

극지 해양의 결빙 및 해빙작용에 의한 해양
무기탄소시스템 변화 연구

Studies on the change in polar marine inorganic carbon cycle in
response to sea ice melting and formation



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 국내 학 · 연 극지연구진흥프로그램(PAP사업)” 에 관한 연구 “극지 해양의 결빙 및 해빙작용에 의한 해양 무기탄소시스템 변화 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



연구기관명 : 고려대학교

연구책임자 : 김태욱

참여연구원 : 모아라

“ : 박승희

“ : 박정은

“ : 석민우

요 약 문

I. 제 목

극지 해양의 결빙 및 해빙작용에 의한 해양 무기탄소시스템 변화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 기후변화에 의한 극지 해양 환경변화가 극지 해양 탄소순환에 미치는 영향에 대한 이해를 향상하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 극지 해양의 기존 자료들을 수집/분석하여 결빙과 해빙작용이 극지 해양 탄소시스템에 미치는 영향을 진단한다.
- 극지 해양에서 총알칼리도, 총 무기탄소, pH 간의 상호 일관성을 검증한다.

IV. 연구개발결과

- 기존 공개자료를 활용한 극지 해양 탄소 인자 예측식 개발
- 결빙과 해빙이 해양 탄소순환에 미치는 영향 파악
- 극지 해양에서 해양 탄소 인자들 사이의 상호 일관성 검증

V. 연구개발결과의 활용계획

- 해양산성화에 취약한 극지역에서의 해양산성화 연구로 확장
- 기후변화와 극지 환경 변화에 의한 기후변화 피드백 작용에 대한 모형 개발의 기초자료로 활용

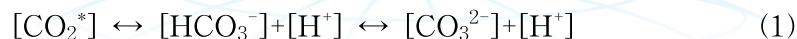
목 차

제 1 장 서론	4
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	6
제 1 절. 극지 해양 탄소 인자 자료 수집 및 예측식 개발	6
제 2 절. 해빙 형성 및 제거 과정이 해양 탄소순환에 미치는 영향	14
제 3 절. 극지 해역 해양 무기탄소 시스템 인자 상호 일관성 진단	25
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	29
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	30
제 6 장 참고문헌	31

제 1 장 서론

해양은 산업혁명 이후 인위적인 활동으로 증가된 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 역할을 하고 있다. 이전의 연구에 따르면 산업혁명 이후 대기로 방출된 이산화탄소의 30%가량을 해양에서 흡수한 것으로 제시되었다(Sabin et al., 2004). 북/남극 해역의 강한 바람과 차가운 해수 온은 타 대양에 비해 더 많은 대기 이산화탄소를 흡수할 수 있는 흡수원으로써의 역할을 가능하게 하였다. 하지만 최근 지구온난화와 같은 기후변화로 인해 북극의 표층 수온이 상승하고, 상승된 표층 수온은 상대적으로 낮은 이산화탄소 용해도를 보이기 때문에, 향후 지구온난화가 지속되었을 경우 현재보다 흡수하는 대기 이산화탄소의 양이 감소할 것으로 보고 있다(Cai et al., 2010). 또한, 이러한 기후변화에 의해 북극 해빙의 면적이 감소하는 등 급격한 해양환경 변화를 겪고 있는 것으로 확인되고 있다. 특히, 해빙의 감소로 인한 담수의 유입이 해양 무기탄소 순환에 영향을 줄 것으로 예상하며, 기존 연구자들에 의해서 이와 관련된 연구가 진행되어왔다(Bate et al., 2006; Brown et al., 2015; Yamamoto et al., 2012).

해양으로 흡수된 이산화탄소(CO_2^*)는 아래와 같은 과정을 통해 중탄산염, 탄산염과 같은 용존 무기탄소 형태로 변화되며, 이 과정에서 방출된 수소이온은 해양산성화를 발생시키는 주범으로 지목되어지고 있다(식1).



해양산성화는 해양의 pH가 낮아지는 현상으로, 산업혁명 이후 해양의 pH는 약 0.1 감소한 것으로 알려져 있으며, 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)의 IS92a ‘business-as-usual’ 시나리오에 따르면 2100년 해양의 pH는 0.3~0.4 감소할 것으로 예측하고 있다(Calderia and Wickett, 2003; Orr et al., 2005; IPCC 2007). 해양산성화 현상은 해양 생물에게 직·간접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 가장 대표적인 사례로는 탄산칼슘 골격을 가진 해양생물의 피해와 산호의 백화현상 등이 있다(Orr et al., 2005; Hoegh-Guldberg et al., 2007; Comeau et al., 2010). 탄산칼슘(CaCO_3) 골격을 가진 해양생물의 피해는 이를 먹이로 하는 상위단계 포식자에게 영향을 미치며, 나아가 인간에게도 직접적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다. 접합대순환모델 6(Coupled model intercomparison project 6, CMIP6) 결과를 사용하여 추정된 아라고나이트 포화도($\Omega_{\text{aragonite}}$) 변화 양상은 최근 20년 동안 북극에서의 감소율이 지난 200년에 비해서 약 4배 이상 증가한 것으로 확인되며, 이를 통해 북극에 서식하는 익족류는 더 빠른 속도로 해양산성화의 피해를 입을 것으로 예상된다.

본 과제를 통해 기후변화와 이것이 초래하는 극지 해양의 환경변화가 극지 해양 탄소순환에 미치는 영향에 대한 이해를 향상하고, 이를 확장하여 미래의 극지 해양의 탄소순환 및 기후변화 피드백 작용을 내다보기 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- East Greenland Current 해역에서 해빙(ice melting) 및 강을 통해 해양으로 유입되는 총알칼리도를 정량하여 보고하였다. West Sprtsbergen Current 지역에서는 해빙(ice melting)으로 인한 알칼리도의 유입이 초과 알칼리도(Excess alkalinity)의 대부분을 차지하였음을 보고하였다(Tan et al., 1983).
- 해빙(sea ice)의 melt pond의 물을 채취하여, 총 무기탄소, 총알칼리도 등을 측정한 결과, pCO_2 가 10-1500 μatm 의 넓은 범위에서 관측되었다. 이는 melt pond가 균일한 상태가 아님을 반증하는 측정 결과이다. 또한, 해빙과 맞닿는 해수를 연구한 결과, 혼합층 아래의 물보다 pCO_2 는 상대적으로 낮고, pH와 탄산칼슘의 포화도는 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 따라서 해빙(sea ice) 기원의 담수가 해양표층의 CO_2 흡수를 촉진하는 역할을 하는 것으로 나타났다(Bate et al., 2014).
- 2007년 11월부터 2008년 5월 동안 북극 해빙(sea ice)의 생성/소멸 과정에 따른 1년생 해빙(sea ice)의 탄산염 시스템 변화를 연구를 진행하였다. 탄산칼슘과 해양-대기 이산화탄소 교환 때문에 총 무기탄소의 농도가 영향을 많이 받은 것으로 나타났으며, 결빙 작용에 의해 탄산칼슘(아라고나이트)의 포화도가 해빙-해수 경계수에서 약 0.8 정도 감소하는 것으로 나타났다. 하지만, 얼음형성 과정에서는 오히려 포화도를 증가시키는 것으로 보고하였다(Fransson et al., 2013).
- 총 무기탄소, pH, pCO_2 를 연속 관측한 결과와 산소 안정동위원소 분석결과를 결합하여, 해빙(sea ice) 및 육상 기원의 담수의 상대적 영향을 분석하였다. 육상 담수의 영향이 전 지역에서 발견되었지만, 서 북극해 해역의 해양 탄소순환은 해빙(sea ice)수의 영향이 더 큰 것으로 파악되었으며, 그로 인해 해양산성화의 피해가 커진 것으로 해석하였다(Robbins et al., 2013).
- 국내에서는 포항공대 연구팀이 예비실험을 진행한 바가 있으나, 초기 단계에 연구에 머물렀고, 이 외에는 관련 연구가 미비한 상태인 것으로 파악되었다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 극지 해양 탄소 인자 자료 수집 및 예측식 개발

1990년대 이후로 본격화된 대양의 이산화탄소 연구에도 불구하고, 극지 해양은 WOCE, Repeat Hydrography, CLIVAR 등과 같은 해양관측 프로그램의 대상이 되지 못하였고, 타 대양에 비해 상대적으로 자료가 부족한 실정이다. 하지만, 2000년대에 들어오면서 극지 해역의 해양 탄소순환에 관한 연구가 활발해지면서, CARINA(Carbon in Atlantic Ocean), SOCAT(Surface Ocean CO₂ Atlas) 데이터베이스 및 개별 연구프로젝트 등을 통해 많은 자료가 축적되고 있으며, 그중 상당 부분이 공개되고 있다(그림 1). 본 극지 해양 탄소 인자 예측식 개발을 위해 수집대상이 되는 자료는 염분, 온도, 총알칼리도, 총 무기탄소, pH, pCO₂ 등의 물리, 화학적 자료이다. 앞서 언급한 자료들을 활용하여, 본 연구에서는 물리변수와 탄소 변수 간의 관계를 파악, 수괴에 따른 탄소 변수들의 변화를 예측할 수 있는 경험식(empirical equation)을 제시하고자 한다. 해양 탄소 자료가 집중적으로 분포되어 있는 지역은 베링해, 태평양 쪽의 서북극, 대서양 쪽의 동북극 해역이며, 북극 중앙부는 상대적으로 자료로 매우 빈약하다. 자료가 집중된 이들 세 지역을 상호 비교하여 차이와 그 원인을 찾는 과정을 통해 북극 및 주변 해역의 해양 무기탄소시스템에 대한 이해를 향상하고자 한다. 즉시 활용 가능한 자료인 CARINA와 SOCAT 자료가 집중된 지역을 우선적으로 연구하였다.

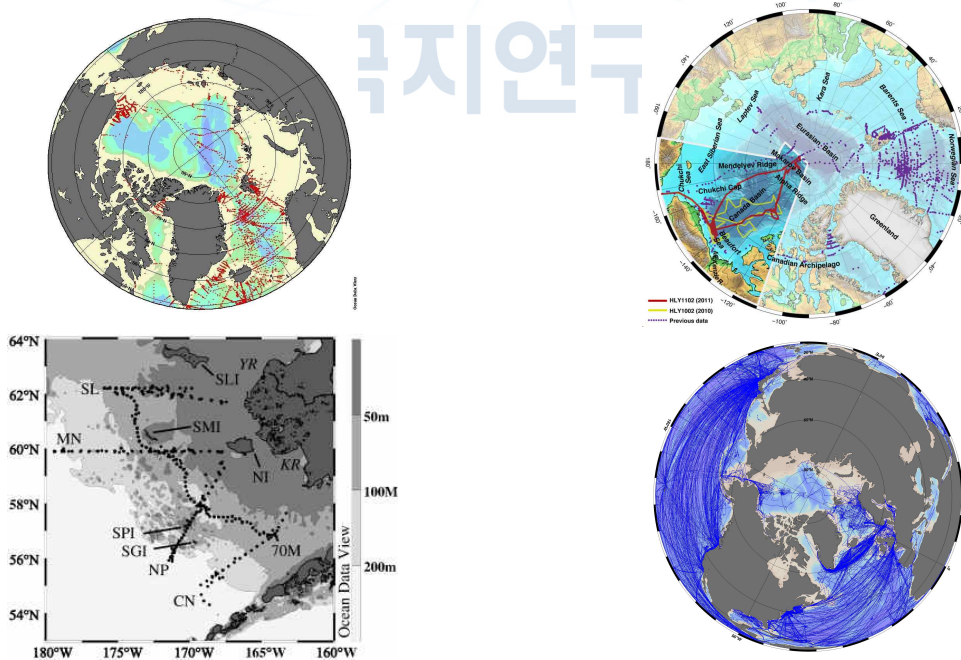


그림 1. 극지 해양의 무기탄소시스템 변수의 측정자료 모음 예시.

상단 좌측: CARINA(<http://cdiac.ornl.gov/oceans/CARINA/>)

상단 우측: Robin et al. (2013)의 표층 연속 관측 자료(흰색 음영 지역은 타 관측자료)

하단 좌측: Cross et al. (2013)의 베링해 자료

하단 우측: SOCAT pCO₂ 자료(<http://www.socat.info/>)

1. 극지 해양 탄소 인자 자료 수집 및 예측식 개발

SoCATv4(Surface Ocean CO₂ Atlas Version 4), 북극해 인근 해역 조사자료의 집합체인 CARINA, 미국지질조사국의 현장조사 자료(Robin et al., 2013)와 같은 공개자료를 수집하였을 뿐만 아니라, 개별 연구자 접촉을 통해서 SoCAT 자료와 신경망 예측 기반의 pCO₂ 자료인 MPL_SIM_FFN를 확보하였다. 하지만, SoCAT 자료의 압도적인 자료의 수와 분포 때문에 pCO₂ 예측알고리즘을 개발하는데 연구의 초점을 두었다. MPL_SIM_FFN자료(그림 2)는 SoCAT 자료를 기반으로 만들어진 자료이기 때문에, 원자료인 SoCAT 자료를 활용하는 것이 타당하다고 판단된다.

