

극지 어류 생리실험용 아쿠아리움 시스템
구축을 위한 예비연구

A pilot study of aquarium for physiological
experiment of polar fish



한국해양과학기술원
부설극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 어류 생리실험용 아쿠아리움 시스템 구축을 위한 예비연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2018. 5. 31

연구 책임자 : 김진형

참여 연구원 : 박현
안도환
김보미
안인혜

보고서 초록

과제관리번호	PE17330	해당단계 연구기간	2017.04~2018.03	단계 구분	
연구사업명	중 사업명	창의연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명	신진연구자 지원 과제			
	세부(단위)과제명	극지 어류 생리실험용 아쿠아리움 시스템 구축을 위한 예비연구			
연구책임자	김진형	해당단계 참여연구원수	총 : 5명 내부 : 5명 외부 : 0명	해당단계 연구비	정부: 30,000천원 기업: 천원 계: 30,000천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지유전체사업단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<ul style="list-style-type: none"> ● 극지 해양생태계 먹이망에 있어서 어류의 위치는 그 중심에 위치하여, 하위포식자와 상위포식자를 연결하는 중요한 역할을 수행하며, 연구주제의 다양성으로 인해 전체 어류 연구결과는 지속적으로 증가하고 있으며, 극지 어류 연구도 꾸준히 진행되고 있음 ● 모든 생명과학 연구에 있어서, 생리학 연구는 분자수준에서 집단에 이르기까지 가장 넓은 분야에 걸쳐서 적용되는 핵심 분야이며, 극지 환경의 특수성을 고려했을 때, 극지 어류의 적응 기작은 다양한 생리요인이 함께 작용하는 것으로서, 적응기작 규명을 위해서는 생리학 연구가 중요 ● 전세계에서 극지 생물을 주제로 수행된 연구 결과, 우리나라는 20위 정도이며, 연구를 수행한 기관으로 보면, 극지연구소가 7위에 해당, 나름의 연구 경쟁력 확보 ● 그러나, 연구주제를 극지 어류로 한정 했을 때, 우리나라는 전체 28위, 우리 연구소는 공동 10위권 임, 따라서, 선진연구기관과의 격차해소를 위해서 극지어류 연구는 반드시 필요함 ● 어류를 포함하여 해양생물연구를 선도하는 BAS나 AAD 등 선진기관들은 남극기지와 본국에 각각 우수한 아쿠아리움시스템을 운영하고 있음. 따라서 해양생물 연구를 주도하고, 선진기관과의 격차를 해소하기 위해서는, 지속 가능한 연구 인프라 구축이 필수임 ● 선진연구기관들을 방문 벤치마킹함으로써, 아쿠아리움 시스템 설계에 필요한 유용한 정보를 습득 하였음 ● 본 연구를 통하여 구비 된 극지해양생물용 아쿠아리움시스템을 활용하여 어류 생리연구와 더불어 대국민 홍보에 큰 효과가 있을 것으로 기대됨. 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	극지, 어류, 해양생물, 아쿠아리움시스템, 생리연구, RNA-Seq, 극지유전체			
	영어	Polar, Fish, Marine organisms, Aquarium system, Physiology, RNA-Seq, Polar genomics			

요 약 문

I. 제 목

극지 어류 생리실험용 아쿠아리움 시스템 구축을 위한 예비연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 극지 생물의 효율적 활용을 위한 채집, 유지, 관리 시스템 구축
- 극지 고유모델생물을 활용하여 다양한 생리실험을 실시하고, 극지 생물 고유의 생물학적 특성을 파악하고, 이를 이용하여 극지 생물의 환경 적응기작을 해석, 규명

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 혹독한 극지 환경의 특수성으로 인한 극지 생물의 잠재적인 생리학적 반응 및 변화 요인을 감안한 맞춤형 실험계획을 수립하고, 구축된 생물관리 시스템을 활용하여 다양한 생리실험을 수행.
- 극지생물을 이용한 생리 실험을 통하여,
 - 저온적응 기작 (AFGP)
 - 혈액학적 특성 (Hb)
 - 성장 및 영양
 - 생체 시계(Circadian rhythm)
 - 식성 및 소화
 - 스트레스 적응 (온도, 염분, 산화스트레스, 빈 산소) 등 다양한 환경요소에 대한 극지생물의 특성을 파악할 수 있을 것으로 사료 됨
- 선진 연구기관의 아쿠아리움 방문 및 견학

IV. 연구개발결과

- 극지 생물 및 어류연구의 연구동향 파악
- 극지 어류연구 주제 확보
- 선진 연구기관 아쿠아리움 시스템 파악 및 벤치마킹
- 극지 해양생물 아쿠아리움 시스템을 갖춘 배양실 구비

V. 연구개발결과의 활용계획

- 극지 환경에 중 특이적으로 적응한 극지생물의 생리학적 특성을 파악함으로써, 지속가능한 극지 생물자원의 활용

S U M M A R Y

I. Title

A pilot study of aquarium for physiological experiment of polar fish

II. Significance and Objectives of the Study

- To understand the complexity of eco-system of polar areas, the relationship between polar environment and physiological factors of polar animals should be considered when designing experiments.
- Therefore, it is critical to carefully consider species for specific experimental designs based on their physiological characteristics.

III. Contents and Scope of the Study

- To develop experimental animal managing system to maintain continuous experimental resources. Using the integrated managing system, various physiological experiments will be performed using experimental polar animals.

IV. Results of the Study

- Finding global research trends of polar fish
- Benchmarking of advanced research organizations.
- Construction of aquarium system for research of polar fish

V. Further Application of the study

- To perform physiological experiments based on various methodological approaches such as NGS, bioinformatics, transgenetics, CRISPR & Cas9
- To improve understanding about cold-adaption mechanism of polar animals and its application for sustainable use of polar bio-resource

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	6
Chapter 2 The technology development present state	9
Chapter 3 The research development achievements and results	13
Chapter 4 The extent of aim achievement and contribution of related field	36
Chapter 5 The application of research result	38
Chapter 6 References	39



목 차

제 1 장. 연구개발의 필요성	6
1절. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성	6
제 2 장. 국내외 기술 개발 현황	9
1 절. 국내외 연구 동향	9
2 절. 현재 개발내용의 수준	10
3 절. 현 기술상태의 취약성	11
4 절. 앞으로의 전망	12
제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과	13
1 절. 연구개발목표 및 내용	13
2 절. 연구개발 추진체계	15
3 절. 연구 결과	17
1. 재료 및 방법	17
2. 결과 및 고찰	23
제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도	36
1 절. 연구개발목표 달성도	36
2 절. 기대성과	36
제 5 장. 연구개발결과의 활용계획	38
1절. 추가연구의 필요성	38
2절. 타 연구에의 응용	38
제 6 장. 참고문헌	39



제 1 장. 연구개발의 필요성

1절. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

- 극지 어류 유전체정보의 효율적 활용
- 중소형 극지 해양생물 생리 실험을 위한 유지, 배양 및 관리 시설 기반 마련
- 선진 극지 해양생물 연구시스템 벤치마킹을 통한 연구 경쟁력 강화
- 극지 해양생물을 활용한 산업화 가능성 타진

1. 기술적 측면

- 극지유전체정보에 대한 중요성과 유전체 분석기술의 발달에 따라 빠르게 축적되어지고 있는 극지 유전체 정보의 효율적 활용 및 가치제고를 위해서는 확보된 유전체 정보를 바탕으로 살아있는 극지 생물을 대상으로 손쉽게 도입 적용할 수 있는 모델 종이 필수 임
- NGS 분석기술의 발달로 고효율 저비용의 기능유전체 연구가 비약적으로 발전 중이며, 이미 상당수의 생물 유전체 전체 정보 활용이 가능
- 최근 극지연구소 극지생물연구부의 노력으로, 남극대구 (*Nototothenia coriiceps*) 등의 유전체 데이터의 활용이 가능해짐으로서, 이를 활용한 극지 생물 특이적 분자생리학적 특성파악 및 극지 환경적응 기작 해석을 위한 본격적인 생리 연구가 필요한 시기로 사료 됨

2. 경제·산업적 측면

- Next generation sequencer의 발달로 분석 비용이 저렴해져 비교 기능유전체 연구의 가속화가 진행되고 있으며, 유전체 정보를 활용한 후속 연구는 잠재적으로 경제, 산업화 가능성이 큼.
- 현재 전 세계에 걸쳐 미지 생물 특히 해양생물의 유전체 및 유전자원 정보 선점을 위한 다양한 프로젝트가 진행 중
- 극지 해양생물 모델 종 개발을 통하여 극지 생물 특이적 분자생리학적 특성 연구를 기반으로 한 다양한 유용 단백질 및 신물질 개발 등 후속연구를 통한 막대한 고부가가치 창출 가능

3. 과학적 측면

- 어류 유전체의 경우 척추동물 모델로서 과학적으로 파급효과가 매우 큼(그림 1)

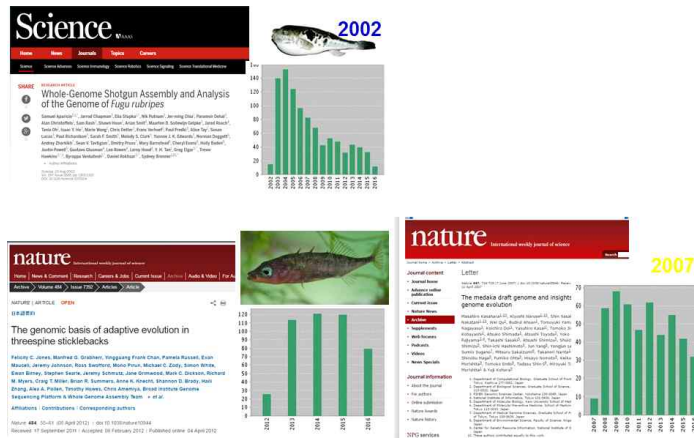


그림 2. 어류 유전체 우수연구 및 파급효과

- 확보된 기능 유전체 정보를 이용하고, 그 활용 가치를 높이기 위해서는 생물을 대상으로 한 생리 연구와, 지속적인 실험 생물의 확보가 반드시 필요하다.
- 해양 어류를 비롯한 극지생물은 수세기에 걸친 저온환경 적응 및 진화에의 특성 상, 환경 특이적인 기능 유전체 및 생리학적 특성을 가지고 있을 가능성이 높아 연구 모델로서의 가치가 크다.
- 해양 어류는 극지 해양생태계 먹이망에 있어서 그 중심에 위치하며, 하위포식자와 상위포식자를 연결하는 중요한 역할을 수행함(그림 2)

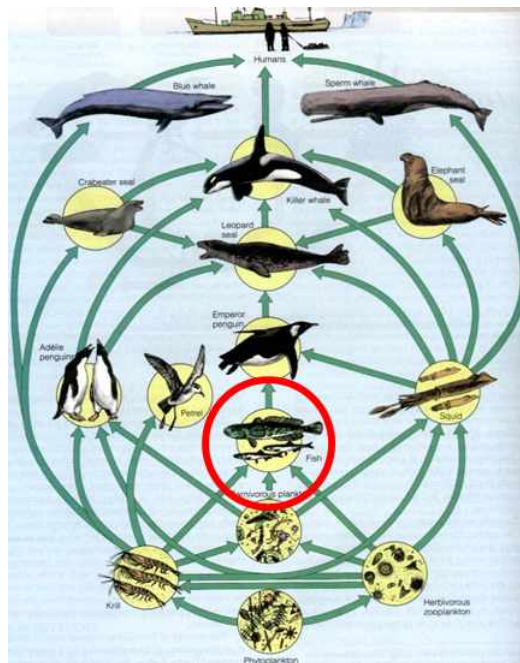


그림 3. 극지 해양생태계 먹이망에서의 어류 지위

- 그럼에도 불구하고, 현재 극지생물의 진화와 적응 메커니즘을 규명하기 위한 극지생물을 대상으로 한 본격적인 생리학적 특성 연구는 실험 생물의 확보의 어려움으로 인하여, 매우 제한적이다.
- 생물을 대상으로 한, 분자 생리학적 연구는 분자수준에서부터 세포와 조직뿐만 아니라, 기관과 개체 및 단일 종의 군집에 이르는 가장 넓은 범위의 생명 현상을 다루는 생물학 연구의 핵심이다(그림 3).

