

BSPE99449-11318-4

쿠로시오 확장역에서의 이산화탄소
흡수 변동 연구

Changes in oceanic CO₂ uptake in the Kuroshio Extension
region

2017.02.28

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “쿠로시오 확장역에서의 이산화탄소 흡수 변동 연구”과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2017. 02. 28.

총괄연구책임자 : 박 근 하

참 여 연 구 원 : 이 선 은
이 병 길
김 성 은

보고서 초록

과제고유 번호	PE99449	해당단계 연구기간	2016.06.01- 2017.02.28	단계 구분	
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	쿠로시오 확장역에서의 이산화탄소 흡수 변동 연구			
	세부과제명				
연구책임자	박근하	해당단계 참여연구원 수	총 : 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총 : 4 명 내부: 1 명 외부: 3 명	총 연구비	정부: 55,000 천원 기업: 천원 계 : 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 동해특성연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약				보고서 면수	34
<p>○ 북서태평양에서 여름철 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 분포 및 분포 조절 요인을 파악함. 각 지역 간의 표층 이산화탄소 분압 공간변동은 수온과 총 용존 무기탄소 변화에 의해 결정되며, 각 지역 내 변동은 변동을 일으키는 인자들이 지역별로 달랐음.</p> <p>○ 특히, 쿠로시오 확장역에서 2015년 여름에 관측된 매우 높은 이산화탄소 분압은 climatological value보다 훨씬 높았으며, 이는 계절에 따른 수온 변화의 폭이 증가하였기 때문인 것으로 나타남.</p> <p>○ KEO 부이로 대표되는 쿠로시오 확장역에서의 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율을 산정함.</p> <p>○ KEO 부이의 해양 표층 이산화탄소 분압의 연 변화는 수온, 수직 혼합, 식물생산량에 의함.</p> <p>○ 겨울철 대기보다 낮은 이산화탄소 분압 증가율은 수온과 관련 있으며, 여름철 대기보다 높은 이산화탄소 분압 증가율은 염분 및 식물생산량 변화와 관련이 있음.</p> <p>○ 이 지역의 이산화탄소 흡수량은 최근 증가한 것으로 밝혀짐. KEO 부이와 SOCAT 데이터 베이스 자료 모두 흡수량 증가를 보임. 이는 대기로 이산화탄소를 방출하는 여름철을 제외한 계절의 대기 이산화탄소 흡수량이 증가하였기 때문임.</p> <p>○ Sea level anomalies와 해양 표층 이산화탄소 분압 변화 사이에 좋은 상관관계가 성립하지만, 정확히 어떤 프로세스에 의해서 관계가 성립하는지는 현재 수집된 과거 자료의 한계로 파악이 어려움. 따라서 이 부분에 대한 추가 연구가 필요함.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	해양이산화탄소 흡수, 북서태평양, 이산화탄소 분압 변동, 기후 변화, 쿠로시오 확장역			
	영 어	Oceanic CO ₂ uptake, western North Pacific, changes in fCO ₂ , climate change, Kuroshio Extension region			

요 약 문

I. 제 목

쿠로시오 확장역에서의 이산화탄소 흡수 변동 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

해양은 대기로부터 방출된 이산화탄소의 주요 흡수원으로서 대기에 잔류하는 이산화탄소량을 조절하는 중요한 역할을 해왔다. 해양이 대기 이산화탄소를 흡수하는 가장 일차적인 기작은 해양 표층과 대기의 이산화탄소 분압 차이이며, 해양 표층 이산화탄소 분압을 모니터링하면 해양의 이산화탄소 흡수 능력 변화를 알 수 있다. 쿠로시오 확장역은 북태평양에서 가장 많은 양의 대기 이산화탄소를 흡수하는 지역으로, 이 지역에서의 대기 이산화탄소 흡수 변동은 북태평양 전체 흡수량에 큰 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 본 연구는 쿠로시오 확장역에서 선박으로 관측된 해양 표층 및 대기 이산화탄소 분압 자료와 고시계열의 부이 자료를 이용하여 이 지역의 이산화탄소 흡수 변동을 파악하고 그 변화를 야기하는 원인을 살펴보고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구기간: 2016년 6월 1일 - 2017년 2월 28일

2. 연구개발 내용

- 가. 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 분포 및 분포 조절 요인 파악
- 나. 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율 및 변동 요인 파악
- 다. 이 지역의 이산화탄소 흡수량 변화 진단

IV. 연구개발결과

2015년 여름 북서태평양 관측 자료를 이용하여 여름철 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 분포 및 분포 조절 요인을 파악하였다. 각 지역 간의 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 변동은 수온과 총 용존 무기탄소 변화에 의해 결정되며, 각 지역 내 변동은 변동을 일으키는 인자들이 지역별로 달랐다. 여름철 쿠로시오 확장역 내에서의 이산화탄소 분압 변동은 수온 변화에 의해 결정되는 것으로 밝혀졌다. 특히, 쿠로시오 확장역에서 매우 높은

이산화탄소 분압이 관측되었고, 이는 climatological value보다 훨씬 높은 값으로 계절에 따른 수온 변화 폭의 증가가 원인인 것으로 나타났다. 이 지역에 위치한 KEO 부이 자료로 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율을 산정하였다. KEO 부이의 해양 표층 이산화탄소 분압의 연 변화는 수온, 수직 혼합, 식물생산량 변화에 의한 것으로 보인다. 겨울철 대기보다 낮은 이산화탄소 분압 증가율은 수온 변화와 관련이 있으며, 여름철 대기보다 높은 이산화탄소 분압 증가율은 염분 및 식물생산량 변화와 관련이 있다. 이 지역의 이산화탄소 흡수량은 최근 증가한 것으로 밝혀졌으며, KEO 부이와 SOCAT 데이터베이스 자료 모두 비슷한 증가율을 보였다. 이는 대기로 이산화탄소를 방출하는 여름철을 제외한 계절의 대기 이산화탄소 흡수량이 증가하였기 때문이다. Sea level anomalies와 해양 표층 이산화탄소 분압 변화 사이에 좋은 상관관계가 성립하는 것이 발견되었지만, 정확히 어떤 프로세스에 의해서 관계가 성립하는지는 현재 수집된 과거 자료의 한계로 파악이 어렵다. 따라서 이 부분에 대한 추가 연구가 필요하다.

V. 연구개발결과의 활용계획

연구결과는 북서태평양, 특히 쿠로시오 확장역의 대기 이산화탄소 흡수 변동에 대한 과학적 이해를 넓히기 위한 기초자료로 활용될 것이며, 3차 생지화학 모델 및 기후 진단 모델의 평가 및 결과 향상을 위한 주요 기반 자료로 사용될 수 있다. 장기간의 이산화탄소 자료가 확보된 지역에서는 본 연구에서 사용된 방법을 이용하여 그 지역의 이산화탄소 흡수량 변화 및 요인을 진단해 볼 수 있다.

S U M M A R Y

I. Title

Changes in oceanic CO₂ uptake in the Kuroshio Extension region

II. Necessities and Objectives of the Study

The ocean has played an important role in modulating the increase of carbon dioxide (CO₂) concentrations in the atmosphere during the industrial era. The principal removal processes of atmospheric CO₂ is CO₂ exchange at the sea-air interface. The key driving force for sea-air CO₂ exchange is the difference in CO₂ fugacity ($\Delta f\text{CO}_2 = f\text{CO}_{2\text{SW}} - f\text{CO}_{2\text{AIR}}$) between surface seawater and the atmosphere. Therefore, monitoring of variability in surface CO₂ concentrations is critical, not only to detect changes in oceanic CO₂ uptake, but also to better understand the processes causing these changes. The Kuroshio Extension (KE) region is the largest sink for the atmospheric CO₂ in the North Pacific. However, the mechanisms controlling CO₂ uptake in this region have not yet been fully elucidated. In this study, we describe regional variation in surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$, examine the reasons for the variation, and explore the factors underlying the recent large increase in summer surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ in the KE region. We also determine rates of changes in surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ using the KEO buoy data and data from SOCAT database, and investigate contributing factors to temporal changes in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and difference between rates of changes in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and $f\text{CO}_{2\text{AIR}}$. Finally, we check the changes in sea-air CO₂ fluxes.

III. Contents and scopes of the study

1. Study period: June 1, 2016 - February 28, 2017
2. Contents and scopes of the study
 - a. Understanding of spatial distribution of surface $f\text{CO}_2$ and its controlling factors
 - b. Determining of increase rate in surface $f\text{CO}_2$ and understanding of its possible causes

c. Understanding of changes in sea-air CO₂ fluxes

IV. Results

We observed unusually high levels ($> 440 \mu\text{atm}$) of carbon dioxide fugacity ($f\text{CO}_2$) in surface seawater in the western subtropical North Pacific, the area where Subtropical Mode Water is formed, during summer 2015. The NOAA Kuroshio Extension Observatory (KEO) moored buoy located in this region also measured high CO₂ values, up to $500 \mu\text{atm}$ during this period. These high sea surface $f\text{CO}_2$ ($f\text{CO}_{2\text{SW}}$) values are explained by much higher normalized total dissolved inorganic carbon and slightly higher normalized total alkalinity concentrations in this region compared to the equatorial Pacific. Moreover, these values are much higher than the climatological CO₂ values, even considering increasing atmospheric CO₂, indicating a recent large increase in sea surface CO₂ concentrations. A large seasonal change in sea surface temperature (SST) contributed to higher surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ in the summer of 2015. Rates of changes in surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ are determined from the KEO buoy data and data from SOCAT database. Annual changes in surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ in the KE region were due to changes in SST, mixing, and primary production. In winter, slower increase of surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ than the atmosphere were related to changes in SST, and faster increase of summer $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ than the atmosphere were associated with changes in sea surface salinity and primary production. Annual net sea-air CO₂ fluxes in this region show increasing trend for the study period.

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 changes in oceanic CO₂ uptake in the North Pacific Ocean, particularly the KE region. Also, they can be used for validating and improving the results of 3-dimensional biogeochemical and climate models. 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 where long-term CO₂ datasets are available.

C O N T E N T S

Summary	v
Contents	vii
List of Figures	ix
List of Tables	xi
Chapter I Introduction	1
Section 1 Necessities of the study	1
Section 2 Contents of the study	3
Chapter II Status of domestic and oversea technology	5
Section 1 Trend of study	5
Section 2 Previous related studies	8
Section 3 Weak points of current technology status	9
Chapter III Contents and results of the study	11
Section 1 Spatial distribution of surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and its controlling factor	11
Section 2 Determination of increase rate in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$	17
Section 3 Parameters controlling changes in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$	22
Section 4 Changes in sea-air CO_2 fluxes	27
Chapter IV Achievements of objectives and contributions to the related fields	30
Section 1 Achievements of objectives	30
Section 2 Contributions to the related fields	30
Chapter V Application plans of the results of the study	32
Chapter VI References	33

목 차

요 약 문	iii
목 차	viii
그림목차	ix
표 목 차	xi
제 1 장 서론	1
제 1절 연구의 필요성	1
제 2절 연구 개발의 범위 및 개요	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1절 국내외 연구 동향	5
제 2절 기타 선행 연구 분석	8
제 3절 현기술의 한계 분석	9
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
제 1절 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 분포 및 조절 인자 파악	11
제 2절 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율 산정	17
제 3절 해양 표층 이산화탄소 분압 증가에 영향을 주는 인자 파악	22
제 4절 이산화탄소 흡수량 변화 진단	27
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	30
제 1절 연구목표 달성도	30
제 2절 관련분야의 기여도	30
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	32
제 6 장 참고문헌	33

