

Notes

https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.3.429
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

SARAL/Altika 해표면 고도 위성에 의한 동해 북부 연안 해류

이동규^{1*} · 최장근²¹부산대학교 자연과학대학 해양학과, ²뉴 햄프셔 대학교 해양과학 및 해양공학 대학

Observation of Along-shore Current in the Northern East Sea by SARAL/AltiKa Sea Level Data

DONG-KYU LEE^{1*} AND JANG-GEUN CHOI²¹Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea²School of marine science and ocean engineering, University of New Hampshire, Durham, NH 03824, USA

*Corresponding author: dglee@pnu.edu

Editor Jong Jin Park

Received 9 July 2019; Revised 16 July 2019; Accepted 18 July 2019

ABSTRACT

연안에서 해표면고도를 정확하게 측정하도록 특별히 설계된 SARAL/Altika위성에 의해 관측된 해류를 비교 검증하기 위해 2015년 3월부터 2년간 위성추적 뜰개가 동해 북부 해상에 투하되었다. 해표면 고도 측정 위치에서 반경 20 km 이내에 위치한 뜰개(30분 간격으로 GPS로 위치 관측)와 비교한 결과, 수심 200 m 보다 얕은 해역에서 외해와 유사하게 높은 상관관계를 가진 것으로 나타나, 해류의 직접 관측이 어려운 동해 북부의 연안류의 시간 변동을 관측할 수 있게 되었다. 리만 해류는 일년 내내 시베리아 연안을 따라 남하하는 해류로 관측되었으며, 북한 한류는 여름철에만 남향하는 해류를 보였다. 북한 한류는 무수단곶 이남에서는 주로 남향류를, 무수단곶 이북에서는 무수단곶 근해에서의 에디 존재 유무에 의해 방향이 결정되는 것으로 연구되었다.

The drifters of the Global Drifter Program were deployed in the northern East Sea for two years from March 2015 to compare and validate currents estimated from sea-level measurements with the SARAL/AltiKa altimetry satellite mission, specially designed to accurately measure sea level in the near-coastal area. The collocated (less than 20 km apart) directly measured current from GPS locations every 30 minutes and the currents normal to the satellite tracks show a similar correlation in the area shallower than 200 m depth as the open ocean and it makes it possible to investigate the time variations of the current along the coast in the northern East sea, where direct observations of current are scarce. The Liman Current along the Siberian coast is found to be southward all year round, but the North Korean Cold Current flows southward only in the summer. The North Korean Cold Current south of the Musudan cape mostly flows to the south, but the current direction depends on the presence of an eddy around the coast of Musudan cape.

Keywords: Liman current, SARAL/AltiKa, North Korean cold current

1. 서론

SARAL (Satellite with ARGOS and ALtiKa)은 2013년 4월부터 Indian Space Research Organization (ISRO)과 프랑스 Center National d'Etudes Spatiales (CNES)에 의해 공동으로 운영되는 해표면 고도 측정 위성이다. 2015년 3월에 발생한 위성 제어 장치 고장으로 2016년 7월부터는 35일 반복 주기(repeat cycle)가 변동하는 상태로 운영되고 있으나 측정 정확도에는 변동이 없다. 탑재된 AltiKa (Ka-band Altimeter)는 전파 주사 반경이 8 km로서 기존 해표면 고도 측정기에 비해 2배 이상으로 작아 육지로부터의 반사파에 의해 발생하는 오차를 줄일 수 있도록(Raney and Phalippou, 2011) 설계되어, 특히 연안 해역에서 정확도를 높인 측정기이다. 외양에서의 측정 오차는 4 cm 이하로(Verron *et al.*, 2015) 연구 되었으나, 연근해에서의

비교 연구는 현재까지 지중해 연안에서 주로 이루어졌다(Birol and Niño, 2016; Pascual *et al.*, 2015; Troupin *et al.*, 2015). 그리고 Durand *et al.*(2017)에 의해 East Caledonian 해류가 통과하는 남서태평양 연근해에서 직접 관측된 해류와의 비교 연구가 발표되었으나, 연근해에서의 비교 연구는 현재까지 매우 적은 편이다.

