

해양에서 근거리효과를 이용한 수동 위치추정 오차분석

Error Analysis of the Passive Localization Using Near-field Effect in the Sea

박 정 수*, 최 진 혁*
(Joung-Soo Park*, Jin-Hyuk Choi*)

*국방과학연구소

(접수일자: 2001년 2월 13일; 채택일자: 2001년 7월 16일)

본 논문에서는 근거리 효과를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 탐지 기법을 해양환경에 적용할 경우에 발생할 수 있는 위치추정 오차에 관하여 분석하였다. 삼각 (triangulation) 알고리즘과 파면곡률 (wavefront curvature) 알고리즘 등을 이용하는 근거리 탐지 기법은 음파가 2차원 평면 (방위, 거리)에서 전달된다고 가정한다. 그러나 해양환경은 2차원 평면이 아닌 3차원 공간 (방위, 거리, 수심)이므로 음파전달에 따른 오차가 발생할 수 있다. 3차원 공간을 가정한 경우에도 해양에서의 다중경로 음파전달을 고려하지 않았다면 역시 오차가 발생하게 될 것이다. 근거리 탐지 기법의 위치추정 오차를 분석하기 위하여 다중경로 음파전달모델과 파면곡률을 이용한 초점 빔형성 (focused beamforming) 기법을 이용하여 시뮬레이션하였다. 분석결과 수중음속구조, 해저면 수심, 해저면 경사와 음원의 거리 등에 따라 위치추정 오차가 달라짐을 볼 수 있었다.

핵심용어: 수평선배열, 근거리 탐지, 파면 곡률, 초점 빔형성, 다중경로 음파전달, 거리오차
투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper we analyzed the localization error of near-field detection algorithm in the sea. The near-field detection algorithms using triangulation and wavefront curvature basically assume a signal in two dimension of bearing and range. But the assumption causes localization error because there is three dimension of bearing, range, and depth in the sea. Even through three dimensional effect is considered, the localization error is occurred if multipath propagation in the sea is ignored. To analyze the localization error in the sea, we simulate the near-field localization using acoustic propagation model and focused beamforming considering wavefront curvature. The simulation results indicate that localization error always occurs in the sea and the error varied with sound velocity profile, water depth, bottom slope, source range, etc.

Keywords: Horizontal line array, Near-field detection, Wavefront curvature, Focused beamforming, Multipath propagation, Range error

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.6)

I. 서론

수중에서 수평선배열 센서를 이용하여 빔형성으로부

터 음원의 위치를 탐지하는 알고리즘은 일반적인 기법이다. 음원이 원거리에 있다고 가정할 수 있다면 수신된 음파를 평면파로 가정하고 고전적인 빔형성을 이용하면 방위를 추정할 수 있다. 음원이 근거리에 있다고 가정할 수 있다면 삼각 (triangulation) 알고리즘과 파면곡률 (wavefront curvature) 알고리즘 등을 이용하여 방위

와 거리를 동시에 추정하거나, 고전적인 빔형성 결과와 결합하여 거리를 추정할 수 있다[1-3]. 최근에 국내에서도 근거리 음원의 파면곡률 (wavefront curvature) 알고리즘을 이용하여 음원의 위치를 추정하고자 하는 연구가 진행되고 있다[4-6].

음원의 음파가 2차원 평면상 (방위, 거리)에서 전달되고 시스템에서 야기되는 오차가 없다고 한다면 이러한 알고리즘을 적용한 위치추정 오차는 무시할 수 있을 것이다. 그러나 실제 해양환경은 2차원 평면이 아닌 3차원 공간 (방위, 거리, 수심)이므로 이에 따른 오차가 발생할 수 있다[7]. 3차원 공간을 고려한 추정 알고리즘이라고 해도 해양환경에서 음파의 반사와 굴절에 의한 다중경로를 고려하지 않았다면 역시 오차가 발생하게 될 것이다.

