BSPE16200-089-13

환경변화에 대한 킹조지섬 주요생물의 반응 모델링 기반구축사업 기획

Planning for modeling biological responses of representative organisms in King George Island to environmental changes

KOPRI
극지연구소

2016. 5. 31

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 환경변화에 대한 킹조지섬 주요생물의 반응 모델링 기반구축사업 기획 ”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 5. 31

연 구 책 임 자 : 홍 순 규
참 여 연 구 원 : 김 상 희
“ : 김 옥 선
“ : 김 정 훈
“ : 김 지 희
“ : 서 태 건
“ : 이 영 미
“ : 이 원 영
“ : 이 정 은
“ : 이 형 석
“ : 이 홍 금
“ : 정 호 성
“ : 최 한 구
“ : 김 현 철
“ : 지 준 화
“ : 김 성 중
“ : 박 태 윤
“ : 우 주 선
“ : 이 주 한
“ : 김 고 홍
“ : 박 채 행
“ : 이 재 진
“ : 현 창 욱
“ : 노 현 주
“ : 박 경 민
“ : 박 미 라
“ : 조 안 나

KOPRI 극지연구소

보고서 초록

<table>
<tr><td>과제관리번호</td><td></td><td>해당단계
연구기간</td><td colspan="2">2016. 2. 15. -
2016. 5. 31 (3.5월)</td><td>단계 구분</td><td>1 / 1</td></tr>
<tr><td rowspan="2"><u>연구사업명</u></td><td>중 사 업 명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5">연구정책・지원과제</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>중 과 제 명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>세부(단위)과제명</td><td colspan="5">환경변화에 대한 킹조지섬 주요생물의 반응 모델링 기반구축사업 기획</td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>홍순규</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>총 : 26 명
내부 : 18 명
외부 : 8 명</td><td>해당단계
연구비</td><td colspan="2">정부: 5,000천원
기업: 천원
계: 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">극지생명과학부</td><td colspan="2">참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="4">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 :</td><td colspan="4">연구책임자 :</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)</td><td>보고서
면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">
○ 지난 6년(2011-2016년)에 걸쳐 진행된 킹조지섬 장기생태연구의 후속과제 개발을 위하여 지금까지 수행한 연구결과를 정리하고 국제동향을 분석하여 향후 3년간 진행할 연구의 목표와 내용을 설정하는 것을 목표로 기획연구를 수행함
○ 6년간의 연구결과 킹조지섬 바톤반도의 생태계 구성요소에 대한 기초자료 확보가 이루어졌으며, 정보 분석을 위한 기술개발이 수행됨. 또한 생태계변화 장기모니터링 지점과 관측방법이 구축되어 기후변화에 의한 생물반응과 생태계변화 연구를 위한 기초 확립
○ 환경변화에 의한 생물반응은 남극과학위원회에서 중요한 문제로 인식되고 있으며, 이에 대한 답을 하기 위한 연구조직이 갖추어지고 있음. 또한 생태계장기연구는 오랜 역사를 가지고 남극을 포함하여 전 세계적으로 진행되고 있고, 임계영역 관측이라는 새로운 개념으로 생태계를 종합 관측함으로써 작용기작과 진화를 이해하기 위한 시도가 이루어짐
○ 남극생태계를 구성하고 있는 주요 생물군인 선태류, 지의류, 무척추동물, 미세조류, 원생생물, 미생물에 대하여 환경변화에 대한 생물반응 모델링을 목표로 설정. 이를 실현할 구체적인 계획 수립

제1세부과제: 환경변화에 대한 생물반응 모델링 기반구축
- 온도, 수분, 광량 등 주요 환경요소에 대한 지의류, 선태류, 무척추동물 및 미생물군집의 반응자료 확보
- 환경변화에 대한 생물반응 모델링 프로토타입 개발
제2세부과제: 환경변화-생물반응 종합조사 (Critical Zone Observatory)
- 대기환경 요소, 지질・담수 환경 요소, 생물활성 등 생태계 구성요소의 종합관측
- 생태계 구성요소 간 상호작용 분석
제3세부과제: 기후변화에 의한 생태계 변화 장기 모니터링
- 육상생태계 장기모니터링 지점의 환경변화 자료 및 생물상 변화 자료 확보
- 연안생태계 환경변화 및 생물상 변화 장기모니터링 셋업
- 빙하융해로 새롭게 노출된 지역의 생물상 천이과정 추적
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td>장기생태연구, 환경변화, 생물반응, 임계영역 관측</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td>LTER, environmental change, biological response, critical zone observatory</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

환경변화에 대한 킹조지섬 주요생물의 반응 모델링 기반구축사업 기획

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

전 지구적인 온난화로 인한 지구환경변화는 극지를 포함하여 전 세계적으로 생태계에 영향을 미치는 주요 요인으로 인식되고 있다. 지구환경변화는 홍수, 가뭄, 태풍 등 대규모의 자연재해를 일으킬 뿐 아니라 생물상의 변화, 병원균의 분포변화, 어류자원의 분포변화 등 농업, 임업, 어업, 보건 등 우리의 실생활에 영향을 미치는 다양한 변화를 야기하고 있다. 이에 따라 우리정부는 지구온난화에 대한 대비책 마련을 중요 국정과제로 설정하였으며, 극지연구소는 “극지의 변화 원인 규명 및 대응”을 전략목표로 설정하였으며 “기후변화에 의한 남극생태계 변화 예측”을 주요 해결과제로 설정하였다.

기후변화에 의한 생태계의 반응과 변화를 예측하기 위하여 생물다양성, 생물분포, 진화적 기원, 생물반응 등 남극생물에 대한 기초자료 확보가 필요하며, 이들 자료를 해석하고 생태계 작동원리를 규명하기 위한 분석기술의 개발이 필요하다. 또한 이들 자료로부터 생태계변화를 예측하기 위한 모델링기술의 개발이 필요하다. 이에 본 과제에서는 생태계변화 예측기술 개발이라는 장기목표를 달성하기 위한 단계사업을 기획하는 것을 목표로 하였다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

기후변화에 의해 킹조지섬을 포함한 남극육상생태계와 연안생태계의 반응과 변화를 관측하고 생태계 구성요소 간 상호작용 기작 규명 및 모델링기술 개발을 위한 계획을 도출하고자 하였다.

Ⅳ. 연구개발결과

기획연구 결과 3개의 세부목표를 도출하였으며 구체적인 내용은 다음과 같다.

제1세부과제: 환경변화에 대한 생물반응 모델링 기반구축

- 온도, 수분, 광량 등 주요 환경요소에 대한 지의류, 선태류, 무척추동물 및 미생물군집의 반응자료 확보
- 환경변화에 대한 생물반응 모델링 프로토타입 개발

제2세부과제: 환경변화-생물반응 종합조사 (Critical Zone Observatory)

- 대기환경 요소, 지질·담수 환경 요소, 생물활성 등 생태계 구성요소의 종합관측
- 생태계 구성요소 간 상호작용 분석

제3세부과제: 기후변화에 의한 생태계 변화 장기 모니터링

- 육상생태계 장기모니터링 지점의 환경변화 자료 및 생물상 변화 자료 확보
- 연안생태계 환경변화 및 생물상 변화 장기모니터링 셋업
- 빙하융해로 새롭게 노출된 지역의 생물상 천이과정 추적

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구결과는 극지연구소 제4기 주요과제 개발을 위한 자료로 활용하여 2017-2019년의 3년간의 연구계획을 수립하는 데 활용할 계획이다. 3년간 직접비 56억원을 투입하여 환경변화에 대한 생물반응 모델링 기반구축이라는 목표를 달성하고 70여편의 논문 성과를 달성할 계획이다.

KOPRI 극지연구소

목 차

제 1 장 서론 · · ·

제 1 장 서론

1-1. 연구개발 목적 및 필요성

가. 연구개발의 최종목표

○ 환경변화에 대한 킹조지섬 주요생물의 반응 모델링 기반구축 사업 기획

나. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

○ 2030 극지연구소 연구부문 발전전략에서 전략목표 “극지의 변화 원인 규명 및 대응”의 주요 해결과제로 “기후변화에 의한 남극생태계 변화 예측”이 설정됨
○ 기후변화는 농작물과 산림의 생육환경 변화, 병원균의 분포변화, 어업자원의 분포변화 등 인간생활에 큰 영향을 미치는 생태계 변화를 동반함. 이에 대응하기 위하여 생태계 변화 예측기술 개발 필요
○ 남극 생물상의 변화를 추적하기 위하여 생물다양성, 생물분포, 진화적 기원, 생물반응 등 남극생물에 대한 기초자료 확보 필요
○ 남극생태계의 반응 및 변화 모니터링 및 이를 통한 생태계의 작동원리 규명은 전 지구적 관심사임

KOPRI 극지연구소

□ 기술적 측면

○ 박근혜정부 140대 국정과제 중 “93. 기후변화 적응역량 제고”에서는 “기후변화의 위기를 기회로 활용한 지속가능사회 구현”을 목표로 “기후변화 감시·예측 능력 확보 및 이상기후 대응능력 강화”와 “기후변화로 인한 질병관리 강화 및 생물다양성 보전” 등을 주요 실천과제로 제시하였음
○ 국정과제 “92. 온실가스 감축 등 기후변화에 적극 대응”과제에서는 “기후변화 등 환경문제에 적극 대응, 환경과 성장이 선순환 되도록 하고 지구 환경문제 해결에 선도적 역할 수행”을 목표로 함
○ “2030 극지연구소 연구부문 발전전략”에서 전략 목표 “극지의 변화 원인 규명 및 대응”, 핵심연구분야 “극지 환경변화 원인과 영향 파악 및 예측”, 주요 해결과제 “기후변화에 의한 남극생태계 변화 예측”로 설정됨
○ 남극생태계의 보존과 관리를 위하여 기후변화에 의한 남극생태계의 반응 및 변화 예측기술 개발 필요
○ 생태계 변화 예측기술 개발을 위해서 미기후 모델링, 환경변화에 대한 생물반응 모델링, 가상생태계 모델링 등 기반기술 개발 필요

□ 경제·산업적 측면

○ 기후변화는 농작물과 산림의 생육환경 변화, 병원균의 분포변화, 어업자원의 분포변화 등 인간생활에 큰 영향을 미치는 생태계 변화를 동반함
○ 기후변화가 인간 활동에 미칠 영향을 예측하고 이에 대한 대비 필요

□ 과학적 측면

○ 킹조지섬은 기후변화가 가장 빨리 진행되고 있는 지역으로서, 기후변화에 의한 생태계의 반응 및 변화 연구의 최적지임
○ 기후변화에 의한 남극생물종의 멸종, 외래 생물종의 유입, 남극생태계의 구성 및 기능변화 등을 동반할 것으로 예측됨
○ 남극 생물상의 변화를 추적하기 위하여 생물다양성, 분포, 기원, 진화, 생물반응 등 남극 생물에 대한 기초자료 확보 필요
○ 유전체, 전사체, 대사체, 환경유전체, 환경 전사체, 미생물 군집 등의 생리반응 분석기술, 분광학적 원격탐사기술, 광합성 모니터링, 마이크로코즘 실험 등 대상 생물종들에 적합한 기술의 선정 및 개발 필요

□ 사회·문화적 측면

○ 남극 생태계는 청정자연의 상징으로서 전세계인의 관심 대상이며, 기후변화에 의한 생태계의 변화는 지구환경 변화의 시금석임
○ 남극생태계의 반응 및 변화 모니터링 및 이를 통해 생태계의 작동원리 규명은 전지구적 관심사임

KOPRI 극지연구소

다. 지금까지의 연구개발 실적

○ 1단계 연구(2011~2013)를 통해 킹조지섬의 생물다양성 및 생태계 구성요소에 대한 기초연구 수행, 이를 통해 킹조지섬 생태계 연구를 위한 기초 확립
○ 2단계 연구(2014~2016)를 통해 생태계 변화 장기모니터링 셋업, 킹조지섬 서식 생물의 진화적 기원 규명, 생태계 연구 기반기술 개발 수행
○ “남극과학기지 포괄적 환경모니터링 및 장기환경자료 DB구축” 사업을 통해 인간활동이 기지주변의 환경에 미치는 영향 조사 중. 마리안소만 연안생태계 정점조사 수행을 통해 해양환경 변화 모니터링, pCO_2 연속관측, 연안의 미세조류 장기모니터링 수행

라. 외국의 사례

○ SCAR의 생명과학분야 과학연구프로그램으로 AntEco (State of the Antarctic Ecosystem)와 Ant-ERA (Antarctic Thresholds - Ecosystem Resilience and Adaptation) 운영 중
○ AntEco 프로그램에서는 남극, 아남극 및 남극해의 다양한 환경에 서식하는 과거와 현재의 생물다양성을 유전자에서 생태계까지 다양한 수준에서 이해도를 높이고, 이를 바탕으로 남극생태계 보전에 활용하고자 함
○ AnT-ERA 프로그램에서는 생태계의 작동기작을 유전자, 군집 및 생태계 3가지 단계에서 이해하는 것을 목표로 함. 이를 바탕으로 향후 기후변화가 발생했을 때 남극생태계의 안정성과 생태계 기능을 예측하고자 함
○ SCAR의 Action Group인 Antarctic Near-shore and Terrestrial observation System

(ANTOS)에서는 남극 대륙 전지역에 걸쳐 육상과 연안생태계 관측시스템을 구축하고자 함

○ The 1st SCAR Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan에서는 남극생물연구 주제 26개 선정

마. 현 기술상태의 취약성

○ 기후변화에 의한 생태계 반응 및 변화 예측기술은 기술의 태동단계임. 따라서 기초자료의 확보, 모델링 기술 개발 등 다양한 분야의 기술개발과 노하우 축적이 필요함

○ 선진국을 중심으로 장기생태계 모니터링 사업을 통해 생태계 변화 자료 축적 중. 현재 진행중인 장기모니터링은 큰 권역별로 이루어지고 있음

○ 자연 생태계에서 각 생물의 반응은 미소환경에 대한 반응으로 이루어지므로 생태계 반응과 변화 예측기술 개발을 위해서 미소환경 별 모니터링과 종별 또는 유전형별 반응을 연구해야 함

바. 앞으로의 전망

○ 오믹스 기술과 원격탐사 기술의 발전으로 인해 자연생태계 분석과 관측 분야의 비약적인 발전 기대

○ 관측데이터와 분석결과를 축적하고 분석하기 위한 데이터베이스 구축 및 분석기술 발전을 통해 생태계 작동원리 규명과 예측기술 분야의 획기적인 발전 기대

KOPRI 극지연구소

1-2. 연구개발 내용 및 범위

구 분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위	추정연구비 (단위: 천원)
1차년도 (2015)	○환경변화에 대한 킹조지섬 주요생물의 반응 모델링 기반구축 사업 기획	○환경변화에 대한 육상생태계 주요 생물의 반응모델링 기반구축 연구 기획 - 온도, 수분, 광량 등 주요 환경요소에 대한 지의류, 선태류, 무척추동물 및 미생물군집의 반응자료 확보 - 장기모니터링 지점의 환경변화 자료 및 생물상 변화 자료 확보 - 빙하융해로 새롭게 노출된 지역의 생물상 천이과정 추적 - 환경변화에 대한 생물반응 모델링 프로토타입 개발 ○빙하 융해가 킹조지섬 연안생태계에 미치는 영향 연구 기획 - 연안생태계 환경변화 및 생물상 변화 장기모니터링 셋업 - 주요 환경요소에 대한 해양생물의 반응자료 확보	5,000

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 연구 동향

가. 킹조지섬 장기생태 연구 현황

○ 1단계 연구(2011~2013)를 통해 킹조지섬의 생물다양성 및 생태계 구성요소에 대한 기초연구 수행, 이를 통해 킹조지섬 생태계 연구를 위한 기초 확립

○ 2단계 연구(2014~2016)를 통해 생태계 변화 장기모니터링 셋업, 킹조지섬 서식 생물의 진화적 기원 규명, 생태계 연구 기반기술 개발 수행