타타르 해협에서 블라디보스톡까지의 러시아 연안에서는 겨울철에 결빙되었던 해수가 봄-여름철에 해빙되면서 연안을 따라 저염수가 형성되며 이에 의해 남향하는 리만 해류가 형성된다고 연구되었으나(Martin and Kawase, 1998; Park *et al.*, 2016) 겨울철에는 어떤 흐름이 있는지에 대한 관측은 아직 보고되지 않고 있다. 북한 연안을 따라 흐르는 북한 한류는 위성 추적 뜰개에 의해 여름철에만 남향하는 해류로 관측되었고(Lee and Niiler, 2005), 겨울철에는 북쪽 방향의 흐름이 Yoon *et al.*(2005)에 의해 보고되었다. 그러나 Kim and Yoon(2010) 등에 의한 수치 모델은 계절에 따라 크기는 변동을 하여도 방향은 항상 남향으로 나타났다. 본 논문에서는 위성 추적 뜰개를 통해 북부 해상에 투입, 30분 간격으로 해류를 직접 관측하여 SARAL/AltiKa(이후부터 SARAL로 표시)에 의해 관측된 해류를 비교 검증하였고, 동해 북부 해역에서 SARAL에 의해 관측된 해류를 이용하여 지금까지 직접 관측된 일이 거의 없는 연안류의 겨울철 흐름을 밝혀 Liman 해류와 북한 한류의 계절 변동을 연구하였다.

2. 자료 및 방법

SARAL 위성 궤도(Fig. 1) 상의 해표면 고도 자료를 Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS: <http://marine.copernicus.eu/>)에서 내려 받아 궤도 방향에 수직 방향 성분의 지형류를 계산하였다. AVISO-SSALTO/DUACS에 의해 경위도 0.25° 간격의 격자에서 모든 해표면 고도 측정 위성 자료를 혼합하여 계산된 지형류 정보도 CMEMS에서 내려 받아 뜰개 및 SARAL에 의해 관측된 해류와 비교하였다. 해표면 수온(SST) 자료는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)에서 제공하는 4 km × 4 km 격자에서의 자료를 사용하였다. 북한 연안에서 겨울철에 북쪽으로 흐르는 해류를 보기 위해 사용된 뜰개의 궤적은 Lee and Niiler(2005)와 Yoon *et al.*(2005)에 의해 발표된 자료로부터 취득하였다.

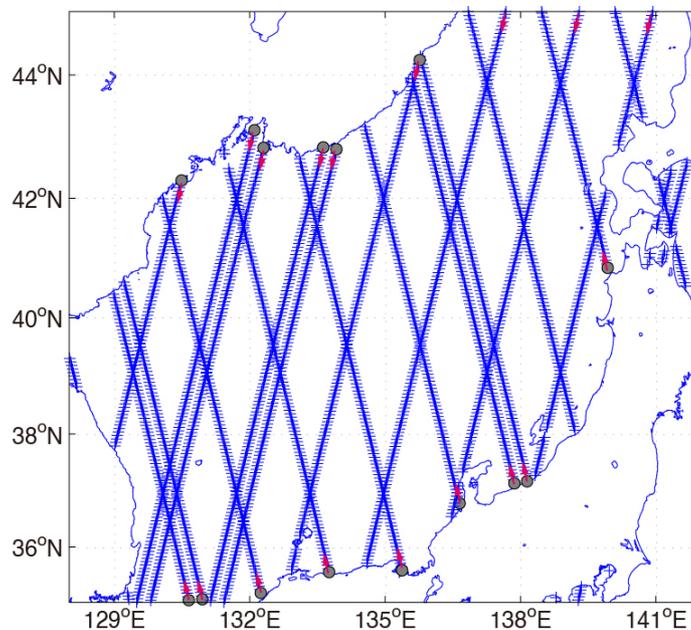


Fig. 1. The SARAL/AltiKa ground tracks in the East Sea. The starting locations and directions of satellite movements are indicated with circles and red arrows, respectively.

