

# 북그린란드 Sirius Passet 지역의 동물행동생태 기초 연구

Basic research for behavioral ecology  
in Sirius Passet, North Greenland



2020. 2. 28

극 지 연 구 소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북그린란드 Sirius Passet 지역의 동물행동생태 기초 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020. 2. 28

연구 책임자 : 이원영

참여 연구원 : 조현준, 박미진,  
이유경, 김일찬, 박태윤, 현창욱,  
김민철, 안인혜, 이미리내, 서명호,  
강창구, 황예린, 정현재, 박성섭,  
이종찬, 이윤성



보고서 초록

|   |                                      |  |                       |                        |
|---|--------------------------------------|--|-----------------------|------------------------|
| 세부사업 구분   | Seed형 선행과제                           |  |                       |                        |
| 과 제 명   | 국문                                   | 북그린란드 Sirius Passet 지역의 동물행동생태 기초 연구   |                       |                        |
|   | 영문                                   | Basic research for behavioral ecology in Sirius Passet, North Greenland                    |                       |                        |
| 주 관 연구 기관   | 극지연구소                                |  | 과 제 성 격               |                        |
| 공 동 연구 기관   | -                                    |  | 기초( V ), 응용( ), 개발( ) |                        |
| 연구<br>책임자   | 소속 및 부서명                             | 극지생명과학연구부  | 직 위                   | 선임연구원                  |
|   | 성명 (한문)                              | 이원영(李元榮)   | 전 공                   | 동물행동학                  |
|   | 소내전화                                 | 5523   | 핸드폰                   | 010-2439-8421          |
| 총 연구 기간   | 2018. 05. 01 - 2019. 12. 31 (1년 8개월) |  |                       |                        |
| 연구 개발비  | 정부출연금                                | 300,000 천원   | 참여연구원                 | 16명<br>내부: 5 , 외부: 11명 |
|   | (직접비)                                | 300,000 천원   |                       |                        |
| 요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)   |                                      |  | 보고서<br>면수             | 51                     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Sirius Passet 지역에서 번식 조류 및 포유류 등을 포함한 육상 생태계 조사 수행</li> <li>○ 고위도 북극에 서식하는 동물의 적응 기작 연구</li> <li>○ 북극 환경에 적합한 생태 모니터링을 위한 샘플링 방법 개발</li> <li>○ 북그린란드 기반 생태학적 연구를 위한 기반 구축</li> </ul> |                                      |  |                       |                        |
| 색 인 어<br>(각 5개 이상)  | 한 글                                  | 북그린란드, 동물행동, 적응, 육상 생태계, 생태 모니터링   |                       |                        |
|   | 영 어                                  | North Greenland, animal behavior, adaptation, terrestrial ecosystem, ecological monitoring |                       |                        |

# 요 약 문

## I. 제 목

북그린란드 Sirius Passet 지역의 동물행동생태 기초 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 낮은 접근성으로 인해 상대적으로 드물었던 북그린란드 연구를 위한 육상 생태계의 기초 자료를 구축할 필요
  - 1차 년도 : Sirius Passet 지역의 번식 조류 및 포유류 서식지 파악
  - 2차 년도 : Ella Island 일대의 식생 및 동물상 조사
- 고위도에 서식하는 동물행동 변화의 모니터링 기술 개발 필요
- 북극 동물들의 적응기작 규명을 위한 기초 기술 개발
- 북그린란드 관련 공동 연구를 위한 국제적 네트워크 기반 마련

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북그린란드 현장 조사 및 생태 자료 수집
- 고위도 북극 환경에 적합한 생태 모니터링 기법 적용
- 추위에 적응하기 위한 동물의 열 흡수 기작 연구

## IV. 연구개발결과

- 수집한 시료를 분석하여 그린란드 늑대와 북극토끼의 전장 미토콘드리아 유전체 염기서열 확보

- 분변을 통한 고위도 북극 육상 동물의 먹이원 조사 및 분변 미생물 군집 분석
- 열화상 카메라를 부착한 무인기 기반의 모니터링의 효용성 확인
- 박물관 보관 시료를 이용하여 나비의 적외선 영역 파장 반사도 측정

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 고위도 북극에서의 새로운 생물자원을 발굴하기 위한 동물, 식물 자료 목록 제공
- 북그린란드 지역 생물의 생태학적 연구를 통해 추위에 대한 적응기작을 밝히고 유용한 물질을 추출하여 응용할 수 있는 기초 발판을 제공
- 그간 많이 알려지지 않았던 고위도 북극권 육상 동물에 대한 생태적 연구를 통하여 북극 생태계에 대한 국민적 관심을 고취
- 고위도 북극 지역에서의 생명의 탄생과 순환을 조사함으로써 극지 생태계의 다양성과 풍요로움을 홍보

극지연구소

# S U M M A R Y

In North Greenland, Sirius Passet and its surrounding areas are ecologically important for their rich vegetation. During the summers of 2018, we conducted basic research for behavioral ecology studies with birds and mammals in this area. By collecting fecal samples, we estimated their diet and bacterial composition. We also developed a new method to monitor birds near sea-ice and stream, which are hard to detect due to the low accessibility and high camouflage, using an UAV (unmanned aerial vehicle) system. We performed comparative studies in Svalbard and Ella Island.



# C O N T E N T S

|  |    |
|--|----|
| Chapter 1 Introduction   | 1  |
| Chapter 2 Previous studies                                     | 4  |
| Chapter 3 Results  | 7  |
| Chapter 4 Achievements against plan                            | 33 |
| Chapter 5 Utilization plan                                     | 34 |
| Chapter 6 Scientific information acquired from other countries | 35 |
| Chapter 7 References   | 40 |



# 목 차

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 제 1 장 서론                    | 1  |
| 제 2 장 국내외 기술개발 현황           | 4  |
| 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과        | 7  |
| 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도    | 33 |
| 제 5 장 연구개발결과의 활용계획          | 34 |
| 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 | 35 |
| 제 7 장 참고문헌                  | 40 |



## 제 1장 서론

최근 지구온난화에 따른 고위도 북극 생태에 대한 학문적 관심이 증대되고 있으며 특히 기후변화와 관련한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어, 환경변화 지표종인 장거리 이동철새들의 번식지 생태계의 빠른 변화와 기후변화의 연관성에 관한 연구가 수행되고 있다. 그러나 그린란드 북부 지역은 다른 곳과 비교하여 접근성의 문제로 인해 상대적으로 연구가 많이 수행되지 못했다. 뿐만 아니라, 고위도 지역 특유의 저온 백야의 조건에서 번식하는 동물들의 적응 기작에 대한 연구는 거의 수행되지 않아서 이에 관한 연구 개발이 필요한 실정이다.

현장연구지인 Sirius Passet은 북위 82도 이상으로 북그린란드에서 생물상이 가장 풍부한 곳 중 하나이다(Boertmann and Nielsen 2010). 하지만 낮은 접근성으로 인해 생태학적 연구가 거의 이뤄지지 않은 지역이다. 따라서 고위도 북극 환경을 연구하기에 적합한 미답지라고 판단되며, 북그린란드 지역의 생태를 조사하기 위한 기초 연구를 하기에 알맞은 것으로 여겨진다.

본 과제에서는 북그린란드 Sirius Passet 인근에 서식하는 동물의 분포와 생태를 관찰하고, 고위도 북극의 극한 환경에 살고 있는 동물의 행동생태 기초 연구를 위한 조사를 수행하였다.

KOPRI  
극지연구소

## 제 2장 국내외 기술개발 현황

과거 연구 기록을 살펴보면 지난 1984년 덴마크 연구진들에 의해 조류 관찰 기록이 남아 있으나, 번식 현황 및 생태학적인 연구 조사는 이뤄지지 않은 것으로 보인다. 최근 고위도 북극의 기후변화와 관련하여 동물의 행동생태적 반응에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 북그린란드 지역의 제한된 접근성은 연구자들이 조사를 진행하기에 어려움이 있었다. 이로 인해 비행기에서 촬영한 사진을 통해 조류의 개체수를 확인하는 등 간접적이고 간헐적인 관찰만이 이뤄지고 있었다(Boertmann et al. 2015).

극지연구소 주도로 이뤄진 2016년, 2017년 북그린란드 Sirius Passet 현장조사에서 붉은배지느러미발도요, 긴발톱멧새 등의 번식을 최초로 확인하였다. 특히 2016년 북그린란드 Sirius Passet 지역의 눈이 녹기 시작하는 시점을 위성영상으로 관찰하고 식생지수를 파악하는 등 생태학적으로 의미 있는 발견이 기록된 바 있다.



## 제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

이 장에서는 연구개발내용을 (i) Sirius Passet과 Ella Island 현장조사 개발, (ii) 북그린란드 동물 유래 시료 분석, (iii) 북극 동물 모니터링 기법 개발, (iv) 극지 동물의 추위 적응 기작 연구, (v) 북극 조류의 이동경로 분석의 다섯 가지 분야로 나누어 기술한다.

### 3.1 Sirius Passet과 Ella Island 육상 생태계 조사

#### 3.1.1 현장조사 개요

##### ○ 2018. 7. 11. ~ 2018. 7. 21. Sirius Passet 지역의 현장조사

노르웨이 스발바르 제도의 롱이어비엔에서 임차한 트윈오토로 북그린란드의 노르드 기지(Station Nord)를 경유한 뒤 Sirius Passet으로 이동하였다(그림 3-1). 약 2주 간 캠프를 설치하고 하계 현장연구를 수행하였다.

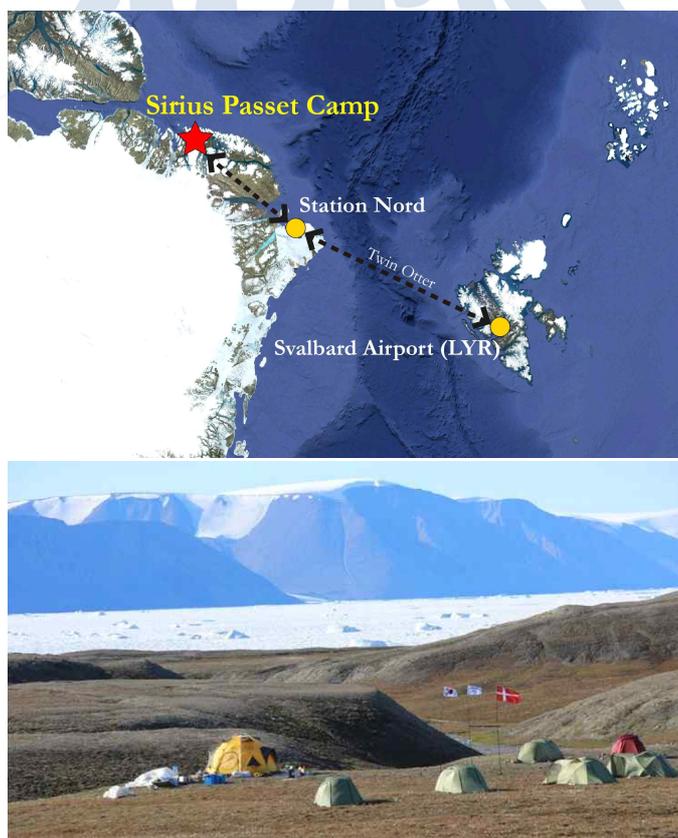


그림 3-1. (위) 북그린란드 Sirius Passet 지역의 위성사진 및 이동경로, (아래) Sirius Passet에 설치한 캠프 정경 사진

○ 2019. 8. 5. ~ 2019. 8. 16. Ella Island 일대의 현장조사

아이슬란드의 케플라비크, 레이카비크를 경유하여 아쿠레이리에서 임차한 트윈 오터를 타고 Ella Island로 이동하였다(그림 3-2). 약 2주 간 캠프를 설치하고 하계 현장연구를 수행하였다.



그림 3-2. (위) 북그린란드 Ella Island 일대의 위성사진 및 이동 경로, (아래) Ella Island에 설치한 캠프 정경 사진

### 3.1.2 현장조사 내용

○ Sirius Passet 지역의 동물상 관찰 및 시료 채취

캠프 근처에서 조사자는 쌍안경과 GPS 기기를 휴대하고 다니며 조사 지역 내 관찰된 조류 및 포유류 종과 개체 수, 지점을 기록하였다. 5종의 번식 조류 및 둥지를 발견하였으며 꼬까도요(*Arenaria interpres*)의 번식밀도가 가장 높았다(표 3-1, 그림 3-3). 비번식 조류로는 흰기러기(*Anser caerulescens*)와 아비

(*Gavia stellata*), 바다꿩(*Clangula hyemalis*)의 3종이 새로이 발견되었다(표 3-1). 당해 관찰된 흰기러기는 흰기러기 아종 가운데 그린란드 북서부와 캐나다 배핀만(Baffin Bay) 도서 지역에 분포하는 ‘Greater Snow Goose (*Anser caerulescens atlanticus*)’ 로 판단된다(Kennard, 1927). 아비와 바다꿩은 북반구에서 폭넓은 분포를 보이는데 바다꿩의 경우 발틱해(Baltic Sea)에서 어업에 의한 사망률과 비변식지에서 유류 오염에 의한 사망률이 높아 IUCN Red List에 의해 취약종(Vulnerable)으로 분류되어 있다(IUCN Red List, 2018).

포유류로는 사향소(*Ovibos moschatus*), 북극여우(*Vulpes lagopus*), 북극토끼(*Lepus arcticus*)를 관찰하였으며 회색늑대의 아종인 그린란드 늑대(*Canis lupus orion*)의 분변과 털을 발견하여 시료를 수집할 수 있었다(표 3-1).

