

스발바르 콩스 및 이스 피오르드  
지형변동성 특성화 연구

Characterization of geomorphologic variability of  
Kongsfjorden and Isfjorden in Svalbard



서울대학교 산학협력단

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 스발바르 피오르드 지형변화 연구” 과제의 위탁연구 “스발바르 콩스 및 이스 피오르드 지형변동성 특성화 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	남 승 일
위탁연구기관명	:	서울대학교 산학협력단
위탁연구책임자	:	최 경 식
위탁참여연구원	:	김 도 형
“	:	석 정 웅
“	:	원 문 성
“	:	전 지 혜
“	:	조 주 희

## 보고서 초록

위탁연구과제명	스발바르 콩스 및 이스 피오르드 지형변동성 특성화 연구				
위탁연구책임자	최 경 식	해당단계 참여연구원수	6	해당단계 연구비	70,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 산학협력단 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약				보고서 면수	33
<p>해안절벽, 피오르드와 같은 접근하기 어려운 지역에서 무인 항공기를 활용하여 광역적인 지역에서의 정밀 사진측량자료를 획득하는 연구 접근방법은 국내 최초로 시도된 것으로, 공간적인 제약을 극복하고 광범위한 영역에서의 지형자료를 획득하여 UAV를 활용한 지형 변동성 분석연구기법을 확립하고자 하는 것을 목표로 함. 대부분의 북극지역에서의 지질조사는 육상지역에 초점이 맞춰져 있었음. 본 연구과제와 같이 무인 항공기(UAV)를 활용하여 피오르드 연안지역의 침·퇴적양상을 연구하는 것은 본 연구진에 의해 최초로 시도된 연구임.</p> <p>본 연구를 통해 스발바르 콩스 및 이스피오르드 지역에서 정밀 지형측량 수행 및 오차 보정을 위한 4 지점의 기준점을 확보하였으며, 콩스 피오르드 연안에 발달한 연안 사취에 3개의 측선을 설정, RTK-GPS를 통한 정밀 지형 측량을 수행하였음. 사취의 해안선은 매우 단조로운 특징을 가지고 있으며, 석호가 발달하고 있는 점, 와시오버(washover) 퇴적층이 석호방향으로 형성되어 있는 점을 고려할 때, 파랑에 의한 퇴적작용이 현저한 퇴적지형으로 해석됨. 다산 기지 남쪽 500m 지점 망상하천 발달 지역의 퇴적환경 분석, 용빙수에 의해 형성되는 퇴적 지형 특성 분석을 수행하였음. 또한 강화도 조간대 조수성사주의 형태 및 분포특성을 파악하였고, UAV를 사용하여 정밀사진자료로 3차원 DEM 모델의 생성 및 성공적인 정확도 검증을 수행하였음. 연안사주 지역에서 불교란 시료를 획득하여 퇴적상을 분석하였고, 퇴적물 이동 및 퇴적에 주요하게 작용하는 요인 및 환경해석을 위한 기초 자료를 구축하였음. 본 연구과제 1차년도에 수립된 세부 연구내용 주요 목표는 국내·외에서 수행된 조사를 통해 모든 연구목표는 100%의 달성도를 이루었음.</p> <p>본 연구를 통해 개발된 UAV를 활용한 지형 변동성 분석 연구기법은 북극지역 뿐만 아니라 전세계 육상-연안지역에 폭넓게 적용될 수 있으므로 지형변동성을 모니터링 하는데 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 판단됨. 장단기간의 시계열 관측자료 획득 및 분석을 토대로 침·퇴적양상 및 지형변동성에 기초한 지질위험도면을 제작할 수 있는 원천 기술의 확보가 가능하고, 육상-해양 전이지대에서의 물질순환에 대한 정보를 제공하는 기술 개발이 가능하여 정확한 기후복원 및 기후변화 예측연구에 활용될 수 있을 것으로 판단됨. 피오르드 지형의 변동성을 평가하고, 지질학적인 특성화를 통하여 과거의 지형 변화과정을 추적하고, 미래의 변화과정을 예측함으로써 피오르드 연안지역 경제개발 활동에 가장 중요한 원천 자료를 제공할 수 있음. 기후 온난화 추적 프록시의 연구에 있어서 핵심적인 정보를 제공함에 따라 기후변화 및 해수면 변화를 추적하기 위한 기초과학 연구에 중요하게 활용. 지질학 및 지형변동성에 대한 기술·정보를 제공함으로써, 극지역에 진출하고자 하는 기업의 기회비용 감소 및 사업 성공률 향상에 기여할 수 있음.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	피오르드, 지형변화, 침식, 퇴적, DEM, 측량, 지질특성화, 스발바르, 시계열 분석			
	영 어	fjord, morphologic change, erosion, deposition, DEM, levelling, geological characterization, Svalbard, time-series analysis			

# 요 약 문

## I. 스발바르 콩스 및 이스 피오르드 지형변동성 특성화 연구

### II. 연구개발의 목적 및 필요성

북극지역은 과거 해빙으로 연중 덮여 있는 항해를 할 수 없는 미답의 지역으로, 파랑의 작용이 미약하여, 연안지역의 침식현상이 뚜렷하지 않은 지역이었으나, 최근 기후온난화와 함께 해빙면적의 축소, 파랑의 세기 강화 등으로 인해 연안지역에서의 침식작용이 가속화되면서, 연안지역에 건설된 인프라, 거주지역에 직접적인 피해를 주고 있으며, 기후온난화의 경향성을 고려해 볼 때 향후 급격한 해안선의 변화를 예측하기 위한 체계적인 연구가 시급한 상황임.

북극지역에서의 해안침식현상은 복합적인 요인의 상호작용 결과에 의해 공간적으로 다양한 양상으로 나타나는 것이 특징적이며, 지형의 변동성을 예측하기 어려운 특징을 가지고 있음.

북대서양 표층수의 영향을 받는 스발바르 군도의 피오르드는 전 지구적 기후변화가 가장 빠르게 일어나고 있는 곳으로 조수빙하의 빠른 후퇴에 따른 환경변화 모니터링뿐 아니라 기후 변화 복원연구를 위한 최적의 연구지역임

본 연구는 스발바르의 피오르드에서 발생하고 있는 연안지형을 정밀하고 정확하게 측정하고, 시계열 분석을 통해 지형의 변동성을 평가하며, 이러한 실측 자료를 기반으로 향후 피오르드지형의 변화양상을 예측하는 것이 주요 목적임.

콩스피오르덴(Kongsfjorden) 및 디슨피오르덴(Dicksonfjorden)에 발달하는 퇴적환경의 퇴적학적 특성을 규명하고, 퇴적층의 공간적 분포양상과 층서, 이를 제어하는 외부 기작을 분석하고, 항공촬영을 통한 정사이미지 획득, 정밀 지형측량, DEM 생성을 통한 침식지형과 퇴적지형의 지형 변동성 분석을 수행하고자 함.

이러한 실측 자료를 기반으로 생산된 지질특성화 및 지형변동성 관련 도면들은 동지역에 거주하는 거주민의 안전을 담보하고, 동지역에 진출하려는 기업들의 경제활동을 극대화시키는 데 활용될 수 있을 것으로 예상됨.

스발바르 지역 내에 북극 연안환경 변화를 장기적으로 관측하고, 수집된 정보를 분석하며 이를 SIOS 지식센터와 공유하기 위한 스발바르 피오르드연안 관측정점의 설치 및 운영, 연구 공조체제 구축하여 북극연구역량 강화 추진

### III. 연구개발의 내용 및 범위

스발바르내 콩스피오르드와 이스피오르드 지역에서 침식지형과 퇴적지형을 선정하여, 장기간에 걸쳐 반복적인 정밀 측량을 수행하고, 시계열 분석을 통해 지형변동성을 특성화함.

피오르드지형의 지형변동성 특성화를 위한 모니터링 체계를 구축하기 위해 관측정점과 측선을 설계하고, 정밀 측량, 무인항공측량, 항공사진, 인공위성 사진등을 분석하여, 스발바르 피오르드의 연간 지형변동성을 정량적으로 분석함.

정밀 측량 결과들의 시계열 분석을 통해, 피오르드 지형변동성의 규모 및 변화량의 추세를 분석하고, 미래의 변화를 추정하기 위한 평가를 실시함.

특히 접근성의 한계가 뚜렷한 연구지역의 특성을 고려하여, 무인항공기를 활용한 DEM제조를 실시하고, DEM의 시계열 분석을 통해, 퇴적물의 유출입량에 대한 정보를 획득함.

이와 함께 지형관측대상 피오르드 지역의 지질을 특성화하기 위해, 연구지역의 지형적 요소, 층서, 층면구조, 경사, 연장성, 식생유무, 기반암, 단구형태, 수로의 인접성, 동토의 특성, 퇴적상, 암상 등 다양한 지질학적 정보를 체계적으로 수집하고 분석함. 이러한 지질학적 정보들과 지형변동성과의 연관성을 고찰함으로써, 지형변동성에 영향을 주는 주요 지질학적 요인을 특성화하고, 이를 데이터베이스화 함.

지형변동성을 제어하는 외부 환경적 요인을 분석하고 평가하기 위해 주요 환경적 요인인 기상, 빙하, 파랑, 해수면 변동에 대한 정보를 수집하고 분석하여 환경제어요인들의 중요도 순위를 설정하고, 향후 동지역의 지형변동성을 제어하는 프로세스 모니터링 연구대상을 선정함. 정밀 측량결과와 장기간 시계열 분석과 지질특성화 결과를 종합하여, 스발바르 피오르드지형의 지질특성화 및 지형변동성 정보를 담고 있는 도면을 제작하고 지질학적 위험도를 평가함.

### IV. 연구개발결과

측량 기준점의 정확도 향상을 위하여 위성신호를 장시간 획득하였으며, 명확히 식별되는 고정점을 확보하고 이를 기준점으로 선정함. 다산기지 인근 콩스피오르덴 입구에 발달하고 있는 연안사취에서 측량 기준점 2 곳의 경위도 좌표, UTM, 고도값을 각각 획득함.

단기간 지형변화가 예상되는 해안선을 대상으로 복수의 측선을 설정하고, 정밀 측량을 수행함. 콩스피오르덴 입구 연안사취에서 해안선과 평행한 1.5 km 측선, 해안선과 직각 방향의 70m, 45m 측선에 대한 정밀 지형측량을 수행함. 자갈 해변, 사취, 석호 퇴적지형을 관찰하였고 파랑의 영향을 받은 층면구조 형태적 특성을 관찰함. 연안 사취의 동쪽지역의 고도가 상대적으로 높으며, 해안보다 석호 방면에서 급경사면이 형성됨.

무인항공기를 활용한 정밀항공사진촬영 및 3차원 DEM을 생성함. 강화도 여차리 하부조간대 조수성 사구를 대상으로 3차원 DEM을 생성하였음. 조수성 사구들은 대부분 썰물방향의 비대칭성과 썰물방향으로의 이동양상을 보이며 일일 최대 2미터 이상 이동한 것으로 분석됨.

