

동해의 음향층심도와 혼합층깊이 차이 분석

임세한*

Analysis of Differences between the Sonic Layer Depth and the Mixed Layer Depth in the East Sea

Sehan Lim*

Department of Oceanography, Naval Academy, Changwon, 645-797, Republic of Korea

요 약

음향층심도의 변화에 대한 이해는 해양상층에서 수중음향 통신, 음향 토모그래피 및 수중항체를 수색하거나 탐지하는 해군 작전에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 음향층심도와 혼합층깊이의 정의는 다르게 내려져있으나 혼합층깊이가 음향학적으로는 음향층심도와 같다고 할 수 있다. 본 연구에서는 동해에서 가용한 수온-염분 관측자료를 활용하여 연간 음향층심도와 혼합층깊이를 비교해 보았다. 비교를 위해 다양한 혼합층깊이 결정 기준과 방법으로부터 도출된 혼합층깊이 자료를 활용하였다. 분석결과 동해에서 음향층심도는 곡률변화를 이용한 혼합층깊이와 거의 유사하였으나 다른 혼합층깊이 기준을 적용하였을 시는 많은 차이를 보였다. 한편 음향층심도 계산의 정확도를 평가해 보기 위해 음파전달손실 모의 실험을 실시하였다. 이를 통해 음향층심도내에서 음파전달손실이 최소가 되는 최적주파수가 존재함을 확인하였다.

ABSTRACT

The sonic layer depth (SLD) variability is important for understanding the acoustic properties of the upper ocean that influence acoustic communications, acoustic tomography, and naval operations related to searching and detecting marine underwater vessels. Generally, the SLD is the acoustical equivalent of the mixed layer depth (MLD), although they are defined differently. In this study the SLD was compared with the MLD over the annual cycle in the East Sea using an available set of temperature-salinity observation profiles. For the comparison, various definitions and methods of the MLD had applied. As a result, the SLD in the East Sea is slight similar to the curvature method applied MLD, but the other MLD have severe differences with the SLD. Futhermore, a parabolic equation transmission model is used to evaluate the cutoff frequency trapped in surface duct. It follow that there is an optimum frequency for propagation at which the loss of sound is minimum.

키워드 : 동해, 음향층심도, 혼합층깊이

Key word : East Sea, Sonic Layer Depth, Mixed Layer Depth

Received 04 February 2015, Revised 03 March 2015, Accepted 16 March 2015

* Corresponding Author Sehan Lim (E-mail:shlim@navy.ac.kr, Tel:+82-55-549-1076)
Department of Oceanography, Naval Academy, Changwon 645-797, Republic of Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.5.1259>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

수중음파전달은 음속의 수직/수평적인 구조와 밀접하게 연관되어 있고 음속은 결국 해수의 수온, 염분, 압력의 함수로 표현됨으로서 해양물리 환경변화가 수중음파전달에 큰 영향을 미치게 된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 특히 음속의 수직 구조와 관련되어 음향층심도(Sonic Layer Depth)는 음파통로(sound channel) 위에서 최대 음속을 갖는 최대 깊이로 정의되며, 대부분의 경우에 혼합층깊이(Mixed Layer Depth)와 거의 같다 [1]. 즉, 음향층심도는 해양표층으로부터 아래로 내려오면서 음속이 최대가 되는 수심으로 음향층심도 아래에서는 부음속경사가 나타나고 양음속 경사인 표층으로부터 음향층심도까지는 표층도파관(Surface Duct)을 형성하여 적절한 파장대의 음파가 포획된다(그림 1). 여기에서 음향층심도에 포획될 수 있는 음파의 최대주파수를 최대차단주파수(Maximum Cutoff Frequency, MCF) 또는 차단주파수(Cutoff Frequency, CF)라고 한다. 즉, $f = c/\lambda$ (c 가 음속, λ 는 파장)이므로 음파의 파장이 음향층심도보다 크면 음파의 주파수 f 는 차단주파수보다 낮아져 음에너지는 포획되지 않고 구형 확산(Spherical spreading) 형태로 감쇄되며 음에너지 강도는 거리의 제곱(r^2)에 반비례하여 감소하게 된다. 반면, 음파의 파장이 음향층심도보다 작으면 음파의 주파수 f 는 차단주파수보다 높아져 음에너지가 포획되어 원통형 확산(Cylindrical spreading) 형태로 감쇄되며 음에너지 강도는 거리(r)에 반비례하여 감소하게 된다[2].

따라서 음향층심도가 깊을수록 차단주파수의 주파수는 낮아져 표층도파관에 포획되는 음 에너지의 양이 많아지고 음파는 더 멀리까지 전달될 수 있다. 한편 이러한 표층도파관 형성은 음파의 포획 및 굴절로 인해 표층도파관 하부에 음 에너지의 전달이 희박한 음영구역(Shadow zone)을 형성하게 된다(그림 1). 일반적으로 잠수함은 대잠세력으로부터 탐지 및 접촉을 회피하고자 이 음영구역 내에서 기동을 하여 공격목표로 은밀하게 접근해 가는데 이때 잠수함의 잠항심도를 최적심도(Best depth, BD)라 하고 식 1과 같이 산출할 수 있다[3]. 즉, 음향층심도가 50m이면 최적심도는 약 120m, 음향층심도가 100m이면 최적심도는 160m가 되는 것이다.

