

극끝연구회

이경호, 김유민, 오영근, 최장원, 손지혜, 이혁재, 신명섭, 이응찬

서론: 남극해 해양생태계의 보존 방법: 해양보호구역 설정

기후변화로 인하여 환경보호 및 보존에 대한 인식이 증가함에 국제기구에서 생물다양성 보호 및 보존에 대한 의제가 주요하게 다루어져 왔다. 특히 2002년 남아공 요하네스버그에서 개최된 지속 가능발전 세계정상회의(World Summit on Sustainable Development: WSSD)에서 각국 정상들은 2012년까지 글로벌 차원의 해양보호구역 네트워크를 구축할 것을 약속하는 등 실질적으로 생물다양성 보호를 위한 보호구역 설정에 대한 논의가 시작되었다. 또한 지구보호 보고서(Protected Planet Report)에 따르면 2010년 대비 육지와 내륙 수상 생태계의 보호구역은 2,100만 km² 증가하였으며, 해양 보호구역은 1,880만 km² 증가하였다(2020년 기준). 특히 2023년에는 전 세계 공해의 30%를 해양보호구역(MPA)으로 지정 및 관리하는 다자간 조약인 UN 해양생물다양성 협약(BBNJ) 국가관할권이원 해양생물다양성이 채택되었을 뿐만 아니라 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR)에서 해양보호구역 지정 관련 특별회의를 개최하는 등 공해상에서의 해양보호구역 설정과 그에 따른 과학적 연구에 기반한 유효성 검증에 주목하고 있다.

2016년 남극해양생물자원보존위원회(이하 CCAMLR)는 남극의 로스해를 세계 최대규모의 해양보호구역으로 설정하였으나, 몇몇 국가들의 반대로 영구적인 형태가 아닌 일몰조항(Sunset Clause)을 포함하고 있어 35년간의 과학적·정책적 연구조사 결과를 토대로 MPA 설정 기간 연장이 재검토될 예정이다.

미래 세대를 위해 해양수산 분야는 항상 보존과 합리적 이용이라는 두 대명제사이에서 과학적 연구에 기반한 정책결정이 필요한 분야라 할 수 있다. 그렇기에 과학과 정책을 연구하는 젊은 연구자들이 모여, 함께 논문을 읽고 각 분야에서의 관점에서 토의하고 인류 공동의 유산(Common Heritage of Mankind)인 남극해를 어떻게 보존하고 활용할 수 있는 방안에 대해 연구하고자 한다. 본 연구는 크게 4파트로 구분되며 극지 해양 지표종과 생태 그리고 신기술을 활용한 비침습적 연구 방안과 같은 과학적 연구와 극지 생태계와 국제사회 그리고 시민과학과 같은 사회적 연구로 구성되어 있다.

1. 극지 해양 지표종과 생태 ① - 남극 서식 펭귄 및 조류 생태 연구와 변동

● 아델리펭귄의 특정 지역에서 *Pagothernia borchgrevinki* 먹이 취식을 중심으로 환경 변화가 번식에 주는 영향 분석¹⁾

연구 지역은 동남극에 위치한 Hukuro Cove 지역이며, 1995/96 시즌과 1996/97 시즌 동안 진행되었다. GPS 추적 장치와 잠수기록계를 펭귄에 부착하여 데이터를 수집하였으며, 추적한 개체와 그 외 다른 개체로부터도 위내용물 수집을 실시하였다. 위내용물 수집은 튜브를 부리 안에 넣고 물을 넣어 토하게 하는 방식을 이용하였으며, 4mm 이상의 먹이원만을 이용하였다. 두 종류의 크릴과 물고기, 단각류를 구별하였다.

각 연구 시즌의 바다 얼음 상황은 크게 달랐다. 1995/96 시즌에는 정착빙이 1월까지도 유지된 반면, 1996/97 시즌에는 12월 말에 육지 근처 약 3km의 정착빙이 녹아 있었다. 1995/96 시즌에는

1) Annual and seasonal changes in foraging sties and diving behavior in Adelie penguins. Akiko Kato, Yutaka Watanuki, Yasuhiko Naito. (2003)

굉장히 좁은 범위에 취식지가 몰려 있었던 반면, 1996/97 시즌에는 비교적 넓은 범위에서 취식이 진행되었다. 또 번식이 진행될수록 더 오래 멀리 취식이동하는 것으로 나타났다. 시기에 따른 잠수 깊이는 차이가 없었으나, 얕은 잠수는 시즌이 지날수록 증가하였다. 먹이원의 경우 두종의 크릴과 어린 *Pagothenia borchgrevinki*가 주요 먹이로 확인되었으며, 1996/97에 물고기 크기는 더 작았다. 취식행동과 먹이를 매칭시켰을 때 크릴 취식 시, 더 깊게 오래 잠수하는 것으로 확인되나 취식이동 시간에는 차이가 없었다.

결과적으로 아델리펭귄은 이 지역에서 얼음구멍 등의 제한적인 취식지에 의존하다가 먹이가 고갈되면 더 멀리 이동하게 되는 것으로 보인다. 또한 아델리펭귄의 취식지는 환경이 다른 두 연도에 크게 차이났으며, 이는 펭귄이 환경적 요인에 따라 취식행동을 수정함을 의미한다. *Pagothenia borchgrevinki*는 본 연구에서 중요한 먹이원으로 확인되었으며, 이 물고기의 경우 바다얼음 아래에 서식하기에 이런 정착빙 환경에서 선호하는 먹이로 보인다. 연간 취식 및 잠수에 차이는 존재하지만 추적 방법도 차이가 있어 엄밀히 비교하기는 어렵다.

아델리펭귄은 정착빙이 많이 있는 지역에서는 일반적으로 알려져 있는 남극은암치가 아닌 다른 먹이를 선호하는 것으로 보인다. 기존 보존 조치가 남극은암치와 남극크릴에 집중되어 있으나, 차후에는 추가 연구를 거친 후 *Pagothenia borchgrevinki*을 보존 관리 전략 수립 시 고려할 필요가 있다.

● 바이오로거 기술, 비디오기술, 가속도 자료를 로스해 야생동물 연구에 적용하기 위해 기계 학습 사례2)

연구에서는 South Orkney Islands의 두 턱끈펭귄 번식지에서 두 시즌에 걸쳐서 수행하였으며, 총 96개체의 등에 가속도-잠수 로거와 비디오카메라를 부착하여 수행하였다. 분석은 딥러닝 기술을 이용해서 데이터를 training, validation, test로 나누어서 모델을 제작하고 검증하는 방식을 이용하였다. 데이터는 총 41개체, 151시간의 비디오 자료를 확보했으며, 약 14시간의 잠수 데이터를 확보했다. 두 가지 딥러닝 모델을 이용해 검증하였을 때 각각 0.86, 0.87의 상관성을 가진 높은 정확도의 취식 시도 검증 모델을 형성할 수 있었고, 7%와 2%의 false positive foraging dive가 확보되었으나, 이들은 대부분 1번의 취식 시도 정도로만 판단되었다. 또한 생태적인 관점에서는 대부분의 취식 시도(83%)가 바닥층에서 이뤄졌고, 12%가 상승 중에 이뤄졌음을 확인하였다. 가속도 데이터를 이용한 취식 확인은 비디오로 확인할 수 없는 깊은 잠수나 혹은 오랜 시간의 데이터를 분석하기에 유용하지만, 엄청난 데이터 양 때문에 딥러닝 기술적용이 필수이며, 데이터가 더 수집된다면 먹은 먹이의 분류까지도 가능할 것으로 보인다.

남극해에서의 방대한 데이터 분석을 위해서는 머신러닝을 이용한 연구가 유용하며, 추후 이를 바탕으로 남극해 지표종인 아델리펭귄의 취식효율과 실제 취식량을 파악하여 어획활동 제한에 필요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

● 턱끈펭귄속 펭귄과 같은 해양 생태계 내 상위 포식자 간 경쟁 양상 및 기후 환경 변화가 종에 따라 미치는 영향 분석3)

동소적 번식 개체군은 여러 방향으로 경쟁을 완화시킬 필요가 있고, 그 중 하나로 서로의 활동

2) Identifying prey capture events of a free-ranging marine predator using bio-logger data and deep learning. Stefan Schoombie, Lorene Jeantet, Marianna Chimienti, Grace J. Sutton, Pierre A. Pistorius, Emmanuel Dufourq, Andrew D. Lowther and W. Chris Oosthuizen (2024)

3) Niche partitioning of sympatric penguins by leapfrog foraging appears to be resilient to climate change. Clewlow, H. L., Takahashi, A., Watanabe, S., Votier, S. C., Downie, R., & Ratcliffe, N. (2019)

시간이나 시기를 달리하는 allochrony가 존재한다. 기존 남극반도 지역의 연구에서 남극크릴을 주 식으로 하는 턱끈펭귄속의 두 종, 아델리펭귄과 턱끈펭귄 사이의 경쟁은 시간적인 차이를 고려하지 않아 과대평가 되었었다. 본 논문에서는 번식단계에 따른 두 펭귄 종의 취식행동 차이를 확인하고, 한 종이 다른 종의 취식지를 건너뛰어 취식하는 leapfrog foraging이 나타날지를 확인하고자 하였다. 또한 전지구적 기온 상승에 따른 번식 시기 변화가 두 종의 경쟁에 어떤 잠재적인 영향을 미칠지 확인하고자 하였다.

연구는 4번의 번식기 동안 GPS와 잠수기록계를 부착하여 총 185개체의 펭귄을 추적하였다. 그 결과 각각의 번식단계에서의 취식지는 많이 중첩되는 것으로 보였으나, 같은 날짜를 비교했을 때에는 30-60% 중첩이 감소하였다. 특히 아델리펭귄은 포란기동안 멀리 이동하여 취식하다 육추기에 이동거리가 감소하고, 보육원기에 다시 증가하는 반면, 턱끈펭귄은 포란기 이후 번식단계 진행에 따라 취식이동거리가 계속 감소하는 양상이 나타났다. 잠수 깊이의 경우 턱끈펭귄이 아델리펭귄보다 잠수를 깊게 하였고, 서로 중첩되는 취식지에서 잠수 깊이의 차이가 더 크게 나타났다. 기온 상승에 따라 두 종 모두 1도 증가할 때마다 산란일이 1.2일 빨라졌고, 결과적으로 상대적인 번식 시기의 차이는 나타나지 않을 것으로 예측되었다.

본 논문에서는 기존에 과평가되었던 두 종의 취식지 중첩을 allochrony를 고려하여 보다 확실하여 확인하였고, leapfrog foraging 이라는 중요한 기작이 이용됨을 확인하였다. 또한 잠수에 있어서도 서로 자원 분할하려는 부분을 확인하였다. 다만, 예상과 달리 기후변화로 인한 산란일 변화는 두 종 간의 경쟁에는 큰 영향을 주지 못할 것으로 확인하였다.

인간의 간섭과 기후변화가 펭귄 개체군 변동에 주는 영향은 각 지표종의 생태적 특성을 고려하여 분석할 필요가 있다. 만약 이대로 기후변화가 심화된다면, 턱끈펭귄과 아델리펭귄의 낮은 기후 적응력으로 인해 더욱 치명적인 영향을 받을 것으로 예상된다.

● 안정성 동위원소 이용한 펭귄 먹이원 분석 연구 방향 검토4)

연구지역은 Phillip Island (38°15' S, 145°30' E)이며, 2003/04부터 2011/12년까지 little penguin을 매년 약 70개체씩 샘플링을 수행하였다. 이 샘플링을 통해 혈액 안정성 동위원소와 과거 위내용물 먹이원을 분석하고자 하였으며 일반화선형회귀모델(GLM)을 이용해 분석하였다.