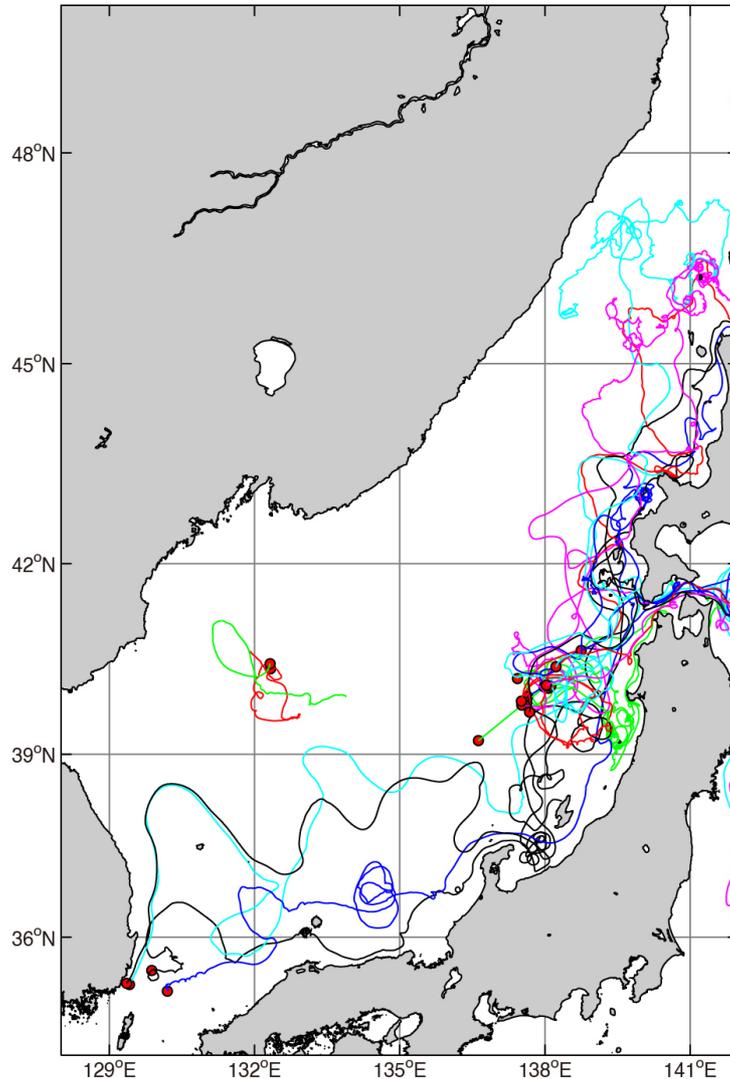


Fig. 2. Drifter trajectories used for comparison with the currents estimated from the satellite sea level.

위성 추적 뜰개는 15 m 깊이의 해류를 관측하게 설계된 Global Drifter Program (GDP)의 표준 뜰개이며, Global Positioning System (GPS)를 이용하여 30분 간격으로 관측된 위치로부터 해류를 추정하였다. 본 연구에 사용된 뜰개는 2015년 3월부터 2017년 5월까지의 화물선에서 동해 북부에 2개월 간격으로 2기씩 투하한 자료와 부산 근해에서 투하한 4기(총 24기)의 자료이며 뜰개의 궤적을 Fig. 2에 도시하였다. 관성 주기 운동을 제거하기 위해 Low-pass filter를 사용하여 주기 1일 이하의 운동을 각 뜰개의 속도 성분 별로 제거하였다.

3. 결 과

3.1 SARAL/Altika에 의한 해류와 실측 해류와의 상관관계

뜰개로 관측된 해류와 SARAL 위성 궤도에 수직 방향인 해류 성분과 비교하기 위해 뜰개 위치로부터 20 km 반경 내, 뜰개에 의한 해류 관측 시간 전 후 3시간 내의 해표면 고도 자료를 찾아내어 비교한 결과를 수심 200 m 이하의 연안 해역과 이상의

