



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

입자추적실험을 통한 제주 근해
괭생이 모자반 유입에 영향을
끼치는 요인 분석

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

이 승 용

2018년 2월

입자추적실험을 통한 제주 근해 괭생이 모자반 유입에 영향을 끼치는 요인 분석

지도교수 문 일 주

이 승 용

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 신청함

2017년 12월

이승용의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

제주대학교 대학원

2017년 12월

Analysis of the physical factors affecting
the inflow of *Sargassum horneri* into
adjacent seas of Jeju Island
using particle tracking experiment

Seung Yong Lee

(Supervised by professor Il-Ju Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Science

2017. 12.

This thesis has been examined and approved.

Interdisciplinary Program in Marine Meteorology

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figure	ii
List of Table	v
Abstract	vi
1. 서론	1
2. 모델 및 실험방법	4
2.1 지역 해양순환모델 및 입자추적 실험 개요	4
2.2 GOCI 위성영상 기반의 입자추적 실험 설계	7
3. 결과	11
4. 토의	30
5. 요약 및 결론	33
참고문헌	38

List of Figure

- Fig. 1. Massive *Sargassum horneri* found in (a) Jeju and (b) Shin-Ahn, June 2015 1
- Fig. 2. (a) Model domain for numerical experiments and (b) initial release points of particles (magenta circles). Three boxes are for calculating the number of inflow of particles. 6
- Fig. 3. Distribution of *Sargassum horneri*(green color) GOCI image at May 5, 2015. 7
- Fig. 4. Percentages of the number of particles entering Three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the initial release points number and periods (color) in the CTL experiment. 9
- Fig. 5. Location of the particles on 5th May 2015 selected from the CTL experiment, which have the same initial release points (among 9 points) and period (7-day interval). Here the particles are selected where/when on 5th May 2015, more than 105 of the total released particles flow into three regions (boxes). marker shape and color represent the initial release point and period, respectively. 10
- Fig. 6. Comparison of observed and model-simulated sea level heights in Incheon. 11
- Fig. 7. Comparison of satellite-estimated and model-simulated surface ocean current in (a) December 2014, (b) February 2015, (c) April 2015. 12
- Fig. 8. Trajectories of particles entering the each box. Particles were selected only at the release time when the inflow probability was more than 10%. Marker colors represent time at the location. 16
- Fig. 9. Monthly-average surface ocean current (a) December 2014, (b) January 2015, (c) February 2015, (d) March 2015, (e) April 2015 and (f) May 2015 from the CTL experiment. 17
- Fig. 10. Monthly ASCAT average wind speed vectors in (a) December 2014,

	(b) January 2015, (c) February 2015, (d) March 2015, (e) April 2015 and (f) May 2015, respectively.	18
Fig. 11.	Tidal residual current in CTL experiment. Contours denote depth (Contour interval is 10m).	19
Fig. 12.	Spatial distribution of particles released from the south of Shandong Peninsula (Point 4) to Box A in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the initial release time.	21
Fig. 13.	Difference in sea surface current (upper panel) between CTL and No wind experiment, (lower panel) CTL and No tide experiment in (a,d) December 2014, (b,e) February 2015 and (c,f) April 2015, respectively	22
Fig. 14.	Spatial distribution of particles released from the Jiangsu Province (Point 6) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.	24
Fig. 15.	Spatial distribution of particles released from the north of Shandong Peninsula (Point 3) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.	26
Fig. 16.	Spatial distribution of particles released from the Zhejiang Province (Point 8) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.	28
Fig. 17.	Spatial distribution of particles released from the Fujian Province (point 9) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.	29
Fig. 18.	Monthly QuikSCAT and ASCAT averaged wind vectors within the Yellow sea (121–125°E, 34–38°N) during 1999–2017. Red, blue, black, cyan indicate 2002, 2009, 2015, 2017 with <i>Sargassum horneri</i> inflow cases, respectively. December wind speed vector is the data for each previous year. The unit is m/s.	31

Fig. 19. Percentage of the number of particles entering three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the initial release points and periods in various experiments : (Upper) percentage of entering region A, (Middle) percentage of entering region B, (Lower) percentage of entering region C. CTL, No wind, No tide, No river, 12 Halfwind indicate the various numerical experiment used for our study. The date and colors represent release time and the ratio inflow into each box. The unit is percentage(%). 35

List of Table

Table 1. List of numerical experiments.	5
Table 2. Percentage of the number of particles entering three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the initial release points and periods in the CTL experiment. Unit is percentage(%) and the bold font means over 10%. Three numbers in each cell represent the percentage for A, B, C in order.	14
Table 3. Physical factors affecting the inflow into the each box from by release points. (+)- means positive (negative) affect.	36
Table 4. Percentage of the number of particles entering three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the release points during winter (DJF). The unit is percentage(%). Three numbers in each cell represent the percentage of entering into the each Box A, B, C.	37

Abstract

Massive *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh was found in the south-western coasts of the Korean Peninsula (KP) and around Jeju Island in 2015 and had caused enormous damage to fishing and aquaculture industries. The drifting *S. horneri* in the East China Sea (ECS)/Yellow Sea (YS) was sometimes detected by satellite images from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI), but it is not well known its origin, inflow path, and physical factors affecting the inflow. This study investigates the origin and detail inflow path of *S. horneri* into the adjacent seas of Jeju Island and what the physical factors influence the inflow through a series of particle tracking numerical experiment.

Numerical results reveal that *S. horneri* found in the western seas of Jeju Island originated from two regions of China, the south of the Shandong Peninsula from December to early January and the Jiangsu province from late January to mid-February. *S. horneri* in the northern part of Jeju Island originated from the north of the Shandong Peninsula in early December and was moved by winter monsoon and tidal residual current. *S. horneri* in the southern part of Jeju Island originated from the southern coast of China below 33°N from December to January and was moved along the Kuroshio Current. It is also found that the magnitude of northwesterly winds in the YS in December is a main factor that determines the annual amount of *S. horneri* inflow toward Jeju Island, indicating that it can be used as a potential predictor of *S. horneri* inflow.

1. 서론

2015년 1월부터 6월까지 전남 서해안과 제주 연안에 이례적으로 많은 양의 팽생이 모자반(*Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh)이 유입되어 엄청난 재산상의 피해를 가져왔다(Fig. 1). 연안으로 유입된 팽생이 어장과 양식장의 그물에 걸려 시설물을 파괴하였고 항구에 밀려와 배 스크류에 감겨 조업과 항해를 방해하여 인명사고를 유발하였다. 또한 해안가에 밀려와 퇴적되어 관광지를 훼손할 뿐만 아니라 부패하며 악취를 풍기는 등의 피해가 발생하였다(제주연구원 2017).



Fig. 1. Massive *Sargassum horneri* found in (a) Jeju and (b) Shin-Ahn, June 2015

과거 팽생이 모자반 유입은 제주도에 2002년 4월, 2009년 4월 두 차례에 걸쳐 발생하였지만 그 양이 많지 않아 큰 피해를 입지 않았다. 그러나 2015년에 제주도와 전남 연안에서 수거한 팽생이 모자반의 양은 2만여 톤(해양수산부 2016; 제주연구원 2017)에 달하였고 식용이 불가능한 팽생이 모자반은 마땅한 활용방안이 없어 피해가 가중되었다.

팽생이 모자반은 일본과 중국, 한반도 연안에서 흔히 발견되는 대형 갈조류의 일종으로 주로 중국 연안의 조간대 하부에서 암반에 부착하여 성장한다(Komatsu et al.1982; Xu 2016; Yoshida 1963). 이후 성체를 이루게 되면 전체 길이가 3-5 m에 이르게 되며(Komatsu et al. 2007) 크기가 커지고 줄기가 많아진 팽생이 모자반은 파도와 해류에 의해 암반으로부터 떨어뜨리는 힘이 암반에 붙어있으려는 힘보다 강해져 탈락하게 된다(Yoshida 1963). 탈락된 팽생이 모자반에 있는 기포의 부력으로 인해 표층에서 해류를 따라 표류하며 한국과 일본으로 유입된다(Hurka 1971; Komatsu et al. 2007; Yoshida 1963).

한국해양과학기술원 해양위성센터에서는 정지궤도 해색위성 GOCI (Geostationary Ocean Color Imager)에서 얻은 영상을 이용해 표류하는 팽생이 모자반을 종종 포착하였다. 그러나 한반도에 유입되는 팽생이 모자반의 주 서식지이자 유입경로인 황해와 동중국해는 구름에 덮인 날이 많아(Wei 2013) GOCI 영상을 이용하여 팽생이 모자반의 움직임을 연속적으로 포착하는데 한계가 있고 이로 인해 한반도로 유입되는 팽생이 모자반의 경로와 유입에 영향을 미치는 요인들을 분석하는 데에 어려움이 있다. 이 팽생이 모자반은 최근 한반도에 유입되는 양과 빈도가 증가하며 피해가 커지고 있어 관심이 대두되고 있지만 이동과 한반도 유입에 관한 연구는 부족한 실정이다.

팽생이 모자반의 기원에 관해서는 중국 연안의 팽생이 모자반 서식지를 조사하여 분류한 선행연구(Tseng 2000; Komatsu et al 2014)가 있었고, 팽생이 모자반의 공간분포에 관해서는 저장성(Zhejiang Province) 연안에서 팽생이 모자반에 GPS를 부착시켜 움직임을 관측하는 연구(Komatsu et al. 2007)가 있었다. 또한 국내에서는 2015년 2월 전남 신안군과 제주도 지역에 대량 유입된 팽생이 모자반은 우리나라 동해안과 서해안에 분포하는 팽생이 모자반과는 유전적으로 차이가 있고 수치모델의 재현과 역추적 결과에서는 산둥반도 (Shandong Peninsula) 해역에서

비롯되었다고 추정된 선행 연구가 있었다(수산과학원 2015). 그러나 제주 인근 해역에서 발견된 갯생이 모자반은 한 가지 기원과 경로가 아닌 다양한 곳에서 유입되고 있어 갯생이 모자반을 예측하고 대처하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 한반도, 특히 제주 주변해역에서 발견되는 갯생이 모자반의 기원과 유입경로를 조사하고 유입에 영향을 끼치는 물리적 요인을 분석하고자 하였다. 이를 위해 해양순환모델을 이용한 입자추적 실험을 통해 실제와 유사하게 갯생이 모자반의 공간분포를 모사하고 이를 GOCI 영상을 통해 검증하였다. 또한 한반도로 유입되는 갯생이 모자반에 대한 암반 탈락 시기와 유입경로를 알아내고 한반도 유입에 영향을 끼치는 물리적 요인을 분석하고자 바람, 조석, 양자강 유출수의 강제력을 각각 제거한 실험을 진행하여 비교 분석하였다. 2장에서는 모델 구성과 실험방법을 3장에서는 입자추적 실험의 결과, 4장에서는 결과에 대한 토의와 5장에서는 물리적 요인분석을 서술하고 요약하였다.

2. 모델 및 실험방법

2.1 지역 해양순환모델 및 입자추적 실험 개요

제주도 연안 팽생이 모자반 유입 경로와 물리적 요인의 분석을 위해, 본 연구에서는 Regional Ocean Modeling System(ROMS)을 이용하여 입자추적실험을 수행하였다. ROMS는 3차원 자유수면 정역학 원시방정식이 적용된 수치모델로 수평 격자는 직교곡선좌표계(Orthogonal Curvilinear coordinates)를 이용하여 각 격자의 중심에 밀도, 수심, 수온 등을 주고 각 격자의 좌우방향에서 u 값, 상하방향에서 v 값을 계산 Arakawa - C의 아격자체계를 사용하여 계산의 안정성과 경제성을 높였다(Arakawa and Lamb 1977) 수직격자는 z -coordinate의 planetary boundary layer(PBL) 구현이 가능한 장점과 σ -coordinate의 바닥경계층 구현이 가능한 장점을 살린 s -coordinate를 사용하여 지형에 민감하게 반응하는 압력구배의 오차를 줄였다(Song and Haidvogel 1994). 수직 혼합 기법은 리차드슨 수를 사용하여 표층과 바닥의 경계층, 해양 내부의 혼합층을 나타내는 KPP(K-profile Parameterization, Large et al. 1994)을 사용하였고 모델의 계산 시간을 효율적으로 분배하기 위해 순압모드와 경압모드를 분리하여 계산하는 시간 분할법(split-explicit time-stepping scheme)을 사용하였다(Shchepetkin and McWilliams 2005).

