


제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “기후변화에 따른 스발바르 식물의 대응 이해를 위한 다중분광 영상분석 및 고용량 분자 마커와 대사체 분석 기법 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 2 20.



연구책임자 : 이유경

참여연구원 : 김현철, 지준화
" : 정지영, 김민철
" : 이형석, 이정은
" : 남성진, 이성재
" : 박상규, 김상태
" : 김준, 류영일
" : 김문교, 양준영

보고서 초록

과제관리번호	PE22450	해당단계 연구기간	2021. 2. 1 - 2022. 12. 31	단계 구분	1단계 / 총 1단계
연구사업명	중 사업명	Seed형 선행과제			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	기후변화에 따른 스발바르 식물의 대응 이해를 위한 다중분광 영상분석 및 고용량 분자 마커와 대사체 분석 기법 개발			
연구책임자	이 유 경	해당단계 참여연구원수	총 : 15 명 내부 : 9 명 외부 : 6 명	해당단계 연구비	정부: 300,000 천원 기업: 천원 계: 300,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 KOPRI-NPI 극지연구협력센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					145
<ul style="list-style-type: none"> - 롱여비엔 인근 Adventdalen 지역의 식생 분석을 위한 다중분광 원격탐사 영상자료를 확보하고 KPDC에 데이터를 등록함 (Entry ID: KOPRI-KPDC-00001868) - Adventdalen 식생의 현장 초분광 데이터를 확보하고 분광 라이브러리 구축함 - 초분광 라이브러리의 기계학습(machine learning)으로 무인기로 촬영한 현장 식생 분포를 분석하여 식생지도를 제작함 - 북극 툰드라 식생 변화 모니터링에 적합한 식생 분석 모델을 선정함 - 분자마커 분석을 위하여 담자리꽃나무 111개체, 북극종꽃나무에서 94개체, 북극콩버들에서 129개체, 나도수영에서 108개체, 자주범의귀 111개체, 총 553개체의 식물에서 각각 1 g 내외의 잎을 채집하였음 - 분자마커 분석을 위한 레퍼런스 확보를 위하여 북극종꽃나무, 북극콩버들, 나도수영, 자주범의귀의 유전체 분석을 수행하였음. 이중 나도수영은 유전체 지도 초안 두 벌을 확보하여 논문 작성 중이며 나도수영 유전체 지도의 크기는 각각 561 Mb와 546 Mb로 확인되었음 - 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구별할 수 있는 SNP 분자마커를 담자리꽃나무 13개, 북극종꽃나무 3개, 북극콩버들 15개, 나도수영 79개, 자주범의귀 193개, 총 303개 확보함 - 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구별할 수 있는 대사체 마커를 담자리꽃나무 대사체 GC와 LC 분석으로 각각 한 개씩, 북극종꽃나무 대사체 GC 분석으로 한 개, LC 분석으로 세 개, 북극콩버들에서 GC 분석으로 한 개, 나도수영 대사체 GC 분석으로 네 개, LC 분석으로 열 개, 자주범의귀에서 GC 분석으로 한 개, 총 22개 확보함 - 북극 식생 영상분석 관련 논문 1편, 담자리꽃나무 분자마커 논문 1편을 투고중이며, 스발바르 육상생태계 연구 리뷰 논문 1편을 게재 완료함 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	롱여비엔, 니알슨, 다중분광분석, 식생, SNP 분자마커, 대사체			
	영어	Longyearbyen, Ny-Ålesund, Multispectral analysis, Vegetation, SNP marker, Metabolome			

요 약 문

I. 제 목

기후변화에 따른 스발바르 식물의 대응 이해를 위한 다중분광 영상분석 및 고용량 분자 마커와 대사체 분석 기법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 기후변화에 따른 식생 변화 이해를 위한 원격탐사 기술과 현장 다중분광 영상분석을 통한 식생 변화 분석 기술 개발
- 스발바르 대표 식물 생태형(ecotype)의 유전형 및 표현형 분석을 위한 고용량 분자 마커와 대사체 분석 기법 개발
- 우리나라 다산과학기지가 위치한 스발바르는 1910년대 이후 평균기온이 5도나 상승하는 등 급격한 기후 변화를 겪고 있어 기후변화가 생태계에 미치는 영향에 대한 장기모니터링이 필요
- 기후변화로 인한 빙권 축소와 동토 융해, 기온 상승, 강설 증가, 눈 위에 형성된 얼음과 같은 환경 변화는 스발바르에서 육상생태계 먹이그물에서 1차 생산자를 담당하는 식생의 변화를 초래하고 이로 인해 멸종위기종과 외래종이 발생하고 있어 이들에 대한 모니터링이 시급함
- 이와 같은 식생의 변화를 모니터링하기 위하여 원격탐사를 활용한 식생 모니터링의 기본이 되는 분광 라이브러리 구축 및 분석 기술 개발 필요
- 멸종위기종의 과학적이고 효율적인 보전 기준을 확보하기 위하여 식물의 유전형과 표현형에 기반한 북극 식물 생태형(ecotype) 비교 분석 기술 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 기후변화에 따른 식생 변화 이해를 위한 조사지점 선정 및 현장 식생 조사
- 현장 초분광 영상 분석을 통해 스발바르 툰드라 식생 분석에 적합한 기계학습 모델을 선정하고 식생 지도 제작
- 스발바르 대표 식물 5종을 선정하여 다양한 지역에서 식물을 채집하였으며, DNA 추출, 제한효소 처리, RAD sequencing, 염기서열 비교 분석 등을 통해 생태형(ecotype)을 구분할 수 있는 분자 마커 확보
- 식물을 GC (gas chromatography) 및 LC (Liquid chromatography)로 분석하고 이중 지역별로 서로 다른 정량 변화를 보이는 특정한 물질인 대사체 마커 확보

IV. 연구개발결과

- 식생 특성 분석을 위하여 접근이 용이하며 스발바르의 대표 우점 식물이 분포하고 있는 롱여비엔 인근 Adventdalen 지역을 조사 지점으로 선정하고 대표 식생을 조사하였으며 다중분광 영상자료를 확보하고 KPDC에 데이터를 등록함 (Entry ID; KOPRI-KPDC-00001868)
- Adventdalen 식생의 초분광 데이터를 확보하고 이에 기반한 분광 라이브러리 구축하였으며 이를 대상으로 기계학습으로 식생 분포를 분석하고 북극 툰드라 식생 변화 모니터링에 적합한 식생 분석 모델을 선정함
- 무인기를 활용하여 Adventdalen 식생의 초분광/RGB/LIDAR 영상을 확보하고 식생 지도(vegetation map)를 제작함
- 스발바르에 서식하는 대표적인 우점 식물인 담자리꽃나무 111개체, 북극종꽃나무에서 94개체, 북극콩버들에서 129개체, 나도수영에서 108개체, 자주범의귀 111개체, 총 553개체의 식물에서 각각 1 g 내외의 잎을 채집함
- 분자마커 개발의 레퍼런스로 활용하기 위하여 대표식물 5종의 유전체를 short read 수준에서 분석하였고, 이중 나도수영은 long read 분석도 병행하여 보다 정밀한 유전체 데이터를 확보하였음
- 롱여비엔과 니알슨의 생태형을 구별할 수 있는 SNP (single nucleotide polymorphism) 분자마커를 담자리꽃나무에서 13개, 북극종꽃나무에서 3개, 북극콩버들에서 15개, 나도수영에서 79개 확보, 자주범의귀에서 193개, 총 303개 확보
- 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구별할 수 있는 대사체 마커를 담자리꽃나무 대사체 GC와 LC 분석으로 각각 한 개씩, 북극종꽃나무 GC 분석으로 한 개, LC 분석으로 세 개, 북극콩버들에서 GC 분석으로 한 개, 나도수영에서 GC 분석으로 네 개, LC 분석으로 열 개, 자주범의귀에서 GC 분석으로 한 개, 총 22개 확보

V. 연구개발결과의 활용계획

- 니알슨 기반 육상 모니터링 분야(Terrestrial Flagship) 활동을 강화하고 스발바르종합관측시스템(SIOS)에 주도적으로 참여할 수 있는 대형 R&D 사업 개발에 기여
- 기후변화가 북극 육상 생태계에 미치는 영향과 대응을 위한 다학제 연구 사업 개발에 기여하고 본 과제에서 확보한 핵심 기술을 활용하여 기후변화로 인하여 개체수가 감소하고 있는 북극 멸종위기 식물 보전에 기여
- 본 과제를 기반으로 NPI를 비롯한 COAT 참여 기관과 공동연구를 통해 국가역량 강화에 필요한 북극 연구네트워크를 구성하고 북극권 국가와 연구 협력 기반 마련
- 대표적인 북극 식물의 개체군 수준에서의 유전 다양성을 확인하여 식물 보존 전략 수립의 기반 구축 및 새로운 식물 형질 개발 가능성 확보
- 북극 식물의 생육 환경 적응에 관련된 유전자 연구를 위한 기본 토대를 마련

목 차

제 1 장	서론	7
제 2 장	국내외 기술개발 현황	8
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절	원격탐사와 현장 다중분광 영상분석을 통한 식생 변화 분석 기술 개발	9
1.	기후변화에 따른 식생 변화 이해를 위한 기초 자료 구축	9
가.	조사 지점 선정 및 식생 조사	9
나.	위성 다중분광 영상 확보	11
다.	현장 초분광 자료 구축	12
라.	식생 지도 제작을 위한 식생 분류 모델 구축	14
2.	식생 변화 분석을 위한 무인기 영상 기반 북극 식생 지도 제작	17
가.	무인기를 활용한 북극 식생의 초분광/RGB/LIDAR 영상 획득	17
나.	초분광 & LIDAR 융합 이미지를 활용한 북극 식생 지도 제작	20
제 2 절	식물 생태형의 유전형 분석을 위한 고용량 분자 마커(RAD-seq) 분석	22
1.	스발바르 대표 식물 채집	22
가.	조사 지점 선정	22
나.	스발바르 식물의 염색체 및 유전체 크기 분석	23
다.	스발바르 식물 채집 및 동결건조	30
2.	스발바르 식물 5종의 고용량 분자 마커 분석	49
가.	스발바르 식물 5종의 DNA 추출	49
나.	스발바르 식물의 고용량 분자 마커 분석용 라이브러리 제작	59
다.	북극식물 분자 마커 개발을 위한 유전체 분석	67
라.	담자리꽃나무 분자 마커 분석	71
마.	북극종꽃나무 분자 마커 분석	86
바.	나도수영 유전체와 분자 마커 분석	96
사.	북극콩버들 분자 마커 분석	101
아.	자주범의귀 분자 마커 분석	105
자.	스발바르 우점식물에 대한 분자마커 분석 종합 결과	109

제 3 절 식물 생태형의 표현형 분석을 위한 대사체(metabolomics) 분석	110
1. 스발바르 식물 대사체 분석	110
가. 북극식물 대사체 추출	110
나. 북극식물 대사체 분석	110
다. 통계분석	110
라. 북극종꽃나무 대사체 분석 결과	111
마. 담자리꽃나무 대사체 분석 결과	115
바. 북극콩버들 대사체 분석 결과	119
사. 자주범의귀 대사체 분석 결과	121
아. 나도수영 대사체 분석 결과	122
자. 대사체 분석 결과 종합	127
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도	128
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	132
제 6 장 연구 성과 증빙 자료	133
제 7 장 참고문헌	145



제 1 장 서론

2019년 발간된 [IPCC 해양과 빙권 특별보고서¹⁾]에 따르면 북극에서 빙상과 빙하는 양적인 감소 상태에 있고 적설 면적도 줄어들고 있으며 이로 인해 북극 전역에서 빙권이 축소되고 있다. 북극의 지표면 온도는 지난 20년 동안 전 지구 평균의 2배 이상 상승했고 영구동토층의 온도도 상승하여 동토의 용해(thawing)가 광범위하게 일어나고 있다. 북극에서 눈이 녹기 시작하기 전인 6월에 눈에 뒤덮인 면적은 1967년~2018년까지 매 10년마다 13.4±5.4%씩 감소하여 총 손실은 약 2천5백만 평방미터에 이른다. 이런 눈과 얼음의 감소는 북극 전반에 큰 영향을 끼쳐 예전에 눈에 덮였던 지역이 드러나고 북극 생물종 및 생태계가 변하고 있다.

[IPCC 기후변화 2021 과학적 근거] 보고서에서도 1950년대 이후 전 세계 대부분의 빙하가 동시에 감소하고 있으며, 이런 현상은 적어도 과거 2000년 동안 유례가 없었다고 밝히며, 1970년 이후 지구온난화와 함께 육지 생물권의 변화가 진행되어 기후대가 양극지방으로 이동하고 있다고 보고하였다.

스발바르는 1910년대 이후 평균기온이 5도나 상승하는 등 급격한 기후 변화를 겪고 있어 기후변화가 생태계에 미치는 영향에 대한 장기모니터링이 필요하며 노르웨이는 COAT 프로그램을 통해 육상 생태계의 먹이그물을 모니터링하고 있다. 기후변화로 인한 빙권 축소와 동토 용해, 기온 상승, 강설 증가는 스발바르에서 육상생태계 먹이그물에서 1차 생산자를 담당하는 식생의 변화를 초래하고 있고, 멸종위기종과 외래종이 발생하고 있다.

이와 같은 식생의 변화를 모니터링하고 멸종위기종을 효율적으로 보전하기 위하여 스발바르 식생 모니터링 기술을 개발하고 식물의 유전자 다양성과 분자 다양성을 파악하여 이들 북극 식물 생태형(ecotype) 보전의 과학적 근거 제공이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기후변화가 북극 툰드라 식물에 미치는 영향을 파악하고 변화를 예측하는데 필요한 핵심기술인 원격탐사 기술과 분자마커 탐색 기술을 개발하고자 하였다. 본 연구 결과 기후변화에 따른 식물의 변화 및 대응을 거시적인 관점에서 이해하기 위한 기술로 원격탐사를 활용한 식생 분포와 군집 변화 분석에 필요한 기초 기술 개발하고, 기후변화에 따른 식물의 변화 및 대응을 개체군 수준에서 연구할 수 있도록 북극 식물의 생태형(ecotype)을 구별하는 분자마커를 발굴하는 기술을 개발하였다.

1) 빙권에서 일어나는 기후변화 영향을 다음과 같은 주제를 중심으로 분석함

- 극지방에 영향을 미치는 대기 및 해양 순환의 변화(기후 되먹임, 원격 연결 및 고생물학적 관점 포함)
- 그린란드와 남극의 빙상과 빙봉, 북극과 남극의 빙하, 질량 변화, 역학적 불안정성의 물리학 및 가속 얼음 배출; 해양 순환과 생지화학, 해수면에 대한 결과
- 적설, 만물 얼음 및 영구 동토층(지상 및 해저)의 변화; 탄소 플럭스 및 기후 피드백; 인프라 및 생태계에 미치는 영향; 커뮤니티 기반 적응
- 변화하는 해빙; 원격 연결을 포함하여 해양 및 대기 순환과 기후에 미치는 영향; 생태계, 해안 지역 사회, 운송 및 산업에 대한 영향
- 변화하는 극지 해양(물리적, 역학적 및 생지화학적 특성), 산성화, 탄소 흡수 및 방출에 대한 영향; 생태계 및 생태계 서비스(예: 어업)에 미치는 영향 적응 옵션(예: 생태계 기반 관리 및 서식지 보호) 및 적응 제한
- 자원에 대한 접근과 국제 협력 문제를 포함하여 극지 변화의 생태적, 제도적, 사회적, 경제적, 생계 및 문화적 결과
- 회복탄력성 강화를 위한 대응

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국외 동향

- 노르웨이의 COAT(Climate-Ecological Observatory for Arctic Tundra) 프로그램은 노르웨이 극지연구소(Norwegian Polar Institute, NPI), 북극대학(The Arctic University of Norway, UiT), 노르웨이자연연구소(Norwegian Institute for Nature Research, NINA) 등의 다양한 기관이 참여하는 북극 육상 생태계 장기 모니터링 사업으로, 먹이그물을 중심으로 생태계 기반 연구 시스템을 구축하는 것을 목표로 한다. (<http://www.coat.no/>)
- COAT에는 스발바르순록 개체군 동태에 영향을 주는 출산시기(UiT), 개체군 유전학(NTNU), 기생충(James Hutton Institute), 식물 군집의 계절 변화(NPI) 등을 연구하고 있으나 식물의 원격탐사나 개체군 수준의 생태형(ecotype) 연구는 없다.
- 스발바르에서 COAT 프로젝트의 주요 연구지는 먹이그물과 주요 식생이 알려진 Nordenskiöld Land와 Brøgger peninsula이며, 주요 연구 대상은 초식동물과 먹이 식물이고 식물 기반 먹이그물에 크게 영향을 주고받는 반사율(albedo), 적설량, 토양 온도와 영구동토층도 연구에 포함된다.
- 한편 노르웨이 정부가 주관하고 NPI, 노르웨이대기연구소(NILU), 국립영양-수산식품연구소(NIFES), 노르웨이기상연구소(MET), 노르웨이해양연구소(IMR)가 참여하는 MOSJ (Environmental Monitoring of Svalbard and Jan Mayen) 모니터링 시스템을 통해 스발바르의 동물, 수산업, 사냥, 환경오염 등을 종합적으로 추적하고 있다. (<http://www.mosj.no>)
- 원격탐사 기술을 이용한 연구는 노르웨이 NORCE(Norwegian Research Centre)와 북극대학(UiT)을 중심으로 수행되고 있으며, 스발바르 식생지수를 분석과하여 식생지도를 제작하고, Adventdalen 지역에서 적설 기간과 식물이 광합성 시작 시기를 위성 기반으로 분석하여 지도 제작하였다. (Karlsen et al. 2014, 2018, Vickers 2020)
- 북극 식물의 유전자 분석이 매우 제한적으로 이루어져서 스발바르 식물의 경우 34종 식물의 ITS 유전자 정보가 NCBI에 등록되어 있고 대사체 분석은 스발바르 식물에서 수행된 바 없다.

2. 국내 동향

- 극지연구소에서 다중분광 분석 기법을 이용하여 남극 식생 분포를 파악하는 기술을 개발하였고 (Shin et al., 2014), 남극에서 무인기와 영상 센서를 운용하여 다수의 연구 결과 출판하였다. (Kim et al., 2019, Kim et al., 2021)
- 남극 세종기지 주변 지의류와 선태류 분포가 눈 피복의 상관성 분석을 위해 원격탐사 기술을 개발한 바 있지만 북극에서 식생조사를 위한 원격탐사를 수행한 바 없다.
- 극지연구소는 스발바르 서식 관속식물 국명을 정리하고 (이유경 & 이은주 2019), 스발바르 식물의 기재문을 정리하여 식물도감을 발간하였으며 (이유경 & Arve Elvebakk 2019), 스발바르 식물의 특징과 기후변화가 북극 식물에 미치는 영향을 영문책으로 출판하는 등 (Lee 2020) 스발바르 식생 관련 기초 연구를 수행하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 다중분광 영상분석을 통한 식생 변화 분석 기술 개발

1. 기후변화에 따른 식생 변화 이해를 위한 기초 자료 구축

가. 조사 지점 선정 및 식생 조사

스발바르에서 극지 사막, 초원, 습지 등 다양한 지형적 특징을 갖는 Adventdalen을 연구지로 선정하였다. Adventdalen은 롱여비엔에서 차량으로 20분 거리에 있으며 UNIS와 트롬소대학 등의 연구팀이 온도 상승 챔버와 스노우펜스 등의 기후변화 관련 실험을 수행해 온 지역으로 과거 식생 데이터를 확보하기 용이한 지역이다.

이곳에서 향후 원격탐사 다중분광 영상 데이터와 비교연구할 때를 고려하여 위치를 식별하기 쉽도록 건물에 있는 주변과 트롬소대학이 지난 20년 동안 스노우펜스를 운영해온 Site B 주변에서 건조 지역, 토양 수분이 중간인 지역, 습한 지역을 구분하여 각각 방형구(5 m x 5 m 또는 1 m x 1 m)를 설치하고 방형구 내의 식생을 조사했다 (그림 1-1, 표 1-1).

조사 결과 Adventdalen은 건조한 지역에서 북극종꽃나무(*Cassiope tetragona*)와 담자리꽃나무(*Dryas octapetala*)가 우점했고, 토양 수분이 중간 지역은 이끼류와 북극콩버들(*Salix polaris*)이 밀집했다. 습한 지역에서는 이끼류, 사초과와 벼과 식물(Grasses), 북극황새풀(*Eryophorum scheuchzeri* ssp. *arcticum*), 북극쇠뜨기(*Equisetum arvense* ssp. *alpestre*) 등이 우점하였다.



그림 1-1. 방형구 (5 m x 5 m) 내의 식생 조사

표 1-1. 스발바르 Adventdalen 대표 식생 군집

조사날짜 / 장소 / 우점종	GPS	식물명	피도	비고
2021.7.26 Camp Barrents 뒤편 북극종꽃나무 (<i>Cassiope tetragona</i>)	78.17085315 N 16.00836541 E	<i>Cassiope tetragona</i>	75%	건조 지역 (dry)
		<i>Carex</i> sp.	8%	
		Moss	5%	
		<i>Salix polaris</i>	4%	
		<i>Bistorta vivipara</i>	2%	
		<i>Dryas octapetala</i>	2%	
		<i>Oxyria digyna</i>	1%	
		grasses	1%	
		lichen	1%	
		open soil (소계)	100%	
2021.7.28 Adventdalen (Site B 주변) 담자리꽃나무 (<i>Dryas octapetala</i>)	78 10 15.007 N 16 02 32.063 E	<i>Dryas octapetala</i>	65%	건조 지역 (dry)
		Lichen	12%	
		Soil crust	10%	
		<i>Salix polaris</i>	8%	
		Moss	5%	
		Stone	5%	
		(소계)	100%	
2021.7.28 Adventdalen (Private house) 이끼, 북극콩버들 (Moss, <i>Salix polaris</i>)	78 10 95.679 N 16 02 12.352 E	Moss	35%	토양 수분 중간 지역 (mesic)
		<i>Salix polaris</i>	20%	
		<i>Equisetum arvense</i> ssp. <i>alpestre</i>	15%	
		Grasses	10%	
		Rushes	7%	
		Open soil	6%	
		<i>Dryas octapetala</i>	4%	
		<i>Bistorta vivipara</i> (소계)	100%	
2021.7.28 Adventdalen (Site B 주변) 북극쇠뜨기 (<i>Equisetum arvense</i> ssp. <i>alpestre</i>)	78 10 05.261 N 16 02 57.610 E	<i>Equisetum arvense</i> ssp. <i>alpestre</i>	80%	습한 지역 (wet)
		Moss	15%	
		<i>Bistorta vivipara</i>	4%	
		<i>Salix polaris</i>	1%	
		(소계)	100%	
2021.7.28 Adventdalen (Site B 아래편) 사초과, 벼과 식물 (Grasses)	78 10 07.472 N 16 03 04.536 E	Grasses	80%	습한 지역 (wet)
		<i>Eryophorum scheuchzeri</i> ssp. <i>arcticum</i>	10%	
		<i>Equisetum arvense</i> ssp. <i>alpestre</i>	10%	
		(소계)	100%	
2021.7.28 Adventdalen (Site B 주변 stony area) 토양 피각, 돌 (Soil crust, stones)	78 10 11.492 N 16 02 55.041 E	Soil crust	30%	나대지 (mesic)
		Stones	28%	
		<i>Luzula confusa</i>	15%	
		<i>Deschampsia</i> sp.	15%	
		<i>Stellaria</i> sp.	5%	
		<i>Bistorta vivipara</i>	5%	
		<i>Alopecurus ovatus</i>	2%	
		(소계)	100%	

나. 위성 다중분광 영상 확보

Adventdalen 지역의 식생을 원격탐사로 분석하는 기초자료를 얻기 위하여 다중분광 영상 데이터를 확보하고 KPDC에 데이터를 등록하였다(Entry ID; KOPRI-KPDC-00001868). 본 연구에서는 WorldView-3 영상을 구입했는데, 이는 최고의 공간해상도와 분광해상도를 지닌 위성 다중분광센서로 31 cm 해상도의 전정색, 1.24 m 해상도를 지닌 8개의 다중분광밴드, 3.7 m 해상도를 갖는 8개의 단파적외선밴드를 사용한다. 확보한 영상 데이터에 기하보정 등 전처리를 한 뒤 RGB, 근적외선, 단파적외선 합성 영상을 획득하였다(그림 1-2). 각각의 영상에서 식물이 자라는 지역은 특정 파장대역으로 흡수/반사 특성이 잘 관찰되었다.

그러나 위성 영상으로는 식물을 종류별로 구분할 수 없다. 식생을 구분하기 위해서는 각 식물별 파장의 특성을 파악해야 하므로 주요 식물별 초분광 라이브러리를 제작하였다.

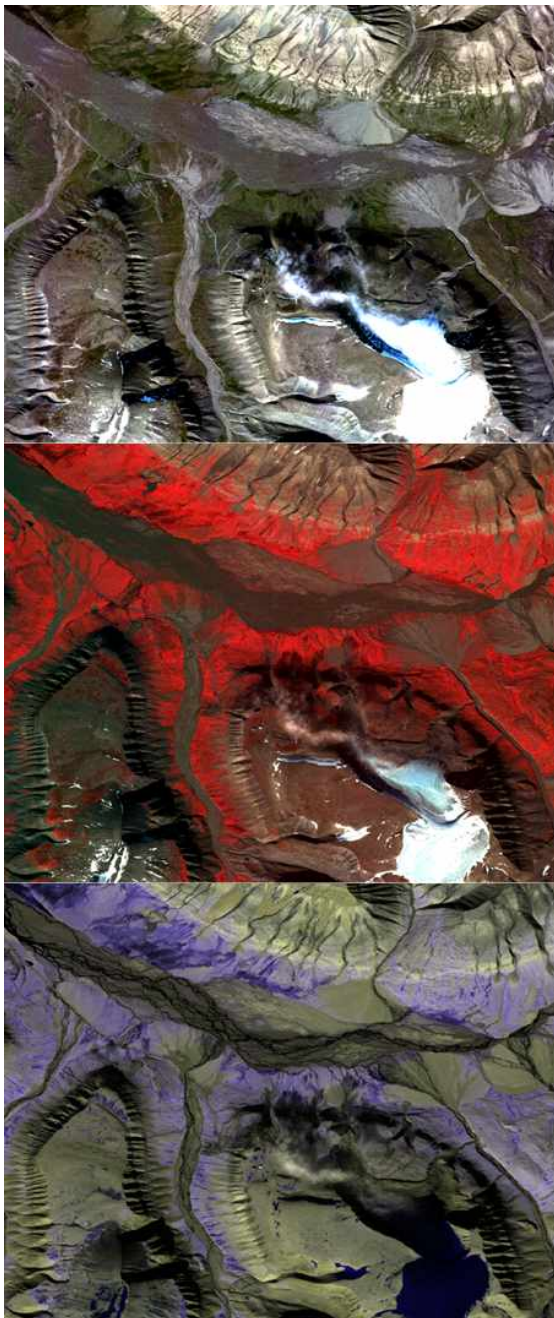


그림 1-2. 위로부터 Adventdalen RGB 합성영상 (1.2 m 해상도) 근적외선 합성영상 (1.2 m 해상도), 단파적외선 합성영상 (3.7 m 해상도)

KOPRI
연구소

다. 현장 초분광 자료 구축

식물별 초분광 라이브러리를 제작하기 위하여 21년 7월 수행된 현장조사에서는 휴대용 지상 초분광카메라를 이용하여 대표적 식생분포 특징을 보이는 Adventdalen과 Blomstrandøya 지역 15개 지점에서 지상 초분광영상을 획득하였다 (그림 1-3, 1-4). 휴대용 지상 초분광카메라와 스펙으로 400-1000 nm 대역에서 7 nm의 분광해상력을 지닌 204개의 분광밴드로부터 512 x 512 크기의 초분광영상을 획득하였다.

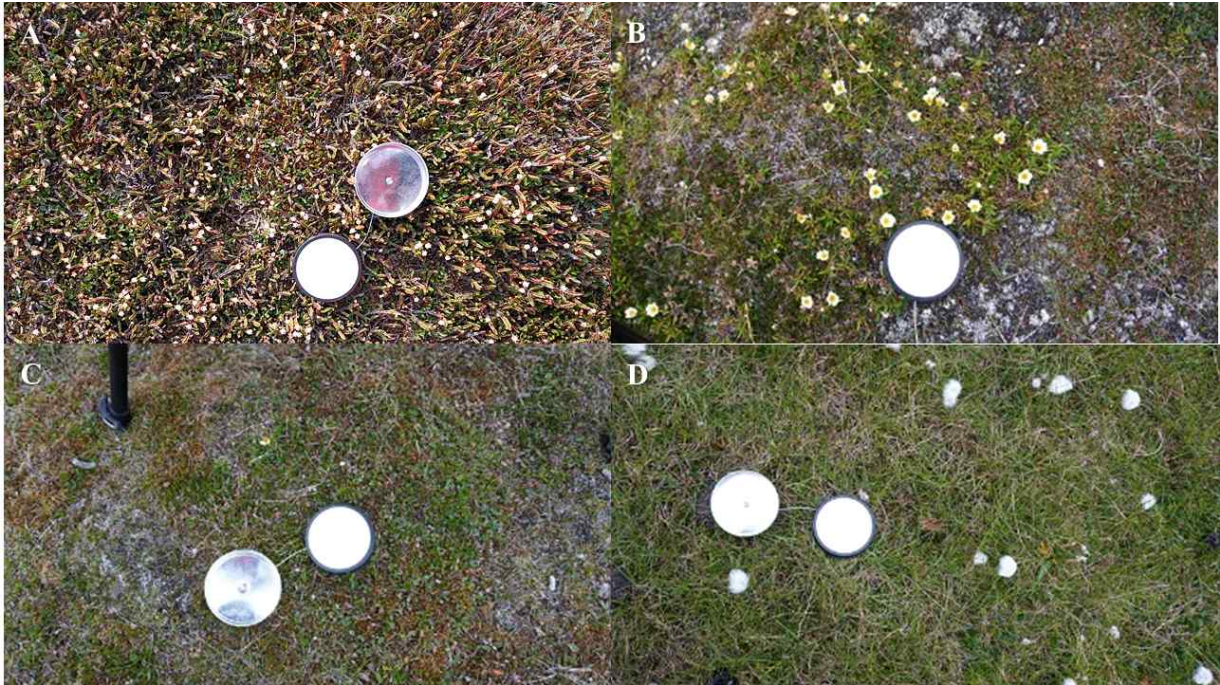


그림 1-3. (A) 북극종꽃나무 우점 식생, (B) 담자리꽃나무 우점 식생, (C) 북극콩버들 우점 식생, (D) 초본 우점 식생



그림 1-4. 지상 초분광영상 획득 지점

지상초분광영상은 100%의 빛을 반사하는 검보정타겟을 이용하여 흡수하는 에너지양과 반사하는 에너지양의 비율을 계산 정량화된 반사율(reflectance)값으로 환산했고 각 대상체별로 고유한 반사율 특성을 보여주었다 (그림 1-5). 각각의 식물별 분광곡선은 식물의 분광라이브리리 구축에 활용되었다.

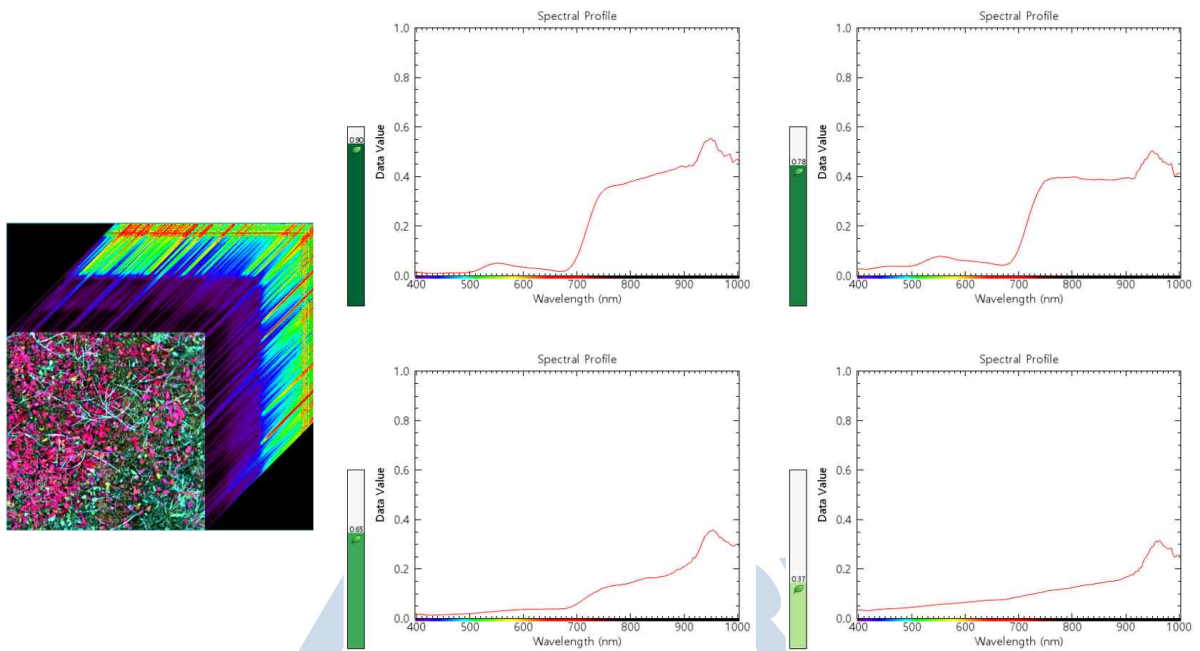


그림 1-5. Adventdalen에서 획득한 지상초분광영상과 그로부터 추출된 분광곡선의 샘플

극지연구소

라. 식생 지도 제작을 위한 식생 분류 모델 구축

원격탐사로 북극 식생 생태계의 변화를 분석할 수 있는 분석 기술을 개발하기 위하여 초분광 영상을 기반으로 식생을 분류할 수 있는 모델을 구축하고자 하였다. Adventdalen 지역에 우점하는 다섯 종의 식물에 대하여 지상 초분광 영상으로부터 분광 정보를 추출하였고, 이를 꽃(flower), 잎(leaf) 또는 죽은 잎(dead)으로 세분화하여 총 8개의 클래스를 선정하였다. 또한, 식생 주변에 분포하는 흙과 나지 클래스를 추가하여 비 식생 클래스가 식생으로 분류되는 오류를 예방하고자 하였다. (표 1-2). 이때 초분광 센서의 민감도 특성으로 인한 낮은 신호대잡음비를 보이는 파장 대역을 제거하여 최종적으로 452-899 nm 파장 영역만을 분석에 사용하였다.

기계학습 기반의 분류 모델을 훈련하고 평가하기 위하여, 본 연구에서는 독립적인 3개의 자료를 제작하고 활용하였다. 2022년도에 획득한 초분광 영상으로부터 훈련 자료 (2022), 평가 자료 (2022)를 제작하였고, 2021년도에 획득한 초분광 영상으로부터 평가 자료 (2021)를 제작하였다. 서로 다른 연도에서 획득한 평가 자료를 활용함으로써, 보다 강건한 분류 모델을 개발하고자 하였다. 훈련 자료 (2022)는 각 클래스 별로 1,000개의 화소로 구성되었으며, 식생 별 분광 정보의 평균값을 이용하여 참조 자료로 활용될 수 있는 분광 라이브러리를 구축하였다. (그림 1-6).

초분광 자료로부터 북극 식생을 효과적으로 분류할 수 있는 모델을 구축하기 위하여 널리 활용되는 3가지 분류 알고리즘: random forest (RF), support vector machine (SVM), one-dimensional neural network (1D-CNN) 들을 활용하였다. 훈련 자료를 통해 각 분류 모델을 훈련시키고, 2개의 평가 자료를 활용하여 그들의 통계적 분류 성능을 비교하였다. 모델의 예측의 정확도를 평가할 수 있는 전체 정확도와 우연을 고려한 일치도를 평가하는 Kappa 계수 값을 평가 지표로 활용하였다. 결과적으로 딥러닝 기반의 1D-CNN 분류 모델이 2개의 평가 자료에 대해 97.24% (Kappa = 0.9693), 92.80% (Kappa = 0.9200)로 가장 높은 통계적 정확도를 보였다 (표 1-3).

이와 더불어 정성적 분류 성능을 평가하기 위하여 훈련된 각각의 모델들을 지상 초분광 영상에 적용하였다 (그림 1-7). 1D-CNN 분류 모델은 정량적 뿐만 아니라 정성적으로도 초분광 정보를 활용한 식생 분류에 있어 높은 성능을 보여주었다. 본 연구에서 구축한 연구방법론과 분류 모델을 무인기를 활용한 북극 식생의 지도 제작에 적용해 보았다.

표 1-2. 지상 초분광 영상으로부터 선정한 북극 식생 클래스

ID	Class	국문명
V1	<i>Dryas octopetala</i> (leaf)	담자리꽃나무(잎)
V2	<i>Dryas octopetala</i> (flower)	담자리꽃나무(꽃)
V3	<i>Eriophorum scheuchzeri</i> (leaf)	북극황새풀(잎)
V4	<i>Eriophorum scheuchzeri</i> (flower)	북극황새풀(꽃)
V5	<i>Cassiope tetragona</i> (flower)	북극종꽃나무(꽃)
V6	<i>Cassiope tetragona</i> (dead)	북극종꽃나무(죽은 잎)
V7	<i>Equisetum</i> sp. (leaf)	북극쇠뜨기(잎)
V8	<i>Salix polaris</i> (leaf)	북극콩버들(잎)
V9	Soil (mixed)	흙 (식생 혼합)
V10	Bareground	나지

표 1-3. 평가 자료에 대한 각 분류 모델 별 통계적 정확도

평가 자료	분류 모델	전체 정확도	Kappa
2022	RF	91.52%	0.9058
	SVM	96.40%	0.9600
	1D-CNN	97.24%	0.9693
2021	RF	73.52%	0.7058
	SVM	88.92%	0.8769
	1D-CNN	92.80%	0.9200

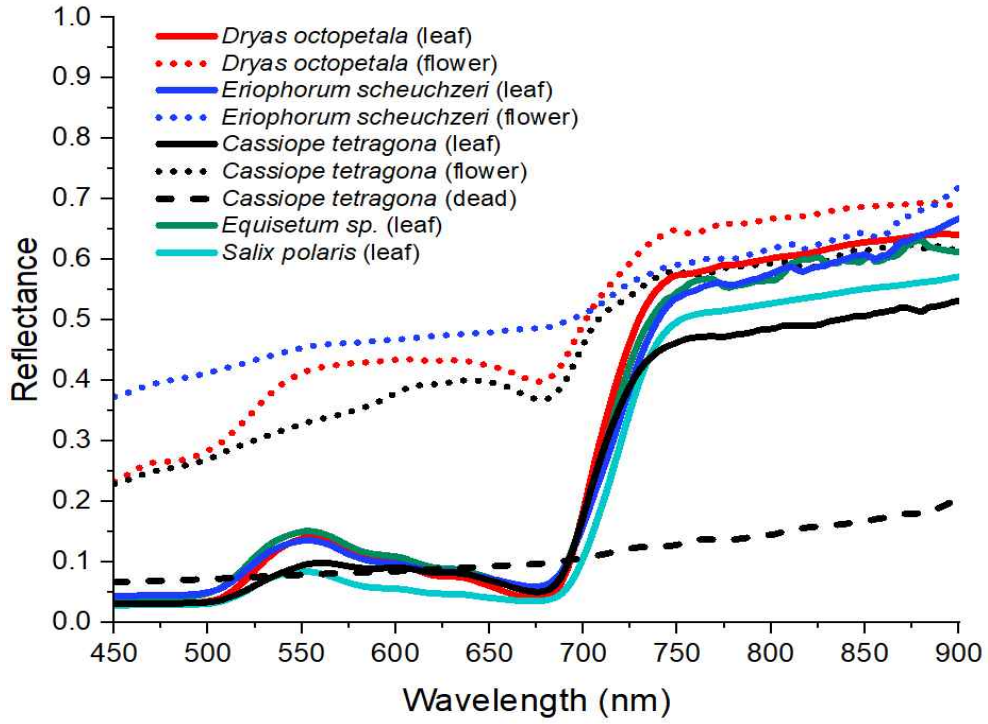


그림 1-6. Adventdalen 지역의 북극 식생 분광 라이브러리

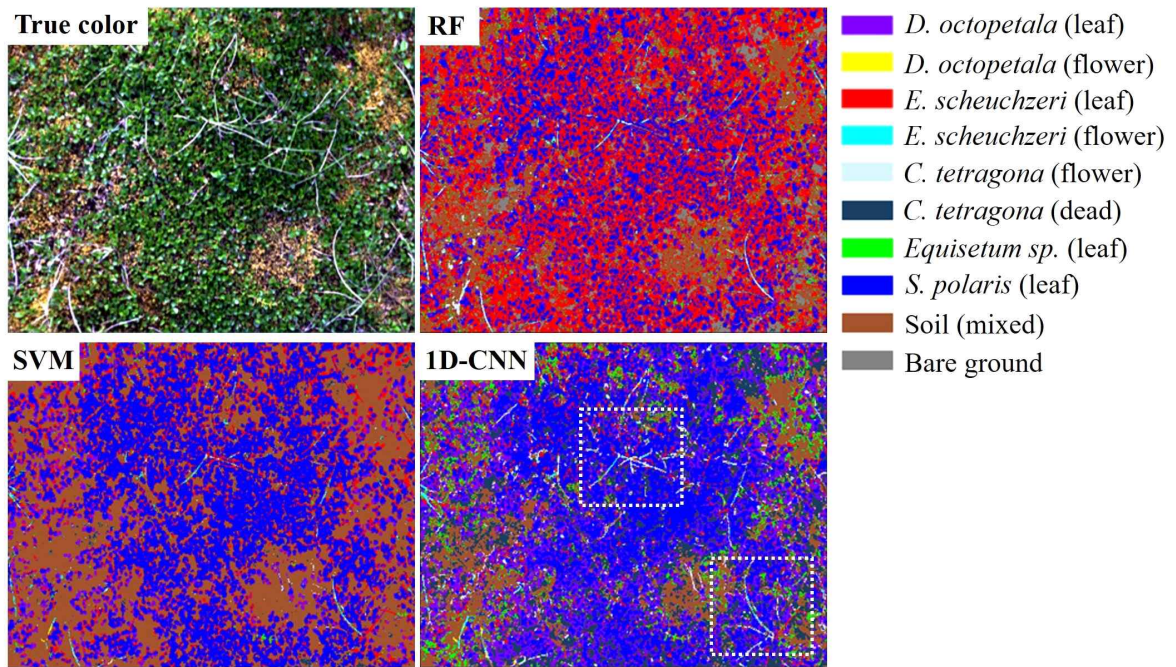


그림 1-7. 분류 모델에 따른 영상 분류 결과 비교. 다른 분류 모델인 RF와 SVM에 비하여, 딥러닝 기반의 1D-CNN 분류 모델은 보다 더 세분화 된 식생 지도를 제작하였다 (사각형).

2. 식생 변화 분석을 위한 무인기 영상 기반 북극 식생 지도 제작

가. 무인기를 활용한 북극 식생의 초분광/RGB/LIDAR 영상 획득

식생 지도는 어떤 식물이 얼마나 분포하고 있는지, 그 지역의 대표 식생 종은 무엇인지 한 눈에 파악하기에 효과적이다. 과거에는 사람이 직접 관측하고 방형구 조사를 하면서 식생 지도를 제작하였지만, 무인기를 활용하면 넓은 지역을 보다 빠른 시간 안에 조사할 수 있다.

본 연구에서는 Adventdalen에서 서로 다른 식생 분포를 보이는 세 개의 지역을 선정하여 2022년 7월 무인기 촬영을 수행하였다 (그림 1-8). 이때 사용한 무인기는 멀티콥터 무인항공기로, 초분광/RGB/LIDAR 센서를 장착하여 Adventdalen 일대를 촬영하였다 (그림 1-9).

식생 식별을 위해서 5 mm의 해상도를 가진 RGB 영상을 획득하였다 (그림 1-10). 400-1000 nm의 파장대역과 약 9 nm의 분광해상도를 가진 초분광 센서를 활용하여 연구지역을 촬영하여 초분광 영상을 얻었다 (그림 1-11). 초분광 영상의 Digital Number (DN)은 각각 100%, 50%, 0% 빛을 반사하는 검보정 타겟을 촬영지역에 설치하여 흡수하는 에너지양과 반사하는 에너지양의 비율을 계산 정량화된 표면 반사율(reflectance)값으로 변환되었다 (그림 1-12).

동시에 라이다 센서를 통해 연구지역의 높이 정보를 담고 있는 Point Cloud 데이터를 획득하였다 (그림 1-13). Point Cloud 데이터는 지상 식생의 표면 높이 정보와 고도 높이 정보를 담고 있는 Digital Surface Model (DSM)과 Digital Elevation Model (DEM)을 구축하는데 활용하였다.



그림 1-8. Adventdalen 무인기 영상 획득 지점



기체

대각선 축간거리	1133 mm
크기	프로펠러, 프레임 앞, GPS 마운트 펼쳤을 때: 1668 mm × 1518 mm × 727 mm (랜딩 기어 포함) 프로펠러, 프레임 앞, GPS 마운트 접었을 때: 437 mm × 402 mm × 553 mm (랜딩 기어 제외)
포장 크기	525 mm × 480 mm × 640 mm
무게 (TB475 배터리 6개 포함)	9.5 kg
무게 (TB485 배터리 6개 포함)	10 kg
최대 권장 이륙 무게	15.5 kg
호버링 정확도 (P-GPS)	수직: ±0.5 m, 수평: ±1.5 m
최대 각속도	피치: 300°/s, 요: 150°/s
최대 피치각	25°
내풍 가능 최대 풍속	8 m/s
최대 상승 속도	5 m/s
최대 하강 속도	3 m/s
최대 속도	65 km/h (바람이 없을 때)
최대 실용 상승 한도 (해발 고도)	2500 m
호버링 시간* (TB475 배터리 6개 탑재 시)	탑재하중 0kg: 32 분, 탑재하중 0kg: 16분
호버링 시간* (TB485 배터리 6개 탑재 시)	탑재하중 0kg: 38분, 탑재하중 5.5kg: 18 min
지원 DJI 짐벌	로닌-MX, 줌루즈 Z30, 줌루즈 X5/SR, 줌루즈 X3, 줌루즈 XT, 줌루즈 Z15 시리즈 HD 짐벌: Z15-A7, Z15-BMPC, Z15-SD III, Z15-GH4
비행 컨트롤 시스템	A3 Pro
추진 시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 모터 모델: DJI 6010 • 프로펠러 모델: DJI 2170R
접이식 랜딩 기어	표준
작동 온도	-10° ~ 40° C

그림 1-9. 본 연구에서 사용한 멀티콥터 무인기 스펙



<R1>



<R2>



<R3>

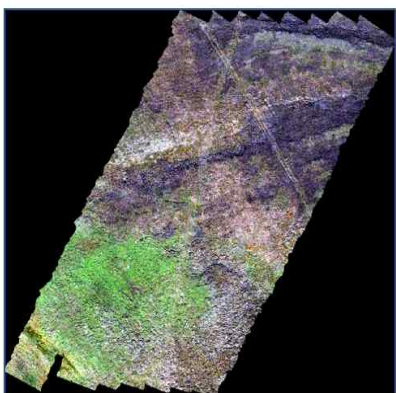


그림 1-10. Adventdalen 지역의 고해상도 RGB 영상

<R1>



<R2>



<R3>



그림 1-11. Adventdalen 지역의 초분광 영상

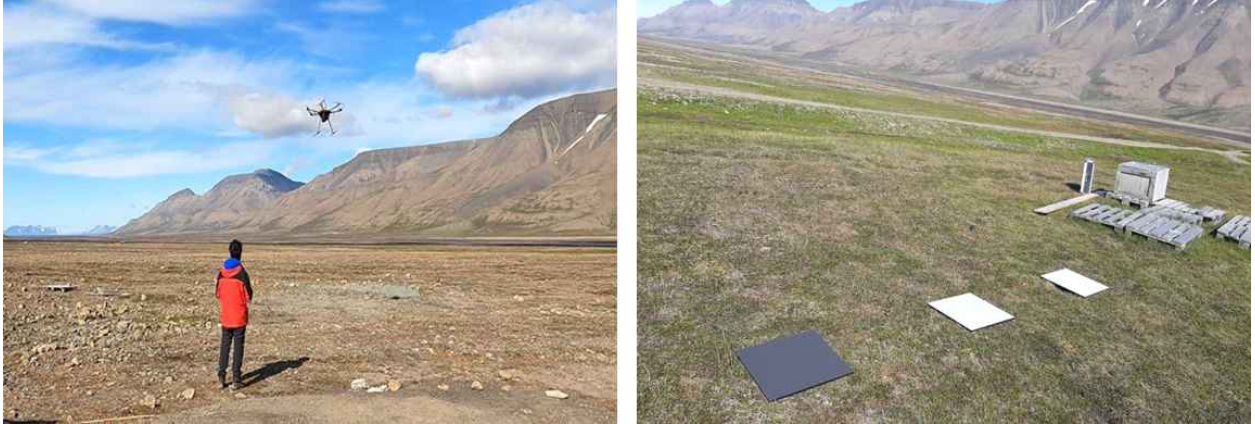


그림 1-12. 무인기 촬영 (좌), 무인기 검보정 타겟 (우)

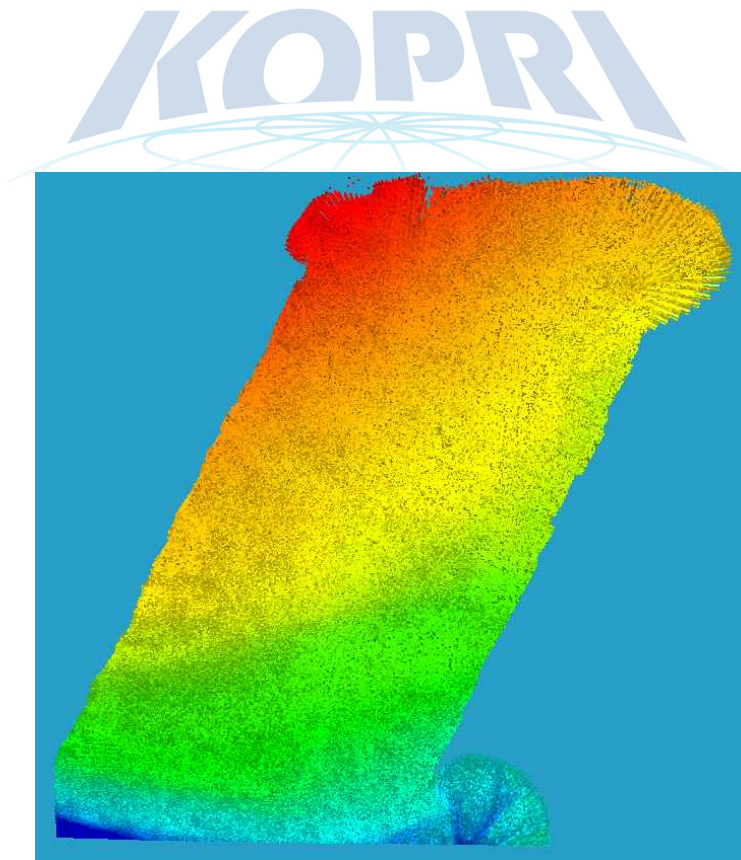


그림 1-13. LIDAR 센서를 통해 획득한 Point Cloud

나. 초분광 & 라이다 융합 이미지를 활용한 북극 식생 지도 제작

식생지도를 제작하기 위하여 앞에서 제시한 초분광 영상의 분류 방법과 동일한 방법으로 분광 라이브러리를 구축하고 의사결정 기반의 Random Forest (RF) 알고리즘 모델을 활용하여 각각의 식물 종을 구분하였다. 식생의 높이 자료는 앞에서 획득한 Point Cloud를 통해 구축된 DSM과 DEM 영상을 활용하여 얻었다.

초분광 이미지와 식생의 높이 정보가 담긴 라이다 이미지를 융합하여 연구지역의 식생 지도 제작을 위한 분류 연구를 수행하였다. 융합 영상으로부터 모델 훈련과 평가에 사용할 화소들을 추출하고 식생조사의 결과와 대조하여 화소의 라벨링을 진행하였다. 최종적으로 12개의 클래스를 선정하였다 (표 1-3).

앞에서 제시한 초분광 영상의 분류 방법과 동일한 방법을 사용하여 분류 알고리즘을 훈련한 뒤, 훈련에 사용하지 않은 자료를 이용하여 통계적 분류 정확도를 평가하였다. 무인기 초분광 & 라이다 융합 이미지는 94%의 높은 통계학적 분류 정확도를 보여주었다.

정성적 비교를 위하여 전체 이미지에 대하여 분류를 수행하였고, 분류 결과는 RGB color 이미지와 비교하여 매우 높은 분류 성능을 보였다 (그림 1-14). 융합 이미지와 기계학습 기반 모델을 활용하여 제작된 식생 지도는 정량적 및 정성적으로 우수한 정확도를 보였다. 따라서 스발바르 식생 분석에 본 연구에서 확보한 식물의 초분광 라이브러리와 분류 알고리즘을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

표 1-3. Adventdalen 무인기 영상의 클래스 정보

ID	Classes	Training pixels	Test pixels
V1	Background (masking)	1,000	250
V2	<i>Cassiope tetragona</i> (dead)	1,000	250
V3	<i>Cassiope tetragona</i> & <i>Dyras octopetala</i>	1,000	250
V4	<i>Equisetum.sp</i> & <i>Salix polaris</i>	1,000	250
V5	Granoid (dead) & <i>Luzula confusa</i>	1,000	250
V6	Bareground	1,000	250
V7	Moss (dry)	1,000	250
V8	Moss (wet)	680	170
V9	<i>Silence acaulis</i>	200	50
V10	<i>Salix polaris</i> & moss	1,000	250
V11	Tussock (mixed)	1,000	250
V12	Shadow	1,000	250

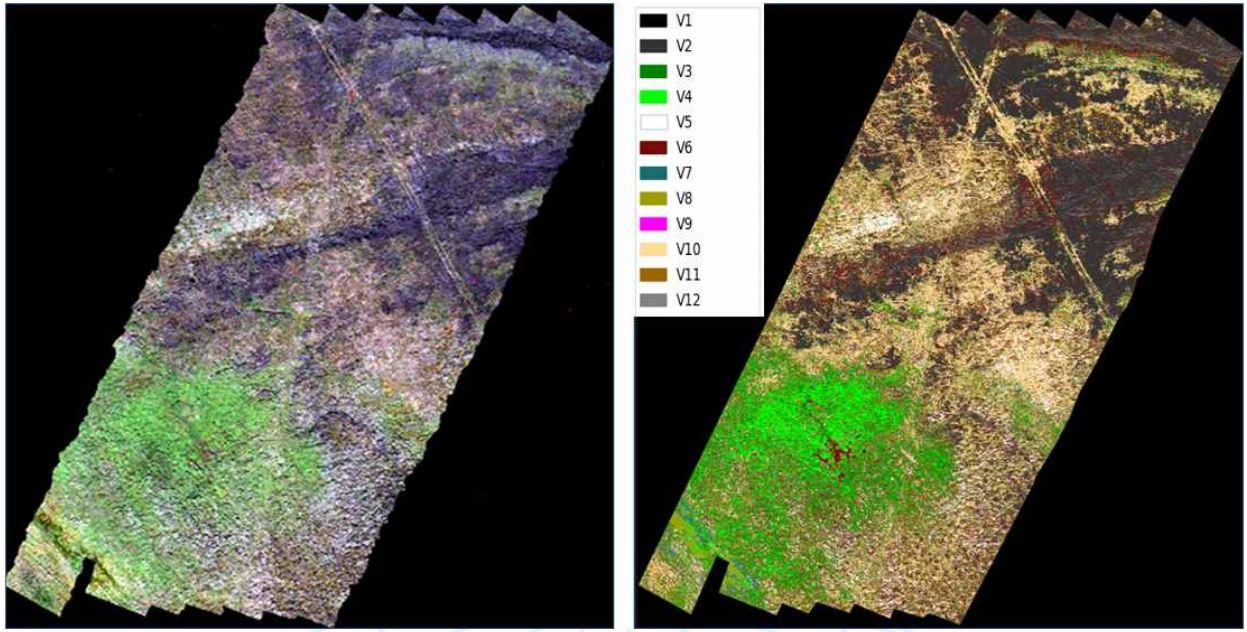


그림 1-14. 연구지역의 무인기 RGB True color 촬영 이미지 (좌), 인공지능 기반의 분류를 바탕으로 제작된 식생 지도 (우)

특지연구소

제 2 절 식물 생태형의 유전형 분석을 위한 고용량 분자 마커 분석

1. 스발바르 대표 식물 채집

가. 조사 지점 선정

스발바르에서 극지 사막, 초원, 습지 등 다양한 지형적 특징을 갖는 연구지를 선정하여 원격탐사와 현장 식생조사를 통해 식생구조를 분석하고자 하였다 (표 2-1). Adventdalen은 기존에 다양한 모니터링 연구가 수행된 곳으로 북극대학(UiT)과 UNIS가 20여년 간 기온 상승, 눈 덮이는 기간의 증가 등이 식생에 미치는 영향을 연구하고 있다. 이곳은 기본적으로 건조한 곳과 습한 지역이 공존한다. 건조한 지역에서는 북극종꽃나무와 담자리꽃나무가 우점하고 지역에 따라서 북극콩버들이 밀집되어 있다. 습한 지역에서는 이끼와 사초, 북극황새풀, 북극쇠뜨기 등이 우점한다. 건조한 지역의 토양은 전반적으로 빙하가 녹으며 퇴적된 암석이 섞여있고 습한 지역에서는 유기물이 표층 2~5 cm 정도 분포한다.

Blomsterdalen은 종자보관소 (Seed Vault) 뒤편 경사진 언덕으로 해발 130~150 m 부근이다. 북극종꽃나무와 담자리꽃나무가 우점하며 군데군데 북극황새풀이 서식하는 습지도 있다.

Blomstrandøya는 다산과학기지 맞은편에 있는 지름 5 km 가량 되는 섬이다. 당초 빙하로 육지와 연결되어 있어 반도를 뜻하는 halvøya를 붙여 Blomstrandhalvøya로 불렸으나 빙하가 녹고 섬이 되어 현재는 섬을 뜻하는 øya를 붙여 Blomstrandøya라고 한다. 섬의 북쪽 사면은 산 정상에서 해안가로 갈수록 천이 초기 환경이라 식물이 단순하다. 반면 서쪽 해안가는 습지가 발달해 있고 오래전부터 식물이 정착해서 종 다양성이 높다. 건조한 지역은 담자리꽃나무와 북극콩버들이 우점한다.

Ossian Sars와 Stuphallet은 철새가 서식하는 벼랑이 있어 유기물이 풍부하여 식물이 잘 자라는 곳이다. Ossian Sars는 다른 지역에서 볼 수 없는 양치식물과 국화과 식물이 서식한다. Stuphallet은 해안가에 담자리꽃나무와 북극콩버들이 우점하고 안쪽으로 습지가 분포한다.

