TSPP15020-039-12

원격탐사 자료를 활용한 아문젠 해역의 시공간적 융빙 변화 연구

Research on Spatial-temporal Variations of Ice Melting in the Amundsen Sea, Antarctica, Using Remote Sensing Data

KOPRI
극지연구소

서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 아문젠해역 생태계와 해양 순환 변동연구”과제의 위탁연구“원격탐사 자료를 활용한 아문젠 해역의 시공간적 융빙 변화 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 01.31

총괄연구책임자 : 이 상 훈

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 김 덕 진

위탁참여연구원 : 김 승 희

“ : 강 기 묵

“ : 정 정 교

“ : Xu Zhen

“ : 최 창 현

요 약 문

Ⅰ. 제 목

원격탐사 자료를 활용한 아문젠 해역의 시공간적 융빙 변화 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구의 최종 목표는 해빙과 빙하의 물리적 융빙으로 인한 아문젠해 지역의 생태계의 변화와의 관련성을 제공할 수 있는 인공위성 자료의 확보에 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

□ 아문젠 해역의 시공간적 해빙 및 폴리냐 분포특성변화 도출

- 확보된 시계열 영상을 통계적 분석기법에 적용하여 아문젠 해역에 존재하는 해빙의 시공간적 분포변화 도출

□ 유효성이 검증된 altimeter 자료로부터 아문젠해 지역의 해빙두께의 시공간적 변화 도출

- 얇은 두께의 해빙도 관측이 가능하기 때문에 검증된 altimeter 자료확보
- 확보된 자료를 아문젠해역 지역의 해빙두께의 변화 도출.

□ 고해상도 SAR 영상을 이용한 시계열 DEM 도출을 통한 grounding line 지역의 표면 높이 변화 분석

- 고해상도 SAR 영상을 이용하여 정확한 빙하의 DEM 제작
- Grounding line의 위치 추청 및 변화탐지

Ⅳ. 연구개발결과

☑ 아문젠 해역의 시공간적 해빙 및 폴리냐 분포특성변화 도출

- 1978년부터 2013년까지 35년동안의 SSMI 시계열 자료 확보하였으며 Empirical Orthogonal Function (EOF) 분석을 통하여 아문젠 해역의 분포변화특성 도출하였다. 1년주기의 변화를 정확하게 탐지할 수 있는 것을 확인하였으며 공간적으로는 지속적으로 해빙의 분포가 변화하는 지역과 그렇지 않은 지역을 통계적인 분석을 통하여 추출할 수 있는 가능성을 확인하였다. 추가적인 자료들과의 비교를

통하여 새로운 정보를 추출할 수 있을 것으로 예상된다.

☑ 유효성이 검증된 altimeter 자료로부터 아문젠해 지역의 해빙두께의 시공간적 변화 도출

- 가장 최근 검증된 CryoSat-2 SAR 모드의 Baseline C 자료를 2015년 1월부터 12월까지 확보하였으며 제공되는 freeboard 값을 이용하여 해빙의 두께를 산출하였다. 아문젠 해역에서는 최대 2~3m의 두께를 갖는 것을 확인하였으며, 이보다 큰 값을 가지는 위치는 빙산으로 의심되는 값의 필터링으로 인한 오류인 것으로 고려된다.

☑ 고해상도 SAR 영상을 이용한 시계열 DEM 도출을 통한 grounding line 지역의 표면 높이 변화 분석

- TanDEM-X/TerraSAR-X 자료를 이용하여 2011년의 고해상도 DEM을 제작하였으며 hydrostatic equilibrium 을 이용하여 지반접지선의 위치를 예측하였다. 2009년에 작성된 지반접지선의 위치와 비교하였을 때 약 1~4km 차이를 보였으며 사용된 해저지형도의 정확도에 의한 변화일 수도 있기 때문에 추가적인 정보가 필요할 것으로 고려된다. 하지만 정확한 DEM의 확보로 인하여 과거 연구들보다 더욱 정확한 지반선의 위치추청이 가능하였다.

KOPRI 극지연구소

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구에서 확보된 기술을 지속적으로 이용한다면 현재 화두가 되고 있는 아문젠 해역의 변화에 대한 기초적인 정보들을 확보할 수 있을 것으로 고려된다. 해빙의 분포 및 두께의 변화에 대한 연구는 아라온호의 안전한 항해를 위하여 활용될 수 있으며, 고해상도 DEM 및 지반접지선의 정확한 정보는 추후 가능한 현장 조사를 위한발판으로 사용될 것으로 예상된다.

Summary

Ⅰ. Title

Research on Spatial-temporal Variations of Ice Melting in the Amundsen Sea, Antarctica, Using Remote Sensing Data

Ⅱ. Objectives of the project

The main objective of this research is to provide satellite remote sensing data regarding spatial and temporal variation of sea ice and ice sheet melting in the Amundsen Sea Sector.

Ⅲ. Contents and scopes of the project and research

☐ Spatial-temporal variation of sea ice and polynya in the Amundsen Sea Sector

- Archive space remote sensing data in time series and apply statistical analysis technique to extract spatial-temporal variation of sea ice and polynya in the Amundsen Sea Sector.

☐ Extraction of sea ice thickness using validated altimeter data

- Since space-borne altimeters are now able to extract even thin sea ice, thickness of sea ice in the Amundsen Sea Sector will be extracted.

☐ Grounding line variations derived by high resolution DEM

- Generation of high resolution DEM using recently launched sensors and accurately estimate locations of grounding line.

Ⅳ. Results of the project

☑ Spatial-temporal variation of sea ice and polynya in the Amundsen Sea Sector

- SSMI sea ice concenration data during the period between 1978 and 2013 are archived and Empirical Orthogonal Function analysis is applied. The

extracted temporal variation clearly shows a 1-year wavelength that the lowest concentration is observed during January and February. In terms of spatial variation, the analysis provides the regions where sea ice is consistently present. It is expected to provide more useful information when a different dataset is compared.

☑ Extraction of sea ice thickness using validated altimeter data

- CryoSat-2 is now providing freeboard information in SAR mode starting from 2015. The extracted freeboard is converted to sea ice thickness using hydrostatic equilibrium and the maximum thickness in the Amundsen Sea Sector turns out to be around 2~3m. The higher values are suspected to come from spatial filtering of the data which contain possible icebergs. Further investigation of those abnormal values with in-situ data to sort out outliers.

☑ Grounding line variations derived by high resolution DEM

- High resolution DEM is generated using TanDEM-X and TerraSAR-X interferometry, acquired in June, 2011. The high resolution DEM is then converted to thickness of glacier using hydrostatic equilibrium and compared with bathymetry to estimate locations of grounding line. The grounding line is compared with the one from 2009. The retreat is estimated 1~4km during the period. The retreat might be from low resolution of the used bathymetry.

KOPRI 극지연구소

Ⅴ. Appliation of the results

- The results from this research is expected to provide significantly important information about field operations in the future. Especially, Korean ice breaker Araon can set navigation route based on the statistical result of spatial pattern of sea ice variations. In addition, high resolution DEM can provide crucial information about the glacier surface when ground operation is necessary.

Contents

I. Introduction ····· 1

1. Objective of the research and scope ····· 1

2. Reasons of this research ····· 2

II. Status of the related fields of study ····· 3

1. Development in foreign countries ····· 3

2. Domestic developments ····· 3

III. Research topics and their results ····· 4

1. Spatial-temporal variation of sea ice and polynya in the Amundsen Sea Sector ····· 4

2. Extraction of sea ice thickness using validated altimeter data ····· 13

3. Grounding line variations derived by high resolution DEM ····· 30

IV. Level of achievements and contribution ····· 41

1. Achievements ····· 41

2. Contributions ····· 41

V. Application of the research results ····· 43

1. Scientific effect ····· 43

2. Economical effect ····· 43

VI. Reference ····· 44

KOPRI 극지연구소

목 차

제 1 장. 서론 ····· 1

1 절. 연구개발의 목적 및 범위 ····· 1

2 절. 연구개발의 필요성 ····· 2

제 2 장. 국내외 기술개발 현황 ····· 3

1 절. 해외 기술개발 현황 ····· 3

2 절. 국내 기술개발 현황 ····· 3

제 3 장. 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 4

1 절. 아문젠 해역의 시공간적 해빙 및 폴리냐 분포특성변화 도출 ····· 4

2 절. 유효성이 검증된 altimeter자료로부터 아문젠해 지역의 해빙두께의 시공간전 변화 도출 ····· 13

3 절. 고해상도 SAR영상을 이용한 시계열 DEM도출을 통한 grounding line 지역의 표면·높이 변화 분석 ····· 30

제 4 장. 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도 ····· 41

1 절. 목표달성도 ····· 41

2 절. 대외기여도 ····· 41

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획 ····· 43

1 절. 학술적 파급효과 ····· 43

2 절. 경제적 파급효과 ····· 43

제 6 장. 참고문헌 ····· 44

KOPRI 극지연구소

그림 차례

그림 1 각 모드가 차지하는 비율(green) 및 누적비율(red) ····· 6
그림 2 시간 분산에 의한 제 1 모드의 고유벡터의 공간화 ····· 7
그림 3 시간 분산에 의한 제 1 모드의 시간계수와
1978년 10월부터 1980년 9월까지의 시간계수 ····· 8
그림 4 시간 분산에 의한 제 2 모드의 고유벡터의 공간화 ····· 9
그림 5 시간 분산에 의한 제 2모드의 시간계수 ····· 9
그림 6 각 모드가 차지하는 비율(green) 및 누적비율(red) ····· 10
그림 7 공간 분산에 의한 제 1 모드의 고유벡터 ····· 11
그림 8 공간 분산에 의한 제 1모드의 공간 계수 ····· 12
그림 9 전자기파 투과율 ····· 15
그림 10 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께.
(상단) 공간 필터링 미적용시. (하단) 필터링 적용시. ····· 17
그림 11 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 1월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 18
그림 12 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 2월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 19
그림 13 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 3월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 20
그림 14 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 4월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 21
그림 15 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 5월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 22
그림 16 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 6월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 23
그림 17 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 7월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 24
그림 18 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 8월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 25
그림 19 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 9월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 26

KOPRI 극지연구소

그림 20 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 10월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 27
그림 21 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 11월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 28
그림 22 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께
(2015년 12월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해 ····· 29
그림 23 SAR 간섭기법을 이용하여 추출한 DEM ····· 32
그림 24 DEM 제작을 위해 사용된 CryoSat-2 자료 ····· 33
그림 25 제작된 DEM과 ATM 자료 비교 ····· 34
그림 26 MODIS 영상 및 해수면 추출을 위한 CryoSat-2 자료 ····· 35
그림 27 제작된 DEM과 새로 정의된 지반접지선 ····· 38
그림 28 사용된 해저지반지도와 새로 정의된 지반접지선 ····· 39
그림 29 추출된 빙하표면(검정), 빙하바닥(파랑), 해저지반(빨강) ····· 40

KOPRI
극지연구소

제 1 장. 서론

1 절. 연구개발의 목적 및 범위

연구연차	3차년도
연구개발의 목적	다중센서 시계열 원격탐사 자료로부터 아문젠 해역의 입체적(lateral, vertical and temporal) 융빙 속도 변화 도출
연구개발의 범위	① 아문젠 해역의 시공간적 해빙 및 폴리냐 분포특성변화 도출
	② 유효성이 검증된 altimeter 자료로부터 아문젠해 지역의 해빙두께의 시공간적 변화 도출
	③ 고해상도 SAR 영상을 이용한 시계열 DEM 도출을 통한 grounding line 지역의 표면 높이 변화 분석

표 1. 3차년도 연구 목적 및 범위

KOPRI 극지연구소

2 절. 연구개발의 필요성

극지에 존재하는 해빙/빙하는 전 지구적 기후변화로 인해 융빙 속도가 점점 극적으로 변화하고 있다는 연구가 보고되고 있다. 이러한 융빙 속도의 변화, 특히 가속화 현상은 빙하붕괴, 해빙면적 감소의 원인이 되어 주변 생태계에 직·간접적으로 영향을 끼친다. 그러므로 지속적인 해빙/빙하의 융빙 속도 모니터링은 전 지구 온난화 정도를 정량적으로 측정을 하고 주변 해양 생태계 변화의 원인을 파악하는데 있어서 매우 중요한 의미를 가질 수 있다.
특히, 최근 연구보고에 따르면, 서남극 아문젠 해역의 빙하가 다른 어느 지역의 빙하보다도 융빙 속도가 빠르게 증가하고 있다 (Rignot et al., 2011). 또한 서남극지역의 얼음두께 또한 변화하고 있다는 연구보고가 많다 (Flament and Remy, 2012). 이러한 서남극의 급격한 변화는 아문젠 해역으로 유입되는 고온고염의 Circumpolar Deep Water (CDW) 유입량과 밀접하게 연관되어 있다는 연구보고가 많다. 하지만 아직까지 이러한 관계를 직접적으로 연결시키기에 충분한 시공간적 해양물리자료 및 원격탐사자료가 부족하여 체계적인 분석이 잘 이루어지지 않았다. 또한 대부분의 융빙과 관련된 연구들은 남극 대륙 위에서의 변화에 집중적으로 초점이 맞춰져 있기 때문에 해양의 영향성을 분석하기 위해서는 적합하지 않다고 여겨진다.

따라서 본 과제에서는 아문젠 해역의 대기 및 해양학적 온난화 현상과 이 해역의 융빙 현상을 입체적이고 보다 체계적으로 이해하고 평가하기 위하여 근 10년 동안의 Radar/Laser Altimeter, Passive microwave와 Synthetic Aperture Radar 위성원격탐사자료를 활용하여 아문젠 해역 전체에 대한 시공간적 융빙 현상의 변화를 모니터링 하고자 한다.

제 2 장. 국내외 기술개발 현황

1 절. 해외 기술개발 현황

현재 남극 융빙에 관한 연구는 해외 기관들의 주관으로 많이 진행되고 있는 상황이다. 특히 본 연구와 관련된 연구로써는 아문젠 해역의 Pine Island Glacier주변을 중심으로 집중적인 연구가 진행되고 있다. 특히 글라이더(Glider), 다양한 센서를 탑재한 계류장비(Mooring) 그리고 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)센서를 이용하여 빙붕의 해수면 아랫부분과 CDW의 통로로 생각되는 터널을 집중적으로 조사하는 것이 현재 진행되고 있는 연구의 경향이다(Jenkins et al., 2010). 또한 오래전부터 쇄빙선 및 남극 대륙에 존재하는 여러 기지들을 이용하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 현장조사로는 미국 NASA의 Operation IceBridge를 통하여 항공조사가 활발히 진행되고 있으며 확보된 자료는 전세계적으로 공유되어 활발한 연구가 진행되고 있다.

2 절. 국내 기술개발 현황

KOPRI 극지연구소

현재 국내는 한국 최초의 쇄빙선인 '아라온'을 활용하여 해외 기관들과의 긴밀한 협력을 통해 연구의 질을 높이고 있다. 쇄빙선을 운행하는데 있어서 지역에 존재하는 해빙의 분포 및 두께에 대한 정보는 매우 중요하다. 또한 남극에 '세종과학기지' 및 '장보고과학기지'의 건립으로 인해 현장자료의 확보가 현재는 가능해 졌기 때문에 현장조사를 위해서는 얼음표면의 성질, 또는 고도의 변화량의 정확한 정보가 필요하다. 이러한 기반 시설 및 장비를 이용하여 다양한 연구가 진행되고 있으며 현재 여러 연구의 성과가 나타나고 있다. 또한 다목적실용위성5호(KOMPSAT-5)의 성공적인 발사로 인해서 국내의 장비만을 활용하여 남극의 연구를 진행할 수 있는 능력이 생겼다고 여겨진다. 이렇게 확보된 기술들과 해외 기관들과의 긴밀한 협력을 통해 더 다양한 연구가 가능해 질 것으로 기대된다.

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

1 절. 아문젠 해역의 시공간적 해빙 및 폴리냐 분포특성변화 도출

본 연구에서는 EOF(Empirlcal Orthogonal Function, 경험직교함수) 분석을 이용하여 서남극 아문젠 해역에 분포하는 해빙의 변화 특성을 도출하였다. EOF 분석은 시간 및 공간에 대한 개개의 '변화'의 분포를 볼 수 있는 분석 방법이다. Sea ice concentration 지도와 같은 단일 자료가 오랜 기간동안 축적되어 있는 경우 EOF 분석 방법을 이용하여 그 자료의 시간 및 공간적 특징을 분석할 수 있다. 간단히 각 자료의 시간 및 공간적 변동을 기술할 수 있는 가장 최소한의 지수로 자료를 설명할 수 있다. EOF 분석은 SSMI의 1968년 10월부터 2013년 12월까지 월평균 자료를 이용하였으며 아문젠 해역중 경도 -114° ~ −98°, 위도 -71° ~ −66° 사이의 sea ice concentration 자료를 잘라내어 분석을 하였다.

a) 시간적 변화 분석 (Temporal variation analysis)

KOPRI 극지연구소

먼저 E 는 s개의 공간자료와 t개의 시간 자료로 이루어진 행렬(t × s)을 뜻한다.

$$E=\begin{bmatrix} e_{11} \dots e_{1s} \\ \dots \dots \dots \\ e_{t1} \dots e_{ts} \end{bmatrix}$$

E는 각각의 공간적인 위치에서 시계열 자료로부터 시간에 따른 평균을 제거한 자료로써 EOF 분석을 통해 나온 결과는 시간적인 변화를 가장 잘 표현하는 모드(mode)를 추출할 수 있다. 반대로 만약 동시에 관측된 자료로부터 공간적인 평균을 제거한 다음 EOF 분석을 한다면 이는 공간 분산(variation)에 의한 분해가 되며 각각의 결과는 공간적인 분포를 가장 잘 표현하는 것을 나타낸다. 시계열 평균이 제거된 E를 이용하여 공분산행렬(covariance matrix) C 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C=(\frac{1}{N})E^{'}\times E=\begin{bmatrix} c_{11} \dots c_{1s} \\ \dots \dots \dots \\ c_{s1} \dots c_{ss} \end{bmatrix}$$

여기서 N은 행렬의 자료 개수이다. 계산된 공분산행렬은 (s × s)행렬로 고유값해석(eigenvalue

analysis)를 통해 고유벡터(eigenvector) V 와 고유값(eigenvalue)행렬 D 를 도출한다. 고유값 행렬의 대각요소는 각각의 값에 상응하는 고유벡터가 설명할 수 있는 크기를 의미한다. 각각의 고유벡터는 서로 직교한다. 마지막으로 추출된 고유벡터행렬 V 와 자료행렬 C를 다음의 식을 이용하여 시간계수(temporal coefficient) Z 를 추출한다.

$$Z = V' \times C'$$

b) 공간적 변화 분석 (spatial variation analysis)

공간적 변화 분석을 위해서는 앞서 언급된 내용과 같이 한 시기에 획득된 공간적 평균을 제거한 자료를 이용한다. 공간적 평균이 제거된 자료를 이용하여 다음과 같은 공분산행렬을 구한 후 고유값해석을 통하여 공간적 변화를 가장 잘 설명할 수 있는 고유벡터와 설명할 수 있는 크기를 가진 고유값행렬을 추출할 수 있다.

$$C = (\frac{1}{N})E \times E' = \begin{bmatrix} c_{11} \dots c_{1t} \\ \dots \dots \dots \\ c_{t1} \dots c_{tt} \end{bmatrix}$$

KOPRI 극지연구소

여기서 주의할 점은 공분산행렬을 추출 시 자료행렬의 순서를 바꿔서 시간의 자료의 수로 이루어진 공분산행렬(t × t)을 만들어야 한다. 이 공분산행렬을 이용하여 생성된 고유벡터 또한 (t × t)로 이루어져 있으며 공간계수행렬 Z를 만들기 위해서 다음과 같은 식을 이용한다.

$$Z = V' \times C$$

본 연구에서는 아문젠 해역만 분석하였기 때문에 시간적으로 435개(t), 공간적으로 378개(s)의 화소가 있다. 본래 고유벡터 V는 t와 s 중에서 작은 수에 따를 수 있다는 것이 과거 논문으로부터 증명되어있기 때문에 공분산행렬을 계산할 때 순서는 뒤바뀔 수 있다. 이는 만약 전 남극에 대한 시간적 변화 분석을 하게 될 때 공간적 자료가 기하급수적으로 커지게 되며 이를 통하여 제작되어야 하는 공분산은 상당히 큰 처리시간과 용량이 필요하기 때문에 문제가 된다. 이를 해결하기 위해서는 특이치분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 이용하여 고유치를 계산한 다음 행렬들의 변환을 통해 어느 방향으로도 분석이 가능할 수 있다.

