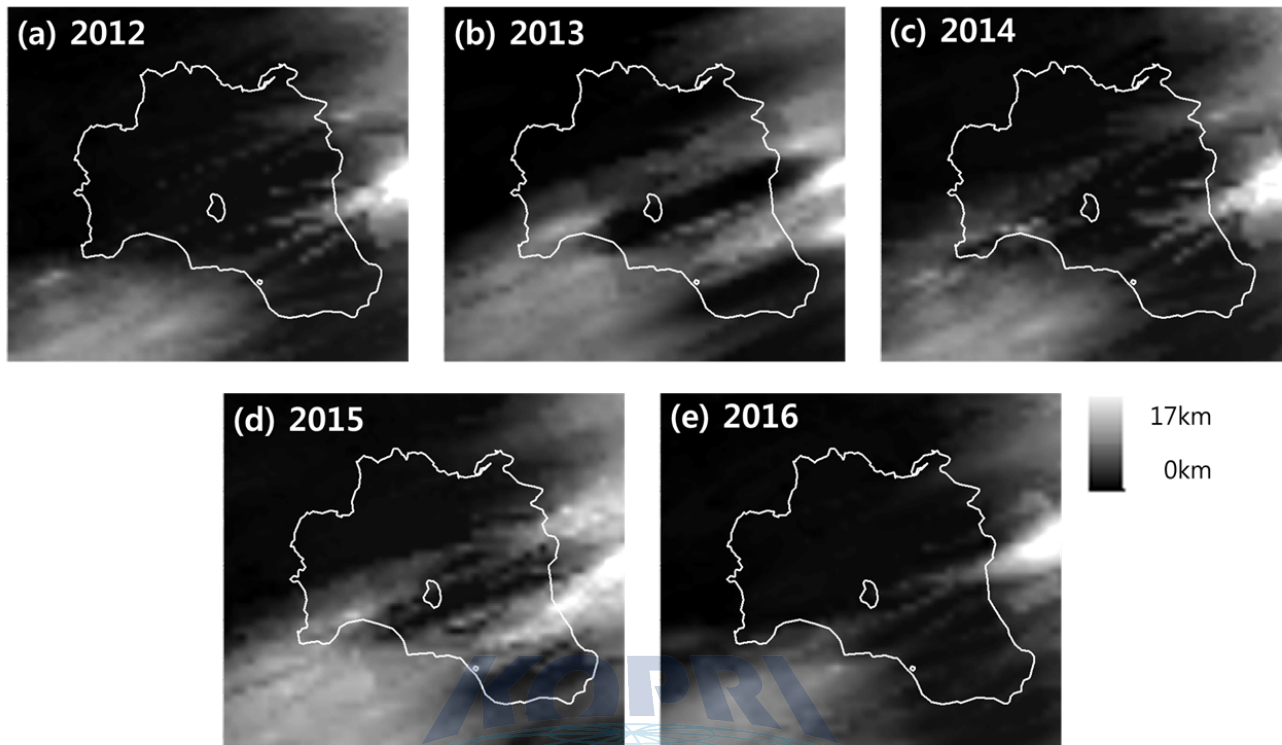


그림 15. Crosson 빙붕 지역의 2012년에서 2016년까지의 연간 빙붕의 두께.

3. 질량균형

기저 질량 균형을 산출하기 위한 총 질량 변화는 Cryosat-2 자료를 통해 산출한 빙붕의 두께 자료의 연간 변화 속도를 산출하여 사용할 수 있다. 따라서, 2012년에서 2013년까지, 2013년에서 2014년까지, 2014년에서 2015년까지, 2015년에서 2016년까지 총 네 개의 두께변화 속도를 산출하였고, 이는 그림 16과 같다. 2013년부터 2016년까지 빙붕의 두께는 감소와 증가 경향을 반복하여 보이고 있으며, 육지에 가까울수록 그 변화율이 큰 것을 알 수 있다. 그리고 플럭스 질량균형의 경우, 빙하의 이동 속도와 두께의 곱의 발산을 통해 구해낼 수 있는데, Landsat영상의 피쳐트래킹을 통해 산출한 빙하 이동 속도와 Cryosat-2 자료를 통해 산출한 빙붕의 두께 자료사용하여 산출하였다(그림 17). 2012년에서 2013년 사이의 경우, 평균 -1.104 m/a , 2014년에서 2015년 사이의 경우, -0.193 m/a , 2015년에서 2016년 사이의 경우 -0.677 m/a 의 속도 변화를 나타내고 있다. 이는 연간 빙붕의 두께가 증가 감소를 반복하여 생기는 변화로 판단이 된다. 그리고 표면 질량균형은 표면의 적설/승화에 의한 두께 변화를 RACMO 모델을 통하여 계산을 하였고, 평균 1.7 m/a 의 적설 누적량을 나타내었다. 그림 18는 연도별 기저 질량 균형

의 값인 두께 변화 속도를 나타낸다. 기저 두께변화의 속도는 해안에서 멀어질수록 변화가 큰 것을 볼 수 있었으며, 2014년에서 2015년까지는 기저의 두께변화 속도가 대체로 음의 값을 보이는 것을 알 수 있었고, 2015년에서 2016년까지는 기저의 두께변화 속도가 대체로 양의 값을 보임을 나타내었다. 하지만 이는 여름철 빙붕의 흐름 속도 및 두께변화를 파악한 것으로, 표면의 빠른 변화에 의해 불확실성이 상대적으로 큼을 판단할 수 있다.

