The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 32, No. 2, June, 2022, pp. 271-280
https://doi.org/10.9720/kseg.2022.2.271

RESEARCH ARTICLE

Sentinel-1 영상레이더 간섭 긴밀도 영상의 레이어 병합을 활용한 남극 장보고 과학기지 주변 정착해빙 탐지

김승희[1] · 한향선[2*]

[1]한국해양과학기술원 부설 극지연구소 원격탐사빙권정보센터 선임연구원, [2]강원대학교 지구물리학과 조교수

Detection of Landfast Sea Ice Near Jang Bogo Antarctic Research Station Using Layer-Stacked Sentinel-1 Interferometric SAR Coherence Images

Seung Hee Kim[1] · Hyangsun Han[2*]

[1]Senior Research Scientist, Center of Remote Sensing & GIS, Korea Polar Research Institute
[2]Assistant Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract

Landfast sea ice forms near coastlines in polar regions. Continuous monitoring of this sea ice is important, as it plays a key role in the marine ecosystem and affects the operation of nearby research stations. This study detected landfast sea ice around Jang Bogo research station in East Antarctica by stacking interferometric coherence images of Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) data with 6-, 12- and 18-day temporal baselines. A total of 50 landfast sea ice maps were generated covering July 2017 to June 2018. The time series revealed regional differences in the timing of the maximum extent as well as growth rate of landfast sea ice. Overall, detecting landfast sea ice using interferometric SAR coherence seems promisingly feasible; however, limitations remain owing to low backscattering coefficients from new and smooth sea ice surfaces and subtle movements of sea ice in contact with the Campbell Glacier Tongue.

Keywords: landfast sea ice, synthetic aperture radar, coherence, Antarctica, Sentinel-1

초 록

정착해빙은 극지역 해안에 형성되는 고착된 해빙으로, 해양 생태계와 해안에 위치한 과학기지들의 운용에 큰 영향을 끼치는 중요한 인자이기 때문에 지속적인 관측이 중요하다. 본 연구에서는 6, 12, 18일의 시간 기선을 가지는 Sentinel-1 영상레이더(synthetic aperture radar, SAR) 간섭 긴밀도 영상들을 레이어 병합하여 동남극 장보고 과학기지 주변의 정착해빙을 탐지하였다. 2017년 7월부터 2018년 6월까지 총 50장의 간섭 긴밀도 영상을 제작하였으며, 이로부터 1년간의 정착해빙 면적 변화를 도출하였다. Campbell 빙하설을 기준으로 동쪽과 서쪽에서 정착해빙의 면적이 최대가 되는 시기가 상이함을 확인하였다. 이 연구를 통하여 SAR 간섭 긴밀도를 활용한 정착해빙 탐지 가능성을 확인하였으나, 생성 시간이 짧거나 부드러운 표면을 가져 작은 레이더 후방산란을 보이는 정착해빙과 Campbell 빙하설의 흐름 및 붕괴로

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Hyangsun Han
E-mail: hyangsun@kangwon.ac.kr

Received: 11 June, 2022
Revised: 24 June, 2022
Accepted: 26 June, 2022

Ⓒ 2022 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인해 급작스러운 움직임을 보이는 빙하설 인접 지역에서의 정착해빙이 미탐지 되는 한계점은 개선이 필요할 것으로 보인다.

주요어: 정착해빙, 영상레이더, 긴밀도, 남극, Sentinel-1

서 론

정착해빙(landfast sea ice)은 극지역 연안 지역에 형성되는 고착된 해빙으로 해안선 및 해안선 주변의 얕은 해저면, 빙붕(ice shelf), 빙하설(ice tongue) 또는 빙산(iceberg)의 빙벽에 고정되어 있다(Armstrong, 1972). 정착해빙은 지역 내 해수가 결빙되거나 다른 지역에서 흘러온 유빙들이 서로 융합 동결되어 형성될 수 있으며, 수십~수백 km^2의 영역에 형성된다(Fraser et al., 2020). 일반적으로 가을-겨울철에 형성되었다가 봄-여름철에 융빙되는 단년빙(first-year ice)이 정착해빙의 주를 이루며, 일부 지역에서는 수 m 두께의 다년빙(multiyear ice)으로 발달하는 경우도 있다(Massom et al., 2010; Fraser et al., 2012).

정착해빙은 남극 연안의 생물학적 및 물리적 환경을 조절하는 중요한 인자이다. 정착해빙은 미생물, 연안 저서생물, 펭귄, 웨델 물개 등 다양한 생물종에게 서식지를 제공하고 번식에 큰 영향을 끼친다(Massom et al., 2009). 빙붕 주변에 형성되는 정착해빙의 경우 빙벽에 물리적으로 고정되어 있으므로 빙붕에 후방응력을 제공한다. 이는 빙붕의 안정성을 높이고 해수면 상승을 야기할 수 있는 빙상의 질량 손실을 완화하는 데에도 기여하고 있다(Massom et al., 2018). 또한 정착해빙은 우리나라의 장보고 과학기지와 같이 남극 연안에 위치한 기지들의 보급로 역할도 하고 있다. 따라서 정착해빙의 분포와 그 변동성을 모니터링 하는 것은 매우 중요하다.

