

ORIGINAL ARTICLE

이러도 주변해역에서 수중음속의 시공간적 변동성

박경주*

해군사관학교 해양학과

Temporal and Spatial Variability of Sound Speed in the Sea around the leodo

Kyeongju Park*

Department of Oceanography, ROK Naval Academy, Chinhae 51704, Korea

Abstract

The impact of sound speed variability in the sea is the very important on acoustic propagation for the underwater acoustic systems. Understanding of the temporal and spatial variability of ocean sound speed in the sea around the leodo were obtained using oceanographic data (temperature, salinity). from the Korea Oceanographic Data Center, collected by season for 17 years. The vertical distributions of sound speed are mainly related to seasonal variations and various current such as Chinese coastal water, Yellow Sea Cold Water (YSCW), Kuroshio source water. The standard deviations show that great variations of sound speed exist in the upper layer and observation station between 16 and 18. In order to quantitatively explain the reason for sound speed variations, Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis was performed on sound speed data at the Line 316 covering 68 cruises between 2002 and 2018. Three main modes of EOFs respectively revealed 55, 29, and 5% the total variance of sound speed. The first mode of the EOFs was associated with influence of surface heating. The second EOFs pattern shows that contributions of YSCW and surface heating. The first and second modes had seasonal and inter-annul variations.

Key words : leodo, Sound speed, Empirical orthogonal function

1. 서론

해양음향학에 대한 연구는 제2차 세계대전 이래로 많은 발전을 거듭해왔다. 수중음향시스템은 소나(SONAR, sound navigation and ranging), 수중통신, 해저자원탐사 등 민간 및 군사 분야에서 큰 역할을 하고 있으며 필수적인 시스템이다. 이러한 역할을 수행함에 있어서 수중에서의 정보전달 매체는 음파를 이용하고 있으며, 이러

한 음파의 전달특성을 결정짓는 가장 중요한 해양학적 요소는 음속이다.

해양에서 음속은 통상적으로 수중의 수온, 염분 및 수심을 관측하여 어떤 경험식을 통하여 계산할 수 있다. 음속은 수온, 염분 및 수심에 대한 함수이며, 해양의 상층부에서는 수온의 영향을 가장 많이 받으며, 수온이 거의 일정한 심해에서는 압력의 영향을 주로 받는다. 또한 음속은 해양에서 시간과 공간에 따라 다양한 변동성을 가지고 있다. 음속의 공간적

Received 8 September, 2020; Revised 3 November, 2020;

Accepted 16 November, 2020

*Corresponding author: Kyeongju Park, Department of Oceanography, ROK Naval Academy, Chinhae 51704, Korea
Phone : +82-55-907-5300
E-mail : parkkj9@gmail.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

변화에 있어서 수직변화는 수평변화 보다 크게 나타나는 것이 일반적이며, 수평변화는 대부분 약하게 나타나지만 수온전선대(oceanic front)가 형성된 곳은 변화량이 크다. 음속 변화는 수온의 영향을 많이 받으므로 수온의 성층화(stratification)로 인해 음속도 유사하게 수직적으로 성층화 된다. 해양의 성층화는 수심에 따른 음속의 변화와 연관성이 있다(Clay and Medwin, 1977).

음속의 시공간적인 변화는 스넬의 법칙(Snell's law)에 근거하여 수중음파를 굴절하게 하고 다양한 형태의 음파전달 경로를 유발함으로써 수중물체 탐지, 수중통신 등 수중 음파전달을 응용하는 분야에서는 필수적으로 파악되어야 할 중요한 부분이다.

이에도(Ieodo)는 동중국해(ECS, East China Sea) 북부해역에 위치해 있으며, 해양과학기지가 있는 전략적으로 중요한 곳이다. 또한, 그 주변해역은 해군의 활동에 있어서도 해양음향학적으로 많은 관심을 가져야 할 해역이다. 이에도 주변해역은 대기-해양의 상호작용으로 해양 환경이 복잡하고 변화가 많은 해역이다. 동중국해는 중국, 대만, 류큐섬(Ryukyu Island) 및 한반도에 의해 둘러싸인 연해이며, 수심 200 m 이내의 대륙붕이 전체면적의 70% 이상을 차지한다(Ichikaw and Beardsley, 2002). 동중국해는 쿠로시오(Kuroshio), 그 지류인 대만난류(Tsushima warm current), 대만난류(Taiwan warm current)와 양자강 유출수(Changjiang river discharge) 외에 중국과 한국 연안수의 영향을 직접 받는 해역으로 계절풍에 의한 해황의 계절변동이 뚜렷하게 나타난다(Beardsley et al., 1985; Chen et al., 1994).

동계의 동중국해는 강한 북서풍에 의한 해수 혼합으로 혼합층(mixed layer)이 잘 형성되며 하계에는 강한 태양 복사열과 중국대륙 연안수의 영향으로 해수 표층이 고온저염화 되는 특성이 있다. 반면 하계 저층은 동계 기온변화에 의해 형성된 황해저층냉수(YSCW, Yellow Sea Cold Water)가 존재하며 이는 황해중양골을 따라 남하하여 이에도가 위치해 있는 동중국해 북부해역까지 확장한다(Jang et al., 2011). 또한 하계 저층에는 황해저층냉수의 영향을 받은 저온수가 분포하며 상층에는 강한 성층을 형성한다(Jang et al., 2007).

동중국해 북부의 이에도 주변해역은 다양한 해류의 영향, 특히 저층냉수대에 의한 수중음속의 시공간적 변화가 많을 것으로 보이며 이로 인해 수중 음파전달에 다

양한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 해양음향학적인 복잡성은 수중탐지를 위한 소나의 운용에도 민감하게 작용할 수 있다. 이러한 환경에서의 음파전달 해석은 거리종속음향모델(range-dependent acoustic models)을 사용함으로써 정확도를 높일 수 있으며, 관련 기초연구가 필요하다. 이러한 관점에서 볼 때 수중음속의 변동성에 관한 연구는 거의 없는 실정이며, 경험직교함수(EOF, Empirical Orthogonal Function)를 이용한 분석은 처음이다. 따라서 수중음속의 변동성 분석은 이에도 주변해역의 음향학적 효과를 연구하는데 있어 상당한 의미를 함축하고 있으며 관련 분야 연구에 기초자료로 사용될 수 있다.

이 논문은 이에도 주변해역에서 수중음속의 시공간적인 변화를 기술하며, 음속의 변동성에 대한 황해저층냉수의 영향을 보여준다. 먼저 수온, 염분 및 음속의 계절별 수직분포 특성에 대해 알아보고, 이어서 음속의 표준편차와 경험직교함수 방법을 적용하여 음속의 변동성을 시공간적으로 분석하였다.

