

천해에서 간섭패턴 정합을 이용한 근거리 음원의 3차원 위치추정 기법연구

A Study on 3-Dimensional Near-Field Source Localization Using Interference Pattern Matching in Shallow Water Environments

김 세 영*, 천 승 용**, 손 윤 준***, 김 기 만*

(Se-Young Kim*, Seung-Yong Chun**, Yoon-Jun Son***, Ki-Man Kim*)

*한국해양대학교 전파공학과, **국방과학연구소, ***국방기술품질원

(접수일자: 2008년 11월 28일; 수정일자: 2009년 1월 23일; 채택일자: 2009년 4월 24일)

본 논문에서는 천해환경에서 근거리 광대역 음원의 3차원 위치추정 알고리즘을 제안한다. 음향 도파관 불변 이론에 따라 센서 스펙트로그램에 나타나는 간섭패턴의 기울기는 음원의 거리에 비례한다. 두 개의 센서 스펙트로그램에 나타나는 간섭패턴의 정합을 통해 음원과 두 센서간의 상대적인 거리비를 추정 하였다. 이를 아폴로니오스의 원에 적용하여 두 센서로부터 일정한 거리비를 가지는 음원의 궤적을 나타낸다. 3개의 센서를 이용하면 두 개의 아폴로니오스 원이 음원의 수평거리와 방위를 나타내는 교점을 형성하며 이는 음원의 수심에 대하여 일정하다. 따라서 음원의 깊이는 두 센서로부터 거리차가 일정한 3차원 쌍곡면의 방정식을 적용하여 최종 추정하였다. 제안된 알고리즘의 성능평가를 위하여 음파 전달 모델을 이용한 모의실험을 통해 위치추정 오차를 분석하였다. 모의실험 결과 음원의 거리에 대한 추정오차는 50 m 이내, 깊이에 대한 추정오차는 15 m 이내인 것으로 나타났다.

핵심용어: 수중음향, 음향 도파관 불변성, 간섭 패턴 정합, 아폴로니오스의 원, 쌍곡면, 3차원 위치추정

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, we propose a 3-D geometric localization method for near-field broadband source in shallow water environments. According to the waveguide invariant theory, slope of the interference pattern which is seen in a sensor spectrogram directly proportional to a range of the source. The relative ratio of the range between source and sensors was estimated by matching of two interference patterns in spectrogram. Then this ratio is applied to the Apollonius's circle which shows the locus of a source whose range ratio from two sensors is constant. Two Apollonius's circles from three sensors make the intersection point that means the horizontal range and the azimuth angle of the source. And this intersection point is constant with source depth. Therefore the source depth can be estimated using 3-D hyperboloid equation whose range difference from two sensors is constant. To evaluate a performance of the proposed localization algorithm, simulation is performed using acoustic propagation program and analysis of localization error is demonstrated. From simulation results, error estimate for range and depth is described within 50 m and 15 m respectively.

Keywords: Underwater acoustics, Waveguide invariant, Interference pattern matching, Circle of apollonius, Hyperboloid, 3-dimensional localization

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

수중에서 음파를 이용하여 음원의 위치를 탐지하는 소

나 (SONAR)는 중요한 연구 분야이며 성능 개선을 위한 많은 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히, 한반도 인근 해역은 수심 200 m 이하의 천해환경으로 음파 전달 시 해수면 및 해저면 반사에 의한 다중경로 현상 및 전달 손실, 잡음 등의 장애요인 때문에 음원을 탐지하기 어려운 환경이다. 기본적인 위치추정법인 빔형성 기법, MUSIC

(Multiple Signal Classification) 기법 등은 천해환경에서 발생하는 음파의 다중경로 현상을 비롯한 음파 전달 특성을 고려하지 않아 음원탐지에 적용될 경우 배열 이득의 저하 및 위치 추정 오차가 발생한다 [1-2]. 따라서 수중 음파 전달 특성을 직접 신호처리에 적용하여 탐지 성능을 높이고자하는 많은 시도들이 이루어졌으며, 정합장처리 (Matched Field Processing) 및 Lee 등이 제안한 배열불변 (Array Invariant) 기반의 기법 등을 통하여 위치 추정 성능을 개선할 수 있었다 [3-6].