본 논문에서는 3차원 공간인 해양환경에서 음파가 근거리 음원으로부터 다중경로를 따라 수평선배열에 수신될 때 발생할 수 있는 위치추정 오차와 원인을 해석하였다. 위치추정 오차를 분석하기 위하여 파면곡률을 이용한 기본적인 초점빔형성 (focused beamforming) 기법을 이용하였다. 대표적인 한국근해의 해양환경을 고려한 다중경로 음파전달 모델로부터 음원의 신호를 만들어 위치추정 시뮬레이션을 수행하고, 이로부터 거리 추정오차 및 원인을 분석하였다. 위치추정 시뮬레이션은 기본적인 해양환경 요소들인 수중음속구조, 해저면 수심, 해저면 경사와 음원의 거리를 변화시키며 수행하였다.

II. 근거리 음원의 파면곡률

그림 1과 같이 2차원 평면상에서 수신센서 3개가 간격 d 로 배열된 선배열을 가정하고, i 번째 수신센서와 근거리

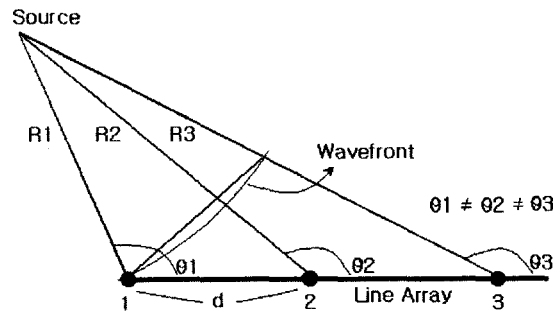


그림 1. 선배열로부터 근거리에 있는 음원의 파면곡률
Fig. 1. Wavefront curvature of near-field source.

에 있는 음원사이의 거리를 $R_i (i=1,2,3)$ 라 하면, $R_1 \gg d$ 일 때 수신센서 1에 대한 2와 3의 거리 차는 다음과 같다[3].

$$R_1 - R_2 \approx R_1 - R_1 [1 + d \cos(\theta) / R_1 - d^2 / 2R_1^2]$$

$$R_1 - R_3 \approx R_1 - R_1 [1 + 2d \cos(\theta) / R_1 - 2d^2 / R_1^2] \quad (1)$$

식 (1)에서 $d \cos(\theta)$ 와 $2d \cos(\theta)$ 는 평면파 성분이고 $d^2 / 2R_1$ 와 $2d^2 / R_1$ 는 파면곡률의 성분이며, $R_1 \gg d$ 이라도 $R_1 \gg d^2$ 를 만족하지 못할 경우에는 파면곡률을 무시할 수 없음을 알 수 있다[3].

이와 같은 2차원 평면상의 근거리 효과를 이용하는 기법들은 선배열 센서에 대한 신호의 다중경로 음파전달 현상을 무시하고 수직 수신각을 0° 이라고 가정함으로써 다중경로가 존재하는 3차원 공간의 해양에 적용될 때는 필연적으로 추정오차를 수반하게 된다. 3차원 해양환경에서 음파전달모델 (GSM)[8]을 이용하여 100Hz 기준으로 5개의 수신센서가 균등 배열된 길이 30λ의 선배열 센서와 3번째 수신센서를 기준으로 90° 방위에 있는 음원으로부터의 파면곡률의 도달시간과 도달각을 계산하면 그림 2와 같고, 가파하게 2차원 평면에서 계산한 파면

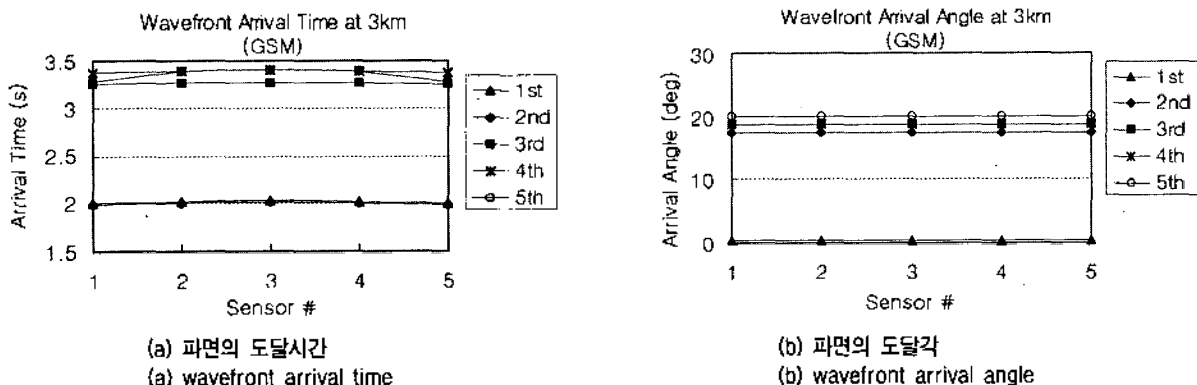


그림 2. 음파전달모델 (GSM)로부터 계산된 3km에 있는 근거리 음원의 파면곡률
Fig. 2. Wavefront curvatures of near-field source at 3km modeled with acoustic propagation model (GSM).