표 3-1. Sirius Passet에서 관찰된 동물 목록

| 영문명                  | 학명                              | 국문명      | 관찰 단위 수          |
|----------------------|---------------------------------|----------|------------------|
| <b>번식 조류</b>         |                                 |          | <b>(등지)</b>      |
| Ruddy turnstone      | <i>Arenaria interpres</i>       | 꼬까도요     | 17               |
| Sanderling           | <i>Calidris alba</i>            | 세가락도요    | 2                |
| Red knot             | <i>Calidris canutus</i>         | 붉은가슴도요   | 3                |
| Common-ringed plover | <i>Charadrius hiaticula</i>     | 흰죽지꼬마물떼새 | 4                |
| Snow bunting         | <i>Plectrophenax nivalis</i>    | 흰뱃새      | 4                |
| <b>비변식 조류</b>        |                                 |          |                  |
| Long-tailed skua     | <i>Stercorarius longicaudus</i> | 긴꼬리도둑갈매기 |                  |
| Pink-footed goose    | <i>Anser brachyrhynchus</i>     | 분홍발기러기   |                  |
| Snow goose           | <i>Anser caerulescens</i>       | 흰기러기     |                  |
| Red-throated loon    | <i>Gavia stellata</i>           | 아비       |                  |
| Long-tailed duck     | <i>Clangula hyemalis</i>        | 바다꿩      |                  |
| <b>포유류</b>           |                                 |          |                  |
| Muskox               | <i>Ovibos moschatus</i>         | 사향소      |                  |
| Arctic hare          | <i>Lepus arcticus</i>           | 북극토끼     |                  |
| Arctic fox           | <i>Vulpes lagopus</i>           | 북극여우     |                  |
| Greenland wolf       | <i>Canis lupus orion</i>        | 그린란드 늑대  | (feces and hair) |



표 3-2. Ella Island에서 관찰된 동물 목록

| 영문명                  | 학명                              | 국문명      | 관찰 일자 별 개체 수 (비고) |        |             |                 |             |        |                  |        |        |
|----------------------|---------------------------------|----------|-------------------|--------|-------------|-----------------|-------------|--------|------------------|--------|--------|
|                      |                                 |          | 08.05.            | 08.06. | 08.07.      | 08.08.          | 08.09.      | 08.10. | 08.11.           | 08.12. | 08.13. |
| <b>조류</b>            |                                 |          |                   |        |             |                 |             |        |                  |        |        |
| Red-throated loon    | <i>Gavia stellata</i>           | 아비       | 1                 | 2      | 2<br>(nest) | 4               |             | 6      | 2                |        | 2      |
| Purple sandpiper     | <i>Calidris maritima</i>        | 주홍도요     | 6                 | 5      | 1           |                 |             | 4      |                  | 3      | 8      |
| Long-tailed skua     | <i>Stercorarius longicaudus</i> | 긴꼬리도둑갈매기 | 3                 | 2      | 3           | 1               | 2           |        | 1                |        |        |
| Common-ringed plover | <i>Charadrius hiaticula</i>     | 흰죽지꼬마물떼새 |                   | 2      | 1           | 2               | 3           | 4      | 1                | 2      | 1      |
| Glaucous gull        | <i>Larus hyperboreus</i>        | 흰갈매기     |                   | 1      |             |                 |             |        | 1                |        |        |
| Arctic tern          | <i>Sterna paradisaea</i>        | 북극제비갈매기  |                   | 2      |             |                 | 7           |        | 3                |        |        |
| Northern wheatear    | <i>Oenanthe oenanthe</i>        | 북방사막딱새   |                   | 2      |             |                 |             |        | 1                |        |        |
| Barnacle goose       | <i>Branta leucopsis</i>         | 흰뺨기러기    |                   |        | 3           |                 | 4           | 12     | 12               | 12     |        |
| Pink-footed goose    | <i>Anser brachyrhynchus</i>     | 분홍발기러기   |                   |        | 4           |                 |             |        |                  |        | 5      |
| Common raven         | <i>Corvus corax</i>             | 큰까마귀     |                   |        |             | 1               |             | 2      |                  |        |        |
| Arctic redpoll       | <i>Acanthis hornemanni</i>      | 쇠홍방울새    |                   |        |             | 2<br>(juvenile) |             |        |                  | 2      | 2      |
| Common redpoll       | <i>Acanthis flammea</i>         | 홍방울새     |                   |        |             |                 |             | 1      |                  |        |        |
| Snow bunting         | <i>Plectrophenax nivalis</i>    | 흰멧새      |                   |        |             |                 | 1<br>(male) | 2      | 2<br>(juvenile)  |        |        |
| Common eider         | <i>Somateria mollissima</i>     | 참숨깃오리    |                   |        |             |                 |             |        | 5                |        | 8      |
| Iceland gull         | <i>Larus glaucoides</i>         | 작은재갈매기   |                   |        |             | 1               |             |        |                  |        |        |
| <b>포유류</b>           |                                 |          |                   |        |             |                 |             |        |                  |        |        |
| Muskox               | <i>Ovibos moschatus</i>         | 사향소      | 16                | 12     | 14          | 7               |             | 5      |                  |        | 2      |
| Polar bear           | <i>Ursus maritimus</i>          | 북극곰      | 1<br>(footprint)  |        |             |                 |             |        | 1<br>(footprint) |        |        |

식물은 여러 초식 동물의 먹이원으로 이용되기 때문에 동물행동생태에서 생태계 내에 어떤 식물 종이 있는지 파악하는 것이 매우 중요하며 Ella Island에서도 식물상을 관찰하였다(표 3-3, 그림 3-5). 동정한 결과 북극담자리꽃나무, 고산나도들쭉, 북극버들, 북극종꽃나무, 북극이끼장구채, 노랑범의귀 및 기타 냉이과 식물 등이 관찰되었으며 이 식물종들이 실제로 초식 동물의 먹이원으로 사용되는지 분변을 통해 확인하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

표 3-3. Ella Island에서 관찰된 식물 목록

| 영문명                       | 학명                           | 국문명      |
|---------------------------|------------------------------|----------|
| Mountain Avens            | <i>Dryas octopetala</i>      | 북극담자리꽃나무 |
| Alpine Bearberry          | <i>Arctostaphylos alpina</i> | 고산나도들쭉   |
| Arctic Willow             | <i>Salix arctica</i>         | 북극버들     |
| White Arctic Bell-heather | <i>Cassiope tetragona</i>    | 북극종꽃나무   |
| Moss Campion              | <i>Silene acaulis</i>        | 북극이끼장구채  |
| Yellow Saxifrage          | <i>Saxifraga aizoides</i>    | 노랑범의귀    |
| Cruciferae sp.            |                              | 냉이과 식물   |



그림 3-5. Ella Island에서 관찰된 식물 사진. 차례로 (A) 북극담자리꽃나무, (B) 고산나도들쭉, (C) 북극버들, (D) 북극종꽃나무, (E) 북극이끼장구채, (F) 노랑범의귀, (G) 냉이과 식물

## 3.2 북그린란드 동물 유래 시료 분석

### 3.2.1 전장 미토콘드리아 유전체 염기서열 분석

#### ○ 그린란드 늑대

그린란드 지역에 있는 늑대는 회색늑대(Grey wolf, *Canis lupus*)의 아종으로 알려져 있고 표현형적으로 크게 캐나다 북부 지역에 서식하는 북극늑대(Arctic wolf, *Canis lupus arctos*)와 그린란드 지역에 서식하는 그린란드 늑대(Greenland wolf, *Canis lupus orion*)으로 나눌 수 있다(Pocock 1935). 그린란드 늑대의 분류에 대한 논쟁은 예전부터 계속되어왔다. 1985년 그린란드 늑대의 역사적 고찰과 현황에 대해 연구한 논문에서도 그린란드에 있는 늑대를 별도의 아종으로 봐야 하는지에 대한 논쟁에 대해 언급하고 있다(Dawes et al. 1986). 2005년 Wozencraft는 본인의 책에서 늑대의 아종 중 그린란드 늑대를 *C. l. orion*으로 분류하여 아종으로 구별하고 있다(Wozencraft 2005).

최근 전 세계에 있는 모든 늑대의 계통을 미토콘드리아 DNA의 control region으로 비교한 연구를 통해 그린란드 늑대가 북아메리카에 있는 늑대에서 확인되었던 하나의 유전형과 일치한다는 것이 밝혀졌다(Ersmark et al. 2016). 이 유전자형이 모계 혈통을 통해 북아메리카 늑대에서 그린란드 늑대로 전달 되었을 가능성에 대해서도 언급하고 있다(Ersmark et al. 2016).

이러한 분류학적 모호성을 줄이기 위해 Sirius Passet 지역에서 채집한 그린란드 늑대 털의 모근으로부터 Qiagen 사의 DNeasy Blood and Tissue kit로 DNA 추출하여 분석하였다. 낮은 DNA 농도를 보완하기 위해서 Qiagen 사의 Whole Genome Amplification kit를 이용하였으며 Illumina 사의 HiSeq platform으로 16,650bp의 전장 미토콘드리아 유전체 염기서열을 확보할 수 있었다. 실험 과정에서 14개의 시료 중 2개에서만 DNA가 성공적으로 증폭되었는데 털 시료를 직접 채취한 것이 아니라 털같이 시기에 자연적으로 빠진 것을 수집하였기 때문이다. 이 경우 털 시료에 모근이 존재하지 않거나 존재하더라도 장시간 야외에 방치되면 DNA degradation이 일어날 가능성이 높아지게 된다.

미토콘드리아 DNA 전체를 분석한 결과, 그린란드 늑대는 유라시아 늑대와 자매관계를 나타냈는데 이는 그린란드 늑대가 북아메리카에 있는 늑대에서 유래된 것이 아닐 가능성도 제시된다(그림 3-6, Cho et al. 2019).

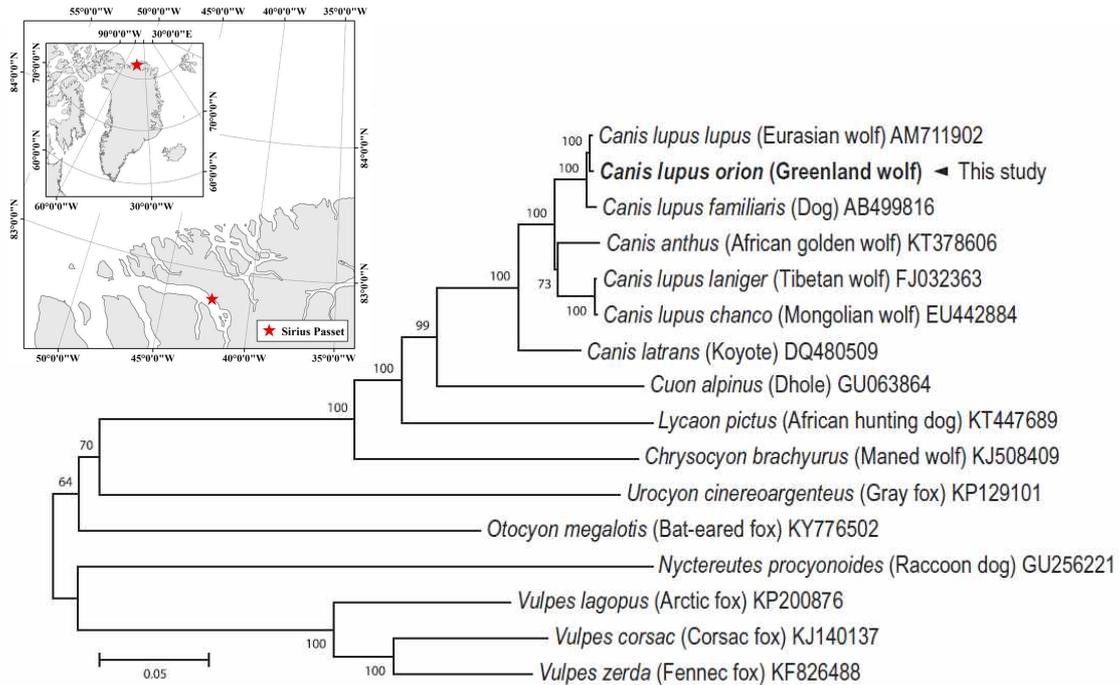


그림 3-6. 그린란드 늑대가 포함된 근연종들의 계통도(Cho et al. 2019)

### ○ 북극토끼

북극토끼(Arctic hare, *Lepus arcticus*)에는 9아종이 알려져 있으며(Hall 1981) 서식하고 있는 지역에 따라 아종을 구분하고 있어 북그린란드에 서식하는 북극토끼는 *Lepus arcticus groenlandicus*에 해당한다(Best and Henry 1994).

북극토끼의 미토콘드리아 DNA를 Sirius Passet 지역에서 채집한 사체 앞다리의 조직으로부터 추출하여 분석하였다. 앞서 그린란드 늑대의 털 시료 분석과 동일한 과정을 통해 전체 DNA를 추출하고 증폭한 뒤, 16,972bp 길이의 전장 미토콘드리아 유전체 염기서열을 확보할 수 있었다.

미토콘드리아 DNA 전체를 분석한 결과, 북극토끼는 알래스카 토끼(*L. othus*), 고산 토끼(*L. timidus*)와 근연 관계에 있는 종임을 확인할 수 있었다(그림 3-7, Kim et al. 2019). 추후 토끼목 계통 연구에 유용한 자료가 될 것으로 기대된다.

