영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구

Development of Monitoring Techniques for Subglacial Lake Using Synthetic Aperture Radar

KOPRI
극지연구소

강원대학교

영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구

강원대학교

KOPRI
극지연구소

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 단계보고서로 제출합니다.

KOPRI 극지연구소

2022. 12. 31

총괄연구책임자 : 이종익

위탁연구기관명 : 강원대학교

위탁연구책임자 : 한향선

위탁참여연구원 : 김다희, 김서현, 김진영

“ : 김태욱, 김현수, 안현준

“ : 원유준, 이시웅, 한상명

“ : 홍지훈

보고서 초록

<table>
<tr><td>위탁연구과제명</td><td colspan="5">영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구</td></tr>
<tr><td>위탁연구책임자</td><td>한향선</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>11명</td><td>해당단계
연구비</td><td>130,000,000원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">강원대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 :　　상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)</td><td>보고서
면수</td><td>74</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ David 빙하 주변 빙저호의 형태학적 특성 분석
- David 빙하 주변 빙저호 지역의 시계열 Sentinel-1 SAR 간섭쌍 구축
- 영상레이더 간섭기법 적용을 통한 빙저호 영역의 정밀 탐지 및 검증
- 빙저호 활동(수위 변화 속도)에 의한 지표변위 산출
- David 빙하 주변의 미보고 빙저호 탐지

○ 빙저호의 활동성 모니터링 기술 구축
- 영상레이더 간섭기법 기반 빙저호 활동 특성 변화에 따른 지표변위 산출기술 확보
- David 빙하 빙저호 지역의 시계열 지표변위 해석
- 빙저호 지표변위를 이용한 수위 및 수체 변화 해석 방안 구축
- 빙저호 지표변위 모델링을 통한 빙상의 탄성특성 추정

○ David 빙하 주변 빙저호의 활동에 따른 빙하 유동 분석
- 빙저호들의 시계열 수위 변화 속도 산출 및 활동성 변화 해석
- 빙저호 주변 지역 빙상 표면유속의 시계열 변동성 분석
- 빙저호 수위변화 속도에 따른 빙상의 국지적 흐름속도 변화 파악
- David 빙하 주변 빙저호 배수망 추정</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">빙저호, David 빙하, 인공위성, 영상레이더, 영상레이더 간섭기법, 영상레이더 이중 위상차분 간섭기법</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Subglacial lake, David Glacier, Satellite, Synthetic aperture radar, SAR interferometry, Double-differential SAR interferometry</td></tr>
</table>

KOPRI 극지연구소

요 약 문

Ⅰ. 제 목

○ 영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구

Ⅱ. 연구개발의 목표

○ 인공위성 영상레이더를 이용한 빙저호 지표변위 정밀 관측 및 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 지표변위 산출
- 빙저호 활동에 의한 지표변위 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 지표변위 산출기술 개발
- 시계열 지표변위 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

KOPRI 극지연구소

Ⅳ. 연구개발결과

○ 영상레이더 이중 위상차분 간섭기법을 통한 빙저호 지표변위 산출기술 확립

○ David 빙하 주변 빙저호 공간정보 구축

○ 레이더 간섭기법으로 산출된 지표변위로부터 빙저호의 활동 특성 해석

○ 빙저호 활동 특성 변화가 빙상 표면유속 변화에 미치는 영향 추정

○ David 빙하 주변 빙저호들의 배수망 추정

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

○ 빙저호의 형태, 수위 및 수량 변화, 충진-배수 시스템 규명 연구를 위한 기반기술로 활용

○ 남극 내륙 빙저호 공간정보 갱신 및 활동성 모니터링 연구에 활용

○ 남극 내륙 빙저호 지구물리탐사 및 열수시추 원천기술 개발 연구에 중요 기초자료로 활용

KOPRI 극지연구소

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 techniques for precise observations of surface displacement and activity monitoring of subglacial lakes using satellite synthetic aperture radar

III. Contents and Extent of R&D

○ Development of techniques for morphological characterization of subglacial lakes using satellite synthetic aperture radar

- Construction of interferometric synthetic aperture radar pairs and measurement of surface displacement of subglacial lakes around David Glacier
- Design of remote sensing technique for retrieval of surface displacement by subglacial lake activity
- Defining area and morpholgical characteristics of subglacial lakes

○ Research on subglacial lake activity monitoring techniques based on time-series satellite synthetic aperture radar

- Development of technique for retrieving surface displacement according to the velocity of water level change of the lake
- Establishment of methods for analyzing the changes in water level and water body of subglacial lake from its time-series surface displacement

○ Understanding the mutual influence of subglacial lake and ice sheet flow

KOPRI 극지연구소

- Measurement of ice surface flow around the subglacial lakes
- Analysis of the interaction between subglacial lake activity and ice sheet surface velocity

IV. R&D Results

○ Established subglacial lake surface displacement retrieval technique based on double-differential radar interferometry

○ Established spatial information of subglacial lakes around David Glacier

○ Analyzed the activity characteristics of subglacial lakes from surface displacement derived by the radar interferometry

○ Estimated the effect of changes in the subglacial lake activity on variation of ice sheet surface velocity

○ Estimated drainage network of subglacial lakes around David Glacier

KOPRI 극지연구소

V. Application Plans of R&D Results

○ Identification of the shape, changes in water level and water body, and the filling-draining system of subglacial lakes

○ Updating geospatial information and monitoring activity of subglacial lakes of Antarctic inland ice sheet

○ Utilization as important basic data for development of technologies for geophysical survey and hot water drilling of the subglacial lakes

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 필요성 ····· 1

제 2 절 연구개발의 범위 ····· 2

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 4

제 1 절 국외 연구개발 현황 및 기술 수준 ····· 4

제 2 절 우리나라의 연구개발 현황 및 기술 수준 ····· 6

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 8

제 1 절 연구개발의 목표 ····· 8

제 2 절 연구개발 추진전략 및 방법 ····· 10

제 3 절 연구개발 내용 및 결과 ····· 15

KOPRI 극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 49

제 1 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성 ····· 49

제 2 절 연구개발 성과 및 의의 ····· 54

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 56

제 1 절 추가연구의 필요성 ····· 56

제 2 절 연구성과 활용계획 ····· 56

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 58

제 7 장 참고문헌 ····· 61

부록: David 빙하 주변 빙저호 지역 DDInSAR 영상 ····· 63

KOPRI 극지연구소

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)

○ 우리나라의 극지연구소는 동남극 David 빙하 상류 지역 빙저호에 초점을 맞춰 지구물리 탐사 및 열수시추 기술개발 연구를 진행하고 있으며, 이 연구의 성공적 수행을 위해서는 David 빙하 주변의 빙저호 영역 정밀 탐지 및 빙저호 활동성 모니터링을 위한 기술개발이 필수적임

○ 2000년대부터 인공위성 고도계를 이용하여 빙저호의 수위 변화에 따른 빙상 표면고도 변화가 관측되었고, 이를 바탕으로 빙저호의 탐지 및 활동성 분석이 시작되었음

○ 인공위성 고도계의 경우 점(point) 형식의 자료를 취득하므로 2차원 공간정보를 획득하기 위해서는 여러 번의 관측이 필요하고 많은 시간이 소요되는 문제점이 있으며, 이는 빙저호 탐지 및 모니터링에 단점으로 작용함

○ 인공위성 영상레이더(synthetic aperture radar, SAR) 간섭기법(SAR interferometry, InSAR)은 짧은 기간(수일 - 수십일) 동안 cm 급 정밀도를 가지는 2차원 지표변위 공간정보 취득이 가능한 원격탐사 기법으로 빙저호 탐지 및 모니터링에 효과적으로 이용될 수 있음

○ 인공위성 SAR를 활용하여 남극 및 그린란드의 빙저호를 연구한 사례가 있으나 대부분 단기 관측에 국한되었고, 장기 모니터링을 통한 빙저호 활동성 정보는 제공되지 않고 있음

○ 최근 유럽우주국(European Space Agency, ESA)에서 운용하는 Sentinel-1과 같이 전지구 InSAR 관측이 가능한 영상을 취득하는 인공위성 영상레이더가 지속적으로 발사되어 운용되거나 발사 예정에 있으며, 빙저호의 장기 모니터링 연구에 유용하게 활용될 수 있음

○ David 빙하와 같이 유속이 빠른 지역의 빙저호에 대한 InSAR 관측 결과는 빙상 흐름과 빙저호 수위변화에 의한 표면변위를 모두 포함하고 있어 빙저호 모니터링에 직접적으로 적용되기는 어려움

○ 남극 David 빙하 주변 빙저호의 지구물리탐사 및 열수시추 원천기술 확보를 위해 빙저호 공간정보 구축이 시급하며, 이를 위해 InSAR 관측자료로부터 빙저호를 탐지하고 활동성을 모니터링하기 위한 기술개발이 필요한 상황임

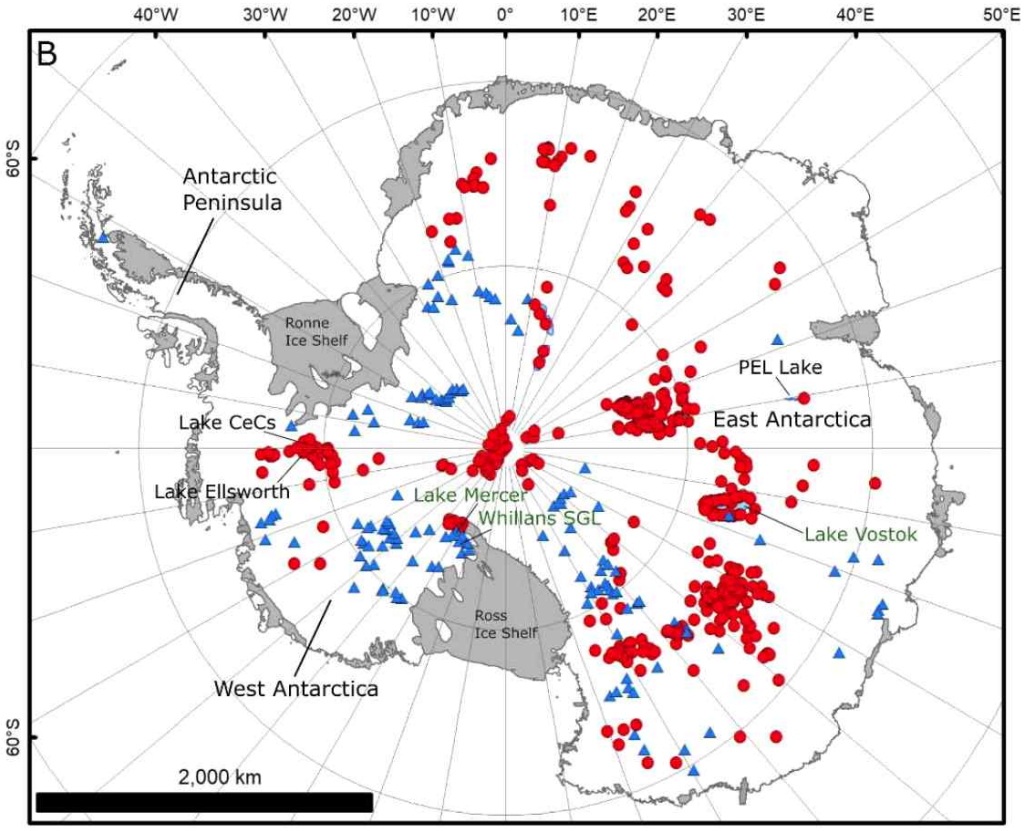


그림 1. 남극의 활성 상태(파란색 삼각형) 및 안정 상태(빨간색 원) 빙저호 분포(Livingstone *et al.*, 2022)

제 2 절 연구개발의 범위

○ 연구의 공간적 범위

- David 빙하 주변에서 현재까지 5개의 활동성 빙저호(David1 - David5)가 발견되었음

- 본 위탁연구에서는 IPR 및 탄성파 탐사 등 지구물리탐사가 수행되어 향후 연구 확장성이 높은 David2 빙저호를 중심으로 인공위성 InSAR 기반 빙저호 모니터링 기술개발 연구를 수행함

- 연구에 가용한 인공위성 SAR 영상의 ground range coverage가 최대 250 km인 점을 고려하여 David2 빙저호 외에도 영상에서 관측 가능한 주변 빙저호들을 연구의 범위에 포함함(그림 2)

○ 연구의 시간적 범위

- 현재 극지역을 주기적으로 촬영하고 있는 SAR 탑재 인공위성은 Sentinel-1이 대표적

- 2015년부터 David 빙하 주변에 대한 Sentinel-1 SAR 간섭쌍(interferometric pair)이 시계열로 구축되고 있으며, 이를 고려하여 2015년 이후부터 빙저호 모니터링 기술개발 연구를 수행함

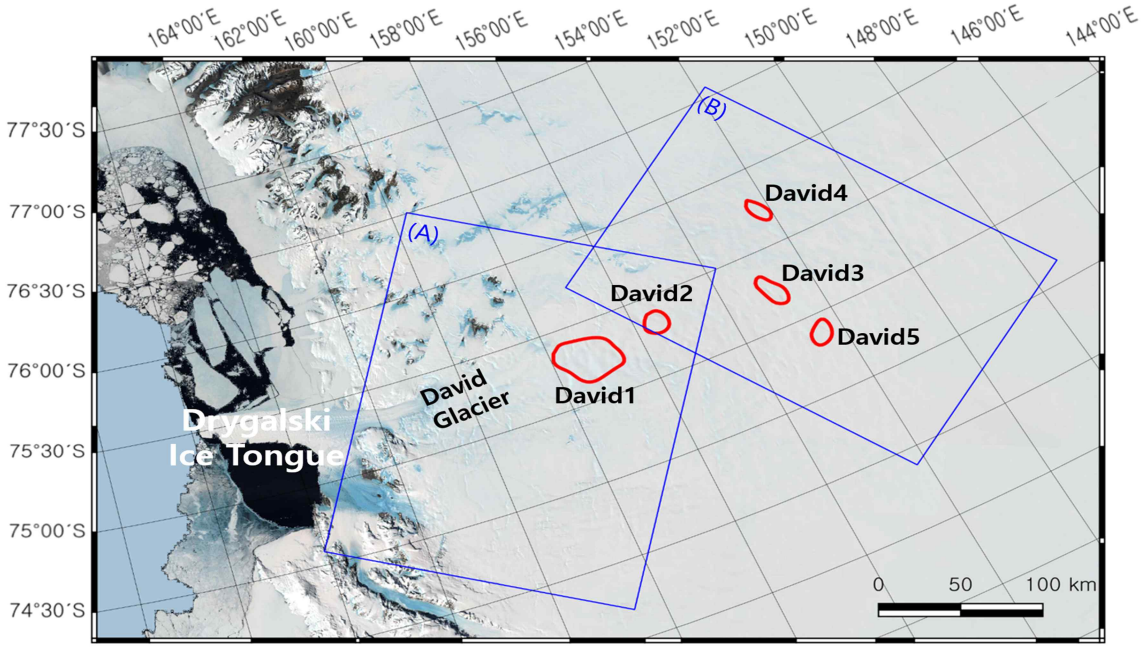


그림 2. David 빙하 주변 빙저호 위치 및 Sentinel-1 SAR 영상 촬영 범위. 빨간색 폴리곤(polygon)은 Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호 영역이며, 파란색 사각형 (A)와 (B)는 각각 Sentinel-1의 상향(ascending node) 및 하향(descending node) 궤도 SAR 영상 촬영 영역

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외 연구개발 현황 및 기술 수준

○ 남극의 빙저호 탐지 및 활동성 모니터링에는 인공위성 고도계를 활용하는 것이 전 세계적인 추세임

○ 빙저호 상부를 덮고 있는 빙상은 호수 수위의 변화에 따라 표면고도가 상승하거나 하강할 수 있으므로 시계열 고도계 관측자료를 이용하면 활동성 빙저호를 탐지하고 모니터링할 수 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 정밀한 고도 측정이 가능하여 수-수십 cm의 고도변화를 보이는 빙저호 탐지에 유용함

○ 미국은 ICESat 및 ICESat-2 위성의 레이저 고도계 시계열 관측자료를 분석하여 남극의 신규 활성 빙저호 발견과 활동 특성 연구를 수행하고 있음(그림 3)

KOPRI 극지연구소

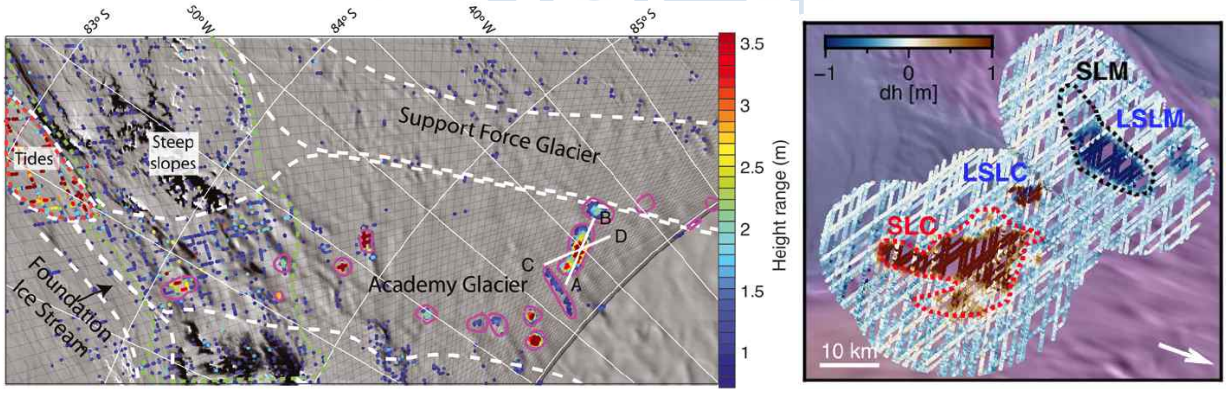


그림 3. ICESat 및 ICESat-2 고도계를 이용한 남극 빙저호 탐지 사례(Smith *et al.*, 2009; Siegfried and Fricker, 2021)

○ 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 4)

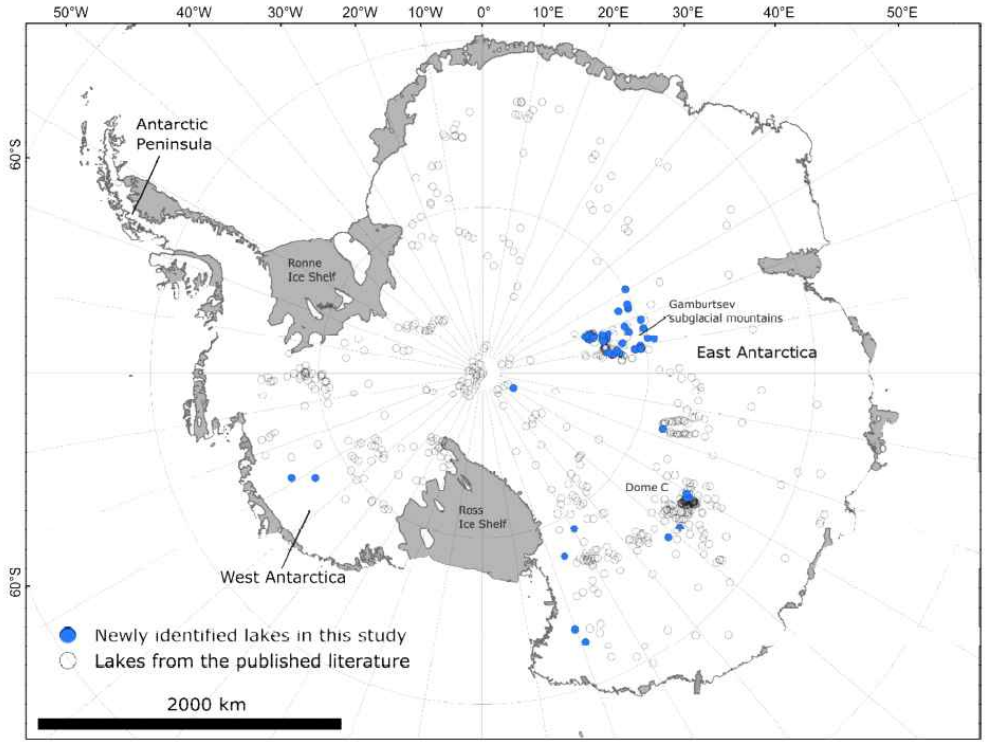


그림 4. 인공위성 고도계(회색 원) 및 radio echo sounding(파란색 원)으로 탐지된 남극 빙저호 (Livingstone *et al.*, 2022)

○ ESA에서 2010년 발사한 CryoSat-2는 레이더 고도계를 탑재하여 날씨와 관계없이 지표고도 측정이 가능하므로 남극 빙저호 모니터링 연구에 널리 이용되고 있음(그림 5)

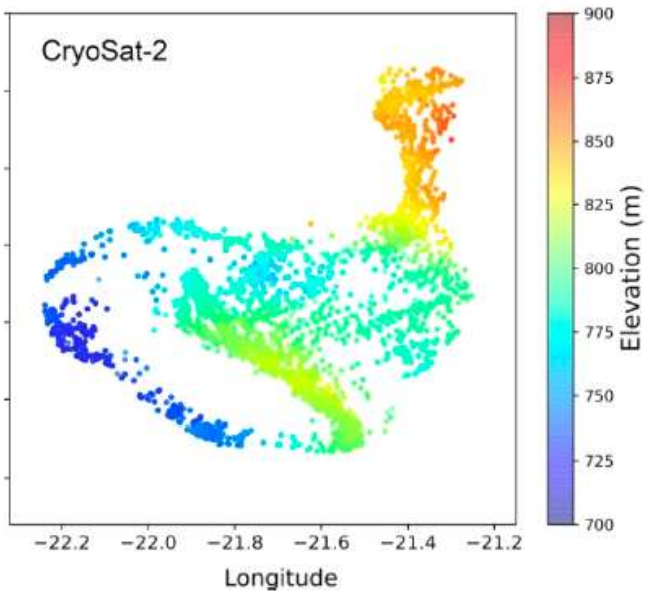


그림 5. 남극 $Slessor_{23}$ 빙저호에 대한 CryoSat-2 고도계 관측 결과(Fan *et al.*, 2022)

○ ICESat-2 레이저 고도계와 CryoSat-2 레이더 고도계 자료는 현재 무상으로 배포되고 있어 빙저호 연구에 활용성이 매우 높지만, 위성의 재방문 주기가 수십-수백 일로 길어 빙저호를 탐지하는데 많은 시간이 소요됨

○ 인공위성 고도계는 광학 및 SAR와 같이 2차원의 영상정보가 아닌 1차원의 점(point) 데이터를 제공하므로 빙저호 영역의 정밀 탐지에도 한계가 있음

○ 최근 미국, 영국, EU 소속 국가들을 중심으로 두 이종 위성 고도계를 융합하여 빙저호 탐지의 효율성과 정밀도 향상을 위한 노력을 하고 있음

○ 국외에서 InSAR를 이용한 빙저호 모니터링 연구는 남극이 아닌 알래스카의 고산빙하(alpine glacier) 지역에서 수행된 연구(Capps *et al.*, 2010) 외에는 거의 없는 상황임(그림 6)

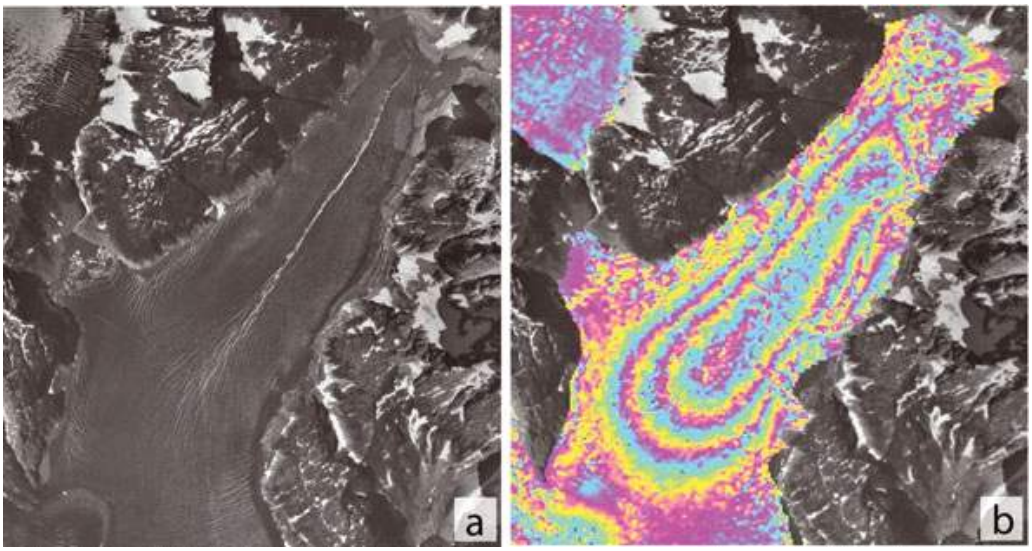


그림 6. (a) SAR 영상에서 관측된 빙저호 상부 빙하의 표면특성 변화와 (b) 영상레이더 간섭기법으로 관측된 빙저호 수위 변동(Capps *et al.*, 2010)

제 2 절 우리나라의 연구개발 현황 및 기술 수준

○ 국내에서 빙저호 원격탐사 연구는 일부 대학에서만 수행되고 있음

○ 인공위성 InSAR를 통한 빙저호 연구 수행기관은 본 위탁연구기관(강원대)이 국내에서 유일하며, 국내 최고의 연구력을 보유하고 있음

○ 본 위탁연구기관에서는 인공위성 InSAR 기술을 통해 David 빙하의 David1 빙저호 인근에서 새로운 빙저호 추정 지역 발견, 장보고 과학기지 인근 Campbell 빙하에서 빙저호의 존재 가능성(그림 7), $Cook_{E2}$ 빙저호의 활동성에 관한 연구를 수행한 바 있음(그림 8)

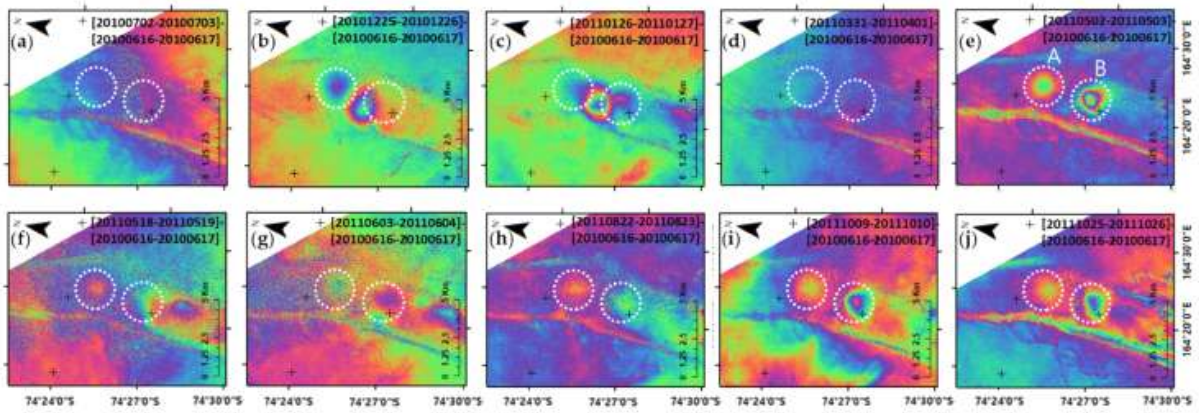


그림 7. 영상레이더 이중 위상차분 간섭기법으로 관측된 Campbell 빙하의 빙저호 추정 지역 탐지 (Lee *et al.*, 2021)