탄소, 질소 동위원소 값과 기존의 먹이원 연구를 통해 꼬마펭귄의 시기별 먹이의 변화를 확인하였다. 꼬마 펭귄은 번식 단계와 번식 연도에 따라 먹이가 변화하는 것을 안정성 동위원소 분석과 위내용물 분석 양쪽에서 공통적으로 확인하였다. 그러나 성별이나 번식성공율과 먹이의 연관성을 크게 나타나지 않았다. 이를 통해, 연간 해양환경 내 먹이원 가용도 변화가 펭귄의 먹이원 이용에 영향을 미치는 것으로 예상했다.

해양환경을 확인하는 것은 실제 해양을 조사하는 것은 인력과 비용 소모적이며, 이를 대체하기 위해 지표종의 취식 및 번식 생태를 확인해볼 필요가 있다. 실제로 해양 지표종의 먹이 변화가 해양환경과 연관되어 있음을 보였다.

● 황제펭귄 개체 모니터링을 위한 위성 자료 분석, 모니터링 모델 형성의 필요성 확인 5)

4) Stable Isotopes (d13C,d15N) Combined with Conventional Dietary Approaches Reveal Plasticity in Central-Place Foraging Behavior of Little Penguins *Eudyptula minor*. André Chiaradia, Francisco Ramírez, Manuela G.Forero and Keith A. Hobson (2016)

5) Remote sensing of emperor penguin abundance and breeding success. Alexander Winterl, Sebastian Richter, Aymeric Houstin, Téo Barracho, Matthieu Boureau, Clément Cornec, Douglas Couet, Robin Cristofari, Claire Eiselt, Ben Fabry, Adélie Krellenstein, Christoph Mark, Astrid Mainka, Delphine Ménard, Jennifer Morinay, Susie Pottier, Elodie Schloesing, Céline Le Bohec &

남극대륙에 위치한 Pointe Geologi와 Atka Bay 두 지역에서 연구 진행하였으며, 해당 지역의 위성자료를 확보할 뿐 아니라 각각 2012년부터 2020년, 2018년부터 2020년까지의 황제펭귄을 2주에 한번 지상에서 계수하였다. 또한 기상 데이터는 설치된 기상관측장비와 기상 모델링을 통해 확보하였다.

황제펭귄은 체감온도가 낮을수록 더욱 높은 밀도를 보일 것이라 예측하였고, 위성데이터에 기반하여 확인하였을 때 비록 낮은 상관성을 보였지만 예측 값을 얻을 수 있었다. 또한 실제 개체군 규모 추정에 있어서는 훨씬 높은 정확도가 확인되었다. 황제펭귄의 연주기에 따라 개체군 변동이 어떻게 진행될지를 추정하여 각 시기에 새끼와 성조의 비율을 추정한 모델을 형성하였다. 모델에는 암컷이 번식지로 돌아오는 시기와 수컷이 돌아오는 시기에 따라서 부화성공율과 새끼 사망률 추정이 함께 포함되었으며, 이를 통해 보다 정밀하게 새끼와 성조 비율을 계산하였다. 해당 모델을 Coulman Island와 Stancomb-Wills 지역에 적용하여 새끼와 성조의 수도 추정을 시도했으며, 실제 현장 관측 결과와도 연관성을 확인하였다.

황제펭귄은 남극해에서 가장 많은 관심을 받고 있는 종이고, 특별보호종으로 제안되고 있다. 그러나 실제 개체군 계수가 제한적으로 이루어져 있고 위성자료의 정확도는 낮은 것으로 거론되고 있다. 해당 논문의 모델은 위성자료로부터 더 정밀하게 개체군 변동을 추정하여 황제펭귄 보전 전략을 세우는데 필요한 자료를 제공할 수 있다.

● Ross Island의 아델리펭귄 번식 개체군 변동을 모니터링하고, 변동 이유 분석 6)

과거 1955년부터 펭귄 번식 개체군 변동을 모니터링한 결과를 바탕으로, 5개 지점에서 큰 경향성 변화를 확인하였고, 이를 관련된 요인을 찾아 분석하였다. 또한 최근 20년에 대해서는 바람세기, 폴리냐넓이, 물고기 포획량 등의 9개 요인을 고려한 모델로 분석을 실시하였다.

펭귄은 1955년 당시에는 스콧 기지가 생기고 인간의 활동이 증가하면서 개체 수 감소 경향이 나타났고, 이는 남극특별보호구역으로 지정되고 본격적인 제재가 진행되면서 다시 개체군 유지 추세로 변화되었다. 이후 포경활동으로 인해 1970년대 아델리펭귄의 경쟁 종인 밍크고래의 개체군이 감소하였고, 이 때문에 펭귄 개체군 증가가 나타났다. 1980년대 초반에 고래 사냥이 금지되면서 다시 고래 개체군은 점차 증가하였으나, 1980년대 90년대의 폴리냐가 넓게 열리면서 펭귄과 고래의 먹이인 크릴 가용도가 커졌고, 때문에 펭귄은 증가된 개체군을 유지할 수 있었다. 2000년대 초반 초대형 유빙이 2년 동안 아델리펭귄의 잠재적인 취식지에 위치하면서 심각한 영향을 받았고, 때문에 개체군 감소가 나타났다. 이후 최근에는 여러 요인들을 고려하였는데 전체적으로 해류의 흐름이 5년 후 펭귄 개체군에 영향을 주었고, 폴리냐의 넓이가 당해연도 번식개체군에 영향을 줄 수 확인하였다.

또 다른 잠재적인 요인들인 펭귄과 물고기 경쟁을 하는 웨델물범 개체군의 경우, 큰 영향을 주지 않았는데, 이는 먹이원이 되는 물고기가 이빨고기가 감소하면 남극은암치가 증가하는 등으로 먹이 가용도가 유지되었기 때문으로 보인다.

해당 논문은 아델리펭귄 연구가 실제로 생태계 보존 전략 수립에 어떻게 이어질 수 있는지를 잘 보여주는 사례이다. 아델리펭귄 개체군 변화와 취식 행동 변화가 해양환경과 하위 생태계변화를 반영할 수 있음을 보여주고, 아델리펭귄이 남극해의 환경 지표종으로서 적절한 역할을 함을 보여주었다.

Daniel P. Zitterbart (2024)

6) Varying population size of the Cape Royds Adelie penguin colony, 1955.2020: a synthesis Ainley, D. G., Morandini, V., Barton, K., Lyver, P. O. B., Elrod, M., Larue, M. A., & Pennycook, J. a synthesis. (2024)

● 아델리펭귄의 먹이사냥을 추적 연구하여 연도별 및 번식 시기별 비교 및 장기적 변화 분석⁷⁾

킹조지섬은 남극반도에 있는 섬 중 하나이며, 아틀레이섬(62°13' S, 58°56' W)은 남서쪽에 있고 맥스웰만(Maxwell Bay)이 인접해 있다. 해당 연구는 2019/2020 ~ 2021/2022 시즌 동안 진행됐으며 GPS, 가속도계, 수압계, 온도측정 센서를 57개체에 부착해 데이터를 취득했다.

57개체에서 총 205번의 먹이사냥, 106,482번의 잠수, 45,179번의 사냥잠수 데이터를 얻었다. 육추기 후반이 육추기 초반에 비해 아델리펭귄의 사냥시간이 더 길었고, 총거리와 최대 거리가 두 배 이상으로 길었으며, 최대 잠수깊이도 더 깊었다. 그만큼 활동반경도 육추기 후반이 초반에 비해 컸다. 하지만 잠수 빈도는 육추기 후반이 육추기 초반에 비해 감소하였으며 다른 지표들은 육추 시기에 따라 유의미한 차이가 생기지 않았다.

같은 시즌에서 시기별 차이뿐만 아니라 다른 시즌에서도 아델리펭귄의 사냥지표는 차이가 났다. 19/20 시즌과 21/22 시즌 각각의 육추기 초반을 비교했을 때 총거리, 최대거리, 기간, 밀집한구역의 넓이, 최대잠수 깊이에서 차이가 났다. 19/20 시즌이 21/22 시즌보다 번식지 가까이에서 아델리펭귄의 먹이사냥이 이뤄졌다.

이러한 번식기 초반과 후반에 아델리펭귄의 먹이사냥이 달라지는 이유는 번식이 진행될수록 요구되는 에너지 또는 먹이 가용성이 달라지기 때문에 이러한 변화에 맞춰서 아델리펭귄의 적응과 조정의 결과로 볼 수 있다. 특히 턱끈펭귄의 경우 새끼들의 먹이요구량이 증가하면 번식지에서 더 멀리 사냥을 나가는 것으로 현재 알려져 있다. 또한, 연도별 크릴의 이동과 변동이 있으므로 연도별로 아델리펭귄의 사냥지표가 변한 이유는 자신들이 주로 먹는 크릴이 주로 있는 장소가 변하거나 양이 달라졌기 때문으로 추측된다.

펭귄의 먹이 사냥은 시기에 따라 변화하며, 남극해 보존 전략 수립 시에도 시기에 따라 보존 전략이 달라질 필요가 있다. 펭귄의 취식이 집중되는 번식기 후반에 더욱 강한 보존 조치가 취해지는 것이 적절하다.

● 마카로니펭귄과 턱끈펭귄 사이에서 발생하는 경쟁에 따른 취식 행동 변화를 분석⁸⁾

대서양 남쪽 남극 인근에 있는 Bouvetoya(54°25'S, 3°20'E) 섬에서 서식하는 90마리의 마카로니펭귄과 49마리의 턱끈펭귄을 대상으로 14/15, 17/18 시즌 두 차례 연구를 진행했다. 펭귄을 대상으로 GPS와 TDR 로거를 부착했으며, 추가로 혈액도 수집하였다.

번식기 초반과 번식기 후반으로 나눠 턱끈펭귄과 마카로니펭귄의 사냥지역을 조사했다. 마카로니펭귄은 번식기 초반 평균 150km, 번식기 후반 평균 60km만큼 나가 사냥했지만, 턱끈펭귄은 번식기 초반 평균 52km, 번식기 후반 평균 15km로 마카로니펭귄에 비해서 번식기 초반과 후반 시기에 상관없이 짧다는 것이 밝혀졌다. 사냥 면적은 마카로니펭귄이 턱끈펭귄보다 6배 더 넓었다. 턱끈펭귄의 번식기 후반 사냥 면적은 2015년이 2018년보다 3배 더 넓은 지역에서 사냥했다.

번식기 초반과 후반을 비교했을 때 두 펭귄 종 모두에게서 사냥 거리와 사냥 면적의 감소가 있었다. 하지만 두 종은 번식기 후반이 초반보다 잠수에 대한 투자를 많이 했다. 특히 턱끈펭귄의 경우 변동이 심했고 마카로니펭귄은 큰 변동이 있지는 않았다. 이러한 변화는 번식기 후반으로 갈수록 새끼 먹이급여로 인한 잠수 투자가 늘어난 모습이며 마카로니의 경우는 주로 먹는 먹이원이 얕은 수심에서 서식하고 먹이원의 변화가 적다 보니 큰 변동이 나타나지 않은 것으로 나타났다.

7) Using latent behavior analysis to identify key foraging areas for Adélie penguins in a declining colony in West Antarctic Peninsula. Machado-Gaye, A. L., Kato, A., Chimienti, M., Gobel, N., Ropert-Coudert, Y., Barbosa, A., & Soutullo, A. (2024)

8) Foraging behaviour of sympatrically breeding macaroni (*Eudyptes chrysolophus*) and chinstrap (*Pygoscelis antarcticus*) penguins at Bouvetøya, Southern Ocean. Narvestad, A., Kovacs, K. M., Lydersen, C., & Lowther, A. D.(2022)

남극에서도 해양지표종 간의 경쟁과 상호작용에 따라 취식 생태가 변화할 것으로 예상된다. 남극 펭귄 중 한 종인 턱끈펭귄에서의 사례를 바탕으로 펭귄 간의, 펭귄과 물범과의 경쟁을 고려하여 보존 조치 범위를 결정할 필요가 있다.