지면과 연직방향으로 Cancore 를 삽입하여 불교란 시료를 획득한 후, 시료 표면에 에폭시를 가하여 퇴적물의 공극 차이에 반영하는 relief peel을 제작하고 퇴적상을 분석. 가로 10cm, 세로 15cm의 Peel을 제작. 중·하부는 중립질의 모래로 구성되어 있으며 파랑에 의해 형성된 수평, 경사층리 퇴적구조가 발달함. 상부에 지름 3cm 내외의 자갈 퇴적물이 피복하고 있음.

## V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구과제에서 개발될 핵심적인 기술은 스발바르 피오르드 지형의 변동성을 평가하고, 지질학적인 특성화를 하는 것임. 즉 특정 피오르드 지역의 침식 및 퇴적작용의 시공간적 특성을 규명함으로써 동 지역의 과거변화과정을 추적하고, 미래의 변화과정을 예측하는 기술을 개발하는 것임. 이러한 기술은 스발바르 피오르드 지역의 연안역에 대한 경제적인 개발활동에 가장 중요한 원천자료를 제공할 뿐 만 아니라, 피오르드 지역에 거주하고 있는 거주민의 안전을 도모하기 위한 핵심자료로서 활용될 수 있음.

또한 스발바르 피오르드에 위치하고 있는 유적지 및 사적지의 효율적 관리방안 마련에도 활용될 수 있음. 즉 지형변화가 가속화되고 있는 지역내에 유적지 및 사적지가 위치하고 있는 경우, 이를 효과적으로 보호하고, 재배치 및 방치와 같은 행정적 의사결정 도출시에 본 연구의 기술이 활용될 수 있음.

스발바르 피오르드의 지형변화는 기후온난화와 밀접하게 관련이 있으며, 해빙의 감소, 적설량의 증가, 파랑의 세기 강화, 해수면 변동 등과 같은 상호 복잡하게 연결되어 있는 기후온난화 추적 프록시의 연구에 있어서 핵심적인 정보를 제공함. 따라서, 극지역의 기후변화 및 해수면 변화를 추적하기 위한 기초과학 연구에 긴요하게 활용될 수 있음.

스발바르 피오르드지역을 비롯한 극지역에 진출하고자 하는 기업에게 현지의 지질학 및 지형변동성에 대한 기술정보를 제공함으로써, 기회비용을 최소화하고, 성공적인 현지진출을 지원할 수 있는 실용적 목적으로 활용이 가능함.



# S U M M A R Y

## I. Characterization of geomorphologic variability of Kongsfjorden and Isfjorden in Svalbard

### II. Purpose and Necessity of R&D

Arctic region has been known as no significant wave-erosion along the coastline because the region is covered by thick sea ice year-round and wave action is not strong. However, recent climate warming reduces ice-covered area and intensified wave actions. As a result, coastal erosion has been evident along the some of the coastal areas and has threaten infrastructures and residential areas located near the coastlines. Considering the acceleration of recent climate change, organized and systematic study to predict future coastal changes is timely and imperative. As coastal erosion in the arctic region is the product of interrelated factors, prediction of future coastal morphologic changes is a challenge.

Fjords in the Svalbard, influenced by North Atlantic Surface Waters, are the places where rapid changes occur in response to climate warming and are considered an ideal venue for environmental monitoring due to the retreat of tidal ice and for researches of climate changes and reconstruction.

This study aims to measure coastal morphodynamics of fjord in the Svalbard, to quantify the morphodynamics through the time-series of morphologic measurements, and to predict future morphologic changes of coastal areas in the fjord based on the observation data.

This study will conduct sedimentological analysis, mapping of surface sediment distribution, stratigraphy, external factors affecting sediment transport, acquisition of geo-referenced ortho-photos and DEM using UAV, quantification of morphodynamics in erosional and depositional coastlines.

Based on these observation, maps containing information about geological characterization and morphodynamics will be produced. These maps will be utilized to ensure the safety of residents who lives in the fjord of Svalbard and to facilitate economic activity of companies who plan to run business in the arctic region.

The purpose of this study is to monitor long-term coastal environmental changes, to analyze observed dataset and to establish observation station and transects, to exchange data with SIOS knowledge center to strengthen the capability of arctic research.

### III. Contents and Extent of R&D

This project aims to characterize morphodynamics through long-term observation of coastal morphology in the erosional and depositional coastlines in the Kongfjorden and Isfjorden in the Svalbard.

Annual morphodynamic changes will be documented through the analysis of precision profiling, photogrammetry using UAV, satellite imagery at the study locations and transects for the monitoring of long-term morphodynamic changes in the fjord.

Through time-series analysis of precision morphologic measurements, magnitude and trend of morphodynamics will be documented and evaluated for the prediction of future changes.

In particular, DEM using unmanned aviation vehicle (UAV) will be made considering poor accessibility of study area. Sediment flux will be measured using time-series analysis of DEM.

In order to characterize the geology of the fjord of interest, various aspects, such as morphology, stratigraphy, bedform, slope gradient, connectivity, vegetation cover, basement, terrace, proximity of channels, permafrost, facies, lithology, will be collected and analyzed. Factors controlling the morphodynamics will be characterized and summarized into a database by correlating the factors with the morphodynamics.

To analyze the environmental factors that control morphodynamics, observation data regarding weather, glacier, waves, sea level change will be collected and analyzed to establish the hierarchical orders of the environmental factors. Long-term monitoring sites will be decided based on the hierarchical orders of the environmental factors.

By combining long-term time-series analysis of precision profiling results and geological characterization, maps containing geological characterization and morphodynamics will be made and geological hazard will be evaluated.

#### IV. R&D Results

Accurate positioning and elevations were measured at two locations in the Kongsfjorden near Dasan station through long-term acquisition of satellite signals using RTK-GPS. Benchmark locations for the time-series of morphologic measurements were established in the coastal area.

Accurate morphologic measurements were conducted along transects where short-term morphologic changes are anticipated. Morphologic measurements were conducted along 1.5-km-long transect that runs parallel to spit and along 70 m and 45 m-long transects that are perpendicular to the coastlines in the entrance of Kongsfjorden. Gravel beach, spit and lagoon were described and sedimentary structures of wave-influenced beach were documented in detail. The eastern part of the spit has higher elevation. Landward side of the spit has steeper slope gradient than the seaward side of the spit.

High resolution aerial photographs and three dimensional elevation model (DEM) were obtained using unmanned aerial vehicle (UAV). For the tidal dunes in the intertidal zone

of Yeochari tidal flat in Ganghwa Island, accurate three dimensional DEM were produced. The tidal dunes are either ebb-asymmetric or flood-asymmetric and migrate as fast as 2 m per day.

Relief peels were made for cores obtained from Kongsfjord. Peels are 10 cm in width and 15 cm in length. Sediments in the coastal area near outwash delta consist of parallel to cross-bedded medium sands in the middle to lower part and angular gravels of 3 cm in diameter in the upper part.

## V. Application Plans of R&D Results

Key results to be documented in the present project are to evaluate morphologic change and to characterize geological features in the coastal environment in the fjord. Through elucidation of erosion and deposition in time and space in the fjord, this project aims to develop technology that enables us to track down changes in the past and to predict future changes. This technology not only provides basic data for economic development of coastal areas in Svalbard fjord but also can be utilized as key dataset to secure safety for local residents in the fjord.

In addition, results can be utilized as means for effective management of historic sites in the Svalbard fjord. In particular, the sites are located in the coastal regions that experience rapid morphologic changes, the results of the present study can be used for decision making to prepare protection, relocation and abandonment of the sites.

Morphologic changes of Svalbard fjord is closely linked with climate warming and provide key information for proxy studies of climate warming such as decrease of sea ice, increase of snow falls, intensified waves, and sea-level fluctuation. Therefore, results of the present study can be used for basic science to unravel the climate and sealevel changes in the arctic region.

The results are also beneficial to companies who are trying to run business in the fjord area. Information and technology regarding local geology and morphodynamics will help them to minimize opportunity cost and maximize possibility for successful launching of their projects.

# 목 차

<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>11</b>
제 1 절 연구개발의 개요 .....	11
제 2 절 연구개발 대상의 경제적·산업적 중요성 및 연구개발의 필요성 .....	12
<b>제 2 장 국내·외 기술개발 현황</b> .....	<b>13</b>
제 1 절 대상기술 수준 .....	13
제 2 절 국내·외 현황 .....	14
제 3 절 선행연구의 내용 및 결과 .....	14
제 4 절 기존사업 및 R&D와의 차별성 .....	15
제 5 절 현재 기술상태의 취약성 .....	15
제 6 절 앞으로의 전망 .....	15
<b>제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과</b> .....	<b>16</b>
제 1 절 연구내용 및 연구결과 .....	16
1. 스발바르 측량 기준점 설정 및 좌표 생산 .....	16
2. 연안 지형 정밀 측량 .....	18
3. 무인 항공기를 활용한 지형 변동성 평가 .....	21
가. 무인항공기 기반 지형변동성 분석 방법 .....	22
나. 무인항공기 기반 지형변동성 분석 결과 .....	22
4. 퇴적상 분석 및 퇴적환경 해석 .....	25
<b>제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도</b> .....	<b>27</b>
제 1 절 단계 최종목표 .....	27
제 2 절 연차별 세부연구의 목표, 내용 및 평가 착안점 .....	28
제 3 절 연구개발목표 달성도 및 자체평가 .....	29
1. 연구개발목표 달성도 .....	29
2. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가 .....	30
3. 연구결과의 정성적 성과 및 관련분야에의 기여 .....	30

<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획</b> .....	<b>31</b>
제 1 절 연구개발결과의 활용방안 .....	31
제 2 절 기술적·경제적 측면에의 활용 .....	32
 <b>제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보</b> .....	 <b>33</b>



# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 개요

- 북극지역은 과거 해빙으로 연중 덮혀 있는 항해를 할 수 없는 미답의 지역으로, 파랑의 작용이 미약하여, 연안지역의 침식현상이 뚜렷하지 않은 지역이었으나, 최근 기후온난화와 함께 해빙면적의 축소, 파랑의 세기 강화등으로 인해 연안지역에서의 침식작용이 가속화 되면서, 연안지역에 건설된 인프라, 거주지역에 직접적인 피해를 주고 있으며, 기후온난화의 경향성을 고려해 볼 때 향후 급격한 해안선의 변화를 예측하기 위한 체계적인 연구가 시급한 상황임.
- 북극지역에서의 해안침식현상은 복합적인 요인의 상호작용 결과에 의해 공간적으로 다양한 양상으로 나타나는 것이 특징적이며, 지형의 변동성을 예측하기 어려운 특징을 가지고 있음.
- 우리나라는 2013년 5월 북극이사회 영구옵저버 지위획득을 계기로 북극이사회 활동강화 및 기후변화 대응연구 확대를 위해 다산북극과학기지가 위치한 스발바르군도에서의 관련 주제에 대한 연구활동강화가 요구되고 있는 실정임.
- 북대서양 표층수의 영향을 받는 스발바르 군도의 피오르드는 전 지구적 기후변화가 가장 빠르게 일어나고 있는 곳으로 조수빙하의 빠른 후퇴에 따른 환경변화 모니터링뿐 아니라 기후변화 복원연구를 위한 최적의 연구지역임
- 본 연구는 스발바르의 피오르드에서 발생하고 있는 연안지형을 정밀하고 정확하게 측정하고, 시계열 분석을 통해 지형의 변동성을 평가하며, 이러한 실측 자료를 기반으로 향후 피오르드지형의 변화양상을 예측하는 것이 주요 목적임.
- 이러한 실측 자료를 기반으로 생산된 지질특성화 및 지형변동성 관련 도면들은 동지역에 거주하는 거주민의 안전을 담보하고, 동지역에 진출하려는 기업들의 경제활동을 극대화시키는 데 활용될 수 있을 것으로 예상됨.
- 스발바르 지역 내에 북극 연안환경 변화를 장기적으로 관측하고, 수집된 정보를 분석하며 이를 SIOS 지식센터와 공유하기 위한 스발바르 피오르드연안 관측정점의 설치 및 운영, 연구 공조체제 구축하여 북극연구역량 강화를 추진하고자 함.