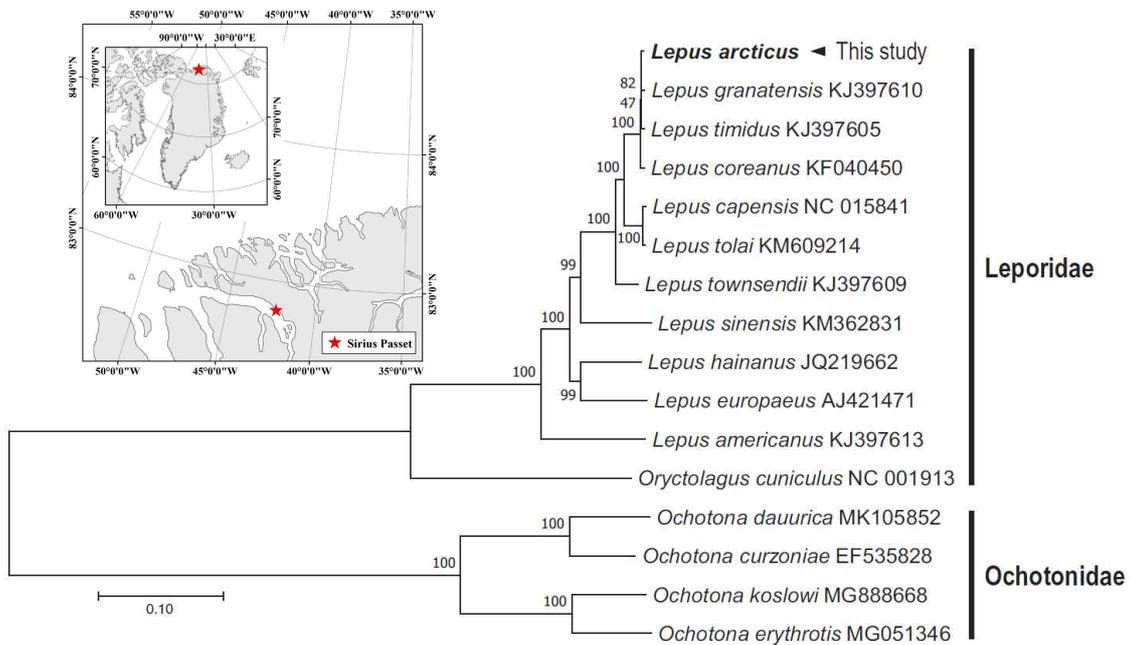


그림 3-7. 북극토끼가 포함된 근연종들의 계통도(Kim et al. 2019)

### 3.2.2 분변을 통한 먹이원 분석

#### ○ 그린란드 늑대

육식인 그린란드 늑대의 먹이원(diet)을 분석하기 위해 전통적인 방법으로 분변을 해체하여 피식 동물의 뺏조각과 털을 발견하였으며(표 3-4) 광학현미경을 이용하여 총 13개의 그린란드 늑대 분변시료를 관찰한 후 시료별로 사진을 촬영하였다(그림 3-8). 시료가 채취된 지역에 서식하는 그린란드 늑대는 주로 레밍과 조류와 같은 작은 먹이를 주로 이용하는 것을 확인할 수 있었다.

표 3-4. 그린란드 늑대의 분변을 해체하여 발견한 피식 동물의 잔존물

|      | gw1 | gw2 | gw3 | gw4 | gw5 | gw6 | d1 | nd1 | nd2 | nd3 | w1 | w2 | w3 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|
| 깃털   |     | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |     |    |     |     | ✓   |    | ✓  |    |
| 레밍털  |     |     |     |     |     | ✓   | ✓  |     |     | ✓   | ✓  | ✓  | ✓  |
| 사향소털 |     |     |     |     |     |     |    | ✓   |     |     |    |    |    |
| 토끼털  | ✓   |     |     |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |
| 새똥   |     |     |     | ✓   |     |     |    |     | ✓   |     |    |    |    |
| 레밍똥  | ✓   |     |     |     |     | ✓   | ✓  |     |     | ✓   | ✓  | ✓  | ✓  |
| 사향소똥 |     |     |     |     |     |     |    | ✓   |     |     |    |    |    |



그림 3-8. 그린란드 늑대의 분변에서 발견된 (좌측 위) 사향소의 털, (우측 위) 사향소의 뺨조각, (좌측 아래) 조류의 깃털, (우측 아래) 레밍의 아래턱뼈

○ **순록과 흰뺨기러기, 바위늑조**

먹이원 분석 방법을 비교하기 위하여 다산기지 근처에서 서식하는 초식동물인 순록과 흰뺨기러기, 바위늑조의 배설물 시료를 채취하였다(표 3-5). 분변을 통한 먹이원 분석을 위해 QIAamp사의 Fast DNA Stool Mini Kit를 이용하여 공급자의 매뉴얼에 따라 genomic DNA를 추출하였다.

추출된 DNA를 rbcL(large subunit of RuBisCO) 영역을 증폭하는 rbcL\_S1\_For, rbcL\_S1\_Rev 프라이머를 이용하여 PCR을 진행하였다(표 3-6). PCR 증폭 산물로부터 클로닝(cloning) 후, 염기서열을 확보하고 NCBI의 Genbank 내에 등록된 염기서열 정보와의 BLASTN 분석을 실시하여 동정하였다.

표 3-5. 다산기지 인근에서 채취된 동물 분변 시료 목록

| 시료    |    | 시료 채취 일자 | 시료 채취 장소               |
|-------|----|----------|------------------------|
| 순록    | 1  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 순록    | 2  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 순록    | 3  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 순록    | 4  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 순록    | 5  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 순록    | 6  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 순록    | 7  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 순록    | 8  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 순록    | 9  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 1  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 흰뺨기러기 | 2  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 흰뺨기러기 | 3  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 흰뺨기러기 | 4  | 18.07.27 | 다산기지 인근                |
| 흰뺨기러기 | 5  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 6  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 7  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 8  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 9  | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 10 | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 11 | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 흰뺨기러기 | 12 | 18.07.28 | 섬(Blomstrandhalv ø ya) |
| 바위늪조  | 1  | 18.08.01 | 다산기지 인근                |
| 바위늪조  | 2  | 18.08.01 | 다산기지 인근                |
| 바위늪조  | 3  | 18.08.01 | 다산기지 인근                |
| 바위늪조  | 4  | 18.08.01 | 다산기지 인근                |

표 3-6. 본 연구에서 사용된 프라이머 정보

|      | 프라이머 이름     | 염기서열 (5' -3' )             | 참고문헌                     |
|------|-------------|----------------------------|--------------------------|
| rbcL | rbcL_S1_For | ATGTCACCACAAACAGAGACTAAAGC | Kress and Erickson. 2007 |
|      | rbcL_S1_Rev | GTAAAATCAAGTCCACCRGC       |                          |

순록 배설물 9개 중 7개, 흰뺨기러기 배설물 12개 중 11개, 바위늪조 배설물 4개 중 2개에서 성공적으로 DNA가 추출 및 증폭되었다. National Center for Biotechnology Information(NCBI) 데이터베이스에서 nucleotide-nucleotide Basic Local Alignment Search Tool(BLASTn)을 이용하여 동정한 결과, 다양한 식물로

확인되었다(표 3-7). 버드나무속(*Salix* spp.)과 털깃털이끼속(*Hypnum* spp.)의 다양한 식물 종이 가장 높은 점수로 검색되었다(표 3-7). 이 지역의 식물상과 비교하여 종을 판단하기 위해서는 해상력이 더 높은 영역을 증폭하는 프라이머를 사용하는 것이 중요하다. 초식동물이지만 그 지역의 버섯이나 지의류 등도 섭식하는 것으로 알려져 있어 rbcL 영역을 증폭하는 프라이머뿐만 아니라 균류와 식물의 ITS2를 증폭하는 프라이머를 함께 사용하는 후속 연구가 필요할 것이다.

분석된 시료의 수가 충분하지 않아 먹이 선호도를 파악하긴 어렵지만, 순록과 바위뇌조는 버드나무속의 식물을 먹이원으로 공유하며, 순록과 흰뺨기러기는 버드나무속과 담자리꽃나무속의 식물을 공유하는 것으로 확인되었다.

표 3-7. 초식동물 분변 DNA를 이용한 먹이원 분석 결과

| 대상종   | 번호 | BLASTn 결과                      |             |            |               |
|-------|----|--------------------------------|-------------|------------|---------------|
|       |    | Description                    | Korean name | Similarity | Assession No. |
| 순록    | 1  | <i>Polytrichastrum alpinum</i> | 산솔이끼        | 100%       | GU569461.1    |
| 순록    | 2  | <i>Salix</i> spp.              | 버드나무속       | 100%       | NC_043878.1   |
| 순록    | 3  | <i>Salix</i> spp.              | 버드나무속       | 100%       | MF695005.1    |
| 순록    | 4  |                                |             |            |               |
| 순록    | 5  | <i>Dryas</i> spp.              | 담자리꽃나무속     | 100%       | KY420029.1    |
| 순록    | 6  | <i>Hypnum</i> spp.             | 털깃털이끼속      | 99%        | AB332263.1    |
| 순록    | 7  | <i>Salix</i> spp.              | 버드나무속       | 100%       | NC_044419.1   |
| 순록    | 8  |                                |             |            |               |
| 순록    | 9  | <i>Poa</i> spp.                | 포아풀속        | 100%       | MF158725.1    |
| 흰뺨기러기 | 1  | <i>Salix</i> spp.              | 버드나무속       | 100%       | NC_043878.1   |
| 흰뺨기러기 | 2  | <i>Salix</i> spp.              | 버드나무속       | 100%       | MF695005.1    |
| 흰뺨기러기 | 3  | <i>Cerastium</i> spp.          | 점나도나물속      | 100%       | MH627219.1    |
| 흰뺨기러기 | 4  |                                |             |            |               |
| 흰뺨기러기 | 5  | <i>Campylopus areodictyon</i>  | 붓이끼속        | 98%        | AF231295.1    |
| 흰뺨기러기 | 6  | <i>Sanionia uncinata</i>       | 낫깃털이끼속      | 100%       | KM111545.1    |
| 흰뺨기러기 | 7  | <i>Equisetum variegatum</i>    | 속새속         | 100%       | KC482742.1    |
| 흰뺨기러기 | 8  | <i>Dryas</i> spp.              | 담자리꽃나무속     | 100%       | KY420029.1    |
| 흰뺨기러기 | 9  | <i>Salix</i> spp.              | 버드나무속       | 99%        | MF695005.1    |
| 흰뺨기러기 | 10 | <i>Carex</i> spp.              | 사초속         | 99%        | MG227629.1    |
| 흰뺨기러기 | 11 | <i>Dryas</i> spp.              | 담자리꽃나무속     | 99%        | KY420029.1    |
| 흰뺨기러기 | 12 |                                |             |            |               |
| 바위뇌조  | 1  |                                |             |            |               |
| 바위뇌조  | 2  | <i>Salix</i> spp.              | 버드나무속       | 100%       | MF695005.1    |
| 바위뇌조  | 3  | <i>Saxifraga rivularis</i>     | 물범의귀        | 99%        | KX166343.1    |
| 바위뇌조  | 4  |                                |             |            |               |

### 3.2.3 장내 미생물 군집 분석

#### ○ 그린란드 늑대와 흰멧새, 분홍발기러기, 세가락도요

그린란드 동물의 분변시료 내의 박테리아의 16s rRNA gene 분석을 통해 세가락도요, 분홍발기러기, 흰멧새 등의 조류와 그린란드 늑대와 같은 포유류의 장내 미생물 군집(gut microbiome)에 관한 연구를 수행함으로써 먹이의 종류에 따라 나타나는 박테리아 군집의 차이에 대해 조사하였다.

네 종의 서로 다른 그린란드 동물의 분변 시료들에서 추출한 DNA를 통해 장내 박테리아 군집이 어떠한 구조를 가지고 있는지를 분류군 간 상대빈도의 비교를 통해 문(phylum) 수준에서 나타낼 수 있었다(그림 3-9). 흰멧새와 세가락도요에서는 Firmucutes가 우점하는 것으로 나타났지만 분홍발기러기와 늑대에서는 Proteobacteria가 우점하였다. 분홍발기러기를 제외한 다른 두 종의 조류에서는 Bacteroidetes가 두 번째로 높은 빈도를 보였으나 그 비율에 있어서는 종에 따라 차이가 존재하였다. 늑대에서는 조류에서 나타나지 않는 Tenericutes이 나타났는데 이는 포유류에만 있는 태반과 연관 있는 박테리아로 알려져 있다.

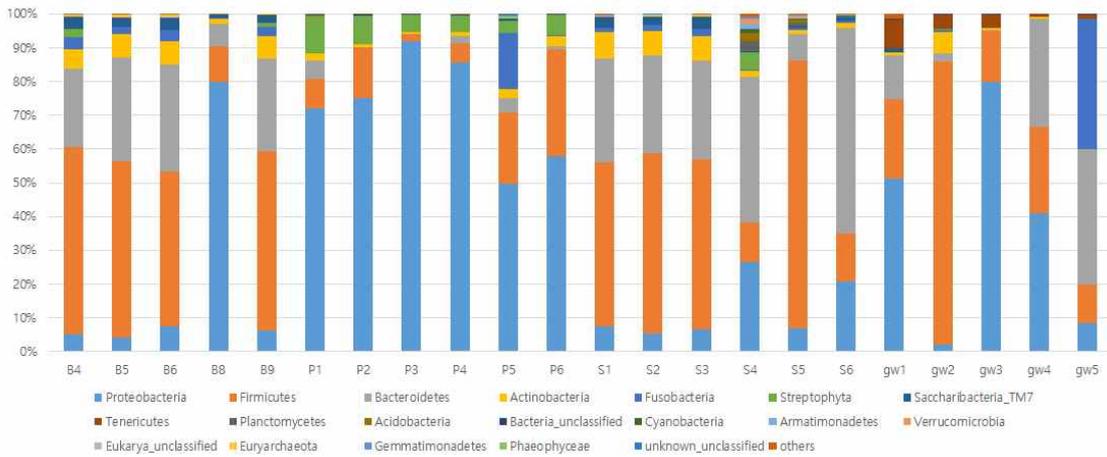


그림 3-9. 서로 다른 네 종의 그린란드 동물 장내 박테리아 군집의 문 수준의 상대빈도 (B4-B9: 흰멧새, P1-P6: 분홍발기러기, S1-S6: 세가락도요, gw1-gw5: 그린란드 늑대)

종에 따른 박테리아 군집의 차이는 Bray-Curtis index를 이용해 박테리아 군집 간의 유사도를 계산한 후 Non-metric multidimensional scaling(NMDS)를 이용해 시각화하였다(그림 3-10). 유사성 해석 통계인 ANOSIM(Analysis of similarity)

test 결과 흰뱀새와 세가락도요를 제외한 서로 다른 동물 장내 미생물 군집 간에 상당한 차이( $p < 0.05$ )가 나타났다.

