

## 다중경로 음파전달이 HLA의 근거리 방위탐지에 미치는 영향

### Effects of the Multipath Propagation on the Source Bearing Detection of HLA at near range

박정수\*, 천승용\*, 이성은\*, 심태보\*

(Joung-Soo Park\*, Seung-Yong Chun\*, Sung-Eun Lee\*, Taebo Shim\*)

#### 요약

다중경로의 영향을 분석하기 위하여 다중경로가 방위로 나타나는 과정을 설명하고, 동해와 남해의 대표적인 수직 음속 구조를 이용하여 계산한 다중경로로부터 방위를 추정하였다. 또한 HLA의 빔형성 시뮬레이션을 실시하여 빔출력에 나타나는 잘못된 방위를 관찰하고 분석하였다.

수온 구조가 강한 음(-)의 기울기를 갖는 동해의 경우에 근거리에서 탐지된 방위가 실제 수평방위와 다르게 나타나고, 음원의 수가 잘못 탐지되는 구간이 발생할 가능성도 있는 것으로 보인다.

#### ABSTRACT

To analyze the multipath propagation effects on the source bearing detection of HLA(Horizontal Line Array), the conversion mechanism of the multipath into the bearing is described, and the bearing is estimated from the multipath modeled with typical sound velocity structures of the East and the South Sea of Korea. The erroneous bearing is observed from the beamforming outputs simulated with the modeled multipath, and the erroneous phenomena are analyzed.

In case of the East Sea, since the multipath propagation with a high receiving angle occurs due to strong inverse slope of the sound velocity structure, it is possible that the estimated source bearing is different from the real source bearing, and that the number of the source is misrecognized.

#### I. 서론

수중음향 분야에서 다양한 목적에 따라 HLA(Horizontal Line Array)가 광범위하게 이용되고 있다. 간격  $d$ 로  $M$ 개의 수신센서가 직선으로 배열된 HLA는 평면파 가정에 따라 빔형성할 수 있어서 신호대 잡음비가 높고, 수신 음의 방위 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 복잡한 음속 구조를 갖는 해양에서의 음파전달은 평면파 가정을 만족하지 못하는 경우가 발생하여 HLA의 고전적 선형 빔형성 결과 때문에 수평방위로 나타나는 과정을 설명하였다. 그리고 한국 해역에서 발생하는 다중경로 형태를 분석하고 HLA를 운용할 때 나타나는 다중경로의 영향을 분석하였다. 이를 위하여 적용

한 해역은 수심이 100m인 남해와 1000m인 동해이고, 2월과 8월의 대표적인 음속 구조를 가정하여 음파전달 모델로부터 다중경로를 예측하여 방위를 계산하고 다중경로 영향을 분석하였다. 또한 32개의 수신센서가 등간격으로 배열된 HLA를 가정하고, 계산된 다중경로 정보를 이용한 빔형성 시뮬레이션을 수행하여 다중경로가 잘못된 방위로 나타나는 현상을 관찰하고 설명하였다.

#### II. 다중경로 음파전달

다중경로 음파전달은 음원과 수신기 사이에 하나 이상의 전달 경로가 존재하는 것을 의미한다. 이러한 현상은 해양에서 음파가 전달될 때 해수면 및 해저면과 복잡한 수직 음속 구조의 영향을 받아서 예외 없이 발생하는 것으로 알려져 있다. 굴절 및 반사에 의한 다중경로는 표층 도파관, 심해 도파관, 천해 도파관, 해수면 및 해저면의 반사 등에 의하여 발생한다. 다중경로는 공간적으로 각각 다르게 존재하는 전달경로 때문에 여러 개의 수신센서가 수평면에 직선으로 배열된 HLA에 다음과 같은 간섭 현상을 유발한다. 첫째, 수신 신호의 크기와 위상의 변