표 2-1. 본 연구에서 선정한 식생 분석 대상 연구지 특징

연구지	환경 특징	식생 특징
Adventdalen	dry, meadow, wet tundra	<i>Cassiope</i> heath, <i>Dryas</i> heath, moss, tussock, <i>Salix</i> , <i>Equisetum</i>
Blomsterdalen	snowbed, slopes, wet	moss, tussock
Blomstrandøya	빙하후퇴, 천이초기	<i>Luzular</i> , lichen, <i>Dryas</i> , <i>Salix</i>
Ossian Sars	철새 서식지, dry	<i>Cassiope</i> heath, <i>Dryas</i> heath,
Stuphallet	철새 서식지, Mesic	moss, <i>Dryas</i> heath, <i>Carex</i>

나. 스발바르 식물의 염색체 및 유전체 크기 분석

스발바르에 서식하는 관속식물 목록과 이들의 국명이 정리된 바 있으나 (이유경 & 이은주 2019), 이들 식물의 염색체 숫자와 배수화 상태, 유전체 크기 등은 아직까지 정리된 적이 없다. 따라서 본 연구에서 스발바르 식물의 염색체 숫자와 배수화 상태, 유전체 크기를 정리하였다 (표 2-2). 유전체 크기가 알려진 식물이 많지 않아 동일한 속에서 유전체가 보고된 경우 동일 속 식물의 유전체를 기입했다. 양치식물문 식물의 유전체가 비교적 큰 편이고, 사초과와 골풀과 식물의 유전체가 상대적으로 작은 편이었다.

표 2-2. 스발바르 관속식물 목록, 염색체 숫자, 배수화 상태 (<https://svalbardflora.no/>), 식물의 국명 (이유경 & 이은주 2019), 유전체 크기 (<https://cvalues.science.kew.org/>). ND, No data.

Scientific Name	English Common Name	Korean Name	Chromosome number	Genome size 1C (Mbp)
Lycopodiophyta Lycopodiopsida Lycopodiales Lycopodiaceae		석송문 석송강 석송목 석송과		
<i>Huperzia arctica</i>	Mountain Fir-moss	북극다람쥐꼬리	2n = 68~270	5522 (<i>H. lucidula</i>)
Pteridophyta Equisetopsida Equisetales Equisetaceae		양치식물문 속새강 속새목 속새과		
<i>Equisetum arvense</i> ssp. <i>alpestre</i>	Polar Horsetail	북극쇠뜨기	2n = 216	14352
<i>Equisetum scirpoides</i>	Dwarf Horsetail	좁속새	2n = 216	20822
<i>Equisetum variegatum</i> ssp. <i>variegatum</i>	Variegated Horsetail	얼룩속새	2n = 216	29743
Psilotopsida Ophioglossales Ophioglossaceae		솔잎난강 나도고사리삼목 나도고사리삼과		
<i>Botrychium boreale</i>	Northern Moonwort	메고사리삼	2n = 180 4x	25788
<i>Botrychium lunaria</i>	Moonwort	백두산고사리삼	2n = 90	13695
Polypodiopsida Polypodiales Cystopteridaceae		양치식물강 양치식물목 한들고사리과		
<i>Cystopteris fragilis</i>	Brittle Bladder-fern	한들고사리	2n = 168 4x	8119
Woodsiaceae		우드풀과		
<i>Woodsia glabella</i>	Smooth Woodsia	큰솜털고사리	2n = 78	2385 (<i>W. pulchella</i>)
Magnoliophyta Alismatales Tofieldiaceae		속씨식물문 택사목 돌창포과		
<i>Tofieldia pusilla</i>	Scottish Asphodel	스코틀랜드꽃장포	2n = 28	ND
Poales Cyperaceae		벼목 사초과		
<i>Carex bigelowii</i> ssp. <i>arctisibirica</i>	Bigelow's Sedge	북극갈미사초	2n = 60	411 (<i>C. bigelowii</i> ssp. <i>dacica</i>)
<i>Carex capillaris</i> ssp. <i>fuscidula</i>	Hair Sedge	가는빛풀사초	2n = 54	490
<i>Carex concolor</i>	Water Sedge	물갈미사초	2n = 76	402 (<i>C. aquatilis</i>)

<i>Carex fuliginosa</i> ssp. <i>misandra</i>	Shortleaved Sedge	얼룩사초	2n = 40	676 (<i>C. fuliginosa</i>)
<i>Carex glacialis</i>	Glacial Sedge	빙하사초	2n = 34	ND
<i>Carex glareosa</i>	Gravel Sedge	자갈사초	2n = 66	422
<i>Carex krausei</i>	Krause's Sedge	크라우스사초	2n = 62	ND
<i>Carex lachenalii</i>	Hare's Foot Sedge	토끼발사초	2n = 64	392
<i>Carex lidii</i>	Lids Sedge	리디사초	ND	ND
<i>Carex marina</i> ssp. <i>pseudolagopina</i>	Sea Sedge	바다사초	2n = 64	ND
<i>Carex maritima</i>	Curved Sedge	굽은사초	2n = 60	ND
<i>Carex nardina</i> ssp. <i>hepburnii</i>	Hepburn's Sedge	헵번사초	2n = 68	ND
<i>Carex parallela</i>	Parallel Sedge	잔디사초	2n = 44	608
<i>Carex rupestris</i>	Curly Sedge	눈사초	2n = 50	333
<i>Carex saxatilis</i> ssp. <i>laxa</i>	Rock Sedge	뫼사초	2n = 80	412
<i>Carex subspatheacea</i>	Hoppner's Sedge	애기천일사초	2n = 78	ND
<i>Carex ursina</i>	Bear Sedge	곰사초	2n = 64	ND
<i>Eriophorum</i> <i>scheuchzeri</i> ssp. <i>arcticum</i>	Arctic Cottongrass	북극항새풀	2n = 58	686 (<i>E. angustifolium</i>)
<i>Eriophorum sorensonii</i>	Rousseau's Cottongrass	루소항새풀	2n = 59	ND
<i>Eriophorum triste</i>	Narrowleaf Cottongrass	갈래항새풀	2n = 60	ND
<i>Kobresia simpliciuscula</i> ssp. <i>subholarctica</i>	Simple Bog Sedge	민좀바늘사초	2n = 76	ND
Poales				
Juncaceae				
<i>Juncus albescens</i>	Northern White Rush	흰골풀	2n = 132	ND
<i>Juncus arcticus</i>	Arctic Rush	북극골풀	2n = 80	ND
<i>Juncus biglumis</i>	Twoflower Rush	쌍화골풀	2n = 60	554
<i>Juncus leucochlamys</i>	Chestnut Rush	밤색골풀	2n = 60	ND
<i>Luzula arcuata</i>	Curved Woodrush	굽은평의밥	2n = 36	425 (<i>L. pallescens</i>)
<i>Luzula confusa</i>	Northern Woodrush	북극평의밥	2n = 36	1024 (<i>L. divulgata</i>)
<i>Luzula nivalis</i>	Reindeer Woodrush	눈평의밥	2n = 24	ND
<i>Luzula wahlenbergii</i>	Arctic Woodrush	좀평의밥	2n = 24	ND
Poales				
Poaceae				
<i>Alopecurus ovatus</i>	Polar Foxtail	북극뚝새풀	2n = 98 14x	5684 (<i>A. utriculatus</i>)
<i>Arctagrostis latifolia</i>	Russian Grass	큰잎북극잔디	2n = 28 4x, 6x, 8x	ND
<i>Arctophila fulva</i>	Arctic Marsh Grass	북극습지잔디	2n = 42 6x	ND
<i>Calamagrostis neglecta</i> ssp. <i>groenlandica</i>	Narrow Small-reed	그린란드산새풀	2n = 28 4x	2656 (<i>C. arundinacea</i>)
<i>Calamagrostis purpurascens</i>	Purple Reedgrass	자주산새풀	2n = 28, 42, 56 4x, 6x, 8x	ND
<i>Deschampsia alpina</i>	Alpine Hairgrass	고산좀새풀	2n = 39 3x, 5x	ND
<i>Deschampsia cespitosa</i>	Tufted Hairgrass	좀새풀	2n = 26	5111
<i>Deschampsia sukatschewii</i> ssp. <i>borealis</i>	Tundra Hairgrass	툰드라좀새풀	2n = 26, 39 2x, 3x	ND
<i>Dupontia fisheri</i>	Fisher's Tundrgrass	피셔듀폰	2n = 42, 44 4x, 8x	ND
<i>Festuca baffinensis</i>	Baffin Fescue	배핀김의털	2n = 28 4x	ND
<i>Festuca brachyphylla</i>	Alpine Fescue	고산김의털	2n = 42 6x	5758

<i>Festuca edlundiae</i>	Grass-cushion	방석김의털	2n = 28 4x	ND
<i>Festuca hyperborea</i>	Boreal Fescue	북극김의털	2n = 28 4x	ND
<i>Festuca ovina</i>	Sheep Fescue	김의털	2n = 14, 28 2x, 4x	2364
<i>Festuca rubra</i> ssp. <i>richardsonii</i>	Richardson's Fescue	리처드슨김의털	2n = 42 6x	ND
<i>Festuca rubra</i> ssp. <i>rubra</i>	Red Fescue	왕김의털	2n = 42 6x	6703
<i>Festuca vivipara</i>	Viviparous Fescue	이삭김의털	2n = 21, 28, 42 3x, 4x, 6x	4862
<i>Festuca viviparoidea</i>	Northern Fescue	개이삭김의털	2n = 28 4x	ND
<i>Hierochloa alpina</i>	Alpine Sweetgrass	산향모	2n = 56 8x	ND
<i>Pleuropogon sabinei</i>	False Semaphoregrass	북극깃발풀	2n = 40 10x	ND
<i>Poa abbreviata</i>	Short Bluegrass	꼬마포아풀	2n = 42 6x	ND
<i>Poa alpina</i> var. <i>alpina</i>	Alpine Meadow-grass	고산포아풀	2n = 21~71 3x~10x	ND
<i>Poa alpina</i> var. <i>vivipara</i>	Alpine Meadow-grass	고산포아풀	2n = 32~52 4x~8x	ND
<i>Poa annua</i>	Annula Meadow-grass	새포아풀	2n = 28 4x	2842
<i>Poa arctica</i> ssp. <i>arctica</i>	Arctic Bluegrass	북극포아풀	2n = 42~74 7x~11x	ND
<i>Poa arctica</i> ssp. <i>caespitans</i>	Arctic Bluegrass	북극포아풀	2n = 56 8x	ND
<i>Poa glauca</i>	Glaucous Meadow-grass	자주포아풀	2n = 42~70 7x~10x	ND
<i>Poa hartzii</i>	Hartz's Bluegrass	하츠포아풀	2n = 70 10x	ND
<i>Poa pratensis</i> ssp. <i>alpigena</i>	Smooth Meadow-grass	왕포아풀	2n = 28~127 4x~18x	4155
<i>Puccinellia angustata</i>	Northern Alkaligrass	북방각시미꾸리광이	2n = 42 6x	ND
<i>Puccinellia coarctata</i>	Sea Urchins Alkaligrass	성계각시미꾸리광이	2n = 42 6x	ND
<i>Puccinellia phryganodes</i>	Creeping Alkaligrass	기느각시미꾸리광이	2n = 21, 28 3x, 4x	ND
<i>Puccinellia svalbardensis</i>	Svalbard Alkaligrass	스발바르각시미꾸리광이	2n = 42 6x	ND
<i>Puccinellia vahliana</i>	Vahl's Alkaligrass	발리어나각시미꾸리광이	2n = 14 2x	1740 (<i>P. stricta</i>)
<i>Trisetum spicatum</i>	Spike Trisetum	산잠자리피	2n = 28 4x	4812
Ranunculales Papaveraceae		미나리아재비목 양귀비과		
<i>Papaver cornwallisense</i>		나도스발바르양귀비	2n = 70 10x	3724 (<i>P. somniferu</i>)
<i>Papaver dahlianum</i>	Svalbard Poppy	스발바르양귀비	2n = 70 10x	ND
Ranunculales Ranunculaceae		미나리아재비목 미나리아재비과		
<i>Coptidium lapponicum</i>	Lapland Buttercup	라플란드미나리아재비	2n = 16 2x	ND
<i>Coptidium pallasii</i>	Glossy Buttercup	광택미나리아재비	2n = 32 4x	ND
<i>Coptidium spitsbergense</i>	Spitsbergen Buttercup	스피츠베르겐미나리아재비	2n = 24 3x	ND
<i>Ranunculus acris</i>	Arctic Buttercup	산미나리아재비	2n = 14, 28 2x, 4x	4410
<i>Ranunculus arcticus</i>	Tall Buttercup	북극미나리아재비	2n = 32, 48 4x, 6x	ND
<i>Ranunculus glacialis</i>	Glacier Buttercup	빙하미나리아재비	2n = 16 2x	3234
<i>Ranunculus</i>	Tundra Buttercup	북극젓가락나물	2n = 32	ND

<i>hyperboreus</i> ssp. <i>arnellii</i>			4x	
<i>Ranunculus hyperboreus</i> ssp. <i>hyperboreus</i>	Swamp Buttercup	북방젓가락나물	2n = 32 4x	ND
<i>Ranunculus nivalis</i>	Snow Buttercup	눈미나리아재비	2n = 48, 56 6x, 7x	5782
<i>Ranunculus pygmaeus</i>	Pigmy Buttercup	난장이미나리아재비	2n = 16 2x	ND
<i>Ranunculus repens</i>	Creeping Buttercup	기름미나리아재비	2n = 16, 32 2x, 4x	ND
<i>Ranunculus subborealis</i> ssp. <i>villosus</i>	Meadow Buttercup	습지미나리아재비	2n = 14 2x	ND
<i>Ranunculus sulphureus</i>	Sulphur Buttercup	유황미나리아재비	2n = 64, 80, 96 8x, 10x, 12x	ND
<i>Ranunculus wilanderi</i>	Polar Kidney Buttercup	일란드미나리아재비	2n = 32 4x	ND
Caryophyllales Caryophyllaceae		석죽목 석죽과		
<i>Arenaria humifusa</i>	Low Sandworts	땅벼룩이자리	2n = 40 4x	583 (<i>A. gracilis</i>)
<i>Arenaria pseudofrigida</i>	Fringed Sandworts	북극벼룩이자리	2n = 40 4x	ND
<i>Cerastium alpinum</i>	Alpine Chickweed	고산점나도나물	2n = 72 4x	1813
<i>Cerastium arcticum</i>	Arctic Mouse-ear	북극점나도나물	2n = 108 6x	3126
<i>Cerastium cerastoides</i>	Mountain Chickweed	산점나도나물	2n = 38 2x	686
<i>Cerastium regelii</i> ssp. <i>caespitosum</i>	Regel's Chickweed	리겔점나도나물	2n = 72 4x	ND
<i>Honckenya peploides</i> ssp. <i>diffusa</i>	Sea Sandwort	북극갯별꽃	2n = 66~70 4x	4243
<i>Minuartia biflora</i>	Mountain Sandwort	북극개미자리	2n = 26 2x	1070 (<i>M. gerardii</i>)
<i>Minuartia rossii</i>	Ross' Sandwort	로스개미자리	2n = 60 4x	ND
<i>Minuartia rubella</i>	Beautiful Sandwort	예쁜개미자리	2n = 24, 26 2x	ND
<i>Minuartia stricta</i>	Rock Sandwort	북극외대개미자리	2n = 30 2x	ND
<i>Sagina caespitosa</i>	Tufted Pearlwort	포기개미자리	2n = 84, 88 12x	ND
<i>Sagina nivalis</i>	Snow Pearlwort	눈개미자리	2n = 56 8x	ND
<i>Silene acaulis</i>	Moss Champion	북극이끼장구채	2n = 24 2x	2166 (<i>S. alpestris</i>)
<i>Silene involucrata</i> ssp. <i>furcata</i>	Artic White Champion	흰풍선장구채	2n = 48 4x	ND
<i>Silene uralensis</i> ssp. <i>arctica</i>	Polar Champion	북극풍선장구채	2n = 24 2x	ND
<i>Stellaria humifusa</i>	Saltmarsh Starwort	북극별꽃	2n = 26 2x	ND
<i>Stellaria longipes</i>	Longstalk Starwort	툰드라별꽃	2n = 104 8x	ND
<i>Stellaria media</i>	Chickweed	별꽃	2n = 40 4x	980
Caryophyllales Polygonaceae		석죽목 마디풀과		
<i>Bistorta vivipara</i>	Alpine Bistort	씨범꼬리	2n = 77~132 Polyploidy	ND
<i>Koenigia islandica</i>	Iceland Purslane	쇠비름아재비	2n = 28 4x	ND
<i>Oxyria digyna</i>	Mountain Sorrel	나도수영	2n = 14 2x	ND
<i>Rumex acetosa</i>	Common Sorrel	수영	2n = 14 2x	1666
Saxifragales		범의귀목		

Crassulaceae		돌나물과		
<i>Rhodiola rosea</i>	Roseroot	돌꽃	2n = 22 2x	1093 (<i>S. maximum</i>)
Saxifragales		범의귀목		
Saxifragaceae		범의귀과		
<i>Chrysosplenium tetrandrum</i>	Northern Golden Saxifrage	북방향금괘이눈	2n = 24 4x	ND
<i>Micranthes foliolosa</i>	Foliolose Saxifrage	좀범의귀아재비	2n = 56 8x	ND
<i>Micranthes hieraciifolia</i>	Stiff Stem Saxifrage	붉은범의귀아재비	2n = 100, 120 10x, 12x	ND
<i>Micranthes nivalis</i>	Snow Saxifrage	눈범의귀아재비	2n = 60 6x	ND
<i>Micranthes tenuis</i>	Ottertail Pass Saxifrage	가는대범의귀아재비	2n = 20 2x	ND
<i>Saxifraga aizoides</i>	Yellow Saxifrage	노랑범의귀	2n = 26 2x	ND
<i>Saxifraga cernua</i>	Drooping Saxifrage	씨눈바위취	2n = 24~72 2x~6x	ND
<i>Saxifraga cespitosa</i>	Tufted Saxifrage	다발범의귀	2n = 80 10x	ND
<i>Saxifraga hirculus</i> ssp. <i>compacta</i>	Marsh Saxifrage	노랑습지범의귀	2n = 32 4x	ND
<i>Saxifraga hyperborea</i>	Pygmy Saxifrage	꼬마범의귀	2n = 26 2x	ND
<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Purple Saxifrage	자주범의귀	2n = 26, 39, 52 2x, 3x, 4x	1434
<i>Saxifraga platysepala</i>	Thread Saxifrage	가는범의귀	2n = 32 4x	ND
<i>Saxifraga rivularis</i>	Alpine Brook Saxifrage	물범의귀	2n = 52 4x	ND
<i>Saxifraga svalbardensis</i>	Svalbard Saxifrage	스발바르바위취	2n = 64 5x?	ND
Brassicales		십자화목		
Brassicaceae		십자화과		
<i>Arabis alpina</i>	Alpine Rock-cress	고산장대	2n = 16 2x	372
<i>Barbarea vulgaris</i>	Winter-cress	유럽나도냉이	2n = 16, 18 2x	ND
<i>Braya glabella</i> ssp. <i>purpurascens</i>	Purplish Braya	자주꽃다지아재비	2n = 56 8x	ND
<i>Cakile maritima</i> ssp. <i>islandica</i>	Arctic Sea Rocket	북극갯냉이	2n = 18 2x	666 (<i>C. maritima</i>)
<i>Cardamine bellidifolia</i>	Alpine Cress	고산황새냉이	2n = 16 2x	ND
<i>Cardamine nymanii</i>	Polar Cress	북극황새냉이	2n = 56~100 Polyploidy	1666
<i>Cochlearia groenlandica</i>	Greenland Scurvygrass	그린란드고추냉이	2n = 14 2x	735 (<i>C. officinalis</i>)
<i>Draba alpina</i>	Alpine Whitlow-grass	고산꽃다지	2n = 80 10x	ND
<i>Draba arctica</i>	Arctic Draba	북극꽃다지	2n = 80 10x	ND
<i>Draba corymbosa</i>	Flat-top Draba	민꽃다지	2n = 100~144 Polyploidy	ND
<i>Draba fladnizensis</i>	Austrian Draba	오스트리아꽃다지	2n = 16 2x	270
<i>Draba glabella</i>	Smooth Draba	산꽃다지	2n = 64, 80 8x, 10x	ND
<i>Draba lactea</i>	Lapland Whitlow-grass	라플란드꽃다지	2n = 32, 48 4x, 6x	ND
<i>Draba micropetala</i>	Small-flowered Draba	꼬마꽃다지	2n = 48 6x	ND
<i>Draba nivalis</i>	Snow Whitlow-grass	눈꽃다지	2n = 16 2x	309
<i>Draba oxycarpa</i>	Gredin's Whitlow-grass	뺨족꽃다지	2n = 64 8x	ND

<i>Draba rupestris</i>	Rock Whitlow-grass	바위꽃다지	2n = 48 6x	ND
<i>Draba pauciflora</i>	Few-flowered Whitlow-grass	작은꽃다지	2n = 32 4x	ND
<i>Draba subcapitata</i>	Ellesmere Island Whitlow-grass	엘즈미어꽃다지	2n = 16 2x	245
<i>Eutrema edwardsii</i>	Edwards' Mock Wallflower	에드워즈고추냉이	2n = 28, 42, 56 4x, 6x, 8x	ND
Malpighiales		말피기목		
Salicaceae		버드나무과		
<i>Salix herbacea</i>	Dwarf Willow	꼬마버들	2n = 38 2x	421 (<i>S. purpurea</i>)
<i>Salix lanata</i>	Woolly Willow	털버들	2n = 38 2x	828 (<i>S. cinerea</i>)
<i>Salix polaris</i>	Polar Willow	북극콩버들	2n = 114 6x	ND
<i>Salix reticulata</i>	Netleaf Willow	그물잎버들	2n = 38 2x	ND
Rosales		장미목		
Rosaceae		장미과		
<i>Alchemilla glomerulans</i>	Clustered Lady's Mantle	송이망토틀	2n = 96~144 Polyploidy	1808 (<i>A. plicata</i>)
<i>Alchemilla subcrenata</i>	Broadtooth Lady's Mantle	넓은거치망토틀	2n = 90~100 Polyploidy	ND
<i>Dryas octopetala</i>	Mountain Avens	담자리꽃나무	2n = 18 2x	588
<i>Potentilla arenosa</i> ssp. <i>chamissonis</i>	Bluff Cinquefoil	카미소양지꽃	2n = 56 8x	445 (<i>P. erecta</i>)
<i>Potentilla crantzii</i>	Alpine Cinquefoil	고산양지꽃	2n = 28~49 4x~7x	1049 (<i>P. hirta</i>)
<i>Potentilla hyparctica</i>	Arctic Cinquefoil	북극양지꽃	2n = 42 6x	
<i>Potentilla insularis</i>	Svalbard Cinquefoil	스발바르양지꽃	ND	ND
<i>Potentilla lyngei</i>	Lynge Cinquefoil	린지양지꽃	2n = 28 4x	ND
<i>Potentilla nivea</i>	Snow Cinquefoil	은양지꽃	2n = 56, 63 8x, 9x	ND
<i>Potentilla pulchella</i>	Pretty Cinquefoil	다발양지꽃	2n = 28 4x	ND
<i>Rubus chamaemorus</i>	Cloudberry	진들딸기	2n = 56 8x	1205
<i>Sibbaldia procumbens</i>	Creeping Sibbaldia	너도양지꽃	2n = 14 2x	ND
Fagales		참나무목		
Betulaceae		자작나무과		
<i>Betula nana</i> ssp. <i>nana</i>	Dwarf Birch	난장이자작	2n = 28 2x	448
Ericales		진달래목		
Ericaceae		진달래과		
<i>Cassiope tetragona</i>	Arctic Bell-heather	북극종꽃나무	2n = 26 2x	ND
<i>Empetrum nigrum</i> ssp. <i>hermaphroditum</i>	Mountain Crowberry	검은시로미	2n = 52 4x	632
<i>Harrimanella hypnoides</i>	Moss Bell-heather	이끼석남	2n = 32 4x	ND
<i>Vaccinium uliginosum</i> ssp. <i>microphyllum</i>	Polar Bilberry	꼬마들쭉나무	2n = 24 4x	652 (<i>V. corymbosum</i>)
Ericales		진달래목		
Polemoniaceae		꽃고비과		
<i>Polemonium boreale</i>	Northern Jacob's Ladder	북방꽃고비	2n = 18 2x	5929 (<i>P. reptans</i>)
Boraginales		지치목		
Boraginaceae		지치과		
<i>Mertensia maritima</i> ssp. <i>tenella</i>	Baltic Wort	발트갯지치	2n = 24 4x	ND

Gentianales Gentianaceae		용담목 용담과		
<i>Comastoma tenellum</i>	Slender Gentian	가는용담	2n = 10 2x	ND
Lamiales Lentibulariaceae		꿀풀목 등발과		
<i>Pinguicula alpina</i>	Alpine Butterwort	고산벌레잡이제비꽃	2n = 32 4x	600 (<i>P. colimensis</i>)
Lamiales Orobanchaceae		꿀풀목 열당과		
<i>Pedicularis dasyantha</i>	Wooly Lousewort	솜털송이풀	2n = 16 2x	2749 (<i>P. sylvatica</i>)
<i>Pedicularis hirsuta</i>	Hairy Lousewort	긴털송이풀	2n = 16 2x	ND
Lamiales Plantaginaceae		꿀풀목 질경이과		
<i>Hippuris lanceolata</i>	Lance-leaved Mare's-tail	창쇠뜨기말풀	2n = 32 4x	ND
Lamiales Scrophulariaceae		꿀풀목 현삼과		
<i>Euphrasia wettsteinii</i>	Mountain Eyebright	산좁쌀풀	2n = 44 4x	833 (<i>E. willkommii</i>)
Asterales Asteraceae		국화목 국화과		
<i>Achillea millefolium</i>	Yarrow	서양톱풀	2n = 36, 54, 72 4x, 6x, 8x	4778
<i>Arnica angustifolia</i>	Alpine Arnica	고산아르니카	2n = 38, 57, 76 2x, 3x, 4x	1534 (<i>A. montana</i>)
<i>Erigeron eriocephalus</i>	Wool Fleabane	털개망초	2n = 18 2x	1519 (<i>E. calderae</i>)
<i>Erigeron humilis</i>	Snow Fleabane	애기개망초	2n = 36 4x	ND
<i>Erigeron uniflorus</i>	One Flower Fleabane	외꽃개망초	2n = 18 2x	ND
<i>Petasites frigidus</i>	Arctic Butterbur	북극머위	2n = 60 6x	3136
<i>Saussurea alpina</i>	Alpine Saw-wort	고산분취	2n = 52 4x	ND
<i>Taraxacum acromaurum</i>	Iceland Dandelion	아이슬란드민들레	ND	971 (<i>T. glaciale</i>)
<i>Taraxacum arcticum</i>	Arctic Dandelion	북극흰민들레	2n = 40 5x	1808 (<i>T. fartoris</i>)
<i>Taraxacum brachyceras</i>	Common Dandelion	북극민들레	2n = 32 4x	ND
Asterales Campanulaceae		국화목 초롱꽃과		
<i>Campanula rotundifolia ssp. gieseckiana</i>	Hairbell	가는초롱꽃	2n = 34 2x	1074
<i>Campanula uniflora</i>	Alpine Hairbell	고산초롱꽃	2n = 34 2x	ND
Apiales Apiaceae		미나리목 미나리과		
<i>Anthriscus sylvestris</i>	Cow Parsley	전호	2n = 16 2x	2254

나. 스발바르 식물 채집 및 동결건조

당초 계획했던 식물 채집 후보 지역은 스발바르 정기 항공편이 운항하는 롱여비엔 인근 Adventdalen과 Blomsterdalen, 다산과학기지 주변 Blomstrandøya, Btandalpynten, Ossian Sarsfjellet, 그리고 롱여비엔에서 선박을 이용해 갈 수 있는 Petuniabukta를 선정했었다. 그러나 코로나19로 인해 Petuniabukta행 선박을 이용할 수 없어 이곳은 채집 지역에서 제외하고 대신 롱여비엔 주변에서 일부 식물을 채집하였다. 롱여비엔에서는 스발바르공항과 공동묘지, Nybien에서 식물을 채집하였다. Adventdalen에서 자주범의귀가 희귀하여 이 식물을 채집하기 위하여 인근 Endalen을 채집 지역으로 추가하였다 (그림 2-1). Adventdalen은 자주범의귀를 제외하고 다섯 종의 식물을 충분히 채집할 수 있었다. 스발바르종자보관소 주변인 Blomsterdalen에서는 북극종꽃나무, 담자리꽃나무, 나도수영, 북극콩버들을 채집하였다.

다산기지 주변 채집지 중에서 Ossian Sarsfjellet에서 fjellet은 산 정상이라는 의미인데, 실제 식물을 채집한 지역은 해안가이므로 이곳의 지명은 이 지역을 뜻하는 Ossian Sars로 변경하였다. Blomstrandøya는 예정대로 식물을 채집하였는데, 섬의 남쪽과 동, 서쪽의 서로 식생 특징이 다른 지역에서 각각 식물을 채집하였다. 또한 Brandalpynten은 이 지역보다 식생이 더 풍부하고 NPI에서 모니터링을 하고 있는 Stuphallet 지역으로 변경하였다. Stuphallet에도 벼랑에 철새가 서식하고 있고 철새 서식지 앞으로 넓은 평지가 있어 다양한 식물이 서식하고 있었다. 자주범의귀 개체수가 부족하여 천이 초기지역이라 이 식물이 풍부한 Midtre Lovénbreen을 채집지로 추가하였다 (표 2-3). Blomstrandøya에서는 나도수영을 제외한 5종 식물, Stuphallet에서는 북극종꽃나무를 제외한 5종 식물, Ossian Sars에서는 6종 모두 채집하였다.



그림 2-1. 본 과제에서 식물을 채집한 지역

표 2-3. 스발바르 식물 채집지 GPS 정보와 우점종

Sampling Site		GPS	Vegetation
Adventdalen	Camp Barrents	78°10'13" 16°00'17"	<i>Cassiope tetragona</i> , <i>Dryas octopetala</i> <i>Salix polaris</i>
	near site A	78°10'17" 16°02'30"	<i>Cassiope tetragona</i> , <i>Dryas octopetala</i> <i>Salix polaris</i> , <i>Bistorta vivipara</i>
	near site B	78°10'01" 16°00'50"	
	near site C	78°10'34" 16°04'10"	<i>Cassiope tetragona</i> , <i>Dryas octopetala</i> <i>Salix polaris</i> , <i>Bistorta vivipara</i>
	near site D	78°10'21" 16°04'56"	<i>Cassiope tetragona</i> , <i>Dryas octopetala</i> <i>Salix polaris</i> , <i>Bistorta vivipara</i>
Blomsterdalen		78°14'08" 15°29'36"	<i>Cassiope tetragona</i> , <i>Dryas octopetala</i>
Blomstrandøya	site 1	78°59'18" 12°12'36"	<i>Dryas octopetala</i> , <i>Salix polaris</i>
	site 2	78°59'24" 12°04'38"	
Endalen		78°11'09" 15°45'39"	
Longyearbyen Cemetery		78°14'50" 15°29'37"	<i>Cassiope tetragona</i> , <i>Dryas octopetala</i> , <i>Bistorta vivipara</i>
Midtre Lovenbreen	site 2	78°53'50" 12°03'39"	<i>Saxifraga oppositifolia</i>
	site 3	78°53'58" 12°03'46"	<i>Saxifraga oppositifolia</i>
	site 4	78°54'06" 12°04'07"	<i>Salix polaris</i>
	site 5	78°54'19" 12°12'36"	<i>Salix polaris</i> , <i>Dryas octopetala</i>
Nybieen		78°12'08" 15°35'24"	
Ossian Sars		78°56'57" 12°26'03"	<i>Cassiope tetragona</i> , <i>Dryas octopetala</i> <i>Salix polaris</i>
Stuphallet		78°57'43" 11°38'27"	<i>Dryas octopetala</i> , <i>Salix polaris</i>
Svalbard Airport	seaside slope	78°14'53" 15°29'45"	Grasses, <i>Dryas octopetala</i> , <i>Oxyria</i> <i>digyna</i> , <i>Salix polaris</i> , <i>Saxifraga</i> <i>cernua</i>

분자마커 분석을 위하여 담자리꽃나무 111 개체, 북극종꽃나무에서 94 개체, 북극콩버들에서 129 개체, 나도수영에서 108 개체, 자주범의귀 111 개체, 총 553개체의 식물에서 각각 잎을 채집하였다 (표 2-4). 각 개체에서 중량(fresh weight) 1 g 이상의 잎을 잎줄기를 포함하여 채집하였고 북극종꽃나무와 자주범의귀의 경우 줄기와 잎의 구분이 어려워 줄기도 포함했다. 다른 식물은 한 개체에서 1 g 이상의 잎을 확보할 수 있었으나 씨범꼬리의 경우 한 개체의 잎이 2~4개로 적어서 1 g이 되지 않았다. 씨범꼬리는 무성아(bulbil)를 통해 무성생식을 하는데 이 무성아는 그것이 유래한 모 식물체와 유전 정보가 동일하다. 따라서 모여 나는 씨범꼬리는 동일한 유전정보를 갖는 모성아에서 유래했다는 가정 하에 모여서 서식하는 씨범꼬리를 한 개체로 보고 이들의 잎을 모았다.

1차년도에 염색체 정보 분석 결과 씨범꼬리는 염색체가 최대 132개로 배수화되어 있어 유전형 변이 정량화에 부적합한 식물로 판정되어 ecotype 분석 대상에서 제외하고 2차년도에 식물 채집에서도 제외하였다. 스발바르 ecotype과 비교 분석을 위하여 그린란드 식물을 일부 채집하였다 (표 2-4).

채집한 시료는 현장에서 즉시 실리카겔과 함께 밀봉하여 건조하였으며, 다산기지에 도착 즉시 냉동고에 넣어 시료를 동결하였다. 동결건조기에 넣어 24시간 이상 충분히 건조하였다. 건조가 완료된 시료는 잘게 부쇄 균질화하였다. 현장에서는 1~2 g 이상의 잎을 채집했으나 동결건조기에서 건조 후 건조량은 0.1 g 이하인 경우도 있었다 (표 2-5).

표 2-4. 본 과제에서 2021 ~ 2022년에 채집한 스발바르 대표 식물의 총 개체수

년도	국명	학명	개체수 (그린란드)
2021	나도수영	<i>Oxyria digyna</i>	46
	담자리꽃나무	<i>Dryas octopetala</i>	66
	북극종꽃나무	<i>Cassiope tetragona</i>	51
	북극콩버들	<i>Salix polaris</i>	66
	씨범꼬리	<i>Bistorta vivipara</i>	59
	자주범의귀	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	54
	소계		342
2022	나도수영	<i>Oxyria digyna</i>	62 (7)
	담자리꽃나무	<i>Dryas octopetala</i>	45
	북극종꽃나무	<i>Cassiope tetragona</i>	43 (7)
	북극콩버들	<i>Salix polaris</i>	63
	자주범의귀	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	57 (9)
	민담자리꽃나무	<i>Dryas integrifolia</i>	(8)
	북극버들	<i>Salix arctica</i>	(7)
소계		270 (23)	

표 2-5. 본 과제에서 2021년에 채집한 스발바르 대표 식물 목록과 건조량

No.	Date	Location	Plant Species	Raw No.	Korean name	Dry Weight (g)
1	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Bistorta vivipara</i>	71	씨범꼬리	0.4
2	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Bistorta vivipara</i>	72	씨범꼬리	0.2
3	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Bistorta vivipara</i>	73	씨범꼬리	0.3
4	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Bistorta vivipara</i>	74	씨범꼬리	0.4
5	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Bistorta vivipara</i>	75	씨범꼬리	0.2
6	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Bistorta vivipara</i>	76	씨범꼬리	0.3
7	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Bistorta vivipara</i>	7	씨범꼬리	0.2
8	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Bistorta vivipara</i>	8	씨범꼬리	0.4
9	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Bistorta vivipara</i>	9	씨범꼬리	0.2
10	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Bistorta vivipara</i>	1	씨범꼬리	0.1
11	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Bistorta vivipara</i>	2	씨범꼬리	0.2
12	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Bistorta vivipara</i>	3	씨범꼬리	0.2
13	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Bistorta vivipara</i>	4	씨범꼬리	0.1
14	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Bistorta vivipara</i>	5	씨범꼬리	0.4
15	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Bistorta vivipara</i>	6	씨범꼬리	0.4
16	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Bistorta vivipara</i>	10	씨범꼬리	0.2
17	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Bistorta vivipara</i>	11	씨범꼬리	0.2
18	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Bistorta vivipara</i>	12	씨범꼬리	0.1
19	2021/7/27	Adventdalen, Site A3	<i>Bistorta vivipara</i>	13	씨범꼬리	0.2
20	2021/7/27	Adventdalen, Site A3	<i>Bistorta vivipara</i>	14	씨범꼬리	0.1
21	2021/7/27	Adventdalen, Site A3	<i>Bistorta vivipara</i>	15	씨범꼬리	0.1
22	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Bistorta vivipara</i>	16	씨범꼬리	0.4
23	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Bistorta vivipara</i>	17	씨범꼬리	0.2
24	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Bistorta vivipara</i>	18	씨범꼬리	0.3
25	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Bistorta vivipara</i>	19	씨범꼬리	0.4
26	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Bistorta vivipara</i>	20	씨범꼬리	0.3
27	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Bistorta vivipara</i>	21	씨범꼬리	0.5
28	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Bistorta vivipara</i>	22	씨범꼬리	0.3
29	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Bistorta vivipara</i>	23	씨범꼬리	0.3
30	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Bistorta vivipara</i>	24	씨범꼬리	0.1
31	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Bistorta vivipara</i>	31	씨범꼬리	0.1
32	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Bistorta vivipara</i>	32	씨범꼬리	0.2
33	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Bistorta vivipara</i>	33	씨범꼬리	0.1
34	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Bistorta vivipara</i>	34	씨범꼬리	0.4
35	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Bistorta vivipara</i>	35	씨범꼬리	0.1
36	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Bistorta vivipara</i>	36	씨범꼬리	0.1
37	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Bistorta vivipara</i>	37	씨범꼬리	0.2
38	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	41	씨범꼬리	0.2
39	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	42	씨범꼬리	0.1
40	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	43	씨범꼬리	0.3
41	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	44	씨범꼬리	0.2

42	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	45	씨범꼬리	0.2
43	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	46	씨범꼬리	0.4
44	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	47	씨범꼬리	0.3
45	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	48	씨범꼬리	0.2
46	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	49	씨범꼬리	0.2
47	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	50	씨범꼬리	0.2
48	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	51	씨범꼬리	0.2
49	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Bistorta vivipara</i>	52	씨범꼬리	0.3
50	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	53	씨범꼬리	0.1
51	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	54	씨범꼬리	0.3
52	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	55	씨범꼬리	0.2
53	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	56	씨범꼬리	0.1
54	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	57	씨범꼬리	0.2
55	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	58	씨범꼬리	0.2
56	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	59	씨범꼬리	0.2
57	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	60	씨범꼬리	0.2
58	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	61	씨범꼬리	0.2
59	2021/8/3	Stuphallet	<i>Bistorta vivipara</i>	62	씨범꼬리	0.4
60	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	1	북극종꽃나무	0.7
61	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	2	북극종꽃나무	1.0
62	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	3	북극종꽃나무	0.6
63	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	4	북극종꽃나무	0.9
64	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	5	북극종꽃나무	1.1
65	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	6	북극종꽃나무	1.1
66	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	7	북극종꽃나무	0.4
67	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	8	북극종꽃나무	0.6
68	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	9	북극종꽃나무	0.6
69	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	10	북극종꽃나무	1.2
70	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Cassiope tetragona</i>	71	북극종꽃나무	1.1
71	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Cassiope tetragona</i>	72	북극종꽃나무	1.5
72	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Cassiope tetragona</i>	73	북극종꽃나무	1.5
73	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Cassiope tetragona</i>	74	북극종꽃나무	1.6
74	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Cassiope tetragona</i>	75	북극종꽃나무	0.9
75	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	11	북극종꽃나무	0.9
76	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	12	북극종꽃나무	0.7
77	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	13	북극종꽃나무	0.7
78	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	14	북극종꽃나무	1.1
79	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	15	북극종꽃나무	1.4
80	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	16	북극종꽃나무	1.3
81	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	17	북극종꽃나무	1.0
82	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	18	북극종꽃나무	0.7
83	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	19	북극종꽃나무	0.8
84	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Cassiope tetragona</i>	20	북극종꽃나무	0.9
85	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Cassiope tetragona</i>	21	북극종꽃나무	1.4

86	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Cassiope tetragona</i>	22	북극종꽃나무	1.5
87	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Cassiope tetragona</i>	23	북극종꽃나무	1.6
88	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Cassiope tetragona</i>	24	북극종꽃나무	1.2
89	2021/7/27	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	25	북극종꽃나무	1.4
90	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Cassiope tetragona</i>	26	북극종꽃나무	1.6
91	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Cassiope tetragona</i>	27	북극종꽃나무	0.9
92	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Cassiope tetragona</i>	28	북극종꽃나무	0.9
93	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Cassiope tetragona</i>	29	북극종꽃나무	1.3
94	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Cassiope tetragona</i>	30	북극종꽃나무	1.6
95	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Cassiope tetragona</i>	31	북극종꽃나무	0.7
96	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Cassiope tetragona</i>	32	북극종꽃나무	0.4
97	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Cassiope tetragona</i>	33	북극종꽃나무	1.0
98	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Cassiope tetragona</i>	34	북극종꽃나무	1.0
99	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Cassiope tetragona</i>	35	북극종꽃나무	1.1
100	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Cassiope tetragona</i>	36	북극종꽃나무	0.7
101	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	41	북극종꽃나무	0.5
102	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	42	북극종꽃나무	0.7
103	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	43	북극종꽃나무	0.5
104	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	44	북극종꽃나무	0.6
105	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	45	북극종꽃나무	0.8
106	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	46	북극종꽃나무	0.8
107	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	47	북극종꽃나무	0.7
108	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	48	북극종꽃나무	0.4
109	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	49	북극종꽃나무	0.8
110	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	50	북극종꽃나무	0.8
111	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	1	담자리꽃나무	0.5
112	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	2	담자리꽃나무	0.5
113	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	3	담자리꽃나무	0.3
114	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	4	담자리꽃나무	0.4
115	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	5	담자리꽃나무	0.4
116	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	6	담자리꽃나무	0.3
117	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	7	담자리꽃나무	0.5
118	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	8	담자리꽃나무	0.6
119	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	9	담자리꽃나무	0.4
120	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Dryas octopetala</i>	10	담자리꽃나무	0.5
121	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Dryas octopetala</i>	71	담자리꽃나무	0.5
122	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Dryas octopetala</i>	72	담자리꽃나무	0.6
123	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Dryas octopetala</i>	73	담자리꽃나무	0.8
124	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Dryas octopetala</i>	74	담자리꽃나무	0.6
125	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Dryas octopetala</i>	75	담자리꽃나무	0.6
126	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Dryas octopetala</i>	76	담자리꽃나무	0.5
127	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Dryas octopetala</i>	77	담자리꽃나무	0.7
128	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Dryas octopetala</i>	78	담자리꽃나무	0.6
129	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Dryas octopetala</i>	79	담자리꽃나무	0.5

130	2021/7/26	Longyearbyen Cemetery	<i>Dryas octopetala</i>	80	담자리꽃나무	0.6
131	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	11	담자리꽃나무	0.5
132	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	12	담자리꽃나무	0.5
133	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	13	담자리꽃나무	0.5
134	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	14	담자리꽃나무	0.5
135	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	15	담자리꽃나무	0.4
136	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	16	담자리꽃나무	0.5
137	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	17	담자리꽃나무	0.4
138	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	18	담자리꽃나무	0.4
139	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	19	담자리꽃나무	0.4
140	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Dryas octopetala</i>	20	담자리꽃나무	0.5
141	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Dryas octopetala</i>	21	담자리꽃나무	0.6
142	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Dryas octopetala</i>	22	담자리꽃나무	0.7
143	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Dryas octopetala</i>	23	담자리꽃나무	0.4
144	2021/7/27	Adventdalen, Site A3	<i>Dryas octopetala</i>	24	담자리꽃나무	0.6
145	2021/7/27	Adventdalen, Site A3	<i>Dryas octopetala</i>	25	담자리꽃나무	0.5
146	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Dryas octopetala</i>	26	담자리꽃나무	0.6
147	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Dryas octopetala</i>	27	담자리꽃나무	0.5
148	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Dryas octopetala</i>	28	담자리꽃나무	0.5
149	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Dryas octopetala</i>	29	담자리꽃나무	0.6
150	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Dryas octopetala</i>	30	담자리꽃나무	0.5
151	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Dryas octopetala</i>	31	담자리꽃나무	0.3
152	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Dryas octopetala</i>	32	담자리꽃나무	0.3
153	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Dryas octopetala</i>	33	담자리꽃나무	0.4
154	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Dryas octopetala</i>	34	담자리꽃나무	0.5
155	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Dryas octopetala</i>	35	담자리꽃나무	0.5
156	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Dryas octopetala</i>	36	담자리꽃나무	0.5
157	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	41	담자리꽃나무	0.7
158	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	42	담자리꽃나무	0.6
159	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	43	담자리꽃나무	0.4
160	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	44	담자리꽃나무	0.3
161	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	45	담자리꽃나무	0.3
162	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	46	담자리꽃나무	0.3
163	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	47	담자리꽃나무	0.3
164	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	48	담자리꽃나무	0.4
165	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	49	담자리꽃나무	0.3
166	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	50	담자리꽃나무	0.3
167	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	51	담자리꽃나무	0.2
168	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	52	담자리꽃나무	0.3
169	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	53	담자리꽃나무	0.3
170	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	54	담자리꽃나무	0.3
171	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	55	담자리꽃나무	0.3
172	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	56	담자리꽃나무	0.5
173	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	57	담자리꽃나무	0.3

174	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	58	담자리꽃나무	0.4
175	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	59	담자리꽃나무	0.4
176	2021/8/3	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	60	담자리꽃나무	0.2
177	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	1	나도수영	0.1
178	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	2	나도수영	0.3
179	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	3	나도수영	0.1
180	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	4	나도수영	0.5
181	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	5	나도수영	0.4
182	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	6	나도수영	0.4
183	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	7	나도수영	0.6
184	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	8	나도수영	0.4
185	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	9	나도수영	0.4
186	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Oxyria digyna</i>	10	나도수영	0.3
187	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Oxyria digyna</i>	71	나도수영	0.4
188	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Oxyria digyna</i>	72	나도수영	0.5
189	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Oxyria digyna</i>	73	나도수영	0.4
190	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Oxyria digyna</i>	74	나도수영	0.7
191	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Oxyria digyna</i>	75	나도수영	0.4
192	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Oxyria digyna</i>	11	나도수영	0.3
193	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Oxyria digyna</i>	12	나도수영	0.2
194	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Oxyria digyna</i>	13	나도수영	0.4
195	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Oxyria digyna</i>	76	나도수영	0.4
196	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Oxyria digyna</i>	77	나도수영	0.3
197	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Oxyria digyna</i>	78	나도수영	0.4
198	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Oxyria digyna</i>	79	나도수영	0.5
199	2021/7/26	Longyearbyen	<i>Oxyria digyna</i>	80	나도수영	0.3
200	2021/7/27	Adventdalen, Site A1	<i>Oxyria digyna</i>	14	나도수영	0.4
201	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Oxyria digyna</i>	15	나도수영	0.3
202	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Oxyria digyna</i>	16	나도수영	0.5
203	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Oxyria digyna</i>	17	나도수영	0.3
204	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Oxyria digyna</i>	18	나도수영	0.6
205	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Oxyria digyna</i>	19	나도수영	0.6
206	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Oxyria digyna</i>	20	나도수영	0.4
207	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Oxyria digyna</i>	31	나도수영	0.2
208	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Oxyria digyna</i>	32	나도수영	0.3
209	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Oxyria digyna</i>	33	나도수영	0.2
210	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Oxyria digyna</i>	34	나도수영	0.2
211	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Oxyria digyna</i>	35	나도수영	0.3
212	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	51	나도수영	0.2
213	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	52	나도수영	0.2
214	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	53	나도수영	0.4
215	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	54	나도수영	0.2
216	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	55	나도수영	0.5
217	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	56	나도수영	0.3

218	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	57	나도수영	0.1
219	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	58	나도수영	0.3
220	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	59	나도수영	0.2
221	2021/8/3	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	60	나도수영	0.3
222	-	-	<i>Oxyria digyna</i>	61	나도수영	0.3
223	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	1	북극콩버들	0.3
224	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	2	북극콩버들	0.2
225	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	3	북극콩버들	0.3
226	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	4	북극콩버들	0.6
227	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	5	북극콩버들	0.8
228	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	6	북극콩버들	0.5
229	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	7	북극콩버들	0.2
230	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	8	북극콩버들	0.8
231	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	9	북극콩버들	0.7
232	2021/7/25	Blomsterdalen	<i>Salix polaris</i>	10	북극콩버들	0.6
233	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Salix polaris</i>	71	북극콩버들(암)	0.4
234	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Salix polaris</i>	72	북극콩버들(암)	0.5
235	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Salix polaris</i>	73	북극콩버들(암)	0.3
236	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Salix polaris</i>	74	북극콩버들(수)	0.7
237	2021/7/26	Svalvard Airport	<i>Salix polaris</i>	75	북극콩버들(수)	0.4
238	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	11	북극콩버들	0.4
239	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	12	북극콩버들	0.5
240	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	13	북극콩버들	0.5
241	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	14	북극콩버들	0.4
242	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	15	북극콩버들	0.4
243	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	16	북극콩버들	0.5
244	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	17	북극콩버들	0.3
245	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	18	북극콩버들	0.3
246	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	19	북극콩버들	0.4
247	2021/7/26	Adventdalen Camp Barrents	<i>Salix polaris</i>	20	북극콩버들	0.5
248	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Salix polaris</i>	21	북극콩버들	0.4
249	2021/7/27	Adventdalen, below Site B4	<i>Salix polaris</i>	22	북극콩버들	0.4
250	2021/7/27	Adventdalen, Site B5	<i>Salix polaris</i>	23	북극콩버들	0.4
251	2021/7/27	Adventdalen, Site B5	<i>Salix polaris</i>	24	북극콩버들	0.5
252	2021/7/27	Adventdalen, Site B5	<i>Salix polaris</i>	25	북극콩버들	0.6
253	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Salix polaris</i>	26	북극콩버들	0.3
254	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Salix polaris</i>	27	북극콩버들	0.4
255	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Salix polaris</i>	28	북극콩버들	0.4
256	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Salix polaris</i>	29	북극콩버들	0.5
257	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Salix polaris</i>	30	북극콩버들	0.4
258	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Salix polaris</i>	31	북극콩버들	0.2
259	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Salix polaris</i>	32	북극콩버들	0.3
260	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Salix polaris</i>	33	북극콩버들	0.4
261	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Salix polaris</i>	34	북극콩버들	0.3

262	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Salix polaris</i>	35	북극콩버들	0.2
263	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Salix polaris</i>	36	북극콩버들	0.1
264	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 3	<i>Salix polaris</i>	61	북극콩버들	0.1
265	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 3	<i>Salix polaris</i>	62	북극콩버들	0.2
266	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 3	<i>Salix polaris</i>	63	북극콩버들	0.2
267	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 4	<i>Salix polaris</i>	64	북극콩버들	0.2
268	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 4	<i>Salix polaris</i>	65	북극콩버들	0.1
269	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 4	<i>Salix polaris</i>	66	북극콩버들	0.2
270	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 5	<i>Salix polaris</i>	67	북극콩버들	0.3
271	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 5	<i>Salix polaris</i>	68	북극콩버들	0.4
272	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 5	<i>Salix polaris</i>	69	북극콩버들	0.3
273	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	41	북극콩버들	0.2
274	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	42	북극콩버들	0.2
275	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	43	북극콩버들	0.1
276	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	44	북극콩버들	0.2
277	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	45	북극콩버들(암)	-
278	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	46	북극콩버들	0.4
279	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	47	북극콩버들	0.3
280	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	48	북극콩버들	0.4
281	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	49	북극콩버들	0.4
282	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	50	북극콩버들	0.4
283	2021/8/3	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	51	북극콩버들	0.1
284	2021/8/3	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	52	북극콩버들	0.2
285	2021/8/3	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	53	북극콩버들	0.3
286	2021/8/3	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	54	북극콩버들	0.1
287	2021/8/3	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	55	북극콩버들	0.3
288	2021/8/3	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	56	북극콩버들	0.3
289	2021/7/27	Adventdalen, near Site D	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	1	자주범의귀	0.1
290	2021/7/27	Adventdalen, Site D and C	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	2	자주범의귀	0.5
291	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	3	자주범의귀	0.3
292	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	4	자주범의귀	0.3
293	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	5	자주범의귀	0.2
294	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	6	자주범의귀	0.3
295	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	7	자주범의귀	0.3
296	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	8	자주범의귀	0.2
297	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	9	자주범의귀	0.4
298	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	10	자주범의귀	0.3
299	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	11	자주범의귀	0.5
300	2021/7/28	Endalen, right of OTCs	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	12	자주범의귀	0.6
301	2021/7/28	Endalen, left of OTC	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	13	자주범의귀	0.5
302	2021/7/28	Endalen, left of OTC	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	14	자주범의귀	0.3
303	2021/7/28	Endalen, left of OTC	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	15	자주범의귀	0.4
304	2021/7/28	Endalen, left of OTC	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	16	자주범의귀	0.6
305	2021/7/28	Endalen, left of OTC	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	17	자주범의귀	0.6

306	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	21	자주범의귀	-
307	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	22	자주범의귀	-
308	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	23	자주범의귀	-
309	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	24	자주범의귀	-
310	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	25	자주범의귀	-
311	2021/7/31	Ossian Sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	26	자주범의귀	-
312	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	63	자주범의귀	0.1
313	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	64	자주범의귀	0.4
314	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	65	자주범의귀	0.6
315	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 3	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	66	자주범의귀	0.4
316	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 3	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	67	자주범의귀	0.2
317	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 3	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	68	자주범의귀	0.1
318	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 4	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	69	자주범의귀	0.1
319	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 4	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	70	자주범의귀	0.2
320	2021/7/31	Midtre Lovenbreen Site 4	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	71	자주범의귀	-
321	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	41	자주범의귀	0.1
322	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	42	자주범의귀	0.1
323	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	43	자주범의귀	0.1
324	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	44	자주범의귀	0.1
325	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	45	자주범의귀	0.2
326	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	46	자주범의귀	0.2
327	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	47	자주범의귀	0.4
328	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	48	자주범의귀	0.4
329	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	49	자주범의귀	0.3
330	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	50	자주범의귀	0.2
331	2021/8/2	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	51	자주범의귀	0.3
332	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	52	자주범의귀	0.3
333	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	53	자주범의귀	0.2
334	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	54	자주범의귀	0.2
335	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	55	자주범의귀	0.2
336	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	56	자주범의귀	0.3
337	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	57	자주범의귀	0.4
338	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	58	자주범의귀	0.3
339	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	59	자주범의귀	0.1
340	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	60	자주범의귀	0.2
341	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	61	자주범의귀	0.2
342	2021/8/3	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	62	자주범의귀	0.2

2022년에는 6개 종 중에서 배수화가 많이 된 것으로 파악된 씨범꼬리를 제외하고 다른 식물을 각각 50개체 이상 채집하는 것을 목표로 하였다. 담자리꽃나무와 북극종꽃나무를 제외하고는 목표 개수인 50개체 이상 확보하였다. 2022년도 샘플링 결과 총 247개의 스발바르 식물을 수집하였다 (표 2-6). 2021년도 수집한 지역의 샘플링 수를 고려하여 개체수가 상대적으로 부족한 지역은 가중치를 두어 샘플링 수량을 조절하였다.

한편 북그린란드 연구팀을 통해 비교연구를 할 수 있는 식물 38개체를 Sirius Passet 지역에서 확보하였다.

수집된 샘플은 2021년과 동일하게 처리되었다. 현장에서는 종으로 된 황봉투에 식물의 잎을 담고 실리카겔과 함께 큰 지퍼백에 담아 1차적으로 수분을 제거하였다. 이후 동결건조기를 이용하여 1~2일 동안 완전히 건조시킨 후 15 ml 튜브에 담아 스파툴라를 이용하여 분쇄시켜 파우더 상태의 시료로 만들었다.

나도수영은 6개의 장소에서 (Adventdalen, Endalen, Bjørndalen, Blomstrandøya, Ossian sars, Stuphallet) 채집하였으며 총 62개체를 수집하였다. 이중 7개체는 그린란드의 Sirius Passet 지역에서 확보했다.

담자리꽃나무는 6개 장소에서 (Adventdalen, Endalen, Bjørndalen, Blomstrandøya, Ossian sars, Stuphallet) 수집되었으며 총 45개체가 수집되었고 그린란드의 Sirius Passet 지역에서는 유사종인 민담자리꽃나무 8개체를 수집하였다.

북극콩버들은 7개의 장소에서 (Adventdalen, Endalen, Bjørndalen, Blomstrandøya, Ossian sars, Midtre Lovénbreen, Stuphallet) 채집하였으며 총 63개체가 수집되었다. 또한 비슷한 종인 북극버들이 그린란드 Sirius Passet 지역에서 7개체 수집되었다.

자주범의귀는 6개 지역에서 (Adventdalen, Endalen, Blomstrandøya, Ossian sars, Stuphallet, Midtre Lovénbreen) 수집되었으며 Adventdalen 지역에서는 다른 식물에 비해 발견한 개체수가 적어 3개체 밖에 수집하지 못하였다. Bjørndalen 지역에서는 자주범의귀를 발견할 수 없어 수집할 수 없었다. Sirius Passet 지역에서는 9개체의 자주범의귀가 수집되었다.

북극종꽃나무는 6개 지역 (Adventdalen, Endalen, Bjørndalen, Blomstrandøya, Ossian sars, Sirius Passet)에서 수집하였으며 총 43개체를 수집하였고 이중 7개체는 그린란드의 Sirius Passet 지역에서 확보했다. Stuphallet 지역에서는 북극종꽃나무가 발견되지 않아 수집할 수 없었다.