○ 다음단계 연구를 기획하기 위한 기초로서 현재까지 진행된 연구를 분석

1) 지형특성

○ 지형적 특성과 기후가 동시에 작용하여 형성하는 미기후는 선태류, 지의류, 무척추동물, 미생물 등 육상생태계를 구성하고 있는 생물분포를 결정하는데 중요한 작용을 함

○ 미세지형이 선태류, 지의류를 포함한 생물분포에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Digital elevation model을 이용하여 고도, 경사, 사면 등의 기본정보 분석

○ 고해상도의 지형자료 및 식생분포를 분석하기 위하여 드론을 이용한 이미지 자료 확보. 향후 정밀 지형분석 예정

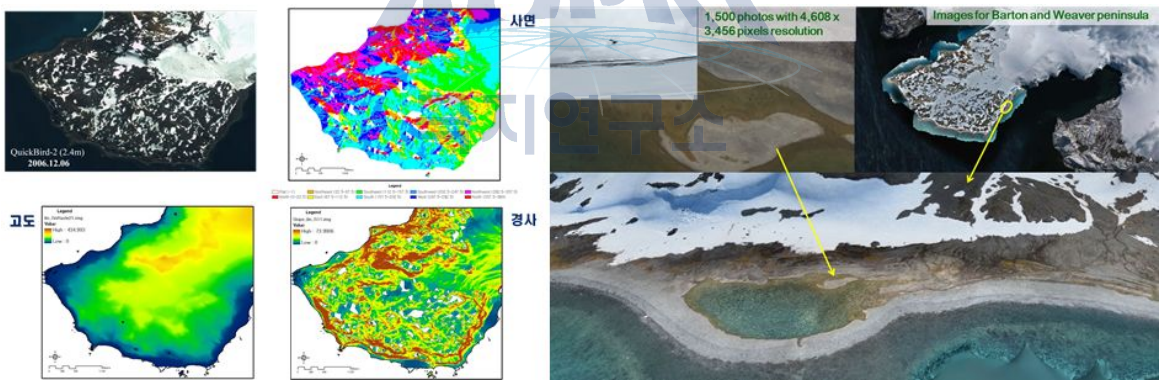


그림 1. 킹조지섬 바톤반도의 지형학적 특성 분석 및 원격탐사

2) 기온 및 지온 특성

○ 바톤반도 전역에 걸쳐 지표면 기온과 동토 활동층에 대한 연중 온도변화 관측을 수행

○ 지표면 기온의 경우 지형의 영향을 많이 받으며, 계곡과 능선, 사면과 식생분포에 의해 크게는 15도까지 동시간대 온도 차이가 있음을 밝힘. 이로서 작은 지역적 범위 내에서도 미기후의 차이기 매우 크게 형성될 수 있음을 보여주었으며, 작은 지역임에도 불구하고 다양한 생태계가 구성될 수 있음을 시사

○ 지온 데이터 분석결과 고도에 의한 영향을 크게 받으며 위치에 따라 활동층의 깊이가 서로 다름을 밝힘. 토양에서 발생하는 유기물의 전환이나 각종 미생물의 활성 연구에 기초자료로 활용

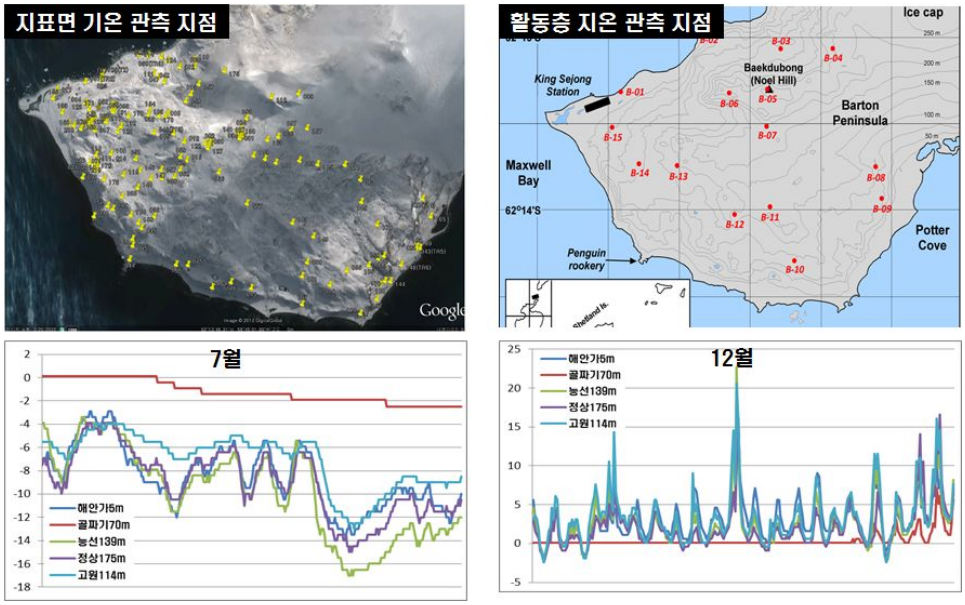


그림 2. 지표면의 기온 및 동토 활동층의 지온 관측

3) 식생분포도 및 식생밀도

- 킹조지섬 육상생태계는 대부분의 경우 선태류와 지의류가 서식하고 있으며, 미기후 차이에 의해 매우 다양한 종류의 식생이 차별적으로 분포함
- 생태계 변화연구의 기초자료인 식생분포도를 5년에 걸친 작업을 통해 완성
- 바톤반도의 식생은 주로 암석으로 지표면이 구성되어 있으며, 경사가 크고 토양형성이 빈약하여 수분이 적은 내륙부에는 *Usnea, Himantormia*등이 주요 식생을 구성하고 있으며, 경사가 완만하여 토양형성이 비교적 잘 발달하여 수분보유가 많은 연안지역에는 선태류와 *Cladonia, Psoroma* 등 이끼 위에 주로 서식하는 지의류의 밀도가 높고 다양하게 발달

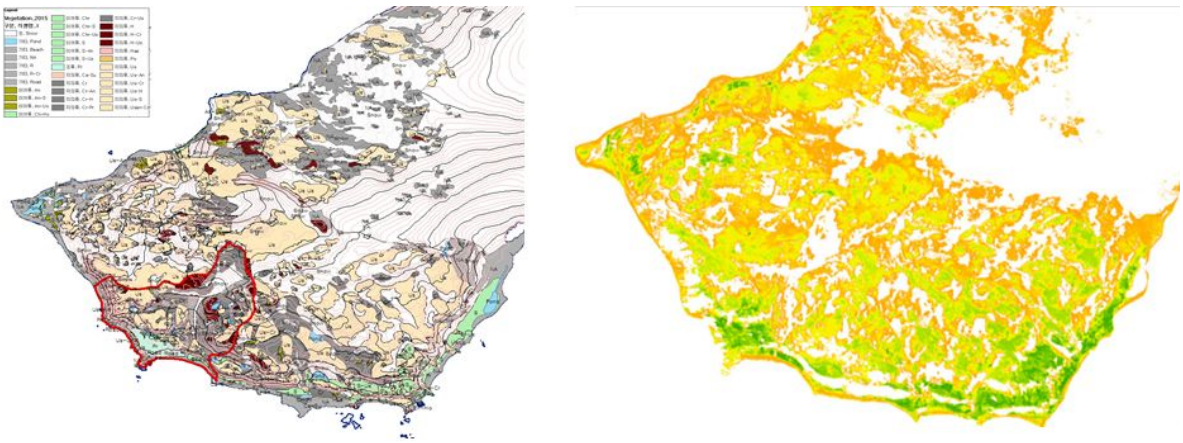


그림 3. 바톤반도 식생분포도 및 식생밀도

4) 미생물군집 구조 및 토양지화학 성분

- 바톤반도 전역에 걸쳐 표층토양 시료에 대하여 미량원소를 포함한 지화학적 특성 분석 및 세균, 고세균, 균류를 포함한 진핵미생물 다양성 및 군집구조 분석
- 토양의 생물활성, 기후변화에 의한 토양생태계의 변화 연구를 위한 기초자료로 활용

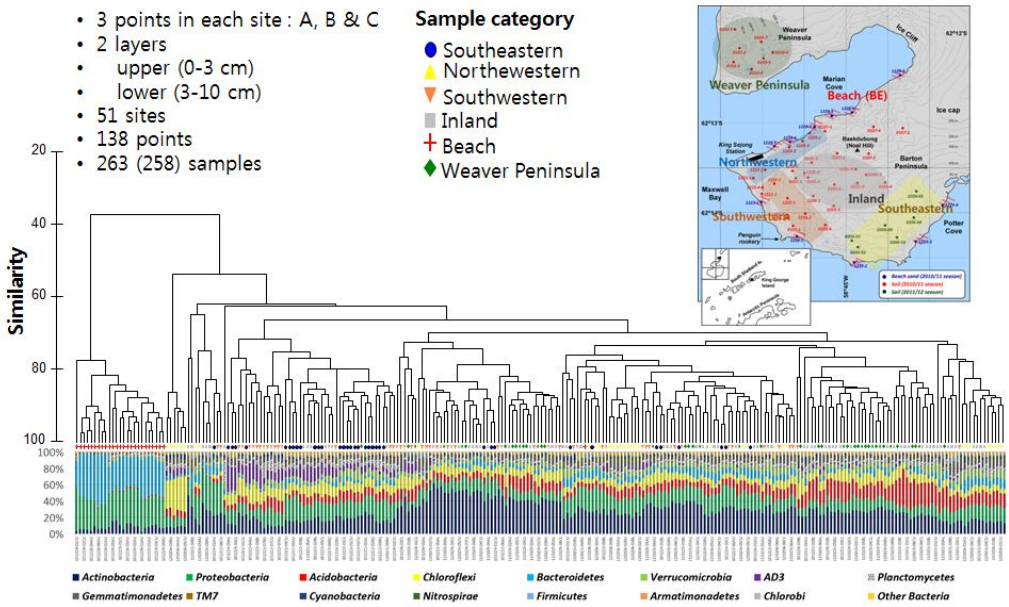


그림 4. 지형별 토양미생물 군집구조 분석

5) 생물다양성 자료

○ 기후변화에 의한 생태계 반응 및 변화 예측기술을 개발하기 위하여 생태계를 구성하고 있는 생물다양성 자료는 필수임

○ 선태류, 지의류, 해조류, 무척추동물, 원생동물 및 미세조류에 대하여 킹조지섬 및 남쉐틀랜드군도와 남아메리카 남부 지역의 생물다양성 자료 확보

○ 웹이미지 도감, 현장가이드 북 등 자료발간

KOPRI 극지연구소

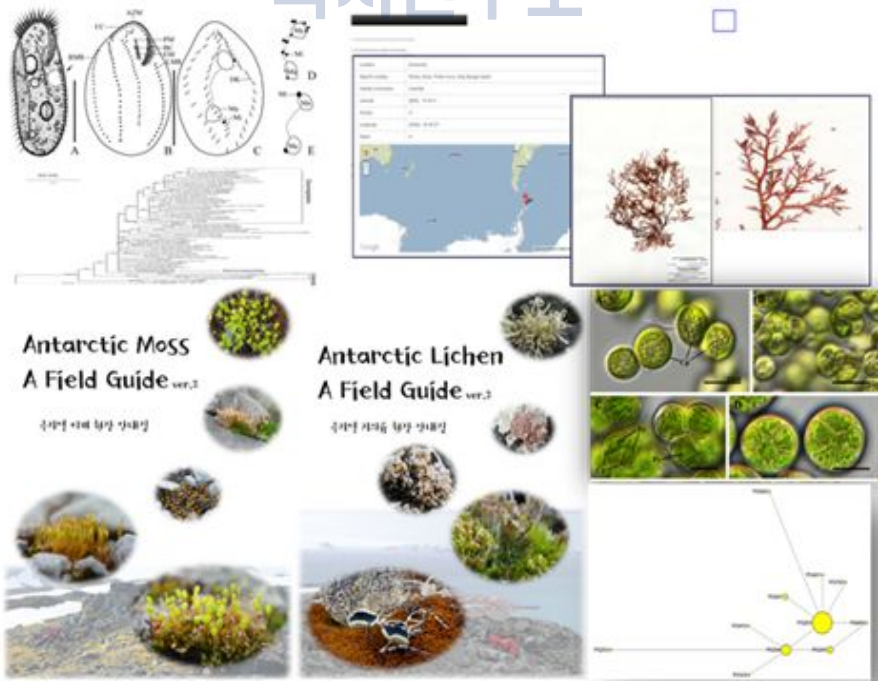


그림 5. 선태류, 지의류, 해조류, 미세조류, 무척추동물 및 원생생물 다양성 조사 및 자료 발간

6) 장기모니터링

○ 지형, 온도, 식생분포, 미생물군집 등의 데이터를 바탕으로 서로 다른 특성을 가진 지점을 선정하여 장기모니터링 셋업

○ 기온, 상대습도, 광량, 지온, 토양함수율 등의 기후자료를 연속관측하고, 매년 정기적으로 미생물군집의 변화 모니터링

○ 식생밀도와 분포변화는 3-5년 간격으로 조사할 계획이며, 원격탐사 방법을 이용하여 생물반응 관측예정

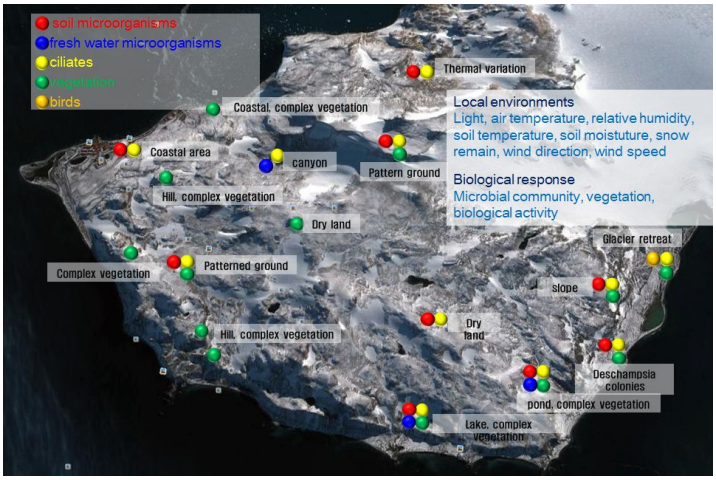


그림 6. 생태계 장기 모니터링 지점 및 지점 별 조사항목

7) 생물정보 분석기술

○ 차세대염기서열분석기의 출현으로 미생물생태학 분야는 혁명기를 겪고 있음. 향후 이 분야를 선도하기 위해서 생물정보 분석기술의 확보는 필수

○ 미생물다양성 정보 분석을 위한 필수 처리단계인 염기서열 전처리, 오류염기서열 구분, 클러스터링, 동정용 표준 염기서열 데이터베이스, 통계분석 등 전 단계에 걸쳐 최고수준의 정확성을 가진 생물정보 처리기술 개발

○ 환경유전체, 환경발현유전체 정보기술 개발 중

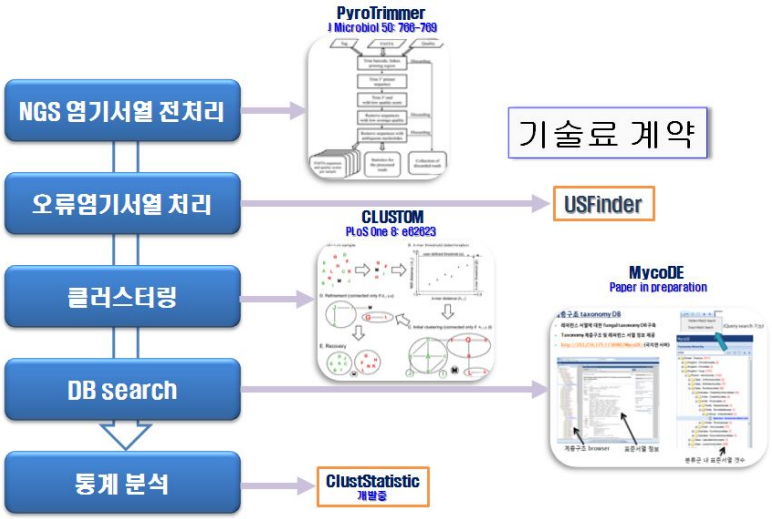


그림 7. 생물정보 분석기술 개발 현황

8) 연구자료 관리 데이터베이스

○ 연구자료의 안정적인 관리 및 원활한 자료공유를 위하여 생태연구자료 데이터베이스 시스템 개발

○ 지리정보, 기상 자료, 생물다양성 자료, 화학분석 자료, 연구시료 자료 등 각종 연구자료의 통합관리

○ 2015년 출범한 ANTOS (Antarctic Near-shore and Terrestrial Observation System)의 데이터베이스 개발 및 데이터관리 책임을 본 연구팀이 맡게 됨에 따라, 본 연구팀의 연구자료 데이터베이스 시스템을 개선하여 모든 남극생태연구자들이 공유할 수 있는 데이터베이스 시스템으로 업그레이드 중