List of Figures

Figure 1	Global carbon dioxide budget (2006–2015) (Le Quéré et al., 2016) ······	1
Figure 2	Column inventory of anthropogenic CO ₂ in the ocean (Sabine et al., 2004)·	2
Figure 3	Climatological air–sea CO ₂ fluxes (Park et al., 2010)··········	2
Figure 4	C _T concentrations accumulated during the periods 1992–1999 and 1999–2007 as a function of density surface and depth (Park et al., 2008)···	5
Figure 5	Long-term trend of fCO ₂ at the Ulleing Basin from 1995 and 2009 (Kim et al., 2014)··········	6
Figure 6	Map of International Repeat Hydrography Program··········	7
Figure 7	Trend in ΔpCO ₂ (μatm yr ⁻¹) between 1981 and 2007 from observations (Le Quéré et al., 2010)··········	9
Figure 8	Surface fCO _{2SW} (μatm) variation along the cruise track. A gray square shows the location of the KEO buoy and a rectangle with dashed line denotes the KE region··········	11
Figure 9	Meridional distributions of a) surface fCO _{2SW} and fCO _{2AIR} , b) SST, and c) SSS··········	12
Figure 10	Meridional distributions of a) DIC and NDIC (normalized to salinity of 35) and b) TA and NTA. Arrow in (a) indicates the abrupt increase in NDIC concentrations at 27.5°N··········	14
Figure 11	Correlations between fCO _{2SW} and SST. Open dots, open squares, and gray triangles denote values in the regions of 35–41.5°N, 27.5–35°N, and 2– 27.5°N, respectively. Inserted figure shows a correlation between fCO _{2SW} and SSS in the region of 2–27.5°N where no significant correlation between fCO _{2SW} and SST was found··········	15
Figure 12	a) Monthly mean NOAA OI SST values in the middle latitude region (27.5–34°N) for the period of 2000–2015. Solid line indicates a decrease of de-seasonalized monthly mean values. b) Mean seasonal difference in SST for the period of 2001–2005 when the CO ₂ values used for the climatology were obtained and seasonal amplitude of SST in 2015 when the cruise was conducted··········	16
Figure 13	KEO buoy CO ₂ data··········	18
Figure 14	SOCAT database (v.3) data in the western North Pacific··········	18
Figure 15	Temporal variations of a) fCO _{2SW} and fCO _{2AIR} , b) SST, and c) SSS in KEO buoy data··········	19
Figure 16	Monthly mean values of (top) fCO _{2SW} and (bottom) fCO _{2AIR} . Black and gray circles denote the mothly values in winter and summer, respectively, while the white circles are the remaining months. Solid lines indicate	

increases of de-seasonalized monthly mean values for the full years. Dashed and dotted lines denote the rates of changes in the winter and summer, respectively..... 20

Figure 17 Monthly $1^\circ \times 1^\circ$ gridded SOCAT data in the area where the KEO buoy is located for (top) the full year when data exist and (bottom) the period when data used for the rate calculation measured..... 21

Figure 18 Correlation between $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and SST ($\partial \ln f\text{CO}_{2\text{SW}} / \partial \text{SST} = 1.94 \pm 0.01 \%$ $^\circ\text{C}^{-1}$)..... 23

Figure 19 Correlation between mean winter $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and mean winter mixed layer depth (MLD)..... 23

Figure 20 Temporal changes in (top) $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and (bottom) chlorophyll concentrations. Blue circles denote the times when $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ show minimum values in spring due to high biological production confirmed by high chlorophyll concentrations..... 24

Figure 21 Correlation between annual NPP and mean seasonal amplitude of $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ ($r=-0.98$, $p<0.005$)..... 24

Figure 22 Kuroshio Extension Index (KEI), Underlines indicate unstable periods (Qui et al., 2014)..... 25

Figure 23 Temporal variations between $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ from a) KEO buoy and b) SOCAT database and sea level anomaly (SLA)..... 26

Figure 24 Net primary production in the region where the KEO buoy is located..... 27

Figure 25 Annual net sea-air CO_2 fluxes (black bars), effluxes (white bars), and influxes (gray bars) from the KEO buoy data for the study period..... 28

Figure 26 Annual net sea-air CO_2 fluxes (black bars), effluxes (white bars), and influxes (gray bars) from the SOCAT database for the study period..... 29

List of Tables

Table 1	Contents and objectives of the study	4
Table 2	Rates of changes in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and $f\text{CO}_{2\text{AIR}}$ ($\mu\text{atm yr}^{-1}$).....	20
Table 3	Rates of changes in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ for the different periods.....	22
Table 4	Achievements of the research objectives.....	30

제 1 장 서론

제 1절 연구의 필요성

1. 연구개발의 배경 및 필요성

- 해양은 대기로부터 방출된 이산화탄소의 약 30% 정도를 흡수하는 중요한 이산화탄소 흡수원이다. 현재 지구 온난화와 같은 기후 변화로 인해 해양은 수온 및 해수면 상승, 빈산소층의 확대, 생물생산력 변동 등 다양한 변화를 겪고 있으며, 지속적인 온실가스 배출로 그 변화는 더욱 확대되고 심해질 것으로 예상된다. 이와 함께 해양의 대기 이산화탄소 흡수 능력도 변할 것으로 예상되며, 이는 기후 변화에 다시 영향을 미칠 수 있기 때문에 중요성이 대두되고 있다.

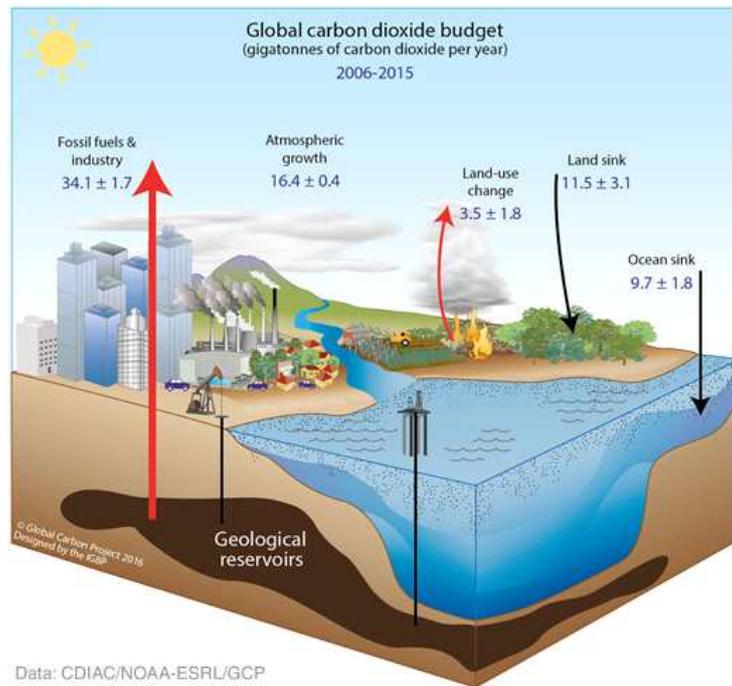


Figure 1 Global carbon dioxide budget (2006-2015) (Le Quéré et al., 2016)

- 이러한 측면에서 해양 내부로 많은 양의 이산화탄소를 흡수 하는 기작인 심층수 형성이나 중층수 형성이 일어나는 지역은 특히 중요하며 모니터링의 가치가 크다.

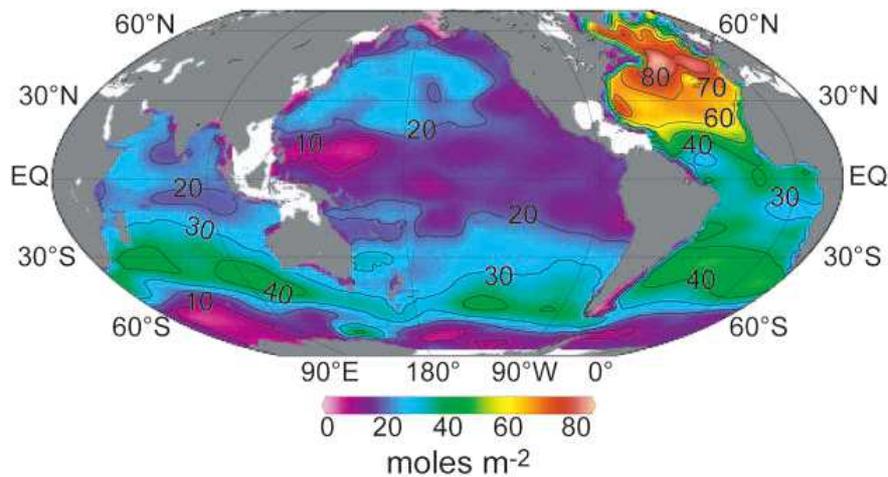


Figure 2 Column inventory of anthropogenic CO₂ in the ocean (Sabine et al., 2004)

- Kuroshio Extension 지역은 북태평양에서 mode water가 형성되는 지역으로 mode water 형성과 함께 많은 양의 이산화탄소가 해양 내부로 흡수되기 때문에 북태평양에서 가장 중요한 대기 이산화탄소 흡수 지역 (carbon hot spot)으로 알려져 있다. 해양 표층-대기 이산화탄소 교환량 또한 북태평양에서 가장 크다. 따라서 이 지역의 이산화탄소 흡수 변동은 북태평양 전체의 대기 이산화탄소 흡수에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 연구의 가치와 필요성이 있다.

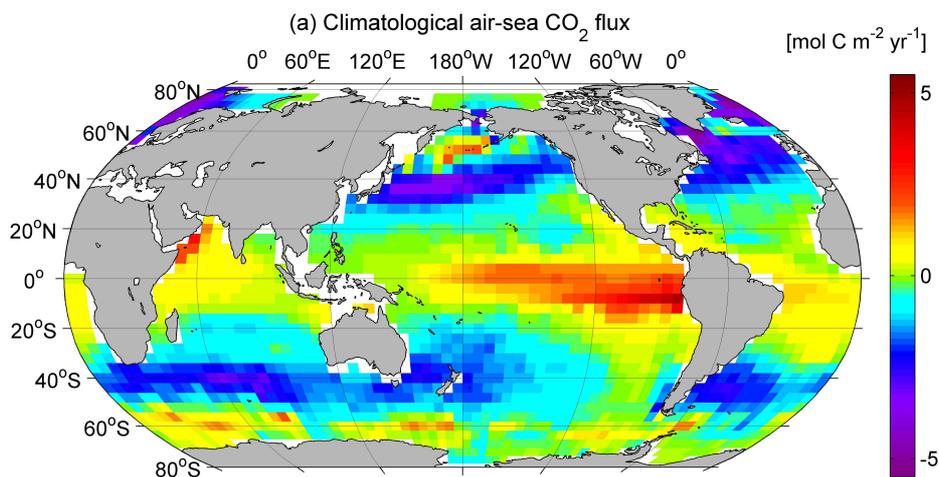


Figure 3 Climatological air-sea CO₂ fluxes (Park et al., 2010)

- 해양의 대기 이산화탄소 흡수 능력의 변화는 미래 대기 이산화탄소 농도 추정 및 기후 변동 예측에 매우 중요한 항목이며, 이는 다양한 프로세스에 의해 변할 수 있기 때문에 전 지구적 뿐만 아니라 지역 스케일에서 연구될 필요가 있다.

2. 상위목표와의 연계성

가. 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성

- 본 연구는 해양과기원의 목적 ‘해양의 체계적인 연구’와 ‘국가 해양과학기술의 발전과 국제경쟁력 확보’ 달성에 기여한다.
- 해양과기원의 경영목표 중 ‘해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응’에 연계되어 있다.
 - 해양의 이산화탄소 흡수 변동은 기후 변화와 밀접한 관련이 있다.

나. 국가적 아젠다 (정부 140대 국정과제, 제3차 과학기술기본계획 등)와의 연계성

- 정부 140대 국정과제의 ‘해양 신성장동력 창출 및 체계적 해양관리’와 ‘기상이변 등 기후변화 적응’에 연계된다.
- 제3차 과학기술기본계획의 ‘기후변화대응력 강화’와 ‘해양과학조사 및 예보 역량 강화’와 연계된다.
 - 기후 변화에 따른 해양의 이산화탄소 흡수 능력 변화 파악을 통해 기후 변화 대응에 필수 자료를 확보하고 이를 통해 모델링 역량을 강화할 수 있다.

제 2절. 연구 개발의 범위 및 개요

1. 연구개발의 최종목표

- Kuroshio Extension 지역의 기후 변화에 따른 이산화탄소 흡수 변동 파악

2. 당해연도 연구 목표 및 내용

- 총 9개월의 연구기간 동안의 세부연구 목표 및 내용은 아래 표에 요약된다.

