

독도 실시간 해양관측 부이에서 관측된 2009~2014년 동안 독도 주변 해역 수온, 염분의 월 변동성 - 해수 유동의 영향을 중심으로

김윤배 · 임세한[†]

한국해양과학기술원 동해연구소 울릉도·독도해양연구기지(연구원) ·

[†]해군사관학교(교수)

Monthly Variability of Sea Water Temperature and Salinity Observed at the Dokdo Real-time Ocean Buoy between 2009 and 2014 - Focus on the Advections of Sea Water

Yun-Bae KIM · Sehan LIM[†]

Ulleungdo-Dokdo Ocean Research Station, Korea Institute of Ocean Science and Technology(researcher) ·

[†]Republic of Korea Naval Academy(professor)

Abstract

Data from a moored buoy of the Dokdo Ocean Time-series site (DOT) were analyzed to improve understanding of the monthly variability of temperature and salinity around Dokdo between 2009 and 2014. The buoy was deployed 3.2 km off Dokdo at a depth of 140 m to measure meteorological and oceanographic data in real-time. The variability of temperature and salinity was closely related to current variability, with periods of 25-40 days from the path variability of the East Korean Warm Current, Ulleung Warm Eddy, and East Sea Intermediate Water inflow. The monthly mean temperature in the surface layer reached a minimum in March and maximum in August. The month with the monthly mean temperature maximum in each layer was delayed from August to November as the depth deepened. Subsurface water below a depth of 60 m reached a minimum mainly August because of the inflow of East Sea Intermediate Water. Between July and October, surface water became warmer and fresher with less than 33.5 because of the inflow of Tsushima surface water. The buoy at the DOT, called Dokdo Ocean Buoy, is one of the most useful observation approaches to observe the short and long term fluctuations around the Dokdo considering the frequent sea weather deterioration in the sea around the Dokdo.

Key words : Dokdo, East sea, Ocean buoy, Monthly variability, Temperature, Salinity

I. 서론

최근에 해양관측 장비 및 기술이 발달하면서 시·공간적으로 다양한 규모에서 일어나는 해양

환경을 장기적으로 모니터링하기 위하여 장기 시계열 관측이 활발하게 시도되고 있다. 장기 시계열 관측 중 부이를 이용한 고정형 무인해양관측은 비록 해양 환경의 공간적인 변동 특성 파악이

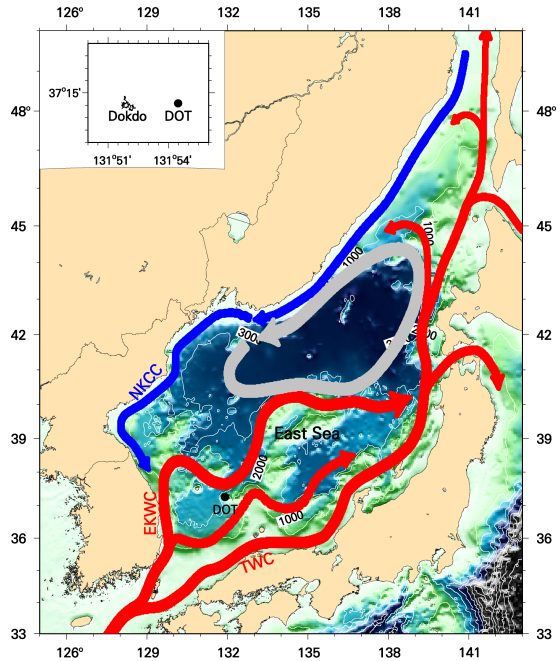
[†] Corresponding author : 055-907-5255, shlim@navy.ac.kr

※ 이 논문은 한국해양과학기술원 기본사업“한국 주변 해양생태계 변동 이해 및 대응 기반 연구(PE99813)” 및 해양수산부“독도의 지속가능한 이용 연구(PG51650)”과제의 지원을 받아 수행되었음.

제한적이지만, 수초 혹은 수분 이상의 조밀한 시간 간격으로 장기간 연속적인 자료를 얻는데 가장 유용한 관측방법이다(Nam et al., 2012). 대양의 경우, 대서양 버뮤다 인근의 BATS (Bermuda Atlantic Time-series Study) 일환의 BTM (Bermuda Testbed Mooring; 1994년 이후 지속 관측), 태평양 하와이 인근의 HOT (Hawaii Ocean Time-series) 일환의 WHOTS (WHOI-Hawaii Ocean Time-series Site, 2004년 이후 지속 관측) 등 대양에 위치한 섬을 기반으로 한 수 십 개의 해양 관측부이가 운용 중이다(Dickey et al., 2001; Lucks et al., 2001). 동해의 경우, 장기 시계열 관측 부이로서 동해시 동쪽 약 10 km 해상에 설치된 서울대학교 해양연구소의 ESROB (East Sea Real-time Ocean Buoy, 1999년 이래)(Nam et al., 2004), 독도 동쪽 3.2 km 해상에 설치된 한국해양과학기술원 독도 해양관측부이(2009년 이래) 등이 장기간 운용 중에 있다.

독도는 남·북한, 러시아, 일본에 둘러싸인 북서태평양의 연해인 동해의 남서부, 북위 37도 14분, 동경 131도 52분에 위치한 섬으로, 울릉도와 함께 독도 주변 해역은 동해의 난수역과 냉수역을 구분하는 극전선역에 위치하는 지리적 특성상 난류와 한류의 영향이 교차하면서 해황의 시·공간적 변화가 매우 심한 해역이다(Fig. 1). 독도 주변 해역 상층 해황변화는 동한난류 및 대마난류 외해지류 (Offshore Branch)의 경로 변화, 울릉난수성소용돌이 (Ulleung Warm Eddy)와 독도냉수성소용돌이 (Dok Cold Eddy)의 위치 변화 등에 의해 좌우되며, 약 20~50일 주기의 해황 변동이 우세한 것으로 연구되고 있다(Chang et al., 2002; Chang et al., 2004; Mitchell et al., 2005).

독도 주변해역의 상층 약 200 m 이내에 영향을 미치는 수괴는 크게 대마난류수와 동해중층수로 분류될 수 있다(Chang et al., 2002). 대한해협을 통해 동해로 유입되는 대마난류의 영향을 받는 대마난류수는 수온 10 °C 이상, 염분 34.3 이상의 특성을 갖는 해수로, 동해중층수는 동해 극



[Fig. 1] Bathymetry and schematic of warm and cold water circulation of the East Sea. The black circle implies Dokdo Ocean Time-series site(DOT) whose detailed location are shown in the inset (NKCC: North Korean Cold Current, EKWC: East Korean Warm Current, TWC: Tsushima Warm Current).

전선 북쪽에서 기원하는 수온 1~5 °C, 염분 34.06 미만의 범위를 보이며 비교적 높은 용존산소량을 갖는 해수로 정의되어 왔다(Kim et al., 2004). 비록 고온, 고염의 특성을 갖는 해수를 대마난류수로 흔히 정의하여 왔지만, 여름철을 중심으로 표층에 나타나는 약 33.8 미만의 저염수와 구분하기 위하여 약 34.3 이상의 고염수를 대마난류중층수 그리고 표층의 저염수를 대마난류표층수로 대마난류수를 세부적으로 분류하고 있기도 하다(Kim et al., 1983; Rho et al., 2010). 저염, 고온의 특성을 갖는 대마난류표층수는 양자강저염수 혹은 남해연안수의 영향을 받은 물이 제주해류 혹은 대마난류에 실려 동해로 유입된 것으로 고려되고 있다(Nof, 2001; Lie et al., 2003).

