

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “다중선형회귀를 이용한 북태평양 해역의 탄산칼슘 포화도 분포 연구”과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2015. 2. 28.

총괄연구책임자 : 김 태 욱

참 여 연 구 원 : 박 근 하

보고서 초록

과제고유 번호	PE99246	해당단계 연구기간	2014.01.01.- 2014. 12.01	단계 구분	1단계
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	다중선형회귀를 이용한 북태평양 해역의 탄산칼슘 포화도 분포 연구			
	세부과제명				
연구책임자	김태욱	해당단계 참여연구원 수	총 : 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
		총연구기간 참여연구원 수	총 : 2 명 내부: 2 명 외부: 명		총 연구비
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 화학연구본부		참여기업명		
국제공동연구 위탁연구					
요약				보고서 면수	50
<p>○ PACIFICA 자료를 활용하여 아라고나이트의 포화도를 예측하는 다중선형회귀 기반의 알고리즘을 개발하였음 (독립변수: 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량)</p> <p>○ 개발된 알고리즘은 3개의 시계열 자료(HOT, K2, KNOT)와 태평양을 북위 30도를 따라 가로지르는 공간자료인 P02 자료를 이용하여 검증하였고, 알고리즘의 평균 오차인 0.1 범위 내에서 검증자료의 아라고나이트 값을 예측해냈음.</p> <p>○ 개발된 알고리즘을 1도의 공간해상도를 가진 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량의 기후값과 결합하여, 북태평양 해역의 50미터와 100미터 깊이에서 아라고나이트의 포화도의 계절 변동을 연구한 결과, 아라고나이트의 계절적 변동폭은 0.4-0.6에 이르렀음.</p> <p>○ 이러한 변화는 주로 중위도 지역과 열대 북동태평양 해역에서 발생하였고, 주요 원인은 수직혼합과 용승의 계절적 변동으로 인한 아라고나이트 저포화 해수의 계절적 연직 변동이었음.</p> <p>○ 북태평양 지역에서 100% 아라고나이트 포화도 깊이의 계절 변동은 개발된 예측 알고리즘의 오차범위 내에서 유의미하지 않았음.</p> <p>○ 본 연구 결과는 최근에 발표된 표층의 아라고나이트의 기후값과 상호보완적으로 사용될 수 있음.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	북태평양, 탄산칼슘 포화도, 해양 산성화, 탄소순환, 계절변화			
	영 어	North Pacific Ocean, CaCO ₃ saturation, Ocean acidification, Carbon cycle, Seasonal variation			

요 약 문

I. 제 목

다중선형회귀를 이용한 북태평양 해역의 탄산칼슘 포화도 분포 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

해양산성화는 인류가 당면하고 있는 핵심 해양생태계 문제 중에 하나로, 주요 요인은 화석연료 기반의 이산화탄소이다. 하지만, 최근의 연구에 따르면, 용승과 같은 물리적 현상에 의해서 해양산성화가 계절적으로 크게 변동하는 것으로 알려져 있다. 북태평양은 해양산성화에 가장 취약한 대양 지역이지만, 이와 같은 해양산성화 인자의 계절변동과 관련된 연구가 매우 미흡하였다. 본 과제는 북태평양에서 해양산성화의 지표로 사용되는 아라고나이트(탄산칼슘의 한 형태) 포화도를 예측할 수 있는 다중선형회귀 기반의 알고리즘을 개발하고, 이것을 이용하여 북태평양의 아라고나이트 포화도의 계절 변동을 살펴 보는데 그 목적이 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구기간: 2014년 1월 1일 - 2014년 12월 31일
2. 연구개발 내용
 - 가. 다중선형회귀 기반의 아라고나이트 포화도 예측 알고리즘 개발
 - 나. 예측 알고리즘의 검증
 - 다. 북태평양 지역의 아라고나이트 포화도의 계절변동 및 원인 파악

IV. 연구개발결과

PACIFICA 자료를 활용하여 아라고나이트의 포화도를 예측하는 다중선형회귀 기반의 알고리즘을 개발하였다. 독립변수로는 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량이 최적의 조합인 것으로 나타났다. 개발된 알고리즘은 3개의 시계열 자료(HOT, K2, KNOT)와 태평양을 북위 30도를 따라 가로지르는 공간자료인 P02 자료를 이용하여 검증하였고, 알고리즘의 평균 오차인 0.1 범위 내에서 검증자료의 아라고나이트 값을 예측해냈다. 개발된 알고리즘을 1도의 공간해상도를 가진 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량의 기후값과 결합

하여, 북태평양 해역의 50미터와 100미터 깊이에서 아라고나이트의 포화도의 계절변동을 연구한 결과, 아라고나이트의 계절적 변동폭은 0.4-0.6에 이르렀으며, 이러한 변화는 주로 중위도 지역과 열대 북동태평양 해역에서 발생하였다. 이러한 계절변동의 원인은 수직혼합과 용승의 계절적 변동으로 인한 깊은 곳의 아라고나이트가 저포화된 해수의 계절적 연직 변동이 있었다. 북태평양 지역에서 100% 아라고나이트 포화도 깊이의 계절 변동은 개발된 예측 알고리즘의 오차범위 내에서 유의미하지 않았다. 본 연구 결과는 최근에 발표된 표층의 아라고나이트의 기후값과 상호보완적으로 사용될 수 있을 것이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

연구결과는 북태평양의 산성화 변동성에 대한 과학적 이해를 넓히기 위한 기초자료로 활용될 것이며, 본 연구에서 적용한 방법론은 대서양과 인도양과 같은 광대한 해역에 적용할 수 있을 것이다. 본 연구결과는 국내에서 해양산성화 관련 프로젝트를 개발하기 위한 자료로 활용할 수 있을 것이라 예상된다. 본 연구의 방법론과 내용은 국내 연안 및 동해, 동중국해 등에도 동일하게 적용할 수 있기 때문에, 국내의 해양산성화 현황을 파악하기 위한 방안으로 활용될 수 있을 것이다.

S U M M A R Y

I. Title

Studies on CaCO_3 saturation state in the North Pacific using multi-parameter linear regression

II. Necessities and Objectives of the Study

Ocean acidification is one of the most significant ocean environmental threats. The primary cause for ocean acidification is the input of fossil fuel CO_2 into the ocean. However, recent studies indicated that seasonal variation of ocean acidification can be significant in the North Pacific Ocean, which is a major basin highly susceptible to ocean acidification. In this study, we develop the algorithm to predict the aragonite (a meta stable form of CaCO_3) saturation state and use it to examine the seasonal variation of the aragonite saturation state.

III. Contents and scopes of the study

1. Study period: January 1, 2014 - December 31, 2014
2. Contents and scopes of the study
 - a. Development of aragonite prediction algorithm based on multi-parameter linear regression
 - b. Evaluation of the derived algorithm
 - c. Understanding of seasonal variation of aragonite saturation state in the North Pacific Ocean and its possible causes.

IV. Results

Seasonal variability of the aragonite saturation state (Ω_{AR}) at the 50 m and 100 m depths of the North Pacific Ocean (NPO) was investigated using multiple linear regression (MLR), with predictor variables of potential temperature (Θ) and apparent oxygen utilization (AOU). The MLR algorithm calibrated using PACIFICA dataset accurately predicted the Ω_{AR} of evaluation datasets (HOT, K2, KNOT, P02) with

acceptable uncertainty ($<0.1 \Omega_{AR}$). Seasonal amplitudes estimated from algorithm with climatology of Θ and AOU approached 0.4 - 0.6 W_{AR} at 50 - 100 m of the mid-latitude western NPO, and were often higher in the tropical eastern NPO. These significant variations were caused by the seasonal change in vertical mixing and thermocline depth that control the entrainment of corrosive waters from deeper depths. However, the 100% saturation horizon was not significantly altered seasonally over the study area. Our MLR-based subsurface W_{AR} climatology is complementary to surface climatology based on pCO_2 measurements.

V. Application plan of the results of the study

The results of the study can be used as the basic background to better understand the seasonal variability of aragonite saturation state in the North Pacific Ocean. The methodology used in the study can be applied to other major basins like the Indian and Atlantic Oceans as well as domestic coastal waters and marginal seas around the Korea Peninsula.

C O N T E N T S

Summary	v
Contents	vii
List of Figures	ix
List of Tables	xi
Chapter I Outline of the study	1
Section 1 Necessities of the study	1
Section 2 Contents of the study	5
Chapter II Status of domestic and oversea technology	7
Section 1 Trend of study	7
Section 2 Recent advances in the study area	9
Section 3 Weak points of current technology status	11
Section Future outlook	11
Chapter III Contents and results of the study	12
Section 1 Data used for the development and evaluation of the algorithm	12
Section 2 Development of the aragonite prediction algorithm	15
Section 3 Evaluation of the aragonite prediction algorithm	26
Section 4 Seasonal variation of the aragonite saturation state	30
Chapter IV Achievements of objectives and contributions to the related fields	44
Section 1 Achievements of objectives	44
Section 2 Contributions to the related fields	44
Chapter V Application plans of the results of the study	46
Chapter VI References	47

목 차

요 약 문	iii
목 차	viii
그림목차	ix
표 목 차	xi
제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1절 연구의 필요성	1
제 2절 연구 개발의 범위 및 개요	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황	7
제 1절 국내외 연구개발 동향	7
제 2절 지금까지의 연구개발현황	9
제 3절 현기술 상태의 취약성	11
제 2절 앞으로의 전망	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	12
제 1절 알고리즘의 개발과 검증에 사용된 자료	12
제 2절 알고리즘의 개발	15
제 3절 알고리즘의 검증	26
제 4절 아라고나이트 포화도의 계절적 변화	30
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	44
제 1절 연구목표 달성도	44
제 2절 관련분야의 기여도	44
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	46
제 6 장 참고문헌	47

List of Figures

Figure 1	Ocean pH trend in the past (Tuley et al., 2006)	1
Figure 2	Aragonite saturation horizon in the North Pacific Ocean (Feely et al., 2004)	2
Figure 3	Impact of ocean acidification on marine biology (From ‘Ocean Acidification: Summary for Policymakers’)	4
Figure 4	Expected change due to ocean warming and acidification (Hoegh-Guldberg et al., 2007).....	5
Figure 5	International collaboration efforts.....	8
Figure 6	(Left) Temperature, (middle) oxygen concentration, (right) predicted aragonite saturation state in the coast of Oregon (Juraneck et al., 2009).....	9
Figure 7	Time-series of temperature, oxygen, pH, aragonite saturation in the North Pacific (49.57°N, 138.68°W) (Juraneck et al., 2011).....	10
Figure 8	Aragonite saturation horizon in the East Sea (Kim et al., 2010).....	11
Figure 9	Data stations included in the PACIFICA dataset	12
Figure 10	Station map for the PACIFICA data and time-series stations (HOT, K2, KNOT) used to derive and evaluate the MLR-based algorithms (Red: K2, Orange: KNOT, Yellow: HOT, Blue: PACIFICA)	13
Figure 11	Data stations for the P02 cruise (CIDIAC)	14
Figure 12	Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature and AOU as predictor variables	18
Figure 13	Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the algorithm using potential temperature and AOU as predictor variables	18
Figure 14	Interpolated coefficient field for the AOU term of the algorithm using potential temperature and AOU as predictor variables	19
Figure 15	Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature and nitrate as predictor variables	19
Figure 16	Interpolated coefficient field for the nitrate term of the algorithm using potential temperature and nitrate as predictor variables	20
Figure 17	Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the algorithm using potential temperature and nitrate as predictor variables	20
Figure 18	Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables	21
Figure 19	Interpolated coefficient field for the AOU term of the algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables	21
Figure 20	Interpolated coefficient field for the nitrate term of the algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables	22
Figure 21	Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the	

	algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables	22
Figure 22	Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables	24
Figure 23	Interpolated coefficient field for the AOU term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables	24
Figure 24	Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables	25
Figure 25	Interpolated coefficient field for the potential temperature \times AOU term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables	25
Figure 26	Difference between measured and predicted Ω_{AR} (HOT)	28
Figure 27	Difference between measured and predicted Ω_{AR} (KNOT)	28
Figure 28	Difference between measured and predicted Ω_{AR} (K2)	29
Figure 29	Seasonal biases (Blue: HOT, Green: K2, Red: KNOT)	29
Figure 30	Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (50m)	33
Figure 31	Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (100m)	34
Figure 32	Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (150m)	35
Figure 33	Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (200m)	36
Figure 34	Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (50m)	37
Figure 35	Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (100m)	38
Figure 36	Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (150m)	39
Figure 37	Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (200m)	40
Figure 38	Seasonal variation in the 20°C isotherm	41
Figure 39	Comparison of Ω_{AR} seasonal amplitudes in the tropical NPO taken from O ₂ -based and MLR-based estimations	41
Figure 40	Seasonal changes in the 100% Ω_{AR} (unit; m)	42
Figure 41	Seasonal changes in the 150% Ω_{AR} (unit; m)	43
Figure 42	Seasonal changes in the 200% Ω_{AR} (unit; m)	43

List of Tables

Table 1	Contents and objectives of the study	6
Table 2	Coefficient of determination and Root Mean Squared Error	16
Table 3	Achievements of the research objectives	44

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1절 연구의 필요성

1. 연구개발의 배경

- 화석연료 사용으로 부수적으로 발생하는 CO₂의 대기축적으로 인해, 지구온난화, 극지방 해빙과 해수면 상승, 각종 기후변화 등의 전 지구적 규모의 환경문제들이 발생하고 있음.
- 해양은 이러한 환경적 부작용을 초래하고 있는 CO₂의 1/4 - 1/2을 흡수하여(해양은 현재 매일 2천 4백만톤의 CO₂를 흡수하고 있음) 지구환경 변화의 폭을 감소시키는 긍정적 역할을 하여 왔으나, 또 다른 부작용으로 해양산성화를 겪고 있음. 해양산성화는 해수의 pH가 감소하는 현상을 일컫음.
- 해수의 pH는 과거 5천5백만년 동안 매우 안정적으로 유지되어 왔으나, 인간활동에 의해서 최근 200년간 0.1 정도 감소(H⁺ 농도로 26% 증가)했으며, 이 추세가 계속될 경우 향후 2100년까지 0.3 정도의 감소(H⁺ 농도로 170% 증가)가 예상되고 있음. 이러한 최근의 pH 감소 속도는 5천5백만년 전에 발생했던 해양산성화 이벤트보다 약 10배 가량 빠른 것임.

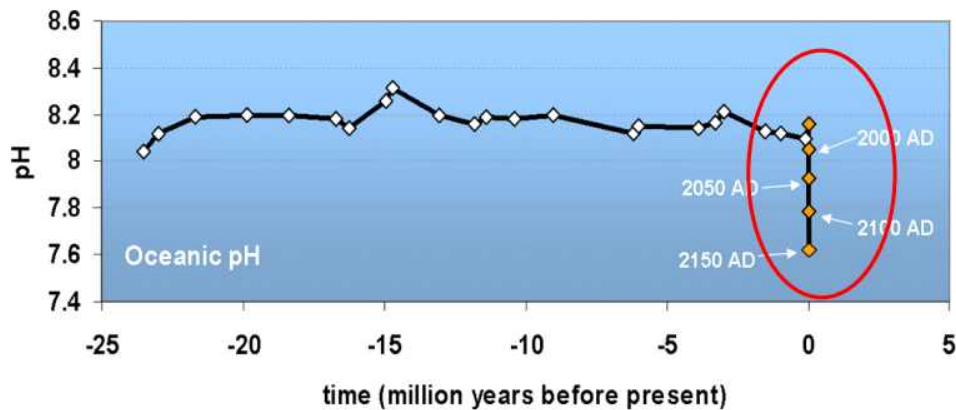


Figure 1 Ocean pH trend in the past (Tuley et al., 2006)

- 해양산성화는 해양 CO₂ 시스템의 변화로 이어져서, 탄산염(CO₃²⁻)의 농도가 감소하고 중탄산염(HCO₃⁻)의 농도가 증가하는 결과를 초래함. 결과적으로 해양의 탄산칼슘(CaCO₃)의 포화도를 감소시킴.
- 탄산칼슘의 해수 포화도는 석회외각을 가지고 있는 해양생물들의 성장과 번성에 있어 매우 중요한 요소이며, 이러한 생물군은 해양생태계에서 1차 생산을 담당하는 등의 중요한 지위를 가지고 있음.

- 따라서 탄산칼슘의 포화도 감소는 해양생태계의 건전성을 위협할 것이라고 예상되는 바이며, 실제로도 최근의 연구와 피해사례들에 의해서 부정적 영향들이 밝혀지고 있음.
- 이러한 우려 속에서 해양산성화가 해양생태계에 미치는 영향에 대한 사회, 경제, 과학적으로 관심이 크게 증대되고 있으며, 유관 국제기구들을 통해서도 해양산성화 이슈가 주요 문제로 다루어지고 있음. 해양 선진국들도 해양생태계에 대한 위협을 인식하고 앞 다투어 해양산성화 연구를 진행하고 있음.
- 대양 가운데 해양산성화의 위협을 가장 크게 받고 있는 지역은 북태평양임. 북태평양은 아라고나이트(Aragonite, 탄산칼슘의 한 형태)의 포화 깊이가 불과 수십에서 수백 미터의 범위 내에 분포하고 있기 때문에(대서양은 수천 미터 깊이에서도 포화도 100% 이상이 유지됨), 해양산성화로 인해 해양생물이 영향을 받을 여지가 매우 큼.
- 특히, 북태평양의 고위도 지역은 2100년에 이르렀을 때, 표층까지 아라고나이트의 포화도가 1 이하로 떨어질 것이라고 예상되는 지역임.

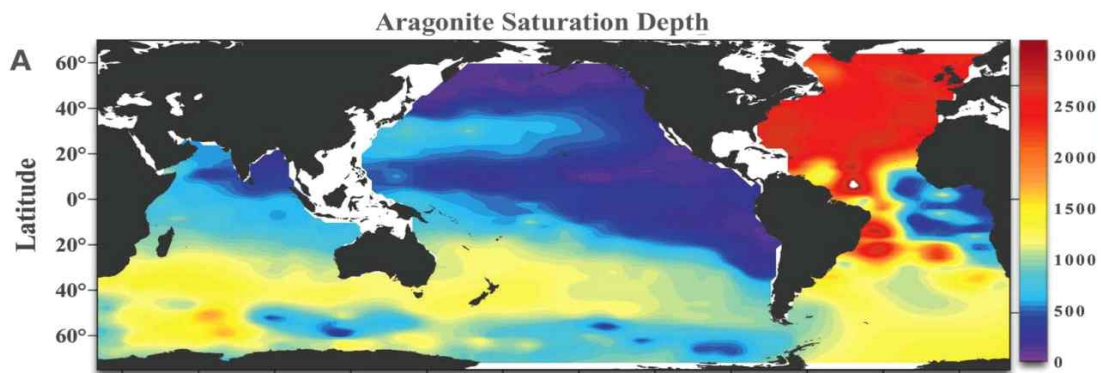


Figure 2 Aragonite saturation horizon in the North Pacific Ocean (Feely et al., 2004)

- 북태평양 지역의 해양산성화의 높은 위협수준의 위협에도 불구하고, 아직까지도 이 지역에서의 탄산칼슘의 포화도 분포에 관한 연구는 대부분 지역적으로 이루어지고 있으며 최근 20년간의 광범위한 조사에도 불구하고 자료가 충분치 못한 실정임.

2. 연구사업의 필요성

가. 기술적 측면

- 일반적으로 해수 중에 탄산칼슘의 포화도를 유추하는 방법으로, 해양 CO₂ 시스템의 4가지 인자인 pH, CO₂ 분압 (pCO₂), 용존무기탄소(DIC; Dissolved Inorganic Carbon), 총알칼리도(TA; Total Alkalinity) 가운데 2 가지 이상을 측정하여 열역학적 모형을 이용하여 해수 탄산염의 농도를 계산해내는 방식을 사용함.