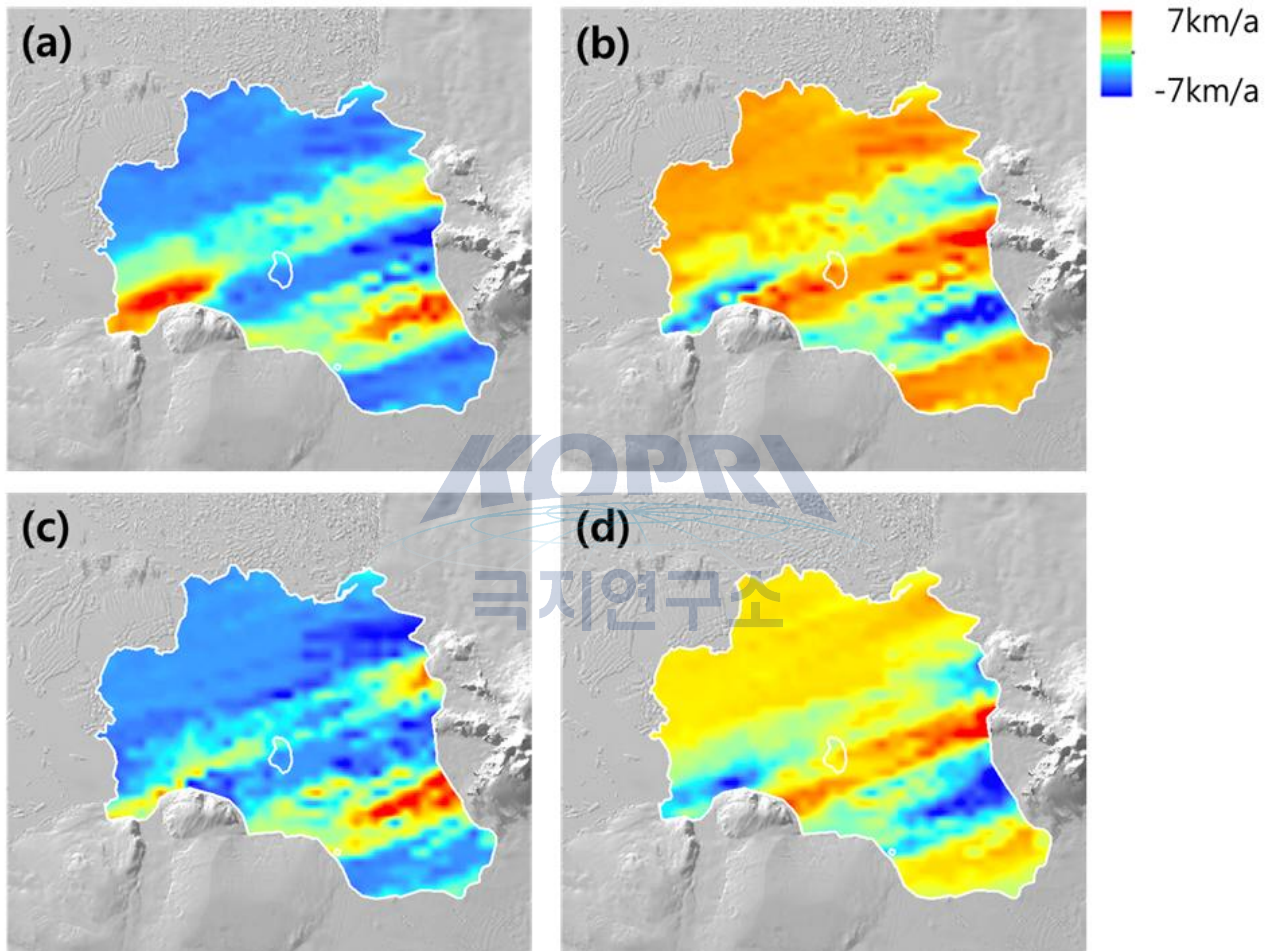


그림 16. Cryosat-2 고도계 자료를 이용한 Crosson 지역 빙하의 연간 두께 변화 속도. (a) 2012년에서 2013년까지, (b) 2013년에서 2014년까지, (c) 2014년에서 2015년까지, (d) 2015년에서 2016년까지.

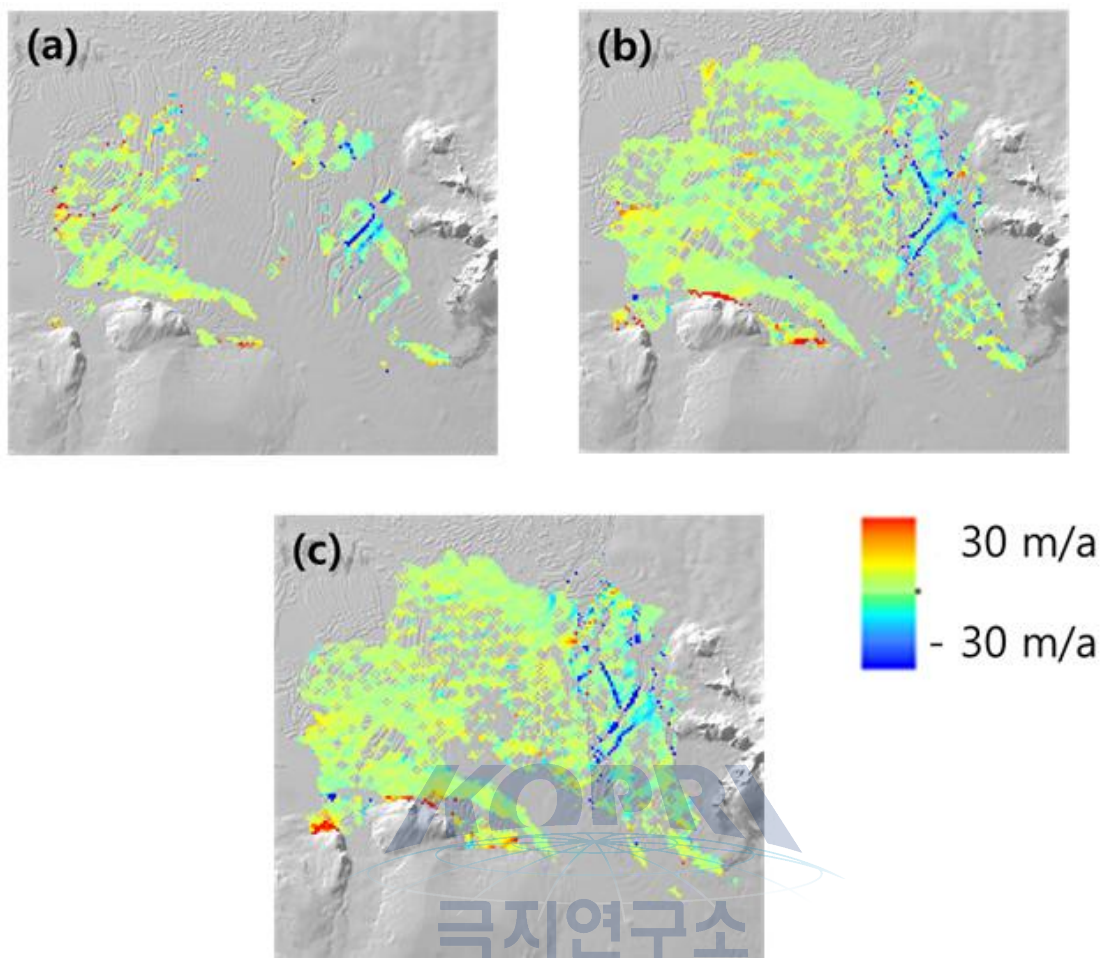


그림 17. 빙하의 이동 중 발산에 의한 두께 변화인 플렉스 질량 균형 결과. (a) 2012년에서 2013년, (b) 2014년에서 2015년, (c) 2015년에서 2016년.