1. 극지 해양 지표종과 생태 ② - 남극 서식 기각류 생태 연구와 변동

● 남극해 지표종 중 하나인 웨델 물범의 식단에 대한 소개 9)

총 105개와 39개의 배설물이 1998년 1월~3월, 2000년 1월~3월에 수집되었으며 주변 해변에서 휴식을 취하고 있는 두 성별의 어린 표본과 성체 표본 그룹 주변에서 수집되었다. 연구 시작 전에 오래된 배설물을 제거하여 연구 기간 동안 생산된 신선한 배설물만 수집하였다. 샘플은 최소 0.54mm 크기의 체를 사용해 세척하여 먹이 잔해물을 분리하였으며, 먹이 잔해물은 참조 자료 및 종 설명을 바탕으로 가능한 낮은 분류 수준까지 식별하였다. 물고기는 이성을 통해 식별하였으며, 가장 많이 발견된 이식을 세어 물고기의 수를 추정하였다. 남극 크릴의 수는 눈, 꼬리 부위인 텔슨, 그리고 껍질의 건조 중량을 기준으로 추정하였으며, 다른 갑각류는 외골격 잔해물을 통해 식별되었다. 부리와 눈 렌즈를 통해 오징어와 문어 종을 식별하였으며,복족류와 이매패류는 껍데기 또는 판을 통해 식별하였다.

식별한 먹이원은 먹이 종의 빈도, 수 질량을 분석하였고, 두 연도 사이에서 발견된 먹이 종의 수와 질량을 비교하였다.1998년 평균 먹이 질량은 678.4g이었으며, 2000년 은 737.1g이었다. 샘플 당 먹이 개수는 1998년 평균 41.7개, 2000년 27.3개였다. 두 시즌 간 질량 및 먹이 개수는 통계적으로 유의미한 차이는 없었다.

웨델물범의 식단은 다양했으며, 물고기, 연체동물, 갑각류가 가장 자주 발견된 먹이였고, 두해 여름 시즌동안 주요 먹이로 나타났다. 문어와 오징어가 주 먹이원이었으며 오징어의 경우 2000년 샘플에서 질량이 더 크게 나타났다. 1998년에는 *Pleuragramma antarcticum*, *Chaenodraco wilsoni*, 그리고 *Gobionotothen gibberifrons*가 주요 물고기였으며, 2000년에는 *Chionodraco rastrospinosus*, *P. antarcticum*, *C. wilsoni*가 주요 물고기로 확인되었다. 두 시즌 간 먹이로 잡힌 물고기들의 길이에 유의미한 차이가 있었으며, 특히 *C. wilsoni*와 *P. antarcticum* 종의 경우 두 시즌 동안 길이에 큰 차이를 보였습니다. 그러나 다른 종의 경우 통계적으로는 표본 수가 부족했습니다. 갑각류인 남극 크릴과 등각류(*Glyptonotus antarcticus*)가 일부 샘플에서 발견되었으나, 이들의 질량 기여도는 크지 않았다. 다양한 연체동물과 함께 두족류는 물고기 다음으로 중요한 먹이였으며, 이 중에서도 오징어의 기여가 상당한 것으로 나타났다.

웨델물범은 남극해 지표종 중 하나이며, 무엇을 먹는가를 파악하는 것은 결국 어떤 해양 환경이 있는지를 추정하는 하나의 단서가 된다. 웨델물범의 각 먹이가 어떤 환경을 의미하는지 파악함으로써 지표종으로서의 역할을 더욱 확실히 할 수 있을 것이라 기대된다.

● 북극 고래의 잠수 행동 특성을 확인하여 해양생태계 변화가 상위포식자의 취식 전략에 줄 수 있는 영향을 분석10)

West Greenland의 Disko Bay에서 2009 - 2010년 3월부터 5월까지 발견되는 성체 북극고래 44마리를 대상으로 Wildlife Computers사의 MK10과 Splash 바이오로거를 부착하여 위치 및 잠수 자료 데이터를 획득하였다. 추적 데이터의 위치 정보를 바탕으로 발생할 수 있는 오류값을 필터링 제거하였으며(부착 1일차 및 마지막 데이터, Argos location class “Z locations”, 비현실적 유영 속도, 비현실적 유영 각도“), 누락된 위치 정보는 보간하였다. 잠수 행동 데이터는 6시간 간격으로 4개의 시간대를 확인, 이외에 잠수 빈도, 주요 잠수 수심 bins 설정, 24시간 기준 시간별 잠수 빈도, 잠수 시간, 잠수 속도, 주요 잠수 수심, 최대 잠수 수심을 확인하였다. 24시간 기준 시간별 잠수

9) The diet of the Weddell Seal *Leptonychotes weddellii* at the Danco Coast, Antarctic Peninsula. R Casaux, A Baroni, A Ramón (2006).

10) Identification of Potential Foraging Areas for Bowhead Whales in Baffin Bay and Adjacent Waters. Nynne Hjort Nielsen, Kristin Laidre, Rasmus Stenbak Larsen and Mads Peter Heide-Jørgensen (2014)

빈도를 ≤ 2 , ≤ 3 , ≤ 4 , ≤ 5 로 각각 설정하여 주요 취식지 확인에 주요 잠수 빈도 값의 기준을 확인 비교하였다. 그리고 확인된 주요 취식지와 그 외의 장소 간 잠수 특성인 24시간 기준 시간별 잠수 빈도, 잠수 시간, 잠수 속도, 주요 잠수 수심, 최대 잠수 수심을 비교하였다.

북극고래의 요각류의 취식과 24시간 이내 시간당 잠수 빈도 $\leq 2-5$ 회, 잠수 시간, 잠수 형태(U-Shape) 등을 바탕으로 취식 잠수 특징을 정립하였다. 24시간 이내 시간당 잠수 빈도가 ≤ 2 , ≤ 3 , ≤ 4 , ≤ 5 의 각각의 경우에서 취식지를 잘 설명할 수 있는 시나리오를 선정, 시간당 잠수 빈도가 3개 이하인 경우 가장 적절한 시나리오로 판단 되어 이를 바탕으로 9개의 취식지를 확인하였다. 9개의 취식지 내에서도 잠수빈도, 유영속도, 주요 잠수 수심, 최대 잠수 수심을 비교하였으며, 뿐만 아니라 취식지 외 지역과의 비교도 수행하였다. 취식지 내에서의 잠수 특징들의 유의한 차이가 일부 확인이 되긴 하였으나, 이는 회유 경로상에서 발생할 수 있는 북극고래의 생활사와 연관된 차이로 추측된다. 특히나 부착 개체들 중 암컷의 비율이 81%로 대부분을 차지하는데, 로거 부착 사이트인 Disko Bay는 암컷의 출산 및 수유를 위한 주요 장소로 활용됨에 따라 그 빈도가 높게 확인되었다. 9개의 주요 취식지와 그 외의 장소와의 잠수 특징의 차이를 비교하였을 때 취식지에서 시간당 잠수 빈도가 적고, 취식 시 잠수 시간이 길고, 이에 따라 유영 속도는 느리게 나타났다. 주요 잠수 수심은 주요 취식지가 얇게 나타났으나 최대 잠수 수심은 취식지에서 더 깊게 나타났으며, 위치정보에 따라 Disko Bay에서 회유를 시작하는 시기를 확인하였을 때 위의 잠수 특징과 회유 시작 시기는 북극고래의 주요 먹이원인 Copepod의 번성 시기와 분포 수심의 차이에 따른 전략적 선택의 결과로 추측된다.

북극고래의 먹이는 Copepod이기 때문에 당시의 해양 환경의 변화와 식물플랑크톤의 번성에 따라 분포와 번성 시기가 달라진다. 이는 취식지와 취식 행동의 변화를 일으킬 수 있다. 즉, 북극고래는 해양 환경의 변화에 따라 취식 전략을 달리하므로 환경 변화의 지표종으로 활용 될 수 있음도 시사한다

1. 극지 해양 지표종과 그 생태 ③ - 극지 서식 기타 생태계 연구와 변동

● 남극 세종과학기지에서 진행되고 있는 갈색도둑갈매기 연구와 관련하여 안정성 동위원소 분석과 추적 결과를 결합 보완할 수 있는 방법¹¹⁾

킹조지섬 포터반도 (Stranger Point)에 위치한 갈색도둑갈매기들의 이동과 먹이이용을 혈액 안정성 동위원소와 GPS 추적으로 수행하였다. 연구 대상은 포란기에 포획하였으며, 3-7일 후 재포획하여 로거를 회수하고 채혈을 진행했으며, 혈액 안정성 동위원소는 약 일주일간의 먹이를 반영하는 혈장과 약 한달의 먹이를 반영하는 혈구로 나누어서 분석하였다. 이를 추적 결과와 함께 분석하면서 포란기, 초기 육추기, 후기 육추기로 시기를 나누어서 수행하였다.

그 결과 갈색도둑갈매기는 해양을 이용하는 개체와 펭귄 번식지를 이용하는 개체가 뚜렷하게 구별되었다. 갈색도둑갈매기들의 먹이는 이용하는 장소와 관계없이 유사하게 나타났으며, 시기가 지날수록 낮은 영양단계의 원양성 먹이(남극크릴)의 비중이 크게 나타났다. 이는 갈색도둑갈매기가 펭귄 번식지에서 위장 속 남극크릴을 이차 취식으로 이용한다는 것을 시사한다. 그러므로 해양에 머문 시간과 혈장 동위원소의 상관성이 나타나지 않았다.

남극도둑갈매기는 생태계 내 포식자이자 청소부로 역할을 하고 있는 종으로, 도둑갈매기의 먹이 연구를 통해 펭귄 번식지 상황을 유추하고 남극해 전반의 환경을 짐작할 수 있을 것으로 보인다.

11) Apparent mismatch between stable isotopes and foraging habitat suggests high secondary ingestion of Antarctic krill in brown skuas. Maricel Grana Grilli, Agustina Di Virgilio, Pablo A. E. Alarcon, Yves Cherel (2023)

● 남극 상위 포식자 바닷새와 물범의 중간 경쟁과 먹이 변화에 따른 섭식 전략 변화 분석 12)

South Orkney Island (SOI) 지역에서 1996-2000년 여름에 연구된 포식자 11종 -아텔리펭귄, 턱끈펭귄, 젠투펭귄, 사우스조지아가마우지 (South Georgia Shag), 알락풀마갈매기 (Cape Petrel), 흰풀마갈매기 (Snow Petrel), 남방큰풀마갈매기 (Southern Giant Petrel), 남방큰재갈매기 (Kelp Gull), 갈색도둑갈매기 (Brown Skua), 남극물개, 웨델물범의 먹이원 정보를 종합하였다. 이 먹이원들이 중첩의 여부는 Tyler (1972) index를 사용하였고, 먹이의 유사도는 similarity index S (Linton et al. 1981)를 사용하였다.