\*국방과학연구소

접수일자: 1997년 7월 21일

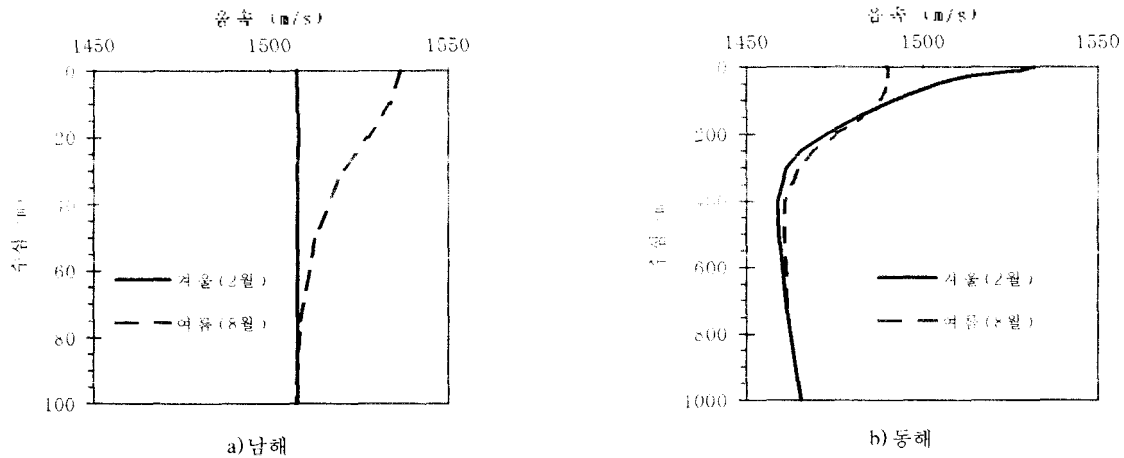


그림 1. 남해의 동해의 겨울(2월)과 여름(8월)의 대표적인 수직 음속구조

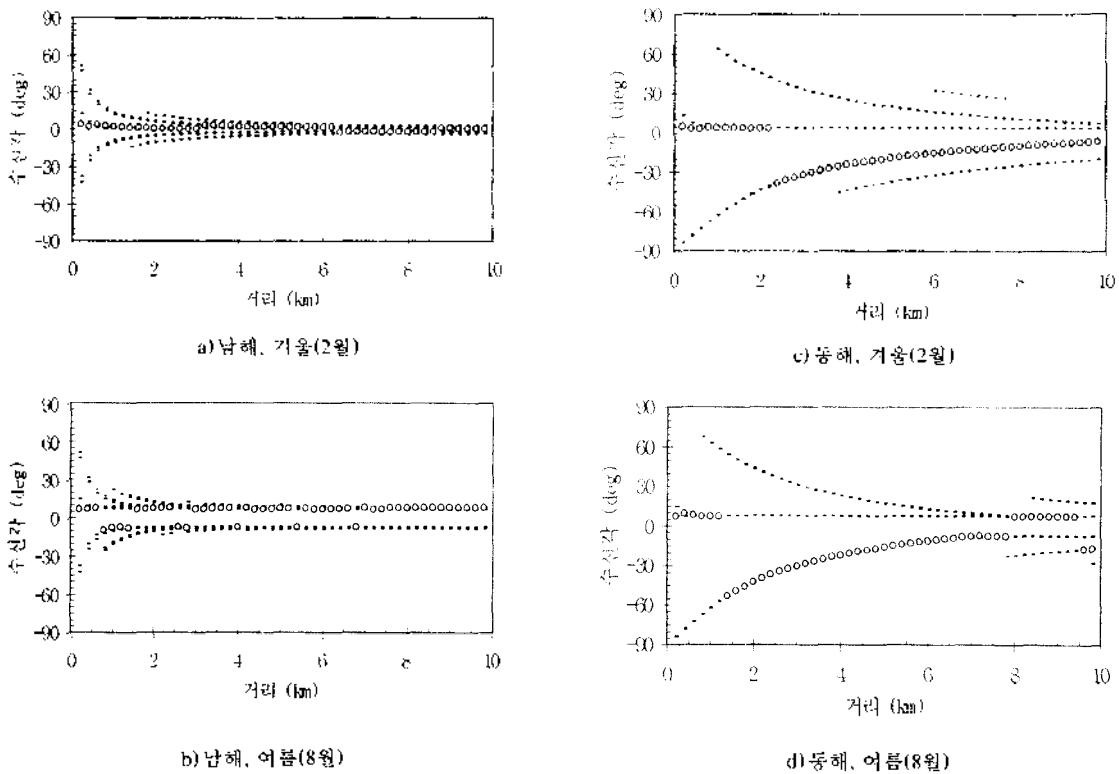


그림 2. 남해와 동해의 여름(8월)과 겨울(2월)의 다중경로 수신각 음원수심 45m, HLA수심 45m

동 원인이 되므로 인접한 수신소자 사이의 위상과 신호 크기의 상관을 저하시킨다. 둘째, 전달 시간의 차이 때문에 신호 변형의 원인이 된다. 마지막으로 음원과 HLA가 이동할 때 단일 수신센서의 경우보다 주파수 확장(frequency broadening)이 더욱 심해지는 원인이 된다<sup>6)</sup>.

