

2012년~2015년 하계 대한해협저층냉수의 수온변동 특성

Characteristics of Temperature Variations of Korea Strait Bottom Cold Water During Summer 2012~2015

김국진* · 고지민** · 김영택*** · 김민하****

Kuk Jin Kim · Ji Min Ko · Young-Taeg Kim · Min Ha Kim

요약 국립해양조사원의 국가해양관측망 실시간 해양관측부이와 한국연안 해류조사 정점자료를 이용하여 2012년부터 2015년 동안 대한해협저층냉수의 수온변동 특성을 규명하고자 하였다. ‘대한해협’과 ‘남해동부’ 부이의 표층 및 저층수온 시계열 분석을 통하여 2013년 하계에 ‘대한해협’ 부이의 저층수온이 가장 낮게 나타났다. 그 확장범위는 ‘남해동부’ 부이에 미치지 못함을 파악하였다. 한편, HF-radar 표층유속자료, 수온과 염분의 수직단면도 및 T-S Diagram 분석을 통해 대한해협저층냉수의 변동과 대마난류의 수송량이 밀접한 상관관계가 있으며, 2013년 하계에는 못 미치지만 2015년 하계에 대한해협저층냉수가 강하게 확장했음을 확인하였다.

키워드 국가해양관측망, 대한해협저층냉수, 수온변동, 수송량, 확장범위

Abstract Real-time water temperature data obtained from ocean monitoring buoys, components of Korea Hydrographic and Oceanographic Agency(KHOA)’s Korea Ocean Observing and Forecasting System(KOFS), and hydrographic data obtained from Korea Coastal Current Research survey were used to investigate the cause of temperature variations of Korea Strait Bottom Cold Water(KSBCW) during 2012~2015. Time-series analysis of surface and bottom temperatures obtained from ‘Korea Strait’ and ‘Jeju(Eastern)’ buoys represented that the lowest temperature of KSBCW appeared in 2013 summer and its expansion range did not reach the location of ‘Jeju(Eastern)’ buoy. Through the analysis of surface velocity from HF-radar, vertical section of temperature and salinity and T-S diagram showed that the temperature variation of KSBCW was highly correlated with the volume transport of Tsushima Warm Current, and KSBCW was strongly expanded in 2015 summer, although weaker than in 2013.

Key words Korea Ocean Observing and Forecasting System(KOFS), Korea Strait Bottom Cold Water(KSBCW), Temperature variation, Volume transport, Expansion range

1. 서론

대한해협은 우리나라의 동해와 남해를 연결하는 해협으로 대마도를 중심으로 서수도와 동수도로 나뉘며, 평균수심은 101 m이고 최고수심은 대마도 북서부의 서수도에서 228 m이다(이, 1992). 대한해협과 연결된 우리나라 남동해안은 여름철 용승에 의해 냉수역이 발달하는 해역으로 알려져 있고 기존에 많은 연구가 수행되어 왔다(Seung, 1984; Lee et al., 2003; 이, 2011).

반면, 대한해협의 저층에서 나타나는 냉수괴인 대한해협저층냉수(Korea Strait Bottom Cold Water)는 장기 관측 자료의 부재로 그 변동현상에 대한 이해가 부족하다.

대한해협저층냉수는 동해의 중층 보다 깊은 수심에 분포하는 차가운 냉수가 대한해협의 저층으로 잠입하여 존재하는 수괴로 보통 난류의 세력이 강한 하계에 저층냉수의 영향도 강하게 나타난다. 이는 대한해협의 표층에서 동해로 유입되는 수송량의 보상 개념으로 표

Received: 2016.07.04, Revised: 2016.07.25, Accepted: 2016.07.26

* ㈜전략해양, 서울 금천구 가산디지털2로 53 한라시그마밸리 1108호, kjkim@oceanrns.com

** 국립해양조사원 해양예보과, 부산광역시 영도구 해양로 351, jmko124@korea.kr

*** 국립해양조사원 해양예보과, 부산광역시 영도구 해양로 351, kyt5824@korea.kr (교신저자)

**** ㈜전략해양, 서울 금천구 가산디지털2로 53 한라시그마밸리 1108호, mhkim@oceanrns.com

층의 수송량이 증가할수록 저층에서는 차가운 냉수가 대한해협을 통해 동해 밖으로 유입되는 것으로 알려져 있다(이, 1992).