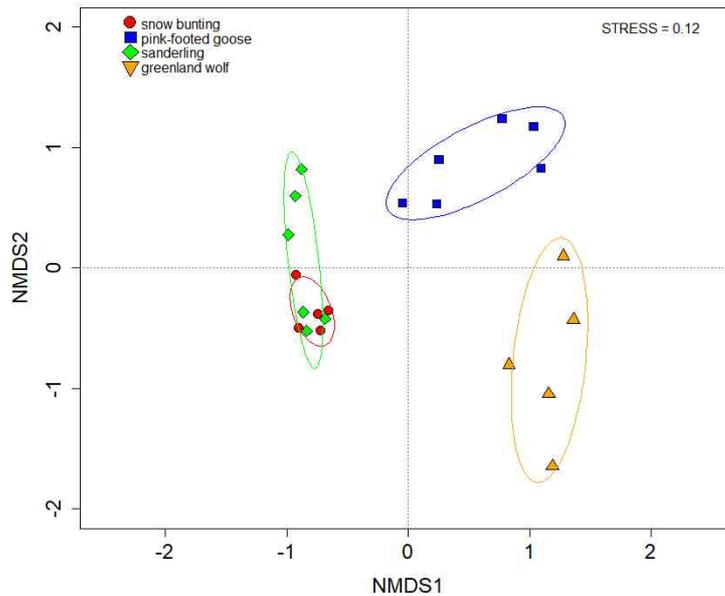


그림 3-10. 네 종의 그린란드 동물 장내 박테리아 군집 간의 유사도를 계산하여 나타낸 NMDS plot

위 결과를 바탕으로 각 종에 따른 고유한 박테리아 군집이 존재하는 것을 알 수 있었다. 흰뱀새와 세가락도요의 분변에서 박테리아 군집의 차이가 나타나지 않는 것은 이 두 종이 비슷한 먹이를 공유하기 때문인 것으로 추측된다. 따라서 북극 동물의 분변에서 서로 다른 박테리아 군집이 나타나는 것은 먹이에 의한 차이라고 볼 수 있다.

#### ○ 스발바르 순록과 흰뺨기러기

북극 육상동물의 장내 미생물 군집을 비교하기 위하여 다산기지 인근에서 서식하는 대표적인 스발바르 육상 초식동물인 스발바르 순록과 흰뺨기러기 분변으로 박테리아의 16s rRNA gene을 분석하였다. 이 두종을 대상으로 연구를 수행함으로써 종과 먹이원에 따른 장내미생물 군집(gut microbiota) 구성에 관한 연구를 수행하였다.

스발바르 순록과 흰뺨기러기 분변 시료에서 추출한 DNA를 이용한 미생물 군집 분석을 통해 장내 미생물의 상대빈도를 문(phylum) 수준에서 확인할 수 있었다(그림 3-11). 스발바르 순록은 Actinobacteria (40.34%), Bacteroidetes

(35.60%), Proteobacteria (12.09%) 순서로 박테리아가 우점하는 것으로 나타났지만, 흰뺨기러기에서는 Bacteroidetes (27.85%), Proteobacteria (27.30%), Firmicutes (26.00%) 순으로 나타났다. 같은 초식을 하고 일부 먹이원이 겹치는 것으로 알려져 있지만 종에 따른 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다.

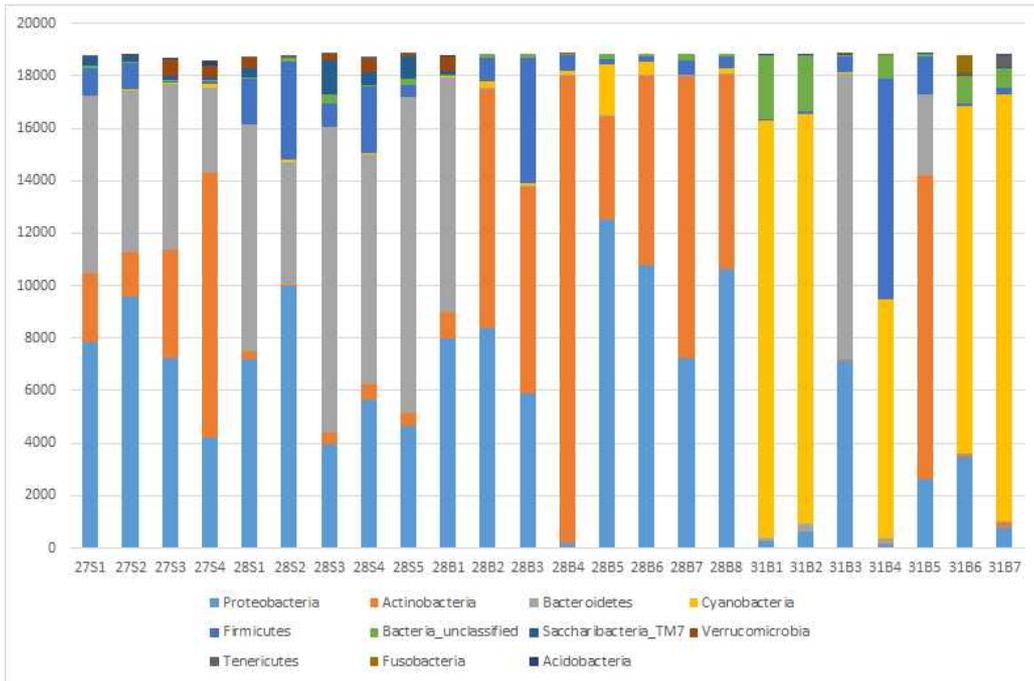


그림 3-11. 스발바르 순록과 흰뺨기러기 장내 박테리아 군집의 문 수준의 상대빈도 (27S1-28S5: 스발바르 순록, 28B1-31B7: 흰뺨기러기)

종에 따른 박테리아 군집의 차이는 Bray-Curtis index를 이용해 박테리아 군집 간의 유사도를 계산한 후 Non-metric multidimensional scaling (NMDS)를 이용해 시각화하였다 (그림 3-12). 유사성 해석 통계인 ANOSIM(Analysis of similarity) test 결과 스발바르 순록과 흰뺨기러기 간의 장내 미생물 군집 간에 상당한 차이( $p < 0.05$ )가 나타나는 것을 알 수 있었다. 스발바르 순록과 흰뺨기러기의 분변에서 박테리아 군집의 차이가 나타나는 것은 이 두 종이 초식을 한다는 공통점에도 불구하고 선호하는 먹이의 차이 및 종에 따른 요인에 따른 장내 미생물 군집의 차이에 의한 것으로 추측된다. 따라서 북극 동물의 분변의 장내 미생물 군집에는 먹이 및 계통학적 요인들이 영향을 미친다고 볼 수 있다.

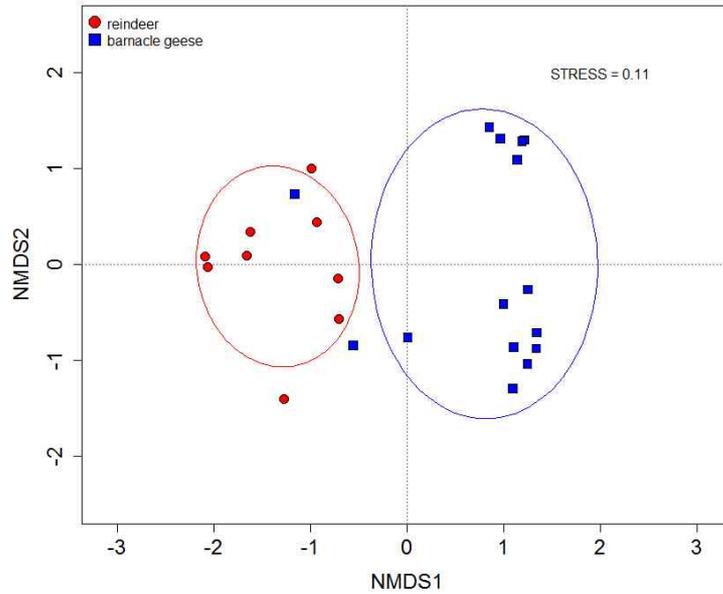


그림 3-12. 스발바르 순록과 흰뺨기러기의 장내 박테리아 군집 간의 유사도를 계산하여 나타낸 NMDS plot

#### ○ 사향소

북그린란드의 사향소는 대형 육상 초식동물로서 기후 변화와 사냥 등 인간 활동에 의해 지역적으로 개체수가 감소하여 다양한 연구가 필요한 상황이다. Ella Island에서 사향소를 일 최대 16마리까지 발견하여 번식하는 사향소의 분변시료를 채취할 수 있었다. 분변에서 추출된 DNA에서 박테리아 16S rRNA gene 분석을 통해 어미와 새끼의 장내미생물 군집에 관한 연구를 수행하였다. 특정 장내 미생물의 수직적 이동 (어미에서부터 새끼로의 전달) 여부 확인 및 먹이원 차이로 인한 박테리아 군집의 차이에 대해 알아보았다.

박테리아 군집을 문 수준(phylum)수준에서 분석한 결과, Firmicutes가 어미와 새끼 모두 가장 우점하는 박테리아 문으로 나타났으나, 다른 장내미생물 군집 구성에서의 차이가 있는 것으로 나타났다(그림 3-13). 어미 사향소에서는 Firmicutes(66.28%), Bacteroidetes(10.35%), Tenericutes(2.75%) 순으로 박테리아가 우점하는 것으로 나타났으나 새끼 사향소에서는 Firmicutes(84.37%), Actinobacteria(8.01%), Bacteroidetes(4.90%) 순서로 우점하는 것을 알 수 있었다.

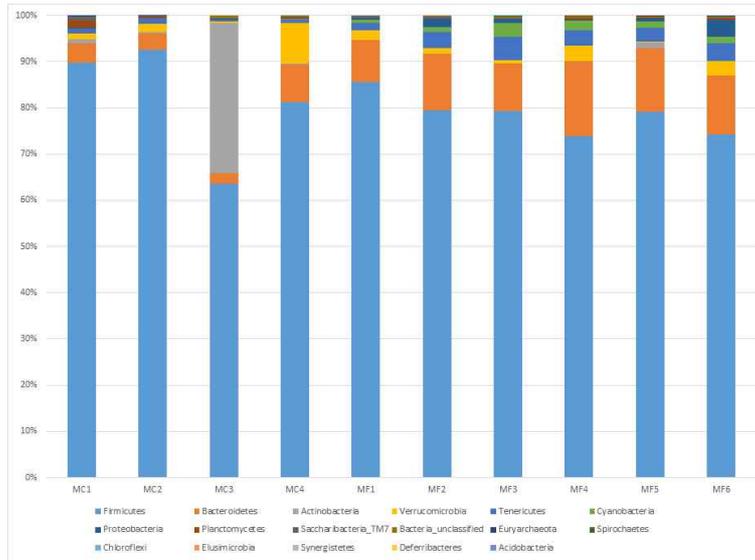


그림 3-13. 그린란드에서 번식하는 사향소 중 어미와 새끼 장내 박테리아 군집의 박테리아 문 수준에서의 상대빈도 분석 (MC1-MC4: 새끼 사향소, MF1-MF6: 어미 사향소)

그린란드에서 번식하는 어미 사향소와 새끼 사향소의 분변에 있는 박테리아의 다양성을 알아보기 위하여 다양성을 나타내는 지수중 하나인 invsimpson index 를 t-test를 통해 비교했을 때 통계적으로 유의미한 차이가 나타났다(welch's two sample t-test,  $t=3.15$ ,  $df=8$ ,  $p=0.0136$ )(그림 3-14). 위 결과를 바탕으로 어미가 새끼에 비해 더 높은 장내 박테리아 다양성을 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 어미는 초식을 통한 다양한 먹이원을 이용하는 반면에 새끼는 성장하는 동안 초식을 하지 않고 어미가 젖을 먹이는 포유 행동에 의한 차이일 것으로 추측된다. 따라서 같은 지역에 서식하는 동종의 개체들임에도 불구하고 어미와 새끼의 분변에서 서로 다른 박테리아 군집이 나타나는 것은 동물의 행동과 먹이에 의한 차이라고 볼 수 있다.

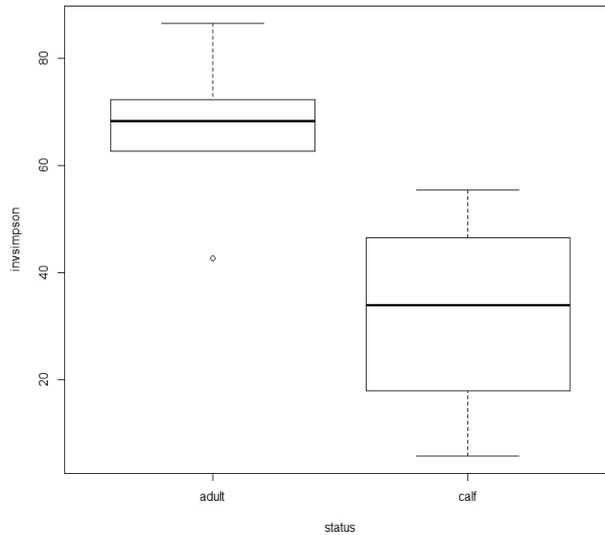


그림 3-14. 어미 사향소와 새끼 사향소의 분변 박테리아 다양성 (invsimpson index) 지수 비교 분석 (t-test,  $p < 0.05$ )

### 3.3 고위도 북극 환경에 적합한 동물 모니터링 기법 개발

#### 3.3.1 북그린란드 동물 모니터링에의 무인기 적용

##### ○ Sirius Passet에서의 무인기 운용

북극 환경에서의 동물 모니터링은 해빙 주변으로 접근이 어렵고 조류의 경우 위장이 잘 되어 있어 관찰하는 데에 어려움이 존재했다. 이러한 기존 현장조사의 한계를 보완하기 위해 적외선 열화상 카메라를 장착한 무인기(Unmanned Aerial Vehicle; UAV)를 활용한 모니터링 기법을 개발하였다. 열화상 카메라는 1980년대부터 동물 모니터링에 많이 사용되었고 현재는 해상도도 높아지고 다양한 알고리즘의 개발로 기술적 한계도 상당히 극복된 바 있다. 광범위한 지역을 모니터링 할 때에 헬리콥터나 경비행기 등을 이용하였으나 최근에는 이를 무인기가 대체하고 있다(그림 3-15).



