



Original Article

위성추적부이를 활용한 겨울철 서해 해역에 유입된 외국기인 해양쓰레기 거동 특성

김영민¹ · 장선웅² · 김대현³ · 윤홍주^{4,†}

¹국립수산과학원 어장환경과 석사후 연구원

²(주)아이렘 기술개발 대표이사

³(주)오션테크 해양시스템연구소 연구소장

⁴부경대학교 공간정보시스템공학과 교수

Behavior Characteristics of Foreign Marine Debris into the West Sea of Korea in Winter using Satellite Tracked Drifters

Youngmin Kim¹, Seonwoong Jang², Daehyun Kim³, and Hongjoo Yoon^{4,†}

¹Scientific Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

²CEO, IREMTECH. CO. LTD., Busan 46079, Korea

³Research Director, OCEANTECH CO., Busan 15097, Korea

⁴Professor, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University, Busan 48500, Korea

요 약

본 연구는 겨울철 한국 서해로 유입되는 외국기인 해양쓰레기의 거동 특성을 파악하기 위해 위성추적부이 실험과 해양 기상환경 자료를 비교한 것이다. 우리나라 연안에 피해를 끼치는 해양쓰레기들 가운데 겨울철에 가장 높은 비율을 차지하는 검은색 플라스틱 부이를 대상으로 선정하였고, 이와 유사한 형태로 제작된 부이에 위성 위치 발신기를 부착하여 이동 속도와 경로를 분석하였다. 부이 이동궤적은 서남해 해역에서 바람의 영향을 지배적으로 받으며 이동하였고, 풍속이 5 m/s 이하로 약해진 시기부터는 조류와 해류의 영향을 받으며 이동하였다. 동중국해에서 북풍계열 바람의 영향으로 남하하던 부이들은 대만해협을 통해 북상하는 쿠로시오 해류를 만나면서 바람 방향과 반대 방향으로 움직이거나 정체되는 이동궤적을 보였다. 즉, 겨울철 서해로 유입되어 29°N 부근까지 북서계절풍 영향으로 남진하였던 해양쓰레기는 풍속이 일시적으로 약해지는 시기에 조류 및 해류를 따라 이동 궤적이 바뀌고, 쿠로시오 해류 영향권에 접어들면서 복잡한 이동궤적을 나타내었다. 본 연구 결과는 겨울철 서해에 유입되는 외국기인 해양쓰레기의 해양오염 문제 대응방안 마련에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract – This study compared a satellite tracked buoy trial and marine meteorological environment data in order to understand behavior characteristics of foreign marine debris which enter the West Sea of Korea in winter. Among the marine debris causing damage to the coast of Korea, we selected black plastic buoys, which occupy the highest proportion of debris in winter, and analyzed their movement speed and path by attaching satellite positioning transmitters to buoys made in similar form. The buoy movement trajectory was primarily dominated by the wind in the southwestern region of the West Sea, but moved according to the influence of the tidal current and ocean current from the time the wind speed was weakened to less than 5 m/s. In the East China Sea, the buoys which moved south due to the influence of the northern winds showed movement patterns that were stagnating or moving in the opposite direction of the wind direction against the Kuroshio Current which flows north through the Taiwan Strait. In other words, the marine debris which inflow into the West Sea during the winter, moving southward to 29°N due to the effect of the northwest seasonal wind, showed a changed pattern of movement along tidal currents and ocean currents at a time when the wind speed was temporarily weakening and a complex trajectory

†Corresponding author: yoonhj@pknu.ac.kr

while entering the influence of the Kuroshio Current. The results of this study can be used as important data for preparing countermeasures against marine pollution of foreign marine debris which enters the West Sea in winter.

Keywords: West Sea(서해), Winter(겨울), Satellite Tracked Drifters(위성추적부이), Foreign Marine Debris(외국기인 해양쓰레기), Wind(바람)

1. 서 론

외국기인 해양쓰레기의 이동은 최근 인접한 연안국들 간 환경피해를 유발시켜 심각한 외교적 갈등의 원인이 되고 있으며(Jang *et al.*[2012]; Lee *et al.*[2012]) 해양쓰레기로 인한 전 세계 피해액은 연간 약 13조원 이상으로 추정되고 있다(UNEP[2014]). 다양한 해양쓰레기 종류 중 플라스틱 쓰레기는 매년 8백만 톤 이상이 해양으로 유입되고 있고, 2015년 기준으로 약 1억 5천만 톤의 플라스틱 쓰레기가 해양에 존재하는 것으로 보고되고 있다(Jambeck *et al.*[2015]). 플라스틱 쓰레기는 주로 해류와 조류, 바람의 영향을 받아 특히 오랜 시간 부유 상태로 광역에 걸쳐 이동한다는 점(Golik and Gertner [1992]; Derraik[2002]; Aliani *et al.*[2003]; Seville *et al.*[2012]; Maximenko *et al.*[2012])에서 국제사회가 우선적으로 대응할 필요가 있다.

지금까지 해양쓰레기 관련 연구로는 해양쓰레기의 유형, 발생량, 공간분포 등을 파악하기 위한 장기 모니터링(Ryan *et al.*[2009], Barnes *et al.*[2009]; Ribic *et al.*[2012]; Schulz *et al.*[2013])이 주로 수행되었으나 연안 표착 후 쓰레기 분포를 조사하는 연구만으로는 해수순환과 기상조건에 따라 시시각각 변하는 이동경로를 파악하기 어려웠다(Ryan *et al.*[2009]). 해양쓰레기의 이동경로를 밝히기 위해 입자추적모델을 적용한 연구들이 태평양(Kubota[2005]; Maximenko *et al.*[2012]) 및 우리나라 서해(MLTM and KOEM[2012]; Oh and Kim[2014])와 동해(Yoon *et al.*[2010], Iwasaki *et al.*[2017]), 동중국해(Isobe *et al.*[2009]; Kako *et al.*[2010b])를 대상으로 진행됐으나 모델계산에 의한 수치입자와 표류부이의 궤적을 비교하여 검증한 연구(Poulain *et al.*[2009], Kako *et al.*[2010a])는 많지 않았다. 한편, 우리나라에서 외국기인 해양쓰레기 유입으로 매년 가장 큰 피해를 보고 있는 서해 해역을 대상으로 비교한 연구 사례는 없었다.

본 연구 대상 해역인 서해는 한반도와 중국 대륙으로 둘러싸여 있는 반폐쇄성 천해역으로 중국의 양쯔강을 비롯한 중국 동부해안 하천들과 서해안의 하천들로부터 담수가 유입된다. 또한 얕은 수심으로 인해 계절풍과 조석의 영향 등 서해 해수순환에 영향을 미치는 요인들이 다양하게 존재하는 복잡한 해역이다(Riedlinger *et al.*[2000]; Teague *et al.*[2000]; Moon *et al.*[2009]; Seung *et al.*[2012]). 1978년 이래로 중국 정부는 해안 지역으로 치중된 개발 전략을 채택한 이후, 저지대 해안 지역을 중심으로 경제 성장과 도시화가 진행되었으며, 빠른 산업화와 인구 증가로 인해 극심한 환경오염을 겪고 있다(Liu *et al.*[2016]). 이에 육상기인 쓰레기의 서해 유입이 지속적으로 증가하고 있으며(Suh[1999]; Kim *et al.*[1999]), 겨울철 중국기인 해양쓰레기의 국내 유입에 따른 피해 사례는 언론을 통해서도 지속적으로 보도되고 있다(예: 이투데이, 2011. 12. 27.; 경인일보,

2014. 3. 28.; 연합뉴스, 2016 10. 3.). MOF and KOEM[2017]은 2017년 실시한 외국기인 해양쓰레기 모니터링 조사 결과 우리나라로 유입되는 외국기인 해양쓰레기의 약 94%가 중국에서 온 것으로 보고하였다. 중국 연안에서 해양으로 유입되는 플라스틱 쓰레기의 연간 유입량은 지속적으로 증가하고 있을 뿐만 아니라 연안 어업 시설량 급증으로 인한 플라스틱 쓰레기양이 강을 통해 유입되는 것보다 훨씬 증가되고 있다(Bai *et al.*[2018]). 국내에서도 급증하는 외국기인 해양쓰레기의 문제에 대응하기 위해 서해안과 남해안을 대상으로 외국기인 해양쓰레기 모니터링 연구가 수행되었다(Jang *et al.*[2011]; Jang *et al.*[2012]; Lee *et al.*[2012]; Han[2013]). MLTM and KOEM[2012]는 ROMS 모델을 구축하여 서해와 동중국해상의 해양쓰레기 이동 경로를 추적하였으며, Oh and Kim[2014]은 HYCOM에서 제공하는 모델에 입자추적 수치모의를 적용하여 서해에서의 해양쓰레기의 이동 특성을 파악한 바 있다. 그러나 그 결과에 대한 실제적인 관측 자료가 부족하여 이동 경로에 대한 신뢰성 있는 충분한 근거를 제시하기에 부족하다.