2. 재료 및 방법

이에도 주변해역에서 수중음속의 시공간적 변동성을 연구하기 위하여 국립수산과학원에서 동중국해 북부해역을 대상으로 관측한 해양조사자료의 일부분을 이용하였다. 동중국해 북부해역의 관측은 124°00'~127°30'E, 31°30'~32°30'N에 해당하며 3개 Line 315, 316, 317의 32개 정점에서 수행되고 있다(Fig. 1).

본 연구에서는 이에도와 가장 근접한 Line 316(11개 정점)에서 관측한 자료 중 2002~2018년까지 17년간 매 분기별(각 계절 대표)로 2월, 5월, 8월, 11월에 관측한 수온, 염분 자료를 이용하였다. 자료는 국립수산과학원의 한국해양자료센터 홈페이지(<http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc>)에서 공개 제공하고 있다. 연구에 적용된 수온, 염분자료는 표준수심(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m)에서 관측된 자료이므로 간격이 일정하지 않아 내삽법을 적용하였다. 내삽법은 자료 사이의 왜곡을 줄이기 위해 Monotone cubic hermite 방법(Fritsch and Carlson, 1980)을 이용하였고, 수심 1 m 간격으로 음속 수직분포를 나타내었다. 이때 음속계산은 Mackenzie의 공식(Mackenzie, 1981)을 적용하였다. 또한 경험직교

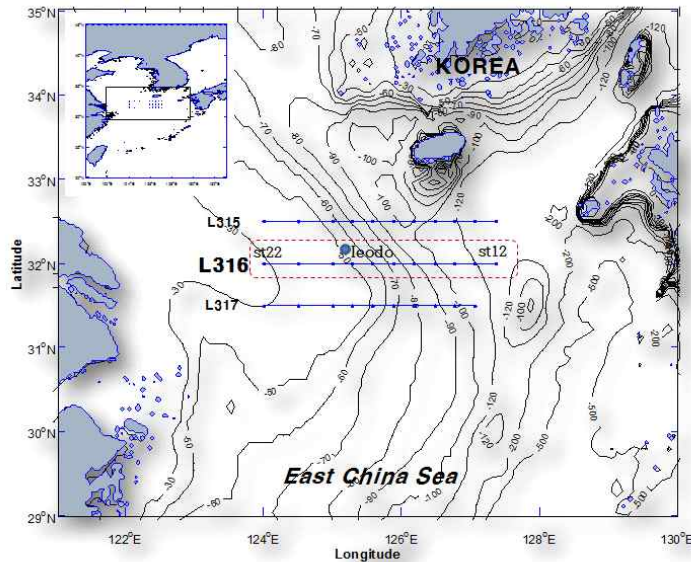


Fig. 1. The study area(Line 316) in the northern East China Sea.

함수 분석을 위해서 Line 316에서 관측 정점 간격이 동일한 정점 12~20을 대상으로 한 17년간(68분기)의 음속자료를 이용하였으며, 원래의 음속자료로부터 전체평균을 제거한 후 특이값 분해(SVD, Singular Value Decomposition) 방법을 사용하여 EOF를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 계절별 평균수온 수직분포

이러도 주변해역에서 음속의 변동성을 확인하기 위하여 수중음속의 변화에 큰 영향을 미치는 수온에 대한 수직분포 변화를 알아보았다. Fig. 2는 계절별 평균수온에 대한 수직분포를 나타내고 있다.

동계에는 강한 북서풍으로 인한 활발한 해수의 혼합에 의해 9.0~17.4°C 범위에서 표층부터 해저면 부근까지 균일한 수온 분포를 보이며 해역 전반에 걸쳐 혼합층이 형성되어 있다. 정선의 동쪽(정점 12)은 17.4°C이며 서쪽(정점 22)은 9.0°C로 상당한 수온차이를 보이고 있다. 이는 중국대륙 연안수와 쿠로시오 기원수 영향이 있음을 짐작할 수 있다. 황해로 유입되는 황해난류는 쿠로시오의 지류인 대마난류에서 분기되는 것으로 알려져 있으며 (Guan, 1984), Yoon et al.(2015)은 쿠로시오 기원수는

모든 계절에 출현하며 동계에는 표층에서 저층까지 관측된 것으로 보고 하였다.

춘계에는 혼합층이 전반적으로 상당히 얇아졌고 서서히 수온약층(thermocline)이 형성되는 시기이며 20~30 m 부근에 약한 수온약층이 분포하고 있다. 또한, 정점 16~20 사이의 20 m 보다 깊은 수심에서는 13°C 이하의 냉수괴가 존재함을 알 수 있다.

하계 수온은 15.3~28.5°C 범위로 표층과 저층 간 온도차가 심하고 20 m 수심을 중심으로 강한 수온약층이 형성되어 있으며, 정점 15~18 사이에는 상대적으로 수온이 낮은 16°C 이하의 냉수괴가 존재하였다. 이는 춘계에 존재하던 냉수괴가 하계까지 잔존하거나 또는 북쪽에서 남하한 냉수괴로 생각된다. 황해저층냉수는 황해에서 동계에 형성되어 황해중앙골을 따라 남하하는 것으로 알려져 있다. Jang et al.(2011)은 동중국해 북부해역에서 7년간(2003~2009년)의 하계 관측자료를 토대로 황해저층냉수 수온과 염분을 새롭게 정의(수온 13.2°C 이하, 염분 32.6~33.7 psu)하고, 이 냉수괴가 동중국해 북부해역까지 남하하는 것을 확인하였다. 관련하여 연구해역의 Line 316 관측 정점을 대상으로 본 연구에서 사용한 17년간의 자료중 Jang et al.(2011)이 제시한 황해저층냉수의 하계 출현 여부를 확인(수온, 염분)해 보았다(Table