결과

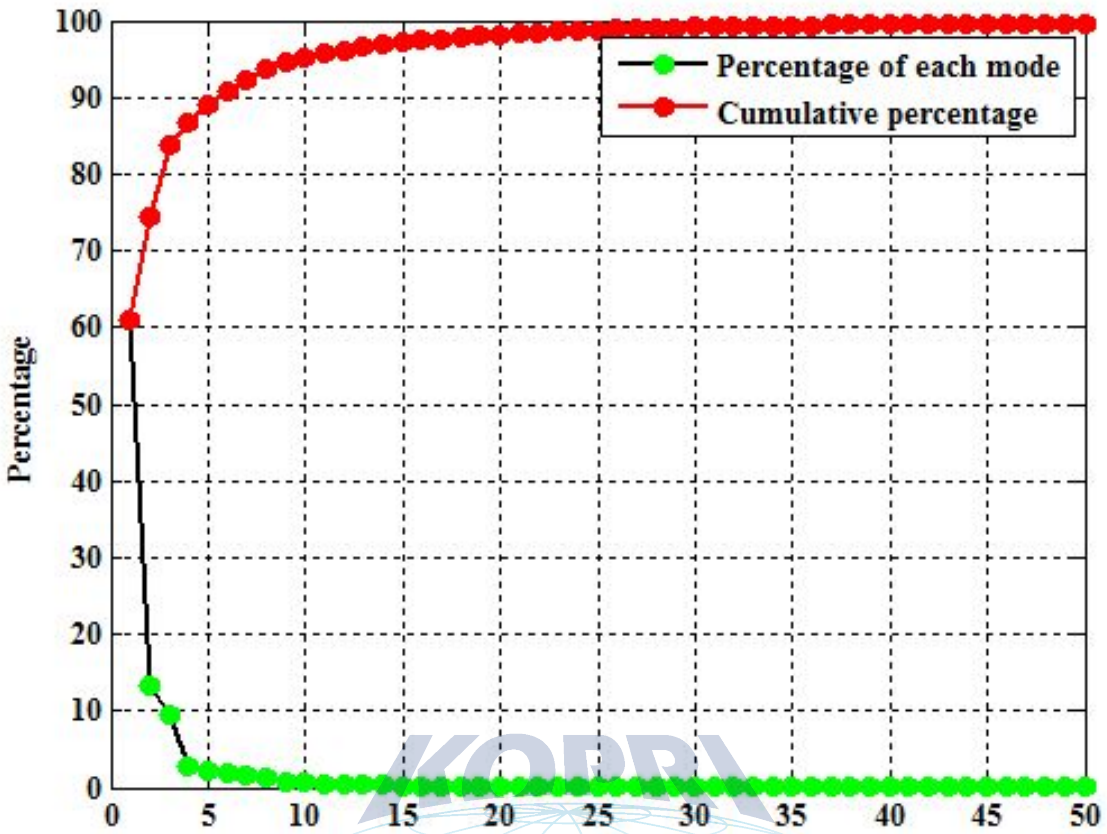


그림 1 각 모드가 차지하는 비율(green) 및 누적비율(red)

아문젠 해역의 해빙 결집(sea ice concentration)의 시공간적 분포를 알아보기 위하여 아문젠 해역을 추출한 후 EOF 분석을 통한 결과 중 고유벡터의 시간 분포 및 진폭함수 (amplitude function)의 제 1모드 (61.06%)를 공간상 그림2에 나타내었다. 그림1은 각 모드가 차지하는 비율 및 누적비율을 나타낸 것으로 제 1모드 (61.06%), 2모드(13.34%), 3모드(9.47%), 그리고 4모드(2.73%)로 내려가는 것을 볼 수 있다. 그림3은 시간 분산에 상응하는 시간 계수(temporal coefficient)를 나타낸다. 시간 분산 분포의 진폭함수는 시간 변동에 의해서 규정되는 해빙 결집의 변화를 가장 잘 나타내고 있는 것을 보여주며 모든 값이 양수를 띄는 것으로 보아 연관된 시간계수의 시간적 변화의 양상을 공통적으로 따르고 있음을 뜻한다. 즉 시간 계수에 다른 경향을 보이는 위치가 없이 전체적으로 모든 위치에서 시간에 따라 비슷한 양상을 보임을 나타낸다.

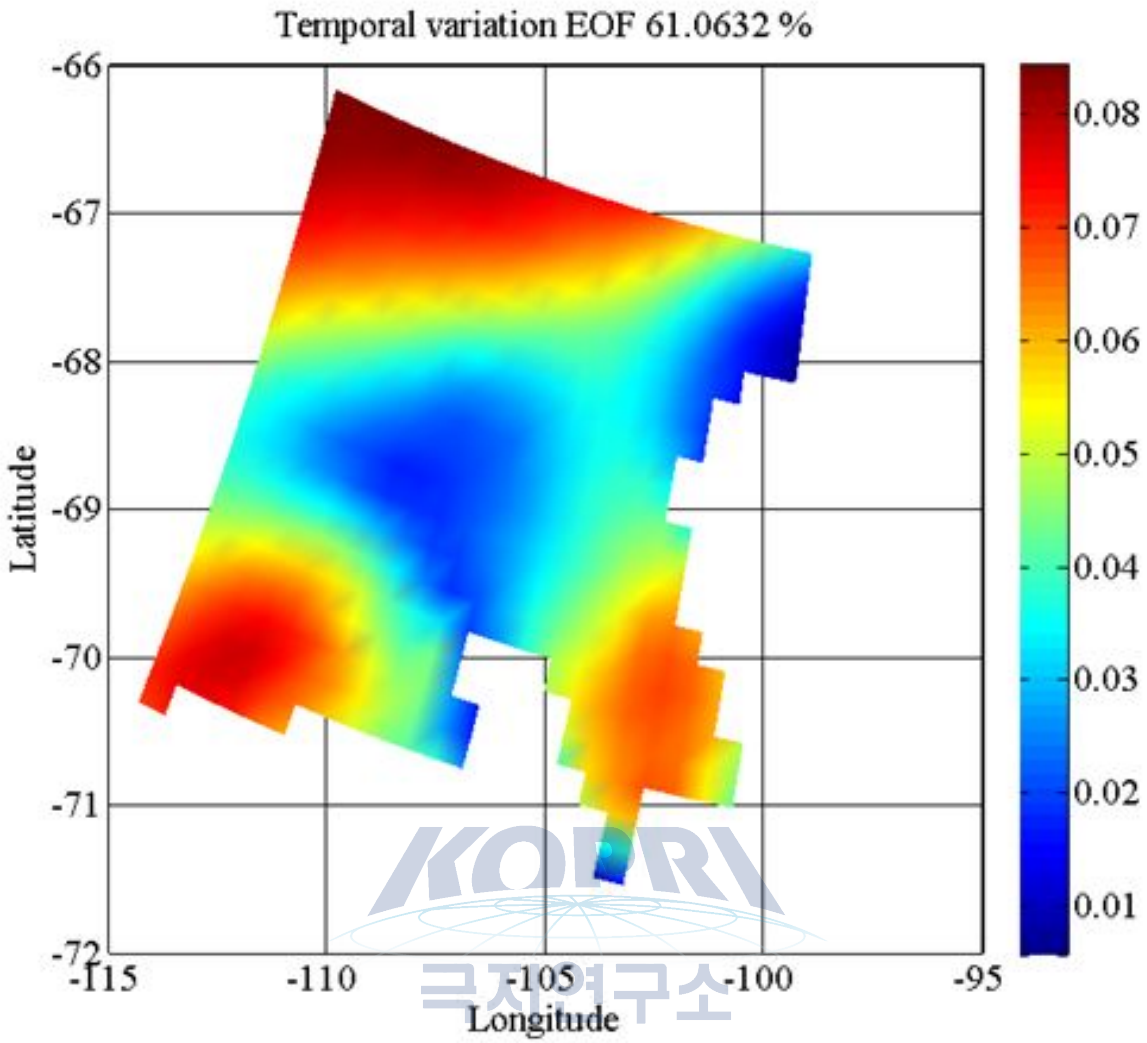


그림 2 시간 분산에 의한 제 1 모드의 고유벡터의 공간화

시간 분산에 의한 고유벡터 값은 북쪽과 남서쪽에서 가장 높은 값을 보이며 이는 계절에 따라서 해빙의 결집양이 변화하는 경향을 잘 나타내고 있는 지역을 뜻한다. 특히 연구지역의 남서쪽은 폴리냐가 발생하는 지역으로 겨울에는 해빙이 사라지고 여름에 다시 발생하는 경향을 잘 보여준다. 이에 반해 중간 지역 또한 같은 경향성을 보이지만 변화하는 경향성의 크기는 작은데, 이는 계절과는 상관없이 해빙이 지속적으로 존재하고 있을 수 있는 가능성을 뜻한다.

그림3은 시간 분산에 의한 시간계수를 나타내는데 값이 0인 지역은 각 공간적인 위치에서 35년 동안의 해빙결집의 평균값을 의미하며 1978년 10월부터 1980년 9월가지의 그래프를 통하여 2~3월에 가장 낮은 해빙결집을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 일반적인 계절적 온도변화와 아주 같은 경향을 보여주며 이 시기에는 그림2에서 높은 값을 보이는 위치에서 해빙결집이 아주 낮다는 것을 뜻한다.

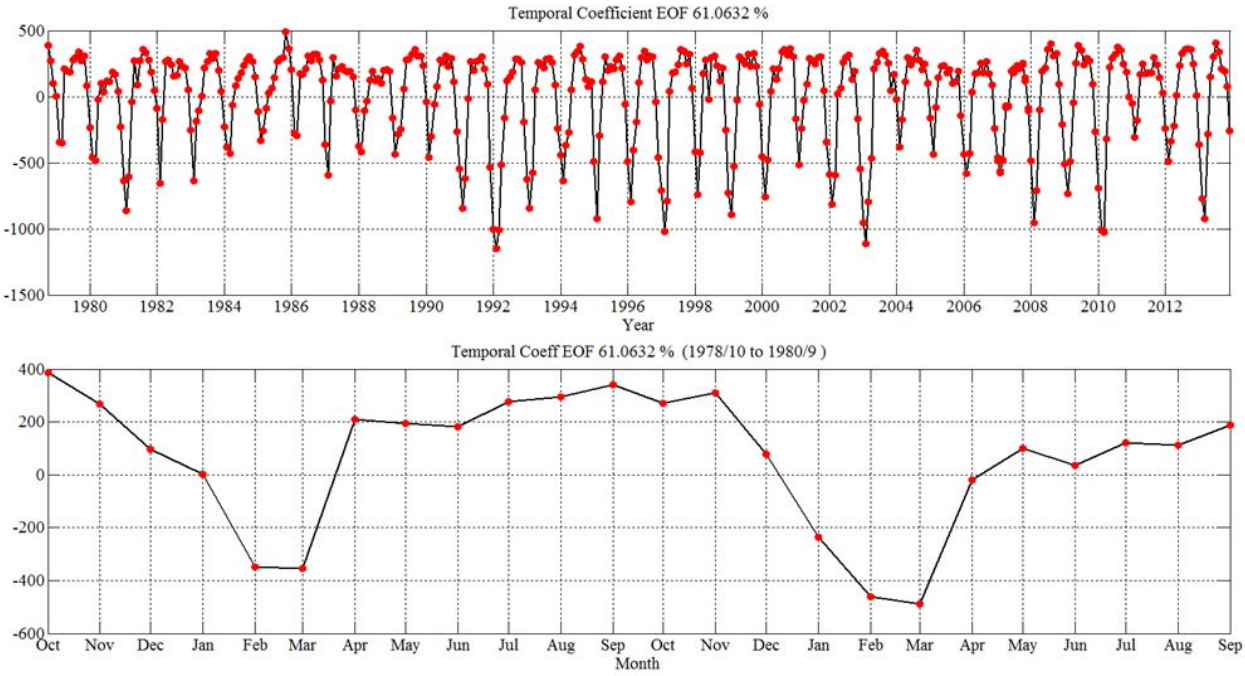


그림 3 시간 분산에 의한 제 1 모드의 시간계수와 1978년 10월부터 1980년 9월까지의 시간계수

그림4는 아문젠 해역의 해빙결집에 대한 제 2모드를 보여주며 전체의 약 13.34%를 차지하고 있다. 제 1모드와는 비슷하지만 고유벡터의 부호가 양수와 음수가 교차하는 경향을 보여주고 있으며 변동폭은 -0.1에서 0.06정도이다. 부호가 바뀌는 지역을 검정색 선으로 표시하였으며 제 1모드와 비슷하게 아문젠해 지역을 4등분 하고 있다. 부호가 양수인 가운데 지역은 제 1모드에서 지속적으로 해빙이 존재할 가능성이 있는 지역으로 제 2모드에 따르면 1년 중 12월과 2월 사이에 가장 높은 시간계수를 보여준다. 폴리냐가 주로 생성되는 지역인 남서쪽 지역은 음수의 부호를 나타내고 있으며 이는 부호가 다른 지역간에 변동양상이 역상관관계에 놓여있다는 것을 나타내며 절대값의 차이는 변동폭의 차이를 나타낸다. 그러므로 부호가 양수인 가운데 지역에 해빙결집이 높아질 때 남서쪽의 부호가 음수인 지역은 해빙결집이 낮아지는 양상을 뜻한다. 이는 12월부터 2월 사이에 폴리냐가 활발하게 생성되는 것을 잘 표현해 주고 있다. 아문젠 해역의 북쪽 지역과 Pine Island 빙하가 있는 남동쪽 지역 역시 중간 지역과는 역상관관계에 있는 지역이지만 절대값이 그리 크지 않다.

KOPRI 극지연구소

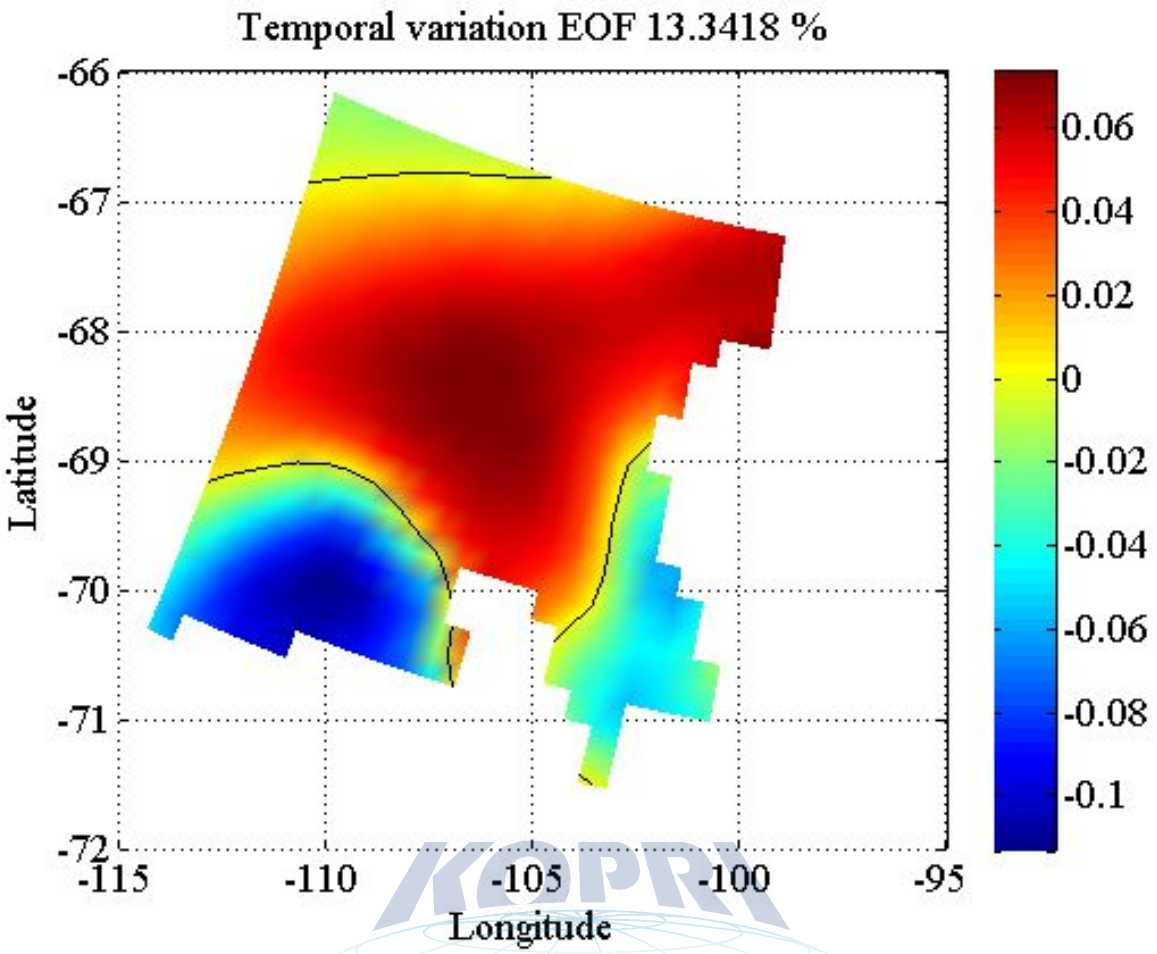


그림 4 시간 분산에 의한 제 2 모드의 고유벡터의 공간화

KOPRI 극지연구소

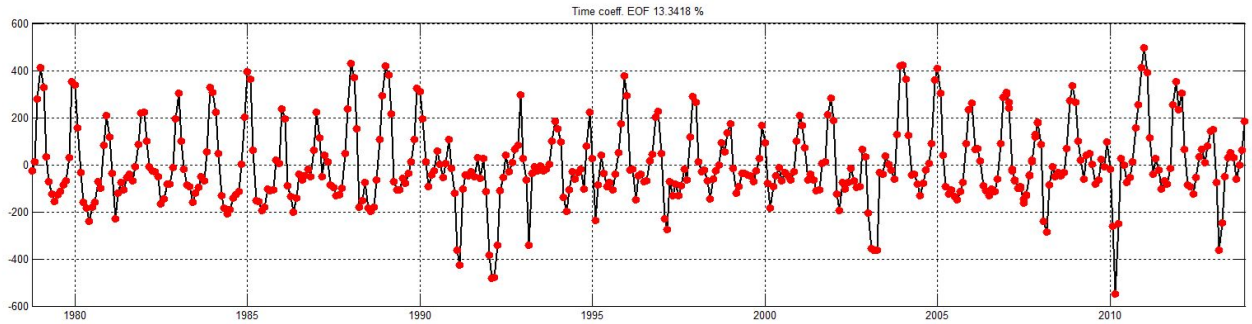


그림 5 시간 분산에 의한 제 2모드의 시간계수

제 2모드에서 눈에 띄는 다른 특징은 1991, 1992, 1993, 2003, 2010, 2013년 남극의 여름(12~2월) 동안 시간계수가 강력한 음수를 갖는다는 것이다. 이 시기에는 오히려 폴리냐 지역에 해빙결집이 더 크게 일어나며 중앙지역에서 해빙결집이 낮아지는 경향성을 보여주는데 이는 북극의 해빙의 규모가 가장 적었던 시기들과 매우 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 폴리냐 지역에서 오히려 해빙이 증가하기보다 위에 언급된 기간에는 평균적으로 해빙결집 자체가 매우 낮

았던 것으로 예상된다.