넓은 영역에 대해 관측이 가능한 인공위성은 해빙을 모니터링하는데 유용한 도구이다. 현재까지 광학(optical), 영상레이더(synthetic aperture radar, SAR), 수동 마이크로파 센서(passive microwave sensor) 등 다양한 센서들을 탑재한 인공위성을 활용하여 정착해빙을 탐지하는 연구들이 진행되어 왔으나 아직 해결이 필요한 문제점들이 남아있다. 정착해빙은 대양에서 바람과 해류에 의해 자유부유하는 유빙(drift sea ice)에 비해 분포하는 영역이 좁다. 따라서 수~수십 km의 저해상도를 가지는 수동 마이크로파 센서 탑재 위성은 매일 극지 전역이 관측 가능하다는 장점에도 불구하고 유빙과 정착해빙의 경계 탐지가 불분명하다는 단점이 있다(Fraser et al., 2020). 가시광선 및 적외선 파장 대역의 광학영상은 수 m~1 km 규모의 공간해상도로 지표 관측이 가능하나 날씨와 태양고도에 큰 영향을 받기 때문에 흐린 날이 많고 극야가 있는 극지역에서는 활용에 한계가 있다(Lubin and Massom, 2006; Fraser et al., 2009). SAR는 고해상도 관측이 가능한 전천후 원격탐사 시스템으로 극지 연구에 매우 유용하며, 정착해빙 탐지에도 다양하게 활용되고 있다. Han et al.(2015)과 Han and Lee(2018)는 고해상도의 COSMO-SkyMed SAR 영상에 레이더 간섭기법(interferometric SAR, InSAR)을 적용하여 동남극 장보고 과학기지 연안의 정착해빙을 탐지한 바 있으나, 좁은 관측 범위(40 km × 40 km)로 인해 연구지역에 대한 정착해빙 분포를 명확히 분석할 수 없었다. Kim et al.(2020)은 약 350 km 폭의 Advanced Land Observing Satellite(ALOS) Phased Array L-band SAR(PALSAR) 영상에 영상분할(image segmentation) 및 기계학습 기법을 적용하여 서남극 지역의 정착해빙을 탐지하는 알고리즘을 개발하였다. 그러나 해빙 지역에 대한 일관적이지 않은 ALOS PALSAR 영상의 획득 주기 때문에 시공간 관측이 제한적이었다. 이와 같이 기존에 수행된 SAR 기반 정착해빙 탐지 연구들은 상대적으로 좁은 관측 범위와 영상 획득의 비주기성으로 인한 제약이 있었다. 또한 고해상도의 광역 관측 SAR 자료를 사용하는 경우 대부분의 자료가 유상으로 배포되므로 비용적인 측면의 문제점도 가지고 있었다.

이 연구에서는 짧은 주기로 전지구 관측이 가능하며, 관측 자료가 무상으로 배포되고 있는 Sentinel-1 위성의 시계열 SAR 영상을 활용하여 동남극 장보고 과학기지 주변의 정착해빙을 탐지하는 방법을 제안하였다. Mahoney et al.(2006)이

제시한 정착해빙의 시간적 지속성에 근거하여 시계열 SAR 영상으로부터 약 20일 동안 움직임이 없고 연안에 근접해 있는 해빙을 정착해빙으로 정의하고, 영상레이더 간섭기법의 산출물 중 하나인 긴밀도(coherence)를 활용하여 1년 동안 정착해빙의 시공간적 변동성을 분석하였다.

연구지역

장보고 과학기지는 남극 로스해(Ross Sea)의 테라노바 만(Terra Nova Bay)에 위치한다(Fig. 1). 장보고 과학기지의 동쪽에는 Campbell 빙하설(Campbell Glacier Tongue)과 반도 지형인 Cape Washington이 위치하며 주변 해역은 연중 약 9개월 동안 정착해빙이 넓게 형성된다(Bromwich and Kurtz, 1984). 연구지역에 넓고 평평한 형태로 형성되는 정착해빙은 항공기 활주로로도 사용되고 있으며, 장보고 과학기지의 물류 보급에 큰 영향을 끼친다(Han and Lee, 2018). 연구지역은 Campbell 빙하설과 정착해빙 환경이 연안 생태계에 큰 영향을 끼칠 것으로 예상되는 지역이다. 남극 연안생태계는 전체 해양생물의 80% 이상이 서식하는 곳으로 장보고 과학기지 인근 연안에는 크릴과 실버피쉬가 주로 서식하는 것으로 알려져 있다(Fraser et al., 2020). 장보고 과학기지로부터 약 30 km 떨어진 Cape Washington은 황제펭귄의 서식지로 안정적인 상태의 정착해빙은 펭귄 번식에 매우 중요하다(Kooyman et al., 1990).

