

[Oceanography] Article

**연구선 이사부호의 해양·대기 이산화탄소 분압 연속 측정 시스템을 활용한
2018년 여름 북서태평양 해양 표층 및 대기 이산화탄소 관측 자료**

이선은* · 조소설

한국해양과학기술원 해양환경연구센터, 부산 49111, 대한민국

**Atmospheric and Surface Seawater CO₂ Measurements on R/V ISABU in
the Western North Pacific in the Summer of 2018**

Seon-Eun Lee* · Sosul Cho

Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Republic of Korea

Received: 9 August 2021, Revised: 10 September 2021, Accepted: 27 September 2021

요약문 해양은 매년 대기로부터 방출되는 인위적인 이산화탄소의 약 24%를 흡수하고 있으며, 해양 표층의 이산화탄소 흡수는 해수의 물리화학적 특성과 생물 활동 등에 따라 지역 및 계절적인 차이를 보인다. 북서태평양 열대 해역은 표층 수온이 높고 심층수의 공급이 제한되며 여름철 열대저기압이 빈번하게 통과한다. 이 해역에서의 해양 표층 및 대기 이산화탄소 분압 분포를 알아보기 위해 2018년 8월 29일부터 9월 19일까지 약 21일간 한국해양과학기술원 연구선 이사부호에 장착된 해양·대기 이산화탄소 분압 연속 측정 시스템을 활용해 총 9,367개 표층 해수 및 대기 이산화탄소 자료를 획득했다. 이와 동시에 현장 표층 해수의 수온, 염분과 해수를 채취한 위경도 자료도 함께 수집하였다. 조사기간에 북위 22도와 북위 23.5도 사이, 북위 29도와 북위 35도 사이 해역은 해양의 이산화탄소 농도가 대기보다 높아 대기로부터 이산화탄소를 방출했고, 북위 17.5도와 북위 20.5도 사이 해역은 대부분 표층 해수의 이산화탄소 농도가 대기보다 낮아 대기 이산화탄소 흡수원임을 확인했다. 본 조사 자료는 향후 전지구 해양 표층 이산화탄소 분압 분포 연구 자료로 활용될 수 있다.

주요어: 이산화탄소 분압, 북서태평양, 필리핀해, 기체교환

Abstract The ocean takes up approximately 24% of anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emitted into the atmosphere in a year. The oceanic CO₂ uptake shows regional and seasonal differences depending on physical and chemical characteristics of seawater and biological activities (such as CO₂ fixation). In the tropical Western North Pacific, the surface water temperature is high, the supply of deep water is limited, and tropical cyclones usually pass in summer. We investigated atmospheric and sea surface CO₂ concentrations in this area using the continuous underway pCO₂ measuring system equipped on the Research Vessel ISABU of Korea Institute of Ocean Science and Technology for about 21 days from August 29 to September 19, 2018. During the cruise, 9,367 CO₂ data were obtained from this measuring system with temperature, salinity, and GPS information. Higher CO₂ concentrations of the surface seawater than those of the atmosphere were observed in the areas of 22°N-23.5°N and 29°N-35°N where CO₂ was emitted into the atmosphere, while most of the areas between 17.5°N and 20.5°N were sinks for the atmospheric CO₂. This dataset can be used for future research on the distribution of partial pressure of carbon dioxide over the global ocean surface.

