

영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링
기술개발 연구

Development of Monitoring Techniques for Subglacial Lake
Using Synthetic Aperture Radar



강원대학교

영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구



강원대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발” 과제의 위탁연구 “영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2024. 12. 31

총괄연구책임자	: 이종익
위탁연구기관명	: 강원대학교
위탁연구책임자	: 한향선
위탁참여연구원	: 김다희, 김서현, 김진영
“	: 김태욱, 김현수, 신현진
“	: 안현준, 원유준, 유선재
“	: 이시웅, 조민지, 한상명
“	: 홍지훈

보고서 초록

위탁연구과제명	영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구				
위탁연구책임자	한향선	해당단계 참여연구원수	14명	해당단계 연구비	1단계: 130,000,000원 2단계: 100,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	강원대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	107
○ David 빙하 주변 빙저호의 형태학적 특성 분석 - 영상레이더 간섭기법 적용을 통한 빙저호 영역의 정밀 탐지 및 검증 - 빙저호 수위 변화 속도에 의한 빙상 표면변위 산출 - David 빙하 주변의 미보고 빙저호 탐지 ○ 빙저호의 활동성 모니터링 기술 구축 - 영상레이더 간섭기법 기반 빙저호 활동 특성 변화에 따른 빙상 표면변위 산출기술 확보 - David 빙하 빙저호 지역의 시계열 표면변위 해석 - 빙저호 상부 빙상 표면변위를 이용한 수위 및 수체 변화 해석 방안 구축 ○ David 빙하 주변 빙저호의 활동에 따른 빙하 유동 분석 - 빙저호 주변 지역 빙상 표면유속의 시계열 변동성 분석 - 빙저호 수위변화 속도에 따른 빙상의 국지적 흐름속도 변화 파악 - David 빙하 주변 빙저호 배수망 추정 ○ K-루트 주변 남극 내륙 빙저호 탐지 - David 빙하 상류부터 쿱코르디아 기지 사이 K-루트 주변의 빙저호 탐지 - 남극 내륙 신규 탐지 빙저호 상부 빙상 표면고도의 시계열 변화 해석 ○ 빙저호 충전-배수 활동 분석 - 시계열 영상레이더 간섭도 분석 기반 빙저호 충전-배수 활동의 시공간 변화 분석 기술 개발 - 빙저호 충전-배수 활동 분석 기술의 정량적 검증 및 적용성 평가 - David2 빙저호 및 주변 신규 탐지 빙저호의 충전-배수 활동과 빙저수 유동 특성 해석					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	빙저호, David 빙하, 인공위성, 영상레이더, 영상레이더 간섭기법, 영상레이더 이중 위상차분 간섭기법			
	영 어	Subglacial lake, David Glacier, Satellite, Synthetic aperture radar (SAR), SAR interferometry, Double-differential SAR interferometry			

요 약 문

I. 제 목

- 영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구

II. 연구개발의 목표

- 인공위성 영상레이더를 이용한 빙저호 수위 변화 유발 빙상 표면변위 정밀 관측 및 빙저호 활동성 모니터링 기술개발

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 인공위성 영상레이더 기반 빙저호의 형태학적 특성 분석기술 개발
 - David 빙하 주변 빙저호 지역 레이더 간섭쌍 구축 및 빙상 표면변위 산출
 - 빙저호 활동에 의한 빙상 표면변위 산출 및 분석 기술 설계
 - 빙저호 영역 정의 및 형태학적 특성 분석
- 시계열 인공위성 영상레이더 기반 빙저호 활동성 모니터링 기술 연구
 - 레이더 간섭기법을 통한 빙저호 수위변화 속도에 따른 빙상 표면변위 산출
 - 시계열 빙상 표면변위 해석을 통한 빙저호의 수위 및 수체 변화 분석 방안 마련
- 빙저호 활동성과 빙상 유동의 상호 영향 파악
 - 빙저호 주변 빙상의 흐름속도 산출 및 변화 연구
 - 빙저호 활동성과 빙상 표면유속 사이의 상호관계 파악
- 남극 내륙 K-Route 주변 빙저호 탐지 연구
 - 남극 내륙 고위도 지역의 시계열 영상레이더 간섭쌍 구축

- David 빙하 상류-콩코르디아 기지 사이 지역에서 신규 빙저호 탐지
- 남극 내륙 K-Route 주변 빙저호의 충전-배수 활동 규명
 - 고해상도 및 고정밀의 빙저호 충전-배수 활동 모니터링을 위한 시계열 영상레이더 간섭위상 분석 기술 개발
 - David2 및 주변 신규 탐지 빙저호의 충전 및 배수 활동 분석

IV. 연구개발결과

- 영상레이더 간섭기법의 응용을 통한 빙저호 상부 빙상 표면변위 산출기술 확립
- David 빙하 주변 및 남극 내륙 빙저호 공간정보 구축
- 레이더 간섭기법으로 산출된 빙상 표면변위로부터 빙저호의 활동 특성 해석
- 빙저호 활동 특성 변화가 빙상 표면유속 변화에 미치는 영향 추정
- 빙저호 충전 및 배수 활동의 고해상도/고정밀 모니터링이 가능한 영상레이더 간섭 기법 기반의 새로운 방법론 개발
- David 빙하 상류 활성 빙저호들의 충전 및 배수 활동 파악

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극 미답 지역의 빙저 수문 네트워크 규명 연구를 위한 기반 기술로 활용
- 남극 내륙 빙저호 공간정보 갱신 및 활동성 모니터링 연구에 활용
- 남극 내륙 빙저호 지구물리탐사 및 열수시추 원천기술 개발 연구에 중요 기초자료로 활용

S U M M A R Y

I. Title

- Development of monitoring techniques for subglacial lake using synthetic aperture radar

II. Purpose of R&D

- Development of precise observation techniques for ice sheet surface displacement caused by subglacial lake water level variations and for monitoring subglacial lake activity using satellite synthetic aperture radar (SAR)

III. Contents and Extent of R&D

- Development of analysis techniques for morphological characteristics of subglacial lakes using SAR images
 - Construction of interferometric SAR (InSAR) pairs for subglacial lake regions near David Glacier and calculation of ice sheet surface displacement
 - Design of techniques for calculating and analyzing ice sheet surface displacement caused by subglacial lake activities
 - Definition of subglacial lake boundaries and analysis of morphological characteristics
- Study on monitoring techniques for subglacial lake activities using time-series SAR images
 - Calculation of ice sheet surface displacement due to changes in subglacial lake water levels using InSAR
 - Development of analysis methods for changes in water levels and volume of

subglacial lakes based on time-series ice sheet surface displacement

- Understanding the interaction between subglacial lake activities and ice flow dynamics
 - Measurement of ice flow around subglacial lakes
 - Examination of the relationship between subglacial lake activities and surface ice velocity
- Detection of subglacial lakes around the K-Route
 - Construction of time-series InSAR pairs for high-latitude inland Antarctic regions.
 - Detection of unreported subglacial lakes between the upstream region of David Glacier and Concordia Station
- Analysis of filling and drainage activities of subglacial lakes around the K-Route
 - Development of high-resolution and precise InSAR phase analysis technique for monitoring filling and drainage activities of subglacial lakes
 - Analysis of filling and drainage activities of David2 and newly detected subglacial lakes



IV. R&D Results

- Establishment of techniques for deriving ice sheet surface displacement above subglacial lakes using InSAR
- Construction of spatial information on subglacial lakes near David Glacier and the Antarctic inland region
- Interpretation of subglacial lake activity characteristics using surface displacement derived from InSAR
- Estimation of the impact of subglacial lake activity changes on surface ice flow
- Development of a novel InSAR-based methodology for high-resolution and precise monitoring of subglacial lake filling and drainage activities
- Identification of filling and drainage activities of active subglacial lakes in the upstream region of David Glacier

V. Application Plans of R&D Results

- Utilization as a foundational technology for investigating subglacial hydrological networks in unexplored regions of Antarctica
- Application in updating spatial information and monitoring the activities of Antarctic inland subglacial lakes
- Provision of critical baseline data for geophysical exploration and thermal drilling of Antarctic inland subglacial lakes



목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구개발의 필요성	1
제 2 절 연구개발의 범위	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1 절 국외 연구개발 현황 및 기술 수준	5
제 2 절 우리나라의 연구개발 현황 및 기술 수준	10
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
제 1 절 연구개발의 목표	11
제 2 절 연구개발 추진전략 및 방법	14
제 3 절 연구개발 내용 및 결과	19

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	89
제 1 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성	89
제 2 절 연구개발 성과 및 의의	95
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	97
제 1 절 추가연구의 필요성	97
제 2 절 연구성과 활용계획	97
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	99
제 7 장 참고문헌	105



제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

- 빙상 아래 위치한 호수인 빙저호는 과거 기후 및 지구온난화, 극한 환경의 생태계 및 생물 진화와 새로운 에너지원의 발견 등 다양한 연구 분야에서 대변혁을 일으킬 만한 단서를 가지고 있는 것으로 추정되고 있음
- 현재까지 남극에서 670여 개의 빙저호가 보고되고 있으며(그림 1), 이 중 약 20%는 수위가 변화하는 활동성 빙저호인 것으로 보고되고 있음(Livingstone *et al.*, 2022)
- 극지연구소는 동남극 David 빙하 상류 지역 빙저호에 초점을 맞춰 지구물리탐사 및 열수 시추 기술개발 연구를 진행하고 있으며, 이 연구의 성공적 수행을 위해서는 David 빙하 주변의 빙저호 영역 정밀 탐지 및 빙저호 활동성 모니터링을 위한 기술개발이 필수적임
- 빙저호의 수위 변화는 상부 빙상의 표면고도 변화를 발생시킨다는 사실에 근거하여(Iken *et al.*, 1983; Smith *et al.*, 2009; Wright and Siegert, 2012), 2000년대부터 인공위성 고도계(altimeter)를 이용하여 빙저호의 수위 변화에 따른 빙상 표면고도 변화가 관측되기 시작했고, 이를 바탕으로 빙저호 탐지 및 활동성 모니터링 연구가 활발히 이루어짐(Smith *et al.*, 2009; Siegfried and Fricker, 2018; Lindzey *et al.*, 2020; Malczyk *et al.*, 2023)
- 인공위성 고도계의 경우 점(point) 형식의 자료를 취득하므로 2차원 공간정보를 획득하기 위해서는 많은 시간이 소요되는 문제점이 있으며, 관측 궤도 간격 또한 수 km로 넓어 빙저호의 정밀 탐지 및 활동성 모니터링에 한계가 있음
- 인공위성 영상레이더(synthetic aperture radar, SAR)는 날씨와 일조량에 영향을 받지 않고 고품질의 지표 영상을 제공하는 전천후 원격탐사 시스템으로, 레이더 간섭기법(SAR interferometry, InSAR)을 적용하면 수 - 수십 일 동안 mm - cm급 정밀도를 가지는 2차원 변위 공간정보 취득이 가능하여 효과적인 빙저호 탐지 및 모니터링 연구가 가능함
- 최근 유럽우주국(European Space Agency, ESA)에서 운용하는 Sentinel-1과 같이 전 지구 InSAR 관측이 가능한 영상을 취득하는 인공위성 영상레이더가 다수 발사되어 운용되거나 발사될 예정이며, 이들 인공위성 SAR는 빙저호 활동성의 장기 모니터링 연구에 유용하게 활용될 수 있음
- 남극의 David 빙하와 같이 유속이 빠른 지역의 InSAR 관측 결과는 빙상 흐름과 빙저호 수위 변화에 의한 표면변위를 모두 포함하므로 빙저호 모니터링에 직접적으로 활용되기 어려우며, 빙저호 활동에 의한 변위만 탐지할 수 있는 SAR 영상 활용 기술개발이 요구됨

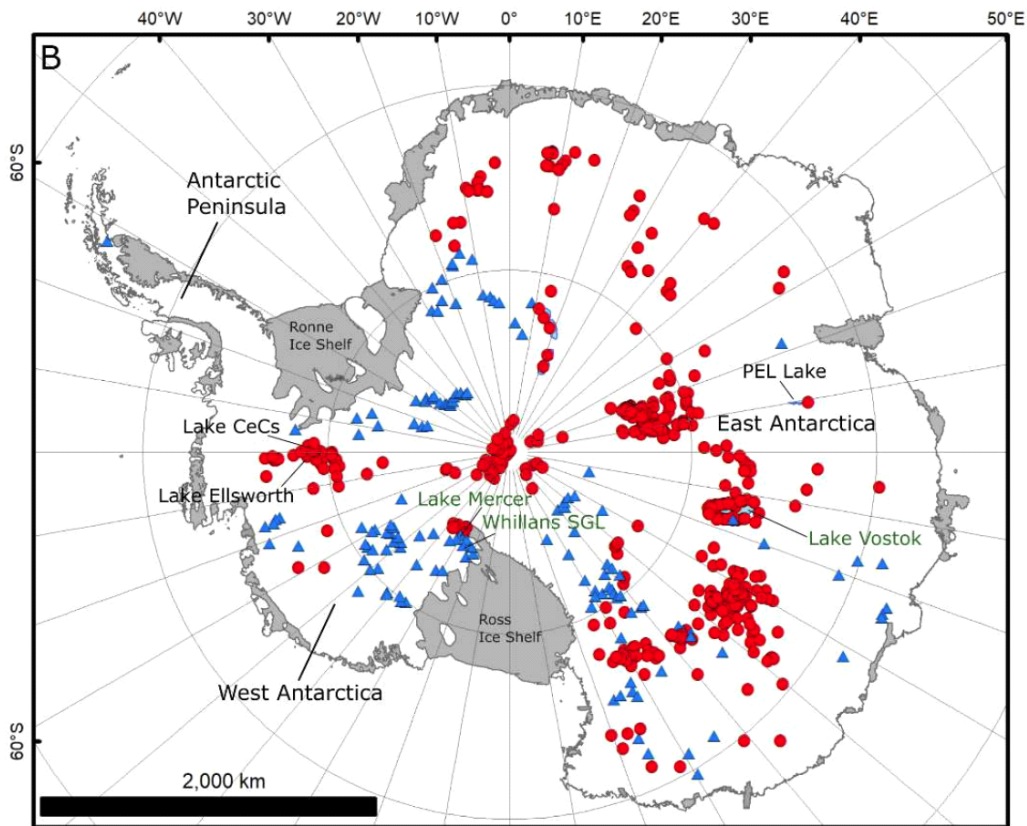


그림 1. 남극의 활성 상태(파란색 삼각형) 및 안정 상태(빨간색 원) 빙저호 분포(Livingstone *et al.*, 2022).

- 빙저호 활동에 의한 빙상 표면변위만을 산출하는 기법으로 두 개의 InSAR를 차분하는 이중차분 레이더 간섭기법(double-differential InSAR, DDIInSAR) 기법이 활용될 수 있음
- DDIInSAR 기법은 두 개의 InSAR에서 동일한 크기와 방향을 가지는 변위는 제거하고 시간에 따라 변화하는 변위의 차이를 구할 수 있는 기법으로(Joughin *et al.*, 1995; Fatland and Lingle, 2002), 빙저호가 위치한 지역의 빙상 흐름속도가 시간에 따라 일정하다면 빙저호 수위 변화의 변동에 의한 빙상 표면변위, 즉 고도 변화의 시간적 차이를 산출하는데 활용될 수 있음
- 그러나 남극 David 빙하 지역에서 빙저호 활동성 모니터링을 위한 인공위성 DDIInSAR 적용 사례는 거의 없으며, 그 활용성에 대한 평가가 필요한 상황임
- 또한 DDIInSAR 기법으로 빙저호의 활동성에 기인하는 빙상 표면변위가 관측될 수 있다고 하더라도, 이는 수위 변화의 시간적 차이를 지시할 뿐 수위가 변화하는 방향과 크기를 결정하지 못하는 한계점이 있음
- 남극 David 빙하 주변 빙저호의 지구물리탐사 및 열수시추 원천기술 확보를 위해 빙저호 공간정보 구축이 시급한 상황에서, 빙저호를 탐지하고 활동성 모니터링을 위한 인공위성 영상레이더 기반 기술이 필수적으로 개발되어야 함

제 2 절 연구개발의 범위

○ 연구의 공간적 범위

- David 빙하 주변에서 2000년대 인공위성 고도계 관측을 통해 6개의 활동성 빙저호 (David1 - David6)가 발견되었음
- 본 위탁연구에서는 Ice Penetrating Radar 및 탄성과 탐사 등 지구물리탐사가 수행되어 향후 연구 확장성이 높은 David2 빙저호 및 그 주변 지역을 중심으로 인공위성 SAR 영상 기반의 빙저호 모니터링 기술개발 연구를 수행함
- 인공위성 SAR의 관측 폭이 수십 - 수백 km인 점을 고려하여 David2 빙저호 외에도 SAR 영상에서 관측될 수 있는 주변 빙저호들을 연구의 범위에 포함함(그림 2)
- David2 빙저호 주변 지역 외에도, 아직 발견되지 않은 빙저호가 존재할 가능성이 있는 K-Route 주변의 David 빙하 상류 및 Vostok 빙저호 인근 남극 내륙도 연구의 공간적 범위에 포함함

○ 연구의 시간적 범위

- 현재 극지역을 주기적으로 촬영하고 있는 SAR 탑재 인공위성은 Sentinel-1이 대표적이며, ALOS-2는 ScanSAR 모드로 비주기적 관측을 수행하고 있음
- Sentinel-1 위성의 모든 관측 영상과 ALOS-2 위성의 ScanSAR 모드 관측 영상은 현재 연구자들에게 무료로 배포되고 있어, 빙저호 활동성 모니터링 연구에 매우 유용하게 활용될 수 있음
- David 빙하 주변에 대한 Sentinel-1 및 ALOS-2 위성의 관측은 2014년부터 수행되어 오고 있음
- 이 연구과제에서는 David 빙하 주변 지역에 대해 Sentinel-1 및 ALOS-2 레이더 간섭쌍 (interferometric pair)이 구축되고 있는 2014년 이후부터 빙저호 모니터링 기술개발 연구를 수행함

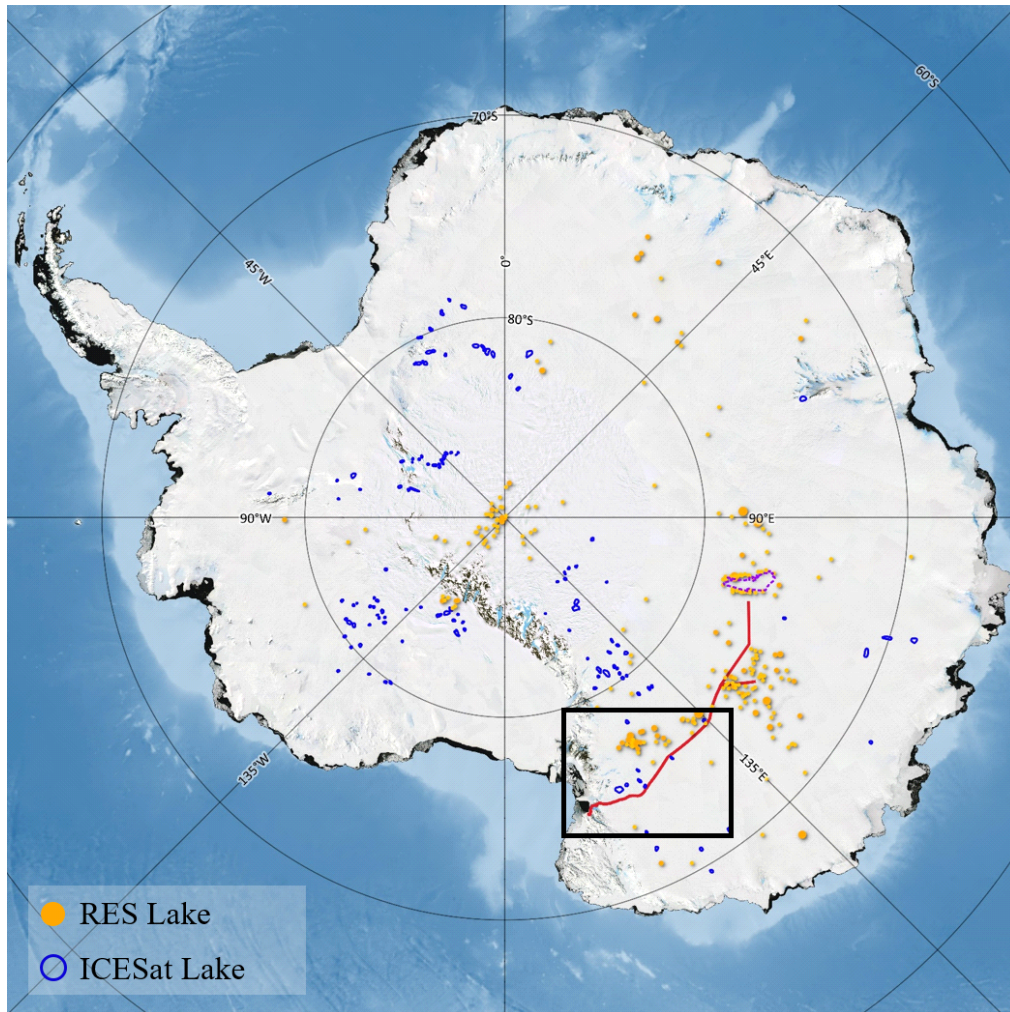


그림 2. 남극 주요 빙저호 분포 및 연구과제 관심 지역(검은색 사각형). 빨간색 실선은 K-루트를 나타냄.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외 연구개발 현황 및 기술 수준

- 빙저호의 수위 변화는 호수 상부의 빙상 고도 변화를 발생시키므로, 빙저호의 탐지 및 활동성 모니터링에 인공위성 고도계 관측이 널리 활용되어 오고 있음
- 미국에서 개발하여 운용하는 레이저 고도계 위성 시리즈인 ICESat (2003년 발사, 2010년 임무 종료) 및 ICESat-2 (2008년 발사, 현재 운용 중)는 맑은 날씨에만 정보를 취득할 수 있는 한계점이 있긴 하지만, 수 cm 이상의 빙상 표면고도 변화를 발생시키는 빙저호 탐지에 유용함
- 미국을 비롯하여 극지 원격탐사에 선도적인 국가들은 ICESat 및 ICESat-2 위성의 레이저 고도계 시계열 관측자료를 분석하여 남극의 신규 활성 빙저호 발견과 활동 특성 연구를 수행하고 있음(그림 3)
- 유럽우주국에서는 2010년 4월 레이더 고도계를 탑재한 CryoSat-2를 발사하였으며, 날씨에 관계 없이 관측이 가능한 레이더의 장점을 바탕으로 극지 빙상 고도의 변화를 효과적으로 모니터링하고 있고(McMillan *et al.*, 2013; Fan *et al.*, 2022), 빙저호 탐지 및 활동성 분석에도 널리 활용되고 있음(그림 4-5)
- ICESat, ICESat-2, CryoSat-2 시계열 관측의 융합을 통해 빙저호들의 장기적인 활동성 모니터링 연구들이 진행되고 있음
- 영국과 미국은 항공 radio-echo sounding 조사를 통해 남극의 활성 및 안정적 상태의 빙저호를 탐지해 오고 있으며, 이를 인공위성 고도계 관측자료와 융합하여 남극 전역의 빙저호 분포와 상호 연결 특성, 나아가 빙저호가 기후변화에 미치는 영향 등 다양한 연구를 수행하고 있음(그림 6)

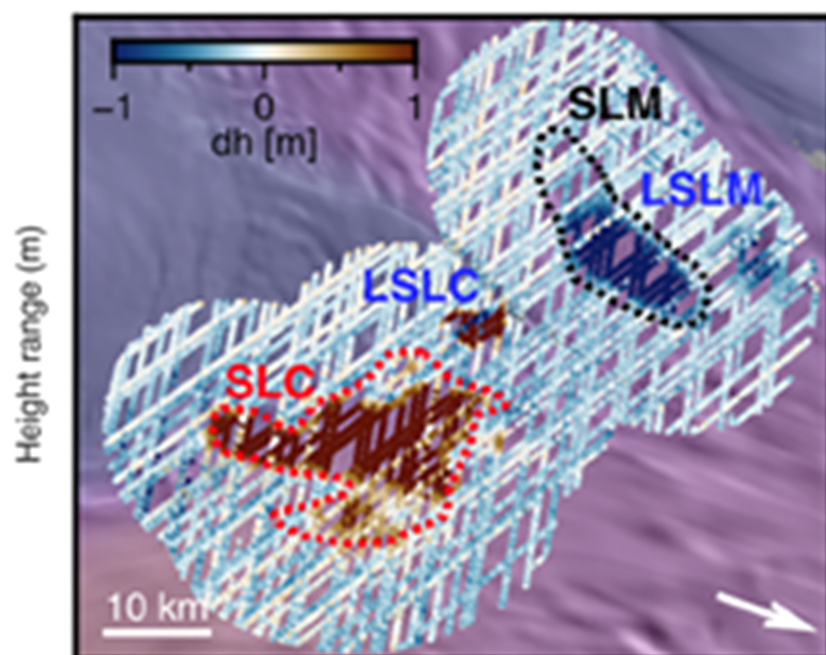
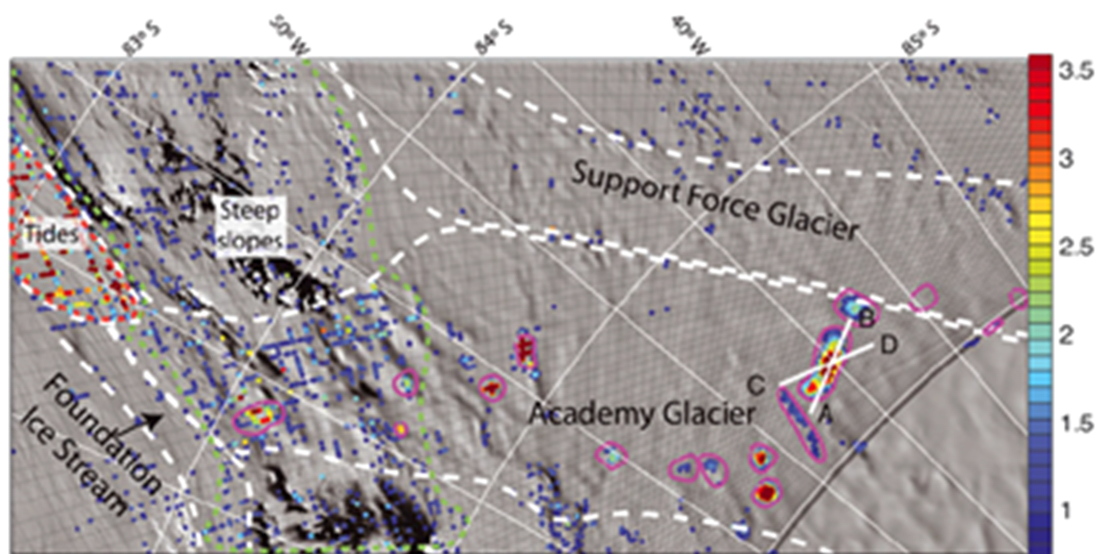


그림 3. ICESat 및 ICESat-2 고도계를 이용한 남극 빙저호 탐지 사례(Smith *et al.*, 2009; Siegfried and Fricker, 2021).

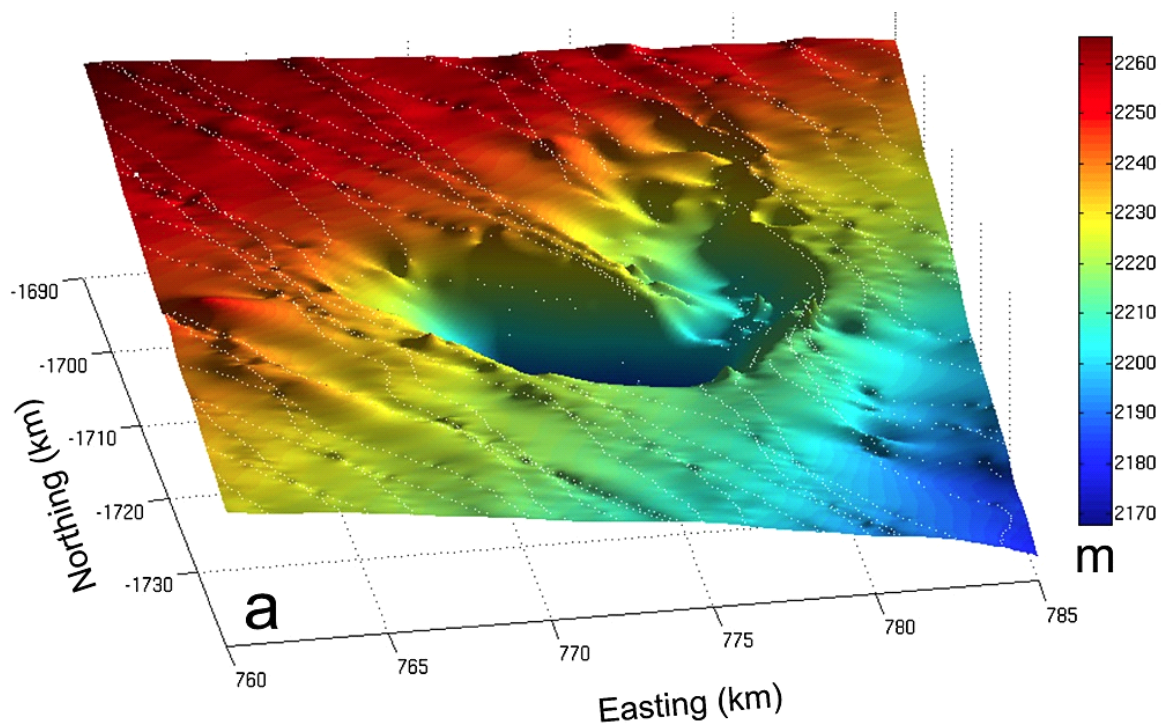


그림 4. CryoSat-2 레이더 고도계를 활용한 CookE2 빙저호 상부 빙상 표면고도 관측.

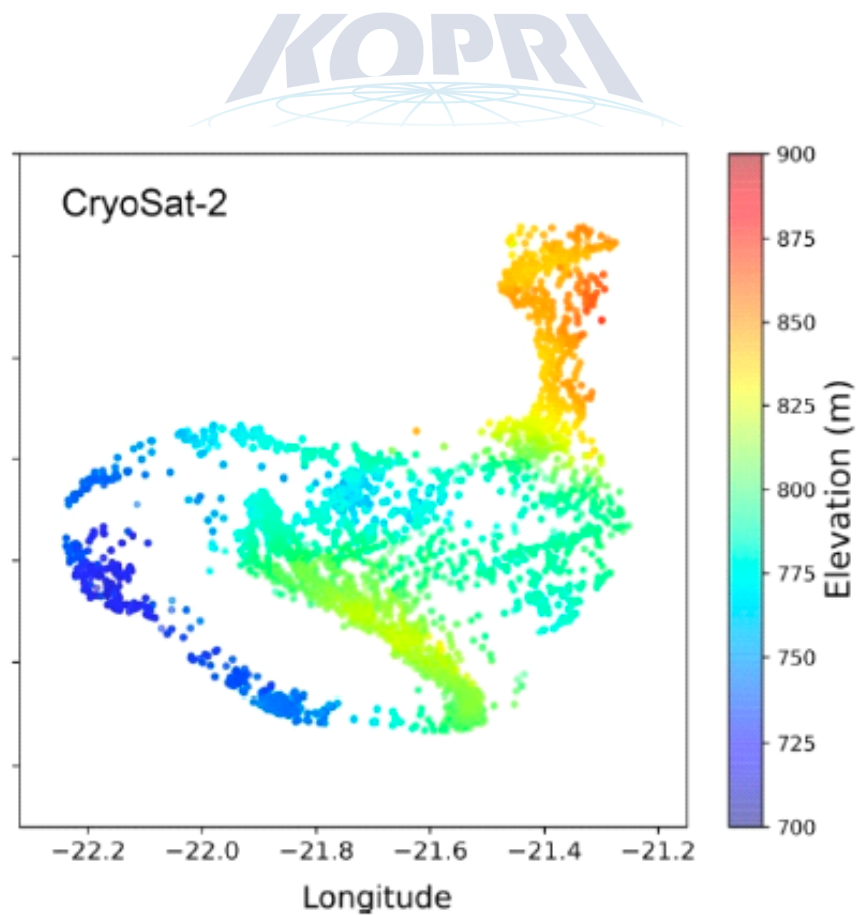


그림 5. 남극 Slessor₂₃ 빙저호에 대한 CryoSat-2 고도계 관측 결과(Fan *et al.*, 2022).

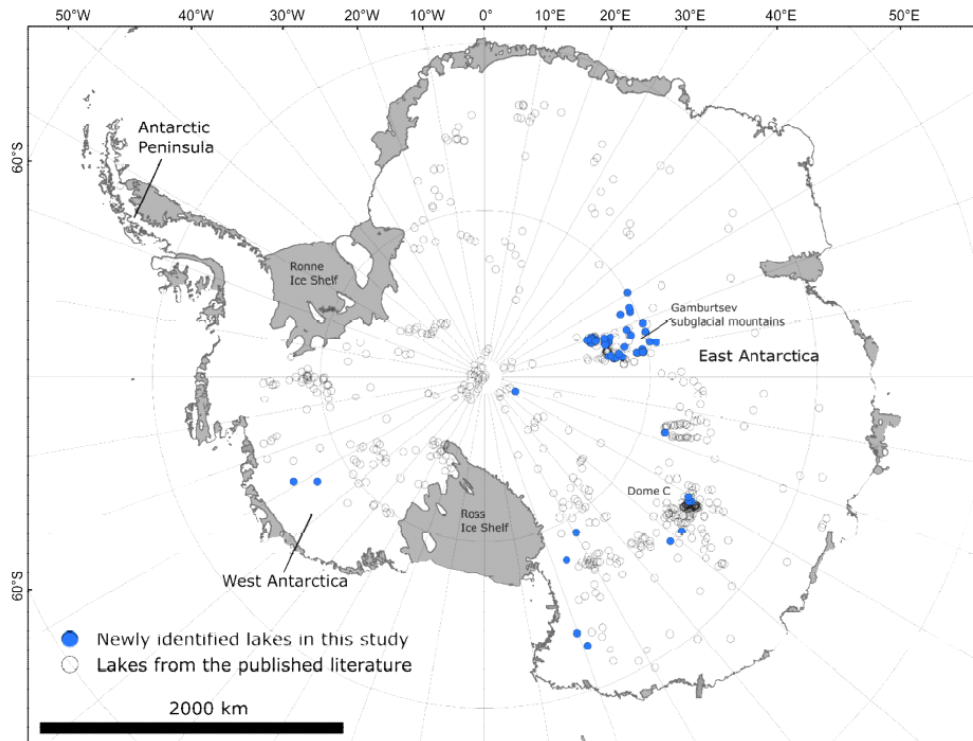


그림 6. 인공위성 고도계(회색 원) 및 radio echo sounding(파란색 원)으로 탐지된 남극 빙저호 (Livingstone *et al.*, 2022).



- ICESat-2 레이저 고도계와 CryoSat-2 레이더 고도계 자료는 현재 무상으로 배포되고 있어 극지 연구에서 활용성이 매우 높지만, 위성의 재방문 주기가 수십-수백 일로 길어 빙저호를 탐지하는 데 많은 시간이 소요되고, 짧은 시간 동안의 빙저호 활동성 모니터링은 매우 어려움
- 인공위성 고도계는 광학 및 SAR와 같이 2차원의 영상정보가 아닌 1차원의 점(point) 데이터를 제공하며, 관측점 사이의 거리 또한 수십 m-수 km에 달하여 빙저호 영역을 정밀하게 탐지하는 데에도 한계가 있음
- 최근 미국, 영국, 유럽연합 국가들을 중심으로 이중 위성 고도계를 융합하여 빙저호 탐지의 효율성과 정밀도 향상을 위한 노력을 하고 있음
- 국외에서는 인공위성으로부터 획득된 SAR 영상에 DInSAR, DDIInSAR 등 다양한 레이더 간섭기법을 적용하여 고산빙하(alpine glacier) 및 남극 빙상 하부의 빙저호를 탐지하고, 빙저호의 활동 추세를 분석한 연구들이 수행된 바 있음(Fatland and Lingle, 2002; Gray *et al.*, 2005; Capps *et al.*, 2010)
- 빙저호 상부 빙상은 중력에 의한 유동을 보이며, 레이더 간섭기법 적용 결과 관측되는 얼음 표면변위는 빙상의 유동과 빙저호 수위 변화에 의한 고도 변화 성분이 혼재되어 있음
- 빙상의 유동이 시간에 따라 일정하고 빙저호 수위 변화의 크기와 방향은 시간에 따라 변

한다면, 두 개의 DInSAR를 차분하는 DDInSAR 기법을 통해 빙저호 수위 변화의 시간적 변동에 따른 빙상 표면변위를 원형 또는 타원형의 간섭띠(fringe)로 관측할 수 있음(그림 7)

- 그러나 DDInSAR로 관측되는 변위는 빙상 고도 변화의 방향(고도 상승 및 하강)이나 크기를 직접적으로 지시하지 않기 때문에 빙저호 활동 분석을 위해서는 고도화된 레이더 간섭기법 활용 기술이 요구되고 있음

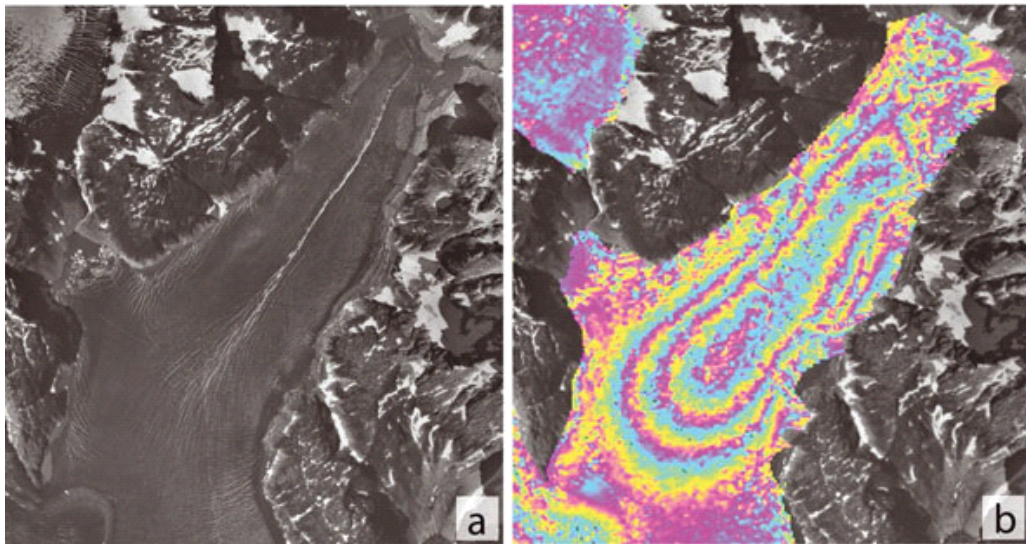


그림 7. (a) SAR 영상에서 관측된 빙저호 상부 빙하의 표면특성 변화와 (b) 영상레이더 간섭기법으로 관측된 빙저호 수위 변동(Capps *et al.*, 2010).

제 2 절 우리나라의 연구개발 현황 및 기술 수준

- 국내에서 빙저호 활동성 모니터링을 위한 인공위성 원격탐사 연구는 극지연구소와 일부 대학에서만 수행되고 있음
- 빙저호 활동성 연구에 적용성이 높을 것으로 기대할 수 있는 인공위성 InSAR를 통하여 빙저호 관련 연구를 수행하는 기관은 본 위탁연구기관(강원대학교)이 국내에서 유일함
- 강원대학교에서는 인공위성 InSAR 기술을 통해 David 빙하의 David₁ 빙저호 인근에서 새로운 빙저호 추정 지역 발견, 장보고 과학기지 인근 Campbell 빙하에서 빙저호의 존재 가능성(그림 8), Cook_{E2} 빙저호의 활동성에 관한 연구를 수행한 바 있음(그림 9)
- 본 위탁연구과제를 통해 강원대학교는 빙저호 연구에 적합한 InSAR 활용 기술개발의 필요성을 제기하였고, 인공위성 InSAR와 그 응용 기술의 개발 및 활용, 고도계 관측의 융합을 통해 빙저호를 탐지하고 빙저호 수위 변화를 정량적으로 규명하고자 하는 연구를 수행하고 있음

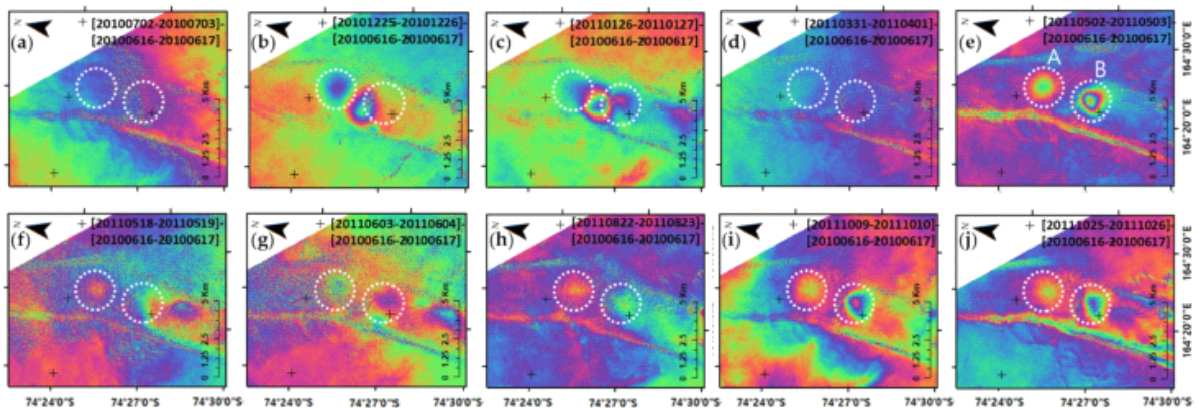


그림 8. 영상레이더 이중 위상차분 간섭기법으로 관측된 Campbell 빙하의 빙저호 추정 지역 탐지 (Lee *et al.*, 2021).