매년 외국기인 해양쓰레기는 유입되지만 현존량과 그 분포를 파악하는 것에 한정되어 있다. 국가 간 해양쓰레기 환경 문제에 대비하여 국가적 차원의 대응책을 마련하기 위해서는 외국기인 해양쓰레기의 이동 경로에 대한 관측 자료 확보가 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 겨울철 서해 해역으로 유입된 외국기인 해양쓰레기의 이동 거리, 이동 시간, 정체 구간 등 이동 경로 분석을 통해 구체적인 거동 특성을 파악하고자 하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 위성추적부이

해양에 부유하는 쓰레기들은 모양이나 형태에 따라 해양기상환경의 영향을 받는 조건들이 달라지기 때문에(Yoon *et al.*[2010]; Strafella *et al.*[2015]) 유형별로 이동 경로를 모두 해석하는 것은 어렵다. 따라서 효율적인 연구를 위해 가장 대표적인 품목을 선정하여 분석하는 것이 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 겨울철 서해안과 서남해안에 집중적으로 피해를 끼치고 있는 것으로 알려진 검은색 플라스틱 부이를 대표 품목으로 선정하였다. 폐류와 해조류 양식에 사용되는 검은색 플라스틱 부이의 생산지는 중국 북부 3성(대련, 허베이, 산둥) 지역으로 나타났으며, 주로 겨울철 북서계절풍에 의해 이동하여 서해안과 서남해안 해역에 많은 피해를 끼치고 있는 것으로 알려져 있다(MLTM and KOEM[2011], Lee *et al.*[2012], Han[2013]). 본 연구에서는 Jang *et al.*[2015]이 제안한 저궤도 이동 위성 서비스와 위성 위치 발신기를 장착한 부이를 활용하였다(Fig. 1a). 수면에 부유하여 바람의 직접적인 영향을 받

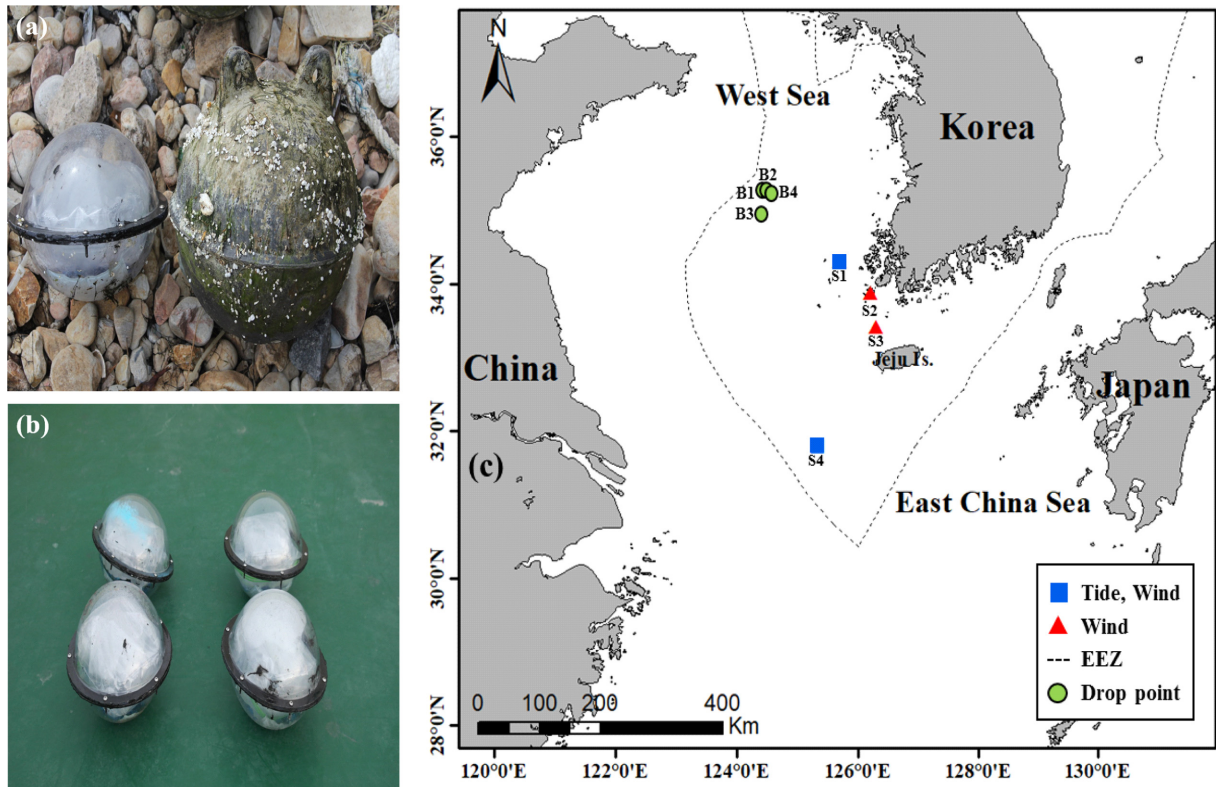


Fig. 1. (a) Satellite tracked drifter (left) and black round plastic buoy (right). (b) Satellite tracked drifters. (c) Study area and location of observation stations of study.

이 이동하는 부이의 특성을 재현하기 위해 하단에 드로그(Drogue)를 장착하지 않았다(Fig. 1b). GPS 부이의 위치 정보(경·위도, 시간)는 10분 간격으로 수신되도록 설정하였고 부이 위치 정보는 웹사이트 (<http://www.spot.co.kr>)를 통해 제공받았다. 해양쓰레기가 서해로 유입되어 서해 중앙부까지 이동하였다고 가정하여 4개의 부이를 투하하였다(Fig. 1c). 해양쓰레기의 이동 추적은 2015년 2월 8일부터 3월 28일까지 수행하였다.

2.2 해양기상자료 분석

해양기상 환경에 따른 위성추적부이의 이동 경로를 분석하기 위해 조위, 해상풍 자료를 활용하였다. 조위 자료는 국립해양조사원 (<http://www.khoa.go.kr>)의 흑산도(S1), 이어도 종합해양과학기지(S4) 자료를 사용하였다. 풍속·향 자료는 기상청 기상자료개방포털

(<http://data.kma.go.kr>)의 흑산도 기상대(S1), 추자도 부이(S2)와 해수서 등표(S3) 자료와 국립해양조사원 이어도 종합해양과학기지(S4) 자료를 활용하였다(Fig. 1c). 취송류 모의에 이용되는 풍속은 해면상 10 m의 풍속이므로 관측 풍속에 Oh and Ha(2005)가 이어도 종합해양과학기지에 사용하였던 변환 식 (1)을 사용하였다.

$$u_{10m} = u_{Hm} \frac{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)} \quad (1)$$

H는 실측지점에서 해상풍을 관측한 높이를 의미하며, z_0 는 거칠기 길이로 외해에 해당하는 이어도 기지는 5×10^{-4} m로 하였으며, 그 외의 실측지점은 연안에 해당하는 값인 10^{-3} m 사용하였다. 실측지점의 상세정보는 Table 1에 기술하였다.

