Article

동해에서 저주파 음파전파에 미치는 난수성 소용돌이의 영향

김봉채* · 최복경 · 김병남

한국해양과학기술원 해양방위센터
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Influence of a Warm Eddy on Low-frequency Sound Propagation in the East Sea

Bong-Chae Kim*, Bok Kyoung Choi, and Byoung-Nam Kim

Maritime Security Research Center, KIOST
Anson P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea

Abstract : It is well known that sound waves in the sea propagates under the influence of sea surface and bottom roughness, the sound speed profile, the water depth, and the density of sea floor sediment. In particular, an abrupt change of sound speed with depth can greatly affect sound propagation through an eddy. Eddies are frequently generated in the East Sea near the Korean Peninsula. A warm eddy with diameter of about 150 km is often observed, and the sound speed profile is greatly changed within about 400 m of water depth at the center by the eddy around the Ulleung Basin in the East Sea. The characteristics of low-frequency sound propagation across a warm eddy are investigated by a sound propagation model in order to understand the influence of warm eddies. The acoustic rays and propagation losses are calculated by a range-dependent acoustic model in conditions where the eddy is both present and absent. We found that low-frequency sound propagation is affected by the warm eddy, and that the phenomena dominate the upper ocean within 800 m of water depth. The propagation losses of a 100 Hz frequency are variable within ± 15 dB with depth and range by the warm eddy. Such variations are more pronounced at the deep source near the sound channel axis than the shallow source. Furthermore, low-frequency sound propagation from the eddy center to the eddy edge is more affected by the warm eddy than sound propagation from the eddy edge to the eddy center.

Key words : low-frequency sound propagation, warm eddy, sound speed profile, East Sea

1. 서 론

해양에는 직경이 수십 km로부터 수백 km에 이르는 다양한 소용돌이가 항상 존재한다. 소용돌이에는 주위보다 수온이 높은 난수성 소용돌이(warm eddy)와 주위보다 수온이 낮은 냉수성 소용돌이(cold eddy)가 있다. 일반적으로 북반구에서 난수성 소용돌이는 시계방향으로 회전하

고, 냉수성 소용돌이는 반시계방향으로 회전한다. 해양에서 소용돌이는 수온분포, 유속분포 및 해수면 고도에 영향을 미치고 있다. 동해의 경우에도 소용돌이가 항상 존재하며, 특히 울릉도 주변해역에는 거의 연중 내내 소용돌이가 존재하는 것으로 알려져 있다. 여러 물리해양학자들은 울릉도 주변해역에 존재하는 난수성 소용돌이의 수온분포, 유속분포 및 이동 등 소용돌이의 특성에 대하여 자세히 보고하고 있다(Isoda and Saitoh 1993; Shin et al. 2005; Shin 2009).

*Corresponding author. E-mail : bckim@kiost.ac

해수중에서 음파는 해수면 거칠기, 수심분포, 음속구조, 해저면 거칠기 및 해저지질의 음파특성 등의 영향을 받으면서 전파하는 것으로 알려져 있다(Urick 1982). 해수중의 수온분포는 음속구조에 결정적으로 영향을 미치고, 음속구조는 음파가 해수중을 전파할 때 굴절에 영향을 미친다. 소용돌이가 존재하면 수온구조가 영향을 받아 수직방향 및 수평방향의 해수중 음속구조가 변동한다. 따라서 소용돌이를 관통하여 전파하는 음파는 소용돌이가 없는 경우에 비해 다르게 굴절하면서 전파하리라 예상된다. 국외에서는 이미 오래전부터 수중음파 전파실험 및 수치모델에 의해 소용돌이가 해수중 음파전파에 미치는 영향에 관한 연구를 실시하고 있다. 특히 소용돌이가 빈번하게 발생하는 것으로 알려져 있는 ‘Gulf Stream’ 해역(Baer 1980; Beckerle et al. 1980; Mellberg et al. 1990), ‘Tasman Sea’ 해역(Nysen et al. 1978; Lawrence 1983) 및 ‘East Greenland Sea’ 해역(Mellberg et al. 1987) 등에서 음파전파에 미치는 소용돌이의 영향에 관한 연구가 활발히 수행되었다. 이들 결과에 의하면, 난수성 또는 냉수성 소용돌이는 음파전파 양상을 크게 변경시킬 정도로 음파전파에 지대한 영향을 미쳤고, 특히 음파 수렴대(convergence zone)의 위치, 간격 및 폭 등 수렴대의 특성에 큰 영향을 미쳤으며, 전파손실(propagation loss)의 분포를 상당한 정도로 변경시켰다. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 수심이 5000 m 이상인 해역에서 수행되었기 때문에 해저로부터의 음파반사를 고려할 필요가 없이 해수중에서 굴절하면서 전파하는 음파만을 고려하는 전파환경에서 수행되었으므로 울릉도 주변해역의 전파환경과는 다른 환경이었다. 또한 동해의 경우 소용돌이가 음파전파에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구결과는 거의 보고되고 있지 않다.