그림 8. 연구자료 관리 데이터베이스 개발

나. 기타 남극생태 연구 현황

○ "남극과학기지 포괄적 환경모니터링 및 장기환경자료 DB구축" 사업을 통해 인간활동이 기지주변의 환경에 미치는 영향 조사 중. 마리안소만 연안생태계 정점조사 수행을 통해 해양환경 변화 모니터링, pCO_2 연속관측, 연안의 미세조류 장기모니터링 수행

○ "남극특별보호구역 모니터링 및 남극기지 환경관리에 관한 연구" 사업을 통해 펭귄의 개체군 변화와 환경변화와 행동양식 변화 모니터링

○ "CCAMLR 생태계모니터링 수행을 위한 장기 연구기반 구축" 사업을 통해 북빅토리아랜드 지역의 생태계 연구기반 구축 중. 향후 국가연구개발사업으로 발전될 경우 본 과제와 함께 빅토리아랜드와 남극반도의 생태계의 비교연구를 위한 기반이 갖추어질 것으로 예상됨

2-2. 해외 연구 동향

가. SCAR 연구조직 및 남극생태연구

○ SCAR의 생명과학분야 과학연구프로그램으로 AntEco (State of the Antarctic Ecosystem)

와 Ant-ERA (Antarctic Thresholds - Ecosystem Resilience and Adaptation) 운영 중

- AntEco 프로그램에서는 남극, 아남극 및 남극해의 다양한 환경에 서식하는 과거와 현재의 생물다양성을 유전자에서 생태계까지 다양한 수준에서 이해도를 높이고, 이를 바탕으로 남극생태계 보전에 활용하고자 함
- AnT-ERA 프로그램에서는 생태계의 작동기작을 유전자, 군집 및 생태계 3가지 단계에서 이해하는 것을 목표로 함. 이를 바탕으로 향후 기후변화가 발생했을 때 남극생태계의 안정성과 생태계 기능을 예측하고자 함
- SCAR의 Action Group인 Antarctic Near-shore and Terrestrial Observation System (ANTOS)에서는 남극 대륙 전 지역에 걸쳐 육상과 연안생태계 관측시스템을 구축하고자 함

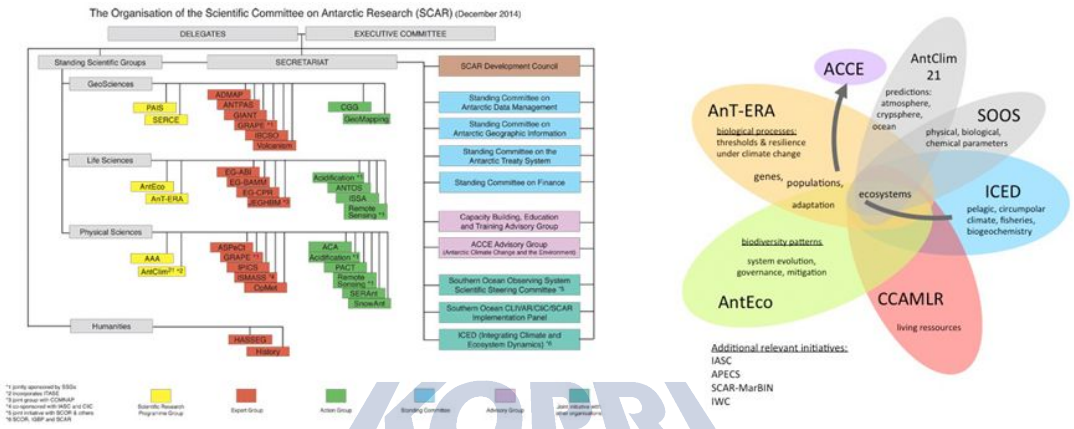


그림 9. SCAR 조직도 및 과학연구 프로그램

KOPRI 극지연구소

- The 1st SCAR Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan에서는 남극생물연구 주제 26개 선정
- 45번과 46번 항목은 과거 역사에서 기후온난화에 대해 남극생태계와 남극생물이 어떻게 반응하고 진화했는지에 관한 연구주제임
- 48, 49, 50번 항목은 급격히 변화하는 환경 하에 멸종할 가능성이 있는 생물을 확인하고 생태계 기능에 어떠한 영향을 미칠 것인지 그리고 생물상에 어떤 영향을 미칠 것인지에 관한 연구주제임
- 54, 55, 56, 57 항목은 외래생물의 유입과 그 영향에 대한 연구주제임
- 이러한 주제들은 킹조지섬 생태계의 생물다양성 및 물리화학적 특성 분석, 환경변화에 대한 생물반응, 생물상변화, 외래생물의 유입과 정착 기록복원을 통해 생태계반응을 모델링하고 생태계변화 예측기술을 개발하고자 하는 본 과제의 연구목표와 연관성이 높음

ANTARCTIC LIFE ON THE PRECIPICE[1,2]

43. What is the genomic basis of adaptation in Antarctic and Southern Ocean organisms and communities?
44. How fast are mutation rates and how extensive is gene flow in the Antarctic and the Southern Ocean?
45. How have ecosystems in the Antarctic and the Southern Ocean responded to warmer climate conditions in the past? *(Cross-cuts "Antarctic Atmosphere" and "Oceans")*
46. How has life evolved in the Antarctic in response to dramatic events in the Earth's history? *(Cross-cuts "Dynamic Earth")*
47. How do subglacial systems inform models for the development of life on Earth and elsewhere? *(Cross-cuts "Eyes on the Sky")*
48. Which ecosystems and food webs are most vulnerable in the Antarctic and Southern Ocean, and which organisms are most likely to go extinct?
49. How will threshold transitions vary over different spatial and temporal scales, and how will they impact ecosystem functioning under future environmental conditions?
50. What are the synergistic effects of multiple stressors and environmental change drivers on Antarctic and Southern Ocean biota?
51. How will organism and ecosystems respond to a changing soundscape in the Southern Ocean?" *(Cross-cuts "Human")*
52. How will next-generation contaminants affect Antarctic and Southern Ocean biota and ecosystems?
53. What is the exposure and response of Antarctic organisms and ecosystems to atmospheric contaminants (e.g. black carbon, mercury, sulphur, etc.), and are the sources and distributions of these contaminants changing? *(Cross-cuts "Antarctic Atmosphere" and "Human")*
54. How will the sources and mechanisms of dispersal of propagules into and around the Antarctic and Southern Ocean change in the future?
55. How will invasive species and range shifts of indigenous species change Antarctic and Southern Ocean ecosystems? *(Cross-cuts "Human")*
56. How will climate change affect the risk of spreading emerging infectious diseases in Antarctica? *(Cross-cuts "Human")*
57. How will increases in the ice-free Antarctic intertidal zone impact biodiversity and the likelihood of biological invasions?
58. How will climate change affect existing and future Southern Ocean fisheries, especially krill stocks? *(Cross-cuts "Human")*
59. How will linkages between marine and terrestrial systems change in the future?
60. What are the impacts of changing seasonality and transitional events on Antarctic and Southern Ocean marine ecology, biogeochemistry, and energy flow?
61. How will increased marine resource harvesting impact Southern Ocean biogeochemical cycles? *(Cross-cuts "Human")*
62. How will deep sea ecosystems respond to modifications of deep water formation, and how will deep sea species interact with shallow water ecosystems as the environment changes?
63. How can changes in the form and frequency of extreme events be used to improve biological understanding and forecasting? *(Cross-cuts "Antarctic Atmosphere")*
64. How can temporal and spatial "omic-level" analyses of Antarctic and Southern Ocean biodiversity inform ecological forecasting?
65. What will key marine species tell us about trophic interactions and their oceanographic drivers such as future shifts in frontal dynamics and stratification?
66. How successful will Southern Ocean Marine Protected Areas be in meeting their protection objectives, and how will they affect ecosystem processes and resource extraction? *(Cross-cuts "Human")*
67. What ex situ conservation measures, such as genetic repositories, are required for the Antarctic and Southern Ocean? *(Cross-cuts "Human")*
68. How effective are Antarctic and Southern Ocean conservation measures for preserving evolutionary potential? *(Cross-cuts "Human")*

그림 10. SCAR Horizon Scan 생물학 관련 질문

KOPRI 극지연구소

나. 장기생태 연구

○ 생태계의 변화는 단기간에 이루어지지 않으며 오랜 기간에 걸쳐서 발생하는 특성을 가지고 있음. 따라서 지구환경변화가 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 장기간에 걸친 관측과 작용기작 연구가 필요함

○ 전 세계적으로 지역 기반 장기 생태연구가 수행 중인데 NSF가 1980년에 설립한 The Long Term Ecological Research Network (LTER)에는 2000 여명의 과학자, 학생들이 참여 중이며 LTER DATA portal을 제공하고 http://directory.lternet.edu/dir.php에서 현재 전세계 약 30 지역에서 진행 중인 LTER 관련 연구자들 정보를 얻을 수 있음

○ 이 중 극지역은 북극 LTER, 남극 맥머도 LTER, Palmer station LTER이 등록되어 있음. 이중 Palmer Station LTER은 해양생태계 장기생태연구이며, 남극반도지역의 육상생태 장기관측 프로그램은 등록되어 있지 않음

○ 킹조지섬 기반 LTER은 2014년 12월 칠레에서 ILTER (Internation LTER) 그룹 연구자들 8명과 만나 우리 연구팀이 수행중인 킹조지섬 LTER 진행과 NSF LTER Network와의 협력 방안을 논의함

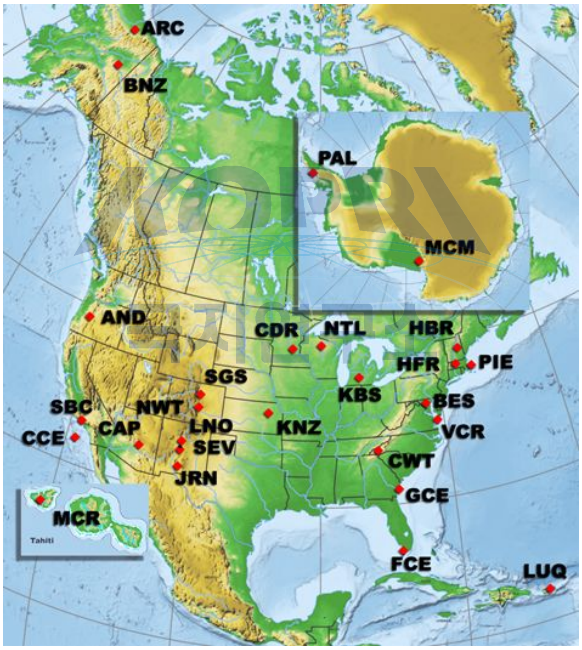


그림 11. 미국의 LTER 연구지역

다. 임계영역 관측 (Critical Zone Observatory, CZO)

○ Critical Zone Observatory (CZO)는 미국 NSF에서 추진하고 있는 프로그램의 하나로, 현재의 지표면의 형태를 이루고 있는 화학적, 물리적, 지질학적, 생물학적 과정에 대하여 공간적 및 시간적 작용과 변화를 종합적으로 이해하기 위한 다학제 연구 프로젝트임

○ 지하 깊은 곳에 존재하는 물에서부터 최상부의 나무까지 지표근처에서 일어나고 있는 현상에 대한 연구로서, 생물, 바위, 공기, 물, 토양의 상호작용과 향후 식량 이용가능성과 수질 등을 고려하여 자연 서식지를 더 잘 이해하고자 함

○ 이러한 복잡한 반응을 이해하기 위하여 특히 지구 온난화의 관점에서 연구자들은 지구과학, 수문학, 미생물학, 생태학, 토양학, 그리고 공학을 포함한 다양한 연구영역의 연구자들이 critical zone을 연구하도록 권유하고 있음

○ 현재 미국 내에는 10개의 CZO 연구지점이 NSF 지원으로 운영되고 있으며, 남극에서는 팔머와 드라이밸 리가 CZO연구지역으로 선정됨. 현재는 Earth's Critical Zone으로 전 세계로 확대(총 46개의 지점)하여 네트워크를 형성하여 진행하고 있음

○ 우리나라는 강원도 평창의 백룡동굴(37° 16′ 19.65″N, 128° 34′ 46.0308″E)에 대한 CZO 연구가 진행중

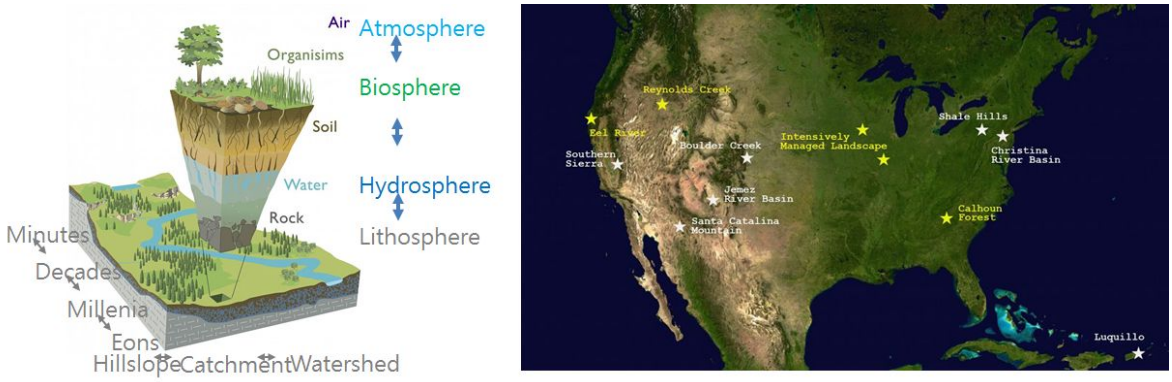


그림 12. Critical Zone Observatory (CZO)의 개념과 미국 내 CZO 연구지역

KOPRI
극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1. 연구개발 목표 및 내용

연구개발 목표	내용
○ 환경변화에 대한 킹조지섬 주요생물의 반응 모델링 기반구축	○ **환경변화에 대한 생물반응 모델링 기반구축** - 온도, 수분, 광량 등 주요 환경요소에 대한 지의류, 선태류, 무척추동물 및 미생물군집의 반응자료 확보 - 환경변화에 대한 생물반응 모델링 프로토타입 개발 ○ **환경변화-생물반응 종합조사 (Critical Zone Observatory)** - 대기환경 요소, 지질·담수 환경 요소, 생물활성 등 생태계 구성요소의 종합관측 - 생태계 구성요소 간 상호작용 분석 ○ **기후변화에 의한 생태계 변화 장기 모니터링** - 육상생태계 장기모니터링 지점의 환경변화 자료 및 생물상 변화 자료 확보 - 연안생태계 환경변화 및 생물상 변화 장기모니터링 셋업 - 빙하융해로 새롭게 노출된 지역의 생물상 천이과정 추적

KOPRI 극지연구소

가. 환경변화에 대한 생물반응 모델링 기반구축

○ 진화, 생태, 생리 등 종합적이고 심도 높은 연구를 위한 모델생물 선정
○ 온도, 수분, 광량 등 주요 환경요소에 대한 모델생물의 생물반응 종합관측
○ 지리적분포, 유전형, 생리특성 간 상호관계 분석
○ 환경변화에 대한 생물반응 모델링 프로토타입 개발