일반적으로 음원이 HLA로부터 원거리에 있으면 다중경로 수신각이 작아지므로 다중경로가 미치는 영향이 크지 않을 것이다. 그러나 음원이 근거리에서 있을 때는 다중

경로 수신각이 커져서 그 영향을 많이 받게 된다. 수신각이 커지면 HLA의 수평방위탐지에 영향을 주게 되고 방위탐지 오차를 유발하게 된다. 따라서 본 논문에서는 음원이 근거리에서 있을 때 방위에 미치는 영향을 주로 분석하였다. 특히 동해와 남해의 2월과 8월의 대표적인 음속구조(그림 1)를 적용하여 분석을 수행하였다.

그림 2은 GSM(Generic Sonar Model)<sup>6)</sup>으로 산출한 다중경로 수신각이다. 그림에서 (+) 수신각은 수평 기준

으로 위쪽, (-)는 아래쪽 방향이다. 섭선은 거리별 수신 각( $\mu_n$ )을 나타냈고 속이 비어 있는 원 모양은 신호의 강도가 가장 큰 다중경로 수신 각( $\mu_{1st}$ )을 표시한 것이다.

남해의 경우에 2월과 8월의 다중경로 수신 각의 형태가 서로 비슷하지만 2월에는 음원과의 거리가 멀수록  $\mu_{1st}$ 가 약  $\pm 5^\circ$ 에 수렴하고, 8월에는 약  $\pm 10^\circ$ 에 수렴한다. 음원이 1km 이내에 있을 때는 수신각이 약  $\pm 50^\circ$ 까지 커지지만 신호의 강도가 큰 수신각은 역시  $\pm 10^\circ$  이하에 존재한다. 이러한 경향은 수심이 얇은 해역일수록 해저면 반사각이 커서 해저면 손실이 증가하므로 음원이 조금만 멀어져도 수신각이 큰 경로의 신호 강도가 급격히 감소하기 때문이다.

동해의 경우에 음원이 멀리 있으면 수신각이 작아져서  $\mu_{1st}$ 가 약  $\pm 25^\circ$  이하에 존재한다. 음원의 거리가 가까워지면 수신각이 커져서  $\mu_{1st}$ 가 겨울철에 약 2.5km에서 약  $\pm 25^\circ$ 로 가장 크고, 여름철에는 약 1.5km에서  $\pm 55^\circ$ 로 가장 크다. 여름철에 이처럼  $\mu_{1st}$ 가 커지는 이유는 강한 음(-)의 기울기를 갖는 수직 음속 구조의 영향을 받아 대부분의 음파가 해저면 쪽으로 반사되며 전달되기 때문이다.

전체적으로 겨울철보다 여름철의  $\mu_{1st}$ 의 수신각이 크고 거리별 변동이 심하다. 또한 수심이 얇은 경우보다 깊은 경우의  $\mu_{1st}$ 의 수신각이 크다.

### III. HLA의 빔형성 특성

#### 3.1 HLA의 빔 형태

HLA의 고전적 빔형성 기법인 선형 빔형성(Linear Beamforming)은 음원과 HLA 사이를 원거리로 가정하고 음원에서 전달되어 온 음파의 파면을 수평면에 대하여 직선으로 가정한다. 다시 말하면, 간격  $d$ 로  $M$ 개의 수신센서가 배열된 HLA에 음파가 수평 방향에서 도달할 때, 첫번 수신센서를 기준으로 각 수신센서에 대한 수평 방향 입사각의 관계는  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_M$ 이고, 시간 지연은  $\tau_M = n\tau_2$ 로 정비례 관계를 가지고 있다. 이러한 가정을 이용하는 선형 빔형성 기법은 크게 시간영역 및 주파수영역 빔형성으로 나눌 수 있다. 시간영역 빔형성의 기본 식은 식 (1)과 같고,

$$b(t, \theta) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i x_i(t - \tau_i(\theta)) \tag{1}$$