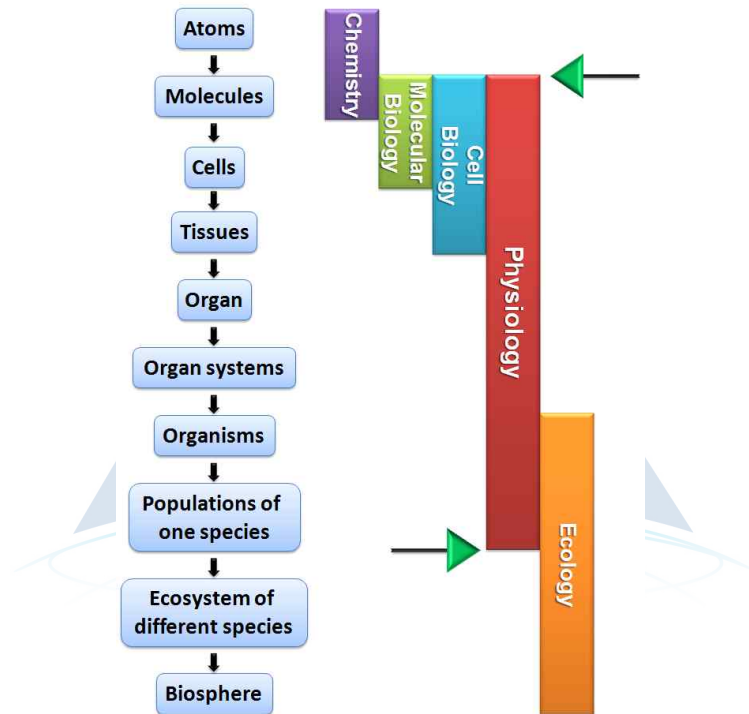


그림 4. 생물을 이용한 생리학 연구의 수준 및 범위

4. 사회·문화적 측면

- 어류를 비롯하여, 극지 해양생물을 대상으로 한 생리학적 특성 연구는 순수 자연과학 연구 분야의 핵심연구로써, 극지 연구 선진국의 경우 오래전부터 집중적으로 연구를 수행해 온 바, 우리와의 격차가 큰 실정
- 극지 해양생물 유래의 유용 단백질 확보, 형질관련 유전자 활용 기술 및 유용 기능성 유전자 발굴 분야에 있어서도 필수적인 연구로서 고부가가치 첨단산업으로의 전환에 중추적인 역할을 수행할 것으로 기대
- 극지 해양생물, 특히 어류 관리 및 유지 할 수 있는 아쿠아리움 시스템을 갖춤으로서, 향후 극지 해양생물의 전시공간을 마련하는데, 기초자료로 활용할 수 있으며, 대중을 대상으로 한 홍보 효과를 기대(그림 4)



그림 5. 남극 해양생물 전시, 오사카 아쿠아리움

제 2 장. 국내외 기술 개발 현황

1 절. 국내외 연구 동향

- 2004년 해양수산부 해양극한유전체 연구단을 설립하여, 국가 자산으로서 해양·극한 생물자원 및 유전체 정보 뱅크 구축과 활용을 위한 연구가 시작되었다.
- 또한 확보한 유전체 정보를 기반으로, 해양 극한 환경 및 생명현상을 규명하고 이를 활용한 기술 개발 연구의 필요성이 대두되었다.
- 세계적인 게놈 유전체 사업의 하나인, Ensembl project(<http://www.ensembl.org>)에 의하면 총 50종(포유류 36종, 어류 5종, 그 외 9종)에 대하여 전체 게놈 분석을 완료하였다.
- 어류에 대한 Genome project는 2002년의 International Fugu Genome Consortium에서 자주복어(*Takifugu rubripes*)를 대상으로 처음으로 완성한 후 현재 5종(송사리, 자주복어, 녹색복어, 제브라피쉬, 큰가시고기)의 유전체초안이 완성되었다[5-7].
- 벨기에는 IPY사업의 일환으로 SCAR-MarBIN (SCAR-Marine Biodiversity Information Network) 포털을 구축하고 남극 해양 환경의 생물다양성 정보를 관리하고 있다.
- 또한, 극지생물다양성, 생물계통·진화, 스트레스반응 등에 대한 연구를 위해 2007/2008 IPY를 통하여 국제공동연구 체계가 이루어지고 있으며, 이외 저온효소 등의 신규 생물소재 연구가 공식적으로 보고되었다.
- 미국의 McMurdo 기지에서는 필요 시, 다이버 및 선박에 장착된 트롤을 실험 생물을 확보하고, 채집된 생물을 유지 관리하기 위한 시설을 갖추고 있으며, 이를 활용한 원활한 생리 연구를 수행해 오고 있다(그림 5).



그림 5. McMurdo 기지의 해양 생물 관리시스템 전경

- 독일과 네덜란드 공동 연구 팀은 특수하게 제조된 수평용 트롤을 이용하여, 북극해의 얼음 아래에 집단으로 서식하고 있는 북극대구(Boreogadus sida)를 채집함으로써, 중요한 수산 자원의 분포와 생리 생태를 파악하는 성과를 얻었다[8].

2 절. 현재 개발내용의 수준

- 본격적인 생리 연구의 필요성에도 불구하고, 극지 생물, 특히 어류를 대상으로 한 분자생물학적 특성연구를 위해서는 보다 효율적인 연구용 시료확보 방법 마련이 요구된다.
- 현재 남극의 모든 시료는 환경보호에 관한 남극조약의정서에 허가 하에 채취되며, 우리나라의 경우 낚시에 의존하다 보니, 필요한 개체수의 확보에 어려움이 있다. 또한 낚시를 이용한 실험 생물 확보에 대한 부정적인 견해를 접하는 경우가 존재한다.
- 미국 등 선진국의 경우는 소형 어선을 이용한 트롤을 사용하는 등 유명 어류 샘플 확보를 위한 체계적인 시스템을 갖추고 있다.
- 또한, 확보 된 실험동물의 유지, 축양 및 관리, 그리고, 다양한 생리학적 실험을 실행하기 위해서는 극지생물의 특수성을 고려한 수조 및 설비 시스템 구축이 필요한 반면에 현재 남극 세종기지에는 해양생물을 효과적으로 채집하고, 유지 관리하기 위한 시설이 전무한 실정이다 (그림 6).



그림 6. 남극 세종기지의 해양생물 실험 시설

3 절. 현 기술상태의 취약성

1. 극지 해양생물 모델 종 부재

- 극지 해양 생물에 대한 유전체 연구는 극지연구소를 중심으로 활발히 진행되고 있으나, 어류를 대상으로 한 연구는 단 2편에 불과하며, 이는 연구소에서 수행한 모든 생물연구에서 가장 작은 비중을 차지함(그림 7).
- 다행히 2009년부터 쇄빙연구선 아라온호를 활용한 극지환경 및 해양생물자원 연구가 새로운 장을 열게 되었으나, 여전히 극지 해양생물, 특히 어류를 대상으로 한 생리, 생태, 생물학적 특성연구를 위해서는 보다 효율적인 연구용 시료확보 방법 마련이 요구됨.

- 현재 남극의 모든 시료는 환경보호에 관한 남극조약의 정서에 허가 하에 채취되며, 우리나라의 경우 낚시에 의존하다 보니, 필요한 개체수의 확보에 어려움이 있음.
- 확보된 실험동물의 유지, 축양 및 관리, 그리고, 다양한 생리학적 실험을 실행하기 위해서는 극지생물의 종 특이성을 고려한 아쿠아리움의 설계 및 항온, 항습 시스템 구축이 필요하며, 더 나아가, 장기 사육 및 보존에 관한 기술 개발이 필요함.

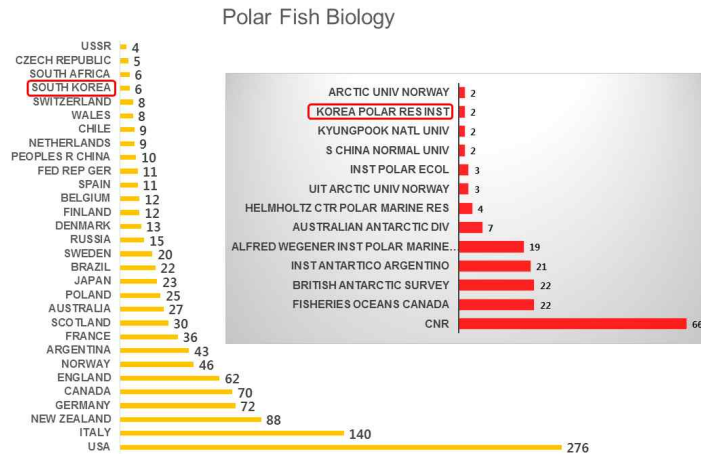


그림 7. 극지 어류 주제의 연구 수행 결과(논문 수)

4 절. 앞으로의 전망

- 기하급수적으로 늘어나는 기능 유전체 정보의 활용과 더불어, 어류를 비롯한 극지 해양생물의 진화특성 및 환경적응 기작에 관한 연구는 기존 온열대 생물 연구 결과의 활용 및 비교 연구를 통하여 무궁한 활용가능성이 있음.
- 남극 어류는 극지 생태계 먹이사슬의 가장 중요한 요소 중의 하나로, 그 생태학적 중요성과 더불어, 종 특이적인 생리학적 특성연구를 통하여 생명의 기원 및 기초대사 메커니즘을 규명할 수 있는 최고의 모델 생물로 집중적인 연구 대상임.
- 따라서, 어류 등 중소형 해양 생물 연구의 후발 주자로서, 과감한 설비 투자와 연구 기반 구축을 통하여, 극지 해양생물을 대상으로한 생리실험용 아쿠아리움 시스템을 구축하다면, 선진 연구 그룹과의 격차를 빠르게 줄일 수 있을 것으로 기대

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

1 절. 연구개발목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표

- 극지 어류 생리실험용 아쿠아리움 시스템 설계
 - 극지 어류 생리연구 동향 분석
 - 해외 선진기관의 아쿠아리움 벤치마킹
 - 예비 생리실험을 통한 극지 어류 연구 기초자료 확보

2. 연차별 연구개발목표 및 내용

표 1. 연구 개발 목표 및 내용



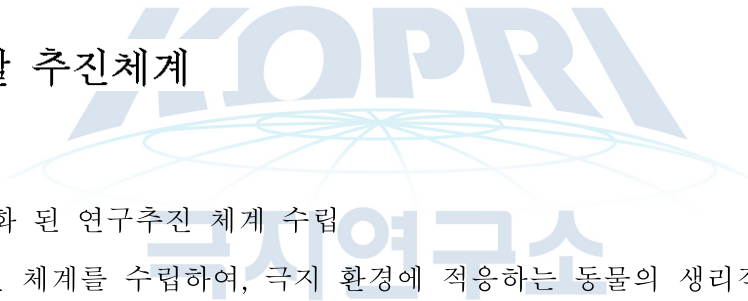
구분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위	추정연구비 (단위: 천원)
1차년도 (2017)	○ 극지 어류 생리연구 동향분석	○ 연구 주체, 주제, 방법 및 연구 동향 분석 ○ 극지 어류의 연구 의의 파악	3,000
	○ 해외 선진기관 벤치마킹	○ 중소형 해양생물 연구 분야의 선진기관 조사 ○ 관계자 연락, 방문 및 시설 견학 ○ 벤치마킹 및 기술 도입 타진	12,000
	○ 예비 생리실험을 통한 연구 기초자료 확보	○ 남극 대구 유지관리 ○ 온도, 염분, 먹이 등 관련, 다양한 예비 생리실험 실시 ○ 남극대구 생리연구 기초자료 확보	15,000