## 제 2 절 연구개발 대상의 경제적·산업적 중요성 및 연구개발의 필요성

- 북극이사회 영구 옵저버 지위 획득을 계기로 북극이사회 활동 강화되고 기후변화 대응연구 확대를 위해 다산과학기지가 위치한 스발바르군도 피오르드 연구사업을 진행할 필요가 있음
- 2012년 우리나라의 스발바르조약 가입을 계기로 스발바르군도 지역내 아국의 경제활동 및 국가위상제고를 도모하고, 국제공동 북극환경정보 공동수집체계인 SIOS 및 NySMAC 가입 목적에 부응하기 위한 극지연구역량 강화 필요.
- 기후 온난화에 따라 스발바르군도내 피오르드의 연안침식 및 퇴적환경변화가 가속화되고 있고, 이에 따른 원주민 및 거주민의 안전 및 경제활동에 미치는 파장이 확대됨에 따라 피오르드 연안지형 및 퇴적환경에 대한 집중적인 모니터링이 필요.
- 향후 스발바르 군도는 북극지역의 경제적 활동(에너지, 광물자원 개발)을 위한 교두보로 이용될 가능성이 높은 전략적 지역으로, 현지에 진출하는 기업들과 현지 거주민들이 활용할 수 있는 피오르드연안 퇴적환경의 지질학적 특성 및 지형변동성 도면을 제공하여, 미래의 위험도를 예측할 수 있는 정보를 생산할 필요가 있음.



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 대상기술 수준

- 국내 수준
  - 국내 연안환경에서의 침식문제는 사회적으로 큰 파장을 일으키고 있으며, 지난 2003년 이후 전국 62개소의 모래해안에 대한 모니터링 관측을 수행하고 있고, 지역별 침식양상을 유형별로 특성화하고 있음.
  - 해안침식이 초래하는 피해는 도로 및 항만등의 인프라 시설 파괴, 상업시설 파괴, 인명 손실 등이 있으며, 강원도의 경우 2015년 현재 피해방지와 해안선 복원에만 115억원을, 2019년까지 총 1,739억원의 예산을 투입할 예정임.
  - 해안침식 현상이 가속화되는 추세임을 고려할 때, 향후 소요되는 예산은 더욱 증가할 것으로 예상되며, 해안침식을 효율적으로 예측하고, 대비하기 위한 기술개발이 박차를 가할 것을 판단됨.
  - 우리나라의 연안침식 관련 연구 수준은 선진국 대비 약 80%정도인 것으로 판단되나, 극지 피오르드환경에 대한 연구는 비교하기 어려운 상황임.
- 국외 수준
  - 해마다 기상이변, 재해, 홍수등으로 인해 연안지역의 피해가 극심하게 발달하는 미국은 해안침식을 모니터링하고 변동성을 예측하는 분야에 최고의 기술수준을 보유하고 있으며, 해마다 관련 연구분야에 막대한 연구비를 지원하고 있음.
  - 미국의 경우, 연간 8억 달러 (8천 2백억원) 수준으로 해안선 침식 및 복원 관련 예산이 사용되고 있음 (Coastal Protection and Restoration Authority, 2015)
  - 해안침식 영향이 현저한 영국의 경우 해안선 범람 및 침식 관련 예산이 약 8억 파운드 (1조 3천억원) 수준으로 책정되어 있음(Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2015).
  - 북극지역에 광활한 피오르드 해안을 보유하고 있는 노르웨이는 극지방 피오르드지형 침식 연구에 심혈을 기울이고 있으며, 침식을 직접적으로 제어하는 동토의 해빙방지 연구등 다양한 분야에서 선도적인 기술을 보유하고 있음.
- 참여기관의 해당 연구분야 핵심기술 보유내용 및 수준
  - 서울대학교는 세계 수준의 국내외 연안침식 및 퇴적환경 연구에 필요한 인력과 장비, 경험을 보유하고 있음

## 제 2 절 국내·외 현황

- 다산기지 주변에 대한 기상관측, 동토층 토양 및 미생물, 식생 연구등에 대한 연구가 극지연구소와 공동참여연구기관에 의해 진행중에 있음.
- 북극지역의 연안침식에 대한 연구는 국내의 경우 전무한 상황이나, 2003년부터 2005년까지 노르웨이 트롬소 북극대학에서 수행한 이스피오르드 탐사에 우리나라 해양연구원이 참여한 바 있음.
- 스발바르 소재 UNIS (University Centre in Svalbard)에서 2011년부터 2015년까지 스베아 브라간자베간 지역의 조간대 지역의 퇴적작용 및 퇴적층 연구가 진행중에 있음.
- UNIS의 연구진에 의해 2011년 콩스피오르드의 해저지형 특성 연구가 다중주사소나를 이용하여 성공적으로 진행된 바 있음.
- 스발바르 프레드하임 지역에 대한 해안선 침식양상 연구가 지난 2011년부터 2013년 사이에 UNIS의 연구진에 의해 진행된 바 있음.

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
UNIS (노르웨이)	프레드하임 피오르드 연안지형의 침식작용 현상 연구	피오르드 연안지형의 침식양상이 공간적으로 복잡한 특성을 가지고 있으며, 연구결과를 바탕으로 연구지역에 위치하고 있는 유물의 관리방안 처리 의사결정을 내림.
해양연구원 극지연구소	이스피오르드 용빙수 탁도조사	다산기지 과학연구 활동 기반조성에 기여

## 제 3 절 선행연구의 내용 및 결과

- UNIS 연구팀은 이스피오르드의 프레드하임 지역에서 침식률이 연간 0~2 m 범위에서 평균적으로 0.3~0.4 m 수준임을 보고한 바 있음 (Sessford, 2013).
- UNIS 연구팀은 이러한 침식률이 공간적으로 매우 복잡하게 변하는 것을 관찰하였으며, 피오르드연안 지형의 특성, 동토특성, 암상의 차이 등의 요인에 의해 공간적인 침식률 변화가 나타나는 것으로 해석하였음 (Tangen and Justad, 2012).
- 스발바르 지역의 피오르드 현생 퇴적환경내 퇴적작용에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았으며, UNIS 연구팀은 Svea 인근 지역의 피오르드 갯벌을 대상으로 조수퇴적작용 및 표층퇴적물 분포에 대한 연구를 수행한 바 있음 (Eriksen, 2013).
- 극지연구소와 지질자원연구원의 공동연구팀은 이스피오르드에서 획득한 피스톤코어 분석을 통해 지난 15000년 동안 스발바르 이스피오르드 내의 퇴적작용이 기후변화에 따른 빙하의 용융과 밀접한 관계가 있음을 보고하였음 (윤호일 외, 2006).

## 제 4 절 기존사업 및 R&D와의 차별성

- 본 연구 과제는 스발바르 피오르드 연안지형의 침식 및 퇴적작용, 지형변동성을 조사하는 최초의 연구과제로서, 장기간에 걸친 정밀 측량을 통해 지형변동성을 평가하고, 피오르드지질 특성과 지형변동성을 야기하는 원인들을 입체적으로 분석함으로써 정밀도와 정확도가 높은 지질특성 및 지형변동성 도면을 제작하는 것을 주요 목적으로 하고 있음.
- 또한 연구지역의 접근성이 좋지 않고, 작업 여건의 시공간적 제약이 많은 관계로 무인항공기를 이용한 근거리 원격탐사를 추진할 계획이며, 이를 통해 연구성과의 공간적 한계를 극복할 계획임.
- UNIS 및 스발바르 지역을 연구하는 다국적 연구기관들과 긴밀한 공조하에 연구성과를 공유함으로써, 자료의 검증과 추가적인 자료의 확보, 향후 연구방향 설정 등 연구성과의 질적 향상을 도모할 수 있을 것으로 예상됨.

## 제 5 절 현재 기술상태의 취약성

- 연안지형 변동성을 분석하고 평가하는 원천기술을 보유하고 있으나, 스발바르 피오르드의 연안지형 탐사에 대한 경험이나 위험대응 시스템이 갖춰져 있지 않음.
- 스발바르 피오르드 연안지형 탐사를 위한 소형 선박등 인프라를 갖추고 있지 않음.
- 접근성이 떨어지는 지역에서 단기간에 대한 첨단 연구장비의 활용이 요구되나, 예산의 한계로 인한 장비 구축이 단기간에 이루어지기 어려운 상황임.
- 그러나 서울대학교 연구진은 접근성이 어려운 다양한 연안환경에서의 조사경험과 노하우를 보유하고 있고, 스발바르 현지 연구를 위한 국제공조체제를 구축하고 있어서 상기의 취약성을 극복할 수 있음.

## 제 6 절 앞으로의 전망

- 기후온난화의 결과로 북극지역에 발달한 해빙이 급격하게 감소하면서 북극항로가 속속 만들어지고 있고, 북극지역에 대규모로 매장되어 있는 에너지 자원의 개발에 선진각국이 큰 관심을 보이고 있는 상황에서, 우리나라의 북극지역 경제활동 진출은 가속화될 것으로 전망됨
- 기후온난화와 이에 따른 해빙의 감소로 북극지역에서 폭풍 발생이 이루어지고 있고, 피오르드 지형의 침식현상이 가속화되면서, 피오르드 인프라 지역 인프라 및 거주민의 안전문제가 대두되고 있음
- 이러한 상황에서 피오르드 지형의 형태변동성을 파악하고 향후 변화과정을 예측하기 위한 본 기술 및 성과물에 대한 수요가 급증할 것으로 전망됨.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 연구내용 및 연구결과

연구 내용	연구 결과
측량 기준점의 정확도 향상을 위하여 위성신호를 장시간 획득하였으며, 명확히 식별되는 고정점을 확보하고, 이를 기준점으로 설정	다산기지 인근 콩스피오르텐 입구에 발달하고 있는 연안사취에서 측량 기준점 2 곳의 경위도 좌표, UTM, 고도값을 각각 획득함.
단기간 지형변화가 예상되는 해안선을 대상으로 복수의 측선을 설정하고, 정밀 측량을 수행함	콩스피오르텐 입구 연안사취에서 해안선과 평행한 1.5km 측선, 해안선과 직각 방향의 70m, 45m 측선에 대한 정밀 측량. 자갈 해변, 사취, 석호 퇴적지형 관찰 연안사취의 동쪽지역의 고도가 상대적으로 높으며, 해안보다 석호 방면에서 급경사면이 형성됨.
무인항공기를 활용한 정밀항공사진촬영 및 3차원 DEM생성	강화도 여차리 하부조간대 조수성 사구를 대상으로 3차원 DEM을 생성하였음. 조수성 사구들은 대부분 썰물방향의 비대칭성과 썰물방향으로의 이동양상을 보이며 일일 최대 2미터 이상 이동한 것으로 분석됨.
지면과 연직방향으로 Cancore를 삽입하여 불교란 시료를 획득한 후, 시료 표면에 에폭시를 가하여 퇴적물의 공극 차이에 반영하는 relief peel을 제작하고 퇴적상을 분석.	가로 10cm, 세로 15cm의 Peel을 제작. 중·하부는 중립질의 모래로 구성되어 있으며 파랑에 의해 형성된 수평, 경사층리 퇴적구조가 발달함. 상부에 지름 3cm 내외의 자갈 퇴적물이 피복하고 있음.

