

무인기 획득 영상 기반 빙하 모니터링 기술 연구

Research on Glacier Monitoring Techniques Using Images
from Unmanned Vehicle

2023. 12. 31

한국해양과학기술원
부설극지연구소

한국연구재단

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		전략형 국제공동연구사업						
내역사업명 (해당 시 작성)						연구개발과제번호		2019K1A4A7A02112565
기술 분류	국가과학기술 표준분류	1순위 소분류 코드명	%	2순위 소분류 코드명	%	3순위 소분류 코드명	%	
	과학기술 분야분류	1순위 소분류 코드명	%	2순위 소분류 코드명	%	3순위 소분류 코드명	%	
총괄연구개발명 (해당 시 작성)								
연구개발과제명		무인기 획득 영상 기반 빙하 모니터링 기술 연구 Research on glacier monitoring techniques using images from unmanned vehicle						
전체 연구개발기간		2019.10.01 ~ 2023.12.31. (51개월)						
총 연구개발비		총 680,000 천원 (정부지원연구개발비: 680,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
연구개발단계		기초[o] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()	
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		그린란드 빙하 무인기 자료 기반 변화 모니터링 연구					
	전체 내용		극지역에서 효율적인 관측이 가능한 무인이동체로부터 획득된 고해상도 영상과 인공위성 원격탐사 데이터를 복합 활용하여 그린란드 빙하를 정밀 모니터링하 고 표면 구조와 시계열 고도 변화를 탐지할 수 있는 기술 개발					
	1년차	목표	무인이동체 기반 그린란드 빙하 지역 고해상도 영상 획득 요구 조건 정립					
		내용	변화 탐지를 위한 고해상도 빙하 영상 획득 대상 지역 선정, 고품질 영상 획득 을 위한 무인이동체 및 센서 최적 운용법 상세 정의					
	2년차	목표	그린란드 하계 현장 영상 및 실측 자료 획득/동시기 인공위성 데이터 획득					
		내용	그린란드 현장 고려 하계 및 동계 무인이동체 운용 환경 특성 조사 및 분석, 무인이동체 획득 영상 모자이크와 획득된 인공위성 데이터의 정밀 위치 정합 수행					
	3년차	목표	무인이동체 획득 영상 기반 고해상도 빙하 영상 및 지형 모델 제작 기술 연구					
		내용	무인이동체 획득 빙하 지역 영상 전처리 기법 연구, 다중 시점 빙하 지역 영상 정 합 및 모자이크 제작 기법 연구, 빙하 지역 고해상도 지형 모델 제작 기법 연구					
	4년차	목표	무인이동체 획득 영상 기반 고해상도 빙하 지형 변동 모니터링 기술 연구					
		내용	시계열 빙하 지형 모델 비교를 통한 변화 탐지 기법 연구, 고해상도 모자이크 영상을 이용한 빙하 흐름 속도 산출 기법 연구					
5년차	목표	고해상도 빙하 지형 모델과 인공위성 데이터 기반의 빙하 지형 모델 비교 연구						
	내용	무인이동체 획득과 동시기에 인공위성 데이터 추가 획득, 무인이동체 기반 고해상도 지형 및 인공위성 데이터 기반 빙하 지형 정합 기법 연구, 고해상도 지형 모델 활용 인공위성 데이터 기반 빙하 정보 검증 기법 연구						

연구개발성과	• 무인이동체 획득 영상을 이용한 그린란드 지역 고해상도·고정밀 빙하 정보 생산 기술 확보 • 무인이동체 획득 정보 및 인공위성 데이터의 융복합 빙하 모니터링 결과로부터 SCI/SCIE 연구 논문 출판											
	<예상되는 연구개발성과 유형>											
	구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 • 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
		생명 정보	생물 자원	정보	실물							
	예상성과 (Y/N)	Y	N	Y	N	N	N	N	N	N	N	N
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	• 무인이동체 획득 영상 기반 빙하 정보와 인공위성 데이터 기반 빙하 정보를 복합 활용하여 극지역 변화 모니터링 기술의 정밀화 및 효율화 달성 • 무인이동체 활용 빙하 모니터링 기술 확보로부터 향후 동토, 해빙 등 다양한 극지 환경 모니터링으로의 연구 지역 및 분석 대상의 확대 가능											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유												
연구개발성과의 등록 • 기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 • 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
		생명 정보	생물 자원	정보	실물							
	3		5									
연구시설 • 장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설 • 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)		ZEUS 등록번호		
국문핵심어 (5개 이내)	무인이동체		그린란드		변화 탐지		빙하 모니터링		원격탐사			
영문핵심어 (5개 이내)	Unmanned vehicle		Greenland		Change detection		Glacier monitoring		Remote sensing			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

별첨자료 (참고 문헌 등)



1. 연구개발과제의 개요

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

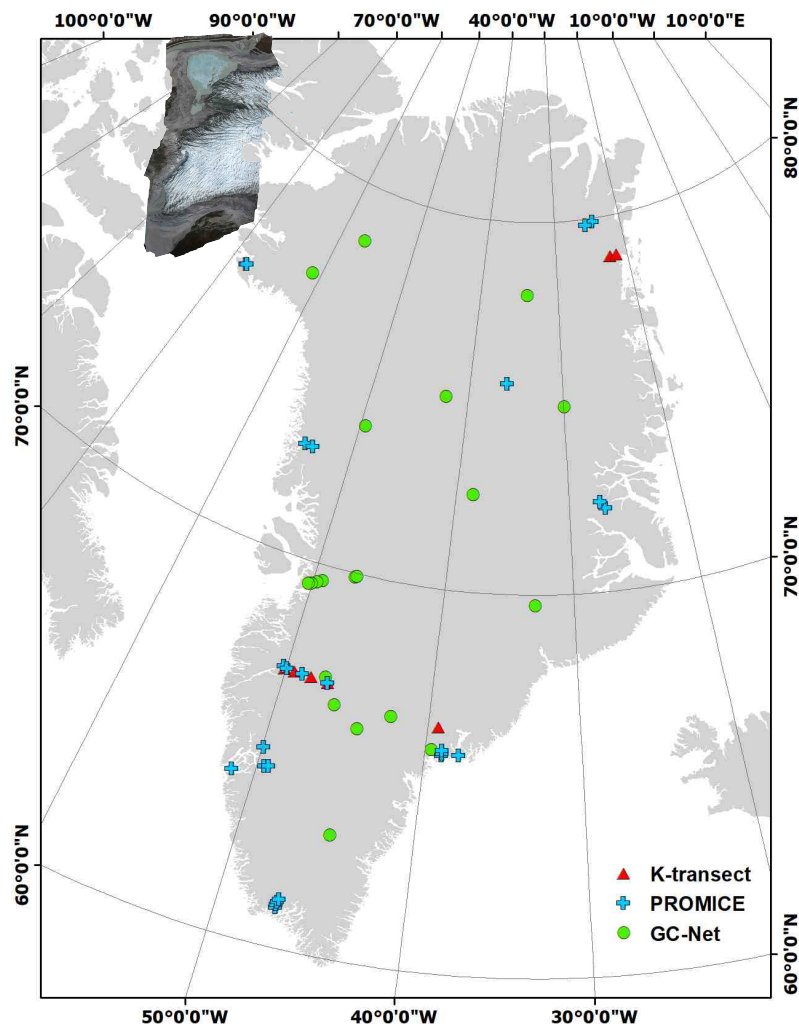
(1) 정성적 연구개발성과

I. 1단계 1차년도 연구수행내용 및 결과

1. 극지 환경요구서 작성

가. 그린란드 자동기상관측장비 (AWS) 관측 사례

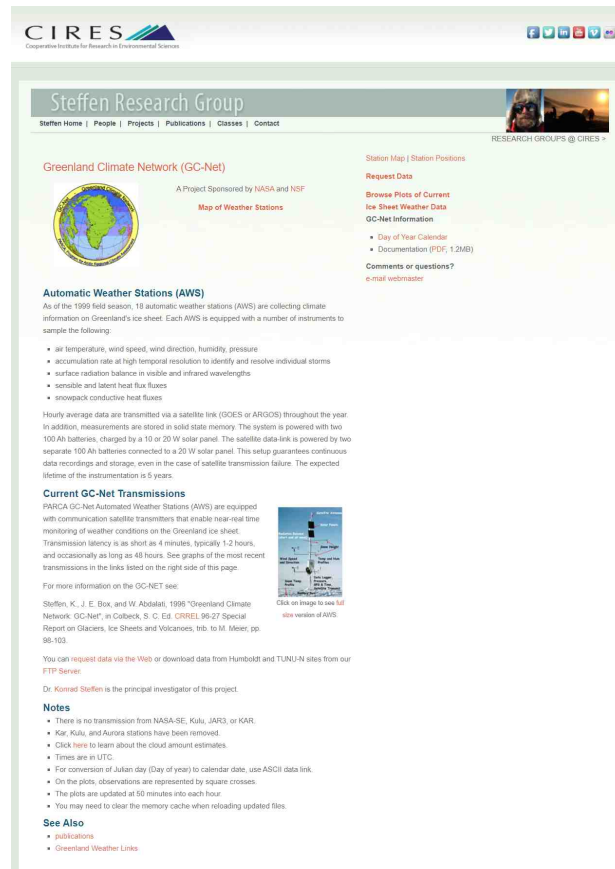
그린란드에서 무인기 활용 전 운용 환경 파악을 위해 자동기상관측장비 (automatic weather station, AWS)을 통해 획득된 기상관측 자료를 확보하였다. 기상관측 자료는 GC-NET, K-transect, PROMICE의 세 국제 관측 프로젝트들을 통해 그린란드 전역에 걸쳐 수집이 이루어졌다. 관측 자료 중 그린란드 현장 무인기 활용 지역 인근의 자료를 선별 후 현장 조사 시기의 기상 환경에 대한 사전 분석과 무인기 운용 계획 수립에 활용할 수 있다.



< K-transect, PROMICE, GC-NET 자동기상관측망의
그린란드 자동 기상관측 지점 분포 지도 >

1) GC-Net

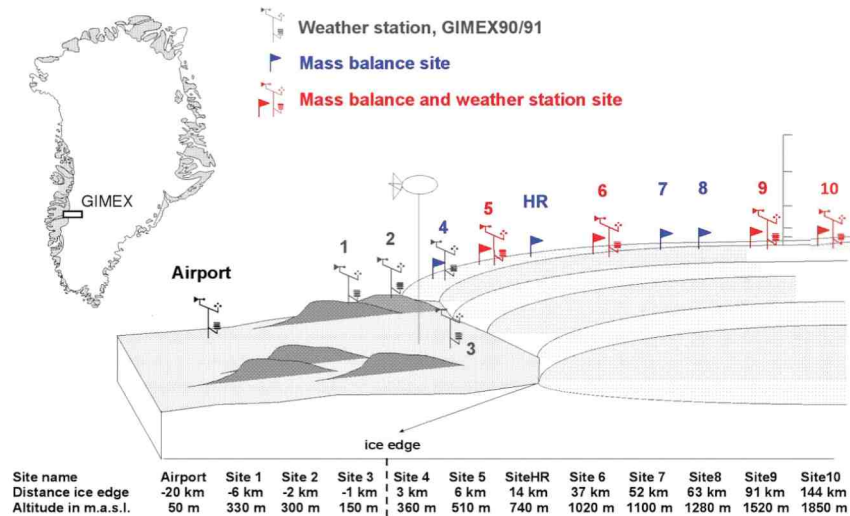
GC-Net (Greenland Climate Network)은 미국항공우주국 (NASA)과 미국국립과학재단 (NSF)의 지원으로 1999년 그린란드 빙상 (ice sheet)에 설치된 18개의 자동기상관측장비로 구성된 관측망이다 (Steffen et al., 1996). 미국 콜로라도 대학 (University of Colorado Boulder)의 Konrad Steffen 교수가 프로젝트 책임자이며, 관측된 기상자료는 시간 평균 전처리 후 위성 통신망을 통해 전송된다. 현재 6개 지점의 관측 장비는 현장에서 제거된 상태이다.



< GC-Net 웹사이트: <http://cires1.colorado.edu/steffen/gcnet> >

2) K-transect

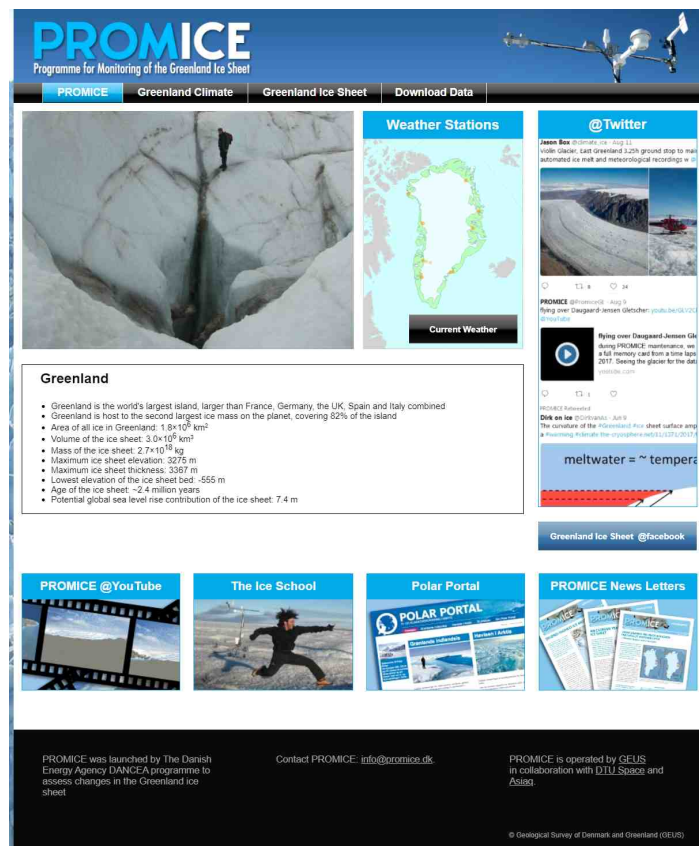
K-transect는 서그린란드 Kangerlussuaq 지역 인근 지점에서 네덜란드 위트레흐트 대학 (Utrecht University) 해양 및 대기 연구소 (Institute for Marine and Atmospheric Research)에서 Greenland Ice Margin Experiment (GIMEX) 프로젝트를 통해 1993년 8월부터 구축 및 운용이 시작된 관측망이다 (Smeets et al., 2018). K-transect는 러셀 빙하 (Russel Glacier) 전방 지역 동토부터 해발 1,500 m 지점까지 횡단하는 지점들에서 기상관측을 시작하였다.



< GIMEX91 프로젝트의 K-transect 기상관측망 분포 예 (Smeets et al., 2018) >

3) PROMICE

PROMICE (Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet)는 다수의 프로젝트가 결합된 기상관측망으로 덴마크 및 그린란드 지질조사소 (Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS))에 의해 2007년부터 관측을 시작하였다 (van As et al., 2011). PROMICE 관측망을 구성하는 관측지점 중 KAN 관측지점은 Greenland Analogue Project (GAP)에 의해, KAN_B 관측지점은 Greenland Analogue Surface Project (GRASP)에 의해, NUK 관측지점은 Greenland Climate Research Centre (GCRC)에 의해, MIT 관측지점은 SEDIMICE 프로젝트에 의해 설치되었다.

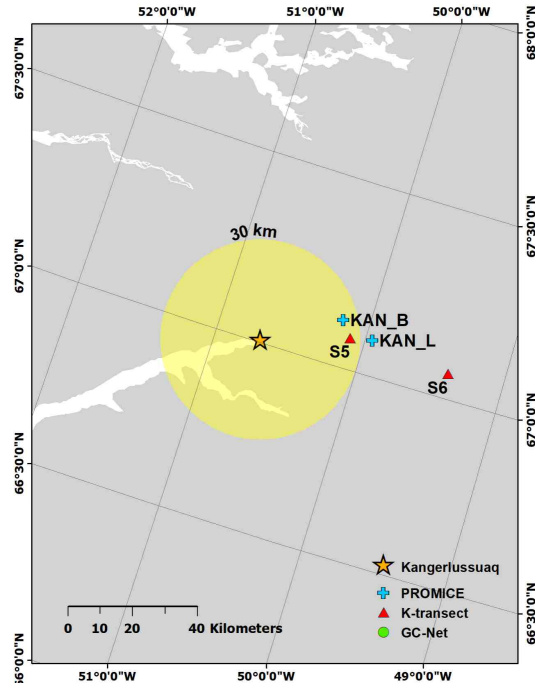


< PROMICE 웹사이트: <http://www.promice.dk> >

나. 하계 실증 대상 Kangerlussuaq 지역 기상 현황

하계 실증 지역인 Kangerlussuaq의 기상 현황 분석을 위해 지리정보시스템 기반 거리분석 수행 후

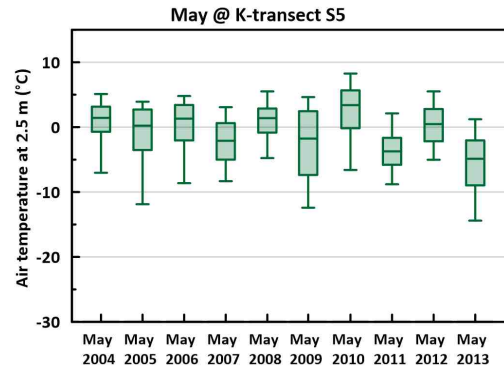
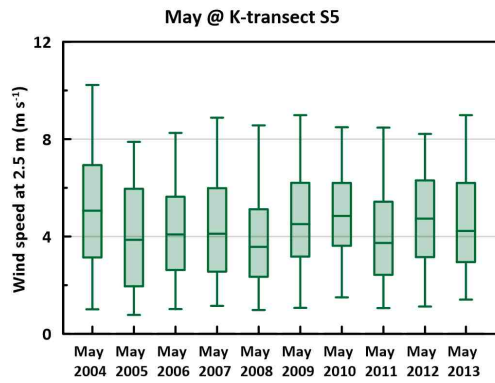
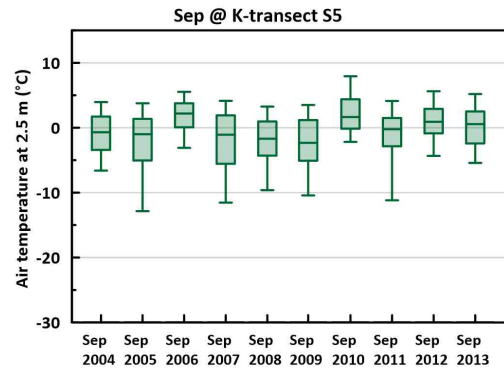
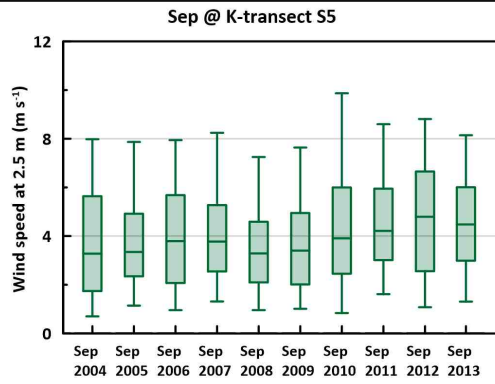
30 km 이내의 근거리에서 설치된 자동기상관측 장비를 선정하였다. 선정된 관측 지점은 PROMICE의 KAN_B 지점과 K-transect의 S5 관측지점이다. 두 관측지점은 인접해 있지만 KAN_B는 동토 위에 설치된 반면 S5는 빙상 위에 위치한다. 하계 실증 시기에 대한 기상관측 자료 분석은 초기 계획인 8월에서 1차 수정된 9월과 2차 수정된 계획인 5월에 대해 각각 수행하였다.



< 하계 무인기 실증 지역인 Kangerlussuaq 인근의 자동기상관측 지점 >

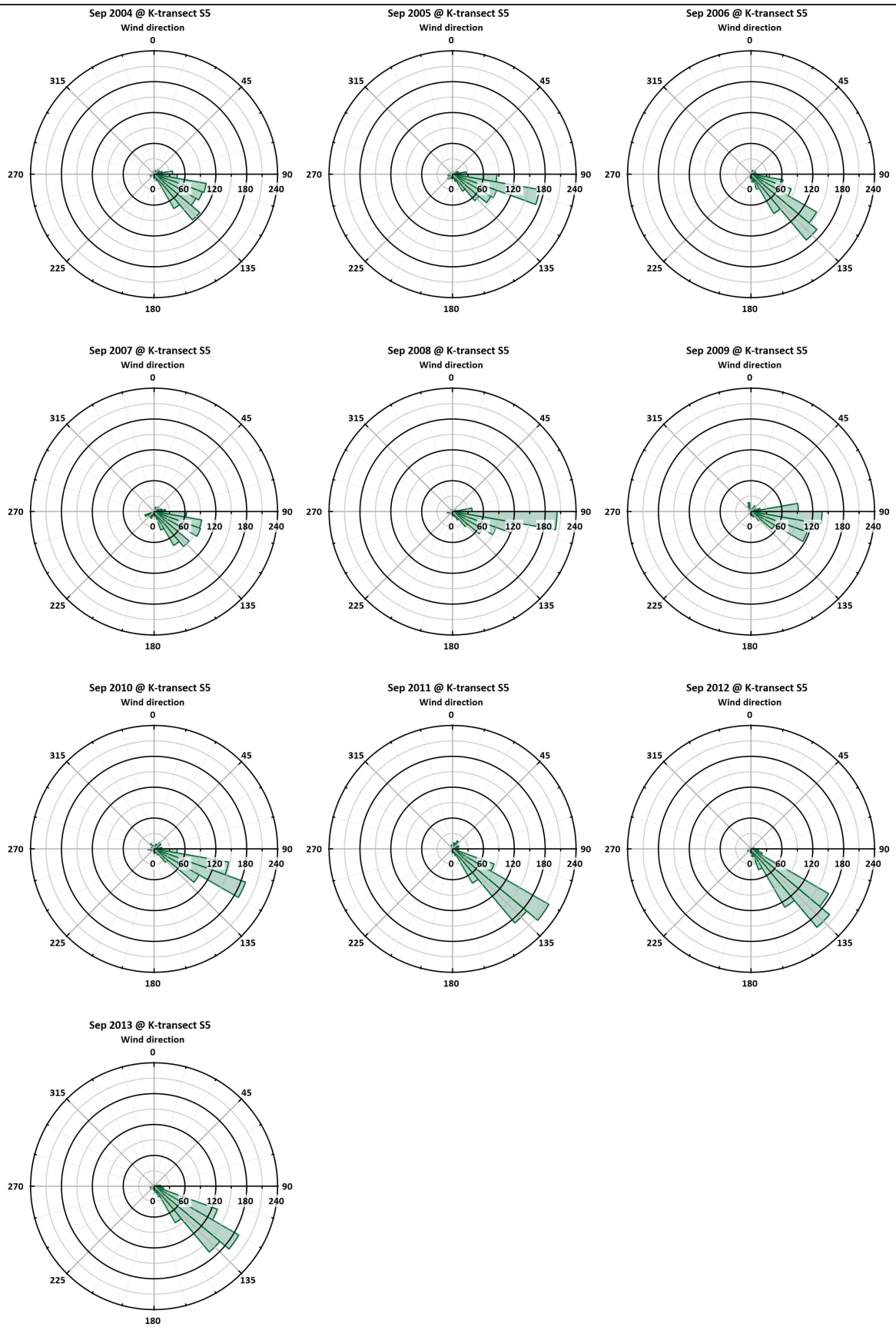
1) K-transect S5 기상관측지점 데이터 분석

K-transect의 S5 지점에 대해 2004년부터 2013년까지 10년 동안의 1차 수정된 현장 조사 시기인 9월의 풍속과 기온에 대한 분석을 수행하였다. 평균 풍속은 약 $4.11 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$ 이며, 평균 기온은 $-0.53 \pm 0.05^\circ\text{C}$ 이다. 2차 수정된 현장 조사 시기인 5월의 평균 풍속은 약 $4.40 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$ 이며, 평균 기온은 $-1.20 \pm 0.05^\circ\text{C}$ 이다. 9월보다 5월의 평균 풍속이 높으며, 평균 기온은 낮은 것으로 산정되었다.

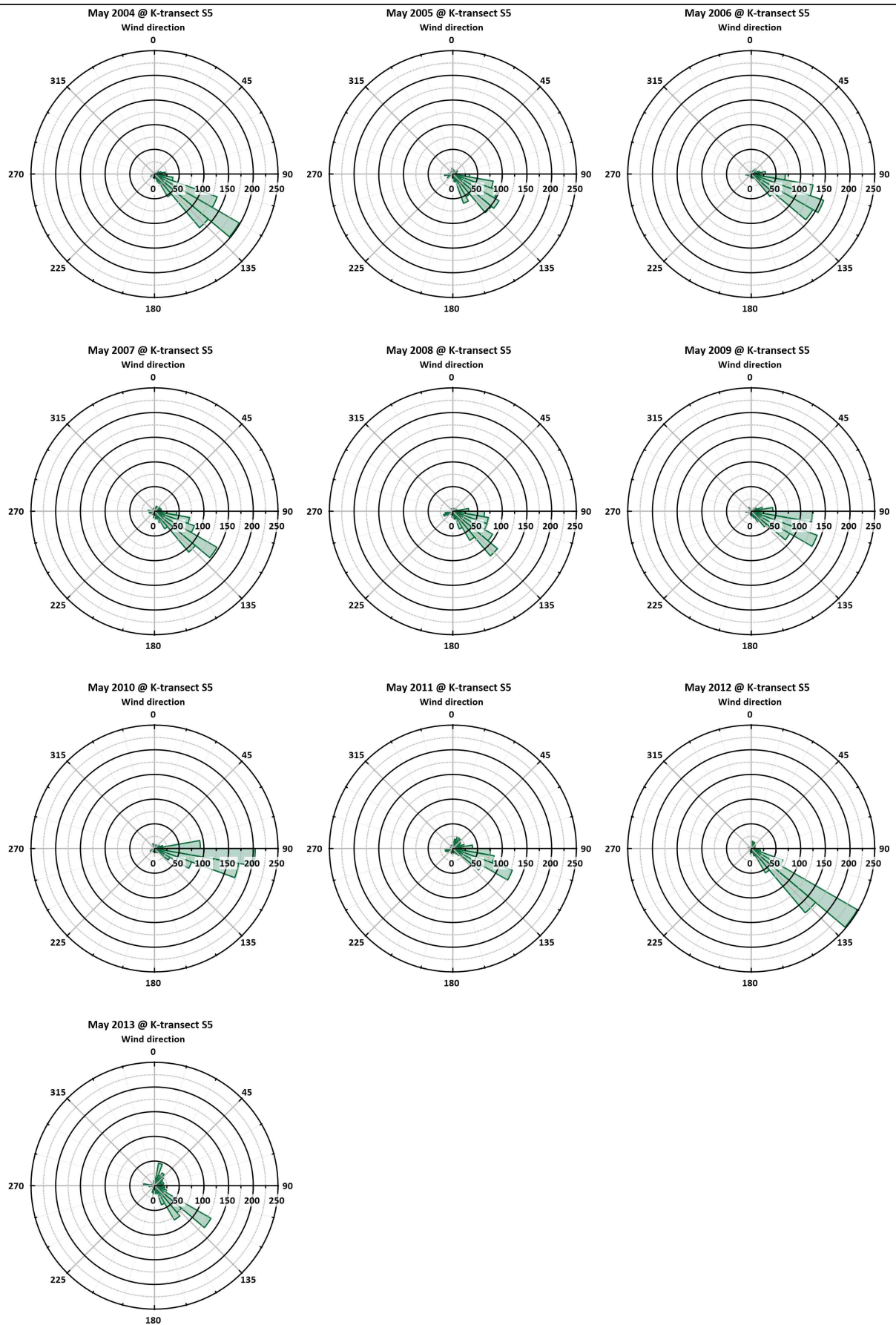


< K-transect S5 지점의 2004-2013년 9월과 5월의 풍속(좌)과 온(우) >

풍향의 경우 9월과 5월 모두 남동풍 계열이 우세한 것으로 관측되었고 일부 동풍 계열이 우수한 시기가 나타나기도 한다.



< K-transect S5 지점의 2004-2013년 9월 풍향 >

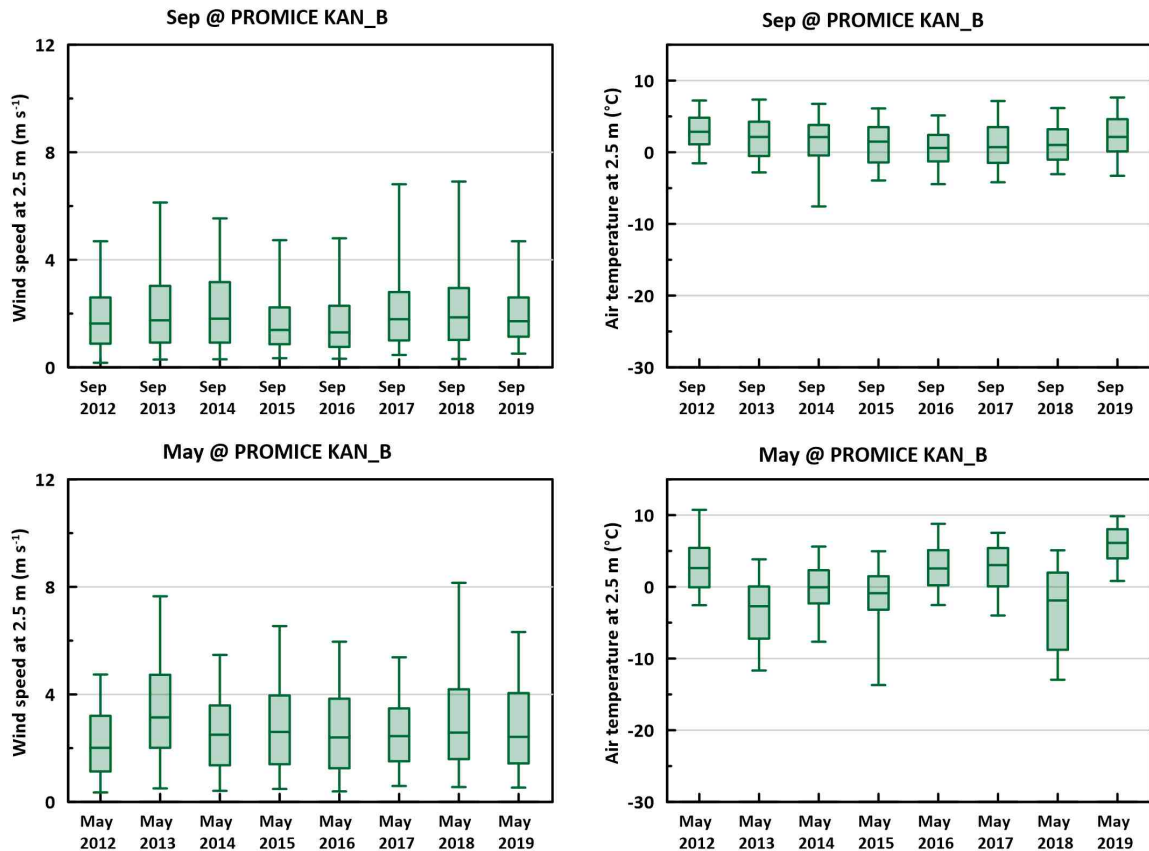


< K-transect S5 지점의 2004-2013년 5월 풍향 >

2) PROMICE KAN_B 기상관측지점 데이터 분석

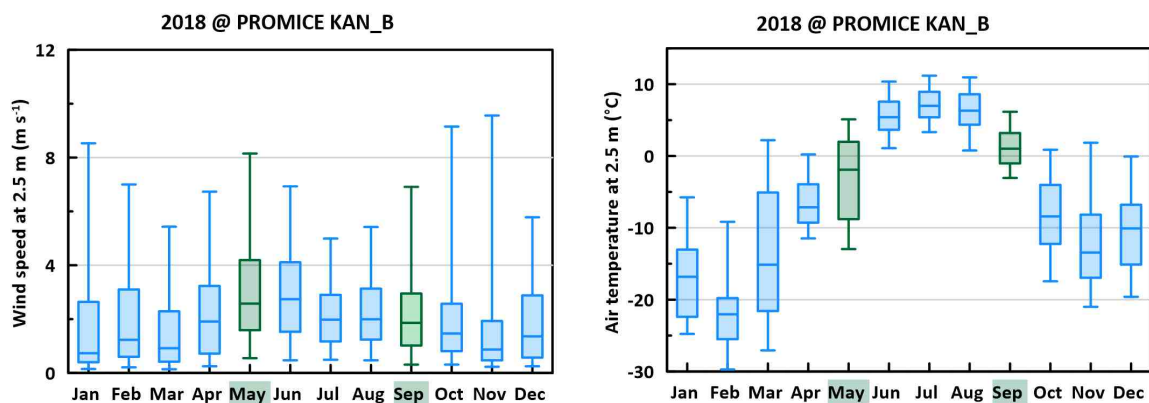
PROMICE의 KAN_B 지점에 대해 K-transect의 S5 관측 기간보다 최근인 2012년부터 2019년까지 1차 수정된 현장 조사 시기인 9월의 풍속과 기온에 대한 분석을 수행하였다. 평균 풍속은 약

$1.89 \pm 0.18 \text{ m s}^{-1}$ 이며, 평균 기온은 $1.36 \pm 0.18^\circ\text{C}$ 이다. 2차 수정된 현장 조사 시기인 5월의 평균 풍속은 약 $2.38 \pm 0.02 \text{ m s}^{-1}$ 이며, 평균 기온은 $0.72 \pm 0.07^\circ\text{C}$ 이다. K-transect의 S5 관측과 마찬가지로 9월보다 5월의 평균 풍속이 높으며, 평균 기온은 낮은 것으로 산정되었다.



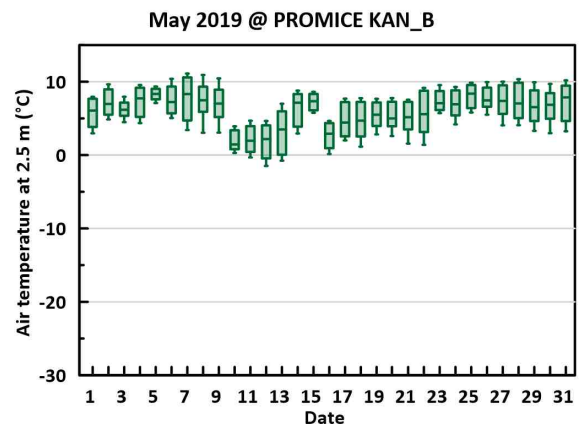
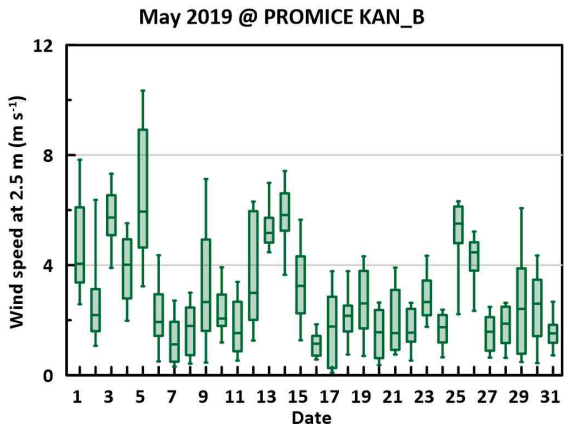
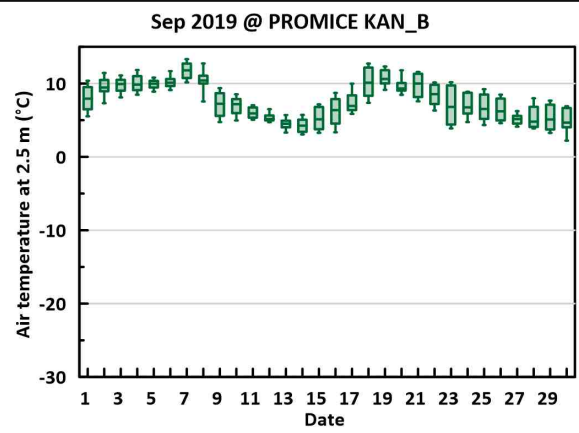
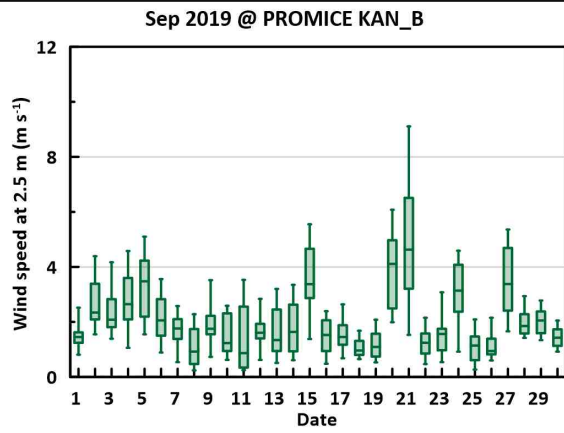
< PROMICE KAN_B 지점의 2012-2019년 9월과 5월의 풍속(좌)과 기온(우) >

연중 풍속과 기온 변화를 살펴보기 위해 1년 동안의 관측이 모두 이루어진 2018년 자료를 분석하였다. 월평균 풍속은 동계 시기보다 하계 시기에 더 높은 것으로 관측되었으며 월평균 기온은 6월부터 9월까지 영상인 것으로 관측되었다.



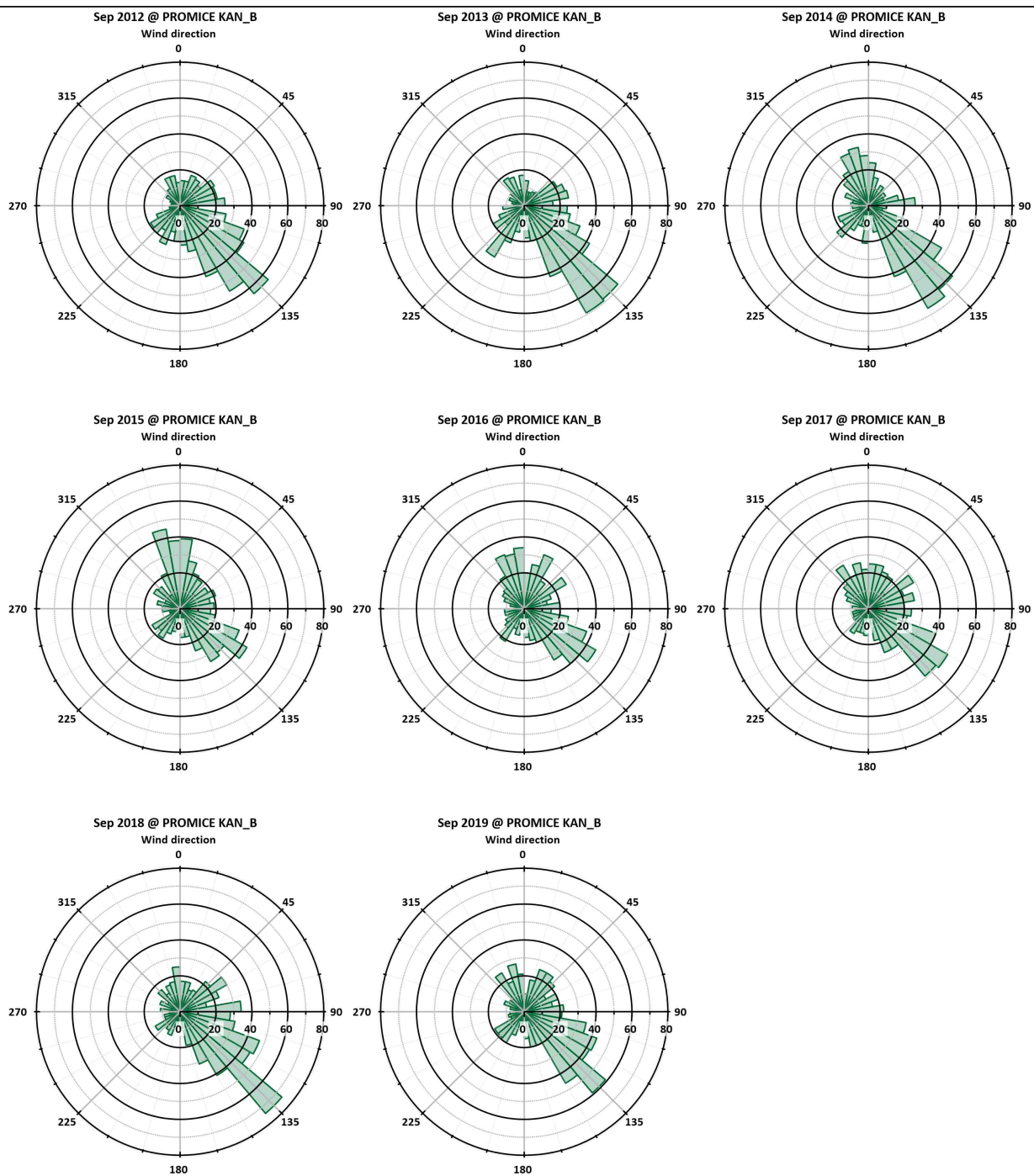
< PROMICE KAN_B 지점의 2018년 월간 풍속(좌)과 기온(우) >

세밀한 기상 변화를 알아보기 위해 가장 최근의 관측 시기인 2019년 9월과 5월에 대해 일간 온도와 기온을 분석하였다. 풍속은 간헐적으로 5 m s^{-1} 을 넘는 경우가 관측되어 이때를 제외하고 대부분의 시기에 무인기 운용이 가능할 것으로 판단된다. 일평균 기온은 모두 영상으로 관측되어 일출 이후 기온이 오르면 무인기 운용이 가능할 것으로 판단된다.

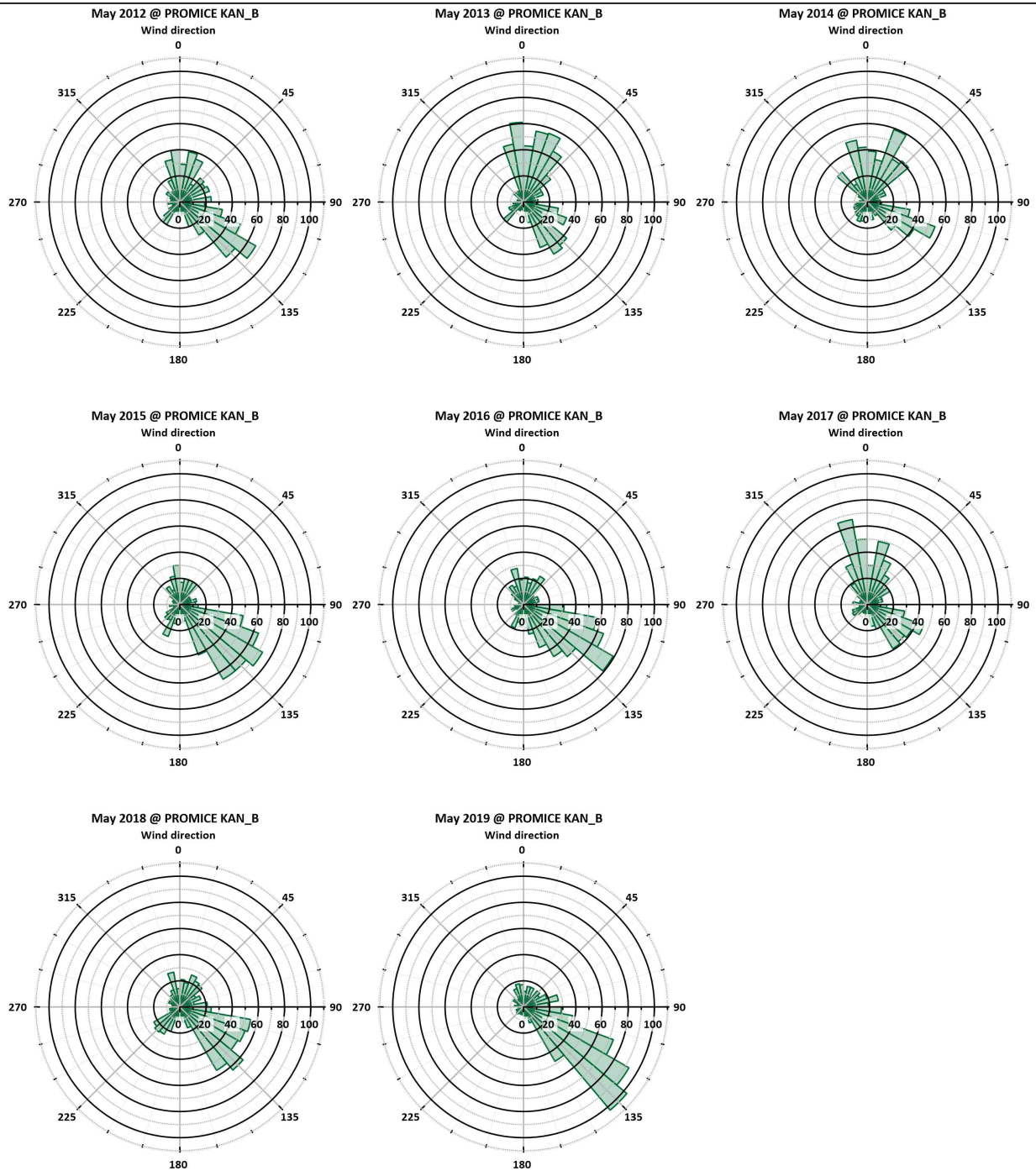


< PROMICE KAN_B 지점의 2019년 9월과 5월 일간 풍속(좌)과 기온(우) >

풍향의 경우 K-transect의 S5와 마찬가지로 대부분의 시기에 9월과 5월 모두 남동풍 계열이 우세하지만 일부 북풍 계열이 우세한 시기가 나타나기도 한다.



< PROMICE KAN_B 지점의 2012-2019년 9월 풍향 >



< PROMICE KAN_B 지점의 2012-2019년 5월 풍향 >

2. 극지연구 유형별 임무 정의서 작성

가. 무인기 기반 극지역 빙하 연구 사례

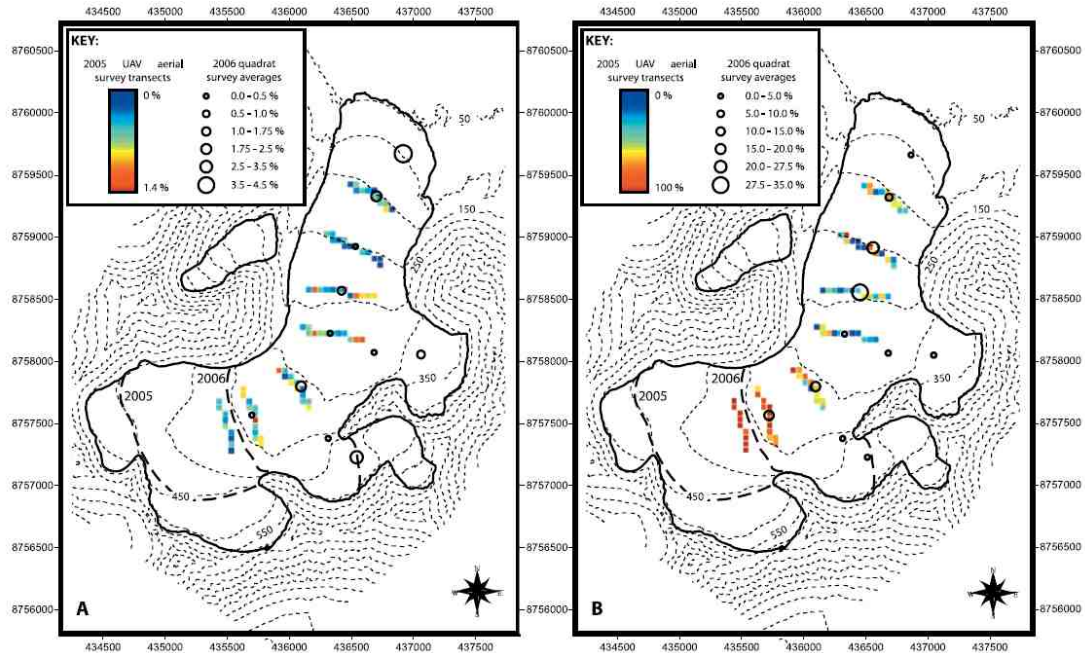
빙하 연구를 위해 다양한 원격탐사 플랫폼과 센서 기술이 활용되어 왔다. 최근에는 무인기를 활용하여 빙하를 관측하는 사례들이 늘어나고 있다. 전통적으로 전지구 빙하에 대한 광역 관측을 위해 인공위성 데이터가 사용되었으나, 무인기는 인공위성 대비 저궤도에서 운용되기 때문에 공간해상도가 우수한 고정밀 데이터를 확보할 수 있고 궤도 특성에 따라 데이터 획득 주기가 결정되는 인공위성과는 달리 기상 조건이 허락할 경우 원하는 시기에 데이터 획득이 가능한 장점이 있다. 점차 무인기 운용 비용도 저렴해지고 있으므로 향후 빙하 연구에 대한 활용성이 더욱 커질 것으로 기대된다.