독도 실시간 해양관측 부이에서 관측된 2009~2014년 동안 독도 주변 해역 수온, 염분의 월 변동성 : 해수 유동의 영향을 중심으로

한편, 독도는 한반도 본토에서 최단 216.8 km, 울릉도에서 87.4 km 떨어져 있는 지리적 특성상 그리고 연간 풍랑특보 발령일이 약 69.5일 (동해 중부 먼바다 1999~2019년 평균) 정도로 해양기상 악화가 빈번하여 선박을 이용한 주변 해역의 해양관측이 매우 제한적으로 수행되어왔다. 특히, 11월~3월 등 겨울철에는 풍랑특보 발령일이 월 평균 6.6~11.2일 정도로 해양기상이 크게 악화되어 겨울철 독도 주변 해역 조사가 극히 제한적이었다(Kim and Kim, 2014). 비록 제한적이거나 국내 관련 기관에서 동해 정선해양관측의 일환으로 울릉도 주변 해역에서 격월 관측 등이 시도되고 있지만, 울릉도와 독도 주변 해역은 약 20~50일 주기의 해양 환경 변동이 우세한 해역으로서 격월 미만의 조밀한 관측이 요구되는 해역이다. 이러한 독도 해역의 지리적 특성 및 해상기상 악조건에 따른 선박을 이용한 현장 관측 문제를 극복하기 위하여 한국해양과학기술원에서는 <독도의 지속 가능한 이용 연구> 일환으로 독도 주변 해역의 상층 해수 물성 변동 특성 등 연구를 위해 2009년 3월부터 독도 동쪽 3.2 km 해상의 수심 140 m 해역에 실시간 독도 해양관측부이를 운영 중이다.

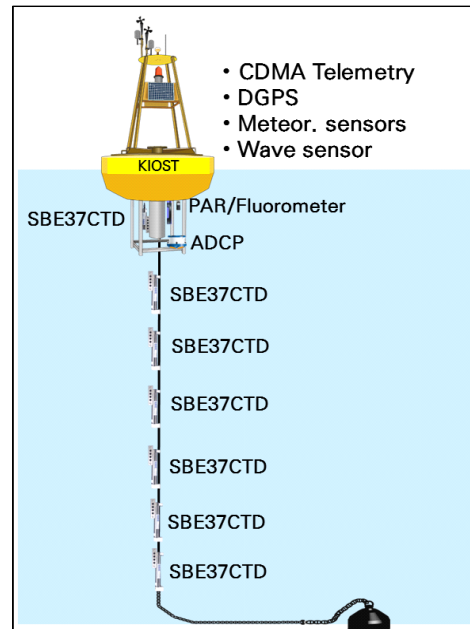
이 연구에서는 한반도 주변 해역의 해양관측 부이 중에서 최동단에 위치한 독도 해양관측 부이를 소개하고, 2009~2014년 동안 관측된 자료를 기반으로 독도 주변 해역의 수온과 염분의 월별 변동 특성을 고찰하였다. 이 연구는 비록 시공간적 변동 특성이 크지만, 독도 해역의 잦은 해상기상 악화로 그동안 단편적으로 관측되어왔던 독도 주변 해역 상층의 해황 변동 특성을 보다 정밀하게 파악하는데 기여할 것이다.

II. 연구자료 및 자료 검토

1. 독도 해양관측 부이

독도 해양관측 부이는 독도 동쪽 약 3.2 km 해상에 위치한 실시간 해양관측 부이로서, 한반

도 본토에서(죽변항 기준) 약 221 km 동쪽에 위치한 대한민국 최동단 부이이다. 계류 위치는 37°14.583' N, 131°54.483' E 으로, 계류 수심은 약 140 m 이다([Fig. 1]). 부이는 2009년 3월 29일에 최초 계류되었으며, 계류장비 점검을 위한 회수 및 재계류, 계류선 이탈 사고, 겨울철 배터리 충전 문제 등으로 자료의 결측 기간이 존재한다(<Table. 1>).



[Fig. 2] Mooring design of the Dokdo Ocean Buoy.

독도 해양관측 부이는 풍향, 풍속, 기온, 습도, 기압을 관측하는 기상 관측 센서와 함께 파고 및 파주기, 수심별 수온 및 염분, 해수유동 관측 센서가 장착되어 있다([Fig. 2]). 관측자료는 특별한 경우를 제외하고 10분 간격으로 측정되었으며, CDMA, Orbocomm과 같은 통신 장비를 이용하여 실시간으로 전송된다. 수심별 수온 및 염분 관측의 경우, 각각 0.002 °C 및 0.0003 S/m의 정확도를 갖는 미국 SeaBird 사의 SBE37 CTD가 사용되었다. CTD는 2012년 8월 이전에는 1, 20, 40, 60,

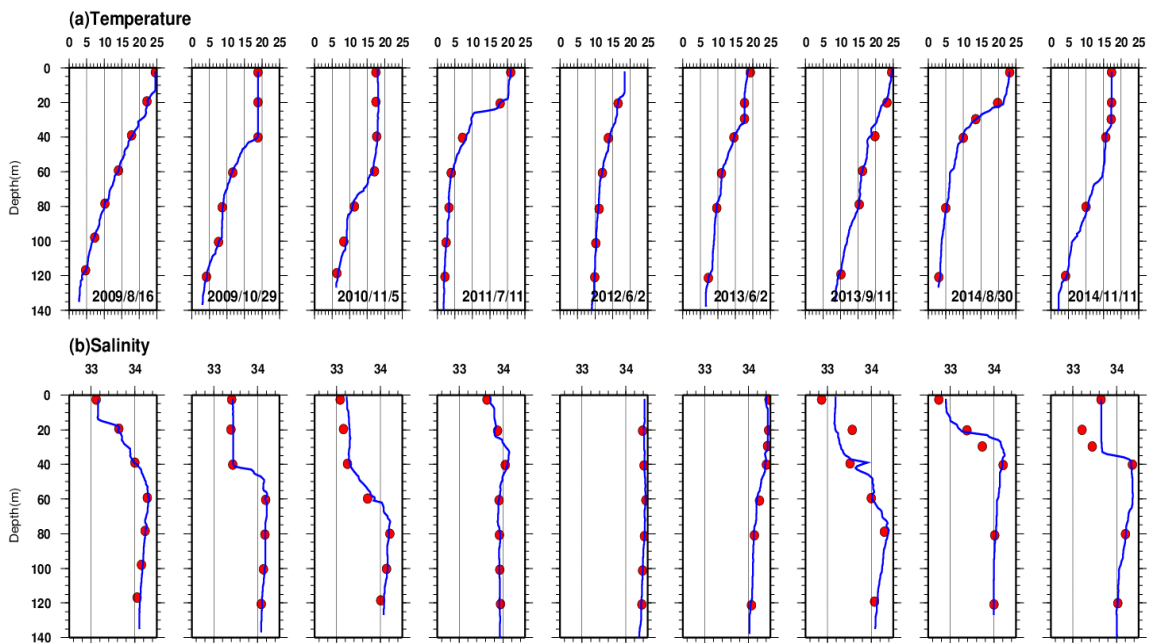
80, 100, 120 m에 계류되었지만, 2013년 4월 이후에는 상층의 수온 및 염분의 변화를 더욱 정밀하게 측정하기 위하여 CTD 계류 수심을 1, 20, 30, 40, 60, 80, 120 m로 변경하였다. 층별 해수 유동은 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, WH 300 kHz, Teledyne RDI)를 부이 Hull 바로 아래 수심 약 1 m 근처에 장착하여 4 m 간격으로 층별 유속, 유향을 측정하였다.

<Table 1> Deployment periods of the Dokdo Ocean buoy during 2009~2014.