#### 1. 스발바르 측량 기준점 설정 및 좌표 생산

- 다산기지 주변과 콩스피오르텐 입구 지역에서 지형관측을 위한 측량 기준점을 설정하고, RTK GPS를 이용하여 기준점의 좌표를 정밀 측량(그림 1).
- 연속적인 정밀 지형 측량 수행 시 발생 가능한 오차를 보정하고, 정확도 검증을 위하여 지표면에 고정된 부동점을 측량 기준점으로 설정.
- Real Time Kinematic - Global Positioning System(RTK-GPS)를 사용하여 기준점 측량 실시.
- 위성 신호의 안정성 확보를 위하여 각 기준점 별 30분의 대기 시간 부여 후 측량 수행.
- RTK-GPS 장비는 수평오차 10 mm, 수직오차 20 mm의 정확도 보유.
- WGS 84 타원체와 TM 좌표계를 기반으로 획득한 자료를 위·경도 좌표 및 UTM 값으로 변환.
- 북극 콩스피오르텐 지역 2곳의 측량 기준점 확보.

기준점 명	위도	경도	UTM	
			위거	경거
콩스피오르덴 01	N 78.580666	E 11.251645	N 8768802.99	E 423599.10
콩스피오르덴 02	N 78.582518	E 11.285102	N 8769298.78	E 424904.63

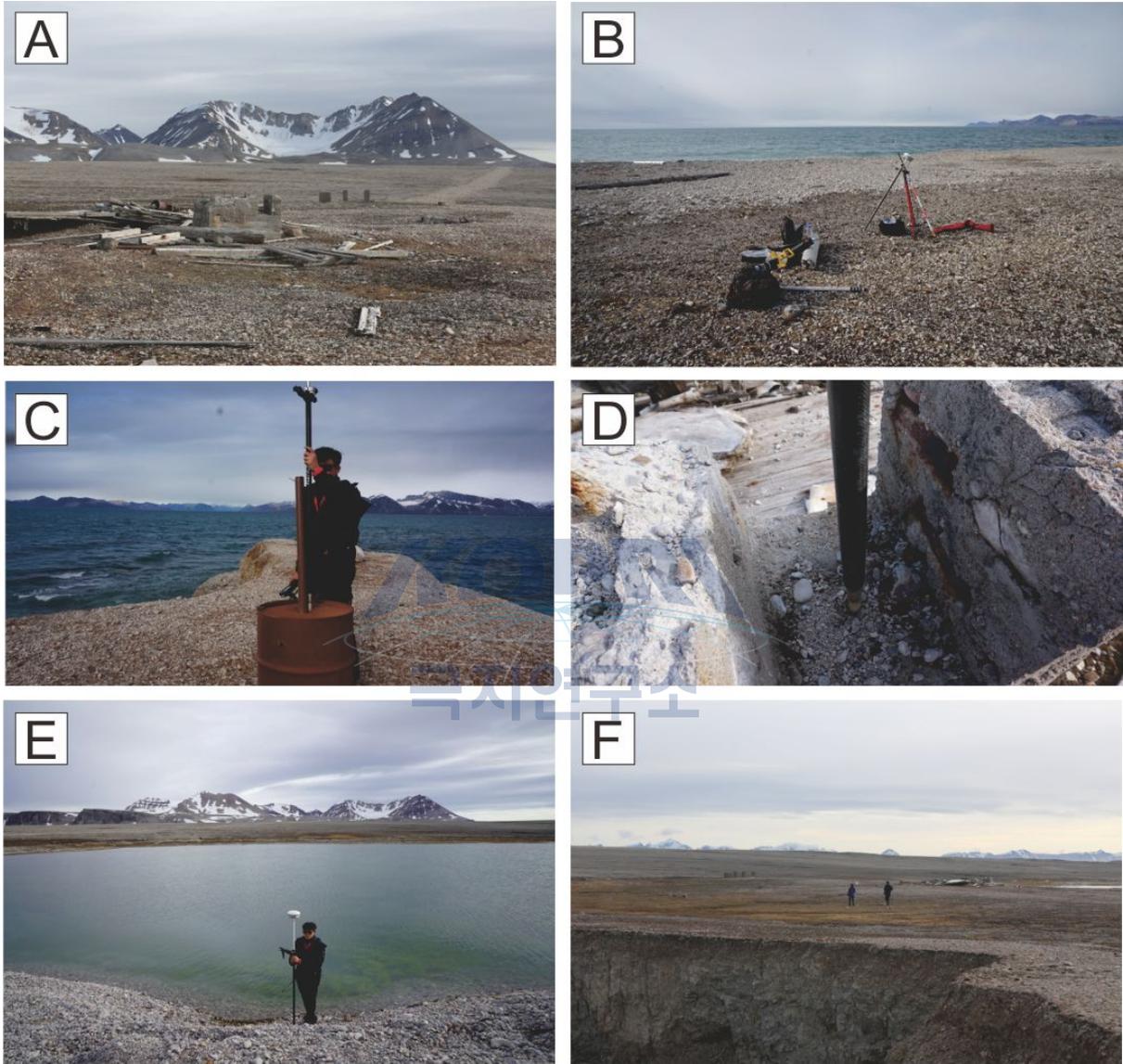


그림 1 스팔바르 콩스피오르덴 지역 현장 측량 사진. 스팔바르 측량 기준점 주변 전경 (A), RTK GPS 고정국(B), 콩스피오르덴 01점 (C), 콩스피오르덴 02 (D), RTK GPS 이동국(E), RTK GPS 측량(F).

## 2. 연안 지형 정밀 측량

- 단기간 지형 변화가 예상되는 콩스피오르덴 입구에 위치하고 있는 연안사취를 정밀 측량 대상으로 선정(그림 2A).
- 연안사취 발달 방향과 평행한 측선 A-A'(연장 90 m), 연안사취 발달 방향과 직각 방향의 측선 B-B'(연장 22 m), C-C'(연장 19 m)를 서쪽, 동쪽 지역에서 각각 1개 설정(그림 2A).
- 설정된 측선을 따라 RTK-GPS를 이용하여 1-2 미터 간격으로 지형 측량을 수행하였으며, 측량값의 수평적 오차는 1 cm 범위 이내, 수직적 오차는 2 cm 범위임.
- RTK-GPS는 고정국과 이동국을 설치하여 운용하였으며, 고정국의 정밀 좌표 획득을 위해 1시간 동안 획득된 좌표값의 평균을 사용하려고 하였으나, 극지방의 특성상 수렴되는 좌표값이 생성되지 않아 상대적인 좌표값으로 등록하여 활용함.
- 국내와는 달리 수준점을 활용할 만한 신호 수신이 불가하여 부득이하게 상대적인 고도값을 사용하였으며, 측량된 지형의 절대고도값은 추후 수준점 측량을 통해 획득할 예정임.
- RTK-GPS 측량 값은 위·경도 좌표로 획득되었으며, 이를 UTM 값으로 변환하여 활용함.
- 연안사취는 콩스피오르덴 입구의 남단에 위치하고 있으며, 연안사취의 배후에는 석호(lagoon)가 형성되어 있음(그림 3B).
- 연안사취는 중립질의 사질 및 자갈로 구성되어 있으며, 자갈은 원마도가 불량하고 각력질이 우세하게 분포함.
- 연안사취의 해안선을 따라 서쪽에서 동쪽으로 이동할수록, 고도가 증가하며, 해변을 구성하는 입자들이 조립해지는 특성을 보이고 있음(그림 2B).
- 연안사취의 서쪽은 사질 퇴적물로 구성되어 있고 바다쪽 경사는 7-8도 내외로 육지방향 석호쪽 경사인 10-11도에 비해 완만한 특징을 보임(그림 2C).
- 연안사취의 동쪽은 주로 자갈 퇴적물로 구성되어 있고, 바다쪽 경사는 13-14도 내외로 역시 육지방향 석호쪽 경사인 19-21도에 비해 완경사의 특징을 보임(그림 2D).
- 연안사취의 서쪽에 비해 동쪽 지역의 지형이 급경사면을 이루고 있는데, 이는 동쪽 지역의 구성 퇴적물이 자갈로 구성되어 있어, 안식각(angle of repose)가 상대적으로 크기 때문임.
- 사취의 해안선은 매우 단조로운 특징을 가지고 있으며, 석호가 발달하고 있는 점, 와시오버(washover) 퇴적층이 석호방향으로 형성되어 있는 점을 고려할 때, 파랑에 의한 퇴적작용이 현저한 퇴적지형으로 해석됨.
- 와시오버(washover) 퇴적층의 존재는 일시적인 강한 폭풍에 의해 형성된 것으로 해석되며, 와시오버 퇴적층 뿐 만 아니라, 범(berm)퇴적지형의 존재 역시 폭풍발생시기에 형성된 것으로 해석됨(그림 3C, D, E).
- 스위시(swash)작용이 발생하는 해변에는 해안선과 평행한 방향으로 해조류가 분포하고 있는데, 다양한 수준에서 해조류 띠가 형성되어 있는 것으로 미루어, 1미터 미만의 조위가 존재하는 것으로 추정됨(그림 3A).
- 연안사취 동쪽 지역 내측에는 파식에 의해 후퇴하는 해안절벽이 관찰되며, 해안절벽의 하부에는 폭 10미터 내외의 해변이 발달하고 있음(그림 3F).