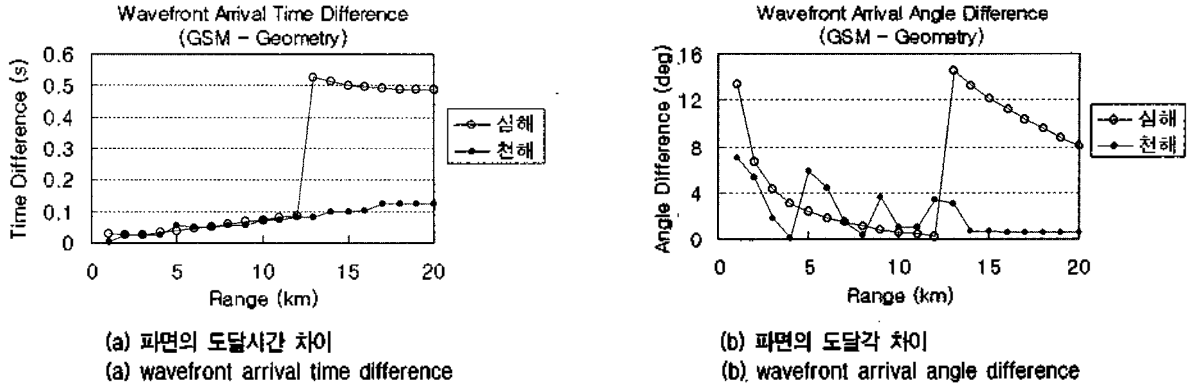


그림 3. 음파전달 모델과 기하학적 계산으로부터 산출된 파면의 도달시간 및 도달각 차이
 Fig. 3. Arrival time and arrival angle differences between modeled wavefront and geometrically calculated wavefront.

곡률의 결과와 비교하면 그림 3과 같다. 동해를 가정 한 심해의 경우에 해역 수심은 2,000m이고 음원과 수신기는 모두 200m에 있고, 남해를 가정한 천해의 경우에는 해역 수심은 200m이고 음원과 수신기는 모두 60m에 있는 저 울절 해양환경을 가정하였다. 먼저 근거리 음파전달 특성을 살펴보기 위하여 음파전달모델로부터 도달시간과 도달각을 계산하였다.

3km에 있는 근거리 음원의 파면곡률 특성을 살펴보면 그림 2와 같다. 음원과 수신기 사이에는 수신신호에 영향을 미칠 수 있는 5개의 다중경로(직접도달경로, 해수면 반사경로, 해저면반사경로, 해수면-해저면반사경로, 굴절경로)가 존재하며 음속을 1,500m/s로 가정할 때의 도달시간인 2 (3,000/1,500)s 와 같거나 늦게 도착한다. 센서간의 도달 시간 차이는 최대 약 0.01s이며, 5개 경로간의 도달 시간 차이는 약 1.4s 이하이다. 3km에서의 도달각은 음원과 수신기가 동일 수심일 때의 2차원의 기하학적 도달각인 0°보다 모두 크게 나타나며, 센서간의 도달각 차이는 0.01°이하이다. 이와 같은 파면곡률의 특성을 이용하면 음원의 거리와 방위정보를 동시에 획득할 수 있게 된다.

