

극지 해양 환경 예측 역량 향상을 위한
해빙 생태계 역학 모델 개발

Development of a Sea-Ice Ecosystem Dynamics Model for
Enhanced Prediction of Polar Marine Environments



극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 해양 환경 예측 역량 향상을 위한 해빙 생태계 역학 모델 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2026. 6. 26

연구책임자 : 권영신



보고서 초록

과제관리번호	PE25310	해당단계 연구기간	20250401 ~ 20260331	단계 구분	1/1
연구사업명	중 사 업 명	연구·정책지원사업			
	세부사업명	신진연구원 지원과제			
연구과제명	중 과 제 명	-			
	세부(단위)과제명	극지 해양 환경 예측 역량 향상을 위한 해빙 생태계 역학 모델 개발			
연구책임자	권 영 신	해당단계 참여연구원수	총 : 1 명 내부 : 0 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 해양대기연구본부		참여기업명	-	
국제공동연구	상대국명 :	-	상대국연구기관명 :	-	
위 탁 연 구	연구기관명 :	-	연구책임자 :	-	
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수 75
- 기존 SPBM(Sea-ice Pelagic Benthic Model)을 기반으로 남극 연안 해빙 환경에 적합한 해빙 생태계 역학 모델로 고도화하였음. 해빙을 단순한 물리 경계가 아니라 독립적인 생태·생지화학 반응 공간으로 다루도록 구조를 개선하였음. - 해빙조류 저온 최적 성장, 수층 전용 동물플랑크톤의 해빙 진입 제한, 외부 농도 기반 N·P·Fe 제한, 규산 재순환, 총 알칼리도 및 CO₂ 플럭스 계산, 해빙 내 Fe 농축과 빠른 재광물화 등을 반영하여 극지 해빙 생태계의 핵심 과정을 구현하였음. - FABM 변수 연결 보완, 연일수·해수 밀도 입력 오류 수정, 해빙 성장·소멸 시 수치 안정성 강화, GLORYS 재분석 기반 해빙·적설 입력 도입 등을 통해 물리-생지화학 결합 정확도와 모델 안정성을 향상시켰음. - ASPeCt-Bio 자료를 활용하여 ASP, TNB, WAP 3개 지역의 해빙 내 엽록소·영양염 및 수층 물리 환경 자료를 정리하고, 월별·수직구조 비교가 가능한 관측-모형 검증 체계를 구축하였음. 모델은 세 지역의 해빙 두께, 해빙 온도·염분, 수층 수온·염분, 엽록소·영양염의 주요 계절 및 수직 구조를 전반적으로 양호하게 재현하였음. - 물리 환경 비교 결과, TNB는 가장 두껍고 차가운 해빙과 뚜렷한 C-type 염분 구조를, WAP는 가장 얇고 온난한 해빙과 빠른 I-type 전환 특성을, ASP는 그 중간적 특성을 나타냈음. 이는 이후 생산성, 철 공급, 탄소순환의 지역별 차이를 설명하는 핵심 배경으로 작용하였음. - 해빙 두께 60% 감소 민감도 실험에서는 세 지역 모두 광환경은 개선되었으나, 생태계 반응은 지역별로 다르게 나타났음. ASP는 해빙 생산 감소와 수층 생산의 부분 보상이 함께 나타나는 재편형, TNB는 수층 생산과 CO₂ 흡수 기능이 비교적 유지되는 완충형, WAP는 수층 생산과 먹이망, CO₂ 흡수 기능이 크게 약화되는 취약형 반응을 보였음. 특히 WAP에서는 해빙 생태계 변화가 남극 연안 탄소순환의 방향 자체를 바꿀 수 있음을 확인하였음.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극 해빙 생태계; 해빙-표영 결합모형; 해빙 두께 민감도; 철 제한과 1차생산; 탄소 순환 및 CO ₂ 플럭스			
	영 어	Antarctic sea-ice ecosystem; sea ice-pelagic coupled model; sea-ice thickness sensitivity; iron limitation and primary production; carbon cycle and CO ₂ flux			

요 약 문

I. 서론

본 연구는 기존 SPBM을 기반으로 남극 연안 해빙 환경에 보다 적합한 해빙 생태계 역학 모델을 개발하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 해빙조류의 저온 적응 성장, 해빙 - 수층 간 서식지 제약, 외부 농도 기반 영양염 및 철 제한 등 기존 모델이 충분히 반영하지 못했던 극지 고유 과정을 도입하고자 하였다. 연구 범위는 ASP, TNB, WAP 세 지역을 대상으로 한 1차원 결합모형 구축, 관측자료 기반 검증, 해빙 두께 감소 민감도 평가를 포함한다. 궁극적으로는 해빙을 단순한 물리 경계가 아니라 독립적인 생태·생지화학 반응 공간으로 표현하여, 극지 해양 생태계 변화 예측의 정확성과 신뢰성을 높이는 데 목적이 있다.

II. 국내외 기술개발 현황

국외에서는 해양-해빙-생지화학 결합 모델(ESM)을 활용하여 해빙 내부 생태계의 고해상도 모사를 시도하는 등 기술적 진보가 빠르게 이루어지고 있으나, 해빙 내부 서식지 이질성, 기능군별 생리 차이, 철 및 탄산염계 결합, 관측 기반 검증의 한계는 여전히 남아 있다. 국내에서는 극지 관측자료 축적과 남극 연안 저차 영양단계 모델 응용은 이루어져 왔으나, 해빙 생태계를 독립적 sympagic domain으로 명시하고 이를 정량적으로 재현한 사례는 매우 제한적이다. 본 연구는 이러한 공백을 보완하여, 기존 SPBM을 해빙 고유 과정 중심으로 고도화한 국내 선도 사례로 자리매김한다.

III. 연구개발수행 내용 및 결과

본 연구에서는 기존 SPBM에 해빙 생태계 역학 모듈을 추가·개선하여, 해빙조류 저온 최적 성장 함수, 수층 전용 동물플랑크톤의 해빙 진입 제한, 외부 농도 기반 N·P·Fe 제한, 규산 재순환 강화, 총 알칼리도 연동, 철 재광물화 개선 등을 구현하였다. 또한 DOY·밀도 연결 오류 수정, 해빙 성장·소멸 시 수치 안정성 보강, GLORYS 재분석 기반 해빙·적설 입력 도입 등을 통해 물리 - 생지화학 결합 정확도도 높였다. 모델은 ASPeCt-Bio 관측자료를 이용한 검증에서 해빙 두께, 해빙 내부 온도·염분 구조, 수층 수온·염분의 계절 변동과 엽록소·영양염의 주요 수직 구조를 전반적으로 양호하게 재현하였다. 해빙 두께 감소 민감도 실험에서는 ASP와 WAP에서 총 생산성 저하가 뚜렷했고, TNB에서는 수층 생산 유지로 일부 보상 효과가 나타났으며, 특히 WAP에서는 CO₂ 흡수 기능이 크게 약화되어 가장 취약한 반응을 보였다.

IV. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 과제는 단년도 신진연구자 지원사업으로 수행되었으며, 제안서에서 제시한 핵심 목표인 해빙 - 표영 생태계 프로세스 이해, 통합 1차원 모형 구축, 관측 기반 검증, 미래 민감도 평가를 계획 범위 내에서 전반적으로 달성하였다. 특히 기존 SPBM의 구조적 한계를 보완하여 해빙 특이적 생리·행동·물질순환 과정을 반영한 모델 프레임워크를 제시했다는 점에서 학술

적 기여가 크다. 또한 동일한 모델 틀로 서로 다른 남극 연안 세 해역을 비교하고, 관측자료 검증과 미래 민감도 실험을 통합 수행함으로써 후속 논문화와 국제학술 발표로 이어질 수 있는 기반을 마련하였다. 이 성과는 향후 극지 생태계 모델 고도화와 해빙 생태계 기반 정책지원 연구의 중요한 출발점이 될 수 있다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 구축한 결합모형과 검증 체계는 향후 남극해 전역으로의 적용 확대, 머신러닝 기반 매개변수 최적화, 철 및 영양염 순환 고도화, 실제 기후변화 시나리오와 연계한 장기 예측 연구에 활용될 수 있다. 또한 물리-생태 결합 분석 방법론은 북극해 및 기타 계절빙 해역 연구, 극지 생태계 취약성 평가, 해양 탄소흡수 기능 진단, 지구시스템모형 내 해빙 생태계 모듈 개선 등에 응용 가능하다. 직접적인 단기 사업화보다는 공공 활용성이 높은 기초 연구 성격이 강하지만, 장기적으로는 극지 환경예측 및 정책지원 기술의 핵심 기반으로 기능할 수 있다. 따라서 본 연구 성과는 후속 모형 개발과 광역 예측 시스템 구축을 위한 플랫폼형 연구 자산으로 활용 가치가 높다.



목 차

제 1 장 서론

- * 연구개발의 목적,필요성 및 범위 등을 기술

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- * 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황과 연구결과가 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 등을 기술

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- * 이론적, 실험적 접근방법, 연구내용, 연구결과를 기술

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- * 연도별 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전에의 기여도 등을 기술

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- * 추가연구의 필요성, 타연구에의 응용, 기업화 추진방안을 기술
- * 연구기획사업 등 사업별 특성에 따라 목차는 변경 가능함.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

- * 보고서 작성시 인용된 모든 참고 문헌을 열거한다.

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

본 연구의 목적은 기존 SPBM(Sea-ice Pelagic Benthic Model; Yakubov et al., 2019)을 기반으로, 남극 연안 해빙 환경에서 나타나는 실제 생태·생지화학 과정을 보다 정밀하게 재현할 수 있는 해빙 생태계 역학 모델로 고도화·개발하는 데 있다. 본 연구는 단순히 기존 모델에 기능을 일부 추가하는 수준이 아니라, 해빙과 표영 환경을 동일한 생태적 공간으로 간주하던 기존 접근의 한계를 보완하고, 해빙 내부 및 해빙 - 수층 경계면에서 작동하는 고유한 과정을 명시적으로 반영할 수 있는 모델 구조를 구축하는 것을 목표로 한다. 초기 연구 계획서에서도 기존 모형들이 해빙과 표영 환경의 기능군을 사실상 동일하게 취급하고, 생물들이 물리적 결빙·융해에 따라 얼음과 수층 사이를 수동적으로 이동하는 형태로 가정함으로써, 극지 해양 생태계의 특수성을 충분히 재현하지 못한다고 지적한 바 있다.

기존 SPBM은 해빙 - 표영 - 저서 생태계를 연계하여 다룰 수 있는 유용한 기반 틀을 제공하지만, 실제 극지 해양의 생태적 비대칭성과 생리적 차이를 반영하는 데에는 제약이 있었다. 예를 들어 일부 대형 동물플랑크톤은 해빙 내부의 고염도 brine 환경에 적응하지 못해 수층에만 존재함에도 (Flores et al. 2012), 기존 모델은 결빙 과정에서 모든 생물 변수를 일괄적으로 해빙 레이어로 이동시켜 이러한 서식지 제약을 반영하지 못하였다. 일차생산자 표현 측면에서도 기존 모델은 수층 식물플랑크톤과 해빙조류에 동일한 온도 반응 함수를 적용하였으나, 실제 빙조류는 일반 식물플랑크톤과 달리 저온 조건에서 최적 성장하고 온도가 상승하면 성장성이 억제되는 반응을 보인다 (Martin et al., 2012). 따라서 단일 Q10 기반 함수만으로는 해빙조류 생산성을 구조적으로 오판할 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 해빙조류 전용 저온 최적 시그모이드 함수를 도입하여, 동일 모델 내에서도 빙조류와 수층 식물플랑크톤의 생리 반응을 구분할 수 있도록 하였다.

영양염 및 미량원소 제한 방식 역시 기존 구조의 중요한 한계 중 하나였다. 기존 SPBM에서는 일차생산자의 성장 제한을 세포 내 저장량(quota)에 기반한 방식으로 계산하여 생리적 과정을 비교적 정교하게 표현할 수 있다는 장점이 있었으나, 현장 관측에서 직접 확보할 수 있는 외부 영양염 농도와 모형 결과를 직접적으로 비교·검증하기 어렵다는 한계가 있었다. 특히 남극 연안의 해빙 및 표층 해양에서는 철, 질소, 인, 규산염의 제한 양상이 계절과 해역에 따라 복합적으로 달라지므로 (Sedwick et al., 2000; Henley et al., 2023), 관측 자료와의 직접 연계 및 매개변수 보정이 가능한 구조가 필요하다. 이에 본 연구에서는 N·P·Fe 제한을 외부 농도 기반의 Michaelis - Menten 방식으로 전환하고, 철 단독 제한뿐 아니라 영양염과 철의 복합 제한이 가능하도록 모형 구조를 수정하였다.

더 나아가 기존 SPBM은 규산과 철 재순환, 동물플랑크톤 월동, 총 알칼리도 변화와 같은 생지화학 결합 과정에서도 단순화가 남아 있었다. 규조류 사망 플릭스를 전량 입자성 규산으로 처리하는 방식은 현장 재용해를 과소평가할 수 있으며, 월동 과정을 on/off 스위치로 표현하는 것은 극지 동물플랑크톤의 연속적인 대사 저하와 회복을 충분히 재현하지 못한다. 또한 생물 과정에 의한 총 알칼리도 변화를 반영하지 않으면 탄산염계 진단의 정합성이 떨어

질 수 있다. 이에 본 연구에서는 규산과 철 재순환 강화, 연속적 월동 함수 도입, N·P 배출과 총 알칼리도 연동을 새롭게 구현하였다.

모델의 과학적 표현력뿐 아니라 수치적 안정성과 결합 정확도 측면에서도 개선이 필요하였다. 기존 구조에서는 연중 날짜(day of year, DOY)와 해수 밀도와 같은 일부 물리 변수가 FABM 전역에 일관되게 전달되지 않아, 탄산염계 계산이나 태양 천정각 계산의 정확도에 영향을 줄 가능성이 있었다. 또한 해빙의 성장과 소멸이 급격하게 일어날 때 배열 인덱스 범위를 초과하는 문제가 발생할 수 있어, 해빙 두께 변화가 큰 조건에서 모델의 안정적 구동을 저해할 우려가 있었다. 따라서 본 연구에서 수행한 오류 수정과 구조 단순화는 단순한 코드 정비가 아니라, 해빙 생태계 모의 결과의 정확성과 신뢰도를 높이기 위한 필수적인 개발 과정이었다. 또한 Kwon et al. (2023)에서 사용된 SPBM original 버전은 해빙 두께를 1차원 열역학적으로만 계산하였으며, 적설(snow depth)의 영향을 고려하지 않았다. 그러나 실제 해빙 환경에서 적설은 단열 효과, 광 투과 조절, 해빙 성장 및 용해 과정에 중요한 영향을 미치는 요소이므로, 이를 제외할 경우 모델 결과와 자연계 사이의 차이가 커질 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 이미 존재하는 SPBM을 반복적으로 사용하는 데 있지 않다. 오히려 기존 SPBM이 제공하는 통합 골격을 유지하되, 해빙 생태계 고유의 서식지 제약, 행동학적 과정, 저온 생리 반응, 영양염·철 제한, 규산 및 탄산염 순환, 그리고 수치 안정성을 새롭게 반영함으로써, 기존 모델이 가지는 구조적 한계와 단순화를 극복한 차세대 해빙 생태계 모델 프레임워크를 마련하는 데 있다. 이는 당초 제안서에서 제시한 바와 같이 해빙과 표영 생태계 간 구조와 상호작용을 정밀히 모사하고, 양극해 생태계 변화 예측의 정확성과 신뢰성을 향상시키기 위한 핵심 기반 연구에 해당한다.

제 2 절 연구개발의 필요성

본 연구의 필요성은 남극 연안 해빙 생태계가 극지 해양의 생산성과 물질순환에 중요한 역할을 함에도 불구하고, 이를 정량적으로 재현할 수 있는 모델 기반이 아직 충분하지 않다는 점에서 출발한다. 해빙은 단순한 계절성 얼음 덮개가 아니라, 빙조류와 미생물이 서식하고 영양염, 유기물, 미량원소가 재분배되는 독립적인 반응 공간이다(그림 1&2). 또한 해빙의 성장과 용해는 표층 광환경, 성층, 영양염 공급 및 생물계절성에 직접적인 영향을 미치므로, 남극 연안 생태계의 계절 변동을 이해하기 위해서는 해빙 생태계를 별도의 과정으로 다룰 필요가 있다.

그러나 기존 해양 생태계 모델은 주로 수층 과정을 중심으로 발달해 왔으며, 해빙 생태계는 부수적이거나 단순화된 요소로 취급되는 경우가 많았다(Hunke et al., 2011; Tedesco et al., 2014; Tedesco et al., 2026). 당초 연구계획서에서도 해빙 내부 구조와 미세 물리·생물학적 과정을 지나치게 단순화하고, 영양염 및 미량원소의 운반과 재분배, 해빙-수층 접합면의 상호작용을 충분히 반영하지 못하는 점을 주요 한계로 제시한 바 있다. 이로 인해 해빙 내부 생물량 형성, 용해기 방출, 해빙이 표영 생태계와 생지화학 순환에 미치는 영향을 연속적으로 해석하는 데 제약이 있었다.

특히 기존 SPBM은 해빙 - 표영 - 저서를 연계한 유용한 통합 틀을 제공하지만, 실제 해빙 생태계의 특수성을 반영하기에는 여전히 부족한 점이 있었다. 예를 들어 해빙과 수층 생물의 서식지 차이, 해빙조류의 저온 적응 특성, 외부 영양염 농도에 기반한 제한 반응, 규산 및 철 재순환, 월동에 따른 연속적 대사 변화, 총 알칼리도와와의 연계, 그리고 해빙 성장·소멸 과정에서의 수치 안정성 등은 추가적인 개선이 필요한 영역이었다. 따라서 기존 SPBM을 그대로 적용하는 것만으로는 남극 연안 해빙 환경의 핵심 생태·생지화학 과정을 충분히 재현하기 어려웠다.

결국 본 연구는 해빙 생태계를 표영 생태계의 단순한 연장으로 보지 않고, 독립적 구조와 기능을 가진 반응 공간으로 모의할 수 있도록 기존 SPBM의 한계를 보완할 필요에 의해 수행되었다. 이는 남극 연안 해역에서 해빙 존재가 생물 생산성, 영양염 순환, 탄소 및 규산 순환에 미치는 영향을 보다 현실적으로 이해하고, 향후 극지 해양 생태계 변화 예측의 신뢰성을 높이기 위한 기반을 마련한다는 점에서 연구 필요성이 크다.

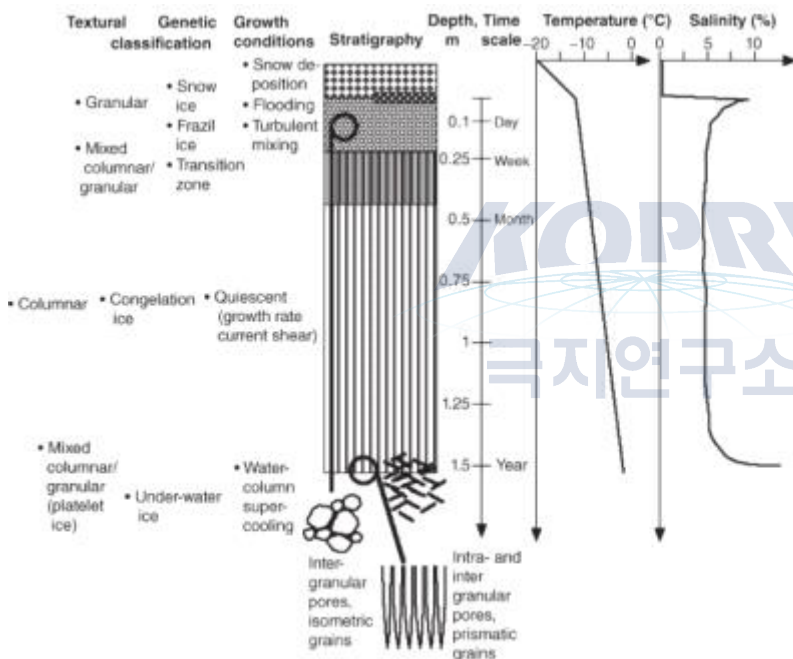


그림 1. 1년생 해빙의 주요 조직 유형, 형성 조건, 시간 규모 및 전형적인 겨울철 온도·염분 연직구조의 개념도. 해빙은 성장 과정에서 조직과 기공 구조가 변화하며, 이에 따라 염분, brine volume, 물질교환 및 생물 서식 가능성이 크게 달라진다. 본 연구는 이러한 해빙 내부의 구조성과 과정 의존성을 생태계 모형에 반영하고자 하였다. (Petrich and Eicken, Sea Ice, 3rd ed., Figure 1.6)

제 3 절 연구개발의 범위

본 연구는 남극 연안 해역을 대상으로, 기존 SPBM 기반의 1차원 해빙 - 표영 - 저서 결합 모델을 바탕으로 해빙 생태계 역학 모듈을 개발·개선하고, 이를 관측자료와 비교하여 검증 가능한 수준으로 고도화하는 것을 범위로 한다. 제안서에서는 연구 범위를 크게 세 단계로 설정하였다. 첫째, 해빙 및 표영 생태계 관련 관측자료의 수집과 구조 분석, 둘째, 개념 모형을 수학적 방정식과 Fortran 코드로 구현한 통합 1차원 모델의 구축, 셋째, 관측자료 기반

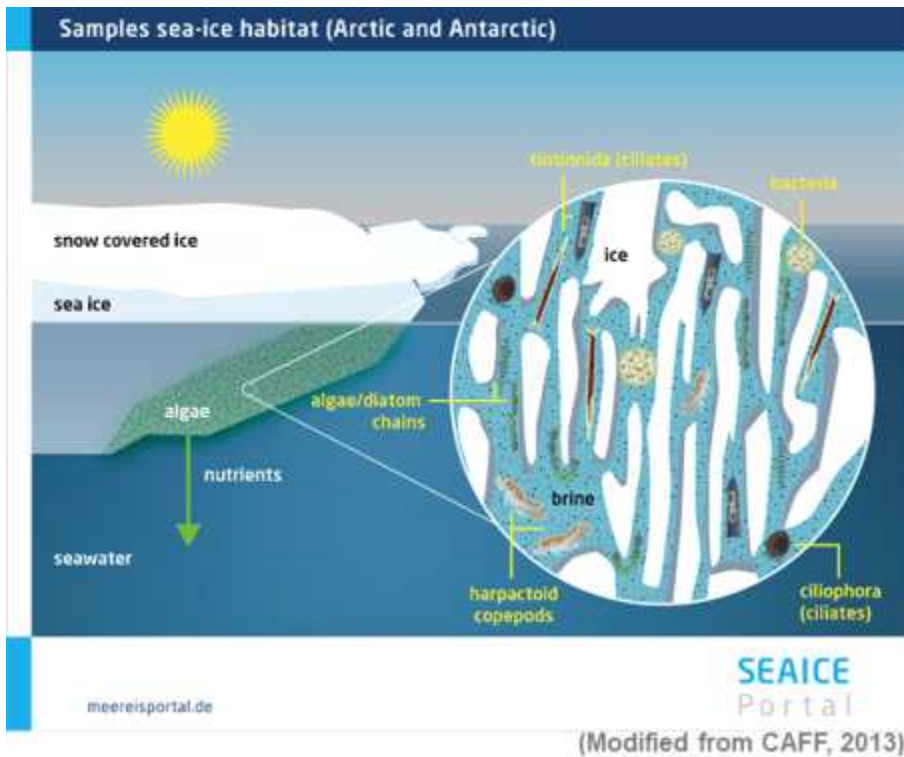


그림 2. 해빙 내부에 서식하는 미세 생물들과 brine channel을 표현한 모식도.

모델 검증과 단순 미래 시나리오 적용이다. 또한 해빙 두께, 수온, 염분, 영양염, 생물량 등 다양한 자료를 활용하여 개념 모형을 정립하고, 해빙-표영 연계를 반영할 수 있는 결합 구조를 마련하는 것을 포함하였다.

실제 수행 범위는 제안 단계에서 제시한 큰 방향을 유지하되, 특히 해빙 생태계의 생태역학 과정 개선과 모델의 수치·구조 개선에 중점을 두었다. 생태역학 과정 측면에서는 해빙 생태계와 수층 생태계가 동일한 기능군 구조를 공유한다는 기존 가정을 완화하고, 해빙 특이적 생리 및 행동 특성을 반영할 수 있도록 모듈을 개선하는 것을 범위에 포함하였다. 구체적으로는 수층 전용 동물플랑크톤의 해빙 내 진입 제한, 해빙조류 전용 저온 최적 온도 반응 함수 도입, 외부 농도 기반 영양염·철 제한 구조 도입, 규산 재순환 개선, 동물플랑크톤 월동 과정의 연속적 표현, 생물 과정에 의한 총 알칼리도 변화 반영 등이 이에 해당한다. 이러한 내용은 해빙 생태계의 독립성과 수층 생태계와의 차별성을 보다 명시적으로 반영하기 위한 핵심 개발 범위였다.

물리-생지화학 결합과 수치 안정성 측면에서는 FABM 전역 변수 연결 보완, 연일수(DOY) 및 해수 밀도 입력 오류 수정, 탄산염 계산 정확도 향상, 해빙 성장·소멸 시 배열 범위 초과 문제 해결, 모델 구성의 단순화 및 안정화 등을 수행 범위에 포함하였다. 또한 해빙 두께 및 적설 자료의 활용을 통해 물리 구동의 현실성을 높이고자 하였다. 특히 DOY와 밀도 변수의 일관된 연결은 광량 계산과 탄산염계 진단 정확도 향상에 직접적으로 기여하며, 해빙 성장·소멸 과정에서의 경계 보호는 급격한 해빙 변화 조건에서도 모델을 안정적으로 구동하기 위한 필수 조치에 해당한다. 이와 함께 적용 해역 특성에 맞추어 일부 불필요한 침강·완화 항을 비활성화하고 종 분류를 정리하는 등 구조 최적화도 포함하였다. 이러한 수치적·구조적 개

선은 단순한 코드 정비가 아니라, 해빙 생태계 과정의 해석 가능성과 모형 신뢰도를 높이기 위한 기반 범위였다.

본 연구의 공간적 범위는 남극해 전역의 일반적 메커니즘 이해를 지향하되, 사례 해역으로 아문젠해(ASP), 테라노바만(TNB), 서남극반도(WAP)와 같이 관측자료가 비교적 축적된 고생산성 해역을 우선 활용하는 방식으로 설정하였다. 즉, 공개 데이터베이스 자료를 폭넓게 수집하되, 대표 해역에 대한 사례 연구를 통해 모형 검증을 수행하고, 이를 바탕으로 향후 보다 넓은 남극해 영역으로 확장할 수 있는 토대를 마련하는 것을 범위에 포함하였다. 따라서 본 연구의 범위는 특정 정점이나 단일 계절의 재현에 국한되지 않으며, 해빙 - 표영 생태계 상호작용의 보편적 구조를 설명할 수 있는 과정 기반 모형 틀을 구축하는 데 있다.

종합하면, 본 연구의 범위는 해빙 내부 구조와 생리적 차이를 충분히 반영하지 못하던 기존 단순화 모델에서 한 단계 나아가, 해빙 특이적 기능군, 물질순환, 행동 과정, 그리고 수치 안정성을 함께 반영한 해빙 생태계 모형으로 SPBM을 고도화하는 데 있다. 이는 관측자료 해석, 대표 해역 적용, 민감도 실험, 그리고 향후 다차원화 및 지구시스템 모형 연계로 확장될 수 있는 중간 규모의 과정 기반 모델 개발 연구로서 의미를 가진다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

국외에서 해빙 생태계 모델링은 상당한 축적이 이루어져 온 분야이다. 초기에는 해빙 내 미세조류의 성장과 광·염·영양염 반응을 다루는 해빙 내부만의 과정 모델이 중심이었고, 이후 해빙-수층-저서를 연계한 결합 생지화학 모델로 확장되어 왔다. 해빙 생지화학 모델 전반을 정리한 리뷰는 해빙 모델이 과정 이해와 미래 예측, 타 생태계와의 상호작용 연구에 핵심 도구로 활용되어 왔음을 보여준다 (Vancoppenolle & Tedesco 2017).

이후 국외 기술은 단순한 해빙 조류 생산 모의에서 나아가, pelagic - benthic - sympagic 결합모델과 ocean - sea ice - biogeochemistry 결합모델로 발전하였다. 대표적으로 Bering Sea의 BESTNPZ는 pelagic - benthic - sympagic 생지화학을 한 체계 안에서 문서화·검증한 사례이며, 동부 Bering Sea 환경의 하위 영양단계 및 계절 변동을 모의하기 위한 대표적인 지역 결합모델로 자리잡고 있다 (Kearney et al. 2020; Cheng et al. 2021). 보다 큰 규모에서는 AWI 계열의 FESOM - REcoM 계열처럼 해양 - 해빙 - 생지화학 결합 모델이 발전해 왔다. 최근의 FESOM2.1 - REcoM3 - MEDUSA2 기술 논문은 REcoM이 탄소, 산소, 질소, 규소, 철 순환을 다루는 ocean biogeochemistry and ecosystem model임을 명시하고 있으며, 이를 해빙과 결합해 장기 기후·탄소 순환 문제까지 다루고 있다. 다만 이러한 대규모 모델은 계산 효율과 광역 적용성을 중시하기 때문에, 해빙 내부 생물군집의 세부 서식지 제약이나 행동학적 과정을 구현하는 데에는 아직도 많은 한계가 남아 있다 (Ye et al. 2023&2025).

남극 fast ice 자체를 대상으로 한 정량화도 최근까지 계속 진행 중이다. 2024년에는 남극 landfast sea ice의 연간 총 1차 생산을 범남극 규모로 추정한 연구가 발표되었는데, 이는 남극 fast-ice 생산성의 첫 circum-Antarctic 규모 추정이라는 점에서 의미가 크다. 반대로 말하면, 남극 해빙 생태계의 대규모 정량화가 아직도 최신 연구 주제라는 뜻이기도 하다. 이어진 2025년 관측 기반 순생산 추정 연구 역시 해빙 생태계가 남극 생산성과 탄소 순환에 의미 있는 기여를 한다는 점을 다시 보여준다(Wongpan et al. 2024; Dalman et al. 2025).

동시에 국외에서도 기술적 한계는 분명하다. 최근 1차원 sea-ice biogeochemical model intercomparison 연구는 기본 설정 상태에서 여러 모델이 조류 phenology와 nutrient dynamics를 완전히 재현하지 못했으며, 튜닝 후에도 영양염 재현은 제한적이었다고 보고했다. 이는 해빙 생태계 모델링이 국제적으로 활발하더라도, 여전히 관측 부족, 과정 단순화, 파라미터 불확실성 문제가 남아 있음을 뜻한다. 사용자가 보유한 계획서 역시 국외 동향을 정리하면서 해빙 내부 구조 단순화, 관측 자료 부족, 영양염·미량원소 파라미터화 미비, 해빙 - 표영 상호작용의 부분적 구현을 현 기술의 공통 한계로 제시하고 있다 (Tedesco et al. 2026).

정리하면, 국외 기술은 이미 해빙 조류 중심의 1차원 과정모델 → 지역 결합 생지화학 모델 → 광역 해양 - 해빙 - 생지화학 결합모델로 발전해 왔다. 그러나 해빙 내부 서식지 이질성, 생물 기능군의 차별적 생리, 미량원소 및 탄산염계 결합, detritus 및 ice - ocean

coupling의 정교화는 여전히 발전이 필요한 영역으로 남아 있다 (Vancoppenolle & Tedesco 2017; Kearney et al. 2020; Ye 2025).

국내에서는 극지 해양 생태·생지화학 연구 자체는 꾸준히 이루어져 왔고, 특히 극지연 구소를 중심으로 아문센해와 남극 연안 해역의 관측자료 축적과 생태계 해석 연구가 진행되어 왔다. 예를 들어 KPDC에는 Ocean-to-Ice Interactions in Amundsen Sea와 같은 연구 사업 아래 해양 식물플랑크톤, chlorophyll-a, DOC/DON, 해빙 인접 해역 자료 등이 축적 되어 있으며, 이는 국내가 극지 생태계 관련 관측 기반은 분명히 보유하고 있음을 보여준다.

또한 국내 연구진은 해빙을 포함한 남극해 생지화학 모델 응용 연구를 수행해 왔다. Kwon et al. (2021)은 아문센해 대륙붕 수역에서 철과 입사광이 규조류와 *Phaeocystis* 동 역학에 미치는 영향을 1차원 pelagic ecosystem model로 분석하였고, 모델에 sea-ice effect를 포함해 관측 자료와의 비교를 수행하였다. 이는 국내에서도 남극 연안 저차영양단계 모델링 역량이 축적되어 있음을 보여주는 사례이다. 다만 국내에서 해빙 생태계 역학을 독립 적인 sympagic domain으로 명시하고, 이를 수층 및 저서와 결합한 과정기반 모델을 체계적 으로 활용한 사례는 매우 제한적이다 (Kwon et al. 2023).

즉 국내는 관측자료 축적, 남극 연안 저차 영양단계 모델 응용, 해빙 영향 평가 연구 는 존재하지만, 해빙 내부 서식지 제약, 저온 특이 생리, 영양염·철 복합 제한, 규산 재순환, 총 알칼리도 연동 등을 포괄한 명시적 해빙 생태계 역학 모델 개발은 드문 편이다. 이 점에서 국내 기술 기반은 아직 제한적이며, 바로 그 공백이 본 연구의 독창성과 필요성을 뒷받침한다.

본 연구는 기존 SPBM을 단순 적용한 것이 아니라, 생태역학 과정 개선과 모델 수치· 구조 개선을 동시에 수행한 고도화 연구에 해당한다. 요컨대 수층 전용 동물플랑크톤의 해빙 진입 차단, 해빙 조류용 저온 최적 온도 함수 도입, N·P·Fe 제한의 외부 농도 기반 전환, 규 산 재순환 강화, 월동의 연속 함수화, 총 알칼리도 변화 반영, FABM 결합 및 수치 안정성 보완 등이다. 이 개선 사항들은 곧 기존 SPBM과 기존 유사 모델들의 한계를 역으로 보여준 다. 즉 기존 구조는 해빙과 수층 생물의 서식지 제약을 충분히 구분하지 못했고, 해빙 조류와 수층 식물플랑크톤의 생리 차이, 영양염·철 복합 제한, 규산 재순환, 탄산염계 연동, 급격한 해빙 성장·소멸 시 수치 안정성 문제를 충분히 반영하지 못했다. 사용자의 계획서도 현 기술의 취약성으로 해빙 내부 구조 단순화, 영양염·미량원소 파라미터화 미비, 해빙 - 표영 상호작용의 불충분한 구현을 지적하고 있다.

따라서 본 연구 결과는 국내에서는 희소한 명시적 해빙 생태계 모델 고도화 사례로 평 가할 수 있고, 국외 기준으로도 아직 완전히 해결되지 않은 공백, 즉 해빙 고유의 생리·행동· 물질순환 과정을 과정식 수준에서 보강하는 방향과 정합적이다. 대규모 3차원 지구시스템모형 단계는 아니지만, 기존 단순 SPBM을 해빙 고유 과정 중심으로 한 단계 발전시킨 과정 기반 중간 규모 모델 개발 성과로 위치지을 수 있다 (Wongpan et al. 2024; Tedesco et al. 2026).