Number	Time Period	Duration (day)
1	2009/03/29~2010/02/09	317
2	2010/09/14~2011/03/22	189
3	2011/07/07~2012/08/06	396
4	2013/04/10~2014/12/31 No data because of battery problem (2013/12/21~2014/04/07)	630

2. 자료 검토

[Fig. 3]은 부이에서 관측된 자료(빨간 점)와 연구선에서 CTD로 관측된 자료(파란 실선)의 층별 수온과 염분 비교를 나타낸다. 2009년 3월부터 2014년 12월까지 부이 계류기간 동안 부이 계류 위치 1 km 이내에서 총 9차례에 걸쳐 CTD 관측이 수행되었으며, CTD 관측은 부이 센서와 동일한 정확도를 갖는 SBE911plus CTD로 수행되었다. 수온의 경우, 연구선 기반의 CTD 관측자료와 잘 일치하였으며, 염분의 경우, 전반적으로 모든 수심대에 걸쳐 잘 일치하였지만, 2013년 9월 11일, 2014년 11월 11일의 경우에 수심 20 m 근처에서 약 0.4의 차이를 보였다. 본 연구에서는 현장 관측자료와의 비교를 고려하여 수온 자료의 경우 2009년 3월부터 2014년 12월까지의 자료를 분석하였지만, 월평균 염분 자료 분석의 경우에는 2009년 3월부터 2013년 6월까지의 자료만을 분석하였다.

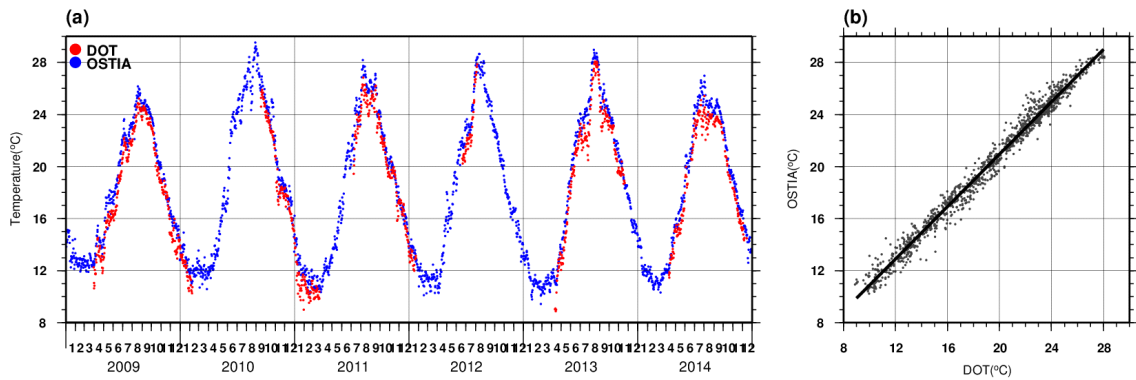


[Fig. 3] Comparison of (a) temperature and (b) salinity observed at the Dokdo Ocean Buoy (red dot) and research vessel (blue line).

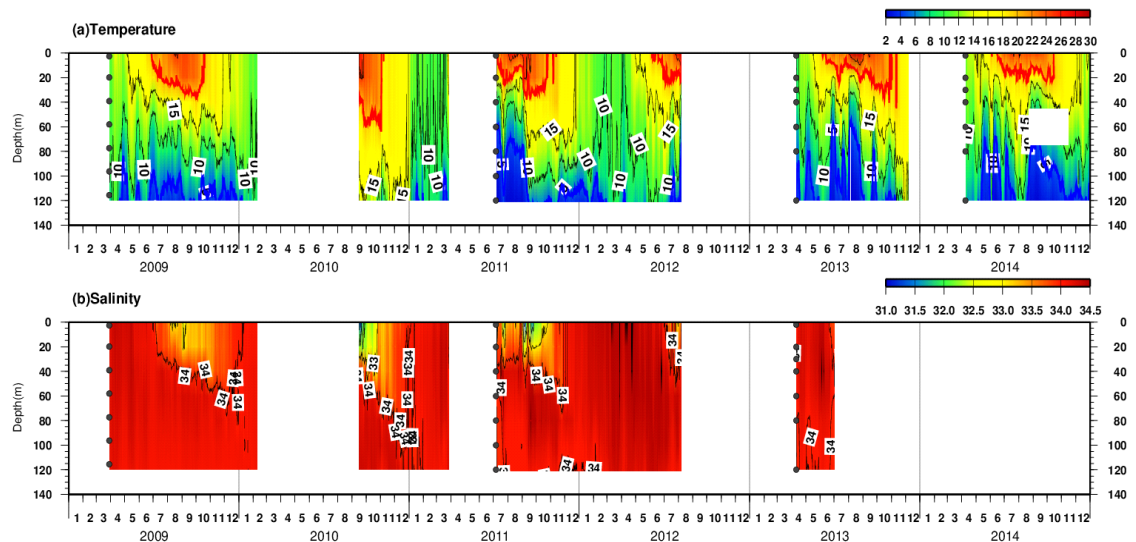
독도 실시간 해양관측 부이에서 관측된 2009~2014년 동안 독도 주변 해역 수온, 염분의 월 변동성 : 해수 유동의 영향을 중심으로

OSTIA SST는 미국 해양대기청의 4 km 해상도 AVHRR(Advanced Very-High-Resolution Radiometer) pathfinder V5 자료, Rutherford Appleton Laboratory와 University of Leicester의 1 km 해상도 AATSR(Advanced Along Track Scanning Radiometer) 자료, ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 자료를 바탕으로 재처리하여 0.025°격자 크기로 전 세계 해양에 대한 일일 해표면 온도 자료를 1985년부터 제공하고 있다

(Stark et al., 2007). 비교를 위해 사용된 자료는 독도 해양관측부이의 일평균 표층 자료와 독도 해양관측부이에 인접한 OSTIA SST의 일별 해표면 수온 자료이다. 비록 독도 해양관측부이의 표층 센서가 해표면이 아닌 수심 약 2 m에 위치하고 있지만, 두 자료는 $Y(\text{OSTIA SST}) = 1.00624 \times X(\text{DOT SST}) + 0.82217$ 의 관계식을 가지고 결정계수(coefficient of determination, R^2) 0.98의 높은 상관성을 보였다.



[Fig. 4]. (a) Time-series of sea surface temperature at DOT and OSTIA in the vicinity of Dokdo. (b) Comparison of DOT SST and OSTIA SST in the vicinity of Dokdo.



[Fig. 5] Time-depth contours of (a) temperature and (b) salinity at the Dokdo Ocean Buoy during 2009~2014.

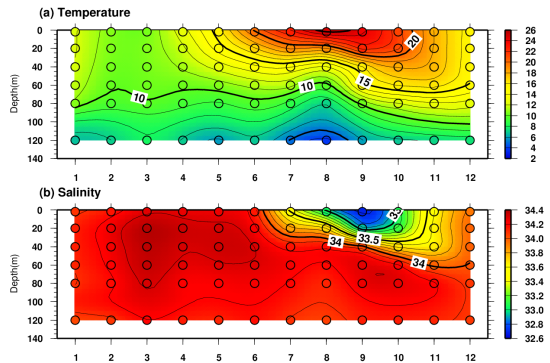
Ⅲ. 결 과

1. 수심별 수온의 월 변동

[Fig. 5(a)]는 2009~2014년 동안의 수온의 수심별 분포를 나타낸다. 20 °C 등온선(빨간색 실선)은 6월 중순 혹은 7월 초부터 수심 약 10 m 이내의 표층에 나타나기 시작하여 점차 깊어지다가 2010년 9~10월에는 60 m 근처까지도 깊어졌다. 10월 중순 무렵부터 다음 해 6월 중순까지는 모든 수층에 걸쳐 20 °C 미만의 수온을 보인다. 표층 수온이 12 °C 아래로 낮아지는 1~3월에는 때때로 120 m 근처까지 수온이 거의 일정한 특성을 보여준다. 기존의 연구에서 동해중층수의 상한 수온으로 정의되어온 5 °C 등온선(파란색 실선)은 2011년 7월과 2013년 8월의 경우 60 m 근처까지도 알아진다. 2012년 1~2월의 경우, 바닥 근처까지 5 °C 등온선이 깊어지지만, 겨울철 보다는 7월, 8월 등 여름철을 중심으로 5 °C 미만의 수온이 중층 아래에서 두껍게 나타난다. 5 °C 미만의 수온은 2011년의 경우 관측이 시작된 7월 초부터 9월 초까지 약 2개월 동안 그리고 2014년의 경우 8월 중순부터 10월 말까지 약 2개월 동안 지속적으로 수심 약 80 m 아래에서 발달하였다. 이외에도 4~6월에 약 10~20일 동안 간헐적으로 5 °C 미만의 수온이 관측되었다.