동해 중부해역에 난수성 소용돌이가 존재할 때 이것이 음파전파에 미치는 영향을 파악하기 위해 음파전파 수치모델을 사용하여 해수중 저주파 음파의 전파특성을 조사하였다. 음파전파 수치모델의 계산결과를 검증하는 데에는 1996년도 10월중에 실시한 수중음파 전파실험의 측정결과를 사용하였다. 먼저 그 당시에 관측된 난수성 소용돌이의 특성 및 해양환경에 대해 수온 및 수중음속의 분포를 중심으로 고찰하였다. 그리고 음파전파 수치모델에 의한 수중음파 전파손실의 계산결과를 전파손실 측정결과와 비교하여 수치모델 계산결과와 유효성을 확인하였다. 난수성 소용돌이가 존재하는 경우 소용돌이의 중심 부근에 위치한 음원에서 발생한 음파가 소용돌이의 가장자리를 향해 전파할 때 음선(acoustic ray) 및 전파손실을 각각 계산하였다. 그리고 동일한 조건에서 소용돌이의 가장자리에 위치한 음원에서 발생한 음파가 소용돌이의 중심을 향해 전파할 때 음선 및 전파손실을 각각 계산하였다. 또한 동일한 정선에서 소용돌이가 존재하지 않은 경우를 가정

하여 음선 및 전파손실을 각각 계산하였다. 그리고 나서 동일한 음파전파 조건에 대해 소용돌이의 유무에 따른 음선 및 전파손실의 차를 각각 비교함으로써 음파의 해저반사를 고려하는 해양환경에서 난수성 소용돌이가 음파전파에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 수중음파 전파실험 및 수치계산

난수성 소용돌이가 존재하는 동해 중부해역에서 1996년도 10월 하순에 수중음파 전파실험을 실시하였다. 해수면의 수온분포를 나타내는 인공위성 사진으로부터 난수성 소용돌이의 대략적인 위치를 확인한 후 소용돌이를 관통하도록 정선을 설정하였으며, 이 정선의 전체거리는 약 150 km가 되도록 하였다. Fig. 1에 나타낸 정선에서 수중음파 전파실험은 전파거리가 약 75 km인 정점 EC5~EC9의 구간에서 실시되었는데, 정점 EC5는 소용돌이의 중심 부근에 해당되고, 정점 EC9는 소용돌이의 가장자리에 해당되게 하였다.

소용돌이의 가장자리 부근인 정점 EC9에 위치시킨 연구선에서 해수중에 수신기를 설치하면, 정점 EC9로부터 정점 EC5의 방향으로 정선을 따라 이동하면서 미리 정한 위치에 폭발성 음원을 투하하여 해수중에서 폭발시킴으로써 전파하는 수중음파를 수신해 전파실험을 실시하였다. 음원으로는 TNT 약 0.82 kg이 장전된 SUS(signals underwater sound)를 사용하였다. 이러한 음원을 약 2.78 km의 일정한 간격으로 수중음파의 전파거리가 약 1.85~74.08 km가 되도록 투하하였다. 이때 수신기를 각각 수심 30 m 및 180 m에 위치시켰고, SUS의 폭발수심을 각각 18 m 및 244 m로 설정하였다. 그리고 연구선을 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5에 위치시켜 수신기를 해수중에 설치하여 동일한 방식으로 수중음파 전파실험을 반복하였다.

수신기로 수신된 음파신호는 데이터 레코더에 의해 기록되었다. 음원 투하위치와 수신기 위치와의 거리에 따라 수신기에 도달하는 수중음파의 음압진폭이 변하므로 오실로스코프로 수신음파의 파형을 관찰하면서 측정용 증폭기의 이득을 적절히 조절하여 적절한 레벨의 음파신호가 기록되도록 하였다. 수중음파의 전파손실을 구하기 위해 수신한 음파신호를 신호분석기에 의하여 1/3 옥타브대역(octave band)으로 63~2000 Hz 범위의 16개 중심주파수에서 음향에너지 플럭스밀도(acoustic energy flux density)의 분석값을 구하였다. 이때 이러한 분석값은 다중경로(multipath)에 따른 음파전파의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 약 3.2초 동안 신호분석기에서 적분하여 얻어지도록 하였다. 그 다음 수신기의 수신감도, 측정용 증폭기의 이득 및 주파수의 대역폭 등을 고려하여 각각의 중심주파