이 연구에서는 국립해양조사원(KHOA)에서 운영 중인 국가해양관측망 중 우리나라의 남동해안에 설치된 ‘대한해협’ 및 ‘남해동부’ 해양관측부이로부터 획득한 표층과 저층의 수온자료를 분석하여 2012년부터 2015년까지 최근 4년간 대한해협저층냉수의 시간에 따른 변동특성 및 해양관측부이 주변의 해황특성과의 상관성을 파악하고자 하였다.

2. 관측위치 및 사용자료

분석에 사용된 자료는 국립해양조사원의 국가해양관측망¹⁾에서 실시간으로 제공되는 ‘대한해협’과 ‘남해동부’ 해양관측부이에서 2012년 9월부터 2015년 11월까지 약 3년 이상 관측한 표층(해면 하 2m) 및 저층(해저면 상 1m)의 수온 시계열이다. 수온 시계열 관측에 사용된 기기는 노르웨이 Aanderaa사의 CT3919로 표층의 경우 30분 간격의 실시간 전송 자료를 사용하였으며, 저층은 부이 유지보수를 위한 관측장비 회수 시 30분 간격으로 메모리에 저장되어 있던 자료를 취득하여 분석에 사용하였다.

한편 비교 관측을 위한 보조 자료로 2012년~2015년 하계(8월)에 관측된 일본 큐슈대학 응용역학연구소(Research Institute for Applied Mechanics)에서 운영하는 HF-Radar (CODAR, 미국)를 이용한 일평균 표층 유속²⁾ 결과와 그림을 분석에 사용하였으며, 2012년~2015년 국립해양조사원에서 수행한 ‘한국연안 해류조

사’의 정선인 TSA 라인(부산관측선; 부산-대마도 북부)의 정점별 수온, 염분 자료를 사용하여 수온, 염분의 수직단면도 및 T-S diagram을 작성하여 분석을 수행하였다.

분석에 사용된 관측정점의 위치를 Fig. 1에 도시하였으며, 사용된 자료의 개요를 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Observations summary.

Station Name	Latitude(N)	Obs. Items	Data Acquisition Period	Depth (Obs. Interval)
	Longitude(E)			
TSA-01	35° 01'12"	(Vertical) Temp. & Saln.	2012.08.13	85 m
	129° 07'42"			-
TSA-02	34° 59'23"			93 m
	129° 09'36"			-
TSA-03	34° 57'18"			2013.08.20
	129° 11'33"		-	
TSA-04	34° 55'23"		2014.08.14	110 m
	129° 13'53"		-	
TSA-05	34° 53'40"		2015.08.16	137 m
	129° 15'38"		-	
Korea Strait	34° 55'59"	(Surface /Bottom) Temp. & Saln.	2012.09. ~2015.11.	96 m (30 min.)
	129° 08'16"			-
Jeju (Eastern)	34° 13'26"			84 m (30 min.)
	128° 25'03"			-

3. 자료분석 결과

3.1 시계열 분석

2012년 9월부터 2015년 11월까지 ‘대한해협’과 ‘남해동부’ 해양관측부이에서 관측한 표층과 저층수온의 시계열 분석 결과를 Fig. 2에 제시하였다.

3.1.1 표층수온 분석

‘대한해협’과 ‘남해동부’ 해양관측부이에서의 표층수온은 여름철 고온과 겨울철 저온의 전형적인 계절변동 양상을 나타냈다. 2013년 8월에는 ‘대한해협’과 ‘남해동부’ 해양관측부이에서 표층수온의 최고값이 30.0°C 이상으로 매우 높게 나타난 반면, 나머지 해(2012년, 2014년, 2015년)의 여름철에는 이에 못 미치는 값이 나타나 전반적으로 여름철에 대한해협으로 유입되는 고온·고염의 특성을 지닌 대마난류(Tsushima Warm Current) 수송량이 최근 4년 중 2013년에 가장 컸음을 유추할 수 있다.