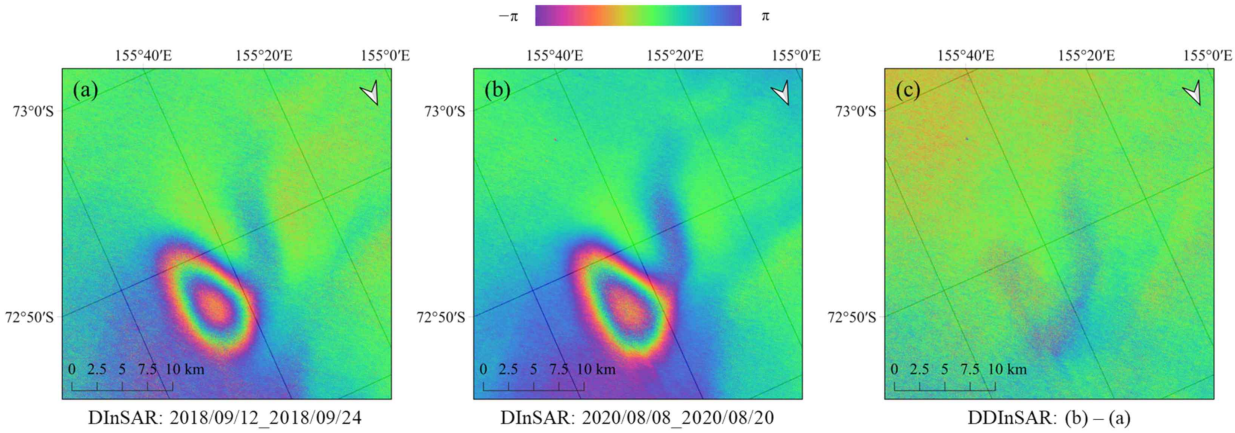


그림 8. DInSAR를 이용한 $Cook_{E2}$ 빙저호 활동 탐지 사례(Moon *et al.*, 2022)

○ 본 위탁연구기관은 다양한 선행연구들을 통해 두 개의 InSAR를 차분하는 기법으로 빙저호 탐지 가능성을 제시한 바 있음

○ InSAR를 통한 광역적인 빙저호 탐지 및 장기 활동성 모니터링 연구는 아직 수행된 바 없으며, 빙저호 연구에 적합한 InSAR 활용기술 개발의 필요성이 제기됨

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

- InSAR 기반 빙저호 활동에 의한 지표변위 산출
- 지표변위 해석을 통한 빙저호의 형태학적 특성 분석 및 공간정보 구축
- 시계열 지표변위 해석을 통한 빙저호의 수위 및 수체 변화 분석
- 빙저호 활동에 따른 빙상 표면의 변화 분석
- 지표변위 해석을 통한 빙저호 지역 빙상의 물리적 특성 추정 가능성 평가
- 빙저호 주변 빙하 흐름속도 산출 및 변동성 분석
- 빙저호 활동성과 빙하 흐름속도 사이의 상호 영향도 파악

KOPRI 극지연구소

나. 연차별 연구목표

연차	연구 목표	연구 내용
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
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
3차년도 (2022)	빙저호 활동성과 빙상의 유동특성 상호 영향 파악	빙저호 주변 빙하 흐름속도 산출 및 변화 분석
		빙저호 활동성과 빙하 흐름속도 사이의 상호관계 파악

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 지표변위 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 표면특성 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 사이의 상호관계 파악	40

나. 정량적 성과목표

구분		계획					
논문	연차별 목표	국외			국내		
		SCI (주/공동)	기타 (주/공동)	소계 (주/공동)	SCI (주/공동)	기타 (주/공동)	소계 (주/공동)
	1년차	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	2년차	1/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
	3년차	2/0	0/0	2/0	0/0	0/0	0/0
	합 계	3/0	0/0	3/0	0/0	0/0	0/0
Proceeding		국외			국내		
		2			3		

제 2 절 연구개발 추진전략 및 방법

1. 추진전략 및 체계

가. 추진전략

○ 인공위성 InSAR 기술을 활용한 빙저호 지표변위의 시계열 분석을 통해 빙저호 활동성을 체계적으로 모니터링 할 수 있는 원격탐사학적 방법을 정립함

○ 위성 고도계 관측은 InSAR 기법에 비해 낮은 민감도와 정확도로 지표변화를 관측하지만, 지표변화의 장기적 트렌드를 분석하는데 용이하므로 InSAR 시계열 분석에 위성 고도계 관측자료를 융합 활용하여 연구결과를 검정함

○ 국외 선진 연구그룹의 빙저호 원격탐사 기술을 도입하여 활용하고, 기존 기술의 한계점을 보완하는 연구를 수행함으로써 원격탐사 기반 빙저호 모니터링 기술의 정확도와 신뢰도를 제고함

○ 극지연구소 지권연구본부, 미답지연구단, 미래기술개발부, 원격탐사연구팀 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 연구수행 결과를 검증하고 연구 영향력을 확산함

KOPRI 극지연구소

나. 추진체계도

그림 9. 연구 추진체계도

2. 추진방법

○ 인공위성 SAR 영상 시계열 자료 구축

- 빙저호 지표변위를 모니터링하기 위해서는 인공위성 시계열 SAR 영상 자료를 구축하는 것이 매우 중요함

- 이 연구에서는 자료의 접근성이 높은 유럽우주국의 Sentinel-1A/B SAR 영상을 적극적으로 활용하고자 함

- Sentinel-1 위성의 활용이 어려울 경우 ALOS PALSAR, ALOS-2 PALSAR-2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed 등의 유/무료 위성 영상레이더 자료를 활용

○ 정밀 지표변위 산출을 위한 고품질 지형고도 자료 활용

- InSAR 기법을 통해 관측된 극지 지표변위의 정확성은 지형고도에 의한 위상 제거에 사용되는 DEM 정밀도에 크게 의존함

- 본 연구에서는 고해상도, 고정밀의 TanDEM-X DEM을 영상레이더 간섭기법에 활용하여 정확도 높은 지표변위 산출

○ InSAR 관측 결과의 보정 알고리즘 개발

- InSAR 관측 결과에 포함된 빙상 흐름속도의 측정 및 제거를 위한 방법론 마련
- 상승 및 하강 패스의 InSAR 자료를 융합하여 빙상 흐름속도 영향이 최소화 된 빙저호 표면변위 산출 기술 구현
- 빙상 흐름속도 변화량을 보정하여 빙저호 수위 변화에 기인하는 표면변위만을 산출할 수 있도록 함

○ 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 표고의 장기변화 관측에 유용하므로, InSAR 기법으로 분석된 빙저호 표면변위의 시계열 변화의 검정에 상호 보완적으로 활용
- InSAR 기법에 의한 빙저호 표면변위를 이용하여 인공위성 고도계 관측의 민감도 평가에 활용
- CryoSat-2, ICESat-2 등의 인공위성 고도계 관측자료를 활용하여 빙저호 지역 표고변화 정보를 구축하고, InSAR 기법을 통해 산출된 빙저호 표면변위의 시계열 변화와 상호 비교 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 처리과정에서의 오류를 최소화하여 정밀한 빙상 흐름속도를 산출할 수 있도록 함

○ 다중센서 위성 관측자료와 현장자료의 상호 보완적 활용

- 빙저호 지역에서 장기 관측된 위성 고도계 자료를 이용하여 InSAR 기법을 통해 산출된 빙저호 활동성 정보(시계열 지표변위 변화 정보)의 신뢰도 평가

- 빙저호 지역 시계열 지표변위 변화와 주변 빙상의 흐름속도 변화의 상호 비교 분석 수행

- 빙저호 활동성과 빙상 흐름속도의 관계성 해석에 빙저 지형을 고려하기 위해 Bedmap2 등 빙상 지반구조를 파악할 수 있는 연구자료 활용

○ 국내외 전문 연구진과의 교류를 통한 연구목표 달성 노력

- 극지연구소 빙저호 연구그룹, 국내외 극지 원격탐사 전문가들과의 교류를 통해 다학제적 연구 논의를 수행하고, 이를 연구수행 과정에 적극적으로 반영

- 공동활용이 가능한 빙저호 지역 현장 및 위성관측 자료를 통합 분석하여 본 연구의 빙저호 모니터링 결과를 검증하고 신뢰도를 확보할 계획임

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
합 계														130,000

KOPRI 극지연구소

제 3 절 연구개발 내용 및 결과

1. 빙저호의 지표변위 및 형태학적 특성 정보 산출

가. 빙저호 표면변위 정보 산출

○ David 빙하 빙저호 지역 인공위성 영상레이더 간섭쌍 구축

- 빙저호 표면변위를 시계열로 관측할 수 있는 인공위성 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 10)

  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

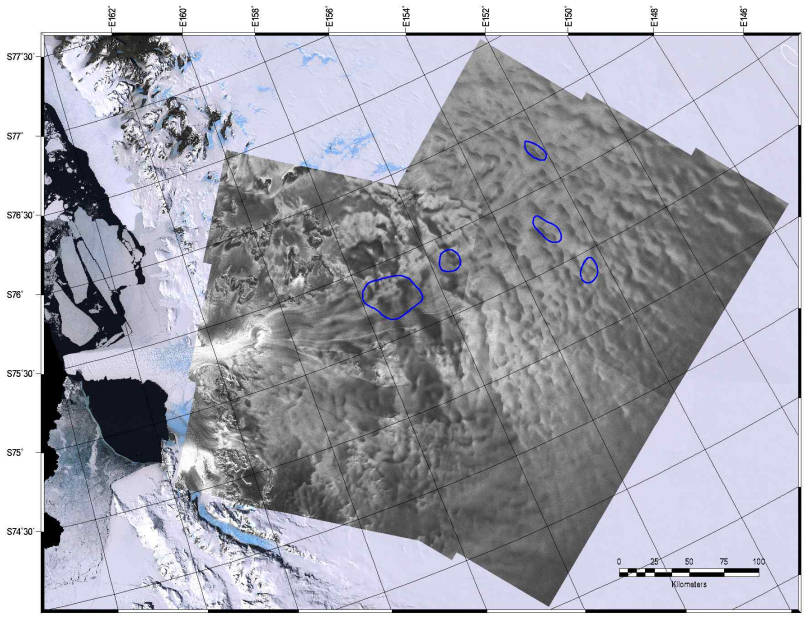


그림 10. David 빙하 주변 빙저호 지역에 대해 구축한 3개 패스의 Sentinel-1 SAR 관측 범위

KOPRI 극지연구소

- 각각의 패스에서 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 지표변위 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 11은 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 12는 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

KOPRI 극지연구소

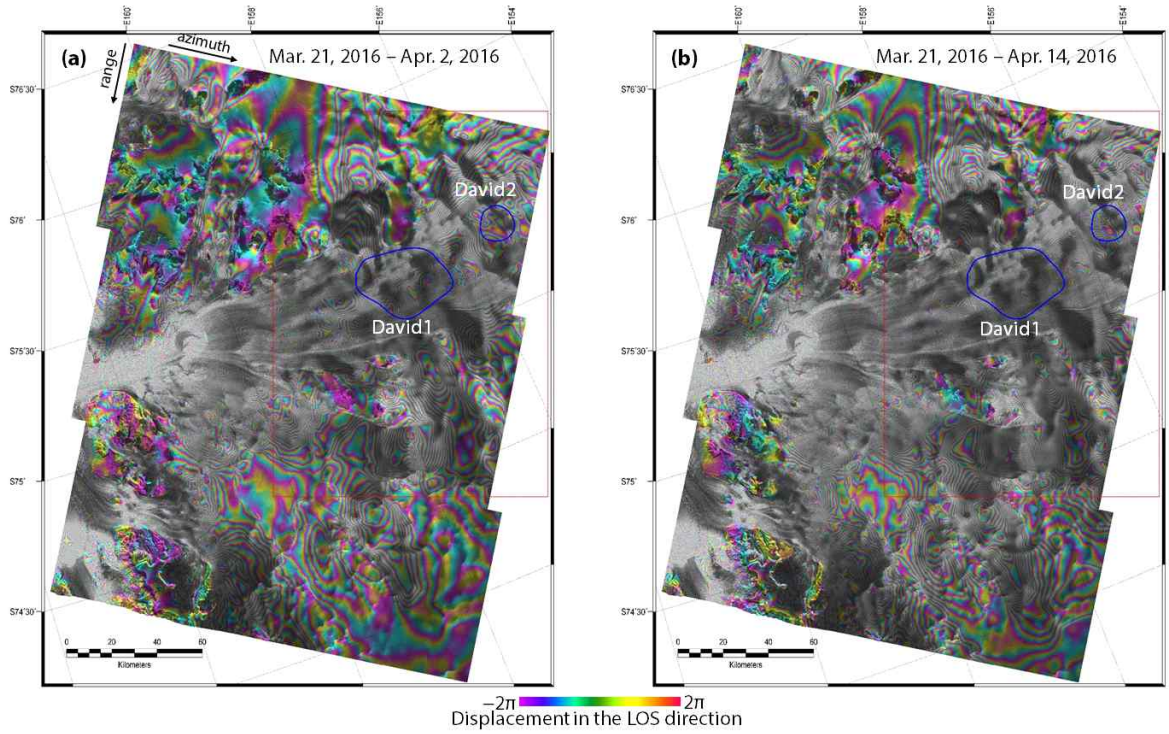


그림 11. David1, David2 빙저호를 포함하는 Sentinel-1 InSAR 영상 예시, (a) 12일 시간 기선거리의 InSAR 영상, (b) 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상

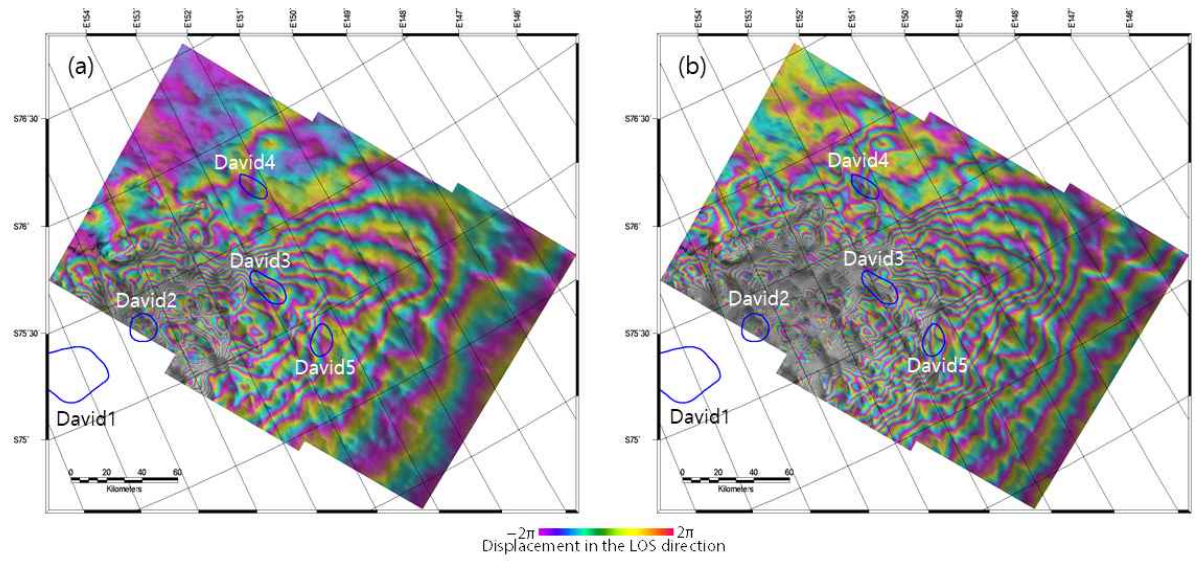


그림 12. David2, David3, David4, David5 빙저호를 포함하는 Sentinel-1 InSAR 영상 예시, (a) 12일 시간 기선거리의 InSAR 영상, (b) 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상

- David1을 제외한 나머지 빙저호 지역은 빙하 유속이 느리고, 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상에서도 지표변위가 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 13은 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

KOPRI 극지연구소

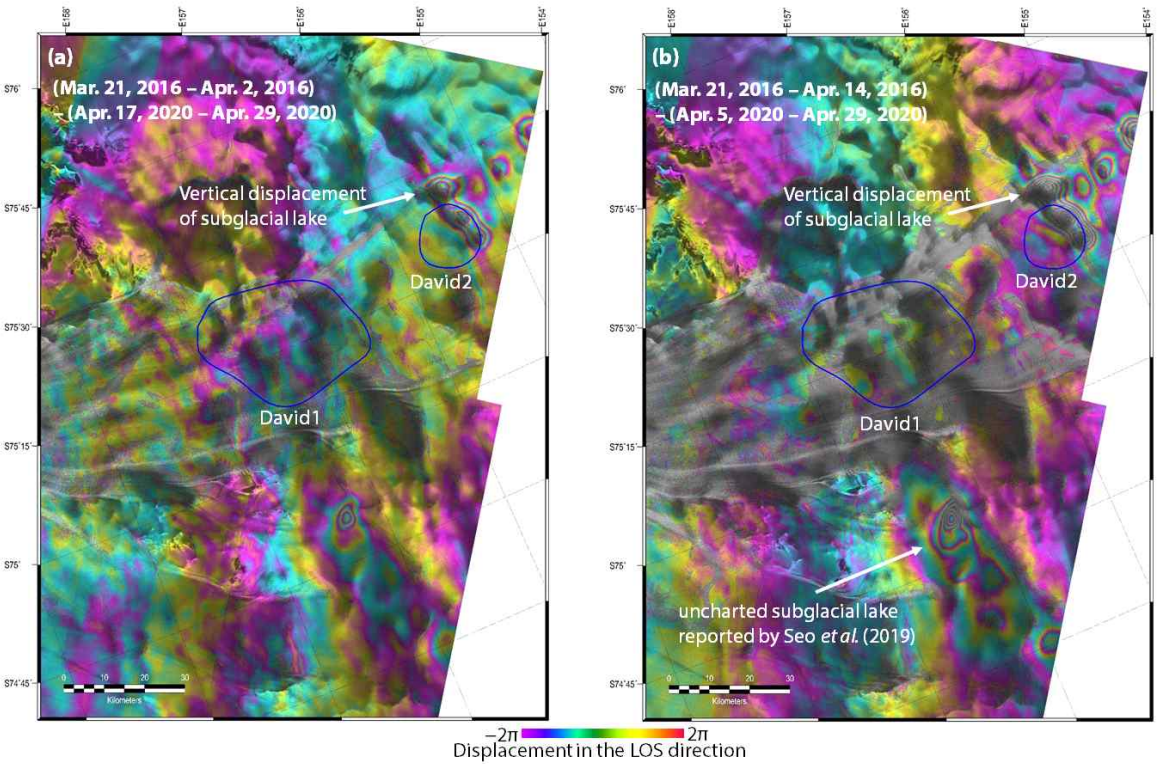


그림 13. David1, David2 빙저호 주변 지역에 대해 (a) 12일 시간 기선거리와 (b) 24일 시간 기선거리의 Sentinel-1 InSAR 영상을 이용하여 생성한 DDInSAR 영상 예시

- 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 표면변위를 보다 명확하게 관측할 수 있음을 확인

- David2 빙저호 뿐만 아니라 Seo *et al.* (2019)에서 새롭게 보고된 빙저호의 표면변위도 DDInSAR에서 관측됨을 확인

- 그림 14는 David3, David4, David5 빙저호에 대한 DDInSAR 영상의 예시로, Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호 지역(적색 폐합선)에서 폐합된 형태의 지표변위가 뚜렷하게 관측됨(David4 빙저호 제외)

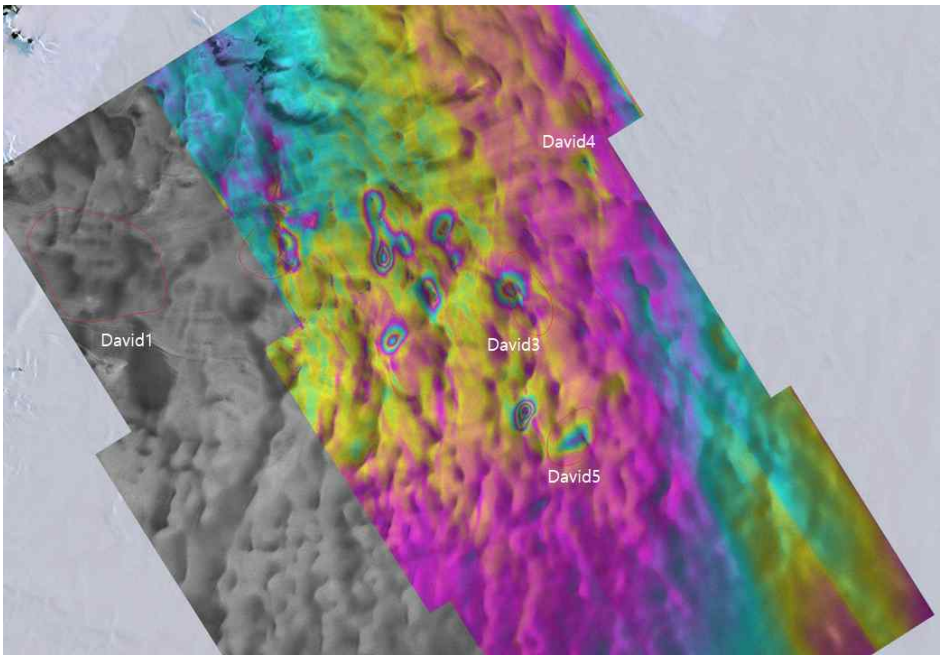


그림 14. David3, David4, David5 빙저호 주변 지역에 대해 24일 시간 기선거리의 Sentinel-1 InSAR 영상을 이용하여 생성한 DDInSAR 영상 예시

- DDInSAR에서 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
- DDInSAR 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 DDInSAR 영상의 간섭띠 패턴 분석

- DDInSAR 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 DDInSAR 영상에서 간섭띠 변화를 분석
- 그림 15는 서로 다른 시기에 획득된 24일 시간 기선거리의 InSAR 영상(InSAR 관측 사이의 시간차는 최대 3년)을 사용하여 생성한 DDInSAR 영상으로 청색 폐합선은

Smith *et al.* (2009)에서 보고된 빙저호 경계를 지시

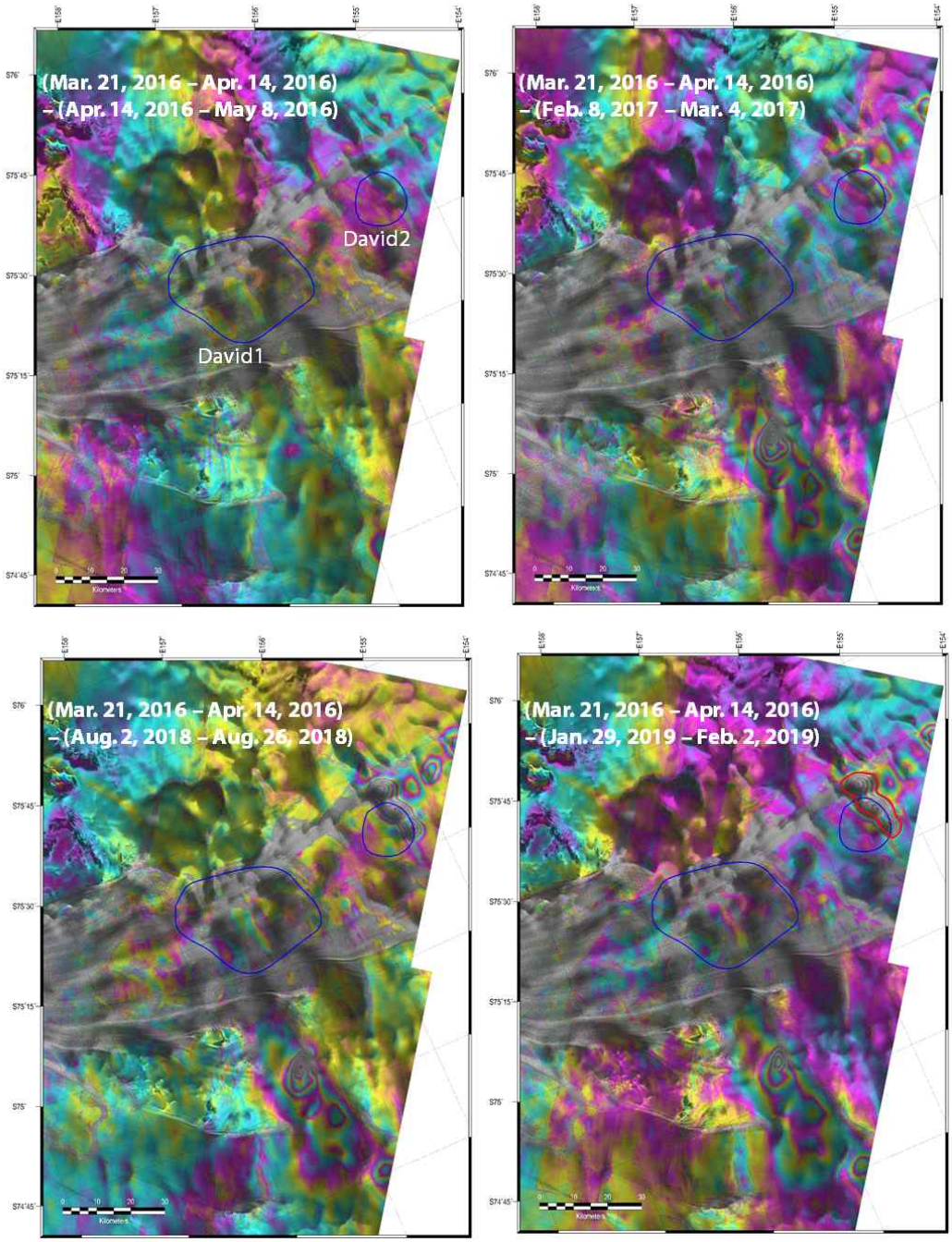


그림 15. David1, David2 빙저호 주변 지역에 대해 1개월, 1년, 1년 6개월, 3년의 시간차를 가지는 InSAR 영상쌍을 이용하여 생성한 DDInSAR 영상

- 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 형태

가 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 16의 적색 폐합선)

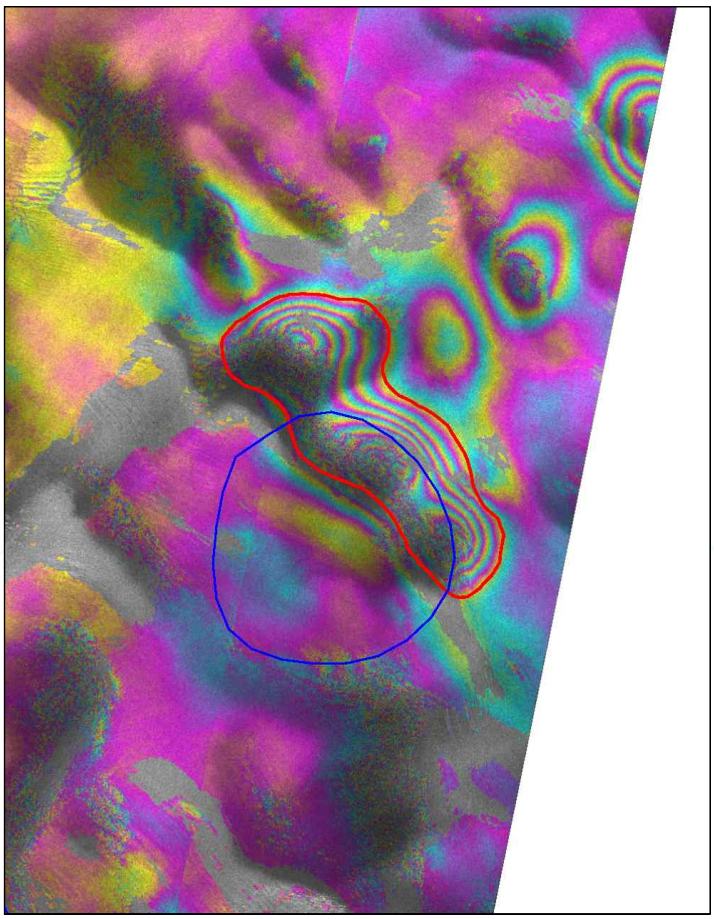


그림 16. DDInSAR에서 정의된 David2 빙저호 영역(적색 폐합선)과 Smith *et al.* (2009)에서 위성 고도계 관측으로 정의된 David2 빙저호 영역(청색 폐합선)