3. 추진전략 및 방법

표 2. 추진전략

연구개발 내용	월별 추진 계획												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
기존 연구 문헌 분석													
해외 선진 기관 방문 및 견학													
예비 생리실험 수행													
조사 자료 분석 및 결과 정리													

2 절. 연구개발 추진체계



- 각 단계별 모듈화 된 연구추진 체계 수립
- 단계적 연구추진 체계를 수립하여, 극지 환경에 적응하는 동물의 생리적 반응을 다양한 분석 파라미터를 활용하여 그 특성을 파악하고, 적응기작을 규명함(그림 8).
- 극지 고유생물 중 극지 어류를 포함한 모델 생물을 선정함
 - 극지 어류: 약 3천 4백 만 년 전부터 남극해에서 독립적인 진화과정으로 분화, 진화연구에 최적화 된 종중 하나로 남극생물종의 40%를 차지하며, 생물량의 90%를 차지함
- 선진 연구팀과의 교류 및 정보 교환을 통하여, 필요한 정보와 기술을 습득 효율적인 실험 생물 확보, 유지, 축양 및 관리와 실험 디자인 및 시스템 구축 방안을 모색함

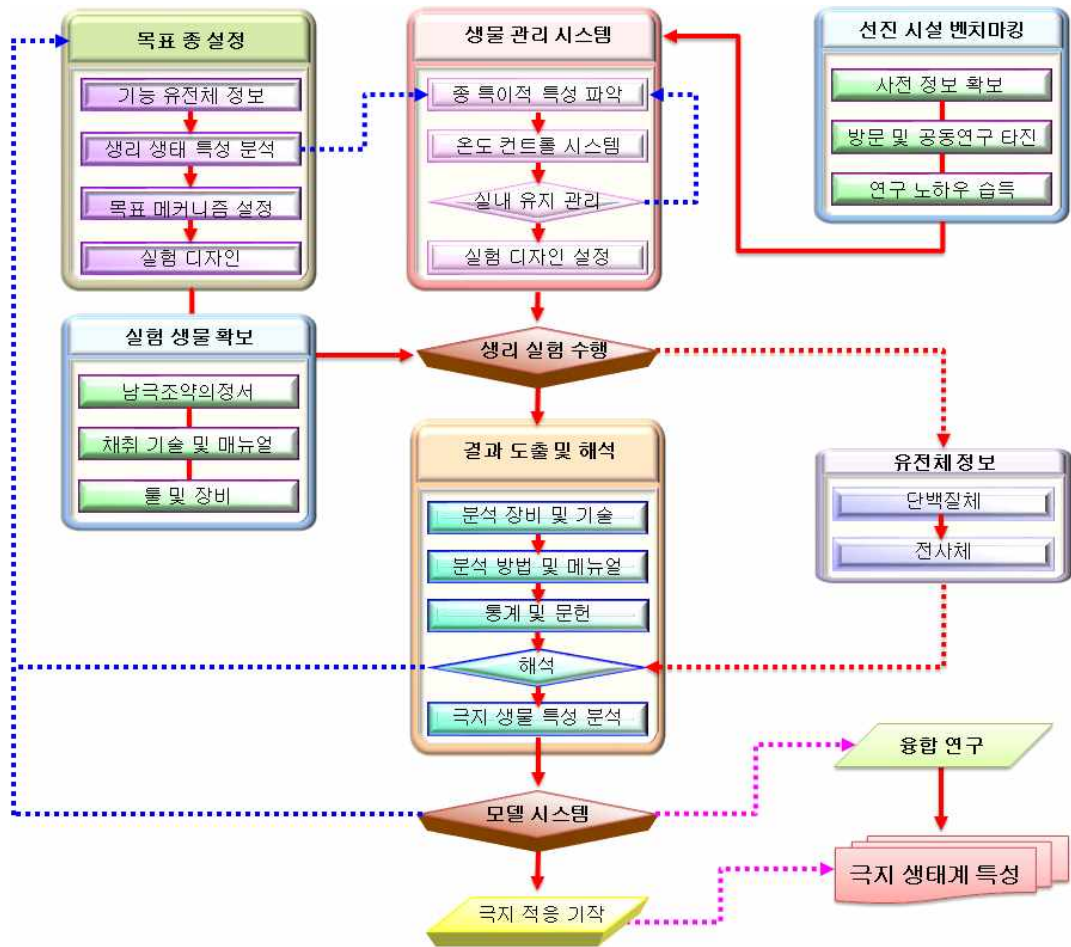


그림 8. 연구개발 추진체계 모식도

극지연구소

3 절. 연구 결과

1. 재료 및 방법

가. 극지환경 요소와 어류생리 요인

- 혹독한 극지 환경의 특수성으로 인한 극지 생물(어류 등)의 잠재적인 생리학적 반응 및 변화 요인을 감안하는 것이 매우 중요(그림 9)

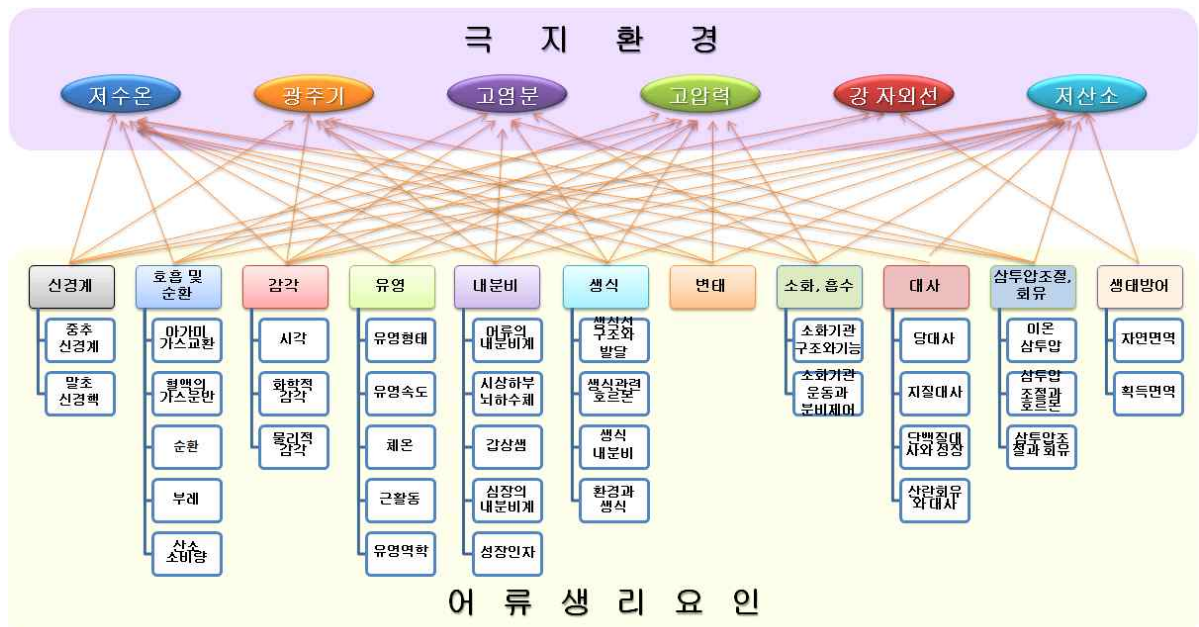


그림 9. 극지 환경 요소와 어류생리 요인의 관계도

- 극지생물 특이적 생리 생태학적 특성을 고려한 고유 모델생물(어류 등)을 선정
- 극지 고유모델생물의 효율적 활용을 위한 채집, 유지, 관리 시스템을 구축
- 극지 고유모델생물을 활용하여 다양한 생리실험을 실시하고, 극지 생물 고유의 분자생리학적 특성을 파악하고, 이를 이용하여 극지 생물의 환경 적응기작을 해석, 규명함으로써, 지속 가능한 생물자원 활용이 가능(그림 10)

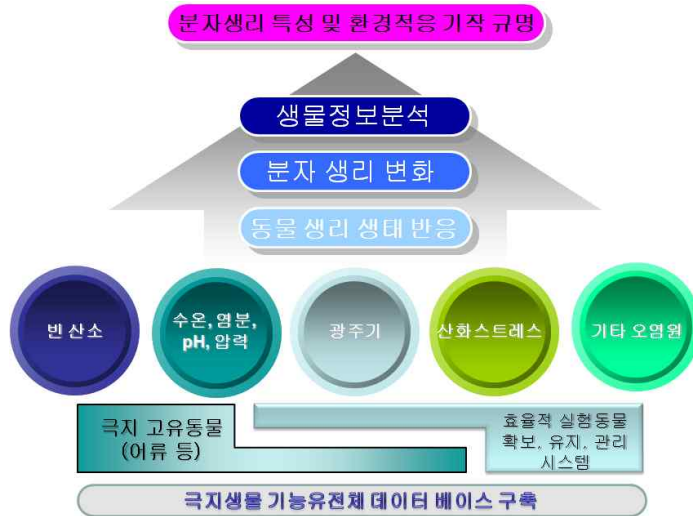












그림 10. 연구개발 내용의 개념도

나. 저온 적응 기작

1) Anti-freezing glyco protein (AFGP)

- 가장 잘 알려진 극지 생물의 환경 적응 기작으로써, 극지 미생물, 곰팡이, 식물, 플랑크톤, 곤충 그리고, 어류를 대상으로 한 AFGP와 관련한 구조 및 특성 연구가 대표적[11]
- 극한환경을 이겨내는데 필요한 가장 기본적인 기작에 관한 연구이며, 이는 결정격자가 형성되는 것을 억제함으로써 어는점을 낮추어 줌. 또한 더 혹독한 환경에 처해있는 육지생물 중 식물로써 *Deschampsia antarctica*에서도 Ice recrystallization inhibition protein (IRIP)이 발견이 되었으며, 이 유전자가 추위를 견디는데 역할을 할 것이라는 것을 실험적으로 설명 [12]
- 어류에서 밝혀진 AFP의 타입은 4 종류이며, 각각의 타입은 다른 구조와 분자량을 가지고 있으며, activity 또한 다름(표 3) [13]
- AFP를 생물의 장기 보관 및 유지 등과 관련 그 잠재력을 인정받아, 실제로 적용되고 있으며, 더 많은 연구와 개발이 진행 중
- 어류에서 새로운 타입의 AFP 존재 가능성이 높으며, 그 존재 여부와 특성을 밝히는 것과 더불어, 밝혀진 AFP의 종류에 따른 종 특이적 분포와 구조, 그 반응과 역할, 그리고 환경 변화에 대한 변화를 검증하는 시스템적인 연구가 필요

표 3. 어류의 AFP와 AFGP의 종류에 따른 구조 및 특성

Characteristics	AFGP	Type I AFP	Type II AFP	Type III AFP	Type IV AFP
Mass (Da)	2600-33000	3300-4500	11000-24000	6500	12000
Key Properties	AAT repeat Disaccharide	Alanine-rich α -helix	Disulfide bonded	β -sandwich	Alanine rich herical bundle
Representative Structure					
Natural Sources	Antarctic-notothenioids	Right-eyed, flouders	Sea raven, Smelt, herring	Ocean pout, Wolfish, eel pout	Longhorn, sculpin
					

