

선박 및 위성 플랫폼을 이용한 대한해협과 동해 봄철 표층 해양 변수 관측

모하메드 함자 · 최준명* · 이준호†
국립부경대학교(학생 · *†교수)

Observations of Ocean Surface Variables from Shipboard and Remote Sensing Platforms in the Korea Strait and East Sea During Spring

Mohamed Shahrul Daniel Bin HAMZAH · Jun Myoung CHOI* · Jun Ho LEE†
Pukyong National University(student · *†professor)

Abstract

Surface ocean variables derived from satellite and reanalysis products are widely used to investigate marine environmental conditions and can be used as indicators of the physical and biological processes that control air-sea CO₂ exchange. This study collected both shipboard observations from R/V *NARA* and satellite reanalysis data (GOCI-II, GLORYS12V1, CMEMS) in the Korea Strait and East/Japan Sea during spring including sea surface temperature, salinity, and chlorophyll-a concentration, while direct CO₂ flux measurements were obtained via eddy covariance method. Spatial distributions showed distinct regional contrasts between KS and EJS although both regions acted as net sinks of atmospheric CO₂. Correlation analyses showed moderate agreement between in-situ and gridded products for SST and SSS. Two satellite-derived Chl-a products (GOCI-II and CMEMS) showed better agreement, supporting their combined use for characterizing biogeochemical variability. These variables are important for understanding upper-ocean hydrographic and biological conditions and for supporting studies related to marine carbon processes.

Key words : Shipboard observation, Satellite observation, Korea strait, East sea

I. 서론

해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST), 해수면 염분(Sea Surface Salinity, SSS), 그리고 Chl-a(Chlorophyll-a)는 상층 해양의 물리·생지화학적 상태를 이해하는 데 필수적인 표층 해양 변수이다. SST는 해양-대기 간 열교환과 상층 해양의 성층 구조에 영향을 미치며, SSS는 담수 유입, 증발, 수괴 혼합의 영향을 반영한다. 또한 Chl-a

는 표층의 생물학적 생산성을 나타내는 지표로 널리 활용된다. 이러한 변수들은 해양 표층 환경의 상태를 설명할 뿐 아니라, 수괴 구조와 해양 탄소 관련 과정 연구에도 중요하게 이용된다. 최근 이산화탄소(CO₂)를 포함한 온실가스의 증가는 전 지구적 기후변화를 가속화하고 있으며(Oliveira et al., 2019), 이에 따라 해양과 대기 사이의 상호작용에 대한 이해가 더욱 중요해지고 있다. 특히 해양-대기 접합면에서의 CO₂ 교환은 물리적 및

† Co-Corresponding author : 051-629-6582, jmchoi@pknu.ac.kr / 051-629-5995, leejh@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2024)에 의해 연구되었음.

생지화학적 과정에 의해 지배되므로, 관련 표층 해양 변수에 대한 신뢰성 있는 관측은 지역적 탄소순환 과정의 해석을 향상시키는 데 중요하다 (Rodrigues et al., 2023).

대한해협(Korea Strait, KS)은 동중국해(East China Sea, ECS)와 동해(East Sea, ES)를 연결하는 주요 해협으로서, 대마난류의 유입과 수송 변동, 그리고 두 해역 사이의 수괴 교환에 중요한 역할을 한다(Lyu and Kim, 2005; Na et al., 2009). 동해는 한반도, 일본, 러시아에 둘러싸인 반폐쇄성 주변해로서, 독자적인 물리·생지화학 및 탄소순환 특성을 나타내는 해역이다(Jang et al., 2017; Kim et al., 2022). 기존 연구는 대한해협의 해협역학과 유량 변동, 그리고 동해의 표층 CO_2 및 Chl-a 변동성을 각각 다루어 왔다(Lyu and Kim, 2005; Na et al., 2009; Jang et al., 2017; Park et al., 2022).

본 연구에서는 봄철 대한해협과 동해에서 획득한 선박 관측 자료와 위성 및 재분석 자료를 이용하여 SST, SSS, CO_2 , Chl-a의 분포 특성을 비교·분석하였다. 이를 통해 서로 다른 해양학적 특성을 지닌 두 해역의 표층 환경을 동일한 자료 체계에서 파악하고, 향후 관측 기반 연구에서 활용 가능한 표층 해양 자료의 적용성을 평가하기 위한 기초 정보를 제시하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. Study Area

대한해협은 북위 33–35°, 동경 126–129° 사이에 위치하며, 한반도와 일본 열도 사이에서 동중국해와 동해를 연결하는 주요 해협이다. 이 해역은 비교적 얇은 수심을 가지며, 대마난류에 의해 유입되는 고온·고염수의 영향을 크게 받는다.