- 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 표면변위에 더 민감하기 때문으로 분석됨

- 위의 DDInSAR 영상에서 David2 빙저호 주변(좌상단)에 폐합된 형태의 변위가 관측되고 있으며, 이는 현재까지 보고된 바 없는 소규모의 빙저호 또는 David2 빙저호가 현재 알려진 바와 비교하여 더 넓은 범위에 걸쳐 형성되어 있음을 나타냄

- 다시기의 DDInSAR 영상을 검토한 결과 David2 빙저호의 2차원적 형태가 유지되고 있음을 확인

- 그림 17은 2016년 3월과 2018년 2월의 InSAR 영상으로 생성한 DDInSAR 결과로부터 빙저호의 지표변위 지도를 제작한 것으로, 두 시기의 InSAR 관측 기간 사이에 10 cm 이상의 표면변위 차이가 발생한 것을 보여줌

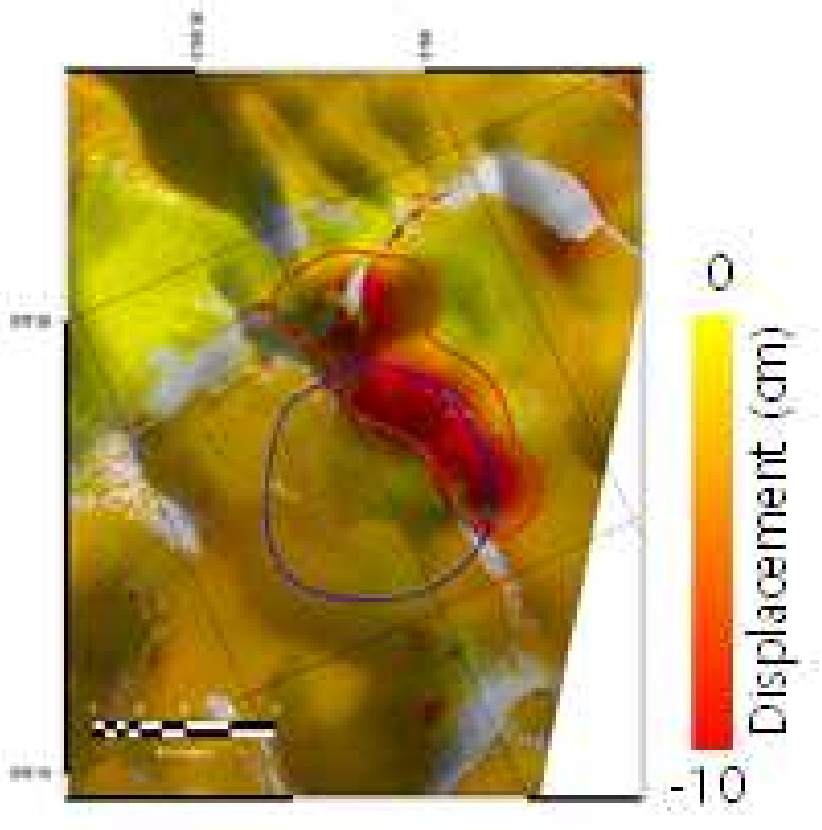


그림 17. DDInSAR로 제작한 David2 빙저호의 표면변위 지도. 적색 폐합선과 청색 폐합선은 각각 본 연구의 DDInSAR와 Smith *et al.* (2009)에서 위성 고도계 관측으로 정의된 David2 빙저호 영역

- 위의 지표변위 지도는 DDInSAR의 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 표면의 변위를 cm급 정밀도, 수십 m 공간해상도로 제공하며 인공위성 고도계 관측보다 뛰어난 빙저호 탐지력을 보임

- 아래 Sentinel-1 DDInSAR 영상(그림 18)은 위성 고도계 관측 기반으로 보고된 David 빙하 주변 빙저호(적색 폐합선, Smith *et al.*, 2009) 외에도 빙저호로 추정되는 지역을 다수 보여주고 있음

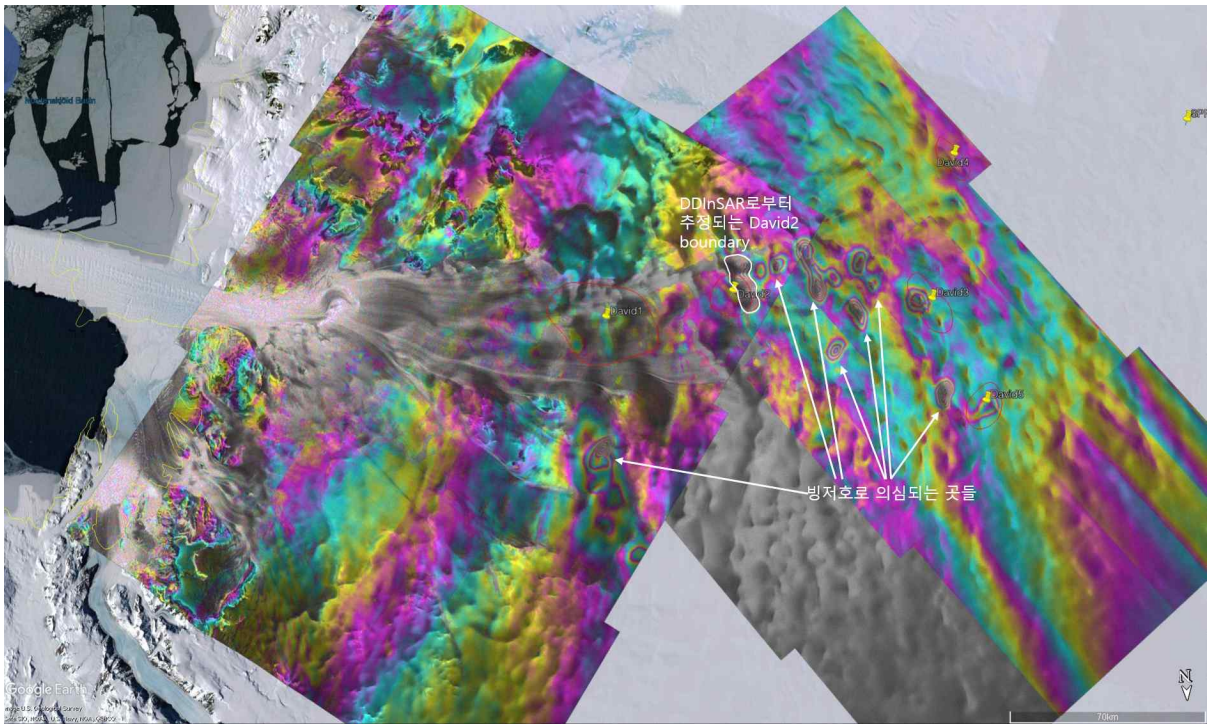


그림 18. DDInSAR 영상에서 발견된 빙저호 추정 지역

- 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. 빙저호의 시계열 정밀 지표변위 산출기술 개발

○ 인공위성 InSAR 기법으로부터 빙상 흐름속도가 보정된 빙저호 지표변위 정밀 산출

- 빙저호의 활동성은 지표의 수직변위로 관측될 수 있음
- InSAR 기법은 지표변위를 cm급 정밀도로 관측할 수 있으나, 빙저호 지역의 경우 빙상 흐름에 의한 수평변위와 빙저호 활동에 의한 수직변위가 모두 InSAR 영상에 포함됨
- 빙상의 흐름속도에 시간에 따라 일정하다고 가정하면, 두 개의 InSAR 영상을 차분하는 DDInSAR 기법을 통해 빙저호 활동의 시간적 변화에 의한 수직변위만을 관찰할 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($\overrightarrow{dd}=(dd_x,dd_y,dd_z)$)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_y는 DDInSAR 변위에 포함된 빙상 흐름의 시간적 변화 성분이며, dd_z는

빙상 흐름의 변화가 제외된 빙저호 지표변위를 나타냄

- 그림 19는 DDInSAR 변위의 빙상 흐름속도 보정 알고리즘을 David 빙하 주변에서 신규로 탐지된 빙저호에 적용한 결과 중 하나로, 좌측 영상은 DDInSAR 영상, 우측 영상은 DDInSAR에 포함된 수평 방향 변위 성분(빙상 흐름의 시간적 변화)을 지시함

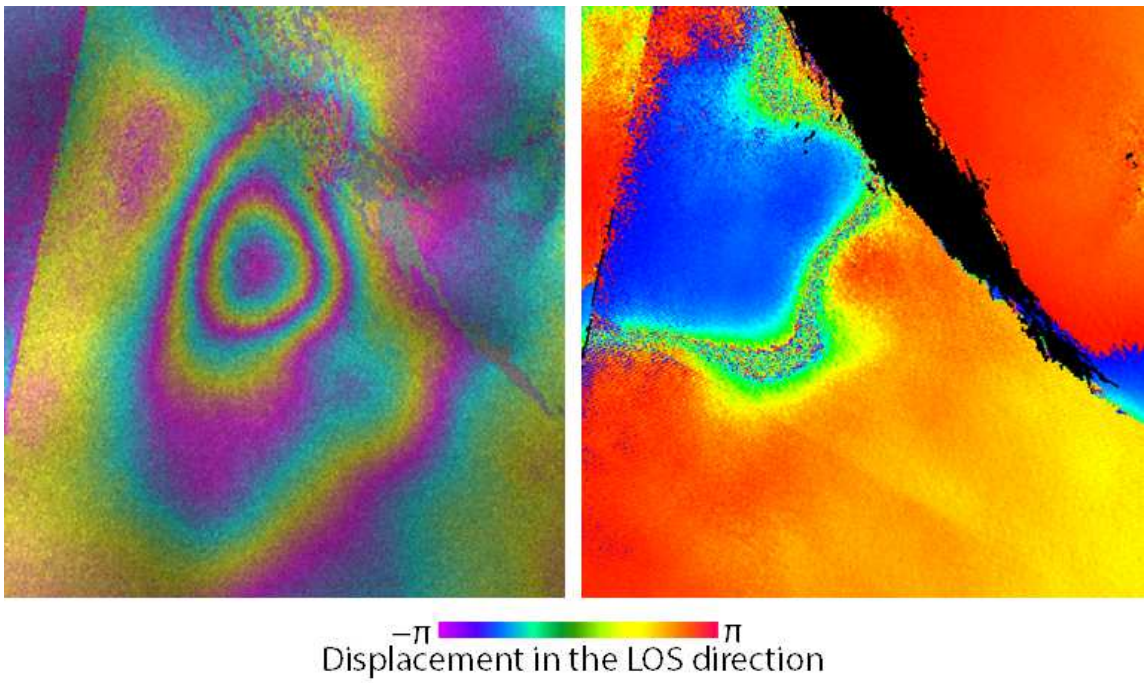


그림 19. David 빙하 주변 빙저호에 대한 DDInSAR 영상 및 DDInSAR에 포함된 빙하 흐름 성분

극지연구소

- 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 지표변위를 산출함

- 인공위성 고도계로 관측된 빙저호 지역 지표고도 변화는 DDInSAR로 산출된 빙저호 지표변위의 비교 및 검증에 활용될 수 있음

- 그러나 SAR 영상 관측 시기와 고도계 관측 시기의 불일치로 인해 DDInSAR에서 산출된 빙저호 지표변위의 정량적 비교 및 검증이 불가능하였음

- 이에 따라 빙상 흐름속도가 보정된 DDInSAR에서 지표변위가 발생하는 영역에 대해 고도계 관측 지표고도의 변화 여부를 파악함으로써 DDInSAR를 통한 빙저호 활동성 모니터링의 신뢰도를 평가하고자 하였음

- 그림 20은 2016년 5월 21일과 6월 14일의 Sentinel-1 SAR 간섭쌍(interferometric pair) 및 2020년 4월 5일과 4월 29일의 간섭쌍을 이용하여 생성한 빙하 흐름이 보정된 DDInSAR 영상에 Smith *et al.* (2009)에서 인공위성 고도계 관측을 통해 정의된 David2 빙저호 영역(파란색 폴리곤)을 도시한 것임

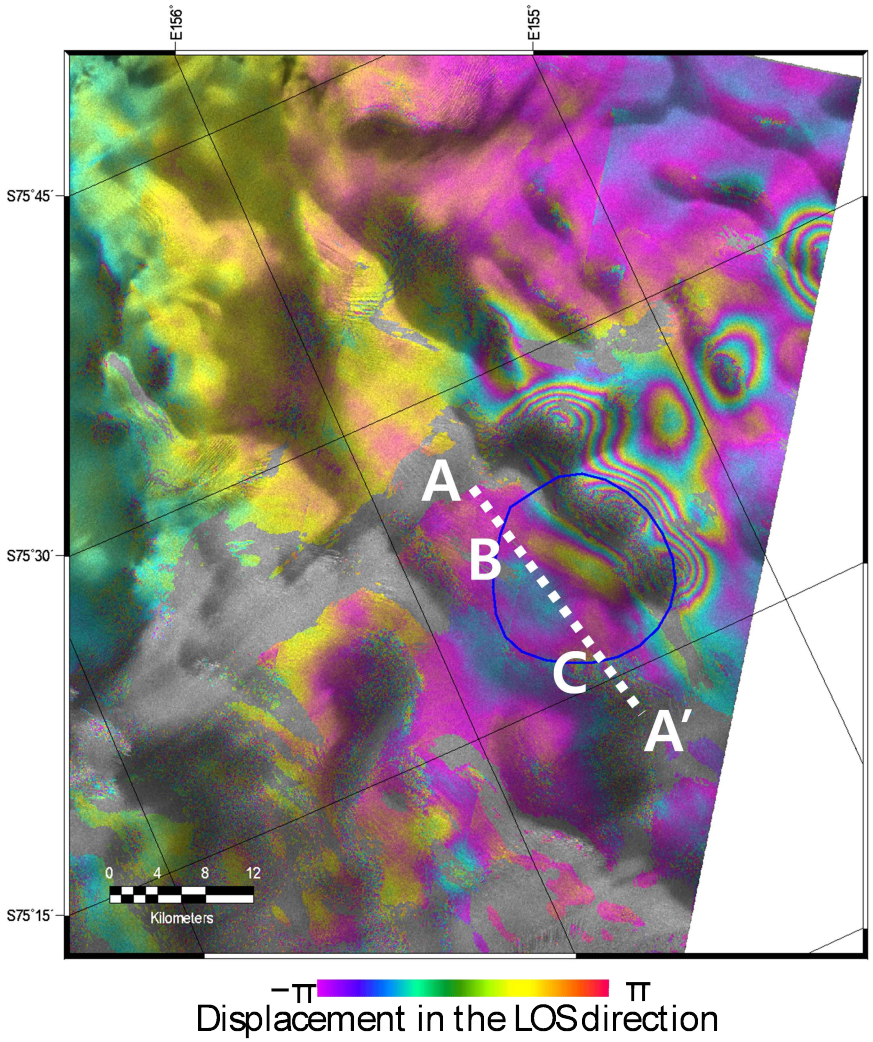


그림 20. David2 빙저호 지역에 대한 Sentinel-1 DDInSAR 영상과 위성 고도계 관측으로 정의된 빙저호 영역

- 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 21과 같음

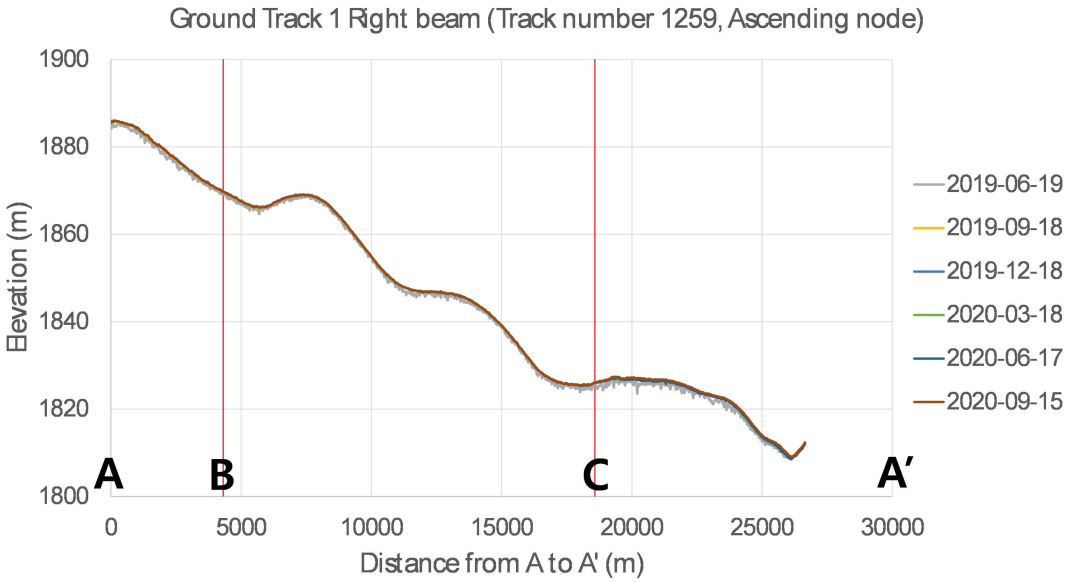


그림 21. ICESat-2 고도계로 정의된 David2 빙저호 영역에 대한 지표고도 변화

- Smith *et al.* (2009)에서 인공위성 고도계 관측을 통해 정의된 David2 빙저호 영역 내에서 시간에 따른 고도변화가 거의 관찰되지 않음

- 아래 그림 22는 위의 DDInSAR 지표변위를 통해 정의된 David2 빙저호 영역을 빨간색 폴리곤으로 나타낸 것으로, 빙저호의 지표변위가 폐합된 간섭띠로 명확하게 관찰되는 것을 확인할 수 있음

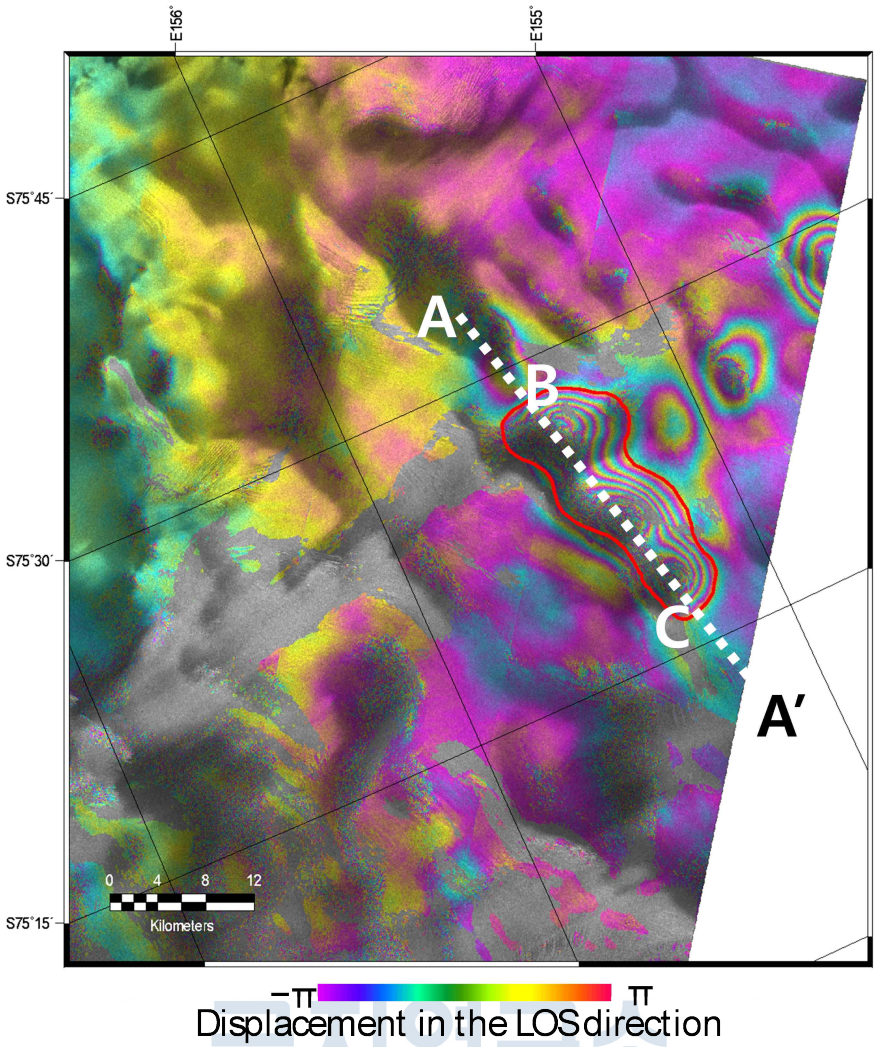


그림 22. David2 빙저호 지역에 대한 Sentinel-1 DDInSAR 영상과 지표변위 관측으로 정의된 빙저호 영역

- A-A'은 DDInSAR에서 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 23과 같음

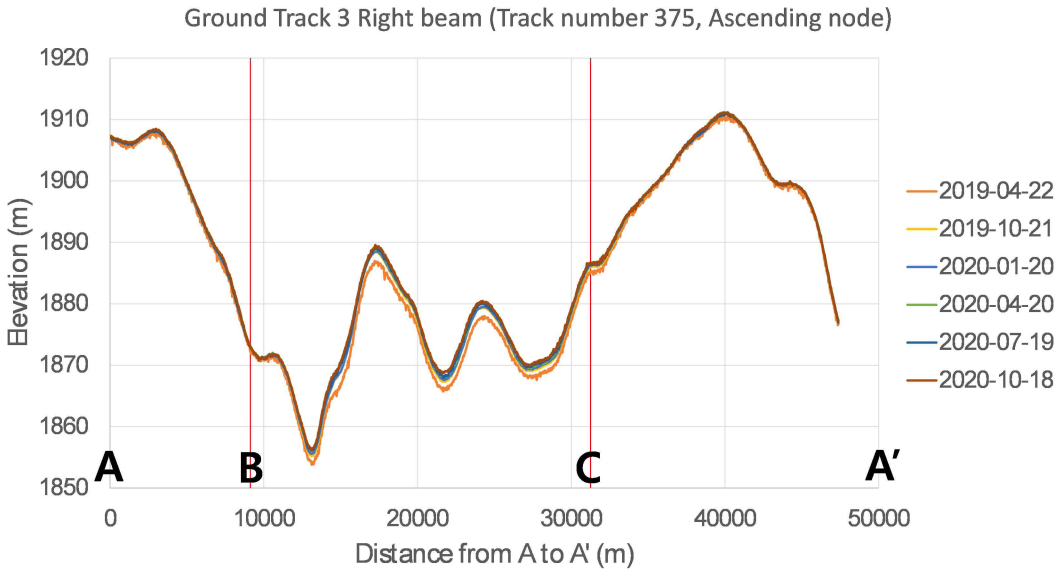


그림 23. DDInSAR로 정의된 David2 빙저호 영역에 대한 지표고도 변화

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

KOPRI 극지연구소

나. 빙저호 수위 및 수체 변화 해석

○ 빙저호 지표변위의 시계열 변화 정보 정량적 구축 및 해석

- 빙저호 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 기선거리(temporal baseline)을 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 DDInSAR 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 24는 서로 다른 시기의 David2 빙저호에 대한 DDInSAR 영상으로, 간섭띠의 변화율이 시간에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있고 이는 빙저호 지표변위의 변화속도가 시간적으로 변화함을 지시함

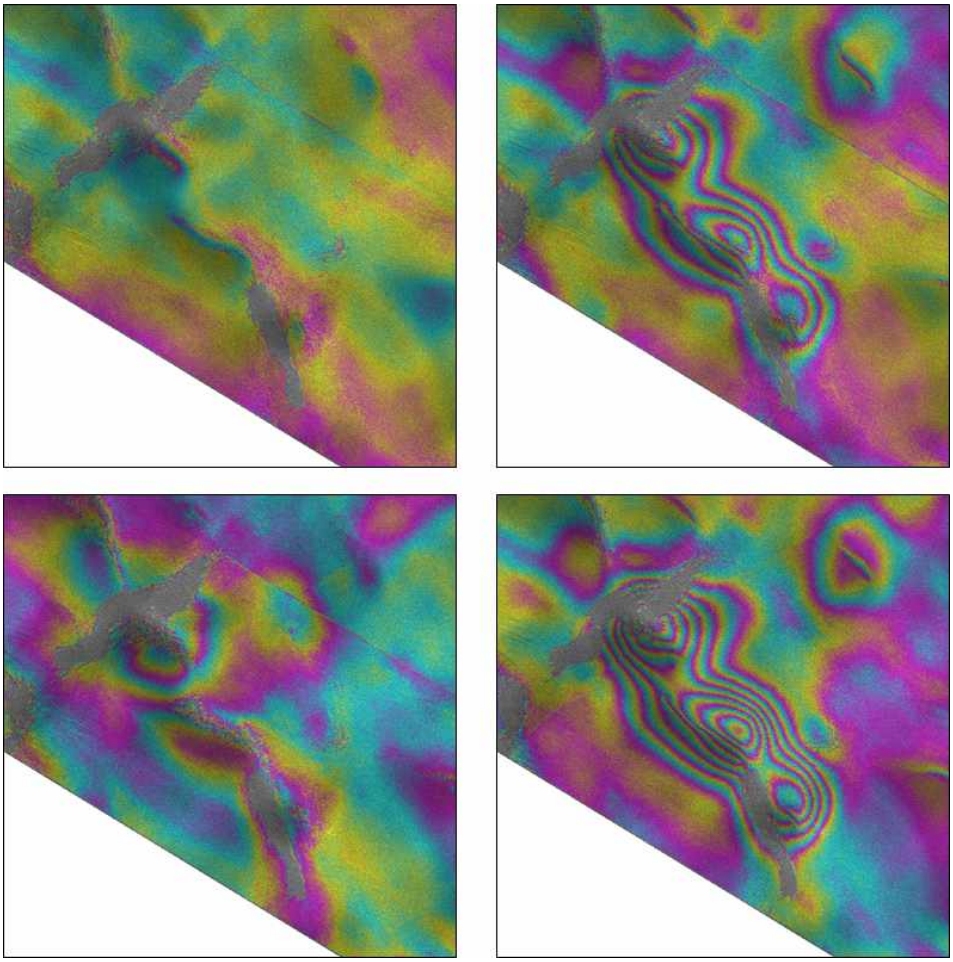


그림 24. David2 빙저호에 대한 서로 다른 시기의 DDInSAR 영상. 간섭띠 변화율이 영상마다 다르게 나타남을 확인할 수 있음

- 그림 25에서 청색 실선은 DDInSAR에서 관측된 David2 빙저호 지표변위의 시계열 변화로, 2017년 2월 20일과 3월 16일의 간섭쌍을 이용하여 생성한 InSAR 영상을 기준으로 산출된 LOS 방향의 지표변위임(즉, 2017년 2월 20일과 3월 16일 사이에 발생한 변위를 기준으로 계산된 시간에 따른 변위의 변화를 나타냄)