Table 1. The information of the Wind Observation Station

Observation station	Position	Anemometer height, H (m)
Heuksando (S1)	34°41'14"N 122°27'4"E	15.5
Haesuseo (S2)	34°15'48"N 126°01'36"E	12
Chujado (S3)	33°47'37"N 126°08'28"E	3.6
Ieodo Ocean Research Station (S4)	32°07'23"N 125°10'59"E	44

3. 결과 및 고찰

3.1 위성추적부이 이동 경로

위성추적부이를 활용하여 이동 경로 추적 시험 결과, 겨울철 해양쓰레기를 포함하여 부유물질이 서해로 유입될시 서남해 해역에 위치한 흑산도와 제주도 서쪽 해안에 표착될 수 있는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 서해를 벗어나 동중국해로 유입된 해양쓰레기는 동중국해 해역에서 정체되어 있거나 다시 북상하여 일본 규슈반도로 유입될 수 있음을 파악할 수 있었다(Fig. 2). 본 연구에서는 해역별 부이 이동에 영향을 주는 요인을 파악하기 위해서 서남해 해역(Fig. 2a)과 동중국 해역(Fig. 2b)으로 구분하여 거동 특성을 파악하였다.

서남해 해역에서 부이들은 2월 8일부터 2월 24일까지 22일간 이동하였다(Fig. 3). 투하 후 부이들은 2월 8일부터 9일 12시까지 남동쪽으로 약 74.5 km(평균 0.63 m/s)를 이동하다가 동쪽으로 방향을 전환하여 11일 23시까지 약 71.5 km(평균 0.46 m/s)를 이동하였다. 부이들은 북서쪽과 남동쪽 방향을 번갈아가며 왕복성 조류 흐름에 따라 움직였다. 이후 3개의 부이(B1, B3, B4)들은 비슷한 경로를 따라 남동쪽으로 진행하였으나, B2 부이는 동쪽으로 16.2 km

를 더 이동하여 12일 12시에 흑산도 북서쪽 해안에 표착하였고 2일 뒤 송신을 중단하였다. 12일부터 남동쪽으로 방향을 전환하여 이동하던 부이들은 14일부터 3일간 차례대로 북동, 북서, 북동진하였다. 16일 18시부터 부이들은 다시 남동쪽으로 방향을 바꾸어 이동하였으며, 125°30'E, 34°20'N 부근을 중심으로 장축 길이가 약 12 km인 타원형으로 소용돌이 궤적을 그리며 정체한 흐름을 나타냈다. 이후 계속 남동쪽으로 진행하여 제주도 북서쪽 약 53 km 해역 125°40'E, 33°60'N에 도달한 부이들은 56 km 정도의 타원형 궤적을 그리며 다시 시계방향의 회전성 흐름을 나타냈다. 부이 투하 16일 이후 2월 24일 6시에 3개의 부이는 제주도 서쪽 약 20 km 해역을 지나 동중국해로 진입하였다.

한편, 흑산도 북서쪽 해안에 표착한 부이(B2) 수거 당시 주변 현황 파악을 위해서 표착 지역과 인접한 3곳을 추가적으로 모니터링을 수행하였다. 그 결과, 중국 남부 지방에서 유출된 것으로 알려진 파란색 부이(Fig. 4a), 북부지방에서 유출된 것으로 추정되는 다량의 검은색 플라스틱 부이(Fig. 4b)가 집적되어 있었다. 또한 외국기인 품목 중 가장 많은 양을 차지하는 플라스틱 병(Fig. 4c, d)이 집적되어 있었다. 2015년 1월부터 5월까지 3차례 막대한 영향을 끼친

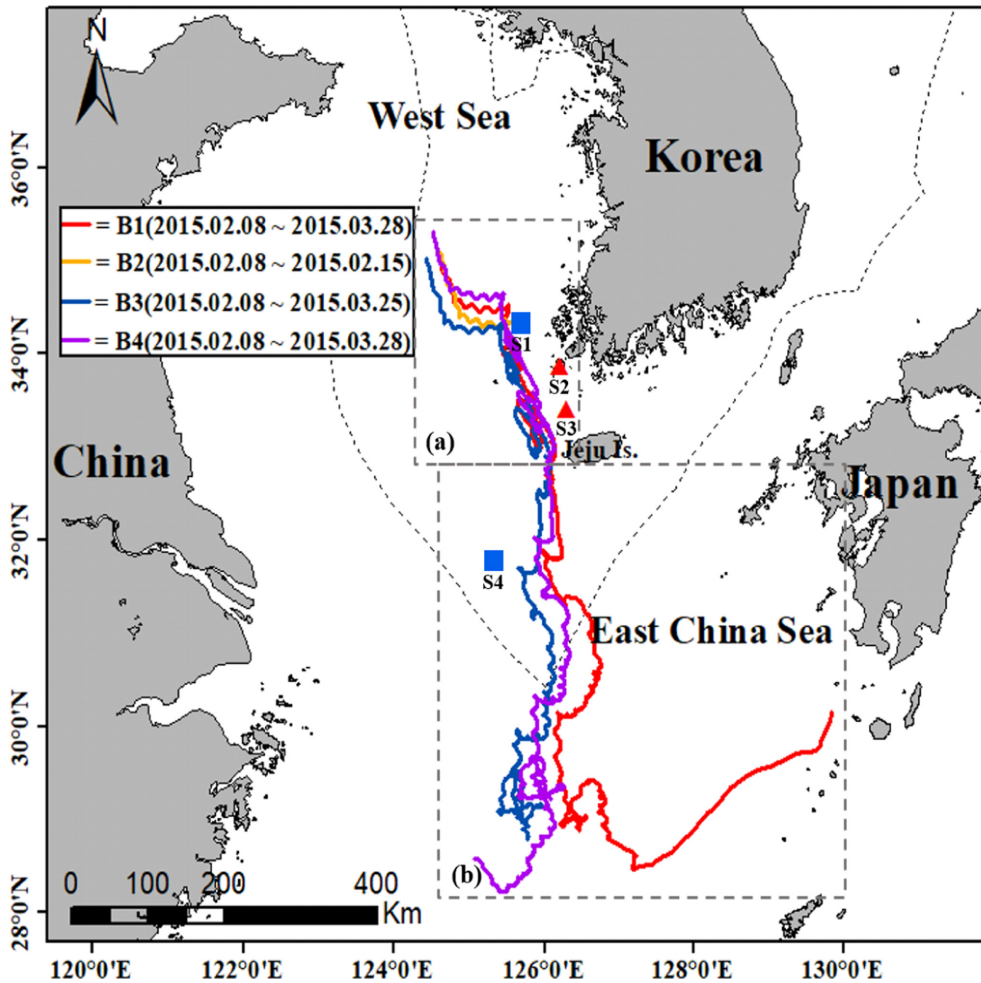


Fig. 2. Trajectories of satellite tracked drifters in the observation period : (a) Southwestern Sea, (b) East China Sea.