연별 월평균 표층 수온의 최대값은 2009년의 경우 9월(23.8 °C), 2011년은 8월(25.2 °C), 2013년은 8월(26.9 °C), 2014년은 7월(23.7 °C)로 대체로 8월에 표층 수온의 최대값이 나타났다. 연별 월평균 표층 수온의 최저값은 2009년 3월~2010년 2월에는 2010년 2월(10.8 °C), 2010년 10월~2011년 3월에는 2011년 3월(10.2 °C), 2011년 10월~2012년 3월 사이에는 2012년 3월(10.4 °C)로 주로 3월에 월평균 최소를 나타냈다. 해저면 근처의 수심 120 m의 연별 월 평균 최저 수온의 경우, 2009년 8월(3.75 °C), 2011년 8월(2.21 °C), 2013년 8월(2.71 °C), 2014년 9월(2.61 °C) 등 대체로 연 중 8

월에 120 m 층에서 월 평균 최저 수온이 나타났다. [Fig. 6(a)]는 2009~2014년 동안의 수심별 수온의 누년 월평균을 나타낸다. 최대 수온의 경우 표층에서는 8월, 20 m에서는 9월, 40 m에서는 10월, 60 m에서는 11월, 80 m에서는 11월로 표층에서 깊어질수록 최대 수온이 나타난 달이 점차 늦어지는 경향이 나타난다. 120 m에서는 3월에 최대 수온이 나타났다. 수심별 최저 수온의 경우, 표층에서는 3월에, 20 m에서는 2월에, 40 m에서는 2월 등 2월 혹은 3월에 최저 수온이 나타나지만, 60 m부터 바닥 근처인 120 m에서는 8월에 최저 수온이 나타나는 것이 특징적이다.



[Fig. 6] (a) Monthly mean temperature and (b) salinity observed at the Dokdo Ocean Buoy during 2009~2014.

2. 수심별 염분의 월 변동

[Fig. 5(b)]와 [Fig. 6(b)]는 2009년 3월부터 2013년 6월 동안의 수심별 염분 변동 및 수심별 누년 월 평균 염분을 나타낸다. 표층 염분은 연중 3월에 누년 평균 34.3으로 최대를 보이며, 9월에 평균 32.7로 연중 최소 염분을 보였다. 3월은 누년 평균으로 볼 때 표층에서 수심 120 m까지 전 층에 걸쳐 각 수심별 연 중 최대 염분이 나타난 달이었다. 표층 월평균 염분은 3월부터 5월 사이에 34.2 이상을 보이다가 7월에 평균 염분이 33.5로 저염화되며 9월에 연중 최소를 보이며, 10월부터 이듬해 3월까지 다시 증가하는 경향을 보였다.

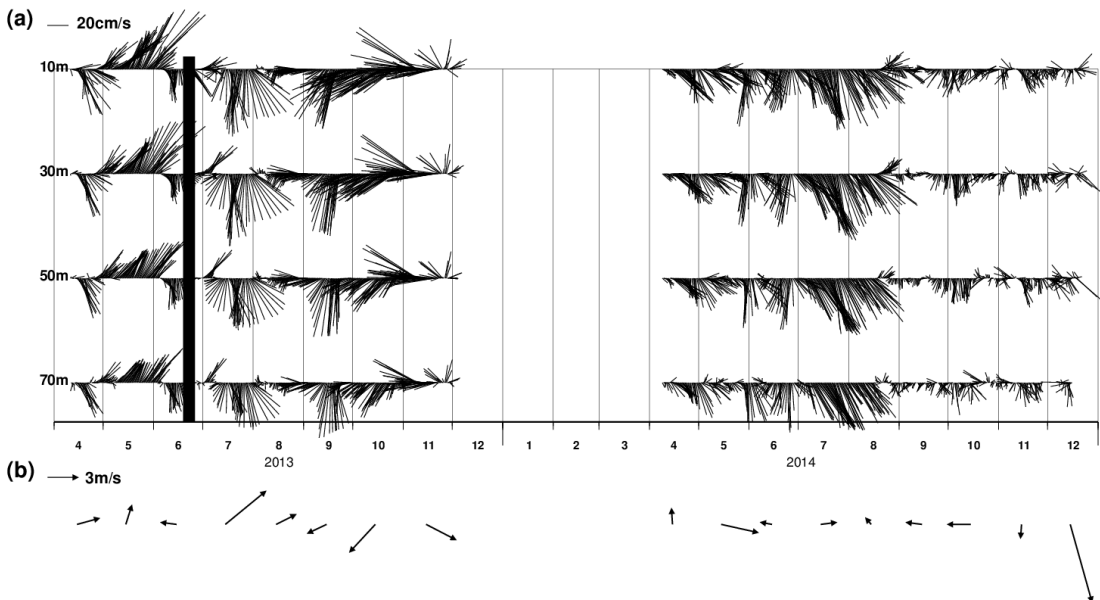
독도 실시간 해양관측 부이에서 관측된 2009~2014년 동안 독도 주변 해역 수온, 염분의 월 변동성 : 해수 유동의 영향을 중심으로

표층 염분은 2010년 9월의 경우 월 평균 31.7로 크게 저염화되었다. 염분 33.5 미만의 저염수는 주로 여름과 가을철의 수심 40 m이내의 상층에서 나타나고, 표층의 경우 7월부터 10월 사이에 주로 나타나며, 20 m에서는 8월 중순부터 10월 사이에 주로 나타난다. 2010년 11월의 경우 60 m 까지도 33.5 미만의 저염수가 관측되었다. 염분 34.3 이상의 고염수는 분석기간 동안 누년 월평균으로 볼 때 3~5월에 20~40 m에서 주로 나타났다. 6~11월 사이에는 누년 평균 34.2 이상의 염분이 주로 60~80 m에서 나타났다. 2012년 5월의 경우 수심 40 m에서 월평균 염분이 34.4로 가장 높은 월평균 염분을 보였다. 누년 월평균 염분 최대층은 1월에는 40 m에서, 2~4월에는 20 m에서, 5~6월에는 40 m에서, 7~9월에는 60 m에서, 10~12월에는 80 m에서 월평균 염분의 최대층을 보이며 봄철에서 겨울철로 갈수록 깊어지는 경향을 보였다.

3. 해수 유동 변동 특성

[Fig. 7(a)]는 해수 유동 관측이 비교적 양호한 기간인 2013년 4월~2013년 11월, 2014년 4월~2014년 12월 동안의 수심 10 m에서 70 m까지의 수심대에서 각 층별로 40시간 저주파 필터된 유속 벡터를 나타내며, <Table 2>는 각 기간 동안의 40시간 저주파 필터된 유속의 통계를 나타낸다. ADCP 관측 자료 중 음향 강도의 특성상 비교적 유의한 자료를 획득한 수심 70 m 까지 나타났다. [Fig. 7(a)]의 층별 유속 벡터로부터 2013년의 경우 관측이 시작된 4월 초순부터는 남동향 흐름을 보이다가 4월말 부터는 북동향 흐름이 나타나기 시작했으며 5월 중순부터 북동향 흐름이 크게 강해지다가 6월 중순부터는 다시 남향 흐름이 관측되었다.

남향 흐름은 2013년 7월 말에 크게 강해졌으나 8월 초부터는 상대적으로 약한 남향 흐름이 나타났다. 이러한 남향 흐름은 9월부터 다시 강해지기 시작해졌으며 10월에는 남서향 흐름이 우세하였다.