Table 1 Contents and objectives of the study

세부 연구 목표	세부 연구개발 내용	연구범위
Kuroshio Extension	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 분포 및 분포 조절 요인 파악 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 북서태평양 조사 자료 활용 - 해양 표층 및 대기 이산화탄소 분압, 수온, 염분, 총 용존 무기탄소, 총 알칼리도 등
지역 이산화탄소 분압 변동 파악	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율 및 변동 요인 파악 - 해양 표층 및 대기 이산화탄소 분압 증가율 산정 - 해양 표층 이산화탄소 분압 증가에 영향을 주는 인자 파악 - 이 지역 이산화탄소 흡수량 변화 진단 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Kuroshio Extension Observatory (KEO) 부이 자료 ○ 과거 해양 표층 이산화탄소 분압 측정 자료 (SOCAT database)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국내·외 연구동향

- 국내에서는 동해를 중심으로 이산화탄소 흡수 변화 연구가 진행되었다.
 - 동해가 산업혁명 이후에 흡수한 총 이산화탄소량이 정량화되었으며 (Park et al., 2006), 동해 내부로의 이산화탄소를 흡수하는 가장 중요한 기작인 심층수 형성이 일어나는 일본분지에서는 1992-1999년에 비해 1999-2007년 사이에 300m이하로 anthropogenic CO₂ 흡수가 일어나지 않은 것으로 밝혀졌다. 이는 심층수 및 중층수 형성의 약화로 기인한다(Park et al., 2008).

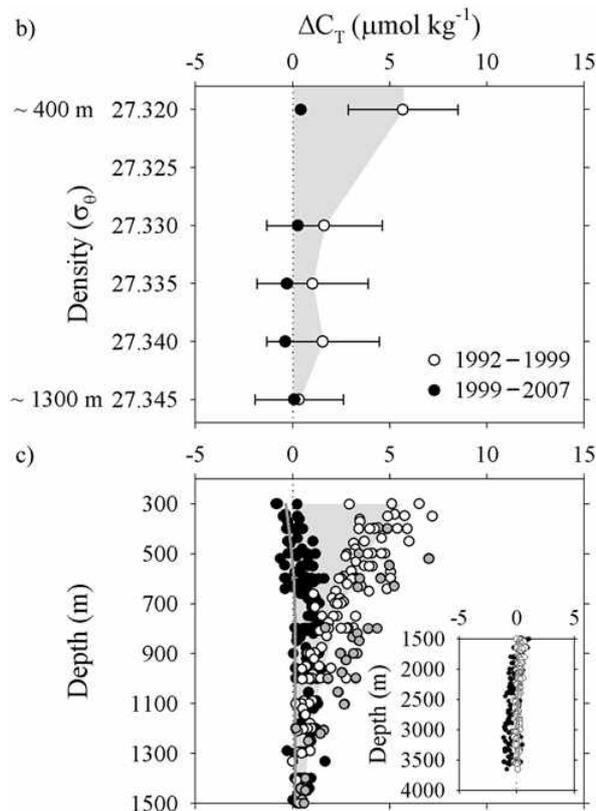


Figure 4 C_T concentrations accumulated during the periods 1992-1999 and 1999-2007 as a function of density surface and depth (Park et al., 2008)

- 1995년에서 2009년까지 동해에서 관측으로 수집한 해양 표층 이산화탄소 분압 자료를 가지고 이산화탄소 분압 증가율을 추정하였다. 울릉분지에서 해양 표층 이산화탄소 분압은 $2.7 \pm 1.1 \mu\text{atm yr}^{-1}$ 의 속도로 증가하며, 이는 대기 증가율인 $1.8 \pm 0.4 \mu\text{atm yr}^{-1}$ 보다 높아 동해의 이산화탄소 흡수가 줄어들고 있음을 밝혔다 (Kim et al., 2014).

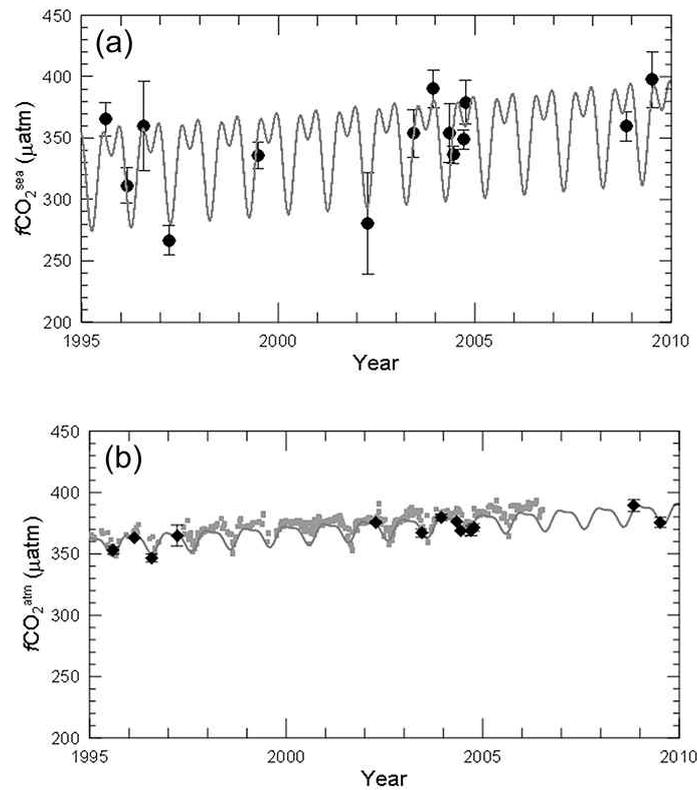


Figure 5 Long-term trend of fCO₂ at the Ulleing Basin from 1995 and 2009 (Kim et al., 2014)

- 북서태평양 해역에서 관측한 자료로 2006년에서 2014년까지 9년 동안의 해양-대기 이산화탄소 교환량을 산출함. $-0.46 \sim 1.71 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위에서 변화였으며, 평균 플럭스는 $0.44 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 관측 자료 수집 기간 중 2011년 5월을 제외하고는 대기로 이산화탄소를 방출하였다.
- 미국은 Kuroshio Extension 지역에서 일어나는 여러 현상들을 규명하기 위한 연구들을 진행하고 있다.

- NOAA에서는 Kuroshio Extension 해류 남쪽의 32.3°N, 144.6°E 위치에 Kuroshio Extension Observatory (KEO) 표층 부이를 운영 중에 있다. 이 부이에는 풍속, 기온, 습도, 강우 등을 측정할 수 있는 기상 센서와 수온, 염분, 해류, 생지화학인자들을 측정할 수 있는 해양 센터들이 부착되어 있다. 이 부이에서 얻어지는 관측 자료로 해양-대기 열 교환변화를 연구하며, 태풍이 지나가는 골목에 위치하고 있어 태풍이 지나갈 때 일어나는 현상도 연구한다. 2011년 7월에는 pH 센서가 추가 부착되어 해양 산성화 연구도 수행 중 이다.
- 2004년에서 2006년까지 이 지역에서 일어나는 역학 또는 열역학 프로세스들을 규명하고 정량화하기 위해 로드아일랜드대, 우즈홀, 하와이대의 연구진들이 많은 mooring 장비들과 Argo float들을 투입하여 Kuroshio Extension System Study (KESS)를 수행하였다.
- Repeat Hydrography 프로그램의 일환으로 10년에 한번 씩 이 지역에 대한 탄소 탐사를 수행 중이다 (line P02).

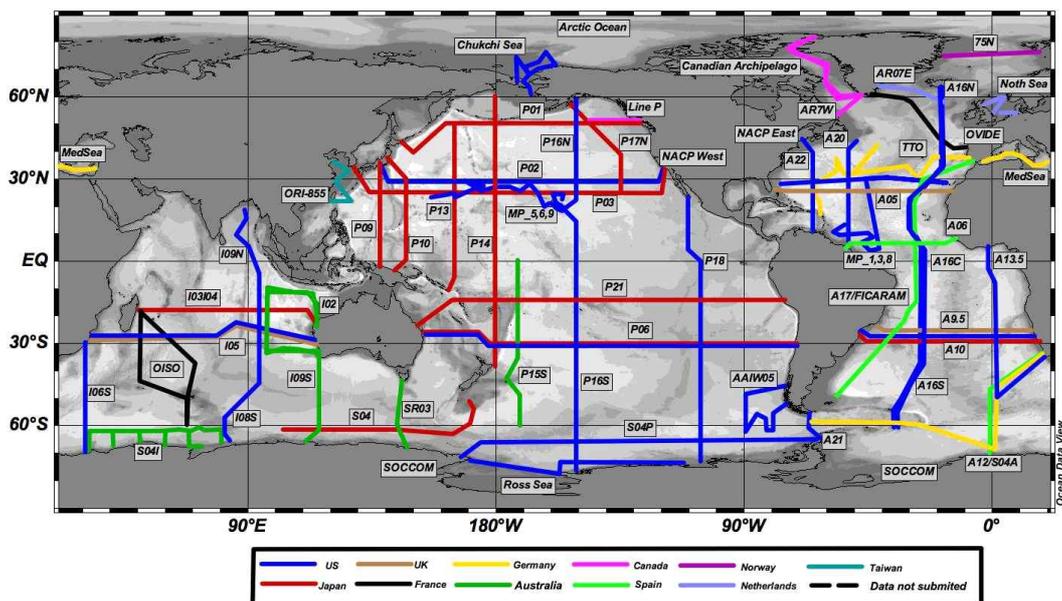


Figure 6 Map of International Repeat Hydrography Program

- 중국은 Kuroshio Extension 지역이 북태평양의 기후 시스템에 미치는 영향을 알기 위해 대기-해양 교환과 기후변화 연구 (Air-Sea Interaction in the Kuroshio

Extension and its Climate impact experiment)를 리드하여 수행 중에 있으며, 2017년 여름에 관련 탐사를 계획 중에 있다.

- 일본은 World Ocean Circulation Experiment (WOCE), Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change (CLIVAR) 등의 국제 프로그램에 참여하여 이 지역을 지나는 여러 해양탐사를 지속적으로 수행하고 있으며, 이를 통해 북태평양 물질순환 연구를 진행하고 있다.
- Kuroshio Extension 지역의 이산화탄소 흡수 메커니즘 및 조절 인자들을 파악하고 기후 변화와의 상관성 이해를 통해 기후 모델을 향상시키고자하는 세계 각국의 다양한 연구자들로 구성된 워킹 그룹 (Carbon Hot Spot)이 활동을 계획 중이다.

제 2절. 기타 선행 연구 분석

- 전 대양을 물리 및 생지화학 특성에 따라 5개 지역 (biome)으로 구분하여 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율을 계산한 연구가 수행되었다 (Fay & McKinley, 2013). 지역에 따라, 증가율 계산에 사용하는 자료의 시간 분포에 따라 그 크기가 달라짐을 밝혔다. 너무 넓은 지역을 한 biome에 포함하고 있어 대기에 비해 상대적으로 높거나 낮은 증가율이 온도 변화에 의한 것인지 아닌지 정도만 설명할 수 있었다. 또한 이 연구에서는 Kuroshio Extension 지역이 서로 다른 특징을 가진 두 지역으로 나뉘져 있어, 이 지역에서의 변화를 정확히 알 수 없었다.
- 북서태평양의 열대해역에서 크루즈선에 부착된 이산화탄소 측정 장비를 이용하여 고시계열로 얻은 해양 및 대기 이산화탄소 분압 측정 자료를 이용하여 대기 및 해양 이산화탄소 분압 증가율을 연구가 수행되었다 (Park et al., 2012). 그 결과 대기에 비해 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율이 현저히 낮은 것으로 나타났다. 따라서 이 지역은 연구 기간 동안 대기로부터 지속적으로 더 많은 이산화탄소를 흡수해 왔음이 밝혀졌다. 계절별로 증가율이 달랐는데, 특히 겨울철 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율이 대기에 비해 현저히 낮았다. 그 이유는 최근 혼합층이 깊게 유지되는 시간이 길어져 흡수된 이산화탄소에 대해 더 넓은 표층 부피를 제공하여 상대적으로 농도 증가가 낮았고, 염분 변화 또한 낮은 증가율에 영향을 준 것으로 나타났다. 이 연구는 해양 표층 이산화탄소 분압 변화가 대기 농도 변화 외에 해양의 다양한 물리, 화학

적 프로세스에 의해 변화될 수 있음을 보여준다.

- 기후변화에 따른 해양의 대기 이산화탄소 흡수변화를 알아보기 위한 모델 연구에서 모델 결과를 평가하기 위해 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율을 계산한 연구가 있었다 (Le Quéré et al., 2009, 2010). 북태평양에서는 $5^{\circ}\text{N} \times 10^{\circ}\text{E}$ 크기의 일정한 위경도 box에서 증가율이 계산되었고, 본 연구 지역에 포함된 2개의 box에서 서로 다른 결과를 보여준다. 서로 다른 증가율의 원인은 논문에서 설명하지 않았으며, 자료의 시계열 분포 차이에 따른 오차인지, 다른 원인이 있는지는 밝혀지지 않았다. 특히 과거 80년대 자료는 자료의 개수가 적고 월별 커버리지가 매우 낮아 과거 자료에 의한 바이어스 가능성이 있다. 따라서 최근 자료를 포함하여 재평가할 필요가 있으며, 원인을 분석할 필요가 있다.