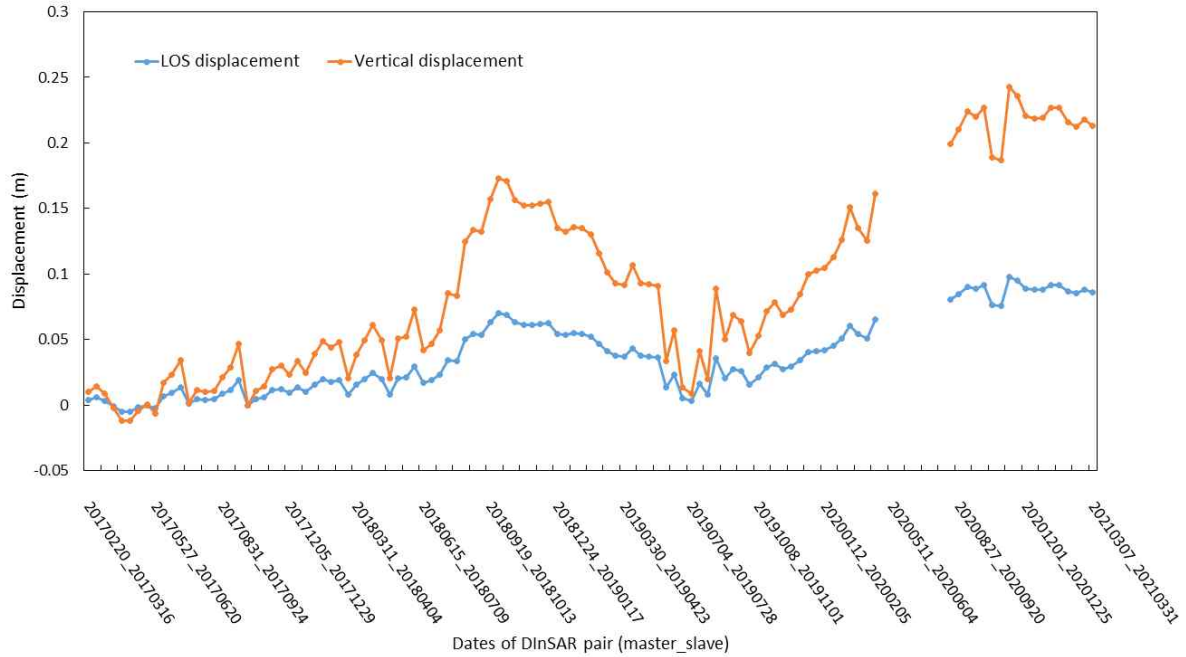


그림 25. David2 빙저호에 DDInSAR 관측 지표변위의 시계열 변화. 빙저호 활동에 의한 지표변위의 변화 속도를 나타냄

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

○ 보정된 빙저호 지표변위를 이용한 빙저호 수위 및 수체 변화 해석

- 빙상의 흐름속도가 보정된 DDInSAR에서 LOS 방향의 빙저호 지표변위는 빙저호의 수위변화에 따른 수직변위로 변환될 수 있음
- 위 그림 25에서 주황색 실선은 David2 빙저호에 대한 수직변위의 시계열 변화로, 2017년 2월 20일과 3월 16일 사이의 수직변위를 기준으로 산출된 것임

- 수직변위는 DDInSAR로 관측된 지표변위를 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 지표변위는 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 추세만을 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 26은 David2 빙저호에서 큰 지표변위가 나타나는 영역에 대해 2015년 10월 22일(좌)과 2016년 11월 13일(우)에 촬영된 WorldView-2 전정색 영상임

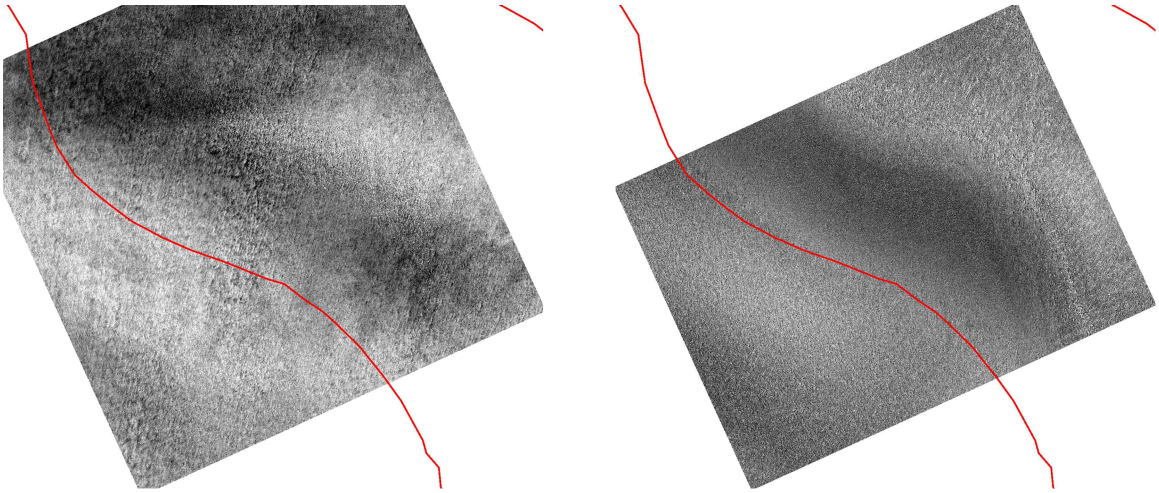


그림. 26 David2 빙저호에 대한 WorldView-2 영상. (좌) 2015년 10월 22일, (우) 2016년 11월 13일

- 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 지표변위 모델링을 통한 빙상의 탄성특성 추정

- 빙저호 수위 변화는 상부 빙상의 휨을 일으키며, 이는 빙상의 두께와 탄성특성(영률, 포아송비 등)에 의존함

- DDInSAR로 관측된 빙저호 지표변위의 공간적 변화를 모델링하면 빙체의 탄성특성 추정이 가능함

- 이 연구에서는 David2 빙저호에 대해 DDInSAR 영상으로부터 수직변위 profile을 구축하고, 이에 대한 1차원 휨 모델링(bending modeling)을 적용하여 빙상의 영률을 추정하였음

- 1차원 탄성 휨 모델은 거리 x에 따른 휨(수직변위, h)을 아래와 같이 모사함(Vaughan, 1995)

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

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

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

- 위 식에서 ρ는 담수 밀도, g는 중력가속도, ν는 포아송비(0.3), E는 영률, h는 빙상 두께를 지시함

- 아래 그림 27은 David2 빙저호에서 관측된 수직변위(파란색 점)와 1차원 휨 모델을 통해 모사한 수직변위(빨간색 실선)를 나타냄

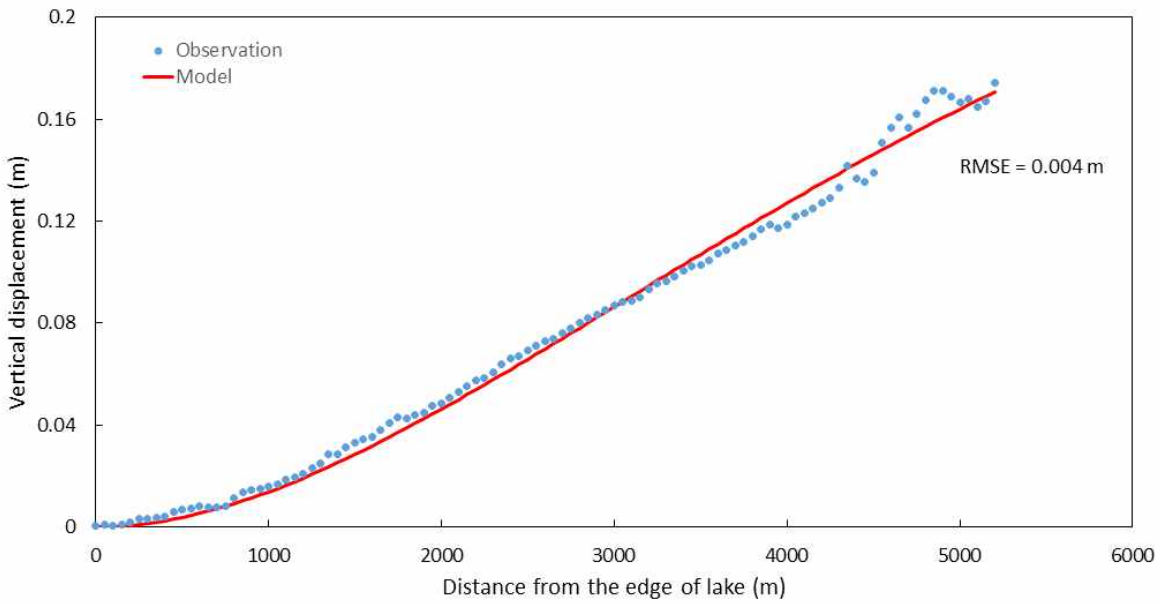


그림 27. David2 빙저호에 대한 DDInSAR로 관측된 변위(청색 점선)와 1차원 탄성 모델로 모사된 변위(적색 실선)

- 빙하 휨 모델을 통해 산출된 David2 빙정호 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 지표변위가 같다는 가정 아래 수행되었기 때문에 이로 인한 오차를 가질 수 있음

- 빙상의 두께가 두꺼울수록 빙저호의 수위변화량 보다 지표변위량이 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 표면변위가 더욱 명확하게 관측될 수 있음
- 그러나 레이더 간섭쌍의 시간 기선거리가 길어질수록 비상관성(decorrelation)이 커질 수 있으며, 이는 InSAR의 지표변위 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 표면변위에 대한 DDInSAR 민감도를 높이기 위해서는 레이더 간섭쌍에 대한 최적의 시간 기선거리 조건을 선택할 필요가 있음
- 본 연구에서는 David 빙하 상류 지역(그림 1)에 대해 2017년 2월부터 2022년 2월까지 12일 간격으로 획득된 Sentinel-1 IW 모드의 SAR 영상을 총 139장 구축함(그림 28)

  : relative orbit number 72

  : slice number 7

  : ascending pass

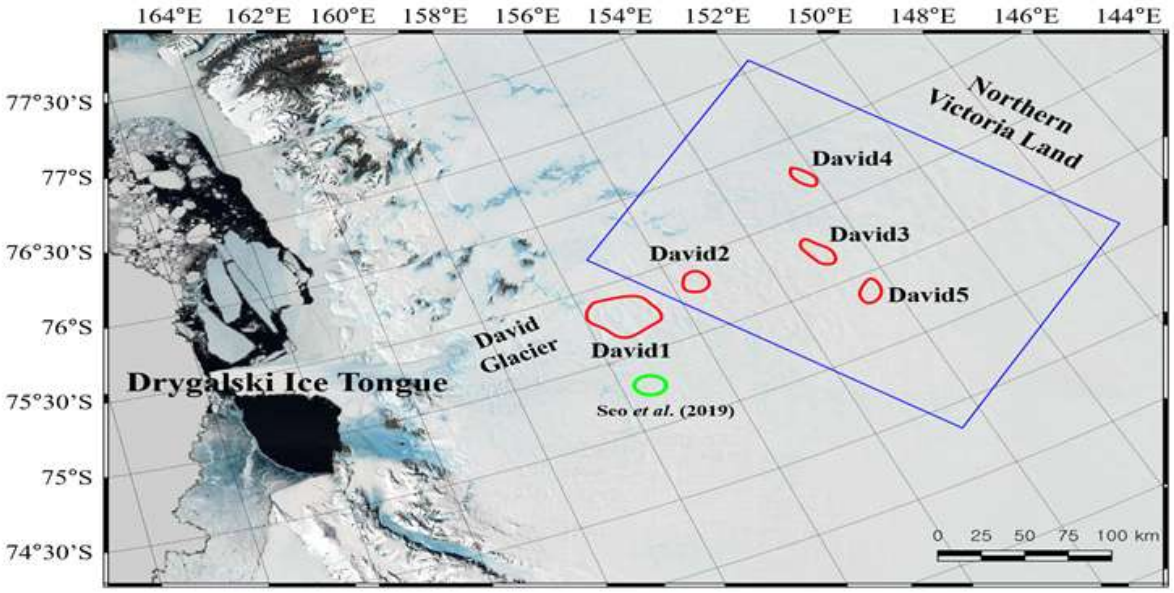


그림 28. David 빙하 유역의 빙저호 탐지 지역. 파란색 사각형은 Sentinel-1 관측 범위. 빨간색 폴리곤은 과거 인공위성 고도계 관측을 통해 발견된 빙저호 영역을 나타냄. 초록색 폴리곤은 이 연구과제 수행 이전에 레이더 간섭기법으로 발견된 빙저호 영역을 의미함

- 연구지역에서는 인공위성 레이저 고도계 관측을 통해 4개의 빙저호(David2, David3, David4, David5)가 보고된 바 있으며, 본 위탁연구과제를 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 DDInSAR 영상(그림 29)에서는 빙저호의 수위 변화 속도에 따른 표면변위가 폐합된 형태의 간섭띠로 나타남

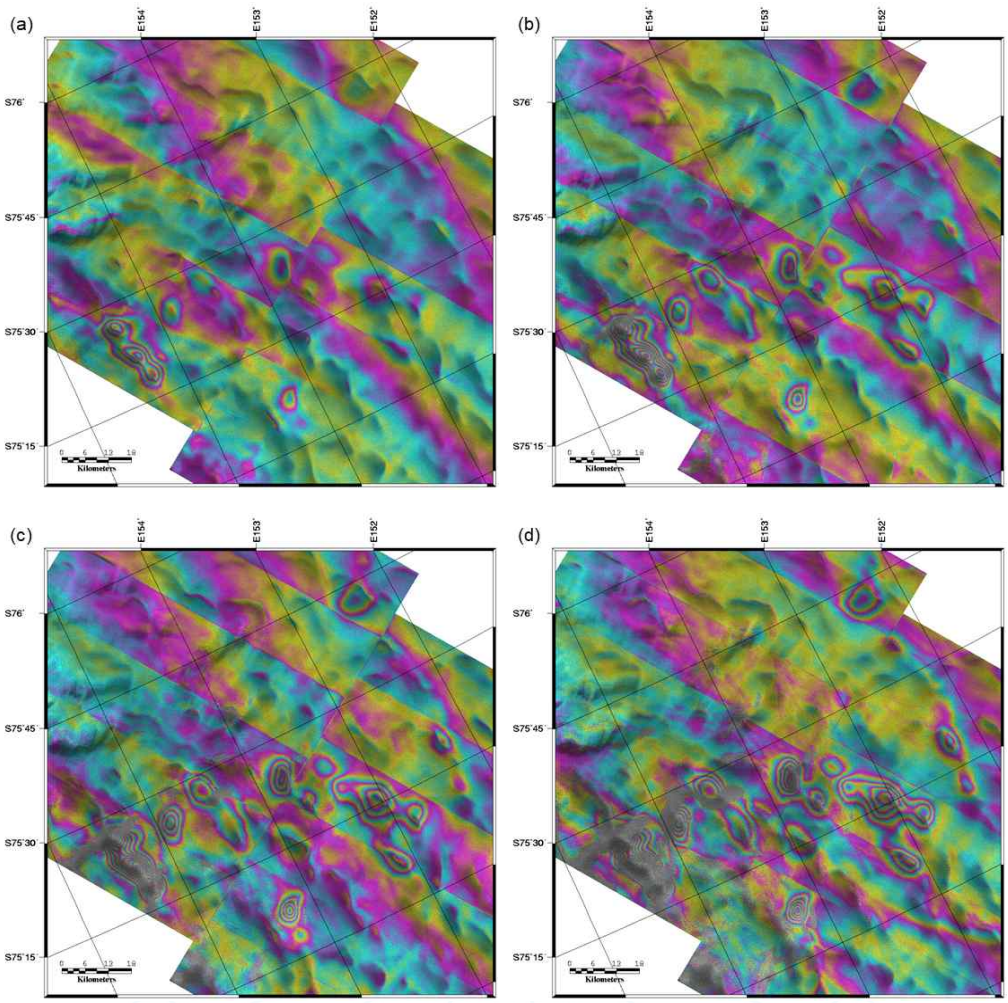


그림 29. (a) 12일, (b) 24일, (c) 36일, (d) 48일 시간 기선거리의 Sentinel-1 레이더 간섭쌍으로 생성한 DDInSAR 영상 예시

극지연구소

- 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 30)

- 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(부록 참조)

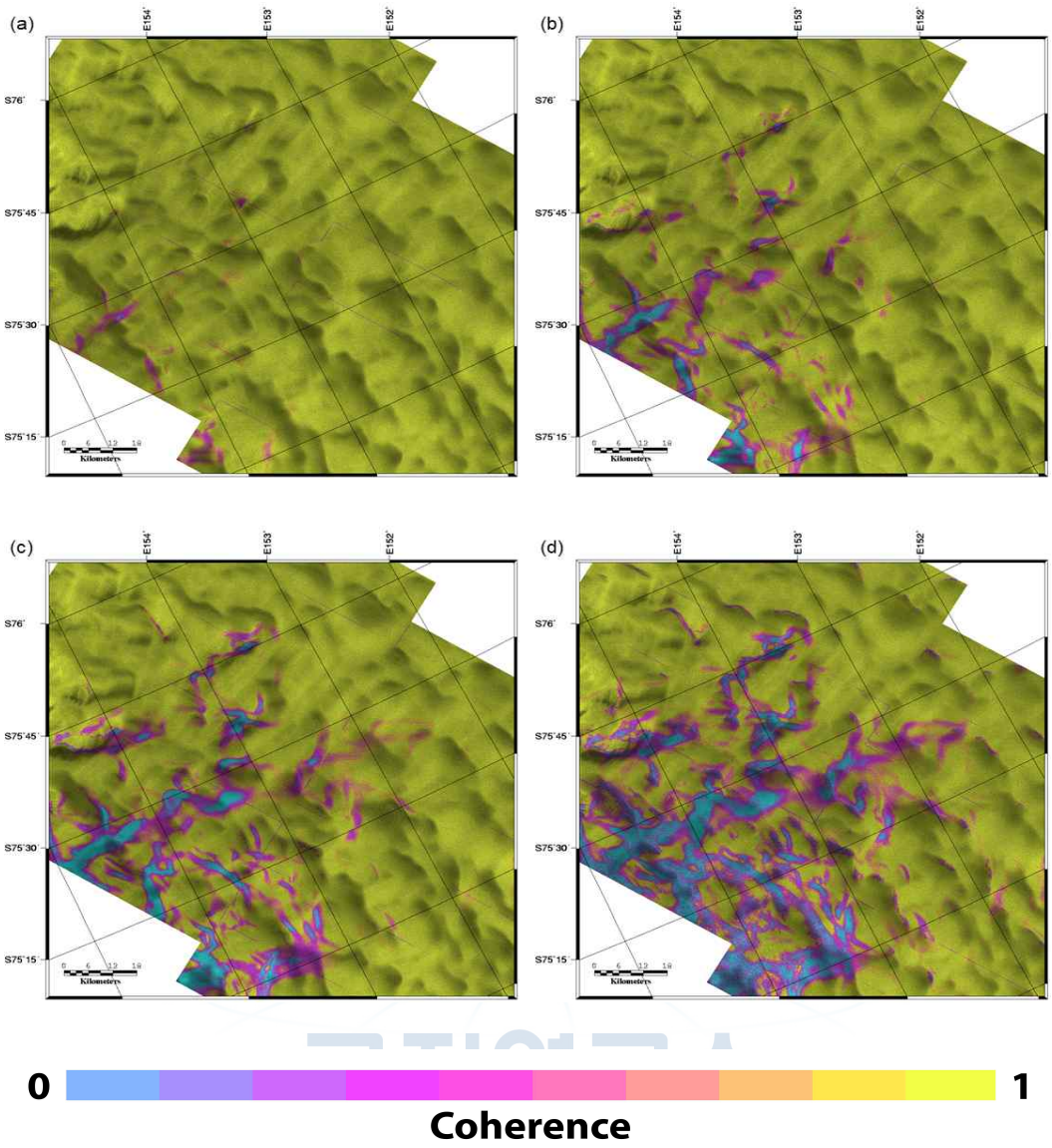


그림 30. (a) 12일, (b) 24일, (c) 36일, (d) 48일 시간 기선거리의 Sentinel-1 레이더 간섭 긴밀도 영상 예시

- 또한 36일의 시간 기선거리를 가지는 레이더 간섭쌍들의 수직 기선거리는 ±200 m 이내로 매우 짧았으며(그림 31), 이는 DDInSAR의 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 DDInSAR 영상을 생성하였음

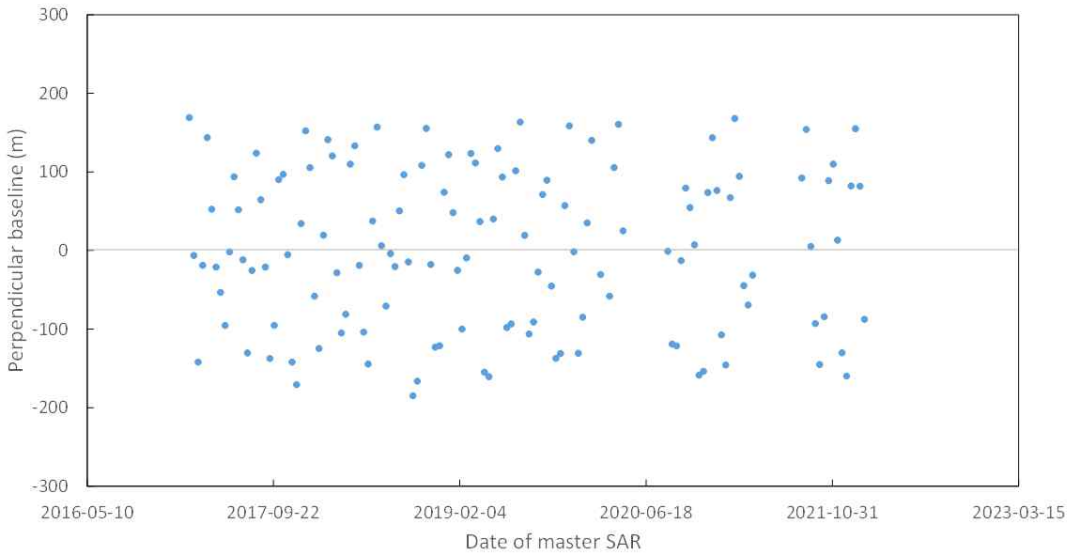


그림 31. 36일 시간 기선거리의 Sentinel-1 레이더 간섭쌍 수직 기선거리

○ 영상레이더 간섭기법 기반 David 빙하 주변 빙저호 탐지 및 검증

- 36일 시간 기선거리의 DInSAR 영상들을 차분하여 그림 32와 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

KOPRI 극지연구소

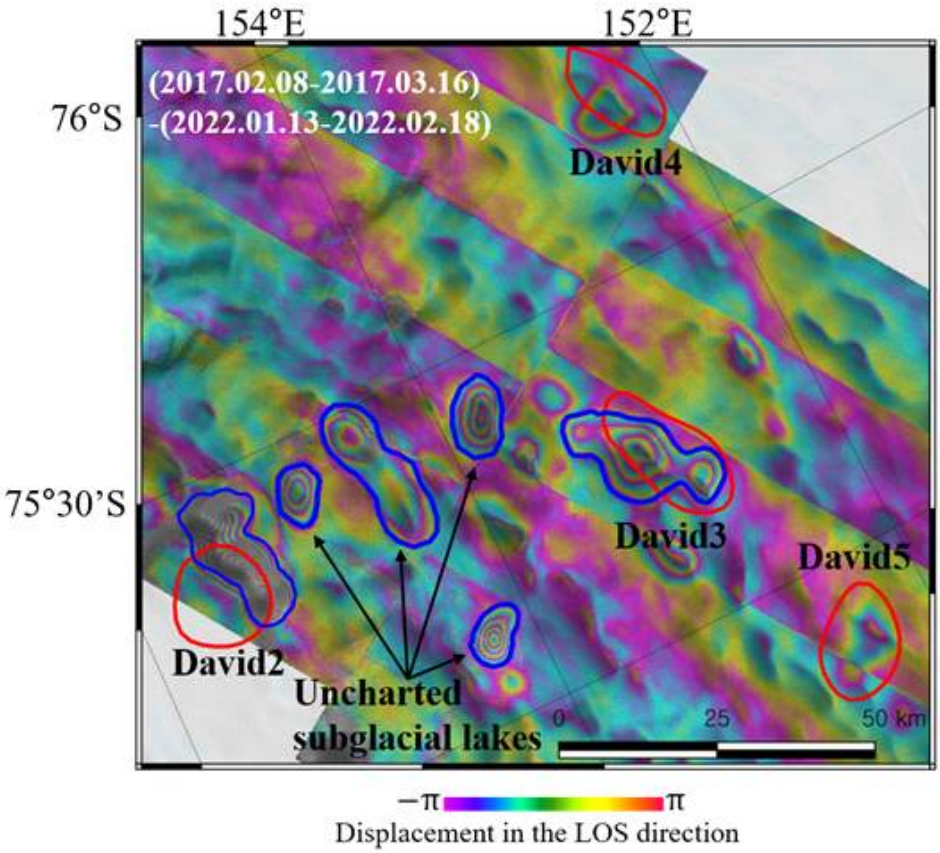


그림 32. 연구지역의 DDInSAR 영상 예시. 빨간색 폴리곤은 기존에 보고된 빙저호 영역이며, 파란색 폴리곤은 DDInSAR 영상의 간섭띠 분석을 통해 추정된 빙저호 영역

- 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 33)

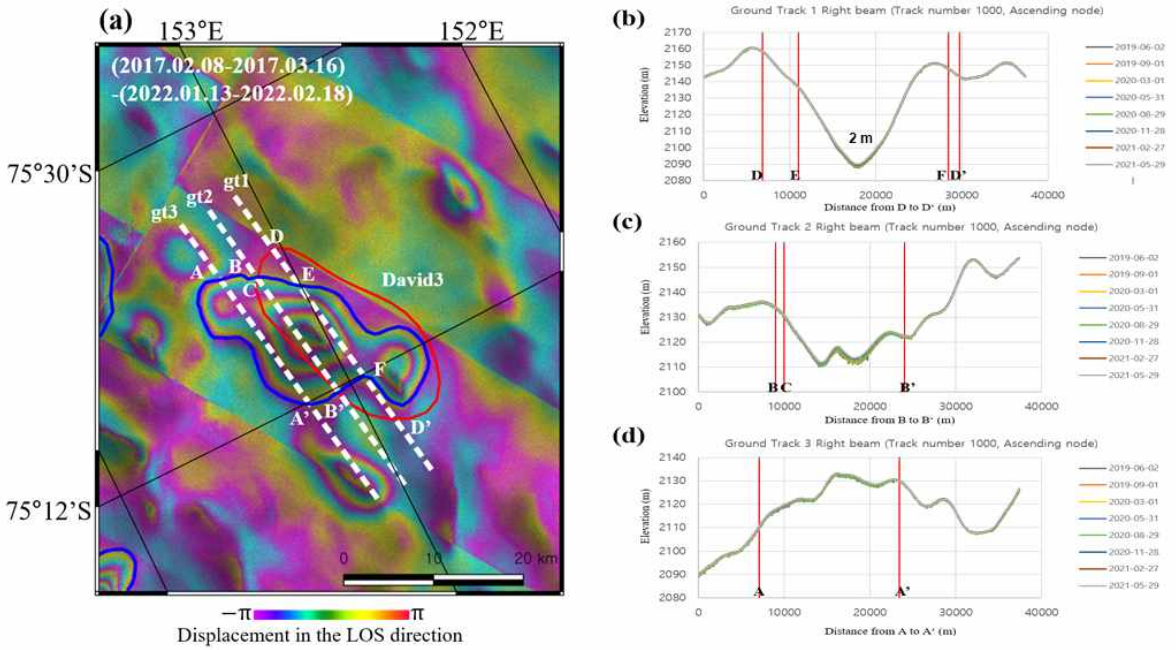


그림 33. David3 빙저호에 대한 시계열 지표고도 변화

- 신규로 발견된 빙저호 추정 영역에서도 지표고도는 DDInSAR 영상에서 관찰되는 간섭띠 영역 내에서만 변화(2년간 최대 60 cm)한 것이 확인됨(그림 34)