모델 영역은 팽생이 모자반이 서식하고 한반도로 유입되는 경로인 황해 및 동중국해 전체와 북서태평양 일부를 포함하는 북위 5-52도, 동경 105-165도로 설정하였다(Fig 2a). 모델의 수평해상도는 $1/10^\circ$ 이며 수직으로는 30개의 시그마 층으로 구성하였다. 수심자료는 NGDC(National Geophysical Data Center)의 수평해상도 5분 간격의 ETOPO5 자료(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/93mkg01.html>)와 30초 간격의 Sung Kyun Kwan University Topography Dataset(SKKU, Seo et al. 2008) 자료를 합성하여 사용하였다. 초기 조건과 개방 경계역의 유속, 수온, 염분 및 해수면고도는 공간해상도 2.5° 의 전구 해양 재분석장인 Estimating the Circulation and Climate of the Ocean(ECCO, Koehl 2003) 자료를 3일 평균하여 사용하였다. 조석경계자료는 TOPEX/Poseidon 인공위성의 관측 자료를 이용하여 수

행된 전구모델의 TPX07 자료를 이용하였다(Egbert 1994). 사용된 분조는 10개 (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm)다. 풍속자료는 Meteorological Operational satellite (Metop)위성의 Advanced Scatterometer(ASCAT)의 0.25° 일일 평균자료(Figa-Saldaña et al. 2002)를 사용하였고 이외 표층 대기 강제력은 미국립 환경예보센터 National Center for Environmental Prediction(NCEP) 재분석 일일 평균자료(Kanamitsu et el. 2002)를 사용하였다. 양자강 유출수는 월평균 기후장을 사용하였다. 모델은 2014년 12월부터 2015년 6월까지 수행되었고 팽생이 모자반의 유입에 영향을 주는 물리적 요인을 분석하기 위해 동일기간 동안 바람 강제력, 양자강 유출수의 유입, 조석효과를 각각 제거한 추가 실험을 동일한 방법으로 수행하였다(Table 1). 입자추적실험에서 입자의 투하지점은 Tseng (2000)과 Komatsu et al. (2014)의 선행연구와 수산과학원 보도자료(국립수산과학원 2015)를 참고하여 결정하였고 투하지점별로 약 30개씩 겹치지 않게 입자를 투하하였다(Fig. 2b). 겨울 동안 암반에 부착, 성장하고 이후 탈락하여 표류하는 팽생이 모자반의 일생을 고려하여(Komatsu et al. 1982) 입자는 2014년 12월부터 2015년 4월까지 매일 표층에 투하되었다. 팽생이 모자반은 온 몸에 있는 기포로 인해 부유하여 표류하는 특징을 가지므로 이를 유사하게 모사하고자 모델에서 입자는 표층에서만 이동하며 입자의 수직적 움직임과 생물학적 과정은 고려되지 않았다(Lee et al. 2011; Moon et al. 2010; Son et al. 2015).

Table 1. List of numerical experiments.

Experimental Name	Physical factors		
	Winds	Tides	River discharge
Control(CTL) EXP.	○	○	○
No wind EXP.	X	○	○
No tide EXP.	○	X	○
No river EXP.	○	○	X

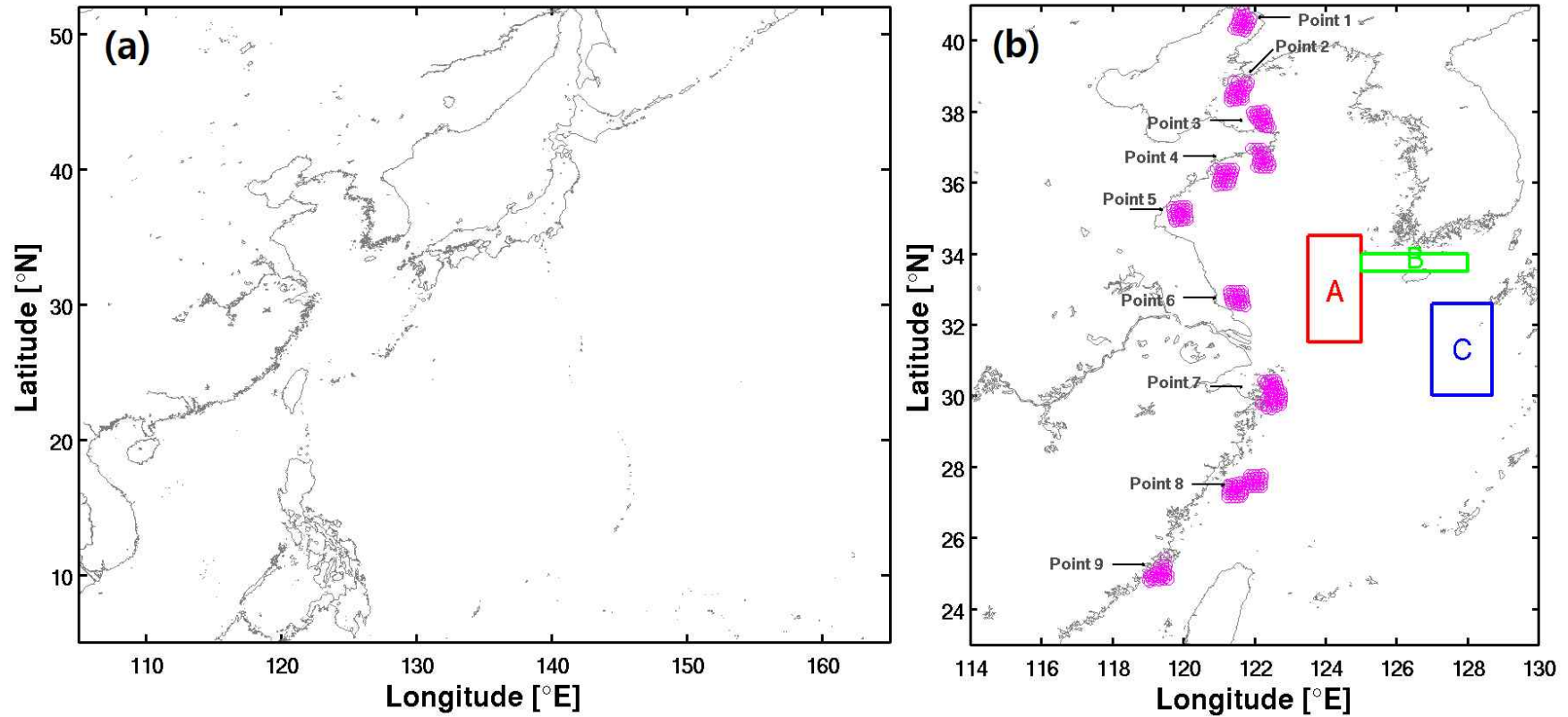


Fig. 2. (a) Model domain for numerical experiments and (b) initial release points of particles (magenta circles). Three boxes are for calculating the number of inflow of particles.

2.2 GOCI 위성영상 기반의 입자추적 실험 설계

한국해양과학기술원에서 운영 중인 정지궤도 해색위성 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)는 한반도를 중심으로 낮 시간(09h-16h, KST)동안에 걸쳐 매일 8회 해양환경을 관측하고 있다(Ryu and Ishizaka 2012; Yang et al. 2010). 2015년 4월부터 5월까지 GOCI 영상으로부터 팽생이 모자반이 양자강 하구, 대륙사면, 중국 장수성 연안 등 널리 분포하는 것을 확인할 수가 있었다(not shown). 그러나 동중국해와 황해는 구름으로 인해 가려진 부분들이 많아(Wei 2013) 연속적인 자료의 획득이 힘들어 팽생이 모자반의 기원과 이동경로를 상세히 파악하기에 어려움이 있다. 본 연구에서는 모델을 이용한 입자추적 결과를 비교하기 위해 구름에 가리지 않고 팽생이 모자반이 제주 인근 해역에서 군집을 이루어 명확하게 포착되는 시점인 2015년 5월 5일의 위성영상을 선택하였다(Fig. 3).

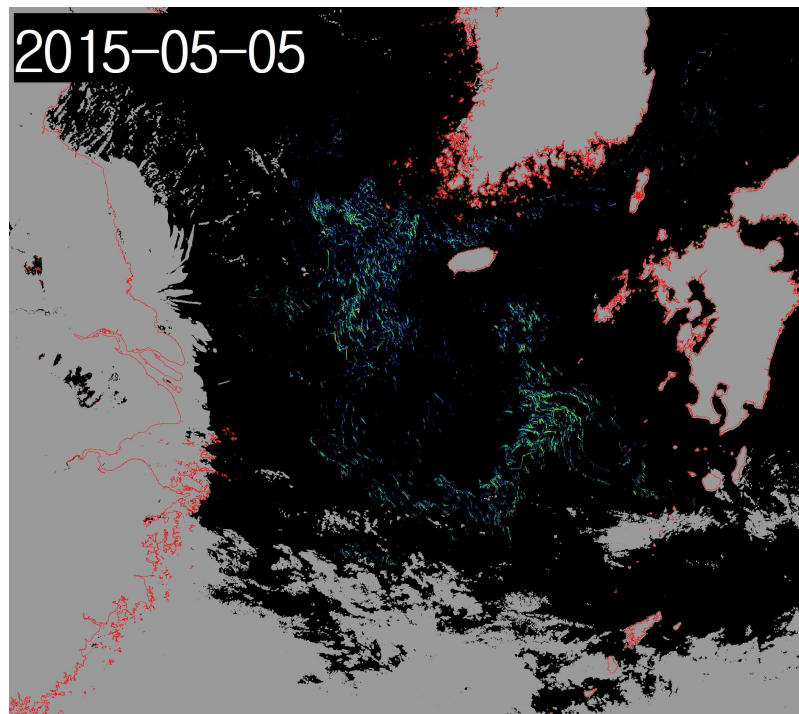


Fig. 3. Distribution of *Sargassum horneri*(green color) GOCI image at May 5, 2015.

2015년 5월 5일의 위성영상에서 포착된 팽생이 모자반은 제주 서쪽 해역인 동경 123-125도, 북위 31-34.5도에서 폭넓게 많은 양이 분포하였고 제주 북부 연안에서도 일부 팽생이 모자반이 발견되었다. 제주 남동쪽 해역인 동경 127-128.5도, 북위 30-33도에서 쿠로시오 해류에서 분리되어 북상하는 대마난류의 흐름을 따라 많은 양의 팽생이 모자반이 분포하였다. 입자추적 실험을 통해 제주 인근 해역에서 발견되는 이러한 팽생이 모자반의 유입경로를 상세하게 분석하기 위해 위성영상을 기초로 하여 세 개의 지역(Fig. 2b)을 설정하였다. 세 지역은 각각 제주 서쪽(A), 제주 북쪽(B), 제주 남쪽(C)에 유입된 입자를 추적하기 위해 사용된다. 이 박스에 유입된 팽생이 모자반의 경로추정은 먼저 바람, 양자강 유출수, 조석을 모두 고려한 CTL 실험으로부터 모의된 2015년 5월 5일의 입자위치와 위성사진의 비교로부터 시작된다. 그 다음 과정은 세 개의 지역(A, B, C)으로 5월 5일에 유입된 입자들을 역추적하여 입자의 초기 투하위치와 시기를 조사하는 것이다. 마지막으로 투하위치별로 7일 간격으로 3개의 영역에 유입된 입자의 개수가 투하량의 10% 이상인 투하지점과 시기를 선택하였다. Fig. 4는 A, B, C 세 지역에 도달한 입자의 초기투하위치와 시기별 유입확률을 나타낸 막대그래프이고, Fig. 5는 유입확률이 10% 이상인 초기투하위치와 시기의 입자만 선택하여 공간분포를 나타낸 그림이다.

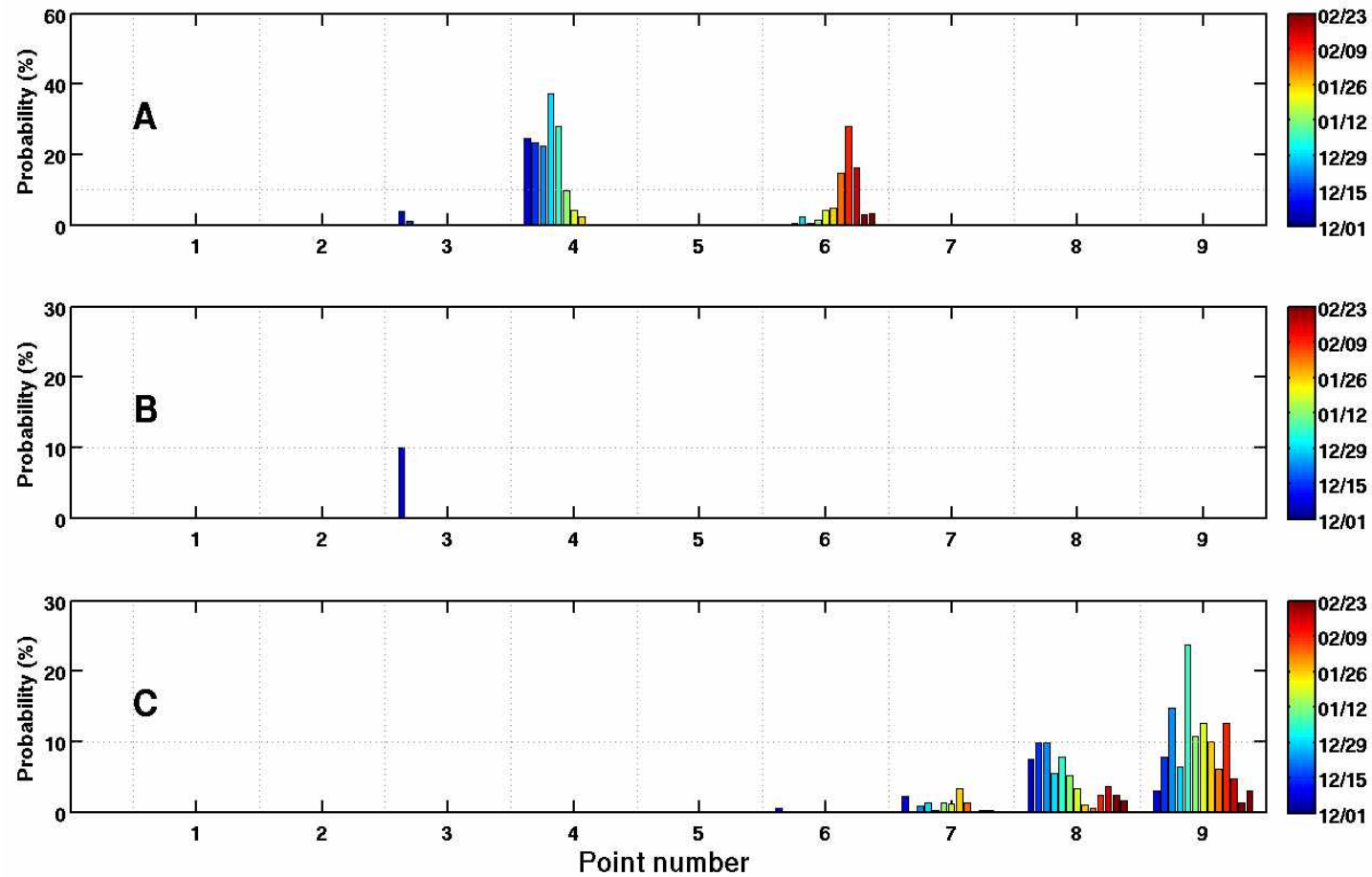


Fig. 4. Percentages of the number of particles entering Three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the initial release points number and periods (color) in the CTL experiment.