공간적 변화 양상을 알아보기 위해서 자료행렬에서 공간적 평균을 제거 한 후 EOF 분석을 실시하였다. 그림6은 공간 분산의 EOF 분석의 각 모드가 차지하는 비율 및 누적비율을 나타낸 것으로 제 1모드가 49.13%를 차지한다.

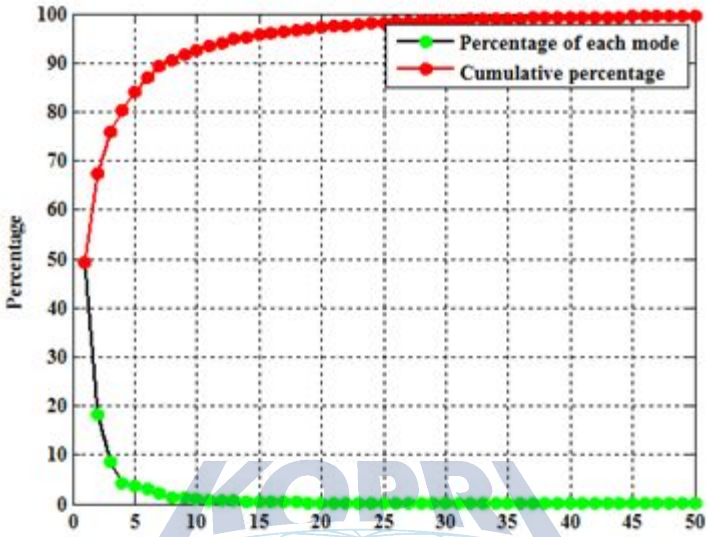


그림 6 각 모드가 차지하는 비율(green) 및 누적비율(red)

그림7은 아문젠 해역의 공간 분산에 대한 고유벡터의 제 1 모드의 진폭함수를 시간변동으로 나타낸 것이다. 진폭함수가 0에 가까울수록 그 시기의 해빙의 공간적 분산이 평균과 비슷한 것을 나타낸다. 0에서 멀어질수록 분산이 높아지는 것을 뜻하며, 각 시각에서의 공간평균을 제거한 후의 분석이기 때문에 그림에 나타나있는 각 위치에서 높은 절대값을 가지고 있을수록 평균으로부터의 편차가 시간이 지남에 따라 점차 증가하고 있다는 것을 나타낸다. 공간적 분산 또한 12월에서 2월 사이에 가장 낮은 값을 보여주고 있으며 이는 남극의 여름동안에는 해빙이 녹아 분산적으로 위치하기 때문인 것으로 예상된다. 반대로 겨울 시기에는 0에 가까운 값을 나타내며 이는 해빙이 아문젠 해 전체적으로 위치하기 때문에 해빙결집의 평균에 가까운 것으로 여겨진다.

그림8은 공간 분산에 의한 공간계수를 나타내며 시간적 분석의 제 1모드에서와 비슷한 양상으로 세 지역으로 분리가 되어있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이 지역들의 공간계수가 0으로 나누어지고 지역간에 부호가 양수와 음수로 교차하는 경향을 보이는 점이 다르다. 계수가 0인 부분은 시간 변화에 영향을 받지 않는 지속적인 경계부분으로써 다른 말로는 해빙이 지속적으로 위치한다고 볼 수 있다.

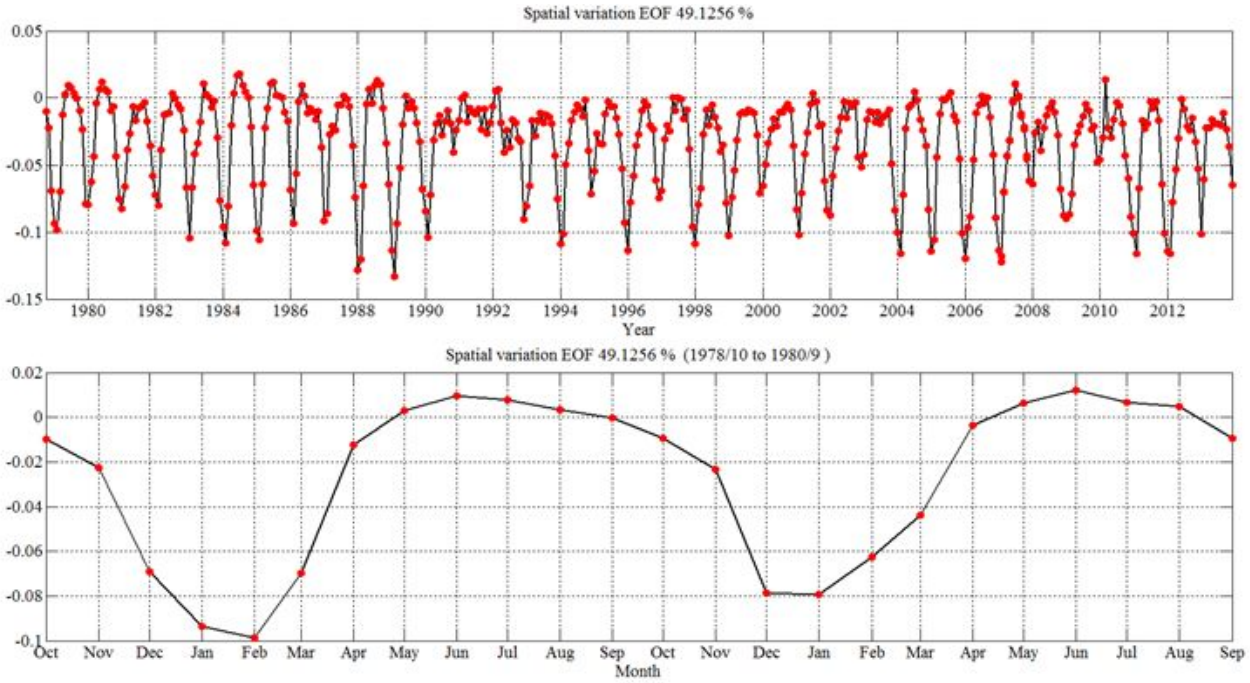


그림 7 공간 분산에 의한 제 1 모드의 고유벡터

KOPRI 극지연구소

공간 분산의 고유벡터와 공간 계수의 부호가 각각 다르기 때문에 이를 분석하는데 조심성이 필요하다. 먼저 공간 계수가 음수인 지역은 영상의 가운데 위치하며 공간 분산의 고유벡터가 음수인 시기와 상관관계에 있음을 보여준다. 따라서 이 지역은 여름에는 평균보다 더 적은 양을 보여주는 지역으로 해빙 결집의 변화가 가장 큰 지역이라고 볼 수 있다.

공간 계수의 부호가 양수인 지역 중 가장 높은 값을 가지고 있는 폴리냐 지역의 경우 공간 분산의 고유벡터와 역상관 관계에 놓여있기 때문에 시간적으로 해빙 결집이 낮아지기 때문에 공간 분산이 높아지는 여름의 경우 더욱 변화가 적어지는 것을 뜻하고 있다.

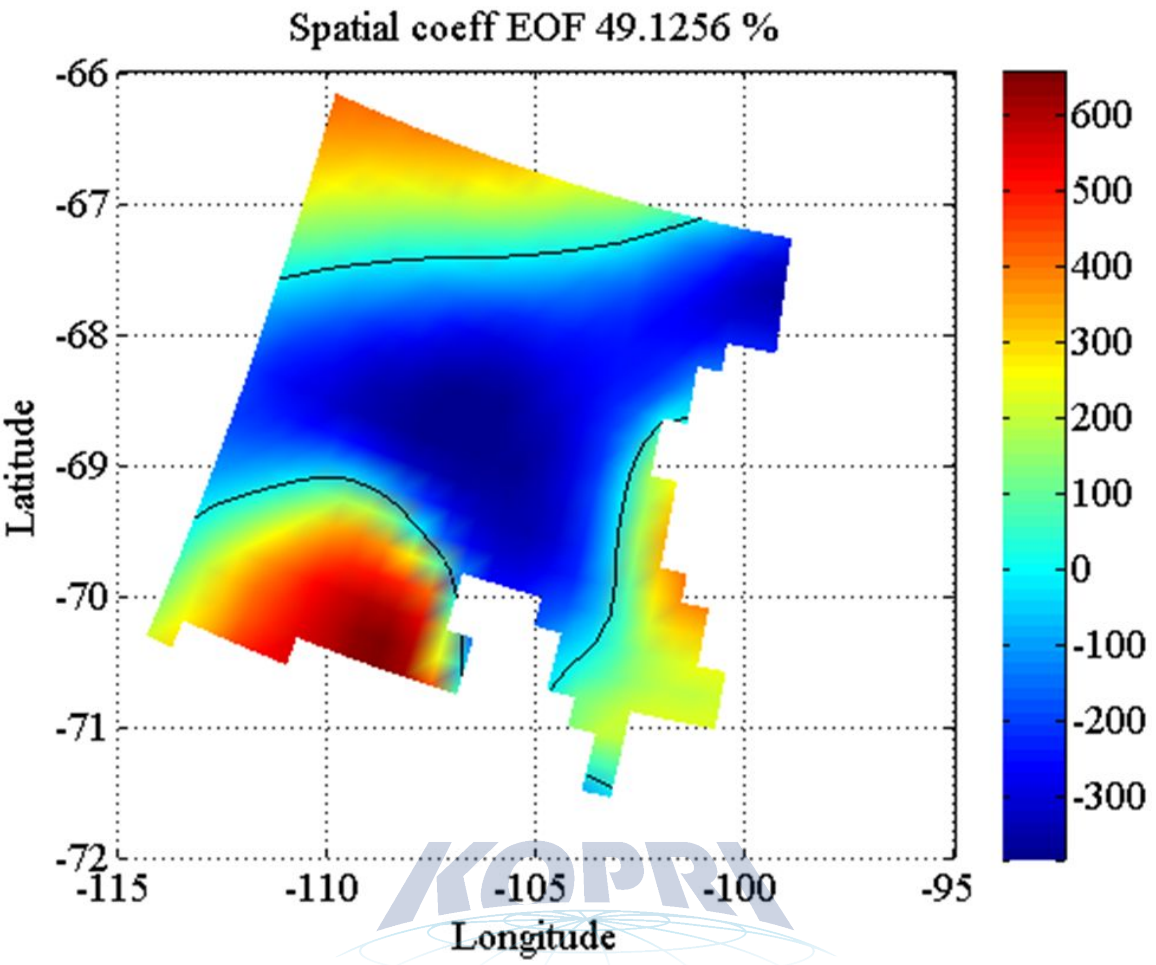


그림 8 공간 분산에 의한 제 1모드의 공간 계수

본 연구에서는 35년간 축적한 SSMI passive microwave 자료를 이용하여 아문젠 해역의 해빙 분포의 시공간적 변화 패턴을 EOF 분석을 통하여 연구하였다. 이를 통하여 폴리냐 지역과 해빙이 지속적으로 관측되는 지역 간의 상관관계를 알아볼 수 있었으며 북극의 해빙면적의 감소시기와 남극 아문젠해역의 해빙분포의 시기가 일치하는 것을 알 수 있었다. 추후 다양한 성격의 시계열 자료를 EOF 와 같은 통계적인 분석을 통하여 해빙분포 패턴의 원인 또한 알아낼 수 있을 것으로 기대된다.

2 절. 유효성이 검증된 altimeter 자료로부터 아문젠해 지역의 해빙 두께의 시공간적 변화 도출

본 연구에서는 CryoSat-2 고도계 자료를 이용하여 아문젠해 지역의 해빙두께를 microwave파와 해빙의 상층에 존재하는 눈의 투과율을 고려하여 계산하였으며 2015년 1월부터 12월까지 시간적인 변화를 도출하였다.

이용된 CryoSat-2 고도계 자료는 Low Resolution Mode(LRM), Synthetic Aperture Radar(SAR), Synthetic Aperture Radar Interferoetric(SARIn) 모드 중 SAR 모드를 이용하였다. SAR 모드는 CryoSat-2 위성으로부터 적용된 알고리즘으로써 합성개구레이더의 신호처리 과정을 이용하여 과거 고도계위성들보다 높은 공간 및 수직적 해상도를 가지는 이점을 가지고 있다. Laxon/Ridout sea-ice model fit을 이용한 retracker를 적용하여 해빙 표면의 높이를 추출할 수 있는 검증된 고도계 자료로 이용되고 있다. 반면, CryoSat-2 는 2015년부터 Baseline B 에서 C 로 프로세서가 변화되었으며 해빙과 가장 밀접하게 관련된 변화는 SAR 모드에서 freeboard값(Field 43)이 제공된다는 점이다. 앞선 Baseline B 까지는 -9999 로 지정되어있었지만 2015년 자료부터는 값이 제공된다. 몇가지 주의해야할 사항들 중 Freeboard의 값을 확인해 보면 작은 음수로 되어있는 지역을 확인할 수 있는데 이는 충분한 양의 눈이 얇은 얼음 위에 쌓여있을 때 발생할 수 있는 값으로 본 연구에서는 제거를 하였다.

해빙의 두께는 유체정력학정평형(Hydrostatic equilibrium)이론을 적용하여 추출하였다. 이는 얼음과 물의 밀도차를 이용하여 해수면 아래에 존재하는 얼음의 두께를 유추할 수 있는 방법으로써 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$H_d = R(H_f - F_c)$$

$$R = \frac{\rho_i}{(\rho_w - \rho_i)}$$

여기서 Hd 는 해수면 아래에 존재하는 얼음의 두께로써 Firn의 깊이(Fc)가 수정된 Freeboard (Hf) 와 얼음(pi)과 해수(pw)의 밀도차이의 비율과 곱해서 계산을 할 수 있다. 얼음과 해수의 밀도는 각각 1025 g/㎥ 와 917 g/㎥로 정하고 계산하였다. (Van den Breke, 2008)의 결과에 따르면 서남극 지역의 빙하의 Firn Depth Correction은 약 10m에서 20m 사이의 값을 보이는 것으로 확인되었지만 본 연구에서는 남극의 해빙은 초년생인 것을 감안해 무시하였다.

Microwave파를 이용하는 고도계의 해빙표면에 존재할 수 있는 눈의 투과율을 추정하여 두께가 얇은 해빙의 경우 해빙 표면에 쌓인 눈으로 인하여 표면의 높이가 해빙이 아닌 눈일 경우 해빙의 두께가 과대평가될 수 있는 가능성을 연구하였다. CryoSat-2는 Ku-Band(13.575 GHz)를 이용하기 때문에 그다지 높은 투과율을 보이지는 않을 것으로 예상하였다. 전자파의 투과율을 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Pd_{elec} = \frac{1}{\sigma}$$

여기서 σ는 전자기파가 어떤 매체를 통과할 때 신호의 세기가 줄어드는 양을 표현하는 two-way power extinction coefficient를 나타내며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\sigma = \frac{2\pi|imag(\sqrt{\epsilon}|}{\lambda}\frac{2}{\cos(\theta)}$$

여기서 Θ는 전자기파의 입사각(incidence angle)를 나타내며 고도계위성의 경우 안테나는 nadir 방향을 가르키고 있기 때문에 0으로 가정할 수 있다. λ는 전자기파의 파장을 나타내며 CryoSat-2의 파장은 2.2cm다. ε은 매체의 유전율을 나타내며 유전율의 허수를 이용한다. 또한 유전율은 굴절율과 다음과 같은 관계식으로 정의될 수 있다.

$$n = \sqrt{\epsilon}$$

위의 식을 이용하여 전자기파의 투과율을 계산하였다 (그림9). 입사각이 증가할수록 투과율은 낮아지는 것을 확인할 수 있는데 고도계의 경우 0도와 가까운 입사각을 가지고 있기 때문에 1.44m 정도 투과할 수 있는 가능성을 보여준다. 다년생 해빙이 비교적 존재하지 않으며 해빙 표면에 쌓일 수 있는 눈의 깊이가 본 연구에서 계산된 투과율 보다 적을 것으로 예상되기 때문에 해빙 두께에 이용된 freeboard값에 추가적인 보정 작업은 진행되지 않았다.

고도계의 자료처리와 결과의 시각화를 위해서 CNES/ESA에서 제공하는 BRAT(Basic Radar Altimeter Toolbox)를 이용하였다. 2015년1월1일부터 12월31일까지 자료를 확보하였으며 1달간의 자료를 종합하여서 해빙의 두께를 도출하고 시각화 하였다. Freeboard 값은 0보다 크고 품질평가를 통과한 자료만을 선정하여 계산에 사용하였다. 마지막으로 아문젠해 전역 및 남극 전

체적인 시각화를 위해서 0.3°x0.3°격자를 이용하였다.

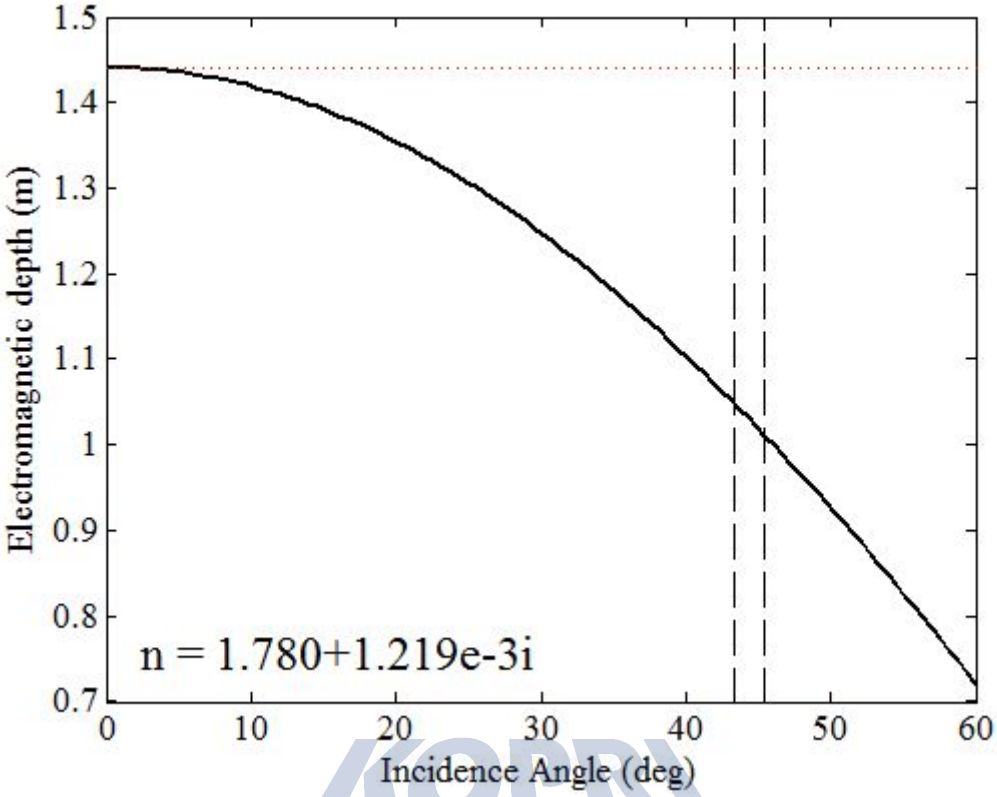


그림 9 전자기파 투과율

KOPRI 극지연구소

그림10은 2015년 8월 자료를 이용하여 계산한 해빙의 두께를 나타낸다. 상단에 위치한 그림은 각 트랙에서 추출된 값을 아무런 필터링을 거치지 않고 그리드 안에 표현한 것으로 트랙 중간에 빈 값들이 존재한다. 하단에 위치한 그림은 Loess 필터를 이용한 결과를 보여주며 중간에 존재하였던 빈 공간들을 성공적으로 채우고 있는 것을 확인할 수 있다. Loess 필터를 적용할 때 사용하는 주변 값들의 개수를 지정해야 하는데 본 연구에서는 반복적인 과정을 통하여 Loess cut-off 값이 9 일 때 가장 만족한 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

그림11~22는 2015년 1부터 12월까지의 자료를 이용하여 계산한 해빙의 두께를 나타낸다. 상단의 그림은 남극 전체의 해빙 분포 및 두께를 나타내고 있으며 하단의 그림은 아문젠해역을 확대하였다. 12개월동안 확인할 수 있는 가장 현저한 특징으로는 동남극 지역보다는 서남극 지역에 해빙이 지속적으로 분포하는 것을 볼 수 있으며 특히 Weddell해 지역에서 가장 많은 해빙이 관측된다. 남극 전체와 마찬가지로 아문젠 해역에서는 7~8월에 가장 넓은 분포를 갖으며 최대 2~3m의 두께를 갖는 것을 볼 수 있으며 1~2월에 가장 작은 분포를 갖는다.