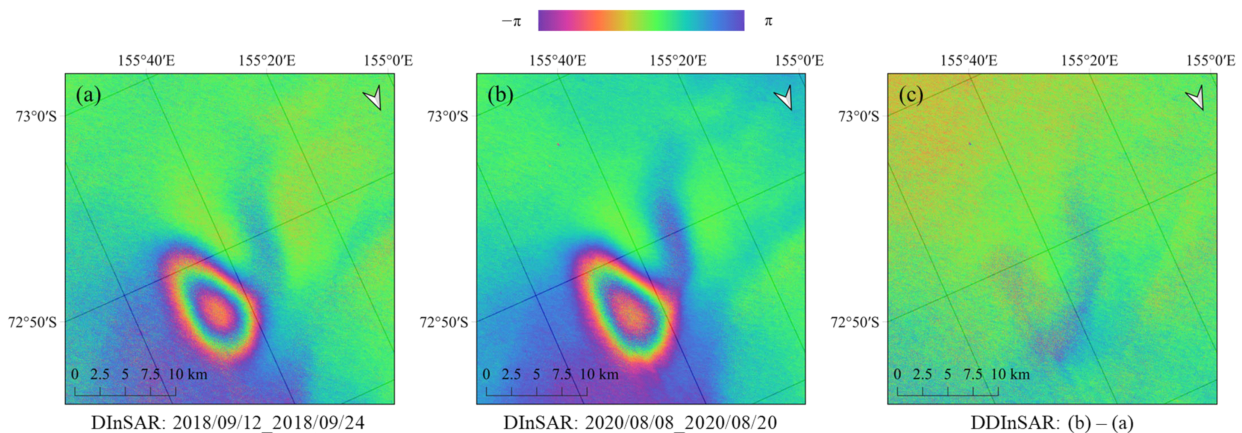


그림 9. DInSAR를 이용한 Cook_{E2} 빙저호 활동 탐지 사례(Moon *et al.*, 2022).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발의 목표

1. 최종목표 및 연차별 연구목표

가. 최종목표

○ 인공위성 영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술 개발

- 인공위성 InSAR 기반 David 빙하 주변 및 남극 내륙 고위도 지역 빙저호 탐지
- 빙저호 활동에 의한 빙상 표면변위 산출 및 시계열 변화 분석
- 빙저호 수위 변화 추정을 위한 InSAR 활용 기술개발 및 검증
- InSAR 관측 기반 빙상 표면변위 해석을 통한 빙저호의 충전-배수 활동 분석

나. 연차별 연구목표

단계	연차	연구 목표	연구 내용
1단계	1차년도 (2020)	인공위성 영상레이더 기반 빙저호의 형태학적 특성 분석	David 빙하 주변 빙저호 지역 영상레이더 자료 구축 및 InSAR 기법을 통한 지표변위 산출
			빙저호 활동에 의한 지표변위 추출
			빙저호의 형태학적 특성 분석 및 공간정보 구축
1단계	2차년도 (2021)	시계열 인공위성 영상레이더 기반 빙저호 활동성 모니터링	지표변위의 시계열 해석을 통한 수위 변화 분석
			빙저호 지역 지형학적 특성을 고려한 수체 변화 분석
			빙저호 활동성에 따른 상부 빙상의 표면변화 분석 및 물리적 특성 추정 가능성 평가
1단계	3차년도 (2022)	빙저호 활동성과 빙상의 유동특성 상호 영향 파악	빙저호 주변 빙하 흐름속도 산출 및 변화 분석
			빙저호 활동성과 빙하 흐름속도 사이의 상호관계 파악

2단계	1차년도 (2023)	영상레이더 간섭기법 기반 남극 내륙 빙저호 탐지	남극 내륙 K-Route 주변 지역의 인공위성 영상레이더 시계열 자료 조사 및 구축
			영상레이더 간섭기법을 활용한 남극 내륙 빙저호 추정 영역 탐지
			인공위성 영상레이더와 고도계 자료의 융복합 분석을 통한 빙저호 탐지 결과 검증
2단계	2차년도 (2024)	빙저호의 충전-배수 활동 규명	남극 내륙 빙저호의 활동 특성 시계열 분석
			빙저호의 충전-배수 파악을 위한 영상레이더 간섭위상 분석 기술 개발
			빙저호의 충전-배수 활동 분석

2. 상세 성과목표 및 내용

가. 정성적 성과목표



성과목표	세부목표	평가지표(핵심성과 스펙)	가중치 (%)
빙저호의 지표변위 및 형태학적 특성 정보 산출 (2020)	빙저호 표면변위 정보 산출	- InSAR 기법 적용을 통한 빙저호 지 표변위 산출	50
	빙저호 형태학적 특성 정보 산출	- 빙저호의 2차원적 형태 정보 산출	50
빙저호 활동성 정보 산출 (2021)	빙저호 수위 및 수체 변화 정보 산출	- 빙저호 지표변위 분석을 통한 수위 및 수체 변화 정량화	60
	빙저호 상부 빙상 표면변화 분석	- 빙저호 활동성에 따른 빙상 표면특 성 변화 파악	40
빙저호 활동성과 빙하 유동의 관계성 분석 (2022)	빙저호 주변 빙하 흐름속도 산출	- 영상레이더를 이용한 빙저호 주변 빙하 흐름속도 산출	60
	빙저호 활동성이 빙하 유동에 미치는 영향 분석	- 빙저호 활동성과 빙하 흐름속도 사 이의 상호관계 파악	40

남극 내륙 활성 빙저호 탐지 (2023)	남극 내륙 빙저호 추정 지역 탐지	- 다중 위성 InSAR 기법을 통한 남극 내륙 지역 빙저호 추정 영역 탐지	40
	남극 내륙 빙저호 탐지 공간정보 산출	- 미보고 빙저호의 활동성 공간정보 산출	60
빙저호 충전-배수 활동 정보 산출 (2024)	빙저호 활동성 시계열 분석	- 영상레이더 간섭기술 기반 빙저호 상부 빙상 표면고도의 시계열 변화 분석	50
	빙저호 충전-배수 파악	- 빙상 표면고도의 시공간적 변화 특 성 해석을 통한 빙저호 충전-배수 활동 규명	50

나. 정량적 성과목표

구분		계획					
논문	단계/연차별 목표	국외			국내		
		SCI (주/공동)	SCOPUS /KCI (주/공동)	소계 (주/공동)	SCI (주/공동)	SCOPUS /KCI (주/공동)	소계 (주/공동)
	1단계/1년차	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	1단계/2년차	1/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
	1단계/3년차	2/0	0/0	2/0	0/0	0/0	0/0
	2단계/1년차	1/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
	2단계/2년차	1/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
	합 계	5/0	0/0	5/0	0/0	0/0	0/0
Proceeding		국외			국내		
		4			7		

제 2 절 연구개발 추진전략 및 방법

1. 추진전략 및 체계

가. 추진전략

- 인공위성 InSAR 기술을 활용한 빙저호 상부 빙상 표면변위의 시계열 분석을 통해 빙저호 활동성을 체계적으로 분석할 수 있는 원격탐사학적 방법을 정립함
- InSAR 기반 기술로 탐지된 빙상 표면변위로부터 빙저호 수위 변화의 크기와 방향을 분석할 수 있는 새로운 방법론을 제시함
- 위성 고도계 관측은 InSAR 기법의 수직 방향 변위 관측에 비해 낮은 민감도와 정확도를 가지지만, 빙상 고도 변화의 장기적 추세를 분석하는데 용이하므로 InSAR 시계열 분석에 위성 고도계 관측자료를 융합 활용하여 빙저호 추정 영역 탐지 결과를 검증함
- 국외 선진 연구그룹의 빙저호 원격탐사 기술을 도입하여 활용하고, 기존 기술의 한계점을 보완하는 연구를 수행함으로써 원격탐사 기반 빙저호 모니터링 기술의 정확도와 신뢰도를 제고함
- 빙저호 모니터링 연구를 위해 인공위성 영상레이더 시계열 관측자료는 필수적이며, 영상 자료에 대한 접근성이 높은 Sentinel-1과 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상을 적극 활용함
- 이중 위성 영상레이더의 융합 활용기술 및 이중 센서 관측자료의 융복합 분석기술 개발을 통해 빙저호 탐지와 활동성 모니터링 연구 결과의 신뢰도를 확보함
- 극지연구소 빙하지권연구본부, 미래기술센터, 원격탐사빙권정보센터, 남극내륙연구사업단 및 국내 빙저호 연구자들과의 유기적인 연구 논의를 통해 인공위성 SAR 영상 기반 빙저호 모니터링 연구의 질적 향상을 도모함
- 원격탐사 및 극지과학 분야 국내외 학술대회 발표, 학술지 논문 출판을 통하여 연구 영향력을 확산함

나. 추진체계도

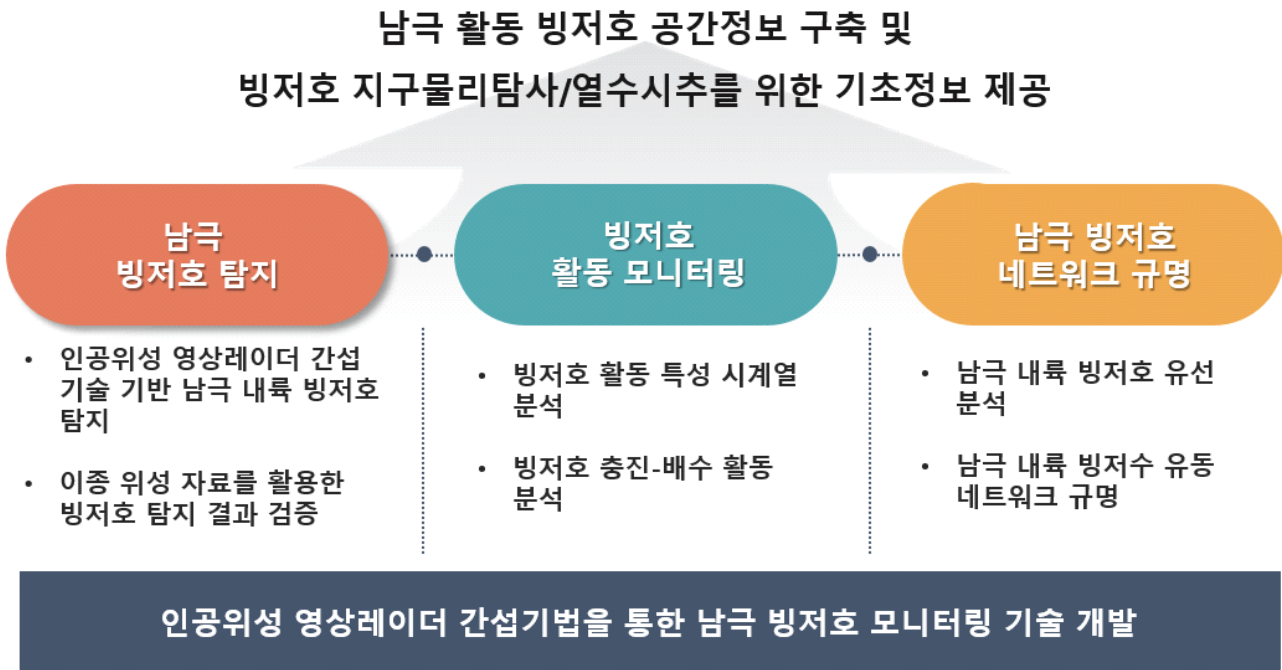


그림 10. 추진체계도.

2. 추진방법

○ 인공위성 SAR 영상 시계열 자료 구축

- 빙저호 상부 빙상 표면변위 모니터링을 위해서는 인공위성 시계열 SAR 영상 자료를 구축하는 것이 매우 중요함
- 이 연구에서는 자료의 접근성이 높은 유럽우주국의 Sentinel-1A/B C-band SAR 영상, ALOS-2 L-band PALSAR-2 ScanSAR 영상을 적극적으로 활용하고자 함
- 고위도 지역에서는 Sentinel-1 SAR 영상 자료가 제한적이며, ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR의 경우 일부 지역에서 충분한 수의 시계열 영상이 획득되지 않을 수 있음
- 필요시 본 위탁연구책임자가 독일 항공우주센터(DLR)와 공동으로 수행하는 연구과제를 통해 유상 위성 SAR(TerraSAR-X) 영상 자료를 구축하여 활용함

○ InSAR 관측 결과의 보정 알고리즘 개발

- InSAR 관측 결과에 포함된 빙상 흐름속도의 측정 및 제거를 위한 방법론 마련
- 빙저호 활동에 의한 변위의 크기와 방향을 도출할 수 있는 영상레이더 간섭위상 분석

방안을 검토하고, 적합한 분석기법을 적용함

- ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상으로부터 남극 내륙 지역의 정밀한 빙상 표면변위를 탐지할 수 있는 최적의 레이더 간섭기법 조건을 파악함
- L-band InSAR (특히 ScanSAR 모드)에서 나타날 수 있는 간섭위상 오차의 보정 방안을 조사하고, 연구에 적용할 수 있도록 보정 알고리즘을 구현하여 활용함

○ 영상레이더와 고도계 관측자료의 상호 보완적 활용

- InSAR 관측과 고도계 관측은 상호 간에 검증 및 평가자료로 활용될 수 있으나 두 자료가 시공간적으로 완전히 일치하는 경우는 거의 없음
- 인공위성 고도계 관측은 빙저호 지역 빙상 표면 고도의 장기 변화 관측에 유용하므로, InSAR 기법으로 분석된 빙저호 상부 빙상 표면변위의 시계열 변화의 검정에 상호 보완적으로 활용
- InSAR로 관측된 빙상 표면변위를 이용하여 인공위성 고도계 관측 민감도 평가에 활용
- CryoSat-2, ICESat-2 등의 인공위성 고도계 관측자료를 활용하여 빙저호 지역 빙상 표면 고도 변화 정보를 구축하고, InSAR 기법을 통해 산출된 변위의 시계열 변화와 상호 비교 및 융합 분석을 수행

○ 위성기반 빙상 흐름속도 오차 보정기술 제안

- SAR 및 광학영상에서 산출된 흐름속도의 오차를 보정하기 위한 통계적 방법론 제안
- 특정 관측값(빙상 흐름속도)를 기준으로 공간적으로 인접한 관측값들과의 상호관계를 평가하거나 기존에 보고된 빙상 흐름속도와의 차이를 이용하는 보정 알고리즘 활용
- 위성자료 처리의 오류를 최소화하여 정밀한 빙상 흐름속도를 산출할 수 있도록 함

○ 국내외 전문 연구진과의 교류를 통한 연구목표 달성 노력

- 극지연구소 빙저호 연구그룹, 국내외 극지 원격탐사 전문가들과의 교류를 통해 다학제적 연구 논의를 수행하고, 위탁연구의 결과 향상 및 목표 달성을 위해 노력함
- 위성 영상레이더 관측 결과의 공유 및 공동 해석, 공동 연구논문 작성을 통해 연구 영향력을 확산함

3. 연차별 연구개발 추진일정

(단위 : 천원)

연구개발 수행 내용		수행 월												소요 연구비
		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	
영상레이더 활용 빙저호의 형태학적 특성 분석 (2020)	영상레이더 자료 구축 및 InSAR 기법을 통한 표면변위 산출													10,000
	빙저호 활동에 의한 지표변위 추출													10,000
	지표변위량에 따른 빙저호의 형태학적 특성 분석													10,000
시계열 위성 영상레이더 자료 기반 빙저호 활동성 모니터링 (2021)	지표변위의 시계열 해석을 통한 빙저호 수위 변화 분석													20,000
	빙저호 지역 지형학적 특성을 고려한 수체 변화량 분석													20,000
	빙저호 활동성에 따른 빙상 표면변화 분석 및 물성 추정													10,000
빙저호 활동성과 빙상의 유동특성 상호 영향 파악 (2022)	빙저호 주변 빙하 흐름속도 산출 및 변화 분석													30,000
	빙저호 활동성이 빙하 유동에 미치는 영향 분석													20,000

영상레이더 간섭기법 기반 남극 내륙 빙저호 탐지 (2023년)	인공위성 영상레이더 시계열 자료 조사 및 구축													15,000
	남극 내륙 빙저호 추정 영역 탐지													15,000
	인공위성 영상레이더와 고도계 자료의 융복합 분석을 통한 빙저호 탐지 결과 검증													20,000
빙저호의 충진-배수 활동 규명 (2024년)	남극 내륙 빙저호의 활동 특성 시계열 분석													10,000
	빙저호의 충진-배수 파악을 위한 영상레이더 간섭위상 분석 기술 개발													20,000
	빙저호의 충진-배수 활동 분석													20,000
합 계														230,000

제 3 절 연구개발 내용 및 결과

1. 빙저호 상부 빙상 표면변위 및 형태학적 특성 정보 산출

가. 빙저호 상부 빙상 표면변위 정보 산출

○ David 빙하 빙저호 지역 인공위성 영상레이더 간섭쌍 구축

- 빙저호 상부 빙상 표면변위를 시계열로 관측할 수 있는 위성 영상레이더 자료 조사
- C-band SAR를 탑재한 Sentinel-1 위성은 빙저호 모니터링에 가장 활용성이 높은 자료로 확인
 - : 2014년부터 12일 간격으로 전지구 관측
 - : Smith *et al.* (2009)에서 보고된 David 빙하 주변 빙저호에 대해 2015년부터 관측자료 배포
- 2015년부터 2020년까지 David 빙하 주변 빙저호 지역이 촬영된 Sentinel-1 IW(Interferometric Wide swath) SAR 영상을 총 323장 구축(그림 11)
 - 1) relative orbit number: 69, slice number 2, ascending pass에 대해 119장
 - 2) relative orbit number: 72, slice number 4, descending pass에 대해 101장
 - 3) relative orbit number: 72, slice number 5, descending pass에 대해 103장

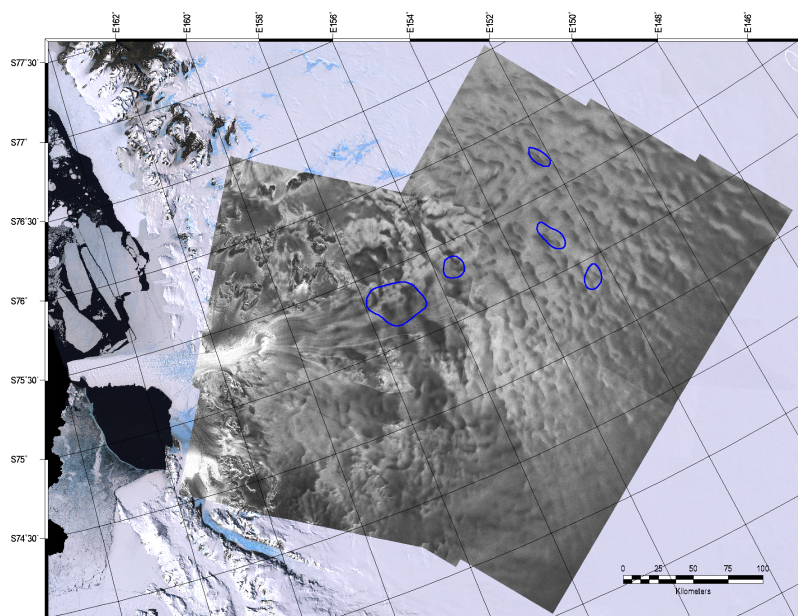


그림 11. David 빙하 주변 빙저호 지역에 대해 1차년도에 구축한 3개 패스의 Sentinel-1 SAR 관측 범위.

- SAR 영상은 12일 간격으로 촬영(일부 기간 제외)되었고, InSAR 적용이 가능한 자료로 구축
- 본 연구에서 구축한 Sentinel-1 SAR 영상의 범위는 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호 영역(위 그림의 청색 폐합선)을 모두 포함

○ InSAR 기법 수행을 통한 빙저호 상부 빙상 표면변위 산출

- 구축된 Sentinel-1 SAR 영상 중 12일과 24일의 시간 기선거리(temporal baseline)를 가지는 영상들에 InSAR 적용
- SAR 영상 사이의 정밀 정합과 지표고도에 의한 위상 제거를 위해 독일우주국에서 제공하는 30 m 공간해상도의 TanDEM-X DEM 활용
- 12일과 24일의 시간 기선거리를 가지는 InSAR 영상을
 - 1) relative orbit number: 69, slice number 2, ascending pass에 대해 각각 114개와 110개
 - 2) relative orbit number: 72, slice number 4, descending pass에 대해 각각 98개와 96개
 - 3) relative orbit number: 72, slice number 5, descending pass에 대해 각각 99개와 97개 생성
- 그림 12는 relative orbit number: 69, slice number 2, ascending pass의 InSAR 영상 중 하나로 (a)는 12일, (b)는 24일의 시간 기선거리를 가짐
- David1 빙저호 지역은 빠른 빙하 유속으로 인해 긴밀도가 유지되지 않아 지표변위 관측이 어려움
- 그림 13은 David2, David3, David4, David5 빙저호를 포함하는 relative orbit number: 72, slice number 5, descending pass에 대한 InSAR 영상의 예시로, (a)는 12일, (b)는 24일의 시간 기선거리를 가짐

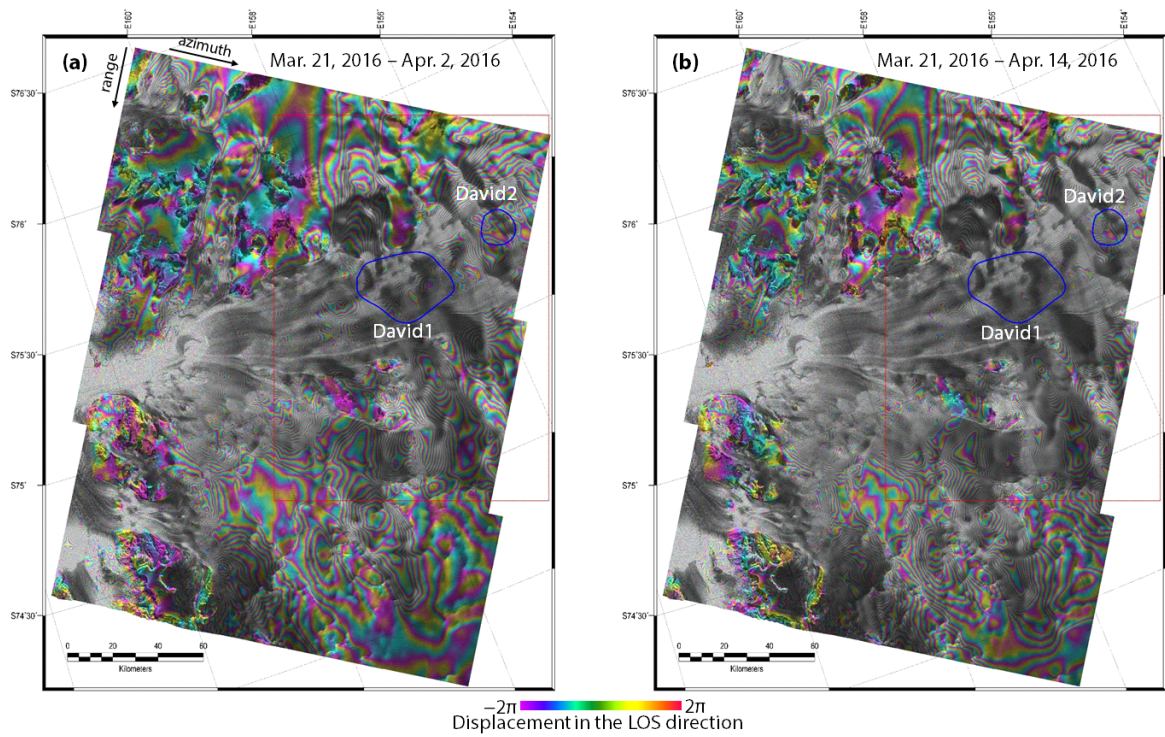


그림 12. David1, David2 빙저호를 포함하는 Sentinel-1 InSAR 영상 예시, (a) 12일 시간 기선거리의 InSAR 영상, (b) 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상.

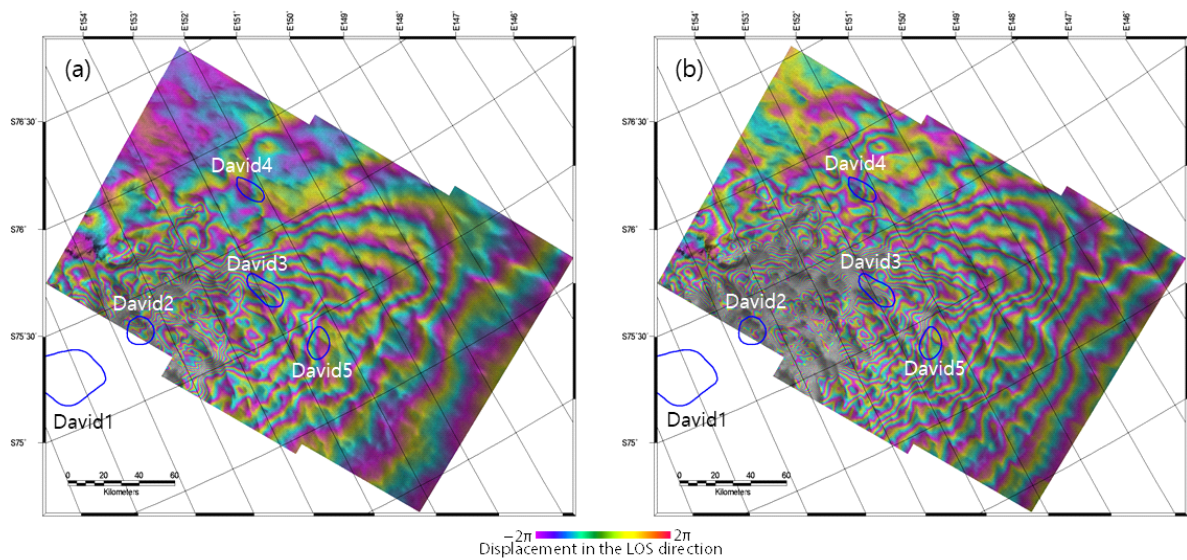


그림 13. David2, David3, David4, David5 빙저호를 포함하는 Sentinel-1 InSAR 영상 예시, (a) 12일 시간 기선거리의 InSAR 영상, (b) 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상.

- David1을 제외한 나머지 빙저호 지역은 빙하 유속이 느리고, 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상에서도 표면변위가 관측 가능하였음
- 빙저호 표면은 빙상 흐름에 의한 수평방향의 변위와 빙저호 수위 변화에 따른 수직방향의 변위를 모두 나타내며, InSAR 영상에는 두 가지 성분의 변위가 모두 포함되어 있음
- 전통적인 InSAR 기법으로는 빙저호의 활동성 분석이 어려움을 확인함

○ 빙저호 활동에 의한 지표변위 산출

- 레이더 이중위상차분간섭기법(Double-Differential Interferometric SAR, DDInSAR)은 두 개의 InSAR 영상을 차분하는 기법
- 빙상의 흐름속도가 두 개의 InSAR 관측에서 동일하다면, DDInSAR를 통해 두 InSAR 관측에 포함된 빙저호 수위 변화의 차이만을 분석할 수 있음
- 본 연구에서 생성한 Sentinel-1 InSAR 영상을 이용하여 12일과 24일 시간 기선거리 기반의 DDInSAR 영상을
 - 1) relative orbit number: 69, slice number 2, ascending pass에 대해 각각 6,441개와 5,995개
 - 2) relative orbit number: 72, slice number 4, descending pass에 대해 각각 4,950개와 4,753개
 - 3) relative orbit number: 72, slice number 5, descending pass에 대해 각각 112개와 57개 생성
- 그림 14는 12일과 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상을 이용하여 생성한 DDInSAR 영상의 예시로, Smith *et al.* (2009)에서 보고된 David2 빙저호(청색 폐합선) 인근에서 폐합된 형태의 간섭띠(fringe) 패턴이 뚜렷하게 관찰됨

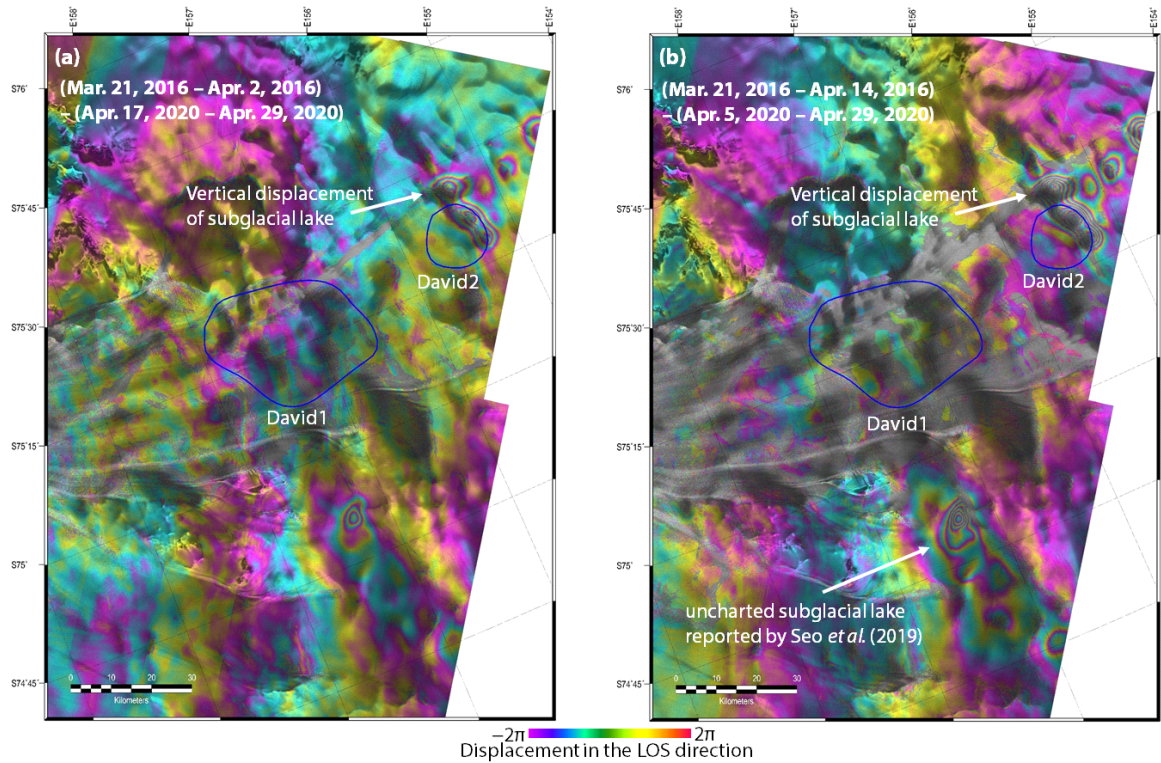


그림 14. David1, David2 빙저호 주변 지역에 대해 (a) 12일 시간 기선거리와 (b) 24일 시간 기선거리의 Sentinel-1 InSAR 영상을 이용하여 생성한 DDInSAR 영상 예시.

- 빙저호 주변 빙상에서 DDInSAR 위상의 공간적 변화는 2π 이내로 나타나 빙상 흐름에 의한 수평방향 변위가 대부분 제거되었고, 빙저호 인근의 간섭띠 패턴은 두 InSAR 관측에 포함된 수위 변화의 차이임을 확인
- 24일 시간 기선거리의 InSAR 관측을 통해 생성한 DDInSAR 영상에서 빙저호 상부 빙상 표면변위를 보다 명확하게 관측할 수 있음을 확인
- David2 빙저호 뿐만 아니라 Seo *et al.* (2019)에서 새롭게 보고된 빙저호의 표면변위도 DDInSAR에서 관측됨을 확인
- 그림 15는 David3, David4, David5 빙저호에 대한 DDInSAR 영상의 예시로, Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호 지역(적색 폐합선)에서 폐합된 형태의 표면변위가 뚜렷하게 관측됨(David4 빙저호 제외)

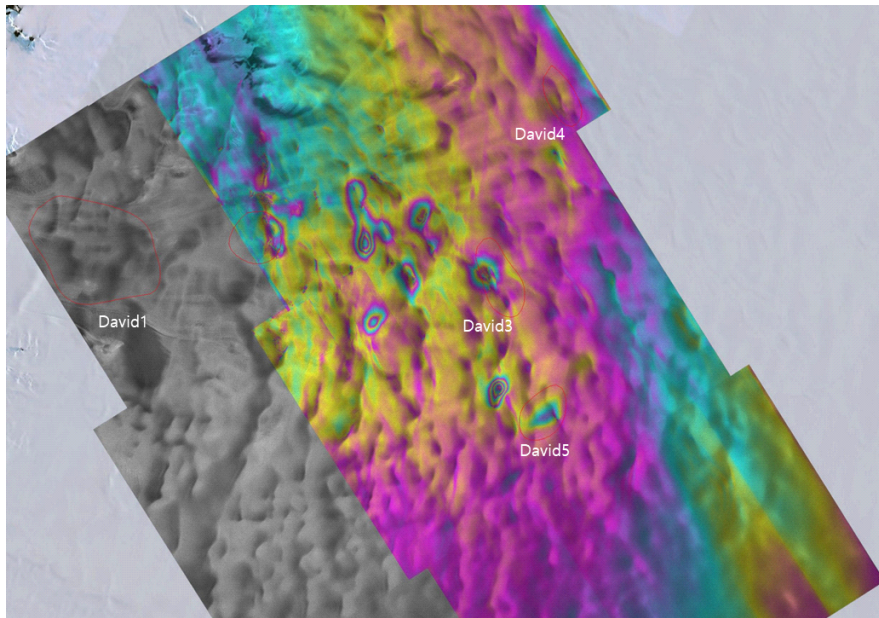


그림 15. David3, David4, David5 빙저호 주변 지역에 대해 24일 시간 기선거리의 Sentinel-1 InSAR 영상을 이용하여 생성한 DDIInSAR 영상 예시.

- DDIInSAR에서 관측되는 빙저호의 표면변위는 두 개의 InSAR에서 관측된 수위변화에 의한 지표변위량의 차이, 즉 지표변화의 속도를 지시
- 현재까지 구축된 Sentinel-1 SAR 위성 자료의 관측 기간 내에서 최대 1 cm/day의 수직방향 지표변화 속도를 보임
- DDIInSAR 영상에서 빙저호 주변 빙상 표면에 잔여 위상 성분(2π 내외)이 남아있는 것을 확인하였는데, 이는 빙상의 흐름속도가 시간에 따라 조금씩 변화한다는 것을 의미

나. 빙저호 형태학적 특성 정보 산출

○ 시계열 DDIInSAR 영상의 간섭띠 패턴 분석

- DDIInSAR 영상에서 관측되는 간섭띠 패턴으로부터 빙저호의 분포 영역을 정의할 수 있음을 확인
- 빙저호 지역의 간섭띠 중에서 가장 외곽의 간섭띠를 빙저호의 경계로 정의할 수 있으며, 시추 후보지인 David2 빙저호에 대해 시계열 DDIInSAR 영상에서 간섭띠 변화를 분석
- 그림 16은 서로 다른 시기에 획득된 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상(InSAR 관측 사이의 시간차는 최대 3년)을 사용하여 생성한 DDIInSAR 영상으로 청색 폐합선은 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호 경계를 지시

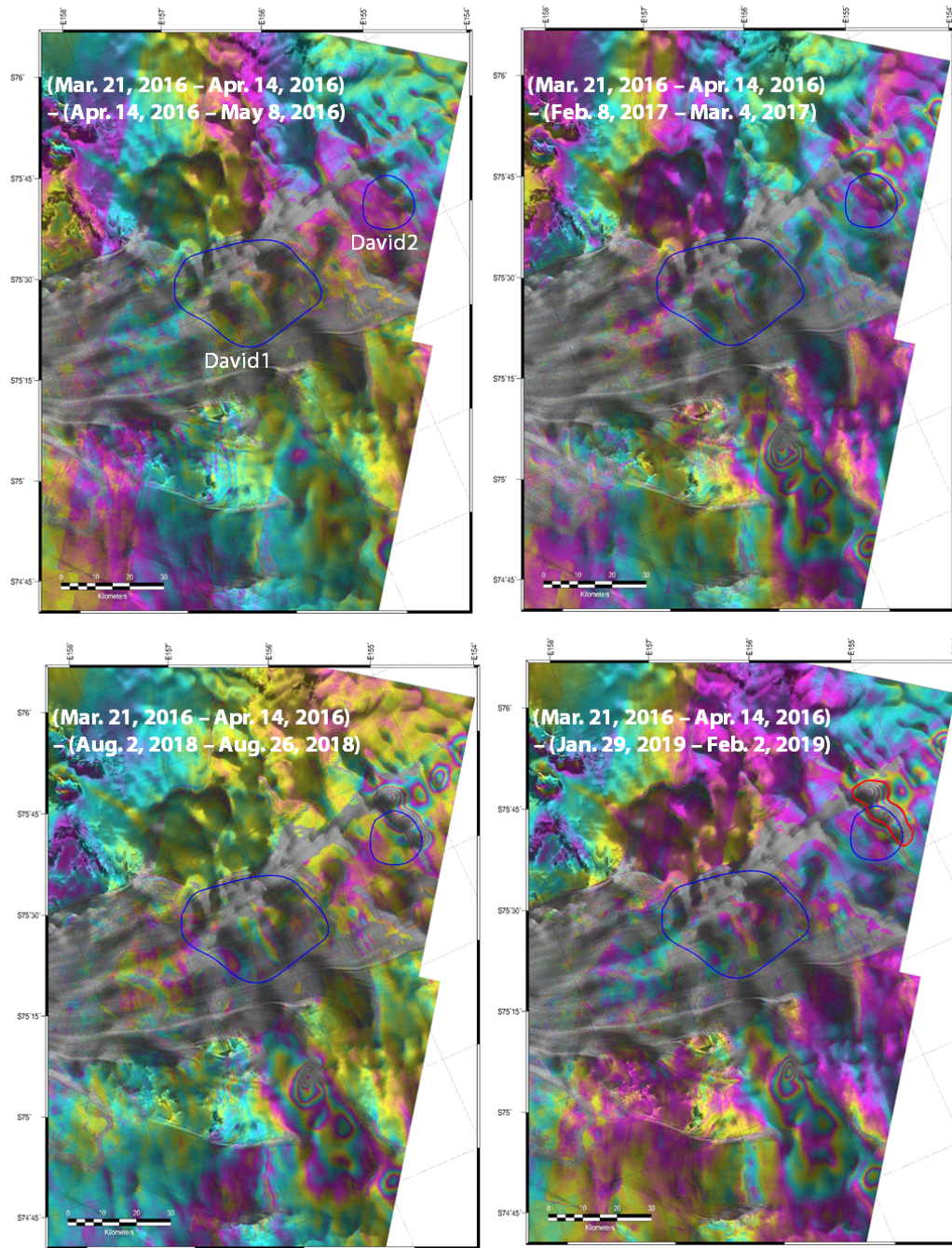


그림 16. David1, David2 빙저호 주변 지역에 대해 1개월, 1년, 1년 6개월, 3년의 시간차를 가지는 InSAR 영상쌍을 이용하여 생성한 DDInSAR 영상.

- 표면변위가 관찰되지 않는 좌측 상단의 영상을 제외하면 모두 David2 빙저호에 대해 뚜렷한 변위 패턴(간섭띠 패턴)을 보여줌
- 이 연구결과는 적어도 Sentinel-1 관측 기간 동안 David2 빙저호의 2차원적 분포 형태가 시공간적으로 변하지 않았음을 나타냄

○ DDInSAR 영상과 위성 고도계 관측에서 정의된 David2 빙저호 영역의 상호 비교

- 빙저호 표면에서 간섭띠 변화율이 가장 크게 나타나는 DDInSAR 영상으로부터 빙저호의 경계를 정의(그림 17의 적색 폐합선)

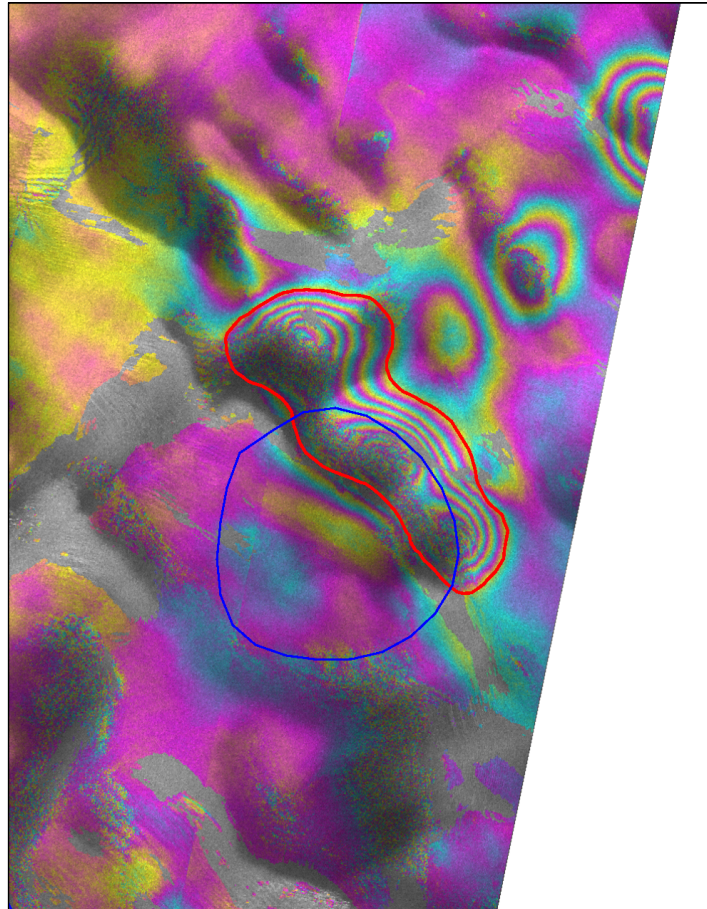


그림 17. DDInSAR에서 정의된 David2 빙저호 영역(적색 폐합선)과 Smith *et al.* (2009)에서 위성 고도계 관측으로 정의된 David2 빙저호 영역(청색 폐합선).