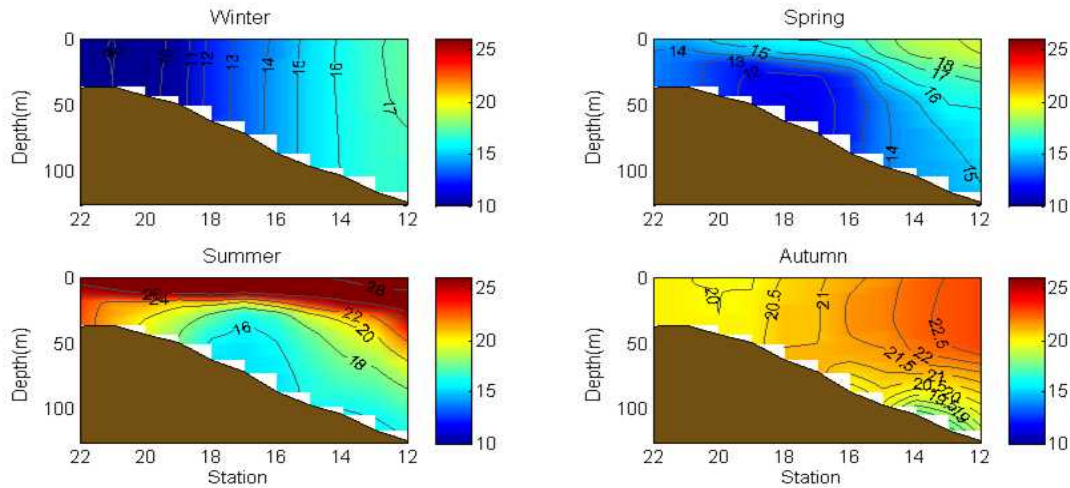


Fig. 2. Vertical distributions of mean temperature fields for along Line 316 for four seasons.

Table 1. The year and station of YSCW emergence in summer along Line 316 for the 17 years(2002-2018)

Year	Station(depth)	Year	Station(depth)
2003	17(50 m), 18(50 m)	2010	15(30~50 m), 16(50~75 m), 17(30~50 m), 18(50 m)
2005	18(50 m)	2012	16(30~75 m), 17(30~50 m), 18(50 m)
2007	18(50 m)	2013	16(50~75 m), 17(50 m), 18(50 m)
2008	17(50 m)	2014	18(30~50 m)
		2018	13(75 m), 14(50 m), 15(50 m), 16(75 m), 17(50 m)

* YSCW(Jang et al., 2011) : temperature below 13.2°C, salinity 32.6~33.7 psu

1). 이 중 9개 년도에서 기준에 부합하는 냉수괴가 출현하였으며, 수심은 주로 50 m 내외에서 분포하였다. Yoon et al.(2015)은 동중국해 북부해역(Line 315~317)에서 하계에 출현하는 황해저층냉수의 수심 분포는 50 m 내외에서 관측된 것으로 분석하였다. 하계는 다른 계절에 비해 황해저층냉수와 장강희석수의 영향으로 복잡한 해양환경을 나타낸다(Hur et al., 1999).

하계 표층수온 증가는 저층수온 변화보다 큰 경향을 보이며, 이는 표층 및 저층수온 차이가 모두 증가하는 방향으로 변화하여 성층 강화의 경향이 있음을 의미한다(Lee and Kim, 2013). 추계에는 태양 복사열이 약해지고 해수의 수직혼합이 발달함에 따라 해역 전반에 걸쳐 수심 50 m 부근까지 혼합층이 형성되었으며, 정점 16 동쪽의 약 60 m 보다 깊은 수심에서는 수온약층이 존재하고 있다. 동중국해 북부해역의 수괴는 크게 장강희석수,

대만난류, 쿠로시오 기원수, 황해저층냉수에 의해서로 다른 계절적 특성을 나타낸다(Yoon et al., 2015).

3.2. 계절별 평균염분 수직분포

음속의 변화에 영향을 크게 미치는 수온분포에 이어 염분의 수직분포에 대하여 살펴보았다. 일반적으로 염분은 해양에서 30~35 psu 범위에 있기 때문에 음속의 변화에는 거의 영향을 주지 못한다(Knauss, 1978). 하지만 동중국해 북부해역은 하계 장강희석수의 유입으로 저염분수가 출현하므로 이를 고려하여야 한다. 이에 17년 간의 염분자료에 대한 계절별 평균염분 수직분포를 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 저염분수는 염분 30 psu 이하의 해수를 말한다(Oh, at al., 2006). 전반적으로 염분은 수온분포에서 보인 뚜렷한 계절변화는 보이지 않으나 하계에는 다른 계절에서 볼 수 없는 특별한 분포 형태를

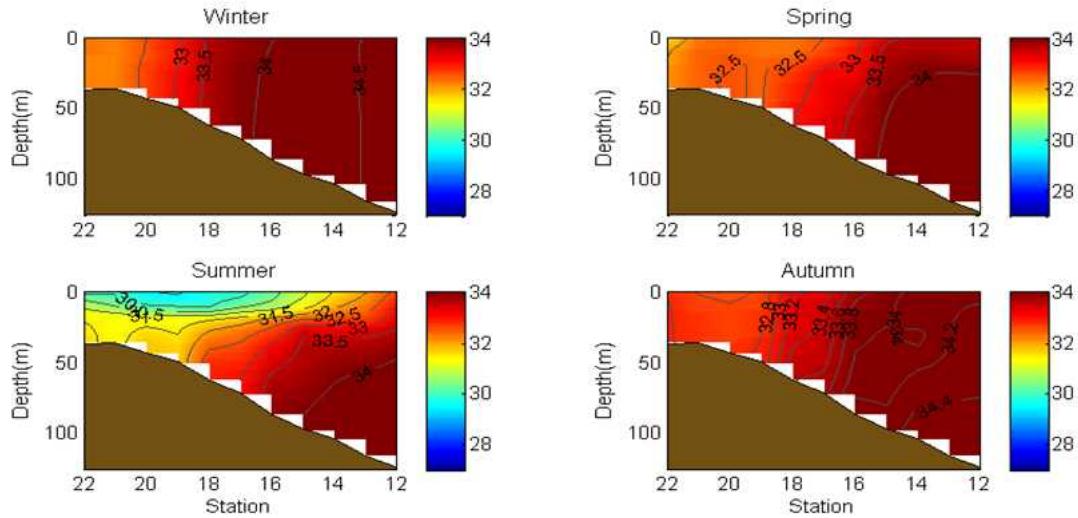


Fig. 3. Vertical distributions of mean salinity fields for along Line 316 for four seasons.

보여주고 있다.

먼저 하계를 제외한 다른 계절의 염분 범위를 보면, 동계는 32.14~34.58 psu, 춘계는 31.42~34.46 psu, 추계에는 32.49~34.54 psu의 범위를 보였으며, 평균적으로 32.02~34.53 psu에 해당된다. 이들 계절별 염분 범위 차이는 크지 않으며, 대체적으로 정선의 서쪽은 낮은 염분 값을 보이며 정선의 동쪽과 수심이 깊은 곳은 높은 염분 값을 보였다. 이는 중국대륙 연안수와 쿠로시오 기원수의 영향으로 판단된다.