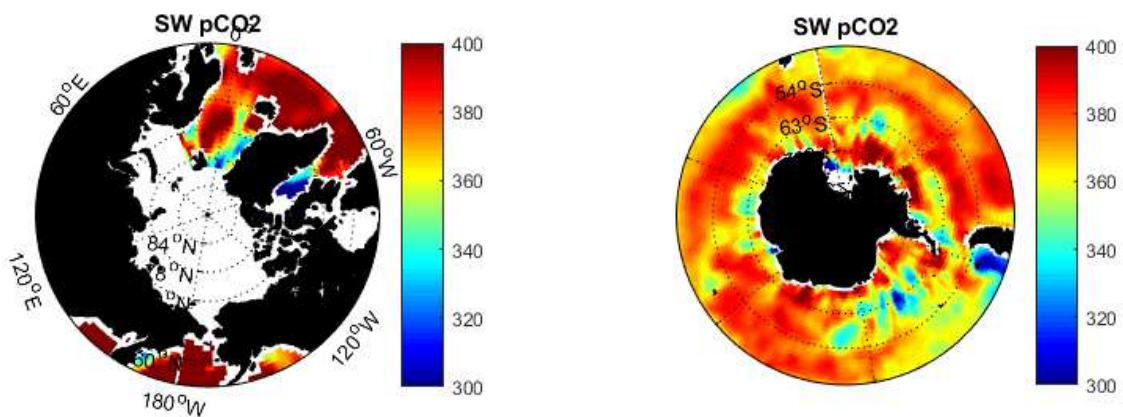


그림 2. 신경망 예측 기반의 pCO₂ 자료인 MPL_SIM_FFN의 남북극 농도 예시(2015년 12월)

SoCAT 자료의 경우, 1960년대부터 최근까지 관측된 다양한 연도의 관측자료가 포함되어 있다. 대기 중의 이산화탄소 농도에 의해 자연적으로 증가하는 해수 중의 이산화탄소를 반영할 필요가 있기 때문에, 격자를 나누어 격자별로 증가세를 파악하고자 시도하였다. 또한, 상대적으로 계절 변화가 거의 없는 극지역이지만, 연구목적과 관련된 해빙이 계절적으로 다른 양상을 보이기 때문에 계절 변화를 파악하고자 시도하였다. 결과적으로 계절적 차이가 있는 것으로 판명되어, 1월~12월까지 월별로 알고리즘을 각각 만들기 위한 시도도 진행하였고, 동시에 1년 치 자료를 모두 이용한 알고리즘 개발도 진행하였다.

다중선형회귀모형은 독립변수(주로 수온과 염분)와 종속변수(이산화탄소 표층 분압) 간의 성립되는 상관관계를 파악하고, 이렇게 파악한 상관관계를 통해서 독립변수만 존재하는 시공간에서 종속변수의 변화를 파악하는 개념이다. 이러한 모형은 이산화탄소 자료와 같이 시공간적인 자료가 수온과 염분과 같은 자료에 비해 매우 부족한 경우 활용할 수 있다. 이론적으로는 염분은 무기탄소시스템의 주요 인자인 용존 무기탄소와 총알칼리도에 영향을 미치고, 수온의 경우에는 수직혼합으로 인한 이산화탄소의 농도변화, 열역학적인 이산화탄소 분압 변동과 직/간접적인 영향을 가지고 있으므로, 이산화탄소 예측에 염분과 수온을 활용할 수 있다. 뿐만 아니라, 이산화탄소에 영향을 미치는 생물 활동을 대변할 수 있는 엽록소 농도, 탄산칼슘 농도, 광합성 유효

광량 등도 위성 자료를 통해 획득할 수 있기 때문에 예측알고리즘을 도출할 때 활용할 수 있다. 지역별로 예측알고리즘을 만들기 위해서 등간격의 격자를 생성하였다(그림 3). 남/북극의 경우에는 위도가 증가할수록 단위 위도에 대한 거리 감소가 발생하고, 이를 방지하기 위해 위도별로 격자 수를 조절하였다. 해당 연구는 0.5도와 1도 간격의 두 경우로 격자를 나누어 진행하였다. 0.5도 간격의 경우 자료가 있는 격자의 수는 총 14,000여 개, 1도 간격의 경우에는 5300여 개의 격자가 생성되었다(그림 3의 위도 범위 이내). 알고리즘의 가능한 조합형태를 고려하면, 최대 21,200,000번의 알고리즘 추정 연산(실제로는 자료가 있지만, 너무 부족하거나 모형이 유효하지 않거나 등의 경우로 인해 이것보다 작음)이 필요하며, 연산 실행시간과 결과의 저장공간을 고려하여, 2차식까지 최대 허용하는 것으로 하였다. 향후 결과를 보면 1차식과 2차식의 예측 오차가 대체적으로 10 μ atm 보다 매우 낮았기 때문에, 3차식을 포함하더라도 큰 차이는 없을 것으로 판단된다.

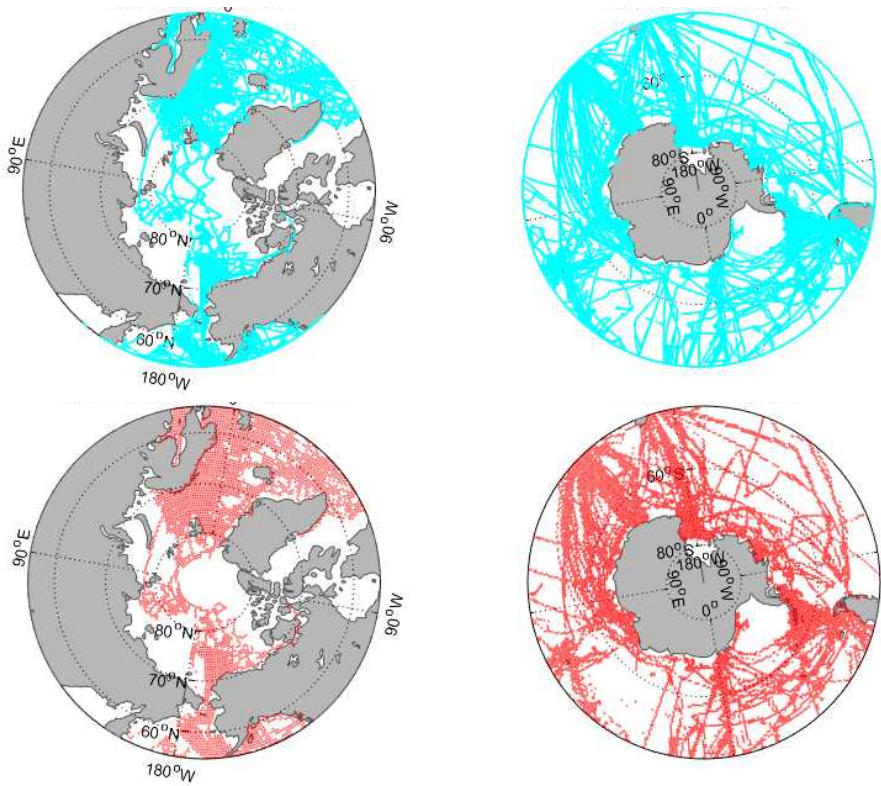


그림 3. SoCATv4에 포함된 남/북극 및 주변 해역의 표층이산화탄소 분압자료 분포(상단 그림의 푸른 점)와 그를 기반으로 등거리(equal distance)의 격자 생성 예시(하단 그림의 붉은 점은 약 50km를 나타냄)

SoCAT 자료에는 이산화탄소분압 자료와 함께 염분과 온도 자료가 포함되어 있기 때문에 이를 독립변수로 사용하는 데 있어서, 추가자료 확보의 노력이 요구되지 않았지만, 앞서 언급한 바와 같이 생물 활동을 대변할 수 있는 엽록소(Chl), 유기 탄소(POC), 무기탄소(PIC), 광합성 유효 광량(PAR)을 NASA의 해색자료 데이터베이스로부터 제공받아 독립인자로 추가 활용하였다(그림 4). 따라서 최대 6개의 독립변수를 고려하여 2차식까지 허용하는 방식으로 stepwise fit

방식과 모든 유의한 조합 가운데 RMSE가 가장 작은 형태를 선정하는 방식으로 최적 알고리즘을 각 격자에서 파악하였다. 일반적으로 많이 활용되는 결정계수(r^2)의 경우에는 변수를 추가하면 할수록 증가하므로 이를 보정한 결정계수를 고려하였으며, 이 경우 RMSE가 가장 작은 조합과 일치하였다.

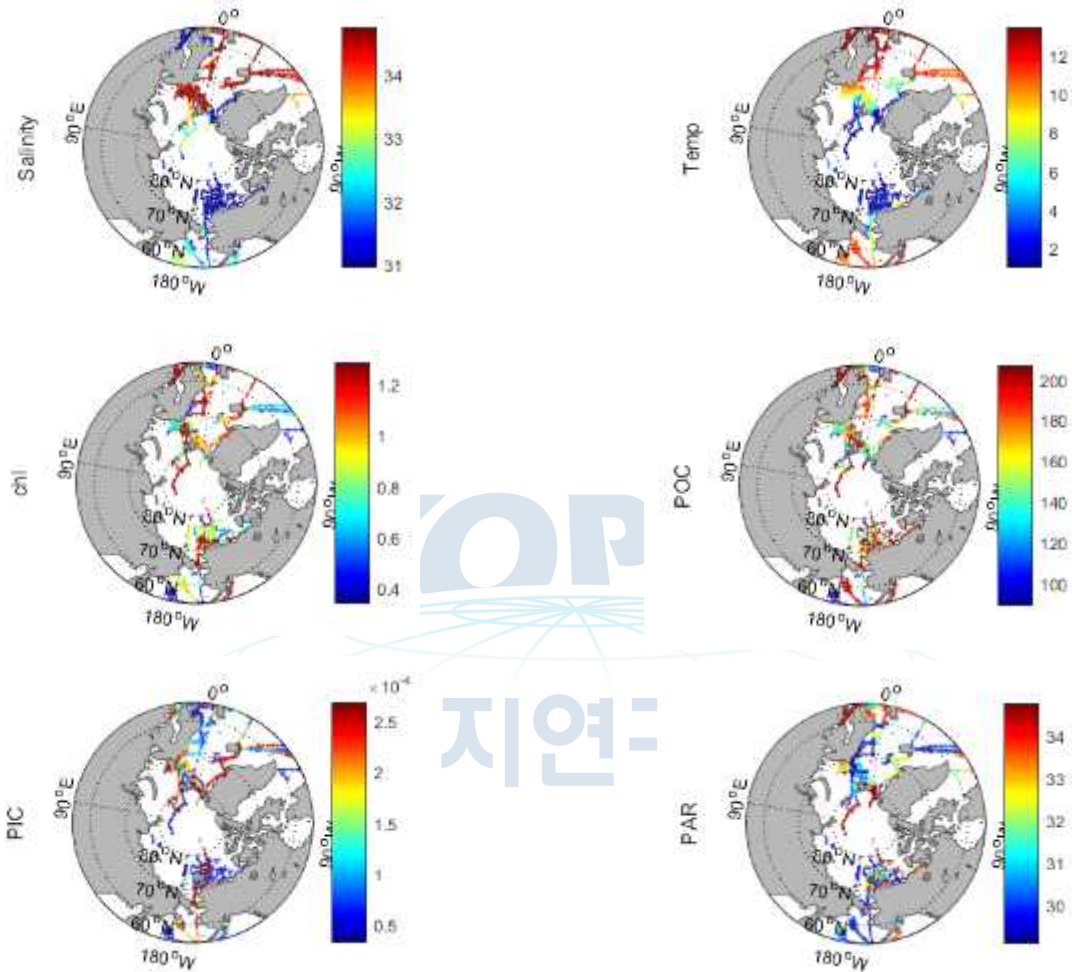


그림 4. 연구에 활용된 자료 예시(8월). 염분, 온도는 SoCAT 측정자료로부터, 나머지 자료는 MODIS aqua 자료로부터 관측자료의 연도와 월이 같은 것을 추적하여 추출하였음.

2. 표층 이산화탄소 인자 예측알고리즘 개발 수행

연도와 상관없이 1990년 이후에 측정된 모든 자료를 1월부터 12월까지 각각의 격자에서 분석하였다. 모든 자료를 특정 연도로 보정하기 위해서, 연도별 자연증가율(대기 중 이산화탄소 농도 증가에 의한 증가)을 파악하는 과정을 진행하였다. 하지만, 자료를 월별로 나누었을 때는 해당 격자에서 충분한 자료가 확보되지 못했거나 다른 더 큰 변동요소가 있는 이유로 인해서 유의한 증가율이 발견되지 않는 경우가 대부분이었다. 또한, 특정 지역의 결과를 전체적으로 확장하기가 어렵기 때문에 기존의 Takahashi et al. (2009)의 연구결과를 활용하여 2010년을 기준으

로 남극해 연평균 2.1 μatm 증가, 북극해 연평균 1.5 μatm 증가, 베링해 연평균 1.2 μatm 감소를 적용하였다. 이 부분을 해결하는 것이 향후 예측알고리즘의 정확도를 향상시키기 위한 우선순위가 될 것이지만, 현재로서는 자료가 충분하지 않아서 파악이 평균 증가율을 사용하는 것이 가장 오차를 줄이는 방안으로 판단된다.