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 모델 개선 및 개발 내용

1. 모델 개선 및 개발 개요

본 연구는 기존 해빙-표영-저서 통합 모델(SPBM; Sea-ice Pelagic Benthic Model)에 해빙 생태계 역학 모듈을 추가·개선하였다. 개선 내용은 크게 두 범주로 구분된다: (1) 생태계 역학 과정 개선 - 해빙 조류 역학, 동물플랑크톤 행동, 영양염 제한 등 극지 생태계 고유의 과정을 정밀하게 모의하기 위한 개선이며, (2) 모델 수치·구조 개선 - FABM 기반 물리-생지화학 결합의 정확성과 수치 안정성을 강화하기 위한 개선이다. 표1에 요약된 개선 사항들을 2에서부터 수식 및 모델 코드와 함께 상세히 설명하였다.

섹션	개선 내용	대상 파일 (모델 코드 파일)	과학적 의의
2. 생태계 역학 과정 개선			
2.1	수층 전용 동물플랑크톤의 해빙 내 진입 차단 구현	transport_yearday_patch.F90	크릴 등 수층 종 서식지 제약 현실화
2.2	일차생산자 온도 반응 이원화 — 해빙 조류용 저온 최적 시그모이드 함수 신규 추가	primary_producer.F90	빙조류-수층 식물플랑크톤 생리 차이 반영
2.3	N·P·Fe 영양염 제한: 내부 쿼타 기반 → 외부 농도 Michaelis-Menten 방식 전환	primary_producer.F90	현장 관측 영양염 자료 직접 활용 용이
2.4	규조류 사망 시 규산 재순환 강화 — 입자(10%) + 용존(90%) 분배	primary_producer.F90	규산 순환 폐쇄성 개선
2.5	동물플랑크톤 월동 과정 — 이진 스위치 → f_active 연속 전환	mesozooplankton.F90	포식자 기능군 계절 대사 변동 재현
2.6	생물 과정에 의한 총 알칼리도(TA) 변화 반영 — 동물플랑크톤 N·P 배출 탄산염 연동	mesozooplankton.F90	탄산염 시스템-생물 과정 결합 강화
2.7	해빙 결빙 시 Fe 브라인 농축 구현 — 공극률(ϕ) 기반 브라인 농도 자동 환산	transport_yearday_patch.F90	해빙 내 Fe 고농도(수층 대비 최대 10-100×) 현실적 재현 및 빙조류 Fe 가용성 개선
2.8	입자성 Fe 재광물화 속도 독립 조정 — N·P 공유 파라미터(sRPr1) → Fe 전용(sRPr1f) 분리	bacteria_docdyn.F90	Fe 순환의 N·P 사이클로부터 구조적 분리, 표층 용존 Fe 재생 속도 현실화
2.9	빙조류 수층 방출 후 빠른 침강 구현 — $rm = 0.05 \rightarrow 10 \text{ m/d}$ (수층 규조류 대비 200배)	fabm_ersem.yaml	빙조류의 수층 체류 최소화 및 저서-수층 POC 플럭스 계절 패턴

섹션	개선 내용	대상 파일 (모듈 코드 파일)	과학적 의의
			현실화
3. 모델 수치·구조 개선 및 오류 수정			
3.1	연일수·해수 밀도의 FABM 전역 연결 — 탄산염 계산 및 태양 천정각 오류 수정	transport_yearday_patch.F90 carbonate.F90	pH·pCO ₂ ·O ₂ 산출 정확도 향상
3.2	해빙 성장·소멸 시 배열 범위 초과 수정 — 수치 안정성 강화	transport_yearday_patch.F90	급격한 해빙 변화 시 안정적 모델 운영
3.3	해빙 및 적설량 입력 체계 교정		적절한 빙두께와 적설량 사용 --> 빙투과율등 의 개선

표 1. 본 연구 사업을 통해 남극 해빙 생태계 모델 개선을 위해 수행한 내용



2. 생태계 역학적 개선

극지 해양의 해빙-표영 생태계는 수층 해양 생태계와 구별되는 고유한 생태·생리학적 특성을 지닌다. 해빙 기공 채널을 주 서식처로 하는 빙조류, 광량 변화에 따라 능동적으로 이동하는 동물플랑크톤, 저온에 특화된 생리 반응 등이 대표적이다. 본 절에서는 이러한 특성을 SPBM에 정량적으로 반영하기 위해 수행한 생태역학·생지화학 과정의 개선 내용을 기술한다.

2.1 수층 전용 동물플랑크톤의 서식지 제약 구현

크릴(Euphausiids)을 비롯한 일부 대형 동물플랑크톤은 해빙과 밀접한 생태적 연관성을 가지며, 특히 크릴의 경우 해빙 내부 미세서식처 전체보다는 해빙 하부의 under-ice habitat, ice - water interface 및 인접 수층이 보다 중요한 서식·섭식 공간으로 작용한다 (Swadling et al. 2023; Flores et al. 2012). 이는 해빙 내부가 매우 작은 기공 구조와 높은 brine salinity를 갖는 극한 환경이기 때문이다. 반면 요각류(copepods), 소형 원생동물(microzooplankton), 박테리아, 빙조류(ice algae) 등의 빙생(sympagic) 생물은 해빙-수층 경계를 자유롭게 이동하거나 해빙 내 브라인 채널에 서식한다 (Fraser et al. 2023) (그림 3). 기존 SPBM은 결빙 과정에서 모든 생물 변수를 일괄적으로 해빙 레이어로 이동시켜 이러한 생태적 서식지 제약을 반영하지 못하였다. 이번 개선을 통해, 수층 전용 종(water-only species)에 대해 다음 세 조건이 동시에 적용된다:

(1) 해빙 영역 내 확산 계수 영점화

우선, 결빙 기간 동안 해빙 레이어($z_{IW} \sim z_{surf}$) 내의 확산 계수를 강제로 0으로 설정하여 확산에 의한 수직 이동을 차단한다:

$$\kappa_i(z, t) = 0, \forall z \in [z_{IW}, z_{surf}], \quad i \in \{\text{water-only}\}$$

κ_i : 종 i 의 확산 계수 [m^2/s] | z_{IW} : 해빙-수층 경계면 | z_{surf} : 표면

(2) 퇴적층 계면 침강 플럭스 차단

수층 전용 종은 저서층 진입도 허용되지 않는다. 퇴적층-수층 경계면(SWI)에서의 침강 플럭스를 0으로 강제하여 퇴적층으로의 유입을 차단한다:

$$F_{\text{sink},i}(z_{SWI}) = w_i \cdot C_i(z_{SWI}) = 0, i \in \{\text{water-only}\}$$

w_i : 침강 속도 [m/s] | C_i : 생물량 농도 [mgC/m^3] | z_{SWI} : 퇴적층-수층 경계면

(3) 결빙 시 신규 해빙 레이어 생물량 영점화

해빙이 성장($\Delta h > 0$)하여 새로운 해빙 레이어가 생성될 때, 일반 종은 인접 수층 생물량의 일부를 새 레이어로 복사하는 반면, 수층 전용 종은 새 레이어 농도를 0으로 초기화한다:

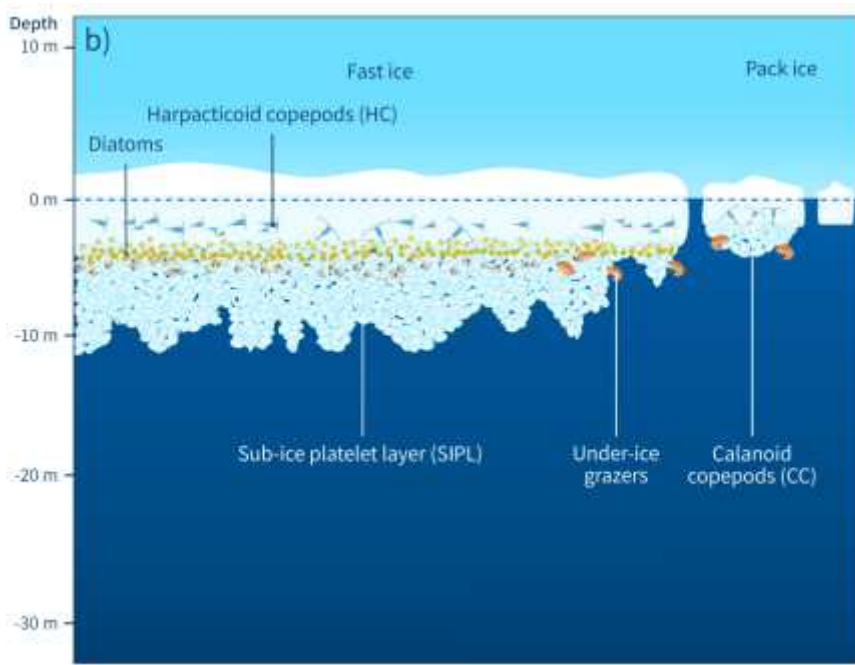


그림 3. 해빙-수층 생태계에서의 수직 서식지 구조 및 수층 전용 종 (water-only species) 제약의 개념도. 빙조류와 박테리아를 비롯한 해빙 미생물군은 주로 brine network를 포함한 해빙 내부 미세서식처에 분포하며, 일부 요각류와 소형 원생동물도 해빙 내부 또는 ice-water interface를 이용한다. 반면 크릴은 주로 under-ice habitat, ice-water interface 및 인접 수층을 이용하며, 해빙 내부 생물군과는 서식 방식이 다르다.

$$C_i(z_{\text{new}}) = 0, \text{ (일반 종: } C_i(z_{\text{new}}) = C_i(z_{\text{water}}) \times \Delta h / h_{\text{layer}})$$

Δh : 해빙 성장 두께 [m] | h_{layer} : 해빙 레이어 두께 [m]

이 세 조건을 함께 적용함으로써, 수층전용 종의 생물량은 어떠한 물리적 경로(확산, 침강, 결빙)를 통해서도 해빙 또는 퇴적층으로 진입할 수 없다. 코드 수준에서 결빙 시 처리는 다음과 같이 구현된다:

실제 코드 구현

```
! 결빙 시: water-only 종의 새 해빙 레이어 생물량 = 0
if (any(water only ids == j)) then
  do i = int(air ice indexes(id)-1), ice water index+ice growth, -1
    state vars(j)%value(i) = &
      state vars(j)%value(max(i - ice growth, 1)) ! 기존 레이어 이동
  end do
  do i = ice water index, ice water index + ice growth - 1
    state vars(j)%value(i) = 0. rk ! 새 해빙 레이어: 진입 차단
  end do
  cycle
end if
```

이 개선은 크릴과 같이 해빙에 의존하지 않는 동물플랑크톤의 계절별 생물량 분포와 표영-저서 탄소 수송 경로를 보다 현실적으로 모의하는 데 기여한다.

2.2 일차생산자 광합성 특성 개선 - 온도 반응 및 PI 곡선 파라미터

해빙 조류와 수층 식물플랑크톤은 온도 및 광량에 대한 생리학적 반응이 근본적으로 다르다. 기존 SPBM에서는 두 종류의 생물이 동일한 온도 반응 함수 및 광합성-광량(PI) 곡선 파라미터를 공유하였는데, 이는 해빙 내 생물의 성장 특성을 현실적으로 모의하지 못하는 주요 원인이었다. 본 연구에서는 (1) 온도 반응 함수를 이원화하고 (2) 해빙 조류의 PI 곡선 파라미터(α , β)를 관측 문헌 기반으로 대폭 조정하였다.

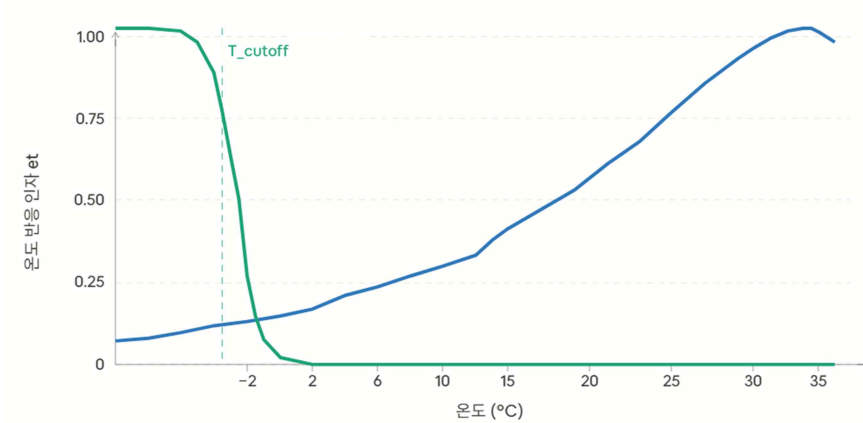


그림 4. 수층 식물플랑크톤(파란색, q10 함수)과 해빙 조류(초록색, 역방향 시그모이드)의 온도 반응 함수 비교. 해빙 조류는 -2°C 이하에서 최적 성장을 보이며, $T_{\text{cutoff}} = -2.5^{\circ}\text{C}$ 에서 급격히 전환된다.

(1) 온도 반응 함수 이원화

수층 식물플랑크톤은 10°C 기준 q10 함수를 따라 온도가 높을수록 성장이 빨라지다가 상한 온도($T_{\text{max}} = 32^{\circ}\text{C}$)에서 급격히 억제된다(그림 4). 반면 해빙 조류는 빙점 부근의 저온에 생리적으로 적응되어 있으며, 실험적 온난화는 이들의 광생리와 회복 능력을 저하시킬 수 있다(Martin et al., 2012; Kennedy et al., 2012). 이러한 점을 고려하여 기존의 모델 방정식 (가)를 개선하여 빙조류를 위한 방정식으로 (나)와 같이 변형하여 적용하였다.

가. 기존 - 표준 q10 함수 (수층 식물플랑크톤, 유지)

$$et = \max(0, q10^{\{(T-10)/10\}} - q10^{\{(T-T_{\text{max}})/T_{\text{steep}}\}})$$

$$q10 = 2.0, T_{\text{max}} = 32^{\circ}\text{C}, T_{\text{steep}} = 3^{\circ}\text{C}$$

나. 개선 - 역방향 시그모이드 함수 (해빙 조류 전용, use_sigmoid_temp 스위칭)

$$et = 1 / [1 + \exp((T - T_{\text{cutoff}}) / T_{\text{width}})]$$

$$T_{\text{cutoff}} = -2.5^{\circ}\text{C} \text{ (해빙-수층 전환 온도)} \quad | \quad T_{\text{width}} = 0.5^{\circ}\text{C} \text{ (전환 폭)}$$

$$et \rightarrow 1: T \ll T_{\text{cutoff}} \text{ (해빙 내 저온 조건),}$$

$$et \rightarrow 0: T \gg T_{\text{cutoff}} \text{ (해빙 용융·수층 조건)}$$

그림 4는 두 함수의 온도 의존성을 비교한 것이다. 해빙 조류는 빙점에 가까운 약 -2°C 이

하 구간에서 $et \approx 1.0$ 의 최대 성장 효율을 유지하다가 0°C 를 넘으면 거의 0에 가까워지며, 이는 해빙 용융기에 빙조류가 수층으로 방출되어도 적정 수온 환경이 아니면 성장하지 못하는 현상을 반영한다.

```

실제 코드 구현
! primary producer.F90 - 온도 반응 이원화
if (self%use sigmoid temp) then
  ! 해빙 조류: 저온 최적, 고온 억제
  et = 1. rk / (1. rk + exp((ETW - self%Tcutoff) / self%Twidth))
else
  ! 수층 식물플랑크톤: 표준 q10 함수
  et = max(0. rk, self%q10**((ETW-10. rk)/10. rk) &
    - self%q10**((ETW-self%Tmax)/self%Tsteep))
end if

```

(2) PI 곡선 파라미터(α , β) 조정 - 해빙 조류 저광량 적응 반영

ERSEM의 광합성 - 광량(PI) 곡선은 광량 증가에 따른 저광량 효율, 광포화, 광억제 (photoinhibition) 효과를 함께 반영하는 함수 형태를 사용한다. 여기서 α 는 저광량 조건에서의 광합성 효율, 즉 PI 곡선의 초기 기울기를 결정하며, β 는 고광량 조건에서 나타나는 광억제의 강도를 조절한다:

$$P(I) = P_{\max} \times (1 - e^{\{-\alpha I \cdot \theta / P_{\max}\}}) \times e^{\{-\beta I \cdot \theta / P_{\max}\}}$$

I : 광합성유효복사량 [W/m^2] | $\theta = \text{Chl:C}$ 비율 [$\text{mg Chl}/\text{mg C}$] |

$P_{\max}$: 최대 광합성 속도 [$1/\text{d}$]

해빙 조류는 해빙 내 극도로 낮은 광량($\ll 1 \text{ W}/\text{m}^2$) 환경에 적응하여 매우 높은 광합성 효율(α)을 가지며, 광량 증가 시 빠르게 광억제(β)가 나타나는 특성을 보인다 (표10과 각주 1 참조). 기존 모델은 수층 규조류와 동일한 α , β 를 사용하여 해빙 조류의 저광량 적응 능력을 크게 과소평가하였다.

파라미터 ¹⁾	수층 규조류	해빙 조류	기존 대비 변화율	생태학적 의미
α (초기 기울기) [$\text{mgC} \cdot \text{m}^2 / \text{mgChl} / \text{W} / \text{d}$]	3.0	12.0	$\times 4 \uparrow$	저광량 광합성 효율 향상, 해빙 내 $1 \text{ W}/\text{m}^2$ 이하 환경 적응
β (광억제 계수) [$\text{mgC} \cdot \text{m}^2 / \text{mgChl} / \text{W} / \text{d}$]	0.1	1.5	$\times 15 \uparrow$	광억제 강도 증가, 광포화점(E_k) 대폭 감소
θ (최대 Chl:C) [mgChl/mgC]	0.024	0.047	$\times 2 \uparrow$	해빙 내 고 Chl:C 관측값 반영

표 2. 빙조류와 식물플랑크톤간의 광생리적 특성 차이를 반영하기 위한 파라미터 설정 값.

1) 파라미터 설정 근거

해빙 조류의 PI 곡선 파라미터(α , β)를 직접 보고한 정량적 관측 자료는 현재까지 극히 제한적이다. 이는 해빙 환경의 현장 접근성 제약, 녹이는 과정에서 발생하는 광생리 추정 오차(Melt procedure bias; Campbell et al., 2019), 그리고 연구자마다 상이한 측정 단위 사용 등에 기인한다. 따라서 본 연구의 $\alpha = 12.0$ 및 $\beta = 1.5$ 설정은 직접 추정치라기보다, 해빙 조류의 극저광 적응성과 높은 광스트레스 민감성을 보여주는 기존 정성·반정량 관측을 종합해 설정하였다.

- 높은 α 의 근거 — under-ice algae는 매우 낮은 광량(사레 연구에서는 약 $0.17 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)에서도 net growth가 가능했으며 (Hancke et al., 2018, JGR Oceans), 광보상점은 $0.8 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 에 불과하다(Kottmeier & Sullivan,

표 10와 같이 α 4배 증가는 저광량에서의 광합성 초기 기울기가 현저히 가파름을 의미하며, β 15배 증가는 광포화점($E_k = P_{\max}/(\alpha \cdot \theta)$)이 수층 규조류 대비 약 4분의 1 수준으로 낮아짐을 의미한다. 그림 5는 두 종의 PI 곡선을 비교한 것으로, 해빙 조류는 상대적으로 낮은 광량($\sim 20 \text{ W/m}^2$)에서 광포화에 도달하며 그 이상의 광량에서는 광억제로 인해 광합성

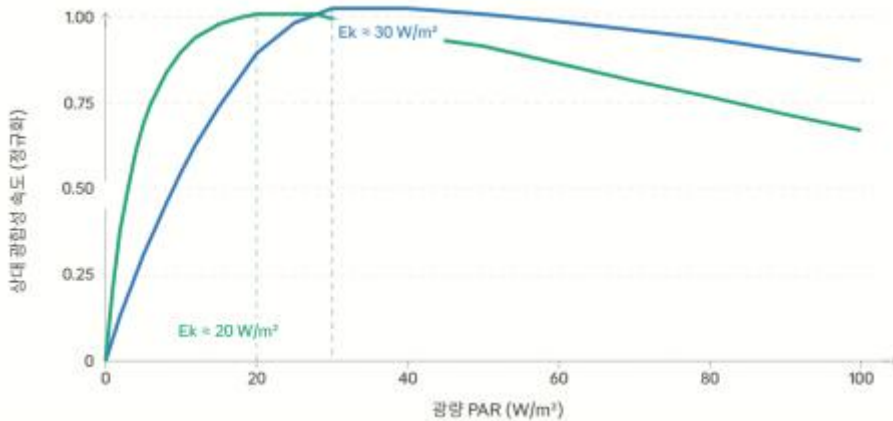


그림 5. 수층 식물플랑크톤(파란색)과 해빙 조류(초록색)의 광합성-광량(PI) 곡선 비교. 해빙 조류는 낮은 광량에서 빠르게 광포화에 도달하며($\alpha \uparrow$), 높은 광량에서 강한 광억제가 나타난다($\beta \uparrow$).

속도가 감소한다. 이 두 파라미터의 변화는 서로 상호 작용한다. α 의 증가는 저광량 환경에서의 성장을 촉진하는 반면, β 의 증가는 광포화 이후 성장을 억제하여 해빙 조류가 강한 광량에 노출되면 급격히 성장률이 감소하는 현상을 재현한다. 이는 해빙 용융 후 빙조류가 수층의 높은 광량 환경에서 생존하기 어려운 이유를 모델 내에서 설명하는 메커니즘으로 작용한다.

극지연구소

2.3 영양염·철분 제한 방식 개선 - 관측 농도 기반 전환

(1) 개요 및 개선 동기

식물플랑크톤의 성장 속도는 주변 해수에 녹아있는 영양염(질소, 인, 철)의 가용성에 의해 제한된다. 이 '제한'을 어떻게 수식으로 표현하느냐에 따라 모델이 예측하는 일차생산량이 크게 달라진다. 기존 SPBM에 연결된 ERSEM은 내부 quota 방식을 사용하였고, 개선된 버전은 Michaelis-Menten (MM) 외부 농도 방식으로 전환하였다.

가. 기존 방식 - 내부 quota

세포가 외부에서 영양염을 흡수하면, 그 영양염이 세포 내부에 쌓인다. 이 내부

-
- 1988, Marine Biology). 이는 해빙 조류가 극저광량 조건에서 매우 높은 광합성 효율(α)을 유지함을 의미한다.
- 높은 β (광억제)의 근거 — 저광량에 최적화된 해빙 조류는 광량이 증가하면 쉽게 광억제 상태에 진입하며(Young et al., 2024, L&O; van Leeuwe et al., 2018, Elementa), 눈 덮개 소실로 광량이 급증할 경우 광계II 단백질 손상과 광산화 스트레스가 발생한다(Lund-Hansen et al., 2020; Young et al., 2024). 해빙 저면 군집은 일반적으로 낮은 E_k 를 보이며, 일부 Antarctic bottom-community 정리에서는 약 $25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 수준이 보고된다 (van Leeuwe et al., 2022; Torstensson et al., 2018).
 - 아문센-로스 해 현장 관측 — Torstensson et al. (2018, PLoS ONE)은 아문센 해 및 로스 해 여름 해빙의 광생리를 직접 측정하여, 눈 두께·결빙 두께·염분이 E_k 및 광합성 효율에 강하게 결합됨을 보였다. 이는 해역에 따른 해빙 조류 광특성의 가변성을 시사한다.
 - 또한 해빙조류는 해빙 내부/하부의 저광 환경에 적응하면서 상대적으로 높은 Chl:C를 보이는 것으로 알려져 있다 (Kirst and Wiencke, 1995; Lizotte, 2003).

저장량(quota, q_{pc} = 세포 내 P:C 비율)이 최소값(q_{plc})과 최대값(q_{pmax}) 사이 어디에 위치하는지에 따라 제한인자를 계산한다 (그림 6).

$$iN_p \text{ (기준)} = (q_{pc} - q_{plc}) / (q_{pmax} - q_{plc})$$

q_{pc} : 현재 세포 내 P:C 비율 | q_{plc} : 최소 quota | q_{pmax} : 최대 quota

이 방식은 세포가 영양염을 흡수하고 소비하는 과정을 명시적으로 추적하므로 생리학적으로 정교할 순 있으나 다음 두 가지 한계가 있다고 판단된다.

- quota 이력 의존성: 제한인자가 현재 외부 농도가 아니라 과거부터 누적된 세포 내 상태에 의존한다. 같은 외부 농도라도 세포가 직전에 얼마나 영양염을 흡수했느냐에 따라 제한인자가 달라진다.
- 관측 자료 활용 제약: 현장 관측으로 얻을 수 있는 것은 해수 중 영양염 농도([N], [P], [Fe])이지 세포 내부 quota 값이 아니다. 따라서 관측 자료를 이용한 직접적인 매개변수 교정이 어렵다.

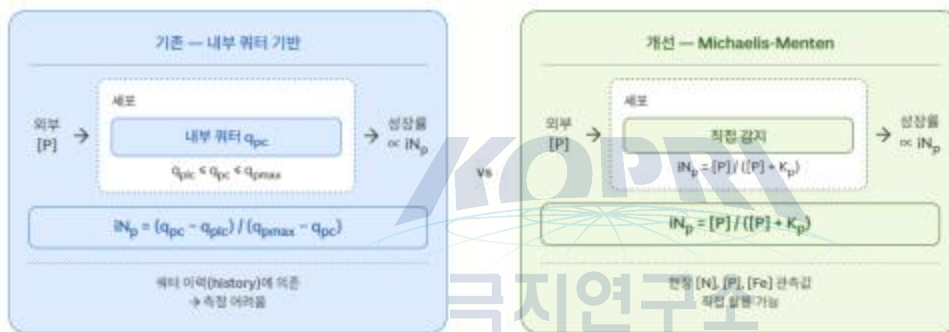


그림 6. 내부 quota (쿼타)방식(좌, 파란색)과 Michaelis-Menten 방식(우, 초록색)의 작동 원리 비교. 쿼타 방식은 외부 농도가 세포 내부에 축적된 뒤 내부 상태를 기준으로 제한인자를 계산하는 반면, MM 방식은 주변 해수 농도를 직접 제한인자로 변환한다.

나. 개선 방식 - Michaelis-Menten 외부 농도 기반

개선된 방식은 세포 내부 quota를 추적하는 대신, 현재 주변 해수의 영양염 농도를 직접 제한인자로 환산한다. 이는 생태계 모델에서 널리 사용되는 Michaelis-Menten (MM) 함수 형태를 따른다:

$$iN_p = [P] / ([P] + K_p)$$

[P]: 주변 해수 인산염 농도 [mmol/m³]

K_p : 반포화 상수 - 제한인자가 0.5가 되는 농도

K_p 는 반포화 상수(half-saturation constant)로, 농도가 K_p 와 같을 때 제한인자가 정확히 0.5가 된다. 농도가 K_p 보다 훨씬 낮으면 제한인자가 0에 가까워져 성장이 거의 불가능하고, K_p 보다 훨씬 높으면 1에 가까워져 제한이 해소된다 (그림 7).

(2) N·P·Fe 제한 수식

세 가지 영양염에 대해 동일한 MM 함수 형태를 적용하였다:

가. 질소(N) – 질산염

$$iN_n = [NO_3^-] / ([NO_3^-] + K_N)$$

$[NO_3^-]$: 질산염 농도 $[mmol/m^3]$ | $K_N = 2.5 mmol/m^3$

나. 인(P) – 인산염

$$iN_p = [PO_4^{3-}] / ([PO_4^{3-}] + K_P)$$

$[PO_4^{3-}]$: 인산염 농도 $[mmol/m^3]$ | $K_P = 0.1 mmol/m^3$

다. 철(Fe) – 용존 철

$$iN_f = [Fe] / ([Fe] + K_{Fe})$$

$[Fe]$: 용존 철 농도 $[μmol/m^3]$ | $K_{Fe} = 0.037 μmol/m^3$

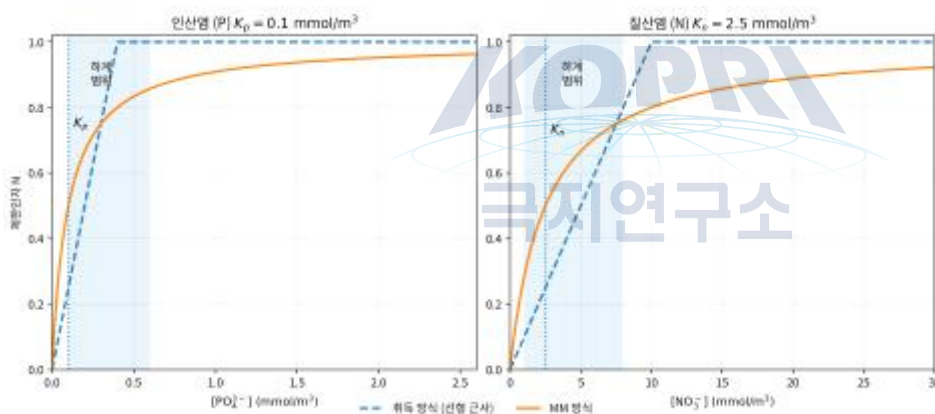


그림 7. 인산염(좌)과 질산염(우)에 대한 Michaelis-Menten 제한 곡선. 음영 구간은 아문센 해 하계 전형적 농도 범위를 나타낸다. $K_p = 0.1 mmol/m^3$ 인 인산염은 낮은 농도에서 이미 제한이 빠르게 해소되는 반면, $K_n = 2.5 mmol/m^3$ 인 질산염은 하계 농도 범위 전반에 걸쳐 제한인자가 유의미하게 변화한다.

(3) 성장률에 복합 제한 적용 – $\min(iN_f, iN_i)$

각 영양염의 제한인자가 산출되면 이를 결합하여 최종 성장률에 적용한다. 기존 모델은 철 제한(iN_f)만을 성장률에 직접 곱하였으나, 개선된 모델은 N·P 통합 제한(iN_i)과 철 제한 중 더 강한 쪽이 성장을 결정하도록 $\min()$ 함수를 적용한다:

$$iN_i = \min(iN_n, iN_p)$$

질소·인 중 더 제한적인 요소를 통합 제한인자로 사용

$$sum = sum_max \times et \times iN_s \times \min(iN_f, iN_i)$$

기준: $\times \text{iNf}$ 만 적용 (철 단독 제한)

→ 개선: $\min(\text{iNf}, \text{iNI})$ (철·영양염 복합 제한)

2.4 규산 순환 개선 - 세포 사멸(Lysis) 시 용존 재순환 강화

(1) 기존 모델의 한계

규조류는 이산화규소로 이루어진 세포벽을 형성하여 생물 기원 규산(biogenic silica, bSi)을 생산한다. 규조류가 사망하면 세포벽이 하강하거나 분해되는 과정에서 이 bSi의 상당 부분이 수층 내에서 용존 규산염(DSi, $[\text{Si}(\text{OH})_4]$)으로 재용해되어 현장에서 재순환된다²⁾. 이 과정은 표층 수층의 DSi 공급원으로서 일차생산을 지속시키는 핵심 기작이다.

기존 SPBM내 ERSEM은 규조류 사망 시 발생하는 모든 bSi 플럭스(fPIRPs)값을 입자성 유기규산(RPs)으로 전량 처리하였다. 이 입자성 규산은 물리적 침강을 통해 저층으로 이동하므로 수층에서의 용해 및 재순환 과정은 반영되지 않았다 (그림 8 왼쪽).

기준: $d[\text{RPs}]/dt \leftarrow f\text{PIRPs}$ (100%)

→ 규조류 사망 시 생성되는 규산이 전량 입자로 침강 → 수층 내 현장 재순환 없음

→ 표층 DSi 과소평가, 저층 규산 침강 과대평가

fPIRPs: 규조류 사멸에 의한 총 bSi 플럭스 $[\text{mmol Si}/\text{m}^3/\text{d}]$

이 처리 방식은 문헌들이 보고하는 현실(사망 후 50 - 60%가 표층 100m 이내에서 재용해)과 명백히 배치되며, 결과적으로 수층의 용존 규산염 농도를 과소평가하고 규조류 성장을 불필요하게 제한하는 방향으로 작용하였다.

(2) 개선 내용 - bSi 플럭스 10:90 분할

위 문헌들을 종합하여, 규조류 사멸 시 발생하는 bSi 플럭스를 두 경로로 분할하였다. 전체 fPIRPs의 10%만 RPs으로 침강 경로에 남기고, 나머지 90%는 즉시 용존 규산염(N5s)으로 전환하여 수층 내 현장 재순환을 나타낸다(그림 8 오른쪽).

$d[\text{RPs}]/dt \leftarrow 0.1 \times f\text{PIRPs}$ (10%: 입자성 규산 → 침강)

2) 문헌 근거

Van Cappellen (2002, Global Biogeochem. Cycles, doi:10.1029/2001GB001431) — 유광층에서 생산된 diatomaceous opal의 평균 50-60%가 상부 100 m 내에서 재용해된다고 정리하였으며, 표층 해양의 biogenic silica 용해율이 심해 퇴적물보다 훨씬 높다고 제시하였다. 이는 표층에서 bSi 재순환이 매우 활발함을 시사한다.

Bidle & Azam (1999, Nature, doi:10.1038/17351) — 해양 박테리아가 규조류 frustule을 둘러싼 유기물층을 분해함으로써 biogenic silica dissolution을 가속할 수 있음을 보였고, 이 과정이 상층 해양에서의 Si 재생에 중요한 생물학적 기작일 수 있음을 제안하였다.

Kwon et al. (2023a, Environmental Research, doi:10.1016/j.envres.2022.114811) — 남극해의 세 생지리 구역을 대상으로 한 지역 생태계 모델에서, biogenic silica dissolution rate의 지역 차이가 Si 분포와 수직 플럭스의 이질성을 유발함을 보였으며, 이러한 과정의 표현이 남극해 생지화학 모의 개선에 중요하다고 제안하였다.

$$d[N5s]/dt \leftarrow 0.9 \times fPIRPs \quad (90\%: \text{용존 규산염} \rightarrow \text{수층 재순환})$$

N5s: 용존 규산염(DSi) | 즉시 다른 규조류의 성장에 재이용 가능한 형태

10:90 비율은 Van Cappellen (2002)의 표층 100m 이내 재용해율(50 - 60%)에 더해 Bidle & Azam (1999)의 박테리아 가속 용해, 그리고 Tréguer et al. (2021)의 낮은 퇴적 보존율(~3.6%)을 함께 고려한 보수적 추정값이다.