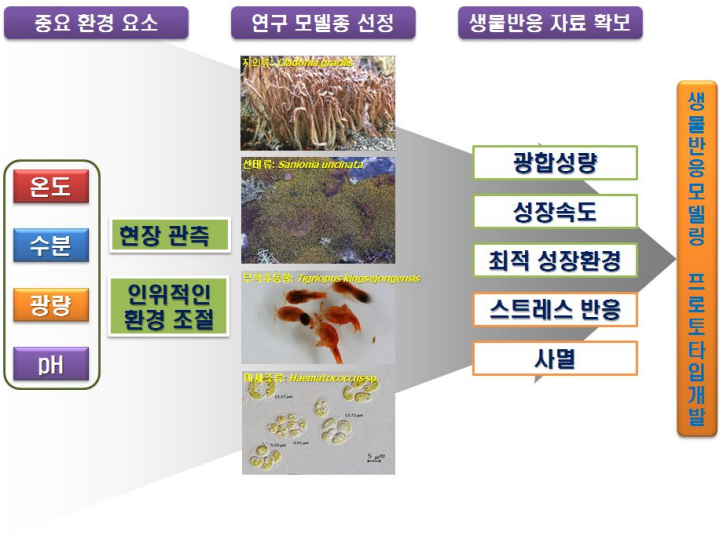


그림 13. 생물반응 모델링 계획

1) 생물반응 모델링을 위한 대표생물 선정

○ 킹조지섬 생태계의 주요 구성원을 대상으로 생태계에 미치는 영향, 연구의 파급효과, 연구의 용이성 등을 고려하여 모델연구생물 선정
○ 선태류 모델생물: *Sanionia uncinata*
○ 지의류 모델생물: *Cladonia gracilis, Usnea auratiaco-atra, Psoroma hypnorum*
○ 무척추동물 모델생물: *Tigriopus kingsejongensis*
○ 미세조류 모델생물: *Haematococcus* sp.
○ 원생생물: 섬모충류 군집
○ 미생물: 토양미생물 군집

2) 생물반응 자료 확보

○ 현장관측, 현장실험, 실험실 내 환경조절 실험 병행
○ 모델생물의 종류와 특성에 따라 유전체, 전사체, 대사체, 환경유전체, 환경전사체, 미생물군집 등의 분석기술, 분광학적 원격탐사기술, 광합성 모니터링, 마이크로코즘 실험 등을 대상으로 적합한 기술 선정

□ 환경 차이에 따른 선태류와 지의류의 생물반응 연구

○ *Sanionia uncinata*는 킹조지섬의 대표적인 선태류로서 수분이 풍부한 지역의 우점종이며, 잔설분포, 수분공급 정도에 따라 생물활성 변화가 극단적으로 나타남
○ 환경내 수분량의 차이에 따른 *Sanionia uncinata*의 유전자 발현차를 조사한 결과 건조환경에서 특히 발현이 증가하는 유전자들과, 반대로 수분이 풍부한 습윤환경에서 발현이 증가하는 환경 특이적 유전자들을 일부 선별하였음

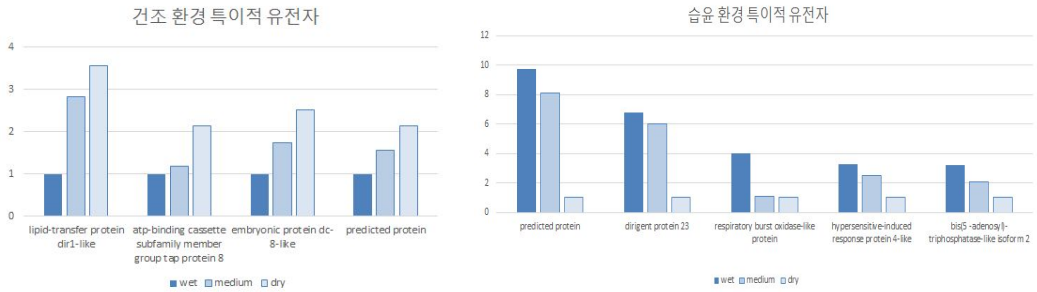


그림 14. 건조환경과 습윤환경에서 특이적으로 발현이 변화하는 *Sanionia uncinata* 유전자 선별

○ *Cladonia gracilis*는 토양습도가 높고 선태류의 서식이 풍부한 지역에 주로 서식하며, 건조한 지역에서 암석을 주요 기질로 서식하는 *Usnea*에 비해서 성장속도가 비교적 빠르고 기후변화에 의한 영향이 상대적으로 클 것으로 예상됨
○ 지의류 모델 종으로 선정된 *Cladonia gracilis*는 지구 전체적으로 분포하는 코스모폴리탄 종이며, 바톤반도 내에서 종다양성이 가장 높은 분류군인 *Cladonia*속에 속함
○ 바톤반도 내 서식지에 따라서 형태적 다양성이 매우 높으며 LSU 유전자형이 상이함. 이는 진화적인 기원에 따라 선호하는 환경특성이 다르다는 것을 의미함. 진화-생태-생리학적인 연구결과는 향후 생물반응 모델링 및 생태계변화 모델링에 중요 자료로 활용될 것으로 예상됨

○ 온도, 수분, 광량 등의 중요 환경요소에 대해 현장 관측 또는 실험실 내 인위적인 환경조절을 통해 동일 서식지 및 구별되는 서식지에서 동종 및 이종 유전자형간의 생리적인 반응 차이를 분석할 계획임

○ 이를 통해 *Sanionia uncinata*와 *Cladonia gracilis*가 서식하기 위한 중요 환경 요소의 범위와 이에 따른 광합성량, 유전자 발현, 스트레스 반응 등 생물반응 정도 조사

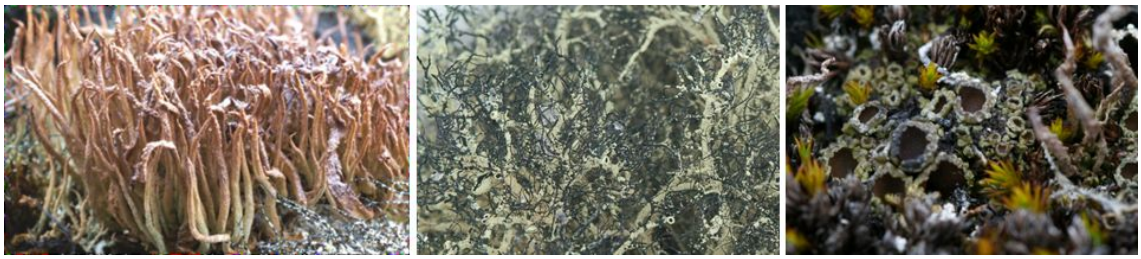


그림 15. 지의류 생리반응 모델인 *Cladonia gracilis*, *Usnea aurantiaco-atra* 및 *Psoroma hypnorum*

□ 지리적분포 차이에 따른 지의류의 진화 및 생리특성 연구

○ 남극대륙, 남극반도, 남미, 북극지역은 서로 다른 기후대에 속하며, 기온, 습도, 광량, 강수량 등 지의류의 서식에 필요한 환경에서 큰 차이를 보임

○ 서로 다른 환경에 적응하는 진화과정을 통해 차별화된 생리적인 특성을 보여하고 있을 것으로 예상됨. 향후 기후변화에 의해서 환경변화가 발생했을 때 다른 지역에 서식하고 있는 종이 유입되어 정착할 가능성이 있음

○ 남극대륙, 남극반도, 남쉐틀랜드군도, 남미의 남부지역에 넓게 서식하고 있는 지의류인 *Usnea* 속 지의류를 남극과 남미지역 간 지의류의 지리적 이동, 진화과정 및 형태적 특성 비교 연구 모델로 선정

○ 남쉐틀랜드군도, 남미 및 북극지역에 서식하는 *Psoroma* 속 지의류를 대상으로 대륙 간 지리적 이동, 진화과정 및 형태적 특성비교 연구 모델로 선정

○ 지의류 형성 균류, 공생 미세조류 및 지의류 내생 균류의 구성, 계통진화, 및 집단유전학적 분석방법을 통해 지리적 이동, 공생의 진화 및 표현형의 진화과정 분석

○ 기후변화에 의한 생물의 이동과 적응에 관한 모델링의 기초자료로 활용

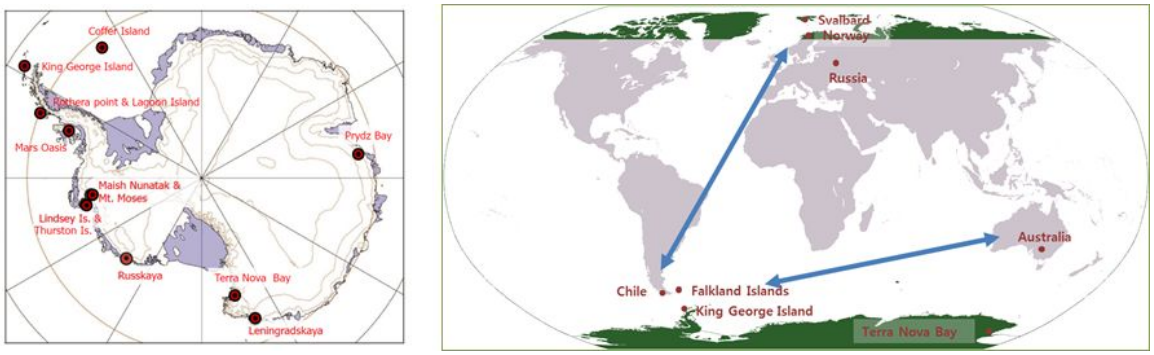


그림 16. *Usnea* 속 지의류와 *Psoroma* 속 지의류의 지리적 분포 및 시료확보 계획

□ 기후변화에 따른 식물, 지의류의 공생미생물 변화 예측

○ 지속되고 있는 전 지구적 기후변화는 여러 지역에 살고 있는 대형 동식물과 그에 공생하는 미생물을 변화시키고 있음. 또한 최근 공생 미생물이 대형 동식물의 건강에 중대한 영

KOPRI 극지연구소

향을 미친다는 보고가 잇따르고 있음

○ 다양한 환경의 사이트를 관찰할 수 있는 킹조지섬 바톤반도에서 다양한 생태를 가지는 사이트들을 선정, 기온, 지온, 습도, 일조량, 풍향, 풍량 등 환경적인 특성들을 센서를 통해 수집하고 각 장소의 식물, 지의류 공생미생물상을 비교함으로써 환경적 요소와 공생미생물과의 관계를 밝히고자 함

○ 바톤반도 내 약 20개 지역을 대상으로 3종의 지의류와 3종의 선태류를 대상으로 차세대 염기서열 분석법(NGS)을 통한 공생미생물상의 분석 예정

○ 남극반도, 남미, 북극 및 한반도 등 다양한 기후대에 서식하는 식물과 지의류를 대상으로 연구 확대

○ 수집한 데이터를 통해 기후변화에 의한 공생미생물상과 병원성 미생물의 변화를 예측하는 모델링 기술 개발

○ 이러한 모델은 향후 국내외의 대형동식물에 확대시킴으로써 기후변화가 국내외의 농업, 임업에 미칠 수 있는 중대한 영향의 사전예측 기술 개발에 활용

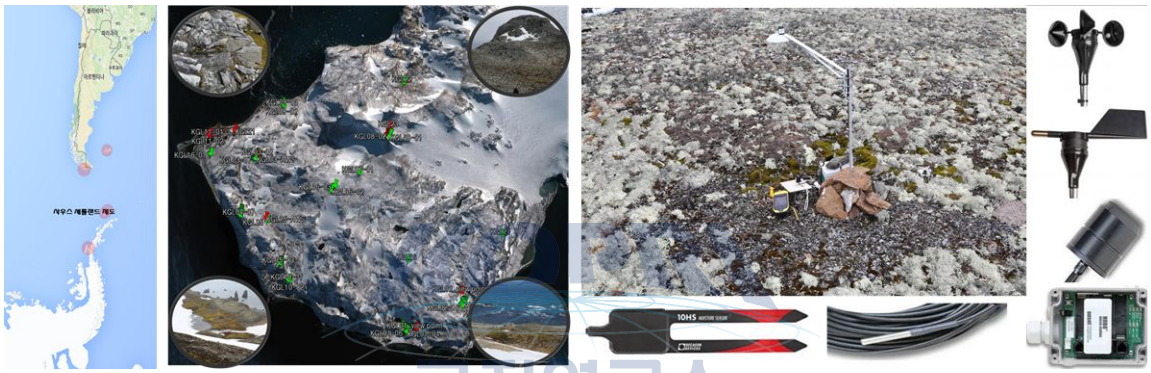


그림 17. 선태류 및 지의류 내생균류 및 병원균 연구대상 지역 및 기후관측

□ 요각류의 광주기 및 온도 반응 분자지표 개발

○ 생명체는 대략 하루 주기(일주기)로 나타나는 생체시계(circadian clock)을 가지고 있으며 세포 주기를 포함해 다양한 생명현상들이 조절되고 있음

○ 빛은 일주기 리듬에 중요한 환경자극으로, 백야현상이 나타나는 남극에 서식하는 생물들의 경우 온대 생물들과는 다른 특이적 일주기 조절기작을 가졌을 것으로 예상되며 일주기 리듬에 영향을 받는 세포주기 및 발생과정도 다를 것이라 예상됨

○ 현재까지 요각류의 일주기 리듬 관련 연구는 미비하며 남극 생물의 광주기 연구는 전무

○ 정상적인 광주기 상태에서 일주기 리듬을 조절하는 중심 유전자들의 발현량과 리듬이 남극/온대 생물에서 차이가 날 것으로 예상되며, 유전자가 암호화 하고 있는 단백질의 활성 및 기능도 차이 날 것으로 예상됨

○ 백야와 같이 지속적인 빛에 노출된 온대 요각류는 남극 요각류와 달리 리듬유지와 발생에 문제가 생길 것으로 예상되며 이는 오랜 기간의 환경 적응 결과임

○ 환경적응 특이 기작을 규명함으로써 극지/비극지 생물간의 생리, 생화학적 생체 장벽을 제시하고 외래종의 남극 유입에 ecophysical barrier 규명

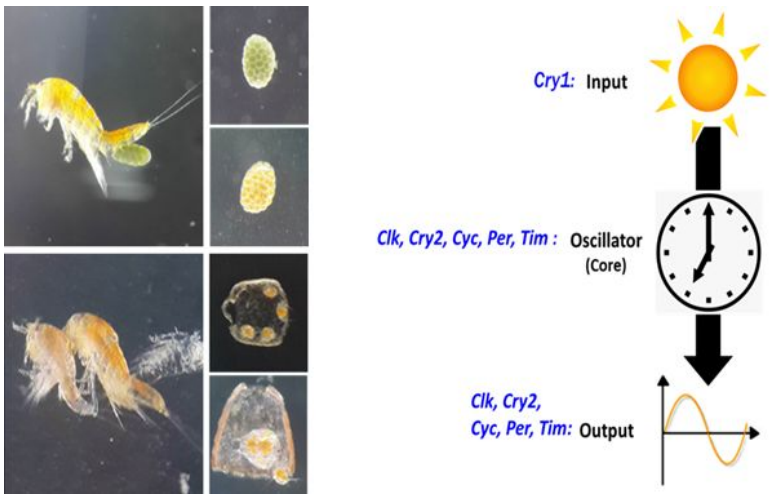


그림 18. 남극 요각류 Tigriopus kingsejongensis와 주요 광주기 관련 유전자들과 생체리듬 모식도

○ 실험 내용 및 방법

- 남극 요각류인 *Tigriopus kingsejongensis*과 온대 요각류인 *Tigriopus japonicus, Tigriopus californicus*의 일주기 리듬 관련 유전자의 서열과 구조의 비교분석
- 일주기 리듬 유전자들의 주기별 mRNA 발현량을 측정하여 유전자 발현 리듬을 확인하고, 백야와 온대지방 일주기에 노출되었을 때 남극/온대 요각류의 리듬변화와 유전자 발현 비교 분석
- 광주기 변화에 따른 실제 요각류의 발생률을 알아보기 위해서 남극과 온대 요각류를 각각의 최적 생장환경에서 배양한 후 광주기를 변화 시켰을 때 암컷의 포란율과 유생의 생산율 비교분석