- 위의 4가지 인자 가운데, pH와 pCO₂는 측정이 상대적으로 불안정하기 때문에 일반적으로 DIC와 TA를 활용함.
 - 하지만, 이들 인자는 연속관측이 쉽지 않고 측정시간이 상대적으로 길기 때문에 해양관측으로 얻을 수 있는 자료의 수가 제한적인 단점이 있음.
 - 게다가, TA와 DIC의 측정은 불과 0.1%의 오차를 요구하기 때문에 시료의 분석 자체에도 어려움이 존재함.
- 1990년대부터 국제 해양조사 프로그램을 통해서 해양 CO₂ 인자의 전 지구적인 조사가 진행되어 왔으나, 선박을 이용한 조사의 시·공간적, 비용적 한계와 TA/DIC의 측정횟수 제한 때문에 여전히 대부분의 해양에서는 CO₂ 인자가 측정되지 못함. 결론적으로 측정만으로는 시·공간적 분포에 대한 연구에 한계가 있음.
- 이러한 한계를 극복하기 위한 수단으로, TA/DIC보다 측정도 용이할 뿐만 아니라 고해상도로 축적된 자료가 많은 온도, 염분, 산소, 영양염 등의 해양학 인자들을 활용하여 탄산칼슘의 포화도를 예측함으로써, 측정으로 인한 공간적 분포의 한계를 채우는 방안이 대두됨.
- 이 방안은 이론적 배경도 충분함. 탄산칼슘의 포화도는 열역학적으로 온도, 염분과 압력의 영향을 받으며 생지화학적으로도 산소 및 영양염 등에 의해서도 영향을 받기 때문임.
- 이 방안은 일부 지역에서 적용된 바 있지만, 태평양 해역 등의 넓은 지역에 걸쳐서 일괄적으로 적용된 바는 현재까지 없음.

나. 경제·산업적 측면

- 수산물은 10억명 이상의 인류에게 주요 단백질 공급원의 역할을 하고 있으며, 세계 인구의 10%가 수산업에 종사하고 있고 소규모 연안 지역의 경우에는 수산업 종사자가 인구의 90%에 이르기도 함.
- 따라서 해양산성화, 탄산칼슘 포화도의 감소 등으로 발생하는 해양생태계의 연쇄적인 변화는 수산업에 종사하는 인류의 삶에 직접적 영향을 미치게 되며, 수산물을 소비하는 인구들에게도 영향을 미칠 것임.
- 조개, 굴 등의 연체동물군, 성게 등의 극피동물군, 새우, 게와 같은 갑각류, 그리고 산호초와 정어리와 같은 일부 어류군 등이 해양산성화에 의해서 직·간접인 영향을 받음.
- 이들의 현재 경제적 추산가치는 240억 달러(연체동물군), 7억 달러(극피동물군), 370억 달러(갑각류), 650억 달러(어류군), 300-4000억 달러(산호)에 이르는 것으로 알려져 있음. 따라서 해양산성화로 인한 이들 해양생물의 피해는 상당한 경제적 문제로 이어질 수 있음.
- 다른 연구에 의하면, 2100까지 산성화로 예상되는 연체동물군의 피해는 현재가치로

1300억 달러에 이를 것이라 예상됨.

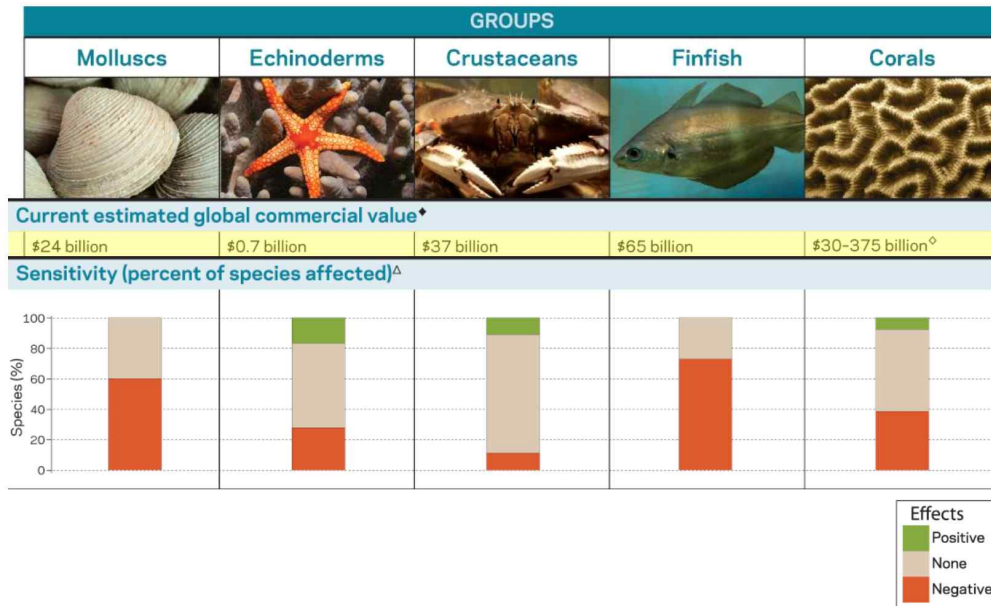


Figure 3 Impact of ocean acidification on marine biology (From 'Ocean Acidification: Summary for Policymakers')

- 북태평양 해역은 주요 수산업에 있어서 매우 중요한 해역이며(*Feely et al.*, 2004; *Orr et al.*, 2005), 해양산성화의 위협이 가장 큰 지역이기 때문에 이 지역에 대한 연구가 필수적이며, 그 가운데에 탄산칼슘 포화도의 분포에 관한 연구가 핵심임.
- 최근 미국 오리곤주의 북태평양 연안의 굴유생 양식장은 2007년과 2008년에 걸쳐서 산성화된 해수가 유입됨에 따라서 굴유생의 80%를 잃었으며, 이후 산성화되지 않은 해수를 유입함으로써 이 문제를 해결한 바가 있음. 이는 해양산성화가 해양 생물과 수산업에 미치는 영향을 직접적으로 보여줌.

다. 사회·문화적 측면

- 해양은 휴양을 위한 각종 스포츠 및 레크리에이션을 위한 공간임. 특히 산호초 등의 해양생태계가 잘 발달한 환경은 이러한 활동들을 위한 최상의 공간을 제공하지만 해양산성화에 의해서 해양생태계의 경관적 이점을 잃을 수 있음(그림4).
- 빈곤한 국가들에게 해양은 주요 영양의 공급원이고 삶의 터전인 경우가 많음.
- 해양산성화는 선진국 및 개발도상국에 의해서 배출된 CO₂에 의해 발생된 문제임에도 불구하고, 결과적으로는 그 손해가 오히려 빈곤한 국가에 전가될 수 있다는 점에서 국제 사회에서 갈등의 소지가 될 수 있음.

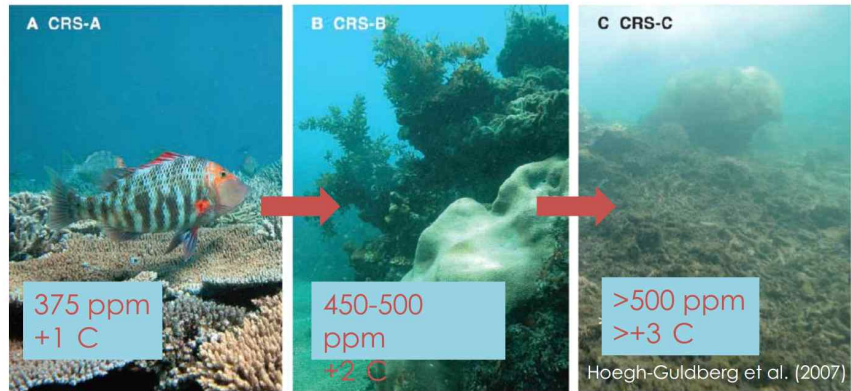


Figure 4 Expected change due to ocean warming and acidification (Hoegh-Guldberg et al., 2007)

라. 기관 고유기능 발전과의 연관성

- 우리 KIOST는 국내 유일의 종합해양연구기관으로서 기후변화에 의한 해양환경의 변화 연구(해양산성화 포함)에 대한 시대적 요구에 발맞추어야 함.
- 해양산성화 연구는 해양수산부의 해양과학기술체계도의 해양환경기술 중 기후변화 대응기술 및 해양생태계관리기술, 그리고해양관측 및 예보기술 중 해양정보 및 예보기술과 연관되어 있음.
- 국내 대학 및 연구소에서 해양산성화에 대한 체계적인 연구가 진행되지 못하고 있는 실정이며, 해양산성화에 대한 국가적인 연구개발 투자도 미미한 실정임. 따라서, 우리 기관 고유의 연구투자를 통해서 해양산성화의 중요성을 널리 인식시킴으로써 국가적 연구투자의 확대를 유도하고 국내의 해양산성화 연구를 이끌어 나가야함.
- 전 세계적으로 해양산성화에 대한 정치, 사회, 과학적 관심과 이목이 크게 집중되고 있는 시점에서, 해양산성화에 대한 우수한 연구결과 발표는 우리 기관의 국제적 위상을 제고에 기여할 수 있음.

제 2절. 연구 개발의 범위 및 개요

1. 연구개발의 최종목표

- 탄산칼슘 포화도를 가장 잘 예측할 수 있는 핵심 독립변수 선정.
- 북태평양 전역에 대하여 지역별로 다중선형회귀 모형(알고리즘)을 도출.
- 다중선형회귀 모형을 통해 북태평양의 탄산칼슘 포화도의 분포도 작성.

2. 연차별 연구개발 목표 및 내용

○ 총 연구기간 1년간의 세부연구개발 목표 및 내용은 아래표에 요약됨.

Table 1 Contents and objectives of the study

세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	연구범위
해양 조사 자료 수집	해외 데이터베이스로부터 양질의 해양 CO ₂ 인자를 포함하는 해양학 자료의 수집	북태평양의 과거 20년 자료
탄산칼슘 포화도 예측 모형 개발	탄산칼슘 포화도를 종속변수로, 온도, 영양염 등을 독립변수로 하는 다중선형회귀 모형 개발	북태평양 50-1000m 범위
탄산칼슘 포화도 분포도 작성	MLR 모형과 해양관측자료 등을 결합하여 북태평양 해역의 탄산칼슘 포화도 분포 규명	탄산칼슘 100% 포화도 깊이
연구결과의 검증 및 보완	타 연구결과와 비교 및 전문가 의견 수렴 및 결과 보완 후 최종 결과 산출	-

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국내·외 연구개발동향

- 1950년대 이후의 대기 중의 이산화탄소 증가 현상을 Keeling이 관측함. 이와 같은 경향으로 해수 중의 이산화탄소 농도가 증가하는 현상이 관측됨.
- 2000년도 이전에는 해양이 흡수한 화석연료 기원의 이산화탄소의 양을 추정하기 위한 목적으로 국제해양조사(WOCE 등) 전 대양을 대상으로 광범위하게 진행되었음.
 - 그 결과를 NOAA PMEL 연구소의 Sabine 등이 2004년에 Science 지에 발표함.
 - 같은 연구팀의 Feely 등은 같은 해에 화석연료 기원의 이산화탄소에 의한 해양 산성도의 포화도에 감소 논문을 Science에 발표함.
- 2005년에는 3D지구모형의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 Orr 등이 극지역의 해양산성화가 가장 심각함을 지적하는 논문을 Nature에 발표함.
- 이상의 사례를 포함하는 선도적인 연구들에 의해 해양산성화가 해양생태계에 미치는 잠재적 위험에 대한 공감대가 사회, 과학 전반에 확산되기 시작하여, 관련 연구가 폭발적으로 증가함.
- 2005년에 정부 간 국제기구를 통해 다루어지기 시작하여 IPCC 보고서 등에 의해 의미 있게 다루어짐.
- 해양산성화를 연구하는 대형프로젝트가 유럽을 중심으로 발족하기 시작함.
 - UK Ocean Acidification Programme (UKOARP), European Project on Ocean Acidification (EPOCA)
 - Biological Impact of Ocean Acidification (BIOACID, German)
 - Mediterranean Sea Acidification under changing climate (MedSea, EU),
 - National research programmes on ocean acidification (Japan), National Projects on ocean acidification and the CHOICE-C programme (China),
 - Research programmes and centres focusing on the Antarctic and Australasian regions (Australia)
- 미국은 해양산성화 연구에 대한 법률을 제정하여 국가 전략적으로 National Science Foundation을 통해서 해양산성화 부분을 체계적으로 지원하고 있음.

- 향후 국제적으로 해양산성화에 대한 모니터링 및 생물영향과 미래예측에 대한 연구는 점차 증가할 것으로 보이고, 단순히 개별연구실 또는 국가프로젝트를 뛰어넘어서 국제협력이 강조되어 나갈 것으로 예상됨(그림5).

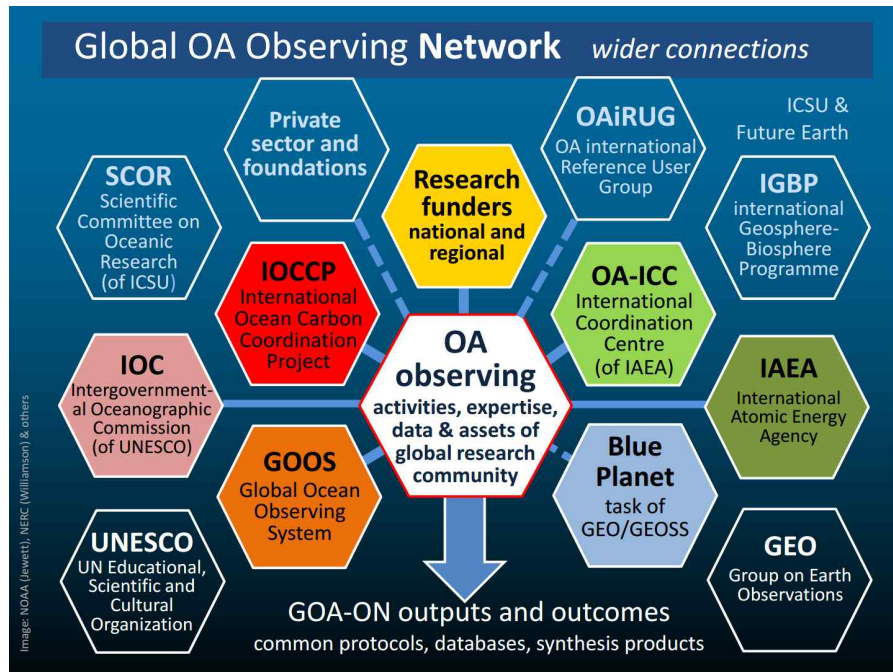


Figure 5 International collaboration efforts

- 국내에는 포항공대를 중심으로 메조코즘 실험 등이 진행됨. 서울대를 중심으로 동해해역의 해양이산화탄소에 대한 측정이 진행됨.
- 부경대 및 국립수산과학원에서 국내수산어종을 대상으로 해양산성화의 영향을 연구함.
- 최근 우리 기관 내부에서 해양산성화가 해양생태계에 미치는 영향을 주요과제로 진행하고 있으며, 위성기반 탄소지도 사업을 통해 우리나라 주변해역의 해양산성화 연구를 간접적으로 진행할 수 있는 여건도 마련되기 시작함.
- 하지만, 여전히 국내의 해양산성화 연구는 연구 기반 및 인력과 국가적 차원의 지원이 매우 부족한 실정임.

제 2절. 지금까지의 연구개발현황

- 해양산성화의 연구는 해양산성화 모니터링(해양 CO₂ 흡수 또는 탄산칼슘 포화도 변화), 해양생태계에 미치는 영향, 미래 예측의 세가지 분류로 나뉨.
 - 본 연구과제는 첫 번째 항목에 포함됨. 따라서 광범위한 해양산성화의 모든 연구 개발현황을 다루기 보다는 본 과제와 직접 관련된 연구개발에 한하여, 주요 연구 결과를 아래에서 소개하고자 함.
- 해양 CO₂ 시스템 및 산성화 연구의 선두그룹인 PMEL(Pacific Marine Environmental Laboratory)에서 북태평양의 탄산칼슘 포화도의 연구를 다양하게 진행함.
- 그림 2는 PMEL 그룹과 타 연구진과의 공동연구를 통해 얻은 결과로 측정자료를 기반으로 전 세계 대양의 탄산칼슘 포화도와 이에 대한 인간에 영향을 최초로 밝힘.

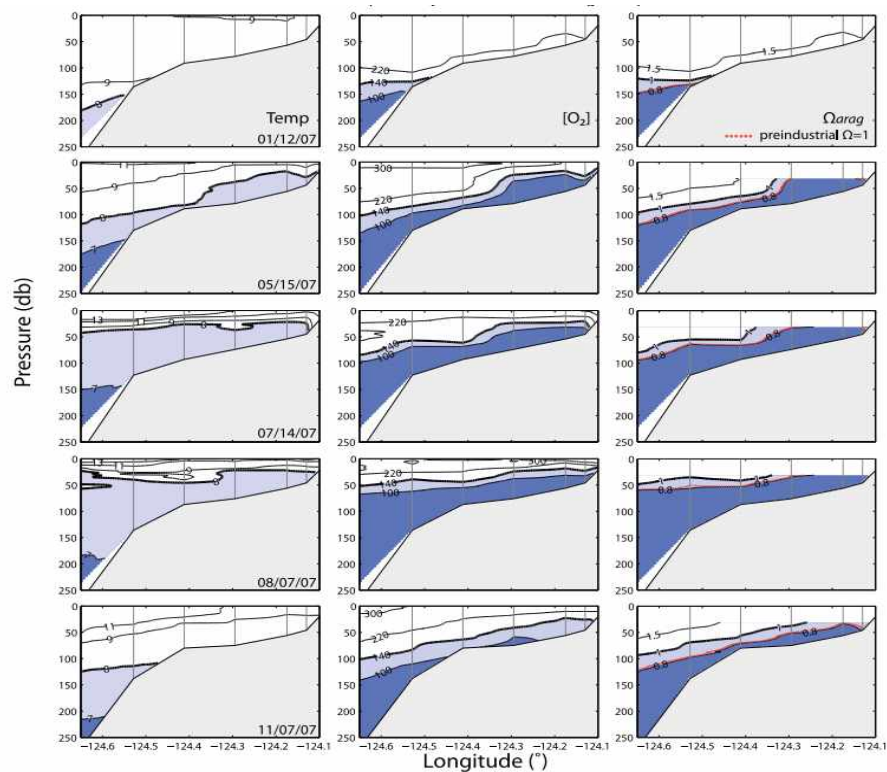


Figure 6 (Left) Temperature, (middle) oxygen concentration, (right) predicted aragonite saturation state in the coast of Oregon (Juranek et al., 2009)

- PMEL에서는 본 연구의 핵심방법론인 다중선형회귀(Multiple-parameter Linear Regression) 모형을 통한 탄산칼슘 포화도 연구를 다양하게 진행하였음.
- 해양산성화 문제가 중요하게 부각되고 있는 미국 오레곤주의 연안에서 온도와 산소 농도를 독립변수로 하는 다중선형회귀 모형을 개발하고 이를 온도와 산소 시계열 자료에 접목시켜서 오레곤주 연안 해양산성화의 계절적 변동에 대해 연구함(그림 6).
- PMEL 그룹과 동료연구자들은 캘리포니아 해안에 대해서도 유사한 연구를 진행하였음(Alin et al., 2012).
- PMEL에서는 북동태평양 지역에서, Argo floats에 의해 기록된 온도와 산소 자료를 이용하여 탄산칼슘 포화도와 pH를 예측하는 연구를 진행하였음(그림 7). 상대적으로 저비용으로 무인자동관측이 가능한 도구인 Argo로부터 얻은 자료를 해양산성화와 해양 CO₂ 시스템의 연구에도 활용할 수 있음을 보여준 연구임.
- 이와 유사한 연구가 알래스카대학 연구팀에 의해서 알래스카만 지역을 대상으로 진행되었음(Evan et al., 2013).