그림 3-15. Sirius Passet에서 카메라가 장착된 무인기로 동물 촬영을 시도하는 모습

Sirius Passet 지역에서 적외선 열화상 카메라와 가시광선 영역(Red, Green, Blue; RGB)의 카메라를 부착하여 UAV 영상을 획득하였다(그림 3-16). 분홍발기러기(*Anser brachyrhynchus*)는 조심성이 많고 깃갈이 시기에 바다 위에 떠 있어서 접근하여 관찰하기 어려운데 UAV를 이용한 모니터링이 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 특히 극지방의 해수의 온도와 조류는 체온의 차이가 크므로 선명한 열화상 사진을 얻기에 적합하였다.

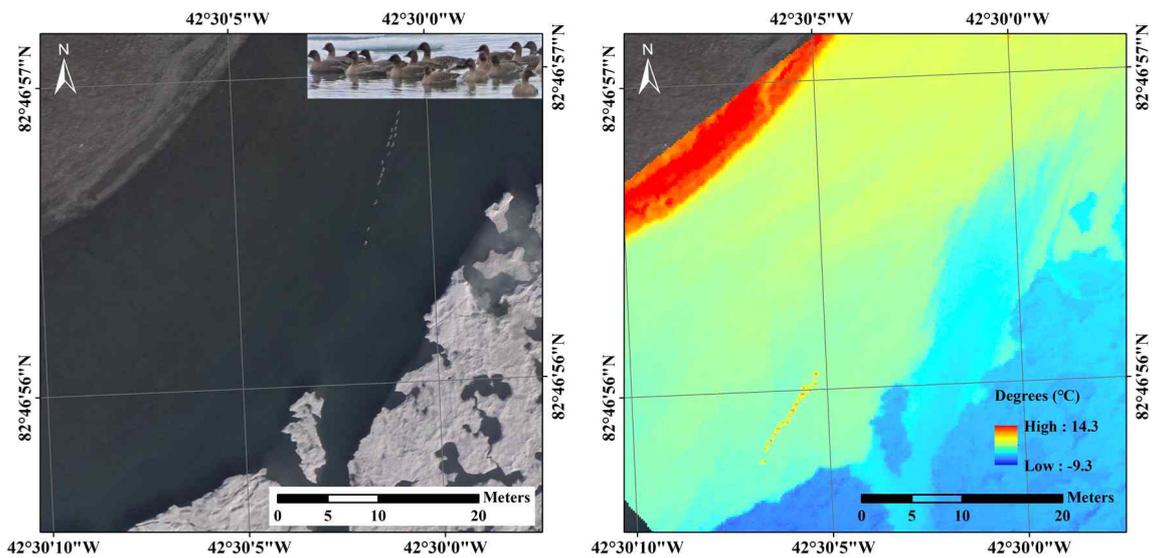


그림 3-16. 16마리의 분홍발기러기가 확인된 (좌) RGB 사진, (우) 열화상 사진 (Lee et al. 2019)

흰죽지꼬마물떼새(*Charadrius hiaticula*)는 번식기에 주변의 환경과 유사한 색깔로 위장하며 알들도 위장색을 띄어 둥지를 파악하기 어려운 점이 있다. RGB 사진으로는 포착되지 않았지만 열화상 사진에서는 높은 온도를 보여 조류 번식 둥지를 확인할 수 있었다(그림 3-17). 이처럼 육상에서 교란을 최소화하면서 위장된 둥지를 찾는 데에 UAV가 도움이 될 것으로 여겨진다.

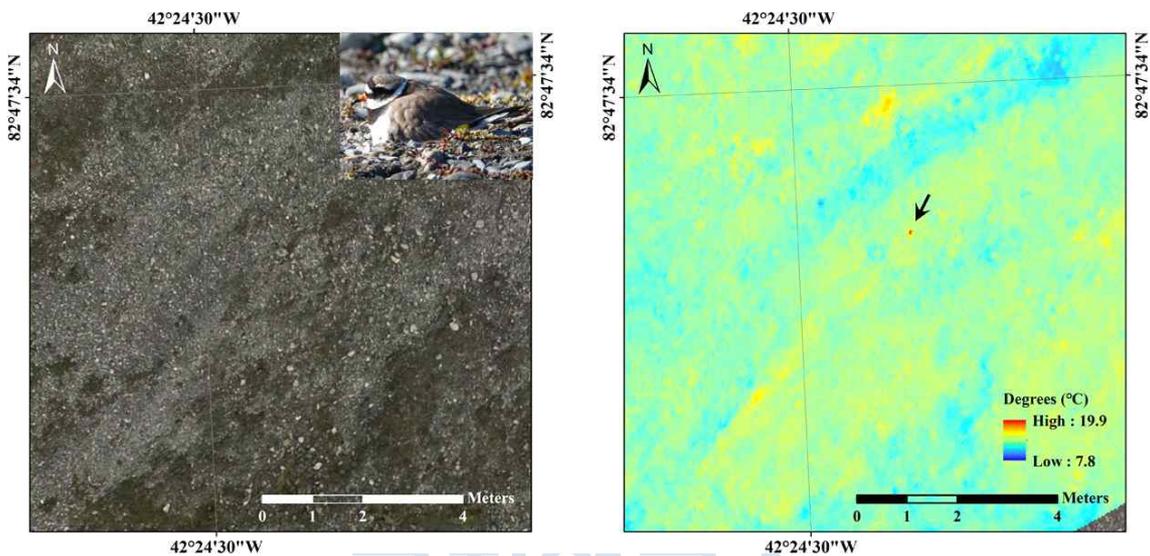


그림 3-17. 포란 중인 흰죽지꼬마물떼새가 발견된 (좌) RGB 사진, (우) 열화상 사진 (Lee et al. 2019)

### 3.3.2 국내 멸종위기 조류 모니터링에의 무인기 적용

#### ○ 송도 인근 갯벌에서의 무인기 운용

북그린란드 지역에서와 비슷하게 국내 멸종위기 조류 모니터링에도 무인기를 운용하였다. 저어새(*Platalea minor*)는 인천의 남동 유수지에서 번식하는 조류로서 부리가 특징적인 멸종위기종이기에 지역 주민의 많은 관심을 받아왔다. 인근 갯벌에서 먹이 활동을 하는 것으로 알려져 있어 제17보병사단의 사전허가를 받아 blind survey를 수행할 수 있었다. 어두운 갯벌 색과는 달리 흰색의 저어새가 포착된 RGB 사진을 통해 개체수를 쉽게 파악할 수 있었고 반대로 열화상 사진에서는 저어새 표면 온도가 15.4°C로 배경 온도에 비해 낮은 값을 나타냈다(그림 3-18). 앞서 북그린란드 지역과는 반대로 배경 온도가 더 높은 경우였지만 군 관련 제한구역 등 접근이 어려운 특수지 등에서도 무인기의 장점을 살려 손쉽게 모니터링을 수행할 수 있었다.

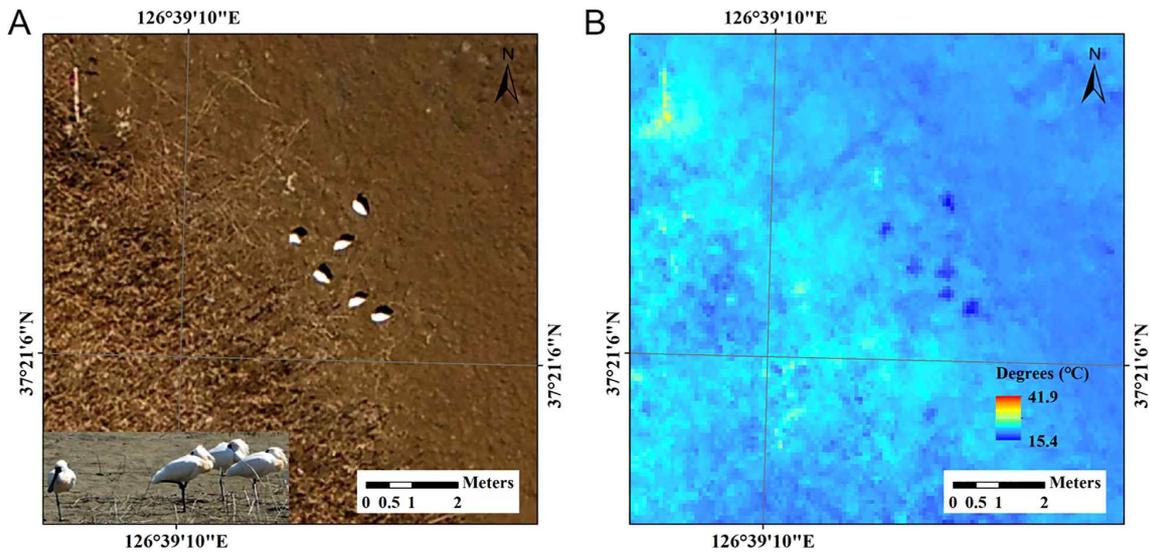


그림 3-18. 한 무리의 저어새가 발견된 (좌) RGB 사진, (우) 열화상 사진 (Lee et al. 2019)

### 3.3.3 스발바르 해양조류 번식지 모니터링에의 무인기 적용

#### ○ 다산기지 인근 해안절벽에서의 무인기 운용

북그린란드와 국내에서의 무인기 기반 모니터링 기법과 비교하기 위하여 다산기지 인근 해안절벽에서도 해양조류 번식지 모니터링을 수행하였다(그림 3-19). 먼저 무인기 운용을 위해 스발바르 정부 및 노르웨이 관계 당국, 킹스베이 사의 공항 등에서 전파사용 및 항공 안전에 관해 사전 승인을 얻었다. 스발바르 연구를 위한 포털인 Research in Svalbard의 RIS ID 11249에서 관련 허가를 확인할 수 있다.

세가락갈매기(*Rissa tridactyla*)나 풀머갈매기(*Fulmarus glacialis*)와 대표적인 스발바르의 해양조류로서 포식의 위험을 피하기 위해 절벽에서 무리 지어 둥지를 짓는다(Götmark and Andersson 1984; Porter and Coulson 1987). 이들 해양조류의 모니터링은 개체 수를 파악하는 기본적인 자료 수집 외에도 북극 환경의 변화를 의미하는 지표(indicator)로 사용되기 때문에 매우 중요하다(Vihtakari et al. 2018). 그러나 절벽에서 둥지를 짓는 특성 때문에 연구자가 직접 접근하기 위험했고 따라서 지금까지의 모니터링은 밀도가 높거나 낮음 등을 정성적으로 평가하는 방식으로 이루어졌다(Massaró et al. 2001).



그림 3-19. 무인기를 이용하여 해양조류를 모니터링 한 다산기지 인근 해안절벽 위치와 촬영 일자 상세 정보

북그린란드 육상 및 해양의 이차원 모니터링처럼 무인기에 부착된 RGB와 열화상 카메라를 활용하여 여러 각도에서 해안절벽을 촬영할 수 있었다. 두 종류의 사진을 통해 삼차원 모델을 구성하여 해양조류의 번식지를 관찰할 수 있었다(그림 3-20). 지상에서 촬영한 것에 비해 무인기로 획득한 RGB 사진으로 구성된 해안절벽 모델에서 약 30% 이상의 세가락갈매기 개체를 추가적으로 발견할 수 있어 개체수를 정확하게 파악할 수 있다는 제언이 가능하였다. 특히 열화상 사진은 바위 틈에서 위장이 잘 된 새끼 풀머갈매기를 탐지하는 데에 도움이 되었다(그림 3-21).



그림 3-20. RGB 사진을 통해 구성한 Irgensfjellet의 해안절벽 모델 및 마커로 표시된 둥지 위치



그림 3-21. 스발바르 해안절벽에서 촬영된 풀머갈매기의 (상) RGB, (하) 열화상 사진

### 3.4 극한지 추위 적응을 위한 동물의 열 흡수 기작 규명

#### 3.4.1 그린란드 절지동물의 열 반사도 측정

##### ○ 극한 환경에 서식하는 동물의 추위 적응에 관한 가설 검증

극지 동물들은 낮은 온도 환경에서 열 흡수를 높여야 생존에 유리할 것이다. 하지만 열 흡수를 높이기 위해서는 어두운 색깔을 띠어야 하는데 눈으로 덮인 밝은 환경에선 오히려 포식자에게 노출될 위험이 증가하게 되는 역설적인 관계(trade-off)에 놓이게 된다. 이러한 환경에 적응하기 위해 가시광선 영역대의 파장은 반사하는 반면 열 흡수를 위해 적외선 영역대의 파장은 흡수한다면 이와 같은 문제를 해결할 수 있을 것이다(그림 3-22). 따라서 추운 지역에 서식하는 극지 동물은 빛 반사도를 낮춰 열 흡수를 증가시킬 것으로 예측된다.

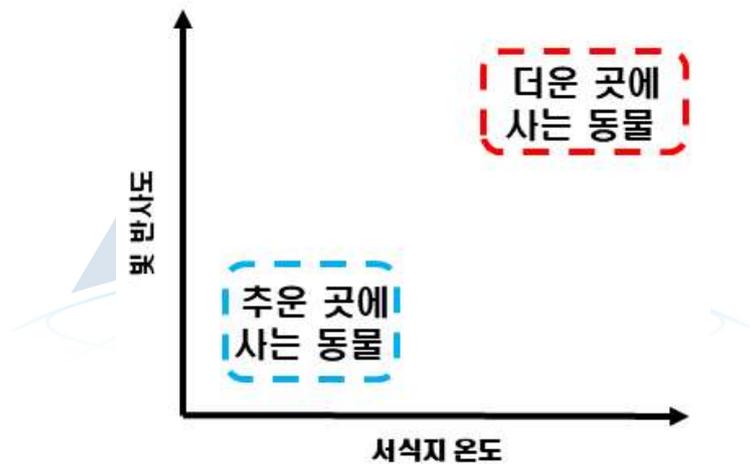


그림 3-22. 서식지 온도에 따른 빛 반사도의 예측 모델

##### ○ Sirius Passet 현장에서 촬영된 절지동물

Sirius Passet 캠프 인근에서 채집된 북극 곤충 및 거미류를 대상으로 열 흡수 기작을 실험해볼 수 있었다(그림 3-23). ImageJ 프로그램을 사용하였으며 RGB Measure Plugin으로 색채분석도 병행하였다. 가시광선 영역의 색채분석을 위해 가시광선 필터를 적용한 카메라를 이용하여 촬영하였으며 촬영된 사진의 RGB(Red, Green, Blue) 채널의 색채를 측정하였다. 적외선 영역의 색채분석을 위해서는 적외선 필터를 적용한 카메라를 이용하여 촬영하였으며 촬영된 사진의 R(Red) 채널이 적외선에 가장 민감하여 R 채널의 색채를 측정하였다. 곤충 사진에서 적외선 영역의 반사도를 측정된 결과 표 3-8과 같았다.