다음 과정으로, 표층 이산화탄소의 계절 변화 파악을 시도하였다. 12개월의 자료가 충분히 확보된 곳은 매우 제한적이었지만, 그림 5에서 나타난 바와 같이 계절 변화가 극지역에서도 비교적 뚜렷하게 나타나는 것이 확인되었다. 계절에 따른 온도변화가 불과 3도 정도에 불과하지만, 표층 이산화탄소의 분압차이는 100 μatm 정도로 높게 나타났다. 따라서, 극 지역의 무기탄소 시스템, 표층 이산화탄소 분압을 명확하게 이해하기 위해서는 계절 자료가 충분히 확보되어야 할 것이다. 또한, 계절 변화와 동반되는 온도 및 염분의 변화가 표층 이산화탄소 부분압 분포와 연관된 것으로 나타났기 때문에, 충분한 계절 자료 확보 시에 온도와 염분에 의한 예측력을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

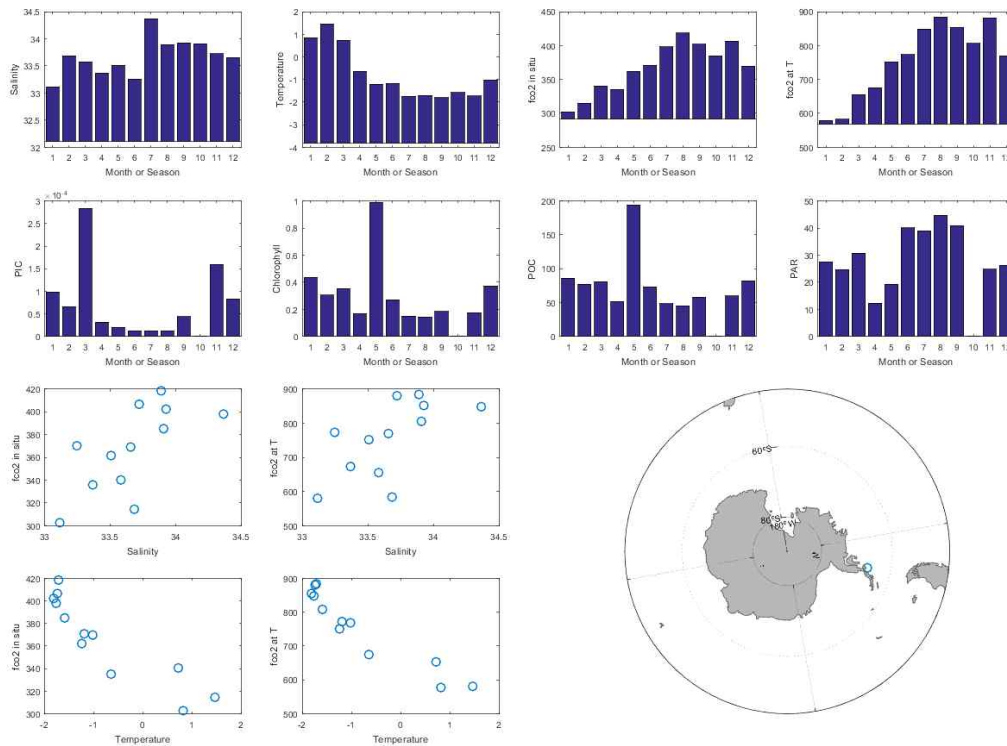


그림 5. 남극해의 표층이산화탄소 분압 및 해양학 인자의 계절변동 및 상호관계 예시 (상단 좌측부터 차례로 염분, 온도, 표층이산화탄소 분압 관측값, 표층이산화탄소값의 온도 보정치, PIC, Chl, POC, PAR, 표층이산화탄소 분압과 염분과의 관계, 표층이산화탄소 온도보정 값과의 염분과의 관계, 표층 이산화탄소분압과 온도와의 관계, 표층이산화탄소 분압 온도보정 값과 온도와의 관계를 나타냄. 상관관계가 나타남. 이를 바탕으로 예측알고리즘이 만들어짐)

예측의 오차를 확인하기 위하여, 월별, 전체자료를 통해 알고리즘(모든 계수가 통계적으

로 유의미하고 RMSE가 가장 작은 것을 선정)을 격자별(0.5도)로 만들고, 6개 모든 변수(염분, 온도, 엽록소, POC, PIC, PAR)를 고려하여 표층 이산화탄소 분압의 오차 예측하였다. 예측 오차는 남북극 통틀어서 2월이 가장 낮은 5.1 μatm 으로 확인되었고, 4월이 가장 높은 15.2 μatm 의 오차를 보였다. 또한, 월에 상관없이 전체자료를 활용했을 때에는 12.6 μatm 의 오차를 보였다. 남북극 모두 월별 자료의 분포가 매우 상이하고 제한적이기 때문에, 이를 전체지역으로 확대하기 위한 방안에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. Stepwise fit을 통해 최적 모형을 격자별로 선정한 경우 앞선 방법보다 오히려 오차가 더 낮았다(3.4~9.3 μatm). 또한, 월과 관계없이 전체자료를 활용한 결과는 9.3 μatm 의 오차를 보여 앞선 방법보다 향상된 결과를 보였다. 하지만, stepwise fit의 결과 중 일부 계수는 통계적으로 유의미하지 않음이 확인되었고, 추후 이에 대한 고려도 필요한 것으로 판단된다. 또한, 동일한 조건에서 격자 크기를 0.5도에서 1.0도로 변화시켜 예측 오차를 확인한 결과, 월과 관계없이 전체자료를 사용했을 때 오차가 17.3 μatm 으로 나타났다. 이는 0.5도에서 추정된 오차 12.6 μatm 보다 큰 오차로, 이를 통해 극지 해양에서 지역별 차이가 크다는 것이 확인되었다.

격자별로 최적의 알고리즘이 만들어지기 위해 포함된 변수들이 어떤 것이 있는지 파악하여, 해당 지역에서 해양 무기탄소 순환이 어떤 환경인자에서 크게 영향을 받는지 파악하였다(그림 6). 하지만, 위성 자료와 SoCAT 해양자료와의 공간 해상도의 불일치 때문에 표층이산화탄소 분압과 동시에 관측되는 인자인 온도와 염분에 대한 의존성이 큰 것으로 확인되었다. 위성 자료는 4~5km 해상도이기 때문에 수 분의 시간 해상도를 가지는 해양관측자료보다 공간 해상도가 매우 떨어지고, 또한, 동일한 인공위성자료의 픽셀 안에서 해양관측자료는 변동을 보이기 때문에 위성 자료의 활용성이 극지역에서 상대적으로 떨어지는 것으로 확인되었다.

모든 격자에 대해 동일한 알고리즘 형태를 적용했을 때, 그 계수의 분포 차이를 통해서 표층이산화탄소 분압에 영향도를 파악할 수 있다. 그림 7은 염분과 온도의 1차항만을 활용한 다중선형회귀 알고리즘, 염분과 온도와 엽록소의 1차항만 사용한 다중선형 알고리즘의 2가지 경우에서 각각의 계수가 지역별로 어떻게 변화하는지 파악한 결과이다. 염분과 온도의 1차항만을 활용한 다중선형회귀 알고리즘의 경우, 북극 지역에서는 북대서양과 연결된 해역의 경우에는 염분에 대한 민감도가 큰 것으로 나타났으며, 심지어 부호가 다른 지역도 다수 확인되었다. 반면, 태평양과 연결된 부분은 온도에 상대적으로 덜 민감한 것으로 나타났고 전체적으로 모두 음의 상관관계를 가지는 것으로 확인되었다. 엽록소를 추가한 경우, 엽록소 자료가 극지역으로 갈수록 부족하고, 위성 자료의 공간적 해상도 또한 해양관측자료를 따라가지 못하기 때문에, 알고리즘 자체가 성립하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지역별로 활용 가능한 다양한 변수를 모두 고려하는 방식이 고정된 알고리즘 형태를 사용한 것에 비해 유리하다는 점을 시사하고 있다.

최적의 조합을 선정하기 위해(최소 오차와 유의한 계수 기준방법과 stepwise fit 방법), 각 독립변수의 차수를 1차에서 2차로 증가시켜 알고리즘의 오차 변화를 살펴보았다. 그 결과, 모든 월 자료를 사용하여 2차항을 추가시킬 수 있는 옵션을 준 경우에도 오차는 크게 개선되지 않았고, 북극 3.3 μatm , 남극 2.3 μatm 의 향상이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해, 오차의 향상이 크지 않은 상황에서는 독립변수의 범위에 따라 값이 크게 변할 수 있는 2차식을 사용

하는 것보다 1차식을 사용하는 것이 적절하다고 판단할 수 있다.

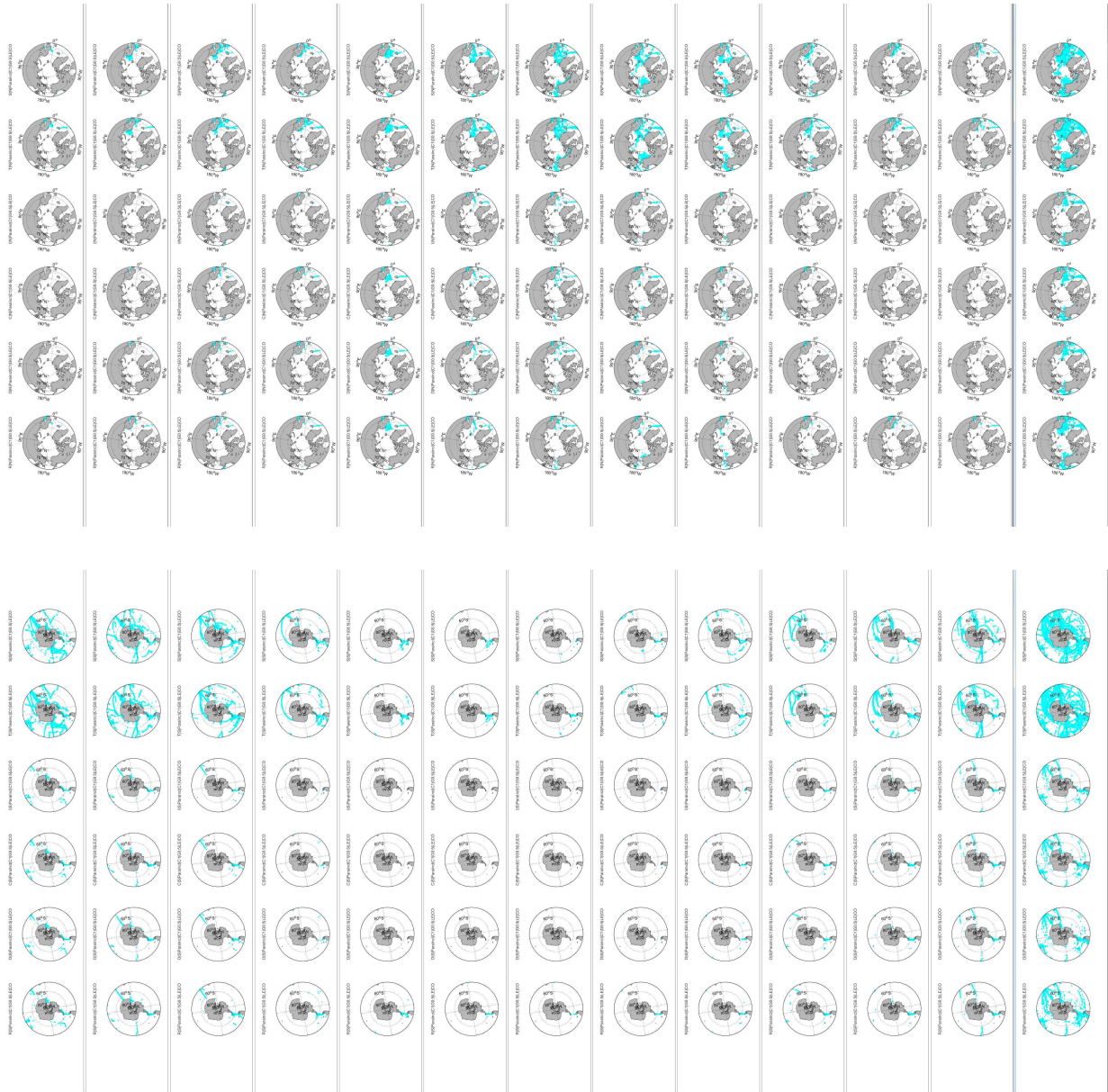


그림 6. 6개 모두 1차식의 변수 포함 여부를 표시한 그림. 첫 번째 줄부터 마지막 줄까지 순서대로 염분, 온도, PIC, Chl, POC, PAR임. 첫 행부터 마지막행까지 순차적으로 1월~12월, 그리고 모든 자료를 의미함. 해당 기간에 해당 지역에서의 최적의 알고리즘에 해당 변수가 포함되어 있으면 해당 지역에 푸른색 표시가 나타남.