센서에 수신되는 다중경로 중에서 수신신호의 크기에 가장 큰 기여를 하는 경로를 기준으로 근거리 탐지 알고리즘에서 이용하는 기하학적 파면곡률의 도달시간과 도달각을 해역에 따라 거리별로 비교하였다(그림 3 참조). 도달 시간 차이는 심해인 경우에 지속적으로 증가하여 약 12km에서 0.09s이나 이후에 음선종류 (ray family)의 변화에 따라 20km에서 약 0.48s까지 증가한다. 천해의 경우에는 거리에 비례하여 증가하여 20km에서 약 0.12s의 차이를 보인다. 도달각의 차이는 심해인 경우에 13.7°에서부터 거리에 따라 지속적으로 감소하여 약 12km에서는

약 0.6°까지 좁혀지지만 이후에 음선종류 변화에 따라 약 14.5°까지 증가하고 20km에서는 약 8°의 차이를 보인다. 천해의 경우에는 약 7°에서부터 거리에 따라 큰 변동을 보이며 감소하여 20km에서는 약 0.5°의 차이를 보인다. 이와 같이 해양환경에서의 다중경로가 근거리 탐지기법의 기하학적 파면곡률과 차이를 보임으로써 결과적으로 음원위치 추정 결과의 오차 요인이 될 수 있다.

III. 파면곡률을 이용한 초점빔형성

파면곡률 효과를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 기법들을 해양환경에 적용할 경우에 II장에서 살펴본 바와 같은 현상 등에 의하여 발생할 수 있는 오차를 분석하기 위한 시뮬레이션을 위하여 초점빔형성 기법을 이용하였다[7]. 기본적으로 초점빔형성은 음원이 근거리에서 있다는 가정 하에 2차원 탐색평면에 대하여 기하학적으로 각각의 수신센서에 대한 파면곡률을 계산하고, 계산된 파면곡률의 시간지연을 이용하여 빔형성한다.

초점빔형성을 위한 2차원 평면의 거리가 \hat{R}_n ($n=1,2,\dots,K$) 이고 방위가 $\hat{\theta}_m$ ($m=1,2,\dots,L$) 일 때 임의의 거리 (\hat{R}_k)와 방위 ($\hat{\theta}_l$)에 음원이 있다고 가정하면 파면곡률의 시간지연을 포함하는 주파수영역 초점빔형성 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$B(F, (\hat{R}_k, \hat{\theta}_l)) = \sum_{n=1}^K a_n X_n(F) \exp(-i\omega\tau_n(\hat{R}_k, \hat{\theta}_l)) \quad (2)$$

본 논문의 시뮬레이션을 위하여 식 (2)의 주파수영역 초점빔형성 식을 이용하였다.

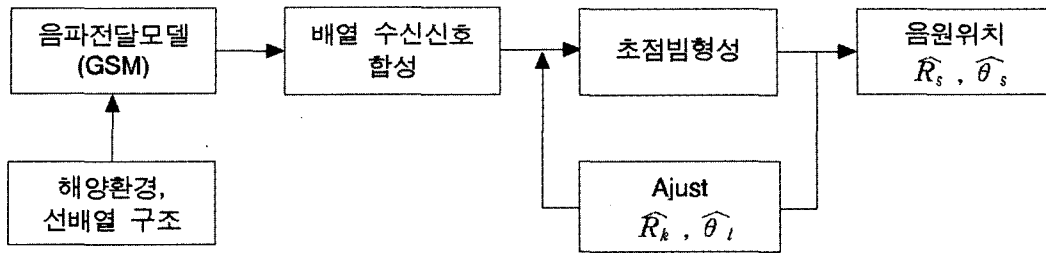


그림 4. 초점빔형성을 이용한 음원위치 추정 시뮬레이션 흐름도
 Fig. 4. Simulation flow for source localization with focused beamforming.

음원 위치 (R_s, θ_s)를 포함하는 가상 음원 위치 ($\hat{R}_k, \hat{\theta}_l$) 들로 이루어진 탐색평면상에서 빔형성 출력들을 비교하여 최대값을 갖는 위치 ($\hat{R}_s, \hat{\theta}_s$)를 탐색하고 오차를 계산하였다.

음원 위치추정 시뮬레이션을 위한 입력 신호를 만들기 위하여 겨울철에 해역 수심이 2,000m 일 때 음원이 선배열의 중간 센서를 기준으로 90° 방위에 있고, 선배열 센서의 길이는 30λ , 음원과 선배열 센서의 수심을 삼해의 경우에 200m로, 천해의 경우에 60m로 가정하고 음선 이론을 적용한 음파전달모델 (GSM)로부터 eigenray 성분을 산출하여 합성하였다. 위치추정 시뮬레이션 결과는 거리와 방위의 2차원 평면에 나타내고, 빔출력을 등준위선으로 나타냈다. 등준위선의 내부를 불확정영역 (Area Of Uncertainty, AOU)이라 하고, 탐색에 의한 AOU내의 추정위치 ($\hat{R}_s, \hat{\theta}_s$)는 점(·)으로 표시하였다. 이러한 위치추정 과정을 정리하면 그림 4와 같다.