Fig. 1. Site map for sound propagation

수에서 음향에너지 플럭스밀도의 수신레벨을 산출하였다. 이때에는 해수중 주위잡음의 영향도 고려하였다. 그리고 나서 각각의 중심주파수에서 SUS의 음원레벨(Gaspin and Shuler 1971)과 수중음파 수신레벨과의 차이로부터 각각의 전파거리에 대한 수중음파의 전파손실을 구하였다.

해수중을 전파하는 수중음파의 전파특성을 조사하기 위해 거리종속 음향모델(range-dependent acoustic model)인 HARCAM(Hodgson And RAM Composite Acoustic Model)을 사용하여 음선을 계산하였고, 저주파 수중음파의 전파손실을 계산하였다. 이때 수치모델의 입력자료로서 수중음속은 실제로 관측된 자료를 사용하였다. 그리고 해수면상의 풍속을 5 m/s로 설정하였고, 해저는 모래, 실트 및 점토(sand, silt and clay)의 혼합물로서 이것의 음속, 밀도 및 두께를 각각 1530 m/s, 1.583 g/cm³ 및 50 m로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

해양환경

난수성 소용돌이의 구조 및 규모를 파악하기 위해 Fig. 1에 나타난 정선상의 EC1~EC9의 9개 정점에서 CTD 관측을 실시하여 수온을 구하였다. 이때 정점간의 간격은 약 18.52 km이었다. 정점별 수온의 프로파일 및 수온의 수직단면을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 의하면, 해수면으로부터 수심 약 30 m까지의 사이와 수심 약 400 m로부터 해저면까지의 사이에서 수온의 수직분포는 정점에 따라 차이가 거의 나타나지 않았다. 그러나 수심 약 30~400 m의 사이에서 수온의 수직분포는 정점에 따라 약간 다르게

Fig. 2. (a) Temperature profiles, (b) vertical temperature cross-section within 500 m depth

나타났다. 이것은 난수성 소용돌이의 영향에 의해 소용돌이의 중심으로 갈수록 동일한 수심에서 수온이 높게 나타

나기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 이때 관측된 난수성 소용돌이는 수평방향으로 반경 약 75 km까지 수온분포에 영향을 미쳤고, 수직방향으로 해수면으로부터 수심 약 400 m까지 영향을 미쳤다. Fig. 2로부터 정점 EC4는 난수성 소용돌이의 중심이었고, 정점 EC5는 난수성 소용돌이

Fig. 3. (a) Sound speed profiles, (b) vertical cross-section of sound speed within 500 m depth, (c) profiles of sound speed difference

의 중심 부근이었으며, 정점 EC9는 난수성 소용돌이의 가장자리 부근임을 확인할 수 있었다.

CTD 관측으로부터 수중음파 전파실험을 실시한 구간인 정점 EC5~EC9에서 수중음속을 계산하여 정점별 음속 프로파일, 수심 500 m 이내의 음속 수직단면 및 정점별 음속차(sound speed difference)의 프로파일 등을 Fig. 3에 나타내었다. 특히 Fig. 3(c)는 난수성 소용돌이가 수중음속에 미치는 영향을 알아보기 위해 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9에서의 음속을 기준으로 각 정점에서의 음속과의 차를 구하여 나타낸 것이다. 즉 여기에서는 각 정점에서의 수심별 음속으로부터 정점 EC9에서의 수심별 음속을 뺀 값을 음속차로 하였다.

전체적으로 해수면으로부터 수심 약 400 m까지에서는 정점에 따라 음속구조가 서로 다르게 나타나고 있었는데, 이것은 난수성 소용돌이의 영향에 의한 것으로 생각된다. 즉 난수성 소용돌이의 중심 부근으로 갈수록 동일한 수심에서 수중음속은 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 수심 약 400 m부터 해저면까지의 사이에서는 정점에 관계없이 음속구조가 거의 동일하게 나타나고 있었다. Fig. 3에 의하면, 음파 층심도(sonic layer depth)는 20~30 m로 나타나 정점에 따라 크게 변동하지 않았지만, 음향채널 축(sound channel axis)은 220~350 m로 나타나 정점에 따라 크게 변동하였으며, 난수성 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5에서 350 m로서 가장 깊게 나타났고, 난수성 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9에서 220 m로서 가장 얇게 나타났다. 음속차의 최대값은 EC5의 경우 수심 115 m에서 28.7 m/s이었으며, 정점 EC6의 경우 수심 70 m에서 27.8 m/s이었다. 그리고 정점 EC7의 경우 수심 60 m에서 19.9 m/s이었으며, 정점 EC8의 경우 수심 50 m에서 7.0 m/s이었다. 즉 음속차의 최대값은 소용돌이의 중심 부근으로 갈수록 깊은 수심에서 나타났으며, 또한 음속차의 최대값도 점점 커지는 경향을 보였다.