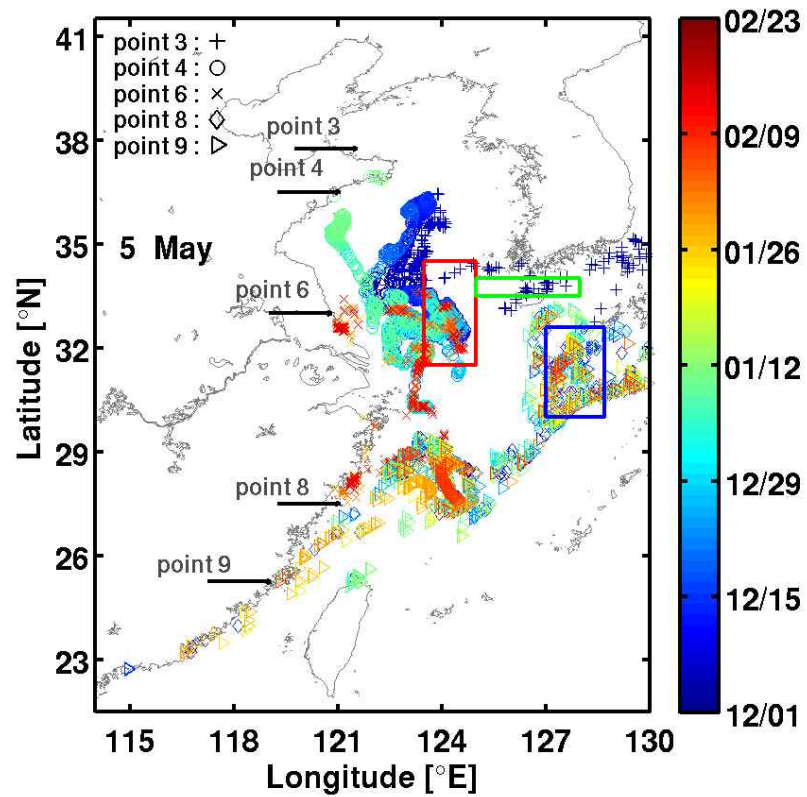


Fig. 5. Location of the particles on 5th May 2015 selected from the CTL experiment, which have the same initial release points (among 9 points) and period (7-day interval). Here the particles are selected where/when on 5th May 2015, more than 105 of the total released particles flow into three regions (boxes). marker shape and color represent the initial release point and period, respectively.

3. 결과

검증을 위하여 국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr/>)의 1시간 간격 조위 관측자료를 1일 평균 내어 비교하였다. 조차가 가장 강하게 나타나는 지역 중 하나인 인천(Moon et al. 2000) 조위 검조소의 조위 값과 모델 결과의 같은 위경도 조위 값을 비교 한 결과 조석 주기와 진폭이 유사하게 잘 모의 되는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 6).

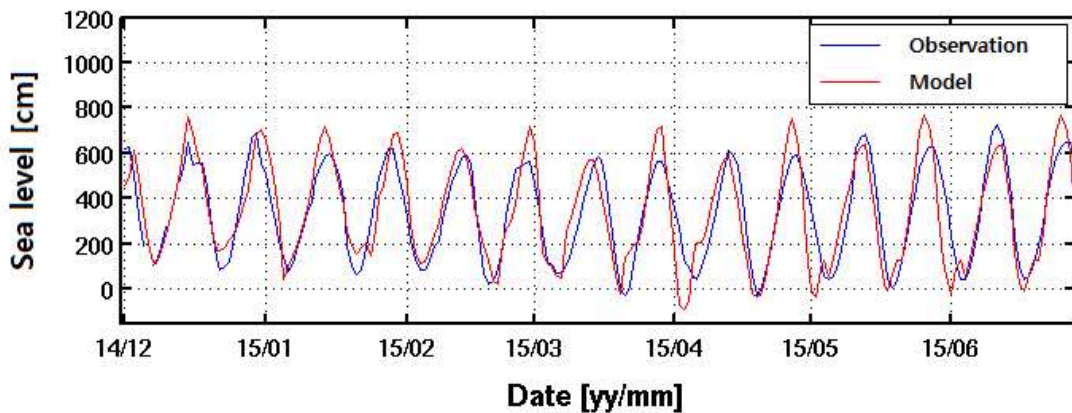


Fig. 6. Comparison of observed and model-simulated sea level heights in Incheon.

국립해양조사원에서 인공위성 고도계 자료로 추정된 해수면 높이 자료를 사용하여 산출된 월 평균 북서태평양 해류도와 비교하였다. 이 해류도는 해수면 높이 편차를 이용하여 정수압 방정식과 지형류 방정식으로부터 지형류를 계산한다(이상현 등 2009). 인공위성으로 관측되는 해수면 높이 편차는 육지에서 약 50 km까지 연안 해역에서 약 50% 이상의 오차를 포함하고 있지만(이상현 등 2009) 이를 이용하여 추정된 월 평균 해류도와 모델에서 쿠로시오 해류를 비롯하여 동중국해 중국 연안류와 서한연안류 그리고 제주난류 등이 유사하게 모의되었고(Fig. 7) 이는 국립해양조사원에서 제공하는 황·동중국해 해류모식도와도 유사한 것을 확인할 수 있다(not shown).

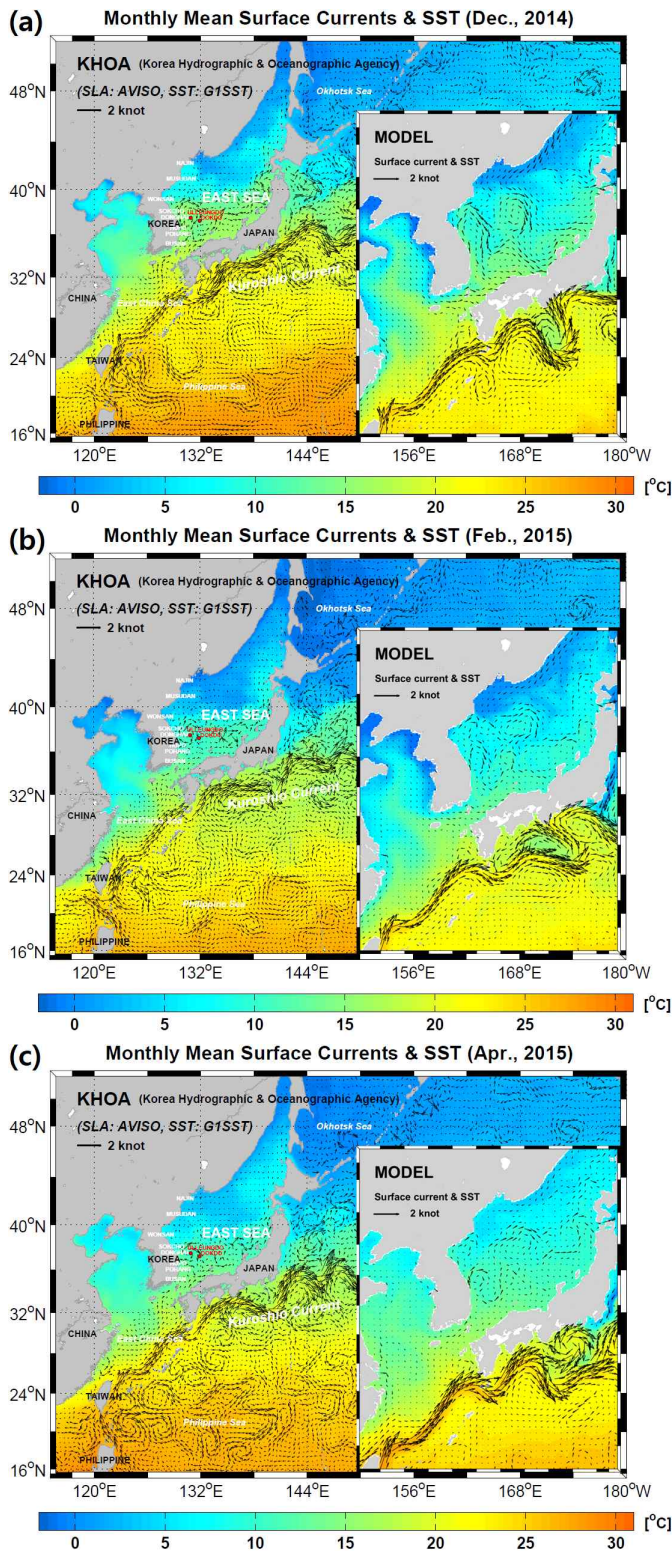


Fig. 7. Comparison of satellite-estimated and model-simulated surface ocean current in (a) December 2014, (b) February 2015, (c) April 2015.

2015년 5월 5일 A, B, C 지역에 도달한 입자들은 황해 가장 수심이 깊은 중앙을 따라 북위 31도부터 36도까지 중국 연안 쪽으로 치우쳐 수직적으로 길게 분포하였다. 제주 북부 연안과 대한해협 등에서 발견되었고 제주 남쪽으로는 쿠로시오 해류와 대마난류를 따라 규슈 앞바다에 넓게 분포하는 것을 확인할 수가 있었다 (Fig. 5). 이 입자들의 분포는 GOCI에서 포착된 갯생이 모자반의 분포(Fig. 3)와 유사하게 나타나 CTL 실험이 잘 모의됐음을 알 수 있다.

제주 서쪽에 위치한 A 지점에서는 산둥반도 남쪽 지역인 point 4에서 12월초부터 1월초까지 투하된 입자들과 장수성 지역인 point 6에서 2월동안 투하된 입자들이 이동해 온 것으로 나타났다. 제주 북쪽에 위치한 B 지점에서는 산둥반도 북쪽 지역인 point 3 에서 12월초에 투하된 입자들이 이동해 온 것으로 파악된다. 제주 남쪽에 위치한 C 지점에서는 중국 남중국해에 위치한 저장성과 푸젠성 지역인 point 8과 9에서 12월부터 1월까지 투하된 입자들이 이동해 온 것으로 분석된다 (Fig. 4). Table 2는 CTL 실험의 결과로 입자투하위치와 입자투하시기로 나누어 A, B, C 세 지역에 유입되는 비율을 나타낸 것이고 굵은 글자는 유입비율이 10퍼센트가 넘는 것을 의미한다. 예를 들어 12월 22일부터 12월 28일까지 Point 4에 떨어뜨린 입자들은 A, B, C의 박스에 각각 37%, 0%, 0% 유입된 것을 알 수 있다.

바람, 조석 효과, 양자강 유출수가 제주 인근 해역으로의 입자유입에 미치는 영향을 알아보기 위해 이 요인들을 제거한 실험의 유입비율을 정량적으로 표현하였고 CTL 실험과 이러한 추가 실험의 결과를 제주 인근에 설정한 세 개의 지역으로 나누어 분석하였다.

Table 2. Percentage of the number of particles entering three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the initial release points and periods in the CTL experiment. Unit is percentage(5) and the bold font means over 10%. Three numbers in each cell represent the percentage for A, B, C in order.