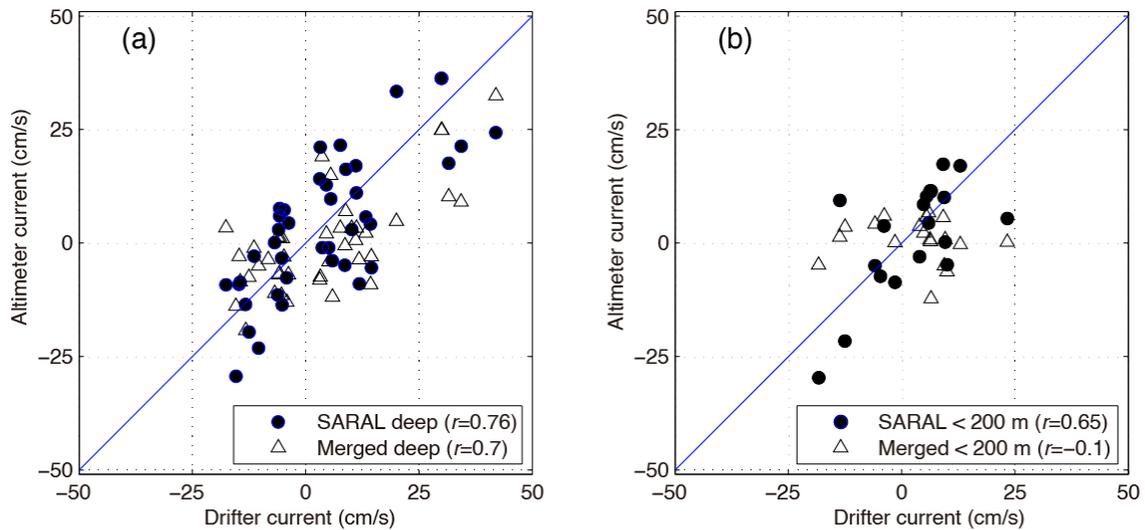


Fig. 3. Scatter plots of the current estimates with drifter measured current versus AltiKa and merged multi-mission sea level for (a) in the area deeper than 200 m depth and (b) in the area shallower than 200 m depth. The correlation coefficients (r) are also indicated in the figure legend.

해역으로 나누어 Fig. 3에 나타내었다. 위성 궤도에 수직 방향 해류 성분만을 비교한 이유는 SARAL 위성의 반복 주기가 길고 궤도 간격이 넓어 궤도에 수직인 방향의 지형류만 비교가 가능하기 때문이다. 수심 200 m 이상의 해역에서 SARAL에 의한 해류와 실측 해류와의 상관계수는 0.76으로 병합 다중 미션(Merged Multi Mission) 해표면 고도에 의한 상관계수 0.7보다 약간 높았다. 그러나 수심 200 m 이하의 연안 해역에서 SARAL에 의해 추정된 해류는 실측된 해류와 상관계수 0.65로 상관관계가 높았으나 병합 다중 미션에 의해 추정된 해류는 실측된 해류와 상관관계가 거의 없는(-0.1) 관계를 가진 것으로 나타났다. 연안에서 SARAL에 의해 추정된 해류와 뜰개에 의해 실측된 해류와의 RMS 오차가 약 9.3 cm/s로 외해보다는 크나, 해류 방향은 거의 같게 나타나 동해의 연안 해류의 시간 변동 연구에 충분히 사용될 수 있는 자료인 것으로 나타났다.

3.2 동해 북부 연안 해류의 계절 변동

동해 북부의 5 곳의 연안 해역에서 SARAL에 의해 관측된 위성 궤도에 수직방향 성분의 해류를 여름철(4월에서 10월까지)에는 적색, 겨울철(11월에서 3월까지)에는 청색 화살표로 분리하여 Fig. 4에 도시하였다. 관측 위치는 육지의 영향을 최소화하기 위해 바다로부터 육지로 진행되는 위성 궤도상의 위치만 선택하였다. 여름과 겨울의 구분은 Lee and Niiler(2005)에 의한 뜰개 자료로부터 추정하여 정하였다. 시베리아 연안에서 블라디보스톡 동쪽 연안까지는(관측점 3, 4, 5) 연 중 연안을 따라 남하하는 해류로 나타나 리만 해류는 기존 연구에서 추정된 바와 같이 계절 변동이 거의 없이 남하하는 해류로 확인되었다. 관측점 2에서는 여름에는 10 cm/s 정도의 남향류가 대체적으로 관측되었고 겨울철에는 10 cm/s 보다 약한 북향류가 관측되었다. 그러나 Lee and Niiler(2005)에 의한 뜰개 궤적에 나타난 바와 같이 여름철에는 연안을 따라 남향의 연안류가 잘 형성되나, Fig. 5에 도시된 뜰개 궤적에 나타난 바와 같이 겨울철에는 평균적으로는 북쪽의 흐름이나 에디 등에 의해 관측 시기와 위치에 따라 복잡한 양상을 가진 해류 특성을 보인다. 에디와 함께 나타나는 북향류는 Fig. 6a에 도시된 SST 분포에도 잘 나타난다.