Fig. 4. Water depth profile along sound propagation track

수중음파 전파실험을 실시한 정선의 구간인 정점 EC5~EC9의 사이에서 수심의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 의하면, 수심은 약 1500~2200 m의 범위이었다. 그리고 거리 0~15 km의 사이에서 수심은 약 1500 m로 거의 일정하였으나, 거리 15~30 km의 사이에서 수심은 약 1500 m로부터 약 2200 m로 급격히 증가하였으며, 거리 30~75 km의 사이에서 수심은 약 2200 m로 매우 일정하였다.

수중음파 전파손실

음파전파 수치모델에 의해 계산을 실행하기 위해서는 필요로 하지만 직접 관측하지 못한 입력자료인 해양지질 자료를 설정하고, 음파전파 수치모델에 의한 전파손실 계산값의 유효성을 확인하기 위해 수중음파 전파손실의 측정값 및 계산값을 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. 이들 그림은 주파수 100 Hz의 경우이다. 그리고 이들 그림에서 전파손실의 측정값을 점으로 나타내었고, 전파손실의 계산값을 실선으로 나타내었다. 여기서 해양지질의 입력자료들은 전파손실 계산값의 분포가 전파손실 측정값의 분포와 가장 비슷하도록 설정되었다.

Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)에서 음원수심은 18 m, 수신기수심은 30 m이고, Fig. 5(b) 및 Fig. 6(b)에서 음원수심은 18 m, 수신기수심은 180 m이다. 그리고 Fig. 5(c) 및 Fig. 6(c)에서 음원수심은 244 m, 수신기수심은 30 m이고, Fig. 5(d) 및 Fig. 6(d)에서 음원수심은 244 m, 수신기수심은 180 m이다. Fig. 5는 난수성 소용돌이의 가장자리 부근에 위치한 정점 EC9에서 수중음파를 수신한 경우이고, Fig. 6은 난수성 소용돌이의 중심 부근에 위치한 정점 EC5에서 수중음파를 수신한 경우이다. 즉 Fig. 5는 소용돌이의 내부로부터 소용돌이의 외부로 향해 수중음파가 전파하는 경우이고, Fig. 6은 소용돌이의 외부로부터 소용돌이의 내부로 향해 수중음파가 전파하는 경우이다.

Fig. 5 및 Fig. 6에 의하면, 전파손실 계산값의 분포는 측정값의 분포와 대체로 일치하는 경향을 보였다. 따라서 음파전파 수치모델에 의한 전파손실 계산값이 유효함을 확인할 수 있었다. 그러나 부분적으로 전파손실의 계산값이 측정값과 일치하지 않는 경우도 있었다. 이것은 음원수심 및 수신기수심의 변동, 수중음속의 변동, 음원레벨 및 전파거리의 부정확 등 여러 가지의 원인에 의해 생길 수 있지만, 구체적인 원인을 특정하기는 매우 어려운 실정이다.

Fig. 5. Comparison between measured values and calculated values of propagation loss of frequency 100 Hz in case of propagation from eddy center to eddy edge. (a) Source depth 18 m and receiver depth 30 m, (b) source depth 18 m and receiver depth 180 m, (c) source depth 244 m and receiver depth 30 m, (d) source depth 244 m and receiver depth 180 m

Fig. 6. Comparison between measured values and calculated values of propagation loss of frequency 100 Hz in case of propagation from eddy edge to eddy center. (a) Source depth 18 m and receiver depth 30 m, (b) source depth 18 m and receiver depth 180 m, (c) source depth 244 m and receiver depth 30 m, (d) source depth 244 m and receiver depth 180 m

