

동해에서 난수성 소용돌이의 원거리 음파전달에 미치는 영향

Effects of Warm Eddy on Long-range Sound Propagation in the East Sea

김원기,[†] 조창봉, 박정수, 한주영, 나영남

(Won-Ki Kim,[†] Chang-bong Cho, Joung-Soo Park, Jooyoung Hahan, and Youngnam Na)

국방과학연구소

(Received September 25, 2015; accepted October 27, 2015)

초 록: 동해에는 주변 수온보다 온도가 높은 난수성 소용돌이가 자주 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 난수성 소용돌이의 발생은 음속구조의 변화를 야기해 음전달특성을 변화시키게 되며, 특히 원거리 음전달에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 본 논문에서는 난수성 소용돌이가 확인되는 2007년 3월 23일의 수온자료를 재분석한 자료를 이용하여 난수성 소용돌이가 원거리 음전달에 미치는 영향을 분석하였다. 연구를 위해 포물선 방정식 모델을 이용해 음파 전달손실과 평균 직접 신호초과 거리를 이용한 탐지거리 성능분포분석을 수행하였다. 분석결과 난수성 소용돌이의 존재는 난수성 소용돌이가 존재하지 않을 때와는 매우 다른 음전달 특성을 보여주고 있으며, 특히 난수성 소용돌이의 경계는 음전달의 제한적인 요소가 될 수 있기 때문에 원거리 음전달에 불리할 것으로 판단된다. 이러한 난수성 소용돌이에 의한 원거리 음전달의 제한은 해저 심도가 낮을수록 더 커지는 것을 확인하였다.

핵심용어: 동해, 난수성 소용돌이, 원거리 음파전달, 해저면 심도

ABSTRACT: It is well known that warm eddy is frequently developed through the year in the East Sea. The warm eddy may affect sound propagation due to changes of sound velocity structures in the sea water. To verify the effects of the warm eddy for long-range sound propagation, transmission loss and performance surface, which were used mean direct signal excess range generated by sound propagation modeling using re-analyzed climatology data on March 23th in 2007 were analysed. From these analyses, we found that characteristics of sound propagation in the sea water are changed by the warm eddy, and boundaries of the warm eddy act as a barrier for long-range sound propagation. Furthermore, these disadvantages of the eddy related to sound propagation were increased when the sea bottom depth is shallow.

Keywords: East Sea, Warm eddy, Long-range sound propagation, Ocean bottom depth

PACS numbers: 43.30.Bp, 43.30.Zk

1. 서 론

수중에서의 음파전달은 음속구조에 의해 그 특성이 달라진다. 이 음속구조는 해수의 수온, 염분 및 압력에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^[1] 해수의 특성을 변화시키는 해양환경변화는 음속구조에 큰 영향을 주기 때문에 수중 음파전달에 많은 영향을 미

치게 된다.^[2] 따라서 해양환경 특성 변화가 수중 음파전달에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

일반적으로 해양에는 수온이 주위보다 낮거나 높은 냉·난수성 소용돌이가 발생한다. 북반구에서 냉수성 소용돌이는 반시계방향, 난수성 소용돌이는 시계방향으로 회전하는 것으로 알려져 있으며, 우리나라와 접해있는 바다 중 수심이 가장 깊고 해류의 영향이 큰 동해에서도 매년 소용돌이가 수십 ~ 백여 km의 수평규모를 가지고 발생하는 것으로 알려져

[†]Corresponding author: Won-Ki Kim (konekee@add.re.kr)
Jinhae P. O. Box 18, Changwon 51678, Republic of Korea
(Tel: 82-55-540-6126, Fax: 82-42-823-3400)

“이 논문은 2015년 한국음향학회 수중음향학 학술발표회에서 발표하였던 논문임.”

있다.^[3] 해외의 경우 소용돌이의 발달 및 해양학적 특성과 소용돌이가 음파전달에 미치는 영향에 대해 활발하게 진행되어 왔다.^[4-6] 국내의 경우 동해에 많이 발달하는 난수성 소용돌이에 대한 해양학적 연구는 많이 진행되어 온 반면에^[7,8] 동해에 존재하는 소용돌이에 의한 음파전달 특성변화와 관련된 연구는 제한적으로 진행되어 왔다. 따라서 동해에 발달하는 난수성 소용돌이의 해양학적 특성을 고려한 음파전달 특성변화 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