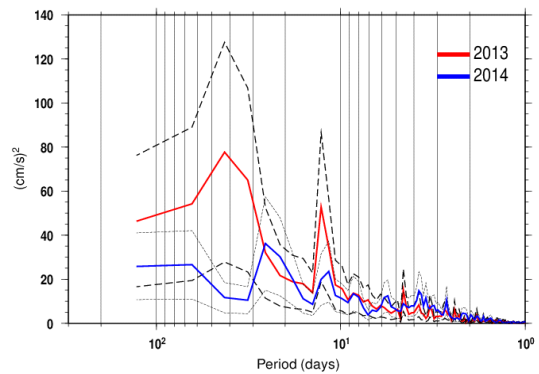
[Fig. 7] (a) Time-series of 40 hr low-pass filtered currents and (b) monthly mean wind vector at the Dokdo Ocean Buoy during April 2013 ~ November 2013 and April 2013 ~ December 2014.

<Table 2> Basic Statistics for low-pass filtered currents sampled at 12 hr intervals during April 2013 ~ November 2013 and April 2013 ~ December 2014.

Period	Depth(m)	Velocity Component	Mean (cm/s)	SD (m/s)	Max. (cm/s)	Min. (cm/s)	Vector mean			MKE (cm ² /s ²)	EKE (cm ² /s ²)	EKE /MKE
							Speed (cm/s)	Max. Speed (cm/s)	Dir (o)			
2013/04	10m	U	-5.8	23.8	56.1	-65.2	8.6	76.8	222.3	37.3	528.7	14.2
		V	-6.4	22.2	57.0	-64.2						
2013/04	30m	U	-6.0	21.0	55.7	-61.8	8.3	71.8	225.7	34.6	462.3	13.4
		V	-5.8	22.1	50.6	-69.1						
2013/11	50m	U	-4.6	17.3	39.7	-53.7	7.2	60.1	220.4	25.6	339.4	13.2
		V	-5.5	19.5	38.1	-56.1						
2013/11	70m	U	-3.0	12.8	30.8	-42.2	7.0	53.7	205.8	24.4	206.3	8.5
		V	-6.3	15.8	32.7	52.8						
2014/04	10m	U	6.8	12.2	41.9	-19.5	16.7	60.8	156.0	138.6	176.9	1.3
		V	-15.2	14.4	16.8	-58.4						
2014/04	30m	U	6.4	11.7	41.8	-18.2	16.6	71.6	157.4	137.2	190.1	1.4
		V	-15.3	15.7	15.6	-63.6						
2014/12	50m	U	5.8	10.8	37.6	-23.4	15.1	64.7	157.3	113.5	163.8	1.4
		V	-13.9	14.6	12.8	-54.3						
2014/12	70m	U	4.1	9.5	36.0	-28.9	12.8	57.3	161.6	81.9	131.1	1.6
		V	-12.1	13.1	11.8	-47.7						

2013년에는 유향 및 유속의 변동성이 크게 나타났지만, 2014년은 2013년에 비교하여 비교적 안정적 유향 변동을 보여준다. 2014년 4월부터 8월 중순까지 비교적 일정하게 남서향 흐름이 유지되었으며 이러한 흐름은 8월 중순 이후부터 12월 중순까지 동안 비교적 약해졌다. 이러한 해수 흐름의 변동 특성은 통계 특성에서 잘 나타난다. 2013년에는 전 수심에 걸쳐 eddy kinetic energy가 mean kinetic energy와 비교해 8.5~14.2배 높아 해수 유동의 변동성이 매우 크지만, 2014년에는 eddy kinetic energy가 mean kinetic energy보다 1.3~1.6배로 비교적 낮아 해수 유동의 안정성이 매우 높게 나타나 독도 해역 해수 흐름의 연변동성이 큼을 보여준다(<Table 2>).

2013년과 2014년의 해수 흐름의 변동성의 차이를 검토해보기 위해 관측기간 동안의 독도 해양 관측부이에서 관측된 월평균 바람 벡터와 비교해 보았다. [Fig. 7(b)]는 월평균 바람 벡터를 나타낸다. 2013년 4~8월에는 남서풍 혹은 남동풍 바람



[Fig. 8] The kinetic energy spectra, in the variance-preserving form, for 40 hr low-passed currents in 2013 and 2014. Dashed lines show the 95% confidence limits.

이 우세하지만, 2013년 9~11월에는 북동풍 혹은 북서풍 바람이 우세하였다. 2013년 7월에 남서풍의 바람이 우세하지만, 상층 해류는 남향 흐름이 크게 우세하게 나타난다. 2014년 4월~10월에는 2013년에 비해 바람이 비교적 약하였으며 또한

독도 실시간 해양관측 부이에서 관측된 2009~2014년 동안 독도 주변 해역 수온, 염분의 월 변동성 : 해수 유동의 영향을 중심으로

동풍 혹은 서풍이 우세하게 나타난다. 2014년 12월에는 비교적 강한 북풍이 나타났다. 2013년과 2014년의 유향의 변동성의 차이와 독도 해양관측 부이에서 관측된 바람과의 관련성은 크게 낮은 것으로 보인다.

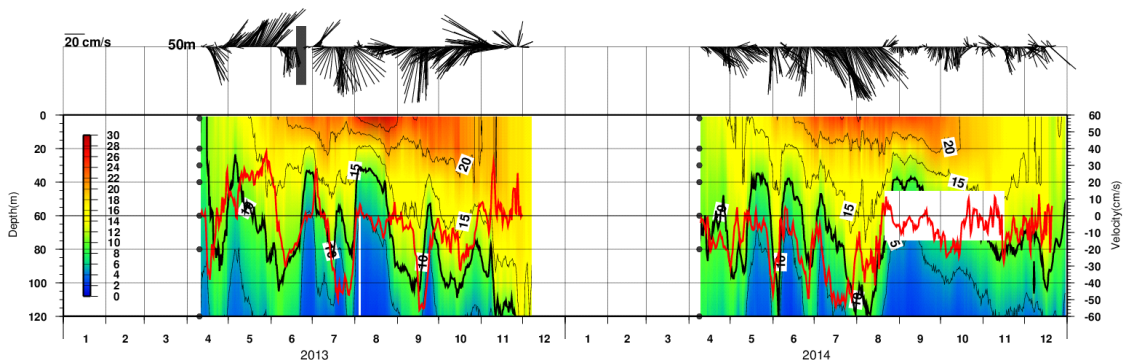
40시간 저주파 필터된 최대 유속은 2013년 5월에 수심 10 m에서 76.8 cm/s를 보였다(<Table 2>). 각 수심별 벡터 평균된 유속은 2013년은 7.0 ~ 8.6 cm/s, 2014년에는 12.8 ~ 16.7 cm/s로 수심이 깊어짐에 따라 평균 유속이 약해지는 경향을 보인다. 벡터 평균된 평균 유향은 2013년에 남서향(206~226o, 북쪽을 기준으로 시계방향)의 평균 흐름이 나타나며, 2014년에는 남동향(156~162o)의 평균 흐름을 보인다. 수심별 유향 분포의 수직적 구조 및 [Fig. 7(a)]의 유속 벡터는 표층으로부터 수심이 깊어지면서 유속은 약해지지만, 유향은 거의 일정한 특성을 보여준다. 이러한 특성은 바닥 근처까지도 유지되는 경향이 나타난다.

[Fig. 8]은 수심 10 m에서 40시간 저주파 필터된 유속의 2013년과 2014년의 관측기간 동안의 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 2013년 4~11월의 경우 40일 주기 근처에서 에너지가 가장 높고, 13일, 5일 주기 근처에서 또한, 에너지가 높게 나타났다. Fig. 6의 유속 벡터에서처럼 2013년에는 주로 약 40일 주기의 변동 규모가 우세하다.

