

동해 북부해역의 수중음파전달 변동성

Variability of Underwater Sound Propagation in the Northern Part of the East Sea

임 세 한*
Lim, Se-Han

윤 재 열*
Yun, Jae-Yul

김 윤 배*
Kim, Yun-Bae

남 성 현**
Nam, Sung-Hyun

ABSTRACT

Temporal and spatial variations of sea water largely affect on the pattern of underwater sound propagation. Acoustic environmental changes and their effects on underwater sound propagation in the northern part of the East Sea, which have been poorly studied mainly due to lack of observations, are investigated by analyzing the hydrographic data acquired since 1993. Severe changes in acoustic environments are associated with various physical processes such as deep convection, thermal fronts, and eddies in the northern part of the East Sea. Spatio-temporal variations of sound speed field and the layer of the maximum sound speed are categorized into six typical cases. Using a sound source of 5 kHz, acoustic transmission losses are calculated range-independently for the six typical cases. Significant differences among the patterns of transmission loss in the six cases suggest that a different tactics are required when we operate in the northern part of the East Sea.

주요기술용어(주제어) : Acoustic Transmission loss(음파전달손실), Sonic Layer Depth(음향층심도), Minimum Sound Speed Layer(최소음속층), The East Sea(동해)

1. 서론

수중음파전달은 음속의 수직/수평적인 구조와 밀접하게 연관되어 있고 음속은 결국 해수의 수온, 염분, 압력의 함수로 표현됨으로서 해양환경 변화가 수중음파전달에 매우 큰 영향을 미치게 된다는 것은 자명한 사실이다^[1].

동해북부 해역의 경우 연안으로부터 138°E 사이 해

역에서 수온전선, 와동류, 겨울철 표층냉각에 의한 침강 등 다양한 해양변동 현상이 보고되고 있다^[2~4]. 해양환경 변화에 따른 음파전달 양상분석에 관한 연구는 폭넓게 다루어져왔으나 주로 동해 남서 해역의 연안과 남해 동부 해역에 대해 이루어 졌었다^[5~9]. 이는 동해 북부해역에 대한 해양관측 자료의 부족과 해양환경 변화와 관련된 음향환경 분석에 대한 연구관심의 부재로 인한 것이다. 최근 Park(2005)^[6]이 동해 전체해역의 음향환경을 비교분석한 결과에 의하면 음파전달 양상이 해역에 따라 상당한 차이가 있고 이는 결과적으로 시·공간적인 해양환경 차이에 기인한 것이라는 분석을 제시하기도 하였으나 동해 북부해역의 경우 1929~1941년 중앙수산시험소가 북한연안의 3

† 2007년 10월 11일 접수~2007년 11월 29일 게재승인

* 서울대학교(Seoul National University)

** 국방과학연구소(ADD)

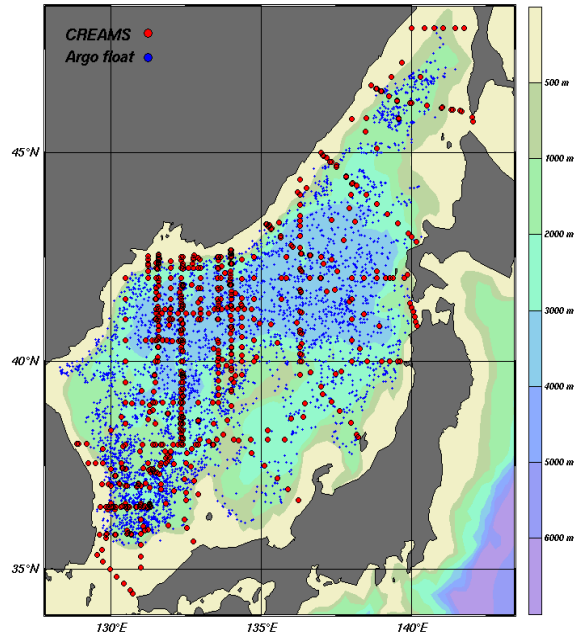
주저자 이메일 : satzmo@storm.snu.ac.kr

개 정선에서 관측한 자료를 이용한 것으로 다양한 해양환경 변화와 관련된 음향환경 분석에는 제한점을 가지고 있었다.

따라서 본 연구에서는 1993년 이후 CREAMS 프로그램(Circulation Research of the East Asian Marginal Seas) 등을 통해 수집한 동해 북부해역의 관측 자료를 분석하여 계절별 음향환경특성과 그 변화에 따른 수중음파전달양상의 계절 변화를 규명하였다. 본 연구는 또한 관련 음향장비의 활용을 위한 기초자료를 제공함에 그 의의가 있다 하겠으며, 음향장비의 특성상 제한된 운용 환경에서의 결과를 제시한다.

2. 자료 및 분석방법

CREAMS 프로그램은 1993년 동해의 물성구조와 순환을 이해하기 위한 국제공동연구 프로그램으로 시작되었다. 1993년~1997년 기간 동안은 CREAMS I에 해당되며 한국을 비롯하여 일본과 러시아가 참여하여 동해 전역을 포괄하는 해역에서 수온과 염분의 물리적 특성과 화학적 특성들을 관측하였다. 1998년부터 2002년의 CREAMS II 기간 동안에는 좀더 심도 있는 관측이 실시되었다. 특히 울릉분지와 대한해협에서의 PIES(Pressure-equipped-Inverted-Echo-Sounder) 및 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용한 집중적인 관측은 동해의 계절 및 장주기 변동 뿐 아니라 중규모 운동을 이해하고 설명하는데 귀중한 자료가 되었다. 2003년부터 2007년까지 CREAMS III가 진행 중이며 기존의 물리 및 화학적인 특성뿐만 아니라 생물학적 그리고 수산학적인 특성의 관측이 추가되었다. 그동안 CREAMS 관측은 여름에 총 5회(1993, 1994, 1995, 1996, 1999) 실시되었으며 겨울에 총 7회(1995, 1996, 1997, 1999, 2001, 2002, 2004) 실시되었다. 모든 관측에서 SBE(SeaBird Electronics)사의 CTD(Conductivity-Temperature-Depth)가 이용되었으며 기존의 전도온도계 및 채수기를 이용한 관측보다 정확도와 정밀도가 높은 자료를 수직적으로 보다 조밀한 간격으로 관측할 수 있었다.