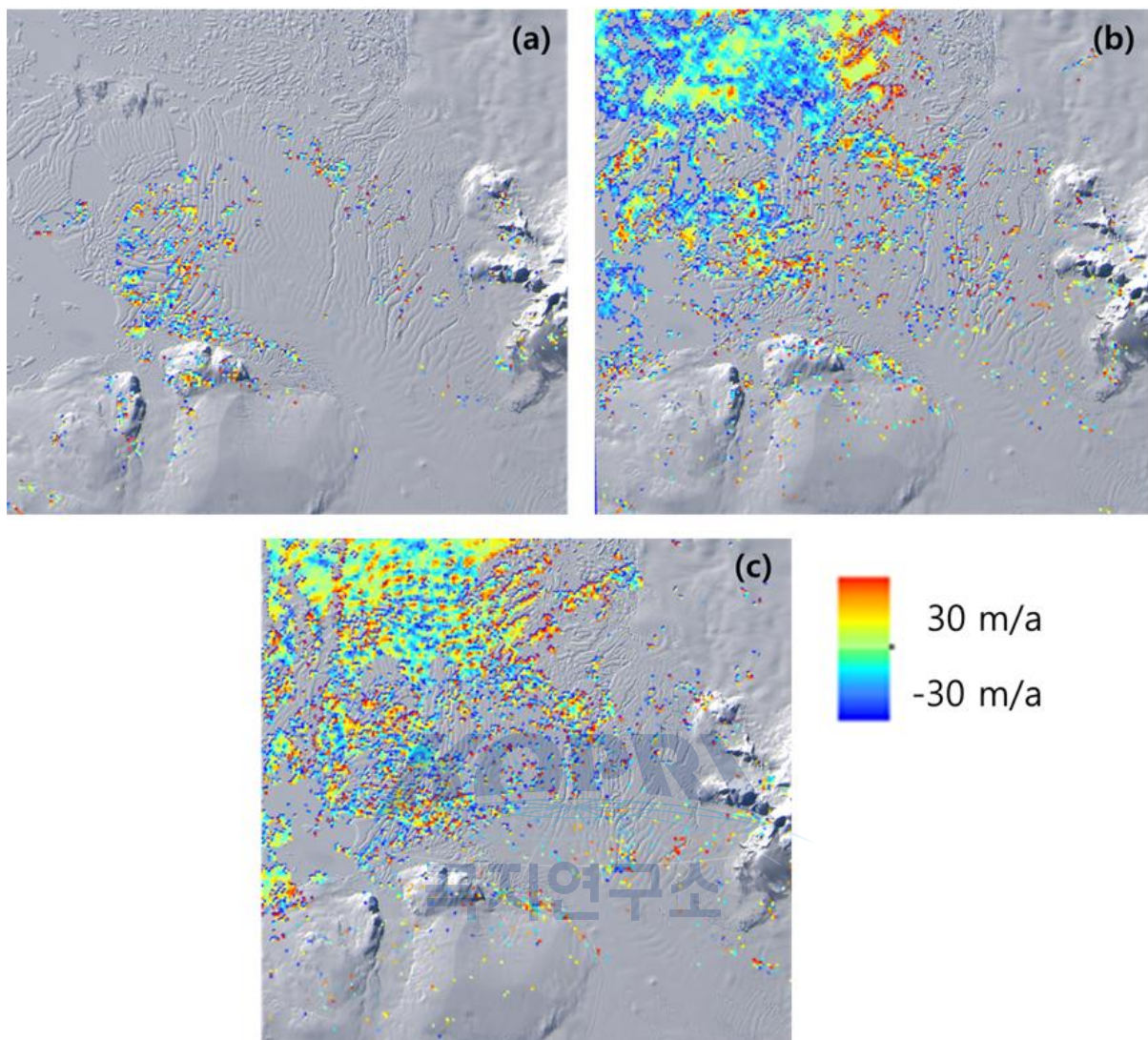


그림 18. 빙하 두께변화, 빙하 이동 속도, 표면 적설/승화 자료를 이용한 Crosson 빙붕 지역 기저용융 변화 추출 결과 (a) 2012년에서 2013년까지, (b) 2014년에서 2015년까지, (c) 2015년에서 2016년까지 (단위 m/a).

제 2 절 서남극해 고착빙 탐지 연구

1. 서남극해 고착빙 기준자료 구축 및 서남극 해역별 고착빙 탐지

고착빙 탐지를 위해서 기존 고착빙 탐지는 SAR 영상의 후방산란의 단일 값을 이용해 국지적인 지역에 대해서 사례 연구가 수행되었거나 광학센서를 이용함으로써 기상조건의 영향이 있었으나 본 연구에서는 SAR의 후방산란 영상으로부터 다양한 통계적인 변수를 활용하여 한

계점들을 극복하고자 하였고 서남극해 지역에 대한 고착빙 탐지를 시도하였다. 서남극해 고착빙을 추출하기 위해서 level 1.5의 좌표 참조된(geo-referenced) ALOS-1 PALSAR(Advanced Land Observing Satellite-1 Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) SAR 영상을 이용하여 5일 간격의 SAR 영상세트를 구축하였다(표 3). Brunt 빙봉, Larsen 빙봉 및 웨델해 동쪽 지역의 고착빙 지역은 훈련 및 테스트 자료로 사용하였고 벨링스하우젠해, 아문센해, 로스해의 고착빙 지역은 검증자료로 사용하였다(그림 19).

표 3. 본 연구에 사용된 ALOS-1 PALSAR SAR 영상 정보.

해역	연구 지역	날짜	시간 간격	입사각	사용	
웨델해	Brunt 빙봉	2007.08.08	5일	34.078°	훈련 및 테스트 자료	
		2007.08.13		34.090°		
	Larsen 빙봉	2007.08.20.		34.106°		모델 검증 자료
		2007.08.25		34.086°		
	동웨델해 지역	2007.08.08.		34.112°		
2007.08.13		34.107°				
아문센해와 로스해 사이 해역	Nickerson 빙봉	2007.07.26.		34.095°		
		2007.07.31		33.979°		
벨링스하우젠 해	Stange 빙봉	2007.07.07.		34.099°		
		2007.07.12		34.101°		
아문센해	Cape dart 지역	2010.10.31.		34.091°		
		2010.11.05		34.092°		

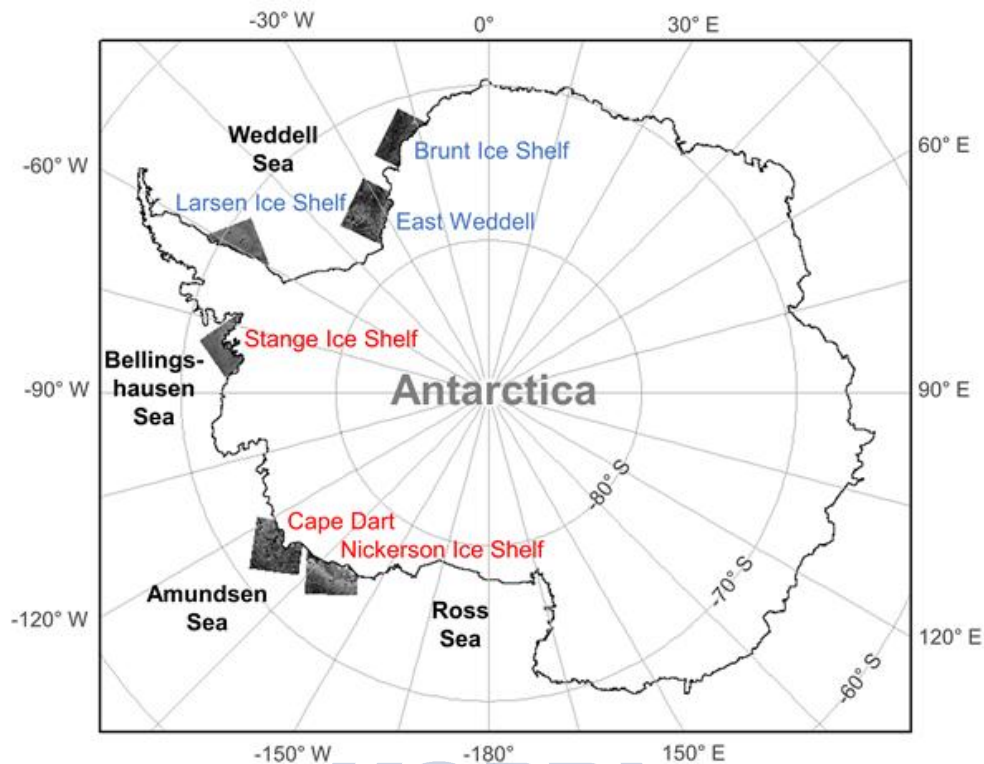


그림 19. 웨델해, 벨링스하우젠해, 아문센해, 로스해의 고착빙 연구 지역에 대한 ALOS-1 PALSAR 영상. 웨델해의 고착빙 지역(파란색 글자)은 훈련 및 테스트 자료로 사용되었고 다른 해의 고착빙 지역(빨간색 글자)은 모델 검증 자료로 사용함.