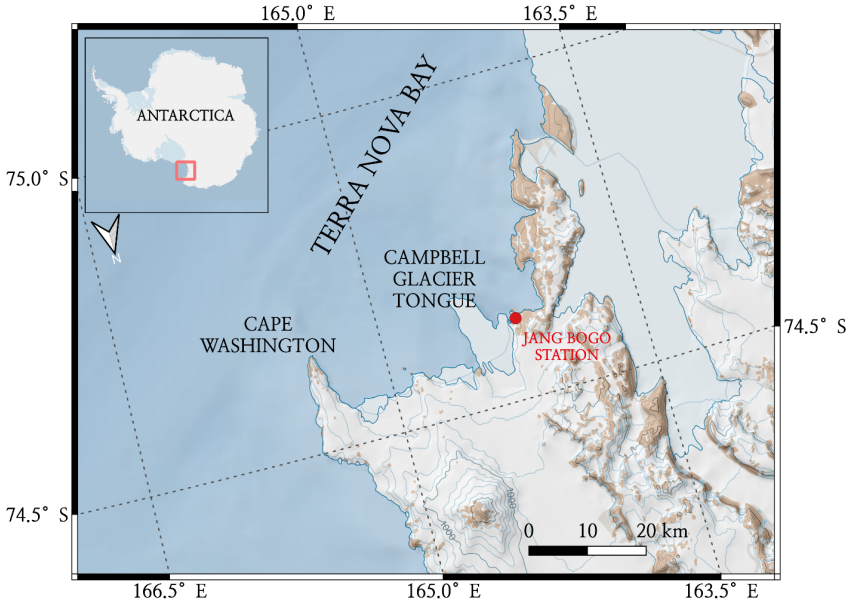

Fig. 1. Map of the study area in Terra Nova Bay, Ross Sea, East Antarctica. The location of Jang Bogo Antarctic research station is depicted with a red dot where Campbell Glacier Tongue and Cape Washington are closely located.

연구자료

정착해빙 탐지를 위해서 Sentinel-1A와 Sentinel-1B 위성의 SAR 영상을 활용하였다. Sentinel-1A/-1B 위성은 유럽우주국(European Space Agency, ESA)의 Copernicus 지구관측 프로그램에서 개발된 극궤도 위성이며 주야간, 날씨에 상관없이 지구 표면 관측이 가능하다. 5.405 GHz의 중심주파수를 사용하는 C-Band 다중 편파 SAR를 탑재하였으며 Sentinel-1A 위성은 2014년 4월 3일, Sentinel-1B 위성은 2016년 4월 25일에 각각 발사되었다. 두 위성은 모두 12일 재방문주기를 가지

며, 위성 간 교차 재방문 주기는 6일이다. 따라서 Sentinel-1A/-1B 영상이 모두 획득될 경우 최소 6일 간격의 관측이 가능한 장점이 있다. 각 위성은 최고 5 m 공간해상도와 최대 400 km 폭의 관측이 가능하다. 관측 목적에 따라 Stripmap(SM), Interferometric Wide Swath(IW), Extra Wide Swath(EW), Wave(WV) 모드로 촬영이 가능하다. 이 연구에서는 레이더 간섭기법이 가능한 IW 모드에서 관측되어 Single Look Complex(SLC) 포맷으로 배포되는 HH 편파의 Sentinel-1A/-1B SAR 영상을 사용하였다.

Sentinel-1 위성 자료는 미국항공우주국의 Distributed Active Archive Center(DAAC) 중 하나인 Alaska Satellite Facility (ASF)를 통해 확보하였다(https://search.asf.alaska.edu/#/). 연구 기간은 6일 시간 기선(temporal baseline)로 영상 확보가 가능한 2017년 7월부터 2018년 6월까지로 설정하였다. Fig. 2는 2017년 12월 10, 16, 22, 28일에 촬영된 Sentinel-1A/-1B SAR 후방산란계수(backscattering coefficient) 시계열 영상을 보여준다. 후방산란이 강하여 상대적으로 밝게 보이는 빙하 및 내륙 지역에서는 18일 동안 레이더 산란특성에 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 1에서 바다로 정의되는 영역인 장보고 과학기지 연안 및 Campbell 빙하설과 Cape Washington 사이의 영역에서도 후방산란에 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 반면에 Cape Washington 서쪽과 북쪽에서 후방산란이 약하여 비교적 어둡게 나타나는 바다와 유빙에서는 레이더 후방산란이 지속적으로 변화하는 것이 확인된다.