2) 혈액학적 특성 변화

- 결빙방지 단백질과 더불어, 극지 고유 어류의 혈액학적 특성연구는 수중생물 특유의 생리학적인 관점에서 매우 유의함
- 어류의 경우 호흡과 순환에 있어, 혈액을 통한 가스교환 및 산소소비량은 매우 중요한데, 극지 초저온 환경에 적응한 어류의 경우, 특별한 혈액학적 특징을 보이는데, 즉, 낮은 적혈구와 헤모글로빈 수치를 보이는 반면, 점성이 높게 나타남[14, 15]
- 극지 어류의 특별한 혈액학적 특성은 어류의 heart rate, 혈압, 산소 소비율과 호흡 등 어류의 호흡 및 순환, 그리고, 질병 저항성 및 면역에 대한 차별화 된 대사와 기작의 존재 가능성을 높임으로써 극지 환경 적응기작을 규명하는 데 반드시 필요한 연구 분야 중 하나임

3) 소화, 흡수 및 성장과 에너지 대사

- 극지의 저온 환경의 영양으로 인하여, 극지 생물의 주요 성장요인인, 먹이의 섭취와 소화, 영양의 흡수과정은 온, 열대 생물과는 다른 독특한 생리적 차이를 보이며 진화
- 어류를 비롯하여, 대부분의 생물은 일반적으로 섭취된 먹이의 소화와 흡수 속도는 수온에 비례하여 증가하며, 에너지 대사 또한 수온이 높을수록 빨라짐[16]
- 극지 어류의 경우 낮은 수온으로 인하여 에너지 대사 속도가 늦을 것으로 사료되나, 극지 어류의 자연 상태에서의 먹이 섭취율, 소화율, 및 에너지 대사에 대한 연구는 거의 전무[17]
- 따라서, 극지 어류의 에너지 대사와 성장 기작을 규명하기 위해서는 실험어 확보를 위한 시스템 구축과 더불어 극지 어류의 생리를 고려한 체계적인 계획이 필요

다. 광주기 적응 기작

1) 생체시계 리듬 (Circadian rhythm)

- 생체시계 리듬은 식물, 동물, 균류, 심지어 박테리아까지 모든 생명체들에서 존재하며 생화

학적, 생리학적, 또는 행동학적 흐름이 24시간의 주기로 나타나는 현상

- 생체 시계는 빛, 온도, 영양상태와 같은 외부 요인에 의해 24시간을 주기로 조정됨. 생물의 수면과 섭식에 관여할 뿐만 아니라 체온, 뇌파활동, 호르몬 생성, 세포 재생성 등과 같은 생물학적 활동의 패턴에도 관여하는 중요한 요인
- 노르웨이의 한 연구진은 일부 극지방 동물에서 한 해 중에서 일출과 일몰이 있는 때에만 일주기 생체 리듬이 나타난다고 보고[18], 하지만 북부 알래스카에서의 또 다른 연구에서는 땅다람쥐와 포쿠파인에서 82일간 낮이 지속되는 동안에도 일주기 생체 리듬이 정확히 유지됨[19]
- 어류를 포함하여 생체시계 리듬의 기작에 대해서는 Clock gene, Cryptochrome, Period, Bmal1 등 관련된 유전자의 발현들을 비롯하여 비교적 많은 연구가 진행(그림 11). 하지만, 극지 어류를 대상으로 한 연구는 매우 드물다. 광주기의 변화가 생체리듬의 가장 큰 변화요인임을 감안할 때, 극지방의 특수한 광조건으로 인한 생물의 반응은 매우 흥미로운 연구결과를 가져올 것으로 사료됨

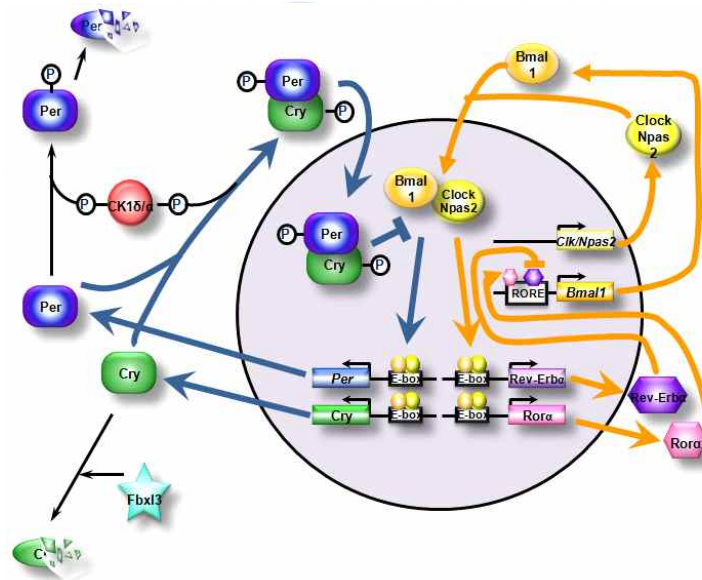


그림 11. 어류의 생체시계 리듬 대사 경로

라. 스트레스 적응 기작

1) 빈 산소(hypoxia) 환경 적응 기작

- 빈 산소 환경에 대처하기 위한 생물의 반응은 다양한데, 항상성을 유지하기 위하여 독특한 행동반응과 생리적 또는 세포 반응을 보임(그림 12)
- 어류의 경우 빈 산소 환경에 노출 됐을 때, 가장 큰 어려움은 일정한 에너지 대사 균형을 유지하는 것인데, 왜냐하면, 어류는 전체 산소 소비율의 95%를 전자전달연쇄계를 통한 ATP 생산을 위해 사용하기 때문임[20]

- 따라서, 빈 산소 환경에서 생존하기 위해서는 특별한 산소소비 시스템과 더불어 미토콘드리아에서 줄어들 ATP생산의 영향을 최소화 하기 위한 방안이 필요
- 북극의 경우 겨울에 얼음으로 덮여 있던 작은 규모의 호수가 여름이 되면 수온이 오르고, 빈 산소(hypoxia) 환경이 되는데, 이러한 환경에서 먹이를 찾고, 산란을 하는 어류 중, Alaska blackfish (*Dallia pectoralis*)에 대한 연구가 보고[21]
- 극지 어류 중인 Alaska blackfish는 빈 산소 조건에서 공기 호흡을 하며 생존 하는데, 겨울에는 공기호흡이 불가능함을 감안 할 때, 혈액 내 산소 공급을 극대화 할 수 있는 능력, 대사율을 줄이기 위해 최대한 움직임을 최소화 하는 등 아직 분명히 밝혀지지 않은 독특한 기작을 지니고 있을 것으로 사료됨

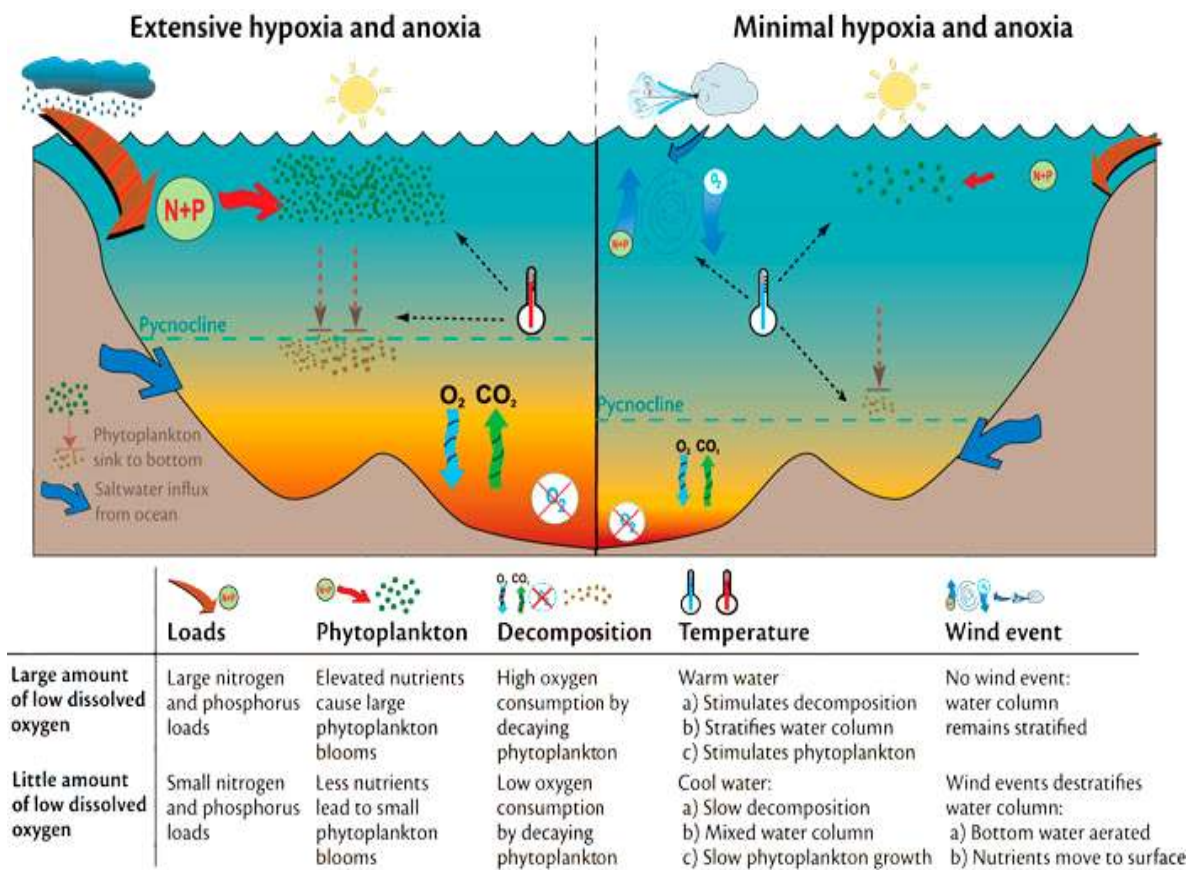


그림 12. 빈 산소 환경(hypoxia)의 생성 요인 및 과정

2) 강한 자외선 적응 기작

- 극지방의 강한 자외선(UVB)은 생물의 DNA를 파괴하는 심각한 피해를 야기할 수 있으며, 전 지구적인 환경오염으로 인한 오존층 파괴의 가속화로 인해 그 영향은 증가 추세[22, 23]
- 자외선으로부터 피해를 완화시킬 수 있는 물질을 생산해내는 기작에 관한 연구가 극지 생물을 대상으로 시도(그림 13)[24, 25]

- 플랑크톤의 경우 자외선이 약한 봄철에 DNA 피해 복구율이 최대치를 나타내었고, 어류의 자치어의 경우 생물량이 많은 겨울철에 가장적인 복구율을 나타냄[26]
- 자외선은 생물에 있어 유전자 수준 뿐 만 아니라, 먹이 연쇄의 테두리 안에서 개체의 생리, 집단 및 군집에 이르기 까지 모든 생태계에 있어서 생식과 에너지 순환에 방대한 영향을 미치는 요인으로서, 그 영향과, 복구 능력에 관한 체계적인 연구가 시급함