한편 2013년 2월에는 ‘남해동부’ 해양관측부이에서 표층수온의 최저값이 10.0°C 미만으로 매우 낮게 나타난 반면, 2014년과 2015년 겨울철에는 이보다 높게 나타나 전반적으로 ‘남해동부’ 해양관측부이에서 표층수온의 연변동 폭이 다른 해보다 2013년에 더 크게 나타났음을 알 수 있다.

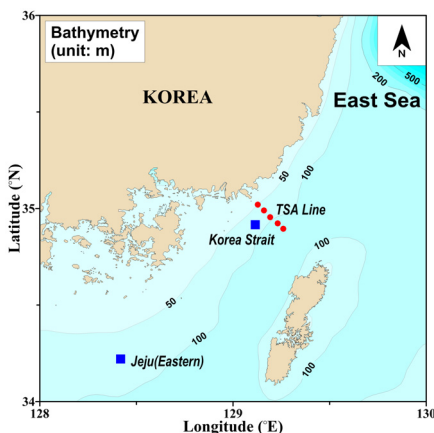


Figure 1. Location map of ocean observation buoys and TSA survey line

¹⁾ http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_real.do

²⁾ <http://le-web.riam.kyushu-u.ac.jp/radar/daily/>

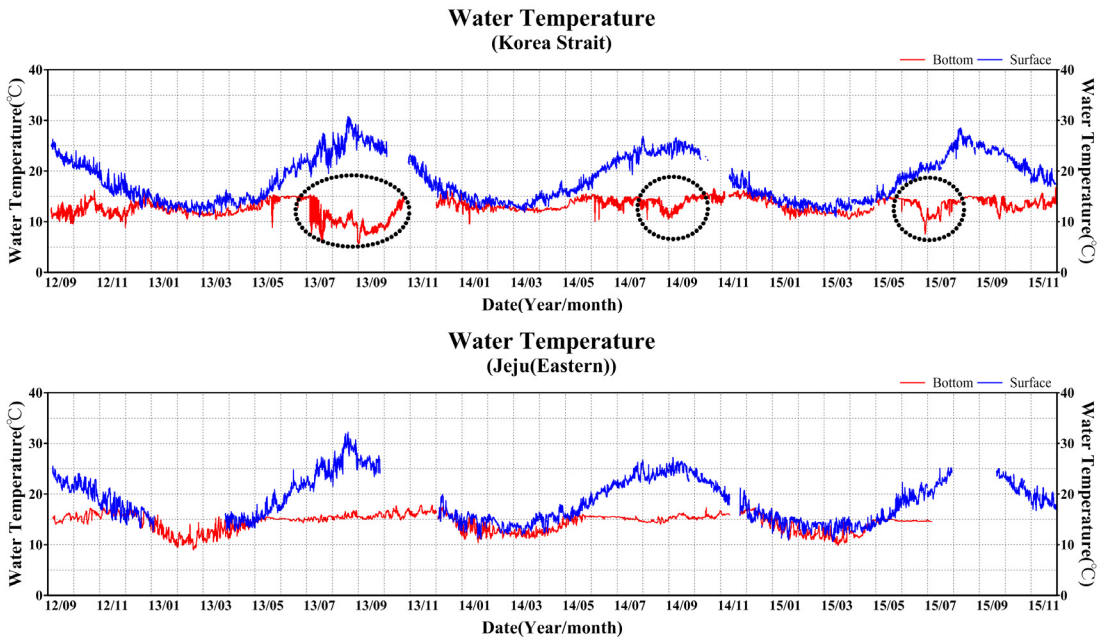


Figure 2. Time series plots of surface and bottom temperature at Korea Strait(upper) and Jeju(Eastern) (lower) ocean observation buoys

3.1.2 저층수온 분석

Fig. 2로부터 여름철인 2013년 7월~10월과 2014년 8월~9월, 그리고 2015년 6월~7월 사이에 ‘대한해협’ 해양관측부이의 저층에서는 겨울철보다 더 낮은 수온의 냉수괴가 관측되었는데, 이는 겨울철에 냉각으로 인한 수직혼합으로 형성된 것이 아닌 동해의 중층 보다 깊은 수심으로부터 유입된 냉수괴의 영향임을 알 수 있다. 특히 2013년 여름철이 나머지 2012년, 2014년 및 2015년 여름철보다 더 낮은 수온을 보였으며, 냉수괴의 출현기간도 더 길게 나타났는데, 이는 앞서 언급된 대한해협에서 대마난류의 수송량이 2013년 여름철에 더 컸음을 나타낸다.