그러나 무수단 곳(Fig. 4에 위치 표시)의 남쪽 연안인 관측점 1에서는 계절 변동 없이 주로 남향류가 관측되어 계절 변동이 크지 않은 남향류로 관측되었다. 그러나 여름철에 몇 번의 북향류가 관측되어 해안선의 방향이 남향에서 남동 방향으로 바뀌므로 인한 영향으로 북향류가 형성된 것으로 보인다. 이러한 해류 양상은 Fig. 6b에 나타난 SST 분포에서도 한류가 해안선의

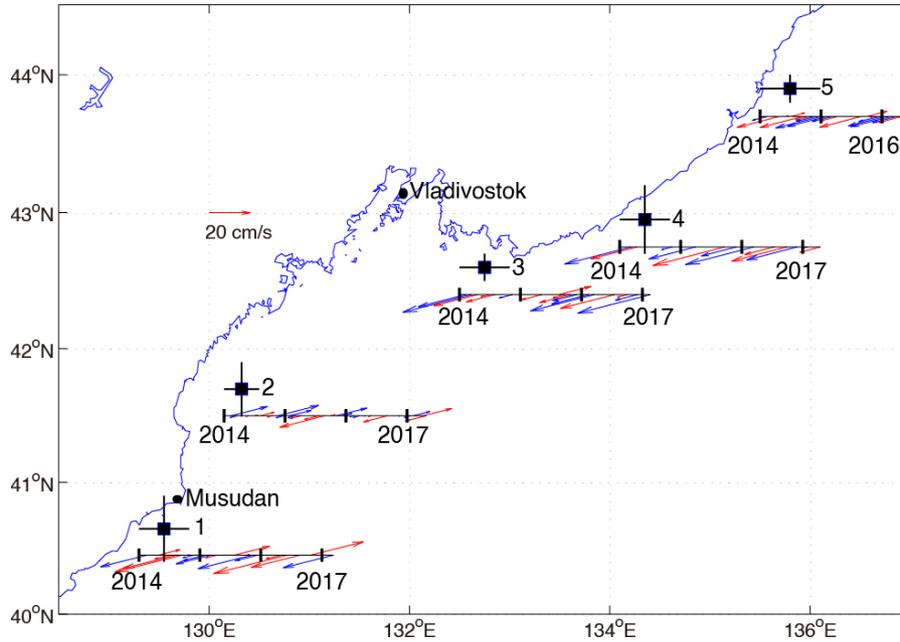


Fig. 4. The currents estimated from the SARAL/AltiKa sea levels at five locations along the coast in winter (from November to March, blue arrows) and in summer (from April to October, red arrows). The latitudinal and longitudinal bars of the numbered locations represent the averaging area.

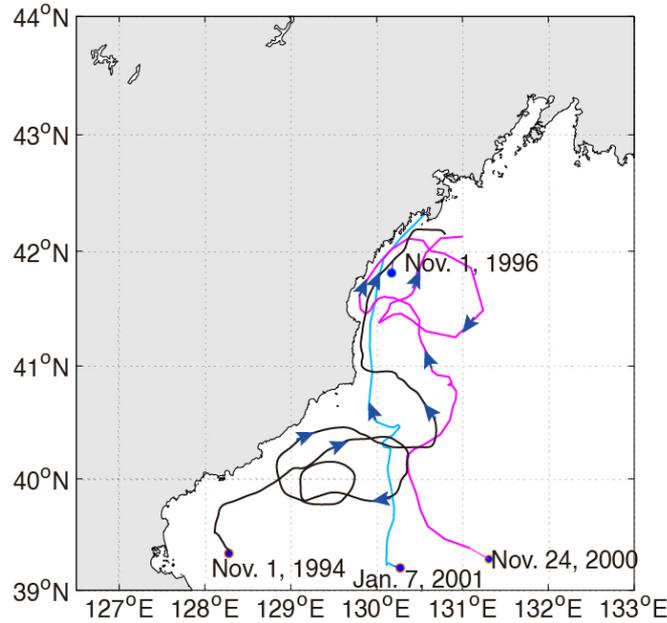


Fig. 5. Four drifter trajectories that show the northward flow in the winter. The starting positions are indicated by black circles.