[그림 1] CREAMS와 Argo float 자료의 공간분포

Argo float는 서울대학교와 미국 워싱턴대학교 연구진과 공동으로 1999년 2월에 최초로 2개를 동해에 투하하고, 같은 해 7월과 8월에 34개를 추가로 투하하여 성공적으로 실험함으로써 점차 전세계 해양에서 사용되기 시작하였다. 이밖에도 각 기관에서 ARGO float를 지속적으로 투하해왔다. 2004년 11월까지 총 92개의 float가 동해에 투하되었으며 1999년 8월부터 2004년 11월까지 동해 전체 해역에 대해서 5000여개 이상의 수온/염분 프로파일 자료를 얻을 수 있었다. 동해북부 해역의 표층 및 심층의 평균수온 및 평균염분 분포특성 분석을 위하여 1999년 3월~2004년 8월에 동해북부 해역에 투하된 ARGO float 자료와 1993년 7월~2004년 10월에 동해북부 해역을 대상으로 조사된 CREAMS 관측 자료를 사용하였다. ARGO float는 800m까지 관측되었으며, CREAMS 관측 자료는 대부분 1000m 이상 관측되었으며 부분적으로는 전 층에 걸쳐 관측되었다^[11].

해양환경변화에 따른 음파전달 양상분석을 위해서는 음원의 방사 주파수에 따라 통상 저주파 대역(1kHz 미만)과 고주파 대역(1kHz 이상)으로 구분하여 분석한다. 이는 수중에서 음파전달손실을 계산하

여 상황별 전달 양상을 분석하게 되는 음파 전달손실 계산모델의 모델별 장점을 최대한 활용하기 위함이다. 하지만 본 논문에서는 동해 북부해역의 국지적인 음향환경 변화가 표층에 위치한 고주파 음원의 음파 방사에 어떠한 영향을 미치는지, 해역별 음향특성은 어떠한지에 대해 분석하는 것을 중심으로 하였기 때문에 근거리 음파 전달손실계산에 적합하고 고주파 음원의 전달손실계산에 유리한 Bellhop(Ray/Beam model) 모델을 사용하였다^[12]. 확보된 해양관측자료의 관측시간이 상이하고 분포간격이 넓음으로(최소 약 25km) 동해에서 중규모 해양 운동 연구 시 공간적 변이의 척도가 되는 Rossby deformation radius(약 20km)를 고려하여 한 정점에서의 해양환경이 약 반경 20km까지는 일정하다고 가정하였다. 음원의 주파수는 거리독립 환경 하에서 5kHz, 음원수심은 10m를 적용하고 해저에서의 감쇠계수를 결정하기 위해 해저 저질은 점토(Clay)로 하였다.

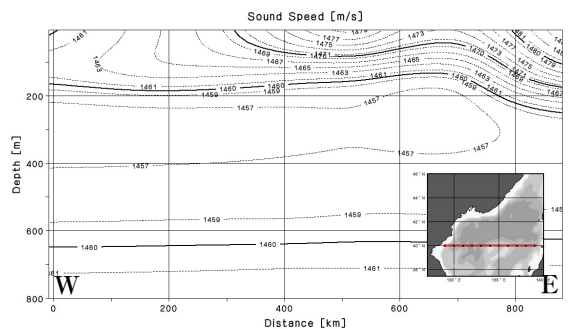
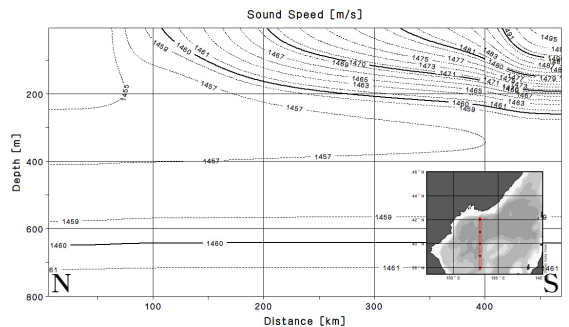
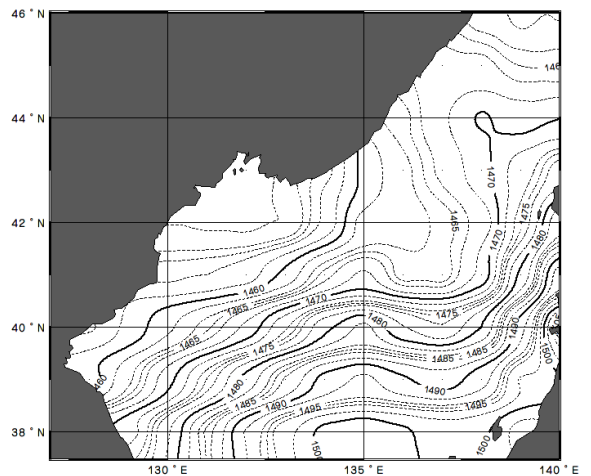
3. 동해 북부해역의 음향환경분석