Keywords: pCO₂, Western North Pacific, Philippine Sea, Air-Sea Gas Exchange

*Corresponding author: selee@kiost.ac.kr

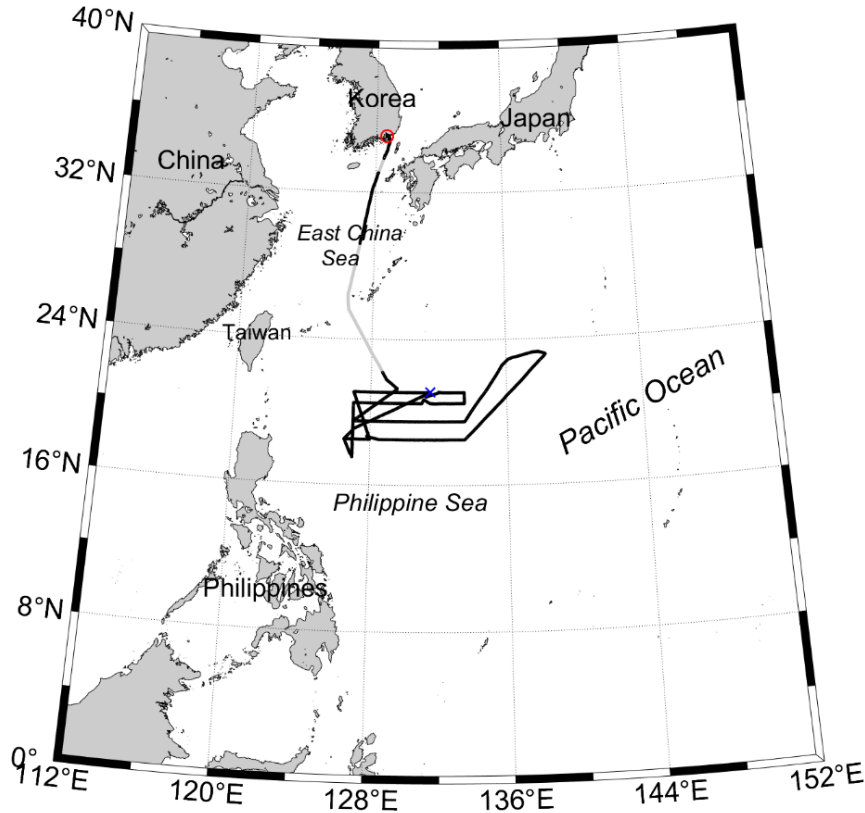


Figure 1. The cruise track. The open red circle and the blue cross indicate the starting and end points of CO₂ measurement, respectively. The gray line indicates the track within Japanese EEZ with no seawater measurement.

1. 서론

산업혁명 이후 인간활동에 의해 방출된 이산화탄소로 인해 대기 이산화탄소 농도는 매우 빠르게 증가하였으며, 2020년 기준 연평균 대기 이산화탄소 증가율은 약 $2.31 \pm 0.11 \text{ ppm yr}^{-1}$ 이다(NOAA GML, 2021). 지구 표면의 70%를 차지하고 있는 해양은 매년 인간활동에 의해 방출된 이산화탄소 중 약 24%를 흡수한다(Friedlingstein et al., 2020). 이러한 해양 표층의 이산화탄소 흡수는 대기의 이산화탄소 분압과 해양의 수온, 염분, 일차생산량 등에 의해 지역적으로 및 계절적으로 차이를 보인다(Takahashi et al., 1993). 따라서 지역해와 대양, 전지구의 이산화탄소 흡수 능력을 연구하기 위해서는 높은 공간 해상도 및 시계열 이산화탄소 분압 자료 획득이 필수적이며, 연구자들은 관측 자료를 공유하는 협력을 통해 시간과 비용의 한계를 보완하고 있다.

조사 해역인 북서태평양 저위도 해역은 일반적으로 표층 수온이 높고 심층에서의 영양염 공급이 제한되어 일차생산량이 낮은 특성으로 인해 대기로 이산화탄소를 약하게 방출하는 것으로 알려져 있다(Takahashi et al., 2002, 2009). 또한 이 지역은 북반구 여름철에 빈번히 발달하는 열대저기압이 통과하는 경로 중 하나로, 열대저기압의 통과 시 강한 바람에 의해 혼합층 깊이 및 수온 변화가 발생하고 이 과정에서 영양염이 풍부하고 용존무기탄소 농도가 높은 심층수가 공급되는 경우 생물생산량이 증가하여 표층 해수의 이산화탄소 분압 변화가 발생할 수 있다. 더불어 태풍의 강한 바람은 해양 표층과 대기의 이산화탄소 교환을 강화하여 결과적으로 해양의 이산화탄소 흡수량이나 방출량을 증가시킨다(Bates et al., 1998; Wanninkhof et al., 2007).