한편, ‘남해동부’ 해양관측부이에서 저층수온은 여름철에 변동이 없는 것으로 나타났는데, 이로부터 대한해협 저층냉수의 영향이 ‘남해동부’ 해양관측부이에는 이르지 못했음을 파악할 수 있다.

저층수온의 연변동을 살펴보면 ‘대한해협’과 ‘남해동부’ 해양관측부이 모두에서 약 15.0°C 정도의 일정한 저층수온이 관측되었는데, 이중 ‘남해동부’ 해양관측부이의 경우 여름철에 대한해협 저층냉수의 영향이 거의 나타나지 않고 15.0°C 정도의 저층수온이 일정하게 유지되는 반면, 겨울철에는 표층냉각에 의한 수직혼합의 영향으로 저층수온이 15.0°C 이하로 떨어지며, 특히 2013년 1월~3월 동안에는 표층과 저층의 수온이

거의 동일하게 나타나 전 수층에서 균질(homogeneous)한 상태를 보였다.

‘대한해협’ 해양관측부이에서 저층수온의 연변동은 ‘남해동부’ 해양관측부이와는 다르게 여름철과 겨울철 모두 저층수온이 15.0°C 이하로 떨어지는 것으로 나타났다. 겨울철의 경우는 표층냉각에 의한 수직혼합의 영향이지만 수온 하강의 폭이 크지 않은 반면, 여름철의 수온 하강은 차가운 대한해협 저층냉수 유입의 영향으로 겨울철보다 수온 하강의 폭이 더 크게 나타났다. 여름철 ‘대한해협’ 해양관측부이에서 저층의 최저 수온은 2014년에 10.5°C, 2015년에 7.5°C인 반면, 2013년에는 최저 수온이 약 5.6°C까지 더 낮게 나타났으며, 수온이 하강한 기간도 2014년 및 2015년의 여름철에 비하여 더 길게 나타났다.

3.2 HF-radar 표층유속자료 분석

일본 큐슈대학교의 응용역학연구소에서 대한해협 주변의 표층유속을 모니터링하기 위하여 설치한 HF-radar 자료 중 2012년~2015년 하계에 국립해양조사원의 ‘한국연안 해류조사’ 정선인 TSA 라인의 관측기간과 동기간에 관측된 일평균 표층유속 결과를 그림으로 도시하였다(Fig. 3).