- DDInSAR에서 정의된 David2 빙저호의 2차원적 분포 형태는 위성 고도계 관측에 기반하여 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 것(아래 그림의 청색 폐합선)과 상이함
- 극지연구소가 David2 빙저호에 대해 수행한 IPR 탐사에서 반사율이 높은 지역이 DDInSAR에서 정의된 빙저호 영역과 일치하였음
- 이를 통해 DDInSAR로부터 정확한 빙저호 형태 정보 제공이 가능함을 확인함
- 이는 위성 고도계보다 DDInSAR가 빙저호 활동에 따른 빙상 표면변위에 더 민감하기 때문으로 분석됨
- 위의 DDInSAR 영상에서 David2 빙저호 주변(좌상단)에 폐합된 형태의 변위가 관측되

고 있으며, 이는 현재까지 보고된 바 없는 소규모의 빙저호 또는 David2 빙저호가 현재 알려진 바와 비교하여 더 넓은 범위에 걸쳐 형성되어 있음을 나타냄

- 다시기의 DDIInSAR 영상을 검토한 결과 David2 빙저호의 2차원적 형태가 유지되고 있음을 확인
- 그림 18은 2016년 3월과 2018년 2월의 InSAR 영상으로 생성한 DDIInSAR 결과로부터 빙저호의 지표변위 지도를 제작한 것으로, 두 시기의 InSAR 관측 기간 사이에 10 cm 이상의 표면변위 차이가 발생한 것을 보여줌

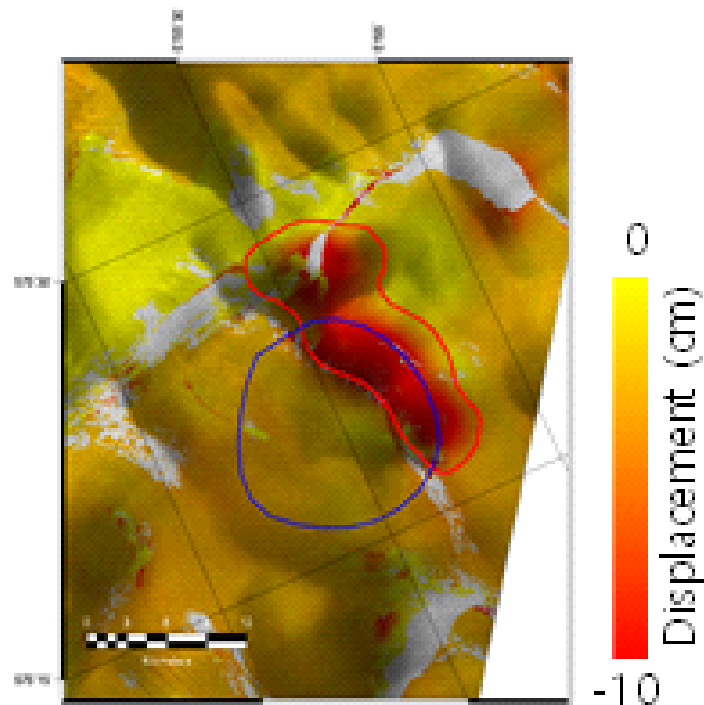


그림 18. DDIInSAR로 제작한 David2 빙저호의 표면변위 지도. 적색 폐합선과 청색 폐합선은 각각 본 연구의 DDIInSAR와 Smith *et al.* (2009)에서 위성 고도계 관측으로 정의된 David2 빙저호 영역.

- 위의 지표변위 지도는 DDIInSAR의 간섭띠 패턴으로 정의된 빙저호 경계가 변위 0이 되는 경계와 잘 일치함을 나타냄

다. 미보고 빙저호 추정 지역 탐지

- DDInSAR 영상과 위성 고도계 관측 기반 빙저호 영역 상호 비교를 통해 빙저호로 추정되는 지역 신규 탐지
 - Sentinel-1을 이용한 DDInSAR는 빙저호 상부 빙상 표면의 변위를 cm급 정밀도, 수십 m 공간해상도로 제공하며 인공위성 고도계 관측보다 뛰어난 빙저호 탐지력을 보임
 - 아래 Sentinel-1 DDInSAR 영상(그림 19)은 위성 고도계 관측 기반으로 보고된 David 빙하 주변 빙저호(적색 폐합선, Smith *et al.*, 2009) 외에도 빙저호로 추정되는 지역을 다수 보여주고 있음

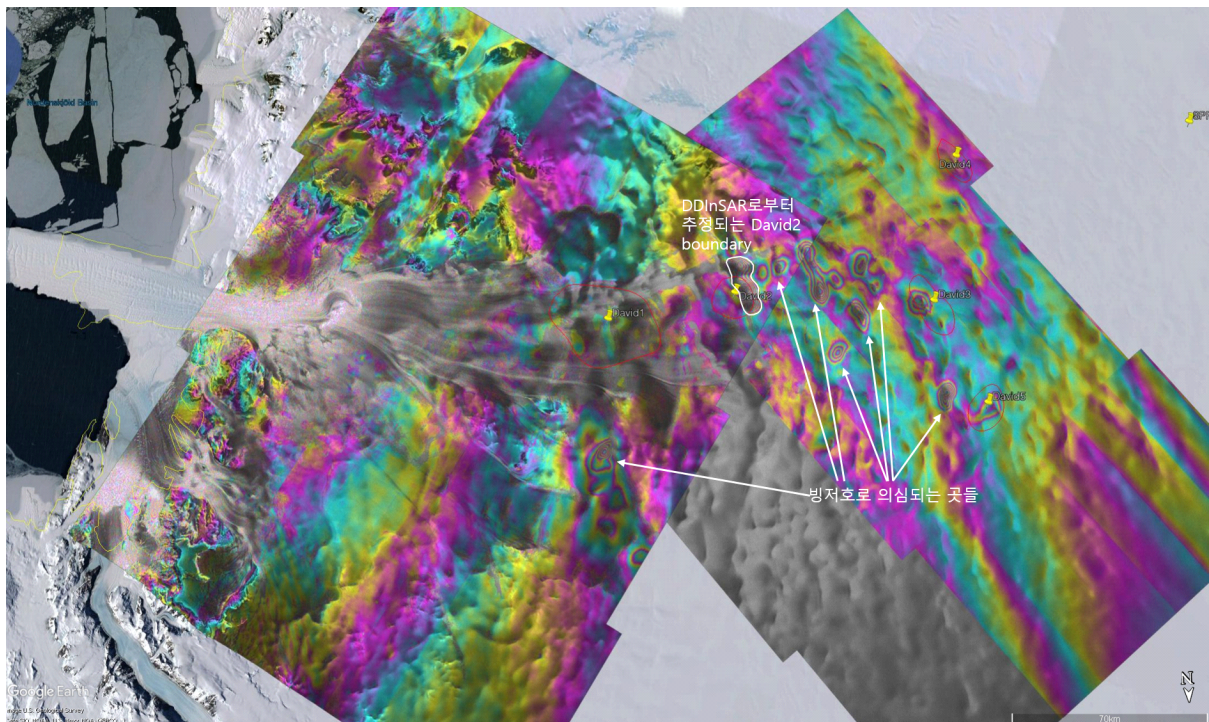


그림 19. DDInSAR 영상에서 발견된 빙저호 추정 지역.

- 주변 빙상 표면에서 DDInSAR 위상이 거의 관찰되지 않고 폐합된 형태의 간섭띠 패턴이 뚜렷하게 나타나는 것으로 볼 때, 변위가 나타나는 지역은 현재까지 보고된 바 없는 빙저호라고 판단할 수 있음

2. 인공위성 영상레이더 기반 빙저호 활동성 모니터링

가. 빙저호 상부 빙상의 시계열 정밀 표면변위 산출기술 개발

○ 인공위성 InSAR 기법으로부터 빙상 흐름속도가 보정된 표면변위 정밀 산출

- 빙저호의 활동성은 빙상 표면의 수직변위로 관측될 수 있음
- InSAR 기법은 변위를 cm급 정밀도로 관측할 수 있으나, 빙저호 지역의 경우 빙상 흐름에 의한 수평변위와 빙저호 활동에 의한 수직변위가 모두 InSAR 영상에 포함됨
- 빙상 흐름속도가 시간에 따라 일정하다고 가정하면, 두 개의 InSAR 영상을 차분하는 DDInSAR 기법으로 빙저호 활동의 시간적 변화에 의한 수직변위만을 관측할 수 있음
- 그러나 David 빙하의 경우 흐름속도가 빠르고 시간에 따른 흐름속도의 변화가 발생 가능하며, 빙저호 활동성 관측을 위한 DDInSAR 수행의 가정(시간에 따라 일정한 빙상 흐름속도)이 성립하지 않을 수 있음
- 이 연구에서는 두 개의 서로 다른 궤도(ascending, descending)에서 획득된 DDInSAR로부터 빙상의 흐름속도 변화가 보정된 빙저호 지표변위 산출
- InSAR는 레이더 관측방향(line-of-sight, LOS)으로 변위를 관측하며, 이때 빙상 흐름에 대한 3차원 벡터($\vec{d} = (d_x, d_y, d_z)$)는 ascending 및 descending 궤도의 LOS 벡터($\hat{l}_a, \hat{l}_d$)와 관측된 변위(d_a, d_d), 수직 단위벡터($\hat{z}$)를 이용하여 다음과 같이 정의됨(Seo *et al.*, 2019)

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{l}_a \\ \hat{l}_d \\ \hat{z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_a \\ d_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 수직 단위벡터와 흐름에 대한 단위벡터($\hat{d}$)의 외적을 통해 평면상의 normal 벡터($\hat{n}$)를 구할 수 있으며, 이를 통해 ascending 및 descending 궤도의 DDInSAR 변위(dd_a, dd_d)로부터 3차원 벡터($\vec{dd} = (dd_x, dd_y, dd_z)$)를 아래와 같이 구할 수 있음

$$\begin{bmatrix} dd_x \\ dd_y \\ dd_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{l}_a \\ \hat{l}_d \\ \hat{n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} dd_a \\ dd_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

- 여기서 dd_x, dd_y 는 DDInSAR 변위에 포함된 빙상 흐름의 시간적 변화 성분이며, dd_z 는 빙상 흐름의 변화가 제외된 빙저호 지표변위를 나타냄
- 그림 20은 DDInSAR 변위의 빙상 흐름속도 보정 알고리즘을 David 빙하 주변에서 신

규로 탐지된 빙저호에 적용한 결과 중 하나로, 좌측 영상은 DDInSAR 영상, 우측 영상은 DDInSAR에 포함된 수평 방향 변위 성분(빙상 흐름의 시간적 변화)을 지시함

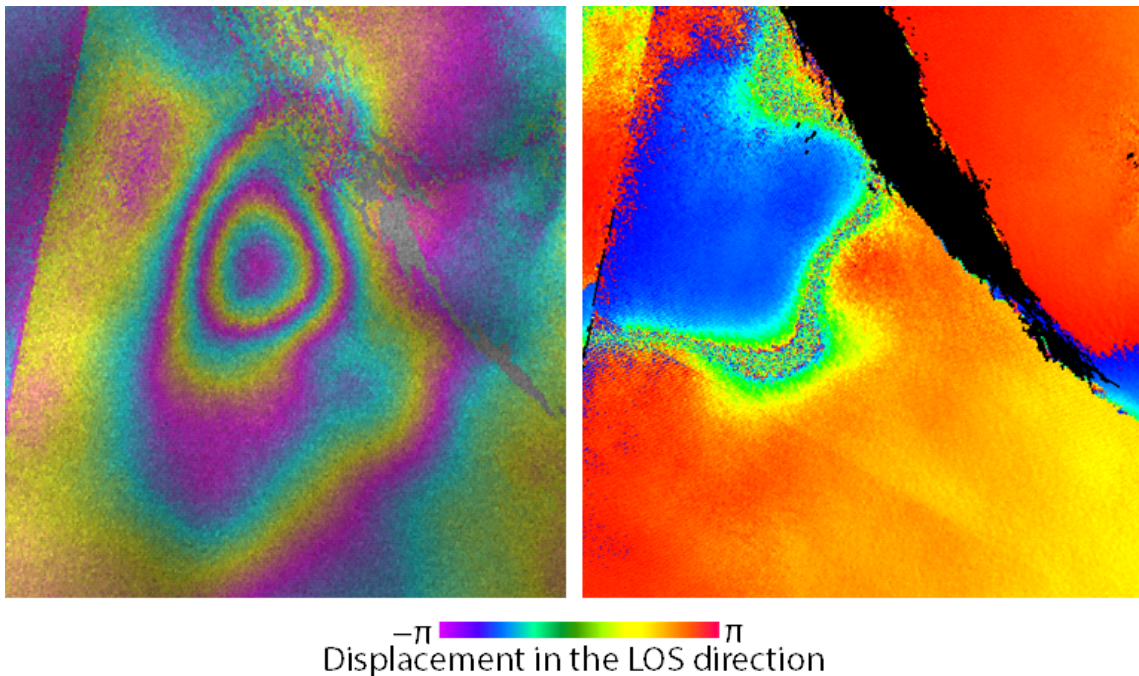


그림 20. David 빙하 주변 빙저호에 대한 DDInSAR 영상 및 DDInSAR에 포함된 빙하 흐름 성분.

- DDInSAR 변위에 빙상의 흐름속도 변화 성분이 포함되어 있음을 확인함
- David 빙하 주변 빙저호 모니터링에 DDInSAR를 적용할 경우 빙상 흐름속도 보정이 필수적임을 확인함

○ 고도계 관측자료를 이용한 DDInSAR 기반 빙저호 탐지 결과 평가

- 이 연구에서는 위에서 설명된 알고리즘을 사용하여 DDInSAR 영상으로부터 David2 빙저호에 대해 빙상 흐름속도가 보정된 표면변위를 산출함
- 인공위성 고도계로 관측된 빙저호 지역 지표고도 변화는 DDInSAR로 산출된 빙저호 상부 빙상 표면변위의 비교 및 검증에 활용될 수 있음
- 그러나 SAR 영상 관측 시기와 고도계 관측 시기의 불일치로 인해 DDInSAR에서 산출된 빙상 표면변위의 정량적 비교 및 검증이 불가능하였음
- 이에 따라 빙상 흐름속도가 보정된 DDInSAR에서 표면변위가 발생하는 영역에 대해 고도계 관측 지표고도의 변화 여부를 파악함으로써 DDInSAR를 통한 빙저호 활동성

모니터링의 신뢰도를 평가하고자 하였음

- 그림 21은 2016년 5월 21일과 6월 14일의 Sentinel-1 SAR 간섭쌍(interferometric pair) 및 2020년 4월 5일과 4월 29일의 간섭쌍을 이용하여 생성한 빙하 흐름이 보정된 DDIInSAR 영상에 Smith *et al.* (2009)에서 인공위성 고도계 관측을 통해 정의된 David2 빙저호 영역(파란색 폴리곤)을 도시한 것임

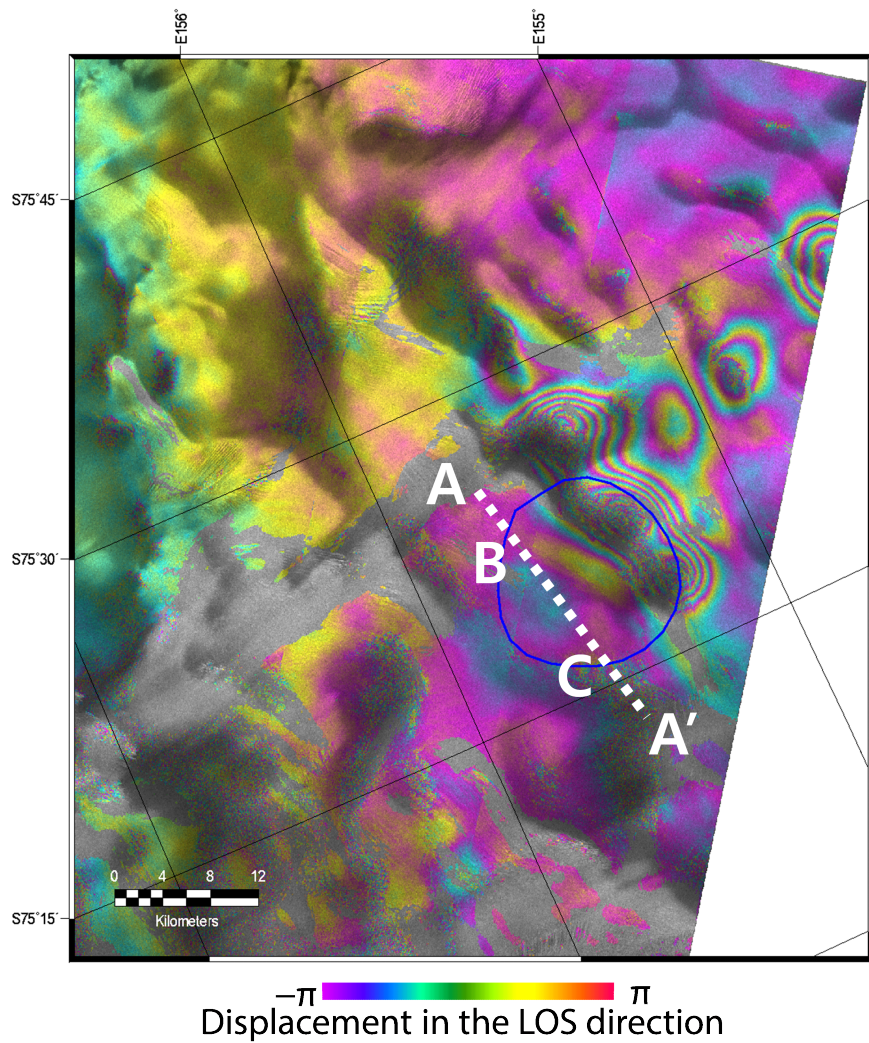


그림 21. David2 빙저호 지역에 대한 Sentinel-1 DDIInSAR 영상과 위성 고도계 관측으로 정의된 빙저호 영역.

- A-A'은 지표고도를 관측한 ICESat-2 레이저 고도계의 ground track이며, B와 C 지점은 기존에 보고된 빙저호 영역의 가장자리를 지시함
- 2019년 6월부터 2020년 9월까지 해당 ground track의 고도변화는 그림 22와 같음

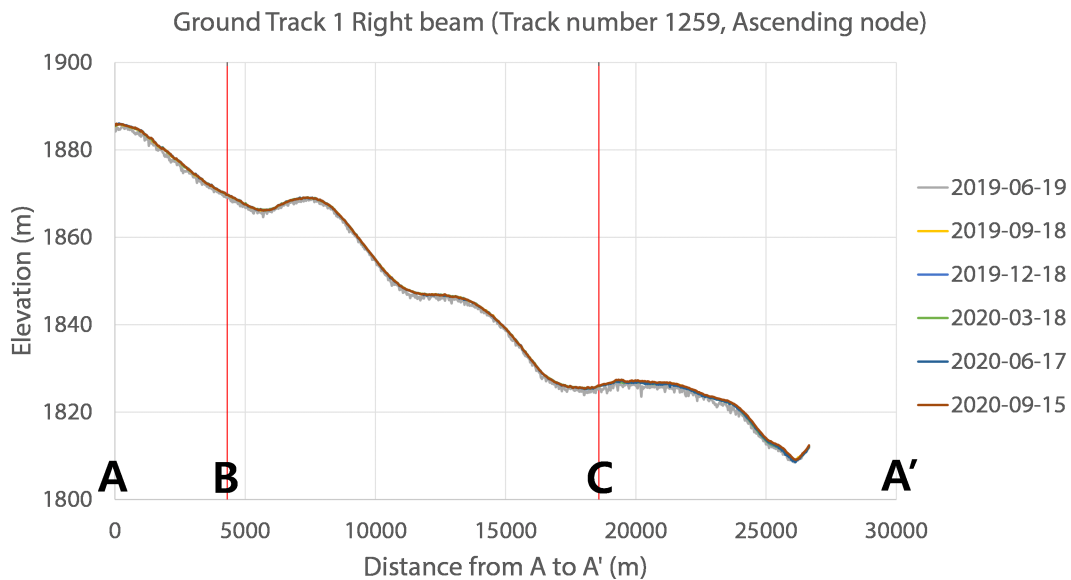


그림 22. ICESat-2 고도계로 정의된 David2 빙저호 영역에 대한 지표고도 변화.

- Smith *et al.* (2009)에서 인공위성 고도계 관측을 통해 정의된 David2 빙저호 영역 내에서 시간에 따른 고도변화가 거의 관찰되지 않음
- 아래 그림 23은 위의 DDIInSAR 표면변위를 통해 정의된 David2 빙저호 영역을 빨간색 폴리곤으로 나타낸 것으로, 빙저호 상부 표면변위가 폐합된 간섭띠로 명확하게 관찰되는 것을 확인할 수 있음

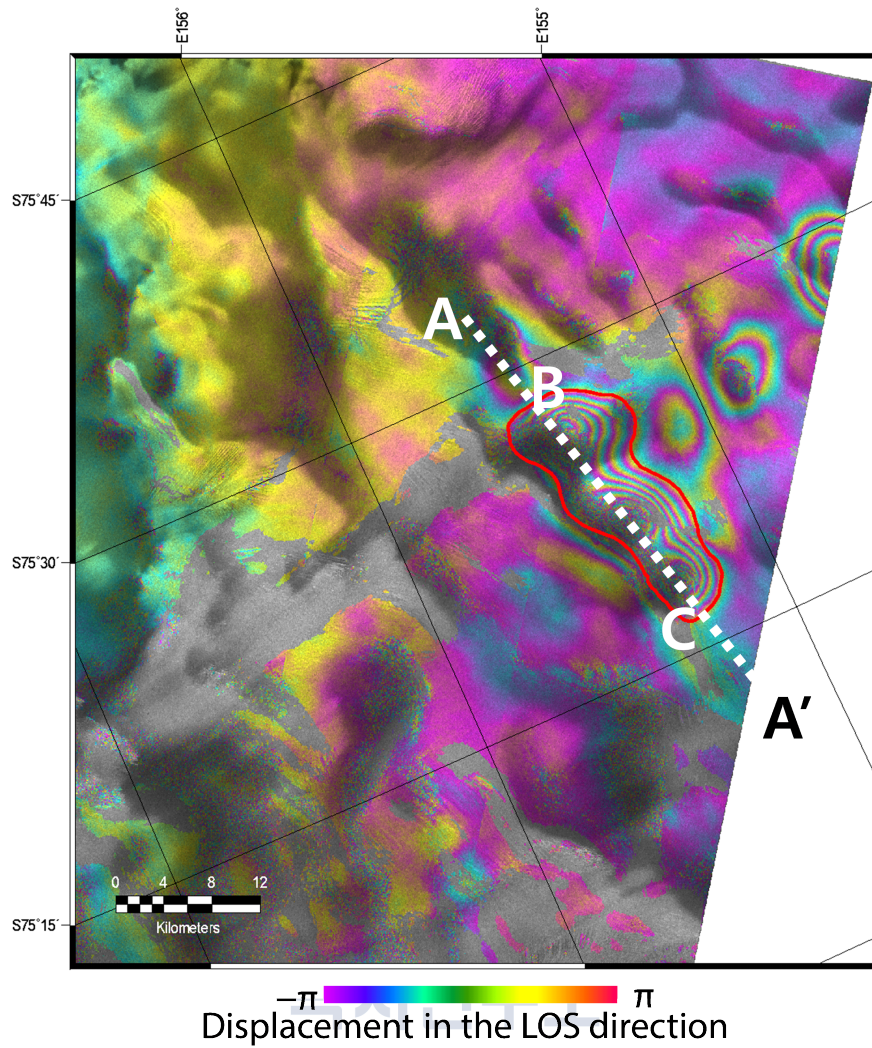


그림 23. David2 빙저호 지역에 대한 Sentinel-1 DDIInSAR 영상과 지표변위 관측으로 정의된 빙저호 영역.

- A-A'은 DDIInSAR에서 정의된 빙저호 영역에 대해 지표고도를 관측한 ICESat-2 레이저 고도계의 ground track이며, B와 C 지점은 빙저호 영역의 가장자리를 지시함
- 2019년 4월부터 2020년 10월까지 해당 ground track의 고도변화는 아래 그림 24와 같음

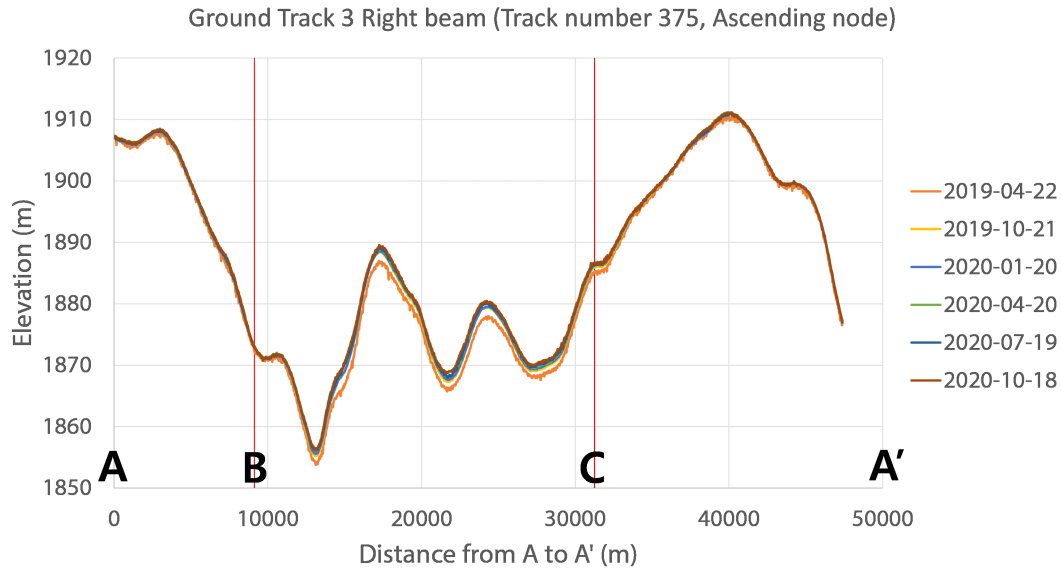


그림 24. DDIInSAR로 정의된 David2 빙저호 영역에 대한 지표고도 변화.

- 지표고도의 변화는 DDIInSAR에서 정의된 빙저호 영역인 B와 C 사이에서 관측기간 동안 최대 3 m 발생하였는데, 이는 빙저호의 수위 변화에 따른 것임을 추정할 수 있음
- 위성 고도계 관측 결과로부터 빙상 흐름속도가 보정된 DDIInSAR 기반 빙저호 탐지 결과가 정확함을 확인함

나. 빙저호 수위 및 수체 변화 해석

○ 빙저호 상부 빙상 표면변위의 시계열 변화 정보 정량적 구축 및 해석

- 빙저호 상부 빙상 표면변위의 시계열 관측을 위해 2017년부터 2021년까지 David 빙하 주변 빙저호 지역이 촬영된 Sentinel-1 IW 모드의 SAR 영상을 총 350장 구축
 - 1) relative orbit number: 69, slice number 2, ascending pass에 대해 112장
 - 2) relative orbit number: 72, slice number 7, descending pass에 대해 119장
- 각각의 패스에서 24일의 시간적 기선거리를 가지는 DInSAR 영상을 생성
 - 1) relative orbit number: 69, slice number 2, ascending pass에 대해 105개
 - 2) relative orbit number: 72, slice number 7, descending pass에 대해 114개
- 시계열 InSAR 영상을 이용하여 DDIInSAR 영상을 생성하고, 본 연구에서 정의한 빙상 흐름속도 보정 알고리즘을 통해 정밀한 빙저호 지표변위를 산출하였음

- 빙상 흐름속도 보정을 위해서 ascending과 descending 궤도의 SAR 자료가 모두 요구되는데, David2 빙저호 지역의 경우 2017년 2월부터 두 궤도의 자료가 획득되었음
- 따라서 David2 빙저호의 활동성에 대한 시계열 모니터링은 2017년부터 수행됨
- 그림 25는 서로 다른 시기의 David2 빙저호에 대한 DDIInSAR 영상으로, 간섭띠의 변화율이 시간에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있고 이는 빙저호 상부 빙상 표면변위의 변화속도가 시간적으로 변화함을 지시함

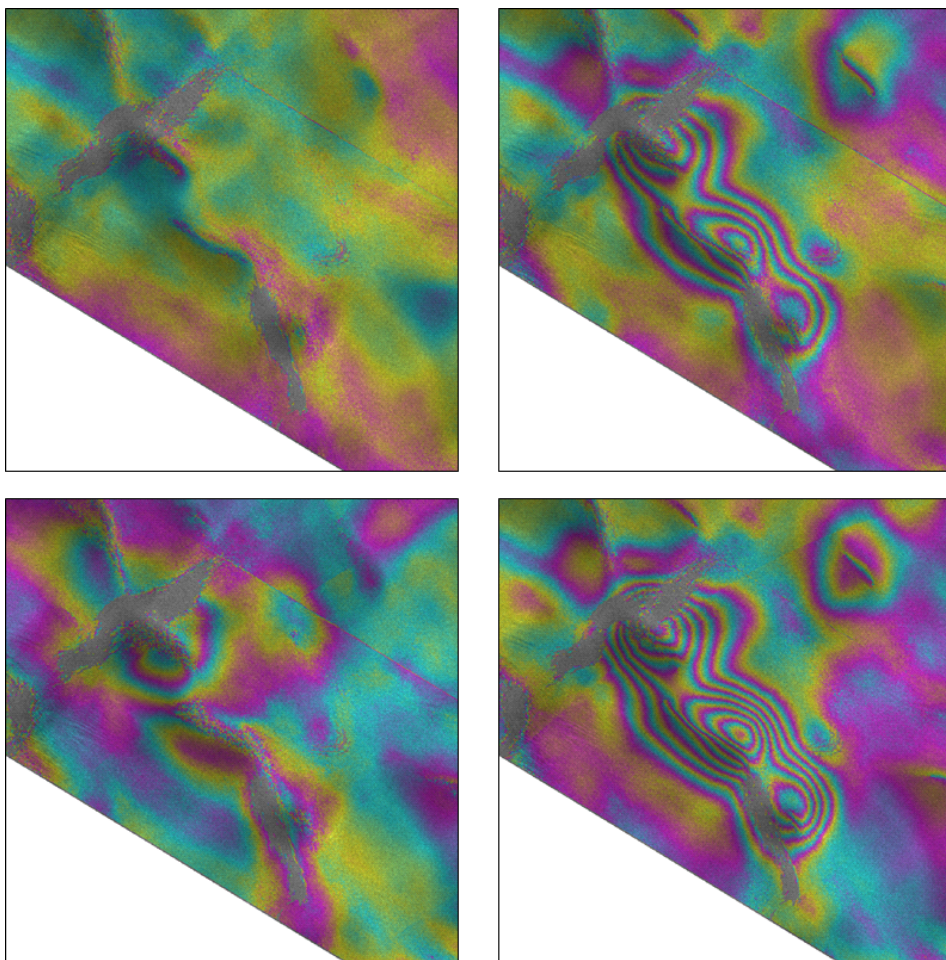


그림 25. David2 빙저호에 대한 서로 다른 시기의 DDIInSAR 영상. 간섭띠 변화율이 영상마다 다르게 나타남을 확인할 수 있음.

- 그림 26에서 청색 실선은 DDInSAR에서 관측된 David2 빙저호 상부 빙상 표면변위의 시계열 변화로, 2017년 2월 20일과 3월 16일의 간섭쌍을 이용하여 생성한 InSAR 영상을 기준으로 산출된 LOS 방향의 변위임
- 즉, 2017년 2월 20일과 3월 16일 사이에 발생한 변위를 기준으로 계산된 시간에 따른 변위의 변화를 나타냄

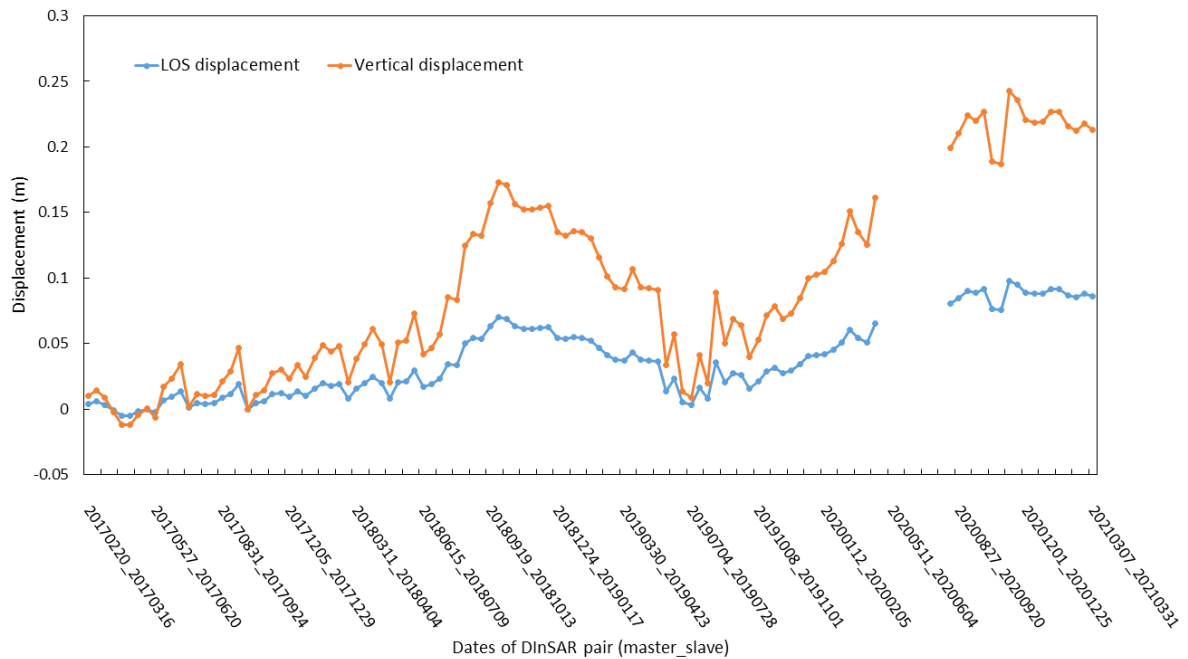


그림 26. David2 빙저호에 DDInSAR 관측 지표변위의 시계열 변화. 빙저호 활동에 의한 지표변위의 변화 속도를 나타냄.

- DDInSAR 변위는 변위의 시간적 변화를 지시함
- 따라서 위의 그림은 David2 빙저호 지표변위의 변화가 시간에 따라 매우 변동적임을 나타냄
- David2 빙저호 상부 빙상 표면변위는 2017년부터 2018년까지 거의 일정한 속도로 변화하였으나, 그 이후에는 급격한 시간적 변동성을 나타냄을 확인할 수 있음

○ 보정된 빙저호 상부 빙상 표면변위를 이용한 빙저호 수위 및 수체 변화 해석

- 빙상의 흐름속도가 보정된 DDInSAR에서 LOS 방향의 빙저호 지표변위는 빙저호의 수위변화에 따른 수직변위로 변환될 수 있음

- 위 그림 26에서 주황색 실선은 David2 빙저호에 대한 수직변위의 시계열 변화로, 2017년 2월 20일과 3월 16일 사이의 수직변위를 기준으로 산출된 것임
- 수직변위는 DDInSAR로 관측된 변위를 레이더 입사각을 이용하여 변환한 것으로, LOS 방향 변위(청색 실선과) 서로 동일한 시간적 변화 패턴을 보임
- 따라서 David2 빙저호의 수위변화는 시간에 따라 매우 변동적이며, 2017년부터 2018년까지 거의 일정한 속도로 변동하였으나, 그 이후에는 급격한 변동성을 나타냄을 확인할 수 있음
- 2017년과 2021년 사이에 인공위성 영상레이더로 관측한 David2 빙저호 지역의 수직방향 지표변위 변화는 최대 25 cm임
- 빙저호 수위변화에 따른 빙상 표면변위는 빙상의 두께, 점성, 흐름속도에 따라 그 양이 달라지기 때문에 이 연구에서 분석된 변위의 변동량은 빙저호 수위변화의 변동량을 그대로 지시하지는 않음
- 따라서 DDInSAR 기법으로는 빙저호 수위변화의 변동 추세를 확인할 수 있으며, 정량적인 수위 변화량 추정을 위해서는 IPR 등의 지구물리탐사 자료가 복합적으로 활용될 필요가 있음



다. 빙저호 상부 빙상의 변화 및 물리적 특성 추정

○ 고해상도 광학영상을 이용한 빙저호 상부 빙상의 표면변화 분석

- 빙저호의 활동성에 따라 상부 빙상에는 지속적인 변위가 발생하며, 이로 인한 표면의 변화(예: 크레바스 형성 및 지형 기복의 변화)가 발생할 수 있음
- 현재까지 보고된 David 빙하 주변 빙저호에 대해 2014년부터 획득된 Sentinel-1 SAR 영상의 후방산란을 관측하였으나, 빙저호 표면에서 유의미한 변화를 발견할 수 없었음
- 이는 Sentinel-1 SAR 영상의 공간해상도(20 m급)가 빙상 표면의 변화를 관측하기에 충분하지 않은데 기인함
- 이에 이 연구에서는 30 cm급 공간해상도를 가지는 고해상도 광학영상인 WorldView-2 영상을 이용하여 빙저호 상부 빙상 표면의 변화를 파악하였음
- 아래 그림 27은 David2 빙저호에서 큰 빙상 표면변위가 나타나는 영역에 대해 2015년 10월 22일(좌)과 2016년 11월 13일(우)에 촬영된 WorldView-2 전정색 영상임

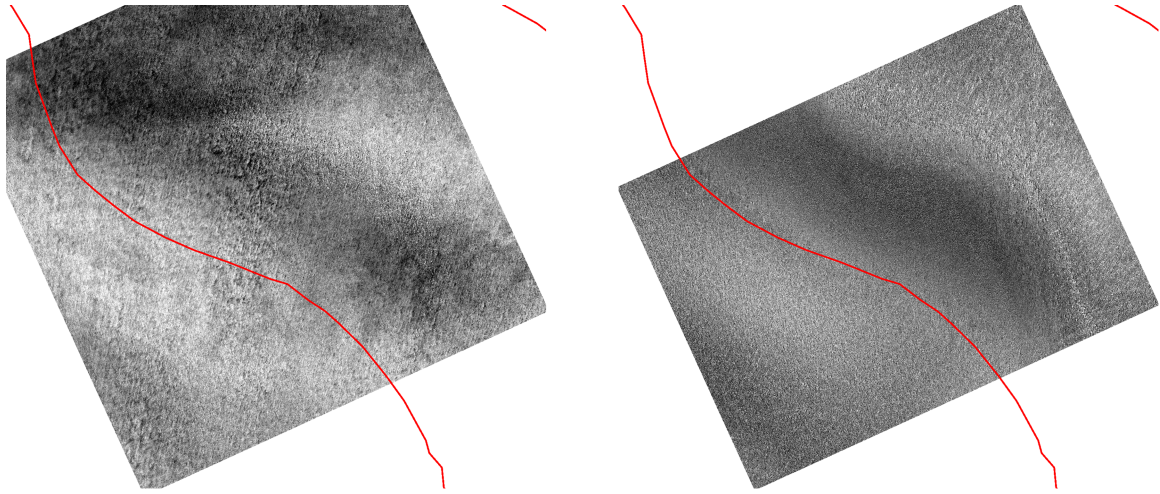


그림 27. David2 빙저호에 대한 WorldView-2 영상. (좌) 2015년 10월 22일, (우) 2016년 11월 13일.