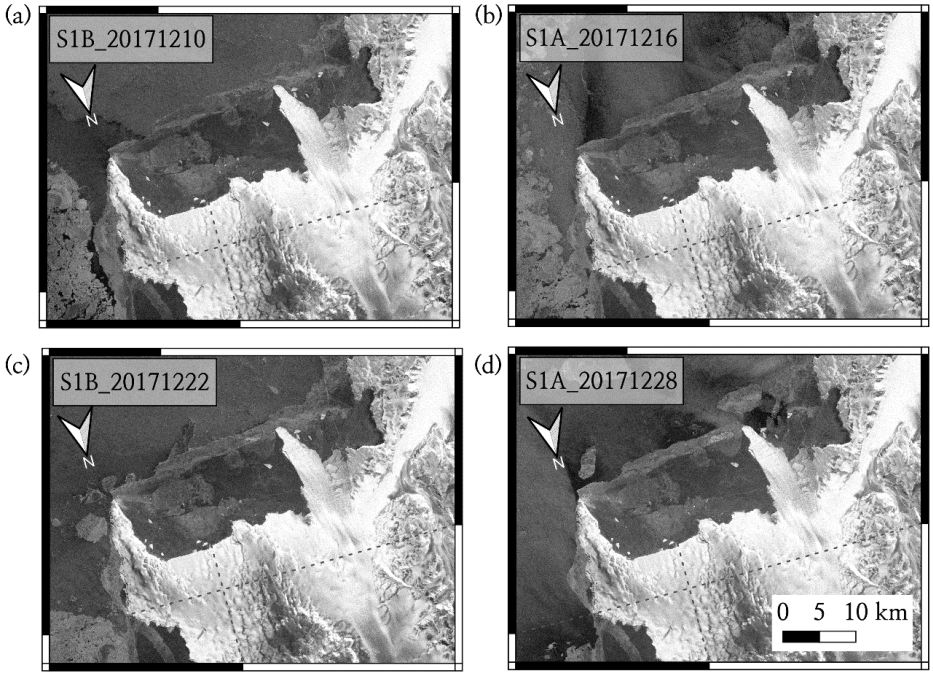

Fig. 2. Backscattering coefficients of Sentinel-1A and -1B data acquired on December (a) 10, (b) 16, (c) 22, and (d) 28 in 2017. Bright areas represent bare rock and glacier, whereas sea ice and ocean are relatively dark.

연구방법

영상레이더 간섭 긴밀도 제작

Sentinel-1 SLC SAR 자료의 처리는 ASF의 Hybrid Pluggable Processing Pipeline(HyP3)에서 진행하였다(https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/). 긴밀도는 영상레이더 간섭기법의 산출물로 두 SAR 영상(S_i) 사이에 정규화된 복소 상관 관계를 통해

아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{\Delta t} = \frac{\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} S_1 S_2^*}{\sqrt{\frac{1}{L}\left(\sum_{l=1}^{L} S_1 S_1^*\right) \cdot \frac{1}{L}\left(\sum_{l=1}^{L} S_2 S_2^*\right)}} (L > 1) \quad (1)$$

여기서, L은 앙상블 평균 내 샘플 수를 나타내며 주로 멀티 룩(multi-look)으로 언급된다. 이 연구에서 SLC 영상의 멀티 룩은 관측 방향(range direction)과 비행 방향(azimuth direction)으로 각각 10과 2를 적용하였다. γ은 긴밀도를 뜻하며 0과 1 사이의 값을 갖는다. Δt는 두 SAR 영상 사이의 시간 기선이며, 이 연구에서는 6, 12, 18일 시간 기선 별 긴밀도를 제작하였다. 두 영상 간 상관관계가 높을수록 긴밀도는 1에 가까우며, 이는 두 영상이 촬영된 시간 차이 동안 관측 대상의 표면에 물리적인 변화가 적다는 것을 의미한다. 긴밀도 영상은 멀티 룩 윈도우의 크기를 고려하여 40 m 픽셀 크기를 가지도록 제작하였다.

정착해빙 탐지

6, 12, 18일 시간 기선을 가지는 세 장의 긴밀도 영상들을 레이어 병합하여 정착해빙을 탐지하고자 하였다. Fig. 3은 긴밀도 영상의 레이어 병합을 통한 정착해빙 탐지의 순서를 보여준다. 정착해빙은 유빙과 다르게 해안에 고착되어 있어 수~수십 일 동안 움직임이 없을 수 있다. 이 연구에서는 약 20일 동안 위치 변화가 없는 해빙을 정착해빙으로 정의하였기 때문에 이론적으로 20일 보다 짧은 시간 기선에 해당되는 레이더 간섭기법 수행 결과에서 정착해빙은 높은 긴밀도 값을 보일 것으로 예상할 수 있다. 하지만 미세한 해빙의 움직임이 누적되거나 기온, 바람, 강설 등 기상 환경에 따라 변하는 해빙 표

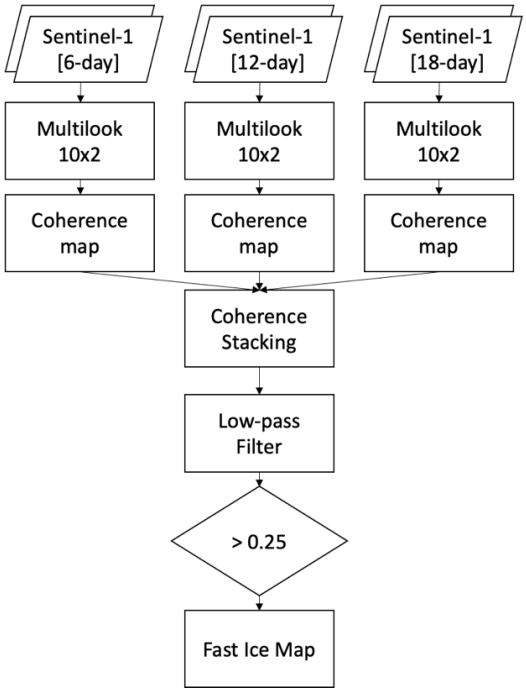

Fig. 3. Schematic flow chart to generate a map of landfast sea ice by layer stacking three interferometric coherence maps of Sentinel-1 data.