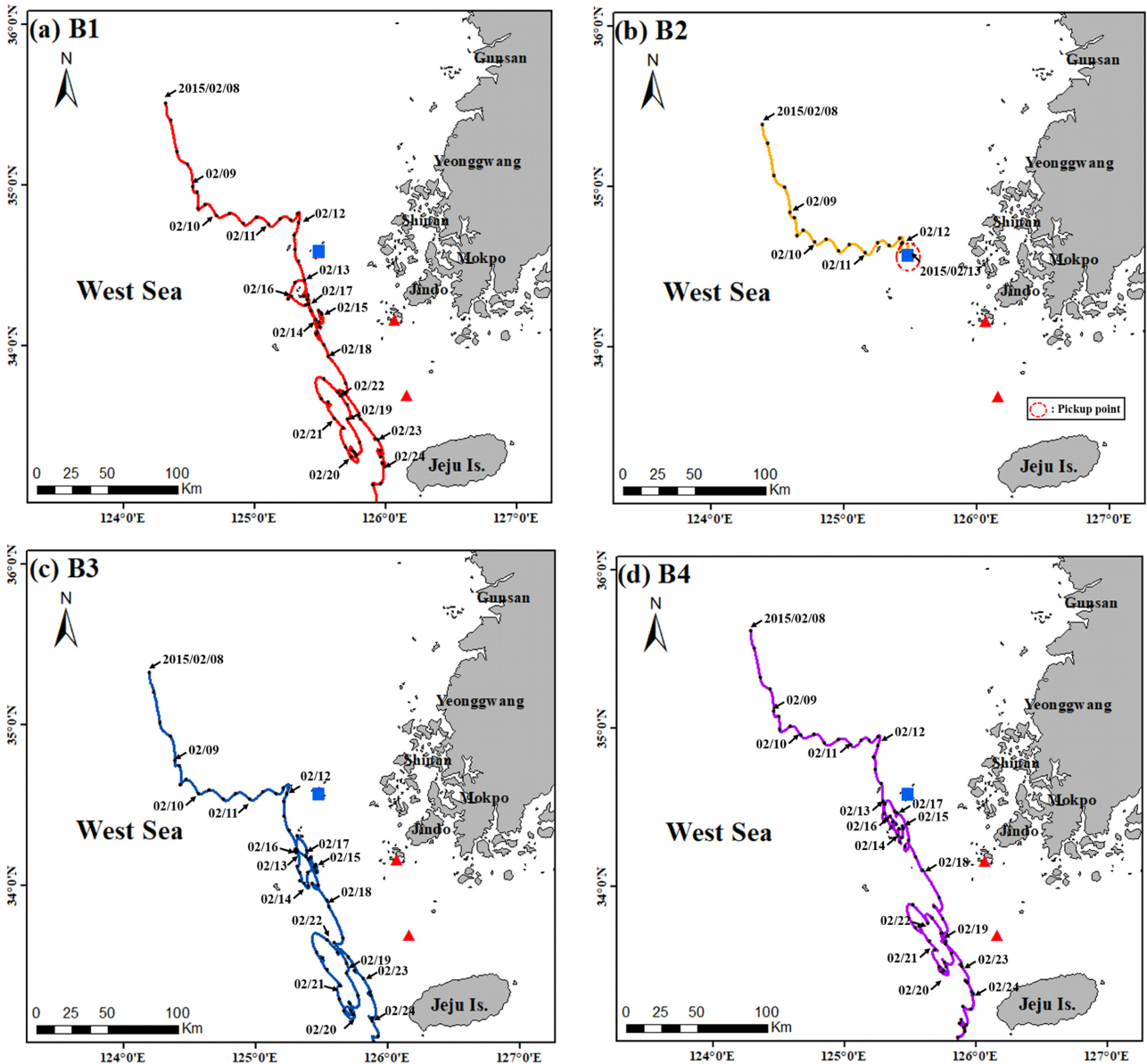


Fig. 3. Trajectories of satellite tracked drifters in the Southwestern sea (Fig. 2(a)). Blue square indicates the Station where wind and tide data were collected. Red triangles indicate the Station where wind data was collected.

팽생이모자반으로 추정되는 해조류도 1 km 이상의 유조(띠) 형태로 나타났다(Fig. 4e). 이는 서해 해류와 북서 계절풍의 영향으로 우리나라에 유입된 것으로 보고되었다(Hwang *et al.*[2016]). 다량의 대형 스티로폼과 미세 스티로폼도 해안에 넓게 분포하고 있었다(Fig. 4f).

Fig. 5에 서남해 해역을 벗어나 동중국해로 유입된 부이들의 이동 경로를 나타내었다. 제주해협을 지나 남쪽으로 진행하던 부이들은 2월 28일, 3월 7일 서쪽으로 이동한 흐름을 제외하고 3월 8일까지 직선거리 약 307.9 km(평균 0.49 m/s)를 남진하였다. 이 때 부이들의 궤적은 작은 왕복성 흐름을 나타냈다. 2015년 3월 9일부터 11일 6시까지 부이들은 다시 남쪽으로 방향을 전환하여 진행하였다. B1 부이는 125°43'E, 29°06'N, B3와 B4 부이는 126°12.5'E, 29°87.5'N 부근에서 약 10일간 정체된 흐름을 보였다. 세 개의 부이 중 B1 부

이는 3월 19일 126°82'E, 29°32'N 부근에서 이동 방향이 동쪽으로 바뀌며 5일간 남동쪽으로 이동하였다. 이후 B1 부이는 3월 24일 127°17'E, 28°80'N에서 북동쪽으로 방향 전환하여 일본 규슈 반도를 향해 매우 빠르게 북동진하다가 3월 28일 19시 129°85'E, 30°52'N 부근에서 위치를 소실하였다. 이 기간 동안 B1 부이는 최대 1.47 m/s(평균 0.83 m/s) 속도로 325.4 km를 이동하였다. B3 부이는 시계 방향의 회전선 흐름으로 정체된 궤도를 나타내며 3월 22일 6시에 125°44'E, 29°06'N 부근에서 위치를 소실하였다. B4 부이는 B3 부이와 유사하게 10일 동안 직선거리 약 53.2 km 이동하다가 3월 23일부터 남서쪽으로 방향을 전환하였다. 이후 북동쪽으로 방향이 바뀌어 2일간 진행하다가 3월 28일 3시 125°02'E, 28°52'N 부근에서 위치를 소실하였다.

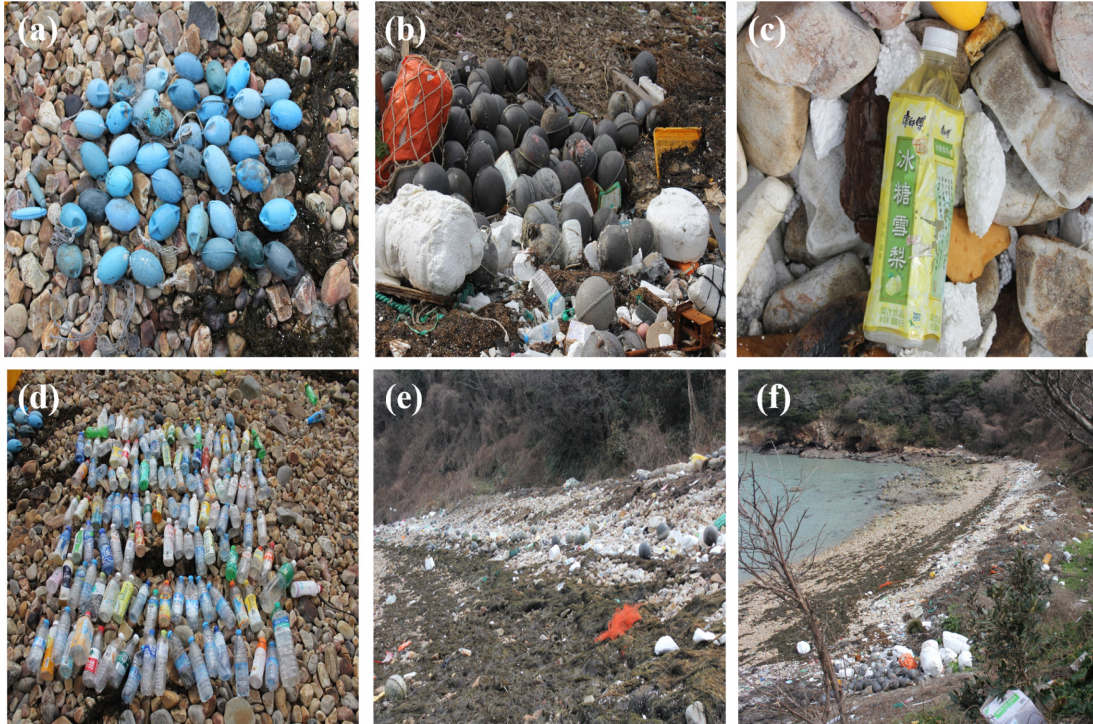


Fig. 4. The status of foreign marine debris in monitoring area ((a) : Plastic blue buoys, (b) : Plastic black buoys, (c) : Plastic bottle, (d): Plastic bottles, (e) and (f) : zonal of foreign marine debris and *Sargassum horneri*).