한국해양과학기술원의 연구선 이사부호는 해양-대기 이산화탄소 분압 연속 측정 시스템을 장착하고 있어 대양

에서 연속으로 표층 해수 및 대기의 이산화탄소 관측이 가능하다. 본 연구에서는 이 시스템을 활용해 2018년 8월 29일부터 9월 19일까지 우리나라 거제 장목항(북위 35.0도, 동경 128.7도)에서 출발하여 동중국해 및 북서태평양 필리핀해(북위 17-21도, 동경 125.5-139.5도)까지 약 21일간 해양 표층 및 대기 이산화탄소를 관측하였다.

Table 1. Reported data variables of the pCO₂ measuring system on R/V ISABU.

Variables	Description	Unit
type	측정 CO ₂ 종류	
GPS date	GPS 일자 (UTC)	
GPS time	GPS 시간 (UTC)	
latitude	위도	
longitude	경도	
equ temp	평형기 내 해수 온도	°C
std val	표준 기체 농도	ppm
CO ₂ um/m	LICOR 이산화탄소 측정값	Micromole mole ⁻¹
H ₂ O mm/m	LICOR 수증기 측정값	Millimole mole ⁻¹
licor temp	LICOR 온도	°C
licor press	LICOR 압력	hpa
atm press	대기압	hpa
equ press	압력차 [LICOR 압력 - 평형기 압력]	hpa
temp	CTD 수온	°C
sal	CTD 염분	psu
SBE38	선저 유입 해수 온도	°C

2. 조사 방법

2.1. 해양·대기 이산화탄소 분압 연속 측정 시스템

연구선 이사부호의 해양·대기 이산화탄소 분압 연속 측정 시스템(Model 8050, General Oceanics, USA)은 크게 해수를 공급하는 해수 펌프 및 배관, 평형기, 측정기, 센서모듈(CTD), GPS, 컴퓨터로 구성되어 있다. 이 시스템은 선저의 해수 펌프와 관을 통해 표층 해수를 여과기까지 이동시키고 여과기에서 부유물을 제거한 후 평형기 내부로 분사하여 평형기 내부 공기와 해수가 이산화탄소 분압 평형에 도달하도록 한다. 이 평형 상태의 공기는 연동 펌프를 통해 응축기와 Nafion tube를 통과하면서 수분이 제거되고, 비분산적외선 CO₂/H₂O 분석기(Li-7000, LICOR, Inc., USA)로 주입되어 최종적으로 CO₂ 농도가 측정된다. 해수의 수온과 염분은 여과기 도달 직전에 별도의 관으로 분리 연결된 센서모듈의 CTD(OS315, Idronaut, Italy)를 이용해 측정하였다. CO₂/H₂O 분석기(LICOR)와 센서모듈은 GPS와 함께 컴퓨터에 연결되어 모든 측정값이 위·경도와 함께 기록되었다(Fig. 2). 측정 시스템에 대한 상세한 설명과 모식도는 Pierrot et al. (2009)에서 확인할 수 있다. 측정 항목은 Table 1에 기술하였다.