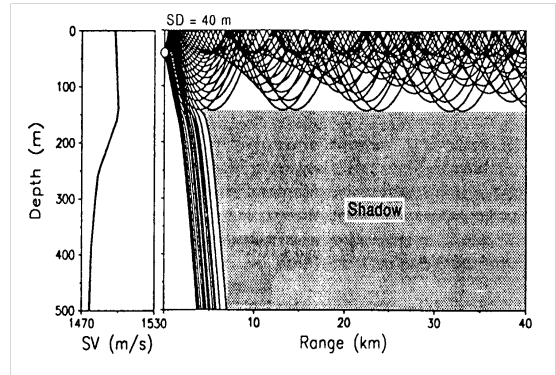


그림 1. 음선추적에 의한 음향층심도내 음파전달 모의(음원위치: 40m, SLD 150m)[4]

Fig. 1 For a source at 40 m depth the ray diagram shows that only sound leaving the source within a vertical aperture is trapped in the 150-m deep surface duct, repeatedly interacting with the sea surface[4]

$$\text{Best depth} = 17 \sqrt{SLD}, SLD < 60m \quad (1a)$$

$$\text{Best depth} = SLD + 60m, SLD > 60m \quad (1b)$$

한편, 해군작전세력이 일반적으로 현장에서 음향층심도를 결정하는 방법은 XBT (eXpendable Bathy-Thermograph, 소모성 연직수온측정기), AXBT (Airborne eXpendable Bathy-Thermograph, 항공기투하 소모성 연직수온측정기) 등으로 수온의 수직구조를 측정하고 염분은 해역 평균값으로 설정한 후 음속을 계산하여 계산하거나, 수온 수직구조만을 가지고 혼합층깊이를 산출하여 음향층심도로 전용하여 사용하고 있다. 일반적으로 혼합층깊이는 해양의 표층에서 해수 물성(수온, 염분, 밀도 등) 변화가 거의 없는 최대 깊이까지로 정의한다. 그러나 수온-염분의 동시 관측자료가 없는 해역이 많고 염분이 수심에 따른 변화가 크지 않으므로 수온이 거의 일정하게 유지되는 깊이(표층과 수온 차이 0.2-0.8℃) 까지를 혼합층깊이로 정의하는 경우도 많다. 그러므로 어떤 혼합층깊이가 기준을 적용했는지에 따라 혼합층깊이는 차이가 날 수 있으며 해군작전세력은 혼합층깊이가 음향층심도와 거의 동일한 것으로 인식하기 때문에 해수 물성의 실측자료 수준과 질에 따라 혼합층깊이와 음향층심도간에 차이가 날 수 있다는 인식의 전환이 필요하다. 특히 동해는 평균 수심이 약 1580m에 달하고 동해 중부해역의 아극 전선(Sub-Poar

Front)을 기준으로 북부의 냉수역과 남부의 난수역으로 이루어져있으며 동한 난류, 북한 한류, 울릉 와동류, 내부파 등의 존재와 대기온도, 바람, 강수 등 대기강제력의 계절변화로 해수의 물성변화가 시공간적으로 매우 복잡하며 이에 따라 혼합층깊이의 공간 및 계절 변화도 뚜렷한 것으로 알려져 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 잠재적인 대잠위협이 가장 큰 동해를 대상으로 음향층심도와 혼합층깊이를 비교해보고 차단주파수를 활용하여 음향층심도 산출방식을 보완하고자 하였다. 또한 음파 전달 손실 모델을 이용하여 혼합층깊이와 음향층심도의 차이에 따른 음 에너지 포획 정도와 차단주파수의 적절성 여부를 평가해 보았다.

II. 자료 및 분석방법

일반적으로 혼합층깊이의 분포 특성 및 계절 변화 등을 연구할 때에는 최대한 많은 자료를 활용하기 위해 OSD (Ocean Station Data, 채수기이용 관측자료), MBT (Mechanical Bathy-Thermograph, 기계식 연직수온측정기), XBT (eXpendable Bathy-Thermograph, 소모성 연직수온측정기), PFL (Profiling FLOat, 체류 이동식 연직수온-염분측정기) 등의 관측수단으로 획득된 자료가 모두 포함되어 있는 WOD (World Ocean Database, www.nodc.noaa.gov)를 주 자료원으로 활용한다[6]. 그러나 자료의 획득수심이 관측 수단별로 상이하여 음향층심도나 혼합층깊이 산출시에는 일정한 수심 간격으로 보간(Interpolation)을 실시해야 하므로 자료의 해상도가 왜곡되어 산출값의 정확성이 다소 떨어질 수 있다.

한편, 동해의 경우 관측 자료 중 수온과 염분이 동시에 관측된 자료의 수가 전체 관측자료의 1/3 정도 수준으로 적어 수온-염분-밀도의 일반적인 해수 물성을 조밀한 시공간범위(월 변화, 경도 0.5~1도-위도 0.5~1도 기준 등)로 분석하기에는 다소 무리가 있다[5]. 그러므로 통상 혼합층깊이를 산출시에는 수온기준 혼합층깊이 정의를 선택하고 수온-염분 자료가 필요한 밀도 기준 혼합층깊이 기준은 특정한 시절, 해역에서의 특징을 수온 기준 혼합층깊이 특성과 비교해 볼 때 활용되는 경우가 많다. 음향층심도의 경우에도 대상 해역의 염분 평균값을 적용하고 수온만 실 관측자료를 사용하여 음

속을 계산, 산출하는 경우가 많은데 이는 음속변화율이 수온-염분-압력/수심 순으로 커지는 것을 감안할 때 수온-염분 값의 미세한 변화에 따라 결정되는 음향층심도를 결정하는 데는 다소 부정확할 수밖에 없다. 따라서 혼합층깊이와 음향층심도를 비교해보기 위해서는 수온-염분자료가 동시에 관측된 고해상도 자료를 활용하여 혼합층깊이는 밀도 기준으로, 음향층심도는 실 염분 관측값이 온전하게 적용된 음속구조에서 산출한 것이 타당하다고 생각된다.