또한, 천해환경을 음향 도파관으로 가정하고 음파전달 특성을 분석한 음향도파관 불변이론을 위치추정에 적용한 방법들이 연구되고 있다. 음향 도파관 불변성은 1982년 S. D. Chuprov에 의해 발표 되었으며, 음파 전달시 모드간의 상호간섭 작용으로 나타나는 광대역 간섭패턴의 기울기가 음원의 거리에 비례한다는 이론이다 [7-8]. 이상적인 도파관에서 도파관 불변 인자 β 는 모드, 주파수 및 음원과 수신기의 수심 등에 대하여 불변이다. 그러나 실제 해양에서는 환경에 따라 β 가 변하므로 음원의 위치 추정시 β 의 값을 다르게 적용해야 함을 확인하였다 [9]. 기존의 위치추정 기법에 도파관 불변성을 적용한 여러 방법들은 향상된 위치추정 성능을 보였으나 실제 해양에서 음파 전달 환경에 따라 변하는 β 와 환경변수의 영향을 많이 받는 한계점을 가졌다 [10-12].

이를 개선하기 위해 동일한 음파전달 환경에 존재하는 소수의 센서를 이용하여 β 및, 환경정보와 무관하게 음원의 위치를 추정하는 기법들이 연구되었다. 김 등은 광대역 음원과 센서간의 상대적인 거리비를 최대강도 간섭패턴으로부터 추정하고 이를 아폴로니오스의 원에 적용한 기하학적인 위치 추정법을 제안하였으며, 천 등은 음원과 센서간의 상대적인 거리비를 간섭패턴 정합 (IPM : Interference Pattern Matching)을 통해 추정하고, 제안된 위치 추정법을 실제 해상실험에 적용하여 적용성을 검토하였다 [13-14]. 기 제시된 기법들은 적은수의 센서를 사용하여 β 와 환경정보에 무관하게 음원의 위치를 추정할 수 있으나 2차원 공간에서 음원의 거리 및 방위 정보만 포함하고 있다.

따라서 본 논문에서는 세 개의 센서를 배치하여 각 센서 스펙트로그램에 나타나는 광대역 간섭패턴의 정합을 통해 근거리 음원의 3차원 위치를 기하학적으로 추정하는 방법을 제안한다. 간섭패턴 정합을 이용하여 음원과 두 센서간의 상대적인 거리비를 추정하고 이를 아폴로니오스의 원에 적용하면 두 센서로부터 일정한 거리비를 가지는 음원의 궤적을 유추할 수 있다 [15-16]. 세 개의

센서를 배치하는 경우 최대 세 개의 아폴로니오스의 원을 형성 할 수 있고, 두 개의 아폴로니오스의 원이 이루는 교점을 구하여 음원의 방위와 거리를 추정한다. 간섭패턴에 나타나는 줄무늬의 기울기는 음원과 수신 센서간의 수평거리에 대한 변화량을 나타낸다. 그러므로 간섭패턴 정합을 통해 추정된 음원과 두 센서간의 거리비는 음원의 수심에 대해 일정하기 때문에 두 개의 아폴로니오스의 원이 이루는 교점을 구하더라도 음원의 깊이는 추정하기가 어렵다.

따라서 깊이까지 포함한 음원의 3차원 위치를 구하기 위해 TDOA (Time Difference Of Arrival)를 이용한 위치 추정법을 적용하였다 [17]. TDOA로부터 추정된 음원과 두 센서간의 거리차는 두 정점에서 일정한 거리차를 가지는 궤적인 쌍곡선의 방정식에 대응하고 이는 3차원 공간에서 쌍곡면의 방정식이 된다. 최종적인 음원의 위치는 두 개의 아폴로니오스 원의 방정식과 쌍곡면의 방정식의 연립을 통해 추정한다. 제안된 알고리즘의 성능을 검토하기 위하여 음파전달 모델을 이용한 모의실험을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기본적인 음향도파관 불변이론과 간섭패턴 정합에 대해 설명한다. 3장에서는 제안된 3차원 위치추정 알고리즘에 대해 나타내었다. 4장에서는 모의 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 성능을 분석한다.

II. 도파관 불변성과 간섭패턴 정합

2.1. 음향 도파관 불변 이론

그림 1과 같이 주파수와 거리의 함수인 광대역 간섭패턴에 나타나는 줄무늬의 기울기와 도파관 불변 인자 β 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{dw/w}{dr/r} = \beta \tag{1}$$

여기서 ω 와 r 은 임의의 줄무늬에 대응하는 주파수와 거리를 나타내고 $d\omega$ 와 dr 은 주파수와 거리의 변화량을 나타낸다. 일정한 음속구조를 가지는 이상적인 Pekeris 도파관에서 β 는 모든 모드에서 동일하게 1의 값을 가진다. 그러나 음속이 수심에 따라 선형적으로 증가하는 음향도파관에서 β 는 -3의 값을 가진다.