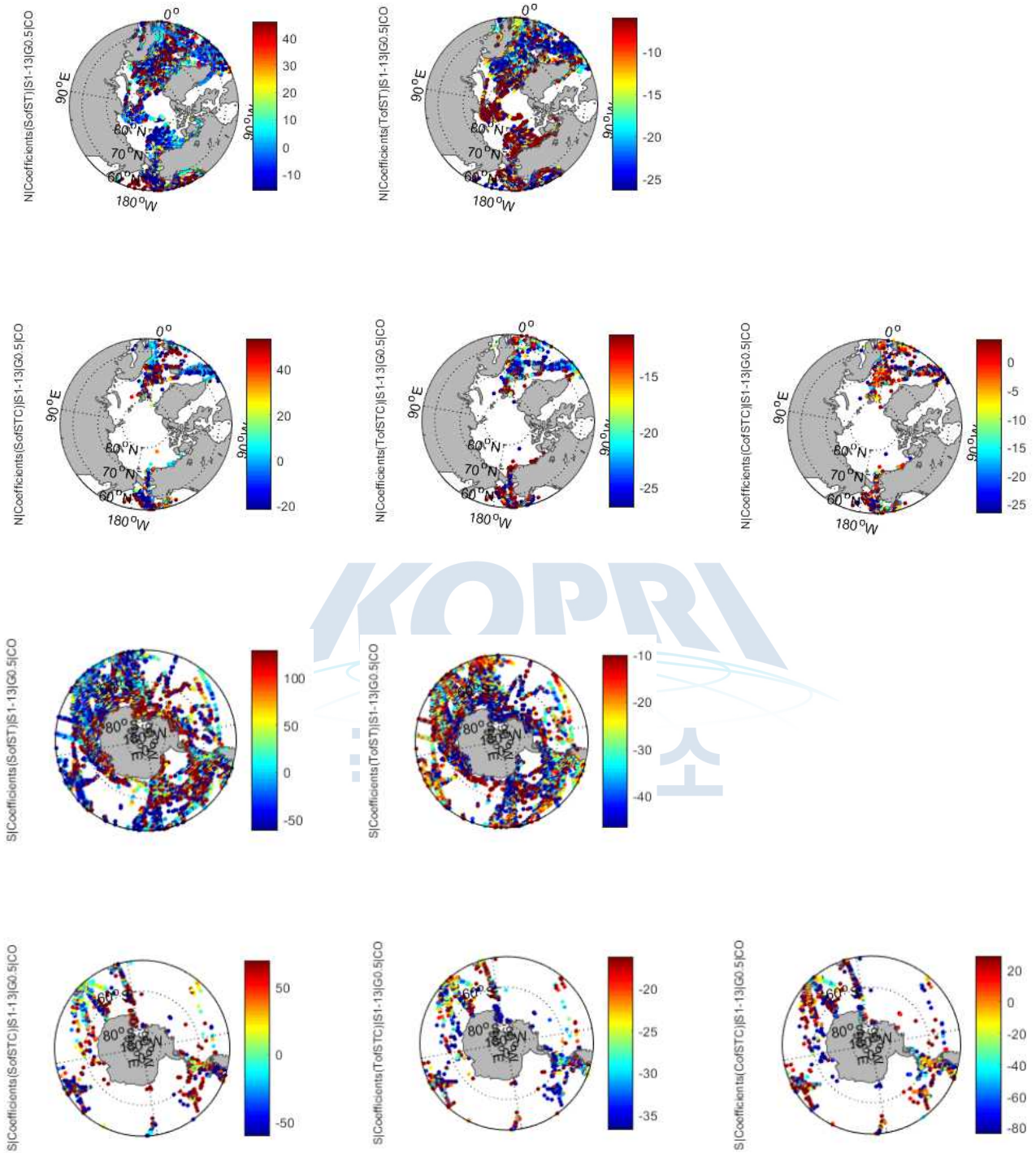


그림 7. 남북극의 표층 이산화탄소 분압 예측알고리즘의 격자별 계수 값 분포(0.5도 격자, 온도 보정된 이산화탄소분압 사용). 첫 번째 세 번째는 온도와 염분의 1차식을 고정적으로 사용하는 알고리즘의 결과이고 두 번째 네 번째는 여기에 엽록소(Chl)를 추가하였을 때 나타내는 계수 값임. 극으로 갈수록 엽록소 자료의 해상도 문제와 자료 부족 때문에 알고리즘이 성립하지 않는 경우가 발생함.

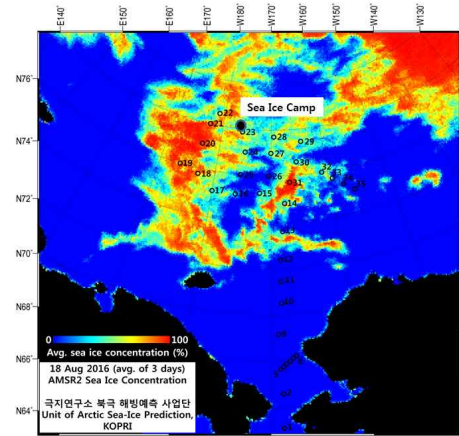
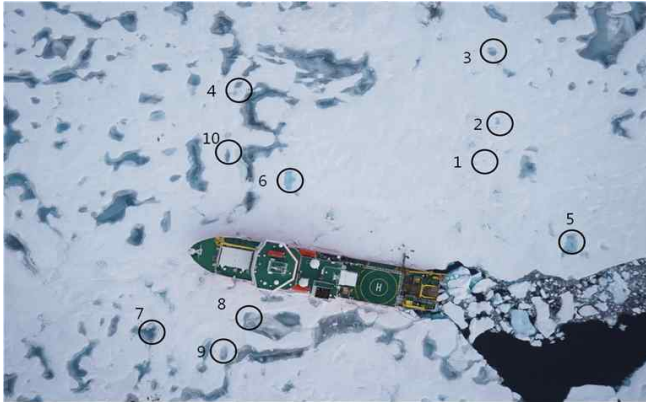
제 2 절 해빙 형성 및 제거 과정이 해양 탄소순환에 미치는 영향

극지 해양에서는 계절에 따라 해빙(sea ice)이 녹고 형성되는 과정이 매년 반복되며, 기후변화에 의해 이러한 자연적 순환이 영향을 받기도 한다. 이러한 결빙과 해빙(ice melting) 과정은 해수의 모든 성분을 농축 및 희석하는 역할을 하고, 더불어 탄산칼슘의 침적 및 용해 작용과 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 생물 생산력에도 영향을 끼침으로써 총 무기탄소의 농도에 영향을 주고, 마지막으로 해양-대기 이산화탄소 교환에 영향을 미친다. 이러한 각각의 작용은 염분과 알칼리도, 총 무기탄소의 Endmember 값, 그리고 보전적 농축-희석 관계식과 실제값 사이의 차이, 4가지 해양 탄소 인자들 간의 상호 비교 등을 통해서 설명할 수 있다. 특히, 장기적인 기후변화의 관점에서 보면, 기후변화가 심화될수록 해빙(ice melting)으로 인한 담수 유입량도 지속적으로 확대될 것으로 예상하고 있다. 더불어 해수의 pH 변화 완충 능력도 희석되게 되어, 해양산성화에 더 취약한 상황으로 전개될 것으로 추정된다. 하지만, 해빙(sea ice)이 녹는 과정 중에 이카이트(ikaite)와 같은 탄산칼슘의 용해가 발생하면 반대 방향으로 작용할 것으로 생각된다. 본 연구 수행을 위해 총 3회(북극 2회, 남극 1회)의 현장 연구를 진행하였다. 1, 2차 현장 연구는 북극의 해빙(sea ice) 시료를 채취하였으며, 각각 2016년 8월과 2017년 8월에 수행되었다. 3차 현장 연구는 남극의 해빙(sea ice) 시료를 획득하였으며, 2018년 4월에 수행되었다(그림 8).

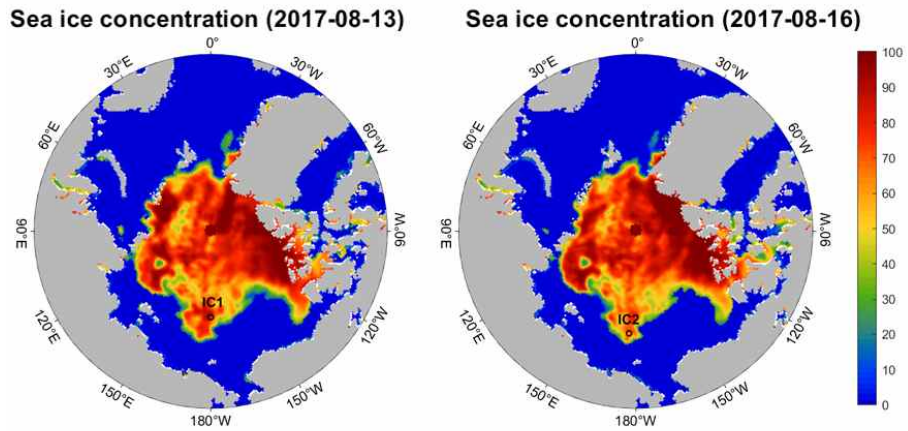
1. 결빙과 해빙(ice melting)에 의한 해수의 총알칼리도 변화 파악

극지 해양에서는 계절에 따라 발생하는 결빙과 해빙(ice melting) 과정에 의해 해수의 성분이 농축되거나 희석되는 현상이 발생한다. 결빙과 해빙(ice melting)이 해양무기 탄소 인자(총알칼리도) 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 2016년 현장조사를 통해 획득된 해수 시료를 사용하였으며, 해빙(sea ice)에서 떨어져 있어 상대적으로 고염분을 보이는 해수(station 10, 그림8)와 해빙(sea ice)에 근접해있어 상대적으로 저염분을 해역의 해수(station 13), 2개의 해빙 아래 해수(Under Ice Water, UIW)를 사용하였다. 4개의 해수 시료 모두 결빙과정에 의해 총알칼리도가 증가하는 경향을 보였으며, 해빙(ice melting)에 의해 총 알칼리도가 감소하는 경향을 보였다(그림9). 또한, Station 10(외해)의 해수를 제외한 나머지 3개의 해수는 결빙과 해빙에 따른 염분과 총알칼리도 변화 경향성이 유사한 것으로 확인되었다($\Delta S/\Delta TA=70$). 반면, Station 10(외해)의 해수는 나머지 시료들과는 다른 염분-총알칼리도 변화 경향을 보였다($\Delta S/\Delta TA=68$).

2016년
(북극)



2017년
(북극)



2018년
(남극)

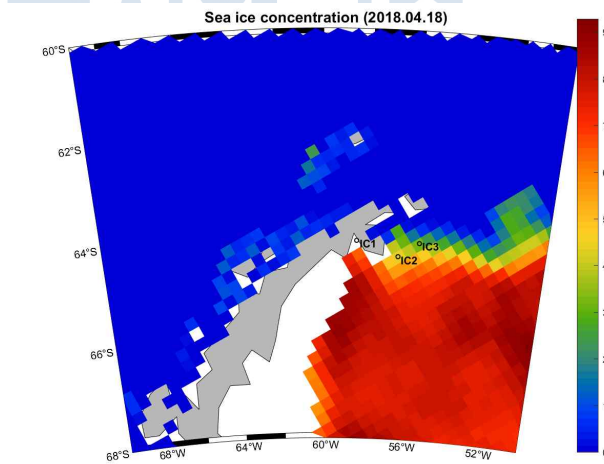


그림8. (상) 2016년 아라온 북극 조사. (좌) Melt pond 연구지역, (우) 해양조사 정점 <극지연구소 제공>
(중) 2017년 아라온 북극 조사. 해빙의 농도(color bar) 및 ICE CAMP 실시 지역
(하) 2018년 아라온 남극 조사. 해빙의 농도(color bar) 및 ICE CAMP 실시 지역

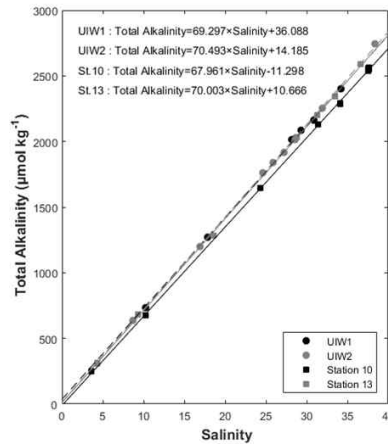


그림 9. 결빙과 해빙에 의한 해수 시료의 총알칼리도 변화.

2. 해빙(sea ice) 시료의 총알칼리도 분석

연구지역의 해빙(sea ice) 시료의 염분은 0.05~1.379 psu으로 매우 낮은 범위의 염분분포를 보였다. Thomas et al.(1995)의 연구에서 다년생 해빙(sea ice)의 염분은 깊이가 깊어질수록 증가하는 양상을 보였으며, Fransson et al.(2013)의 연구에서 1년생의 해빙(sea ice)의 염분은 중간이 낮고 양 끝이 높은 ‘C’ 형태를 보이는 것으로 제시되었다. 본 연구에서 획득한 해빙(sea ice) 시료는 깊이가 깊어질수록 염분이 증가하는 다년생 해빙(sea ice)의 염분분포를 보이는 것으로 확인되었으나, 이는 현장조사가 실시된 여름철 표층의 해빙(sea ice)이 녹으면서 해빙(sea ice) 표층의 염수(brine)가 방출된 결과로 판단된다. 염분이 낮은 시료의 경우 정확한 총알칼리도 분석이 어렵기 때문에 해수와 녹은 해빙(sea ice) 시료를 혼합하여 염분과 총알칼리도의 관계식을 획득하고, 해빙(sea ice) 시료의 염분을 대입하여 총알칼리도 값을 도출하였다. 그림8의 2016년 Melt pond 6번 정점 인근에서 3개의 해빙(sea ice) 시료를 채취하였다. 분석에 필요한 최소 시료량 확보를 위해 해빙(sea ice) 코어를 20cm 길이로 잘라서 총알칼리도 분석을 진행하였다. 3개의 해빙(sea ice) 시료의 총알칼리도는 염분 분포양상과 동일하게 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 것으로 확인되었다(그림 10). 2017년 획득된 해빙(sea ice) 시료의 분석결과를 그림 11에 도식하였다. 해빙(sea ice) 시료의 수직 분포 양상을 살펴보면, IC1과 IC2에서 획득한 시료 모두 염분과 유사한 경향의 총알칼리도와 용존 무기탄소 분포를 보였다. 총 알칼리도와 용존 무기탄소의 분포 경향은 IC1과 IC2에서 약간 상반된 경향이 확인되었는데, IC1의 경우 총 알칼리도가 용존 무기탄소보다 유사하거나 높은 값을 보인 반면, IC2에서는 총 알칼리도의 값이 용존 무기탄소보다 현저하게 낮게 확인되었다. 이러한 차이는 ice camp가 진행된 해역의 해빙(sea ice) 양에 의한 차이로 생각된다(그림 8). 상대적으로 높은 위도에 위치하여 해빙(sea ice)이 덜 녹은 IC1에서는 주로 표층에 한정되어 해빙(sea ice)-대기 기체교환에 의한 용존 무기탄소의 증감과 생물 활동에 의한 총 알칼리도와 용존 무기탄소의 증감이 있었을 것이며, 수직으로 깊어질수록 투과성이 낮아져 해빙(sea ice)-대기 기체교환, 생물 활동에 의한 변화 등과 같이 해빙(sea ice)의 용

존 무기탄소의 변화를 야기시킬수 있는 기작이 없었을 것으로 생각된다. 반대로 IC2에서는 해빙 (sea ice)이 상대적으로 많이 녹아서 해빙(sea ice)-대기 기체교환, 생물 활동에 의한 용존 무기탄소 인자의 변화가 있었을 것으로 판단되며, 겨울 동안 축적된 ikaite의 손실(해양으로의 방출), 염수(brine)의 방출 때문에 총 알칼리도가 낮은 값을 보이는 것으로 판단된다. 2018년 남극 현장 조사를 통해 채취된 해빙(sea ice) 시료는 해빙의 깊이가 깊어질수록 염분이 증가하는 양상을 보였으며, 염분의 범위는 0.05~5.66으로 확인되었으며, 기존 북극 해빙 결과와 마찬가지로 염분분포와 매우 유사한 분포 경향을 보였다. 총 알칼리도는 해빙 표층에서 가장 낮고, 해빙의 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다. 반면, 용존 무기탄소는 해빙의 깊이에 따라 큰 변화폭을 보이지 않았다(그림12).