연구 결과, 연구된 종들의 먹이 중첩은 25.3%~36.7% 였으며, 어류, 크릴 오징어가 주로 중첩되었다. 어류의 중첩된 정도는 8.1%~28.1% 범위였다. 턱끈펭귄과 아텔리펭귄의 먹이 중첩이 가장 높았으며, 젠투펭귄은 다른 포식자 종들과 중간 정도의 중첩 값을 가졌다. 사우스조지아가마우지와 흰풀마갈매기의 먹이는 주로 어류로, 중첩 정도가 높았지만, 종 수준에서는 중첩되지 않았다. 남방큰풀마갈매기는 전적으로 펭귄을 섭식하여, 다른 포식자 종들과 먹이가 중첩된 정도가 낮았다. 크릴과 어류를 모두 섭식하는 젠투펭귄과 웨델물범은 주로 섭식하는 어류의 종이 다른 것으로 확인되었고, 이것은 포식자 종들의 서식지가 분리되어 있음을 보여준다. 웨델물범의 주요 먹이원은 어류이며, 표영성과 저서성 종을 포함한다. 웨델물범은 개체수가 적은 저서성 자원보다 풍부한 표영성 종을 선호할 것이다. *Pleuragramma antarcticum* (남극은암치)는 남극 연안에 우점하며 여러 포식자의 주요 먹이원으로 알려져있지만, 연구 지역에서는 낮은 빈도로 이용된다. 남극반도에서도 북쪽인 SOI에서 남극은암치의 개체수가 적다. 연구 기간동안 연안에서 어류를 섭식하는 사우스조지아가마우지의 먹이원 중 *G. gibberifrons*의 중요성이 증가하였는데, 이는 어업으로 감소된 개체수가 회복되었음을 시사한다. 아텔리펭귄과 턱끈펭귄의 먹이 유사도가 가장 높았고, 그 중 어류는 젠투펭귄과 알락풀마갈매기와 유사하다. 남극물개와 웨델물범과는 예상보다 유사도가 낮다. 젠투펭귄의 크릴 섭식 정도는 SOI 내의 크릴 풍부도를 반영한다.

South Orkney Island는 해양보호구역 후보 지역 중 하나로, 실제로 어떤 범위에서 어떤 보존 조치가 이루어져야할지 과학적 근거를 바탕으로 제안될 필요가 있다. 이러한 먹이원 연구는 어업 제한 조치가 어떤 물고기를 대상으로 이루어져야하는지 제안하는데 하나의 참고 자료를 제공할 수 있다.

● 남극 갈색도둑갈매기의 먹이원(펭귄) 조성에 대해 자원의 가용성 및 번식 주기, 시기에 따른 먹이원 변화 분석 13)

아남극권 South Orkney 제도의 Laurie Island에서 2000/2001, 2001/2002, 2002/2003, 2003/2004, 2004/2005년의 번식 시기에 pellet을 채집하여 먹이원을 파악하였다. 해당 연구 지역에는 갈색도둑갈매기 약 200쌍이 서식하고, 주요 먹이원으로는 아텔리펭귄과 턱끈펭귄이 서식 및 번식하고 있었다. 기존 연구를 토대로 갈색도둑갈매기의 번식 주기를 3단계 - 포란기, 초기 육추기, 후기 육추기로 나누었고, 펭귄의 번식 주기는 5단계 - Egg, Eggs and small chicks, Small chicks and large chicks, Large chicks and fledged chicks, Fledged chicks로 나누었다.

연구 결과, 갈색도둑갈매기의 펠렛에서 총 14개의 먹이원이 확인되었으며, 그 중 펭귄의 출현 빈도가 가장 높았고, 그 다음은 알과 flying bird 순서였다. 갈색도둑갈매기의 먹이원은 본종의 번식 주기에 따른 유의한 차이를 보였다. 갈색도둑갈매기는 다른 시기보다 자신의 포란기동안 펭귄 알을 많이 소비하였는데, 이는 운반이 어려워 성조가 직접 섭취했을 것으로 보인다. 갈색도둑갈매

12) Diet overlap among top predators at the South Orkney Islands, Antarctica Bertolin, M. L., & Casaux, R. (2019)

13) Variation in diet composition during the breeding cycle of an Antarctic seabird in relation to its breeding chronology and that of its main food resource. Grilli, M. G., & Montalti D. (2015)

기의 후기 육추기 동안에는 운반이 쉬운 펭귄과 다른 조류의 유조를 섭식하거나 자신의 유조에겐 전달할 것이다. 갈색도둑갈매기의 먹이원은 펭귄의 번식 주기(5 periods)에 따른 유의한 차이를 보였다. 펭귄의 알과 유조가 동시에 존재할 때(E+SC), 예상보다 알의 소비가 많고 유조의 소비가 적었다. 이는 펭귄 부모가 알보다 유조에 대해 더 강한 방어(투자)를 하기 때문으로 보인다. 펭귄의 포란기(E)에 갈색도둑갈매기는 다른 종의 유조를 많이 섭식하다가, 펭귄 유조가 부화한 후(E+SC, SC+LC)에는 그 비율이 감소한다. 갈색도둑갈매기는 펭귄의 큰 유조(FC)를 예상보다 적게 소비하였는데, 이는 큰 크기 때문에 포획이 어렵고, 한번 포획하면 오래 먹기 때문일 것으로 보인다. 펭귄 성조의 깃털은 출현 빈도가 높는데, 이는 사체를 먹이로서 소비하였거나 내장 청소를 목적으로 섭식했을 가능성이 있다.

남극도둑갈매기의 먹이 분석은 해양 지표종인 펭귄의 번식 환경을 반영할 수 있으며, 이차적인 해양 환경 지표종으로서 역할을 할 수 있다. 해당 논문을 통해 실제 도둑갈매기와 펭귄의 번식지에서 긴밀한 상호작용을 확인할 수 있다.

● 북극여우의 중요한 먹이원 개체군 변화가 먹이 변화에 준 영향을 분석¹⁴⁾

연구는 허드슨만 연안에 생성된 북극여우 굴에서 진행되었으며, 2011년부터 2018년까지 90개의 굴에서 매년 4월에 샘플을 수집하였다. 총 1800개의 배설물을 수집하였으며, 그 중 959개의 샘플을 선정하여 먹이원 DNA 분석을 실시하였다. 이와 동시에 피식종인 레밍과 그 외 초원밭쥐, 들쥐 등의 풍부도를 매년 조사하였다. DNA 분석 결과 먹이원으로 사용되는 종의 그룹을 먹이원 중 가장 큰 비중을 차지하는 설치류를 중심으로 구분하였으며, 그 외에 북극곰이나 물개, 철새를 별도로 그룹화하여 분석하였다. 분석 방법으로는 선형 회귀 분석을 사용하였으며, 이를 통해 레밍 밀도가 다른 먹이원의 소비 정도 비율에 얼마나 영향을 미치는지 분석하였다.

2011년에서 2018년동안 모든 해에서 소형 포유류가 북극여우 먹이원의 82~100%를 차지하는 주요 먹이종으로 검출되었다. 연구 기간 내에서 레밍의 등지 밀도가 가장 낮았던 2015년에 소형 포유류가 차지하는 먹이원 비율이 가장 낮았다. 먹이원에서 해양생물 사체 등의 해양 자원과 철새가 차지하는 비중은 샘플을 수집한 굴에서 해안까지의 거리가 증가함에 따라 줄어들었지만 레밍의 비율과도 음의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 레밍의 증가와 감소에 가장 많은 영향을 받는 것은 동일한 소형 포유류인 들쥐 종이었으며, 레밍의 개체수가 줄어든 해에는 초원들쥐가 레밍의 대체원으로 사용되었다.

먹이원 개체군 변화는 남극 해양에서 주로 해양 환경 변화로 인한 동물성 플랑크톤 먹이원인 크릴의 변화로 나타난다. 북극여우에서의 사례와 같이 크릴의 개체군 변화가 펭귄에게 미치는 영향을 추측할 수 있는 하나의 참고자료를 본 연구가 제공한다.

14) Arctic fox winter dietary response to damped lemming cycles estimated from fecal DNA. Megan Dudenhoefter, James D Roth, Lucy K Johnson, Stephen D Petersen (2008)

2. 新기술을 활용한 생태계 연구 방법 - 드론, 인공위성과 같은 비침습적 연구방법

- 본 연구는 geofence 기술을 공동 육아를 하는 조류 개체군의 서식지 혹은 넓은 먹이 사이트를 가지는 번식 중인 조류에게 확장시켜 적용¹⁵⁾

해당 연구는 미국/멕시코 국경을 가로질러 Energía Sierra Juárez Wind-energy Project(ESJWP) 반경 40km로 진행되었다. geofence 시스템을 통합하기 위해 개발한 송신기 모델은 Cellular Tracking Technologies™, LLC의 CTT-1050a-PM 시리즈 GPS-GSM(2세대), 고급 조류 원격 측정 시스템이다. 반수가 가능하며 태양광 충전 리튬 이온 폴리머 배터리 팩으로 구동되며 수명은 5년 이상이다. GPS 기록 간격은 15분으로 설정하고 기기가 부착된 개체가 가상 경계 안으로 진입하면 30초 간격으로 기록, 경계 밖으로 나가면 다시 15분 간격으로 기록되게 설정하였다. 성능 테스트를 위해 이전 연구에서 추적한 *Gymnogyps californianus*의 비행 경로를 따라 GPS 태그가 부착된 헬리콥터를 날렸다. 비행 속도는 기존 추적에서 기록된 *Gymnogyps californianus* 개체군의 평균 비행 속도(15km/h)를 기반했다. 비행 경로는 ESJWP와 교차했으며 ESJWP 사이트 주변 20km와 40km 간격으로 원형의 가상 경계를 GSM/GPS 태그 서버에 프로그래밍했다. 지오펜스 태그는 정확한 위치 데이터를 제공했으며 가상 경계를 통과한 후 몇 분 이내에 SMS 경고 메시지를 전송했다. 비행 중인 태그가 바깥 경계를 지나고 메시지를 받기까지 평균 9분 14초, 안쪽 경계에 진입했을 때는 1분 17초가 걸렸다.

추적된 기존 *Gymnogyps californianus*의 평균 비행 속도로 바깥 경계에서 ESJWP 사이트까지 도달하는데 3~4시간, 최대 비행 속도인 47km/h로 ESJWP로 직접 날아갔다면 43~46분 가량 걸렸을 것으로 첫 번째 경계에 진입해 경고 SMS를 받은 후 충돌을 방지할 완화 조치를 시행할 수 있는 충분한 시간을 제공한다.

해당 연구는 수천에서 수만마리가 함께 번식하는 펭귄뿐 아니라 인간이 접근하기 힘든 남극 지역에서 연구를 하기 위한 무인항공기 기술 활용에 대한 방법론적인 제언을 한다.

- 드론이 mixed-species flocks에 접근할 때 위험을 인지하고 도피 반응을 보이는 거리 (flight initiation distance)를 조사하여 남극의 드론 조사가 조류에게 부정적인 영향을 최소화 할 수 있는 지침 제공¹⁶⁾

연구는 호주 동부에 위치한 Moreton Bay 지역에서 2020년, 2021년, 2022년동안 드론 비행이 240회 진행되었다. 주로 바닷새가 포함된 혼합 무리에 드론을 접근하였고 전반에 걸쳐 무리에 속한 종, 개체수, 거리, 속도 등 자극의 종류 등 변수와 그에 따라 새가 날아오르는 거리를 기록했다. 또한 드론 종류에 따른 교란을 확인하기 위해 크기, 색상, 소음 강도가 다른 4개의 드론 ((Inspire 2, Mavic 2 Pro, Phantom 4 Pro 및 Mavic Mini)을 사용했으며 드론 로그 파일을 사용하여 각 비행 내내 드론의 동작을 정량화했다.

종이 혼합된 무리에서 감시자 역할을 하는 종이 있는 무리와 없는 무리에서의 종 반응을 비교했을 때, 종마다 반응은 현저히 달랐으며 대부분의 종이 60m 이상의 수직 거리에서 접근할 때 비행 가능성이 20%로 낮았다. 그러나 가장 민감하게 반응했던 알락꼬리마도요의 경우 교란 발생 시 무리에서 항상 먼저 날았고, 알락꼬리마도요가 난 후 10초 이내에 다른 새들도 비행했다. 그 중 흑고니는 같이 나는 경우가 적었고 큰뒷부리도요는 거의 매번 같이 날았던 것을 보아 알락꼬리마도요가 몇몇 종 내에서 주위를 경계하는 감시자 역할을 수행했을 수도 있다. 이전 연구에서는 체

15) An autonomous GPS geofence alert system to curtail avian fatalities at wind farms JK Sheppard, A McGann, M Lanzone (2015).