Initial release point	Initial release period											
	12/01 -12/07	12/08 -12/14	12/15 -12/21	12/22 -12/28	12/29 -01/04	01/05 -01/11	01/12 -01/18	01/19 -01/25	01/26 -02/01	02/02 -02/08	02/09 -02/15	02/16 -02/22
Point 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 3	4/ 10 /-	1/-/-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 4	25 /-/-	23 /-/-	23 /-/-	37 /-/-	28 /-/-	1/-/-	4/-/-	2/-/-	-	-	-	-
Point 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 6	-	-	-	2/-/-	-	1/-/-	4/-/-	5/-/-	15 /-/-	28 /-/-	16 /-/-	3/-/-
Point 7	-/-/2	-	-/-/1	-/-/1	-	-/-/1	-/-/1	-/-/3	-/-/1	-	-	-
Point 8	-/-/8	-/-/ 10	-/-/ 10	-/-/5	-/-/8	-/-/5	-/-/3	-/-/1	-/-/1	-/-/2	-/-/4	-/-/2
Point 9	-/-/3	-/-/8	-/-/ 15	-/-/6	-/-/ 24	-/-/ 11	-/-/ 13	-/-/1	-/-/6	-/-/ 13	-/-/5	-/-/1

제주 서쪽: A 지역

CTL 실험에서 입자추적실험 결과 제주 서쪽 해역에 위치한 A 지점에서 12월부터 1월 초까지 산둥 반도 남쪽인 Point 4에서 떨어뜨린 입자와 1월 말부터 2월 중순까지 장수성 연안인 point 6에서 떨어뜨린 입자들이 발견되었다(Fig. 4). point 4에서 12월부터 1월 초까지 떨어뜨린 입자는 12, 1, 2월 동안 꾸준히 남하하였고 3월에는 북위 33-34도에 머무르다가 4월부터 시계 방향으로 회전하며 A 지역으로 유입되었다(Fig. 8a).

CTL 실험의 월별 표층 해류분포도의 산둥 반도 남쪽에서는 겨울동안 남하하는 중국연안류가 지배적으로 나타났다(Fig. 9a, 9b, 9c). 이 흐름으로 인해 2월까지 지속적으로 남쪽으로 이동한 입자는 북위 32-33도에 도달하였다. 이는 황해 내부에서 12월에 북서풍이 매우 강하게 불었으며 1월과 2월에도 꾸준히 북서풍계열의 바람이 불었기 때문이다(Fig. 10a, 10b, 10c). 입자는 다시 3월에 북위 33-34도까지 북동쪽으로 움직인 후 4월에 남동진하였다(Fig. 8a, Fig. 9d, 9e). 겨울철 풍성류가 약해진 3, 4월의 움직임은 잔차류(Fig. 11)와 비슷하게 나타난다. CTL 실험에서 얻은 잔차류는 한국 서해안을 타고 북상하고 산둥반도를 따라 남하하며 북위 33도부근에서는 남동진하는 반시계방향의 흐름을 나타낸다(Fig. 11). 산둥반도 남쪽, point 4에서 12월부터 1월 초까지 투하된 입자들은 겨울 계절풍의 영향을 받아 남하하였고 북위 약 33도 부근에 도달하였을 때 잔차류에 의해 시계방향으로 남동진하며 A 지역으로 유입되었다.

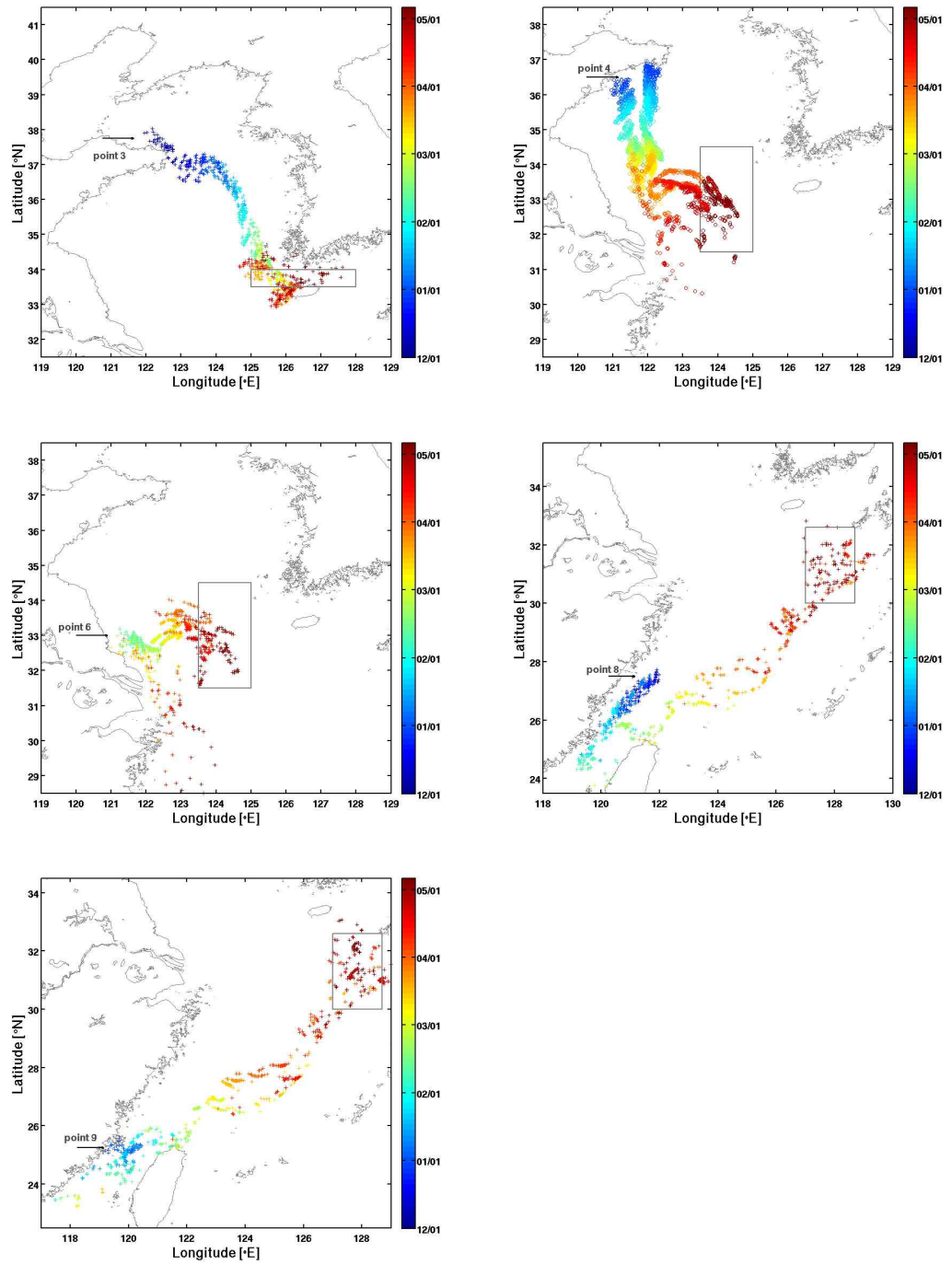


Fig. 8. Trajectories of particles entering the each box. Particles were selected only at the release time when the inflow probability was more than 10%. Marker colors represent time at the location.

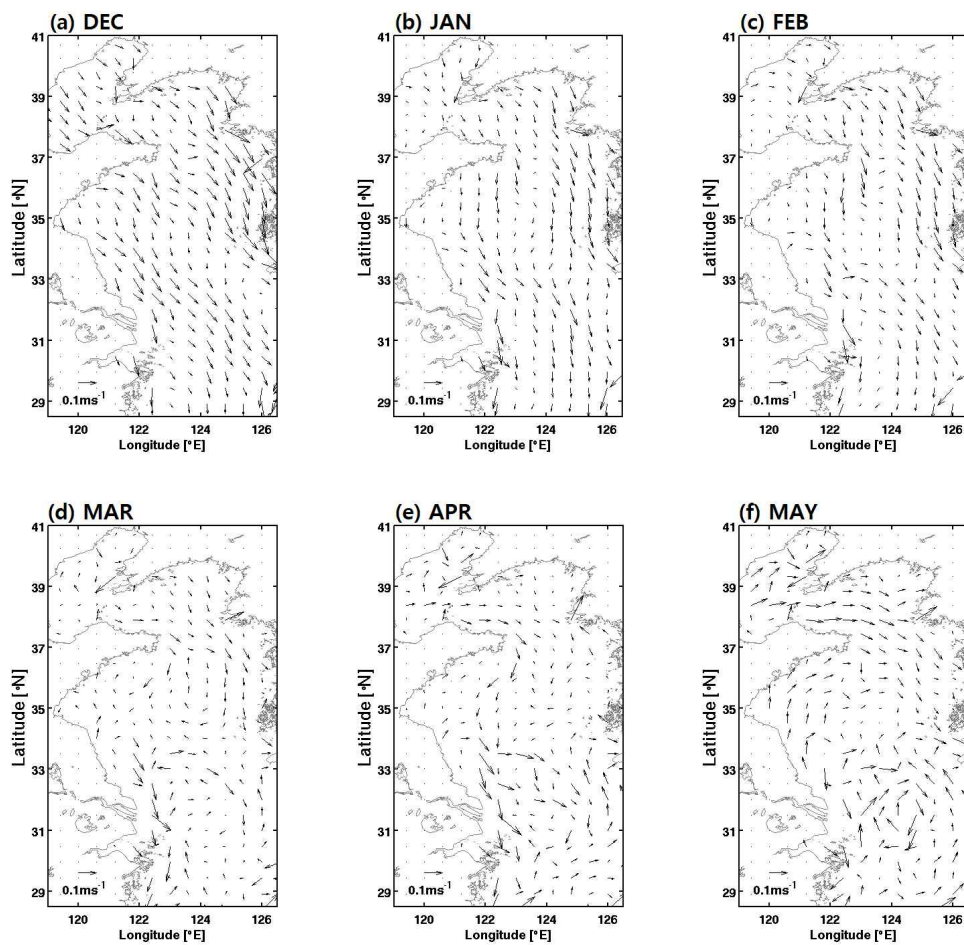


Fig. 9. Monthly-average surface ocean current (a) December 2014, (b) January 2015, (c) February 2015, (d) March 2015, (e) April 2015 and (f) May 2015 from the CTL experiment.

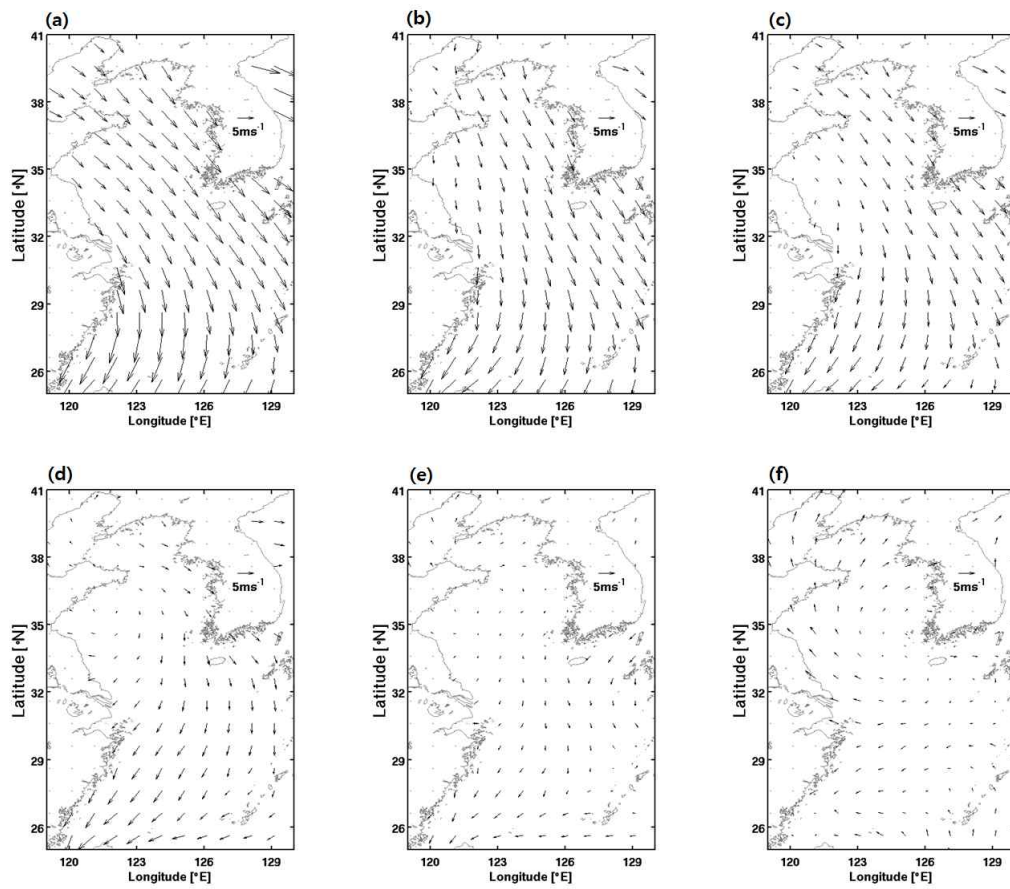


Fig. 10. Monthly ASCAT average wind speed vectors in (a) December 2014, (b) January 2015, (c) February 2015, (d) March 2015, (e) April 2015 and (f) May 2015, respectively.