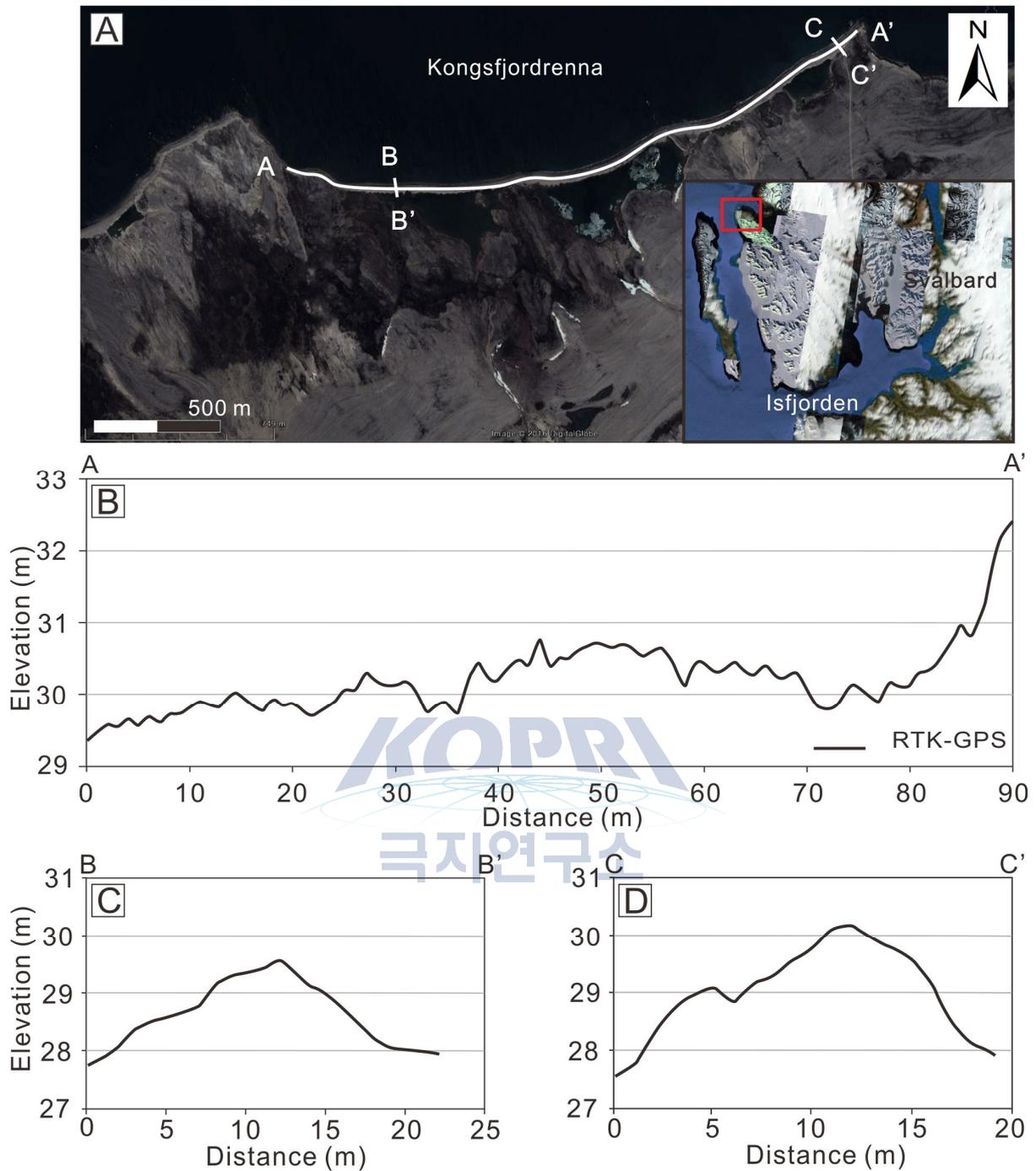


그림 2 (A) 2015년도 하계조사 간 콩스피오르덴 입구 연안사취(spit) 측량 지역 및 측선 위치. (B) 사취 발달 방향과 평행한 측선 A-A'의 측량단면. 측선의 동쪽으로 갈수록 고도가 높아지는 경향 관찰됨. (C) 사취와 직각 방향의 측선 B-B'. (D) 사취와 직각 방향의 측선 C-C'. 측선 B-B'에 비해 사취의 기복이 약 1미터 이상 높은 특징을 보임.

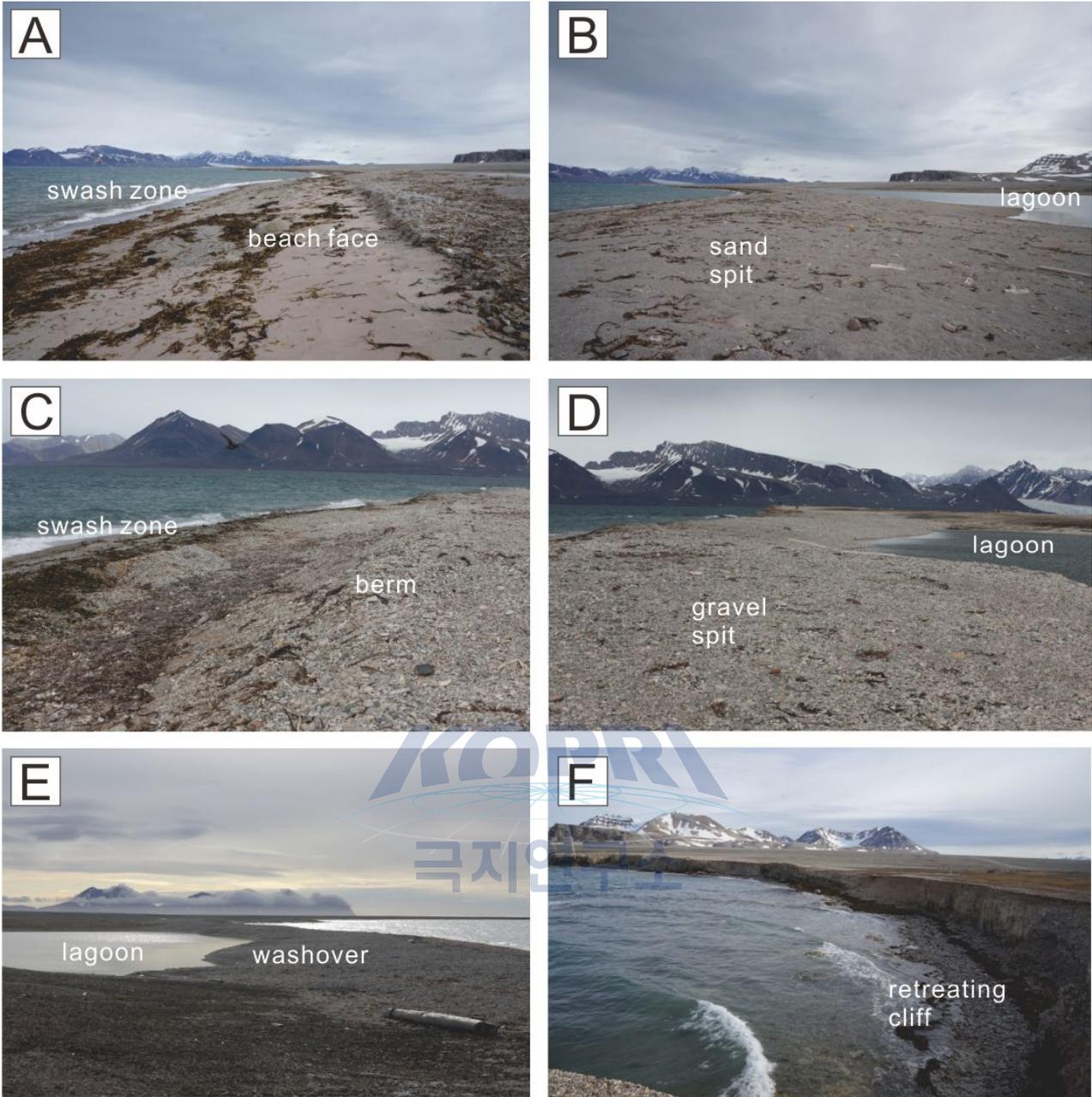


그림 3. 콩스피오르덴 입구 전경. (A) 연안사취(coastal spit)의 서쪽 해변(beach face)과 스워시존(swash zone). (B) 연안사취 서쪽에 분포하는 사질퇴적물 및 석호(lagoon). (C) 연안사취 동쪽 해변에 발달하는 범(berm) 및 스워시존. (D) 연안사취 동쪽에 분포하는 자갈질 퇴적물 및 석호. (E) 연안사취 동쪽 끝단에서 바라본 연안사취 전경. 석호 및 와시오버(washover) 퇴적지형이 관찰됨. (F) 연안사취 동쪽에 위치하는 침식해안절벽(retreating cliff). 절벽의 하단부에 폭 10여 미터의 해변이 형성되어 있음.

### 3. 무인 항공기를 활용한 지형 변동성 평가

- 무인항공기를 활용한 해안선 지형 측량 및 침·퇴적 양상 분석 및 정확도 검증 기법 개발.
- 콩스피오르덴 지역에서의 무인항공기 사용이 현지의 복잡한 절차로 인해 불가함에 따라 1차 년도에는 국내 서해 연안 퇴적지형을 대상으로 기술개발을 시도하였음(그림 4).
- 서해안 중에서 조석에 따른 지형 변동성이 현저하게 나타나며 역동적인 층면구조가 발달하는 강화도 남단 여차리 조간대를 연구지역으로 선정(그림 4C, D).
- 조석에 따른 사구의 침·퇴적 양상 분석을 위하여 3월 12일, 3월 13일 연속 무인 항공기 측량을 실시.
- 무인 항공기 측량 자료 검증을 위해 RTK-GPS를 활용한 정밀 측선 측량.

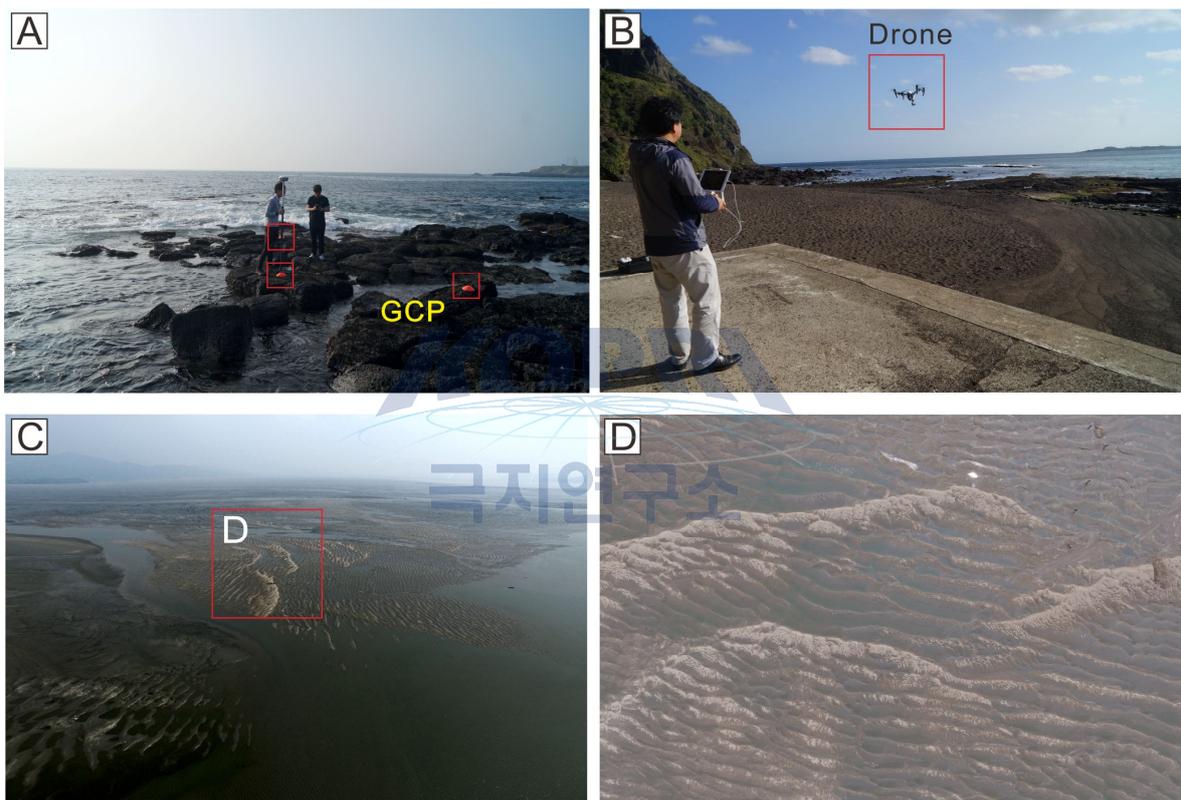


그림 4. 무인항공기(드론)를 이용한 항공 사진 촬영 (A) 항공 사진 위치, 고도 보정을 위한 GCP 설치 및 RTK-GPS를 통한 정밀 측량. (B) 무인 항공기 촬영 전경. (C) 무인항공기 사진 촬영 영상. (D) 지형측량을 위한 수직 방향 항공사진 촬영 영상.