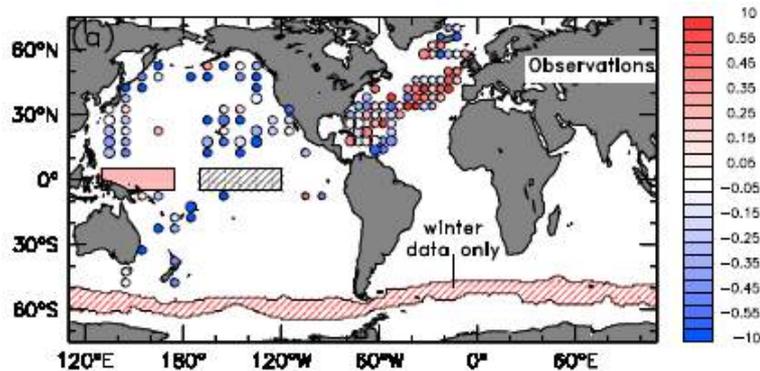


Figure 7 Trend in $\Delta p\text{CO}_2$ ($\mu\text{atm yr}^{-1}$) between 1981 and 2007 from observations (Le Quéré et al., 2010)

- 북서태평양에서 2006년부터 2014년까지 9년 동안 해양-대기 이산화탄소 교환량을 산정한 지역은 본 연구과제의 대상해역에 포함되지 않는다.

제 3절. 현기술의 한계 분석

- 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율 및 대기 이산화탄소 흡수 변동 관련 연구는 장기간 축적된 자료의 부족으로 지금까지 많이 수행되지 않았지만, 최근 각국의 주요 연구 그룹들이 모여 지금까지 얻은 자료를 공유하기 위한 방안을 모색하였고, 그

결과 Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT)라는 국제 자료 공유 데이터베이스가 출범하였다. 그 이후 이 자료들을 이용한 많은 다양한 연구들이 진행되고 있다.

- 장기 축적 자료를 이용하여 분압 증가율을 추정한 대부분의 연구들이 최근 자료에 비해 상대적으로 부족한 과거 자료들을 사용하였기 때문에 추정된 증가율이 과거 자료에 크게 좌우되는 경향을 보인다. 따라서 시계열 자료의 분포가 매우 중요하다. 부이 자료는 이러한 문제를 최소화할 수 있다. 그리고 상대적으로 높거나 낮은 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율의 원인을 구체적으로 설명하는 논문은 거의 없다. 따라서 이를 통한 미래 이산화탄소 흡수 진단과 영향 평가에 한계가 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절. 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 분포 및 조절 인자 파악

쿠로시오 확장역을 커버하는 유일한 한국해양과학기술원의 해양 표층 이산화탄소 분압 측정 자료를 본 연구에 사용하였다. 2015년 7월 18일부터 8월 4일까지 한국해양과학기술원 R/V인 온누리호를 이용하여 남해 장목을 출발하여 미국 괌까지의 탐사에서 얻어진 자료이다. 해양 표층 및 대기 이산화탄소 분압 (fugacity of CO₂, fCO_{2SW}, fCO_{2AIR}) 자료 외에 표층 수온 (SST, sea surface temperature), 표층 염분 (SSS, sea surface salinity), 총 용존 무기탄소 (DIC, total dissolved inorganic carbon) 및 총 알칼리도 (TA, total alkalinity) 자료가 있다. 이 자료들을 분석하여 공간 변화 분포와 변화를 일으킨 인자들을 파악하였다.

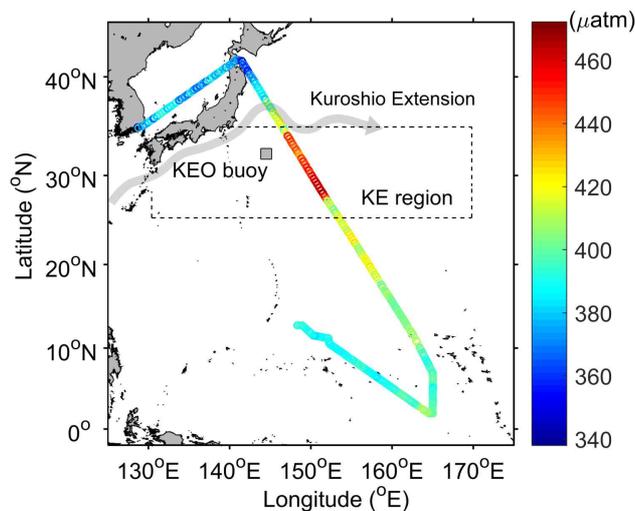


Figure 8 Surface fCO_{2SW} (µatm) variation along the cruise track. A gray square shows the location of the KEO buoy and a rectangle with dashed line denotes the KE region.

먼저, 해양 표층 이산화탄소 분압 분포를 살펴보면, 431-437 µatm의 높은 표층 이산화탄소 분압이 중위도 지역 (27.5-34°N)에서 관측되었으며, 이는 적도해역 (2-10°N)에서 관측된 값 (380-413 µatm)보다 훨씬 높았다 (Figures 8 and 9). 32.3°N, 144.5°E에 설

치된 NOAA Kuroshio Extension Observatory (KEO) 부이 역시 같은 시기에 500 ppm 까지 높은 이산화탄소 물분율 ($x\text{CO}_2$)를 보였다. 해양 표층 이산화탄소 분압 ($f\text{CO}_{2\text{SW}}$)은 27.5°N 의 남쪽에서는 $380\text{--}428\ \mu\text{atm}$ 의 분포를 보이다 27.5°N 을 기준으로 약 $460\ \mu\text{atm}$ 까지 급격히 증가하였다 (Figure 9a). 그 후 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 값은 $27.5\text{--}34^\circ\text{N}$ 위도 범위에서 높게 유지되었다가 $34\text{--}35^\circ\text{N}$ 근처에서 급격히 감소하였고, 그 후 41.5°N 까지 지속적으로 감소하였다. 반면 표층 수온 (SST)과 염분 (SSS)은 27.5°N 에서 크게 변하지 않았다 (Figures 9b and 9c). 수온은 적도에서 34°N 까지는 $27.7\text{--}31.3^\circ\text{C}$ 범위에서 변했으며, $34\text{--}35^\circ\text{N}$ 지역에서 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 의 감소와 함께 28.2°C 에서 26°C 까지 급격히 수온이 감소하였다. 표층 염분은 22.7°N 근처에서 가장 높았고, 그 후 남북으로 감소하였다. 측정된 대기 이산화탄소 분압은 조사 기간 동안 $385.0 \pm 3.8\ \mu\text{atm}$ 로 거의 일정하게 유지되었다 (Figure 9a).

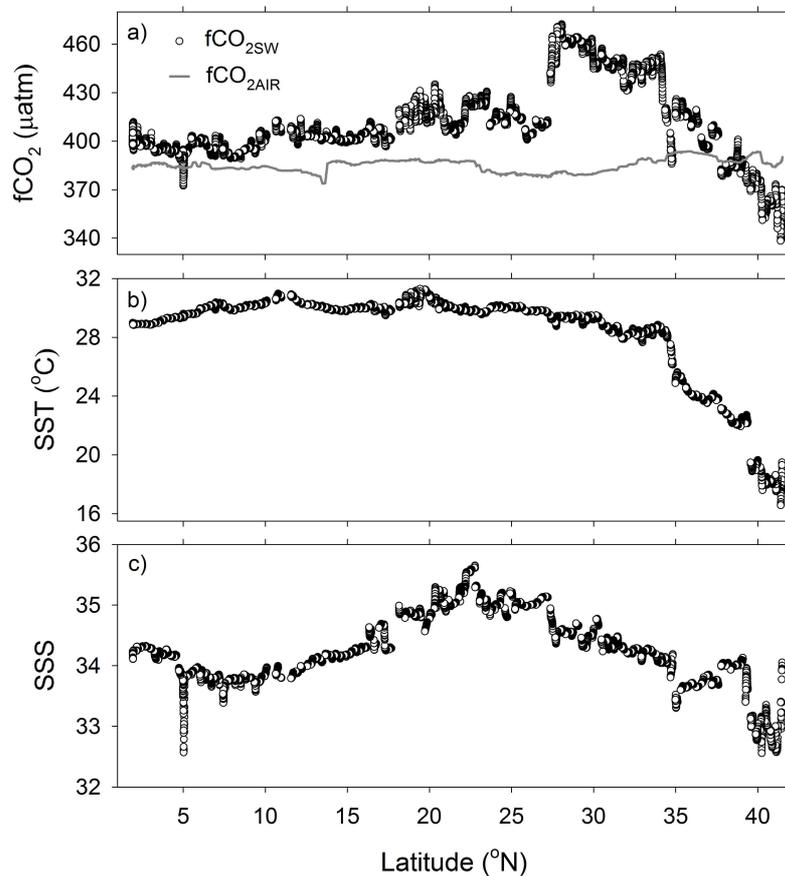


Figure 9 Meridional distributions of a) surface $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and $f\text{CO}_{2\text{AIR}}$, b) SST, and c) SSS.

해수 이산화탄소 인자 중에 DIC와 TA는 염분에 의해 변하기 때문에, 염분의 영향을 제거한 특정 염분에 표준화한 값으로 그 변화를 비교하는 것이 일반적이다. 염분의 영향을 제거하기 위해 염분 35에 표준화한 총 용존 무기탄소 (NDIC, normalized total dissolved inorganic carbon)의 분포를 살펴보면, 2–27°N 지역에서 NDIC는 좁은 범위에서 변화하다 27.5°N에서 급격히 증가하였다 (Figure 10a). 그 후 27.5–34.5°N 지역에서는 값이 $2011.8 \pm 3.8 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 로 일정하게 유지되었고, 34.5°N에서 41.2°N까지 값이 지속적으로 증가하였다. 염분 35에 표준화한 총 알칼리도 (NTA, normalized total alkalinity) 역시 2–27°N 지역에서는 거의 일정하게 유지되다 27.5°N부터 41.2°N까지 값이 지속적으로 증가하였다 (Figure 10b). 높은 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 값이 발견되는 중위도 지역(27.5–34°N)에서 NDIC 농도는 저위도 (2–27°N)에 비해 약 $40 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이 높았고, NTA는 약 $14 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 높았다. NDIC와 NTA의 이러한 증가는 약 $57 \mu\text{atm}$ 의 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 증가를 가져올 수 있다. 이 추정 값은 CO2SYS 프로그램으로 계산되었다 (Pierrot et al., 2006). 실제 두 지역은 평균 약 $46.9 \mu\text{atm}$ 의 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 차이를 보였으며, 대부분이 두 지역 사이의 NDIC와 NTA의 변화로 설명될 수 있다.

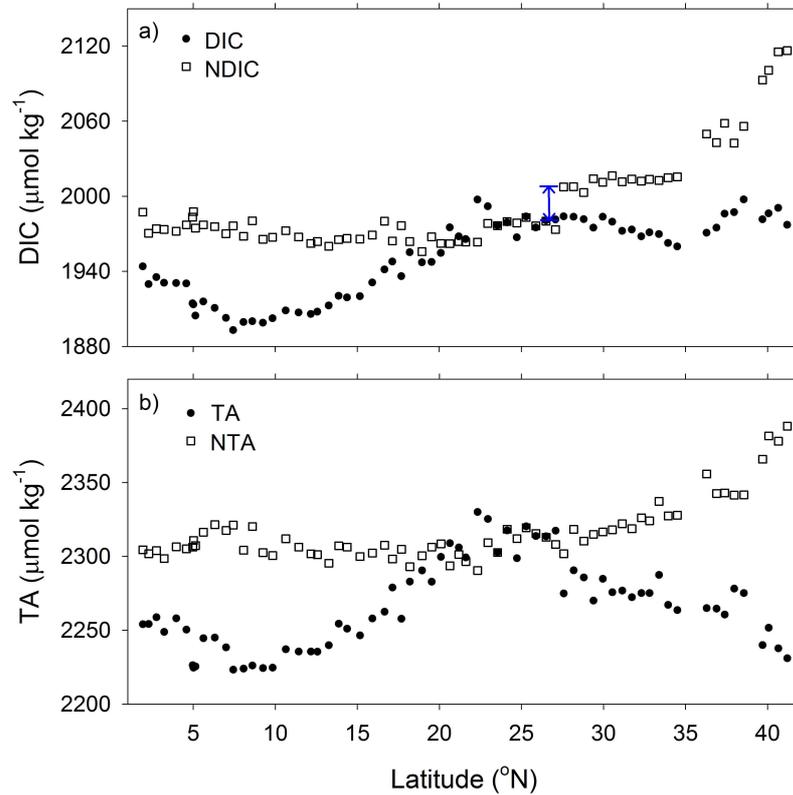


Figure 10 Meridional distributions of a) DIC and NDIC (normalized to salinity of 35) and b) TA and NTA. Arrow in (a) indicates the abrupt increase in NDIC concentrations at 27.5°N.