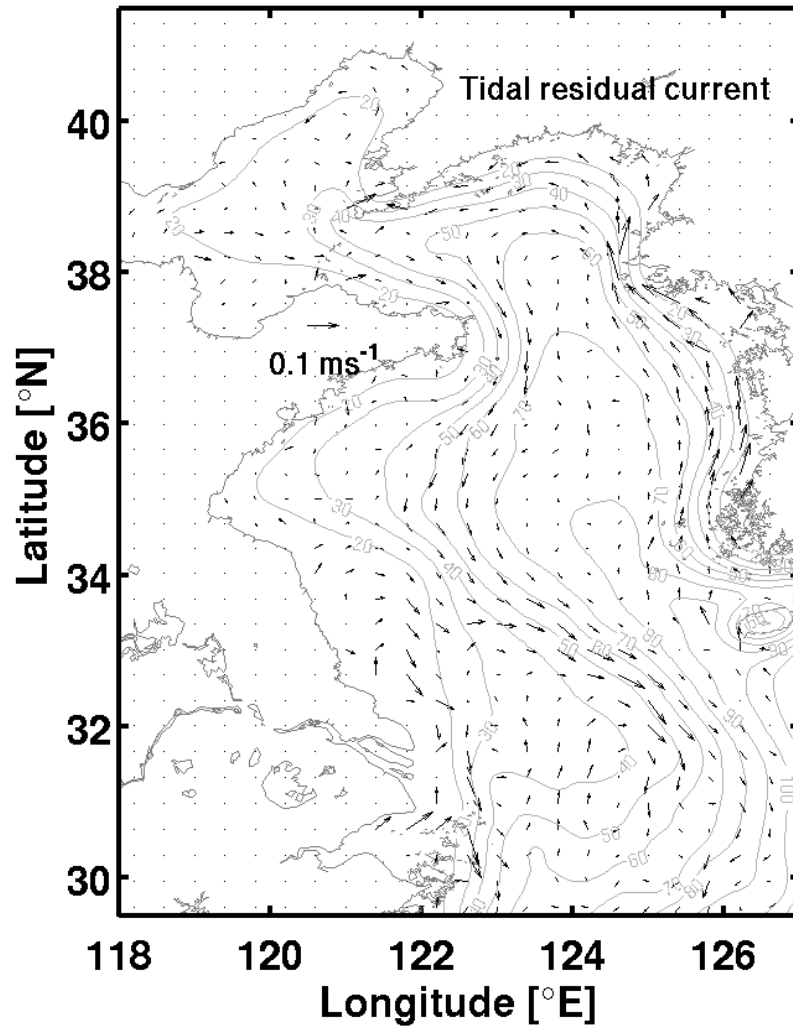


Fig. 11. Tidal residual current in CTL experiment. Contours denote depth (Contour interval is 10m).

바람제거실험에서 입자는 북위 36도 이하로 남하하지 못하고 산둥반도 남쪽 연안에서 맴돌며 A 지역으로 유입되지 않았다(Fig. 12b). CTL과 바람제거실험의 해류차(Fig. 13a, 13b, 13c)와 CTL 실험 표층해류(Fig. 9)는 겨울동안 비슷하게 나타났고 겨울철 CTL 실험에서 표층해류는 주로 바람에 의해서 생성되는 취송류가 지배적인 것을 알 수 있다. 바람제거실험에서 이 취송류가 발생하지 못해 입자는 남하하지 못하였다. 조석제거실험에서 입자는 떨어뜨린 위치를 기준으로 반시계 방향으로 회전하여 장수성 연안으로, 시계 방향으로 회전하여 한국 서해 앞바다로 유입되어 반원 형태의 분포를 보였고 이중 일부 입자가 A 지역에서 발견되었다(Fig. 12c). CTL와 조석제거실험 해류 차, 즉 조석의 효과는 황해 내부에서 서해안을 타고 올라가 황해 중앙을 따라 내려오는 반시계 방향으로 흐름을 보이고 있다(Fig. 13d, 13e, 13f). 이 조석 효과가 제거된 실험에서 입자는 한국 서해안 연안을 따라 남하하였다. 양자강 유출수 제거 실험에서는 기존실험과 유사하게 12월초부터 1월초에 떨어뜨린 입자들이 중국연안류를 타고 남하하다가 북위 33도 부근에서 잔차류에 의해 남동쪽으로 뺏어나가는 입자분포가 나타났다(Fig. 12d).

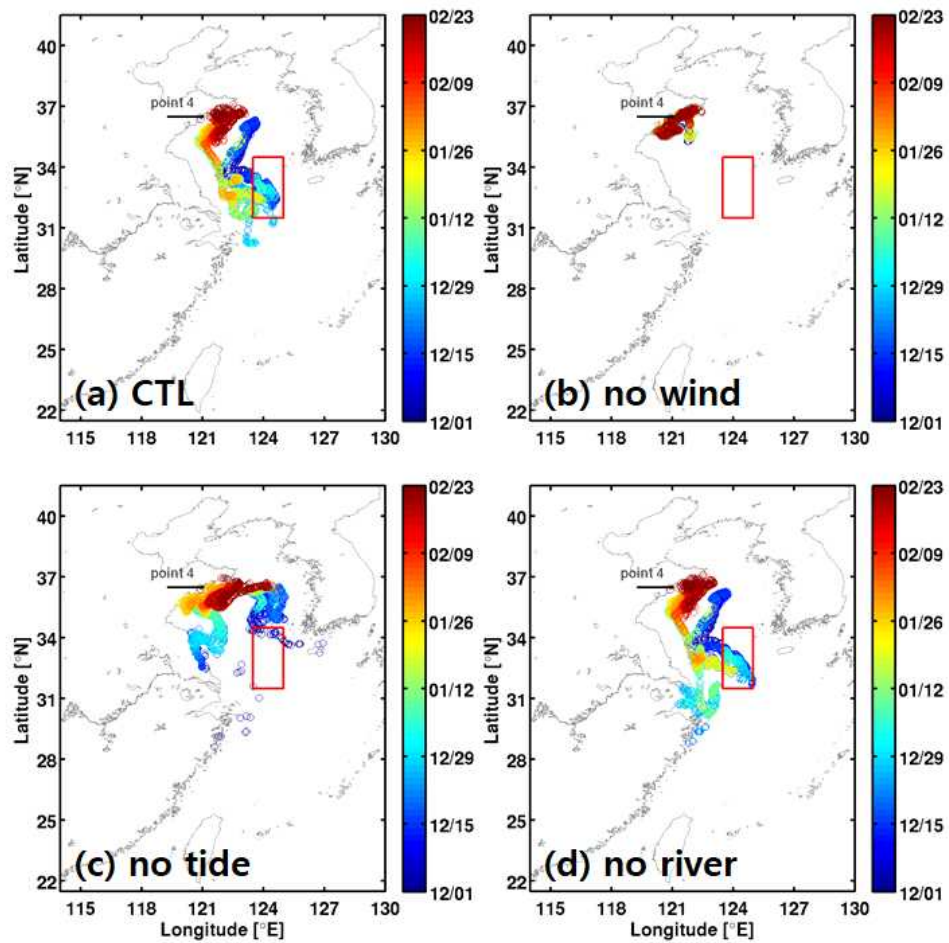


Fig. 12. Spatial distribution of particles released from the south of Shandong Peninsula (Point 4) to Box A in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the initial release time.

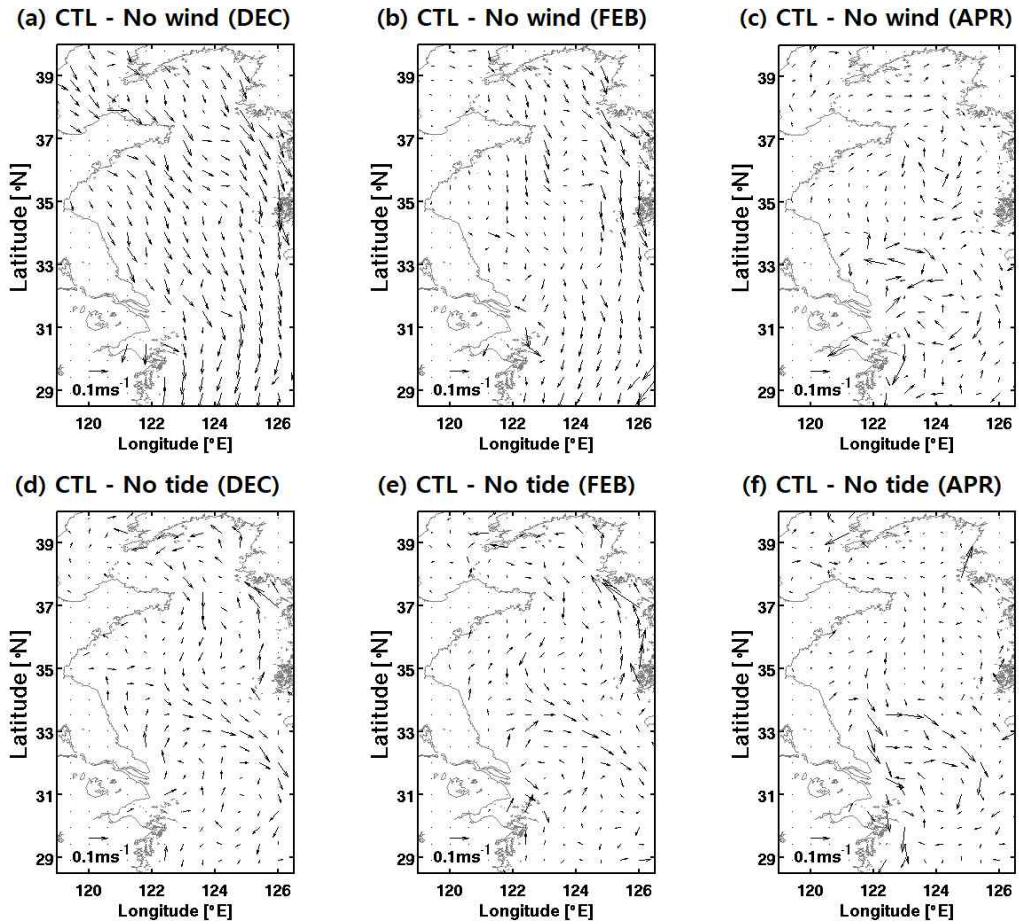


Fig. 13. Difference in sea surface current (upper panel) between CTL and No wind experiment, (lower panel) CTL and No tide experiment in (a,d) December 2014, (b,e) February 2015 and (c,f) April 2015, respectively.

point 6에서 1월 말부터 2월 초까지 떨어뜨린 입자는 2월동안 북위 32-33도 인근 연안에 머물러있었고 3월부터 시계방향으로 회전하며 A 지역으로 유입되었다(Fig. 8b). 장수성 연안은 다른 지역에 비해 2월 바람이 약하게 나타나 남하하는 표층해류가 모의되지 않았다(Fig. 9c, 10c). 이 지역에서 3월부터 4월에는 약한 북동풍이 불면서(Fig. 10d, 10e) 약하게 북서쪽으로 향하는 해류(Fig. 9d, 9e)가 발생하였고 또한 잔차류(Fig. 11)와 유사하게 북위 33도 부근에서 북동, 남동쪽 방향으로 해류가 발생하였다(Fig. 9d, 9e). 1월 말부터 2월 중순까지 떨어뜨린 입자들은 2월부터 약해진 계절풍으로 인해 남하하지 못하고 북위 33도 부근에 묶여 있다가 3월부터 잔차류와 양자강 유출수의 영향을 받아 제주 서쪽 A 지역으로 유입되었다.

바람제거실험에서 황해 내부에서 남하하는 해류가 모의되지 않았고(Fig. 13a, 13b) 북위 32-33도 부근에서 양자강 유출수와 조석효과에 의해 동쪽으로 향하는 해류가 발생하였다(not shown). 이로 인해 입자는 빠르게 황해 입구 중앙에 도달하였고 제주 북부지역에 널리 분포하고 일부 입자들은 대한해협을 통과해 동해로 유입되었다(Fig. 14b). 조석제거실험에서는 12월과 1월에 떨어뜨린 입자들은 취송류에 의해 남하하였고(not shown), 이후 북위 29도에 위치한 대륙사면을 따라 대만난류에 의해 흘러가는 분포를 보였다. 바람이 약해진 2월에 떨어뜨린 입자들은 조석효과가 발생하지 않아 장수 연안에 묶여있는 모습을 보였다(Fig. 14c). 양자강 유출제거 실험에서 겨울철에 떨어뜨린 입자들은 연안을 따라 남쪽으로 흘러간 후 대만난류를 따라 분포하였고, 2월에 떨어뜨린 대부분의 입자들은 남하하지 않고 장수성 남부 연안과 양자강 하구에 위치하는 모습을 보였다(Fig. 14d). 일부 입자들은 잔차류에 의해 A 지역으로 유입되는 모습을 보이며 기존실험과 비교해 입자의 공간분포가 달랐지만 A 지역의 유입량은 크게 다르지 않았다.