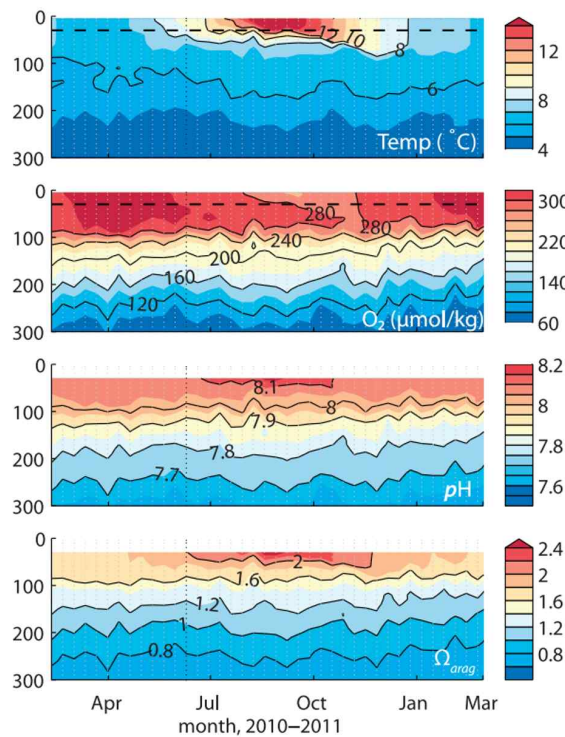


Figure 7 Time-series of temperature, oxygen, pH, aragonite saturation in the North Pacific (49.57°N, 138.68°W) (Juraneck et al., 2011)

- 국내 연구진의 해양산성화 연구(화학 부문)는 현재까지 부족한 실정이며, 포항공대, 서울대, 부산대, 해양과학기술원 등에 의해 진행되고 있음. 이 가운데 포항공대 연구팀은 PMEL의 국외연구진과도 2004년, 2009년에 걸쳐 공동연구를 진행하였음.
- 본 연구제안자는 포항공대에서 수확했던 2010년에 Global Biogeochemical Cycles 발표한 논문 연구를 통해, 본 연구제안과 유사한 연구를 동해에서 진행하였음(그림 8).
- 1999년에 동해 한·러·일 조사자료로 탄산칼슘 포화도를 예측하는 다중회귀모형을 개발하고 이를 과거자료와 결합해서 동해의 해양산성화 경향을 연구하였음.

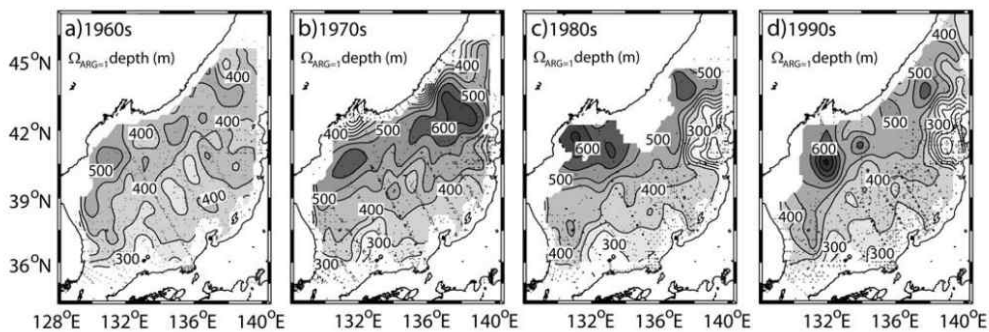


Figure 8 Aragonite saturation horizon in the East Sea(Kim et al., 2010)

제 3절. 현기술 상태의 취약성

- 본 과제와 관련된 최근의 연구 개발은 앞선 연구결과에서도 다루었듯이, 주로 좁은 지역을 목표로 탄산칼슘 포화도에 대한 연구를 진행하였음.
- 따라서, 향후 연구를 통해 넓은 지역을 커버할 필요성이 있음. 하지만, 북태평양과 같은 넓은 해역에 대해서 다중선형회귀 알고리즘을 적용한 사례는 없음.
- 현재까지는 넓은 지역에 대한 연구는 주로 관측과 3차원지구모형을 통해 진행되었음. 관측 결과는 높은 신뢰성을 담보하지만 시공간적으로 매우 제약이 많기 때문에 자료의 해상력이 낮은 단점이 있음. 반면에, 3D 지구모형을 활용한 연구는 시공간적인 제약의 거의 없지만 결과의 신뢰성에 문제가 발생함.

제 4절. 앞으로의 전망

- 해양산성화 이슈는 CO₂의 배출이 멈추지 않는 이상, 점차 그 중요성을 커질 것이 분명하고, 그에 따라 미국 오레곤주의 굴 유생의 폐사와 같은 부작용의 발생빈도가 점차 늘어날 것으로 전망됨.
- 따라서, 해양산성화의 핵심이슈인 탄산칼슘 포화도 분포에 대한 연구 역시 그 중요성을 더해 나갈 것으로 판단됨.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절. 알고리즘 개발과 검증에 위해 사용된 자료

다중선형회귀 모형 기반의 아라고나이트 예측 모형을 개발하기 위하여, PACIFICA(Pacific Ocean Interior Carbon) 자료를 사용하였다(Suzuki et al., 2013). PACIFICA는 여러 국가들이 다년간 태평양 관측연구를 통해서 얻은 해양 이산화탄소 인자와 이와 관련된 변수들의 측정 결과를 하나의 자료로 취합하기 위한 국제협력프로젝트의 산물이고, PICES(The North Pacific Marine Science Organization)이 이를 지원하였다. 이 프로젝트를 통해서 1980년대부터 2000년대에 측정된 자료 중에 GLODAP(Global Ocean Data Analysis Project)에 포함되지 않은 자료와 2000년대 이후 CLIVAR(Climatology and Ocean Variability, Predictability, and Change)/CO₂ Repeat Hydrography 프로젝트의 자료를 포함하여 총 213개의 현장관측연구 자료가 취합되었다.

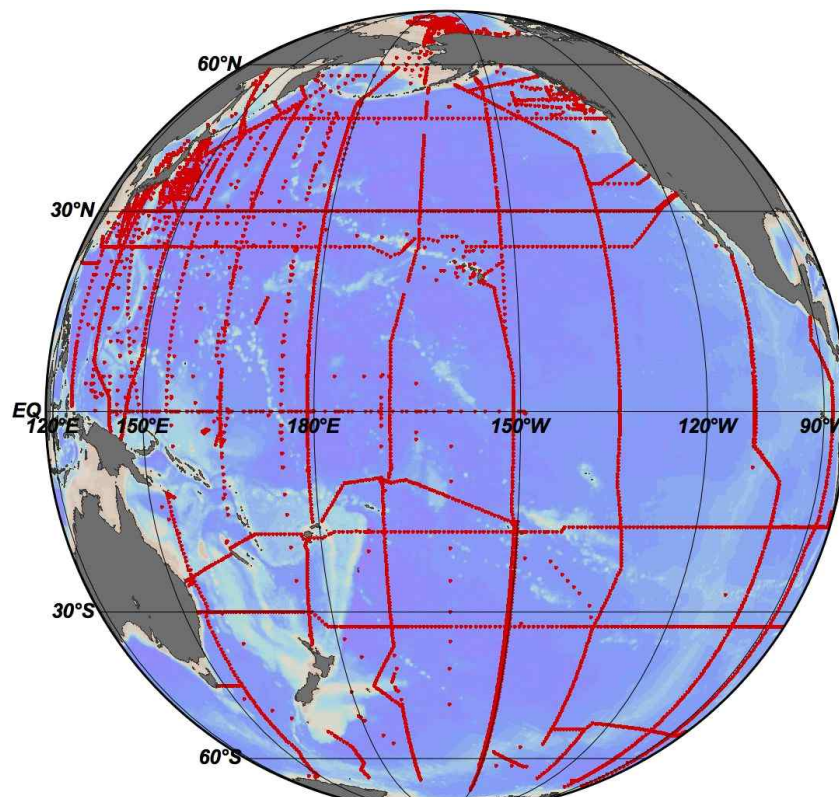


Figure 9 Data stations included in the PACIFICA dataset

이 프로젝트의 통해서 전체 자료의 일관성 유지를 위해서 서로 다른 크루즈의 총무기탄소, 총알칼리도, 염분, 산소, 영양염 값들을 보정하였다. 그리고, 추가적으로 캐나다 서해안의 P Line 자료와 WOCE(World Ocean Circulation Program) 자료를 추가해서 총 304개의 관측 자료가 PACIFICA자료에 취합되었다. 자료의 배포는 CIDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)와 PICES 홈페이지에서 진행 중이다. 자료를 획득 가능한 인터넷 주소는 pacific.pices.jp/data.html와 cdiac.ornl.gov/oceans/PACIFICA/이다. PACIFICA 자료에 포함되어 있는 총알칼리도와 총무기탄소 자료를 이용하여 알고리즘 개발에 필요한 아라고나이트 포화도를 계산하였다. 이 계산에는 탄산(Carbonic Acid)의 해리상수를 포함하는 열역학 상수들이 사용되었고 이들은 전 지구적 자료에 의해 보정되었다 (Mehrbach et al., 1973; Millero, 1995; Dickson and Millero, 1987; McElligott et al., 1998; Wanninkhof et al., 1999; Lee et al., 2000; Millero et al., 2002).

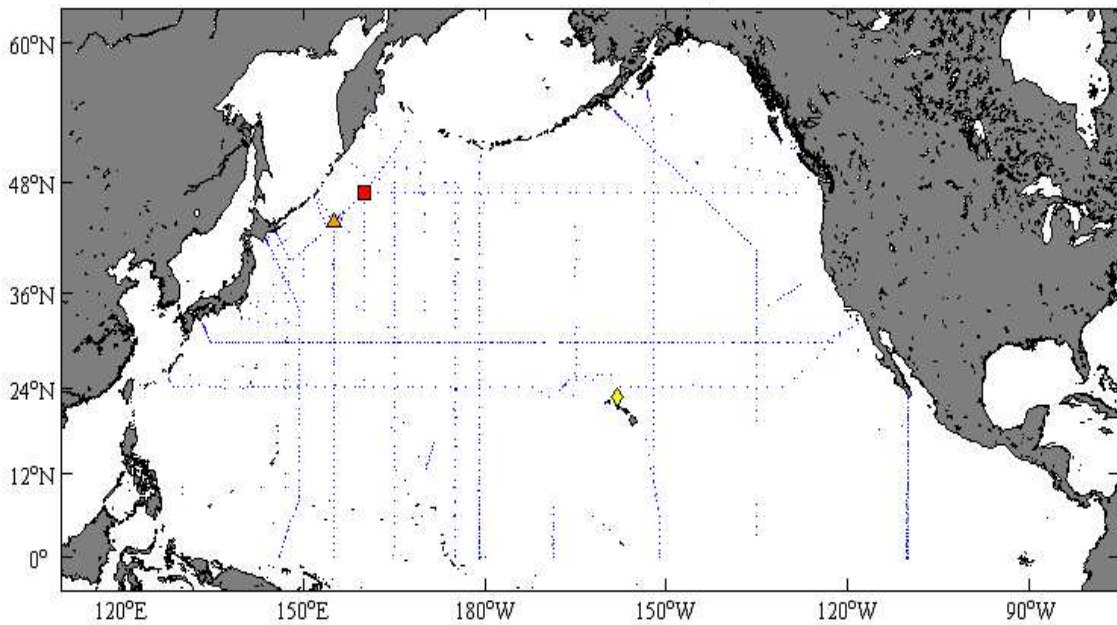


Figure 10 Station map for the PACIFICA data and time-series stations (HOT, K2, KNOT) used to derive and evaluate the MLR-based algorithms (Red: K2, Orange: KNOT, Yellow: HOT, Blue: PACIFICA)

PACIFICA 자료를 기반으로 개발된 알고리즘의 예측성을 검증하기 위해서, PACIFICA 자료에 포함되지 않는 시계열 자료 및 최신 정선 관측 자료를 이용하였다. 먼저

HOT(Hawaiian Oceanographic Time-Series, 22° 45'N, 158° 00'W) 시계열 자료 (1989-2013) 자료를 사용하였다. HOT 시계열 자료는 미국 하와이 대학에서 주관하여 물리, 화학, 생물 인자를 높은 정밀/정확도로 수집하고 있다. 관련 자료는 홈페이지 (hahana.soest.hawaii.edu/hot/#)를 통해서 무료로 배포되고 있다. 알고리즘 예측성 검증에는 일본에서 운영 중인 시계열 정점인 K2(47°N, 160°E)와 KNOT(44°N, 155°E)자료를 사용하였다. 이들 정점에서 1997에서 2008년 사이에 얻어진 자료를 사용하였고, 역시 CIDIAC 홈페이지를 통해 자료를 개방하고 있다. 이상의 세 개의 시계열 자료를 통해서 개발된 아라고나이트 포화도 예측 알고리즘이 서로 다른 연도에도 적용될 수 있는지 여부를 확인하였고, 다른 한편으로 공간적 검증을 위해서 2013년에 북위 30도를 따라, 북태평양을 횡단한 GO-SHIP P02 관측조사의 자료를 사용하였다. 해당 자료는 CIDIAC 홈페이지를 통해 개방되어 있다.

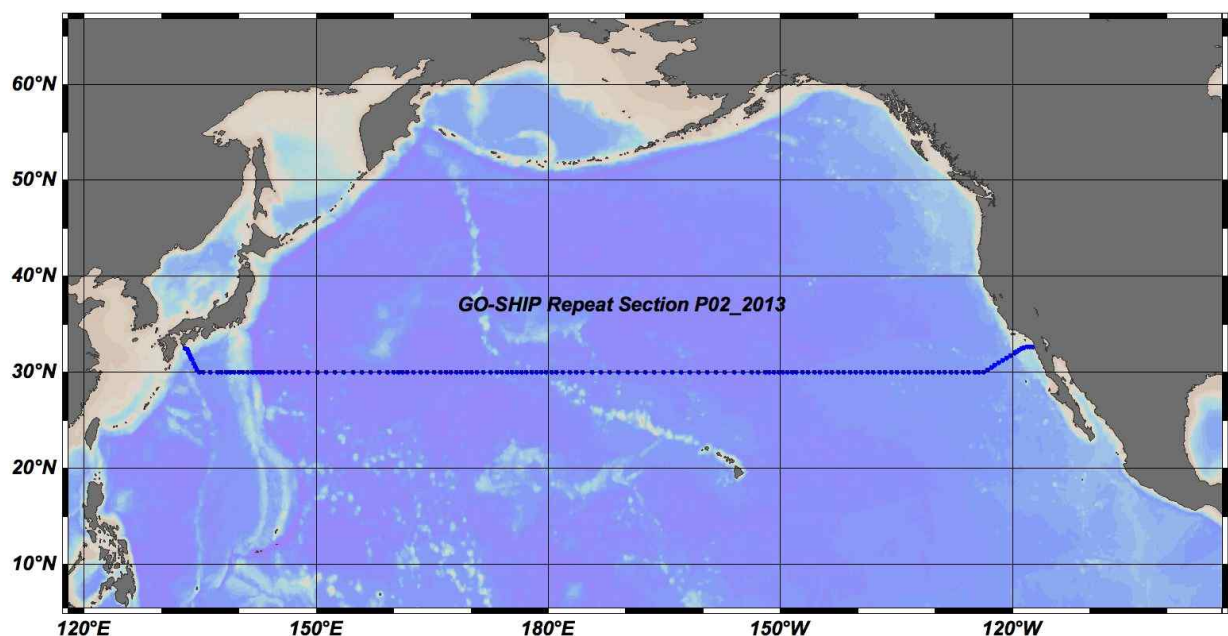


Figure 11 Data stations for the P02 cruise (CIDIAC)

마지막으로, 1도 해상도의 WOA 2013 (World Ocean Atlas) 자료를 개발된 알고리즘과 결합하여 아라고나이트의 포화도 계절값을 제시하였다. WOA 2013 자료 역시 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 NODC(National

Oceanographic Data Center)의 인터넷 홈페이지(www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/)를 통해 무료로 개방되어 있다(Garcia et al., 2013).

제 2절. 알고리즘 개발

다중선형회귀 알고리즘을 이용하여 북태평양의 개별 해역에 대한 아라고나이트의 계절적 변동 연구는 있어 왔지만, 북태평양 전체 지역을 아우르는 연구는 사실상 없었다. 그 이유는 측정자료가 부족한 측면도 있었고, 북태평양과 같은 광대한 해역의 다양한 환경 특성을 반영하는 알고리즘의 개발이 어려운 측면이 있었다. 이런 기존 연구의 한계를 극복하기 위해서 본 연구에서는 지역적인 특이성을 가지는 다중선형회귀 알고리즘을 개발하고자 하며, 그 기본 형태는 다음과 같다.

$$\Omega_{AR,i} = a_{0,i} + a_{1,i} \cdot X_{1,i} + a_{2,i} \cdot X_{2,i} + \dots + a_{n,i} \cdot X_{n,i} \quad (1)$$

x 와 a 는 각각 독립변수와 독립변수들의 계수를 뜻하며, i 는 특정한 지역을 지칭한다.

북태평양 지역에서 아라고나이트를 예측하기 위해 다중선형회귀 알고리즘을 사용한 기존의 연구결과들을 보면, 공통적으로 온도, 산소, 질산염 농도를 알고리즘의 독립변수로 사용하였다(Juranek et al., 2009; Juranek et al., 2011; Alin et al., 2012). 이는 이들 독립변수들이 아라고나이트와 직간접적인 상관관계를 가지고 있기 때문에 발생한 결과로 예상된다. 예를 들어, 온도가 상승하면 열역학적으로 아라고나이트의 포화도가 증가되게 되어 있고, 다른 한편으로 온도는 해양의 연직순환의 지표로 낮은 온도는 강한 연직순환을 의미하고, 강한 연직 순환의 경우에는 깊은 곳의 아라고나이트가 저포화된 물이 공급되므로 아라고나이트 포화도에 영향을 미치게 된다. 질산염과 산소 농도의 경우에는 생물에 의한 CO₂ 제거와 연관되어 있고, 표층 아래에서는 유기물의 분해로 인한 산성물질의 생성과 연관되어 있기 때문에 아라고나이트 포화도와 연관성을 가지게 된다. 본 연구에서도 기존의 연구결과를 따라 온도와 질산염(NO₃⁻)과 산소 농도를 아라고나이트 예측 알고리즘의 독립변수의 후보군으로 선정하였고, 그 조합 중에 가장 예측성이 좋은 것과 일반적인 과학적 상식에 부합하는 조합을 최종 알고리즘으로 채택하였다. 기존 연구와의 차이점은 본 연구에서는 온도와 산소 대신에 깊이에 따른 압력변화와 무관한 포텐셜 온도(Potential temperature, θ)와 겉보기 산소소비량(AOU, Apparent Oxygen Utilization)을 사용하였다.

알고리즘의 개발을 위해 사용된 깊이 범위는 50-800미터로, 이렇게 정한 이유는, 첫째는, 표층의 경우에는 해양과 대기의 상호작용 등으로 독립변수들과 아라고나이트 포화도의 관계가 변할 수 있기 때문이고, 둘째로는 100%, 150%, 200% 아라고나이트 포화도 깊이의 계절변화를 나타내기 위함이다. 해양 표층에서는 소비된 산소가 해양과 대기의 기체교환에 의해서 보충되기 때문에 산소 농도 변화를 통해서 산성물질의 발생을 예측할 수 없을 뿐만 아니라, 질소고정과 대기를 통한 질소오염물질 공급 등에 의해서 질산염과 아라고나이트의 관계가 표층과 그 이하 깊이에서 다를 수도 있다. 한편, 북태평양의 경우에 100% 포화도 깊이가 대부분 50에서 800미터 사이에 대부분 분포한다(*Feely et al., 1988; Feely et al., 2004*).

지역적 특성을 반영한 아라고나이트 포화도 예측 알고리즘 개발을 위해서 북태평양을 5도 격자로 나누어서 해당 격자 내에 들어오는 PACIFICA 자료를 이용하여 모든 격자에 대해서 알고리즘을 만들었다. 이 격자크기와 유사한 격자에서 지역의 특이성을 반영하는 결과들을 발표한 선행연구의 결과를 참고하였다(*Juranek et al., 2009; Takahashi et al., 2014*). 충분한 PACIFICA 자료가 있는 5도 격자의 수는 총 146개였다. 포텐셜 온도, 질산염 농도, 겔보기 산소소비량을 조합하여 얻을 수 있는 독립변수 조합에서 얻는 결정계수 (coefficients of determination)과 오차(Root Mean Squared Error)의 값은 다음 표와 같다. 각각의 값은 모든 격자에서 얻은 수치의 평균값으로 제시되었다.