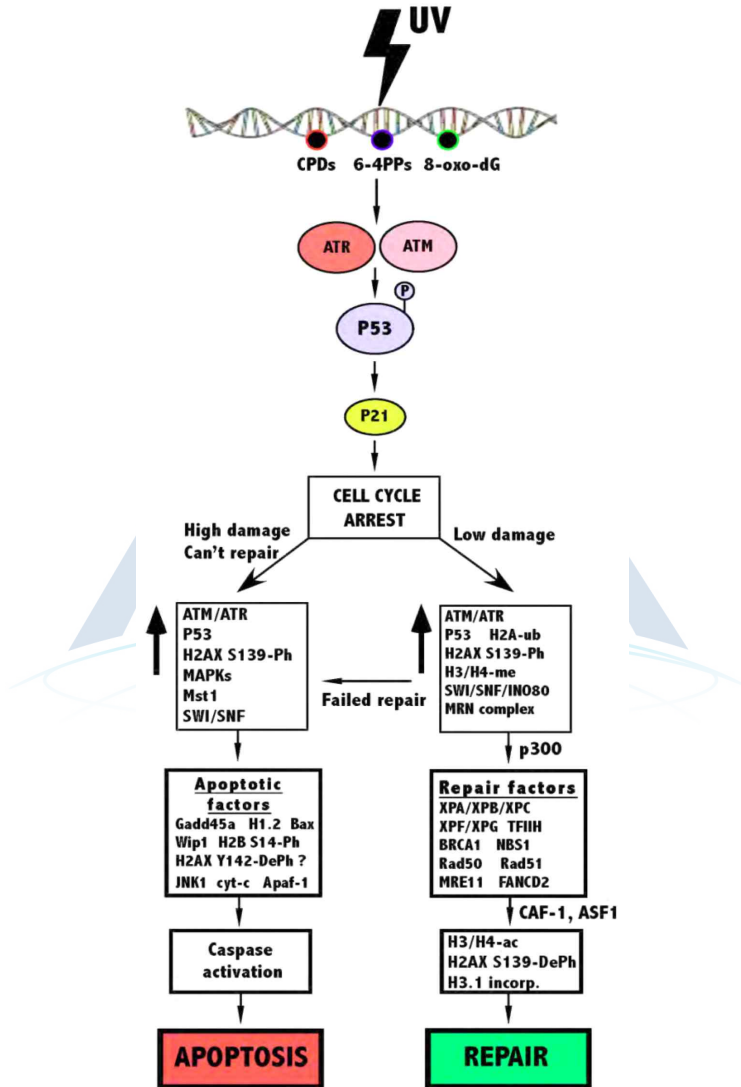


그림 13 자외선에 의한 DNA 파괴 및 수리 과정

2. 결과 및 고찰

가. 극지어류 연구동향 분석(국내)

- 극지 어류의 생태학적 중요성과 더불어 연구주제의 다양성으로 인해 전체 어류 연구결과는 지속적으로 증가하고 있으며, 극지 어류 연구도 꾸준히 진행되는 추세임(그림 14)

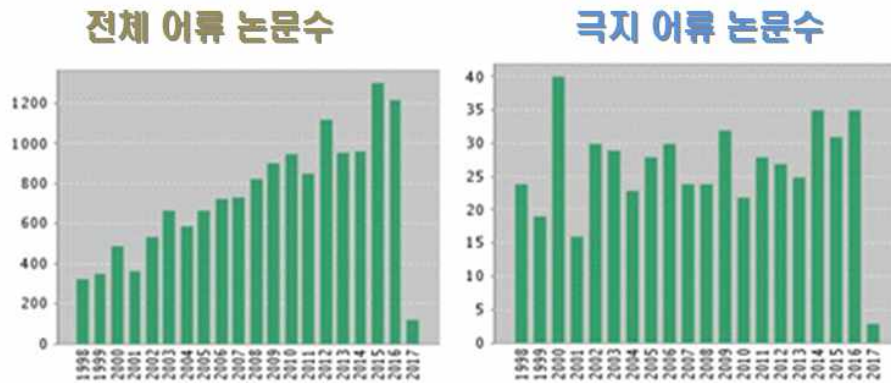


그림 14 어류 연구 결과 현황

- 국내의 극지 생물연구는 극지연구소에서 주도적으로 수행되어져 오고 있다. 극지연구소는 극지 생물을 주제로 출판 된 연구 논문 중에서 약 40%를 차지하고 있으며, 이는 BAS와 CNRS에 이어 3위에 해당하는 결과임(그림 15, 그림 16, 그림 17)
- 그러나, 연구주제를 극지 어류로 한정 했을 때, 우리나라는 전체 28위, 우리 연구소는 공동 10위권에 머물며, 따라서, 선진연구기관과의 격차해소를 위해서 극지 어류 연구는 반드시 필요함



그림 15. 극지 생물 연구에 있어서 각 국의 대표 연구기관이 차지하는 비율(%)

Polar Biology

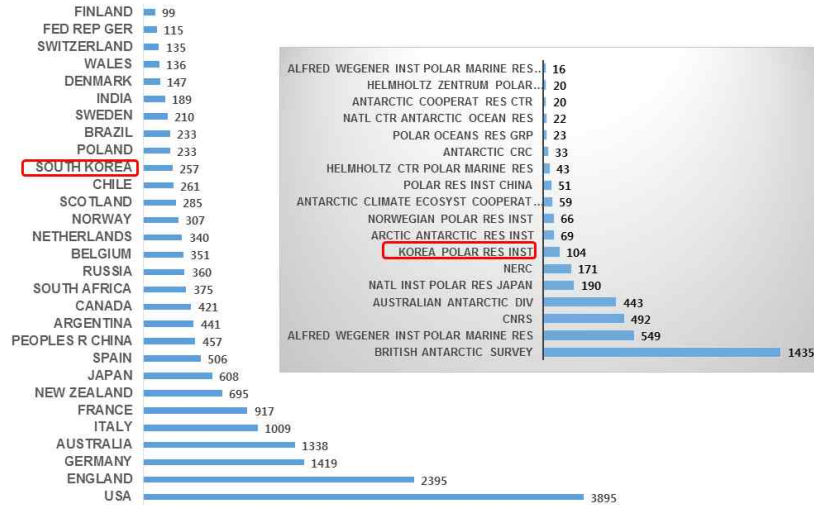


그림 16. 남극 생물연구 현황 (논문편수)

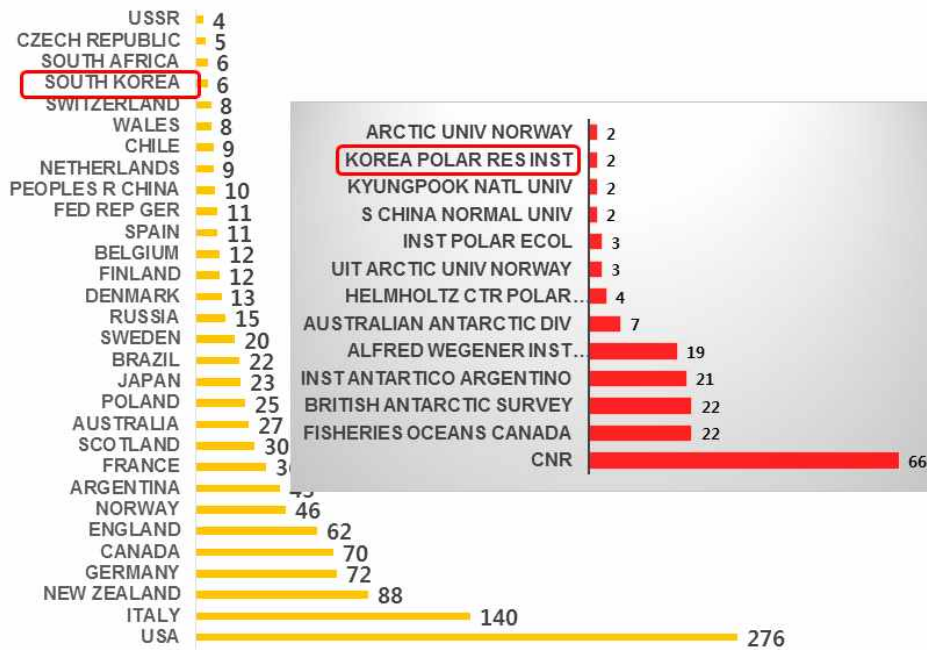


그림 17. 남극 생물연구기관 현황 (논문편수)

- 2004년 해양수산부 해양극한유전체 연구단을 설립하여, 국가 자산으로서 해양·극한 생물자원 및 유전체 정보 은행 구축과 활용 및 해양 극한 환경 및 생명현상을 규명하고 이를 활용한 기술 개발 연구가 실시됨
- 극지연구소는 다양한 극지 생물을 대상으로 한 저온적응 기작 규명 연구 및 유용단백질 발굴을 위한 많은 연구를 수행
- 그러나, 극지 생물의 채집과 유지 및 관리의 어려움으로 인하여, 대부분의 연구는 식물, 지의류, 플랑크톤, 미생물 등에 한정되었으며, 특히 해양 생물을 대상으로 한 연구는 표4에서

보듯이 다이어나 그래프를 이용한 한정된 지역의 모니터링 연구가 주를 이룸

표 4. 극지연구소에서 수행한 극지 생물 대상 연구

연구제목	수행 연도
구조 단백질학을 이용한 극지해양생물의 저온적응기작에 관한 연구	2009
구조 단백질학을 이용한 극지해양생물의 저온적응기작에 관한 연구	2010
구조 단백질학을 이용한 극지해양생물의 저온적응기작에 관한 연구	2005
구조 단백질학을 이용한 극지해양생물의 저온적응기작에 관한 연구	2011
극지 호냉성 미생물의 저온적응 기작에 대한 구조적 연구	2011
극지생물 유래성분의 면역조절 작용 및 기전 연구	2006
남극 연안의 중금속오염 모니터링을 위한 생물지표 연구	2003
극지저서생물의 중금속 해독 유전자와 단백질 검색 및 특성 연구	2006
극한저온해양환경에 서식하는 미생물에 의한 지구미생물학적 탄소 및 금속이온순환연구	2007
극한지 호수 및 주변지역 생물자원 확보	2009
남극 Marian Cove와 Collins Harbor에 서식하는 남극큰띠조개의 번식 생태 비교	2010
남극 해양생물자원 및 생태계 연구	2002
배양된 극지 빈영양미생물의 생태기능 유전자분석 및 다상분류	2010
남극큰띠조개(<i>Laternula elliptica</i>)의 번식량 정량화를 위한 다클론항체 개발에 관한연구	2010
남극해 생물자원의 현황과 전망에 대한 연구(1) 파타고니아 이빨고기	1994
남극해 유용생물자원 개발 연구 (남극 반도해역 유용생물의 분포 및 자원량 추정 연구)	1998
남극해 유용생물자원 개발 연구 (남극 반도해역 유용생물의 분포 및 자원량 추정 연구)	2001
북극 다산기지 주변 환경모니터링 및 생물자원 연구(북극기지 주변 환경모니터링)	2006
극지중앙해령 서식 생물 진화연구를 위한 다유전자 마커 개발 및 활용 방안 모색: 동태평양 심해 열수구 서식 종합 내부공생세균의 유전적 집단구조와 적응진화	2012
극지생물 재현 및 활용기반 구축	2011
남극 킹조지섬에 서식하는 무척추동물 플랑크톤의 다양성 연구	2013
환경변화에 의한 남극 빅토리아랜드 육상 생물 반응 기초 연구	2014
극지 방선균 Cytochrome P450 관련 특성 연구	2014
남극에서 Biologger를 활용한 도둑갈매기류의 취식행동연구기법 개발	2012
해양산성화에 의한 남극 킹조지섬 석회질 패각 해양생물의 영향 연구 기반구축	2015
북극해 해양환경변화에 따른 미생물 생태연구	2015

- 2009년부터 쇄빙연구선 아라온호를 활용한 극지환경 및 해양생물자원 연구가 새로운 전기를 마련
- 해양 척추 생물의 경우, 2012년 극지연구소 박현 박사팀은, 남극 어류 3 종에 대한 전사체 분석을 통한, 기능 유전체 특성 비교 연구를 개시[9].
- 그 결과, 2014년 극지연구소 박현 박사 팀은, 세계 최초로 남극 고등생물인 남극대구 (Antarctic bullhead notothen, *Notothenia coriiceps*)의 전체 유전자 염기서열을 해독, 분석함으로써, 남극 고등생물 연구에 새로운 전기를 마련[10](그림 18)