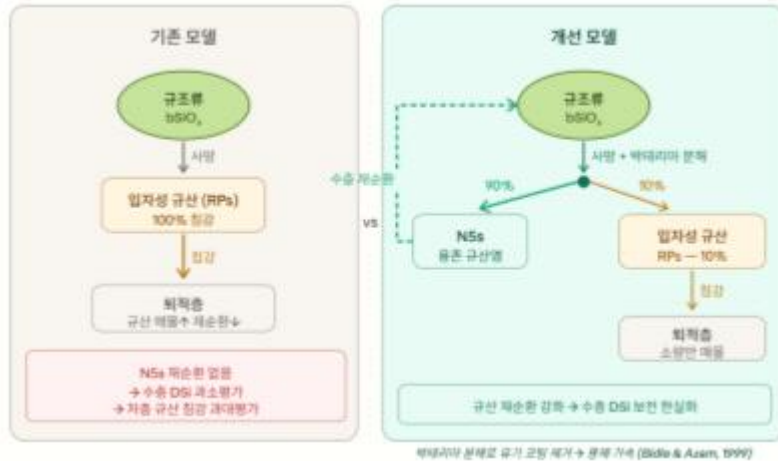


그림 8. 규조류 사망 시 규산 플럭스 처리 방식 비교. 기존 모델(좌)은 사망 플럭스 전량을 입자성 규산(RPs)으로 처리하여 침강시킨 반면, 개선 모델(우)은 박테리아 분해를 통한 유기 코팅 제거 과정을 반영하여 90%를 용존 규산염(코드명 N5_s)으로 전환·재순환시키고 10%만 침강 경로로 처리한다.

코드 구현

```
! primary producer.F90 - 규산 플럭스 분할 (기존: 100% RPs)
SET ODE (self%id RPs, 0.1 rk * fPIRPs) ! 10%: 입자성 규산 (침강 경로 유지)
_SET_ODE_(self%id_N5s, 0.9_rk * fPIRPs) ! 90%: 용존 규산염으로 수층 현장 재순환
```

이 개선은 SPBM 내 규산 순환의 폐쇄성을 크게 향상시킨다. 기존 모델에서 규산은 규조류 사멸과 함께 표층 수층에서 제거되어 저층으로 소실되는 경향이 강하였으나, 개선된 모델에서는 사멸한 규조류의 Si가 수층 내에서 즉시 재활용되어 다음 블룸의 성장 기반을 유지한다. 구체적으로 다음과 같은 효과가 기대된다:

- **표층 DSi 농도 유지:** 사망 후 90%의 Si가 N5s로 환원되어 수층 내 용존 규산염 농도 하락을 억제한다. 이는 남극해의 봄철 규조류 번성 지속성을 보다 현실적으로 재현하는 데 기여한다.
- **저층 과잉 침강 방지:** 기존 모델에서 과대 평가되던 bSi 침강 플럭스가 현실적 수준으로 감소하여 저서 생태계로의 Si 공급량이 조정된다.
- **모델 내 Si 보존 강화:** 총 Si의 수치(budget)가 보다 폐쇄적으로 유지되어 장기 시뮬레이션에서의 Si 고갈 오류가 완화된다.

2.5 동물플랑크톤 월동 과정의 연속적 표현

(1) 기존 모델의 이전 스위치 방식 - 한계

극지 해양에서 *Calanus* 속 요각류는 극지 생태계 탄소 흐름의 핵심 매개자이다. 이들은 봄·여름 식물플랑크톤 번성 기간에 wax ester 형태의 지질을 대량 축적하고, 먹이가 거의 없는 가을·겨울에는 대사를 크게 낮추어 심층(수백~수천 m)에서 월동 상태에 진입한다. 이 과정에서 표층에서 심층으로 탄소를 수송하는 지질 펌프가 형성된다³⁾.

기존 SPBM에서는 중형동물플랑크톤의 월동 전환을 이전, 즉 binary 방식으로 처리하였다. 주변 적분 먹이량(intprey)이 임계값(Minprey)을 초과하는지 여부에 따라 완전 활성화와 완전 월동 사이를 즉각 전환하는 방식이다(그림 9 왼쪽).

기존: 활성화 여부 = { 1 (intprey ≥ Minprey 이면 완전 활성화)
 { 0 (intprey < Minprey 이면 완전 월동)
→ 먹이량이 임계값을 한 단위만 넘어도 즉각 완전 활성화 전환 (비현실적)

이 방식은 다음 두 가지 문제를 야기한다:

- **생태적 비현실성:** 관측 자료에 따르면 북극 요각류의 대사 수준 변화는 먹이 가용성에 따라 점진적으로 이루어진다(Freese et al., 2016). 단 하나의 임계값으로 상태를 이분하는 것은 이 연속적 전환을 반영하지 못한다.
- **수치적 불연속:** 먹이량이 임계값 부근에서 진동할 때 활성화도가 0과 1 사이를 반복 전환하여 모델 변수의 급격한 변동을 유발할 수 있다.

(2) 개선 - f_{active} 연속 활성화도 인자

먹이 가용성에 따라 대사 수준이 연속적으로 전환되도록 Michaelis-Menten 형태의 연속 활성화도 인자 f_{active} 를 도입하였다. Minprey는 이제 이분 임계값이 아니라 '활성도가 0.5가 되는 반포화 먹이 농도'로 기능한다(그림 9 오른쪽).

$$f_{\text{active}} = \frac{\sum \text{prey}}{(\sum \text{prey} + \text{Minprey})}$$

$\sum \text{prey}$: 주변 식물플랑크톤 총 생물량 [mgC/m³] |
Minprey: 반포화 먹이 농도

$f_{\text{active}} \rightarrow 1.0$: 먹이 풍부 (완전 활성화) | $f_{\text{active}} \rightarrow 0$: 먹이 희박 (완전 월동)

3) 문헌 근거

Hirche (1997, Marine Biology, doi:10.1007/s002270050127) — Greenland Sea에서 *C. hyperboreus*의 계절적 수직이동과 장주기 생활사를 기술하였으며, 월동기에 심층으로 하강해 저장 지질에 의존하는 전략과, 표층 봄 블룸에 느슨하게 결합된 번식 전략을 제시.

Auel et al. (2003, Marine Biology, doi:10.1007/s00227-003-1061-4) — 프람 해협 수심 2300 m에서 월동하는 *C. hyperboreus*의 호흡량이 활성화 개체 대비 70~90% 감소함을 직접 측정. 심층의 낮은 수온이 대사 억제를 보조하여 지질 소비를 최소화하는 역할을 한다.

Freese et al. (2017) Marine Biology, doi:10.1007/s00227-016-3036-2) — *C. glacialis*의 연중 효소활성과 체성분 변화를 추적하여, 겨울철에 대사 활동이 감소하고 diapause의 시기와 강도가 계절적 먹이 환경 상태와 밀접하게 연관됨을 보였다.

Søreide et al. (2008, Deep-Sea Res.) 및 Daase et al. (2021) — 북극 *Calanus*류의 계절적 대사 전략은 먹이 가용성, 저장 지질 상태, 그리고 내인성 timing 메커니즘의 상호작용에 의해 조절되며, diapause의 진입과 이탈 시점에는 개체 간 변이가 존재.

f_{active} 는 섭식, 호흡, 사망의 세 주요 과정에 적용되어 먹이 가용성에 따른 대사 수준을 연속적으로 조절한다. 이는 Auel et al. (2003)이 보고한 70 - 90% 호흡 감소 및 Freese et al. (2017)의 먹이 중단에 따른 대사 저하 관측 결과와 일관된다. f_{active} 도입은 북극 요각류의 계절적 생태 역학을 보다 현실적으로 재현하는 동시에 다음의 모델 개선 효과를 제공한다.

- **탄소 수직 플럭스 개선:** 월동 시 섭식 감소로 표층의 유기탄소가 중형 동물플랑크톤에 의해 과도하게 소비되지 않아, 저층 침강 플럭스 추정치가 보다 현실적으로 유지된다.
- **봄 블룸 초기화 개선:** 먹이가 다시 증가할 때 f_{active} 가 점진적으로 상승하여 포식 압력이 서서히 회복되므로, 봄 블룸 초기 급격한 포식에 의한 모델 오류가 완화된다.
- **지질 펌프 표현:** 월동 중 감소된 호흡($f_{active} \rightarrow 0$ 조건)은 요각류가 표층에서 축적한 지질을 심층으로 수송한 뒤 서서히 소비하는 과정, 즉 북극 해양의 seasonal lipid pump를 부분적으로 반영한다 (Visser et al., 2017).

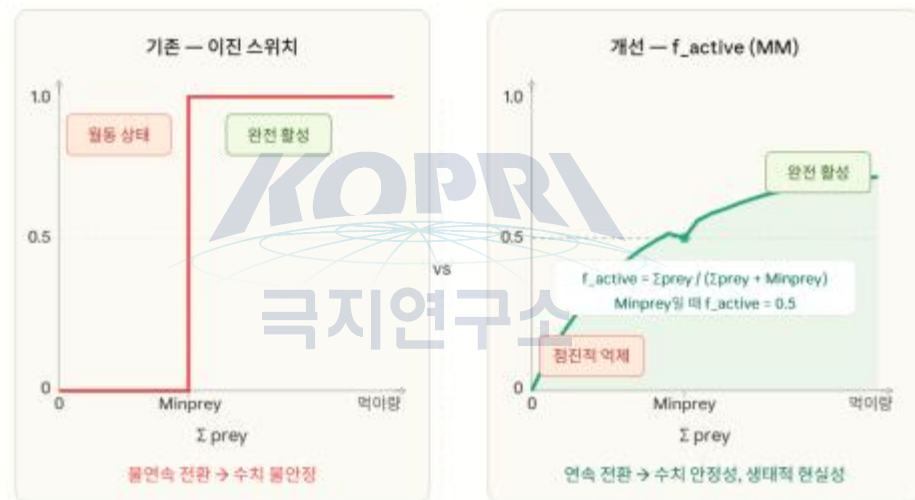


그림 9. 기존 이진 스위치 방식(좌, 빨간색)과 개선된 f_{active} Michaelis-Menten 방식(우, 초록색)의 비교. 기존 방식은 $Minprey$ 임계값에서 활성도가 0에서 1로 불연속적으로 전환되는 반면, 개선된 방식은 먹이량에 따라 활성도가 부드럽게 변화하며 $Minprey$ 에서 $f_{active} = 0.5$ 가 된다.

2.6 생물 과정에 의한 총 알칼리도(TA) 변화 반영

(1) 이온 배출에 의한 알칼리도 변화 메커니즘

해수의 탄산염 시스템(pH, pCO_2 , $CaCO_3$ 포화도 등)은 총 무기탄소(DIC)와 총 알칼리도(TA)의 두 변수로 완전히 기술된다. TA는 해수의 산 중화 능력의 척도로, 주로 HCO_3^- 와 CO_3^{2-} 가 기여한다. 생물 과정은 이온 형태로 영양염을 배출하여 해수의 전하 균형을 변화시키고, 이에 따라 TA가 증감한다.

그래서 동물플랑크톤이 Redfield 비율을 초과하는 N과 P를 배출할 때에도 이온 전하 균형이 변화한다. NH_4^+ 배출은 양이온 증가 $\rightarrow$ TA 상승, PO_4^{3-} 배출은 음이온 증가 $\rightarrow$ TA

하강을 유발하며, 두 효과의 합이 순 TA 변화량이 된다:

$$\Delta TA = \text{excess N} - \text{excess P} \text{ [mmol eq/m}^3\text{/d]}$$

NH_4^+ 방출: +1 eq/mmol N (TA 증가) |

PO_4^{3-} 방출: -1 eq/mmol P (TA 감소)

$\text{excessN} = \max(0, \text{SZIn} - \text{SZIc} \times \text{qnc})$ |

$\text{excessP} = \max(0, \text{SZIp} - \text{SZIc} \times \text{qpc})$

먹이의 N:P 비율이 Redfield 비(16:1)보다 높으면 $\text{excess N} > \text{excess P}$ 가 되어 TA가 순증가하고(pH 상승, pCO_2 감소), 반대이면 TA가 감소한다. 극지 해양에서는 철 제한 시 식물플랑크톤의 N:P가 크게 상승할 수 있어 이 효과가 무시하기 어려운 수준에 이를 수 있다.

(2) 기존 모델의 누락 및 개선 내용

기존 SPBM은 N·P 배출 시 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 풀을 갱신하였으나 TA 상태변수는 갱신하지 않았다. 이로 인해 pH, pCO_2 , Ω 가 실제보다 편향된 값으로 산출되었으며, 특히 번성기의 대사 활동이 집중되는 기간에 오차가 누적될 가능성이 있었다. 개선된 모델은 N·P 배출 루틴에 다음 한 줄을 추가하여 전하 균형을 유지한다:

실제 코드 구현

```
! mesozooplankton.F90 - TA 기여 추가
excess n = max(SZIn - SZIc*self%qnc, 0. rk) ! 초과 질소
excess p = max(SZIp - SZIc*self%qpc, 0. rk) ! 초과 인
SET ODE (self%id N4n, excess n) !  $\text{NH}_4^+$  풀로
SET ODE (self%id N1p, excess p) !  $\text{PO}_4^{3-}$  풀로
_SET_ODE_(self%id_TA, excess_n - excess_p)
```

이 개선으로 동물플랑크톤의 대사 활동이 탄산염 모듈(carbonate.F90)과 완전히 결합되어, pH, pCO_2 , CaCO_3 포화도(Ω_{cal} , Ω_{arg}) 등 모든 탄산염 진단 변수가 보다 정확하게 산출된다. 특히 SPBM을 활용한 아문센 해 대기-해양 CO_2 플럭스 추정의 신뢰도를 높이는 데 기여한다.

2.7 해빙 결빙 시 철분(Fe) 염수 농축 구현

(1) 구현 방식 - 공극률 기반 브라인 농도 자동 농축

철은 남극해에서 식물플랑크톤과 빙조류의 일차생산을 제한하는 핵심 미량원소이다. 해빙은 주변 표층 해수 대비 Fe가 현저히 농축된 독특한 저장소로 기능하며, 봄철 해빙 용융 시 이 고농도 Fe가 수층으로 방출되어 하계 식물플랑크톤 blooms의 개시를 촉진한다⁴⁾. 따라서

4) 문헌 근거

Lannuzel et al. (2016, Elementa, doi:10.12952/journal.elementa.000130) — Antarctic sea ice Fe 자료를 종합하여, PFe·DFe·TDFe 농도가 전형적인 남극 표층 해수보다 적어도 한 자릿수 이상 높다고 정리하였다. 리뷰의 통계에 따르면 sea

해빙 내 Fe 농축 과정을 모델에 정확히 반영하는 것은 극지 해양의 일차생산 모의에 직접적으로 영향을 미친다.

SPBM에서 해빙 내 상태변수는 레이어 전체 부피 기준의 부피 평균농도 즉 bulk concentration으로 저장된다. 그러나 실제 생지화학 반응은 브라인 액체 내에서만 일어나므로, FABM 생지화학 모듈 호출 전후로 브라인 농도로의 변환·역변환이 수행된다:

$$C_{\text{brine}}(z) = C_{\text{bulk}}(z) / \phi(z)$$

C_{bulk} : 레이어 전체 부피 기준 농도 |

$\phi(z)$: 염수 공극률 (brine volume fraction) $\phi \approx 0.05 - 0.20 \rightarrow$

$C_{\text{brine}} = C_{\text{bulk}} / \phi$ (브라인 내 실효 농도가 수층 대비 크게 높아짐)

이 구조를 통해 해빙의 낮은 공극률($\phi \ll 1$)이 곧 브라인 내 Fe 실효 농도를 수층 대비 크게 높이는 자동 농축 메커니즘으로 작동한다. 그림 10은 해빙 내 브라인 채널에서의 Fe 농축과 수층 방출 과정, 그리고 모델 내 구현 방식을 나타낸다.

실제 코드 구현

```
! transport yearday patch.F90 - FABM 호출 전: bulk → brine 농도 변환
state vars(j)%value(ice water index:surface index-1) = &
  state vars(j)%value(ice water index:surface index-1) &
  / porosity(ice water index:surface index-1) ! C_bulk / φ = C_brine

call fabm do(fabm model, 1, surface index-1, increment) ! 브라인 농도 기준 반응

! FABM 호출 후: brine → bulk 농도 역변환
state vars(j)%value(ice water index:surface index-1) = &
  (state vars(j)%value(ice water index:surface index-1) &
  + increment(ice water index:surface index-1,j)) &
  * porosity(ice_water_index:surface_index-1) ! C_brine × φ = C_bulk
```

2.8 입자성 철 재광물화 속도 독립 조정

(1) 개선 배경 - 모델 내 용존 Fe의 지속적 고갈 문제

기존 SPBM에서는 입자성 유기 철(코드명 RPF)의 재광물화 속도가 입자성 유기 N·P의 재광물화 속도(코드명 sRPr1)와 동일한 파라미터를 공유하였다. 시뮬레이션 결과 수층 용존 철(코드명 N7f) 농도가 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소하여 빙조류 및 식물플랑크톤의 철 제한이 현실보다 과도하게 발생하는 문제가 나타났다.

ice 내 평균 DFe는 9.8 ± 15.0 nM이며, 이는 off-shelf Southern Ocean surface waters의 평균 DFe 0.38 ± 0.55 nM 보다 현저히 높다. 또한 기존 리간드 연구를 종합하면 sea ice 내 용존 Fe의 대부분은 유기 리간드와 결합된 형태로 존재한다. Janssens et al. (2016, Elementa, doi:10.12952/journal.elementa.000123) — 웨델 해 현장 결빙 실험. Fe 및 유기물의 농축지수(enrichment index)가 수층 대비 1-2자리수 높음을 확인. 입자성 Fe(PFe)는 용존 Fe(DFe)보다 먼저 농축되며, 브라인 대류가 활성화된 하층 골격 레이어(skeletal layer)가 Fe 농축의 주요 장소임을 밝혔다.

van der Merwe et al. (2011, JGR Biogeosciences, doi:10.1029/2010JG001628) — 동남극 연안 고정 빙에서 28일 시계열 관측. 용존 Fe의 방출이 브라인 부피 분율(brine volume fraction)에 정량적으로 비례함을 직접 실증. 빙하 1 m² 당 419 μmol TDFe가 수층으로 방출되어 남극 표층 419 m³를 Fe 충분 상태로 만들 수 있는 잠재 시비력(fertilization potential)을 제시하였다.

Lannuzel et al. (2007, Marine Chemistry) — 동남극 해빙에서 총 용존 Fe가 하층 해수 대비 최대 한 자리수 이상 높게 관측. 겨울형('cold') 정점에서 더 높은 농도를 보이며, 봄철 빙하 투수성 증가에 따른 브라인 배수로 수층으로 이동한다.

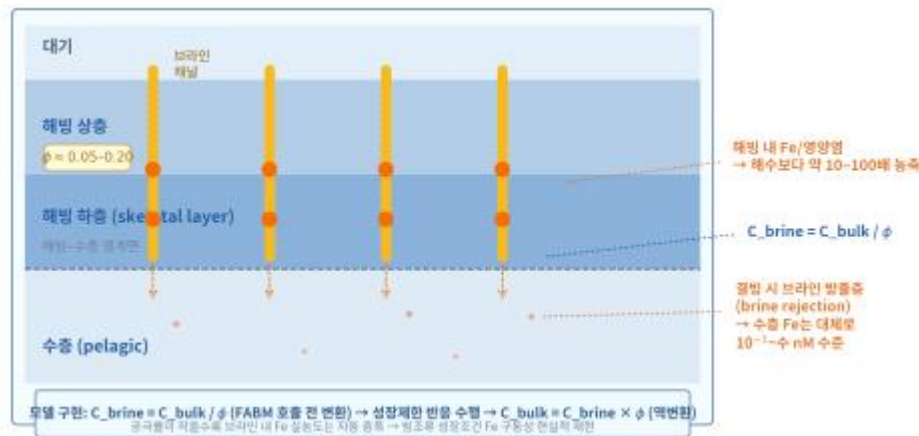


그림 10. 해빙 염수 채널 내 철 농축 과정과 모델 구현 개념도. 해빙 내 염수 채널(노란색)에서 Fe(주황색 원)가 고농도로 농축되며(~수십 nM), 수층(~0.4 nM) 대비 최대 10 - 100배 높다. FABM 호출 전후로 $C_{bulk} \leftrightarrow C_{bulk}/\phi$ 변환을 통해 브라인 내 실효 농도가 자동으로 구현된다. 결빙 시 염수 방출(brine rejection)로 Fe가 수층으로 공급된다.

이 문제의 원인은 크게 두 가지이다. 첫째, 모델에서 Fe는 식물플랑크톤이 사망하거나 용출될 때 입자성 풀(RPf)로 이동하지만, N·P와 동일하게 느린 속도로만 다시 용존 형태(N7f)로 재생되어 생물 이용 가능한 Fe가 빠르게 고갈된다. 둘째, SPBM은 퇴적물 재부유나 대기 분진 침적 등 외부 Fe 공급원이 단순화되어 있어, 내부 재순환이 Fe 수치 유지에 더욱 중요하다. 따라서 입자성 Fe의 재광물화 속도를 N·P와 분리하여 독립적으로, 그리고 더 빠르게 설정하는 것이 필수적이었다. 모델에서 Fe 재광물화를 빠르게 설정하는 것은 일부 관측 연구 결과와도 부합한다. 특히 생물기원 입자(biogenic particles)에 결합된 Fe는 유기 복합체로부터 비교적 빠르게 해리될 수 있으며, 표층에서의 생물학적 과정이 이를 가속한다⁵⁾.

(2) 개선 내용 - 철 재광물화 전용 파라미터 도입

개선된 모델에서는 입자성 Fe 재광물화에 N·P와 완전히 분리된 전용 속도 상수 (코드명 sRPr1f)를 적용한다. 핵심은 이 속도가 N·P 재광물화 속도보다 10 - 20배 빠르게 설정되었다는 점이다 (그림 11):

기존: $f_{RPN7f} = sRPr1 \times RPf$ (N·P와 동일한 느린 속도)

개선: $f_{RPN7f} = sRPr1f \times RPf$ (Fe 전용 · N·P 대비 10 - 20배 빠름)

f_{RPN7f} : 입자성 Fe(RPf) → 용존 무기 철(N7f) 재광물화 플럭스

5) 문헌 근거

Boyd et al. (2010, Limnology & Oceanography, doi:10.4319/lo.2010.55.3.1271) - 남대양의 polar 및 subpolar 표층 혼합층에서 heterotrophic bacteria가 biogenic particulate Fe의 >25% d⁻¹를 동원할 수 있음을 보여주었으며, 이는 심층(<2% d⁻¹)보다 훨씬 빠른 표층 Fe 재생을 시사한다.

Aumont et al. (2003, Global Biogeochem. Cycles, doi:10.1029/2001GB001745) - PISCES 계열 모델에서 Fe를 P, Si와 함께 독립적으로 취급하고 scavenging을 별도로 파라미터화함으로써, Fe 순환이 거대영양염과는 다른 제거·재생 구조를 가짐을 반영하였다.

Poorvin et al. (2004, Limnology & Oceanography, doi:10.4319/lo.2004.49.5.1734) - 바이러스 용균(viral lysis)에 의해 식물플랑크톤의 세포 내 Fe가 용존 상태로 빠르게 방출됨을 확인.

실제 코드 구현

```
! bacteria docdyn.F90
!fRPN7f = self%sRPr1 * RPfP ! 기존: N·P와 동일한 속도 (느림)
fRPN7f = self%sRPr1f * RPfP ! !!!YSK added for faster remin of Fe
```

fabm_ersem.yaml의 교정한 파라미터 값을 보면, Fe 전용 속도(sRPr1f)가 N·P 속도(sRPr1) 대비 10 - 20배 크게 설정되어 있음을 알 수 있다.

파라미터 재설정

```
# fabm_ersem.yaml - B1 (bacteria)
# — N·P 재광물화 속도 (기존, 변경 없음) —————
sRP1R1: 0.010 # 소형 POM (R4) N·P 재광물화 [1/d]
sRP2R1: 0.0025 # 중형 POM (R6) N·P 재광물화 [1/d]
sRP3R1: 0.001 # 대형 POM (R8) N·P 재광물화 [1/d]

# — Fe 전용 재광물화 속도 (신규 · 훨씬 빠름) —————
sRP1R1f: 0.10 # 소형 POM Fe [1/d] → N·P 대비 × 10
sRP2R1f: 0.05 # 중형 POM Fe [1/d] → N·P 대비 × 20
sRP3R1f: 0.01 # 대형 POM Fe [1/d] → N·P 대비 × 10
```

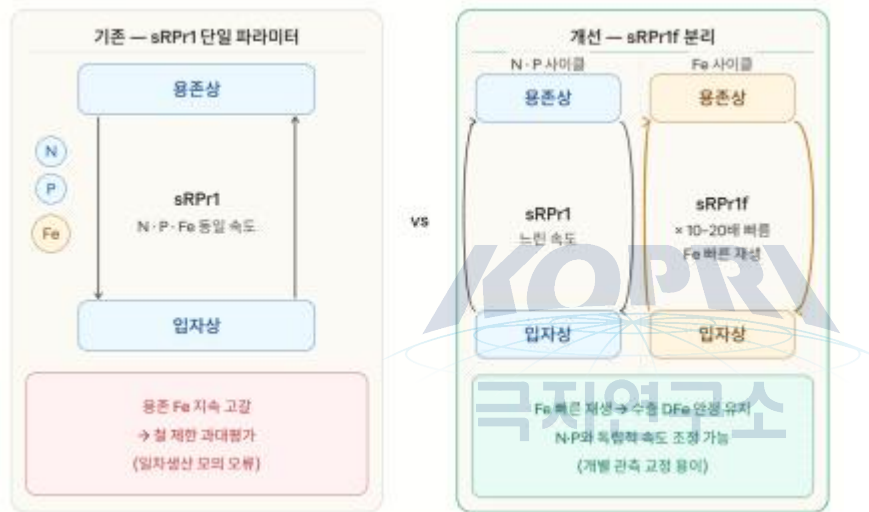


그림 11. 영양염 재광물화 사이클의 구조적 분리. 기존 모델(좌)에서는 N·P·Fe가 동일한 느린 속도(sRPr1)로 재광물화되어 수층 용존 Fe가 지속적으로 고갈되었다. 개선된 모델(우)에서는 N·P 사이클(파란색, sRPr1)과 Fe 사이클(주황색, sRPr1f)이 구조적으로 분리되며, Fe 재광물화 속도가 N·P 대비 10 - 20배 빠르게 설정되어 수층 Fe 가용성이 현실적으로 유지된다.

입자 크기가 클수록 Fe 재광물화 속도가 낮게 설정된 것은, 대형 입자일수록 난분해성 lithogenic Fe 비율이 높아 분해가 느리다는 점을 반영한다 (Boyd et al., 2010). 이 개선을 통해 기존 모델에서 시간이 지남에 따라 과도하게 감소하던 수층 용존 Fe 농도가 보다 안정적으로 유지되어, 빙조류와 수층 식물플랑크톤의 Fe 제한 모의 정확도가 향상되었다. 특히 봄철 블룸 개시 시 Fe 가용성이 현실적으로 재현되며, N·P와 Fe의 순환을 구조적으로 분리함으로써 향후 개별 calibration 및 관측 자료와의 정합도 검증이 용이해졌다.

2.9 빙조류 수층 침강 속도 증가

(1) 기존 모델의 문제 — 빙조류를 수층 규조류와 동일하게 처리

봄철 해빙 용융기 염수 채널에서 해방된 빙조류는 수층 환경에서 두 가지 상반된 경로를 따를 수 있다. 하나는 수층 부유 식물플랑크톤으로서 성장에 기여하는 seeding 경로이며, 다른 하나는 빠르게 응집·침강하여 저서 생태계로 유기물을 공급하는 sedimentation 경로이다. 어떤 경로가 지배적인지는 빙조류의 종 구성, 응집 성질, 수층의 물리 환경에 달려 있다. 관측 연구들은 해빙에서 방출된 빙조류, 특히 대형 규조류가 주를 이루는 bottom-ice community는 강한 응집 경향을 보이며 수층에 장기 체류하지 않고 빠르게 저층으로 침강한다는 사실을 일관되게 보고하고 있다⁶⁾.



그림 12. 기존 모델(좌, $rm = 0.05 \text{ m/d}$)과 개선 모델(우, $rm = 10 \text{ m/d}$)에서의 빙조류 수층 방출 후 거동 비교. 기존 모델에서는 빙조류가 수층에 장기 체류하며 분산되는 반면, 개선 모델에서는 빠른 침강으로 저층으로 유기물을 공급한다. 오른쪽 패널의 파란 점선은 비교를 위한 수층 규조류(P1)의 침강(0.05 m/d)을 나타낸다.

기존 SPBM에서 빙조류(코드명 P1_i)와 수층 규조류(P1)는 동일하거나 유사한 배경 침강 속도($rm \approx 0.05 \text{ m/d}$)를 사용하였다. 이 설정에서는 해빙 용융 후 방출된 빙조류가 수층에서 수층 규조류와 동등하게 취급되어 장시간 체류하고 성장을 지속하게 되므로, 위 관측

6) 문헌 근거

- Riebesell et al. (1991, Polar Biology, doi:10.1007/BF00238457) — 웨델 해 빙조류 방출 실험. 해빙 용융 시 빙조류는 강한 응집 성질을 보이며, 응집체의 침강 속도는 분산 세포 대비 3자리수 높았다. 이 관측은 빙조류 방출 후 씨앗 효과가 미미하고 빠른 침강이 지배적 경로임을 제안한다.
- Kwon et al. (2023b, Frontiers in Marine Science, doi:10.3389/fmars.2023.1181650) — 아문센 해 생태계 모델링 연구. 빙조류(sympagic diatoms)의 침강 속도를 부유 식물플랑크톤(0.05 m/d) 대비 높은 1.0 m/d 로 설정하였으며, 봄철 POC 플럭스의 주요 선행 피크가 빙조류 용융·방출과 연계된 입자 침강으로 구성됨을 보여주었다.
- Michel et al. (1997, J. Marine Systems, doi:10.1016/S0924-7963(96)00034-6) — 사로마 호(Sea of Okhotsk)에서 빙조류 침강 및 수층 재순환의 공존을 보고. 빙조류 생산량의 일부는 수층에서 재순환되지만, 상당 부분은 빠른 세포 침강으로 저층 퇴적층으로 유실됨을 정량화하였다.
- Szymanski & Gradinger (2016, Polar Biology, doi:10.1007/s00300-015-1783-z) — 베링 해 빙조류 연구. 해빙 용융기 퇴적 트랩에서 측정된 빙조류 세포 수직 플럭스가 결빙기 대비 10배 이상 급증하였으며, 이는 용융 시 방출된 빙조류가 빠르게 저층으로 침강함을 실증한다.

들이 보고하는 빙조류의 빠른 침강 현상을 전혀 재현하지 못한다.

(2) 개선 내용 - 빙조류 침강 속도 대폭 증가

빙조류의 배경 침강 속도와 영양염 스트레스 침강 속도를 모두 수층 규조류(P1) 대비 높게 설정하였다 (그림 12). 즉,

```
# fabm ersem.yaml - 침강 속도 비교
P1:  rm: 0.05  resm: 5.0   # 수층 규조류 [m/d] (기준값)
P1_i: rm: 10.0  resm: 10.0 # 빙조류 [m/d] (수층 규조류의 200배)
```

그리고 수층에서의 침강 속도 SD는 영양염 제한 인자(iNI)를 통해 결정된다.

$$SD = resm \times \max(0, esni - iNI) + rm$$

rm = 10 m/d: 영양염이 충분해도 기본 10 m/d 침강

esni = 0.7: 이 값 이하에서 resm 추가 침강 개시 → 최대 20 m/d 침강 가능

한편 빙조류는 해빙 내부에서는 gravity drainage에 의해 해빙 하층으로 집적되며, 이 이동 속도는 수층 침강 속도와 별도의 파라미터(ice_algae_velocity)로 관리된다:

```
코드 구현 방법

# spbm.yaml
ice algae velocity: 200 # 해빙 내부 이동 속도 [cm/d] = 2 m/d
                        # 브라인 채널 내 중력 대류에 의한 하강 이동

# 수층 방출 후 침강 (fabm ersem.yaml)
P1_i:  rm: 10.0         # 해빙-수층 경계 통과 후 rm = 10 m/d로 즉시 전환
```

두 과정의 역할은 명확히 구분된다. 해빙 내부에서의 이동(2 m/d)은 빙조류를 염수 채널 하부에 집적시켜 하층 영양염 공급과 광합성을 최적화하는 기능을 하며, 수층 방출 후의 빠른 침강(10 m/d)은 빙조류가 수층의 높은 광량과 희박한 영양염 환경에 적응하지 못하고 빠르게 저층으로 가라앉는 현실을 반영한다. 이 이중 구조는 봄철 아문젠 해 저층 POC 플럭스의 초기 피크를 보다 현실적으로 재현하며, 저서-수층 결합을 개선하는 데 기여한다.

3. 모델 수치 및 구조적 개선

본 절에서는 기존 SPBM에서 발견된 물리-생지화학 결합 인터페이스의 오류 및 버그 수정, 수치 안정성 강화, 모델 수행의 용이성을 위한 구성 간소화 등 기술적 개선 내용을 기술한다. 이러한 개선들은 생태계 역학 과정의 정확한 모의를 위한 계산 기반을 제공한다.

3.1 물리-생지화학 결합 강화 – 연일수·해수 밀도 전역 연결

(1) 연일수(year day; DOY) FABM 전역 연결

ERSEM의 태양 천정각 모듈(zenith_angle.F90)은 일·계절 광량 변화를 계산하기 위해 FABM 표준변수 number_of_days_since_start_of_the_year를 요구한다. 기존 코드에서 이 연결은 특정 컴파일 플래그(_PURE_ERSEM_) 활성화 시에만 이루어져, 표준 빌드에서는 광량 계산에 오류가 발생하였다. 개선된 버전은 플래그와 무관하게 실수형 연일수를 FABM에 항상 연결한다:

코드 구현 방법

```
! 전역 선언 (플래그 무관 – 항상 사용 가능)
real(rk), target :: realday ! 연일수 (실수형)
type(type scalar variable id):: id yearday

! 초기화 시 FABM 표준변수에 연결
id yearday = fabm_model%get_scalar_variable id(&
  standard_variables%number of days since start of the year)
call fabm_model%link_scalar(id yearday, realday)

! 매 타임 스텝 갱신
realday = real(day, rk) ! integer → real(rk)
```

(2) 해수 밀도(ρ) 연결 및 +1000 오프셋 오류 수정

탄산염 시스템의 농도 단위 변환($\text{mmol/m}^3 \leftrightarrow \text{mol/kg}$) 시에는 해수 밀도(ρ , kg/m^3)가 필수적으로 요구된다. 기존 코드에서는 ① 밀도 변수가 FABM에 연결되지 않았으며, ② 입력 데이터의 밀도값에 1000 kg/m^3 를 더하는 오프셋 오류가 존재함을 확인하였고, 두 오류가 복합적으로 pH, pCO_2 , 포화도(Ω_{cal} , Ω_{arg}) 등 모든 탄산염 진단변수(코드명 O3c)에 영향을 미쳤다.