KOPRI 극지연구소

□ 생물고유 포화 지방산/불포화 지방산 함량 지표 개발

○ 해양생물이 함유하고 있는 지질 및 지방산은 생물의 에너지원이자 전반적인 해양생태계 안전성을 판단하는 주요 물질임

○ 지방산 조성 및 함량은 외부의 산화 환경 및 온도에 의해 변화한다고 보고되어 있으며 (Parrish 2014), 특히 저온 노출 시 세포 항상성 유지를 위해 plasma membrane ATPase (PM ATPase)의 활성이 변하며, 생체 내 물질 수송을 위한 특정 지방산 조성 및 함량이 있음이 보고됨(Deming 2002; Lindberg et al. 2005; Martz et al. 2006; Zhou et al. 2014, Jung et al., 2016)

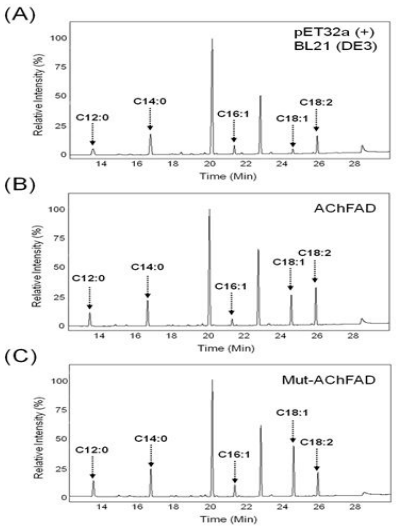


그림 19 저온에서 발현량이 증가하는 남극 미세조류 omega-6 desaturase의 효소 활성

○ 환경별 생물의 기본 지방산 표준값을 구할 수 있다면, 급격한 생물량 변화나 종조성 변화가 광범위하게 일어나기 전에 PM ATPase 효소나 지방산 조성, 그의 함량 프로파일 조사를 통해 온도 및 기타 해양 환경 변화를 미리 예측하는 중요 지표로 활용할 수 있을 것이라는 가설을 세움

○ 중온성(서해안)과 남극 양쪽에서 우점하는 해양생물분류군 중 조개, 엽새우, 물고기를 연구 대상종으로 선정하여 계절별(온도별) 지방산 조성을 조사

○ 포화/불포화 지방산의 분포를 정량화하고 수치화하여 일정한 성분 값과 변화가 많은 특정 성분값을 선별하여 환경별 표준 지표 값을 수립

○ 계절별, 연차별 남극 해양생물의 지방산 조성 및 함량을 조사하여 남극 해양 생태계 변화를 모니터링

□ 섬모충류 군집의 온도반응 표준지표 개발

○ 킹조지섬 생태계 연구 주요과제 2단계(2014-2016) 연구를 통해 남극 토양 원생생물의 다양성과 높은 고유종 비율을 확인하였으며 특히 일부 원생생물의 경우 온도에 특이적으로 출현하는 종 확인

○ 기후 변화로 인해 지속적인 온도 상승이 일어날 경우 일부 종의 경우 사라지거나 증가할 가능성이 있으며, 이를 예측하기 위해 배양 온도별 출현 종 정보를 확보하고 각 온도별 우점종 또는 적응종, 적정 생육 온도 범위, 민감종 등을 확인하고 온도별 대표 군집구조를 산출하고자 함

○ 실험으로 얻은 데이터를 기반으로 실제 유사 환경 샘플을 확보하고 온도별 군집변화에 대한 신뢰성을 검증

○ 온도 변화로 발생하는 군집구조 변화 예측을 위한 수치모델 프로토타입 개발

□ 군집 수준과 종 수준에서의 미생물의 환경변화에 따른 생물반응 모델링 연구

○ 킹조지섬 생태계연구 주요과제 1단계(2011-2013) 연구에서는 동물상, 식물상, 미생물, 지화학, 지형, 미기후 등 바톤반도의 생태학적 요인의 공간분포 조사가 주로 이루어졌고, 2단

계(2014-2016) 연구에서는 시간변화에 따른 환경변화요인 모니터링 기반 구축에 집중하였음. 이를 통하여 바톤반도의 각 생태계 구성요소의 기본적인 분포패턴 분석이 완료되었으며, 주요생물종이 확인됨

○ 미생물은 각종 환경변화에 민감하게 반응하는 생물군으로서 환경변화와 생태계 작용 변화를 확인할 수 있는 중요 지표임

○ 현장관측과 마이크로코즘 실험을 활용하여 환경변화에 의한 미생물군집 변화를 관측하고, 환경유전체 분석을 통해 미생물의 생물활성 변화를 관측하여 환경변화에 의한 미생물반응 모델링 기초를 확립하고자 함

○ 남극 육상생태계 중요 미생물로 확인된 *Subtercola boreus*를 대상으로 개체 수준에서의 생물반응 조절작용을 규명하고자 함

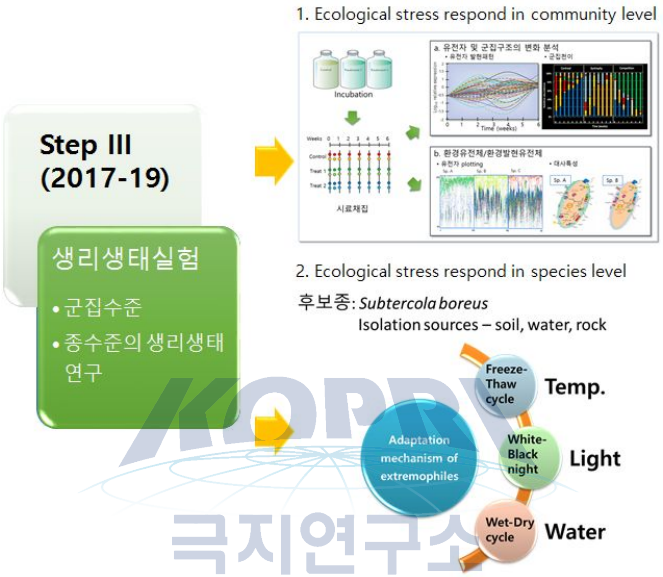


그림 20. 환경변화에 대한 미생물반응 연구 계획

- 육상 시료를 대상으로 한 군집 수준에서의 천이. 환경의 물리학적 변화 요인에 따른 토양, 호수 등의 세균 군집의 변화를 마이크로코즘을 통하여 자연의 복잡계를 인위적 조절이 가능한 단순계로 모사하여 생태학적 법칙을 이해하고자 함
- 2단계에서 수행한 마이크로코즘 테스트 결과, 온도만을 변화요인으로 주었을 경우에는 미생물 군집 천이에는 큰 영향이 없음을 밝힘. 생지화학적 물질순환과 관련된 미생물을 대상으로 하여, 온도와 빛 등의 환경변화를 줌으로써 군집 수준에서의 천이를 시간별로 관찰하고자 함
- 온도는 호냉성(psychrophilic, <15°C), 중온성(mesophilic, 20-45°C), 호염성(thermophilic, 60-80°C)의 카테고리로 진행하여, 메타지노믹스 또는 메타트랜스크립토믹스 기술을 적용하여 군집 천이와 유전자 수준에서의 변화관찰. 이러한 마이크로코즘 실험은 자연에서는 예측 불가능한 많은 변수를 배제시켜 단순화하여 변화의 법칙을 이해하는 데 매우 유용함. 이는 향후 현장시료를 대상으로 하여 생지화학적 순환에 관여하는 미생물을 자연상태에서 복잡성을 이해하기 위한 배경지식으로 활용하고자 함
- *Subtercola boreus*를 대상으로 한 개체 수준에서의 반응. 호냉성 방선균인 *Subtercola boreus*는 바톤반도의 토양과 습지에서, 남극 빅토리아 랜드의 암석에서 많이 분리되었음. 이중 토양에서 분리된 균주, 암석에서 분리된 균주를 선별하여 표준 균주를 포함한

비교 유전체학 분석을 수행 예정임. 이을 통하여 core-genome과 pan-genome에 대하여 확인하고, 이들 균주가 각각의 환경에서 어떻게 적응하여 진화하였는지를 이해하고자 함. 또한 온도, 습도, 빛 등의 환경요인을 조절하여 환경스트레스에 대한 균주의 반응에 대하여 연구함으로써 생물반응 모델링 기초자료 확보할 예정임

□ 기계학습 기반의 데이터마이닝 기법을 적용한 생태계 상호작용 기작 분석

○ 미생물 생태, 환경미생물 분야에서 생물반응 분석 기술의 발달로 점차 많은 데이터를 획득할 수 있게 되었음. 그러나 이렇게 축적된 방대한 데이터들로부터 보다 더 의미 있는 정보를 뽑아내지 못하는 data rich but information poor 상태는 점차 심화되고 있음. 다양한 종류의 방대한 데이터들을 통합 분석함으로써 미생물 생태의 구조나 기능, 특정 미생물 종의 존재 여부 등을 예측하는 모델을 개발할 필요가 있음

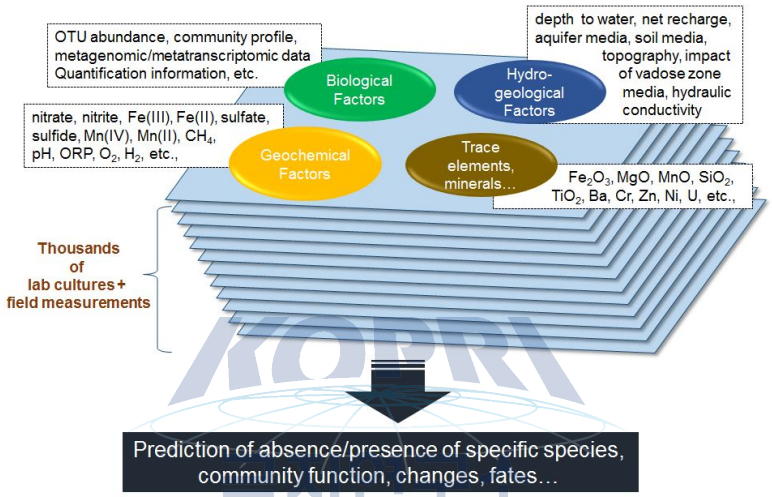


그림 21. 방대한 양의 데이터를 통합 분석 필요성 증대

○ Data mining은 빅데이터로 부터 새로운 지식, 패턴, 정보를 찾아내는 것으로, Knowledge- discovery in databases (KDD)라고도 함. 전통적인 통계학, 패턴인식, 인공지능 등은 모두 data mining 범주에 포함됨

○ 기계학습은 인공지능의 한 분야로, 컴퓨터로 하여금 데이터를 학습하고 미지의 데이터가 주어졌을 때 예측하도록 하는 알고리즘. 대표적인 기계학습 알고리즘으로는 decision tree, 인공신경망, 그리고 알파고에 사용된 deep learning 등이 있음

○ 전통적으로 예측 모델을 만드는 방식은 데이터와 예측 모델을 컴퓨터에 입력하면 결과값이 나오는 방식이지만, machine learning의 경우에는 주어진 데이터에서 입력 변수와 예측하고자 하는 출력 변수를 지정해주면, 스스로 학습을 통해 예측 모델을 내놓는 방식임

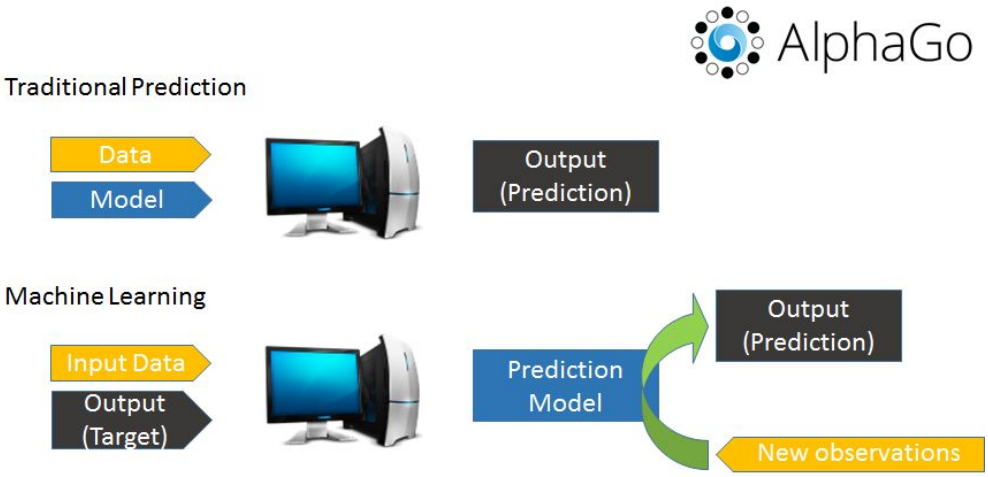


그림 22. Machine learning-based data mining

○ 1단계와 2단계에 생산된 데이터는 데이터마이닝 기법을 적용하여, 바톤반도를 비롯한 남극의 생태계 구조와 기능을 포괄적으로 이해할 수 있을 것임. 이것은 미래 기후변화에 따른 남극 생태계의 변화를 예측할 수 있는 기반이 될 것임

그림 23. Machine Learning-based Data Mining 과정

3) 생물반응 모델링기술 프로토타입 개발

○ 확보된 자료와 대상생물에 적합한 생물반응 모델링 기술 선정

○ 킹조지섬 생태계 연구 주요과제 1단계(2011-2013)에 개발된 가상생태계 모델링 기술을 기본적인 모델링 기술로 활용

○ 환경변화와 연계하여 생태계 예측기술 개발과 연계

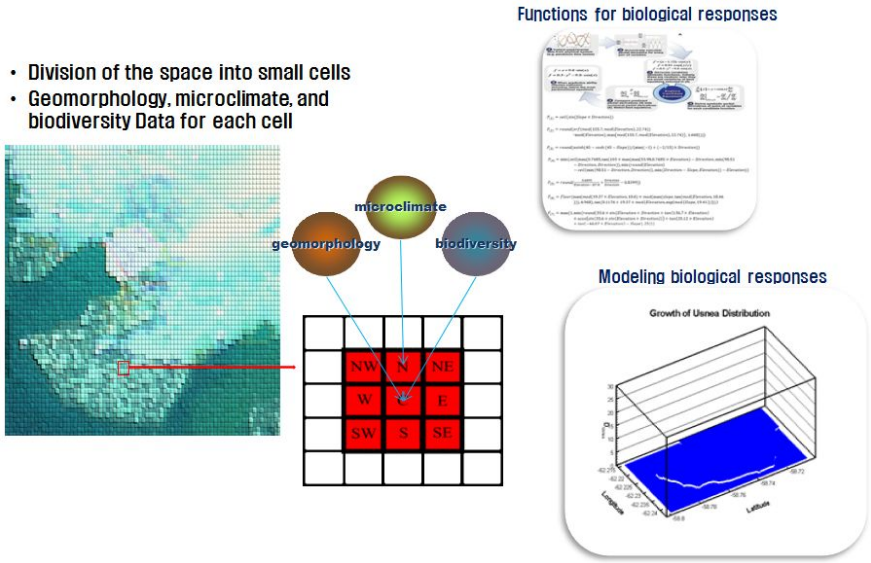


그림 24. 가상생태계 모델링 기술

나. 환경변화-생물반응 종합조사 (Critical Zone Observatory)

○ 생태계 작동원리를 이해하고 기후변화에 의한 생태계 변화 예측기술 개발을 위해서는 생태계를 구성하고 있는 구성요소들 각각의 변화원리와 상호작용을 이해해야 함

○ 현재까지의 조사결과를 바탕으로 생태계를 구성하는 다양한 요소들이 복합적으로 작용할 것으로 예상되는 지점을 선정하여 지형, 지화학, 기후, 동물, 식물, 미생물 간의 상호작용을 분석하고자 함