반면 동해는 한반도 동쪽에 위치한 반폐쇄성 주변해로, 좁은 대륙붕과 급경사의 해저지형을 가지며 수심은 약 3,000 m에 이른다. 동해 심층수의 형성과 강한 용해도 펌프는 이 해역의 탄소

순환에 중요한 역할을 하며, 지역적 CO_2 흡수에도 영향을 미칠 수 있다 (Kim et al., 2025).

따라서 본 연구에서는 서로 다른 지형적·해양학적 특성을 지닌 대한해협과 동해를 대상으로 표층 해양 변수의 지역적 차이를 비교하였다.

2. Observed data

표층 해양 변수는 2024년과 2025년 봄철 부경대학교 실습선 나라호(R/V NARA)를 이용한 항해에서 수집하였다. 대한해협 관측은 2024년 4월 1–5일에 수행되었고, 동해 관측은 2025년 5월 19일에 수행되어 두 관측은 서로 다른 연도에 이루어졌으나 두 관측 모두 겨울 이후 수온 상승과 봄철 성층 형성 초기라는 비교적 유사한 계절적 조건에서 수행되었다. 따라서 본 연구는 연차 변동성을 평가하기보다는 봄철 관측 기간 동안 두 해역에서 나타난 표층 해양 특성의 차이를 비교하는 데 초점을 두었다. 관측 장비로는 3차원 초음파 풍속계와 개방형 CO_2 가스 분석기(IRGASON, Campbell Scientific), 그리고 나라호에 설치된 자동기상관측장치(AWS)를 사용하였으며, 이를 통해 바람과 CO_2 밀도 자료를 획득하였다. 또한 나라호에 설치되어 있는 TSG (SBE 21 SeaCAT Thermosalinograph, Sea-Bird Scientific)를 이용하여 수온과 전기전도도를 연속적으로 측정하여, 이로부터 염분 데이터를 획득하였다. 연속 관측 장비 및 측정 변수는 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> List of instruments and measured variables

Instruments	Measured variables
Integrated CO_2 and H_2O Open-Path Gas Analyzer	CO_2 density (mg/m^3) Vertical wind (m/s)
Ship Automatic Weather Station (AWS)	Wind speed (m/s)
Thermosalinograph (TSG)	Temperature ($^{\circ}C$) Salinity (psu)

원시 바람 자료는 이상값 제거 및 품질관리를 수행하였으며, 선박 선수부에 의한 흐름 왜곡이 발생할 수 있는 방위 구간(170°-190°)은 분석에서 제외하였다(Sabbatini et al., 2018). 선박 운동에 의한 영향은 IMU 자료를 이용하여 바람 자료를 지구좌표계로 변환함으로써 보정하였다. 다만 IMU 자료를 사용할 수 없는 안정적인 항해 구간에 대해서는 선속과 침로 정보를 이용한 간략한 AWS 기반 보정을 적용하였다.

CO_2 밀도와 연직 풍속 성분의 변동값은 와류 공분산법 (eddy covariance method)을 이용한 CO_2 플럭스 계산에 사용되었다.

$$F_{CO_2} = \overline{w' \rho'_{CO_2}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 F_{CO_2} 는 CO_2 의 연직 플럭스, w 는 연직 풍속, ρ_{CO_2} 는 CO_2 밀도를 의미한다. 기호 '은 각 변수의 평균값으로부터의 난류 변동성분을 나타내며, $\overline{\cdot}$ 는 일정 시간 구간에 대한 평균을 의미한다. 따라서 $\overline{w' \rho'_{CO_2}}$ 는 연직 풍속과 CO_2 밀도의 난류 변동성분 사이의 공분산으로서, 와류공분산법에 의한 CO_2 의 연직 교환량을 나타낸다. 이 방법은 공기-해수 경계면에서 CO_2 농도 차이를 수반하는 난류 와류에 의해 유도되는 교환을 직접적으로 측정하는 방법이다(Rodrigues et al., 2024). 또한 수분에 의한 영향을 보정하기 위하여 CO_2 자료에 Webb 보정을 적용하였으며, 최종적으로 30분 평균 CO_2 플럭스를 산출하였다(Webb et al., 1980).