코드 구현 방법

```
! 기존 (오류): GOTM 출력 밀도에  $1000 \text{ kg/m}^3$  오프셋 추가
density = standard_vars%get_column( RHO , pseudo day) + 1000. rk

! 개선 (수정): GOTM 출력값( $[\text{kg/m}^3]$ )을 그대로 FABM에 연결
density = standard_vars%get_column( RHO , pseudo day)
call fabm_link_bulk_data(fabm_model, rho_id, density)
```

3.2 해빙 성장·소멸 과정의 수치 안정성 강화

해빙이 급격히 성장하거나 소멸할 때 레이어 인덱스를 이동(shift)하는 과정에서 배열 경계(1 ~ N)를 초과하는 접근이 발생할 수 있었다. 이는 런타임 오류로 이어져 모델 붕괴의 원인이 되었다. min()·max() 함수를 통한 경계 보호를 추가하여 여름철 급격한 해빙 변화에서도 모델이 안정적으로 운영될 수 있도록 하였다:

```
! 기존 - 상·하한 범위 초과 위험
state vars(j)%value(i) = state vars(j)%value(i + ice growth)
state vars(j)%value(i) = state vars(j)%value(i - ice growth)

! 개선 - min/max 경계 보호
state vars(j)%value(i) = &
  state vars(j)%value(min(i+ice growth, size(state vars(j)%value)))
state vars(j)%value(i) = &
  state_vars(j)%value(max(i-ice_growth, 1))
```

3.3 해빙 두께·적설량 입력 체계 교정 - GLORYS 재분석 자료 도입

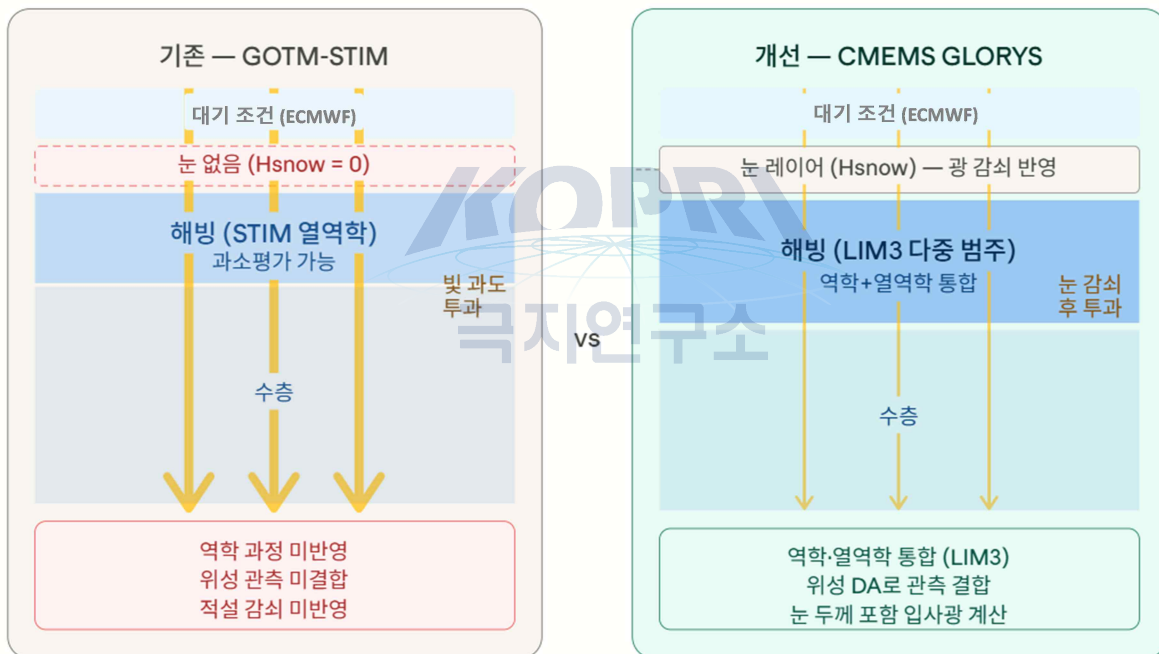


그림 13. 기존 GOTM-STIM(좌)과 개선된 CMEMS GLORYS(우) 해빙 입력 체계의 수직 단면 비교. 기존 방식에서는 적설량이 전혀 반영되지 않아($H_{\text{snow}} = 0$) 입사광량이 과도하게 투과되고, 순수 열역학 기반의 해빙 두께가 과소평가되는 문제가 있었다. 개선된 방식은 LIM3 다중 범주 해빙 모델과 위성 관측 데이터 동화(DA)를 결합한 GLORYS 재분석 자료를 사용하여 눈 두께(H_{snow})에 의한 광 감쇠 및 해빙 역학 과정이 명시적으로 반영된다.

(1) 기존 방식의 한계 - GOTM-STIM 열역학적 해빙 모델

기존 SPBM의 해빙 입력 체계는 Kwon et al. (2023)에서 기술된 바와 같이, 1차원 수리 역학 모델 GOTM과 열역학적 해빙 모델 STIM (Simple Thermodynamic Ice Model)을 결합하여 해빙 두께(H_{ice})를 산출하였다. MyLake 알고리즘 기반의 STIM은 Stefan의 법칙에 따른 기온-해빙 두께 관계만을 사용하며, 다음 두 가지 주요 제약이 있었다:

- **적설량 미고려:** STIM 모델은 적설량을 전혀 반영하지 않는다. 눈은 해빙 상부의 단열재 역할을 하여 해빙 두께와 지속 기간에 직접적인 영향을 미치며, 눈의 높은 광 감쇠계수($k_{\text{snow}} \approx 4.3 \text{ m}^{-1}$)로 인해 해빙 하부 입사광량도 결정적으로 좌우한다. 적설량을 고려하지 않으면 해빙 두께와 빛 투과량이 모두 실제보다 과대 평가된다.
- **단순 열역학만 반영:** STIM은 기온과 해수 온도 간의 열 교환만으로 해빙 두께를 결정한다. 실제 해빙은 ridging, rafting, 해류에 의한 이류(advection) 등 역학적 과정에 의해서도 크게 변하지만 이런 과정이 반영되지 않아, 위성 관측과 비교 시 해빙 두께가 상당히 과소 평가되는 경우가 있었다.

(2) 개선 - CMEMS GLORYS 재분석 자료 도입

이러한 문제를 해결하기 위해, 해빙 두께(H_{ice}), 해빙 표면 온도(T_{ice}), 적설량(H_{snow})을 모두 CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)의 GLORYS (Global Ocean Reanalysis and Simulations) 재분석 자료에서 직접 추출하여 SPBM 입력자료로 사용하도록 변경하였다 (그림 13). GLORYS 자료의 특성은 아래와 같다.

- **해빙 물리 모델:** LIM3 (Louvain-la-Neuve Ice Model version 3) 다중 범주 (multi-category) 해빙 모델 기반. 단순 열역학 외에 해빙 역학(ridging, rafting, 이류)과 눈의 열역학적 효과를 포함한다.
- **위성 관측 동화:** 실제 위성 해빙 농도 (sea ice concentration) 관측값을 데이터 동화 (Data Assimilation) 기법으로 결합하여 산출된 값으로, 관측 기반의 현실성이 보장된다.
- **적설량 포함:** 해빙 위의 눈 두께 (snow depth) 자료를 함께 제공하므로, 눈에 의한 빛 감쇠 및 단열 효과를 처음으로 명시적으로 반영할 수 있게 되었다.

입력 변수	기존 (GOTM-STIM)	개선 (CMEMS GLORYS)
해빙 두께	Stefan 법칙 기반 열역학적 산출 (역학 과정 미포함, 과소평가 우려)	GLORYS LIM3 + 위성 DA → 역학·열역학 통합, 현실적 두께
해빙 표면 온도	STIM 내부 계산값	GLORYS 재분석 직접 추출
적설량	미반영 (0으로 고정) → 빛 투과 과대평가	GLORYS 눈 두께 자료 사용 → 광 감쇠·단열 효과 반영
모델 특성	순수 열역학 모델	위성 DA 결합 재분석 (관측 기반 신뢰도 높음)

표 3. 기존 SPBM 모델에서의 해빙 두께 입력 방식과 개선된 입력 방식 비교

제 2 절 모델 시뮬레이션 결과 및 관측 비교

1. 해빙 현장 관측 공개 데이터 수집

남극 해빙 생태계의 생지화학적 특성을 기록한 현장 관측 자료는 그 특성상 단일 연구 기관이나 단일 항해를 통해 일괄적으로 확보하기 어렵다. 남극 해빙은 계절성이 강하고 해역별 접근 난이도가 높아, 체계적인 코어 채취 관측은 수십 년에 걸쳐 다수의 국가 연구기관이 독립적으로 수행한 현장 조사의 결과물로 세계 각지에 분산되어 존재한다. 본 연구에서는 이러한 분산된 자료들을 모델 검증에 통합적으로 활용하기 위해 ASPeCt-Bio (Antarctic Sea Ice Processes and Climate - Biological) 데이터베이스를 수집·정리하였다 (그림 14).



그림 14. ASPeCt 해빙 코어 자료의 공간적 분포와 지역별 코어 수를 나타낸 남극 지도. 각각 녹색, 적색, 청색으로 대표 연안인 서남극 반도와 아문젠해, 테라노바 만 및 로스해 시료들을 표시하였으며 회색으로는 그 외 지역들의 코어 시료 위치를 의미함.

ASPeCt-Bio는 SCAR의 주도 하에 1983년부터 남극 전역에서 수행된 해빙 코어 관측 자료를 축적해온 데이터셋으로, 총 1,300개의 해빙 코어 기록을 포함하고 있다 (Meiners et al., 2012). 그러나 이 데이터베이스는 단일한 형태로 배포되고 있지 않아, 각 항해 단위의 자료를 개별적으로 수집·취합하여 이를 동일한 포맷으로 정렬하여 재료를 재가공하는 과정이 필요하였다. 수집된 자료에는 코어 채취 위치(위·경도), 채취 시기, 해빙 두께, 적설량과 함께, 수온(Temperature), 염분(Salinity), 엽록소 a (Chlorophyll a), 입자성 유기탄소(POC), 입자성 유기질소(PON), 질산염(Nitrate) 등의 생지화학 변수가 층위별 수직 프로파일 형태로 포함되어 있다. 그러나 이 자료들이 모든 코어 시료에 동일하게 기록되어 있지는 않으며 대부분의 시료는 위 파라미터들 중 일부의 값들만을 포함하고 있다.

따라서 수집된 1,300개 코어의 공간 분포를 검토한 결과, 자료는 남극 전역에 광범위하게 분포하나 관측 밀도는 해역에 따라 현저히 불균등한 것으로 나타났다 (그림 15&16).

이는 각 해역의 선박 접근성, 연구 향해 이력, 각국의 관측 투자 비중 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구는 이러한 전체 자료의 분포 특성을 분석한 결과를 토대로, 모델 검증에 활용할 대표 해역으로 서남극반도(West Antarctic Peninsula, WAP), 테라노바만·로스해(Terra Nova Bay/Ross Sea, TNB), 아문젠 해(Amundsen Sea, ASP) 세 해역을 선정하였다.

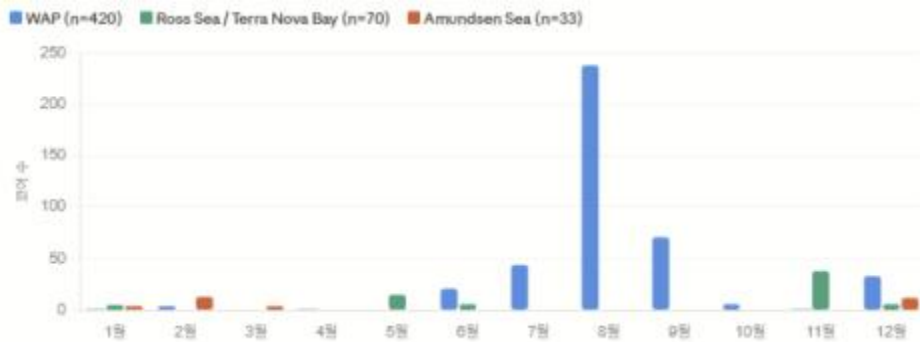


그림 15. ASPeCt-Bio 데이터베이스(1983 - 2008)에 수록된 해빙 코어의 월별 채취 현황. 서남극반도(WAP, 파란색), 테라노바만·로스해(초록색), 아문젠해(주황색)의 집중 분석 3개 해역을 대상으로 집계하였으며, 전체 1,300개 코어 중 해당 해역에 해당하는 523개 코어를 표시하였다. WAP 해역은 남반구 동계인 7 - 9월에 관측이 집중된 반면, 로스해와 아문젠해는 각각 초봄(11월)과 하계(1 - 3월)에 자료가 편중되어 있어 해역별 관측 계절 편차가 크다.

각 해역의 선정 근거는 다음과 같다. 서남극반도 해역($-80^{\circ}\text{W} \leq \text{lon} \leq -55^{\circ}\text{W}$, $\text{lat} \leq -60^{\circ}\text{S}$)은 지난 수십 년간 남극에서 기온 상승과 해빙 면적 감소가 가장 빠르게 진행되어 온 지역으로 (Vaughan et al., 2003; Stammerjohn et al., 2008), 해빙 생태계의 기후 반응성을 모의·검증하기에 과학적 중요성이 가장 높은 해역이다. ASPeCt-Bio 내 해당 해역 코어 수는 420개로 세 해역 중 최다이며, 7 - 9월(남반구 동계)에 관측이 집중되어 있어 결빙기 해빙 생태계 특성을 분석하기에 충분한 자료가 확보되어 있다. 특히 엽록소 자료가 1 - 10월에 걸쳐 비교적 연속적으로 분포하여 (그림 16), 계절 변동 모의 검증에 적합하다.

테라노바만·로스해 해역($\text{lon} \geq 160^{\circ}\text{E}$ 또는 $\text{lon} \leq -155^{\circ}\text{W}$, $\text{lat} \leq -70^{\circ}\text{S}$)은 WAP와 대조적으로 고위도 연안 환경 특성을 지닌 해역으로, 70개의 코어 자료가 확보되어 있다. 자료 분포는 5 - 6월과 11월에 편중되어 있지만 (그림 16), 또한 로스해는 위성 관측에서 큰 연변동성을 보이며, 특히 2007년 이후 여름철 해빙 감소와 최근의 저해빙 사건이 두드러지게 나타났다 (Parkinson, 2019). 이 때문에 해빙 감소 시나리오 기반 모델 적용 가능성을 타진하는 데 적합한 해역으로 판단하였다.

마지막으로 아문젠해 해역($-140^{\circ}\text{W} \leq \text{lon} \leq -100^{\circ}\text{W}$, $\text{lat} \leq -68^{\circ}\text{S}$)은 코어 수가 33개로 세 해역 중 가장 적으나, 탄소 순환 및 생지화학 관점에서 또한 중요한 지역이다. 아문젠 해는 남극 빙상 유출과 해빙 - 대륙붕 상호작용이 활발하여 생지화학적 환경 변동성이 크며 (Naughten et al., 2023; St-Laurent et al., 2017), 자료는 주로 1 - 3월(하계)과 12월에 집중되어 있어 용빙기 해빙 생지화학 특성 검증에 활용될 예정이다. 다만 아문젠해의 경우 검증 가능한 변수가 제한적이라는 점은 본 연구의 자료 한계로 명시한다.

파라미터별 자료 가용성을 종합 검토한 결과, 세 해역 공통으로 가장 광범위하게 측정된 변수는 엽록소 a로 확인되었다. 이에 본 연구에서는 엽록소를 1차 모델 검증 변수로 채택

파라미터별 자료 가용성

해빙 코어 중 해당 파라미터 측정값이 존재하는 코어 수 (월별)

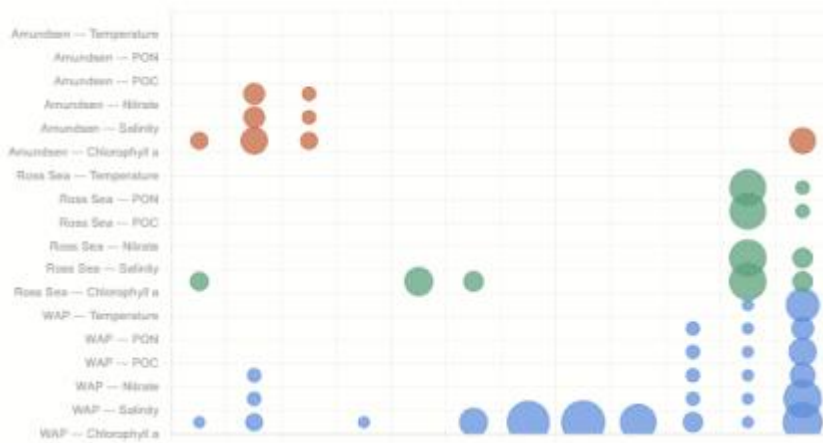


그림 16. 3개 집중 분석 해역에서 파라미터별·월별 자료 가용성. 원의 크기는 해당 월에 해당 파라미터가 측정된 코어 수를 나타낸다. 엽록소는 세 해역 모두에서 가장 광범위하게 측정된 반면, 수온(Temperature)과 POC·PON은 특정 해역·계절에 한정되어 자료가 희박하다. 본 연구는 자료 가용성이 가장 높은 엽록소 a를 1차 모델 검증 변수로 활용하였다.

하고, 해역 및 자료 가용성에 따라 그 외 변수들을 보조 검증 변수로 활용한다. 수온은 WAP 일부 코어에서만 측정되어 모든 해역에 걸친 정량적 비교에는 한계가 있으며, 향후 추가 현장 관측 자료 확보를 통한 보완이 필요하다.

2. 해빙 생태계 모델 셋업 및 물리 환경 재현

2.1 모델 셋업 및 기본 변수 결과

모델 셋업에 관한 내용은 구성상 3장 1절(모델 개선 및 개발 내용)에 포함시키는 것이 원칙이지만, 이어지는 모델 결과 해석의 이해를 돕기 위해 여기에 기술하였다. 본 연구는 남극 연안의 대표적 고생산성 해역을 대상으로 해빙 - 표영 생태계 상호작용을 비교하기 위하여, 앞서 서술한 아문젠해(ASP; 72.5° S, 115° W), 로스해 테라노바만(TNB; 75° S, 165° E), 서남극반도(WAP; 68.5° S, 68.5° W) 인근의 대표 정점을 사례 해역으로 선정하여 수행하였다. 이러한 사례 해역 중심 접근은 당초 연구계획서에서 제시한 바와 같이, 관측 자료가 비교적 축적된 대표 해역을 우선 활용하여 모델 검증 및 매개변수 보정을 수행한 뒤 향후 보다 넓은 남극해로 확장하기 위한 전략에 해당한다.

본 연구에서 사용한 SPBM은 해빙 - 표영 - 저서 생태계를 1차원 연직 구조 내에서 결합하여 모의하는 체계이므로, 구동을 위해서는 시뮬레이션 기간 동안의 해수층과 해빙층의 물리 환경 정보가 선행적으로 준비되어야 한다. 해수층 입력장은 수온, 염분, 밀도 및 연직 난류혼합계수(eddy diffusivity)와 같은 연직 물리 상태 변수를 포함하며, 해빙층 입력장은 해빙 두께와 해빙 온도를 기본으로 하고, 필요에 따라 적설량을 추가적으로 포함할 수 있다. 이러한 변수들은 해빙 생물의 서식 가능 조건, 광환경, 영양염 교환 및 생물량 분포를 결정하는 기본 경계 조건으로 작용한다.

해수층 물리장은 1차원 연직 수주 모형인 GOTM (General Ocean Turbulence Model) 을 이용하여 생산하였다. GOTM은 자연수체에서의 연직 혼합과 관련된 주요 수리·

열역학 과정을 계산하는 1차원 water column model로 (Burchard et al. 2006), 운동량·열·염분의 연직 수송을 풀어 수온, 염분, 난류 혼합 계수 등의 연직 구조를 제공한다. 본 연구에서는 대기 강제력으로 ERA5 재분석 자료를 사용하였으며, 주로 10 m 바람 성분(u10, v10), 2 m 기온, 평균해면기압, 2 m 이슬점온도, 총운량 등의 변수를 입력하여 해양-대기 간 운동량 및 열 교환을 고려하였다. ERA5는 1940년부터 현재까지의 다수 대기·지표 변수를 시간연속적으로 제공하는 ECMWF의 5세대 전 지구 재분석 자료이며, 위 변수들은 공식 단일고도(single levels) 자료 항목에 포함된다.

한편 해빙층 물리장은 Copernicus Marine Service의 전지구 해양 재분석 자료인 GLORYS 계열 자료에서 추출하였다. GLORYS는 전지구 해양과 해빙 상태를 함께 재분석한 고해상도 자료군으로, 해빙 농도와 해빙 두께를 포함한 sea-ice state variable을 제공하며, 남극 및 북극의 계절적 해빙 변동을 비교적 일관되게 재현하도록 구축되어 있다. 본 연구에서는 GLORYS로부터 각 정점의 해빙 두께와 해빙 온도 자료를 추출하였고, 적설량 정보도 함께 반영하였다. 이와 같은 방식으로 해수층의 연직 물리장과 해빙층의 상태 변수를 결합하여 SPBM 구동에 필요한 입력 netCDF 파일을 구축하였다. 이때 GLORYS 자료가 2022년부터 2025년 까지만 제공되고 있어 시뮬레이션 기간은 이 4년으로 제한하였고 뒤에서 분석할 모델 결과들은 이 4년의 결과를 연일수 평균으로 나타낸 것들임을 밝힌다.

정리하면, 본 연구의 입력장 구성은 해수층에 대해서는 GOTM 기반의 연직 물리 상태 변수, 해빙층에 대해서는 GLORYS 기반의 해빙 상태 변수를 결합하는 방식으로 이루어졌다. 이러한 이원적 구성은 수층 연직 혼합과 해빙 상태를 각각 가장 적절한 자료원에서 확보하기 위한 것으로, SPBM이 요구하는 해빙 수층 경계의 시간 변동을 안정적으로 재현하기 위한 전처리 과정에 해당한다. 또한 이는 계획서에서 제시한 바와 같이 공개 재분석·관측 자료를 이용하여 대표 해역의 모델 검증 및 보정 기반을 마련한다는 연구 수행 전략과도 부합한다.

이와 같이 구축한 입력장을 바탕으로 각 정점에서의 해빙 두께, 해빙 온도, 수온 및 해수 염분의 계절 변화를 우선 비교하여 모델의 기본 물리 환경 재현성을 점검하였다. 해빙 두께는 해빙 생태계의 형성과 유지, 빙조류 서식 공간의 확보, 광환경 조절, 그리고 용해기 유기물 방출 시점을 좌우하는 핵심 변수이므로, 본 연구에서는 후속 생태계 결과를 해석하기에 앞서 물리적 배경장 재현 여부를 먼저 확인하였다. 그림 17는 세 지역(ASP, TNB, WAP)의 1년 시뮬레이션 결과에서 해빙 두께(시계열), 해빙 내부 온도와 염분, 수층 수온과 염분을 시간(가로축)×깊이(세로축) 단면으로 나타낸 것이다.

(1) Amundsen Sea (ASP)

ASP의 연평균 해빙 두께는 0.568 m이며, 해빙은 6월부터 10월 사이에 점차 두꺼워져 최대 약 1.2 m에 이르고, 1월부터 3월에는 약 0.1 m 수준까지 얇아지는 뚜렷한 계절 변동을 보인다. 해빙 내부 온도는 얼음 두께와 밀접하게 연동되며, 겨울철에는 얼음 표층이 대기 냉각의 영향으로 -20°C 이하까지 낮아지는 반면, 저면은 해수와의 접촉으로 약 -2°C 부근

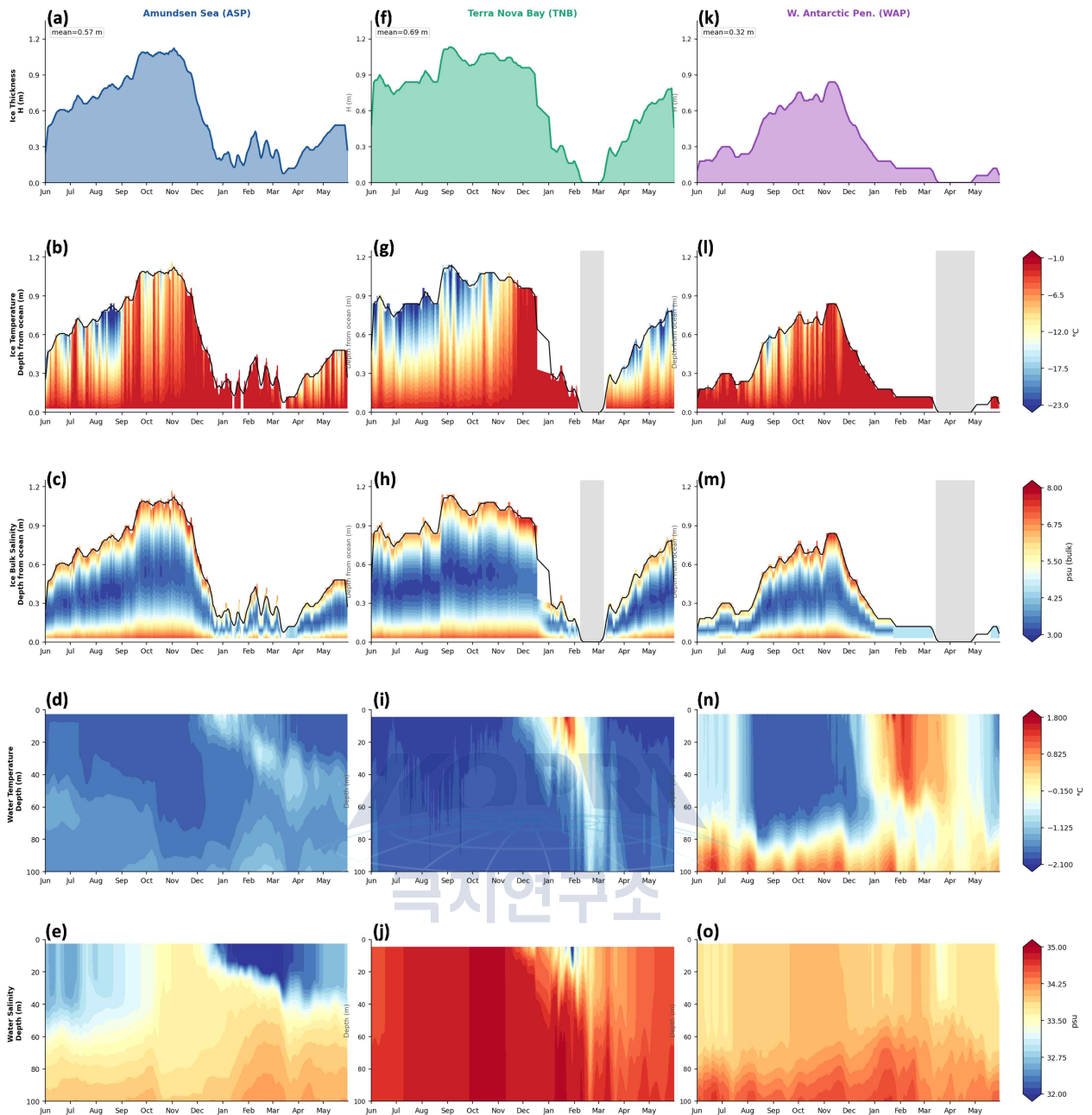


그림 17. ASP(a-e), TNB (f-j), WAP (k-o)에 대해 SPBM 모델이 구현한 해빙 두께, 해빙 온도, 해빙 bulk 염분, 수온, 수층 염분 결과.

을 유지한다. 이로 인해 겨울철 해빙 내부에는 강한 수직 온도 구배가 형성되며, 이는 brine channel의 발달과 용질 이동, 그리고 생물 서식 가능 환경을 결정하는 주요 요인으로 작용한다. 여름철에는 전층 온도가 -5°C 이상으로 상승하면서 이러한 구배가 완화된다.

해빙 염분은 전형적인 C-type 분포, 즉 상층과 하층의 염분이 높고 중간층이 상대적으로 낮은 구조를 재현하였다. 다만 그 강도는 TNB보다 약하고 WAP보다는 다소 뚜렷한 중간적 특성을 보였다. 이는 ASP가 충분한 겨울철 냉각을 경험하여 brine 농축이 발생하지만, TNB만큼 강한 냉각 및 염분 농축은 일어나지 않기 때문으로 해석된다. 여름철 2-3월로 갈수록 이러한 C-shape는 점차 약화되며, 해빙 내부 염분 프로파일은 보다 선형적인 I-type 구조에 가까워진다. 이는 해빙 온도 상승과 함께 desalination이 진행되면서 내부 brine이 배출되기 때문이며, ASP에서는 이 전환 시기가 WAP보다는 늦고 TNB보다는 빠르게 나타난

다.

수층 수온은 연중 $-2.0 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ 의 비교적 좁은 범위를 유지하며, 표층에서 계절적으로 다소 높아지는 경향을 보인다. 전반적으로 낮은 수온을 유지하지만 TNB 보다는 다소 높은 편인데, 이는 상대적으로 따뜻한 Circumpolar Deep Water (CDW)의 유입 영향과 관련이 있는 것으로 판단된다. 수층 염분은 표층에서 31~33 psu로 비교적 낮고, 계절 변동 폭은 세 지역 중 가장 크다. 겨울철에는 해빙 형성에 따른 brine rejection으로 표층 염분이 증가하고, 여름철에는 해빙 용해수 유입으로 담수화가 나타나는 계절성이 뚜렷하다. 또한 그림에는 제시하지 않았지만, 약 100 m 이하의 심층에서는 34 psu 이상의 비교적 안정된 염분이 유지된다.

(2) Terra Nova Bay (TNB)

TNB는 세 지역 가운데 해빙이 가장 두껍고(연평균 0.646 m, 최대 1.14 m), 계절 변동도 가장 크게 나타난다. 특히 9월부터 11월까지는 1.0 m 이상의 두꺼운 해빙이 지속되며, 이러한 두께 특성은 TNB에서 빙조류 bloom의 강도와 수층으로의 광 투과를 결정하는 핵심 인자로 작용한다. 해빙 내부 온도는 ASP보다도 더 낮은 극저온 범위를 보인다. 겨울철 표층에서는 -25°C 에 가까운 값이 나타나는데, 이는 Ross Ice Shelf 인근에서 유입되는 강한 katabatic wind의 영향으로 대기 냉각이 매우 강하게 작용하기 때문이다. 표층과 저면 사이의 온도 차는 세 지역 중 가장 크며, 이러한 강한 수직 온도 구배는 brine channel 내 용질의 농축과 이동을 활성화하여 영양염 및 철의 축적과 방출에 유리한 조건을 제공한다.

해빙 염분 역시 세 지역 가운데 가장 뚜렷한 C-type 구조를 나타낸다. 즉, 상층과 저층의 염분이 높고 중간층이 상대적으로 낮은 전형적인 C-shape가 잘 재현되었으며, 그 강도 또한 ASP와 WAP보다 더 크다. 이는 TNB에서 겨울철 냉각이 가장 강하여 brine 농축 효과가 두드러지기 때문으로 해석된다. 절대적인 염분 값의 지역 간 차이는 크지 않지만, 6-7월 평균을 기준으로 보면 TNB의 해빙 염분이 ASP나 WAP보다 소폭 높은 경향을 보인다. 그림 상 차이가 크게 두드러지지 않은 것은 컨투어 범위를 동일하게 설정하였기 때문으로 판단된다. 여름철 2-3월에는 다른 지역과 마찬가지로 C-shape가 점차 약화되며 보다 선형적인 I-type으로 이행하지만, 그 전환은 세 지역 중 가장 늦다. 즉, TNB에서는 여름철에도 C-type의 잔재가 일부 남아 있어, 해빙 내부의 염분 구조가 가장 오래 유지되는 특징을 보인다.

수층 수온도 TNB만의 뚜렷한 특성을 나타낸다. 겨울~봄(6-11월)에는 전 수층이 약 -2°C 수준으로 비교적 균질하지만, 여름철에는 표층 수온이 최대 $+1.8^{\circ}\text{C}$ 까지 상승한다. 이는 강한 여름 일사와 해빙 용해의 영향으로 따뜻해진 표층수가 안정한 성층을 형성하기 때문이며, 일시적으로는 상대적으로 저위도인 WAP와 비슷한 수준의 높은 표층 수온을 보이기도 한다. 수층 염분은 해빙이 녹는 1-2월을 제외하면 전 수층과 전 계절에 걸쳐 다른 두 지역보다 높은 편이며(대체로 34 psu 이상), 2월에는 표층 20 m 이내에서 염분이 30 psu 이하로 급격히 낮아져 매우 강한 성층이 형성된다. 이러한 강한 성층은 여름철 1차생산이 활발한 시기에 혼합을 억제하고 광환경을 안정화함으로써 생산성 유지에 기여할 수 있다.

(3) W. Antarctic Peninsula (WAP)

WAP는 세 지역 중 해빙 두께가 가장 얇으며(연평균 0.318 m, 최대 0.84 m), 계절 변동의 폭도 상대적으로 작다. 해빙은 10 - 11월에 약 0.6~0.84 m까지 두꺼워지지만, 여름철인 1월부터 3월에는 약 0.1 m 수준으로 얇아진다. 이러한 특성은 WAP 해빙이 빙 투과에 유리한 반면, 두께 감소 시나리오에서는 구조적으로 가장 취약한 상태에 놓여 있음을 의미한다. 해빙 내부 온도는 세 지역 중 가장 높다. 겨울철 표층에서도 $-15 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 수준으로 ASP나 TNB보다 높고, 여름철에는 -3°C 이상으로 빠르게 상승한다. 이는 WAP가 상대적으로 온화한 기후 환경에 위치하며, 남대서양 기원 공기와 해류의 영향을 지속적으로 받기 때문으로 해석된다.

이와 같은 온난한 열적 조건은 해빙 내부 brine volume 증가와 빠른 desalination을 유도하여, 염분 구조의 계절 전환도 다른 지역보다 빠르게 일어나도록 한다. 실제로 WAP의 해빙 염분은 세 지역 중 가장 완만한 C-type 구조를 보였다. 즉, 상·하층 염분 증가와 중층 감소라는 전형적 패턴은 존재하지만, 그 강도는 TNB나 ASP보다 약하다. 이는 해빙이 얇고 상대적으로 따뜻하여 brine 농축이 강하게 진행되지 않기 때문이다. 여름철 2-3월에는 이러한 C-shape가 가장 빠르게 붕괴하여 거의 선형적인 I-type 구조로 전환되며, 이는 세 지역 중 desalination이 가장 빠르게 진행된다는 점을 시사한다. 반면 TNB는 여름에도 C-type의 잔재가 남아 있고, ASP는 그 중간적 특성을 보인다. 따라서 해빙 염분 구조의 계절 변화만 보더라도, WAP는 가장 빠르게 여름형 구조로 전환되는 해역으로 이해할 수 있다.

수층 수온은 세 지역 가운데 가장 큰 계절 진폭을 보인다. 겨울철 표층 수온은 $-1.8 \sim -2.0^{\circ}\text{C}$ 수준이지만, 여름에는 최대 $+1.75^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하여 연간 약 3.5°C 의 변동 폭을 나타낸다. 이러한 여름철 표층 가열과 해빙 용해는 혼합층을 안정화시켜 식물플랑크톤 bloom 형성에 유리한 조건을 제공한다. 수층 염분은 표층에서 33.0~34.0 psu 범위로 세 지역 중 가장 좁은 변동 폭을 보이며, 겨울철 해빙 형성 시 다소 증가하고 여름철 용해 시 감소하는 비교적 단순한 계절 패턴을 나타낸다.