동해에 발달하는 난수성 소용돌이는 소용돌이 주변과 구분되는 높은 수온을 가지게 된다. 이러한 국지적 수온변화는 소용돌이 외부와 구분되는 음파 전달 특성을 가지게 될 것이기 때문에 음파의 원거리 전달에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 본 연구에서는 동해 북부해역에서 난수성 소용돌이가 확인된 2007년 3월 23일의 수온자료를 재분석한 자료를 이용하여 난수성 소용돌이가 존재함에 따라 음파의 원거리 전파 특성이 어떻게 변화하는지를 파악하고자 하였다. 또한 수중 음파전달에 있어 중요한 요소인 해저면의 영향을 함께 고려하여 동해에서의 난수성 소용돌이가 원거리 음파전달에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 분석을 위해 송신원의 위치를 소용돌이 내부와 외부에 위치시켜 음파전달 모델링을 수행하여 음파전달 특성을 비교하였으며, 평균 직접신호초과거리를 이용하여 탐지거리 성능분포 분석을 수행함으로써 동해에서 난수성 소용돌이가 원거리 음파전달에 미치는 영향을 공간적으로 파악하고자 하였다.

II. 연구지역 및 수온자료

동해는 한국, 러시아, 일본으로 둘러 쌓여있는 바다로 다양한 해류와 서해와 남해와 비교하여 상대적으로 깊은 수심이 특징이다. 동해 내에는 일본분지, 야마토분지 및 울릉분지가 분포하고 있고, 대한해협을 통해 쓰시마 난류가 동해로 유입되고 있다. 이 난류는 다시 각각 동한난류와 대만난류 내측지류로 분절되어 한반도와 일본 연해를 따라 흐르고 있다. 북쪽에는 리만해류와 북한한류가 흐르고 있다.

Fig. 1은 본 연구의 연구지역인 동해 북부해역의

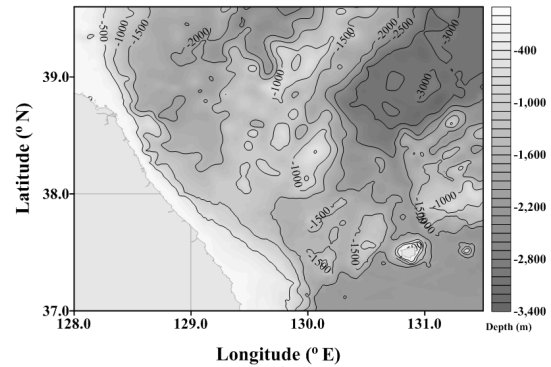


Fig. 1. Bathymetry of the study area.

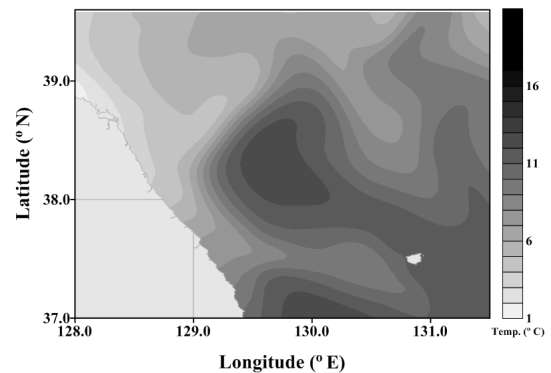


Fig. 2. Climatology data on March 23th in 2007.

수심정보를 보여주고 있다. 연구지역의 수심은 대체로 1,000 m 내외로 북동쪽에 일본분지가 일부 포함되어 있다.

Fig. 2는 2007년 3월 23일의 수온자료를 재분석한 자료로서 해수면의 수온분포를 보여주고 있다. 수온자료를 보면 수온이 약 14°C로 주변보다 높게 나타나고 있는 난수성 소용돌이가 발달하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3을 보면, 난수성 소용돌이의 수평규모는 130 km × 140 km, 수심은 약 130 m까지 분포하고 있다. 소용돌이 내부에서 남서쪽의 해수면이 가장 수온이 높고, 소용돌이의 수심이 가장 깊은 지역은 북동쪽으로 치우쳐 있는 것이 특징이다. Figs. 2와 3과 같이 난수성 소용돌이의 발달은 뚜렷한 국지적 수온구조변화를 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 따라서 수온에 영향을 받는 음속구조변화가 발생하여 수중 음파전달특성이 변화할 것으로 판단되며, 특히 원거리 음파전달에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