그림 3-23. 현장에서 채집된 곤충 및 거미류의 (좌) 가시광선 영역과 (우) 근적외선 영역의 사진

표 3-8. 곤충 사진에서의 적외선 영역 반사도 측정값

| 구분 |                  | 사진에서의 근적외선 영역 반사도 측정값 |            |
|----|------------------|-----------------------|------------|
|    |                  | 나비목의 경우 몸통            | 나비목의 경우 날개 |
| 1  | 나비목              | 31.038                | 76.795     |
| 2  | 나비목              | 28.048                | 75.53      |
| 3  | 나비목              | 19.27                 | 89.027     |
| 4  | 나비목              | 22.676                | 124.284    |
| 5  | 거미류              | 30.592                |            |
| 6  | 거미류              | 27.737                |            |
| 7  | 거미 옆 세 마리 곤충(우측) | 15.713                |            |
| 8  | 거미 옆 세 마리 곤충(우측) | 21.714                |            |
| 9  | 거미 옆 세 마리 곤충(우측) | 20.971                |            |
| 10 | 호박벌              | 54.992                |            |
| 11 | 두 마리 나방(좌측)      | 40.673                | 72.941     |
| 12 | 두 마리 나방(좌측)      | 49.324                | 65.679     |
| 13 | 여섯 마리 큰 나방       | 22.53                 | 109.796    |
| 14 | 여섯 마리 큰 나방       | 27.635                | 72.271     |
| 15 | 여섯 마리 큰 나방       | 24.064                | 102.206    |
| 16 | 여섯 마리 큰 나방       | 29.484                | 98.455     |
| 17 | 여섯 마리 큰 나방       | 24.51                 | 126.18     |
| 18 | 여섯 마리 큰 나방       | 12.406                |            |
| 19 | 노랑나비속            | 23.196                | 101.356    |

### 3.4.2 유럽 내 나비목의 열반사도 측정

#### ○ 영국 자연사박물관에서 촬영된 나비목 표본

영국 자연사박물관에서 극지방에 서식하는 종을 포함하여 343종의 나비목 동물 표본을 각각 근적외선(near infrared, NIR), 가시광선, 자외선(ultraviolet, UV) 영역의 필터를 씌워 카메라로 촬영하였다(그림 3-24). 샘플 사진은 각 샘플마다 등면(dorsal), 배면(ventral)을 나눠서 촬영하였으며 각 종마다 적게는 1개, 많게는 4개의 표본이 촬영되었다. 총 4104장의 사진을 ImageJ 프로그램을 사용하여 분석에 적합하도록 변환하고 우측 상단의 화이트밸런스로 보정하였다.

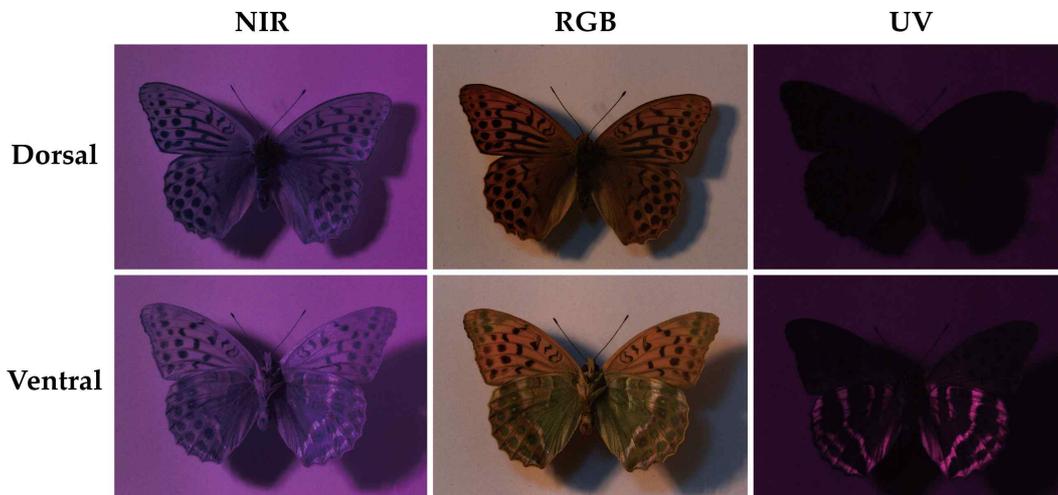


그림 3-24. *Argynnis paphia*의 등, 배면의 근적외선, 가시광선, 자외선 사진

보정이 끝난 표본 사진들은 몸통(thorax), 안쪽 날개(basal wing), 날개 전체(whole wing)의 세 부분으로 나누어 각 파장 영역대 별로 반사도를 측정하였다. 몸통에는 대부분의 기관이 모여 있고 안쪽 날개는 날개를 움직이는 근육이 직접적으로 위치하며 체액을 통한 순환이 어려워 열 흡수율이 높아야 할 것으로 생각되는 날개 전체로 구분한 것이다. 특히 나비목의 생물종들은 날개를 접고 휴식을 취하기 때문에, 배면쪽 날개의 열 흡수도가 나비목 생물종들의 열순환에 중요한 역할을 할 것으로 추측된다. 그러나 이전의 연구에서는 등면만을 촬영하여 흡수도를 측정했으므로, 등면뿐 아니라 배면의 날개 역시 촬영하여 데이터를 얻은 본 연구에 차별점을 둘 수 있었다. 각 부분은 ImageJ 프로그램에서 테두리를 일일이 지정하여 측정할 수 있었다(그림 3-25).

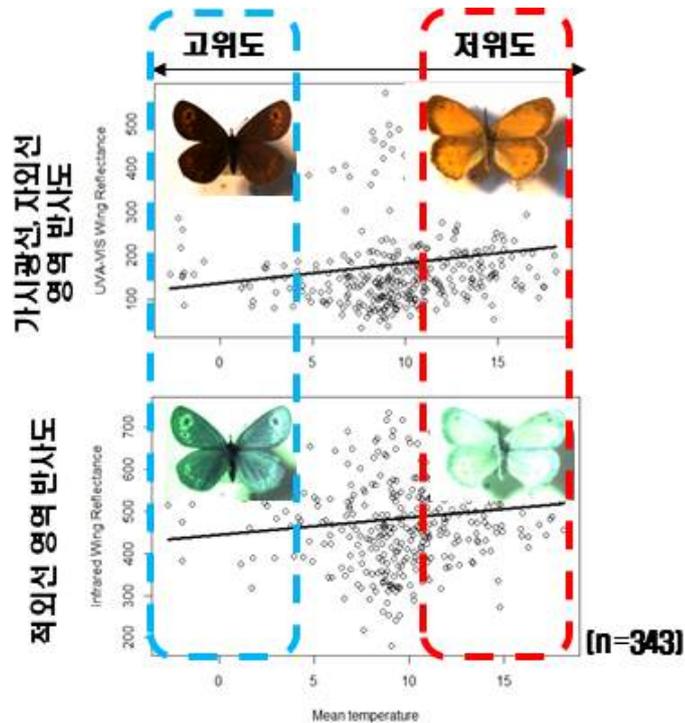


그림 3-25. 가시광선 영역에서 촬영한 *Anthocharis damone* 표본의 날개 부분의 반사도를 측정 중인 모습

본 연구에 사용된 343개 샘플의 반사도 측정값을 기반으로, 햇빛을 통해 전달되는 에너지의 50% 이상을 차지하는 근적외선 영역의 반사도가 나비목 생물종들이 서식하는 지역의 기후에 따라 차이가 나타나는지를 판별할 수 있었다.

예측한 바와 마찬가지로 온도가 낮은 고위도 지역에 서식하는 동물은 온도가 높은 저위도 지역에 비하여 가시광선, 자외선 및 적외선 영역 반사도가 모두 낮은 것으로 나타났다(그림 3-26). 나비 종들의 날개와 몸통 반사도는 각 종들의 서식지 평균기온과 밀접한 상관성을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 나비의 계통수 분석에서도 나타났으며, 계통수 내에서 공통 조상을 고려한 이후에도 나비 서식지의 기후와 반사도에 유의한 관계를 발견하였다. 이는 나비의 날개 및 몸통의 반사도의 진화에 서식지의 기후조건이 영향을 주었음을 보여주는 결과이다. 따라서 이는 극지 동물이 극한 추위 환경에 적응하기 위해 체표면의 빛 반사도를 낮추는 방향으로 적응한 결과로 보이며, 이는 추위에 적응하는 극지 동물의 중요한 기작 중 하나일 것으로 추측된다.

극지를 비롯한 한랭 기후에 서식하는 나비목 생물종들이 열 흡수가 용이하도록 적응하였을 것이라는 가설을 검증할 수 있었다. 또한, 계통도를 작성함으로써 이러한 적응의 경로를 추적하는 후속 연구가 필요할 것이다.



서식지 연평균 온도

그림 3-26. 서식지 연평균 온도에 따른 가시광선, 자외선 영역 반사도(위) 및 적외선 영역 반사도(아래) 측정치. 총 343개 샘플 사용.

극지연구소

### 3.5 북극에서 번식하는 해양조류의 이동경로 분석

#### 3.5.1 동아시아-대양주 철새이동경로 내 조류 이동 분석

##### ○ 이동성 조류에의 바이오로거 부착 기술 확보

물새들이 이동할 때 주로 사용하는 길을 철새이동경로(flyway)라 하며 전 세계에서 아홉 여 개의 철새이동경로로 구분하여 보전 노력을 기울여왔다(Amano et al. 2010). 동아시아-대양주 철새이동경로(East Asian - Australasian Flyway, EAAF)는 한국을 포함하여 알래스카, 시베리아를 아우르는 북극권과 동남아시아 및 호주와 뉴질랜드까지 뻗어 있는 지역이다. 5,000만 마리가 넘는 물새들의 터전으로 겨울철에는 남하하고 여름철에는 북극권에서 번식하기 때문에 국내에서도 북극 조류를 연구할 수 있다. 그러나 철새의 자세한 서식지 이용에 관한 자료들은 포획의 어려움, 장비의 비싼 가격 등의 원인으로 많이 밝혀지지 못해왔다.

GPS(Global Positioning System) 기반의 위치추적 발신기는 바이오로거의 일종으로 최근 경량화, 소형화되어 조류에 부착하기 용이해졌다. 바이오로거를

활용하기 위해서는 조류 포획이 선행되어야 하므로 포획과 부착 기술을 확보하는 것이 필수적이다. 포획에 대한 과정은 먼저 조류가 휴식을 취하고 있는 수변의 적절한 포획 작업지와 비가 오지 않는 날짜를 선정하는 것이 중요하다. 그 후 포획을 위해서 압축공기를 충전한 포에 그물을 매달아 놓고 그 앞쪽에 먹이를 살포하여 포획 대상조류를 유인하고, 포획 예상 수량 이상의 개체가 접근하면 압축된 포를 발포하여 그물을 이용해 조류를 포획하였다. 포획된 개체의 성, 무게, 년생 등의 기본 자료를 수집하고 조심스럽게 그물에서 개체를 떼어내어 따로 분리시켜 놓은 뒤 한 마리씩 위치추적 발신기를 부착한 후 안전하게 방사하였다(그림 3-27).