(4) 종합 정리

종합하면, TNB는 가장 두껍고 차가운 해빙과 가장 뚜렷한 C-type 염분 구조를 보이며, 강한 냉각과 brine 농축이 지배적인 해역으로 나타났다. ASP는 해빙 두께와 염분 구조 면에서 중간적 특성을 보이며, 표층 담수화와 심층 고염수의 공존이 비교적 뚜렷하다. 반면 WAP는 가장 얇고 온난한 해빙, 가장 완만한 C-type 염분 구조, 그리고 가장 빠른 I-type 전환을 보임으로써, 해빙 내부 구조가 가장 빠르게 여름형 상태로 이행하는 해역으로 해석된다. 이러한 물리적 차이는 이후 나타나는 지역별 빙조류 생산, 수층 bloom, 철 공급 및 탄소 순환 반응의 차이를 설명하는 핵심 배경으로 작용한다.

2.2 해빙 염분 검증

모델 검증을 위한 수온과 염분에 대한 ASPeCt-Bio 관측 자료의 지역·월별 분포 비교 결과는 그림 18에 나타났다. 세 비교 지역(ASP, TNB, WAP) 중 TNB는 염분 관측만 있으며 수온 관측은 오로지 WAP에만 존재하였다. 모델 염분은 bulk 농도($\text{salt} \times \text{porosity}$)로 산출하였는데 이는 모델이 내부적으로 brine 농도를 사용하므로, 관측의 melted ice 기준 값과 직접 비교하기 위해 porosity 보정이 필요하기 때문이다. 해빙 코어마다 총두께가 상이하므로, 절대 깊이를 기준으로 비교할 경우 동일한 상대적 층위가 서로 다른 깊이에 대응되는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 각 코어의 깊이를 총 해빙두께로 나눈 표준화 깊이를 계산($\xi = 0$: 대기/표면, $\xi = 1$: 해양/저면)하고 0.2 간격 구간으로 나누어, 서로 다른 두께의 해빙 사이에서도 표층 - 중층 - 저층의 상대적 수직 구조를 일관되게 비교하였다.

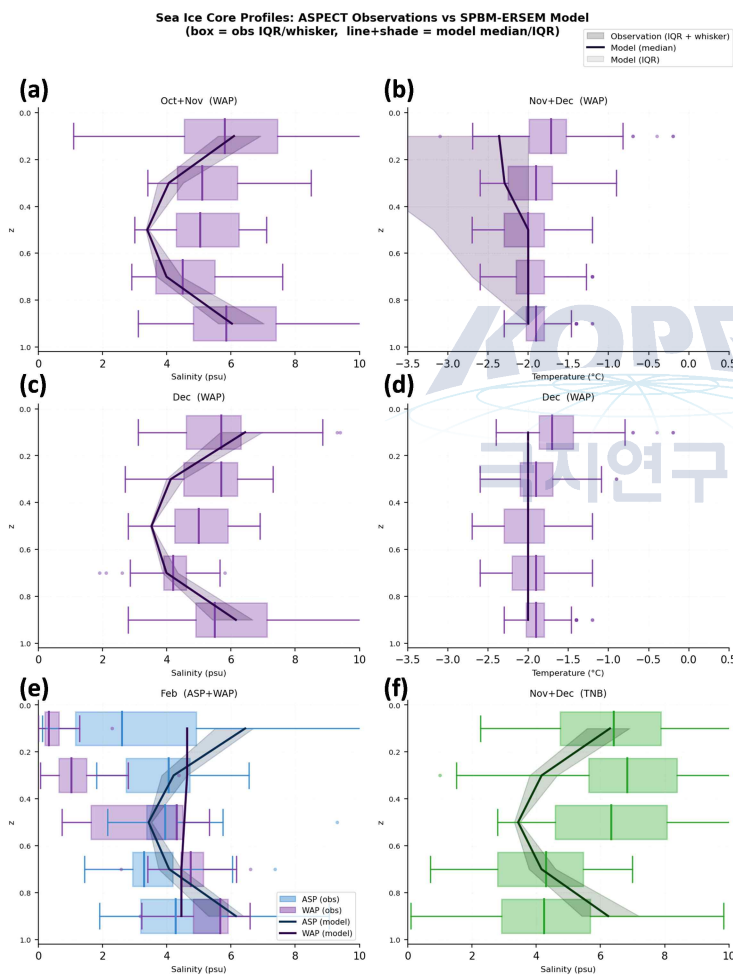


그림 18. 염분과 수온의 관측 및 모델 결과 비교. a-c는 자색으로 WAP의 염분을 비교하였으며, c에는 청색으로 ASP의 염분을 같이 나타냄. d와 e는 WAP의 수온분포, f에는 TNB의 염분 분포를 비교.

10 - 11월은 남반구 기준 이른 봄에 해당하는 시기로, 해빙 두께가 비교적 두꺼운 상태($H \approx 0.78 - 0.90$ m)에서의 비교이다. 관측 중앙값은 상층과 저층 모두 약 7.5 psu 수준을 보이고, 해빙 중층에서 약 5 psu까지 감소하는 전형적인 C자형 분포를 나타낸다. 모델 역시 상층과 저층에서 유사한 염분 범위를 보여 전체적인 C자형 구조 자체는 재현하고 있으

나, 중층 염분을 관측보다 더 낮게 모의하는 경향이 나타난다. 이는 모델에서 중층 탈염 과정, 특히 gravity drainage에 의한 brine 배출이 상대적으로 강하게 작동하고 있기 때문으로 해석된다. 실제 해빙은 성장기와 초기 봄철에 상·하부 경계층에서 높은 염분을 유지하면서도 중층의 탈염이 점진적으로 진행되는데, 모델에서는 이 재배치가 다소 과장되어 중층의 bulk salinity minimum이 실제보다 더 깊게 형성된 것으로 보인다. 또한 해빙 내부 brine network의 연결성과 배수 효율이 이상화되어 있을 경우, 실제보다 빠른 중층 탈염이 발생하여 C자형 분포가 과도하게 강조될 수 있다.

한편 12월은 가장 많은 관측 코어를 보유한 시기로, 관측 중앙값은 표면과 저층에서 모두 약 5.5 psu, 중층에서는 약 4.5 psu의 상대적으로 완만한 C자형 분포를 보인다. 모델은 저층과 표층 염분을 6.0 psu 이하 수준으로 다소 높게 모의하고, 중층은 약 3.5 psu로 더 낮게 나타나 C자형 구조를 관측보다 다소 과장되게 재현하였다. 그럼에도 불구하고 10 - 11월에 비해서는 전반적인 분포 형태와 절대값 차이가 줄어 재현성이 개선된 것으로 판단된다. 이는 12월로 갈수록 해빙 내부의 탈염이 진행되면서 실제 관측에서도 전체 염분 수준이 낮아지고, 모델이 상대적으로 잘 포착할 수 있는 계절적 완화 단계에 들어섰기 때문으로 보인다. 다만 모델은 여전히 표·저층의 염분 보존을 다소 강하게 유지하고 중층 탈염을 과하게 구현하고 있어, 봄철 후반으로 갈수록 실제 해빙에서 나타나는 flushing 또는 상층 담수화 효과를 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있다. 즉, 모델은 성장기 잔재가 남아 있는 전형적 C자형 구조를 유지하는 반면, 실제 관측은 계절 진행에 따라 보다 완만한 분포로 이행하고 있는 것으로 해석된다. 한편 11-12월에는 TNB에서의 염분 관측 자료가 존재하는데 (그림 18f), 이시기 실제 관측에서는 표층보다 중층의 염분이 높고 저층으로 갈수록 낮아져 해빙 저면에서 염분이 가장 낮은 역의 C 타입 혹은 역의 S 자형 분포를 보인다. 그러나 모델은 이러한 분포를 재현하지 못하고 표층의 염분 범위만을 잘 재현할뿐 전형적인 C 타입의 분포를 나타내 괴리감을 보였다. 이는 모델이 해빙 내부 염분 구조를 주로 평균적 열역학 성장과 탈염 과정으로 재현하는 반면, TNB와 같은 연안 fast ice 환경에서 중요한 저면 용융, 담수 유입, 조석·연안 혼합, 브라인 재분배 등의 국지적 과정을 충분히 반영하지 못하기 때문으로 보인다. 그 결과 실제 관측에서 나타나는 저면 저염분층과 역 C형 분포가 모의되지 못하고, 모델은 보다 이상화된 전형적 C자형 구조를 지속적으로 유지하는 것으로 해석된다.

2월은 ASP와 WAP 두 지역의 관측이 모두 존재하는 유일한 시기로, 동일 패널에 색만 달리하여 함께 표현하였다. ASP 관측(2 - 3월 합산, $n = 215$)은 표층이 약 2.5 psu, 저층이 약 4.5 psu로 얼음 하부로 갈수록 염분이 증가하는 구배를 보인다. 그러나 모델은 중층과 저층의 구배는 어느 정도 재현하면서도 표층에서 약 6.0 psu의 과도한 값을 보여, 여전히 C자형에 가까운 분포를 유지하였다. 이는 모델이 용해기 표층 담수화와 flushing에 의한 상부 탈염을 충분히 재현하지 못하고 있기 때문으로 해석된다. 실제 늦여름의 해빙 표층은 융설수 및 융빙수 유입, 공극 연결성 증가, gravity drainage 이후의 잔류 담수화 효과에 의해 급격히 저염화될 수 있으나, 모델에서는 이러한 표층 저염화 과정이 상대적으로 약하게 표현되어 상부 염분이 과대평가된 것으로 보인다. WAP 역시 2월 관측에서 표층은 1.0 psu 이

하, 저층은 약 5.5 psu 수준으로 매우 강한 연직 염분 구배를 보인다. 반면 모델에서는 전층에 걸쳐 약 4.5 psu 내외의 염분이 유지되어, 관측과 달리 거의 I자형에 가까운 분포를 나타냈다. 이는 용해가 강하게 진행된 얇은 해빙에서 실제로는 상층의 담수화와 하층의 상대적 고염분 유지가 동시에 나타나야 하나, 모델이 얇은 얼음 조건에서의 연직 이질성을 충분히 분리하지 못했기 때문으로 판단된다. 특히 WAP은 상대적으로 온난하고 계절적 용해가 빠르게 진행되는 해역이므로, 적설 용해수 유입, 해빙 상부의 flushing, 하부 해수와의 지속적인 염 교환이 동시에 작용하여 강한 비대칭 구조가 형성될 수 있다. 그러나 현재 모델은 매우 얇은 얼음 상태에서 층간 차이를 충분히 해상하지 못하고, bulk 관점에서 평균화된 염분 분포를 산출함으로써 결과적으로 균질한 I자형 구조를 보인 것으로 해석된다.

또한 2월의 경우 특히 WAP 지역은 해빙이 매우 얇아($H \approx 0.1$ m) 관측 자료와 모델 결과를 깊이 방향으로 엄밀하게 비교하는 데 한계가 있다는 점도 함께 고려해야 한다. 얇은 해빙에서는 표준화 깊이 좌표를 적용하더라도 실제 절대 두께가 매우 작기 때문에, 작은 깊이 오차나 샘플링 위치 차이만으로도 연직 구배가 크게 달라질 수 있다. 따라서 늦여름 얇은 해빙 조건에서 나타난 모델 - 관측 불일치는 단순히 모델 구조의 한계뿐 아니라, 관측 자체의 층 분해능 제한과 표준화 깊이 비교의 불확실성도 함께 반영하는 결과로 해석하는 것이 타당하다.

종합하면, 모델은 성장기 및 초봄 조건에서 전반적인 C자형 염분 구조는 비교적 잘 재현하였으나, 중층 탈염을 다소 과도하게 모의하는 경향을 보였다. 반면 늦여름의 매우 얇은 해빙 조건에서는 실제 관측에서 나타나는 표층 담수화 및 강한 연직 구배를 충분히 재현하지 못하였다. 이는 현재 모델이 성장기 해빙의 내부 탈염 구조는 비교적 적절히 표현하는 반면, 용해기 flushing, 표층 담수화, 얇은 얼음에서의 강한 연직 비균질성을 재현하는 데에는 한계가 있음을 시사한다.

2.3 해빙 수온 검증

수온 관측은 WAP 지역(11월 및 12월, $n = 250$)에만 존재하며, ASP와 TNB에 대해서는 비교 가능한 자료가 없다. WAP의 11 - 12월 관측 수온은 전층에 걸쳐 대부분 $-2.0 \sim -1.7^{\circ}\text{C}$ 범위에 분포하며, 표층과 저층의 중앙값은 약 $-1.8 \sim -1.7^{\circ}\text{C}$ 로 상대적으로 높고, 중층은 약 -2.0°C 로 다소 낮은 값을 보인다. 이는 WAP 해빙이 남극 연안 내에서도 비교적 온난한 환경에서 형성되고 유지됨을 반영하는 것으로 해석된다. 실제 관측 분포는 전반적으로 완만한 역 C자형 또는 거의 등온에 가까운 구조를 보이며, 해빙 내부 전체가 극단적으로 한랭하지는 않은 상태를 나타낸다.

모델은 저층 수온에 대해서는 관측과 매우 유사한 값을 재현하였다. 그러나 상층으로 갈수록 모델 수온이 관측보다 낮은 방향으로 기울며, 표층에서는 중앙값이 약 0.5°C 정도로 약간의 과소평가를 보였다(그림 18d). 그림 18e 에는 11월 자료에 포함된 극저온 사례가 제외되면서 모델과 관측 간 차이가 상당히 줄어들어 전반적인 재현성이 뚜렷하게 향상되었다. 11

월의 표층 해빙의 온도가 다소 과소평가 되었던 것은 현재 모델의 해빙 내부 온도 계산 방식과 입력 자료의 특성에서 기인할 가능성이 크다. 본 모델에서 해빙 내부 온도는 외부에서 입력한 해빙 표면 온도(코드명 Tice_surface)와 해수 온도 사이의 관계를 바탕으로 계산되므로, 상부 경계 조건으로 사용된 표면 온도가 실제보다 낮게 주어질 경우 해빙 내부 전체, 특히 상층부 수온이 체계적으로 낮아질 가능성이 있다. 또한 WAP과 같은 비교적 온난하고 계절적 변동성이 큰 해역에서는, 실제 해빙 표면 온도는 적설의 단열 효과, 표면 융해, 재결빙, 일사 흡수, 눈 - 얼음 경계의 열 완충 작용 등에 의해 상대적으로 완화될 수 있다. 그러나 현재 모델 구조에서는 이러한 복합적인 상부 경계 열과정이 충분히 반영되지 않거나, 외부 입력된 해빙 표면 온도에 의해 단순화되어 표현된다. 그 결과 실제 관측에서 나타나는 “따뜻한 상층” 또는 완만한 연직 구배가 모델에서는 충분히 재현되지 못하였을 가능성이 있다.

그럼에도 불구하고 전반적인 해빙 내 수온이 관측과 잘 일치한다는 점은 모델의 해수 경계 조건과 저면 열평형 자체에는 큰 문제가 없음을 시사한다. 따라서 현재 나타나는 표층 해빙 온도 오차는 모델 전체의 열역학 구조가 잘못되었다기보다는, 상부 경계조건 또는 해빙 표면 인근 열과정의 표현에서 주로 발생한 편향으로 해석하는 것이 타당하다. 특히 표면 온도에 대한 외부 입력 의존성이 큰 현재 구조에서는, 재분석 자료 기반 해빙 표면 온도가 실제 국지 환경의 열적 특성을 충분히 반영하지 못할 경우 이러한 오차가 더욱 커질 수 있다.

3. 해빙 내 생지화학 변수 모의 결과 검증

모델 엽록소는 개별 식물플랑크톤 변수를 직접 합산(코드명 $P1 + P1_i + P2 + P3 + P4$)하여 산출하였다. 영양염(NO_3 , PO_4 , Si)은 모델의 코드명인 $N3_n$, $N1_p$, $N5_s$ 변수를 사용하였다. 관측 자료는 물리 자료와 같이 ASPeCt-Bio 데이터베이스(Meiners et al., 2012)에서 표준화 깊이(ξ) 0.2 간격 구간으로 집계하여 박스 플롯으로 표현하였으며 모델 결과는 해당 월의 전체 타임 스텝에서 계산한 중앙값(실선)과 사분위 범위(IQR, 음영)로 제시하였다. 영양염 관측은 ASP(2 - 3월)와 WAP(10 - 11월, 12월, 2월)에만 존재하며, TNB는 비교 가능한 관측 자료가 없어 본 검증에서 제외하였다.

3.1 Amundsen Sea (ASP)

ASP 해역에서는 관측이 집중된 남반구 여름철(12 - 3월)에 대해 엽록소 비교를 수행하였고, 영양염은 관측 자료가 존재하는 2 - 3월을 비교하였다(그림 19). 엽록소의 경우 모델과 관측 모두 전 기간에 걸쳐 얼음 하부에서 농도가 뚜렷하게 증가하는 하부 농집(bottom enrichment) 패턴을 일관되게 나타냈다. 이러한 분포는 앞서 2장에서 설명한 바와 같이 빙조류 기능군인 $P1_i$ 를 ice_algae_ids에 포함시키고, 해빙 내부에서 침강속도(3 cm d^{-1})를 적용한 결과 재현된 핵심 특징으로 해석된다. 즉, 본 모델은 ASP 해빙 내 빙조류가 하부 서식 공간에 집중되는 기본적인 연직 구조를 적절히 모의하고 있는 것으로 판단된다.

12월과 1월에는 모델이 상층의 매우 낮은 엽록소 농도와 저층의 높은 농도(최대 약

30 mg m⁻³)를 전반적으로 잘 재현하였다. 특히 1월에는 모델 저층 농도가 관측 중앙값과 거의 일치하고 관측 박스 플롯의 사분위 범위(IQR) 내에 위치하여, 여름 초입 ASP 해빙 하부에서 나타나는 활발한 빙조류 축적을 비교적 정확하게 표현한 것으로 보인다. 이는 계절 초기에 해빙 하부의 광환경과 영양염 접근성이 상대적으로 양호하고, 해빙 내부에서 성장한 빙조류가 저면부에 유지되는 과정을 모델이 적절히 반영하고 있음을 시사한다.

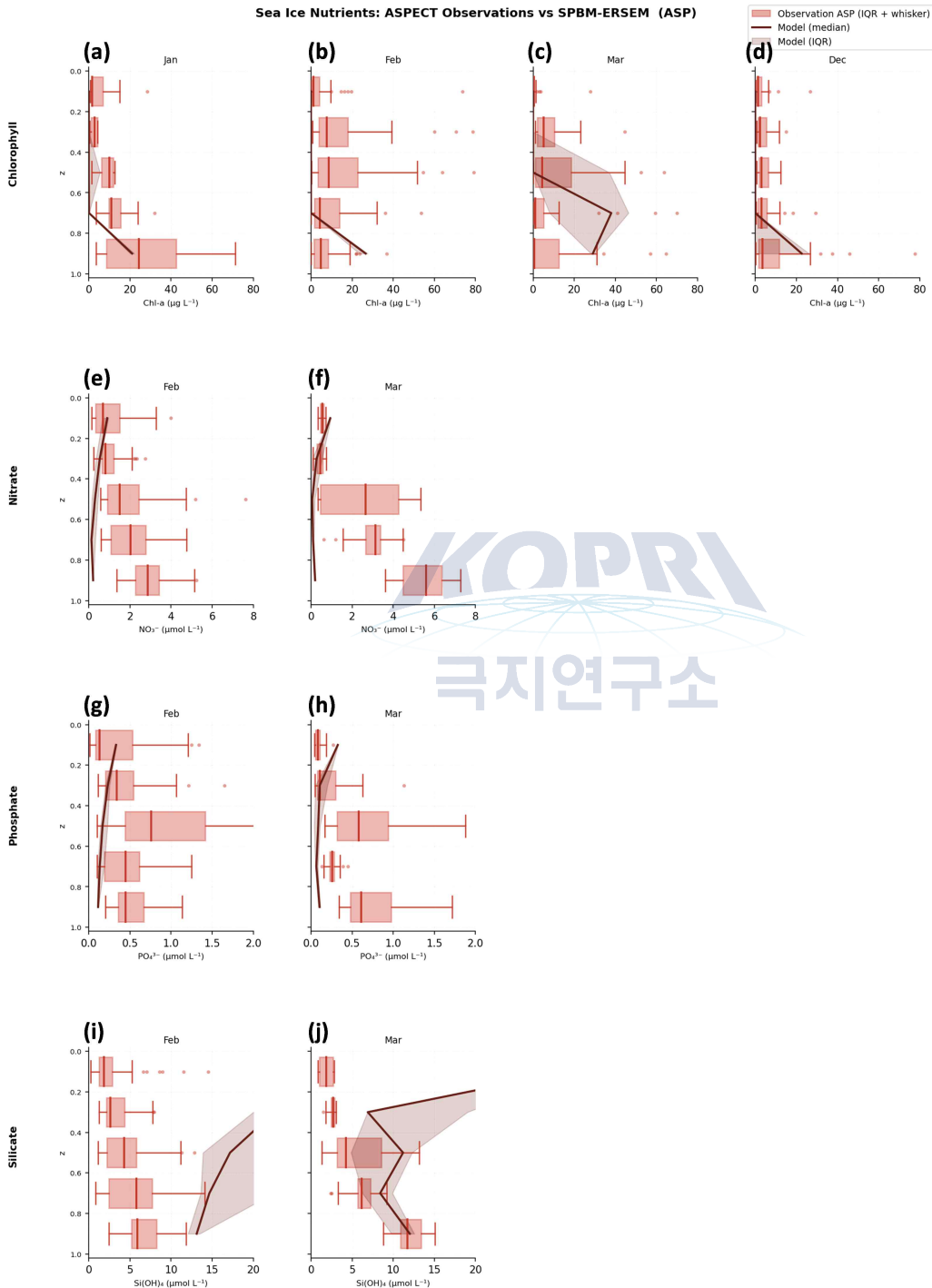


그림 19. 아문젠해(ASP) 모델 및 관측 자료 비교. a-d 는 1-3월, 12월의 엽록소 수직 분포, e-f, g-h, i-j 은 는 각각 질산염, 인산염, 규산염 분포를 비교. 월 구분은 각 플롯 제목에 나타냄.

반면 2월과 3월에는 모델이 저층 엽록소를 관측보다 뚜렷하게 과대평가하였다. 관측에서는 이 시기에 저층 농도가 크게 감소하고, 상대적으로 중층에서 최대값이 나타나는 경향이

보이지만, 모델은 여전히 저층 고농도를 유지하여 늦여름의 분포 변화를 충분히 재현하지 못하였다. 이러한 관측 분포는 중층의 생산성이 실제로 크게 증가하였다고 보다는, 하부 해빙의 용해가 진행되면서 기존에 저층에 농집되어 있던 빙조류가 탈락 및 방출되어 저층 농도가 감소한 결과로 해석하는 것이 더 타당하다. 다시 말해, 관측에서 나타나는 중층 상대적 최대는 중층 생산의 강화라기보다 저층 생물량 손실에 따른 수직 분포 중심의 상향 이동을 반영한 것으로 볼 수 있다. 2월과 달리 3월에는 최하층 바로 위 깊이에서 엽록소 최대치가 나타나 이러한 변화가 일부 반영되기는 하였으나, 모델은 여전히 최하층 농도를 과대평가하고 있다. 즉, 본 모델의 주된 한계는 중층 생산을 과소모의한 데 있다기보다, 늦여름 하부 용해에 따른 빙조류 번성의 종결과 저층 생물량의 소실 과정을 충분히 재현하지 못한 데 있는 것으로 판단된다. 이러한 불일치는 모델 구조와 비교 방법의 제약이 함께 작용한 결과로도 볼 수 있다. 먼저 현재 모델은 해빙 하부 용해가 진행되더라도 저층에 축적된 빙조류가 관측에서처럼 급격히 제거되거나 수층으로 방출되는 과정을 충분히 강하게 표현하지 못할 가능성이 있다. 그 결과 실제 관측에서는 감소한 저층 엽록소가 모델에서는 상대적으로 오래 유지되어, 늦여름 저층 과대평가로 이어졌을 수 있다. 또한 2-3월의 ASP 해빙은 매우 얇은 상태($H \approx 0.12$ m, $n_{lyr}=2$)이므로, 수직 해상도 한계와 보간 오차도 함께 고려할 필요가 있다.

종합하면, ASP에서 모델은 여름 초입의 빙조류 하부 농집 구조와 저층 고농도 형성은 비교적 잘 재현하였으나, 늦여름으로 갈수록 진행되는 하부 용해와 빙조류 방출에 따른 저층 농도 감소는 충분히 모의하지 못하였다. 따라서 본 결과는 모델이 빙조류의 성장 및 저층 축적 단계는 적절히 표현하는 반면, 용해기에 나타나는 저층 생물량 소실과 분포 재조정 과정에서는 한계를 가진다는 점을 보여준다.

ASP의 2-3월 평균 영양염 분포 비교(그림 19e-g)에서는 질산염과 인산염이 공통적으로 해빙 상층부의 값은 비교적 잘 재현하지만, 중층부터 저층으로 갈수록 관측보다 현저히 낮게 모의되는 경향이 나타났다. 관측에서는 두 영양염 모두 해빙 최하층에서 최대값을 보이는 반면, 모델은 오히려 하부에서 가장 낮은 값을 나타내어 수직 경사가 반대로 형성되었으며, 이로 인해 하부로 갈수록 과소평가가 더욱 두드러졌다. 예를 들어 실제 질산염은 하층에서 약 $3-7 \mu\text{M}$, 인산염은 약 $0.3-1 \mu\text{M}$ 범위를 보이지만, 모델에서는 두 변수 모두 최하층에서 약 $0.1 \mu\text{M}$ 수준에 머무른다. 이는 해빙-해수 경계에서의 영양염 공급 또는 유지 과정이 모델에서 충분히 반영되지 못하고 있음을 시사한다. 특히 빙조류 생물량이 저층에 집중된 상황에서 모델이 하부층의 생물학적 영양염 소모를 강하게 계산하는 반면, 해수로부터의 재공급이나 브라인 채널을 통한 하향·상향 교환은 상대적으로 약하게 표현할 경우, 실제 관측에서 유지되는 저층 고농도 영양염층이 모의되지 못할 수 있다. 다시 말해, 현재 모델은 저층 생산에 수반되는 영양염 소비는 비교적 강하게 재현하지만, 해빙 저면에서 해수와의 물질 교환을 통해 영양염이 지속적으로 보충되는 과정은 충분히 구현하지 못했을 가능성이 있다.

반대로 규산염은 상이한 불일치를 보였다. 모델은 하부 농도는 관측과 어느 정도 유사한 범위로 재현하지만, 상층으로 갈수록 농도가 과도하게 증가하여 관측 최대값을 수배 이상

초과하는 경우가 나타났다. 이는 규산염의 공급 - 소비 균형이 질산염·인산염과 다르게 모의되고 있음을 의미한다. 한 가지 가능성은 모델에서 규산염 소비가 실제보다 약하게 설정되어, 상층부에서 빙조류 또는 규조류에 의한 규산염 이용이 충분히 일어나지 않는 경우이다. 특히 현재 빙조류 기능군의 영양염 흡수 비율이나 종조성 표현이 실제 ASP 해빙에서의 규조류 우세 특성을 충분히 반영하지 못한다면, 질소와 인에 비해 규산염 소모가 상대적으로 약하게 계산될 수 있다.

결국 ASP에서 나타나는 영양염 불일치는 단일한 원인이라기보다, 하부층에서의 영양염 재공급 부족, 생물학적 소비 강도의 불균형, 그리고 규산염에 대한 종 특이적 소비 과정의 단순화가 복합적으로 작용한 결과로 해석하는 것이 타당하다. 특히 질산염과 인산염은 저층 공급 부족 또는 과도한 소모로 인해 하부 과소평가가 나타난 반면, 규산염은 상층 소비 부족 인해 상층 과대평가가 나타났다는 점에서, 현재 모델의 영양염 순환 체계가 각 원소별로 상이한 편향을 가지고 있음을 시사한다. 따라서 향후에는 해빙 - 해수 경계에서의 영양염 교환, 빙조류 기능군의 원소별 흡수비, 그리고 용해기 브라인 배수 및 재분배 과정을 보다 정교하게 개선할 필요가 있다. 우선 질산염과 인산염의 저층 과소평가는 해빙 저면에서 빙조류 생산에 의한 영양염 소비는 강하게 계산되는 반면, 인접 수층으로부터 해빙 하부의 염수층으로 공급되는 영양염 보충 과정이 상대적으로 약하게 표현된 결과일 가능성이 있다. 이를 보완하기 위해 질산염, 인산염, 규산염 및 철에 대해 다음과 같은 농도구배 기반 해빙-해수 교환항을 해빙 최하층 영양염 수지식에 추가할 수 있다.

$$J_X^{ice-water} = k_x A_{eff} (C_X^{water} - C_X^{brine})$$

여기서 X 는 각 영양염 농도를 의미하며, C_X^{water} 는 해빙 저면과 접한 수층의 영양염 농도, C_X^{brine} 은 해빙 하부 염수 내 영양염 농도, k_x 는 원소별 교환계수, A_{eff} 는 해빙 공극률, 투수성을 반영한 교환 면적 계수이다. 이 교환항을 통해 해빙 하부에서 생물학적 소비로 감소한 질산염과 인산염이 수층으로부터 지속적으로 보충될 수 있으므로, 저층 영양염 과소평가를 완화할 수 있을 것으로 예상된다.

또한 현재 모델에서는 빙조류의 종조성, 세포 크기, 규조류 외피 형성 정도에 따른 Si 요구량 차이가 충분히 반영되지 못했을 가능성이 있다. 이에 따라 해빙조류 전용 규산염 흡수항을 다음과 같이 도입할 수 있다.

$$U_{Si}^{ice} = \mu_{ice} C_{ice} R_{Si:C}^{ice} \frac{C_{Si}^{brine}}{C_{Si}^{brine} + K_{Si}^{ice}}$$

여기서 μ_{ice} 는 해빙조류 성장률, C_{ice} 는 해빙조류 탄소 생물량, $R_{Si:C}^{ice}$ 는 해빙조류 Si:C 흡수비, K_{Si}^{ice} 는 해빙조류의 규산염 반포화 상수이다. 이와 같이 해빙조류의 Si:C 흡수비를 독립적으로 조정하면, 빙조류 성장에 따른 규산염 소비를 보다 동적으로 표현할 수 있으며, 규산염 상층 과대평가를 완화하는 데 기여할 수 있다. 향후 후속 모델 개발에서는 이렇듯 해빙-해수 경계면의 물질교환 과정과 빙조류 기능군의 원소별 흡수비를 명시적으로 정교화할 계획이다.

3.2 Terra Nova Bay (TNB)

TNB 해역의 엽록소 비교 결과(그림 20), 모델은 해빙 일차생산이 활발한 11, 12, 1월에 얼음 저면부에서 농집이 형성되는 특징을 잘 재현하였다. 관측에서 나타나는 저층 고농도 범위는 대체로 약 $10 - 30 \text{ mg m}^{-3}$ 이며, 모델 역시 이 시기 해빙 저면에서 뚜렷한 최대값을 모의하였다. 또한 5 - 6월의 겨울철 저농도 상태와 11월의 약한 하층 농집도 비교적 잘 표현하였다. 이는 모델이 TNB 해역에서 빙조류가 해빙 저면에 집중적으로 축적되고, 이후 계절 진행과 함께 변화하는 기본적인 seasonal cycle을 전반적으로 포착하고 있음을 보여준다. 다만 ASP의 경우와 유사하게, 관측에서는 여러 계절에 걸쳐 해빙 중층에서도 약 10 mg m^{-3} 이상의 엽록소가 분포하는 경우가 적지 않은 반면, 모델에서는 이러한 중층 농도가 거의 나타나지 않고 대부분 0에 가까운 값으로 모의되었다. 즉, 모델은 빙조류 생물량을 지나치게 저면부에 집중시키는 경향을 보이며, 실제 관측에서 나타나는 보다 완만하고 두꺼운 농집층을 충분히 재현하지 못하였다.

이러한 차이는 우선 모델의 생물량 유지 및 수직 재분배 구조와 관련이 있을 가능성이 크다. 현재 모델에서는 빙조류 기능군이 해빙 내부에서 성장하더라도 침강 및 농집 효과에 의해 생물량이 주로 최하층에 집중되도록 모의되기 때문에, 실제 관측에서 보이는 중층의 잔존 생물량이나 분산된 분포가 약하게 표현될 수 있다. 특히 TNB와 같은 fast ice 환경에서는 해빙 내부 브라인 채널을 통한 재분배, 저면에서 탈락한 세포의 재부착 또는 재포획, 그리고 부분적인 용해·재결빙 과정이 반복되면서 생물량이 단순한 저면 단일층이 아니라 중층까지 확장된 형태로 나타날 가능성이 있다. 그러나 현재 모델은 이러한 과정들을 충분히 반영하지 못하고, 보다 이상화된 저면 중심 구조를 유지하는 것으로 보인다.

또한 앞서 설명한 바와 같이 관측에서 나타나는 중층 엽록소는 반드시 그 깊이에서의 활발한 현장 생산만을 의미하는 것은 아닐 수 있다. 실제로는 저면에서 성장한 빙조류가 용해, 탈락, 재부유, 또는 해빙 내부 배수 구조의 변화에 따라 위쪽 층으로 재배치되면서 중층 상대 최대를 형성할 수 있다. 반면 모델은 이러한 생물량의 재배치보다 저면 축적과 유지에 더 큰 비중을 두고 있어, 결과적으로 중층 엽록소를 체계적으로 과소모의하는 경향을 보였을 가능성이 있다. 여기에 더해 TNB 해빙은 계절에 따라 매우 얇아지거나 층수가 제한될 수 있으므로, 수직 해상도의 한계 역시 일부 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 실제 관측에서는 수 cm 규모의 얇은 층에서 농도 최대가 나타나더라도, 모델에서는 제한된 층수와 월평균 프로파일 비교 과정 때문에 이러한 세부 구조가 매끄럽게 퍼지거나 반대로 특정 저층 격자에만 집중되어 표현될 수 있다. 따라서 본 비교에서 나타난 불일치의 일부는 순수한 생태 과정의 오차뿐 아니라, 모델의 층 구조와 관측 - 모델 매칭 방식의 차이에서도 기인할 수 있다.

종합하면, TNB에서 모델은 저면 bloom의 형성 시기와 기본적인 계절 변동은 비교적 잘 재현하였으나, 실제 관측에서 나타나는 중층 생물량의 유지와 보다 완만한 수직 분포는 충분히 모의하지 못하였다. 이는 모델이 빙조류의 저면 집중과 초기 축적 단계는 적절히 표현하는 반면, 이후 용해기 또는 전이기 동안 나타나는 생물량의 재분배와 잔존 과정을 단순화하고

있음을 시사한다. 따라서 향후에는 빙조류의 수직 이동성, 탈락 후 재포획, 브라인 채널을 통한 재분배, 그리고 얇은 해빙에서의 층별 구조 표현을 보다 정교하게 개선할 필요가 있다.