34–35°N 지역에서 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 의 급격한 감소는 SST 변화 때문이다. 열역학적으로 온도의 감소는 이산화탄소 분압의 감소를 초래한다 (Takahashi et al., 1993). 34°N와 35°N 사이에서 관찰된 약 2.2°C의 온도 감소는 약 40 μatm 의 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 감소를 설명할 수 있다. 35°N 북쪽으로 SST는 16.5°C까지 감소했으며, 이는 약 145 μatm 의 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 감소를 일으킬 수 있다. 그리고 약간의 DIC 증가와 함께 관측된 TA의 큰 감소는 SST 감소에 의한 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 의 감소를 75.7 μatm 정도 상쇄시킨다. 따라서 SST와 DIC, TA 변화의 순 영향으로 35°N에서 41.5°N까지의 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 의 관측된 감소 (약 70 μatm)를 설명할 수 있다.

$f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 와 SST의 관계는 표층 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 에 영향을 주는 프로세스를 보여줄 수 있다. 예를 들어 관계 ($\partial \ln f\text{CO}_{2\text{SW}} / \partial \text{SST}$)가 열역학적 관계인 4.23% $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 에 가까우면, $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 변화의 주된 프로세스가 수온 변화인 것이고, 이 값과 다를수록 온도 외에 물리적 혼합이나

식물생산량의 영향을 많이 받는 것이다. 변화가 유사한 지역별로 지역을 나누어 관계를 구해봤을 때, 27.5°N에서 41.5°N 사이 지역에서 fCO_{2SW} 가 SST와 유의한 관계를 보였다 (Figure 11). 특히 27.5–35°N 지역의 경우 열역학적 관계와 거의 유사한 $4.66 \pm 0.09 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 값을 나타내었고, 이는 여름철 이 지역의 표층 이산화탄소 분압이 수온 변화에 의해 조절됨을 보여주는 것이다. 반면, 북쪽 지역 (35–41.5°N)의 경우, $1.99 \pm 0.03 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 값을 보여, 온도 외에 물리적, 생물학적 프로세스가 여름철 이 지역의 fCO_{2SW} 변화를 지배함을 알 수 있다.

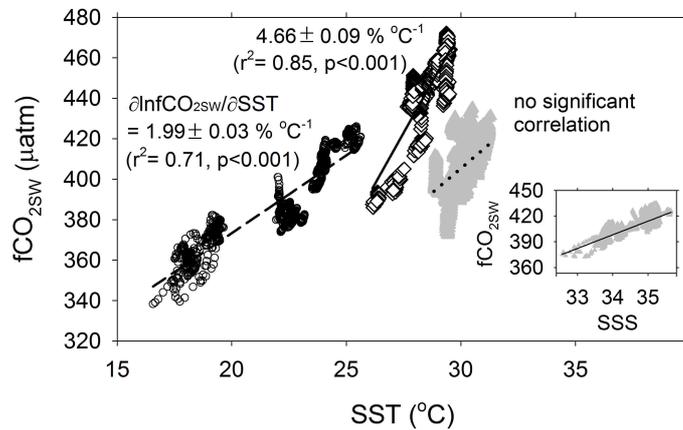


Figure 11 Correlations between fCO_{2SW} and SST. Open dots, open squares, and gray triangles denote values in the regions of 35 - 41.5°N, 27.5 - 35°N, and 2 - 27.5°N, respectively. Inserted figure shows a correlation between fCO_{2SW} and SSS in the region of 2 - 27.5°N where no significant correlation between fCO_{2SW} and SST was found.

2–27°N 지역의 경우, fCO_{2SW} 와 SST 사이에 유의한 상관관계가 보이지 않은 반면, SSS와 유의한 상관관계를 보였다. 관계상수 ($\partial \ln fCO_{2SW} / \partial \ln SSS = 1.35$)는 이산화탄소 용해도와 용해도 상수에 대한 염분의 영향만을 고려한 값인 0.93보다 컸으며, 이는 증발이나 강수와 같은 염분 변화에 영향을 주는 다른 프로세스들이 이 지역 fCO_{2SW} 의 변화를 주도함을 나타낸다.

중위도 (27.5–34°N) 지역에서 관측된 높은 fCO_{2SW} 값은 이산화탄소 분압 climatology

와 그리고 climatology에 사용된 과거 자료와 비교했을 때 월등히 높았다. 대기 이산화탄소 농도 증가를 고려하더라도 높은 값이다. 이의 원인을 찾기 위해 SST, SSS, 혼합층 깊이, 클로로필 농도, 식물 생산량 변화를 살펴보았다.

NOAA Optimum Interpolation SST V2 자료를 분석하였을 때, 이 지역 SST는 2000년 이후 감소하는 것으로 나타났다 (Figure 12a). 감소율은 계절변화를 제거한 후 계산하였을 때 $-0.05 \pm 0.09 \text{ } ^\circ\text{C yr}^{-1}$ ($p < 0.001$)로 나타났다. 이러한 표층 수온의 감소가 수직 혼합 증가와 관련된다면 이산화탄소 농도가 높은 아표층 수의 유입 증가로 여름철 높은 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 를 설명할 수 있지만, Argo 자료로부터 추정된 겨울철 혼합층 깊이를 살펴보았을 때 연변화는 보이지만, 유의한 증가나 감소 경향을 보이지는 않았다.

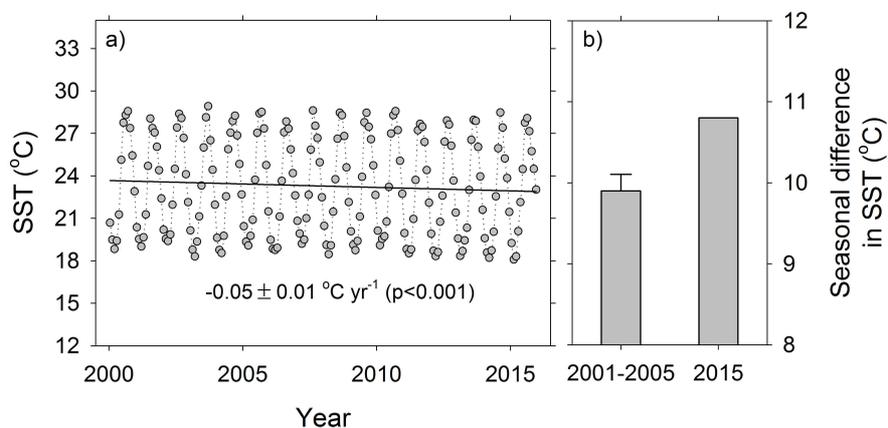


Figure 12 a) Monthly mean NOAA OI SST values in the middle latitude region ($27.5 - 34^\circ\text{N}$) for the period of 2000 - 2015. Solid line indicates a decrease of de-seasonalized monthly mean values. b) Mean seasonal difference in SST for the period of 2001 - 2005 when the CO_2 values used for the climatology were obtained and seasonal amplitude of SST in 2015 when the cruise was conducted.

시간에 따른 SST의 감소 경향과는 달리, SST의 겨울과 여름의 계절변화 크기는 증가한 것으로 나타났다. Climatology에 사용된 자료를 얻은 2001-2005년의 변화 크기는 9.9°C 였던 반면, 조사가 진행된 2015년의 경우 이보다 높은 10.8°C 였다 (Figure 12b). 이러한 SST 증가는 약 $19 \text{ } \mu\text{atm}$ 의 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 증가를 설명할 수 있고, 여기에 대기 이산화탄소 분압 증가에 따른 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 증가 ($2.26 \pm 0.10 \text{ } \mu\text{atm yr}^{-1}$, KEO 부이 자료로 추정됨)를

고려한다면, 그 값은 47 μatm 에 이를 것으로 추정된다. 하지만 SST의 계절변화 크기 증가 이유는 본 연구에서 밝힐 수 없었으며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

SSS 변화 또한 표층 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 를 변화시킬 수 있지만 Argo 자료를 분석할 결과 여름철이나 전체 기간 동안 통계학적으로 유의한 증감을 보이지 않았다. 표층 식물 생산량 변화를 알아보기 위해 SeaWiFS와 Aqua/MODIS 클로로필 자료를 분석하였고, 특정 해의 봄철 클로로필 농도가 0.5 mg m^{-3} 이상으로 증가하였지만, 이를 제외하고는 2002-2015년의 기간 동안 큰 변화는 없었다. 위성 클로로필 자료, 수온, PAR, 수광대 깊이로부터 추정된 1차 순생산량 (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>) 또한 변화 경향이나 2000년대 초반과 2015년 사이의 큰 변화를 보이지 않았다.

제 2절. 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율 산정

해양 표층 이산화탄소 분압 증가율 파악을 위한 자료로 2가지를 사용하였다. 먼저 고정점에서의 고시계열 자료인 Kuroshio Extension Observatory (KEO) 부이 자료는 Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) 홈페이지 (<http://cdiac.ornl.gov/oceans/Moorings/KEO.html>) 에서 얻을 수 있으며, 현재 2007년 9월에서 2014년 6월까지의 자료가 사용 가능하다. 수온, 염분, 대기압, 해양 및 대기 이산화탄소 분압 자료를 제공한다(Figure 13). 두 번째 자료는 Surface Ocean CO_2 Atlas (SOCAT) 데이터베이스 자료로 자료는 <http://www.socat.info/>에서 얻을 수 있으며, 해당 지역의 경우 1980년대부터 자료가 존재한다(Figure 14). 하지만 과거 자료의 양과 커버리지 부족으로 본 과제에서는 지속적인 월별 자료가 있는 시기만의 자료를 이용하였다.