Fig. 3에서 대한해협 저층냉수의 영향이 강했던 2013년 하계가 2012년, 2014년 및 2015년 하계에 비

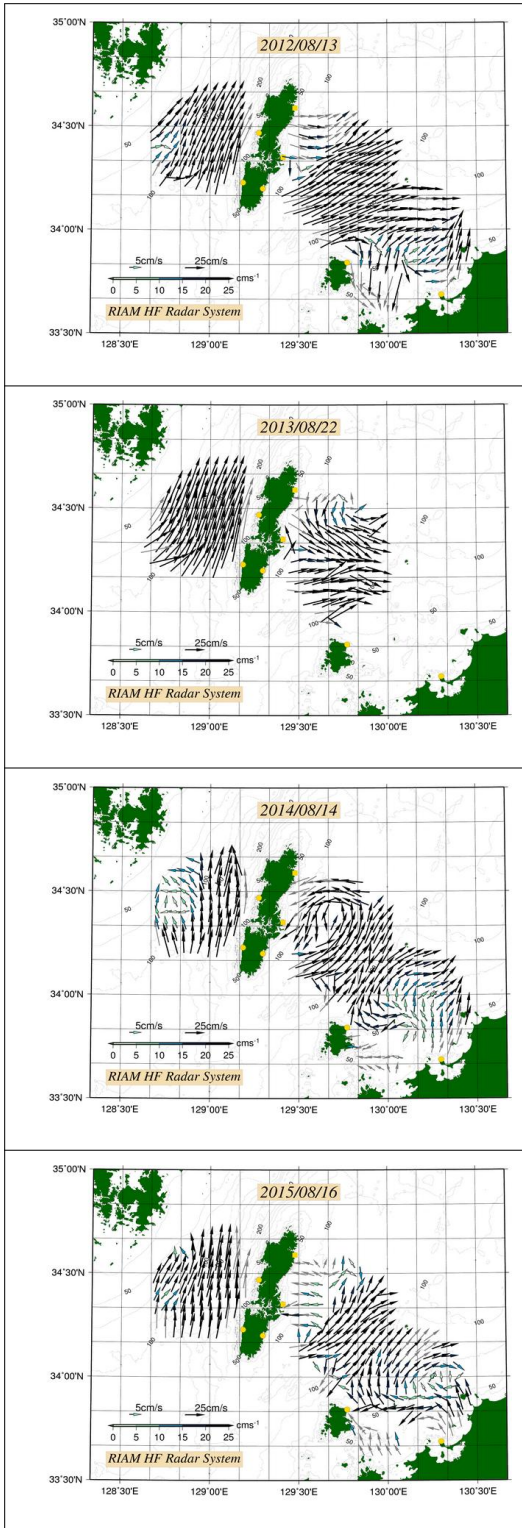


Figure 3. Distribution of surface velocity in the Korea Strait on August(2012~2015) using HF-radar data

하여 대한해협 서수도의 표층유속이 상대적으로 더 크게 나타났으며, 이는 하계 대마난류의 영향이 2013년에 상대적으로 강하게 나타났음을 보여준다.

3.3 수온염분 수직단면 분석

2012년~2015년 8월에 국립해양조사원의 ‘한국연안 해류조사’ 정선인 TSA 라인의 수온과 염분 수직단면을 도시하여 분석하였다(Fig. 4). 그림에서 사용된 자료는 TSA 라인을 따른 5개의 정점에서 획득한 CTD 수직관측 자료로 각 년도 별로 8월의 특정일에 관측된 정점별 수심에 따른 수온과 염분 자료이다(Table. 1).

Fig. 4에서 2012년~2015년 수온·염분 수직단면도의 전반적인 특성을 살펴보면 하계에 수온약층이 강하게 형성되었으며, 수온약층을 기준으로 위쪽의 상층에서는 외해로 갈수록 고온저염의 특성이 나타났고, 아래쪽의 하층에서는 외해로 갈수록 저온고염의 특성이 나타났다. 한편, Fig. 4로부터 2013년 하계가 다른 해에 비하여 저층수온이 더 낮고, 표층수온이 더 높아 표층과 저층의 수온차가 크게 나타나며, 수온약층의 수심도 보다 얇은 곳에 형성되어 난류의 영향이 강하게 나타났음을 확인하였다. 일반적으로 동해로 유입되는 난류의 영향이 강해지면 대한해협의 수송량이 증가하게 되며 이는 지형류 방정식으로 확인할 수 있다.

연구해역인 대한해협 서수도에서 지형류 방정식은 다음의 식으로 표현되는데

$$v = \frac{g}{f} \frac{\Delta z}{\Delta x} \tag{1}$$

여기서, f =Coriolis parameter, g =중력가속도, Δx =대한해협의 길이, Δz =수온약층을 기준으로 한 시작점과 끝점의 해수면 차이다.

Fig. 4에서 2013년 하계에는 다른 해와 비교하여 표층에서 수온약층의 기울기가 급격하게 형성되어 지형류에 의한 표층해류의 흐름이 더 강하게 나타나며, 저층에서는 다른 해 보다 수온이 더 낮은 냉수괴가 분포하여 TSA-01의 약 60 m 수심부터 TSA-05의 약 90 m 수심을 따라 연결되는 중층과 저층을 구분하는 저층 수온약층이 형성됨을 확인할 수 있다. 이는 표층에서 양자강희석수의 영향을 받은 고온저염의 수괴가 동해로 유입되는 반면, 저층에서는 표층수송량 증가에 대한 보상으로 상대적으로 저온고염의 대한해협저층냉수가 동해로부터 대한해협으로 유입되고 있음을 나타낸다.