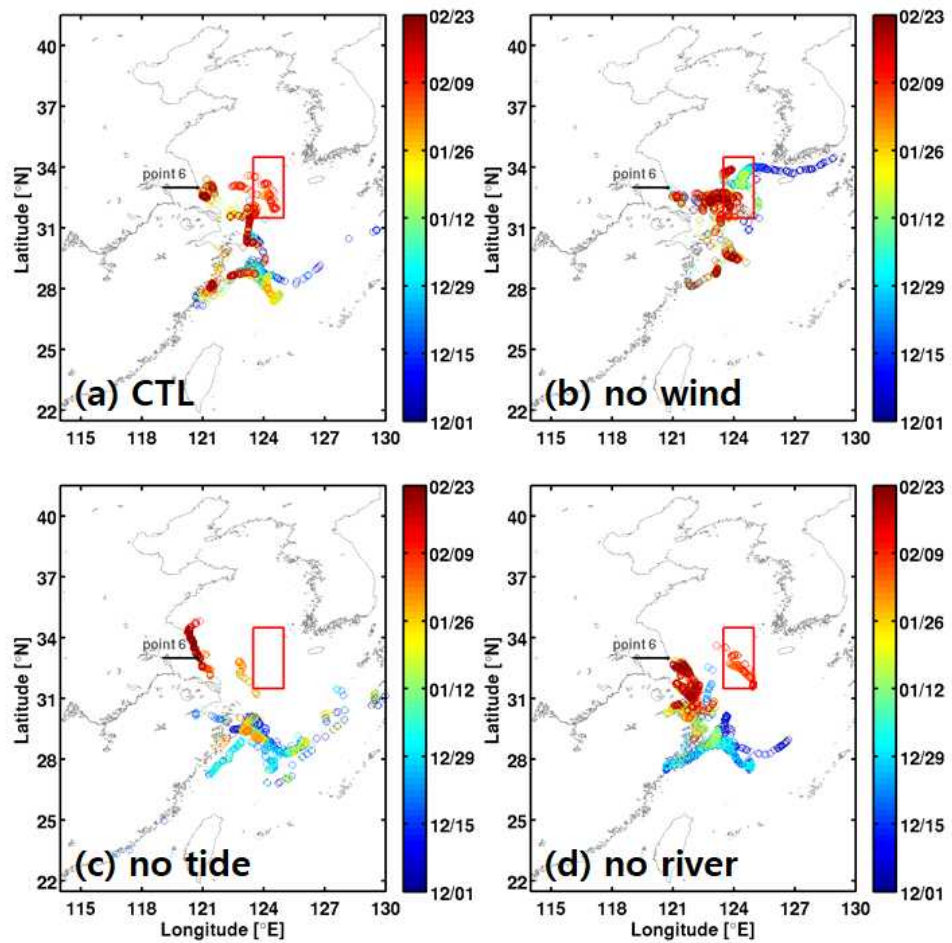


Fig. 14. Spatial distribution of particles released from the Jiangsu Province (Point 6) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.

제주 북쪽: B 지역

CTL 실험에서 입자추적실험결과 제주 북쪽 해역에 위치한 B 지점에서 12월 초에 산둥 반도 북쪽인 point 3에 떨어뜨린 입자들이 발견되었다(Fig. 4). Point 3에서 떨어뜨린 입자는 12월에 산둥반도 북쪽에서 황해 내부로 들어왔고, 이후 1, 2월에 남하하며 제주 서쪽 해역에 도달하였고 이후 동쪽으로 유입되며 B 지역으로 유입되었다(Fig. 8c). 12월 산둥반도 북쪽과 동쪽에서 남동쪽으로 향하는 강한 해류가 발생해 입자를 황해 내부(동경 124도 부근)로 밀어 넣었다(Fig. 9a). 1월과 2월에는 위도에 관계없이 동경 124도 부근에서 꾸준히 남하하는 해류로 인해 입자들은 북위 34도에 도달하였고(Fig. 9b, 9c) 이후 제주 북쪽 해역으로 흘러 들어갔다(Fig. 9d, 9e, 9f). 황해 내부에서 강한 겨울철(12, 1, 2월) 북서계절풍(Fig. 10a, 10b, 10c)에 의해 황해내부를 통해 제주 북서쪽 해역까지 빠르게 유입될 수 있었다. 이후 봄에 약한 바람과 관계없이 제주와 전남 연안에 유입되었다(Fig. 8c, 10d, 10e, 10f). 산둥반도 북쪽 point 3에서 12월 초에 떨어뜨린 입자는 겨울철 북서풍에 의해 황해내부를 통해 제주 북부로 유입되었고 조석효과가 제거되었을 때는 입자는 한국의 서해안에 가까이 위치하며 유입경로는 달라졌지만 유입량은 비슷한 것으로 나타났다. 특히 산둥반도 북쪽에 위치한 point 3은 2015년 4월과 5월 제주 연안에 유입되어 큰 피해를 입힌 맹생이 모자반의 기원지로 추측된다.

바람제거실험에서는 겨울철 남하하는 해류가 발생하지 못해 입자들이 북상하며 보하이 해(Bohai Sea)로 유입되거나 산둥반도 연안 근처에 머무르며 B 지역으로 유입이 되지 않았다(Fig. 13a, 13b, 15b). 조석이 제거된 실험에서는 잔차류가 모의되지 않았고 또한 북서계절풍의 영향으로 한반도 서해안을 따라 강하게 남하하는 해류가 발생하였다. 입자들은 동쪽으로 이동하여 계절풍의 영향으로 한반도 서쪽 해역을 따라 B 지역으로 유입되었다. 양자강 유입효과 제거 실험에서 입자가 산둥반도 북쪽인 point 3에서 B 지역으로 유입되는 경로에 양자강 유출수가 영향을 주지 못하며 기존실험과 동일하게 공간분포를 보였다(Fig. 15d).

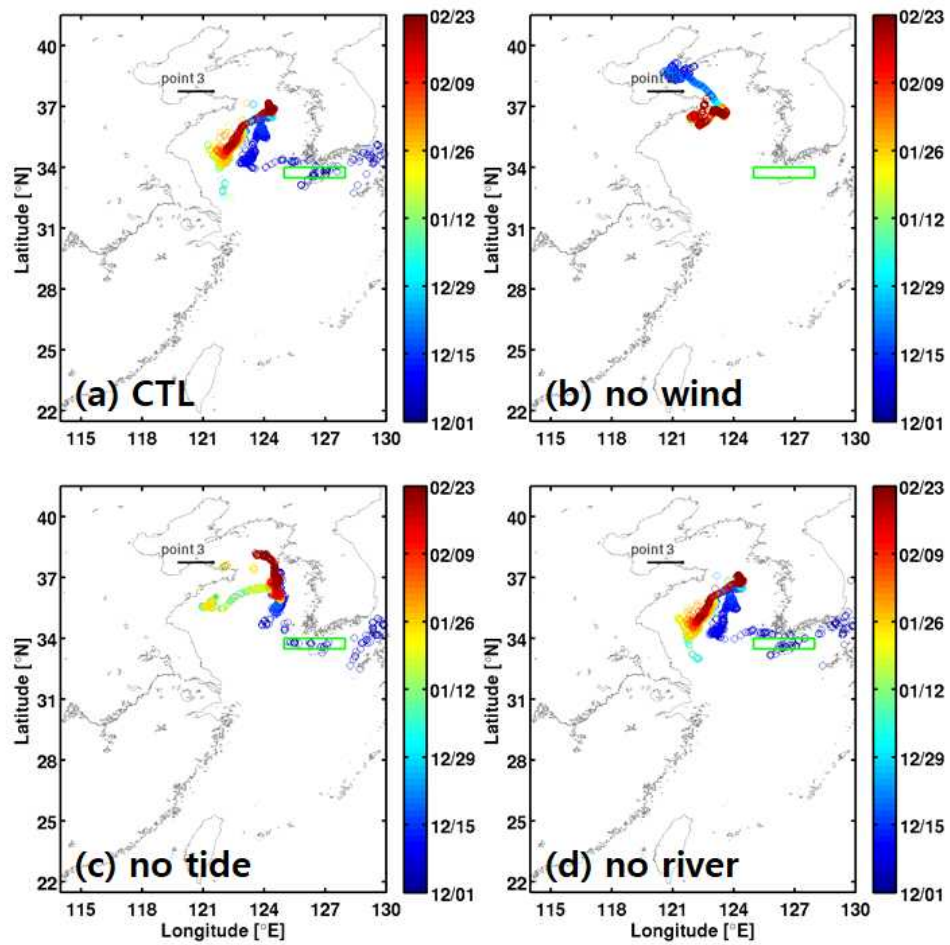


Fig. 15. Spatial distribution of particles released from the north of Shandong Peninsula (Point 3) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.

제주 남쪽 : C 지역

CTL 실험에서 입자추적실험 결과 제주 남쪽 해역에 위치한 C 지점에서 12월부터 1월까지 중국 남부지역의 저장 성과 푸젠 성 연안인 point 8, 9에 떨어뜨린 입자들이 발견되었다(Fig. 4). 저장성 연안, point 8에서 12월 초부터 중순까지 떨어뜨린 입자는 12월에 중국 남부 연안을 따라 대만해협으로 유입되었다. 이후 2월부터 대륙사면을 따라 북상하여 C 지역으로 유입되었다(Fig. 8d). 푸젠성 연안, point 9에서 12월 말부터 1월 중순까지 떨어뜨린 입자는 1월에 대만해협에 머물러 있다가 이후 2월부터 point 8에 떨어뜨린 입자의 움직임과 유사하게 북상하여 C 지역으로 유입되었다(Fig. 8e). 대만해협에서 12월과 1월에 남서쪽으로 흐르는 동중국해 중국연안류가 지배적이었다. 2월부터 중국남부 연안을 제외한 대만해협 전체해역에서 북상하는 해류가 발달하였다. 이 해류는 대만 북쪽 연안을 지나 대륙사면을 따라 제주도 남쪽과 규슈 서쪽으로 북상하였다(not shown). Point 8, 9 지역에 12월부터 3월까지 황해에 비해 강한 북동풍이 지속되었지만 대만해협을 통해 북상하는 해류를 억누르지 못했다(Fig. 10a, 10b, 10c, 10d). Point 8, 9 지역에서 12월과 1월에 떨어뜨린 입자는 겨울철 북동풍에 의해 남하하다가 2월부터 대만난류에 의해 대륙사면을 따라 황해 입구로 유입되었고 북상하며 일본 남쪽으로 흘러가거나 대만난류를 타고 제주 남쪽으로 유입되는 모습을 볼 수 있다.

바람제거실험에서 기존실험과 유사하게 제주 남쪽해역으로 유입되지만 겨울 계절풍의 방해를 받지 않아 대만 난류와 쿠로시오 해류가 원활하게 북상하며 입자의 유입시기가 더욱 빨라지는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 16b, 17b). 조석 제거실험과 양자강 유출수 제거실험에서 조석과 양자강 유출수가 쿠로시오 해류에 영향을 끼치지 못하였고 기존실험과 유사한 움직임을 보이며 제주 남부 해역으로 유입되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 16c, 16d, 17c, 17d).

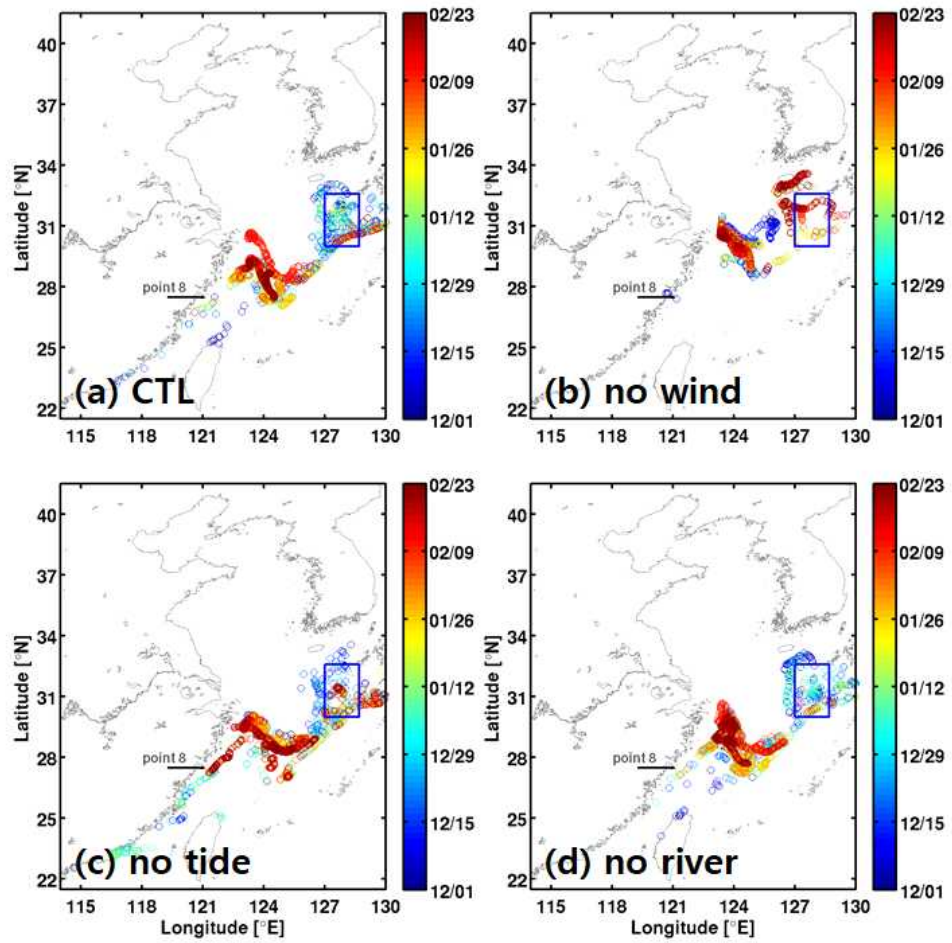


Fig. 16. Spatial distribution of particles released from the Zhejiang Province (Point 8) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.