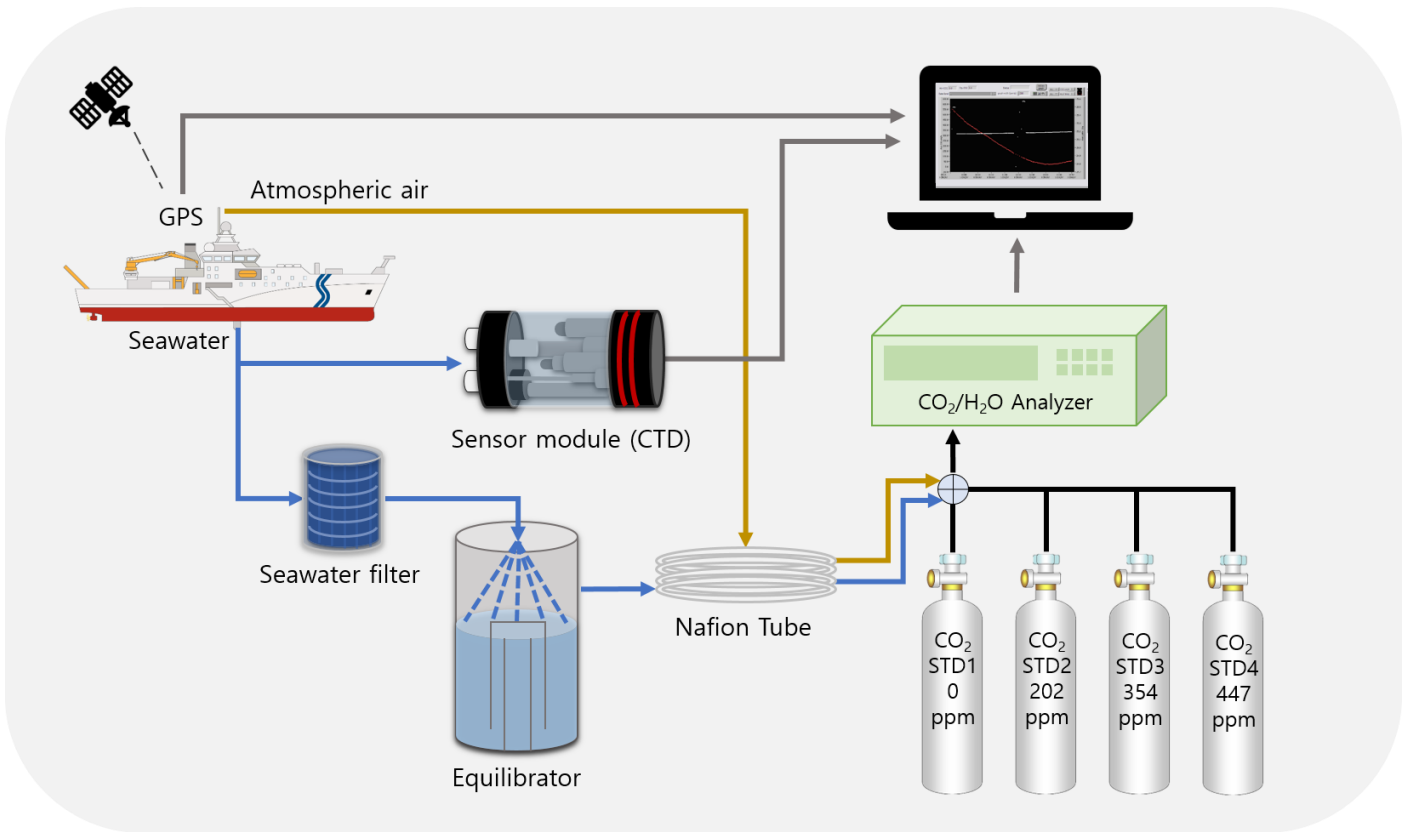


Figure 2. Schematic of the pCO₂ measuring system

2.2. 관측 방법 및 자료 획득

해양·대기 이산화탄소 분압 연속 측정 시스템의 시간에 따른 변화를 보정하기 위해 주기적인 표준 기체 측정이 필요하며, 본 조사에서는 0, 202, 354, 447 ppm의 4개 농도의 고순도 표준 이산화탄소 기체를 사용하여 약 5시간 간격으로 표준 기체를 측정하였다. 또한, 약 50시간 간격으로 최저(0 ppm) 및 최고 농도(447 ppm) 표준 기체를 사용하여 영점 및 최고점 기기 보정(Zero-Span)을 실시하였다. 0 ppm의 표준 기체는 이산화탄소 기체를 포함하지 않은 고순도 질소 기체를 사용하였다. 표준 기체, 대기 이산화탄소 농도, 해수 이산화탄소 농도 순으로 측정하였으며, 대기 이산화탄소 측정관의 유입구는 선수에서 주변 오염이 없는 위치에 설치하였고, 측정 오차를 최소화하고자 대기 이산화탄소 농도와 가장 비슷한 447 ppm 표준 기체 측정 직후에 대기 이산화탄소 농도를 측정하였다. 본 조사에서 설정한 측정 순서와 횟수는 Table 2에 기술하였다.