표 2-6. 본 과제에서 2022년에 채집한 스발바르 대표 식물 목록과 건조량

No.	Date	Location	Plant Species	Raw No.	Korean name	Dry Weight (g)
1	2022-07-05	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	1	나도수영	0.39
2	2022-07-05	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	2	나도수영	0.249
3	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	3	나도수영	0.381
4	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	4	나도수영	0.486
5	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	5	나도수영	0.453
6	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	6	나도수영	0.488
7	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	7	나도수영	0.716
8	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	8	나도수영	0.608
9	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	9	나도수영	0.166
10	2022-07-06	Adventdalen	<i>Oxyria digyna</i>	10	나도수영	0.353
11	2022-07-06	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	11	나도수영	0.98
12	2022-07-06	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	12	나도수영	0.522
13	2022-07-06	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	13	나도수영	0.427
14	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	14	나도수영	0.43
15	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	15	나도수영	0.158
16	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	16	나도수영	0.377
17	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	17	나도수영	0.545
18	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	18	나도수영	0.444
19	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	19	나도수영	0.521
20	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	20	나도수영	0.275
21	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	21	나도수영	0.225
22	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	22	나도수영	0.879
23	2022-07-08	Endalen	<i>Oxyria digyna</i>	23	나도수영	0.531
24	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	24	나도수영	0.183
25	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	25	나도수영	0.195
26	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	26	나도수영	0.324
27	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	27	나도수영	0.123
28	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	28	나도수영	0.115
29	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	29	나도수영	0.153
30	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	30	나도수영	0.067
31	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	31	나도수영	0.076
32	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Oxyria digyna</i>	32	나도수영	0.199
33	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	33	나도수영	0.508
34	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	34	나도수영	0.056
35	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	35	나도수영	0.272
36	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	36	나도수영	0.257
37	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	37	나도수영	0.228
38	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	38	나도수영	0.18
39	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	39	나도수영	0.125
40	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	40	나도수영	0.112
41	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	41	나도수영	0.105

42	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	42	나도수영	0.188
43	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Oxyria digyna</i>	43	나도수영	0.596
44	2022-07-14	Ossian sars	<i>Oxyria digyna</i>	44	나도수영	0.899
45	2022-07-14	Ossian sars	<i>Oxyria digyna</i>	45	나도수영	0.745
46	2022-07-14	Ossian sars	<i>Oxyria digyna</i>	46	나도수영	0.552
47	2022-07-14	Ossian sars	<i>Oxyria digyna</i>	47	나도수영	0.614
48	2022-07-14	Ossian sars	<i>Oxyria digyna</i>	48	나도수영	0.464
49	2022-07-14	Ossian sars	<i>Oxyria digyna</i>	49	나도수영	0.172
50	2022-07-14	Ossian sars	<i>Oxyria digyna</i>	50	나도수영	0.205
51	2022-07-15	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	51	나도수영	0.454
52	2022-07-15	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	52	나도수영	0.565
53	2022-07-15	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	53	나도수영	0.469
54	2022-07-15	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	54	나도수영	0.392
55	2022-07-15	Stuphallet	<i>Oxyria digyna</i>	55	나도수영	0.566
56	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Oxyria digyna</i>	56	나도수영	-
57	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Oxyria digyna</i>	57	나도수영	-
58	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Oxyria digyna</i>	58	나도수영	-
59	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Oxyria digyna</i>	59	나도수영	-
60	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Oxyria digyna</i>	60	나도수영	-
61	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Oxyria digyna</i>	61	나도수영	-
62	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Oxyria digyna</i>	62	나도수영	-
63	2022-07-05	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	1	담자리꽃나무	0.853
64	2022-07-05	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	2	담자리꽃나무	0.338
65	2022-07-05	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	3	담자리꽃나무	0.423
66	2022-07-05	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	4	담자리꽃나무	0.596
67	2022-07-06	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	5	담자리꽃나무	0.734
68	2022-07-06	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	6	담자리꽃나무	1.21
69	2022-07-06	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	7	담자리꽃나무	0.871
70	2022-07-06	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	8	담자리꽃나무	0.829
71	2022-07-06	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	9	담자리꽃나무	0.377
72	2022-07-06	Adventdalen	<i>Dryas octopetala</i>	10	담자리꽃나무	0.916
73	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	11	담자리꽃나무	1.138
74	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	12	담자리꽃나무	1.213
75	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	13	담자리꽃나무	0.904
76	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	14	담자리꽃나무	1.086
77	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	15	담자리꽃나무	0.765
78	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	16	담자리꽃나무	1.14
79	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	17	담자리꽃나무	0.955
80	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	18	담자리꽃나무	1.008
81	2022-07-06	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	19	담자리꽃나무	0.812
82	2022-07-08	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	20	담자리꽃나무	0.577
83	2022-07-08	Endalen	<i>Dryas octopetala</i>	21	담자리꽃나무	0.733
84	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Dryas octopetala</i>	22	담자리꽃나무	0.855
85	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Dryas octopetala</i>	23	담자리꽃나무	0.447

86	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Dryas octopetala</i>	24	담자리꽃나무	0.964
87	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Dryas octopetala</i>	25	담자리꽃나무	1.277
88	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Dryas octopetala</i>	26	담자리꽃나무	0.723
89	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Dryas octopetala</i>	27	담자리꽃나무	0.714
90	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Dryas octopetala</i>	28	담자리꽃나무	0.946
91	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	29	담자리꽃나무	0.752
92	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	30	담자리꽃나무	1.031
93	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	31	담자리꽃나무	1.211
94	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	32	담자리꽃나무	1.09
95	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Dryas octopetala</i>	33	담자리꽃나무	0.488
96	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Dryas octopetala</i>	34	담자리꽃나무	0.536
97	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Dryas octopetala</i>	35	담자리꽃나무	1.069
98	2022-07-14	Ossian sars	<i>Dryas octopetala</i>	36	담자리꽃나무	0.533
99	2022-07-14	Ossian sars	<i>Dryas octopetala</i>	37	담자리꽃나무	0.799
100	2022-07-14	Ossian sars	<i>Dryas octopetala</i>	38	담자리꽃나무	0.9
101	2022-07-14	Ossian sars	<i>Dryas octopetala</i>	39	담자리꽃나무	1.017
102	2022-07-14	Ossian sars	<i>Dryas octopetala</i>	40	담자리꽃나무	0.84
103	2022-07-15	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	41	담자리꽃나무	0.884
104	2022-07-15	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	42	담자리꽃나무	0.914
105	2022-07-15	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	43	담자리꽃나무	0.824
106	2022-07-15	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	44	담자리꽃나무	0.83
107	2022-07-15	Stuphallet	<i>Dryas octopetala</i>	45	담자리꽃나무	0.899
108	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	1	민담자리꽃나무	-
109	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	2	민담자리꽃나무	-
110	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	3	민담자리꽃나무	-
111	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	4	민담자리꽃나무	-
112	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	5	민담자리꽃나무	-
113	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	6	민담자리꽃나무	-
114	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	7	민담자리꽃나무	-
115	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Dryas integrifolia</i>	8	민담자리꽃나무	-
116	2022-07-05	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	1	북극콩버들	0.85
117	2022-07-05	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	2	북극콩버들	0.51
118	2022-07-05	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	3	북극콩버들	0.37
119	2022-07-06	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	4	북극콩버들	0.96
120	2022-07-06	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	5	북극콩버들	0.608
121	2022-07-06	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	6	북극콩버들	0.729
122	2022-07-06	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	7	북극콩버들	0.49
123	2022-07-06	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	8	북극콩버들	0.58
124	2022-07-06	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	9	북극콩버들	0.886
125	2022-07-06	Adventdalen	<i>Salix polaris</i>	10	북극콩버들	0.767
126	2022-07-06	Endalen	<i>Salix polaris</i>	11	북극콩버들	0.992
127	2022-07-06	Endalen	<i>Salix polaris</i>	12	북극콩버들	1.393
128	2022-07-06	Endalen	<i>Salix polaris</i>	13	북극콩버들	0.917
129	2022-07-06	Endalen	<i>Salix polaris</i>	14	북극콩버들	1.757

130	2022-07-06	Endalen	<i>Salix polaris</i>	15	북극콩버들	0.931
131	2022-07-06	Endalen	<i>Salix polaris</i>	16	북극콩버들	1.821
132	2022-07-08	Endalen	<i>Salix polaris</i>	17	북극콩버들	0.741
133	2022-07-08	Endalen	<i>Salix polaris</i>	18	북극콩버들	0.967
134	2022-07-08	Endalen	<i>Salix polaris</i>	19	북극콩버들	1.035
135	2022-07-08	Endalen	<i>Salix polaris</i>	20	북극콩버들	0.806
136	2022-07-08	Endalen	<i>Salix polaris</i>	21	북극콩버들	0.806
137	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Salix polaris</i>	22	북극콩버들	-
138	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Salix polaris</i>	23	북극콩버들	0.032
139	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Salix polaris</i>	24	북극콩버들	0.043
140	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Salix polaris</i>	25	북극콩버들	0.883
141	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Salix polaris</i>	26	북극콩버들	0.828
142	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Salix polaris</i>	27	북극콩버들	0.693
143	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	28	북극콩버들	0.256
144	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	29	북극콩버들	0.155
145	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	30	북극콩버들	0.306
146	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	31	북극콩버들	0.224
147	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	32	북극콩버들	0.316
148	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	33	북극콩버들	0.386
149	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	34	북극콩버들	0.325
150	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	35	북극콩버들	0.416
151	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Salix polaris</i>	36	북극콩버들	0.174
152	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Salix polaris</i>	37	북극콩버들	0.294
153	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Salix polaris</i>	38	북극콩버들	0.155
154	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Salix polaris</i>	39	북극콩버들	0.283
155	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Salix polaris</i>	40	북극콩버들	0.212
156	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Salix polaris</i>	41	북극콩버들	0.248
157	2022-07-14	Ossian sars	<i>Salix polaris</i>	42	북극콩버들	0.316
158	2022-07-14	Ossian sars	<i>Salix polaris</i>	43	북극콩버들	0.332
159	2022-07-14	Ossian sars	<i>Salix polaris</i>	44	북극콩버들	0.469
160	2022-07-14	Ossian sars	<i>Salix polaris</i>	45	북극콩버들	0.374
161	2022-07-14	Ossian sars	<i>Salix polaris</i>	46	북극콩버들	0.368
162	2022-07-14	Ossian sars	<i>Salix polaris</i>	47	북극콩버들	0.19
163	2022-07-14	Ossian sars	<i>Salix polaris</i>	48	북극콩버들	0.426
164	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site1	<i>Salix polaris</i>	49	북극콩버들	0.434
165	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site1	<i>Salix polaris</i>	50	북극콩버들	0.309
166	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site1	<i>Salix polaris</i>	51	북극콩버들	0.538
167	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site2	<i>Salix polaris</i>	52	북극콩버들	0.431
168	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site2	<i>Salix polaris</i>	53	북극콩버들	1.06
169	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site2	<i>Salix polaris</i>	54	북극콩버들	0.875
170	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site3	<i>Salix polaris</i>	55	북극콩버들	0.308
171	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site3	<i>Salix polaris</i>	56	북극콩버들	0.399
172	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site3	<i>Salix polaris</i>	57	북극콩버들	0.79
173	2022-07-14	Midtre Lovénbreen Corbel	<i>Salix polaris</i>	58	북극콩버들	0.409

174	2022-07-15	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	59	북극콩버들	0.539
175	2022-07-15	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	60	북극콩버들	0.613
176	2022-07-15	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	61	북극콩버들	0.642
177	2022-07-15	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	62	북극콩버들	0.902
178	2022-07-15	Stuphallet	<i>Salix polaris</i>	63	북극콩버들	0.577
179	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Salix arctica</i>	1	북극버들	-
180	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Salix arctica</i>	2	북극버들	-
181	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Salix arctica</i>	3	북극버들	-
182	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Salix arctica</i>	4	북극버들	-
183	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Salix arctica</i>	5	북극버들	-
184	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Salix arctica</i>	6	북극버들	-
185	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Salix arctica</i>	7	북극버들	-
186	2022-07-05	Adventdalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	1	자주범의귀	0.228
187	2022-07-05	Adventdalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	2	자주범의귀	0.195
188	2022-07-06	Adventdalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	7	자주범의귀	0.31
189	2022-07-06	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	8	자주범의귀	0.387
190	2022-07-06	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	3	자주범의귀	0.268
191	2022-07-06	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	4	자주범의귀	0.313
192	2022-07-06	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	5	자주범의귀	0.479
193	2022-07-06	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	6	자주범의귀	0.174
194	2022-07-08	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	9	자주범의귀	0.363
195	2022-07-08	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	10	자주범의귀	0.301
196	2022-07-08	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	11	자주범의귀	0.199
197	2022-07-08	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	12	자주범의귀	0.38
198	2022-07-08	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	13	자주범의귀	0.686
199	2022-07-08	Endalen	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	14	자주범의귀	0.413
200	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	15	자주범의귀	0.673
201	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	16	자주범의귀	0.138
202	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	17	자주범의귀	0.542
203	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	18	자주범의귀	0.366
204	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	19	자주범의귀	0.387
205	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	20	자주범의귀	0.561
206	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	21	자주범의귀	0.587
207	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	22	자주범의귀	0.451
208	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	23	자주범의귀	0.529
209	2022-07-13	Blomstrandøya site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	24	자주범의귀	0.53
210	2022-07-14	Ossian sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	25	자주범의귀	0.255
211	2022-07-14	Ossian sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	26	자주범의귀	0.319
212	2022-07-14	Ossian sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	27	자주범의귀	0.199
213	2022-07-14	Ossian sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	28	자주범의귀	0.404
214	2022-07-14	Ossian sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	29	자주범의귀	0.263
215	2022-07-14	Ossian sars	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	30	자주범의귀	0.153
216	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site1	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	31	자주범의귀	0.476
217	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site1	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	32	자주범의귀	0.12

218	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site1	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	33	자주범의귀	0.288
219	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	34	자주범의귀	0.449
220	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	35	자주범의귀	0.735
221	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	36	자주범의귀	0.579
222	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site3	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	37	자주범의귀	0.536
223	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site3	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	38	자주범의귀	0.839
224	2022-07-14	Midtre Lovénbreen site3	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	39	자주범의귀	0.493
225	2022-07-14	Midtre Lovénbreen Corbel	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	40	자주범의귀	0.651
226	2022-07-14	Midtre Lovénbreen Corbel	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	41	자주범의귀	0.399
227	2022-07-14	Midtre Lovénbreen Corbel	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	42	자주범의귀	0.231
228	2022-07-15	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	43	자주범의귀	0.942
229	2022-07-15	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	44	자주범의귀	0.46
230	2022-07-15	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	45	자주범의귀	0.474
231	2022-07-15	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	46	자주범의귀	0.731
232	2022-07-15	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	47	자주범의귀	0.301
233	2022-07-15	Stuphallet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	48	자주범의귀	0.603
234	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	49	자주범의귀	-
235	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	50	자주범의귀	-
236	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	51	자주범의귀	-
237	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	52	자주범의귀	-
238	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	53	자주범의귀	-
239	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	54	자주범의귀	-
240	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	55	자주범의귀	-
241	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	56	자주범의귀	-
242	2022-07-15	Sirius Passet	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	57	자주범의귀	-
243	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	1	북극종꽃나무	2.413
244	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	2	북극종꽃나무	2.116
245	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	3	북극종꽃나무	2.556
246	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	4	북극종꽃나무	2.366
247	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	5	북극종꽃나무	1.868
248	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	6	북극종꽃나무	1.601
249	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	7	북극종꽃나무	2.205
250	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	8	북극종꽃나무	2.631
251	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	9	북극종꽃나무	1.934
252	2022-07-06	Adventdalen	<i>Cassiope tetragona</i>	10	북극종꽃나무	2.662
253	2022-07-06	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	11	북극종꽃나무	2.157
254	2022-07-06	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	12	북극종꽃나무	3.193
255	2022-07-06	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	13	북극종꽃나무	2.375
256	2022-07-06	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	14	북극종꽃나무	1.811
257	2022-07-06	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	15	북극종꽃나무	2.681
258	2022-07-08	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	16	북극종꽃나무	1.948
259	2022-07-08	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	17	북극종꽃나무	1.273
260	2022-07-08	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	18	북극종꽃나무	1.196
261	2022-07-08	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	19	북극종꽃나무	1.477

262	2022-07-08	Endalen	<i>Cassiope tetragona</i>	20	북극종꽃나무	1.479
263	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Cassiope tetragona</i>	21	북극종꽃나무	1.682
264	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Cassiope tetragona</i>	22	북극종꽃나무	1.54
265	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Cassiope tetragona</i>	23	북극종꽃나무	1.167
266	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Cassiope tetragona</i>	24	북극종꽃나무	1.827
267	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Cassiope tetragona</i>	25	북극종꽃나무	1.631
268	2022-07-07	Bjørndalen	<i>Cassiope tetragona</i>	26	북극종꽃나무	1.864
269	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	27	북극종꽃나무	1.106
270	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	28	북극종꽃나무	2.247
271	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	29	북극종꽃나무	1.178
272	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	30	북극종꽃나무	1.158
273	2022-07-13	Blomstrandøya	<i>Cassiope tetragona</i>	31	북극종꽃나무	1.259
274	2022-07-14	Ossian sars	<i>Cassiope tetragona</i>	32	북극종꽃나무	1.525
275	2022-07-14	Ossian sars	<i>Cassiope tetragona</i>	33	북극종꽃나무	1.508
276	2022-07-14	Ossian sars	<i>Cassiope tetragona</i>	34	북극종꽃나무	1.202
277	2022-07-14	Ossian sars	<i>Cassiope tetragona</i>	35	북극종꽃나무	1.57
278	2022-07-14	Ossian sars	<i>Cassiope tetragona</i>	36	북극종꽃나무	1.448
279	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Cassiope tetragona</i>	37	북극종꽃나무	-
280	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Cassiope tetragona</i>	38	북극종꽃나무	-
281	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Cassiope tetragona</i>	39	북극종꽃나무	-
282	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Cassiope tetragona</i>	40	북극종꽃나무	-
283	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Cassiope tetragona</i>	41	북극종꽃나무	-
284	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Cassiope tetragona</i>	42	북극종꽃나무	-
285	2022-07-16	Sirius Passet	<i>Cassiope tetragona</i>	43	북극종꽃나무	-

극지연구소

2. 스발바르 식물 5종의 고용량 분자 마커 분석

가. 스발바르 식물 5종의 DNA 추출

씨범꼬리는 염색체 정보 확인 결과 염색체가 최대 132개이고 배수화되어 있어 유전형 변이 정량화에 부적합한 식물로 판단되어 본 분자 마커 분석에서 제외되었다. 채집한 스발바르 식물의 잎은 절반씩 나눠 각각 DNA 추출과 대사체 분석에 사용하였다. DNA를 추출하기 위한 식물 샘플은 채집 후 바로 동결건조 시켜 수분이 없는 상태로 준비하였고 전처리 작업으로 막자사발을 이용하여 조직을 분쇄하여 파우더 상태의 시료로 만들었다. DNA 추출에는 GeneAll Biotechnology사의 GeneAll®Exgene™ Plant SV mini Kit를 사용하였다. DNA 추출은 다음과 같이 진행하였다.

- ① DNA 추출할 식물의 분쇄 시료를 100 mg (wet) 또는 25 mg (dried)를 준비하는데 수율을 높이기 위해 dried된 시료를 증량하여 50~80 mg을 2.0 ml microcentrifuge tube에 나누어 담았다.
- ② PL buffer 400 µl와 RNase A (100 mg / ml) 4 µl를 넣고 vortex 시켰다.
- ③ 65°C 항온수조에 넣고 3~4 시간 반응시키며 6~8번 정도 vortex 시켜주었다.
- ④ PD buffer를 140 µl 넣고 vortex하여 섞어주며 얼음에 7분 정도 두었다. 이후 5분 30초 동안 14,000 rpm으로 원심분리했다.
- ⑤ 상등액을 EzSep™ filter (blue) 컬럼에 넣고 2분 동안 14,000 rpm으로 원심분리했다.
- ⑥ 여과액에 1.5배 용량만큼 BD buffer 용액을 넣고 15회 정도 pipetting 하였다.
- ⑦ 혼합물을 GeneAll® SV column에 700 µl 넣고 8,000 rpm에서 1분간 원심분리한 후 여과액은 버렸다. 이후 남은 혼합액을 모두 넣고 같은 과정을 진행하였다.
- ⑧ SV column에 CW buffer 700 µl를 넣고 8,000 rpm으로 1분간 원심분리하고 여과액은 버렸다.
- ⑨ CW buffer 300 µl를 넣고 14,000 rpm으로 2분간 원심분리했고 이후 14,000 rpm으로 1분간 한번 더 원심분리했다.
- ⑩ SV column을 새로운 1.5 ml 튜브로 옮기고 AE buffer를 column의 membrane에 잘 스며들도록 하여 50 µl를 첨가하고 1~1.5시간 상온에서 녹인 후 8,000 rpm으로 1분 동안 원심분리했다. 이 과정을 한번 더 진행하여 총 100 µl의 용액을 획득하였다. 추출된 DNA는 nano drop을 통해 농도와 순도를 확인하였으며 전기영동을 통해 DNA 밴드 형성여부와 깨짐현상 및 RNA 등을 확인하였다.

2021년 채집한 식물은 나도수영(*Oxyria digyna*) 46 개체 중 45 개체, 담자리꽃나무(*Dryas octopetala*) 66 개체, 북극종꽃나무(*Cassiope tetragona*) 51 개체, 북극콩버들(*Salix polaris*) 66 개체 중 65개체, 씨범꼬리(*Bistorta vivipara*) 59 개체 중 50 개체, 자주범의귀(*Saxifraga oppositifolia*) 54 개체 중 45개체 총 322개체에서 DNA를 추출하였다 (표 2-7). 추출한 DNA는 3% agarose gel에 30분간 running 하여 quality를 확인하였다 (그림 2-2).

표 2-7. 2021년 채집 식물에서 추출한 DNA의 정량 및 순도

No.	Name	Raw No.	Conc. (ng/ μ l)	A230 (10 mm)	A260 (10 mm)	A280 (10 mm)	A260 /A280	A260 /A230
1	<i>Bistorta vivipara</i>	71	15.350	0.144	0.304	0.191	1.582	2.088
2	<i>Bistorta vivipara</i>	72	35.900	0.381	0.711	0.385	1.832	1.851
3	<i>Bistorta vivipara</i>	73	33.300	0.349	0.662	0.360	1.830	1.887
4	<i>Bistorta vivipara</i>	74	40.850	0.407	0.816	0.444	1.836	2.002
5	<i>Bistorta vivipara</i>	75	18.800	0.237	0.374	0.212	1.757	1.573
6	<i>Bistorta vivipara</i>	76	32.300	0.559	0.641	0.378	1.687	1.145
7	<i>Bistorta vivipara</i>	7	23.650	0.302	0.471	0.255	1.840	1.556
8	<i>Bistorta vivipara</i>	8	26.200	0.335	0.523	0.296	1.764	1.560
9	<i>Bistorta vivipara</i>	9	34.250	0.335	0.678	0.383	1.756	2.003
10	<i>Bistorta vivipara</i>	1	30.050	0.398	0.604	0.329	1.844	1.522
11	<i>Bistorta vivipara</i>	2	35.450	0.369	0.704	0.382	1.832	1.896
12	<i>Bistorta vivipara</i>	3	19.800	0.302	0.388	0.214	1.784	1.277
13	<i>Bistorta vivipara</i>	4	20.450	0.240	0.401	0.214	1.842	1.649
14	<i>Bistorta vivipara</i>	5	19.850	0.257	0.396	0.240	1.647	1.539
15	<i>Bistorta vivipara</i>	6	48.300	0.536	0.967	0.535	1.809	1.806
16	<i>Bistorta vivipara</i>	10	24.350	0.195	0.481	0.260	1.831	2.423
17	<i>Bistorta vivipara</i>	11	62.750	0.497	1.254	0.689	1.819	2.520
18	<i>Bistorta vivipara</i>	12	36.150	0.349	0.716	0.387	1.835	2.031
19	<i>Bistorta vivipara</i>	13	33.550	0.324	0.666	0.373	1.775	2.040
20	<i>Bistorta vivipara</i>	14	10.600	0.108	0.211	0.119	1.767	1.945
21	<i>Bistorta vivipara</i>	15	-	-	-	-	-	-
22	<i>Bistorta vivipara</i>	16	67.000	0.710	1.348	0.743	1.823	1.909
23	<i>Bistorta vivipara</i>	17	44.950	0.487	0.909	0.507	1.809	1.885
24	<i>Bistorta vivipara</i>	18	66.000	0.637	1.325	0.715	1.859	2.089
25	<i>Bistorta vivipara</i>	19	41.650	0.461	0.834	0.474	1.761	1.811
26	<i>Bistorta vivipara</i>	20	42.550	0.458	0.859	0.486	1.780	1.891
27	<i>Bistorta vivipara</i>	21	24.400	0.364	0.487	0.295	1.649	1.337
28	<i>Bistorta vivipara</i>	22	43.100	0.427	0.868	0.492	1.774	2.048
29	<i>Bistorta vivipara</i>	23	45.650	0.479	0.916	0.517	1.776	1.918
30	<i>Bistorta vivipara</i>	24	34.500	0.366	0.687	0.380	1.802	1.870
31	<i>Bistorta vivipara</i>	31	-	-	-	-	-	-
32	<i>Bistorta vivipara</i>	32	64.600	0.683	1.303	0.727	1.804	1.923
33	<i>Bistorta vivipara</i>	33	-	-	-	-	-	-
34	<i>Bistorta vivipara</i>	34	57.900	0.688	1.166	0.638	1.838	1.703
35	<i>Bistorta vivipara</i>	35	-	-	-	-	-	-
36	<i>Bistorta vivipara</i>	36	-	-	-	-	-	-
37	<i>Bistorta vivipara</i>	37	40.250	0.494	0.813	0.466	1.758	1.656
38	<i>Bistorta vivipara</i>	41	53.650	0.575	1.081	0.615	1.768	1.892
39	<i>Bistorta vivipara</i>	42	58.750	0.563	1.180	0.658	1.799	2.106
40	<i>Bistorta vivipara</i>	43	59.100	0.582	1.185	0.660	1.799	2.041
41	<i>Bistorta vivipara</i>	44	33.200	0.346	0.656	0.356	1.824	1.876
42	<i>Bistorta vivipara</i>	45	34.350	0.395	0.684	0.389	1.753	1.726
43	<i>Bistorta vivipara</i>	46	40.750	0.519	0.829	0.463	1.815	1.614

44	<i>Bistorta vivipara</i>	47	49.150	0.549	0.995	0.564	1.781	1.831
45	<i>Bistorta vivipara</i>	48	-	-	-	-	-	-
46	<i>Bistorta vivipara</i>	49	45.550	0.496	0.915	0.518	1.772	1.852
47	<i>Bistorta vivipara</i>	50	90.600	1.021	1.804	1.019	1.764	1.761
48	<i>Bistorta vivipara</i>	51	41.850	0.405	0.832	0.497	1.667	2.041
49	<i>Bistorta vivipara</i>	52	70.650	0.621	1.418	0.796	1.786	2.294
50	<i>Bistorta vivipara</i>	53	-	-	-	-	-	-
51	<i>Bistorta vivipara</i>	54	50.800	0.463	1.009	0.584	1.719	2.162
52	<i>Bistorta vivipara</i>	55	102.85	0.977	2.065	1.151	1.800	2.123
53	<i>Bistorta vivipara</i>	56	-	-	-	-	-	-
54	<i>Bistorta vivipara</i>	57	83.850	0.769	1.680	0.943	1.784	2.189
55	<i>Bistorta vivipara</i>	58	106.70	1.013	2.139	1.182	1.813	2.117
56	<i>Bistorta vivipara</i>	59	55.500	0.486	1.112	0.627	1.776	2.293
57	<i>Bistorta vivipara</i>	60	-	-	-	-	-	-
58	<i>Bistorta vivipara</i>	61	74.900	0.751	1.501	0.838	1.794	2.003
59	<i>Bistorta vivipara</i>	62	118.75	1.080	2.377	1.310	1.816	2.203
60	<i>Cassiope tetragona</i>	1	33.550	0.214	0.672	0.370	1.818	3.150
61	<i>Cassiope tetragona</i>	2	27.550	0.100	0.542	0.305	1.755	5.055
62	<i>Cassiope tetragona</i>	3	41.400	0.266	0.820	0.448	1.816	3.022
63	<i>Cassiope tetragona</i>	4	31.200	0.213	0.622	0.343	1.809	2.902
64	<i>Cassiope tetragona</i>	5	18.350	0.180	0.362	0.214	1.676	1.984
65	<i>Cassiope tetragona</i>	6	31.100	0.191	0.618	0.344	1.787	3.190
66	<i>Cassiope tetragona</i>	7	40.650	0.291	0.818	0.444	1.852	2.843
67	<i>Cassiope tetragona</i>	8	17.000	0.072	0.331	0.199	1.635	4.198
68	<i>Cassiope tetragona</i>	9	37.900	0.259	0.752	0.400	1.867	2.860
69	<i>Cassiope tetragona</i>	10	21.050	0.129	0.422	0.226	1.871	3.289
70	<i>Cassiope tetragona</i>	71	27.450	0.180	0.544	0.301	1.794	2.968
71	<i>Cassiope tetragona</i>	72	38.250	0.281	0.761	0.408	1.857	2.684
72	<i>Cassiope tetragona</i>	73	18.800	0.212	0.371	0.214	1.717	1.733
73	<i>Cassiope tetragona</i>	74	41.450	0.286	0.831	0.444	1.876	2.919
74	<i>Cassiope tetragona</i>	75	31.500	0.212	0.625	0.324	1.915	2.903
75	<i>Cassiope tetragona</i>	11	21.850	0.161	0.444	0.246	1.828	2.838
76	<i>Cassiope tetragona</i>	12	25.300	0.167	0.505	0.280	1.801	3.012
77	<i>Cassiope tetragona</i>	13	21.700	0.123	0.437	0.240	1.831	3.617
78	<i>Cassiope tetragona</i>	14	19.200	0.135	0.393	0.230	1.738	3.048
79	<i>Cassiope tetragona</i>	15	32.200	0.298	0.646	0.357	1.814	2.176
80	<i>Cassiope tetragona</i>	16	20.850	0.199	0.417	0.251	1.661	2.095
81	<i>Cassiope tetragona</i>	17	19.950	0.131	0.404	0.214	1.909	3.167
82	<i>Cassiope tetragona</i>	18	15.600	0.091	0.315	0.168	1.891	3.545
83	<i>Cassiope tetragona</i>	19	24.200	0.206	0.490	0.272	1.820	2.420
84	<i>Cassiope tetragona</i>	20	22.550	0.220	0.461	0.261	1.797	2.148
85	<i>Cassiope tetragona</i>	21	30.250	0.267	0.610	0.337	1.822	2.309
86	<i>Cassiope tetragona</i>	22	46.450	0.381	0.940	0.521	1.822	2.511
87	<i>Cassiope tetragona</i>	23	27.250	0.274	0.538	0.299	1.781	1.940
88	<i>Cassiope tetragona</i>	24	21.600	0.152	0.427	0.235	1.800	2.752
89	<i>Cassiope tetragona</i>	25	37.050	0.349	0.755	0.423	1.812	2.212

90	<i>Cassiope tetragona</i>	26	28.650	0.255	0.576	0.317	1.825	2.274
91	<i>Cassiope tetragona</i>	27	21.950	0.183	0.437	0.240	1.814	2.373
92	<i>Cassiope tetragona</i>	28	31.850	0.257	0.635	0.344	1.841	2.459
93	<i>Cassiope tetragona</i>	29	16.800	0.147	0.338	0.185	1.836	2.317
94	<i>Cassiope tetragona</i>	30	34.700	0.338	0.698	0.386	1.817	2.078
95	<i>Cassiope tetragona</i>	31	18.200	0.172	0.369	0.203	1.838	2.180
96	<i>Cassiope tetragona</i>	32	15.050	0.127	0.304	0.173	1.771	2.427
97	<i>Cassiope tetragona</i>	33	26.900	0.254	0.535	0.302	1.764	2.093
98	<i>Cassiope tetragona</i>	34	41.350	0.436	0.840	0.454	1.875	1.955
99	<i>Cassiope tetragona</i>	35	16.700	0.215	0.335	0.205	1.637	1.561
100	<i>Cassiope tetragona</i>	36	24.750	0.241	0.495	0.273	1.813	2.054
101	<i>Cassiope tetragona</i>	41	15.000	0.187	0.304	0.173	1.775	1.639
102	<i>Cassiope tetragona</i>	42	15.500	0.191	0.312	0.180	1.742	1.640
103	<i>Cassiope tetragona</i>	43	12.600	0.143	0.253	0.142	1.787	1.775
104	<i>Cassiope tetragona</i>	44	10.550	0.158	0.203	0.111	1.773	1.271
105	<i>Cassiope tetragona</i>	45	13.850	0.166	0.271	0.146	1.822	1.610
106	<i>Cassiope tetragona</i>	46	17.100	0.193	0.340	0.179	1.890	1.754
107	<i>Cassiope tetragona</i>	47	6.4500	0.021	0.132	0.071	1.897	7.167
108	<i>Cassiope tetragona</i>	48	12.050	0.090	0.236	0.127	1.826	2.537
109	<i>Cassiope tetragona</i>	49	18.700	0.067	0.370	0.204	1.798	5.268
110	<i>Cassiope tetragona</i>	50	11.200	0.071	0.222	0.131	1.684	3.068
111	<i>Dryas octopetala</i>	1	115.60	1.282	2.320	1.274	1.826	1.815
112	<i>Dryas octopetala</i>	2	51.000	0.403	1.032	0.582	1.789	2.609
113	<i>Dryas octopetala</i>	3	11.700	0.030	0.232	0.120	1.918	7.313
114	<i>Dryas octopetala</i>	4	23.800	0.138	0.484	0.249	1.975	3.662
115	<i>Dryas octopetala</i>	5	25.050	0.128	0.500	0.270	1.849	3.884
116	<i>Dryas octopetala</i>	6	25.450	0.107	0.504	0.255	1.958	4.545
117	<i>Dryas octopetala</i>	7	15.100	0.280	0.478	0.360	1.641	2.904
118	<i>Dryas octopetala</i>	8	19.350	0.087	0.389	0.200	1.955	4.553
119	<i>Dryas octopetala</i>	9	14.800	0.050	0.301	0.162	1.885	6.578
120	<i>Dryas octopetala</i>	10	36.400	0.214	0.729	0.381	1.916	3.418
121	<i>Dryas octopetala</i>	71	50.250	0.444	1.017	0.531	1.936	2.326
122	<i>Dryas octopetala</i>	72	78.400	0.689	1.586	0.870	1.840	2.337
123	<i>Dryas octopetala</i>	73	58.450	0.431	1.172	0.616	1.907	2.731
124	<i>Dryas octopetala</i>	74	25.550	0.164	0.512	0.269	1.907	3.135
125	<i>Dryas octopetala</i>	75	57.450	0.436	1.158	0.602	1.938	2.691
126	<i>Dryas octopetala</i>	76	252.35	2.824	5.066	2.628	1.934	1.799
127	<i>Dryas octopetala</i>	77	133.10	1.545	2.674	1.417	1.895	1.736
128	<i>Dryas octopetala</i>	78	11.250	0.025	0.233	0.145	1.642	13.24
129	<i>Dryas octopetala</i>	79	25.800	0.170	0.526	0.291	1.836	3.225
130	<i>Dryas octopetala</i>	80	83.200	1.302	1.781	1.074	1.739	1.404
131	<i>Dryas octopetala</i>	11	7.4000	0.025	0.156	0.102	1.574	8.706
132	<i>Dryas octopetala</i>	12	9.9000	0.013	0.201	0.122	1.664	19.80
133	<i>Dryas octopetala</i>	13	136.35	2.006	2.732	1.506	1.817	1.363
134	<i>Dryas octopetala</i>	14	5.7500	0.332	0.104	0.068	1.456	0.335
135	<i>Dryas octopetala</i>	15	211.00	2.631	4.234	2.228	1.906	1.613

136	<i>Dryas octopetala</i>	16	37.200	0.239	0.748	0.421	1.784	3.166
137	<i>Dryas octopetala</i>	17	40.800	0.524	0.823	0.493	1.679	1.578
138	<i>Dryas octopetala</i>	18	15.500	0.093	0.310	0.180	1.722	3.333
139	<i>Dryas octopetala</i>	19	16.900	0.054	0.334	0.189	1.751	5.828
140	<i>Dryas octopetala</i>	20	14.850	0.043	0.298	0.152	1.967	7.071
141	<i>Dryas octopetala</i>	21	44.900	0.525	0.897	0.528	1.698	1.707
142	<i>Dryas octopetala</i>	22	2.7000	0.001	0.038	0.029	1.200	3.176
143	<i>Dryas octopetala</i>	23	22.650	0.154	0.464	0.265	1.783	3.168
144	<i>Dryas octopetala</i>	24	17.450	0.088	0.356	0.206	1.754	4.309
145	<i>Dryas octopetala</i>	25	15.550	0.042	0.304	0.169	1.767	6.347
146	<i>Dryas octopetala</i>	26	4.4000	-0.052	0.091	0.042	2.256	-1.600
147	<i>Dryas octopetala</i>	27	14.600	0.063	0.295	0.156	1.908	4.867
148	<i>Dryas octopetala</i>	28	253.70	3.264	5.086	2.657	1.918	1.560
149	<i>Dryas octopetala</i>	29	4.9500	0.166	0.090	0.046	1.800	0.566
150	<i>Dryas octopetala</i>	30	20.000	0.521	0.400	0.275	1.455	0.768
151	<i>Dryas octopetala</i>	31	35.100	0.572	0.699	0.447	1.560	1.221
152	<i>Dryas octopetala</i>	32	30.650	0.246	0.614	0.362	1.698	2.502
153	<i>Dryas octopetala</i>	33	5.2500	-0.024	0.112	0.087	1.313	-3.387
154	<i>Dryas octopetala</i>	34	110.35	1.702	2.217	1.237	1.799	1.304
155	<i>Dryas octopetala</i>	35	20.750	0.208	0.434	0.277	1.609	2.196
156	<i>Dryas octopetala</i>	36	102.15	1.445	2.059	1.150	1.802	1.430
157	<i>Dryas octopetala</i>	41	197.00	2.164	3.946	2.066	1.913	1.826
158	<i>Dryas octopetala</i>	42	82.000	0.799	1.642	0.902	1.822	2.058
159	<i>Dryas octopetala</i>	43	35.550	0.331	0.713	0.421	1.697	2.161
160	<i>Dryas octopetala</i>	44	79.500	1.153	1.602	0.930	1.732	1.394
161	<i>Dryas octopetala</i>	45	350.15	3.476	7.033	3.435	2.057	2.032
162	<i>Dryas octopetala</i>	46	106.75	1.398	2.148	1.201	1.797	1.542
163	<i>Dryas octopetala</i>	47	289.00	3.536	5.814	2.975	1.965	1.650
164	<i>Dryas octopetala</i>	48	45.100	1.124	0.908	0.608	1.498	0.807
165	<i>Dryas octopetala</i>	49	141.25	1.781	2.836	1.532	1.857	1.596
166	<i>Dryas octopetala</i>	50	125.55	1.786	2.527	1.393	1.824	1.419
167	<i>Dryas octopetala</i>	51	56.000	0.619	1.130	0.627	1.815	1.839
168	<i>Dryas octopetala</i>	52	31.900	0.274	0.634	0.368	1.715	2.295
169	<i>Dryas octopetala</i>	53	22.750	0.179	0.460	0.249	1.865	2.615
170	<i>Dryas octopetala</i>	54	9.6000	0.058	0.200	0.105	1.979	3.840
171	<i>Dryas octopetala</i>	55	15.050	0.073	0.304	0.169	1.813	4.300
172	<i>Dryas octopetala</i>	56	17.800	0.138	0.357	0.184	1.945	2.599
173	<i>Dryas octopetala</i>	57	39.050	0.335	0.797	0.458	1.767	2.448
174	<i>Dryas octopetala</i>	58	75.400	0.891	1.513	0.837	1.813	1.702
175	<i>Dryas octopetala</i>	59	18.850	0.136	0.385	0.203	1.933	2.945
176	<i>Dryas octopetala</i>	60	19.300	0.162	0.390	0.241	1.629	2.443
177	<i>Oxyria digyna</i>	1	94.050	1.003	1.880	1.060	1.773	1.874
178	<i>Oxyria digyna</i>	2	75.850	0.625	1.525	0.836	1.832	2.459
179	<i>Oxyria digyna</i>	3	114.60	0.856	2.289	1.241	1.842	2.668
180	<i>Oxyria digyna</i>	4	79.350	0.673	1.593	0.890	1.795	2.379
181	<i>Oxyria digyna</i>	5	143.80	1.312	2.895	1.582	1.840	2.224

182	<i>Oxyria digyna</i>	6	160.30	1.352	3.226	1.746	1.857	2.407
183	<i>Oxyria digyna</i>	7	133.65	1.240	2.691	1.472	1.838	2.187
184	<i>Oxyria digyna</i>	8	114.00	0.933	2.291	1.269	1.812	2.473
185	<i>Oxyria digyna</i>	9	92.350	0.719	1.852	1.016	1.827	2.587
186	<i>Oxyria digyna</i>	10	96.250	0.980	1.925	1.095	1.758	1.964
187	<i>Oxyria digyna</i>	71	103.05	0.805	2.077	1.137	1.839	2.612
188	<i>Oxyria digyna</i>	72	106.10	0.940	2.138	1.173	1.834	2.297
189	<i>Oxyria digyna</i>	73	118.05	0.960	2.378	1.322	1.809	2.504
190	<i>Oxyria digyna</i>	74	109.90	0.827	2.215	1.201	1.856	2.714
191	<i>Oxyria digyna</i>	75	95.000	0.756	1.921	1.048	1.850	2.585
192	<i>Oxyria digyna</i>	11	82.850	0.624	1.656	0.919	1.801	2.651
193	<i>Oxyria digyna</i>	12	68.450	0.577	1.384	0.764	1.828	2.436
194	<i>Oxyria digyna</i>	13	92.000	0.755	1.858	1.009	1.857	2.497
195	<i>Oxyria digyna</i>	76	90.850	0.793	1.837	1.014	1.828	2.351
196	<i>Oxyria digyna</i>	77	162.60	1.493	3.272	1.765	1.864	2.208
197	<i>Oxyria digyna</i>	78	108.50	0.820	2.177	1.191	1.833	2.669
198	<i>Oxyria digyna</i>	79	108.60	0.881	2.183	1.195	1.834	2.497
199	<i>Oxyria digyna</i>	80	113.80	0.921	2.282	1.243	1.840	2.487
200	<i>Oxyria digyna</i>	14	23.150	0.138	0.459	0.253	1.802	3.261
201	<i>Oxyria digyna</i>	15	67.150	0.628	1.349	0.768	1.762	2.159
202	<i>Oxyria digyna</i>	16	95.700	0.809	1.925	1.058	1.828	2.398
203	<i>Oxyria digyna</i>	17	113.50	0.921	2.280	1.236	1.852	2.492
204	<i>Oxyria digyna</i>	18	179.75	1.545	3.612	1.970	1.841	2.353
205	<i>Oxyria digyna</i>	19	75.600	0.631	1.528	0.831	1.855	2.459
206	<i>Oxyria digyna</i>	20	57.050	0.458	1.154	0.627	1.858	2.564
207	<i>Oxyria digyna</i>	31	88.050	0.836	1.778	0.971	1.846	2.150
208	<i>Oxyria digyna</i>	32	61.550	0.530	1.243	0.677	1.851	2.376
209	<i>Oxyria digyna</i>	33	33.750	0.463	0.673	0.361	1.860	1.452
210	<i>Oxyria digyna</i>	34	45.200	0.301	0.915	0.500	1.849	3.117
211	<i>Oxyria digyna</i>	35	78.650	0.655	1.581	0.867	1.831	2.431
212	<i>Oxyria digyna</i>	51	41.650	0.361	0.841	0.455	1.864	2.360
213	<i>Oxyria digyna</i>	52	107.70	1.060	2.163	1.168	1.858	2.049
214	<i>Oxyria digyna</i>	53	136.80	1.212	2.749	1.485	1.859	2.282
215	<i>Oxyria digyna</i>	54	178.70	7.969	9.436	7.864	1.785	1.696
216	<i>Oxyria digyna</i>	55	12.300	0.110	0.230	0.125	1.745	1.952
217	<i>Oxyria digyna</i>	56	85.500	0.811	1.725	0.953	1.823	2.148
218	<i>Oxyria digyna</i>	57	-	-	-	-	-	-
219	<i>Oxyria digyna</i>	58	36.750	0.259	0.747	0.409	1.851	2.976
220	<i>Oxyria digyna</i>	59	56.400	0.385	1.139	0.620	1.852	3.016
221	<i>Oxyria digyna</i>	60	1.1000	-0.180	0.021	0.023	0.917	-0.123
222	<i>Oxyria digyna</i>	61	175.65	1.653	3.527	1.920	1.843	2.143
223	<i>Salix polaris</i>	1	142.40	1.198	2.832	1.549	1.820	2.346
224	<i>Salix polaris</i>	2	149.05	1.297	2.985	1.613	1.853	2.305
225	<i>Salix polaris</i>	3	94.700	0.883	1.895	1.045	1.814	2.147
226	<i>Salix polaris</i>	4	71.700	1.221	1.438	0.892	1.615	1.178
227	<i>Salix polaris</i>	5	69.250	0.615	1.395	0.762	1.842	2.289

228	<i>Salix polaris</i>	6	65.700	0.793	1.326	0.763	1.750	1.682
229	<i>Salix polaris</i>	7	87.450	0.808	1.763	0.966	1.837	2.203
230	<i>Salix polaris</i>	8	77.900	0.667	1.565	0.879	1.787	2.361
231	<i>Salix polaris</i>	9	44.750	0.369	0.900	0.518	1.745	2.459
232	<i>Salix polaris</i>	10	50.550	0.474	1.016	0.586	1.740	2.156
233	<i>Salix polaris</i>	71	64.500	0.620	1.299	0.739	1.767	2.111
234	<i>Salix polaris</i>	72	52.150	0.527	1.059	0.598	1.792	2.041
235	<i>Salix polaris</i>	73	58.950	0.567	1.192	0.676	1.778	2.128
236	<i>Salix polaris</i>	74	64.450	0.566	1.296	0.699	1.863	2.306
237	<i>Salix polaris</i>	75	75.850	0.818	1.609	0.946	1.776	2.090
238	<i>Salix polaris</i>	11	51.700	0.448	1.045	0.591	1.783	2.366
239	<i>Salix polaris</i>	12	44.100	0.420	0.888	0.503	1.775	2.130
240	<i>Salix polaris</i>	13	75.650	0.818	1.524	0.845	1.814	1.875
241	<i>Salix polaris</i>	14	55.800	0.610	1.123	0.636	1.774	1.851
242	<i>Salix polaris</i>	15	47.100	0.455	0.949	0.541	1.764	2.103
243	<i>Salix polaris</i>	16	70.450	0.661	1.412	0.789	1.793	2.141
244	<i>Salix polaris</i>	17	53.000	0.586	1.061	0.619	1.715	1.812
245	<i>Salix polaris</i>	18	68.050	0.893	1.374	0.812	1.703	1.547
246	<i>Salix polaris</i>	19	81.800	0.805	1.645	0.908	1.820	2.055
247	<i>Salix polaris</i>	20	47.700	0.528	0.968	0.554	1.767	1.856
248	<i>Salix polaris</i>	21	51.600	0.498	1.048	0.588	1.804	2.141
249	<i>Salix polaris</i>	22	50.000	0.477	1.015	0.573	1.792	2.165
250	<i>Salix polaris</i>	23	56.100	0.633	1.139	0.647	1.781	1.821
251	<i>Salix polaris</i>	24	37.250	0.383	0.757	0.422	1.817	2.008
252	<i>Salix polaris</i>	25	17.900	0.233	0.359	0.228	1.577	1.543
253	<i>Salix polaris</i>	26	31.500	0.392	0.635	0.383	1.667	1.628
254	<i>Salix polaris</i>	27	35.800	0.349	0.727	0.408	1.804	2.118
255	<i>Salix polaris</i>	28	30.100	0.369	0.600	0.337	1.776	1.623
256	<i>Salix polaris</i>	29	33.100	0.366	0.655	0.386	1.684	1.775
257	<i>Salix polaris</i>	30	27.700	0.363	0.555	0.329	1.689	1.530
258	<i>Salix polaris</i>	31	25.350	0.432	0.506	0.303	1.668	1.171
259	<i>Salix polaris</i>	32	34.550	0.603	0.881	0.604	1.669	1.673
260	<i>Salix polaris</i>	33	32.250	0.400	0.643	0.375	1.711	1.604
261	<i>Salix polaris</i>	34	24.150	0.336	0.483	0.290	1.666	1.437
262	<i>Salix polaris</i>	35	32.950	0.421	0.663	0.376	1.772	1.580
263	<i>Salix polaris</i>	36	28.450	0.413	0.562	0.319	1.745	1.355
264	<i>Salix polaris</i>	61	72.850	0.742	1.466	0.799	1.844	1.988
265	<i>Salix polaris</i>	62	50.000	0.508	1.009	0.549	1.852	2.004
266	<i>Salix polaris</i>	63	60.000	0.681	1.206	0.679	1.783	1.778
267	<i>Salix polaris</i>	64	53.550	0.552	1.085	0.600	1.828	1.991
268	<i>Salix polaris</i>	65	73.700	0.737	1.492	0.824	1.829	2.050
269	<i>Salix polaris</i>	66	79.300	0.770	1.600	0.900	1.790	2.098
270	<i>Salix polaris</i>	67	26.550	0.521	0.534	0.310	1.730	1.025
271	<i>Salix polaris</i>	68	42.250	0.375	0.853	0.474	1.813	2.302
272	<i>Salix polaris</i>	69	45.350	0.424	0.912	0.509	1.800	2.165
273	<i>Salix polaris</i>	41	30.400	0.313	0.607	0.352	1.722	1.936

274	<i>Salix polaris</i>	42	41.300	0.329	0.826	0.459	1.800	2.511
275	<i>Salix polaris</i>	43	28.500	0.355	0.571	0.331	1.727	1.610
276	<i>Salix polaris</i>	44	25.500	0.192	0.501	0.290	1.706	2.537
277	<i>Salix polaris</i>	45	30.450	0.283	0.603	0.344	1.740	2.107
278	<i>Salix polaris</i>	46	34.750	0.280	0.690	0.390	1.759	2.439
279	<i>Salix polaris</i>	47	20.600	0.186	0.405	0.229	1.746	2.135
280	<i>Salix polaris</i>	48	23.200	0.297	0.465	0.271	1.719	1.568
281	<i>Salix polaris</i>	49	28.400	0.386	0.554	0.317	1.716	1.420
282	<i>Salix polaris</i>	50	24.800	0.256	0.489	0.283	1.710	1.886
283	<i>Salix polaris</i>	51	-	-	-	-	-	-
284	<i>Salix polaris</i>	52	37.300	0.301	0.746	0.405	1.842	2.478
285	<i>Salix polaris</i>	53	40.850	0.349	0.818	0.452	1.812	2.348
286	<i>Salix polaris</i>	54	34.100	0.291	0.678	0.371	1.819	2.312
287	<i>Salix polaris</i>	55	57.300	0.515	1.137	0.616	1.834	2.187
288	<i>Salix polaris</i>	56	90.850	0.811	1.826	0.984	1.864	2.266
289	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	1	-	-	-	-	-	-
290	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	2	2.1500	0.231	0.033	0.025	1.229	0.178
291	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	3	-	-	-	-	-	-
292	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	4	48.250	0.513	0.967	0.554	1.748	1.888
293	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	5	99.300	1.426	1.999	1.088	1.847	1.406
294	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	6	173.95	1.650	3.493	1.691	2.075	2.127
295	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	7	33.800	0.954	0.702	0.370	1.965	0.728
296	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	8	26.400	0.545	0.540	0.289	1.906	0.991
297	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	9	6.0000	0.144	0.117	0.070	1.644	0.816
298	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	10	10.250	0.201	0.206	0.133	1.553	1.025
299	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	11	51.250	0.493	1.061	0.622	1.749	2.243
300	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	12	28.450	0.491	0.571	0.331	1.729	1.164
301	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	13	20.700	1.294	0.541	0.376	1.663	0.355
302	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	14	34.750	1.012	0.982	0.686	1.742	0.959
303	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	15	75.700	0.914	1.533	0.865	1.790	1.692
304	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	16	15.050	0.236	0.305	0.172	1.792	1.297
305	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	17	13.450	0.204	0.262	0.149	1.724	1.275
306	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	21	25.200	0.592	0.512	0.305	1.697	0.863
307	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	22	24.250	0.855	0.713	0.538	1.565	0.774
308	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	23	58.200	0.754	1.177	0.668	1.777	1.571
309	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	24	31.150	0.413	0.625	0.368	1.702	1.516
310	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	25	40.250	0.656	0.815	0.456	1.805	1.246
311	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	26	40.350	0.761	0.844	0.526	1.650	1.115
312	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	63	69.350	1.839	1.933	1.386	1.651	1.073
313	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	64	19.350	1.405	0.793	0.664	1.500	0.387
314	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	65	69.900	1.131	1.422	0.810	1.779	1.263
315	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	66	133.80	1.411	2.691	1.487	1.818	1.917
316	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	67	79.450	0.757	1.601	0.900	1.789	2.133
317	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	68	-	-	-	-	-	-
318	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	69	-	-	-	-	-	-
319	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	70	29.650	0.470	0.601	0.347	1.749	1.284

320	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	71	-	-	-	-	-	-
321	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	41	-	-	-	-	-	-
322	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	42	-	-	-	-	-	-
323	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	43	-	-	-	-	-	-
324	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	44	-	-	-	-	-	-
325	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	45	25.400	1.125	0.702	0.529	1.516	0.546
326	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	46	25.100	0.470	0.508	0.302	1.696	1.082
327	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	47	38.950	0.320	0.790	0.446	1.791	2.521
328	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	48	12.850	0.316	0.260	0.143	1.836	0.821
329	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	49	11.950	0.610	0.280	0.166	1.912	0.420
330	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	50	33.000	0.682	0.672	0.388	1.755	0.985
331	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	51	69.300	1.418	1.783	1.198	1.730	1.357
332	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	52	12.700	0.429	0.262	0.178	1.494	0.603
333	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	53	27.550	0.388	0.551	0.320	1.722	1.420
334	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	54	54.700	0.752	1.104	0.630	1.765	1.474
335	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	55	16.250	1.070	0.379	0.281	1.432	0.320
336	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	56	89.200	0.970	1.805	0.988	1.845	1.880
337	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	57	79.150	0.858	1.598	0.882	1.826	1.878
338	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	58	49.600	0.657	0.998	0.569	1.762	1.524
339	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	59	77.100	1.268	1.783	1.127	1.740	1.501
340	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	60	78.100	0.971	1.585	0.895	1.791	1.648
341	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	61	176.60	2.612	3.842	2.096	1.978	1.534
342	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	62	57.150	0.629	1.145	0.636	1.803	1.823

극지연구소

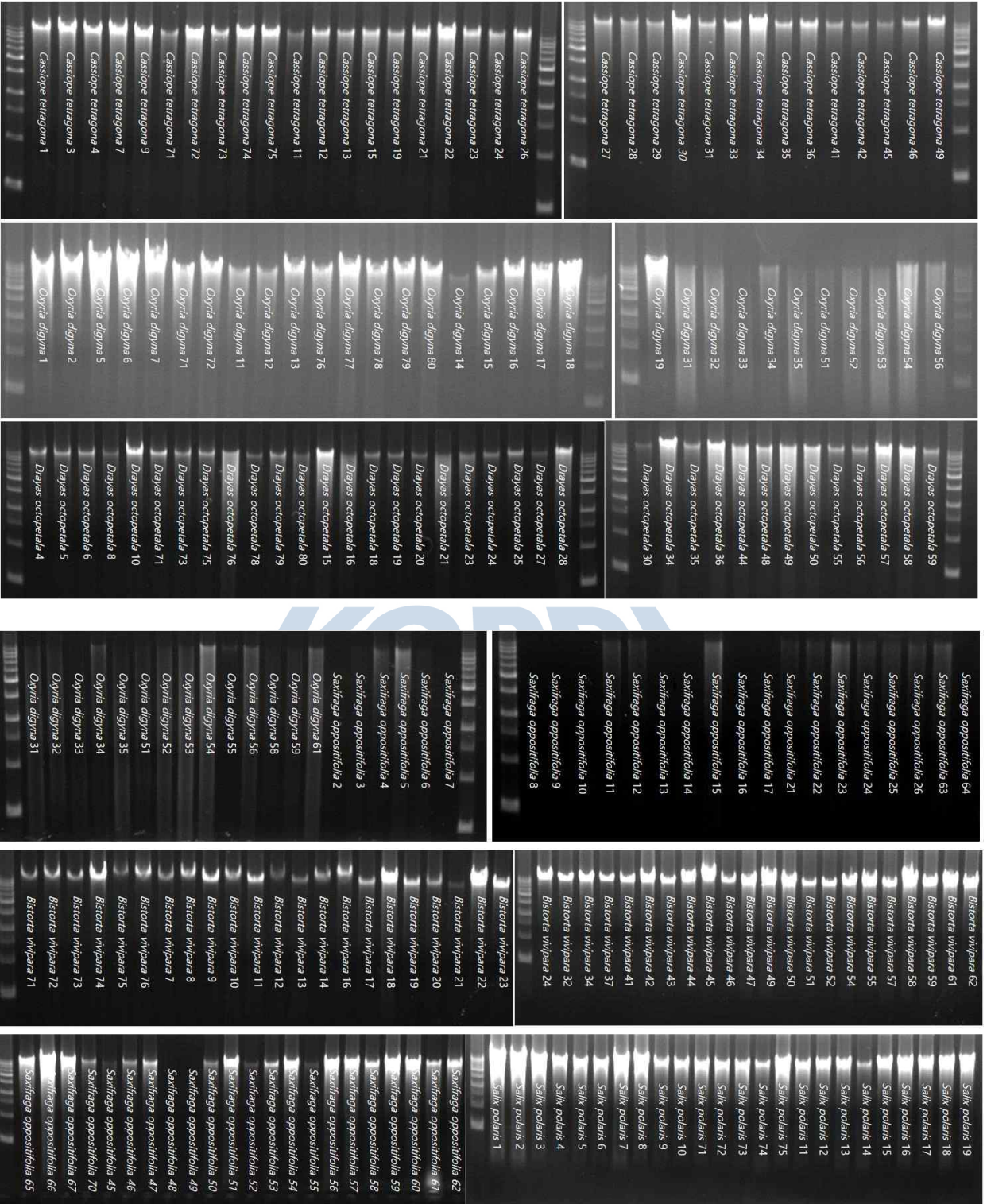


그림 2-2. 추출한 DNA의 상태를 확인하기 위해 4 μ l의 DNA를 1%의 agarose gel에 전기영동 결과

나. 스발바르 식물의 고품량 분자 마커 분석용 라이브러리 제작

추출한 DNA를 사용하여 1차년도에 분석하기로 계획했던 담자리꽃나무, 북극종꽃나무, 나도수영에서 고품량 분자 마커 분석용 라이브러리를 제작하였다. 우선 각 채집지 별로 3개 이상의 DNA를 선별하고 quality check를 한 결과 담자리꽃나무 33개, 북극종꽃나무 34개, 나도수영 23개가 선별되었다 (그림 2-3, 표 2-8). 여기에 씨범꼬리 6개를 추가하여 총 96개의 DNA 시료로 라이브러리를 제작하였다. 선별한 96개 DNA를 제한효소 *ApeKI*으로 절단한 뒤 차세대 염기서열 분석용 Adaptor를 붙이고 DNA를 모아 정제한 뒤 PCR을 한 뒤 전기영동으로 적당한 크기의 DNA 회수 후 염기서열을 분석하였다.

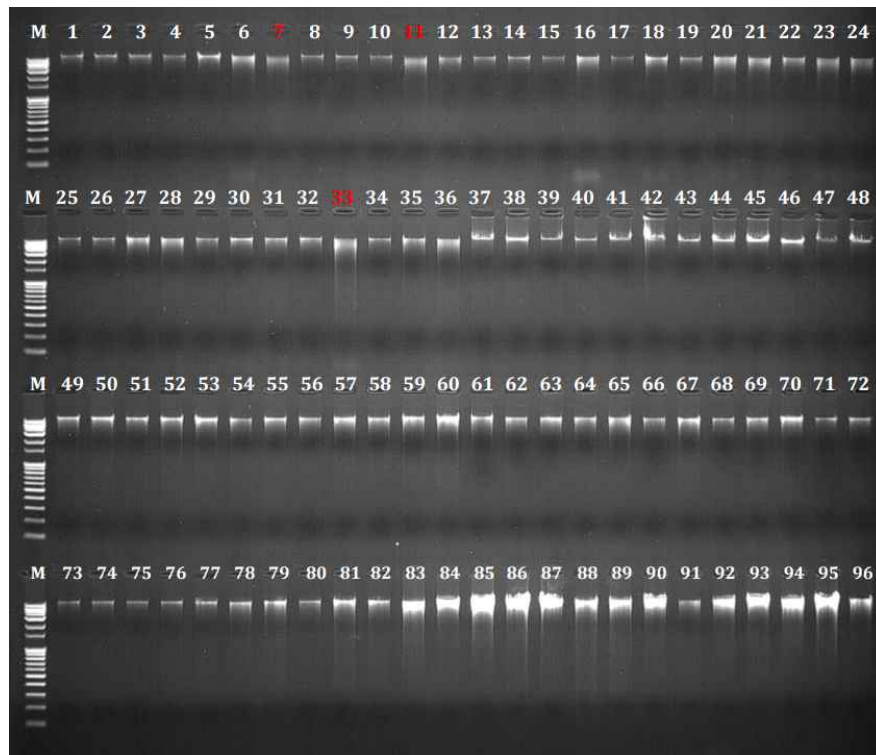


그림 2-3. 고품량 분자 마커 분석용 라이브러리 제작용 DNA 각각 3 μ 를 1.5% agarose gel에서 25분간 전기영동 한 결과. M, 1 kb size marker.