면 때문에 레이더 간섭 긴밀도는 시간 기선이 늘어날수록 감소될 수 있다. 따라서 이 연구에서는 6, 12, 18일 시간 기선의 긴밀도를 병합하여 정착해빙 탐지 민감도를 높이고자 하였다.

세 개의 긴밀도 영상들은 공간적으로 정밀하게 정합(co-registration)된 후 병합되며, 최종적으로 제작된 레이어 병합 긴밀도 영상의 각 픽셀이 가지는 값은 세 개 긴밀도 값들의 합계이다. 레이어 병합된 결과는 영상레이더 관측 특성에 기인하는 스펙클 노이즈(speckle noise)를 저감시키기 위해 저주파 필터(low-pass filter)가 적용되었으며, 경험적으로 정착해빙 탐지가 잘 이루어지는 긴밀도 값인 0.25를 정착해빙 탐지를 위한 임계값으로 설정하였다. 즉, 레이어 병합 긴밀도 영상에서 0.25보다 높은 값을 가지는 픽셀은 정착해빙으로 탐지된다. 정착해빙으로 탐지된 면적이 1 km^2 이하이거나 연안에 접해 있지 않음에도 정착해빙으로 탐지된 픽셀들은 유빙으로 재분류하였다. 움직임이나 변화가 육지도 긴밀도가 높게 나올 수 있기 때문에 정착해빙의 정확한 탐지를 위하여 육지는 SCAR Antarctic Digital Database에서 제공하는 해안선 정보를 이용하여 마스크 하였다(Matsuoka et al., 2021).

연구결과 및 토의

Fig. 4는 2017년 12월 10일의 SAR 영상을 기준으로 6일과 12일의 시간 기선을 갖는 간섭 긴밀도를 나타내며, 이를 활용하여 탐지한 정착해빙 영역을 노란색으로 표시하였다. 6일 시간 기선의 긴밀도 영상에서 긴밀도가 높은 영역이 12일 시간 기선의 긴밀도 영상에서는 값이 감소하였음을 확인할 수 있었다. 18일 시간 기선의 긴밀도 영상에서는 긴밀도 값이 높게 나타나는 영역을 찾을 수 없었다. 장보고 과학기지와 Campbell 빙하설에 접한 부분은 SAR 영상에서 후방산란의 변화를 확인할 수 없었지만 매우 작은 긴밀도 값을 보이며 정착해빙으로 탐지되지 않았다.

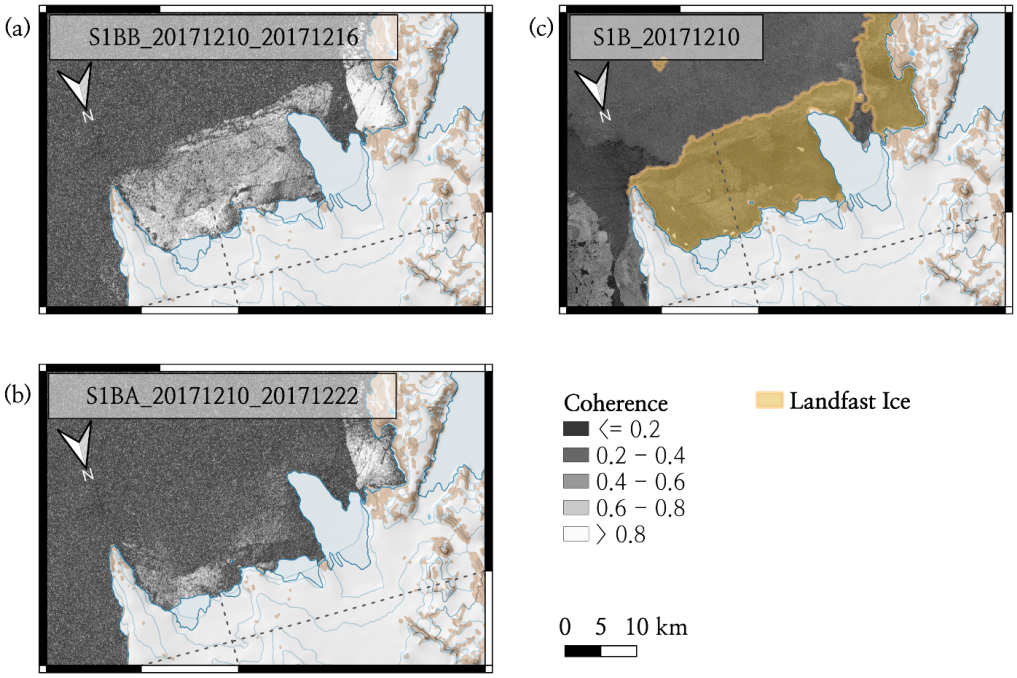

Fig. 4. Interferometric coherence maps with (a) 6- and (b) 12-day temporal baselines. (c) Extent of landfast sea ice. Interferometric coherence was processed by ASF DAAC HyP3 2021. Contains modified Copernicus Sentinel data 2018, processed by ESA.