3.1 평균 음속 분포

동해 북부해역에서의 평균음속구조 특성을 분석하기 위하여 1999년 3월~2004년 8월에 동해북부 해역에 투하된 ARGO float 자료와 1993년 7월~2004년 10월에 동해북부 해역을 대상으로 조사된 CREAMS 관측자료를 사용하였다. ARGO float에 의해서는 800m 까지 관측되었고 CREAMS 관측자료는 대부분 1000m 이상 관측되었으며 ARGO와 CREAMS 자료로부터 1°×1° 간격의 평균수온, 염분으로 재구성한 자료로부터 표층에서 800m까지 평균음속을 계산하였다. 동해 북부 해역은 아극전선(Subpolar front), 외동류(eddies), 대규모 침강(Deep convection) 등 다양한 해양현상이 존재하는 곳으로 해양환경 변화에 따라 평균음속 구조 또한 계절별, 해역별로 매우 상이한 특성을 나타낸다. 이러한 해양환경변화는 그 주기가 길게는 수십 년에서 짧게는 수개월에서 수십 일에 걸쳐 나타나는 것으로 특히 음속구조에 지대한 영향을 미치는 수온의 변동으로부터 다양한 음속구조가 나타나는데 본 장에서는 관측 자료로부터 1°×1°로 내삽된 평균음속

구조로 동해북부 해역의 전체적인 음속구조의 특징에 대해 설명하고자 한다. 그림 2~3은 평균음속구조를 바탕으로 동·하게 수심 10m에서의 수평 음속장과 북부해역의 남북방향/동서방향 횡단면에 대한 수직 음속장을 나타낸 것이다.

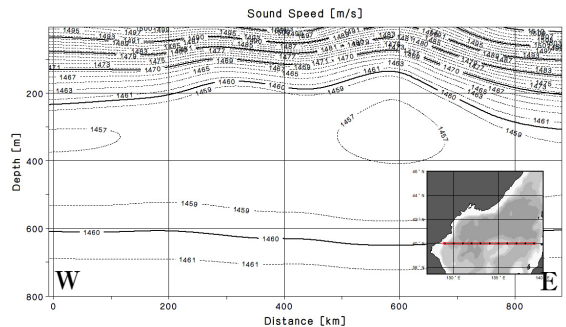
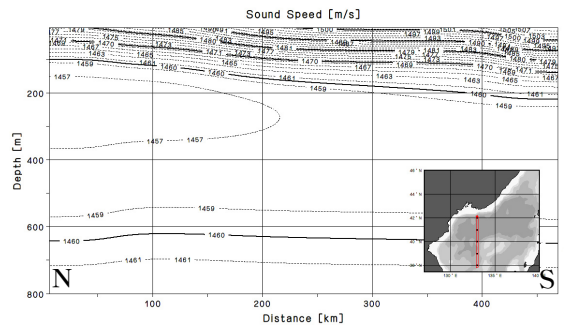
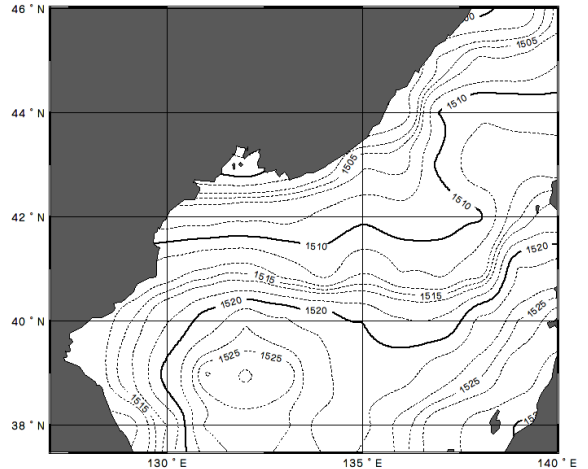
겨울철에는 표층음속이 1450~1490m/s로 나타나며 전 해역에 걸쳐 약 50~300m 내외의 음향층심도



[그림 2] 동계 평균 음속장의 수평/수직 구조

(Sonic Layer Depth)가 형성된다. 음향층심도는 음속의 최대값이 나타나는 수심으로 정의^[13]되며 이 깊이는 해양 혼합층 깊이(Mixed layer Depth)와 거의 일치하므로 음향층심도 분포와 혼합층 깊이 분포는 통상 같은 경향을 나타내게 된다. 또한 음향층심도 분포에서 음속이 낮은 곳은 해양 상층에 냉수가, 높은 곳은 온난수가 형성되어 있는 것이다. 음향층심도 아래에는 음속이 급속히 감소하는 음속약층이 존재하며 동해에서 연중 형성되는 아극전선을 기준으로 북쪽 해역의 음향층심도 깊이가 깊고 음속약층의 깊이가 얇게 나타나며, 남쪽 해역은 상대적으로 음향층심도의 깊이가 얇고 음속약층의 깊이가 깊어진다. 특히 러시아 블라디보스톡 근처의 시베리아 연안을 따라 표층에서 저층까지 강한 정음속경사의 음속구조가 나타나는데 이는 이 해역에서 차가운 해수의 침강으로 인해 전 층이 균일한 수온구조를 형성하게 되고 수심이 깊어짐에 따라 압력의 영향으로 음속이 점차 증가하기 때문이다(그림 2, 남북단면).