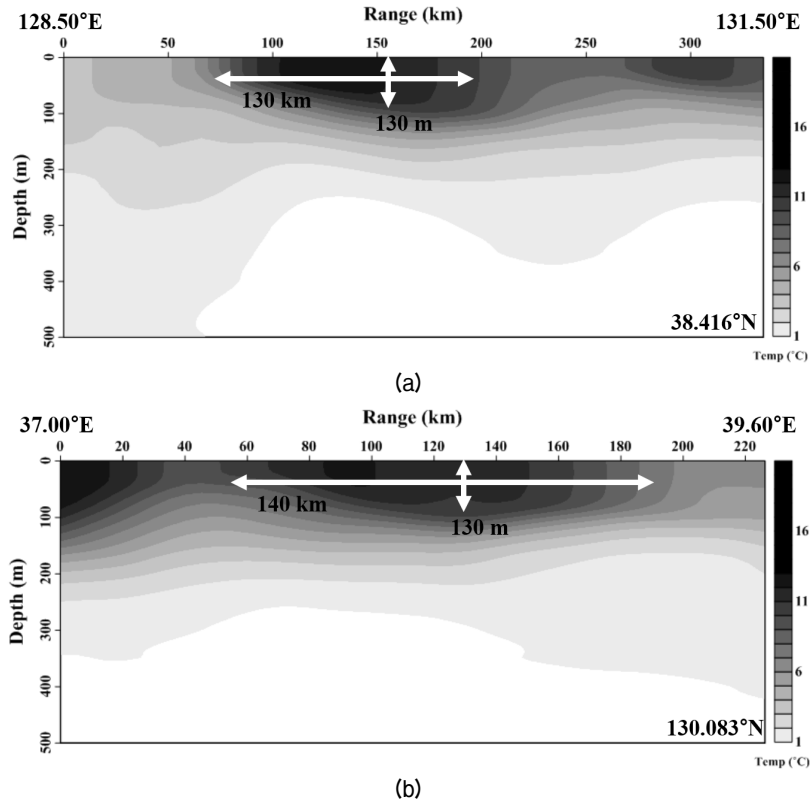


Fig. 3. Vertical temperature distributions at (a) latitude of 38.416°N and (b) longitude of 130.083°E.

III. 음전달 특성 분석

2007년 3월 23일의 재분석 수온자료를 이용하여 해당지역에 난수성 소용돌이가 원거리 음파전달에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하기 위해 음파전달 모델링을 수행하였다. 모델링을 위해 저주파 음파전달에 적합한 것으로 알려져 있는 포물선 방정식을 기반으로 하는 RAMGEO 모델을 이용하였다.^[9] 비교 분석을 위해 송신원의 위치는 소용돌이의 심도가 가장 깊은 지점(CP)과 소용돌이 외부 지역(OP)에 위치시켰으며, 송신원의 주파수와 심도는 각각 300 Hz와 15m이다. 원거리 전파특성을 파악하기 위해 모델링 거리는 100km로 설정하였다. 해당 지역은 진흙이 우세한 지역임을 가정하여 설정하였다.^[10] Table 1은 음파전달 모델링 변수들을 보여주고 있다.

Fig. 4는 소용돌이 외부 지역인 OP 지점에서 소용돌이방향으로 10km 간격마다의 음속구조를 도시한 그래프이다. 소용돌이 외부와 내부의 음속구조 차이는 약 40~50 km 지점부터 크게 나타나고 있는 것을

Table 1. Modeling parameters.

Maximum Range		Frequency of Source	Depth of Source	
100 km		300 Hz	15 m	
Geoacoustic Parameter		Position of Source		
Sound Speed Ratio	Density Ratio	CP	OP	
1.02	1.1	38.44°N / 130.08°E	39.06°N / 129.42°E	

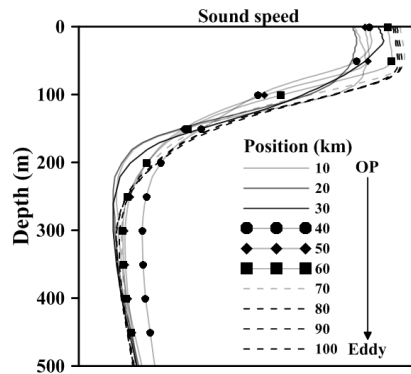


Fig. 4. Sound speed profiles from OP to the eddy center with interval of 10 km.