### 가. 무인항공기 기반 지형변동성 분석 방법

- DJI 사의 Inspire 1 모델을 이용하여, 항공사진을 촬영하였으며, 사용된 카메라의 기종은 X3d이며
- 초점거리는 20 mm(f/2.8고정), 왜곡방지렌즈, CMOS(Sony EXMOR 1/2.3")가 장착되어 있음.
- 이미지 촬영시에는 무인항공기의 진행방향으로 40 %, 수직방향으로 60 % 이상의 사진 중복도 확보를 확보하여, 3차원 지형모델 생성시에 오차를 최소화하였고, 렌즈왜곡 및 초점 보정이 이미지 처리 시에 자동으로 수행되었음.
- 항공사진 위치 및 고도 값 보정을 위한 Ground Control Point (GCP) 20 개를 무인항공기 촬영시마다 설치하였으며, RTK-GPS를 사용하여, 각 GCP에 대한 좌표 및 고도값을 획득하였음.
- 촬영된 이미지는 PIX4D Mapper를 사용하여 정사이미지 모자이크 및 표면지형고도분포 모델 (DSM: digital surface model)을 생성하였음.
- PIX4D Mapper를 통해 정사이미지 모자이크 생성 직전 단계에서, 기 측정되었던 20개 GCP 지점의 UTM좌표 및 고도 데이터를 입력하여, 실제 고도값이 부여된 고해상도 TIFF 파일을 생성하고, ARC GIS 10.0의 3D Analysis tool의 surface tool을 사용하여 Digital Elevation Model (DEM) 작성.
- Spatial analysis tool의 cutfill tool 을 활용하여 연속적인 체적 변화량 계산 및 퇴적물 거동 양상 분석.
- Topology tool의 단면 추출 기능을 이용하여 DEM에서 지형 단면 추출하여, RTK-GPS 측선 측량 자료와 비교 분석을 수행함.

### 나. 무인항공기 기반 지형변동성 분석 결과

- 강화도 여차리 조간대의 하부조간대 41,164 m<sup>2</sup> 지역에 대해 무인항공기 항공측량을 2일간 연속 수행(그림 5A)
- 무인항공기 항공측량시에 GCP 20개 정점에 대한 RTK-GPS 측량을 동시에 수행하였으며, 항공측량 오차검증을 위한 측선을 설정하여, 측선을 대상으로 RTK-GPS 측량을 동시에 수행함.
- 무인항공기 항공측량을 통해 생성된 최종 성과물인 정사영상의 해상도는 2.3 cm임(그림 5B).
- RTK-GPS 이용한 정밀측선 측량 결과와 무인항공기 항공촬영을 통해 획득된 3차원 지형모델을 비교 분석한 결과, 대부분의 지역에서 허용 오차범위 내에서 일치하는 결과를 보여주었으나, 일부 물에 잠겨있는 지역의 경우에는 무인항공기 항공촬영을 이용한 지형모델 결과물의 한계로 인해 국지적인 오차값이 발생함 (그림 5C).
- 연구지역에 분포하는 조수성 사구는 대부분 썰물 방향의 비대칭성을 가지고 있으며, 간조선 근방의 사구는 밀물 방향의 비대칭을 가지고 있음.
- 관측시기동안 대부분의 사구는 썰물 방향으로 우세하게 이동한 것으로 분석되었으며, 간조선 근방인 연구지역 남쪽 지역에 발달하는 사구들은 국지적으로 밀물 방향으로 이동한 것이 관찰됨 (그림 5E).
- 조수성 사구는 하루동안 대부분 썰물방향으로 1.5-2.5 미터 정도 이동한 것으로 분석되었으며, 밀물우세 지역에서는 0.5-1 미터 정도 육지방향으로 이동한 것이 관찰됨(그림 5D, F).
- 이틀간의 조수성 사구 형태분석 결과, 연구지역의 육지쪽 썰물우세 지역의 사구 특히 복합사구들은 100평방미터당 5-12 센티미터 고도가 감소한 것으로 분석되고, 밀물우세 지역의 단순사구들은

최대 5센티미터 정도 고도가 상승한 것으로 분석됨.

- 조수성 사구의 정부(crestline) 이동양상과 체적변화를 고려하였을 때, 연구지역내에 밀물과 썰물에 의해 밀집이 수렴하는 지역이 존재하는 것으로 분석됨(그림 6).



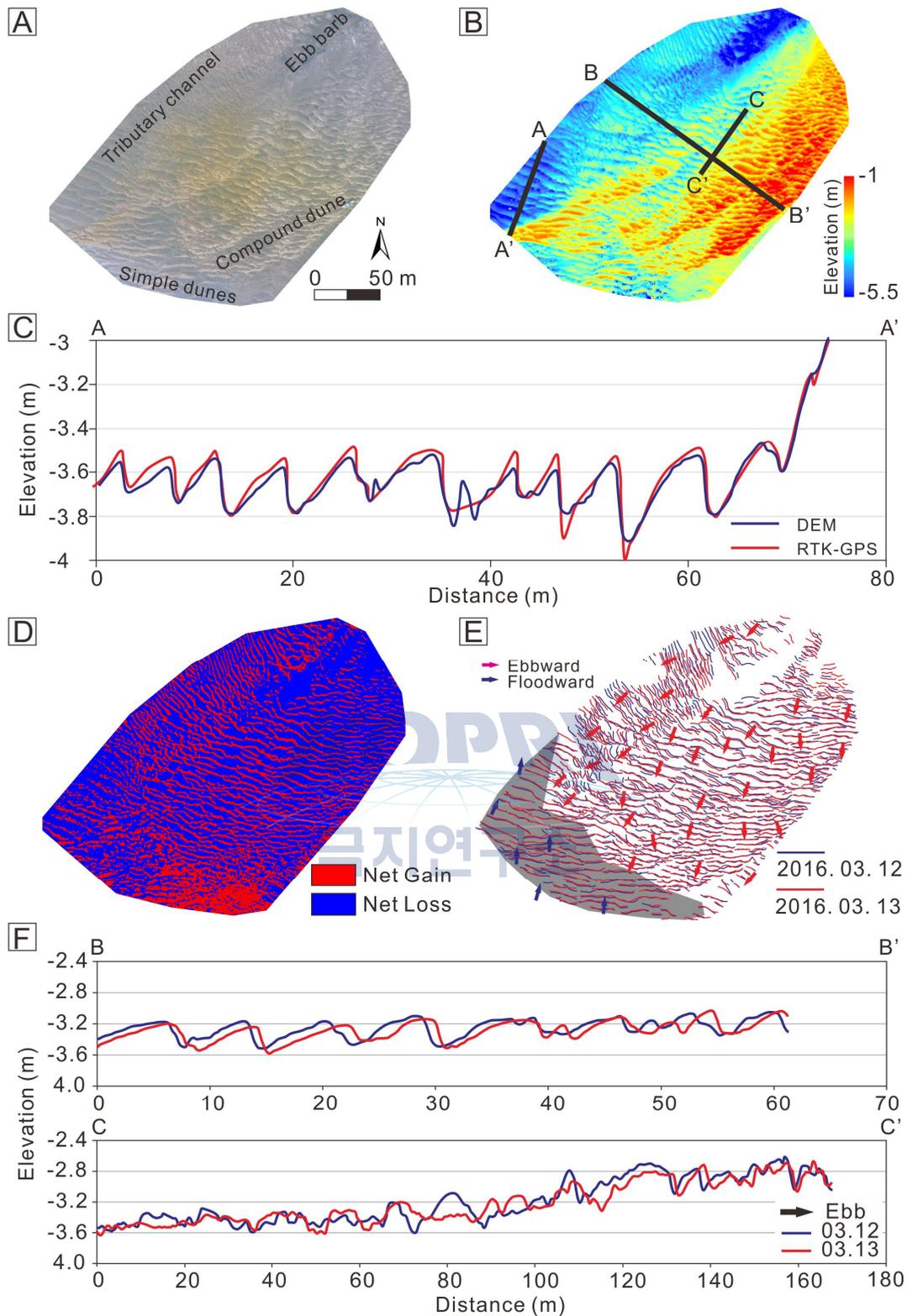


그림 5. 무인항공기를 이용한 지형분석 절차 및 도출 결과. (A) 촬영 영상 모자이크 및 GCP 자료를 결합한 정사영상. (B) 정사영상을 기반으로 ARC-GIS에서 도출한 DEM. (C) 무인항공기 기반 자료 정확도 검증 결과. (D) 퇴적물 유입 및 유출의 공간 분포 양상. (E) 퇴적물 침·퇴적 양상에 따른 조건대 사구 이동 경향. (F) DEM 기반 3D 공간 분석을 통한 지형 단면 추출 및 지형 변화 분석 결과.