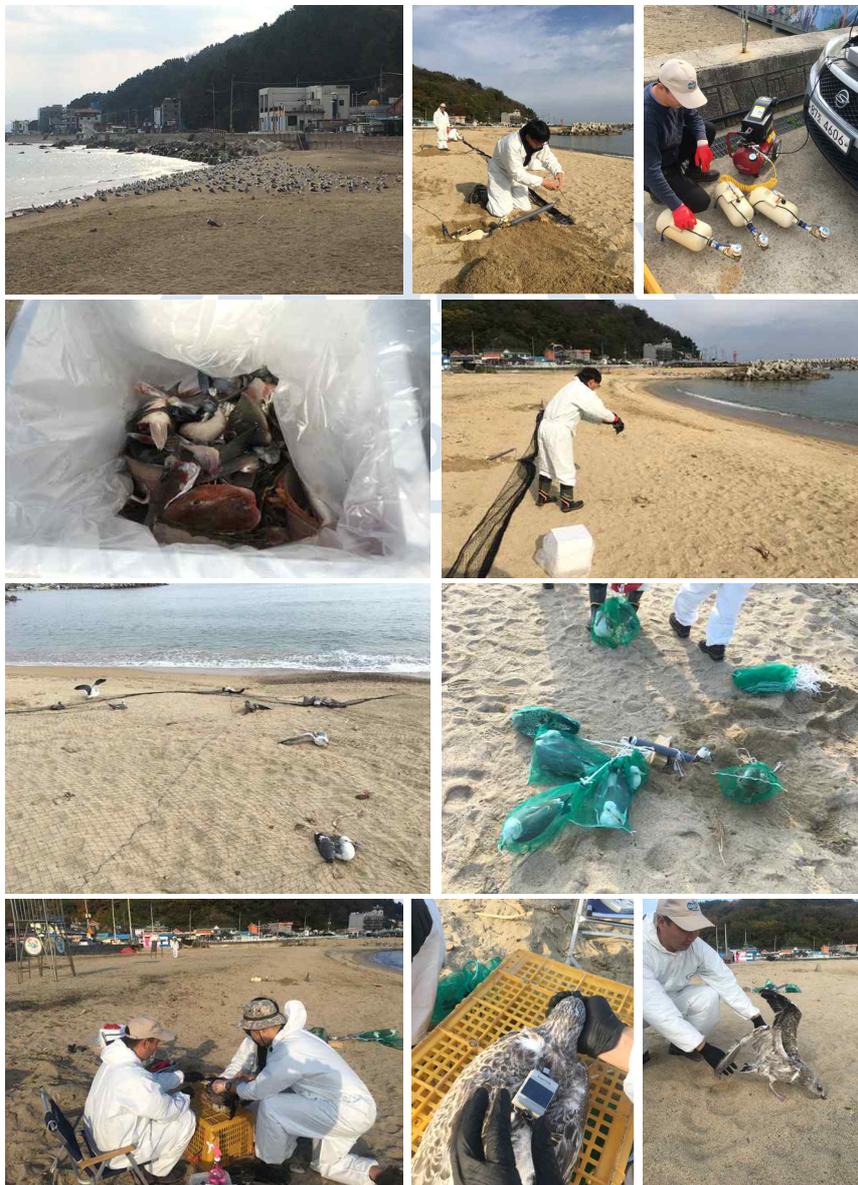


그림 3-27. 재갈매기 포획 작업 일련의 과정을 보여주는 사진들

○ 국내에서 부착된 바이오로거를 통한 재갈매기의 이동 파악

국내에서 이동성 조류 연구는 조류독감과 같은 바이러스 전파, 번식지 또는 월동지에서의 개체수 증감 및 생태계 변화를 위주로 진행되었다. 재갈매기는 한국 및 동아시아 등지에서 폭넓게 월동하고 러시아를 포함한 동아시아 북단에서 번식하는 종으로 알려져 있다. 환경부 겨울철 조류 동시센서스에 따르면 수만 마리가 국내에 도래하고 전체 갈매기류 중 약 36.6%나 차지하여(국립생물자원관 철새지리정보, 2020) 주기적으로 모니터링된 종이라 할 수 있다. 특히 재갈매기 대상으로는 처음으로 국립생물자원관에서 2015년 2월 강원도 삼척에서 네 마리에 위치추적 발신기를 부착하여 4월 하순부터 5월 중순에 북상하여 러시아 극동 지역까지 이동함을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 앞서 획득한 바이오로거 부착 기술을 바탕으로 동해안에서 재갈매기 11개체에 위치추적 발신기를 부착하였다. 2019년 3월에는 삼척시에서 두 개체, 10월에는 부산광역시 기장군에서 여섯 개체, 11월에는 영덕군에서 세 개체를 포획하여 부착 후 현재까지도(2020년 2월) 위치정보를 수신하고 있다(표 3-9). 이 좌표들을 ArcGIS 프로그램으로 지도와 함께 나타내었으며 3월에 삼척에서 부착된 개체들은 국내 선행연구와 유사하게 5월 하순까지 북상한 것을 확인할 수 있었다(그림 3-28A). 특히 10월과 11월에 부착된 개체들은 현재까지 동해안과 남해안 일대에서 월동하고 있으며 가장 바깥쪽의 좌표를 꼭지점으로 하는 최소불록다각형(minimum convex polygon, MCP)을 확인할 수 있었다(그림 3-28B,C). 이는 재갈매기 월동지에서의 행동권(home range)에 대한 기초 자료를 제공해주며 기장보다 영덕에서 포획된 개체들이 더 넓은 행동권을 점유하는 모습을 관찰할 수 있어 집단에 따라 다른 이동양상을 보여준을 확인하였다.

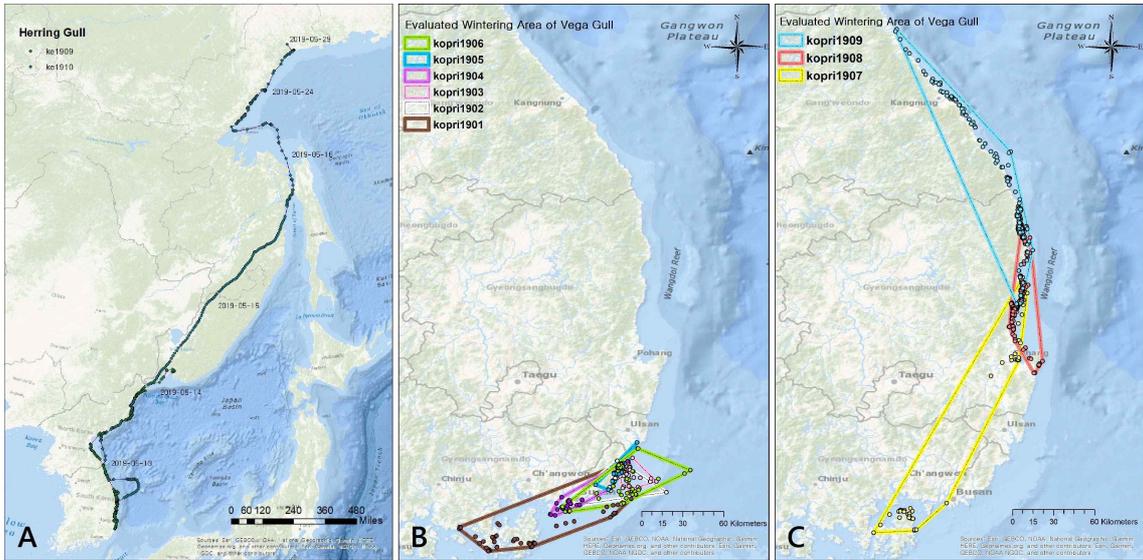


그림 3-28. 바이오로거가 부착된 재갈매기의 이동경로. (A) 삼척에서 부착된 두 개체의 이동경로, (B) 기장에서 부착된 여섯 개체의 이동경로 및 MCP, (C) 영덕에서 부착된 세 개체의 이동경로 및 MCP



표 3-9. 재갈매기 11개체에 부착한 바이오로거 상세정보 및 이동에 관한 요약수치

| Track ID  | 부착지역    | 부착시기       | 마지막 전송 시기       | 무게(g) | 데이터 수 | 총 이동거리(km)  | MCP 둘레(km) | MCP 면적(km <sup>2</sup> ) |
|-----------|---------|------------|-----------------|-------|-------|-------------|------------|--------------------------|
| Kel909    | 삼척시     | 2019-03-08 | 2019-05-12 7:01 | -     | 896   | 2373.273094 | -          | -                        |
| Kel910    | 삼척시     | 2019-03-08 | 2019-05-30 3:02 | -     | 1390  | 6477.144267 | -          | -                        |
| Kopri1901 | 기장군(부산) | 2019-10-22 | 2020-02-03 3:01 | 970g  | 1292  | 1181.41     | 257.92     | 3089.33                  |
| Kopri1902 | 기장군(부산) | 2019-10-23 | 2020-02-03 3:02 | 1120g | 631   | 851.45      | 140.5      | 896.83                   |
| Kopri1903 | 기장군(부산) | 2019-10-23 | 2020-02-02 7:01 | 1300g | 1258  | 807.79      | 70.51      | 307.81                   |
| Kopri1904 | 기장군(부산) | 2019-10-23 | 2020-01-26 7:01 | 1230g | 817   | 768.2       | 126.17     | 494.04                   |
| Kopri1905 | 기장군(부산) | 2019-10-30 | 2020-02-03 3:02 | 785g  | 869   | 743.91      | 87.47      | 195.57                   |
| Kopri1906 | 기장군(부산) | 2019-10-31 | 2020-02-03 3:02 | 1005g | 871   | 1089.52     | 184.09     | 1518.17                  |
| Kopri1907 | 영덕군     | 2019-11-12 | 2020-02-03 3:02 | 1060g | 991   | 1505.47     | 435.9      | 4712.69                  |
| Kopri1908 | 영덕군     | 2019-11-12 | 2020-02-03 3:00 | 920g  | 1082  | 1747.77     | 223.33     | 1217.05                  |
| Kopri1909 | 영덕군     | 2019-11-12 | 2020-02-03 3:01 | 850g  | 1140  | 1466.03     | 442.17     | 4287.98                  |

## 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 4.1 연차별 연구개발 목표 및 달성내역

| 구분       | 년도                            | 연구개발목표                  | 연구개발내용   | 연구범위         | 달성도  |
|----------|-------------------------------|-------------------------|--|--------------|------|
| 1차<br>년도 | 2018.05.01<br>~<br>2018.12.31 | ○ 북그린란드 현장<br>동물 서식지 조사 | ○ 야외 현장조사를 통한 조류, 포유류 서식지 위치 지도 작성<br>○ 조류 깃털 및 포유류 분변 시료 채집                 | 현장조사         | 100% |
|          |                               | ○ 모니터링 기법<br>개발         | ○ 무인기를 활용한 동물 모니터링 기법 개발<br>○ 해빙 주변 깃털이 개체 모니터링을 위한 촬영 분석                    | 현장조사<br>자료분석 | 100% |
|          |                               | ○ 동물 시료 분석              | ○ 2016년, 2017년 Sirius Passet 현장에서 수집된 동물시료 분석<br>○ 2018년 현장 동물시료 전처리 및 분석 의뢰 | 시료분석         | 100% |
| 2차<br>년도 | 2019.01.01<br>~<br>2019.12.31 | ○ 북그린란드 현장<br>동물 서식지 조사 | ○ 야외 현장조사를 통한 조류, 포유류 서식 자료 수집<br>○ 조류 깃털 및 포유류 분변 시료 채집                     | 현장조사         | 100% |
|          |                               | ○ 극지 환경적응<br>기작         | ○ 극지역에서 채집된 박물관 보관 시료를 이용한 적외선/자외선/가시광선 반사율 촬영 분석                            | 자료분석         | 100% |
|          |                               | ○ 동물 시료 분석              | ○ 2018년, 2019년 북그린란드 현장에서 수집된 동물시료 분석  | 시료분석         | 100% |

### 4.2 정성적 연구성과의 우수성

총 3편의 SCI(E) 급 논문을 본 과제 단독 사사로 출간하였음.

#### 4.2.1 그린란드늑대, 북극토끼의 계통학적 연구(Cho et al. 2019; Kim et al. 2019)

- 미토콘드리아 DNA 염기서열을 분석하여 그린란드늑대와 북극토끼의 계통학적 분류를 밝힘

#### 4.2.2 무인기를 활용한 모니터링 기법 개발(Lee et al. 2019)

- 접근성이 낮고 식별이 어려운 북극 조류를 탐지하기 위한 적외선 카메라 센서 부착
- 국내 멸종위기 조류(저어새)에 적용 가능성 시험

### 4.3. 정량적 목표 달성도

#### 4.3.1. 연차별 논문 성과표

| 구분             | 논문                    |                       | 비고 |
|----------------|-----------------------|-----------------------|----|
|                | SCI(E) 목표<br>(1저자/공동) | SCI(E) 달성<br>(1저자/공동) |    |
| 1차년도<br>(2018) | 0/0                   |                       |    |
| 2차년도<br>(2019) | 2/0                   | 3/0                   |    |
| 합계             | 2                     | 3                     |    |

#### 4.3.2. 출판된 논문 목록 및 상세 설명

##### ○ 북극토끼의 전장 미토콘드리아 유전체

- 논문분류 : SCIE
- 학술지명 : Mitochondrial DNA Part B-Resources
- 게재일자(승인일자) : 2019년 9월 24일
- 논문명 : Complete mitochondrial genome of the Arctic hare, *Lepus arcticus*
- 논문내용 : 그린란드 Sirius Passet에서 수집한 사체 시료를 바탕으로, 북극토끼의 전장 미토콘드리아 유전체 정보를 보고한 논문. 알래스카토끼, 고산토끼와 근연 관계에 있는 종임을 확인하여 추후 토끼목 계통 연구에 유용한 자료가 될 것으로 기대됨.
- 저자명 : 김보미(제1저자), 이원영(교신저자), 이재성(교신저자)

##### ○ 그린란드 늑대의 전장 미토콘드리아 유전체

- 논문분류 : SCIE
- 학술지명 : Mitochondrial DNA Part B-Resources
- 게재일자(승인일자) : 2019년 8월 3일
- 논문명 : Complete mitochondrial genome of the Greenland wolf, *Canis lupus orion*
- 논문내용 : 그린란드 Sirius Passet에서 채취한 털 시료를 바탕으로, 그린란드 늑대의 전장 미토콘드리아 유전체 정보를 보고한 논문. 북아메리카 늑대보다 유라시아 늑대와 더 근연 관계에 있는 것으로 확인되어 추후 회색늑

대의 아종 계통 연구에 활용될 것으로 기대됨.

- 저자명 : 조현준(제1저자), 김보미(공동저자), 이원영(교신저자), 이재성(교신저자)

○ 무인기를 활용한 조류의 모니터링

- 논문분류 : SCIE

- 학술지명 : PLOS ONE

- 게재일자(승인일자) : 2019년 8월 21일

- 논문명 : Detection of two Arctic birds in Greenland and an endangered bird in Korea using RGB and thermal cameras with an unmanned aerial vehicle (UAV)

- 논문내용 : 무인기에 부착된 가시광선, 적외선 카메라를 활용하여 북그린란드 Sirius Passet에 서식하는 조류를 관찰한 보고. 또한 같은 방법으로 국내 조류 서식지에서 블라인드 테스트를 한 결과, 인천 송도 갯벌에서 멸종위기 조류인 저어새를 확인.