3. Satellite and reanalysis data

대한해협과 동해의 봄철 표층 해양 상태를 파악하기 위하여 위성 자료와 재분석 자료를 함께 사용하였다. SST와 Chl-a는 Geostationary Ocean Color Imager II (GOCI-II) 자료로부터 획득하였으며, 이를 항해 경로를 따라 보간하여 현장관측

자료와 직접 비교하였다. 한편, GOCI-II Chl-a 자료는 구름에 의한 결측이 발생할 수 있으므로, 이를 보완하기 위하여 Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)의 일별 해색 재분석 Chl-a 자료를 함께 사용하였다 (Hong et al., 2023). CMEMS 자료는 MODIS-Aqua, MODIS-Terra, MERIS, SeaWiFS, VIIRS-SNPP 및 Sentinel-3A/B의 OLCI 등 여러 센서의 관측을 통합한 산출물을 제공한다.

일별 SSS장은 Global 1/12° Ocean Reanalysis version 1(GLORYS12V1)으로부터 획득하였다. 이 자료는 약 0.083°의 공간 해상도를 가지는 표층 염분 자료를 제공하며, 항해 경로를 따라 추출하여 현장관측 자료와 비교하였다.

현장관측과 위성·재분석 자료 간의 일치성을 평가하기 위하여 SST, SSS 및 Chl-a에 대한 비교 통계분석을 수행하였다. 자료 간 일치도는 Pearson 상관계수(r)와 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)를 이용하여 평가하였으며, 산포도와 1:1 기준선을 함께 제시하여 관측값과 격자형 자료 간의 관계를 시각적으로 검토하였다.

III. 연구 결과

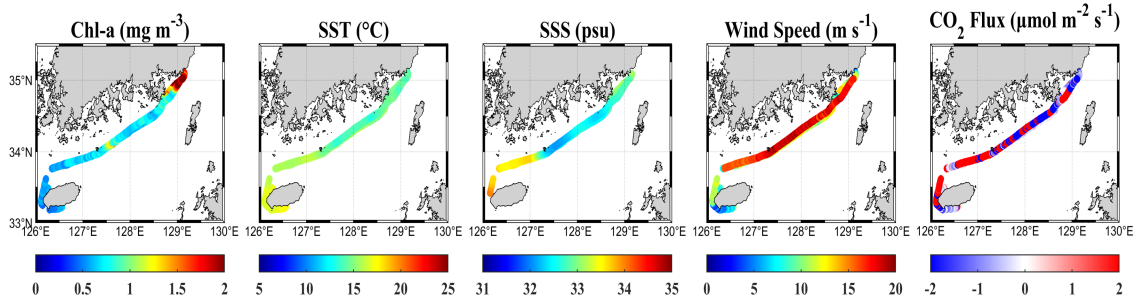
1. Surface distribution of SST, SSS and Chl-a in spring

대한해협과 동해의 항해 경로를 따라 SST, SSS, Chl-a 농도, 풍속 및 해양-대기 CO_2 flux의 공간분포를 분석한 결과, 두 해역은 서로 다른 표층 해양 특성을 보였으나 관측 기간 동안 모두 대기 CO_2 의 흡수원으로 작용한 것으로 나타났다(<Table 2>). 대한해협에서는 SST가 항해 경로를 따라 뚜렷한 공간 구배를 보였으며, 남서쪽 해역에서 상대적으로 낮고 북동쪽으로 갈수록 높아지는 경향을 나타냈다([Fig. 2]). 이러한 특성은 지역 평균값에서도 확인되었으며, 대한해협의 평균 SST는 15.38 °C로 동해의 14.75 °C보다 유의하게