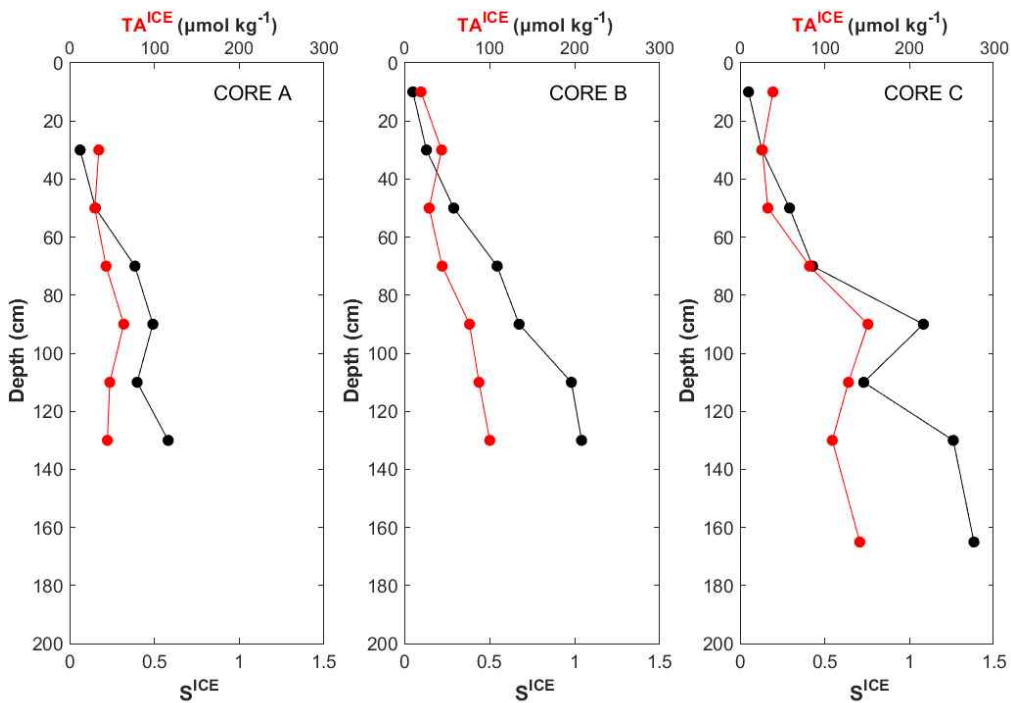


그림 10. 2016년 북극 항해를 통해 획득된 해빙 시료의 총알칼리도 분포

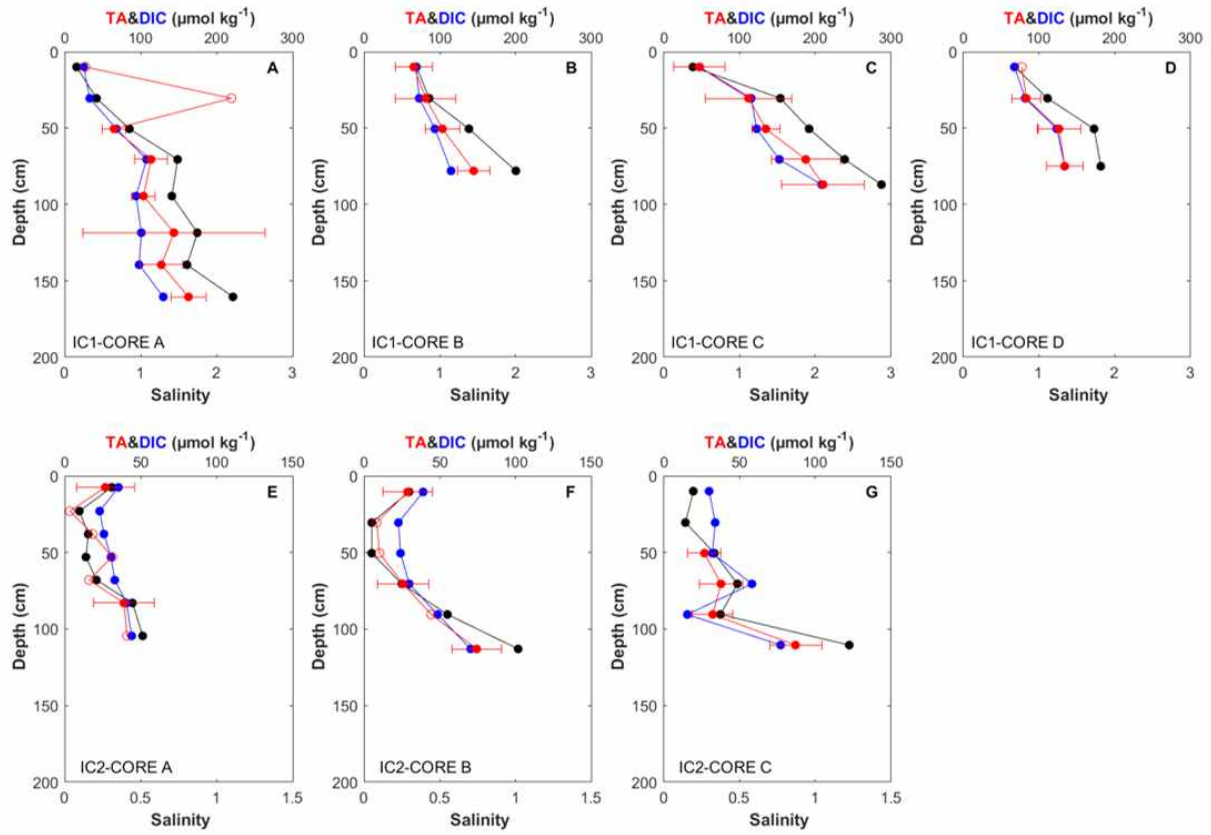


그림 11. 2017년 북극 항해를 통해 획득된 해빙 시료의 총알칼리도 분포

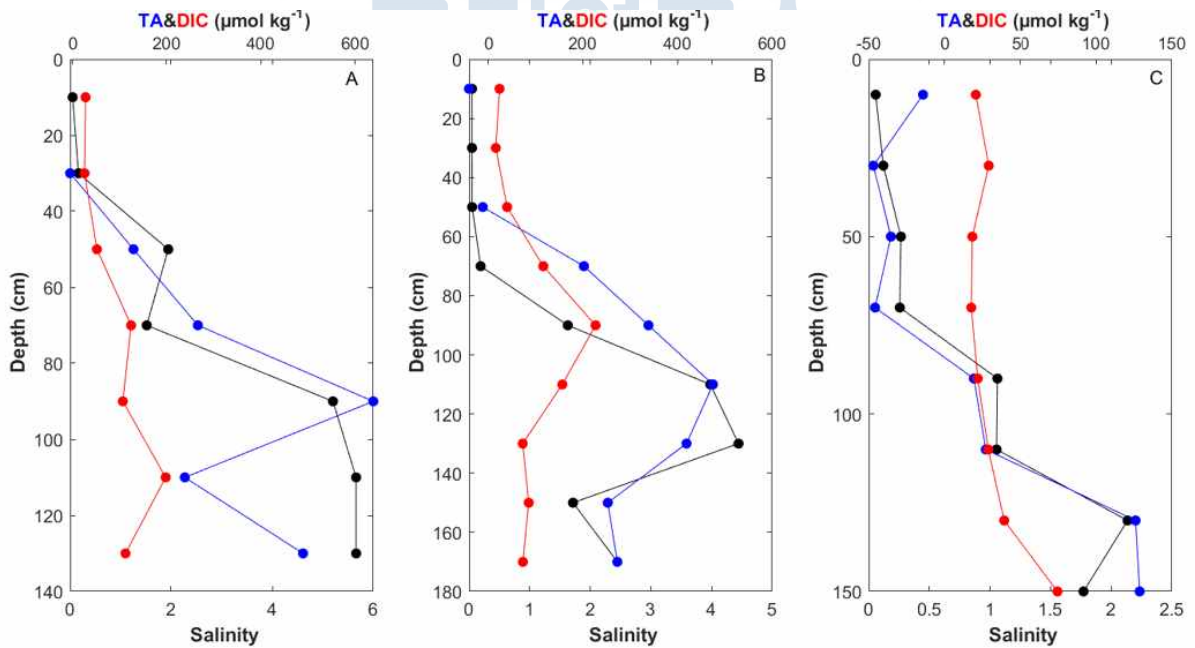


그림 12. 2018년 남극 항해를 통해 획득된 해빙 시료의 총알칼리도 분포

3. 눈, Melt pond water 총알칼리도 측정

2016년 북극 현장조사를 통해 획득된 두 개의 눈 시료의 총알칼리도는 $10.7\mu\text{mol kg}^{-1}$ 과 $9.2\mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로 도출되었다. 또한, 동시에 획득된 10개의 melt pond water의 염분은 0.51~26.65 psu의 넓은 범위에 걸쳐 나타났다. 그중 8개의 melt pond water 시료에서 10 psu 이하의 염분 범위를 보였다. 해빙(sea ice) 시료와 동일한 방식으로 해수와 혼합하여 염분과 총알칼리도 사이의 선형 관계식을 도출하고, melt pond water의 염분을 사용하여 총알칼리도 농도를 도출하였다(표 1). MP5와 MP9의 melt pond water 시료의 경우 26.65, 19.36의 높은 염분을 보이며, 동시에 총알칼리도도 높은 것으로 확인되었다. 이 두 개의 melt pond의 경우 해빙 아랫부분의 해수와 연결된, 즉 개방형의 melt pond로 추정된다.

표 1. 2016년 북극 항해를 통해 획득된 melt pond 시료의 염분과 총 알칼리도

No.	Salinity	Total Alkalinity ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	No.	Salinity	Total Alkalinity ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)
MP1	2.018	150.0	MP6	6.547	489.2
MP2	3.523	366.9	MP7	0.629	56.0
MP3	4.236	448.0	MP8	0.512	67.2
MP4	5.221	574.6	MP9	19.36	1386.3
MP5	26.65	1920.4	MP10	0.777	62.8

2017년 북극 현장조사를 통해 획득된 눈과 melt pond water 시료 분석결과를 그림 13에 도식하였다. 2016년 눈과 melt pond water 시료와는 다르게 총알칼리도와 더불어 용존 무기탄소를 측정하였다. 현장조사에서 획득된 두 개의 눈 시료의 총 알칼리도는 $-4\pm 4\mu\text{mol kg}^{-1}$ 과 $0\pm 4\mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로 도출되었으며, 용존 무기탄소는 각각 $17.7\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$, $16.8\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 측정되었다. Melt pond water 시료는 IC2에서 5개의 시료가 채취되었다. 시료의 총 알칼리도와 용존 무기탄소는 염분이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였다 (그림 13).

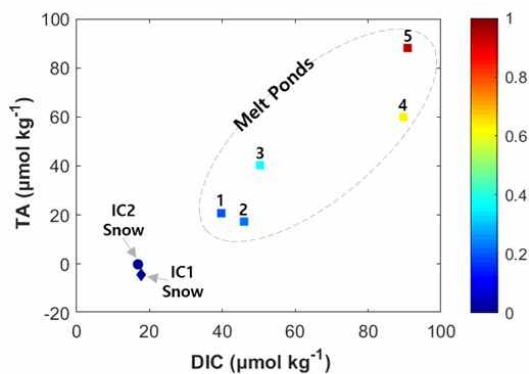


그림 13. 2017년 북극 항해를 통해 획득된 Melt pond와 눈 시료의 총알칼리도와 용존 무기탄소 분포. 연구해역에서 채취된 melt pond 시료와 눈 시료의 총알칼리도(Total alkalinity) 및 용존 무기탄소(Dissolved inorganic carbon) 분석결과(melt pond 시료의 번호는 염분이 낮은 것부터 순서대로 지정함)

4. 극지 결빙 해역의 해빙 용빙이 해양 무기탄소 시스템에 미치는 영향

여름철 해빙의 용빙과정이 북극 해양 무기탄소 시스템에 미치는 영향에 대해서 진단하기 위해 2017년 북극 현장 연구를 통해 획득된 2정점의 Ice camp와 주변해수와 해빙의 총알칼리도, 총 무기탄소, 염분 측정값을 활용하여 총알칼리도-염분 직선식을 도출하였다. 이론적으로, 총알칼리도-염분 직선식의 y절편이 0이 되어야 하지만, 해빙의 경우 이카이트(ikaite)와 같이 초과 알칼리도로 작용하는 물질이 포함되어있어 총알칼리도-염분 직선식의 y절편을 변화시킨다. 본 연구에서는 총알칼리도-염분 직선식의 y절편을 초과 알칼리도라고 판단하였으며, IC1과 IC2에서 각각 $13 \mu\text{mol kg}^{-1}$, $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 의 초과 알칼리도가 도출되었다. 본 연구에서 도출된 총알칼리도-염분 직선식과 해빙의 평균 염분(IC1: 1.4, IC2: 0.4)을 사용하여 도출된 해빙의 평균 총알칼리도는 $109 \mu\text{mol kg}^{-1}$, $31 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 로 확인되었다. 이 해빙 용빙수가 해수에 유입되어 표층 혼합층 내에서 균일하게 혼합될 경우, 해수의 이산화탄소 분압은 약 $32 \mu\text{atm}$ 이 감소될 것이며 이는 북극 해양 표층 혼합층 내에서 대기 이산화탄소의 흡수를 촉진시키는 결과를 가져올 것이다. 감소된 이산화탄소의 분압이 원래 초기 해수 이산화탄소의 분압으로 회복된다고 가정할 경우, $8.2 \sim 8.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 이산화탄소가 해양으로 흡수될 것이며, 초과알칼리도의 영향을 제외할 경우 $7.7 \sim 8.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 이산화탄소를 흡수할 것으로 예상된다.