정착해빙 탐지 민감도를 확인하기 위하여 관심지역을 Campbell 빙하설을 기준으로 동쪽(Area 1)과 서쪽(Area 2)으로 구분하고, 6, 12, 18일 시간 기선 별 정착해빙으로 예상되는 픽셀들의 평균 긴밀도 값을 계산하였다(Fig. 5). 두 지역 모두 시간 기선이 증가할수록 평균 긴밀도 값이 감소하는 경향을 보였다. 장보고 과학기지가 위치한 서쪽 지역이 동쪽 지역보다 낮은 평균 긴밀도 값을 보였다. 특히 Campbell 빙하설 서쪽 지역은 빙하설의 붕괴가 많이 발생하는 지역으로, 빙하설의 유동과 붕괴로 인하여 정착해빙에 균열이 발생하고 긴밀도가 감소할 정도의 해빙 움직임이 발생한 것으로 판단된다.

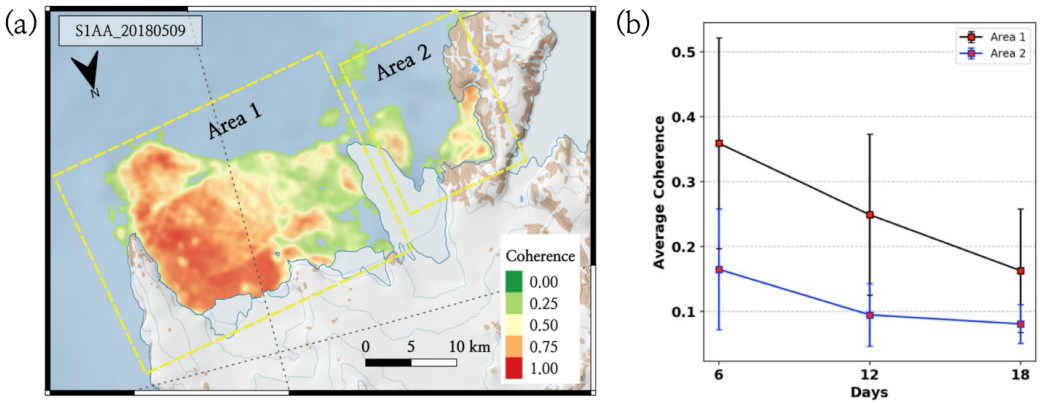

Fig. 5. Average interferometric coherences in 6-, 12-, and 18-day temporal baselines in two regions. Areas 1 and 2 are separated to the west and east, respectively, of the Campbell Glacier Tongue.

2017년 7월부터 2018년 6월까지 총 50장의 긴밀도 영상을 제작하였다. Fig. 6은 2017년 7월부터 2018년 6월까지 이 연구에서 제안한 방법으로 탐지된 정착해빙 면적을 나타낸다. 장보고 과학기지 연안(Area 2)의 정착해빙 면적은 7월부터 11월까지 변화가 크지 않았으며 11월부터 12월 초에 급격하게 증가하였다(Fig. 6a). 그 후 남극의 여름철인 2월까지 급격하게 감소하였다가 남극의 겨울철이 시작되는 5월부터 정착해빙이 다시 증가하였다. Cape Washington 지역(Area 1)은 7월부터 정착해빙의 면적이 서서히 증가하여 10월 말에 최대를 보였다(Fig. 6b). 이후로 장보고 과학기지 연안과 유사하게 2월까지 정착해빙 면적이 감소하는 경향을 보이지만 해빙이 완전히 사라지지 않는 것으로 파악되었다. 장보고 과학기지와 Cape Washington 사이의 거리가 약 30 km 정도로 멀지 않음에도 정착해빙 면적의 증가 시기가 서로 다른 것을 확인할 수 있었다.

2017~2018년 기간 중 정착해빙 면적이 급격하게 감소하는 것으로 확인된 시기는 이 연구에서 제안한 방법에서 정착해빙임에도 긴밀도 값이 작아 미탐지되었기 때문으로 판단된다. 이와 같이 정착해빙에서 작은 긴밀도가 산출된 것은 매끄러운 표면 특성으로 인한 작은 후방산란계수, 미세하지만 지속적인 해빙의 움직임, 그리고 강설, 기온 및 바람 등 기상의 영향으로 인한 해빙 표면의 변화 때문으로 추정된다. 장보고 과학기지 연안에서는 2017년 8월과 10월(Fig. 6a), Cape Washington에서는 2017년 10월(Fig. 6b)에 정착해빙 면적이 급격하게 감소하는 것으로 분석되었다. 2017년 8월에 장보고 과학기지 주변에 생성되는 정착해빙은 표면의 거칠기가 매우 작아 SAR 영상에서 작은 후방산란계수로 관측되었다(Fig. 2). 일반적으로 생성된 지 얼마 되지 않은 해빙일수록 표면의 거칠기가 작기 때문에 작은 후방산란계수를 보이는데, 이는 Area 2(Fig. 6a)의 정착해빙이 Area 1(Fig. 6b)보다 늦게 증가하는 경향성 때문으로 보인다. 또한 장보고 과학기지 주변의 Campbell 빙하설과 접해 있는 지역은 후방산란계수가 비교적 높음에도 정착해빙으로 예상되는 영역이 미탐지 되는 경우가 있음을 확인하였다. 이는 빙하설의 유동과 붕괴의 영향으로 인한 정착해빙의 움직임 때문으로 판단된다. 2017년 10월에는 Area 1과 2에서 정착해빙 면적이 동시에 급격하게 감소하였는데, SAR 후방산란계수 분석만으로는 해빙 감소의