여름철에는 표층음속이 약 1520m/s 이상까지 상승하고 전 해역에서 음향층심도는 형성되지 않는다. 음속약층의 음속경도가 년 중 가장 강하게 나타나고 음속약층의 깊이는 아극전선을 기준으로 남쪽해역은 약 300m 내외로 깊어지고 표층음속은 약 1530m/s이며 북쪽 해역은 음속약층의 깊이가 약 200m, 표층음속은 1520m/s 이하이고 음속약층의 음속경도는 남쪽에 비해 북쪽해역이 높다. 수심이 1500m 이상 되는 아극전선 북쪽해역에서는 음속약층의 수심이 얕아지게 되어 음속약층 이후 수심증가에 따른 음속증가로 약한 정음속경사가 나타나기도 한다. 봄·가을철에는 음향층심도의 깊이가 얕아지거나 서서히 형성되기 시작하는데 이는 표층음속이 상승·하강하기 때문이다. 500m 이하의 수심에서는 전 계절에서 약 1460m/s 이하로 해역별 변동이 크게 나타나지 않고 있으나 표층에서 300m까지는 계절 및 해역별 변동이 크게 나타나는데 이는 앞서 설명한 바와 같이 동해 북부해역의 음속구조가 다양한 해양환경변화에 의한 시공간적인 변동이 크다는 것을 보여주는 것으로 여름에는 수심 300m, 가을에는 100m까지 수심별로 강한 음속경계가 생긴다. 이러한 음속구조의 수평적인 변화는 고음속 구역에서 저음속 구역, 저음속 구역에서 고음속



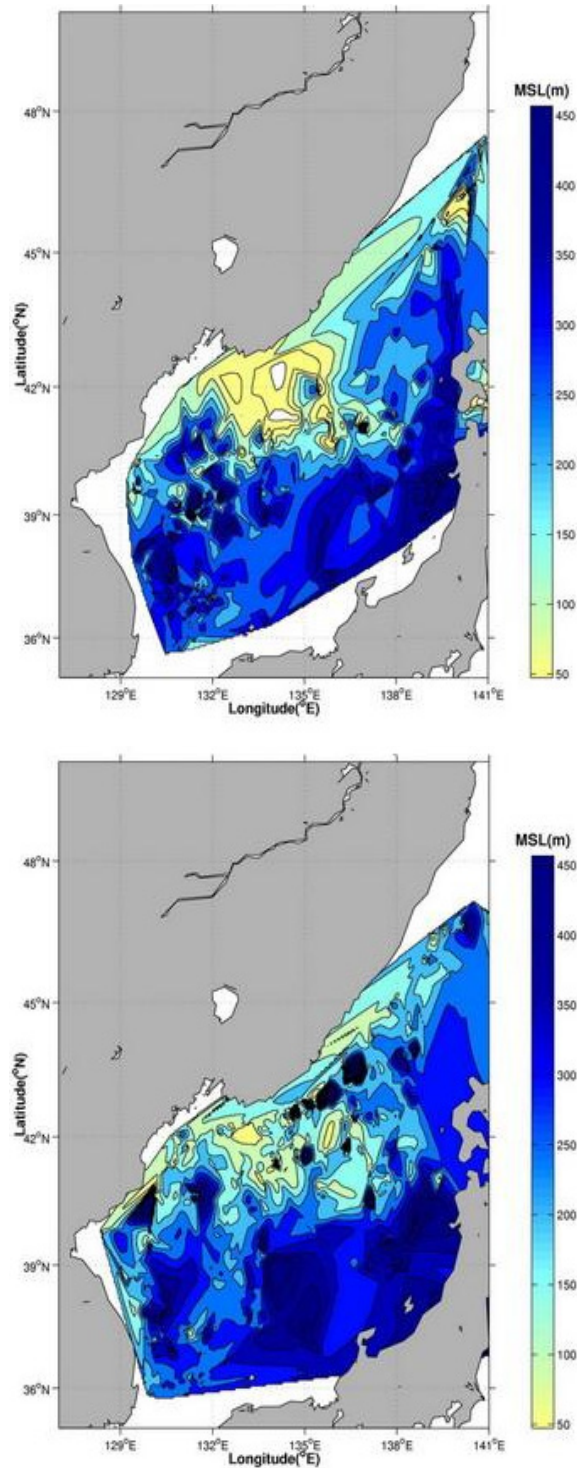
[그림 3] 하계 평균 음속장의 수평/수직 구조

구역으로의 음파전달 시 음파의 진행을 방해하는 장벽 역할을 하게 된다. 결과적으로 난류와 한류의 경계해역에서 발생하는 해양 전선이 급격한 수평수온경도를 야기시키고 음파장벽으로 작용하게 되는데 수온전선의 위치와 출몰 시기는 매우 다양한 기작을 내포하고 있으므로 수온전선역에서의 음파전달 양상은 별도의 연구 진행이 필요하다. 또한 평균 음속장의 수