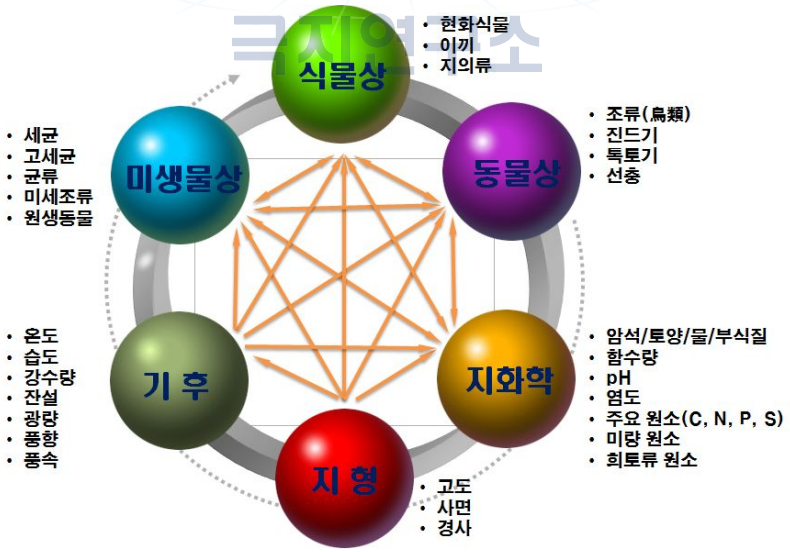


그림 25. 남극 육상생태계의 구성요소 및 상호작용 개념도

○ 본 과제에서는 포터소만 쪽 사면 중간에 위치한 호수와 주변 식생지(KGL29, 62° 14′ 24.140″ S, 58° 44′ 36.571″ W)를 CZO 조사지역으로 선정함

○ 북서사면은 눈이 쌓여있으며, 남동사면은 지의류와 이끼류가 잘 발달하였음. 사면에서 녹은 물과 땅속을 통해서 흘러나온 물이 모여 호수 형성

○ 바톤반도 전체의 지형적 특성을 가장 잘 반영한 지역으로 토양과 호수 모두를 관찰하기에 적합한 지역임

○ 바톤반도의 대표 식생인 지의류와 이끼류가 잘 발달되어 있고, 현재 이 지역에는 미기후 관측 로거가 설치되어 있으며, 가장 많은 연구자가 모니터링을 진행하고 있는 지역임. 또한 기지에서의 접근성이 상대적으로 용이한 편임

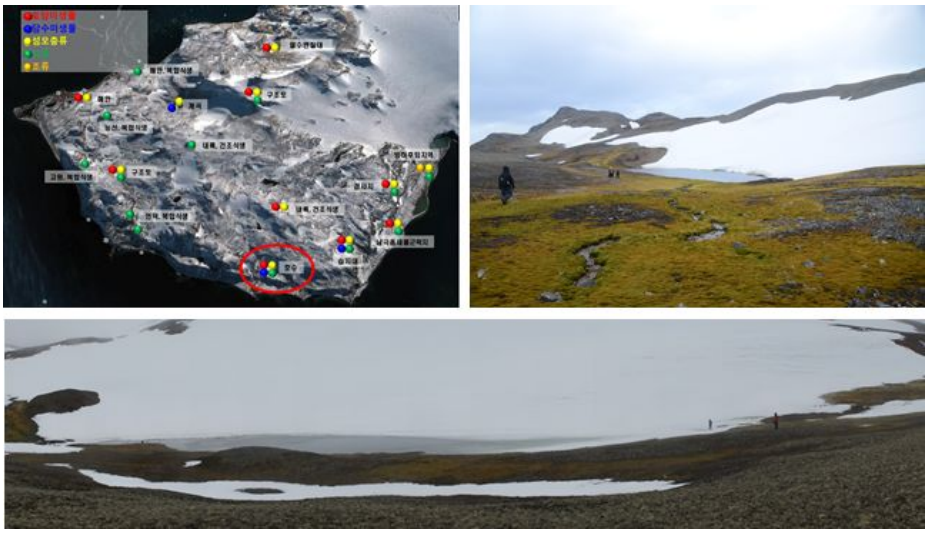
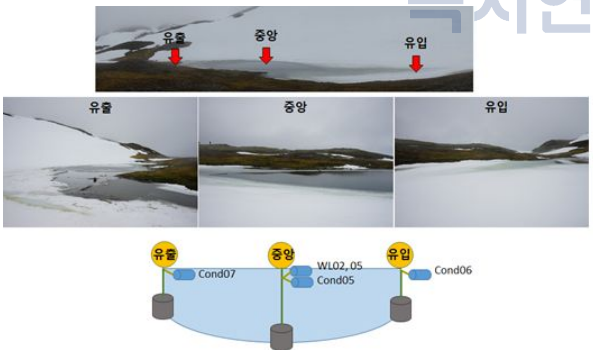


그림 26. 바톤반도 CZO 후보지역(왼쪽 위), 전경사진(오른쪽 위, 2012년 1월 눈이 많이 녹았음; 아래, 2014년 2월 눈이 내리기 시작한 시기

○ 육상식생지대와 호수에는 2014년 이래로 다양한 로거를 설치하여 환경정보를 수집하고 있음. 식생지대에는 기온, 상대습도, PAR 센서를 지표면에 설치하였으며, 토양 깊이에 따라 지온과 수분함량 센서 설치. 호수 바닥과 1m 수심에 수위계, 수온, 전기전도도 연변화 측정 중임



Category	Measurement periods	Point or Depth	HOBO sensor
Fresh Water	2013.01~2014.01	중앙	water Level, conductivity
	2014.02~2016.02	중앙	water Level, conductivity
		유입	Conductivity
		유출	Conductivity
Soil	2013.01~2015.01	표층	PAR, air temp./RH, soil moisture, soil temp.
		5cm	soil moisture, soil temp.
		10cm	soil moisture, soil temp.
	2015.01~2016.01	표층	PAR, air temp./RH, soil moisture, soil temp.
		10cm	soil moisture, soil temp.
		20cm	soil moisture, soil temp.
		40cm	soil moisture, soil temp.
		60cm	soil moisture, soil temp.

그림 27. 2014년 2월부터 2016년 2월까지 호수에 설치되었던 로거 정보, WL02, 수위계 2013년도 설치, WL05, 수위계 2014년도 설치 및 토양과 담수에 설치한 환경 요인 측정 로거 종류

KOPRI 극지연구소

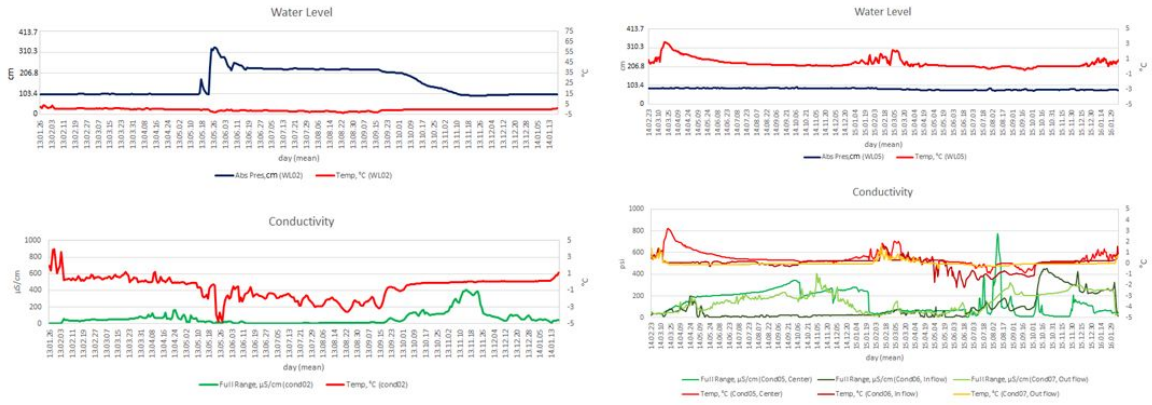


그림 28. 수위, 온도, 전기전도도 측정값 연중변화(왼쪽, 2013.01.26.-2014.01.18.; 오른쪽, 2014.02.23.-2016.02.09.)

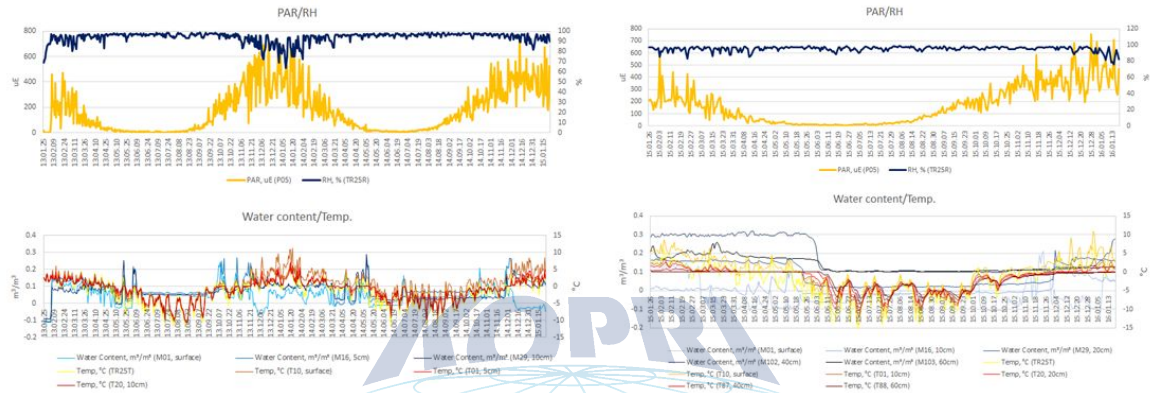


그림 29. 토양표층 및 깊이별 처리 센서로부터 관측된 환경자료 2013-14년(왼쪽), 2015년(오른쪽)

극지연구소

1) 육상 생태계 연구

○ 지형학적 특성, 기상학적 환경요소, 생물학적 구성요소 간 상호작용을 이해하는 것을 최종목표로 함

○ 토양 내 수분분포, 동토의 온도 변화, 원격탐사 기술을 이용한 지형특성 및 환경요소 분석, 식생의 분광학적 특성 분석, 식생의 분포에 미치는 환경요소의 분석, 식생과, 진핵미생물, 원핵미생물 간 상호작용 분석 수행

□ 식생분포도 작성 및 생물반응 자료 확보

○ 2016년 현장조사를 통해 확보한 고해상도 영상자료를 분석하여 정밀식생분포도 작성

○ 광합성활성의 연속관측을 통해 환경변화가 선태류와 지의류의 광합성 활성에 미치는 영향 분석

○ 제1세부과제에서 수행하는 다양한 생물반응 자료 활용

□ 지구물리 탐사를 이용한 동토구조 및 활동층 수분구배 탐사

○ 전기비저항 탐사 방법을 이용하여 지표에서 지하 1m의 평균 겉보기 전기전도도(겉보기

비저항) 변화 측정

○ 지형구조, 잔설분포 패턴, 대기온도, 풍향, 풍속 및 광량 등의 기상상태와 토양 내 수분량 변화와의 상관관계 분석

○ 수분분포와 선태류, 지의류 등의 식생분포와의 상관관계 분석

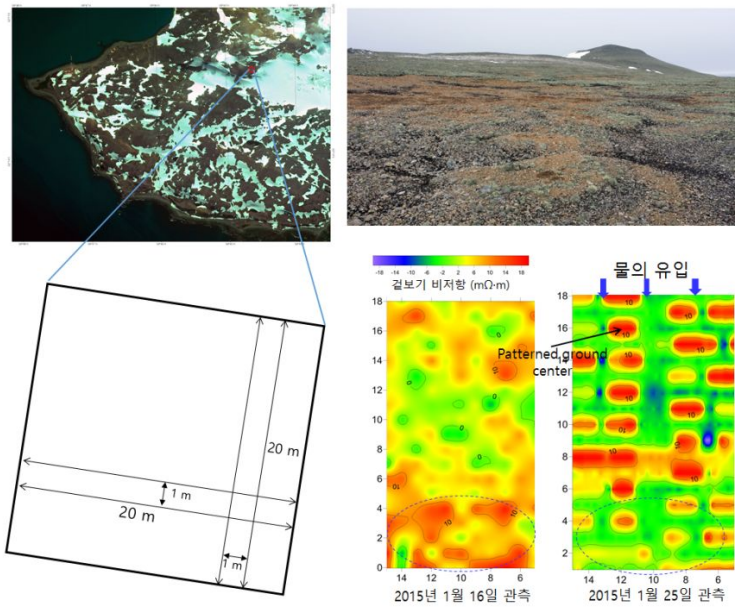


그림 30. 지구물리탐사를 이용한 토양 수분 변화 분석

□ 원격탐사 기술을 활용한 식생의 공간분포, 분광학적 특성 및 환경 영향요소 분석

○ 무인기 기반 센싱기술의 발달로 육상 식생 분포, 지온 분포, 수계 형성과 관련된 눈 분포 및 지형기복 등 다양한 생태계 반응모델링 입력 요소들에 대한 세밀한 공간 단위의 데이터 취득이 가능

○ 기존 광학위성원격탐사 자료의 한계점을 극복하고자 인공위성 및 무인기 기술을 복합적으로 활용하여 가시광선-근적외선-열적외선 파장 영역에서의 고해상도 다중분광영상을 획득하고, 지상 초분광카메라를 이용하여 다양한 바톤반도 식생의 고분광해상도 정보를 수집

○ 획득된 자료의 전처리와 분석 및 개별 환경요소 모델링을 통하여 생태계반응 모델링을 위한 자료 확보

○ 지상 센서, 무인기 센서 및 인공위성을 이용한 원격탐사 자료획득 및 전처리기법 개선

- 생태계반응 모델링 입력자료 확보를 위한 인공위성과 무인기 플랫폼 및 센서 선정
- 인공위성 및 무인기 자료획득 지역 및 시기 결정
- 지형공간분석을 통한 무인기 이착륙 지점, 비행 반경 및 경로 결정
- 무인기 데이터 획득 프로토콜 기반 조사기간 내 다중 시기·다중 센서 데이터 획득
- 원격탐사 자료 지형보정, 방사보정, 모자이킹 및 3차원 지형정보 추출기법 선정 및 개선
- 지상초분광카메라 영상 획득기법 개선
- 바톤반도 주요식생에 대한 초분광영상 획득

KOPRI 극지연구소

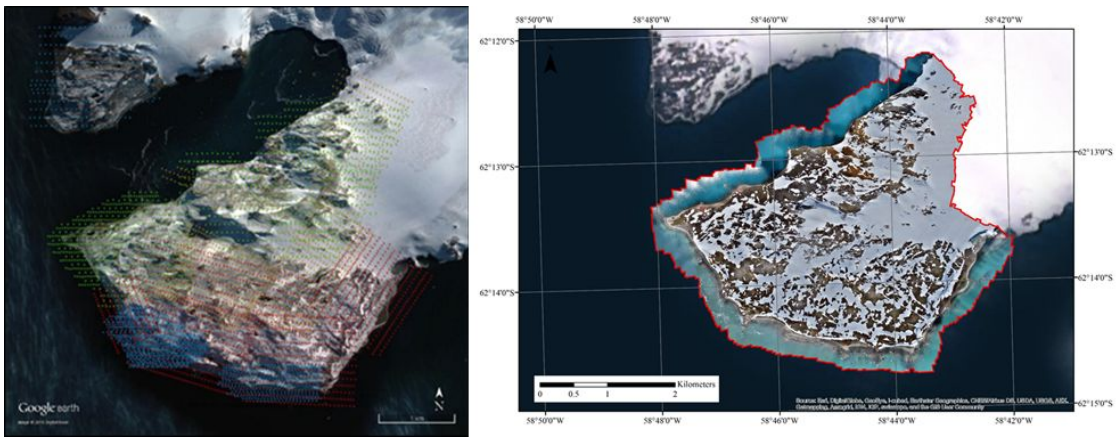


그림 31. 무인기 영상획득 및 바톤반도 모자이크 영상

○ 바톤반도 식생의 공간분포도 작성
- 인공위성 및 무인기에서 획득한 다중분광 정보와 현장조사 자료를 결합한 바톤반도 식생 공간분포도 작성
- 식생종류의 분포 패턴 등 사물, 텍스쳐 정보를 결합한 정밀 식생분류 기법 개발