본 조사에서는 2018년 8월 29일 04:21 UTC부터 9월 19일 13:08 UTC까지 21일 9시간 동안 대기 및 해수 이산화탄소 측정 자료 총 9,367개를 획득하였으며, 대기 이산화탄소 측정 자료는 890개, 해수 이산화탄소 측정 자료는 8,477개이다. 해수는 2.5분, 대기는 1.5분 간격으로 건조 공기의 물분율(xCO₂)을 측정하였으며, 조사하는 동안 해수 공급과 기체 흐름의 중단 없이 원활히 측정이 이루어졌다.

본 데이터셋은 조사에서 획득한 모든 관측 자료를 포함하고 있으며, 측정 항목 일부에서 측정값이 기록되지 않았거나 기록 오류가 발생한 경우 해당 값을 -999.9로 표시하였다. 데이터셋의 측정 항목(Table 1) 중 해수 온도(temp), 해수 염분(sal), 선저 해수 온도(SBE38)는 측정 CO₂ 종류(type)에 관계 없이 연속해서 측정되었으며, 이산화탄소(CO₂ um/m)는 type에 표시된 CO₂ 종류의 측정값이다. CO₂ 종류는 Table 2의 Gas type에 표시하였다.

Table 2. The sequence of underway CO₂ measurement.

Step	Gas type	Times
1	Zero – 0 ppm (STD1z)	1
2	Span – 447 ppm (STD4s)	1
3	Standard gas 1 – 0 ppm (STD1)	5
4	Standard gas 2 – 202 ppm (STD2)	5
5	Standard gas 3 – 354 ppm (STD3)	5
6	Standard gas 4 – 447 ppm (STD4)	5
7	Air (ATM)	10
8	Seawater (EQU)	100
9	Step 3 – 8 반복	10