모든 영상은 ScanSAR(400×400 km) 촬영 모드, 하향(descending)의 촬영 방향, 100 m의 화소 크기(range와 azimuth 방향)를 가지며 영상 간 입사각 차이는 거의 없다. ASF(Alaska Satellite Facility)에서 제공하는 MapReady 소프트웨어를 이용하여 구축된 영상 셋들을 전처리하였고, 전처리된 영상은 서로 겹쳐지는 고착빙 지역에 대해서 영상을 마스킹하고 영상 분할을 위해서 합성(composite)을 하였다. 영상 분할은 eCognition 소프트웨어를 사용하였다. 합성 영상 내의 각 영상에 대한 평균, 표준편차, 비대칭도와 해안선으로부터의 거리, 해빙 속도, 두 날짜의 영상 사이의 객체 상관 변수(OCI; Object Correlation Images)인 correlation, slope, intercept의 총 12개의 입력 변수를 분할된 영상의 각 객체로부터 추출하였다(그림 20). 객체 당 남극 해안선으로부터의 거리를 계산하기 위해서 남극 해안선은 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에서 배포하는 MODIS MOA(Mosaic Of Antarctica) 2004년과 2009년 자료를 활용하였고, 해빙 속도자료는 AMSR-E 자료를 이용하였다. OCI는 각 객체에 포함된 모든 화소들을 이용하여 두 날짜 사이의 correlation, slope, intercept를 계산함으로써 얻는다.

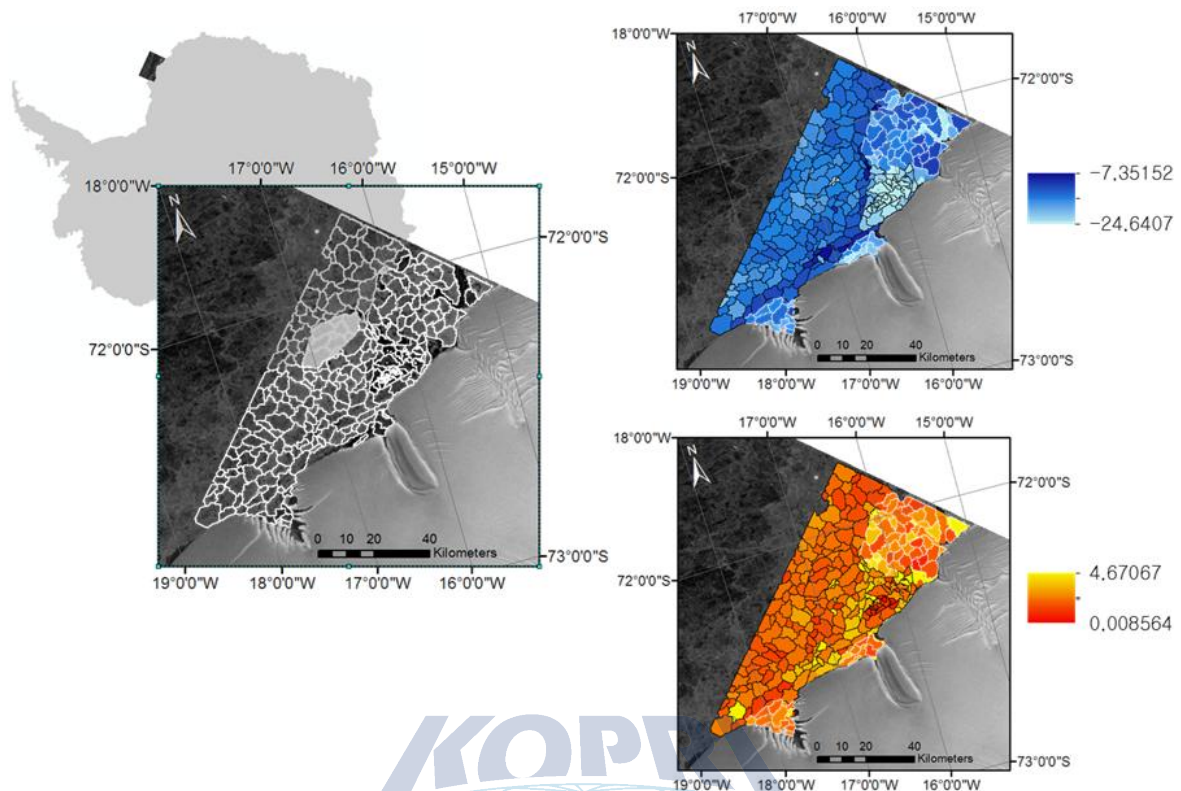


그림 20. 동웨델해 연구 지역에 대한 SAR 영상 분할 결과(좌) 및 각 객체로부터 계산한 입력변수(평균 및 표준편차) 예시(우). 오른쪽 그림에서 검은색 선은 유빙, 흰색 선은 고착빙 지역을 의미함.

웨델해의 고착빙과 비고착빙 지역에 대한 기준 자료를 구축하기 위해서 전처리된 SAR 영상을 이용하여 육안 판독을 이용하였다. 육안 판독을 기반으로 한 기준 자료 구축 방법에 대해서 타당성을 부여하기 위해서 해당 날짜의 시계열 MODIS 광학 영상(MOD02QKM 산출물)을 이용하여 육안 판독으로 추출된 고착빙 기준 지역이 실제로 고착빙 지역으로 판단할 수 있는지에 대해 확인하였다(그림 21).