무인기에는 가시광 (visible) 센서, 다중분광 (multispectral) 센서, 초분광 (hyperspectral) 센서, 열적외선 (thermal infrared) 센서, 영상 레이더 (radar) 센서, 라이다 (light detection and ranging, LiDAR) 센서 등 다양한 센서의 탑재가 가능하며, 기본적으로 획득되는 데이터로는 고해상도 영상과 이를 기반으로 structure-from-motion (SfM) 기술을 적용하여 획득되는 수치고도모델 (digital

elevation model, DEM)이 있다. 이러한 데이터셋을 활용하여 빙하 및 빙하 후퇴지역 (glacier foreland)에 대한 분석과 변화 탐지가 가능하다.

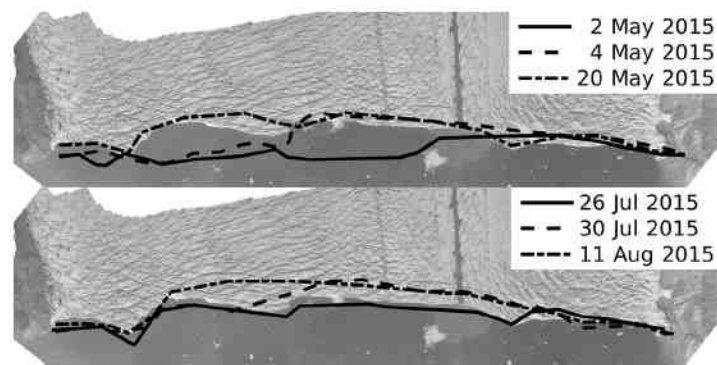
1) 고해상도 무인기 영상 활용 빙하 연구 사례

스발바르 (Svalbard)의 Midtre Lovenbreen 빙하를 대상으로 빙하 표면에 분포하는 유기물 덩어리인 cryoconite 탐지를 위해 무인기 획득 고해상도 영상을 활용한 바 있다 (Hudson et al., 2007).



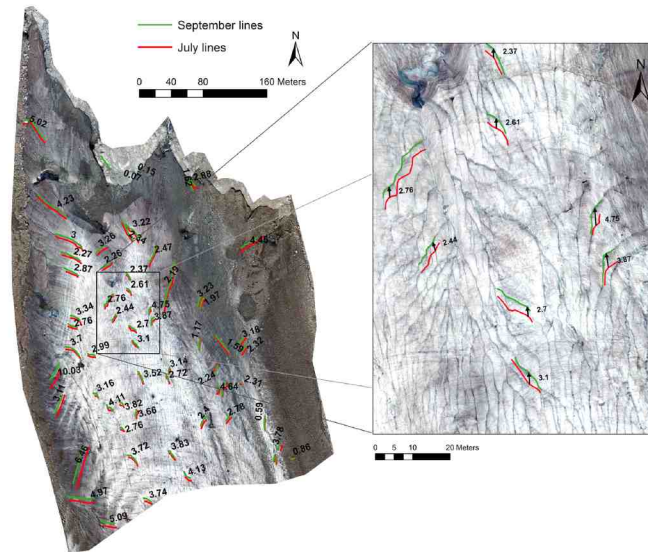
< 무인기 영상 기반 빙하 표면 cryoconite 탐지 사례 (Hudson et al., 2007) >

무인기 획득 영상은 빙하 끝 경계 관측에도 활용되었다. Ryan et al. (2015)과 Juvet et al. (2017)은 빙하 경계에서 발생하는 분리 (calving) 현상을 고해상도 시계열 영상을 이용하여 정밀 관측하였다.



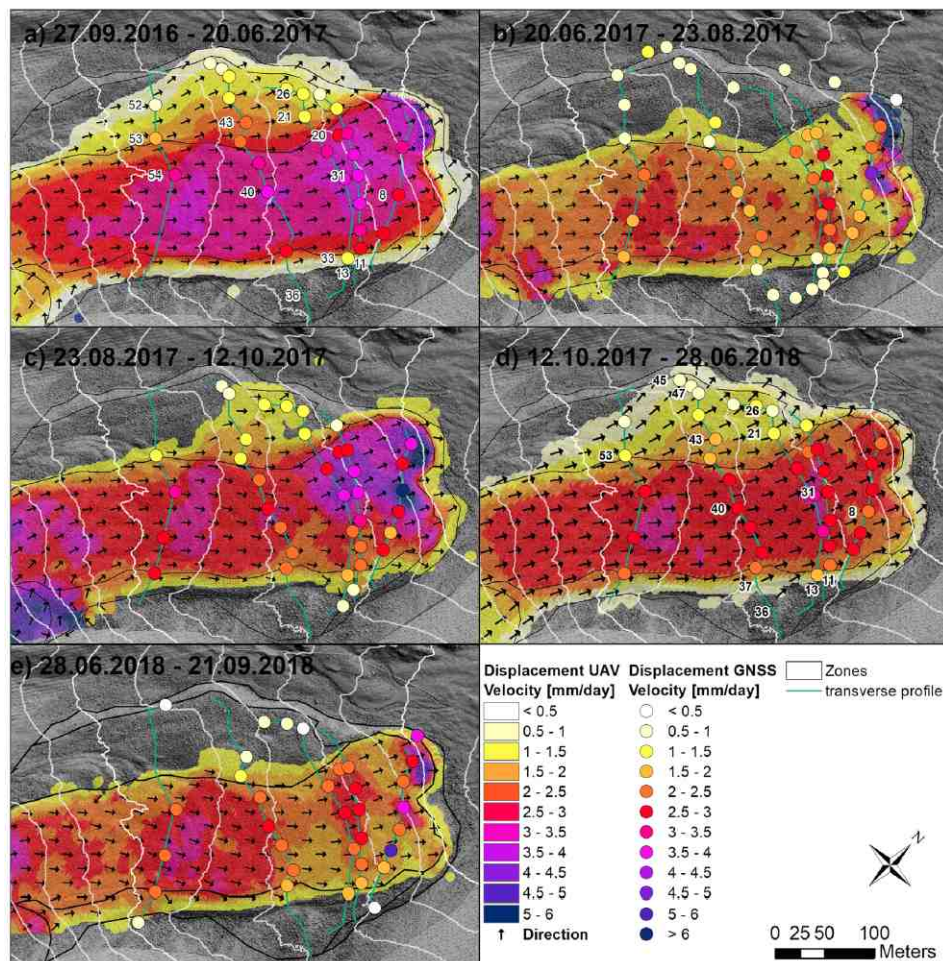
<Bowdoin 빙하 경계 분리 현상의 시계열 정밀 관측 (Juvet et al., 2017)>

육상 빙하의 경우에도 두 시기에 획득된 영상을 이용하여 경계 변화를 탐지하였다. 또한 빙하 표면의 균열 등 특징을 추적하면 이동 거리와 흐름 속도를 산정할 수 있다 (Rossini et al., 2018).



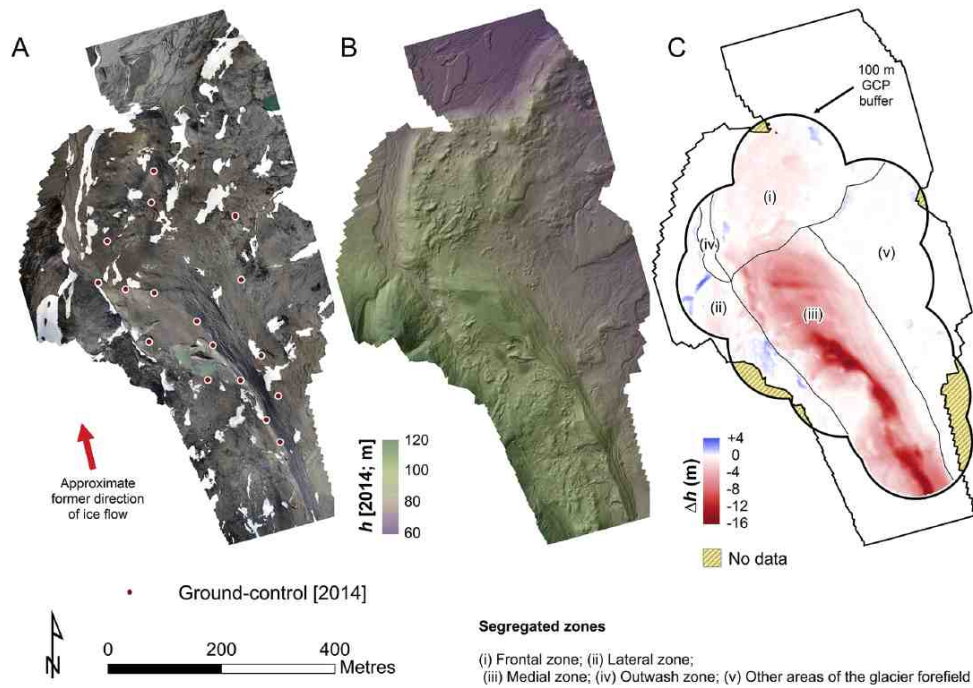
< 알프스 Morteratsch 빙하 시계열 경계 변화와 흐름 관측 (Rossini et al., 2018) >

빙하 이동 속도 관측은 빙하에 설치된 범지구 위성 항법 시스템 (GNSS) 기반으로 소수의 지점 또는 선형으로 배열된 지점들에 대해 측정된다. 무인기 영상 기반으로 빙하 이동 속도를 관측할 경우 영상 내 모든 지점에 대해 속도 산정할 수 있으므로 빙하 주변 지형 또는 하부 지형에 대한 영향을 보다 세밀하게 파악할 수 있다 (Fey and Krainer, 2020).



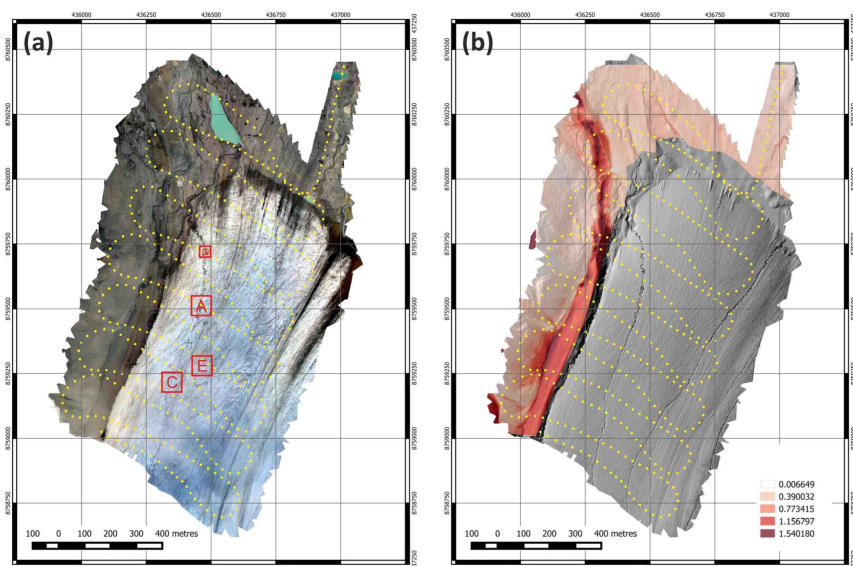
< 두 시기에 획득된 무인기 영상으로부터 빙하 흐름 속도 산정 (Fey and Krainer, 2020) >

무인기 획득 영상을 기반으로 제작된 수치고도모델은 다양한 종류의 원격탐사 기반 지형 데이터와 복합 활용이 가능하다. Midgley et al. (2018)은 LiDAR 기반 수치고도모델과 무인기 획득 영상 기반 수치고도모델을 비교하여 Svalbard의 Midtre Lovenbreen 빙하 후퇴 지역의 지형 변화에 대해 분석하였다.



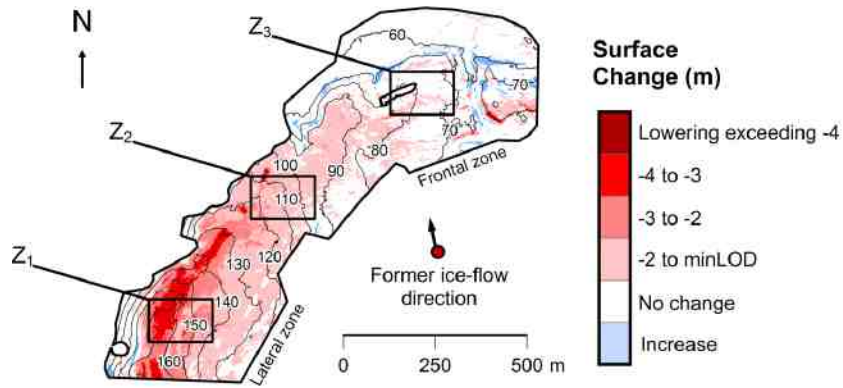
< Midtre Lovenbreen 빙하 후퇴 지역의 2003년 획득 LiDAR 기반 수치고도모델과 2014년 획득 무인기 영상 기반 수치고도모델 비교 (Midgley et al., 2018) >

영국 York 대학교 Rippin et al. (2015)는 Svalbard의 Midtre Lovenbreen 빙하의 정사 모자이크 영상과 수치고도모델을 제작하여 빙하의 미세 배수로 밀도, 표면 거칠기 및 반사도 사이의 연관성을 분석하였다. 모자이크 영상과 수치고도모델은 423장의 무인기 영상으로부터 각각 공간해상도 5 cm, 10 cm 급으로 제작되었다.



< Midtre Lovenbreen 빙하 하류의 정사 모자이크 영상과 수치고도모델 생성 (Rippin et al., 2015) >

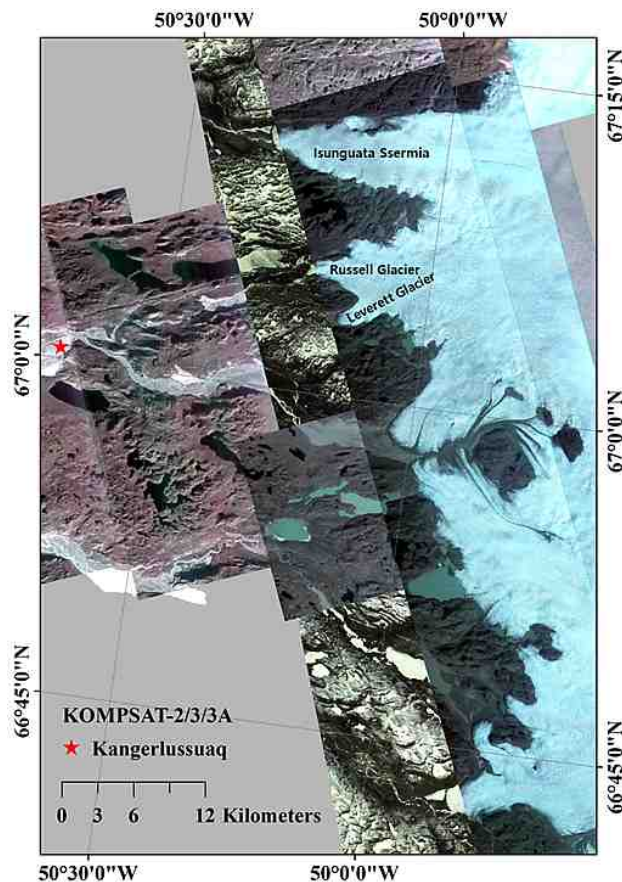
Tonkin et al. (2016)과 Ely et al. (2017)은 빙하 후퇴로 인한 노출 지형의 소규모 지형 구조와 변화에 대한 분석을 수행하였다. 점진적인 빙하 후퇴로 인한 노출지가 증가할 경우 주기적인 정밀 모니터링의 가능성을 보고하였다.



<빙하 후퇴지 고도 변화 분석 (Tonkin et al., 2016)>

나. 극지연구 대표임무 선정 및 우선도 도출

하계 실증 지역인 그린란드 Kangerlussuaq 인근에는 Isunguata Sermia, Russell, Leverett의 세 육상 빙하 (land-terminating glacier)가 위치하고 있다. 선행된 극지역 무인기 활용 빙하 연구들에 대한 검토 결과 이들 빙하 및 후퇴지역에 대해 기본 임무장비인 고해상도 가시광 영상 센서를 활용하는 다음과 같은 데이터 획득 임무가 최우선 대표 임무로 선정 가능하다.



< 아리랑 (KOMPSAT) 위성 영상 기반 Kangerlussuaq 인근 빙하 분포도 >

- 고해상도 가시광 무인기 시계열 영상 획득
- 시기별 고해상도 가시광 영상 모자이크 작성
- 시기별 고해상도 가시광 영상과 현장 지상기준점 (ground control point, GCP) 측량 기반 빙하 수치고도모델 제작

가장 우선적으로 기본 임무장비로부터 획득될 고해상도 무인기 영상 모자이크와 수치고도모델을 활

용하여 그린란드 빙하에 대해 다음과 같은 주제의 연구 수행이 가능하다.

< 그린란드 빙하 연구를 위한 무인기 임무 선정 >

임무 횟수	획득 데이터	활용안
단일 시기	고해상도 영상	• 빙하/후퇴지역 표면 구성요소 분석
		• 빙하 경계 매핑
	수치표고모델	• 빙하 표면 수계 탐지
		• 빙하/후퇴지역 표면 고도 산정
다중 시기	고해상도 영상	• 빙하 표면 구성요소 변화 탐지
		• 빙하 경계 변화 탐지
		• 빙하 흐름 속도 산정
	수치표고모델	• 빙하 표면 수계 변화 분석
		• 빙하 질량 변화 분석
		• 빙하 후퇴지역 지형 변화 분석

다중 시기에 획득된 영상을 활용할 경우 빙하 표면 구성, 빙하 표면 수계, 빙하 고도에 대한 시계열 변화 탐지뿐만 아니라 빙하 흐름 속도와 질량 변화도 산정이 가능하다. 또한 빙하 표면 구성과 빙하 고도에 대한 정보는 고해상도 특성으로부터 인공위성 데이터 기반 분석 결과를 검보정하는 정밀 기준 자료로도 활용이 가능하다.

3. 극지 하계 실증시연 시행 계획 수립

가. 국제공동워크샵 수행

- 일정: 2019.11.12.~2019. 11.14.
- 장소: Technical University of Denmark (DTU) (덴마크 코펜하겐)
- 참석인원 : 한국 3개 기관 11명, 덴마크 3개 기관 9명

한국	덴마크
(KARI) 강왕구, 정용운, 황인성, 석효정, 임병옥, 이돈구, 김도운 (KOPRI) 김현철, 현창욱 (KETI) 신영수, 최성찬	(DTU Space) Kristian Pedersen, Niels Andersen, Michael Linden-Vørnle, René Forsberg, Hanne Thomasen, Per Lundahl Thomsen, Susanne Hanson (Aarhus Univ.) Ulrich Gosewinkel (Min. Higher Education & JAC) Frej S. Dichmann

- 종합 현장조사 계획 수립
 - (1차년도) Kangerlussuaq 현장조사
 - (2차년도) Ilulissat, Kangerlussuaq 현장조사
 - (3차년도) Villum Research Station (VRS), Ilulissat 현장조사
 - (4~5차년도) 하계/동계 종합비행시험 (3개 지역)
- 1차년도 하계 실증 계획 (2021년 5월 2주간으로 연기)
 - 날짜 : 2020년 8월 2주간
 - 장소 : 그린란드 Kangerlussuaq 인근 지역
 - 임무장비 : 고해상도 광학카메라 기본 활용 및 필요시 추가 (IR, 분광카메라 등)

4. 참고문헌

- 1) Ely, J. C., Graham, C., Barr, I. D., Rea, B. R., Spagnolo, M., & Evans, J. (2017). Using UAV acquired photography and structure from motion techniques for studying glacier landforms: application to the glacial flutes at Isfallsglaciären. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(6), 877-888.
- 2) Fev, C., & Krainer, K. (2020). Analyses of UAV and GNSS based flow velocity variations

of the rock glacier Lazaun (Oetztal Alps, South Tyrol, Italy). *Geomorphology*, 107261.

- 3) Hodson, A., Anesio, A. M., Ng, F., Watson, R., Quirk, J., Irvine-Fynn, T., Dye, A., Clark, C., McCloy, P., Kohler, J., & Sattler, B. (2007). A glacier respire: quantifying the distribution and respiration CO₂ flux of cryoconite across an entire Arctic supraglacial ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G4).
- 4) Jouvett, G., Weidmann, Y., Seguinot, J., Funk, M., Abe, T., Sakakibara, D., Seddik, H., & Sugiyama, S. (2017). Initiation of a major calving event on the Bowdoin Glacier captured by UAV photogrammetry. *Cryosphere*, 11(2), 911-921.
- 5) Midgley, N. G., Tonkin, T. N., Graham, D. J., & Cook, S. J. (2018). Evolution of high-Arctic glacial landforms during deglaciation. *Geomorphology*, 311, 63-75.
- 6) Rippin, D. M., Pomfret, A., & King, N. (2015). High resolution mapping of supra-glacial drainage pathways reveals link between micro-channel drainage density, surface roughness and surface reflectance. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(10), 1279-1290.
- 7) Rossini, M., Di Mauro, B., Garzonio, R., Baccolo, G., Cavallini, G., Mattavelli, M., Amicis, M. D., & Colombo, R. (2018). Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry. *Geomorphology*, 304, 159-172.
- 8) Ryan, J. C., Hubbard, A. L., Box, J. E., Todd, J., Christoffersen, P., Carr, J. R., Holt, T. O., & Snooke, N. (2015). UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. *Cryosphere*, 9(1), 1-11.
- 9) Smeets, P. C., Kuipers Munneke, P., Van As, D., van den Broeke, M. R., Boot, W., Oerlemans, H., Snellen, H., Reijmer, C.H., & van de Wal, R. S. (2018). The K-transect in west Greenland: Automatic weather station data (1993-2016). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 50(1), S100002.
- 10) Steffen, K., Box, J. E., & Abdalati, W. (1996). Greenland climate network: GC-Net. US Army Cold Regions Reattach and Engineering (CRREL), CRREL Special Report, 98-103.
- 11) Tonkin, T. N., Midgley, N. G., Cook, S. J., & Graham, D. J. (2016). Ice-cored moraine degradation mapped and quantified using an unmanned aerial vehicle: a case study from a polythermal glacier in Svalbard. *Geomorphology*, 258, 1-10.
- 12) van As, D., Fausto, R. S., Ahlstrøm, A. P., Andersen, S. B., Andersen, M. L., Citterio, M., Edelvang, K., Gravesen, P., Machguth, H., Nick, F. M., & Nielsen, S. (2011). Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet (PROMICE): first temperature and ablation records. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 23, 73-76.

II. 1단계 2차년도 연구수행내용 및 결과

1. 그린란드 현지 하계 조건 현장 조사 공동 수행

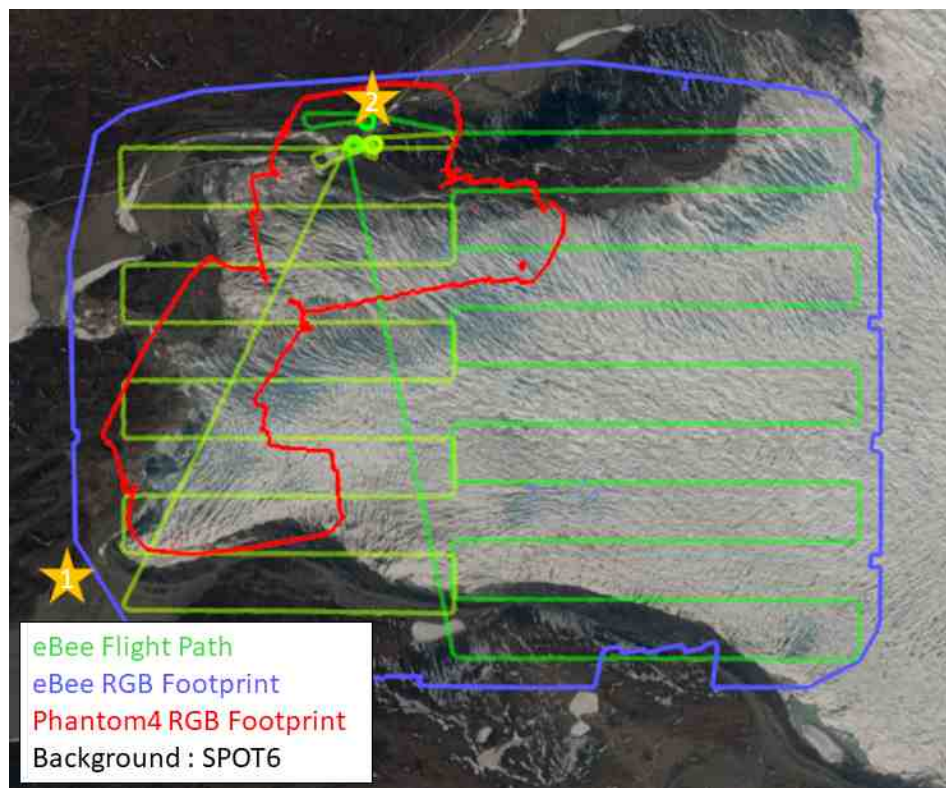
가. 그린란드 Kangerlussuaq 인근 빙하 지역에 대한 하계 무인기 영상 획득 계획 수립

- Kangerlussuaq 인근 대표적인 빙하는 Isunnguata Sermia, Russell, Leverett 등 3개이며, 이중 접근이 가장 용이한 빙하는 Kangerlussuaq 시내로부터 약 25 km 떨어진 Russell 빙하로서 공동 현장 조사 지역으로 적합하다고 판단하였다.
- 그린란드 현지 현장 조사 공동 수행
 - 일정 : 2021.09.09.~2021.09.17.
 - 장소 : Russell 빙하
 - 참석기관 : KOPRI, KARI, DTU-space, JAC
 - 참조 : JAC에서 기체 준비 및 현장 방문 준비를 위한 장소 제공
- 촬영계획: 멀티콥터와 고정익 무인기 각각 특성에 따라서 촬영 가능한 면적이 달라지며 이를 고려

하여 빙하 표면 촬영을 계획하였다. 멀티콥터(Phantom4 Pro) 는 비행 가능 속도가 낮기 때문에 촬영 가능 면적이 작다. 따라서 Russell 빙하 가장자리 지역을 촬영할 수 있도록 영상 획득을 계획하였다. 고정익 무인기(eBee) 는 비교적 높은 고도에서 촬영이 가능하고, 이동 속도가 빠르며 긴 비행 시간이 가능하여 넓은 영역의 촬영이 용이하다. 따라서 멀티콥터가 촬영하는 지역을 포함한 Russell 빙하 전역이 촬영될 수 있도록 비행을 계획하였다. 촬영 지역의 합이 최소 1 km² 이상 되도록 비행 경로를 계획하였다.

<촬영에 사용된 무인기의 기본 특성>

	Phantom4 Pro	eBee ¹⁾
최대 비행 시간 [분]	30	50
비행 가능 속도 [m/s]	14	11-25
촬영 가능 면적 [km ²]	1 (예상)	12



<무인기 촬영 면적 (빨강: Phantom4 Pro, 파랑: eBee) 과 비행 경로 (녹색 : eBee)>

나. 그린란드 연구 대상 지역에 대한 하계 무인기 영상 획득 수행

• Russell 빙하까지의 접근은 최소 왕복 2시간이 소요되었기 때문에 최적으로 무인기를 날릴 수 있는 지점을 선정하였다. 멀티콥터를 사용하여 9월 10일과 11일에는 Russell 빙하 끝단 지역에서, 14일에는 내륙 지역을 촬영하였다. 비교적 넓은 지역의 촬영이 가능한 고정익 무인기는 9월 11일에 Russell 빙하 전체를 촬영하였다.

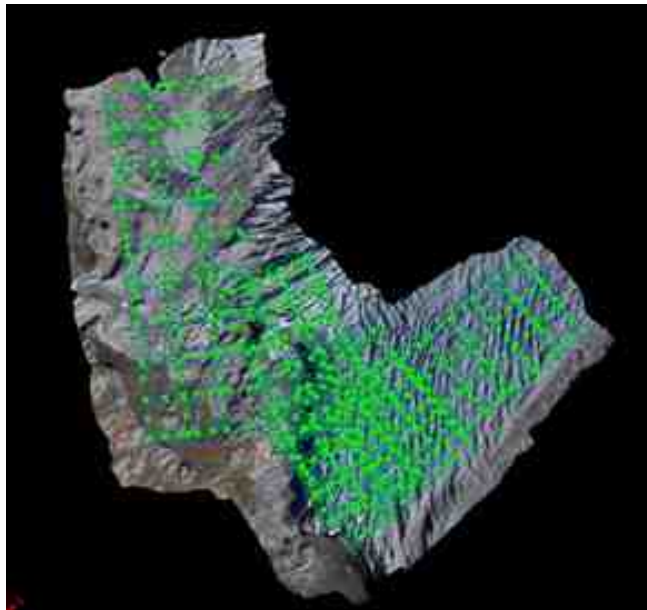
• 멀티콥터 무인기 촬영 비행고도는 지상으로부터 150-250 m 까지 변화를 주었으며 빙하 표면의 크레바스 및 빙벽의 촬영을 위해 카메라 앵글은 65도로 고정하였다. 고도와 각도에 따른 지상해상도는 약 3-7 cm 정도 확보 가능하였다. 영상 중첩도는 가로/세로 80/70% 로 설정하여 높은 많은 영상에서 매

청포인트를 찾을 수 있도록 하였으며 짧은 비행시간 (15-20분) 으로 인하여 촬영 범위가 매우 제한되었다.

- 9월 10일 : 총 4번의 비행을 통해 552장의 영상을 확보하였으며 촬영 환경은 아래와 같다.

<9월 10일 촬영 환경>

비행 번호	1	2	3	4
비행 시간	16분 55초	19분 53초	17분 27초	20분 56초
카메라 앵글 [도]	65	65	65	65
고도 [m]	150	150	150	180
비행 거리 [m]	4047	4304	4304	5793
촬영 범위 [m x m]	292 x 306	502 x 194	502 x 194	687 x 228
영상 오버랩 [%, 가로/세로]	80/70	80/70	80/70	80/70



<무인기 비행 경로 및 카메라 촬영 위치 (녹색)>

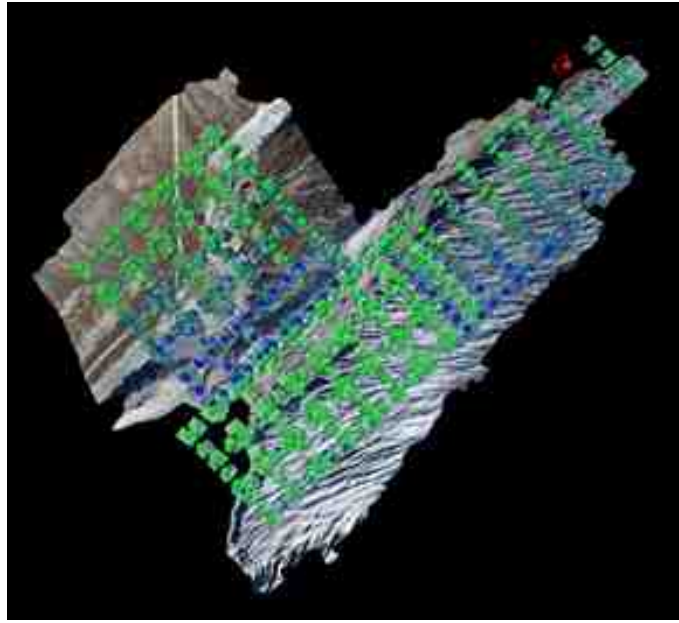


<무인기 촬영 영상 모자이크>

- 9월 11일 : 총 3번의 비행을 통해 358장의 영상을 확보하였으며 촬영 환경은 아래와 같다.

<9월 11일 촬영 환경>

비행 번호	1	2	3	-
비행 시간	16분 21초	18분 11초	16분 16초	-
카메라 앵글 [도]	65	65	65	-
고도 [m]	180	180	180	-
비행 거리 [m]	5267	5267	5337	-
촬영 범위 [m x m]	592 x 245	592 x 245	391 x 390	-
영상 오버랩 [%, 가로/세로]	80/70	80/70	80/70	-



<무인기 비행 경로 및 카메라 촬영 위치 (녹색)>

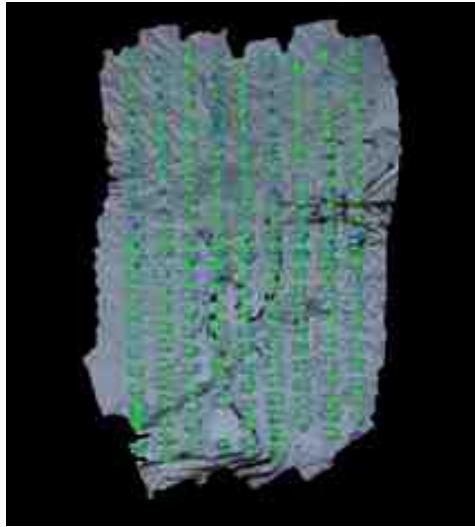


<무인기 촬영 영상 모자이크>

- 9월 14일 : 총 2번의 비행을 통해 212장의 영상을 확보하였으며 촬영 환경은 아래와 같다.

<9월 14일 촬영 환경>

비행 번호	1	2	-	-
비행 시간	34분 39초 (오류)	18분 55초	-	-
카메라 앵글 [도]	65	65	-	-
고도 [m]	250	250	-	-
비행 거리 [m]	7909	7909	-	-
촬영 범위 [m x m]	858 x 794	858 x 794	-	-
영상 오버랩 [%, 가로/세로]	70/70	70/70	-	-



<무인기 비행 경로 및 카메라 촬영
위치 (녹색)>



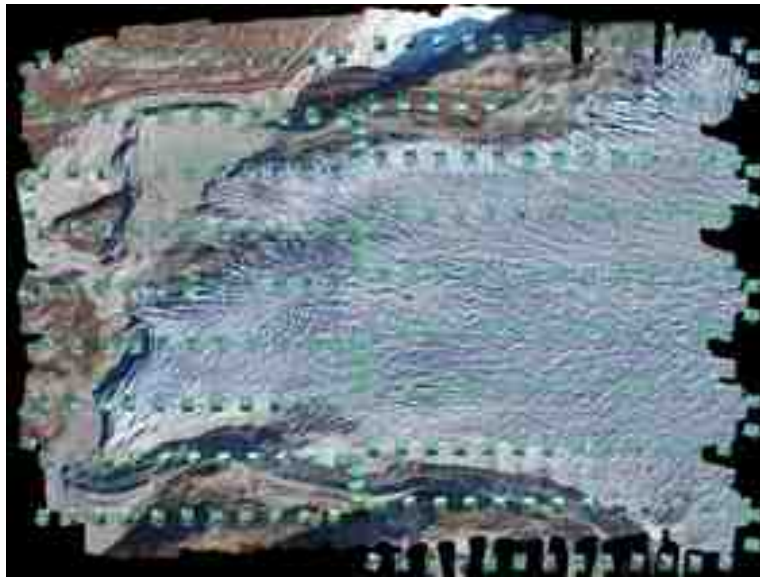
<무인기 촬영 영상 모자이크>

- 고정익 무인기는 해수면으로부터 680m 높이로 비행하였으며 촬영된 영상은 약 11cm 해상도를 확보했다. 중첩도는 60~75%로 설정하였으며 총 71분 비행을 통해 총 6.8 km² 면적을 촬영하였다.
- 9월 11일 : 총 2번의 비행을 통해 273장의 영상을 확보하였으며 촬영 환경은 아래 표와 같다.

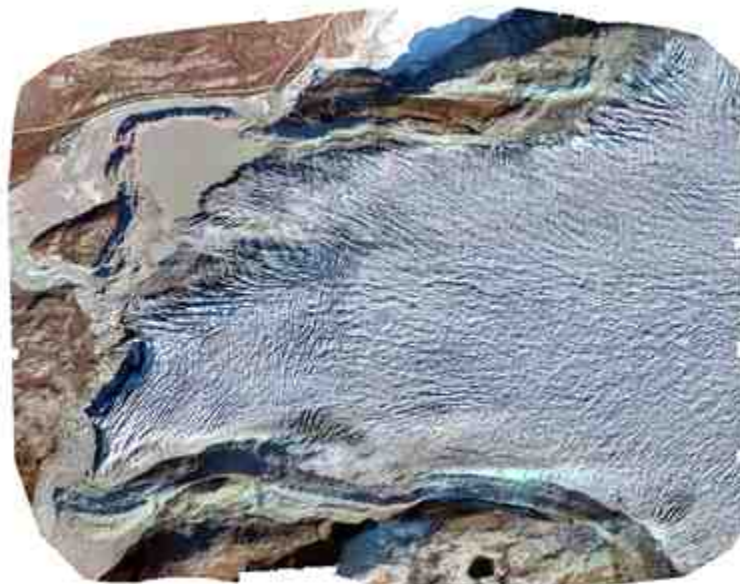
<9월 11일 촬영 환경>

비행 번호	1	2	-	-
비행 시간	36분	36분	-	-
카메라 앵글 [도]	90	90	-	-
고도 [m]	680 AMSL	680 AMSL	-	-
비행 거리 [m]	-	-	-	-
촬영 범위 [m x m]	1,750 x 1,300	2,200 x 1,600	-	-

영상 오버랩 [%, 가로/세로]	60/75	60/75	-	-
----------------------	-------	-------	---	---



<고정익 무인기 비행 경로 및 카메라 촬영 위치 (녹색)>



<무인기 촬영 영상 모자이크>

다. 무인기 획득 자료의 검보정 자료로 활용을 위해 무인기 영상 획득과 동시기에 현장 관측 수행

- 수십~수백장의 무인기 영상의 위치 정합 및 Digital Surface Model (DSM)의 절대높이 보정을 위해 Ground Control Point (GCP)를 활용한 검보정은 필수다. 영상 정합에 사용될 GCP의 재료로 30 cm x 30 cm 크기의 타겟을 사용하였다. 빙하 표면의 접근은 물리적으로 불가능하기 때문에 촬영 시작점 주위에 설치하였으며 설치된 GCP 위치와 고도는 Handheld GPS (Garmin)을 사용하여 기록하였다.

<GCP 위치와 고도>

GCP#	Latitude [deg]	Longitude [deg]	Elevation [m]
1	67.1051067	-50.2156467	307
2	67.1048517	-50.2148267	308
3	67.1054117	-50.2148783	319
4	67.1051050	-50.2140367	308
5	67.1052017	-50.2138050	311
6	67.1055167	-50.2133433	310
7	67.12020333	50.17426333	310
8	67.11865667	50.17224667	292
9	67.11905167	50.16996167	291
10	67.118885	50.17495833	308
11	67.11888	50.17495667	307
12	67.11916667	50.17572167	313
13	67.12028167	50.17547167	316
14	67.11962333	50.17408167	308
15	67.11969333	50.17409833	308
16	67.11965333	50.174165	308
17	67.11963833	50.17417167	305
18	67.11925	50.17531333	313
19	67.11953667	50.175515	316
20	67.12030833	50.17649333	321

2. 극지 실증시연 취득 데이터 분석·활용 및 기존 위성 데이터와 비교 연구

가. 현장 획득 무인기 영상 전처리 수행

• 그린란드 현장에서 확보된 무인항공기 기반 고해상도 영상들은 Pix4Dmapper를 사용하여 1) 카메라 렌즈 보정, 2) 영상 기반 표적 매칭 포인트 추출, 3) 영상 정합 및 point cloud 구성, 4) 수치고도모델 추출, 5) 정사영상 제작 순으로 처리 하였다.

• 사진측량은 공선조건식을 기반하나 카메라 렌즈의 왜곡으로 인하여 실제로 공선조건을 만족하지 못하는 경우가 발생한다. Pix4Dmapper는 자동으로 영상 내 식별이 가능한 표적 특이점들을 자동으로 추출하여 근처 영상들 간의 상호비교를 통해 각 영상에서 추출된 특이점들을 서로 연계한다. 연계된 특이점들은 자동항공삼각법(automatic aerial triangulation), 번들블럭조정(bundle block adjustment) 그리고 카메라 자체보정 단계를 반복하여 수행한다. 위 단계를 통해 최적화된 내부표정요소는 아래 표와 같다.

<최적화된 내부표정요소 (Phantom4D Pro)>

Internal Parameters	Camera	Initial Value	Optimized 9/10	Optimized 9/11	Optimized 9/14
------------------------	--------	---------------	-------------------	-------------------	-------------------

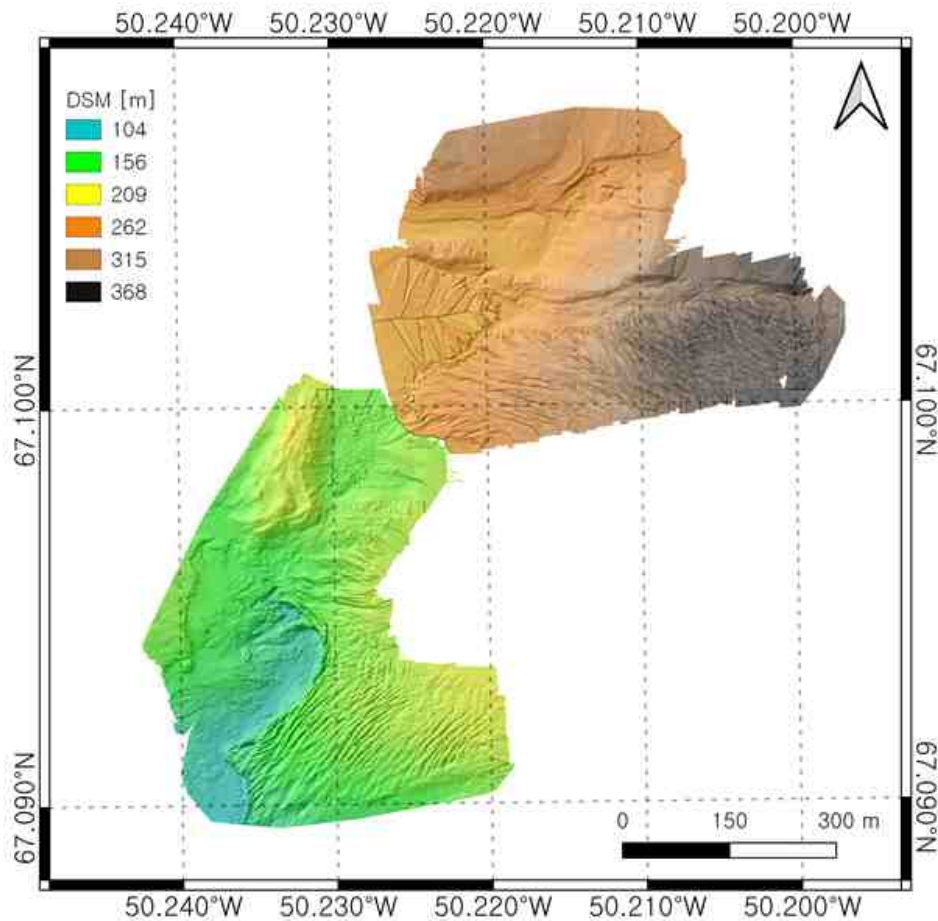
Focal Length [mm]	8.604	8.663	8.660	8.666
Principal Point X [mm]	6.417	6.434	6.435	6.435
Principal Point Y [mm]	4.278	4.242	4.246	4.243
R1	0.003	-0.014	-0.014	-0.014
R2	-0.008	0.001	0.002	0.001
R3	0.008	0.008	0.007	0.008
T1	-0.000	-0.002	-0.002	-0.002
T2	0.000	0.000	-0.000	-0.000

<최적화된 내부표정요소 (eBee)>

Internal Camera Parameters	Initial Value	Optimized 9/10
Focal Length [mm]	4.371	2.396
Principal Point X [mm]	3.113	3.081
Principal Point Y [mm]	2.402	2.482
R1	-0.049	-0.047
R2	0.056	0.048
R3	-0.034	-0.027
T1	0.005	0.008
T2	0.002	-0.000

나. 다중시점 무인기 획득 영상 분석을 통한 빙하 지역 수치고도모델 추출

• 모든영상의 기하보정 완료 후 연속하는 영상들 내에서 중복되는 동일한 지점을 결정하고, 기하학적 해석 및 비교를 통해 3차원 좌표를 추정하여 3D point cloud가 구성된다. Point cloud의 보간을 통해 수치고도모델을 추출할 수 있다. 본 연구에서는 역거리가중법(inverse distance weighting)을 사용하였으며 노이즈 필터링과 Sharpening 필터링을 적용하였다.



<9월10일과 11일에 촬영된 영상을 활용하여 추출한 수치고도모델>

- 제작된 수치고도모델은 촬영된 날짜에 따라 큰 차이를 보였다. 이는 무인기의 비행정보와 기기 특성만을 이용하여 자동으로 계산된 결과이며 GCP를 사용하여 절대고도를 보정해주어야 한다. 하지만 3D point cloud 구성 시 현장에서 설치 및 GPS를 사용하여 위치를 측정한 GCP는 무인기 영상에서 식별이 불가하였다. 특히 적설로 인하여 지표색과 GCP표면색이 동일하여 식별이 힘들었으며 비교적 높은 고도(200m 이상)로 비행하여 자동으로 특이점으로 식별되지 않았다. 따라서 수치고도모델의 절대고도는 눈이나 얼음이 없는 지형의 고도와 GCP 고도의 차이를 보정해 계산하였다. 추후 GCP의 크기를 늘리고 표면 색의 변화가 필요할 것으로 예상된다.

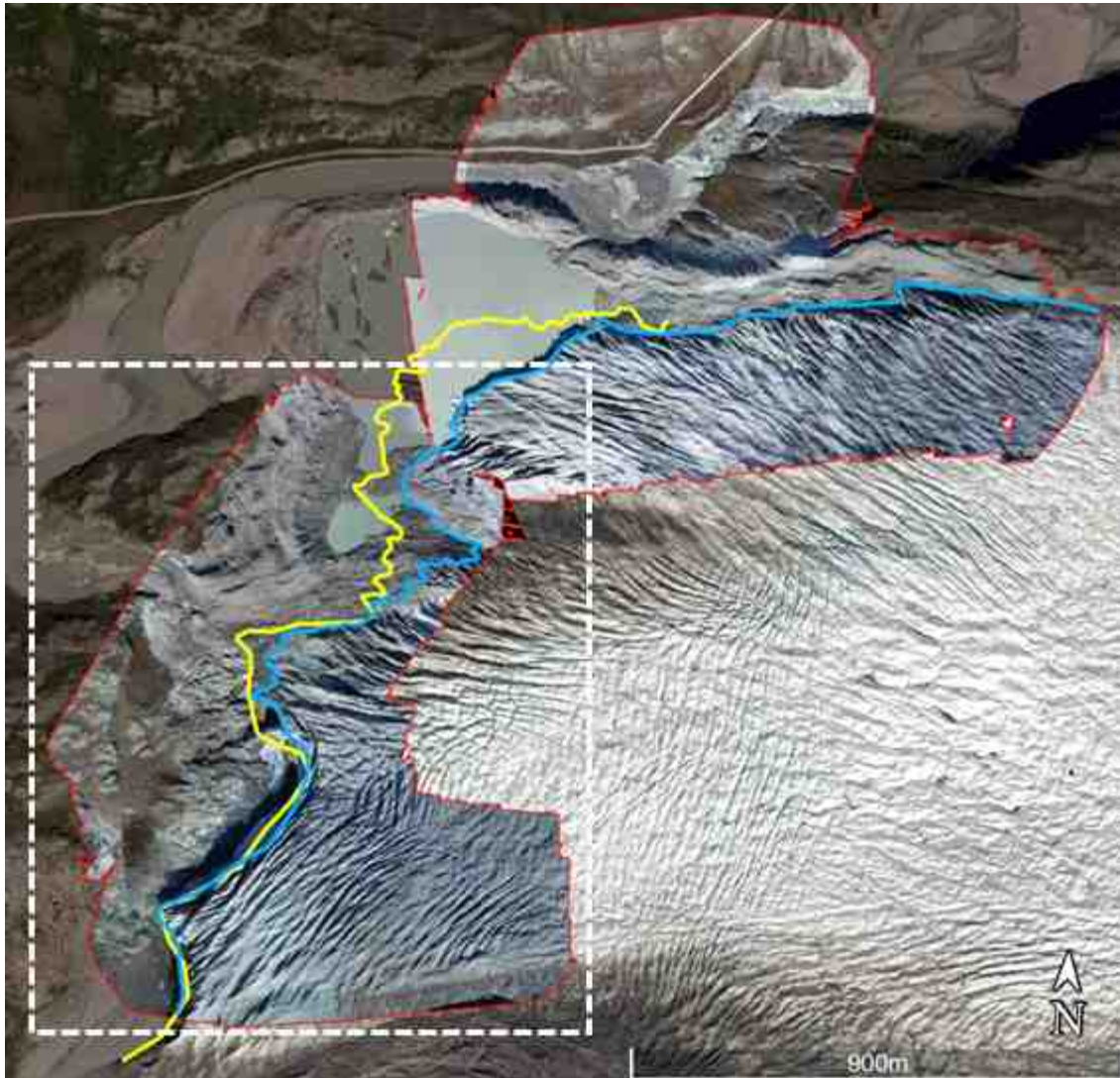
다. 현장 조사와 동시기에 인공위성 데이터 획득

- 무인기 영상과 비교 분석을 위해 고해상도 인공위성 데이터를 확보하였다. SPOT6 위성은 2012년 9월 9일에 발사되었으며 최대 1.5m 해상도 (panchromatic)를 갖고 있다. Tri-Stereo 모드로 촬영시 Fore, nadir, Aft (전, 아래, 후) 방향의 자료를 확보할 수 있기 때문에 추후 스테레오 영상 처리를 통해 수치고도모델을 제작할 수 있다. 본 연구에서는 2017년 7월 21에 촬영된 영상을 확보하였다.