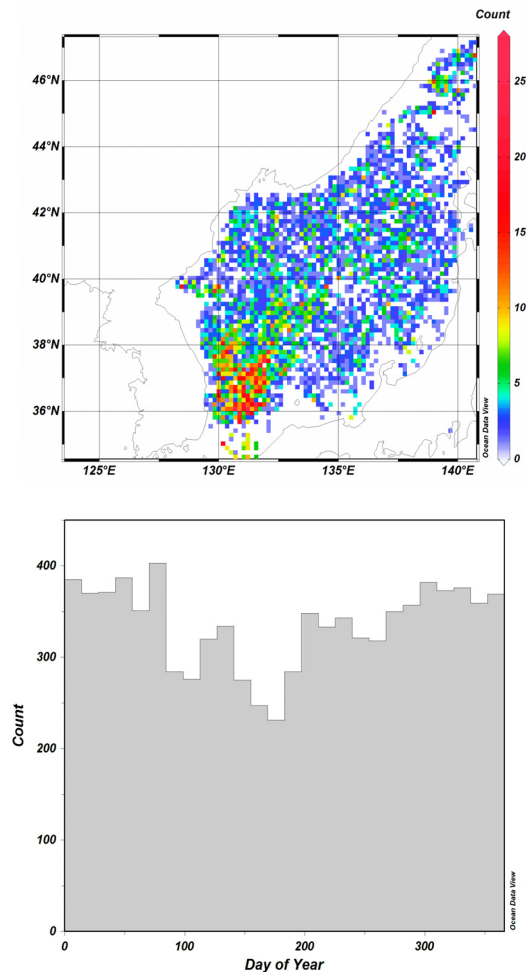


그림 2. 동해에서 음향층심도 계산을 위해 사용된 수온-염분자료의 공간분포(위) 및 연중 일자별 누적분포(아래) 현황
 Fig. 2 Spatial distribution (top) and daily histogram (bottom) of temperature-salinity profile for the sonic layer depth calculation in the East Sea

이를 위해 본 연구에서는 동해에서 관측된 고해상도 CTD자료인 CREAMS (the Circulation Research of East Asian Marginal Seas program) 자료와 1999년 이후 관측 자료가 꾸준히 축적된 ARGO 자료 (<http://www.nimr.go.kr>)를 이용하였다. 사용된 전체 자료의 수는 8487개이며 자료 분포기간은 1996년~2006년이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 수온-염분 자료의 공간 분포 밀집도가 동해 중서부 해역만 다소 높은 편이기 때문에 공간 분포 특징을 분석하는 것은 통계적으로 유의한 결과를 얻기가 어렵다. 하지만, 연중 월별 자료 분포가 비교적 균일하므로(그림 2) 동해 전 해역에서 구해진 음향층심도와 혼합층깊이 간의 월평균을 이용하여 위도별로 어느 정도 차이가 나는지 분석을 실시하였다.

2.1. 음향층심도(Sonic Layer Depth)

앞서 설명한 바와 같이 음향층심도는 해양표층으로부터 음파통로 상부에 형성되는 음속이 최대가 되는 수심이다. 즉, 표층으로부터 음향층심도까지는 양음속 경사 또는 정음속 경사가 형성되고 음향층심도 아래에서는 부음속경사가 형성되며 표층과 음향층심도 내에서 적절한 파장대의 음파가 포획되어 비교적 원거리까지 음 에너지의 전달이 양호한 표층도파관을 형성하여 된다. 음향층심도 결정을 위한 음속 계산식은 Mackenzie (1981)[6]의 식을 사용하였다.

$$c = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.34(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3 \quad (2)$$

여기서 c 는 음속(m/s), T 는 수온(°C), S 는 염분(PSU), D 는 수심(m) 이다. 동계 해수표면 수온(Sea Surface Temperature, SST)이 5°C 이하로 떨어지는 동해 북부 해역에서는 표층부터 심층까지 수온수직구조가 균일한 상태를 형성하는 경우가 있다. 이러한 해역에서는 수심에 따른 음속 증가로 양음속 경사가 이루어져 1000 m 이상의 깊은 수심에서 최대 음속이 형성되기도 하는데 이를 표층도파관이라고 보기는 어렵다[7]. 또한 음속구조의 미세한 변화로 인해 여러 층의 음향층심

도가 형성되기도 하고 관측 장비의 오류나 해양이상현상으로 특정수심에서 일시적인 최대 음속층이 나타나기도 한다[2].

이와 같은 경우 음향층심도를 결정하는데 어려움을 겪을 수 있다. 따라서 음향층심도 결정시 음향층심도 내에 포획되는 음의 주파수인 차단주파수 존재 유무를 기준으로 차단주파수의 범위를 지정하면 음파전달손실 계산 및 음선추적 등을 통해 보다 실제적으로 음향층심도 산출 및 표층도파관 효과를 평가해 볼 수 있다. 식(3)은 차단주파수를 산출할 수 있는 식으로

$$CF = \bar{c} \left\{ \frac{8}{3} \sqrt{2} \int_0^{SLD} \left[\frac{c(SLD)}{c(z)} - 1 \right]^{1/2} dz \right\} \quad (3)$$

여기서 z 는 수심, \bar{c} 는 음향층심도까지 수층에서의 평균음속, $c(z)$ 는 수심에 따른 음속이다[2].