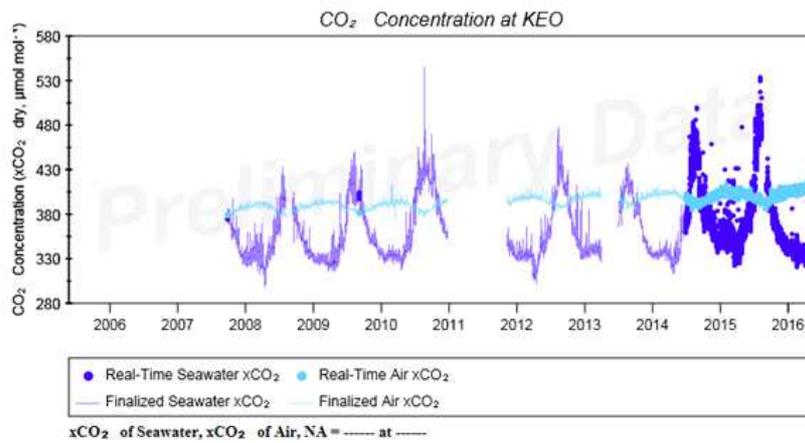


Figure 13 KEO buoy CO₂ data

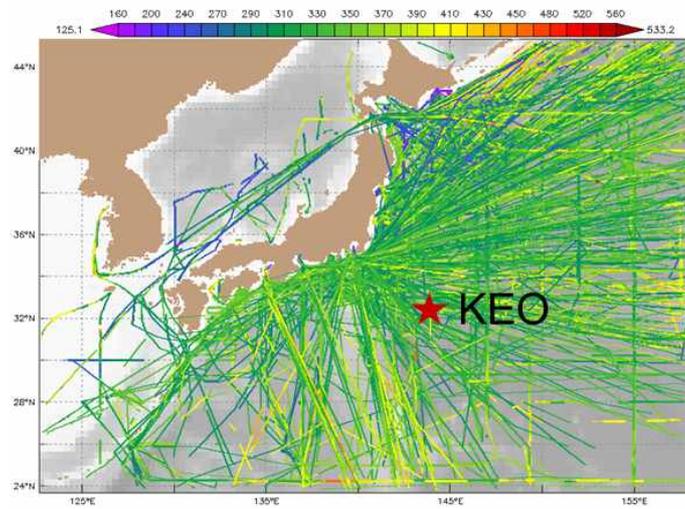


Figure 14 SOCAT database (v.3) data in the western North Pacific

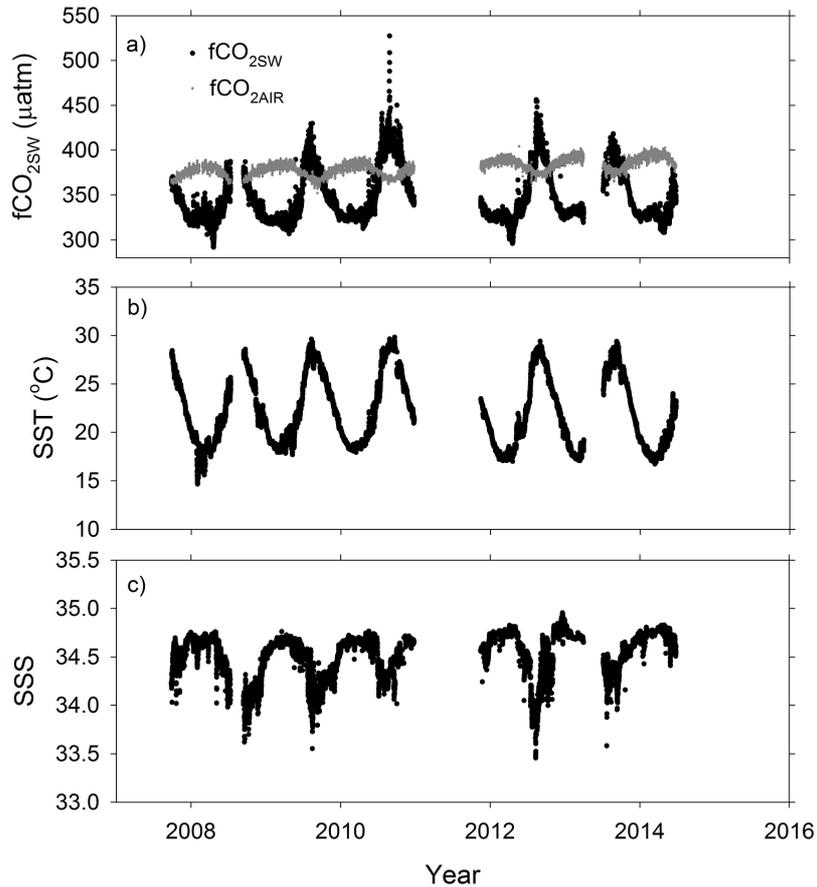


Figure 15 Temporal variations of a) fCO_{2SW} and fCO_{2AIR} , b) SST, and c) SSS in KEO buoy data.

2007년 9월부터 2014년 6월까지의 NOAA KEO 부이 자료를 사용하여 해양 표층 및 대기 이산화탄소 분압 증가율을 산정하였다. 증가율 산정에 앞서서 약 3시간 간격으로 측정된 부이 자료로 월 평균 값을 만들었다 (Figures 15 and 16). 이후 계절변화의 영향을 없애기 위해 harmonic function을 이용하여 de-seasonalization을 실시한 후 계절 변화의 영향을 없앤 월 평균 값들로 해양 표층과 대기 이산화탄소 분압 증가율을 각각 계산하였다. Harmonic function을 이용한 de-seasonalization 방법은 Park & Wanninkhof, 2012에 자세히 나와 있다. 또한 계절차이를 알기 위해 여름과 겨울철 이산화탄소 분압 증가율도 추정하였다 (Table 2). 그 결과, 높은 연변화로 인해 오차가 크긴 하지만 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율이 대기보다 낮은 것으로 나타났다. 대기 이산화탄소 분압 증가율은 계절에 따른 큰 차이를 보이지 않았지만, 해양 표층의 경우는 겨울철이 대기 증가율의 약

절반에 그쳤고, 여름철의 경우는 대기보다 2배 빠른 증가율을 보였다.

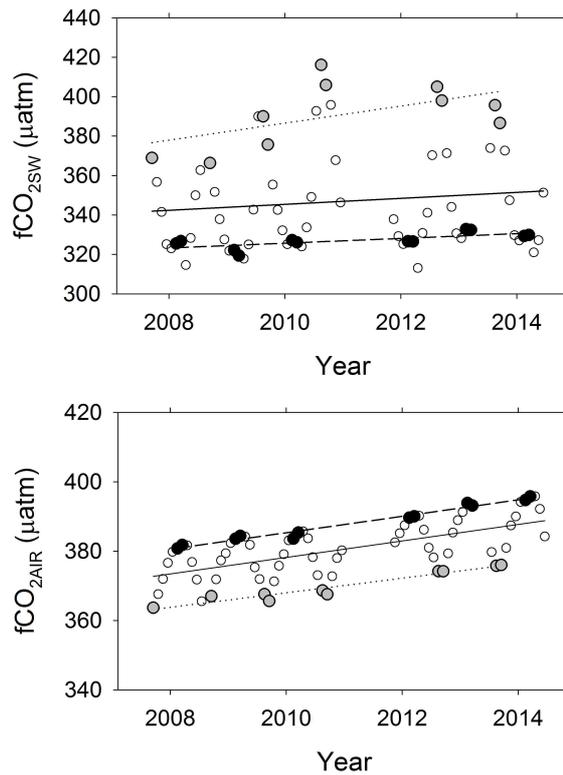


Figure 16 Monthly mean values of (top) $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and (bottom) $f\text{CO}_{2\text{AIR}}$. Black and gray circles denote the monthly values in winter and summer, respectively, while the white circles are the remaining months. Solid lines indicate increases of de-seasonalized monthly mean values for the full years. Dashed and dotted lines denote the rates of changes in the winter and summer, respectively.

Table 2 Rates of changes in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ and $f\text{CO}_{2\text{AIR}}$ ($\mu\text{atm yr}^{-1}$)

$f\text{CO}_{2\text{SW}}$			$f\text{CO}_{2\text{AIR}}$		
전 기간	겨울	여름	전 기간	겨울	여름
1.52 ± 0.73	1.22 ± 0.38	4.33 ± 2.33	2.26 ± 0.10	2.37 ± 0.12	2.10 ± 0.19

SOCAT 데이터베이스 자료의 경우 이 지역에 2007년 이전은 특정 해에 1~3달 자료 밖에 없기 때문에, 그 이후의 자료만을 사용하였다 (Figure 17). 과거 자료가 존재할 경우 부이자료와 함께 사용하려 하였으나, 두 자료 사이의 systematic error를 보정하기 어렵고, 두 자료의 이용 가능한 시기가 거의 동일하여, 상호 비교 자료로 이용하였다. 또한 부이보다 월 평균 자료가 작아 계절별 증가율은 산정하지 못 하였다. KEO 부이가 설치된 지역을 포함하는 SOCAT 위도 1° x 경도 1° gridded 자료로 계산된 2007년부터 2014년까지의 fCO_{2SW} 증가율은 $1.62 \pm 0.73 \mu atm yr^{-1}$ 로 KEO 부이 자료로 추정된 결과 값과 비슷하였다 (Table 3). SOCAT 데이터베이스 자료를 가지고 추정 기간에 따른 증가율을 계산해 본 결과, 자료의 숫자가 증가율 계산에 큰 영향을 미치며, 10년 주기 이내의 주요한 변동이 있음을 알 수 있었다.

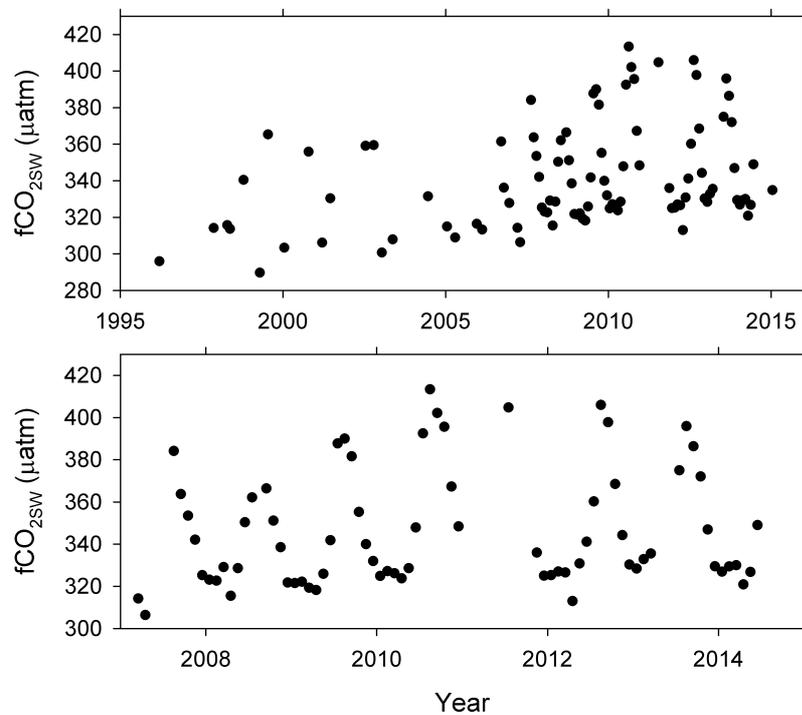


Figure 17 Monthly $1^\circ \times 1^\circ$ gridded SOCAT data in the area where the KEO buoy is located for (top) the full year when data exist and (bottom) the period when data used for the rate calculation measured.

Table 3 Rates of changes in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ for the different periods

Period	Rate of change in $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ ($\mu\text{atm yr}^{-1}$)
Full	1.98 ± 0.29
1996-2004	0.49 ± 0.29
2005-	2.11 ± 0.59
2007-2014	1.62 ± 0.73
2010-	-1.87 ± 1.49

제 3절. 해양 표층 이산화탄소 분압 증가에 영향을 주는 인자 파악

해양 표층 이산화탄소 분압 증가에 영향을 주는 인자를 파악하기에 앞서 KEO 부이의 표층 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 값의 연변화를 일으키는 인자들을 분석하였다. 먼저 SST와 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 변화 관계를 알아본 결과, $1.94 \pm 0.01 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 의 관계 값을 가지는 것으로 나타났으며 (Figure 18), 이는 수온 외에 물리 및 생물학적 프로세스가 이 지역의 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 월 변화에 영향을 줄을 의미한다. 주된 물리 프로세스로서 겨울철 혼합층 깊이 변화를 살펴본 결과, 평균 겨울철 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 값 변화가 평균 겨울 혼합층 깊이 변화와 유의한 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다 (Figure 19). 이는 겨울 혼합층 깊이 변화에 따른 표층으로 유입되는 이산화탄소 농도가 높은 아표층수의 양 변화가 겨울철 표층 $f\text{CO}_{2\text{SW}}$ 값을 변화시키는 것임을 보여준다. 혼합층 깊이 자료는 Argo 자료로부터 추정된 값을 사용하였으며, 2005년부터 2015년까지 이용 가능하며, 웹사이트 (http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/argo_iprc.php)에서 다운로드 받을 수 있다.

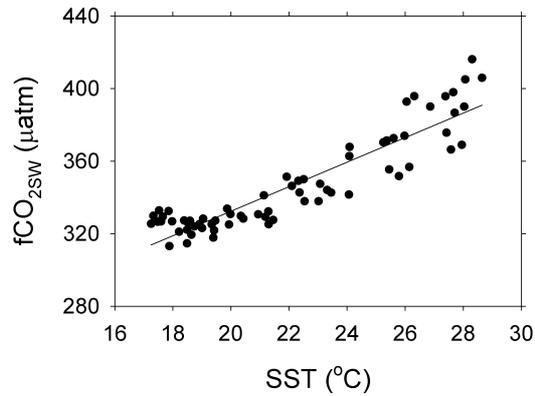


Figure 18 Correlation between fCO_{2SW} and SST ($\partial \ln fCO_{2SW} / \partial SST = 1.94 \pm 0.01 \% \text{ } ^\circ C^{-1}$).

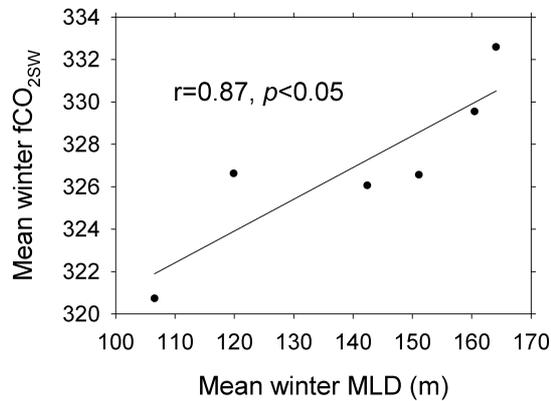


Figure 19 Correlation between mean winter fCO_{2SW} and mean winter mixed layer depth (MLD).