한가지 주의해야할 점은 아문젠 해역의 경우 이용된 고도계자료의 트랙의 가장자리 부분에서

특히 높은 값들이 관측되었다는 점인데, 이는 추후 상세한 분석을 통해서 원인을 밝혀야 할 것으로 고려된다. 예상되는 원인으로는 아문젠해역에 존재하는 많은 빙산, 또는 빙붕의 끝자락으로써 해빙보다는 급격하게 높은 freeboard를 나타내고 Thwaites/Smith 빙하와 근접한 지역이라는 것을 볼 때 타당한 것으로 생각된다. 특히 아문젠 해역의 경우 이러한 높은 값이 많이 관측되며 공간적 필터링으로 인하여 주위의 두께에 영향을 크게 끼치는 것을 확인할 수 있으며, 이를 밝혀내기 위해서는 공간적 필퍼링을 하지 않은 고도계 자료를 이용하여 검증해야 할 것으로 고려된다.

KOPRI
극지연구소

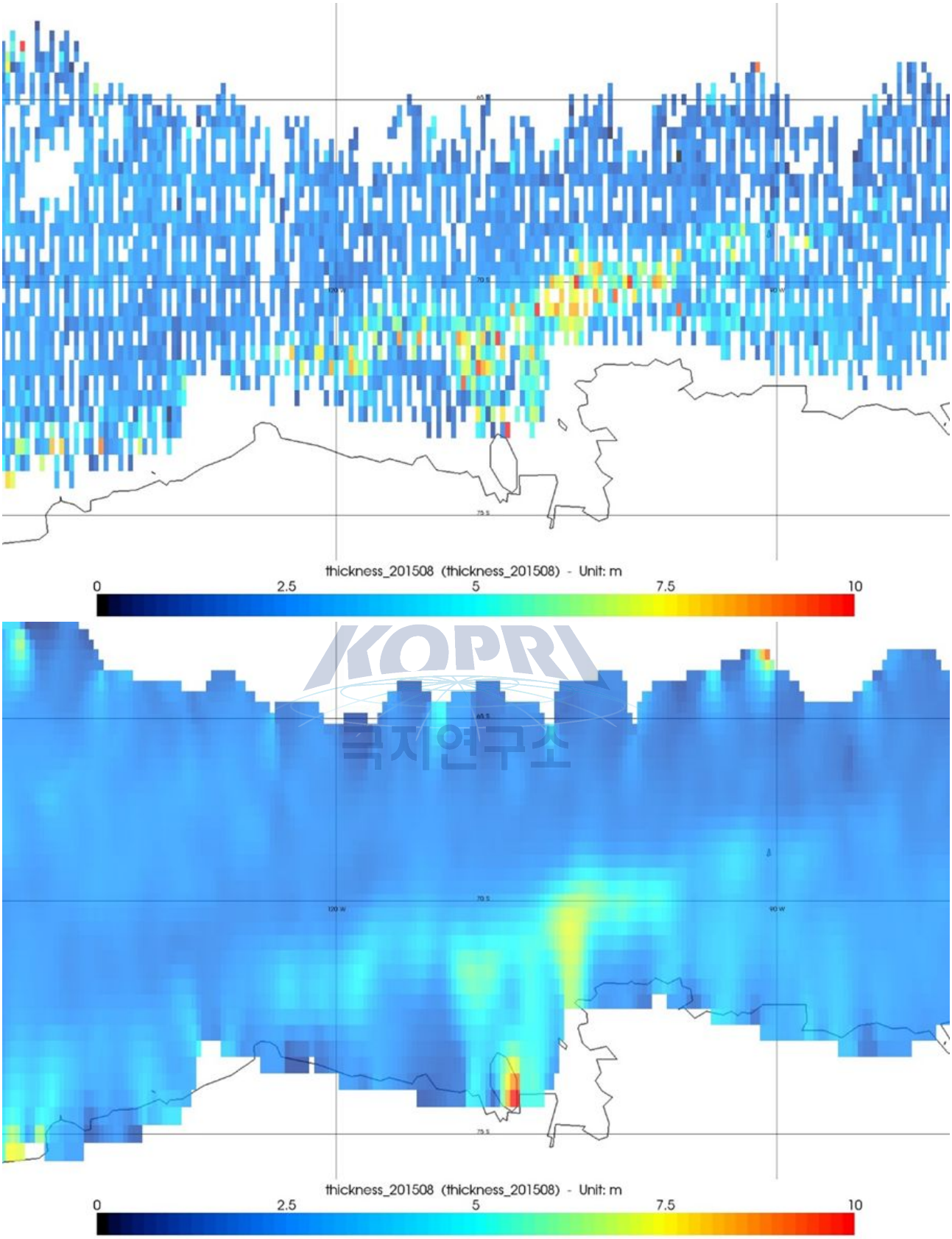


그림 10 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께. (상단) 공간 필터링 미적용시. (하단) 필터링 적용시.

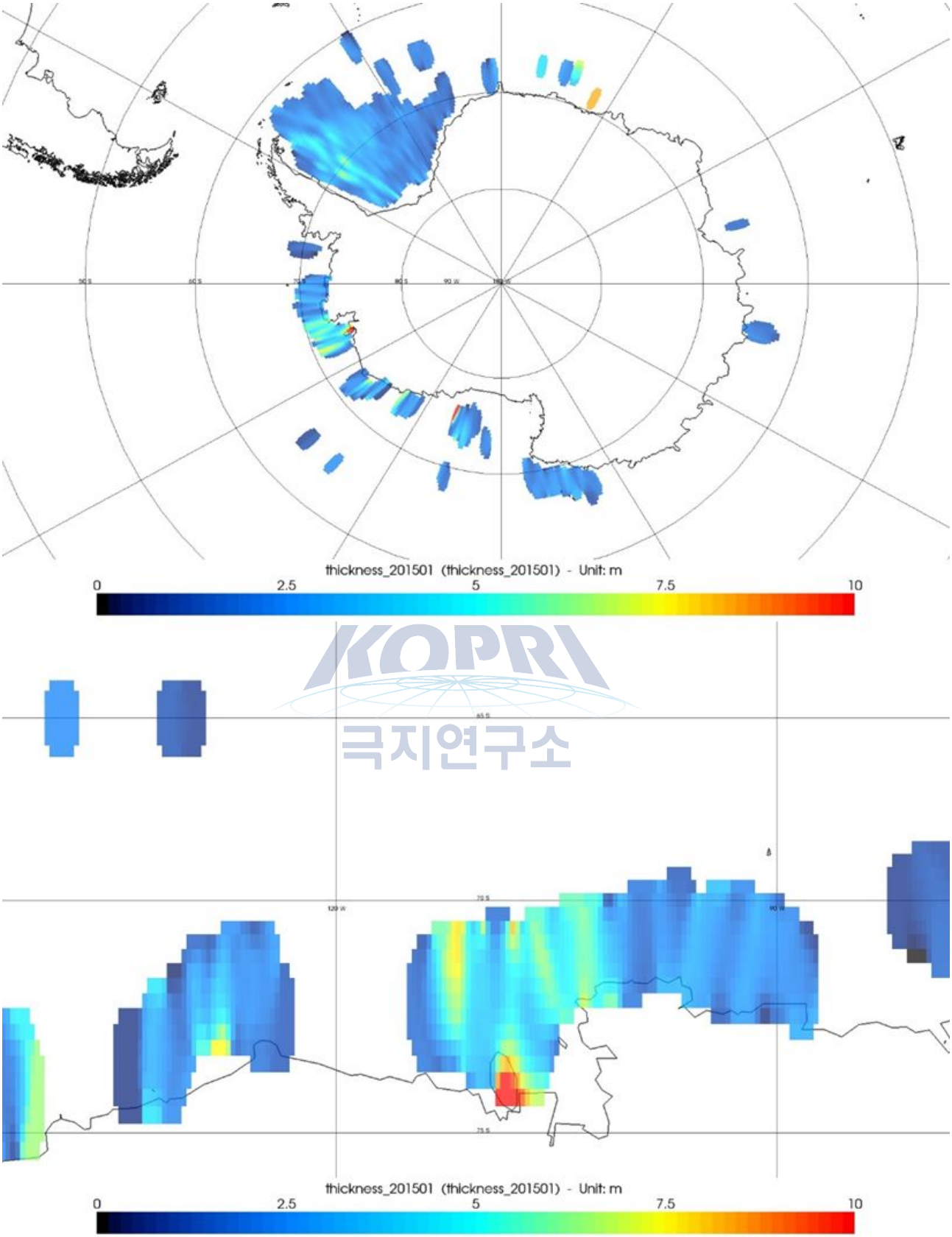


그림 11 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 1월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

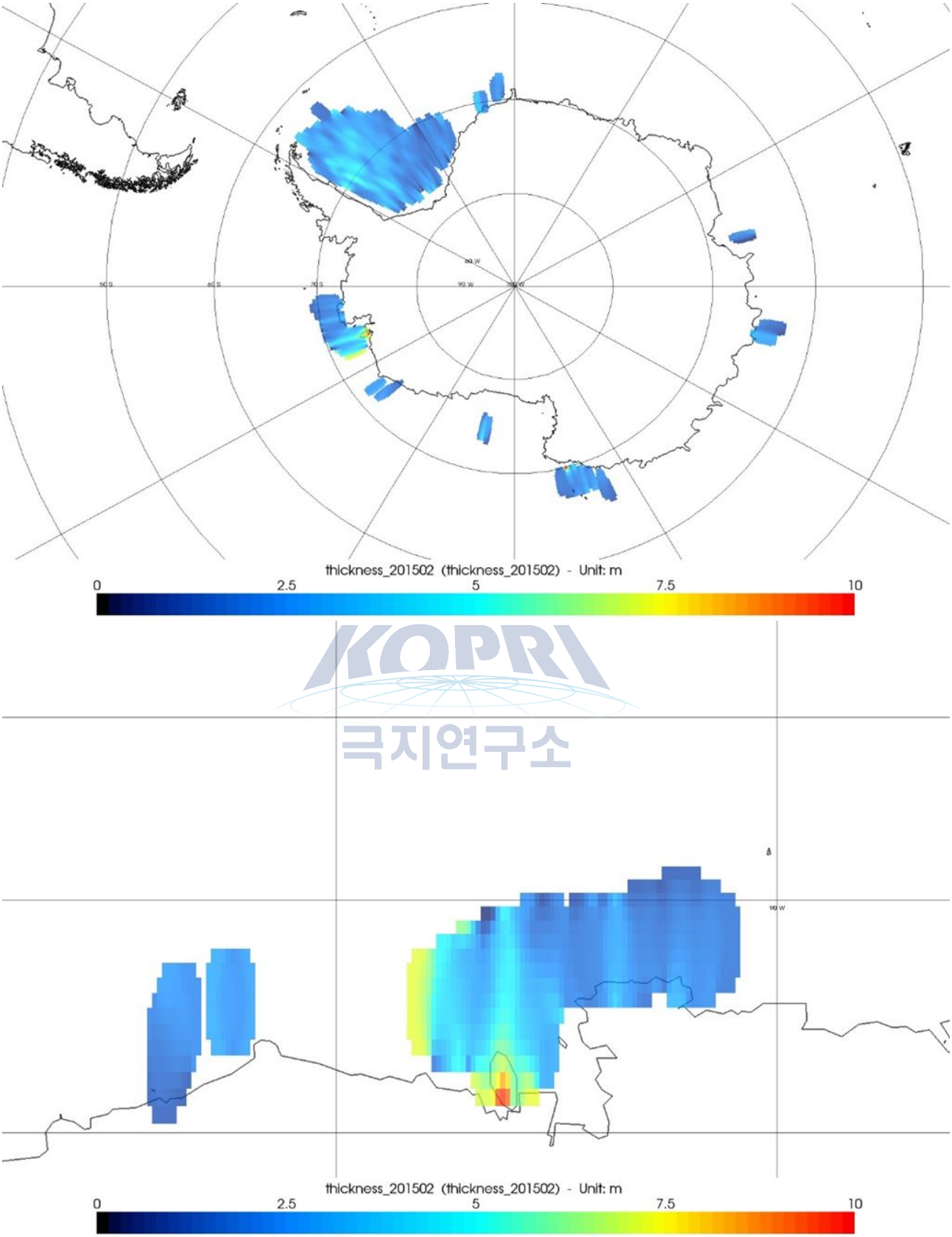


그림 12 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 2월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

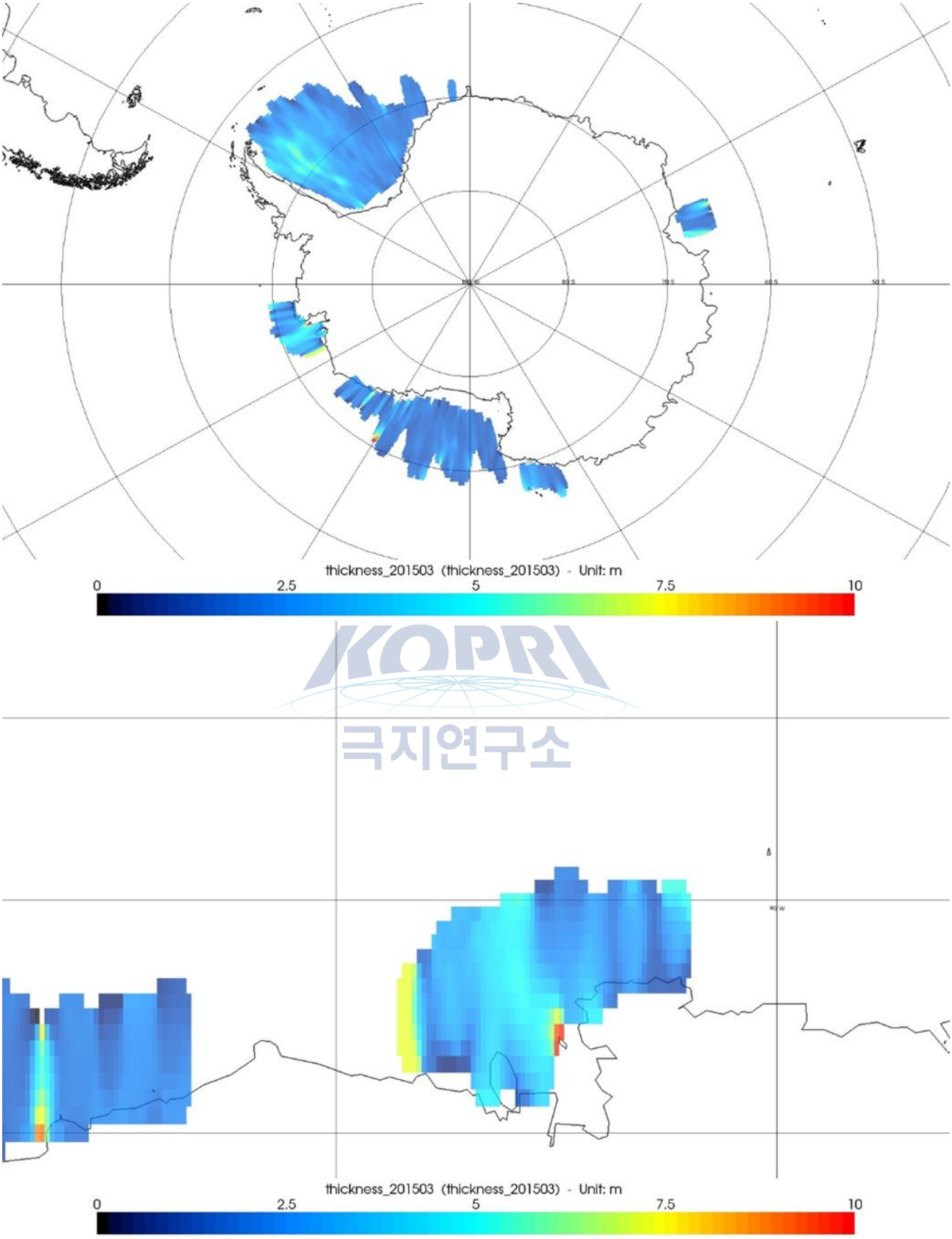
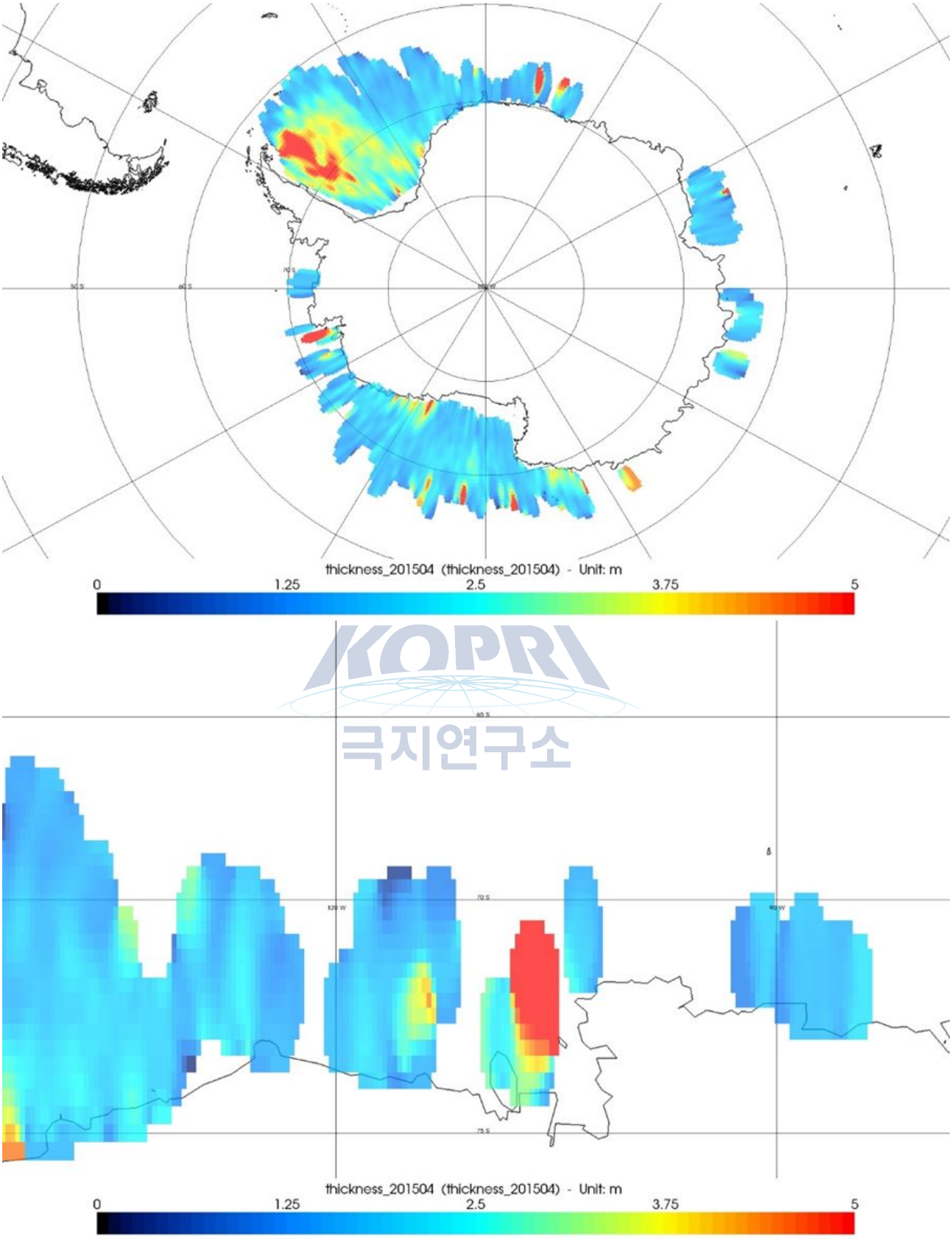
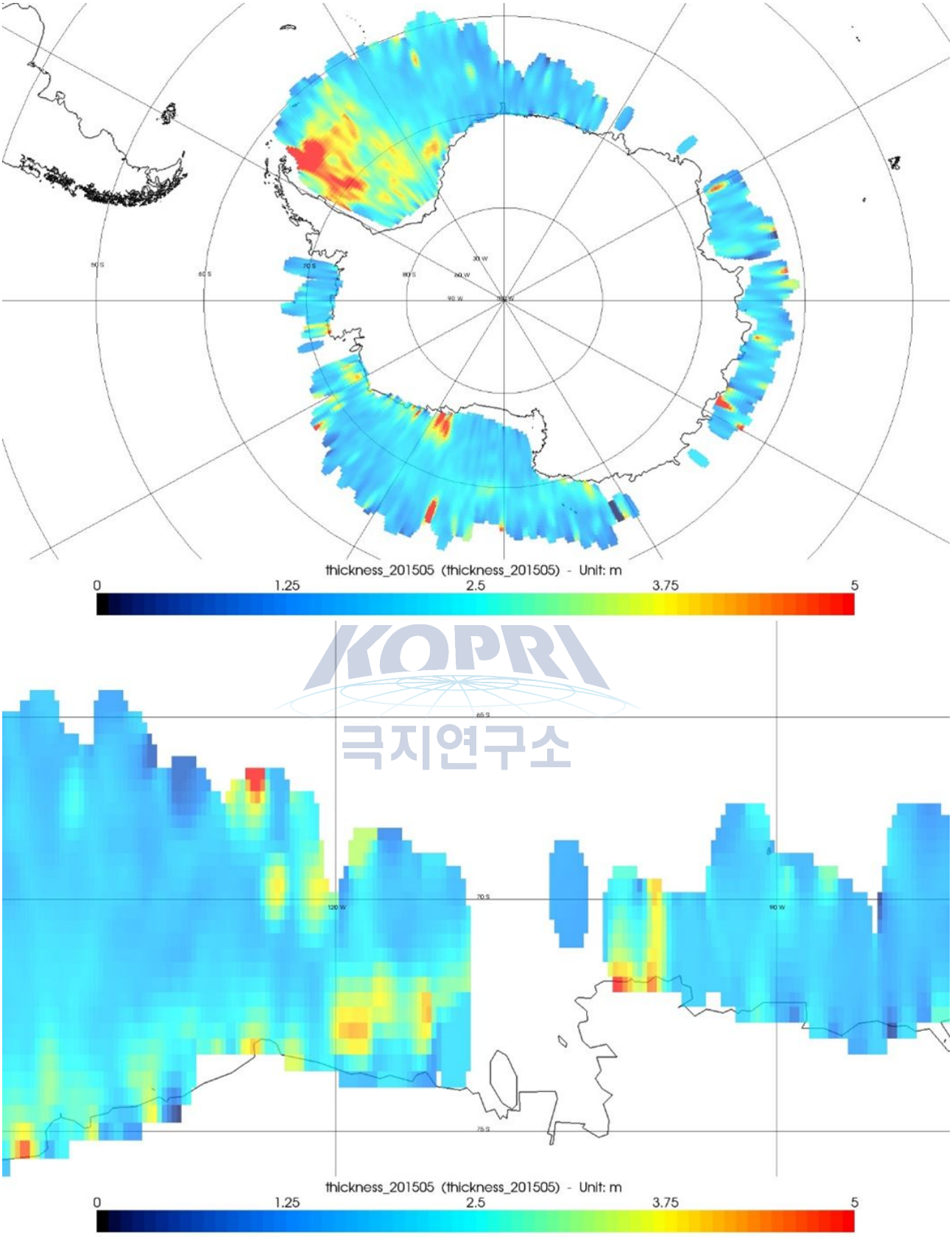