- 현장 조사와 동시기에 확보된 자료가 아니지만, 무인기 영상의 위치정확도 비교를 위해 변화가 적은 것으로 예상되는 도로 위치를 비교하였다. 9월 11일에 획득된 무인기 영상의 좌측 하단과 우측 상단에 위치하는 도로의 위치와 SPOT6 영상의 도로 위치를 비교하였다. 좌측은 약 3m, 우측은 약 8m 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 추후 식별 가능한 GCP를 사용하여 위치 정확도를 높일 수 있을 것으로 예상된다.

- 위치정확도의 오차를 염두에 두고 2017년부터 2021년까지 약 4년 동안의 빙하 위치 변화를 도출하였다 (그림). 노란색 선이 SPOT6 영상에서 추출한 2017년 7월 빙하 끝단 위치이며, 파란색 선이 2021년 9월에 획득한 무인기 영상에서 추출한 빙하 끝단 위치를 나타낸다.

-
- 빙하의 남쪽 끝단보다 북쪽 끝단에서 큰 변화가 있었으며 최대 130~140m 정도 후퇴한 것을 확인하였다. 가장 변화가 큰 지역에는 빙벽으로 막혀있는 호수가 위치하며, 매년 35m 정도 후퇴중임을 확인하였다.

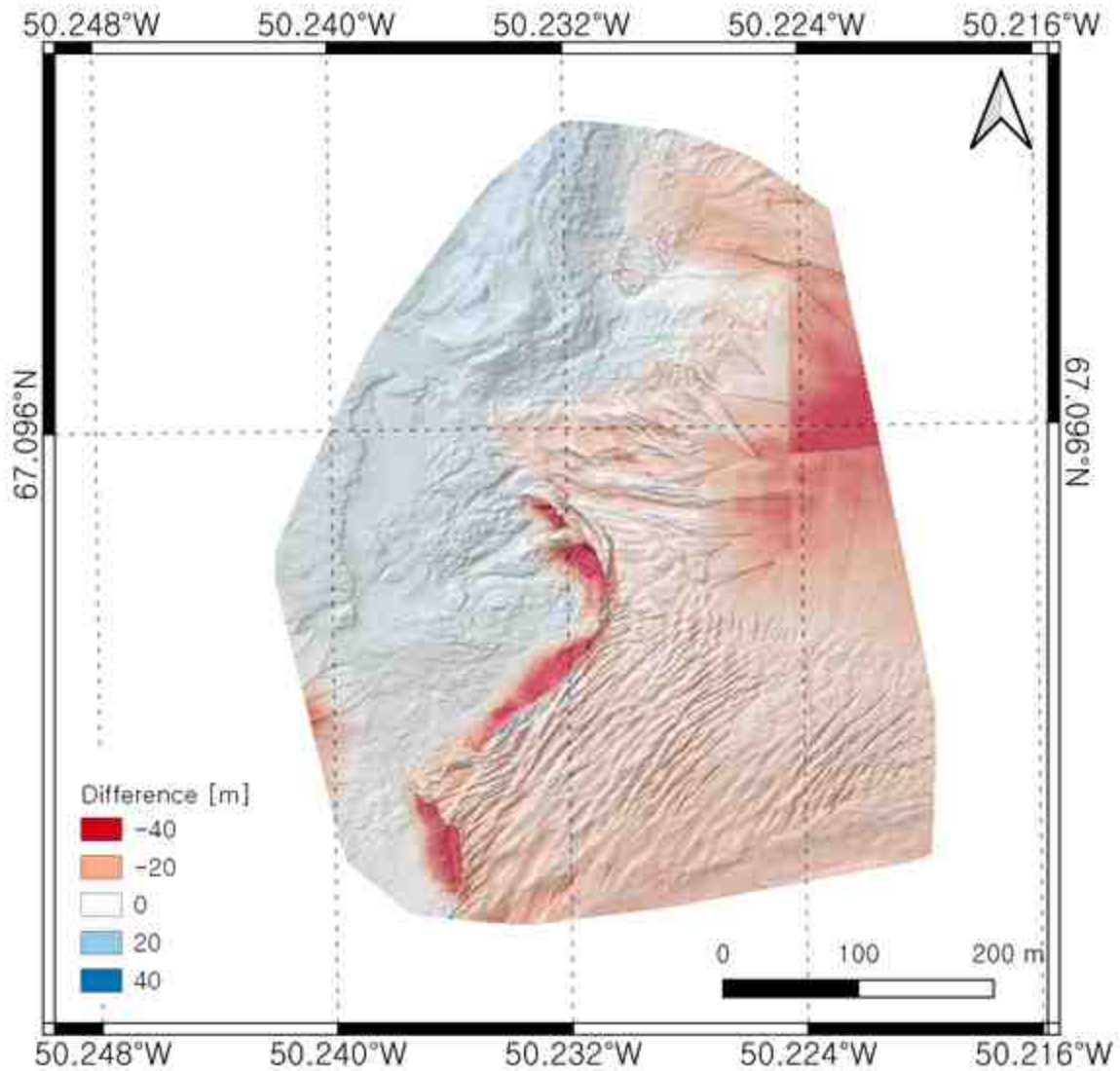


<2017년 7월 21일에 촬영된 SPOT6 영상(배경)과 그 당시 러셀빙하 끝단 위치(노란선).
2021년 9월 10-11일에 촬영된 무인기 정합영상(오버레이, 빨간색 경계)과 현재 러셀빙하
끝단 위치(파란선)>

라. 인공위성 기반 빙하 지역 수치고도모델과 무인기 기반 빙하 수치고도모델의 비교 분석

- WorldView-1,2,3 고해상도 스테레오 위성영상을 이용하여 제작된 그린란드지역 수치고도모델인 ArcticDEM을 사용하여 무인기 기반 빙하 수치고도모델을 비교 분석하였다. ArcticDEM의 공간해상도는 2m 이며 2018년 7월에 획득한 위성영상을 활용하여 제작되었다. 고도의 기준은 EGM96 geoid을 사용하였다.

- 앞서 무인기 영상 기반 수치고도모델은 GCP를 사용하지 못하여 절대고도를 나타내지 못하는 것을 확인하였다. ArcticDEM과 비교를 위해 빙하가 아닌 지표면은 변화가 적을것으로 가정하여 해당 지역의 자료간 고도차이를 계산하여 무인기 영상 기반 수치고도모델의 절대고도를 수정하였다. 수정된 수치고도 모델과 ArcticDEM의 비교를 통하여 변화량을 계산하였다.
-



<무인기 기반 수치고도모델 (2021년 9월 제작) 과 인공위성기반 수치고도모델 (2018년 7월 제작) 차이>

- 9월 10일에 획득한 DSM을 사용하였으며 (그림11, 회색 점선) 다른 시기에 확보된 자료들은 GCP 부재로 인한 오차를 보정하지 못하여 정확한 비교가 불가하였다.
- 가장 큰 변화는 빙하 끝단인 빙벽에서 발생하였으며 최대 40m 변화하였다. 고도 변화가 큰 지역은 빙벽이 무너져 발생한 지역으로 예상된다. 무인기 기반 수치고도모델과 인공위성기반 수치고도모델의 비교를 통하여 빙하 고도 변화 계산이 가능한 것을 확인하였으며, 추후 반복적인 자료 확보 및 비교를 통해 빙하 유실량을 계산 및 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 극지환경 모사시험

가. 국내 겨울철 강설환경에서의 극지환경 모사시험을 통해 획득된 무인기 영상 자료를 활용하여 지표면 특성 및 지형 분석 연구 수행

- 그린란드 빙하 표면은 크레바스와 빙하의 붕괴로 인하여 급격한 경사로 이뤄진 표면이 많다. 특히 빙하 끝단은 주로 절벽의 특성을 갖으며 태양고도에 따라서 끝단 및 크레바스 내부에 그림자가 발생할 수 있다. 경우에 따라 nadir 방향으로 촬영한 영상만을 활용하여 수치고도모델을 제작할 경우 해당 지역 및 주위 값이 부정확할 수 있다.
- 시멘트 재료인 석회 광산은 채굴로 인하여 급격한 경사인 절벽이 많으며 바닥은 암석들로 이뤄져 거칠기가 매우 높다. 이러한 환경은 빙하 표면, 빙하 끝단 그리고 크레바스의 환경과 비슷하다. 경사도가 높은 표면의 지역의 촬영을 위해 고정된 무인기 경로를 따라 incidence angle (camera angle)을

45, 65, 80도로 변화하여 영상 자료를 획득하고 수치고도모델을 제작하였다.

- 각 카메라 각도에 따른 영상 특성은 아래에 정리하였다.

<다양한 카메라 각도에 따라 촬영된 영상 특성>

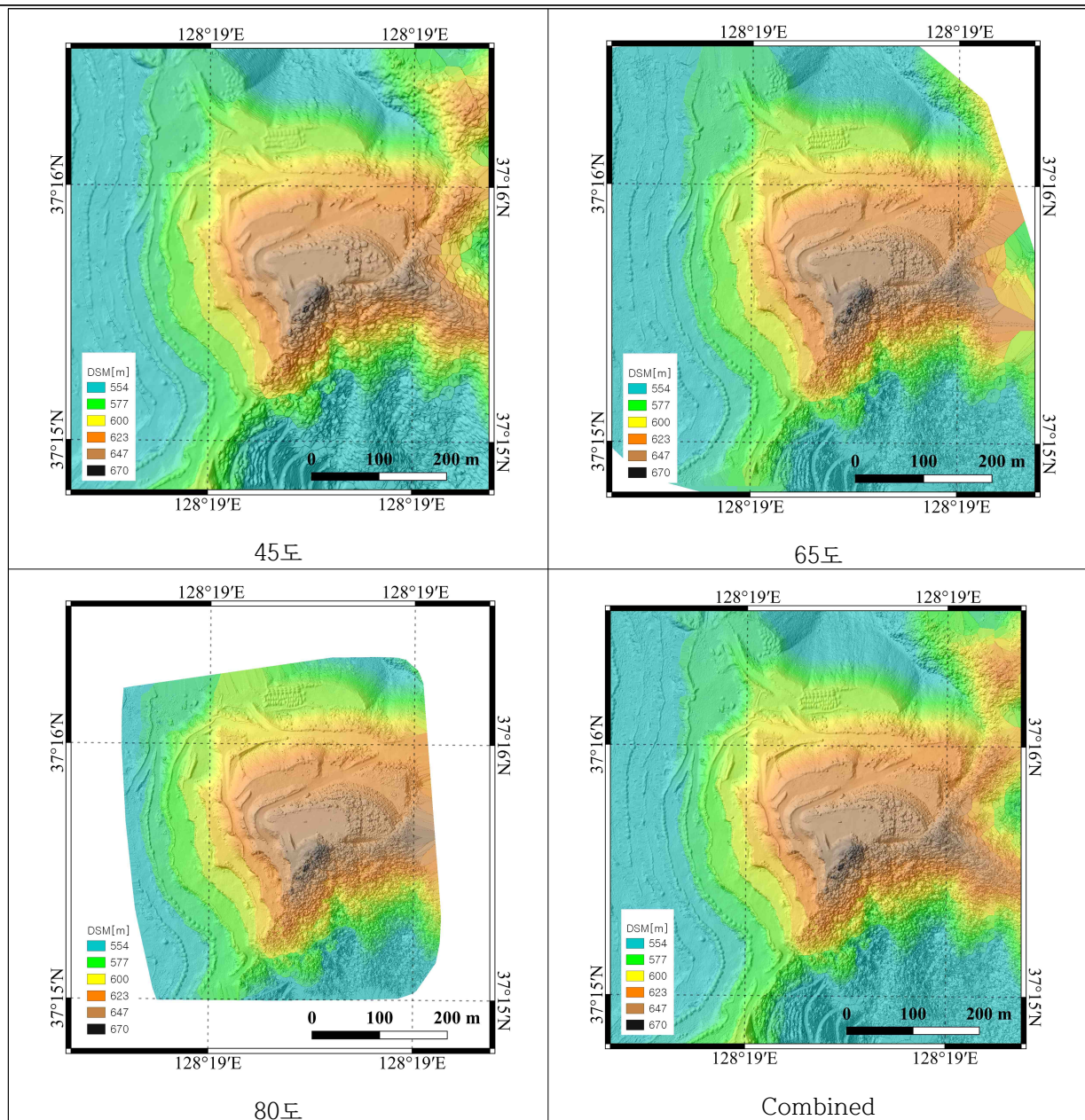
Camera Angle [deg]	45	65	80	Combined
Average Ground Sampling Distance (GSD) [cm]	13.02	4.55	3.45	4.87
Area Covered [km ²]	3.772	0.433	0.211	2.858
Number of Images	131	131	131	393
Median matching number per image	27,652.9	23,038.3	28,172.7	25,247.1
Average Density (per m ³)	2.24	27.46	59.2	18.62
Resolution [cm]	13	4.55	3.45	4.87

- 고도변화가 매우 큰 장소의 특성상 카메라 각도에 따라 촬영 면적, GSD 그리고 해상도가 가장 큰 변화를 보였다. 무인기의 제한된 고도로 인한 작은 촬영 면적의 단점을 보완할 수 있으나 GSD와 해상도가 낮아지는 단점이 있었다.

카메라 각도	45	65	80	Combined
영상				

<카메라 각도에 따른 촬영 면적 변화>

- 카메라 앵글에 따라 제작된 수치고도 모델은 아래와 같다.



<카메라 앵글에 따른 수치표고모델 차이 비교>

- 카메라 각도를 낮출수록 넓은 지역의 수치표고모델의 제작이 가능하였으나 촬영 위치에서 멀어질수록 자료의 품질이 급격하게 떨어지는 것을 확인하였다. 품질, 해상도, 촬영 가능 면적 등을 고려하였을 때 65도일 때 최적의 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.
- 국내 광산에서 진행된 실험 결과를 바탕으로 그린란드 빙하 표면 촬영을 위해 카메라 각도를 65도로 세팅하였다.

Ⅲ. 1단계 3차년도 연구수행내용 및 결과

1. 그린란드 현지 하계 조건 현장 조사 수행

가. Russell 빙하 일대 무인기 영상자료 획득

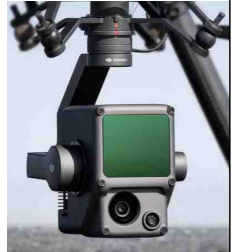
- 현장조사 및 비행 수행 기간
 - 2022년 6월 24일~2022년 6월 25일 (그린란드 현지 시간 기준)
 - 특이사항: 비행기 착륙 불가로 인한 도착일자 지연 및 그린란드 현지 조사 환경의 불가피한 사정에 따라 당초 약 7일간의 조사 계획에서 2일 현장 조사 일정으로 변경됨
- 무인기 및 센서 정보
 - 금번 그린란드 현장조사에서는 DJI사의 Matrice 300 RTK(M300) 회전익 기체를 지역적 LiDAR

및 광학영상자료 획득에 이용하였으며, SensFly사의 Ebee 고정익 기체를 준광역의 광학영상자료 획득에 이용함

<DJI M300 무인기 사양>

Type	Dimensions (mm (L×W×H))	Max Weight	Operating Frequency	Positioning Accuracy	Max Speed	Max Wind Resistance	Max Flight Time	GNSS	Obstacle Sensing Range	Image of aircraft
Quadcopter	Unfolded, 810×670×430	9 kg	2.4 GHz 5.7-5.9 GHz	1 cm+ 1 ppm (Hori.) 1.5 cm +1 ppm (Verti.)	17~23 m/s	15 m/s	55 min	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo	0.7-40m	

<DJI M300 장착 L1 센서(라이다+RGB카메라) 사양>

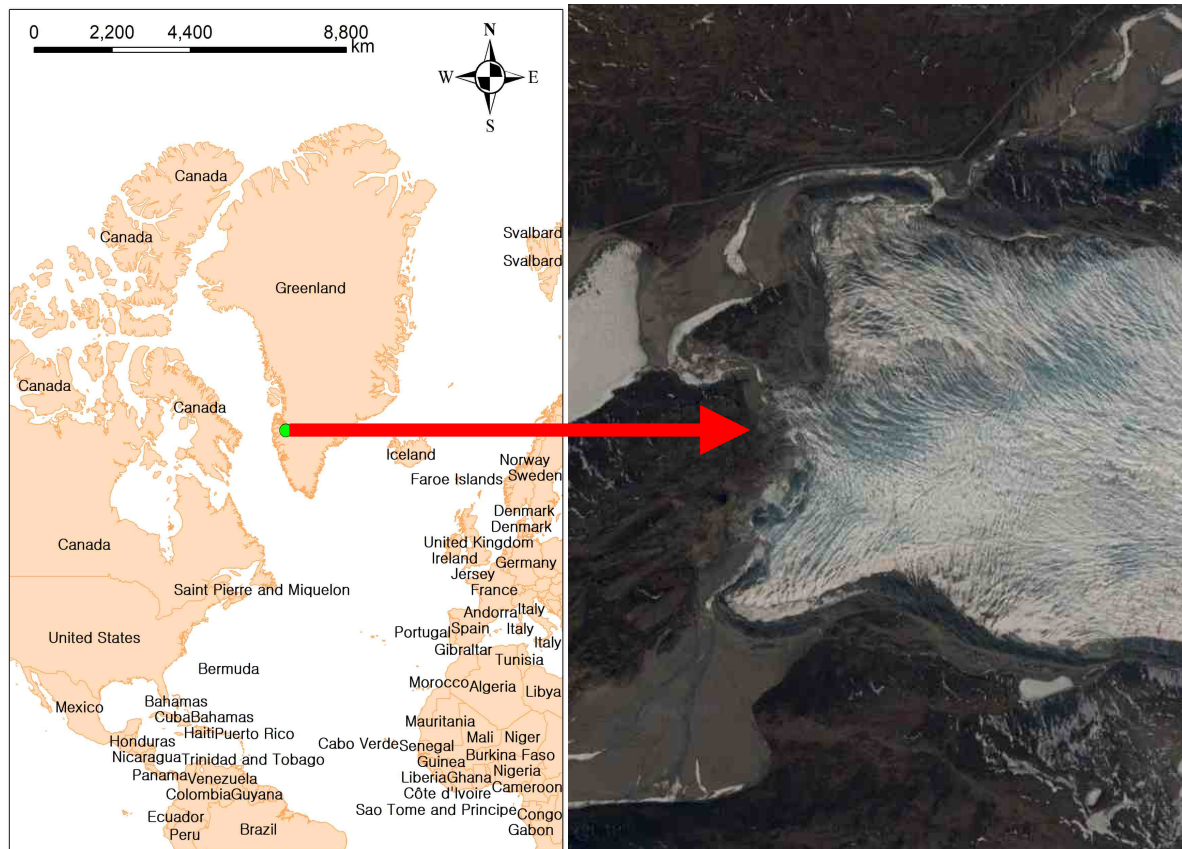
Name	Dimensions (mm (L×W×H))	Weight	Detection Range	System Accuracy	LiDAR Accuracy	IMU update frequency	RGB camera size	Image of L1 sensor
Zenmuse L1	152×110×169	930±10 g	190-450 m	10 cm @ 50 m (Hori.) 5 cm @ 50 m (Verti.)	3 cm @ 100 m	200 Hz	5472×3078 (16:9)	

<SensFly Ebee 사양>

Type	Wingspan	Weight (incl. camera & battery)	Radio link range	Cruise speed	Wind resistance	Max flight time	Sensor	Image of aircraft
Fixed-wing	96cm	0.69	3 km(up to 8km)	11-25 m/s	12 m/s	50 min	Sequoia, thermal M A P , S110 RGB/NIR/RedEdge	

• 촬영 지역 및 촬영 조건

◦ 본 현장조사 및 무인기 촬영은 그린란드 남서쪽 일대에 위치한 Russell 빙하를 대상으로 수행함



<연구지역 위치도 및 위성영상 Russell 빙하 위성영상 모습>

- 빙하 말단 부분의 변이관측을 위해 해당 지역을 대상으로 회전익 및 고정익 무인기의 촬영을 수행하였으며, 촬영 및 환경 조건은 아래와 같음

<회전익(M300) 및 고정익(Ebee) 무인기 비행 촬영/환경조건>

촬영 날짜	센서	비행시간	고도	태 양 고도각	태 양 천정각	태 양 방위각	구 름 (광량)	중첩도 (side%)	셔터속도 (초)	라이다 스캔방식
06/24	L1	약 25 분/1회, 총 3회	150 ~ 200 m	46.08°	43.92°	191.62°	약간	20%	1/3200	단일
	Sequicia	약 30-34 분/회 총 2회	300 m					70%	Auto	-
06/25	L1	약 25 분/1회, 총 2회	150 ~ 200 m	46.06°	43.94°	191.55°	없음	20%	1/4000	삼중
	Sequicia	약 30-34 분/회 총 2회	300 m					70%	Auto	-

- 현장 상황에 맞는 최적화된 무인기 촬영 결과 도출을 위해 태양 기하학적 조건의 통일성을 고려하였으며, 광역 촬영이 가능한 고정익의 경우 높은 고도에서 1회 비행 임무 수행으로 영상을 취득하였고, L1의 경우 상대적으로 저고도 조건에서 2~3회 비행 임무를 수행하여 각각의 결과를 통합하여 자료를 획득하고자 하였음

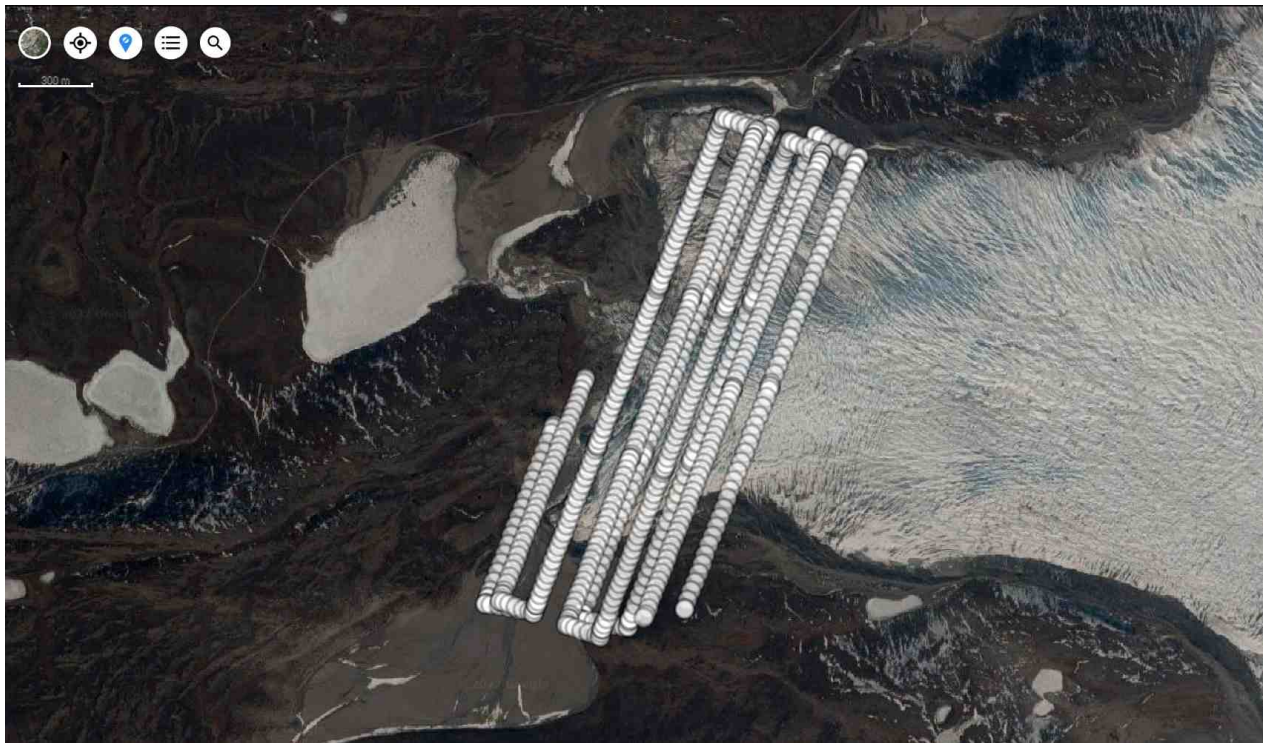
- 무인기 촬영 영상자료의 품질은 태양의 기하학적 조건의 변화와 구름의 양에 따라 변이가 크게 나타날 수 있으며, 본 비행의 고려 조건을 통해 최대한 촬영환경 조건의 일관성이 유지되는 범위

내에서 비행을 수행하고자 하였음

- LiDAR 센서의 경우 스캔방식을 단일, 이중, 삼중 모드로 설정이 가능한데, 이는 레이저의 지표 투과율과 밀접한 관련이 있음
- 본 현장 조사에서는 빙하를 대상으로 해당 스캔방식의 차이에 따른 결과 도출 차이에 관해서도 확인하기 위해 총 2가지 스캔방식(단일, 삼중)을 모두 적용하였음
- 현장특이사항: 1일차 현장 조사 비행 당시, 타 무인기체와의 신호 중복 및 교란으로 인해 회전의 비행(M300기체) 중 조종기-기체 간의 송수신호가 2회 끊기는 상황이 발생함 (사용 조종기 주파수: 2.4 GHz)
- 수행한 고정익 및 회전익의 비행경로는 아래와 같음



<Ebee 고정익 무인기 비행경로>



<M300 무인기 비행경로(위 6.24, 아래 6.25>

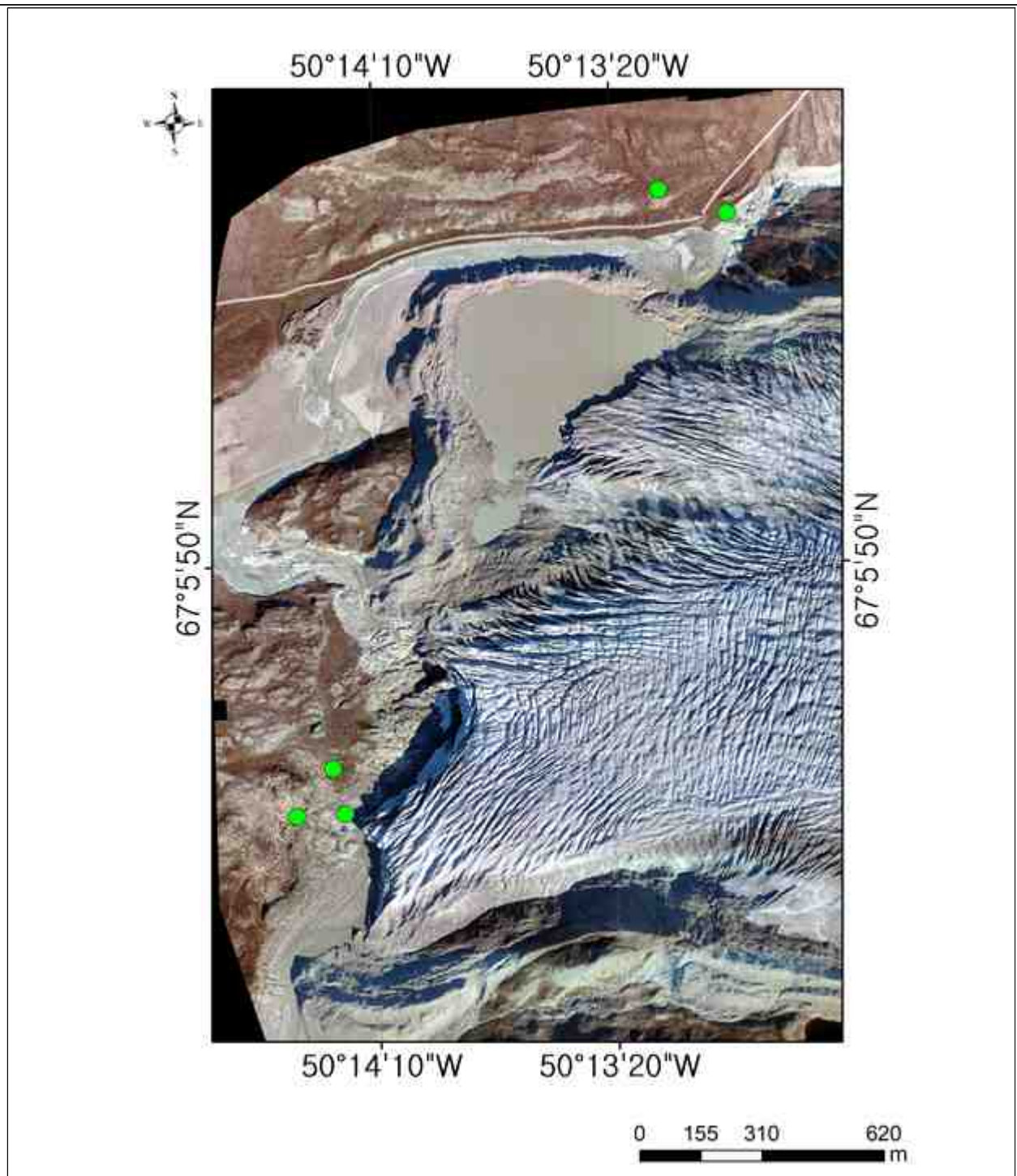
- 무인기 촬영 영상 기반의 정사영상제작을 위해 기준이 될 수 있는 지상 기준점(Ground Control Point, GCP)을 설치하고, 고정형 GNSS 수신기를 통해 위치 정보를 측량함

GCP 설치 및 측량 모습

무인기 영상 내 GCP 모습



조사 지역 내 GCP 분포 모습



2. 무인기 영상처리

가. 회전익(M300, L1센서) 영상 처리 결과

- 본 과제에서 회전익 촬영 결과는 DJI Terra, Pix4D, Metashape Pro 3가지 소프트웨어를 활용하여 영상을 처리함
- LiDAR 획득 정보는 포인트 클라우드를 구성하여 .las 형태의 파일로 추출하였으며, 이를 활용하여 수치표고모형을 구축함
- 사진측량자료는 촬영 사진을 배열하여, 포인트 클라우드를 구성하였으며, 이를 기반으로 정사영상 및 수치표고모형을 구축함 (위치보정: GCP 측량 기준점 정보 활용)
- 현장 조사에서 취득한 회전익 무인기 촬영 영상자료는 GNSS 정보 기반의 수집된 위치정보를 기록하고 있으며, 영상 처리에도 함께 반영됨
- LiDAR 및 사진측량자료의 수치표고모형은 egm96 지오이드 모델의 고도 정보를 기초로 함
- 좌표계 및 투영방식은 WGS84 UTM 22N을 기본으로 하였음
- 정사영상 및 수치표고모형 구축 결과 보고는 아래와 같음

<회전익 RGB 영상 기반 정사영상 및 라이다 수치표고모델 구축 결과 품질 보고 요약>

촬영 날짜	POS 데이터 수집 시간	클라우드 블록 수	총 포인트클라우드 데이터 수집 시간	이미지 수	위치 RMSE	GSD	적용 지역	평균 비행고도
6/24	1시간 15분	3	1시간	502	0.66 m	0.05m	2.43 km ²	170 m
6/25	47분	2	41분	696	0.35 m	0.04m	1.70 km ²	145 m

- 현장조사 1일 차에서 약 평균 170 m 고도로부터 취득한 총 502장의 사진을 통해 구축한 정사영상은 5 cm GSD를 가지며, 2일 차의 경우 4 cm GSD의 초고해상도 공간정보를 제공함
- 1일 차 LiDAR 자료 기반 구축 결과(조건: 단일 스캔 방식(170 m 평균고도), 전반적으로 반사되어 돌아와 기록된 포인트가 대상 지역을 잘 표현하였으나, 기록되지 못한 지역도 존재함
- 2일 차 LiDAR 자료 기반 구축 결과(조건: 삼중 스캔 방식(145 m 평균고도), 1일 차와 비교하여 전반의 지역이 비교적 잘 표현된 것을 확인할 수 있으며, 촬영지역 서부지역에서 누락된 지역 존재함
- 이는 크게 세 가지 이유에 의해 발생된 결과로 사료 됨
 - 하계 빙하의 물성특성: 촬영 당시의 그린란드는 하계 시기로 기온이 높고 가속화된 온난화 현상으로 인해 과거에 비해 높은 용융 속도를 보이고 있었으며, 레이저가 지표에 맞고 다시 센서로 돌아오지 못하고 흡수되는 반사율의 용융상태(물에 가까운)인 영향이 존재하는 것으로 판단
 - 장착된 LiDAR 센서의 한계: 본 현장조사에서 활용한 LiDAR 센서는 드론 전용 센서로 개발되었기 때문에 정확성을 동반하는 고가의 민감한 센서에 비해 센서의 감도 반응 민감성 능력이 상대적으로 저하될 수 있음. 따라서 본 연구에서 수행한 고도 레벨보다 더 낮은 고도에서의 비행이 자료의 획득에 효과적일 수 있을 것으로 판단하며, 2단계 현장조사 시 100 m 고도 레벨의 비행계획을 수행할 예정임
 - LiDAR 촬영 중첩도: 현장조사에서 설정된 LiDAR 중첩도는 20%에 해당하며, 낮은 중첩도로 인해 길게 배열된 자료 유실의 흔적을 아래 그림에서 확인할 수 있음. 이를 통해 2단계 현장조사 시 LiDAR 중첩도를 40%로 설정한다면, 지표 물성특성에 따른 데이터 유실 외의 손실은 없을 것으로 추정함
- LiDAR 포인트 클라우드 자료를 이용하여, 초고해상도의 DSM(수치표고모델)을 각각 일차에 따라 생성하였으며, Gaussian filter 5x5, Bining 보간 기법을 활용하였음(resampled cell size: 1 m)

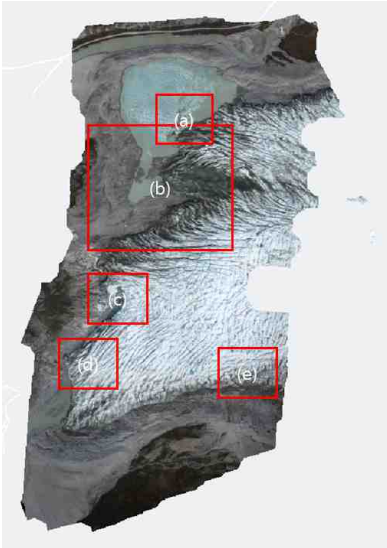
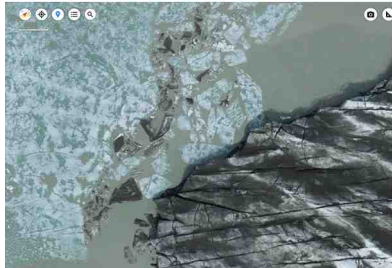
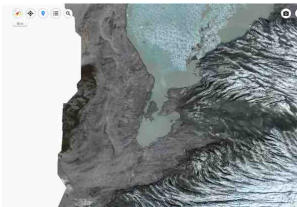
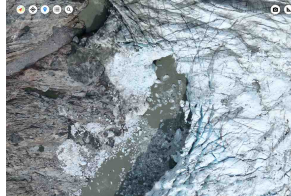
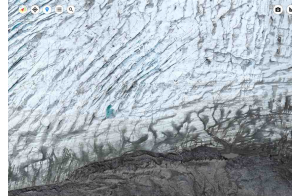
<회전익 RGB 영상 기반 정사영상 및 수치표고모델 구축 결과 품질 보고 요약 그림>

촬영 날짜	정사영상	DSM	사진 장면 오버랩(중첩)
6/24			
6/25			

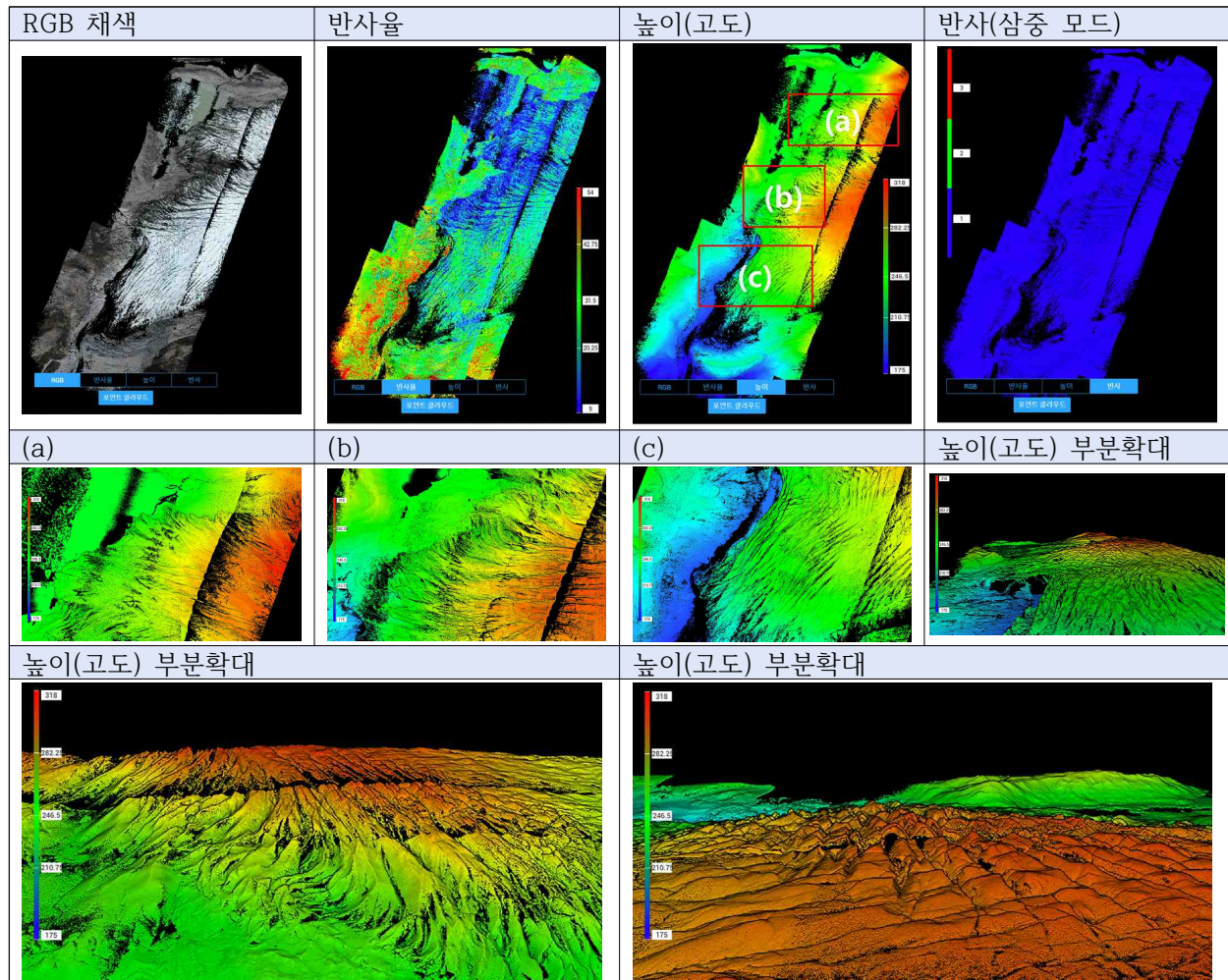
<1일차 현장조사 회전익 LiDAR 자료 기반 포인트 클라우드 구축 결과>

RGB 채색	반사율	높이(고도)
(a)	(b)	(c)
(d)	높이(고도) 부분확대	높이(고도) 부분확대

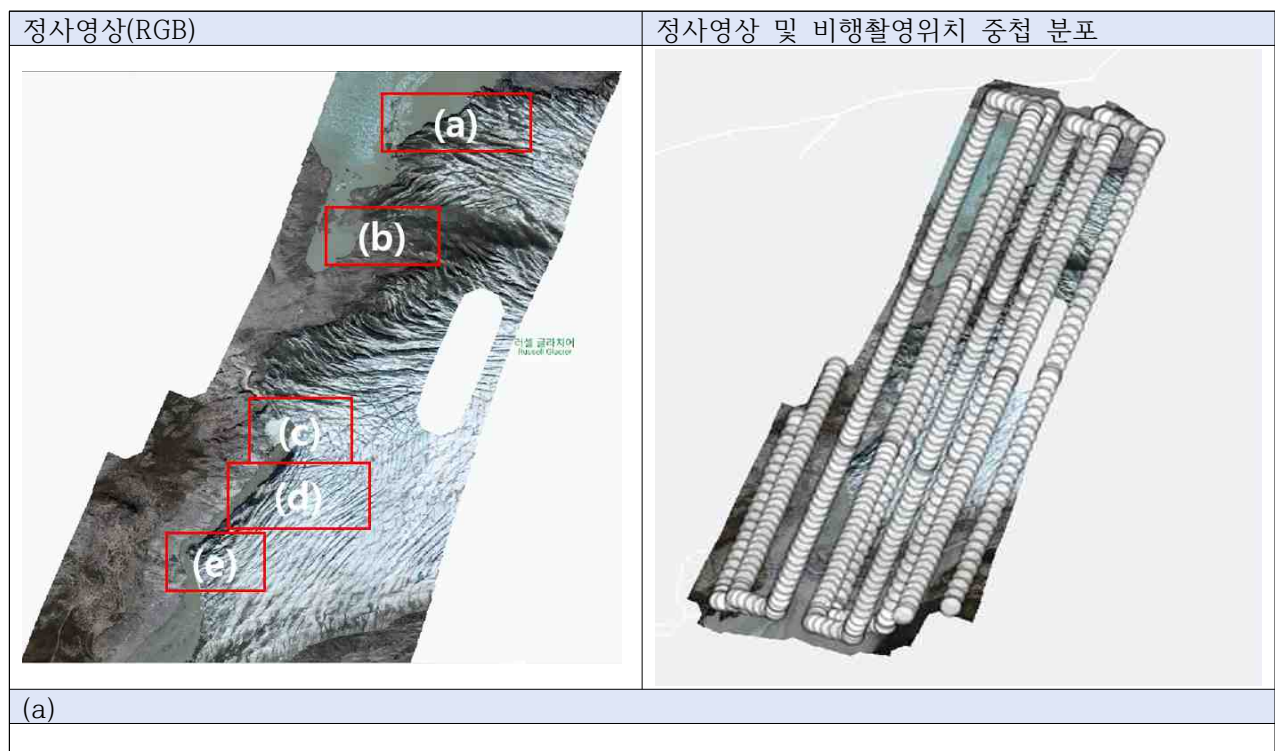
<1일차 현장조사 회전의 RGB 사진 자료 기반 정사영상 구축 결과>

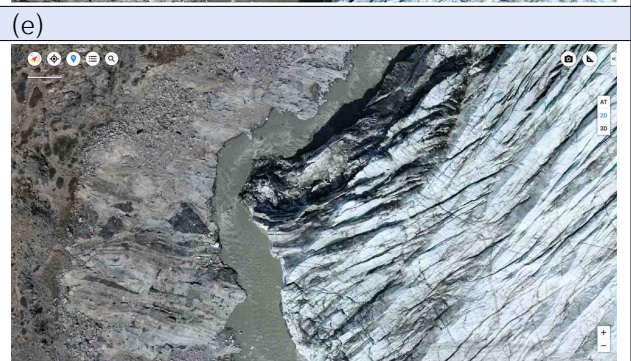
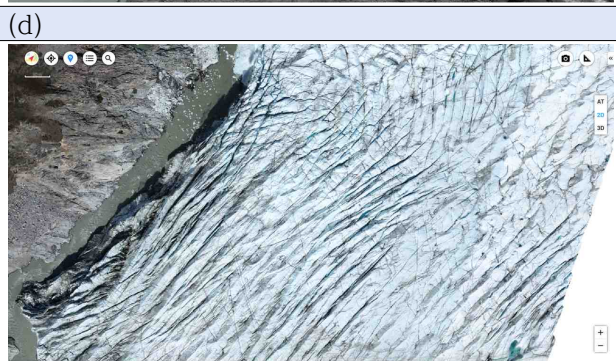
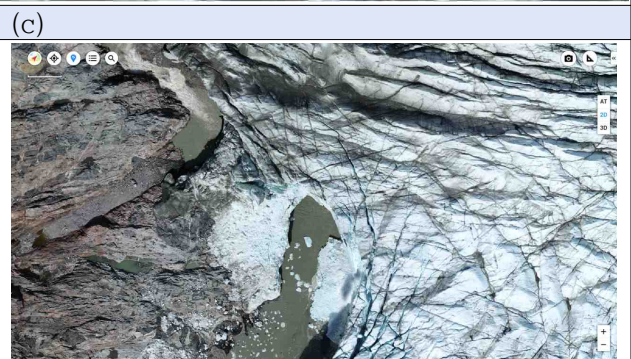
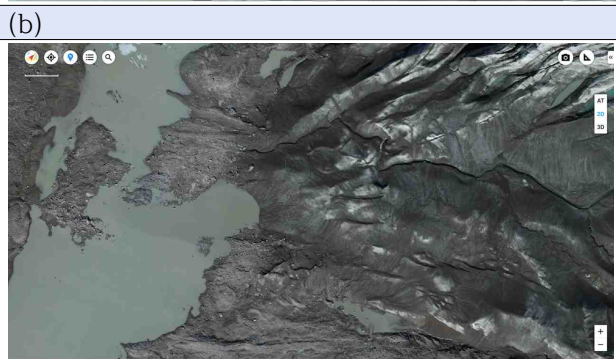
정사영상(RGB)	정사영상 및 비행촬영위치 중첩 분포	(a)	
			
(b)	(c)	(d)	(e)
			

<2일차 현장조사 회전익 LiDAR 자료 기반 포인트 클라우드 구축 결과>



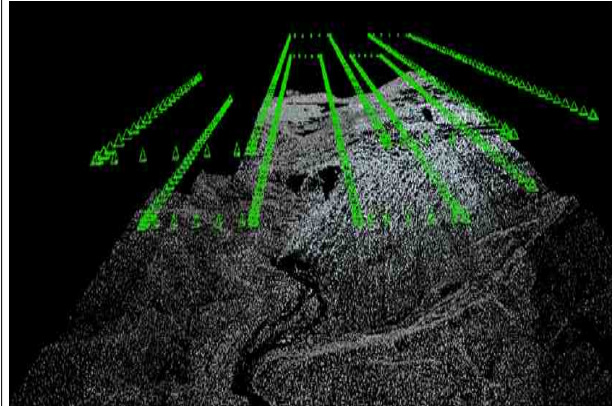
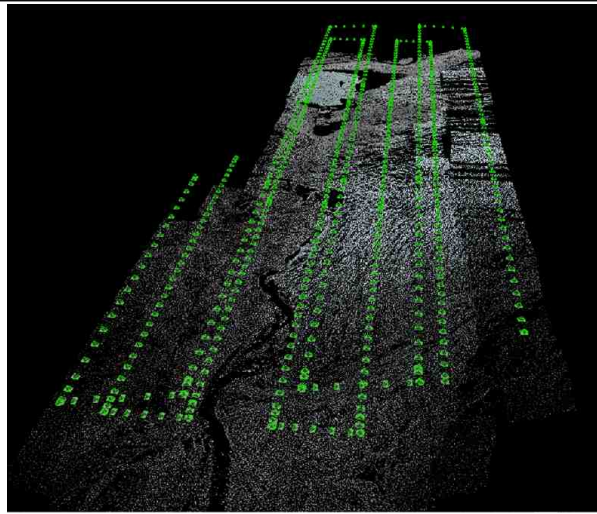
<2일차 현장조사 회전익 RGB 사진 자료 기반 정사영상 구축 결과>





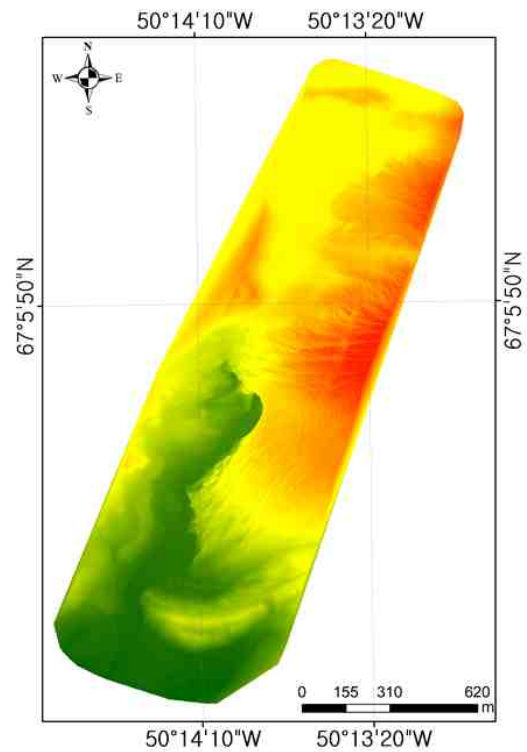
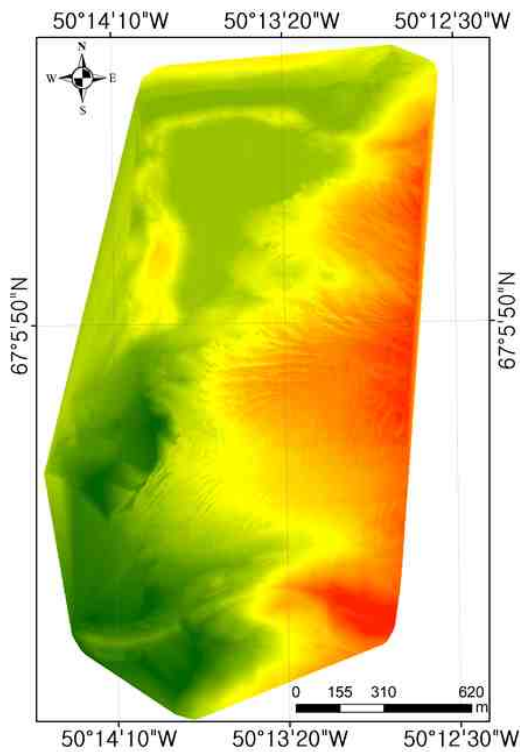
<1일, 2일차 회전익 사진 촬영 분포 차이 비교>