명확한 이유를 파악하기 어려웠다. 기상의 영향으로 인한 긴밀도 감소가 정착해빙 면적이 작게 측정된 원인 중 하나로 추정되지만 보다 명확한 해석을 위해서는 해빙에서 작은 긴밀도가 산출되게 하는 인자들에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

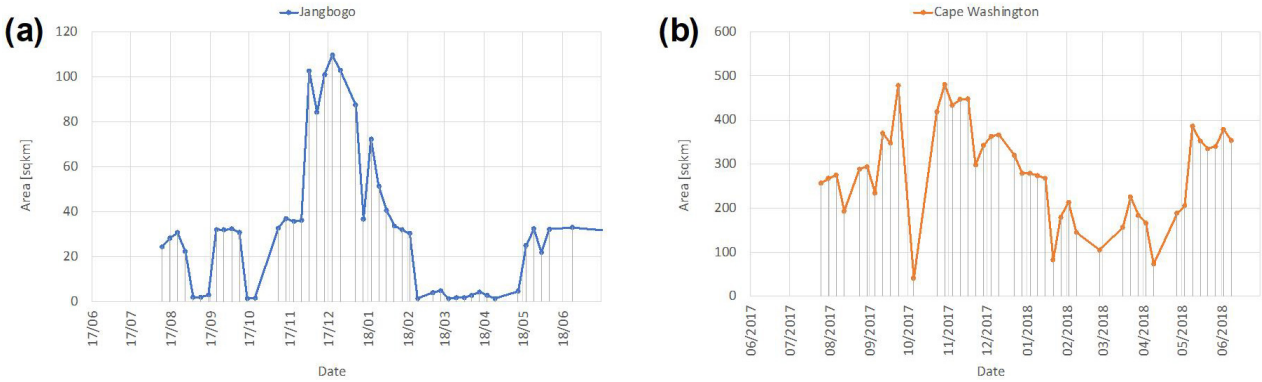

Fig. 6. Time series of land fast ice area in (a) Area 2 and (b) Area 1 from July 2017 to June 2018.

이 연구에서는 10 × 2 멀티 룩 영상을 사용하였으나 20 × 4 또는 더욱 높은 공간적 평균을 활용한다면 정착해빙 탐지를 위한 긴밀도를 높일 수 있을 것으로 예상된다. 다만 SLC 영상의 멀티 룩 크기를 높일 경우 공간해상도의 저감이 있으므로 상대적으로 저해상도의 정착해빙 탐지가 수행될 수 있다.

이 연구에서 제안한 정착해빙 탐지 알고리즘에는 6일 시간 기선의 긴밀도 영상이 요구되며, 이를 제작하기 위해 Sentinel-1A와 Sentinel-1B SAR 영상을 모두 사용하였다. 그러나 2022년 4월 Sentinel-1B 위성의 고장으로 인하여 6일 시간 기선 긴밀도 영상 제작이 더 이상 불가능하게 되었다. Sentinel-1 SAR 영상만을 사용할 경우 12일 시간 기선 긴밀도 값이 높지 않기 때문에 향후 정착해빙 탐지 민감도를 높일 수 있는 연구가 필요할 것으로 보인다.

결 론

이 연구에서는 Sentinel-1A와 Sentinel-1B SAR 자료의 레이더 간섭 긴밀도를 활용하여 남극 장보고 과학기지 주변 해역에 위치한 정착해빙을 탐지하였다. 레이더 간섭영상의 시간 기선이 길어짐에 따라 긴밀도 값이 낮아지기 때문에 6, 12, 18일 시간 기선에 해당하는 긴밀도를 제작하고 레이어 병합하여 정착해빙 탐지의 민감도를 높이고자 하였다. 정착해빙은 6일과 12일 시간 기선을 갖는 긴밀도에서 비교적 높은 값을 보였으나 18일 시간 기선에서는 유빙이나 바다와 유사하게 매우 낮은 긴밀도 값을 보이는 것이 확인되었다. 2017년 7월부터 2018년 6월까지 총 50장의 긴밀도 영상을 제작하여 정착해빙을 탐지하였으며 1년 동안의 면적 변화를 도출하였다. Campbell 빙하설을 기준으로 동쪽과 서쪽에서 정착해빙 면적의 변화 특성이 서로 다른 것을 확인하였다. 장보고 과학기지 주변은 7월부터 11월까지 정착해빙 면적의 변화가 크지 않았으며, 12월에 최대 면적에 도달한 후 2월까지 급격하게 감소하였고 5월부터 증가하였다. Cape Washington 지역은 7월부터 정착해빙 면적이 서서히 증가하여 10월에 최대가 되고, 이후로 2월까지 서서히 감소하는 경향성을 보였다. 다만 Cape Washington 지역은 장보고 과학기지 연안과는 다르게 정착해빙이 완전히 사라지지 않는 것으로 파악되었다.