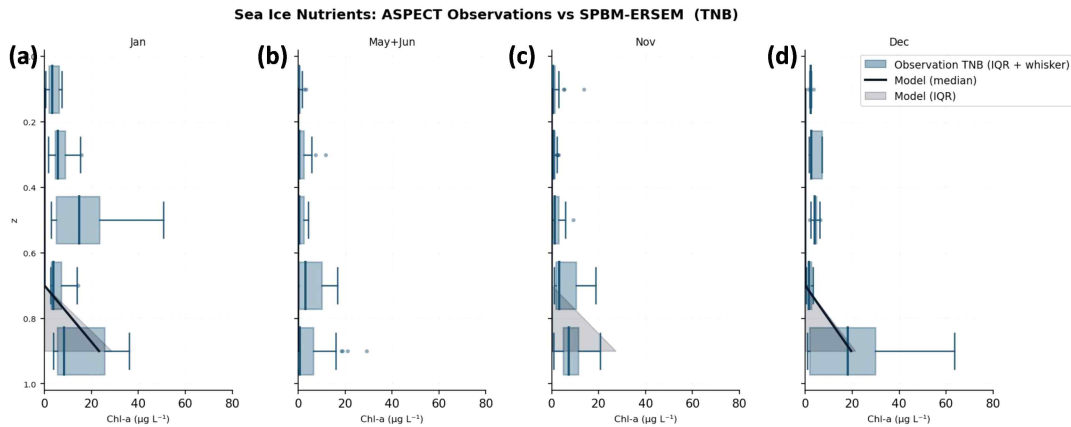


그림 20. 로스해 테라노바만 (TNB) 모델 및 관측 자료 비교. a-d 는 각각 1, 5-6, 11, 12 월의 엽록소 수직 분포를 비교.

3.3 W. Antarctic Peninsula (WAP)

WAP는 세 지역 중 가장 풍부한 관측 자료를 보유한 해역으로, 엽록소는 약 1,500 개, 영양염은 최대 365개의 관측값이 존재하며 계절 분포도 가장 광범위하다. 따라서 본 해역은 모델의 계절 재현성과 연직 구조 모의 성능을 평가하기에 가장 적합한 지역이라 할 수 있다. 엽록소의 경우(그림 21 a-e), 겨울철인 7-9월에는 관측에서 전 층에 걸쳐 거의 0에 수렴하는 매우 낮은 값이 나타나며, 모델도 이러한 저생산 상태를 전반적으로 잘 재현하였다. 그러나 관측에서는 겨울철에도 값이 낮기는 하나 전층에 걸쳐 약 10 mg m^{-3} 수준의 엽록소가 일정하게 유지되는데, 모델에서는 이러한 증가가 재현되지 않았다. WAP은 다른 두 지역에 비해 상대적으로 저위도에 위치하므로 겨울철에도 미약한 수준의 광량이 확보될 수 있으며, 결빙 과정에서 포획된 조류가 해빙 내부 환경 조건이 허용될 경우 일정 수준 유지되거나 제한적으로 성장할 가능성이 있다. 따라서 관측에서 나타난 9월의 전층 엽록소 증가는 이른 봄의 광 회복과 결빙 시 포획된 생물량의 유지 또는 재성장과 관련될 가능성이 크다. 반면 현재 모델은 이 시기의 낮지만 유효한 광 조건이나 초기 해빙 내 생물량 유지 효과를 충분히 반영하지 못하여, 초기 봄철 엽록소 증가를 과소모의한 것으로 해석된다.

한편 10-12월의 봄-초여름 시기에는 상층과 중층의 엽록소가 거의 0에 가깝고 해빙 저면부에서 뚜렷한 농집이 형성되는 관측 패턴이 나타난다. 모델은 이러한 저면 농집 구조를 정성적으로뿐 아니라 정량적으로도 잘 재현하여, 전층의 엽록소 분포가 대체로 관측 IQR 범위 안에 포함되었다. 이는 WAP 해역에서도 빙조류가 주로 저면에 축적되고, 봄철 생산이 해빙 하부를 중심으로 이루어진다는 기본적인 생태 구조를 모델이 적절히 포착하고 있음을 보여준다. 즉, bloom의 개시 시기와 위치, 그리고 봄철 저면 집중이라는 핵심 특징은 본 모델에서 비교적 신뢰성 있게 재현된 것으로 판단된다. 1-2월의 한여름으로 접어들면서 관측에서는 저층에 농집되었던 엽록소가 감소하고, 상대적으로 중층에서 최대값이 나타나는 양상이 보인다. 이러한 분포는 앞선 ASP와 유사하게, 중층 생산이 새롭게 증가했다기보다는 하부 용해와

함께 저층에 축적된 빙조류가 탈락·방출되면서 저층 최대가 약화된 결과로 해석하는 것이 타당하다. 모델은 이러한 저층 bloom의 붕괴와 중층 최대의 형성을 앞선 두 지역과 마찬가지로 완전하게 재현하지는 못하였다. 다만 이 시기 중층에서 20 mg m^{-3} 이상의 비교적 높은 엽록소가 나타나는 특징 자체는 어느 정도 포착하고 있어, 늦여름 biomass 재분포 경향은 부분적으로 재현한 것으로 볼 수 있다. 따라서 모델은 WAP에서 봄철 저면 bloom의 형성은 잘 모의하지만, 한여름 하부 용해와 연계된 빙조류 방출 및 분포 재조정 과정은 여전히 제한적으로만 표현하고 있는 것으로 판단된다.

영양염 측면에서 WAP는 ASP에 비해 전반적으로 양호한 재현성을 보였다(그림 21 f-n). 특히 9 - 12월, 즉 한여름으로 접어들기 전 시기에는 하부의 질산염 축적이 모델에서 정성적·정량적으로 비교적 잘 재현되었으며, 하부에서 대체로 약 $2 \mu\text{M}$ 수준의 농도 범위가 모의되었다. 다만 2월에는 관측에서 여전히 하부 고농도 경향이 유지되는 반면, 모델은 전체 해빙층에서 약 $0.5 \mu\text{M}$ 내외의 거의 균일한 분포를 나타내어 하층의 질산염을 과소모의하였다. 인산염 역시 9 - 12월에는 하부 농도 증가와 최하층 최대(약 $0.1 - 0.6 \mu\text{M}$)를 비교적 잘 재현하였으나, 2월에는 이러한 구조가 모델에서 약화되거나 붕괴되어 하부 인산염을 크게 과소평가하였다. 반면 규산염은 9 - 12월과 2월 모두에서 관측 범위와 비교적 유사한 절대 농도 범위를 보인다는 점에서 ASP보다 고무적인 결과를 나타냈다. 그러나 수직 분포 패턴은 시기별로 일관된 오차를 보였다. 9 - 10월에는 실제 관측에서 하부로 갈수록 규산염이 다소 감소하는 경향이 나타나지만, 모델은 반대로 하부 농도를 더 높게 모의하여 저층 과대평가를 보였다. 반대로 2월에는 관측에서 하부로 갈수록 농도가 증가하는 경향이 나타나는 데 비해, 모델은 상층 농도가 더 높게 나타나 수직구조를 반대로 재현하였다. 11 - 12월에는 상부에서 하부로 갈수록 증가하는 패턴 자체는 비교적 잘 모의하였으나, 전반적인 농도 수준이 관측 상한에 근접하거나 일부 초과하여 다소 과대평가된 경향을 보였다.

이러한 불일치는 영양염의 절대량 자체보다도, 해빙 내부에서의 수직 재분배와 해빙 - 해수 경계에서의 공급·소비 균형을 모델이 계절별로 완전히 포착하지 못한 데서 기인한 것으로 보인다. 질산염과 인산염의 경우, 봄철에는 저층 빙조류 성장에 의해 소비가 일어나더라도 해수와의 교환을 통해 하부 농도가 일정 수준 유지되는데, 모델은 늦여름으로 갈수록 이러한 저면부 보충 과정보다 생물학적 소비 또는 용해에 따른 희석 효과를 상대적으로 강하게 반영하여 2월 하층 농도를 과소모의한 것으로 해석된다. 특히 하부 용해가 진행되는 시기에는 실제 해빙에서 저면 경계층을 통한 지속적인 영양염 공급이 중요해질 수 있는데, 현재 모델은 이러한 저층 재공급을 충분히 유지하지 못해 상·하층 농도 차이를 약화시키는 경향이 있는 것으로 보인다.

규산염의 경우에는 질소·인과 다른 편향이 나타났다는 점에서, 단순한 공급 부족만으로 설명되기 어렵다. 규산염은 주로 규조류의 생리와 밀접하게 연결되므로, 모델에서 빙조류 또는 규조류 기능군의 규산 흡수 강도, 원소비, 혹은 재광물화 과정이 실제와 다르게 표현되었을 가능성이 있다. 예를 들어 봄철 9 - 10월의 저층 규산염 과대평가는 저면부 규조류 생산에

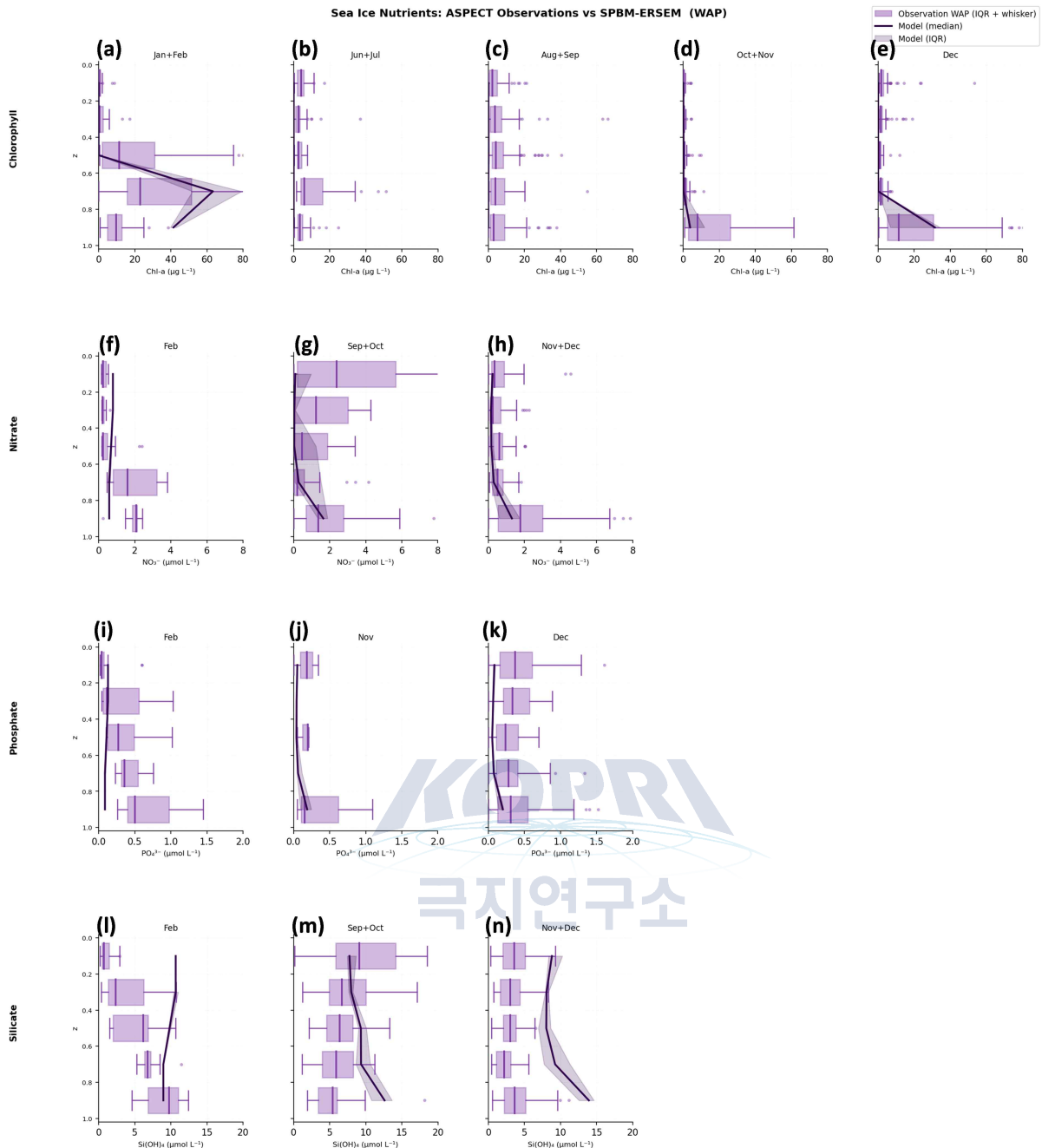


그림 21. WAP 에 대한 모델-관측 비교. a-e 는 1-2월, 6-7월, 8-9월, 10-11월, 12월의 엽록소 수직 분포를 나타냄. f-h, i-k, l-n 은 는 각각 질산염, 인산염, 규산염 분포를 비교. 월 구분은 각 플롯 제목에 나타냄.

의한 규산염 소비가 실제보다 약하게 모의되었거나, 해수로부터의 공급이 과도하게 유지되었음을 시사할 수 있다. 반대로 2월의 상층 과대평가는 용해 및 브라인 배수 과정에서 상층 규산염이 실제보다 충분히 제거되지 못했거나, 하부층에서의 소비·재분배 구조가 실제보다 약화되어 나타난 결과일 수 있다. 즉, 질산염과 인산염은 주로 늦여름 하층 재공급 부족 또는 과도한 소비에 의해 과소 모의된 반면, 규산염은 계절에 따라 소비 부족과 수직 재분배 오류가 번갈아 나타난 것으로 해석된다.

종합하면, WAP에서 모델은 영양염의 절대 농도 범위와 계절적 대략적 변동은 ASP보다 훨씬 잘 재현하지만, 늦여름 하부 영양염 유지와 규산염의 계절별 수직 구조 변화는 여전

히 충분히 포착하지 못하고 있다. 이는 현재 모델이 해빙 - 해수 경계에서의 영양염 교환, 빙조류에 의한 원소별 소비 비율, 그리고 용해기 브라인 배수 및 재분배 과정을 보다 정교하게 표현할 필요가 있음을 시사한다.

4. 종합 평가 및 통계 분석

4.1 모델 평가 방법 수립

본 연구에서는 SPBM-ERSEM 해빙 생태계 모형의 재현성을 정량적으로 평가하기 위해, 서남극반도(WAP), 아문젠해(ASP), 테라노바만(TNB)의 세 지역에 대해 주요 해빙 물리·생지화학 변수의 모의 결과를 관측과 비교하였다. 평가 대상 변수는 온도, 염분, 엽록소, 질산염, 규산염, 인산염의 6개 항목으로 설정하였다. 평가를 위해 각 지역과 변수에 대해 관측 - 모델 대응쌍을 구성한 뒤, 정규화된 RMSE(nRMSE), Pearson 상관계수(R), 정규화된 평균 편향(NMB)을 계산하도록 하였다. 또한 각 관측점의 정규화 깊이와 관측 월에 대응하는 모델 월평균 프로파일을 생성한 뒤, 관측 깊이에서 선형 보간한 모델값을 사용해 통계를 계산하는 구조를 따른다. 구체적으로, 각 관측 코어에서 제공되는 정규화 깊이 z 와 관측값 $obs(z,m)$ 에 대해, 동일 월 m 의 모델 평균 프로파일 $mod(z,m)$ 을 구성하였다. 이때 모델 자료는 먼저 월별 평균 수직 프로파일로 정리되며, 이후 관측 깊이에 맞춰 선형 보간되어 대응 모델값을 얻는다. 이렇게 구축된 (obs_i, mod_i) 쌍을 지역·변수별로 모두 모은 뒤 통계량을 계산하였다. 즉, 본 평가는 개별 코어 하나하나의 순간값 비교라기보다, 각 지역에서 축적된 관측 자료를 바탕으로 모델의 월별 평균적 수직 구조 재현성을 평가하는 방식에 해당한다.

다만 이러한 정규화 된 깊이 기반 비교 방법은 해빙 두께가 매우 얇아지는 조건에서 추가적인 불확실성을 가질 수 있다. 특히 WAP의 여름철과 같이 해빙 두께가 약 0.1 m 수준으로 감소하는 경우, 실제 절대 두께가 작기 때문에 작은 채취 깊이 오차, 코어 절단 간격 차이, 관측층과 모델층의 불일치가 표준화 깊이 좌표상에서는 상대적으로 크게 확대될 수 있다. 또한 모델에서도 얇은 해빙 조건에서는 유효 해빙층 수가 제한되므로, cm 얇은 규모의 표층 담수화, 저층 고염분층, 빙조류 저면 밀집 및 용해기 생물량 분배를 충분히 해상하기 어려울 수 있다. 따라서 이러한 얇은 해빙 조건의 연직구조 비교 결과는 정량적 적합도보다는 정성적 경향 해석에 중점을 두어야 한다.

모델 성능 평가는 다음의 세 지표를 사용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (mod_i - obs_i)^2}$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{S_{obs}}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (obs_i - \overline{obs})(mod_i - \overline{mod})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (obs_i - \overline{obs})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (mod_i - \overline{mod})^2}}$$

$$NMB = \frac{\overline{\text{mod}} - \overline{\text{obs}}}{S_{\text{obs}}}$$

여기서 N은 관측 - 모델 대응쌍의 개수, obs와 mod는 각각 관측과 모델의 평균값이다. S_{obs} 의 정의는 값의 규모가 작은 변수에서 nRMSE와 NMB가 과도하게 커지는 문제를 줄이기 위해 본 연구에서는 변수별 최소 scale floor를 도입한 수정 버전을 사용하였다. 즉,

$$S_{\text{obs}} = \max(\text{mean}(|\text{obs}|), S_{\text{min}})$$

으로 정의하였다. S_{min} 은 관측 평균 절대값이 매우 작은 경우 정규화 오차가 과도하게 증가하는 것을 방지하기 위해 도입한 변수별 최소 스케일 값으로 본 연구에서는 온도 0.5, 염분 1.0, 엽록소 1.0, 질산염 1.5, 규산염 2.0, 인산염 0.5를 각각 적용하였다. 이와 같은 보정은 특히 인산염이나 일부 저농도 영양염 변수에서 정규화 오차가 비정상적으로 증폭되는 현상을 완화하기 위한 것이다.

본 연구에서는 불확실성이 매우 큰 해빙 생지화학 변수의 특성을 반영하여 기준을 완화한 수정 평가체계를 적용하였다. 최종적으로 사용한 등급 판정 기준은 다음과 같다.

- nRMSE: Good ≤ 0.8 , Fair ≤ 1.5 , Bad > 1.5
- R: Good ≥ 0.5 , Fair ≥ 0.15 , Bad < 0.15
- |NMB|: Good ≤ 0.6 , Fair ≤ 1.2 , Bad > 1.2

또한 최종 종합 등급은 세 지표의 단순 최악값(worst-case) 방식 대신, nRMSE와 NMB에 각각 0.4, R에 0.2의 가중치를 부여한 가중 평균 점수 방식으로 계산하였다. 각 지표의 점수인 S_{nRMSE} , S_R , S_{NMB} 는 Good = 2, Fair = 1, Bad = 0으로 환산하였고, 종합 점수 S는 다음과 같이 계산하였다.

$$S = 0.4S_{\text{nRMSE}} + 0.2S_R + 0.4S_{\text{NMB}}$$

이후 $S \geq 1.45$ 이면 Good, $0.60 \leq S < 1.45$ 이면 Fair, $S < 0.60$ 이면 Bad로 판정하였다. 이 방식은 상관계수 하나가 낮다는 이유만으로 전체 성능이 과도하게 Bad로 평가되는 문제를 줄이고, 오차 규모와 평균 편향을 함께 고려한 보다 균형적인 평가를 가능하게 한다.

4.2 모델 성능 평가 결과

완화된 평가 기준을 적용한 결과, 전체적으로 염분과 온도는 비교적 양호한 재현성을 보였으며, 엽록소와 일부 영양염은 대체로 Fair 수준, 규산염은 지역에 따라 여전히 낮은 성능을 보였다.

WAP에서는 온도와 염분이 각각 Good 등급으로 평가되었다. 온도의 경우 nRMSE는 0.256으로 매우 낮았고, NMB 역시 -0.100으로 평균적 편향이 크지 않았다. 상관계수는 0.276으로 높지는 않았으나, 종합적으로는 모델이 WAP 해빙 내 열적 구조를 무난하게 재현하는 것으로 판단된다. 염분 역시 nRMSE 0.360, NMB -0.042로 오차 규모와 평균편향 모두 작아 Good 등급을 나타냈다. 엽록소는 nRMSE가 2.589로 크게 나타났으나, R =

Region	Variable	N	Obs Mean	Mod Mean	nRMSE	R	NMB	Grade
WAP	Temperature (°C)	326	-1.895	-2.084	0.256	0.276	-0.100	Good
WAP	Salinity (psu)	707	5.182	4.964	0.360	0.277	-0.042	Good
WAP	Chlorophyll (µg/L)	1277	8.662	6.597	2.589	0.346	-0.238	Fair
WAP	Nitrate (µmol/L)	284	1.293	0.610	1.191	0.232	-0.455	Fair
WAP	Silicate (µmol/L)	304	4.757	9.610	1.333	0.006	+1.020	Fair
WAP	Phosphate (µmol/L)	211	0.391	0.102	1.092	0.056	-0.579	Fair
ASP	Temperature (°C)	-	-	-	-	-	-	N/A
ASP	Salinity (psu)	216	4.099	4.800	0.615	-0.064	+0.171	Good
ASP	Chlorophyll (µg/L)	652	11.178	8.040	2.860	-0.043	-0.281	Fair
ASP	Nitrate (µmol/L)	213	1.967	0.385	1.169	-0.532	-0.804	Fair
ASP	Silicate (µmol/L)	201	4.921	19.874	3.569	-0.433	+3.038	Bad
ASP	Phosphate (µmol/L)	213	0.675	0.186	1.418	-0.073	-0.725	Fair
TNB	Temperature (°C)	-	-	-	-	-	-	N/A
TNB	Salinity (psu)	147	5.669	4.648	0.573	-0.169	-0.180	Good
TNB	Chlorophyll (µg/L)	271	5.793	1.978	1.974	0.299	-0.659	Fair
TNB	Nitrate (µmol/L)	-	-	-	-	-	-	N/A
TNB	Silicate (µmol/L)	-	-	-	-	-	-	N/A
TNB	Phosphate (µmol/L)	-	-	-	-	-	-	N/A

표 4. 모델을 적용한 세 지역에서 해빙 내부 파라미터들의 재현 결과를 평가한 결과

0.346, NMB = -0.238로 상관성과 평균 편향은 상대적으로 양호하여 최종적으로 Fair로 분류되었다. 이는 모델이 엽록소의 절대 크기 또는 변동폭은 충분히 재현하지 못하지만, 계절적·수직적 분포 경향 자체는 어느 정도 반영하고 있음을 시사한다. 질산염, 규산염, 인산염은 모두 Fair로 평가되었다. 질산염은 nRMSE 1.191, R 0.232, NMB -0.455로, 전반적으로 과소모의 경향을 보이나 완전히 실패한 수준은 아니었다. 규산염은 R이 0.006으로 거의 상관이 없고 NMB가 +1.020으로 과대모의가 뚜렷했으나, 완화된 종합기준에서는 Fair에 머물렀다. 인산염 또한 nRMSE 1.092, R 0.056, NMB -0.579로 분산 재현은 약하지만 평균 수준의 편향은 비교적 제한적이었다. 요약하면 WAP에서는 물리 변수의 재현성이 가장 좋았고, 생지화학 변수는 편향과 변동성 측면에서 추가 개선 여지가 있으나 전체적으로는 Fair 이상 수준을 유지하였다.

ASP에서는 온도 자료가 없어 평가에서 제외되었다. 염분은 nRMSE 0.615, NMB +0.171로 양호하였으며 최종 Good 등급을 받았다. 이는 ASP에서도 모델이 해빙 염분 구조를 비교적 안정적으로 재현하고 있음을 의미한다. 엽록소는 nRMSE 2.860, R -0.043, NMB -0.281로 절대 오차가 다소 컸으나 평균 편향은 상대적으로 작아 Fair로 분류되었다. 질산염 역시 nRMSE 1.169, R -0.532, NMB -0.804로 상관은 낮고 과소모의 경향이 나타났지만, 전체적으로는 Fair 수준으로 평가되었다. 인산염도 nRMSE 1.418, R -0.073, NMB -0.725로 Fair에 해당하였다. 반면 규산염은 ASP에서 가장 낮은 재현성을 보였다. nRMSE는 3.569로 매우 높았고, R은 -0.433으로 음의 상관을 나타냈으며, NMB는 +3.038로 강한 과대 모의 경향을 보였다. 이에 따라 ASP 규산염은 유일하게 Bad 등급으로 평가되었다. 이는 ASP 지역에서 규산염 순환, 공급 또는 해빙 내 농집 과정이 현재 모델 내

에서 충분히 재현되지 못하고 있음을 시사한다. 따라서 ASP에서는 염분을 제외한 생지화학 변수들이 전반적으로 중간 수준의 성능을 보였으며, 특히 규산염 과정의 구조적 개선이 가장 시급한 과제로 판단된다.

TNB에서는 염분과 엽록소만 평가 가능하였다. 염분은 $nRMSE$ 0.574, R -0.164, NMB -0.180으로 Good 등급을 보였다. 상관계수는 다소 낮았지만, 절대 오차와 평균 편향이 작아 전체적으로 양호한 재현성을 나타냈다. 엽록소는 $nRMSE$ 1.97로 다소 크지만, R = 0.30, NMB = -0.659로 평균 편향이 대체로 낮은 편이고 분포 경향도 일정 부분 포착되어 Fair로 평가되었다. 이는 TNB에서 모델이 엽록소의 절대 분산 규모는 과소하게 표현할 수 있으나, 평균 수준 자체는 비교적 잘 맞추고 있음을 의미한다.

전체 평가 결과를 종합하면, 본 모형은 세 지역에서 온도와 염분 같은 물리 변수에 대해 상대적으로 높은 재현성을 보였으며, 엽록소와 일부 영양염은 대체로 Fair 수준의 성능을 나타냈다. 반면 규산염은 특히 ASP 지역에서 뚜렷한 과대모의와 낮은 상관성을 보여 가장 취약한 변수로 확인되었다. 이러한 결과는 해빙 물리 구조 자체는 비교적 안정적으로 모의되고 있으나, 해빙 내부의 생지화학 순환, 특히 영양염 재분배와 생물학적 소비-재생 과정은 지역별 편차가 크며 아직 개선 여지가 크다는 점을 보여준다. 또한 엽록소의 경우 평균 편향은 비교적 작더라도 $nRMSE$ 가 크게 나타난 사례가 많았는데, 이는 해빙 생태계의 고변동성과 관측의 공간·시간적 이질성이 반영된 결과로 해석할 수 있다. 즉, 여전히 모델이 평균적인 계절 구조는 포착하더라도 개별 관측 코어 수준의 세부 변동까지 정확히 재현하는 데는 한계가 있음을 의미한다.

한편, 본 연구에서 사용한 완화된 성능 판정 체계는 해빙 생지화학 변수의 본질적으로 큰 변동성과 관측 불확실성을 고려하여, 단일 지표의 실패가 전체 평가를 과도하게 악화시키지 않도록 설계되었다. 따라서 본 결과는 “엄격한 절대적 적합도”보다는, 지역별·변수별 상대 성능과 추후 연계 연구의 우선순위를 식별하는 데 보다 적합한 진단으로 이해하는 것이 바람직하다.

4.3 연 변동성 및 공간 변동성 평가의 범위와 한계

본 연구에서는 ASP, TNB, WAP 3개 대표 해역에 대해 모델 결과와 ASPeCt-Bio 관측자료를 비교하여 월별·수직구조 중심의 성능 평가를 수행하였다. 특히 엽록소a는 세 해역에서 상대적으로 가장 넓게 확보된 변수였기 때문에 모델 검증의 1차 변수로 활용하였으며, 영양염, 해빙 온도 및 염분은 자료 가용성이 허용하는 범위 내에서 보조 검증 변수로 사용하였다. 다만 관측자료는 해역별·월별로 분포가 불균등하고, 일부 변수는 특정 계절 또는 특정 해역에만 집중되어 있어 모든 변수에 대해 독립적인 연변동성 및 동일 해역 내 공간 변동성을 정량적으로 평가하는 데에는 한계가 있다고 판단된다.

또한 현재 모델 결과는 2022 - 2025년 기간의 GLORYS 기반 해빙 입력자료와 GOTM 수층 물리장을 이용하여 산출하였으며, 본 보고서에서는 이 기간의 결과를 주로 연일

수 (DOY) 평균 또는 월평균 수직구조로 정리하여 제시하였다. 따라서 본 연구의 성능 평가는 개별 연도별 사건 또는 세부 공간구조의 재현성을 평가하기보다는, 대표 해역별 평균적인 계절 변동과 수직 분포 재현성을 진단하는 데 중점을 두었다. 이러한 접근은 단년도 과제의 범위에서 모델 구조 개선과 기본 검증을 우선 수행하기 위한 전략으로서 타당하지만, 연도별 해빙 조건 차이나 동일 해역 내부의 국지적 공간 이질성을 완전히 설명하기에는 제한적이다.

그럼에도 불구하고 본 연구에서 정리한 ASPeCt-Bio 자료의 공간 분포와 월별 자료 가용성은 후속 연변동성 및 공간 변동성 분석의 기초자료로 활용될 수 있다. 향후에는 관측자료가 상대적으로 풍부한 WAP를 우선 대상으로 하여, 연도별 해빙 두께, 염록소 및 영양염 분포 차이를 비교하고, 동일 해역 내 위경도 또는 연안-외해 구배에 따른 공간 변동성을 분석할 계획이다. 또한 ASP와 TNB에 대해서는 추가 관측자료가 확보되는 대로 동일한 분석 체계를 적용하여, 모델의 평균 계절성뿐 아니라 연변동성과 공간 이질성 재현 능력까지 평가할 예정이다. 이를 통해 향후 모델 보정, 매개변수 최적화 및 남극해 광역 적용의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

제 3 절 해빙 두께 감소 시나리오에 따른 생태계 변화 전망

1. 배경 및 모델 실험 설계

남극 해빙은 남극해의 복사 수지, 해양-대기 열 및 물질 교환, 성층 구조, 그리고 해빙 의존 생물의 서식 환경을 조절하는 핵심 요소이다. 특히 해빙 두께는 해빙 내부 brine habitat의 파괴, 빛 투과 조건, 영양염 저장 및 교환 특성에 직접적으로 관여하므로, 빙조류의 생물량과 계절 bloom의 강도, 나아가 해빙-수층 간 생지화학 상호작용을 좌우하는 중요한 물리 인자이다. 남극 해빙 생태계는 해빙 두께와 지속 기간의 변화에 민감하게 반응할 수 있으며, 이러한 변화는 1차 생산과 먹이망 구조에도 연쇄적인 영향을 미칠 가능성이 있다 (Swadling et al. 2023; Massom and Stammerjohn 2010). 앞선 2절의 분석에서는 해빙 두께가 빙조류 bloom 강도를 설명하는 중요한 조절 인자로 작용할 수 있음을 확인하였다. 이는 향후 해빙이 얇아질 경우, 단순히 서식 공간의 축소에 그치지 않고 빛 환경, 염분 구조, 영양염 이용성, 유기물 축적 및 재순환 과정 전반에 변화가 나타날 수 있음을 시사한다. 따라서 해빙 두께 변화에 대한 해빙 생태계의 반응을 정량적으로 탐색하는 것은, 남극 연안 해빙 생태계의 기후 민감도를 이해하기 위한 중요한 단계이다.

그러나 남극 해빙 두께의 미래 변화를 정량적으로 전망하는 데에는 여전히 큰 불확실성이 존재한다. 해빙 두께는 해빙 면적이나 해빙 농도에 비해 직접 관측 자료가 매우 제한적이며, 시공간적으로 연속된 관측망도 충분하지 않다 (Liao et al. 2022; Trivedi et al. 2025). 또한 재분석 자료와 기후모델 간 해빙 두께 재현성의 편차가 크고(Trivedi et al. 2025; Bocquet et al. 2024), 지역별·계절별 변동성 역시 매우 커서, 특정 지역의 미래 해빙 두께 변화를 신뢰성 있게 강제력으로 구성하는 데에는 현실적인 제약이 따른다. 최근에는 ICESat 및 ICESat-2 기반 재구성 자료와 CMIP6 평가가 제시되고 있으나, 여전히 관측 공

백과 모델 간 spread가 큰 편이다.

이러한 제약을 고려하여, 본 연구에서는 복잡한 기후 시나리오 기반의 예측 실험 대신 단일 변수 민감도 실험(single-variable sensitivity experiment)을 수행하였다. 구체적으로는 현재 기후 조건을 유지한 상태에서 해빙 두께만 인위적으로 감소시켜, 해빙 두께 변화가 생지화학적 반응에 미치는 직접적 영향을 분리·정량화하고자 하였다. 즉, 기온, 일사, 해수 온도, 염분, 영양염 등 다른 모든 외부 강제력은 동일하게 유지한 채, 입력 해빙 두께 H_{ice} 만 기준값의 40%로 축소하여 SPBM을 재구동하였다. 해빙 두께 40% 감소는 특정 미래 상태를 직접 예측하기 위한 값이 아니라, 남극 해빙 감소 가능 범위를 참고하여(Fraser et al. 2023) 설정한 대표적 단일변수 민감도 강도이다. 즉 이 실험은 실제 미래 기후를 재현하려는 목적이 아니라, “현재보다 훨씬 얇은 해빙 조건이 형성될 경우 생태계가 어떤 방향으로 반응할 것인가”를 평가하기 위한 이상화된 실험 설계이다. 따라서 본 절의 결과는 미래 예측값(prediction)이 아니라, 해빙 두께 감소에 대한 생태계의 잠재적 민감도(sensitivity)를 나타내는 것으로 해석하여야 한다. 본 연구에서 비교한 두 실험은 다음과 같다.

- **기준 실험(CTL):** 현재 해빙 두께 조건을 적용한 실험으로, 앞 절의 모델 검증에 사용된 3개 지역 시뮬레이션 결과를 그대로 사용하였다.
- **민감도 실험(FUT; Thin-Ice Scenario):** 입력 해빙 두께 H_{ice} 를 기준 실험의 40%로 축소하여 동일 기간에 대해 재시뮬레이션 하였다. 해빙이 얇아짐에 따라 유효 서식 공간이 감소하고, 레이어 구조 및 내부 광환경, 염분 구조, 영양염 교환 조건 또한 연동되어 변화하도록 설정하였다.

이후 두 실험의 차이 (FUT-CTL)를 분석함으로써, 해빙 두께가 약 60% 감소할 경우 각 생지화학 변수의 변화 방향과 상대적 크기를 평가하였다.

다만 본 민감도 실험의 해석에는 다음과 같은 한계가 있다. 첫째, 실제 기후 변화 환경에서는 해빙 두께 감소와 함께 기온 상승, 해양 상층의 성층 변화, 담수 유입 변화, 적설량 및 융설 증가, 바람장 변화 등이 동시에 발생한다. 본 실험은 이러한 공변 환경 변수를 고정된 채 두께만 변화시키므로, 실제 미래 시스템에서 나타날 수 있는 상호작용과 비선형 효과를 충분히 반영하지 못한다. 둘째, SPBM은 1차원 수직 컬럼 모델이므로 수평 이류, 해빙 이동, 측면 융해, 공간적 재분포, 상위 먹이망 반응과 같은 과정을 포함하지 않는다. 따라서 본 결과는 해빙 두께 감소에 따른 국지적·직접적 반응을 보여주는 반면, 해역 규모의 생태계 재편이나 먹이망 연쇄 효과까지 설명하지는 못한다. 이러한 한계는 해빙 생태계 변화가 지역적으로 상이하며 물리·생물 과정이 강하게 결합되어 있다는 기존 연구의 인식과도 일치한다.