그림 13 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 3월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해



KOPRI
극지연구소

그림 14 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 4월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해



KOPRI
극지연구소

그림 15 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 5월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

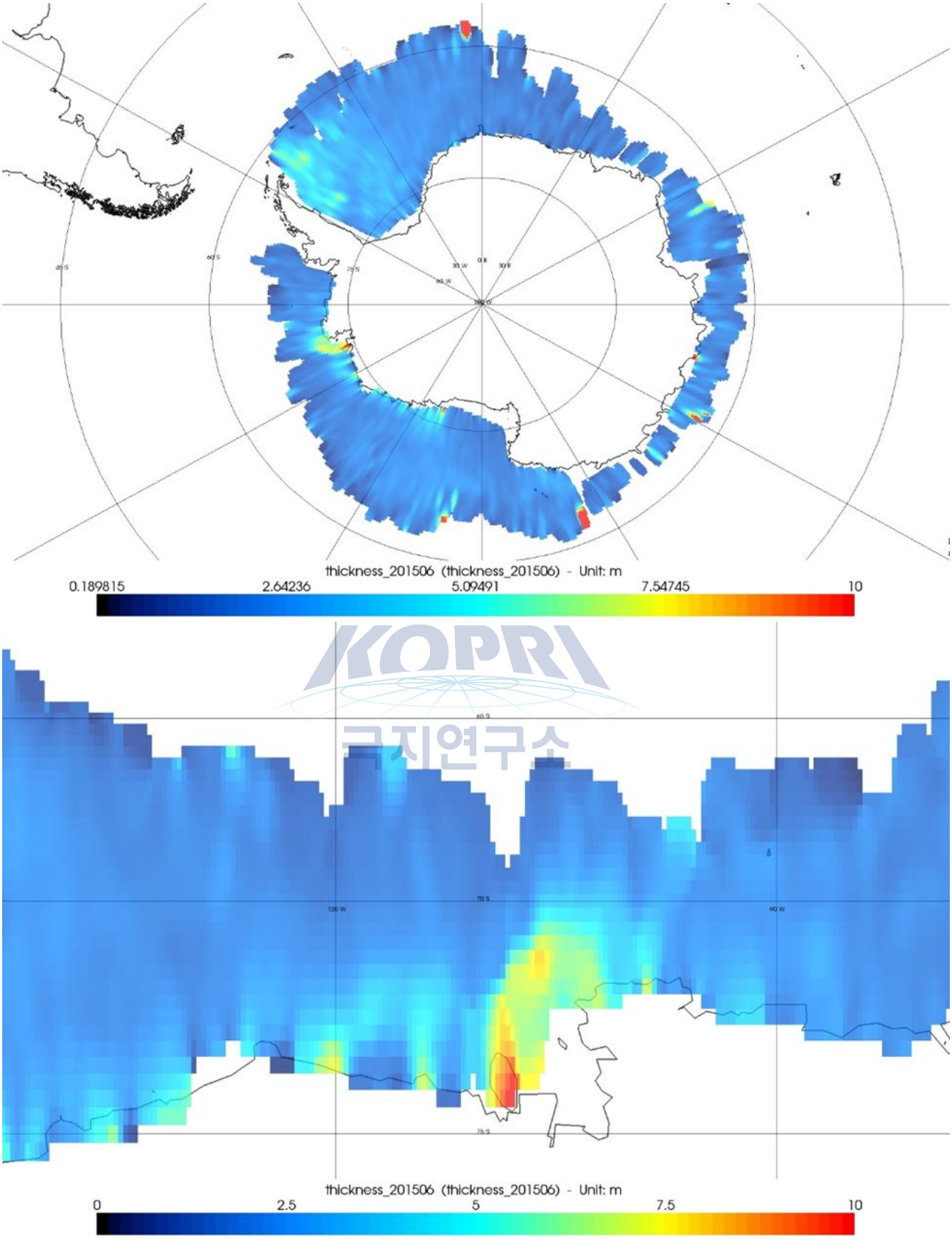


그림 16 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 6월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

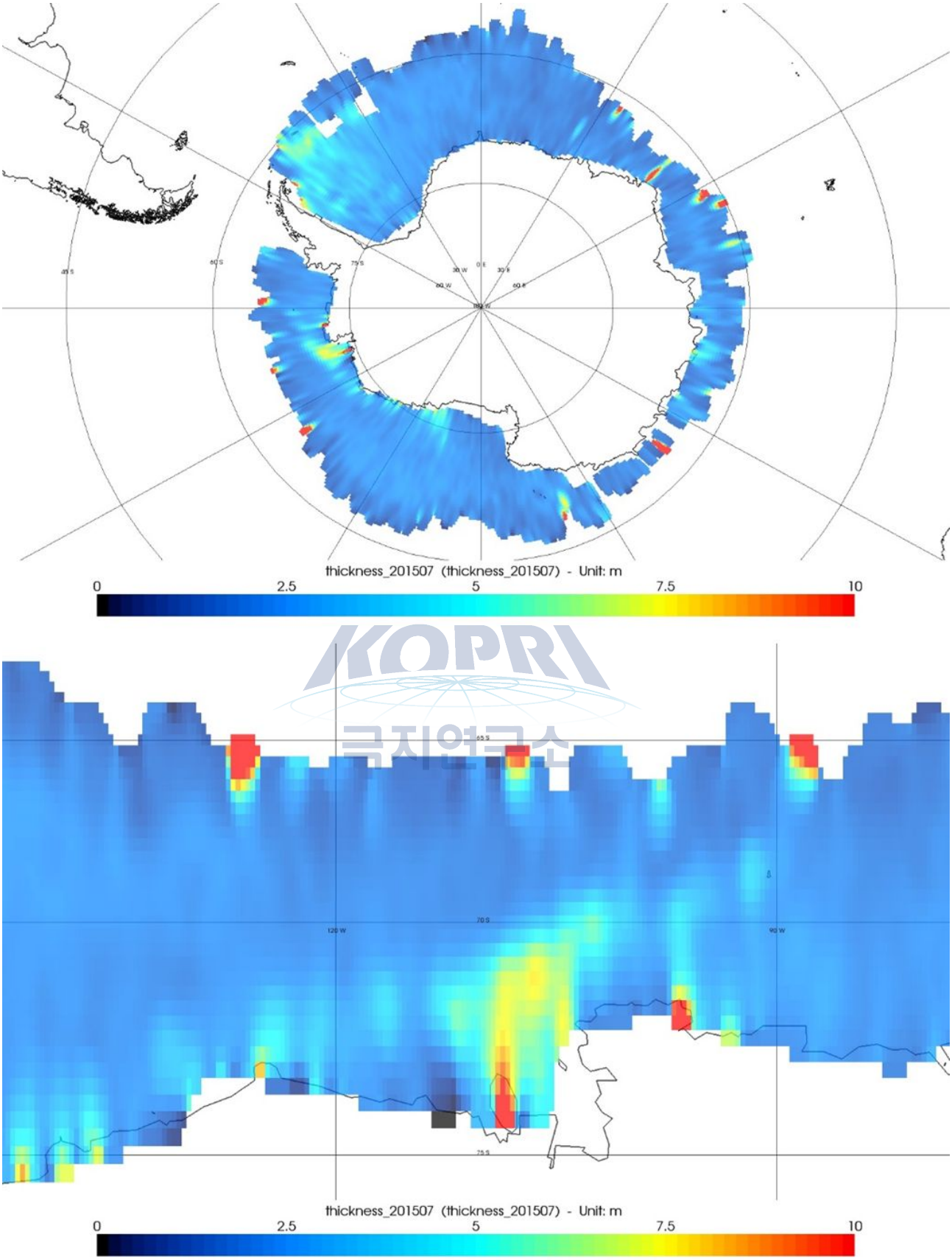


그림 17 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 7월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

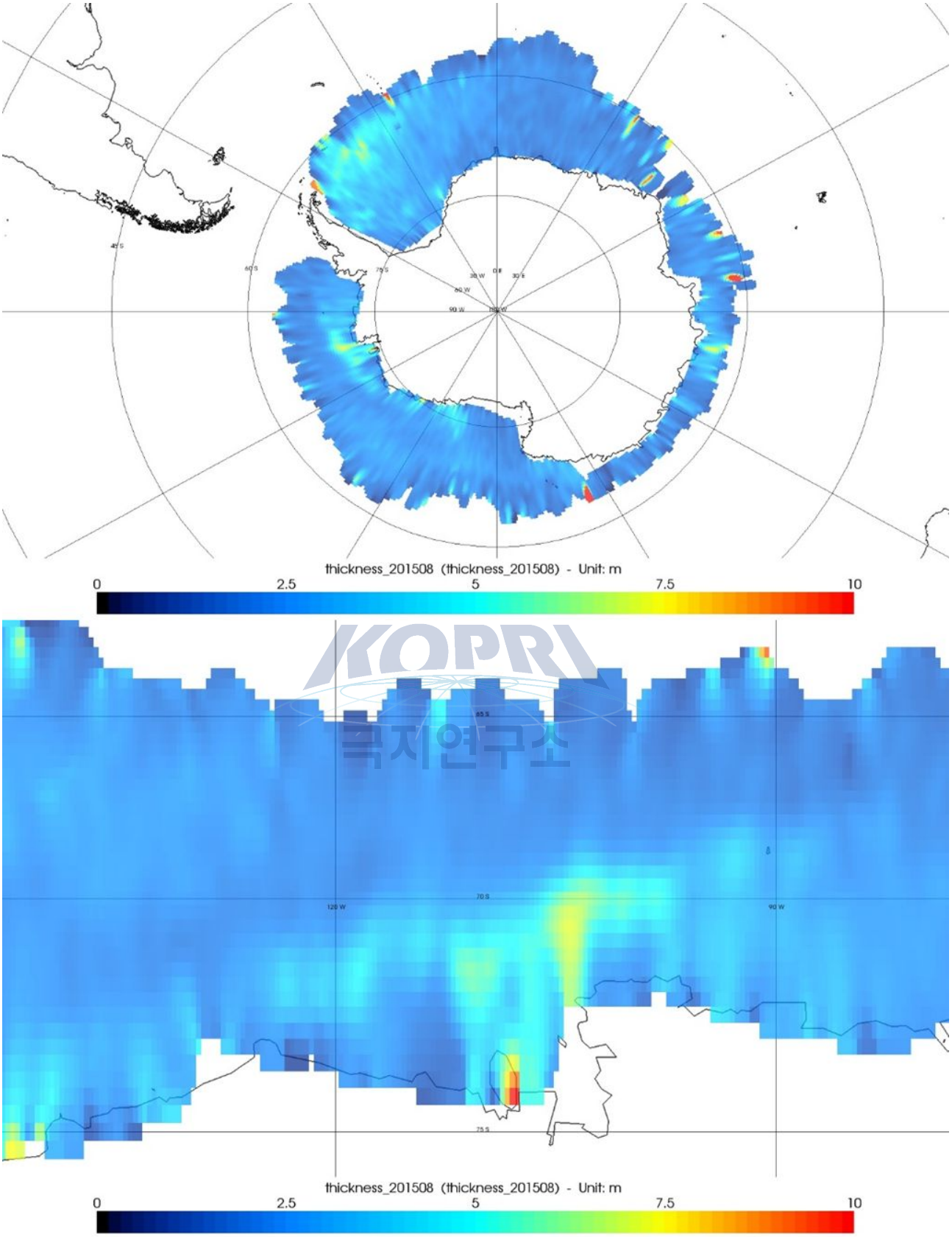


그림 18 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 8월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

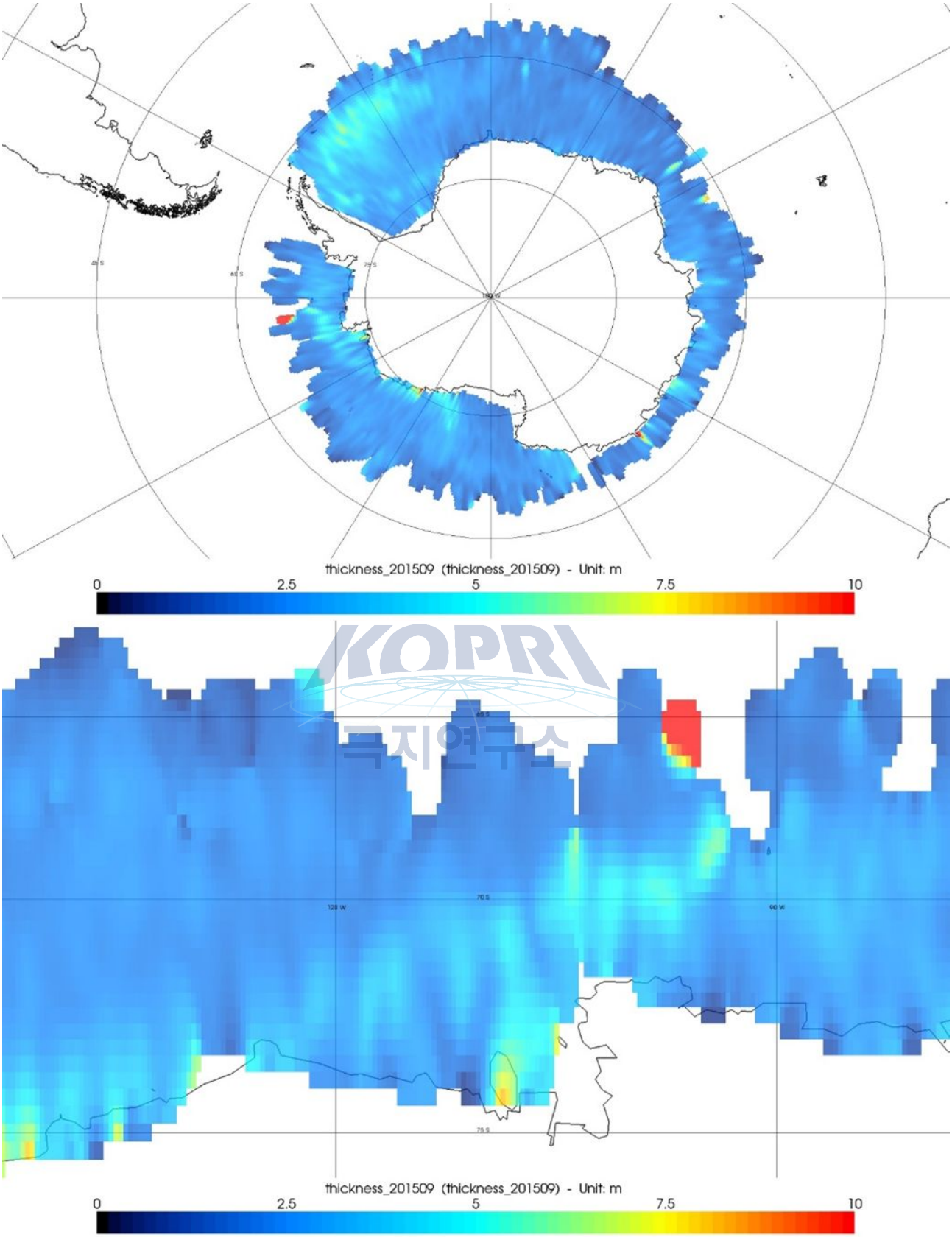


그림 19 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 9월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