다. 또한 전파손실의 측정값에는 3차원적인 수직방향 및 수평방향의 음파굴절이 포함되어 있는 반면, 전파손실의 계산값에는 2차원적인 수직방향의 음파굴절만이 고려되었으므로 측정값과 계산값의 불일치가 일어날 수도 있다. 이들 그림에 의하면, 전파손실의 측정값 및 계산값은 음원 수심 및 수신기수심이 깊어질수록 작아지는 경향을 보였다. 즉 음원수심 244 m 및 수신기수심 180 m의 경우가 전파손실의 측정값 및 계산값이 가장 작게 분포하여 음파 전파가 가장 양호하였고, 음원수심 18 m 및 수신기수심 30 m의 경우가 전파손실의 측정값 및 계산값이 가장 크게 분포하여 음파전파가 가장 불량하였다. 그리고 소용돌이의 내부로부터 소용돌이의 외부로 향해 수중음파가 전파하는 경우의 전파손실 측정값 및 계산값은 소용돌이의 외부로부터 소용돌이의 내부를 향해 수중음파가 전파하는 경우의 전파손실 측정값 및 계산값보다 대체로 약간 작게 나타나는 경향을 보였다.

난수성 소용돌이 영향

난수성 소용돌이가 음파전파에 미치는 영향을 파악하기 위하여 음파전파 수치모델에 의해 음선 및 수중음파 전파

손실을 계산하여 해수중 음파전파 특성을 조사하였다. 먼저 난수성 소용돌이가 존재하는 경우 및 존재하지 않은 경우의 각각에 대하여 수중음파의 전파양상을 나타내는 음선도(ray diagram)를 Fig. 7 및 Fig. 8에 각각 나타내었다. 여기서 난수성 소용돌이가 존재하지 않는 경우란 수중음속의 프로파일이 정점에 관계없이 일정하다고 가정한 것으로서 난수성 소용돌이의 내부에 위치한 정점 EC5~EC8에서의 수중음속 프로파일을 소용돌이의 가장자리에 위치한 정점 EC9의 수중음속 프로파일과 동일하다고 한 것이다. 즉 각각의 정점에서 수심은 실제로 관측된 수심을 적용하였지만, 각각의 정점에서 수중음속 프로파일은 정점 EC9의 프로파일과 동일하다고 가정하여 이것을 적용하였다.

Fig. 7은 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5로부터 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9 쪽으로 수중음파가 전파하는 경우이다. 그리고 Fig. 8은 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9로부터 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5 쪽으로 수중음파가 전파하는 경우이다. Fig. 7(a), Fig. 7(c), Fig. 8(a) 및 Fig. 8(c)에서 음원수심은 18 m이고, Fig. 7(b), Fig. 7(d), Fig. 8(b) 및 Fig. 8(d)에서 음원수심은 244 m이

Fig. 7. Acoustic ray diagrams in case of propagation from eddy center to eddy edge. (a) Source depth 18 m with eddy, (b) source depth 244 m with eddy, (c) source depth 18 m without eddy, (d) source depth 244 m without eddy

Fig. 8. Acoustic ray diagrams in case of propagation from eddy edge to eddy center. (a) Source depth 18 m with eddy, (b) source depth 244 m with eddy, (c) source depth 18 m without eddy, (d) source depth 244 m without eddy

다. 그리고 Fig. 7(a), Fig. 7(b), Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)는 난수성 소용돌이가 존재하는 경우이고, Fig. 7(c), Fig. 7(d), Fig. 8(c) 및 Fig. 8(d)는 난수성 소용돌이가 존재하지 않는 경우이다. 또한 이들 그림에서 음선의 출발각(departure angle)은 2° 간격으로 수평방향에 대해 아래쪽으로 -20° 로부터 위쪽으로 $+20^\circ$ 까지로 하였다. 따라서 이들 각각의 음선도에는 21개의 음선을 나타내었다.

Fig. 7 및 Fig. 8에 나타난 음선도에 의하면, 난수성 소용돌이의 유무에 관계없이 음원수심 18 m인 경우의 음선 분포는 음원수심 244 m인 경우의 음선 분포와 매우 다르게 나타났다. 즉 음원수심 18 m일 때 모든 음선은 해저면에서 반사하였고, 따라서 이 경우 모든 수중음파는 해저면과 상호작용을 하면서 전파하였다. 그러나 음원수심이 244 m일 때 일부분의 음선은 해저면에서 반사하는 일이 없이 해수중에서 굴절만을 계속하였고, 단지 그 밖의 음선만이 해저에서 반사하였으므로 이 경우 일부분의 수중음파는 해저면과 상호작용이 없이 해수중에서 굴절하면서 전파하였다. 수중음파가 해저면에서 반사할 때마다 손실을 입게 된다(Dosso and Chapman 1987; 김 2007). 따라서 Fig. 5 및 Fig. 6에서 음원수심 244 m인 경우의 전파손실은 음원수심 18 m인 경우의 전파손실보다 작게 나타난

것으로 생각된다.