그림 1의 음향 스펙트로그램에 나타나는 간섭패턴의 기

울기와 β 의 관계는 식 (1)로부터 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{dw}{w} = \beta \frac{dr}{r} \quad (2)$$

식 (2)로부터 간섭패턴의 기울기가 β 에 비례하고 주파수 및 음원과 수신기의 수심에 대하여 불변임을 알 수 있다. 하지만 실제 해양에서는 β 가 환경에 따라 변하므로 음원의 위치 추정시 β 의 값을 다르게 적용해야 한다.

그림 2는 동일한 음파 전달 환경내의 두 센서에 수신되는 신호는 β 가 변하더라도 동일한 β 의 영향을 받고 있음을 나타낸다. 그림 1과 그림 2를 통해 두 개의 센서에 나타나는 간섭패턴에 대응되는 주파수는 음원과 두 센서 간의 거리에 따라 각각 다르게 나타남을 알 수 있다.

그림 2에 나와있는 음원과 각각 다른 거리에 위치하는 두 센서와의 거리 r_1, r_2 의 관계는 다음과 같이 가정한다.

$$r_1 = nr_2 \quad (3)$$

n 은 두 거리간의 비를 나타내는 임의의 실수이고 음원의 거리에 따른 각 센서의 간섭패턴에 대응되는 주파수는 비례하므로 식 (3)은 다음과 같이 변환된다.

$$\omega_1 = n\omega_2 \quad (4)$$

동일한 음파 전달 환경내의 두 센서에 적용되는 β 는 같으므로 서로 상쇄가 가능하며 식 (1)로부터 다음과 같은 관계식을 만들 수 있다.

$$\frac{r_1}{r_2} \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{dr_1}{dr_2} \frac{d\omega_2}{d\omega_1} \quad (5)$$

식 (5)에서 음원과 두 센서간의 거리에 대응하는 간섭패턴의 주파수에 대한 관계식과 거리 변화량에 따른 주파수 변화량에 대한 관계식으로 구분할 수 있다. 거리에 대응하는 주파수에 대한 관계식을 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$n = \frac{r_2}{r_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 두 개의 센서에서 측정된 간섭패턴의 대응 주파수 비를 구하면 음원과 두 센서간의 거리비를 구할 수 있음을 알 수 있다.

2.2. 간섭패턴 정합

음원과 두 센서간의 상대적인 거리비는 간섭패턴 정합 (Interference Pattern Matching)을 이용하여 구하고 추정된 거리비를 아폴로니오스 원에 적용하면 음원의 위치 추정이 가능함을 확인하였다 [16]. 간섭패턴 정합은 두 센서의 간섭패턴을 일정 비율로 조정하여 가장 정합도가 높은 비율을 찾는 과정으로 이때의 비율을 표적과 두 센서간의 상대적인 거리비로 추정하는 방법이다.

그림 3은 수심이 150 미고 음속의 구조가 1500 m/s로 일정한 이상적인 Pekeris 도파관을 나타낸다. 센서간의

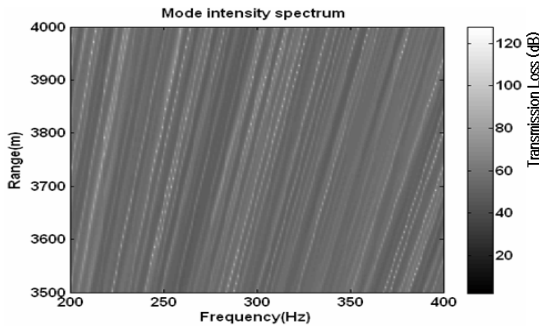


그림 1. 스펙트로그램에 나타나는 광대역 간섭패턴
Fig. 1. Broadband interference pattern in a spectrogram.

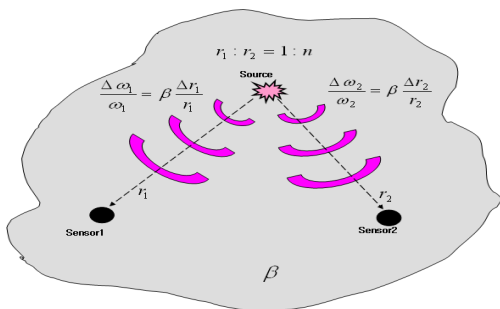


그림 2. 동일한 음장내의 음원과 두 센서간의 도파관 불변 특성
Fig. 2. The characteristic of waveguide invariant between the source and two sensors in identical pressure field.