16) Drone-induced flight initiation distances for shorebirds in mixed-species flocks JP Wilson, T Amano, RA Fuller (2023)

중이 큰 종이 교란에서 더 민감하다는 결과를 제시했지만 본 연구에서는 각 종의 체중과 무리의 크기가 유의미한 교란 요인이 아니었다.

상대적으로 더 크고 시끄러운 드론(DJI Inspire 2)이 나머지 3대의 드론보다 새가 비행할 가능성이 더 높았다. 나머지 3대의 경우 수평거리가 가까울수록, 비행 수직 거리가 짧을수록 교란이 커졌으며, 드론의 상승 속도와 가속도는 테스트 범위 내에서 새가 날 가능성에 유의한 영향을 미치지 않았다. 이전 연구에서는 고정익 드론이 회전익 드론보다 더 많은 교란을 유발한다고 하지만 모양은 같지만 크기와 소음이 다른 회전익 드론 간에도 차이가 있다는 것을 확인했다.

이 연구를 바탕으로 연구자들이 무인항공기를 활용하여 생태계 연구를 수행할 때 생태계에 미치는 영향을 최소화할 수 있으며, 이를 지침으로 삼을 것을 권장할 수 있다.

● GPS 추적 장치 부착으로 인한 행동 변화가 수집된 데이터에 편향성 확인¹⁷⁾

영국 웨일즈 해안의 Skerries islands에서 진행된 연구 당시 섬에는 3,800 쌍으로 추정되는 번식 개체들이 있으며, 10마리에게 tag를 부착했다. 대조군은 Nest nT : GPS tag와 다리 밴딩된 개체(TA)와 잡히지 않은 파트너(TB) Nest nF : 다리 밴딩만 된 개체(FA)와 잡히지 않은 파트너(FB), Nest nU : 해당 연구 년도(2016)에는 잡히지 않았지만 적어도 한마리가 전년도에 밴딩되어 개체 식별이 가능한 등지로 설정했다. 등지에 있는 시간과 먹이 공급 횟수 등 등지에서의 행동을 tag 부착 48시간 전후로 나눠 관찰했다. Tag가 부착되지 않은 새들은 보트를 사용해 직접 관찰했다.

태그가 달린 새는 48시간 이내에 등지에서 보낸 시간이 33.4%, 밴딩만 된 개체와 포획하지 않았던 개체는 각각 43.1%, 44.1%였다. 48시간 후, 태그가 달린 개체가 등지에 머문 시간은 14.4%인 반면, 밴딩만 된 개체와 포획하지 않았던 개체는 24.1%, 25.0%였다. 따라서 태그를 부착한 개체들은 밴딩만 하거나 포획하지 않은 개체에 비해 등지 출석률이 약간 감소했다.

먹이 공급률 변화에서는 48시간 이내에 tag개체와 밴딩 개체간에 큰 차이를 보이지 않았으나 48시간 이후로는 tag개체와 밴딩개체는 먹이 공급률이 감소했으나 포획하지 않았던 개체들은 높은 먹이 공급률을 유지했다. 이 결과를 보아 GPS tag와 밴딩이 즉각적인 영향보다는 48시간 이후로 영향을 미쳤을 수 있다. 그러나 개체가 아닌 등지별로 비교했을 때는 먹이 공급률에 차이가 없었는데 tag나 밴딩이 부착된 개체의 먹이 공급률이 감소하더라도 파트너 새가 더 많은 먹이를 제공하므로써 먹이 공급률이 큰 문제로 이어지지 않았다.

연구로 인한 생태계 교란은 항상 문제가 되는 부분이며, 연구자들은 교란을 최소화하기 위해 노력해야 한다. 본 연구는 바이오로거를 이용한 연구에서 실제로 펭귄 생태 교란이 유효하지 않았음을 확인하였으며, 남극해 환경 과학을 위한 지표종인 펭귄 연구가 기존의 방식이 적합함을 뒷받침해준다.

● 기존의 추적장비에 카메라를 부착하여 펭귄들이 잠수할 때 수중에서 어떠한 일들이 발생하는지를 확인¹⁸⁾

시그니섬에 있는 고월레이반도(Gourlay Peninsula, 60°43' S, 45°35' W)에서 포란기 21개체, 육추기 37개체의 턱끈펭귄을 대상으로 2018/19 시즌에 연구를 진행했다. 모든 개체에 GPS와 TDR 로거를 부착했으며 새끼 부화 이후 22개체에 비디오카메라까지 부착했다.

17) Effect of GPS tagging on behaviour and marine distribution of breeding Arctic Terns *Sterna paradisaea* A Seward, RC Taylor, MR Perrow, RJ Berridge, KM Bowgen, S Dodd, I Johnstone, (2021)

18) Predicting foraging dive outcomes in chinstrap penguins using biologging and animal-borne cameras. Manco, F., Lang, S. D., & Trathan, P. N. (2022)

비디오카메라를 부착해서 턱끈펭귄이 먹이원이 크릴에 어떻게 접근하는지를 살펴봤다. 한 번의 잠수당 크릴을 사냥하는 횟수는 평균적으로 5.8회로 최대 31번까지 크릴 사냥을 한다. 크릴 무리를 만나는 횟수는 평균 7.2회다. 그리고 시간당 111마리의 크릴을 사냥하고 최대 355마리까지 사냥을 했다. 턱끈펭귄은 주로 상승하면서 먹이사냥을 했다. 3분의 2 이상이 최대로 내려갔다 올 라오면서 먹이사냥이 기록됐다.

그리고 예측모델을 통해서 데이터를 정리했을 때 크릴사냥과 관련해서 상승속도 지표와 주변잠수 빈도가 크릴 때 만남 예측모델에서 중요한 예측인자로 나타났다. 빠른 상승속도는 턱끈펭귄의 먹이활동과 저장된 산소를 소비하는 것을 반영하면서, 빠르게 올라와 시간을 감축시킬 수 있다는 이러한 이점을 가질 수 있다.

해당 연구는 비디오 카메라를 활용한 연구를 통해 해양 환경과 지표종의 취식생태 연구에 어떤 기여를 할 수 있을지 제안하며, 남극해 환경 연구에 적용할 방안을 참고할 수 있다.

● ‘Complete continuous recording’ 과 ‘Instantaneous Recording’ 두 관찰 방법론 결과 비교하여, 번식 중인 야생조류를 대상으로 해당 방법론 적용 가능성에 대한 고려¹⁹⁾

제주 동부의 성산포 지역에서 2003년 12월부터 2004년 3월까지 월동하는 30여 개체의 저어새를 대상으로 관찰이 진행되었다. 관찰은 한 개체의 행동을 연속해서 기록하는 Complete Continuous Recording과 휴식하는 무리의 행동을 일시에 관찰하는 Instantaneous Recording 방식을 병행하였다. Complete Continuous Recording의 경우 1시간 중 각각 5, 10, 20, 60분간 관찰하며 결과를 비교하였으며, Instantaneous Recording의 경우 5, 10, 15, 20, 30, 60분 간격으로 진행되었다. 저어새들의 행동은 Resting, Comfort, Locomotion, Foraging, Alarm, Social으로 나뉘어 정리하였다. 관찰과 분석은 두 명의 연구자가 진행하였으며, Kappa coefficient 분석을 통해 inter- and intra-observer reliability를 확인하였다.

분석 결과 Continuous Recording의 경우 1시간 중 5, 10, 15, 20, 60분을 관찰한 결과간의 차이가 없는 것으로 나타났으며, Scan Sampling 결과 또한 standard technique로 여겨지는 60분간의 연속 관찰 결과와 차이가 없는 것으로 나타났다. resting과 foraging의 경우 모든 관찰 방법에서 standard technique과 correlated 한 것으로 나타났다. Locomotion의 경우 20분간의 focal sampling 방법만 correlation이 있는 것으로 나타났다. Comfort의 경우 모든 scan sampling 방법과 15, 20분 간격의 focal sampling과 correlation이 있는 것으로 나타났다. Alarm의 경우 모든 focal sampling과 5, 10분 간격의 scan sampling이 correlated 한 것으로 나타났으며, Social의 10분 이상의 focal sampling과 10분 이하의 간격으로 scan 하였을 때 적합한 correlation을 갖는 것으로 나타났다.

일반적으로 행동 관찰은 standard method와 비슷한 평균, 높은 상관성을 지녀야 한다. 따라서 해당 연구에선 최적의 월동기 저어새의 행동 분석을 위해 시간당 20분 이상의 관찰이 필요하다고 밝히며, 필드 조건에 따라 최소한 10분 미만의 간격을 갖는 scan sampling이나 15분 이상의 focal sampling이 필요하다고 결론지었다. 다만, 월동기 저어새들의 행동은 약 90%가 Resting이며, Locomotion, Foraging, Alarm, Social 과 같은 행동의 경우 각각 2%정도로 극단적으로 편향되어 있다. 이렇게 극단적으로 편향된 행동은 적합한 관찰 방법론 선택에 영향을 줄 수 있으며, 행동의 비율이 변하는 경우 관찰에 필요한 시간과 간격이 변할 수 있음을 인지해야 한다.

19) Measuring the Behaviors of Wintering Black-faced Spoonbills (*Platalea minor*): Comparison of Behavioral Sampling Techniques. CHANG-YONG CHOI, HYUN-YOUNG NAM, AND Woo-SHIN LEE (2007)

● 드론을 이용해 북극 물범의 서식지 모니터링과 지속적인 모니터링을 통한 분포 변화 측정²⁰⁾

미국의 프리빌로트 섬과 오테 섬을 위주로 연구가 진행되었으며, 이 섬들의 북쪽 해안에 서식하는 물개를 고정익 UAS를 사용하여 모니터링하였다. 두 대의 고정익 UAS는 모두 가시광선과 자외선 카메라를 장착하였으며, 중을 동정할 수 있을 정도의 낮은 높이로 경로비행하였다. 정사촬영을 통해 섬의 지형을 방위, 고도, 해안으로부터의 거리 등 8개의 조건의 지도를 제작하여 종 분포와 연관지어 분석하였다.

결과적으로 오테 섬의 북쪽 해안 서식지에서 *Callorhinus ursinus* 511마리와 *Phoca vitulina* 132마리, 추가적으로 남쪽 해안에서 20마리를 식별하였으며, *Callorhinus ursinus*는 한 서식지에 밀집하여 분포하였고, *hoca vitulina*는 분산되어 여러 지역에 밀집해 분포하는 것으로 나타났다. 모델링 결과 두 종 모두 분포 형태와 서식지의 지형 사이에 연관성이 높은 것으로 나타났으며, *Phoca vitulina*은 경사가 낮은 곳을 선호하였으며, *Callorhinus ursinus*는 고도가 낮고 지형 복잡성이 낮은 지역을 선호하는 것으로 나타났다. 또한, 개체간의 거리를 분석하였을 때, 실제적으로 몸길이 이내로 접근하는 물범에 대한 공격성이 관찰되었지만, 이웃 개체와의 거리 분석을 실시한 결과 이 사실이 반영되지 않았다. 이는 2m로 구축된 모델의 한계로 추정되었다.