Fig. 7 및 Fig. 8에 의하면, 난수성 소용돌이의 유무에 따라 음선도가 약간 다르게 나타났다. 이러한 현상은 소용돌이의 가장자리로부터 소용돌이의 중심을 향해 수중음파가 전파하는 경우보다 소용돌이의 중심으로부터 소용돌이의 가장자리를 향해 수중음파가 전파하는 경우에서 더욱 현저하였다. 그리고 동일한 조건일 때 음원수심 244 m인 경우가 음원수심 18 m인 경우보다 이러한 현상이 더욱 현저하게 나타났다. 이것은 난수성 소용돌이에 의해 해수중 음속변동을 많이 일으키는 부분에서 소용돌이의 유무에 의한 음파굴절의 변동이 심하게 발생하기 때문으로 생각된다. 결론적으로 음파의 전파경로도인 음선도에 의하면, 난수성 소용돌이는 음파굴절에 영향을 미치고 있었고, 따라서 수중음파의 전파에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 난수성 또는 냉수성 소용돌이가 음파 수렴대에 미치는 영향에 관한 타 연구자들의 연구결과에 의하면, 소용돌이는 음속구조를 변동하게 하여 음파굴절에 영향을 미쳐서 음파 수렴대의 위치, 간격 및 폭 등을 약간 변동시키는 것으로 보고되고 있다(Lawrence 1983; Mellberg et al. 1990). 그러나 이러한 연구들은 수심이 5000 m 이상으로서 음파 수렴대가 형성되는 해역에서 수행되었기 때문

Fig. 9. Propagation loss of frequency 100 Hz plotted in range-depth plane in case of propagation from eddy center to eddy edge. (a) Source depth 18 m with eddy, (b) source depth 244 m with eddy, (c) source depth 18 m without eddy, (d) source depth 244 m without eddy

Fig. 10. Propagation loss of frequency 100 Hz plotted in range-depth plane in case of propagation from eddy edge to eddy center. (a) Source depth 18 m with eddy, (b) source depth 244 m with eddy, (c) source depth 18 m without eddy, (d) source depth 244 m without eddy

에 소용돌이가 음파 수렴대에 영향을 미쳤지만, 울릉도 주변해역의 경우에는 수심이 충분히 깊지 않아 음파 수렴대가 형성되지 않기 때문에 울릉도 주변해역의 난수성 소용돌이가 음파 수렴대에 미치는 영향은 나타나지 않았다.

난수성 소용돌이가 존재하는 경우 및 난수성 소용돌이가 존재하지 않은 경우의 각각에 대해 주파수 100 Hz 수중음파의 전파손실을 계산하여 Fig. 9 및 Fig. 10에 각각 나타내었다. Fig. 9는 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5로부터 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9 쪽으로 수중음파가 전파하는 경우이다. 그리고 Fig. 10은 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9로부터 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5 쪽으로 수중음파가 전파하는 경우이다. Fig. 9(a), Fig. 9(c), Fig. 10(a) 및 Fig. 10(c)에서 음원수심은 18 m 이고, Fig. 9(b), Fig. 9(d), Fig. 10(b) 및 Fig. 10(d)에서 음원수심은 244 m이다. 그리고 Fig. 9(a), Fig. 9(b), Fig. 10(a) 및 Fig. 10(b)는 난수성 소용돌이가 존재하는 경우이고, Fig. 9(c), Fig. 9(d), Fig. 10(c) 및 Fig. 10(d)는 난수성 소용돌이가 존재하지 않는 경우이다.

Fig. 9 및 Fig. 10에 나타난 전파손실의 분포도에 의하면, 난수성 소용돌이의 유무에 관계없이 음원수심 18 m인 경우의 전파손실은 음원수심 244 m인 경우의 전파손실보

다 대체로 크게 분포하였다. 그리고 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타난 음선도의 경우와 같이 Fig. 9 및 Fig. 10의 전파손실 분포도에서도 음원수심 18 m일 때 모든 수중음파는 해저면에서 반사하면서 전파하였으나, 음원수심이 244 m일 때 대부분의 수중음파는 해저면에서 반사하는 일이 없이 해수중에서 굴절하면서 전파하였다. 따라서 음원수심 18 m일 때에는 모든 수중음파가 해저면과 상호작용을 하므로 해저손실을 입으면서 전파하여 전파손실이 크게 분포하였지만, 음원수심 244 m일 때에는 일부분의 수중음파가 해저면과 상호작용이 없이 해저손실을 입지 않고 전파하여 전파손실이 비교적 작게 분포하였다.