5. 남극 세종기지 주변 해수의 해양무기 탄소시스템의 연변화

1차년도 연구계획에는 남극지역에서 pH를 현장 관측하여 pH 측정 시스템의 검증자료 및 현장 연구를 진행하고자 했지만, 남극 세종기지의 시설보수공사로 인하여, 기지방문 인원이 제한되어 계획했던 현장 방문연구를 진행하지 못하였다. 이를 대신하여, 기지월동대원의 도움을 받아 현장 시료를 주기적으로 확보하여, 세종기지 주변 해수의 총 알칼리도 및 용존 무기탄소의 연변화 양상 파악연구를 진행하였다.

세종기지의 염분은 여름철(2월~3월)에 큰 변동 폭을 보이거나 이후 거의 일정한 값을 보이는 것으로 확인되었다. 총 알칼리도와 용존 무기탄소는 염분의 영향을 많이 받는 무기탄소 인자로, 염분의 분포와 유사하게 1년 내내 거의 일정한 값을 보이는 것으로 확인되었다(그림 14). 본 연구에서 획득된 수온, 염분, 총알칼리도 및 용존 무기탄소를 활용하여 현장 pH와 아라고나이트 포화도($\Omega_{\text{aragonite}}$)와 해수 이산화탄소 부분압을 CO2SYS를 사용하여 계산하였다(그림14). 해수의 pH와 아라고나이트 포화도($\Omega_{\text{aragonite}}$)는 2~4월 높은 값을 보이며, 11~12월로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 반면, 해수 이산화탄소 부분압(pCO_2)은 2월에 가장 낮고, 12월로 갈수록 증가하는 양상을 보였다. 대기의 이산화탄소 부분압을 400ppm이라고 가정하면, 2월부터 5월, 3개월 동안은 대기 이산화탄소를 흡수하는 해역으로 판단되며, 이후에는 대기로 이산화탄소를 방출하는 해역으로 추정된다.

남극 세종기지 1년 치 자료 획득과 동시에 마리안 소만에서 계절에 따른 해양환경 변화를 파악하였다. 먼저, 마리안 소만에서 표층 해수 수온의 계절 변화는 남극의 여름철에 해당하는

1월~3월에 가장 높게 확인되었으며 겨울에 해당하는 7월에 가장 낮은 표층 수온을 보였다(그림 15). 표층 해수의 공간적인 분포는, 마리안 소만 입구에서 내측으로 갈수록 감소하는 경향이 확인되었는데, 이는 마리안 소만 내측에 위치한 빙벽의 영향으로 파악된다. 마리안 소만에 위치한 빙벽의 해빙(ice melting)은 마리안 소만의 표층 염분분포에도 영향을 미치는 것으로 확인되었다(그림 16). 빙벽의 해빙(ice melting)으로 유입된 담수에 의한 희석효과는 마리안 소만 내측 표층 해수 염분을 감소시키는 원인으로 작용하였을 것이다. 이러한 공간적인 염분 농도 구배는 겨울철을 제외한 나머지 계절에서 뚜렷하게 확인되었으며, 마리안 소만 내측에서 가장 낮고, 마리안 소만 입구로 갈수록 증가하는 표층 염분의 변화를 보였다. 염분의 영향을 많이 받는 총알칼리도와 용존 무기탄소의 분포양상은 염분의 분포와 유사하게 확인되었다. 마리안 소만에서 획득된 염분, 수온, 무기탄소 인자들을 활용하여 아라고나이트 포화도와 표층 이산화탄소 분압($p\text{CO}_2$)을 CO2SYS 프로그램을 사용하여 계산하였다. 표층 아라고나이트 포화도의 계절적인 분포는 봄철(10월) 1 부근까지 감소하는 것이 확인되었으며, 여름철(12월~2월) 다시 증가하는 경향을 보였다(그림 17). 또한, 마리안 소만에서 아라고나이트 포화도의 공간적인 경향은, 여름철(12월) 가장 큰 포화도 구배를 보였으며, 내측에서 높은 아라고나이트 포화도를 보이고 마리안 소만 입구로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 마리안 소만에서의 표층 이산화탄소 분압의 분포양상은 아라고나이트 포화도의 분포양상과 매우 유사하게 확인되었다(그림 18). 여름철 마리안 소만에서 낮은 이산화탄소 분압은 빙벽의 해빙(ice melting)으로 인해 유입된 담수에 의한 것으로, 해빙(ice melting) 기원의 담수는 낮은 이산화탄소 분압을 보이고 있는 특징이 있다. 이러한 담수의 유입은 마리안 소만 내에서 높은 아라고나이트 포화도를 가질 수 있는 조건이 되었을 것으로 판단된다.

극지연구소

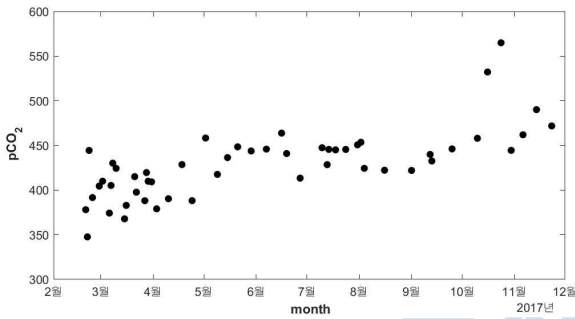
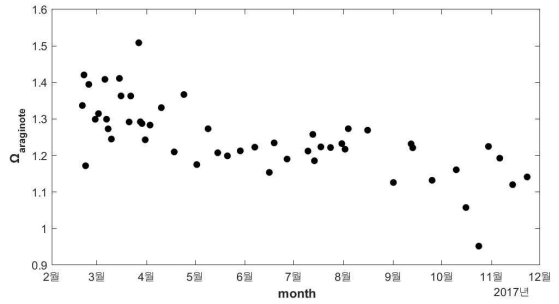
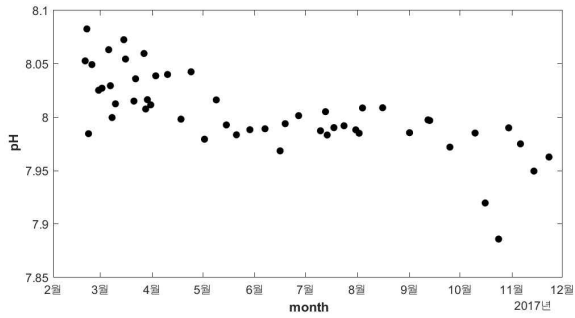
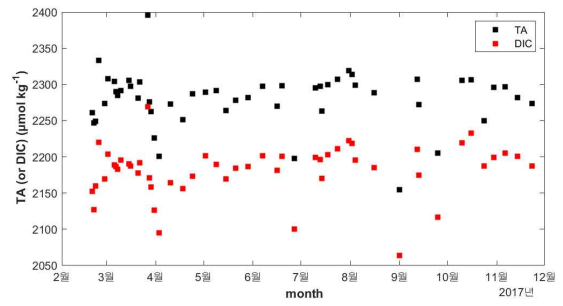
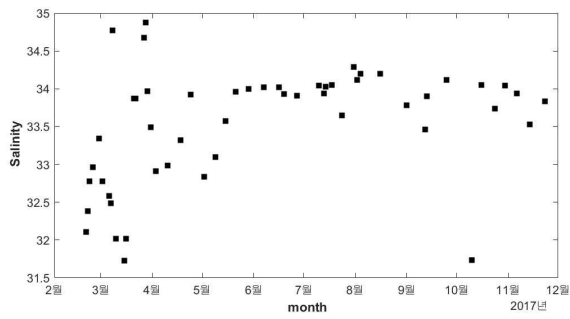


그림 14. 세종기지 해수의 월별 총 알칼리도, 용존 무기탄소, 염분, pH, 아라고나이트 포화도, 해수 이산화탄소 부분압. 세종기지에서 채취된 표층 해수의 (좌) 염분분포, (우) 총 알칼리도와 용존 무기탄소 분포. 연구해역 표층에서 (좌) 분광광도법으로 측정된 pH(pH_{Measured}), (중) 용존 무기탄소 인자(총 알칼리도, 용존 무기탄소)로부터 계산된 pH 분포(pH_{Calculated}), (우) 측정값과 계산 값의 consistency 계산