2014년 4~12월의 경우에는 25일 주기 근처에서 에너지가 가장 높고, 12일, 4일 주기에서도 에너지가 비교적 높다. 2013년과 2014년에 각각 12~13일과 4~5일 근처에서 에너지가 높게 나타나지만, 2013년은 40일 근처, 2014년에는 25일 근처에서 에너지가 높게 나타나 비교적 장주기에서 변동 주기의 차이가 있음을 보여준다.

4. 해수 유동과 등온선의 변동

등온선의 변동과 해수 유동 변동의 관련성을 살펴보기 위하여 해수 유동 관측이 비교적 양호하게 관측된 기간인 2013년 4월~2013년 11월, 2014년 4월~2014년 12월 기간 중 수심 50 m에서의 해수 유동과 10 °C 등온선의 변동을 중심으로 비교하였다. [Fig. 9]는 2013년 4월부터 2014년 12월 동안 수심 50 m에서의 유속 벡터와 수온의 수심별 분포를 나타낸다. 그림에서 검은 실선은 10 °C 등온선을 나타내며, 빨간 실선은 50 m에서의 남북방향의 유속 변동을 의미한다(음은 남향류, 양은 북향류). 10 °C 등온선의 변동은 대체적으로 15°C 및 5°C 등온선의 변동과 유사하다. 2013년 4월 중순 이후 남서향 해류가 30~40 cm/s로 강해지면서 10 °C 등온선은 100 m 근처까지 깊어졌으며, 4월 말 무렵에 남동향 흐름이 약해지면서 다시 북동향 흐름이 나타나면서 등온선은

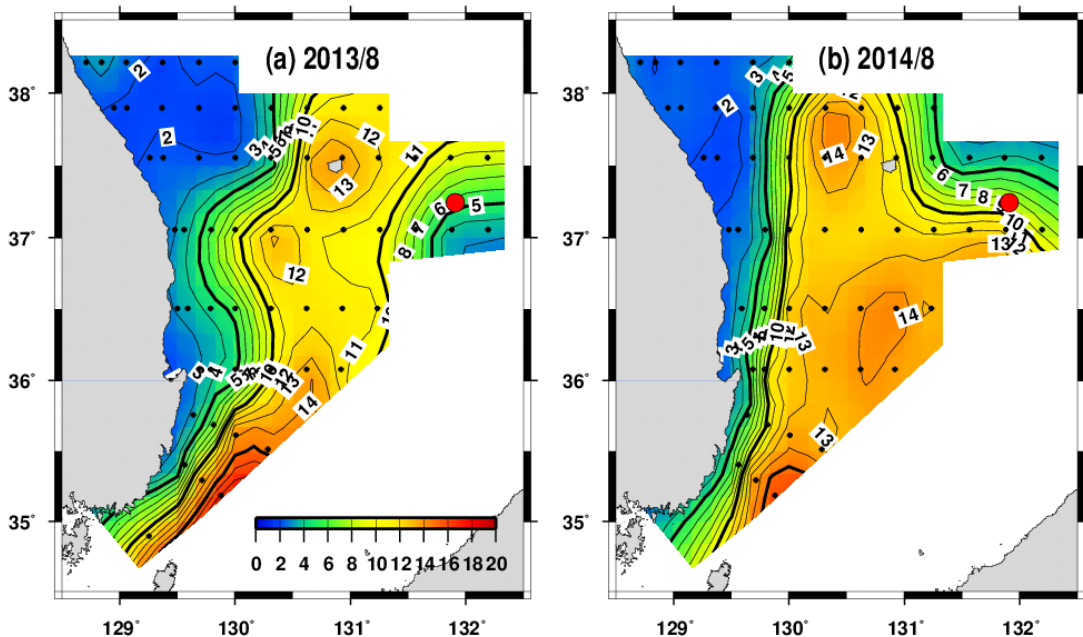


[Fig. 9] Time-series of 40h low-pass filtered currents at 50 m depth and time-depth contours of temperature during April 2013 ~ November 2013 and April 2013 ~ December 2014. Thick black implies contour of 10 °C isotherm and red line implies velocity of north-east component at 50 m depth.

30 m 근처까지도 얗아졌다. 5월 초부터 점차 북동향 흐름이 증가하면서 5월 말에 최대 54 cm/s에 도달하는 동안 10 °C 등온선은 30 m에서 80 m 근처까지 점차 깊어졌다. 6월 초부터는 흐름이 북동향에서 남향으로 바뀌었고 남향흐름이 약 30 cm/s까지 강화되면서 등온선은 100 m 이상으로 깊어졌다. 그러나 6월 중순이후 남향흐름이 크게 약화되면서 10 °C 등온선은 6월 말에 30 m 근처까지도 얗아졌다. 7월 초에 다시 남향 흐름이 30 cm/s 이상 강화되면서 등온선은 다시 80 m 근처까지도 깊어졌다. 그러나 8월 2일부터 8월 20일 사이에 유속이 10 cm/s 미만으로 약화되면서 등온선은 30 m 근처까지 크게 얗아진다. 이후 다시 남서향에서 남향으로 유속이 강화되면서 등온선은 다시 깊어지는 경향을 보였다.

남동향 흐름이 지배적이었던 2014년의 경우에도 50 m에서 유속이 30 cm/s 이상 증가할 때 10 °C 등온선의 깊이가 증가하고 있다. 4월 중순 이

후 남동향 흐름이 30 cm/s 이상 강화되면서 등온선의 깊이가 100 m 근처까지 증가하였으며 다시 흐름이 약해지면서 40 m 근처까지 등온선이 얗아졌다. 5월 말~6월 초, 6월 중순~7월 초, 7월 중순~8월 중순에도 마찬가지로 유속이 30 cm/s이 증가하면서 등온선이 깊어졌다. 8월 중순 이후에는 유속이 약해지면서 등온선이 60 m 내외로 비교적 얗아지고 있다. 이러한 등온선 변동 특성은 독도 해양관측 부이 계류 해역에서 등온선의 변동이 해수 유동 특성과 크게 관련되어 있음을 보여준다. 즉, 10 °C 등온선 변동은 50 m에서 해수 유동이 30 cm/s 이상 증가할 때 100 m 주변까지도 깊어졌으며, 반면에 해수 유동이 약화될 때는 등온선이 30 m 근처까지도 얗아졌다. 2013년~2014년 기간 동안 대체적으로 남동향 혹은 남서향 흐름이 강화될 때 10 °C 등온선이 깊어졌지만 2013년 5월의 경우에는 북동향 흐름이 강화될 때 등온선이 깊어지는 특성을 보였다.



[Fig. 10] Water temperature distribution at 100m depth in (a) August 2013 and (b) August 2014. The red circle implies Dokdo Ocean Time-series site (DOT).

독도 실시간 해양관측 부이에서 관측된 2009~2014년 동안 독도 주변 해역 수온, 염분의 월 변동성 : 해수 유동의 영향을 중심으로

[Fig. 10]은 국립수산과학원 동해 정선관측 일환으로 관측한 2013년 8월(8월 19~21일 독도 주변 정선 관측)과 2014년 8월(8월 15~17일 독도 주변 관측)의 100 m층에서의 수온 분포를 나타낸다. 독도는 빨간색 원으로 표시되었다. 2013년 8월의 경우, 독도 근처의 100 m 층 수온은 약 5 °C인 반면에 2014년 8월에는 약 9 °C의 수온 분포를 보인다. 2013년 8월에는 10 °C 등온선의 분포를 고려할 때 울릉도를 향하여 북동향하는 동한난류의 영향으로 울릉도 부근에서는 비교적 수온이 높지만, 독도 근처에서는 5 °C 내외의 비교적 찬 해수가 분포하며 [Fig. 7]의 부이 관측 자료에서처럼 북서향하는 유동 특성이 나타나고 있다. 반면에, 2014년 8월의 경우에는 10 °C 등온선의 분포를 고려할 때 울릉도 서쪽을 향하여 북상한 동한난류가 울릉도 북쪽에서 독도를 향하여 사행하는 특성이 나타나며 [Fig. 7]의 부이 관측 자료에서도 남동향하는 유동 특성이 잘 나타나고 있다. 이처럼 독도 주변 해역은 독도 주변 해역에 영향을 미치는 동한난류의 유입과 경로 변화, 북쪽으로부터 여름철을 중심으로 한 동해중층수의 유입 등에 따라 주로 25일에서 40일 주기의 해수 특성 변동이 나타난다.