- 빙저호 상부 빙상 표면에서 매우 작은 feature들이 분포하고 있는데, 이는 빙저호 활동에 따라 빙상이 상하로 움직임으로 인해 표면에 형성된 소규모의 크레바스 군집으로 파악됨
- 2015년 영상의 경우 노이즈가 심하여 표면 관측이 다소 어려우나, 빙저호의 변위가 가장 크게 나타나는 부분에서 지형의 기복(영상의 음영)이 있음을 확인할 수 있음
- 이와 같은 크레바스 군집과 지형의 기복은 빙저호 영역 내에서도 변위가 가장 크게 발생하는 부분에 집중됨을 알 수 있음
- 빙저호 상부 빙상의 표면변화는 시간에 따라 지속적으로 발생하고 변화 양상 또한 달라질 것으로 판단됨

○ 빙저호 상부 빙상 표면변위 모델링을 통한 빙상의 탄성특성 추정

- 빙저호 수위 변화는 상부 빙상의 휨을 일으키며, 이는 빙상의 두께와 탄성특성(영률, 포아송비 등)에 의존함
- DDIInSAR로 관측된 빙저호 상부 빙상 표면변위의 공간적 변화를 모델링하면 빙체의 탄성특성 추정이 가능함
- 이 연구에서는 David2 빙저호에 대해 DDIInSAR 영상으로부터 수직변위 profile을 구하고, 이에 대한 1차원 휨 모델링(bending modeling)을 적용하여 빙상의 영률을 추정함
- 1차원 탄성 휨 모델은 거리 x 에 따른 휨(수직변위, h)을 아래와 같이 묘사함(Vaughan, 1995)

$$h(x) = h_{\max} [1 - e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)] \quad (3)$$

- 위 식에서 $h_{\max}$ 는 최대 수직변위, β 는 탄성감쇠계수로 아래와 같이 정의됨

$$\beta^4 = 3\rho g \frac{1 - \nu^2}{Eh^3} \quad (4)$$

- 위 식에서 ρ 는 담수 밀도, g 는 중력가속도, ν 는 포아송비(0.3), E 는 영률, h 는 빙상 두께를 지시함
- 아래 그림 28은 David2 빙저호에서 관측된 수직변위(파란색 점)와 1차원 휨 모델을 통해 모사한 수직변위(빨간색 실선)를 나타냄

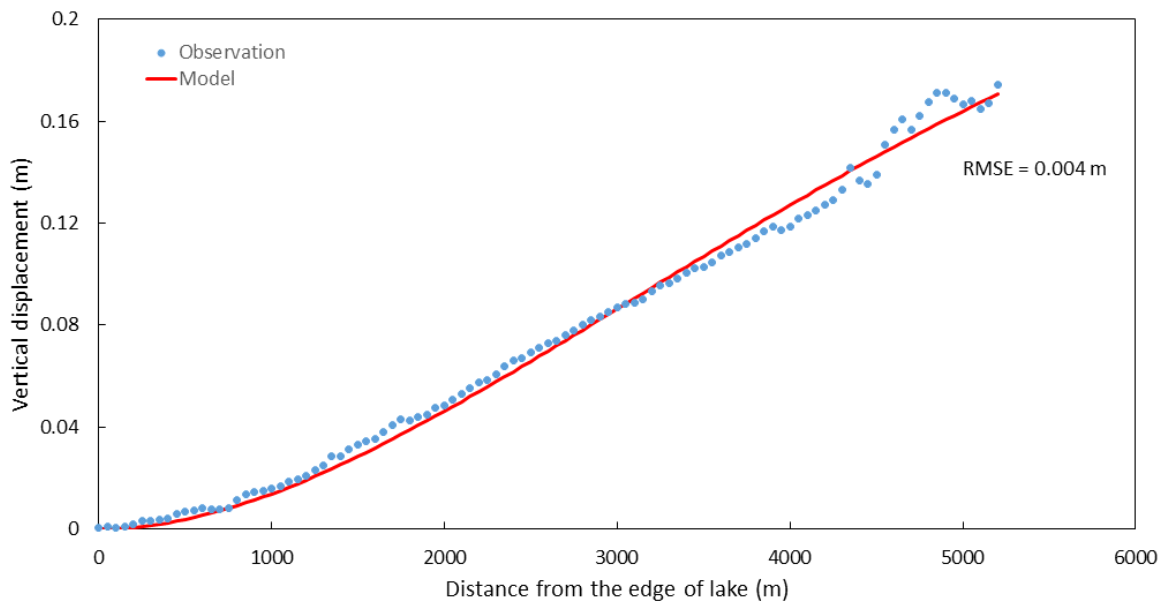


그림 28. David2 빙저호에 대한 DDIInSAR로 관측된 변위(청색 점선)와 1차원 탄성 모델로 모사된 변위(적색 실선).

- 빙하 휨 모델을 통해 산출된 David2 빙저호 상부 빙상의 탄성감쇠계수는 0.257 km^{-1} 이며, 변위가 관측된 부분의 Bedmap2 ice thickness인 1800 m를 고려하면 빙상의 영률은 1.06 GPa로 추정됨
- 이 연구에서 추정된 빙상의 탄성특성은 빙저호 수위변화와 빙상 표면변위가 같다는 가정 아래 수행되었기 때문에 이로 인한 오차를 가질 수 있음
- 빙상 두께가 두꺼울수록 빙저호의 수위변화량보다 빙상 표면변위량이 작을 수 있으며, 이에 따라 David2 빙저호 지역 빙상의 영률은 이 연구에서 추정된 값보다 클 수 있음

3. 빙저호 활동성 변화와 빙상 유동의 상호 영향 파악

가. 빙저호 활동성의 시계열 변동 분석

○ 빙저호 활동성 분석을 위한 최적의 레이더 간섭기법 조건 선택

- 이전 연도 연구수행을 통해 Sentinel-1 SAR 자료에 DDInSAR 기법을 적용하여 빙저호의 수위 변화 속도 관측이 가능함을 파악한 바 있음
- David 빙하 주변 빙저호들은 수위 변화의 속도가 상대적으로 빠르지 않기 때문에 DDInSAR에 사용되는 레이더 간섭쌍의 시간 기선거리가 길수록 빙저호 상부 빙상 표면변위가 더욱 명확하게 관측될 수 있음
- 그러나 레이더 간섭쌍의 시간 기선거리가 길어질수록 비상관성(decorrelation)이 커질 수 있으며, 이는 InSAR의 변위 관측 효율을 감소시킴
- 또한 시간 기선거리가 길어질수록 레이더 간섭쌍의 공간적 기선거리(수직 기선거리, perpendicular baseline)가 커질 수 있으며, 레이더 간섭기법의 지표변위 관측 민감도를 감소시키는 요인이 됨
- 따라서 빙저호 상부 빙상 표면변위에 대한 DDInSAR 민감도를 높이기 위해서는 레이더 간섭쌍에 대한 최적의 시간 기선거리 조건을 선택할 필요가 있음
- 본 연구에서는 David 빙하 상류 지역(그림 29)에 대해 2017년 2월부터 2022년 2월까지 12일 간격으로 획득된 Sentinel-1 IW 모드의 SAR 영상을 총 139장 구축함(그림 29)

: relative orbit number 72

: slice number 7

: ascending pass

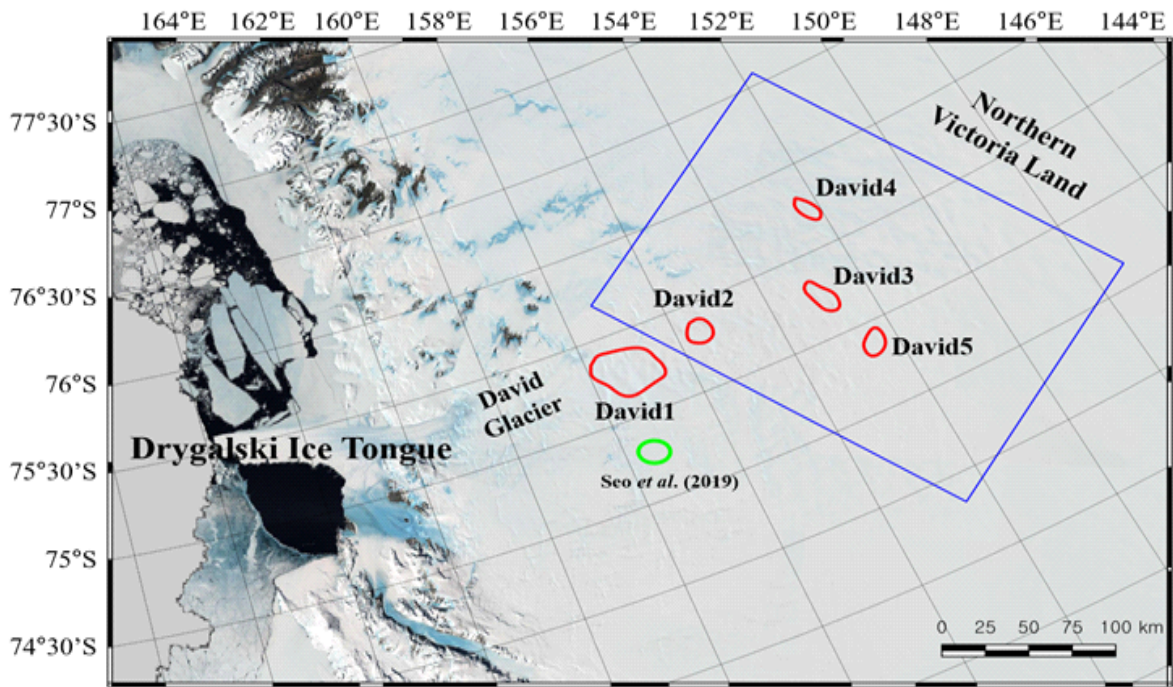


그림 29. David 빙하 구역의 빙저호 탐지 지역. 파란색 사각형은 Sentinel-1 관측 범위. 빨간색 폴리곤은 과거 인공위성 고도계 관측을 통해 발견된 빙저호 영역을 나타냄. 초록색 폴리곤은 이 연구과제 수행 이전에 레이더 간섭기법으로 발견된 빙저호 영역을 의미함.

- 연구지역에서는 인공위성 레이저 고도계 관측을 통해 4개의 빙저호(David2, David3, David4, David5)가 보고된 바 있으며, 본 연구를 통해 추가적인 빙저호가 존재할 것으로 추정되는 지역임
- 가장 높은 민감도로 빙저호 활동성을 관측할 수 있는 레이더 간섭쌍 조건 선택을 위해 Sentinel-1 SAR 영상으로부터 12, 24, 36, 48일의 시간 기선거리를 가지는 간섭도를 생성하였음
- 12, 24, 36, 48일 시간 기선거리의 레이더 간섭도로부터 생성된 DDIInSAR 영상(그림 30)에서는 빙저호의 수위 변화 속도에 따른 표면변위가 폐합된 형태의 간섭띠로 나타남

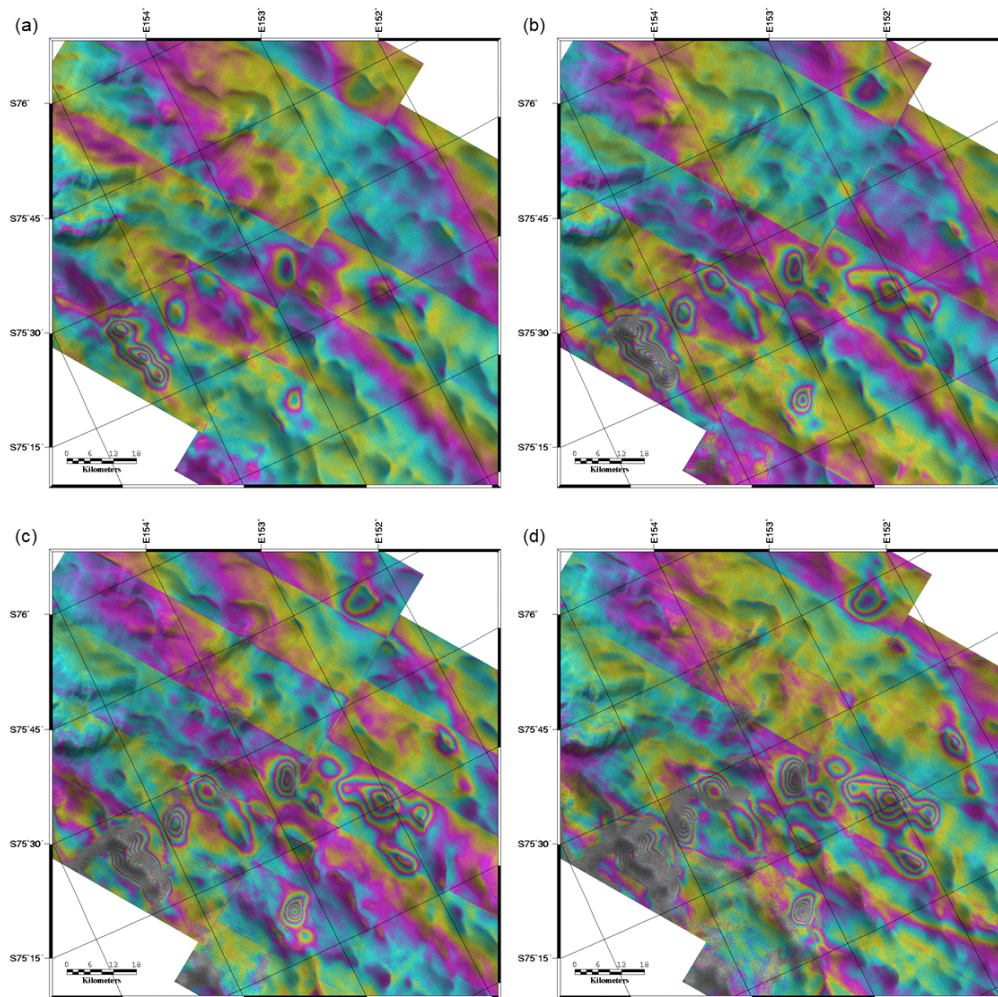


그림 30. (a) 12일, (b) 24일, (c) 36일, (d) 48일 시간 기선거리의 Sentinel-1 레이더 간섭쌍으로 생성한 DDInSAR 영상 예시.

- 시간 기선거리가 긴 간섭쌍을 사용할수록 DDInSAR 영상에서 빙저호의 표면변위를 지시하는 간섭띠의 개수(fringe density)가 많은 것을 확인할 수 있음
- 반면 레이더 간섭쌍의 시간 기선거리가 길어질수록 빙저호 표면변위가 나타나는 영역에서 긴밀도가 낮아 변위 관측 민감도가 떨어지는 것이 확인됨(그림 31)
- 모든 레이더 간섭 긴밀도 영상과 DDInSAR 영상을 종합하여 분석한 결과, 36일의 시간 기선거리의 간섭쌍을 이용한 DDInSAR가 David 빙하 주변 빙저호의 표면변위 관측에 가장 적합함을 확인하였음

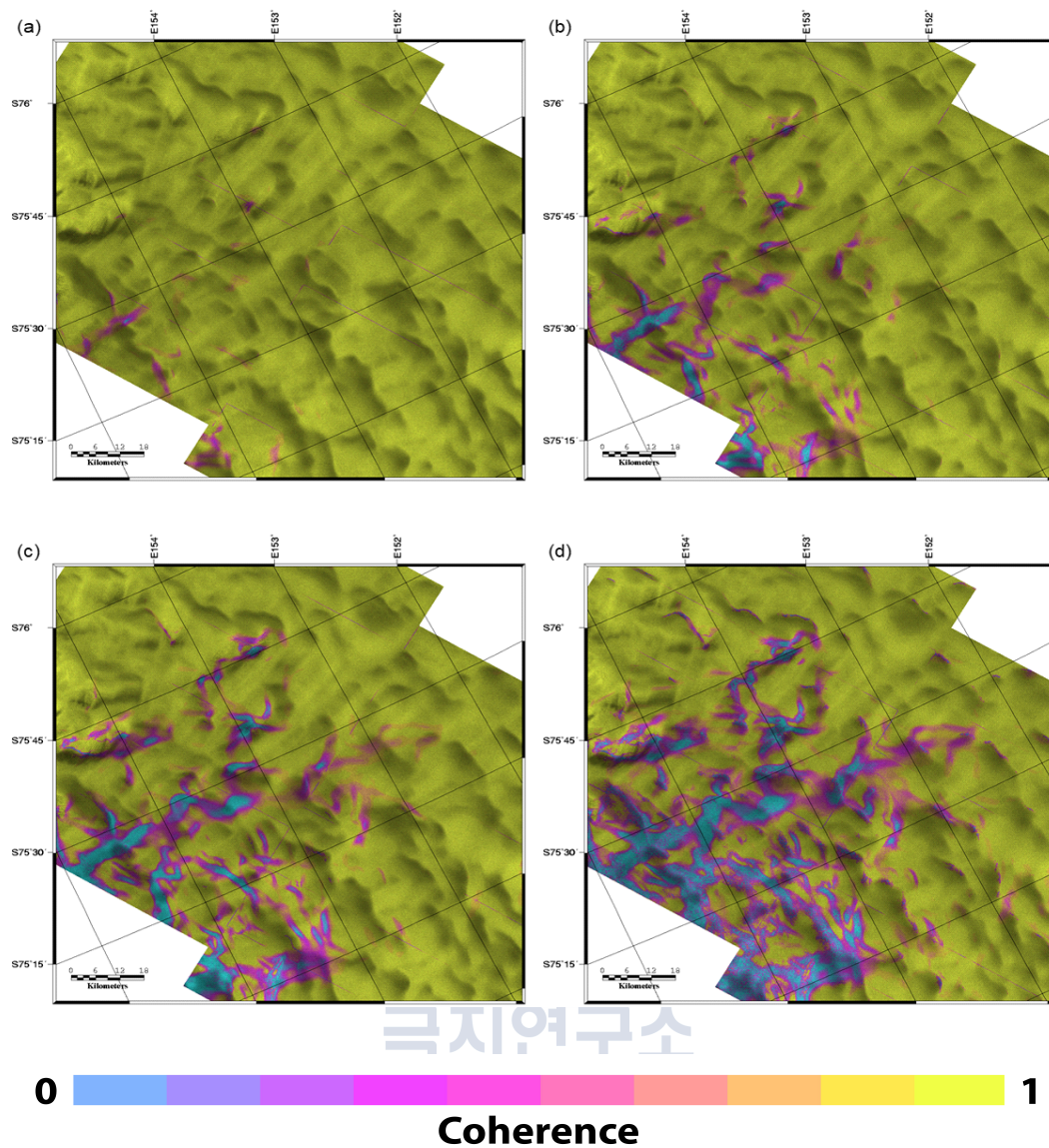


그림 31. (a) 12일, (b) 24일, (c) 36일, (d) 48일 시간 기선거리의 Sentinel-1 레이더 간섭 긴밀도 영상 예시.

- 또한 36일의 시간 기선거리를 가지는 레이더 간섭쌍들의 수직 기선거리는 ± 200 m 이 내로 매우 짧았으며(그림 32), 이는 DDIInSAR의 지표변위 관측 민감도가 높음을 지시함
- 이 연구에서는 2017년 2월부터 2022년 2월까지 36일의 시간 기선거리에 대한 Sentinel-1 영상레이더 차분 간섭기법(Differential Interferometric SAR, DInSAR)을 수행하고, 각각의 DInSAR 영상을 다시 차분하여 총 128장의 DDIInSAR 영상을 생성하였음

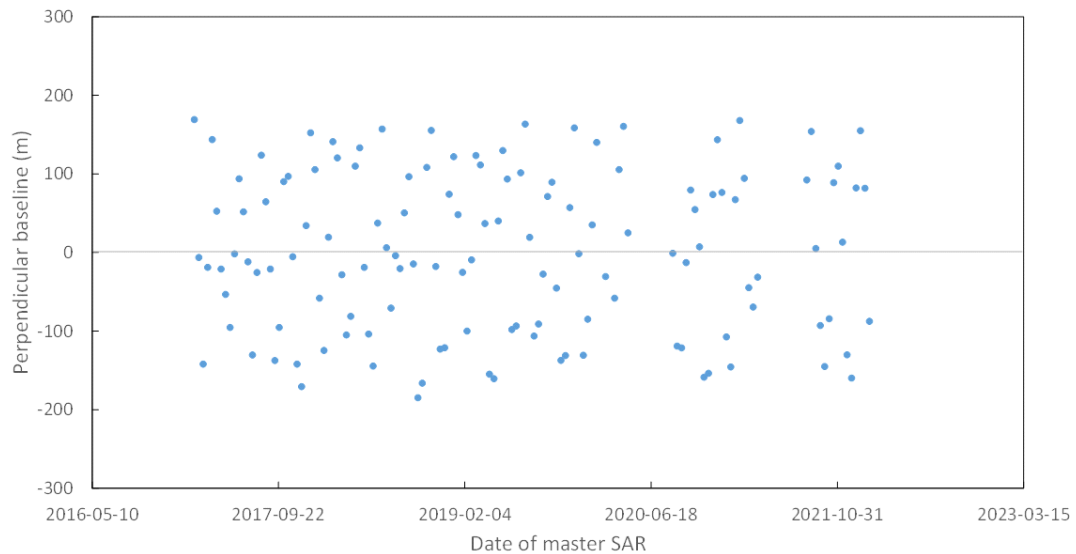


그림 32. 36일 시간 기선거리의 Sentinel-1 레이더 간섭쌍 수직 기선거리.

○ 영상레이더 간섭기법 기반 David 빙하 주변 빙저호 탐지 및 검증

- 36일 시간 기선거리의 DInSAR 영상들을 차분하여 그림 33과 같은 DDInSAR 영상들을 생성하였음
- 그림 32에서 빨간색 폴리곤은 기존에 위성 고도계 관측으로 보고된 빙저호 영역이며, 파란색 폴리곤은 DDInSAR 영상의 간섭띠 분석을 통해 추정된 빙저호 영역임
- David2와 David3 빙저호에 대해 DDInSAR에서 관찰된 간섭띠 분포는 기존에 인공위성 레이저 고도계(ICESat)로 관측된 빙저호 영역과 차이를 보였음
- DDInSAR 영상은 현재까지 빙저호가 탐지된 바 없는 영역에서 빙저호로 추정되는 지표변위 신호를 보임

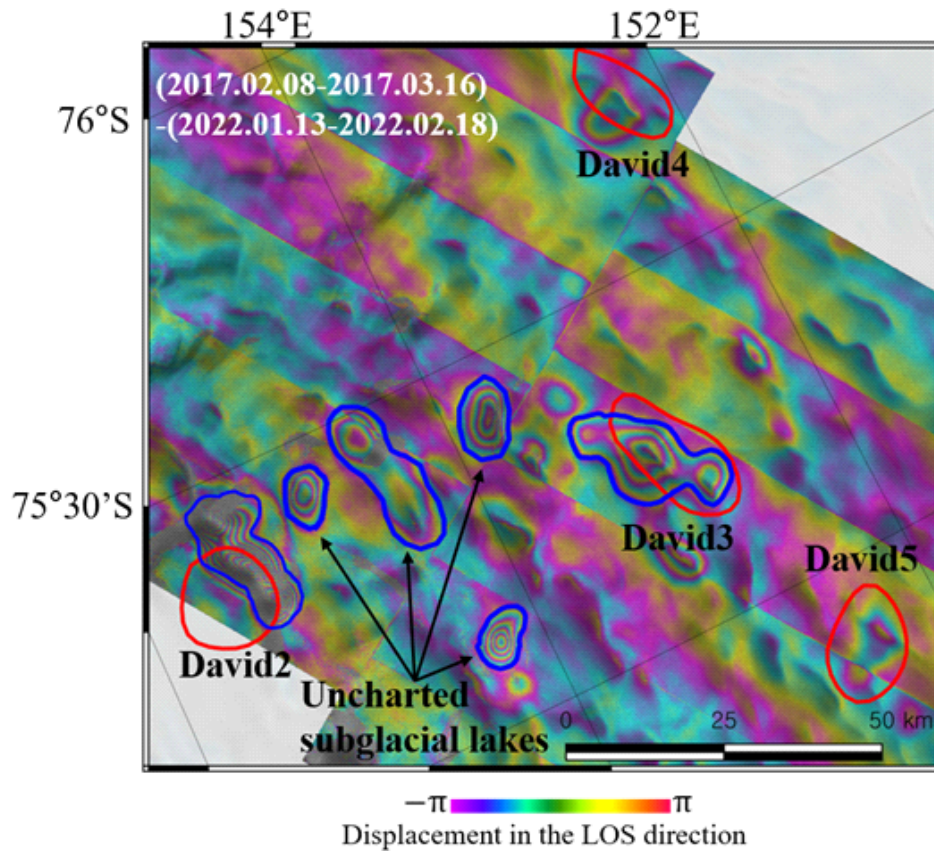


그림 33. 연구지역의 DDInSAR 영상 예시. 빨간색 폴리곤은 기존에 보고된 빙저호 영역이며, 파란색 폴리곤은 DDInSAR 영상의 간섭띠 분석을 통해 추정된 빙저호 영역.

- DDInSAR 간섭띠 패턴이 빙저호 활동에 의한 지표변위를 지시하는지 검증하기 위해 2019년 1월부터 2021년 5월까지 획득된 ICESat-2 ATL06 시계열 지표고도 자료를 분석하였음
- David3 빙저호에 대해 ICESat-2로 관측된 지표고도는 DDInSAR 영상에서 관찰되는 간섭띠 영역 내에서만 변화(2년간 최대 2 m) 하였으며, 간섭띠 영역 외에서는 시간적인 변화를 보이지 않았음(그림 34)

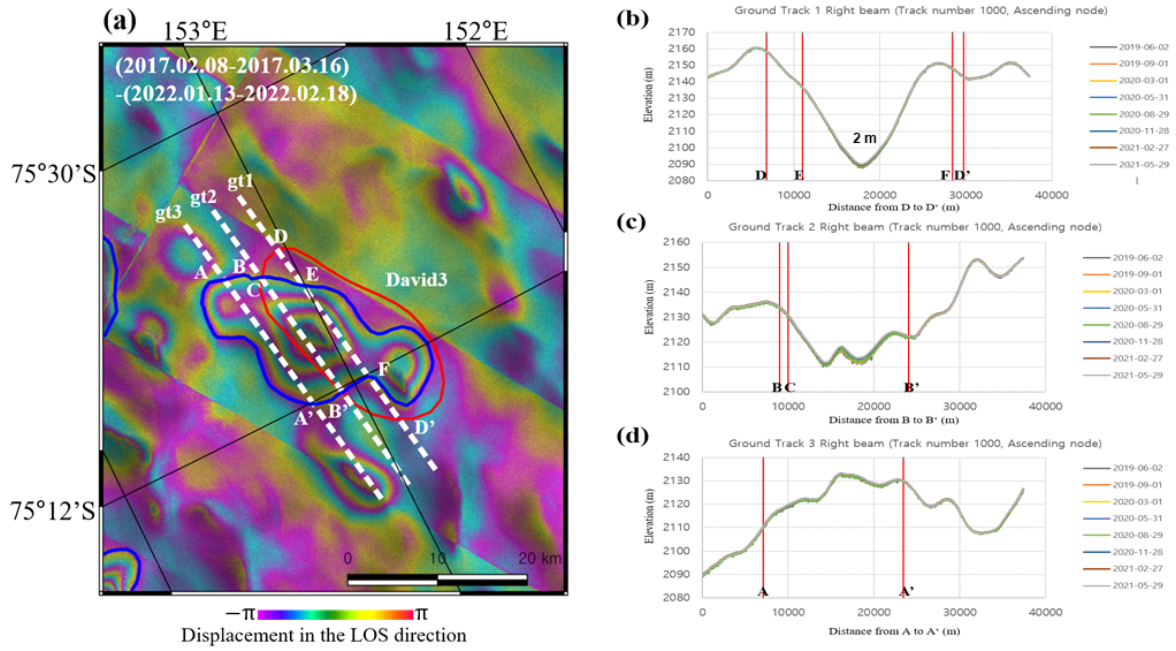


그림 34. David3 빙저호에 대한 시계열 지표고도 변화.

- 신규로 발견된 빙저호 추정 영역에서도 지표고도는 DDIInSAR 영상에서 관찰되는 간섭 띠 영역 내에서만 변화(2년간 최대 60 cm)한 것이 확인됨(그림 35)

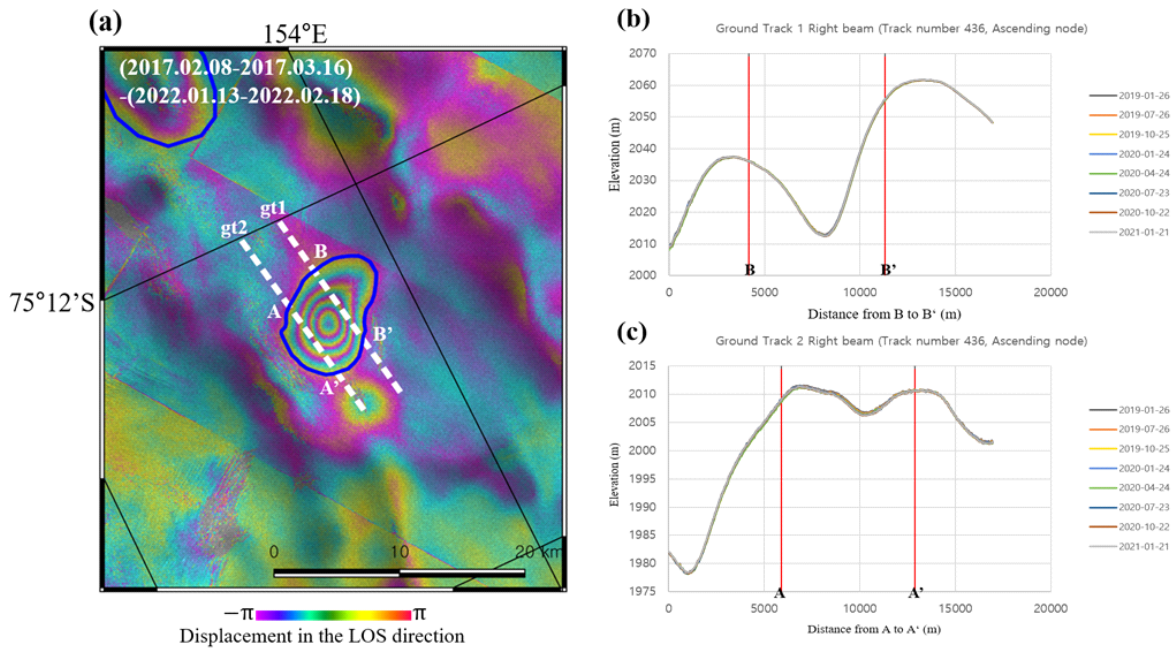


그림 35. 신규 탐지 빙저호에 대한 시계열 지표고도 변화.

- 인공위성 시계열 고도계 관측자료 분석을 통해 DDInSAR 영상에서 관찰되는 간섭띠가 빙저호의 활동성 변화에 의한 표면변위임을 확인함

○ 시계열 빙저호 수위 변화 속도 산출 및 활동성 변화 해석

- DDInSAR 영상의 간섭띠, 즉 위상 신호(phase signal)를 변위로 변환하기 위해 절대 위상 복원(phase unwrapping)을 수행함
- 이때, 빙저호에서 관찰되는 DDInSAR 간섭띠의 외부 영역을 0의 변위로 설정하였음
- 모든 DDInSAR 영상에서 빙저호들에 대한 레이더 관측 방향의 변위를 산출하고(그림 36), 이를 수직 방향의 변위로 환산하여 시간적 변화를 분석하였음

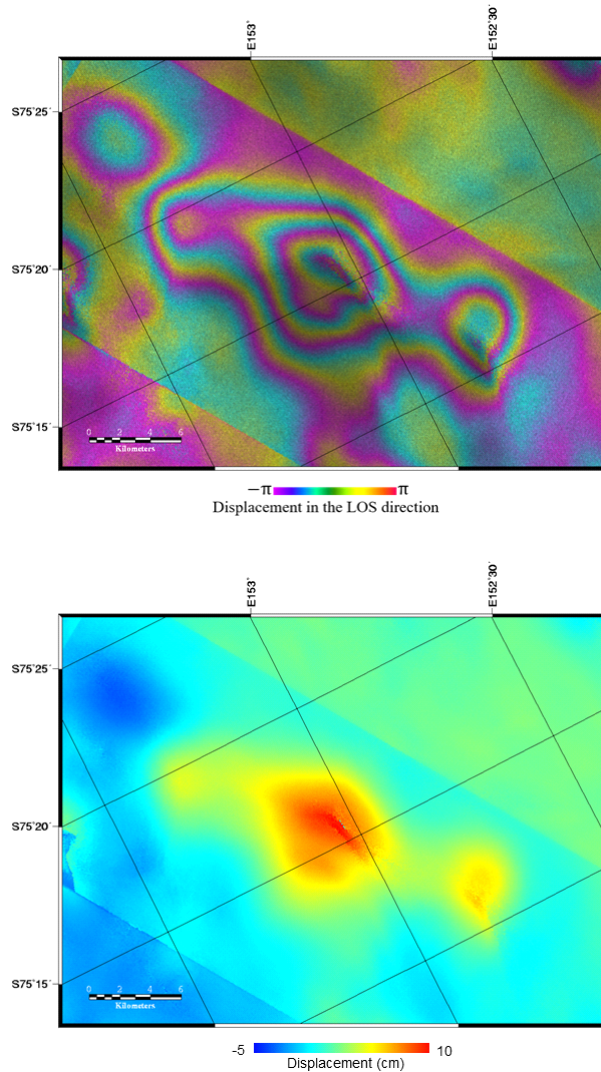


그림 36. David3 빙저호에 대한 DDInSAR 영상 및 수직 변위 지도.

- 그림 37은 DDInSAR에서 산출된 David2 빙저호 수직 변위의 시간적 변화, 즉 빙저호 수위 변화 속도의 변동(가속도)을 보여줌

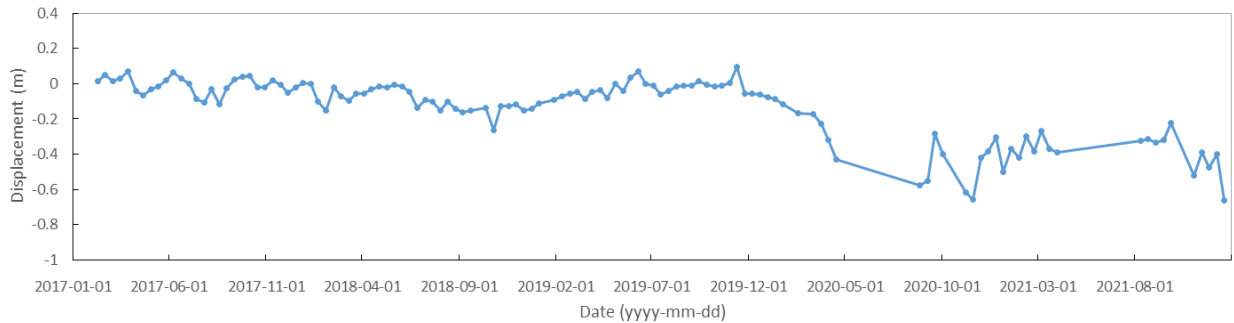


그림 37. David2 빙저호의 시계열 DDInSAR 변위.

- David2 빙저호의 수위 변화 속도는 2017년부터 2019년까지 거의 일정하였으나, 2020년부터 수위 변화 속도에 증감이 있음이 관측됨
- 이는 David2 빙저호가 최근 활동 특성의 변화를 보였음을 지시함
- David3 빙저호의 경우 2018년 4월과 7월, 2019년 2월과 2020년 4월 사이에 수위 변화 속도의 변동이 있었음(그림 38)

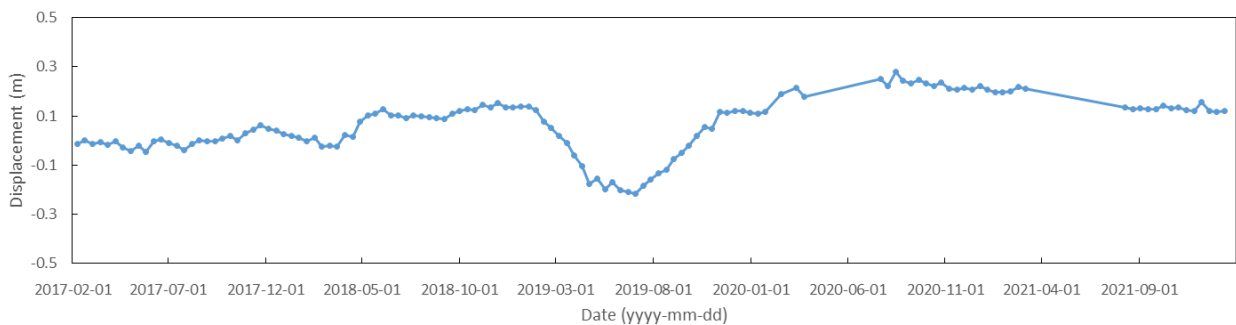


그림 38. David3 빙저호의 시계열 DDInSAR 변위.

- David2와 David3 빙저호의 활동성 변화는 서로 상이하였으며, 이는 두 빙저호가 서로 다른 수계에 위치하거나 충전-배수의 시간 간격이 다르다는 것을 의미함

나. 빙저호 주변 빙상의 유동속도 산출

○ 영상레이더 간섭기법을 활용한 빙저호 주변 지역 표면변위 산출

- 빙저호의 활동성은 주변 빙상의 유동 특성에 영향을 줄 수 있으며, 이를 규명하기 위해서는 빙저호의 활동성 정보뿐만 아니라 주변 빙상의 흐름속도 정보 구축이 필요함
- 이 연구에서는 David2 빙저호를 대상으로 빙저호의 활동성 변화와 주변 빙상의 유속 변화 사이의 상호관계를 파악하고자 함
- 이를 위해 David2 빙저호 주변 지역에 대해 Sentinel-1 SAR 영상을 이용하여 36일 시간 기선거리의 DInSAR를 수행하였음(그림 39)

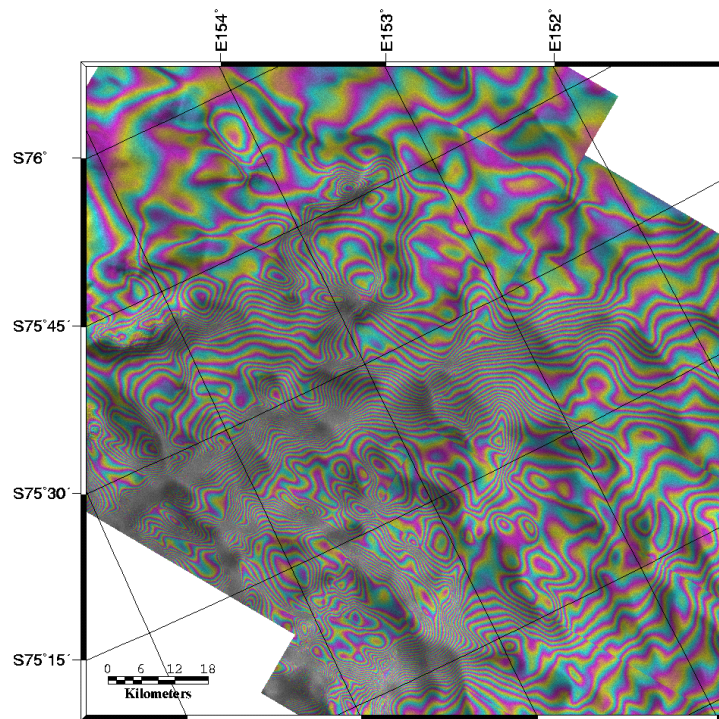


그림 39. 연구지역 DInSAR 영상 예시.

- DInSAR 위상 신호는 빙저호를 제외한 영역에서 빙상 표면의 흐름에 의한 변위를 지시함
- DInSAR 위상 신호의 절대 위상 복원을 통해 레이더 관측 방향으로의 표면변위를 그림 40과 같이 산출하였음
- 그림 40의 표면변위는 빙저호 영역(빨간색으로 표현되는 부분)을 제외하면 모두 빙상의 흐름에 의한 변위를 나타냄

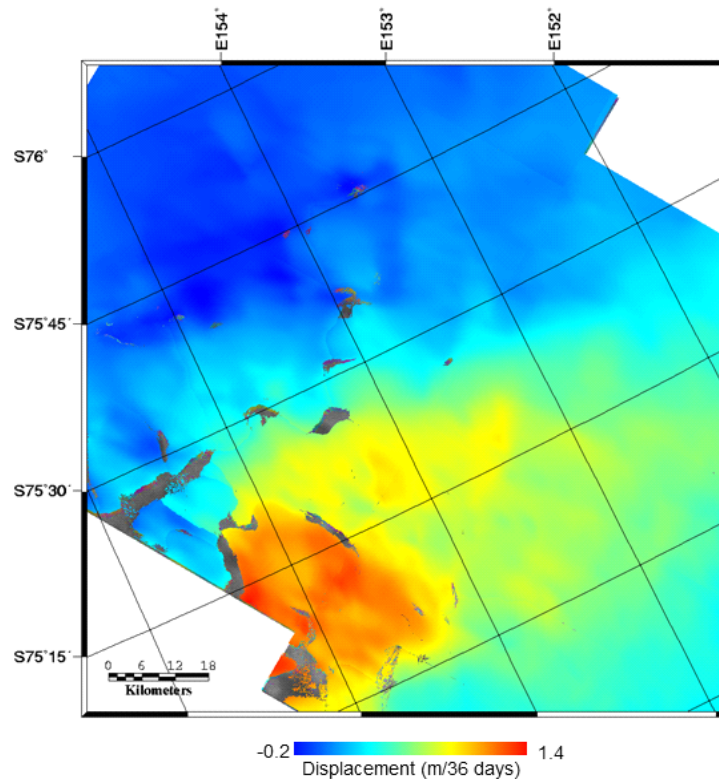


그림 40. 연구지역에 대한 빙상 유속 지도 예시.

○ 빙저호 주변 지역 표면유속의 시계열 변동성 정보 구축

- 총 126개의 DInSAR(36일 시간 기선거리) 영상으로부터 David2 빙저호 주변 지역의 빙상 표면유속 공간정보를 구축하였음
- 그러나 DInSAR는 레이더 관측 방향에 대한 변위만을 제공하므로, 이 연구에서는 실제 흐름방향에 대한 빙상 유속을 관측할 수 없었으며 레이더 관측 방향에 대한 유속 정보를 구축하였음
- David2 빙저호 주변 지역은 유속이 비교적 느리고 흐름방향이 거의 변화하지 않으므로 빙저호 활동성 변화에 따른 유속 변화를 분석할 때 레이더 관측 방향에 대한 유속 정보가 충분히 사용될 수 있으리라 판단되었음
- 그림 41은 빙상의 흐름방향을 기준으로 David2 빙저호의 직하류 지점에서 산출한 레이더 관측 방향으로의 시계열 표면유속을 보여줌
- 레이더 관측 방향으로의 표면유속은 2019년까지 6 - 7 m/yr 내외를 유지하다가 2020년 이후 시간적 변동성이 크게 나타남을 볼 수 있음

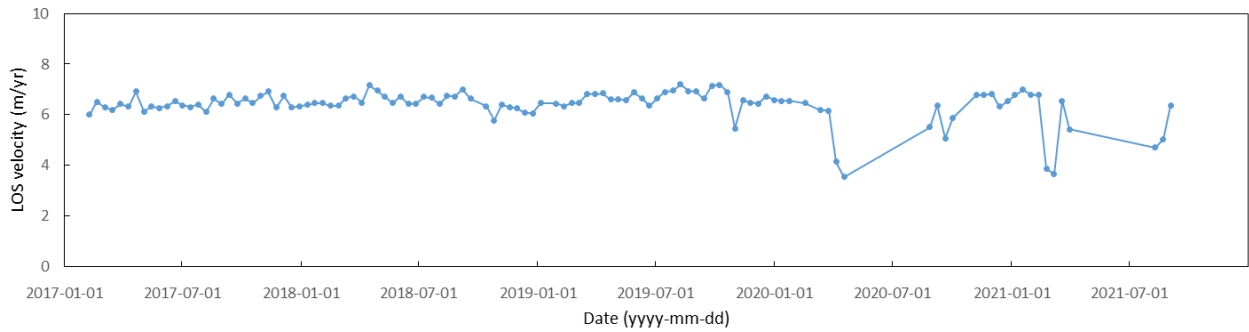


그림 41. David2 빙저호 주변 빙상의 시계열 표면유속(레이더 관측 방향).