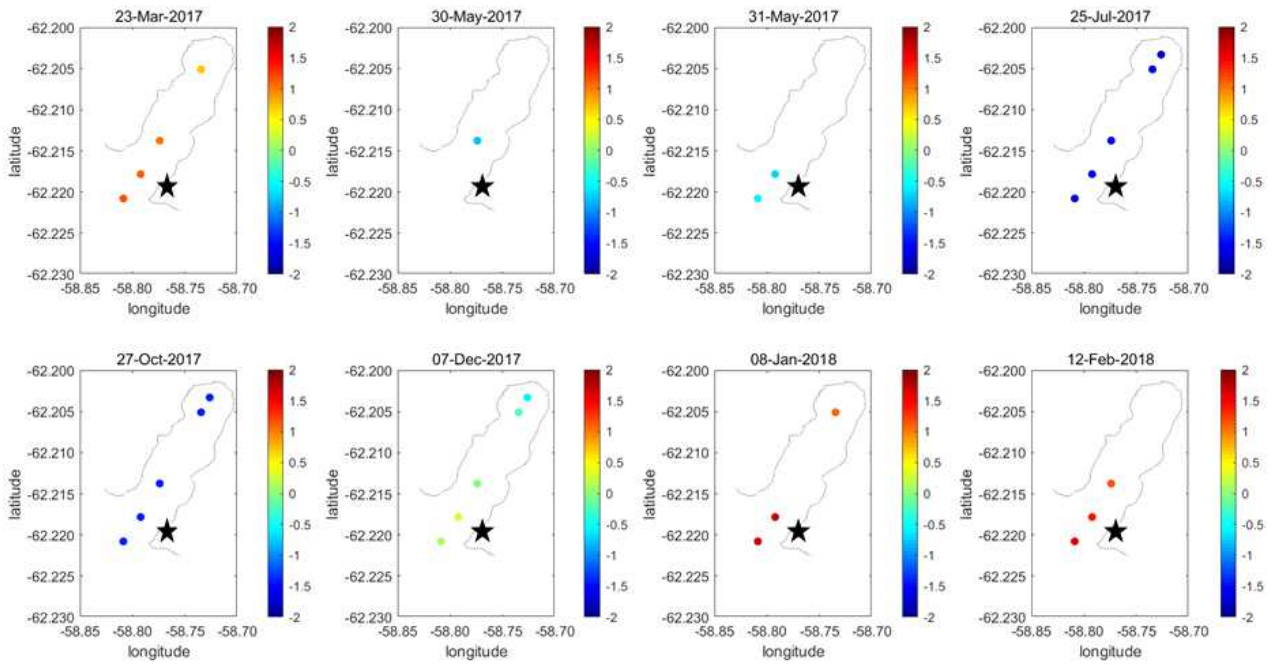


그림 15. 마리아나 소만 표층 수온의 계절(월) 분포

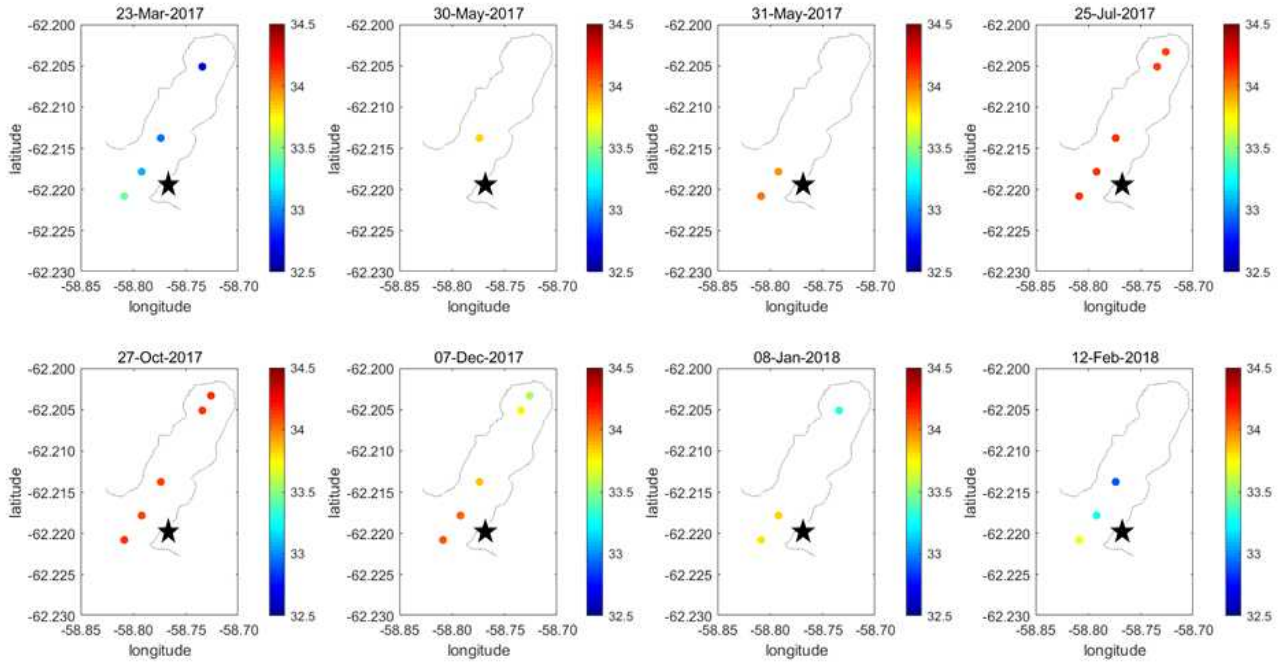


그림 16. 마리아나 소만 표층 염분의 계절(월) 분포

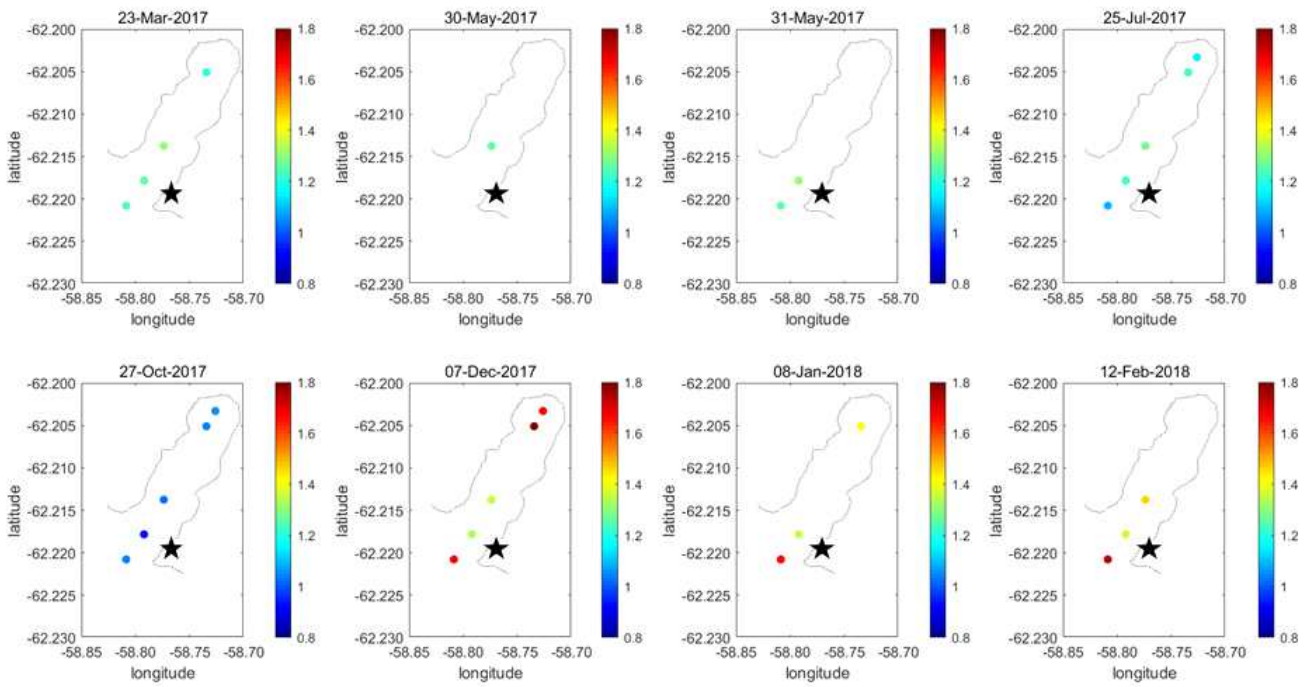


그림 17. 마리안 소만 표층 아라고나이트 포화도의 계절(월) 분포

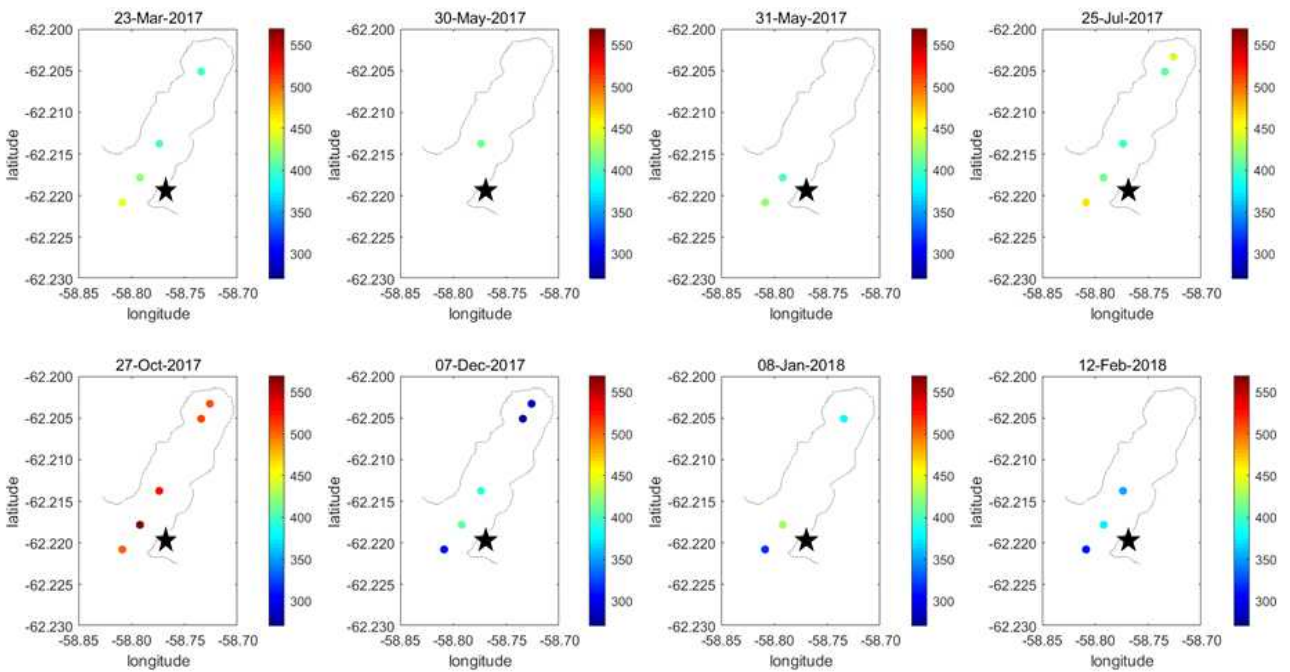
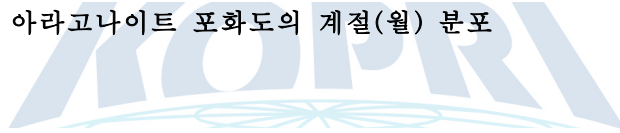


그림 18. 마리안 소만 표층 이산화탄소 분압의 계절(월) 분포

6. 위도에 따른 아라고나이트 포화도(Ω_{Arag}) 경향

북극은 다른 해역보다 해양산성화에 취약한 해역으로 알려져 있다. 해양산성화의 지표중으로 사용되는 익족류의 골 밀도와 해양 무기탄소 인자와의 상관관계를 파악하기 위해서 위도에 따라 익족류 채집을 시도하였으며, 익족류가 채집된 해역의 해양 무기탄소 인자(총 알칼리도, 용존 무기탄소, pH)를 기반으로 계산된 아라고나이트 포화도와 비교를 진행하였다. 연구해역에서 잡힌 익족류는 모두 *Limacina helicina*로 동정 되었다. 익족류의 골 밀도는 일본 해양연구소(JAMSTEC)에서 분석되었다.

본 연구에서 획득된 익족류의 단위 길이당 두께는 위도가 높아질수록 얇아지는 경향을 보였으며, 동시에 평균 골 밀도(Mean CT number)도 감소하는 것으로 확인되었다(그림 19). 또한, 수심별 아라고나이트 포화도($\Omega_{aragonite}$)는 아북극 해에서는 약 80m 부근까지 1 이상의 값을 유지하는 반면, 북극해에서는 표층에서 낮고, 수심이 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다. 아라고나이트 포화도($\Omega_{aragonite}$)와 골 밀도의 관계를 확인하기 위해서 아라고나이트 포화도($\Omega_{aragonite}$)가 1 이상인 값들을 추출, 추출된 값들의 평균과 골 밀도 사이의 경향성을 확인할 결과 매우 유의미한 관계를 보였으며($p < 0.001$), 아라고나이트 포화도($\Omega_{aragonite}$)가 감소할수록 골 밀도(Mean CT number)도 감소하는 것으로 확인되었다(그림 19).

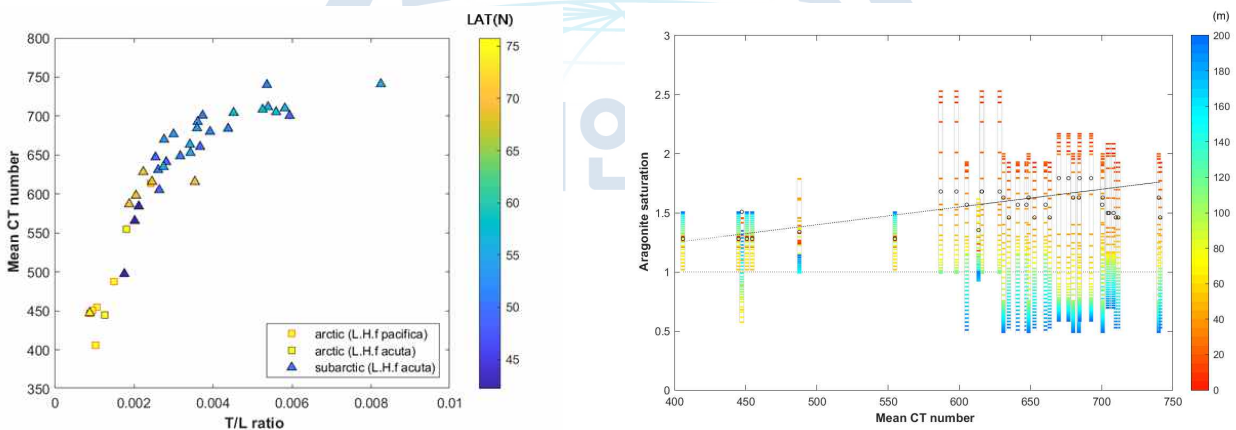


그림 19. (좌) 위도에 따른 T/L ratio와 골 밀도(Mean CT number) 분포 경향, (우) 수심별 아라고나이트 포화도와 골 밀도(Mean CT number) 분포현황. 수심별 아라고나이트 포화도($\Omega_{aragonite}$)와 골 밀도 분포현황. 골 밀도가 1 이상인 값의 평균(○)과 골 밀도는 통계적으로 유의미한 관계를 보임($p < 0.001$).

제 3 절 극지 해역 해양 무기탄소 시스템 인자 상호 일관성 진단

해양 무기탄소시스템의 4가지 인자들(총 알칼리도, 용존 무기탄소, pH, pCO_2) 가운데 2가지 인자를 측정하면, 나머지 2가지 인자는 이미 알려진 해양의 용존성분들의 조성과 화학반응 및 열역학 계수 등을 활용하여 도출할 수 있다. 따라서, 현장에서 3가지 이상의 인자를 측정하

면, 2가지 인자의 값을 통해 다른 인자들의 값을 유추할 수 있으며, 이 추정값을 실측값과 비교하여 해빙(sea ice)의 결빙 및 해빙(ice melting)에 의한 무기탄소 시스템 인자 간의 상호 일관성 진단이 가능하다. 만약 극지 해양환경에서는 이러한 비교에서 유의미한 차이가 발견된다면, 이것은 기존의 알려진 일반적인 대양의 무기탄소시스템과 극지의 그것과의 차이가 존재한다는 것을 의미한다. 북극 지역을 예로 들면, 해양생물 또는 하천을 통해 유입되는 유기물 등의 개입으로 인해, 4가지 탄소 인자 간의 상호 예측에 큰 오류가 포함될 가능성이 높은 해역이다. 현재 극지 연구소에서는 총 무기탄소, 총알칼리도의 개별 관측 및 pCO₂ 표층 연속관측 시스템을 갖추고 활용하고 있지만, 정밀한 pH의 측정에는 진척되지 못하였다. 본 연구팀은 극지연구소에서 수행하고 있는 타 과제(총알칼리도와 총 무기탄소 측정)의 참여연구원들과 협력하여 pH 측정 및 일관성 검증에 관한 연구를 진행할 계획이다.

1. 해수 pH 측정기반 구축 및 현장 자료 확보

pH는 온도 등의 주변 환경에 매우 민감하고 시료의 변질이 쉬우므로 시료의 보관이 상대적으로 어려운 측면이 있다. 따라서, 신뢰성 있는 값을 얻기 위해서는 현장에서 빠른 시간 내에 측정되어야 한다. 해수 pH를 측정하는 방법은 적정법(potentiometric)과 분광법(spectrophotometric)이 있으며 분광법으로 측정된 pH가 적정법으로 측정된 값보다 높은 정확·정밀도를 가지는 것으로 알려져 있다(Easley and Byrne, 2012). 해수 pH 측정 시스템의 정확·정밀도를 검증하기 위하여 해수 이산화탄소 표준물질(CO₂ CRM, Batch #161)을 사용하여 검증을 진행하였다. 표준물질의 총알칼리도와 용존 무기탄소의 농도를 CO2SYS 프로그램을 통해 유추한 pH 값(7.816)을 실측치와 비교하였다. 반복실험 결과 측정 pH는 7.807±0.005(N=20)로 약 99.88%의 정확도를 보이는 것으로 확인되었다.