Table 2 Coefficient of determination and Root Mean Squared Error

Predictor variables	Coefficient of determination (r^2)	Root Mean Squared Error (RMSE)
Θ and AOU	0.973	0.107
Θ and NO_3^-	0.970	0.113
AOU and NO_3^-	0.954	0.163
Θ , AOU, and NO_3^-	0.978	0.097
Θ , AOU, and [$\Theta \times \text{AOU}$]	0.983	0.080

포텐셜 온도와 걸보기 산소소비량, 포텐셜 온도와 질산염, 포텐셜 온도와 걸보기 산소 소비량과 질산염의 조합에서 모두 결정계수가 0.97이상이고 에러가 0.1에서 0.11의 범위로 유사한 결과를 나타내었고 걸보기 산소소비량과 질산염을 조합했을 때 나오는 값보다 더 나은 수치였다. 따라서 이들 중에 어느 조합을 사용하여도 무방하다고 판단되었으며, 최종적으로 독립변수를 결정하기 위해서, 독립변수의 계수값들이 일반적인 과학적인 상식과 부합하는지 여부를 기반으로 하여 결정하였다. 다음의 그림을 통해 각각의 조합에 대하여, 146개의 격자에서 얻은 값을 내삽하여 얻은 독립변수들의 공간 분포를 나타내었다.

포텐셜 온도와 걸보기 산소소비량의 독립변수 조합을 통해 얻는 결과를 보면, 포텐셜 온도의 계수가 모두 양의 값을 보였으며, 반대로 걸보기 산소소비량에 대해서는 음의 값을 모두 보였다. 이는 아라고나이트 포화도와 포텐셜 온도와 걸보기 산소소비량에 대한 일반적인 관계와 일치한다. 해수 온도의 상승은 아라고나이트 포화도를 직간접적으로 높이는 효과가 있기 때문에, 양의 상관계수를 갖는 것이 맞다. 걸보기 산소소비량이 증가하는 산성물질의 농도 증가와 직접적으로 관련되기 때문에 아라고나이트 포화도와 음의 상관 관계를 갖는 것이 맞다. 따라서 포텐셜 온도와 걸보기 산소소비량의 조합은 일반적인 과학적 상식에 일치하는 결과를 보여주었기 때문에, 최종적으로 독립변수의 조합으로 선정되었고, 향후 알고리즘과 WOA 자료를 결합하여 얻은 모든 결과는 특별한 묘사가 없을 때는 모두 포텐셜 온도와 걸보기 산소소비량의 조합에서 얻은 결과이다.

반면에, 포텐셜 온도와 질산염의 조합의 경우에는 포텐셜 온도에 대한 계수가 일부 지역에서 음의 값을 보여줬기 때문에 제외하였다. 포텐셜 온도와 질산염과 걸보기 산소 소비량의 3개의 독립변수를 갖는 조합에서도 북위 24도 이상에서 걸보기 산소소비량이 양의 계수를 가지고 있었고 일부지역에서는 포텐셜 온도 역시 음의 값을 가지고 있었기 때문에 독립변수의 조합으로 적절치 못하였다.

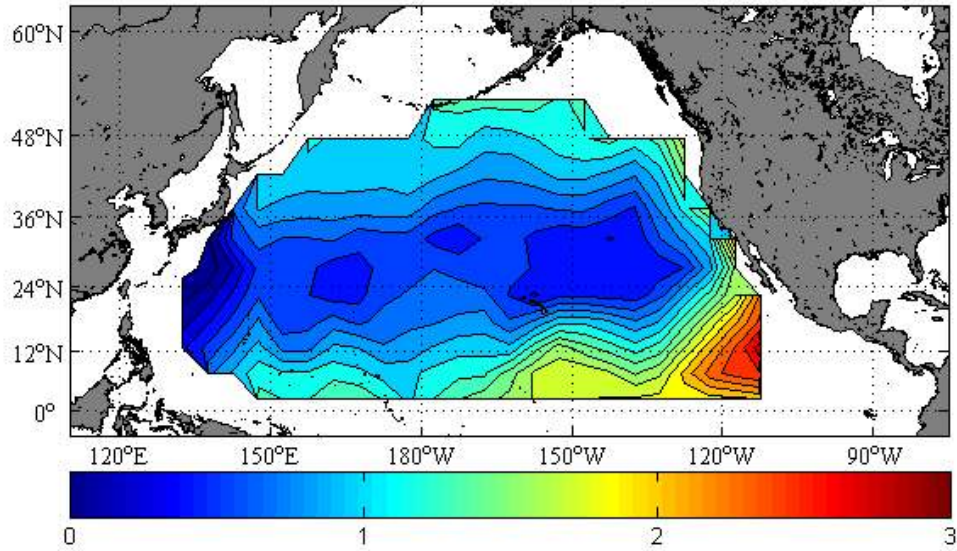


Figure 12 Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature and AOU as predictor variables

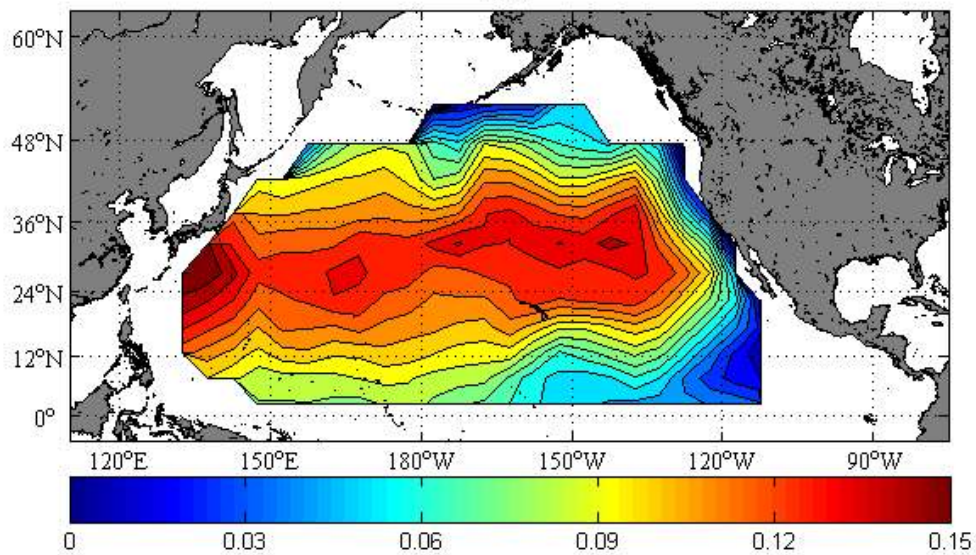


Figure 13 Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the algorithm using potential temperature and AOU as predictor variables

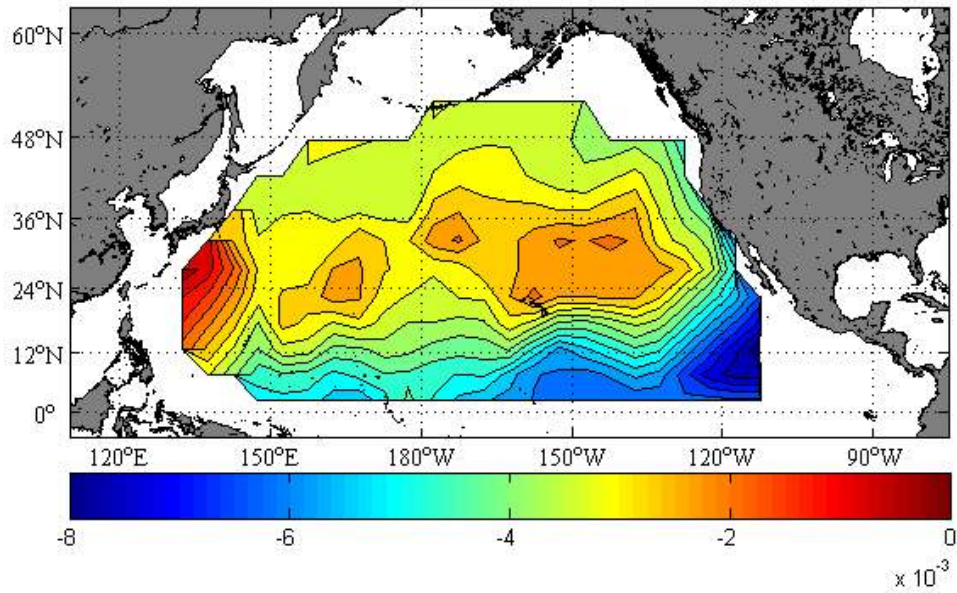


Figure 14 Interpolated coefficient field for the AOU term of the algorithm using potential temperature and AOU as predictor variables

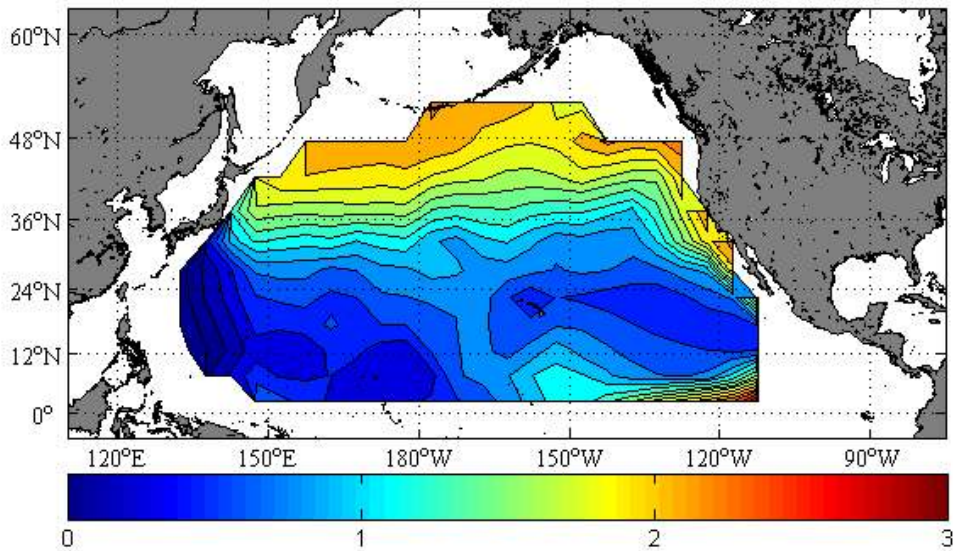


Figure 15 Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature and nitrate as predictor variables

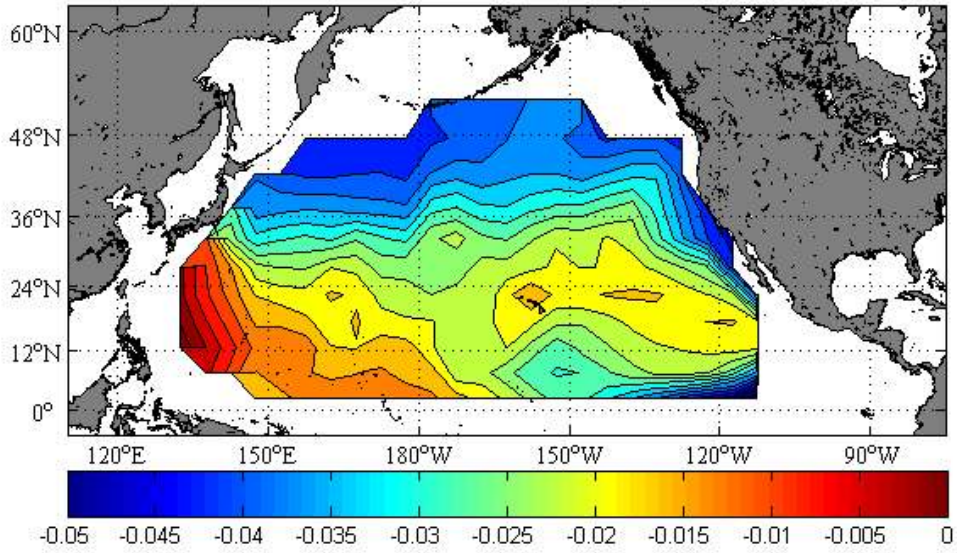


Figure 16 Interpolated coefficient field for the nitrate term of the algorithm using potential temperature and nitrate as predictor variables

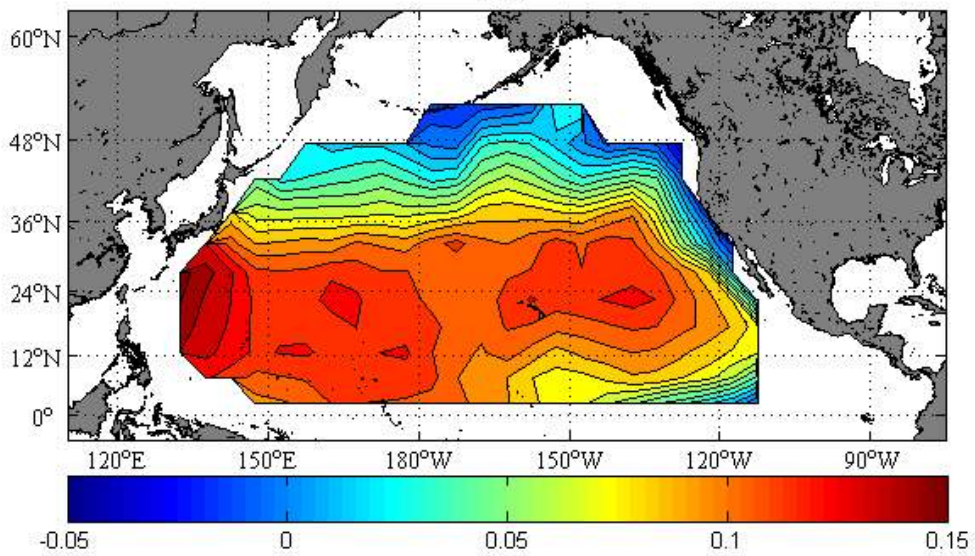


Figure 17 Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the algorithm using potential temperature and nitrate as predictor variables

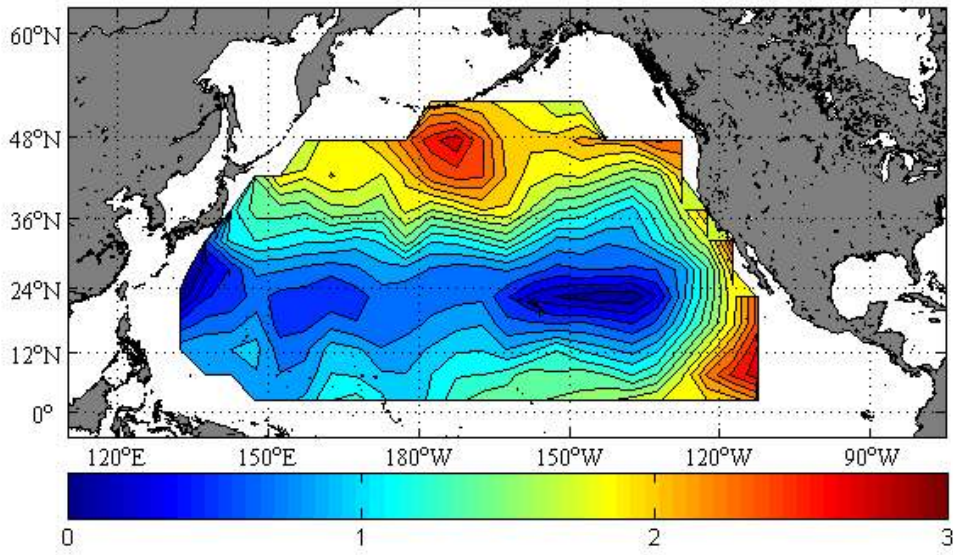


Figure 18 Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables

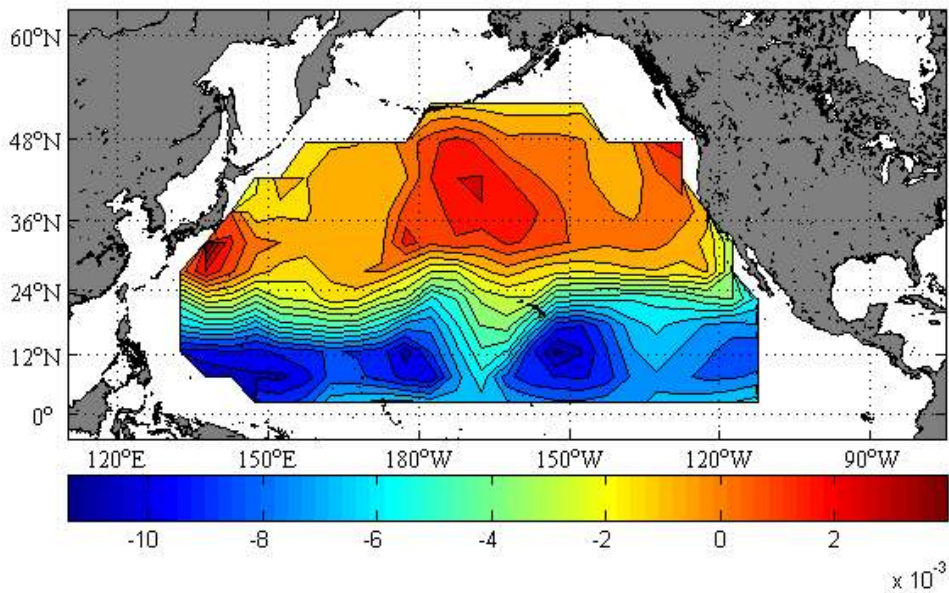


Figure 19 Interpolated coefficient field for the AOU term of the algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables

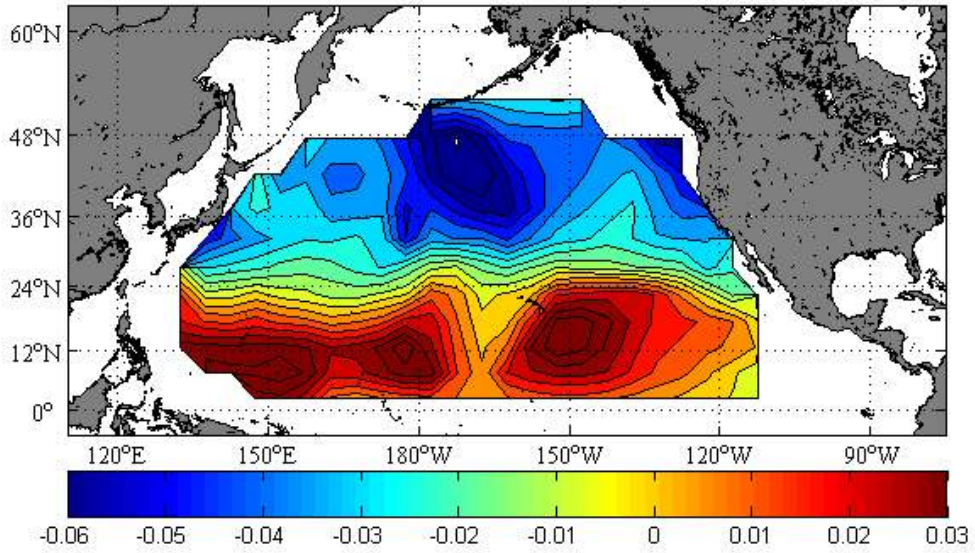


Figure 20 Interpolated coefficient field for the nitrate term of the algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables

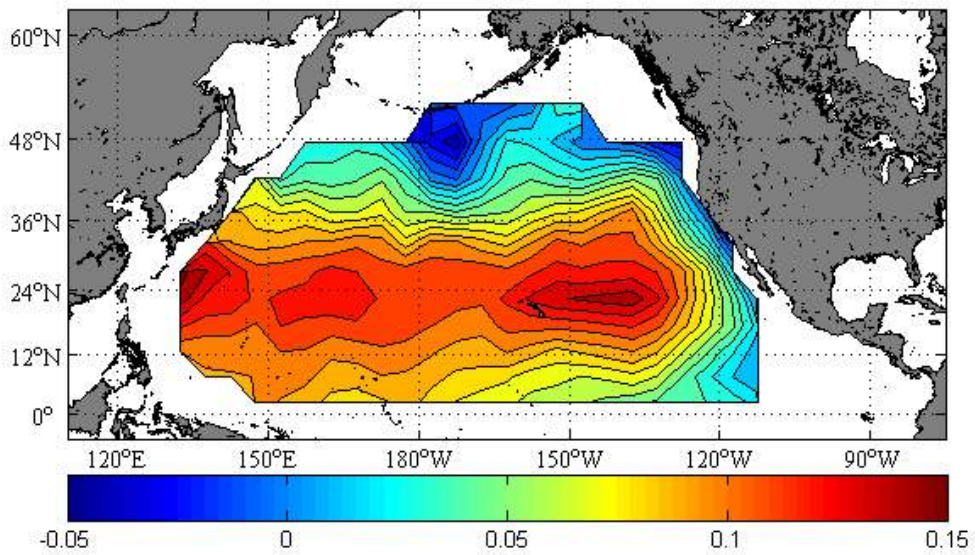


Figure 21 Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the algorithm using potential temperature, nitrate and AOU as predictor variables

5도 격자로 나누어서 각각에서 아라고나이트 포화도 예측 알고리즘을 만들었을 경우에, 북태평양 전체지역에 대해 1개의 알고리즘을 만든 경우보다 예측능력이 약 50% 향상되는 것으로 나타났다. 이 결과는 북태평양 전체와 같이 넓은 지역에 대해 알고리즘을 만들 때 지역적 특이성을 고려할 수 있는 장치를 두는 것이 예측 능력을 향상시킬 수 있다는 것을 의미하고, 본 연구가 기존의 연구와 차별성을 갖는 부분이다. 기존의 연구들 같이 1개의 알고리즘을 적용했다면, 예측능력이 더 낮았을 것이다.