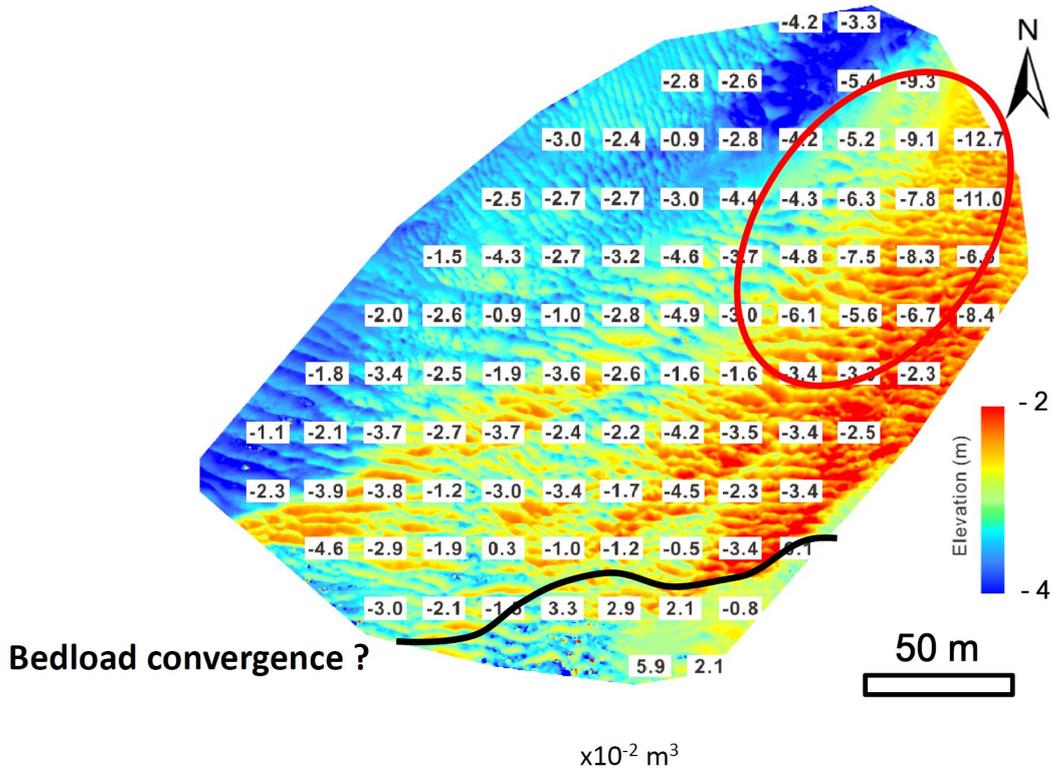


그림 6. 무인항공기 촬영 이미지 분석을 통한 여차리 조간대 조수성 사주의 체적변화 분포도. 체적 단위는 100 평방미터당 고도의 변화를 나타냄. 연구지역의 육지쪽 썰물 우세 지역과 복합사구가 발달하는 고도가 높은 지역에서 썰물방향으로 체적의 변화가 높게 나타나는 반면, 바다쪽 밀물우세 지역에서는 밀물방향의 체적변화가 관찰됨. 따라서 검은 실선으로 표시된 지역은 밀물과 썰물에 의한 밀집이동이 수렴하는 지역으로 해석됨.

#### 4. 퇴적상 분석 및 퇴적환경 해석

- 스발바르 콩스피오르텐 다산기지 인근 퇴적층에 트렌치 및 불교란 코어를 획득하여, 퇴적구조 및 퇴적상 분석을 수행하였음(그림 7).
- 퇴적층 관찰 및 코어 획득은 다산기지 동쪽으로 해안선을 따라 500미터 지점에 위치하고 있는 outwash delta의 망상하천(braided streams)에서 이루어 졌음(그림 7A, B).
- 노출된 퇴적층 단면 관찰결과, 하류 방향 즉 피오르드 방향으로 경사진 사층리 구조가 잘 관찰되며, 각력질의 자갈층은 피오르드 방향으로 경사질 비늘구조(imbrication structure)를 보이고 있음(그림 7C, E).
- 사층리구조와 비늘구조들은 퇴적물의 이동이 하류방향으로 이루어졌음을 지시하며, 이는 해빙기에 급격하게 불어난 유량발생시기에 형성된 것으로 해석됨.
- 망상하천에서 획득한 코어의 퇴적구조는 비늘구조 및 파랑의 작용에 의한 것으로 해석되는 평행층리가 관찰됨(그림 7D).
- 퇴적층을 구성하는 물질이 대부분 조립한 모래나 각력질의 자갈이며, 하류방향으로의 경사층리가 우세한 것은 용빙수에 의한 하천 퇴적작용이 지배적으로 작용하고 있고, 퇴적물의 공급이 인접지

역에서 이루어졌음을 지시함.

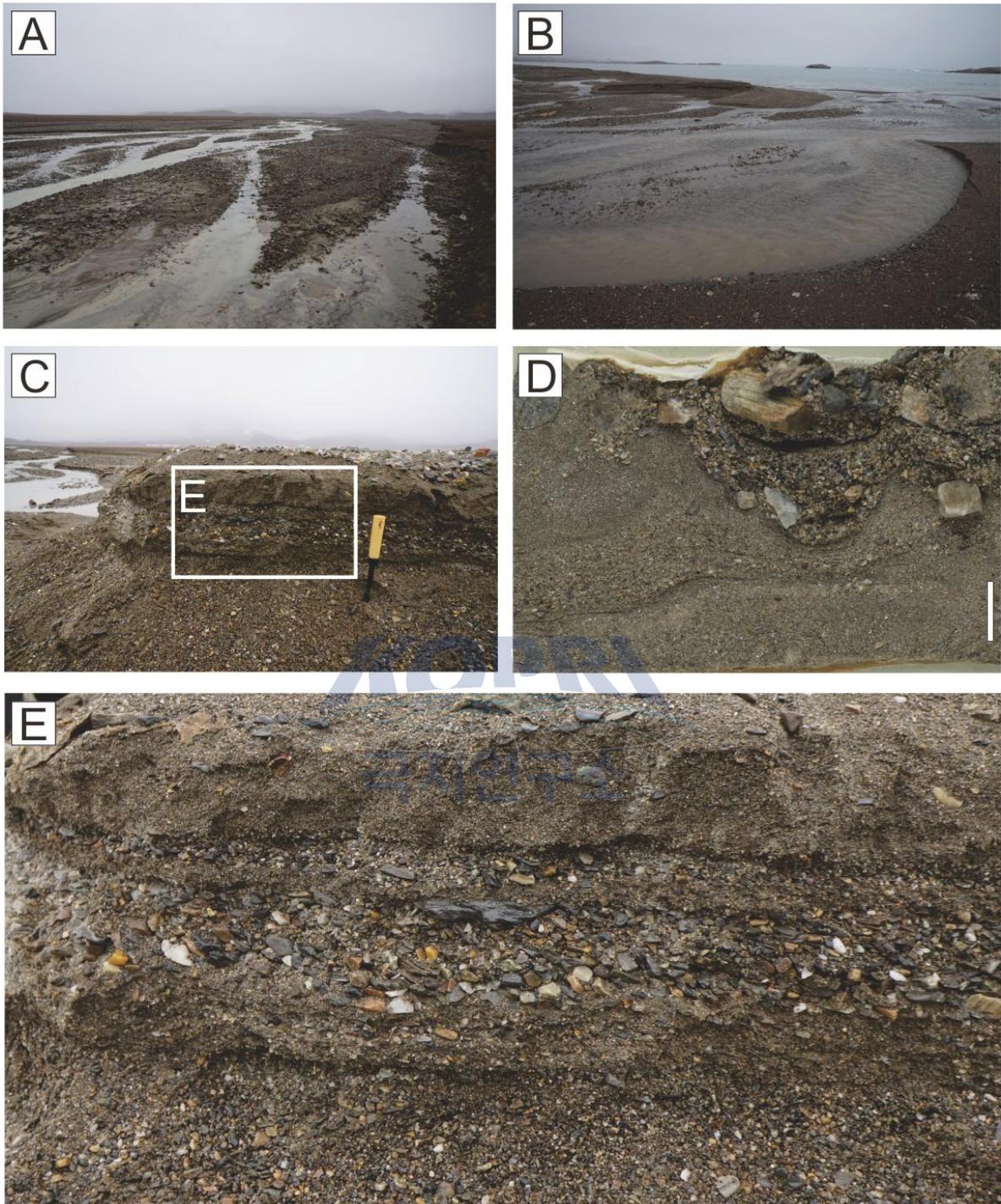


그림 7. 다산기지 인근 outwash 삼각주의 망상하천 및 퇴적층 발달. (A) 망상하천과 사주. 사주는 주로 조립질의 모래와 자갈로 구성됨. (B) 피오르드로 진입하는 망상하천. (C) 망상하천에 의해 형성된 퇴적층 단면. (D) 현재 망상하천과 파랑의 작용으로 형성된 퇴적층 코어. 스케일바 길이는 1센티미터임. (E) 망상하천에 의해 형성된 퇴적층 단면의 확대사진. 하류방향으로 경사진 사층리와 비늘구조의 각력질 자갈층 발달이 특징적임.

## 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 단계 최종목표

#### ○ 단계별 목표

- 1단계 (2015~2017); 모니터링 체계 구축, 피오르드 지형 측량 및 시계열 분석기술 개발
  - 정밀측량 정점 및 측선 설계
  - 피오르드 지형의 지질 특성화 항목 설정 및 분석
  - 피오르드 침식지형 및 퇴적지형 정밀 측량 및 시계열 분석
  - 피오르드 침식지형 및 퇴적지형 DEM 제작 및 시계열 분석
  
- 2단계 (2017~2020); 피오르드 지형변동성 분석 및 지질 특성화 기술 고도화
  - 피오르드 침식지형 및 퇴적지형 정밀 측량 및 시계열 분석
  - 피오르드 침식지형 및 퇴적지형 DEM 제작 및 시계열 분석
  - 피오르드 침식지형 및 퇴적지형 지질특성화 및 도면 제작
  - 피오르드 침식지형 및 퇴적지형 지질, 지형 변동성 환경제어요인 분석 및 평가
  - 피오르드 지형 변동성 도면 제작

#### ○ 최종 목표

- 피오르드 지형 정밀 측량 및 시계열 변동성 분석기술 개발
- 피오르드 지형 DEM 제작 및 시계열 변동성 분석기술 개발
- 피오르드 지형 지질특성화 기술 개발
- 피오르드 지형 지형변동성 환경제어요인 분석기술 개발
- 스발바르 롱스 및 이스피오르드의 지질특성화 및 지형변동성 도면 제작

## 제 2 절 연차별 세부연구의 목표, 내용 및 평가 착안점

구분	년도	세부연구목표	세부 연구개발내용 및 범위	평가목표 및 착안점	가중치	연구비 (천원)
1차 년도	2015	연구정점 및 연구추진 설계	기준점 설정 및 측선 좌 표 생산	정점 및 측선의 생성 유 무	20%	30,000
		침식지형 정밀측량 및 광역 지질특성화	정밀지형 측량 퇴적상, 층면구조, 층서해 석	현장조사 여부 자료 확보 여부	50% 30%	40,000
2차 년도	2016	연구정점 및 연구추진 설계	기준점 설정 및 측선 좌 표 생산	정점 및 측선의 생성 유 무	10%	30,000
		침식지형 정밀측량 및 지질특성화	정밀지형 측량 및 시계열 분석, DEM 제작	현장조사 여부 연안지형 변동성 파악여 부 DEM 제작여부	25%	40,000
			퇴적상, 층면구조, 층서해 석	퇴적상 및 층면구조 등 지질특성화 성과물 도출 여부	20%	
		퇴적지형 정밀측량 및 광역지질특성화	정밀지형 측량	현장조사 여부	25%	
퇴적상, 층면구조, 층서해 석	퇴적상 및 층면구조 등 지질특성화 성과물 도출 여부		20%			
3차 년도	2017	침식지형 정밀측량 및 상세지질특성화	정밀지형 측량 및 시계열 분석, DEM제작 및 시계 열 분석	현장자료 확보여부 DEM제작 여부 측량 및 DEM시계열 분 석여부 학회발표 및 논문게재여 부	35%	35,000
			퇴적상, 층면구조, 층서해 석	퇴적상 및 층면구조 등 지질특성화 성과물 도출 여부	15%	
		퇴적지형 정밀측량 및 상세지질특성화	정밀지형 측량 및 시계열 분석, DEM제작	현장자료 확보여부 DEM제작 여부 측량 시계열 분석여부 학회발표 및 논문게재여 부	35%	35,000
			퇴적상, 층면구조, 층서해 석	퇴적상 및 층면구조 등 지질특성화 성과물 도출 여부	15%	
4차 년도	2018	침식지형 정밀측량	정밀지형 측량 및 시계열 분석, DEM제작 및 시계 열 분석	현장자료 확보여부 DEM제작 여부 측량 및 DEM시계열 분 석여부 학회발표 및 논문게재여 부	35%	20,000
		퇴적지형 정밀측량	정밀지형 측량 및 시계열 분석, DEM제작 및 시계 열 분석	현장자료 확보여부 DEM제작 여부 측량 및 DEM시계열 분 석여부 학회발표 및 논문게재여 부	35%	20,000
		환경제어요인 분석	해수면, 파랑특성 분석	연구대상지역 인근자료 확보 및 분석여부	10%	10,000
		지질특성 도면화	지형별 지질특성 도면제 작	도면 제작여부	20%	20,000