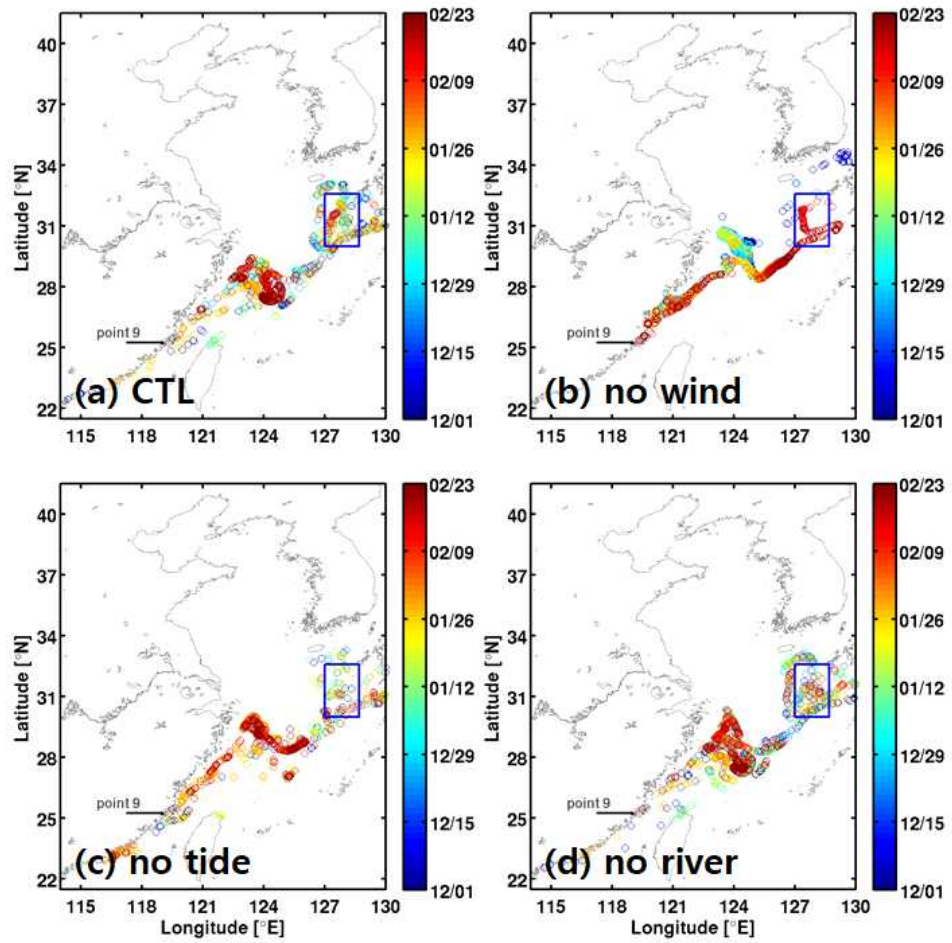


Fig. 17. Spatial distribution of particles released from the Fujian Province (point 9) in (a) CTL, (b) no wind, (c) no tide, (d) no river experiment. Marker colors represent the release time.

4. 토의

괭생이 모자반의 한반도 유입이 2015년에만 발생한 이상 현상인지 해마다 일어날 수 있는 현상인지 관심을 가질 필요가 있다. 3절의 결과에서 괭생이 모자반은 겨울철 바람과 조석의 영향으로 우리나라로 유입되는 것을 확인하였다. 조석의 효과는 CTL실험과 No tide실험의 표층해류 차이(Fig. 13d, 13e, 13f)에서 알 수 있듯이 매달 유사하게 나타났지만, CTL실험과 No wind 실험의 표층해류 차이(Fig. 13a, 13b, 13c)에서는 월 별로 큰 차이를 보이고 있다. 괭생이 모자반의 주 서식지이자 유입경로인 황해와 동중국해는 수심이 얕고 반폐쇄성 해역으로 계절풍의 영향을 크게 받기 때문에 괭생이 모자반의 유입에 대해 영향을 끼치는 물리적 요인 중 시간에 따라 변동성이 큰 바람자료를 살펴보았다. ASCAT 위성자료와 2015, 2017년 괭생이 모자반 제주도 유입사례(한국해양과학기술원 2015, 2017)를 비교한 결과, 1월과 2월 황해 내부(동경 121-125도, 북위 34-38도)의 월평균 바람은 2차례 유입사례 모두 큰 차이가 없었지만 전년도 12월의 경우 큰 차이를 보였다(Fig. 18). 괭생이 모자반의 제주 유입량이 역대 가장 많았던 2015년도 사례(12,100t, 제주연구원, 2017)에서는 전년도 12월에 북서풍이 6.6 m/s로 강하게 불었던 반면, 2015년 사례의 유입량에 절반 수준에 못 미치는 2017년 사례(4,410t, 제주연구원, 2017)의 경우 전년도 12월에 북북서풍이 4.2 m/s로 약하게 불었고 이는 최근 10년간의 위성 바람 자료 중에서도 작은 수치이다. 전년도 12월의 바람의 세기가 괭생이 모자반의 제주도 유입량과도 관련이 있는 것으로 판단되어 바람의 영향을 확인하고자 기존 실험에서 전년도 12월 바람을 절반 수준으로 줄여 바람 외력을 준 12 Halfwind 실험을 추가로 진행하였다. 이 결과 산둥반도 남쪽에 위치한 Point 4에서 제주 인근 해역으로 유입되는 양은 기존실험 12%에서 8%로 감소하였으며 반대로 장수성 연안에 위치한 Point 6에서는 6%에서 8%로 증가하였다.

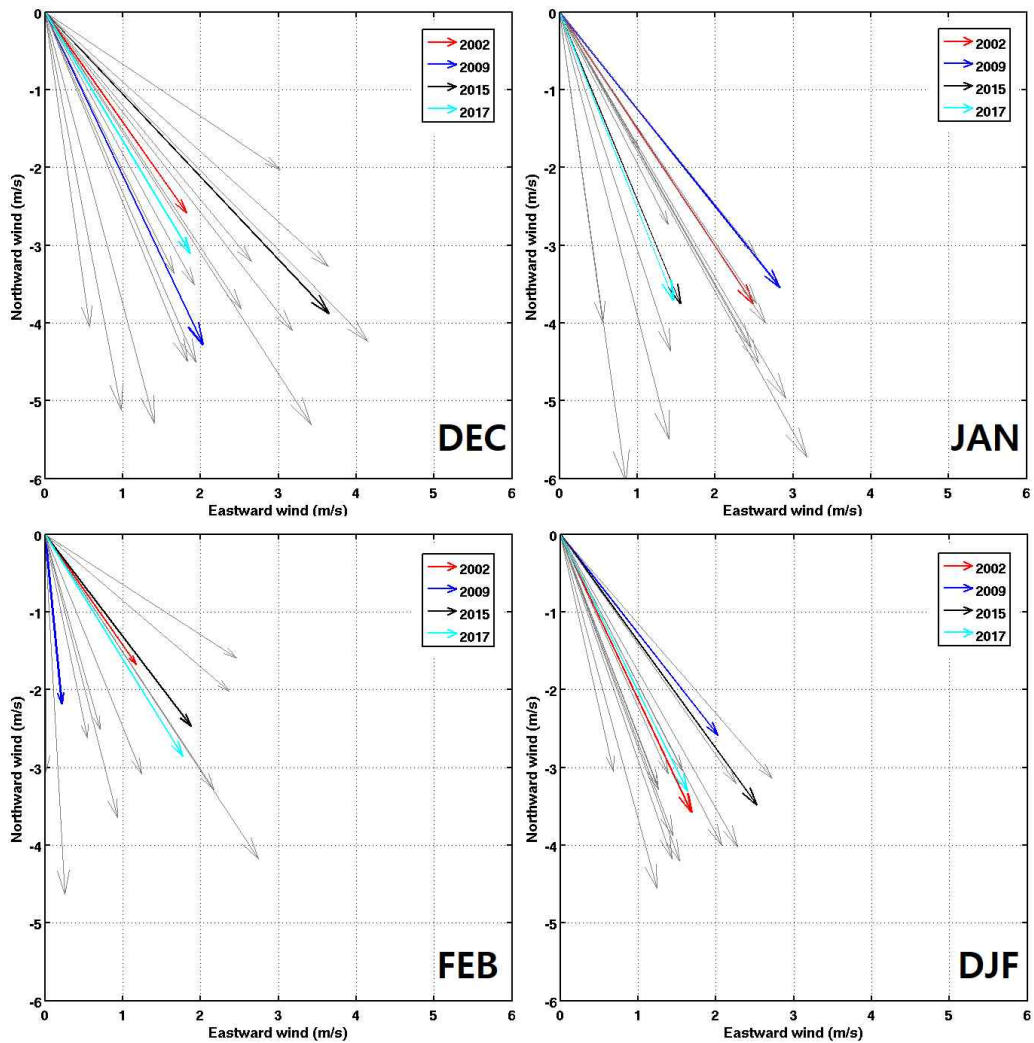


Fig. 18. Monthly QuikSCAT and ASCAT averaged wind vectors within the Yellow sea (121-125°E, 34-38°N) during 1999-2017. Red, blue, black, cyan indicate 2002, 2009, 2015, 2017 with *Sargassum horneri* inflow cases, respectively. December wind speed vector is the data for each previous year. The unit is m/s.

2015년부터 2017년까지 최근 3년간 꾸준히 발견된 사례에 대한 연구(제주연구원, 2017)에 따르면 제주 인근 해역에서 발견된 팽새이 모자반은 중국에서 양식으로 인해 번성한 것이고 2011년부터 5년간 저장성 해역인 저우산 군도에서 ‘팽새이 모자반 양식 증대 기술시범 산업화 개발’이라는 프로젝트를 진행했다(제주연구원, 2017). 또한 수산과학원은 팽새이 모자반의 유입경로 파악을 위한 수치모델의 재현과 역추적 결과에서 2015년 우리나라에 유입한 팽새이 모자반은 중국 산둥반도 해역에서 비롯되었다고 추정하였다(수산과학원, 2015). 이는 2015년 제주 인근에서 발견된 팽새이 모자반이 산둥반도와 장수성 연안에서 유래한 것이라는 본 연구의 결과를 뒷받침한다. 또한 향후 팽새이 모자반이 우리나라, 특히 제주도 인근해역으로 유입될 수 있으며 황해 내부에서 12월 북서풍의 강도가 제주도로의 팽새이 모자반의 연간 유입량을 결정하는 주요 요인이며 잠재적 예측 인자로 사용될 수 있음을 나타낸다.

5. 요약 및 결론

2015년 봄철 제주와 전남 신안 해역에서 기록적인 양의 갯생이 모자반이 발견되었다. 이로 인해 조업, 양식업 등에 피해를 입었고 갯생이 모자반이 연안에 쌓여 부패하며 2차 피해가 발생하였다. 한반도에 유입된 갯생이 모자반은 중국에서 유래하였다고 알려져 있지만 기원지와 유입경로에 대해서는 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 2015년 GOCI 영상을 통해 얻은 갯생이 모자반의 공간분포와 입자추적 수치모델링을 이용하여 갯생이 모자반의 기원정보에 대해 알아내고자 하였다. 2015년 5월 5일의 GOCI 영상에서 얻은 갯생이 모자반의 공간분포와 유사하게 제주 인근 해역에 3개의 영역을 설정하였고 입자의 정보를 역추적하여 3개의 영역, 박스 A, B, C로 유입확률을 투하위치와 투하시기 그리고 실험 별로 나누어 표현하였다(Fig. 19).

제주 서쪽 해역에 위치한 박스 A로 유입된 갯생이 모자반은 2가지 지역에서 유래한 것으로 추정된다. 첫 번째는 산둥반도 남쪽에 위치한 Point 4에서 12월부터 1월 초에 떨어뜨린 입자들이 황해내부에서 겨울 계절풍과 반시계 방향의 조석효과에 의해 중국 연안을 따라 남하하였고 봄철 북위 33도 부근에서 중국연안류보다 잔차류의 영향을 더 많이 받아 제주 서쪽으로 유입되었다. 두 번째는 장수성 연안에 위치한 Point 6에서 1월말부터 2월 초에 떨어뜨린 입자들이 중국연안류와 잔차류가 이루는 균형에 의해 북위 33도 부근의 장수성 연안에서 머무르다 3월부터 잔차류의 영향과 양자강 유출수의 영향을 받아 남동쪽으로 움직이며 제주 서쪽으로 유입되었다.