표 2-8. 2021년도 채집지에 따라 선별한 고용량 분자 마커 분석용 DNA 시료 96개의 농도 및 순도

Sample name	Location	Conc. (ng/ul)	A260 / A280	A260 / A230
담자리꽃나무 4	Blomsterdalen	25.000	1.805	1.238
담자리꽃나무 5	Blomsterdalen	28.950	1.862	1.844
담자리꽃나무 6	Blomsterdalen	29.100	1.813	2.094
담자리꽃나무 8	Blomsterdalen	20.750	1.995	4.029
담자리꽃나무 10	Blomsterdalen	40.650	1.882	2.863
담자리꽃나무 71	Svalvard Airport	55.500	1.937	2.270
담자리꽃나무 73	Svalvard Airport	62.350	1.918	2.545
담자리꽃나무 75	Svalvard Airport	62.250	1.970	2.817
담자리꽃나무 78	Longyearbyen Cemetery	16.350	1.827	3.442
담자리꽃나무 79	Longyearbyen Cemetery	25.550	1.858	3.135
담자리꽃나무 80	Longyearbyen Cemetery	83.450	1.812	1.455
담자리꽃나무 15	Adventdalen Camp Barrents	217.80	1.915	1.643
담자리꽃나무 18	Adventdalen Camp Barrents	16.900	1.847	2.965
담자리꽃나무 19	Adventdalen Camp Barrents	21.300	1.919	1.210
담자리꽃나무 20	Adventdalen Camp Barrents	18.100	1.766	2.586
담자리꽃나무 23	Adventdalen, Site A1	23.900	1.817	2.490
담자리꽃나무 24	Adventdalen, Site A3	18.600	1.763	2.601
담자리꽃나무 25	Adventdalen, Site A3	17.350	1.726	2.892
담자리꽃나무 27	Adventdalen, near Site D	15.450	1.807	3.000
담자리꽃나무 28	Adventdalen, near Site D	272.30	1.946	1.609
담자리꽃나무 30	Adventdalen, near Site D	11.800	1.686	1.829
담자리꽃나무 34	Ossian Sars	116.10	1.838	1.315
담자리꽃나무 35	Ossian Sars	21.450	1.788	1.826
담자리꽃나무 36	Ossian Sars	109.75	1.805	1.336
담자리꽃나무 44	Blomstrandøya	85.500	1.779	1.407
담자리꽃나무 48	Blomstrandøya	48.450	1.571	0.819
담자리꽃나무 49	Blomstrandøya	150.75	1.880	1.645
담자리꽃나무 50	Blomstrandøya	135.70	1.834	1.460
담자리꽃나무 55	Stuphallet	19.050	1.850	1.740
담자리꽃나무 56	Stuphallet	20.250	1.709	1.646
담자리꽃나무 57	Stuphallet	41.300	1.836	2.288
담자리꽃나무 58	Stuphallet	79.750	1.897	1.686
담자리꽃나무 59	Stuphallet	21.850	1.828	1.806
북극종꽃나무 1	Blomsterdalen	37.400	1.785	1.768
북극종꽃나무 3	Blomsterdalen	45.650	1.867	1.773
북극종꽃나무 4	Blomsterdalen	36.000	1.773	1.778
북극종꽃나무 7	Blomsterdalen	42.000	1.818	1.757
북극종꽃나무 9	Blomsterdalen	42.250	1.760	2.302
북극종꽃나무 71	Longyearbyen Cemetery	33.800	1.832	1.576
북극종꽃나무 72	Longyearbyen Cemetery	40.400	1.862	1.726
북극종꽃나무 73	Longyearbyen Cemetery	24.300	1.876	1.272

북극종꽃나무 74	Longyearbyen Cemetery	47.400	1.769	1.900
북극종꽃나무 75	Longyearbyen Cemetery	36.150	1.893	1.666
북극종꽃나무 11	Adventdalen Camp Barrents	25.450	1.767	1.725
북극종꽃나무 12	Adventdalen Camp Barrents	25.900	1.744	1.947
북극종꽃나무 13	Adventdalen Camp Barrents	26.150	1.861	1.726
북극종꽃나무 15	Adventdalen Camp Barrents	36.000	1.818	1.791
북극종꽃나무 19	Adventdalen Camp Barrents	27.600	1.775	1.628
북극종꽃나무 21	Adventdalen, Site A1	34.650	1.741	1.741
북극종꽃나무 22	Adventdalen, Site A1	50.950	1.887	1.905
북극종꽃나무 23	Adventdalen, Site A1	32.800	1.848	1.423
북극종꽃나무 24	Adventdalen, Site A1	24.450	1.753	1.652
북극종꽃나무 26	Adventdalen, near Site D	30.700	1.838	1.629
북극종꽃나무 27	Adventdalen, near Site D	24.650	1.780	1.677
북극종꽃나무 28	Adventdalen, near Site D	36.550	1.805	1.924
북극종꽃나무 29	Adventdalen, near Site D	19.350	1.825	1.542
북극종꽃나무 30	Adventdalen, near Site D	40.400	1.845	1.673
북극종꽃나무 31	Ossian Sars	21.100	1.751	1.518
북극종꽃나무 33	Ossian Sars	30.750	1.841	1.662
북극종꽃나무 34	Ossian Sars	62.800	1.802	1.192
북극종꽃나무 35	Ossian Sars	20.350	1.725	1.321
북극종꽃나무 36	Ossian Sars	27.850	1.785	1.648
북극종꽃나무 41	Blomstrandøya	17.400	1.758	1.475
북극종꽃나무 42	Blomstrandøya	17.850	1.879	1.395
북극종꽃나무 45	Blomstrandøya	17.800	1.771	1.134
북극종꽃나무 46	Blomstrandøya	18.750	1.838	1.339
북극종꽃나무 49	Blomstrandøya	23.850	1.863	1.569
나도수영 1	Blomsterdalen	94.050	1.773	1.874
나도수영 2	Blomsterdalen	75.850	1.832	2.459
나도수영 5	Blomsterdalen	143.80	1.840	2.224
나도수영 6	Blomsterdalen	160.30	1.857	2.407
나도수영 7	Blomsterdalen	133.65	1.838	2.187
나도수영 71	Svalvard Airport	103.05	1.839	2.612
나도수영 72	Svalvard Airport	106.10	1.834	2.297
나도수영 11	Adventdalen Camp Barrents	82.850	1.801	2.651
나도수영 12	Adventdalen Camp Barrents	68.450	1.828	2.436
나도수영 13	Adventdalen Camp Barrents	92.000	1.857	2.497
나도수영 76	Longyearbyen	90.850	1.828	2.351
나도수영 77	Longyearbyen	162.60	1.864	2.208
나도수영 78	Longyearbyen	108.50	1.833	2.669
나도수영 79	Longyearbyen	108.60	1.834	2.497
나도수영 80	Longyearbyen	113.80	1.840	2.487
나도수영 14	Adventdalen, Site A1	23.150	1.802	3.261
나도수영 15	Adventdalen, below Site B4	67.150	1.762	2.159
나도수영 16	Adventdalen, below Site B4	95.700	1.828	2.398

나도수영 17	Adventdalen, below Site B4	113.50	1.852	2.492
나도수영 18	Adventdalen, below Site B4	179.75	1.841	2.353
나도수영 19	Adventdalen, below Site B4	75.600	1.855	2.459
나도수영 54	Stuphallet	196.20	1.855	2.088
나도수영 55	Stuphallet	12.300	1.745	1.952
씨범꼬리 1	Longyearbyen	30.050	1.844	1.522
씨범꼬리 2	Longyearbyen	35.450	1.832	1.896
씨범꼬리 71	Svalvard Airport	15.350	1.582	2.088
씨범꼬리 72	Longyearbyen Cemetery	35.900	1.832	1.851
씨범꼬리 73	Longyearbyen Cemetery	33.300	1.830	1.887
씨범꼬리 74	Longyearbyen Cemetery	40.850	1.836	2.002

2022년도에는 나도수영, 북극콩버들, 자주범의귀에 중점을 두었다. 2022년도에 수집한 북극식물 샘플에 대해서도 GBS 분석이 실시되었으며 나도수영(57개체), 북극콩버들(60개체), 자주범의귀(57개체) 3종에 대해서 진행되었다. 각각 수집된 개체들의 DNA를 추출하고 전기영동을 통해서 GBS 라이브러리 제작에 적합한지 QC를 진행하였다. 전기영동은 1.5% gel에서 30분 동안 진행되었으며 DNA 밴드가 선명하지 않은 샘플들은 fail 시켜 GBS 분석 대상에서 제외시켰다 (그림 2-4, 2-5, 2-6). 나도수영은 57개체 중 41개의 샘플이 pass 되었으며 다른 샘플과는 다르게 Ny-Ålesund 지역에서 수집한 샘플에 대해서 fail의 비율이 높았다. 북극콩버들은 60개 샘플 중 53개가 pass 되었으며 자주범의귀는 57샘플 중 42개 샘플에서 pass 되었다.

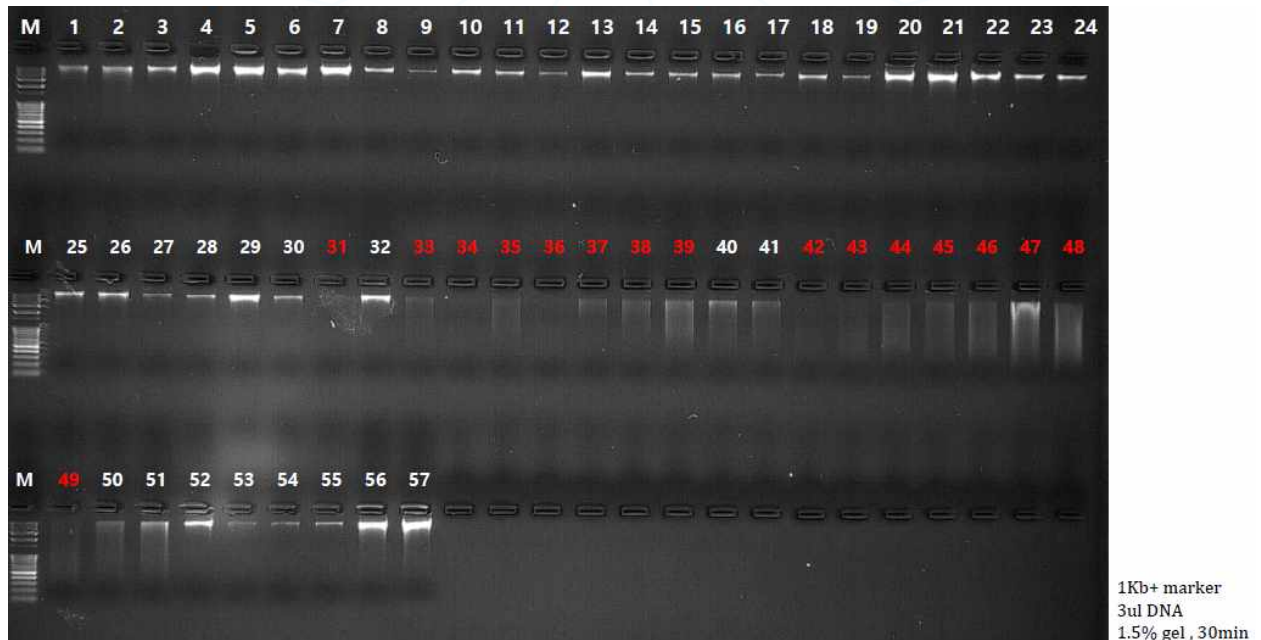


그림 2-4. 나도수영 57개체 추출한 DNA 전기영동 QC

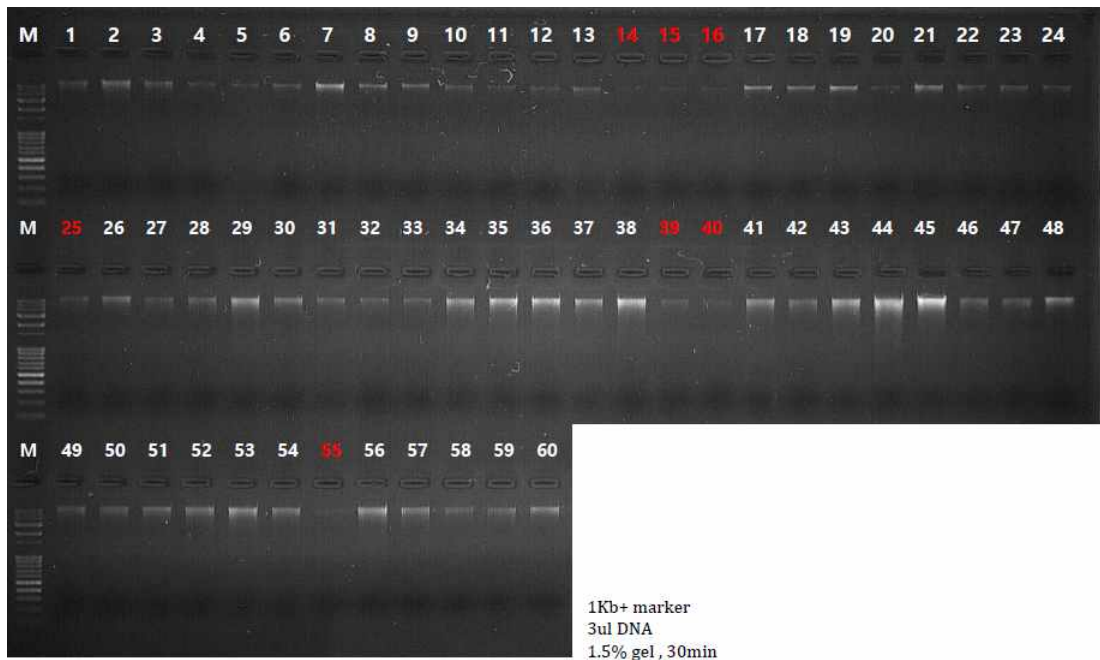


그림 2-5. 북극콩버들 60개체 추출한 DNA 전기영동 QC

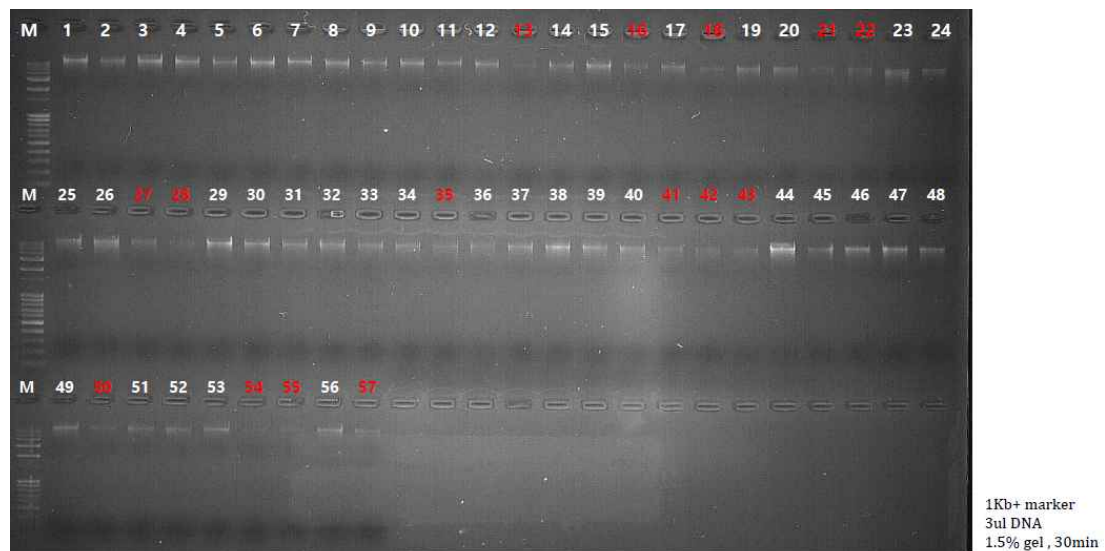


그림 2-6. 자주범의귀 57개체 추출한 DNA 전기영동 QC

QC 결과에서 라이브러리 제작가능한 DNA 중 Longyearbyen과 Ny-Ålesund 집단을 비교할 수 있도록 개체를 선발하여 3종에 대하여 총 96개체를 선발하였다. 선발 기준은 QC에서 pass 판정을 받고 농도가 높은 개체를 기준으로 하였으며 지역별로 구별할 수 있도록 분배하여 선발하였다 (표 2-9). 2022년도 나도수영 샘플은 Longyaerbyen 지역 11개, Ny-Ålesund 지역 4개를 분석에 사용하였으며 여기에 Greenland 샘플 3개를 추가하여 총 18개체를 대상으로 분석을 수행하였다. 나도수영의 경우 21년도에 분석한 23개체에 대한 GBS 분석 데이터가 있기 때문에 합하여 분자마커 개발에 사용하였다. 북극콩버들은 Longyearbyen 지역 15개, Ny-Ålesund 지역 26개에 대하여 GBS 분석을 실시하였다. 자주범의귀는 Longyearbyen 지역 9개, Ny-Ålesund 지역 24개에 대하여 분석을 했고 추가로 Greenland 지역 4개 샘플을 분석하였다.

표 2-9. 2022년도 샘플에서 GBS 분석 대상으로 선별한 96개체 및 DNA 추출 농도

No.	Scientific name	Location	Serial number	Conc.	A260/A280	A260/A230
1	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220705-LA-O1-1	43.600	1.836	4.449
2	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220705-LA-O1-2	58.900	1.829	3.475
3	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220706-LA-O1-3	46.750	1.830	3.235
4	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220706-LA-O1-4	114.55	1.852	2.627
5	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220706-LE-O1-11	25.100	1.630	1.342
6	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220706-LE-O1-13	53.200	1.736	2.407
7	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220708-LE-O1-14	18.350	1.617	2.085
8	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220708-LE-O1-15	24.850	1.738	2.906
9	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220707-LB-O1-24	44.250	1.648	0.953
10	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220707-LB-O1-25	45.700	1.626	1.046
11	<i>Oxyria digyna</i>	Longyearbyen	220707-LB-O1-26	47.500	1.750	1.530
12	<i>Oxyria digyna</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-O1-44	44.150	1.843	2.620
13	<i>Oxyria digyna</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-O1-45	34.200	1.786	3.954
14	<i>Oxyria digyna</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-O1-54	202.35	1.713	0.763
15	<i>Oxyria digyna</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-O1-55	96.100	1.875	2.073
16	<i>Oxyria digyna</i>	Greenland	220716-GS-O1-56	58.800	1.812	2.486
17	<i>Oxyria digyna</i>	Greenland	220716-GS-O1-60	114.05	1.848	2.140
18	<i>Oxyria digyna</i>	Greenland	220716-GS-O1-61	178.45	1.864	2.494
19	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220705-LA-S1-1	89.700	1.829	1.952
20	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220705-LA-S1-2	136.30	1.826	1.958
21	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220705-LA-S1-3	97.600	1.848	2.085
22	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220706-LA-S1-4	42.950	1.732	2.085
23	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220706-LA-S1-5	22.700	1.518	1.002
24	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220706-LA-S1-6	36.850	1.683	1.266
25	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220706-LE-S1-12	22.500	1.568	0.849
26	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220706-LE-S1-13	94.800	1.618	0.793
27	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220708-LE-S1-17	63.850	1.784	0.881
28	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220708-LE-S1-18	184.15	1.658	0.673
29	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220708-LE-S1-19	53.000	1.869	2.335
30	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220708-LE-S1-21	153.10	1.717	0.830
31	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220707-LB-S1-25	34.550	1.804	1.657
32	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220707-LB-S1-26	53.550	1.847	1.834
33	<i>Salix polaris</i>	Longyearbyen	220707-LB-S1-27	59.500	1.630	0.647
34	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB-S1-29	82.550	1.808	1.648
35	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB-S1-32	147.40	1.831	1.670

36	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB-S1-33	82.050	1.821	1.791
37	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S1-37	113.65	1.839	1.560
38	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S1-38	97.550	1.820	1.806
39	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S1-39	97.350	1.788	1.135
40	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S1-40	90.050	1.816	1.620
41	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S1-41	117.45	1.797	1.614
42	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S1-44	170.00	1.937	1.876
43	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S1-46	119.55	1.832	2.018
44	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S1-47	221.75	1.873	2.243
45	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S1-48	254.25	1.904	2.298
46	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM1-S1-49	61.450	1.885	1.917
47	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM1-S1-50	126.35	1.883	1.245
48	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM1-S1-51	118.20	1.885	2.161
49	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM2-S1-52	99.200	1.884	1.893
50	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM2-S1-53	75.550	1.889	2.168
51	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM2-S1-54	61.750	1.824	1.785
52	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM3-S1-55	90.200	1.845	1.731
53	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM3-S1-56	162.50	1.896	2.105
54	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220714-NM3-S1-57	95.100	1.874	1.923
55	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S1-59	148.80	1.865	1.656
56	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S1-60	106.20	1.853	1.992
57	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S1-61	70.100	1.626	0.702
58	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S1-62	42.700	1.715	1.514
59	<i>Salix polaris</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S1-63	172.25	1.754	0.773
60	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220705-LA-S2-1	63.950	1.784	1.368
61	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220705-LA-S2-2	34.900	1.723	0.852
62	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220706-LA-S2-3	48.100	1.765	1.425
63	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220706-LE-S2-4	50.900	1.777	1.317
64	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220706-LE-S2-5	25.400	1.789	1.160
65	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220706-LE-S2-6	39.300	1.720	1.312
66	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220706-LE-S2-7	35.200	1.575	0.561
67	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220706-LE-S2-8	32.750	1.761	0.798
68	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Longyearbyen	220708-LE-S2-9	34.500	1.503	0.560
69	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220713-NB-S2-15	32.350	1.787	0.754
70	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220713-NB-S2-17	24.300	1.705	0.569
71	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220713-NB-S2-19	22.100	1.857	0.882
72	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S2-20	25.800	1.773	0.552

73	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S2-23	48.800	1.824	1.283
74	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220713-NB2-S2-24	24.850	1.726	0.497
75	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S2-25	46.550	1.747	0.906
76	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S2-26	72.450	1.791	1.129
77	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S2-29	62.250	1.812	1.053
78	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NO-S2-30	43.650	1.774	0.709
79	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM1-S2-31	44.000	1.725	0.555
80	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM1-S2-32	35.700	1.785	0.816
81	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM1-S2-33	28.600	1.707	0.503
82	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM2-S2-34	34.150	1.747	0.551
83	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM2-S2-36	20.250	1.716	0.414
84	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM3-S2-37	37.800	1.775	0.746
85	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM3-S2-38	47.800	1.811	0.915
86	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM3-S2-39	30.450	1.664	0.499
87	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220714-NM4-S2-40	27.400	1.681	0.468
88	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S2-44	84.600	1.839	1.340
89	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S2-45	31.750	1.730	0.670
90	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S2-46	46.150	1.782	0.742
91	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S2-47	55.050	1.811	1.016
92	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Ny-Ålesund	220715-NS-S2-48	44.750	1.758	0.870
93	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Greenland	220715-GS-S2-49	47.550	1.801	0.929
94	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Greenland	220715-GS-S2-51	50.400	1.623	0.518
95	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Greenland	220715-GS-S2-52	30.350	1.641	0.469
96	<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Greenland	220715-GS-S2-53	42.700	1.701	0.748

다. 북극식물 분자 마커 개발을 위한 유전체 분석

북극식물 분자마커를 개발하기 위해 DNA를 추출하고 일련의 유전체 분석과정을 거쳐 진행되었다 (그림 2-7).

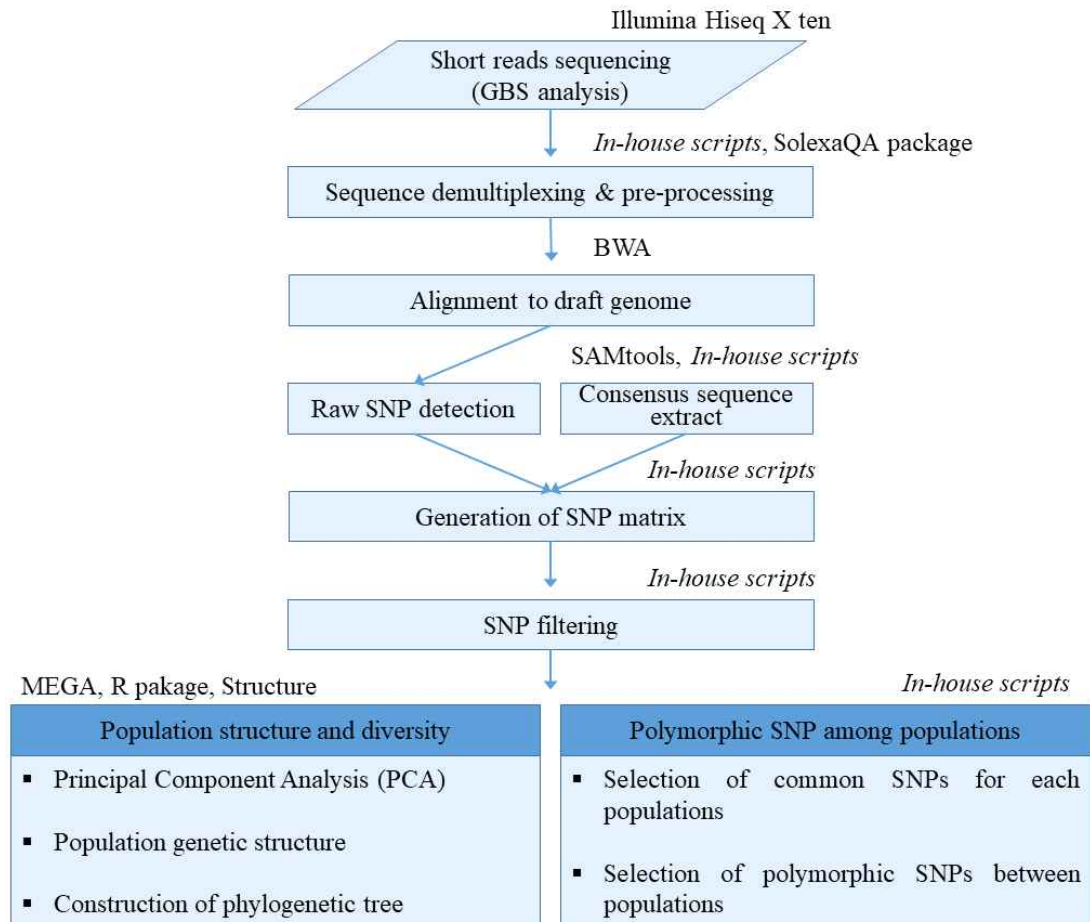


그림 2-7. 북극식물 GBS 분석 모식도

① GBS sequence pre-processing

GBS 분석에 사용된 sequencing platform은 Illumina Hiseq X ten이 사용되었으며 library 제작에는 single digestion with *ApeKI* enzyme이 사용되었다 (표 2-10).

표 2-10. GBS raw data 요약 (2021, 2022년도 샘플)

Sequencing file	No. of barcode	No. of sample	No. of reads	Avg. length (bp)	Total length (bp)	GC (%)*	Q30 (%)**	No. of demultiplexed reads (%)
AP-1_1.fastq	96	96	368,688,538	151	55,671,969,238	46.85	91.69	633,711,580 (85.94%)
AP-1_2.fastq	96	96	368,688,538	151	55,671,969,238			
Total	96	96	737,377,076		111,343,938,476			
AP-2_1.fastq	96	96	383,243,257	151	57,869,731,807	49.1	91.8	7,652,858 (95.85%)
AP-2_2.fastq	96	96	383,243,257	151	57,869,731,807			
Total	96	96	766,486,514		115,739,463,614			

*GC(%): GC content

**Q30(%): Ratio of vases that have phred quality score of over 30

Barcode sequence를 이용하여 demultiplexing을 수행하고 (표 2-11), adapter sequence 제거 및 sequence quality trimming을 수행하였다 (표 2-12). Adapter trimming은 cutadapt (ver. 1.8.3) 프로그램을 사용하고 sequence quality trimming은 SolexaQA (v.1.13) package의 DynamicTrim과 LengthSort 프로그램을 사용하였다. DynamicTrim은 phred score에 따라 short read의 양쪽 끝의 bad quality base를 잘라내고 양질의 cleaned read로 정제하는 과정을 수행하며, LengthSort는 DynamicTrim에서 너무 많은 base가 잘린 read를 제거하는 과정을 수행하였다. DynamicTrim의 phred score ≥ 20 을, LengthSort 과정은 short read length \geq bp를 사용하였다.

표 2-11. Demultiplexing 과정을 거쳐 얻은 샘플 별 raw data 통계치 정보

Bar Code	Sample name	Sum of raw reads	Total length of raw reads
CTCC	D_octopetala_4	14,466,022	2,184,369,322
TGCA	D_octopetala_5	9,688,618	1,462,981,318
ACTA	D_octopetala_6	14,150,826	2,136,774,726
CAGA	D_octopetala_8	5,486,872	828,517,672
AACT	D_octopetala_10	25,390,574	3,833,976,674
GCGT	D_octopetala_15	30,589,996	4,619,089,396
CGTGTGGT	O_digyna_72	1,329,534	200,759,634
GCTGTGGA	O_digyna_76	762,126	115,081,026
GGATTGGT	O_digyna_77	2,781,900	420,066,900
GTGAGGGT	O_digyna_78	2,438,148	368,160,348
TATCGGGA	O_digyna_79	2,219,914	335,207,014
TTCCTGGA	O_digyna_80	1,718,452	259,486,252

표 2-12. Trimming을 수행하여 barcode 및 adapter 서열을 제거하고 서열의 품질을 향상시킨 data

Sample name	Sum of trimmed reads	Total length of trimmed reads (bp)	Avg. length of trimmed reads (bp)	Trimmed/Raw (%)
D_octopetala_4	13,507,340	1,497,742,131	110.88	93.37%
D_octopetala_5	9,039,514	998,812,018	110.49	93.30%
D_octopetala_6	13,212,608	1,463,972,661	110.80	93.37%
D_octopetala_8	5,129,622	563,907,324	109.93	93.49%
D_octopetala_10	23,686,168	2,634,913,091	111.24	93.29%
D_octopetala_15	28,721,962	3,073,514,063	107.01	93.89%
...				
O_digyna_72	1,223,700	132,698,225	108.44	92.04%
O_digyna_76	710,984	77,729,110	109.33	93.29%
O_digyna_77	2,599,262	286,848,166	110.36	93.43%
O_digyna_78	2,286,096	251,319,834	109.93	93.76%
O_digyna_79	2,072,442	228,738,768	110.37	93.36%
O_digyna_80	1,604,362	176,203,275	109.83	93.36%

② Alignment to draft genome

전처리 과정을 통과한 cleaned reads를 BWA (0.7.17-r1188) 프로그램을 사용하여 draft genome에 mapping을 수행하였다 (표 2-13). Mapping은 draft genome과 시퀀싱한 샘플간의 raw SNP를 detection을 하기 위한 선행 과정으로서 BAM format의 파일을 생성하며, 옵션은 기본값을 사용하였다.

표 2-13. Draft genome에 mapping하여 추출한 통계치

Sample name	Sum of trimmed reads	No. of mapped reads	Percent of mapped reads (%)	No. of mapped region	Avg. depth of mapped region (#)	median depth of mapped region (#)	Total length of mapped region (bp)	Avg. length of mapped region (bp)	Reference Genome coverage (%)
D_octopetala_4	13,507,340	13,032,112	96.48	156,711	34.80	10.74	38,052,169	242.82	15.1801
D_octopetala_5	9,039,514	8,684,278	96.07	131,048	27.77	9.66	30,512,107	232.83	12.1722
D_octopetala_6	13,212,608	12,684,003	96.00	139,324	37.31	10.81	32,778,997	235.27	13.0765
D_octopetala_8	5,129,622	4,663,149	90.91	111,180	19.14	7.76	23,841,348	214.44	9.5110
D_octopetala_10	23,686,168	22,443,915	94.76	150,499	59.77	13.04	34,475,434	229.07	13.7532
D_octopetala_15	28,721,962	22,626,681	78.78	151,821	65.54	13.93	31,034,929	204.42	12.3807
O_digyna_72	1,223,700	436,329	35.66	24,567	11.74	6.00	680,142	27.69	0.2713
O_digyna_76	710,984	264,336	37.18	14,566	11.10	4.66	440,705	30.26	0.1758
O_digyna_77	2,599,262	1,025,186	39.44	34,653	19.86	7.73	921,938	26.60	0.3678
O_digyna_78	2,286,096	864,244	37.80	34,145	17.71	6.00	914,908	26.79	0.3650
O_digyna_79	2,072,442	790,542	38.15	33,901	15.95	6.00	911,762	26.89	0.3637
O_digyna_80	1,604,362	579,338	36.11	29,371	13.53	6.00	807,492	27.49	0.3221

③ Raw SNP detection 및 consensus sequence 추출

Clean reads를 draft genome에 mapping하여 생성된 BAM format의 파일을 SAMtools (0.1.16) 프로그램을 사용하여 raw SNP detection을 하고, consensus sequence를 추출하였다. 이때 SNP detection 하는 과정 전에 SEEDERS *in-house script*를 사용하여 SNP validation을 거친 후 raw SNP detection을 수행하였으며 다음의 옵션 이외에는 기본 값을 사용하였다.

- minimum mapping quality for SNPs (-Q) = 30
- minimum mapping quality for gaps (-q) = 15
- minimum read depth (-d) = 3
- maximum read depth (-D) = 138
- min indel score for nearby SNP filtering (-G) = 30
- SNP within INT bp around a gap to be filtered (-w) =15
- window size for filtering dense SNPs (-W) -30

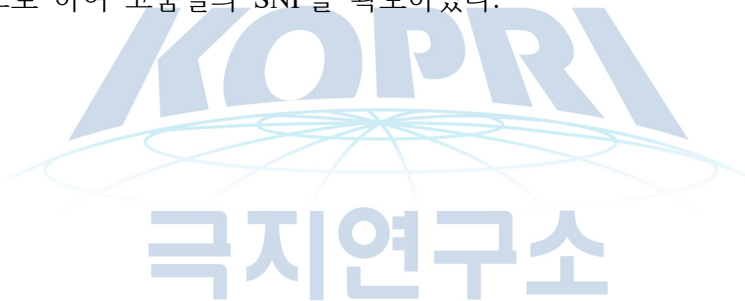
④ Generate SNP matrix

분석대상 간의 SNP 비교분석을 수행하기 위해 샘플간 통합 SNP matrix를 작성하였다. 각 샘플을 draft genome과 비교하여 얻은 raw SNP position을 후보로 하여 합집합의 리스트를 구축하고, 이 때 빈 영역(non-SNP loci)은 샘플의 consensus sequence로부터 채워 넣는 filling 과정을 거쳐 matrix를 작성하였다. 이후 샘플 간의 SNP 비교를 통해 mis-calling된 SNP locus를 필터링 하여 final SNP matrix를 작성하였다. 해당 locus를 기반으로 SNP를 유형 구분 기준에 따라 분류하였다.

- Homozygous: SNP read depth \geq 90%
- Heterozygous: $40\% \leq$ SNP read depth \leq 60%
- Etc.: 20% read rate $<$ 40%, and $60\% <$ read rate $<$ 90%

⑤ SNP filtering

고품질의 SNP를 개발하기 여러 조건으로 SNP filtering을 수행하였다. Biallelic인 SNP loci를 대상으로 read의 최소 개수가 3개 이상, minor allele frequency가 5% 초과, 결측된 데이터가 0%인 것을 조건으로 하여 고품질의 SNP를 확보하였다.



라. 담자리꽃나무 분자 마커 분석

담자리꽃나무의 SNP를 찾기 위해 NCBI에 공개된 담자리꽃나무 유전체를 이용했다. *Dryas octopetala* SRA sequence (SRX11162110)을 *De novo* genome assembly를 통해 draft genome 작성을 수행했으며 reference genome으로 사용하였다 (표 2-14).

표 2-14. *D. octopetala*의 draft genome (k-mer = 69)의 정보

Scaffolds No.	Length (bp) of contigs				
	Total length (bp)	Min. length (bp)	Max length (bp)	Avg. length (bp)	N50 length (bp)
547,073	250,671,376	200	28,662	458	515

담자리꽃나무 33개체를 분석하여 얻은 total SNP matrix에서 filtering 과정을 거쳤으며 33,010 loci를 선발하였다 (표 2-15).

표 2-15. Filter 단계별 SNP loci

단계	Filtering 조건	SNP matrix loci
1	Total SNP matrix	807,872
2	MAF (minor allele frequency) > 5%*	343,884
3	Missing data = 0%**	132,495
4	MAF > 5% and Missing data = 0%	33,010

*MAF (minor allele frequency) > 5%: 해당 locus의 전체 샘플에서 minor allele frequency가 5% 보다 큰 SNP를 선발

**Missing data = 0%: 해당 locus의 전체 샘플에서 missing data가 없는 SNP를 선발

SNP filtering 과정을 거쳐 선발된 33,010 SNP loci를 MEGA6 프로그램을 이용하여 샘플 간 유연관계 분석을 수행하였다. Neighbor-Joining 방법으로 1000번 반복하여 계통수를 작성하였으며 branch length의 합은 4.583으로 나타났다 (그림 2-8A)

SNP filtering 과정을 통해 선발된 33,010 SNP loci를 R package SNPRelate를 이용하여 주 성분 분석(principal component analysis, PCA)을 수행하였다. 각 수집한 세부 지역을 기준으로 33,010 SNP를 이용하여 PCA 분석을 했을 때는 두드러지게 구별되는 것을 확인하기는 어려웠다 (그림 2-8B).

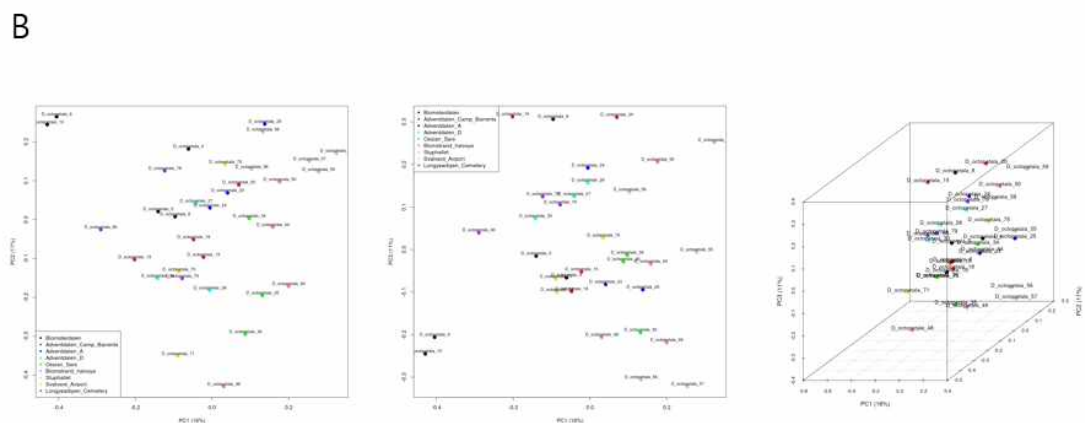
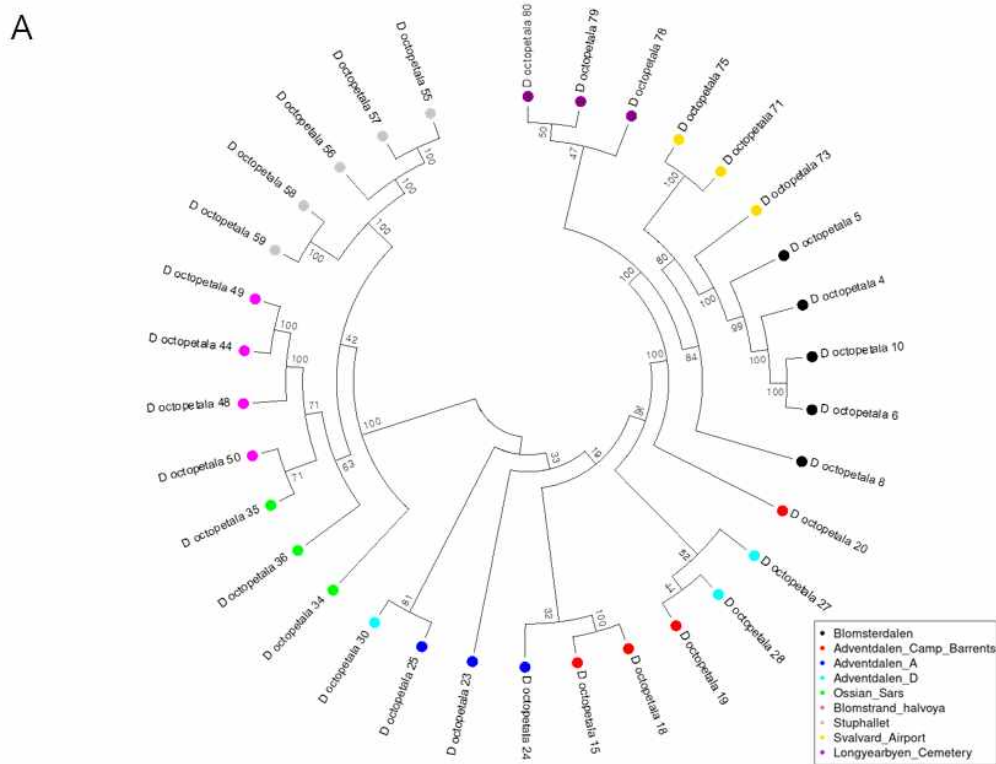


그림 2-8. 담자리꽃나무 33개체에 33,010 SNP를 이용한 Neighbor-Joining 방식의 계통수와 PCA 분석 결과

담자리꽃나무 33개 샘플의 filtered SNP 33,010 loci를 이용하여 Longyearbyen과 Ny-Ålesund 두 지역의 집단별 공통 SNP로 선발하고 공통으로 선발된 loci를 이용하여 두 그룹 간 polymorphic SNP 선발을 시도하였다. Comparable common SNP loci는 비교 그룹 간 공통 SNP(70% 이상 허용)를 비교할 수 있는 SNP loci 개수이며 공통 비율이 100%인 경우는 두 집단끼리 비교 가능한 locus가 확인되지 않아 각 그룹별 한 SNP locus에 70% 이상 같은 염기서열을 보이는 locus를 선발하여 2,849개가 선발됨. 이 중 비교 집단 간 공통 SNP를 비교하여 서로 polymorphism을 보이는 SNP를 찾았고 총 150개의 loci를 발견했다. 150개의 SNP를 적용하여 PCA 분석을 한 결과 Longyearbyen 지역과 Ny-Ålesund 지역의 샘플들이 구별이 되는 것을 확인하였다 (그림 2-9).

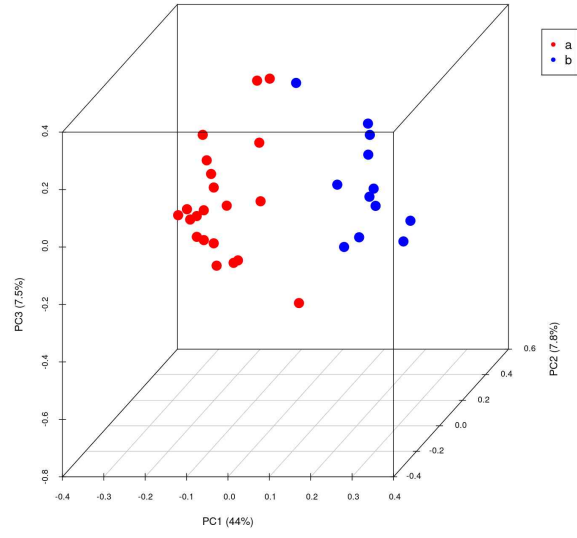
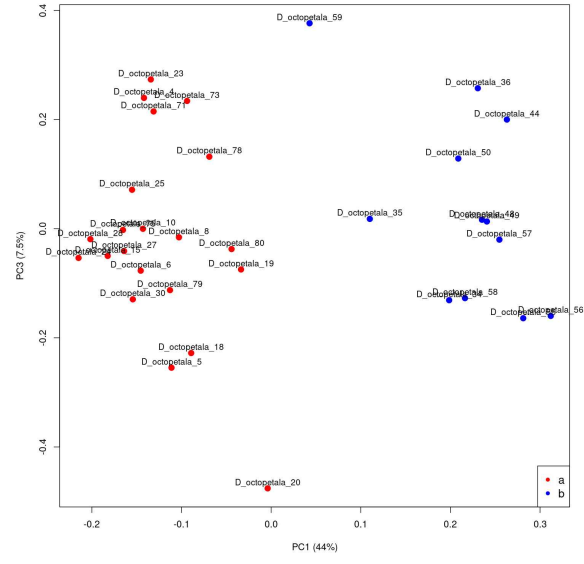
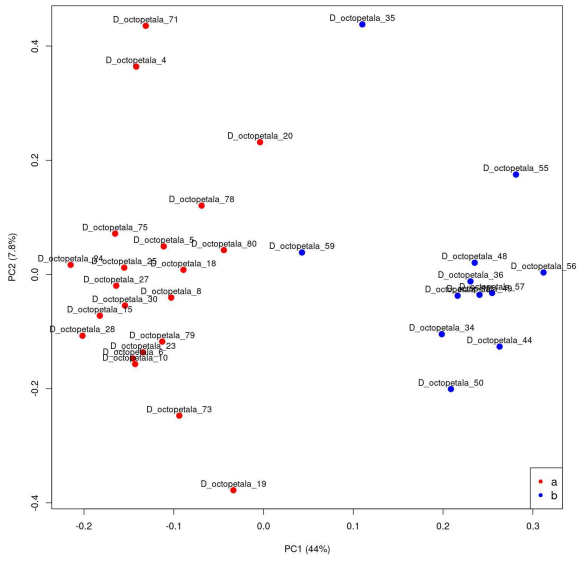


그림 2-9. 담자리꽃나무 150 SNP loci의 PCA 분석 결과

150개의 SNP loci 중 중복되는 위치와 primer가 만들어지지 않는 부위를 제외하고 PCR 분석 시스템을 구축하기 위해 총 118개의 primer sets가 디자인되었다 (표 2-16). Primer의 제작 조건은 다음과 같다.

- Maximum primer length 22
- Minimum primer length 18
- Maximum G/C content 0.6
- Minimum G/C content 0.4
- Maximum melting temperature 58°C
- Minimum melting temperature 48°C
- Maximum self annealing 18°C
- Maximum self end-annealing 8
- Max percentage point difference in G/C content 55
- Max difference in melting temperatures within a primer pair 5
- Max hydrogen bonds between pairs 18
- Max hydrogen bonds between pair ends 8
- Maximum length of amplicon 400



KOPRI
극지연구소

표 2-16. Longyearbyen과 Ny-Ålesund 집단을 비교하는 SNP의 디자인된 primer 정보

Name	Contig	Position	Score	Fragment length	Sequence	Melt. temp.
Do-SNP-Sv-1	Dryas_contig010285	143	49.42	136	F: GAGGAGGATGTGGATGAA R: ACATTATATCCAACCGTGC	54.17 55.19
Do-SNP-Sv-2	Dryas_contig300565	194	62.78	151	F: AAGAAGGAGATGAGAGGAGG R: AAGTGAAGTAGTCGAAAGAGG	57.37 56.96
Do-SNP-Sv-3	Dryas_contig144192	138	48.73	199	F: AGCCCAATGCACCATCAA R: GAGAGGCAAGGAGAAGGT	58.51 58.26
Do-SNP-Sv-4	Dryas_contig146450	192	58.95	157	F: AGAGAGAGAGAGAGATTGAA R: CGCCAACATCAATAAACAG	53.09 54.73
Do-SNP-Sv-5	Dryas_contig164145	132, 157	52.8	159	F: CTTTCATCACTTACCACCAC R: AAACCGATTGGAGAAGAC	55.91 54.16
Do-SNP-Sv-6	Dryas_contig194540	103	52.84	174	F: TACGATGTTGAGAAGCAC R: CCCCATACACTCCCAAAA	53.17 54.46
Do-SNP-Sv-7	Dryas_contig198669	78	52.93	121	F: GGAACAAGTGTGTGTGTA R: GGAGCTAGGAAGGCAAAA	54.22 55.9
Do-SNP-Sv-8	Dryas_contig199558	83	45.63	144	F: GTGATGGCTGCATTGTAAA R: AAATAGCATGAACACGGG	55.5 55.6
Do-SNP-Sv-9	Dryas_contig205515	70	56.94	208	F: GCAGATGAGCAACCATAA R: GGGAAAAGCAGTATGAAGA	53.7 54.63
Do-SNP-Sv-10	Dryas_contig246325	188	47.64	175	F: TGCTTAGAGAGAGAGGG R: GCATGGTGTAGCTGAC	52.19 52.89
Do-SNP-Sv-11	Dryas_contig546987	6698	40.62	177	F: CTAAAAGCCTTACCAACC R: CTGAAAAGTCTGAGTATGTG	53.7 54.18
Do-SNP-Sv-12	Dryas_contig253201	183	55.77	213	F: TCGACCATACAATTCCA R: GCCCAAAGATCAACAACA	54.59 53.97
Do-SNP-Sv-13	Dryas_contig273722	144	38.73	252	F: CTCCGAAAGCTCAAACATCT R: CAAACGTTACAGGACCC	57.64 57.57
Do-SNP-Sv-14	Dryas_contig296446	246	41.96	249	F: TGAAGCCATGTTAGCCGT R: GTGACCCAAGCAAGCTAT	57.57 56.92
Do-SNP-Sv-15	Dryas_contig296625	224	38.14	245	F: CAACAGCTACAAGCATAACA R: AGCTTGTAAGGCAGTGAC	56.75 56.88
Do-SNP-Sv-16	Dryas_contig297429	147	55.1	220	F: TAGAAAGACAAGCCAGAG R: GGGAGAAAGCTAAGAAGG	52.62 52.36
Do-SNP-Sv-17	Dryas_contig320327	164	51.64	236	F: AGAAAGATGTTGACAGAGA R: ACGTTAGGGTTTTAGGCA	54.61 56.08
Do-SNP-Sv-18	Dryas_contig326156	218	70.11	279	F: AGGAGATAAGTTGTGGTG R: AGTTGAGGGGTTTGAATG	53.68 54.73
Do-SNP-Sv-19	Dryas_contig359220	110	40.82	274	F: CTTTATTGTTCACTAGGCCA R: CGGAGATTCACATTCTTTCA	55 54.99
Do-SNP-Sv-20	Dryas_contig369512	185	50.28	305	F: CCACCATTTCGAATCACCA R: ACGAATTATGAGCAGGAC	53.86 54.16
Do-SNP-Sv-21	Dryas_contig394975	113	51.02	313	F: ACAAAGGAGAAATTGATGGG R: TAGGGCATGATGTGAAGG	55.37 54.85
Do-SNP-Sv-22	Dryas_contig412087	311	50.98	251	F: GCATAGTTCATCATTAGGAG R: GGGAAGATTTGTGAGAAG	52.4 52.91
Do-SNP-Sv-23	Dryas_contig436999	124	45.63	309	F: GCAAAACCAATCACCTTCA R: CATTGCGATCAGGTAAT	54.5 54.26
Do-SNP-Sv-24	Dryas_contig438544	266	64.93	266	F: TGGTTTTGTTTGTGCTGG R: TTGTTAATGGCGGTGGTG	55.07 56.83
Do-SNP-Sv-25	Dryas_contig439144	155	43.06	279	F: ACAATTGACCGAGACTTCC R: AATCATGCCAATGCCTCC	57.11 57.97
Do-SNP-Sv-26	Dryas_contig445714	345	41.26	311	F: GCAACTTAAAACCTCTGCAT R: GTGGTGGTACAGATGGA	56.3 56.21
Do-SNP-Sv-27	Dryas_contig456967	337	67.54	325	F: CCCATCCAATCTTCTAC R: TTTATTCTTCCACCGCC	54.78 54.42
Do-SNP-Sv-28	Dryas_contig457438	389	54.2	263	F: CAAAAAGAGCCCAACTCA R: ACATTCACATAGCGCCA	54.73 54.64

Do-SNP-Sv-29	Dryas_contig458462	198	54.34	298	F: TCTCTGTTTTGGGGGCTT R: CTCCTTCCAGAATTTCCAC	56.66 56.09
Do-SNP-Sv-30	Dryas_contig466369	206	57.53	284	F: CCCTCTTTCCTGAGCCAA R: CACCTCCACTTTTTCCAC	56.42 55.19
Do-SNP-Sv-31	Dryas_contig466990	578	28.56	194	F: AGAATTTTTGGAGGCTCG R: CAAGTGAAGACTGATCGAA	56.06 52.8
Do-SNP-Sv-32	Dryas_contig467490	441	44.16	371	F: GTTCTGCATGTTTCAATC R: AATGGGTAGGAGAGAGAC	54.1 54.52
Do-SNP-Sv-33	Dryas_contig474878	264	63.6	282	F: CTCTCATCCCTCCCACATT R: CCCAATCCAAAAACACGCA	57.75 57.65
Do-SNP-Sv-34	Dryas_contig478059	433	53.95	301	F: AACCTGAGAGTGTGCCAA R: TAGGAGAGGAGAACCGGA	55.74 56.4
Do-SNP-Sv-35	Dryas_contig482947	178	36.92	218	F: CCCTTAATTGAGTAGCTC R: TGCGGGGGAAAATATATC	52.45 52.44
Do-SNP-Sv-36	Dryas_contig485544	334	63.51	291	F: GCCCAACTCTTCTCACT R: ATCCTTTCCTTGCCTCT	57.92 57.81
Do-SNP-Sv-37	Dryas_contig485544	445	65.87	368	F: TGAGCTCTGGACATGTAT R: GAGAGGGAAAGAAGAGGG	53.55 54.77
Do-SNP-Sv-38	Dryas_contig486756	610	62.91	266	F: ACCTTAACATCCCACCT R: TTGTTTTCCCTACTTGCT	54.3 54.89
Do-SNP-Sv-39	Dryas_contig491917	169	42.79	271	F: GTTCTGGATCTCTGGGC R: GATGAACTTGCAAAGGGG	56.56 57.03
Do-SNP-Sv-40	Dryas_contig494579	490	50.44	271	F: CATTAAATAGCTGCCACC R: CTCACATATCCCTACTCTT	54.73 51.8
Do-SNP-Sv-41	Dryas_contig496765	394	47.44	269	F: CGTATATCTGGTAGGTAGCTT R: CTGTGTGTAGCTAGGTTT	54.83 54.39
Do-SNP-Sv-42	Dryas_contig497220	633	63.5	222	F: AAGTGGTGGTGATGATCAAG R: GATGGGTTTGGTGGTTGG	57.35 57.99
Do-SNP-Sv-43	Dryas_contig497574	394	42.5	284	F: GATAGTGTGGTGCCAGA R: TATGCGTCCATTTGCT	54.87 56.22
Do-SNP-Sv-44	Dryas_contig498026	457	54.78	307	F: GCTCCAAAGAAAGGTTAATG R: GGATGTTGGTTGATTGAGT	54.64 55.09
Do-SNP-Sv-45	Dryas_contig498026	683	50.59	312	F: CGTCAAACCAACAGCTCTA R: TCTCTGTGCTACTTCATT	55.56 55.06
Do-SNP-Sv-46	Dryas_contig498212	279	43.82	266	F: GATGTCAAGGTAGGTGAT R: TCTAGACTCAAAGGGCCA	52.74 52.39
Do-SNP-Sv-47	Dryas_contig498212	385	35.15	205	F: TTCCACACATTCTTCAG R: TAAAATGGCTTTCGCAGC	53.61 54.82
Do-SNP-Sv-48	Dryas_contig498763	234	47.29	294	F: AAACCGATAGGCAGCAAA R: AGCTATTGTACCTGCGGA	55.61 55.3
Do-SNP-Sv-49	Dryas_contig499916	299	52.44	305	F: GGTCTGGATGCTTTATTTGT R: CTGCAAAAGAAGTCCATGT	55.58 55.61
Do-SNP-Sv-50	Dryas_contig503320	391	52.42	289	F: GTTTTGTATTGTCGTGGG R: CTAACACAAAAACCGCTG	53.98 54.33
Do-SNP-Sv-51	Dryas_contig503456	605	41.13	295	F: CACAGTACATAGAACAAACC R: TTATTAGTTGCAGCACTCTC	52.91 53.46
Do-SNP-Sv-52	Dryas_contig503715	541	44.13	305	F: CTTGTGGAAGGAAATTGTGA R: GCTCCAATGATTCTCTTCT	55.05 54.58
Do-SNP-Sv-53	Dryas_contig504261	577	53.09	285	F: CCACCTGCCAATGATACT R: CCACACTCTTCTGATCATCT	57.73 57.41
Do-SNP-Sv-54	Dryas_contig505069	225	52.38	329	F: AGATATGCATTAAGCTGGGT R: CAAAAGGGGTAGCAGGAA	56.55 57.47
Do-SNP-Sv-55	Dryas_contig505580	107	38.86	256	F: CAAGGTTCTTTCCAGTTC R: GATAAGCCTGAATTGAGTG	53.13 52.98
Do-SNP-Sv-56	Dryas_contig509742	296	44.03	272	F: CGTTTGCTGCTGATTTAC R: AGGATTACATGGGCGGA	53.95 56.62
Do-SNP-Sv-57	Dryas_contig510765	141	55.35	309	F: CCATAATCTACTCACCGCAA R: TCTTTCTGGTTCTGGTGCT	56.24 57.18
Do-SNP-Sv-58	Dryas_contig512673	540	56.12	303	F: GACCCGATGTAGCAAAA R: GCAATGGGTGATGAGGAA	56.34 56.64