- 저자명 : 이원영(제1저자, 교신저자), 박미진, 현창욱

4.4. 기대 성과 및 활용 기여도

○ 기술적 측면

- 북그린란드와 같이 낮은 접근성으로 인하여 생태학적 연구가 상대적으로 미비한 지역에서 선도적으로 연구 방법을 개발할 필요성

- 고위도 북극에서 진행되는 환경 변화에 따라 동물행동생태를 기록하고 관찰 기술 개발 필요

- 그린란드, 덴마크 등 국가와의 협력을 통해 북극권 협력 거점을 확보

○ 경제·산업적 측면

- 고위도 북극에서 새로운 생물자원을 발굴할 수 있도록 동물 분포에 관한 기초 자료 제공

- 북극에서 진행되는 생태계 변화를 모니터링하여 미래 변화에 대응할 수 있는 기반 마련

- 북그린란드 지역 생물의 동물행동생태 기초 연구를 통해 추위에 대한 적응 기작을 규명하여, 산업적으로 응용할 수 있는 발판 제공

○ 사회·문화적 측면

- 고위도 북극권 육상 동물에 대한 생태 연구를 통하여 북극 생태계에 대한 국민적 관심 고취
- 북극 동물의 분포와 서식을 조사하여 극지 생태계의 다양성을 홍보
- 연구개발결과의 활용방안
  - 북극권 동물 개체군 변화를 이해하고 예측자료로 활용
  - 북그린란드 동물 서식지 변화와 행동생태에 기초정보 획득



## 제 5장 연구개발결과의 활용계획

- 새로운 생물자원 발굴을 위한 자료 목록 제공
- 북극 동물의 추위에 대한 적응기작을 밝히고 유용한 물질을 추출하여 응용할 수 있는 기초 제공
- 고위도 북극권 동물에 대한 연구를 홍보하여 국민적 관심을 고취



## 제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 북그린란드 조사지역의 생태 정보

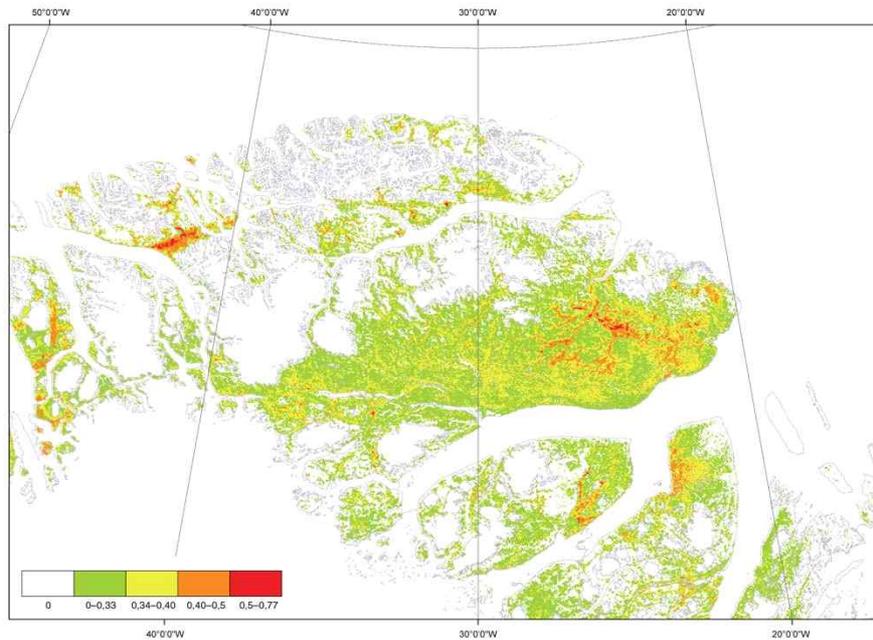


그림 6-1. 북그린란드 식생 지수(NDVI)를 나타낸 위성 지도(Boertmann and Nielsen 2010).

극지연구소



그림 6-2. NASA worldview 웹페이지에서 수집한 Sirius Passet 지역의 2019년 눈 녹는 시기(2019년 6월 17일 경으로 파악됨).

○ 영국 자연사박물관의 나비목 표본 사진

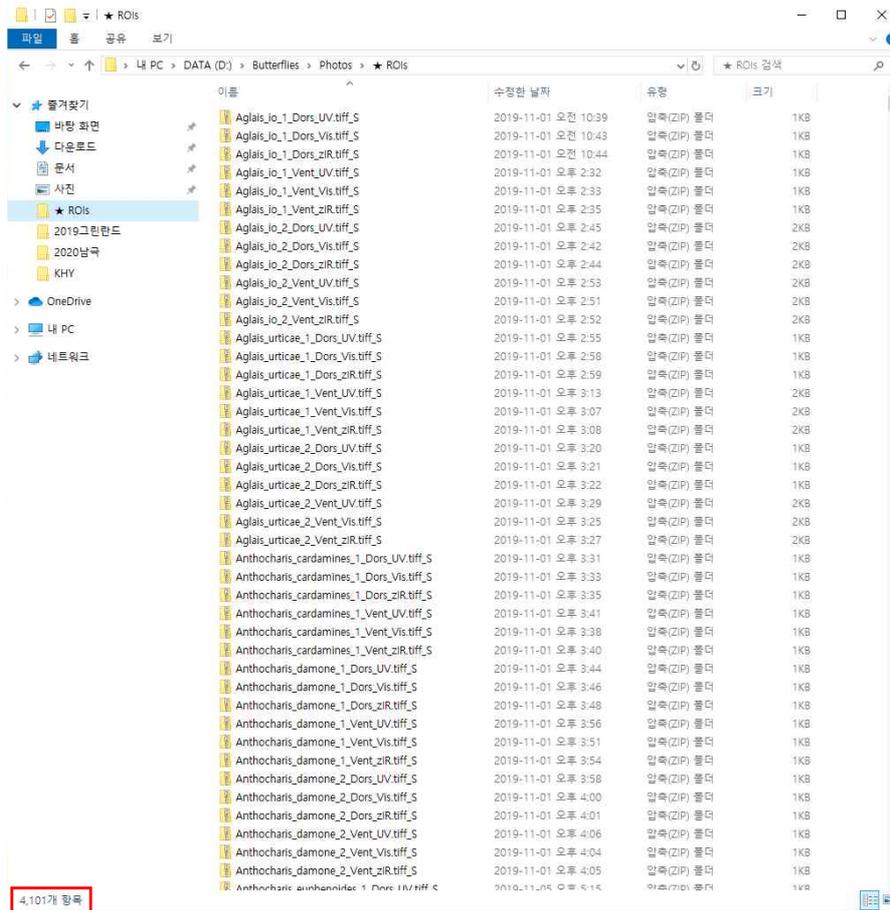


그림 6-3. 영국 자연사박물관에서 촬영한 4,100여 장의 나비목 표본 사진

## 제 7장 참고문헌

Amano, T., Székely, T., Koyama, K., Amano, H., & Sutherland, W. J. (2010). A framework for monitoring the status of populations: an example from wader populations in the East Asian-Australasian Flyway. *Biological Conservation*, 143(9), 2238-2247.

Best, T. L., & Henry, T. H. (1994). *Lepus arcticus*. *Mammalian Species*, (457), 1-9.

Boertmann, D., & Nielsen, R. D. (2010). Geese, seabirds and mammals in North and Northeast Greenland. and no.: NERI Technical Report, (773).

Boertmann, D., Olsen, K., & Nielsen, R. D. (2015). Geese in Northeast and North Greenland as recorded on aerial surveys in 2008 and 2009. *Dansk Ornitologisk Forenings Tidsskrift*, 109(4), 206-17.

Cho, H., Kim, B. M., Lee, W. Y., & Rhee, J. S. (2019). Complete mitochondrial genome of the Greenland wolf, *Canis lupus orion*. *Mitochondrial DNA Part B*, 4(2), 2836-2838.

Dawes, P. R., Elander, M., & Ericson, M. (1986). The wolf (*Canis lupus*) in Greenland: a historical review and present status. *Arctic*, 119-132.

Ersmark, E., Klütsch, C. F., Chan, Y. L., Sinding, M. H. S., Fain, S. R., Illarionova, N. A., ... & Savolainen, P. (2016). From the past to the present: wolf phylogeography and demographic history based on the mitochondrial control region. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4, 134.

Götmark, F., & Andersson, M. (1984). Colonial breeding reduces nest predation in the Common Gull (*Larus canus*). *Animal Behaviour*, 32(2), 485-492.

Hall, E. R. (1981). *The mammals of North America*. Second ed. John Wiley & Sons, New York, 1:1-600 + 90.

Kennard, F. H. (1927). The specific status of the greater snow goose. In *Proc. New England Zool. Club* (Vol. 9, pp. 85-93).

Kim, B. M., Lee, W. Y., & Rhee, J. S. (2019). Complete mitochondrial genome of the Arctic hare, *Lepus arcticus*. *Mitochondrial DNA Part B*, 4(2), 3621-3623.

Lee, W. Y., Park, M., & Hyun, C. U. (2019). Detection of two Arctic birds in Greenland and an endangered bird in Korea using RGB and thermal cameras with an unmanned

aerial vehicle (UAV). PloS one, 14(9).

Massaro, M., Chardine, J. W., & Jones, I. L. (2001). Relationships between black-legged kittiwake nest-site characteristics and susceptibility to predation by large gulls. *The Condor*, 103(4), 793-801.

Porter, J. M., & Coulson, J. C. (1987). Long-term changes in recruitment to the breeding group, and the quality of recruits at a kittiwake *Rissa tridactyla* colony. *The Journal of Animal Ecology*, 675-689.

Pocock, R. I. (1935, September). The races of *Canis lupus*. In *Proceedings of the Zoological Society of London* (Vol. 105, No. 3, pp. 647-686). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

Vihtakari, M., Welcker, J., Moe, B., Chastel, O., Tartu, S., Hop, H., ... & Gabrielsen, G. W. (2018). Black-legged kittiwakes as messengers of Atlantification in the Arctic. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.

Wozencraft, W. C. (2005). *Mammal Species of the World*, Edited by D. E. Wilson and D. M. Reeder (Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press), 532-628.

Zhuravlev, A. Y., & Wood, R. A. (2008). Eve of biomineralization: Controls on skeletal mineralogy. *Geology*, 36(12), 923-926.

BirdLife International 2018. *Clangula hyemalis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T22680427A132528200.

<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T22680427A132528200.en>. [Downloaded on 27 February 2020].

Dynamic Planet. [online] Available at:

<https://worldview.earthdata.nasa.gov/> [Accessed 27 Feb. 2020].

국립생물자원관 (2020). 생물자원관, 재갈매기 이동경로 세계 최초로 밝히다. [online] Available at:

<http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=50&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=539410&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=> [Accessed 27 Feb. 2020].

## 첨 부 2

## 창의연구사업 최종 결과보고서 평가의견

| 창의연구사업 구분   | Seed형 선행과제  |                 |                                      |
|---|---|-----------------|--------------------------------------|
| 과제명   | 북그린란드 Sirius Passet 지역의 동물행동생태 기초 연구 (계정번호: PE18370, PE19370)   | 연구기간            | 2018. 05. 01 - 2019. 12. 31 (1년 8개월) |
| 연구책임자   | 이원영   | 연구비(직접비)        | 300,000 천원                           |
| 과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항  |   |                 |                                      |
| (1) 과제목적  |   |                 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1차년도 목표: Sirius Passet 현장에서 야외조사를 수행하고 생태 데이터 수집, 2016년, 2017년에 수집된 동물의 분변, 털, 깃털 등 시료 분석, 기존 현장 실험과정을 보완할 수 있는 모니터링 기법 시도 및 새로운 방법 개발</li> <li>2차년도 목표: Sirius Passet 현장에서 야외조사를 수행하고 생태 데이터 수집, 추위에 적응하기 위한 열 흡수 기작에 관한 동물생태 연구, 2018년, 2019년 현장조사에서 수집된 동물의 분변, 털, 깃털 등 시료 분석 완료</li> </ul> |   |                 |                                      |
| (2) 최종성과  |   |                 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>정량적 성과: 본 과제 단독 사사로 SCI(E) 급 3편 논문 출간</li> <li>정성적 성과: 2018년, 2019년 북그린란드 연구 수행 및 현장 동물시료 분석</li> </ul>  |   |                 |                                      |
| (3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과   |   |                 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>고위도 북극권 동물 개체군 분포 및 밀도에 관한 기초 자료 제공</li> <li>북극 현장 연구를 위한 현장 노하우 및 협력 거점 확보</li> </ul>   |   |                 |                                      |
| (4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항  |   |                 |                                      |
| 평가의견  | 반영사항  | 비고              |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>연차실적 계획서에 제시한 과제 최종목표에 '고위도 북극에 적응한 동물의 적응기작연구'가 주요 최종목표임에도 불구하고 실제 발표에는 포함되어 있지 않아, '적응기작연구'에 대한 결과를 최종 보고서에 포함 필요</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>최종 결과보고서에서 극한 환경 추위 적응에 대한 기작 연구 부분을 포함하였음</li> </ul>  | 연구 보고서 p. 29 참조 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>연구성과의 실용화, 확산 및 극지연구 활성화 기여도를 보고서에 기술 필요</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>연구 과제가 기초 행동생태 연구로 특성화되어 있어 실용화를 언급하기엔 어려움이 있으나, 연구 활용 기여도를 보고서에서 기술하였음</li> </ul>                           | 연구 보고서 p. 37 참조 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>연구결과의 기대 성과와 활용방안을 보고서에 기술 필요</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>기대 성과와 활용 방안을 기술하였음</li> </ul>   | 연구 보고서 p. 38 참조 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>제안연구와 발표논문과의 연관성을 설명 필요</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>제안연구와 발표논문과의 연관성을 보고서에서 기술하였음</li> </ul>   | 연구 보고서 p. 36 참조 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>국제네트워크 연구자와 역할에 대해 구체적으로 제시 필요</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>국제네트워크 연구자(Dr. Arne Nielsen)는 현장 조사를 위한 허가 문제를 맡았으므로 과제에서 역할이 미미하였으나, 추후 공동연구를 위한 발판을 마련한 것으로 판단됨</li> </ul> |                 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>세부 연구목표 구성에 맞는 연구결과와 향후 필요 연구(중/장기)에 대한 내용의 기술 필요</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>극지 적응기작연구에 관한 향후 연구 가능성 및 필요연구에 대한 기술 추가</li> </ul>  | 연구 보고서 p. 29 참조 |                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>그린란드 생물시료를 국내로 반입하는 요령 또는 절차 기재 필요(해당 내용에 대해서는 향후 다른 연구자들에게 중요한 정보라고 사료됨)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>시료 반입 및 절차를 기술하였음</li> </ul>   | 연구 보고서 p. 6 참조  |                                      |

## 주 의

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