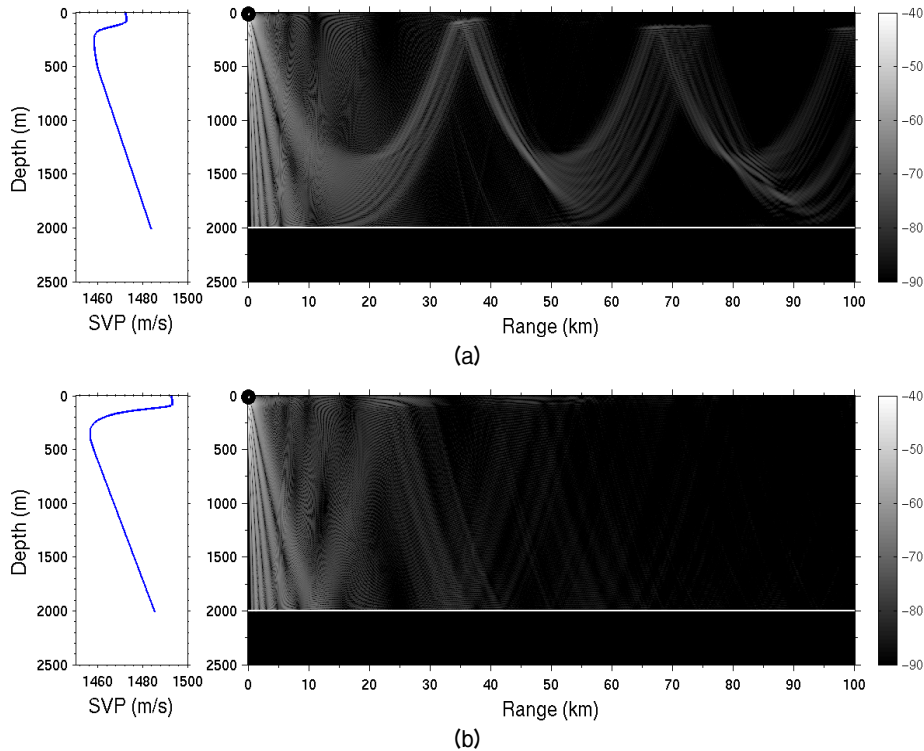


Fig. 5. Transmission losses using the sound speed profiles in Fig. 4. Sound propagation directions are (a) from the OP to the eddy center and (b) from the eddy center to OP.

확인할 수 있다. 즉 50 km 이후부터는 소용돌이 영역임을 알 수 있다. 두 지역 간의 뚜렷한 차이로는 해수면 부근에서의 온도가 소용돌이에서는 외부보다 높고 혼합층의 두께도 두꺼워진 것이다. 또한 최소음속층의 심도가 소용돌이 외부에서는 약 200 m인 반면에 소용돌이에서는 약 250 m로 더 깊어진 것을 알 수 있다. 이러한 음속구조의 변화는 소용돌이 내의 음파전달특성이 소용돌이 외부와는 다를 것이라는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 음속 구조를 이용하여 해저면의 지형영향을 최소화하기 위해 수심 2000 m에 수평 해저면을 가정한 음파전달 모델링결과로부터 구한 음파전달손실로서 Fig. 5(a)와 5(b)는 각각 OP에서 소용돌이 방향으로, 소용돌이에서 OP방향으로 전파하는 경우이다. Fig. 5(a)를 보면 소용돌이 경계, 즉 40~50 km를 기준으로 전파특성이 매우 달라지는 것을 알 수 있다. 소용돌이 외부에서는 수렴대의 형성이 잘 되는 것을 확인할 수 있는 반면에 음파가 소용돌이 내로 들어가게 되면 수렴대의 형성이 약화됨을

확인할 수 있고 수렴대의 간격 또한 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 수렴대의 심도가 음파가 소용돌이 내로 진입한 후에는 좀 더 깊어지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 소용돌이 내부와 외부의 음속 구조 변화로부터 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)에서는 얇은 수심에 분포하는 소용돌이에 의한 높은 음속으로 인해 하향굴절이 더욱 강해져 대부분의 음파가 해저면에서 반사되는 것을 알 수 있다. 따라서 강한 해저면 반사손실로 인해 음파가 100 km까지 전파하는데 한계가 있는 것을 확인할 수 있다. 즉 소용돌이 내에서 외부로 전파할 경우에는 심도초과가 존재할 수 있을 정도로 심도가 깊어야 원거리 전파가 가능할 것으로 예측된다. 일부분의 음파는 혼합층을 따라 전파되는 특성이 확인된다. 이것은 혼합층의 속도와 두께변화에 기인한다고 판단할 수 있다. 두 결과를 보면, 송신원의 위치가 소용돌이 내부에 있을 때와 외부에 있을 때 원거리 음파 전달특성이 달라지는 것을 뚜렷이 확인할 수 있다.