최종적으로 독립변수로 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량을 선정하였지만, 이 둘의 조합의 경우 수직적으로 약간 편향된 결과치를 주는 것으로 나타났다. 예를 들어, 약 150에서 500미터 사이에서는 측정값에서 예측치를 뺀 경우 그 값이 0보다 컸지만, 50에서 100미터와 600에서 800미터의 경우에는 그 값이 0보다 작았다. 이러한 편향성은 깊이 선택과 무관하게 유사한 형태로 발생하였다. 하지만, 편향된 정도는 알고리즘의 평균인 0.1 수준보다 낮았고 대체적으로 0.05보다 작았다. 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량의 Interaction Term을 독립변수 조합에 추가하여, 총 3개의 독립변수(포텐셜 온도, 겔보기 산소소비량, 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량의 곱)로 알고리즘을 만들었을 때에는 이러한 편향성이 감소하는 모습을 보여주었지만, 이를 최종 독립변수로 사용하지 않고, 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량의 2개의 독립변수를 사용하는 것으로 유지하였다. 그 이유는 두 가지이다. 첫째로, 앞에서 언급하였던 바와 같이, 깊이에 대한 편향성이 알고리즘의 평균오차를 넘어서지 않는 수준이었기 때문에 알고리즘을 최대한 간단하게 유지하는 쪽으로 하여 결과를 쉽게 해석할 수 있는 방향으로 진행하였다. 겔보기 산소소비량과 온도의 곱과 아라고나이트 포화도를 직관적으로 연결시키기는 쉽지 않다. 둘째 이유는 interaction term을 추가했을 경우 각각 독립변수의 계수들의 공간 분포가 자연스럽지 않았기 때문이다. 부자연스러운 형태의 코어가 군데군데 나타남으로써, 자연스럽게 연속스러운 분포가 형성되지 못하였다. 반면, 포텐셜 온도와 겔보기 산소소비량만을 독립변수로 채택한 경우의 각각에 대한 계수 분포를 보면 자연스럽게 분포되어 있는 모습을 보일 뿐만 아니라, 북태평양에서 고유성을 가지고 있는 서태평양의 난수풀(Warm pool)과 미국 서부연안 지역 등의 계수값이 주위와 구별되는 특징 등이 잘 재현되고 있었다. 난수풀은 온도가 특별히 높은 지역이므로 온도의 영향이 상대적으로 커서 계수값도 다른 지역보다 더 컸으며 용승이 발생하는 지역에서는 깊은 곳의 산성화된 물이 용승되어 오기 때문에 겔보기 산소소비량에 대한 계수의 절대값이 더 컸다.

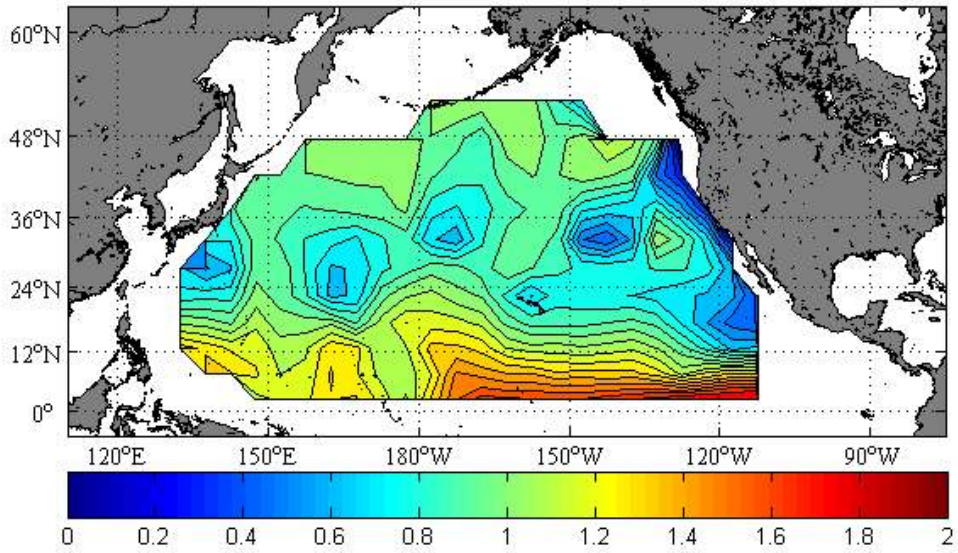


Figure 22 Interpolated coefficient field for the constant term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables

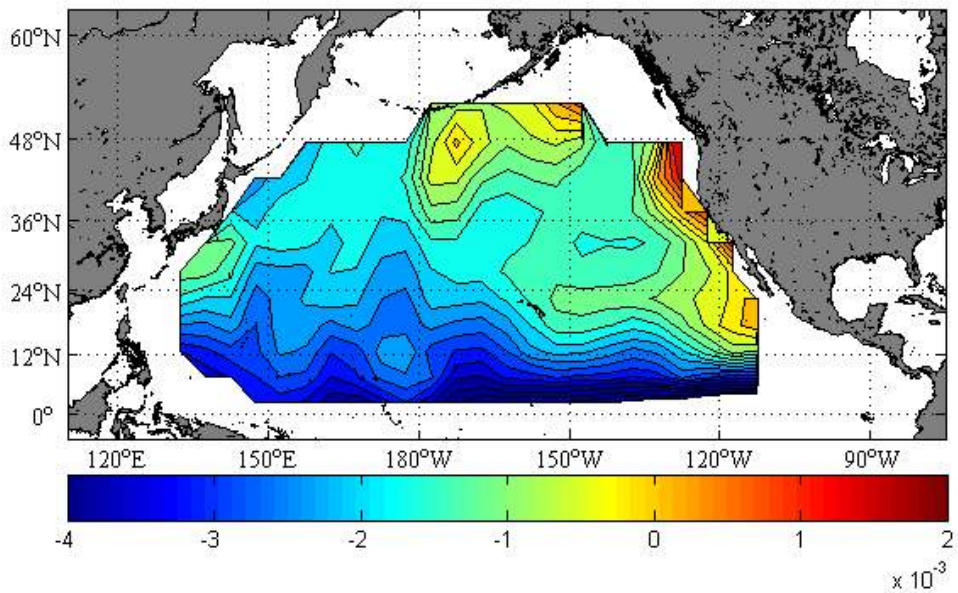


Figure 23 Interpolated coefficient field for the AOU term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables

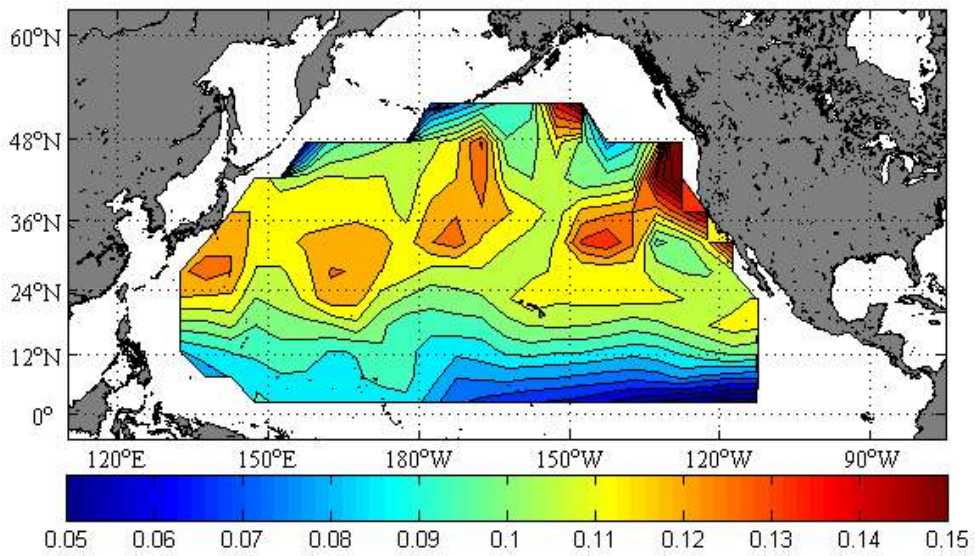


Figure 24 Interpolated coefficient field for the potential temperature term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables

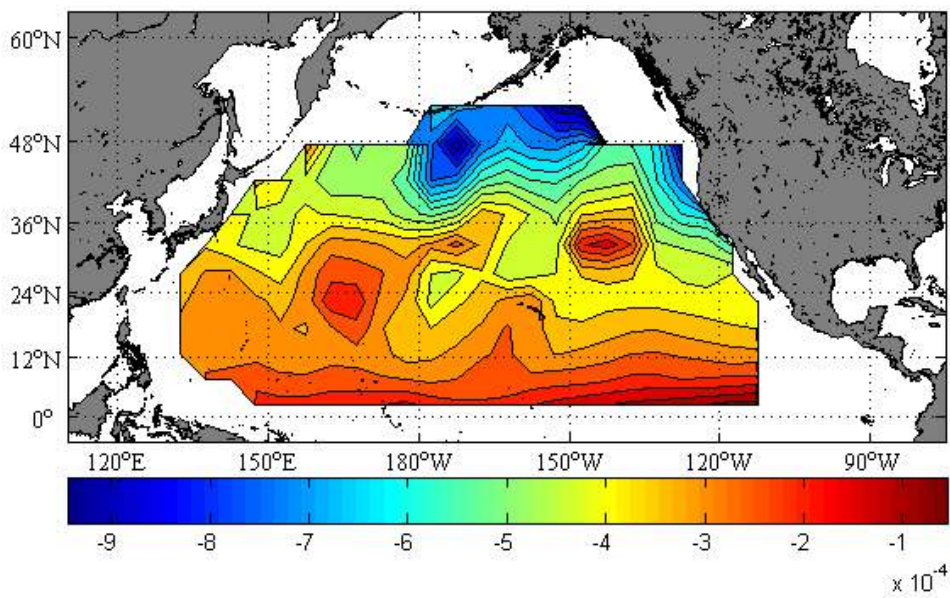


Figure 25 Interpolated coefficient field for the potential temperature \times AOU term of the algorithm using potential temperature, AOU, potential temperature \times AOU as predictor variables

제 3절. 알고리즘 검증

HOT, K2, KNOT 시계열 정점의 총알칼리도와 총무기탄소 자료로부터 얻은 아라고나이트 포화도 값(실측치)과 이들 자료의 포텐셜 온도와 겉보기 산소소비량과 알고리즘을 결합하여 얻은 예측치를 상호 비교하여 알고리즘의 예측성을 검증하였다. 개발된 아라고나이트 포화도 예측 알고리즘은 HOT 시계열 정점에서 평균적으로 0.07만큼 아라고나이트 포화도를 과소평가하였다. 하지만, 알고리즘의 평균오차인 0.1보다는 낮았기 때문에, 통계적으로는 유의미하지 않았다. 일본 시계열 정점에서는 평균적으로 0.02이하의 차이를 보여줘서 HOT보다는 좋은 결과를 나타냈다. 따라서, 본 연구를 통해 얻은 알고리즘은 다년에 걸친 시계열 자료를 평균적으로 잘 재현해냈기 때문에, 알고리즘을 혼란시켰던 자료의 측정년도가 아닌 다른 해에도 적용할 수 있음을 보여주고 있다. 같은 시계열 자료를 이용하여, 개발된 알고리즘이 계절적 편향성을 띄는지 검증하였지만, HOT, K2, KNOT 정점에서 각 계절별 잔차는 0.05 - 0.09, 0.01 - 0.06, 0.01 - 0.04 범위였기 때문에, 모형의 평균오차와 비교해서 유의미하지 않았다. 단지 겨울에 상대적으로 잔차가 큰 것을 볼 수 있었는데, 이는 알고리즘 개발에서 제외된 0-50미터 깊이의 해수가 겨울의 강한 혼합작용에 의해 50미터 이하의 깊이까지 영향을 미친 결과로 예상할 수 있다.

P02 자료의 총알칼리도와 총무기탄소 자료로부터 얻은 아라고나이트 포화도 값(실측치)과 이들 자료의 포텐셜 온도와 겉보기 산소소비량과 알고리즘을 결합하여 얻은 예측치를 상호 비교하여 알고리즘을 공간적으로 검증하였다. P02 정선은 일본 동해안에서 미국 서해안까지 정점이 있기 때문에 태평양을 가로지르는 다양한 환경에 대해서 공간적 검증을 수행할 수 있는 장점을 제공한다. 우리의 예측 알고리즘은 평균적으로 0.09만큼 과대평가하는 것으로 나타났다. 하지만 역시 알고리즘의 평균 예측오차보다는 작았기 때문에 오차범위 내에서 알고리즘이 좋은 결과를 내고 있음을 나타내고 있다. 하지만, 중간 깊이인 동태평양의 표층 300미터에서, 서태평양의 300에서 500미터 깊이에서 차이가 두드러지게 나타나는 것을 볼 수가 있었는데 이것은 화석연료 기인의 CO₂가 등밀도선을 타고 유입되는 것과 유사한 경향을 나타내었기 때문에, 이것의 의한 영향으로 보였다 (*Sabine et al.*, 2002; *Feely et al.*, 2012).

사실, 개발된 알고리즘의 가장 큰 단점은 P02 정선에서 나타난 것과 같이, 화석연료 기반의 CO₂가 해양으로 유입되는 것을 보정할 수 없다는 것이다(*Juranek et al.*, 2009;

Kim et al., 2010). 알고리즘을 훈련시키기 위해 사용되었던 PACIFICA 자료는 약 18여 년 간 수집되어 온 자료의 모음이기 때문에, 알고리즘의 평균오차 범위내에서 감내할 수 있는 수준(화석연료 이산화탄소에 의해 평균적으로 매년 0.007만큼 감소함. 따라서 14년 정도까지는 모형오차 범위에 들어감)을 넘어서게 될 뿐만 아니라, PACIFICA 자료 안에서 측정치별로 화석연료 기반의 이산화탄소에 의해 영향을 받은 정도가 상이하다. 이 양의 보정은 사실상 별도의 프로젝트에 의해 수정되어야 할 정도로 많은 노력을 필요로 하고, CFCs와 SF₆와 같은 연대추적자가 없거나, 동일한 지역에서 반복된 측정자료가 없는 경우에는 보정이 가능하지도 않다. 따라서 본 연구에서는 화석연료 기인의 이산화탄소에 의한 오차는 어쩔 수 없이 포함하고 갈 수 밖에 없다. 하지만, 본 연구의 핵심 목적인 계절적 변이를 파악하는데 있어서는, 계절 간의 차이를 보는 것이기 때문에, 차이를 구하는 과정에서 화석연료 기인의 이산화탄소에 의한 영향이 상쇄되어 사라지기 때문에 이런 오차가 최소화될 것이다.

게다가, 화석연료 기반의 이산화탄소에 의한 영향을 고려하면, HOT와 P02의 검증결과를 위에 계산된 것보다 사실 더 좋아야 한다. HOT 자료는 1990년대부터 측정된 자료를 사용하였지만, HOT 주변 지역의 알고리즘 개발에 사용된 PACIFICA 자료는 2006년에 측정되었다. 따라서 1990년대의 HOT 자료에는 화석연료 기인의 이산화탄소가 더 적은 양이 들어있을 것이고 더 많은 이산화탄소를 가진 2006년 자료를 기반으로 개발된 알고리즘은 1990년대의 HOT의 아라고나이트 포화도를 과소평가할 수 밖에 없었을 것이다. 비슷하게, P02 자료는 2013년 측정되었기 때문에 화석연료 기반의 이산화탄소가, 같은 정선에서 9-19년 정도 일찍 측정된 PACIFICA에 포함된 자료보다 높은 농도로 들어있었을 것이고, 결과적으로 PACIFICA 자료로 개발된 알고리즘은 2013년 P02 아라고나이트 포화도를 과대평가할 수밖에 없었을 것이다.

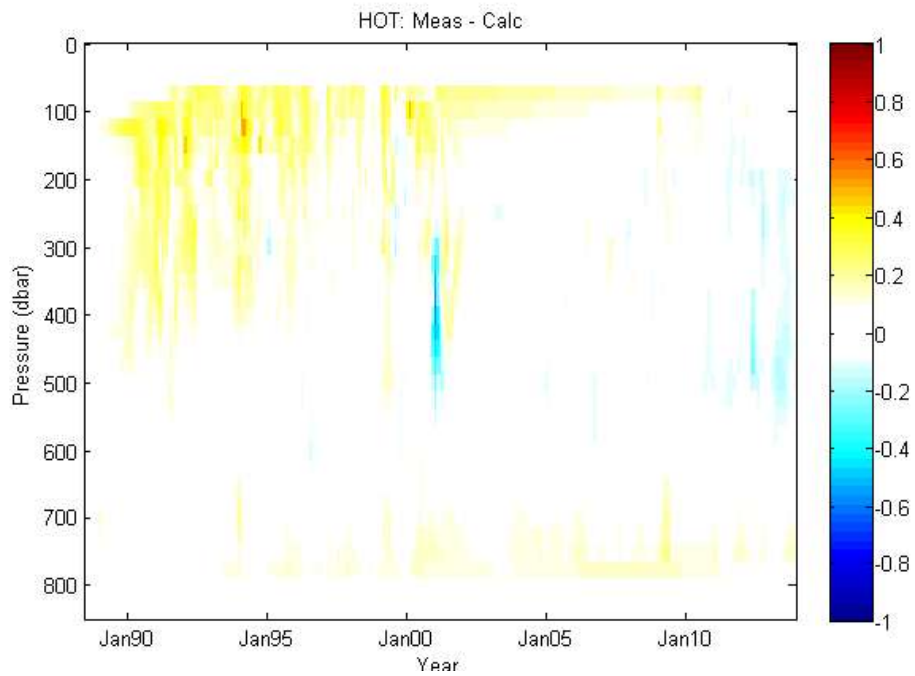


Figure 26 Difference between measured and predicted Ω_{AR} (HOT)

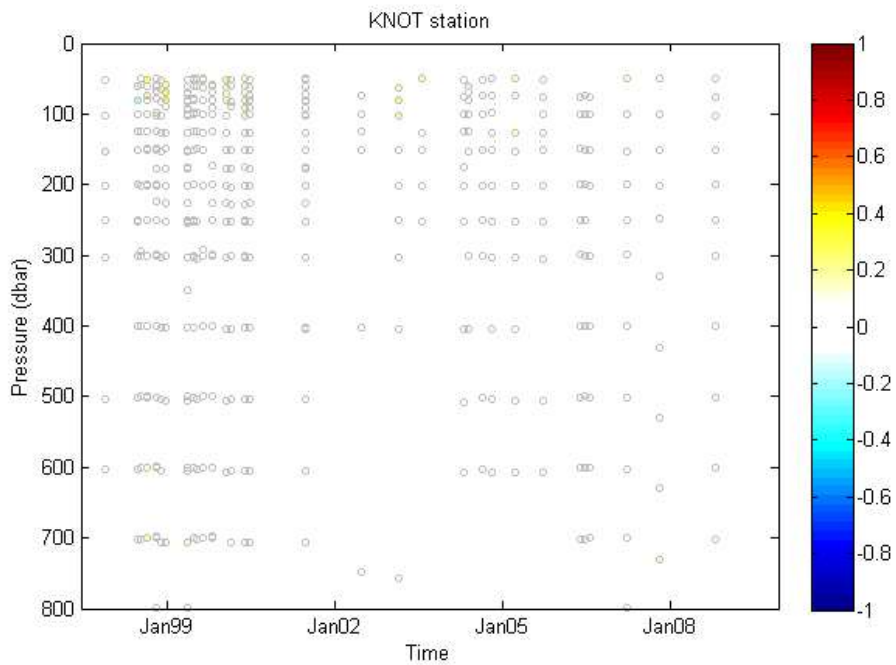


Figure 27 Difference between measured and predicted Ω_{AR} (KNOT)