다. 빙저호 활동성과 빙상 유동 사이의 상관관계 파악

○ 빙저호 수위변화 속도에 따른 빙상의 국지적 흐름속도 변동성 해석

- David2 빙저호의 활동성 변화와 주변 빙상 유속의 변화 사이의 상호관계 파악을 수행하였음
- 먼저 그림 13의 시계열 빙상 유속으로부터 유속의 시간적 변화(가속도)를 산출하고 이를 DDInSAR에서 관측된 빙저호의 표면변위, 즉 빙저호 수위 변화 속도의 시간적 변화(가속도)와 비교하였음(그림 42)

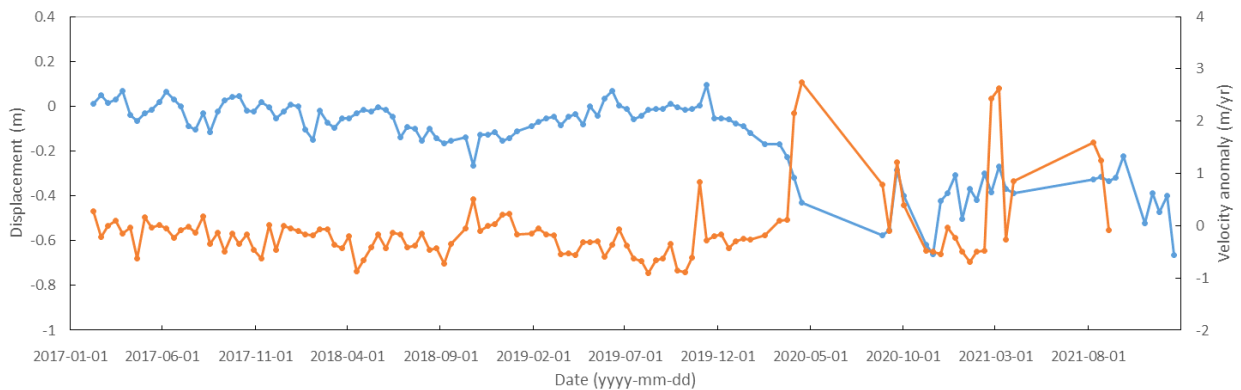


그림 42. David2 빙저호 수위 변화 속도(파란색)와 주변 빙상 표면유속의 변화(주황색).

- David2 빙저호 주변의 유속 변화는 2017년부터 2019년까지 ± 0.5 m/yr 내외로 비교적 작았으나, 2020년 이후로는 짧은 시간 사이에 유속이 급격히 감소하다가 증가하는 큰 변동성이 관측되었음(그림 42의 주황색 실선)
- 유속의 변동이 큰 시기는 빙저호 수위 변화의 속도가 크게 변화하는 시기와 대체적으로 일치하는 경향을 보였음(그림 42의 파란색 실선)

- 그러나 DDIInSAR로 관측된 빙저호 표면변위는 수위의 증감(방향)에 대한 정보를 제공하지 않으며, 수위 변화의 속도 정보만을 제공하므로 빙저호의 충전 또는 배수가 빙상 유속에 어떤 영향을 미쳤는지 명확히 규명하기 어려움

○ David 빙하 주변 지역 빙저호 배수망 추정

- 이 연구에서는 BedMachine의 빙상 두께와 빙저 고도를 이용하여 hydraulic potential을 구하고, 이를 통해 David 빙하 주변 지역의 빙저호 배수망을 추정하였음
- Hydraulic potential(ϕ)은 아래와 같은 식으로 계산될 수 있음

$$\phi = z_{bed}\rho_{water} + h\rho_{ice} \quad (5)$$

- 식 (5)에서 z_{bed} 는 빙저 고도, ρ_{water} 는 물의 밀도(1000 kg m^{-3}), h 는 빙상 두께, ρ_{ice} 는 얼음의 밀도(917 kg m^{-3})를 지시함
- Hydraulic potential을 통해 산출된 연구지역의 빙저 배수망(그림 43)은 David2, David3, David4 및 David5 빙저호와 이 연구에서 DDIInSAR를 통해 탐지된 새로운 빙저호들이 연결되어 있음을 시사함

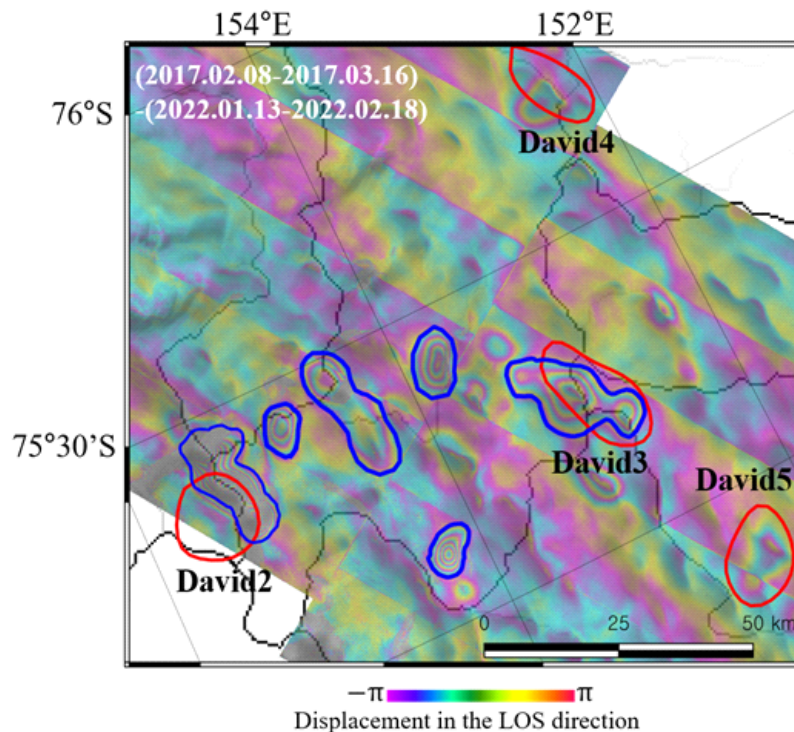


그림 43. David 빙하 주변 빙저호 배수망 추정.

4. 인공위성 InSAR 기반 남극 내륙 빙저호 탐지

가. 남극 내륙 K-Route 주변 지역 위성 SAR 자료 조사 및 구축

○ David 빙하 상류부터 남극 내륙 ice divide에 이르는 K-Route 주변 지역에 대한 인공 위성 SAR 시계열 영상 조사 및 가용 영상 구축

- 1단계 연구에서는 David 빙하 중상류 지역에 대한 영상레이더 간섭기법 기반 빙저호 탐지 연구를 수행하였으며, 2단계 1차년도 연구에서는 K-Route 주변 남극 내륙 지역의 빙저호 탐지와 활동성 모니터링이 가능한 인공위성 영상레이더 자료를 조사하고 가용할 수 있는 영상을 구축하고자 하였음
- C-band SAR를 탑재한 Sentinel-1 위성은 Interferometric Wide(IW) swath 모드로 2015년부터 2023년까지 David 빙하 유역을 지속적으로 관측하고 있으나, 2015년 이후 고위도의 남극 내륙 지역을 관측하지 않음이 확인됨(그림 44, 표 1)
- Sentinel-1 SAR 영상으로는 David6 빙저호보다 높은 위도의 영역을 시계열로 관측할 수 없어 남극 내륙 빙저호 탐지 연구에 어려움이 존재함

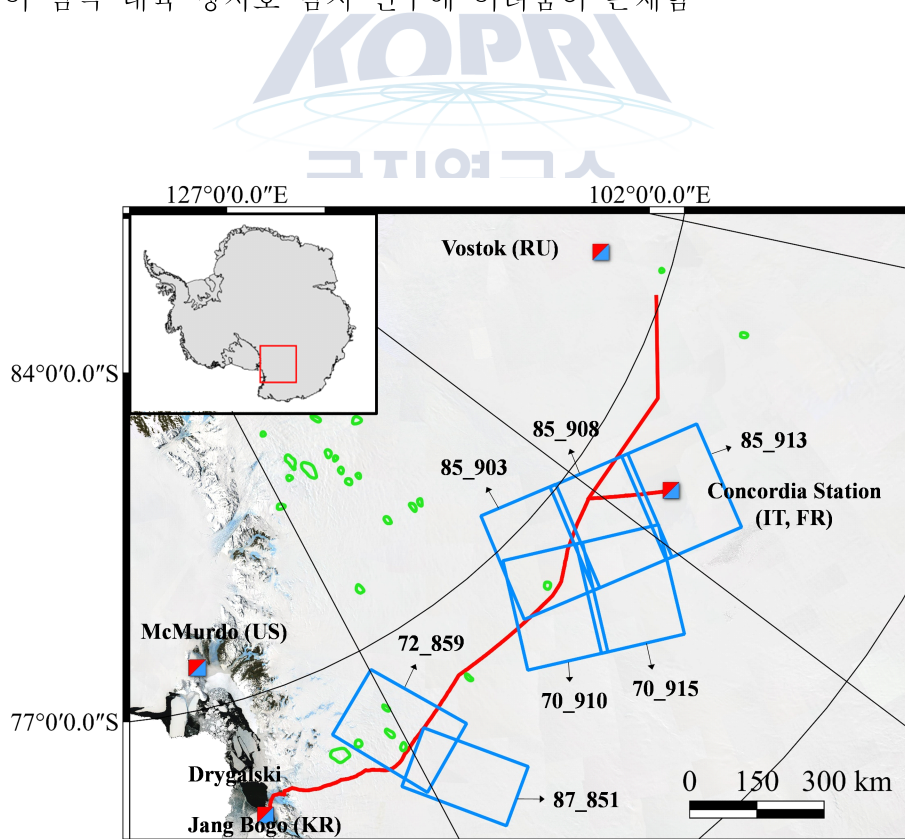


그림 44. David 빙하 유역부터 남극 내륙에 대한 K-Route(빨간색 실선) 주변 Sentinel-1 SAR IW 모드 관측 영역(파란색 사각형). 각 관측 영역의 숫자는 Sentinel-1의 path와 frame(표 1 참고)을 지시하며, 초록색 폴리곤은 Smith *et al.* (2009)이 고도계 관측을 통해 발견한 빙저호 영역을 나타냄.

표 1. K-Route 주변 남극 내륙 지역에 대해 활용 가능한 Sentinel-1 IW 모드 SAR 영상

Path	Frame	Dates (YYYY.MM - YYYY.MM)	Orbit direction
70	910	2015.08 - 2015.10	Ascending
70	915	2015.08 - 2015.10	Ascending
72	859	2017.02 - 2023.04	Descending
85	903	2015.07 - 2015.08	Ascending
85	908	2015.07 - 2015.08	Ascending
85	913	2015.07 - 2015.08	Ascending
87	851	2015.07 - 2023.04	Descending

- ALOS-2 위성은 L-band의 PALSAR-2를 탑재하여 2014년부터 350 km의 광범위한 영역을 촬영하는 ScanSAR 모드로 남극 내륙을 관측하고 있음
- ALOS-2 PALSAR-2는 인공위성 SAR에서 일반적으로 취하고 있는 right-looking 이미징 대신에 left-looking 이미징을 적용하여 2014년부터 2023년까지 남극 내륙 고위도 지역을 지속적으로 관측하고 있음(그림 45, 표 2)
- Sentinel-1과 ALOS-2의 촬영 영역 및 기간을 고려하여 David 빙하 상류에서 콩코르디아 기지(Concordia Station) 인근에 이르는 남극 내륙 미답 지역에 대한 빙저호 모니터링 연구에 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 모드 영상이 적합하다고 판단함
- 이 연구에서는 남극 내륙 지역에 대해 2015년 8월부터 2023년 2월까지 획득된 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 모드의 ascending pass 영상을 총 49장 구축하였음(그림 45, 표 2)

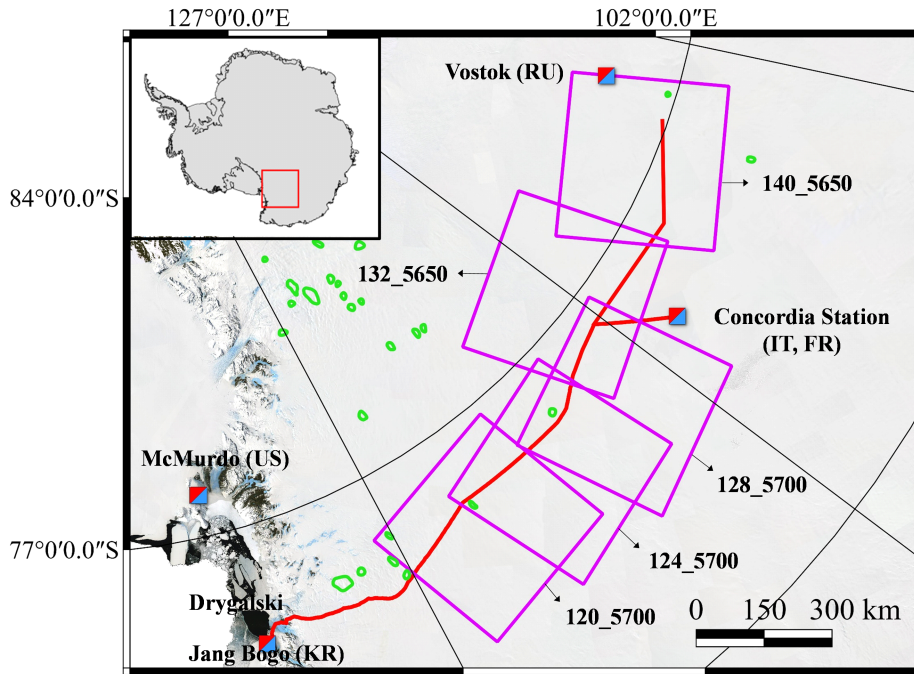


그림 45. David 빙하 유역부터 남극 내륙에 대한 K-Route(빨간색 실선) 주변 ALOS-2 PALSAR-2의 ScanSAR 모드 관측 영역(보라색 사각형). 각 관측 영역의 숫자는 ALOS-2의 path와 row(표 2참고)를 지시함.



표 2. K-Route 주변 남극 내륙 지역에 대해 구축한 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 모드 영상

Path	Row	Dates (YYYY.MM - YYYY.MM)	Number of images
120	5700	2015.12 - 2019.02	10
124	5700	2016.08 - 2019.02	8
128	5700	2016.08 - 2022.02	10
132	5650	2015.08 - 2017.12	9
140	5650	2016.08 - 2023.02	12

- ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 모드 영상은 모두 레이더 간섭기법(SAR Interferometry, InSAR) 적용이 가능한 자료로 구축하였으며, 표 2의 path 120~132에서 촬영된 영상은 126일 간격, path 140의 영상은 140일 간격으로 구축함(일부 기간 제외)

- 본 연구에서 구축한 path 120, 124, 128, 140의 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 모드 영상의 관측 범위는 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 David4, David6 빙저호와 E9 빙저호, Vostok 빙저호 영역을 포함함

나. 영상레이더 간섭기법을 활용한 남극 내륙 빙저호 영역 추정 영역 탐지

○ 빙저호 탐지 및 모니터링 연구를 위한 최적의 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 간섭기법 조건 분석

- 1단계 연구 수행을 통해 Sentinel-1 영상레이더 자료에 이중 위상 차분 간섭기법(Double-Differential Interferometric SAR, DDIInSAR)을 적용하여 David 빙하 유역의 빙저호 탐지가 가능함을 확인한 바 있음
- David 빙하 상류 빙저호들의 수위 변화 속도가 느린 것이 확인된 바 있으며, 이를 바탕으로 남극 내륙에 위치한 빙저호의 수위 변화 속도도 빠르지 않을 것이라 예상하였음
- 이에 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상 기반 DDIInSAR에 사용되는 레이더 간섭쌍(InSAR pair)의 시간 기선거리(temporal baseline)가 길수록 빙저호에 의한 변위를 더욱 명확히 관측할 수 있으리라 기대되었음
- 이 연구에서는 남극 내륙 빙저호 탐지 연구를 위한 ALOS-2 PALSAR-2 간섭쌍의 최적 시간 기선거리를 선정하고자 path 120의 ScanSAR 영상을 사용하여 14일, 126일, 350일의 시간 기선거리를 가지는 차분 간섭도(differential interferogram)를 생성하였음(그림 46)
- DInSAR 수행시 지표 고도에 의한 간섭위상 제거를 위해 Copernicus GLO-30 수치표고모델(digital surface model, DSM)을 사용하였음
- ALOS-2 위성이 구현할 수 있는 최소의 시간 기선거리인 14일의 경우, 빙상 표면에 feature가 거의 없는 영역에서 SAR 영상쌍의 정합(co-registration)에 오류가 발생하는 것을 확인하였음(그림 46a)
- 특히 남극 내륙은 영상 정합에 유용하게 사용될 수 있는 빙상 표면의 feature가 많지 않고 유속이 매우 느리기 때문에 짧은 시간 기선거리일수록 SAR 영상 정합에 어려움이 크게 발생함

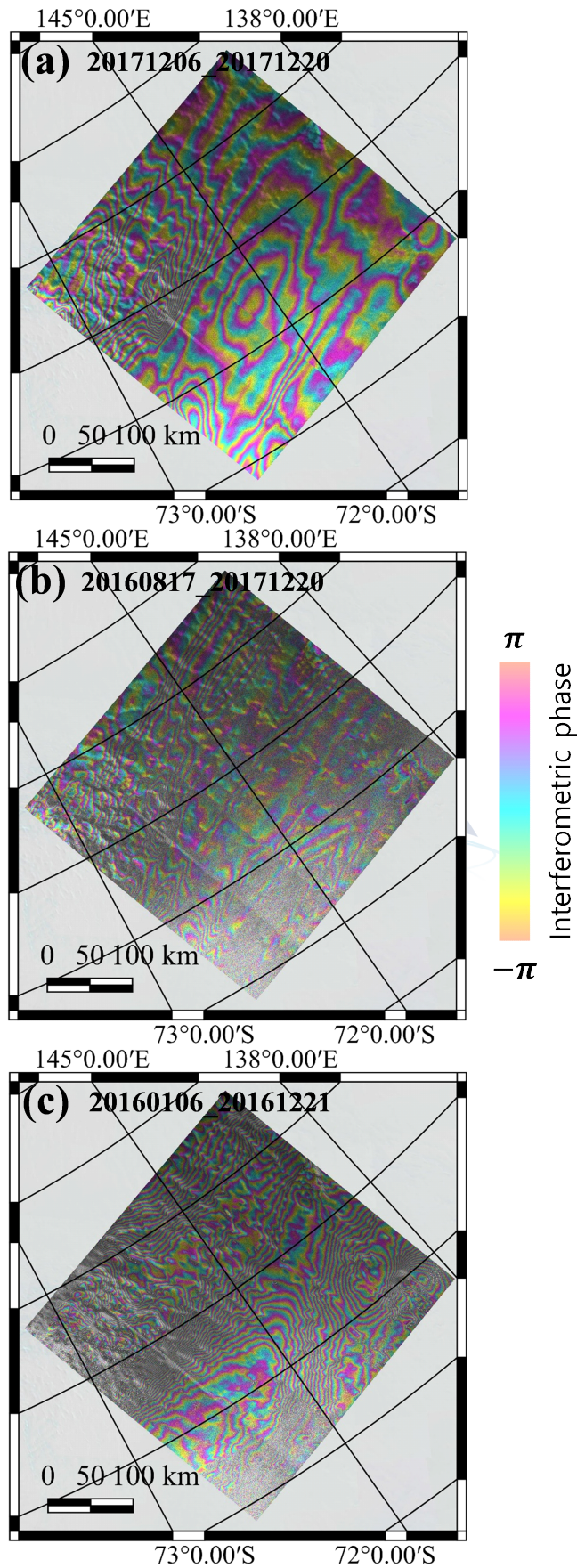


그림 46. ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 모드 영상의 (a) 14일, (b) 126일, (c) 350일의 시간 기선거리에 대한 차분 간섭도 예시.

- 또한 ALOS-2 L-band DInSAR의 변위 탐지 민감도가 Sentinel-1의 C-band DInSAR에 비해 낮기 때문에 더 긴 시간 기선거리를 가지는 간섭도 제작이 요구됨을 확인하였음
- 126일과 350일의 시간 기선거리를 가지는 간섭도는 14일의 시간 기선거리를 가지는 간섭도에 비해 영상 정합 오류가 적었으며, 빙상 표면에서 충분히 큰 변위를 관측할 수 있었음(그림 46b, 3c)
- 레이더 간섭쌍의 시간 기선거리가 너무 길면 빙저호 수위 변동성을 탐지하지 못할 가능성이 크다는 문제점이 존재함
- 이 연구에서는 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상의 레이더 간섭기법 적용을 통한 남극 내륙 빙저호 탐지를 위해 126일 내외의 시간 기선거리를 적용하였음
- path 140의 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 시계열 영상으로는 126일의 시간 기선거리를 가지도록 생성할 수 있는 간섭쌍의 개수가 제한적이었으며, 대신 140일의 시간 기선거리를 적용하였음
- 2015년 8월부터 2023년 2월까지 126일과 140일의 시간 기선거리를 적용하여 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR의 DInSAR를 수행하였음
- ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상은 5개의 sub-swath로 구성되어 있는데, 모든 sub-swath를 모자이크 한 후 DInSAR를 수행하면 3번과 4번 sub-swath에서 차분 간섭도가 비정상적으로 생성되는 것을 확인하였음(그림 47a)
- 이는 모든 sub-swath에 대해 일괄적으로 레이더 간섭기법을 적용하여 간섭도를 제작하는 자료처리 과정에서 발생한 문제로 추정됨
- DInSAR 영상 생성에 문제가 있는 2개의 sub-swath를 따로 추출하여 간섭기법을 적용한 결과, 정상적으로 간섭도가 생성됨을 확인하였음(그림 47b)
- 독립적으로 생성한 3번과 4번 sub-swath의 DInSAR 영상은 다른 sub-swath(1번, 2번, 5번)의 DInSAR와 공간적으로 연결되는 위상 변화를 보였음(그림 47c)
- 동일한 문제를 보이는 모든 ScanSAR 간섭쌍에 대해 위와 같은 방식을 적용하여 DInSAR를 수행하였음

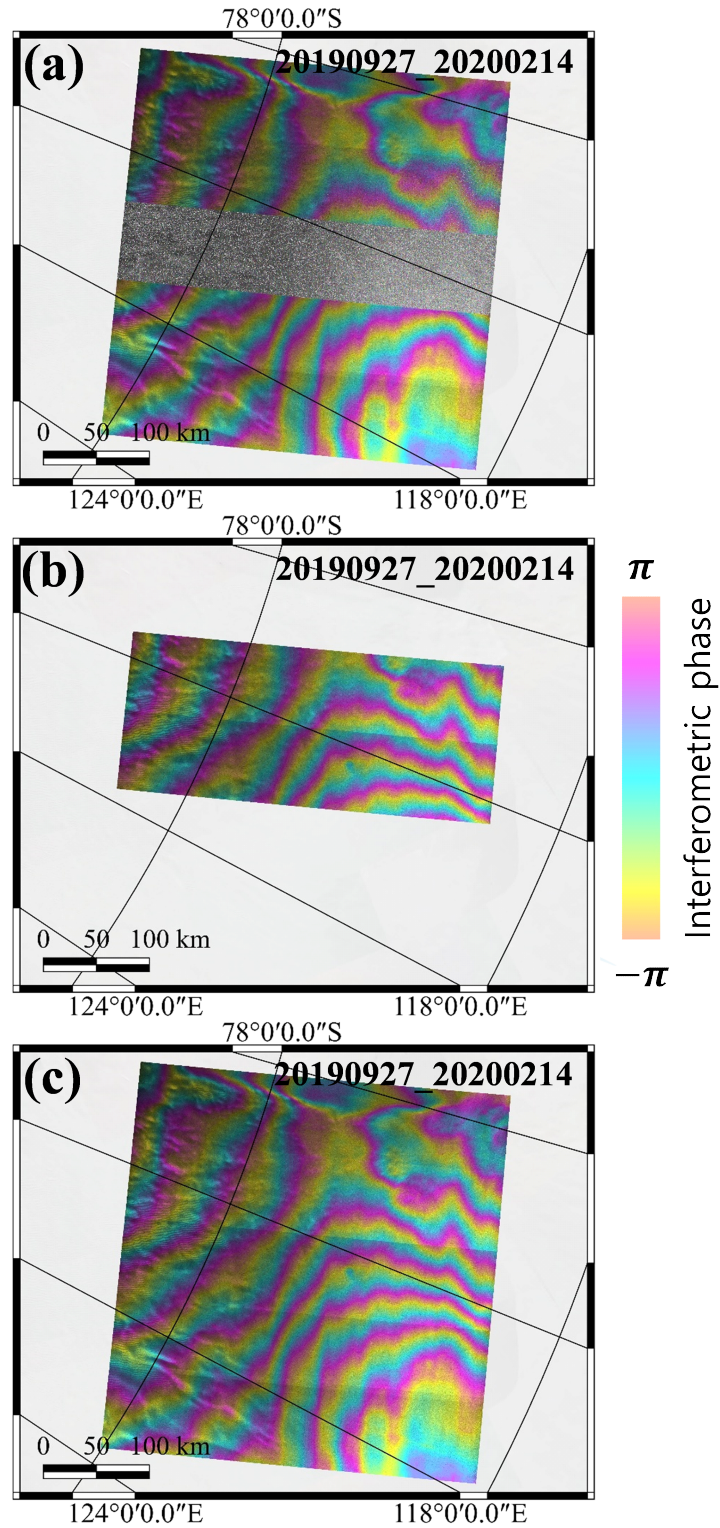


그림 47. 2019년 9월 27일과 2020년 2월 14일의 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상을 이용하여 생성한 DInSAR 영상. (a) 5개의 sub-swath 모자이크 후 DInSAR 수행시 3번째와 4번째 sub-swath에 문제가 발생한 경우, (b) 3, 4번째 sub-swath를 각각 따로 추출하여 DInSAR를 수행한 결과, (c) (a)와 (b)의 합성 DInSAR 영상.

○ ALOS-2 ScanSAR DDInSAR 기반 남극 내륙 K-Route 주변 빙저호 탐지 및 Sentinel-1 DDInSAR와의 교차 분석 수행

- DInSAR 영상에는 빙상 흐름에 의한 수평 방향의 변위 성분과 빙저호 수위 변화에 기인하는 수직 방향의 변위 성분이 혼재함
- 빙상 흐름에 의한 수평 방향의 변위가 시간에 따라 변화가 없다고 가정한 후, 빙저호의 수위 변화 차이에 의한 변위 신호를 탐지하기 위해 시간 기선거리가 동일한 두 개의 ALOS-2 PALSAR-2 DInSAR를 서로 차분하는 DDInSAR를 수행하였음
- ALOS-2 위성의 path 120에 대해 2016년 8월 17일과 12월 21일, 2017년 8월 16일과 12월 20일의 ScanSAR 영상을 이용하여 DInSAR 영상을 생성한 후 DDInSAR를 수행한 결과, 기존에 인공위성 레이저 고도계(ICESat)로 보고된 David4 빙저호 위치(Smith *et al.*, 2009)에서 원형의 간섭띠가 관측되었음(그림 48의 L1, 파란색 폴리곤)

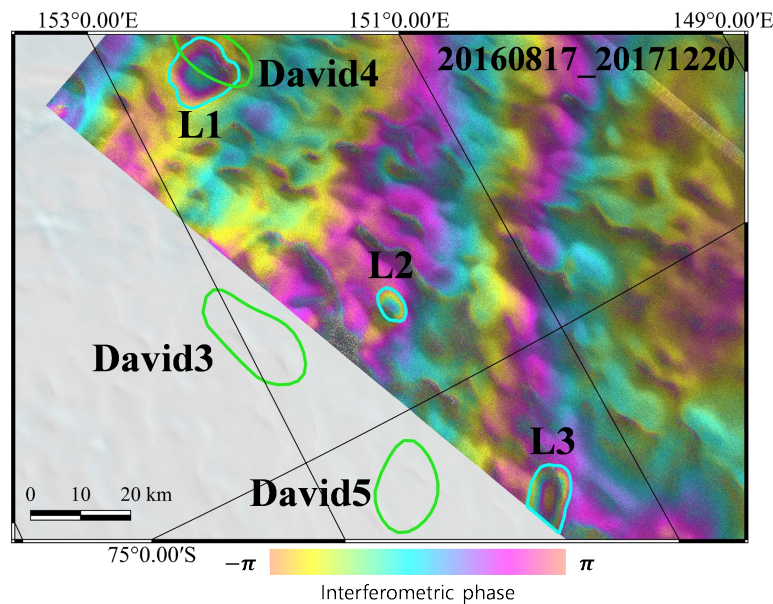


그림 48. 2016년 8월 17일과 12월 21일, 2017년 8월 16일과 12월 20일의 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상을 이용하여 생성한 DDInSAR 영상. 초록색 폴리곤은 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호이며, 파란색 폴리곤은 ALOS-2 DDInSAR 영상에서 빙저호로 추정할 수 있는 영역을 나타냄.

- David4 빙저호 위치에서 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상의 DDIInSAR를 통해 관찰된 간섭띠 형태(L1)는 기존에 보고된 빙저호 영역(초록색 폴리곤)과 차이를 보였음
- 또한 Smith *et al.* (2009)에서 보고되지 않은 영역에서 빙저호로 추정되는 변위 신호가 관측됨(그림 48의 L2 및 L3, 파란색 폴리곤)
- David4 빙저호 주변은 Sentinel-1 위성이 관측할 수 있는 범위에 포함되므로 그림 48의 ALOS-2 DDIInSAR 영상을 Sentinel-1 DDIInSAR 영상과 비교 분석하였음
- ALOS-2 PALSAR-2는 23.6 cm 파장의 마이크로파를 사용하는 L-band로, 간섭도에서 하나의 간섭띠는 11.8 cm의 변위(레이더 관측 방향)를 지시함
- 반면 Sentinel-1의 C-band SAR는 파장이 5.6 cm인 마이크로파를 사용하며, 간섭도에서 하나의 간섭띠가 나타내는 변위는 2.8 cm에 해당함
- 이에 ALOS-2 ScanSAR DDIInSAR 영상을 하나의 간섭띠가 2.8 cm의 변위를 나타낼 수 있도록 생성하였고(그림 49a), 이를 2017년 2월 8일과 3월 16일, 2022년 1월 13일과 2월 18일의 Sentinel-1 SAR 영상으로 생성한 DDIInSAR 영상(그림 49b)과 비교하였음
- ALOS-2와 Sentinel-1 DDIInSAR 영상은 David4 빙저호(L1) 영역에서 간섭띠의 개수는 다르지만 변위 신호가 나타나는 영역의 위치가 일치하는 것을 확인함
- ALOS-2 DDIInSAR에서 간섭띠의 개수가 더 많이 나타나는데, 이는 ALOS-2 DDIInSAR가 126일 시간 기선거리의 DInSAR 2개를 차분하여 생성되었고 Sentinel-1 DDIInSAR는 36일 시간 기선거리의 DInSAR 2개로 생성된 것에 기인한다고 판단됨
- L2와 L3 영역에서 빙저호로 추정되는 원형의 간섭띠 패턴은 Sentinel-1 DDIInSAR 결과에서 뚜렷하게 보이지 않았으나, ALOS-2 DDIInSAR에서 명확하게 탐지되는 것을 확인하였음

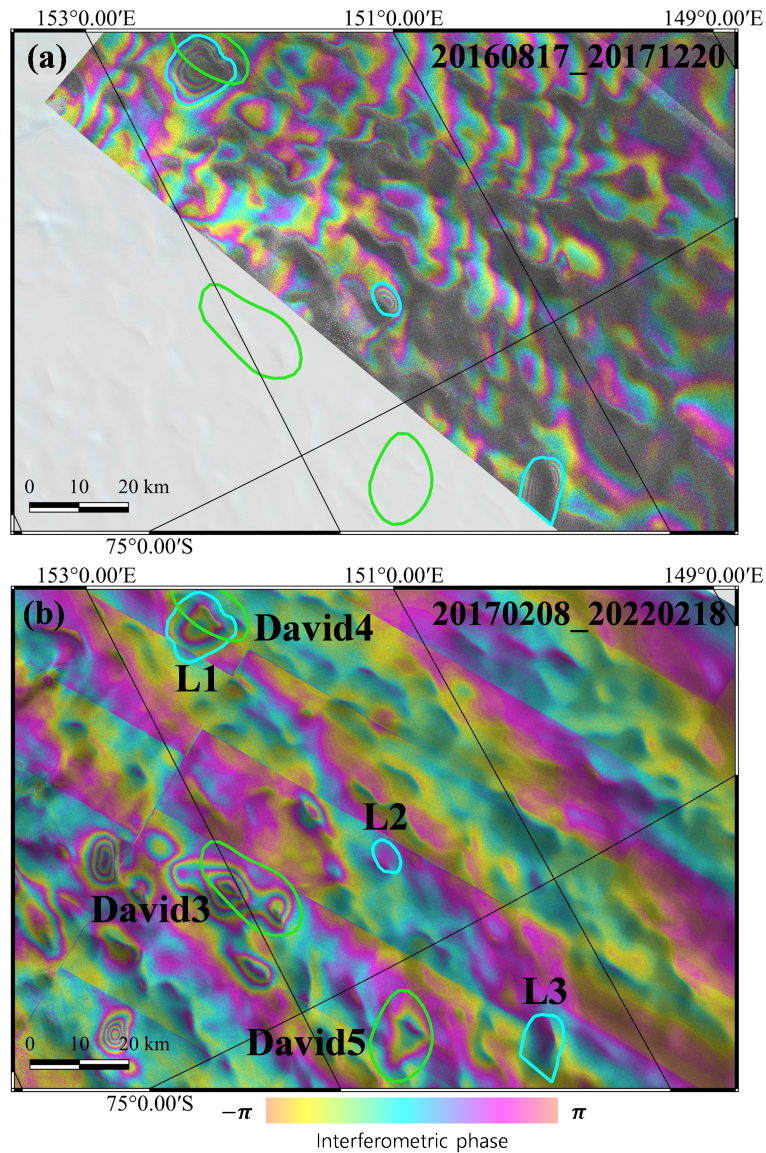


그림 49. (a) 그림 5의 ALOS-2 DDInSAR 영상을 Sentinel-1과 같은 2.8 cm/fringe로 변환하여 나타낸 영상. (b) Sentinel-1 DDInSAR 영상.

- 2019년 9월 27일과 2020년 2월 14일, 2020년 9월 25일과 2021년 2월 12일의 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상에 DDInSAR를 적용하여 Vostok 빙저호 부근에서 폐합된 원형의 간섭위상 신호(L4)를 관측하였음(그림 50)
- ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상의 DDInSAR를 통해 Sentinel-1 DDInSAR 관측으로 정의된 빙저호뿐만 아니라 Sentinel-1으로 발견할 수 없는 신규 빙저호 추정이 가능함을 확인하였음

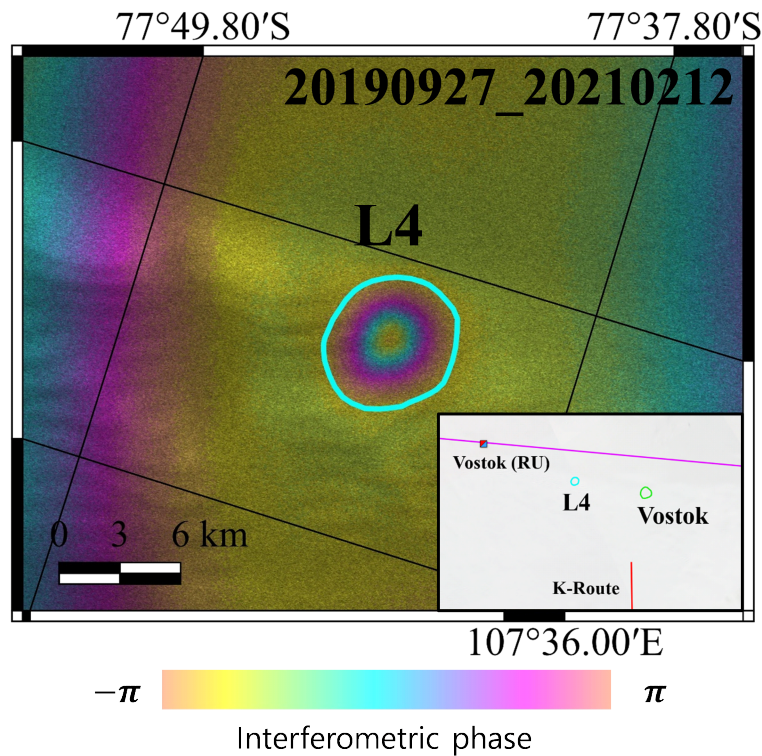


그림 50. Vostok 빙저호 근처에서 ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR의 DDIInSAR를 통해 탐지된 빙저호 추정 영역.



다. 시계열 고도계 자료를 활용한 빙저호 탐지 결과 검증

○ 인공위성 영상레이더와 고도계 자료의 융복합 분석을 통한 빙저호 탐지 결과 검증

- ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상을 활용하여 빙저호 추정 영역(L1, L2, L3, L4)을 탐지하였고, 해당 영역에 대한 시계열 고도계 자료를 구축 및 분석하여 빙저호 존재 여부를 검증하고자 함
- 4개 빙저호 추정 영역에 대해 2019년 2월부터 2023년 4월까지의 ICESat-2 ATL06 시계열 지표 고도 자료를 다음과 같이 구축함

L1, L2 : 2019.02 - 2023.04 (track number : 0619)

L3 : 2019.01 - 2023.01 (track number : 0177)

L4 : 2019.05 - 2022.11 (track number : 0887)

- 그림 51(a)은 David4 빙저호(L1)에 대한 ALOS-2 DDIInSAR 영상이며, A-A'은 L1 빙저호 추정 영역을 지나가는 ICESat-2의 ground track을 나타냄

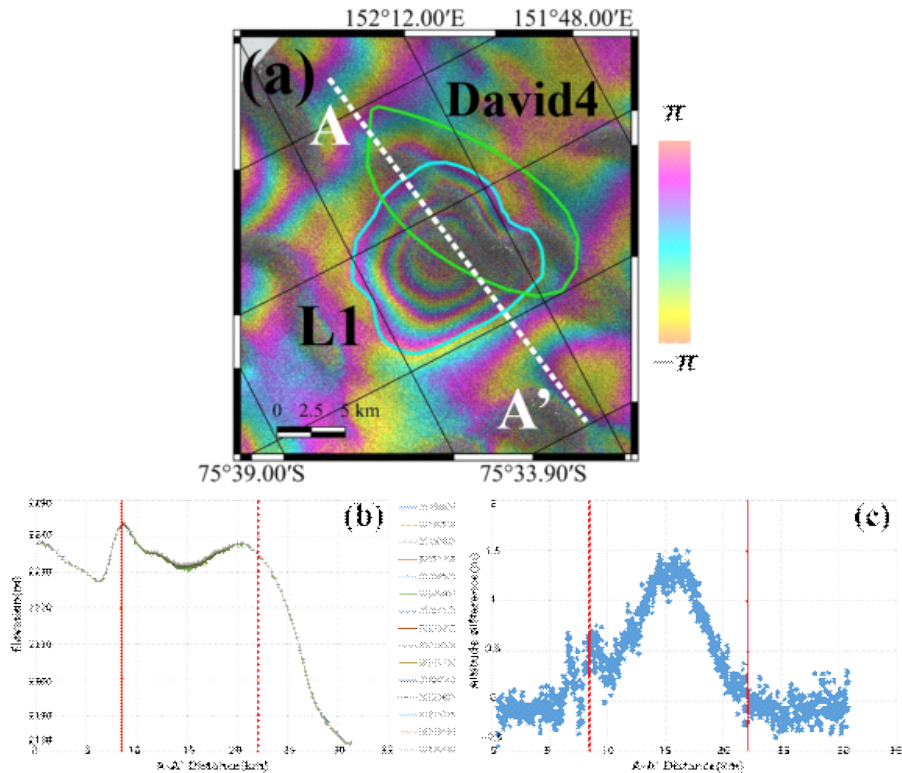


그림 51. (a) David4 빙저호(L1)에 대한 ALOS-2 DDInSAR 영상. 파란색 폴리곤은 DDInSAR로 정의된 빙저호 영역이며, 초록색 폴리곤은 Smith *et al.* (2009)에서 정의된 빙저호 영역을 지시. (b) 2019년 2월부터 2023년 4월까지 A-A'에 대한 표면 고도 변화. (c) 빙저호 영역 내에서 최소 고도와 최대 고도를 보이는 두 날짜에서 관측된 고도의 편차.