3.2 해양기상환경에 따른 위성추적부이 거동 특성

3.2.1 서남해 해역

바람에 의한 취송류는 겨울철 해양쓰레기의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 외력이다. 또한, 대상 해역인 서해는 조석간만의 차가 심한 해역으로 이 외력이 해양쓰레기 이동에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 6은 서남해 해역에서 매시간으로 관측된 조위와 해상풍, 부이들의 스틱다이아그램을 보여준다. 10분 간격으로 관측된 부이의 자료는 해양기상자료와 비교를 위해 한 시간 간격으로 재구성하였고, 부이의 반일주기 성분을 제거하기 위해 25시간 이동평균을 적용하였다. 2월 8일부터 9일까지 주 풍향은 북풍이었으며 지속적으로 10 m/s 이상의 강한 풍속이 지속되었다. 부이들도 0.5 m/s 이상으로 바람 방향에 따라 남진하였다. 10일부터 풍향이 서풍에서 남남동풍으로 전환하였고, 풍속의 세기는 5 m/s 이하로 약해졌다. 풍속이 약해지면서 부이들의 이동 속도는 감소하였으며 창/낙조류의 흐름에 따라 이동하였다. 12일 오전 2시부터 2일간 북풍의 영향으로 부이들은 남진하였다. 14일 오전 6시부터 풍속이 5 m/s 이하로 감소하면서 부이들의 이동 속도도 약 0.2 m/s 감소하였다. 주 풍향은 남풍계열이었고 풍속이 감소하면서 부이들이 조위의 패턴에 따라 상하 왕복성 궤적을 보이며 이동하였다. 이후 20일부터 22일까지 이전 기간 보다 풍속이 강해 궤적의 크기가 크게 나타났다. Teague and Jacobs[2000]와 Lee *et al.*[2003]은 겨울철 서남해 해역 표층 흐름이 북풍이 강해짐에 따라 풍향과 거의 같은 취송류가 형성되지만, 바람이 약해짐에 따라 역풍류 또는 잔차류의 영향이

존재한다고 수치모의를 통해 밝혀냈다. 이와 같은 결과는 풍속이 6 m/s 이상의 강한 풍속이 지속될 때, 바람의 영향이 해양쓰레기 이동에 지배적인 영향을 미쳤으나 풍속이 감소할 때는 조류와 해류 등이 부이 이동에 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2.2 동중국해 해역

Fig. 7에 동중국해 해역에서 매시간 간격으로 관측된 이어도 종합해양과학기지 조위와 해상풍, 부이들의 스틱다이아그램을 나타내었다. 2월 25일부터 일부 남풍이 불었던 시기를 제외하고 탁월풍은 북풍이었으며, 12 m/s 이상의 강한 풍속을 보였다(Fig. 7b). 부이들은 풍속의 영향으로 0.6 m/s 이상의 빠른 속도로 남하하였다. 13일부터 풍속이 6 m/s 이하로 감소하였고 풍향도 남풍과 북풍을 반복하며 바뀌었다. 이 시기에 남하하던 부이들은 왕복성 궤적을 나타내며 정체된 흐름을 나타냈다. 한편, B1 부이는 3월 24일, B4 부이는 3월 26일부터 6 m/s 이상의 북동풍이 우세함에도 바람의 반대 방향으로 이동하였다(Fig. 7c, 7e). Lee[2017]는 ROMS 모델을 활용하여 대만해협을 통해 북상하는 대만난류와 쿠로시오 해류가 원활하게 북상하면서 북동풍이 지속되었음에도 바람 방향에 거슬러 서해와 제주도해에 유입되거나 일본 남쪽으로 흘러간다고 보고하였다. 이 같은 결과는 바람에 의해 남진하던 해양쓰레기가 북상하는 쿠로시오 해류의 영향이 강해지는 시기에 접어들면, 바람 방향에 거슬러 북상하여 우리나라에 재유입되거나 일본에 유입될 수 있음을 시사한다.

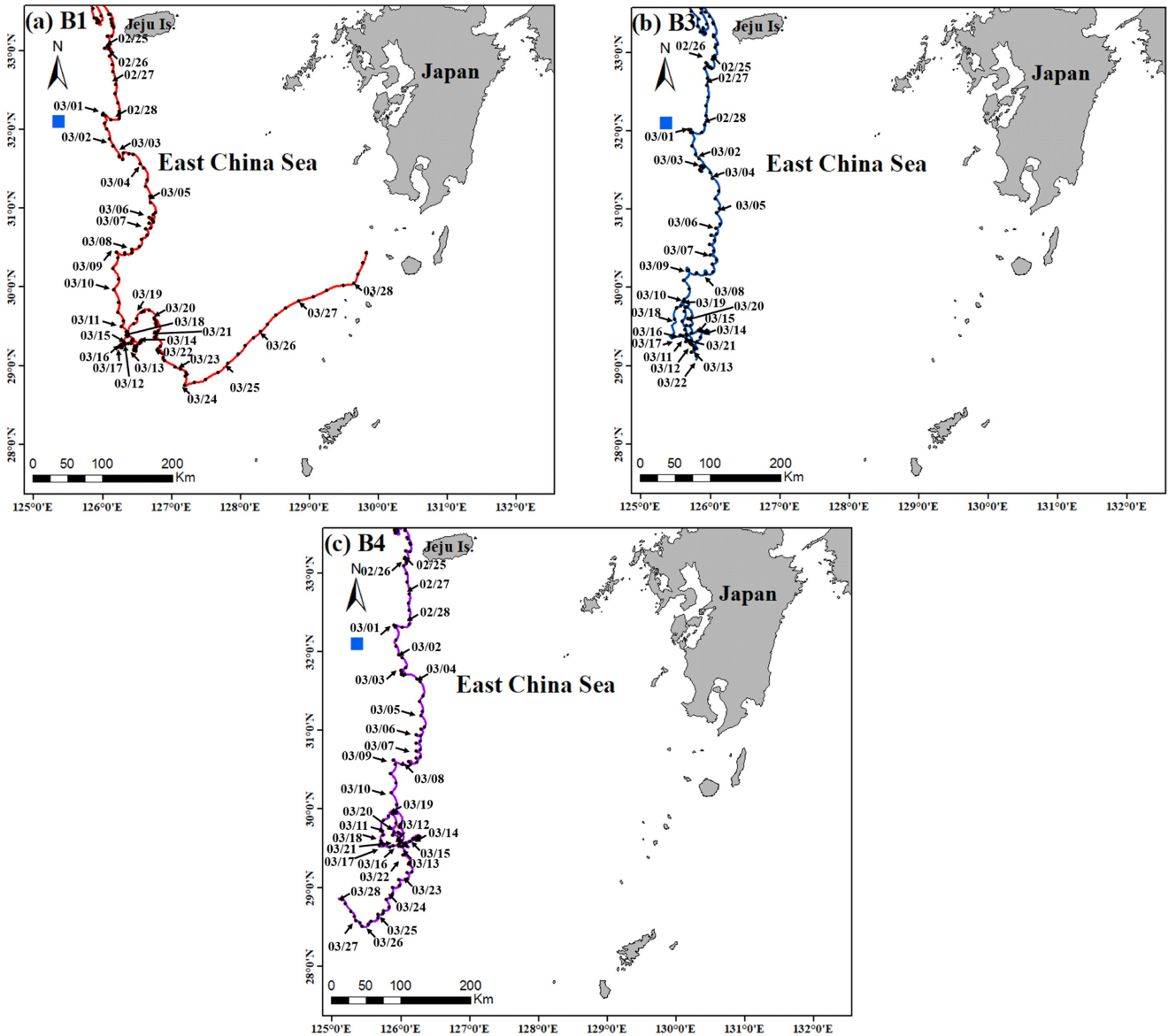


Fig. 5. Trajectories of satellite tracked drifters in the East China Sea (Fig. 2(b)). Blue square indicates the Station where wind and tide data were collected.