3. 결과 및 결론

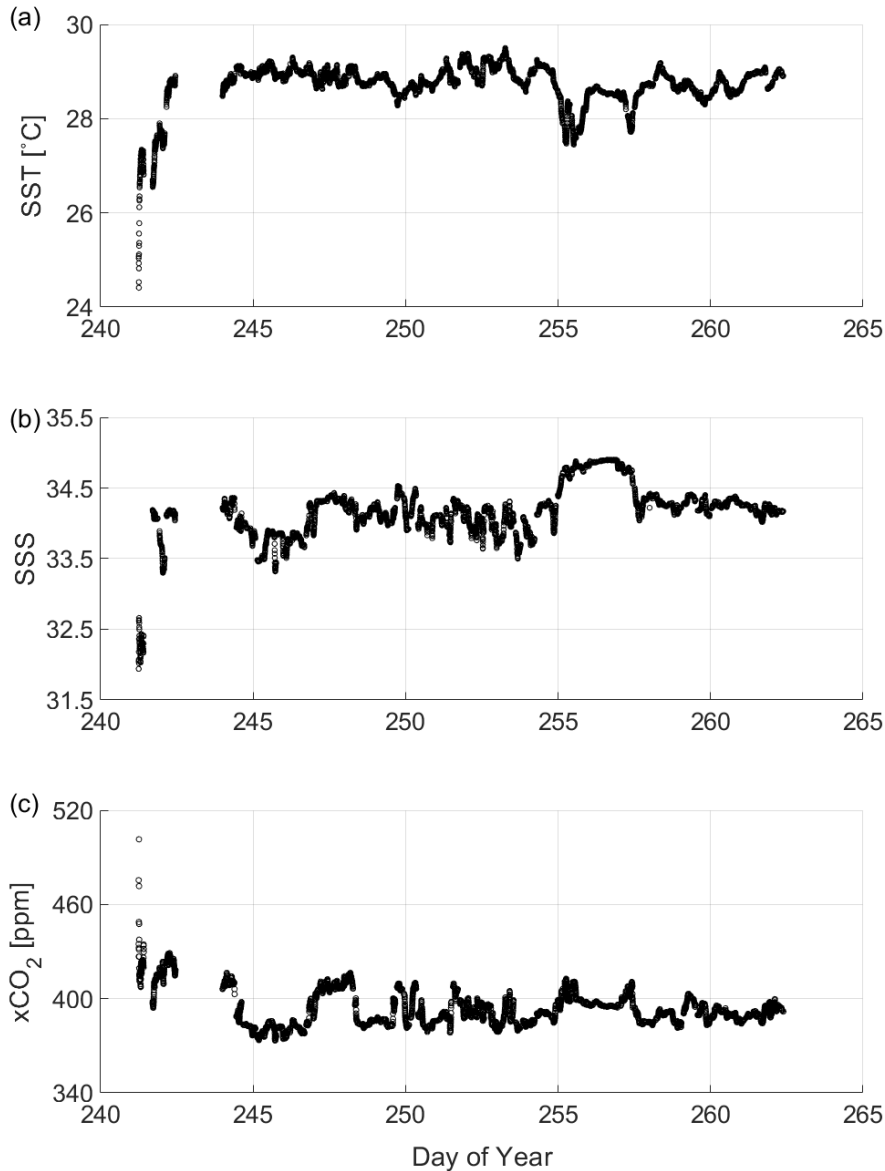


Figure 3. Temporal distributions of (a) sea surface temperature (SST), (b) sea surface salinity (SSS), and (c) xCO_2 in dry air. The values are only shown where seawater xCO_2 measurements are available.

조사 기간의 해수 관측 자료 중 표층 수온 범위는 24.4-29.5°C였으며 평균 수온은 $28.7 \pm 0.4^\circ\text{C}$ (평균±표준편차)였다. 표층 염분 범위는 31.9-34.9, 평균 염분은 34.2 ± 0.4 였다. 표층 해수의 이산화탄소 농도 범위는 373.4-501.5(평균 393.3 ± 10.8) ppm으로 나타났다(Fig. 3). 북위 31도와 북위 35도 사이 해역에서 상대적으로 낮은 수온과 염분이 관측되었으며, 이와 함께 높은 xCO_2 값이 관측되었다. 필리핀해에서는 북위 21-24도, 동경 135-138도 사이 해역에서 주변보다 낮은 수온과 높은 염분이 관측되었다(Fig. 4). 대기의 평균 이산화탄소 농도는 401.5 ± 0.7 ppm이었으며, 북위 22도와 북위 23.5도 사이, 북위 29도와 북위 35도 사이 해역에서는 해양의 이산화탄소 농도가 대기보다 높아 대기로 이산화탄소를 방출했다. 반면 북위 17.5도에서 북위 20.5도 사이 해역은 대부분 표층

해수의 이산화탄소 농도가 대기보다 낮아 해양이 대기 이산화탄소의 흡수원이었다. 본 조사 자료는 다른 조사 자료와 함께 향후 전지구 해양 표층 이산화탄소 분압 분포 연구 자료로 활용될 수 있다.