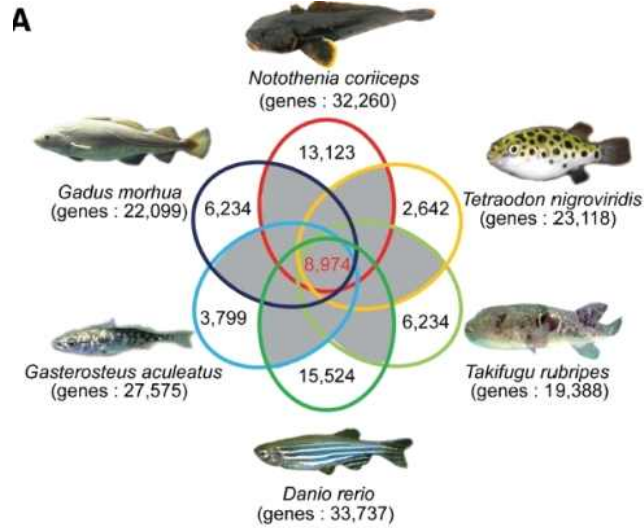


그림 18. 극지연구소에서 세계 최초로 분석한 남극대구의 전체 유전자 염기서열을 이용한 어류 종의 비교연구

- 그러나, 어류를 대상으로 한 연구는 극지연구소 내에서 이루어진 생물 대상 연구에 있어서 가장 빈약한 실정(그림 19)

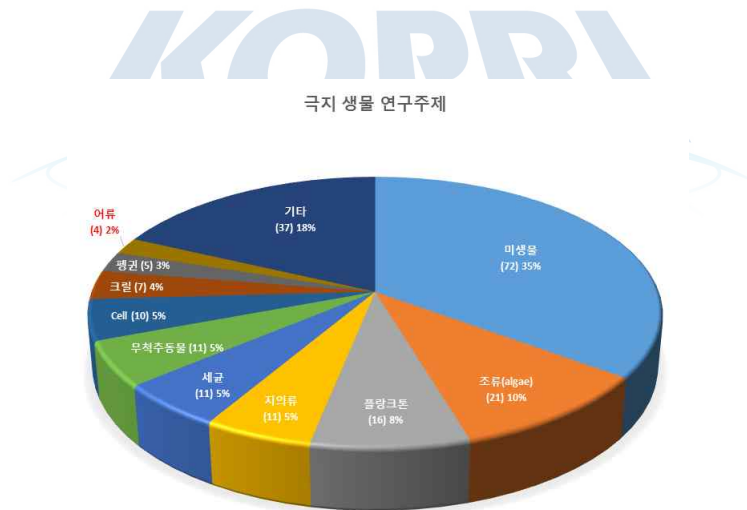


그림 19. 극지 연구소에서 수행한 연구 생물 별 통계(연구보고서 수)

나. 극지어류 연구동향 분석(국외)

- 해양생물, 특히 어류를 대상으로 한 연구는 전 세계에 걸쳐, 꾸준히 증가하고 있는 사실로 미루어 그 연구가치가 높아지고 있음을 알 수 있다. 그 중에 극지 어류에 관한 연구는 꾸준한 결과를 보임(그림 20)

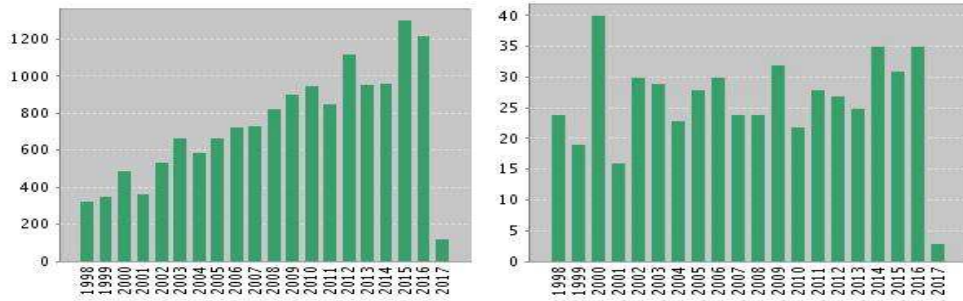


그림 20. 어류를 주제로 한 연구결과(좌) 와 극지 어류를 주제로 한 연구 결과(우)

다. BAS의 해양생물 연구시설

- BAS는 Cambridge 대학과 남극 Rothera Research Station, Bonner Laboratory and Dive facility (Lat. 67°35'8"S, Long. 68°7'59"W)에 각각 해양생물 채집, 유지 관리, 연구를 수행할 수 있는 최첨단 아쿠아리움과 다이버 시설을 갖추고, 활발한 연구를 수행하고 있음(그림 21)

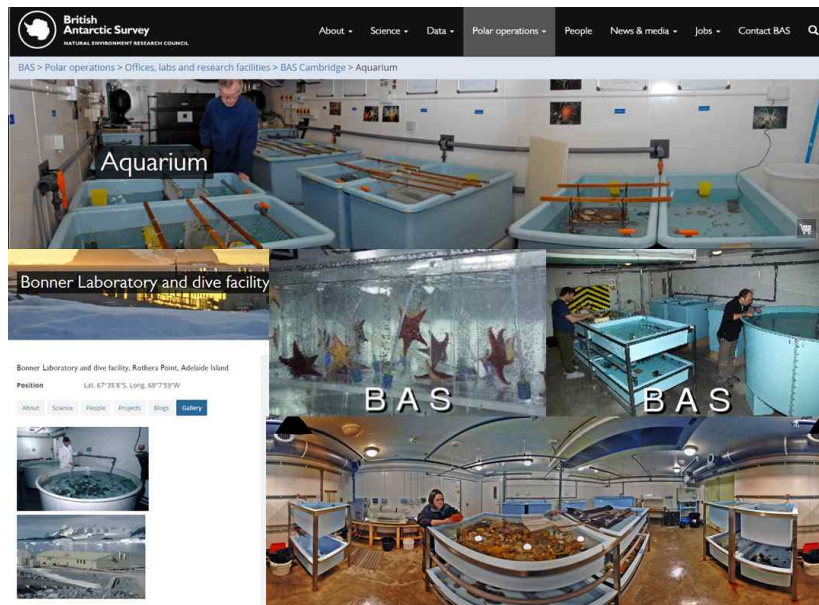


그림 21. BAS의 해양생물 연구 수행을 위한 아쿠아리움

라. McMurdo 기지의 해양생물 연구시설

- 1956년 건설된, 남극 대륙 최대의 상주기지인 McMurdo 기지는, 해양생물 연구에 있어서도 가장 오래되었을 뿐 만 아니라, 그 시설 면에 있어서도 가장 방대함(그림 22).
- 뉴질랜드 연구팀과 공동으로 사용하며, 그 큰 규모를 바탕으로, 남극 이빨고기와 Icefish 등 대형어류를 대상으로 한 생리연구 등이 수행가능 하며, 다이빙 시설과, 선박을 이용한 트롤 등을 이용한 대량의 생물을 확보하고 있음



그림 22. 맥머도 기지의 해양생물 연구시설

마. AAD의 해양생물 연구시설

- 오스트레일리아 남극 연구부는 Kingston, Tasmania에 가장 뛰어난 해양연구용 아쿠아리움을 갖추고 있음(그림 23, 그림 24)
- 이 시설을 이용한 주요 연구 분야는 크릴의 생리, 행동 및 번식에 관한 연구로서, 연구 선인 Aurora Australis를 이용하여, 남극기지에서 직접 다량의 살아있는 개체를 수송함으로써, 크릴 연구에 있어서 독보적인 역할을 하고 있음

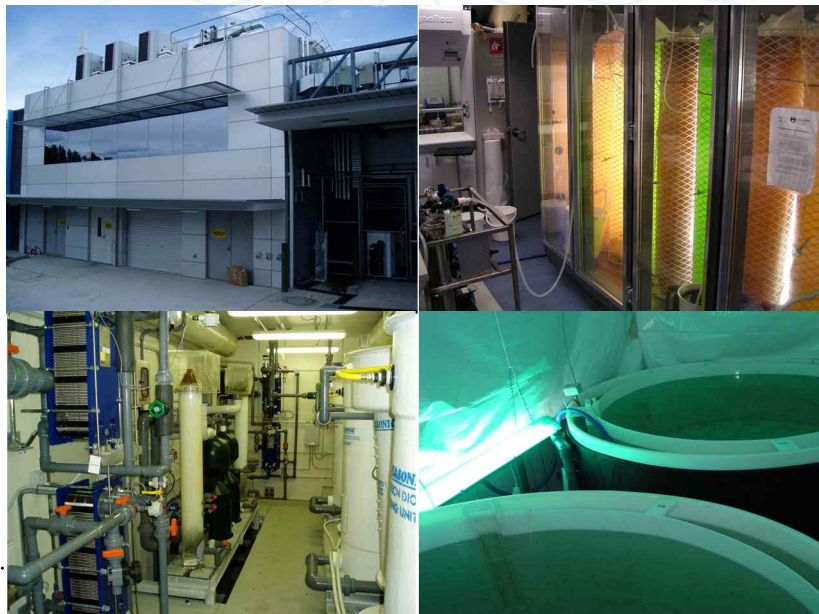


그림 23. AAD의 크릴 및 해양생물 연구용 아쿠아리움

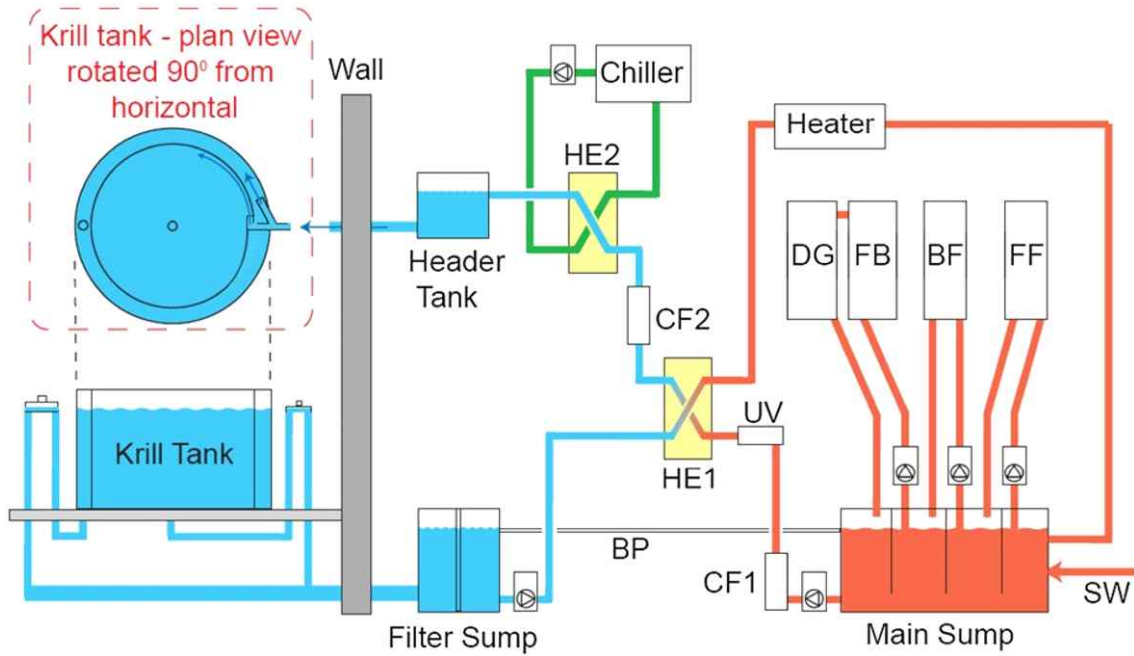


그림 24. AAD의 크릴 및 해양생물 연구용 아쿠아리움 설계도

마. UBC의 냉수성 어류 연구시설

- 캐나다 University of British Columbia는 대표적인 상업종이며 냉수종인 연어를 대상으로 다양한 생리 생물학적 연구가 가능한 대규모 아쿠아리움을 갖추고 있음(그림 25)