하계 염분은 29.44~34.49 psu 범위로, 염분 최소값은 위에서 언급한 세 계절의 염분 범위 최소값 대비 평균 2.24 psu의 낮은 값을 보였으며, 최대값은 거의 차이가 없었다. 하계는 전반적으로 상층에는 염분값이 낮고 외해쪽 수심이 깊어질수록 높은 값을 보였으며, 표층과 저층간 염분 차이가 크게 나타났다. 이러한 표층과 저층의 염분 차이는 모두 증가하는 방향으로 변화하여 성층강화의 경향이 있음을 보여준다(Lee and Kim, 2013). 정점 17~22 사이의 수심 약 10 m 이내에서 30 psu 이하의 저염분수가 분포하고 있고, 이중 정점 19에서 17년 기간 중 11개 연도에서 저염분수가 출현하여 가장 높은 빈도를 나타내었다. 하계 양자강 유출수는 유량이 많으며 외해 북동방향으로 흐르며 동중국해로 유입된다(Beardsley et al., 1985, Lie et al., 2003). 동중국해 북

부해역으로 유입되는 장강희석수는 연평균 염분 29.5 psu로 하계에 집중적으로 관측되었으며, 출현 수심은 30 m 이내에서 약 5 m 수층에 집중된 것으로 나타났다(Yoon, et al., 2015). 일반적으로 해양에서 염분에 의한 음속의 변화는 거의 없지만, 하계 이러도 주변해역의 표층에 출현하는 저염분수는 음속을 느리게 하여 음속 기울기를 변화시킬 수 있으며, 표층부근의 음속변화에 일부 영향을 미칠 수 있다. 하지만 하계 해표면의 높은 수온에 의한 음속변화를 복합적으로 고려한다면 염분에 의한 영향은 적을 것으로 판단된다.

3.3. 계절별 평균음속 수직분포

동중국해 해수의 특성은 쿠로시오, 담수, 조류에 의한 수직혼합 및 대기의 작용과 같은 다양한 요소들에 의해 특징지어 지며(Chang and Isobe, 2003), 다양한 수괴에 의해 복잡한 환경과 계절 특성을 보이며, 관련하여 수중음속의 변동성이 클 것으로 생각된다. 수중음속은 수온, 염분 및 수심의 함수이며 일반적으로 음속에 가장 큰 영향을 주는 것은 수온이다(Urick, 1983). 따라서 계절별 음속의 수직분포 양상은 수온의 수직분포 양상과 유사하게 나타남을 짐작할 수 있다. Fig. 4은 계절별 평균음속의 수직분포 변화 특성을 보여주고 있다. 음속분포의 전체적인 양상은 평균수온의 수직분포 양상과 유사하며 뚜렷한

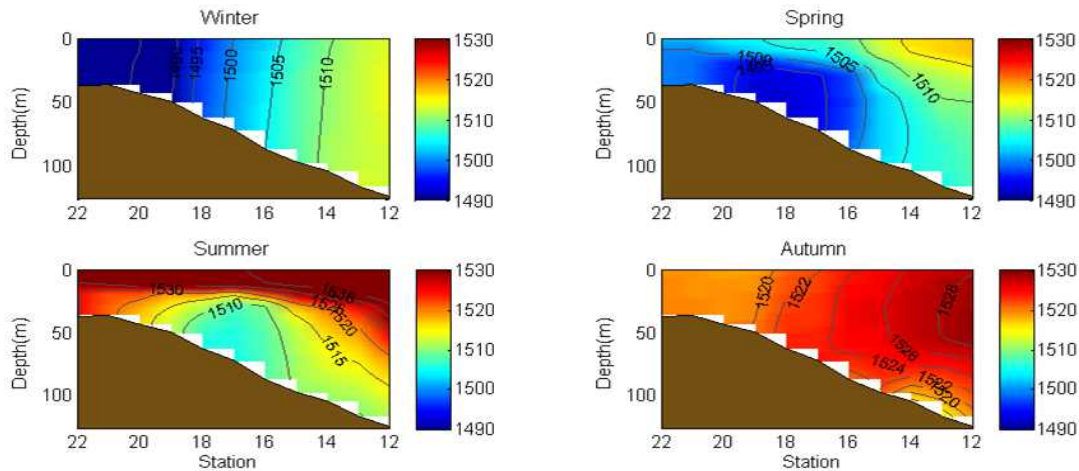


Fig. 4. Vertical distributions of mean sound speed fields for along Line 316 for four seasons.

계절 변화를 볼 수 있다.

동계에는 해상풍이 많이 부는 계절로 표층과 저층간 해수의 혼합이 활발하게 일어난다. 따라서 전 해역에 걸쳐 음향층심도(SLD, Sonic Layer Depth)가 형성되어 표층에서 저층까지 균일한 음속분포를 보이고 있으며, 음속은 1483~1514 m/s 의 범위를 나타내었다. 정점 17 서쪽 해역은 음속이 1500 m/s 이하의 값을 보였으며 상대적으로 동쪽 해역은 음속이 높았다. 이는 수온의 수직분포에서도 유사한 양상을 보였으며 중국대륙 연안수와 고온의 쿠로시오 기원수의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. Wang et al.(2012)에 따르면 동계 황해 남부해역(제주도 남서쪽)에서 수온전선대(oceanic front)는 황해난류가 발달했을 때 거의 출현하며, 제주도 남서쪽에서 전선대가 안정적으로 나타날 확률은 최소 70%라고 분석하였다. 또한 수온전선대는 양쯔강 하구로부터 북동쪽에서 북서-남동 방향으로 형성되며 양쯔뱅크(Changjiang bank) 끝단을 따라 수심 50~70 m 등심선 사이에 분포한다고 보고하였다. 이러한 수온전선대는 냉수와 난류의 경계에서 나타나며 수평적으로 음속의 변화가 크므로 수중음파 전달시 굴절을 발생시켜 전달 효과를 감소시킬 수 있다.

춘계에서 하계로 갈수록 양자강 유출수의 양이 증가하여 중국대륙 연안수의 영향을 많이 받으며, 해수면 가열이 증가하기 때문에 표층과 저층간의 음속차이가 증가한다. 춘계에는 정점 서쪽 낮은 음속분포가 해저 경사면

을 따라 정점 15 부근까지 확장된 모습을 보이며, 상대적으로 표층부근은 음속이 높아지고 있어 동계에는 나타나지 않았던 부음속경사(negative gradient)가 형성되고 있음을 볼 수 있다.