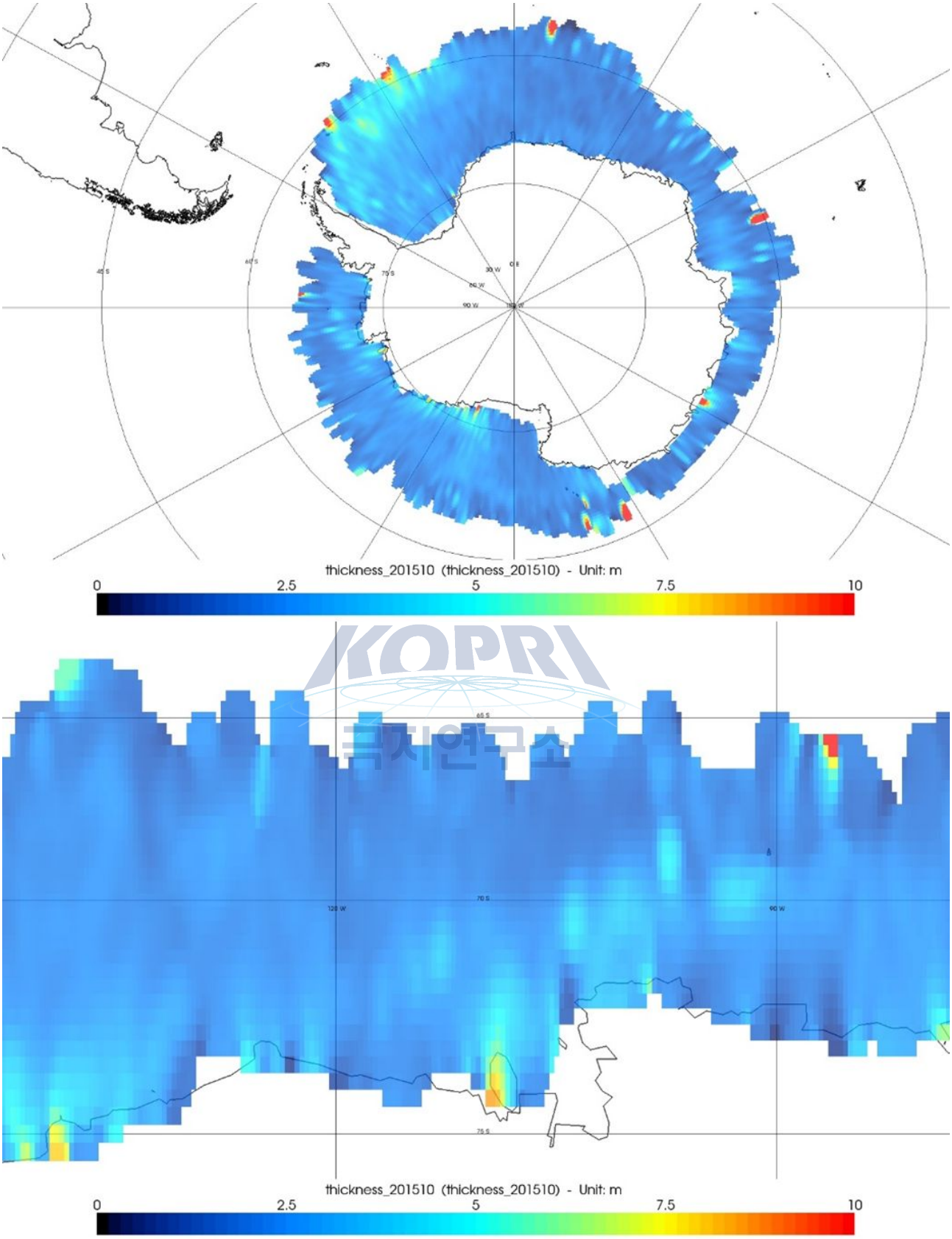


그림 20 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 10월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

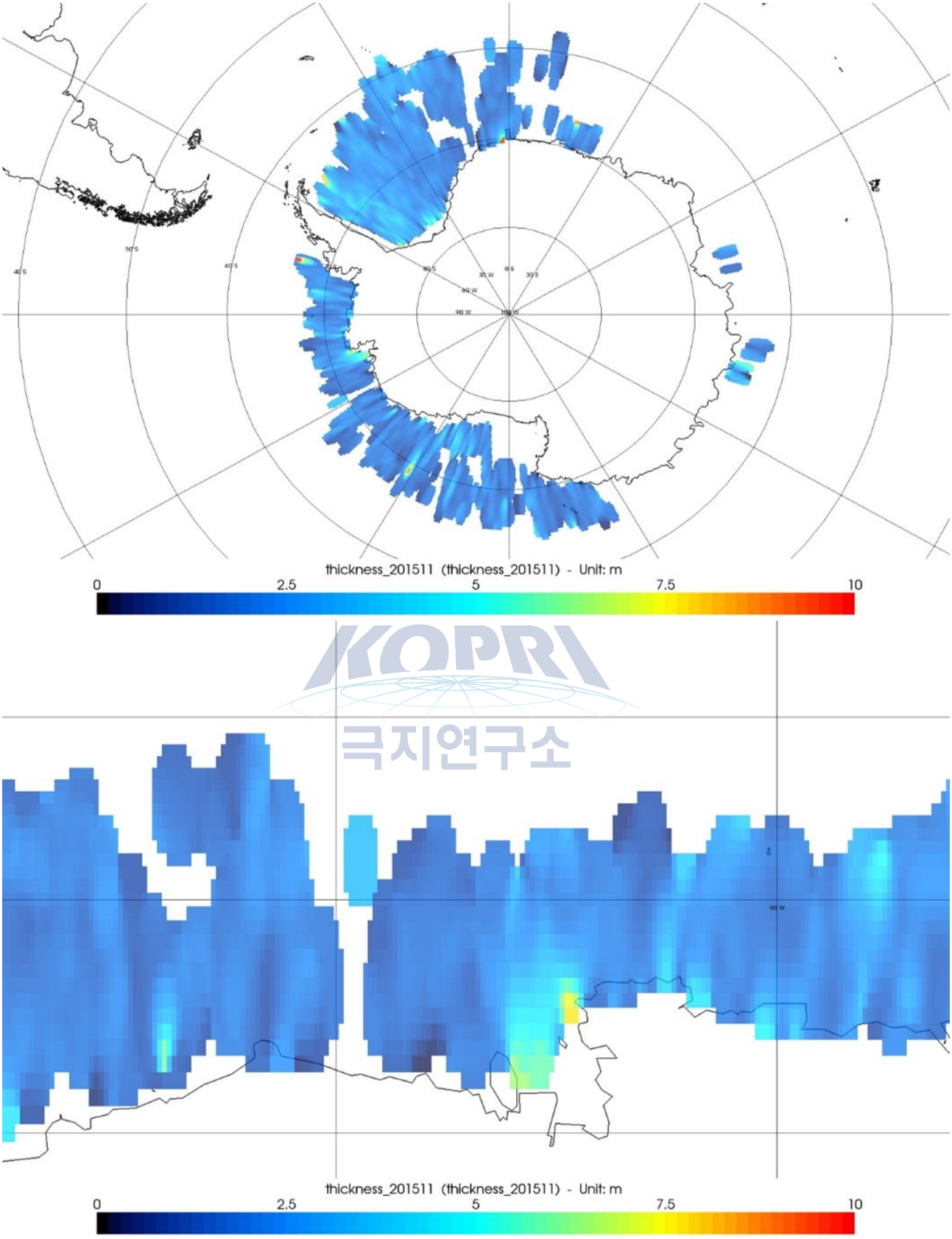
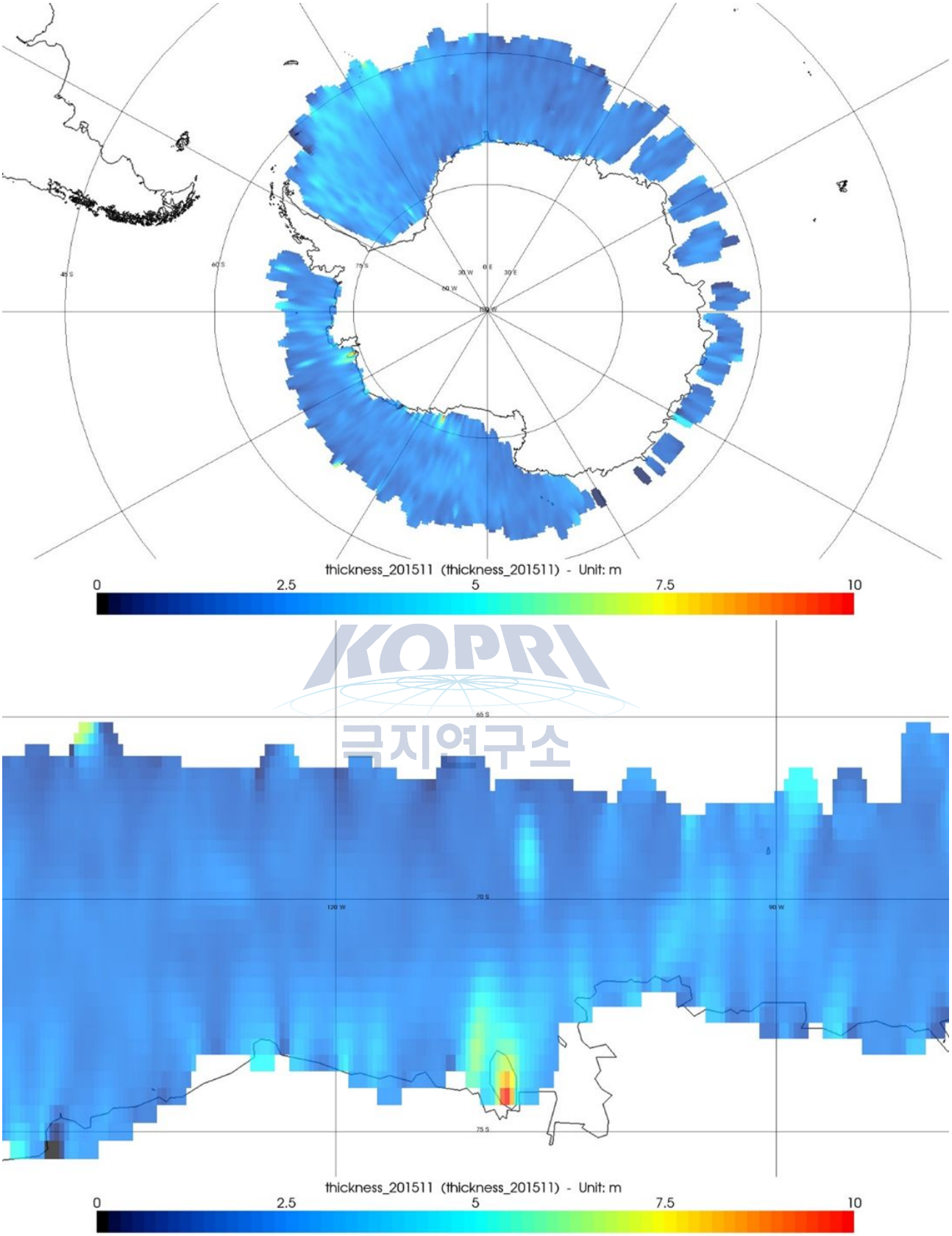


그림 21 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 11월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해



KOPRI
극지연구소

그림 22 CryoSat-2 고도계를 이용하여 추출한 두께 (2015년 12월). (상단) 남극 전체 (하단) 아문젠 해

3 절. 고해상도 SAR 영상을 이용한 시계열 DEM도출을 통한 grounding line 지역의 표면 높이 변화 분석

지반접지선후퇴(Grounding line retreat)은 남극 빙하 및 빙붕의 취약성을 나타내는 가장 핵심적인 척도로 물질균형(mass balance)의 증거로 사용된다. 서남극 지역은 남쪽으로 해저지형이 더 깊어지는 모양을 하고 있기 때문에 지반접지선의 위치에 따라 높은 취약성을 보일 수 있다고 알려져 있다(Mercer, 1978). 서남극지역의 아문젠해역에 위치한 빙하들은 지구온난화의 영향으로 예상되는 급격한 변화를 보이고 있으며 특히 여러 연구들을 통하여 이 지역 빙하의 표면 높이가 빠른 속도로 낮아지는 것이 증명되었다(Rignot, 2006; Wingham et al., 2006). 표면 높이의 감소는 빠른 융빙속도와 깊은 역학적인 관련이 있는데 융빙속도는 또한 빙하의 유속과 빙붕의 면적에 비례한다. 빙붕의 면적도 얼음의 취약성을 나타낼 수 있는 척도로 쓰일 수 있으며 지반접지선의 위치와 밀접한 관련이 있다.

지반접지선을 추출하기 위한 방법으로는 다양한 연구들이 진행되었으며 지반접지선 위치의 추출에 핵심적인 역할을 하는 변수로는 빙하와 빙붕의 표면높이 정확도를 들 수 있다. (Fricker and Padman, 2006)는 레이저 고도계 위성인 ICESat의 반복되는 트랙의 시계열 비교를 통하여 조위의 차이로 인한 빙붕의 표면 높이 변화를 추출하였으며 이를 이용하여 빙하의 hinge zone을 예상하였다. 또한 조위로 인한 위와 같은 현상을 (Rignot et al., 2011)은 DDInSAR 기법을 활용하여 hinge zone을 추출하였다. 두 연구에서 추출한 hinge zone의 범위는 정확하지만 이 지역 안에 지반접지선의 정확한 위치는 알 수 없다. (Bindschadler et al., 2011)는 다른 각도에서 촬영된 가시위성영상(i.e., Landsat)을 photoclinometry 기법을 적용하여 수치고도모델을 제작한 후 가시광위성영상과 고도모델을 시각적 검사를 통하여 수작업으로 지반접지선의 위치를 예측하였으나 제작된 수치고도모델의 낮은 정확도에서 오는 오차가 크다. 위의 연구들은 남극 전체에 대한 지반접지선의 위치를 대략적으로 추출할 수 있는 이점을 가지고 있지만 모두 위치의 정확도가 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 최근 발사된 위성들을 이용하여 빙하와 빙붕의 고해상도 수치고도모델을 제작하고 이를 이용하여 지반접지선의 위치를 정확하게 예상하여 앞서 언급된 문제를 해결하고자 한다.

Thwaites Glacier(TG) 는 서남극의 아문젠해 지역(-75.5S, -107W)의 Pine Island Glacier(PIG)와 Smith Glacier(SG) 의 사이에 위치한다. 레이더와 레이저 고도계 위성들의 시계열 분석을 통하여 지반접지선 주변의 표면 높이가 빠른 속도로 낮아지고 있다고 여러 연구들을 통하여 보고되었다(Wingham et al., 1998; McMillan et al., 2014). 특히 TG는 오랜 기간동안 상당히 큰 면적의 빙붕을 형성하고 있었으며 이러한 빙붕에서 대형 빙산들(i.e., B-22)이 발생하는 특

징을 가졌다. 본 연구의 시점인 2011년에는 약 80km 정도 되는 길이를 가진 B-22A 빙산과 그와 비슷한 규모의 빙붕이 존재하고 있었지만 2016년 현재는 그 규모가 급격하게 감소되었다. 빙하의 유속을 통제할 수 잇는 빙붕면적의 이러한 급격한 감소는 빙하의 유속의 증가에 영향을 끼쳤을 것으로 예상되며, 이에 따른 표면 높이 또한 큰 영향을 끼쳤을 것으로 예상된다. 이러한 영향 때문에 지반접지선의 위치도 변화했을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 지반접지선 위치를 추정하기 위해서 고해상도 DEM 제작이 가능한 TanDEM-X와 TerraSAR-X 합성구경레이더(SAR) Single Look Complex(SLC)영상을 확보하였다. 촬영 날짜는 2011년 6월 10일이며 descending 모드로 획득되었다. 두 시스템은 X-밴드(9.6GHz) 주파수를 사용하며 나선 모양의 상대적 궤도를 이용하여 동시에 자료를 획득하며 전세계의 DEM 제작을 목표로 설계되었다. 제작된 DEM의 상대적 오차는 수직적으로 2m 수평적으로 3m를 가진다(Krieger et al., 2007).

SAR를 이용하여 DEM 제작을 위해서 지상기준점(Ground Control Point)이 필요하다. 본 연구에서는 동시기에 획득된 CryoSat-2 자료를 이용하였다. 두개의 안테나를 이용하여 POCA(Point of Closest Approach)를 계산할 수 있는 SARIn 모드의 자료를 이용하였으며 2011년 6월동안 SAR 영상과 같은 지역을 지나는 자료들을 선정하였다. 또한 이 시기의 평균해면을 구하는데 사용되었다(Wingham et al., 2006).
마지막으로, NASA에서 진행된 Operation IceBridge Camapaign의 항공탐사 자료 중 하나인 자유공기중력이상을 이용하여 제작된 해저지형모델을 이용하였다. 항공탐사는 2009년에 이루어졌으며 1km 의 공간해상도와 70m 의 오차를 가지고 있다(Tinto and Bell, 2011).

본 연구에서는 빙붕의 바닥면의 높이를 추정하여 해저수심과의 비교를 통하여 지반접지선의 위치를 추출하였다. 바닥면의 높이를 추정하기 위해서 hydrostatic equilibrium을 이용하였다(Griggs and Bamber, 2011).

1. DEM 제작

남극의 빙하표면의 고해상도 DEM을 제작하기 위해서 (Kim and Kim, 2015)의 기법을 참조하였다. TanDEM-X와 TerraSAR-X위성간의 수직거리는 106.06m 이며 이에따른 ambiguity height는 74.71m다. 두 SLC 자료는 상호등록되어있는 CoSSC 파일로 제공되기 때문에 바로 간섭도의 제작이 가능하다. 제작된 간섭도에서 지구타원체에 대한 성분을 제거 후 Goldstein 필터를 적용하였으며 Minimum Cost Flow 알고리즘을 이용하여 2pi 모호성을 해결한 위상값

을 추출하였다. 일반적으로 두 SAR자료의 간섭기법을 이용하여 DEM을 제작하기 위해서는 정확한 지상기반점을 이용하여 위상절대값의 보정이 필요하다. 하지만 특히 비교적 빠른 이동 속도를 보이는 서남극의 빙하와 같이 지속적으로 움직이는 표면과 변화가 전혀 없는 노출된 암반지역이 전혀 없는 영상에서 SAR 촬영 시기의 기반점의 정보를 획득하는데는 많은 어려움이 있다. 이와같은 문제점을 해결하기 위해서 TanDEM-X/TerraSAR-X 영상이 촬영된 2011년 6월에 획득된 CryoSat-2 SARIn 모드의 L2 자료를 지반점으로 활용하였다. 총 5개의 트랙을 추출하였으며 SARIn 모드에서 획득된 자료는 0.2도 이하의 경사도를 가진 빙하표면에서 1.5m의 오차를 가진다. 확보된 기상지반점을 이용하여 보정된 위상절대값을 고도값으로 변환하였다. (Kim and Kim, 2015)에 따르면 이렇게 획득된 DEM을 촬영시기가 5개월 차이가 나는 항공라이다(Airborne Topographic Mapper)와 비교하였을때 1m 이하의 정확도를 가지는 것을 확인할 수 있다.