IV. 요약

본 연구에서는 독도 동쪽 3.2 km 해상의 수심 약 140 m 해역에 2009년 3월부터 설치 운영 중인 독도 해양관측부이에서 관측된 자료를 바탕으로 2009~2014년 동안의 독도 주변 해역의 월별 수온 및 염분 변동 특성을 살펴보았다.

독도 주변 해역의 상층 월별 수온 및 염분 변동 특성은 주로 25~40일 주기로 변동하는 해수 흐름의 변동과 크게 관련되어 있다. 독도 주변 해역의 등온선의 변동은 상층의 해수 유동이 주로 남동향 혹은 남서향 흐름으로 약 30 cm/s 이상 강화될 때 5~15 °C 등온선은 깊어지며, 반면에 해수 유동이 약화할 때는 등온선이 얕아지는

경향이 나타난다. 주로 25일 혹은 40일 주기를 갖는 독도 주변 해역의 해수 유동은 비록 남서향 혹은 남동향의 평균 흐름을 보이지만 유향의 연 변동성이 크게 나타났다. 관측 해역에서 수심별 해수 유동 구조는 표층으로부터 수심이 깊어지면서 유속은 점차 약해지지만, 유향은 바닥 근처까지도 거의 일정한 수직 구조를 보였다.

2009~2014년 동안 표층에서 120 m까지의 누년 평균된 월별 층별 평균수온은 최대 25.0 °C(표층, 8월)에서 최소 3.7 °C (120 m, 8월) 분포를 보였다. 월 평균수온의 각 층별 최대 수온은 표층에서는 8월, 20 m에서는 9월, 40 m에서는 10월, 60 m와 80 m에서는 11월로 표층에서 깊어질수록 최대 수온이 나타난 달이 점차 늦어지는 경향을 보였다. 이는 표면 혼합층의 깊이와 주로 5~10월 사이의 여름철을 중심으로 나타나는 냉수의 유입과 관련될 수 있다. 즉, 표면혼합층이 연중 가장 얇은 여름철에서 가을철로 갈수록 표면혼합층이 깊어지면서 중층의 수온이 표층과의 혼합으로 여름철에 비해 높게 나타나고 동시에 여름철을 중심으로 냉수가 중층으로 유입되는 이유로 고려할 수 있다. 즉, 120 m의 경우에 연 중 3월에 최대 수온이 나타나는데 표층 수온이 가장 낮은 달인 연 중 3월에 표면 혼합층이 가장 깊게 발달함과 동시에 봄~가을 사이에 저층으로 냉수가 유입되는 영향으로 고려할 수 있다. 수심별 최저 수온의 경우, 표층에서는 3월, 20 m에서는 2월, 40 m에서는 2월 등 2~3월에 최소가 나타났지만, 여름철을 중심으로 저층으로 유입되는 냉수의 영향으로 60 m에서 120 m까지는 8월에 최저 수온이 나타났다.

2009년 3월부터 2013년 6월 동안 표층에서 120 m까지의 누년 평균된 염분 변동에서 표층 염분은 3월부터 5월 사이에 34.2 이상을 보이다가 7월에 평균 염분이 33.5로 저염화되며 9월에 연중 최소를 보이고 10월부터 이듬해 3월까지 다시 증가하는 경향을 보였다. 염분 33.5 미만의 저염수는 주로 여름과 가을철의 수심 40 m 이내의 상

층에서, 염분 34.3 이상의 고염수는 분석기간 동안 누년 월평균으로 볼 때 3~5월에 수심 20~40 m에서 주로 나타났다.

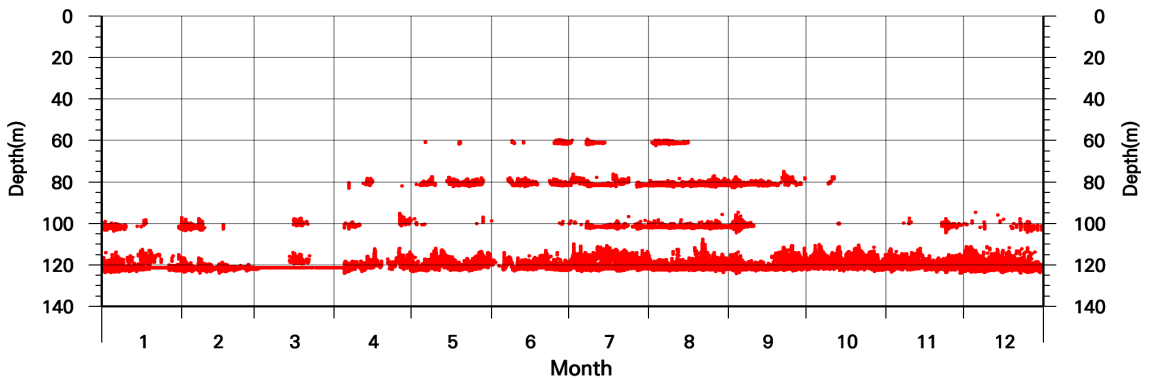
V. 결론 및 토의

독도 해양관측부이는 대한민국 최동쪽에 위치한 부이로서 동해 및 독도 주변 해역의 해상기상 특성상 해양관측이 매우 제한적인 여건을 고려할 때, 비록 해수 물성의 공간적인 특성 파악에 제한이 있지만 독도 주변 해역의 복잡한 시간적인 변화를 매우 조밀하게 장기간 파악할 수 있는 장점이 있다.

[Fig. 11]은 2009~2014년 동안 수온 1~5 °C, 34.06 미만이 관측된 기간 및 수심을 월별로 나타낸다. Cho and Kim(1994)은 물성 분석을 통해 울릉분지 증층에 나타나는 냉수를 1) 동해 연안을 따라 남하하는 북한한류에 동반된 북한한류수, 2) 북한한류수와 비교하여 다른 경로와 물성을 보이는 동해중층수(East Sea Intermediate Water)로 분리하였다. 즉, 동해중층수는 동해 북부해역으로부터 울릉도 독도 주변 해역을 통해 울릉분지로 유입되는 냉수로 고려되어왔다. 동해중층수는 수온 1~5 °C, 염분 34.06 미만의 범위를 보이며 비교적 높은 용존산소량을 갖는 해수로 정의된다 (Kim et al., 2004). 제한된 관측기간을

고려할 때 수온 1~5 °C, 34.06 미만으로 정의되는 동해중층수는 관측 해역의 경우 바닥 근처에서 연중 관측되는 것으로 고려되며, 4월 중순 무렵부터 바닥에서 80 m까지 관측되다가 6~8월을 중심으로 60 m까지로 얕아졌다. 9~10월에 다시 80 m로 깊어졌다가 11월부터는 바닥근처에서 주로 관측된다. 이러한 동해중층수의 월변동은 [Fig. 9] 처럼 남동향 혹은 남서향 흐름이 강화될 때 5 °C 혹은 10 °C 등온선이 깊어지고 반대로 흐름이 약해질 때는 등온선이 얕아지는 특성과 관련될 수 있다. 겨울철에는 강한 바람에 의해 표면혼합층이 100 m 근처까지도 깊어져 바닥 근처를 제외하고 거의 전 층이 10 °C 내외를 보여 수온 1~5 °C 를 갖는 동해 중층수가 바닥근처에 주로 분포하는 것으로 고려된다.