하계 음속은 1506~1540 m/s의 범위를 보이며, 상층에는 수온약층이 발달하였고 저층에는 냉수대가 존재하여 전반적으로 강한 부음속경사를 보이고 있다. 해수면에서 약 20 m 부근까지는 1530 m/s 이상의 높은 음속과 함께 SLD가 형성되어 있다. 수심 20m부터 저층까지는 음속이 계속 낮아지는 부음속경사를 보이는데, 대략 정점 16~18 사이에서 가장 낮은 음속분포를 보이고 있다. 이는 Jang et al.(2011)이 보고한 황해에서 동계에 형성되어 황해중양골을 따라남하하여 하계 동중국해 북부해역에서 관측되는 황해저층냉수와 연관이 많을 것으로 보인다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 하계 가장 낮은 음속분포를 보이는 정점 범위에 속하는 정점 17에서 황해저층냉수가 출현하는 6개 년도(Table 1)에 대한 수온, 염분 및 음속구조를 각각 나타내었다. 음속구조에서는 17년간의 평균음속구조도 같이 표시하여 황해저층냉수에 의한 음속변화를 비교할 수 있도록 하였다. 6개 년도 중 4개 년도(2003, 2008, 2010, 2013년)는 표층부근에 30 psu 이하의 저염분수가 출현한 경우이다. 이들 평균염분은 표층에서 28.84 psu, 10 m 수심에서 29.24 psu를 보였다. 음속은 수온, 염분, 압력의 영향을 받아 변화하는데, 이중 수온

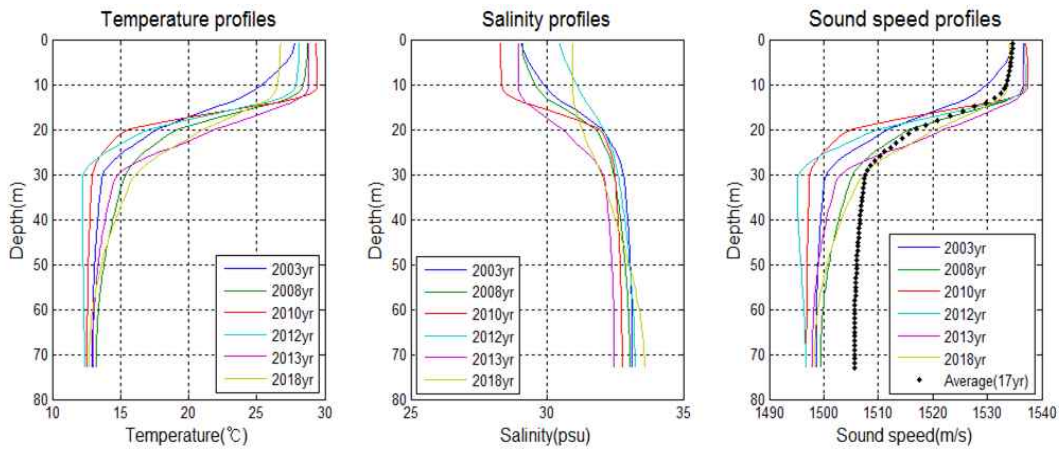


Fig. 5. The vertical profiles of temperature, salinity and sound speed of the year of YSCW emergence(observed at station 17).

변화에 의한 영향이 크며, 염분의 경우는 일반적으로 음속에 미치는 영향이 적다. Fig. 5에서 보는바와 같이 표층 부근의 저염분수는 음속변화에 기여할 수는 있지만, 하계 높은 표층 수온분포의 상호작용을 고려하면 저염분수에 의한 음속변화는 적을 것으로 보인다. 음속구조에서 표층부근의 음속변화를 보면 변화의 폭이 크지 않음을 알 수 있으며, Kim et al.(2015)에 의하면 동중국해 북부해역에 출현하는 저염분수는 염분 수직분포의 기울기를 증가시켜 표층채널 형성에 영향을 줄 수 있지만, 하계 강한 표층수온을 복합적으로 고려하면 표층채널이 형성되기 어렵다고 보고한 바 있다.

황해저층냉수의 출현으로 음속 구조변화에 어떤 영향을 미치는지 살펴보기 위해 저층냉수가 출현하는 경우와 그렇지 않는 경우(17년간 평균 음속구조)를 비교하여 보았다(Fig. 5). 황해저층냉수가 분포한 경우는 그렇지 않은 경우보다 수온약층이 형성되는 음속의 범위가 더 넓었으며, 30 m 보다 깊은 수심에서는 음속의 기울기 변화가 더 크고 다양하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 강한 수온약층으로 인해 상층과 하층이 안정되어 있으며 저층에 형성된 황해저층냉수의 확장은 주변 해수 보다 상대적으로 낮은 수온으로 인해 음속을 느리게 하여 음속의 기울기를 변화시키므로 음속의 변동에 많은 영향을 주는 것으로 판단된다. 이는 냉수대의 출현과 음속구조의 변동은 상관성이 높다고 할 수 있으며, 이러한 음속의 변화는 수중음의 굴절에 영향을 주어 음파전달 양상에 큰 변화

를 가져올 수 있다.

추계의 음속분포는 태양 복사열의 감소와 해수 혼합 작용의 증가 등으로 인해 하계에 형성되었던 수온약층은 모두 사라지고, 수심 70 m 부근 까지 전 해역에서 정음속경사(positive gradient) 분포를 보이고 있으며, 정점 12~16사이의 약 70 m 보다 깊은 수심에서는 약한 수온약층이 형성되는 특성을 보여준다.

3.4. 음속의 표준편차와 경험직교함수 분석

이 장에서는 먼저 Line 316의 9개 정점(정점 12~20)에서 관측한 수온 및 염분 자료를 이용하여 계산된 17년간(68분기)의 전체 음속자료에 대한 통계적 특성을 알아 보았다. Fig. 6에서는 17년간의 음속자료에 대한 표준편차를 나타내고 있다. 수심이 얇은 중국연안쪽의 상층에서 가장 큰 변화를 나타내며, 수심이 깊은 외해 쪽은 상대적으로 약한 변화를 보이고 있다. 또한, 정점 16~18의 수심 약 20~60 m 범위에서 상당한 음속변화를 나타내고 있다.