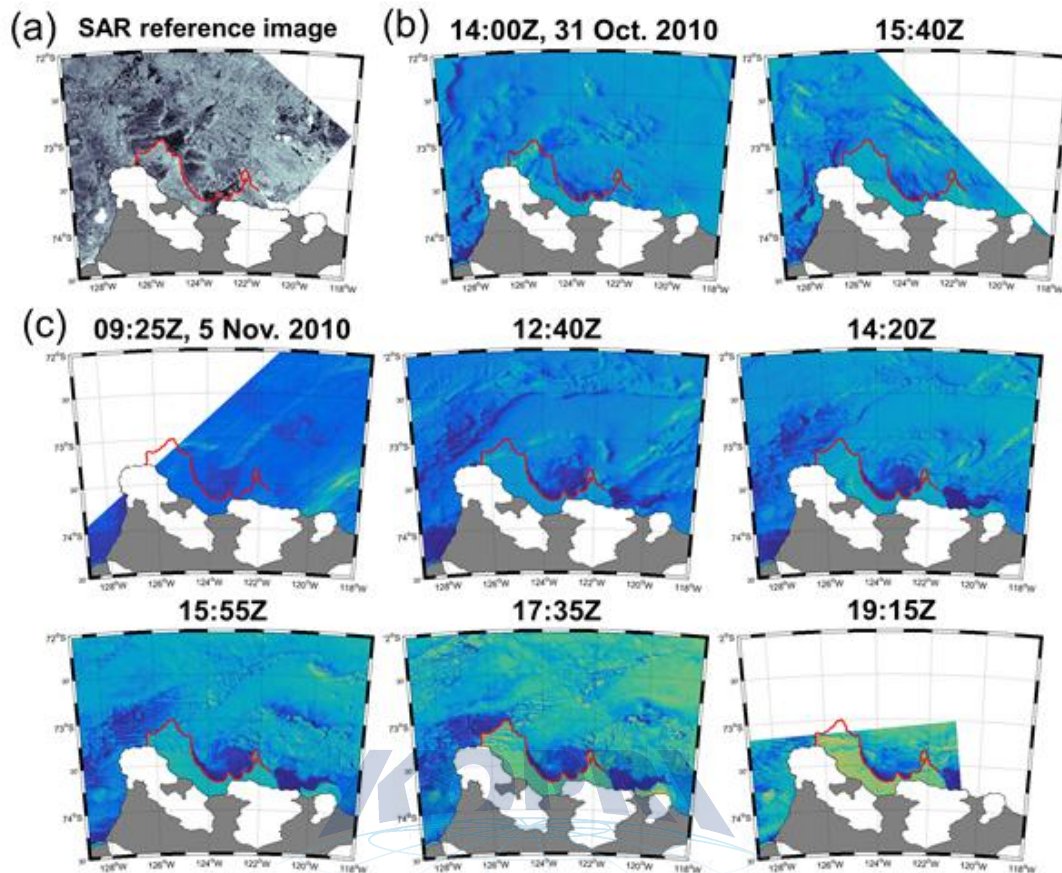


그림 21. 아문센해의 고착빙 지역에 대한 (a) SAR 영상, (b) 이른 날짜에 대한 MODIS 영상들(2010년 10월 31일), (c) 이후 날짜에 대한 MODIS 영상들(2010년 11월 5일). 빨간선은 고착빙 기준지역을 의미함.

고착빙과 비 고착빙의 두 클래스에 대해서 앞서 설명한 입력 변수를 추출하고 기계학습(random forest)의 훈련자료와 테스트 자료로 활용하여 각각 고착빙 분류 모델을 개발하고 이를 모델의 성능 평가를 위해 이용하였다. 서남극 해역 별 다양한 지역(웨델해의 동 웨델해 고착빙 지역, 아문센해와 로스해 사이의 Nickerson 빙봉 지역, 벨링스하우젠해의 Stange 빙봉 지역, 아문센해 Cape Dart 고착빙 지역)에 대해서 고착빙 분류 모델 검증을 수행하였다. 사용된 입력자료를 다양한 조합에 대해서 고착빙 탐지 모델을 구축하여 다양한 지역에 대해서 모델 결과를 비교 평가하였다.

전반적으로 거리 변수와 표준화한 해빙속도가 중요 변수로 확인되었다. 특히 거리변수가 제외되었을 때 탐지 결과가 과대 혹은 과소 추정되는 경향이 있는 것으로 해석되었다. 웨델해의 동 웨델해 고착빙 연구지역은 다양한 조합을 이용한 결과들이 서로 큰 차이를 보이지 않았으나 거리 변수가 제외되었을 때 지역의 서쪽 부분에서 고착빙이 보다 과대 탐지되는 경향을 보

었다(그림 22, 23). 반면 아문센해와 로스해 사이의 Nickerson 빙봉 고착빙 연구 지역은 해빙 속도에 대해서 normalization을 적용할 경우 기준 고착빙 바운더라에 더 가깝게 탐지하였으며(그림 24b), 거리 변수가 제외되었을 때 과소 추정된 결과에서 기준지역을 보다 정확하게 탐지하였다(그림 25a-c).

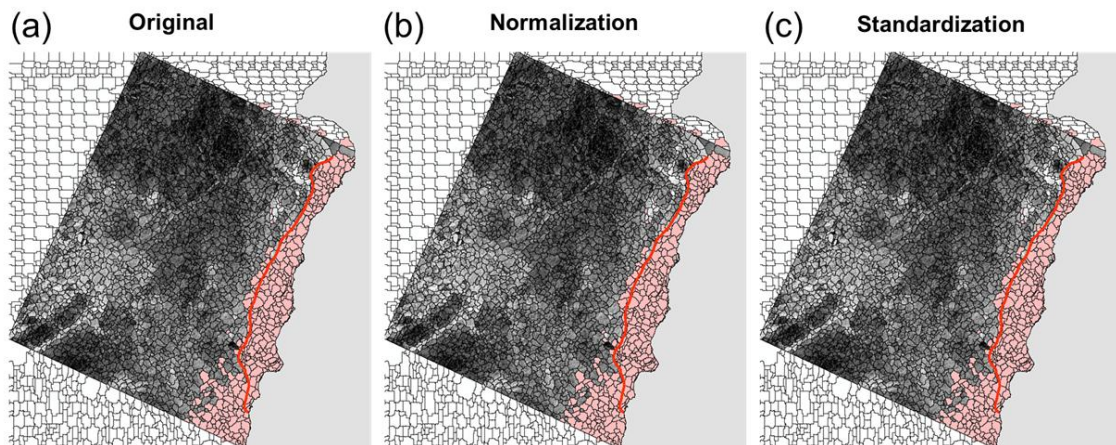


그림 22. 웨델해의 동 웨델해 고착빙 연구 지역에 대한 객체기반 random forest 모델의 예측 결과. (a) 기본 입력 자료를 모두 사용한 결과, (b) normalization 해빙 속도를 이용한 결과, (c) standardization 해빙 속도를 이용한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.