4. 토 의

대상 해역의 해수순환을 재현하여 적용된 입자추적 수치모의는 해양으로 유입된 외국기인 해양쓰레기의 이동 특성과 확산을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 더욱 신뢰성 있는 자료를 확보하기 위해서는 수치모델을 뒷받침할 수 있는 실측 자료가 필요하다. MLTM and KOEM[2012]는 2009~2011년 대상으로 공간해상도 약 5 km인 ROMS 모델에 입자추적 기법을 이용하여 외국기인 해양쓰레기 이동 경로를 파악하였다. 북부 3성을 대상으로 1, 2월에 출발한 입자들은 3~8월에(이동시간 200일 이내) 걸쳐 표착하는 것으로 나타났다. Oh and Kim[2014]은 2009년 대상으로 공간해상도 1/12°인 HYCOM 모델에 입자추적 기법을 적용하여 서해에서 해양쓰레기의 거동을 모의하였다. 12월과 1월에 겨울철 발해만

이북에서 출발한 입자는 200일 뒤에 우리나라에 표착하였으나, 본 연구 투하 정점과 유사한 위치에서 출발한 입자는 표착하지 않는 것으로 나타났다. Fig. 8a는 본 연구에서 부이들의 이동 시기와 경로가 가장 유사한 결과를 보여준다. 2014년 12월에 산둥반도 인근에서 투하한 입자들은 4월 중순 이후 제주도 지역으로 유입되었다(Lee[2017]). 그러나 실제 관측에서는 2월 말에 제주도 서쪽 해역에서 벗어났다(Fig. 8b). 출발시점에서 수치모델과 위성추적부이가 제주도 인근 해역까지 남하하는 시기는 30일 이상 차이를 보인다. 이 결과는 수치모델의 신뢰성을 확보하기 위해 실측자료와 비교·검증을 통해 수치모델의 개선이 필요하다는 것을 시사한다.

본 연구는 투하한 부이의 개수는 부족하였지만, 중국기인 부이의 이동 경로를 파악할 수 있는 실측자료를 확보했다는 것에 의미가 있다. 그러나 4개의 부이와 1회 실험을 통해 매년 겨울철 서해로

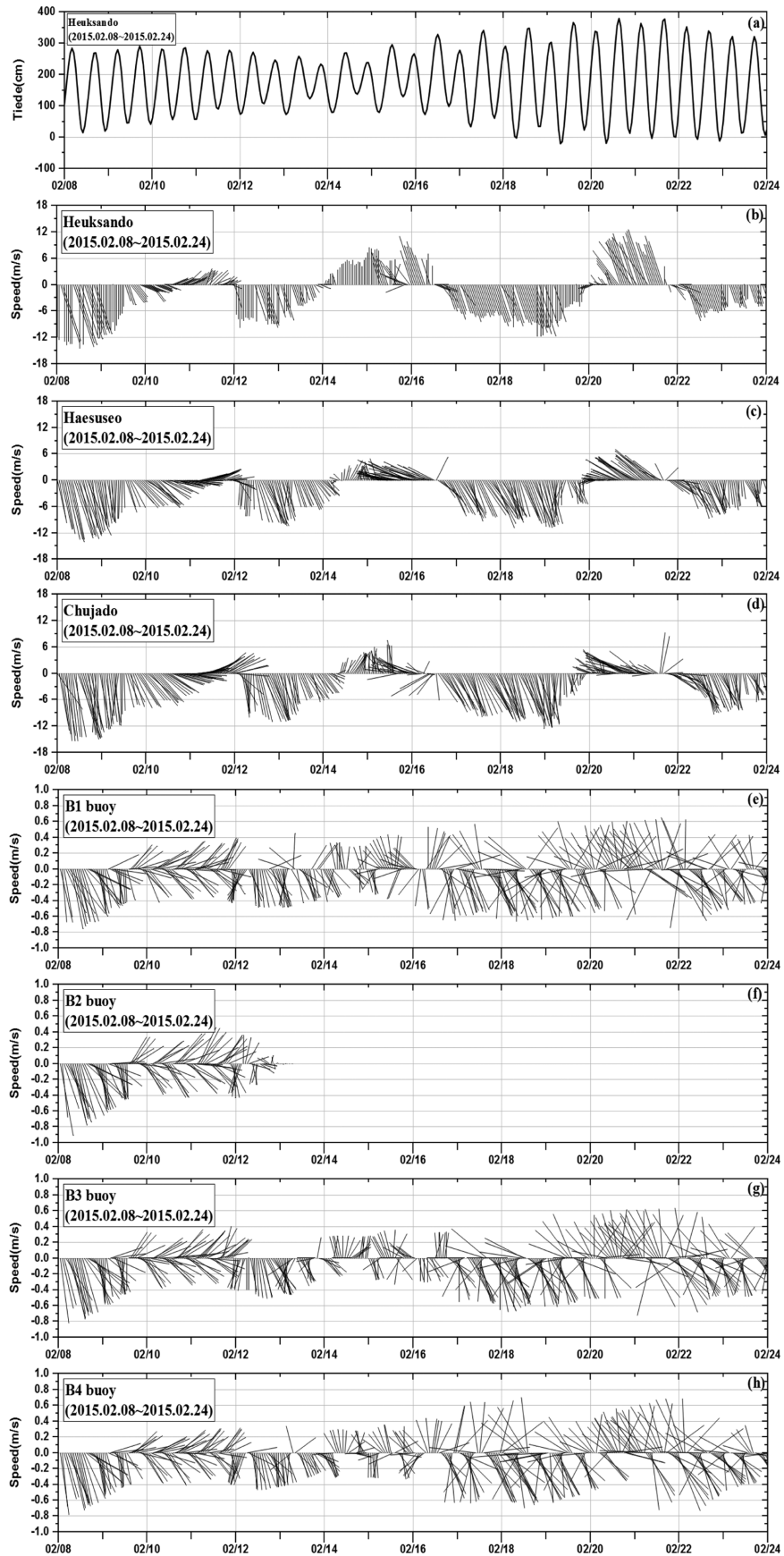


Fig. 6. Tide (a), Wind stick diagram (b~d), Buoy stick diagram (f~h) at Feb. 8~24, 2015.