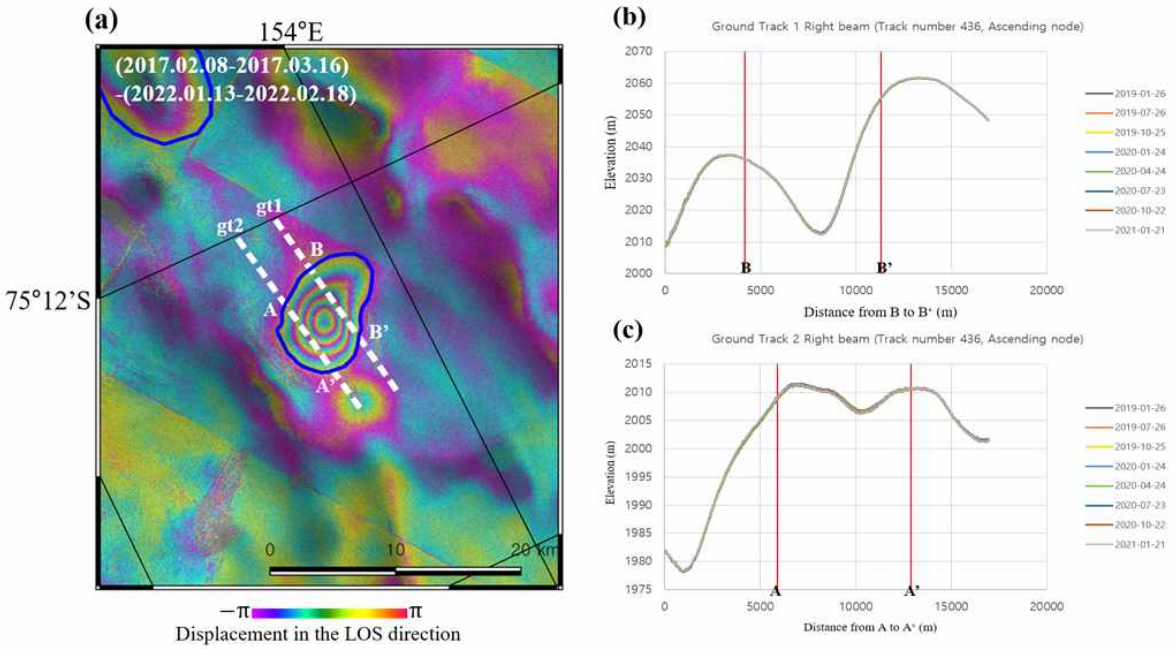


그림 34. 신규 탐지 빙저호에 대한 시계열 지표고도 변화

- 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 35), 이를 수직 방향의 변위로 환산하여 시간적 변화를 분석하였음

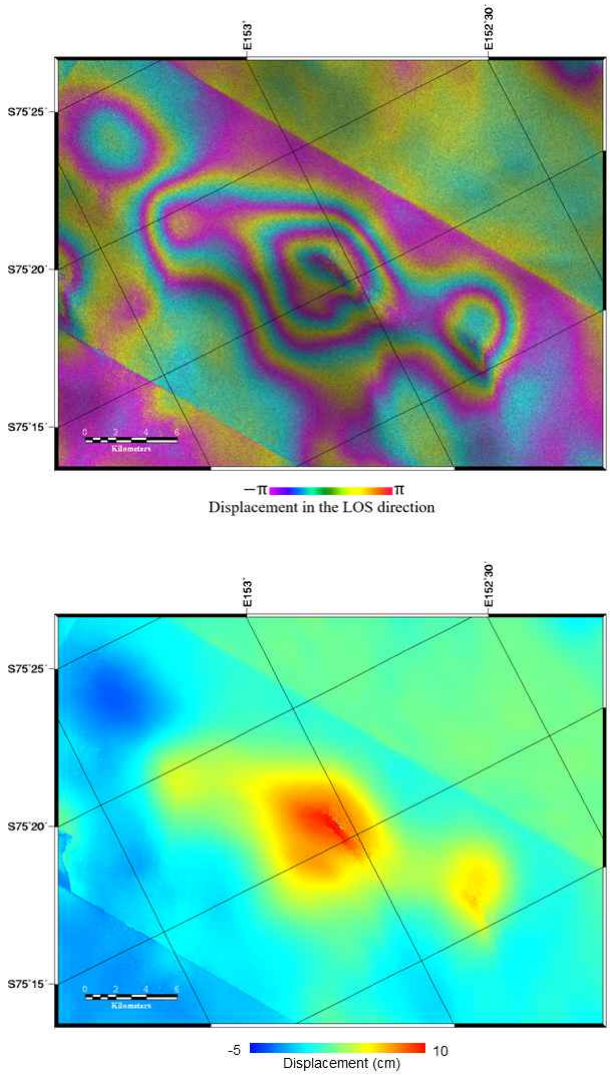


그림 35. David3 빙저호에 대한 DDInSAR 영상 및 수직 변위 지도

- 그림 36은 DDInSAR에서 산출된 David2 빙저호 수직 변위의 시간적 변화, 즉 빙저호 수위 변화 속도의 변동(가속도)을 보여줌

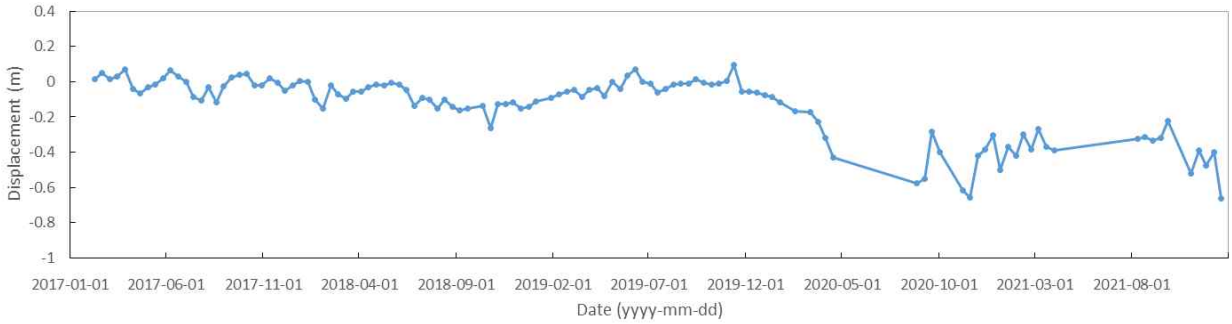


그림 36. David2 빙저호의 시계열 DDInSAR 변위

- 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 37)

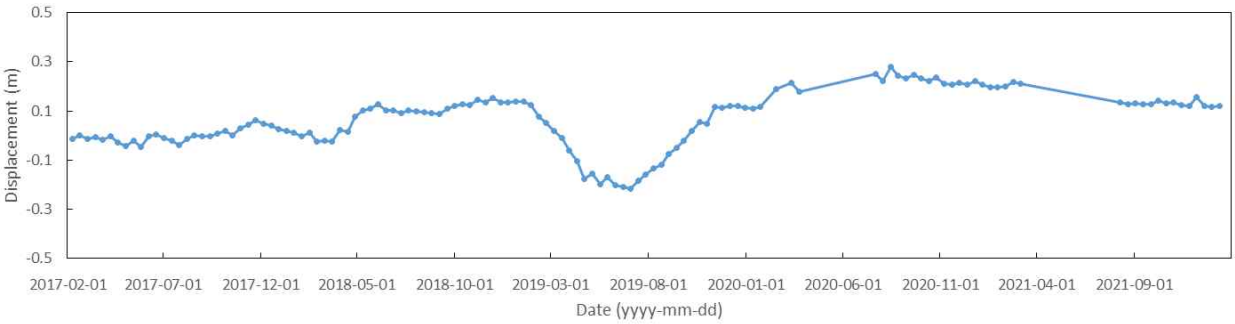


그림 37. David3 빙저호의 시계열 DDInSAR 변위

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

KOPRI 극지연구소

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 38)

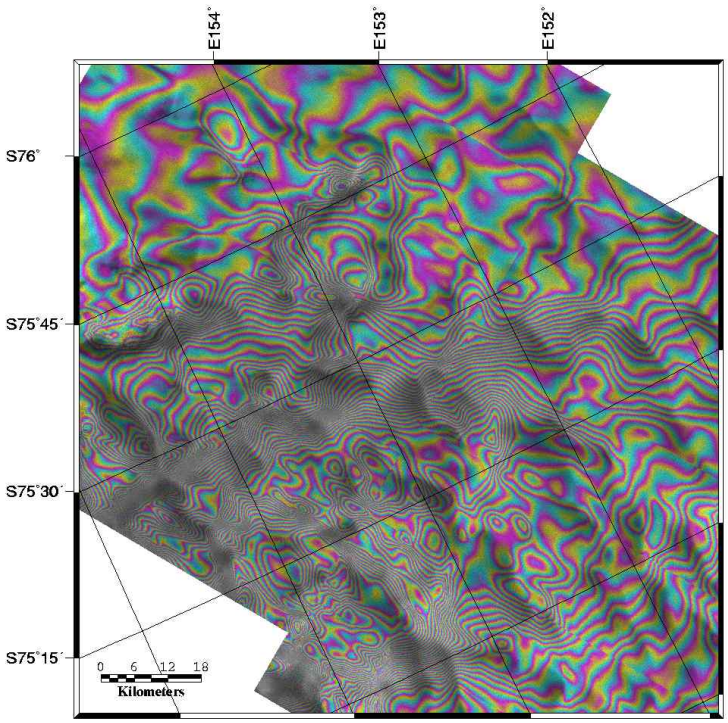


그림 38. 연구지역 DInSAR 영상 예시

- DInSAR 위상 신호는 빙저호를 제외한 영역에서 빙상 표면의 흐름에 의한 변위를 지시함

- DInSAR 위상 신호의 절대 위상 복원을 통해 레이더 관측 방향으로의 표면변위를 그림 12와 같이 산출하였음

- 그림 39의 표면변위는 빙저호 영역(빨간색으로 표현되는 부분)을 제외하면 모두 빙상의 흐름에 의한 변위를 나타냄

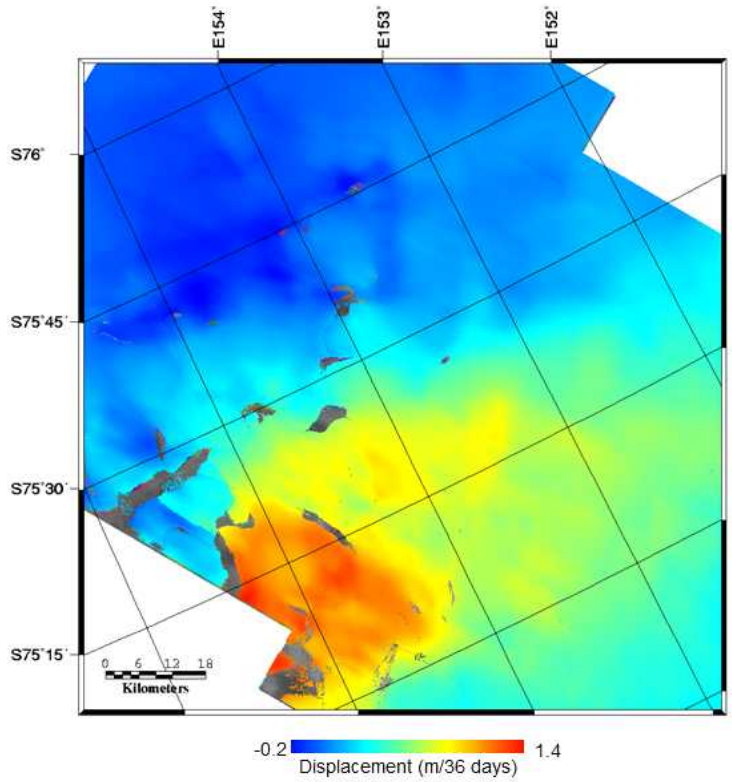


그림 39. 연구지역에 대한 빙상 유속 지도 예시

○ 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 40은 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

KOPRI 극지연구소

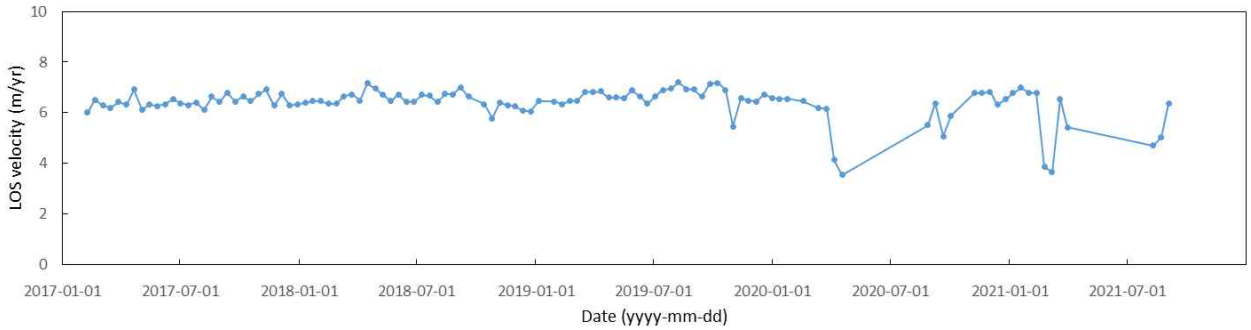


그림 40. David2 빙저호 주변 빙상의 시계열 표면유속(레이더 관측 방향)

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 41)

KOPRI 극지연구소

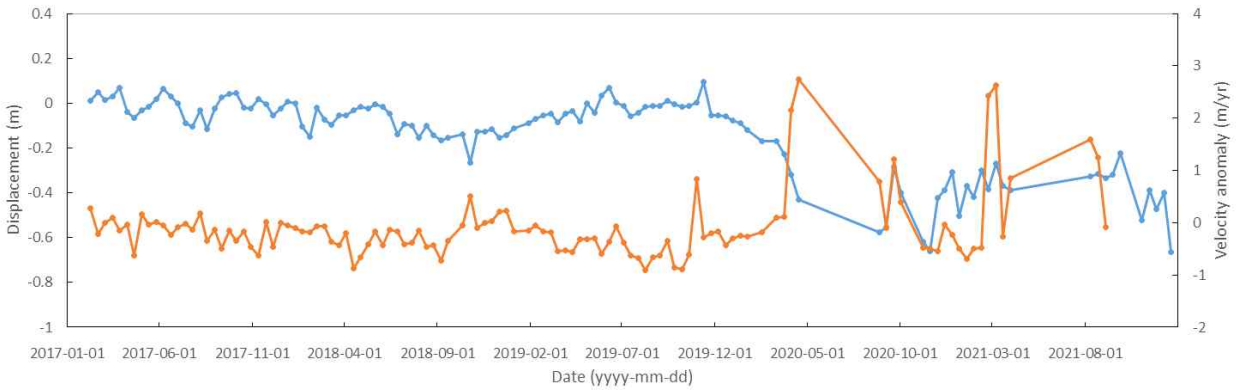


그림 41. David2 빙저호 수위 변화 속도(파란색)와 주변 빙상 표면유속의 변화(주황색)

- 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 41의 주황색 실선)

- 유속의 변동이 큰 시기는 빙저호 수위 변화의 속도가 크게 변화하는 시기와 대체적으로 일치하는 경향을 보였음(그림 41의 파란색 실선)

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

- 이는 영상레이더와 인공위성 고도계 자료의 융복합 활용 기술개발을 통해 규명될 수 있으리라 기대되며, 2단계에서 해당 연구를 수행하고자 함

○ 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

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

- 식 (5)에서 z_{bed}는 빙저 고도, ρ_{water}는 물의 밀도(100 km m^{-3}), h는 빙상 두께, ρ_{ice}는 얼음의 밀도(917 kg m^{-3})를 지시함

- Hydraulic potential을 통해 산출된 연구지역의 빙저 배수망(그림 42)은 David2, David3, David4 및 David5 빙저호와 이 연구에서 DDInSAR를 통해 탐지된 새로운 빙저호들이 연결되어 있음을 시사함

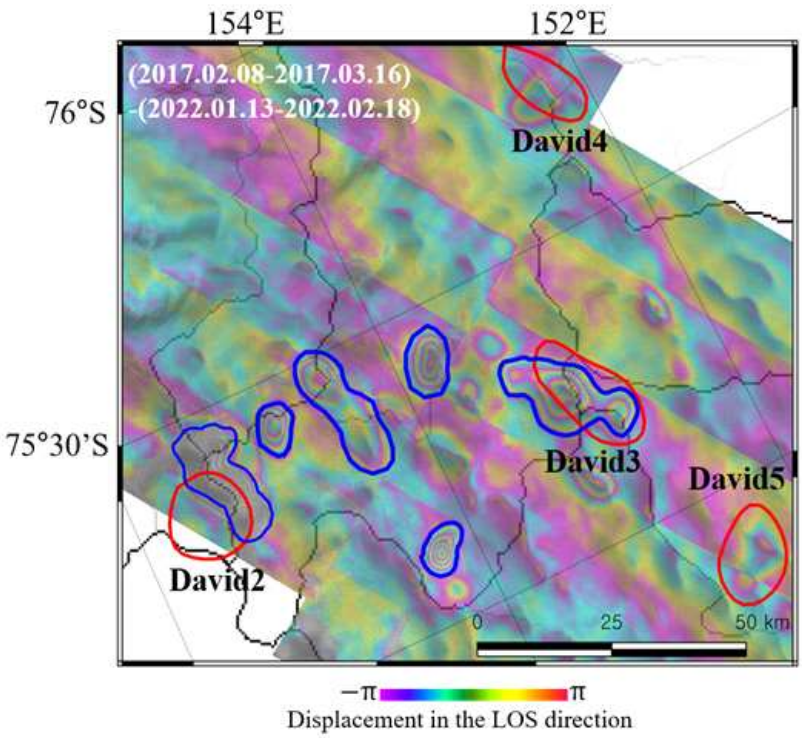


그림 42. David 빙하 주변 빙저호 배수망 추정

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 표면 변위 산출 - 빙저호 활동(수위 변화)에 의한 지표 변위 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 흐름속도가 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%

KOPRI 극지연구소

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 2. 빙저호 활동성과 빙상 유동의 상호관계 분석 능력 3. 연구결과 적용 가능성	- 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		- 영상레이더 차분간섭기법(DInSAR)을 활용한 빙저호 주변 지역 표면변위 산출 - 빙저호 주변 지역 표면유속의 시계열 변동성 분석	100%
	빙저호 활동성과 빙상 유동 사이의 상관관계 파악		- 빙저호 수위변화 속도에 따른 빙상의 국지적 흐름속도 변화 해석 - David 빙하 주변 빙저호 배수망 추정	100%

KOPRI 극지연구소

2. 정량적 성과목표 달성도

(계획(건수)/대비(건수))

구분		계획/실적					
논문		국외			국내		
		SCI	기타	소계	SCI	기타	소계
		3/1	/	/	/	/	/
Proceeding		국외			국내		
		2/2			3/6		
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.

remote sensing MDPI

Technical Note

Velocity Anomaly of Campbell Glacier, East Antarctica, Observed by Double-Differential Interferometric SAR and Ice Penetrating Radar

Hoonyol Lee [1], Heejeong Seo [1,2], Hyangsun Han [1,*], Hyeontae Ju [3] and Joohan Lee [3]

[1] Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea; hoonyol@kangwon.ac.kr (H.L.); sheejeong@korea.kr (H.S.)
[2] Earthquake and Volcano Research Division, Korea Meteorological Administration, Seoul 07062, Korea
[3] Department of Future Technology Convergence, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea; hyeontae@kopri.re.kr (H.J.); joohan@kopri.re.kr (J.L.)
* Correspondence: hyangsun@kangwon.ac.kr; Tel.: +82-33-250-8589

Abstract: Regional changes in the flow velocity of Antarctic glaciers can affect the ice sheet mass balance and formation of surface crevasses. The velocity anomaly of a glacier can be detected using the Double-Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DDInSAR) technique that removes the constant displacement in two Differential Interferometric SAR (DInSAR) images at different times and shows only the temporally variable displacement. In this study, two circular-shaped ice-velocity anomalies in Campbell Glacier, East Antarctica, were analyzed by using 13 DDInSAR images generated from COSMO-SkyMED one-day tandem DInSAR images in 2010–2011. The topography of the ice surface and ice bed were obtained from the helicopter-borne Ice Penetrating Radar (IPR) surveys in 2016–2017. Denoted as A and B, the velocity anomalies were in circular shapes with radii of ~800 m, located 14.7 km (A) and 11.3 km (B) upstream from the grounding line of the Campbell Glacier. Velocity anomalies were up to ~1 cm/day for A and ~5 cm/day for B. To investigate the cause of the two velocity anomalies, the ice surface and bed profiles derived from the IPR survey crossing the anomalies were analyzed. The two anomalies lay over a bed hill along the glacial valley where stick-slip and pressure melting can occur, resulting in temporal variation of ice velocity. The bright radar reflection and flat hydraulic head at the ice bed of A observed in the IPR-derived radargram strongly suggested the existence of basal water in a form of reservoir or film, which caused smaller friction and the reduced variation of stick-slip motion compared to B. Crevasses began to appear at B due to tensile stress at the top of the hill and the fast flow downstream. The sporadic shift of the location of anomalies suggests complex pressure melting and transportation of the basal water over the bed hill.

Keywords: Campbell Glacier; DDInSAR; Ice Penetrating Radar; velocity anomaly

check for updates

Citation: Lee, H.; Seo, H.; Han, H.; Ju, H.; Lee, J. Velocity Anomaly of Campbell Glacier, East Antarctica, Observed by Double-Differential Interferometric SAR and Ice Penetrating Radar. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 2691. https://doi.org/10.3390/rs13142691

Academic Editor: Eric Rignot

Received: 18 May 2021
Accepted: 6 July 2021
Published: 8 July 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Antarctic glaciers flow from the inland to the shore, forming an ice shelf or glacier tongue, and are eventually discharged into the ocean. As the motion of the glacier is closely related to the seaward ice flux, ice flow velocity is an important indicator of global climate change and sea level rise [1–3]. The flow velocity of a glacier changes due to mass balance variations caused by snowfall accumulation or sublimation on the surface of the glacier, changes in physical properties occurring inside and at the bed of the glacier, and basal sliding [4–6].

Apart from the surface mass balance, a number of studies have been conducted on the observation of glacial flow rates due to the action of the ice bed influenced by the basal water. The presence of melt water at the ice bed is an important factor in the change in ice velocity because it causes lubrication, reducing friction between ice and the bedrock, and

그림 43. SCI 논문 실적 증빙 자료

[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.

[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 DDInSAR와 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 DDInSAR를 통한 동남극 David 빙하 유역의 새로운 빙저호 네트워크 분석. 2022 대한원격탐사학회 추계학술대회 논문집. pp. 306-309.