2.2. 혼합층깊이(Mixed Layer Depth)

혼합층깊이는 수온을 기준으로 한 경우와 밀도를 기준으로 한 경우를 구분하여 산출하고 이를 음향층심도와 비교해 보았다. 수온 기준의 경우 수온수직구조에서 기준 수심(표층 0 m)으로부터 곡률의 변화를 측정하여 표층에서 가장 가까운 곡률변화수심을 혼합층깊이(MLD_T)로 결정하는 방법을 채택하였다. 이 방법은 가장 최근의 혼합과정이 반영되어 있는 혼합층깊이 일변화 관측에 효과적이며 혼합층깊이 결정시 일반적으로 사용되는 문턱값 방법(Threshold method)의 단점(문턱값에 따라 혼합층깊이 차이 발생)을 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다[8]. 한편, 밀도기준의 경우 기준 수심(표층 10 m)의 밀도와 비교하여 문턱값 차이 밀도 이내의 수심까지를 혼합층깊이로 정의하였다. 이 때 문턱값은 수온이 각각 0.1 °C, 0.2 °C, 0.3 °C, 0.5 °C 변화할 때의 밀도를 산출하여 적용하였다. 기준수심을 10 m로 하는 이유는 혼합층깊이의 일변화 보다는 계절변화를 보기 위함이며 이러한 밀도기준 혼합층깊이 결정 방법은 전구 및 지중해 해역, 북 태평양 해역 등에서 혼합층깊이 관련 연구에서 널리 사용되고 있다.

하지만 우리나라 동해와 같이 고해상도 수온-염분자료의 부족으로 인해 통계적으로 유의한 분석결과를 도출하기 어려운 경우에는 수온 기준 혼합층깊이 분석결과를 비교 및 검증하기 위한 대안으로 활용되고 있는

실정이다. Lim et al. (2012)의 연구결과에 따르면 동해 전반에 걸쳐 수온 기준 혼합층깊이와 밀도 기준 혼합층깊이가 거의 유사하지만 일부 수온역전 발생 해역이나 저염수 존재 해역에서는 유의하게 다를 수 있다고 보고하고 있다.

III. 결 과

3.1. 음향층심도와 혼합층깊이의 공간분포

동해에서 음향층심도와 혼합층깊이가 거의 같다고 가정하면 두 깊이의 공간적인 분포 특징은 Lim et al. (2012)에서 설명한 혼합층깊이 분포 분석에서 확인할 수 있다. 그림 3 에서 알 수 있듯이 혼합층깊이의 연평균은 대부분 해역에서 30 m 이상이며 아극전선 주변과 동한난류역, 원산만 주변해가 상대적으로 30 m 이하로 얇고 심층대류가 일어나는 해역으로 생각되는 알려져 있는 블라디보스톡 남방해역(132 ~ 136 °E, 41 ~ 44 °N)에서 상대적으로 깊어 45 m 이상이다. 일본 연안을 따라서도 40 m 이상의 깊은 혼합층이 나타난다. 따라서 연평균 공간분포는 대체로 보아 38 °N 이남과 41 °N 이 북에서 30 m 이상으로 깊고 그 사이에서 얇다(20 ~ 30 m). 이러한 분포는 경도 135 °E 를 기준으로 한 혼합층깊이의 위도분포에서 더욱 뚜렷이 확인된다. 혼합층깊이의 계절 변화 진폭을 알아보기 위하여 조화분석을 실시하였다. 연주기의 진폭은 대체로 연평균과 그 공간분포가 일치했다. 즉 심층 대류 해역 주변과 동해 남부(편의상 아극전선 이남으로 정의) 일본 연안에서 커서 60 m에 이르고 그 사이와 동한 난류역, 원산만 주변 해역, 극전선 주변에서 작아 20 m 이하이다. 이와 같이 계절 변화 진폭의 공간 분포가 연평균 공간 분포와 비슷한 이유는 두 변수 모두 겨울철 혼합층깊이에 의해 크게 좌우되기 때문이다.

즉 동해에서는 겨울이외에는 혼합층깊이가 작을 뿐만 아니라 공간 변화 또한 상대적으로 작기 때문에(그림 3) 연평균과 계절 변화 진폭이 모두 겨울철 혼합층깊이에 영향을 받기 때문이다. 한편 혼합층깊이는 동해 남부에서는 주로 1월에, 북부에서는 주로 2월에 최대에 이르며 최소값은 동해 전체에서 주로 7, 8월에 나타난다.

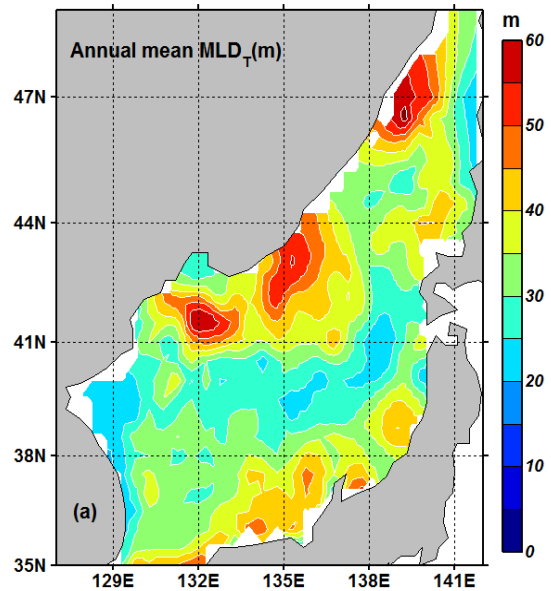


그림 3. 동해의 연평균 혼합층깊이 분포[5]

Fig. 3 Annual mean of the mixed layer depth in the East Sea[5]