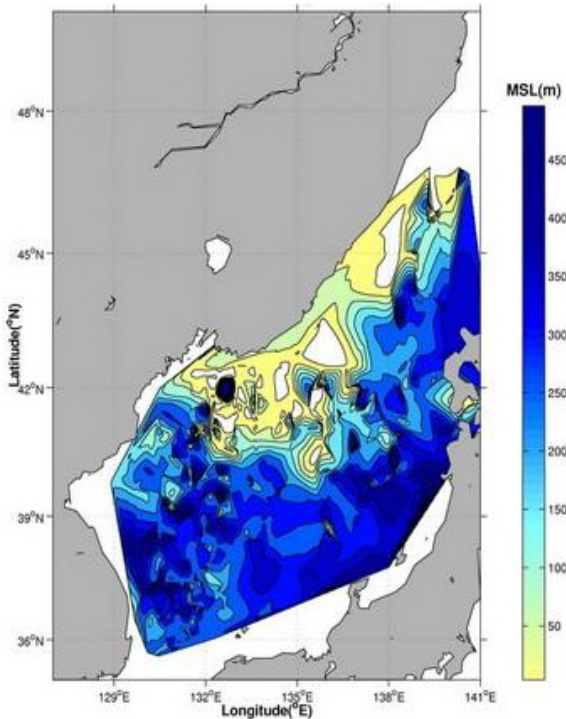
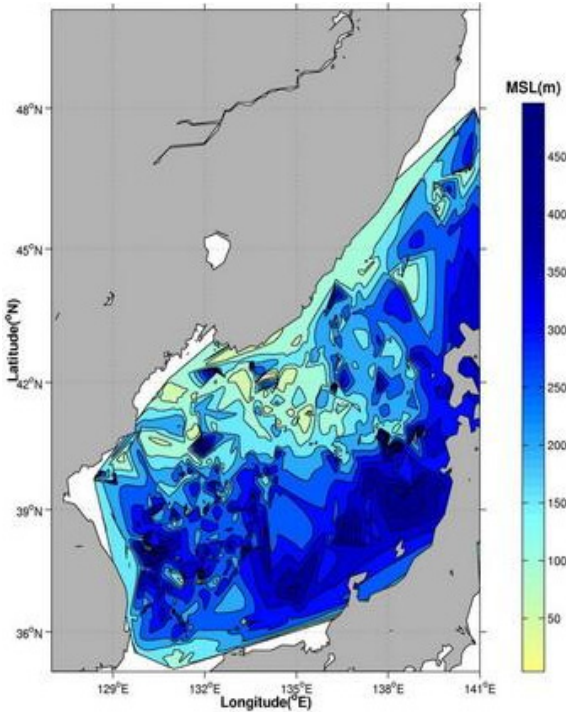
직단면을 보면 최소 음속층이 수심 200~600m 사이의 전 영역에 걸쳐 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 구조에서는 고주파 음원일지라도 음파통로에 포획된 음파가 상당한 원거리까지 전파가 가능하게 되는데 평균 음속장의 특징상 관측자료를 내삽하여 분석함으로써 음속의 변동이 심한 표층에서는 실제 음속 구조와 차이가 날 수 있으므로 내삽하지 않은 음속구조의 분포를 통해 보다 정확한 음속장의 구조를 파악해야 한다.

3.2 최소음속층 분포

최소음속층(Minimum sound speed layer)의 계절별 특성을 알아보기 위해 CREAMS 자료와 Agro float 자료를 취합하여 음속을 산출, 봄(3,4,5월), 여름(6,7,8월), 가을(9,10,11), 겨울(12,1,2월) 최소음속층 깊이의 공간분포를 도시하였다(그림 4, 5). 최소음속층을 기준으로 음파통로(Sound channel)가 형성되고 음파통로 내에 포획된 음파는 원거리까지 전달이 가능하게 된다^[13]. 따라서 특정해역에서 최소음속층의 분포를 파악하는 것은 음향환경분석에 있어 매우 중요하다 할 수 있다. 봄, 여름, 가을, 겨울철 모두 아극전선을 기준으로 남쪽과 북쪽해역의 최소음속층의 차이가 뚜렷하게 나타나는데 아극전선 이북 해역이 아극전선 이남 해역보다 최소음속층의 깊이가 얇게 형성된다. 최소음속층의 깊이는 결국 수온약층의 아래쪽 한계수심과 거의 일치하므로 표층으로부터 수심 300~400m까지 온난수에 의한 중규모 해양현상이 많이 발생하는 아극전선 이남 해역이 깊은 최소음속층을 형성하는 것으로 생각된다. 동해 북부 해역에서 최소음속층이 낮은 수심을 나타내는 해역은 모든 계절에 걸쳐 40°N 이북 해역이다. 가장 얇은 최소음속층 깊이를 보이는 곳은 주로 Vladivostok 앞의 서일 본분지와 Primorye 연안이며 최소음속층의 깊이는 겨울철 거의 표층(10m 내외)에 위치하다 여름철 100~150m까지 깊어지고 있다. 잘 알려진 바와 같이 이 지역들은 동해 심층 순환의 기작이 되는 심층대류현상(Deep convection)이 일어나는 곳이다^[2]. 수온의 수직구조가 표층에서 수심 1000m 이심까지 거의 일정한 수온을 유지하므로 수온과 염분이 일정할 경우 압력의 효과로 음속이 증가함을 고려할 때 최소음속



[그림 4] 춘계(상)/추계(하) 최소 음속층 분포



[그림 5] 하계(상)/동계(하) 최소 음속층 분포

층이 낮게 형성될 수밖에 없다. 아극전선 남쪽해역에서의 최소음속층의 깊이는 여름철 한국연안을 제외하면 300~400m 정도의 깊이를 보이고 있다. 동해 북부해역에서 여름철보다는 겨울철의 최소음속층 깊이가 낮음을 알 수 있으며, 전반적인 최소음속층의 계절변화는 겨울철로 갈수록 얕아지고 여름철로 갈수록 깊어진다. 여름철은 해양의 상층부를 차지하는 해수의 온도가 표층가열의 영향으로 온난하게 되고 온난한 해수의 유입도 증가하면서 해양의 성층화가 강화되어 수온약층의 깊이가 깊어진다. 반면에 겨울철은 차가운 대기와 강한 바람으로 인해 표층의 수온이 떨어지고 난류혼합이 강화되어 해양의 성층화가 약화됨으로서 해양 혼합층이 형성되고 수온약층의 깊이가 얕아진다. 또한 온난한 해수의 유입이 여름과 가을철보다 상대적으로 적어지는 등의 해양환경 변화도 영향을 준다.

4. 음파전달양상 분석

동해 북부해역에서의 전반적인 해양환경변화에 따른 음파전달양상을 파악하기 위해서는 해양환경변화의 시·공간적인 변동이 비교적 유사한 구역으로 크게 분할하여 각 구역 내에서의 세부적인 음속수직구조의 특성에 따른 음파전달양상을 분석하는 것이 효과적일 것이다.