극지연구소

- ICESat-2로 관측된 지표 고도는 DDInSAR 영상에서 관찰되는 간섭띠 영역 내에서만 변화하였으며, 간섭띠 영역 외에서는 시간적인 변화를 거의 보이지 않았음(그림 51b)
- A-A'을 따라 L1의 표면 고도는 2019년 2월부터 2020년 5월까지 하강한 후 2023년 4월까지 상승하였음
- 빙저호 영역 내에서 고도 변화가 최대가 되는 두 날짜(2020.05.06, 2023.04.30)를 선별하여 ICESat-2 ground track에 따른 고도 변화를 도시하였으며, 3년간 최대 1.5 m의 고도 차이를 보임(그림 51c)
- ALOS-2 DDInSAR에서 탐지된 L2 빙저호 추정 영역(그림 52a)을 통과하는 ICESat-2 시계열 고도 자료를 분석한 결과 빙저호 영역 내에서 고도 변화가 크게 발생함을 확인하였음(그림 52b, 52c)

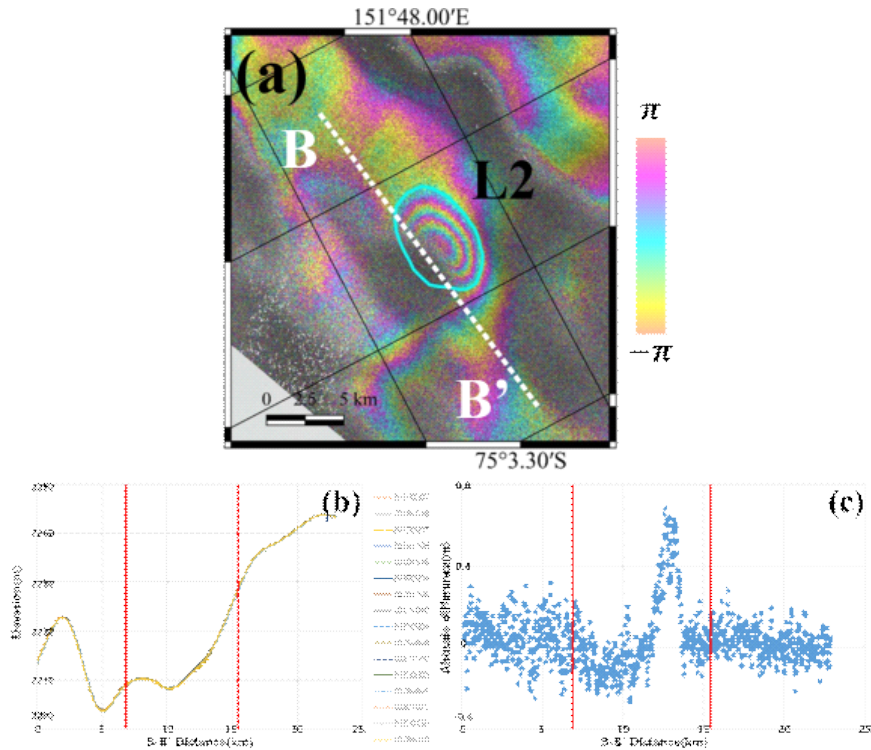


그림 52. (a) L2에 대한 ALOS-2 DDInSAR 영상. 파란색 폴리곤은 DDInSAR로 정의된 빙저호 영역. (b) 2019년 2월부터 2023년 4월까지 B-B'에 대한 표면 고도 변화. (c) 빙저호 영역 내에서 최소 고도와 최대 고도를 보이는 두 날짜에서 관측된 고도의 편차.

- L2 빙저호 추정 영역에서 지표 고도는 2019년 2월부터 2021년 11월까지 서서히 상승한 후 2023년 4월까지 하강하였음
- 빙저호 추정 영역 내에서 최대 표면 고도차를 보이는 2019년 8월과 2021년 11월의 지표 고도 차이를 분석한 결과, 빙저호 추정 영역에서 2년간 최대 0.7 m의 고도 변화가 발생한 것을 확인함(그림 52c)
- 그림 53은 L3 빙저호 추정 영역에 대한 ALOS-2 DDInSAR 영상과 빙저호 추정 영역을 가로지르는 ICESat-2 시계열 고도 자료를 나타냄
- L3 표면은 2019년 1월부터 2023년 1월까지 지속적으로 상승하였으며, 2022년 10월에 최대 고도를 보였음
- L3 영역 내에서 C-C'을 따라 2019년 1월과 2022년 10월 사이에 최대 0.9 m의 차이가 발생하였음(그림 53c)

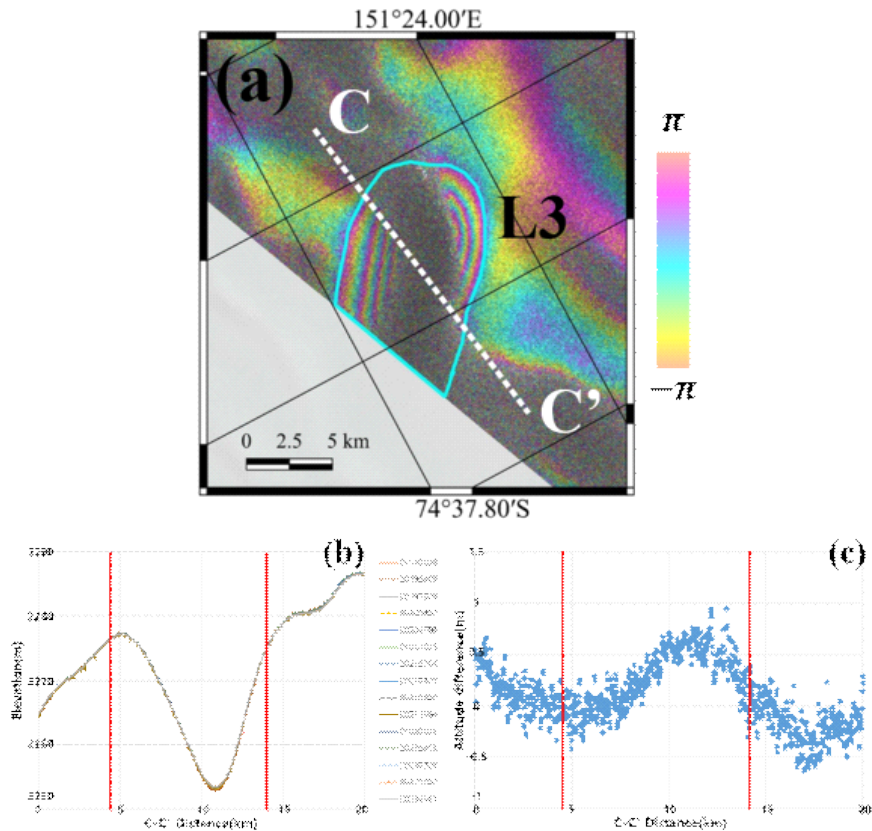


그림 53. (a) L3에 대한 ALOS-2 DDInSAR 영상. 파란색 폴리곤은 DDInSAR로 정의된 빙저호 영역. (b) 2019년 2월부터 2023년 1월까지 C-C'에 대한 표면 고도 변화. (c) 빙저호 영역 내에서 최소 고도와 최대 고도를 보이는 두 날짜에서 관측된 고도의 편차.

- 그림 54는 ALOS-2 PALSAR-2 DDInSAR에서 발견된 L4 빙저호 추정 영역에 대한 표면 고도 변화 분석 결과로, 빙상 표면 고도는 L4 영역 내에서 2019년 5월부터 2020년 11월까지 상승 후 2022년 2월까지 하강하였고, 다시 2022년 11월까지 고도가 상승하였음
- D-D' 축선을 따라 빙상 표면의 굴곡이 관측되는데(그림 54b), 이는 sastrugi에 기인할 가능성이 있음
- L4 빙저호 추정 영역에서 최대 고도 차이를 보이는 2020년 11월과 2022년 2월의 관측 자료를 이용하여 계산된 고도 편차는 최대 1 m로 나타남(그림 54c)
- ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상의 DDInSAR에서 빙저호로 추정된 L1, L2, L3, L4 영역 내에서 지표 고도의 변화가 발생하였고, 이는 빙저호 수위 변화에 따른 것임을 추정할 수 있음

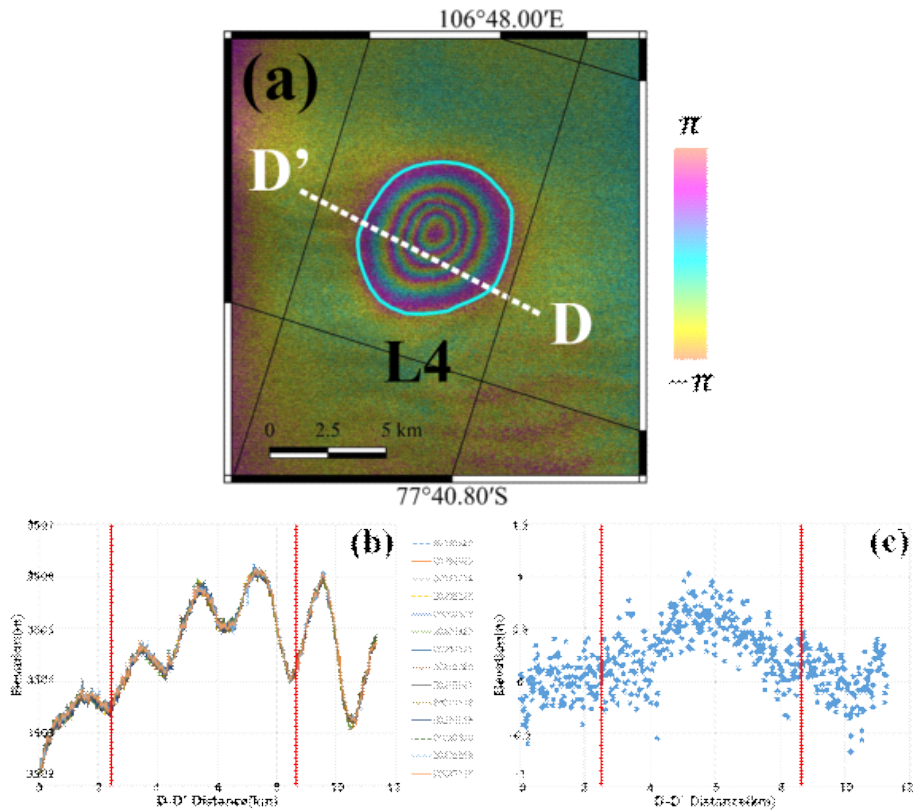


그림 54. (a) L4에 대한 ALOS-2 DDInSAR 영상. 파란색 폴리곤은 DDInSAR로 정의된 빙저호 영역. (b) 2019년 5월부터 2022년 11월까지 D-D'에 대한 표면 고도 변화. (c) 빙저호 영역 내에서 최소 고도와 최대 고도를 보이는 두 날짜에서 관측된 고도의 편차.

극지연구소

5. 빙저호 충전-배수 활동 규명

가. 빙저호 활동성 시계열 분석

○ 인공위성 영상레이더 간섭기법을 활용한 빙저호 추정 영역 탐지

- 빙저호 위치에서 영상레이더 차분간섭기법을 통해 측정된 간섭위상은 빙하의 흐름에 의한 수평변위와 빙저호 활동에 의한 빙상 고도변화를 모두 포함함
- 빙상의 흐름속도가 시간에 따라 변화하지 않는다고 가정하고, 동일한 시간 기선거리 조건의 두 DInSAR 영상을 차분하는 DDInSAR를 수행하면 빙상 흐름에 의한 영향이 제거된 위상을 산출할 수 있음
- 두 DInSAR에 포함될 수 있는 오차의 차이가 무시될 수 있는 수준으로 작다면 DDInSAR를 통해 빙저호 수위 변화의 시간적 차이에 기인하는 빙상 표면고도 변화의 차이를 추정할 수 있으며, 이는 DDInSAR 영상에서 폐합된 간섭띠 형태로 나타날 수 있음

- 이 연구에서는 남극 내륙 K-Route 주변 지역을 관측한 ALOS-2 PALSAR-2 영상과 Sentinel-1 C-band SAR 영상을 구축하였음(그림 55, 표 3)

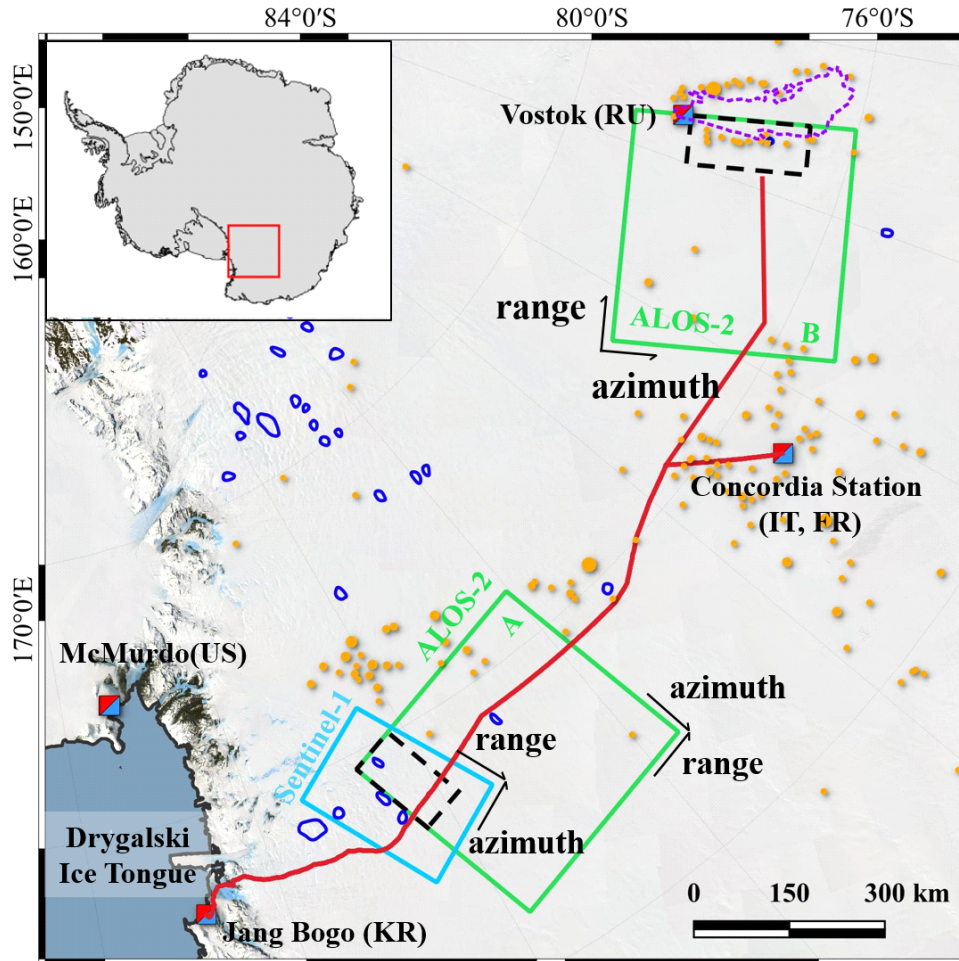


그림 55. K-Route(빨간색 실선) 주변 지역의 ALOS-2 PALSAR-2(초록색 사각형) 및 Sentinel-1 SAR 관측 영역(파란색 사각형). 노란색과 파란색 폴리곤은 각각 radio echo sounding (RES) (Wright and Siegert, 2012)과 ICESat 고도계(Smith *et al.*, 2009)로 탐지된 빙저호 영역이며, 보라색 점선으로 나타낸 폴리곤은 Vostok 빙저호(Studinger *et al.*, 2003)를 지시함. 검은색 점선으로 표기한 사각형은 이 연구과제에서 탐지된 빙저호 밀집 지역을 나타냄.

표 3. 연구에 활용된 ALOS-2 및 Sentinel-1 영상

Satellite	ALOS-2 PALSAR-2		Sentinel-1A SAR
Region	A	B	-
Path/Row	120/5700	140/5650	72/859
Observation period	2015.08 - 2022.02	2015.12 - 2023.02	2017.02 - 2020.02
Number of images	16	18	10
Orbit direction	Ascending		Descending
Antenna direction	Left		Right
Acquisition mode	ScanSAR		Interferometric Wide swath
Polarization	HH		HH

- ALOS-2 관측 영영 중 A 영역에 대해 2015년 8월 19일과 2016년 1월 6일, 2019년 9월 25일과 2020년 2월 12일에 획득된 PALSAR-2 영상을 이용하여 2개의 DInSAR 영상을 생성한 후 DDInSAR를 수행한 결과, 빙저호 영역으로 추정되는 원형의 간섭띠를 관측함(그림 56a)
- 2단계 1차년도 연구에서 기탐지된 빙저호(L2)를 제외하고, 빙저호 활동에 의한 변위가 나타나는 영역으로 추정되는 폐합된 DDInSAR 간섭띠 신호를 추가로 탐지함
- 신규 탐지된 빙저호 추정 영역 중 L1과 L4는 Sentinel-1 DDInSAR 영상에서도 명확하게 관측되었음(그림 56b)
- ALOS-2 관측 영영 중 B 영역(Vostok 빙저호 부근)에서는 2단계 1차년도 연구에서 새로운 빙저호로 추정 영역이 탐지된 바 있는데, 그림 57의 DDInSAR 영상에서도 폐합된 원형의 간섭띠가 뚜렷하게 관측되어 빙저호의 수위 변화가 시간에 따라 다르다는 것이 예상되었음

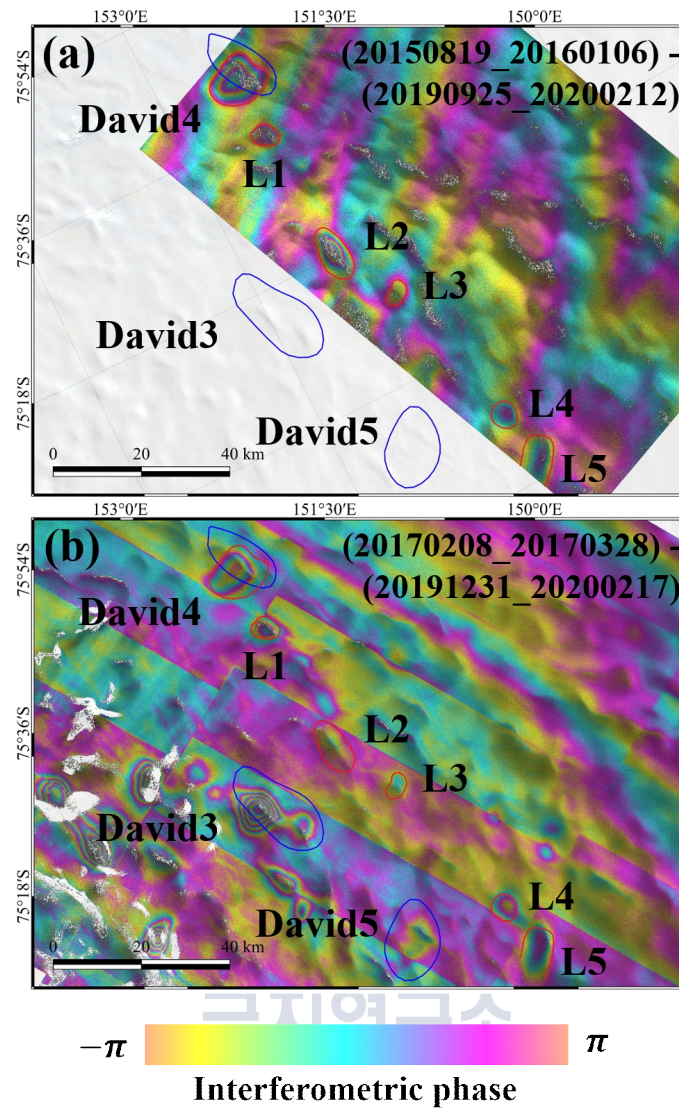


그림 56. David 빙하 주변 지역에 대한 (a) ALOS-2 PALSAR-2 및 (b) Sentinel-1 DDInSAR 영상. 빨간색 폴리곤은 DDInSAR 영상으로부터 추정된 빙저호 영역이며 파란색 폴리곤은 기존에 보고된 빙저호 영역을 지시함.

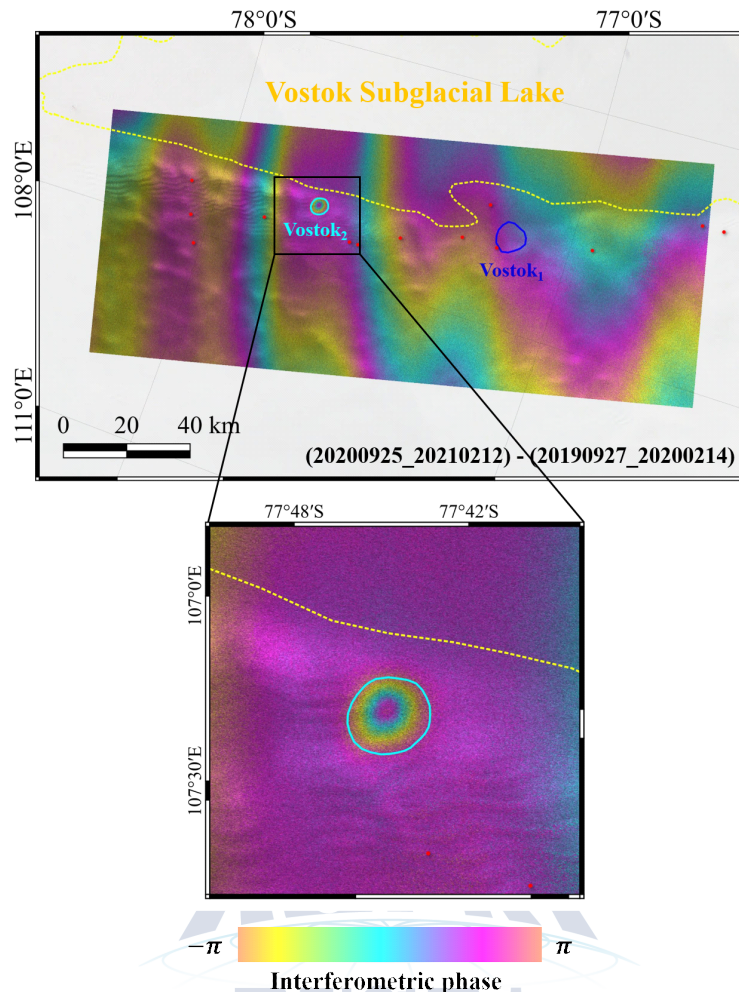


그림 57. Vostok 빙저호 부근의 ALOS-2 DDInSAR 영상. Vostok₂는 이 연구에서 DDInSAR로 신규 탐지된 빙저호 영역이며, 빨간색 점은 RES로 탐지된 빙저호를 지시함. Vostok₁는 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호를 나타냄.

- Sentinel-1 및 ALOS-2 DDInSAR 영상을 통해 빙저호의 활동에 의한 변위로 추정되는 폐합된 간섭띠들이 관측되었고, 해당 영역이 실제 빙저호 영역에 해당하는지 검증하기 위해 Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) ATL06 Land Ice Height 자료를 활용하여 빙상 표면의 시계열 고도 변화를 분석하고자 하였음

○ 빙저호 추정 영역의 빙상 고도 변화 분석을 통한 빙저호 존재 여부 파악

- 시계열로 빙상 표면고도 관측값들이 획득될 경우, 다수의 고도 변화율을 평균하여 평균 고도 변화율을 산정할 수 있으나, 단기간의 고도 관측 값을 산술평균하여 고도 변화율을 산정하면 cm 수준의 고도계 정밀도로 인해 신뢰도 있는 분석이 어려움

- 이 연구에서는 시계열 고도 관측(표 4) 사이의 날짜 차이를 가중치(긴 시간 차이는 높은 가중치)로 설정하여 고도 변화율의 가중 평균과 표준편차를 계산하였음

표 4. DDInSAR 영상에서 빙저호 영역으로 추정된 지역에 대한 ICESat-2 ATL06 고도 자료

Track number	Observation period	No. observation dates
3	2019.03.29.-2023.09.19.	18
57	2019.01.01.-2023.09.22.	18
64	2019.04.02.-2023.12.23.	18
116	2019.01.05.-2023.12.26.	19
118	2019.04.06.-2023.12.26.	19
177	2019.01.09.-2023.09.30.	18
184	2020.07.07.-2023.10.01.	11
245	2020.07.11.-2023.10.05.	10
306	2019.10.16.-2023.07.10.	13
384	2019.04.23.-2023.10.14.	18
445	2019.04.27.-2023.10.18.	15
506	2019.05.01.-2023.10.22.	18
558	2019.02.03.-2023.07.26.	17
560	2019.02.03.-2023.10.25.	18
619	2019.02.07.-2023.10.29.	19
680	2019.02.11.-2023.11.02.	19
687	2019.11.10.-2023.11.03.	16
748	2019.11.14.-2023.11.07.	15
809	2019.05.21.-2023.08.12.	16
887	2019.05.26.-2023.11.16.	16
948	2019.05.30.-2023.11.20.	18
1002	2019.06.02.-2023.11.23.	17
1061	2019.06.06.-2023.11.27.	19
1063	2019.06.06.-2023.11.27.	18
1122	2019.09.09.-2023.09.01.	15
1129	2019.09.10.-2023.09.02.	14
1190	2019.09.14.-2023.09.06.	14
1251	2019.12.17.-2023.09.10.	13
1329	2019.06.24.-2023.09.15.	17

- 2019년 1월부터 2023년 12월까지의 ICESat-2 관측 자료로부터 David 4, L1~L5, Vostok1, Vostok2 영역과 그 주변 영역에 대한 빙상 표면 고도 변화를 분석하였음(그림 58)
- 모든 빙저호 추정 영역 내에서 고도 변화가 관측되었으며, 빙저호 추정 영역 외부에서는 0 m/yr에 가까운 평균 고도 변화율을 보였음. 이는 DDInSAR에서 추정된 빙저호 영역이 실제 빙저호가 존재하는 영역일 가능성이 매우 높음을 설명함
- 빙저호 추정 영역 외의 일부 영역에서 고도 변화가 관측되긴 하였지만, 이는 빙상 이동에 의한 표면 고도의 변화 또는 적설 효과 등이 반영되었을 가능성이 있음
- 2019년 1월 이후 David 4, L1, L3, L4, L5 영역 내에서는 양의 평균 고도 변화율(빙저호 수위 상승)이 확인되었고, 특히 David 4에서는 약 0.6 m/yr의 큰 고도 상승률이 산출됨
- L2의 경우 약 -0.4 m/yr의 고도 변화율(빙저호 수위 하강)을 보임
- L1, L3는 약 0.2 m/yr, L4, L5는 0.2~0.3 m/yr의 양의 고도 변화율이 관측됨
- Vostok1 빙저호 영역 내부의 고도 변화율은 0.3~1.9 cm/yr로 주변 지역과 거의 차이가 없었으며, 이는 ICESat-2 관측 기간 동안 적설의 영향으로 전체적인 빙상 표면 고도 상승이 발생했음을 지시함
- Vostok2 빙저호 영역 내부에서는 -3.4~-1.2 cm/yr의 고도 변화율이 산출되었으나 외부에서는 대부분 3 cm/yr의 양의 고도 변화율이 산출되었는데, 이는 적설 등에 의해 이 지역의 전반적인 빙상 표면고도 상승에도 불구하고 빙저호 추정 영역 내에서만 표면고도가 하강(빙저호 수위 하강)했음을 의미함
- 평균 고도 변화율에 대한 표준편차가 클수록 고도 변화의 시간적 변동성이 크다는 것을 의미하는데, 대부분의 빙저호 추정 영역에서 큰 표준편차가 나타남

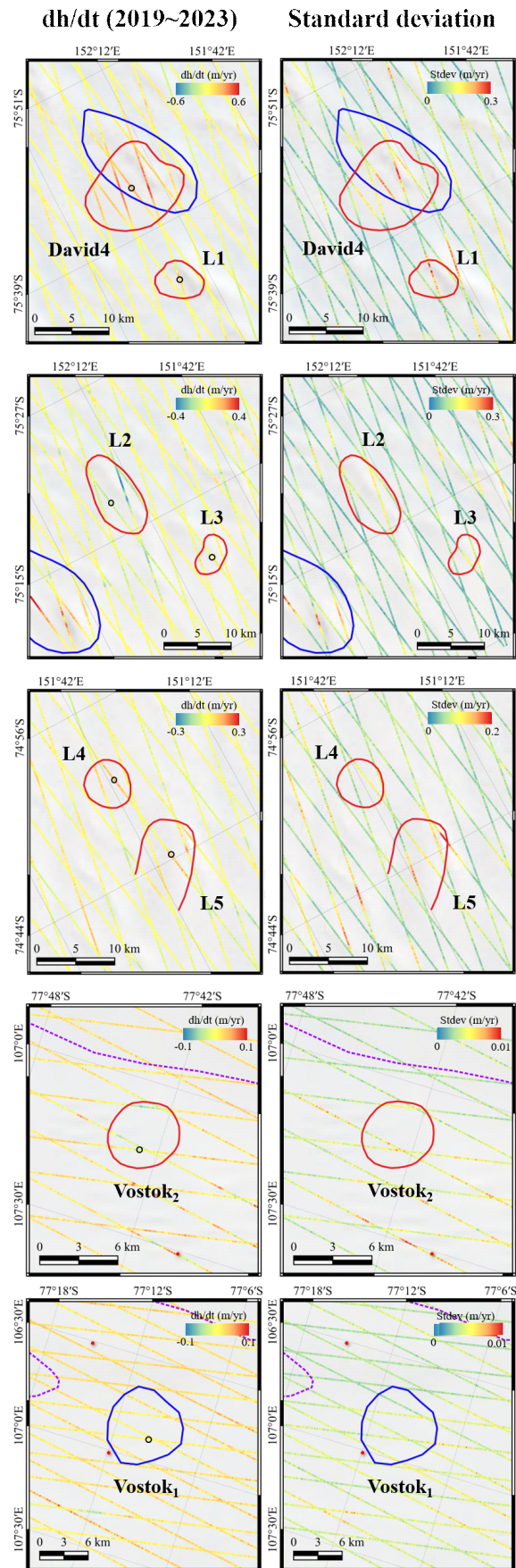


그림 58. 빙저호 추정 영역 주변 고도 변화율의 가중평균 및 표준편차. 좌측 그림의 빙저호 영역 내부에 표시한 검은색 원은 ICESat-2 관측 위치 중에서 최대 DDIInSAR 변위를 보이는 지점. 보라색 점선은 Vostok 빙저호의 경계이며, 빨간색 점은 RES로 탐지된 빙저호의 위치를 의미함.

- Vostok1, Vostok2 영역의 외부에서는 고도 변화율의 표준편차가 ~ 7 cm/yr로 크게 나타남. 이는 sastrugi의 이동에 의한 것으로 추정됨(그림 59)

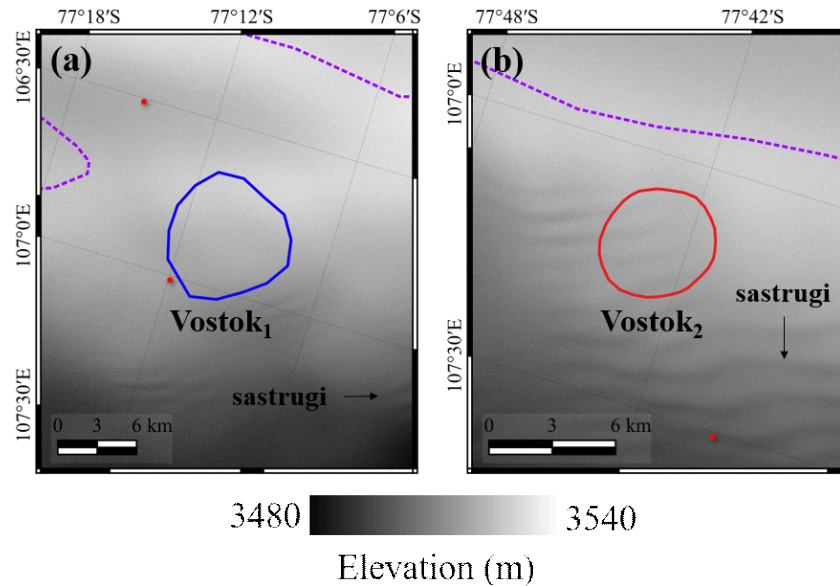


그림 59. (a) Vostok₁과 (b) Vostok₂에서의 표면고도 및 sastrugi의 분포. 보라색 점선과 빨간색 점은 Vostok 빙저호의 경계 및 RES로 탐지된 빙저호를 의미함.

- 빙저호 추정 영역 내부에서 빙상 표면고도의 상대적 변화량은 그림 60과 같음
- David 4에서는 2020년 2월 최저 고도를 기록하고 2023년 10월까지 약 1.6 m의 고도가 급격히 상승함
- L1, L3, L4, L5는 2019년 1월부터 고도가 상승하는 추세를 보였지만 L1은 2021년 6월 이후에, L3와 L4, L5는 2021년 6월 이전에 고도 변화가 크게 발생함
- L2는 2019년 6월부터 2023년 11월까지 빙상 표면의 고도가 0.6 m 감소함
- Vostok2는 2019년 9월부터 2020년 2월 사이에 변화량이 1 cm에 불과하나 2020년 9월부터 2021년 2월 사이에는 10 cm의 변화가 발생함
- ALOS-2 DDIInSAR 영상에서 관측된 원형의 폐합된 간섭띠 패턴은 빙상 표면고도 변화임을 파악할 수 있음

- Vostok1 빙저호 상부 빙상의 표면고도는 1년 이상의 장기간 동안 ± 10 cm 수준의 변화량을 보임

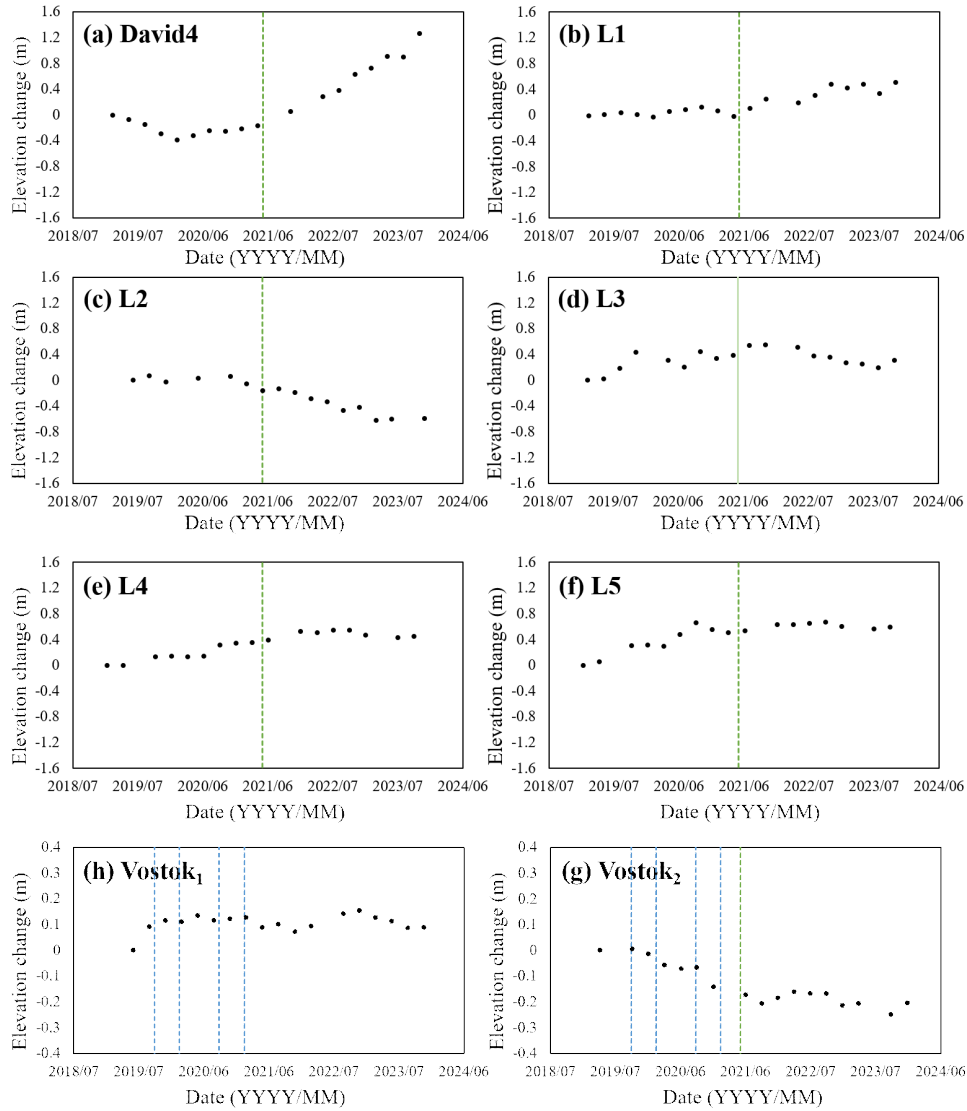


그림 60. 빙저호 추정 영역 내부(그림 58의 검은색 원)에서의 빙상 표면 고도 변화. 파란색 선은 ALOS-2 PALSAR-2 영상의 획득 시기, 초록색 선은 고도 변화의 추세가 달라지는 2021년 6월을 의미함.

- 본 연구에서 분석된 두 번의 ALOS-2 DInSAR 관측 동안에는 Vostok1의 빙상 표면고도가 일정하게 유지되었으며 이로 인해 DInSAR 영상에서 빙저호 활동에 의한 변위가 관측되지 않은 것으로 판단됨

○ 탐지된 빙저호들의 시계열 활동성 분석

- 그림 61은 위에서 탐지된 빙저호들이 대체적으로 활동성에 변화를 보이는 2021년 6월을 기준으로 하여, 2019년 1월부터 2021년 6월, 2021년 6월부터 2023년 12월까지 빙저호 영역 고도 변화율의 가중평균과 표준편차를 보여줌
- David 4와 L1은 2021년 6월 이전에 표면 고도가 거의 일정하게 유지되었으나, 2021년 6월 이후 급격히 상승하는 추세를 보임
- L2는 2021년 6월 이전보다 이후의 표면 고도 하강률이 우세하며 L3, L4, L5는 2021년 6월 이전에 고도의 상승 속도가 높게 나타남
- David 4, L1, L2는 2021년 6월 이후에 활동성을 보였으며, 그 외의 빙저호는 2021년 6월 이전에 수위 변화가 발생함
- 각 빙저호의 활동성에는 차이가 있으나, 인접한 위치에 있는 빙저호가 시기에 따라 유사한 활동 특성을 보이는 것으로 판단됨



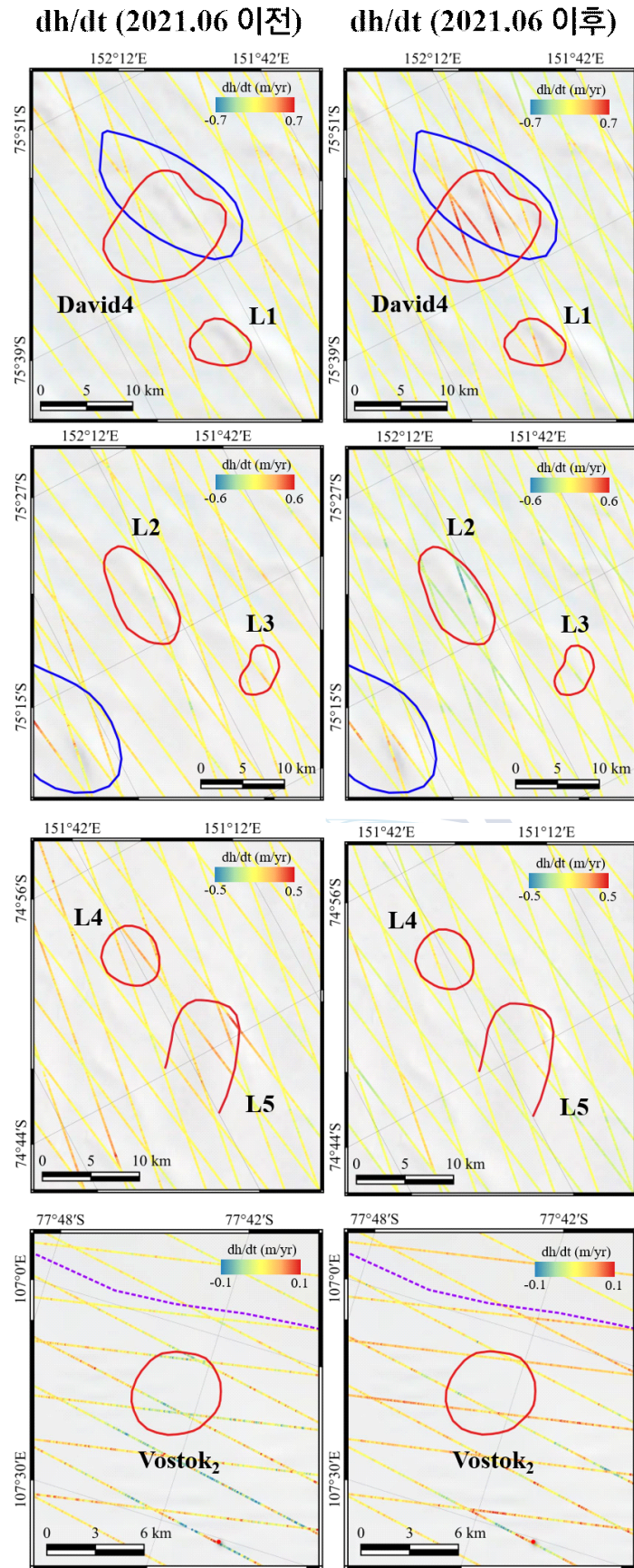


그림 61. 2021년 6월 이전(왼쪽) 및 이후(오른쪽)의 가중 평균 고도 변화율.