변수	단위	WAP	ASP	TNB
----	----	-----	-----	-----

		CTL	FUT (%)	CTL	FUT (%)	CTL	FUT (%)
총 NPP	mg C m ⁻²	64,494.9	-14.2%	54,326.4	-59.8%	88,320.0	-48.3%
총 해빙 NPP	mg C m ⁻²	37,427.2	+43.1%	48,223.2	-69.1%	53,444.1	-79.2%
총 수층 NPP	mg C m ⁻²	27,067.7	-93.5%	6,103.1	+13.6%	34,875.9	-1.1%
표층 Fe	umol m ⁻³	0.233	-82.9%	0.252	-41.1%	0.354	-29.8%
해빙 내 O ₂	mmol m ⁻³	51.3	-15.6%	110.5	-68.0%	168.9	-84.1%
표층 PAR	W m ⁻²	6.09	+18.5%	4.38	+25.8%	8.92	+15.4%
일반 구조류 생체량	mg C m ⁻²	906.3	-93.1%	1.5	+206.0%	1.6	-65.0%
해빙 구조류 생체량	mg C m ⁻²	196.2	+23.9%	113.6	-40.6%	118.7	-69.3%
Nano+PicoPhyto 생체량	mg C m ⁻²	238.0	-86.1%	100.4	-71.7%	445.5	+18.7%
<i>Phaeocystis</i> 생체량	mg C m ⁻²	55.7	-100.0%	196.1	+75.9%	946.5	-12.2%
크릴 생체량	mg C m ⁻²	69.9	-89.1%	2.8	+11.2%	12.3	-51.9%
요각류 생체량	mg C m ⁻²	19.7	-99.9%	0.5	+1148%	21.2	-51.6%
소형동물+HNF 생체량	mg C m ⁻²	95.9	-99.9%	39.1	-87.1%	215.1	-5.6%
CO ₂ 플럭스	mmol m ⁻²	1,910.9	-89.4%	1,832.9	+11.3%	2,629.1	+12.6%

표 5. 세 지역 Control(CTL) 연간 평균값 및 Future(FUT) 변화율. 변화율의 청색 계열은 감소, 적색·주황색 계열은 증가를 의미한다. 이산화탄소 플럭스는 대기에서 해양으로의 흡수율을 양수로 나타냄. 또한 총 NPP, 해빙 NPP, 수층 NPP 는 연간 총 깊이 누적값을 나타내며, 수층 철과 PAR, 해빙 용존산소는 연간 평균 값, 각종 생물 생체량은 총 깊이 누적값의 연평균 값임.

그럼에도 불구하고, 본 민감도 실험은 해빙 두께와 해빙 내 생지화학 반응 간의 1차적 인과 관계를 정량적으로 파악하고, 향후 시나리오 기반의 정교한 예측 연구를 설계하기 위한 기초 자료를 제공한다는 점에서 의미가 있다. 따라서 이하의 결과는 실제 미래를 직접 예측한 결과라기보다, “해빙 두께 감소가 해빙 생태계에 유도할 수 있는 변화의 방향성과 잠재적 규모를 탐색”한 결과로 이해하는 것이 타당하다.

2. 현재 및 미래 전망 비교

그림 22는 세 지역의 Control(CTL) 및 Future(FUT) 실험에서 산출된 해빙 두께, 총 일차생산, 그리고 이산화탄소 플럭스를 1년 시계열로 제시한 것이다. 표 5는 각 지역의 주요 연간 평균 변수에 대해 CTL 대비 FUT의 변화율(%)을 정리한 결과이다. CO₂ 플럭스는 해빙 두께가 0.2 m를 초과하는 기간에 표층 porosity를 곱하여 두꺼운 해빙이 대기-해양 간 기체 교환을 억제하는 효과를 반영하였다. 전체적으로 세 지역 모두에서 광환경은 개선되었으나, 생태계 반응의 방향과 크기는 각 지역의 해빙 상태, 철 저장 능력, 그리고 먹이망 구조에 따라 뚜렷하게 달라졌다.

2.1 Amundsen Sea (ASP)

ASP에서는 해빙 두께 60% 감소 시나리오에서 총 일차생산이 뚜렷하게 약화되지만, 그 반응은 단순한 붕괴라기보다 해빙 기반 생산의 약화와 수층 생산의 부분적 보상이 동시에 나타나는 복합적 양상으로 해석된다. 현재 조건에서 ASP의 총 NPP는 $54,326.4 \text{ mg C m}^{-2}$ 이며, 미래에는 59.8% 감소한다. 이 감소는 주로 해빙 NPP의 급감이 주도하며, 해빙 NPP는 현재 대비 69.1% 감소한다. 반면 수층 NPP는 13.6% 증가하여 해빙 생산 감소를 일부 상쇄하는 방향으로 작용한다. 즉, ASP의 미래 변화는 해빙 생태계의 약화가 전반적인 생산 저하를 이끌지만, 수층 생산이 일정 부분 보완적으로 반응하는 구조로 요약할 수 있다.

물리·화학 환경 측면에서 ASP는 세 지역 가운데 광환경 변화가 가장 크게 나타난다. 표층 PAR은 25.8% 증가하여 해빙 감소에 따른 광투과 증가 효과가 가장 뚜렷하며, 이는 수층 광합성에 유리한 조건을 제공한다. 그러나 동시에 표층 용존철 농도는 41.1% 감소하여, TN지역보다는 다소 강한 철 제한을 형성한다. 이러한 철 감소는 해빙 두께 자체가 줄어들면서 겨울철 해빙 형성 시 해빙 내부에 농축·저장되는 철의 양이 감소하고, 결과적으로 번성기에 수층으로 방출되는 철 공급이 약화되기 때문으로 해석된다. 해빙 내 용존산소 역시 68.0% 감소하여 해빙 내부 생물 활동의 현저한 약화를 보여준다.

시계열 그림에서도 이러한 이중적 반응은 명확하게 나타난다. ASP의 현재 연평균 해빙 두께는 약 0.57 m이며, 1 - 3월에도 일정 두께의 해빙이 유지되는 경향을 보인다. 이는 아문젠해 폴리나 지역에서 해빙 분포의 계절 및 경년 변동성이 크다는 점을 시사한다. NPP는 현재 조건에서 봄철에 강한 피크를 보이지만, 미래에는 그 피크의 크기와 지속 기간이 모두 감소한다. 특히 해빙 기여분이 크게 줄어드는 반면, 일부 시기에는 수층 생산이 상대적으로 유지되거나 재조직되는 양상이 나타난다. 이러한 시계열 특성은 연간 적분값에서 확인된 “총생산 감소 + 수층 생산 부분 보상” 패턴과 잘 부합한다.

생물군집 반응 역시 이러한 특성을 뒷받침한다. ASP에서는 해빙 감소에 따라 수층 규조류가 206.0% 증가하고, *Phaeocystis*도 75.9% 증가한다. 다만 수층 규조류의 현재 절대 생체량이 매우 작기 때문에, 증가율만으로 생태계 우점 구조의 본격적인 전환을 단정하기는 어렵다. 반면 해빙 규조류는 40.6% 감소하고, 소형 식물플랑크톤은 71.7% 감소한다. 동물 플랑크톤은 전반적으로 급격한 붕괴보다는 혼합된 반응을 보이며, 규조류 증가의 영향으로 크릴은 11.2% 증가하고, 요각류는 CTL 값이 낮아 비정상적으로 큰 증가율이 산출된다. 반대로 소형 식물플랑크톤 감소의 영향으로 소형 포식자는 87.1% 감소한다. 따라서 ASP에서는 먹이망 전체가 붕괴하기보다는, 먹이원 변화에 따라 기능군별 재편이 두드러지는 것으로 해석된다.

탄소순환 측면에서 ASP의 특징은 총 생산력 감소에도 불구하고 CO_2 흡수가 11.3% 증가한다는 점이다. 이는 수층 NPP 증가와 함께 표층 pCO_2 가 상대적으로 낮게 유지되면서 대기 - 해양 간 CO_2 흡수가 강화된 결과로 해석된다. 종합하면 ASP는 해빙 기반 생태계는 약화되지만, 폴리나 특성상 수층 과정이 상대적으로 유지되거나 일부 강화되면서 일정 수준의 회복력을 보이는 지역으로 정리할 수 있다.

2.2 Terra Nova Bay (TNB)

TNB는 ASP와 유사하게 미래 시나리오에서 총 NPP와 해빙 NPP가 크게 감소하지만, 수층 생산은 거의 유지되고 CO₂ 흡수는 오히려 증가하는 지역으로 나타난다. 현재 총 NPP는 88,320.0 mg C m⁻²로 세 지역 중 가장 크며, 미래에는 48.3% 감소한다. 해빙 NPP는 79.2% 감소하여 감소폭이 매우 크지만, 수층 NPP는 1.1% 감소하는 데 그쳐 사실상 유지된다. 이는 TNB에서 총 생산 감소의 주된 원인이 해빙 생산 약화에 있으며, 수층 생산 기반은 상대적으로 견고하게 유지됨을 의미한다.

이러한 지역적 특성은 물리·화학 환경 변화에서도 드러난다. TNB의 표층 PAR은 15.4% 증가하지만, 표층 Fe 감소폭은 29.8%로 ASP와 WAP보다 훨씬 작다. 이는 TNB의 CTL 조건에서 해빙이 이미 다른 두 지역보다 충분히 두꺼운 상태로 존재하기 때문에, 60%의 두께 감소 이후에도 해빙 내부에 일정량의 철을 농축·저장할 수 있기 때문으로 해석된다. 즉, 해빙 감소가 철 공급 체계를 약화시키기는 하지만, 그 약화 정도가 다른 지역보다 상대적으로 제한적이다. 반면 해빙 내 O₂는 84.1% 감소하여 해빙 내부 생태계는 크게 약화되지만, 이러한 변화가 수층 생산 전체의 붕괴로 이어지지는 않는다.

시계열 그림에서는 이러한 특성이 더욱 명확하다. TNB의 현재 연평균 해빙 두께는 약 0.67 m로 세 지역 가운데 가장 두껍고, 계절 변화도 뚜렷하다. NPP는 현재 조건에서 강한 봄철 피크를 보이며, 미래에는 그 피크가 약화되고 시기적으로 다소 재조정되지만 완전히 사라지지는 않는다. 특히 10 - 12월 동안 해빙 NPP의 감소가 두드러지며, 이는 총 NPP 감소의 핵심 원인으로 작용한다. 이러한 패턴은 ASP와도 유사하지만, TNB에서는 수층 생산이 보다 안정적으로 유지된다는 점에서 차이를 보인다. CO₂ 플럭스 역시 연간 적분 기준으로는 흡수 기능이 유지되거나 다소 강화되는 방향이다.

생물군집 측면에서 TNB의 핵심은 전면적 붕괴보다는 군집 재편성에 있다. 수층 규조류는 65.0% 감소하고 해빙 규조류는 69.3% 감소하여 규조류 기반 생산이 약화된다. 그러나 소형 식물플랑크톤은 18.7% 증가하여 상대적 우점 가능성을 보이며, *Phaeocystis*는 12.2% 감소에 그친다. 동물플랑크톤의 경우, 주 먹이인 규조류 감소에 따라 크릴은 51.9% 감소하고 요각류도 51.6% 감소하지만, 소형 플랑크톤을 주요 먹이로 이용하는 소형 포식자는 5.6% 감소에 그쳐 상대적으로 안정적이다. 따라서 TNB에서는 규조류 - 크릴 중심의 먹이망 구조가 약화되는 대신, 보다 작은 크기군 중심의 구조로 부분적인 재조직이 진행되는 것으로 해석할 수 있다.

탄소순환 측면에서 TNB는 현재 연간 CO₂ 흡수량이 2,629.1 mmol C m⁻²로 세 지역 중 가장 크며, 미래에는 12.6% 증가한다. 이는 수층 NPP가 거의 유지되는 가운데 광량 증가 효과가 일부 반영되고, 철 감소폭이 상대적으로 작아 생산 기반이 완전히 붕괴하지 않기 때문으로 해석된다. 종합하면 TNB는 해빙 생태계는 크게 약화되지만, 수층 생태계와 탄소 흡수 기능은 비교적 안정적으로 유지되는 상대적 완충형 지역으로 볼 수 있다.

2.3 W. Antarctic Peninsula (WAP)

WAP은 세 지역 중 미래 해빙 감소에 가장 취약한 반응을 보이는 지역이다. 총 NPP

는 현재 $64,494.9 \text{ mg C m}^{-2}$ 에서 미래에 14.2% 감소하여 겉보기 감소폭은 다른 두 지역보다 작지만, 내부 구조를 보면 해빙과 수층의 반응이 극단적으로 엇갈린다. 해빙 NPP는 43.1% 증가하는 반면, 수층 NPP는 93.5% 감소하여 사실상 붕괴 수준을 보인다. 따라서 총 NPP의 변화율만으로는 WAP의 취약성을 충분히 설명할 수 없으며, 실제로는 수층 생산 체계의 급격한 약화가 가장 핵심적인 변화라고 할 수 있다.

환경 변화는 이러한 해석을 강하게 지지한다. 표층 PAR은 해빙이 크게 얇아진 만큼 18.5% 증가하여 광환경 자체는 개선된다. 그러나 표층 Fe는 82.9% 감소하여 매우 강한 철 제한이 발생한다. 이는 TNB와는 정반대의 상황으로, WAP의 CTL 조건에서 해빙이 이미 매우 얇기 때문에 미래 시나리오에서는 겨울철 동안 철을 충분히 붙잡아 둘 수 있을 정도의 해빙이 거의 남지 않게 되기 때문이다. 결과적으로 해빙 유래 철 공급이 크게 약화되고, 수층 생산은 심한 제한을 받게 된다. 해빙 내 O_2 는 15.6% 감소로 다른 지역보다 감소폭이 작지만, 이는 해빙 NPP 증가와도 부분적으로 연결될 수 있다. 즉, WAP에서는 얇아진 해빙을 통해 광이 더 잘 투과되면서 해빙 내부의 단위 면적당 생산은 오히려 강화되지만, 수층에서는 철 제한이 지배적으로 작용하여 생산이 급격히 붕괴하는 구조가 나타난다.

시계열 그림에서도 이 특성은 가장 뚜렷하다. WAP의 현재 연평균 해빙 두께는 약 0.37 m로 세 지역 중 가장 얇고, 미래에는 해빙 지속기간이 더욱 짧아진다. NPP 패널에서는 현재 조건에서 늦여름 - 초가을로 갈수록 수층과 해빙 생산이 함께 증가하지만, 미래에는 해빙이 열리는 3 - 4월 시기의 수층 NPP가 크게 약화된다. 반면 해빙 기여분은 일부 기간에서 상대적으로 유지되거나 오히려 강화되어, 연간 적분 결과에서 해빙 NPP 증가가 나타난 배경을 시각적으로 뒷받침한다. CO_2 플럭스는 현재에는 비교적 안정적인 흡수 경향을 보이지만, 미래에는 흡수 강도가 크게 약화되며 해빙이 열리는 시기에도 해빙이 발달해 있는 시기와 거의 동일하게 흡수 능력을 상실한 결과를 보였다.

생물군집 측면에서 WAP은 사실상 먹이망 연쇄 붕괴형 반응을 보인다. 수층 규조류는 93.1% 감소하고, 소형 식물플랑크톤은 86.1% 감소하며, *Phaeocystis*는 사실상 전멸하게 된다. 반면 해빙 규조류는 23.9% 증가하여 해빙 내부 생산만 예외적으로 강화된다. 일차생산자의 급격한 감소는 상위 소비자에도 직접적인 영향을 미쳐, 크릴은 89.1% 감소하고 요각류와 소형 포식자 역시 거의 전멸에 이르는 극단적 결과를 보인다. 이는 철 감소로 인한 수층 식물플랑크톤 생산 붕괴가 먹이망 상위 단계까지 거의 직접적으로 전파된 결과로 해석된다.

탄소순환 측면에서도 WAP의 취약성은 가장 크다. 현재 연간 CO_2 흡수량은 $1,910.9 \text{ mmol C m}^{-2}$ 이지만, 미래에는 89.4% 감소한다. 이는 수층 NPP의 붕괴와 직접적으로 연결되며, 식물플랑크톤의 CO_2 고정 능력이 급격히 약화되면서 표층 해수 pCO_2 가 상승하고 대기 - 해양 간 CO_2 농도 구배가 줄어들었기 때문이다. 결과적으로 WAP은 강한 탄소 흡수원에서 약한 흡수원, 혹은 거의 중립적인 상태에 가까운 체계로 이동할 가능성이 있다. 따라서 세 지역 중 WAP이 해빙 감소에 대해 가장 구조적으로 취약하며, 생태계와 탄소순환 양 측면에서 가장 큰 위험 신호를 보이는 지역으로 평가된다.

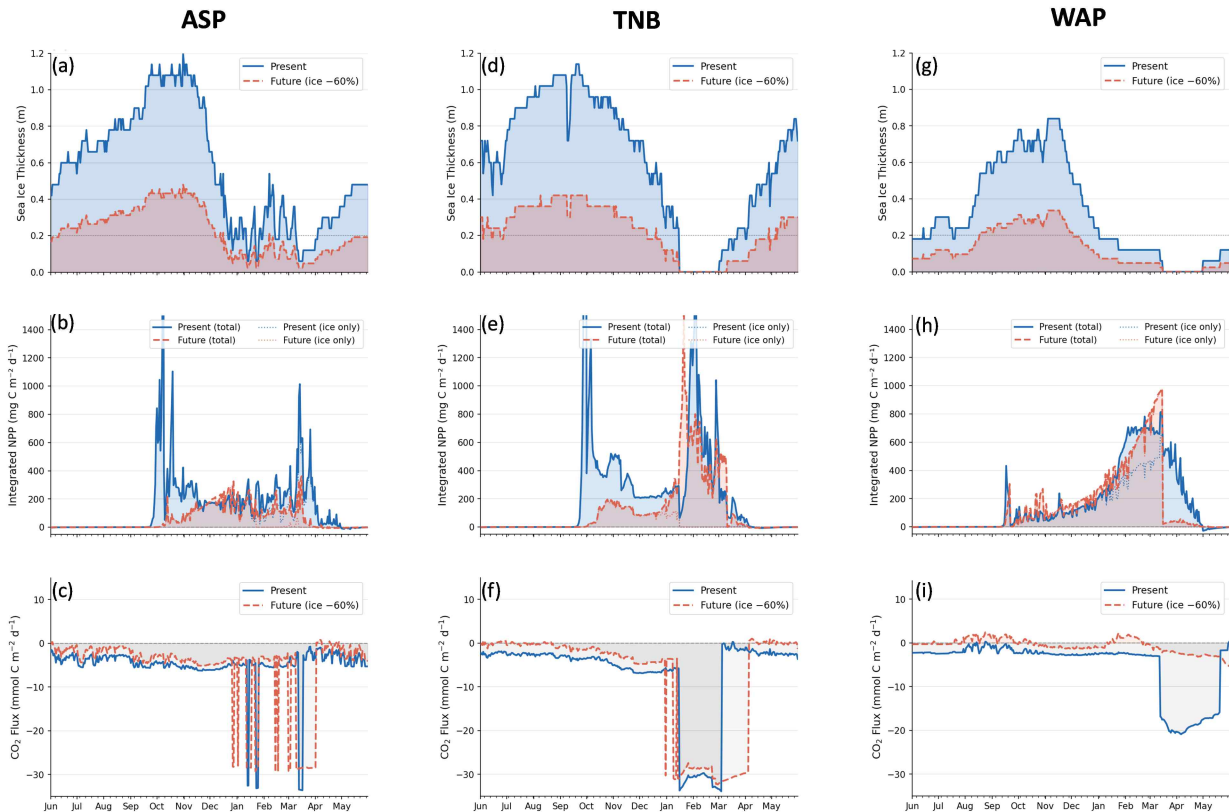


그림 22. 세 지역의 Control(CTL)과 Future(FUT) 실험에서 산출된 1년간의 해빙 두께, 총 일차생산, 표층 이산화탄소 플럭스. a-c는 ASP, d-f는 TNB, g-i는 WAP 지역에 대한 결과를 나타냄.

2.4 종합 정리 및 고찰

본 연구의 미래 시나리오 실험은 해빙 두께가 60% 감소할 경우 남극 연안 생태계의 반응이 단순히 생산 증가 혹은 감소로 환원되지 않음을 보여준다. 세 지역 모두에서 공통적으로 나타난 1차 반응은 해빙 감소에 따른 광투과 증가와, 해빙 내부에 농축·저장되었다가 성장기에 방출되는 철 공급의 약화이다. 그러나 실제 생태계 응답은 이 두 효과의 상대적 크기와 지역 고유의 환경 특성에 따라 현저히 달라졌다. 즉, 같은 해빙 감소 강제력 아래에서도 ASP, TNB, WAP은 서로 다른 생태학적 경로를 보였으며, 이는 해빙이 단지 빛을 차단하는 물리적 매질이 아니라 철 저장고이자 먹이망의 계절적 매개체로 기능하고 있음을 시사한다.

가장 중요한 해석은, 이번 결과에서 미래 반응을 좌우한 핵심 인자가 단순한 광량 변화가 아니라 해빙 두께 변화에 따른 철 저장 능력의 차별적 저하라는 점이다. ASP와 WAP 모두 표층 Fe가 80% 이상 감소했지만, 두 지역의 생태계 결과는 서로 달랐다. ASP에서는 총 NPP가 크게 감소했음에도 수층 NPP가 오히려 증가하였고 CO₂ 흡수도 소폭 강화되었다. 반면 WAP에서는 해빙 NPP가 증가했음에도 수층 NPP가 거의 붕괴하고, CO₂ 흡수 기능 역시 급격히 약화되었다. 이 차이는 같은 철 감소라도 그것이 어느 생산 경로를 먼저 제한하는지, 그리고 그 생산 감소가 먹이망 상위 단계까지 어떻게 전달되는지에 따라 결과가 달라짐을 의미한다. WAP에서는 원래 해빙이 매우 얇기 때문에 미래 시나리오에서 겨울철 철을 붙잡아둘 수 있을 정도의 해빙 자체가 거의 남지 않으며, 결국 수층 생산이 가장 직접적인 타격을 받는다. 반면 ASP는 해빙 생산은 약화되더라도 폴리나 특성상 개방수면 기반 생산이 일

부 보완적으로 작동할 수 있었다.

TNB는 이 두 지역과 다른 의미에서 중요하다. TNB에서는 총 NPP와 해빙 NPP가 크게 감소했지만, 수층 NPP는 거의 유지되었고 CO₂ 흡수도 오히려 증가하였다. 이는 TNB의 CTL 해빙이 세 지역 중 가장 두꺼워, 60% 감소 이후에도 일정 수준의 철 저장 기능을 유지할 수 있기 때문으로 해석된다. 다시 말해, 해빙 감소에 대한 민감도는 감소율 자체보다도 감소 이전의 절대 해빙 상태에 크게 좌우된다. 같은 60% 감소라도 두꺼운 해빙을 가진 지역은 일정 수준의 완충 작용을 보일 수 있는 반면, 원래부터 얇은 해빙 환경은 임계 수준 아래로 빠르게 떨어져 구조적 취약성이 증폭된다. 이런 점에서 TNB는 단순히 변화가 작은 지역이 아니라, 해빙 두께가 철 공급 체계의 완충장치로 기능할 수 있음을 보여주는 사례라 할 수 있다.

생산성 변화는 먹이망 구조를 통해 더욱 증폭된 형태로 나타났다. ASP에서는 수층 규조류와 *Phaeocystis*가 증가하고 해빙 규조류 및 소형 식물플랑크톤이 감소하면서, 생산 기반이 해빙 중심에서 수층 중심으로 부분적으로 재배치되는 양상이 나타났다. 이에 따라 크릴은 소폭 증가했지만, 소형 포식자는 큰 폭으로 감소하여 기능군별 재편이 두드러졌다. TNB에서는 규조류 감소와 함께 크릴 및 요각류가 줄어들었으나, 소형 식물플랑크톤과 이를 먹이원으로 하는 소형 포식자는 상대적으로 안정적이었다. 반면 WAP에서는 수층 규조류, 소형 식물플랑크톤, *Phaeocystis*가 모두 급감하였고, 그 결과 크릴, 요각류, 소형 포식자까지 거의 동시에 무너지는 연쇄 붕괴형 반응이 나타났다. 이는 미래 남극 연안 생태계의 변화가 총생산량 감소 자체보다도, 어떤 먹이 기반이 사라지고 어떤 기능군이 이를 대체하는가에 의해 결정됨을 보여준다. 특히 WAP은 해빙 감소가 기초 생산자의 양적 감소를 넘어, 상위 영양단계까지 직접적인 구조 불안정성을 유발할 수 있는 지역으로 해석된다.

탄소순환의 관점에서도 세 지역은 뚜렷이 구분된다. ASP와 TNB에서는 총 NPP 감소에도 불구하고 CO₂ 흡수가 증가하였다. 이는 수층 생산이 유지되거나 부분적으로 증가하면서 표층 pCO₂가 상대적으로 낮게 유지되었기 때문으로 해석된다. 반대로 WAP에서는 수층 식물플랑크톤 생산의 붕괴로 인해 CO₂ 고정 능력이 크게 약화되었고, 표층 해수 pCO₂ 상승과 함께 대기-해양 간 농도 구배가 축소되면서 CO₂ 흡수량이 급감하였다. 특히 시계열 상 미래 WAP에서는 해빙이 열려있는 시기에도 CO₂ 흡수가 거의 일어나지 못하고 오히려 해빙이 덮여있는 시기와 크게 다르지 않았다. 따라서 해빙 감소가 남극 연안 탄소순환에 미치는 영향은 남극 전체에 대해 단일한 방향성을 갖지 않으며, 최소한 이번 실험 범위에서는 지역별로 흡수 기능의 강화와 약화가 동시에 공존하는 것으로 보아야 한다.

종합하면, 세 지역의 미래 반응은 각각 다른 유형으로 정리할 수 있다. ASP는 해빙 기반 생산이 크게 약화되지만 수층 생산과 일부 기능군이 보상적으로 반응하는 재편형 시스템으로 볼 수 있다. TNB는 해빙 생태계의 손실에도 불구하고 수층 생산과 탄소 흡수 기능이 비교적 유지되는 완충형 시스템에 가깝다. 반면 WAP은 얇은 초기 해빙, 급격한 철 감소, 수층 생산 붕괴, 먹이망 붕괴, 탄소 흡수 저하가 연속적으로 연결되는 취약형 시스템으로 해석된다.

이 구분은 단순한 지역 비교 이상의 의미를 가진다. 즉, 미래 남극 연안 생태계의 민감도는 해빙 감소율 하나로 설명될 수 없으며, 초기 해빙 두께, 해빙-철 결합 강도, 생산의 서식처 분배, 먹이망의 대체 가능성 등이 함께 고려되어야 한다는 점을 보여준다.

이러한 결과는 향후 연구 방향에도 몇 가지 시사점을 제공한다. 첫째, 해빙 두께 변화가 철 저장 및 방출에 미치는 영향을 보다 직접적으로 검증할 수 있는 관측 자료가 필요하다. 둘째, 해빙과 수층 생산의 상대적 기여가 계절별로 어떻게 전환되는지, 특히 해빙이 열리는 시기 전후의 짧은 전이 구간을 정밀하게 추적할 필요가 있다. 셋째, 크릴과 요각류, 소형 포식자를 포함한 상위 먹이망의 반응은 단순 생체량 변화뿐 아니라 먹이 선택성과 생장 시기 변화까지 함께 검토되어야 한다. 결국 본 연구가 보여주는 핵심은, 남극 연안 생태계의 미래가 단일한 방향으로 수렴하는 것이 아니라, 해빙 감소가 각 지역에서 어떤 병목 요인을 먼저 건드리느냐에 따라 서로 다른 경로로 분기될 수 있다는 점이다. 그런 의미에서 본 결과는 향후 관측 우선순위 설정과 지역별 생태계 위험도 평가를 위한 중요한 기반 자료로 활용될 수 있다.



제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

본 과제는 단년도 “신진 연구자 지원사업”으로 수행되었으며, 제안서 작성 당시 연차별 정량·정성 성과지표 및 세부 평가착안점이 별도로 제시되지 않았다. 따라서 본 절에서는 정량적 성과지표의 달성 여부를 일률적으로 제시하기보다, 연구계획서의 「연구개발 목표 및 내용」에 제시된 세부 연구목표가 실제로 어느 수준까지 수행되었는지를 중심으로 목표 달성도를 평가하고자 한다.

연구계획서에서 제시한 최종 목표는 “해빙과 표영 생태계 간 구조와 상호작용을 정밀히 모사할 수 있는 생태계 역학 모형을 구축하고, 관측자료와의 비교를 통해 이를 검증·교정하며, 궁극적으로 극지 해양 생태계 변화 예측의 정확성과 신뢰성을 향상시키는 것”이었다. 이를 위해 1년간의 연구기간동안 해빙 및 표영 생태계 프로세스 이해, 해빙 - 표영 통합 1차원 모형 구축, 그리고 모형 검증 및 미래 변화 예측 제시가 핵심 연구 목표로 설정되었다.

본 과제는 이러한 목표를 전반적으로 계획 범위 내에서 충실히 수행하였다. 먼저 해빙과 수층 생태계를 동일하게 취급하던 기존 구조의 한계를 보완하고, 남극 연안 해빙 환경에 적합한 생태·생지화학 과정을 반영한 개선형 SPBM 모형을 구축하였다. 또한 ASP, TNB, WAP의 세 지역에 대해 관측자료를 정리하고 검증 체계를 마련함으로써, 단순한 모형 개발에 그치지 않고 관측 기반 성능 평가까지 수행하였다. 나아가 해빙 두께 감소 조건에서의 민감도 실험을 통해 지역별 생산성 및 CO₂ 플럭스 반응 차이를 제시함으로써, 당초 계획서에서 제시한 “미래 극지해역 생태계 변화 예측”의 기초 단계까지 이행하였다.

다만, 계획서에 포함되었던 “머신러닝 기반 매개변수 재학습 및 반복 교정”, 그리고 “남극해 전역으로의 즉각적 확장 적용”은 본 과제 기간과 예산 규모를 고려할 때 전면적으로 수행되기보다는 후속 단계 과제로 이관·보완되었다. 이는 목표 미달이라기보다, 단년도 소규모 과제의 여건 속에서 모형의 구조 고도화, 안정적 구동, 대표 해역 검증, 민감도 평가를 우선 완료한 결과이다. 따라서 본 과제의 연구개발목표 달성도는 전체적으로 “대체로 달성” 내지 “핵심목표 달성”으로 평가할 수 있다 (표 6).

계획서상 세부 목표	계획서상 주요 내용	실제 수행 결과	달성도
해빙 및 표영 생태계 프로세스 이해	해빙 농도 · 두께 · 수온 · 염분, 영양염, 철 농도, 생물량 등 자료 수집 및 기능군 생리 특성 분석	ASPeCt-Bio 자료를 중심으로 ASP, TNB, WAP 지역의 해빙 내 엽록소, 영양염, 수층 물리환경 자료를 정리하였고, 해빙조류의 저온 적응, 서식지 제약, 영양염 · 철 제한 등 핵심 생태 과정을 반영할 수 있도록 개념적 · 과정적 정리를 수행함	달성
해빙-표영 통합 1차원 모형 구축	ERSEM 기반 해빙 생태계 모듈 개발, GOTM · BROM과의 통합, Fortran 코드 구현, transport 항 반영	기존 SPBM을 기반으로 해빙조류 저온 반응, 수층 전용 동물플랑크톤의 해빙 진입 제한, 외부 농도 기반 N · P · Fe 제한, 규산 재순환, TA 변화, CO ₂ 플럭스 계산 등 주요 과정이 반영된 개선형 결합 모형을 구축함	달성
관측 기반	특정 해역을 대상으로 통계적 검증,	ASP, TNB, WAP 3개 지역에 대해 해빙	달성

모형 검증	상관계수 · 오차지표 평가 계획	두께, 해빙 내부 온도 · 염분, 수층 수온 · 염분, 엽록소 및 영양염 분포를 비교하여 전반적인 재현성을 검토하였고, 수정 평가 체계를 적용한 성능 평가를 수행함	
기후 변화 시나리오 기반 미래 변화 제시	SSP 등 시나리오 기반 해빙-표영 생태계 구조 및 탄소순환 변화 예측	해빙 두께 감소 민감도 실험을 수행하여 지역별 얼음층 · 수층 생산성, 철 공급, CO2 플럭스 변화 양상을 제시함. 정식 기후 시나리오 연동보다는 민감도 실험 중심이었으나, 미래 변화 예측의 기초 단계는 수행됨	대부분 달성
머신러닝 기반 매개변수 재학습 및 반복 교정	자료 기반 재학습과 반복적 모형 교정 수행 계획	본 과제에서는 단년도 연구 기간 내에서 매개변수는 문헌값과 관측 비교를 기반으로 수동 조정함. 머신러닝 기반 자동 최적화는 본 연구에서 구축한 체계를 활용하여 후속 연구에서 Bayesian optimization 기반으로 수행할 계획임	부분 달성
남극해 전역 확장 적용	대표 해역 검증 후 전체 남극해로 확장 적용 계획	ASP, TNB, WAP의 대표 3개 해역을 선정하여 집중 검증을 수행함. 이는 당초 계획의 단계적 접근에 부합하나, 전역 확장 자체는 후속 과제로 남음	부분 달성

표 6. 본 연구 사업의 연구 목표 달성도 요약.

종합하면, 본 과제는 단년도·소규모 연구라는 제약에도 불구하고, 연구계획서에서 제시한 핵심 목표인 해빙 - 표영 결합 생태계 모형의 고도화, 관측자료 기반 검증, 미래 변화에 대한 민감도 평가를 모두 수행하였다. 특히 단순히 기존 모형을 재사용한 것이 아니라, 해빙 생태계의 고유한 생리·서식지·생지화학 과정을 반영하도록 구조를 실질적으로 수정·개선하였다는 점에서 연구개발의 실질성이 크다. 또한 대표적인 남극 연안 3개 해역에 동일한 모형 틀을 적용하여 지역별 반응 차이를 비교하였고, 이를 통해 해빙 감소가 생산성과 탄소순환에 미치는 영향이 지역에 따라 상이할 수 있음을 제시하였다.

반면 계획서에 포함되었던 일부 확장 목표, 즉 머신러닝 기반 매개변수 최적화와 남극해 전역 확장 적용은 본 과제 기간 내 전면 수행되지는 못했다. 그러나 이는 본 과제의 실패 요인이 아니라, 오히려 우선적으로 해결되어야 할 모형 구조 개선, 입력자료 정비, 대표 해역 검증, 수치 안정화 문제에 선행적으로 예상보다 많은 시간을 들여 해결한 결과로 볼 수 있다. 실제로 이러한 기반이 확보되어야만 후속 최적화와 대규모 확장 적용도 가능하다는 점에서, 본 과제는 후속 고도화 연구를 위한 필수적 선행 단계를 성공적으로 완수하였다고도 볼 수 있다. 따라서 본 과제의 연구개발목표 달성도는 “핵심목표는 달성하였으며, 일부 확장 목표는 후속 연구 단계로 이관된 수준”이라고 판단된다.