3.2. 음향층심도와 혼합층깊이의 공간분포

동해에서 음향층심도와 혼합층깊이가 거의 같다고 가정하면 두 깊이의 공간적인 분포 특징은 Lim et al. (2012)에서 설명한 혼합층깊이 분포 분석에서 확인할 수 있다. 그림 3 에서 알 수 있듯이 혼합층깊이의 연평균은 대부분 해역에서 30 m 이상이며 아극전선 주변과 동한난류역, 원산만 주변해가 상대적으로 30 m 이하로 얇고 심층대류가 일어나는 해역으로 생각되는 알려져 있는 블라디보스톡 남방해역(132 ~ 136 °E, 41 ~ 44 °N)에서 상대적으로 깊어 45 m 이상이다. 일본 연안을 따라서도 40 m 이상의 깊은 혼합층이 나타난다. 따라서 연평균 공간분포는 대체로 보아 38 °N 이남과 41 °N 이 북에서 30 m 이상으로 깊고 그 사이에서 얇다(20 ~ 30 m). 이러한 분포는 경도 135 °E 를 기준으로 한 혼합층깊이의 위도분포에서 더욱 뚜렷이 확인된다. 혼합층깊이의 계절 변화 진폭을 알아보기 위하여 조화분석을 실시하였다. 연주기의 진폭은 대체로 연평균과 그 공간분포가 일치했다. 즉 심층 대류 해역 주변과 동해 남부(편의상 아극전선 이남으로 정의) 일본 연안에서 60 m에 이르고 그 사이와 동한 난류역, 원산만 주변 해역, 극전선 주변에서 작아 20 m 이하이다.

이와 같이 계절변화 진폭의 공간 분포가 연평균 공간 분포와 비슷한 이유는 두 변수 모두 겨울철 혼합층깊이에 의해 크게 좌우되기 때문이다. 즉 동해에서는 겨울 이외에는 혼합층깊이가 작을 뿐만 아니라 공간 변화 또한 상대적으로 작기 때문에 (그림 3) 연평균과 계절 변화 진폭이 모두 겨울철 혼합층깊이에 영향을 받기 때문이다. 한편 혼합층깊이는 동해 남부에서는 주로 1월에, 북부에서는 주로 2월에 최대에 이르며 최소값은 동해 전체에서 주로 7, 8월에 나타난다.

3.3. 음향층심도와 혼합층깊이 비교

혼합층깊이를 음향층심도로 전용할 경우 두 값간의 차이가 어느 정도인지 비교해보았다. 이는 동해 전 해역에 대해 음향층심도와 혼합층깊이간의 차이가 어느 정도인지 관련 정보가 필요한 실무 관계자들에게 정보를 제공하기 위함이다. 우리나라 근해에서 음향층심도 관련 연구는 특정해역의 계절변화나 일변화 등이 몇몇 연구자들에 의해 보고된 바는 있으나 넓은 해역에 대한 음향층심도 연구는 거의 보고된 바가 없다. 또한 해양 학자들이나 해군/해경/수산 관계자들도 기존에 연구되어 있는 혼합층깊이 자료를 음향층심도로 전용하면 된다는 인식이 만연되어있으므로 실용적으로 사용할 수 있는 음향층심도의 분포 및 계절변화 등에 대한 종합적인 연구결과는 미흡한 실정이다. 한편, 음향층심도의 시/공간적인 변화가 매우 심하므로 현장에서 바로 확인하는 것이 가장 정확하기 때문에 대략적인 개황은 혼합층깊이로 대체할 수 있다고 주장하는 학자들도 있다. 즉 현재는 우리나라 주변 해역의 혼합층깊이 계절변동에 대한 개황이나 원인 등에 대해 종합적으로 연구되어 있는 결과가 없는 상태이며 음향층심도와 혼합층깊이 차이가 어느 정도 인지에 대해 거의 연구된 바는 없는 것이다.

음향층심도는 표층으로부터 음파통로(최소 음속층) 상부에서 최대 음속이 나타나는 수심으로 정의한다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 일부 음속구조에서는 하나 이상의 음속최대 수심이 나타나므로 이러한 경우 표층에서 가까운 수심 즉 낮은 수심을 음향층심도로 결정하였다. 이와 같이 결정하는 이유는 음파통로 아래의 최대음속 수심을 선택하는 오류를 피하고 음향층심도의 응용 측면인 차단주파수에 의한 가장 적절한 표층도파관 효과 분석을 위해서이다.

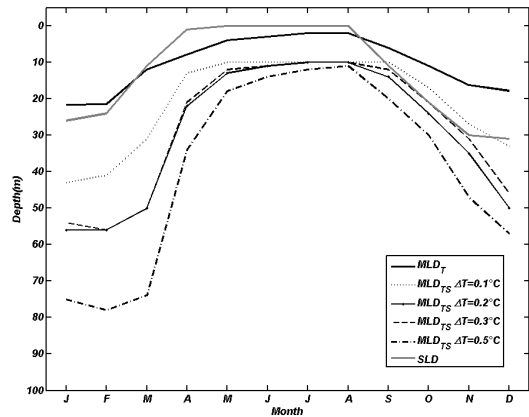


그림 4. 동해 전해역의 음향층심도 및 혼합층깊이의 월 변화
 Fig. 4 Monthly variation of the sonic layer depth and the mixed layer depth in whole area of the East Sea

그리고 수온-염분자료로부터 수온 기준 혼합층깊이(MLD_T)와 밀도기준 혼합층깊이(MLD_{TS})를 산출하였다. 다음 과정으로 동해 전 해역을 경도 0.5도-위도 0.5도 간격의 격자로 나누고 각 격자 내의 음향층심도 및 혼합층깊이의 대푯값을 산출하였다. 이 때 격자 대푯값은 격자 내 자료 분포의 특징을 잘 반영하고 있는 중간값(Median)으로 하였다[5].