표층 식물생산량 변동의 지표로 사용되는 클로로필 농도를 살펴보면, 특정해 봄철 클로로필 농도가 높았을 때, fCO_{2SW} 값이 다른 해보다 낮음을 알 수 있었다 (Figure 20). 그리고 1차 순생산량 (new primary production, NPP)의 경우 fCO_{2SW} 의 계절변화 크기와 유의한 음의 상관관계를 보였고, 이는 1차 순생산량이 클 때 fCO_{2SW} 의 계절변동이 작음을 나타내며, 1차 순생산량 변화가 표층 fCO_{2SW} 계절변화에 큰 영향을 줄을 나타낸다 (Figure 21).

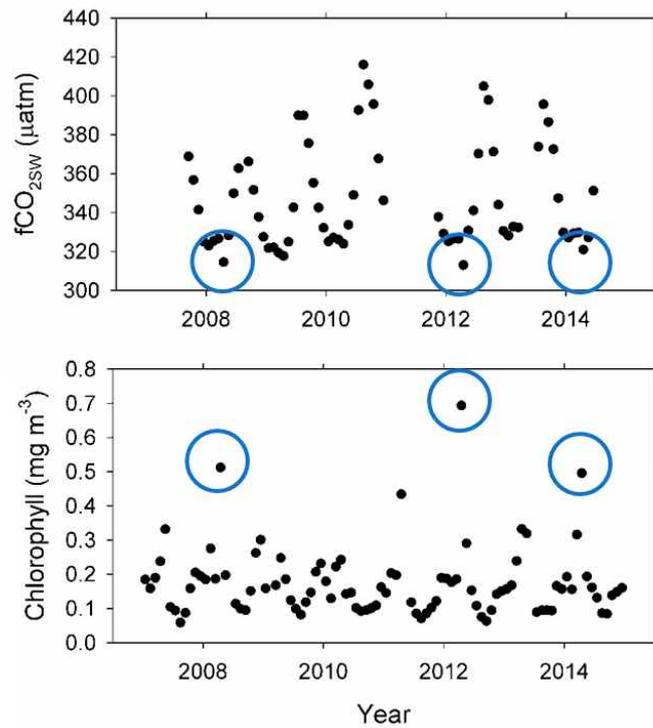


Figure 20 Temporal changes in (top) fCO_{2sw} and (bottom) chlorophyll concentrations. Blue circles denote the times when fCO_{2sw} show minimum values in spring due to high biological production confirmed by high chlorophyll concentrations.

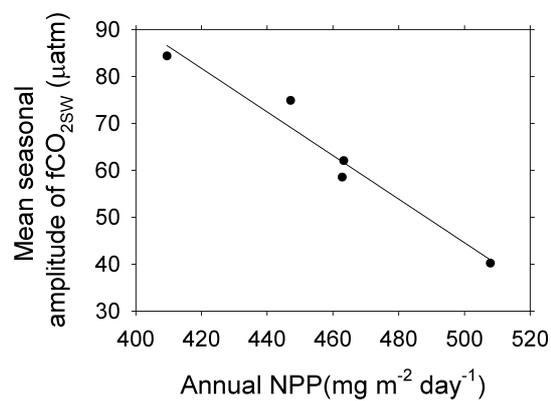


Figure 21 Correlation between annual NPP and mean seasonal amplitude of fCO_{2sw} ($r=-0.98$, $p<0.005$).

쿠로시오 확장역의 상태 변화를 잘 보여주는 것으로 KE 인덱스가 있다 (Figure 22). 이는 쿠로시오 확장해류의 안정성 변화를 대표하며, Pacific Decadal Oscillation (PDO)과 3-4년의 time lag를 가지고 음의 관계를 보인다(Qui et al., 2014). 쿠로시오 확장역의 상태 변화는 지역 해수면 변화, 혼합층 특성, 수온, 생물생산량 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 연구 기간 중 2006년에서 2009년까지는 KE 인덱스가 불안정한 상태였으며, 그 이후에는 안정한 상태였다. 불안정한 상태일 때 표층 클로로필 농도 및 이로 인한 식물생산성이 높은 것으로 알려져 있다 (Lin et al., 2014). 안정된 KE 상태일 때는 양의 해수면 높이 anomaly가 표층으로 올라오는 영양염을 제한하여 표층 클로로필 농도를 감소시킨다는 보고도 있다 (Kaneko et al., 2013). KEO 부이와 SOCAT 데이터베이스 fCO_{2SW} 자료를 해수면 높이 anomaly와 비교를 해 본 결과, 약 한 달의 time lag를 가지고 유의한 양의 관계를 보였다 (KEO 부이: $r=0.79$, $p<0.001$; SOCAT 자료: $r=0.81$, $p<0.001$; Figure 23). 이는 해수면 변동에 영향을 주거나 영향을 받는 인자들에 의해 이 지역 표층 fCO_{2SW} 값이 변함을 나타낸다. 하지만 현재까지의 자료로는 정확히 어떤 프로세스가 주요하게 영향을 주는지 알 수 없었으며, 추가 분석 및 심화 연구가 필요하다. 해수면 anomaly 자료는 <http://marine.copernicus.edu>에서 다운로드 받았으며 다중 고도 위성으로부터 추정된 값으로, 자료 명은 Global Ocean L4 gridded MAPS REP SLA이다.

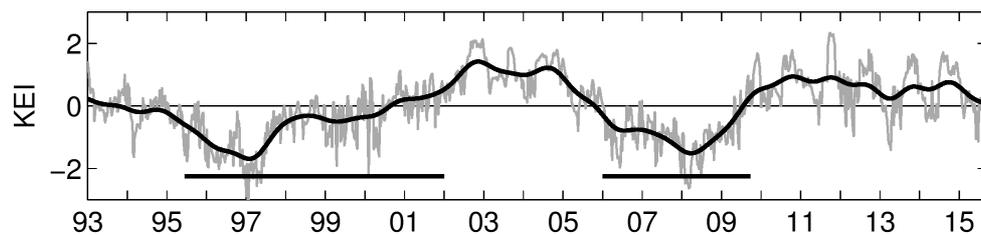


Figure 22 Kuroshio Extension Index (KEI), Underlines indicate unstable periods (Qui et al., 2014).

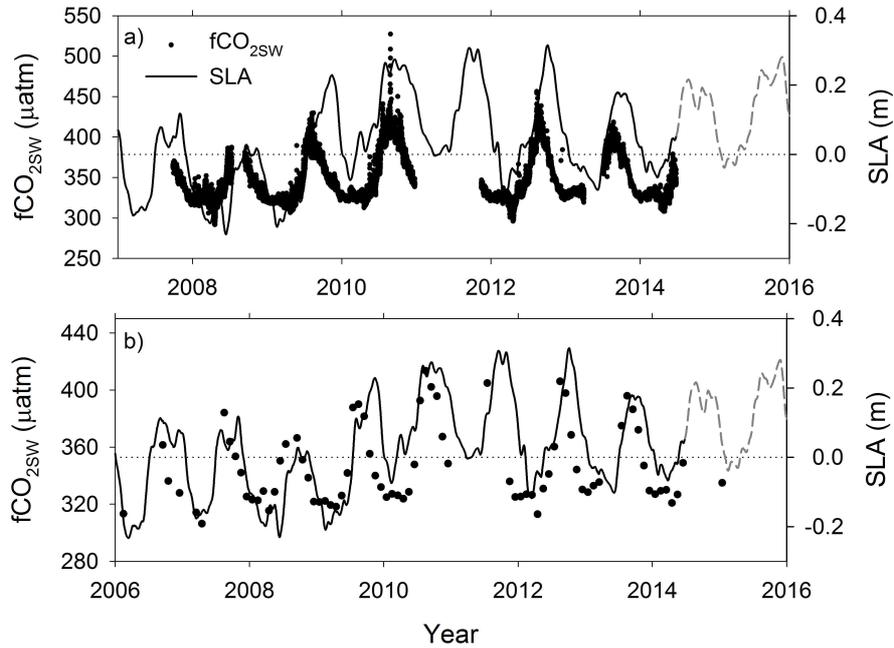


Figure 23 Temporal variations between fCO_{2SW} from a) KEO buoy and b) SOCAT database and sea level anomaly (SLA).

연구기간 동안 SST는 $-0.10 \pm 0.04 \text{ } ^\circ\text{C yr}^{-1}$ 의 속도로 감소하여 약 $-1.48 \text{ } \mu\text{atm yr}^{-1}$ 의 fCO_{2SW} 감소를 설명할 수 있다. 혼합층 깊이에는 큰 변화나 변동 경향은 없었다. SSS는 $0.03 \pm 0.01 \text{ yr}^{-1}$ 의 속도로 증가하였고, 특히 여름철에는 $0.05 \pm 0.01 \text{ yr}^{-1}$ 의 좀 더 높은 증가율을 보였다. 이는 수문학적 변화를 가정하였을 때, 각 $0.57 \text{ } \mu\text{atm yr}^{-1}$ 와 $0.95 \text{ } \mu\text{atm yr}^{-1}$ 의 fCO_{2SW} 증가를 설명할 수 있다. 또한 SST의 계절 변화 크기의 증가는 fCO_{2SW} 의 증가를 초래한다. 따라서 SST 변화에 의해 열역학적으로 fCO_{2SW} 가 감소하였고, SST의 계절변화 크기 증가와 SSS 증가에 의한 fCO_{2SW} 의 증가로 감소 일부가 상쇄된다. 연구기간 앞부분의 1차 순생산량이 KE 인덱스가 안정적인 후반부보다 높았고, 이는 연구기간 초기의 낮은 fCO_{2SW} 의 의해서 fCO_{2SW} 증가율이 크게 나옴을 나타낸다 (Figure 24). 따라서 연구기간 앞부분의 1차 순생산량이 뒷부분 보다 높은 것은 여름철의 대기보다 높은 표층 fCO_{2SW} 증가율의 이유가 될 수 있다. 앞서 언급한 것처럼, 1차 순생산량과 fCO_{2SW} 의 계절 변화 크기가 음의 관계를 가지는 것이 이를 뒷받침할 수 있다 (Figure 21).

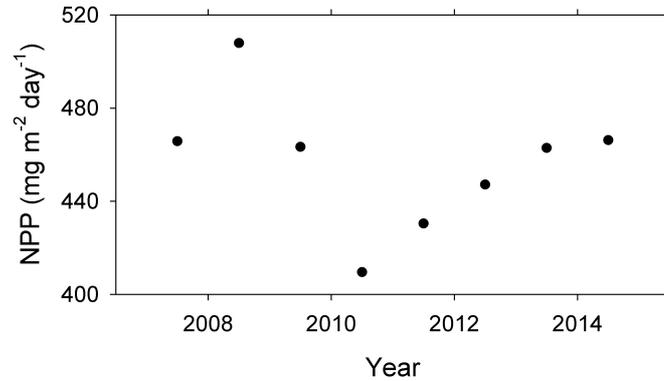


Figure 24 Net primary production in the region where the KEO buoy is located.

부이 자료와 데이터베이스 자료는 장기간의 해양 표층 이산화탄소 분압 자료와 수온 및 염분 자료만을 제공한다. 해양 표층 이산화탄소 분압은 해양 표층에서 일어나는 물리, 생물, 화학적 변화의 결과를 보여주는 것으로 수온과 염분 변화만을 가지고 분압 변동의 원인을 찾는 것은 쉽지 않다. 변화 원인을 찾기 위해 본 연구에서는 모델 결과와 위성 자료를 사용하였으나, 정확한 변동 요인과 그 영향의 크기를 파악하기는 어려웠다. 따라서 해양 표층 이산화탄소 분압 외에 변화의 원인을 설명할 수 있는 DIC와 TA의 추가 측정이 요구된다.