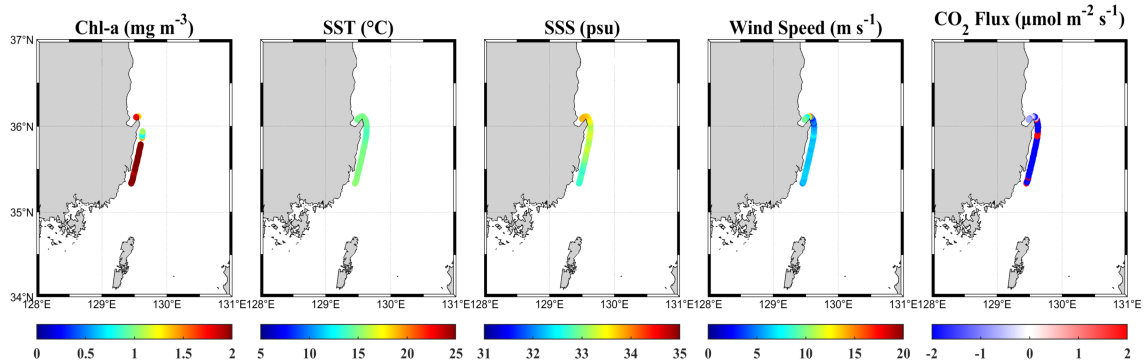
높았다($p < 0.001$; <Table 2>). 표층 염분은 항해 경로를 따라 증가하는 경향을 보였고 남서쪽 해역에서 상대적으로 높은 값을 나타냈으나, 평균 SSS는 32.90 psu로 동해의 33.13 psu보다 유의하게 낮았다($p < 0.001$; <Table 2>). Chl-a 농도는 전반적으로 낮거나 중간 수준이었으나 부산 인근 북동쪽 일부 해역에서 비교적 높은 값을 보여 국지적인 생물 생산성 증가 가능성을 시사하였으며, 평균 Chl-a 농도는 0.8 mg/m^3 로 동해의 2.3 mg/m^3 보다 유의하게 낮았다($p < 0.001$; <Table 2>). 풍속은 대한해협 전역에서 비교적 강하게 관측되었고, 평균 풍속도 12.67 m/s 로 동해의

7.39 m/s 보다 유의하게 높게 나타나($p < 0.001$; <Table 2>), 대한해협이 관측 기간 동안 상대적으로 강한 대기 강제력의 영향을 받고 있었음을 보여준다. CO_2 flux는 항로를 따라 양의 값과 음의 값이 교차하며 국지적인 방출과 흡수가 모두 나타났다으나, 전체 평균은 $-0.23 \text{ } \mu\text{mol/m}^2\text{s}$ 로 음의 값을 보여 대한해협이 관측 기간 동안 평균적으로는 약한 대기 CO_2 흡수원으로 작용하였음을 나타내었다(<Table 2>).

동해의 SST는 항해경로 전반에서 대한해협에 비해 상대적으로 균질한 분포를 나타냈으며, 평균값도 $14.75 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 대한해협보다 낮았다.



[Fig. 1] Spatial distributions of surface ocean variables along the cruise track in the Korea Strait (KS) during spring



[Fig. 2] Spatial distributions of surface ocean variables along the cruise track in the East Sea (ES) during spring.

<Table 2> Mean surface ocean properties and air-sea CO_2 flux characteristics in the KS and ES

Region	SST ($^\circ\text{C}$)	SSS (psu)	Chl-a (mg/m^3)	Wind speed (m/s)	Air-sea CO_2 sink/source
KS	15.38	32.90	0.8	12.67	Sink
ES	14.75	33.13	2.3	7.39	Sink

표층 염분은 전반적으로 대한해협보다 높은 수준을 유지 하였고, 평균 SSS도 33.13 psu로 대한해협(32.90 psu)보다 높아 보다 염분이 높은 수괴의 영향을 반영하는 것으로 해석된다. Chl-a 농도 또한 대한 해협보다 전반적으로 높게 나타났으며 평균값역시 2.3 mg/m³로 대한해협(0.8 mg/m³)을 뚜렷하게 상회하여, 동해가 관측시기 동안 상대적으로 높은 생물학적 생산성을 보였다. 반면 풍속은 측정시기 동안 전반적으로 약하게 나타났고 평균값도 7.39 m/s로 대한해협보다 낮아, 측정 기간동안 두 해역간 대기 강제력 차이가 존재하였다. 그럼에도 불구하고 해양-대기 CO₂ 플럭스는 동해에서도 전반적으로 음의 값(-2.37 $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$)을 유지하여, 동해 역시 관측기간 동안 대기 CO₂의 흡수원으로 기능한 것으로 나타났다. 종합하면, 대한해협은 상대적으로 높은 SST와 강한 풍속의 특성을, 동해는 상대적으로 높은 SSS와 Chl-a 농도의 특성을 보였으며, 이러한 물리적·생물학적 차이에도 불구하고 두 해역 모두 CO₂ 흡수원이라는 공통된 특성을 나타냈다.