Fig. 6은 송신원의 위치가 소용돌이의 수심이 가장

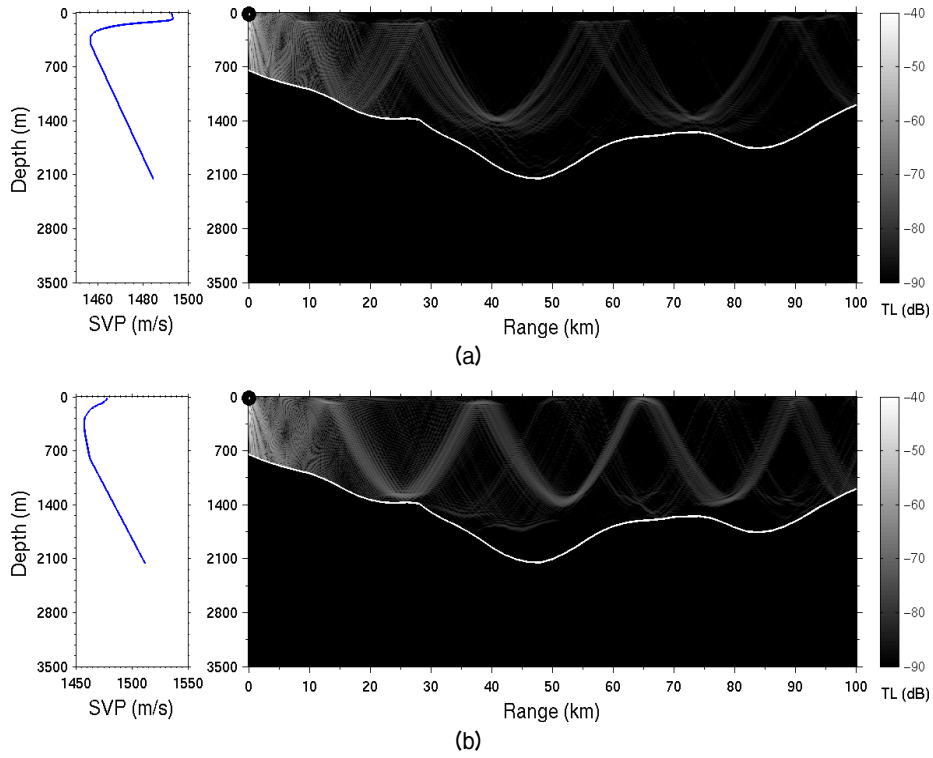


Fig. 6. Transmission losses using the (a) re-analyzed climatology data and (b) mean climatology data for 20 years when the source is located at CP.