1일차 사진 촬영 위치 분포(Top view)	1일차 사진 촬영 위치 분포(Side view)
2일차 사진 촬영 위치 분포(Top view)	2일차 사진 촬영 위치 분포(Side view)



1일차 포인트클라우드 수치표고모델(DSM) 구축 결과

2일차 포인트클라우드 수치표고모델(DSM) 구축 결과



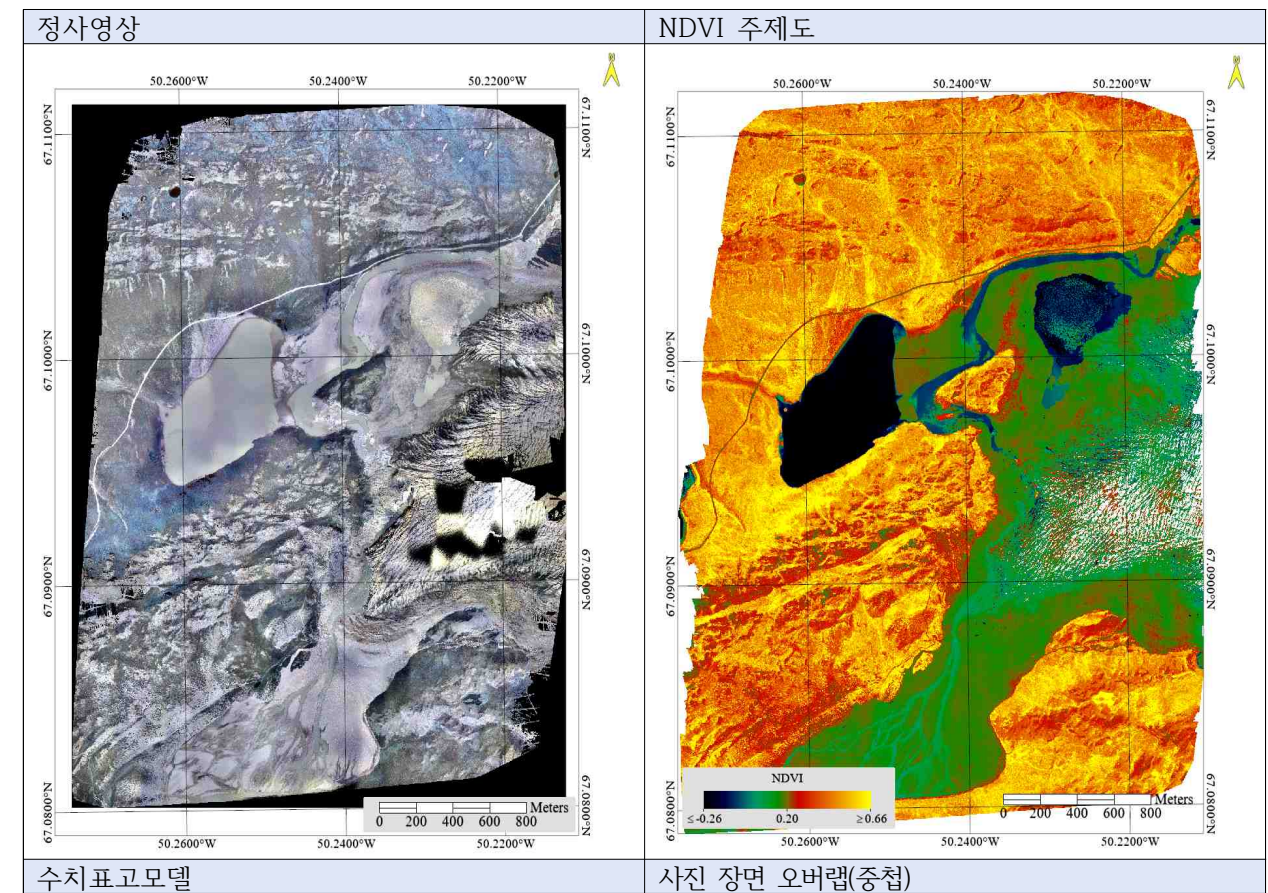
나. 고정익(Ebee, Sequoia 센서) 영상 처리 결과

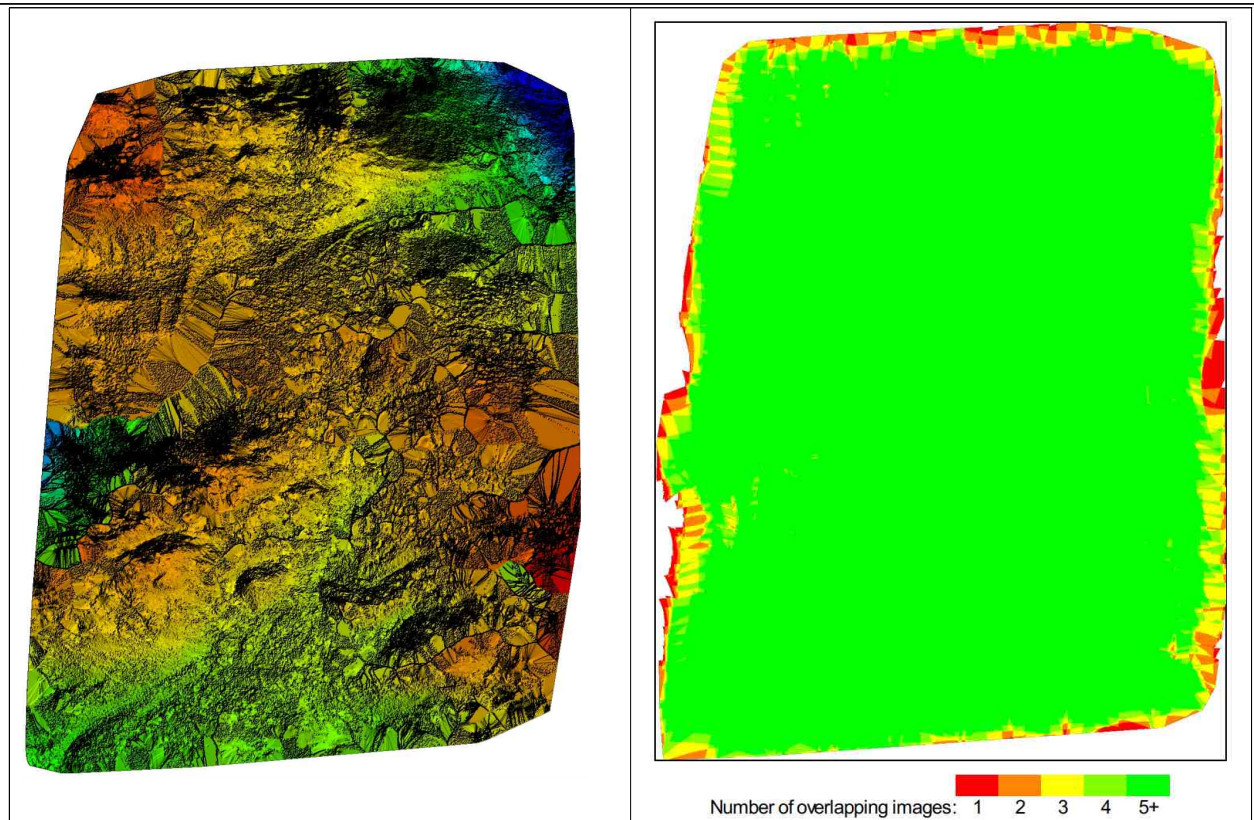
- 고정익 촬영 영상의 경우 준광역적으로 가시화하기 위해 고정익 영상의 경우 1일차, 2일차 영상 획득 자료를 모두 한꺼번에 처리하였음
- Sequoia 센서의 경우 한번의 촬영 위치에서 가시광선-근적외선 파장영역대의 정보를 총 5개 채널로 나누어 획득 할 수 있는 장점을 가짐
- 특히 근적외선 채널 영역의 영상정보를 획득 할 수 있다는 장점을 이용하여, True Color 정사영상 외에 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 결과를 추가적으로 산출하였음
- NDVI는 식생분포 및 식생의 상태를 연구하는데 이용되는 일반적인 원격탐사 기법의 하나로 알려져 있으며, 그린란드 온난화에 따른 빙하 용융 현상과 더불어 쟁점이 되는 그린란드 녹지화 모니터링 활용을 시도할 수 있는 연구적 확정성을 가짐
- 고정익 촬영영상 기반, 정사영상, NDVI 및 수치표고모델 제작 결과는 아래와 같음

<고정익 영상 기반 정사영상, NDVI 및 수치표고모델 구축 결과 품질 보고 요약>

구축결과종류	GSD	위치오차 (m)	영역	활용 사진 수
정사영상 & DSM	7.52 cm	x: 1.06 y: 1.17 z: 1.52	8.17 km ²	922
NDVI 주제도	30.49 cm	-	9.59 km ²	3780

<고정익 영상 기반 정사영상, NDVI 및 수치표고모델 구축 결과 그림>





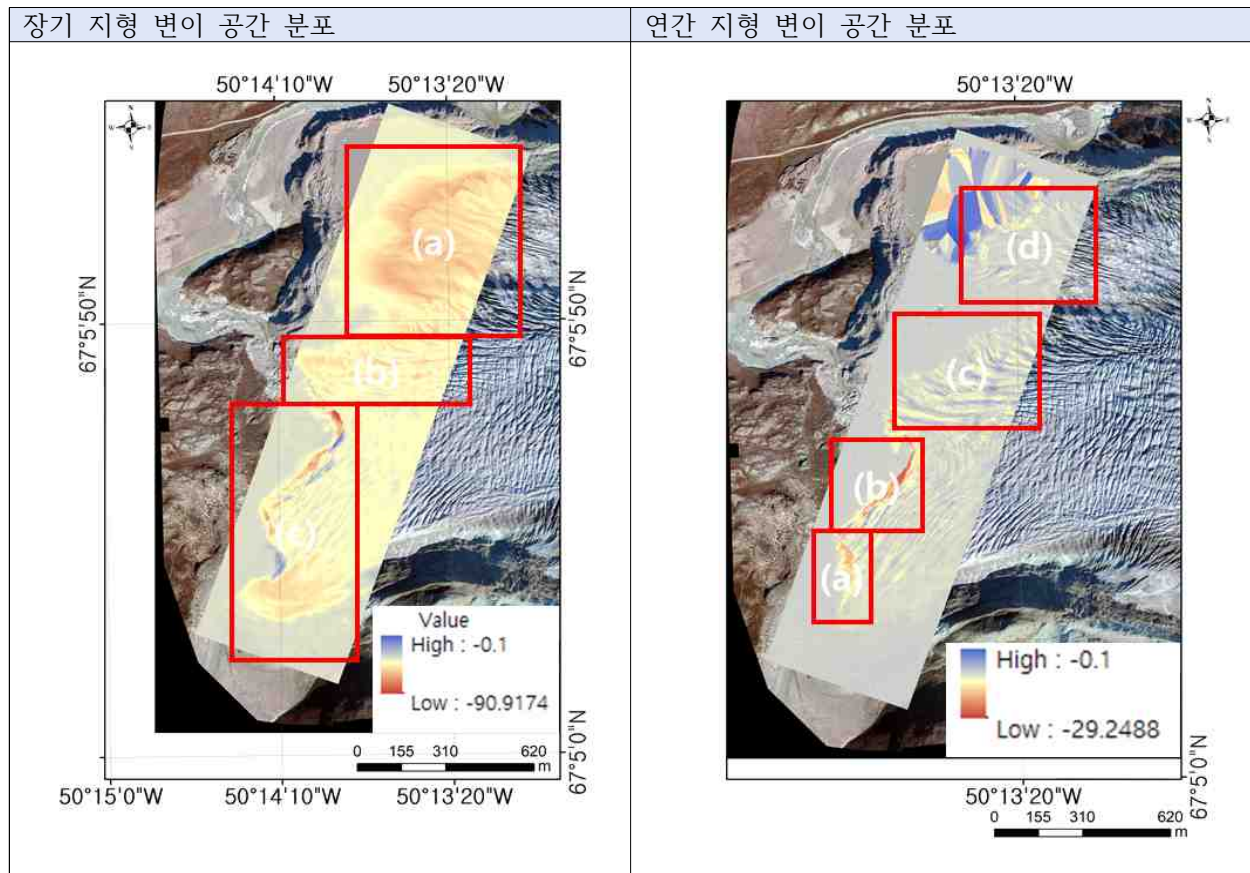
3. 변화 탐지 및 시계열 영상 분석

가. 무인기 영상 기반 변화 탐지 분석

- ArcticDEM 자료(2018년 7월 제작)와의 직관적 비교를 통해 현재와 과거 사이의 공간적 변동성 지역 분포에 관해서 분석함
- 변화 탐지 분석 및 비교를 위해 영상결과물들의 Cell Size는 2 m으로 통일되어 진행되었으며, 지오이드 EGM96 모델 기준 고도로 통일되었음
- 시계열 지형 변이 공간 분포를 파악한 결과 2018년과 2022년 사이 최대 90 m의 지형 변이를 보였으며, 공통으로 미세지형 변이 (a) 지역과 시계열 지형 변이 (c) 지역에서 급격한 변이 차이를 보였음
- 해당 지역은 빙하 말단 부분 중 계속해서 붕괴 및 후퇴가 일어나 뒤로 밀려나고 있는 현상을 보이는 지역으로 변이 발생이 예상되는 지역에 해당하며, 준 광역적으로 5년 전과 비교하여, 전체적인 빙하의 지형 고도가 낮아진 것으로 판단됨
- 이와 같은 지형 하강을 통해 실제 빙하가 해당 시간 동안 어느 속도로 줄어들었는지 계산이 가능할 것으로 판단됨
- 더불어 온난화에 따른 북극권 빙하 후퇴에 대한 근거로써 중요하게 활용될 수 있을 것으로 판단됨
- 향후 위 지역을 더 조밀하고 장기적으로 감시한다면, 5년 단위의 급격한 빙하 용융 이벤트가 불러일으키는 큰 환경적 경각심과 이슈를 조명할 수 있을 것으로 판단됨
- (b) 지역은 (c)와 (a) 지역 사이에 존재하는 지역으로 켜기형의 모습을 띠고 있으며, 이미 빙하가 녹고 Bed Rock(기반암, 기저암)이 노두로 드러난 지역으로 현장에서 확인됨
- 2018년 2022년까지 빙하가 녹음으로써 그 변이 차이가 더욱 드러나는 지역으로 판단됨
- 해당 지역이 완전히 노두로 드러나게 되고 난 후, 추후 계속해서 이 지역의 모니터링을 수행한다면, 노두 상태 그대로 큰 변이가 발생 되지 않게 될 지역으로 여겨짐
- 이와 같은 지역은 온난화로 인해 과거와 미래 사이 빙하 용융에 따른 지형 변화에 있어 실험 및 모니터링 통제 점(Control Point)으로 활용될 수 있는 제한 지역으로 활용될 수 있음
- 2021년 현장조사에서 획득한 무인기 영상의 수치표고모델과의 비교를 통해 연간 지형 변이 공간 분포를 확인한 결과 (a)와 (b) 지역에서 가장 큰 변이가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 해당 지역은 빙하 붕괴지역 및 유속이 빠른 하천이 함께 존재하는 지역임을 현장에서 확인하였으며, 큰

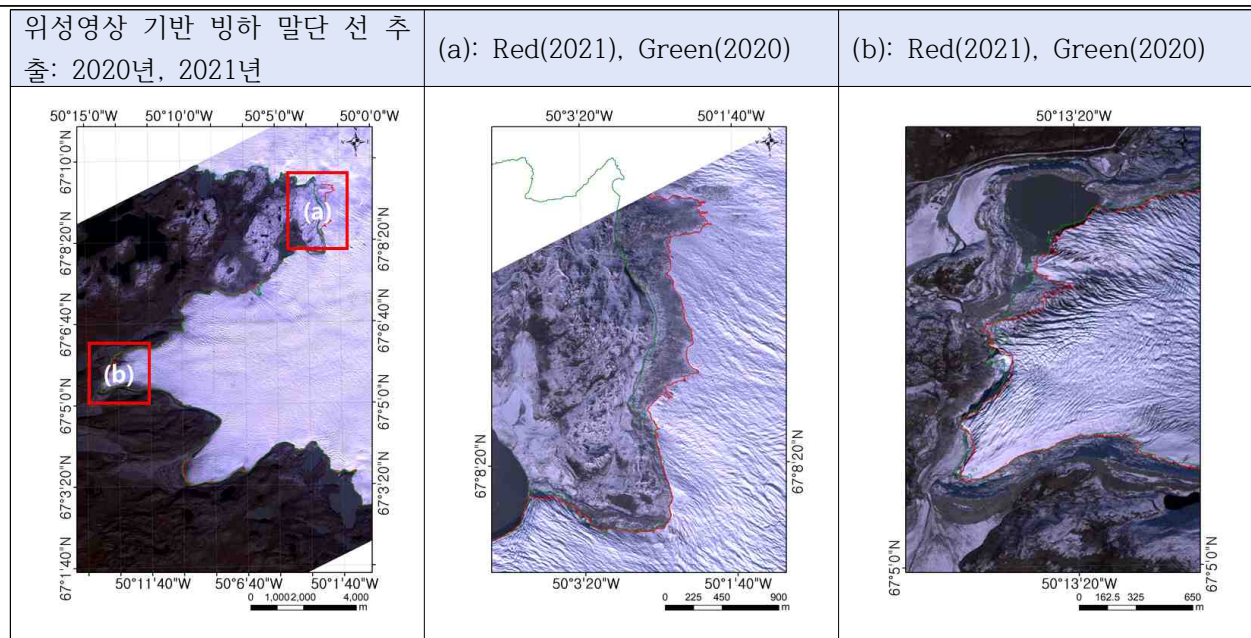
변이 발생이 예상될 수 있는 지역임

- 전체적으로 연간 약 30 m의 고도 변화가 존재하는 것으로 확인되었음
- (c)와 (d) 지역에서의 변이 분포는 장기 지형 변이 공간 분포와 마찬가지로 빙하 표면에서 많은 빙하 용융이 발생 되는 지역으로 연간 약 평균 15 m의 지형 변이가 존재하는 것으로 분석되었음
- 5년간의 변이 비교에서 약 평균 60~70 m 정도의 지형 변이가 존재한 것으로 미루어 보아, 연간 15 m의 빙하 용융 규모가 발생했을 것으로 예상됨



나. 위성영상 정보 기반 변화 탐지 분석

- 국내 고해상도 광학 위성 아리랑(K3)의 영상자료를 활용하여, 2020년과 2021년 사이 빙하 말단 선의 변화를 탐지하는 분석을 수행하였으며, 이를 무인기 영상자료로부터 획득한 빙하 말단 선 자료와 비교 분석 수행함
- 위성영상 비교 분석 결과, 2020년과 비교하여 2021년에 전반적으로 큰 편차를 보이지 않았지만, 본 현장조사일대를 중심으로 북동쪽 부근의 빙하선이 후퇴하는 차이를 보였음
- 현장조사 일대의 경우 빙하가 붕괴하는 급격한 변동 지역에서 마찬가지로 빙하선이 후퇴하는 양상을 보였음
- 본 결과를 기반으로 2단계 연구에서 현재까지 획득한 무인기 영상기반의 세부 빙하선 정보와의 융합을 통해 결년 없이 최대한 조밀한 빙하 말단 선 변이를 시계열로 분석할 수 있을 것으로 예상됨



IV. 2단계 1차년도 연구수행내용 및 결과

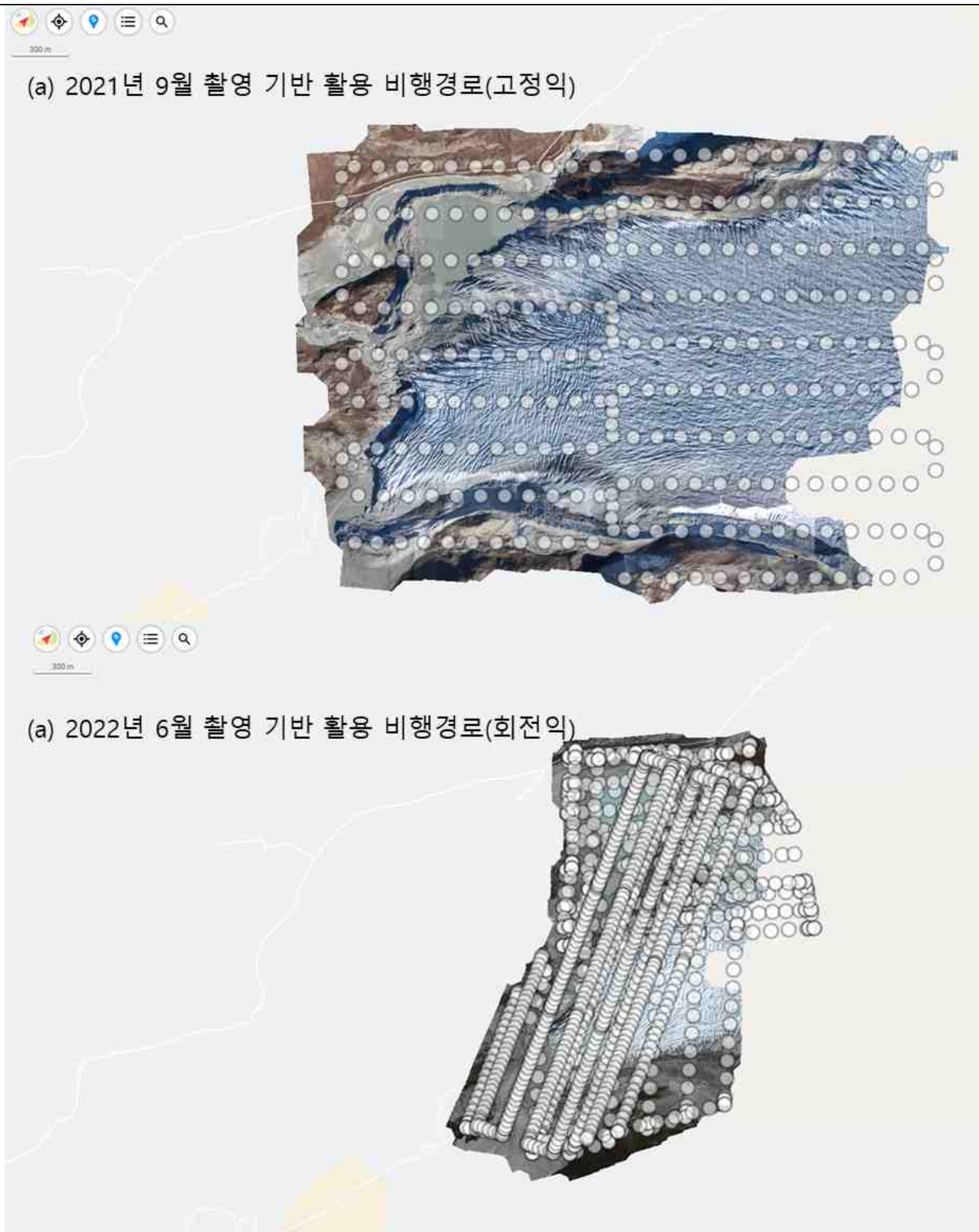
1. 고해상도 무인기 영상 기반 수치표고모델 구축 및 3차원 모델링

가. 고해상도 3차원 수치표고모델(DSM, digital surface model) 활용자료

- 고해상도 3차원 DSM 구축 및 정사영상 제작을 위해 2021년 9월 하계 현장조사 및 2022년 6월 하계 현장조사에서 획득한 RGB 카메라 사진 및 라이다 포인트셋 자료를 활용함
- 본 연구수행내용에서는 현장 조사에서 획득한 고정익 및 회전익 촬영자료를 모두 활용하여 정사영상 및 DSM 자료를 구축함
- 각 영상 획득 시 카메라 각도, 태양 기하, 날씨 정보 등의 세부 사항은 1단계 보고서 내 작성됨

<정사영상 및 DSM 구축 활용 무인기 촬영자료 세부 정보>

분류	촬영 일자	사진 개수	사진 크기	카메라 모델	초점 거리	비행고도정보	확장자
2021 현장조사	2021-09-10~2 021-09-11	263	4608 x 3456	Canon PowerShot ELPH 110 HS	4 mm	약 250 m	JPEG
2022 현장조사	2022-06-24~2 022-06-25	1201	5472 x 3078	DJI EP800	9 mm	약 150~200 m	JPEG



<정사영상 및 DSM 구축 활용 무인기 촬영자료 비행경로>

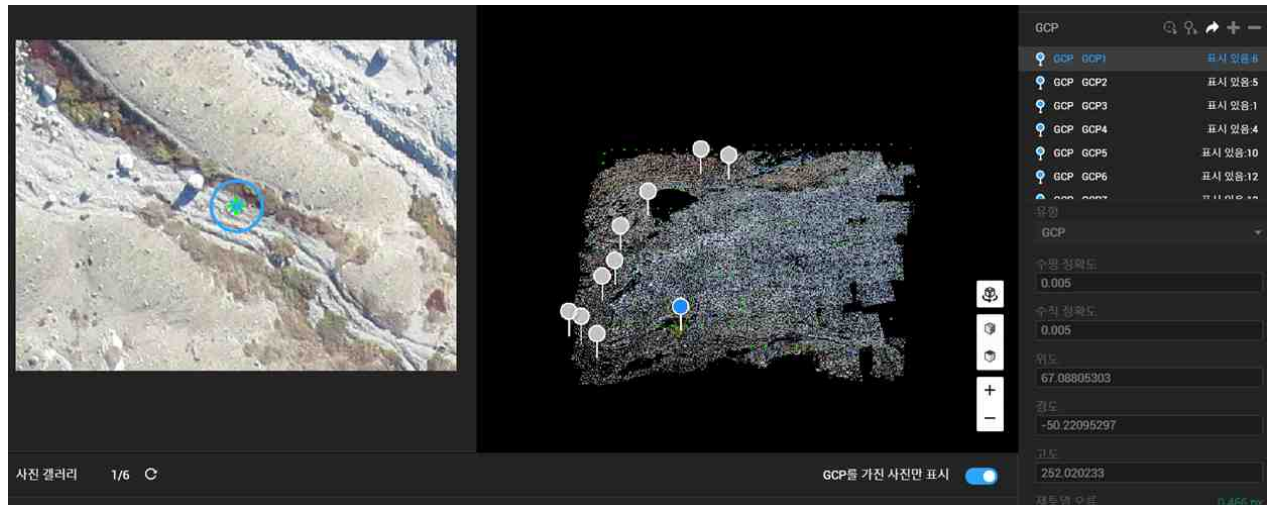
나. 무인기 영상 처리: DSM & 정사영상 구축

- 위 표의 2개의 무인기 사진측량 데이터셋을 활용하여 POS(positioning & orientation system) 사진정보 기반의 정합을 수행하여 정사영상을 제작함
- 2021년 자료의 경우 고정익(Ebee)으로부터 획득한 영상자료를 활용하였으며, 2022년의 경우 회전익(M300)으로 획득한 영상자료를 기반으로 함
- 2021년 및 2022년 무인기 획득자료의 경우 각각 당시의 GNSS 위치정보가 서로 완전히 일치하지 않으므로, 이를 일치시켜 분석을 수행하기 위해 상대기하보정 기반의 co-registration 작업을 수행함

- Co-registration 수행을 위해 2022년 6월 촬영자료 기반의 고해상도 정사영상을 기준 영상으로 하여 육안 기반의 GCP 정보를 추출함
- 추출된 GCP의 세부 정보는 아래와 같음

<2022년 6월 무인기 촬영 자료 기반 정사영상 기준으로부터 추출한 GCP 정보>

Name	Lat.	Long.	X	Y	Height
GCP1	-50.221	67.08805	533844.7	7441408	252.0202
GCP2	-50.2383	67.08607	533094.6	7441177	150.5856
GCP3	-50.2449	67.08798	532805.7	7441387	166.9949
GCP4	-50.2422	67.08758	532923.1	7441344	152.6482
GCP5	-50.2389	67.09126	533062.8	7441756	162.9572
GCP6	-50.2365	67.09274	533163.9	7441922	173.7111
GCP7	-50.2361	67.09617	533175.5	7442304	194.8375
GCP8	-50.2305	67.09979	533414.8	7442711	224.4885
GCP9	-50.2343	67.10371	533243.1	7443146	201.5302
GCP10	-50.2185	67.10489	533928.2	7443287	211.2682
GCP11	-50.2115	67.10383	534234.6	7443172	252.9186
GCP12	-50.2463	67.08848	532742.9	7441442	189.4131



<GCP 기준 상대기하보정 수행 모습 예시>

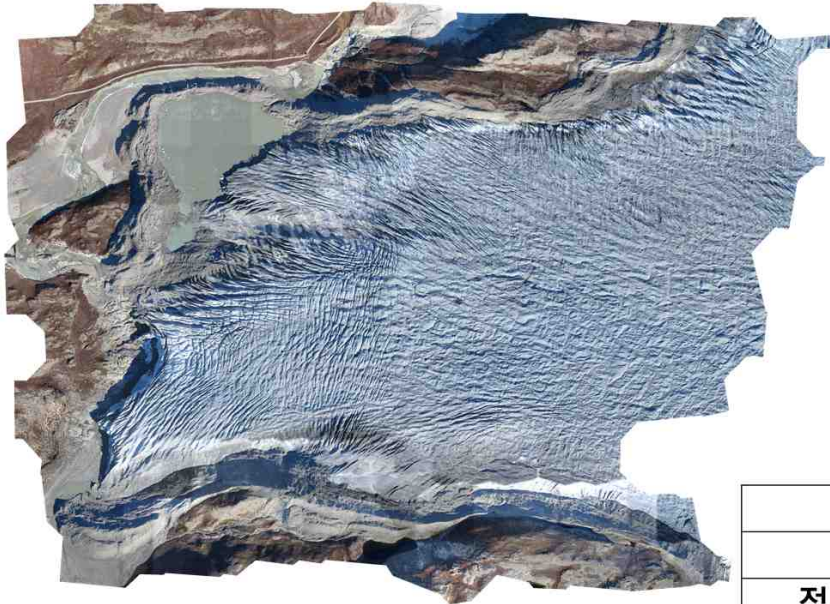
- GCP 정보를 기반으로 2021년 9월 무인기 정사영상 구축 시 상대기하보정 수행하였으며(위 표의 GCP3, GCP9, GCP12는 최종 제외), 이를 기반으로 3차원 포인트 클라우드 제작 및 DSM 구축 수행함
- 각 두 시기의 DSM은 사진측량자료만을 대상으로 구축함
- 2021년 9월 무인기 영상 기반 정사영상 및 DSM 구축 시 수행한 상대기하보정 GCP 기준 XYZ 오차 정보는 아래와 같음
- 최종 구축한 2021년 9월, 2022년 6월 무인기 자료 기반 고해상도 정사영상 및 DSM 품질 보고는 아래 그림과 같음

<GCP 처리 후 오차 정보 개요>

Name	dx (m)	dy (m)	dz (m)
GCP1	0.151724	-0.052684	0.214781
GCP2	0.242726	0.170376	0.118527
GCP4	-0.027763	0.178874	0.287636
GCP5	0.115319	0.012583	0.069449
GCP6	-0.048878	0.104904	-0.167351
GCP7	-0.248856	0.022867	-0.012824
GCP8	0.06495	-0.148928	-0.029458
GCP10	-0.077599	-0.029432	-0.000674
GCP11	0.092532	0.01284	0.035071
RMSE	0.141078	0.10472	0.140636

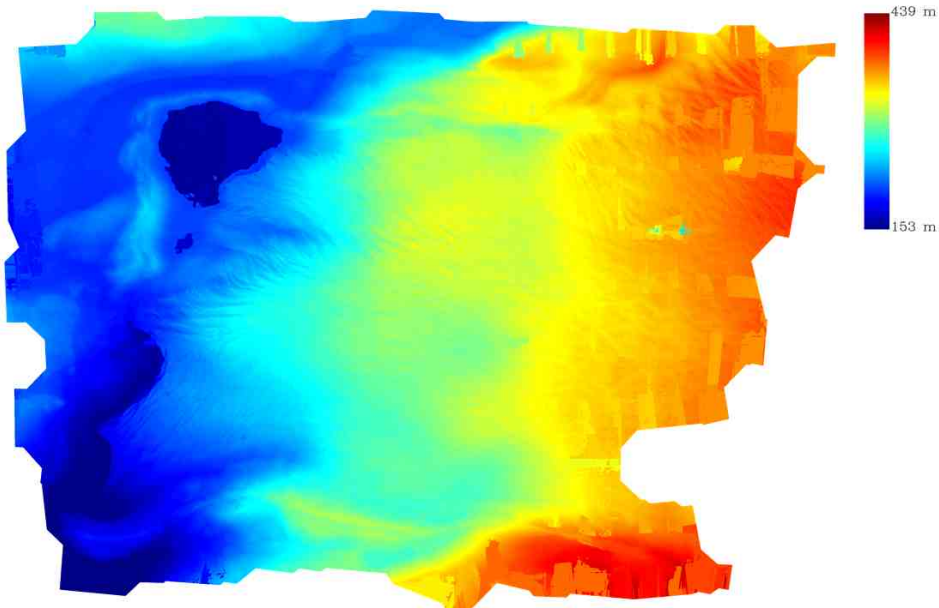


정사영상제작(True color composite)

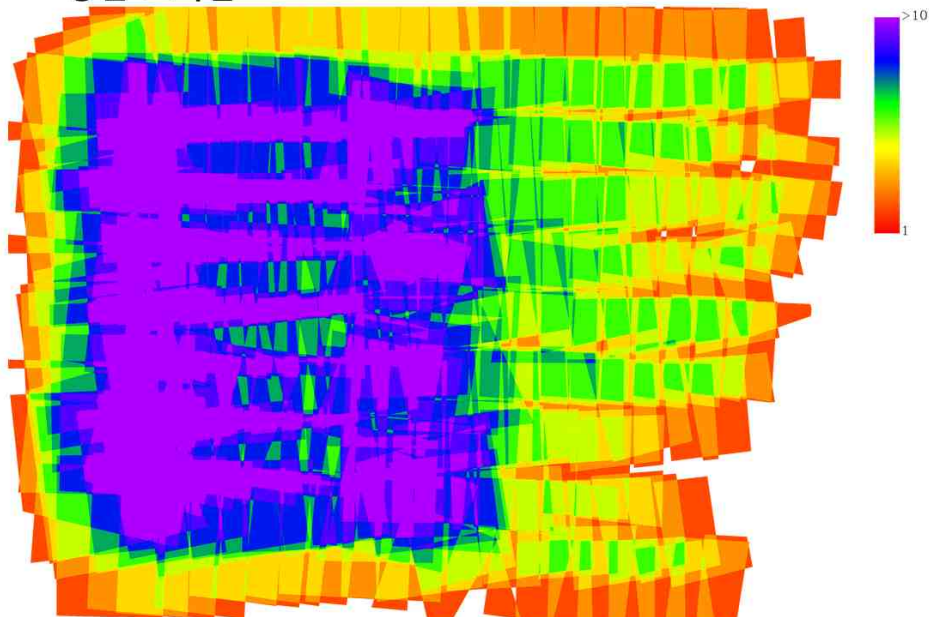


항목	값
GSD	0.117 m
적용 지역	7.197014 km ²

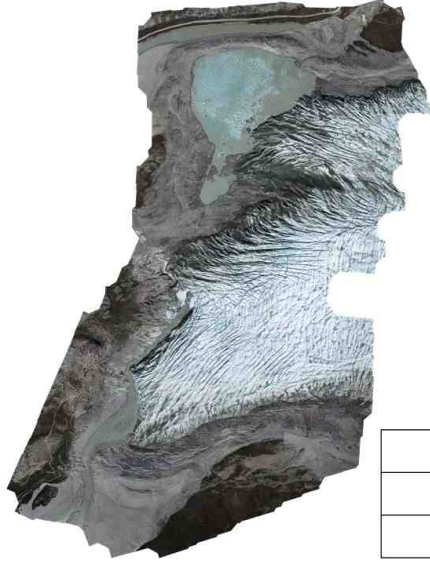
DSM



장면 오버랩

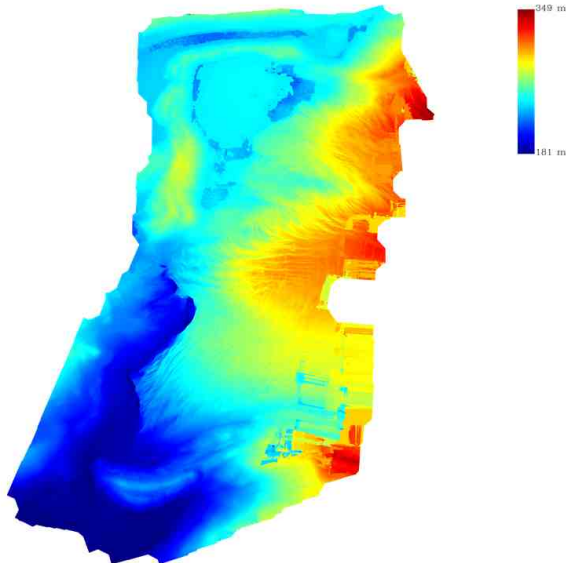


정사영상제작(True color composite)

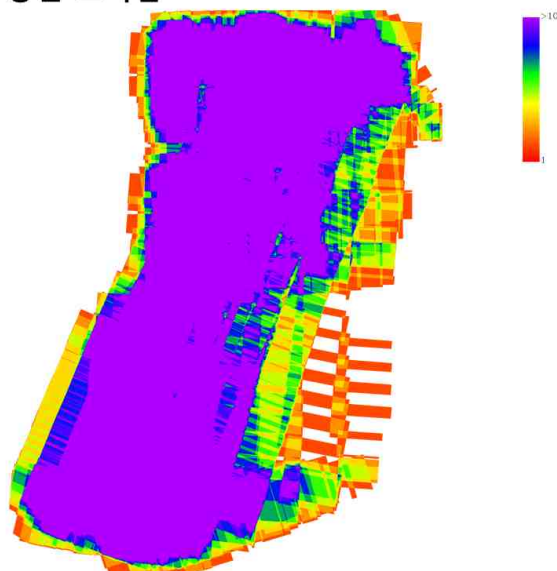


항목	값
GSD	0.042 m
적용 지역	2.676188 km2

DSM

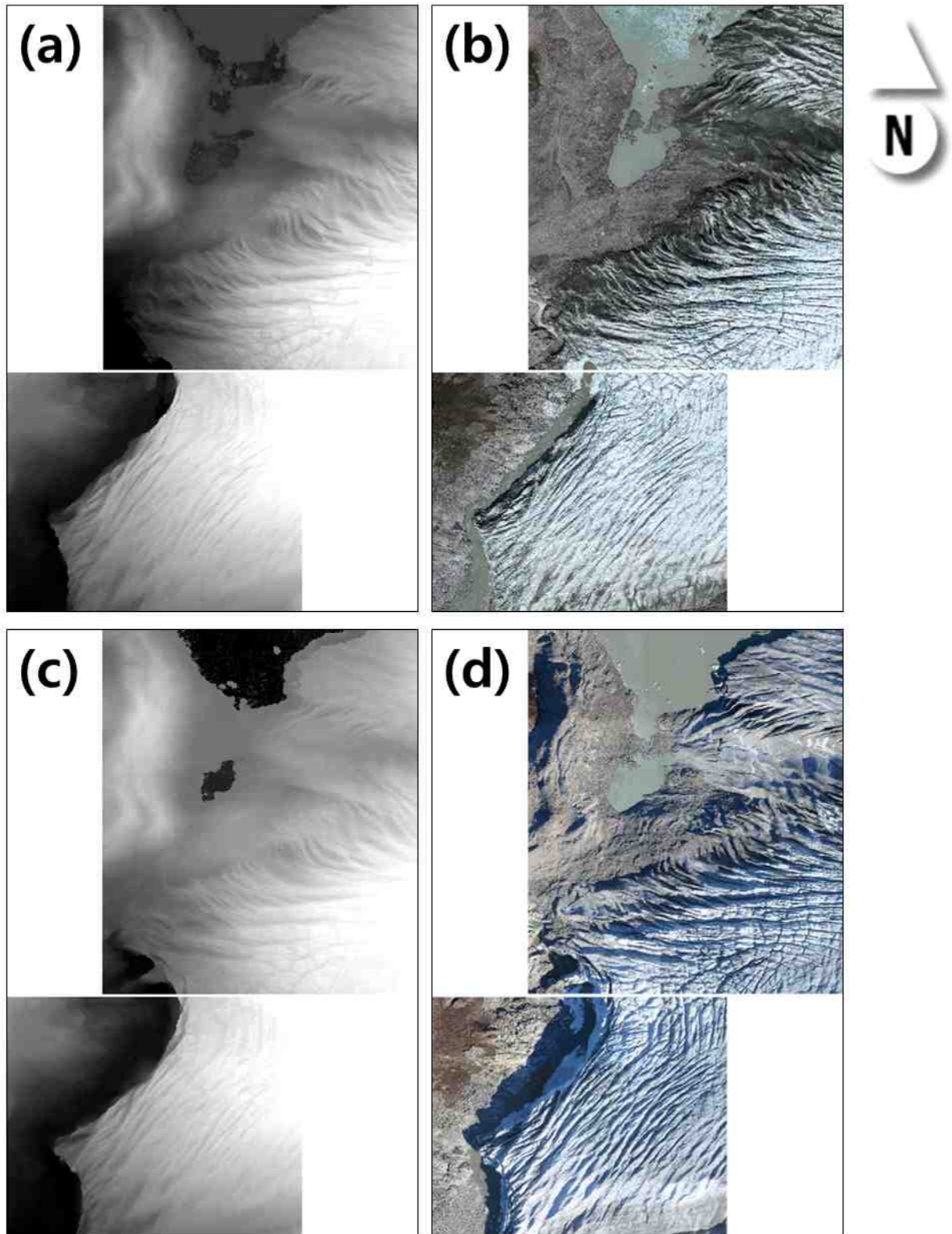


장면 오버랩



<2022년 6월 촬영영상 기반 구축 정사영상 및 DSM 품질 보고>

-
- 각각 구축된 자료는 분석을 위해 관심연구지역(ROI)을 설정하여 Clipping 적용되었으며, 20 cm GSD로 재배열 통일함



<최종 관심연구지역으로 clipping 및 재배열된 무인기 처리 영상: (a), (b) 각각 2022년 6월 무인기 촬영영상 기반 DSM과 정사영상; (c), (d) 각각 2021년 9월 무인기 촬영영상 기반 DSM과 정사영상>

- 무인기 영상 처리는 DJI사의 Terra, ArcGIS Pro, ENVI 5.6를 활용함
- 구축한 무인기 정사영상 및 DSM 자료는 본 연차 연구개발내용을 수행하기 위한 기본 무인기 데이터셋으로 활용함

2. 무인기-인공위성 동시기 데이터셋 구축 및 선별

가. Russell 빙하 일대 KOPMSAT 3 영상자료 선별: 연간 변화 탐지용

- 무인기 영상은 저고도 원격탐사정보 플랫폼에 해당하기 때문에 공간적으로 매우 고해상도 정보를 제공할 수 있음
- 본 연구개발에서는 무인기 추출 정보와 위성 자료의 복합 활용성 평가를 위해 무인기 영상자료와 시간-공간적으로 대응 가능한 고해상도 KOMPSAT 3 위성영상자료를 선별하여 활용함
- 각각 2021년 9월, 2022년 6월 무인기 촬영 영상 시기에 대응되는 KOMPSAT 3 광학 영상 중 날씨(cloud coverage < 1%) 등을 고려하여 선별함
- 선별한 KOMPSAT 3 변화 탐지 수행용 세부 정보는 아래 표와 같음

<연간 전후 변화 탐지 활용 KOMPSAT 3 위성 영상 정보>

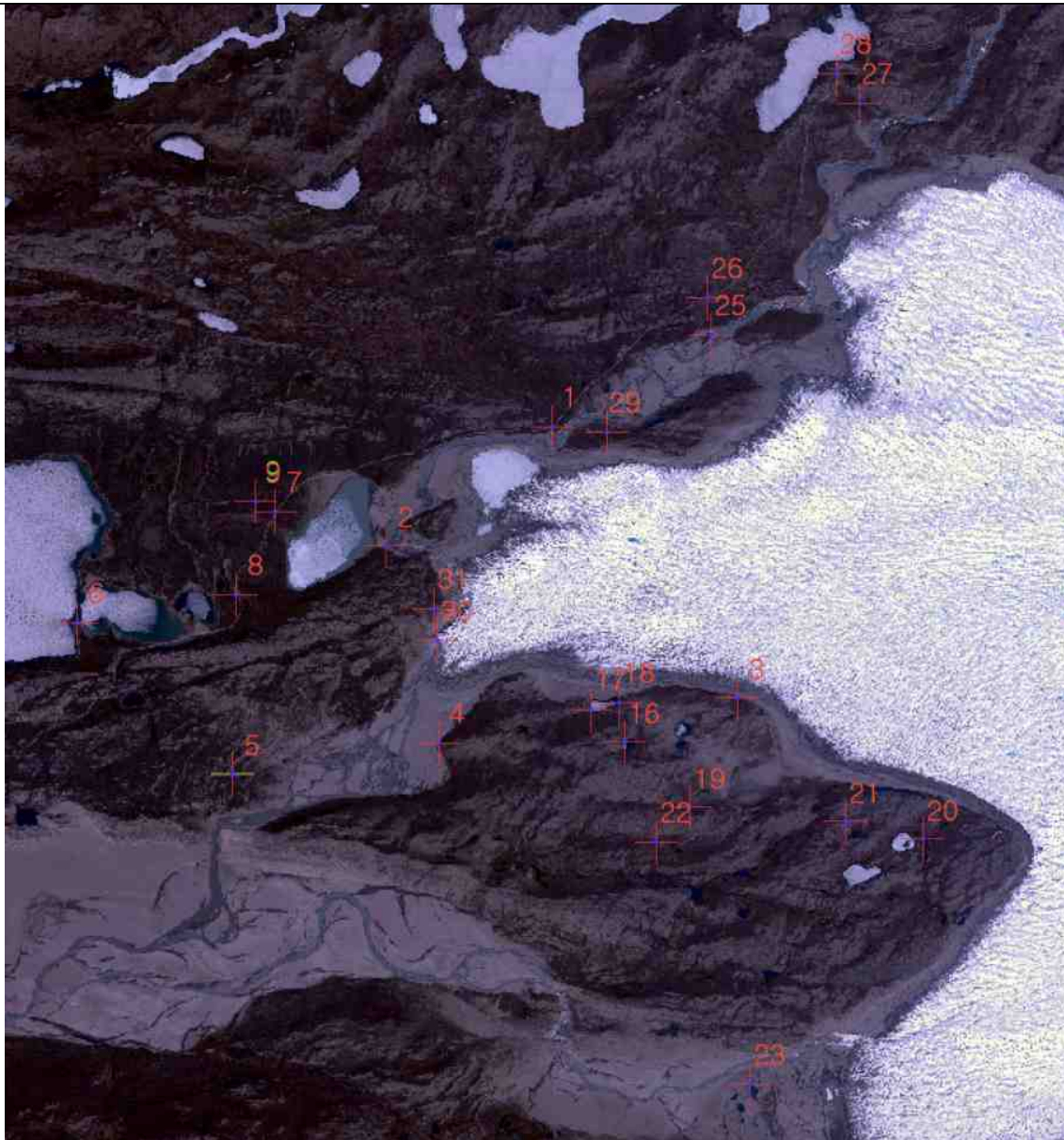
Acquisition date	Pixel size (m)	Level	Band configuration	Projection
2022-06-27 15:45:05	Multispectral: 2.8 Panchromatic: 0.7	1G	RGBN(4 Multispectral)+Pan.	WGS 84 UTM 22N
2021-09-06 15:49:58				