대한해협은 상대적으로 높은 SST와 강한 풍속을 보인 반면, 동해는 상대적으로 높은 SSS와 Chl-a 농도를 보이는 특징을 나타내었다. 이러한 지역 간 차이는 모두 통계적으로 유의하였다(SST, SSS, 풍속: Welch's t-test; Chl-a: Mann-Whitney U test; 모두 $p < 0.001$). 봄철 두 해역이 모두 대기 CO₂의 흡수원으로 작용한 결과는 생물학적 생산과 물리적 환경이 복합적으로 작용한 결과로 해석될 수 있다. 대한해협의 일부 구간에서는 양의 플럭스가 나타나 국지적인 CO₂ 방출이 관측되었으나, 전체 평균은 음의 값을 유지하여 순 CO₂ 흡수가 우세하였다. 이러한 결과는 봄철 남황해가 CO₂ 흡수원으로 작용한다는 기존 연구 결과와도 유사한 경향을 보인다(Kim et al., 2024).

동해에서 나타난 상대적으로 높은 Chl-a 농도는 봄철 생물 생산 증가가 CO₂ 흡수에 기여하였을 가능성을 시사한다. 즉, 식물플랑크톤의 광합

성 활동은 표층 해수의 CO₂를 감소시켜 대기로부터 해양으로의 CO₂ 유입을 촉진할 수 있다. 이러한 해석은 봄철 조류 번성이 표층 해수의 CO₂를 감소시킨다고 보고한 선행연구와도 일관된다(Deng et al., 2021).

또한 낮은 SST와 낮은 SSS는 해수 내 CO₂의 용해도를 증가시키고 표층 해수의 CO₂ 플러그시터를 낮춤으로써 대기-해양 간 CO₂ 분압차를 증가시킬 수 있다(Jang et al., 2017; Parkinson, 2019). 이러한 과정 역시 두 해역에서 관측된 CO₂ 흡수 특성을 설명하는 중요한 요인으로 판단된다.

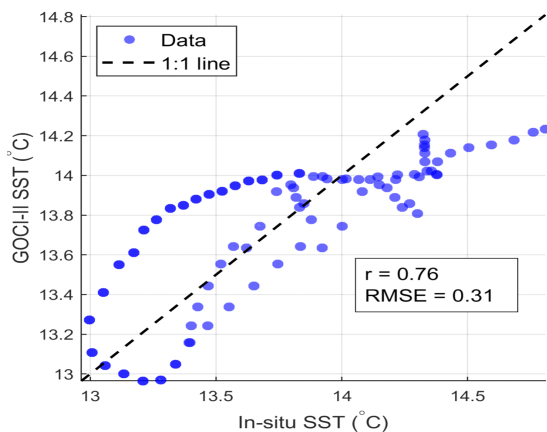
한편, 대한해협에서 나타난 CO₂ 플럭스의 공간적 변동성은 풍속 변화와도 관련될 수 있다. 높은 풍속은 난류 혼합을 강화하고 표층과 아표층 사이의 CO₂ 교환에 영향을 줄 수 있으므로, Chl-a 농도가 낮은 구간에서도 국지적인 플럭스 변동을 유발할 수 있다(Carvalho et al., 2025). 이는 연구해역에서 풍속 변동이 CO₂ 플럭스 변화의 중요한 물리적 요인 중 하나임을 시사한다.

2. Comparison statistics between in-situ measurements and satellite data

현장관측 자료와 위성·재분석 자료 간의 비교 통계분석 결과, SST와 SSS는 비교적 양호한 일치성을 보인 반면, Chl-a는 상대적으로 낮은 상관성을 나타냈다. 이는 물리 변수인 수온과 염분에 비해 생물학적 변수인 Chl-a가 시·공간적으로 더 큰 변동성을 가지며, 센서 및 자료 산출 알고리즘의 차이에 더 민감하기 때문으로 해석된다.