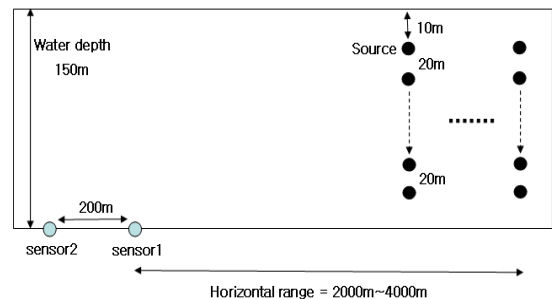


그림 3. 간섭패턴 정합을 위한 시뮬레이션 환경
Fig. 3. Simulation environments for interference pattern matching.

간격은 200 m이며, 센서 1을 기준으로 수평거리가 2000 m, 수심이 10 m인 음원에 대해 간섭패턴 정합을 수행하였다.

센서 1, 센서 2의 스펙트럼이 그림 4 (a)에 나와 있다. 상대적으로 거리가 먼 센서 2의 스펙트럼에 대응하는 주파수가 센서 1의 스펙트럼에 비해 큰 것을 확인할 수 있고, 그림 4 (b)와 같이 센서 1 스펙트럼을 거리비 n만큼 주파수축에서 크기조정을 하면, 두 스펙트럼의 정합도는 가장 높게 나타난다. 이 때, 두 스펙트럼간의 평균제곱오차 (Mean Square Error)는 최소가 된다. 센서 1 스펙트럼을 0.001 간격의 비율로 조정하여 센서 2 스펙트럼에 대해 구한 평균제곱오차의 역수를 그림 5에 나타내었다.

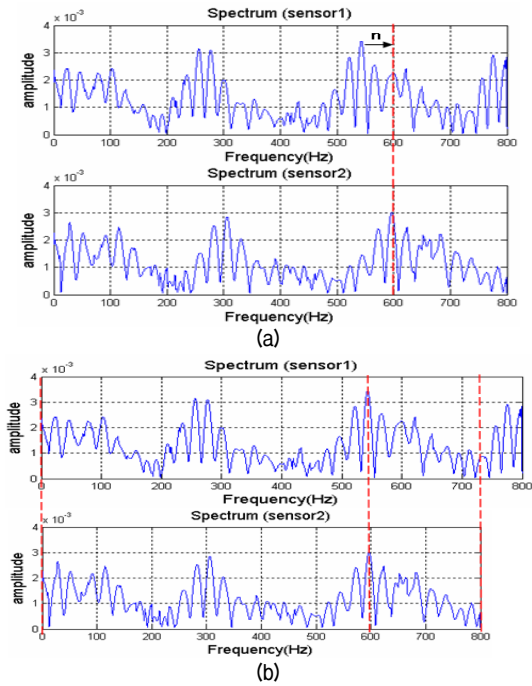


그림 4. 간섭패턴 정합 과정
 (a) 센서 1과 센서 2의 스펙트럼 (b) 매칭 결과
 Fig. 4. Process of interference pattern matching.
 (a) Spectrum of sensor 1 and sensor 2 (b) Matching result

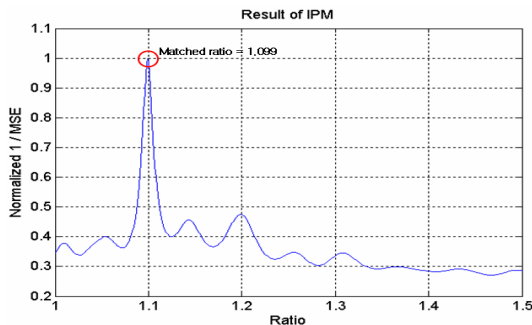


그림 5. 크기조정 비율에 따른 평균 제곱 오차의 역수
 Fig. 5. Inverse mean square error with resized ratio

그림 3에서 센서 1로부터 거리가 2000 m인 음원과 두 센서와의 실제 거리비는 1.1이다. 그림 5에서 간섭패턴 정합을 통해 추정된 음원과 두 센서간의 거리비는 평균제곱오차가 최소가 되는 비율인 1.099의 값을 가진다. 이는 실제 거리비와 비교해서 0.001의 오차를 가지며 간섭패턴 정합을 통해 음원과 두 센서간의 상대적인 거리비의 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