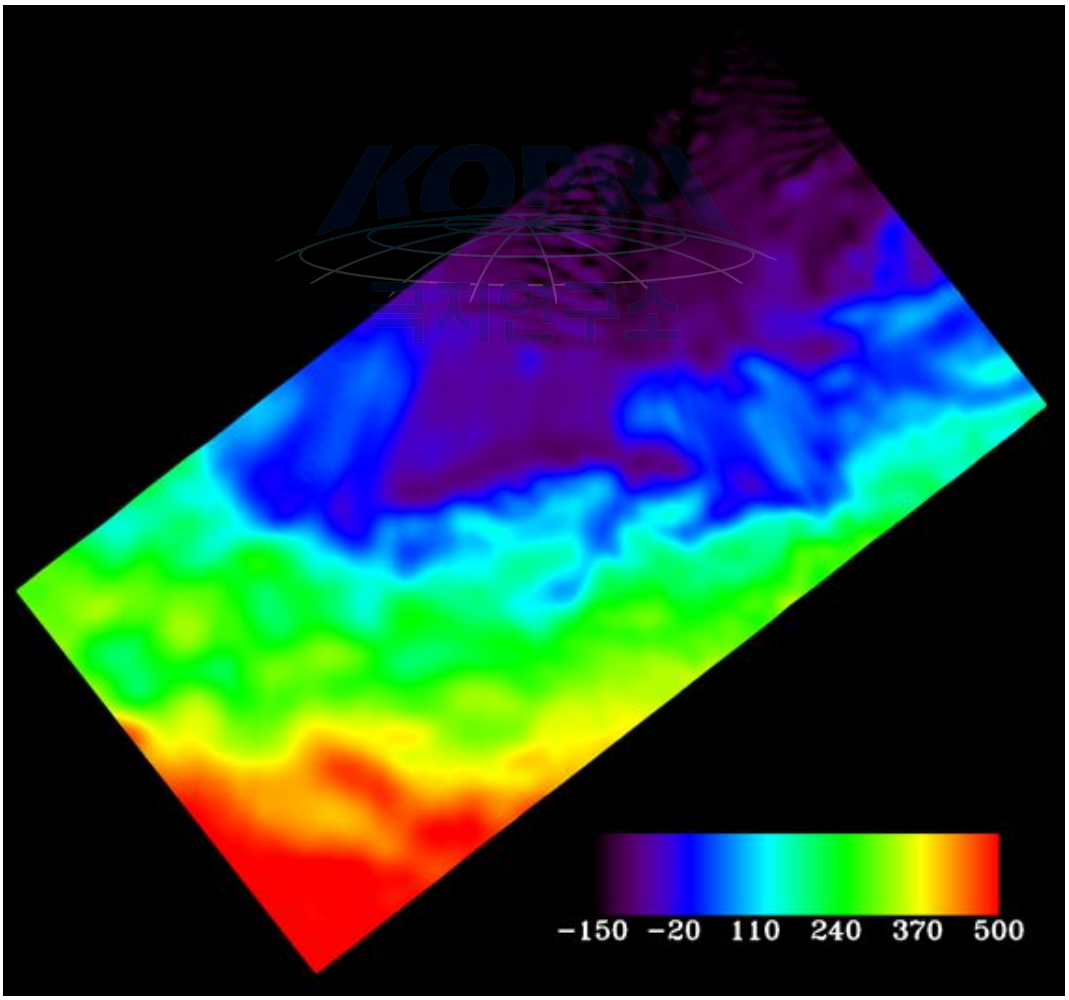


그림 23 SAR 간섭기법을 이용하여 추출한 DEM

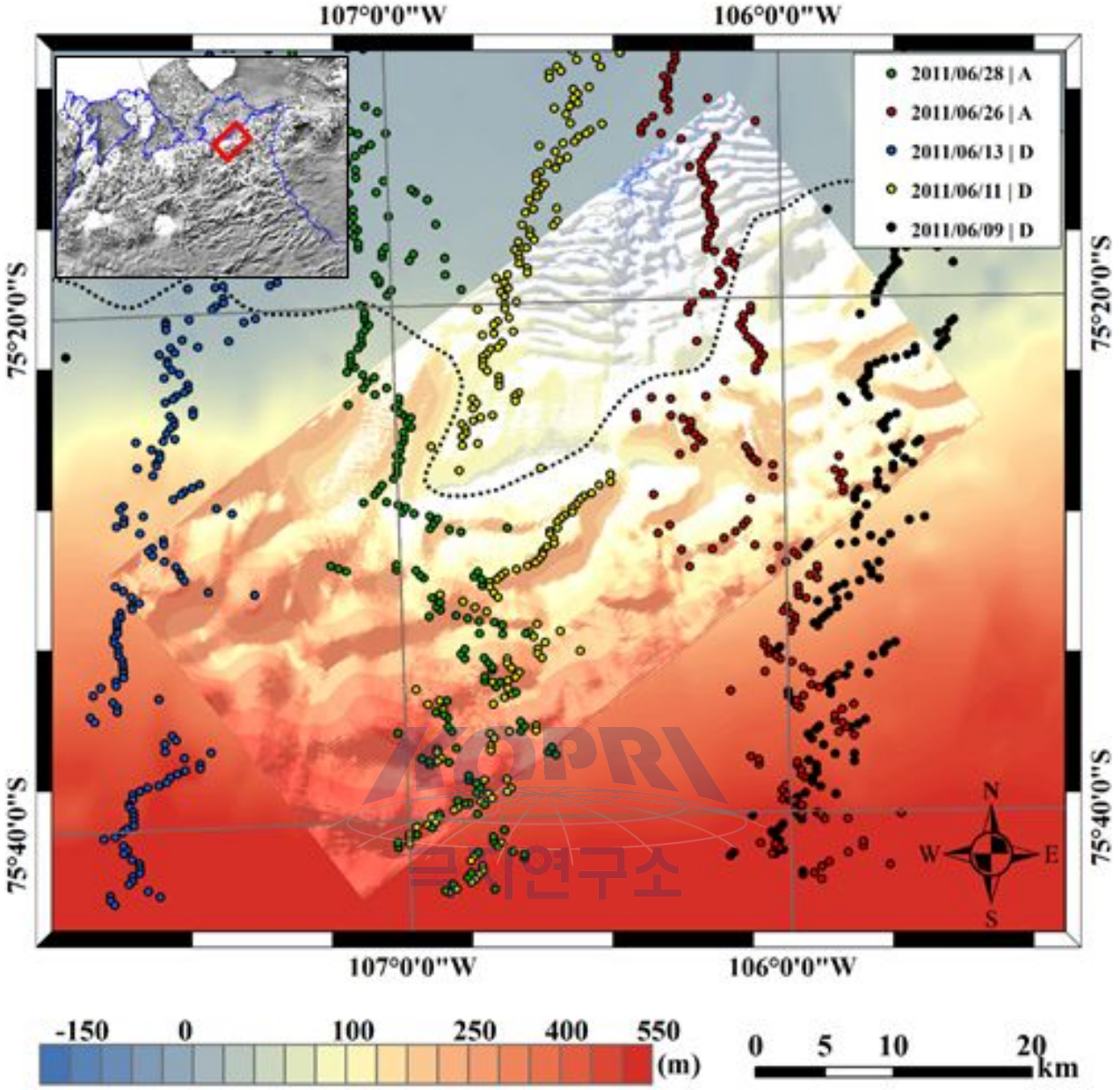


그림 24 DEM 제작을 위해 사용된 CryoSat-2 자료

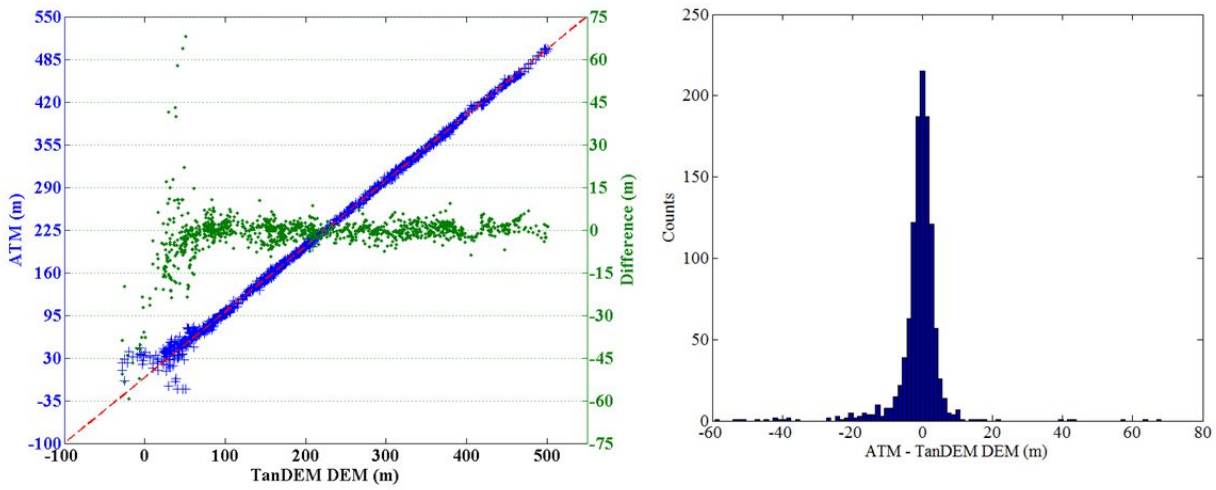


그림 25 제작된 DEM과 ATM 자료 비교

2. 평균해수면 추출

해수에 떠 있는 빙붕의 두께는 빙붕의 표면높이와 해수면까지의 거리인 freeboard를 이용한다. 빙붕의 표면높이는 앞서 제작된 DEM에서 추출 가능하며 해수면은 2011년 6월에 아문젠 해역을 지나는 CryoSat-2 자료를 이용하였다. 그림26은 2011년 6월 19일에 촬영된 MODIS 영상의 아문젠 해역을 보여준다. 본 연구에서 새롭게 규정하는 Thwaites 빙하의 지반접지선의 위치는 MODIS 영상의 남동쪽에 위치하고 있으며 관심지역에 해당하는 해수면 높이를 추정하기 위해서 가까운 유빙들 사이의 CryoSat-2 자료를 추출하였다. 추출된 해수면의 평균 높이는 -37m이며 영상 북서쪽에 위치한 개빙구역의 해수면과 북동쪽에 위치한 해빙구역의 높이와 비교 시 추출된 해수면이 개빙구역의 해수면과 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

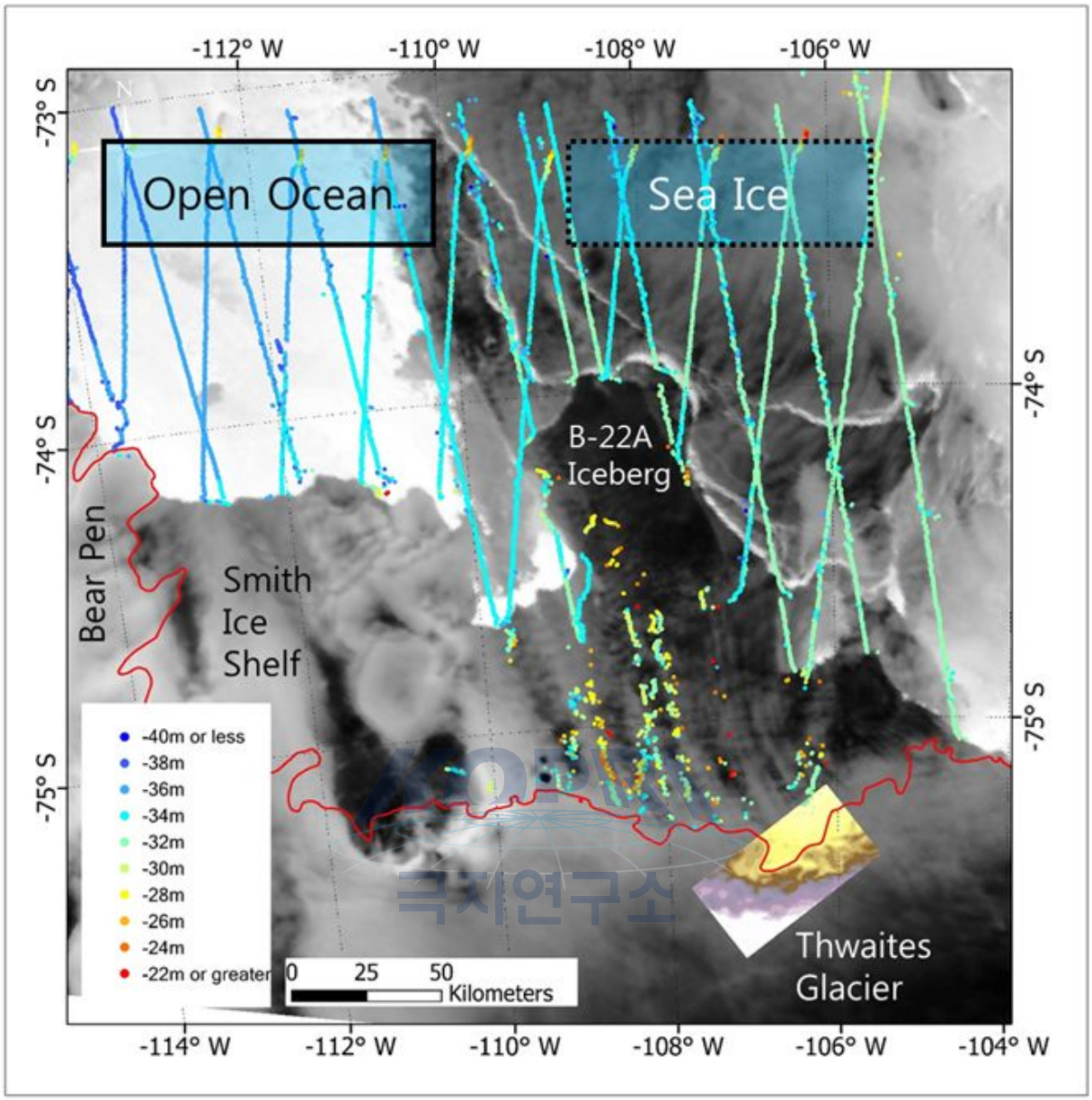


그림 26 MODIS 영상 및 해수면 추출을 위한 CryoSat-2 자료

3. 빙붕 두께 계산 및 지반접지선 추출

빙붕의 두께는 앞서 확보한 빙붕의 표면 높이와 평균 해수면 높이의 차이를 얼음과 해수의 밀도 차이를 이용한 hydrostatic equilibrium에 적용하여 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$T = \left[(F - Z) \frac{\rho_{seawater}}{\rho_{seawater} - \rho_{ice}} \right] + Z$$

여기서 T는 계산된 빙붕의 두께다. F는 생성된 DEM의 표면높이에서 해수면을 뺀 freeboard

를 나타내며 p는 해수와 얼음의 밀도를 나타낸다. 해수와 얼음의 밀도는 각각 1027 kgm-3과 917 kgm-3으로 정의되었다. Z는 빙붕 표면에 위치한 눈(firn)의 깊이를 나타내며 본 연구에서는 (Griggs and Bamber, 2011)에서 적용한 17m 값을 이용하였다. 계산된 빙붕의 두께를 표면 높이에서 빼면 빙붕의 바닥면 높이를 추정할 수 있는데, 이를 해저수심과 비교하여 두 값의 차이가 1m 이하인 지역을 지반접지선으로 결정하였다.

그림27-28은 2011년의 지반접지선을 추출한 결과를 제작된 DEM과 해저지형모델위에 검은색 선으로 표현하였다. 제작된 DEM의 표면 높이는 약 -50m 에서 600m의 범위를 갖고 있으며 해안방향으로 진행할 수록 표면 높이가 완만해지는것을 확인할 수 있다. 그림29는 그림27-28에 검은 점선으로 표시된 프로필에 따른 빙붕의 표면, 바닥 높이, 그리고 해저수심을 각각 검정, 파랑, 빨강으로 표시한 그림이다. 그림27-28의 붉은 선은 2009년에 IceBridge 자료를 이용하여 새로 정의된 지반접지선으로 2011년의 추출된 지반접지선과 비교가 가능하다. 그림29의 프로필들은 지반접지선 후 3 km 이내 표면높이는 최소점을 보이며, 그 이후에는 부력에 의해 얼음이 다시 올라가는 빙붕의 hinge zone 특징을 잘 표현해 주고 있다. 여기서 hinge zone은 지반접지선과 완벽히 물에 떠 있는 지점의 중간에 속하는 지역으로써 완벽한 hydrostatic equilibrium을 만족하지 못한다. 따라서 이 지역의 빙하의 두께는 실제보다 작게 추산된 것으로 예상된다. 하지만 본 연구에서 추출된 지반접지선과 2009년에 갱신된 지반접지선을 비교했을 때 전반적인 위치 및 모양의 양식이 비슷한 것을 토대로 추출된 결과가 타당한 것을 확인할 수 있다.

2009년의 지반접지선과 비교하였을 때 가장 뚜렷한 차이를 보이는 지역을 3군데 선정하였다. A지역은 2009년의 지반접지선 대비 약 5~6km 육지쪽으로 이동한 것을 나타내는데 Tinto,2011에 따르면 이 지역은 error envelope 에 속하는 지역으로 수심이 급격하게 깊어지는 골짜기가 있으며 A는 골짜기의 가장자리에 위치한 것으로 보아 CDW의 영향이 큰 지역으로 생각된다. 비슷한 경향을 보여주는 지역C 또한 깊은 골짜기의 위치와 동일하며 1km 정도의 지반접지선 후퇴가 보여진다. B지역은 A와C지역과 달리 복잡한 모양의 지반접지선을 보인다. 2009년 대비 지반접지선 위치는 약 1km 내외에서 4km까지 변화하고 있다. 이러한 복잡한 모양의 원인은 1km의 공간해상도를 가지는 비교적 매끄러운 해저지형모델에 비해 비교된 표면의 공간해상도는 25m로 높기 때문으로 예상된다.

또한 전반적으로 2011년의 지반접지선은 2009년보다 육지쪽으로 후퇴한 경향을 보인다. 가장 뚜렷한 변화를 보인 A지역의 경우 1년에 2.5~3km의 변화를 보이며 다른 지역도 연간 1km 정도의 후퇴를 보이고 있다. 이러한 후퇴는 이전 연구들에 비해 극적인 차이로 보여지는데 본 연구에서 제작되고 사용된 DEM의 정확도가 이전 연구들보다 향상되었기 때문인 것으로 사료된다.

KOPRI 극지연구소

그림29(b)는 빙붕의 첫번째 지반접지선보다 6.26km 바다쪽으로 작은 영역에 해저지반과 맞닿아 있는 두번째 지반접지선을 보여준다. 본 연구에서 첫번재 지반접지선 후에 발생하는 pinning(빙붕이 지반과 닿아 고정되어 있는 현상)에 대한 설명은 해저지형모델의 정확성과 계산된 얼음의 두께의 정확성, 이 두가지 원인의 복합적인 작용으로 인하여 발생한 것으로 해석된다.

해저지형모델은 1km의 공간해상도와 70m의 수심정확도를 가지고 있다. 두번째 지반접지선 주위의 수심이 약 70m 높다고 가정할 때 지반접지선의 지름은 1.5km 증가하며 140m 증가 시 총 1.9km의 지름이 증가한다. 이를 통해서 해저지형모델의 정확도에 따라서 지반접지선의 위치가 변할 수 있다는 것을 볼 수 있다.