제주 북쪽 해역에 위치한 B 지역으로 유입되는 갯생이 모자반은 산둥반도 북쪽에 위치한 Point 3에서 유래한 것으로 추정되고 이 지역에 12월 초에 떨어뜨린 입자들은 산둥 반도를 벗어나 황해 내부로 흘러 들었다. 이후 황해 내부에서 양자강 유출수의 영향은 받지 않고 반시계 방향의 잔차류와 강한 겨울철 북서 계절풍의 영향을 받아 북위 34도까지 황해 중앙을 따라 남하하였고 전남 해역 일부와 제주 북부 해역으로 유입되었다.

제주 남쪽 해역에 위치한 C 지역으로 유입되는 갯생이 모자반은 중국 남부 해

역인 저장성과 푸젠성 연안에서 유래하였다. 12월부터 1월까지 이 지역에 떨어뜨린 입자들은 비교적 외해에서 유래하여 제주 남부로 유입되기 때문에 조석이나 양자강 유출수의 영향을 받지 않았고 겨울철 북서 계절풍이 쿠로시오 해류를 타고 제주 남쪽으로 유입하는 입자를 억누르는 역할을 하며 북상하는 속도를 늦추는 역할을 하였다. 제주 서쪽, 북쪽, 남쪽인 박스 A, B, C에 유입되는 입자의 초기위치와 유입에 영향을 끼치는 물리적 요인에 대한 효과를 다음 Table 3에 정리하였다.

또한 팽생이 모자반이 유입량이 전년도 12월 바람과 관련이 있는 것으로 판단되어 이 영향을 살펴보고자 기존 실험에서 전년도 12월 바람을 1/2로 줄여 기존 실험을 수행하였다. 그 결과 산둥반도 남측(장수성 연안)에서 제주 서쪽해역으로 유입된 입자의 수는 감소(증가)하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 겨울철 바람이 강할 때(약할 때) 상대적으로 산둥반도 연안(장수성 연안)에서 평년에 비해 더 많은 양의 팽생이 모자반이 유입되는 것을 의미한다(Table 4).

본 연구의 입자추적실험은 해양-생물결합모델이 아니기 때문에 팽생이 모자반이 가지는 생물학적 과정인 발생, 성장, 소멸 등에 대해 고려되지 않은 한계를 가지고 있다. 그러나 제주 인근 해역으로 유입되는 팽생이 모자반에 대해 초기위치와 암반 탈락시기 그리고 유입에 영향을 미치는 물리적 요인을 제시하고 겨울철 바람장의 역할을 정량적으로 표출함으로써 팽생이 모자반 유입에 관한 연구가 활발해지고 효과적인 방재시스템을 구축하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

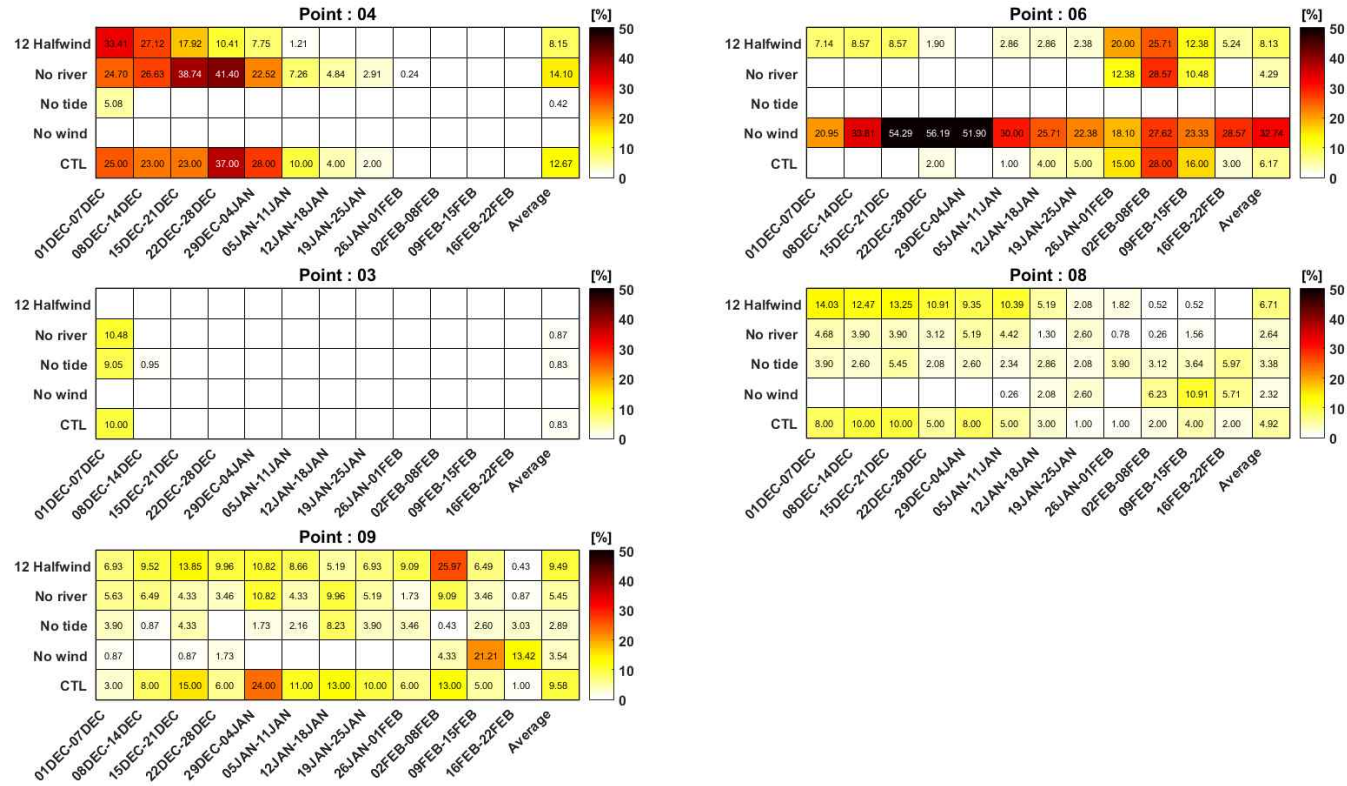


Fig. 19. Percentage of the number of particles entering three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the initial release points and periods in various experiments : (Upper) percentage of entering region A, (Middle) percentage of entering region B, (Lower) percentage of entering region C. CTL, No wind, No tide, No river, 12 Halfwind indicate the various numerical experiment used for our study. The date and colors represent release time and the ratio inflow into each box. The unit is percentage(%).

Table 3. Physical factors affecting the inflow into the each box from by release points. (+)- means positive (negative) affect.

	Box A	Box B	Box C
Point 3	·	Wind(+)	·
Point 4	Wind(+), Tide(-)	·	·
Point 6	Wind(-), Tide(+), River(+)	·	·
Point 8	·	·	Wind(-)
Point 9	·	·	Wind(-)

Table 4. Percentage of the number of particles entering three regions (A, B, C) to the number of the released particles according to the release points during winter (DJF). The unit is percentage(%). Three numbers in each cell represent the percentage of entering into the each Box A, B, C.

Initial release point	Experimental Name				
	CTL	No wind EXP.	No tide EXP.	No river EXP.	12 Halfwind EXP.
Point 1	-	-	-	-	-
Point 2	-	-	-/3/-	-	-
Point 3	-/1/-	-	-/1/-	-/1/-	-
Point 4	12/-/-	-	1/-/-	13/-/-	8/-/-
Point 5	-	-	-	-	-
Point 6	6/-/-	32/2/-	-	4/-/-	8/-/-
Point 7	-/-/1	-	-/-/1	-/-/1	-/-/1
Point 8	-/-/5	-/-/3	-/-/4	-/-/2	-/-/6
Point 9	-/-/9	-/-/4	-/-/3	-/-/5	-/-/9

참고문헌

- 국립수산과학원 (2015) “대량 출현한 팽생이 모자반 국내종과는 유전적으로 달라”. 국립수산과학원 보도자료 1-4
- 이상현, 변도성, 최병주, 이은일 (2009) 평균역학고도장과 인공위성고도계 자료를 이용한 동해 표층해류 추산. *한국해양학회지 바다* **14(4)**: 195-204
- 제주연구원 (2017) 제주지역 팽생이 모자반의 유입 현황 및 대응 방안. 정책이슈브리프 Vol. 268
- 해양수산부 (2016) “2016년도 팽생이 모자반 처리 추진계획”. 해양수산부: 1-8
- Arakawa A, Lamb VR (1977) Methods of computational physics. *Academic Press* **17**:174-265
- Choi BH, Kim KO, Eum HM (2002) Digital bathymetric and topographic data for neighboring seas of Korea. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* **14**: 41-50.
- Egbert G, Bennett A, Foreman M (1994) TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *J Geophys Res* **99**: 24821-24852
- Figa-Saldaña J, Wilson JJW, Attema E, Gelsthorpe R, Drinkwater MR, Stoffelen A (2002) The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: A follow on for European wind scatterometers. *Can J Remote Sens* **28(3)**: 404-412
- Hurka H (1971) Factors influencing on the gas composition of Sargassum. *Marine Biology* **11**: 82-89.

- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang S, Hnilo JJ, Fiorino M, Potter GL (2002) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull Amer Meteor Soc* **83**: 1631-1643
- Koehl A, Stammer D, Cornuelle B (2003) Interannual to decadal changes in the ECCO global Synthesis. *J Phys Oceanogr* **37**: 313-337
- Komatsu T, Ariyama H, Nakahara H, Sakamoto W (1982) Spatial and Temporal Distributions of Water Temperature in a Sargassum Forest. *J Oceanogr Soc Japan* **38**: 63-72
- Komatsu T, Tatsukawa K, Filippi JB, Sagawa T, Matsunaga D, Mikami A, Ishida K, Ajisaka T, Tanaka K, Aoki M, Wang W, Liu HF, Zhang SD, Zhou MD, Sugimoto T (2007) Distribution of drifting seaweeds in eastern East China Sea. *J Mar Syst* **67**: 245-252
- Komatsu T, Fukuda M, Mikami A, Mizuno S, Kantachumpoo A, Tanoue H, Kawamiya M (2014) Possible change in distribution of seaweed, *Sargassum horneri*, in northeast Asia under A2 scenario of global warming and consequent effect on some fish. *Mar Pollut Bull* **85(2)**: 317-32
- Large WG, McWilliams JC, Doney SC (1994) Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev Geophys* **32**: 363-403
- Lee JH, Pang IC, Moon IJ, Ryu JH (2011) On physical factors that controlled the massive green tide occurrence along the

- southern coast of the Shandong Peninsula in 2008: A numerical study using a particle-tracking experiment. *J Geophys Res* **116**: C12036. doi:10.1029/2011JC007512
- Moon IJ, Oh IS, Yoon YH (2000) A numerical study on the real-time sea level prediction along the western coast of Korea. *J Korean Meteorol Soc* **36(2)**: 203-218
- Moon JH, Pang IC, Yang JY, Yoon WD (2010) Behavior of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* in the East China Sea/Japan Sea during the summer of 2005: A numerical model approach using a particle-tracking experiment. *J Mar Syst* **20**: 101-114
- Ryu JH, Ishizaka J (2012) GOCI data processing and ocean applications. *Ocean Sci J* **47(3)**: 221.
- Seo SN (2008) Digital 30sec gridded bathymetric data of Korea marginal seas - KorBathys30s (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Coast Ocean Eng* **20(1)**: 110-120
- Shchepetkin AF, McWilliams JC (2005) The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. *Ocean Model* **9**: 347-404
- Son YB, Choi BJ, Kim YH, Park YG (2015) Tracing floating green algae blooms in the Yellow Sea and the East China Sea using GOCI satellite data and Lagrangian transport simulations. *Remote Sens Environ* **156**: 21-33
- Song Y, Haidvogel DB (1994) A semi-implicit ocean circulation

- model using a generalized topography-following coordinate system. *J Comput Phys* **115**(1): 228-224
- Tseng CK (2000) Flora Algarum Marinarum Sinicarum, Tomus 3. Phaeophyta (No.2) Fucales. Science Press Beijing (in Chinese)
- Wei H, Yuan C, Lu Y, Zhang Z, Luo X (2013) Forcing mechanisms of heat content variations in the Yellow Sea. *J Geophys Res* **118**: 4504-4513. doi:10.1002/jgrc.20326
- Xu M, Sakamoto S, Komatsu T (2016) Attachment strength of the subtidal seaweed *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh varies among development stages and depths. *J Appl Phycol* **28**: 3679-3687
- Yang CS, Bae SS, Han HJ, Ahn YH, Ryu JH, Han TH, Yoo HR (2010) Introduction of acquisition system processing system and distributing service for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data. *Korean Journal of Remote Sensing* **26**(2): 263-275
- Yoshida T (1963) Studies on the distribution and drift of the floating seaweed. *Bull Tohoku Fish Res Lab* **23**: 141-186