○ 정량적 성과 달성 미흡 원인 및 대책

- 자료처리 결과 검수에 대한 시간 소요로 인해 논문 작성이 지체되어 SIC급 논문성과 실적이 계획 대비 부족

- 연구지역 특성상 레이더 간섭위상의 복원을 위한 자료처리 및 결과물에 대한 검수에 많은 시간이 소요되었음

- 자료처리와 결과물 검수 속도를 높이기 위해 참여연구원을 추가하여 연구를 진행하였으며, 현재 연구논문을 작성하여 투고 준비 중에 있음

3. 기타 성과

가. 학문후속세대 양성

○ 석사학위 취득예정자 3명 배출 (2023년 2월 학위취득 예정)

○ 학사학위 취득자 4명 및 취득예정자 3명 배출 (2023년 2월 학위취득 예정)

나. 빙저호 관측 영상레이더 자료 구축을 위한 국제공동연구 계획 승인

○ 독일 항공우주센터(DLR)와 스페인 INTA(National Institute Aerospace Technology)의 TerraSAR-X 및 PAZ 위성 활용 연구 프로그램에 빙저호 모니터링 연구계획서를 제출하여 승인받았으며, 2024년까지 고해상도 X-band SAR 위성영상의 공동활용 연구가 진행 중임

○ 일본 우주항공연구개발기구(JAXA)의 위성 활용 프로그램에 빙저호 모니터링 연구계획서를 제출하여 승인받았으며, 2024년까지 빙저호 연구에 ALOS-2 PALSASR-2 영상을 무료로 활용할 수 있음

KOPRI

hisdeSAT

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)

JAXA

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 44. 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 추정이 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

KOPRI
극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

○ 남극 내륙 빙저호의 지구물리탐사 및 열수시추 연구를 위해서는 관련 인프라의 개발도 필요하지만 연구의 대상이 되는 적합한 빙저호의 선정이 매우 중요함

○ 남극 내륙에서 기존에 발견된 빙저호 뿐만 아니라 새로운 신규 활동 빙저호를 대상으로 연구를 수행하여 과제의 독자성과 확장성을 강화할 필요가 있음

○ 영상레이더 간섭기법은 cm 급 정밀도의 광역적 지표변위를 수-수십 일 주기로 관측 가능하므로 인공위성 고도계에 비해 빙저호 모니터링에 효과적으로 활용될 수 있음

○ 1단계 연구수행을 통해 영상레이더 간섭기술이 빙저호의 수위변화 속도 분석에 탁월함을 확인할 수 있었으나, 빙저호 수위변화의 방향, 즉 충진 및 배수 활동이 규명되지 못함

○ 이는 영상레이더 간섭기법이 시간에 따른 상대적인 변위량에 대한 정보만을 제공하는 기술적 한계에 기인하며, 추가적인 연구개발을 통해 기존 기술을 개선해야 함

○ 차기 단계(2단계) 연구에서는 인공위성 영상레이더 간섭기법을 이용하여 동남극 David 빙하 상류에서 콩코르디아 기진 인근 ice divide 지역까지 우리나라의 남극 내륙 진출 루트(코리안 루트, K-Route) 주변 지역에 대한 광역적인 빙저호 탐지 및 모니터링 연구를 수행할 예정임

○ 영상레이더 간섭기법 응용기술 제안 및 고도계 자료와의 융복합 분석기술 개발을 수행하고, 이를 통해 남극 내륙 빙저호의 활동 특성(충진-배수 시스템)과 배수 네트워크를 분석할 예정임

제 2 절 연구성과 활용계획

○ 남극 빙저호의 정밀 공간정보 구축 및 활동성 모니터링을 위한 기반기술로 활용

○ 시공간적으로 고해상도의 David 빙하 주변 빙저호 활동성 정보를 구축하고, 빙저호의 다양한 특성(형태, 수위 및 수량 변화, 상부 빙상 두께 등) 규명에 활용

○ David 빙하 주변 빙저호의 활동성 정보와 다중위성 기반 빙상 흐름속도의 상호 영향을

파악함으로써 남극 내륙에서 빙상 유동 특성에 영향을 미치는 빙저호의 물리 특성을 분석할 수 있는 기초기술 정립에 활용

○ 빙저호 지표변위의 시계열 관측을 통해 빙저호의 형태학적 특성을 규명하고 인접한 빙저호 간의 활동 상호관계 분석을 위한 기반 기술 확립에 활용

○ 빙저호 탐사 및 열수시추 원천기술 개발을 위한 중요 기초정보 제공

KOPRI
극지연구소

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 45)

- ICESat 위성의 궤도 및 레이저 고도계 특성에 의해 남극 전역을 관측하지는 못하였으나, 위성 고도계 자료로부터 빙저호 탐지 및 수위/수체 변화를 추정하는 기술을 제시함

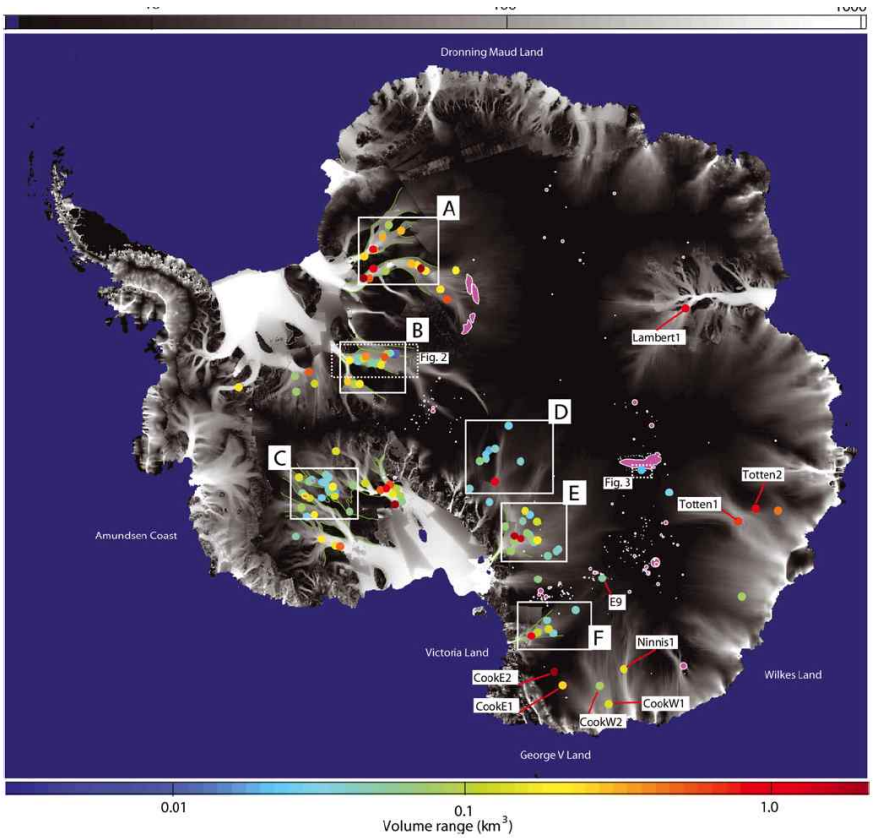


그림 45. ICESat 레이저 고도계 활용 빙저호 탐지 연구(Smith *et al.*, 2009)

- 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 46)

- CryoSat-2 레이더 고도계 관측자료가 빙저호의 배수 이벤트 측정에 효과적임을 설명함

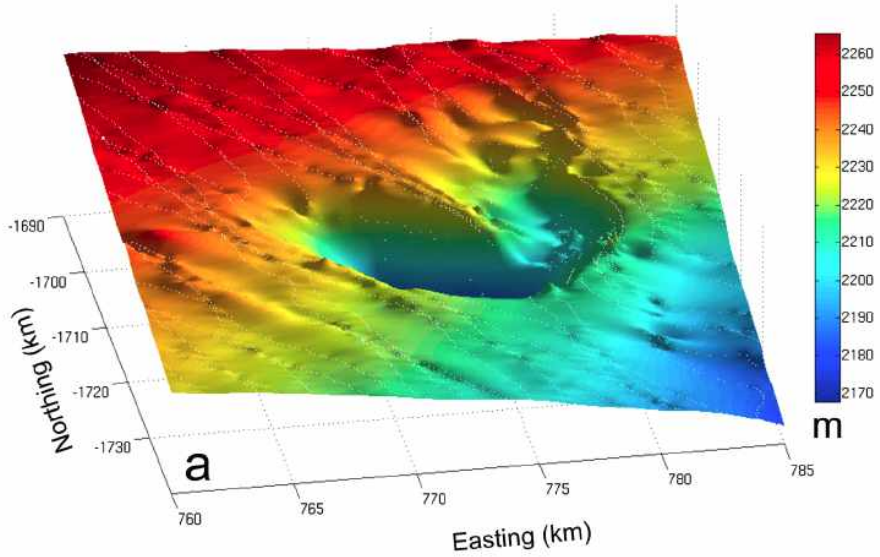


그림 46. CryoSat-2를 활용한 빙저호 부피 변화 연구(McMillan *et al.*, 2013)

- 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 47)

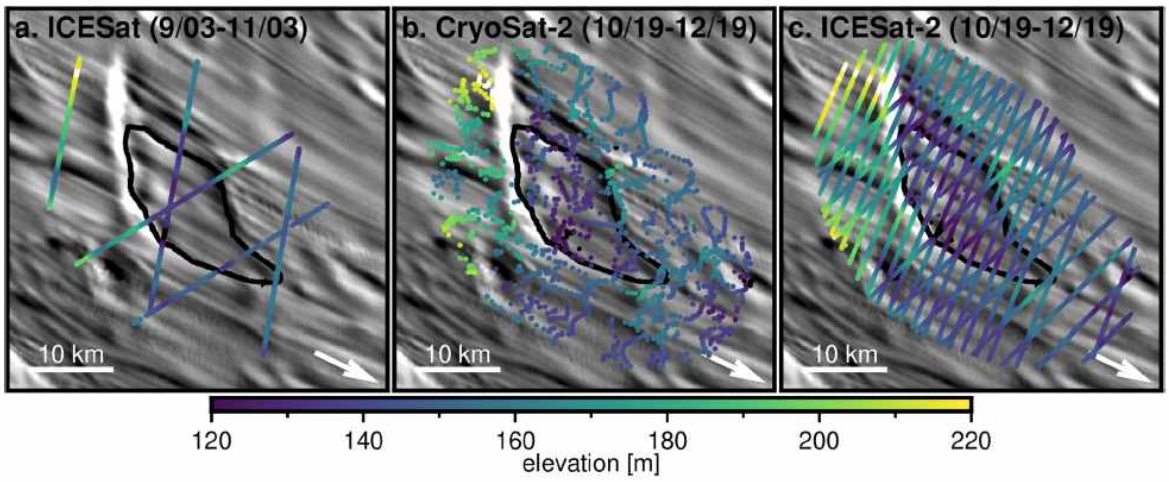


그림 47. ICESat-2 활용 빙저호 모니터링 연구(Siegfried and Fricker, 2021)

○ 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 48)

- Capps *et al.* (2010)이 제안한 기법은 빙하 표변변위가 매우 작고, 레이더 간섭쌍의 시간 기선거리가 1일로 매우 짧은 조건에서만 적용이 가능함

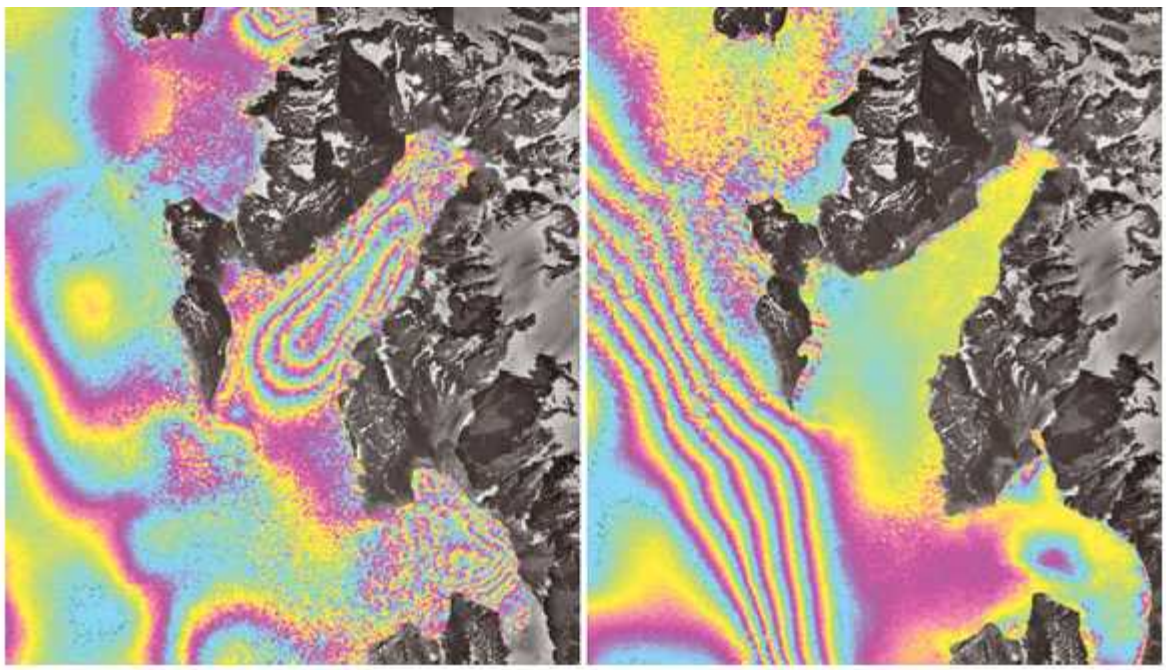


그림 48. 인공위성 영상레이더 간섭기법 기반 고산 빙하 빙저호 연구(Capps *et al.*, 2010)

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.

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.

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.

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: 106-124.

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 $Cook_{E2}$ subglacial lake in East Antarctica observed by DInSAR and time-segmented PSInSAR. *Remote Sensing*, 14: 4616.

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, 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.

Vaughan, D.G., 1995. Tidal flexure at ice shelf margins. *Journal of Geophysical Research*,

100(B4): 6213-6224.

KOPRI
극지연구소

부 록: David 빙하 주변 빙저호 지역 DDInSAR 영상

○ David 빙하 주변 지역에 대해 2017년 2월 8일과 2017년 3월 16일에 획득된 Sentinel-1 SAR 영상으로부터 주(master) DInSAR 영상(36일 시간 기선거리)을 생성

○ 2017년 2월 20일부터 2022년 2월 18일까지 시계열(일부 기간 제외)로 획득된 Sentinel-1 SAR 영상을 활용하여 36일 시간 기선거리의 부(slave) DInSAR 영상을 총 128개 생성

○ 주 DInSAR 영상에서 부 DInSAR 영상을 차분함으로써 총 128개의 DDInSAR 영상 제작

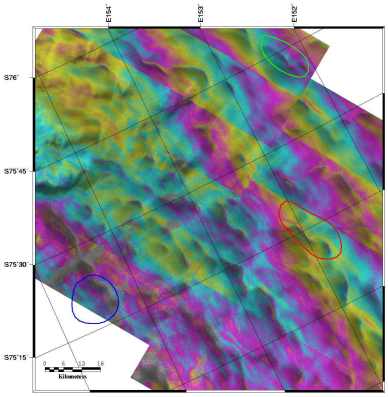
○ 각 DDInSAR 영상 하단의 두 날짜는 부 DInSAR 영상 제작에 사용된 SAR 영상 2개의 획득 날짜를 의미함

○ 파란색, 빨간색, 초록색 폴리곤은 Smith *et al.* (2009)에서 ICESat 레이저 고도계 관측을 통해 탐지된 David2, David3, David4 빙저호의 영역을 나타냄

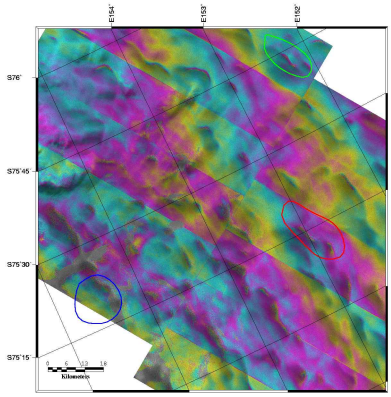
○ 시계열 DDInSAR 영상들은 빙저호의 수위변화 속도가 시간에 따라 다르며, DDInSAR 기법을 통해 위성 고도계보다 정확하게 빙저호 영역을 탐지할 수 있음을 설명함