영향으로 연안을 따라 남하하는 것이 아니라 외해로 바로 남하하는 형태를 잘 보여준다. 이러한 에디에 의해 방향이 변동하는 해류 양상은 해안선 방향이 바뀌는 지역(무수단 곳)으로부터 반경 약 150 km 범위의 연안 해역에서 에디 에너지가 큰 해역으로 뜰개에 의해서도 에디 에너지가 크게 관측되었다(Lee and Niiler, 2005).

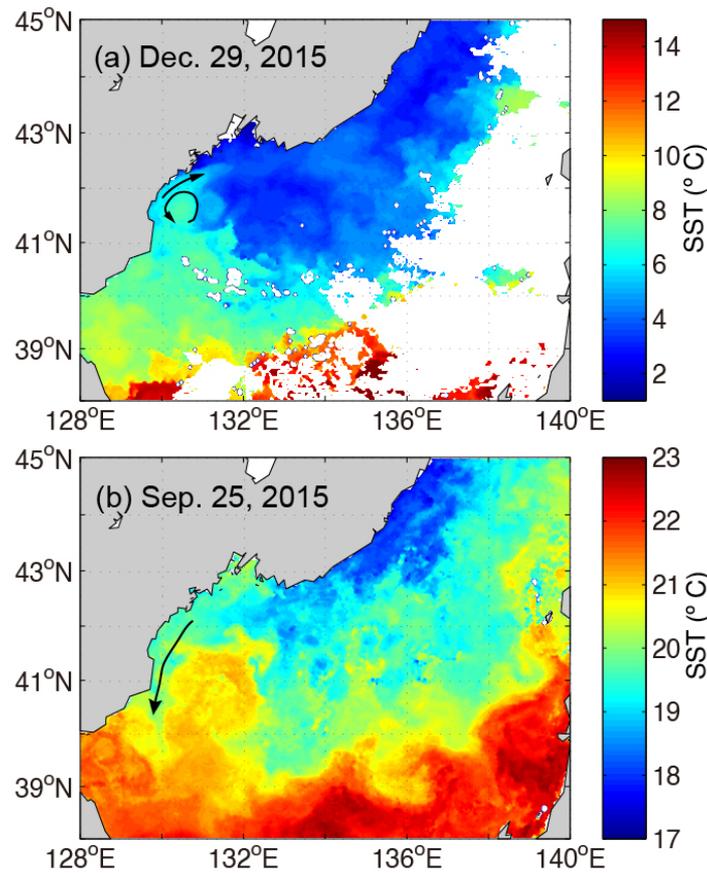


Fig. 6. Daily images of Sea Surface Temperature (SST) from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite (a) on Dec. 29, 2015 and (b) on Sep. 25, 2015. The black arrows indicate the current and eddy deduced from SST distributions.

4. 요약 및 토의

연안 해역에서 해표면 고도의 정확도가 높게 설계된 SARAL로 관측된 해류와 GPS에 의한 위치 정밀 측정 및 30분의 짧은 관측 간격으로 직접 관측한 해류를 수심 200 m 이상의 해역과 이하의 해역으로 나누어 비교하였다. 외해에서는 SARAL로 관측된 해류나 병합 다중 미션에 의해 추정된 해류가 실측된 해류와 유사한 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 연안에서는 병합 다중 미션에 의해 추정된 해류와 실측 해류가 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났으나, SARAL에 의해 추정된 해류는 실측 해류와 높은 상관 관계를 가진 것으로 밝혀졌다. 이에 SARAL에 의해 관측된 해표면 고도로 추정된 해류로, 특히 겨울철에 실측된 해류가 거의 없는 해역인 동해 북부 연안 해역의 해류를 연구하였다. 시베리아 해안을 따라 남하하는 리만 해류는 방향의 계절 변동 없이 연중 남하하는 해류로 나타났다. 북한 한류는 Lee and Niiler(2005)에 의해 관측된 자료와 유사하게 여름철에만 남하하나, 무수단 곳의 북쪽 연안에서만 겨울철에 북향류가 관측되었다. 무수단 남쪽 연안에서는 해안선의 영향으로 평균적으로는 남하하는 남향류이나 에디에 의한 영향에 따라 해류의 변동성이 큰 해역으로 나타났다. 위에 기술한 바와 같이 SARAL에 의한 해류 관측으로 동해 북부 해역의 연안류에 대한 시간 변동 등을 본 연구에서 처음으로 보일 수 있었다. 그러나 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 위성의 궤도가 남한 연안의 해류를 관측하기에는 적당하지 않게 되어있어 동해 연안류의 시간 변동성 등을 모니터링 하기 위해서는 다중 주파수 고주파 레이더(Multi-frequency HF radar)에 의해 발산되는 전파를 한 곳에서 5개 이상의 안테나 어레이(array)로 수신하는 시스템(Zhao *et al.*, 2018) 등을 이용해보는 것을 제안해 본다.