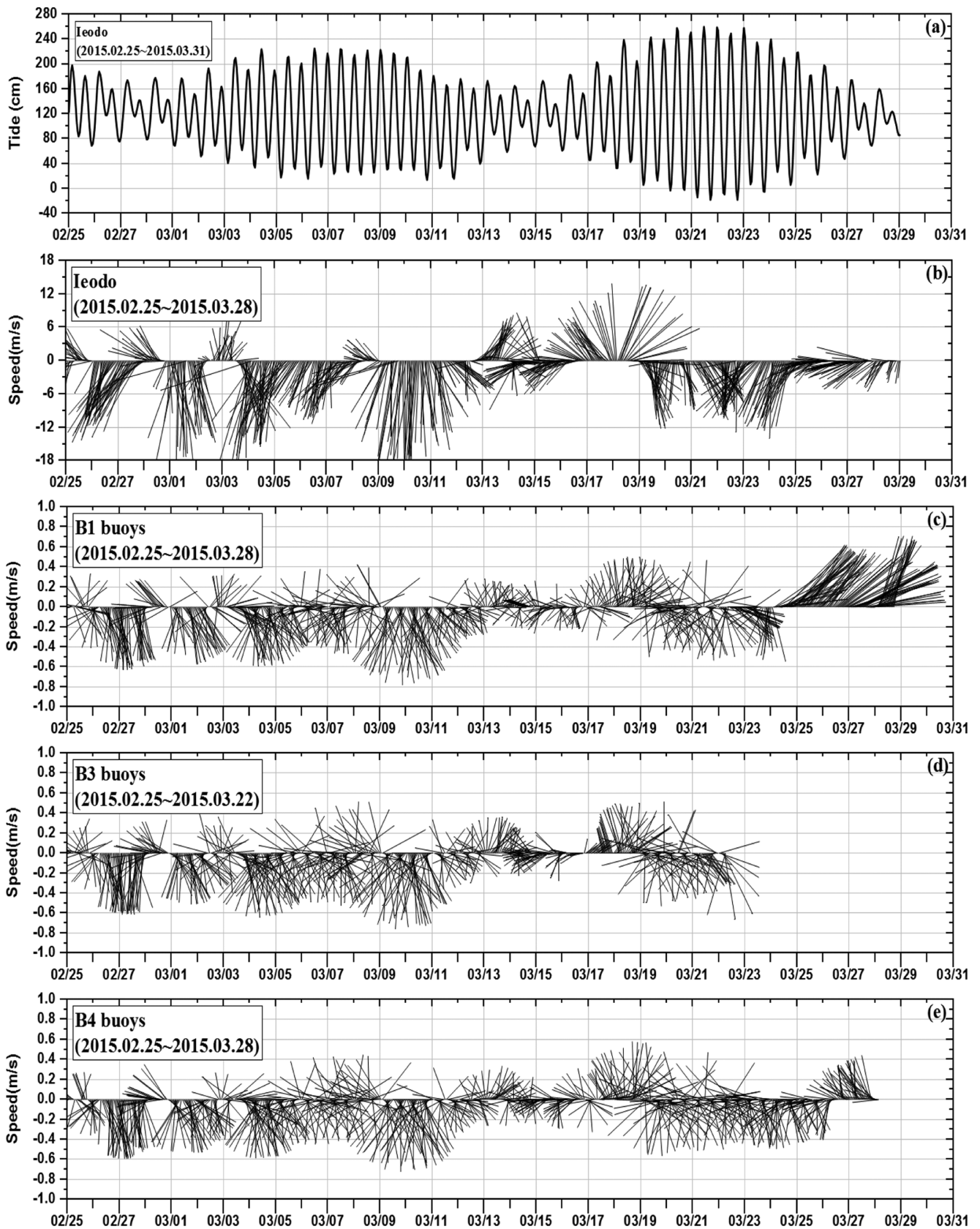


Fig. 7. Tide (a), Wind stick diagram (b), Buoy stick diagram (c~e) at Feb. 25~Mar. 28, 2015(d).

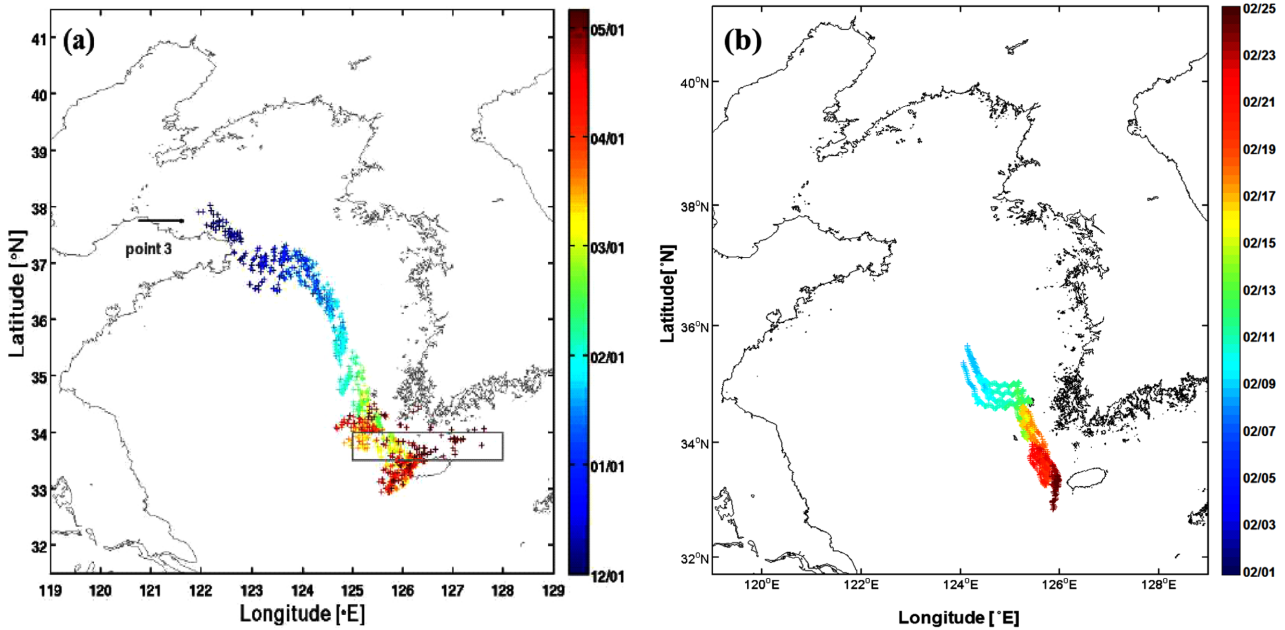


Fig. 8. (a) Trajectories of particles using numerical experiment (Lee[2017]). (b) Trajectories of satellite tracked buoys at west sea. Markers mean time at each location.

유입된 해양쓰레기의 거동 특성을 대표할 수 없다는 분명한 한계가 있다. Lee[2017]는 서해 북서풍의 강도에 따라 갯벌이모자반의 연간 유입량이 다를 수 있음을 수치모델을 활용하여 밝혀냈다. 이는 겨울철 북서풍의 강도에 따라 우리나라에 유입되는 외국기인 해양쓰레기의 발생량의 차이가 존재 한다는 것으로도 볼 수 있다. 부이 표착한 흑산도 모니터링 결과에서도 기원지가 중국 남동부 지역에 위치한 저장성과 푸젠성으로 알려져 있는 파란색 부이가 표착되어 있었다. 이 부이는 쿠로시오 해류의 영향으로 주로 여름철에 유입되는 것으로 알려져 있다(MLTM and KOEM[2012]). 이 결과는 국내에 유입되는 외국기인 해양쓰레기는 한 가지 기원과 경로가 아닌 다양한 곳에서 유입될 수 있음을 보여준다. 따라서 향후 계절에 따라 투하 지점을 확대하여 지속적인 연구가 수행된다면, 외국기인 해양쓰레기의 국가 간 이동의 심각성과 관리 대책 마련에 명확하고 객관적인 근거자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구는 실시간 위성추적부이를 활용한 이동 경로 추적 시험과 해양기상자료를 비교하여 겨울철 서해에 유입된 외국기인 해양쓰레기의 거동 특성을 파악하고자 하였다. 2015년 겨울철을 대상으로 이동 추적 시험을 수행한 결과 서해 해역 일대에서 바람에 의한 해수 표층 흐름이 외국기인 해양쓰레기의 이동에 지배적이었으며, 그 세기에 따라 이동 경로에 미치는 외력이 상이한 것으로 나타났다. 그리고 동중국해 해역에서는 남하하던 해양쓰레기가 쿠로시오 해류를 만나게 되면 바람 방향과 반대 방향으로 이동하는 궤적을 나타냈으며 이는 동중국해에서 해류의 영향이 해양쓰레기 이동에

크게 작용하고 있음을 확인 할 수 있었다. 그 동안 국가 간 해양쓰레기의 관리는 모니터링에 의존하여 현존량과 분포 파악에 한정되어 있었으며, 구체적인 유입 경로에 대한 관측 자료가 매우 부족하였다. 향후 본 연구 결과는 국가 간 해양쓰레기 이동에 대책 마련을 위한 객관적인 자료로 활용할 수 있을 것이다. 또한 서해와 동중국해 해역을 대상으로 구축된 3차원 입자추적모델에서 해양쓰레기를 포함한 오염물질의 이동과 확산 범위 예측에 관한 연구들에 검증 자료로도 활용이 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2019년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2019048)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Aliani, S., Griffa, A., Molcard, A., 2003, Floating debris in the Ligurian Sea, north-western Mediterranean, Mar. Pollut. Bull, 46, 1142-1149.
- [2] Bai, M., Zhu, L., An, L., Peng, G., Li, D., 2018, Estimation and prediction of plastic waste annual input into the sea from China, Acta. Oceanol. Sin, 37(11), 26-39.
- [3] Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M., 2009, Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments, Philos. Trans. R. Soc, 364, 1985-1998.
- [4] Derraik, J.G.B., 2002, The pollution of marine environment by plastic debris: a review, Mar. Pollut. Bull, 44, 842-852.