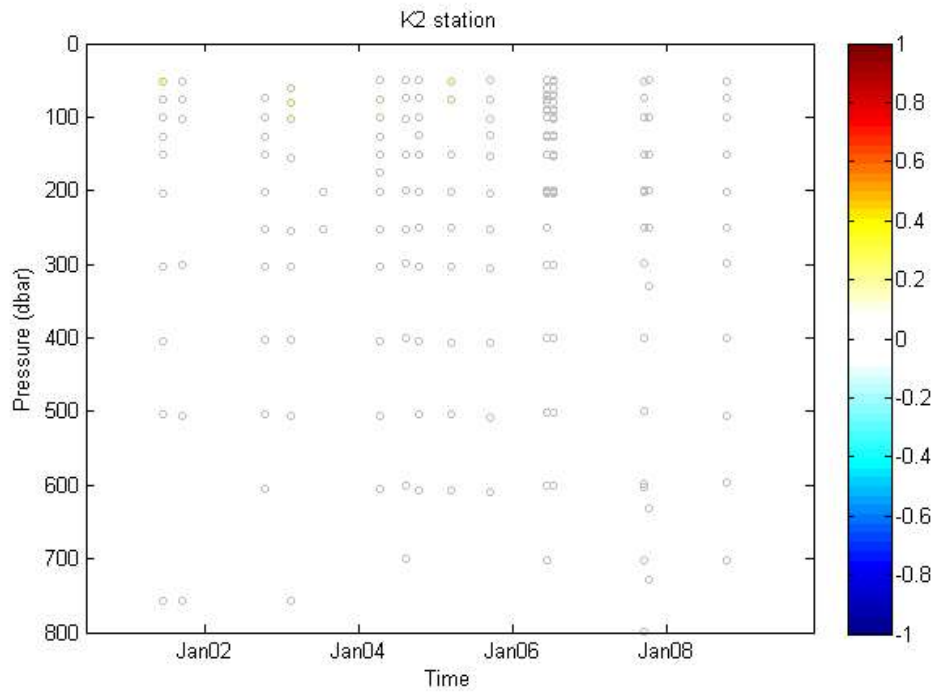


Figure 28 Difference between measured and predicted Ω_{AR} (K2)

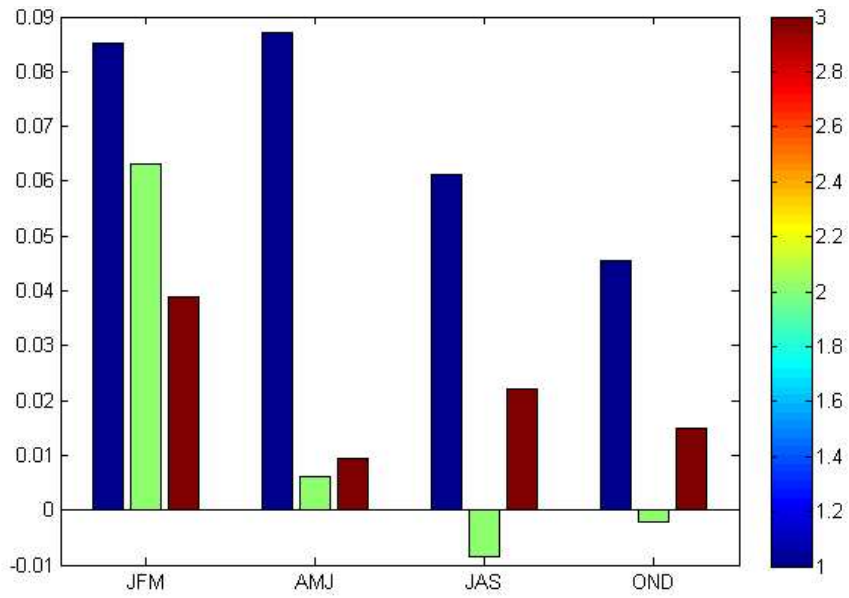


Figure 29 Seasonal biases (Blue: HOT, Green: K2, Red: KNOT)

제 4절. 아라고나이트 포화도의 계절적 변화

다중선형회귀 기반의 아라고나이트 포화도 예측 알고리즘과 WOA 2013 자료와 결합하여 1도 격자 해상도의 아라고나이트 포화도 기후값 분포를 추정하였다. 아라고나이트 포화도 예측 결과는 일반적으로 알려져 있는 포화도 분포를 잘 재현하였다(*Feely et al., 2004*). 봄철과 여름철에는 아라고나이트 포화도의 값이 깊이 50미터와 100미터에서 1.2-4.0과 1.2-3.6 정도로 각각 나타났다. 그리고 서쪽과 열대지방으로 갈수록 그 값이 증가하는 경향을 잘 재현하였다. 북서태평양의 난수풀이 강한 성층과 온도효과로 인해서 가장 높은 포화도 값을 보였고 이는 기존의 연구결과가 유사하였다(*Kuchinke et al., 2014*). 이와 대조적으로, 베링해 남쪽의 아극지(subpolar) 지역은 북태평양 대양수 중에서 가장 포화도가 낮았고, 가을과 겨울에 표층 100미터에서 불포화되는 현상을 보여주었다. 이 역시 기존의 연구결과를 잘 재현하였다(*Evans et al., 2013*). 북태평양의 동쪽, 즉 미국 서부연안으로 가까워질수록 아라고나이트 포화도가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 이 지역에서 용승현상이 발생하는 지역이라 깊은 곳의 아라고나이트 저포화된 물이 표층으로 유입됨으로써 발생하는 현상이다(*Feely et al., 2008; Gruber et al., 2012*).

열대(북위16° 남쪽지역) 북동태평양 해역에서는 약 북위 10°를 따라서 100 미터 깊이에서 아라고나이트가 주변지역보다 저포화된 물이 서쪽으로 확장하는 경향이 나타났다. 이쪽 지역은 바람에 의한 영양염 공급으로 생물생산력이 높고, ventilation이 약해서 산소 농도가 낮고 유기물 분해 산물이 축적되어 있는 지역이기 때문에 아라고나이트 포화도가 상대적으로 낮은 지역이다(*Pennington et al., 2006*). 서쪽으로 확장하는 모습은 표층수에서는 전혀 보이지 않는 것으로써, 표층의 아라고나이트 포화도 계절 변동값이 이미 있는 상황에서 우리 연구가 필요한 이유를 보여준다. 표층 밑에서도 계절적으로 아라고나이트의 변동이 있고 그것이 표층과 다르기 때문에, 해양산성화의 계절변동을 파악하기 위해서는 표층 이하도 연구할 필요가 있다는 것을 보여준다. 기존의 표층 아라고나이트 포화도 예측값은 이산화탄소의 표층 분압 자료를 기반으로 만들어진 것이기 때문에 이것을 표층 아래로 확장할 수 없는 단점을 가지고 있다(*Takahashi et al., 2014*). 반면, 본 연구에서 사용한 방법은 표층에서는 오히려 해양-대기 교환 작용으로 인해 정확성이 떨어질 가능성이 있지만(*Juranek et al., 2009; Kim et al., 2011; Evans et al., 2013*), 표층 이하에서는 유용하게 사용할 수 있기 때문에 본 연구의 결과와 기존의 표층 아라고나이트 포

화도 계절 변동 연구 결과는 상호보완이 될 수 있음을 보여준다. 아래에 그림 30부터 그림 33까지 다중선형회귀 알고리즘과 WOA 2013 자료를 결합하여 예측한 아라고나이트 포화도의 계절값들을 제시하고 있다.

계절변화를 좀 더 분명하게 알아보기 위해서, 아라고나이트 포화도의 계절값에서 연평균값을 뺀 차이를 나타내었다(그림 34-37). 50미터 이하의 깊이에서 아라고나이트의 포화도는 일반적으로 가을과 봄에 각각 최대값과 최소값이 나타난다. 표층에서는 여름과 겨울에 최대값과 최소값이 나타난다. 본 연구는 50미터 이하에 초점을 맞추기 때문에 가을과 봄의 아라고나이트 포화도 위주로 설명한다. 50미터 깊이에서 대부분의 중위도 지역이 큰 계절변화를 보여줬는데, 이런 변화의 주요 원인은 온도변화이다. 포텐셜 온도에 대한 계수가 가장 큰 지역이 이 지역이다. 하지만, 미국 서부해안의 계절변화는 재현하지 못하였는데, 그 이유는 WOA 2013 자료가 대양의 해수 특성을 보기 위해 만들어진 자료이기 때문에 연안의 변동 특성을 잘 반영하지 못하였기 때문이고, 따라서 본 연구를 통해 얻어진 결과는 연안지역의 아라고나이트 포화도 변화를 설명하지 못한다. 연안을 제외한 대부분의 중위도 지역에서는 봄철에 아라고나이트 포화도 값이 연평균보다 0.1-0.2 가량 낮았으며, 반면 가을에는 0.2-0.3가량 높은 수치를 보여줬다. 이와 같은 50미터에서의 뚜렷한 계절변화는 100미터에서는 거의 사라졌음을 볼 수 있었다. 3가지 요소가 중위도 지역의 50미터 깊이에서의 아라고나이트 포화도 계절변동에 영향을 줬을 것이라 예상된다. 첫째는 온도의 계절변동과 그로인한 해양 탄산염 열역학적 변화이다. 하지만 불과 몇 도 밖에 되지 않는 계절 온도 변화의 범주에서는 이것의 영향은 극히 낮다(*Feely et al.*, 1988; *Takahashi et al.*, 2014). 두 번째 가능성은, 생물학적인 이산화탄소 제거이다. 북태평양 중위도 지역에서는 주로 봄철에 온도가 낮고 생물생산성이 높다. 따라서 생물생산력 증가로 인한 50미터 깊이의 이산화탄소 제거의 결과로 아라고나이트 포화도의 증가가 발생했다면, 봄철에 아라고나이트 포화도가 연평균보다 높아야 하는데 결과는 그렇지 못했다. 따라서 두 번째 요소도 계절변동의 주요요인은 아니었다. 마지막 세 번째 가능성은 연직 혼합의 강도의 계절변동으로 인한 깊은 물의 상대적으로 저포화된 해수의 유입이다. 봄철의 낮은 해수 온도는 깊은 물과의 혼합작용의 좀 더 용이하다는 것을 의미하고 그 결과로 봄철의 50미터 깊이에서 아라고나이트 포화도가 연평균보다 낮았다.

100미터 깊이에서는 열대 북동태평양 지역에서 주로 변동이 발견되었다. 북위 10°-16°, 서경 110°-160° 지역에서는 봄철이 연평균값보다 평균적으로 0.2-0.5 정도 더

큰 값을 보여줬고, 이 격차는 서쪽으로 이동할수록 감소되는 경향을 보였다. 이 지역의 바로 남쪽 지역(북위 2°-8°)에서는 그 북쪽 지역과는 확연하게 다른 경향을 보였다. 오히려 봄철에 더 낮은 값을 나타냈다. 게다가, 봄철의 분포와 가을철의 분포 역시 정반대였다. 이러한 북동태평양 열대해역에서의 이런 극적인 아라고나이트의 계절 및 공간 분포의 변화의 주요 원인은 수온약층의 계절변동이 주요원인인 것으로 보였다(그림 38). 이 지역에서 수온약층은 20도 등온선과 일치하는 것으로 알려져 있다(Kessler, 2006). 등온선이 깊어지면, 깊은 곳의 낮은 산소와 아라고나이트 포화도를 가진 물이 표층으로 유입되는 것이 감소되는 반면에, 등온선이 얕아지면 반대의 현상이 발생하게 된다. 산소 농도를 기반으로 예측한 값과 다중선형회귀 알고리즘을 통해 예측한 값이 유사한 형태를 보이는 것으로 봤을 때, 낮은 산소의 물의 계절적으로 연직으로 움직인 것을 확인할 수 있다(그림 39).

수온약층의 계절변동의 원인은 바람에 의한 용승 작용의 계절변동이 주요 원인인 것으로 보인다. 북태평양 열대해역에서는 가을철에 북위 2°-16°사이에서 북위 8°를 기준으로 북쪽은 강한 용승과 남쪽은 강한 하강류가 발생한다(Xie and Hsieh, 1995). 이러한 용승과 하강류는 봄철에는 매우 약해지는데, 이러한 이유 때문에 열대 북태평양 북쪽 지역에서는 봄철이 가을철보다 용승현상이 약하기 때문에 아라고나이트 포화도가 높은 것이고, 남쪽 지역에서는 봄철이 가을철보다 침강류가 약하기 때문에 아라고나이트 포화도가 낮은 결과를 나타나게 된다. 또한 수온약층의 계절변동은 북적도해류(North Equatorial Current)와 북적도반류(North Equatorial Counter Current)의 계절 변동과도 연관성이 있어 보인다. 북적도 반류의 동쪽 이동속도는 봄철에 가장 약하기 때문에(Hsin and Qiu, 2012), 고온의 해수를 수송하는 정도가 약화되고 수온약층의 감소로 이어진다. 반면에, 북적도 해류는 가을철에 가장 약하다.

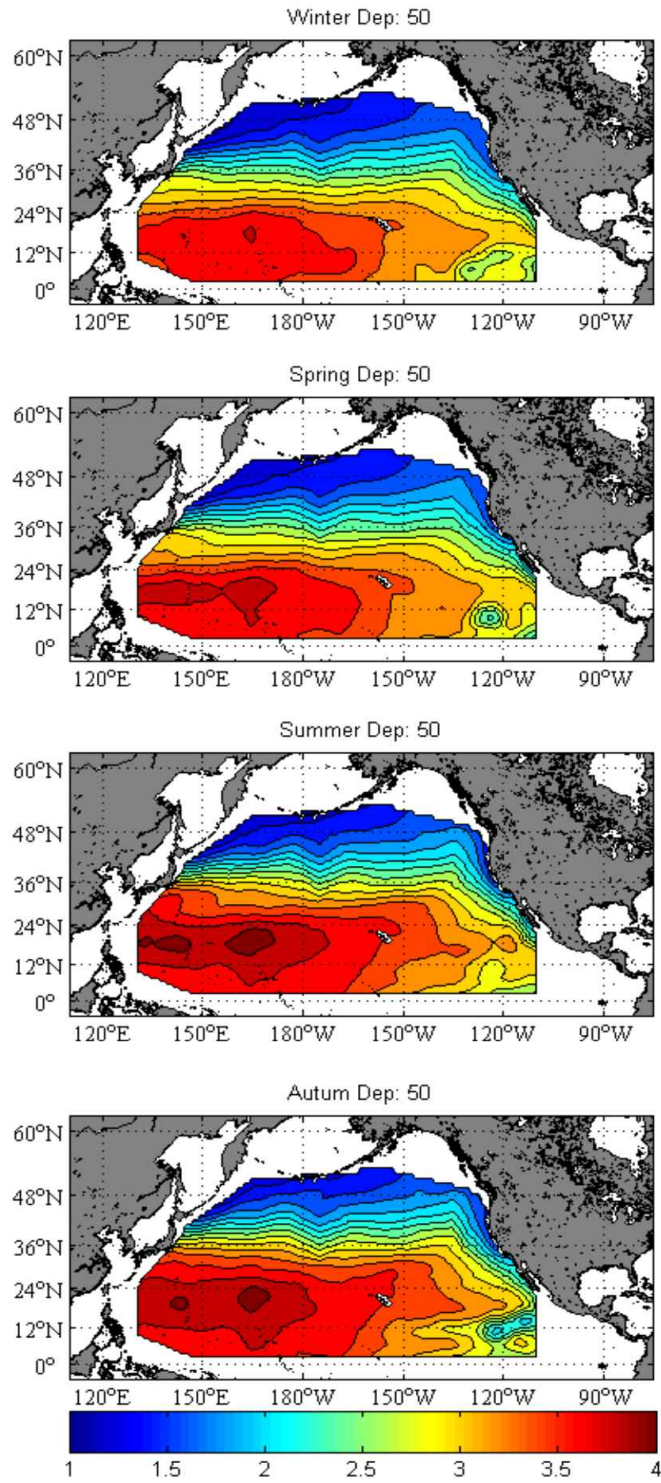


Figure 30 Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (50m)

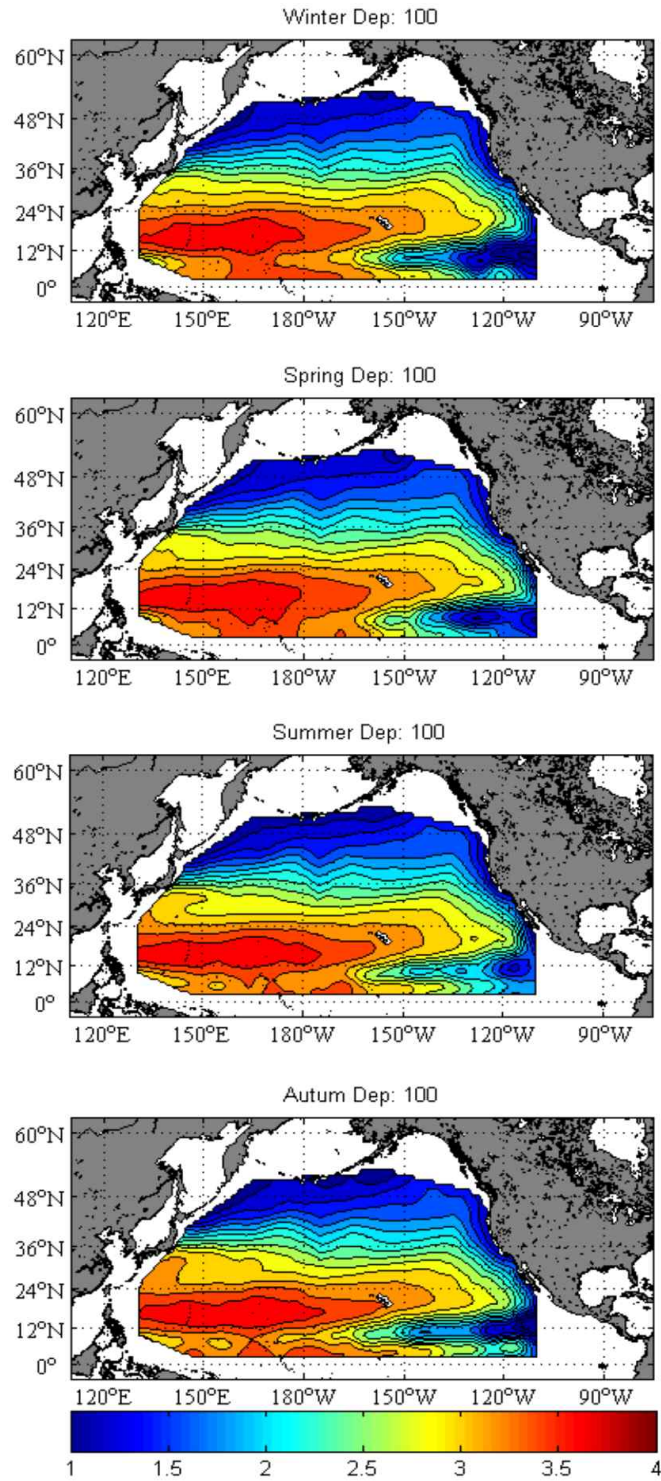


Figure 31 Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (100m)