또한 그림29(b)에 따르면 빙붕의 두께가 두번째 지반접지선 주위에서 250m 정도 급격하게 증가한 것을 볼 수 있다. 첫번째 지반접지선에서는 빙붕의 두께는 1083.65m 였음에도 불구하고 두번째 지반접지선에서는 1261.20m인 오히려 증가한 두께를 가진다. 프로필 진행 방향이 Thwaites 빙하의 진행방향과 일치하기 때문에 첫번째 지반접지선 이후 얼음의 두께가 약 200m 정도 오히려 증가했다는 사실은 이해가 불가능한 현상이다. Hydrostatic equilibrium을 이용하여 계산된 두께는 상대적 고도의 차이의 약 9배정도 되는데 두번째 지반접지선 지역의 작은 산등성이는 주변보다 약 20m 정도 표면이 높기 때문에 이러한 얼음두께의 급격한 변화는 계산적으로 문제는 없는것으로 보인다. 또한 두께추출에 대한 근본적인 문제가 없는 한 1m 이하의 오차를 가진 DEM에서 추출한 표면 높이이기 때문에 두께의 계산에 대한 문제는 없는 것으로 고려된다. 그러므로 본 연구에서 지반접지선의 위치에 가장 큰 영향을 끼치는 원인은 해저지형모델의 정확도로 예상되며 이 두번째 지반접지선의 경우 해저지형모델에는 정확하게 나와있지 않은 해저능선이 존재할 가능성이 있는 것으로 생각된다.

KOPRI 극지연구소

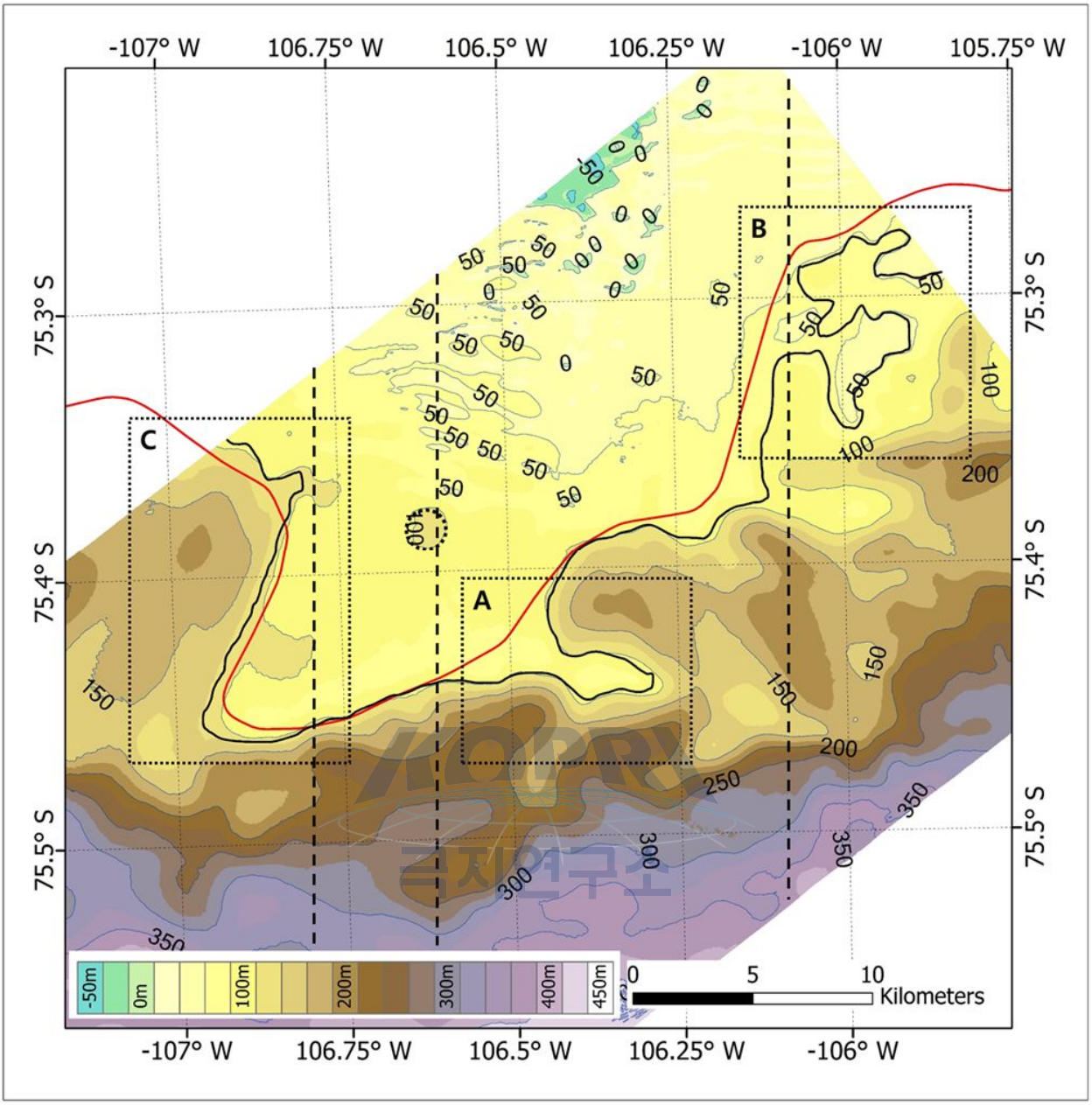


그림 27 제작된 DEM과 새로 정의된 지반접지선

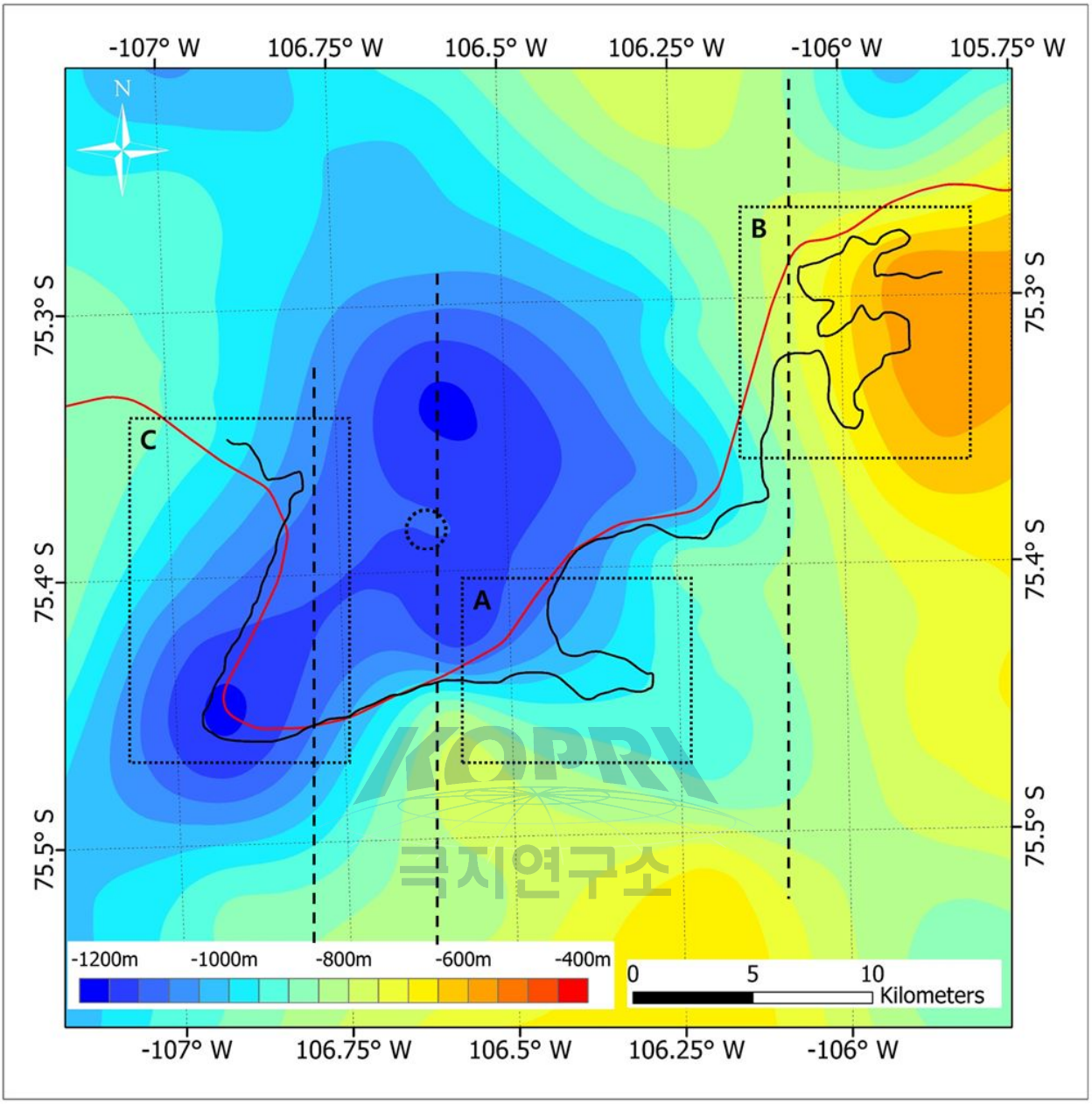


그림 28 사용된 해저지반지도와 새로 정의된 지반접지선

Thwaites 빙하의 지반접지선은 2011년 6월에 획득된 TanDEM-X와 TerraSAR-X의 위상간섭을 이용한 고해상도 DEM을 제작한 후 hydrostatic equilibrium을 이용하여 얼음의 두께로 변환한 후 해저지형모델과의 비교를 통하여 추출하였다. 고해상도 DEM제작을 위해 SAR 영상과 동시간대에 획득된 CryoSat-2 레이더고도계자료를 이용하였으며 DEM은 1m 이하의 오차를 갖는다. 이전 연구들에서 발견된 지반접지선 추정의 최대 오차 원인은 표면 높이의 정확도였으며 본 연구에서 제작된 DEM을 이용하여 위의 한계를 극복하는 것이 1차적인 목표였다. 해저지형모델과의 비교를 통하여 추출된 지반접지선은 2009년 대비 약 1km 에서 6km 까지의 변화를 볼 수 있었다. 이런 급격한 변화는 2년동안 현실적인 융빙으로 인한 지반접지선 후퇴보다는 진보된 기술로 인한 급격한 DEM 정확도의 향상때문인 것으로 고려된다. 따라서 추후 본

연구에서 제작된 DEM과 같은 정확도를 가진 다른 시기의 자료를 이용하여 지반접지선을 추출 후 비교한다면 실제 변화를 탐지할 수 있을 것으로 기대된다.

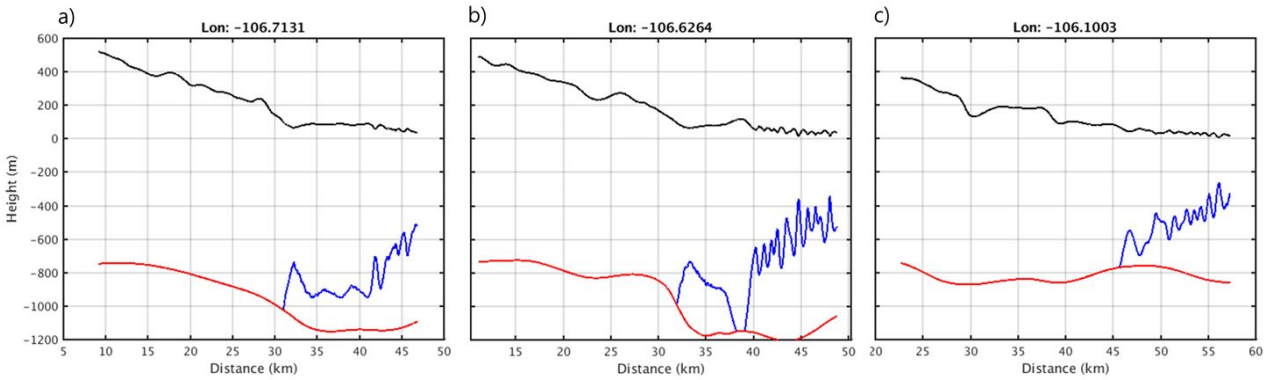


그림 29 추출된 빙하표면(검정), 빙하바닥(파랑), 해저지반(빨강)

KOPRI
극지연구소

제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1 절. 목표달성도

성과목표	달성 주요내용	달성도(%)
1. 아문젠 해역의 시공간적 해빙 및 폴리냐 분포특성변화 도출	• 35년간의 SSMI 자료를 이용하여 EOF 분석 • 폴리냐 지역 및 아문젠 해 지역의 해빙 분산 양상 분석	100
2. 유효성이 검증된 altimeter 자료로부터 아문젠해 지역의 해빙두께의 시공간적 변화 도출	• CryoSat-2 SAR 모드의 Baseline C 자료 확보 • Freeboard 값을 이용하여 남극전체 및 아문젠 해역의 해빙두께 추출 • 2015년 1월부터 12월까지의 시공간적 변화 도출	100
3. 고해상도 SAR 영상을 이용한 시계열 DEM도출을 통한 grounding line 지역의 표면 높이 변화 분석	• TanDEM-X/TerraSAR-X 영상을 이용하여 고해상도 DEM 도출 • 고해상도 지반접지선 추출 및 2009년과 비교	100

표 2 목표달성도

KOPRI 극지연구소

2 절. 대외기여도

본 연구에서 진행된 다양한 분석은 서남극 아문젠해 주변에서 발견되는 급격한 변화를 더욱 더 정밀하고 여러 방향으로 접근할 수 있는 가능성을 보여주었다고 생각된다. 특히 현재 극지연구소에서 집중적으로 진행하고 있는 아문젠 해역의 폴리냐의 연구는 passive microwave를 이용하여 계산할 수 있기 때문에 추후 연구에 많은 도움이 될 것으로 예상된다. 또한 현재 남극에서 진행되고 있는 Interferometry SAR기법이나 Along-track repeat altimetry와 같은 active sensor를 탑재한 위성 원격탐사 자료를 이용한 연구들 중 전형적인 방법의 틀을 깨는 것으로 의미가 있다고 생각된다. 추후 진행될 수 있는 연구로는 해상도가 낮은 passive microwave 영상과 고 해상도 active microwave 영상과의 융합을 통해서 조금 더 정확한 해

빙의 면적, 폴리냐의 면적을 추출할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해서 서남극뿐 아니라 남극 전체의 정보를 추출함으로써 기후변화를 예측 하고 이해를 도울 수 있는 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

KOPRI
극지연구소

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

1 절. 학술적 파급효과

- 통합적 인공위성자료의 활용이 극지연구와 같은 새로운 분야에 유용하게 활용될 수 있음을 발견하였고 앞으로 위성센서개발과 관련하여 기초 자료로 활용될 수 있다.
- 고해상도 인공위성 자료를 이용하여 남극에 존재하는 여러 특징들을 구분할 수 있는 가능성을 확인 하였으며 이를 발전시킨다면 지역적으로 세분화된 연구가 가능할 것으로 예상된다.
- 빙붕의 이동속도 증가와 붕괴와 같은 급격한 변화를 인공위성을 통해 모니터링 할 수 있으며 추후 발생할 수 있는 붕괴의 가능성을 탐지할 수 있음으로써 기후변화로 인한 현상들의 연구에 활용될 수 있다.
- 현장관측과 동시에 획득된 위성자료는 앞으로 다른 연구자들이 극지에 대한 새로운 기술개발이나 향상된 알고리즘을 개발하고자 할 때 유용하게 활용될 수 있다.
- 극지방 및 다양한 지역의 표면 관찰을 위해서 항공기 SAR를 다양하게 활용할 수 있다.

KOPRI 극지연구소

2 절. 경제적 파급효과

- 해빙에 대한 정보를 쇄빙선과 같은 선박에 (준-)실시간으로 전달 해 줄 수 있다면, 선박의 안전한 운항 및 항로결정을 위한 보조 자료로 활용 될 수도 있을 것이다.
- 국제적 기후변화협약과 관련한 과학적 기초자료 제공 및 대응방안을 모색하는데도 활용될 수 있을 것이다.
- 지구온난화로 인한 기후변화 모니터링 및 극지의 환경변화를 연구하는데 중요한 자료가 될 수 있다.
- 극지에 대한 시공간적 자료 축적으로 공공의 과학적 활용이 증대될 수 있다.
- 앞으로 발사될 인공위성들의 잠재적 수요분야를 창출할 수 있다.
- 미개척 분야인 방대한 극지를 직접 가서 조사하는 데는 많은 비용이 소요되지만, 인공위성을 이용하여 관련정보 획득할 수 있다면 많은 비용을 절감할 수 있다.

제 6 장. 참고문헌

Bindschadler, R., H. Choi, A. Wichlacz, R. Bingham, J. Bohlander, K. Brunt, H. Corr, R. Drews, H. Fricker, M. Hall, R. Hindmarsh, J. Kohler, L. Padman, W. Rack, G. Rotschky, S. Urbini, P. Vornberger and N. Young (2011). "Getting around Antarctica: new high-resolution mappings of the grounded and freely-floating boundaries of the Antarctic ice sheet created for the International Polar Year." Cryosphere 5(3): 569-588.

Fricker, H. A. and L. Padman (2006). "Ice shelf grounding zone structure from ICESat laser altimetry." Geophysical Research Letters 33(15).

Griggs, J. A. and J. L. Bamber (2011). "Antarctic ice-shelf thickness from satellite radar altimetry." Journal of Glaciology 57(203): 485-498.

Kim, S. H. and D. J. Kim (2015). "Digital Elevation Model of the Marginal Region of Thwaites Glacier in West Antarctica Derived by Combined Usage of TanDEM-X and CryoSat-2." Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of.

Krieger, G., A. Moreira, H. Fiedler, I. Hajnsek, M. Werner, M. Younis and M. Zink (2007). "TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry." Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45(11): 3317-3341.

McMillan, M., A. Shepherd, A. Sundal, K. Briggs, A. Muir, A. Ridout, A. Hogg and D. Wingham (2014). "Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2." Geophysical Research Letters 41(11): 3899-3905.

Mercer, J. H. (1978). "West Antarctic Ice Sheet and Co2 Greenhouse Effect - Threat of Disaster." Nature 271(5643): 321-325.

Rignot, E. (2006). "Changes in ice dynamics and mass balance of the Antarctic ice sheet." Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences 364(1844): 1637-1655.

KOPRI 극지연구소

Rignot, E., J. Mouginot and B. Scheuchl (2011). "Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet." Science 333(6048): 1427-1430.

Tinto, K. J. and R. E. Bell (2011). "Progressive unpinning of Thwaites Glacier from newly identified offshore ridge: Constraints from aerogravity." Geophysical Research Letters 38.

Wingham, D. J., C. R. Francis, S. Baker, C. Bouzinac, D. Brockley, R. Cullen, P. de Chateau-Thierry, S. W. Laxon, U. Mallow, C. Mavrocordatos, L. Phalippou, G. Ratier, L. Rey, F. Rostan, P. Viau and D. W. Wallis (2006). "CryoSat: A mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields." Natural Hazards and Oceanographic Processes from Satellite Data 37(4): 841-871.

Wingham, D. J., A. J. Ridout, R. Scharroo, R. J. Arthern and C. K. Shum (1998). "Antarctic elevation change from 1992 to 1996." Science 282(5388): 456-458.

Wingham, D. J., A. Shepherd, A. Muir and G. J. Marshall (2006). "Mass balance of the Antarctic ice sheet." Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences 364(1844): 1627-1635.

KOPRI 극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁연구기관에서 수행한 연구결과보고서 입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 위탁연구의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

KOPRI 극지연구소