한편, Fig. 4에서 2015년 하계는 2013년 하계 다음으로 수온약층의 기울기가 급격하게 형성되어 있으며

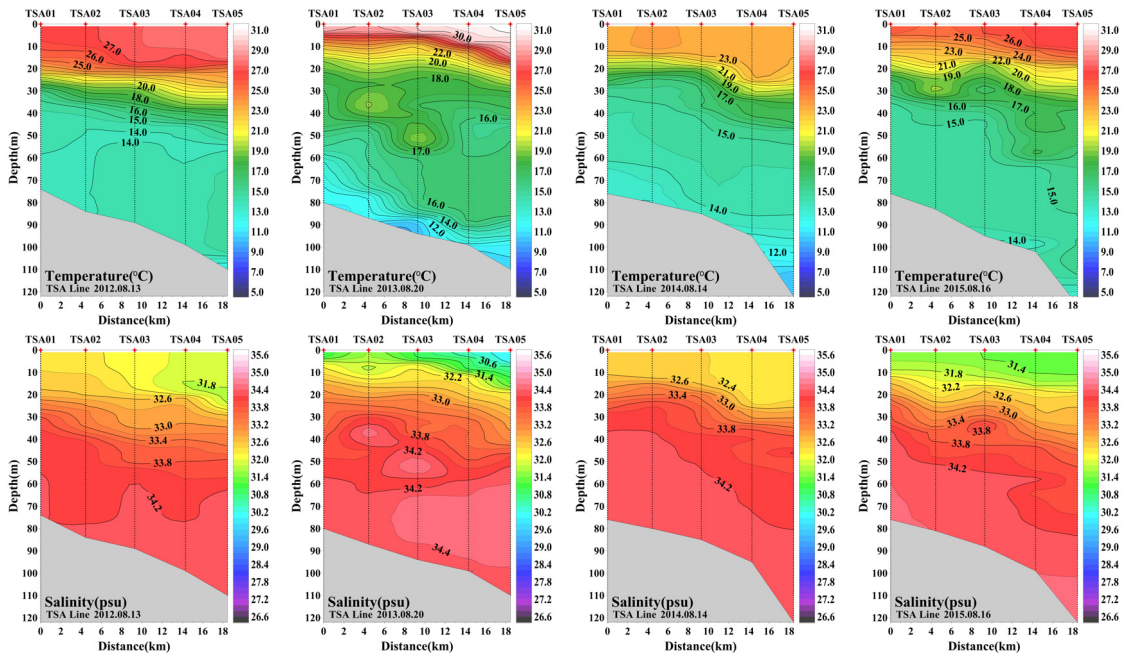


Figure 4. Vertical sections of temperature(upper) and salinity(lower) along the TSA survey line on August (2012~2015)