5차 년도	2019	침식지형 정밀측량	정밀지형 측량 및 시계열 분석, DEM제작 및 시계열 분석, 결과물 실증	DEM제작 여부 측량 및 DEM시계열 분석 및 실증여부 학회발표 및 논문게재여부	35%	20,000
		퇴적지형 정밀측량	정밀지형 측량 및 시계열 분석, DEM제작 및 시계열 분석, 결과물 실증	현장자료 확보여부 DEM제작 여부 측량 및 DEM시계열 분석 및 실증여부 학회발표 및 논문게재여부	35%	20,000
		환경제어요인 분석	빙하, 기상 특성 분석	연구대상지역 인근자료 확보 및 분석여부	10%	10,000
		지형변동성 도면화	지형별 변동성 도면 제작	도면 제작 여부	20%	20,000

### 제 3 절 연구개발목표 달성도 및 자체평가

#### 1. 연구개발목표 달성도

목 표	달 성 도(%)	내 용
측량 기준점 설정	100	연구지역에 명확히 식별되며 불변하는 측량 기준점을 확보하였으며, 정밀한 측량 자료를 취득함
정밀 지형 측량	100	피오르드 지형과 극 지역 해안지형 특성을 분석하기 위한 기초자료를 획득하였으며, 해수면 상승에 따른 침·퇴적 양상을 분석하기 위한 기초 자료를 획득
무인항공기를 이용한 3차원 DEM 생성	100	강화도 조간대 조수성사주의 형태 및 분포특성을 파악하고, 3차원 DEM모델을 생성
퇴적상, 층면구조, 층서해석	100	연안사주 지역에서 불교란 시료를 획득하여 퇴적상을 분석하였으며, 퇴적물 이동 및 퇴적에 주요하게 작용하는 요인 및 환경 해석을 위한 기초 자료 구축

## 2. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

평가의 착안점	자 체 평 가
정점 및 측선 생성 유무	연구기간 동안 지속적으로 적용 가능한 측량 기준점 구축
현장조사 여부	현장조사를 통하여 연안사취의 특성을 명확하게 나타내는 측량 자료를 획득하였으며, 측선 설정을 통하여 장기적인 지형 변동성 추적 및 분석을 위한 기반 구축
현장조사 및 모델생성 여부	현장조사를 통하여 무인항공기 항공촬영을 수행하였고, 이미지처리 및 정밀측량을 통해 3차원 정밀 DEM을 생성하는 기술을 확보
자료 확보 여부	퇴적상 분석을 위한 불교관시료를 확보하였으며, 퇴적환경 해석에 활용

## 3. 연구결과의 정성적 성과 및 관련분야에의 기여

- 단기간 지형 변화가 예상되는 콩스피오르덴 입구 연안사취에서 측량 기준점 구축 및 측선을 설정하고 정밀지형 측량을 수행함.
- 지형 변화 분석이 가능한 정밀한 측량 자료를 획득하였으며, 차후 지형 변화 분석에 활용 가능한 기초 자료 획득에 의의가 있음.
- 무인항공기를 통해 촬영된 이미지를 기반으로 정밀지형분석을 성공적으로 수행하였으며, 이는 접근성과 체제기간이 제한되어 있는 극지 피오르드 연안지역 지형 및 침퇴적양상 연구에 활용할 수 있는 기술적 역량을 확보하였음.
- 무인항공기를 통해 촬영된 이미지 처리 및 분석절차를 수립하였으며, 최종 결과물인 3차원 디지털 고도모델(DEM)의 정확도를 검증하는 기법을 개발하여 생산된 결과물의 신뢰도를 평가하는 기술을 개발함.
- 무인항공기 기반 지형분석 기술은 접근이 제한된 극지 피오르드 연안지역 및 내륙지역 외에도 우리나라 서해 및 동해 연안의 퇴적환경, 육상 하천 퇴적환경에서의 지형특성 및 지형변동성 연구에 광범위하게 활용될 수 있음.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 연구개발결과의 활용방안

- 본 연구과제에서 개발될 핵심적인 기술은 스발바르 피오르드 지형의 변동성을 평가하고, 지질학적인 특성화를 하는 것임. 즉 특정 피오르드 지역의 침식 및 퇴적작용의 시공간적 특성을 규명함으로써 동 지역의 과거변화과정을 추적하고, 미래의 변화과정을 예측하는 기술을 개발하는 것임. 이러한 기술은 스발바르 피오르드 지역의 연안역에 대한 경제적인 개발활동에 가장 중요한 원천자료를 제공할 뿐 만 아니라, 피오르드 지역에 거주하고 있는 거주민의 안전을 도모하기 위한 핵심자료로서 활용될 수 있음.
- 또한 스발바르 피오르드에 위치하고 있는 유적지 및 사적지의 효율적 관리방안 마련에도 활용될 수 있음. 즉 지형변화가 가속화되고 있는 지역내에 유적지 및 사적지가 위치하고 있는 경우, 이를 효과적으로 보호하고, 재배치 및 방치와 같은 행정적 의사결정 도출시에 본 연구의 기술이 활용될 수 있음.
- 스발바르 피오르드의 지형변화는 기후온난화와 밀접하게 관련이 있으며, 해빙의 감소, 적설량의 증가, 파랑의 세기 강화, 해수면 변동 등과 같은 상호 복잡하게 연결되어 있는 기후온난화 추적 프록시의 연구에 있어서 핵심적인 정보를 제공함. 따라서, 극지역의 기후변화 및 해수면 변화를 추적하기 위한 기초과학 연구에 긴요하게 활용될 수 있음.
- 스발바르 피오르드지역을 비롯한 극지역에 진출하고자 하는 기업에게 현지의 지질학 및 지형변동성에 대한 기술정보를 제공함으로써, 기회비용을 최소화하고, 성공적인 현지진출을 지원할 수 있는 실용적 목적으로 활용이 가능함.

극지연구소

## 제 2 절 기술적·경제적 측면에서의 활용

- 본 연구기술이 성공적으로 개발될 경우, 기후온난화에 의해 침식이 가속화되고 있는 극지 피오르드 지형의 형태변동성을 모니터링하고 미래의 경향성을 예측하기 위한 연구 정점 및 측선의 설계 능력을 확보할 수 있음.
- 또한 장단기간의 시계열 관측자료 획득 및 분석을 토대로 피오르드 지형의 침퇴적작용 양상 및 지형변동성에 기초한 지질위험도면을 제작할 수 있는 원천 기술을 확보할 수 있음.
- 아울러 극지의 육상과 해양의 전이지대에서 발생하고 있는 물질순환에 대한 정보를 제공하는 기술의 개발이 가능하여, 보다 정확한 기후복원 및 기후변화 예측연구에 활용될 수 있음.
- 북극 지역은 인위적인 환경변화의 영향을 가장 정확하게 파악할 수 있는 곳으로 미래의 환경변화를 예측하기 위해 선진각국들은 막대한 연구예산을 지원하고 고급연구 인력을 투입하여, 연구에 박차를 가하고 있는 실정임. 본 연구를 통해 극지연구를 선도적으로 수행할 수 있는 고급연구인력들을 양성하며, 육성된 연구인력들을 해외 시장에 진출시킬 수 있는 기반을 제공함으로써 고급연구인력의 수요를 촉진시키고, 인력수출을 통한 수익창출 효과를 기대할 수 있음.
- 또한 북극 지역은 막대한 원유와 천연가스가 매장되어 있는 미래의 자원보고로서, 향후 성공적인 개발을 위한 노력을 선진각국들이 치열하게 전개하고 있는 실정임. 우리나라도 북극지역에서의 자원개발 탐사활동, 관련기업의 진출장벽을 낮추기 위한 연구개발이 필요한 상황임. 본 연구를 통해 북극지역에서 경제활동을 추구하고 있는 국내 기업에 대해 실용적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
- 특히 북극 육상지역에서 경제활동을 전개하는 기업체에 대해, 방제 및 현장개발 관련 활용될 수 있는 정보를 제공함으로써, 인적 및 물적 자원의 효율적 관리가 가능해질 것으로 기대됨.
- 침식현상이 가속화되고 있는 스발바르 피오르드 지역의 거주민의 안전과 경제 시설 및 역사적 유물의 효율적 관리방안에 활용될 수 있는 정보획득 원천기술을 수요기업에 이전함으로써, 극지환경에 특화된 기술중소기업을 육성할 수 있음.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 제 1 절 Dicksonfjorden 퇴적환경

- 디슨피오르덴은 이스피오르덴에서 북쪽으로 60킬로미터 떨어져 있는 곳으로, 조차가 2미터에 달하고 갯벌이 7킬로미터 이상 연장성을 가지고 발달하고 있음.
- 디슨피오르덴은 콩스피오르덴과 달리 상대적으로 빙하의 발달이 미약한 환경으로 지속적인 용기에 의해 상대적인 해수면이 하강하고 있으며, 순차층서학적으로 강제해퇴층서가 형성되고 있는 환경임.
- 디슨피오르덴에는 망상하천들이 우세하게 발달하고 있으나, 일반적인 망상하천과는 달리 세립한 퇴적물로 구성되어 있고, 각 하천들은 사행하는 특징을 보임.
- UNIS의 Maria Jensen 교수 연구팀은 동 지역에서 2015년 첫 야외조사를 시작하였고, 올해 서울대 최경식 교수 연구팀과 공동으로 야외조사를 수행하였음.
- 디슨피오르덴은 극지방 환경에서 조수와 하천의 전이지대 퇴적작용을 이해하는데 중요한 연구지역으로 평가되고 있으며, 향후 집중적인 연구수행을 통한 우수한 연구성과 도출이 예상됨.
- 서울대 최경식 교수 연구팀은 동 지역에 향후 연구거점을 마련하고, 체계적인 연구계획을 수립하여, 지속적인 연구자료 확보에 만전을 기할 계획임.



주 의

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