사 사

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌(References)

- Birol, F. and F. Niño, 2016. Ku- and Ka-band Altimeter Data in the Northwestern Mediterranean Sea: Impact on the Observation of the Coastal Ocean Variability. *Marine Geodesy*, **38**: 313-327. DOI:10.1080/01490419.2015.1034814.
- Durand, F., M. Frédéric, F. Jean-Luc and T. Thierry, 2017. The East Caledonian Current: A case example for the intercomparison between AltiKa and in situ measurements in a boundary current, *Mar. Geod.*, **40**(1): 1-22. DOI:10.1080/01490419.2016.1258375.
- Kim, T. and J.-H. Yoon, 2010. Seasonal variation of upper layer circulation in the northern part of the East/Japan Sea. *Cont. Shelf Res.*, **30**: 1283-1301. DOI:10.1016/j.csr.2010.04.006.
- Lee, D.K. and P.P. Niiler, 2005. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea. *Deep Sea Res Pt II*, **52**: 1547-1563. DOI:10.1016/j.dsr2.2003.08.008.
- Martin, S. and M. Kawase, 1998. The southern flux of sea ice in the Tatarskiy Strait, Japan Sea and the generation of the Liman Current. *J Mar Res.*, **56**: 141-155. DOI:10.1357/002224098321836145.
- Park, J.H., K.I. Chang and S.H. Nam, 2016. Summertime coastal current reversal opposing offshore forcing and local wind near the middle east coast of Korea: observation and dynamics. *Geophys Res Lett*, **43**: 7097-7105. DOI:10.1117/12.864875.
- Pascual, A., A. Lana, C. Troupin, S. Ruiz, Y. Faugère, R. Escudier and J. Tintoré, 2015. Assessing SARAL/AltiKa delayed-time data in the coastal zone: comparisons with HF radar observations. *Mar. Geod.*, **38**: 260-276. DOI:10.1080/01490419.2015.1019656.
- Raney, R K. and L. Phalippou. 2011. The future of coastal altimetry. In *Coastal Altimetry*. Vignudelli, S., A. G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste (eds.), pp. 535-560. Berlin: Springer.
- Troupin, C., A. Pascual, G. Valladeau, I. Pujol, A. Lana, E. Heslop, S. Ruiz, M. Torner, N. Picot and J. Tintoré, 2015. Illustration of the emerging capabilities of SARAL/AltiKa in the coastal zone using a multi-platform approach. *Adv. Space Res.*, **55**(1): 51-59. DOI:10.1016/j.asr.2014.09.011.
- Verron, J., P. Sengenès, J. Lambin, J. Noubel, N. Steunou, A. Guillot and D.R. Murthy, 2015. The SARAL/AltiKa altimetry satellite mission. *Mar. Geod.*, **38**(1): 2-21. DOI:10.1080/01490419.2014.1000471.
- Yoon, J.-H., K. Abe, T. Ogata, Y. Wakamatsu, 2005. The effects of wind-stress curl on the Japan/East Sea circulation. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **52**: 1827-1844. DOI:10.1016/j.dsr2.2004.03.004.
- Zhao, C., Z. Chen, C. He, F. Xie, X. Chen and C. Mou, 2018. Validation of sensing ocean surface current using multi-frequency HF radar based on a circular receiving array. *Rem. Sens.*, **10**: 184. DOI:10.3390/rs10020184.