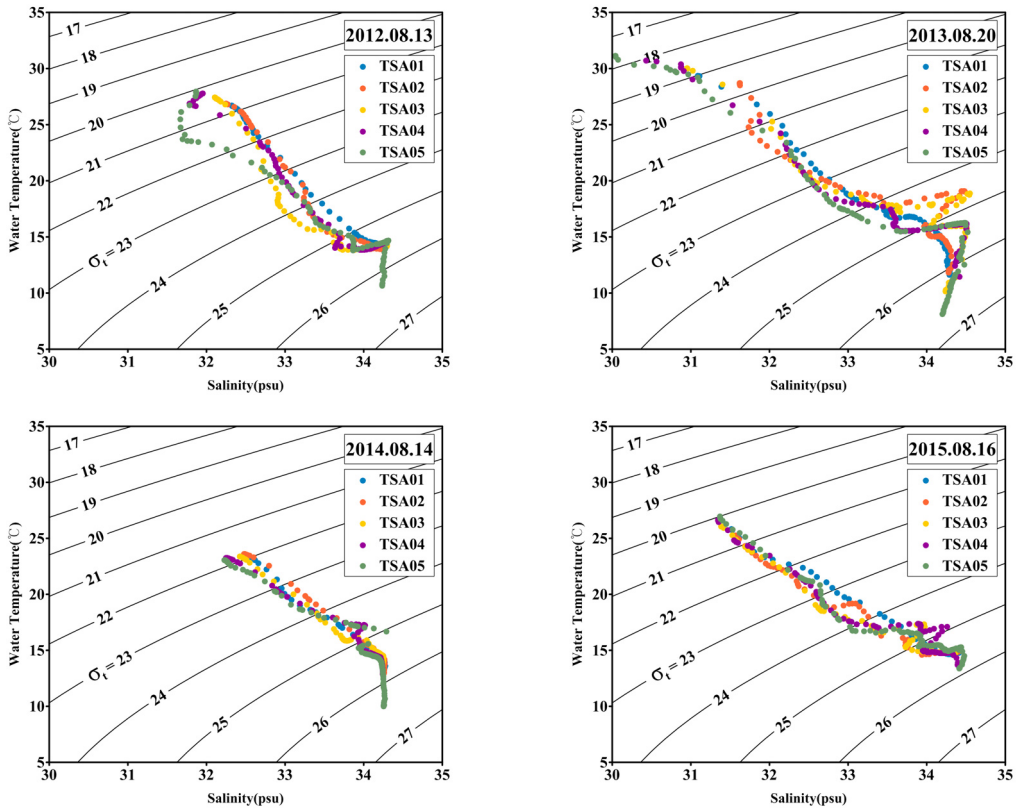


Figure 5. T-S Diagram of TSA survey line on August(2012~2015)

로 저층냉수의 수온도 2013년 다음으로 낮게 형성될 것으로 예상되었지만, 실제로는 2014년 하계가 더 낮게 나타났는데, 이는 Fig. 2의 저층냉수 시계열에서 볼 수 있듯이 대한해협저층냉수의 출현기간은 6월에서 7월 사이로 수온염분의 정점관측이 수행된 8월과는 시간적으로 차이가 많이 나므로 Fig. 4의 수온·염분 수직단면도 상에서는 저층냉수의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

3.4 T-S Diagram 분석

2012년~2015년 8월에 국립해양조사원의 ‘한국연안 해류조사’ 정선인 TSA 라인의 수심에 따른 수온과 염분 자료를 이용하여 T-S Diagram을 작성하여 도시하였다(Fig. 5). T-S Diagram은 수온과 염분의 변화를 물기둥의 깊이 에 따라 도표로 나타내고, 이 결과를 다른 해역의 관측자료와 비교함으로써 연구해역의 해수특성을 파악하는 표현기술 중 하나로 해양학자들이 유용하게 사용하고 있다(안과 오, 1998).

2012년 8월과 2014년 8월의 T-S Diagram으로부터 전반적으로 수심이 깊어질수록 수온이 감소하고 염분이 증가하는 경향이 나타났으며, 관측정점 중 가장 외해역에 위치해 있는 TSA-05의 경우 일정 수심 이상에서는 염분이 약 34.25 psu로 거의 일정하고 수온만 약 10.0°C에 이를 때까지 감소하는 경향이 나타났다. 반면, 2013년 8월의 경우는 정점 TSA-02~TSA-03의 중층에서 상대적으로 고온(18.5°C 이상), 고염(약 34.5 psu)의 수괴가 나타났는데, 이는 대한해협으로 유입되는 대마난류의 특성을 가진 수괴로 TSA 정선의 중층에서 강한 난류의 영향이 나타남을 의미한다.

한편, TSA-05 정점의 저층으로 가면서 수온이 10.0°C 이하로, 염분이 34.2 psu 정도로 감소하는데 이는 대한해협저층냉수의 영향으로 판단되며 Fig. 4의 수온 단면도를 통해서도 확인할 수 있다.

한편, 2015년 8월의 경우 T-S Diagram 상에서 표층에 고온, 저염의 특성을 보여 2013년 8월과 유사한 경향을 나타냈으며, 이는 Fig. 4의 수온·염분 수직단면도에서도 확인할 수 있다. 따라서 2013년 하계에 이어 2015년 하계에 대한해협을 통해 동해로 유입되는 대마난류의 수송량이 컸으며 이로 인한 대한해협저층냉수의 영향도 2013년을 제외한 다른 해 보다 더 크게 나타났을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

주요해역 해양관측부이 중 대한해협저층냉수의 영향이 나타날 것으로 예상되는 해역에 설치된 ‘대한해

협’ 및 ‘남해동부’ 해양관측부이로부터 표층 및 저층 수온자료를 수집하여 분석함으로써 대한해협저층냉수의 시간에 따른 수온의 변동양상과 공간적인 영향범위를 파악하고자 하였다.