- [5] Golik A., Gertner Y., 1992, Litter on the Israeli coastline, *Mar. Environ. Res.*, 33, 1-15.
- [6] Han Hae Kwang, 2013, Distribution and origin of foreign derived ocean floating wastes on the Chonnam coast, Korea, M.S. thesis, Dept. Environ. Oceanogr., Chonnam Nat'l. Univ., Yeosu, Korea.
- [7] Hwang, E.K., Lee, S.J., Ha, D.S., Park, C.S., 2016, Sargassum Golden Tides in the Shinan-gun and Jeju Island, Korea, *Korean J. Fish. Aquat. Sci.*, 49(5), 689-693.
- [8] Iwasaki, S., Isobe, A., Kako, S., Uchida, K., & Tokai, T.M., 2017, Fate of microplastics and mesoplastics carried by surface currents and wind waves: A numerical model approach in the Sea of Japan, *Mar. Pollut. Bull.*, 121(1-2), 85-96.
- [9] Isobe, A., Kako, S., Chang, P.H., Matsuno, T., 2009, Two-way particle tracking model for specifying sources of drifting objects: application to the East China Sea shelf, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 26, 1059-1064.
- [10] Jambeck, J. R., Andrady, A., Geyer, R., Narayan, R., Perryman, M., Siegler, T., Wilcox, C., Lavender Law, K., 2015, Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347(6223), pp. 768-771.
- [11] Jang, S.W., Oh, S.Y., Kim, D.H. and Yoon, H.J., 2011, A Study on the Characteristics of Marine Debris in Coastline : Daekwang Beach in Imja Island, Jeollanam-Do, Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 17(2), 123-129.
- [12] Jang, S.W., Park, J.M., Chung, Y.H., Kim D.H. and Yoon H.J., 2012, A Study on the Inflow and Seasonal Characteristics of Foreign Marine Debris in the Coastal Area of the West Sea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 15(2), 88-100.
- [13] Jang, S.W., Yoon, H.J. and Seo W.C., 2015, Analysis of the estuary outflow characteristics of floating debris in the downstream of Nakdong River using satellite location tracking buoys, *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, 10(2), 157-164.
- [14] Kako, S., Isobe A., Yoshioka, S., Chang, P. H., Matsuno, T., Kim, S. H. and Lee, J. S., 2010a, Technical issues in modeling surface-drifter behavior on the East China Sea shelf, *J. Oceanogr.*, 66(2), 161-174.
- [15] Kako, S., Isobe, A., Seino, S. and Kojima, A., 2010b, Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data, *J. Oceanogr.*, 66, 291-267.
- [16] Kim, K.S., Kim, D.M. and Park, C.K., 1999, A rough Estimation of Environmental Capacity in the Yellow sea using a Numerical Hydrodynamic Model, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 2(1), 63-73.
- [17] Kubota, M., Takayama, K., Namimoto, D., 2005, Pleading for the use of biodegradable polymers in favor of marine environments and to avoid an asbestos-like problem for the future, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 67(4), 469-476.
- [18] Lee, J.C., Kim, C.S., Jung, K.T. and Jun, K.C., 2003, On the Wintertime Wind-driven Circulation in the Yellow Sea and the East China Sea : Part 1. Effect of Tide-induced Bottom Friction, *Ocean and Polar Research*, 25(3S), 361-371.
- [19] Lee, J.M., Jang, Y.C., Hong S.W. and Choi, H.W., 2012, Features of Foreign Marine Debris on the Dune Beach of U-i Island, Korea, *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 18(2), 167-174.
- [20] Lee Seung Yong, 2017, Analysis of the physical factors affecting the inflow of Sargassum horneri into adjacent seas of Jeju Island using particle tracking experiment, M.S. thesis, Interdisciplinary Program in Marine Meteorology., of Jeju Nat'l. Univ., Jeju, Korea.
- [21] Liu, J., Wen, J., Huang, Y., Shi, M.; Meng, Q., Ding, J. and Xu, H., 2013, Human settlement and regional development in the context of climate change: a spatial analysis of low elevation coastal zones in China. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang*, 20(4), 1-20.
- [22] Maximenko, N., Hafner, N. and Niiler, J., 2012, Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters, *Mar. Pollut. Bull.*, 65, 151-162.
- [23] MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2011, A Study on the Precision Monitoring of Foreign Marine Debris.
- [24] MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2012, A Study on the Development of Numerical Modeling Technique for the Movement of Foreign Marine Debris.
- [25] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2017, National Coastal litter Monitoring and Simultaneous Investigation Promotion Service.
- [26] Moon, J.H., Hirose, N., Yoon, J.H., 2009, Comparison of wind and tidal contributions to seasonal circulation of the Yellow Sea, *J. Geophys. Res.*, 114, C08016, doi:10.1029/2009JC005314.
- [27] Oh, H.M. and Ha, G.J., 2005, Analysis of Marine Meteorological Characteristics at Ieodo Ocean Research Station from 2003 to 2004, *J. Meteorol. Soc.*, 41(5), 671-680.
- [28] Oh, N.S. and Kim, G.W., 2014, Modeling of Marine Litter Drift in Yellow Sea Using HYCOM, *Journal of Korean Society of Coastal Disaster Prevention*, 1(2), 55-64.
- [29] Poulain, P.M., Gerin, R. and Mauri, E., 2009, Wind effects on drogued and undrogued drifter in the eastern Mediterranean, *J. Atmos. Ocean Tech.* 26(6), 1144-1156.
- [30] Ribic, C.A., Sheavly, S.B., Rugg, D.J. and Erdmann, E.S., 2012, Trends in marine debris along the U.S. Pacific Coast and Hawai'i 1998-2007, *Mar. Pollut. Bull.*, 64, 994-1004.
- [31] Riedlinger, S.K. and Jacobs, G.A., 2000, Study of the dynamics of wind-driven transports into the Yellow Sea during winter, *J. Geophys. Res.* 105(C12), 28,695-28,708.
- [32] Ryan, P.G., Moore, C.J., van Franeker, J.A. and Moloney, C.L., 2009, Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment, *Phil. Trans. R. Soc. B*, 364, 1999-2012.
- [33] Schulza, M., Neumanna, Fleet, D.M. and Matthiesa, M., 2013, A multi-criteria evaluation system for marine litter pollution based on statistical analyses of OSPAR beach litter monitoring time series, *Mar. Environ. Res.*, 92, 61-70.

- [34] Seung, Y.H., Yoon, J.H. and Lim, E.P., 2012, Evidences of Intermittent Wind-Induced Flow in the Yellow Sea obtained from AVHRR SST Data, *Ocean and Polar Research*, 34(4), 395-401.
- [35] Suh, S.W., 1999, Tidal Hydrodynamic Analysis for the Yellow Sea and East china Sea by Using a Three Dimensional Finite Element Model, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 19(II-3), 375-387.
- [36] Strafella, P., Fabia, G., Spagnoloa, A., Gratia, F., Polidoria, P., Punzoa, E., Fortibuonib, T., Marcetac, B., Raicevichb, S., Cvitkovicd, I., Despalatovicd, M. and Scarcellaa, G., 2015, Spatial pattern and weight of seabed marine litter in the northern and central Adriatic Sea, *Mar. Pollut. Bull*, 91, 120-127.
- [37] Teague, W.T. and Jacobs, G. A., 2000, Current observations on the development of the Yellow sea Warm Current, *J. Geophys. Res.* 105(C2), 3401-3411.
- [38] UNEP, 2014, *Valuing Plastics : The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry*, pp.115.
- [39] van Sebille, E., England M. and Froyland, G., 2012, Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett*, 7, 1-6.
- [40] Yoon, J.H., Kawano, S. and Igawa, S., 2010, Modeling of marine litter drift and beaching in the Japan Sea, *Mar. Pollut. Bull*, 60, 448-463.

Received 14 May 2019

1st Revised 23 July 2019, 2nd Revised 24 September 2019

Accepted 12 November 2019