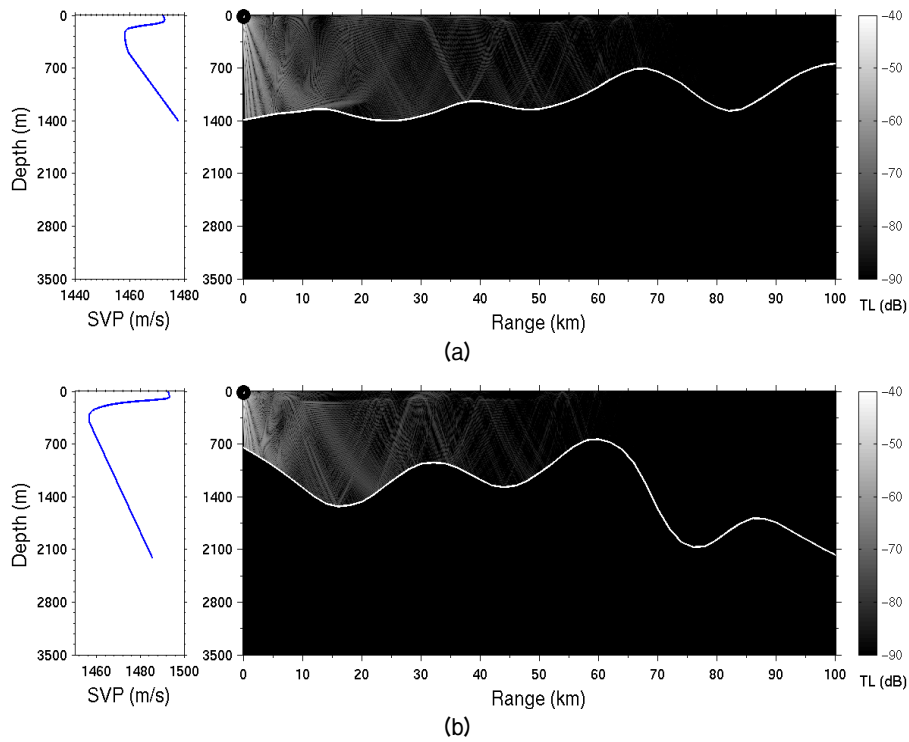


Fig. 7. Transmission losses when the source is located at (a) OP and (b) CP. Azimuthal directions are 140° and 320° .

깊은 지점인 CP 지점에 있고, 정북방향으로 음파가 전달할 때의 해당 지역의 해저면 특성을 함께 고려하여 얻은 음파전달손실로서 Fig. 6(a)는 소용돌이가 존재할 경우이고, Fig. 6(b)는 20년간의 평균 수온자료를 통해 얻은 결과로 소용돌이가 존재하지 않는 경우이다. 두 결과를 비교해 보면, 소용돌이의 존재로 인해 약화된 수렴대가 소용돌이가 존재하지 않을 경우와 비교하여 뚜렷이 확인되고 있다. 또한 같은 수심에도 소용돌이가 존재할 때 해저면 반사가 증가해 전달손실이 더 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 따라서 난수성 소용돌이가 존재할 때 충분한 심도가 되지 못하기 때문에 음파의 원거리 전파가 불리할 것으로 판단된다.

송신원이 소용돌이 내부와 외부에 있을 때의 음파 전달특성을 비교하기 위해 소용돌이 외부지점인 OP 지점에 송신원이 위치한 경우와 CP 지점에 송신원이 있는 경우의 음파전달 특성을 비교하였다(Fig. 7). 각각의 음파전달 방향은 정북방향에서부터 시계방향으로 140°와 320°로 해저면의 심도 및 형태가 동일하지 않아 정확한 비교는 어려울 수 있으나 난수성 소용돌이가 존재할 경우인 Fig. 7(b)를 보면 해저면 반사손실이 음파전달 초기부터 강하게 발생해 상대적으로 Fig. 7(a) 보다 원거리 음파전달이 불리해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 송신원이 소용돌이 외부에 있을 때 음파의 원거리 음파전달이 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

동해에서의 음파전달은 난수성 소용돌이의 영향뿐만 아니라 해저면의 특성도 매우 큰 영향을 미친다는 것을 음파전달 모델링을 통해 확인할 수 있는데, 동해는 매우 다양한 심도분포를 보이고 있기 때문에 동해에서 난수성 소용돌이가 원거리 음파전달에 미치는 영향을 공간적으로 파악할 필요가 있다. 이러한 연구를 위해 평균 직접 신호초과거리를 이용하여 탐지거리 성능분포 분석을 수행하였다.^[11] 본 연구에서는 총 76지점에 대해서 평균 직접신호초과거리를 계산하였다. 각 지점에서는 정북방향을 기준으로 90°간격으로 4번의 모델링을 수행한 후 아래의 Eq.(1)을 통해 탐지거리 성능분포 분석 값을 계산하였다.

$$R_d = \sum_{i=1}^N R_d^i / N, \quad (1)$$

여기서 R_d 는 평균 직접 신호초과거리이고, R_d^i 는 i 번째 방위각에 대한 직접 신호 초과 거리이며, N 은 모델링 횟수이다.