IV. 위치추정 오차 분석

4.1. 음속구조

다중경로 음파전달은 음속구조의 영향을 가장 많이 받는다. 음파전달에 유리한 음속구조에서는 다중경로의 음선종류 (ray family)가 줄어들고, 음파전달에 불리한 음속구조에서는 다중경로의 간섭이 증가한다[7]. 음파전달에 유리한 음속구조에서는 각각의 다중경로의 도달시간 차이와 도달각이 상대적으로 작아서 경로간의 간섭이 줄어들고 수평적으로 파면의 왜곡이 감소함으로써 위치추정 오차가 감소하게 될 것이다. 음파전달에 유리한 음속구조는 일반적으로 수심에 따른 수온의 기울기가 작고 겨울철의 수온구조가 여기에 속한다. 반면 여름철에는 표층의 수온이 급격하게 증가하여 음파의 하향 굴절각이 커지고 다중경로의 도달시간 차이와 도달각이 커지고 수

평적으로 파면의 왜곡이 증가함으로써 추정 오차가 증가하게 된다. 이와 같은 영향은 다음의 위치추정 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있다.

동해의 여름철 (8월)과 겨울철 (2월)의 평균적인 음속구조를 사용하여 위치추정 시뮬레이션을 수행하였다 (그림 5 참조). 겨울철 음속은 표층에서 약 150m까지 음속이 일정한 혼합층이 형성되어 있고, 두 계절 모두 약 400m 부근에 최소 음속층이 있다. 동해의 경우에 음속최소층을 기준으로 도파관이 잘 발달하지 않는 환경으로써 해저

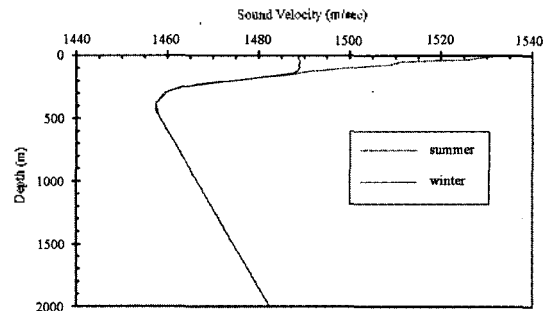


그림 5. 동해의 여름철과 겨울철의 일반적인 음속구조
 Fig. 5. Typical sound velocity profiles in summer and in winter in the East sea.

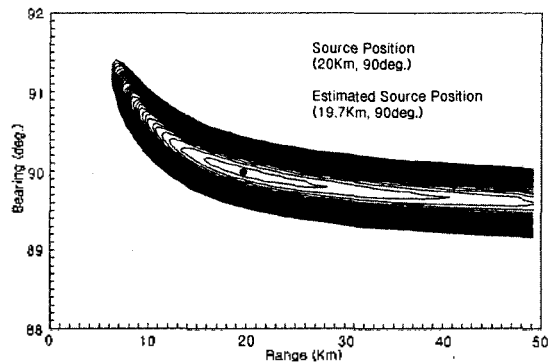


그림 6. 겨울철 동해 환경조건에서 거리-방위 음원위치 추정
 - 음원위치: (20km, 90deg), 추정 음원위치: (19.7km, 90deg)
 Fig. 6. Source range-bearing estimation in winter.
 -source position: (20km, 90deg), estimated source position: (19.7km, 90deg)