제 4절. 이산화탄소 흡수량 변화 진단

이산화탄소 흡수량, 해양-대기 이산화탄소 교환량은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$F \text{ (흡수량)} = kK_0 (f\text{CO}_{2\text{SW}} - f\text{CO}_{2\text{AIR}}) \quad (1)$$

$$k = 0.251 U_{10}^2 (Sc/660)^{-0.5} \quad (2)$$

여기서, K_0 는 이산화탄소 용해도로 SST와 SSS의 함수로 계산된다(Weiss, 1974). k 는 가스 교환 속도 (cm h^{-1}), U_{10} 은 10m 풍속 (m s^{-1}), Sc 는 Schmidt 수, 660은 20°C 해수에서의 이산화탄소 Schmidt 수이다 (Wanninkhof, 2014). 풍속은 여러 위성 자료를 종합해서 제공되는 Cross-Calibrated, MultiPlatform (CCMP; <http://www.remss.com/>)

measurements/ccmp) 풍속을 사용하였다 (http://www.remss.com/measurements/ccmp; Atlas et al., 2011). 상수 0.251은 최근 재정립된 ^{14}C 자료로부터 추정된 값이다 (Wanninkhof, 2014).

KEO 부이 자료로부터 계산된 이산화탄소 흡수량은 연별 변화를 보였고, 연구기간 동안 시간에 따라 이 지역의 대기 이산화탄소 흡수량이 증가하는 것으로 나타났다 (Figure 25). 음의 교환량이 해양이 대기로부터 이산화탄소를 흡수하는 것이고 양의 교환량은 해양이 대기로 이산화탄소를 방출하는 것을 의미한다. 이 지역에서 대기로의 이산화탄소 방출은 여름에 한정되어 있으며, 여름철을 제외한 시기의 이산화탄소 흡수량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이산화탄소 교환량 변화율은 $-0.06 \pm 0.03 \text{ (mol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1})\text{yr}^{-1}$ 였으며, 이 지역의 순 이산화탄소 흡수량 (net uptake)이 시간에 따라 증가함을 나타낸다. SOCAT 데이터베이스 자료로부터 계산된 이산화탄소 흡수량 역시 시간에 따른 증가를 보였으며, 그 변화율은 $-0.05 \pm 0.03 \text{ (mol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1})\text{yr}^{-1}$ 였다 (Figure 26). 따라서 본 연구기간 동안 쿠로시오 확장역의 대기 이산화탄소 흡수량은 증가하였고, 이는 독립적인 두 데이터 셋에서 확인된다.

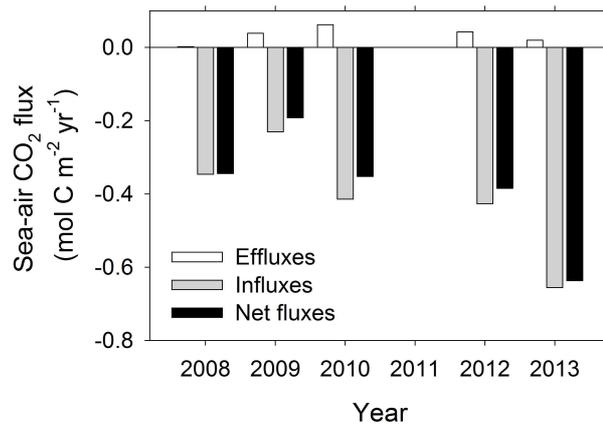


Figure 25 Annual net sea-air CO₂ fluxes (black bars), effluxes (white bars), and influxes (gray bars) from the KEO buoy data for the study period.

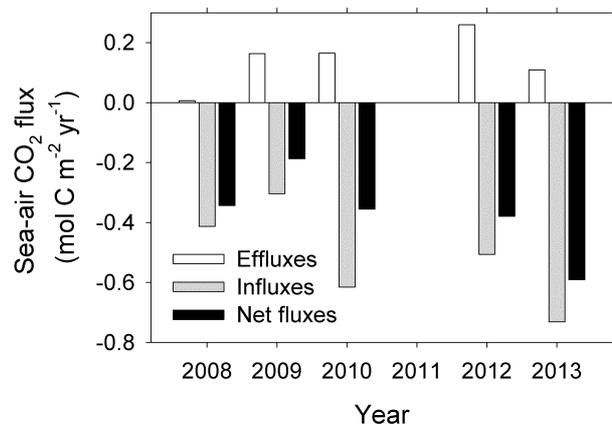


Figure 26 Annual net sea-air CO₂ fluxes (black bars), effluxes (white bars), and influxes (gray bars) from the SOCAT database for the study period.

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 4 Achievements of the research objectives

세부 연구 목표	세부 연구개발 내용	달성도	관련내용
Kuroshio Extension 지역 이산화탄소 분압 변동 파악	○ 해양 표층 이산화탄소 분압 공간 분포 및 분포 조절 요인 파악	100%	3장 1절
	○ 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율 및 변동 요인 파악 - 해양 표층 및 대기 이산화탄소 분압 증가율 산정 - 해양 표층 이산화탄소 분압 증가에 영향을 주는 인자 파악 - 이 지역 이산화탄소 흡수량 변화 진단	100%	3장 2-4절

2. 정량적 목표 달성도

정량적 연구목표는 SCI(E) 논문 1편과 해외학회 발표 1건이었고, SCI(E) 논문은 현재 채택되어 출판 준비 중이며, 2016년 12월 AGU Fall Meeting에서 연구결과를 발표하였다.

제 2절. 관련분야의 기여도

○ 북태평양에서 가장 이산화탄소 흡수가 큰 지역인 쿠로시오 확장역에서 고시계열 관측 자료를 바탕으로 대기 이산화탄소 흡수량 변동을 파악한 연구로, 이 지역의 흡수 변동이 북태평양 전체의 대기 이산화탄소 흡수 변동에 영향을 미친다는 점에서 큰 의의를 가진다.

- 해양의 대기 이산화탄소 흡수능력 변화를 단적으로 보여주는 것이 해양 표층 이산화탄소 분압 변화이지만, 그 변동의 원인을 분석하기 위해서는 다른 두 탄소 인자의 측정이 중요함을 본 연구는 강조한다.
- 쿠로시오 확장역 이산화탄소 흡수 변동 연구의 주요 기초 자료를 제공한다.
- 본 연구는 기초연구이기에 직접적인 경제, 산업적 효과를 창출하지 못하지만, 해양의 대기 이산화탄소 흡수 능력의 변화는 지구 온난화, 기상 이변 등의 전 지구적 문제와 관련이 있기 때문에, 대한민국에 경제 위상에 걸맞은 해양 이산화탄소 연구의 확산이 국가 내부적으로 필요하고 이것에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 쿠로시오 확장역에서의 이산화탄소 변동 연구의 기초 자료로 추후 주요하게 활용될 것으로 생각된다. 관측을 바탕으로 하는 연구뿐만 아니라, 북서태평양 이산화탄소 흡수량 변화 자료로 3차 생지화학 모델 및 기후 진단 모델의 검증과 결과 향상을 위한 주요 기반 자료로 활용 가능하다.
- 추후 이사부호를 이용한 대양 연구 계획 수립의 기초 자료로 활용 가능하다.
- 기후 변화 관련 국제 공동 연구 참여 및 향후 관련 과제 발굴의 주요 자료로 활용 가능하다.
- 기후 변화와 관련된 해양의 변화에 대한 과학적 이해를 증진시킨다.
- 본 연구를 통해 해양 표층 이산화탄소 분압 변화 요인 파악을 위해 추가 인자 측정이 필수적임을 알았으며, 다음 관측에서나 관측을 통한 연구에서는 반드시 추가 탄소인자 측정이 필요함을 제시한다.
- 본 연구에서 제시된 이산화탄소 흡수율 변화와 원인 파악, 그리고 이산화탄소 흡수량 변화 진단 방법은 우리나라 해역의 이산화탄소 흡수량 변화 연구 등을 수행할 때 유용하게 사용될 것으로 생각한다. 그리고 그러한 연구 수행을 위한 고시계열 자료 확보의 중요성을 본 연구는 강조하고 있다.
- 2013년 말에 착수한 위성기반 탄소지도 사업을 통해 우리나라 관할해역의 이산화탄소 인자에 대한 조사가 중점적으로 진행되고 있다. 해당 자료를 활용하면, 본 연구과제에서 제시하고 있는 연구방법론을 통해서 관측 자료가 풍부한 특정 지역에 한해서 본 연구와 같은 분압 증가율 산정을 통한 이산화탄소 흡수량 변화 연구를 수행할 수 있다.

제 6 장 참고문헌

- Atlas, R., R. N. Hoffman, J. Ardizzone, S. M. Leidner, J. C. Jusem, D. K. Smith, and D. Gombos (2011), A cross-calibrated multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, *92*(2), 157–174, doi:10.1175/2010bams2946.1.
- Fay, A. R., and G. A. McKinley (2013), Global trends in surface ocean pCO₂ from in situ data, *Glob. Biogeochem. Cycle*, *27*(2), 541–557, doi:10.1002/gbc.20051.
- Kaneko, H., I. Yasuda, K. Komatsu, and S. Itoh (2013), Observations of vertical turbulent nitrate flux across the Kuroshio, *Geophys. Res. Lett.*, *40*(12), 3123–3127, doi:10.1002/grl.50613.
- Kim, J. Y., D. J. Kang, T. Lee, and K. R. Kim (2014), Long-term trend of CO₂ and ocean acidification in the surface water of the Ulleung Basin, the East/Japan Sea inferred from the underway observational data, *Biogeosciences*, *11*(9), 2443–2454, doi:10.5194/bg-11-2443-2014.
- Le Quéré, C., et al. (2009), Trends in the sources and sinks of carbon dioxide, *Nat. Geosci.*, *2*(12), 831–836, doi:10.1038/ngeo689.
- Le Quéré, C., T. Takahashi, E. T. Buitenhuis, C. Rodenbeck, and S. C. Sutherland (2010), Impact of climate change and variability on the global oceanic sink of CO₂, *Glob. Biogeochem. Cycle*, *24*, 10, doi:10.1029/2009gb003599.
- Le Quéré, C., et al. (2016), Global Carbon Budget 2016, *Earth Syst. Sci. Data*, *8*(2), 605–649, doi:10.5194/essd-8-605-2016.
- Lin, P. F., F. Chai, H. J. Xue, and P. Xiu (2014), Modulation of decadal oscillation on surface chlorophyll in the Kuroshio Extension, *J. Geophys. Res.-Oceans*, *119*(1), 187–199, doi:10.1002/2013jc009359.
- Park, G. H., K. Lee, P. Tishchenko, D. H. Min, M. J. Warner, L. D. Talley, D. J. Kang, and K. R. Kim (2006), Large accumulation of anthropogenic CO₂ in the East (Japan) Sea and its significant impact on carbonate chemistry, *Glob. Biogeochem.*

- Cycle*, 20(4), 13, doi:10.1029/2005gb002676.
- Park, G. H., K. Lee, and P. Tishchenko (2008), Sudden, considerable reduction in recent uptake of anthropogenic CO₂ by the East/Japan Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 35(23), 6, doi:10.1029/2008gl036118.
- Park, G. H., R. Wanninkhof, S. C. Doney, T. Takahashi, K. Lee, R. A. Feely, C. L. Sabine, J. Trinanes, and I. D. Lima (2010), Variability of global net sea-air CO₂ fluxes over the last three decades using empirical relationships, *Tellus, Ser. B*, 62(5), 352–368, doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00498.x.
- Park, G. H., and R. Wanninkhof (2012), A large increase of the CO₂ sink in the western tropical North Atlantic from 2002 to 2009, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 117, 10, doi:10.1029/2011jc007803.
- Pierrot, D., E. Lewis, and D. W. R. Wallace (2006), MS Excel program developed for CO₂ system calculations, *Rep. ORNL/CDIAC-105*, Carbon Dioxide Inf. Anal. Cent., Oak Ridge Natl. Lab., U. S. Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn.
- Qiu, B., S. M. Chen, N. Schneider, and B. Taguchi (2014), A Coupled Decadal Prediction of the Dynamic State of the Kuroshio Extension System, *J. Clim.*, 27(4), 1751–1764, doi:10.1175/jcli-d-13-00318.1.
- Sabine, C. L., et al. (2004), The oceanic sink for anthropogenic CO₂, *Science*, 305(5682), 367–371, doi:10.1126/science.1097403.
- Takahashi, T., J. Olafsson, J. G. Goddard, D. W. Chipman, and S. C. Sutherland (1993), Seasonal variation of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: a comparative study, *Glob. Biogeochem. Cycle*, 7(4), 843–878, doi:10.1029/93gb02263.
- Wanninkhof, R. (2014), Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited, *Limnol. Oceanogr. Meth.*, 12, 351–362, doi:10.4319/lom.2014.12.351.
- Weiss, R. F. (1974), Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas, *Marine Chemistry*, 2(3), 203–215.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.