이 연구를 통해 Sentinel-1 위성의 레이더 간섭 긴밀도를 활용하여 정착해빙을 탐지할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 생성 시기에 따라 낮은 후방산란을 보이는 정착해빙과 Campbell 빙하설의 유동 및 붕괴에 영향을 받는 정착해빙이 미탐지 되는 것은 향후 추가적인 연구를 수행하여 개선할 필요가 있다.

사사

이 연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소(PE22140)와 2022년도 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2021R1C1C1009621, No. 2019R1A6A1A03033167)의 지원을 받아 수행되었습니다. 이 연구에서 활용된 HyP3은 SAR 영상 처리를 위해 GAMMA Software를 사용하였습니다(ASF DAAC HyP3 2021 using the hyp3_gamma plugin version 4.6.3 running GAMMA release 20191203. Contains modified Copernicus Sentinel data 2018, processed by ESA.).

References

Armstrong, T., 1972, World Meteorological Organization. WMO sea-ice nomenclature. Terminology, codes and illustrated glossary. Edition 1970. Geneva, Secretariat of the World Meteorological Organization, 1970, Journal of Glaciology, 11(61), 148-149.

Bromwich, D.H., Kurtz, D.D., 1984, Katabatic wind forcing of the Terra-Nova Bay polynya, Journal of Geophysical Research-Oceans, 89(C3), 3561-3572.

Fraser, A.D., Massom, R.A., Michael, K.J., 2009, A method for compositing polar MODIS satellite images to remove cloud cover for landfast sea-ice detection, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(9), 3272-3282.

Fraser, A.D., Massom, R.A., Michael, K.J., Galton-Fenzi, B.K., Lieser, J.L., 2012, East Antarctic landfast sea ice distribution and variability, 2000-08, Journal of Climate, 25(4), 1137-1156.

Fraser, A.D., Massom, R.A., Ohshima, K.I., Willmes, S., Kappes, P.J., Cartwright, J., Porter-Smith, R., 2020, High-resolution mapping of circum-Antarctic landfast sea ice distribution, 2000-2018, Earth System Science Data, 12(4), 2987-2999.

Han, H., Kim, Y., Jin, H., Lee, H., 2015, Analysis of annual variability of landfast sea ice near Jangbogo Antarctic station using InSAR coherence images, Korean Journal of Remote Sensing, 31(6), 501-512 (in Korean with English abstract).

Han, H., Lee, H., 2018, Glacial and tidal strain of landfast sea ice in Terra Nova Bay, East Antarctica, observed by interferometric SAR techniques, Remote Sensing of Environment, 209, 41-51.

Kim, M., Kim, H.C., Im, J., Lee, S., Han, H., 2020, Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica using time series ALOS PALSAR data, Remote Sensing of Environment, 242, 111782.

Kooyman, G.L., Croll, D., Stone, S., Smith, S., 1990, Emperor penguin colony at Cape Washington, Antarctica, Polar Record, 26(157), 103-108.

Lubin, D., Massom, R., 2006, Polar remote sensing: Volume I, Atmosphere and oceans, Springer Science & Business Media.

Mahoney, A., Eicken, H., Shapiro, L., Graves, A., 2006, Defining and locating the seaward landfast ice edge in northern Alaska, Proceedings of the 18th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'05), Potsdam, NY, 991-1001.

Massom, R.A., Giles, A.B., Fricker, H.A., Warner, R.C., Legresy, B., Hyland, G., Young, N., Fraser, A.D., 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-Oceans, 115.

Massom, R.A., Hill, K., Barbraud, C., Adams, N., Ancel, A., Emmerson, L., Pook, M.J., 2009, Fast ice distribution in Adélie Land, East Antarctica: Interannual variability and implications for emperor penguins Aptenodytes forsteri, Marine Ecology Progress Series, 374, 243-257.

Massom, R.A., Scambos, T.A., Bennetts, L.G., Reid, P., Squire, V.A., Stammerjohn, S.E., 2018, Antarctic ice shelf disintegration triggered by sea ice loss and ocean swell, Nature, 558(7710), 383-389.

Matsuoka, K., Skoglund, A., Roth, G., de Pomereu, J., Griffiths, H., Headland, R., Herried, B., Katsumata, K., Le Brocq,

A., Licht, K., Morgan, F., Neff, P.D., Ritz, C., Scheinert, M., Tamura, T., Van de Putte, A., van den Broeke, M., von Deschwanden, A., Deschamps-Berger, C., Van Liefferinge, B., Tronstad, S., Melvaer, Y., 2021, Quantarctica, an integrated mapping environment for Antarctica, the Southern Ocean, and sub-Antarctic islands, Environmental Modelling & Software, 140.