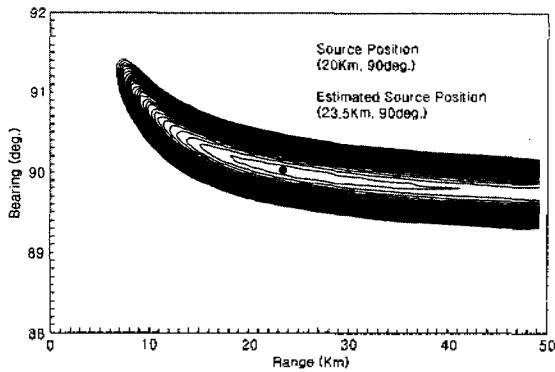


그림 7. 여름철 동해 환경조건에서 거리-방위 음원위치 추정 - 음원위치: (20km, 90deg), 추정 음원위치: (23.5km, 90deg)
 Fig. 7. Source range-bearing estimation in summer in the East sea. - source position: (20km, 90deg), estimated source position: (23.5km, 90deg)

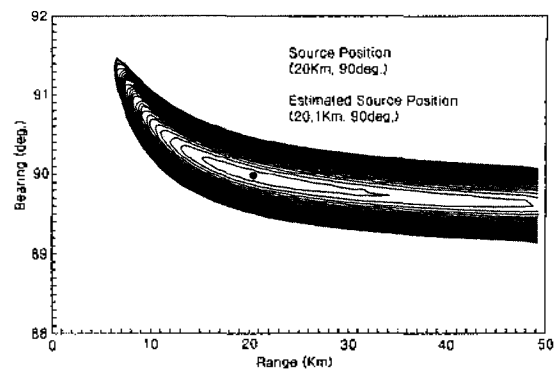


그림 8. 천해 환경조건에서 거리-방위 음원위치 추정 - 음원위치: (20km, 90deg), 추정 음원위치: (20.1km, 90deg)
 Fig. 8. Sourcerange-bearing estimation in shallow water. - source position: (20km, 90deg), estimated source position: (20.1km, 90deg)

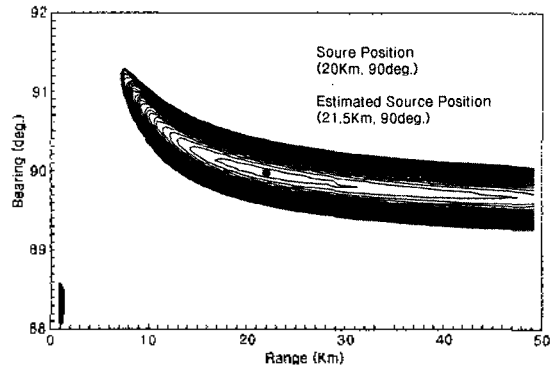


그림 9. 해저면이 상향경사 (up-slope)인 동해 환경조건에서 거리-방위 음원위치 추정 - 음원위치: (20km, 90deg), 추정 음원위치: (21.5km, 90deg)
 Fig. 9. Source range-bearing estimation in case of up-slope bottom in the East sea. - source position: (20km, 90deg), estimated source position: (21.5km, 90deg)

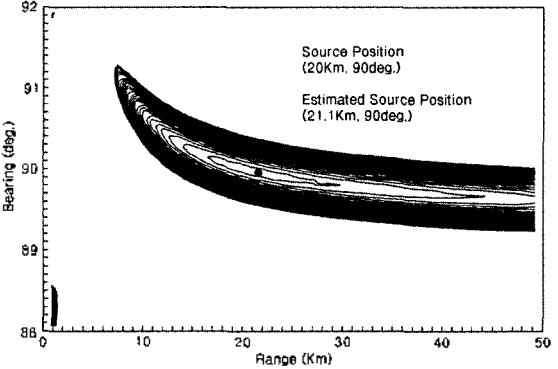


그림 10. 해저면이 하향경사 (down-slope)인 동해 환경조건에서 거리-방위 음원위치 추정 - 음원위치: (20km, 90deg), 추정 음원위치: (21.1km, 90deg)
 Fig. 10. Source range-bearing estimation in case of down-slope bottom in the East sea. - source position: (20km, 90deg), estimated source position: (21.1km, 90deg)

면 바로 위의 음속이 표층보다 낮아서 탁월한 경로의 해저면 반사가 빈번해진다. 위치추정 시뮬레이션 결과를 보면 음원이 혼합층인 120m에 있을 때 겨울철에는 거리 추정오차가 약 0.3km 이며 (그림 6 참조), 여름철에는 약 3.5km 이다 (그림 7 참조).