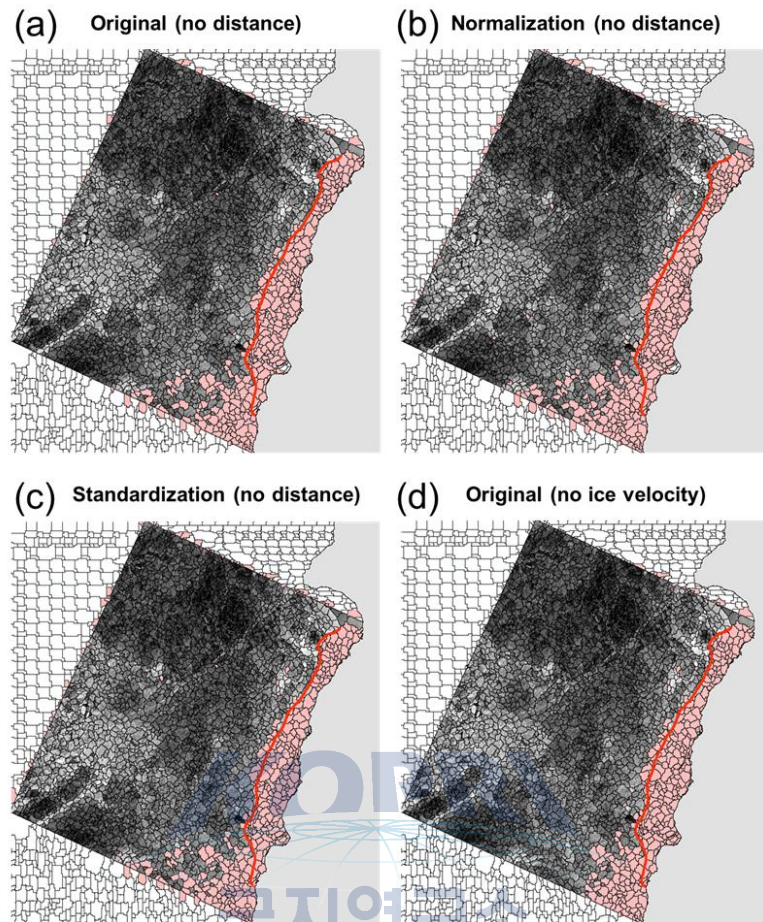


그림 23. 웨델해의 동 웨델해 고착빙 연구 지역에 대한 객체기반 random forest 모델의 예측 결과. (a) 거리 입력 변수를 제외한 결과, (b) 거리 제외 및 normalization 해빙속도 이용 결과, (c) 거리 제외 및 standardization 해빙 속도 이용 결과, (d) 해빙 속도 변수 제외한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계 학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.

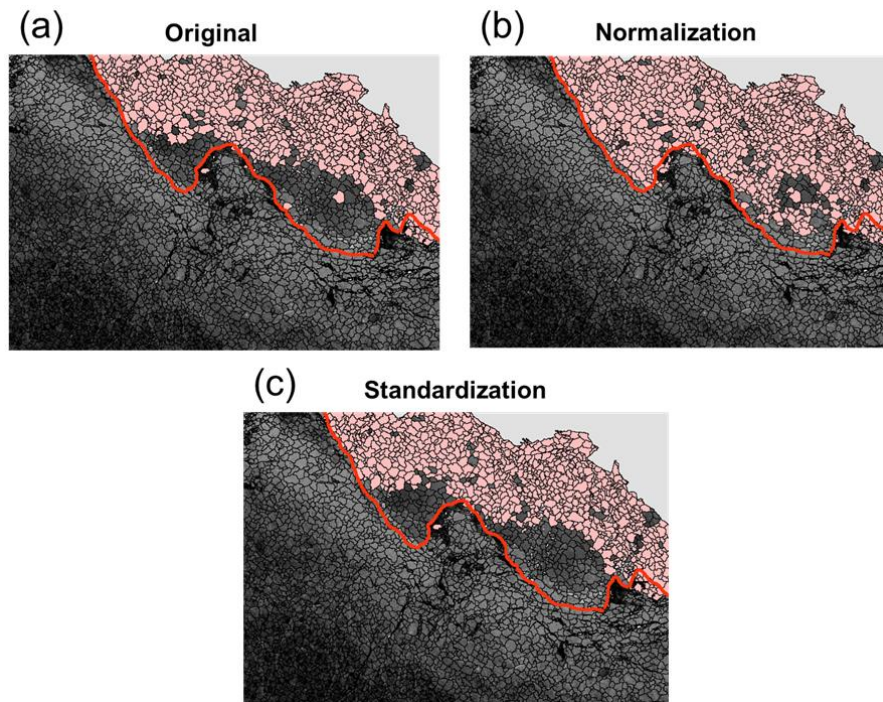


그림 24. 아문센해와 로스해 사이 해역에 Nickerson 빙붕 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 기본 입력 자료를 모두 사용한 결과, (b) normalization 해빙 속도를 이용한 결과, (c) standardization 해빙 속도를 이용한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.

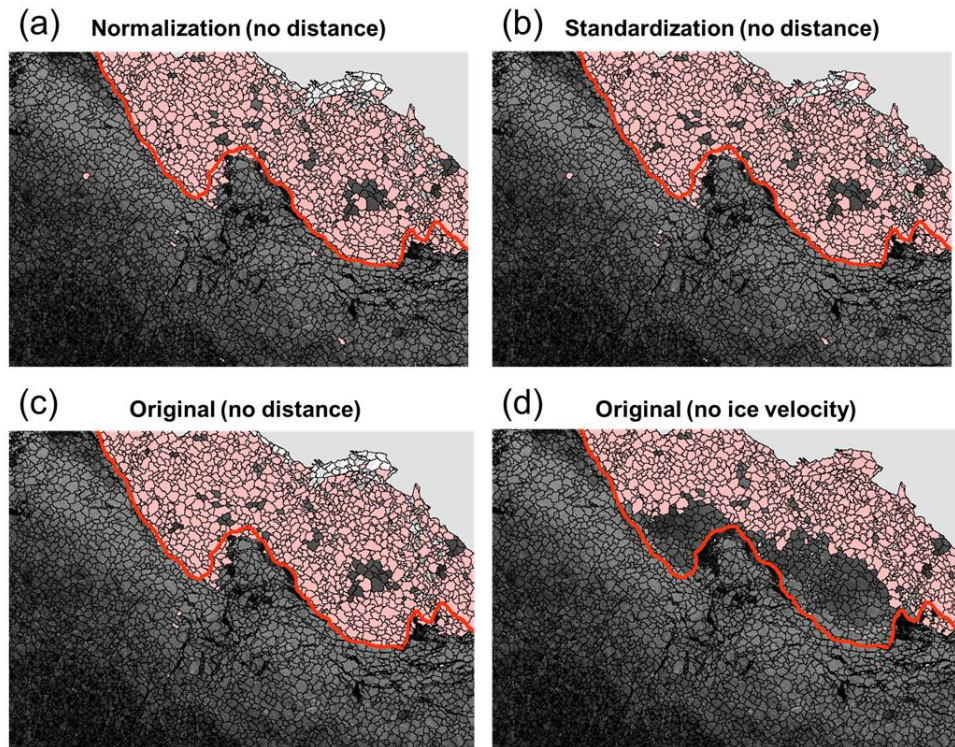


그림 25. 아문센해와 로스해 사이 해역에 Nickerson 빙봉 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 거리 입력 변수를 제외한 결과, (b) 거리 제외 및 normalization 해빙속도 이용 결과, (c) 거리 제외 및 standardization 해빙 속도 이용 결과, (d) 해빙 속도 변수 제외한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.

아문센해 Cape Dart 고착빙 지역은 대부분의 입력 변수 조합이 비슷한 탐지 결과를 보여주었으나 standardization이나 normalization의 표준화하지 않은 기존의 해빙속도를 이용하고 거리 변수를 제외한 입력 변수를 사용하였을 때 탐지 결과가 매우 좋지 않음을 확인하였다(그림 26 a). 이 연구 지역에서는 표준화한 해빙속도가 없고 거리 변수가 있는 경우 혹은 거리 변수가 없어도 표준화된 해빙속도가 있는 경우에 고착빙 탐지 결과가 좋은 반면 거리 변수와 표준화한 해빙속도 변수가 없으면 고착빙 탐지 결과가 매우 안 좋은 것으로 나타나 이 연구 지역에서는 표준화한 해빙속도 및 거리 변수가 고착빙 탐지에 중요한 변수로 해석되었다. 연구 지역마다 고착빙 탐지에 대한 입력변수의 기여도 정도가 다르지만 거리변수는 고착빙의 특성상 해안선 가까이에 분포하기 때문에 유빙과 구분하는데 중요한 변수로 활용될 수 있으며, 또한 고착빙은 일정 시간동안 움직임이 거의 없다는 특성에 따라서 해빙속도 변수가 고착빙 탐지에 크게 기여할 수 있으며 지역마다 바람 세기나 해류 속도의 영향이 다르기 때문에 표준화된 해

빙속도가 보다 큰 영향을 미치는 것으로 해석되었다.