제 2 절 대외기여도

본 과제의 주요 기여는 남극 연안 해빙 환경에 적용 가능한 해빙 - 수층 결합 생태계 모형의 구조적 개선과, 이를 실제 관측자료에 기반하여 검증함으로써 극지 생태계 수치 모의

의 현실성과 활용성을 높인 점에 있다.

기존의 해빙 생태계 모형 또는 해빙이 포함된 해양 생지화학 모형은 해빙 내부 생물과 수층 생물을 충분히 구분하지 못하거나, 해빙을 단순한 물리적 경계 조건 수준으로 취급하는 경우가 많았다. 본 과제에서는 이러한 한계를 보완하기 위해, 수층 전용 동물플랑크톤의 해빙 내부 유입을 제한하고, 해빙조류의 저온·저광 적응 특성, 해빙 결빙 시 철 농축, 해빙 용해 후 빙조류의 빠른 침강, 규산 및 철의 재순환 과정 등을 모형에 반영하였다. 이는 해빙 생태계를 단순 부가 모듈이 아니라 독립적 생태 서식지이자 수층 생태계와 상호 작용하는 능동적 구성 요소로 다루도록 모형 체계를 개선한 것으로, 향후 극지 생태계 모형 개발의 기술적 기반을 확장하는 데 기여한다.

또한 본 과제는 ASP, TNB, WAP 등 서로 다른 환경 특성을 갖는 남극 연안 3개 해역에 대해 동일한 모형 틀을 적용하고, 해빙 두께, 해빙 내부 온도·염분, 수층 수온·염분, 엽록소 및 영양염 분포 등을 비교함으로써, 해빙 생태계 모형의 지역 적용 가능성 및 한계를 동시에 제시하였다. 이는 특정 지역에 맞춘 사례 연구를 넘어, 남극 연안의 다양한 해빙 환경에서 어떤 과정이 중요하게 작용하는지를 구분해 보여주었다는 점에서 의미가 있다. 특히 해빙 감소가 항상 생산성 증가로 이어지는 것이 아니라, 지역에 따라 철 공급 약화와 결합되어 오히려 1차생산과 CO₂ 흡수가 감소할 수 있음을 제시한 점은, 해빙 변화 영향 평가의 해석 틀을 보다 정교하게 만드는 데 기여한다.

본 과제의 또 다른 기여는 모형 개발과 검증의 연결성에 있다. 단순히 새로운 과정을 추가하는 데 그치지 않고, 실제 관측자료와 비교하여 모형의 재현성을 평가하고, 어떤 항목은 잘 재현되며 어떤 항목은 한계가 있는지를 명시적으로 제시하였다. 이러한 접근은 향후 후속 연구에서 매개변수 최적화, 자료동화, 고해상도 지역 모형 확장 등으로 이어질 수 있는 기반을 마련한다는 점에서 기술적 가치가 있다. 즉, 본 과제는 완성형 예측 시스템을 제시했다기보다는, 극지 해빙 생태계 예측 모형의 정교화를 위한 핵심 선행 기반을 구축한 연구로 볼 수 있다.

종합하면, 본 과제는 첫째, 해빙과 수층의 생태적 차이를 반영한 모형 구조 개선, 둘째, 철 제한과 해빙-매개 생지화학 순환의 중요성 반영, 셋째, 남극 연안 대표 해역에 대한 관측 기반 검증, 넷째, 해빙 감소에 따른 생태계 및 탄소순환 변화의 지역별 민감도 제시를 통해, 극지 해빙 생태계 모델링 분야의 기술적 정밀도와 적용 가능성을 높이는 데 기여하였다. 이러한 성과는 향후 남극 연안 생태계 변화 예측, 해빙 감소에 따른 생지화학 반응 평가, 그리고 극지 해양-해빙 결합 모형의 고도화 연구에 직접 활용될 수 있는 기초를 제공한다는 점에서 관련 분야의 기술발전에 의미 있는 기여를 한 것으로 판단된다. 또한 본 과제의 결과는 모델 개발 및 검증, 해빙 두께 감소 민감도 결과를 연결하여 국제학술지 투고를 추진할 예정이며, 이를 통해 개발된 해빙 생태계 모형의 과학적 신뢰성과 국제적 활용 가능성을 검증받고자 한다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

본 과제를 통해 구축한 해빙-수층 결합 생태계 모형은 남극 연안 해빙 환경에서의 생태·생지화학 상호작용을 보다 현실적으로 모의할 수 있도록 개선된 기반 모형으로서, 향후 추가 연구와 타 연구 분야 확장에 활용도가 높다. 특히 본 과제에서는 해빙조류의 저온·저광 적응, 해빙과 수층 생물의 서식지 구분, 해빙 결빙·융해에 따른 철 및 생물량 이동, 빙조류의 침강과 영양염 재순환 등 기존 모형에서 충분히 반영되지 못했던 과정을 도입하였기 때문에, 후속 극지 생태계 연구를 위한 기초 플랫폼으로 활용할 수 있다.

본 과제는 단년도 연구로서 해빙 생태계 모형의 핵심 구조를 개선하고 대표 해역에 대한 검증 및 민감도 실험을 수행하는 단계까지 달성하였다. 그러나 해빙 생태계는 여전히 관측자료가 제한적이고, 공간적·계절적 이질성이 매우 크며, 물리·생물·생지화학 과정이 강하게 결합되어 있어 추가적인 고도화 연구가 필요하다. 특히, 향후 모델 완성도 향상을 위해 ASPeCt-Bio 에 수시로 업데이트 되고 있는 최신 국제 관측 자료, 현재에도 진행중인 극지연구소 현장 조사 자료, 위성·재분석 기반 해빙 및 적설 자료를 추가 확보할 필요가 있다. 특히 해빙 내 영양염, 철, POC/PON, 엽록소, 해빙 온도·염분, 적설량 등 현재 검증자료가 제한적인 변수를 우선적으로 보강하고자 한다. 이를 통해 지역별·계절별 검증자료를 확장하고, 향후 모델 매개변수 최적화와 남극해 광역 적용의 신뢰도를 높일 계획이다.

또한, 본 과제에서 반영한 해빙조류, 철 제한, 규산 재순환, 해빙 융해 후 침강 등의 과정은 남극 연안 환경을 설명하는 데 중요한 기반을 제공하지만, 향후에는 기능군 세분화, 종별 생리 특성 차별화, 월동 전략, 먹이망 구조, 유기물 분해 및 미량원소 순환 등 보다 세밀한 과정의 추가 반영이 요구된다. 특히 검증 과정에서 확인된 지역별 영양염 불일치를 개선하기 위해서는 해빙-해수 경계면의 농도구배 기반 물질교환 항을 추가하고, 빙조류 기능군의 Si:C, Si:N 등 원소별 흡수비와 규산염 반포화 상수를 해빙조류 전용 값으로 분리하여 정교화할 필요가 있다. 또한 현재의 1차원 검증 결과를 바탕으로 향후에는 수평 이류와 공간 이질성을 고려할 수 있는 3차원 또는 광역 결합 체계와의 연계가 필요하다. 아울러 본 과제에서 수행한 해빙 두께 감소 민감도 실험은 미래 변화에 대한 기초적인 방향성을 제시하였으나, 실제 기후 변화 시나리오 자료와 연계한 장기 예측, 다양한 외력 조건에서의 불확실성 평가, 매개변수 최적화 및 반복 교정 등은 후속 연구에서 지속적으로 수행되어야 한다. 특히 해빙 생태계 모형은 아직 국내외적으로도 충분히 정립되지 않은 분야이므로, 본 과제에서 구축한 모형 체계를 바탕으로 자료 축적과 모형 개선을 병행하는 장기적 연구가 필요하다.

한편, 당초 연구계획에는 머신러닝 기반 매개변수 재학습 및 자동 최적화가 포함되어 있었으나, 본 과제는 단년도 소규모 연구로 수행되었기 때문에 우선적으로 기존 SPBM의 구조 개선, 해빙 생태계 과정 구현, 입력자료 정비, 관측자료 기반 검증 및 민감도 실험에 연구역량을 집중하였다. 이에 따라 본 과제에서는 문헌값, 기존 모델 설정, 관측자료와의 비교를 바탕으로 한 수동 매개변수 조정 방식을 적용하였으며, 머신러닝 기반 자동 최적화는 후속 연구과제로 이관하여 수행할 계획이다. 후속 연구에서는 본 과제에서 구축한 ASP, TNB, WAP 3개 해역의 관측-모델 비교 체계를 학습 및 검증 자료로 활용하여, 주요 생태·생지화학 매개

변수의 보정 체계를 구축할 예정이다. 우선 최적화 대상 매개변수는 해빙조류의 광합성 - 광량 반응 계수, 최대 Chl:C 비율, 온도 반응 함수의 전환 온도 및 전환 폭, 질산염·인산염·규산염·철 반포화 상수, 해빙조류 전용 Si:C 및 Si:N 흡수비, 해빙 - 해수 경계면 영양염 교환계수, 빙조류 침강 속도, 규산 재순환 비율, 철 재광물화 속도로 설정한다. 이들은 본 연구의 검증 결과에서 엽록소, 영양염, 철 공급 및 생산성 재현성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 매개변수로 확인된 항목이기 때문이다.

또한 구체적인 접근법으로서 Bayesian optimization 기반의 매개변수 자동 보정 체계를 우선 구축할 계획이다. SPBM 반복 실험을 통해 매개변수 조합별 목적함수 값을 산출하고, 목적함수는 관측 엽록소, 질산염, 인산염, 규산염, 해빙 염분 및 온도에 대한 nRMSE, 평균 편향, 상관계수를 조합하여 정의한다. 이후 Gaussian process 기반 surrogate model을 이용하여 계산비용이 큰 SPBM의 반응을 근사하고, 설정된 실험 횟수 내에서 최적 매개변수 조합과 불확실성 범위를 탐색한다.

본 과제의 결과는 해빙 생태계 자체를 이해하는 데 그치지 않고, 향후 극지 해양 환경 예측 연구 전반에 직접 또는 간접적으로 응용될 수 있다. 해빙은 단순한 물리적 덮개가 아니라 빛, 염분, 영양염, 철, 유기물, 가스 교환을 동시에 조절하는 매개체이므로, 해빙 생태계 과정의 개선은 다른 극지 시스템 모형의 정확도 향상에도 기여할 수 있다.

첫째, 향후 수행 예정인 북극해 메탄 예측 시스템 개발 연구에 본 과제 결과를 직접 활용할 수 있다. 북극해에서 메탄의 생성, 산화, 방출 과정은 해빙 형성과 용해, 수층 성층, 유기물 공급, 광환경, 1차생산 및 미생물 활성과 긴밀하게 연결되어 있다. 따라서 본 과제에서 구축한 해빙 - 수층 결합 구조, 해빙 매개 물질 이동 과정, 계절적 생산성 반응 체계는 북극해 메탄 예측 시스템에서 배경 생태계 모듈 또는 경계조건 개선 요소로 활용될 수 있다. 특히 해빙 변화가 유기물 생산과 분해 환경을 어떻게 조절하는지에 대한 모의 체계는 메탄 생성·소모 환경을 해석하는 데 중요한 기반이 될 수 있다.

둘째, 향후 추진 예정인 남극해 생태계 모델 개발에도 본 과제 결과를 직접적으로 계승할 수 있다. 본 과제는 이미 남극 연안 3개 해역을 대상으로 해빙 내부와 수층 생태계의 상호작용을 검증하였으므로, 이후 보다 광역적인 남극해 생태계 모형을 구축할 때 핵심 과정식과 매개변수 설정의 출발점으로 활용 가능하다. 특히 남극 연안에서 중요한 철 제한, 빙조류의 침강, 해빙-매개 생산성 조절, CO₂ 플럭스 민감도 등의 구조는 남극해 전역 모형으로 확장할 때도 우선적으로 고려되어야 할 요소이므로, 본 과제의 결과는 후속 대형 연구의 기반 모듈로 활용될 수 있다.

셋째, 본 연구 성과는 해빙 감소에 따른 1차생산 변화, 탄소순환 변화, 영양염 공급 변화 등을 평가하는 다양한 극지 환경 변화 연구에도 응용될 수 있다. 이는 단지 해양 생태 분야뿐 아니라, 기후변화 영향 평가, 탄소흡수원 변동성 연구, 극지 관측자료 해석, 위성자료 기반 생태계 추정 연구 등과도 연계될 수 있다.

한편, 본 과제의 결과는 기초연구 성격이 강하므로 단기간 내 독립적 제품 형태로 기업화하기보다는, 예측 시스템의 핵심 모듈화, 환경정보 서비스 고도화, 수치예측 기반 의사결정 지원기술로의 단계적 확장이 보다 현실적이다. 우선, 본 과제에서 개발된 해빙 생태계 모듈

은 향후 극지 환경예측 플랫폼 내에서 재사용 가능한 구성요소로 정리될 수 있다. 예를 들어 해빙 두께 변화에 따른 생산성 변화, 탄소흡수 변화, 생지화학 민감도 등을 자동 계산하는 모듈형 시스템으로 발전시키면, 연구기관·공공기관·정책지원 부문에서 활용 가능한 예측 지원기술로 연결될 수 있다. 특히 극지 관측, 극지 환경영향 평가, 탄소순환 모니터링과 연계된 정보 서비스 분야에서 잠재적 활용성이 있다. 이 경우 기업화는 개별 모형 판매보다는, 예측 소프트웨어, 데이터 서비스, 맞춤형 시뮬레이션, 정책·산업 지원형 분석 서비스 등의 형태로 추진하는 것이 적절하다. 예를 들어 해빙 변화에 따른 생산성 및 탄소순환 변화를 시각화·예측하는 서비스는 연구기관, 공공부문, 해양환경 관련 산업체와의 협업 기반 기술로 발전할 수 있다.

다만 해빙 생태계 모델은 아직 관측자료 축적과 구조 개선이 지속적으로 필요한 분야이므로, 현 단계에서의 기업화는 직접적인 상용화보다는 공공 연구개발 성과를 기반으로 한 기술 축적형·플랫폼 연계형 활용이 타당하다. 즉, 본 과제의 결과는 즉시 수익화 가능한 완성 제품이라기보다는, 향후 극지 예측 시스템, 환경정보 서비스, 디지털 해양 플랫폼 등에 탑재될 수 있는 핵심 기반 기술로서의 가치가 크다.

마지막으로, 본 연구에서 도출된 모형 개발, 관측 검증 및 해빙 두께 감소 민감도 실험 결과는 국제학술지 논문으로 확장하여 성과를 확산할 계획이다. 1차 논문은 “Development and validation of a sea-ice ecosystem dynamics model for Antarctic coastal environments”를 주제로 하여, 기존 SPBM의 구조적 개선, 그리고 ASP, TNB, WAP 3개 해역에 대한 관측 기반 검증 결과를 중심으로 작성할 예정이다. 해당 논문은 해빙 생태계 모형의 개발 및 검증 성격을 가지므로 Ecological Modelling, Geoscientific Model Development 등을 목표 학술지 후보로 검토한다.

또한 2차 논문은 “Regional sensitivity of Antarctic coastal sea-ice ecosystems to reduced sea-ice thickness”를 주제로 하여, 해빙 두께 감소 민감도 실험에서 나타난 지역별 생산성, 철 공급, 먹이망 구조 및 CO₂ 흡수 반응 차이를 중심으로 작성할 예정이다. 이 논문에서는 ASP의 재편형 반응, TNB의 완충형 반응, WAP의 취약형 반응을 비교하여, 해빙 감소가 남극 연안 생태계와 탄소순환에 미치는 영향이 지역별로 상이함을 강조할 계획이다. 목표 학술지 후보로는 Biogeosciences, Journal of Geophysical Research: Oceans등을 검토한다.

논문 작성 일정은 2026년 6 - 8월 중 모델 결과와 검증 통계, 그림 및 표를 재정리하고, 2026년 9 - 10월 중 1차 논문 원고 초안을 완성하는 것을 목표로 한다. 이후 내부 검토와 공동저자 의견 반영을 거쳐 2026년 하반기 내 1차 논문 투고를 추진할 예정이다. 2차 논문은 민감도 실험 결과의 추가 해석과 탄소순환 논의를 보강하여 2027년 상반기 투고를 목표로 한다. 이를 통해 본 과제의 성과가 단년도 연구보고서에 머무르지 않고, 극지 해빙 생태계 모델링 분야의 국제 학술성으로 확장될 수 있도록 할 계획이다.

종합하면, 본 과제의 연구개발 결과는 향후 해빙 생태계 모형의 고도화, 남극해 광역 생태계 모델 개발, 북극해 메탄 예측 시스템 구축, 극지 탄소순환 및 기후변화 영향 평가 연구에 단계적으로 활용될 수 있다. 특히 본 과제에서 확보한 해빙 - 수층 결합 구조와 남극 연안 검증 결과는 후속 연구에서 직접적인 출발점이 될 수 있으며, 장기적으로는 극지 환경 예측

정확도 향상과 관련 정보 서비스 기술 개발에도 기여할 것으로 기대된다.



제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외 과학기술정보

본 과제 수행 과정에서는 남극 연안 해빙 생태계의 구조와 과정, 해빙 - 수층 결합 생태계 모형의 개발 동향, 그리고 관측 기반 검증 방법에 관한 해외 과학기술정보를 지속적으로 수집·분석하였다. 해빙 생태계 모델링은 국내 연구 기반이 아직 제한적이며, 주요 개념모형·수치 모형·관측자료의 상당 부분이 해외 연구를 통해 축적되어 왔기 때문에, 본 과제에서는 관련 국제 문헌과 공개 관측자료, 기존 해외 모형 체계에 대한 검토가 연구 수행의 중요한 기초자료로 활용되었다.

우선, 해빙 생태계 모형의 구조 설계를 위해 해외에서 개발된 해빙 생지화학 및 결합 생태계 모형 연구 동향을 조사하였다. 이를 통해 초기의 단순 해빙 내부 과정 모형에서 출발하여, 이후 해빙 - 수층 - 저서를 연결하는 결합 생태계 모형으로 발전해 온 흐름을 파악하였다. 특히 해빙을 단순한 물리적 경계층이 아니라, 생물 서식과 물질순환이 동시에 일어나는 능동적 생태 공간으로 다루는 최근의 해외 연구 경향을 검토하였으며, 이러한 정보는 본 과제에서 기존 SPBM 구조를 개선하는 데 직접 활용되었다. 그 결과 수층 생물과 해빙 생물의 서식지 차이를 반영하고, 해빙 내부에서의 생리적 적응과 결빙·융해에 따른 물질 이동을 보다 현실적으로 구현하는 방향으로 모형을 수정할 수 있었다.

또한 남극 및 북극 해빙 생태계에서 중요한 것으로 알려진 빙조류의 저온·저광 적응 특성에 관한 해외 문헌 정보를 수집하였다. 이를 통해 해빙조류는 일반 수층 식물플랑크톤과 동일한 온도 반응이나 광합성 특성으로 다루기 어렵고, 낮은 광량 환경에 적응한 높은 광 이용 효율과 광환경 변화에 대한 민감한 반응을 가질 수 있음을 검토하였다. 이러한 정보는 본 과제에서 해빙조류의 광합성 - 광량 반응과 온도 의존성을 조정하는 데 참고되었으며, 해빙 내부 생물량과 계절적 생산성 변동을 보다 타당하게 재현하기 위한 기초자료로 활용되었다.

남극 연안 생태계에서의 철(Fe) 제한과 해빙의 철 저장·공급 기능에 관한 해외 과학기술정보도 본 과제 수행에 핵심적으로 활용되었다. 해외 관측 및 모델링 연구에서는 남극 연안과 폴리나 환경에서 철이 1차생산과 bloom 형성의 주요 제한요소로 작용하며, 해빙이 계절적으로 철을 저장했다가 융해 시 공급원으로 기능할 수 있음이 보고되어 왔다. 본 과제에서는 이러한 정보를 바탕으로, 질소·인과는 구분되는 철 순환 특성을 모형에 반영하고, 해빙 결빙 과정에서의 농축 및 융해 후 공급 가능성을 고려하였다. 이는 해빙 감소가 단순한 광환경 변화만이 아니라 철 공급 변화와 연결되어 생산성과 CO₂ 플럭스에 영향을 줄 수 있음을 해석하는 데 중요한 배경 정보가 되었다.

이와 함께 해빙 융해 후 빙조류의 거동, 특히 수층 방출 후 빠른 침강 가능성과 그에 따른 유기물·영양염 재분배에 관한 해외 연구도 검토하였다. 기존의 단순한 모형 구조에서는 해빙에서 방출된 생물량이 수층에 장기간 잔존하는 방식으로 처리될 수 있으나, 해외 연구에서는 실제로 빙조류 또는 해빙기원 입자들이 빠르게 침강하여 저층 또는 저서로 전달될 수 있음이 제시되어 있다. 본 과제에서는 이러한 과학기술정보를 바탕으로, 해빙 융해 후 빙조류 침강속도를 조정하고 규산 및 철의 재순환 과정도 함께 고려하였다.

관측자료 측면에서는 남극 연안 해빙 생태계 관측자료와 국제 공개 데이터를 수집·분

석하였다. 특히 ASP, TNB, WAP와 같은 대표 해역에 대해 해빙 두께, 해빙 내부 온도·염분, 수층 수온·염분, 엽록소 및 영양염 자료를 확보하여 모형 검증에 활용하였다. 이러한 해외 관측 정보는 단순 참고자료에 그치지 않고, 모형의 성능을 실제 환경과 비교·평가하는 기준자료로 기능하였다. 이를 통해 어느 항목은 비교적 잘 재현되며, 어느 항목은 여전히 오차가 큰지를 구분할 수 있었고, 후속 개선이 필요한 과정도 식별할 수 있었다.

마지막으로, 해빙 감소와 기후변화에 따른 남극 연안 생태계 반응 및 탄소순환 변화에 관한 해외 연구동향도 함께 검토하였다. 해외 선행연구에서는 해빙 감소가 광조건 개선을 통해 생산성을 증가시킬 수 있다는 단순한 해석만으로는 충분하지 않으며, 지역에 따라 철 공급, 성층 구조, 해빙 서식지 상실, bloom 시기 변화 등이 복합적으로 작용할 수 있음이 제시되어 왔다. 본 과제에서는 이러한 국제 연구동향을 참고하여 해빙 두께 감소 민감도 실험 결과를 해석하였고, ASP, TNB, WAP에서 상이한 반응이 나타나는 원인을 과정 중심으로 설명하고자 하였다.

종합하면, 본 과제 수행 과정에서 수집한 해외 과학기술정보는 크게 해빙 생태계 과정 이해, 결합 생태계 모형 구조 설계, 철 및 영양염 순환 해석, 관측자료 기반 검증, 기후변화 민감도 해석의 다섯 측면에서 활용되었다. 이러한 정보는 본 과제의 모형 개선과 결과 해석의 과학적 근거를 제공하였으며, 향후 양 극해역에 대한 생태계 모델링 관련 후속 연구에서도 계속 활용될 수 있는 기반 자료로 기능할 것으로 판단된다.



제 7 장 참고문헌

- Auel, H., Klages, M., & Werner, I. (2003). Respiration and lipid content of the Arctic copepod *Calanus hyperboreus* overwintering in the Fram Strait. *Marine Biology*, 143(2), 275 - 282.
<https://doi.org/10.1007/s00227-003-1061-4>
- Aumont, O., Maier-Reimer, E., Blain, S., & Monfray, P. (2003). An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2), 1060. <https://doi.org/10.1029/2001GB001745>
- Bidle, K. D., & Azam, F. (1999). Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages. *Nature*, 397(6719), 508 - 512.
<https://doi.org/10.1038/17351>
- Bocquet, M., Sallée, J.-B., Garric, G., et al. (2024). Arctic and Antarctic sea ice thickness and volume changes from observations between 1994 and 2023. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129, e2023JC020848.
- Boyd, P. W., Ellwood, M. J., Tagliabue, A., & Twining, B. S. (2010). Remineralization of upper ocean particles: Implications for iron biogeochemistry. *Limnology and Oceanography*, 55(3), 1271 - 1288.
<https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.1271>
- Burchard, H., Bolding, K., & Villarreal, M. R. (1999). GOTM - A General Ocean Turbulence Model: Theory, Applications and Test Cases. European Commission Report EUR 18745 EN.
- Burchard, H., Bolding, K., & Villarreal, M. R. (2006). GOTM, a general ocean turbulence model: Theory, implementation and test cases. *Oceanologia*, 48(S), 55 - 74.
- Campbell, K., Mundy, C. J., Gosselin, M., Landy, J. C., Delaforge, A., & Rysgaard, S. (2019). Melt procedure affects the photosynthetic response of sea ice algae. *Frontiers in Earth Science*, 7, 21.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00021>
- Cheng, W., Hermann, A. J., Ortiz, I., Wang, M., Bond, N. A., Ciannelli, L., et al. (2021). Eastern Bering Sea shelf environmental and lower trophic level responses to projected climate change. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 188, 104789.
- Dalman, L. A., Deman, F., et al. (2025). Observation-Based Estimate of Net Community Production in Antarctic Sea Ice. *Geophysical Research Letters*.
- Flores, H., van Franeker, J. A., Siegel, V., Haraldsson, M., Strass, V., Meesters, E. H. W. G., Bathmann, U., & Wolff, W. J. (2012). The association of Antarctic krill *Euphausia superba* with the under-ice habitat. *PLoS ONE*, 7(2), e31775. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031775>
- Fraser, A. D., Massom, R. A., Haas, C., et al. (2023). Antarctic landfast sea ice: A review of its physics, distribution, and variability. *Reviews of Geophysics*, 61, e2022RG000770.
- Freese, D., Niehoff, B., Søreide, J. E., & Richter, C. (2017). A year-round study on metabolic enzymes and body composition of the Arctic copepod *Calanus glacialis*: implications for the timing and intensity of diapause. *Marine Biology*, 164, 22. <https://doi.org/10.1007/s00227-016-3036-2>
- Hancke, K., Lund-Hansen, L. C., Lamare, M. L., et al. (2018). Extreme low light requirement for algae growth underneath sea ice: A case study from Station Nord, NE Greenland. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 985 - 1000.

- Henley, S. F., et al. (2023). Macronutrient biogeochemistry in Antarctic land-fast sea ice. *Polar Biology*.
- Hirche, H.-J. (1997). Life cycle of the copepod *Calanus hyperboreus* in the Greenland Sea. *Marine Biology*, 128(4), 607 - 618.
<https://doi.org/10.1007/s002270050127>
- Hunke, E. C., Notz, D., Turner, A. K., & Vancoppenolle, M. (2011). The multiphase physics of sea ice: A review for model developers. *The Cryosphere*, 5, 989 - 1009. <https://doi.org/10.5194/tc-5-989-2011>
- Janssens, J., Meiners, K. M., Tison, J.-L., Dieckmann, G. S., Delille, B., Lannuzel, D., et al. (2016). Incorporation of iron and organic matter into young Antarctic sea ice during its initial growth stages. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4, 000123.
<https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000123>
- Kearney, K., Hermann, A., Cheng, W., Ortiz, I., & Aydin, K. (2020). A coupled pelagic - benthic - sympagic biogeochemical model for the Bering Sea: documentation and validation of the BESTNPZ model (v2019.08.23) within a high-resolution regional ocean model. *Geoscientific Model Development*, 13, 597 - 650.
- Kirst, G. O., & Wiencke, C. (1995). Ecophysiology of polar algae. *Journal of Phycology*, 31(2), 181 - 199.
- Kottmeier, S. T., & Sullivan, C. W. (1988). Sea ice microbial communities (SIMCO). 9. Effects of temperature and salinity on rates of metabolism and growth of autotrophs and heterotrophs. *Polar Biology*, 8, 293 - 304.
- Kwon, Y. S., La, H. S., Jung, J., Lee, S. H., Kim, T.-W., Kang, H.-W., & Lee, S. H. (2021). Exploring the roles of iron and irradiance in dynamics of diatoms and *Phaeocystis* in the Amundsen Sea continental shelf water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(3).
- Kwon, Y. S., La, H. S., Kang, H.-W., & Park, J. (2023a). A regional-scale approach for modeling primary production and biogenic silica export in the Southern Ocean. *Environmental Research*, 217, 114811.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114811>
- Kwon, Y. S., Rhee, T. S., Bolding, K., et al. (2023b). Potential impact of the sea-ice ecosystem to the polar seas biogeochemistry. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1181650. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1181650>
- Lannuzel, D., Schoemann, V., de Jong, J., Tison, J.-L., & Chou, L. (2007). Distribution and biogeochemical behaviour of iron in the East Antarctic sea ice. *Marine Chemistry*, 106(1 - 2), 18 - 32.
- Lannuzel, D., Vancoppenolle, M., van der Merwe, P., de Jong, J., Meiners, K. M., Grotti, M., Nishioka, J., & Schoemann, V. (2016). Iron in sea ice: Review and new insights. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4, 000130.
<https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000130>
- Liao, S., Wang, X., Mu, L., et al. (2022). An evaluation of Antarctic sea-ice thickness from the Global Ice-Ocean Modeling and Assimilation System (GIOMAS) using ICESat laser altimeter data. *The Cryosphere*, 16, 1807 - 1825.
- Lizotte, M. P. (2001). The contributions of sea ice algae to Antarctic marine primary production. *Integrative and Comparative Biology*, 41(1), 57 - 73.
- Martin, A., McMinn, A., & Ryan, K. G. (2012). The physiological response to increased temperature in over-wintering sea ice algae and phytoplankton in McMurdo Sound, Antarctica and Tromsø Sound, Norway. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 428, 57 - 66.

- Martin, A., McMinn, A., Ryan, K. G., & Mitchell, K. A. (2012). The response of Antarctic sea ice algae to changes in temperature and salinity during the winter - spring transition. *Polar Biology*, 35, 1141 - 1157.
- Massom, R. A., & Stammerjohn, S. E. (2010). Antarctic sea ice change and variability - Physical and ecological implications. *Polar Science*, 4(2), 149 - 186.
- Meiners, K. M., Vancoppenolle, M., Mundy, C. J., et al. (2012). Chlorophyll a in Antarctic sea ice from historical ice core data. *Geophysical Research Letters*, 39, L21602.
- Michel, C., Legendre, L., Taguchi, S., Bondarenko, A., & Gosselin, M. (1997). Coexistence of microalgal sedimentation and water column recycling in a seasonally ice-covered ecosystem (Saroma-ko Lagoon, Sea of Okhotsk, Japan). *Journal of Marine Systems*, 11(1 - 3), 133 - 148. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00034-6](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00034-6)
- Naughten, K. A., Holland, P. R., Dutrieux, P., et al. (2023). Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century. *Nature Climate Change*, 13, 1222 - 1228.
- Parkinson, C. L. (2019). A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(29), 14414 - 14423.
- Poorvin, L., Rinta-Kanto, J. M., Hutchins, D. A., & Wilhelm, S. W. (2004). Viral release of iron and its bioavailability to marine plankton. *Limnology and Oceanography*, 49(5), 1734 - 1741. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.5.1734>
- Riebesell, U., Schloss, I., & Smetacek, V. (1991). Aggregation of algae released from melting sea ice: Implications for seeding and sedimentation. *Polar Biology*, 11(4), 239 - 248. <https://doi.org/10.1007/BF00238457>
- Sedwick, P. N., DiTullio, G. R., Mackey, D. J., & others. (2000). Seasonal iron limitation in Antarctic shelf waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C5), 11321 - 11336. <https://doi.org/10.1029/2000JC000256>
- St-Laurent, P., Yager, P. L., Sherrell, R. M., Stammerjohn, S. E., & Dinniman, M. S. (2017). Pathways and supply of dissolved iron in the Amundsen Sea (Antarctica). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(9), 7135 - 7162. <https://doi.org/10.1002/2017JC013162>
- Stammerjohn, S. E., Martinson, D. G., Smith, R. C., Yuan, X., & Rind, D. (2008). Sea ice in the western Antarctic Peninsula region: Spatio-temporal variability from ecological and climate change perspectives. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(18 - 19), 2041 - 2058.
- Swadling, K. M., et al. (2023). Biological responses to change in Antarctic sea ice habitats. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 1073823.
- Szymanski, A., & Gradinger, R. (2016). The diversity, abundance and fate of ice algae and phytoplankton in the Bering Sea. *Polar Biology*, 39(2), 309 - 325. <https://doi.org/10.1007/s00300-015-1783-z>
- Tedesco, L., Castellani, G., Duarte, P., Jin, M., Moreau, S., Mortenson, E., Saenz, B. T., Steiner, N., & Vancoppenolle, M. (2026). Brief communication: Intercomparison study reveals pathways for improving the representation of sea-ice biogeochemistry in models. *The Cryosphere*, 20, 723 - 736. <https://doi.org/10.5194/tc-20-723-2026>
- Tedesco, L., et al. (2025). Intercomparison study reveals pathways for improving the representation of sea-ice biogeochemistry in models.

EGUsphere [preprint].

- Tedesco, L., Vichi, M., Scoccimarro, E., & Tomasino, M. P. (2014). Sea ice biogeochemistry: A guide for modellers. *PLoS ONE*, 9(7), e89217. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089217>
- Torstensson, A., Hedblom, M., Andersson, J., et al. (2018). Microalgal photophysiology and macronutrient distribution in summer sea ice in the Amundsen and Ross Seas, Antarctica. *PLoS ONE*, 13(4), e0195587.
- Trivedi, S., Petty, A. A., Turner, A. K., et al. (2025). An assessment of Antarctic sea-ice thickness in CMIP6 models. *The Cryosphere*, 19, 6771 - 6806.
- van Cappellen, P., Dixit, S., & van Beusekom, J. (2002). Biogenic silica dissolution in the oceans: Reconciling experimental and field-based dissolution rates. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 1075. <https://doi.org/10.1029/2001GB001431>
- van der Merwe, P., Lannuzel, D., Bowie, A. R., Meiners, K. M., Nisumaa, A.-M., & Heil, P. (2011). High temporal resolution observations of spring fast ice melt and seawater iron enrichment in East Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116, G03017. <https://doi.org/10.1029/2010JG001628>
- van Leeuwe, M. A., Tedesco, L., Arrigo, K. R., et al. (2022). On the phenology and seeding potential of sea-ice microalgal species. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10(1).
- Vancoppenolle, M., & Tedesco, L. (2017). Numerical models of sea ice biogeochemistry. In D. N. Thomas (Ed.), *Sea Ice* (3rd ed., pp. 492 - 515). Wiley-Blackwell.
- Vaughan, D. G., Marshall, G. J., Connolley, W. M., Parkinson, C., Mulvaney, R., Hodgson, D. A., King, J. C., Pudsey, C. J., & Turner, J. (2003). Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change*, 60, 243 - 274.
- Wongpan, P., et al. (2024). Gross Primary Production of Antarctic Landfast Sea Ice: A Model-Based Estimate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- Yakubov, S. K., et al. (2019). Sea-ice Pelagic Benthic Model (SPBM): development and application.
- Ye, Y., Munhoven, G., Coulon, A., et al. (2025). FESOM2.1 - REcoM3 - MEDUSA2: an ocean - sea ice - biogeochemistry model coupled to a sediment model. *Geoscientific Model Development*, 18, 977 - 1016.
- Young, J. N., et al. (2024). Photosynthetic processes in Antarctic sea ice during the spring melt. *Limnology and Oceanography*.

뒷 면

(국내 과제용)

주 의

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