나. Russell 빙하 일대 KOPMSAT 3 영상자료 선별: 빙하 말단 흐름 변이 속도 관측용

- 그린란드 캥가루수아크 Russell 빙하 말단의 후퇴속도 관측을 위해 KOMPSAT(아리랑위성) 3호, 3A의 자료를 선별함
 - 각 위성영상은 계절적 시기를 고려하여 약 한달 간격으로 확보함
 - 시계열 변이를 살펴보기위해 수집한 기간(연)은 2018년부터 2022년에 해당함
 - 총 14개의 KOMPSAT 영상을 수집 선별함
 - 선별된 영상들은 RPC 정보를 기반으로 정사보정 처리가 적용되어있는 Level 1G 영상이지만, 지상기준점이 부족한 극지 특성상 위치 오차가 큰편에 해당함
 - 위치 오차에 대한 보정을 수행하기 위해 기확보한 고해상도 SPOT-6 위성영상을 기준영상으로 GCP 추출을 통하여 상대기하보정 Co-registration을 수행함
 - 각 위성영상마다 러셀빙하를 기준으로 약 30개 내외의 GCP를 통하여 진행하였으며, 최소한의 위치 오차를 가지는 기하보정을 위하여 spline model을 적용하여 변형을 수행함
-

<빙하 말단 흐름 변이 속도 관측을 위해 수집 선별한 자료 세부 정보>

연번	영상취득날짜	위성종류	영상 고유 ID	비고
1	2017.07.21.	SPOT-6	IMG_SPOT6_MS_201707211441309_SEN_584010 9101_R1C1	기준영상 (상대기하보 정)
2	2018.05.15.	K3A	K3A_20180515154052_17329_00690568_L1G	
3	2020.07.14.	K3A	K3A_20200714160714_29283_00077838_L1G	
4	2020.07.30.	K3	K3_20200730145659_43765_22781508_L1G	
5	2020.08.17.	K3	K3_20200817150019_44028_22791508_L1G	
6	2020.09.08.	K3	K3_20200908155532_44350_22781507_L1G	
7	2021.07.21.	K3A	K3A_20210721160802_34905_00033744_L1G	
8	2021.08.01.	K3A	K3A_20210801154508_35071_00003617_L1G	
9	2021.09.19.	K3	K3_20210919155826_49843_22791507_L1G	
10	2021.10.17.	K3	K3_20211017155410_50252_22771507_L1G	
11	2021.11.05.	K3	K3_20211105145847_50529_22801508_L1G	
12	2022.04.30.	K3A	K3A_20220430161722_39182_00048236_L1G	
13	2022.06.07.	K3	K3_20220607160420_53656_22791507_L1G	
14	2022.07.27	K3	K3_20220727151647_54386_22771507_L1G	
15	2022.10.04.	K3	K3_20221004150340_55394_22771507_L1G	



<KOMPSAT 3 영상 내에서 상대기하보정을 위해 추출한 GCP 위치 예시>

<SPOT-6 기준영상과 KOMPSAT 3 영상간 GCP 위치 및 Warping 연결 기준점>

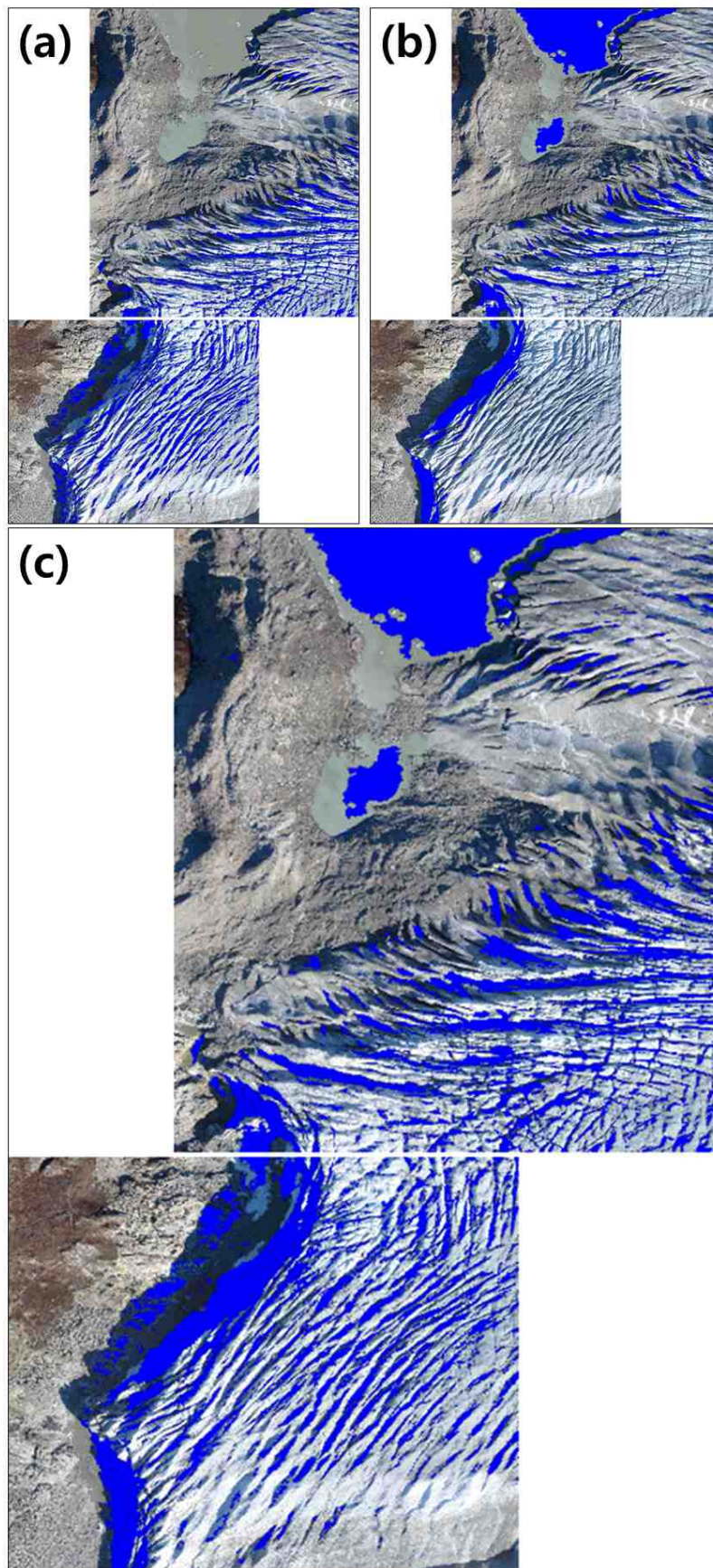
NO.	X Source	Y Source	X Map	Y Map
1	534051.0858	7443301.533	533991.819	7443310.264
2	532821.0866	7442407.125	532755.7873	7442416.491
3	535337.9313	7441298.56	535389.4437	7441280.855
4	533249.4159	7440925.327	533143.7088	7440941.817
5	531702.1109	7440692.4	531603.9939	7440709.345
6	530495.9088	7441830.582	530437.0005	7441840.258
7	531983.147	7442659.209	531919.6623	7442673.234
8	531685.2284	7442041.39	531631.1336	7442052.428
9	531828.1466	7442742.285	531771.2175	7442751.056
10	522621.5826	7438999.15	522573.3829	7439003.905
11	521869.7843	7440736.996	521787.5688	7440740.633
12	522644.8902	7442045.493	522760.7083	7442010.636

13	523497.0402	7443365.05	523565.5724	7443342.551
14	521794.1747	7444685.271	521830.4314	7444671.291
15	527727.9277	7443991.293	527692.6573	7443990.411
16	534475.0731	7440967.136	534541.9331	7440951.52
17	534289.3734	7441192.973	534290.6181	7441195.374
18	534507.1232	7441245.218	534497.7873	7441244.851
19	535000.251	7440475.81	535034.7999	7440461.268
20	536684.0582	7440250.222	536777.0902	7440223.418
21	536072.9326	7440389.107	536195.0057	7440354.123
22	534802.6292	7440197.852	534781.3253	7440198.053
23	535532.2099	7438380.246	535480.3812	7438389.086
24	530665.075	7436300.016	530725.3338	7436281.171
25	535247.0775	7443989.492	535193.0304	7443996.186
26	535191.5149	7444271.97	535164.9625	7444272.874
27	536296.5018	7445735.382	536293.0654	7445730.059
28	536103.4272	7445969.809	536129.5525	7445958.262
29	534436.5523	7443268.556	534403.3898	7443271.74
30	533237.5213	7441689.27	533137.8885	7441706.279
31	533197.8792	7441941.188	533116.3911	7441952.672

3. 시계열 빙하 지형 모델 구축 및 변화 탐지 기법 연구

가. 무인기 구축 자료 기반 연간 변화 탐지

- 각각 2021년 9월 2022년 6월 시기의 무인기 데이터셋(정사영상 및 DSM)을 기반으로 수행함
- 두 시기 간 차이(Image Difference) 요인에 대한 정보로 공간적 변화 요인을 탐지함
- 정사영상 기반의 변화탐지 수행 시 RGB 밴드를 영상 융합하여 활용함
- 영상융합은 Roy et al. (2006)에서 제시하는 RGB 강도 융합 영상 기반 지표 패턴 분석 활용 시 이용한 식을 도입 및 적용함
- 식은 다음과 같음: $Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$ (RGB는 각각 RGB 밴드 영상에 해당함)
- 영상 기반 변화탐지는 변화의 증가와 감소 두 요인에 대한 Class로 구분하여 추출하였으며, Auto-Thresholding을 적용하여 수행함
- Auto-Thresholding 방법 중 유효가능밀도 함수(Probability Density Function)를 적용하여 두 시기 간 이벤트 발생 가능성을 계산하여 분류 추출하는 기법을 적용함
- 정사영상 및 DSM 변화 탐지 결과는 아래와 같음



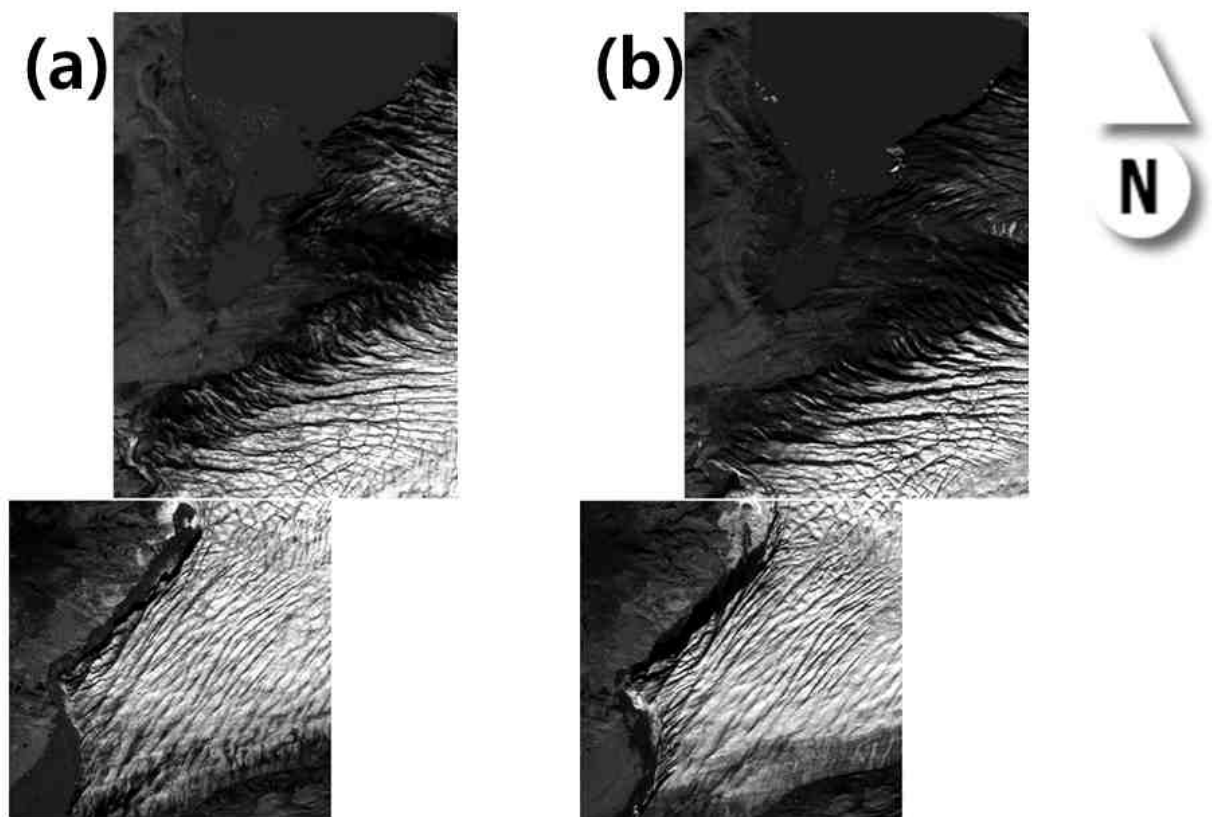
<무인기 자료 기반 변화 탐지 추출 결과(파란색 클래스): (a) 정사영상 기반
 변화 탐지; (b) DSM 기반 변화 탐지; (c) (a)와 (b) 통합 출력 결과;
 배경영상은 2021년 9월 무인기 정사영상에 해당

- 변화 탐지 결과의 분포를 살펴보면 정사영상 기반의 경우 빙하 표면 전체적인 변화를 감지하였고, DMS의 경우 빙벽 붕괴가 존재하는 빙하 말단부쪽과 호수를 따라 집중적으로 변화를 감지함

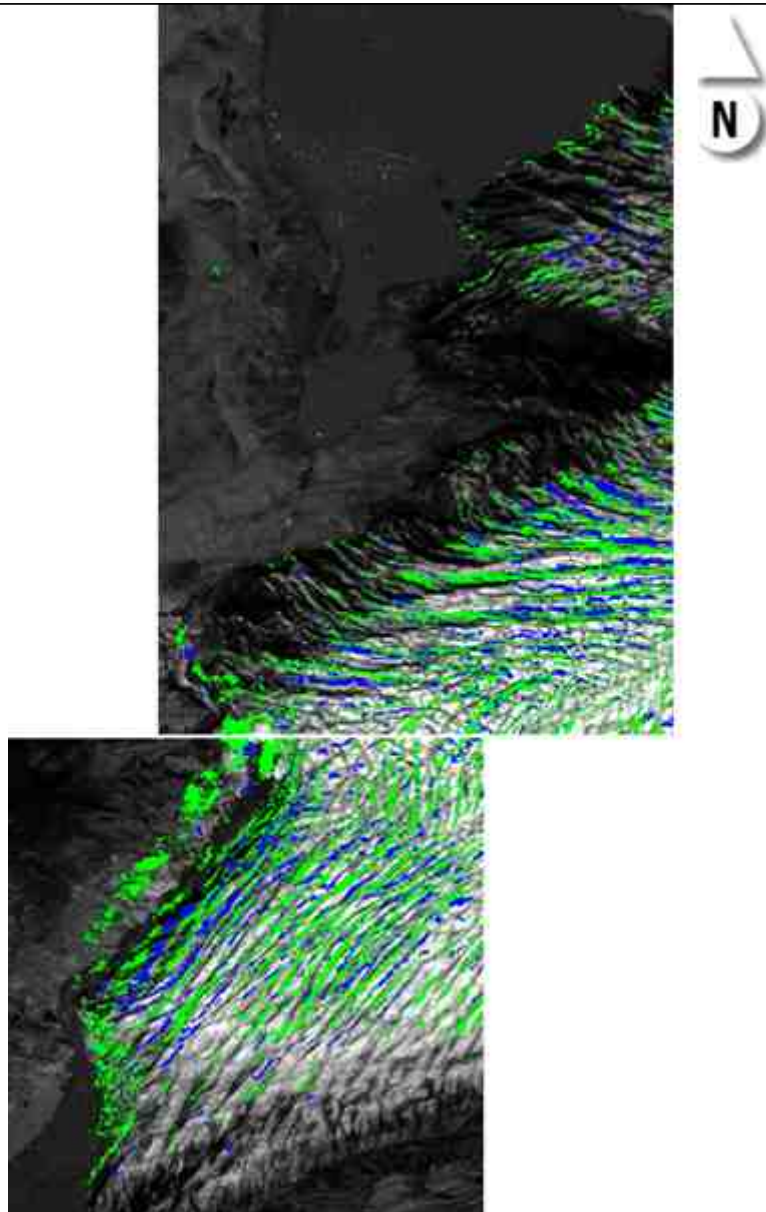
- DSM의 경우 Z 요소, 정사영상의 경우 XY 요소의 변이 감지를 대표함
- 두 자료의 융합 공간 정보를 통해 연간 변이의 분포 정보를 제공할 수 있는 효율성을 확인할 수 있음
- 위 결과는 시기상 6월과 9월 간의 계절적 차이가 존재함
- 같은 하계 시즌이라 해도 6월과 9월 사이의 기온변화(9월 시기: 빙하 일대 다시 얼어붙기 시작)의 편차가 클 수 있는 상황에 해당하므로, 올바른 분석 결과 도출을 위해서는 환경적 요인이 고려되어야 할 필요가 있음
- 하계 동 시기의 자료 누적을 통한 변화 감지의 구축이 요구될 수 있으며, 2단계 2차년도 하계 현장 조사 시 해당 사항을 반영하여 현장 조사 일정 선정 예정(9월)
- 같은 시기라 가정하였을 때, 나타나는 변이양상은 온난화 등의 기온변화요인과의 연관성 분석 자료로써 활용 시 더욱 적절할 것으로 판단됨

나. KOMPSAT 구축 자료 기반 연간 변화 탐지

- KOMPSAT 영상기반의 변화탐지는 무인기 변화탐지 결과와의 비교를 위해서 무인기 자료에 적용하였던 동일한 영상 융합 기법 기반의 변화 탐지를 수행함
- 더불어 전처리의 경우 무인기 영상자료를 기준 자료로 하는 GCP 기반의 co-registration과 GS Pan-sharpening 영상 융합처리를 선 수행하였으며, 3차원 스테레오 기법을 통해 DEM을 각각 구축함
- 융합 적용된 영상의 GSD는 0.7 m 에 해당함



<KOMPSAT 3 융합 영상 관심지역 처리 결과: (a) 2022년 6월 27일 영상; (b) 2021년 9월 6일 영상>



<광학영상기반 변화 탐지 추출 결과녹색 클래스: 무인기 기반
변이 탐지 지역, 파랑 클래스: KOMPSAT 3 기반 변이 탐지
지역>

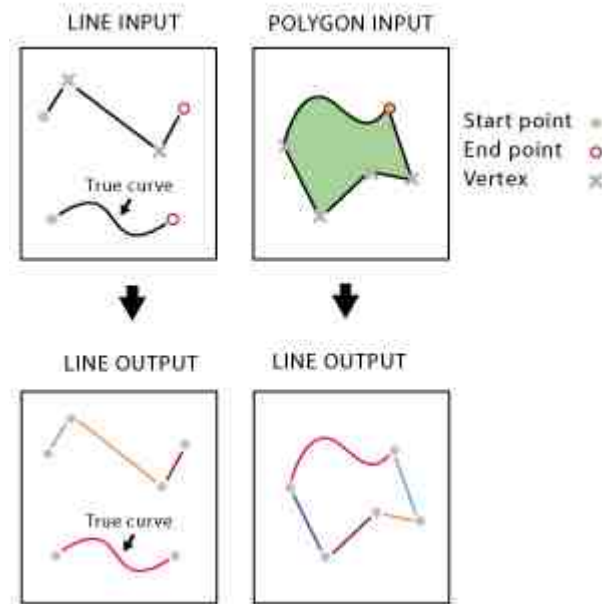
- KOMPSAT 3 영상 기반 변화 탐지 결과는 무인기 정사영상기반(XY요인) 변화탐지 추출 결과와 대응되는 유사한 분포 및 방향성을 보이고 있음
- 무인기의 해상도가 더 높으므로 보다 조밀한 변이 지역에 대한 정보가 포함됨을 확인할 수 있음
- 빙벽부에 대한 변이 관찰에 무인기 자료가 보다 정밀 공간 정보를 탐지한 것으로 판단됨

다. 무인기-인공위성 자료 기반 빙하 표면 방향성 변이 분석

- 두 시기 영상 간 image difference 결과와 더불어 영상으로부터 빙하 표면의 라인 벡터(Line vector)를 추출하여, 빙하 표면 크레바스의 방향성 변이 분석을 수행함
- 위 변이 탐지 결과 도출 시 사용한 융합 영상을 기준으로 라인 벡터를 추출 수행함
- 라인 벡터는 반자동 추출 PCI LINE 알고리즘을 통해 추출함
- 본 파트에서 설정한 라인 추출용 커널 인풋 파라미터는 아래 표로 정리함

Input parameter	Value
Filter radius (pix.)	10
Edge gradient threshold	100
Curve length threshold (pix.)	10
Line fitting error threshold (pix.)	30
Angular difference threshold (deg.)	30
Linking distance threshold (pix.)	100

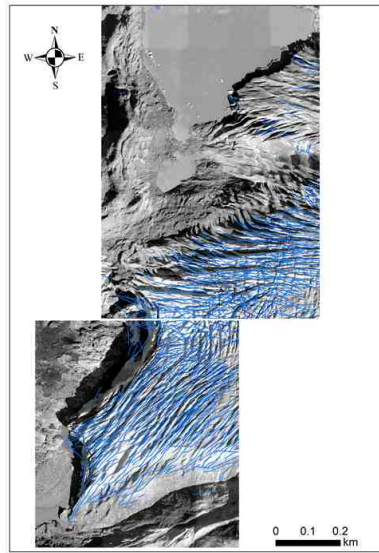
- 추출한 라인 벡터는 Polyline으로 추출하여, 라인의 휘어짐(Vertex)이 있는 지점에 포인트 지점을 형성하여 각 라인 벡터 요소들을 시작-끝점의 형태로 가공함



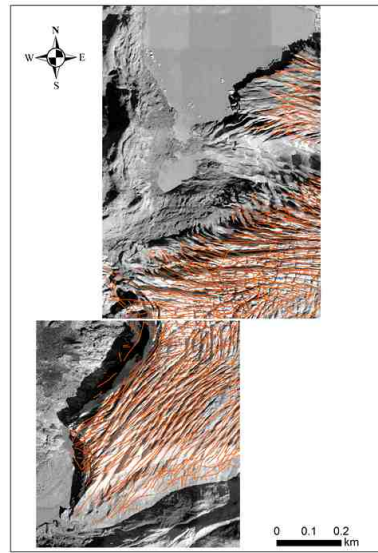
<추출 라인 벡터 가공 예시>

- 가공된 라인의 시작-끝점에 좌표정보를 계산하여 입력 후 각각의 라인 요인들이 좌표계 (WGS84 UTM 22N) 내에서 놓여있는 방향을 합산하여 종합적 방향성 분석을 수행함
- 방향성은 로즈다이어그램을 활용하여 도식함
- 로즈다이어그램 도식 시 각 라인이 가지고 있는 360도 방향의 빈도수/평균 방향성분 등의 기준으로 출력하여 분석함

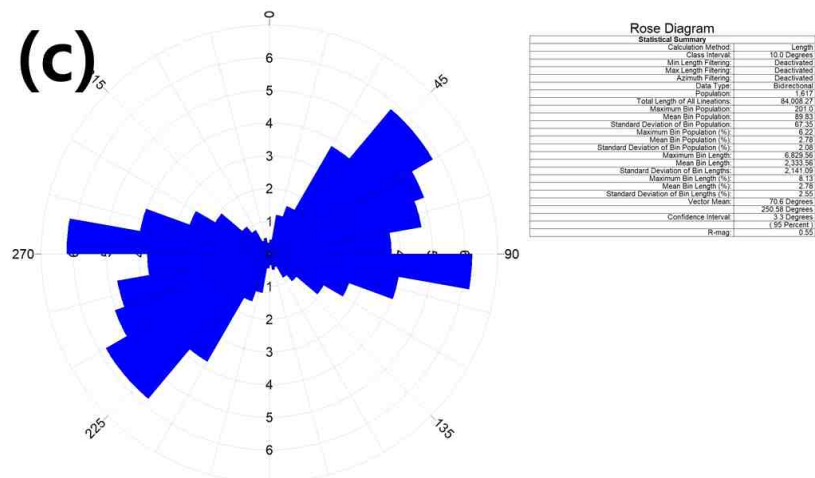
(a)



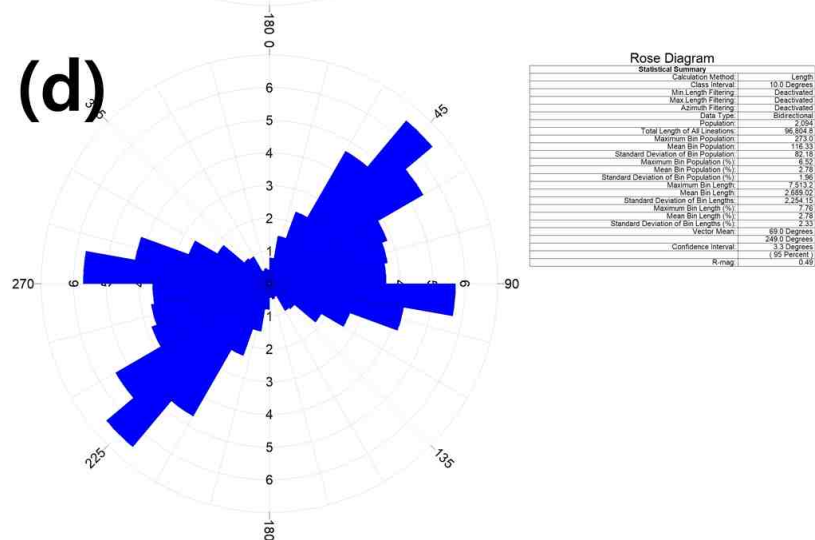
(b)



(c)

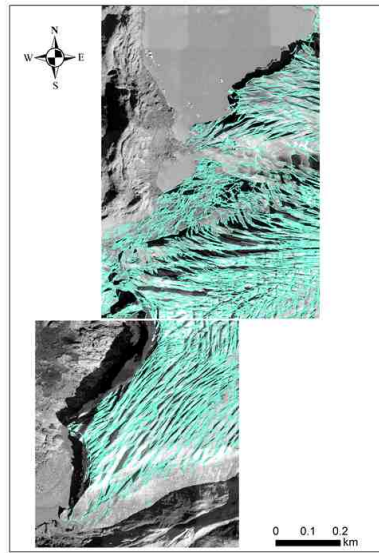


(d)

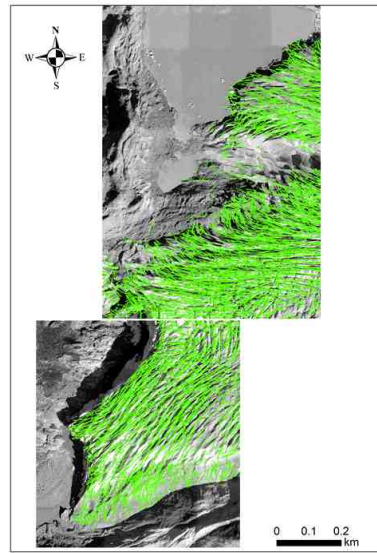


<LINE 알고리즘 추출 라인 벡터 및 방향성 로즈다이어그램: (a) KOMPSAT 3 (2021-09-06) 영상으로부터 추출된 라인 벡터 분포 (b) KOMPSAT 3 (2022-06-27) 영상으로부터 추출된 라인 벡터 분포 (c) 와 (d) (a), (b) 라인 벡터 성분의 빈도 기준 방향성>

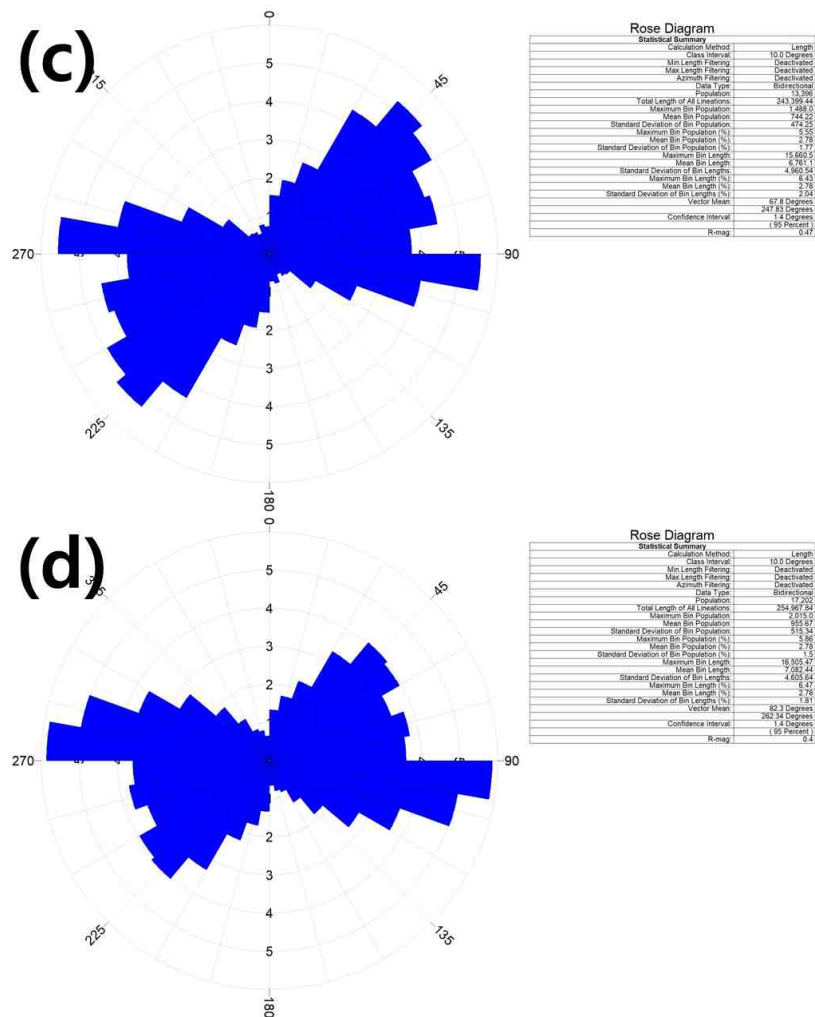
(a)



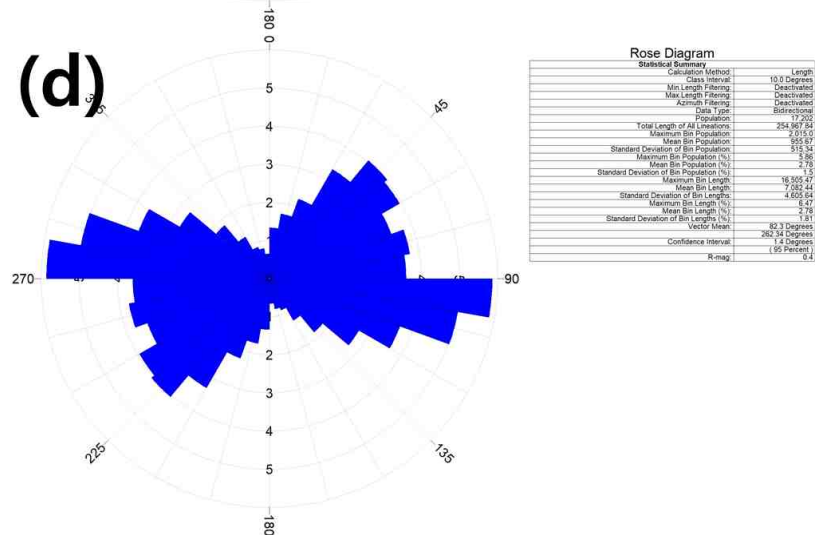
(b)



(c)



(d)



<LINE 알고리즘 추출 라인 벡터 및 방향성 로즈다이어그램: (a) 2021-09 시기 촬영 무인기 영상으로부터 추출된 라인 벡터 분포 (b) 2022-06 시기 촬영 무인기 영상으로부터 추출된 라인 벡터 분포 (c) 와 (d) (a), (b) 라인 벡터 성분의 빈도 기준 방향성>

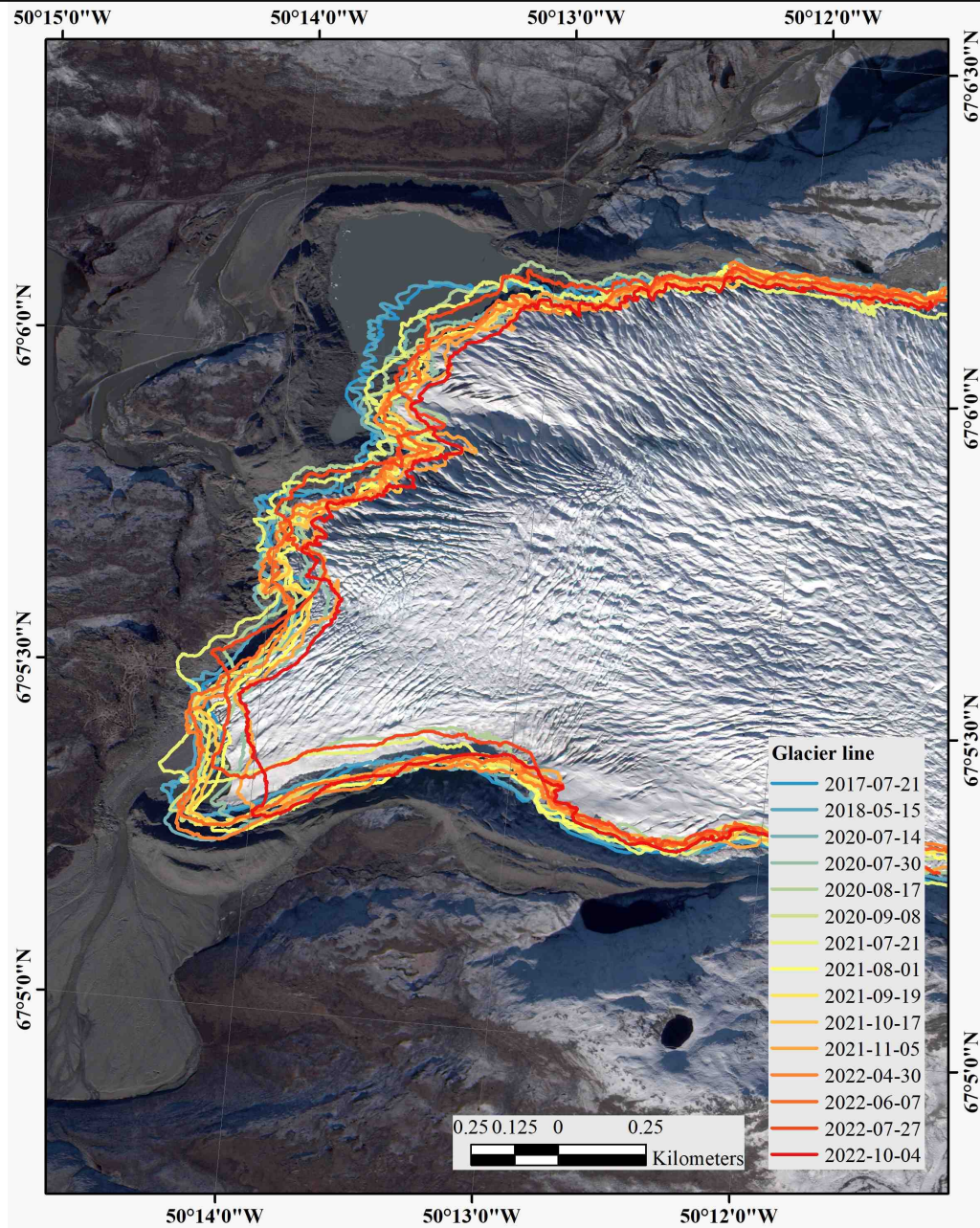
방향성은 각각 $70.6(250.58)^{\circ}$ 와 $69.0(249.0)^{\circ}$ 로 분석되었으며, 약 2° 의 전후 평균 방향성 차이를 보였음

- 빈도수 기준으로 $45(225)^{\circ}$ 와 $90(270)^{\circ}$ 의 성분이 가장 빈번히 나타났음
- 무인기 영상으로부터 추출된 라인 벡터의 평균 방향성은 2021-09 시기가 $62.8(247.83)^{\circ}$ 로 나타났으며, 2022-06 시기에 $82.3(262.34)^{\circ}$ 로 약 17.5° 의 전후 평균 방향성 차이를 보임
- 추출된 라인의 분포를 살펴보았을 때, 위성 영상보다 조밀한 라인 벡터 성분의 밀도를 확인할 수 있으며, 더 높은 공간해상도에서 더 작은 라인 벡터 성분들까지 추출된 영향으로 반영된 차이임을 추정할 수 있음
- 무인기 영상에서도 빈도수 기준으로 $45(225)^{\circ}$ 와 $90(270)^{\circ}$ 의 성분이 가장 빈번히 나타나는 요인으로 확인되었으며, 이는 인공위성 결과와 대응되는 유사성에 해당함

4. 빙하 흐름 속도 산출 기법 연구

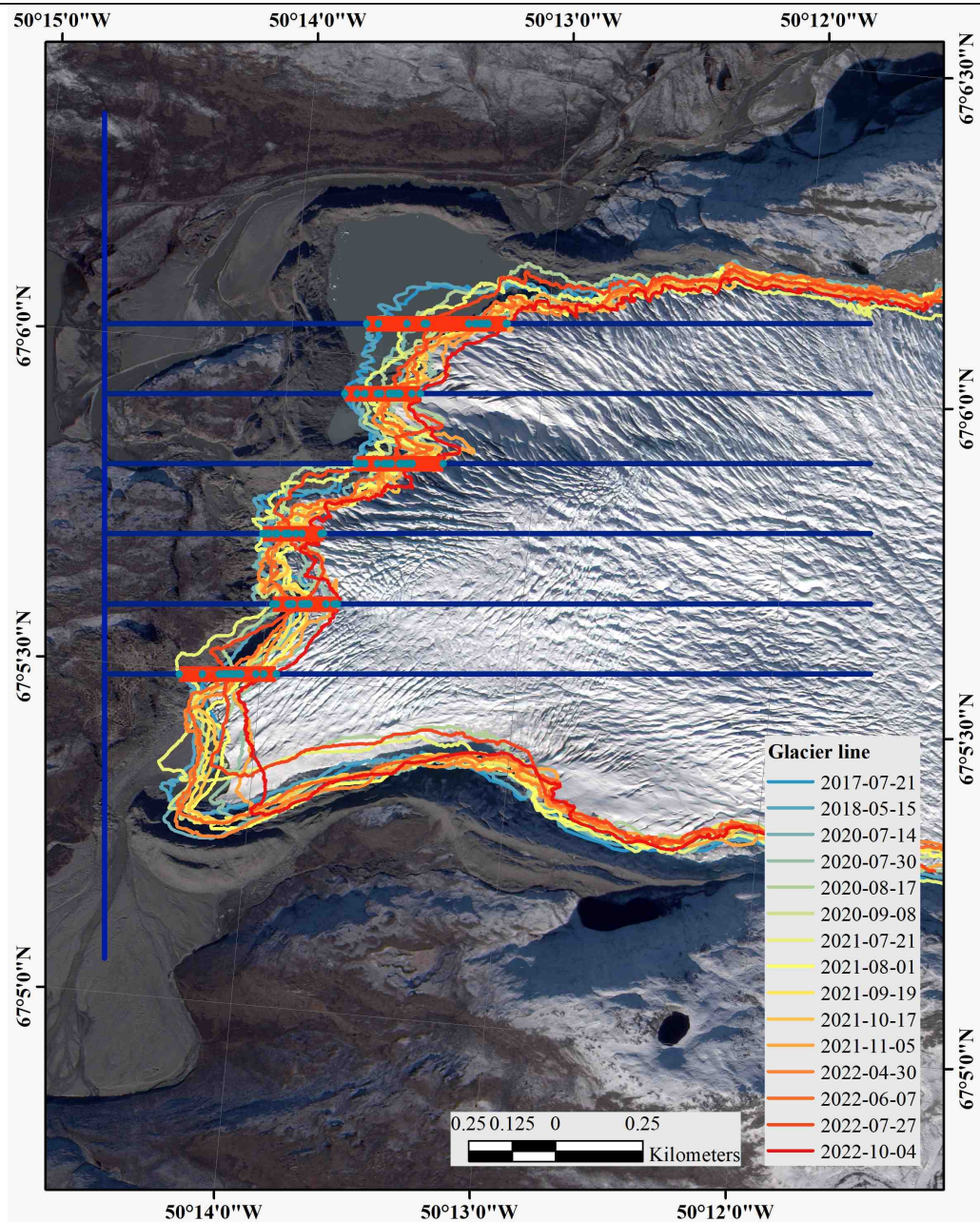
가. Polyline (폴리라인) 벡터 추출

- 두 시기의 연간 무인기 정사영상 자료를 기반으로 흐름속도를 산출함
 - Co-registration된 영상들을 이용하여 빙하 말단 부분의 빙하선을 기준으로 폴리라인 벡터를 추출함
 - 추출은 육안 기반으로 매뉴얼 디지털라이징을 통해 수행하였음
 - 지표-빙하를 구분하는 분류 알고리즘은 다양하게 존재하지만 해당 연구지역은 빙하에 블랙카본 및 토양이 다량 분포하고 있어서 정확한 분류(구분)에 어려움이 있을 수 있으며, 하계시기에도 눈이 오는 등 동일한 기준에서 다시기의 연구지역 지표 대상들의 분광 편차 발생으로 인한 분류 오차가 커질 수 있음
 - 빙하 말단 부분의 경계를 추출한 결과, 2017년부터 2022년까지 약 5년간 빙하는 전체적으로 후퇴한 양상을 보여주고 있었으며, 위치에 따라서 약 200 m 이상 후퇴한 부분도 확인됨
-



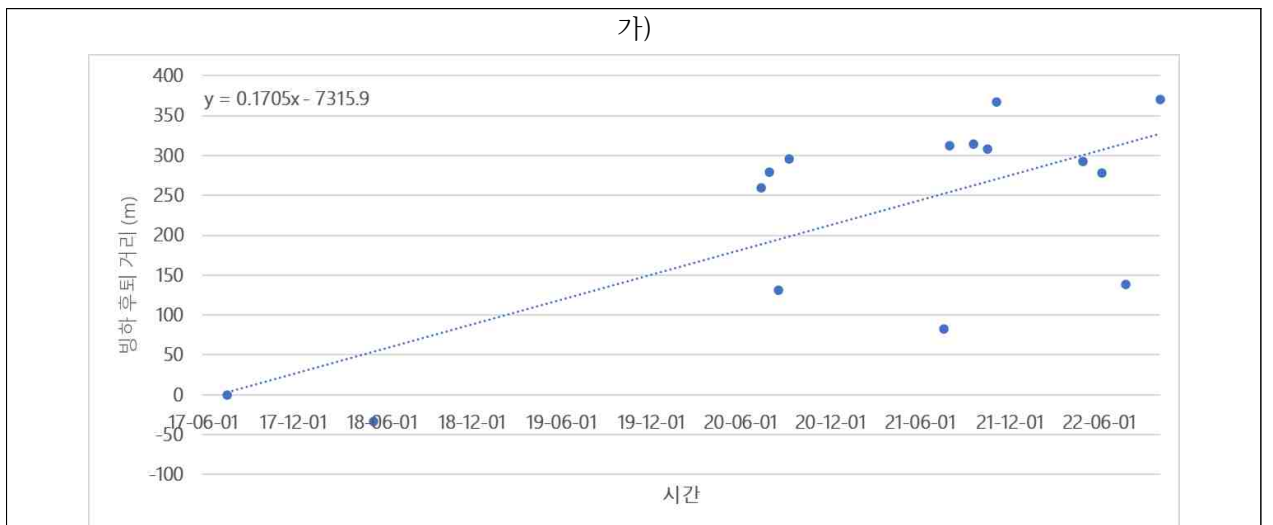
<그린란드 러셀빙하 빙하 말단선 폴리라인 벡터 추출 결과>

- 빙하 말단 부분 변화에 대한 분석은 해안선 변동을 분석하는 시스템인 UGCS의 DSAS(Digital shoreline analysis system)를 기반으로 수행함
- 빙하 후퇴 방향과 유사한 Baseline을 구성하고 일정한 간격으로 위치를 선정하여 교차하는 지점의 거리를 통하여 연간 변화율을 계산함
- 여러 측선을 사용하는 이유는 위치마다 후퇴 정도와 속도가 다를 것을 고려한 결과에 해당함

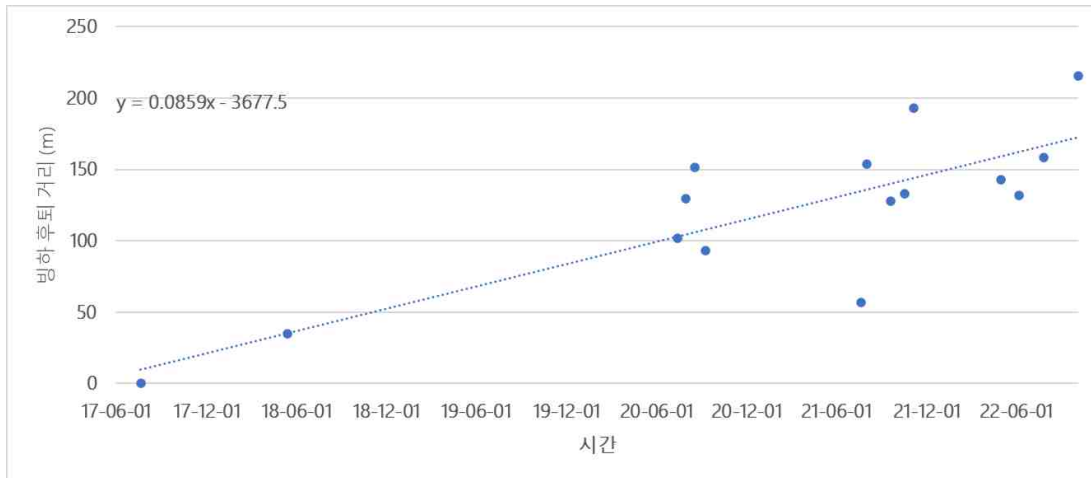


<DSAS 기준 측선>

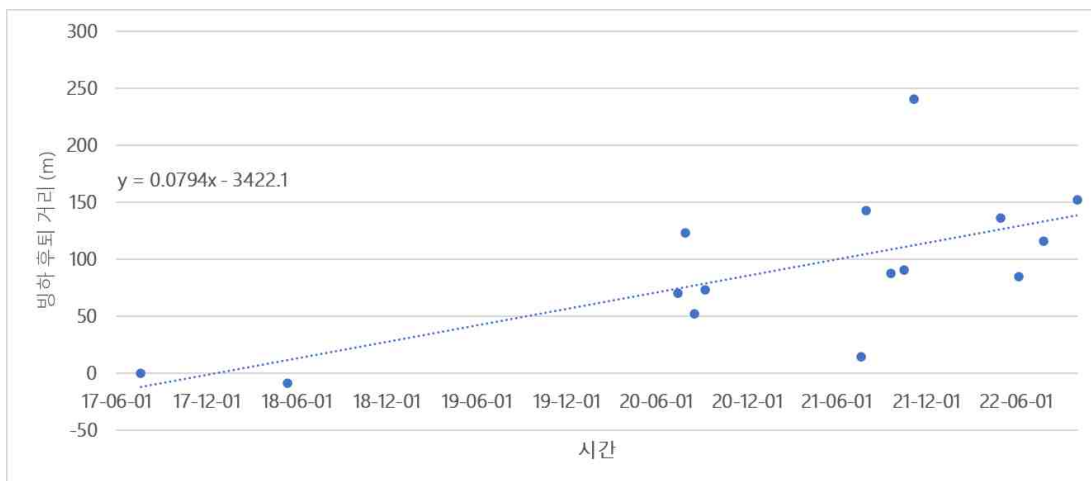
<러셀 빙하 말단 빙하선 변화 관측 결과: 2017년 SPOT-6영상에서 획득한 빙하 말단에서부터의 거리를 나타내며, DSAS 북쪽 측선부터 가)~바) 순서로 정렬>



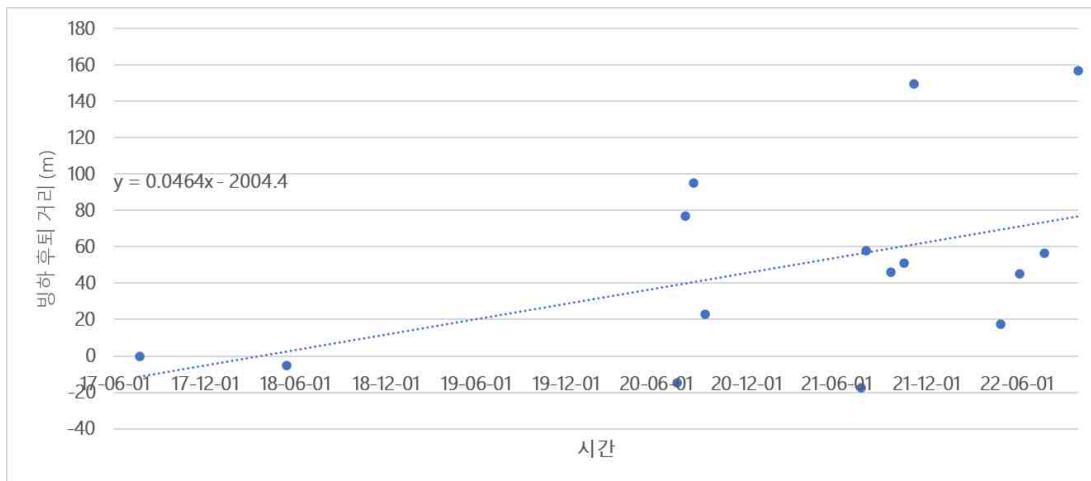
나)