Fig. 8은 심도별 탐지거리 성능분포를 보여주고 있다. 결과를 보면 소용돌이 경계를 따라 평균 직접 신호초과거리가 짧은 것을 알 수 있다. 반면에 소용돌이 내부에서는 신호초과거리가 크게 나타나고 있다. 이것은 송신원이 소용돌이 내부에 위치했을 때 내부에서는 음파전달이 용이할 수 있으나 음파가 소용돌이 경계를 만나면 음파전달에 제약이 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 소용돌이 내부에서 경계를 통과하는 전파하는 음파는 원거리 전달에 불리할 것으로 판단된다. 등고선으로 표시한 수온과 탐지거리 성능분포 결과를 보면, 각 심도에서의 소용돌이 중심이 아닌 소용돌이가 가장 깊은 심도인 지역에 그 중심이 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 소용돌이의 북동쪽과 남서쪽 경계에서 평균 신호초과거리가 낮게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 얕은 수심에서 더 뚜렷이 확인되고 있다. 이러한 특성은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 해당지역의 수심이 상대적으로 낮고 불규칙한 지형을 보이고 있어 소용돌이 경계의 영향과 수심의 영향이 복합적으로 작용하여 평균 직접 신호초과거리가 낮게 나오는 것으로 판단된다. 즉 동해에서 소용돌이가 발생하였을 경우 해당지역에서의 음파전달은 매우 불리할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 동해에 난수성 소용돌이가 음파의 원거리 전파에 미치는 영향을 해당지역의 해저면 특성과 함께 분석하고자 하였다. 이러한 분석을 위해 2007년 3월 23일의 수온자료를 재분석한 자료를 이용하여 음파전달 모델링을 수행하였고, 공간적 특성을 분석하기 위해 평균 직접 신호초과거리를 이용하여 탐지거리 성능분포 분석을 수행하였다.

난수성 소용돌이는 수중에서 음파가 전달함에 있

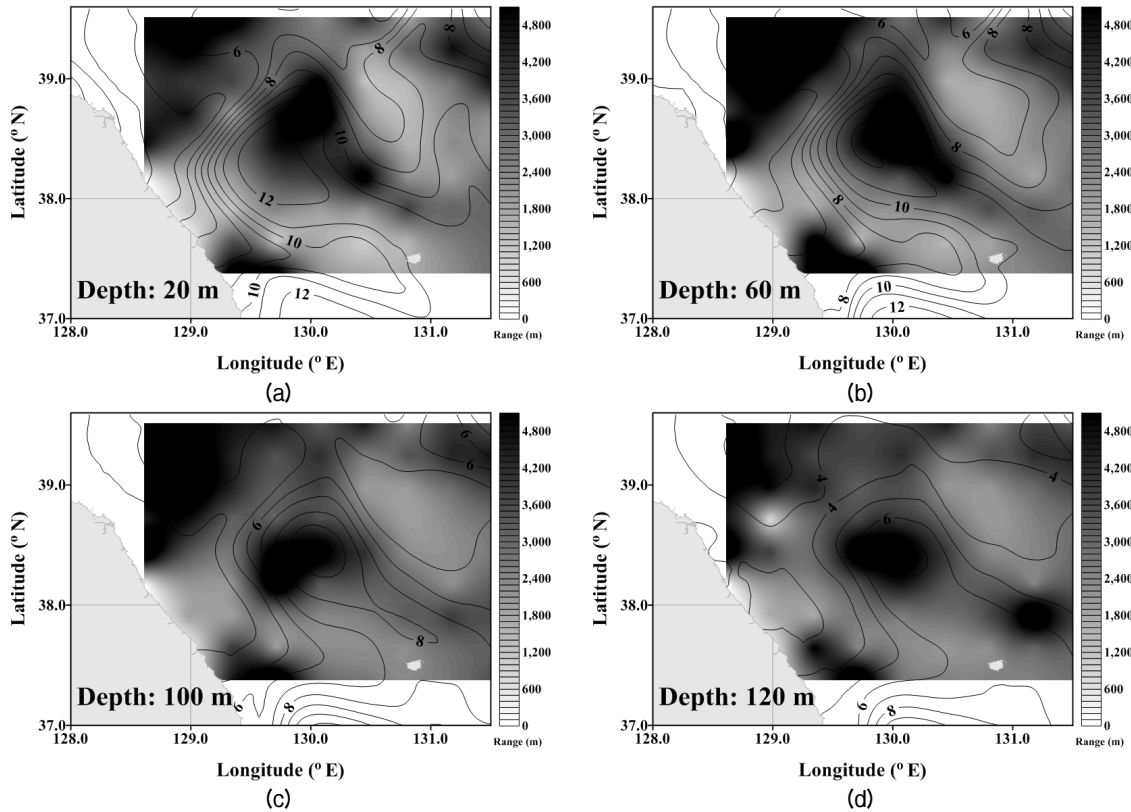


Fig. 8. Results of performance surface with depth using mean direct signal excess range. Black solid contours represent sea water temperature for each depth.