가장 변화가 큰 중국연안 쪽은 계절적인 영향과 중국 대륙 연안수의 영향을 주로 받은 것으로 보이며, 정점 16~18 사이의 변화가 큰 부분은 3.3절의 하계 음속 수직 분포에서 살펴 본바와 같이 저층냉수의 출현에 따른 변동과 관계가 있을 것으로 사료된다. 황해저층냉수는 동계 서해 깊은 수심에서 생성되어 하계에 동중국해 북부 해역으로 남하하여 이라도 부근까지 내려오는 것으로

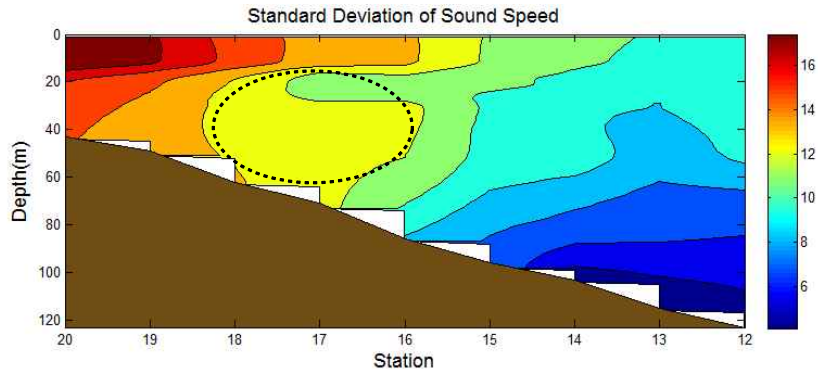


Fig. 6. Standard deviation for sound speed along Line 316 for the 17 years(2002~2018). The dotted circle roughly denotes the region with significant change in sound speed.

보고되었다(Jang et al., 2011). 음속 표준편차의 구조는 수온의 표준편차 형태와 거의 유사하게 나타났으며, 하계 표층 저염분수 출현에 따른 염분 변화의 영향 반영 정도는 3.2절과 3.3절에서 기술한 바와 같이 표층 부근 강한 수온의 상호작용으로 미미한 것으로 보인다.

이러도 주변해역의 해양환경은 시공간적으로 크게 변화한다. 이어서 주변해역에서 수중음속의 변동성을 객관적으로 기술하기 위하여 17년 동안의 매 분기별로 관측한 수중 음속자료에 대하여 EOF 분석을 수행하였다. EOF 분석법은 함수의 직교성을 이용하여 시계열 자료의 시공간적인 변동성을 설명할 수 있으며(Emery and Thomson, 2014), 변동성 중 에너지 크기에 따라 공간분포 특성과 그에 따른 시간적인 변동을 알 수 있다. 수중 음속자료를 EOF 분석하기 위하여 전체평균을 제거한 후 SVD 방법을 적용하였다(Navarra and Simoncini, 2010).

각 정점에는 2002~2018년까지 분기별 간격으로 68개의 수중 음속자료가 있으며, 이 자료를 EOF 분석을 하면 68개의 모드(mode)가 만들어진다. Fig. 7은 제1모드부터 8개 모드에 대한 분산(variance) 정도와 누적백분율을 나타내고 있다. 제1모드, 제2모드, 제3모드는 각각 전체분산(total variance)의 54.97, 28.64, 4.62%를 차지하고 있으며, 1~3모드의 누적 분산은 전체분산의 88.23%를 설명하고 있다. 이와 관련된 EOFs와 시간계수(time coefficients)는 Fig. 8에서 볼 수 있다.

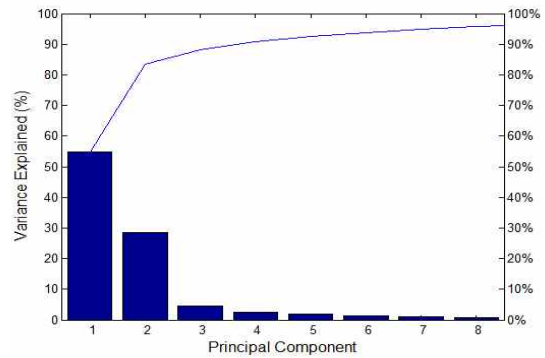


Fig. 7. Variance explained and cumulative sum of the variance explained in each mode.

제1모드(EOF1)는 전체분산의 약 55%를 설명하고 있다. 모드 분석 값은 수심이 얇은 천해역의 표층에서 가장 높으며 경사면을 따라 수심이 깊어질수록 감소하고 있으며, 전반적으로 수평 등치선(isoline) 모양을 보인다. 또한, 연안 쪽과 외해의 수온차이 구조의 변동성과 상층과 하층의 수온차이 변동성이 더해진 형태로 나타나고 있다. 이러한 형태는 표층의 혼합과 해표면의 가열에 의한 영향이 큰 것으로 보이며, 연안 쪽은 중국대륙 연안수, 외해 쪽은 쿠로시오 기원수에 의한 영향도 받는 것으로 사료된다. EOF1의 공간적 패턴은 앞서 언급한 음속의 표준편차(Fig. 6)에 나타난 모양과 다소 유사한 측면이 있다.