SST의 경우, 현장관측 수온과 GOCI-II 기반 SST 자료의 비교에서 상관계수는 0.76, RMSE는 0.31 °C로 나타났다([Fig. 3]). 이는 위성 기반 SST 자료가 항해 경로를 따라 관측된 수온의 공간적 변동 특성을 비교적 잘 재현하고 있음을 보여준다. 다만 약 13.0-13.5 °C의 낮은 수온 구간에서는 GOCI-II SST가 현장관측 수온을 다소 과

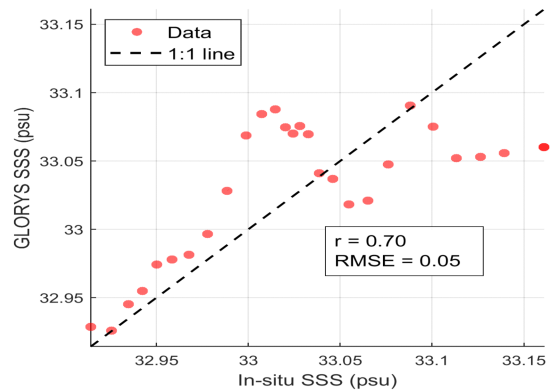
대 추정하는 경향을 보였으며, 최대 약 0.8 °C의 양의 편차가 나타났다. 이러한 저온 구간의 과대 추정은 강한 수온 구배가 존재하는 해역에서 현장관측 TSG가 국지적인 저온 수괴를 포착하는 반면, 250 m 해상도의 GOCI-II SST는 주변의 상대적으로 따뜻한 수역을 함께 평균함으로써 발생하는 sub-pixel 공간 불일치와 관련될 가능성이 있다. 또한 연안 해역에서의 대기 수증기 보정 또는 안개 등의 영향도 일부 불확실성 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 GOCI-II SST 자료는 연구해역의 전반적인 수온 변동을 파악하는 데 유용하지만, 강한 수온 구배가 존재하는 구간에서는 현장관측값과의 차이를 고려한 해석이 필요하다.



[Fig. 3] Correlation between satellite derived SST (GOCI-II) and TSG SST.

SSS의 경우, GLORYS12V1 재분석 자료와 현장관측 염분 사이의 상관계수는 0.70, RMSE는 0.05 psu로 나타났다([Fig. 4]). 이는 재분석 염분 자료가 항해 경로를 따라 관측된 표층 염분의 전반적인 분포 특성을 양호하게 반영하고 있음을 의미한다. 다만 일부 구간에서는 현장관측값과의 소규모 편차가 나타났으며, 이는 재분석 자료의 격자 해상도와 실제 해양의 소규모 변동성이 완전히 일치하지 않기 때문으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, GLORYS12V1 자료는 대한해협과 동해에서 나타나는 상대적인 염분 수준의 차이와

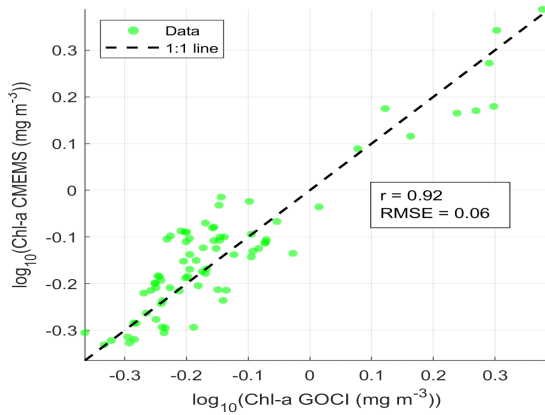
항해 경로를 따른 염분 변화 경향을 재현하고 있어, 연구해역의 광역적인 표층 염분 구조를 파악하고 현장관측이 제한되는 구간을 보완하는 데 유용한 자료로 판단된다.



[Fig. 4] Correlation between satellite derived SSS (GLORYS) and TSG SSS.

Chl-a의 경우, GOCI-II와 CMEMS 자료를 log10 변환한 후 비교하였다. 이는 Chl-a 농도가 일반적으로 로그정규분포에 가까운 특성을 보이기 때문에, Chl-a 자료 비교에서 널리 사용되는 방법이다. log10 변환 후 두 자료의 상관계수는 0.92, RMSE는 0.06으로 나타났으며, 산포도에서도 자료들이 1:1 기준선 주변에 비교적 밀집하여 분포하였다([Fig. 6]). 따라서 선형 스케일에서 넓게 분산되어 보이는 산포는 두 자료 간의 실제 불일치라기보다는 Chl-a 농도 분포의 비대칭성과 높은 변동성에 따른 영향으로 해석된다. 이러한 결과는 GOCI-II와 CMEMS Chl-a 자료가 연구해역의 생지화학적 변동성을 파악하는 데 상호 보완적으로 활용될 수 있음을 시사한다.