Fig. 9 및 Fig. 10에 의하면, 난수성 소용돌이의 유무에 따라 전파손실의 분포가 약간 다르게 나타났다. 특히 이러한 현상은 Fig. 7 및 Fig. 8의 결과와 같이 소용돌이의 가장자리로부터 소용돌이의 중심 부근을 향해 수중음파가 전파할 때보다 소용돌이의 중심 부근으로부터 소용돌이의 가장자리를 향해 수중음파가 전파할 때 더욱 현저하였다. 그리고 동일한 조건일 때 음원수심 244 m인 경우가 음원수심 18 m인 경우보다 이러한 현상이 더욱 현저하게 나타났다. 이것은 난수성 소용돌이에 의해 해수중 음속변동을 많이 일으키는 부분에서 소용돌이의 유무에 의한 음파

Fig. 11. Difference between propagation loss with eddy and propagation loss without eddy. (a) Source depth 18 m with propagation from eddy center to eddy edge, (b) source depth 244 m with propagation from eddy center to eddy edge, (c) source depth 18 m with propagation from eddy edge to eddy center, (d) source depth 244 m with propagation from eddy edge to eddy center

굴절의 변동이 심하게 발생하기 때문에 나타나는 것으로 생각된다.

난수성 소용돌이가 존재할 때 수중음파 전파손실 계산값과 난수성 소용돌이가 존재하지 않을 때 수중음파 전파손실 계산값과의 차를 Fig. 11에 나타내었다. 즉 이 그림들은 소용돌이가 존재하는 경우의 전파손실 계산값으로부터 소용돌이가 존재하지 않은 경우의 전파손실 계산값을 빼어 나타낸 것이다. 여기서 주파수는 100 Hz이다. Fig. 11(a) 및 Fig. 11(b)는 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5로부터 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9 쪽으로 수중음파가 전파하는 경우이다. 그리고 Fig. 11(c) 및 Fig. 11(d)는 소용돌이의 가장자리인 정점 EC9로부터 소용돌이의 중심 부근인 정점 EC5 쪽으로 수중음파가 전파하는 경우이다. Fig. 11(a) 및 Fig. 11(c)에서 음원수심은 18 m이고, Fig. 11(b) 및 Fig. 11(d)에서 음원수심은 244 m이다.

Fig. 11에 의하면, 난수성 소용돌이의 유무에 따른 수중음파 전파손실의 차는 대체로 약 ± 15 dB 이내에서 변동하였다. 난수성 또는 냉수성 소용돌이가 수중음파 전파손실의 변동에 미치는 영향에 관한 타 연구자들의 연구결과에 의하면, 소용돌이에 의한 전파손실의 변동은 약 10~20 dB

인 것으로 보고되고 있다(Baer 1980; Beckerle et al. 1980; Mellberg et al. 1987). 그러나 수중음파의 전파에는 소용돌이에 의한 음속변동뿐만 아니라 해수면 거칠기, 수심분포, 해저면 거칠기 및 해저지질의 음파특성 등이 영향을 미치므로 전파환경에 따라 소용돌이에 의한 전파손실의 변동에는 차이가 있을 것으로 생각된다. 그리고 Fig. 11에 나타난 전파손실의 차는 해수면으로부터 수심 약 800 m의 범위 이내에서 크게 나타났다. 음원수심 244 m인 경우가 음원수심 18 m인 경우보다 난수성 소용돌이의 유무에 따른 수중음파 전파손실의 차가 크게 변동하였다. 특히 음원수심 244 m인 경우 해수면으로부터 수심 약 400 m의 범위 이내에서는 전파손실의 차가 양으로 분포하는 영역이 넓게 나타났으나, 수심 약 400~800 m의 범위 이내에서는 전파손실의 차가 음으로 분포하는 영역이 넓게 나타났다. 즉 수심 약 0~400 m의 범위 이내에서는 난수성 소용돌이가 있는 경우의 수중음파 전파손실은 소용돌이가 없는 경우의 전파손실보다 대체로 크게 나타났으나, 수심 약 400~800 m의 범위 이내에서는 난수성 소용돌이가 있는 경우의 수중음파 전파손실은 소용돌이가 없는 경우의 전파손실보다 대체로 작게 나타났다. 또한 소용돌

이의 가장자리로부터 소용돌이의 중심을 향해 수중음파가 전파할 때보다 소용돌이의 중심으로부터 소용돌이의 가장 자리를 향해 수중음파가 전파할 때 전파손실의 차가 크게 변동하였다.