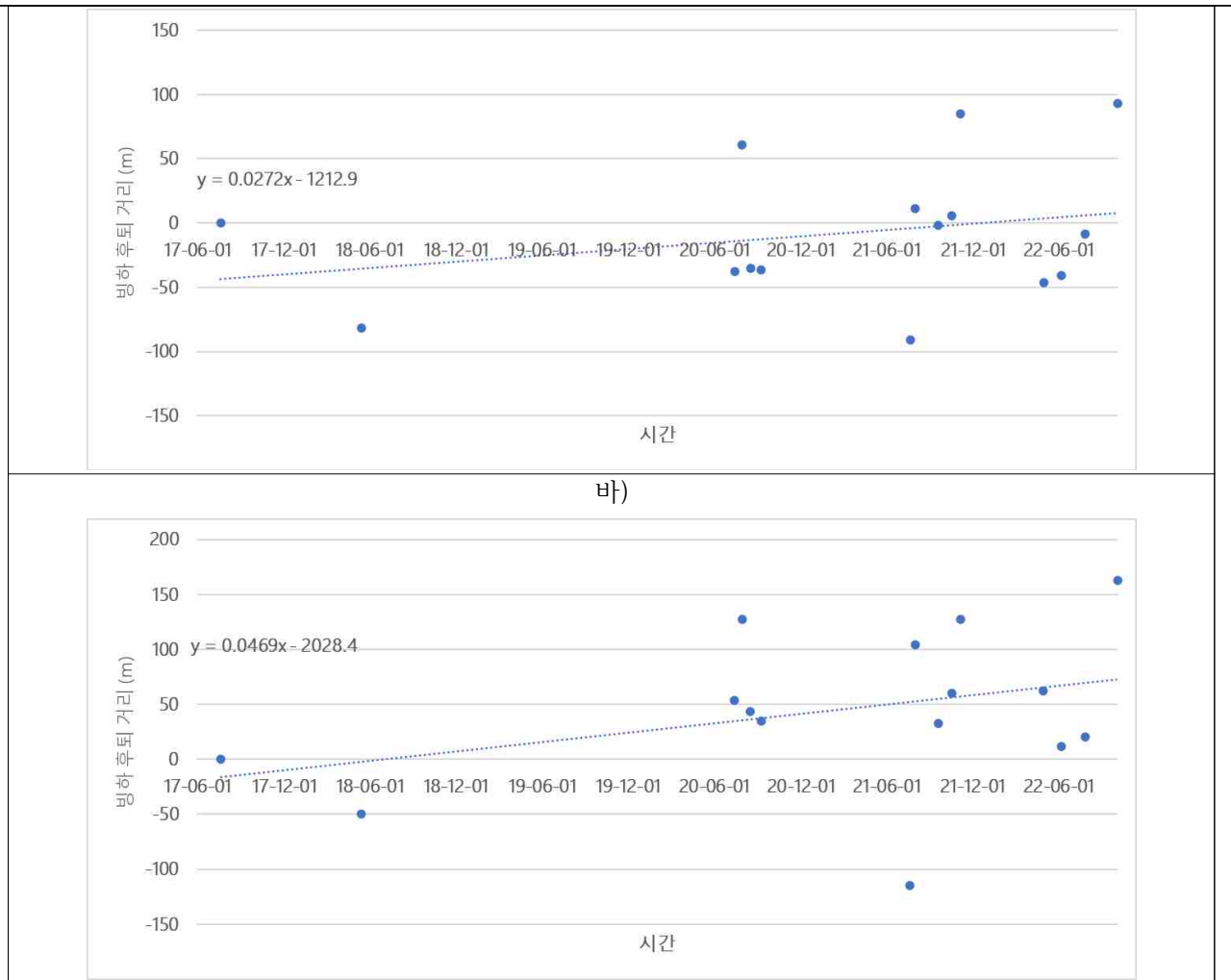
다)



라)



마)



- 2017년 SPOT-6에서 획득한 러셀빙하 말단 부분에서부터 이후 구축한 위성영상에서 구한 말단 부분의 경계의 변화를 파악함
- 위 표에서 빙하 말단 부분 주변의 상태에 따라 각 위치 마다 연간 변화율에 차이를 보임
- 가) 측선 위치에서 연간 약 62m씩 후퇴하고 있으며, 가장 아래쪽의 바) 측선에서 연간 약 17m씩 후퇴하고 있음
- 가) 지점의 영역은 향후 기후변화영향에 따라 가장 빠른 속도로 후퇴 양상이 보여질 수 있는 지역으로 예상됨

5. 무인기-인공위성 빙하 정보 기반 융합 및 검증 적용 가능성 평가

가. 변화 탐지 및 빙하 흐름 속도 산출 기법 연구 기반 평가

- 위성 및 무인기 동시기 자료를 통해 탐지한 변이 지역의 분포를 통해 공간적 변이 정보에 대해 획득이 가능할 것으로 판단됨
- 특히 무인기 자료의 경우 빙벽 지역에서의 변이에 대해 민감하게 탐지하였으며, 빙하표면에서 보다 더 조밀한 변이 공간정보를 제공할 수 있었음
- 위성-무인기 자료를 복합적으로 활용하여 융합된 정보로부터 변이 방향성 등에 대한 탐지 확장이 가능할 것으로 판단됨
- 이러한 정보의 제공은 장기적 모니터링을 통해 변이량을 산정할 수 있으며, 변이의 패턴과 기후변화와의 연관성을 확인해 볼 수 있는 자료로써 확장 가능성이 있을 것으로 판단됨
- 추후 무인기 DSM 자료와 KOMPSAT 3 광학영상 혹은 KOMPSAT 5 SAR 영상자료 기반의 DEM 정보와 복합 활용한 Z 요인의 변이 추세에 대해 실험할 필요가 있을 것으로 사료 됨
- SAR 위성 영상 기반의 DEM 제작은 날씨와 상관없이 높은 시간 해상도와 정확성을 겸비하여 획득할 수 있다는 큰 장점을 제공하지만, 레이더 정보 특성상 반사되어 돌아오는 신호가 지표 대상

의 물성에 따라 크게 달라질 수 있음

- 다소 빙하 혹은 물이 함께 분포할 수 있는 곳에서 단점을 가질 수 있으므로, 보고자 하는 대상에 따라 광학 영상 기반의 사진측량으로부터 획득한 3차원 수치표면/표고모델의 구축이 복합적으로 활용될 필요가 있음
- 향후 XYZ 요인에 대한 변이를 탐지하고 각각 분리하여 세분화된 공간정보 제공이 가능할 것으로 판단됨
- 이러한 공간 정보 제공은 3차원 변이 패턴을 규정하는 데 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단됨
- 본 연구개발 내용을 통해 위성 자료가 제공하는 높은 시간 해상도와 무인기 자료가 제공할 수 있는 높은 공간해상도 정보의 상호보완적 활용을 통해 정밀하고 유용한 공간정보제공의 효율성을 높일 수 있을 것으로 평가됨
- 위성 자료 기반의 빙하 말단 변이 패턴을 통해 확보한 연간 속도 산출 기법 연구 결과는 기후 변화요인의 시계열적 변화 패턴과 연관성을 보일 가능성이 큼
- 남극의 경우 ice-front 선의 후퇴 분석을 통해 기후요인의 영향력과 관련된 연구들이 많이 발표된 바 있음
- 지속적인 시계열 무인기 및 위성 자료 기반의 후퇴속도 등의 빙하 속도 산출 결과를 생산한다면, 지속되는 지구온난화 현상에 따른 반응 특성 중 하나의 요인으로 규명될 수 있을 것으로 판단됨
- 위성 자료로 산출한 시계열 후퇴 속도 분석의 검증용으로써 무인기 자료가 활용된다면, 연구 신뢰성을 향상시키는데 효율적으로 적용될 수 있음
- 본 연구개발 결과보다 더 조밀한 시계열 위성 자료 기반의 빙하 말단 변이 특성 공간 정보를 확보하고, 차년도 연구개발에서 무인기 자료의 복합활용을 시도하고자 함
- 위성-무인기 복합활용에 있어 가장 고려되어야 하는 요인 중 하나는 같은 위치로의 영상 간 등록(co-registration)에 대한 부분이 될 수 있음
- 이를 해결하기 위해 공통으로 활용할 수 있는 지상기준점의(GCPs) 확보가 매우 중요한 상황임
- 정밀 측량 자료 기반의 다수의 지상기준점을 확보하고, 이를 위성-무인기 자료 모두 적용하여 공간적으로 통일된 정보를 제공할 수 있도록 현장에서 반영되어야 할 것으로 사료됨
- 방향성 변이 탐지 결과로부터 빙하 표면에서의 방향성 요인의 추출 및 위성자료와의 복합활용 가능성이 매우 높을 수 있음을 확인할 수 있었음
- 특히 빙하표면의 방향성 변이의 시계열 분석에 용이한 위성자료의 검증자료로써 무인기 자료가 적용되었을 때, 빙하 표면 크레바스의 진화와 움직임을 규명하는데 연구적 가치가 있을 것으로 판단됨
- 방향요인추출에 있어서 무인기 정보가 매우 정밀한 방향 요인의 추출에 효율적일 수 있음을 확인할 수 있었으며, 위성영상과도 공통적으로 주요 방향 빈도 요인에 대해 추정하는 효율성을 보임
- 다종 고도 원격탐사 플랫폼 공간정보의 융복합 활용은 전세계에서 많이 시도되고 있으며, 무인기로부터 획득한 고해상도 정사영상으로부터 GCP를 확보하여 위성 광학/SAR 영상 자료를 보정하는 보다 많은 시도 및 검증이 요구됨
- 본 연구개발에서 무인기 영상으로부터 GCP를 확보하여 위성 광학영상자료의 상대기하보정을 전처리로 수행하였으며, 추후 위성 DEM 자료의 보정을 위해서도 활용 가능성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단됨

V. 2단계 2차년도 연구수행내용 및 결과

1. 그린란드 현장 조사

가. 그린란드 현장 조사

- 2023-09-05~2023-09-14 기간 동안 그린란드 현장 조사 기반 무인기 영상자료를 획득함
 - 각 회전익-고정익 무인기 비행 촬영을 수행하였으며, 활용 무인기 및 센서(라이다, RGB 카메라)의 사양 정보는 아래와 같음
-

- 고정익 기체의 경우 2021년-2022년 현장조사에서 활용한 바 있는 동일 기체 및 센서를 계속 활용함
- 회전익 기체의 경우 2022년 현장조사에서 활용한 바 있는 동일 기체 및 센서를 계속 활용하였으며, 추가로 P1 고정밀사진측량센서를 적용 활용함

<활용 회전익 무인기 및 센서 사양 정보(표)>

Model	DJI matrice 300 RTK	DJI L1	DJI P1	DJI DRTK-2
				
Specification	RTK-aircraft Unfolded, propellers excluded, 810×670×430 mm (L×W×H) Approx. 3.6 kg (without batteries) Operation frequency 2.4000-2.4835 GHz 5.725-5.850 GHz RTK positioning accuracy: When RTK enabled and fixed 1 cm+1 ppm(Horizontal) 15 cm + 1 ppm (Vertical) Wind resist.: 12 m/s (max.) Flight time: 55 min (max.) GNSS:	LiDAR+RGB camera sensor, Zenmuse L1 Dimension: 152×110×169 mm Weight: 930±10 g System accuracy: Horizontal: 10cm@50m Vertical: 5 cm@50 m Point rate: Single return: max. 240,000 pts/s Multiple return: max. 480,000 pts/s System accuracy: Horizontal: 10cm@50m Vertical: 5 cm@50 m Ranging accuracy: 3 cm @ 100 m RGB mapping camera photo size: 5472×3078 (16:9)	Photogrammetry sensor, ZENMUSE P1 (RGB) (Smart oblique capture available) Dimension: 198×166×129 mm Weight: Approx. 800 g Absolute accuracy: Horizontal: 3 cm Vertical: 5 cm Sensor size: 35.9×24 mm (Full frame) Effective Pixels: 45MP Pixel size: 4.4 μm Photo size: 3:2 (8192×5460)	GNSS receiver Simultaneously receive: GPS: L1 C/A, L2, L5 BEIDOU: B1, B2, B3 GLONASS: F1, F2 Galileo: E1, E5A, E5B Single Point Horizontal: 1.5 m(RMS) Vertical: 3.0 m(RMS) RTK Horizontal: 1 cm+ 1 ppm(RMS) Vertical: 2 cm+ 1 ppm(RMS)

	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo	4864×3648 (4:3)		
	Vision system: Obstacle sensing with FOV camera			

<활용 고정익 무인기 및 센서 사양 정보(표)>

	Ebee	Digital camera (sensor)
Model		 
Specification	Width: 96 cm; Height: 6 cm; Length: 40 cm; Weight: 0.67 (inc. batt. and camera); Speed: 65 km/h Full duplex 2.4-GHz wireless communication for telemetry and data logging (range of 3 km); Backup 2.4-GHz remote control (range of 1 km) 1800-mAh lithium-polymer battery, 45 minutes of flight Fully autonomous navigation including take-off and landing and automatic control of the on-board camera Included software: eMotion 3 Automatic 3D flight planning: Incl. in eMotion 3 Cruise speed: 40-90 km/h (11-25 m/s) Max. flight time: 55 minutes Max. flight range: 33 km Nominal coverage at 120m: 200ha Nominal coverage at 2,000m: 9.3 km² Landing: Automatic, linear with ~5 m (16.4 ft) accuracy	DSC-WX220 digital compact camera (rgb photo) or Parrot Sequoia plus (multispectral camera, 4 channels) Parrot Sequoia Specs Multispectral sensor - 4-band RGB resolution - 16 MP, 4,608 x 3,456 px. Single-band resolution - 1.2 MP, 1,280 x 960 px Multispectral wavelengths Green (550nm ± 40nm) Red (660nm ± 40nm) Red edge (735nm ± 10nm) Near infrared (790nm ± 40nm) Single-band shutter - Global RGB shutter - Rolling RGB FOV HFOV: 64° VFOV: 50° DFOV: 74° Single-band FOV HFOV: 62° VFOV: 49° DFOV: 74°

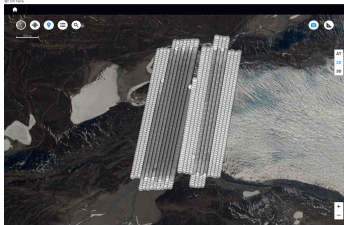
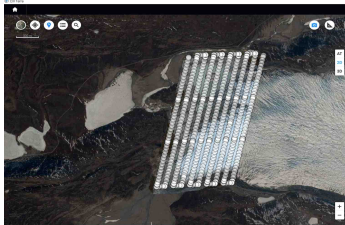
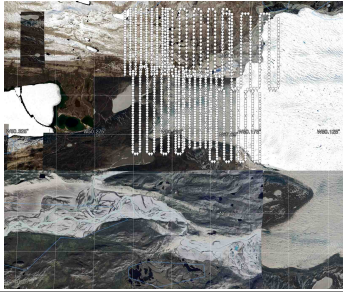
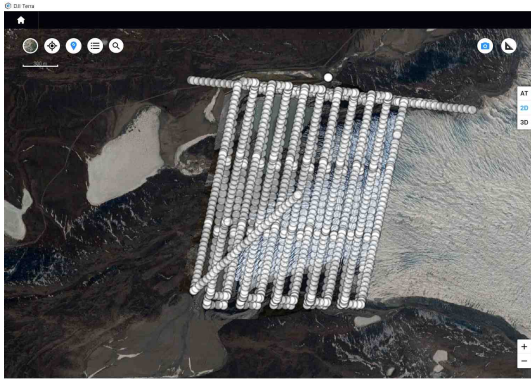
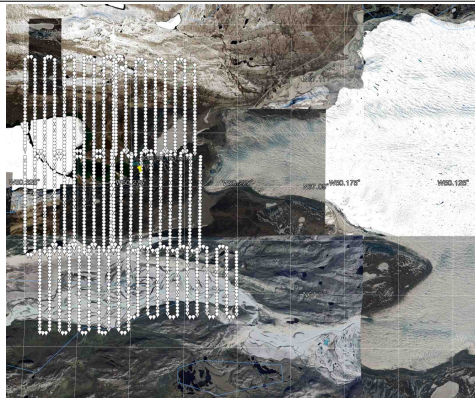
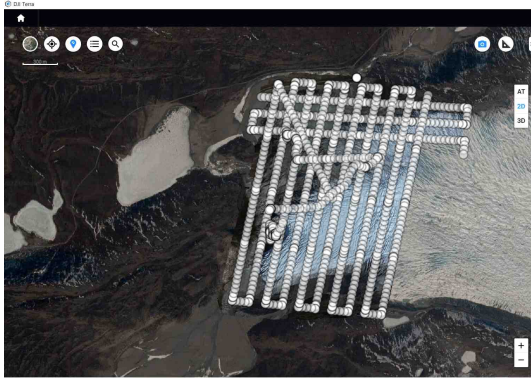
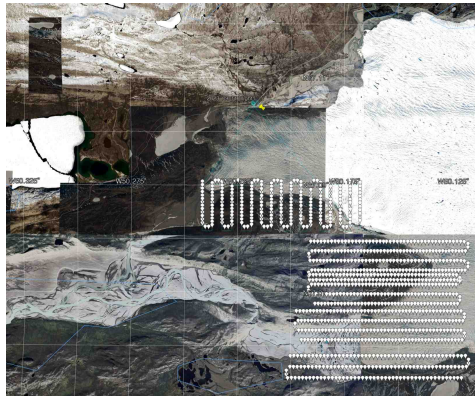
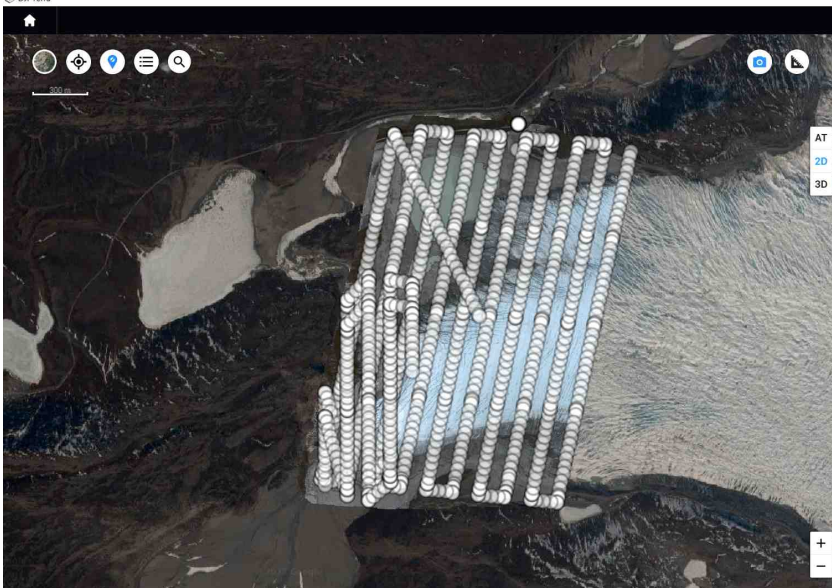
<DRTK-2 GNSS 수신기 현장 설치 모습>



• 본 과제 2021, 2022년도 자료와의 전-후 빙하 일대 변이 탐지(비교)를 위해 과거와 같은 연구 지역(러셀 빙하 말단 중심)을 중심 대상으로 무인기 비행을 수행하였으며, 2023년도 비행경로는 각각 아래와 같음

<2023년 현장조사 일자별 무인기 비행 경로>

Date: 20230907	Sensor: P1 (M300)		
	An aerial photograph of a glacier system. Overlaid on the image are several parallel, light-colored lines representing flight paths. The interface includes a top toolbar with icons for home, compass, location, menu, and search, and a bottom right corner with zoom controls (+, -) and a 3D view toggle.		
Date: 20230909	Sensor: P1 (M300)	Sensor: L1 (M300)	Sensor: Sony camera (Ebee)

			
	Sensor: L1 (M300)		Sensor: Sony camera (Ebee)
Date: 20230910			
	Sensor: L1 (M300)		Sensor: Sony camera (Ebee)
Date: 20230911			
	Sensor: L1 (M300)		
Date: 20230912			

- 회전의 비행을 기준으로 각 센서 촬영 시의 비행 환경 조건을 아래와 같이 정리함

<2023 M300 무인기 일자별 비행 환경 조건 정리표: 좌표기준점 67.091586, 50.218375>

날짜	센서명	비행시간	평균비행 고도(m)	태양천장각	태양고각	태양방위각	구름/ 날씨	전방/사이드 중첩	기타
09.07	P1	약 3시간	150	62.06°	27.94°	166.36°	많음/ 비	70%/80%	-
09.09	L1		150-200	62.83°	27.17°	166.64°	약간/ 흐림	40%(라이다) 70/80% (RGB카메라)	라이다 단일스캔모 드촬영
09.10			200	63.22°	26.78°	166.79°	없음/ 맑음		
09.11			200	63.60°	26.40°	166.93°	없음/ 맑음		
09.12			200	63.99°	26.01°	167.07°	없음/ 맑음		

- 고정익 RGB 카메라 촬영은 09.07을 제외한 회전의 비행과 동일 시간 및 비행환경조건 내에서 비행 수행되었음
- 2022년 현장조사 당시 획득 조건과 비교하여 L1, P1 센서의 중첩률은 약 2배 가까이 향상된 조건으로 자료를 획득함
- 극지방에서의 무인기 기반 모니터링 수행에 있어서, 비행 시 태양 고도-각도 조건은 대상 객체의 분광학적 강도 값 및 그림자 발생으로 인한 관측 오류 발생에 영향을 미칠 수 있으므로, 과거 자료획득 당시의 환경 조건을 고려하여 유사한 태양각 환경 내에서 자료를 획득함
- 더불어 과거 자료 대비 유사한 태양 기하 환경 조건을 고려함으로써 그림자 발생 요인 영향의 일관성(그림자 크기, 방향 등)을 유지함
- L1 라이다 자료의 경우 고도 약 200 m 환경 내에서 자료를 획득함
- P1 고정밀 사진측량 자료의 경우 고도 약 150 m 환경 내에서 자료를 획득함
- 고정익 기체의 경우 약 고도 600 m 환경으로 촬영 수행하였으며, 회전의 기체와 비교하여 상대적으로 넓은 범위를 촬영함
- 고정익 기체의 사진 중첩도는 전방 / 사이드 80/60% 를 유지하여 촬영 수행함

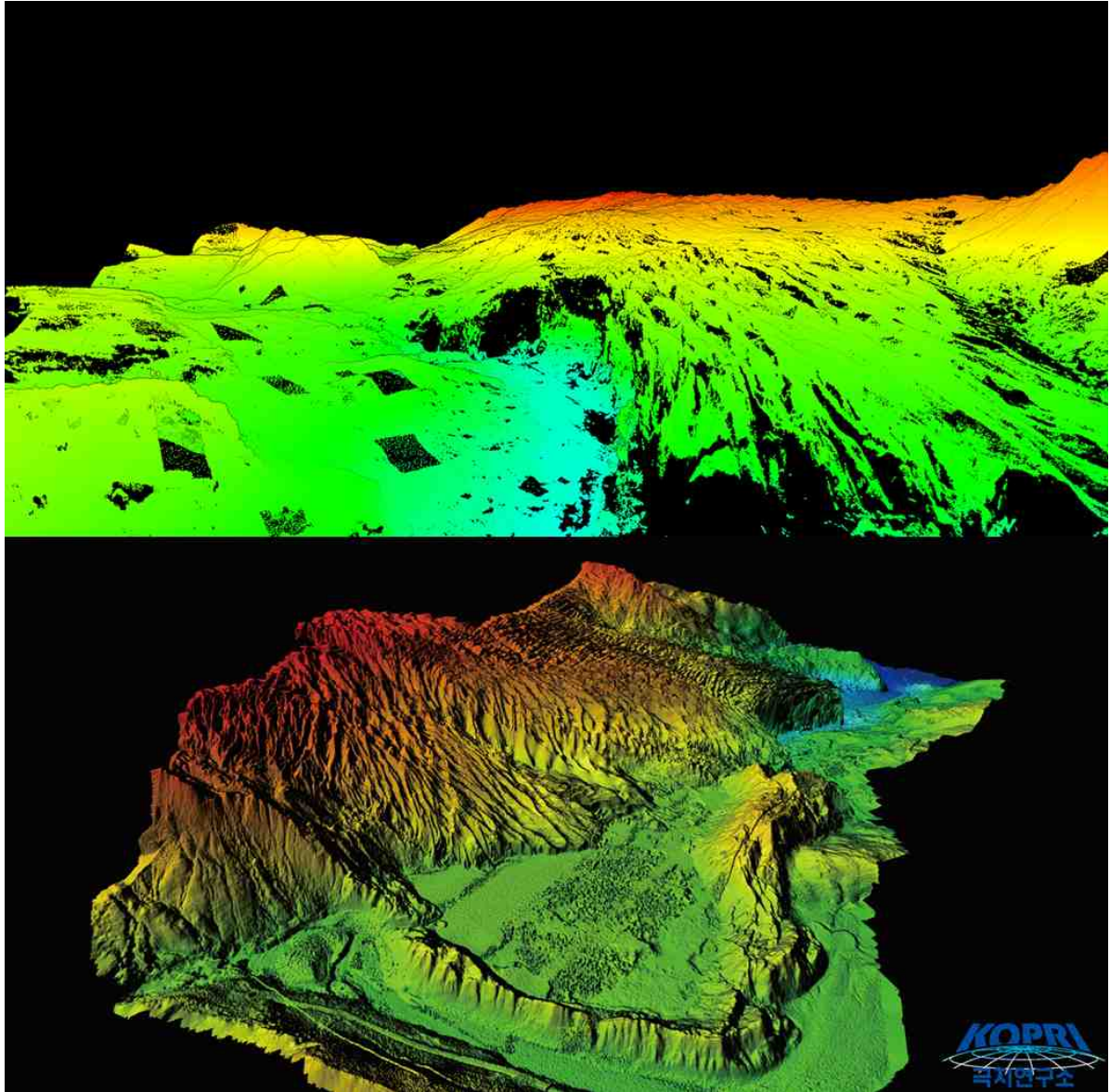
2. 초고해상도 무인기 영상 기반 수치표면모델 구축 및 3차원 모델링

가. 무인기 자료처리

- 3개년 간 현장조사를 통해 획득한 무인기 자료들을 기반으로 효과적인 모니터링을 수행하기 위해 자료 간 기하 정보를 등록하는 작업(정합, co-registration)이 수행되었으며, 영상 간 공통적으로 존재하는 지표 객체들을 지정하여 control point(CP)를 생성하고 해당 점을 기준으로 상대기하보정 수행 처리함
- RGB 사진 영상 자료를 대상으로 DJI Terra 소프트웨어를 활용하여 CP 기준의 정사영상과 3차원 포인트클라우드셋을 생성하였으며, 필요에 따라 ArcGIS 10.8을 통해 Geo-referencing이 필요한 지역에 추가적인 상대기하보정을 수행 처리함
- 상대기하보정이 처리된 3개년 사진 영상자료 기반의 포인트클라우드셋을 .las로 추출하였으며, 이를 Global Mapper Pro 소프트웨어를 활용하여 노이즈 제거 및 포인트클라우드 분류(classification)를 수행하여, 각각 DSM을 각각 구축함
- 일반적으로 사진측량을 위한 수동형 센서를 통해 획득된 자료(사진)는 비행 영역을 커버하는 많은 수의 정렬된 사진의 집합으로 정의할 수 있으며, 이들의 2차원적 각 사진의 모션정보(Position, Orientation)를 활용해 촬영된 사진의 센서 위치와 방향을 역추적한 후 당시 센서의 위치를 얻어 3차원 공간에 중첩된 사진 영역 내의 공통 정합점을 찾아 표현하는 과정을 통해 3차원 포인트 클라우드를 구축할 수 있음
- 따라서 정밀한 정합 산출물의 생산(정사영상 및 DSM)을 위해서는 다각도의 많은 수의 사진 정보가 요구될 수 있으며, 이를 위해 본 연구에서는 비행 시 경로 내 수직 촬영뿐만 아니라 P1 센

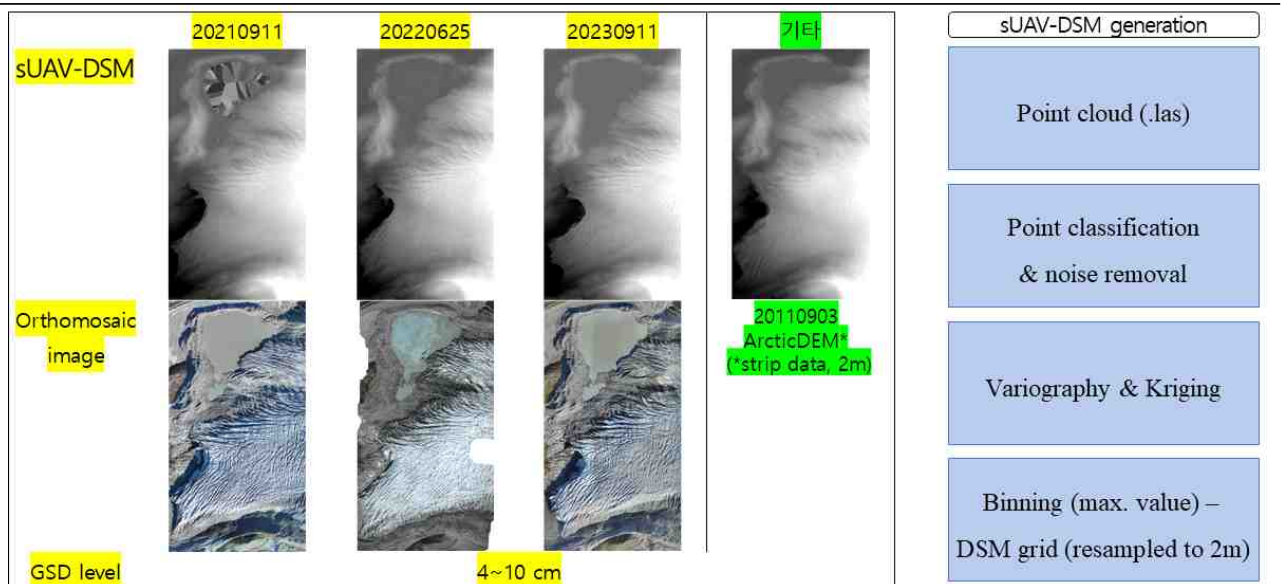
서의 Oblique capture 기능 기반의 고정밀 다각도 촬영이 수행됨

- 라이다 자료의 경우(M300, L1) DJI Terra 소프트웨어를 통해 3차원 포인트클라우드셋을 구축한 후 .las 형태의 파일로 추출하였으며, 이를 Global Mapper Pro 소프트웨어를 통해 노이즈 제거 및 포인트클라우드 분류(classification)를 수행 후 각각 DSM을 구축함



<라이다 포인트클라우드셋 분포 예시 모습(위) 및 DSM 구축 예시 모습(아래)>

- 본 연구개발에서 라이다 자료는 최종적으로 2022년, 2023년 2개년에 걸쳐 자료를 획득되었으며, 이를 기반으로 구축 및 정리되었음
 - 무인기 자료 기반 산출물들에 적용한 좌표계 및 투영방식은 WGS84 UTM 22N에 해당함
 - 무인기 자료들의 포인트클라우드셋을 통해 구축한 DSM(사진 및 라이다 자료 기반 모두 포함)의 워크플로우는 다음과 같음: 1) 포인트 노이즈 검출 및 제거; 2) 고도 분포에 따른 포인트 분류(classification); 3) 중복 포인트 제거(포인트 최적화); 4) Variography 이상적 모델(exponential, Gaussian 등) 기반 Kriging 수행; 5) Bining 기법 기반 표면 구축: DSM 생성
 - 2023 현장조사로부터 획득한 무인기 자료 기반의 DSM의 Ground sample distance (GSD)는 약 4~10 cm 수준에 해당함
 - 과거 지형 모델 자료와의 대비 분석을 위해 최종 DSM (raster) 산출 시 영상의 cell size는 2 m 공간해상도로 재배열함
 - 본 연구개발에서 3개년에 걸쳐 재구축한 DSM 및 정사 영상의 세부 정보를 아래와 같이 정리함
-



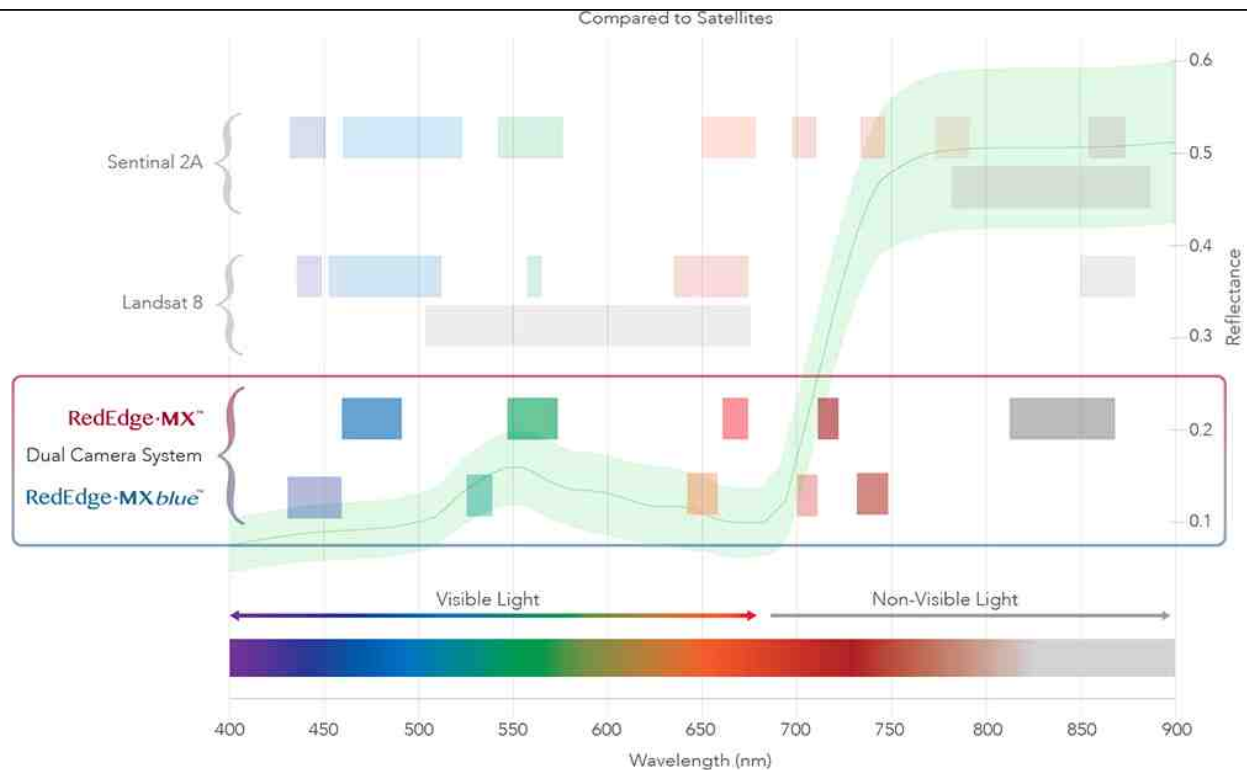
<3개년의 무인기 자료 기반의 구축 데이터셋(좌) 및 DSM 구축 워크 플로우(우)>

- 무인기 자료 기반의 비교 분석 수행을 위해 ArcticDEM에 사용된 단일 Strip 자료를 활용함
- ArcticDEM은 Maxar의 스테레오페어의 Worldview 고해상도 위성 자료와 고도추출알고리즘을 기반으로 구축된 북극권 전반의 수치표고모델에 해당하며, 약 10년간의 누적된 광학영상을 기초로 함(Porter et al., 2023)
- Strip 자료는 ArcticDEM을 구축할 때 사용되었던 개별 산출된 지역적 strip line의 DEM 자료를 의미하며, 본 연구개발에서 과거 비교자료로 활용하기 위해 2011.09.03. 일자에 촬영 및 구축된 strip DEM 자료를 선정하였음 (Porter et al., 2022)

나. 무인기 다분광 영상자료처리

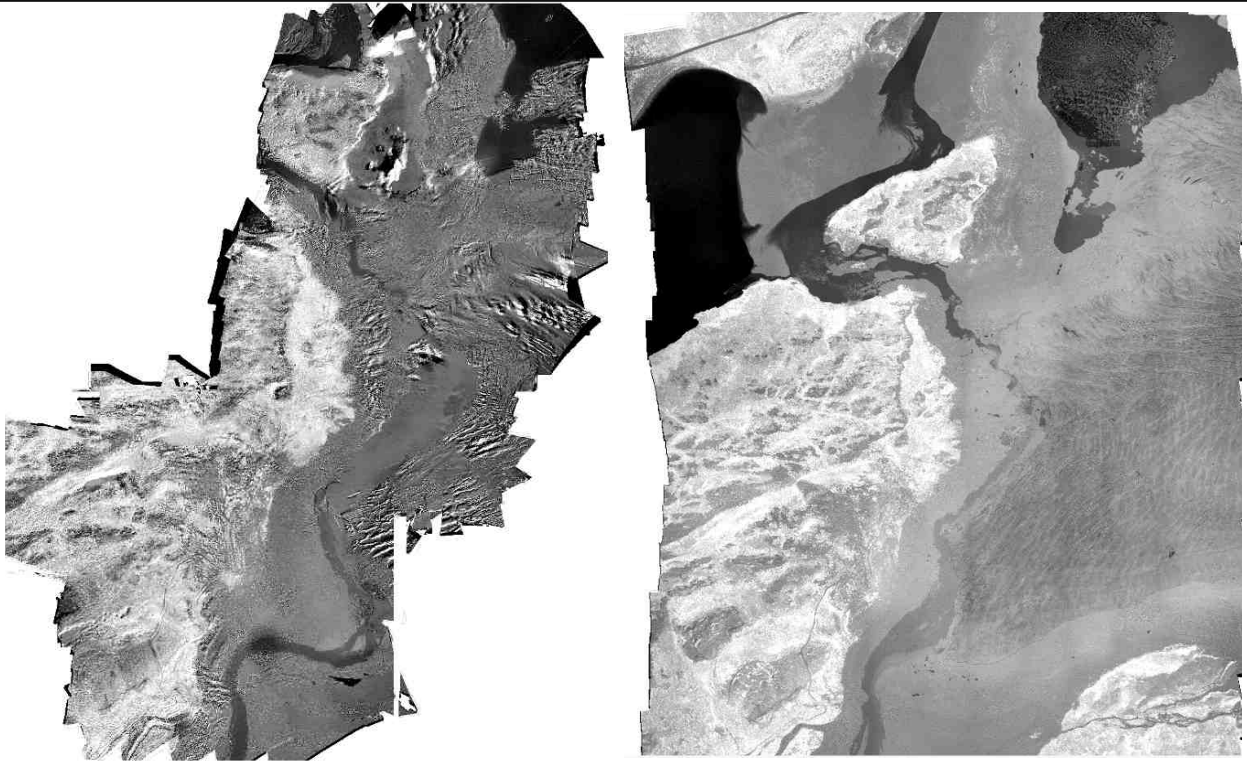
- 2022년, 2023년 무인기 비행을 통한 다분광 영상자료의 획득은 각각 브레인즈랩스 및 AMP 에서 수행함
- 다분광 영상자료의 경우 총 10개의 밴드로 구성되어있는 다분광 센서 Micasense Rededge MX dual를 활용하였으며, 해당 센서의 세부 사항은 아래와 같음





<Micasense Rededge MX dual 다분광 무인기 센서 세부정보: 모습, 장착모습, 파장대역>

- 본 센서는 총 10개의 다분광 밴드로 구성되어있으며, 약 400~1000 nm 파장대역의 분광정보를 제공할 수 있는 장점을 지님
- 일반적으로 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 관련의 정보를 추출하기 위한 목적을 가지고 있으며, 다양한 밴드비연산을 통해 응용 및 적용 가능함
- 본 연구개발에서 2022년 2023년 각각의 NDVI를 계산하여 국소지역의 지수값 변화를 확인하고자 활용함
- NDVI 정사영상을 제작하기 위해 Pix4D Mapper 소프트웨어를 활용하여, 정합점 기반의 포인트 클라우드 생성, 반사도 변환, 정사영상 제작의 전처리를 수행함



<2023년 NDVI 맵(좌) 및 2022년 NDVI 맵(우)>

- 적용한 NDVI 식은 아래와 같음

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

NDVI values range from -1 to 1

<NDVI 계산식>

3. 무인기-인공위성 동시기 데이터셋 구축 및 선별

가. Russell 빙하 일대 KOMPSAT-3 위성 영상 자료 선별: 연간 변화 탐지용

- 무인기 기반의 현장 조사 일정에 시공간적으로 대응할 수 있는 아리랑 위성 영상의 촬영 요청하고 자료 선별을 수행함
- 각각 선별한 2021년 9월, 2023년 9월 무인기 현장 조사 일정에 대응 수집된 KOMPSAT-3 자료의 정보는 아래와 같음

<수집 KOMPSAT-3 위성 영상 정보>

Acquisition date	Spatial resolution (m)	ID	Level	Band configuration	Projection
2021-09-19 15:58:26	Multispectral: 2.8	K3_20210919155826_49843_22791507_L1G	1G	Blue Green Red Near-Infrared	WGS 84 UTM 22N
2023-09-18 15:25:36	Panchromatic : 0.7	K3_20230918152536_60493_22791507_L1G		Panchromatic	

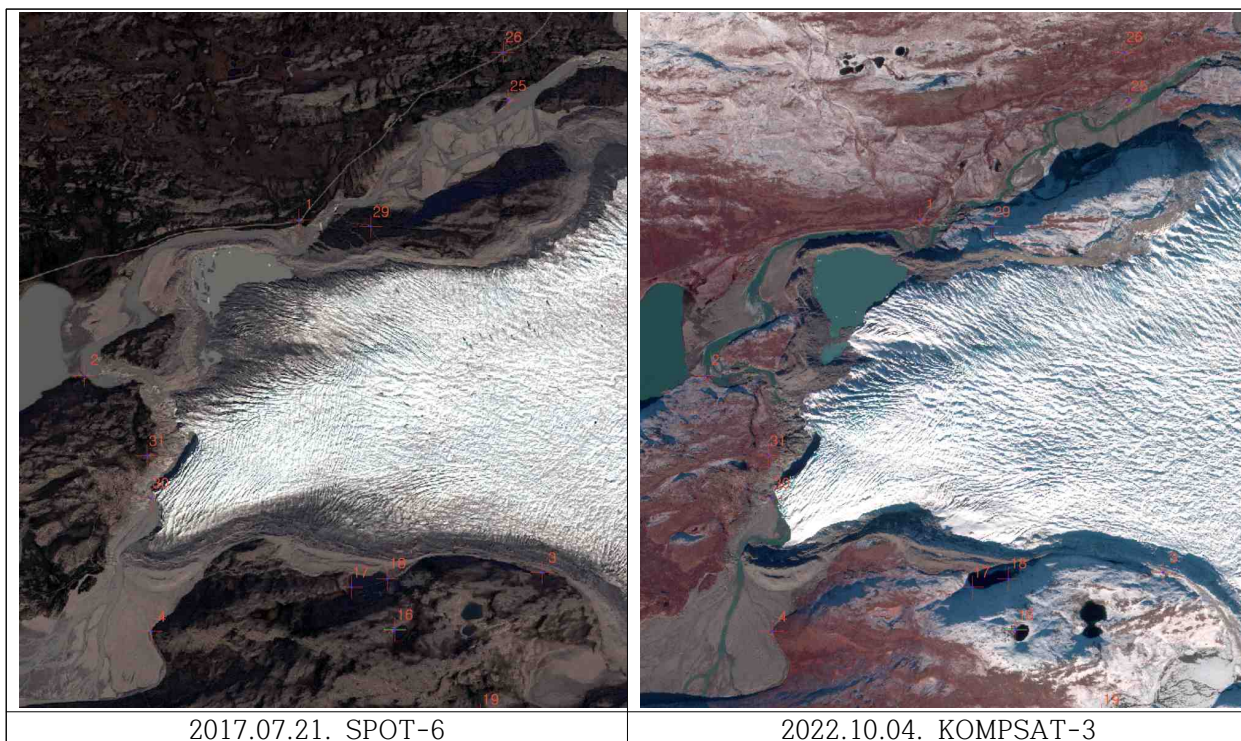
• 수집한 KOMPSAT 광학영상은 무인기 영상을 기준 영상으로 Pansharpen 영상 융합 및 상대기하보정처리하였으며, 4개 다중분광 밴드 기반의 2021년 대비 2023년의 이미지 변화탐지(Image difference)를 수행하고, 각 대응되는 무인기 자료 기반의 이미지 변화탐지 결과와 공간적 비교 분석을 수행함

나. Russell 빙하 일대 KOMPSAT 위성 영상 자료 선별: 빙하 말단 흐름 변이 속도 관측용

- 장기간 시계열적 Russell 빙하 말단의 후퇴속도 관측을 위해 KOMSPAT-3 & -3A 자료를 선별함
- 시간 인터벌은 약 한달 간격으로 확보하였으며, 수집한 기간은 총 2018년~2023년에 해당함
- 한 장의 기준 영상인 2017년 SPOT-6 자료와, 20개 KOMPSAT 영상자료를 수집 선별함
- 기준 영상을 SPOT-6 위성영상으로 설정하여, CP를 추출하고, 기준점을 바탕으로 KOMPSAT 영상자료들을 co-registration 상대기하보정 처리 수행함
- 각 KOMPSAT 위성영상은 약 30개 내외의 CP를 바탕으로 처리되었으며, 3rd-order polynomial transform 및 spline transform model을 적용하여 상대기하보정 처리(Warping by georeferencing) 수행함
- 선정된 연결점(CP)은 수년간 변하지 않는 길의 코너(모서리) 부분, 노출된 기반암 등 고정된 위치로 판단되는 부분을 위주로 선택하여 진행함

<Russell 빙하 말단 장기 흐름 변이 속도 관측을 위한 수집된 KOMPSAT 위성영상자료 정보: 표>

연번	영상취득날짜	위성명	영상 고유 ID	비고
1	2017.07.21.	SPOT-6	IMG_SPOT6_MS_201707211441309_SEN_5840109101_R1C1	기준영상
2	2018.05.15.	K3A	K3A_20180515154052_17329_00690568_L1G	
3	2020.07.14.	K3A	K3A_20200714160714_29283_00077838_L1G	
4	2020.07.30.	K3	K3_20200730145659_43765_22781508_L1G	
5	2020.08.17.	K3	K3_20200817150019_44028_22791508_L1G	
6	2020.09.08.	K3	K3_20200908155532_44350_22781507_L1G	
7	2021.07.21.	K3A	K3A_20210721160802_34905_00033744_L1G	
8	2021.08.01.	K3A	K3A_20210801154508_35071_00003617_L1G	
9	2021.09.19.	K3	K3_20210919155826_49843_22791507_L1G	
10	2021.10.17.	K3	K3_20211017155410_50252_22771507_L1G	
11	2021.11.05.	K3	K3_20211105145847_50529_22801508_L1G	
12	2022.04.30.	K3A	K3A_20220430161722_39182_00048236_L1G	
13	2022.06.07.	K3	K3_20220607160420_53656_22791507_L1G	
14	2022.07.27.	K3	K3_20220727151647_54386_22771507_L1G	
15	2022.10.04.	K3	K3_20221004150340_55394_22771507_L1G	
16	2023.03.05.	K3	K3_20230305160142_57615_22791508_L1G	
17	2023.04.01.	K3A	K3A_20230401160303_44260_00037233_L1G	
18	2023.04.21.	K3	K3_20230421145751_58301_22801508_L1G	
19	2023.05.22.	K3	K3_20230522150456_58754_22781507_L1G	
20	2023.08.14.	K3	K3_20230814160739_59982_22771507_L1G	
21	2023.09.18.	K3	K3_20230918152536_60493_22791507_L1G	