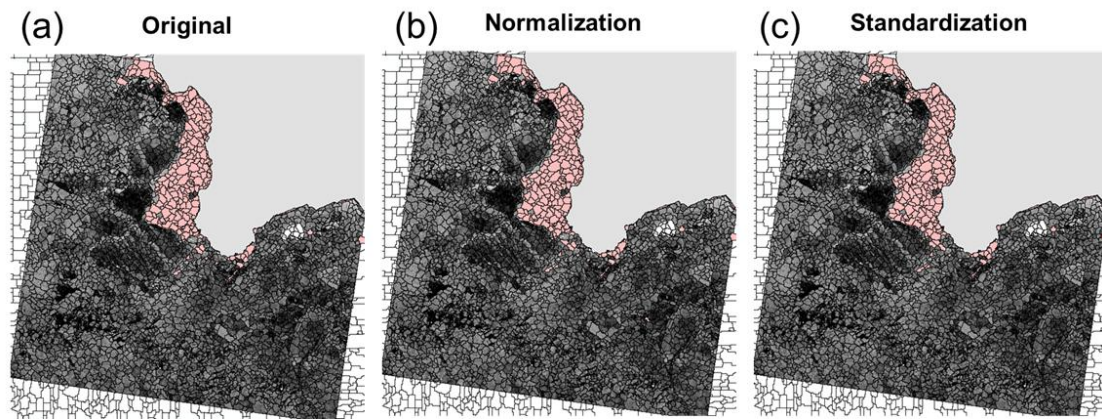


그림 26. 아문센해 Cape dart 고착빙 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 기본 입력 자료를 모두 사용한 결과, (b) normalization 해빙 속도를 이용한 결과, (c) standardization 해빙 속도를 이용한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.



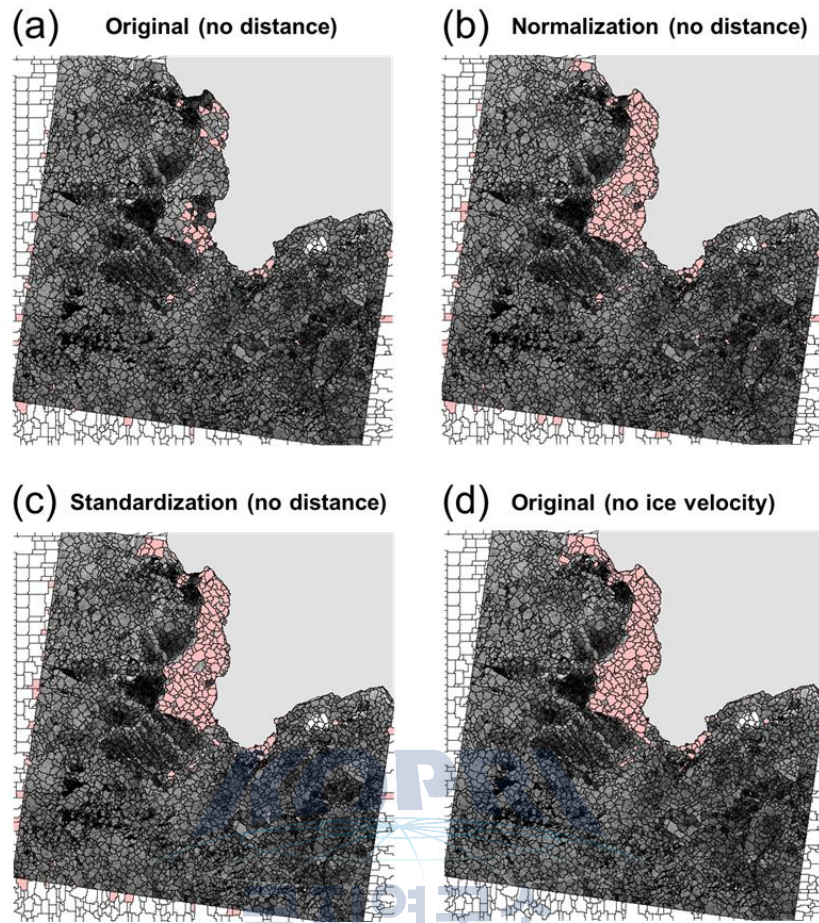


그림 27. 아문센해 Cape dart 고착빙 지역에 대한 객체기반 random forest 모델 예측 결과. (a) 거리 입력 변수를 제외한 결과, (b) 거리 제외 및 normalization 해빙속도 이용 결과, (c) 거리 제외 및 standardization 해빙 속도 이용 결과, (d) 해빙 속도 변수 제외한 결과. 빨간색 선은 고착빙 기준 지역이며 분홍색 지역이 기계학습으로 탐지된 고착빙 지역을 의미함.



제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

연구내용			구분												
			월별 추진일정												
성과목표	세부연구목표	평가 착안점	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1월
서남극해 빙하의 시계열적 기저변화 연구	● 서남극 아문센해 주변 빙하의 시공간적 질량변화 분석	1. 빙하 흐름 속도 파악 및 빙붕 두께 산출													
		2. 요소별 질량 균형 산출													
서남극해 고착빙 탐지 연구	● 서남극해 고착빙 기준자료 구축	1. SAR 영상을 이용한 서남극해 해역별 고착빙 기준자료 구축													
		2. 다양한 통계 변수를 이용하여 고착빙과 비 고착빙 지역을 기계학습으로 분류 모델 개발													
	● 서남극 해역별 고착빙 탐지	3. 서남극해 고착빙 기준자료 구축 및 서남극 해역별 고착빙 탐지													
최종 보고서 작성															

제 2 절 관련 분야에의 기여도

1. 학술적 파급효과

- 기존의 연구의 다음 세대에 해당하는 위성을 이용하여 서남극 빙붕 질량 변화를 산출함으로써, 남극 빙하 질량변화의 최근 동향 파악의 가능성 제시함.
- 큰 규모 빙하에 대한 유출 연구들과 다르게, 작은 규모 빙봉에 대한 질량변화 최근동향을 파악함으로써, 해양기후 연구 갭신에 기여함.
- 여름철에 대한 질량변화 파악 및 한계 파악을 통해, 연구 시기의 중요성 및 그의 한계를 제시함.
- 위성기반 모델링을 통해 서남극해의 고착빙 분포를 정확히 추정함으로써 남극 빙권의 환경 변화 연구의 기반을 마련함.
- 고착빙 탐지를 위해서 SAR 영상을 이용하여 영상 분할과 상관성 분석 기법이 사용됨에 따라 기법의 활용 가능성을 국제 학계에 제공함.
- 남극 고착빙 분포를 정확히 제공함으로써 향후 기후, 대기, 해양관련 위성 자료와의 상관성을 분석하여 남극 빙권 환경 변화의 이해를 도움.
- 위성원격탐사를 활용한 국내 극지 연구 수준을 제고하고 이를 발전시키기 위한 다학제적 연구를 개발하는데 활용될 수 있음.
- 위성원격탐사의 활용도를 높임으로써 향후 현장관측, 위성 모니터링, 역학 모델링 등의 융합형 연구 및 개발에 활용될 수 있음.