2. 무기탄소 시스템 인자의 상호 일관성 진단

극 지역의 해양은 해빙이나 육상 기원 담수의 영향이 크기 때문에 무기탄소 시스템의 일관성이 깨질 가능성이 있는 해역으로 추측된다. 본 연구에서는 담수와 같은 외부 요인에 의해 해양 무기탄소 시스템 인자들 간의 일관성에 영향을 받는지 확인하기 위하여 선상에서 분광광도계를 사용하여 pH를 측정하고, 같은 시료에서 측정된 총알칼리도와 용존 무기탄소의 농도를 활용하여 계산된 pH 간에 차이가 있는지 다음의 식을 사용하여 비교 연구를 진행하였다.

$$pH_{\text{Measured}} / pH_{\text{Calculated}} * 100 (\%)$$

가. 표층 pH 분포 및 일관성 검증

위도 65.1~78.0°N의 해역 총 35개의 정점에서 획득한 표층 pH의 분포를 그림 20에 도식하였다. 표층 pH_{Measured}는 7.17~8.20, pH_{calculated}는 7.17~8.19의 범위를 보였으며, 위도가 높아짐에 따라 표층 pH는 감소하는 경향을 보였다. 위도 75°N 이상의 해역은 조사 기간 동안 해빙(sea ice)의 형성 및 제거 영향을 받은 해역으로, 낮은 표층 pH는 해빙 기원 담수의 영향 때문으로 판단된다. pH_{Measured}와 pH_{calculated} 간의 일관성 비교 결과는, 연구해역 표층 pH의 consistency는 평균 99.7%로 확인되었다. 조사 기간 동안 해빙(sea ice)의 형성 및 제거 영향을 받은 것으로 예상되는 위도 75°N 이상의 해역의 consistency는 99.8±0.3%로 확인되었다. 또한, 위도 75°N 이하의 해역에서의 consistency는 99.5±1.1%로 확인되어 해빙의 형성 및 제거에 따른 해양 무기탄소 시스템 인자들 사이의 일관성 차이는 발견되지 않았다고 판단된다(그림 20).

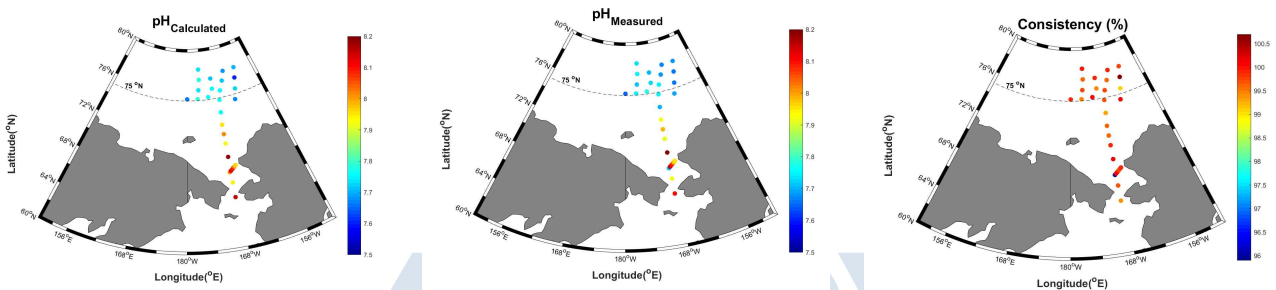


그림 20. 2017년 북극 항해 중 측정된 pH와 계산된 pH의 결과 비교. 연구해역 표층에서 (좌) 분광광도법으로 측정된 pH(pH_{Measured}), (중) 용존 무기탄소 인자(총 알칼리도, 용존 무기탄소)로부터 계산된 pH 분포(pH_{Calculated}), (우) 측정값과 계산 값의 consistency 계산

위도 62.0~67.7°S의 해역 총 13개의 정점에서 획득한 표층 pH의 분포를 그림 21에 도식하였다. 표층 pH_{Measured}는 7.60~7.69, pH_{calculated}는 7.62~7.74의 범위를 보였다. pH_{Measured}와 pH_{calculated} 간의 일관성 비교 결과는, 연구해역 표층 pH의 consistency는 평균 99.8±0.3%로 확인되어 북극과 마찬가지로 남극에서도 해빙의 형성 및 제거에 따른 해양 무기탄소 시스템 인자들 사이의 일관성 차이는 발견되지 않았다고 판단된다(그림 21).

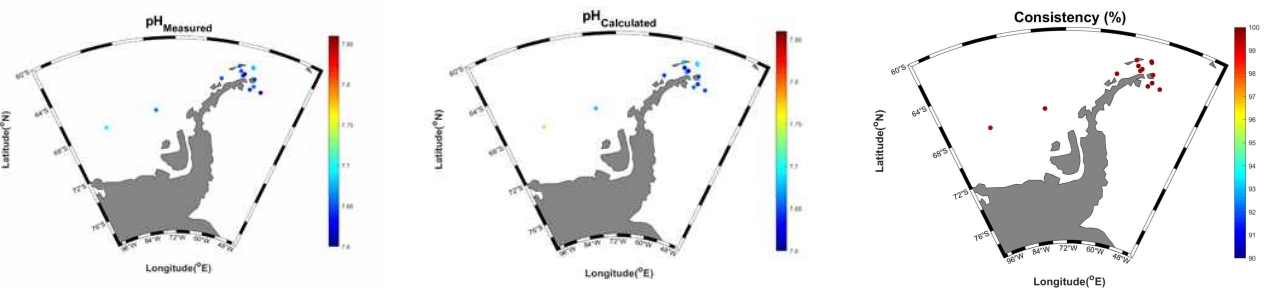


그림 21. 2018년 남극 항해 중 측정된 pH와 계산된 pH의 결과 비교. 연구해역 표층에서 (좌) 분광광도법으로 측정된 pH(pH_{Measured}), (중) 용존 무기탄소 인자(총 알칼리도, 용존 무기탄소)로부터 계산된 pH 분포(pH_{Calculated}), (우) 측정값과 계산 값의 consistency 계산

나. 수직 pH 분포 및 일관성 검증

북극 연구해역의 pH의 수직적인 분포 결과, 연구해역의 $\text{pH}_{\text{Measured}}$ 는 7.17~8.21의 범위를 보였다. $\text{pH}_{\text{Measured}}$ 와 $\text{pH}_{\text{calculated}}$ 간의 일관성 비교 결과 $99.7\pm 0.7\%$ 로 확인되어 해빙의 형성 및 제거에 따른 무기탄소 시스템 인자들 사이의 일관성 차이는 발견되지 않은 것으로 판단된다(그림 22).

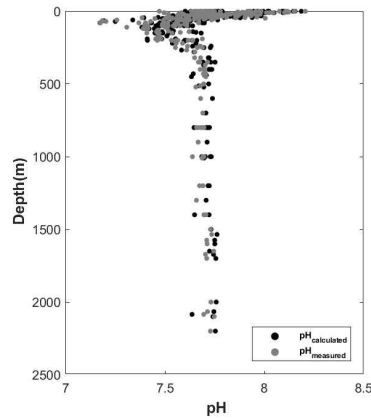


그림 22. 2017년 북극 항해 중 측정된 pH와 계산된 pH 결과의 수직 비교. 연구해역에서 채취된 해수의 분광광도법으로 측정된 pH($\text{pH}_{\text{Measured}}$)와 용존 무기탄소 인자로부터 계산된 pH($\text{pH}_{\text{Calculated}}$)의 수직 분포 비교

극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도

구분	연구개발 목표	달성도 (%)	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
2016년도	○ 극지 해양 탄소 인자 자료 수집 및 예측식 개발	100	극지 해역의 해양무기탄소 시스템 현황 파악	- SoCAT 자료를 활용한 남/북극 지역 이산화탄소 증가율, 계절변동 파악
			극지 해역의 해양무기탄소 예측식 개발	- 통계자료, Stepwise fit 기반의 지역별 pCO ₂ 예측 모형 제시 - 가능한 모든 조합을 고려함 (단 2차식까지. interaction term 제외)
	○ 해수 pH 측정기반 구축 및 현장 자료 확보	100	해수 pH 측정기반 구축	- m-cresol purple 지시약을 사용한 분광학적 해수 pH 측정 - 해수 표준물질의 무기탄소인자를 통한 pH 추정값과 실측값 비교
2017년도 ~ 2018년도	○ 해빙(sea ice) 형성 및 제거 과정이 해양 탄소순환에 미치는 영향 파악	100	해양 무기탄소 인자 측정	- VINDTA 3C를 사용한 해수 총알칼리도 측정 - 해수 표준물질을 사용한 자료처리 - 북극 해빙(sea ice) 및 melt pond 시료 분석
			해빙 무기탄소 인자 측정	- 북극해빙시료/남극 해빙 시료 획득 - VINDTA 3C를 활용한 해빙 시료 총알칼리도 측정
			여름철 해빙(sea ice) 감소가 북극 해양 탄소순환에 미치는 영향	- 분석된 북극 해빙 시료의 결과값을 활용하여 여름철 동시베리안해의 표층 혼합층 내의 탄소순환 변화예측
	○ 극지 해역의 해양 무기탄소 시스템 인자의 상호 일관성 진단	100	익족류의 골 밀도와 아라고나이트 포화도($\Omega_{\text{aragonite}}$)의 상관관계	- 북극과 아북극의 아라고나이트 포화도와 익족류의 골 밀도 변화 파악
표층/수직 pH 분포 및 일관성 검증			- 분광학적 방법으로 측정된 pH와 무기탄소인자를 통해 추정된 pH의 상호 비교 진행	

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 과제에의 연구 결과는 기후변화와 극지 환경 변화에 의한 기후변화 피드백 작용에 대한 모형 개발에 기초 자료로 활용, 그 결과의 신뢰성을 향상시키는 기여를 할 수 있을 것이며, 또한, 극지 연구의 중요성을 알리고, 현재 기후/환경변화의 심각성을 환기시킬 수 있는 자료로 활용가능할 것으로 예상된다. 향후 해양 탄소순환과 관련된 다른 해양 생지화학적 인자들로 그 연구범위를 확장시킬 수 있는 계기가 될 것이며, 더불어 해양산성화에 취약한 극지역에서의 해양산성화 연구로 확장성을 가지고 있다. 이를 통해 선제적으로 기후 및 환경변화에 대응할 수 있는 가능성이 확대될 것으로 예상되고, 이는 국가적 차원의 효과적인 대응전략 확보로 관련 비용의 감소 효과, 미래 불확실성의 감소로 인한 투자 확대 등의 간접적인 경제 효과로 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로, 극지 해양의 연구 분야 확대 및 다양성 확보로 우리나라의 국제적 지위에 걸맞도록 극지 연구의 외연을 확장하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.



제 6 장 참고문헌

Bates, N. R., Moran, S. B., Hansell, D. A., & Mathis, J. T. (2006). An increasing CO₂ sink in the Arctic Ocean due to sea ice loss. *Geophysical Research Letters*, 33(23).

Bates, N. R., Garley, R., Frey, K. E., Shake, K. L., & Mathis, J. T. (2014). Sea-ice melt CO₂ - carbonate chemistry in the western Arctic Ocean: meltwater contributions to air - sea CO₂ gas exchange, mixed-layer properties and rates of net community production under sea ice. *Biogeosciences*, 11(23), 6769-6789.

Brown, K. A., Miller, L. A., Mundy, C. J., Papakyriakou, T., Francois, R., Gosselin, M., ... & Tortell, P. D. (2015). Inorganic carbon system dynamics in landfast Arctic sea ice during the early melt period. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5), 3542-3566.

Cai, W. J., Chen, L., Chen, B., Gao, Z., Lee, S. H., Chen, J., ... & Huang, W. J. (2010). Decrease in the CO₂ uptake capacity in an ice-free Arctic Ocean basin. *Science*, 329(5991), 556-559.

Caldeira, K., & Wickett, M. E. (2003). *Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH*. *Nature*, 425(6956), 365.

Comeau, S., Jeffree, R., Teyssié, J. L., & Gattuso, J. P. (2010). Response of the Arctic pteropod *Limacina helicina* to projected future environmental conditions. *PloS one*, 5(6), e11362.

Fransson, A., Chierici, M., Miller, L. A., Carnat, G., Shadwick, E., Thomas, H., ... & Papakyriakou, T. N. (2013). Impact of sea ice processes on the carbonate system and ocean acidification at the ice water interface of the Amundsen Gulf, Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(12), 7001-7023.

Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., ... & Knowlton, N. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *science*, 318(5857), 1737-1742.

Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., ... & Key,

R. M. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437(7059), 681.

Robbins, L. L., Wynn, J. G., Lisle, J. T., Yates, K. K., Knorr, P. O., Byrne, R. H., ... & Takahashi, T. (2013). Baseline monitoring of the Western Arctic Ocean estimates 20% of Canadian Basin surface waters are undersaturated with respect to aragonite. *PloS one*, 8(9), e73796.

Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., ... & Millero, F. J. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *science*, 305(5682), 367-371.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., ... & Miller, H. L. (2007). Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., ... & Watson, A. (2009). Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8-10), 554-577.

Tan, F. C., Dyrssen, D., & Strain, P. M. (1983). Sea-ice meltwater and excess alkalinity in the East Greenland current. *Oceanologica acta*, 6(3), 283-288.

Yamamoto, A., Kawamiya, M., Ishida, A., Yamanaka, Y., & Watanabe, S. (2012). Impact of rapid sea-ice reduction in the Arctic Ocean on the rate of ocean acidification. *Biogeosciences*, 9(6), 2365-2375.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 PAP사업 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 PAP 사업으로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.