Do-SNP-Sv-59	Dryas_contig514232	480	61.02	263	F: GTGAAGAACAAGAAGCGGA R: ATGGGCAGAAATGGGTGA	57.28 57.21
Do-SNP-Sv-60	Dryas_contig514263	238	51.04	269	F: ACTCACCTATCTCAAACCTC R: TATCACCAGCGTCACATC	52.56 54.78
Do-SNP-Sv-61	Dryas_contig514372	598	54.63	317	F: GCTACATCCACATTCTCTT R: GGGTTGATTTGTTTGGA	54.75 55
Do-SNP-Sv-62	Dryas_contig514678	735	48.38	337	F: CATTTGTGTAGGTGTCAAG R: ACTGGCTAATGTTGTGGA	55.15 55.15
Do-SNP-Sv-63	Dryas_contig517529	771	47.19	273	F: TCGAGCAGAGGAGTCTTT R: CTCTGTGATCTCTTCATCTT	55.84 54.96
Do-SNP-Sv-64	Dryas_contig518429	645	53.8	346	F: TATCACAATCCCTACGCC R: GAAGGAGACGGTGAATGA	54.37 54.42
Do-SNP-Sv-65	Dryas_contig519870	1032	39.58	207	F: GAGGATTGTTTCGGAGTT R: ACTACCTTCCTAACGAG	53.66 52.51
Do-SNP-Sv-66	Dryas_contig521054	1122	41.11	256	F: TTATCATCAGAAAAGGGGTG R: GGATGATCTAAAGCAGAGT	53.23 53.72
Do-SNP-Sv-67	Dryas_contig521607	449	38.49	306	F: AACAGTACTCACCTTCTCA R: CCAATTTATCATCTTGACGC	54.2 55.82
Do-SNP-Sv-68	Dryas_contig521866	554	56.7	231	F: GAAGACCAAATGTGCAAAG R: AATGGTTGTGGAGGAAG	55.92 56.97
Do-SNP-Sv-69	Dryas_contig522487	212	53.52	274	F: GGACCTGCAAAAACAAAAC R: CAAATGAGCAAGCGAAAAGA	55.42 55.54
Do-SNP-Sv-70	Dryas_contig525345	667	61.22	297	F: CATCAACCACCAAATATCC R: GCTCCTAAAACTGACCT	54.33 53.49
Do-SNP-Sv-71	Dryas_contig525347	829	55.99	305	F: AGGGAAGCAATATGTGGA R: GGAGGCAATAAGAATAAGAG	54.02 53.21
Do-SNP-Sv-72	Dryas_contig525812	919	52.94	297	F: TTGTCTTGCCATCTATTCT R: GCTTCTTGTTGTTCTAACCT	55.42 55.32
Do-SNP-Sv-73	Dryas_contig527641	338	53.25	301	F: CAATCACGCACTCTCCTC R: TAAACAGCTCCCAAGCCA	57.05 56.07
Do-SNP-Sv-74	Dryas_contig527641	1202	54.54	294	F: GTGATGAAAGTTGTGTGG R: CAGCTGGCAAGAAACAAA	54.18 55.66
Do-SNP-Sv-75	Dryas_contig528268	198	56.82	300	F: GGGTAGAGGTCAAGAAAG R: ACAGTGTTATTGGTGAGG	54.07 53.95
Do-SNP-Sv-76	Dryas_contig528327	539	50.48	229	F: CTTAACTCCATCCACTCCAC R: TCTAGCTGGTTACTGGGG	56.61 56.44
Do-SNP-Sv-77	Dryas_contig528724	878	42.59	220	F: CTATATAACCACACACGCTT R: CGGTGATCAAAACATATGTC	53.91 55.14
Do-SNP-Sv-78	Dryas_contig528794	684	41.93	340	F: AGTATTGGGTATTCTCTGC R: CAACAATCCCATCACGAA	53.48 53.49
Do-SNP-Sv-79	Dryas_contig528794	1354	54.03	282	F: GTATTGGTGAGCTATGGTT R: CCTCTCCACATTCTTCATC	53.59 53.83
Do-SNP-Sv-80	Dryas_contig529084	594	59.76	333	F: AGGTGATTAATGTAGGATGG R: AGCAGAGTAGGGATAAAAG	54.01 53.92
Do-SNP-Sv-81	Dryas_contig530631	1529	34.42	304	F: ATGAACATAGGCCTGAAC R: CCCATTTCTTAGAAGTCT	54.08 51.78
Do-SNP-Sv-82	Dryas_contig531259	781	59.29	269	F: AGAGAGAAATGGCTGCAC R: CAGCACCCACAAACACAA	57.13 57.9
Do-SNP-Sv-83	Dryas_contig531625	384, 467	56.42	319	F: CGCGTTTCACATGGAGTA R: CTGGTGGTTGTTGTTCT	56.23 56.45
Do-SNP-Sv-84	Dryas_contig532794	803	49.89	312	F: GCATCTGTGTCGTGTAGT R: GGGTGTCAAGCTTAGGG	56.6 57.28
Do-SNP-Sv-85	Dryas_contig532826	486	48.45	379	F: CGTCGCTATCATCTGTAT R: TGTGACAGCTTACCCTT	54.3 54.29
Do-SNP-Sv-86	Dryas_contig532826	824	51.99	273	F: TGGCCTTGTGTGTTGAGT R: CCCAAGTTTGTCTCAAT	57.01 56.28
Do-SNP-Sv-87	Dryas_contig533118	1188	51.81	270	F: TCCAGGCATTTGTCGTTT R: GCATCTTCCCCATTTTCATT	56.6 56.63
Do-SNP-Sv-88	Dryas_contig534229	1321	56.15	242	F: GAGGAAGATGATGATGAAG R: GAAATAGTAGTGTGCAGC	52.53 52.72

Do-SNP-Sv-89	Dryas_contig535670	1001	37.76	327	F: GCTATAATTCCTTCTCAGTG R: AACCAACTGCAAGGTCAA	53.07 54.56
Do-SNP-Sv-90	Dryas_contig535945	1417	39.25	228	F: CGCCGTCATTTCAGTTCAA R: GCTGCAGAGGATAGAACC	56.45 54.76
Do-SNP-Sv-91	Dryas_contig536210	1801	66.02	217	F: TTGTGTGATTTGGTGTGTTG R: CTCTCTGTATTCCACCTTCTT	55.88 55.52
Do-SNP-Sv-92	Dryas_contig536657	1391	57.63	234	F: GATGGCATTTTGGAGTTAGT R: GTTTTTGGAGCAGGTTGT	55.4 56.31
Do-SNP-Sv-93	Dryas_contig537116	1746	53.35	273	F: AAGGCCAACAAAAGCGAA R: GCTGCTGCTCCTTATACT	56.78 56.52
Do-SNP-Sv-94	Dryas_contig537596	1340	60.34	276	F: TCGTGTCTTGTCTTTCTTG R: TGGGTGAGGCTATGTATT	54.3 54.2
Do-SNP-Sv-9'	Dryas_contig'37993	10'1	54.28	28'	F: GAATTTGAAGTTTGGGGAAG R: CCTTTTCTCCTGCATTCT	54.1 55.42
Do-SNP-Sv-9	Dryas_contig'38480	1842	49	3	F: ACCCAAAAGGACCAACA R: CAGCAGTTCTACAAACAAGA	56.62 54.18
Do-SNP-Sv-9	Dryas_contig'38501	708	55.65	339	F: TAATCCACCCTCCTCCACC R: GAGTCCATCTTCTGCAGC	57.68 57.07
Do-SNP-Sv-98	Dryas_contig538935	483	36.56	320	F: GCATAAGCTCCACCAGAG R: GGGCACAGCACAAATCA	57.5 57.52
Do-SNP-Sv-99	Dryas_contig539384	715	63.93	269	F: GAAAGAGAATGAAGAGGG R: TTGTGACGTGCATATGGA	52.71 54.39
Do-SNP-Sv-100	Dryas_contig540159	686	49.67	344	F: CTCAGAAGCCAAGCGTAA R: TGCTAAGGAGATGGTTGT	53.82 54.33
Do-SNP-Sv-101	Dryas_contig541074	637	54.45	299	F: TACTTCATCCTCCGTCTT R: TTATGGAGATAGCGAGGT	53.17 53.93
Do-SNP-Sv-102	Dryas_contig541820	214	47.96	265	F: TCGGTTCTTCAATGGTGG R: ATCTCAACTCACAGGCTC	55.84 55.48
Do-SNP-Sv-103	Dryas_contig542426	1507	51.38	247	F: GGCTCTTTCCTTCTTCAAAT R: GGTGAGTTGTTTTCTTGT	55.04 56.01
Do-SNP-Sv-104	Dryas_contig543113	3109	57.03	230	F: TATGGATGGTGGATAGGT R: CAGGTTAGTGGTGGATGA	52.1 52.36
Do-SNP-Sv-105	Dryas_contig543298	1032	49.19	392	F: AAAGGCACTACCAACCAA R: TGTGTCTGGTGAATGGGAT	56.62 56.78
Do-SNP-Sv-106	Dryas_contig543321	2543	49.36	241	F: TCGGATTGTTTGTCTATGC R: TCAAAAATTCCCCACCCT	55.08 55.13
Do-SNP-Sv-107	Dryas_contig543468	768	50.82	361	F: GGGTCTCTTACATTCTACA R: TAAAGACAAAGGATGGGG	51.76 51.83
Do-SNP-Sv-108	Dryas_contig543958	1440	54.32	241	F: CCAACTTTGATATCTGCTCT R: CACCATTCTGCTTCACT	55.41 55.71
Do-SNP-Sv-109	Dryas_contig544757	1679	58	312	F: CATTCCATTCTCAATCCC R: TCATGTGTCTCCATTCT	54.04 54.07
Do-SNP-Sv-110	Dryas_contig544837	1195	62.21	256	F: ATATGGGGAGGGATGAGGA R: CGAAAAGAGACCCACAGAA	55.67 55.15
Do-SNP-Sv-111	Dryas_contig545549	4501	51.93	290	F: TCTTGCTTCTCTGTGCTT R: TTGAACTTTCCTCGGCAT	54.8 54.94
Do-SNP-Sv-112	Dryas_contig545620	311	42.69	294	F: ACTGAAGCTGTAAATCCC R: GTCTTGCTCATGGTATTG	53.82 53.57
Do-SNP-Sv-113	Dryas_contig546160	969	70.02	220	F: TGGTGGTGATTGTGGTGT R: CGTTGTTGTTATTGGTGTG	57.64 55.05
Do-SNP-Sv-114	Dryas_contig546301	1252	61.28	315	F: CTCTAATCCCGCAACCAA R: CTAACCCATAACCCAATC	54.96 52.03
Do-SNP-Sv-115	Dryas_contig546480	473	72.93	308	F: GGTGGTAAAGTGGGATTG R: AAGGTGGTTAGTTGATAGAG	54.5 53.89
Do-SNP-Sv-116	Dryas_contig546522	4243	59.03	267	F: AATAGAAGAGTGGGTGTG R: CTGGTAATATAAATGGGTGG	53.09 53.61
Do-SNP-Sv-117	Dryas_contig546665	5139	61.87	288	F: GGCATTGGTTTGGGTATT R: CTGTTTTCTATTGCGTGT	54.87 55.46
Do-SNP-Sv-118	Dryas_contig546715	4562	54.2	353	F: CCTCTTCTGGTCATTCT R: ATCTGCCTCTCATTGGT	55.35 55.4

33개체에서 두 집단을 구별하는 150개의 SNP의 각각의 locus에서 나타나는 유전자형을 확인하여 genotyping 하였다. Longyearbyen 및 Ny-Ålesund 집단의 유전형 구조를 분석하기 위해 structure software (ver. 2.3.4)를 사용하였다. K=1부터 K=10까지 분석하여 최적의 K값을 찾기 위해 delta-K값을 확인하였고 K=2에서 가장 높았으며 그 다음으로 K=3, K=8에서 높은 값을 나타냈다. Structure 분석 결과 Longyearbyen 집단과 Ny-Ålesund 집단의 담자리꽃나무 개체들이 서로 다른 구조의 유전형을 나타내는 것이 확인되었다 (그림 2-10).

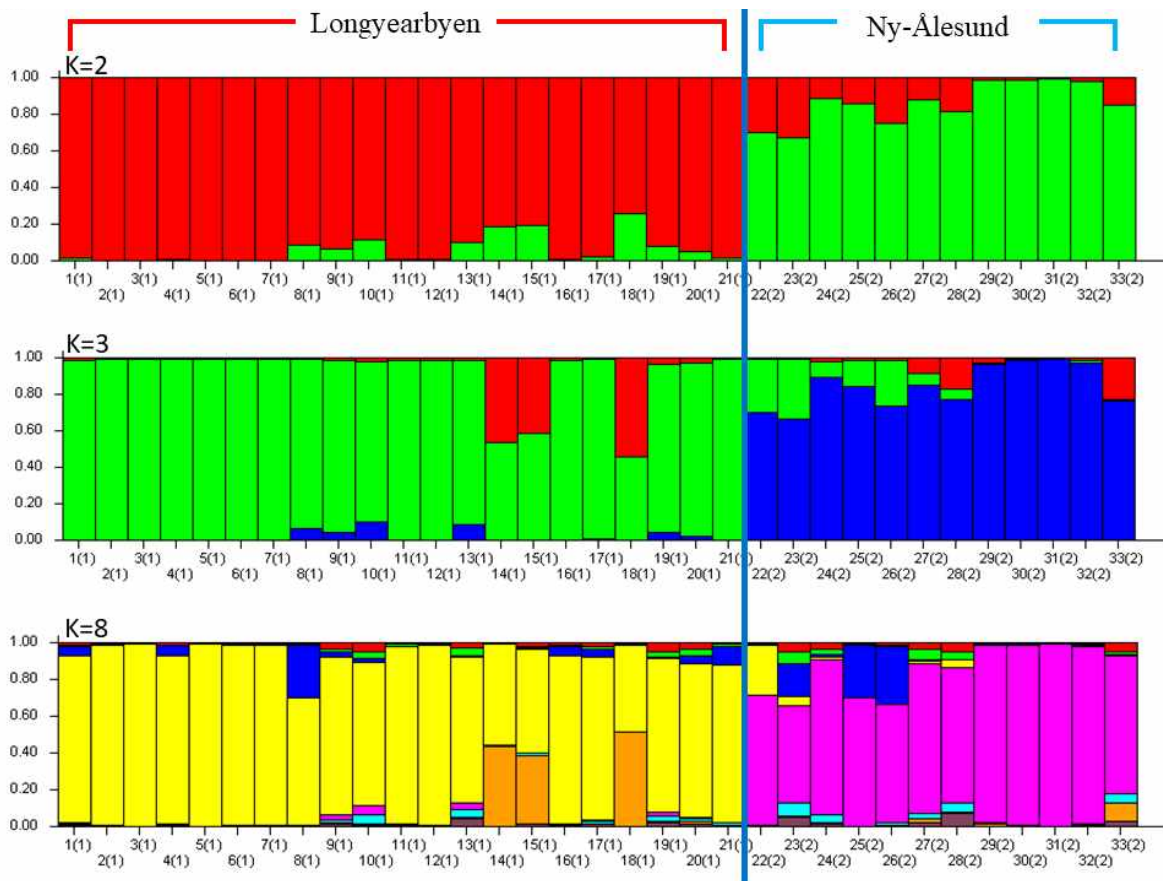


그림 2-10. Longyearbyen과 Ny-Ålesund 집단을 구별하는 SNP의 유전형 구조를 분석하기 위한 structure 분석. K=2, K=3, K=8일 때 보여주는 두 집단의 담자리꽃나무 structure 분석 결과

두 집단간의 유연관계를 알아보기 위해 담자리꽃나무 33개체를 150개의 SNP로 genotyping하여 계통수 분석을 실시하였다. 그 결과 Longyearbyen 집단과 Ny-Ålesund 집단의 개체들이 서로 구별되는 것으로 나타났다 (그림 2-11).

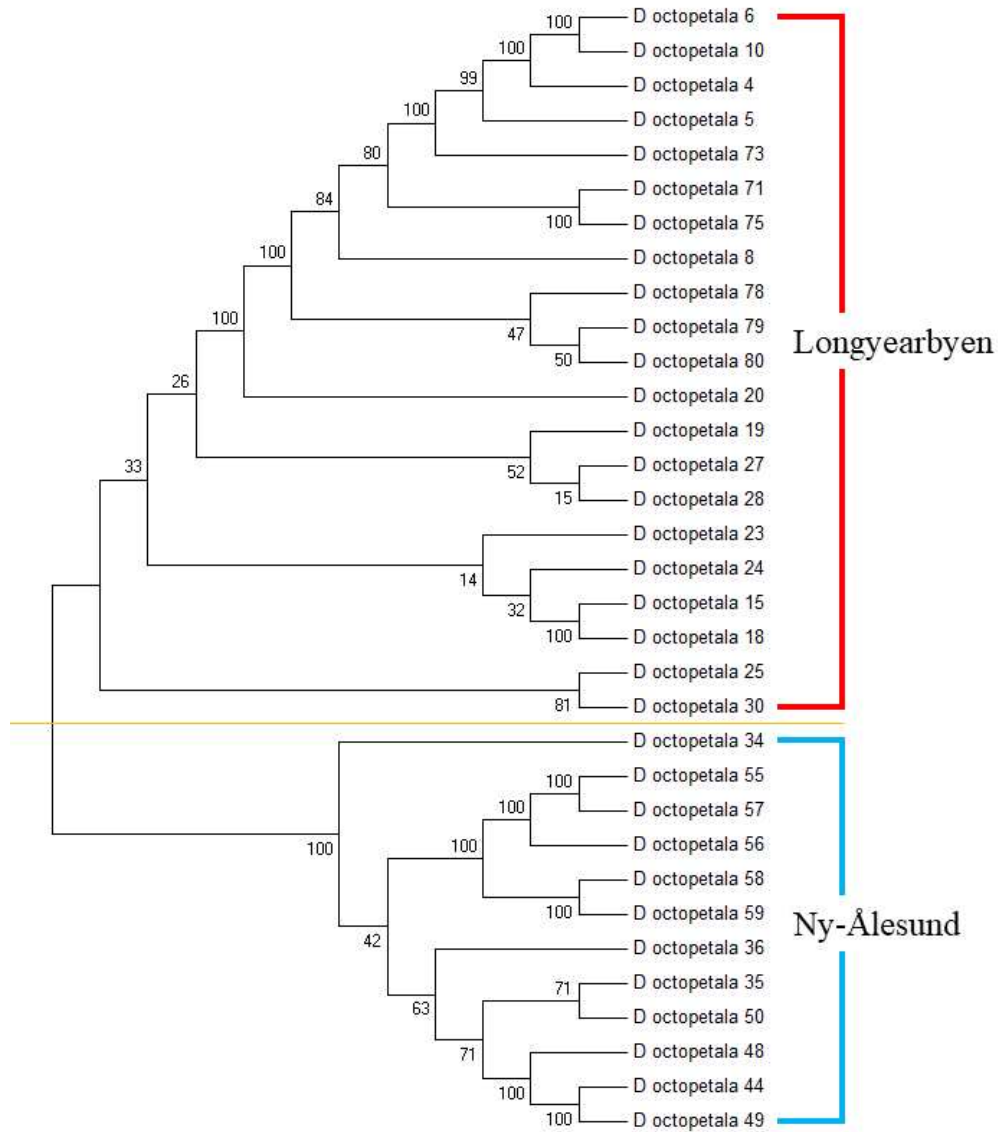


그림 2-11. 두 집단에서 수집한 33개체의 담자리꽃나무의 계통수 분석

분석에 사용된 150개의 SNP의 집단간의 다형성 구별 능력을 파악하기 위해 각 SNP 별로 다형성 지수와 이형접합성 등 통계적인 수치를 산출하였다 (표 2-17).

표 2-17. SNP genotyping 데이터 통계분석

Pop	Locus	N	Na	Ne	I	Ho	He	uHe	F
Longyearbyen	Dryas_contig010285	21	2.000	1.208	0.314	0.095	0.172	0.177	0.447
	Dryas_contig300565	21	2.000	1.446	0.487	0.190	0.308	0.316	0.382
	Dryas_contig438544	21	2.000	1.385	0.451	0.143	0.278	0.285	0.486
	Dryas_contig439144	21	2.000	1.208	0.314	0.095	0.172	0.177	0.447
	Dryas_contig479340	21	2.000	1.324	0.410	0.286	0.245	0.251	-0.167
	Dryas_contig498763	21	2.000	1.049	0.113	0.048	0.046	0.048	-0.024
	...								
	Mean	21	1.980	1.576	0.492	0.408	0.328	0.336	-0.095
	SE	0	0.011	0.030	0.016	0.025	0.013	0.014	0.036
Ny-Ålesund	Dryas_contig010285	12	2.000	1.180	0.287	0.000	0.153	0.159	1.000
	Dryas_contig300565	12	2.000	1.385	0.451	0.167	0.278	0.290	0.400
	Dryas_contig438544	12	2.000	1.280	0.377	0.250	0.219	0.228	-0.143
	Dryas_contig439144	12	2.000	1.492	0.512	0.083	0.330	0.344	0.747
	Dryas_contig479340	12	2.000	1.280	0.377	0.250	0.219	0.228	-0.143
	Dryas_contig498763	12	2.000	1.180	0.287	0.167	0.153	0.159	-0.091
	...								
	Mean	12	1.973	1.584	0.501	0.432	0.334	0.349	-0.173
	SE	0	0.013	0.029	0.016	0.025	0.013	0.013	0.035

Na = No. of Different Alleles

Ne = No. of Effective Alleles = $1 / (\sum pi^2)$

I = Shannon's Information Index = $-1 * \sum (pi * \ln(pi))$

Ho = Observed Heterozygosity = No. of Hets / N

He = Expected Heterozygosity = $1 - \sum pi^2$

uHe = Unbiased Expected Heterozygosity = $(2N / (2N-1)) * He$

F = Fixation Index = $(He - Ho) / He = 1 - (Ho / He)$

디자인된 primer set는 PCR 분석을 거쳐 sequencing으로 genotyping 하고 최종적으로 고품질의 분자마커를 개발을 목표로 하였다 (그림 2-12). 디자인한 primer 중 추가 유전자원에 대하여 genotyping을 실시하기 위해 allele frequency가 95% 이상인 SNP를 선발하였다 (그림 2-13). 총 25개의 SNP locus에서 95% 이상의 allele frequency를 나타냈고 42개의 추가 유전자원에 대해서 해당 SNP 구간을 PCR과 sequencing을 통해 genotyping을 수행했으며 이를 통해 두 집단을 구별할 수 있는 SNP 마커 개발을 확인하였다.

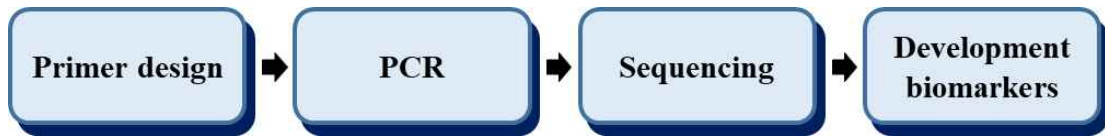


그림 2-12. 담자리꽃나무 SNP 마커 개발 모식도



그림 2-13. Allele frequency가 95% 이상으로 나타나는 SNP 선발 과정

선발된 25개의 SNP에서 총 75개 담자리꽃나무 샘플을 이용하여 genotyping을 실시하였을 때 샘플의 수량이 증가해도 집단간 구별능력이 유지되는 SNP를 선발하였다. Longyearbyen과 Ny-Ålesund 지역에 대하여 75개 개체에서 allele frequency가 95% 이상이 되는 SNP를 선발하였고 최종적으로 13개의 SNP 마커를 개발하였다 (표 2-19).

표 2-19. 담자리꽃나무 75개체에 대한 집단별 allele frequency

Locus	Allele	Longyearbyen	Ny-Ålesund	Greenland
Do-SNP-Sv-16	1	0.500	0.041	0.000
	4	0.500	0.959	1.000
Do-SNP-Sv-22	1	0.457	0.824	0.667
	4	0.543	0.176	0.333
Do-SNP-Sv-27	1	0.457	0.068	1.000
	3	0.543	0.932	0.000
Do-SNP-Sv-29	1	0.000	0.378	0.000
	2	1.000	0.622	1.000
Do-SNP-Sv-33	3	0.957	0.405	1.000
	4	0.043	0.595	0.000
Do-SNP-Sv-43	3	0.543	0.889	1.000
	4	0.457	0.111	0.000
Do-SNP-Sv-48	1	0.971	0.203	0.500
	4	0.029	0.797	0.500
Do-SNP-Sv-49	2	0.971	0.135	1.000
	4	0.029	0.865	0.000
Do-SNP-Sv-50	1	0.471	0.057	1.000
	2	0.529	0.943	0.000
Do-SNP-Sv-54	3	0.971	0.446	1.000
	4	0.029	0.554	0.000
Do-SNP-Sv-57	1	0.329	0.027	0.000
	3	0.671	0.973	1.000
Do-SNP-Sv-59	1	0.014	0.419	0.167
	2	0.986	0.581	0.833
Do-SNP-Sv-62	1	0.029	0.635	1.000
	3	0.971	0.365	0.000
Do-SNP-Sv-65	2	0.057	0.541	0.000
	4	0.943	0.459	1.000
Do-SNP-Sv-70	1	0.443	0.122	0.500
	2	0.557	0.878	0.500
Do-SNP-Sv-76	1	0.000	0.378	0.000
	2	1.000	0.622	1.000
Do-SNP-Sv-77	3	0.457	0.905	1.000
	4	0.543	0.095	0.000
Do-SNP-Sv-94	1	0.043	0.527	0.000
	3	0.957	0.473	1.000
Do-SNP-Sv-95	2	0.514	0.203	0.333
	3	0.486	0.797	0.667
Do-SNP-Sv-97	1	0.986	0.595	1.000
	2	0.014	0.405	0.000
Do-SNP-Sv-100	1	0.985	0.486	1.000
	2	0.015	0.514	0.000
Do-SNP-Sv-115	2	0.397	0.730	0.000
	3	0.603	0.270	1.000

개발한 13개의 SNP 마커에 대하여 75개 담자리꽃나무 샘플을 적용했을 때 나타나는 양상을 Power Marker software를 통해 마커의 정보를 통계처리 하고 PIC value를 산출하였다. 그린란드 샘플 3개를 제외하고 총 72개의 샘플을 13개의 SNP를 적용했을 때 구별되는 것을 확인하기 위해 UPGMA 방식의 tree를 작성하였고 그 결과 해당마커만을 사용하여 Longyearbyen 집단과 Ny-Ålesund 집단의 개체들을 구별할 수 있음을 확인하였다 (그림 2-13).

표 2-20 최종 선발된 13개의 SNP를 75개 샘플에 적용했을 때 나타나는 각 마커의 통계처리 결과

Marker	MAF	GN	SS	NO	AN	A	GD	H	PIC
Do-SNP-Sv-16	0.7432	3	75	74	2	0.9867	0.3817	0.2703	0.3088
Do-SNP-Sv-27	0.7133	3	75	75	2	1.0000	0.4090	0.3067	0.3253
Do-SNP-Sv-29	0.8108	3	75	74	2	0.9867	0.3068	0.2432	0.2597
Do-SNP-Sv-33	0.6867	3	75	75	2	1.0000	0.4303	0.2800	0.3377
Do-SNP-Sv-48	0.5733	3	75	75	2	1.0000	0.4892	0.2133	0.3696
Do-SNP-Sv-49	0.5600	3	75	75	2	1.0000	0.4928	0.1067	0.3714
Do-SNP-Sv-50	0.7055	3	75	73	2	0.9733	0.4156	0.3973	0.3292
Do-SNP-Sv-54	0.7133	3	75	75	2	1.0000	0.4090	0.3067	0.3253
Do-SNP-Sv-57	0.8311	3	75	74	2	0.9867	0.2808	0.2568	0.2414
Do-SNP-Sv-59	0.7800	3	75	75	2	1.0000	0.3432	0.3333	0.2843
Do-SNP-Sv-62	0.6419	3	75	74	2	0.9867	0.4597	0.2027	0.3541
Do-SNP-Sv-65	0.7067	3	75	75	2	1.0000	0.4146	0.2933	0.3286
Do-SNP-Sv-76	0.8133	3	75	75	2	1.0000	0.3036	0.2667	0.2575
Do-SNP-Sv-77	0.7000	3	75	75	2	1.0000	0.4200	0.3600	0.3318
Do-SNP-Sv-94	0.7200	3	75	75	2	1.0000	0.4032	0.3200	0.3219
Do-SNP-Sv-97	0.7933	3	75	75	2	1.0000	0.3279	0.3067	0.2741
Do-SNP-Sv-100	0.7365	3	75	74	2	0.9867	0.3881	0.2838	0.3128
Mean	0.7051	3	75	74.5901	2	0.9945	0.4040	0.3023	0.3206

(MAF: major allele frequency, GN: genotype number, SS: sample size, NO: number of observation, AN: allele number, GD: gene diversity A: availability, H: heterozygosity, PIC: polymorphic information content)

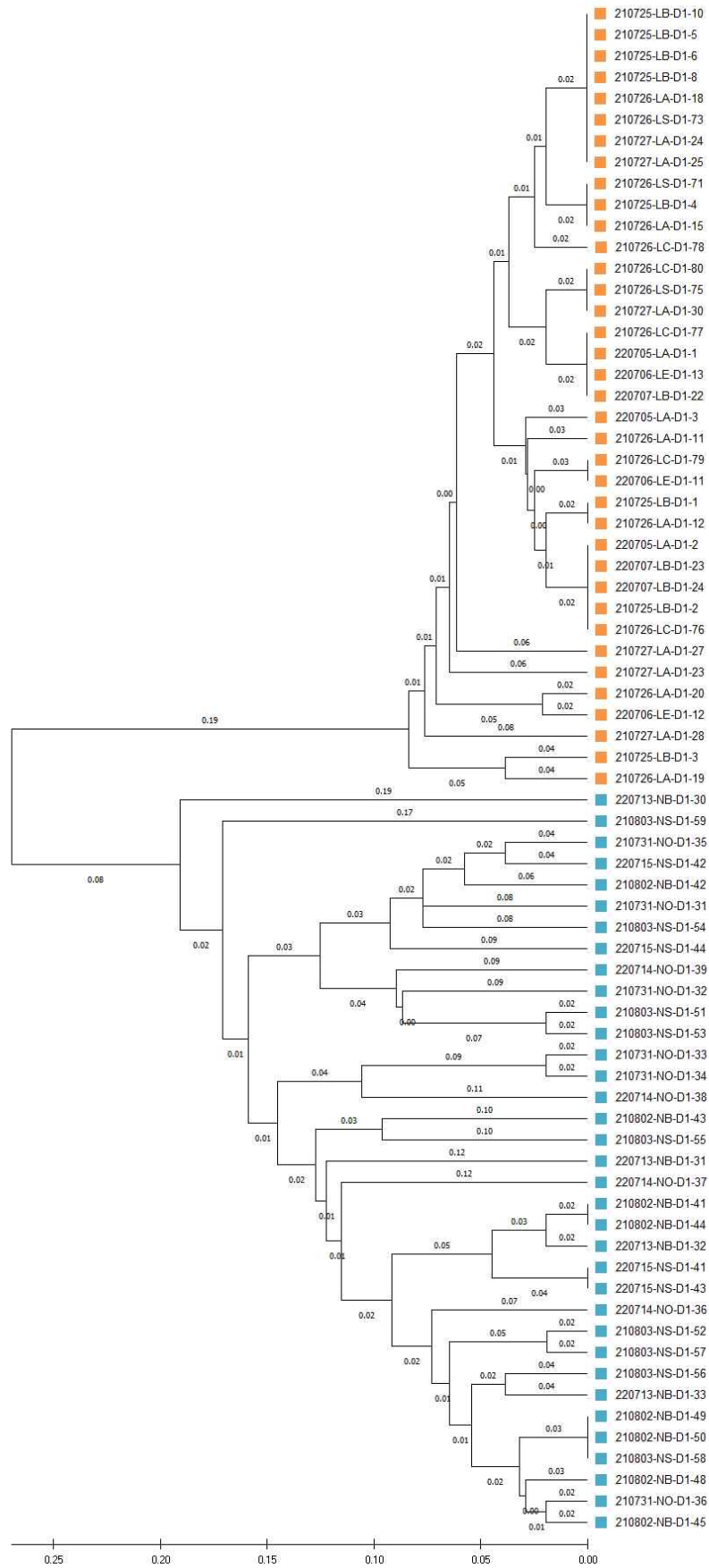


그림 2-14. 선발된 SNP 마커를 72개 샘플에 적용한 UPGMA 방식의 계통수 그림. Longyearbyen 지역은 주황색, Ny-Ålesund 지역은 하늘색으로 표기함.

마. 북극종꽃나무 분자 마커 분석

이번 연구 기간동안 채집된 북극종꽃나무 개체 샘플들을 이용하여 지역 개체군 고유 분자 마커를 발굴하고자 하였다. 전장 유전체적 관점에서 최대한 유전적 변이를 찾고자 고품량 차세대 염기서열 분석법을 이용한 GBS 기법을 사용하였다.

북극종꽃나무 RAD-seq 라이브러리의 NGS 결과를 요약하여 표 2-21에 정리하였다. Pair-end NGS 시퀀싱 결과 1,029,923,162개의 DNA 절편(read)을 생성하였고, 이에 대한 전체 염기 서열은 155,518,397,462 bp를 생산하였다. 본 종은 1차 분석을 위해 2021년에 채집된 34개 개체를 대상으로 진행하여 이에 상응하는 34개의 바코드를 통해 라이브러리는 제작하였다. 따라서 전체 RAD-seq 라이브러리에 포함된 다른 종의 개체 샘플들과 구별 가능하게 준비되었다. 전체 염기서열 정보는 다시 각 바코드로 분리하여 demultiplexing 과정을 거쳐 각 샘플에 대한 염기서열 데이터를 확보하였다.

표 2-21. RAD-seq 라이브러리 Illumina NGS 염기서열 분석 요약

File Name	Sample description	Num.of reads	Avg. length(bp)	Total length(bp)	GC (%)*	Q30 (%)**
C_tetragona_34_1.fastq	C_tetragona_34	514,961,581	151	77,759,198,731	42.95	95.19
C_tetragona_34_2.fastq		514,961,581	151	77,759,198,731		
Total	1ea	1,029,923,162		155,518,397,462		

*GC(%): GC content.

**Q30(%): Ratio of bases that have phred quality score of over 30.

극지연구소

Demultiplexing 이후 얻은 샘플 별 raw 데이터 및 이들 염기서열 정보를 mapping하여 SNP 정보를 확보하기 위해, *De novo* genome assembly를 통해 북극종꽃나무의 draft genome 작성을 수행하였으며, 이에 대한 정보는 표 2-22에 표시하였다. Draft genome에 34개 샘플의 DNA 절편들을 mapping하고, 단일 염기 다형성 정보를 확보하였다 (그림 2-15). 각 샘플의 DNA 절편은 평균 29.5% draft genome에 mapping되었으며, 이는 약 867 Mb의 draft genome을 기준으로 전체 유전체의 0.62%의 지역을 차지하였다.

1.BarCode	2.Sample name	9.Sum of trimmed reads	10.No. of mapped reads	11.Percent of mapped reads (%)	12.No. of mapped region	13.Avg. depth of mapped region (#)	14.medain depth of mapped region (#)	15.Total length of mapped region (bp)	16.Avg. length of mapped region (bp)	17.Reference Genome coverage (%)
CTTCCA	C_tetragona_1	2,552,212	703,881	27.58%	39,622	12.70	6.00	1,191,405	30.07	0.4753%
GAGATA	C_tetragona_3	2,816,904	839,641	29.81%	44,960	13.32	6.00	1,360,541	30.26	0.5428%
ATGCCT	C_tetragona_4	6,144,912	1,397,133	22.74%	62,725	16.70	8.00	1,819,706	29.01	0.7259%
AGTGGA	C_tetragona_7	1,933,064	584,283	30.23%	32,100	12.43	6.00	1,011,931	31.52	0.4037%
ACCTAA	C_tetragona_9	2,926,542	883,985	30.21%	43,086	14.36	6.00	1,362,997	31.63	0.5437%
ATATGT	C_tetragona_11	2,373,476	712,360	30.01%	45,521	10.83	6.00	1,707,432	37.51	0.6811%

그림 2-15. 북극종꽃나무 GBS 라이브러리 NGS 염기서열 생산 후 34개 바코드를 기준으로 demultiplexing을 통해 분류된 각 샘플들의 trimmed data 및 mapping 결과 통계치. 본 그림에서는 일부 샘플을 예시로 제시하였다.

표 2-22. *De novo* genome assembly 결과. (k-mer = 69)

No. of contigs	Length(bp) of contigs				
	Total	Min.	Max.	Avg.	N50
1,791,614	867,155,278	200	27,884	484	577

북극종꽃나무 각 샘플의 raw SNP를 이용하여 통합 SNP matrix를 작성하고 총 624,964 개의 SNP를 구하였다 (표 2-23). SNP를 보이는 해당 유전자좌위(locus)를 유전마커로 볼 때, 각 마커에 대해 MAF (Minor allele frequency)가 5% 이상인 마커만을 선별하였고, 다시 선별된 마커에 대해 확보된 샘플의 수가 100%인 missing data가 없는 마커만을 선별하였고, 총 5,966개의 유전자좌위에 속한 SNP를 마커로 확보하였다. 이후 다시 Fst (Fixation index)가 0.3 이상인 마커만을 선별하였고, 최종적으로 275개 유전자좌위에 속한 SNP를 마커로 확보하였고, 이후 분석에는 5,966개의 마커와 275개 마커를 모두 사용하였다.

표 2-23. 데이터 필터링 과정과 이에 대한 항목

단계	필터 항목	SNP matrix loci
1	Total SNP matrix	624,964
2	MAF (Minor Allele Frequency) > 5%* ¹	311,580
3	Missing data < 30%* ²	30,686
4	MAF > 5% and Missing data < 30%	5,966
5	Fst > 0.3* ³	275

*¹ Missing data < 30%: 해당 좌 (locus)의 전체 샘플에서 정보를 얻을 수 없는 데이터가 30 % 미만인 SNP를 선별함.

*² MAF (Minor allele frequency) > 5% : 해당 좌의 전체 샘플에서 MAF가 5% 보다 큰 SNP를 선별함.

*³ Fst > 0.3 : Fst > 0.3을 만족하는 SNP좌를 선별함.

선별된 북극종꽃나무 SNP를 이용하여 유연관계 분석을 실시하였다.

① 유집 분석: Principal Component Analysis (PCA)

북극종꽃나무 집단의 유전적 구조를 파악하기 위해 34개 샘플의 Filtered SNP를 이용하여 주성분분석(Principal Component Analysis; PCA)을 수행하였다 (그림 2-16, 2-17). 5,966개 SNP 마커를 이용한 분석 결과 주성분 1 (PC1)은 16%, 주성분 2 (PC2)는 12%의 eigenvalue를 설명한다. 275개 SNP 마커를 이용한 분석 결과 주성분 1 (PC1)은 41%, 주성분 2 (PC2)는 13%를 설명하며, Ny-Ålesund 지역(Ossian Sars, Bloomstrand halvoya)이 Longyearbyen 지역과 뚜렷이 구분되는 것을 확인할 수 있다.

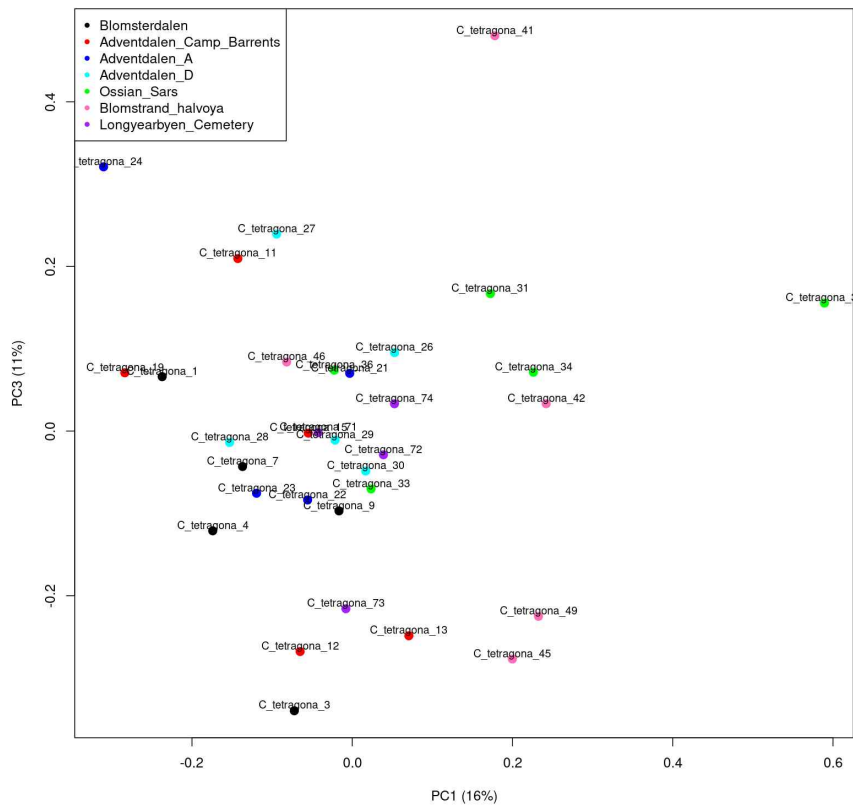
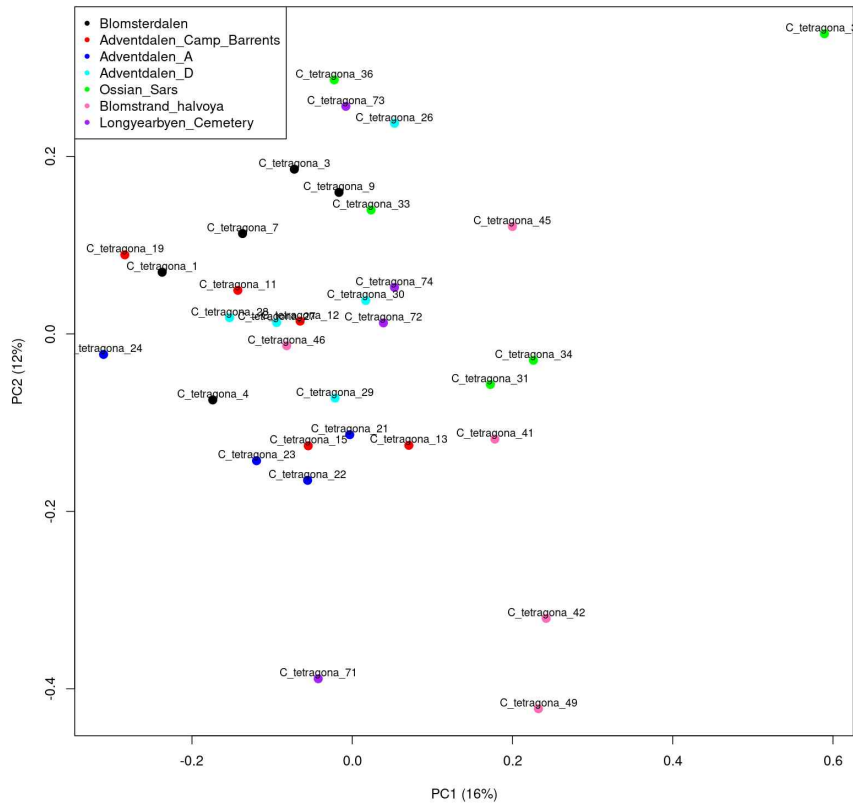


그림 2-16. 북극종꽃나무 5,966개 SNP 마커를 이용한 PCA 분석 결과.

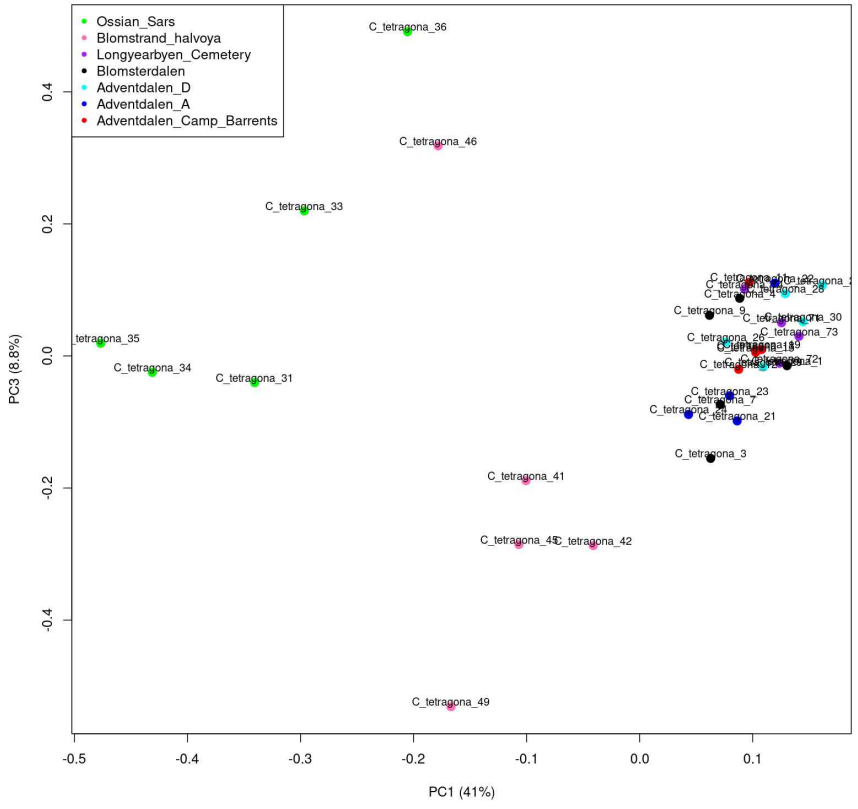
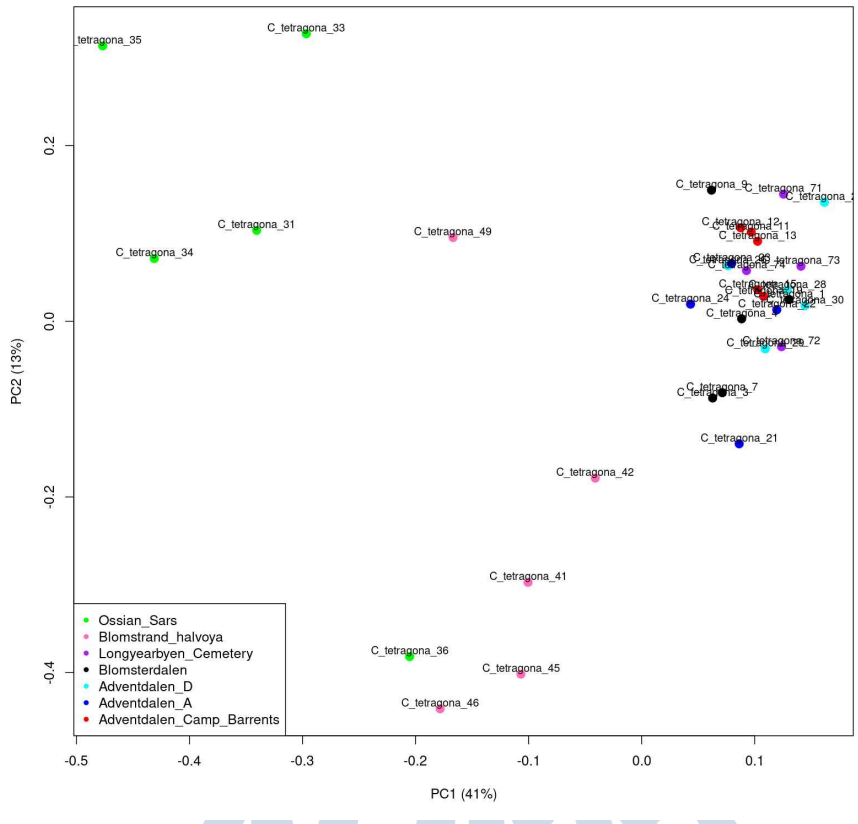


그림 2-17. 북극종꽃나무 275개 SNP 마커를 이용한 PCA 분석 결과.

② 계통유연관계 추적: The construction of phylogenetic trees

북극종꽃나무 집단의 SNP 유전 마커를 기반으로 Neighbor-Joining 분석을 수행하여 유전적 유사성을 통한 유집 양상을 분석하여 대략의 계통유연관계를 추적하였다 (그림 2-18, 2-19, 2-20). 그림 2-15와 2-16은 1000 부스트랩 반복을 통한 consensus 계통수를 작성하였고, 5,966개 마커 기반과 275개 마커 기반을 각각 표시하였다. 5,966개 마커 기반 계통수에서는 Ny-Ålesund 지역이 100% 부스트랩 지지를 받아 유집되었으나, Longyearbyen 지역 개체들은 부분적으로 높은 부스트랩 지지를 받고 유집되거나, 다른 개체군의 개체들과 섞여 유집되는 양상을 보였다.

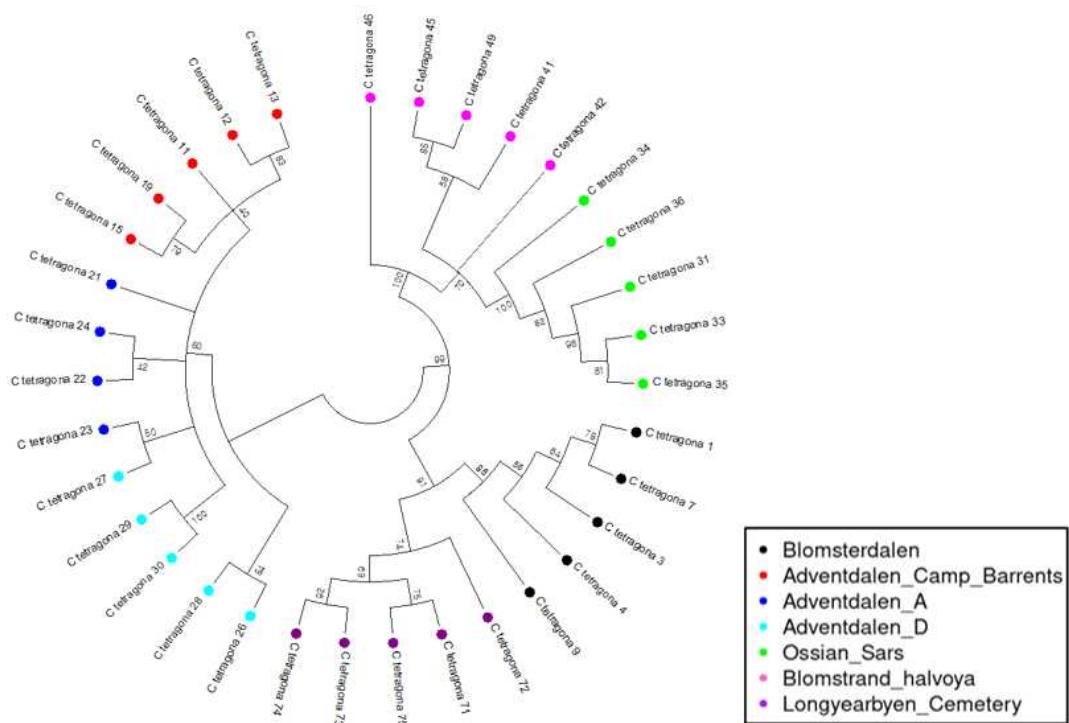


그림 2-18. 북극종꽃나무 개체들의 5,966개 SNP 마커를 이용한 Neighbor-Joining bootstrap consensus tree. 개체군 별로 동일한 색으로 표시하였다. Bootstrap 수치가 40% 이하인 마디는 표시하지 않음.

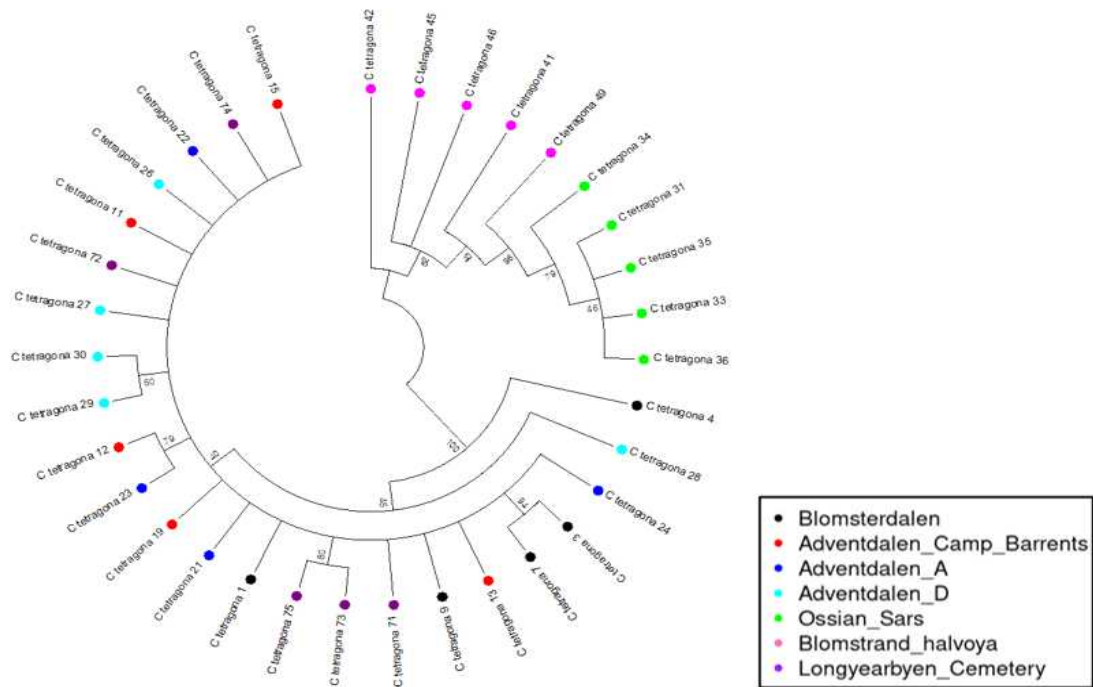


그림 2-19. 북극종꽃나무 개체들의 275개 SNP 마커를 이용한 Neighbor-Joining bootstrap consensus tree. 개체군 별로 동일한 색으로 표시하였다. Bootstrap 수치가 40% 이하인 마디는 표시하지 않음.



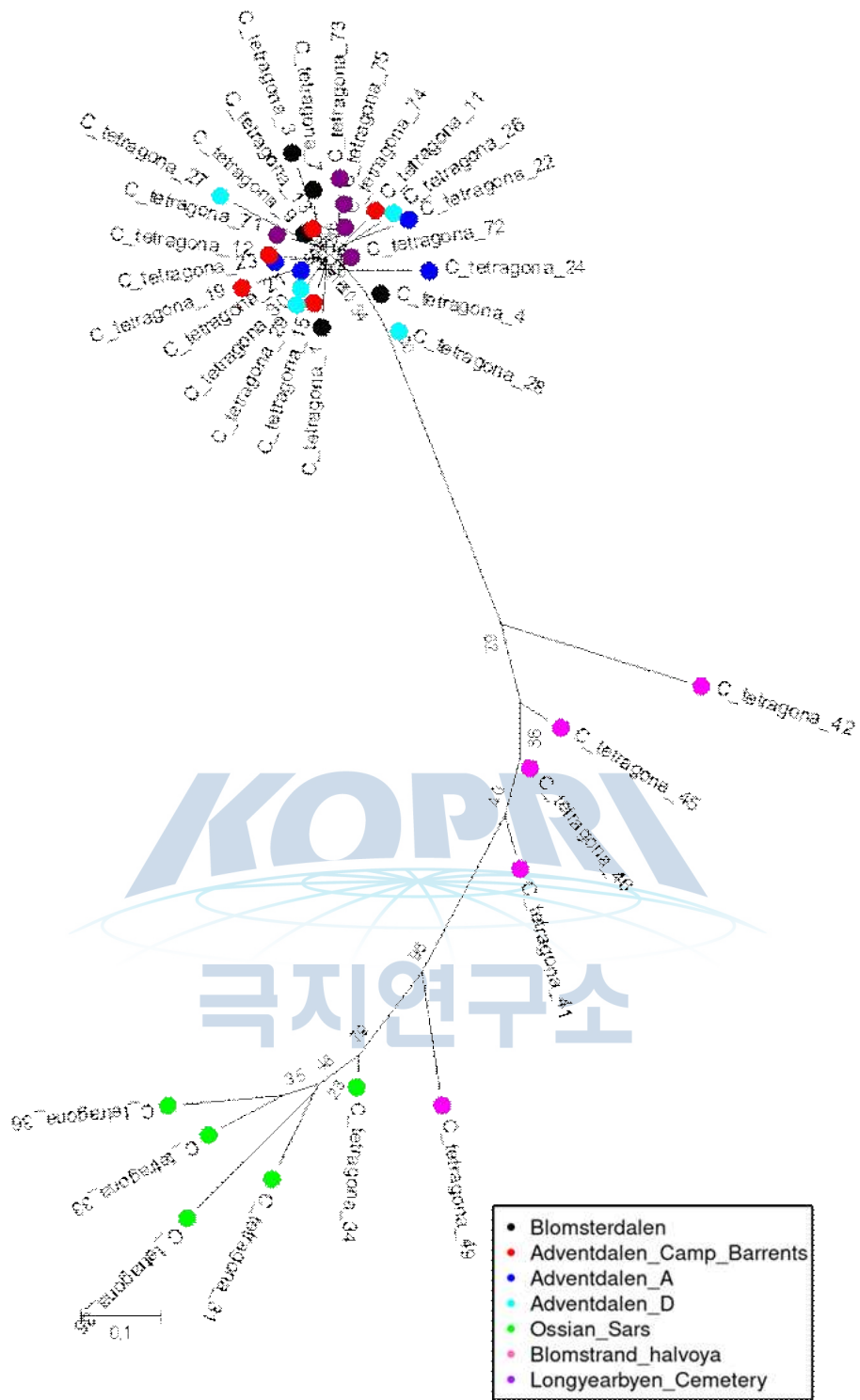


그림 2-20. 북극종꽃나무 개체들의 275개 SNP 마커를 이용한 Neighbor-Joining tree Radiation type. 개체군 별로 동일한 색으로 표시하였다.

③ 집단 간, 집단 내 Polymorphic SNP 탐색

북극종꽃나무 34개 샘플의 filtered SNP 275 좌를 이용하여 2 지역 그룹별 공통 SNP를 선발하고, 공통으로 선발된 유전자좌위를 이용해 두 그룹 간 polymorphic SNP 선발을 시도하였다 (그림 2-21). 추가로 Ny-Ålesund 지역 내 Ossian sars 지역과 Blomstrand halvoya 지역은 두 지역이 유연관계 분석 결과 일정 부분 이상 구분되는 것을 확인하였기에, 추가로 두 지역을 구분할 polymorphic SNP 선발을 시도하였다. 선발된 SNP Marker는 Sanger sequencing을 통해 구분하고자 product size가 400~600 bp 사이가 되도록 프라이머를 디자인하였다 (표 2-23).

ID		C_tetragona_contig1764318	C_tetragona_contig1704980	C_tetragona_contig1764168	C_tetragona_contig1770248	C_tetragona_contig1776834	C_tetragona_contig1779296	
Site	Pos	480	984	1039	2111	1799	452	2820
Longyearbyen	Blomsterdalen	C	C	A	A/R/G	/	/	/
Longyearbyen	Adventdalen_Camp_Barrents	C	C	A	A/R/G	/	/	/
Longyearbyen	Adventdalen_Site_A	C	C	A	R	/	/	/
Longyearbyen	Adventdalen_Site_D	C	C	A	A/R/G	/	/	/
Longyearbyen	Stuphallet	C	C	A	A/R	/	/	/
Ny-Alesund	Ossian_Sars	T/Y	C/G/S	A/G/R	G	A	A	T
Ny-Alesund	Blomstrand_halfvoya	C/Y	C/G/S	A/G/R	G	G/R	G/R	C/Y

그림 2-21. 북극종꽃나무 filtered SNP 275좌를 이용해 개체군 별 polymorphic SNP 선발 결과.



표 2-23. 선택된 SNP marker의 유용성 확인을 위해 본 연구에서 조립된 초안 contig 염기서열의 정보와 PCR 분석을 위해 제작된 프라이머 서열 정보

No.	Contig No.	SNP Position	Primer	Sequence (5'-3')
1	C_t_contig1764318	480	1764318-332F	ACAGAAAAATGGTCGTCGCG
			1763218-842R	ACGCAAGCACAAGCAGAAAG
2	C_t_contig1704980	984, 1039	1704980-764F	TTGGGAAACGGCCGAAAGAT
			1704980-1303R	ACATGTGTGTCCGGTTTGT
3	C_t_contig1764168	2111	1764168-1974F	CGCCCTCTTGAAAAAGTGG
			1764168-2413R	TGCAGGGCTTGTTCATGCA
4	C_t_contig1770248	1799	1770248-1468F	AACTCCTGTACTGGCACG
			1770248-1997R	GCTGCTAAGCCTATGCCTCA
5	C_t_contig1776834	452	1776834-241F	GTGGACCACTGGCATCAAGA
			1776834-788R	TAACCGGGCTGGCATATTCC
6	C_t_contig1779296	2820	1779296-2365F	TCCTTGCCTGTAACCCTGAC
			1779296-2913R	TCTCCAGCTCTTGAGGCAGA

디자인한 프라이머로 SNP position 7 site가 포함된 6개 구간을 PCR로 증폭하여 프라이머의 특이성을 확인하였다. 최초 확인을 위해 Longyearbyen에서 채집된 28번 샘플과 Ny-Ålesund에서 채집된 49번 샘플을 대상으로 진행한 결과를 그림 2-22에 표시하였다. PCR 반응물은 대부분 단일 밴드로 확인되어 제작된 프라이머 세트는 특이적으로 사용 가능한 것으로 판단되었다. 이에 증폭된 PCR 반응물을 정제한 후 Sanger-seq을 통해 염기 서열을 확인하였다. 이 중 3개 위치는 명확하게 염기서열을 확인할 수 있어, 채집 집단 간에 구별을 위한 분자 마커로 사용 가능한 후보로 판단되었다 (그림 2-23). 그러나 나머지 4 구간에 대해서는 염기서열을 확인할 수 없는 복잡한 peaks을 형성하여 제작된 PCR 프라이머 세트의 특이성이 명확하게 적용되지 않는 것으로 판단되었다. 이 구간에 대해서는 PCR products를 subcloning을 통해 정확한 마커 구간을 파악하고 확인된 마커들과 동시 비교하여 이들 분자 마커의 효용성에 대해 확인하고자 계속 분석을 진행하고 있다. 앞으로 선택된 3개 마커에 대해 추가적으로 32개 샘플에서 염기서열 확인을 진행중에 있다. 디자인된 모든 프라이머 세트의 특이성이 명확하게 확인되면 PCR을 통해 북극종꽃나무 전체 DNA 샘플에 대한 분자 마커의 확인을 진행하고자 한다.