그림 4는 동해 전 해역의 음향층심도와 수온기준 혼합층깊이(MLD_T), 각 문턱값차이 0.1°C, 0.2°C, 0.3°C, 0.5°C 일 때 밀도기준 혼합층깊이(MLD_{TS})의 월 변화를 나타낸 것이다. 음향층심도의 월 변화를 보면 9월부터 겨울로 접어들면서 평균 30 m 내외까지 형성되어 3월부터 얇게 형성되다 4월부터 8월까지의 동해 전 해역에서 거의 형성되지 않는 것으로 나타났다. 수온 기준 혼합층깊이(MLD_T)는 겨울철에 음향층심도 보다 약 10여 m 얇게 형성되고 4월부터 8월까지의 5 ~ 10 m 정도 깊게 형성되어 동해 전 해역 평균값의 월 변화임을 감안하면 비교적 비슷한 양상을 보인다고 할 수 있다. 반면 밀도 기준 혼합층깊이(MLD_{TS})는 4월에서 8월 중 평균이 10 ~ 20 m로 혼합층깊이 일변화를 제거하기 위해 기준수심을 10 m로 했던 혼합층깊이 결정방법의 영향을 받은 것으로 판단된다. 또한 0.1°C 문턱값 기준을 제외하고는 모두 2월에 혼합층깊이가 가장 깊어지고 최대 월평균값이 40 ~ 78 m로 음향층심도의 최대 월 평균값보다 2 ~ 4 배로 매우 큰 차이를 보인다.

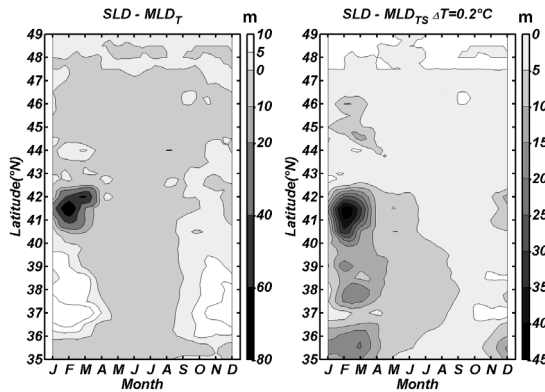


그림 5. 월 평균 음향층심도와 혼합층깊이 차이의 동서방향 평균값의 위도에 따른 분포. (좌) 음향층심도와 수온기준 혼합층깊이와의 차이, (우) 음향층심도와 밀도기준 혼합층깊이 (문턱값 0.2 °C)와의 차이

Fig. 5 Meridional mean difference between monthly mean the sonic layer depth and the mixed layer depth along the latitude. (left) difference between the sonic layer depth and the temperature-based mixed layer depth (ringt) difference between the sonic layer depth and the density-based mixed layer depth

이는 2월에 특정해역의 깊은 혼합층깊이가 영향을 준 것으로 판단된다. 한편 가을로 접어들면서 밀도기준 혼합층깊이 결정 문턱값 차이가 커짐에 따라 혼합층깊이도 깊어지고 있다. 이것은 동해에서 문턱값 방법으로 산출된 혼합층깊이를 음향층심도로 전용하는 것이 적절치 않음을 보여주는 것이다.

그림 5는 월 평균 음향층심도와 혼합층깊이 차이를 동서 평균한 값의 위도에 따른 분포를 나타낸다. 대부분의 해역에서 음향층심도와 혼합층깊이와의 차이는 ± 5 m 내외이나 40.5 ~ 42.5 °N 해역에서 1~3월 중에 40 m 이상으로 큰 차이가 나타났다. 이는 이 해역이 동해 심층 순환의 중심으로 대기강제력과 연관되어 표층수가 침강하는 곳으로 겨울철 표층으로부터 심층까지 수온 및 밀도의 연직구조가 거의 균일하여 혼합층깊이가 깊어진 탓이다. 따라서 기존에 계산되어 있는 혼합층깊이 자료를 음향층심도로 전용하기 위해서는 혼합층깊이가 문턱값 방법으로 계산되었는지, 그리고 두 값간의 차이가 어느 정도인지 반드시 검증해 보아야 한다. 이상 살펴본 바와 같이 수온기준의 곡률변화측정 혼합층깊이가 음향층심도와 비교적 근사함을 알 수 있다. 이는 함정/항공기 등에서 수온 수직구조를 측정하고 음향

층심도를 산출할 경우, 단순히 수온수직구조를 그림으로 그리고 시각으로 혼합층과 수온약층과의 곡률변화를 측정하여 경계선을 정하는 것이 일련의 체계나 장비에서 음속을 계산하고 음향층심도를 결정하는 것과의 같다는 것이다.

3.4. 표층도파관에 포획되는 차단주파수 분석

동해의 경우 해양 상층의 변화가 심하고 아극전선을 중심으로 냉수역과 난수역의 차이가 뚜렷하기 때문에 그림 6과 같이 같은 시기에 획득한 수온-염분자료로부터 계산된 수직음속구조가 매우 상이한 음향층심도를 가지는 것을 알 수 있다. 음향층심도가 형성되면 음파가 포획되어 비교적 멀리까지 전달되는 표층도파관이 형성된다. 이에 따라 표층도파관내에 포획되어 전파되는 음파의 최대 주파수를 차단주파수라 하며 산출방법은 2.1에서 설명하였다.

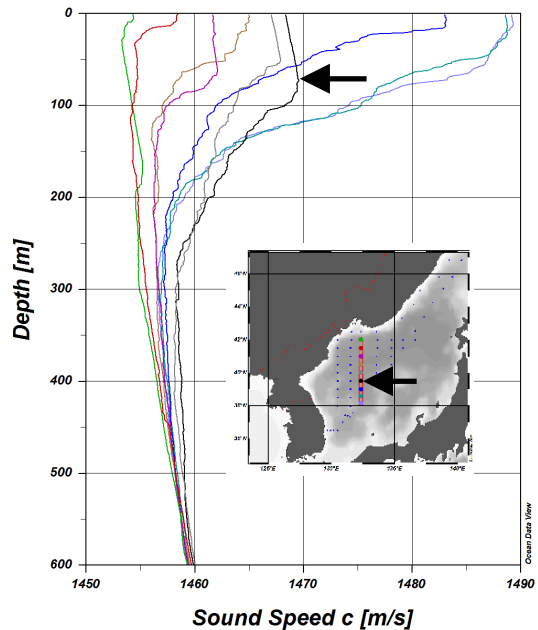


그림 6. 1997년 3월15일~17일 CREAMS 97 관측시 획득된 수온-염분자료로부터 계산된 수직음속구조(화살표 : 음향층심도가 뚜렷하게 형성되어 있는 관측지점)