기존 사진 측량 데이터를 통해 물범은 일반적으로 모래, 갯벌, 자갈, 빙하 얼음 및 바위 산호를 포함한 해안 근처에서 휴식하는 것을 선호하는 것으로 나타났다. 드론을 활용한 이번 연구에 따르면 물범은 $6.4\pm 4.6^\circ$ 정도의 경사가 낮은 곳을 선호하는 것으로 나타났으며, 경사가 높을수록 발견될 확률이 감소하였다. 반면 물범의 휴식 장소와 해안으로부터의 거리는 큰 연관성이 없는 것으로 예측되었는데, 이는 오테 섬의 지리적 특징으로 인한 결과로 예상된다. 오테 섬의 대부분의 해안선은 물에 인접하지만, 경사가 큰 해안 절벽 형태로 이는 물범의 접근을 제한하며, 해안 이외의 내륙 정보에 대한 데이터가 충분히 수집되지 않았기 때문이라고 예측된다.

해당 연구를 통해 두 물범 종에 대한 지리적 분포는 확인하였지만, 추가적인 데이터 수집과 모델 선택을 통해 발견된 휴식 및 이동 지역 분석이 필요할 것으로 보인다. 남극해에서의 물범 연구 역시 단순한 위치 파악으로 끝나는 것이 아니라, 해양환경 조건에 따라서 어떤 지역에 서식하고 이동하는지로 나아가야 할 필요가 있음을 확인할 수 있다.

● 직접 관찰과 DNA 샘플 수집 등 다양한 방법을 복합적으로 사용하여 북극여우의 개체수를 추정하는 논문으로 각 추정 방법의 장단점을 확인²¹⁾

첫 번째 직접 관찰을 통한 최소 생존 개체수 추정을 통해 추정한 개체수는 12마리였으며, 유전자 분석을 통해 최소 30마리의 북극여우 개체를 감지하였다. ear tag를 부착한 개체의 유전자 정보를 활용하여 두 개체수 추정 방법을 결합하였을 때 최소 생존 개체 수는 36마리로 추정되었다. 그러나 포획-재포획 방식의 마이크로세틀라이트 방식은 총 42마리로 앞선 두 방법보다 많은 개체수를 추정해냈다. 또한 recapture 방식에서 직접 관찰을 통한 개체수 추정 방식보다 DNA 분석을 통한 방법에서 CI가 낮은 것으로 나타났다. 또한, 겨울철 기상 조건과 낮은 관찰 확률, 야간 활동 등으로 직접 관찰을 통한 개체수 추정이 어려웠으며, 따라서 개체군의 크기가 과소평가되었다고 판단하였다. 배설물 수집을 통한 DNA 분석 방법이 지표종의 개체군 추정에 더 효율적인 접근 방식이라고 주장한다.

20) Drones reveal spatial patterning of sympatric Alaskan pinniped species and drivers of their local distributions. Gregory D. Larsen gregory.larsen@duke.edu, Alexander C. Seymour, Erin L. Richmond, Lauren M. Divine, Erin E. Moreland, Everette Newton, Josh M. London, and David W. Johnston(2022)

21) Estimating population parameters in a threatened arctic fox population using molecular tracking and traditional field methods. T. Meijer, K. Norén, P. Hellström, L. Dalén, A. Angerbjörn (2008)

- **바이오로거 부착으로 남극에서 해양포유류 개체 수 관리, 서식지 중요도, 분포 밀도의 분석 연구의 수행의 가능성을 논의22)**

국내 서해 백령도의 물범바위와 연봉바위에서 관찰되는 점박이물범을 지속적으로 모니터링 하면서 주요적으로 발견되는 시기 및 분포 양상을 기록하였으며, 바이오로거 부착을 위하여 야생개체들에게 지속적으로 접근하여 적응을 유도하였다. 2021년 8월에 대략 2년생으로 보이는 1개체를 직접 포획하여 Wildlife Computers사의 SPOT-293A 바이오로거를 부착하여 위치 자료 데이터를 획득하였다. 추적 데이터의 위치 정보를 바탕으로 발생할 수 있는 오류값을 필터링 제거하였으며 (Kalman filter algorithm) 위치 정보를 QGIS의 'Heatmap' plugin을 사용하여 Kernel density estimation (KDE)를 통해 50% home range와 95% utilization range로 구분하였다.

점박이물범의 바이오로거 부착 이틀 경과후 107일간 1,556의 위치정보가 수신되었으며 백령도의 물범바위와 연봉바위의 반복적인 이동이 확인되었다. 그러나 12월 중순이 넘어가면서 데이터 수신을 멈춤에 따라 12월 이후 번식지로의 회유 경로 파악에는 실패하였다. 다만 8월 부착 이후부터 12월 회유 시작 전까지 백령도의 서식지 활용 범위를 Kernel density estimation (KDE)의 50% (home range)와 95% (utilization range)를 파악하였다. 해당 기간 동안에는 주요적으로 물범바위와 연봉바위의 선호성이 높게 나타났으며, 그 중 연봉바위의 선호가 더 높은 것을 확인하였다. 또한 백령도의 북서쪽을 활용하는 경우는 드물게 확인되었다.

본 연구에서 제안하는 해양포유류 연구 방법은 남극해의 기각류를 대상으로도 적용할 수 있을 것으로 생각되며, 해당 연구에서 제안한 것과 같이 이동경로와 더 긴 기간의 추적을 통해 환경과 생태의 연관성을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

- **해양 생태계 내 상위 포식자의 주요 서식 및 취식지의 안정동위원소 분포 양상을 남극 해양 생태계에서도 적용 가능여부와 실현 가능성 및 문제점에 대하여 논의23)**

연구지역은 Southern Indian Ocean의 Marion Island (46°54' S; 37°45' E)와 Prince Edward Island에서 2015/16 - 2017/18 8월부터 3월까지 8종의 조류를 대상으로 번식기에 GPS 추적 및 안정동위원소 분석 샘플 수집 실시하였다. 추적한 데이터들을 바탕으로 취식지 모델을 형성하였으며, 수집한 혈액 샘플로부터 혈장을 추출, 지질 제거 및 보정식 적용 과정을 통한 안정동위원소 값 측정했다. 종별 동위원소 값을 GPS 추적 데이터의 결과와 지역적 위치에 따른 매칭을 수행하여 시간별 cell의 가중치를 부여했다. 이를 통해 동위원소 값과 위경도(비행조류) 또는 해안선으로부터의 거리(잠수조류) 간의 상관관계(Pearson's correlation)를 이용하여 구배 확인 및 Isoscape 제작하였다.

비행 조류 중 grey-headed albatross와 wandering albatross에서 탄소 동위원소와 위도 간의 상관관계, wandering albatross와 southern giant petrel에서 질소 동위원소와 위도 간의 상관관계, sooty albatross의 경우 경도와 상관관계를 확인하였으며, 잠수 조류인 펭귄에서는 해안선과의 거리에 따른 동위원소 값의 상관관계가 확인되지 않았으나 rock hopper penguin에서 일부의 상관성을 보였다. 이는 즉, 비행조류의 경우 위도의 변화에 따라 동위원소의 변동 요인이 작용하였을 것이며, 잠수조류의 경우 해안선으로부터의 거리에 따라 동위원소의 변동 요인이 약하게나마 일부 작용하였을 것으로 추측된다.

22) First satellite tracking of a free-ranging spotted seal (*Phoca largha*) from the Baengnyeongdo Island. Hyun Woo Kim, Namgyu Uh, Seulhee Lee (2023)

23) A critical assessment of marine predator isoscapes within the southern Indian Ocean. Carpenter-Kling, T., Pistorius, P., Reisinger, R., Cherel, Y., & Connan, M. Movement ecology (2020)

위도에 따른 안정동위원소 값의 구배는 취식 먹이원의 차이로 인한 것이며, 다른 종간의 비슷한 결과 값은 같은 먹이원의 취식 가능성도 있지만 다른 먹이원이나 비슷한 동위원소원을 가지는 먹이원을 취식할수도 있기 때문에 주의가 필요하다. 또한 subtropical front의 생산성이 높은 eddy를 중심으로 남쪽과 북쪽의 지리적 차이에 따른 동위원소 값의 차이를 보였습니다. 또한 이러한 차이는 식물플랑크톤이라는 생산자의 동위원소 값에서 기인하는 것으로 분석 시기와 방법의 차이로도 볼 수 있을 뿐만 아니라 lipid 제거 방법에 따라 기존 연구와의 차이가 발생하였을 가능성도 염두해야 한다.

잠수조류의 경우는 이동 거리에 따른 위경도 변화가 적으므로 해안선과의 거리와 연결지어 분석하였으며, 그 결과 나타난 안정동위원소 값의 구배는 취식생태와 지역 특징에 따른 차이로 평가된다. 해당 펭귄 종은 benthic 및 autochthonous와 pelagic 및 allochthonous로 구분된다.

본 논문에서는 안정동위원소 분석 기법과 GPS 데이터 결과를 함께 적용하여 Isoscape를 제작하였으며, 이는 많은 분석이 이루어지지 않았고 해양환경자료의 기반으로 제공될 수 있기에 필요한 연구임을 시사한다. 이를 바탕으로 해양생태계 내의 동위원소 지도를 활용하여 상위포식자까지의 연결성 또한 추적이 가능하다. 결과적으로 이를 바탕으로 남인도양에서 적용된 해당 기법을 남극에서 적용 가능성 및 필요성을 확인하였다.

3. 극지 해양 생태계와 국제사회 ① 극지 연구의 발전상과 남극 조약 체제의 변천사

● 남극조약 체제 내에서의 남극해양생물자원보존협약의 해양보호구역 설정 사례

남극조약은 냉전 당시 소련과 미국의 동맹국간 영토 분쟁이 심화되는 것을 방지하고자 체결되었다. 1957년에서 1958년까지 12개국은 남극대륙에서 국제 지구물리 관측년(IGY: International Geophysical Year)을 진행하였으며, 당시 참여국들은 남극대륙의 보존 및 지속적 관리가 중요하다는 과학자들의 의견을 채택하여 분쟁이 심화되고 있던 남극대륙의 영유권 주장을 모두 동결(Frozen)하여 해당 대륙과 연근해는 오직 평화적·과학적 목적으로만 활용할 수 있게 되었다.

1959년에 체결된 총 14개의 조문으로 이루어진 남극조약은 국제기구의 체제 구축 및 목적 그리고 금지되는 사항들만을 언급하고 있을 뿐 실질적이며 구체적인 보존·보호 조치는 포함되어 있지 않다. 그렇기에 공해상의 기름유출 사례 등 심각한 해양환경 문제가 발생했던 시기 남극해 생물자원의 보존 및 관리를 위해 1982년 남극해양생물자원보존협약(CCAMLR: Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources)이 체결되었으며 해당 협약의 주요 목적은 남극 해양 생물자원의 보존이며, 여기서 ‘보존(Conservation)’이라는 용어는 ‘합리적인 사용(Rational Use)’을 포함하고 있다(협약 제2조). 해당 협약을 통해 협약내 해역에서 관리지역, 특별지역, 하위 지역 등 다양한 구역을 설정하여 가능한 어업량의 한계를 설정하고 관리해 왔다.

흥미로운 부분은 앞서 언급한 바와 같이 협약에 명기된 보존이라는 의미는 합리적 이용이 포함(협약 제2조 2항)하고 있기에 해당 용어의 해석에 관하여 지속적인 갈등상황이 발생해 왔으며, 특히 해양보호구역(MPA: Marine Protected Area)지정에 관하여 회원국들간 이해관계가 상충되어 왔다(Jacquet et al, 2016). 국제적인 추세에 발맞춰 CCAMLR의 위원회1) 또한 2002년부터 MPA 설정에 관한 본격적 논의가 시작되었다. 특히 남아공 요하네스버그에서 개최된 세계 정상회의의 해양보호구역 설립 권고사항을 기준으로 남극해에서의 적용가능성을 검토하였으며 2004년 CCAMLR 회원국을 중심으로 MPA 지정 가이드라인을 수립하여 2009년 서남극해 사우스오크니 제도(South Okney Islands)에 첫 해양보호구역을 설정하기에 이른다.