4.2. 수심

남해와 서해처럼 수심이 낮은 곳에서는 해저면 손실이 커서 음파의 전달거리가 매우 짧고 수평선배열의 탐지 성능이 떨어진다. 일반적으로 해역의 수심이 낮을수록 해수면 및 해저면 반사가 증가하여 해저면에 대한 반사각이 큰 경로의 음파전달에는 불리해진다. 그러나 반사각이 큰 경로가 감소하게 되면 음선종류가 단순해지고 따라서 간섭효과가 감소하여 음원의 위치추정 오차는 오히려

줄어든다. 즉, 수평선배열에 수신되는 신호의 각이 작을수록 위치추정 오차가 감소한다[7]. 이와 같은 수심 영향은 다음의 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있다.

수심이 200m인 겨울철 동남해의 경우에 시뮬레이션 결과를 살펴보면 방위 오차는 없고 거리 오차가 약 0.1km로써 (그림 8 참조) 동해의 경우 (그림 6 참조) 보다 추정 오차가 작다. 해역 수심뿐만 아니라 음원과 선배열 센서의 수심변화에 따라 추정오차가 다소 변할 수도 있을 것이다.

4.3. 해저면 경사

음원에서 수평선배열의 방향으로 해저면의 수심이 감소하는 상향경사 (up-slope)에서는 평탄한 해저면의 경우보다 선배열 센서에 수신되는 신호의 각이 점점 커지

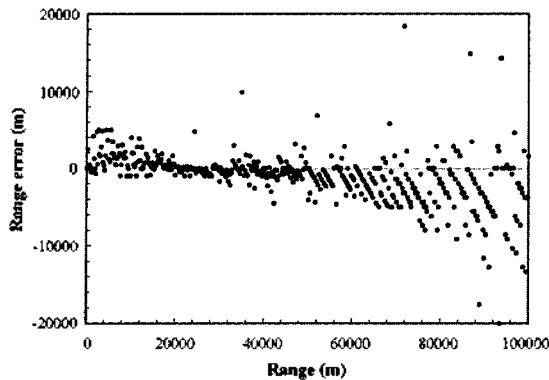


그림 11. 동해의 겨울철 환경에서 음원의 거리별 거리추정 오차
Fig. 11. Estimated range error vs. source range in winter in the East Sea.

고, 수심이 증가하는 하향경사 (down-slope)에서는 수신되는 신호의 각이 점점 작아진다. 따라서 수심이 증가할 때보다 감소할 때 다중경로의 영향이 커지고 위치추정 오차도 증가하게 된다. 이와 같은 해저면 경사의 영향은 다음의 결과에서 볼 수 있다.

동해에서 해저면이 경사진 환경에서 위치추정 시뮬레이션을 위하여 해저면 기울기가 4°인 상향경사와 하향경사 환경을 가정하고 수행하였다. 그림 9와 그림 10의 위치추정 시뮬레이션 결과를 살펴보면 두 경우 모두 방위 오차는 없고, 거리 오차는 하향경사의 경우에는 1.1km 이고 상향경사에서는 1.5km로서, 상향경사인 경우에 수신 각이 커져서 위치추정오차가 상대적으로 크다. 이러한 오차는 해저면이 평탄한 경우 (그림 6 참조)의 0.3km 오차보다 크다.

4.4. 음원의 거리

음원과 수평선배열 사이의 거리에 따라 다양한 다중경로가 결합되어 간섭을 일으킴으로써 파면이 왜곡되는 원인이 된다. 방위오차는 탁월한 경로의 수신각 변화가 큰 근거리에서 크고, 거리오차 역시 탁월한 경로의 수신각 변화가 큰 근거리에서 크다. 근거리 효과가 무시되는 거리에서부터는 도달시간 차이가 더욱 심해짐으로써 오차가 급격히 증가한다. 이와 같은 음원의 거리에 따른 효과를 살펴보기 위한 위치추정 시뮬레이션 결과를 다음에서 볼 수 있다.

동해의 겨울철에 평탄한 해저면 환경의 경우에 약 20km 이내에서는 음원의 거리가 감소할수록 파면곡률이 커지고 따라서 왜곡도 증가하여 오차가 약 5km까지 증가하고, 20km 이상에서는 음원의 거리가 증가할수록 오차도 지속적으로 증가하여 100km에서는 약 14km 이상의

거리 오차를 보이고 있다. 방위오차는 거리오차에 비하여 상대적으로 작으며 수 km 이내에서만 영향을 미친다[7].