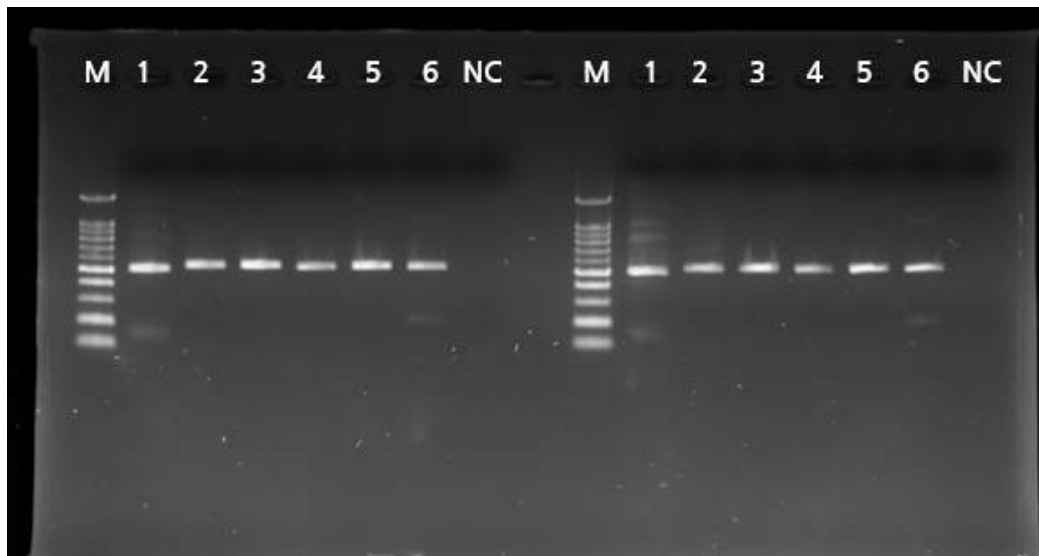


그림 2-22. 선정된 SNP Marker를 이용한 agarose gel 전기영동 결과.

(좌 : 28번 sample, Longyearbyen, 우 : 49번 sample, Ny-Ålesund, M : 100 bp DNA Ladder, Number : 표 2-23에 표기한 No. primer set, NC : Negative Control)

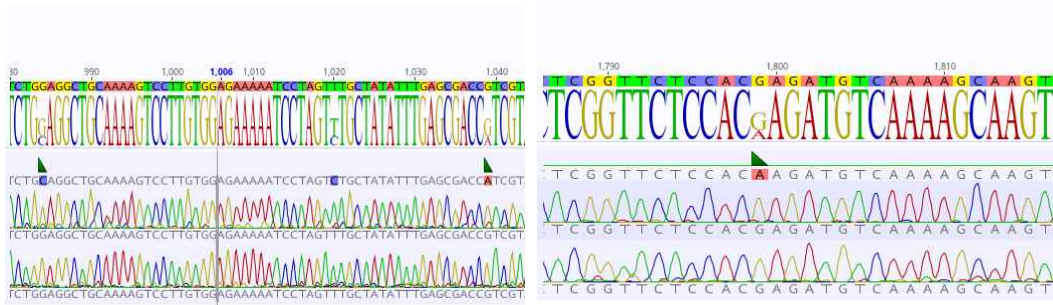


그림 2-23. 선정된 SNP Marker를 이용한 Sanger sequencing 결과. Sequence Peak와 sequence Logo를 함께 표시하였다. (49번 sample, Ny-Ålesund, 좌 : Primer No.2 set, 우 : Primer No.4 set)



바. 나도수영 유전체와 분자 마커 분석

기존에 극지식물의 유전체 크기 추정 결과, 나도수영의 유전체 크기를 300 Mb에서 800 Mb 정도로 추정할 수 있었다. 이를 바탕으로 유전체 크기의 최소 약 30배에 해당하는 PacBio HiFi 시퀀싱 데이터 25.5 Gb를 생산함으로써 나도수영 유전체 지도 작성을 시도했다. 나도수영은 이배체(diploid)이기 때문에 이를 통해 핵 안에 존재하는 두 별의 염색체 집합(paternal/maternal)에 대한 유전체 지도를 각각 얻을 수 있을 것이라 예상하였다.

유전체 지도 작성 프로그램을 활용해 조립을 진행했으며, 그 결과 나도수영의 유전체 지도 초안 두 별을 확보하였다. 유전체 지도의 크기는 각각 561 Mb와 546 Mb로 확인됐으며, 컨티그(contig)의 N50 길이는 37 Mb에 이르러 거의 염색체 수준에 가까운 정도로 성공적인 조립이 진행됐음을 확인하였다 (표 2-24). 텔로미어 반복서열이 끝부분에 나타나는 컨티그는 각각 10개와 11개를 찾았는데, 공통되는 것이 7개, 특이적인 것이 각각 3개와 4개 확인되었다. $2n=14$ 인 나도수영의 핵형을 감안하면 아마도 모든 염색체의 텔로미어를 찾아낸 것으로 추정된다. 두 유전체 지도는 모두 69%에 이르는 반복서열을 지니고 있었으며, retroelement와 DNA transposon 등 크기가 큰 반복서열이 전체 반복서열의 96%를 차지하였다. 유전체 지도의 품질을 측정하는 지표 중 하나인 쌍떡잎식물의 BUSCO 값은 모두 93%에 달했으며, 조립이 가장 어려운 리보솜 RNA 지역 또한 5.3 Mb에 이를 정도로 잘 조립됐음을 확인하였다. 유전자는 총 4만 3천 여 개가 확인됐고, SNP는 총 77만 개 가량이 확보됐으며, 구조 변이 또한 1만 8천 여 개 가량 확보되었다 (그림 2-24). 이는 개체 내에서도 다양성이 꽤 높다는 것을 암시하였다. 이런 결과를 통해 향후 나도수영의 다양성 조사를 안정적으로 수행할 수 있는 분자 마커 수집이 원활하게 진행될 것으로 추정한다.

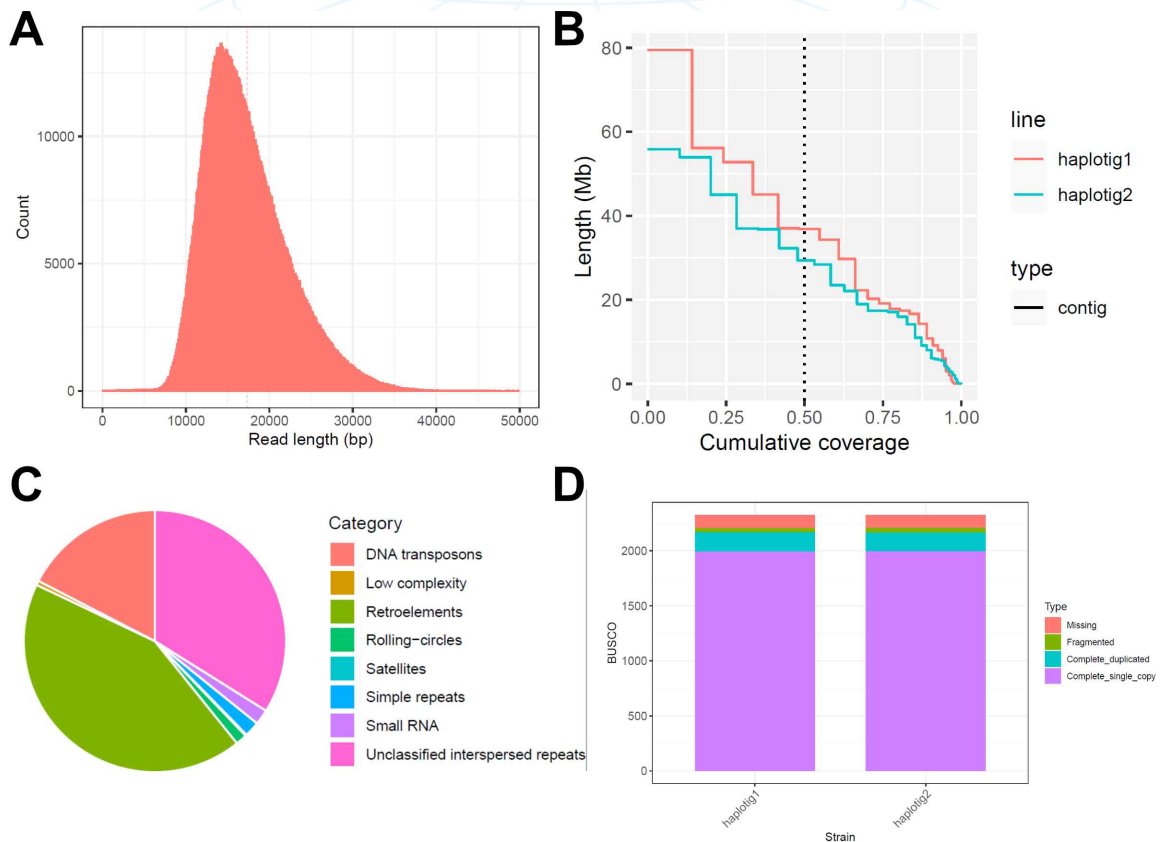


그림 2-24. (A) 확보한 PacBio HiFi 리드의 길이 분포. (B) 확보한 유전체 지도의 컨티그별 길이. (C) 반복서열 분포 요약. (D) BUSCO 값.

표 2-24. Summary of *O. digyna* draft genome

Scaffolds No.	Length (bp) of scaffolds				
	Total length (bp)	Min. length (bp)	Max. length (bp)	Avg. length (bp)	N50 length (bp)
359	561,294,660	17,254	79,472,951	1,563,494	36,875,860

2022년도에 수집한 나도수영 57개체의 DNA를 추출하고 gDNA quality를 확인하였다. 전기영동은 1.5% gel에 30분간 running 하였고 DNA는 3 µl를 분주 하였으며 57개 샘플의 gDNA 전기영동 결과 41개 샘플이 pass 되고 16개 샘플이 fail 판정을 받았다 (그림 2-25).

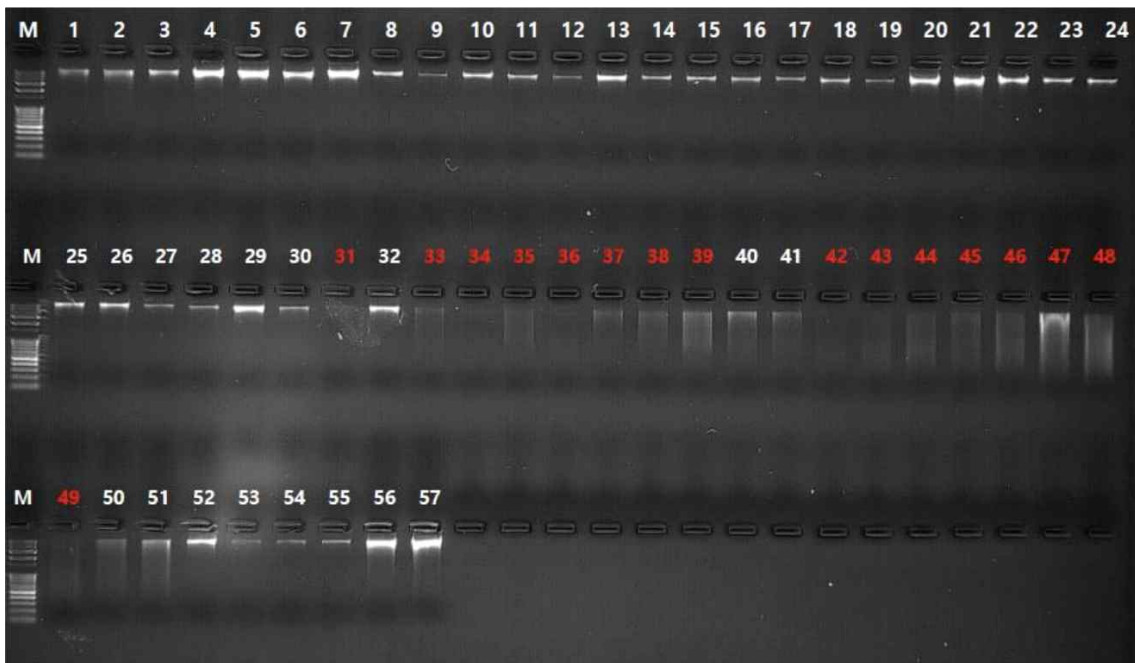


그림 2-25. 나도수영 57개 gDNA sample quality check

나도수영 41개체(21년도 샘플 23개, 22년도 샘플 18개)의 통합 SNP matrix를 사용하여 분석을 수행하기에 앞서 아래 표의 조건으로 SNP 필터 과정을 수행하였다 (표 2-25). 최종적으로 지역구분 마커 후보 79좌를 선발하였다.

표 2-25. Summary of SNP filter process

필터 단계	항목	SNP matrix loci
1	Total SNP matrix	470,801
2	MAF (minor allele frequency) > 5%	245,136
3	Missing data = 0%	22,029
4	MAF > 5% and Missing data = 0%	4,748
5	Fst > 0.3	79

MAF (minor allele frequency) > 5%: 해당 좌의 전체 샘플에서 MAF가 5%보다 큰 SNP를 선발

Missing data = 0%: 해당 좌의 전체 샘플에서 missing data가 없는 SNP를 선발

Fst > 0.3: Fst가 0.3 이상을 만족하는 SNP 좌를 선발

Longyearbyen과 Ny-Ålesund 두 집단을 구별할 수 있을 것으로 예상되는 최종 선발된 79 개의 SNP를 사용하여 phylogenetic tree 분석을 실시하여 41개의 나도수영 개체가 구분되어지는 양상을 관찰하였다. 그 결과 Longyearbyen에서 수집한 개체들과 Ny-Ålesund 지역에서 수집한 개체들이 구분되어지는 것을 확인하였고 추가로 그린란드 지역에서 수집한 개체들이 따로 구분되어지는 것을 확인하였다 (그림 2-26). 나도수영 41개 개체를 79개 SNP loci를 사용하여 PCA 분석을 실시하였다 (그림 2-27, 2-28).

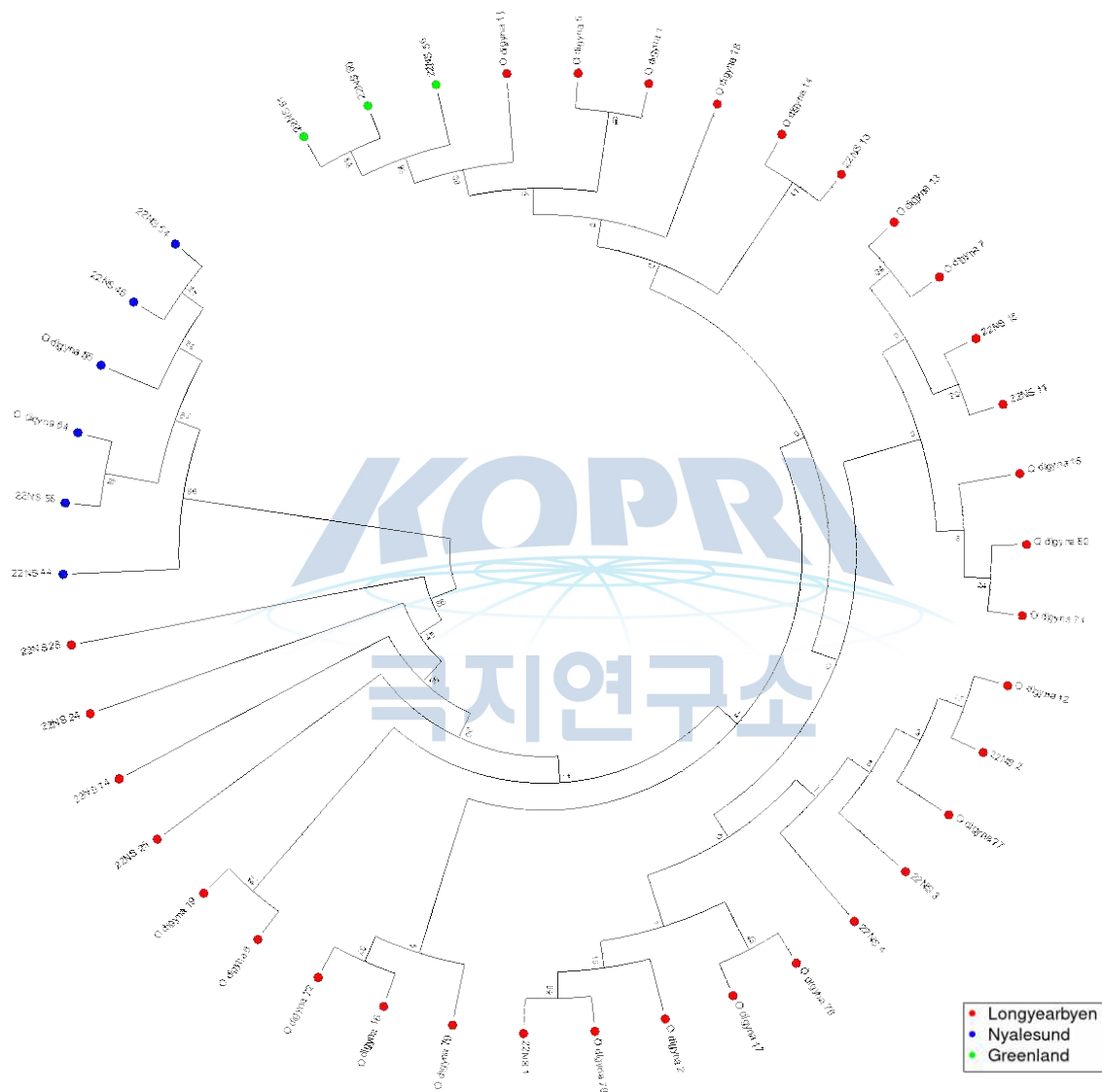


그림 2-26. 나도수영 41 샘플의 filtered SNP 79좌를 이용한 Neighbor-Joining 방법으로 작성한 phylogenetic tree

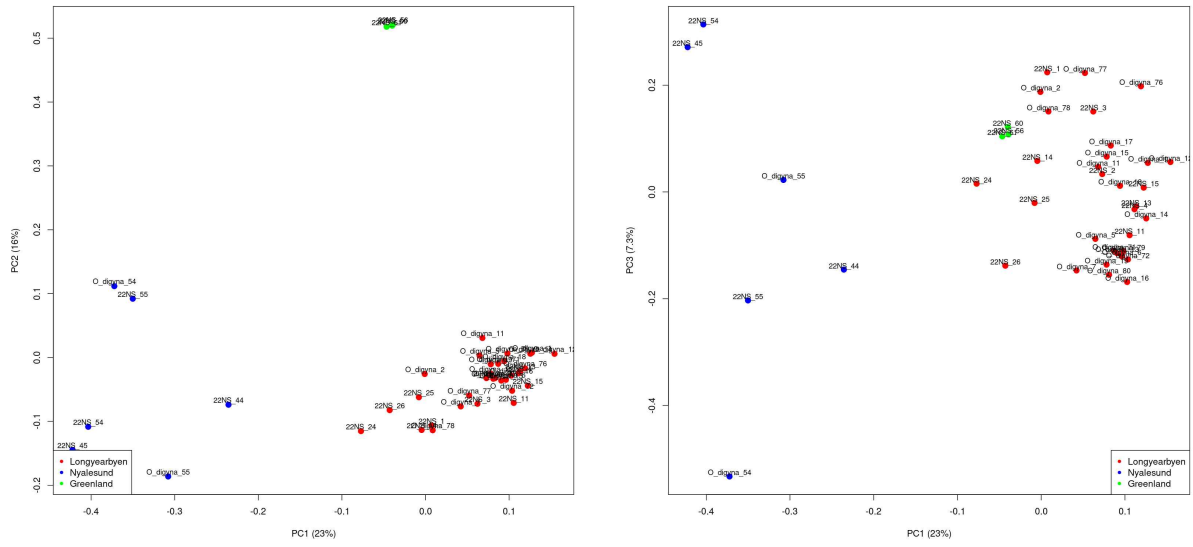


그림 2-27. 나도수영 41 개체를 79개 SNP를 이용하여 작성한 PCA 분석 - 2D plot

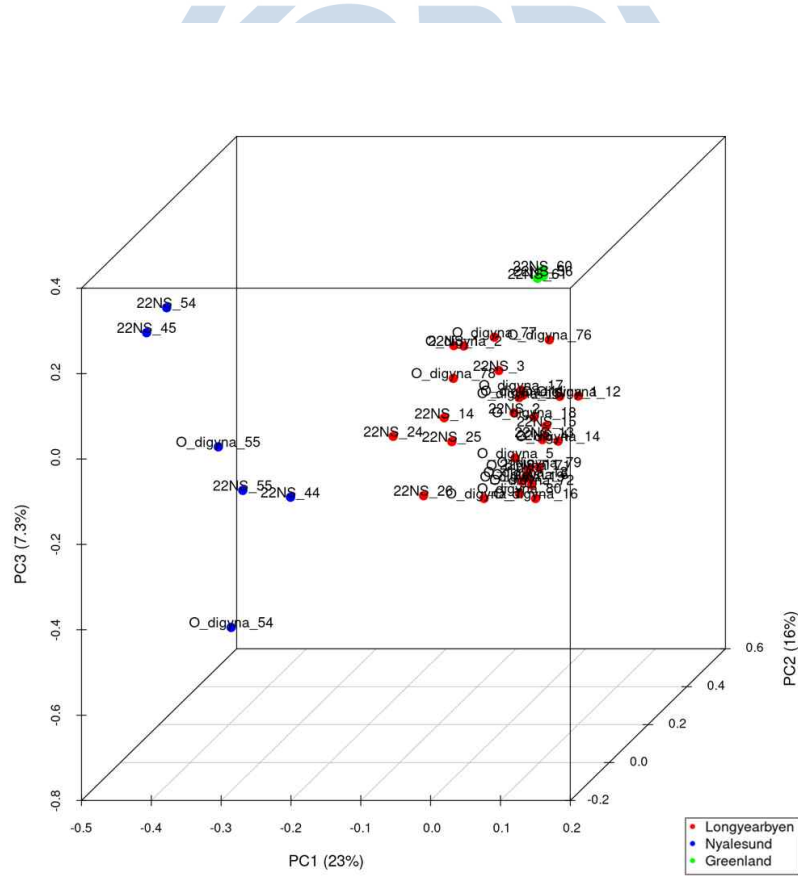


그림 2-28. 나도수영 41 개체의 79 SNP좌를 이용한 PCA 분석 - 3D plot

Longyearbyen, Ny-Ålesund 지역 간 차이를 알기 위해 Greenland 3개체 제외 후 PCA 분석 실시하였다 (그림 2-29, 2-30).

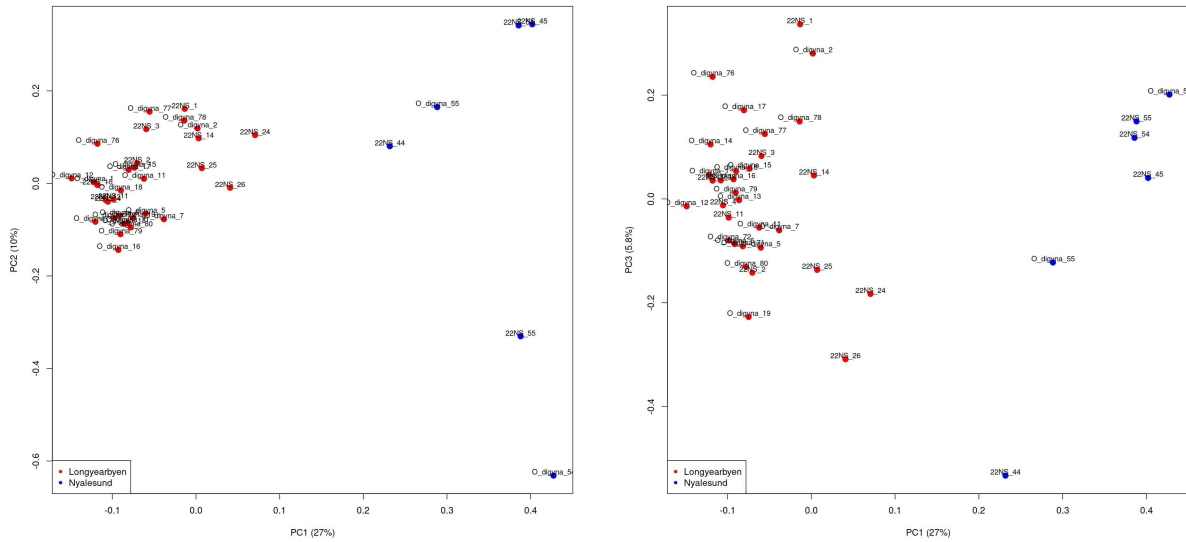


그림 2-29. 나도수영 38개체와 79 SNP를 사용하여 분석한 2D plot PCA 분석

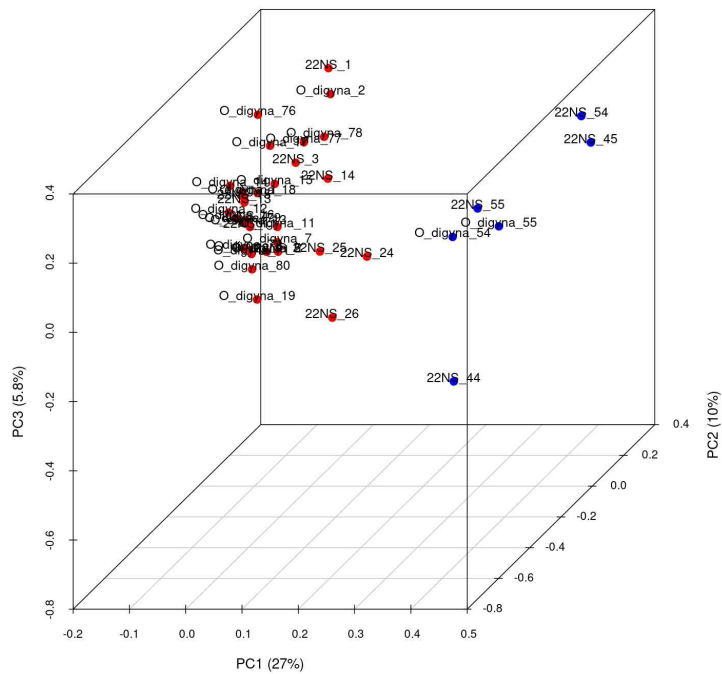


그림 2-30. 나도수영 38 개체와 79개 SNP를 사용하여 분석한 3D plot PCA 분석

사. 북극콩버들 분자 마커 분석

북극콩버들의 SNP 분석을 위한 reference 서열이 존재하지 않아서 draft genome을 만들기 위해 Illumina short read sequencing을 이용하여 데이터를 생산하고 raw data 전처리를 진행하였다 (표 2-26, 2-27, 2-28). *De novo* assembly를 통해 draft genome을 작성하고 SNP 마커를 찾는데 이용하였다 (표 2-29).

표 2-26. Sequencing raw data

Sample	Num. of reads	Avg. length (bp)	Total length (bp)	GC (%)	Q30
북극콩버들_1.fastq	128,789,976	151	19,447,286,376	38.31	91.86
북극콩버들_2.fastq	128,789,976	151	19,447,286,376	38.31	91.86

GC (%): GC content

Q30 (%): Ratio of vases that have phred quality score of over 30

표 2-27. Statistics of PCR duplicate removal data

Sample	Num. of reads	Avg. length (bp)	Total length (bp)	Trimmed/Raw (%)
북극콩버들_1.fastq	114,231,516	151	17,248,958,916	88.70%
북극콩버들_2.fastq	114,231,516	151	17,248,958,916	88.70%

Quality 기준: phred score 값; read의 base quality가 20이하인 것은 데이터에서 제외함

Trimmed/Raw: (Total length of trimmed reads / Total length of raw reads)*100

표 2-28. Statistics of final trimmed data

Sample	Num. of reads	Avg. length (bp)	Total length (bp)	Trimmed/Raw (%)
북극콩버들_1.fastq	111,895,021	136.06	15,224,067,420	78.28%
북극콩버들_2.fastq	111,895,021	135.73	15,187,094,534	78.09%

최소 length 기준: Trimming 후 남은 read length가 25 bp 미만이면 데이터에서 제외함

Trimmed/Raw: (Total length of trimmed reads / Total length of raw reads)*100

표 2-29. Statistics of draft genome (k-mer = 69)

Sample	No. of contigs	Length (bp) of contigs				
		Total	Min.	Max.	Avg.	N50
북극콩버들	1,451,575	490,545,316	200	14,089	337	329

2022년도에 수집한 북극콩버들 60개체의 DNA를 추출하고 gDNA quality를 확인하였다. 전기영동은 1.5% gel에 30분간 running 하였고 DNA는 3 µl를 분주하였으며 60개 샘플의 gDNA 전기영동 결과 53개 샘플이 pass 되고 7개 샘플이 fail 판정을 받았다 (그림 2-31).

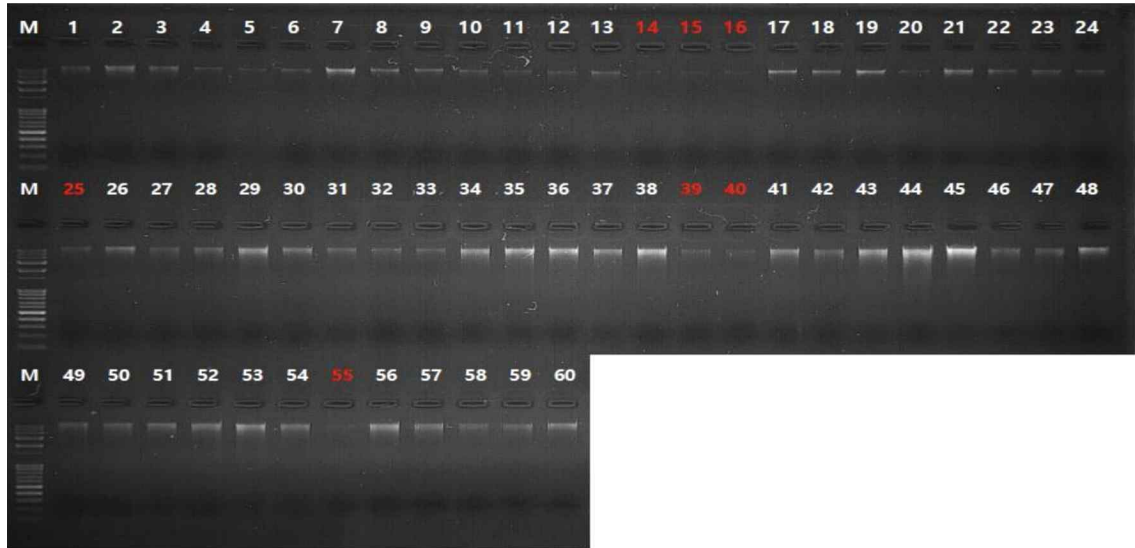


그림 2-31. 북극콩버들 60개 gDNA sample quality check

북극콩버들 41개체의 통합 SNP matrix를 사용하여 분석을 수행하기에 앞서 아래 표의 조건으로 SNP 필터 과정을 수행하였다 (표 2-30). 북극콩버들 41개체 total SNP matrix에서 필터 과정을 거쳐 최종 15좌를 선발하였다. 15개 SNP로는 마커의 수가 적어 계통수 분석이 어려워 10,116개 SNP를 이용하여 phylogenetic tree를 작성하였다 (그림 2-32). 10,116개 SNP를 적용했을 때는 Longyearbyen 집단과 Ny-Ålesund 집단을 명확하게 구별해내지 못했다. 최종선발된 15개의 SNP를 이용하여 PCA 분석을 한 결과 Longyearbyen 집단과 Ny-Ålesund 집단이 구별되는 것을 확인 할 수 있었다 (그림 2-33).

표 2-30. Summary of SNP filter process

필터 단계	항목	SNP matrix loci
1	Total SNP matrix	904,110
2	MAF (minor allele frequency) > 5%	431,885
3	Missing data = 0%	119,748
4	MAF > 5% and Missing data = 0%	10,116
5	Fst > 0.3	15

MAF (minor allele frequency) > 5%: 해당 좌의 전체 샘플에서 MAF가 5%보다 큰 SNP를 선발

Missing data = 0%: 해당 좌의 전체 샘플에서 missing data가 없는 SNP를 선발

Fst > 0.3: Fst가 0.3 이상을 만족하는 SNP 좌를 선발

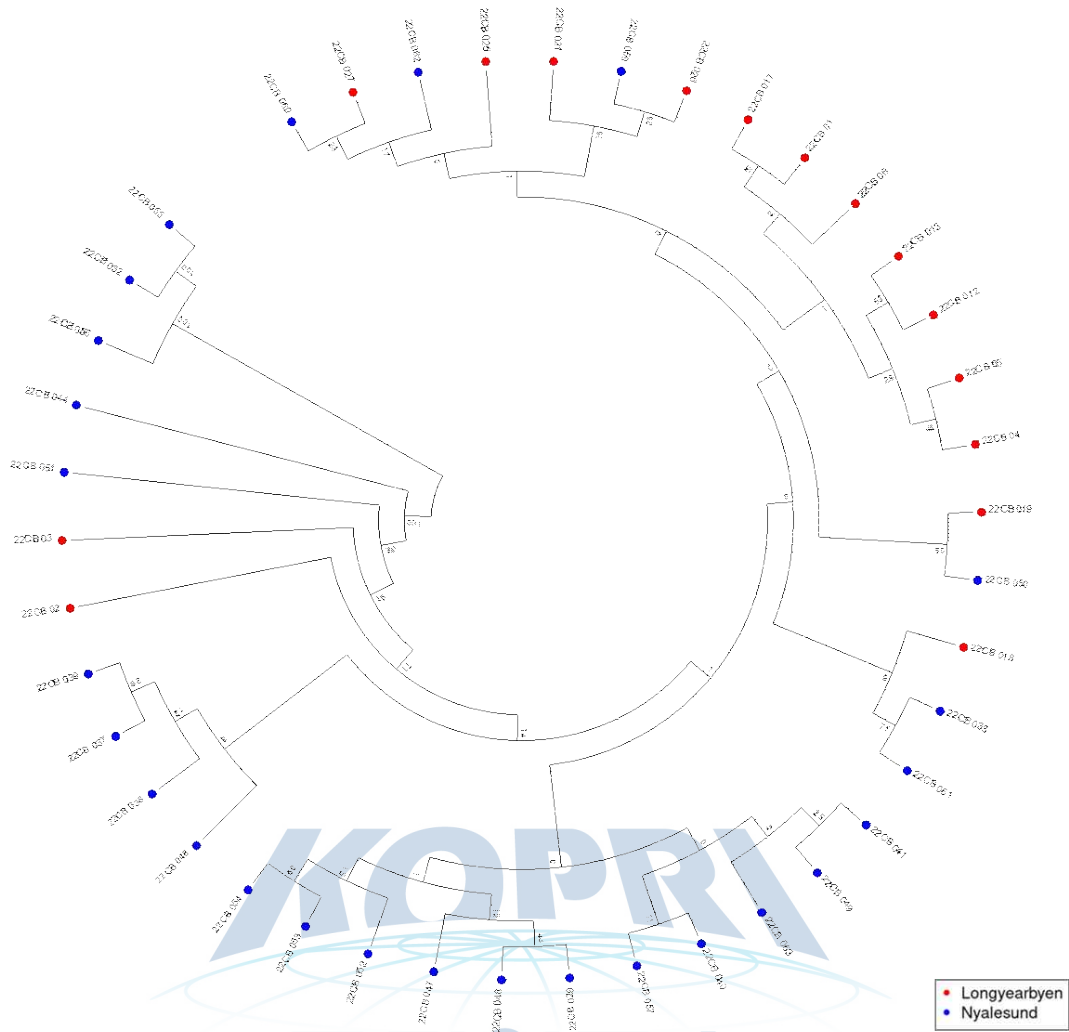
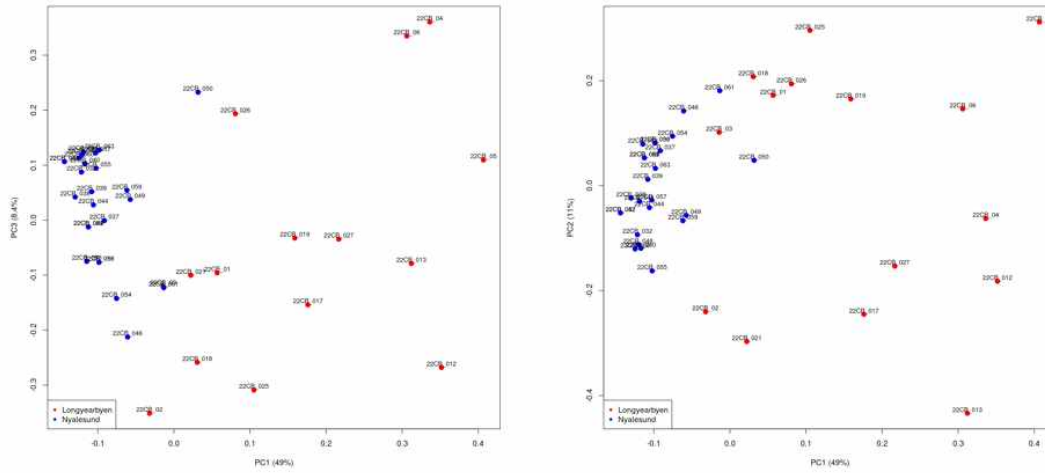


그림 2-32. 북극공버들 41개체의 10,116 loci를 이용한 Neighbor-Joining 방법으로 작성한 phylogenetic tree

A



B

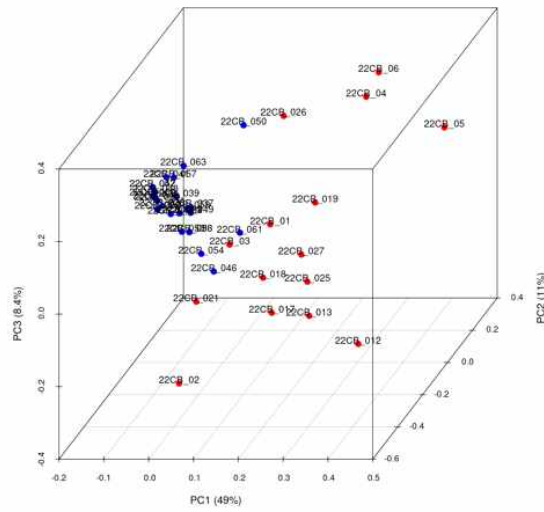


그림 2-33. 북극곰버들 41개체의 15 loci를 이용한 2D plot PCA 분석과 3D plot PCA 분석

아. 자주범의귀 분자 마커 분석

자주범의귀의 SNP 분석을 위한 reference 서열 또한 존재하지 않아서 draft genome을 만들기 위해 Illumina short read sequencing을 이용하여 데이터를 생산하고 raw data 전처리를 진행하였다 (표 2-31, 2-32, 2-33). *De novo assembly*를 통해 draft genome을 작성하고 SNP 마커를 찾는데 이용하였다 (표 2-34).

표 2-31. Sequencing raw data

Sample	Num. of reads	Avg. length (bp)	Total length (bp)	GC (%)	Q30
자주범의귀_1.fastq	205,535,958	151	31,035,929,658	40.10	92.43
자주범의귀_2.fastq	205,535,958	151	31,035,929,658	40.10	92.43

GC (%): GC content

Q30 (%): Ratio of vases that have phred quality score of over 30

표 2-32. Statistics of PCR duplicate removal data

Sample	Num. of reads	Avg. length (bp)	Total length (bp)	Trimmed/Raw (%)
자주범의귀_1.fastq	191,689,085	151	28,945,051,835	93.26%
자주범의귀_2.fastq	191,689,085	151	28,945,051,835	93.26%

Quality 기준: phred score 값; read의 base quality가 20이하인 것은 데이터에서 제외함

Trimmed/Raw: (Total length of trimmed reads / Total length of raw reads)*100

표 2-33. Statistics of final trimmed data

Sample	Num. of reads	Avg. length (bp)	Total length (bp)	Trimmed/Raw (%)
자주범의귀_1.fastq	187,759,929	137.00	25,722,369,058	82.88%
자주범의귀_2.fastq	187,759,929	137.62	25,839,033,729	83.26%

최소 length 기준: Trimming 후 남은 read length가 25 bp 미만이면 데이터에서 제외함

Trimmed/Raw: (Total length of trimmed reads / Total length of raw reads)*100

표 2-34. Statistics of draft genome (k-mer = 69)

Sample	No. of contigs	Length (bp) of contigs				N50
		Total	Min.	Max.	Avg.	
자주범의귀	3,765,080	1,340,003,265	200	36,523	355	352

2022년도에 수집한 북극콩버들 57개체의 DNA를 추출하고 gDNA quality를 확인하였다. 전기영동은 1.5% gel에 30분간 running 하였고 DNA는 3μl를 분주하였으며 57개 샘플의 gDNA 전기영동 결과 42개 샘플이 pass 되고 15개 샘플이 fail 판정을 받았다 (그림 2-34).

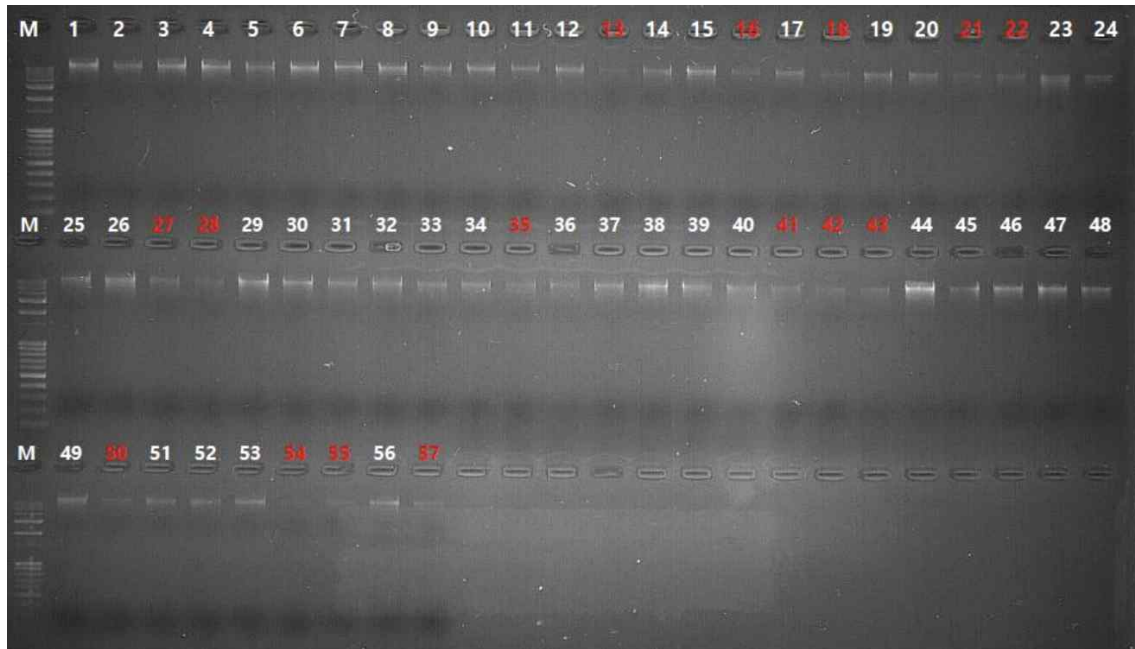


그림 2-34. 자주범의귀 57개 gDNA sample quality check

자주범의귀 37개체의 통합 SNP matrix를 사용하여 분석을 수행하기에 앞서 아래 표의 조건으로 SNP 필터 과정을 수행하였다 (표 2-35). 최종적으로 193개 SNP가 선발되었으며 분석에 사용하였다. 선발한 193개의 SNP를 이용하여 계통수를 작성한 결과 Longyearbyen 집단 개체들과 Ny-Ålesund 집단 개체들이 구분되는 것을 확인하였다 (그림 2-35). 유전적 구조를 파악하기 위해 선발된 193개의 SNP를 이용하여 37개체의 자주범의귀를 대상으로 PCA 분석을 수행하였으며 집단이 구별되는 것을 확인하였다 (그림 2-36, 2-37). Longyearbyen 집단과 Ny-Ålesund 집단을 집중적으로 확인하기 위해 Greenland 개체를 제외하여 다시 PCA 분석을 수행하였으며 역시 집단 간에 구별되는 것을 확인 할 수 있었다 (그림 2-36, 2-37).

표 2-35. Summary of SNP filter process

필터 단계	항목	SNP matrix loci
1	Total SNP matrix	578,620
2	MAF (minor allele frequency) > 5%	283,545
3	Missing data = 0%	41,169
4	MAF > 5% and Missing data = 0%	6,014
5	Fst > 0.3	193

MAF (minor allele frequency) > 5%: 해당 좌의 전체 샘플에서 MAF가 5%보다 큰 SNP를 선발

Missing data = 0%: 해당 좌의 전체 샘플에서 missing data가 없는 SNP를 선발

Fst > 0.3: Fst가 0.3 이상을 만족하는 SNP 좌를 선발

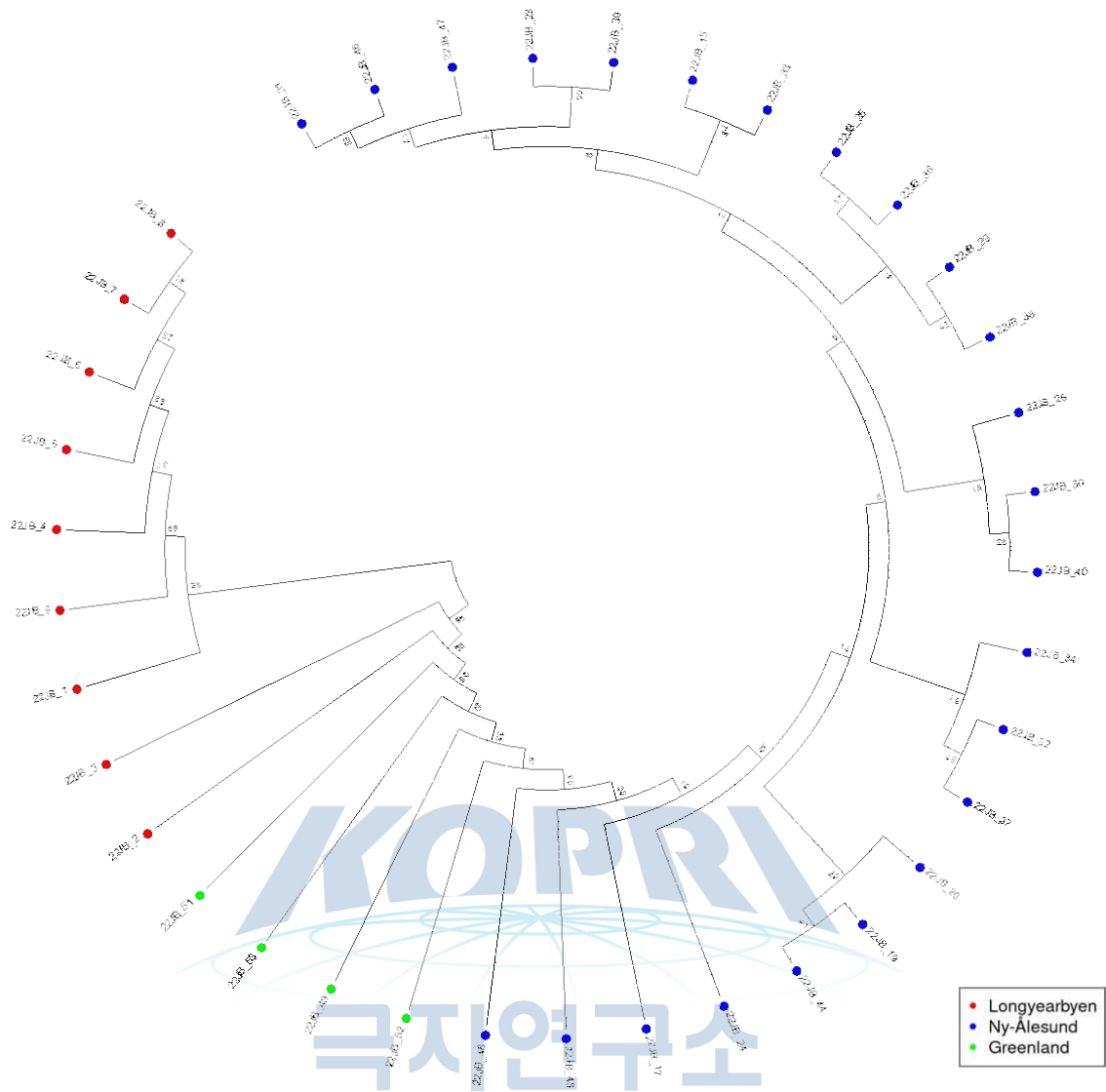


그림 2-35. 자주범의귀 37개체의 193 loci를 이용한 Neighbor-Joining 방법으로 작성한 phylogenetic tree

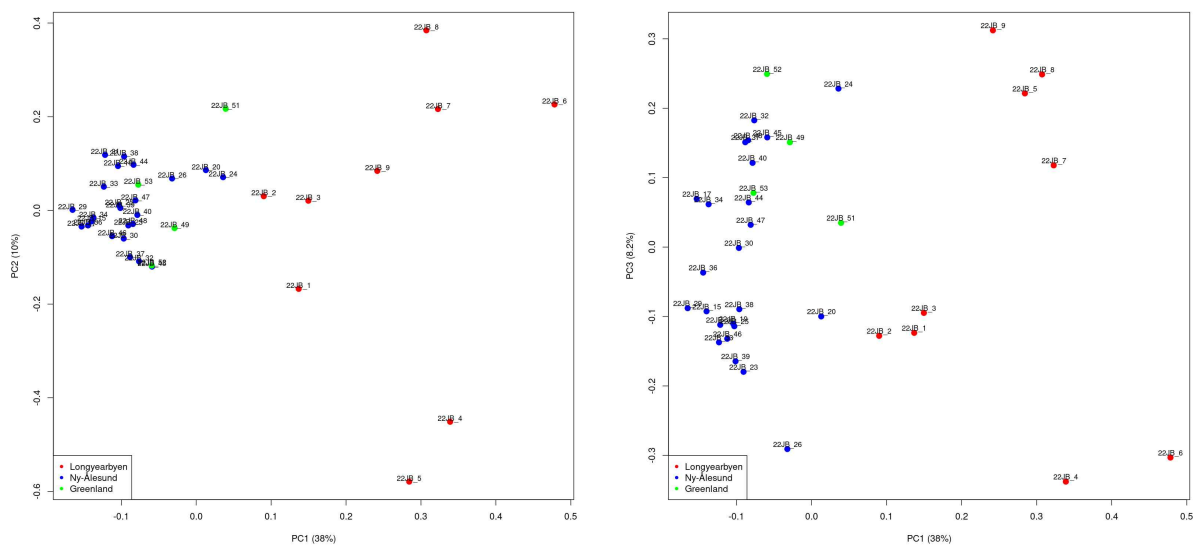


그림 2-36. 자주범의귀 37개체의 193 loci를 이용한 2D plot PCA 분석

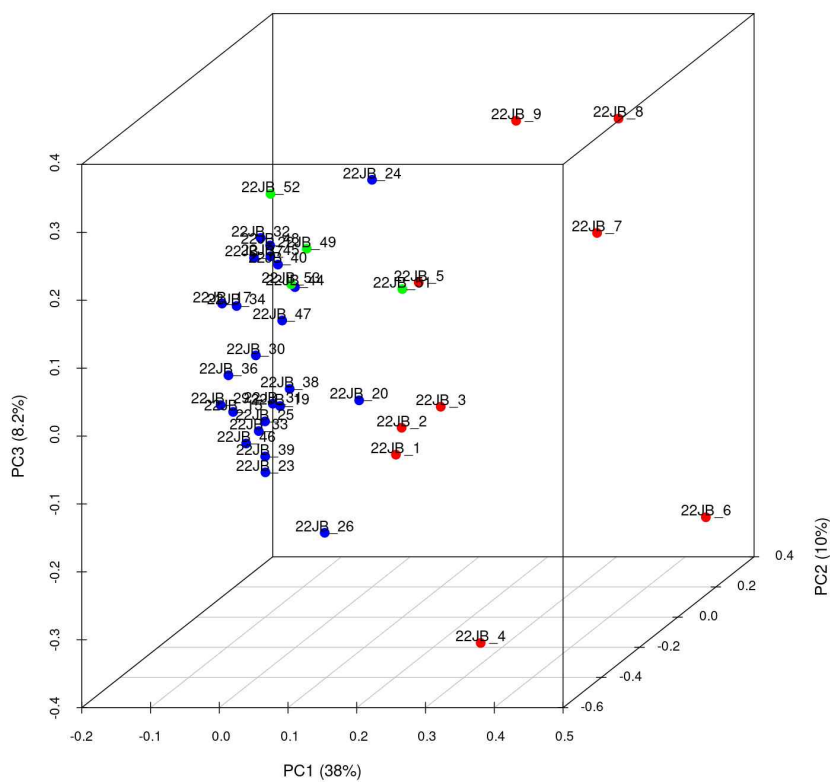


그림 2-37. 자주범의귀 37개체의 193 SNP loci를 이용한 3D plot PCA 분석

자. 스발바르 우점식물에 대한 분자마커 분석 종합 결과

본 과제에서 분석 대상 식물 중 *D. octopetala*는 여러 과정을 거쳐 정밀한 SNP를 개발하였기에 해당 마커와 유사한 염기서열이 있는지 확인하였다. Flanking sequence를 기준으로 NCBI database에 BLAST를 실시하였고 query cover가 90% 이상인 것을 대상으로 결과를 확인하였다. Do-SNP-Sv-16 (Dryas_contig297429)는 *Malus sylvestris*, *Malus domestica*에서 TPR repeat-containing thioredoxin TTL3-like에 해당하는 mRNA 서열과 96% 일치하였으며 *Prunus persica*, *Prunus mume*에서 TPR repeat-containing thioredoxin TTL1에 해당하는 mRNA 서열과 95% 일치하였다. Do-SNP-Sv-59 (Dryas_contig514232)는 *P. mume*의 protein QUIRKY에 해당하는 mRNA 서열과 100% 일치하였으며 *Prunus*속, *Malus*속에서 FT-interacting protein 1에 해당하는 mRNA 서열과 100% 일치하였다. Do-SNP-Sv-76 (Dryas_contig528327)는 *M. domestica*의 9번 염색체 서열에서 95%의 일치하였다. Do-SNP-Sv-94 (Dryas_contig537596)는 *Quercus suber*, *Q. robur*, *Q. lobata*에서 uncharacterized LOC 유전자 서열들과 100% 일치하였으며 *Corylus avellana*의 염색체 10번에서 100% 일치하는 서열이 발견되었다. 또한 *Malus*속 genome에서도 높은 일치도를 보였다. *D. octopetala*의 family가 Rosaceae이기 때문에 대체로 SNP 마커의 flanking sequence가 같은 Rosaceae인 *Prunus*와 *Malus*속 식물의 유전체와 높은 유사도를 보였다. 개발된 SNP의 주변서열이 TPR repeat-containing thioredoxin TTL, protein QUIRKY, FT-interacting protein 1에 해당하는 유전자 서열과 높은 유사성을 보였기 때문에 각 위치에 해당하는 SNP들이 유전자와 연관이 있을 가능성이 있다.

온난화가 가속화되면서 북극지역 식생에 큰 변화를 보이고 있다. 이에 따라 식물 생태계가 빠르게 변화하고 있으며 적응하지 못하고 도태되거나 소실되는 유전자원을 보호할 필요가 있다. 북극권 지역 차이에 따라서 같은 종이 분화되어 새로운 품종이 될 수 있으며 이를 분자마커로 식별하여 이들이 위기에 처했을 때 우선적으로 보호할 필요가 있는지 알아볼 가치가 있다. 본 과제에서는 스발바르에 우점하는 5종의 식물에 대해서 GBS 데이터를 이용하여 Longyearbyen 집단과 Ny-Ålesund 집단을 구별하는 변이를 찾고 마커를 개발하였다. 성공적으로 두 집단을 나누었으며 효율적으로 집단을 구별하는 SNP 마커를 개발했다. 그러나 각 집단 내의 세부 지역의 집단까지 구별하지는 못하였다. 이는 세부 지역 내의 유전적 거리가 비교적 가까워 차이가 적어 구별이 잘 되지 않은 것으로 생각된다. 그러나 더 많은 개체의 유전체를 조사하고 세부 지역 내의 SNP를 추가로 개발하고 genotyping 한다면 이들 간의 유연관계도 밝힐 수 있을 것이다. 또한 전체 유전체를 이용하여 분자마커를 찾는다면 더욱 강력한 분자마커를 개발할 수 있을 것이며, 두 집단뿐만 아니라 세부적인 지역까지 구별하여 유전체가 변화하는 흐름을 관찰할 수 있을 것이라 기대한다.

제 3 절 식물 생태형의 표현형 분석을 위한 대사체 분석

1. 스발바르 식물 대사체 분석

대사체 분석에 이용된 시료는 DNA 분석에 이용된 시료와 같다.

가. 북극식물 대사체 추출

분쇄된 시료를 건중량 20 mg 씩 정량한 후 대사체를 추출하였다. 추출 과정은 한 시료에서 동시에 GC/MS, LC/MS 분석용으로 나누기 위해 Lisec *et al.*(2006)의 GC/MS 분석용 대사체 추출방법을 변형하였다. GC/MS 추출 과정 중 메탄올 추출 산물 상층액을 PVDF 0.2 µm syringe filter를 이용해 필터링 한 후 분석용 amber vial에 옮겨 LC/MS 분석하였다 (Lisec *et al.* 2006).

나. 북극식물 대사체 분석

준비된 시료를 GC/MS (Agilent, 6890N GC, 5973 inert MSD)에 자동주입기(Agilent, 7683B)를 이용해 Split/Splitless inlet mode로 주입했다. 주입된 시료는 기화되어 헬륨 이동상에 실려 DB-5ms column을 통과하며, 물질 특성에 따라 순차적으로 분리되어 검출되었다. 이때 오븐은 70°C에서 5분 유지한 뒤, 320°C까지 분당 5°C씩 온도를 올렸고, 이때 5°C 상승 할 때마다 1분간 대기하였다. 검출된 대사물질 자료를 Chemstation software를 통하여 확인하고 Fiehn GC-MS Metabolomics Retention time Library, NIST library 및 자체 제작된 Standard material library를 통해 물질동정을 수행하였다. 준비된 시료를 HPLC-MS (Agilent 1100-Waters Micromass ZQ 2000)에 주입하여 0.1% Formic acid가 포함된 Water와 ACN 이동상에 실려 역상 column (C18, 250 mm x 4.6 mm I.D, 5 µm, Agilent)에서 60 분간 분석하였다. 150-1,000 amu 스캔 질량 범위로 negative와 positive mode 분석 값을 동시에 얻었다.

다. 통계분석

분석된 데이터를 MS-DIAL software를 통하여 시료-물질의 양적 자료행렬로 정리하고, 자료행렬은 R (R Core Team, 2018)을 이용하여 PCA (Principal Component Analysis)와 OPLS-DA (Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis) 등의 통계적 기법을 통해 종 별 대사물질 차이를 비교하여 생태형에 따른 차이를 분석하였다.