● 남극 거버넌스에 주요 논쟁 주제인 ‘합리적 사용(Rational Use)’라는 용어에 대한 의견이 무엇인지에 대해 살펴봄 24)

해당 연구는 어떻게 CCAMLR의 남극 해양보호구역 및 협약 전체에서 주요 쟁점이 된 ‘합리적 사용’ (Rational Use)와 관련해서 이들에 대한 인식이 CAMLR 협약(1982)부터 지금까지 해석이 되고 사용이 되었는지에 대해 살펴보고 있다. 특히 몇몇 국가들에 있어서 이 합리적 사용이라는 개념을 ‘어업의 권리’로 여기고 있는데, 이는 처음에 CAMLR 협약 당시 그런 내용으로 인식하지 않았다는 것을 강조한다. 이 당시에는 합리적 사용이라는 단어가 한 번 사용되었긴 하였지만, 이 당시에는 환경적 관심에서 ‘보존’의 아이디어가 들어갔었음을 지적한다.

UNESCO의 Conservation and Rational Use of the Environment의 리포트에서 두가지 목표가 CAMLR 협약의 핵심이 되었는데 첫째, 이 보고서가 천연 자원의 최적의 사용을 측정하기 위한 환경 기반 접근 방식 지지했다는 점, 둘째, 환경 관리는 건전한 과학적 연구에 기반해야한다는 확고한 신념에 기반하여 CAMLR 협약이 진행이 되었음을 지적하고 있다. 즉, 당시의 내용을 살펴봤을 때, 보존이라는 뜻은 합리적 자원 관리의 한 측면으로, 자원을 개선, 오용으로 인한 피해를 개선하기 위한 활동으로 여겨졌다고 주장한다. 그리고 중요한 자원의 보존과 합리적 활용을 보장하기 위한 조치가 이뤄지는 것은 과학 프로그램에서 남극 생물자원의 보존과 현명한 관리를 위한 데이터와 정보를 제공하는 것을 첫째 목표로 삼았다고 한다.

그러나 1980년대와는 다르게, CCAMLR의 발족 이후 이에 대한 해석이 어업의 권리와 합리적 사용이 일치해 되었다고 주장한다. 이러한 움직임은 CCAMLR 내에 남극에서 원양 어획을 하는 국가들이 추가로 참가하면서 이들의 주장이 강해진 것이라 주장한다. 이처럼, 남획 위험 방지에 초점을 두고 그 어느 문서에서도 합리적 사용이 무제한적 어업과 권리를 의미한다고 명시되지 않았으며, 어업을 지지하는 내역은 없지만 사실 명확하게 규제 권한에 대해서 언급하지는 않았다는 배경에서 CAMLR 2조 3항의 내용에 대한 잘못된 해석을 불러일으키고 있다는 것을 언급한다.

● 남극 크릴의 경제성, 남극 크릴 연구 중요성, 그리고 이들에 대한 연구비용 지원의 현황을 제시하며 범지구적 남극 크릴 연구가 확장되어야 한다는 근거 25)

본 문헌은 남극 크릴 어업의 경제성, 이익, 그리고 현재 만들어낼 수 있는 과학적 정보를 만들어 내는데 필요한 비용(자금 지원)들에 대해 리뷰를 하는 것에 중점을 두고 있다. 우선 기존 연구와 같은 경우, 크릴 어업에 대한 경제성을 분석하지 않음과 동시에 크릴에 대한 연구가 더더욱 필요하고, 이를 위해 연구 자금의 필요성을 주장하고 있다 이를 위해 크릴에 대한 연구가 어떻게 진행되고 있는지에, 그리고 그 연구가 어디에서 지원을 받는지 살펴보고, 크릴 관련 특정 연구로 확인된 지출과 크릴 산업과 관련된 어선 비용 및 수익과 비교를 하여 민간 부문 기업들이 연구 비용에 기여할 수 있는 능력 평가, 그리고 이들로부터 지속 가능한 크릴 연구 자금 지원 제안을 알아보고자 하였다.

이 크릴에 대해서 각 국들은 처리하는 방식은 각자 다르며 (한국과 같은 경우 오일 추출 공장, 우크라이나 같은 경우는 냉동 크릴로 가공), 아시아 태평양에서 더 각광을 받게 되며, 총 4억 7천만 달러 정도의 시장규모를 지니고 있다. 크릴 어선 또한 노후화 되었지만, 수익성이 총 매출의 31% 남기는 등 경제적 이익이 막대한 것으로 나타났다.

현재 크릴 연구와 관련해서 1천3백만 달러의 연구 지출 중, 정부 기여가 가장 크며, 그 다음으로 민간, CCAMLR 순으로 지원이 되고 있다는 것을 보여주고 있다. 크릴 관련 연구에 대한 지출은 어업 매출 대비 4.3%에 그치고 있으며, 연구 비용은 다른 어업 부문에 비해 상대적으로 높지만, 이는 남극이라는 지역의 특성을 지적하고 있다. 이렇게 순이익을 상당히 얻는 크릴 산업의 행위자들은 연구에 투자하는 비용이 적은 편이며, 자발적으로 크릴 연구를 지원하고 있음을 지적한다. 그러므로 연구 자금의 확대와 더불어 국제기구, 정부 등을 기반으로 하여 크릴 연구 전략의 수립

24) ‘Rational Use’ in Antarctic Waters. Jennifer Jacquet, EliBlood-Patterson, Cassandra Brooks, David Ainley (2015).

25) Research Funding and Economic Aspects of the Antarctic Krill Fishery. Rod Cappell, Graeme MacFadyen, Andrew Constable (2022)

이 필요하고, 과학적 근거를 바탕으로 어업 관리 결정을 내리도록 해야 한다고 주장하고 있다. 그리고 민간 부문과 정부의 적극적인 연구 투자와 CCAMLR의 연구 효율 평가를 하기 위한 노력이 필요하다.

3. 극지 해양 생태계와 국제 사회 ② CCAMLR와 해양보호구역

● 남극 거버넌스에 주요 논쟁 주제인 ‘합리적 사용(Rational Use)’라는 용어에 대한 의견이 영유권이 특정되지 않은 공해상의 해양보호구역 설정은 일반적인 보호구역 설정과는 다른 구조를 가질 수 밖에 없다. 일반적으로 해양보호구역은 생태적, 과학적, 역사적, 문화적 필요성이 있기에 보호를 위해 해양에 일정한 구역을 설정하여 보존조치 하는 것을 의미하기에 기존에 있는 생물자원을 수확(Harvesting)하는 행위는 금지 또는 제한될 수밖에 없다. 이는 해양법의 근간이 되는 자유해론(Mare Liberum)²⁾이 보장하는 공해상의 어업권리를 저해하는 요소가 될 수도 있었으나 공해상에서의 남획문제는 결국 UN차원에서 공해어업협정³⁾을 구축하여 남획 예방 및 지속가능한 어업을 위해 국제기구 차원에서 노력해 왔다.

그렇기에 해양보호구역에 대한 개념은 해양환경 관련 국제기구와 국제규모의 비정부단체들을 중심으로 개발되고 발전되어 왔으며 MPA 개념 및 실효성은 기관별로 다르게 활용되었고 설정된 MPA 규모와 이행 정도 그리고 효과성은 지역별로 천차만별이라 할 수 있다. 국가적 협력에 기반하여 남극대륙의 환경보호를 성공적으로 관리해온 남극조약체제 내에서도 MPA 설정은 많은 논쟁이 되어 왔으며 가이드 라인이 구축된 2004년을 기점으로 총 5건이 제안되었고 그중 2건만이 채택된상태이다.

CCAMLR 총회와 과학위원회의 공식적 회의록을 기반으로 사례분석한 결과 다음표와 같이 정보를 비교분석할 수 있었다. 총 5건의 남극해 MPA 사례들을 통해 미지정된 요소들을 1)경제적 요소: 어업활동 규제 요소와 합리적 이용, 2)국제법적 요소: MPA 지정에 대한 CCAMLR의 권한, 3)과학적 요소: MPA 지정에 필요한 과학적 연구, 4)외부적 요소: 이해관계 당사자의 개입 및 영향과 같이 총 4가지로 분류할 수 있었다. 본 연구에서는 해당 4가지 요소를 기반으로 남극해 해양보호구역 설정의 이해당사자를 정부를 추가하여 총 5개로 분류하여 연구를 진행하고자 한다.

● 남극의 추가적인 해양보호구역이 설립 및 북극 적용 가능한 엄격한 해양 보호와 철저한 평가를 할 수 있는 방안에 대해서 고려 26)

해양 생태계의 보호를 하기 위한 주요한 정책으로 전 세계에는 해양보호구역을 시행하고 있다. 그러나 이러한 범지구적인 해양보호구역에 대한 실질적 보호성에 대해서 평가는 진행되지 않았으며, 이에 대한 평가를 위해 설문조사를 진행하였고, 각자의 이메일로 발송되었다. 이들에 대한 257개 MPA를 설정하여서, 해당 해양보호구역에서 발생하는 어업 수준이 어느정도인지에 대해 4가지로 스케일로 문항을 나눠서 조사를 진행하였다. 낮은 번호에서 큰 번호 순으로 어업이 많이 발생하고 있음을 보여주고 있다. 대상은 학자, 공무원, NGO, 지역 어민, 기자 등에게 보내졌으며, 후속 메일을 보내서 이에 대해서 응답률을 제고하고자 노력하였다. 그리고 이들에 대한 실질적인 보호수준에 대한 답변이, 해당 MPA들이 설정된 정도와 부합하는지에 대해 비교하였다.

총 27%의 대상자들의 답변이 회신되었고, 비교적 어민과 기자의 응답률을 낮은 한편, NGO, 학계, 공무원들은 높은 응답률을 보였다. 그리고 학계와 NGO는 대다수 보통 정도의 어업(moderate)의 답변이 많았는데도 불구하고, 정부 공무원과 어민들은 ‘light fishing’의 정도로 응답을 하는 등, 계층들 사이에서도 답변이 갈라졌다. IUCN과 비교를 했었을 때, no fishing과 light fishing은 보호수준이 높을수록 더 감소했음을 보여주고 있다. 보호수준이 높은 MPA일수록 어업 활동이 확연히 줄어들고 있었으며, 실질적인 인식 또한 다르게 나타나지 않았다.

26) The ‘Paper Park Index’: Evaluating Marine Protected Area Effectiveness Through a Global Study of Stakeholder Perceptions. Rod Cappell, Graeme MacFadyen, Andrew Constable (2022)

지역적으로 상반된 결과가 나타났다. 북극과 북미 지역에서는 보호가 상대적으로 잘 일어나고 있고, 남미, 카리브해, 오세아니아, 동남아, 인도양에서는 어업활동이 비교적 활발하다고 평가를 하였다. 지역별로 MPA가 다르게 인식되고 있음과 동시에 실질적인 보호를 받지 못하는 Paper Park의 가능성 또한 있음을 시사한다. 실제로 IUCN의 정도와 해양보호구역의 인식 정도의 차이를 합산했을 때, 약 29%가 Paper Park로 의심된다고 결론을 지었다.

4. 극지보존을 위한 시민들의 움직임: 시민과학

● 남극에 서식하는 물범과 남극 과학 연구에 시민 과학이 도움이 될 수 있는지에 대해 확인하기 위해 기존 사례를 분석²⁷⁾

해당 논문은 Statelites Over Seals(SOS) 프로젝트를 통해서 남극 웨델 물범의 서식지를 분포 연구에 활용했는지에 대해서 설명한다. 기존 연구의 경우 접근성이 떨어지는 곳에서 웨델 물범의 개체 수를 산정하기 어려운데, SOS 프로젝트는 이를 극복하고자 위성 이미지 - 약 111만개와 시민 과학을 통해 웨델 물범의 분포를 파악하고자 하였다. 시민 과학자와 같은 경우, 환경단체, 학교 등을 통해서 다양한 계층의 사람들 - 32만 5천명- 선정하였고, Tomnod 라는 플랫폼을 활용했다. 그리고 일부 이미지의 경우, 시민 과학자들과 전문가들이 교차 검증을 하여서 유사성을 검토하였다. 그리고 시민 과학자들에 대해 confusion matrix를 사용하였는데, 이 중, 물범이 있다고 투표했지만 물범이 없는 경우가 높았지만 물범이 없다고 투표했는데 실제로 물범이 존재하는 경우를 평가하였다.