○ DDInSAR 영상에서는 현재까지 발견/보고되지 않은 새로운 빙저호들이 다수 탐지됨

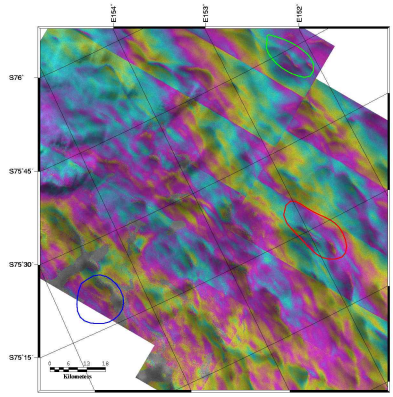
KOPRI 극지연구소



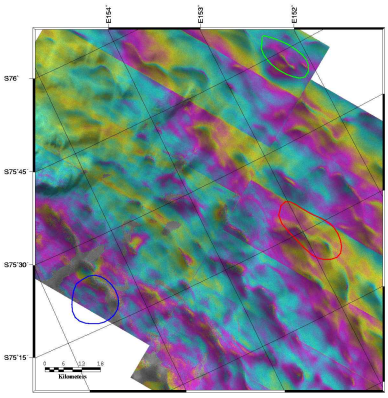
2017-02-20 2017-03-28



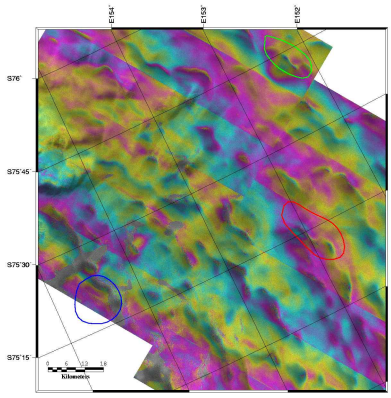
2017-03-04 2017-04-09



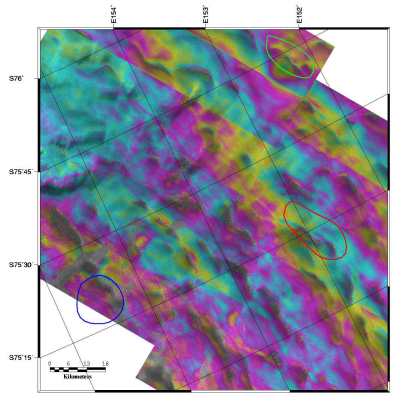
2017-03-16 2017-04-21



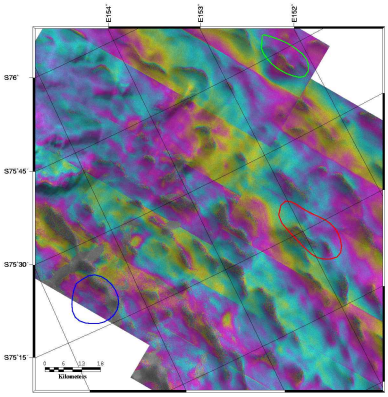
2017-03-28 2017-05-03



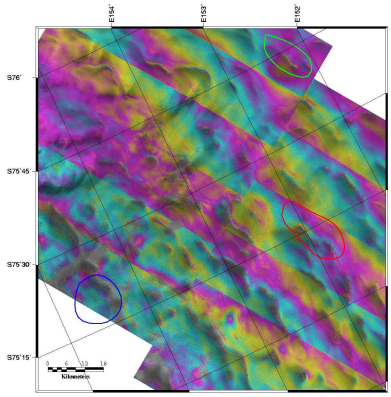
2017-04-09 2017-05-15



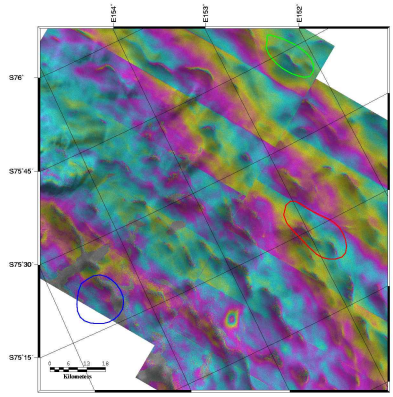
2017-04-21 2017-05-27



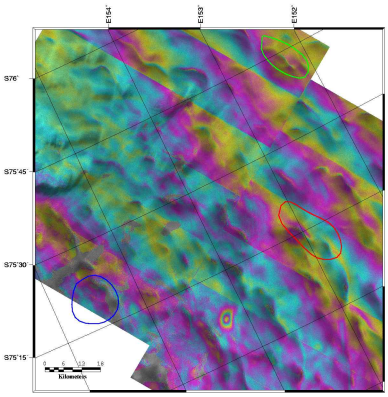
2017-05-03 2017-06-08



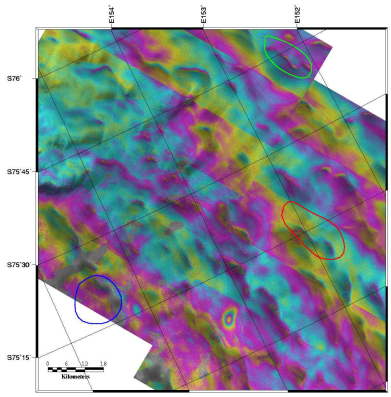
2017-05-15 2017-06-20



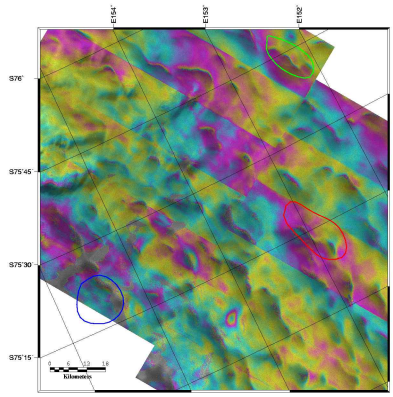
2017-05-27 2017-07-02



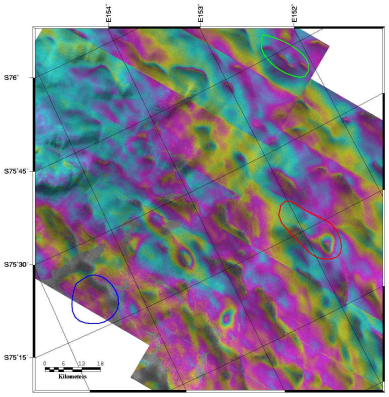
2017-06-08 2017-07-14



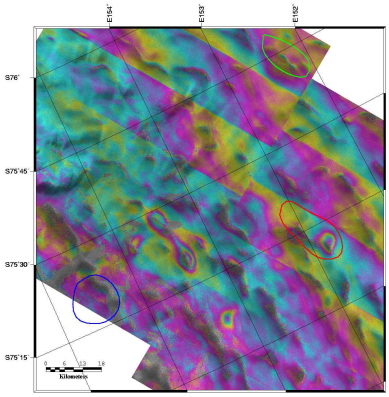
2017-06-20 2017-07-26



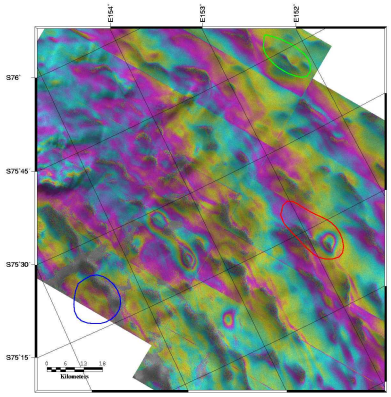
2017-07-02 2017-08-07



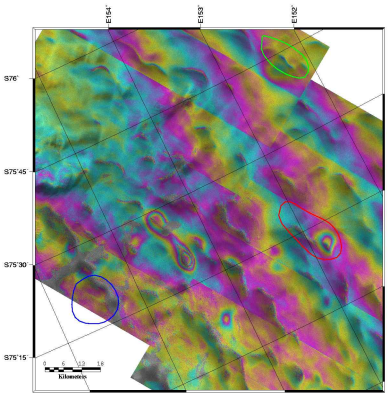
2017-07-14 2017-08-19



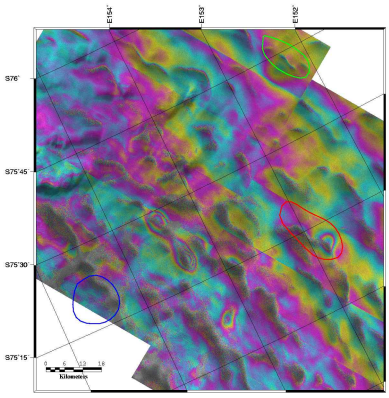
2017-07-26 2017-08-31



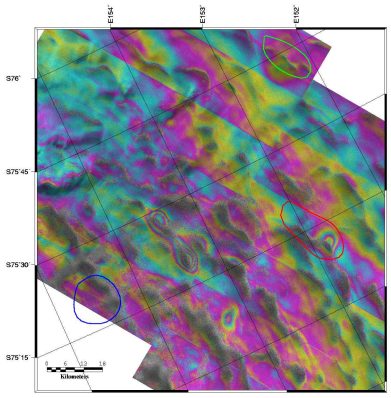
2017-08-07 2017-09-12



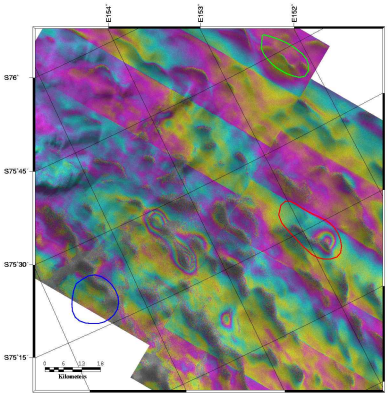
2017-08-19 2017-09-24



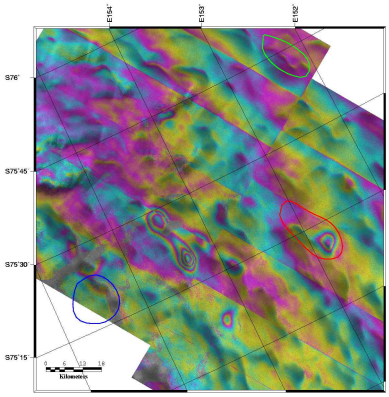
2017-08-31 2017-10-06



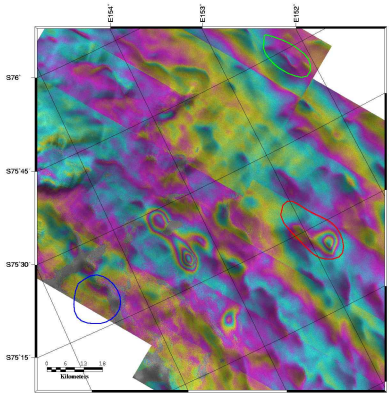
2017-09-12 2017-10-18



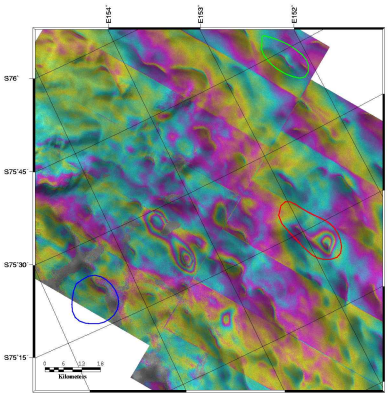
2017-09-24 2017-10-30



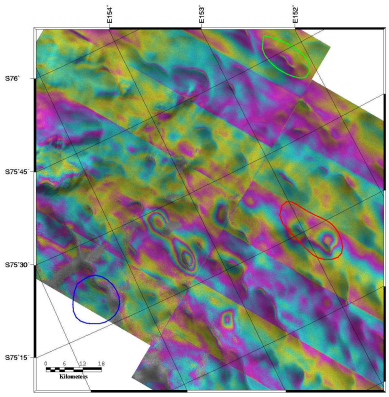
2017-10-06 2017-11-11



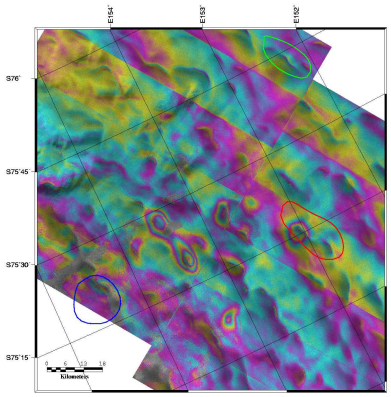
2017-10-18 2017-11-23



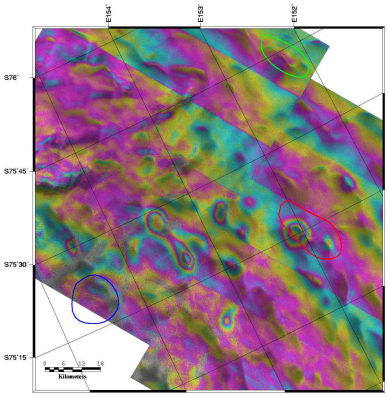
2017-10-30 2017-12-05



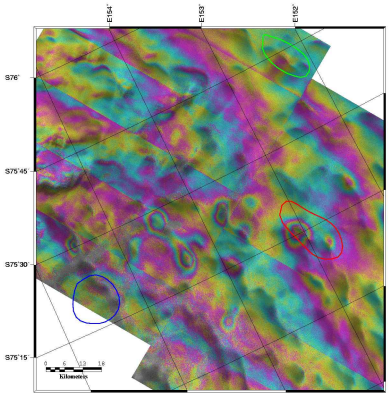
2017-11-11 2017-12-17



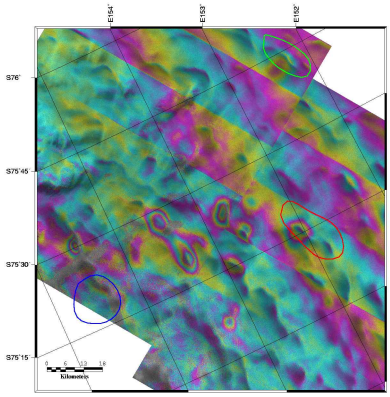
2017-11-23 2017-12-29



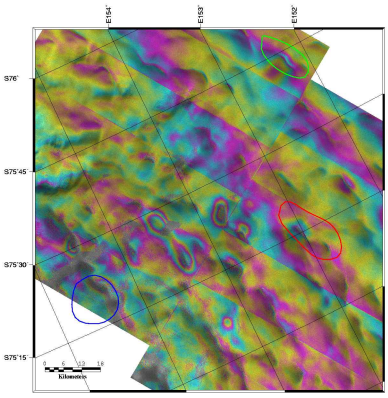
2017-12-05 2018-01-10



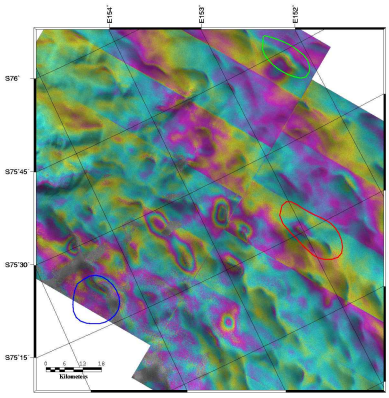
2017-12-17 2018-01-22



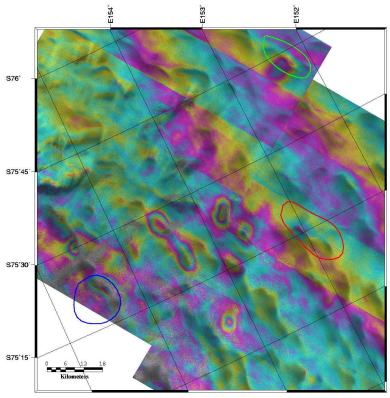
2017-12-29 2018-02-03



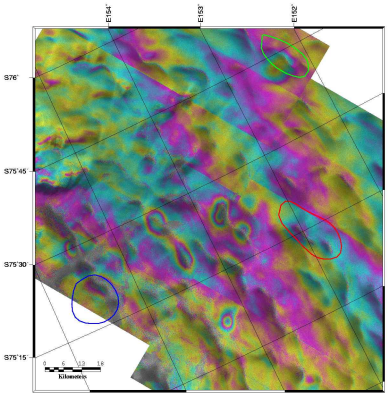
2018-01-10 2018-02-15



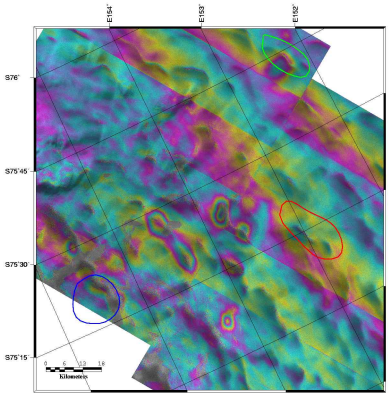
2018-01-22 2018-02-27



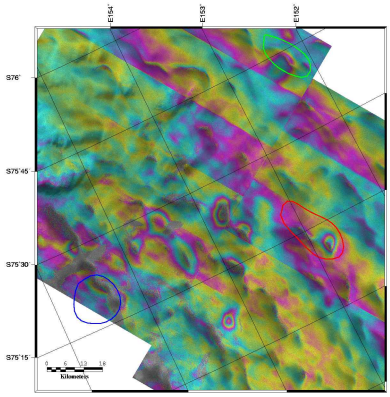
2018-02-03 2018-03-11



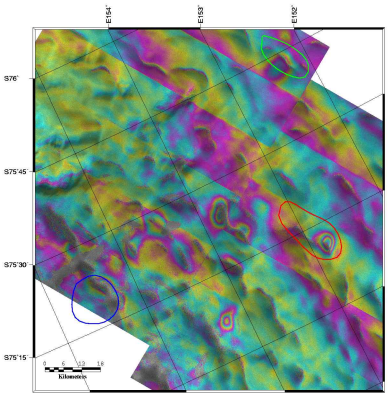
2018-02-15 2018-03-23



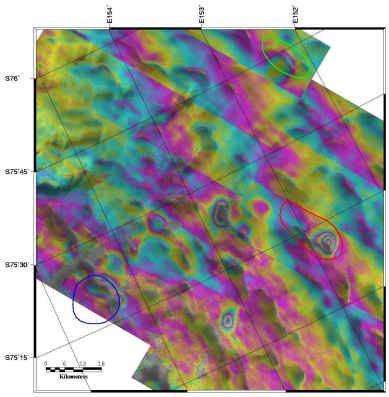
2018-02-27 2018-04-04



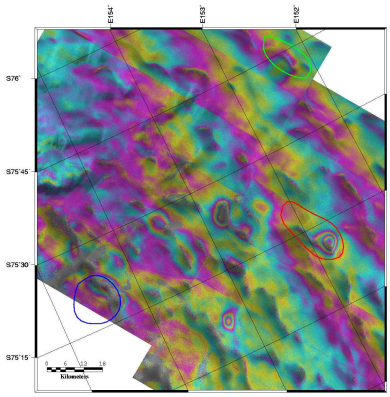
2018-03-11 2018-04-16



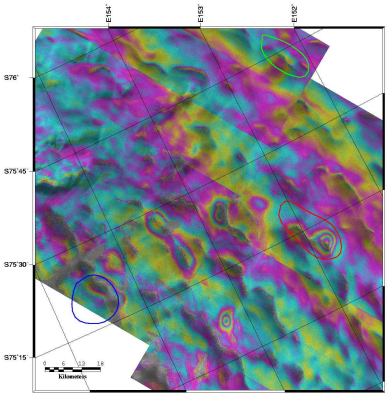
2018-03-23 2018-04-28



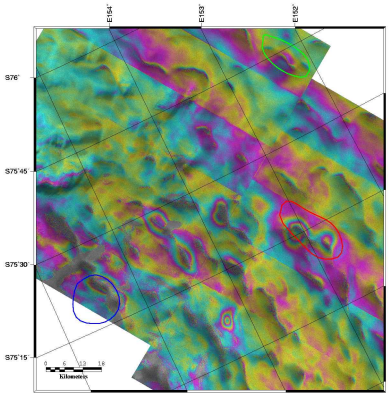
2018-04-04 2018-05-10



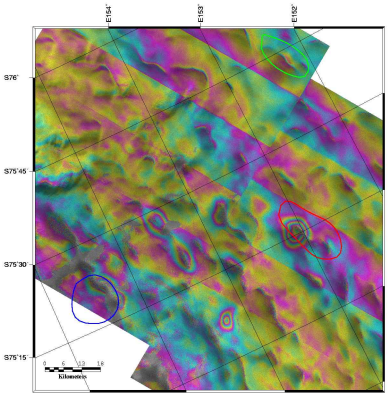
2018-04-16 2018-05-22



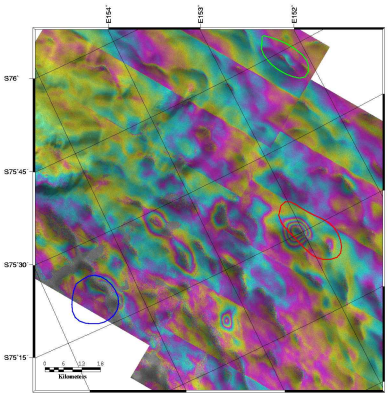
2018-04-28 2018-06-03



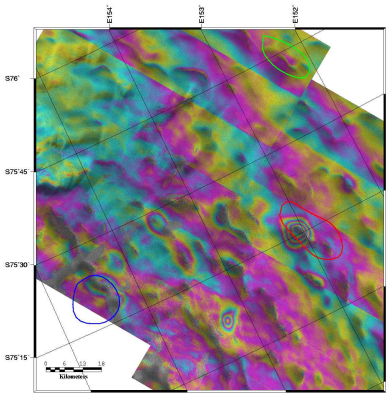
2018-05-10 2018-06-15



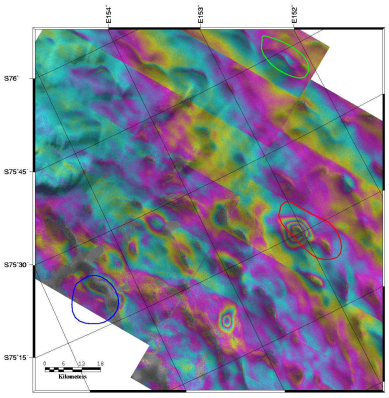
2018-05-22 2018-06-27



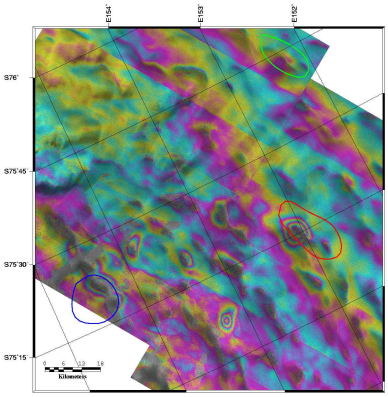
2018-06-03 2018-07-09



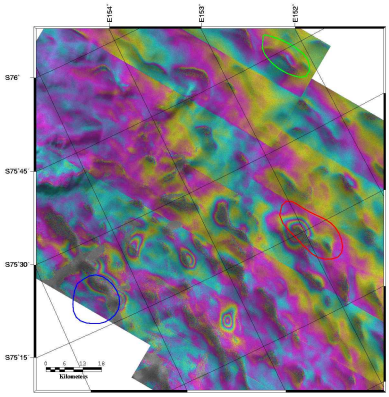
2018-06-15 2018-07-21



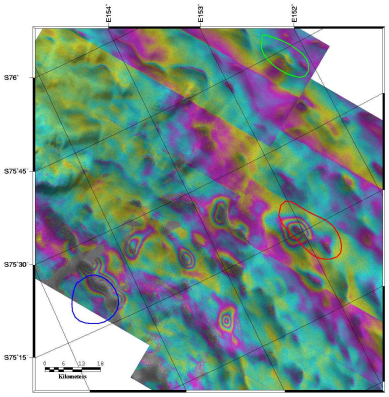
2018-06-27 2018-08-02



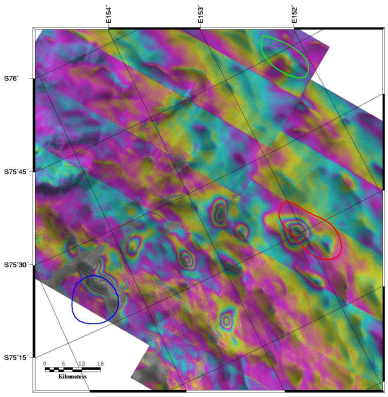
2018-07-09 2018-08-14



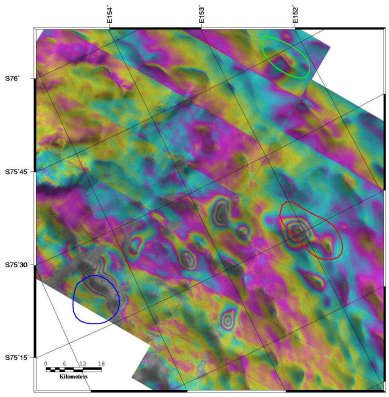
2018-07-21 2018-08-26



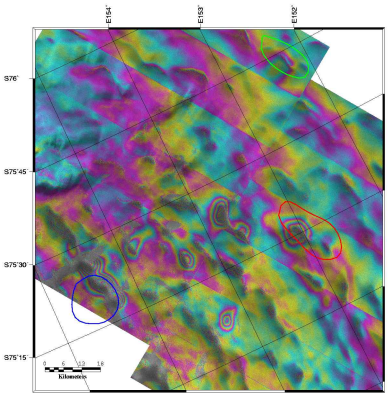
2018-08-02 2018-09-07



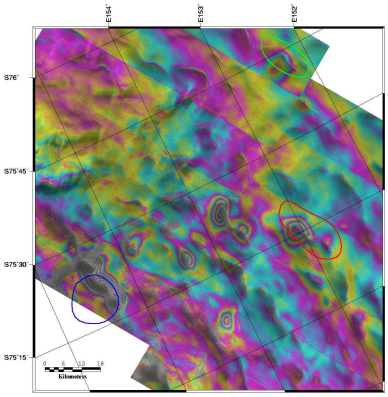
2018-08-14 2018-09-19



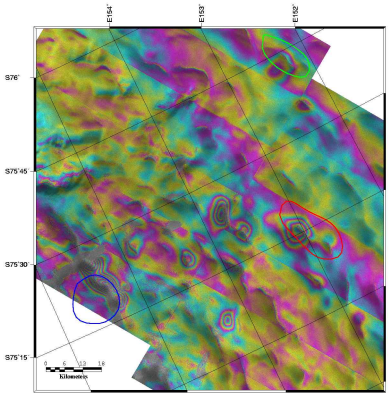
2018-08-26 2018-10-01



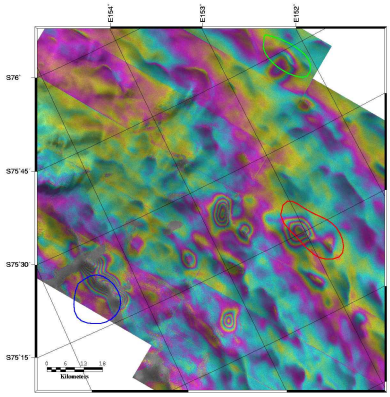
2018-09-07 2018-10-13



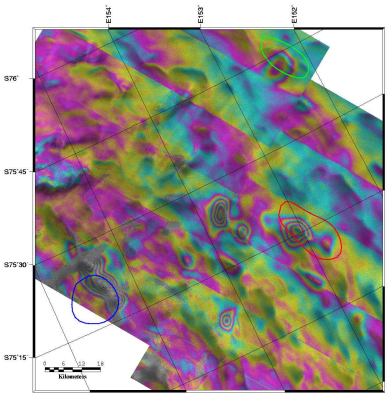
2018-09-19 2018-10-25



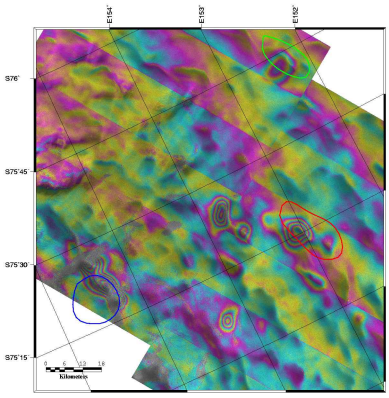
2018-10-01 2018-11-06



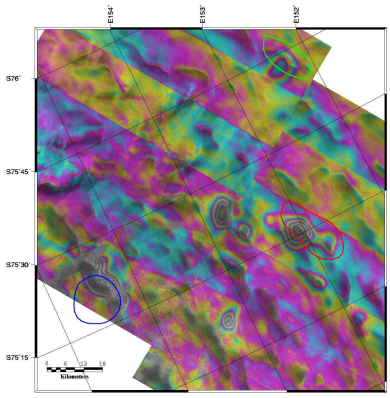
2018-10-13 2018-11-18



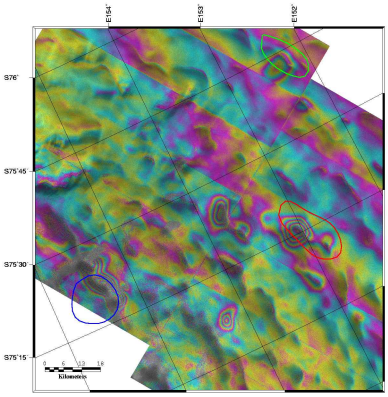
2018-10-25 2018-11-30



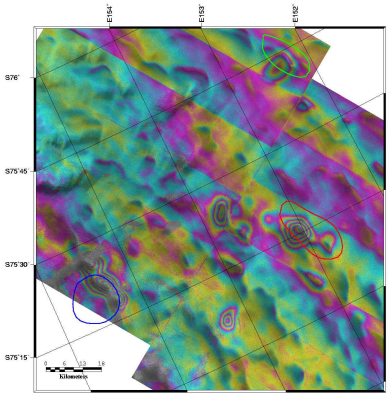
2018-11-06 2018-12-12



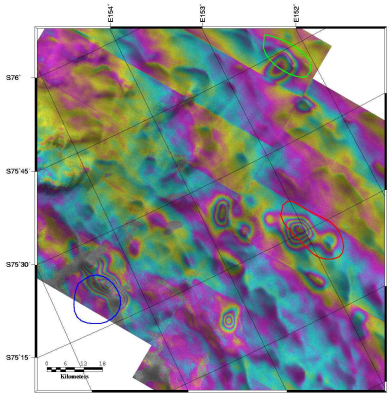
2018-11-18 2018-12-24



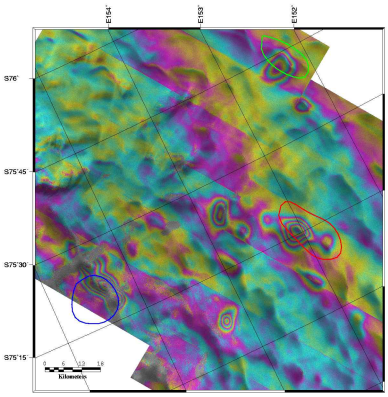
2018-11-30 2019-01-05



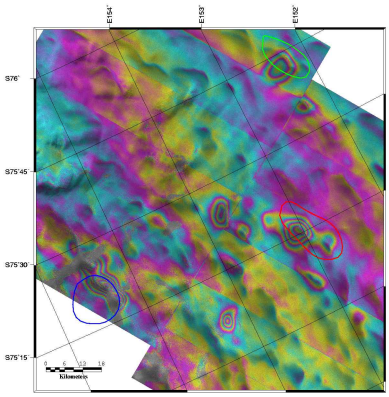
2018-12-12 2019-01-17



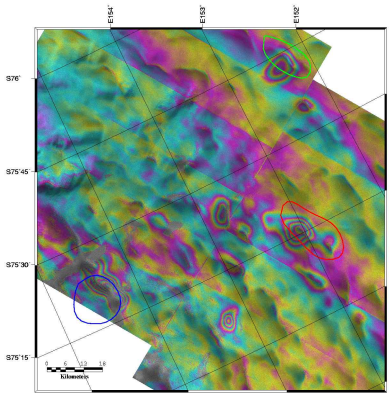
2018-12-24 2019-01-29



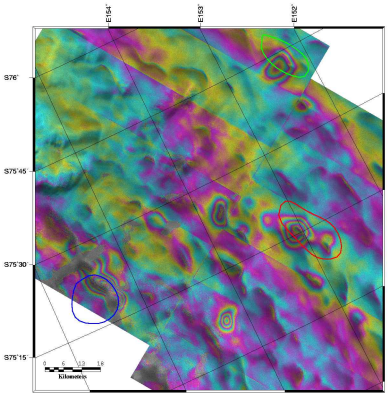
2019-01-05 2019-02-10



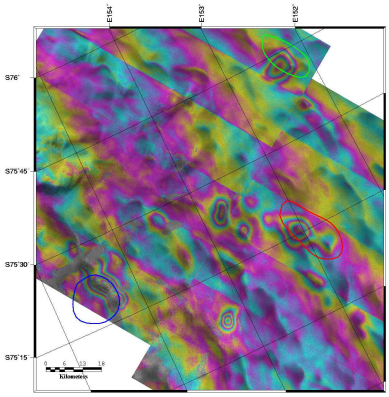
2019-01-17 2019-02-22



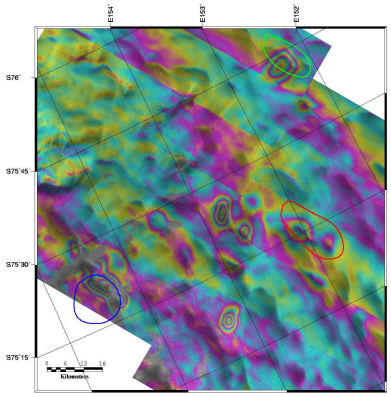
2019-01-29 2019-03-06



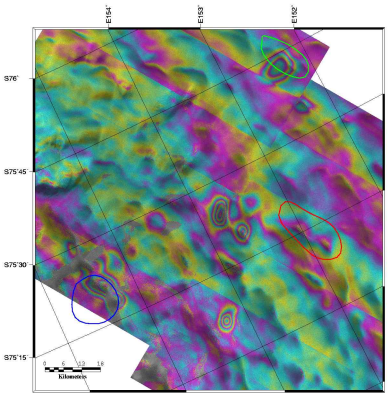
2019-02-10 2019-03-18



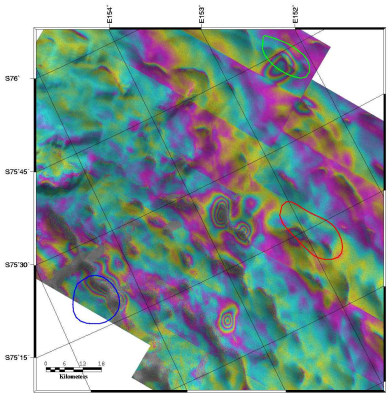
2019-02-22 2019-03-30



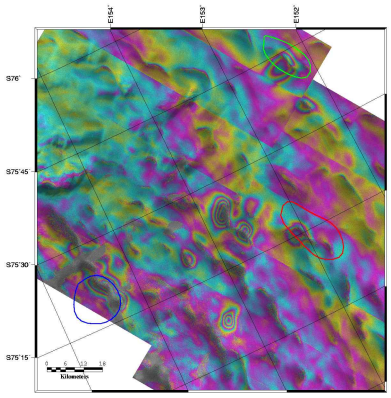