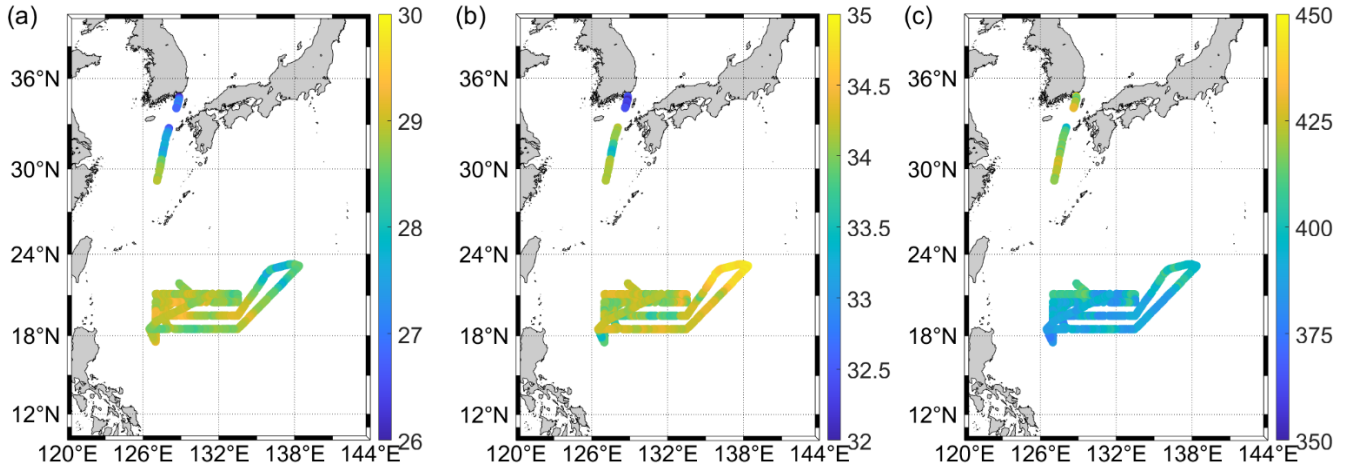


Figure 4. Spatial distributions of (a) SST (°C), (b) SSS, and (c) xCO₂ (ppm) in dry air. The values are only shown where seawater xCO₂ measurements are available.

4. 사사

본 연구는 해양수산부 R&D 과제 '북서태평양 해양-대기 상호작용 및 태풍 급강화 현상 연구(PM62260)'와 한국해양과학기술원 주요사업 '생지화학 순환 및 해양환경변동 연구(PE99912)'의 지원을 받아 수행되었습니다.

5. 참고문헌

Bates NR, Knap AH, Michaels AF (1998) Contribution of hurricanes to local and global estimates of air-sea exchange of CO₂. *Nature*, 395: 58–61.

Friedlingstein et al. (2020) Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12: 3269-3340.

NOAA GML (2021) Carbon Cycle Greenhouse Gases. National Oceanic & Atmospheric Administration Global Monitoring Laboratory. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gr.html> Accessed 9 Aug 2021

Pierrot D, Neill C, Sullivan K, Castle R, Wanninkhof R, Lüger H, Johannessen T, Olsen A, Feely RA, Cosca CE (2009) Recommendations for autonomous underway pCO₂ measuring systems and data-reduction routines. *Deep-Sea Research II*, 56: 512-522.

Takahashi T, Olafsson J, Goddard JG, Chipman DW, Sutherland SC (1993) Seasonal variation of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: a comparative study. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4): 843-878.

Takahashi et al. (2002) Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Research II*, 49: 1601-1622.

Takahashi et al. (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea–air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research II*, 56: 554-577.

Wanninkhof R, Olsen A, Triñanes J (2007) Air–sea CO₂ fluxes in the Caribbean Sea from 2002–2004. *Journal of Marine System*, 66: 272–284.

6. 데이터셋에 대한 메타데이터

Sort	Field	Subcategory#1	Subcategory#2	
Essential	*Title	Underway CO ₂ Measurements on R/V ISABU in the Western North Pacific in the summer of 2018		
	*DOI name	10.22761/DATA2021.3.3.002		
	*Category	Oceans		
	Abstract	xCO ₂ in dry air, location, temperature, salinity, pressure, and ancillary data of sea surface water samples		
	*Temporal Coverage	From 29 Aug 2018 UTC through 21 Sep 2018 UTC		
	*Spatial Coverage	Latitude 17.50°N – 35.05°N Longitude 126.48°E – 138.35°E		
	*Personnel	Name	Seon-Eun Lee	
		Affiliation	Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST)	
		E-mail	selee@kiost.ac.kr	
*CC License	BY-SA			
Optional	*Project	북서태평양 해양-대기 상호작용 및 태풍 급강화 현상 연구	PM62260	
		생지화학 순환 및 해양환경변동 연구	PE99912	
	*Instrument	pCO ₂ Measuring System (Model 8050, General Oceanics, USA)	CO ₂ /H ₂ O Analyzer (Li-7000, LI-COR, Inc., USA)	