시민 과학자들은 98%의 정확도를 기록하였고, 웨델 물범은 로스해 지역에서 많은 서식 분포가 확인되었음을 나타냈다. 그리고 오차와 관련하여, 시민 과학자들이 잘못 표기한 경우도 있었지만, 시민들이 물범을 놓치지 않고 적극적으로 참여했다고 한다.

시민 과학을 통해 남극 웨델 물범의 서식지 분포를 추정하였으며, 이들에 대해서 물범의 개체 수를 정밀하게 추정하는 작업을 더 효율적으로 할 수 있는 의의를 보였다고 밝혔다. 그리고 남극 웨델 뿐만 아니라, 다른 야생동물 생태계들을 조사하는 방법론으로 부상하였으며, 기후 변화 가속화 지역에서 생태계 모니터링에 함의와 기초 자료로서 활용될 수 있음을 보여줬다고 평가한다. 물론 이들을 개선할 사항들 또한 존재했는데, 먼저 더 좋은 이미지의 품질이 요구되며, 시민 과학자들이 이런 생물들을 더 용이하고 정확하게 식별하도록 하는 교육 자료와 예제를 제시해야 함을 언급하고 있다.

● 남극에 서식하는 펭귄과 남극 과학 연구에 시민 과학이 도움이 될 수 있는지, 그리고 오류를 어떻게 줄일 수 있는지 확인하기 위해 분석²⁸⁾

본 논문은 Penguin Watch 프로젝트의 수행 과정과 결과를 논의하며, 이들은 Time Lapse 카메라 촬영 - 일정 시간 간격의 이미지 촬영을 통해 펭귄의 서식지 상황을 장기적으로 기록하여 현장 밖에서 데이터 수집을 하였음을 밝히고 있다. 이를 통해 펭귄의 번식 주기, 개체수, 서식지 패턴 등을 이해할 뿐만 아니라, 기후 변화의 영향을 알 수 있다고 언급한다.

본 프로젝트는 이러한 대규모 이미지 데이터를 Zooniverse 플랫폼을 활용하였고, 총 2012년에서

27) Engaging the Crowd in Remote Sensing to Learn About Habitat Affinity of the Weddell Seal in Antarctica. Michelle A. LaRue, David G. Ainley, Jean Pennycook, Kostas Stamatiou, Leo Salas, Nadav Nur, Sharon Stammerjohn, Luke Barrington (2019).

28) Time-lapse imagery and volunteer classifications from the Zooniverse Penguin Watch project. Fiona M. Jones, Campbell Allen, Carlos Arteta, Joan Arthur, Caitlin Black, Louise M. Emmerson, Robin Freeman, Greg Hines, Chris J. Lintott, Zuzana Macháčková, Grant Miller, Rob Simpson, Colin Southwell, Holly R. Torsey, Andrew Zisserman, Tom Hart (2018).

2014년까지 촬영한 약 7만 3천 장의 이미지를 사용했다고 한다. 남극에 총 15개의 카메라를 설치, 일반적으로 하루에 한 번씩 이미지를 촬영하고, 여름에는 1분 간격으로 이미지를 촬영하는 등, 특정 시간(아침 7시에서 저녁 8시)의 펭귄 활동을 하루도 빠짐없이 서식지 변화를 파악할 수 있다고 주장한다. 카메라는 금속기둥에 고정하여 외부적 환경의 영향을 받지 않도록 노력했다. 그리고 Zooniverse를 통해 시민 과학자들에게 이미지 분류를 맡겼으며, 펭귄의 성조, 유조, 알, 기타 등의 개체 유형을 분류하였다. 그리고 한 시민 과학자가 이미지에서 특징을 식별하면, 여러 명의 다른 시민 과학자들에게도 해당 이미지를 확인하도록 하여 평가에 정확성을 높이고자 하였다. 그리고 시민 과학자들이 동일한 개체에 대해 위치 표시가 약간 다를 수 있다는 것은, 하나의 그룹으로 묶는 클러스터링 방법을 사용하여서 동일 개체를 식별했다고 여기는 형식으로 클릭 수가 적을수록 오류로 간주하는 식으로 신뢰도를 높였다.

시민 과학자들의 결과와 실제 결과를 비교한 결과, 펭귄 성조에 대해서 시민 과학자들이 더 많이 클릭한 것으로 나타났으며, 이는 펭귄 개체군, 혹은 성조의 개체가 많을수록 개체 구분에 있어서 전문가와의 차이가 더 났다고 설명한다. 밀집할수록 오히려 성조의 개체를 과대평가를 함을 보여준다. 이렇게 시민 과학자들이 펭귄의 특징들에 대해서 적극적으로 응해줬으나, 큰 개체군에서는 분류 기준 및 훈련이 필요하다고 분석하였다.

● **시민 과학이 만들어 내는 생태 데이터들에 대한 신뢰성 제고 방안에 대해 논의²⁹⁾**

본 연구는 다수의 시민 과학자들에 의해 생성된 데이터를 신뢰 가능한 데이터로 만들기 위한 방식을 개발하고 검증하고자 하였다. Snapshot Serengeti의 카메라 트랩 프로젝트를 활용하여 시민 과학자들이 전문가 개입 없이 얼마나 신뢰할 수 있는 데이터 품질을 생성할 수 있는지 분석하고자 하였다. 약 151만개 세렝게티 국립공원의 야생 동물 이미지를 수집하여 약 2만 8천명의 시민 과학자들이 분류하도록 하였다. 각 이미지는 평균 27명의 시민 과학자들이 확인했으며, 이미지에 나타난 동물의 종류와 수량등을 분류했고, 다수결의 알고리즘을 활용하여 여러 시민과학자들의 응답을 집계, 최종 분류 결과를 도출하였다. 이들에 대한 신뢰성은 전문가가 검증한 약 3천 8백개의 이미지를 기준으로 검증했으며, Evenness, Fraction Support, Fraction Blank의 지표로 계산, 일치도를 비교하였다.

연구 결과, 전문가와 시민과학자들의 데이터를 검증했을 때, 98%의 일치율을 보였다. 일반적인 종에 대해서는 높은 정확성이 나타났지만, 희귀한 종에 대해서는 오류(긍정 오류와 부정오류)를 더 많이 범하였다고 한다. 또한 5명의 시민과학자들의 분류 했을 때 90%, 10명 이상이 분류 했을 때 95%, 20명인 경우에는 98%의 정확도에 달하였고, 희귀종인 경우에는 더 많은 시민 과학자들이 필요하다. 이러한 결과를 바탕으로, 데이터의 높은 신뢰도를 만들기 위해서는 시민과학자들의 다수 응답의 집계가 필요하다고 한다. 그리고 시민 과학이 신뢰 가능한 데이터를 생성할 수 있는 잠재력 - 특히 대규모 생태계 보전 모니터링 및 다양한 종 모니터링 등에 있어서 효율성과 범위를 확장할 수 있다.

● **생태계 서식 지역의 고해상도 위성 영상을 통해 접근 어려운 곳의 모니터링의 사례와 같**

29)A generalized approach for producing, quantifying, and validating citizen science data from wildlife images Alexandra Swanson, Margaret Kosmala, Chris Lintott, and Craig Packer (2016)

이 극지 연구에서도 시민들의 참여가 중요하다는 것을 뒷받침³⁰⁾

해양 보전의 필요를 위해 해양보호구역들이 설립되고 있고, 생물다양성을 유지하고자 하지만, 국제 해양의 공간에서는 아직 설립이 덜 되었고, 단순한 지정에만 그치지 않는 노력이 필요하다. 특히 남극과 같은 접근이 어려운 곳에 있어서 고해상도 위성 영상(VHR)을 기반으로 하여 남극 해양보호구역의 관리와 정책 지원에 기여할 수 있음을 주장한다. 이미 웨델 물범, 펭귄 등에 개체 수를 조사하는데 사용이 되었고, 인공지능 기술을 활용하여 현재 고래 탐지 방법을 개발하고 있으며, 이 영상은 중 간 경쟁으로 서식지 분포에 영향을 미친다는 선행 연구가 있는 등 남극에서 다양하게 활용되고 있음을 언급한다.

VHR을 통해서 남극 생태계 지표 중의 모니터링 통합을 통해 비용의 효율화를 통해 경계설정과 효과성 평가를 할 수 있다고 평가한다. 그리고 이러한 VHR 모니터링은 국제 협력이 필요하고 대중(시민) 참여를 통해 과학적 인식의 제고할 수 있다. 그리고 남극에서의 VHR 활용은 고래 및 알바트로스와 같은 다른 생태 중, 다른 해양 지역과 국가 관할권을 벗어난 해양보호구역에서의 활약을 할 수 있다고 주장한다. 현재 CCAMLR의 핵심 보존 조치목표를 달성하고, MPA 네트워크 구축에 도움이 될 것으로 보고 있다.

● 극지 지역의 해양보호구역을 고해상도 위성 영상을 통해 실제 적용한 경우를 살펴볼 수 있으며, 추가적 생태학적 의미가 있는 지역을 어떻게 제안해 나갈 수 있는지 의의 존재³¹⁾

웨델해에서 Crabeater Seal의 서식지 모델링을 통해서 이들의 분포를 이해하고자 VHR 고해상도 위성 이미지를 시민 과학 프로젝트를 통해 서식지 적합성을 모델링 하였음. 그래서 이들의 생태학적 지역을 식별하고 MPA 설정에 도움을 주고자 하는 것으로 목적으로 하였다. Tomnod 플랫폼을 통해 시민 과학자들은 물범의 위치를 표시하고, 다수의 응답의 일치함과, 전문가 교차 검증을 시도를 하였으며, 기계 학습 모델들 - Random Forest, Boosted Regression Trees, Support Vector Machine, Maxent 모델들을 사용하였다. 결과적으로 각 모델의 성능을 비교하여 이 물범 서식지 적합성을 예측하는데 최적의 모델을 선정하고자하였다.

이 중, Maxent 모델이 가장 높은 예측 성능을 보였으며, 이 물범의 서식지 적합성 영향을 주는 주요 변수로 빙하 가장자리와의 거리와 수심으로 나타났다. 물범들은 이러한 지역에서 먹이활동과 휴식을 취하는 특성과 연관되어 지내고 있었다. 크릴 또한 주요 먹이원이기에 수심 깊은 곳에서 가까운 곳에 서식지 분포를 보였다. 그리고 빙하의 동적 변화와 연관이 있는 것으로 나타났다. 이 연구를 통해, Crabeater Seal은 남극 크릴 지역 서식 지역과 일치하고, 빙하 농도의 변동적인 지역을 선호한다는 것을 알 수 있었으며, 이 서식지 모델을 통해 물개의 분포를 파악함과 동시에 서식지 분포, 더 나아가 웨델 보호구역과 같은 생태계 보전을 수립하는 주요한 역할을 할 수 있다.

30) High-resolution satellite imagery meets the challenge of monitoring remote marine protected areas in the Antarctic and beyond Michelle LaRue, Cassandra Brooks, Mia Wege, Leonardo Salas, Natasha Gardiner (2021)

31) Citizen science and habitat modelling facilitates conservation planning for crabeater seals in the Weddell Sea. Mia Wege, Leo Salas, Michelle LaRue (2020)