나. 빙저호 충전-배수 시스템 추정을 위한 영상레이더 간섭위상 분석 기술 개발

○ 빙저호 상부 빙상 표면고도의 시계열 변화 추정을 위한 영상레이더 간섭위상 분석 기술 개발

- 본 연구에서는 DDInSAR 위상을 시간에 따라 적분함으로써 빙저호 활동에 의한 빙상 표면고도의 변화(ϕ_h^{LOS})를 추정하는 기술을 개발하였으며, 이는 아래 식과 같은 수식으로 표현될 수 있음

$$\phi_h^{LOS}(t) = \int_{t_0}^t \Delta \phi_{LOS}^{lake}(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t [\phi_{LOS}^{lake}(\tau) - \phi_{LOS}^{lake}(\tau_R)] d\tau \quad (6)$$

- 위 식은 t_0 부터 t 까지 기간에 해당하는 DInSAR 위상 $\phi_{LOS}^{lake}(\tau)$ 에서 참조(reference) DInSAR 위상($\phi_{LOS}^{lake}(\tau_R)$)을 차분하여 생성한 이중차분 간섭위상(DDInSAR 위상)을 시간에 따라 누적하여 참조 DInSAR의 날짜(τ_R)를 기준으로 빙상 표면의 상대 고도 변화를 산출함
- 여기서 참조 DInSAR 영상은 고도 변화를 포함하지 않는 영상으로 선정되어야 함
- ϕ_h^{LOS} 는 SAR 관측 방향(line of sight, LOS)의 고도 변화이며, 이는 아래 식을 이용하여 수직 방향의 상대 고도($h(t)$)로 변환할 수 있음

$$h(t) = \frac{\phi_h^{LOS}(t)}{\cos \theta} \quad (7)$$

- θ 는 SAR의 마이크로 입사각을 의미함
- 식(6)과 (7)을 적용하여 빙상 표면고도의 상대적 변화량을 시계열로 추정하기 위해서는 같은 시간 기선거리를 갖는 DInSAR 영상이 연속적으로 획득되어야 하며, 만약 DInSAR 관측의 시간적 공백이 길면 산출된 빙상 표면고도 변화에 오차가 크게 포함될 수 있음

○ 영상레이더 간섭위상 분석을 통해 추정된 빙저호 상부 빙상 고도 변화 도출 및 검증

- 이 연구에서는 David 2 빙저호와 그 주변 지역(그림 62)에 대해 Sentinel-1 시계열 SAR 영상을 구축하고 식(6)과 (7)을 적용하여 빙저호의 수위변화에 기인하는 상부 빙상 표면 고도변화를 시계열로 산출하였음

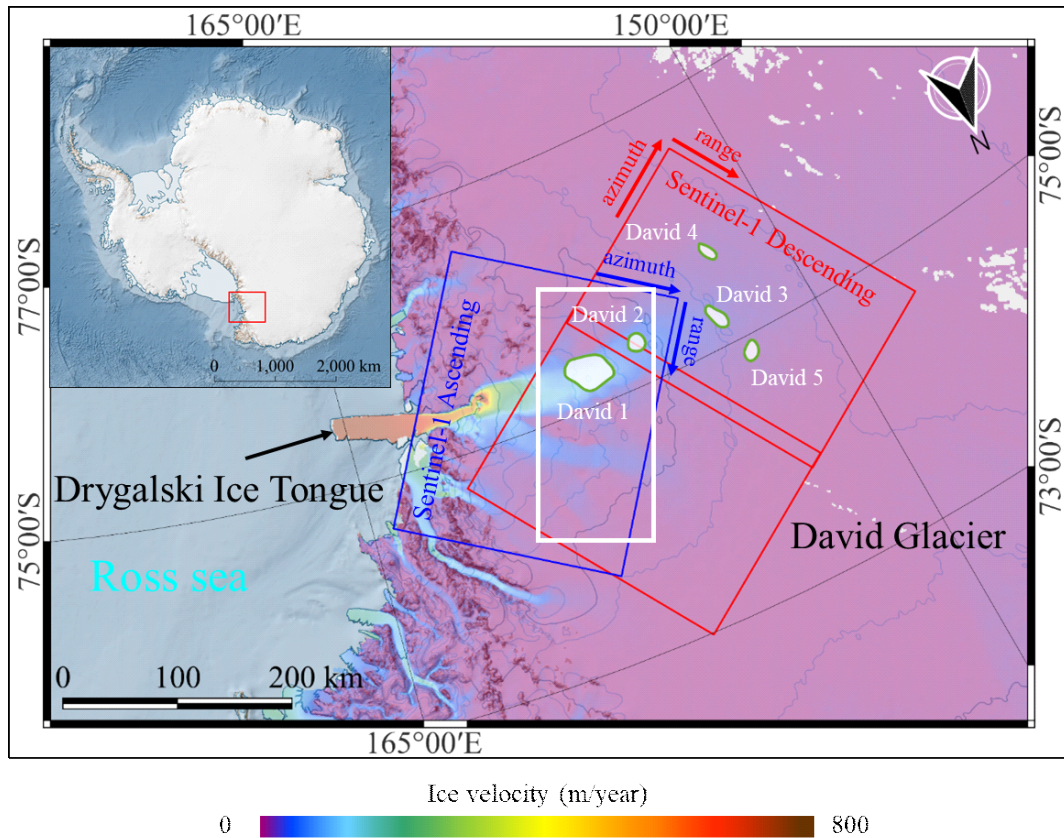


그림 62. David 빙하 주변의 2019-2020 빙하 흐름 속도 지도(Mouginout *et al.*, 2017). 빨간색 및 파란색 다각형은 각각 상향 및 하향 궤도 Sentinel-1 SAR 영상 촬영 범위. 초록색 다각형은 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호 영역을 나타냄. 흰색 사각형은 상향 및 하향 궤도 Sentinel-1 SAR 영상이 중첩되는 영역으로, 이 연구의 관심 지역을 지시함.

- 빙저호 영역 정의를 위해 12일 시간 기선거리의 Sentinel-1 DInSAR 영상을 시계열로 제작한 후, 상향 및 하향 궤도에서 모두 2022년 1월 25일과 2022년 2월 6일의 SAR 영상으로 제작한 DInSAR 영상으로부터 나머지 DInSAR 영상들을 차분하여 시계열 DDInSAR 영상을 생성하였음(그림 63)

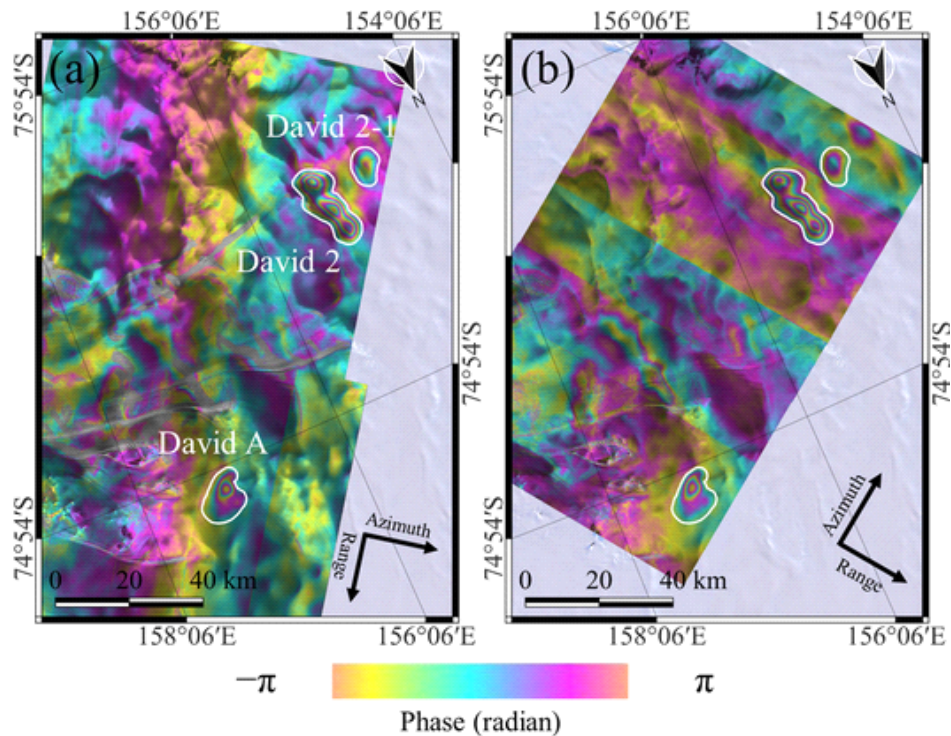


그림 63. Sentinel-1 위성의 (a) 상향 및 (a) 하향 궤도 관측에서의 DDInSAR 영상 예시. 흰색 폴리곤은 두 DDInSAR 영상에서 모두 동일하게 관측되는 폐합된 간섭띠로, 빙저호 활동에 의한 변위를 나타냄.

- 상향 및 하향 궤도 DDInSAR 영상에서 모두 3개의 폐합된 간섭띠가 동일한 형태로 나타나며, 이는 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 David 2 및 본 연구과제를 통해 신규 탐지된 David 2-1과 David A 빙저호의 활동성에 기인한 표면변위를 지시함
- 식(6)의 적용을 위한 참조 DInSAR 선정 및 식(6)과 (7)로 산출된 빙상 표면고도 변화의 검증에 위해 표 5와 같이 ICESat-2 ATL06 고도계 자료를 획득하였음

표 5. 빙상 표면고도 변화 산출을 위해 영상레이더 간섭영상과 융합 활용에 사용된 ICESat-2 ATL06 고도 데이터

ICESat-2 ATL06				
reference ground track	T0001	T0375	T0878	T0192
Dates (YYYY/MM/DD~Y YYY/MM/DD)	2020/03/26~ 2023/09/19	2019/04/22~ 2023/10/13	2019/02/23~ 2023/08/16	2019/01/10~2 023/10/01

- ICESat-2로 관측된 시계열 빙상 표면고도를 통해 Sentinel-1 SAR 관측 기간 중 고도 변화가 최소인 기간을 선정하였음
- David A 빙저호 상부의 빙상 표면고도는 2020년 1월 8일부터 2020년 4월 8일 사이에 약 1 cm의 고도 변화가 ICESat-2를 통해 관측되었으며, 이는 전체 SAR 관측 기간 중 최소 고도 변화에 해당함
- David 2와 David 2-1 빙저호 상부 빙상 표면고도는 각각 2021년 7월 18일부터 2021년 9월 22일, 2020년 8월 21일부터 2020년 11월 20일 사이에 최소 고도 변화(1.7 cm 및 1 cm)를 보였음
- ICESat-2 관측에서 최소 고도 변화를 보이는 기간의 가운데 시기에 해당하는 DInSAR를 식(6)의 적용을 위한 참조 DInSAR로 선정하였음
- David A는 2020년 2월 5일~2020년 2월 17일, David 2와 David 2-1은 각각 2021년 8월 10일과 2021년 8월 22일, 2020년 10월 2일과 2020년 10월 14일의 SAR 간섭쌍으로 제작된 DInSAR를 참조 DInSAR로 선정함
- 각각의 빙저호에 대해 선정된 참조 DInSAR의 위상($\phi_{LOS}^{lake}(\tau_R)$)에는 빙저호의 수위 변화에 따른 빙상 표면고도 변화가 거의 없다고 가정한 후, 나머지 DInSAR 영상들을 차분하는 식(6)을 적용하여 시계열 변위를 산출하였음
- Sentinel-1 위성의 상향 궤도와 하향 궤도 관측은 각각 수개월의 관측 공백기가 존재하였고, 이로 인해 하나의 궤도에서 제작된 DInSAR만 사용하여 식(6)을 적용할 경우 산출되는 빙상 고도 변화에 오차가 크게 포함될 수 있음
- 이 연구에서는 위성 SAR 관측 공백을 최소화하기 위해 상향 및 하향 궤도에서 획득된 모든 영상으로부터 DInSAR를 제작하여 식(6)을 적용하였고, 산출된 변위를 식(7)에 대입하여 수직 방향의 빙상 표면고도 변화를 산출하였음
- 본 연구에서 제안한 방법론으로 산출된 빙저호 상부 빙상 표면고도의 변화량과 ICESat-2 고도계로 관측된 빙상 표면고도의 변화량은 서로 0.999 이상의 높은 상관성을 보였으며, 1.81%의 작은 정규화평균제곱근편차(Normalized Root Mean Square Deviation, NRMSD)를 보였음(그림 64)

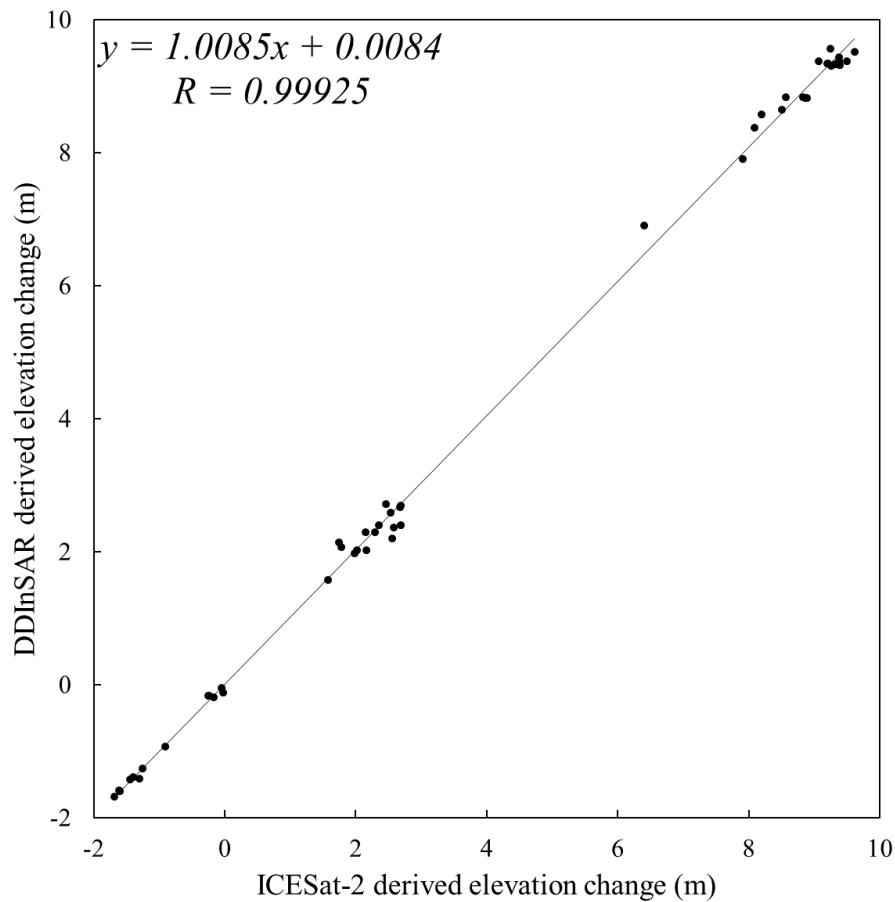


그림 64. 본 연구에서 제안한 기법 및 ICESat-2 고도계로 관측된 빙저호 상부 빙상 표면고도 변화량의 비교.

- 본 연구에서 제안한 기법을 통해 David A, David 2-1, David 2 빙저호의 중심부에서 산출한 빙상 표면고도의 변화는 그림 65의 검은색 점과 같으며, 빨간색 점은 ICESat-2로 관측된 고도 변화에 해당함
- 본 과제에서 제안한 기법은 위성 고도계보다 높은 시간 해상도로 빙상 표면고도의 변화를 산출하며, 빙저호 영역 전체에 걸쳐 SAR의 공간해상도로 빙상 고도변화를 추정하는 데 사용될 수 있음
- 이는 높은 시간 및 공간 해상도로 빙저호의 충전-배수 활동의 분석이 가능함을 지시함

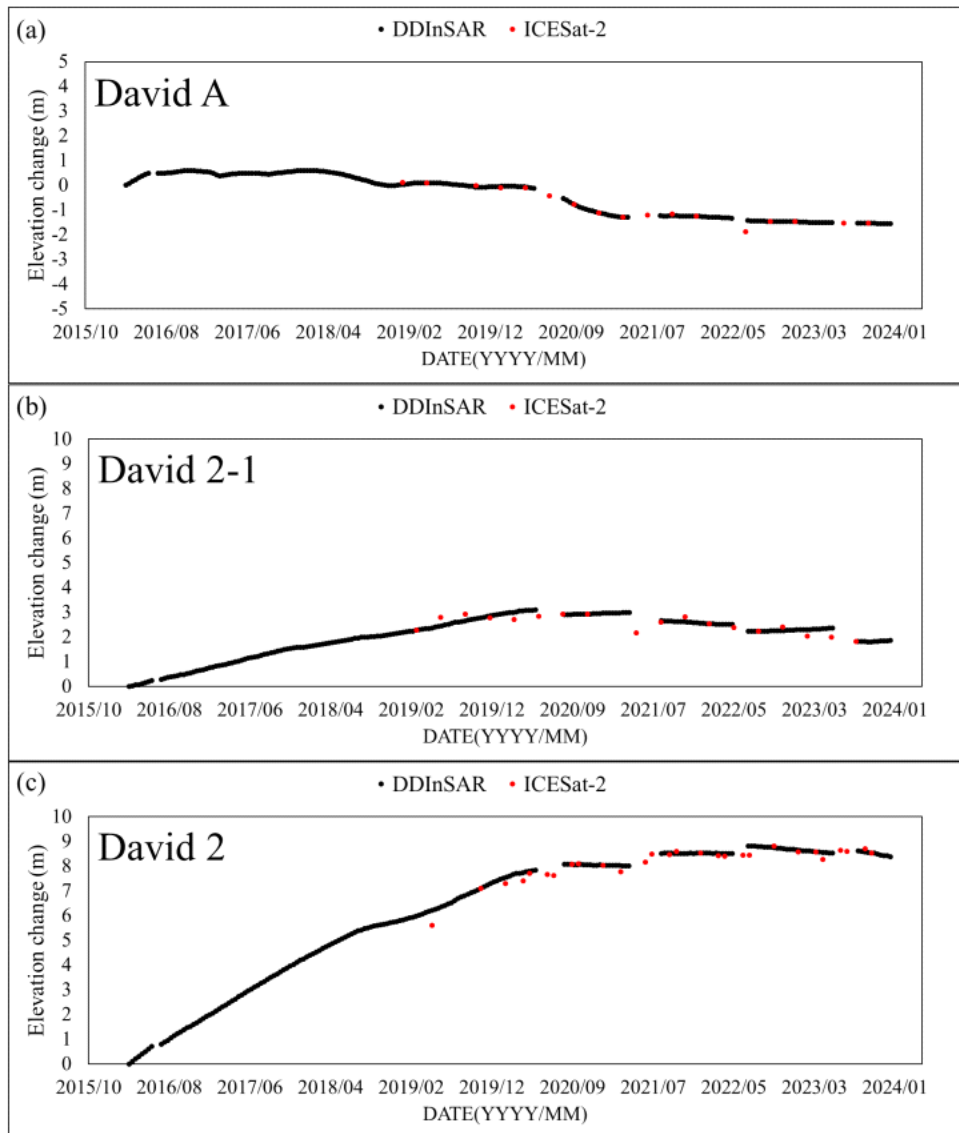


그림 65. 본 연구에서 제안한 방법(검은색 점) 및 ICESat-2 고도계(빨간색 점)로 도출된 빙저호 상부 빙상 표면고도의 상대적 변화.

다. 남극 내륙 빙저호의 충전-배수 활동 분석

○ David 빙하 주변에서 영상레이더 간섭기법으로 탐지된 빙저호의 충전-배수 활동 분석

- 시계열 Sentinel-1 DInSAR 영상에 식(6)과 (7)을 적용하고, 약 6개월 간격으로 David A, David 2, David 2-1 빙저호 상부 빙상의 평균 고도변화율 지도(공간해상도 30 m)를 제작하여 빙저호의 충전-배수 활동을 분석하였음
- 그림 66은 David A 빙저호 상부 빙상 표면의 시계열 고도변화율을 보여줌. 2016년 3월부터 6월까지 빙저호 상부 빙상 고도는 최대 1.94 cm/yr의 속도로 융기하였으며 빙저호의 충전 이벤트가 반영된 것으로 추정됨

- 2018년에 ~ 0.67 m/yr의 빙상 표면 고도 하강(빙저호 배수)을 제외하면 2020년 5월까지 0.2 m/yr 내외의 고도 상승 및 하강이 반복되어 소규모의 충전 및 배수 활동이 있었음이 추정됨
- 2020년 8월부터 12월 사이에 빙상 표면의 고도변화율은 약 -1.7 m/yr로 산출되었으며, 이는 급격한 배수의 영향으로 추정됨
- David A 빙저호 상부 빙상 표면고도의 하강은 2021년 4월까지 0.64 m/yr 수준으로 지속되었으며, 이후부터는 고도 하강의 속도가 0.22 m/yr로 빙저호 수위가 느리게 하강한 것으로 추정됨

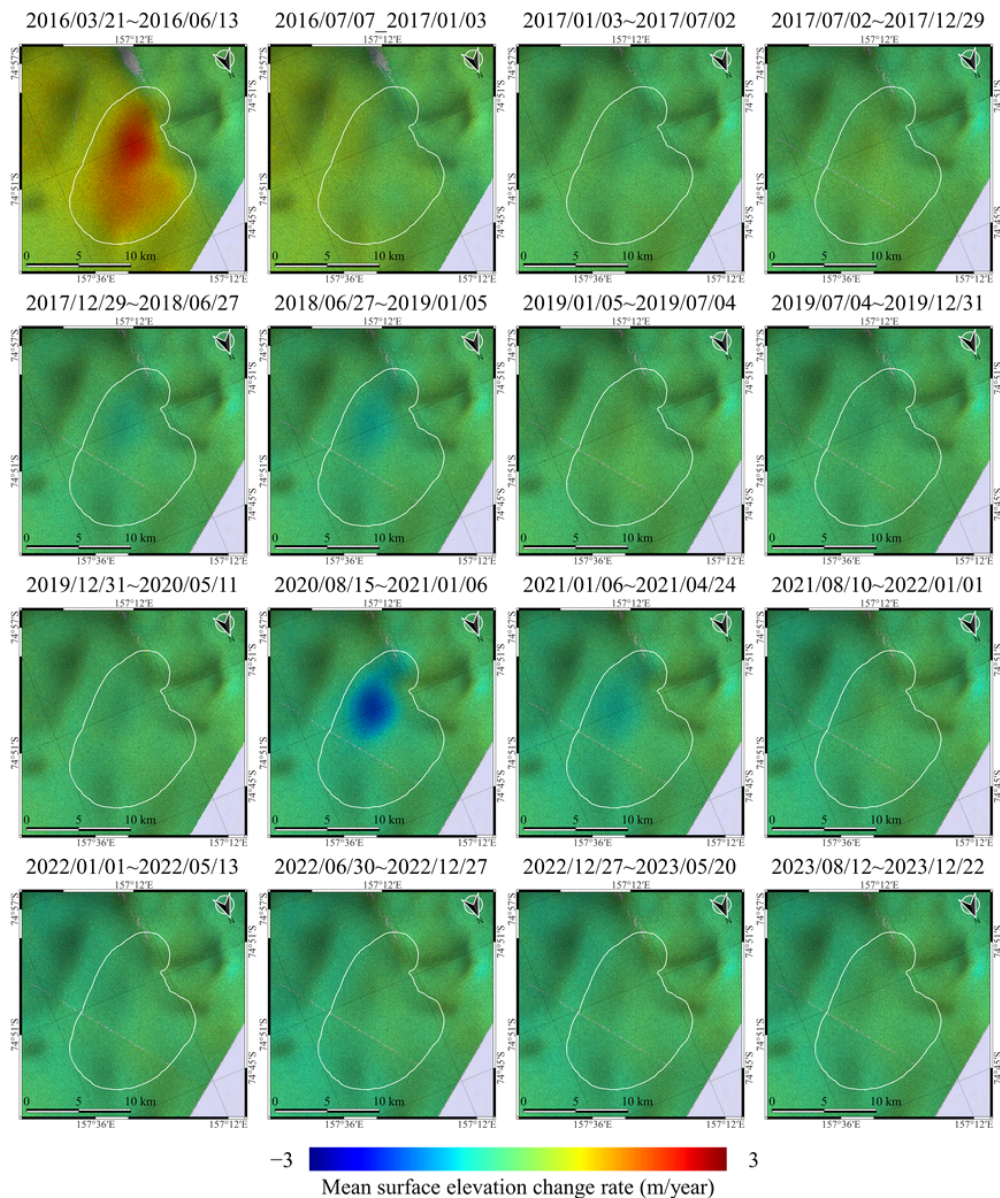


그림 66. David A 빙저호 상부 빙상 표면고도의 시계열 변화율.

- 빙저호에서 대량의 물이 배수되면 새로운 수로가 형성될 수도 있는데(Dow *et al.*, 2018), 2020년 8월-12월에 발생한 대량의 배수로 인해 새로운 배수로가 형성되어 David A 빙저호가 만수위에 도달하지 않아도 이후에 지속적으로 배수되었을 가능성이 있음
- 또한 빙저호의 수위가 만수위를 초과하지 않아도 호수 내부의 압력 변화, 빙하 하부의 용융 또는 이동에 의한 상부 얼음 두께의 감소, 새로운 배수 채널 형성에 의하여 배수가 발생할 수 있음(Livingstone *et al.*, 2022)
- 이는 2020년 이후 지속된 David A 빙저호 배수의 원인일 수 있다고 판단됨
- David 2-1 빙저호는 2016년 3월부터 6월 사이에 1.4 m/yr의 속도로 융기하였고, 2021년 4월까지 고도 상승(0.1-1.3 m/yr)이 지속되었음(그림 67)
- 2021년 8월부터는 배수와 충전이 약 1년 간격으로 반복적으로 발생하였음
- David 2 빙저호 상부의 빙상 표면 고도는 빙저수의 충전으로 인하여 2016년 3월부터 2020년 5월까지 1.1-3.2 m/yr의 매우 빠른 속도로 융기하였고, 이후 1년간 배수로 인하여 ~0.1 m/yr의 느린 속도로 침하하다가 2021년 8-12월에는 융기하는 추세를 보였음(그림 68)
- 2022년 1월부터는 David 2 빙저호 상부 빙상 표면고도의 침하가 발생하였고, 이는 시간이 지날수록 빨라져 2023년에는 0.3 m/yr의 침하 속도가 관측됨
- David 2-1과 David 2 빙저호는 서로 인접(약 6 km 거리)해 있으며, 두 빙저호는 수로를 공유할 가능성이 있음
- 수로를 공유한다면 David 2-1은 David 2의 상류에 위치하고 있기 때문에 두 빙저호가 동시에 충전되는 기간(2016년-2020년)이 설명되기 어려우며, David 2 빙저호가 David 2-1 빙저호와 연결된 수로 외에 다른 경로로 빙저수를 공급받을 가능성을 지시함

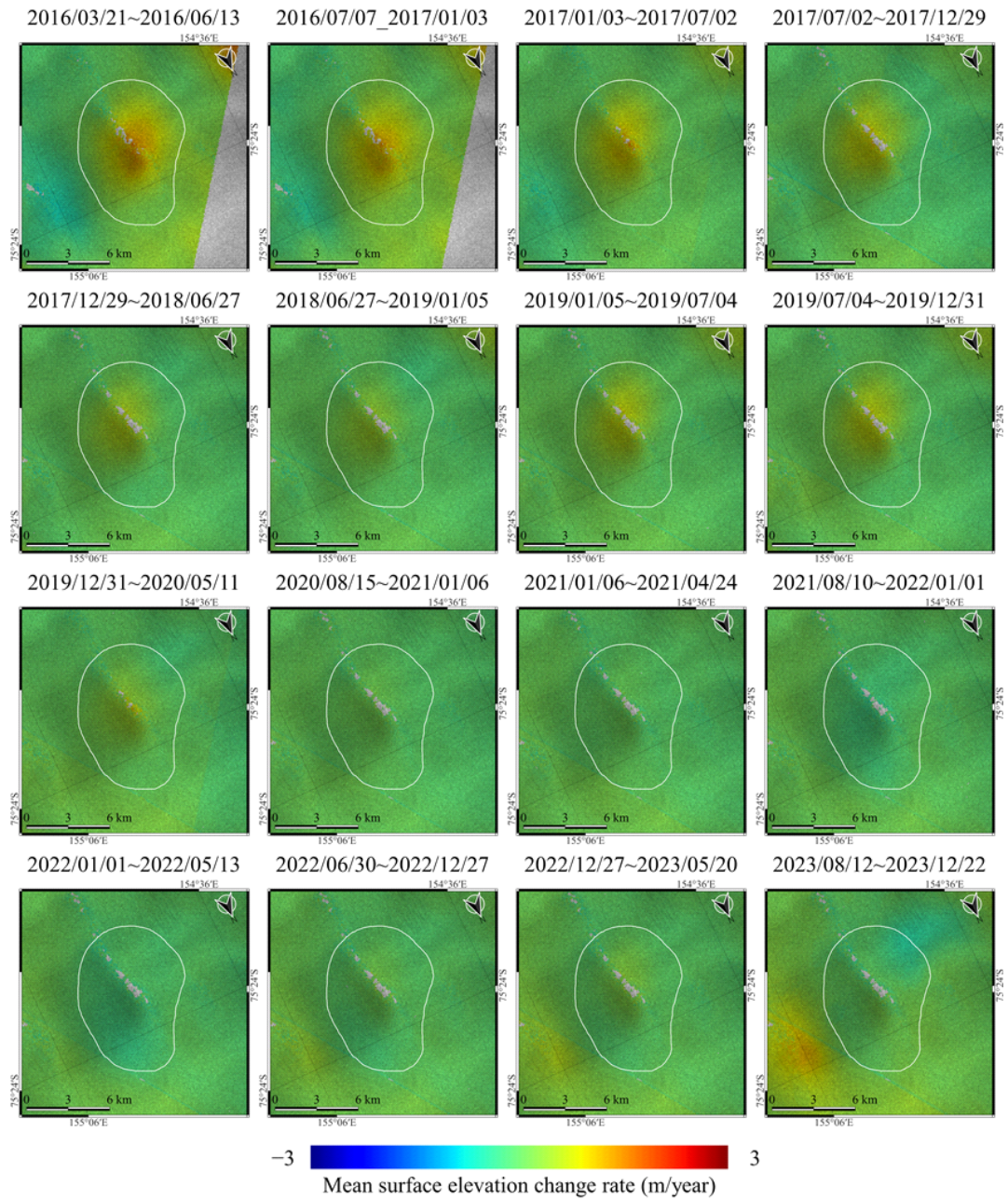


그림 67. David 2-1 빙저호 상부 빙상 표면고도의 시계열 변화율.

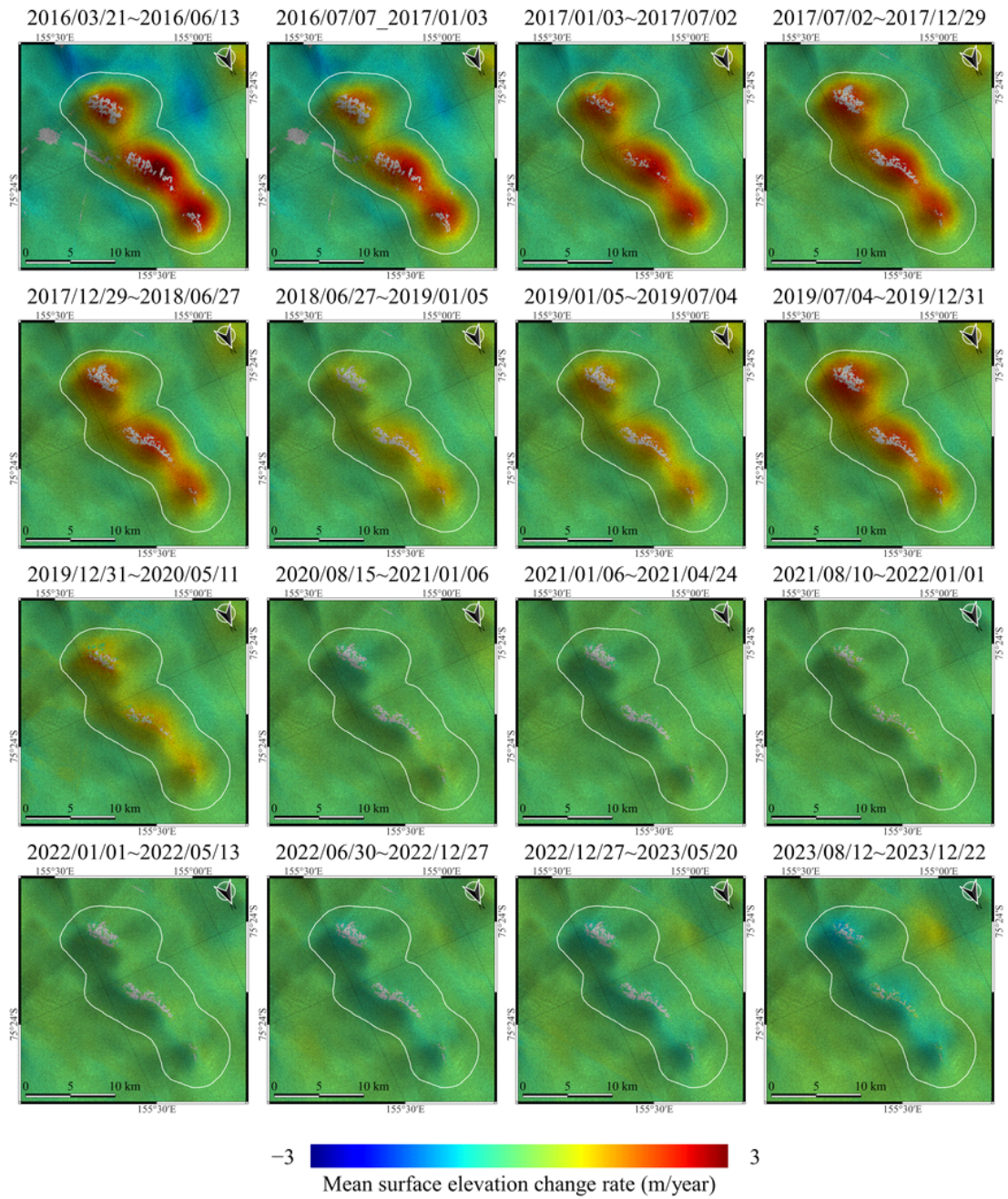


그림 68. David 2 빙저호 상부 빙상 표면고도의 시계열 변화율.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성

1. 연구개발 목표 달성도

성과목표	세부목표	평가의 착안점 및 척도	달성 주요내용	달성도 (%)
빙저호의 지표변위 및 형태학적 특성 정보 산출	빙저호 표면변위 정보 산출	1. 빙저호 탐지 및 변화 공동 연구 수행 능력 2. InSAR 결과 기초 분석 및 해석 능력 3. 연구결과 적용 가능성	- David 빙하 주변 빙저호 지역의 Sentinel-1 SAR 간섭쌍 자료 구축 - InSAR 기법 적용을 통한 빙저호 표면변위 산출 - 빙저호 활동(수위 변화)에 의한 지표변위 산출	100%
	빙저호 형태학적 특성 정보 산출		- 지표변위량에 따른 빙저호의 형태학적 특성 분석 - 레이더 간섭도로부터 David 빙하 주변 빙저호 경계 정의 - InSAR 및 위성 고도계 관측 기반 빙저호 경계의 상호 비교 분석	100%
	미보고 빙저호 추정 지역 탐지 (추가 성과)		- 현재까지 보고된 바 없는 빙저호 추정 지역 발견 - InSAR 기법에 의한 미보고 빙저호 탐지 가능성 분석	100%
인공위성 영상레이더 기반 빙저호 활동성 정보 산출	빙저호의 시계열 정밀 지표변위 산출	1. InSAR 결과 해석 및 활용 능력 2. 빙저호 수체 변화 분석 능력 3. 연구결과 적용 가능성	- 인공위성 InSAR 기법으로부터 빙상 흐름 속도가 보정된 빙저호의 정밀 지표변위 산출 - 고도계 관측자료를 이용한 InSAR 기반 빙저호 탐지 결과 평가	100%
	빙저호 수위 변화 해석		- 빙저호 지표변위의 시계열 변화 정보 정량적 구축 및 해석 - 보정된 빙저호 지표변위를 이용한 빙저호 수위 및 수체 변화 해석	100%
	빙저호 상부 빙상의 변화 및 물리적 특성 추정		- 고해상도 광학영상을 이용한 빙저호 상부 빙상의 표면변화 분석 - 빙저호 지표변위 모델링을 통한 빙상의 탄성특성 추정	100%
빙저호 활동성 변화와 빙상 유동의 상호 영향 파악	빙저호 활동성의 시계열 변동 분석	1. 빙저호 지역 유속 산출을 위한 영상레이더 자료 분석 및 해석 능력	- 영상레이더 이중 위상 차분간섭기법 (DDInSAR)을 통한 David 빙하 유역 빙저호 탐지 및 검증 - 빙저호들의 시계열 수위 변화 속도 산출 및 활동성 변화 해석	100%

	빙저호 주변 빙상의 유동속도 산출	2. 빙저호 활동성과 빙상 유동의 상호관계 분석 능력	- 영상레이더 차분간섭기법(DInSAR)을 활 용한 빙저호 주변 지역 표면변위 산출 - 빙저호 주변 지역 표면유속의 시계열 변 동성 분석	100%
	빙저호 활동성과 빙상 유동 사이의 상관관계 파악	3. 연구결과 적용 가능성	- 빙저호 수위변화 속도에 따른 빙상의 국 지적 흐름속도 변화 해석 - David 빙하 주변 빙저호 배수망 추정	100%
남극 내륙 활성 빙저호 탐지 및 검증	남극 내륙 시계열 영상레이더 자료 조사 및 구축	1. 인공위성 영상레이더 간섭기법 활용기술 개발을 통한 빙저호 추정지역 탐지 연구 수행 능력	- K-Route 주변 남극 내륙 관측 시계열 SAR 데이터 구축 - L-band ScanSAR 데이터 기반 빙저호 탐 지 기술 확보	100%
	영상레이더 간섭기법을 이용한 활성 빙저호 추정 영역 탐지	2. 활성 빙저호에 대한 공간정보(위치, 표면적 등) 산출 여부	- 남극 내륙 빙저호 추정 지역 지표변위 분 석 및 신규 빙저호 탐지 - 남극 내륙 빙저호 추정 영역 공간정보 도 출	100%
	시계열 고도계 자료를 통한 빙저호 탐지 결과 검증	3. 연구결과 적용 가능성	- 인공위성 고도계 관측과 DDInSAR의 융 합 해석을 통한 남극 내륙 빙저호 추정 영역 검증 - 탐지 빙저호 상부 빙상 고도 변화 해석을 통한 빙저호 수위 변화 패턴 분석	100%
빙저호의 충진-배수 활동 분석	빙저호 활동성 시계열 분석	1. 인공위성 영상레이더 간섭기법 결과 해석을 통한 빙저호 표면변위 시계열 분석 능력	- 인공위성 시계열 InSAR와 고도계 관측 융합을 통한 남극 내륙 빙저호 활동성 추 정 - Vostok 빙저호 부근 신규 빙저호 발견 및 활동성 분석	100%
	빙저호 충진-배수 시스템 분석을 위한 영상레이더 간섭위상 분석	2. 빙저호 수위 변화에 의한 시계열 변위 도출 여부	- 시공간적 고해상도의 빙저호 충진-배수 활동 모니터링이 가능한 간섭위상 분석 기술 개발 - 시계열 고도계 관측 자료를 활용한 개발 기술의 적용성 평가 완료	100%
	남극 내륙 빙저호의 충진-배수 활동 분석	3. 연구결과 적용 가능성	- David2 및 신규 발견된 2개 빙저호의 충 진-배수 활동 규명 - 빙저호 수위 변화의 특성 규명 및 시공간 적 변동 패턴 파악	100%

2. 정량적 성과목표 달성도

(계획(건수)/대비(건수))

구분		계획/실적					
논문		국외			국내		
		SCI	기타	소계	SCI	기타	소계
		5/2	/	/	/	/	/
Proceeding		국외			국내		
		4/6			7/12		
단행본(저서)		/					
특허		국외			국내		
	출원	/			/		
	등록	/			/		
기술실시계약		/					
세미나개최		/					
인터넷사이트 개설		/					
기타사항		/					

[SCI 논문 실적]

Hoonyol Lee, Heejeong Seo, Hyangsun Han*, Hyeontae Ju and Joohan Lee, 2021. Velocity Anomaly of Campbell Glacier, East Antarctica, Observed by Double-Differential Interferometric SAR and Ice Penetrating Radar. *Remote Sensing*, 13, 2691.

Siung Lee, Seohyeon Kim, Hyunjun An, and Hyangsun Han*, 2023. Ice velocity variations of the Cook Ice Shelf, East Antarctica, from 2017 to 2022 from Sentinel-1 SAR time-series offset tracking. *Remote Sensing*, 15, 3079.

[국제 학술대회 발표실적]

Hyunsoo Kim, Jong Ik Lee, Joohan Lee, Hoonyol Lee, and Hyangsun Han*, 2021. Observation of Subglacial Lakes in David Glacier, East Antarctica Using DDInSAR and Altimetry. *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2021*, p. 315.

Hyunsoo Kim and Hyangsun Han*, 2022. Analysis of Subglacial Lakes of David Glacier in East Antarctica Using Sentinel-1 DDInSAR. *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2022*, p. 99.

Taewook Kim, Hyunsoo Kim, and Hyangsun Han*, 2023. Activities of subglacial lakes in David Glacier area analyzed from Sentinel-1 DDIInSAR and ICESat-2 altimetry. Abstract presented at 2023 AGU Fall Meeting, 11-15 Dec.

Hyunjin Shin, Hyangsun Han*, A Study on the Feasibility of ALOS-2 ScanSAR Interferometry for Discovering Subglacial Lakes Upstream of David Glacier in East Antarctica. International Symposium on Remote Sensing 2024, 24-26 April.

Taewook Kim, Hoonyol Lee, and Hyangsun Han*, 2024. Activity of Subglacial Lakes Around David Glacier Inferred from The Fusion of Sentinel-1 InSAR and ICESat-2 Altimetry. International Symposium on Remote Sensing 2024, 24-26 April.