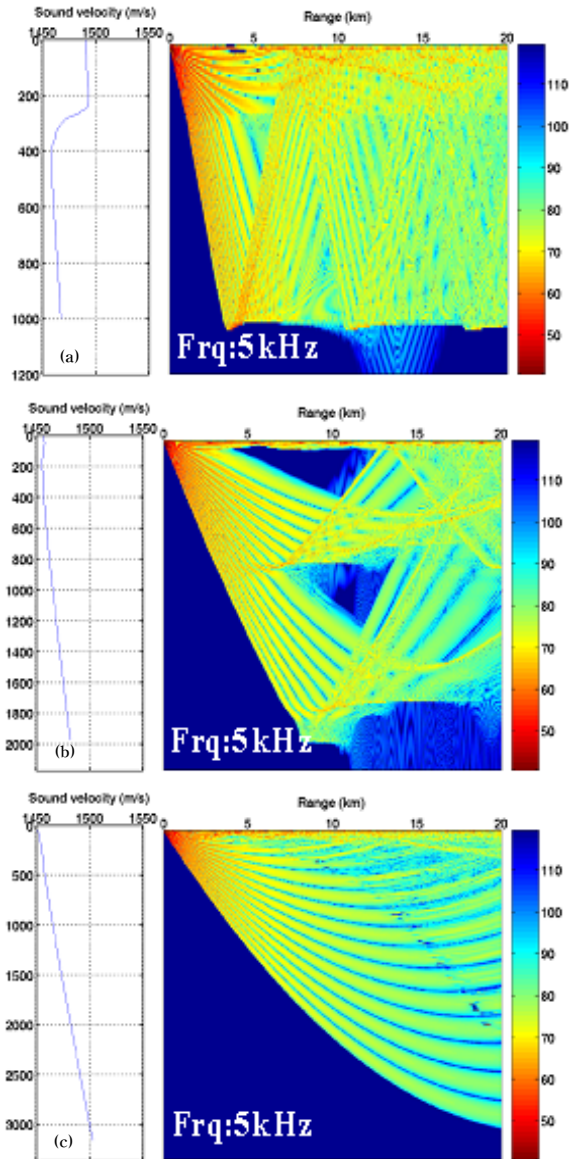
따라서 본 연구에서는 해양환경의 변화가 다양하게 나타나는 연안에서 135°E까지의 동해 북부해역을 중심으로 계절별·구역별로 음속구조를 분석하였다(표 1). 분석결과 주요 중규모 해양현상과 음속구조는 밀접한 관련이 있었으며 국지적으로 매우 다른 양상을 나타낸다. 중규모 해양 현상의 시/공간적인 변동이 매우 크고 관측자료의 획득시간이 서로 상이함을 고려하면 특정 해역에서 특정한 구조의 음속구조만이 나타나는 것은 아니다. 즉 예를 들면, 수온전선이 형성되는 해역에서의 음속구조는 수온전선이 형성되는 다른 해역에서와의 구조와 유사하며 와동류에 의한 국지적인 음속구조의 변이가 와동류 이동과 연관되어 나타나는 것이 대표적이다. 한편 침강 발생 해역 등과 같이 매우 국지적인 현상이 나타나는 곳은 특별한

[표 1] 동해북부 해역별 주요 해양현상

구역	위도(°N)/경도(°E)	주요 중규모 해양현상
Section 1	38~40/128~130	수온 전선 및 와동류
Section 2	38~40/130~132.5	수온 전선 및 와동류
Section 3	38~40/132.5~135	와동류
Section 4	40~43/128~130	수온전선
Section 5	40~43/130~131.5	수온전선
Section 6	40~43/131.5~135	표층 냉각에 의한 침강 수온전선

음속구조를 보이기도 한다. 이를 고려하여 표층에서의 고주파 음원 방사시 큰 영향을 미치는 음향층심도 형성유무 및 깊이와 음속약층의 음속기울기 변이를 중심으로 음속구조의 특징을 분류하였다. 즉 겨울철의 경우 깊은 음향층심도, 얇은 음향층심도, 음향층심도 미형성 및 강한 정음속 경사로 여름철의 경우는 얇은 음속약층 형성 및 계절음속약층 존재시로 봄/가을철은 층심도 미형성 및 깊은 음속약층 형성 등으로 6가지 형태의 대표적인 음속수직구조를 도출하여 분석하였다.

그림 6은 겨울철 동해 북부해역에서 나타나는 대표적인 3가지 형태의 음속구조(왼쪽 그림)에 따른 음파 전달손실(오른쪽 그림)을 나타내며 음파전달손실이 클수록 음 에너지의 전파는 작아짐을 의미한다. 동해 북부 외해 해역에서는 1~4월 사이, 10~12월간 음향층심도가 형성되며 가장 깊이 형성되는 시기는 1~2월경이다. 이는 알려진 바와 같이 동해 북부해역에서 혼합층의 깊이가 가장 깊어지는 시기와 일치한다. 표층에서부터 최대 약 300m까지 깊은 음향층심도가 형성되면 포획된 음파가 원거리까지 전달되는 표층도파 관현상(Surface duct effect)이 나타나고, 주파수가 높아짐에 따라 음향층심도 내에서 포획되어 전파되는 음파에너지가 더 많아지게 된다(그림 6(a)). 그림 6(b)는 동해 북부해역 연안에서 겨울에 나타나는 전형적인 음속구조로 표층음속이 낮고 층심도의 수심이