주파수영역 빔형성의 기본 식은 식 (2)와 같다[3].

$$B(F, \theta) = \sum_{i=1}^M a_i X_i(F) \exp(-i\omega\tau_i(\theta)) \tag{2}$$

여기서  $b(t, \theta)$ 와  $B(F, \theta)$ 는 빔출력,  $\theta$ 는 수평방위의 빔지향 각,  $a_i$ 는 가중 상수,  $x_i(t)$ 는  $i$ 번째 수신센서 신호,  $X_i(F)$ 는 신호의 FFT 출력,  $\tau_i(\theta)$ 는  $i$ 번째 수신센서에 대한 음파 도달 시간지연이다. 그리고  $\exp(-i\omega\tau_i(\theta))$ 는 시간지연에 따른 위상천이이다. 식 (1)과 식 (2)에서 시간 지연은 음속

을  $C$ 라 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_i(\theta) = \frac{nd \cos(\theta)}{C} \tag{3}$$

식 (3)에서 각 수신센서의 시간 지연은  $d$ 에 비례 관계를 갖는다. 또한  $\theta$ 는 수평면상에서 수신되는 각을 가정하므로 HLA에 대하여 직각이 되는 수직면상에서의 빔 형태는 무지향성이된다. 따라서 신호가 다중경로로 전달되어 수신되면 이러한 빔 특성에 따라 (+)와 (-)의 구분 없이 수평방위의 각으로 전환되어 관측 될 것이다<sup>[6]</sup>. 이러한 과정에서 실제 음원의 방위가 잘못 관측되게 될 것이다.

#### 3.2 다중경로 수신 각의 방위

다중경로 전달환경에서 HLA의 빔출력으로부터 관측되는 음원의 방위는 수평면상의 방위  $\phi$ 와 다중경로에 의한 수직면상의 수신 각  $\mu_n$ 이 수직 빔형태에 따라 그림 3과 같이 결합되어 나타난다. 이러한 관계로부터 음원의 수평방위( $\theta_n$ )는 다음과 같이 추정할 수 있다[7].

$$\theta_n = \cos^{-1}[\cos(\phi) \cos(\mu_n)] \tag{4}$$

여기서,  $\phi$ 는 음원의 수평방위,  $\mu_n$ 는  $n$ 번째 다중경로가 수신되는 각이다. 앞장에서 살펴본 바와 같이 다중경로 수신 각  $\mu_n$ 는 (+)와 (-)로 분리되지만 HLA의 빔형성 출력으로부터 이를 구분할 수는 없다. 따라서 HLA에서는 식 (4)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_n = \cos^{-1}[\cos(\phi) \cos(|\mu_n|)] \tag{5}$$

II장에서 계산한 다중경로 수신각  $\mu_n$ 를 적용하여 식 (5)로부터 음원의 수평방위  $\phi$ 를  $30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ 로 가정하여 방위  $\theta_n$ 를 산출하였다(그림 4).  $\theta_n$ 는 주로  $\mu_{1st}$ 로 수신된 신호에 의하여 결정되므로 식 (5)에  $\mu_{1st}$ 만을 적용하여  $\theta_{1st}$ 를 계산하고, 그 결과를 그림 4에 나타냈다.