Fig. 6 Vertical sound speed structure was calculated from temperature-salinity profiles which were obtained by CREAMS 97 in March 15~17, 1997 (Arrow mark : a observation position of the clearly-generated sonic layer depth)

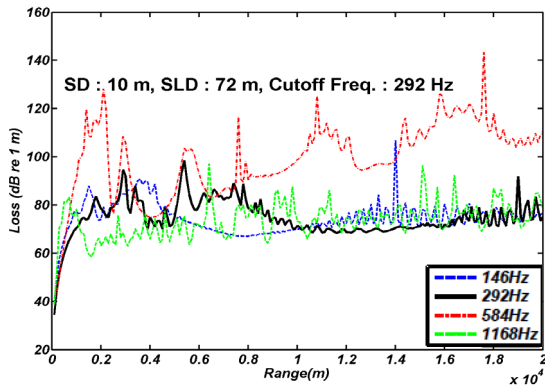


그림 7. 음향층심도 72 m 형성시 음원 수심 10 m, 수신기 수심 10 m 일 때 차단주파수 292 Hz 및 연관주파수(146/584/1168 Hz)의 음파전달손실 모의
Fig. 7 Sound transmission loss simulation of the cut-off frequency 292 Hz and the related frequency (146/584/1168 Hz) with a source at 10 m depth and a receiver at 10 m depth

식(2)에서 알 수 있듯이 음향층심도가 얇으면 차단주파수는 높아지고 음향층심도가 깊어지면 차단주파수는 낮아진다. 본 연구에서는 식(2)로 계산된 차단주파수를 뚜렷하게 형성된 음향층심도를 기준(그림 6 화살표 음속 구조, 음향층심도 72 m)으로 수중음 전달손실모델(RAM, Range-dependent Acoustic transmission Model)을 이용하여 수중음이 표층도파관내에 잘 포획되는지 여부를 확인하였다. 이 때 RAM의 입력변수로 주파수는 차단주파수와 차단주파수의 0.5배~4배 까지의 주파수, 음원의 위치는 10 m로 하였고 격자간의 수심 간격은 1 m, 거리간격은 100 m로, 전체 음속장은 음향층심도 형성에 의한 표층도파관 효과를 확인해 보기위해 수직음속 구조를 동일하게 하고 거리는 20 km로 설정하였다. 수심은 1200 m, 바닥은 평평하며, 퇴적물은 실험해역에서 우세하게 분포하는 clay를 적용하고 감쇄계수와 음속을 설정하였다. 또한 RAM 모델의 해를 근사하기 위한 Pade 계수는 10차로 설정하여 해의 신뢰성을 높였다.

그림 7은 위에서 설명한 설정을 바탕으로 식 2로 계산한 차단주파수 292 Hz 와 연관주파수(146/584/1168 Hz)에 음원수심/수신기 수심은 10 m 로 하여 음파전달손실을 산출한 것이다. 차단주파수 292 Hz 와 연관 주파수들의 전달손실을 보면 음원으로부터 거리 500 m 에서부터 차이가 나기 시작하는데 1km 지점에서는 차

단주파수보다 20 dB 이상까지 커진다. 이후 차단주파수 292 Hz 는 최소 67 dB 에서 최대 92 dB 사이에서, 146 Hz 는 76 ~ 107 dB, 584 Hz 는 89 ~ 144 dB, 1168 Hz 는 78 ~ 97 dB 사이의 전달손실값을 나타낸다.

여기에서 주목할 점은 차단주파수 보다 낮은 주파수는 표층도파관에서 구형 확산(Spherical spreading)을 하게 되면서 음에너지의 전달손실이 커지고 차단주파수 부터 높은 주파수는 원통형 확산(Cylindrical spreading)을 하면서 비교적 멀리까지 음에너지가 전달될 것으로 예상했으나 차단주파수보다 높은 주파수인 584 Hz 는 오히려 차단주파수보다 전달손실값이 매우 커진다는 것이다(그림 8). 한편 1168 Hz 는 1 ~ 8 km 에서 차단주파수보다 전달손실값이 10 ~ 25 dB 낮게 나타나고 있다. 이는 차단주파수보다 음파의 파장이 짧을 경우 음에너지의 흡수(Absorption)와 누설(Leakage)로 인해 전달손실이 증가한 것과 표층도파관내에 포획될 수 있는 최대 주파수가 차단주파수라면 이와 더불어 전달손실이 최소가 되는 최적주파수(Optimum Frequency, OF)가 존재한다는 것을 보여주는 것이다[1,9]. 한편 같은 조건하에서 음원 수심을 음향층심도의 중간수심 (36 m), 즉 표층도파관의 중심에 위치시켰을 때의 결과를 그림 8에 나타내었다. 먼저 차단주파수의 음원 수심에 따른 전달손실 양상을 보면 음원으로부터 1 km 이내에서는 음원 수심 36 m(회색 실선) 일 때가 음원 수심 10 m(검은색 실선) 보다 약 10 dB 내외의 높게 나타나지만 이후 9 km 구간까지 수 dB에서 최대 20 dB 정도 낮게, 10 ~ 20 km 까