4. 결 론

동해 중부해역에 난수성 소용돌이가 존재할 때 해수중 저주파 음파전파에 미치는 소용돌이의 영향을 밝히기 위해 음파전파 수치모델에 의해 음선 및 전파손실을 계산하여 수중음파 전파특성을 조사하였다. 대상해역의 수심은 약 1500~2200 m의 범위이었고, 대상으로 한 난수성 소용돌이는 수평방향으로 반경 약 75 km까지 해수중 음속분포에 영향을 미쳤으며, 수직방향으로 해수면으로부터 약 400 m까지 영향을 미쳤다. 그 결과 난수성 소용돌이가 있는 경우와 없는 경우에 대해 음파전파 경로인 음선의 분포는 약간 다르게 나타났다. 이러한 현상은 난수성 소용돌이의 가장자리로부터 난수성 소용돌이의 중심을 향해 수중음파가 전파하는 경우보다 난수성 소용돌이의 중심으로부터 난수성 소용돌이의 가장자리를 향해 수중음파가 전파하는 경우에서 더욱 현저하였다. 그리고 음원수심 244 m인 경우가 음원수심 18 m인 경우보다 이러한 현상이 더욱 현저하게 나타났다. 난수성 소용돌이의 유무에 따른 주파수 100 Hz인 수중음파 전파손실의 차는 대체로 약 ± 15 dB 이내에서 변동하였다. 그리고 이러한 전파손실의 차는 해수면으로부터 수심 약 800 m의 범위 이내에서 크게 나타났다. 음원수심 244 m인 경우가 음원수심 18 m인 경우보다 난수성 소용돌이의 유무에 따른 수중음파 전파손실의 차가 크게 변동하였다. 그리고 난수성 소용돌이의 가장자리로부터 난수성 소용돌이의 중심을 향해 수중음파가 전파할 때보다 난수성 소용돌이의 중심으로부터 난수성 소용돌이의 가장자리를 향해 수중음파가 전파할 때 전파손실의 차가 크게 변동하였다.

사 사

본 논문을 세심하게 검토해 주시고 유익한 조언을 해주신 두 분의 심사위원께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 한국해양과학기술원의 Lab창의과제(PE98824)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김봉채 (2007) 황해에서 저주파 음파의 해저손실 변동. *Ocean and Polar Res* **29**(2):113-121
- Baer RN (1980) Calculations of sound propagation through an eddy. *J Acoust Soc Am* **67**(4):1180-1185
- Beckerle JC, Baxter II L, Porter RP, Spindel RC (1980) Sound channel propagation through eddies southeast of the Gulf Stream. *J Acoust Soc Am* **68**(6):1750-1767
- Dosso SE, Chapman NR (1987) Measurement and modeling of downslope acoustic propagation loss over a continental slope. *J Acoust Soc Am* **81**(2):258-268
- Gaspin JB, Shuler VK (1971) Source levels of shallow underwater explosions. Naval Ordnance Laboratory Report, NOLTR 71-160, 58 p
- Isoda Y, Saitoh S (1993) The northward intruding eddy along the east coast of Korea. *J Oceanogr* **49**:443-458
- Lawrence MW (1983) Modeling of acoustic propagation across warm-core eddies. *J Acoust Soc Am* **73**(2):474-485
- Mellberg LE, Johannessen OM, Connors DN, Botseas G, Browning D (1987) Modeled acoustic propagation through an ice edge eddy in the East Greenland Sea marginal ice zone. *J Geophys Res* **92**(C7):6857-6868
- Mellberg LE, Robinson AR, Botseas G (1990) Modeled time variability of acoustic propagation through a Gulf Stream meander and eddies. *J Acoust Soc Am* **87**(3):1044-1054
- Nysen PA, Scully-Power P, Browning DG (1978) Sound propagation through an East Australian Current eddy. *J Acoust Soc Am* **63**(5):1381-1388
- Shin C-W (2009) Characteristics of a warm eddy observed in the Ulleung Basin in July 2005. *Ocean and Polar Res* **31**(4):283-296
- Shin H-R, Shin C-W, Kim C, Byun S-K, Hwang S-C (2005) Movement and structural variation of warm eddy WE92 for three years in the Western East/Japan Sea. *Deep-Sea Res II* **52**:1742-1762
- Urick RJ (1982) Sound propagation in the sea. Peninsula Publishing, Los Altos, 225 p

Received Aug. 7, 2012

Revised Sep. 6, 2012

Accepted Sep. 13, 2012