○ 환경요소의 식생분포 영향도 분석
- 인공위성 및 무인기 데이터를 활용한 지표 온도분포 추출
- 인공위성 및 무인기 데이터를 활용한 눈 피복 및 빙하 분포 추출
- 고해상도 지형공간정보를 이용한 지표 수계모델링, 광량모델링, 지형특성정보 추출
- 원격탐사 자료에서 추출된 개별 환경요소와 식생 분포 및 변화와의 상관성 분석

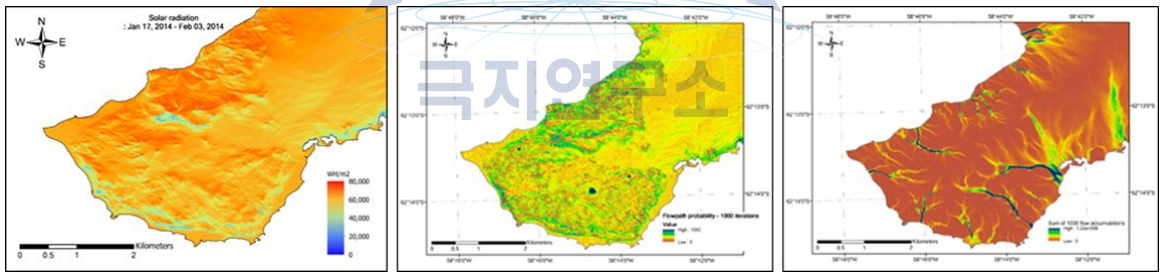


그림 32. 영상자료로부터 지형, 복사량, 물분포 모델링 예시

○ 바톤반도 주요식생의 분광학적 특징 규명
- 바톤반도 주요식생의 분광특징과 생물학적 요인(온도, 수분 등)의 관계 분석
- 식생종별 분광흡수특징 분석
- 복잡하게 혼합된 또는 육안으로 구분이 힘든 식생의 정량적인 공간 분포 분석

□ 토양 이산화탄소 모니터링

○ 남극에서 온난화의 영향에 따른 동토층의 해빙은 식생 분포와 미생물 군집에 많은 영향을 미칠 것으로 예상

○ 동토층의 해빙시기가 증가할 경우, 토양 이산화탄소 방출량은 증가할 가능성이 매우 높으므로 육상생태계에서의 탄소 순환의 메커니즘을 이해하는 것은 매우 중요. 특히 다양한 식생이 전역에 걸쳐 분포하고 있는 바톤반도에서는 그 중요성이 더욱 부각될 것임

○ 본 연구에서는 토양 이산화탄소 방출량과 토양내 이산화탄소 농도를 모니터링하여 탄소 순환에 있어서 동토층이 탄소의 흡원인지 발원인지를 평가하고자 하며, 이를 위하여 다음

의 네 가지 연구 계획을 도출하였고 다음 단계(2017-2019)에서 수행하고자 함

- 유기물층 토양 이산화탄소 방출량의 정량화 및 토양의 물리적/화학적 특성, 토양수분, 토양온도, 풍속, 풍향, 식생 종류, 사면경사, 방위 등 환경 조절 인자와의 관계 규명
- 미생물의 군집 구조 및 미생물 활성도(DNA, ATP)와 관계 규명
- 실내 환경 조절실험(incubation manipulation)을 통해 토양 온도 및 수분 조절을 통한 온실기체와 미생물과의 관계 조사
- 토양 이산화탄소 방출량 및 토양 내 이산화탄소 농도의 연속 관측

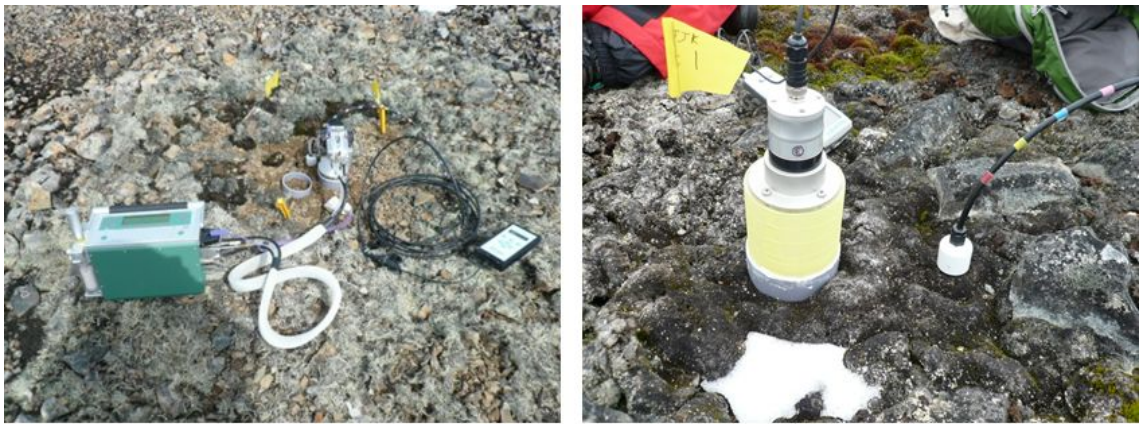


그림 33. 토양 이산화탄소 플럭스 측정을 위한 챔버 시스템 사진, Closed dynamic chamber (왼쪽), Closed chamber(오른쪽)

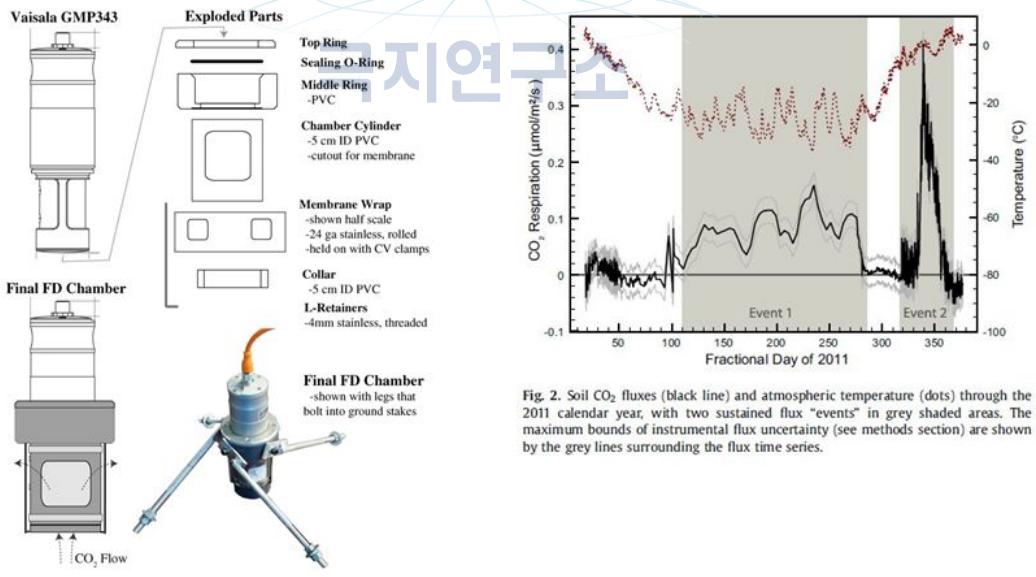


Fig. 2. Soil CO_2 fluxes (black line) and atmospheric temperature (dots) through the 2011 calendar year, with two sustained flux "events" in grey shaded areas. The maximum bounds of instrumental flux uncertainty (see methods section) are shown by the grey lines surrounding the flux time series.

(Risk et al, 2011, Agricultural and Forest Meteorology) (Risk et al, 2013, Soil Biology & Biochemistry)

그림 34. Forced Diffusion (FD) dynamic chamber 시스템의 구성(왼쪽)과 토양 CO2 플럭스 변화 모니터링 결과 예시

KOPRI 극지연구소

2) 호수 생태계 연구

○ 호수 온도, 용존산소, 영양염, Chl a, TN, TP 등의 생지화학적 요인 측정, 호수에 서식하는 바이러스, 세균, 고세균, 진핵미생물, 무척추동물 등 생물 다양성 조사

○ 연구 주제로는 다음의 소주제 중 선택하여 진행하고자 함. 1) 주변 융빙수의 유입에 따른 호수내 미생물 반응 모니터링, 2) 호수 내 미생물의 생태학적 역할 규명, 3) 배양을 통한 배양체 획득 후, 생리·생태학적 역할 규명, 4) 바이러스 군집 구조 연구, 5) 미소진핵생물의 군집 구조 연구, 6) 수서생물의 환경적 선택압과 유전체 진화와의 연관성 분석, 7) Boeckella poppei(요각류)와 Parochlus steinenii(곤충)에 대한 microsatellite 개발, 8) NGS를 활용한 metabacoding을 통하여 host 별, 서식지(물리화학적 환경)별 군집구조 분석

○ 이 지역을 CZO 컨셉으로 현재의 생태계 형태를 이루게 된 물리적, 화학적, 생물학적, 지질학적 과정을 이해하고, 어떠한 상호작용을 하고 있는지를 연구하고자 함. 또한 데이터 마이닝 기법을 활용한 유용한 정보 추출 및 이를 활용한 생태계 법칙에 대하여 이해하고자 함. 이는 향후 기후변화에 따라 생태계의 변화 예측 기술 개발과 연계할 예정임

다. 기후변화에 의한 생태계 변화 장기 모니터링

○ 2단계 사업(2014-2016)을 통해 확립된 장기모니터링 지점을 중심으로 환경변화 연속관측을 수행

○ 식물상 분포변화, 미생물군집 변화, 생물반응 변화 관측 수행

○ 장기관측을 통해 기후변화에 의한 생태계 반응 및 분포변화 트렌드 추출

KOPRI 극지연구소

1) 육상생태계 장기 모니터링

○ 기존 장기모니터링 지점을 포함하여 주요 관측지점 선정

○ 관속식물, 선태류, 지의류, 무척추동물, 해조류 및 미생물 군집구조 및 분포변화 자료 확보 계획 수립

○ 온도, 상대습도, 광량, 풍향, 풍속, 토양온도, 토양함수율, 잔설 등 생물반응에 중요한 영향을 미치는 환경요소 연속 관측

○ 토양모니터링 지점의 미생물군집 변화 분석

2) 해양생태계 장기 모니터링

○ 맥스웰만 환경변화와 해양생물상을 재조사하고 과거 자료와 비교를 통해 지난 20년 간 동일 해역에서 일어난 해양 환경변화와 생물량, 군집 변화를 분석하여 향후 일어날 해양환경 변화를 예측하고자 함

- 조사 방법은 다이빙을 통해 수심 40m 까지 깊이별 생물분포, 생물량, 피도를 조사하고 표본을 확보하며 방형구와 바이오로거를 설치하여 영상과 환경데이터를 확보하여 데이터베이스를 구축하고자 함
- 동일 지역에서 수행되었던 20년 전 해조류 분포상, 환경연구 자료들과 비교를 통해 서식지 생태환경 변화와 생물상 변화간의 상관관계를 규명

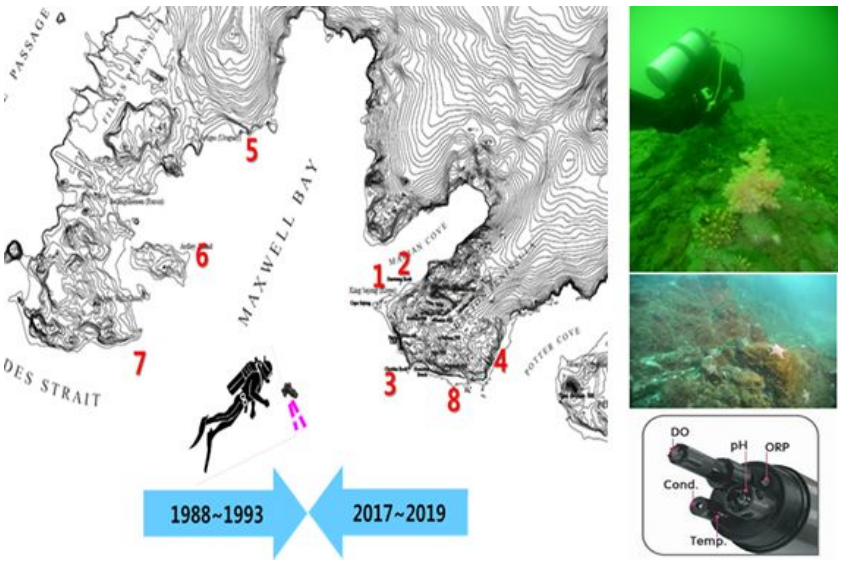


그림 35. (왼쪽) 1. Northern shore of Cape Sejong, 2. Daewang Rock, 3. an islet off penguin rockery, 4. an islet in the entrance of Potter Cove, 5. an islet off Artigas Station, 6. an islet off Ardley Island, 7. an islet off Great Wall station, 8. a South-western shore of Barton Pen; (오른쪽) 다이빙을 통한 생물상, 영상자료 획득(위)과 바이오로거(아래)

○ ANTOS (Antarctic Nearshore and Terrestrial observation System) 프로그램에 국제공동연구팀으로 참여하여 남극반도, Terra Nova Bay, 빅토리아랜드를 잇는 남빙양 연안생태계 장기 관측 시스템 (platform)을 구축하고자 함

- 남극 연안생태 연구 분야 공동 연구 추진을 위한 ANTOS 워크샵에 참석하여 이태리, 뉴질랜드, 영국, 한국 간 네트워크를 구축하고 협력방안을 토의
- 프랑스는 PROTEKER, 이태리는 ICE-LAPSE, 뉴질랜드는 INTERACT 프로그램을 통해 장기간 남극 해양연구를 수행해 왔으며 각 프로그램에서 도출된 과학정보들을 통합, 비교할 수 있도록 관측 시스템, protocol 등에 표준화 작업이 필요하다는데 동의하였음
- 각국 연구 거점 지역을 정하고 통합된 관측시스템으로 연안생태 연구를 시작하기로 의견을 모았고 기후변화에 따른 로스해 연안생태계 장기 모니터링 연구를 착수하였음

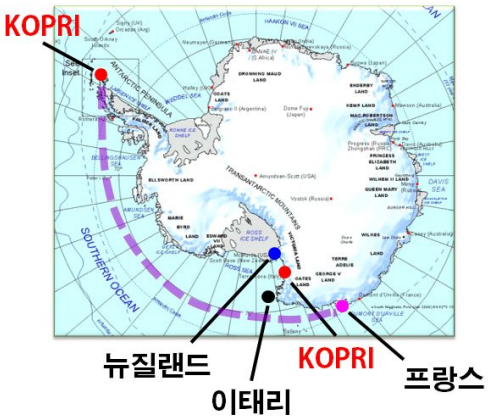


그림 36. 각국 연안생태 모니터링 거점 지역

- 우리 연구팀은 2015/2016년 장보고 기지를 연구 거점으로 삼고 기지 앞 연안 수심에 이태리연구팀이 개발한 ARMS(Artificial reefs matrix structure)와 뉴질랜드에서 보완, 제작한 YSI6600v2을 설치하였으며 이태리 기지, 뉴질랜드 기지와 동시에 3년 동안 포괄적이고 지속적인 로스해 연안 환경 조사를 수행할 예정
- 2017/2018년에는 세종기지 앞 연안에도 동일 관측 장비를 설치함으로써 서남극과 로스해 연안을 연결하는 장기 연안 관측기반을 구축하고자 함
- 빙하융해로 새롭게 노출되고 있는 바톤반도 빙하후퇴 지역을 새로운 모니터링 지점으로 선정하고 생물상 천이 과적을 추적
- 확보된 자료와 대상생물에 적합한 생물 반응 모델링 기술을 개발
- 장기모니터링 지점의 환경변화 자료 및 생물상 변화 자료를 통해 생태계 예측기술을 개발