[그림 6] 겨울철 음속구조에 따른 음파전달양상

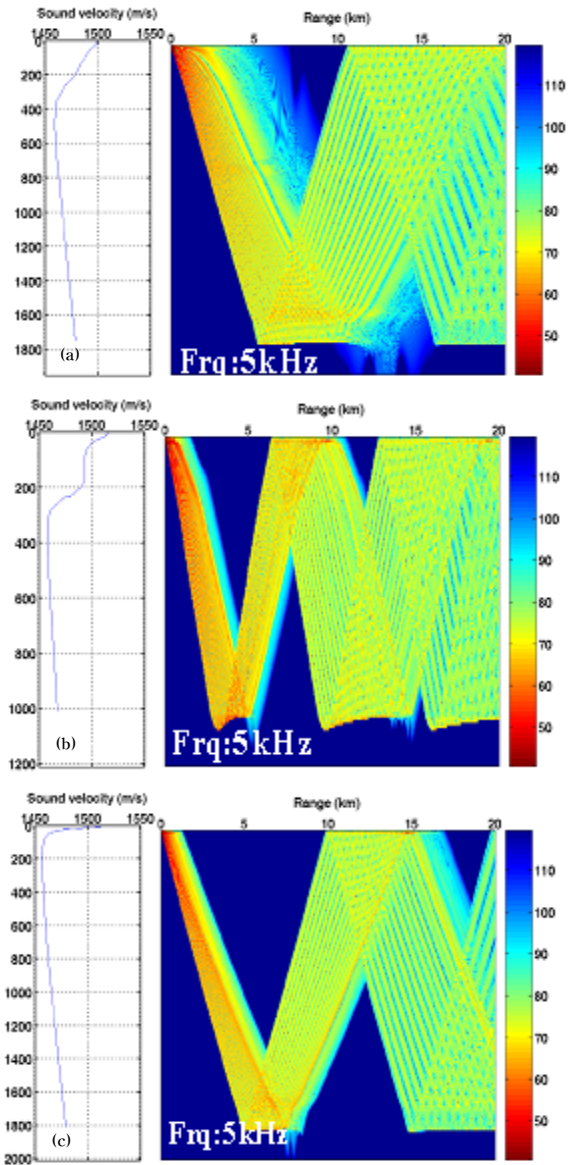
얕아 근거리(약 4km)에서는 음영구역(Shadow zone)이 생기고 수심 200m 축을 기준으로 음파통로가 형성되어 층심도 하부로 굴절된 음파가 다시 표층까지 굴절, 전파되어 음영구역을 축소시키는 양상을 볼 수 있다. 음영구역은 음 에너지가 거의 전파되지 않는 음 에너지 전달 회박구역으로 정의된다^[13]. 이와 같은 음속구조일 때는 주파수를 변경시켰을 때보다 음원의

수심이 음파전달양상에 많은 변화를 주는데 음원 수심이 200m 내외로 깊어져 최소음속층에 위치하게 될 때 근거리 음영구역이 현저하게 줄어들고 음파통로에 포획된 음파가 근거리에서 원거리까지 양호하게 전달된다.

그림 6(c)는 동해북부 해역 중 겨울철 표층냉각으로 인해 대규모 침강이 발생하는 블라디보스톡 남부 해역과 Prymorye 연안(132°E~135°E/41°N~43°N)에서의 음 전달을 표현한 것이다. 음속은 약 1450m/s 이하로 심층까지 정음속경사를 이루어 음파방사 시 강한 상향굴절이 우세하게 일어난다. 이러한 음속구조에서는 표층으로부터 약 250m까지 근거리 음영구역이 존재하지 않고 전 층이 표층도파관을 형성하여 원거리까지 양호한 음파전달 양상을 보이는데 음원의 수심이 깊어질수록, 음원의 주파수가 5kHz에서 고주파로 높아질수록 전 층에 걸쳐 음파밀도가 더 조밀해지는 것을 예상할 수 있다.

4~5월과 9~10월은 음향층심도가 급격하게 사라지거나 형성되기 시작하는 시점이다. 음향층심도가 사라지는 시기와 형성되기 이전 시기에는 음속약층의 깊이가 깊어지는 음속구조가 나타나는데 분석결과 음속약층의 깊이는 연안보다 외해에서 깊었다. 또한 여름은 해양의 표층가열로 인해 강한 수온경도를 가지는 수온약층이 형성되는 시기로 음향층심도가 존재하지 않으면 표층의 음원에서 방사된 음파가 음속약층 내에서의 강한 부음속경사로 인해 대부분 하향굴절하게 되어 근거리 음영구역이 발달하게 된다. 그림 7은 동해 북부해역의 봄과 가을(a), 여름철(b, c)에 나타나는 대표적인 음속구조에 따른 음파전달양상을 표현한 것으로 음속약층의 음속경도가 클수록 근거리 음원구역이 발달되는 것을 볼 수 있다. 특히 주목할 만한 사실은 음 에너지가 근거리 음영구역 배후의 표층에 모이는 구역이 나타나는데 이를 음 수렴구역(Convergence zone)이라고 정의한다^[13].

그림 7(b)는 동해 북부해역 외해에서 여름(6~8월)에 나타나는 음속구조로 계절수온약층과 영구수온약층 형성에 따라 표층의 음속약층 아래에 음향층심도가 나타나는 것을 볼 수 있다. 상부의 계절수온약층의 경우 표층 가열이 최대가 되는 8월에 강한 음속경도의 표층 음속약층을 형성하면서 아래의 음향층심도



[그림 7] 봄, 가을과 여름철의 음속구조에 따른 음파 전달 양상

깊이가 얕아지는데 영구수온약층의 음속경도와 수심은 거의 변화하지 않는다. 이와 같은 음속구조에서는 강한 하향굴절이 일어나 음영구역이 커지지만 계절수온약층 아래의 음향층심도 내에서 음파방사 시는 표층도파관 현상과 유사한 효과로 인해 음영구역이 표층에서의 음파방사 시 보다 현저히 작아질 수 있다.