어 수렴대의 형성을 약화시키고 강한 하향굴절특성으로 인해 해저면의 심도가 충분히 깊지 않을 경우 해저면 반사손실이 증가해 음파전달에 불리하게 작용하였다. 또한 송신원이 외부에 있을 경우가 소용돌이 내부에 있을 경우보다 상대적으로 원거리 음파전달이 유리한 것으로 분석되었다. 평균 직접 신호 초과거리를 이용한 탐지거리 성능분포 분석결과를 보면 음파는 소용돌이 내부에서는 음파전달에 불리하게 작용하지 않지만, 음파가 소용돌이 경계를 만나게 되면 음파전달이 불리해지는 것을 알 수 있었다. 이러한 소용돌이에 의한 불리한 음파전달특성은 해저면의 특성으로 인해 소용돌이 북동쪽과 남서쪽에서 더욱 강하게 나타나고 있어 원거리 음파전달에 매우 불리할 것으로 판단된다.

마지막으로 동해에서 발생하는 난수성 소용돌이가 원거리 음파전달에 미치는 영향을 보다 정확하게 분석하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 송신원의 위치뿐만 아니라 실제 소나 운

용심도를 고려했을 때의 소용돌이의 영향을 추가적으로 분석해야할 것으로 생각되며, 보다 다양한 해양환경자료에 대한 분석 등이 추가적으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

References

1. R. J. Urick, *Principles of underwater sound*, 3rd Ed. (McGraw-Hill, New York, 1983), pp. 113-114.
2. S. Lim, J. Yun, Y. Kim, and S. Nam, "Variability of Underwater Sound Propagation in the Northern Part of the East Sea," *J. Korea Institute of Military Science and Technology* **10**, 52-61 (2007).
3. B. Kim, B. K. Choi, and B. Kim, "Influence of a Warm Eddy on Low-frequency Sound Propagation in the East Sea," *Ocean and Polar Research* **34**, 325-335 (2012).
4. G. Jerónimo and J. Gómez-Valdéz, "A subsurface warm-eddy off northern Baja California in July 2004," *Geophysical Research Letters* **34**, 1-5 (2007).
5. G. Chen, Y. Hou, X. Chu, and P. Qi, "Vertical structure and evolution of the Luzon Warm Eddy," *Chinese J. Oceanology*

- and Limnology **28**, 955-961 (2010).
6. M. W. Lawrence, "Modeling of acoustic propagation across warm-core eddies," J. Acoust. Soc. Am. **73**, 474-485 (1983).
 7. Y. Isoda and S. Saitoh, "The Northward Intruding Eddy along the East Coast of Korea," J. Oceanography **49**, 443-458 (1993).
 8. C. Shin, "Characteristics of a Warm Eddy Observed in the Ulleung Basin in July 2005," Ocean and Polar Research **31**, 283-296 (2009).
 9. M. D. Collins, "Higher-order Padé approximations for accurate and stable elastic parabolic equations with application to interface wave propagation," J. Acoust. Soc. Am. **89**, 1050-1057 (1991).
 10. M. A. Ainslie, *Principles of sonar performance modeling*, (Springer-praxis, London, 2010), pp. 176-177.
 11. P. J. McDowell, *Environmental and Statical Performance Mapping Model for Underwater Acoustic Detection Systems*, (Ph.D. thesis, University of New Orleans, 2010).

▶ 한 주 영 (Jooyoung Hahan)



1997년 2월: 한양대학교 지구해양학과 학사
 2000년 2월: 한양대학교 지구해양학과 석사
 2004년 8월: 한양대학교 지구해양학과 박사
 2005년 8월 ~ 현재: 국방과학연구소

▶ 나 영 남 (Youngnam Na)



1985년 2월: 서울대학교 해양학과 학사
 1988년 2월: 서울대학교 해양학과 석사
 1998년 2월: 부경대학교 음향진동공학과 공학박사
 1988년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소

저자 약력

▶ 김 원 기 (Won-Ki Kim)



2007년 2월: 충북대학교 지구환경과학 학사
 2009년 2월: 충북대학교 지질과학 석사
 2014년 8월: 서울대학교 에너지시스템 공학 박사
 2015년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소

▶ 조 창 봉 (Chang-bong Cho)



1997년 2월: 군산대학교 해양학과 학사
 2001년 2월: 서울대학교 해양학과 석사
 2014년 8월: 서울대학교 지구환경과학 박사
 2003년 8월 ~ 현재: 국방과학연구소

▶ 박 정 수 (Joung-Soo Park)



1988년 2월: 한양대학교 지구해양학과 학사
 1990년 2월: 한양대학교 지구해양학과 석사
 2006년 8월: 한국해양대학교 해양개발 공학과 박사
 1990년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소