그림 25. UBC의 냉수성 어류 연구용 아쿠아리움

사. 극지 해양생물 배양시스템 구축

- 선진 연구기관 벤치마킹을 통해 확보한 연구시설 설계도를 바탕으로 극지 어류를 포함한 해양생물을 유지 배양할 수 있는 아쿠아리움 시스템을 구축함(그림 26-38)

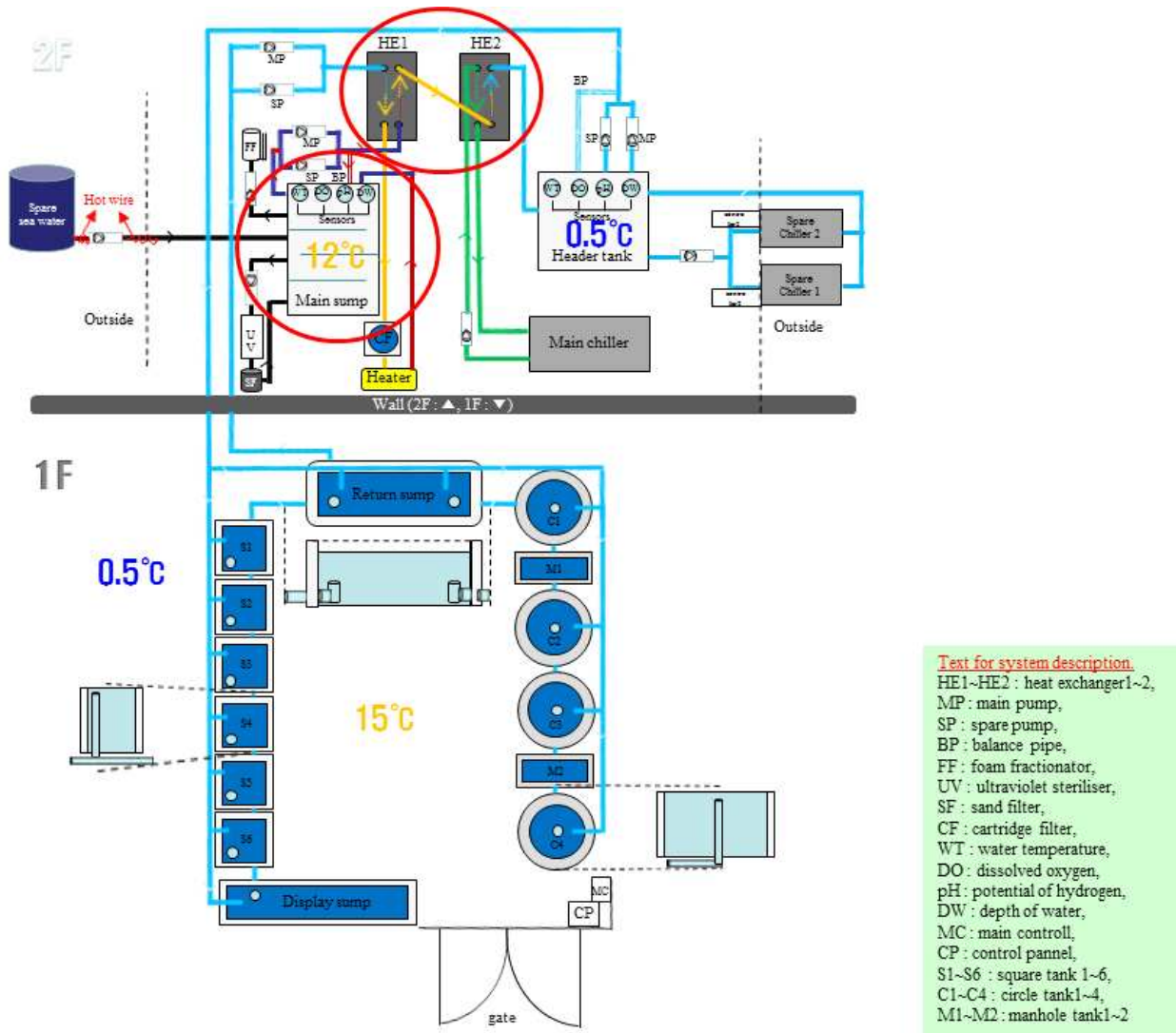


그림 26. 극지 해양생물용 배양시스템 설계도

- 극지 해양생물을 지속, 안정적으로 유지 배양하고 이를 연구 실험에 활용하기 위한 순환여과식 아쿠아리움 시스템
- 극지 해양생물의 사육 적수온인 썩씨 0-2도를 유지 하는 동시에, 여과 효율 향상과 어류에 독성을 일으키는 암모니아를 효과적으로 제거하기 위해 이중 열교환기를 이용한 가온 및 쿨링을 병행하는 자동화 시스템
- 적용 시스템의 특징
 - 극지 해양생물 유지 배양에 특화 됨
 - 전자동 순환여과식 아쿠아리움 시스템
 - 공간 활용을 위한 복층 구조 아쿠아리움

- 연구자의 편의를 위한 실내온도 유지가능
- 이중 열교환기 사용을 통한 에너지 효율 극대화
- 가온 및 쿨링이 일체화 된 시스템

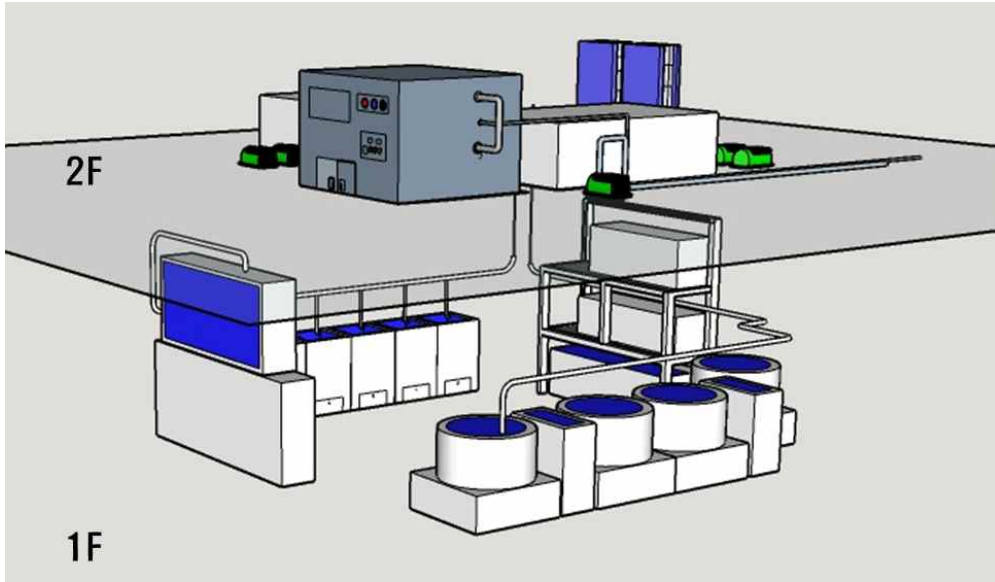


그림 27. 극지 해양생물용 배양시스템 모식도

● 시공 순서



바닥 배수



벽재 골조공사



복층 골조 설치



수조 설치

그림 28. 극지 해양생물용 배양시스템 시공 순서

● 완공



그림 29. 극지 해양생물용 배양시스템 수조



그림 30. 극지 해양생물용 배양시스템 사각수조

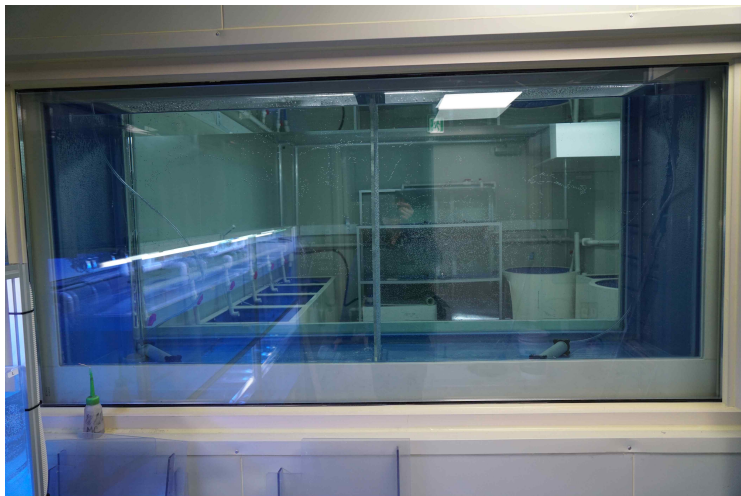


그림 31. 극지 해양생물용 배양시스템 전시용 수조



그림 32. 극지 해양생물용 배양시스템 기계 장치실



그림 33. 극지 해양생물용 배양시스템 냉각장치



그림 34. 극지 해양생물용 배양시스템 모래여과기



그림 35. 극지 해양생물용 배양시스템 외부 보충수



그림 36. 극지 해양생물용 배양시스템 모터터링 장치

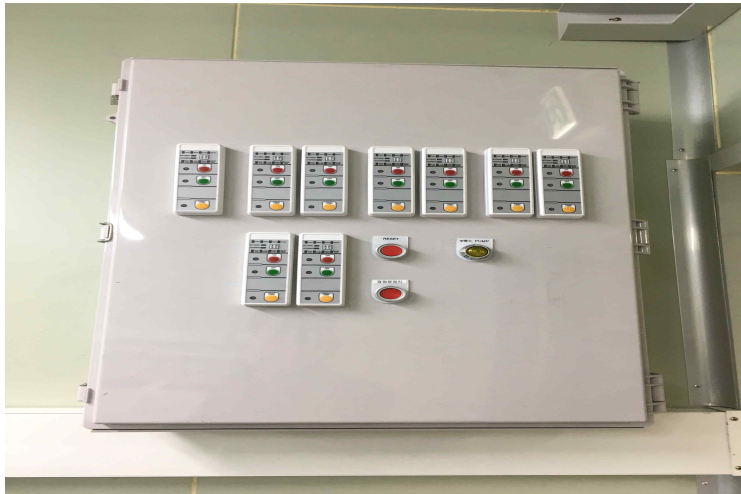


그림 37. 극지 해양생물용 배양시스템 컨트롤판넬



그림 38. 극지 해양생물용 배양시스템 비상경보장치

아. 기초 생리 실험 수행

- 대표적인 남극 극지 어류 두 종(*Notothenia coriiceps*, *Notothenia rossii*)을 대상으로 최대가온내성(CTMax)를 측정하고, 조직 내에서의 반응을 RNA-Seq 분석을 통해 전사체수준에서 조사하였음(그림 39)