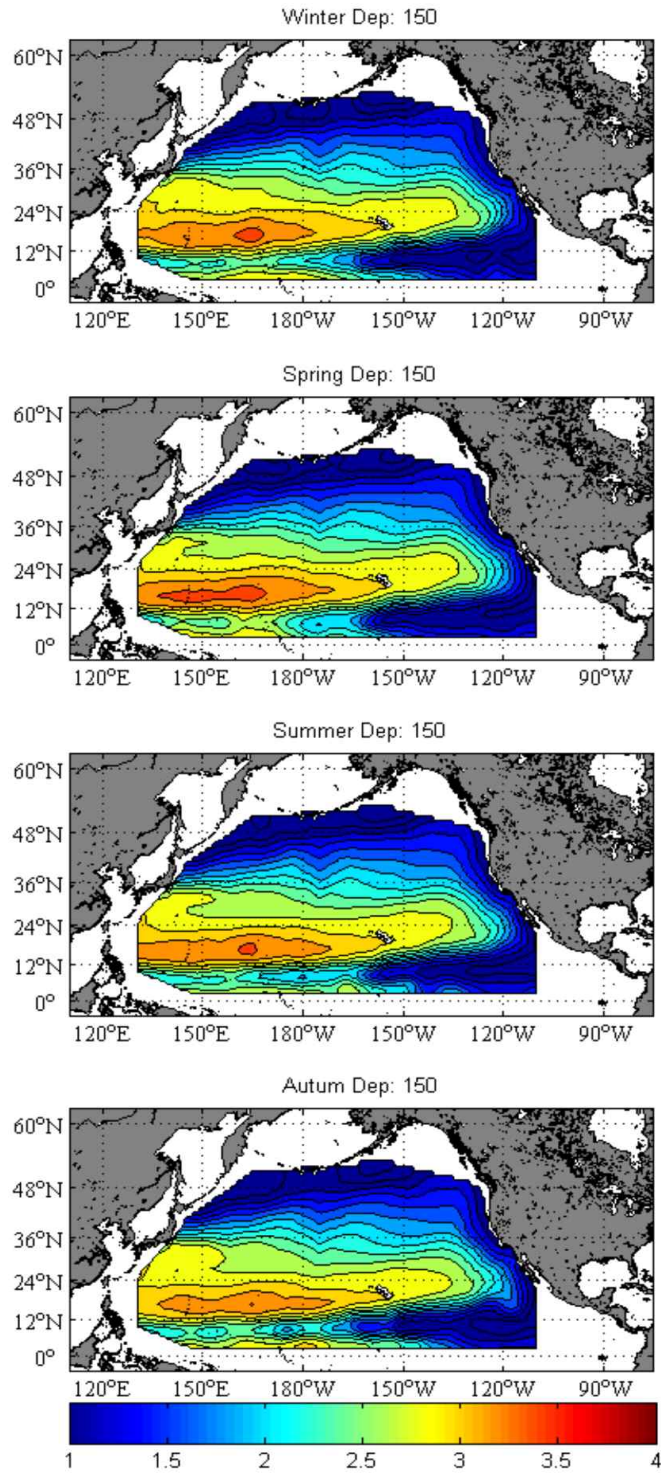


Figure 32 Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (150m)

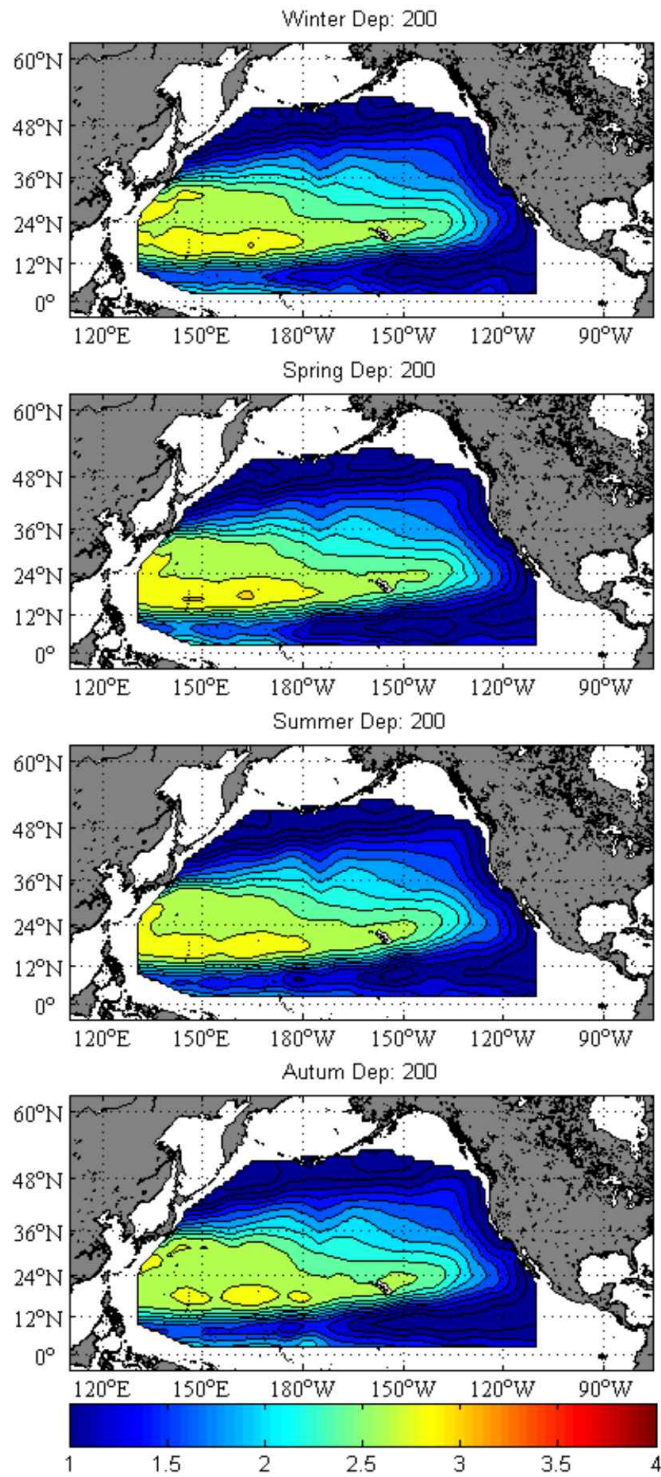


Figure 33 Predicted seasonal variation in Ω_{AR} (200m)

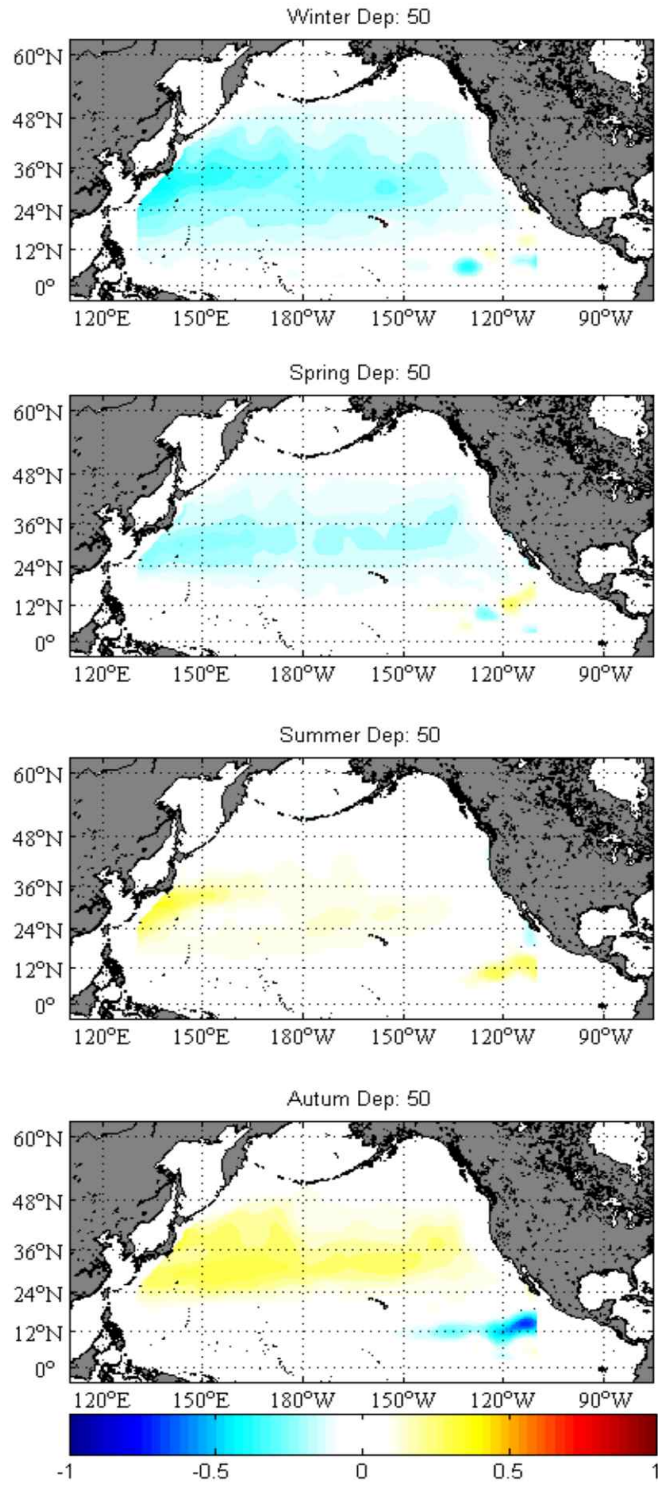


Figure 34 Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (50m)

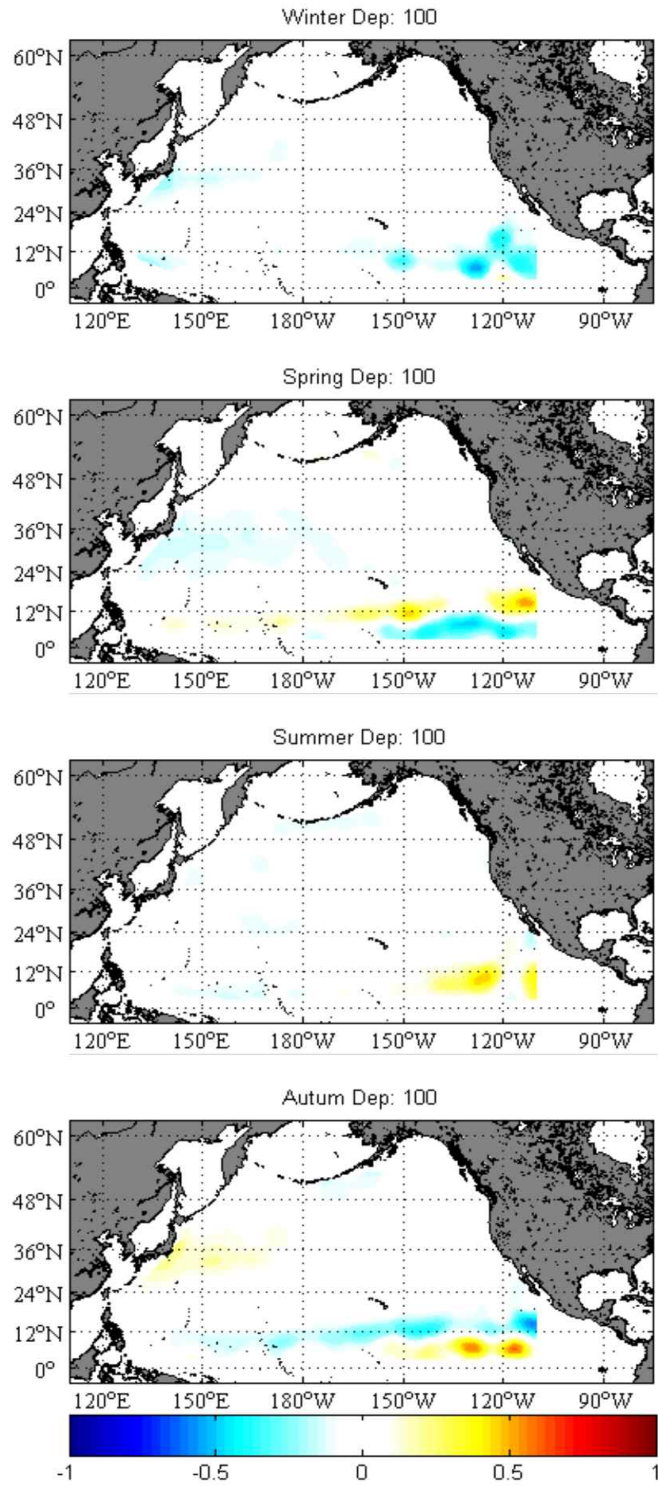


Figure 35 Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (100m)

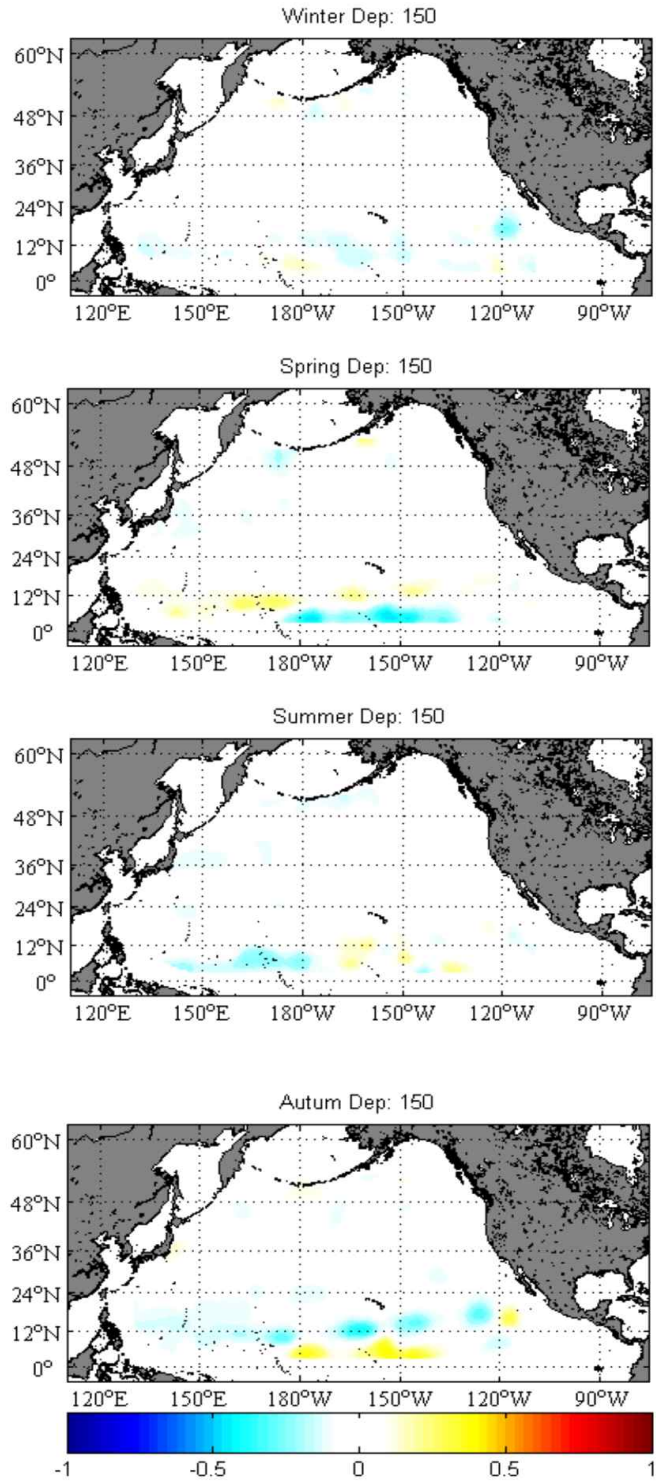


Figure 36 Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (150m)

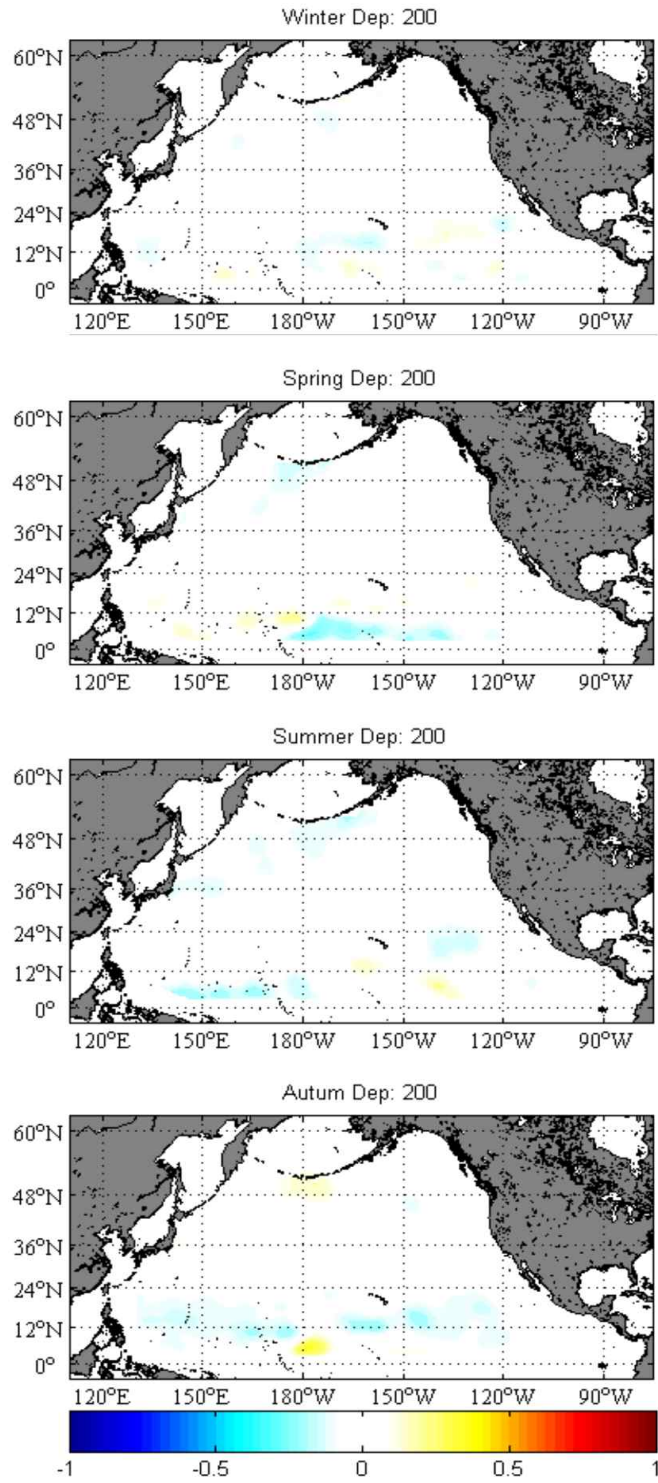


Figure 37 Predicted seasonal anomaly in Ω_{AR} (200m)

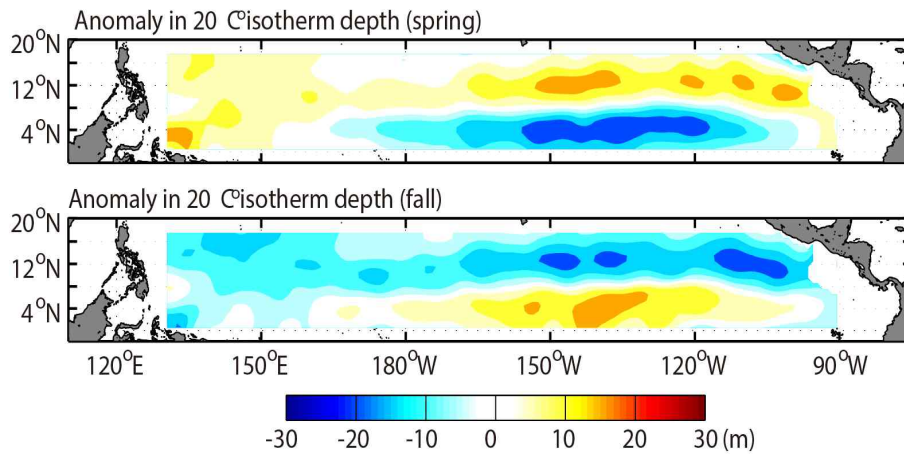


Figure 38 Seasonal variation in the 20°C isotherm

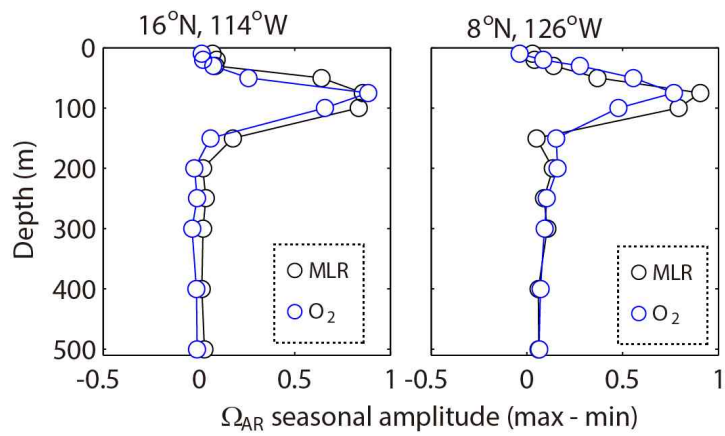


Figure 39 Comparison of Ω_{AR} seasonal amplitudes in the tropical NPO taken from O_2 -based and MLR-based estimations

이상의 연구결과를 종합하면, 북태평양에의 50미터와 100미터 깊이에 서식하는 생물들은 아라고나이트 포화도의 계절변동을 0.4-0.6 정도로 겪는 것으로 보여지며, 이것은 연평균 포화도의 약 10-25%이다. 그림 39에 보여지는 지역처럼 제한된 지역에서 최대 1까지 차이가 날 수 있으며, 이 정도의 계절변동은 연안에서 발생할 수 있는 그것과 근접하는 수치이며, 화석연료 기인의 이산화탄소 유입으로 인해 수십년간 지속된 변화와 맞먹는다(Juranek et al., 2009; Juranek et al., 2011, Feely et al., 2009).