종합하면, 위성 및 재분석 자료는 현장관측에서 확인된 표층 해양 상태를 전반적으로 잘 재현하였으며, 특히 SST와 SSS 자료는 비교적 높은 활용 가능성을 보였다. 반면 Chl-a 자료는 보다 신중한 해석이 필요하지만, 연구해역의 광역적인 생물학적 변동 특성을 파악하는 데에는 여전히 유용한 자료로 판단된다.



[Fig. 5] Correlation between satellite derived Chl-a from GOCI-II and CMEMS.

IV. 결 론

본 연구에서는 봄철 대한해협과 동해에서 수행한 선박 기반 현장관측과 위성·재분석 자료를 결합하여 표층 해양 변수와 해양-대기 CO_2 교환 특성을 분석하였다. 관측 결과, 두 해역은 모두 관측 기간 동안 대기 CO_2 의 흡수원으로 작용하였다. 또한 본 관측 기간 및 항로상에서 대한해협은 상대적으로 높은 SST와 강한 풍속을 보였고, 동해는 상대적으로 높은 SSS와 Chl-a 농도를 나타내었다. 다만 본 연구의 선박 관측은 대한해협에서 5일, 동해에서 1일 동안 수행되었으며, 두 해역의 관측 시기도 서로 다른 연도에 해당하므로, 이러한 차이를 각 해역의 일반적인 지역 특성으로 확대 해석하는 데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 관측된 차이를 봄철 특정 관측 기간 동안 나타난 표층 해양 조건의 차이로 해석하였다.

두 해역이 모두 CO_2 흡수원으로 나타난 결과는 관측 기간 동안의 생물학적 생산과 물리적 조건이 복합적으로 작용한 결과일 가능성이 있다. 특히 동해에서 상대적으로 강한 CO_2 흡수가 나타난 것은 높은 Chl-a 농도와 낮은 SST가 함께 관측된 조건과 관련될 수 있다. 반면 대한해협에서는 상대적으로 강한 풍속과 CO_2 flux의 공간적 변동성이

함께 나타나, 풍속에 의한 난류 혼합이 CO_2 교환 변동성에 기여했을 가능성이 있다. 그러나 이러한 해석은 제한된 관측 자료에 근거한 것으로, 계절적 또는 연차적 대표성을 의미하는 것은 아니다.

위성 및 재분석 자료와 현장관측 자료의 비교에서는 SST와 SSS가 비교적 양호한 일치성을 보여, 연구해역의 표층 물리 환경을 파악하는 데 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 또한 GOCI-II와 CMEMS Chl-a 자료는 log10 변환 후 높은 일치성을 보여, 연구해역의 생지화학적 변동성을 파악하는 데 상호 보완적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 다만 Chl-a는 생물학적 반응, 광학적 특성, 구름에 의한 결측, 센서 및 자료 처리 알고리즘의 영향을 받을 수 있으므로, 위성 기반 Chl-a 자료의 해석에는 신중한 접근이 필요하다.

본 연구는 제한된 현장관측 자료를 위성 및 재분석 자료와 함께 활용하여 대한해협과 동해의 봄철 표층 해양 변수와 CO_2 교환 특성을 비교·분석한 사례를 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 그러나 선박 운용의 제약으로 관측 기간과 횟수가 제한되었으므로, 향후 연구에서는 계절별·연차별 반복 관측을 추가로 확보할 필요가 있다. 이를 통해 연구해역의 연간 탄소수지와 그 지배요인을 보다 정밀하게 규명하고, 해양-대기 CO_2 교환의 시공간적 변동성을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Carvalho GTd, Pezzi LP, Lefevre N, Rodrigues CCF, Santini MF and Mejia C(2025). Spatio-Temporal Variability in CO_2 Fluxes in the Atlantic Sector of the Southern Ocean. *Atmosphere* 2025, 16, 319. <https://doi.org/10.3390/atmos16030319>
- Choi Y, Kim D, Cho S and Kim TW(2019). Southeastern Yellow Sea as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide. *Mar. Pollut. Bull.* 149, 110550. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110550>
- Deng X, Zhang GL, Xin M, Liu CY and Cai