V. 결론

본 논문에서는 2차원 평면상 (거리, 방위)에서 파면이 곡선이라고 가정할 수 있는 근거리 효과를 이용한 음원의 위치추정 기법들을 다중경로가 존재하는 3차원 공간 (방위, 거리, 수심)인 해양환경에 적용할 경우에 발생할 수 있는 추정오차와 원인을 분석하였다. 파면곡률 알고리즘을 이용한 초점 빔형성 기법에 의한 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 여름철보다 겨울철의 수온구조에서 수신 각이 작아지는 원인에 따라 거리 오차가 감소한다.
- (2) 해저면 손실이 크고 수심이 낮으면 거리 오차가 작아진다.
- (3) 해저면이 기울어져 있는 경우에 평탄한 해저면의 경우보다 위치추정의 오차가 크고, 수심이 증가할 때보다 감소할 때의 거리 오차가 크다.
- (4) 거리오차는 다중경로 사이의 도달시간 차이가 큰 구간에서는 크고 시간차이가 작은 경우에는 오차도 감소한다.
- (5) 근거리 효과가 없어지는 구간에서는 거리오차가 증가한다.

근거리 효과를 이용한 위치추정 기법은 원거리 평면파를 가정한 고전적 빔형성을 이용하는 경우보다 해양환경에 보다 민감하고 특히, 배열의 형상에 매우 민감하게 되는 등 얻을 수 있는 정보가 많아지는 반면에 오차요인도 더불어 증가하게 된다. 본 논문에서 나타난 추정오차는 개선된 탐지기법을 사용한다면 다소 줄어들 수 있지만 근본적인 오차요인의 영향을 제거하기는 어려울 것으로 보인다. 따라서 근거리 효과를 이용한 위치추정 기법을 해양에 적용할 경우에는 본 논문에서 분석한 요인 외에도 다양한 오차요인에 대한 심층적인 분석이 병행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. G. C. Carter, "Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing," *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-32, No. 2, pp. 426-431, 1984.
2. G. C. Carter, "Coherence and Time Delay Estimation," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 75, No. 2, pp. 236-255, 1987.

3. R. O. Neilsen, Sonar Signal Processing, Artech House, Inc, pp. 351-355, 1991.
4. 이종환, 이균경, "대수적 경로추정에 의한 근거리 표적의 수동형 위치추정," 한국음향학회지, Vol. 17, No. 4, pp. 54-59, 1998.
5. 이수형, 류창수, 이균경, "다중경로환경에서 바닥고정형 선배열 센서를 이용한 근거리표적의 위치추정기법," 한국음향학회지, Vol. 19, No. 7, pp. 7-14, 2000.
6. 김준환, 양인식, 김기만, 오원천, "견인 어레이를 이용한 수동거리 추정기법," 제3회 해상무기체계 발전세미나 논문집, pp. 216-221, 2000.
7. 박정수, 천승용, 이성은, 심태보, "다중경로 음파전달이 HLA의 근거리 방위탐지에 미치는 영향," 한국음향학회지, Vol. 16, No. 6, pp. 100-105, 1997.
8. H. Weinberg, Generic Sonar Model, NUSC Technical Document 5971A, 1980.

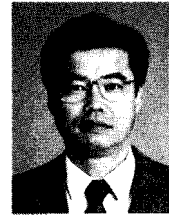
저자 약력

● 박 정 수 (Joung-Soo Park)



1986년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 졸업 (이학사)
 1990년 2월: 한양대학교 대학원 지구해양과학과 졸업 (이학석사)
 1990년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원
 ※ 주관심분야: 천해수중음향, 정합장처리(MFP), 수중음향토모그래피 (OAT)

● 최 진 혁 (Jin-Hyuk Choi)



1878년 2월: 서울대학교 해양학과 졸업 (이학사)
 1981년 8월: 서울대학교 대학원 해양학과 졸업 (이학석사)
 1990년 9월: 서울대학교 대학원 해양학과 졸업 (이학박사)
 1985년 5월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 ※ 주관심분야: 지음향모델링, 수중음향토모그래피 (OAT)