2. 경제적 파급효과

- 위성자료를 이용한 남극 질량변화를 파악함으로써 해양환경 및 해양산업 미래 동향 예측에 도움을 줄 수 있음.

- 위성자료를 이용하여 고착빙 분포를 모니터링하고 예측함으로써 남극 과학기지 주변 환경 변화에 보다 효율적이고 빠르게 대응이 가능함.
- 극지 연구에 적합한 자료 처리 방법 및 기법이 발전함에 따라 극지 환경 변화의 이해 및 나아가 기후 변화 예측 등과 같은 고부가 산출물 생산이 가능함.
- 본 연구 과제를 통해 국내 극지 연구 인력, 특히 극지 원격탐사 전문가를 양성함으로써 극지연구의 발전에 기여함.





제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구과제의 결과를 해양기후 모델 연구의 검증 자료로 사용함으로써, 기후변화 모니터링 및 예측에 기여를 할 수 있음.
- 빙하의 질량변화 경향을 통해 극지 생태계의 변화를 예측함으로써, 다양한 종 보존 활동들의 방향에 대한 참고자료로 사용이 가능 함.
- 본 연구과제의 결과를 통해 서남극 고착빙 지역을 정확히 탐지하고 이를 통해 향후 남극 빙권의 해양환경 변화 예측을 위한 기초자료를 제시할 수 있음.
- 본 연구과제에서 적용된 자료와 기법을 통해 서남극 고착빙 지도화가 가능하다면 고착빙 면적의 시공간적인 분포를 분석하고 향후 서남극 고착빙의 두께 및 체적 변화를 추정하는데 활용될 수 있음.
- 고착빙 면적이나 두께 등의 정보는 향후 해양순환모델이나 기후변화 모델링 분석에 활용되어 기존의 기후변화 역학 모델링의 불확실성을 줄이는데 도움이 될 수 있음.
- 기존 서남극 고착빙 연구는 거의 수행된 바가 없으며 본 연구 개발 결과는 서남극 고착빙 지역에 대한 적용 가능한 방법을 제시하며 향후 서남극 해빙 연구에 활용될 수 있음.



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- Crosson 빙붕 기저 용융 변화 파악을 위해, Sentinel-1A IW모드 영상을 통해 InSAR 적용 시험을 하였고, 2013년에서 2016년까지 1, 2월달에 대한 Landsat-7 ETM+와 Landsat-8 OLI 영상을 입력변수로 사용하여 CIAS 소프트웨어의 피쳐트래킹 방법을 통해 빙하 흐름 속도를 파악함
- 빙하 두께 파악을 위해 2013년부터 2016년까지의 Cryosat-2의 고도계 자료를 사용함.
- 빙하 표면 적설/승화로 인한 두께 변화량 추출을 위해 RACMO 모델을 사용함.
- 서남극 고착빙을 탐지하기 위해서 사용된 위성 영상은 ALOS-1 PALSAR scanSAR 모드의 SAR 영상이며, 서남극 해역들(웨델해, 아문젠해와 로스해 사이, 벨링스하우젠해, 아문젠해)의 고착빙 연구 지역에 대해서 2007년 7, 8월 및 2010년 10-11월의 영상 pair들을 수집함.
- 고착빙 탐지 모델링에 사용한 입력 변수들을 추출하기 위해서 남극 해안선으로부터의 거리를 계산하기 위한 남극 해안선은 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에서 배포하는 MODIS MOA(Mosaic Of Antarctica) 2004년과 2009년 자료를 활용하였고, 해빙 속도자료는 AMSR-E 자료를 이용함.
- 육안 판독을 기반으로 한 기준 자료 구축 방법의 타당성을 부여하기 위해서 2010년 11월 5일의 시계열 MODIS 산출물(MOD02QKM)의 광학 영상을 이용하였음.



제 7 장 참고문헌

- 한향선, 지영훈, & 이훈열. (2013). COSMO-SkyMed SAR 영상을 이용한 동남극 Campbell 빙하의연간 면적변화 및 유속 추정. *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(1), 45-55.
- 황도현, 황병준, & 윤홍주. (2013). 다중주파수 SAR 영상을 이용한 북극해 그린란드 정착빙 분류. *대한원격탐사학회지*, 29(1), 1-9.
- Fraser, A.D., Massom, R.A., & Michael, K.J. (2010). Generation of high-resolution East Antarctic landfast sea-ice maps from cloud-free MODIS satellite composite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2888-2896.
- Giles, A. Barry, Robert A. Massom, and Victoria I. Lytle. "Fast ice distribution in East Antarctica during 1997 and 1999 determined using RADARSAT data." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113.C2 (2008).
- Han, H., & Lee, H. (2015). Tide-corrected flow velocity and mass balance of Campbell Glacier Tongue, East Antarctica, derived from interferometric SAR. *Remote Sensing of Environment*, 160, 180-192.
- Han, H., Im, J., & Kim, H. C. (2016). Variations in ice velocities of Pine Island Glacier Ice Shelf evaluated using multispectral image matching of Landsat time series data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 358-371.
- Kim, M., Im, J., Han, H., Kim, J., Lee, S., Shin, M., & Kim, H. C. (2015). Landfast sea ice monitoring using multisensor fusion in the Antarctic. *GIScience & Remote Sensing*, 52(2), 239-256.
- Massom, R. A., et al. "Effects of regional fast-ice and iceberg distributions on the behaviour of the Mertz Glacier polynya, East Antarctica." *Annals of Glaciology* 33.1 (2001): 391-398.
- Massom, R. A., A. B. Giles, H. A. Fricker, R. C. Warner, B. Legresy, G. Hyland, N. Young, and A. D. Fraser. 2010. "Examining the Interaction between Multi-Year Landfast Sea Ice and the Mertz Glacier Tongue, East Antarctica: Another Factor in Ice Sheet Stability?" *Journal of Geophysical Research* 115 (C12): C12027. doi:10.1029/2009JC006083.
- Mahoney, A., Eicken, H., Shapiro, L., & Graves, A. (2005). Defining and locating the seaward landfast ice edge in northern Alaska. *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Vol. 3. (pp. 991-1001).

- Meyer, Franz J., et al. "Mapping arctic landfast ice extent using L-band synthetic aperture radar interferometry." *Remote Sensing of Environment* 115.12 (2011): 3029-3043.
- Pritchard, H. D., Ligtenberg, S. R. M., Fricker, H. A., Vaughan, D. G., Van den Broeke, M. R., & Padman, L. (2012). Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, 484(7395), 502-505.
- Rignot, E., Jacobs, S., Mouginot, J., & Scheuchl, B. (2013). Ice-shelf melting around Antarctica. *Science*, 341(6143), 266-270.



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.