제1모드의 시간계수는 Fig. 8의 우측 열 맨 위쪽 그림에 나타내었고 계절변화와 함께 1년 주기로 반복되고

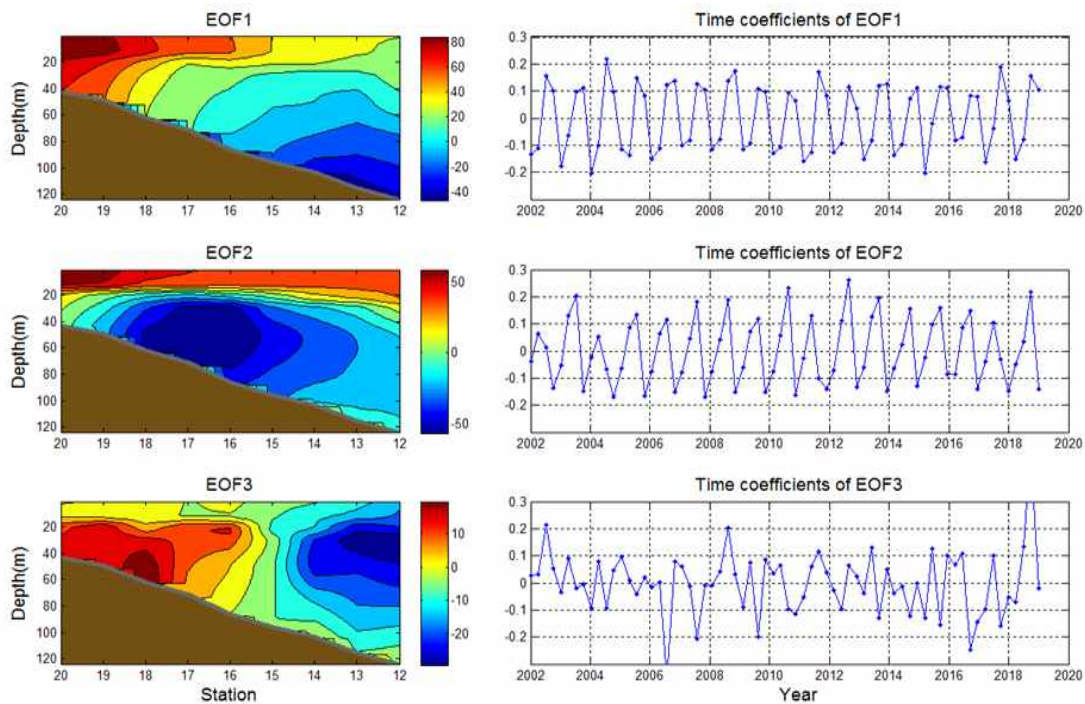


Fig. 8. First three EOFs(left column) and the associated time coefficients(right column) of sound speed variance.

있으며, 매년 최대 양의 값을 갖는 시기는 대부분 8월에 해당된다.

제2모드(EOF2)는 전체분산의 약 29%를 설명하고 있으며 공간분포의 특징은 8월 평균수온의 수직구조와 유사한 형태를 나타내고 있다. 표층에서 약 20 m 부근까지는 유사한 값을 나타내고, 약 20~25 m 사이에서 수평으로 등치선이 조밀하게 형성되어 있으며, 수심에 따라 값이 감소하는 경향을 보인다. 또한 정점 15~18 사이를 중심으로 가장 낮은 음의 값을 나타내고 있으며, 수심 약 30~70 m 범위에서 타원형 모양의 구조가 중심부에 위치하고 있는 특징을 보인다.

25 m 이내 상층은 해표면 가열에 의한 원인으로 보이며, 앞서 분석한 수온의 수직분포에서 하계 황해저층냉수가 출현하는 연도와 수심대를 고려한다면, EOF2에 나타난 가장 낮은 값의 타원형 모양의 구조는 서해로부터 남하하여 하계 동중국해 북부해역에 출현하는 황해저층냉수일 가능성이 높다. Jang et al.(2011)은 서해에서 동중국해 북부해역까지 남하하는 황해저층냉수는 수온약

층이 강할 때 수온약층 아래에서 균질한 형태로 존재하지만 그렇지 않는 경우에는 냉수대의 영역은 연간 변동성이 있음을 보고 하고 있다. 또한 Yoon et al.(2015)은 동중국해 북부해역에서 황해저층냉수의 하계 수심 분포는 50 m 내외에서 관측된다고 하였고, 냉수대의 세력은 지속적으로 증가하는 추세로 다른 수괴에 비해 상대적으로 큰 볼륨을 나타내는 것으로 분석하였다.

시간계수는 제1모드의 시간계수와 유사하게 계절변화를 나타내며 1년을 주기로 반복되는 형태를 보인다. 시간계수 1모드와 유사하게 2모드의 피크(최대값) 역시 대부분 8월에 나타나는데, 두 모드 값이 최대 양의 값을 갖는 시기에 황해저층냉수가 출현할 가능성이 높은 것으로 사료된다. Table 1에서 황해저층냉수가 출현한 시기(9개 연도)를 2모드의 시간계수와 비교하면 모두 피크에 해당하는 시기와 일치함을 알 수 있으며, 이 시기는 모두 8월에 해당된다.

제2모드의 형태는 주로 하계에 나타나는 형상이며 수온약층이 발달하고 하층 냉수대로 인해 음속경사도의

변동이 크게 나타나는 구조이다. 이러한 음속구조는 수중 음파전달 측면에서 보면 음파를 해저면 쪽으로 굴절하게 하는 주요 원인이 되며, 이러한 굴절 양상은 음파의 해저면 반사를 많이 발생시켜 음파전달 효과를 크게 감소시킬 수 있다.

제3모드(EOF3)는 총 분산의 약 5%에 해당되며, 대략 정점 14~16 사이를 기준으로 물성이 다른 두 해수가 서로 접해있는 모양을 보인다. 이는 중국대륙 연안수와 북상하는 고온의 쿠로시오 기원수의 영향으로 생각되며 수온전선대의 형성과 연관성이 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

동중국해 북부해역은 다양한 해류의 흐름으로 인해 환경 변화가 복잡하고 계절 및 연간 변동을 보인다. 이러한 이유로 수중 음파전달 특성 분석 등 해양음향학적 측면에서 연구가 필요한 해역이다.

본 연구에서는 이어도 주변해역(Line 316)에서 관측된 17년간의 수온, 염분 자료를 이용하여 수중음속의 시공간적인 변동 특성을 분석하였다.

음속의 수직분포 분석 결과 음속 변동성은 주로 동계와 하계에 상대적으로 높게 나타났다. 동계에는 표층과 저층간 해수의 활발한 수직혼합으로 인해 균일한 음속분포를 보이는 음향중심도가 발달하였고, 1483~1514 m/s의 음속 분포를 보였다. 내해 쪽의 중국대륙 연안수와 외해의 쿠로시오 기원수의 상호작용으로 수온전선대가 형성되는 것으로 생각된다. 하계에는 주로 해표면의 강한 가열로 인해 수온약층이 발달하였으며 이러한 시기에 출현하는 황해저층냉수대는 수온약층의 강화에 영향을 주며 심한 부음속경사를 형성하는데 기여하는 것으로 사료된다. 이러한 현상은 하계 서해에서 남하하여 이어도 주변해역에 출현하는 황해저층냉수와 수중음속의 변동과 상관성이 높으며, 음파전달 양상에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

17년간의 음속자료에 대한 표준편차를 확인한 결과 내해 쪽의 상층에서 가장 큰 변화를 보였고 수심이 깊어지는 외해 쪽은 상대적으로 약한 변화를 보였다. 또한 정점 16~18사이 수심 30~60 m 범위에서 상당한 음속변화가 나타나는 것이 확인되었으며, 이는 저층냉수와 관련이 많은 것으로 판단된다.