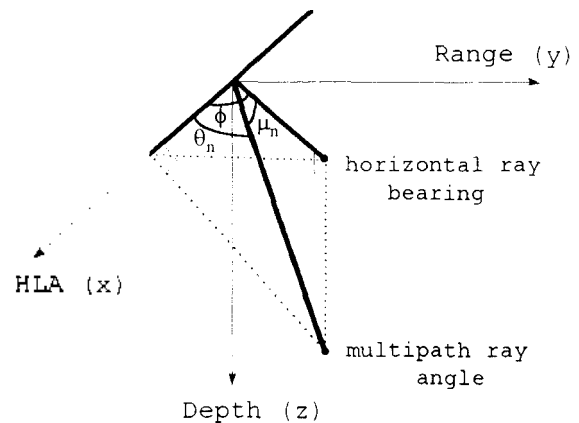


그림 3 다중경로 수신 각의 방위

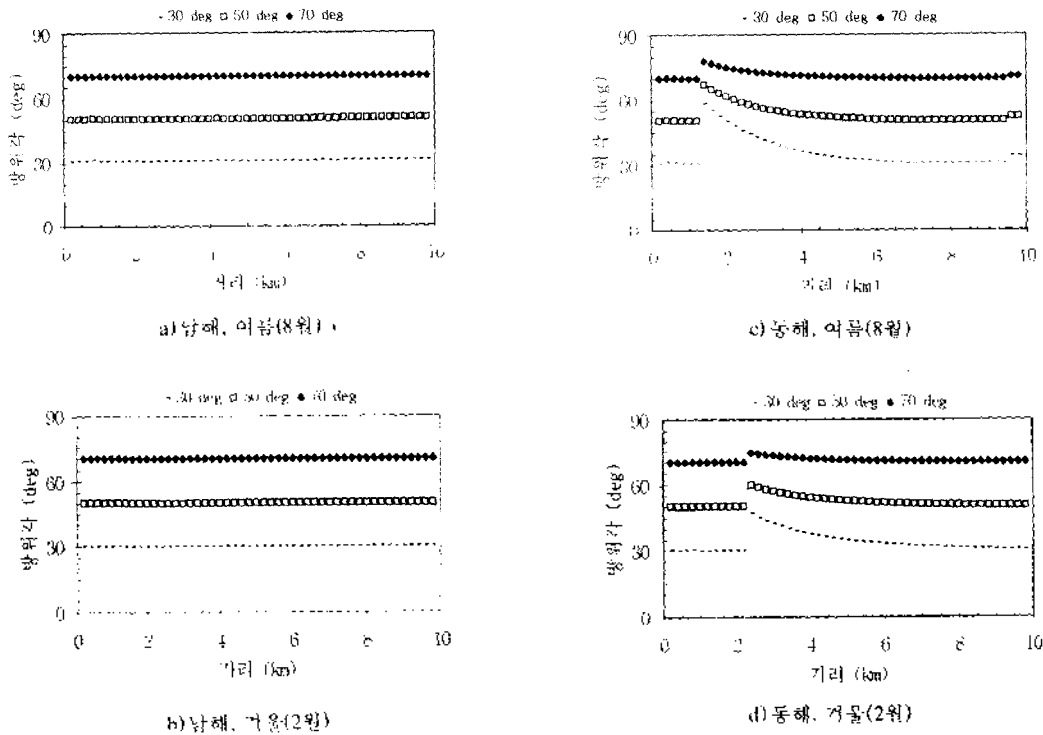


그림 4. 남해와 동해의 여름(8월)과 겨울(2월)의 다중경로 방위각 음원수신 45m, HLA수신 45m

그림 4에서 남해의 겨울철과 여름철의 경우에  $\theta_{1st}$ 는 수신각이 작기 때문에 음원의 수평방위와 거의 일치한다. 동해의 경우에 겨울철에는 음원이 약 2.5km에 있고 수평방위가 30° 일 때 약 15°, 15° 일 때 약 10°, 70° 일 때 약 5°의 방위오차를 볼 수 있다. 동해의 여름철에는 거리 약 1.5km에서 수평방위가 30° 일 때 약 28°, 50° 일 때 약 17°, 70° 일 때 약 10°로 겨울철보다 더 큰 방위오차를 볼 수 있다.

따라서 남해의 경우에는 방형성 출력으로부터 탐지한 방위가 음원의 거리 및 계절에 거의 무관하게 수평방위와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 반면에 동해의 경우에는 겨울철과 여름철에 음원이 근거리에 있을 때는 탐지된 방위가 수평방위에서 크게 벗어나고, 음원의 수평방위각이 작아질수록 방위각의 오차가 심각해질 수 있음 을 알 수 있다

IV. 다중경로 전달신호의 빔형성 시뮬레이션

3.2장의 결과를 검증하기 위하여 II장에서 계산한 다중경로 신호 자료를 이용하여 HLA의 각 수신센서에 수신되는 신호를 각각 만들었다. 음원 신호( $s(t)$ )가 HLA의  $i$  번째 수신센서에 수신될 때 출력( $x_i(t)$ )은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x_i(t) = s(t + \tau_i) = A_i \exp(i\omega t) \tag{6}$$

여기서  $A_i$ 는 센서  $i$ 에 도달하는 진폭이고  $\omega$ 는 각주파수이다.  $n$ 개의 다중경로로부터 수신된 신호는 시간  $t$ 의 위상을  $\phi_i$ 라 할 때 식 (8)과 같이 중첩되어 나타난다[2].