2019-03-06 2019-04-11



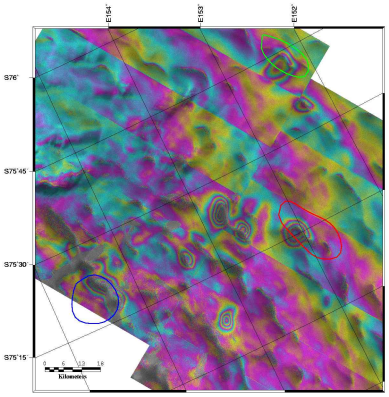
2019-03-18 2019-04-23



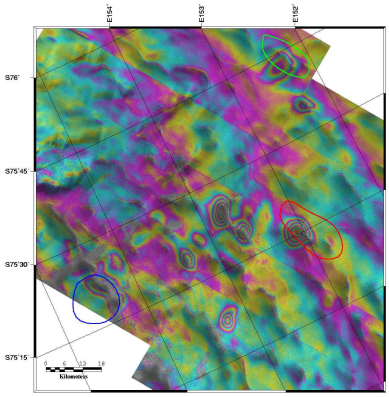
2019-03-30 2019-05-05



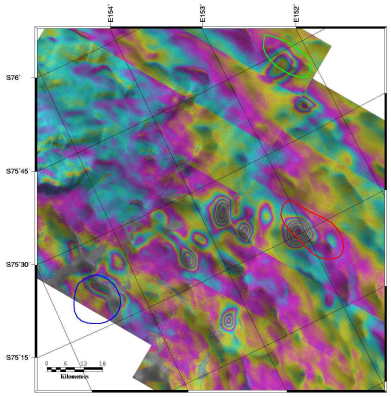
2019-04-11 2019-05-17



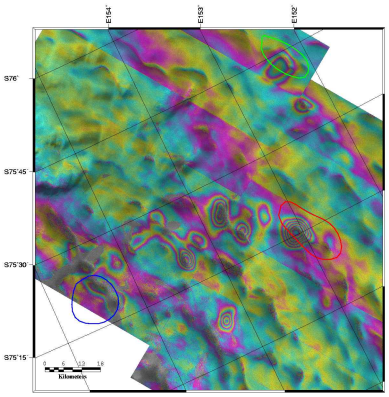
2019-04-23 2019-05-29



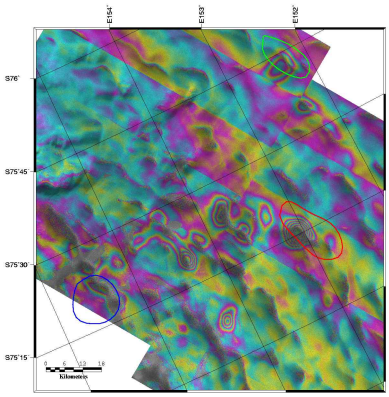
2019-05-05 2019-06-10



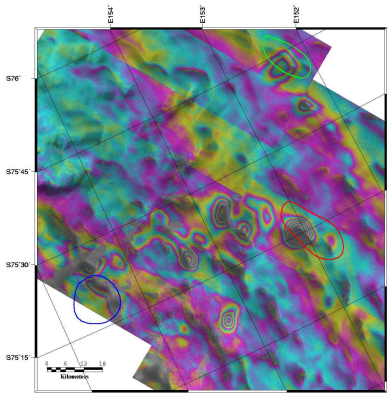
2019-05-17 2019-06-22



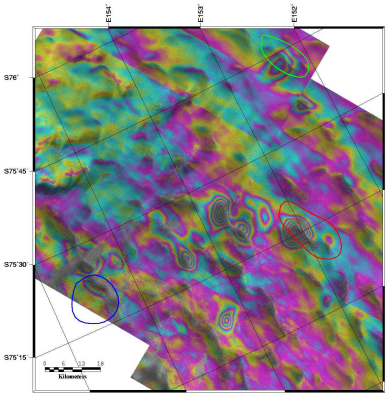
2019-05-29 2019-07-04



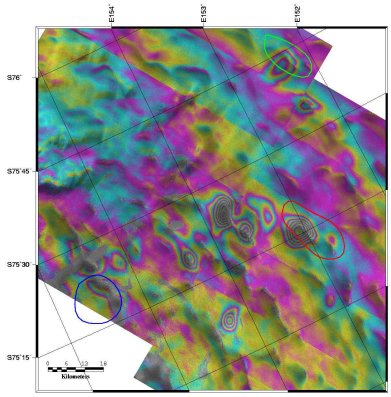
2019-06-10 2019-07-16



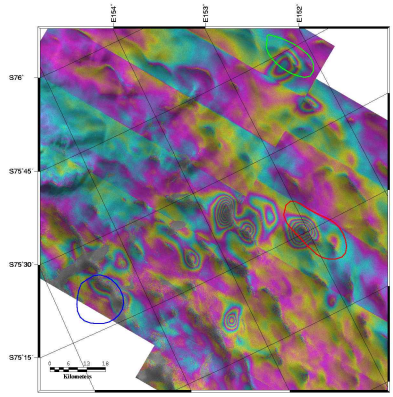
2019-06-22 2019-07-28



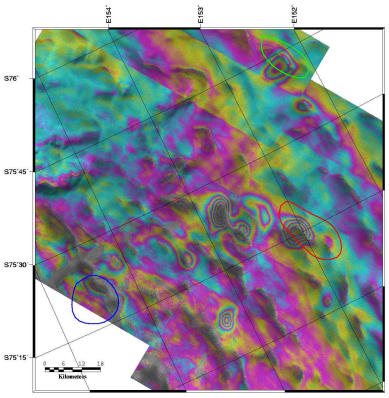
2019-07-04 2019-08-09



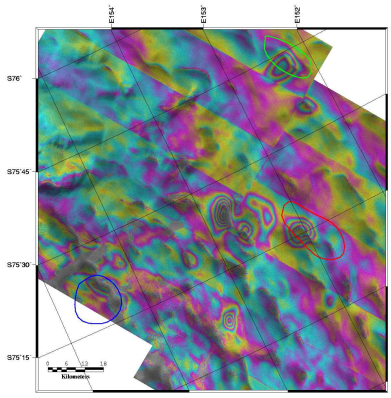
2019-07-16 2019-08-21



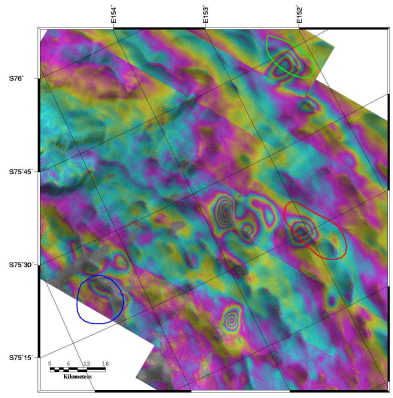
2019-07-28 2019-09-02



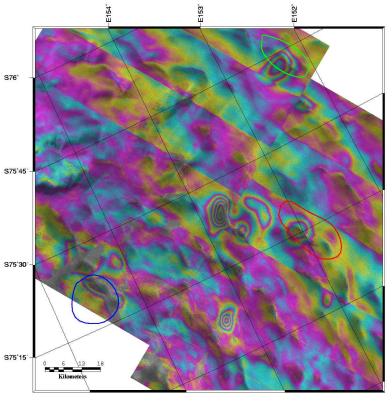
2019-08-09 2019-09-14



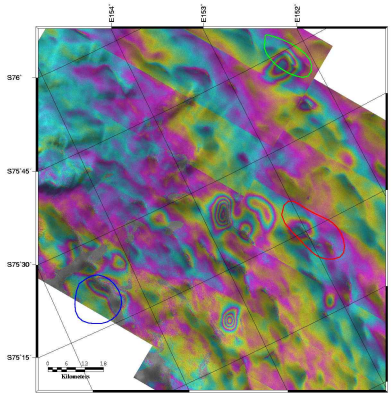
2019-08-21 2019-09-26



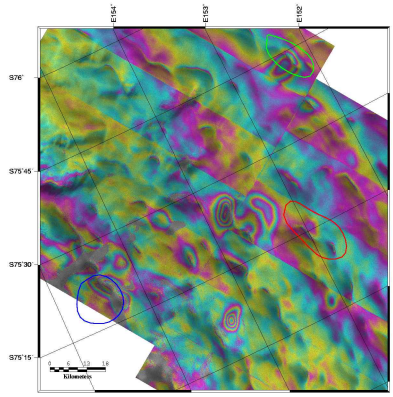
2019-09-02 2019-10-08



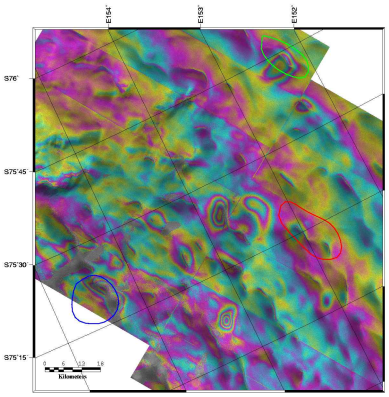
2019-09-14 2019-10-20



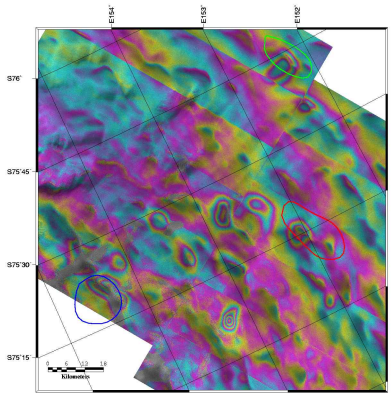
2019-09-26 2019-11-01



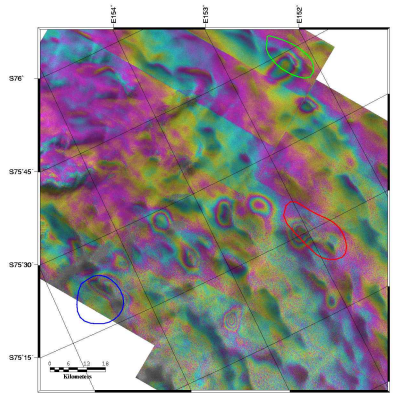
2019-10-08 2019-11-13



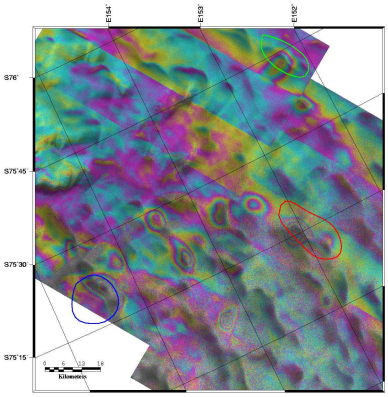
2019-10-20 2019-11-25



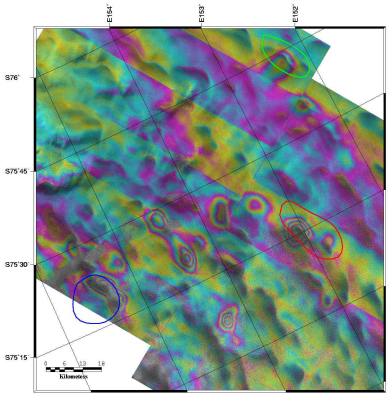
2019-11-01 2019-12-07



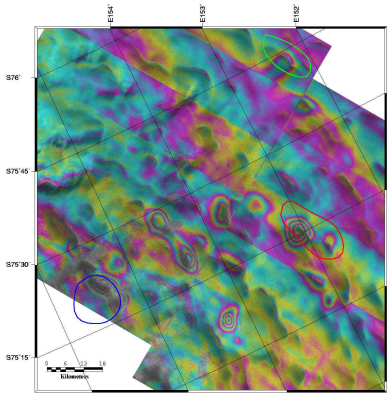
2019-11-13 2019-12-19



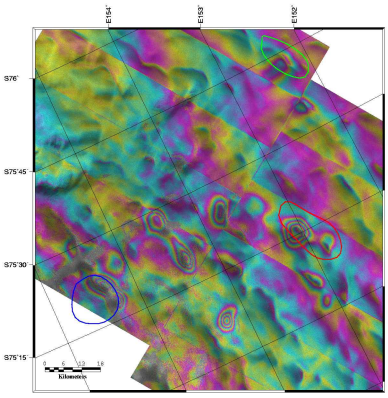
2019-11-25 2019-12-31



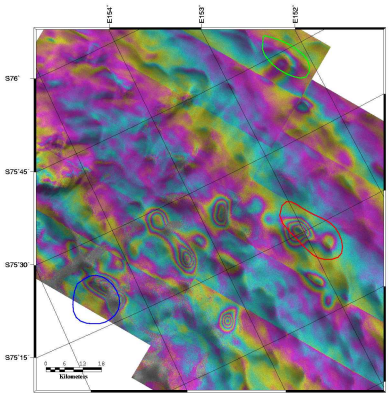
2019-12-07 2020-01-12



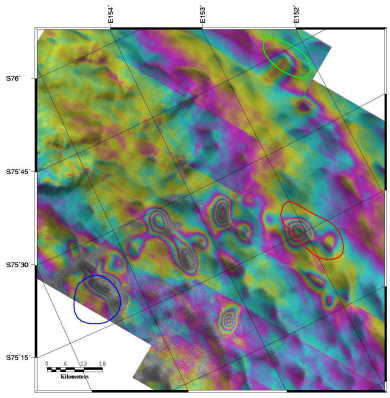
2019-12-19 2020-01-24



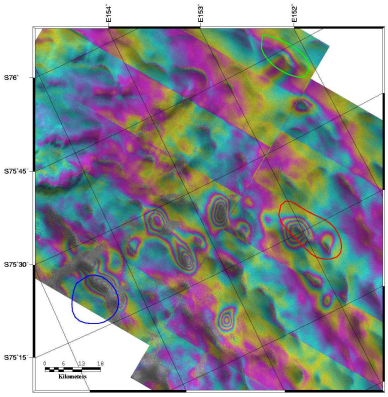
2019-12-31 2020-02-05



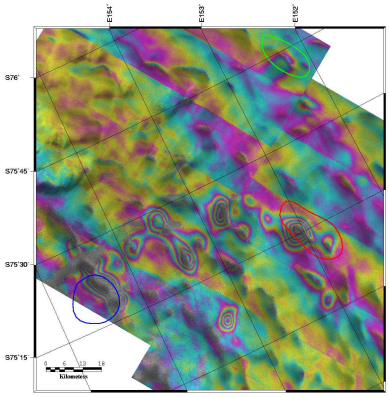
2020-01-12 2020-02-17



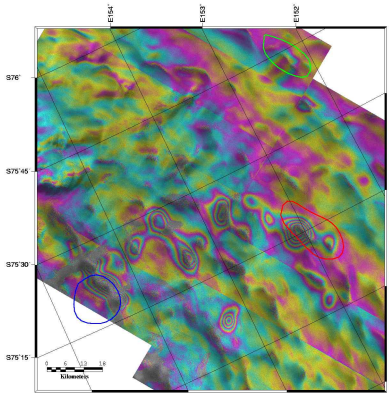
2020-02-05 2020-03-12



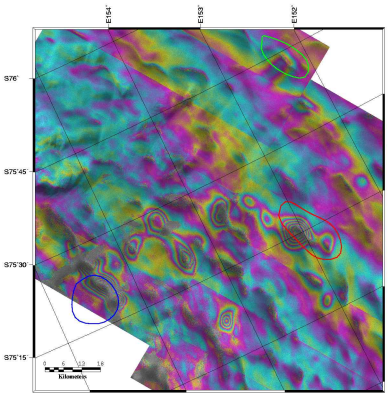
2020-02-17 2020-03-24



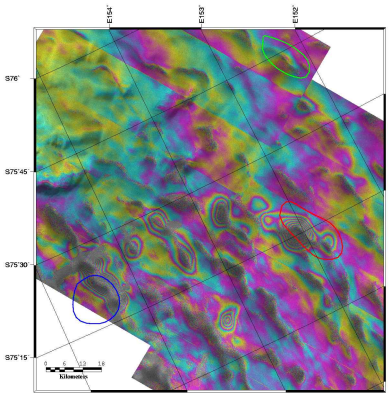
2020-03-12 2020-04-17



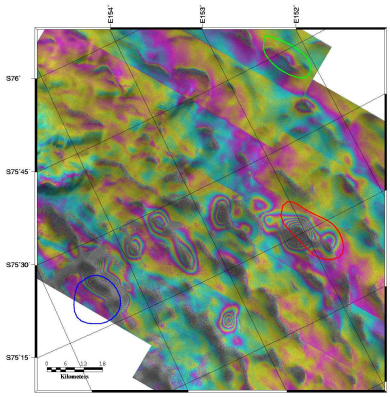
2020-03-24 2020-04-29



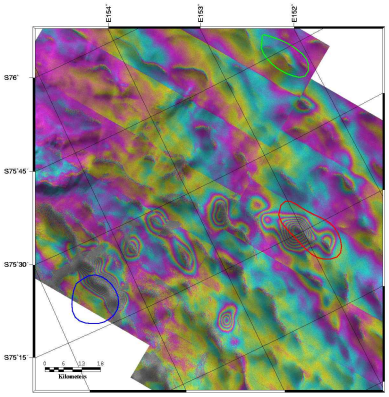
2020-04-05 2020-05-11



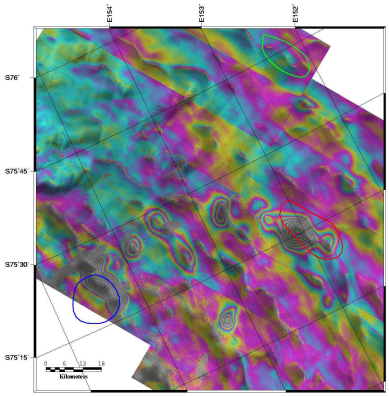
2020-08-15 2020-09-20



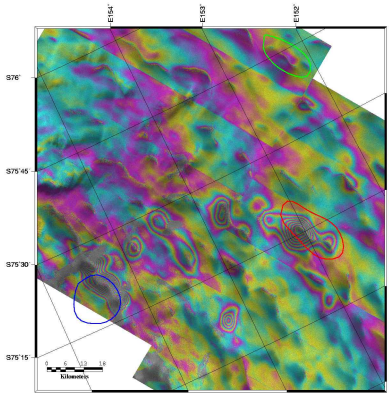
2020-08-27 2020-10-02



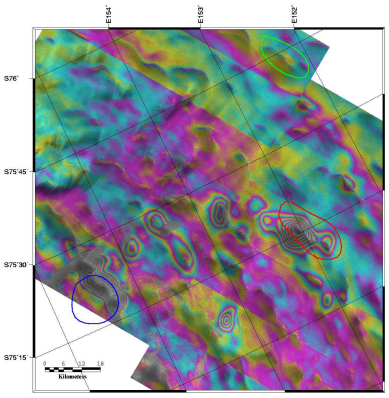
2020-09-08 2020-10-14



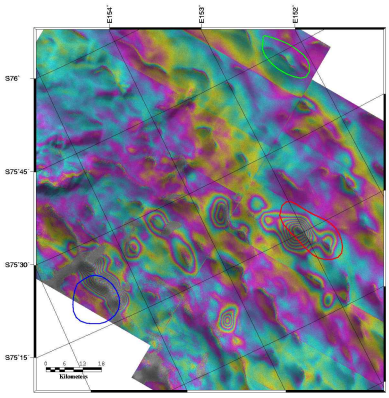
2020-09-20 2020-10-26



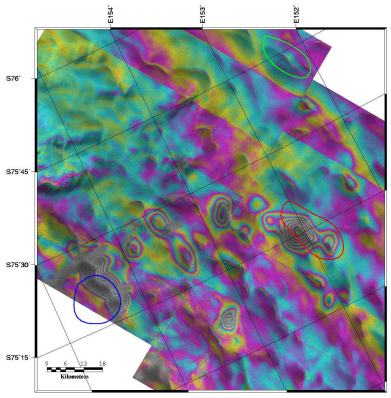
2020-10-02 2020-11-07



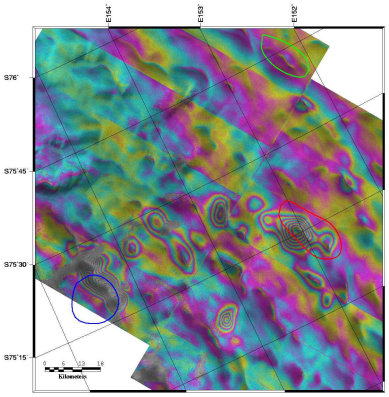
2020-10-14 2020-11-19



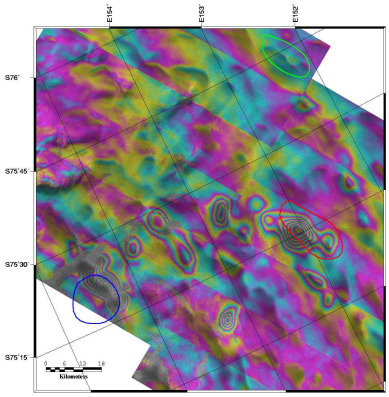
2020-10-26 2020-12-01



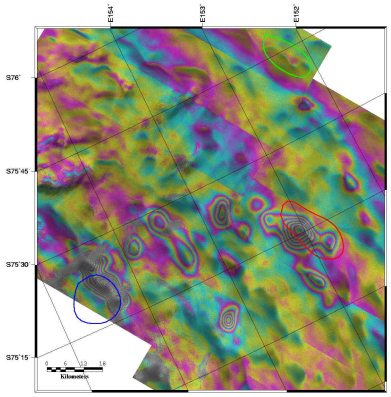
2020-11-07 2020-12-13



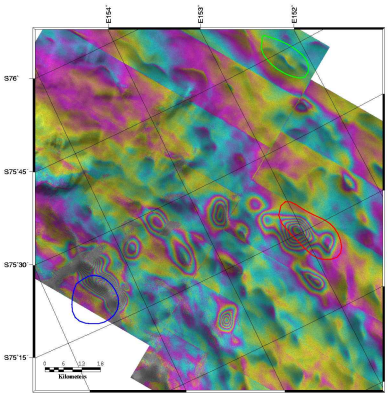
2020-11-19 2020-12-25



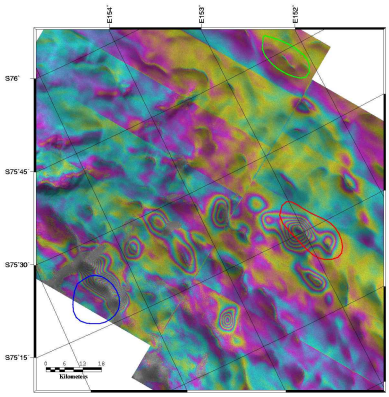
2020-12-01 2021-01-06



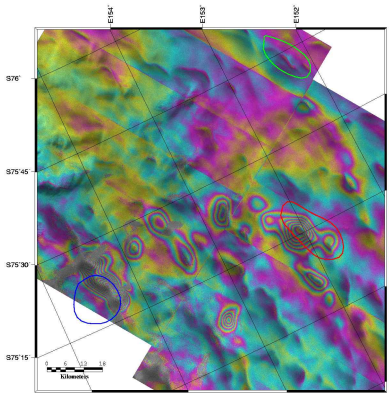
2020-12-13 2021-01-18



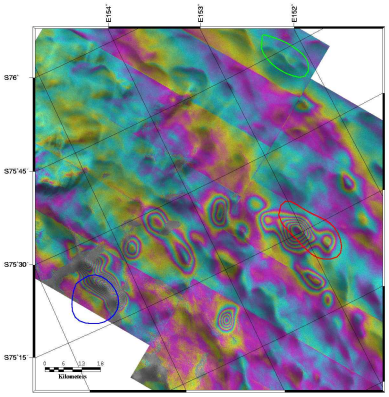
2020-12-25 2021-01-30



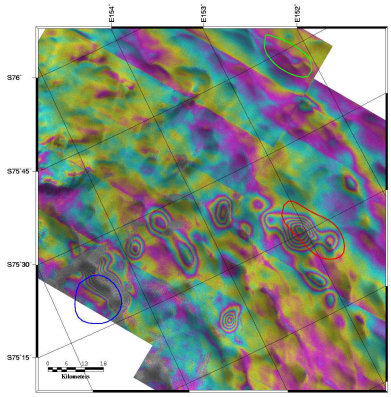
2021-01-06 2021-02-11



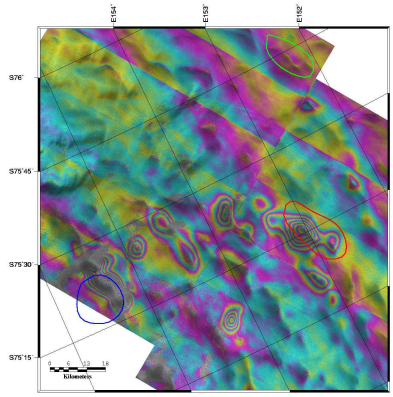
2021-01-18 2021-02-23



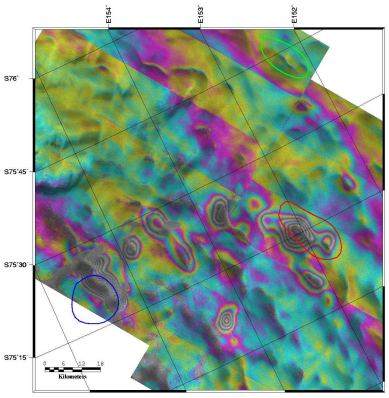
2021-01-30 2021-03-07



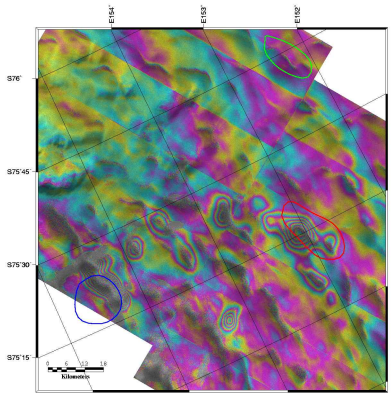
2021-02-11 2021-03-19



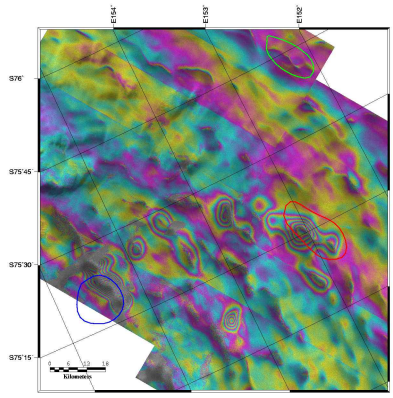
2021-02-23 2021-03-31



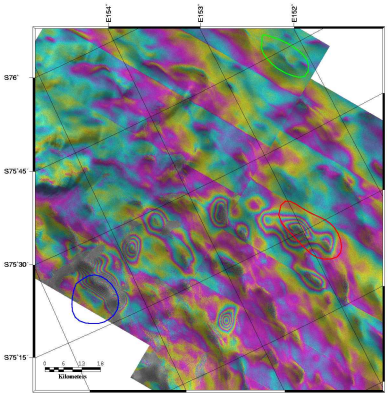
2021-03-07 2021-04-12



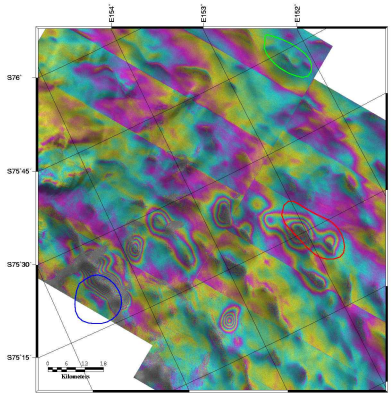
2021-03-19 2021-04-24



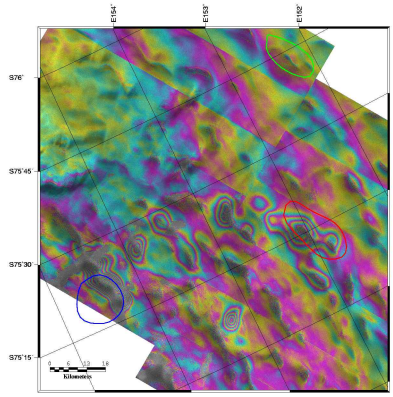
2021-04-24 2021-05-30



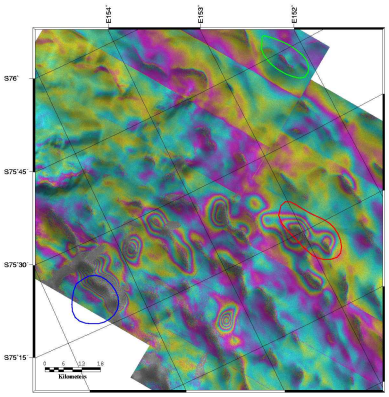
2021-08-10 2021-09-15



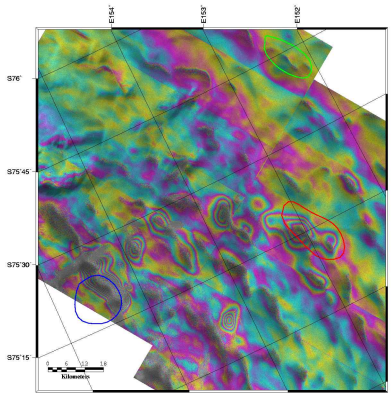
2021-08-22 2021-09-27



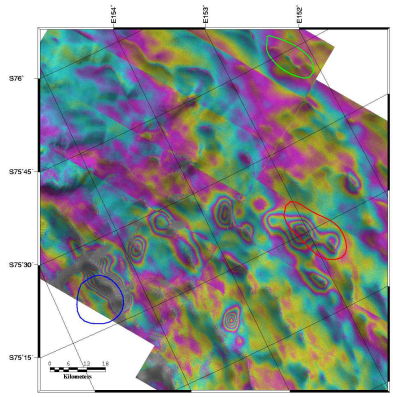
2021-09-03 2021-10-09



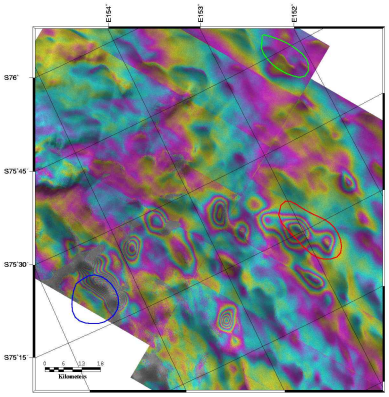
2021-09-15 2021-10-21



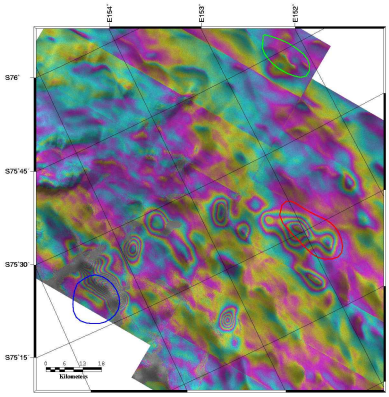
2021-09-27 2021-11-02



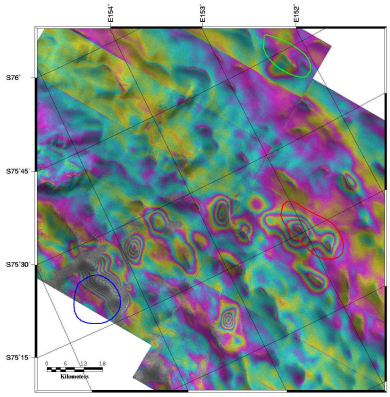
2021-10-09 2021-11-14



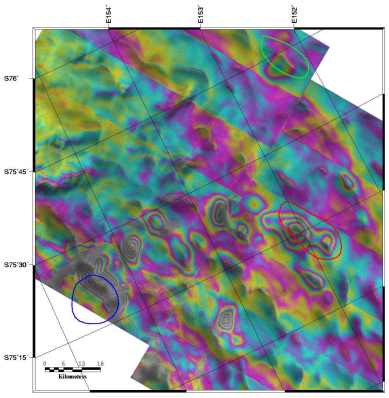
2021-10-21 2021-11-26



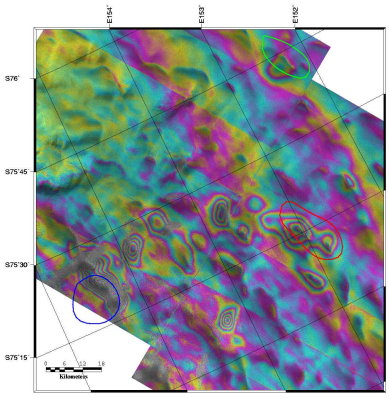
2021-11-02 2021-12-08



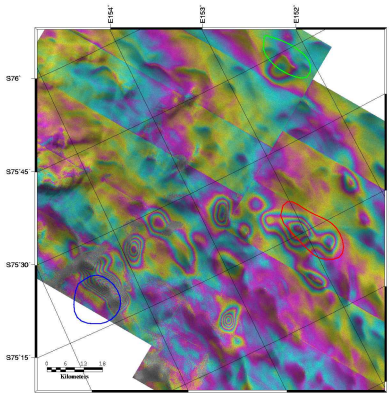
2021-11-14 2021-12-20



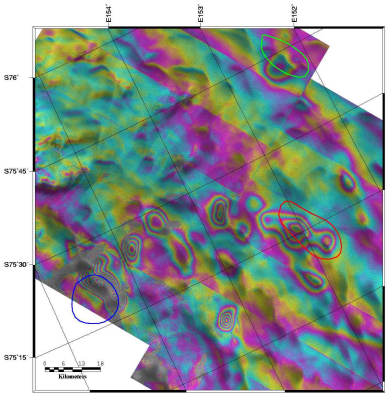
2021-11-26 2022-01-01



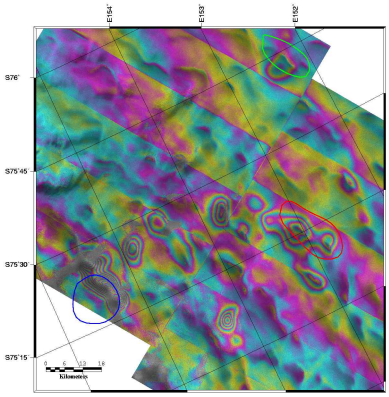
2021-12-08 2022-01-13



2021-12-20 2022-01-25



2022-01-01 2022-02-06



2022-01-13 2022-02-18

KOPRI
극지연구소

주 의

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