Taewook Kim, and Hyangsun Han*, 2024. Elevation changes of the ice sheet above subglacial lakes around David Glacier in East Antarctica measured using Sentinel-1 DDIInSAR. The 37th International Geological Congress 2024, 25-31 August.

[국내 학술대회 발표실적]

한향선, 이훈열, 이주한, 이종익, 2020. Sentinel-1 레이더 이중 위상차분간섭기법으로 관측된 David 빙하 빙저호의 표면변위. 2020 대한원격탐사학회 추계학술대회논문집, p. 70.

김현수, 이종익, 한향선*, 2021. Sentinel-1 DDIInSAR와 위성 고도계를 이용한 동남극의 David2 빙저호 관측. 2021 대한원격탐사학회 추계학술대회 논문집. pp. 151-154.

김현수, 이종익, 한향선*, 2021. 인공위성 SAR 및 고도계를 이용한 동남극의 David2 빙저호 관찰. 2021 대한지질공학회 추계학술대회 초록집. p. 60.

김현수, 한향선*, 2022. 인공위성 레이더 간섭기법을 이용한 동남극 David 빙하의 빙저호 연구. 2022 대한지질공학회 정기총회 및 춘계학술대회 초록집. p. 122.

김현수, 한향선*, 2022. SAR 간섭기법을 이용한 동남극 David 빙하 주변 빙저호들의 표면변위 속도 관측. 2022 추계지질과학연합학술대회 초록집. p. 353.

김현수, 한향선*, 2022. Sentinel-1 DDIInSAR를 통한 동남극 David 빙하 구역의 새로운 빙저호 네트워크 분석. 2022 대한원격탐사학회 추계학술대회 논문집. pp. 306-309.

신현진, 한향선*, 2023. 영상레이더 간섭기법을 이용한 동남극 David 빙하 상류 지역 빙저호 탐지. 2023 한국지구물리·물리탐사학회 봄 학술대회 초록집. p. 42.

김태욱, 한향선*, 이훈열, 2023. Sentinel-1 DDIInSAR를 활용한 동남극 David 2 빙저호의 고도 변화 분석. 2023 대한원격탐사학회 추계학술대회.

신현진, 한향선*, 2023. 남극 David 빙하 상류 유역분지 주변 빙저호 모니터링을 위한 ALOS-2 ScanSAR 간섭기법 활용에 관한 연구. 2023 대한원격탐사학회 추계학술대회.

신현진, 한향선*, 2024. ALOS-2 InSAR를 활용한 동남극 내륙 빙저호 탐지 연구. 2024 KGU 연례학술대회 초록집. p. 137.

김태욱, 이훈열, 한향선*, 2024. Sentinel-1 시계열 DDIInSAR를 이용한 동남극 David 빙하 주변의 빙저수문 활동성 모니터링. 2024 대한원격탐사학회 추계학술대회.

신현진, 한향선*, 2024. ALOS-2 ScanSAR 간섭기법을 활용한 동남극 북빅토리아랜드 빙저호 탐지 및 활동성 분석. 2024 대한원격탐사학회 추계학술대회.

○ 정량적 성과 달성 미흡 원인 및 대책

- 연구지역 특성상 시계열 레이더 간섭위상의 복원을 위한 자료처리 및 결과물에 대한 검토에 많은 시간이 소요되었으며, 연구논문 작성이 늦어짐
- 현재 본 위탁연구의 결과를 바탕으로 1편의 논문이 SCI급 저널에 투고되어 심사 중이며, 1편의 논문도 투고 예정에 있음
- 연구결과 논문화가 지속될 예정이며, 위탁연구사업이 종료된 이후에도 논문 성과가 창출될 수 있도록 하고자 함

3. 기타 성과

가. 학문후속세대 양성

- 석사학위 취득자 8명 배출 (2025년 2월 학위취득 예정자 1명 포함)
- 학사학위 취득자 5명 배출 (2025년 2월 학위취득 예정자 2명 포함)

나. 빙저호 관측 영상레이더 자료 구축을 위한 국제공동연구 추진

- 독일 항공우주센터(DLR)와 스페인 INTA(National Institute Aerospace Technology)의 TerraSAR-X 및 PAZ 위성 활용 프로그램에 빙저호 모니터링 연구계획서를 제출하여 승인받았으며, 2024년까지 고해상도 X-band SAR 영상을 연구에 활용
- 일본 우주항공연구개발기구(JAXA)의 위성 활용 프로그램에 빙저호 모니터링 연구계획서를 제출하여 승인받았으며, 2024년까지 빙저호 연구에 ALOS-2 PALSAR-2 영상을

활용하였음



END USER LICENSE AGREEMENT
for
PAZ Data and any derived products for Scientific Use

Single User License

between **Hisdesat Servicios Estratégicos S.A.** and **END USER (PI)**
Paseo de la Castellana, 149
4ª Planta
28046 Madrid (Spain)
Hereinafter called HISDESAT

Proposal ID	AO-003-057_hyangsun.han
Project Title	Effects of subglacial hydrogeological system on glacier dynamics analyzed by using PAZ-TerraSAR-X DDInsAR and geophysical explorations
PI Name	Hyangsun Han Kangwon National University hyangsun@kangwon.ac.kr
PI Signature and Date	

EULA for PAZ Data - Single Use

Page 1 of 5

Status 06/2019

The 3rd Earth Observation Research Announcement (Non-Funded)



22/JAXA/S1MD No. 0519002
May 24, 2022

Dr. Cheol Seong Jang
KNU University-Industry Cooperation Foundation
Kangwon National University (KNU)
1 Gangwondaehakgil, Chuncheon-si, Gangwon-do, 24341, Republic of Korea

CONFIRMATION SHEET
for
**the 3rd Research Announcement on the Earth Observations
Collaborative Research Agreement (Non-Funded)**
between
the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
and
the Research Organization (RO)
(JFY2022 ~ JFY2024)

Dear Dr. Cheol Seong Jang:

The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) prescribes this confirmation sheet in confirmation of acceptance of the Application Form submitted on January 12, 2022. Therefore JAXA confirms that JAXA and the Research Organization hereby agree to conclude a research agreement to conduct the following research. The terms and conditions of the agreement are stipulated in the "3rd RESEARCH ANNOUNCEMENT ON THE EARTH OBSERVATIONS COLLABORATIVE RESEARCH AGREEMENT (NON-FUNDED) BETWEEN THE JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY AND THE RESEARCH ORGANIZATION".

PI Name	Hyangsun Han
PI No.	ER3A2N147
Research Title	Dynamics of ice shelves and sea ice in East Antarctica investigated by ALOS-2/4 interferometric and polarimetric SAR
Effective Term of the Agreement	From May 24, 2022 To March 31, 2025

Co-Investigators (CI) are defined in the attachment to the Application Form.
JAXA researchers are defined in the APPENDIX of this Confirmation Sheet.

Toshiaki Sato
SATO Toshiaki
Director
Management and Integration Department
Space Technology Directorate I
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505 JAPAN

그림 69. 독일-스페인 및 일본의 인공위성 SAR 활용 빙저호 연구계획서 승인 증빙 자료.

제 2 절 연구개발 성과 및 의의

1. 1차년도 연구개발 성과와 의의

○ 빙저호 지표변위 및 형태학적 특성 정보 산출

- 인공위성 영상레이더 간섭기법을 통해 동남극 David 빙하 주변 빙저호의 정밀 탐지 및 활동성 변화 모니터링을 위한 기술을 설계함
- 빙저호 연구에 널리 활용되고 있는 인공위성 고도계에 비해 짧은 관측 주기를 가지고, 정밀한 2차원 공간정보를 취득할 수 있는 빙저호 원격탐사 기법을 제안하고 적용성을 증명함
- David 빙하 주변 빙저호들의 활동성 변화를 지시하는 지표변위 산출이 가능하였으며, 기존의 고도계 관측과 비교하여 더욱 정밀하게 빙저호 영역을 탐지함

2. 2차년도 연구개발 성과와 의의

○ 빙저호 활동성 정보 산출

- 빙저호의 활동에 따른 지표변위 산출을 위한 레이더 간섭기법 처리 알고리즘을 정립하고, 빙저호의 수위 변화에 상응하는 지표변위를 시계열로 구축함
- 영상레이더 간섭기법으로 탐지된 빙저호 영역과 고도계 관측자료의 상호 비교분석을 통해 빙저호 탐지 결과의 신뢰도를 확보함
- 영상레이더 간섭기법으로 산출된 지표변위를 기반으로 빙저호 탐지 및 활동성 모니터링이 가능함을 확인함
- 빙저호 지표변위에 대한 탄성 휨 모델링 분석을 통해 빙저호 상부 빙상의 탄성특성 추정 가능함을 제시함

3. 3차년도 연구개발 성과와 의의

○ 빙저호 활동성과 빙하 유동의 관계성 분석

- 빙저호 주변 빙상 표면의 정밀 흐름속도 산출을 위한 시계열 레이더 간섭기법 자료처리 알고리즘을 제안함
- David 빙하의 빙저호 수위의 변화속도가 주변 빙상의 표면유속 변화에 미치는 영향을

파악함

- 영상레이더 간섭기법으로 산출된 빙저호 표면변위와 BedMachine 기반 빙저 고도 및 빙상 두께를 이용하여 David 빙하 주변 빙저호들에 대한 수계 네트워크를 해석함

4. 4차년도 연구개발 성과와 의의

○ 남극 내륙 신규 빙저호 탐지

- ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR 영상을 중점 활용하여 남극 내륙(David 빙하 상류-콩코르디아 기지)의 K-Route 인근 지역에서 다수의 빙저호를 신규 탐지함
- 남극 내륙에서 느린 수위 변화를 보이는 소규모 빙저호 탐지를 위한 L-band ScanSAR 간섭기법의 높은 활용성을 제시함
- 다중 주파수 영상레이더 간섭기법을 통해 남극 내륙의 신규 빙저호 탐지가 효과적으로 수행될 수 있음을 확인함

5. 5차년도 연구개발 성과와 의의

○ 남극 내륙 빙저호의 충전-배수 활동 규명을 위한 SAR 활용 기술 개발

- 시계열 영상레이더 간섭도를 활용하여 빙저호의 수위 변화를 시공간적 고해상도로 추정할 수 있는 기술을 최종 확립함
- 인공위성 영상레이더 간섭기법과 고도계 관측을 융합하여 남극 내륙 신규 탐지 빙저호들의 활동성을 추정함
- David2와 그 주변에서 신규 탐지된 빙저호들의 충전-배수 활동을 시공간적으로 규명하고, 빙저수 유동 메커니즘을 파악함

제 5 장 연구개발결과와 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

- 본 위탁연구에서는 인공위성 영상레이더 간섭기법을 기반으로 하는 남극 빙저호 탐지 및 활동성 모니터링 기술을 개발하고, 개발된 기술의 적용성을 평가하였으며, 빙저호들의 충전 및 배수 메커니즘을 규명하는 연구를 수행하였음
- 본 연구에서 개발된 영상레이더 간섭기법 기반 기술은 기존의 위성 기반 기술에 비해 정밀하고 고해상도의 빙저호 활동성 모니터링이 가능하였음
- 그러나 개발된 기술로 탐지된 빙저호의 영역은 빙상의 표면변위에 근거하므로, 빙상의 물리적 특성에 의해 실제 빙저호의 영역과 차이가 있으며, 이는 빙저호 활동에 따른 빙상의 역학적 특성 해석에 불확실성으로 작용할 수 있음
- 영상레이더 간섭기법으로 도출된 빙상의 변위와 기저 지형, 빙상의 물성 등을 종합적으로 고려한 동역학 모델링 연구를 통해 정밀한 빙저호 영역 탐지가 수행될 필요가 있음
- 빙저호의 활동성이 빙상 및 빙봉에 미치는 영향을 종합적으로 이해하고, 최적의 심부 시추 후보지를 결정하기 위해서는 빙저 배수 네트워크의 규명 연구도 요구됨
- 인공위성 영상레이더 기반 기술, IPR 탐사, 탄성과 탐사 등 위성 원격탐사와 복합 지구물리탐사의 융합을 통해 빙저 수문 네트워크 연구의 고도화가 가능하며, 이를 통해 남극 내륙 빙저호 군집에 대한 새로운 빙저수 유동 메커니즘 규명이 가능할 것으로 기대함

제 2 절 연구성과 활용계획

- 남극 빙저호의 정밀 공간정보 구축 및 활동성 모니터링을 위한 원격탐사학적 기술 확보 및 남극 타 지역에서의 적용
- 시공간적으로 고해상도의 David 빙하 주변 빙저호 활동성 정보를 구축하고, 빙저호의 다양한 특성 규명에 활용
- David 빙하 주변 및 K-Route 인근 남극 내륙 빙저호의 활동성 정보와 다중위성 기반 빙상 흐름속도의 상호 영향을 파악함으로써 남극 내륙에서 빙상 유동 특성에 영향을 미치는 빙저호의 물리 특성을 분석할 수 있는 기술 정립에 활용
- 빙저호 지표변위의 시계열 관측을 통해 빙저호의 형태학적 특성을 규명하고 인접한 빙저

호 간의 활동 상호관계 분석을 위한 기반 기술 확립에 활용

- 빙저호 탐사 및 열수시추 원천기술 개발을 위한 중요 기초정보 제공
- 빙저호의 시계열 활동성 분석 데이터를 남극 빙상의 동역학적 특성 변화 모니터링에 활용
- 빙저호의 급격한 배수로 인해 발생할 수 있는 하류 빙하 흐름 변화와 그 위험성에 평가 연구에 활용 가능



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ 인공위성 고도계 기반 빙저호 탐지 및 모니터링 기술

- 미국 University of Washington, University of California-San Diego, University of California Santa Cruz 공동연구팀은 2003년부터 2008년까지 획득된 남극의 ICESat 레이저 고도계 관측값의 시공간적 변화량을 산출하여 124개의 활성 빙저호를 보고함(Smith *et al.*, 2009; 그림 70)
- ICESat 위성의 궤도 및 레이저 고도계 특성에 의해 남극 전역을 관측하지는 못하였으나, 위성 고도계 자료로부터 빙저호 탐지 및 수위/수체 변화를 추정하는 기술을 제시함

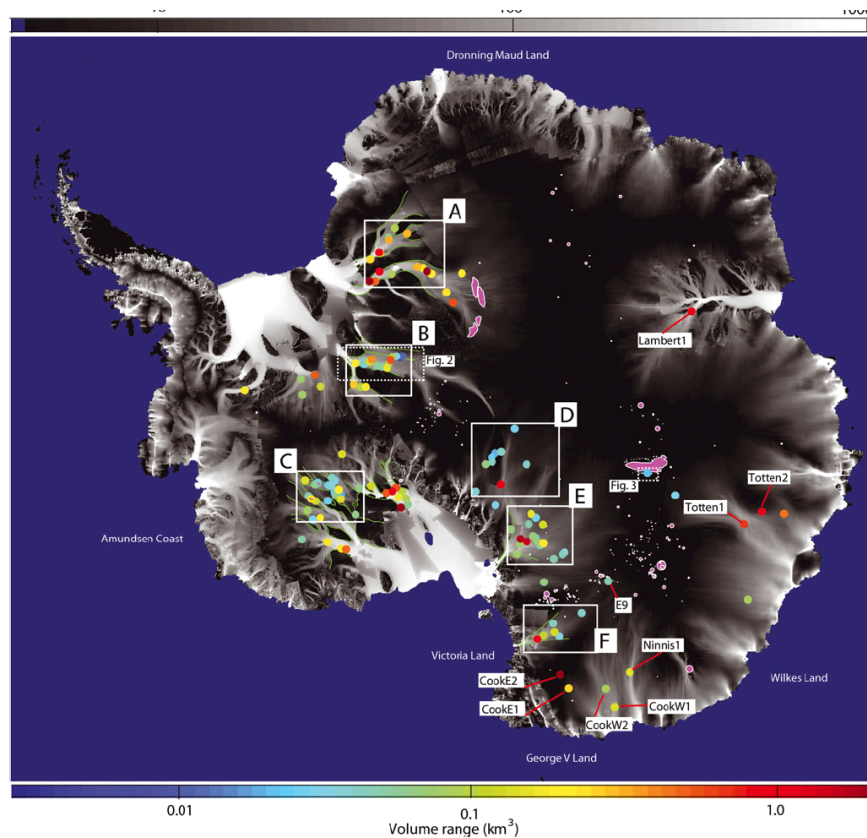


그림 70. ICESat 레이저 고도계 활용 빙저호 탐지 연구(Smith *et al.*, 2009).

- 영국 University of Leeds와 University College London, 유럽우주국(ESA) 공동연구팀은 레이더 고도계 탑재 위성인 CryoSat-2의 남극 관측자료로부터 빙저호 수체의 3차원 지도화를 위한 기술을 개발함(McMillan *et al.*, 2013; 그림 71)
- CryoSat-2 레이더 고도계 관측자료가 빙저호의 배수 이벤트 측정에 효과적임을 설명함

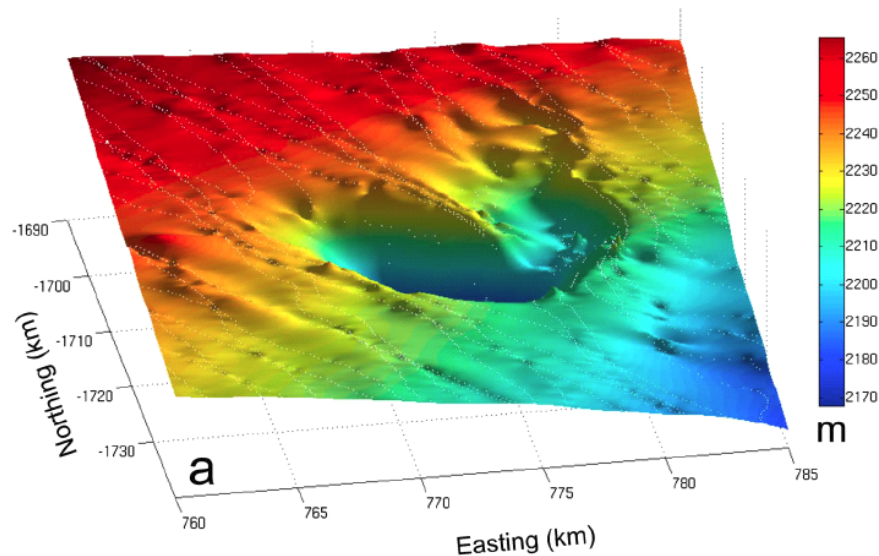


그림 71. CryoSat-2를 활용한 빙저호 부피 변화 연구(McMillan *et al.*, 2013).

극지연구소

- 미국 Colorado School of Mines와 Scripps Institution of Oceanography 공동연구팀은 ICESat의 후속 위성인 ICESat-2의 레이저 고도계 관측자료로부터 남극 빙저호의 활동성을 분석함(Siegfried and Fricker, 2021)
- ICESat-2의 좁은 궤도 간격 및 높은 관측 정밀도는 기존 인공위성 고도계인 ICESat, CryoSat-2 보다 더 효과적으로 빙저호 활동 모니터링 연구를 가능케 함을 설명함(그림 72)
- Stanford University 지구물리학과 연구진은 ICESat 및 CryoSat-2 고도계 데이터를 이용하여 남극 전역에 기보고된 활성 빙저호를 재탐지하고 시계열 고도 변화를 산출하는 방법을 제시함 (Siegfried and Fricker, 2018)
- 장기간의 고도계 데이터를 활용하여 각각의 빙저호마다 reference DEM을 제작하였고 다른 시간의 고도 관측으로부터 차분하여 빙저호 활동에 의한 빙상 고도 이상을 관측하였음 (그림 73)
- Siegfried and Fricker (2018)이 제안한 방법은 빙저호 수위변화에 의한 고도 변화가 너무 크거나 빙상 표면이 거친 지형을 관측하는데 불확실성이 크다는 단점이 존재함

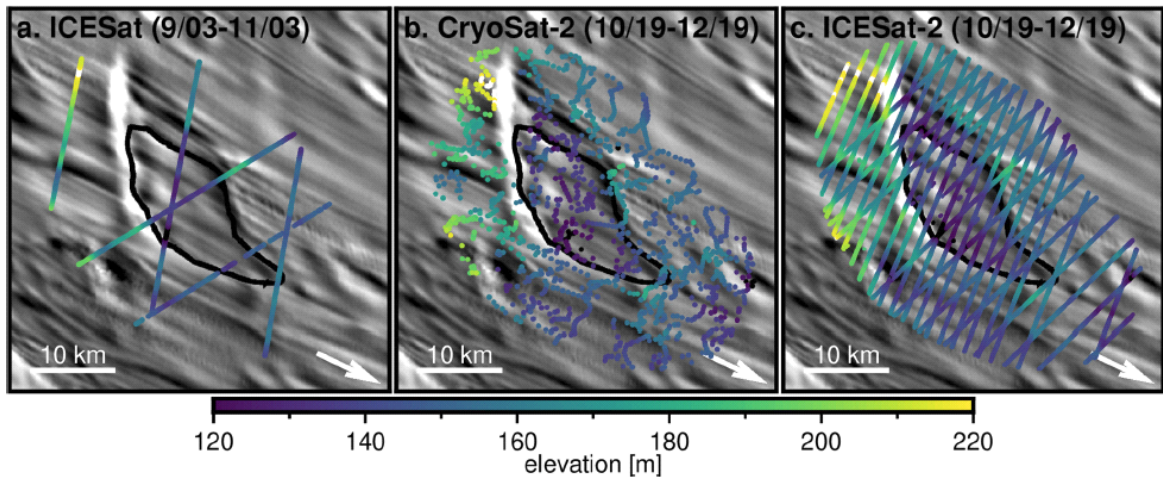


그림 72. ICESat-2 활용 빙저호 모니터링 연구(Siegfried and Fricker, 2021).

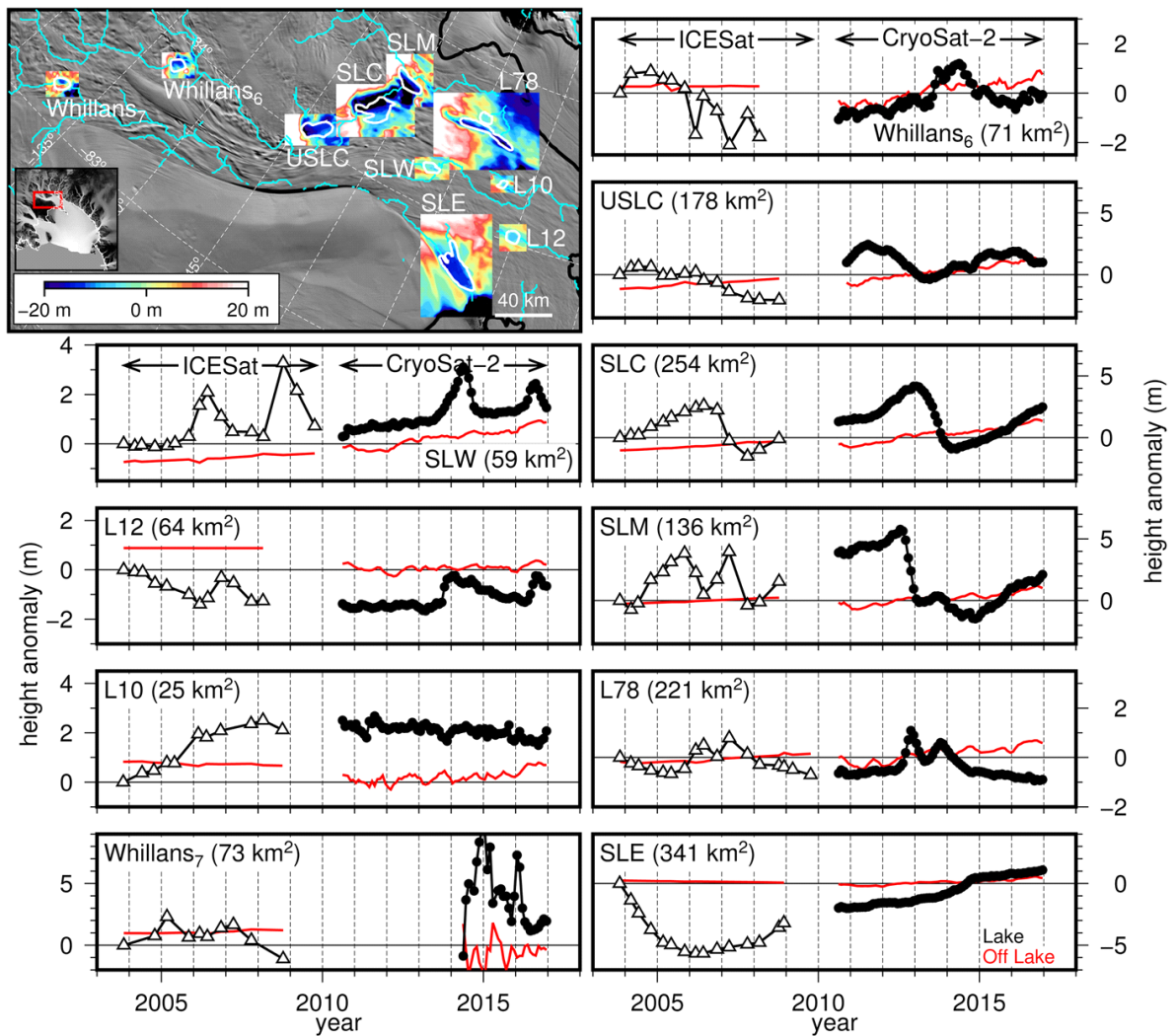


그림 73. 위성 고도계를 활용한 빙저호 활동성 모니터링 연구(Siegfried and Fricker, 2018).

○ 인공위성 영상레이더 기반 빙저호 탐지 및 모니터링 기술

- 캐나다의 University Drive 연구진은 인공위성 영상레이더 간섭기법을 통해 알래스카 고산빙하에 위치한 빙저호의 탐지 및 특성을 분석하는 기술을 제안함(Capps *et al.*, 2010)
- 빙저호의 탐지를 위해 1일의 시간 기선거리를 가지는 레이더 간섭쌍이 활용되었으며, 이를 통해 빙하의 흐름속도 영향이 최소화된 빙저호 지표변위 성분을 산출함(그림 74)
- Capps *et al.* (2010)이 제안한 기법은 빙하 표변변위가 매우 작고, 레이더 간섭쌍의 시간 기선거리가 1일로 매우 짧은 조건에서만 적용이 가능함

○ 이중차분간섭기법 기반 위상 이상 신호 탐지 기술

- Fatland and Lingle (2002)는 미국 알래스카의 Bering 빙하에서 두 장의 영상레이더 간섭쌍의 차분을 통해 시간에 따라 변화하는 원형의 가속도 이상을 관측하였음
- 1~3일의 시간 기선거리를 갖는 이중차분레이더 간섭영상을 활용하여 이 신호가 빙하 하부 물의 이동에 의한 빙상 상부 표면의 수직 변위임을 제안함 (그림 75)
- Fatland and Lingle (2002)이 제안한 방법은 이중차분간섭기법을 통해 약 50 m의 공간해상도로 빙저호를 탐지 가능하였지만 장기간 모니터링은 수행되지 않음

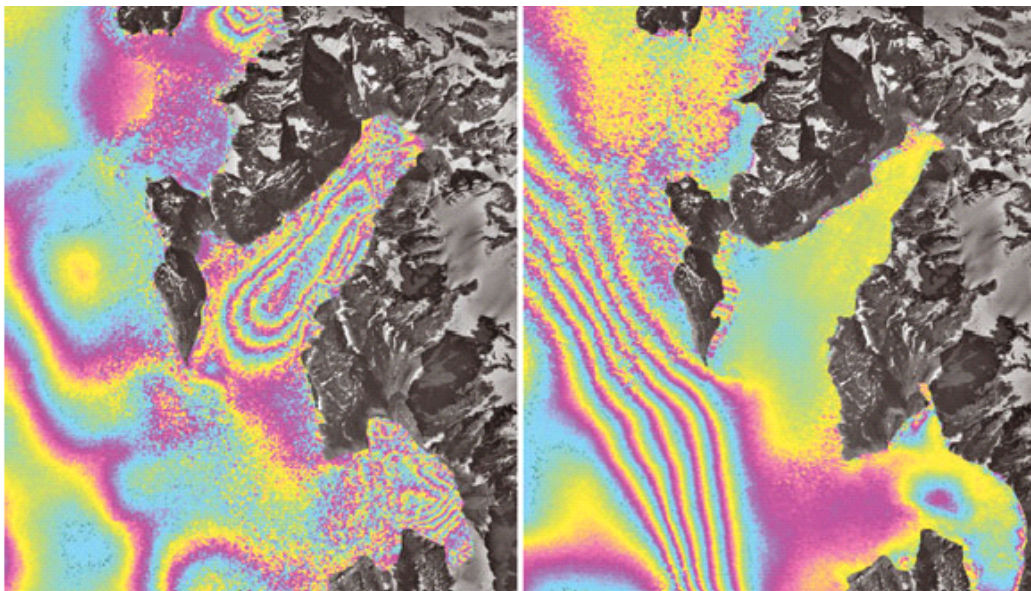


그림 74. 인공위성 영상레이더 간섭기법 기반 고산 빙하 빙저호 연구(Capps *et al.*, 2010).

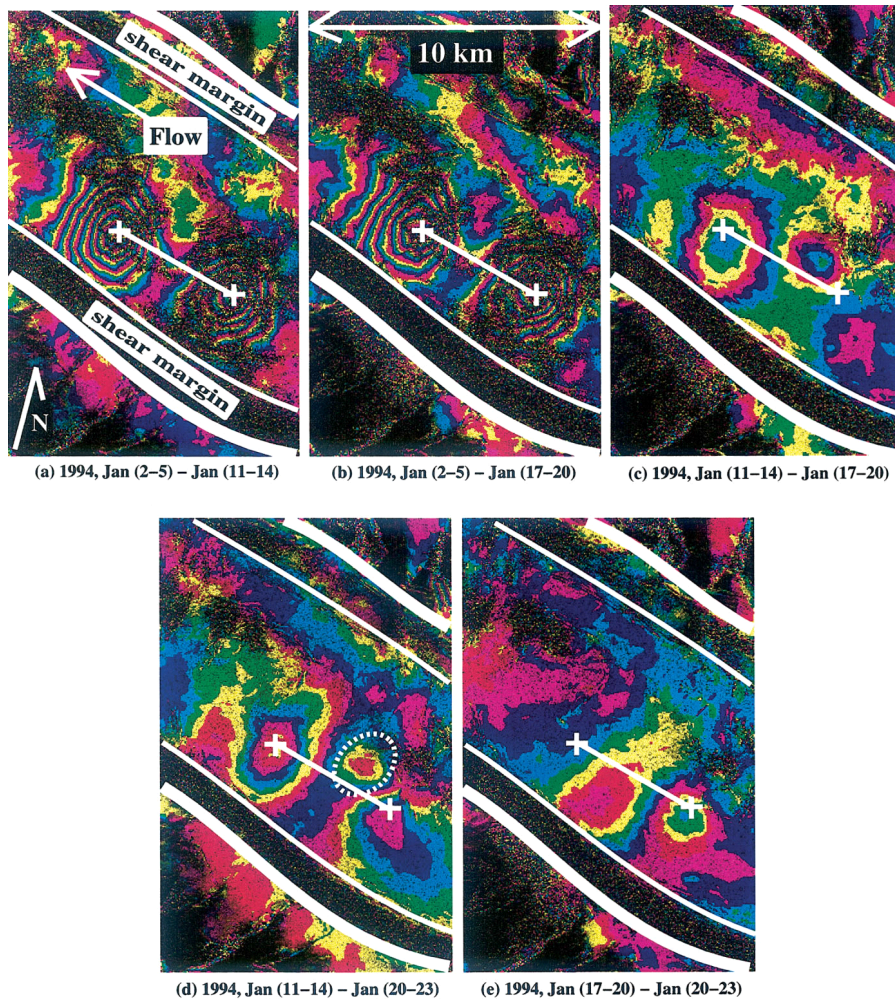


그림 75. 이중차분간섭기법 기반 Bering 빙하 가속도 이상 연구(Fatland and Lingle, 2002).

○ 이중차분간섭기법 기반 빙저호 탐지 및 모니터링 기술

- 독일 Helmholtz Centre의 Polar and Marine 연구진은 다수의 시계열 인공위성 영상레이더 간섭쌍과 고도계를 이용하여 남극 Jutulstraumen Glacier에 위치한 빙저호를 탐지하고 분석하는 기술을 제안함 (Neckel *et al.*, 2021)
- 24일의 시간 기선거리를 갖는 247 장의 레이더 간섭쌍을 평균하여 수평 변위만을 가정한 간섭쌍을 제작하고 이를 각각의 레이더 간섭쌍으로부터 차분하는 이중차분간섭기법을 수행하여 빙저호 수위변화에 기인한 고도변화를 산출함 (그림 76)
- Neckel *et al.*, (2021)이 수행한 방법은 관측 기간 동안 지속적으로 물이 충전되거나 배수되는 빙저호에 적용할 경우 고도변화가 과대 또는 과소평가 될 수 있음

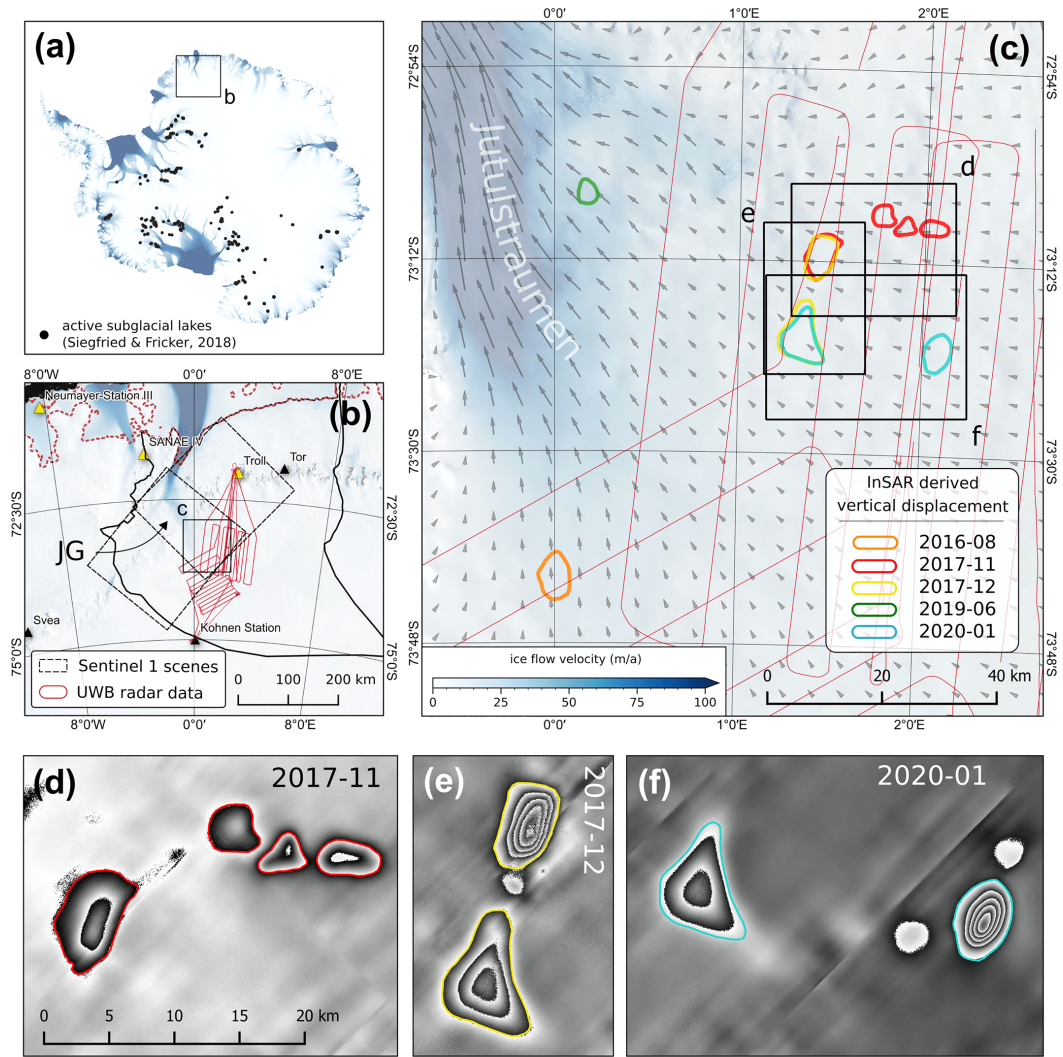


그림 76. 이중차분간섭기법 기반 Jutulstraumen Glacier 빙저호 연구 (Neckel *et al.*, 2021).

제 7 장 참고문헌

- Capps, D.M., B. Rabus, J.J. Clague, and D.H. Shugar, 2010. Identification and characterization of alpine subglacial lakes using interferometric synthetic aperture radar (InSAR): Brady Glacier, Alaska, USA. *Journal of Glaciology*, 56(199), 861–870.
- Dow, C.F., M.A. Werder, G. Babonis, S. Nowicki, R.T. Walker, B. Csathó, and M. Morlighem, 2018. Dynamics of active subglacial lakes in Recovery Ice Stream. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), 837–850.
- Fan, Y., W. Hao, B. Zhang, C. Ma, S. Gao, X. Shen, and F. Li, 2022. Monitoring the hydrological activities of Antarctic subglacial lakes using CryoSat-2 and ICESat-2 altimetry data. *Remote Sensing*, 14, 889.
- Fatland, D.R., and C.S. Lingle, 2002. InSAR observations of the 1993–95 Bering Glacier (Alaska, USA) surge and a surge hypothesis. *Journal of Glaciology*, 48(162), 439–451.
- Gray, L., I. Joughin, S. Tulaczyk, V.B. Spikes, R. Bindshadler, and K. Jezek, 2005. Evidence for subglacial water transport in the West Antarctic Ice Sheet through three dimensional satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 32, L03501
- Iken, A., H. Röthlisberger, A. Flotron, and W. Haeberli, 1983. The uplift of Unteraargletscher at the beginning of the melt season—a consequence of water storage at the bed?. *Journal of Glaciology*, 29(101), 28–47.
- Joughin, I.R., D.P. Winebrenner, and M.A. Fahnestock, 1995. Observations of ice sheet motion in Greenland using satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 22(5), 571–574.
- Lee, H., H. Seo, H. Han, H. Ju, and J. Lee, 2021. Velocity anomaly of Campbell Glacier, East Antarctica, observed by double-differential interferometric SAR and ice penetrating radar. *Remote Sensing*, 13, 2691.
- Lindzey, L.E., L.H. Beem, D.A. Young, E. Quartini, D.D. Blankenship, C.K. Lee, W.S. Lee, J.I. Lee, and J. Lee, 2020. Aerogeophysical characterization of an active subglacial lake system in the David Glacier catchment, Antarctica. *The Cryosphere*, 14(7), 2217–2233.
- Livingstone, S.J., Y. Li, A. Rutishauser, R.J. Sanderson, K. Winter, J.A. Mikucki, J. Björnsson, J.S. Bowling, W. Chu, C.F. Dow, H.A. Fricker, M. McMillan, F.S.L. Ng, N. Ross, M.J. Siegert, M. Siegfried, and A.J. Sole, 2022. Subglacial lakes and their changing role in a warming climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3,

- Malczyk, G., N. Gourmelen, M. Werder, M. Wearing, and D. Goldberg, 2023. Constraints on subglacial melt fluxes from observations of active subglacial lake recharge. *Journal of Glaciology*, 69(278): 1900–1914.
- McMillan, M., H. Corr, A. Shepherd, A. Ridout, S. Laxon, and R. Cullen, 2013. Three-dimensional mapping by CryoSat-2 of subglacial lake volume changes. *Geophysical Research Letters*, 40, 4321–4327.
- Moon, J., H. Lee, and H. Lee, 2022. Elevation change of CookE2 subglacial lake in East Antarctica observed by DInSAR and time-segmented PSInSAR. *Remote Sensing*, 14, 4616.
- Mouginot, J., E. Rignot, B. Scheuchl, and R. Millan, 2017. Comprehensive annual ice sheet velocity mapping using Landsat-8, Sentinel-1, and RADARSAT-2 data. *Remote Sensing*, 9(4), 364.
- Neckel, N., S. Franke, V. Helm, R. Drews, and D. Jansen, 2021. Evidence of cascading subglacial water flow at Jutulstraumen Glacier (Antarctica) derived from Sentinel 1 and ICESat 2 measurements. *Geophysical Research Letters*, 48(20), e2021GL094472.
- Seo, H., H. Han, and H. Lee, 2019. Velocity anomaly of David Glacier, East Antarctica, observed by double-differential InSAR. Proceeding of the International Geosciences and Remote Sensing (IGARSS) 2019, 28 July–2 August, 2019, Yokohama, Japan.
- Siegfried, M.R., and H.A. Fricker, 2018. Thirteen years of subglacial lake activity in Antarctica from multi-mission satellite altimetry. *Annals of Glaciology*, 59(76pt1), 42–55.
- Siegfried, M.R., and H.A. Fricker, 2021. Illuminating active subglacial lake processes with ICESat-2 laser altimetry. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091089.
- Smith, B.E., H.A. Fricker, I.R. Joughin, and S. Tulaczyk, 2009. An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003.2008). *Journal of Glaciology*, 55(192), 573–595.
- Studinger, M., R.E. Bell, G.D. Karner, A.A. Tikku, J.W. Holt, D.L. Morse, T.G. Rithter, S.D. Kempf, M.E. Peters, D.D. Blankenship, R.E. Sweeney, and V.L. Rystrom, 2003. Ice cover, landscape setting, and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3–4), 195–210.

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

Wright, A., and M. Siegert, 2012. A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. *Antarctic Science*, 24(6), 659-664.





주 의

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