마지막으로 100%, 150%, 200% 포화도 깊이의 계절변동을 살펴보았다. 100% 포화도 깊이의 경우에는 생물이 해양산성화에 의해서 영향을 받는 기준선으로 알려져 있기 때문에 중요하다. 아라고나이트 포화도 예측 알고리즘의 오차를 감안하여, 90%와 110% 포화도 깊이를 100% 포화도 깊이의 신뢰구간으로 정하여서 계절적 변동이 이 신뢰구간을 벗어나면 계절적 변동이 실제로 있는 것으로 봤다. 하지만, 100% 포화도의 계절적 차이는 거의 모든 지역에서 유의미하지 않았으며(그림 40), 150%와 200% 포화도 깊이의 경우에는 열대 북동태평양 지역에서 주로 의미있는 계절차이를 보였다. 하지만, 그 변동폭은 수십 미터로 크지 않았다. 산호초 등은 150% 포화도에서도 피해를 입을 수 있다고 알려져 있는데(Langdon et al., 2003; Andersson et al., 2009), 산호가 주로 서식하는 북동 태평양 해역에서는 계절변화가 뚜렷하지 않았으므로(그림 41, 42) 계절 변동이 산호 생태계에 미치는 영향은 약할 것이라 판단된다.

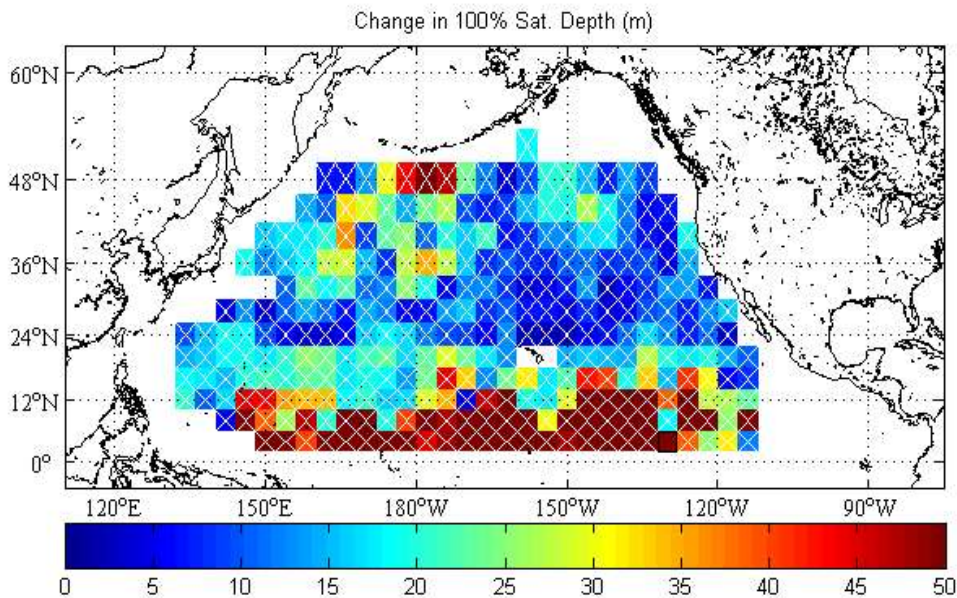


Figure 40 Seasonal changes in the 100% Ω_{AR} (unit; m)

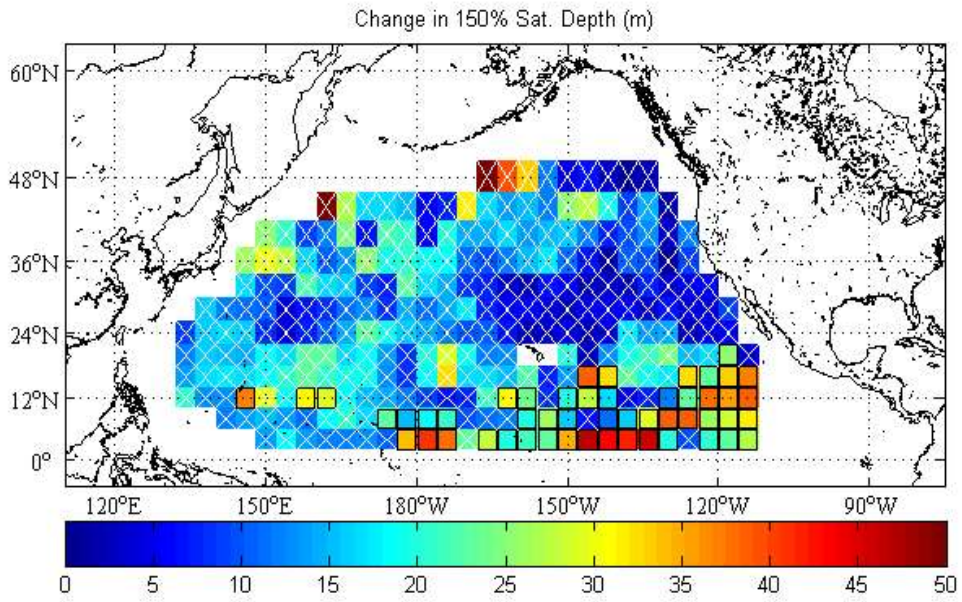


그림 41 Seasonal changes in the 150% Ω_{AR} (unit; m)

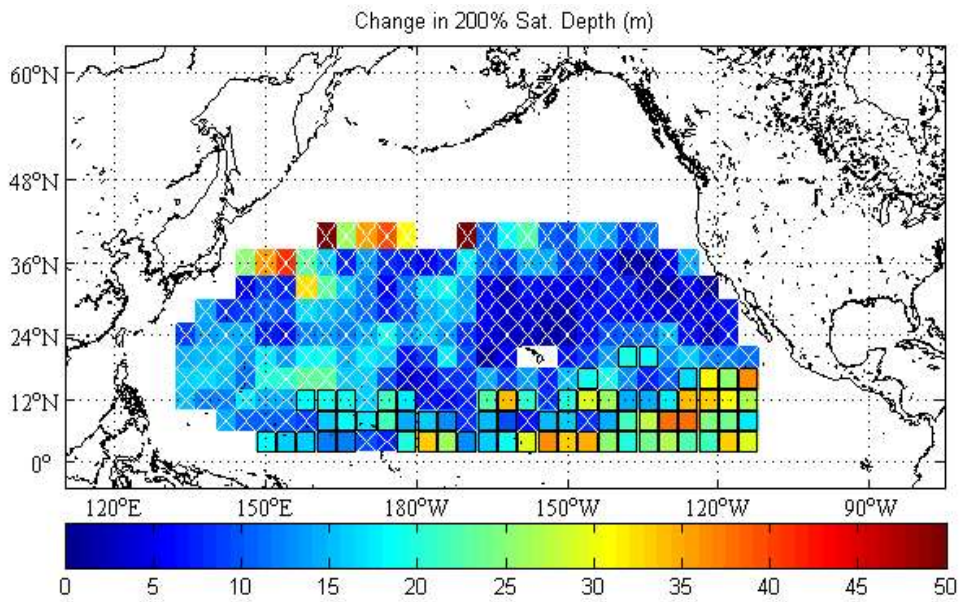


그림 42 Seasonal changes in the 200% Ω_{AR} (unit; m)

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1절. 연구목표 달성도

1. 연구내용 대비 달성도

연구 목표 및 세부 내용 대비 달성도 및 관련 내용의 위치는 다음과 같다.

Table 3 Achievements of the research objectives

세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	달성도	관련내용
해양 조사 자료 수집	해외 데이터베이스로부터 양질의 해양 CO ₂ 인자를 포함하는 해양학 자료의 수집	100%	3장 1절
탄산칼슘 포화도 예측 모형 개발	탄산칼슘 포화도를 종속변수로, 온도, 영양염 등을 독립변수로 하는 다중선형회귀 모형 개발	100%	3장 2절 (그림 12-14)
탄산칼슘 포화도 분포도 작성	MLR 모형과 해양관측자료 등을 결합하여 북태평양 해역의 탄산칼슘 포화도 분포 규명	100%	3장 4절 (그림 30-33, 그림 40-42)
연구결과의 검증 및 보완	타 연구결과와 비교 및 전문가 의견 수렴 및 결과 보완 후 최종 결과 산출	100%	3장 2절 (그림 26-29)

2. 정량적 목표 달성도

정량적 연구목표는 SCI 논문 1편과 해외학외 발표 1건이었고, SCI논문은 투고하였고, 2014년 12월 AGU 가을학회에서 연구결과를 발표하였다.

제 2절. 관련분야의 기여도

1. 기술적 측면

○ 해양산성화의 지표인 탄산칼슘의 포화도를 북태평양에서 새로운 방식으로 연구하여 학문적인 성과를 얻어냄. 특히, 북태평양 지역은 해양산성화의 위협이 가장 큰 지역으로 그 의의가 큼.

○ 다중선형회귀 모형을 통해서 탄산칼슘의 포화도를 예측하는 방법이 그 동안은 특정 연안 지역에 한정되어 적용되어 왔는데, 본 연구에서는 북태평양 모든 지역에 대해 시도함으로써, 그 적용범위를 크게 확대하여 적용하는 새로운 계기가 됨.

○ 북태평양에서 해양산성화에 특히 취약한 지역 및 해양산성화의 계절적 변동의 중요성을 새롭게 조명하는 결과를 낼 수 있을 것이라 예상함.

나. 경제 산업적 측면

○ 본 연구는 기초연구이기에 직접적인 경제, 산업적 효과를 창출하지 못하지만, 해양산성화가 전 지구적 해양환경 문제로 대두되고 있기 때문에, 대한민국에 경제 위상에 걸맞은 해양산성화의 연구의 확산이 국가 내부적으로 필요하고 이것에 기여할 수 있음.

○ 우리나라 해양생태계도 북태평양 해역의 영향을 받으며, 북태평양 해역에서 원양어업이 활발히 진행하고 있음. 따라서 장기적 관점에서 북태평양 해역의 해양생태계 건진성의 중요 지표가 될 해양산성화에 대한 연구가 필요하고, 그를 통해 장기적 대책을 세울 필요가 있음. 본 연구가 이런 대책을 세우기 위한 자료로 기여할 수 있음.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 북태평양 해양산성화 기초자료로 해양산성화 예측 생지화학 모형의 검증/보정 자료 등으로 사용 가능함.
- 해양연구의 선진국인 미국과 유럽은 앞다투어 대형 해양산성화 연구 프로젝트를 가동하고 있으나, 국내의 실정은 그렇지 못함. 본 연구 결과는 해양산성화 관련 국가연구개발 사업을 추진하기 위한 기초자료로 활용 가능함.
- 미국 오레곤 주의 굴양식 피해의 사례처럼, 향후에 우리 연안 지역에서도 이와 같은 피해가 발생할 수 있음. 본 기초연구를 발판으로, 향후 우리 연안 특성에 맞게 개발된 해양산성화 예측모형을 우리나라의 연안 관측망 자료와 결합하여 우리나라 연안 지역에 대한 해양산성화 경보시스템 등을 개발하는데 활용 가능함.
- 2013년 말에 착수한 위성기반 탄소지도 사업을 통해 향후 4년간 우리나라 관할해역의 이산화탄소 인자에 대한 조사가 중점적으로 진행될 예정임. 해당 자료를 활용하면, 본 연구과제에서 제시하고 있는 연구방법론을 통해서 한반도 연안의 산성화를 예측할 수 있는 다중회귀모형의 알고리즘을 개발할 수 있음. 수온, 염분, 산소 등의 기초해양학 인자는 해양환경 모니터링의 일환으로 정기적으로 측정되고 있으며, 부이로부터도 높은 해상도의 자료를 얻을 수 있음. 이런 자료를 우리 연안지역의 다중회귀모형 알고리즘과 결합하여 산성화 정도를 예측하는데 활용이 가능함. 특히, 부이는 연속측정자료를 실시간으로 낼 수 있기 때문에, 실시간 산성화 예측이 가능하여 경보시스템으로 활용 가능성이 있음.

제 6 장 참고문헌

- Alin, S. R., R. A. Feely, A. G. Dickson, J. Martín Hernández-Ayón, L. W. Juraneck, M. D. Ohman, and R. Goericke (2012), Robust empirical relationships for estimating the carbonate system in the southern California Current System and application to CalCOFI hydrographic cruise data (2005–2011), *J. Geophys. Res.*, *117*(5), C05033.
- Andersson, A. J., I. B. Kuffner, F. T. Mackenzie, P. L. Jokiel, K. S. Rodgers, and A. Tan (2009), Net Loss of CaCO_3 from a subtropical calcifying community due to seawater acidification: mesocosm-scale experimental evidence, *Biogeosciences*, *6*(8), 1811–1823.
- Dickson, A. G., and F. J. Millero (1987), A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media, *Deep-Sea Res. Part A*, *34*(10), 1733–1743.
- Evans, W., J. T. Mathis, P. Winsor, H. Statscewich, and T. E. Whitledge (2013), A regression modeling approach for studying carbonate system variability in the northern Gulf of Alaska, *J. Geophys. Res.*, *118*(1), 476–489.
- Feely, R. A., S. C. Doney, and S. R. Cooley (2009), Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high- CO_2 world, *Oceanogr.*, *22*(4), 36–47.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, J. M. Hernandez-Ayon, D. Ianson, and B. Hales (2008), Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf, *Science*, *320*(5882), 1490–1492.
- Feely, R. A., R. H. Byrne, J. G. Acker, P. R. Betzer, C.-T. A. Chen, J. F. Gendron, and M. F. Lamb (1988), Winter–summer variations of calcite and aragonite saturation in the Northeast Pacific, *Mar. Chem.*, *25*(3), 227–241.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V. J. Fabry, and F. J. Millero (2004), Impact of anthropogenic CO_2 on the CaCO_3 system in the oceans, *Science*, *305*(5682), 362–366.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, R. H. Byrne, F. J. Millero, A. G. Dickson, R. Wanninkhof, A. Murata, L. A. Miller, and D. Greeley (2012), Decadal changes in the aragonite and calcite saturation state of the Pacific Ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, *26*(3), GB3001.
- Garcia, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, O. K. Baranova, M. M.

- Zweng, J. R. Reagan, and D. R. Johnson (2013), World Ocean Atlas 2013 Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation *Rep. NOAA Atlas NESDIS 75*, 27 pp, National Oceanographic Data Center Silver Spring, MD.
- Gruber, N., C. Hauri, Z. Lachkar, D. Loher, T. L. Frölicher, and G.-K. Plattner (2012), Rapid progression of ocean acidification in the California Current System, *Science*, 337(6091), 220–223.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A., Hatziolos, M.E., 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.
- Hsin, Y. C., and B. Qiu (2012), Seasonal fluctuations of the surface North Equatorial Countercurrent (NECC) across the Pacific basin, *J. Geophys. Res.*, 117(6).
- Juranek, L. W., R. A. Feely, D. Gilbert, H. Freeland, and L. A. Miller (2011), Real-time estimation of pH and aragonite saturation state from Argo profiling floats: Prospects for an autonomous carbon observing strategy, *Geophys. Res. Lett.*, 38(17), L17603.
- Juranek, L. W., R. A. Feely, W. T. Peterson, S. R. Alin, B. Hales, K. Lee, C. L. Sabine, and J. Peterson (2009), A novel method for determination of aragonite saturation state on the continental shelf of central Oregon using multi-parameter relationships with hydrographic data, *Geophys. Res. Lett.*, 36(24), L24601.
- Kessler, W. S. (2006), The circulation of the eastern tropical Pacific: A review, *Prog. Oceanogr.*, 69(2 - 4), 181–217.
- Kim, T.-W., K. Lee, R. A. Feely, C. L. Sabine, C.-T. A. Chen, H. J. Jeong, and K. Y. Kim (2010), Prediction of Sea of Japan (East Sea) acidification over the past 40 years using a multiparameter regression model, *Global Biogeochem. Cycles*, 24(3), GB3005.
- Kuchinke, M., B. Tilbrook, and A. Lenton (2014), Seasonal variability of aragonite saturation state in the Western Pacific, *Mar. Chem.*, 161, 1–13.
- Langdon, C., W. S. Broecker, D. E. Hammond, E. Glenn, K. Fitzsimmons, S. G. Nelson, T. H. Peng, I. Hajdas, and G. Bonani (2003), Effect of elevated CO₂ on the community metabolism of an experimental coral reef, *Global Biogeochem. Cycles*, 17(1), 1011.

- Lee, K., F. J. Millero, R. H. Byrne, R. A. Feely, and R. Wanninkhof (2000), The recommended dissociation constants for carbonic acid in seawater, *Geophys. Res. Lett.*, 27(2), 229–232.
- McElligott, S., R. H. Byrne, K. Lee, R. Wanninkhof, F. J. Millero, and R. A. Feely (1998), Discrete water column measurements of CO₂ fugacity and pH_T in seawater: A comparison of direct measurements and thermodynamic calculations, *Mar. Chem.*, 60(1–2), 63–73.
- Mehrbach, C., C. H. Culberson, J. E. Hawley, and R. M. Rytkowicz (1973), Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure, *Limnol. Oceanogr.*, 18, 897–907.
- Millero, F. J. (1995), Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(4), 661–677.
- Millero, F. J., D. Pierrot, K. Lee, R. Wanninkhof, R. Feely, C. L. Sabine, R. M. Key, and T. Takahashi (2002), Dissociation constants for carbonic acid determined from field measurements, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(10), 1705–1723.
- Orr, J. C., et al. (2005), Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, *Nature*, 437(7059), 681–686.
- Pennington, J. T., K. L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R. Calienes, and F. P. Chavez (2006), Primary production in the eastern tropical Pacific: A review, *Prog. Oceanogr.*, 69(2–4), 285–317.
- Sabine, C. L., R. A. Feely, R. M. Key, J. L. Bullister, F. J. Millero, K. Lee, T. H. Peng, B. Tilbrook, T. Ono, and C. S. Wong (2002), Distribution of anthropogenic CO₂ in the Pacific Ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 30–31.
- Suzuki, T., M. Ishii, M. Aoyama, J. R. Christian, K. Enyo, T. Kawano, R. M. Key, N. Kosugi, A. Kozyr, L. A. Miller, A. Murata, T. Nakano, T. Ono, T. Saino, K. Sasaki, D. Sasano, Y. Takatani, M. Wakita and C. Sabine. 2013. PACIFICA Data Synthesis Project. ORNL/CDIAC-159, NDP-092. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. doi:10.3334/CDIAC/OTG.PACIFICA_NDP092
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, D. W. Chipman, J. G. Goddard, C. Ho, T. Newberger, C. Sweeney, and D. R. Munro (2014), Climatological distributions of pH, pCO₂, total CO₂, alkalinity, and CaCO₃ saturation in the global surface ocean, and temporal

changes at selected locations, *Mar. Chem.*, 164(0), 95-125.

Turley, C., Blackford, J., Widdicombe, S., Lowe, D., Nightingale, P.D. & Rees, A.P. (2006) Reviewing the impact of increased atmospheric CO₂ on oceanic pH and the marine ecosystem. In: *Avoiding Dangerous Climate Change*, Schellnhuber, H J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley, T. and Yohe, G (Eds),

Cambridge University Press, 8, 65-70. Wanninkhof, R., E. Lewis, R. A. Feely, and F. J. Millero (1999), The optimal carbonate dissociation constants for determining surface water pCO₂ from alkalinity and total inorganic carbon, *Mar. Chem.*, 65(3-4), 291-301.

Xie, L., and W. W. Hsieh (1995), The global distribution of wind-induced upwelling, *Fisheries Oceanography*, 4(1), 52-67.