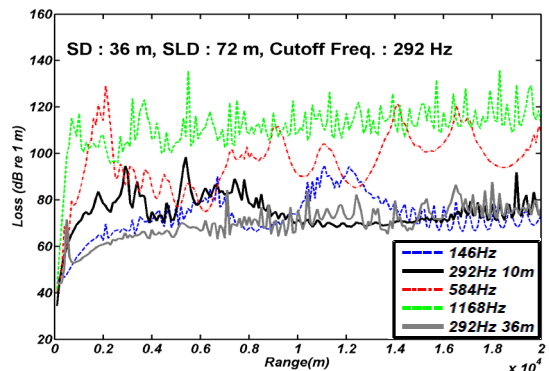


그림 8. 그림 7과 같은 조건에서 음원 수심 및 수신기 수심 36 m 시 전달손실 모의
Fig. 8 Same as Fig. 7 with a source and a receiver at 36 m depth

지는 약 10 dB 미만의 차이를 보인다. 10 km 이후에는 음원 수심 10 m 일 경우가 약 5 ~ 12 dB 정도 낮은 68 ~ 78 dB 로 형성되다 18.5 km 에서부터는 5 ~ 12 dB 정도 높은 전달손실 양상을 보이고 있다. 음원 수심이 10 m 에서 36 m 로 깊어짐에 따라 연관주파수들에서 두드러진 차이가 나타난다. 특히 1168 Hz의 경우는 전달손실 값이 전 음속장에 걸쳐서 95 ~ 137 dB로 높아졌다. 이것은 음원 수심 10 m 일 때에 비하여 약 20 dB 이상 높아진 것이다. 또한 584 Hz도 음원 수심 변화에 따라 10 dB 내외의 상승하였으며 146 Hz는 0.5 km 구간까지 차단주파수보다 10 ~ 20 dB 낮아진 것을 알 수 있다. 이는 표층도파관내에서 방사되는 차단주파수의 전달손실이 음원 수심에 따라 현저하게 달라지며 음원 수심에 따라 최적주파수 또한 달라진다는 것을 의미한다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 동해 음향층심도와 혼합층깊이를 비교해보고 음향층심도와 차단주파수의 관계를 분석하였다. 먼저 음향층심도는 대부분의 해역에서 문턱값 방법으로 산출된 혼합층깊이와는 큰 차이를 보였고 곡률변화수심 기준 방법으로 산출된 수온 기준 혼합층깊이와는 비교적 근사함을 알 수 있었다. 또한 문턱값 방법으로 산출된 밀도 기준 혼합층깊이의 경우는 문턱값 수온이 가장 작은 0.1°C 일 때가 근사했다. 우리나라 근해를 종합적으로 분석한 혼합층깊이 자료는 드물지만 공개되어 있는 자료의 혼합층깊이 기준이 문턱값 기준 0.2 ~ 0.8°C 사이임을 감안하면 혼합층깊이를 음향층심도로 전용해 사용하기에는 문제가 있음을 알 수 있다.

다음으로 음향층심도에 의한 표층도파관 형성시 차단주파수를 분석해 보았다. 익히 알려진 차단주파수 식에서 산출된 차단주파수는 음파전달손실 계산을 중심으로 확인해본 결과 표층도파관 효과와 밀접한 상관이 있었다. 또한 차단주파수보다 음파의 파장이 짧을 경우 전달손실이 증가하는 주파수대가 있으며 이와 더불어 전달손실이 최소가 되는 최적주파수도 존재한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 차단주파수와 연관주파수들이 음원의 수심에 따라 전달손실값이 큰 폭으로 변할 수 있다는 사실도 확인하였다. 그 동안 동해에서 음향층심도와 혼합층깊이와의 관계 및 음향

층심도와 차단주파수와 관계를 다룬 연구가 거의 없었으므로 본 연구가 해군 작전과 무기체계개발 및 운용에 기여할 것으로 생각되며 추후 최적의 음향층심도 결정방법, 표층도파관에서 최적주파수 결정법 등 관련 연구를 지속적으로 실시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 해군사관학교의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] Urick, R. J., *Principle of underwater sound*, McGraw-hill Book Company, New York 3rd ed., PP 147-197, 1983
- [2] Helber, R. W., C. N. Barron, M. R. Carn, R. A. Zingarelli, *Evaluating the sonic layer depth relative to the mixed layer depth*, J. Geophys. Res., 113, C07033, doi:10.1029/2007JC004595, 2008
- [3] US Naval Institute Press, *Principles of naval weapons systems*, PP 235-236, 1985
- [4] Finn B. Jensen, William A. Kuperman, Michael B. Porter, Henrik Schmidt, *Computational ocean acoustics*, 2nd, Springer, pp 25, 2011
- [5] Lim, S., C. J. Jang, I. S. Oh, JJ. Park, *Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea*, J. Mar. Syst., doi:10.1016/j.jmarsys.2012.01.003, 2012
- [6] Mackenzie, K.V. "Nine-term Equation for Sound Speed in the Oceans", *J. Acoust. Soc. Am.* 70 1981, 807-812.
- [7] Lim, Se-Han Yun, Jae-Yul Kim, Yun-Bae Nam, Sung-Hyun, *Variability of Underwater Sound Propagation in the Northern Part of the East Sea*, *J. of The Korea Institute of Military Science and Technology(KIMST)*, Vol. 10, No. 4, PP 52-61, 2007.
- [8] Lorbacher, K., D. D. Dommenget, P. P. Niiler, and A. Ko'hl, *Ocean mixed layer depth: A subsurface proxy of ocean-atmosphere variability*, *J. Geophys. Res.*, 111, C07010, doi:10.1029/2003JC002157, 2006.
- [9] Etter, P. C., *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*, 3rd ed., 424 pp., Spon Press, London, 2003.



임세한(Sehan Lim)

해군사관학교 졸업

이학박사(서울대 지구환경과학부 해양물리전공)

現 해군사관학교 해양학과 부교수 겸 해양연구소 기획운영실장

※관심분야: 중규모 해양변동성, 동해 해양환경, 해양의 군사적 이용, 수중음파전달 등