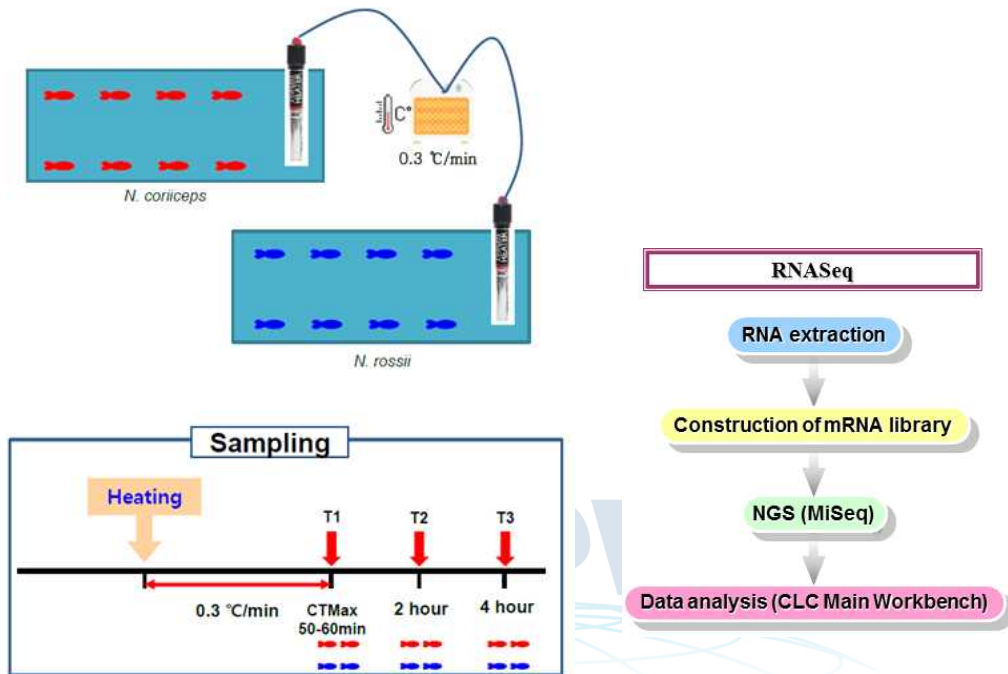


그림 39. 실험 디자인 및 분석방법

- 실험결과 *N. rossii*의 CTMax가 높았으나 통계적으로 유의하지 않은 값을 보였음(*N. coriiceps*: 17.95°C, *N. rossii*: 18.12°C)($P < 0.05$)

제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

1 절. 연구개발목표 달성도

1. 국내외 극지 어류연구 동향 및 연구 주제 분석 (완료)

- 국내외 극지 어류연구 주제의 의의와 파급성 파악

2. 선진 연구기관 연구시설 벤치마킹 (완료)

- 호주 극지연구소 크릴 배양시스템과 캐나다 UBC의 냉수성 어종 연구 아쿠아리움 견학 및 연구자 면담을 통한 연구 노하우 및 설계도 확보

3. 극지 어류 대상 기초생리 실험 수행 (완료)

- 대표적인 남극 어류 두 종에 대한 수온내성 최대치 파악 및 전사체 확보

3. 극지 해양생물 배양시스템 구축 (완료)

- 극지 어류를 포함 극지 중소형 해양생물을 유지 배양 할 수 있는 아쿠아리움 시스템 구축

2 절. 기대성과

1. 기술적 측면

- 극지 어류의 생리연구를 통해 해양 생물의 분자생리학적 특성을 파악하고, 기존의 유전체 정보를 병행 활용하여, 극지의 환경에서 적응하기 위해 극지 생물 특이적으로 진화한 극지생물의 적응 기작 규명이 가능
- 생물다양성협약(CBD), 세계생물다양성정보기구(GBIF), OECD 세계 생물자원센터 네트워크(GBRCN) 등을 통한 자원의 국가전략화 강화 추세 속에서 극지 어류를 포함 해양생물의 유용 유전자원확보 및 적응기작 규명을 위한 생리 연구는 극지연구소가 중점 적으로 투자 할 수 있는 분야일 뿐 만 아니라, 오믹스(유전체, 단백질체 등) 기술을 활용한 신 생물자원 발굴 및 확보에 활용 가능

- 선진 연구그룹의 벤치마킹을 통하여, 효율적으로 해양 생물 확보를 위한 체계적인 시스템 및 실험실 내 유지, 축양, 관리가 가능한 통합 시스템을 구축함으로써, 선진 그룹과의 격차를 빠르게 줄이는 계기 마련

2. 경제 산업적 측면

- 국내 외 극지생물 연구자들에게 극지 해양생물 특이적 환경기작 관련 데이터 및 실험 시료 공유를 통해 학문적/산업적 가치가 높은 유용 생물정보의 공동 활용이 가능
- 남극 유용 해양 생명자원의 산업화 가용성을 타진하고, 신성장 동력의 일환으로 활용가능
- 질적으로 우수한 연구 결과발표를 통한 국제적 연구위상 제고



제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

1절. 추가연구의 필요성

1. 남극 세종아쿠아존 연계

- 남극 세종기지, 측지관측동 내 설치 된, 냉각장치를 구비한 아쿠아리움(세종아쿠아존)을 활용하여 해양생물을 주제로 한 연구 성과를 도출 가능성을 타진함으로써, 연구소 기반 활용 가치 제고
- 기 확보된 유전체 정보를 활용함으로써 극지 생물 유전체 정보의 가치 제고
- 극지생물의 진화와 적응기작 연구가 상시 가능한 모델생물을 확보
- 극지환경의 변화 에 따른 해양 생물의 반응을 모니터링 할 수 있는 시스템 구축 예비자료
- 새로운 극지 연구자원 발굴을 통한 타 분야와의 융합연구 방안 모색
- 극지 해양생물 연구의 세계적 수준의 도달 및 선점

2. 모니터링 기술 접목

- 수중 모니터링이 가능한 ROV등 최신 기술을 접목하여 보다 다양한 생물 채집 방법 모색 및 생태 모니터링 방법 확보

2절. 타 연구에의 응용

1. 연구 네트워크 구성 및 활용연구

- 극지 해양생물 연구를 수행하는 연구 그룹과의 협업가능성을 타진하여 세계 연구 네트워크를 구성하고, 극지 생물 연구에 있어서 우리나라의 위상 제고
- 극지 해양생물 연구의 기초를 마련하여, 형질전환 기술, 유전자 에디팅 기술 등을 이용한 첨단 연구 그룹과의 협업을 통하여, 극지 생물자원 활용 기술 발전 도모

제 6 장. 참고문헌

- [1] Horwath, K.L., & Duman, J.G., 1983. Induction of antifreeze protein production by juvenile hormone in larvae of the beetle, *Dendroides canadensis*. Journal of comparative physiology. 151(2), 233-240.
- [2] Fletcher, G.L., Hew, C.L., Davies, P.L., 2001. Antifreeze proteins of teleost fishes. Annual review of physiology. 63(1), 359-390.
- [3] Kao, M.H., Fletcher, G.L., Wang, N.C., Hew, C.L., 1986. The relationship between molecular weight and antifreeze polypeptide activity in marine fish. Canadian journal of zoology. 64(3), 578-582.
- [4] Scott, G.K., Fletcher, G.L., Davies, P.L., 1986. Fish antifreeze proteins: recent gene evolution. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 43(5), 1028-1034.
- [5] Aparicio, S., Chapman, J., Stupka, E., Putnam, N., Chia, J. M., Dehal, P., Brenner, S., 2002. Whole-genome shotgun assembly and analysis of the genome of *Fugu rubripes*. Science. 297(5585), 1301-1310.
- [6] Kasahara, M., Naruse, K., Sasaki, S., Nakatani, Y., Qu, W., Ahsan, B., Kohara, Y., 2007. The medaka draft genome and insights into vertebrate genome evolution. Nature. 447(7145), 714-719.
- [7] Postlethwait, J. H., Yan, Y. L., Gates, M. A., Horne, S., Amores, A., Brownlie, A., Talbot, W. S., 1998. Vertebrate genome evolution and the zebrafish gene map. Nature genetics. 18(4), 345-349.
- [8] David, C., Lange, B., Krumpfen, T., Schaafsma, F., Andries van Franeker, J., Flores, H., 2015. Under-ice distribution of polar cod *Boreogadus saida* in the central Arctic Ocean and their association with sea-ice habitat properties. Polar Biology.
- [9] Shin, S.C., Kim, S.J., Lee, J.K., Ahn do, H., Kim, M.G., Lee, H., Lee, J., Kim, B.K., Park, H., 2012. Transcriptomics and comparative analysis of three antarctic notothenioid fishes, PLoS One. 7, e43762.
- [10] Shin, S.C., Ahn do, H., Kim, S.J., Pyo, C.W., Lee, H., Kim, M.K., Lee, J., Lee, J.E., Detrich, H.W., Postlethwait, J.H., Edwards, D., Lee, S.G., Lee, J.H., Park, H., 2014. The genome sequence of the Antarctic bullhead notothen reveals evolutionary adaptations to a cold environment, Genome Biol. 15, 468.
- [11] Duman, J.G. and A.L. de Vries, 1976. Isolation, characterization, and physical properties of protein antifreezes from the winter flounder, *Pseudopleuron ectesamericanus*. Comp Biochem Physiol B. 54(3), 375-80.
- [12] John, U.P., et al., 2009. Ice recrystallization inhibition proteins (IRIPs) and freeze tolerance in the cryophilic Antarctic hair grass *Deschampsia antarctica* E. Desv. Plant Cell Environ. 32(4), 336-348.
- [13] Harding, M.M., Anderberg, P.I., Haymet, A.D., 2003. 'Antifreeze' glycoproteins from polar fish, Eur J Biochem. 270, 1381-92.
- [14] Graham, M.S., Fletcher, G.L., Haedrich, R.L., 1985. Blood viscosity in arctic fishes, J Exp Zool. 234, 157-60.
- [15] Nilsson, S., Forster, M.E., Davison, W., Axelsson, M., 1996. Nervous control of the spleen in the red-blooded Antarctic fish, *Pagothenia borchgrevinki*, Am J Physiol. 270, R599-604.
- [16] Sazykina, T.G., Kryshev, II., 1997. Current and potential doses from Arctic seafood consumption, Sci Total Environ. 202, 57-65.
- [17] Montgomery, J.C., Foster, B.A., Cargill, J.M., 1989. Stomach evacuation rate in the planktivorous Antarctic fish *Pagothenia borchgrevinki*. Polar Biology. 9(6), 405-408.

- [18] van Oort B.E., Tyler N.J., Gerkema M.P., Folkow L., Blix A.S., Stokkan K.A., 2005 "Circadian organization in reindeer". *Nature*, 438: 1095-6.
- [19] Folk, G.E., Thrift, D.L., Zimmerman, M.B., Reimann, P.C., 2006. "Mammalian activity - rest rhythms in Arctic continuous daylight". *Biological Rhythm Research*. 37(6): 455-469.
- [20] Richards, J.G., 2009. Metabolic and molecular responses of fish to hypoxia. In *Hypoxia*, Vol. 27 (ed. Richards, J.G., Farrell, A.P., Brauner, C.J.), pp. 443-485. San Diego: Elsevier.
- [21] Lefevre, S., Damsgaard, C., Pascale, D.R., Nilsson, G.E., Stecyk, J.A., 2014. Air breathing in the Arctic: influence of temperature, hypoxia, activity and restricted air access on respiratory physiology of the Alaska blackfish *Dallia pectoralis*, *J Exp Biol*. 217, 4387-98.
- [21] Jeffrey, W. H., Aas, P., Maille Lyons, M., Coffin, R. B., Pledger, R.J., Mitchell, D.L., 1996. *Photochem. Photobiol.* 64, 419 - 427.
- [23] Worrest, R.C., Brooker, D.L., Van Dyke, H., 1980. *Limnol. Oceanogr.* 25, 360 - 364.
- [24] Damkaer, D.M., Dey, D.B., Heron, G.A., 1981. *Oecologia*. 48, 178 - 182.
- [25] Malloy, K.D., Holman, M.A., Mitchell, D., etrich, H.W., 3rd, 1997. Solar UVB-induced DNA damage and photoenzymatic DNA repair in antarctic zooplankton, *Proc Natl Acad Sci USA*. 94, 1258-63.
- Madrid Protocol. (<http://www.ejil.org/pdfs/11/3/544.pdf>)
- Antarctic Environment Protection Act of 1996.
(https://en.wikipedia.org/wiki/Antarctic_Treaty_System)
- 극지교육자료, 극지연구소 (http://www.kopri.re.kr/home/contents/m_4110000/view.cms)