여름의 전형적인 음속구조에서는 음속약층의 매우 강한 음속경도로 인해 음파가 대부분 하향굴절하게 되어 음영구역이 음원으로부터 약 1km부터 10km까지, 표층에서 수심 1400m까지 크게 형성된다(그림 6(c)). 주파수 변동에 따른 음영구역의 감소효과는 미약하며 음원수심이 깊어질수록 음영구역이 현저하게 작아진다. 특히 수심 200m에서는 음속구조상 최소음속에 따른 음파통로축(Sound channel axis)이 위치하고 있어 음파방사 시 음파통로축을 기준으로 상·하향 굴절이 일어나 100m 이내의 음속층을 제외하고 전 층에서 음파전달이 양호하게 이루어 질 수 있다.

5. 결론

동해 북부해역의 음향환경특성에 따른 고주파 중심의 음파전달양상을 분석해 보았다. 평균음속장과 최소음속층의 분포에서 나타나듯이 동해 북부해역은 국지적으로 매우 다양한 해양환경요소의 영향을 받으며 이에 따라 음파전달양상도 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 특히 최소음속층의 깊이가 같은 계절임에도 불구하고 큰 차이를 나타내는데 아극전선을 기준으로 이북 해역이 이남 해역에 비해 겨울철 약 150~200m 이상 얇게 형성된다. 이는 음향층심도의 깊이가 깊고 음속약층의 두께는 얇아짐으로 발생하는 음속구조로 동해 북부해역이 차가운 대기와 강한 바람의 영향으로 해양 혼합층의 깊이가 깊게 형성되기 때문이다. 또한 복잡한 중규모 해양환경요소들로 인해 계절별·해역별로 상이한 형태의 음속수직구조가 나타난다. 6가지 형태의 음속구조 분석결과 겨울철은 해역에 따라 음향층심도 깊이의 차이가 심하며 블라디보스톡 남부해역 등 심해대류가 발생하는 지역은 표층에서 저층까지 강한 정음속 경사가 나타나기도 했다. 봄, 가을과 여름철의 경우 음향층심도가 사라지며 표층에서 강한 부음속경사를 가지는 음속약층이 형성된다. 북부 외해 해역의 경우 음속약층 아래에 음향층심도가 나타나기도 하였다. 음영구역의 크기는 음향층심도의 깊이가 깊을수록, 음향층심도 아래 음속약층의 음속경도가 약할수록 작아진다. 반면에 음향층심도의 깊이가 얕거나 형성되지 않았을 경우, 음속약층 내 음속경도가 클수록 음영구역의 크기는 커진다. 음영

구역의 크기를 줄이기 위해서는 음원의 위치를 변경시켜 가능한 한 음속경도가 약한 수심이나 음속약층 아래의 최소음속층에서 음파를 방사하는 유리하다. 또한 전 층이 정음속경사로 형성되는 음속구조에서와 표층에 깊은 음향층심도가 형성되었을 시는 표층에서 음파방사 시에도 비교적 음파전달이 양호하며 음파전달손실 모델 분석결과 파장이 짧은 수록, 즉 주파수가 높을수록 음파의 밀도가 높아지게 됨으로 운용주파수 중 고주파로 운용하는 것이 보다 효과적이다.

사 사

본 연구는 해군본부의 '동해 북부해역 해양특성 분석' 과제를 통해 수행되었으며, 본 과제에 참여한 모든 연구진들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Medwin, H. and C. S. Clay, Fundamentals of acoustical oceanography, Academic press, pp. 4~6, 1998.
- [2] Seung, Y. H. and J. H. Yoon, Some features of winter convection in the Japan Sea, *J. Oceanogra*, 51, 6173, 1995.
- [3] Kim, K., K. R. Kim, D. H. Min, Y. Volkov, J. H. Yoon, and M. Takematsu, Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: A clue to future changes in global oceans? *Geophys Res. Lett.*, 28, 32933296, 2001.
- [4] Park, K. A., J. Y. Chung, K. Kim, and P. C. Cornillon, Wind and bathymetric forcing of the annual sea surface temperature signal in the East (Japan) Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05610, doi:10.1029/2004GL022197, 2005.
- [5] Park, K. J., 동해 연안 한류수의 시공간적인 변화와 탐지거리에 관한 연구, 군사과학대학원 석사논문, 1998.

- [6] Park, S. W., 동해 남부, 중부 및 북부 행거의 수중음향환경 특성, 서울대학교 지환부 석사논문, 2005.
- [7] Ahn, D. S., 동해 난수성 와동류내 탐지거리에 관한 연구. 군사과학대학원 석사논문, 1998.
- [8] Wang, K. S., 동해 남서해역의 대잠환경에 관한 연구, 군사과학대학원 석사논문, 1997.
- [9] Shin, Y. H., 동해 남서해역 표층에서의 수온의 수직구조 변화에 따른 대잠탐지거리 변화 연구, 군사과학대학원 석사논문, 1998.
- [10] Yang, S. J., 남해 동부해역에서 연안 수온전선과 저질특성에 따른 탐지거리 예측, 군사과학대학원 석사논문, 2001.
- [11] 서울대학교 해양연구소 해군해양과학기술연구센터, 동해 북부해역 해양특성분석, 2005.
- [12] Porter, M. B. and H. P. Bucker, Gaussian beam tracing for computation ocean acoustic field, J. Acoust. Soc. Am., 81, pp. 912~924, 1987.
- [13] Urick, R. J., Principle of underwater sound, McGraw-hill Book Company, New York 3rd ed., pp. 147~197, 1983.