분석에는 ‘대한해협’과 ‘남해동부’ 해양관측부이에서 2012년 9월부터 2015년 11월까지 약 3년 이상 관측된 표층 및 저층수온 자료와 일본 큐슈대학교의 응용역학연구소에서 대한해협 주변의 표층유속을 모니터링하기 위하여 설치한 HF-radar 자료 및 2012년~2015년 8월에 국립해양조사원에서 관측한 ‘한국연안 해류조사’ 정선 중 하나인 TSA 라인의 층별 수온과 염분 자료를 사용하였다

저층수온의 시계열 분석으로부터 2012년~2015년 여름철에 ‘대한해협’ 해양관측부이의 저층에서는 겨울철보다 더 낮은 수온의 냉수괴가 관측되었는데, 이는 겨울철에 냉각으로 인한 수직혼합으로 그 해역에서 지역적으로 형성된 것이 아니라 동해의 중층 보다 깊은 수심으로부터 유입된 냉수괴의 영향임을 알 수 있다. 특히 2013년 여름철이 다른 해에 비하여 더 낮은 수온을 보였으며, 냉수괴의 출현기간도 더 오래 나타났는데, 이는 앞서 언급된 대한해협에서 대마난류의 수송량이 2013년 여름철에 더 컸음을 나타낸다. 상기의 결과는 같은 기간 동안 관측된 국립해양조사원의 TSA 정선관측 자료 및 일본 큐슈대학교의 HF-Radar 표층 유속 결과를 통해서도 확인할 수 있었다.

향후 대한해협 저층냉수의 시·공간적인 변동특성을 더 자세히 파악하기 위해서는 장기적인 대한해협저층냉수 수온의 모니터링이 필요하며, Takikawa and Yoon(2005)의 연구와 같이 부산-후쿠오카 간을 운항하는 Camellia Ferry에서 ADCP(다중 음향 도플러 유속계; Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 관측된 수송량 자료와 저층수온과의 동기간 비교연구를 통해 두 항목 간의 상관관계를 파악하는 과정이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국립해양조사원 “해양예보 기반구축을 위한 해양정보 종합분석” 과업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 실시간해양관측정보시스템. 국립해양조사원, (http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_rel.do)

2. 안희수, 오임상 공역 (1998) 물리해양학. 시그마프레스, 335p.
3. 이석우 (1992) 한국근해해상지. 집문당, 334p.
4. 이재철, 2011. 여름철 해운대 냉수대의 용승반응. 한국해양학회지(바다), 16(4): 206-211.
5. Lee, J. C., D. H. Kim, J.-C. Kim, 2003. Observations of coastal upwelling at Ulsan in summer 1997. J. Korean Soc. Oceanogr., 38(3): 122-134.
6. Ocean Radar System. RIAM, Kyushu Univ, (<http://le-web.riam.kyushu-u.ac.jp/radar/daily/>)
7. Seung, Y. H., 1984. A numerical experiment of the effect of coastline geometry on the upwelling along the east coast of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 19(1): 24-30.
8. Takikawa T. and J.H. Yoon (2005) Volume Transport through the Tsushima Straits Estimated from Seas Level Difference, J. of Oceanography, 61, 699-708.



고 지 민
 2009년 인하대학교 해양학과 이학사
 2012년~현재 국립해양조사원
 해양예보과 주무관

관심분야는 해양정보 종합분석



김 영 택
 2001년 Florida Institute of
 Technology 해양환경학과
 이학박사
 2006년~현재 국립해양조사원
 해양예보과 해양수산연구소
 관심분야는 하구순환 및 연안퇴적역학, 열·염 확산



김 민 하
 2012년 인하대학교 해양과학과
 이학석사
 2012년~2013년 (주)한국해양과학기술
 2013년~현재 (주)전략해양 대리

관심분야는 자료분석, 수치모델



김 국 진
 2002년 인하대학교 해양학과 이학박사
 2002년~2005년 큐슈대학교 학술연구원
 2011년~현재 (주)전략해양 이사

관심분야는 자료분석, 해양역학, 수치모델