<KOMPSAT 상대기하보정 적용을 위한 CP 추출 예시 그림>

<SPOT-6 기준영상과 KOMPSAT 영상간 CP위치 및 Warping 수행 결과 정보: 표>

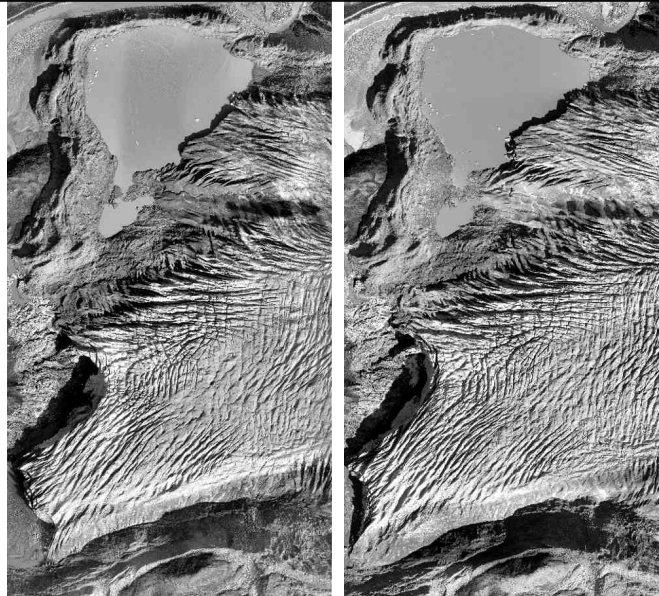


No.	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual X	Residual Y	Residual
1	534051.1	7443302	533991.8	7443310	-0.0205778	-0.287214	0.287951
2	532821.1	7442407	532755.8	7442416	-0.0205705	-0.287112	0.287848
3	535337.9	7441299	535389.4	7441281	-0.0205692	-0.287093	0.287829
4	533249.4	7440925	533143.7	7440942	-0.0205631	-0.287009	0.287744
5	531702.1	7440692	531604	7440709	-0.0205567	-0.286920	0.287656
6	530495.9	7441831	530437	7441840	-0.0205588	-0.286949	0.287684
7	531983.1	7442659	531919.7	7442673	-0.0205692	-0.287094	0.287830
8	531685.2	7442041	531631.1	7442052	-0.0205648	-0.287033	0.287769
9	531828.1	7442742	531771.2	7442751	-0.0205691	-0.287092	0.287828
10	522621.6	7438999	522573.4	7439004	-0.0204815	-0.285869	0.286602
11	521869.8	7440737	521787.6	7440741	-0.0204862	-0.285935	0.286668
12	522644.9	7442045	522760.7	7442011	-0.0205024	-0.286161	0.286895
13	523497	7443365	523565.6	7443343	-0.0205177	-0.286375	0.287109
14	521794.2	7444685	521830.4	7444671	-0.0205064	-0.286216	0.286949
15	527727.9	7443991	527692.7	7443990	-0.0205545	-0.286889	0.287624
16	534475.1	7440967	534541.9	7440952	-0.0205659	-0.287048	0.287784
17	534289.4	7441193	534290.6	7441195	-0.0205670	-0.287063	0.287799
18	534507.1	7441245	534497.8	7441245	-0.0205677	-0.287073	0.287809
19	535000.3	7440476	535034.8	7440461	-0.0205636	-0.287015	0.287751
20	536684.1	7440250	536777.1	7440223	-0.0205633	-0.287010	0.287746
21	536072.9	7440389	536195	7440354	-0.0205640	-0.287021	0.287756
22	534802.6	7440198	534781.3	7440198	-0.0205614	-0.286985	0.287721
23	535532.2	7438380	535480.4	7438389	-0.0205486	-0.286806	0.287541
24	530665.1	7436300	530725.3	7436281	-0.0205167	-0.286362	0.287096
25	535247.1	7443989	535193	7443996	-0.0205826	-0.287281	0.288017
26	535191.5	7444272	535165	7444273	-0.0205837	-0.287296	0.288032
27	536296.5	7445735	536293.1	7445730	-0.0205896	-0.287377	0.288114
28	536103.4	7445970	536129.6	7445958	-0.0205902	-0.287386	0.288122
29	534436.6	7443269	534403.4	7443272	-0.0205784	-0.287222	0.287958
30	533237.5	7441689	533137.9	7441706	-0.0205676	-0.287073	0.287808
31	533197.9	7441941	533116.4	7441953	-0.0205690	-0.287091	0.287827

4. 시계열 빙하 지형 변동 모니터링

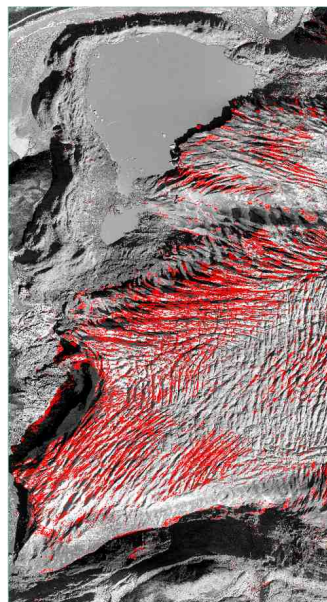
가. 무인기 구축 자료 기반 연간 수평-수직적 변화탐지

- 2023년을 기준으로 과거 2년간 각각 공간적 수평-수직적 요인 변이를 살펴보기 위해 전년도에서도 수행했던 바 있는 Image Difference 기반의 변화탐지를 수행함
- 본 연구개발에서는, 수평적 요인 변화탐지수행을 위해 구축한 무인기 RGB 정사영상자료를 활용하였으며, Roy et al. (2006)에서 제시하는 영상 융합 방법을 기반으로 적용함
- 두 시기의 영상 모두 cm급의 해상도를 가지고 있으나, 1 m 공간해상도 수준으로 다운스케일링 후 탐지를 수행함



<무인기 RGB 영상자료 융합 결과: 2023년(좌) 및 2021년(우) 영상>

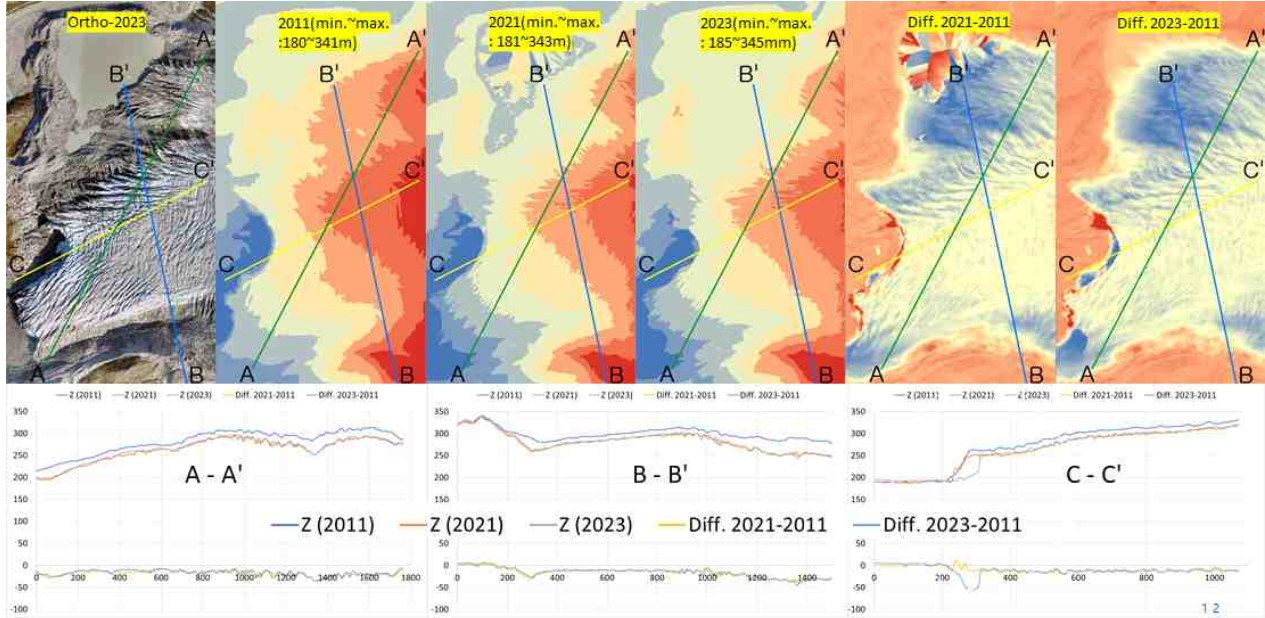
- 영상 기반의 변화탐지는 기준영상으로부터 비교영상의 히스토그램 매칭을 통해 변화의 증가 및 감소 요인(히스토그램 모양 비교)을 분류하는 방법에 해당하며, 증가 및 감소의 임계값을 임의 설정 및 적용하여 전후 간 이벤트 발생 가능성의 지역을 추정할 수 있음
- 본 연구개발에서는 증가 및 감소의 구분을 짓지 않고, 두 요인 모두 변화로 분류하여 변이 지역을 추출하였으며, 증감의 히스토그램 비교 시 임계값은 각각 140 (0~255)로 지정함



<수평적 요인 변화탐지 수행 결과>

- 수평적 요인 변화탐지 수행 결과 빙하 말단부 근방에서 변이가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 총면적은 약 82,333 m²에 해당함
- 특히 빙벽부를 따라 변이의 밀도가 조밀하게 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 지표와 가까워지는 최말단에서 조밀한 변화가 발생함을 알 수 있음
- 연구지역 북부의 빙하 지역 역시 과거 후퇴로 인해 현재 호수로 뒤바뀐 지역의 빙하부에서 변이를 확인할 수 있으며, 그 외 지표부에서는 변이의 밀도가 드물게 확인됨
- 초고해상도의 공간정보를 바탕으로 하고 있는 영상기반의 탐지 수행의 결과로써, 위성영상에서는 확인할 수 없는 미세 변이의 탐지가 가능함을 확인할 수 있음

- 이와 같은 접근을 통해, 누적된 10년, 20년, 30년 인터벌의 변화 감지 수행을 통해 기후변화에 따른 빙하감소 및 빙하후퇴의 진화과정, 지형적 변화량 등을 파악하는데 매우 유용할 것으로 기대함
- 무인기 자료 기반의 수직적 요인 변화탐지수행을 위해 DSM을 기반으로 비교 분석을 수행하였으며, 각각 2021, 2023년 구축한 무인기 DSM을 2011년 고해상도 위성자료(ArcticDEM Strip data) 기반의 지형모델을 기준으로 비교함 (비교: 2 m 공간해상도 재배열 통일)



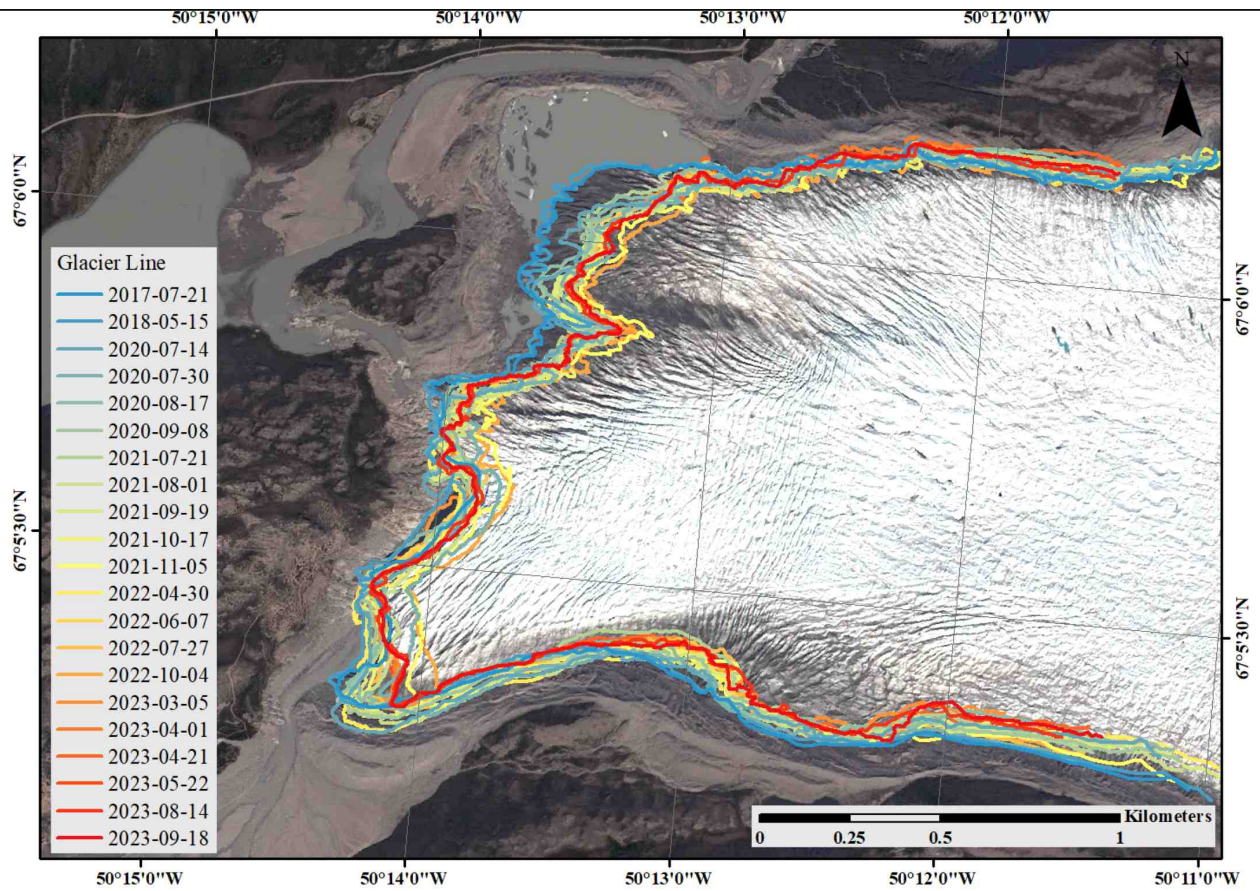
<고도 분포 비교용 결과자료 - DSM 고도 분류 및 고도 차이 분류 분포 (위), A-B-C 프로파일 분석>

- 2차원적 고도 분포 변화를 살펴보았을 때, 2011년과 비교하여 2021, 2023년 붉은색 계열의 클래스 분포의 면적이 연구지역 북쪽을 중심으로 전반에 걸쳐 많이 감소한 패턴을 확인할 수 있음
- 최대-최소 고도 분포의 수준은 2011년과 대비하여 큰 차이를 보이지 않으나, 프로파일 라인 A-B-C 전반에 걸쳐 2011년과 대비하여 약 평균 30 m 감소된 고도 분포 양상을 보임
- 고도차이 맵(Difference Map) 기반의 A-B-C 프로파일 라인 분포로 보았을 때, 마찬가지로 약 평균 30 m 고도 차이의 분포 양상이 나타나는 것이 확인되며 C 라인 내에서 최대 약 50 m 의 급격한 감소 패턴이 확인됨
- 해당 부분은 말단 빙벽부를 지나가는 지역에 해당하며, 계속적 빙벽 붕괴에 따른 후퇴 양상을 관측할 수 있는 위치에 해당함
- 이와 같은 감소 추세가 향후 지속된다면, 빙벽 붕괴 발생지역을 중심으로 급격하게 켜기형 후퇴가 예상됨
- 향후 지속적인 모니터링의 지속을 통해 해당부의 후퇴 진화과정을 정밀하게 진단할 수 있을 것으로 기대됨

5. 빙하 흐름 속도 산출 기법 연구

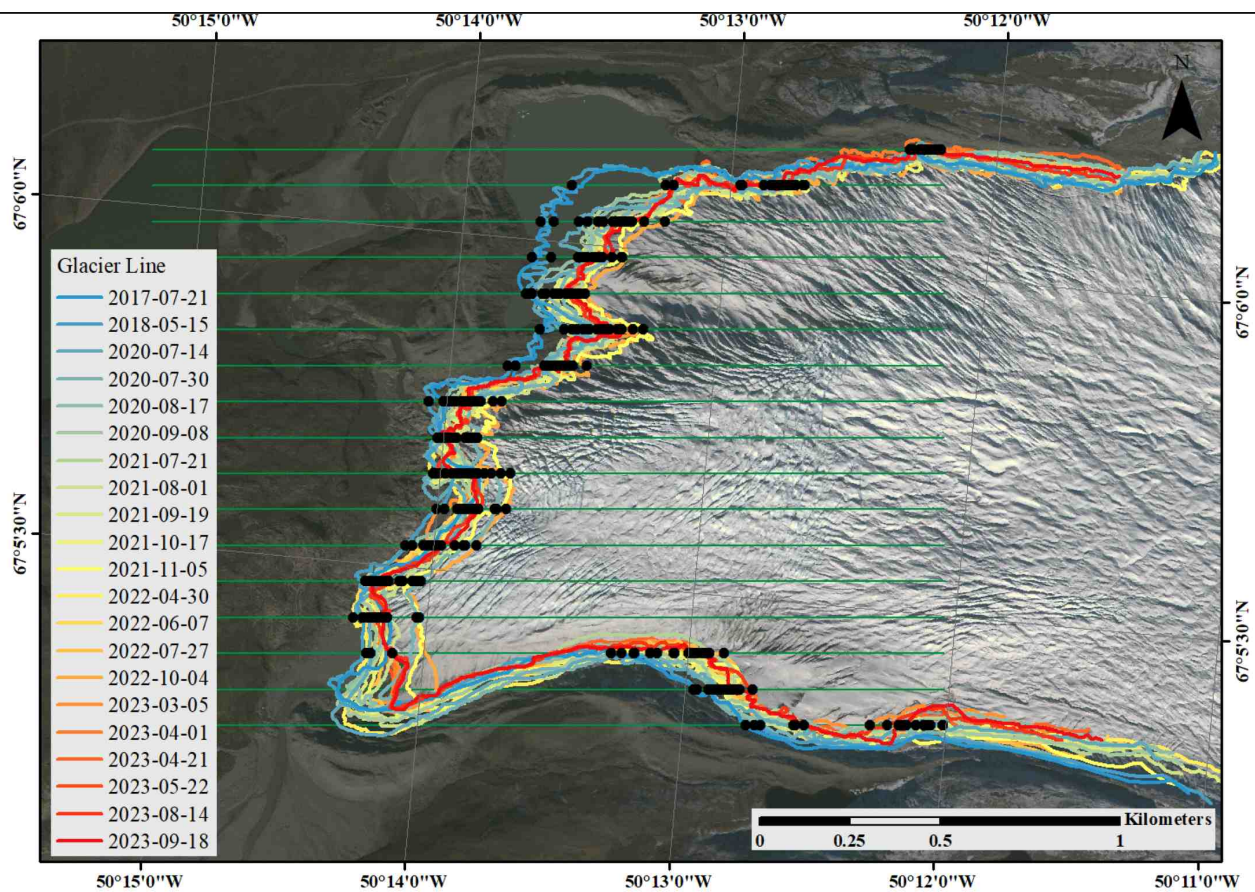
가. 빙하 말단선 Polyline 벡터 추출

- 상대기하보정 처리된 KOMPSAT 영상자료 기반으로 빙하 말단선에 해당하는 Polyline을 수동으로 추출 수행함
- 상대기하보정은 사용자가 직접 수작업을 통해 진행하였음. 자동추출의 경우 빙하와 빙하 위를 덮고 있는 토사를 구분하기 어려우며, 빙하에서 떨어져나온 파편을 같은 덩어리로 인식하는 오류가 발생함
- 따라서 빙하 경계부분의 변동을 정확히 추정하기 위하여 각 영상을 수작업을 통해 끝단 라인을 추출하였음



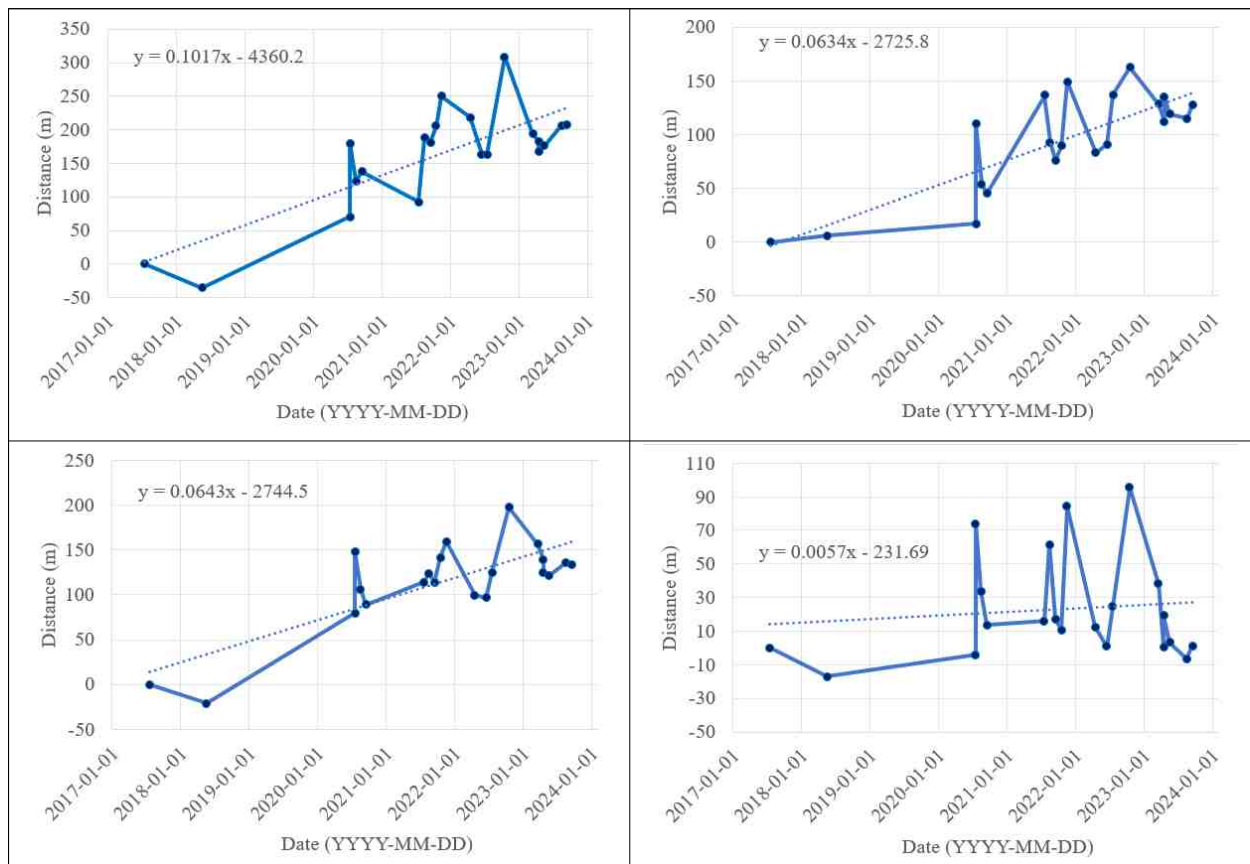
<그린란드 러셀빙하 빙하 말단선 폴리라인 벡터 추출 결과>

- 빙하 말단 부분 경계 추출한 결과 2017년부터 2023년까지 약 6년간 빙하 말단선이 전체적으로 후퇴하는 양상을 보여주고 있으며, 위치에 따라 최대 약 250 m 이상 후퇴하는 양상을 확인할 수 있음
- 각 위치별로 빙하의 흐름 속도가 다르기 때문에 100 m 간격의 측선을 통하여 각 위치에 따른 빙하의 후퇴속도를 고려하였음
- 다양한 속도를 구하는 방법이 있으나 아래의 그래프는 시간에 따른 빙하위치에 대해서 선형화귀변화를 계산 반영함
- UGCS의 DSAS (Digital shoreline analysis system) 수행 결과는 아래와 같음



<DSAS 측선 + 빙하 말단 polyline 오버랩 이미지>

<시간에 따른 측선기준 빙하 말단선 거리: Graphs>



- 계절에 따른 변동성을 확인할 수 있으나 영상의 전체기간을 시계열로 보면 전체적으로 후퇴하

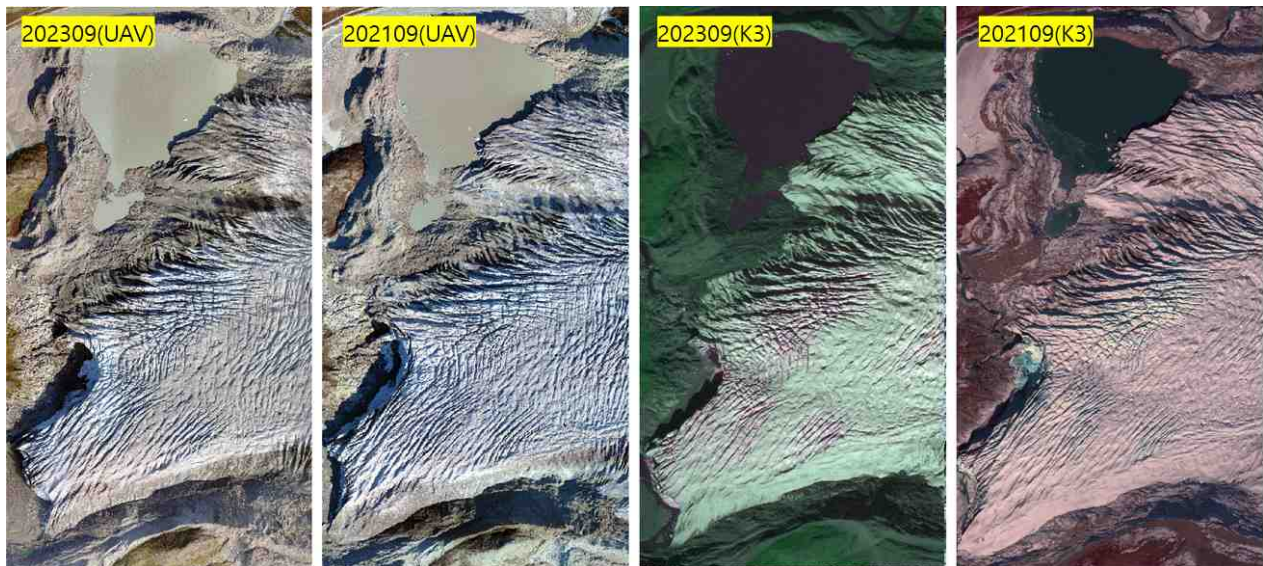
는 것을 확인할 수 있음

- 기준 측선을 기준으로 후퇴 양상을 살펴본 결과, 러셀빙하 상단부의 호수가 있는 부분은 연간 변화 0.1017 m 로 연간 변화로 환산해보면 연간 약 37.1m씩 후퇴하고 있음
- 위치에 따라 다르지만 평균적으로 20 m/year 의 속도로 후퇴하고 있으며, 최하단부의 경우에는 연간 약 2 m로 큰 변화가 발생하지 않는 지역도 있음

6. 무인기-인공위성 빙하 정보 기반 융합 및 검증 적용 가능성 평가

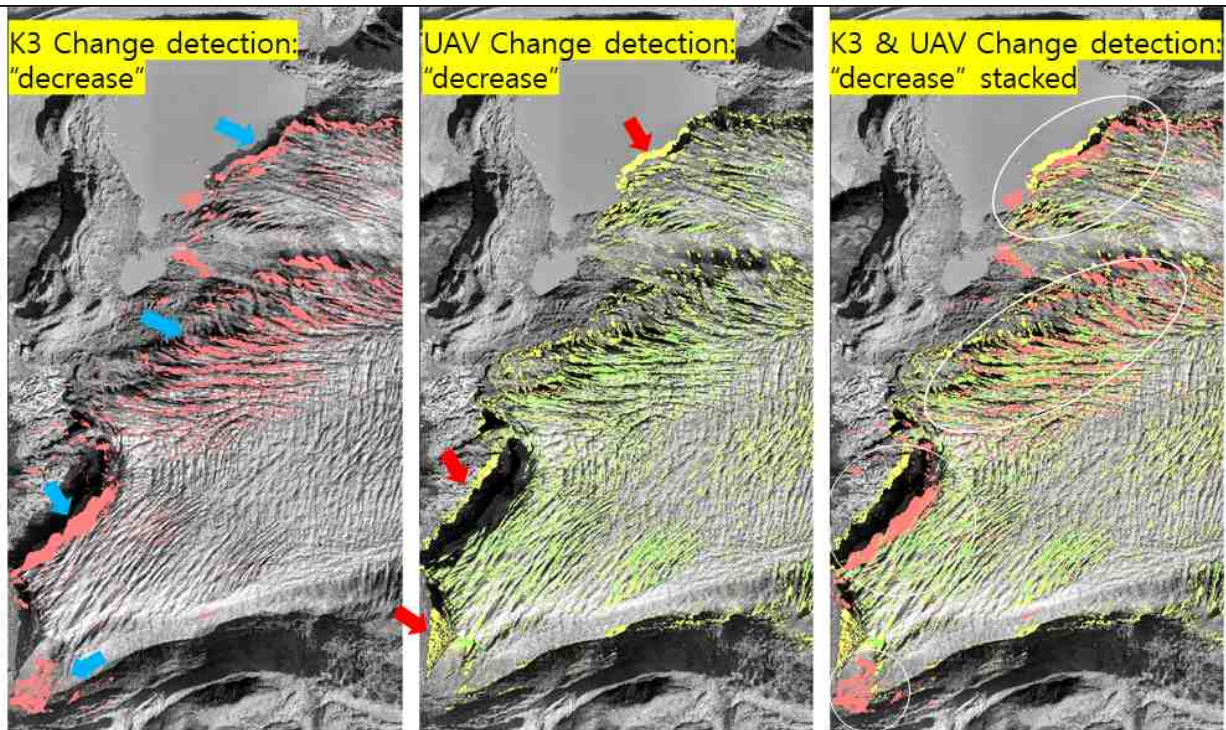
가. 연간 변화탐지 무인기-인공위성 자료 복합활용 가능성 평가

- 처리된 2021 및 2023년 9월 기준의 KOMPSAT 영상과 무인기 수평적 변화 탐지 수행을 위해 융합 처리된 영상자료의 해상도 수준(약 10 cm 미만)을 KOMPSAT 영상자료에 맞추어 0.7 m로 통일하여 분석 수행함



<처리된 무인기 및 K3 영상 자료 연구지역 모습 비교>

- 이미지 변화 탐지를 위해 사용한 kernel 윈도우 사이즈는 동일한 조건 하에서 수행하였으며, 임계값 설정의 경우 빙하 지역 외에서는 감소/증가의 변이가 감지되지 않았던 보수적인 조건을 반영하여 적용함
-

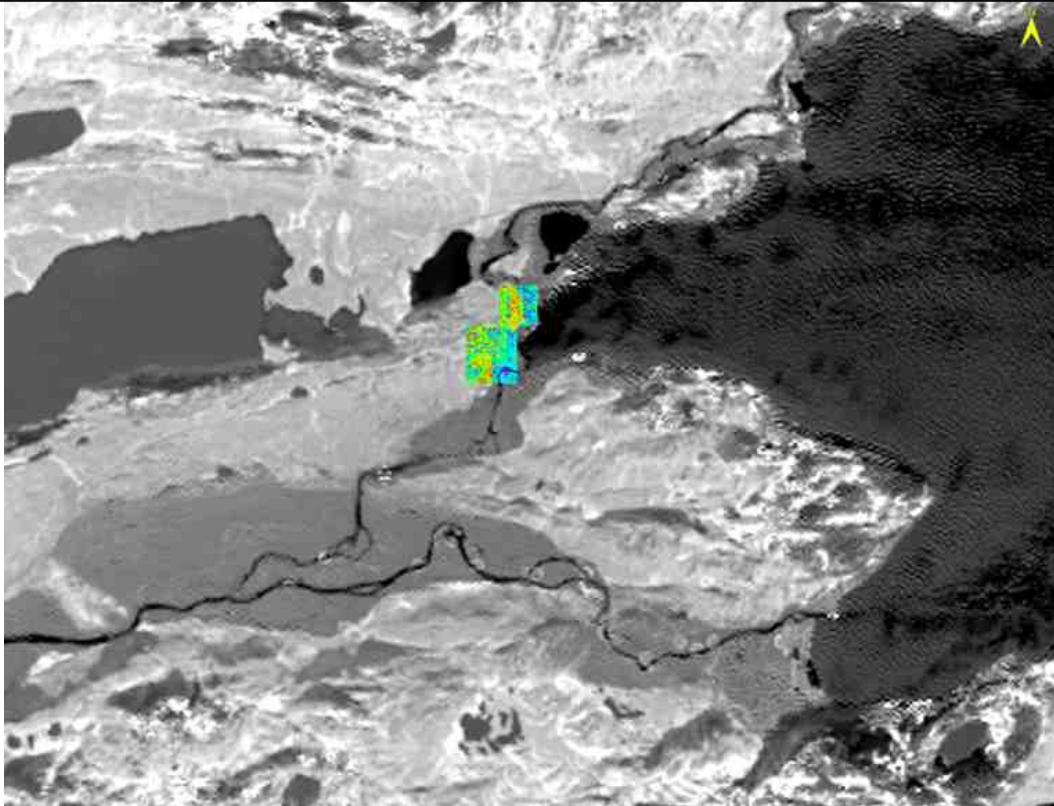


<위성 및 무인기 자료 기반 변화탐지 수행 결과(2021년 대비 2023년 비교, 감소 지시지역)>

- 빙하 표면에서 감소를 지시하는 변화 밀도 클래스가 분류된 공간적 분포는 연구지역 중심부에서 위성과 무인기 자료 모두 공통적으로 높게 분포하는 점을 확인할 수 있음
- 가장 최말단 부에서(예: 빙벽, 붉은색 및 푸른색 화살표) 나타나는 감소 변화는 육안으로 영상에서 확인할 수 있는 부분이기도 하나, 해당 지역에서 발생한 빙벽 높이에 의한 그림자의 영향으로 인한 노이즈도 함께 포함되어있는 것으로 판단됨
- 위성 자료와 무인기 자료의 결과를 비교했을 때, 큰 규모에서의 감소 변화를 대상으로 위성 공간해상도에서의 관측이 더 효과적일 수 있으나 빙하 표면에서 나타나는 작은 규모의 변화 감지에 있어서는 무인기 자료가 월등히 효과적일 것으로 판단됨
- 하지만 두 자료 모두 그림자의 영향으로부터 오류가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 오류 부분에 대해서는 마스킹 등의 제외를 적용하여 정량화 등의 작업이 수행 되어져야 할 것으로 판단됨
- 빙하의 후퇴 및 전진에 의한 변화를 관측할 시 변화 대상의 규모가 작은것부터 큰것까지 말단부에서는 관측되므로, 효과적이고 보다 정확한 모니터링 수행을 위해서 위성 및 무인기 자료의 적절한 복합활용을 통한 정보 제공의 노력이 이어져야 할 것으로 사료됨
- 빙하 중상부를 대상으로 미세 빙하 표면의 변이와 이들의 영상간 상관성 기반의 흐름 속도를 산정할 때는 무인기 자료를 통한 정량화된 정보가 매우 유용할 수 있을 것으로 판단됨
- 다만 지형자료 구축에 있어 무인기 자료가 유리하며, 위성자료의 경우 스테레오 페어를 구축하기 위한 초기 셋팅값이 설정된 상태에서의 촬영이 이루어져야만 지형자료구축이 가능하다는 차이점이 존재하며, 시간 해상도 측면에서는 위성 자료가 무인기 자료에 비해 월등히 유리하다는 자료 간의 장단점이 분명히 존재함
- 활용 목적에 따른 자료의 적용이 적절히 활용되어야 할 것으로 판단됨

다. 연간 변화탐지 무인기-인공위성 자료 복합활용 가능성 평가: NDVI 산출자료 비교

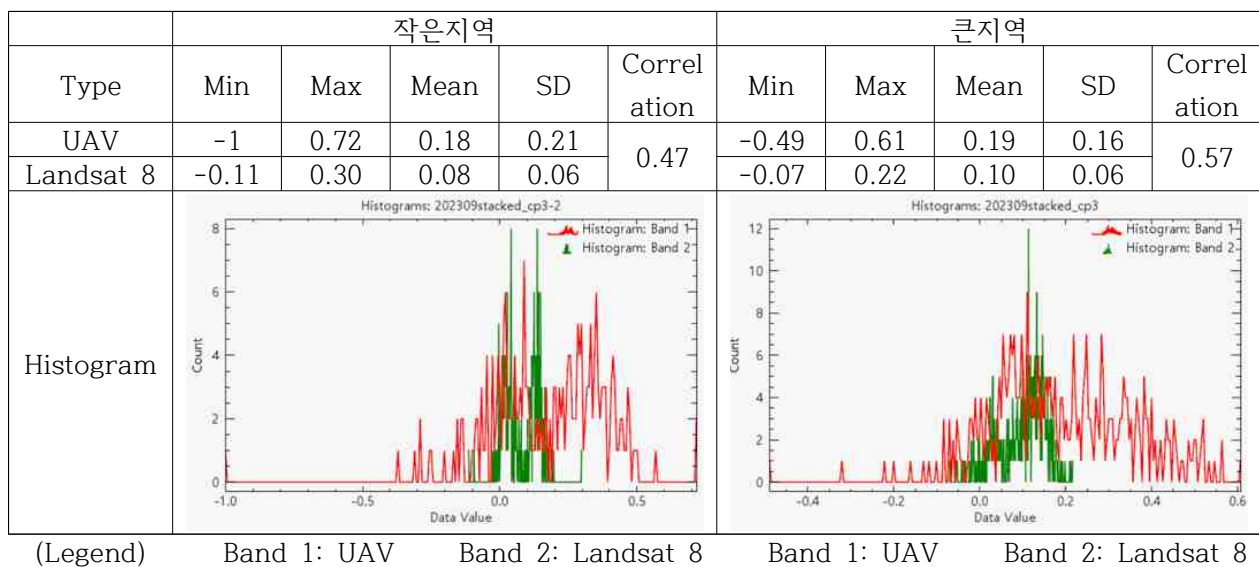
- 본 연구개발과제 수행을 통해 획득한 2023년 무인기 다분광 영상자료를 기반으로 산출한 NDVI 맵과 Landsat 8 L2 다분광 자료 기반의 NDVI 맵을 기반으로 활용 가능성을 평가함
- 두 이종 자료 간 분광학적 정보 제공의 수준이 일관적일 수 있는지 비교 확인 분석을 수행함



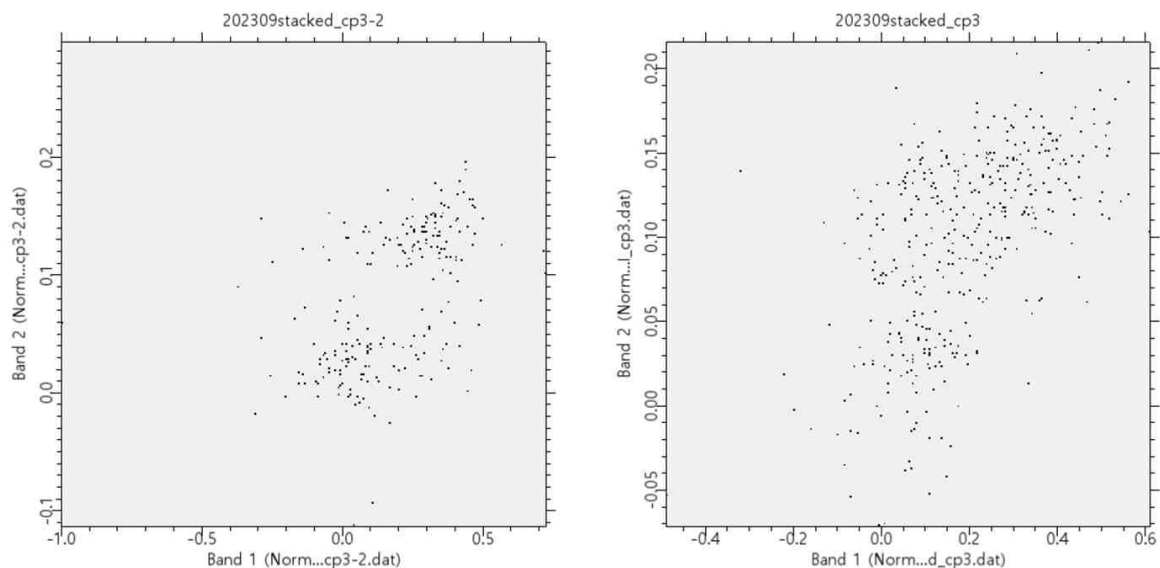
<배경: Landsat 8 NDVI map (gray scale), 무인기 다분광 자료기반 NDVI map 지역 (color classification) 모습: 비교 분석 지역은 무인기 지역을 기준으로 함>

- 무인기 NDVI 맵은 30 m 공간해상도로 재배열 통일하였으며, 동일 지역 내에서의 NDVI 픽셀 값의 기초통계량을 통한 비교를 수행함
- 작은 지역/큰 지역 두 지역으로 구분하여 각각에 대한 기초통계량을 산정함

<무인기 및 Landsat 8 NDVI 픽셀 값 분포의 기초통계량 비교 분석>



- NDVI 평균 값은 약 10 정도의 값의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 약 0.5~0.6 수준의 상관성 기반 식생지수 값의 정보가 제공될 수 있을 것으로 기대됨



<이종 자료 간 NDVI 산점도 분포: 작은지역(좌) & 큰지역(우)>

- 산점도 분포 상 선형보다는 지수형에 가까운 분포 관계를 보이고 있음
- 이종 자료 간 일치성 부분에서 선형이 아닌 관계로 나타나는 점은 공간해상도의 차이로 인한 것으로 판단됨
 - 광역적 변이 혹은 대형적 변이 패턴에 있어 위성자료를 활용하는 것이 적절할 것으로 생각되며, 객체 단일 단위의 지역적 변이 관측에 있어 무인기 자료가 더욱 유용할 수 있을 것으로 판단됨
 - 다분광 자료의 경우 위성 정보 플랫폼으로 획득되는 공간해상도의 수준이 현 기술 수준에서 30 m 급으로 제공되는 점을 들어, 무인기 자료와의 공간적 정보 제공의 복합활용 필요성이 매우 요구됨을 판단할 수 있음
- 추후 분광학적 지표 정보 획득과 이들 정보 기반의 북극권 일대 기후-지표객체상태 변화에 대한 연구 수행에 있어 기초자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대됨

(2) 정량적 연구개발성과

< 정량적 연구개발성과표(예시) >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명			연도	1년차 (YYYY~YYYY)	n년차 (YYYY~YYYY)	계	가중치 (%)
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾		목표					
		실적					
		목표					
		실적					
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾		목표					
		실적					
		목표					
		실적					
계							

* 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신제품 등을 지정합니다.

- * 2」 연구개발과제 특성 반영 지표: 기술실시(이전), 기술료, 사업화(투자실적, 제품화, 매출액, 수출액, 고용창출, 고용효과, 투자유치), 비용 절감, 기술(제품)인증, 시제품 제작 및 인증, 신기술지정, 무역수지개선, 경제적 파급효과, 산업지원(기술지도), 교육지도, 인력양성(전문 연구인력, 산업연구인력, 졸업자수, 취업, 연수프로그램 등), 법령 반영, 정책활용, 설계 기준 반영, 타 연구개발사업에의 활용, 기술무역, 홍보(전시), 국제화 협력, 포상 및 수상, 기타 연구개발 활용 중 선택하여 기재합니다
(연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

< 연구개발성과 성능지표(예시) >

평가 항목 (주요성능 ¹⁾)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 ²⁾ (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		목표설정 근거
			보유국/보유기관	성능수준	성능수준	1년차 (YYYY~YYYY)	n년차 (YYYY~YYYY)	
1								
2								

* 1」 정밀도, 인장강도, 내충격성, 작동전압, 응답시간 등 기술적 성능판단기준이 되는 것을 의미합니다.

* 2」 비중은 각 구성성능 사양의 최종목표에 대한 상대적 중요도를 말하며 합계는 100%이어야 합니다.

(3) 세부 정량적 연구개발성과

※ 해당되는 항목만 선택하여 작성하되, 필요시 행을 추가하여 작성 가능하며, 증빙자료 별도 파일로 첨부
(자유 양식)

[과학적 성과]

☐ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (Y/N)	게재일 (YYYY.MM)	등록번호 (ISSN)	기여율
Monitoring Asbestos Mine Remediation Using Airborne Hyperspectral Imaging System: A Case Study of Jefferson Lake Mine, US	Remote Sensing	Yongsik Jeong	14	스위스	MDPI	Y	2022.11	2072-4292	100
그린란드 러셀빙하 소형무인항공기 라이다 센서 기반 정밀 지형 데이터셋 고정의 무인항공기를 이용한 그린란드 지형정보 데이터 구축	GEODATA	Yongsik Jeong	5	대한민국	GeoAI Data Society	N	2023.03	2713-5004	100
	GEODATA	Sungjae Lee	5	대한민국	GeoAI Data Society	N	2023.03	2713-5004	100

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표

회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국가명
2021년 GeoAI데이터학회 추계학술대회	김승희, 이성재, 김현철	2021.11.25	부산파라다이스호텔	대한민국
2021년 GeoAI데이터학회 추계학술대회	이성재, 김승희, 김현철	2021.11.25	부산파라다이스호텔	대한민국
ISPS 2022	정용식	2022.09.20	온라인	대한민국
2022년 GeoAI데이터학회 추계학술대회	정용식	2022.11.17	그랜드 하얏트 제주	대한민국
2023년 GeoAI데이터학회 춘계학술대회	정용식	2023.06.27	파크하얏트부산	대한민국
2023년 GeoAI데이터학회 추계학술대회	정용식	2023.11.10	그랜드 하얏트 제주	대한민국

☐ 기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

☐ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

☐ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국가명	출원				등록			기여율	활용 여부
		출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		

○ 지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다
(최대 3개 중복선택 가능).

제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

☐ 기술 및 제품 인증

인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
		인증명	인증 번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

- * 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

- * 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]



☐ 시제품 제작

시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 기술 실시(이전)

기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

- * 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

☐ 사업화 투자실적

추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

☐ 사업화 현황

사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술수명
						국내 (천원)	국외 (달러)		

- * 1) 기술이전 또는 자기실시
- * 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등
- * 3) 국내 또는 국외

☐ 매출 실적

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

☐ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과				
사업화 계획	사업화 소요기간(년)			
	소요예산(천원)			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)		
		현재까지	3년 후	5년 후
		국내		
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획			
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후
	수출			

☐ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

☐ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

☐ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

내용	기간	참석 대상	장소	인원

☐ 기술 무역

(단위: 천원)

계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 전문 연구 인력 양성

분류	기준 연도	현황										
		학위별				성별		지역별				
		박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

☐ 산업 기술 인력 양성

프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

☐ 국제화 협력성과

구분 (유치/파견)	기간 (YYYY.MM~YYYY.MM)	대상국가	학위과정	전공	내용

☐ 홍보 실적

홍보 유형	매체명	제목	홍보일
뉴스보도	MBC뉴스데스크	[빙하의눈물②] 작년, 재작년과 또 다르다...빠르게 줄어드는 그린란드 빙하	2023.10.11
뉴스보도	MBC뉴스데스크	[빙하의눈물③] 20년 전보다 5배 빠르다...예측 뛰어넘은 해빙 속도	2023.10.13
뉴스보도	MBC뉴스데스크	[빙하의눈물⑤] 빙하 위를 나는 한국 드론...극지방 조사변화 한국 연구진	2023.10.21

☐ 포상 및 수상 실적

종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

☐ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발 여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)



(2023.11.09.) 2023 GeoAI데이터학회 추계학술대회 공로상 수상



(2023.11.09.) 2023 GeoAI데이터학회 추계학술대회 학술상 수상 I



(2023.11.09.) 2023 GeoAI데이터학회 추계학술대회 공로상 수상 II



수상성과내용:

- 북극권 원격탐사 빙권정보제공 주제 기반 그린란드 무인기 탐사 연구 논문, 학술발표의 정량적 평가를 통한 국내학술대회 수상 실적에 해당

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

<참고 1> 연구성과 실적 증빙자료 예시

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

< 연구개발성과 활용계획표(예시) >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)			연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE		매년 목표치
	비SCIE		
	계		
국내논문	SCIE		
	비SCIE		
	계		
특허출원	국내		
	국외		
	계		
특허등록	국내		
	국외		
	계		
인력양성	학사		
	석사		
	박사		
	계		
사업화	상품출시		
	기술이전		
	공정개발		
제품개발	시제품개발		
비임상시험 실시			
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	
		2상	
		3상	
		의료기기	
진료지침개발			
신의료기술개발			
성과홍보			
포상 및 수상실적			
정성적 성과 주요 내용			

< 별첨 자료 >

성과유형	증빙 자료
1.	1)
	2)
2.	1)
	2)



Article

Monitoring Asbestos Mine Remediation Using Airborne Hyperspectral Imaging System: A Case Study of Jefferson Lake Mine, US

Yongsik Jeong ¹, Jaehyung Yu ², Lei Wang ³, Huy Hoa Huynh ⁴ and Hyun-Cheol Kim ^{1,*}

¹ Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon 21990, Korea

² Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³ Department of Geography & Anthropology, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA

⁴ Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

* Correspondence: kimhc@kopri.re.kr; Tel.: +82-32-760-5398

Abstract: This study investigated an asbestos mine restoration project using Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) hyperspectral data. The distribution of an abandoned asbestos mine (AAM) and treatment area were analyzed before and after the remediation based on the spectral indices for detecting naturally occurring asbestos (NOA) indicators and encapsulation. The spectral indices were developed for NOA, host rock, and encapsulation by logistic regression models using spectral bands extracted from the random forest algorithm. The detection models mostly used VNIR spectra rather than SWIR and were statistically significant. The overall accuracy of the detection models was approximately 84%. Notably, the detection accuracy of non-treated and treated areas was increased to about 96%, excluding the host rock index. The NOA index detected asbestos in the mine area as well as those in outcrops outside of the mine. It has been confirmed that the NOA index can be efficiently applied to all cases of asbestos occurrence. The remote sensing data revealed that the mine area was increased by ~5% by the remediation, and the treatment activity reduced asbestos exposure by ~32%. Moreover, the integrative visualization between the detection results and 3D high-resolution images provided an intuitive and realistic understanding of the reclamation project.