3) 빙하후퇴지역의 조류번식과 식생천이 과정 모니터링

○ 기후변화로 바톤반도의 빙하가 녹으면서 드러나는 노출된 나대지에 새로운 생태계가 형성되는 과정을 기록함으로써 남극 전체 빙하후퇴 지역에서 일어날 육상 천이 과정과 그 생태학적 영향을 예측하는 지표 자료를 확보하고자 함

○ 예상 천이 과정:

① 빙하가 후퇴하면서 드러나는 나대지에 남방큰재갈매기(Kelp gull Larus dominicanus) 둥지 증가

② 둥지를 만들기 위해 물고 온 이끼, 지의류, 해조류와 함께 식물, 미소생물(미생물, 원생생물, 미소무척추동물 등) 유입

③ 토양에 지속적 유기물 공급으로 토양 환경이 변하고 서식 생물 군집구조에 영향

④ 토양, 식생, 미소생물, 갈매기 등 생태 구성요소 간의 상호작용으로 천이 가속화

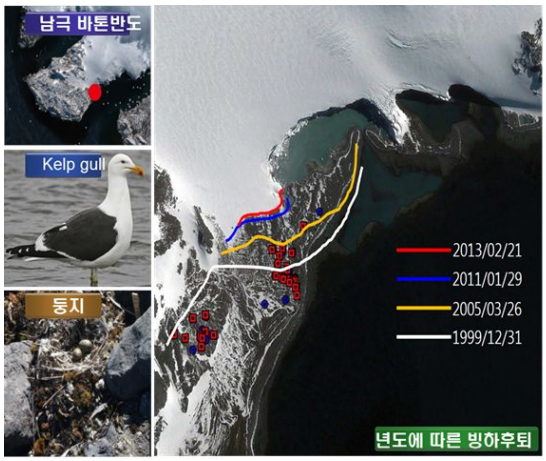


그림 37 바톤반도 빙하후퇴 지역 위치와 년도별 빙하후퇴 범위, kelp gull이 지의류, 해조류를 이용해 만든 둥지

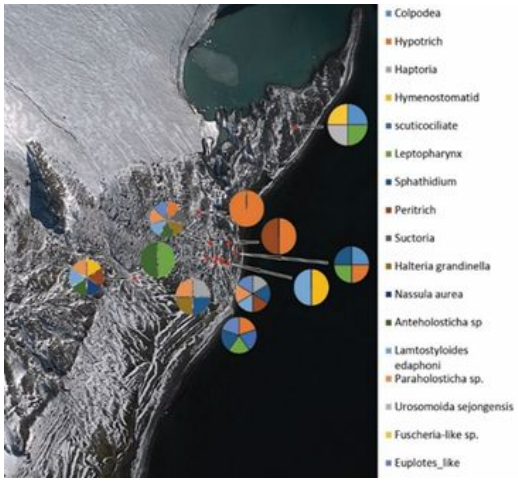


그림 38 선행연구를 통해 확보한 원생생물 군집 정보

○ 빙하 후퇴지역의 장기 기상변화 모니터링 기반 구축(자동 기상 측정 장비 AWS)와 토양 생태계 특성변화 관측을 위한 bio-logger 설치

○ 남방큰재갈매기의 둥지 수, 공간 분포를 파악하고 둥지 선택 시 Glacier wind, 빙퇴석 활

용 등의 환경, 물리적 요인과의 상관관계를 파악

- ○ 둥지 재료와 함께 유입된 식물(이끼, 남극 현화식물)과 미소생물(미생물, 원생생물)을 파악하고 둥지 주변 토양의 물리화학적 변화와 미소생물의 정착과 군집구조에 미치는 영향을 조사
- ○ 1, 2, 3, 4년 된 둥지들에서 미소생물 군집 변화를 분석하고 군집 안정화가 일어나는 기간과 둥지 간 군집 유사도, 바톤반도 타 지역 군집과의 차이점 등을 통해 종이동, 정착, 도태 등을 기록하고 미소생물 군집 안정화(천이과정)에 미치는 주요 환경요인을 파악
- ○ 1단계 선정 및 2단계에서의 logger 설치 지역인 장기모니터링(KGI-LTER) 지점에 설치된 logger에서 기온, 상대습도, 광합성 가능량, 지온, 토양 내 함수율 데이터 수집 및 유지보수
- ○ 장기모니터링 지점에서의 현화식물, 선태류 및 지의류 등의 식물상과 토양에 서식하는 진드기, 톡토기, 선충 등의 동물상 및 세균, 고세균 및 진핵미생 물을 지속적으로 모니터링할 계획임
- ○ 생물 반응에 중요한 영향을 미치는 환경요소를 선정하고 관측 방법을 선별했으며 육상(온도, 상대습도, 광량, 풍향, 풍속, 토양온도, 토양함수율, 잔설 온도, 수분, 광량)과 해양(온도, 염분, 전기전도도, 광량)을 구분하여 주요 환경요소에 대한 지의류, 선태류, 무척추동물 및 미생물군집의 반응 자료를 확보
- ○ 빙하 융해가 킹조지섬 연안생태계에 미치는 영향을 연구하기 위해 환경변화 및 서식 생물상 변화를 장기 모니터링하기 위한 계획을 수립하였음
- ○ 주요 서식생물상, 빈도 등을 파악하고 데이터로거를 이용해 환경변화 자료를 연속 관측하고자 함
- ○ 주요 해양 환경 요소가 생물상에 미치는 영향을 분석

KOPRI 극지연구소

4) ANTOS Database 시스템 구축 2단계 진행

- ○ 1 단계 구축한 ANTOS Database 시스템을 2단계에서 기능 보강 및 시스템 안정화 작업을 진행할 계획임
- ○ ANTOS 데이터 종류 확장에 대비해 데이터 표준화 및 데이터 프로토콜 강화 작업, 연구데이터 비교 기능과 연구 데이터 통계 분석 결과 시각화 분석 기능 강화
- ○ 연구자간의 공동 연구 강화를 위해 관심분야/관심지역이 같은 연구자간의 커뮤니티 기능 확장할 계획임

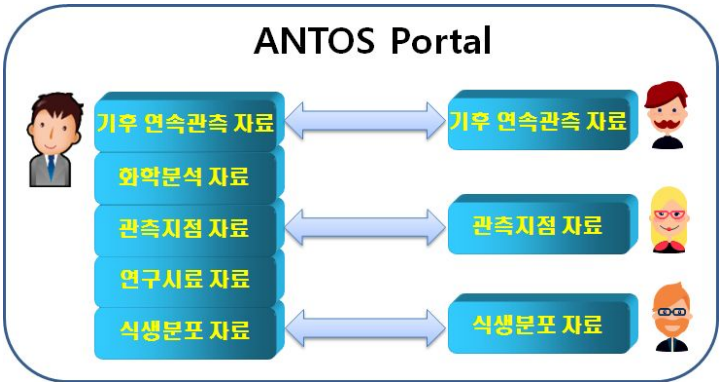


그림 39. ANTOS Portal을 활용한 공동연구

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

○ 본 연구의 핵심결과인 생물반응자료 및 생물반응 모델링 프로토타입은 2025 장기연구목표인 "기후변화에 의한 킹조지섬 생태계 변화 예측기술 개발"을 위한 핵심기술 중 하나인 "생물반응 모델링 기술"개발에 활용

○ 물리화학적 환경 및 생물상변화 모니터링 자료는 생태계변화 예측기술의 검증에 활용

○ 생태계변화에 민감한 종 등 생태계변화 지표 개발

○ 킹조지섬에서 구축한 생태계 연구 시스템을 남쉐틀랜드군도 및 남극반도 지역으로 확장하여 국제공동연구 선도

○ 극지생물의 보호와 극지환경의 보전을 위한 국제적 생태연구에 기여함으로써 남극조약의 이행 및 국제적 위상 제고

○ 킹조지섬 생태계를 대상으로 개발한 생태계변화 예측기술 및 각종 분석기술은 한반도를 포함한 다양한 생태계 분석에 활용

4-1. 향후 연구방향

1. 정성적 목표

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017	환경변화에 대한 생물반응 분석	○ 선태류 및 지의류 공생미생물 분포패턴 분석 ○ 종별 및 서식환경 별 지방산 마커 개발
		생태계 구성요소간 상호작용 기작 규명	○ CZO 캠페인을 위한 분석방법 시험 및 기술 확립 ○ 예비 자선조사 수행
		생태계 장기 모니터링	○ 환경데이터 연속 관측 ○ 해양환경 생물상 변화 조사 (3지점) ○ ANTOS 데이터베이스 시각화
2차년도	2018	환경변화에 대한 생물반응 분석	○ 환경변화에 대한 미생물 반응 분석 ○ 요각류 일주기 및 온도 반응 분자마커 개발 ○ 선태류 및 지의류 생물반응 분석
		생태계 구성요소간 상호작용 기작 규명	○ CZO 현장 캠페인 수행
		생태계 장기 모니터링	○ 환경데이터 연속 관측 ○ 해양환경 생물상 변화 조사 (3지점) ○ ANTOS 데이터베이스 커뮤니티 기능 개발
3차년도	2019	환경변화에 대한 생물반응 분석	○ 섬모충류 군집의 온도반응 표준지표 개발 ○ 지리적 분포, 생물진화, 환경적응 간 상호관계 분석 ○ 기계학습 인공지능 분석기술을 활용한 환경요인 분석 ○ 생물반응 모델링 프로토타입 개발
		생태계 구성요소간 상호작용 기작 규명	○ 현장조사 자료의 종합적인 분석을 통해 환경요소 간 상호작용 기작 규명
		생태계 장기 모니터링	○ 환경데이터 연속 관측 ○ 미생물군집 변화 분석 ○ 해양환경 생물상 변화 조사 (2지점) ○ 빙하후퇴지역의 조류번식과 식생천이 조사 ○ ANTOS 데이터베이스 안정화 작업

KOPRI 극지연구소

2. 정량적 목표

구분	국외논문		국내논문		특허출원		기술이전
	SCI* (주저자/공동)	기타	SCI (주저자/공동)	기타	국외	국내	
1차년도 (2017)	10 (8/2)	2 (2/0)		2 (2/0)			
2차년도 (2018)	21 (16/5)	4 (4/0)		2 (2/0)		1	
3차년도 (2019)	25 (20/5)	5 (5/0)		2 (2/0)		1	1
합 계	56 (44/12)	11 (11/0)		6 (6/0)		2	1

* 주저자는 제1저자와 교신저자 포함, 공동저자는 제2저자만 포함

4-2. 국·내외 공동연구 추진 계획

○ 국제협력 네트워크 구축

- AntEco, Ant-ERA, ANTOS 등의 남극과학위원회 연구프로그램 및 실행그룹과의 공조를 통해 남극전역에서 이루어지고 있는 생태계 연구와 연계
- 2016년 8월 SCAR 회의에서 개최 예정인 남극반도 생태계연구 네트워크 구축을 위한 제1차 회의를 발전시켜, 남극반도 및 남쉐틀랜드군도 지역을 대상으로 연구기획, 공동연구수행, 대규모의 연구데이터를 공동으로 분석하기 위한 생태계 연구 네트워크 구축
- ANTOS 데이터베이스 개발 주체로서 남극과학자 그룹 내의 위상을 강화하고 연구자간 데이터공유를 통해 국제공동연구 활성화에 기여
- 포르투갈 연구자 그룹과 공동으로 바톤반도 보어홀 시추 및 동토모니터링 네트워크 참여
- 한-칠레 공동연구과제 개발을 위한 2016년 5월 워크샵을 기반으로 생태·생리 연구부문 노하우를 가진 칠레 식물반응 연구자 그룹과 분자·생리 부문 노하우를 가진 본 연구진간 상호보완적 협력을 통해 남극반도 및 남쉐틀랜드군도에 서식하는 식물과 지의류 연구의 선도그룹 구축
- 남극반도지역과 빅토리아랜드 양쪽에 기지를 보유한 유일한 국가라는 위상을 살려서 남극전역을 대상으로 생태연구 네트워크 구축에 기여

○ 산학연 협력 네트워크 구축

- 지질, 수문학, 미기상학 등의 분야에서 대학과 협력관계 구축
- 선도적인 생물정보 분석기술을 분석서비스 업체로 이전함으로써 활용성 강화

KOPRI 극지연구소

그림 40. 남극생태연구 네트워크 구축계획

4-3. 연구개발 사업 규모

연구기간(년)	연구개발비(백만원)		
	2017	2018	2019
2017~2019 (3년간)	1,800	2,000	1,800

KOPRI 극지연구소

4-4. 총 연구기간 로드맵

그림 41. 2025년 장기연구 목표 및 비전

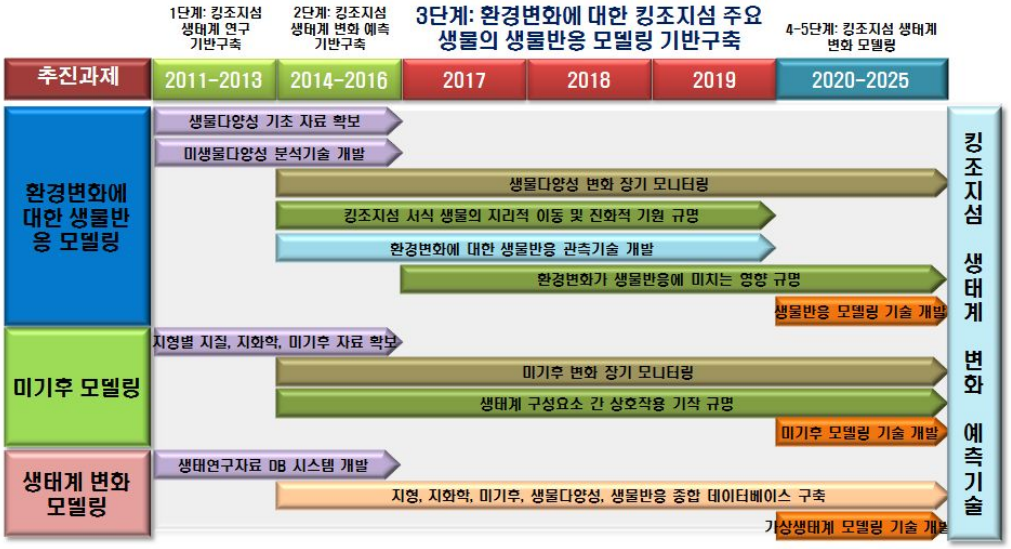


그림 42. 연구개발 로드맵 (2011 - 2025)

4-5. 인프라 활용 로드맵

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
남극 세종과학기지	2017	25	25										15
	2018	25	25										15
	2019	25	25										15
남극 장보고과학기지	2017												
	2018	25	25										
	2019	25	25										
북극 다산과학기지	2017							20	20				
	2018							20	20				
	2019							20	20				
쇄빙연구선 아라온	2017												
	2018												
	2019												

* 활용 시기에 음영표시 및 활용일수 작성

KOPRI 극지연구소

제 5 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

KOPRI
극지연구소

제 6 장 참고문헌

Deming JW (2002) Psychrophiles and polar regions. Curr Opin Microbiol 5:301-309

Lindberg S, Banas A, Stymne S (2005) Effects of different cultivation temperatures on plasma membrane ATPase activity and lipid composition of sugar beet roots. Plant Physiol Biochem 43:261-268

Martz F, Suitnen M, Kiviniemi S, Palta J (2006) Changes in freezing tolerance, plasma membrane H^+-ATPase activity and fatty acid composition in Pins resinosa needles during cold acclimation and de-acclimation. Tree Physiol 26:783-790

Parrish CC (2014) Lipids in marine ecosystems. ISRN Oceanography 2013:1-16

Zhou Y, Pan X, Qu H, Underhill SJR (2014) Low temperature alters plasma membrane lipid composition and ATPase activity of pineapple fruit during blackheart development. J Bioenerg Biomembr 46:59-69

Jung W, Kim E J, Han S J, Kang SH, Choi HG, Kim S (2016) Enzymatic modification by point mutation and functional analysis of an omega-6 fatty acid desaturase from arctic *Chlamydomonas* sp. Preparative Biochemistry and Biotechnology (in press)

KOPRI 극지연구소

뒷 면

(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.

KOPRI 극지연구소