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n x_{ij}(t) = \sum_{j=1}^n A_{ij} \exp(i\phi_{ij}) \tag{7}$$

시뮬레이션을 하기 위하여 동해에서 HLA가 수평면에 직선으로 고정되어 있고, 음원이 수평방위 30°에서 HLA에 접근하는 시나리오를 가정하였다. 음원의 주파수는  $f_0$ ,  $d$ 는  $f_0$ 의 반파장 간격,  $M$ 은 32개로 가정하였다. 식 (7)에 다중경로 성분을 적용하여 각 수신센서의 신호를 만들고, 식 (2)의 주파수영역 빔형성 기법을 적용하였다. 빔형성 시뮬레이션은 Matlab을 이용하였고, 빔해상도를 1°로 하였다(그림 5). 빔 출력은 3.2장의 결과와 비교하기 위하여 거리별 방위로 표시하였다. 남해는 다중경로 영향이 작으므로 대표적으로 동해의 경우만 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션한 빔 출력을 시간별 방위로 나타내면 그림 6과 같다.

그림 6에서 색이 짙을수록 빔 출력의 강도가 크다. 그리고 빔폭이 넓게 확장되어 나타나는 이유는 빔형성시 다중경로 및 곡선파면의 영향으로 수신센서간의 위상이 정확히 일치하지 않기 때문이다. 또한 그림 6에서 방위가 커질수록 빔폭이 줄어들어 가는 것은 빔출력에 영향을 미치는

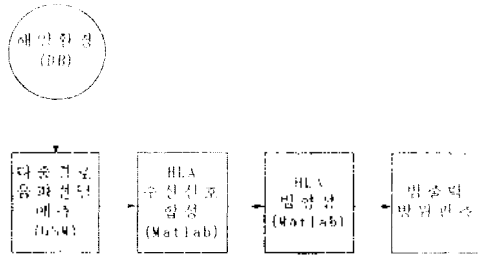
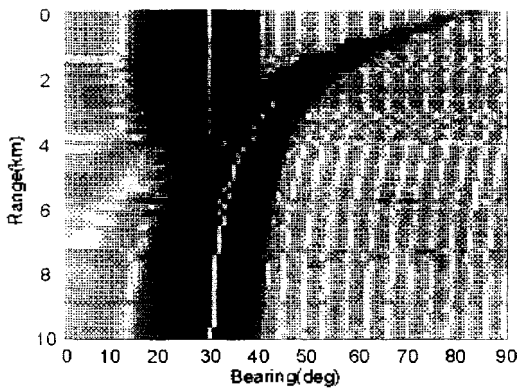
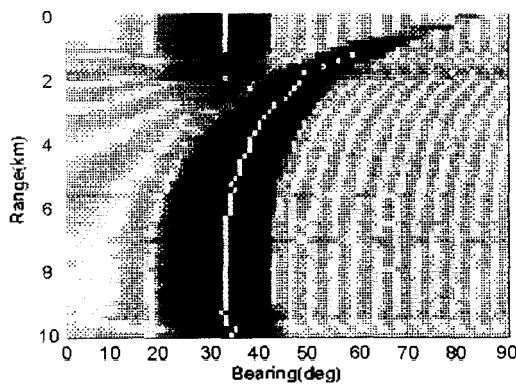


그림 5. HLA 빔형성 시뮬레이션 흐름도



a) 동해 겨울(2원)



b) 동해 여름(8원)

그림 6. 다중경로 전달 신호의 빔형성 출력  
수평방위 30°, 음원수심 45m, HLA수심 45m

수신경로가 단순해지기 때문이다. 빔출력 중간의 하안 접선은 출력이 가장 큰 방위를 표시한 것으로서 그림 4의 방위와 거의 일치한다. 이와 같은 빔 출력에서는 출력이 가장 강한 방위를 음원의 방위로 추정하고, 동시에 또다른 방위에 강한 빔출력이 관측될 경우에는 두 개의 음원이 있는 것으로 판단한다. 따라서 그림 6과 같은 빔 출력에서는 겨울철에 약 2.5~4km사이에서 약 30°~45° 방위에 두 개의 음원이 탐지되고, 4km~7.5km사이에는 약 30°~60° 방위에 하나의 음원이 탐지된다. 여름철에는 약 1.2~6km사이에서 약 30°~60° 방위에 음원이 탐지된다. 두 계절