라. 북극종꽃나무 대사체 분석 결과

1차년도 우선분석대상 북극종꽃나무 시료 34개에 대하여 GC/MS 및 LC/MS 분석을 시행하였다.

① GC/MS 분석 결과

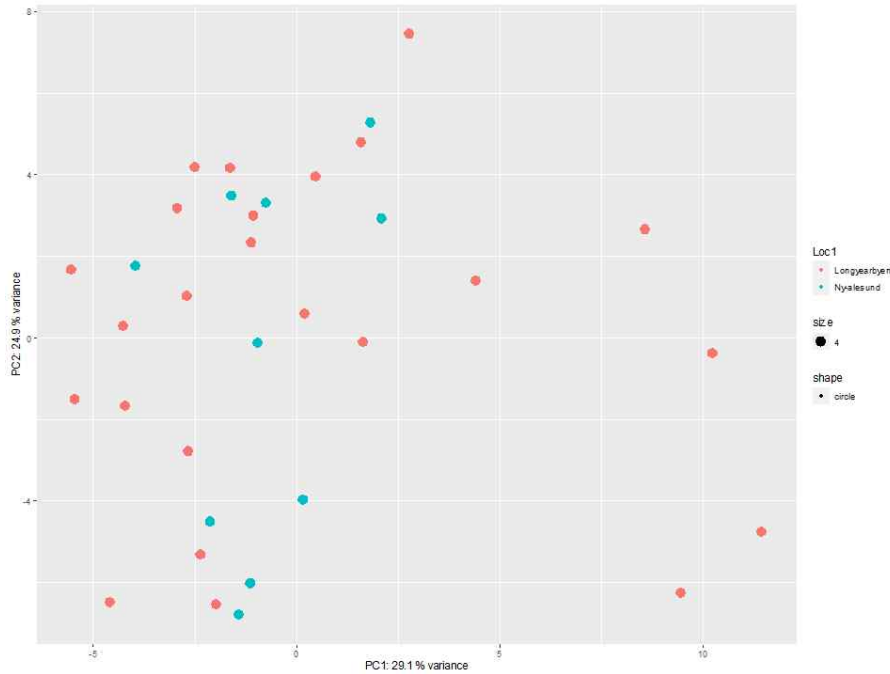


그림 3-1. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 북극종꽃나무의 GC/MS로 분석된 대사체 PCA plot.

PCA 결과 GC/MS로 분석된 북극종꽃나무 대사체는 지역별로 구분되지 않는다 (그림 3-1). 전체 대사체 구성은 두 지역을 구분할 수 없지만, 두 지역에 따라 함량이 차이나는 대사 물질이 있는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-2). 그 결과 동정되지 않은 288번 물질이 선택되었고 통계적으로 유의함을 보였다 (그림 3-3).

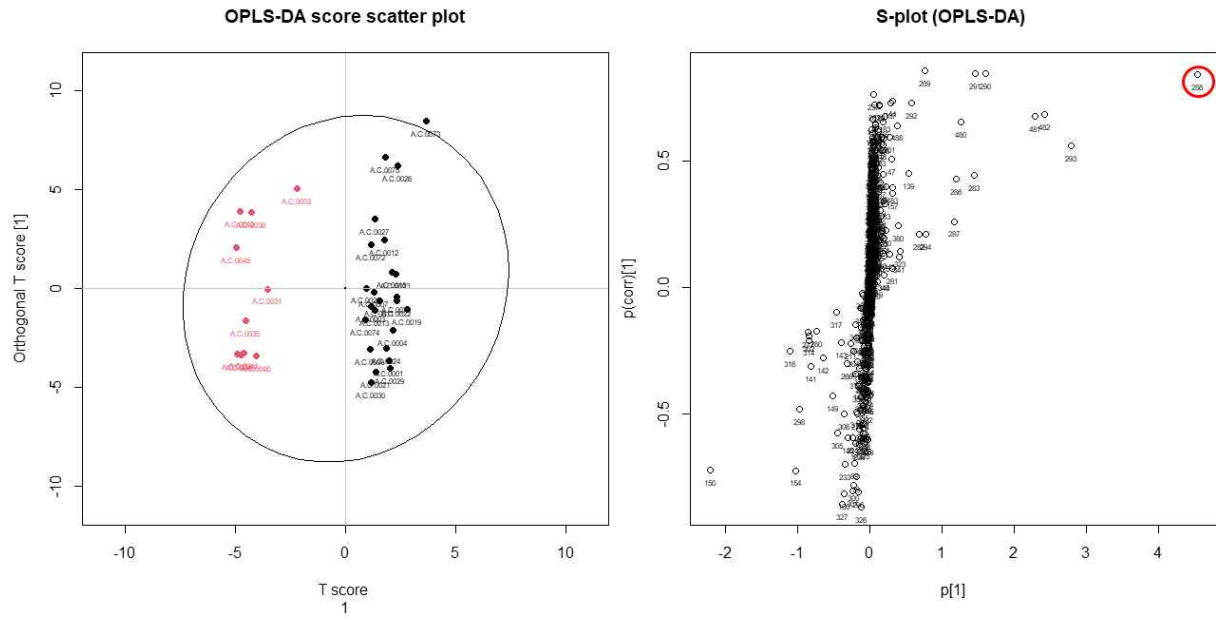


그림 3-2. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 북극종꽃나무 대사체의 OPLS-DA plot (좌) 과 S-plot (우).

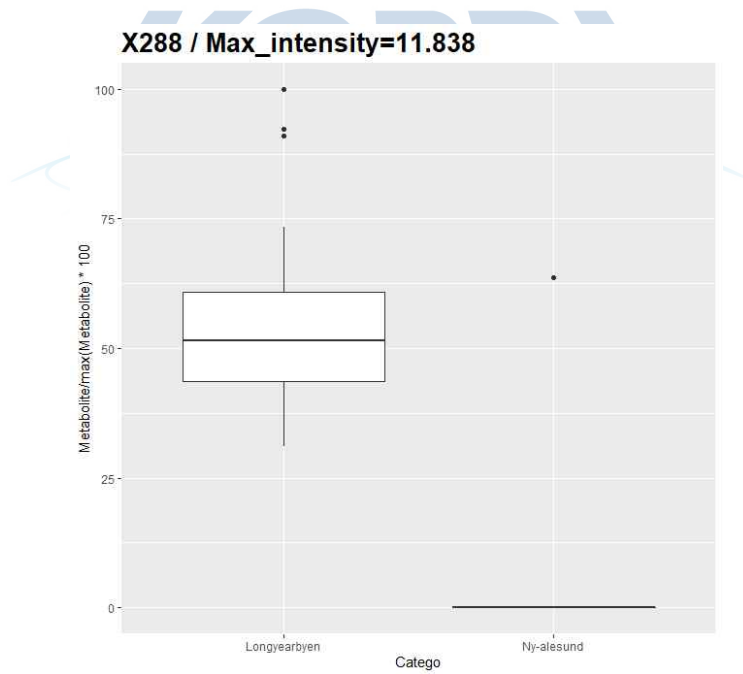


그림 3-3. OPLS-DA를 통해 선별된 물질의 각 지역별 함량.

② LC/MS 분석 결과

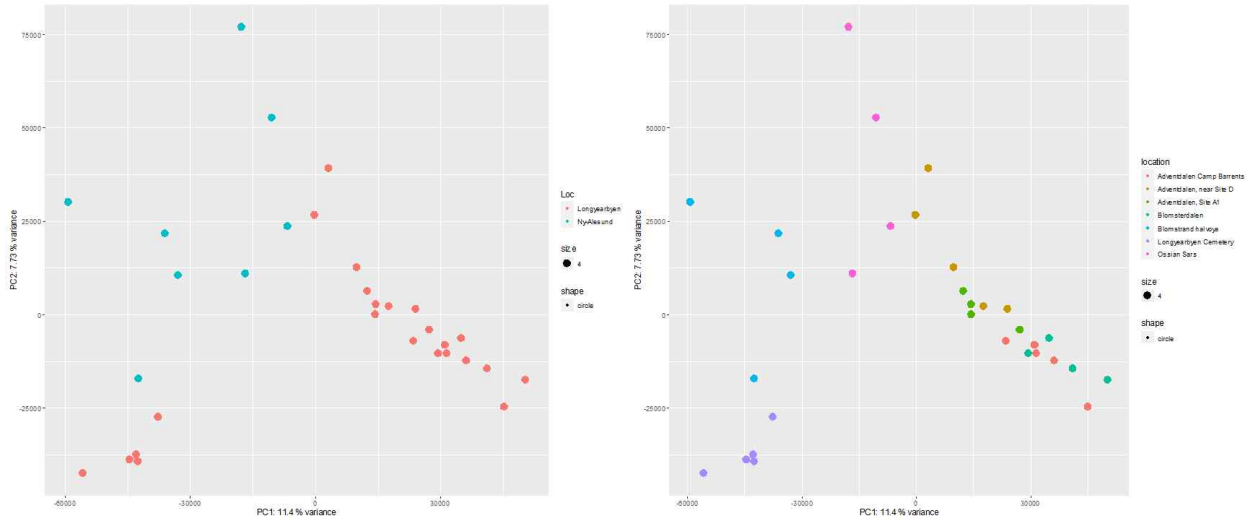


그림 3-4. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 북극종꽃나무의 LC/MS로 분석된 대사체 PCA plot. Longyearbyen 과 Ny-Ålesund 로만 표시한 plot (좌). 각 지역 내 세부 채집지역을 표시한 plot (우).

PCA 결과 LC/MS로 분석된 북극종꽃나무 대사체는 Longyearbyen과 Ny-Ålesund으로 구분되는 양상을 보인다 (그림 3-5). GC/MS 분석 결과와는 다르게 큰 지역 내 세부 지역별로도 구분되는 양상을 보인다. 어떤 대사물질이 Longyearbyen과 Ny-Ålesund 그룹을 구분하는데 영향을 미치는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-5). 그 결과 동정되지 않은 1597번 물질 (m/z: 181.36981, RT: 37.701)이 선택되었다 (그림 3-6).

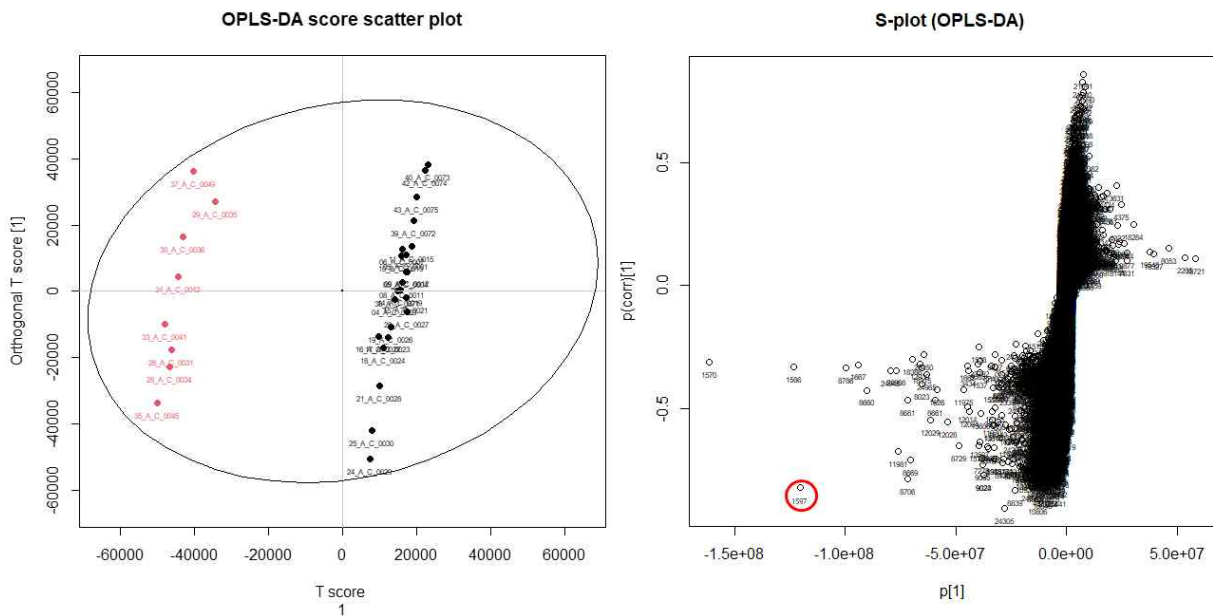


그림 3-5. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 북극종꽃나무 대사체의 OPLS-DA plot (좌) 과 S-plot (우).

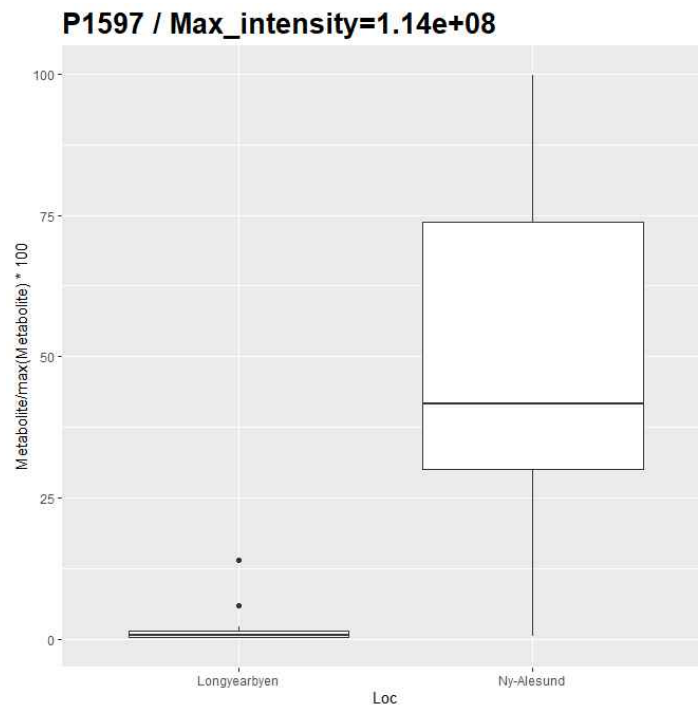


그림 3-6. OPLS-DA를 통해 선별된 물질의 각 지역별 함량.



마. 담자리꽃나무 대사체 분석 결과

1차년도 우선분석대상 식물인 담자리꽃나무 시료 37개에 대하여 GC/MS 및 LC/MS 분석을 시행하였다.

① GC/MS 분석 결과

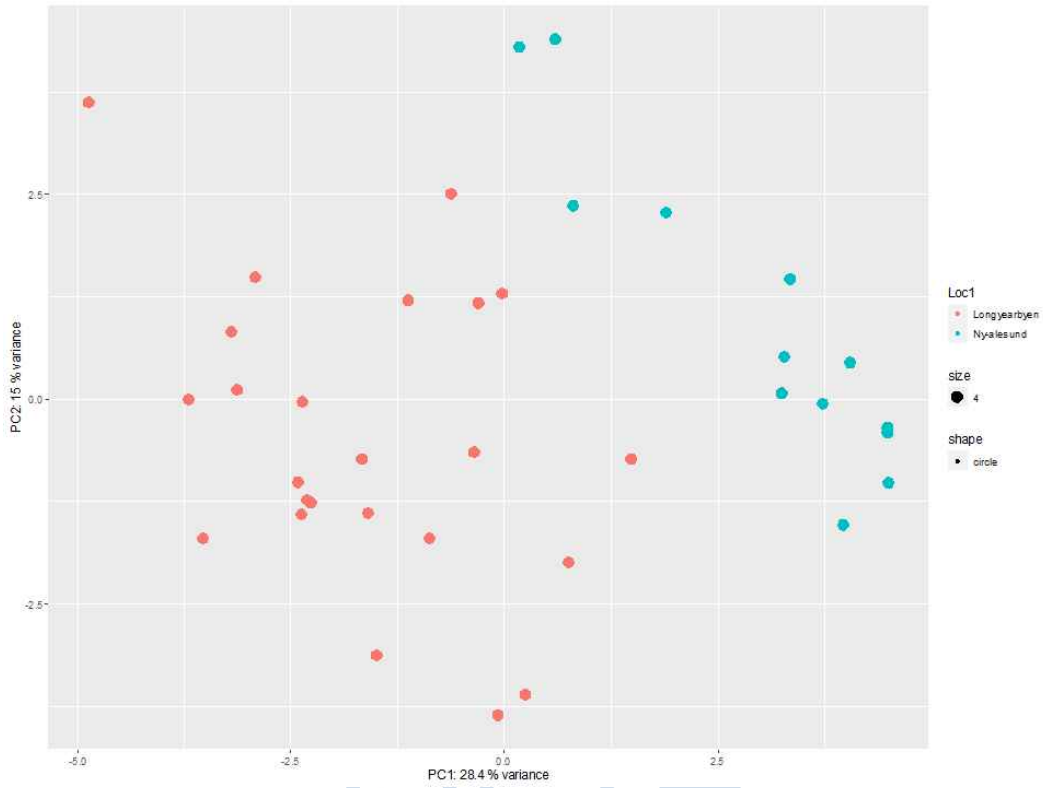


그림 3-7. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 담자리꽃나무의 GC/MS로 분석된 대사체 PCA plot.

PCA 결과 GC/MS로 분석된 담자리꽃나무 대사체는 Ny-Ålesund과 Longyearbyen으로 구분되는 양상을 보인다 (그림 3-7). 어떤 대사물질이 이 두 그룹을 구분하는데 영향을 미치는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-8). 그 결과 동정되지 않은 156번 물질이 선택되었고 통계적으로 유의함을 보였다 (그림 3-9).

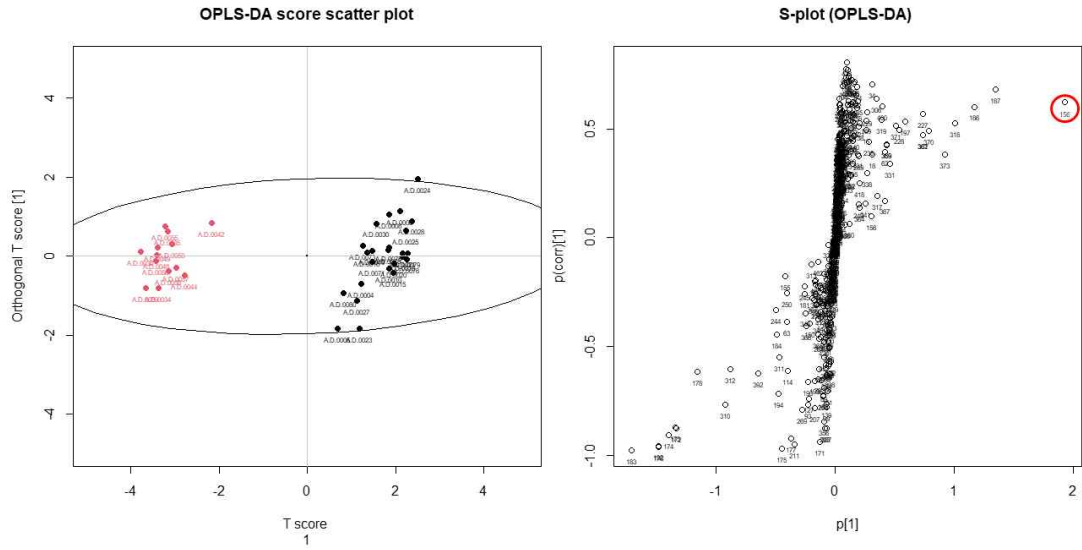


그림 3-8. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 담자리꽃나무 대사체의 OPLS-DA plot (좌)과 S-plot (우).

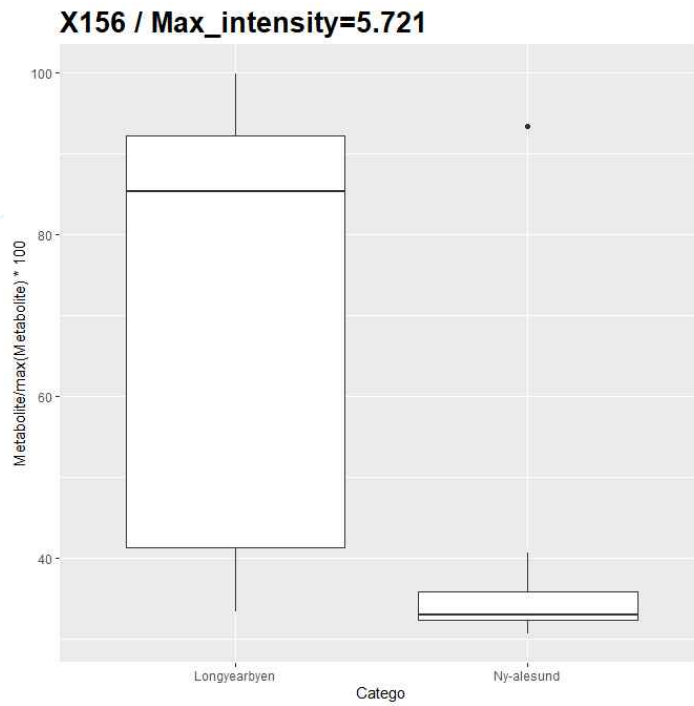


그림 3-9. OPLS-DA를 통해 선별된 물질의 각 지역별 함량.

② LC/MS 분석 결과

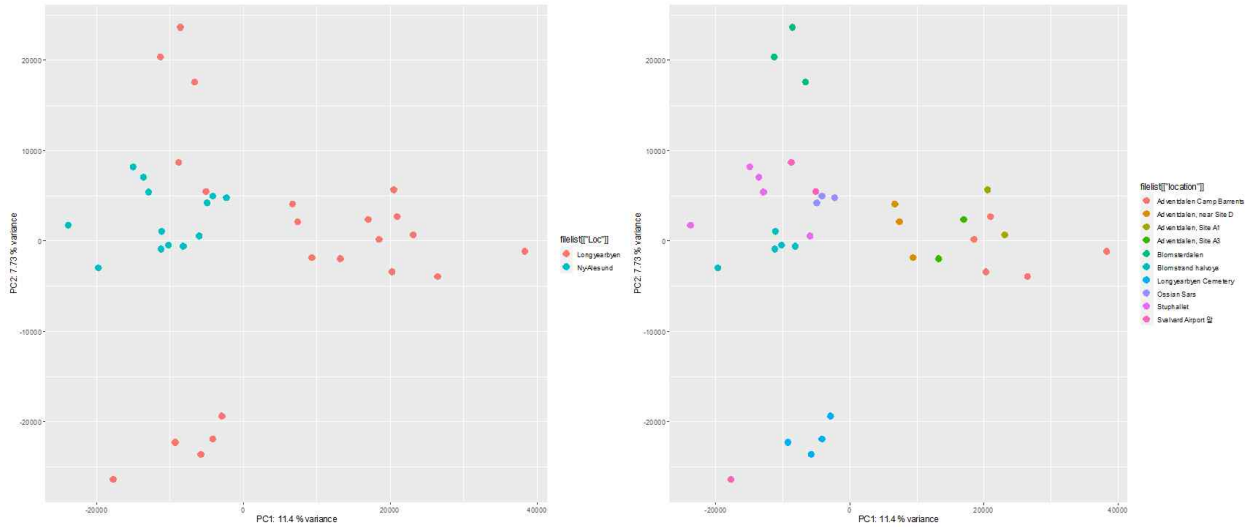


그림 3-10. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 담자리꽃나무의 LC/MS로 분석된 대사체 PCA plot. Longyearbyen 과 Ny-Ålesund 로만 표시한 plot (좌). 각 지역 내 세부 채집지역을 표시한 plot (우).

PCA 결과 LC/MS로 분석된 담자리꽃나무 대사체는 Longyearbyen과 Ny-Ålesund으로 뚜렷이 구분되지는 않지만, Ny-Ålesund 그룹은 비슷한 대사체를 갖는 것으로 보인다 (그림 3-10). GC/MS 분석 결과와는 다르게 큰 지역 내 세부 지역별로도 구분되는 양상을 보인다. 어떤 대사물질이 Longyearbyen과 Ny-Ålesund 그룹을 구분하는데 영향을 미치는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-11). 그 결과 동정되지 않은 15684번 물질 (m/z: 593.77277, RT: 57.766), 15675번 물질 (m/z: 593.70471, RT: 57.766), 15668번 물질 (m/z: 593.63672, RT: 57.732), 15682번 물질 (m/z: 593.77277, RT: 57.671)이 선택되었다 (그림 3-12).

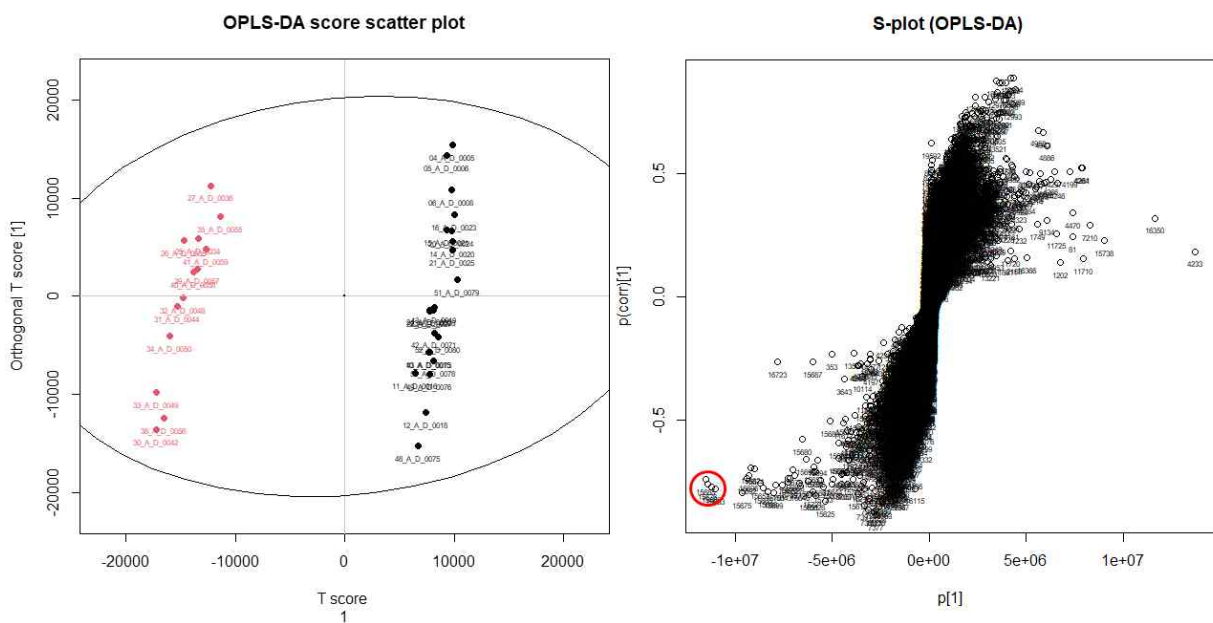


그림 3-11. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 담자리꽃나무 대사체의 OPLS-DA plot (좌) 과 S-plot (우).

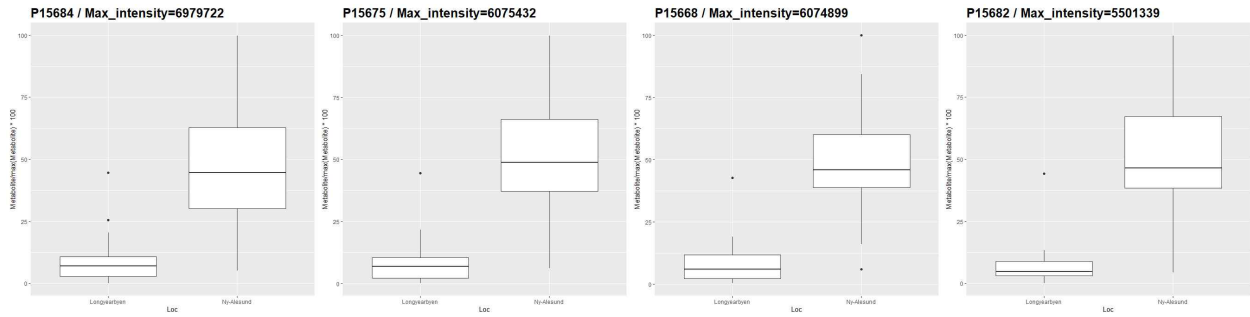


그림 3-12. OPLS-DA를 통해 선별된 물질들의 각 지역별 함량.



바. 북극콩버들 대사체 분석 결과

2차년도 우선분석대상 식물인 북극콩버들 시료 41개에 대하여 GC/MS 분석을 시행하였다.

① GC/MS 분석 결과

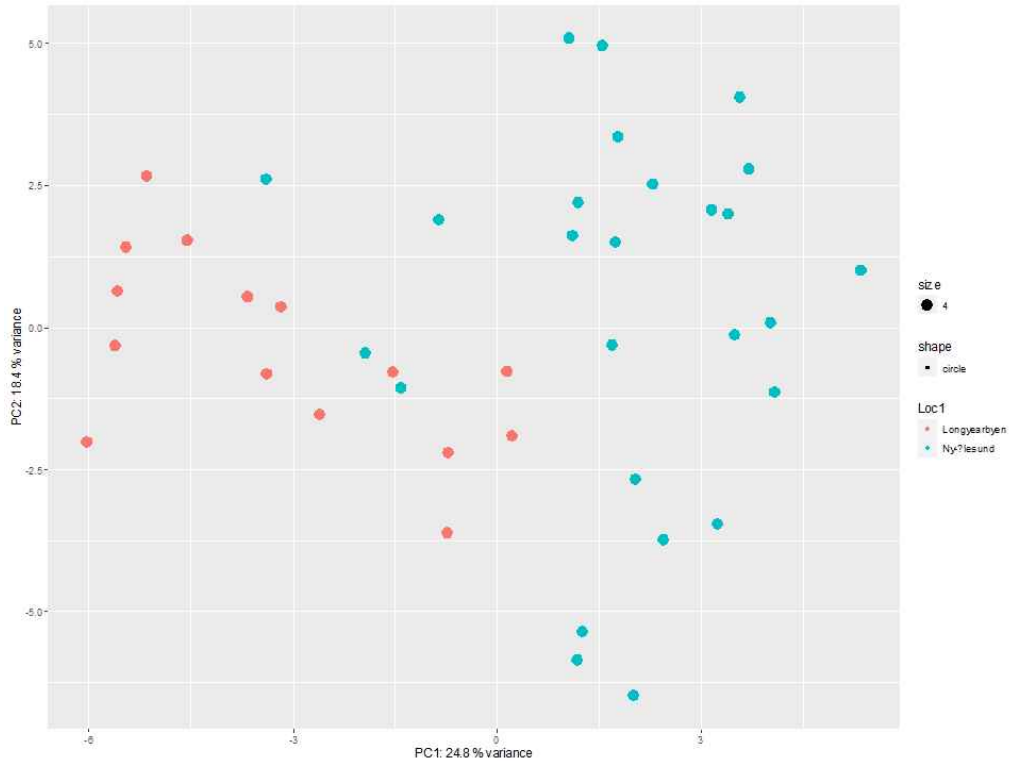


그림 3-13. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 북극콩버들의 GC/MS로 분석된 대사체 PCA plot.

PCA 결과 GC/MS로 분석된 북극콩버들 대사체는 Ny-Ålesund과 Longyearbyen으로 구분되는 양상을 보인다 (그림 3-13). 어떤 대사물질이 이 두 그룹을 구분하는데 영향을 미치는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-14). 그 결과 동정되지 않은 393번 물질이 선택되었고 통계적으로 유의함을 보였다 (그림 3-15).

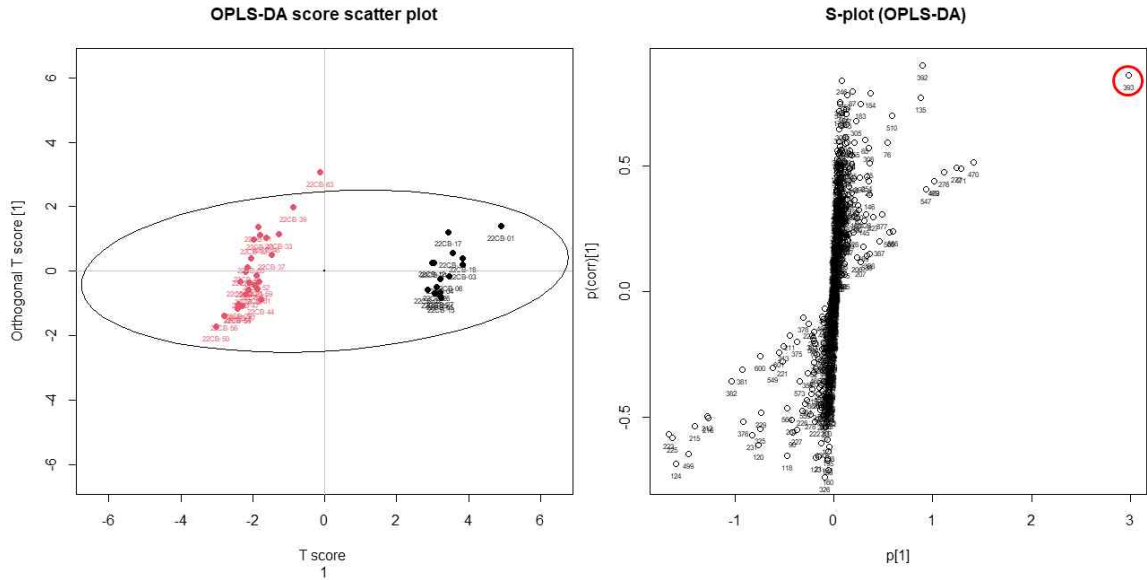


그림 3-14. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 북극콩버들 대사체의 OPLS-DA plot (좌)과 S-plot (우).

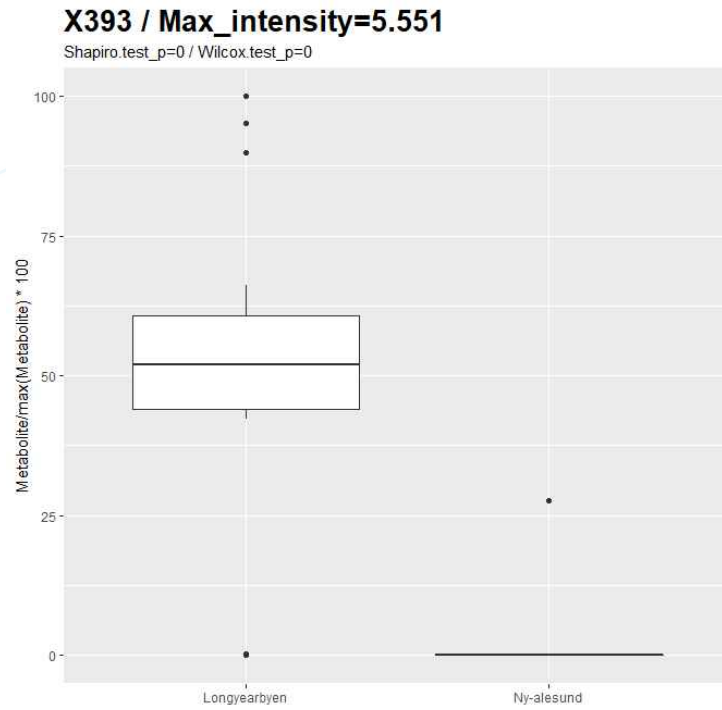


그림 3-15. OPLS-DA를 통해 선별된 물질의 각 지역별 함량.

사. 자주범의귀 대사체 분석 결과

2차년도 우선분석대상 식물인 자주범의귀 시료 37개에 대하여 GC/MS 분석을 시행하였다.

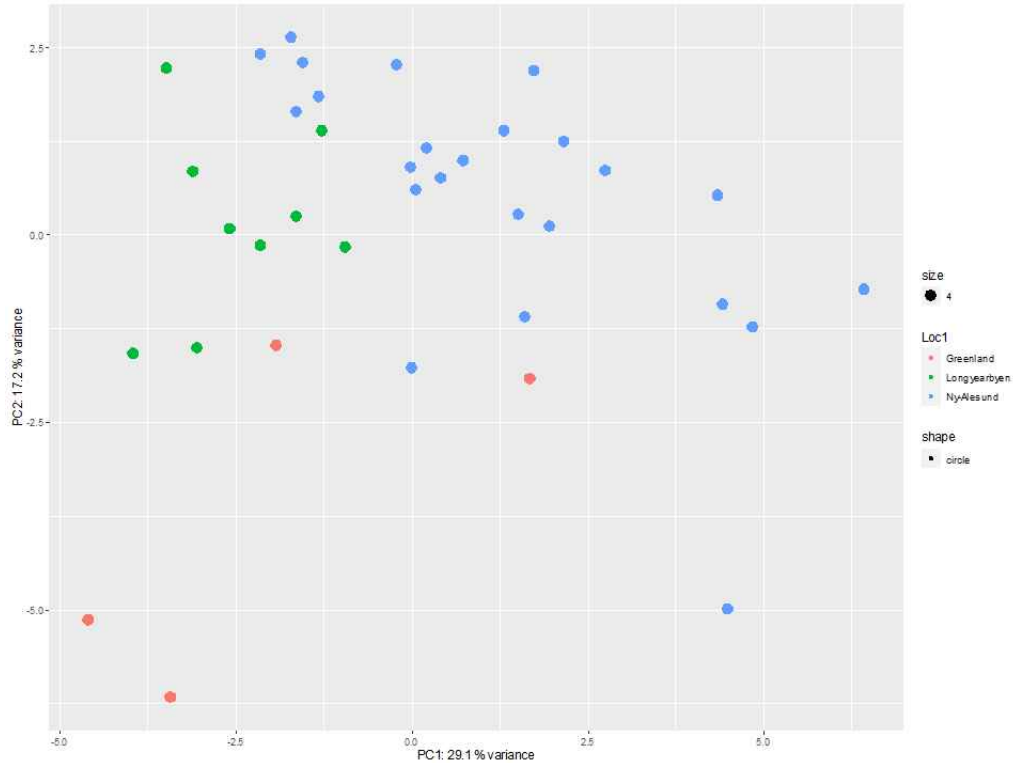


그림 3-16 Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 자주범의귀 대사체의 PCA plot.

PCA 결과 GC/MS로 분석된 자주범의귀 대사체는 Ny-Ålesund와 다른지역 (Longyearbyen, Greenland)으로 구분되는 양상을 보인다 (그림 3-16). 어떤 대사물질이 이 두 그룹을 구분하는데 영향을 미치는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-17). 그 결과 동정되지 않은 541번 물질이 선택되었다 (그림 3-18).

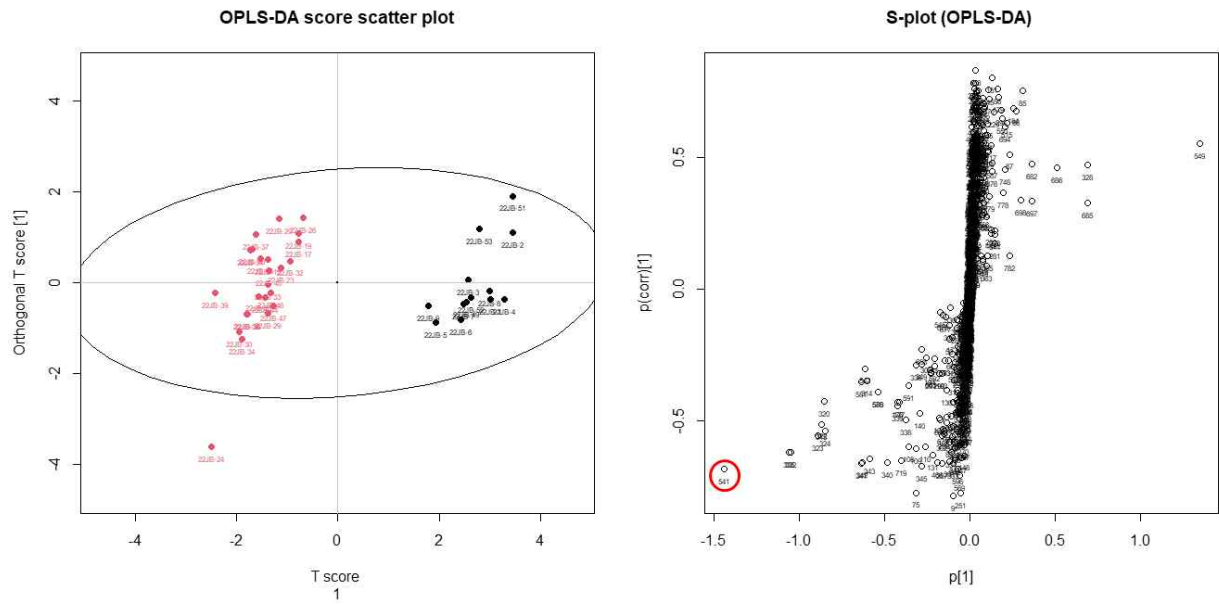


그림 3-17. Ny-Ålesund과 다른지역 (Longyearbyen, Greenland)에서 채집된 자주범의귀 대사체의 OPLS-DA plot (좌)과 S-plot (우).

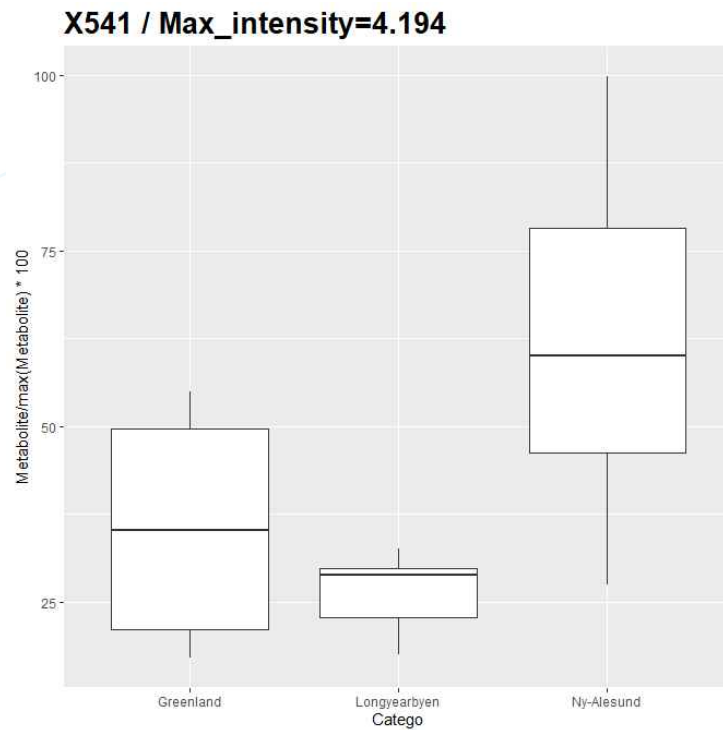


그림 3-18. OPLS-DA를 통해 선별된 물질의 각 지역별 함량.

아. 나도수영 대사체 분석 결과

① GC/MS 분석 결과

1, 2차년도 우선분석대상 식물인 나도수영 시료 52개에 대하여 GC/MS 분석을 시행하였다.

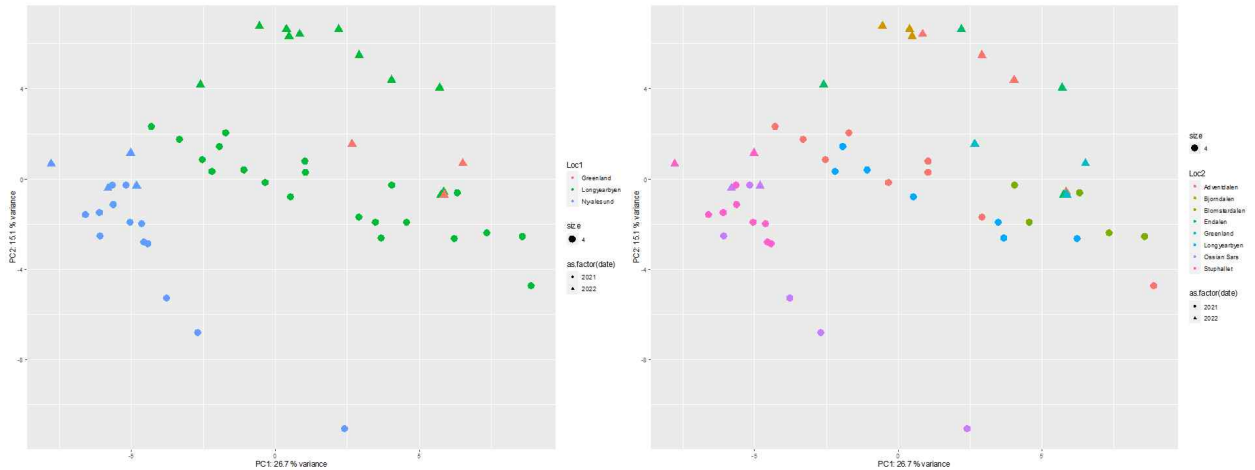


그림 3-19. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 나도수영의 GC/MS로 분석된 대사체 PCA plot. 크게 세 지역으로 나누어 색깔로 표시한 plot (좌). 세부 지역을 나누어 표시한 plot (우).

PCA 결과 GC/MS로 분석된 나도수영 대사체는 Ny-Ålesund와 다른 지역 (Longyearbyen, Greenland)으로 구분되는 양상을 보인다 (그림 3-19). 어떤 대사물질이 이 두 그룹을 구분하는데 영향을 미치는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-20). 그 결과 동정되지 않은 물질 3개 (956번, 960번, 1209번), Maltotriose으로 동정된 1212번 물질이 선택되었다 (그림 3-21).

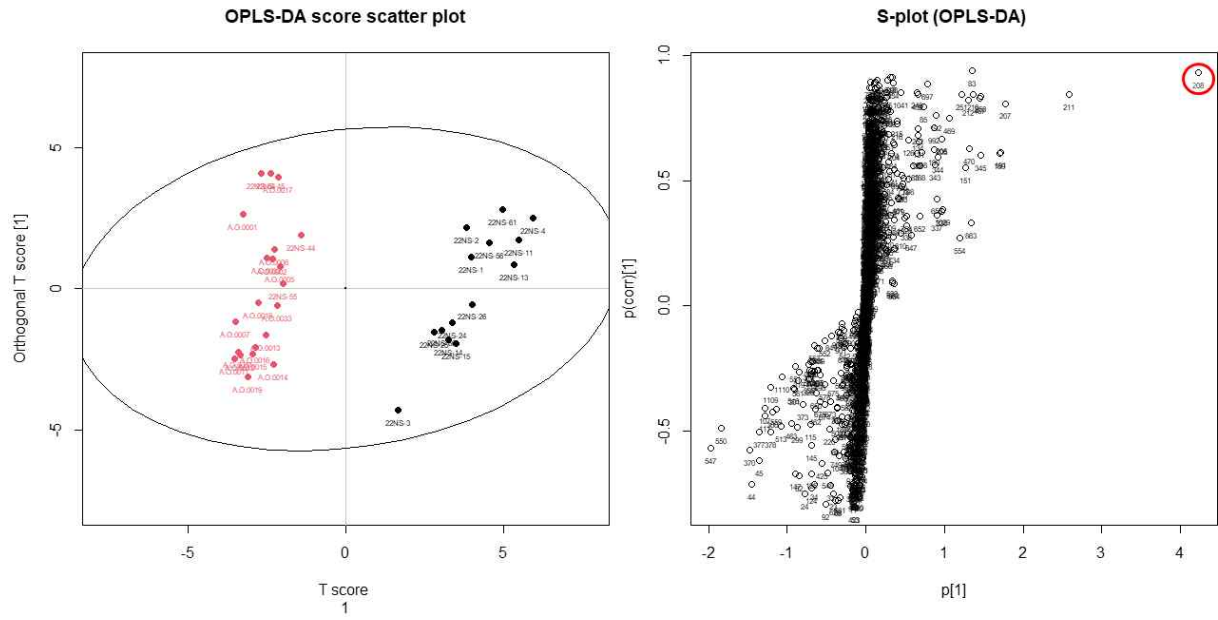


그림 3-20. Ny-Ålesund과 다른지역 (Longyearbyen, Greenland)에서 채집된 나도수영 대사체의 OPLS-DA plot (좌)과 S-plot (우).

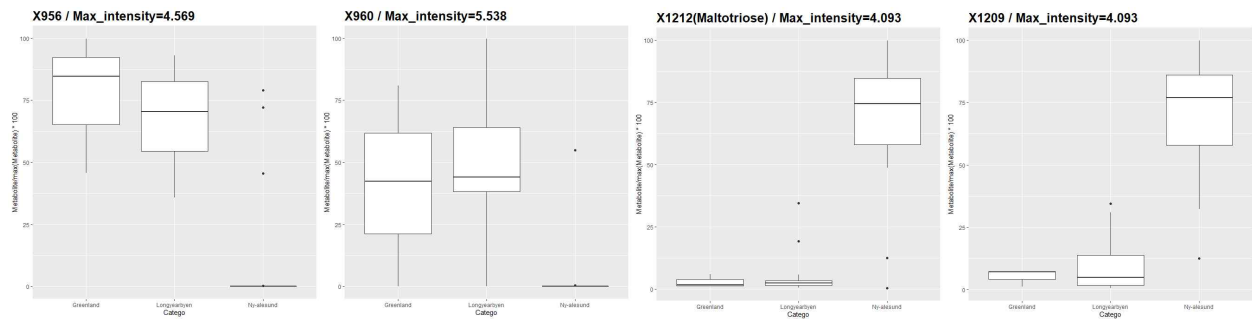


그림 3-21. OPLS-DA를 통해 선별된 물질의 각 지역별 함량.

② LC/MS 분석 결과

1차년도 우선분석대상 식물인 나도수영 시료 34개에 대하여 LC/MS 분석을 시행하였다.

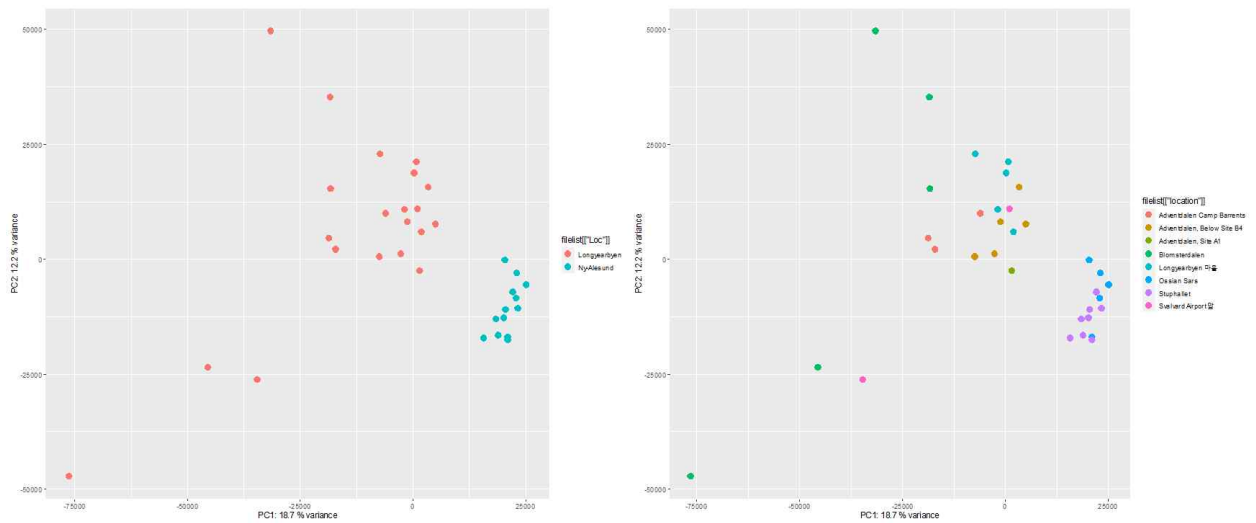


그림 3-22. Longyearbyen과 Ny-Ålesund에서 채집된 나도수영의 LC/MS로 분석된 대사체 PCA plot. 크게 두 지역으로 나누어 색깔로 표시한 plot (좌). 세부 지역을 나누어 표시한 plot (우).

PCA 결과 LC/MS로 분석된 나도수영 대사체는 Ny-Ålesund과 Longyearbyen으로 구분되는 양상을 보인다 (그림 3-22). 어떤 대사물질이 이 두 그룹을 구분하는데 영향을 미치는지 알아보기 위해 OPLS-DA를 수행하여 S-plot을 그렸다 (그림 3-23). 그 결과 10개 물질[2137번 (m/z: 188.2421, RT: 5.473), 2146번 (m/z: 188.31013, RT: 5.489), 2138번 (m/z: 188.24207, RT: 5.518), 2153번 (m/z: 188.37816, RT: 5.476), 2122번 (m/z: 188.10599, RT: 5.489), 2130번 (m/z: 188.17404, RT: 5.509), 2154번 (m/z: 188.37816, RT: 5.519), 2115번 (m/z: 188.03795, RT: 5.489), 2157번 (m/z: 188.4462, RT: 5.506), 2112번 (m/z: 187.96992, RT: 5.499)]이 선택되었다 (그림 3-24).

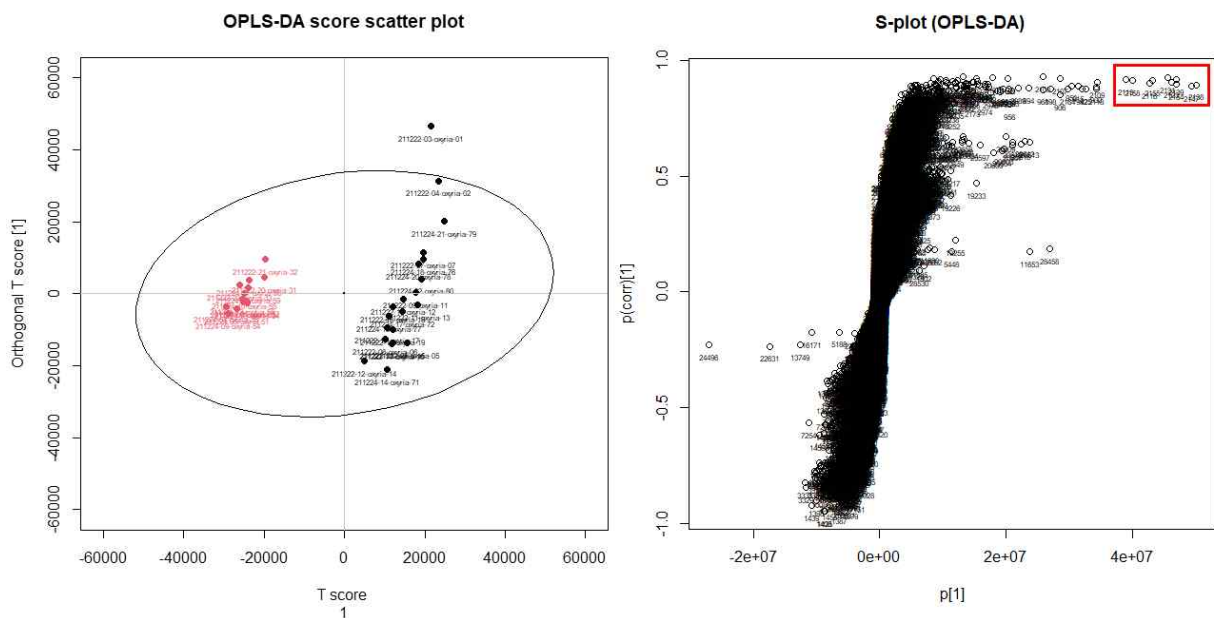


그림 3-23. Ny-Ålesund과 Longyearbyen에서 채집된 나도수영 대사체의 OPLS-DA plot (좌)과 S-plot (우).

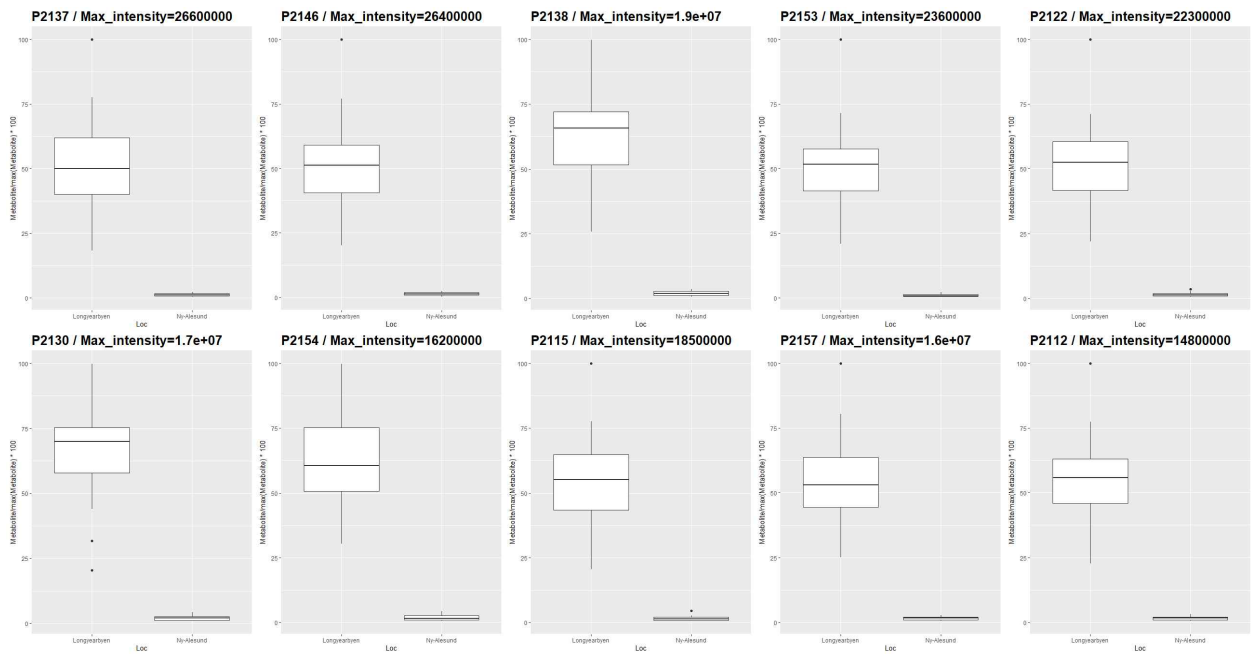


그림 3-24. OPLS-DA를 통해 선별된 물질의 각 지역별 함량.



자. 대사체 분석 결과 종합

스발바르에 생육하는 식물 중 생태형 분석 대상 5종에 대해 GC/MS 및 LC/MS로 대사체 분석 한 결과 대체로 먼 거리에 생육하는 집단 간에 대사체 차이를 보인다. 다만, 종 특성에 따라 명확하게 구분되지 않기도 한다 (북극종꽃나무 GC/MS, 담자리꽃나무 LC/MS 분석 결과). 따라서 생태형 탐색을 위한 대사체 분석은 여러 방법을 적용하여 다각적으로 검토해야 할 것이다.

일부 분석(담자리꽃나무, 북극종꽃나무 LC/MS 분석)에는 지역 내 세부 집단까지 대사체 차이를 보이고, 이는 고분자의 2차 대사물질 분석이 가능한 LC/MS 분석 결과라는 점을 감안할 때 집단간 지역별 생태형은 2차 대사물질이 관여할 가능성이 높다는 점을 보여준다.

Greenland 집단은 거리가 멎에도 불구하고 Longyearbyen 집단과 비슷한 대사체 패턴을 보인다(나도수영, 자주범의귀; 그림 3-25). 이는 고위도임에도 불구하고 높은 기온을 보이는 Sirius passet (Greenland 집단 채집지역)의 특성을 고려하면 기후 환경 요소가 관여할 것으로 생각된다. 더 정밀한 생태형 탐색을 위해서는 기후 환경 자료를 함께 분석해야 할 것으로 보인다.