한편, 동해의 저염수 형성과 유동은 겨울철 북한한류에 의해 남하한 저염수가 여름철에 대한해협을 통해 울릉분지로 유입된 저염수와 만나 섞이는 것으로 알려져 있다. 국립수산과학원의 25년(1992-2016) 간 정선관측자료를 활용하여 분석한 결과에 따르면 최저 염분이 동해 중부 연안에는 8월이나 10월에, 울릉도 근해에서는 주로 10월에 나타나나 8월과 10월에 비슷한 염분값이, 대한해협에서는 대부분 8월에 나타나나 간혹 10월에 나타나기도 한다고 보고했다(Lee and Lee, 2017).



[Fig. 11]. Monthly depth distribution of East Sea Intermediate water(with temperature of 1~5 °C and salinity of less than 34.06) at the Dokdo Ocean Buoy during 2009~2014.

독도 실시간 해양관측 부이에서 관측된 2009~2014년 동안 독도 주변 해역 수온, 염분의 월 변동성 : 해수 유동의 영향을 중심으로

특히 본 연구에서 보고한 2010년 9월 표층 염분이 평균 31.7로 크게 떨어진 시기는 대한해협에서도 8월 염분이 27.7로, 8월 평균 32에 비해 매우 낮은 최저 염분 관측이 보고되었다. 따라서 이는 최저 염분의 장강희석수(Changjiang diluted water)가 대한해협을 통해 동해로 유입되어 독도 근해까지 이동한 것으로 추정되며, 장강희석수의 대한해협으로의 확산 범위는 8월에 동중국해에서 부는 남풍의 강도에 따라 변동하는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2015).

독도 해역의 수온 분포는 독도 주변 해역에 영향을 미치는 동한난류의 경로 변화 등에 따라 크게 달라진다. Yun et al.(2004)은 겨울철에 동해북부해역에서 형성된 차가운 냉수가 동해연안을 따라 남하하는 북한한류 경로와 함께 동해 연안-울릉도 사이, 그리고 울릉도-독도 사이의 심해통로 등 3가지 경로를 통해 울릉분지로 유입됨을 제시하였다.

독도 해양관측부이는 한반도 본토에서 가장 멀리 위치한 부이라는 지리적인 특성과 독도 주변 해역의 잦은 해상 기상 악화, 그리고 울릉도 독도 해역이 한반도 해역 중 연간 일조율이 가장 적은 지역이라는 특성상(KMA, 2012) 겨울철을 중심으로 태양열 전지를 이용한 배터리 충전 문제 등으로 유지 관리에 큰 어려움이 있지만, 독도 해역의 장단기 변동을 관측할 수 있는 가장 유용한 관측 방법들 중 하나라고 할 수 있다. 이 연구에서는 독도 해양관측부이를 소개하고 2009~2014년 동안 관측된 자료를 기반으로 독도 주변 해역의 수온과 염분의 월별 변동 특성을 살펴보았다. 2014년 1월부터 울릉도에 위치한 울릉도독도해양연구기지 개소를 계기로 독도해양관측부이 유지 관리의 개선 및 독도 해양관측부이 활용 연구가 점차적으로 확대될 예정이다. 이 연구에서 검토한 수온, 염분 변동 특성 외에 관측된 생지화학 자료를 활용한 연구와 함께, 태풍 등 특이 환경 발달 시 대기-해양간의 상호작용 특성, 장기 관측 자료를 활용한 독도 주변해역의 해양

환경 장기 변동 특성 연구 또한 기대된다. 한편으로 독도 해양관측부이는 한반도 본토에서 가장 동쪽에 위치한 지리적 특성상 장기 시계열 관측 자료 확보가 어려운 곳에 위치함에 따라 인공위성 관측자료 및 해양-대기 수치모델 검·보정에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

References

- Chang KI, Kim YB, Suk MS and Byun SK(2002). Hydrography around Dokdo, Ocean and Polar Research, 24(4), 369~389.
- Chang KI, Teague WJ, Lyu SJ, Perkins HT, Lee DK, Watts DR, Kim YB, Mitchell DA, Lee CM and Kim K(2004). Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review, Progress in Oceanography, 61, 105~156.
- Cho YG and Kim K(1994). Two modes of the salinity-minimum layer water in the Ulleung Basin, Lar mer, 32, 271~278.
- Dickey T, Zedler S, Yu X, Doney SC, Frye D, Jannasch H, Manov D, Sigurdson D, McNeil JD, Dobeck L, Gilboy T, Bravo C, Siegel DA and Nelson N(2001). Physical and biogeochemical variability from hours to years at the Bermuda Testbed Mooring site: June 1994-March 1998, Deep-Sea Research, 48, 2105~2140.
- Jang ST, Lee JH, Shin CW and Hong CS(2007). Vertical mixing in the Ulleung Basin in the East/Japan Sea, PICES Sixteenth Annual Meeting.
- Kim CH and Kim K(1983). Characteristics and origin of the cold water mass along the East coast of Korea, J Oceano Soc Kor., 18(1), 73~83
- Kim K, Kim KR, Kim YG, Cho YK, Kang DJ, Takematsu M. and Volkov Y(2004). Water masses and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan), Prog Oceanogr, 61, 157~174
- Kim YB and Kim SM(2014). Marine Meteorological Characteristics by Comparison of High wind-wave alert and Moored Buoy data off the coast of the East Sea between 2006 and 2013, J. Fish. Mar. Sci. Edu., 71, 1011~1023.
- Korea Meteorological Administration(2012). The Climate Atlas of Korea.

- Lee DK and Lee JC(2017). Distribution and Circulation of Autumn Low Salinity Water in the East Sea. *Korean J Fish AquaSci* 50, 207~218.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0207>
- Lee DK, Kwon JI and Son SH(2015). Horizontal distribution of salinity in summer inferred from total suspended sediment in the East China Sea. *Acta Ocean Sinica* 34, 44~50.
<https://doi.org/10.1007/s13131-015-0776-7>
- Lie HJ, Cho CH, Lee JH and Lee S(2003). Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 108(C3):3077.
<https://doi.org/10.1029/2001JC001194>
- Lukas R, Santiago-Mandujano F, Bingham F and Mantyla A(2001). Cold bottom water events observed in the Hawaii Ocean time-series: Implications for vertical mixing, *Deep-Sea Research I*, 48(4), 995~1021.
- Mitchell DA, Teague WJ, Wimbush M, Watts DR and Sutyryn GG(2005). The Dok Cold Eddy, *J. Phy. Oceanogr.*, 35, 273~288.
- Nam SH, Kim YB, Park JJ and Chang KI(2012). Status and Prospect of Unmanned, Global Ocean Observation Network, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 19(3), 202~214.
- Nam SH, Yun JY and Kim K(2004). Observations on the Coastal Ocean Response to Typhoon Maemi at the East Sea Real-time Ocean Buoy, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 9(3), 111~118.
- Nof D(2001). China's Development Could Lead to Bottom Water Formation in the Japan/East Sea, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(4), 609~618.
- Rho TK, Kim YB, Park JI, Lee YW, Im DH, Kang DJ, Lee T, Yoon ST, Kim TH, Kwak JH, Park HJ, Jeong MK, Chang KI, Kang CK, Suh HL, Park M, Lee H and Kim KR(2010). Plankton Community Response to Physico-Chemical Forcing in the Ulleung Basin, East Sea during Summer 2008, *Ocean Polar Res*, 32(3), 269~289
- Stark JD, Crig CJ, Martin MJ and McCulloch ME (2007). OSTIA : An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system, *OCEANS 2007*.
- Yun JY, Magaard L, Kim K, Shin CW, Kim C and Byun SK(2004). Spatial and temporal variability of the North Korean Cold Water leading to the near-bottom cold water intrusion in Korea Strait, *Progress in Oceanography*, 60, 99~131.

-
- Received : 03 April, 2020
 - Revised : 26 May, 2020
 - Accepted : 05 June, 2020