- WJ(2021). Carbonate Chemistry Variability in the Southern Yellow Sea and East China Sea during Spring of 2017 and Summer of 2018. *Science of the Total Environment*. 779, 146376.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146376>
- Hong TTM, Park YG and Choi JM(2023). Divergence Observation in a Mesoscale Eddy During Chla Bloom Revealed in Submesoscale Satellite Currents. *Remote Sens*. 15, 995.
<https://doi.org/10.3390/rs15040995>
- Jang E, Im J, Park GH and Park YG(2017). Estimation of Fugacity of Carbon Dioxide in the East Sea Using In Situ Measurements and Geostationary Ocean Color Imager Satellite Data. *Remote Sens*. 2017, 9, 821.
<https://doi.org/10.3390/rs9080821>
- Kim D, Cho S and Choi DH(2024). Sea-air CO_2 Flux in the Southern Yellow Sea Based on Seasonal Underway Observations. *Ocean Science Journal*(2024) 59, 44.
<https://doi.org/10.1007/s12601-024-00169-8>
- Kim M, Hwang J, Kim G, Na T, Kim TH and Hyun JH(2022). Carbon cycling in the East Sea (Japan Sea): A review. *Frontiers in Marine Science*, 9, 938935.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.938935>
- Kim SY, Lee T and Kang DJ(2025). CO_2 Uptake Potential of the East Asian Marginal Seas: Yellow, Esst China, and East/Japan Seas. *Regional Studies in Marine Science*, 86(2025) 104217.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104217>
- Lyu SJ and Kim K(2005). Subinertial to interannual transport variations in the Korea Strait and their possible mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110, C12016.
<https://doi.org/10.1029/2004JC002651>
- Na H, Isoda Y, Kim K, Kim YH, and Lyu SJ (2009). Recent observations in the straits of the East/Japan Sea: A review of hydrography, currents and volume transports. *Journal of Marine Systems*, 78(2), 200~205.
<https://doi.org/10.1016/j.marsys.2009.02.018>
- Oliveira RR, Pezzi LP, Souza RB, Santini MF, Cunha LC and Pacheco FS(2019). First measurements of the open ocean-atmosphere CO_2 fluxes at the Cabo Frio upwelling system region, Southwestern Atlantic Ocean. *Cont Shelf Res*, 181(April): 135~142.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.05.008>
- Park KA, Park JE and Kang CK(2022). Satellite-Observed Chlorophyll-a Concentration Variability in the East Sea (Japan Sea): Seasonal Cycle, Long-Term Trend, and Response to Climate Index. *Frontiers in Marine Science*, 9, 807570.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.807570>
- Parkinson CL(2019). 40-y Record Reveals Gradual Antarctic Sea Ice Increases Followed by Decreases at Rates Far Exceeding the Rates Seen in the Arctic. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2019, 116, 14414~14423.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1906556116>
- Rodrigues CCF, Santini MF, Lima LS, Sutil UA, Carvalho JT, Cabrera MJ, Rosa EB, Burns JW and Pezzi LP(2023). Ocean-atmosphere turbulent CO_2 fluxes at Drake Passage and Bransfield Strait. *Geosciences, An Acad Bras Cienc*(2023) 95(Suppl. 3)
<https://doi.org/10.1590/0001-3765202320220652>
- Rodrigues CCF, Santini MF, Brunsell NA and Pezzi LP(2024). CO_2 Fluxes Under Different Oceanic and Atmospheric Conditions in the Southwest Atlantic Ocean. *Journal of Marine Systems*, 243, (2024) 103949.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103949>
- Sabbatini S, Mammarella I, Arriga N, Fratini G, Graf A, Hortnagl L, Ibrom A, Longdoz B, Mauder M, Merbold L, Metzger S, Montagnani L, Pitacco A, Rebmann C, Sedláč P, Šigut L, Vitalel D and Papale D(2018). Eddy covariance raw data processing for CO_2 and energy fluxes calculation at ICOS ecosystem stations. *Int. Agrophys*, 2018, 32, 495~515.
<https://doi.org/10.1515/intag-2017-0043>
- Webb EK, Pearman GI and Leuning R(1980). Correction of Flux Measurements for Density Effects Due to Heat and Water Vapor Transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 106(447), 85~100.
<https://doi.org/10.1002/qj.49710644707>

-
- Received : 23 April, 2026
 - Revised : 01 June, 2026
 - Accepted : 10 June, 2026