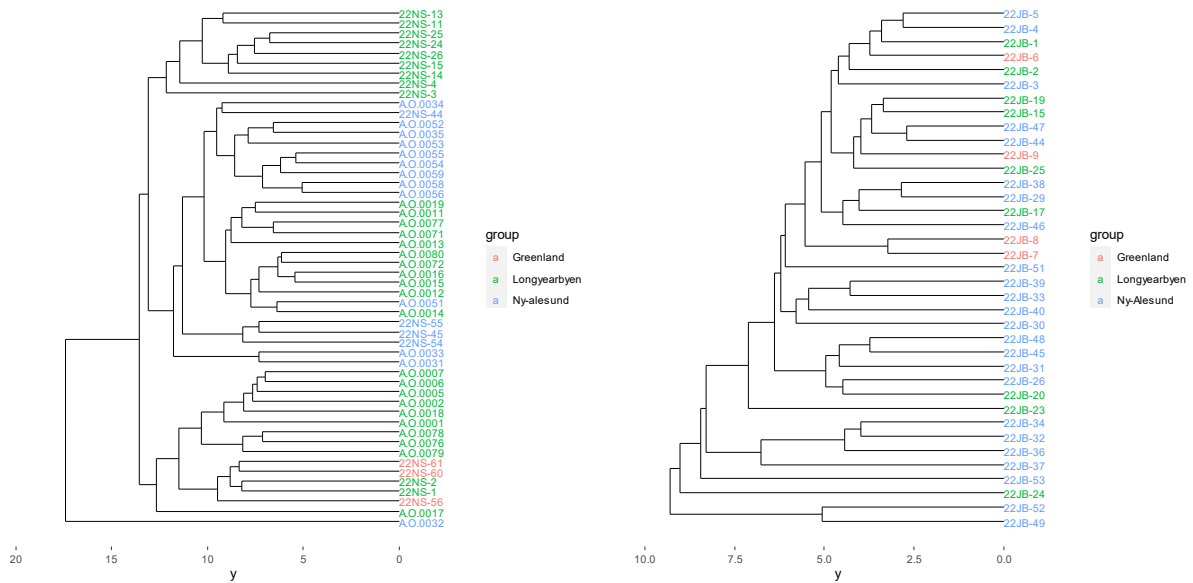


그림 3-25. 나도수영과 자주범의귀 대사체 유집분석 dendrogram.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

가. 연구기간 :총 2년 (2021.02.01. ~ 2022.12.31.)

나. 목표 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2021)	◦ 원격탐사 기술을 활용한 식생 특성 분석	- Adventdalen 영상자료 활용 식생 분포, 식생 지수 분석	0.2	- Adventdalen 다중분광 원격탐사 데이터 확보 및 KPDC에 등록 (Entry ID; KOPRI-KPDC-00001868) - 원격탐사 자료 분석을 위한 기초 데이터로 Adventdalen 현장 식생 군집 구조 분석	100
	◦ 대표 식생 군집 조사 및 고해상도 다중분광분석을 활용한 식생지수 분석	- Adventdalen 대표 식생의 다중분광 관측	0.2	- Adventdalen 현장 식생의 초분광 데이터 확보 및 9개의 대표 식생 클래스 선정하고 분광 라이브러리 구축 및 식생 지수 분석	100
	◦ RAD-seq 기법 활용 스발바르 우점식물 유전형 변이 정량화	- 담자리꽃나무, 북극종 꽃나무, 북극콩버들, 나도수영, 자주범의귀, 씨범꼬리 각각 50 개체 이상 채집	0.4	- 각각의 식물별로 66개체, 51개체, 66개체, 46개체, 54개체, 59개체의 식물 채집	100
		- 담자리꽃나무, 북극종 꽃나무, 나도수영의 유전형 변이 정량화 및 ecotype 분석		- 담자리꽃나무, 북극종 꽃나무, 나도수영의 고용량 분자 바커 분석용 DNA 추출, RAS-seq 분석용 라이브러리 제작 - 담자리꽃나무, 북극종 꽃나무, 나도수영의 유전형 변이 정량화 및 ecotype 분석을 위한 primer set 설정	
	◦ 대사체 분석을 통한 스발바르 우점식물 표현형 변이 정량화	- 담자리꽃나무, 북극종 꽃나무, 나도수영 대사체 분석 및 표현형 변이 정량화	0.2	- 담자리꽃나무 대사체 GC와 LC 분석으로 각각 한 개씩 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구분하는 물질 확보 - 북극종 꽃나무 대사체 GC 분석으로 한 개, LC 분석으로 세 개의 물질 확보 - 나도수영 대사체 GC 분석으로 네 개, LC 분석으로 열 개의 물질 확보	100
계			1.0		

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
2년차 (2022)	◦ 원격탐사 기술을 활용한 식생 특성 분석	- Adventdalen 식물별 분광 라이브러리 제작	0.2	- Adventdalen 식생의 초분광 데이터에 기반한 분광 라이브러리 제작 - 무인기 활용 초분광 영상 획득	100
	◦ 대표 식생 군집 조사 및 고해상도 다중분광분석을 활용한 식생지수 분석	- Adventdalen 대표 식생의 다중분광 정밀 분석	0.2	- Adventdalen 식생의 분광 라이브러리를 대상으로 기계학습으로 식생 분석 - 인공지능 기반의 분류 모델선정 및 북극 식생 지도 제작	100
	◦ RAD-seq 기법 활용 스발바르 우점식물 유전형 변이 정량화	- 담자리꽃나무, 북극종 꽃나무, 나도수영에서 확보한 바이오 마커 특성 분석 및 이를 이용한 ecotype 분석	0.4	- 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구별할 수 있는 담자리꽃나무 SNP 마커 13개, 북극종꽃나무 SNP 마커 3개, 나도수영 SNP 마커 79개 확보	100
		- 북극콩버들, 자주범의귀, 씨범꼬리의 유전형 변이 정량화 및 ecotype 분석		- 북극콩버들과 자주범의귀 draft genome 분석 및 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구별할 수 있는 북극콩버들 SNP 마커 15개, 자주범의귀 SNP 마커 193개 확보 - 씨범꼬리는 염색체가 최대 132개로 배수화되어 있어 유전형 변이 정량화에 부적합한 식물로 판정되어 ecotype 분석 대상에서 제외	
		- 추가 분석이 필요한 경우 대상 식물 추가 채집		- 담자리꽃나무 45개체, 북극종꽃나무 43개체, 북극콩버들 63개체, 나도수영 62개체, 자주범의귀 48개체 추가 채집 - 씨범꼬리를 대체할 식물 후보로 그린란드고추냉이 21개체, 스발바르 식물과 비교 연구할 그린란드 식물로 민담자리꽃나무 8개체, 북극버들 7개체, 나도수영 7개체, 자주범의귀 9개체 채집	
	◦ 대사체 분석을 통한 스발바르 우점식물 표현형 변이 정량화	- 북극콩버들, 자주범의귀, 씨범꼬리의 대사체 분석 및 표현형 변이 정량화	0.2	- 북극콩버들 대사체 GC 분석으로 한 개의 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구분하는 물질 확보 - 자주범의귀 대사체 GC 분석으로 한 개의 롱여비엔과 니알슨 ecotype을 구분하는 물질 확보 - 그린란드 나도수영과 자주범의귀 대사체 분석 결과 롱여비엔 집단과 비슷한 패턴을 보임	100
계		1.0		100	

다. 대외기여도

- 본 연구 과제를 기반으로 NySMAC Terrestrial Flagship에 참여하고 육상 생태계 장기 모니터링 분야 리뷰 논문에 공동저자로 참여하였음 (Pedersen et al. 2022)
- 본 연구 과제 성과를 기반으로 1편의 논문을 투고하였고 3편의 논문을 작성 중임
 - Jun Kim, Moonkyo Kim, Yoo Kyung Lee. Whole-genome sequence of the mountain sorrel *Oxyria digyna*, and genome size estimation of thirteen Arctic plants. G3 투고 중
 - Mapping Arctic Vegetation Species using Ground-based Hyperspectral Imagery in Adventdalen Valley, Svalbard. Remote Sensing. 2023년 상반기 투고 예정
 - Moonkyo Kim, Sang-Tae Kim, Seung Yeon Jang, Junyoung Yang, Yoo Kyung Lee. Development of SNP markers of *Dryas octopetala* to differentiate between Svalbard Longyearbyen and Ny-Alesund regions and population analysis of the two regions. 2023년 상반기 투고 예정
 - Yoo Kyung Lee. The genome size, chromosome numbers, and ploidy levels of Svalbard plants. Journal of Ecology and Environment. 2023년 상반기 투고 예정
- 본 연구에서 과제 성과를 기반으로 3건의 포스터를 발표하고 1건의 프로시딩 제출
 1. Arctic science summit week (AASW) 온라인 포스터 발표 (2022/3/26~4/1)
제목: Spectral Characteristics of the Arctic Vegetation in Adventdalen, Svalbard
저자: Junyoung Yang, Yoo Kyung Lee, Junhwa Chi
 2. International Symposium on Polar Sciences (ISPS) 온라인 포스터 발표 (2022/9/20~9/21)
제목: Spectral Analysis and Classification of Arctic Vegetation using Terrestrial Hyperspectral Imagery
저자: Junyoung Yang, Yoo Kyung Lee, Junhwa Chi
 3. 대한원격탐사학회 전문논문 (프로시딩) 제출 및 구두발표 (2022/11/7~11/9)
제목: Classification of Arctic Vegetation Using Terrestrial Hyperspectral Imagery
저자: Junyoung Yang, Yoo Kyung Lee, Junhwa Chi
 4. 대한원격탐사학회 오프라인 포스터 발표 (2022/11/7~11/9)
제목: 무인기 초분광 영상을 이용한 북극 툰드라 식생 분류 연구
저자: 지준화, 양준영, 이유경
 5. 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2023) 구술 발

표를 위한 초록 접수 (under review) (2023/7/16~7/21)

제목: Mapping Capability of Hyperspectral Information on Dominant Arctic Vegetation Species using Terrestrial Hyperspectral Imagery

저자: Junyoung Yang, Yoo Kyung Lee, Junhwa Chi

- 본 연구에서 개발한 초분광 데이터 기반 식생분석 기법을 기반으로 노르웨이자연연구소(NINA) 및 노르웨이북극대학(UiT)와 공동으로 Svalbard Science Forum Arctic Field Grant를 신청하는 등 **한-노르웨이 북극 연구 네트워크를 구성하고 연구협력 기반을 마련하였음**
- 본 과제에서 수행한 현장 연구 활동이 KBS 시사기획창 384회 [고장난 심장, 북극의 경고]에 소개되어 북극이 기후변화로 어떤 변화를 겪고 있는지 알리는데 기여하였음 (22.08.23)
- 북극 현장 연구 활동과 북극의 중요성에 관하여 EBS 라디오 [이유경의 북극에 다녀왔습니다] (21.08~10), MBC every1 [떡볶이집 그 오빠] (21.10. 18), 유튜브 사피엔스 스튜디오 [환경 읽어드립니다] (22.12.20)에서 소개함
- LG유플러스 블로그 (<https://blog.uplus.co.kr/4285>), 과학서평 매거진 《SEASON》, 과학소년에 북극 생태계와 연구 활동을 소개하는 글을 실고, 김해도서관, 부산광역시교육연수원, 정독도서관, 창원도서관, 2022 고양시 기후환경학교, 철산도서관, 해누리중학교에서 북극 현장에서 경험하는 기후변화의 심각성을 알리는 대중 강연을 진행하였음
- 본 연구를 통해 스발바르 식생 연구와 탐사 능력을 축적한 북극 전문 연구인력(박사과정 학생 세 명)을 양성하였음

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

가. 연구개발결과의 국제 사회 활용 방안

- 본 연구사업에서 개발한 원격탐사 분석 기술을 기반으로 노르웨이 연구자들과 협력하여 스발바르종합관측시스템(SIOS)에 주도적 참여하고 노르웨이 연구재단에서 공모하는 Researcher Project for Scientific Renewal (Thematic Priority Call)에 대형 R&C 사업에 국제파트너로 참여할 예정임
- 니알슨과학운영자회 기반 Terrestrial Ecosystem Flagship 활동 강화 및 스발바르 기반 선도적 국제공동 프로그램 개발에 활용할 예정임
- 기후변화로 인해 위기에 처한 위기식물종 파악 및 보전에 기여함으로써 북극이사회에서 오피서버 국가로서의 위상 강화

나. 연구개발결과의 추후 연구 활용 방안

- 본 연구에서 개발한 스발바르 식물의 초분광 라이브러리와 Random Forest 알고리즘 모델 기반 식물 분류 기술은, 지금까지 초본, 목본, 이끼류 등의 수준으로만 툰드라 식물을 구분해 영상분석 기법의 한계를 극복한 매우 유용한 분석 기술임
- 본 연구에서 개발한 융합 이미지와 기계학습 기반 모델 식생 지도 제작 기술은 정량 및 정성적으로 우수한 정확도를 보였으며 향후 무인기 활용 스발바르 식생 지도 제작에 적용될 수 있을 것임
- 노르웨이 연구진이 보유한 롱여비엔-니알슨 구간 항공 촬영 초분광 영상을 본 연구에서 개발한 초분광 라이브러리와 분류 알고리즘으로 분석하여, 기존 제작된 스발바르 식생 지도와 비교함으로써 기후변화로 인한 식생의 변화를 분석하는 연구를 계획하고 있으며 이를 위하여 추가 과제 개발이 필요함
- 본 연구에서 개발한 분자마커는 그린란드, 알래스카, 캐나다, 러시아 등 스발바르 이외의 지역에 서식하는 환북극 식물의 분자계통 및 생물 지리 정보를 파악하는데 활용될 수 있음
- 본 연구에서 확보한 스발바르 식물 시료와 정보는 향후 북극 식물의 유용성을 파악하는데 활용될 수 있으며 이를 위하여 다양한 북극 식물 자원 확보와 배양, 실용화 기술을 개발하기 위하여 추가 연구 과제가 필요함

제 6 장 연구 성과 증빙 자료

○ 출판 논문



REVIEW ARTICLE

Five decades of terrestrial and freshwater research at Ny-Ålesund, Svalbard

Å.Ø. Pedersen¹, P. Convey^{2,3}, K.K. Newsham², J.B. Mosbacher¹, E. Fuglei¹, V. Ravolainen¹, B.B. Hansen^{4,5}, T.C. Jensen⁶, A. Augusti⁷, E.M. Biersma^{2,8}, E.J. Cooper⁹, S.J. Coulson¹⁰, G.W. Gabrielsen¹, J.C. Gallet¹, U. Karsten¹¹, S.M. Kristiansen¹², M.M. Svenning⁹, A.T. Tveit⁹, M. Uchida^{13,14}, I. Baneschi¹⁵, E. Calizza¹⁶, N. Cannone¹⁷, E.M. de Goede¹⁸, M. Doveri¹⁵, J. Elster¹⁹, M.S. Giamberini¹⁵, K. Hayashi²⁰, S.I. Lang²¹, Y.K. Lee²², T. Nakatsubo²³, V. Pasquali²⁴, I.M.G. Paulsen¹, C. Pedersen¹, F. Peng²⁵, A. Provenzale¹⁵, E. Pushkareva¹¹, C.A.M. Sandström²⁶, V. Sklet¹, A. Stach²⁷, M. Tojo²⁸, B. Tytgat²⁹, H. Tømmervik³⁰, D. Velazquez³¹, E. Verleyen²⁹, J.M. Welker^{32,33}, Y.-F. Yao³⁴ & M.J.J.E. Loonen²⁶

¹Norwegian Polar Institute, Tromsø, Norway

²British Antarctic Survey, Natural Environment Research Council, Cambridge, UK

³Department of Zoology, University of Johannesburg, Auckland Park, South Africa

⁴Centre for Biodiversity Dynamics, Department of Biology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

⁵Norwegian Institute for Nature Research, Trondheim, Norway

⁶Norwegian Institute for Nature Research, Oslo, Norway

⁷Research Institute on Terrestrial Ecosystems, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Porano, Italy

⁸Natural History Museum of Denmark, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

⁹Department of Arctic and Marine Biology, UiT The Arctic University of Norway, Tromsø, Norway

¹⁰SLU Swedish Species Information Centre, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

¹¹Department of Applied Ecology and Phycology, University of Rostock, Rostock, Germany

¹²Department of Biosciences, University of Oslo, Oslo, Norway

¹³National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan

¹⁴The Graduate University for Advanced Studies, Tokyo, Japan

¹⁵Institute of Geosciences and Earth Resources, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pisa, Italy

¹⁶Department of Environmental Biology, Sapienza University of Rome, Roma, Italy

¹⁷Department of Science and Technology, Insubria University, Como, Italy

¹⁸Institute of Environmental Sciences, University of Leiden, Leiden, The Netherlands

¹⁹Centre for Polar Ecology, Faculty of Science, University of South Bohemia, Treboň, Czechia

²⁰Institute for Agro-Environmental Sciences, Ibaraki, Japan

²¹Department of Arctic Biology, The University Centre in Svalbard, Longyearbyen, Norway

²²Korea Polar Research Institute, Incheon, Republic of Korea

²³Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University, Hiroshima, Japan

²⁴Section of Neuroscience, Sapienza University of Rome, Roma, Italy

²⁵China Center for Type Culture Collection, College of Life Sciences, Wuhan University, Wuhan, China

²⁶Arctic Centre, University of Groningen, Groningen, The Netherlands

²⁷Institute of Geoecology and Geoinformation, Faculty of Geographic and Geological Sciences, Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland

²⁸Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University, Osaka, Japan

²⁹Laboratory of Protistology and Aquatic Ecology, Ghent University, Ghent, Belgium

³⁰Norwegian Institute for Nature Research, Tromsø, Norway

³¹Department of Biology, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain

³²Department of Biological Sciences, University of Alaska Anchorage, Anchorage, AK, USA

³³Ecology and Genetics Research Unit, University of Oulu, Oulu, Finland

³⁴State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Abstract

For more than five decades, research has been conducted at Ny-Ålesund, in Svalbard, Norway, to understand the structure and functioning of High-Arctic ecosystems and the profound impacts on them of environmental change. Terrestrial, freshwater, glacial and marine ecosystems are accessible year-round

Keywords

Biogeochemical cycles; climate change; ecosystem structure and functioning; environmental change; High Arctic; human impacts; soil

ecosystems, and their linkages with climate, glacial habitats and marine ecosystems.

Acknowledgments

We thank the following three organizations for providing facilities for the workshops: Kings Bay AS (Ny-Ålesund, August 2018), The University Centre in Svalbard (Longyearbyen, October 2019) and Svalbard Science Conference (Fornebu, November 2019). We also thank Bernt Bye (NPI) for assistance with maps, Sebastian Descamps (NPI) for providing information on seabird monitoring, Geir Gotaas (NPI) for checking parts of the text, Jack Kohler (NPI) for useful references, Marjolein Admiraal (University of Groningen) for help with an early version of the EndNote literature database, Ketil Isaksen (Norwegian Meteorological Institute) for help with meteorological data, and the numerous colleagues and field assistants who contributed to the research described in this study. Three anonymous reviewers provided helpful comments on the manuscript.

Disclosure statement

The authors report no conflicts of interest.

Funding

The Svalbard Science Forum and the Norwegian Research Council funded this study by supporting the three workshops that synthesized the knowledge on which this work is based (grant nos. ES610235 and 300103). The following organizations and programmes funded the participation of researchers in the workshops and the writing process: Chinese Arctic and Antarctic Administration and Polar Research Institute of China (F. Peng); the 2015–16 BiodivERsA Cofund call for research proposals, with the national funders of Belgium (Belgian Science Policy Office [BELSPRO] grant no. BR/175/A1/CLIMARCTIC-BE; E. Verleyen, B. Tygat), Germany (German Research Foundation [DFG] grant no. KA899/33-1; U. Karsten, E. Pushkareva), Norway (Research Council of Norway; 270252/E50; M.M. Svenning) and Spain (former Ministry of Science, Innovation, and Universities of Spain [MINECO] grant nos. PCIN2016-001 and CTM2016-79741; D. Velazquez); DFG priority programme 1158 Antarctic Research (grant no. KA899/30-14; U. Karsten); grant-in-aid for Scientific Research, Japan Society for the Promotion of Science (grant no. 16H05622) and National Institute of Polar Research (project no. KP-309) (M. Uchida); Korea Polar Research Institute (grant no. PE21450; Y.K. Lee); Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech


Republic (Czech–Indian Cooperative Scientific Research, grant no. Iain19139) and the institutional long-term research plan of the Institute of Botany of the Czech Academy of Sciences (grant no. RVO67985939; J. Elster); Natural Environment Research Council core funding to the British Antarctic Survey Biodiversity, Evolution and Adaptation Team (E.M. Biersma, P. Convey, K.K. Newsham); Natural Environment Research Council (UK)—National Commission for Scientific and Technological Research (National Commission for Scientific and Technological Research [CONICYT]; Chile; grant no. NE/P003079/1) and the Carlsberg Foundation (grant no. CF18-0267; E.M. Biersma); Netherlands Polar Programme (E.M. de Goede, M.J.J.E. Loonen, C.A.M. Sandstöm); Nordområdene og Russland (NORRUSS) programme (grant no. 233645/H30; M.M. Svenning); Svalbard Science Forum (Arctic Field Grants nos. 246113/E10 and 256933/E10; E.M. Rainer); Norwegian Institute for Nature Research (T.C. Jensen); NPI (E. Fuglei, G.-W. Gabrielsen, J.C. Gallet, J. Mosbacher, Å.Ø. Pedersen, V. Ravolainen); the National Polar Long-term Observation Program of China (NaPLO) and National Natural Science Foundation of China (grant no. 41271222) (Y.-F. Yao); the Research Council of Norway (M.M. Svenning, A.T. Tveit); the Research Council of Norway independent projects support (FRIPRO) Mobility Grant Project Time and Energy (project no. 251027/RU), co-funded by the European Research Council under Marie Curie grant no. 606895, and Tromsø Research Foundation Starting Grant to the project Cells in the Cold (grant no. 16_SG_ATT; A.T. Tveit); the Research Council of Norway (grant no. 287402) and Norwegian Institute for Nature Research (H. Tømmervik); the Research Council Norway (grant nos. 276080 and 223257) and Norwegian University of Science and Technology (B.B. Hansen); University of Groningen (M.J.J.E. Loonen); Uarctic Research Chairship (J. Welker); UiT The Arctic University of Norway (E. Cooper, M.M. Svenning and A.T. Tveit); University of Oslo and Research Council of Norway (grant no. 280843; S.M. Kristiansen).

References

- Note: the references below include sources cited in the supplementary file that are not cited in the main article. The reference library (compiled by Silje Marie Kristiansen, Ingrid M.G. Paulsen and Åshild Ønvik Pedersen) can be downloaded in EndNote format as a supplementary file.
- Aakra K. & Hauge E. 2003. Checklist of Norwegian spiders (Arachnida: Araneae), including Svalbard and Jan Mayen. *Norwegian Journal of Entomology* 50, 109–129.
- Aanes R., Saether B.E. & Øritsland N.A. 2000. Fluctuations of an introduced population of Svalbard reindeer: the effects of density dependence and climatic variation. *Ecography* 23, 437–443, doi: 10.1034/j.1600-0587.2000.230406.x.

Spectral Characteristics of the Arctic Vegetation in Adventdalen, Svalbard

Junyoung Yang^{1,2}, Yoo-Kyung Lee^{1,2} and Junhwa Chi^{1*}
¹Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea
²University of Science and Technology, Incheon 21990, Republic of Korea
 *Corresponding author: jhchi@kopri.re.kr



Korea Polar Research Institute

1. Introduction

- Remote sensing has been widely used in understanding the Arctic ecosystem.
- Spectral information, a proxy for understanding the characteristics of the ground target, can support the quantitative analysis of remote sensing. Spectral library, serves as reference data in remote sensing analyses, is a database of digital reflectance spectra from ground truth data. Spectral library plays an important role in identifying the targets and quantifying their abundance.
- Previous studies have addressed the Arctic ecosystem using remote sensing data [1, 2]. However, spectral information was limited, and similar vegetation structures cause poor spectral discriminability.
- To address these limitations, this study has two research purposes:
 - (1) Development of a spectral library for six dominant species in Adventdalen, Svalbard: *Dryas octopetala*, *Eriophorum scheuchzeri* ssp. *arcticum*, *Equisetum* sp., *Bistorta vivipara*, *Cassiope tetragona*, and *Salix polaris*.
 - (2) Investigation of an effective strategy for identifying the Arctic plant species from remote sensing imagery.

2. Method

- Study area: Arctic tundra of Adventdalen, Svalbard
- Hyperspectral images were acquired using a hyperspectral camera Specim IQ across the 400 to 1000 nm wavelength range at a spectral resolution of approximately 3 nm.
- The hyperspectral image contained 204 bands. Reflectance values were converted using a white calibration target (Spectralon). However, the 900 to 1000 nm wavelength range was removed as noisy data.
- The spectral similarity, comparing the spectral discriminability between two spectra, was measured using six measures: Spectral Distance Similarity (SDS), Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Information Divergence (SID), Spectral Correlation Angle (SCA), SDSAM-in, and SCA-SAM-in (Table 1) [3].
- To evaluate the performance of the measures, Probability of Spectral Discrimination (PSD) was used as an objective statistical criterion [3].
- The present research proposed two approaches for the effective classification of Arctic vegetation to overcome the poor spectral discriminability of the Arctic plant species:
 - (i) First derivative was applied to the original hyperspectral reflectance data to effectively classify the Arctic plants [4].
 - (ii) Optimal wavelength and ratio value, distinguishing a species from other species in remote sensing data, were determined.

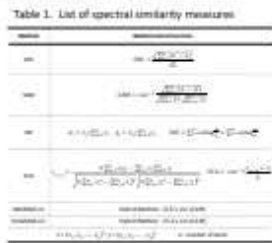


Table 1. List of spectral similarity measures

3. Result

3.1. Spectral Library

- The spectral library of six Arctic plant species was developed using Region of Interest (ROI) associated with each plant species in optical images using ENVI software (Figure 1).
- All ROIs consisted of 1,000 pixels except for *Bistorta vivipara* (300 pixels) due to a lack of relevant pixels.

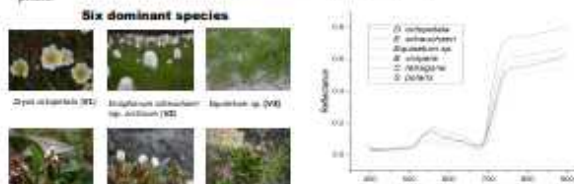


Figure 1. Spectral library of six Arctic plant species

3.2. Spectral Similarity Measures

- The low values of spectral similarity measure between two spectra indicated poor discriminability in Table 2.
- PSDs were compared according to the spectral similarity measures and species in Table 3.
- S. polaris* (V6) showed relatively high overall PSDs compared to other species in Figure 2.
- BDS was most effective measure for identifying *C. tetragona* (V5) from the hyperspectral data of Arctic plants (Figure 2).
- However, the spectral discriminability of Arctic plant species was not significant for classification.

Table 2. Values of spectral similarity measure between two spectra of six plant species

	SDS	SAM	SID	SCA	SDSAM-in	SCA-SAM-in
V1-V2	0.005	0.001	0.011	0.019	0.000	0.003
V1-V3	0.009	0.006	0.006	0.009	0.000	0.000
V1-V4	0.017	0.017	0.018	0.016	0.000	0.001
V1-V5	0.077	0.025	0.002	0.010	0.000	0.000
V1-V6	0.069	0.060	0.021	0.012	0.000	0.001
V2-V3	0.017	0.010	0.003	0.013	0.000	0.000
V2-V4	0.021	0.016	0.011	0.015	0.000	0.000
V2-V5	0.109	0.068	0.010	0.012	0.000	0.001
V2-V6	0.082	0.070	0.020	0.016	0.000	0.001
V3-V4	0.040	0.000	0.011	0.000	0.000	0.001
V3-V5	0.117	0.060	0.014	0.009	0.000	0.001
V3-V6	0.090	0.062	0.007	0.009	0.000	0.000
V4-V5	0.100	0.000	0.010	0.000	0.000	0.001

Table 3. Probability of Spectral Discrimination produced by the measures

	SDS	SAM	SID	SCA	SDSAM-in	SCA-SAM-in
V1	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.007
V2	0.017	0.004	0.000	0.010	0.000	0.010
V3	0.200	0.001	0.011	0.001	0.000	0.010
V4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
V5	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
V6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

PSD (Probability of Spectral Discrimination)

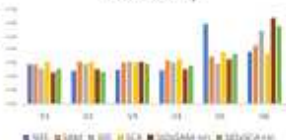


Figure 2. Probability of Spectral Discrimination in the bar chart

3.3. Derivative Analysis

- Compared to the original spectrum, spectral discriminability of the first derivative-spectrum (Figure 3) increased in SAM measure (Figure 4).
- This result indicates that derivative analysis is effective in improving the spectral discriminability and can contribute to the Arctic plant species classification.

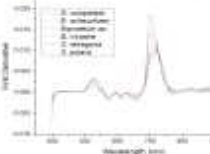


Figure 3. Derivative spectral library of six Arctic plant species



Figure 4. Heat-map comparison between original spectrum and derivative spectrum in SAM measure

3.4. Vegetation Index/Simple Ratio

- All species were evaluated using vegetation indices listed in Table 4 [5].
- Index values according to species and indices were listed in Table 5, highlighting the most effective values.
- D. octopetala*, *E. scheuchzeri* ssp. *arcticum*, *Equisetum* sp. and *C. tetragona* were separated from other species using the optimal index values, but *B. vivipara* and *S. polaris* were difficult to identify.

Table 4. Vegetation indices using in the study

Index	Name	Mathematical function
NDVI-GLC	Normalized Green Ratio	$(G - B) / (G + B)$
		$(G - N) / (G + N)$
TVI	Triangular vegetation index	$0.5 \times [(2R - (R^2 + G^2) - 255) - 256] + (R^2 - G^2)$
		$(R - G) / (R + G)$
MNDWI	Modified normalized difference vegetation index TDS	$(T - B) / (T + B)$
		$(T - G) / (T + G)$

Table 5. Optimal indices of Arctic plant species

Index	Species	Value
NDVI-GLC	<i>D. octopetala</i>	0.000
	<i>E. scheuchzeri</i>	0.000
TVI	<i>D. octopetala</i>	0.000
	<i>E. scheuchzeri</i>	0.000
MNDWI	<i>D. octopetala</i>	0.000
	<i>E. scheuchzeri</i>	0.000

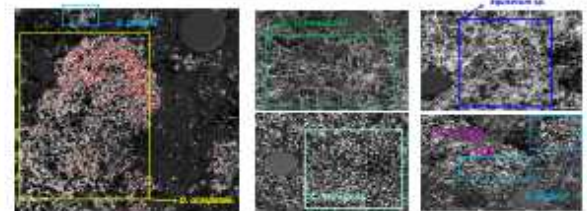


Figure 5. Index (557nm/664nm > 2.0) application in the hyperspectral images

4. Summary

- We developed a spectral library of six dominant plant species in the Adventdalen, Svalbard
- Our result presented the optimal vegetation indices and derivative analysis as strategies for identifying each species from remote sensing imagery.
- The proposed approaches can provide detailed vegetation maps using remote sensing imagery and improve understanding of the Arctic ecosystem.

Reference

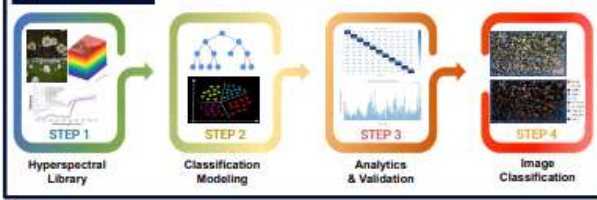
1. Kuchel, J. et al. "Discrimination Mapping in Arctic Tundra Represented by Learning Algorithms for Sparse Spectral Information." *Remote Sensing* 21, 21 (2021): 4244.
2. Szymanski, J. et al. "Use of supervised neural networks (SNN) in a multi-scale vegetation index study of wetland plant communities in Svalbard, Arctic." *Ecology* 91, 11 (2010): 3271-3280.
3. Chi, J. et al. "New Hyperspectral Discrimination Method for Species Classification." *Optical Engineering* 42, 2 (2003): 2171-2180.
4. Yarnal, H., J. Chen, and M. Turner. "Hyperspectral discrimination of ground vegetation in Svalbard, Arctic (Svalbard, 78°N)." *International Journal of Remote Sensing* 26, 20 (2005): 4571-4576.
5. Kopylov, D. et al. "Stability of Vegetation Indices for the Assessment of Atmospheric Contamination in Forest High Arctic Tundra. *Salix polaris*, *Betula ulmaria*, and *Discopeltium*." *Soil Science Society of America* 81, 2 (2017): 453-460.

Spectral Analysis and Classification of Arctic Vegetation using Terrestrial Hyperspectral Imagery

Junyoung Yang^{1,2}, Yoo Kyung Lee^{1,2}, Junhwa Chi^{1*}

¹Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea
²University of Science and Technology, Incheon 21980, Republic of Korea
*Corresponding author: jhchi@kopri.re.kr

Summary



1. Introduction

- Remote sensing has been widely used in understanding the Arctic ecosystem.
- Hyperspectral information consisting of contiguous spectral wavelengths enables the quantitative analysis of remote sensing data.
- A previous study has addressed the Arctic ecosystem using remote sensing data (Eischedl et al., 2021, *Remote Sensing* 13.21: 4466.). However, spectral information for Arctic vegetation is insufficient.
- This study has three research purposes:
 - (1) Development of a spectral library of Arctic vegetation in Adventdalen, Svalbard
 - (2) Presentation of a framework for discriminating Arctic vegetation using terrestrial hyperspectral imagery
 - (3) Assessment of the utility of hyperspectral information with the important wavelengths in the image classification for Arctic vegetation

2. Method

- Study area: Arctic tundra of Adventdalen, Svalbard
- Hyperspectral images were acquired using a terrestrial hyperspectral camera (Table 1). Reflectance was converted using a white calibration target (Spectralon).
- However, the 400 to 450 nm and 900 to 1000 nm wavelength range were removed as noisy data.
- Hyperspectral data pixels of Arctic plant species were extracted using Region of Interest (ROI) from the hyperspectral images in the ENVI software package (Version 5.4.1).
- A Random Forest (RF), a decision tree based ensemble classifier, was used. Then, hyperparameter tuning was performed to optimize the parameters of the RF classifier for the accurate classification (Figure 1).

Table 1. Terrestrial hyperspectral camera specification

Parameter	Value
Camera system	Specim IQ
Spectral range	VNIR 400 - 1000 nm
Spectral resolution	7 nm, FWHM
Spectral bands	204

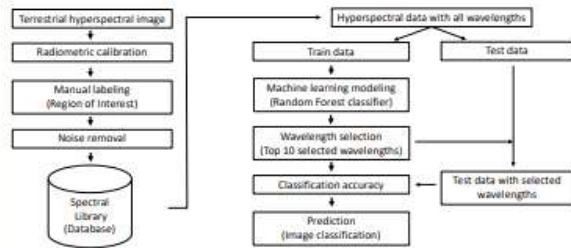


Figure 1. The flow chart of Arctic vegetation classification in Adventdalen, Svalbard

3. Result

1) Spectral Library

- The spectral library was developed using the mean of ROIs associated with plant species (Figure 2).

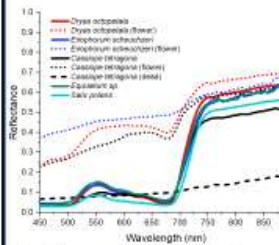


Figure 2. The mean spectral library of Arctic plant species

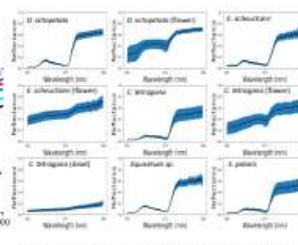


Figure 3. The mean and standard deviation of the reflectance of each Arctic plant species

2) Statistical Accuracy of Arctic vegetation Classification

2-1) Use of All Spectral Bands

- All data consisted of 1,250 pixels except for *Equisetum* sp. (450 pixels) due to a lack of relevant pixels. The hyperspectral samples were allocated to a training set and a test set (Table 1).
- A classification result with a confusion matrix visualizing the classification performance was shown in Table 3.

Table 2. Class information for the hyperspectral dataset

ID	Class	Training (pixels)	Test (pixels)
V1	<i>D. octopetala</i>	1,000	250
V2	<i>D. octopetala</i> (flower)	1,000	250
V3	<i>E. schuchmanii</i>	1,000	250
V4	<i>E. schuchmanii</i> (flower)	1,000	250
V5	<i>C. tetragona</i>	1,000	250
V6	<i>C. tetragona</i> (flower)	1,000	250
V7	<i>C. tetragona</i> (seed)	1,000	250
V8	<i>Equisetum</i> sp.	150	100
V9	<i>E. pilosum</i>	1,000	250

Table 3. Accuracy functions for classification performance

$$\text{Producer's accuracy (Recall)} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{User's accuracy (Precision)} = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$\text{Overall Accuracy (OA)} = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$$

Where TP, FN, FP, TN are the number of true positives, false negatives, false positives, and true negatives.

Table 4. Classification accuracy using all wavelengths (450 to 900 nm)

Sample ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Producer's accuracy (%)
V1	233	5	3	9						93%
V2	344		6							97%
V3		250								100%
V4			250							100%
V5				250						100%
V6					226	3	2	16		90%
V7						247	1			99%
V8							230			100%
V9								99		99%
S2									215	81%

2-2) Use of Important Spectral Bands

- The overall accuracy with the selected wavelengths (95%) was not significantly reduced compared to the one with all hyperspectral wavelengths (96%) in Table 4.

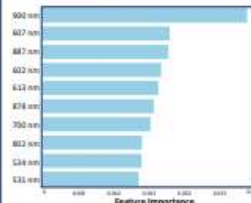


Figure 4. The 10 most important wavelengths was determined by calculating the mean decrease of impurity.

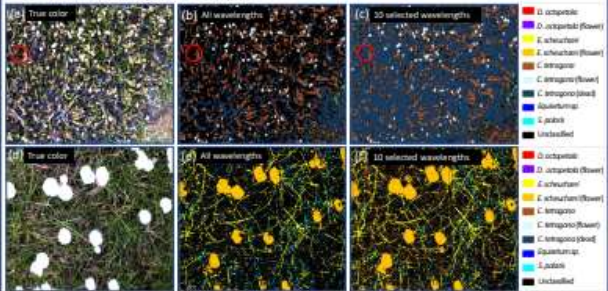
Table 5. Classification accuracy using the 10 most important wavelengths

Sample ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Producer's accuracy (%)
V1	322	15	0	2	3					89%
V2	248		2							99%
V3			250							100%
V4				250						100%
V5					230	3	2	15		92%
V6						245	1			98%
V7							249			99%
V8								92		92%
V9									213	85%

Figure 5. Comparison of the classification results: (a) and (d) True color images, (b) and (e) classification results using all wavelengths, (c) and (f) classification results using 10 selected wavelengths. Pixels below a threshold value of classifier probability (< 0.75) were defined as the unclassified class. The shadow (a red circle in Figure 5.a) was classified as an unclassified class with the all wavelengths, whereas the pixel was misclassified as a *C. tetragona* (seed) class with the 10 selected wavelengths.

3) Visual Inspection of Classification Results

- In qualitative comparison, the significant classification differences between all wavelengths and the 10 selected wavelengths were exhibited.



4. Conclusion

- We developed a spectral library of Arctic vegetation in Adventdalen, Svalbard.
- The random forest classifier-based framework would lead to higher classification performance of hyperspectral data to identify Arctic vegetation.
- Hyperspectral information can provide detailed vegetation maps using remote sensing imagery and improve understanding of the Arctic vegetation.

* This work was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) granted funded by the Ministry of Ocean and Fisheries (KOPRI PE22450).

지상 초분광 영상을 활용한 북극 식생 분류

Classification of Arctic Vegetation Using Terrestrial Hyperspectral Imagery

양준영^{1,2}, 이유경^{1,2}, 지준화^{1*}

Junyoung Yang^{1,2}, Yoo Kyung Lee^{1,2}, Junhwa Chi^{1*}

¹ 극지연구소 (*교신저자 e-mail: jhchi@kopri.re.kr)

² 과학기술연합대학교대학원

요약: 원격탐사 기술은 지구 온난화에 의해 야기되는 북극 식생의 광역 변화를 빠르게 이해하기 위하여 널리 활용되고 있다. 특히 수백 개의 연속적인 밴드로 구성된 초분광 정보는 원격탐사 자료의 정량적 분석을 가능하게 하지만, 북극 식생에 대한 분광 정보 부족으로 인해 분석에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 지상에서 획득한 초분광 영상을 이용하여 노르웨이 스발바르에 위치한 Adventdalen 지역의 우점하는 식생 다섯 종에 대해 그 상태에 따라 9개의 클래스로 세분화하여 분광 라이브러리를 구축하였다. 초분광 영상으로부터 북극 식생 맵핑에 대한 성능을 평가하기 위해 Random Forest 모델을 사용하여 북극 식생 분류 연구를 수행하였다. 분류 모델 훈련에는 분광 라이브러리 구축에 사용된 초분광 영상의 화소들을 이용하였고, 그 결과 약 96%의 높은 분류 정확도를 얻을 수 있었다. 분류 결과를 바탕으로 전체 151개 밴드 중 10개의 중요 밴드를 선정하였고, 이들 전체 밴드를 사용했을 때의 분류 결과와 비교하였다. 그 결과 중요 파장영역만을 사용했을 경우 통계적인 분류 정확도는 크게 감소하지 않았으나, 시각적 분석 시 오분류된 화소가 크게 증가한 결과를 보여주었다. 본 연구를 통해 초분광 정보가 북극 식생의 생태계를 정량적으로 분석할 수 있을 뿐만 아니라 정성적인 분석에 있어서도 보다 많은 기여를 할 수 있음을 시사한다.

1. 서론

원격탐사 자료를 이용하여 기후변화에 의해 빠르게 변화되는 북극 식생 생태계를 이해하려고 하는 연구가 진행되어 왔다(Liu *et al.*, 2017). 미세한 분광학적 차이를 구분할 수 있는 수백 개의 연속적인 파장으로 구성된 초분광 정보는 원격탐사 자료에서 식생의 시각적 구분뿐만 아니라 그 상태에 대한 정보 추출을 가능케 한다. 이러한 분광 반사 정보들로 구성된 분광 라이브러리는 원격탐사 자료의 참조 자료

로 사용되어 식생 분류, 정량화 연구 등에 중요한 역할을 한다. 그러나 자료 획득의 어려움으로 인해 북극 식생에 대한 분광 정보는 부족할 뿐만 아니라 이를 활용한 원격탐사 연구는 여전히 미흡하다.

본 연구는 광범위한 북극 식생 생태계를 이해하고 식생의 변화를 탐지하기 위한 원격탐사의 기초 연구로 활용하기 위해 다음과 같은 연구목적들을 가지고 수행되었다. (1) 지상 초분광 카메라로부터 연구 지역을 대표하는 식생에 대한 분광 라이

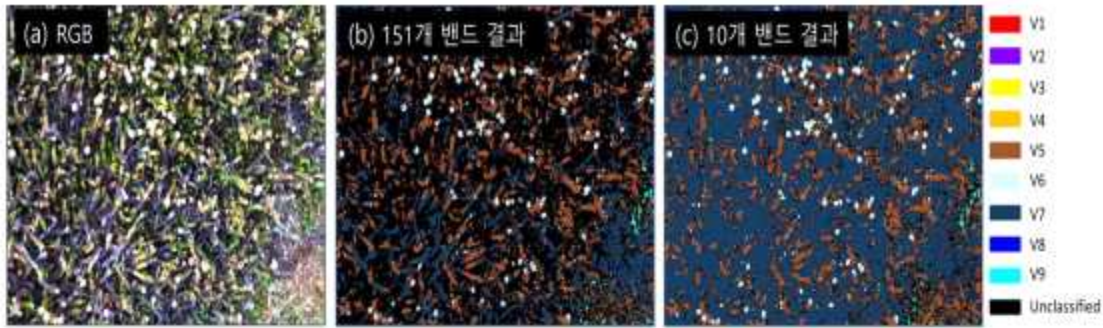


그림 4. 전체 파장영역과 10개의 중요 파장영역을 사용한 시각적 분류 결과

표 2. 북극 식생 분류의 통계적 정확도

Class	151개 밴드 (OA: 96%)		10개 밴드 (OA: 95%)	
	PA	UA	PA	UA
V1	93%	87%	88%	86%
V2	100%	97%	100%	92%
V3	99%	92%	92%	97%
V4	90%	97%	92%	95%
V5	86%	93%	85%	92%
V6	97%	100%	99%	100%
V7	100%	100%	100%	100%
V8	100%	100%	99%	99%
V9	99%	96%	98%	98%

터 변수중요도 값을 계산하여 가장 중요한 10개의 중요 파장영역을 선정하였다(그림 3). 10개의 중요 파장영역만을 사용한 분류시 OA는 95%로 전체 파장 대역의 자료를 사용했을 경우와 비교했을 때 유의미한 변화는 발견할 수 없었다(표 2). 그러나 실제 영상 전체에 적용한 정성적인 분류 결과에 있어 10개의 밴드 사용시 전체 151개 밴드를 사용했을 때보다 오분류된 화소가 크게 증가하였다(그림 4). 특히 전체 밴드 사용시 따로 레이블링이 되지 않은 그림자 등과 관련된 화소들은 'Unclassified'로 적합하게 분류된 반면, 10개 밴드 사용시 해당 화소들은 *C. tetragona* (dead) (V7)로 오분류 되는 결과를 보였다. 이는 초분광 정보가 정량적인 정확도 뿐만 아니라 정성적인 분석에서도 크게 기

여 할 수 있음을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 지상 초분광 영상으로부터 북극 식생의 분광 정보를 수집하고, 이를 이용하여 초분광 영상으로부터의 북극 식생의 분류 가능성을 확인하였다. 분광 라이브러리와 RF 모델을 통한 분류 성능 검증을 통해 본 연구에서 제안한 방법론이 실제 초분광 영상으로부터의 식생 분류에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 해당 분광 정보는 향후 북극 식생의 분광학적 특징 이해뿐만 아니라 무인기 또는 위성에 탑재된 초분광 센서로부터 얻을 수 있는 광역에 대한 맵핑을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

5. 사사

이 연구는 해양수산부의 재원으로 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니다(과제 번호: PE22450).

6. 참고문헌

- Liu, N., Budkewitsch, P., & Treitz, P. (2017). Examining spectral reflectance features related to Arctic percent vegetation cover: Implications for hyperspectral remote sensing of Arctic tundra. *Remote Sensing of Environment*, 192, 58-72.

MAPPING CAPABILITY OF HYPERSPECTRAL INFORMATION ON DOMINANT ARCTIC VEGETATION SPECIES USING TERRESTRIAL HYPERSPECTRAL IMAGERY

Junyoung Yang^{1, 2}, Yoo Kyung Lee^{1, 2}, Junhwa Chi^{1*}

¹Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

²University of Science and Technology, Incheon 21990, Republic of Korea

*Corresponding author, e-mail address: jhchi@kopri.re.kr

Remote sensing is a useful tool to understand and monitor the rapid changes in the Arctic vegetation ecosystem caused by global warming. Hyperspectral information, consisting of hundreds of continuous bands, enables the quantitative analysis of remote sensing data. With recent advances in airborne and spaceborne hyperspectral sensors, hyperspectral remote sensing is becoming an essential technology for Arctic vegetation monitoring. The spectral library, which is a set of hyperspectral reflectance information, is often used for remote sensing research as a reference and plays a significant role in quantifying class abundance in mixed pixels of remote sensing image data [1]. Although the spectral library is important for remote sensing studies, the spectral information for Arctic vegetation is still insufficient due to the difficulty of obtaining data in remote regions. Moreover, much uncertainty still exists about the spectral discriminability of Arctic vegetation species because the similar spectral characteristics among species make it difficult to classify Arctic vegetation species. This study includes three research purposes: (1) the development of a spectral library for Arctic vegetation species; (2) the evaluation of the mapping capability of the hyperspectral information using machine learning approaches; and (3) the presentation of an effective classifier for Arctic vegetation mapping. A portable field spectrometer is common to obtain field spectra of ground targets, but it is difficult to extract accurate spectral information of small Arctic vegetation leaves. As an alternative, we used hyperspectral images captured by a terrestrial hyperspectral camera (Specim IQ) from the 400-1000 nm wavelength range at a spectral resolution of 7 nm. Field campaigns for data acquisition were carried out in the Arctic summer seasons of 2021 and 2022 in the Adventdalen valley, Svalbard (78.9°–78.10° N and 16.0°–16.2° E). The digital number values of the hyperspectral images were converted to surface reflectance using a white calibration target. Data were extracted from the hyperspectral images using the region of interest (ROI) function in the Environment for Visualizing Image (ENVI) software. We divided our datasets into three independent groups: training set (2022) and test sets (2021, 2022). The training set (2022) was used to develop the spectral library, and to train classifiers. The two test sets (2021, 2022) were used to evaluate the classification performance quantitatively and qualitatively. Due to the low signal-to-noise ratio at the ends of wavelength ranges, the spectral range from 452–899 nm was used in this study. To remove the remained noise, Savitzky-Golay smoothing was applied to the data [2]. We first developed a spectral library for ten classes, including sub-classes of Arctic vegetation species (e.g., healthy leaf, dead leaf, and flower), soil, and bare ground. Then, we tested the classification performance using three machine learning classifiers: random forest (RF), support vector machine (SVM), and 1D-convolutional neural network (1D-CNN). The labeled pixels utilized in the development of the spectral library were used to train the classifiers. Each classifier was trained using the best values of the hyperparameters. Fig. 1 illustrates the resulting spectral reflectance curves of the representative ten vegetation classes across the 452 to 899 nm wavelength range employed in this study. Leaf (solid lines) and flower classes (dotted lines) were visually differentiable because of strong absorption features in the near-infrared region, while the spectral characteristics among the leaf classes were not discriminable. Moreover, *C. teragona* (dead) and bare ground showed similar spectral patterns with no significant absorption features. In quantitative analysis, the tested classifiers, RF, SVM, and 1D-CNN, yielded approximately 92%, 97%, and 97% overall accuracy for the test set (2022), respectively. However, classification accuracies generally decreased in the test set collected in 2021 (RF: 74%, SVM: 89%, 1D-CNN: 93%) since the test images (2021) were acquired under different conditions compared to 2022. Fig. 2 illustrates the classified vegetation maps of the three classifiers. The dominant *S. polaris* (leaf) and Soil (mixed) classes were clearly identified by all the classifiers, while other classes showed visual differences according to the classifiers. Overall, the 1D-CNN generally showed better visual agreements with the true color image than the RF and SVM. In conclusion, this study demonstrated the development of the spectral library using ground hyperspectral images and mapping performance of the hyperspectral information on Arctic vegetation species using widely used classifiers. Although some library spectra showed similar spectral patterns according to their structure, they showed good practical classification performance quantitatively and qualitatively. The classification results may depend on the classifier and dataset used, but the deep learning-based 1D-CNN model showed the most robust performance in classifying the Arctic vegetation species regardless of data acquisition times. Additional spectral information for more diverse Arctic vegetation species should be

Integrating multi- and hyperspectral sensors with phenocams for monitoring Arctic tundra vegetation and snow cover phenology (SpecArcPheno)

Partners: SIOS: NINA, UIT, KOPRI and CNR; non-SIOS: NASA/UMBC and FMI

Near-surface remote sensing techniques are essential monitoring tools to provide spatial and temporal resolutions beyond the capabilities of current airborne and spaceborne remote sensing. More frequent and finer scale observations help to monitor specific plant communities and accurately time the phenological stages of vegetation and snow cover (Karlsen et al, 2020). A Hyperspectral field sensor (FloX) was installed as an integral part of an automatic system for monitoring vegetation and environmental seasonal changes (phenology) on Svalbard (AsMoVen) funded by SIOS. Results from the ASMoVen show how multi- (e.g., ordinary RGB and phenocam sensors) and hyperspectral (e.g., FloX) near-surface remote sensing sensors can be used to identify temporal and spatial patterns in vegetation phenology in the landscape (Parmentier, 2021). Results from the first three years in operation (2019-2021) showed distinct interannual variations solar induced chlorophyll fluorescence (SIF) and spectral vegetation indices including MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI), EVI, and NDVI, consistent with differences in summer temperatures (Tømmervik et al., in prep.). In Ny-Ålesund has CNR installed RoX spectrometers and narrowband optical systems (CReM) close to the Amundsen-Nobile Climate Change Tower for particularly monitoring of the cryosphere (Salzano et al., 2021). This setup provides key information about the duration of snow cover and it supports the assessment of the vegetation phenology. The spatial heterogeneity of such observations is evaluated by using a network of RGB and NirGB time-lapse cameras that cover the Bayelva hydrological basin with a timely continuous and a spatially detailed description (Salzano et al., 2022; Salvatori et al., 2022). The KOPRI station in Ny Ålesund has a terrestrial hyperspectral camera and an UAV-integrated miniaturized hyperspectral, LiDAR and RGB which simultaneously can acquire multi-modal remote sensing data over the extended areas compared to field-based measurements like the ROX sensors. KOPRI will develop a spectral library for the primary vegetation species and types in Svalbard using the terrestrial and UAV hyperspectral sensors and will evaluate the library to create vegetation maps from airborne and spaceborne remote sensing data.

Potential applications that further may be explored using the FLoX, ROX and hyperspectral cameras are upscaling FloX-EC based SIF-GPP relations for estimating regional tundra vegetation productivity and carbon flux, detecting tundra vegetation phenology and identifying underlying controlling factors. Another factor is the timing of

the start and end of the snow season. The listed potential activities will naturally incorporate available data from AsMoVen, CReM, EC towers, data from airborne (UAV, Hypex) and space-borne sensors on Landsat 8-9, VIIRS, Planet, Sentinel 2/3, MODIS, OCO-2, EnMAP and PRISMA for upscaling and downscaling. The project will extend the capabilities of the SIOS's Snow Pilot Project to vegetation monitoring. In order to extend the project to a PanArctic dimension, we will integrate the results from sites like Utqiagvik with similar system as ASMoVen (FLoX; NASA/UMBC) in Alaska (FLoX), Sodankyla (FLoX; FMI) and Pallas (FLoX; FMI) in Finland. Here we have already cooperation with NASA and FMI, and NINA has in the period 2016-2022 provided data and knowledge to the section of Tundra Greenness in Arctic Report Card ([Tundra Greenness \(noaa.gov\)](https://tundra.greenness.noaa.gov)) and State of Climate ([BAMS](https://www.bams.noaa.gov)).

Our main goal is to advance the understanding of the seasonality and diurnal variations in snow and tundra vegetation, using measurements at resolutions beyond the capabilities of the current satellite remote sensing systems in a Panarctic way.

Further objectives: **a).** Investigate spatiotemporal variations in vegetation and snow/ice phenology using multi-scale, multispectral- and hyperspectral observations. **b).** Comparison of the FLoX/ROX data from different locations in the Arctic and Boreal regions widening to Pan-Arctic/Boreal perspective. **c).** Upscaling of in situ data (e.g. NDVI, EVI, SIF) from tundra vegetation to airborne and spaceborne data. **d).** Establish an international collaborative network of near-surface remote sensing systems for monitoring Arctic vegetation and snow dynamics. **e).** Archive the collected/produced data including a spectral library and disseminate them to research communities. **f).** Arrange a workshop with the participating institutes at the end of the project period. We will here try to extend the cooperation to Canada and Greenland.

References

Karlsen, S.R. et al. 2020. Sentinel satellite-based mapping of plant productivity in relation to snow duration and time of green-up (GROWTH). *SESS Report 2019* pp. 42-57. Parmentier, et al. 2021. A distributed time-lapse camera network to track vegetation phenology with high temporal detail and at varying scales. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 3593–3606, <https://doi.org/10.5194/essd-13-3593-2021>, 2021. Tommervik et al. A hyperspectral FLoX sensor for monitoring of vegetation phenology and Sun-Induced Fluorescence (SIF) in High-Arctic tundra. In prep. Salzano, R. et al. 2021. On the Seasonality of the Snow Optical Behaviour at Ny Ålesund (Svalbard Islands, Norway). *Geosciences*, 11, 112. Salzano, et al. 2022. Improving terrestrial photography applications on snow cover in Svalbard with satellite remote sensing imagery (PASSES 2). In SESS report 2021 (pp. 56–65). Salvatori, R. et al. 2022. The Collection of Hyperspectral Measurements on Snow and Ice Covers in Polar Regions (SISpec 2.0). *Remote Sens.*, 14, 2213. <https://doi.org/10.3390/rs14092213>.

○ 기타 홍보 활동



KBS는 대한민국의 공영 방송 서비스입니다. 위키 백과 [▶](#)

2022 기후재앙, 그 시작은 북극이었다...고장난 심장, 북극의 경고 [풀영상] | 시사기획 창 384회 (22.08.23)

KBS시사
구독자 38.7만명

5천 5천 공유 오프라인 저장 저장

극지연구소






이유경의 북극에 다녀왔습니다

+ 구독  

19 에피소드

매년 여름 노르웨이 스팔바르에 위치한 '다산과학기지'에서 북극 생태계를 연구하는 이유경 박사가 직접 들려드립니다! 생생한 현장 연구 소식과 플라스틱 쓰레기, 핵 폐기물 같은 안타까운 이슈까지! 인스타그램 @ebsgoodradio

전체재생

최신순 

19	19화. 더 궁금한 사람들을 위한 극지 여행 안내서	2021.10.05	▶ 12	♡ 0	▶
18	18화. 2021년 여름 스팔바르에서 날아온 생생한 현장일기 (외전)	2021.10.05	▶ 4	♡ 0	▶
17	17화. 사람들의 잘못 : 참치 통조림부터 핵 잠수함까지	2021.10.05	▶ 8	♡ 0	▶
16	16화. 북극은 지금 '쓰레기' 파티 중입니다	2021.10.05	▶ 5	♡ 0	▶
15	14화. 빙하를 타고 떠나는 시간 여행	2021.10.05	▶ 4	♡ 0	▶
14	13화. 생명체, 세포 그리고 DNA	2021.10.05	▶ 0	♡ 0	▶
13	12화. 그린란드에 화석을 캐러 갑니다 with 이미리내 고생물학자	2021.10.05	▶ 1	♡ 0	▶
12	11화. 바다 밑 퇴적물에는 오래 전 기억이 남아 있지요 with 고해양학자 이민경	2021.10.05	▶ 0	♡ 0	▶
11	10화. 북극에도 미세먼지가 있나요? with 박지연 대기과학자	2021.10.05	▶ 1	♡ 0	▶
10	9화. 툰드라 식물들의 고군분투	2021.09.30	▶ 2	♡ 0	▶



지구상에서 가장 뜨거운 북극
극지연구소 이유경 책임연구원



도대체 북극에 어떤 일이?



제 7 장. 참고문헌

- Karlsen SR, Elvebakk A, Høgda KA, Grydeland T. 2014. Spatial and Temporal Variability in the Onset of the Growing Season on Svalbard, Arctic Norway—Measured by MODIS-NDVI Satellite Data. *Remote Sens.* 6: 8088–8106.
- Karlsen SR, Anderson HB, van der Wal R, Hansen BB. 2018. A new NDVI measure that overcomes data sparsity in cloud-covered regions predicts annual variation in ground-based estimates of high-arctic plant productivity. *Environmental Research Letters.* 13: 025011.
- Lee YK, Elvebakk A. 2019. Handbook of Svalbard Plants. 한 눈에 보는 스발바르 식물 GEOBook. pp. 138. (in English, Norwegian, Korean, and Chinese)
- Lee YK. 2020. Arctic Plants of Svalbard. Springer. pp. 107.
- Lisec J, Schauer N, Kopka J, Willmitzer L, Fernie AR. 2006. Gas chromatography mass spectrometry-based metabolite profiling in plants. *Nature protocol.* 1: 387-396.
- Pedersen, Åshild Ønvik et al. 2022. Five decades of terrestrial and freshwater research at Ny-Alesund, Svalbard. *Polar Research* 41. <https://doi.org/10.33265/polar.v41.6310>.
- 이유경, 이은주. 2019. 북극 스발바르 제도에 서식하는 관속식물의 국명. *기후변화학회지.* 10: 55-69.