수중음속의 변동성에 대한 객관적인 분석을 위해 Line 316의 17년간 음속자료에 대해 EOF 분석을 하였다. 처음 2개의 모드가 전체 음속 변동성의 약 84%를 차지하였으며, 모두 음속의 계절 및 연간 변동성을 보였다. 제1모드는 변동성의 약 55%를 설명하고 있으며, 해표면 가열에 의한 큰 영향과 중국대륙 연안수와 외해 쪽의 쿠로시오 기원수에 의한 영향을 받는 것으로 판단되며, 계절변화와 1년 주기의 변동을 나타내었다. 제2모드는 변동성의 약 29%를 반영하고 있으며 공간패턴이 하계 평균수온 구조와 유사한 형태를 보였다. 주로 정점 16~18 사이 수심 약 30~60 m에서 냉수대가 타원형 모양의 구조를 보였으며, 이는 냉수의 출현 시기, 위치, 수심 등을 고려했을 때 황해저층냉수로 판단된다.

이어도 주변해역은 해양음향학적으로 복잡한 환경이며 수중음속의 시공간적 변동성에 해표면의 가열과 황해저층냉수의 영향이 크게 기여하고 있다. 이러한 환경에서 음속의 변동성은 수중 음파전달 양상과 밀접한 관련이 있으므로 수중음향시스템 운용하는 관련 분야에서는 충분히 고려되어야 할 중요한 요소이다.

본 연구에서는 이어도에 근접한 Line 316에서 관측된 자료만을 사용함으로써 입체적인 분석이 제한되어 폭넓은 결과를 도출하지는 못했지만, 이어도 주변해역에서 해양음향학적으로 중요한 음속의 변동성에 대한 분석을 처음으로 시도하였다. 향후 심도 있는 연구를 위해서는 자료의 범위를 동중국해 북부해역(Line 315~317) 전반으로 확대할 필요가 있으며, 음속의 변동성과 음향전달 모델을 결합하여 분석한다면 좀더 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구 결과는 수중음향시스템을 이용하는 다양한 민군분야에 기초자료로 활용될 수 있으며, 특히 수중탐지를 위한 소나운용에 도움이 되리라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2019년 해군사관학교 학술연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구입니다.

논문을 심사해 주신 편집위원 및 심사위원들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Beardsley, R. C., Limeburner, R., Yu, H., Cannon, G. A., 1985, Discharge of the Changjiang(Yangtze River) into the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, 4, 57-76.
- Chang, P. H., Isobe, A., 2003, A numerical study on the Changjiang diluted water in the Yellow and East China Seas, *J. Geophys. Res.*, 108, 3299.
- Chen, C., Beardsley, R. C., Limeburner, R., Yu, H., Kim, K., 1994, Comparison of winter and summer hydrographic observation in the Yellow and East China Sea and adjacent Kuroshio during 1986, *Cont. Shelf Res.*, 14, 909-929.
- Clay, C. S., Medwin, H., 1977, *Acoustical oceanography : principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 554.
- Emery, W. J., Thomson, R. E., 2014, *Data analysis methods in physical oceanography*, 3rd ed., Elsevier, New York, 319-343.
- Fritsch, F. N., Carlson, R. E., 1980, Monotone piecewise cubic interpolation, *SIAM J. Numer. Anal.*, 17, 238-246.
- Guan, B., 1984, Major features of the shallow water hydrography in the East China Sea and Huanghai Sea, In: T. Ichieye(Ed.), *Ocean hydrodynamics of the Japan and East China Sea*, Elsevier Oceanography Series, 39, 1-13.
- Hur, H. B., Jacobs, G. A., Teague, W. J., 1999, Monthly variations of water masses in the Yellow and East China Seas, November 6, 1988, *J. Oceanogr.*, 55, 171-184.
- Ichikawa, H., Beardsley, R. C., 2002, The current system in the Yellow and East China Seas, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 58, 77-92.
- Jang, S. T., Lee, J. H., Hong, C. S., 2007, Mixing of sea waters in the northern part of the East China Sea in Summer, *J. Ocean. Soc. Kor.*, 12, 390-399.
- Jang, S. T., Lee, J. H., Kim, C. H., Jang, C. J., Jang, Y. S., 2011, Movement of cold water mass in the Northern East China Sea in summer, *J. Ocean. Soc. Kor.*, 16, 1-13.
- Knauss, J. A., 1978, *Introduction to physical oceanography*, Prentice-Hall, New Jersey, 3-27.
- Kim, K., Rho, H. K., Lee, S. H., 1991, Water masses and circulation around Cheju-Do in summer, *J. Oceanogr. Soc. Kor.*, 26, 262-277.
- Kim, H. S., Kim, J. H., Paeng, D. G., 2015, Analysis of surface sound channel by low salinity water and its mid-frequency acoustic characteristics in the East China Sea and the Gulf of Guinea, *J. Acoust. Soc. Kr.*, 34, 1-11.
- Korea Oceanographic Data Center, 2019 http://kocod.nfrdi.re.kr/page?id=obs_04_01
- Lee, J. H., Kim, C. H., 2013, Long-term variability of sea surface temperature in the East China Sea: a review, *Ocean and Polar Res.*, 35, 171-179.
- Lie, H. J., Cho, C. H., Lee, J. H., Lee, S., 2003, Structure and eastward extension of the Changjiang river plume in the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 108, 3077.
- Mackenzie, K. V., 1981, Nine-term equation for the sound speed in the oceans, *J. Acoust. Soc. Am.*, 70, 807-812.
- Navarra, A., Simoncini, V., 2010, *A guide to empirical orthogonal functions for climate data analysis*, Springer, New York, 42.
- Oh, K. H., Park, Y. G., Lim, D. I., Jung, H. S., Shim, J. S., 2006, Characteristics of temperature and salinity observed at the Ieodo ocean research station, *J. Mar. Env. Soc. Kor.*, 9, 225-234.
- Urick, R. J., 1983, *Principles of underwater sound*, 3rd ed., McgrawHill, New York, 423.
- Wang, W., 1988, Yangtze brackish water plume-circulation and diffusion, *Prog. Oceanog.*, 21, 373-385.
- Wang, F., Liu, C., Meng, Q., 2012, Effect of the Yellow Sea warm current fronts on the westward shift of the Yellow Sea warm tongue in winter, *Cont. Shelf Res.*, 45, 98-107.
- Yoon, S. C., Yoon, S. H., Whang, J. D., Suh, Y. S., Yoon, Y. Y., 2015, Long-term variation in ocean environmental conditions of the northern East China Sea, *J. Kor. Sci. Mar. Environ. Energy.*, 18, 189-206.

• Professor. Kyeong-Ju Park
Department of Oceanography, ROK Naval Academy
parkkj9@gmail.com