Keywords: naturally occurring asbestos (NOA); abandoned asbestos mine; mine remediation; AVIRIS hyperspectral data; binary logistic regression; image classification; spectroscopy



Citation: Jeong, Y.; Yu, J.; Wang, L.; Huynh, H.H.; Kim, H.-C. Monitoring Asbestos Mine Remediation Using Airborne Hyperspectral Imaging System: A Case Study of Jefferson Lake Mine, US. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 5572. <https://doi.org/10.3390/rs14215572>

Academic Editors: Gaetana Ganci, Sabine Chabrilat, Veronika Kopačková-Strandová, Gabor Kereszturi and Annalisa Cappello

Received: 5 October 2022

Accepted: 2 November 2022

Published: 4 November 2022

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



Copyright: © 2022 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

Naturally occurring asbestos (NOA) minerals can be classified into serpentine (chrysotile) and amphibole (actinolite, amosite, anthophyllite, crocidolite, and tremolite) groups. They are known to cause serious health damage to human body systems, as forms of lung diseases, such as mesothelioma and pneumoconiosis [1–4]. Due to their harmful impact, the production/distribution of asbestos minerals is banned in many countries under strict environmental regulations [5].

The Environmental Protection Agency (EPA) in the United States has been extensively managing asbestos-related sites with significant attention to abandoned asbestos mines (AAM). Systematic cleanup activities have been regulated as a national priorities list (NPL). Due to the significance of NOA in both environment and ecology, a survey of NOA in both natural and mine environments is a critical procedure to prevent its dispersion. EPA has introduced mine cleanup strategies according to the type of mining processes, such as open pit, dredging, and underground to minimize exposure [6]. Major mine remediation includes chemical, physical, and thermal treatment to limit the mobility of contaminants [6]. Therefore, the assessment of the remediation work in terms of NOA exposure before and after the remediation is critical.

We expect that follow-on research will be conducted based on current-generation satellite hyperspectral sensors, including EnMap, HISUI, PRISMA, and EMIT, and will contribute to providing efficient ways to make strategies/plans for mine remediation.

Table 8. Spatial assessments of NOAI, HRI, and CAP BLR model applications in both 2018 and 2014 AVIRIS data. The calculation of the mining area only is made inside Jefferson Lake's open pit mining boundary.

Class	2018				2014			
	Model Classification		Mining Area Only		Model Classification		Mining Area Only	
	Number of Pixels	Extent (km ²)	Number of Pixels	Extent (km ²)	Number of Pixels	Extent (km ²)	Number of Pixels	Extent (km ²)
NOAI	4603	0.96	4198	0.87	6395	1.33	6131	1.27
HRI	700	0.15	511	0.11	367	0.08	174	0.04
CAP	2301	0.48	2273	0.47	1	0.00	1	0.00
Total	7604	1.59	6982	1.45	6763	1.41	6306	1.31

4. Conclusions

This study introduced spectral indices for the detection of NOA and reclamation treatment based on AVIRIS hyperspectral image processing for an open-pit AAM in California. The AAM is a past producer of chrysotile, one of the NOAs, and the remediation activities were confirmed by time series analysis of high-resolution satellite images. To assess the remediation effects, the NOAI and HRI classes constituting the AAM area were defined by the MRSFF method. The CAP and Others classes representing the treatment area and other external objects were constructed by visual inspection of the high-resolution satellite images. An RF algorithm was used to select the top effective spectral variables for the detection of NOAI, HRI, and CAP, and the variables were further selected to construct the best BLR models for each class. The results showed that variables in VNIR are more useful than SWIR for discrimination between non-treated and treated areas. The overall detection accuracy for the three classes combined was about 84%. When the classes were aggregated into a two-class scenario for non-treated and treated, the accuracy increased to 96%. Moreover, we have proven the ability of hyperspectral imaging for detecting NOAI not only in AAM but also in natural outcrop occurrences.

Our case study site has an AAM area increased by reclamation activities. Notably, treated by the reclamation activity, NOAI has reduced by about 32%. The reduced area was mostly detected as CAP class, which was confirmed by the high-resolution images.

Author Contributions: Conceptualization, Y.J. and J.Y.; methodology, Y.J. and H.H.H.; software, Y.J.; validation, Y.J., H.H.H., H.-C.K., L.W. and J.Y.; formal analysis, Y.J.; investigation, Y.J.; resources, Y.J.; data curation, Y.J. and J.Y.; writing—original draft preparation, Y.J.; writing—review and editing, J.Y., H.-C.K. and L.W.; visualization, Y.J.; supervision, J.Y., H.-C.K. and L.W.; project administration, H.-C.K. and J.Y.; funding acquisition, H.-C.K. and J.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was supported by ‘the International Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (PN22070)’ and ‘the National Research Foundation (NRF) of Korea grant by the Korean Government (NRF-2020R1A2C2005439)’.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors thank the anonymous reviewers who provided constructive review comments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

□ 국내 논문게재: 2편

(1) 논문 표지 및 사사 증빙



고정의 무인항공기를 이용한 그린란드 지형정보 데이터 구축

이성재¹, 김승희², 김현철^{3*}¹기술원, 극지연구소 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국²산업연구원, 극지연구소 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국³변태장, 극지연구소 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국

Establishment of Geographic Information Data of Greenland Glacier Using Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle

Sungjae Lee¹, Seung Hee Kim², and Hyun-Cheol Kim^{3*}¹Research Specialist, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, 21990 Incheon, South Korea²Senior Research Scientist, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, 21990 Incheon, South Korea³Director, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, 21990 Incheon, South KoreaReceived February 22, 2023
Revised March 14, 2023
Accepted March 15, 2023Corresponding Author
Hyun-Cheol Kim
Tel : +82-32-760-5335
E-mail : kimhc@kopri.re.kr

In recent decades, the Greenland glacier has experienced significant changes in the environment near the surface due to the increase in surface melting on glacier. In order to quantify these environmental changes, precise spatial information data is necessary. Although digital elevation models using satellite data are widely used to secure data, it is difficult to observe the polar regions by satellite alone due to limitations such as spatial resolution, revisit period, and weather. To overcome these shortcomings, many field geographic surveys using unmanned aerial vehicles are being conducted. In this study, a field survey was conducted on September 14, 2021 to produce high-resolution spatial information in the Russell glacier area located in the Greenland Kangerlussuaq. By matching the acquired aerial image data, orthorectification image with a spatial resolution of about 13 cm/pixel and a digital surface model are produced. This data is expected to be utilized as basic spatial data for Russell glacier runoff and topographical changes, and it is expected to be used as data that can grasp changes in time and spatial through continuous data accumulation.

Keywords: Greenland, Glacier, Fixed-wing unmanned aerial vehicle, Orthorectification image, Digital surface model

1. 서론

최근 그린란드 빙상 표면 용융은 급격히 증가하였으며, 빙하의 흐름 속도 증가, 유출량 증가, 빙벽 붕괴 등 빙하 발달 근처의 환경 변화에 큰 영향을 미쳐왔다(Dirk Van, 2011;

Rignot et al., 2010). 이러한 환경 변화를 정량적으로 파악하기 위해 정확하고 정밀한 사물단 변화 측정이 필요하다. 현재 전 지구적으로 수치표고모델이 구축되어 배포되고 있지만 낮은 공간해상도와 비정기적인 관측으로 인한 최신화가 지연되는 문제로 인하여 수치표고모델을 정밀 분석의 기초 자료

Copyright © 2023 GeoAI Data Society

Articles published in GEO DATA are open-access, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Funding Information

This research was supported by 'the International Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (PN22070)' and Korea Polar Research Institute (PE23040).

References

- Dirk Van VS (2011) Warming, glacier melt and surface energy budget from weather station observations in the Melville Bay region of northwest Greenland. *J Glaciol* 57(202):208-220
- Geissler J, Mayer C, Jubanski J, Münzer U, Siegert F (2021) Analyzing glacier retreat and mass balances using aerial and UAV photogrammetry in the Ötztal Alps, Austria. *Cryosphere* 15(8):3699-3717
- Groos AR, Bertschinger TJ, Kummer CM, Erlwein S, Munz L, Philipp A (2019) The potential of low-cost UAVs and open-source photogrammetry software for high-resolution monitoring of Alpine glaciers: a case study from the Kanderfirn (Swiss Alps). *Geosciences* 9(8):356
- Porter C, Mavin P, Howat I et al (2018). ArcticDEM, version 3. <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/0HUKH> Accessed 26 Jan 2023
- Rignot E, Koppes M, Velicogna I (2010) Rapid submarine melting of the calving faces of West Greenland glaciers. *Nature Geoscience* 3(3):187-191
- Ryan JC, Hubbard AL, Box JE, et al (2015) UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. *Cryosphere* 9(1):1-11
- Turner D, Lucier A, De Jong SM (2015) Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sens* 7(2):1736-1757
- Winsvold SH, Kaab A, Nuth C (2016) Regional glacier mapping using optical satellite data time series. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 9(8):3698-3711

38

(2) 논문 표지 및 사사 증명



그린란드 러셀빙하 소형무인항공기 라이다 센서 기반 정밀 지형 데이터셋

정용욱¹, 이성재², 김승희², 김현철^{3*}¹산업연구원, 한국해양과학기술원 부설 극지연구소, 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국²기술원, 한국해양과학기술원 부설 극지연구소, 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국³해임연구원, 한국해양과학기술원 부설 극지연구소, 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국

Small Unmanned Aerial Vehicle LiDAR-based High Spatial Resolution Topographic Dataset in Russell Glacier, Greenland

Yongsuk Jeong¹, Sungjae Lee², Seung Hee Kim², and Hyun-Cheol Kim^{3*}¹Senior Research Scientist, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute (KOPRI), 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, 21990 Incheon, South Korea²Administrative Specialist, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute (KOPRI), 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, 21990 Incheon, South Korea³Principal Research Scientist, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute (KOPRI), 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, 21990 Incheon, South KoreaReceived February 23, 2023
Revised March 9, 2023
Accepted March 10, 2023Corresponding Author
Hyun-Cheol Kim
Tel : +82-32-760-5335
E-mail : kimhc@kopri.re.kr

Greenland contains a large continental glacier. The influence of glacier melting has been expanding due to global warming. Although regional monitoring based on satellite data is being conducted, the demand for local-specific variation observation has increased as rising climate temperature patterns in the polar region. In this study, a precise topographic dataset was created for Greenland's Russell glacier using a small unmanned aerial vehicle (sUAV) onboarded LiDAR sensor. A precise digital surface model (DSM) was constructed based on LiDAR data obtained at an altitude of about 100 to 200 m, and DSM resampled to a 2 m sample distance was produced to confirm its applicability by comparing before-and after variations. This study provides DSM data applied with a pre/post-processing used for the comparison analysis.

Keywords: Small unmanned aerial vehicle, LiDAR, Russell glacier, Digital surface model, Greenland

1. 서론

그린란드 대륙 빙하의 용융 및 가속화는 지구온난화로 인해 극지방 지역의 기온 상승에 따라 영향을 받는 것으로 National Snow and Ice Data Center (NSIDC)에서 보고한 바 있으며, 지표 빙하(ice sheet) mass balance 및 빙하

후퇴 편이-경향 분석을 기반으로 지속적인 모니터링과 관련된 연구 및 보고 내용이 발표되고 있다(King et al., 2020; Mottram et al., 2019; Mouginot et al., 2019; Sassen et al., 2020). 특히 그린란드의 경우 지구 상에서 남극대륙 다음으로 많은 빙하로 이루어져 있으며, 이들의 용융지속에 따라 예상되는 해수면 상승 변화가 전 지구적 환경 변화 및 파

차리되었다. 지표에서 반사되어 획득된 레이저 포인트 측정 자료를 기반으로 3차원 Point Cloud를 구축하였으며, las 형태에의 점군 데이터셋으로 출력하였다. 자료는 EGM96 지오이드를 기반으로 후처리되었으며, WGS84 UTM zone 22N에 투영되었다. 포인트 클라우드 데이터셋 구축시 점군 밀도를 샘플 간 5 cm 간격으로 균일화하여 산출하였다. 생성한 포인트 클라우드 데이터셋(las)은 Binning 기법을 기반으로 지표를 구현하여 DSM (Raster)을 구축하였으며, 과거 인공위성 레이더 고도계 영상 자료(ArcticDEM, 2018년 7월 제작) 기반의 DEM 자료를 활용하여 전후 지형 분포 편이 관찰을 수행하였다. 비교를 위해 DSM은 2 m 샘플 간격(cell size)으로 재배열되었다.

3. 결과

연구지역 라이다 기반 DSM 구축 결과 2022년 6월 기준의 고도분포가 과거 2018년 7월 기준 고도분포와 비교하여 연구지역 전반적으로 낮아진 경향의 고도분포를 보여준다(Fig. 3B, C). Fig. 3B와 Fig. 3C 모두 남서 방향에서 북동 방향으로 진행되며 분포하고 있는 빙하 부분에서 고도가 상승하는 패턴의 일지성을 보이고 있으며, 과거에 비해 북쪽 호수가 위치한 고도분포의 면적이 다소 늘어난 분포를 보인다(Fig. 3A-C). 전후 지형 고도 차이를 지시하는 주제도를 기반으로 최대 약 90 m의 감소 변화가 발생한 것을 정량적으로 확인할 수 있었으며, 지역적으로 가장 큰 고도 차이를 보이는 곳은 연구지역 북쪽, 남쪽에 위치한 빙하 발달 부분 및 중심부를 따라 남서방향으로 알고 길게 늘어진 빙벽부에 해당한다(Fig. 3D). A-A', B-B', C-C' 단면선을 따라 단면 고도분포를 살펴본 결과 공통적으로 2018년 대비 2022년 전반적 고도가 낮게 분포하는 것을 확인할 수 있었으며, 단면선의 진행 방향에 따라 빙하에서 상승되는 고도 및 빙하 표면 크레바스의 모습을 확인할 수 있다(Fig. 4). 전후 지형 차이를 기반으로 한 단면선 분포를 통해 빙하 표면의 이동에 따라 크레바스 영향으로부터 기인한 변화가 큰 편이 분포가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 특히 단면선 C와 B가 교차하는 빙벽부근 위치에서 극단적인 편이가 발생한 것을 확인할 수 있다(Fig. 4).

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 라이다 센서 기반 sUAV 기반으로 획득한 자료를 활용하여, 그린란드 러셀빙하의 지형 편이를 모니터링하는 데 활용할 수 있는 데이터셋을 구축하고, 활용 가능성에 대해 평가하였다. 구축한 정밀 지형 데이터셋 DSM은 전반적으로 과거 자료와 비교하여 연구지역 내에서 합리적인 고도분포 패턴을 나타냈으며, 과거 2018년 대비 2022년 지형의 감소 변화에 관련된 정량화 정보를 제공하였다. 인공위성 영상에서 확인된 바와 대응적으로 연구지역 북쪽에서의 급격한 빙하선 후퇴 및 감소 패턴을 감지하는 데 매우 효과적으로 활용되었으며, 빙하 표면 크레바스의 편이 특성 확인에 있어서도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 빙하의 발달단부에 위치하는 빙벽의 빙하가 쏟아져 내리다 해당 위치에서 붕괴하는 지역적 특성을 가지고 있으며, 붕괴로 인한 급격한 지형 변화의 모습을 확인할 수 있는 데 효과적으로 활용되었다. 하지만 GNSS 기반의 베이스스테이션을 기준으로 작성된 무인기 자료에 해당함으로써, 수직 오차에 대한 정밀 측량을 통해 보정 혹은 오차의 정도가 추가되어야 할 것으로 사료된다. 향후 지속적인 sUAV 기반의 정밀 지형 데이터셋을 빙하 미세 편이 관측 모니터링을 위해 구축한다면, 빙하 미세 요인들의 물리적인 이동 패턴에 대한 정량화뿐만 아니라 기후 요인 변화의 편차에 따라 빙하 발달부 물리적 환경의 민감 반응성을 산정하는 데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

Conflict of Interest

Hyun-Cheol Kim has been an Editorial Board of GEO DATA; however, he was not involved in the peer review selection, evaluation, or decision process of this paper. Otherwise, no other potential conflicts of interest relevant to this paper were reported.

Funding Information

This research was supported by 'the International Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (PN22070)' and Korea Polar Research Institute (PE23040).

5

□ 국내 및 국제 학술회의 발표 성과 증명

2021년 GeoAI데이터학회 추계 학술회 발표 성과 증명

GeoAI 데이터 공유를 위한 만남

2021.11.25(목)~26(금) 부산파라다이스호텔

주최 지오에이아이데이터 학회

주관 한국지질자원연구원, 국립생태원, 한국해양과학기술원, 국지연구소, 한국항공우주연구원, 한국환경연구원, 한국수자원공사, 국립기상과학원

11월 25일 (목)

Grand Ballroom

개회

13:00	개회식	장형섭 (Korea) (이사회 회장)
13:00	축사	김승희 (한국해양과학기술원 원장)
13:00	축사	김승희 (국지연구소 소장)
13:24	축사	김광준 (한국지질자원연구원 원장 직무대행)
13:32	축사	최도순 (국립생태원 원장)
13:40	축사	이상률 (한국항공우주연구원 원장)

Grand Ballroom 1

특별세션1	RS & AI 활용	주최: 이종재 (한국항공우주연구원)
14:20	(8부강) 다목적실용위성 고해상도 위성정보의 해당분야 활용 가능성	
14:35	이종재, 장재성, 이종재, 오관영, 정승희, 최성호 한국항공우주연구원 위성활동부	
14:35	초소형위성 관측정보 향상을 위한 사전 학습자료 구축	
14:50	장재성, 이고로, 최도순, 오관영, 최성호 한국항공우주연구원 위성활동부, (주)에이아이데이터	
14:50	DNN을 이용한 ASCAT 해상도자료의 정확도 향상	
15:05	박승현, 유세진, 손승환, 오관영, 최성호 한국해양과학기술원 해양데이터연구센터, 한국항공우주연구원 국가위성정보물류센터	
15:05	데이터를 이용한 KOMPSAT-5 영상 기반 선박 탐지 초기 실험	
15:20	이종재, 이종재 한국항공우주연구원 위성활동부	
15:20	위성영상 활용을 위한 인공지능의 역할	
15:35	전태근 (주)에이아이데이터	

특별세션5	기후변화 대응을 위한 극지 GeoAI 데이터 활용	주최: 김현철 (국지연구소)
16:20	무인기 활용 그린란드 빙하 표면 관측	
16:35	김승희, 이상재, 김현철 국지연구소 원격탐사방광정보센터	
16:35	영상데이터 기반 해빙의 육상 분포와 변화 추적	
16:50	박정현, 김현철 국지연구소 원격탐사방광정보센터	
16:50	영상데이터 기반 해빙의 육상 분포와 변화 추적	
17:05	박정현, 김현철, 박정현, 오관영 국지연구소 원격탐사방광정보센터, 울산과학기술원 도시환경공학부, 부산대학교 해양학과	
17:05	다중분광 무인기를 활용한 그린란드 식생 관측	
17:20	이상재, 김승희, 김현철 국지연구소 원격탐사방광정보센터	
17:20	연구지원 기반 북극 해빙정보 산출 및 예측 연구	
17:35	지현호, 김현철, 박정현, 이상재, 오관영 국지연구소 원격탐사방광정보센터, 세종대학교 지능형기상학부	

2021년 GeoAI데이터학회 추계학술대회 | 7

【특별세션5】 기후변화 대응을 위한 극지 GeoAI 데이터 활용

무인기 활용 그린란드 빙하 표면 관측

[김승희*, 이상재*, 김현철*]

1. 국지연구소, 원격탐사방광정보센터
* 교신저자: kimhc@kopri.re.kr

북극 그린란드 빙하의 융설속도는 기후변화로 인해 증가하는 추세다. 빙하 융설속도의 증가는 해수면 상승을 야기할 수 있으며 정확한 예측을 위해 정밀한 관측이 필요하다. 본 연구에서는 그린란드 서쪽 Kangerlussuaq 인근 Russe 빙하의 변화를 계산하기 위해 2021년 9월에 DJI Phantom 4 Pro 멀티콥터와 eBee 고정익 무인기를 활용하여 표면을 관측하였다. 획득한 영상의 전처리 수행 후 수치표면모델과 정사영상을 제작하였다. 2017년 7월에 촬영된 SPOT6 위성 영상과 비교하였으며 빙하 북쪽 끝단에서 2년동안 130~140 m 후퇴한 것을 확인하였다. 추후 인공위성 기반 수치표면모델과 비교를 통해 융설 속도를 계산할 수 있을 것으로 기대한다.

사사: 본 연구는 과학기술정보통신부 국가연구개발사업 (PN20070)의 지원을 받아 수행되었습니다.

【특별세션5】 기후변화 대응을 위한 극지 GeoAI 데이터 활용

다중분광 무인기를 활용한 그린란드 식생 관측

[이상재*, 김승희*, 김현철*]

1. 한국해양과학기술원 부설 국지연구소, 원격탐사방광정보센터
* 교신저자: kimhc@kopri.re.kr

지구표면 온도 관측이 가능해진 이래로 북반구의 대기는 점점 따뜻해지고 있으며, 지난 30년의 기간은 지구관측 이래로 가장 따뜻한 기간일 것이다[1]. 북극의 온난화로 인하여 파목 식물과 빙하, 기상의 변화 등 북극 생태계에 광범위한 영향을 미치고 있다. 북극지역의 토지피복 지도는 다양한 생태계 환경 관측과 감시 목적을 위해서는 필수적인 기초자료이다. 토지피복의 변화를 관측하기 위해서 다양한 원격탐사 자료를 이용한 관측이 이루어지고 있다[2]. 본 연구에서는 무인기를 이용하여 그린란드 장가루수아크(Greenland, Kangerlussuaq)지역의 러셀 빙하(Russell Glacier) 주변부의 다중 분광 영상을 획득하였다. Sensefly eBee와 Parrot Sequoia+ 다중분광 센서를 이용하여 Red, Green, Red-Edge, Near-infrared 및 광학카메라를 이용한 RGB 영상을 확보하였으며 영상정합기법을 이용하여 모자이크 하였다. 획득한 영상을 이용하여 러셀빙하 주변부의 NDVI, NDVI_{veg}, SAVI 등 지수정보를 구축하였다. 구축된 지수정보 및 정사영상은 향후 장가루수아크 러셀빙하 주변 환경변화의 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

사사: 본 연구는 과학기술정보통신부 국가연구개발사업 무인이동체 획득 영상 기반 빙하 모니터링 기술 연구(PN20070) 연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.J. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.), 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC
- Karami, M., Westergaard-Nielsen, A., Normand, S., Treier, U., Eberling, B. and Hansen, B., 2018. A phenology-based approach to the classification of Arctic tundra ecosystems in Greenland. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146, pp.516-529.

List of Posters

Session 5. Remote sensing in the Arctic

Online

- | | |
|--------------|--|
| P5 01 | UAV-based monitoring of geographical variations in Russell Glacier, Greenland
Yongkuk Jeong (Korea Polar Research Institute) |
| P5 02 | Assessment of Sea Ice Radiative Forcing according to Surface Albedo and Skin Temperature Changes over the Arctic Surface
Noh-hun Seong (Pohang National University) |
| P5 03 | Estimation of Arctic Sea Ice Thickness during the Melting Season
Jong-Min Kim (Korea Polar Research Institute) |
| P5 04 | Retrieval of Daily Pan-Arctic Sea Ice Thickness from Passive Microwave Data Using Deep Learning
Junhwa Chi (Korea Polar Research Institute) |
| P5 05 | Long-term variability of Arctic vegetation during last 20 years
Minji Seo (Korea Polar Research Institute) |
| P5 06 | Spectral Analysis and Classification of Arctic Vegetation using Terrestrial Hyperspectral Imagery
Jungyeon Yang (Korea Polar Research Institute) |
| P5 07 | Estimation of Cloud Condensation Nuclei (CCN) Concentration with Aerosol Chemical Composition and Optical Properties at the Zeppelin Station, Ny-Ålesund
Seohye Ahn (Korea Polar Research Institute) |
| P5 08 | Spatio-temporal variability of cloud top and tropopause heights over the Arctic from 10-year CALIPSO, GPSRO and MERRA-2 datasets
Haldong Yoo (Seoul National University) |
| P5 09 | Vertical Evolution of Precipitation Microphysics during Different Phases at an Arctic Location
Leisheng Saini (Indian Institute of Technology Indore) |
| P5 10 | Volcanic Activity Monitoring on Mount Melbourne, Antarctic and Fagradalsfjall, Iceland During 2021 Using Time-series InSAR
Wahyu Nugmanul Hakim (Kangwon National University) |
| P5 11 | Surface displacement of subarctic oil sands region analyzed by Sentinel-1 SBAS InSAR: A case study of northern Athabasca in Alberta, Canada
Taewook Kim (Kangwon National University) |

Abstracts of Poster Presentation

Session 5. Remote Sensing in the Arctic

Poster Presentation | P5_01

UAV-based monitoring of geographical variations in Russell Glacier, Greenland

Yongsik Jeong¹

Yongsik Jeong¹, Hyun-Cheol Kim¹, Sungjae Lee¹, Seung Hee Kim¹, Junhwa Chi¹

1. Korea Polar Research Institute

kimhc@kopri.re.kr

Abstract

According to rising global temperature, ice melting has been come up with a major problem in Arctic regions. Satellite-based remote sensing for monitoring variations of the glacier has been conducted by using optical/radar sensors. The UAV application is referred to as one of the monitoring technologies that can provide very-detailed spatial information. Compared to satellite platforms, it has advantages such as flexible flight scheduling, cost-effectiveness, and 3-dimensional (3D) measurements for local regions. In this study, we tried a UAV-based geospatial change detection in the end part of Russell Glacier, Greenland, and evaluate the efficacy of the UAV survey. The image acquisitions were based on the field trip in September 2021 and June 2022, respectively. We used both fixed-wing and quad-copter UAVs onboarded with an RGB camera and LiDAR sensor. A geometry of UAV images was collected and inputted from the GNSS systems receiving signals from GPS, GLONASS, Beidou, and Galileo. The ortho-mosaic and digital surface model (DSM) for each year are constructed by point clouds which are made by photogrammetry and laser altimeter point data. An ArcSceneX (constructed by satellite LiDAR data acquired in July 2018) is used to analyze a geometric difference between 2018 and 2021/2022. The maximum differences showed 40 and 50 m in the glacier wall part where can be existed a glacier collapsed. The surface of the Russell glacier showed a trend of elevation decreasing patterns in a center of the crevasse, regionally. However, more precisely collected UAV data and lower flight altitude for image acquisitions are required, and validation in a field-based survey is also required. A seasonal and seasonal effect (weather conditions) would be a major component that can cause an error bias in DSM. In future work, a fixed-season, two flight paths in a vertical structure with low altitude, and sensor-fitted measurement have to be reflected in the field, and densely-collected UAV data (more than 10 years) for this area will be a foundation to calculate ice-melting velocity and to define a relationship between wind, SST, Si, and CO₂ content.

The 27th International Symposium on Polar Sciences

Two decades of Korean Arctic research : Looking back to look forward

September 20-21, 2022
Online

Program Book



Photo by Kings Bay AS

UAV-based Monitoring of Geographical Variations in Russell Glacier, Greenland

Yongsik Jeong¹, Hyun-Cheol Kim^{1*}, Sungjae Lee¹, Seung Hee Kim¹, Junhwa Chil¹
¹Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute (KOPRI)
^{*}kimhc@kopri.re.kr

KOPRI
KOREA POLAR
RESEARCH INSTITUTE

ABSTRACT

[illegible]

MATERIALS AND METHOD

Fig. 1. Location map and high-resolution satellite image-based observation (KOMPSAT 3A) of study area.



Table 1. UAV specifications used in this study.

Type	Manufacturer	Max Weight	Operating Frequency	Packaging Accuracy	Max Speed	Max Payload	Max Price	Max Size	Max Range	Image of Drone
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	
Fixed-wing	Boeing BB-400-100-100-100	4 kg	2.4 GHz 5.2-5.8 GHz	1.1 mm	10.22 m/s	400 mm	\$60,000	100 cm	1000 m	

RESULTS & DISCUSSION

Fig. 2. 3-dimensional point cloud distributions constructed by RGB and LIDAR data acquisitions at 2022

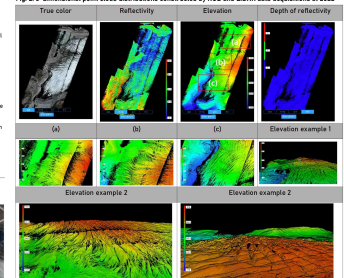
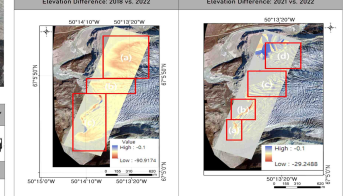


Fig. 3. Digital Elevation Model-based differences between 2018 and 2021/2022. (a to c) in the left are variations of three different parts. (a to d) in the right is also same as the left.



Acknowledgements

This work was supported by National Research Foundation (NRF) of Korea Grant of the Korean Government (NRF PN22070) and Korea Polar Research Institute (KOPRI) grants funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (KOPRI PE21045).



소형 무인기 기반 그린란드 러셀 빙하 변이 관찰 연구

정용식¹, 김현철¹, 이성재¹, 김승희¹¹ 국지연구소, 원격탐사환경정보센터

* 교신저자: kimhc@kopri.re.kr

지구 온난화로 인한 온도 상승에 따라 북극 지역에 분포하고 있는 빙하의 용융 가속화 현상은 자연과학 전 분야에서 큰 이슈로 대두되고 있다. 일반적으로 빙하 변화/변이를 모니터링하기 위한 위성 기반 원격 탐사는 광학/레이더 센서를 사용하여 수행되어왔다. 최근 활용도가 높아지고 있는 소형 무인기체(sUAV)는 상세한 공간 정보를 제공할 수 있는 모니터링 기술력으로써 적용 및 기대되고 있으며, 위성정보 플랫폼과 비교하여 유연한 비행 일정 설정, 비용 대비 효율성, 지역적 초고해상도 3차원 측량 및 지형공간정보 획득 등의 측면에서 유리한 장점을 가진다. 본 연구에서는 그린란드 Kangerlussuaq 인근에 위치하고 있는 Russell Glacier 말단부를 대상으로, sUAV 기반의 지리적 변화를 감지하고, 그 효율성을 평가하였다. sUAV 자료는 2022년 6월에 획득한 자료를 기반으로 하였으며, LIDAR 센서를 탑재한 sUAV 비행을 통해 획득된 자료에 해당한다. 획득한 자료는 GPS, GLONASS, BeiDou 및 Galileo에서 정밀하게 신호를 수신하는 고성능 GNSS 수신기로부터 제공받은 위치정보를 기반으로 하여 일력 및 수집되었다. 각 자료로부터 고해상도 포인트클라우드를 기반으로 하는 Digital Surface Model (DSM)을 구축하였다. 더불어 과거 대비 변화를 분석하기 위해 2018년 7월 위성 레이저 고도계 자료를 기반으로 제작된 ArcticDEM을 비교 자료로 활용하였다. 수치모형을 기준으로 비교를 수행한결과, 약 최대 90 m의 고도 변이 차이를 나타냈다. 광학위성영상으로부터 확인되었던 빙하선이 급격히 후퇴하는 북부 및 남부 지역 빙하표면과 더불어 빙하벽을 따라서도 큰 변이차이를 보였다. 이와 같은 결과는 지속적인 무인기 기반 빙하 모니터링을 수행했을 때, 매우 미세한 감지를 바탕으로 추정된 지역적 연간 빙하 감소량 및 속도를 추정하는데 활용될 수 있을 것으로 판단하며, 대기/기후 변화 요인과의 인과관계를 규명해 있어 근거자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 더불어 위성영상 기반 산출물의 지역적 검증자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 추후 더 낮은 고도에서의 촬영, 고충분률, 다양한 촬영각도를 적용한 무인기 기반의 공간정보의 획득이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 계절적 영향에 따라 본 연구지역의 DSM 구축에 있어 일관성의 오류가 발생할 수 있으므로 이를 고려한 공간적 규명이 이루어져야 할 것으로 생각한다.

2022년 GeoAIDE(터라)학회 추계학술대회 123

발표일정



Room 7 & 8

[천리안위성 2A/2B호 융복합 활용 컨퍼런스]

(09:00 ~ 16:45)

1. 개회식
발표제 소개 및 발표제 선포식 소개 유수형 (한국해양과학기술원)
PACE/GLIMAR 개발 진행 현황 Antonio Mannino (NASA)
2. 천리안위성 2A/2B호 운영현황
GOCS 운영현황 및 계획 최석민(국립해양조사원)
GOCS 운영현황 및 계획 정재현(국립해양조사원)
천리안위성 2A/2B 위성 운영현황 현황 변재영(국가기상연구소)
3. 천리안위성 2A/2B호 융복합 활용
천리안위성 2A/2B호 데이터 융합 활용 연구 홍성희(서울대학교)
GOCS/2B의 다양한 위성자료 융합을 통한 해양수산 분야 개선 박성서(JNIST)
GOCS/2B 융합 데이터를 통한 해양 생태계 모니터링 연구 최중국(한국해양과학기술원)
GOCS/2B를 활용한 우리 나라 주변 해역 오염 원인 분석 안경호(JNIST)
4. 천리안위성 2A/2B호 진보현황
GOCS 위성데이터/데이터 융합 개선현황 안재현(한국해양과학기술원)
GOCS 관측 데이터/데이터 융합 현황 및 향후 계획 문경호(국립해양조사원)
천리안위성 2A/2B 위성데이터/데이터 융합 현황 오대현(국가기상연구소)
천리안위성 2A/2B 위성데이터/데이터 융합 현황 및 향후 계획 이현식(한국해양과학기술원)

16 2022년 GeoAIDE(터라)학회 추계학술대회

발표일정



Room 1

제주 해양생태환경 변화 연구
0900 제주 북부 해역 고위험 해역의 해빙 자료를 이용한 자료분석 연구
0915 김경민, 정성민, 최영수 한국해양과학기술원 제주특성연구소, 전남대학교, 학원대학교
0915 Long-term fluctuations in the coastal ecosystem of Jeju Island
0930 박성민, 최선관, 김유하 제주대학교 해양생태학과, 제주대학교 기후변화대응센터, 제주대학교 지구환경과학과
0930 제주 해역 아열대 해양생태계 모니터링을 위한 AIMS 분석 방법 연구
0945 양현상, 최현우, 이광재, 김재현, 김민호, 윤건우, 장도환 한국해양과학기술원 제주특성연구소, 한국해양과학기술원 생태계연구소, 서서생물연구소
0945 제주 연안 해역 해양생태계의 영향력 분석
1000 이태희, 최수환, 박성민, 최선관, 손영학 한국해양과학기술원 제주특성연구소, 제주대학교 해양생태학과 교수, 제주대학교 해양생물학과 교수
1000 제주 연안 해역 해양생태계 분석
1015 손영학, 최수환, 박성민, 이태희 한국해양과학기술원 제주특성연구소, 제주대학교 해양생태학과
1015 제주 해양생태계 아열대 해양생태계 구축 및 활용 기법 연구
1030 손영학, 이태희, 오현정, 최수환, 김민호, 김도환 한국해양과학기술원 제주특성연구소
북극 환경 변화 관찰 분석을 위한 원격탐사 연구
1050 영상데이터 기반 북극권 고해상도 위성 영상 지도 생성 연구
1105 박영환, 김현철 국지연구소 원격탐사환경정보센터
1105 소빙권에서 가장 그린란드 빙하의 변화 연구
1120 정용식, 김현철, 이성재, 김승희 국지연구소 원격탐사환경정보센터
1120 Is primary production in the Antarctic polynya system declining?
1135 박한구, 김경환, 최영민, 이성재, 김현철 국지연구소 원격탐사환경정보센터, 국지연구소 해양생태연구소, 뉴질랜드국립 해양연구소
1135 수중이산화탄소 농도 자료를 이용한 아열대 해양의 수온 변화
1130 김현철, 김현철 국지연구소 원격탐사환경정보센터
1130 국지 위성자료 수열 및 수리형 시스템 활용
1205 이성재, 김현철 국지연구소, 원격탐사환경정보센터

11월 17일 목요일

2022년 GeoAIDE(터라)학회 추계학술대회 17



GeoAI D.A. Society
2020년 서울특별시 행정안전부 주최, 서울특별시 행정안전부 주관
Web: www.gaidas.org / Tel: 02-6490-5692 / Email: geoidas@gmail.com

https://www.gaidas.org

GeoAI 데이터 나눌수록 커집니다

완벽한 인공지능기술을 위하여
당일의 GeoAI 데이터를 만들고 공유합니다.

| 일 시 | 2022. 11. 15. (화) ~ 11. 18. (금)
| 장 소 | 그랜드 하얏트 제주

2022년 GeoAI데이터학회 추계학술대회

- 주최: (사) GeoAI데이터학회
- 주관: 국립기상과학원, 국립생태원, 국립환경과학원, 국방과학연구소, 극지연구소, 한국수자원공사, 한국지질자원연구원, 한국항공우주연구원, 한국해양과학기술원, 한국환경연구원
- 후원: 한국지능정보사회진흥원 SI-HUB

GeoAI D.A. Society

2023년 GeoAI데이터학회 춘계 학술대회 발표 성과 증빙

23. 12. 29. 오전 9:39
[GeoAI데이터학회] 2023 춘계컨퍼런스 초록 접수 최종 완료 안내 드립니다.

GeoAI데이터학회 2023 <gaidas@gaidas.org>
2023-06-02 (금) 오후 1:51

받는 사람: 정용식 | 열거탐사방관정보센터 <yongsik@kopri.re.kr>

2023년 (사)GeoAI데이터학회 춘계 컨퍼런스
GeoAI 데이터가 많아서, 각자의 미래를 만듭니다.

일시 | 2023.06.27 (화) ~ 06.29. (목) 장소 | 차크 하얏트 부산

GeoAI데이터학회 2023 춘계컨퍼런스
초록접수 최종 완료되었습니다.

정용식 님의 초록접수 최종 완료되었습니다.
초록 마감일 전까지 홈페이지에서 수정 및 접수 철회 가능합니다.

- 초록접수 마감일: 2023년 06월 09일 (금)

접수번호	2023S_0016		
접수자 정보			
성명	정용식	소속	극지연구소
이메일	yongsik@kopri.re.kr	휴대폰번호	010-3474-1611
주소	[21990] 인천 연수구 송도미레로 26 원격탐사방관정보센터		
비밀번호		FAX	

소속 정보

https://mail.kopri.re.kr/owa/#path=/mail/research

1/3

23. 12. 29. 오전 9:39

이메일: yongsik@kopri.re.kr

번호	* 소속		
1	극지연구소		

발표자 정보

성명	정용식	소속	1
이메일	yongsik@kopri.re.kr	휴대폰번호	010-3474-1611

책임자 정보

성명	김현철	소속	1
이메일	kimhc@kopri.re.kr	휴대폰번호	010-8938-2675

공동저자

성명	이성재	소속	1
성명	김승희	소속	1

초록정보

* 발표형식

특별세션 (구두)

* 발표 분야

극지연구소-극지 빅데이터 분석 및 활용 기술 개발

* 제목

그린란드 빙하 말단 소형 무인기 라이다 센서 기반 정밀 지형 데이터셋 구축

* 본문

그린란드는 거대 대륙빙하를 포함하고 있으며, 최근까지 지구온난화에 의해 빙하용융의 영향력이 확대되는 추세에 있다. 기존 인공위성 측정 자료 기반의 광역의 모니터링이 이루어지고 있으나, 극지역의 기후, 상층 패턴에 가속화됨에 따라 지역적 범의 관측의 수요가 증가되었다. 본 연구에서는 소형 무인기 라이다 센서를 활용하여 그린란드 라벨 빙하를 대상으로 정밀 지형 데이터셋을 제작하였다. 약 100~200 m 고도 환경에서 획득한 라이다 자료를 기반으로 정밀 수치표면모형을 구축하고, 2 m 샘플 간격으로 재배열된 영상 자료를 제작하여 과거 수치표면모형 자료와 전후비교를 통해 활용가능성을 확인하였다. 본 연구에서는 전후 비교에 활용된 후처리 적용 정밀 수치표면모형 영상자료를 제공한다.

사사

This research was supported by the International Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (PN22070) and Korea Polar Research Institute (PE23040).

https://mail.kopri.re.kr/owa/#path=/mail/research

2/3

참고문헌

이미지 자료 (도표나 범례 등)

자료 1 2021True_cp.jpg

자료 2

초록접수 확인

(사)GeoAI데이터학회

주소 : 서울특별시 강남구 광령로 56길 8-13(수서타워) 816호

사업자등록번호 : 780-82-00418 | 전화번호 : 02-6677-5682 | 이메일 : gaidas@gaidas.org

<https://mail.kopri.re.kr/owa/pad?m=mail&search>

3/3

국지 데이터 분석 및 활용 기술 개발

June 29 (Thu), 10:45-12:15

Ballroom 2

Chair : 김현철 (국지연구소)

10:45-11:00

국한지 빅데이터 분석 플랫폼을 활용한 기후변화 모니터링 시스템 구축 및 분석 방법 연구
박종필 (한국해양과학기술원)

11:00-11:15

국지통합정보시스템의 구축을 통한 국지 빅데이터 활용
주동찬 (국지연구소)

11:15-11:30

원격 탐사 기반 지하생물 다양성 개선을 위한 남극 해양나 지형의 해역 위성 산출물 구축
박민구 (국지연구소)

11:30-11:45

그린랜드 빙하 변동 소용량 위성 데이터와 위성 기반 빙하 지형 데이터셋 구축
정용식 (국지연구소)

11:45-12:00

2022년 아메리칸 태평양 환경조사 자료 구축: 태평양 고도와 이들 데이터를 중심으로
사민지 (국지연구소)

12:00-12:15

질의 응답

서울 돌출된 탄소흡수원 분석

June 29 (Thu), 13:30-15:00

Ballroom 2

Chair : 이영진 (한국환경연구원)

13:30-13:45

[초청 강연] Sentinel-1을 활용한 고령 인연 광역구 습지 및 사계절 변화 패턴
박정영 (한국해양과학기술원)

13:45-14:00

드론 원격탐사용 활용된 해상 영상 측정
Navally Umutonmase (부경대학교)

14:00-14:15

Spaceborne LiDAR GEDI 기반 산림 지형부 탄소량 추정 연구
이선민 (한국환경연구원)

14:15-14:30

온실가스 인벤토리 고도화를 위한 데이터 기반 사례 분석 -LULUCF 분야를 중심으로-
조승환 (한국환경연구원)

14:30-15:00

질의 응답

선박탐지 시 활용기술

June 29 (Thu), 15:15-16:45

Ballroom 2

Chair : 백원중 (한국해양과학기술원)

2023년 GeoAI데이터학회 추계 학술대회 발표 성과 증빙

[GeoAI데이터학회] 2023 추계학술대회 초록 접수 최종 완료 안내 드립니다.

GeoAI데이터학회 2023 <gaidas@gaidas.org>

2023-10-16 (월) 오후 5:13

받는 사람: 정용식, 윤지현, 방관정, 정보센터 <yongsik@kopri.re.kr>

GeoAI데이터학회 2023 추계학술대회
초록접수 최종 완료되었습니다.

정용식 님의 초록접수 최종 완료되었습니다.

초록 마감일 전까지 홈페이지에서 수정 및 접수 철회 가능합니다.

- 초록접수 마감일 : 2023년 10월 18일 (수)

접수번호 2023F_0055

접수자 정보

성명	정용식	소속	한국해양과학기술원 부설 국지연구소
이메일	yongsik@kopri.re.kr	휴대폰번호	010-3474-1611
주소	[21990] 인천 연수구 송도미레로 26 국지연구소		
비밀번호	8***	FAX	

소속 정보

번호	* 소속
1	한국해양과학기술원 부설 국지연구소

발표자 정보

성명	정용식	소속	1
이메일	yongsik@kopri.re.kr	휴대폰번호	010-3474-1611

책임자 정보

성명	김현철	소속	1
이메일		휴대폰번호	

공동저자

성명	김현철	소속	1
성명	이성재	소속	1
성명	김승희	소속	1

초록정보

* 발표형식	특별세션 (구두)
* 발표 분야	한국항공우주연구원-고해상도 위성정보의 해양 활용
* 제목	소형 무인기 탐사 기반 그린란드 라셀 빙하 감소 관측 연구

* 본문

북극권은 과거대비 꾸준한 온도상승 현상이 나타나고 있으며, 최근 그린란드의 대륙빙하용융 이슈는 범지구적 환경변화에 영향을 미칠 수 있는 요인으로써 많은 주목을 받고 있다. 그린란드 대륙을 대상으로 인공위성 고도계 및 SAR 자료를 통한 관측이 미국 및 유럽 주요 연구기관을 중심으로 수행되어오고 있으나, 북극권 기후변화의 최대지 및 가속화 현상에 대응하여 보다 정밀한 관측이 요구되고 있다. 본 연구에서는 그린란드 환경에서 소형 무인기 탐사 기반 라셀 빙하 관측을 수행하였다. 고정위 및 위성 무인기 및 GeoSAR 및 라이다 측량 센서를 통해 총 3개년의 하계 라셀 빙하 일대 고해상도 자료를 획득하였다. 획득한 측량 자료를 바탕으로 3차원 포인트 클라우드를 구축하고, 크리깅 내삽(Kriging) 및 포인트 갭 필링(Gap-filling) 기반의 1 m 간격 정밀수치표면

모델(Digital Surface Model, DSM)을 작성하였다. 구축 자료를 기반으로
리셀 빙하 일대의 전후 변화를 비교 분석하였다.

This research was supported by Strategic Networking & Development
Program funded by the Ministry of Science and ICT through the National
Research Foundation of Korea (RS-2023-00269684) and the International
Research & Development Program of the National Research Foundation
of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-
2019K1AA7A0211256).

참고문헌

이미지 자료 (도표나 범례 등)

자료 1

자료 2

초록집수 확인

(사)GeoAI데이터학회
주소 : 서울특별시 강남구 광령로 56길 8-13(수서타워) 816호
사업자등록번호 : 780-82-00418 | 전화번호 : 02-6677-5682 | 이메일 : gaidas@gaidas.org

15:00-15:15	천리안 2B호 정확도 향상연구 최종국 (한국해양과학기술원)	Nov 8 (Wed), 16:30-16:45
15:15-15:30	2022년~2023년 현장관측자료를 이용한 천리안 2B호 산출물 정확도 품질검증 결과: 원격탐사도 및 IOP 산출물 민지훈 ((주)유에스티21)	
15:30-15:45	2022년~2023년 현장관측자료를 이용한 천리안 2B호 산출물 정확도 품질검증 결과: 환경 및 수중 빙도 관련 산출물 전형익 ((주)유에스티21)	
15:45-16:00	GOCH-II 장비정 관원 2023년도 현장조사 수행 결과 및 프로토콜 작성 문정연 (한국해양과학기술원)	
16:00-16:15	천리안 2B호 자료분석 플랫폼 박성주 ((주)블루스페이스인원디)	
16:15-16:30	질의 응답	
GOCH-II 정확도 향상 연구 II Chair: 최종국 (한국해양과학기술원)		
16:30-16:45	천리안 해양위성 2호 에어로졸 산출 알고리즘 개선 김준 (연세대학교)	Nov 8 (Wed), 16:30-16:45
16:45-17:00	2023년도 천리안해양위성 2호(GOCH-II) 대기보정 개선 현황 및 후속 계획 안재현 (한국해양과학기술원)	
17:00-17:15	GOCH-II Level 3 자료 연속성 및 업로드능력/배우 알고리즘 개선 박명숙 (한국해양과학기술원)	
17:15-17:30	천리안 2B호 기반 부유체조류(생성이모자반) 탐지 연구 손영택 (한국해양과학기술원)	
17:30-17:45	천리안 2B호 육상 알고리즘의 정확도 및 활용성 분석 김선화 ((주)파픽셀)	
17:45-18:00	질의 응답	
GOCH-II 정확도 향상 연구 III Chair: 이광재 (한국항공우주연구원)		
15:00-15:15	다목적성용위성 다중센서 기반의 선박탐지 및 분류 이광재 (한국항공우주연구원)	Nov 8 (Wed), 16:30-16:45
15:15-15:30	고해상도 위성영상 기반 선박 탐지 결과와 선박 신호의 자동 정합 기법에 대한 연구 장재영 (한국항공우주연구원)	
15:30-15:45	소형초 해양과학기지 CCTV 기반 해양기상상황 분류 AI 개발 박승환 (한국해양과학기술원)	
15:45-16:00	수형 무인기 탐사 기반 고해상도 영상을 통한 침수관측 연구 임용식 (극지연구소)	
16:00-16:15	SAR 영상을 활용한 해양 관련 에너지 자원 모니터링 양희인 ((주)전택)	
16:15-16:30	질의 응답	
임신 GaoAI 기반 해양임시 Chair: 백화영 (한국해양과학기술원)		
16:30-16:45	위성 영상을 활용한 멀티 모달 데이터 융합 AI(제리) 기반 선박 경로 추적 전민수 (KAIST)	Nov 8 (Wed), 16:30-16:45
16:45-17:00	CONTEC Space Studio Platform과 해양 솔루션 홍성재 ((주)전택)	
17:00-17:15	유인기를 이용한 해양 데이터 수집체계 제시 김재현 (서울시립대학교)	
17:15-17:30	GOCH-II를 활용한 선박 탐지 및 추적 가능성의 기초 연구	



주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 전략형 국제공동연구사업 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부(한국연구재단)에서 시행한 전략형 국제공동연구사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.



(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.