모두 음원이 선진하면서 음원의 심근 방위가 점점 커지는 형태를 볼 수 있으며, 이것은 음의 기울기를 갖는 음속 구조의 영향으로 음원이 근거리에서 있을수록 해지면 반사에 의한 다중경로 수신각이 커지기 때문이다.

V. 결 론

다중경로 음파전달이 근거리에서 있는 음원의 방위탐지에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 동해와 남해의 겨울철과 여름철의 대표적인 수직 음속 구조를 이용하여 다중경로를 산출하고 HLA의 빔형성 시뮬레이션을 실시하여 그 결과를 관찰하고 분석하였다.

음원이 원거리에서 있을경우에 가장 우세한 신호 강도를 갖는 다중경로 수신 각은 약  $\pm 10^\circ$  이하에 존재한다. 이러한 경우에 HLA의 빔형성 결과로부터 방위를 탐지할 때 음원의 실제 수평방위와 거의 오차가 없다. 그러나 특히 수직 음속 구조가 상당한 수심까지 강한 음(-)의 기울기를 갖는 동해의 여름철에는 음원이 근거리에서 있을수록 우세한 신호 강도를 갖는 수신 각이 약  $\pm 55^\circ$ 까지 커진다. 따라서 이러한 경우에 HLA의 빔형성 출력으로부터 탐지되는 방위는 실제 수평방위와 크게 다르게 나타나고, 특히 어떤 구간에서는 음원이 두 개로 탐지될 가능성도 있다.

따라서 동해의 여름철과 같이 수심이 깊고 음속 구조가 강한 음(-)의 기울기를 갖는 환경에서 다중경로에 의한 근거리 음원의 방위탐지 오차를 줄이려면 해양 환경에 따른 방위 변화 경향을 고려하여 빔 출력으로부터 음원의 방위를 결정할 수 있는 방위탐지 기법의 개발 및 적용이 필요할 것이다.

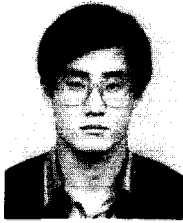
참 고 문 헌

1. 박정수, 김성일, 정문심, 최재영, 심태보, "다중경로 음파전달 환경에서 음원 위치추정 모의," 한국음향학회, 제10회수중음향 학술발표회지, pp. 79-83, 1995.
2. 박정수, 홍우영, 최재영, 이문원, "다중경로 음파전달 환경 하에서 선형배열을 이용한 음원의 위치 추정," 한국 전자공학회, 신호처리 학동 학술대회 논문집 Vol. 8, No. 1, pp. 100-103, 1995.
3. 박정수, 천승용, 심태보, 이성은, "다중경로 음파전달이 HLA의 방위탐지에 미치는 영향," 한국음향학회, '96 학술발표대회 논문집, Vol. 15, No. 1(s), pp. 307-310, 1996.
4. R. O. Nielsen, Sonar Signal Processing, Artech House, Inc, pp. 351-355, 1991.
5. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill, 1983.
6. H. Winberg, Generic Sonar Model, NUSC, NUSC TD-5971A, 1980.
7. A. W. Cox, Sonar and Underwater Sound, Lexington Books, 1974.

▲박 정 수(Joung-Soo Park)

한국음향학회지 제 15권 제 3E호(1996), pp. 4~12 참조

▲천 승 용(Seung-Yong Chun) 1966년 6월 11일생



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과  
졸업(학사)  
1990년 2월: 경북대학교 전자공학과  
졸업(석사)  
1990년 3월~현재: 국방과학연구소  
선언연구원  
※주관심분야: 디지털 신호처리

▲이 성 은(Sung-Eun Lee)

한국음향학회지 제 15권 제 6호(1996), pp. 104~109 참조

▲심 태 보(Tae-Bo Shim)

한국음향학회지 제 15권 제 3E호(1996), pp. 4~12 참조