도파관 불변 이론에 의하면 스펙트로그램에 나타나는 광대역 간섭패턴의 기울기는 음원과 센서간의 수평거리에 대한 변화량으로 표현된다. 따라서 수평거리가 같은 음원에 대해서는 음원의 수심과 무관하게 두 센서와 일정한 거리비를 유지한다. 이를 확인하기 위해 그림 3의 환경에서 음원의 수평거리 및 수심에 따른 두 센서와의 거리비를 간섭패턴 정합을 통해 추정하였다. 음원의 수평거리는 센서 1을 기준으로 2000 m에서 4000 m까지 500 m간격으로, 수심은 각각의 거리에서 10 m에서 130 m까지 20 m 간격으로 변화한다.

음원의 수심 및 거리에 따라 간섭패턴 정합을 통해 추정된 거리비를 표 1에 나타내었다. 스펙트럼의 크기 조정 비율은 0.001로 정하였다. 각 위치별 추정된 거리비를 실제 거리비와 비교했을 때, 최대 0.001이내의 오차를 가지는 정확한 결과를 가진다. 또한 각각의 수평거리에서 음원의 수심에 따른 결과를 보면 거리비의 추정치가 일정하다.

두 센서를 중심으로 일정한 수평거리에 존재하는 음원의 경우 수심이 변하더라도 간섭패턴 정합을 통해 추정된 두 센서와의 거리비는 일정하다. 이는 앞서 언급했듯이 간섭패턴에 나타나는 줄무늬의 기울기는 음원과 센서 사이의 수평거리에 대한 변화량을 나타내기 때문이다.

표 1의 결과에서 음원의 거리가 먼 경우 수심에 따라 거리비가 일정한 특성이 명확히 나타나며 상대적으로 근거리의 음원에 대해서도 0.001이내의 오차가 발생하는

표 1. 간섭패턴 정합을 통해 추정된 음원과 두 센서간의 거리비
 Table 1. Estimated range ratio between source and two sensors using interference pattern matching.

수심	수평 거리 (실제 거리비)				
	2000 m (1.1)	2500 m (1.08)	3000 m (1.0667)	3500 m (1.0571)	4000 m (1.05)
10 m	1.099	1.079	1.067	1.057	1.05
30 m	1.099	1.079	1.067	1.057	1.05
50 m	1.101	1.08	1.066	1.057	1.05
70 m	1.1	1.08	1.066	1.057	1.05
90 m	1.1	1.08	1.066	1.057	1.05
110 m	1.1	1.08	1.066	1.057	1.05
130 m	1.1	1.08	1.066	1.057	1.05

지점도 있으나 일정한 거리비 특성을 유지함을 알 수 있다. 추정된 거리비를 적용한 위치추정은 다음 장에 설명한다.

III. 제안된 3차원 위치 추정 알고리즘

3.1. 아폴로니오스의 원을 이용한 위치추정

그림 6에 표현되는 아폴로니오스의 원은 두 정점에 이르는 거리비가 일정한 점의 자취로 정의되고 음원과 두 센서간의 거리비를 적용할 경우 음원의 궤적을 유추할 수 있는 방정식을 제공한다 [17-18].

앞 장의 간섭패턴 정합을 통해 추정된 음원과 두 센서 A(-k,0)와 B(k,0) 사이의 거리비를 m:n으로 두면 중심이 e, 반지름이 r인 원의 방정식으로 변환가능하고 다음과 같이 표현한다.

$$(x - e)^2 + y^2 = r^2. \tag{7}$$

$$e = (m^2 + n^2)k / (m^2 - n^2)$$

$$r = (2mnk) / (m^2 - n^2).$$

그림 6과 같이 두 개의 센서를 이용한 경우 하나의 아폴로니오스 원만 형성하므로 음원의 유일한 위치는 유추하기가 어렵다. 그러나 세 개의 센서를 이용할 경우 두 개의 아폴로니오스의 원이 형성되며, 두 원의 교점은 음원의 유일한 위치로 간주 할 수 있다.

그림 7은 천해 도파관에서 근거리 음원의 3차원 위치추정을 위한 기하학적 모델을 나타낸다. 3개의 센서가 해저면에 등 간격으로 배치되고 음원의 공간좌표는 (x_s, y_s, z_s) 이다.

수심이 150 m인 환경에서 세 개의 센서가 100 m 간격으로 위치할 때, 좌표가 (1000 m, 1100 m, 20 m)인 음원

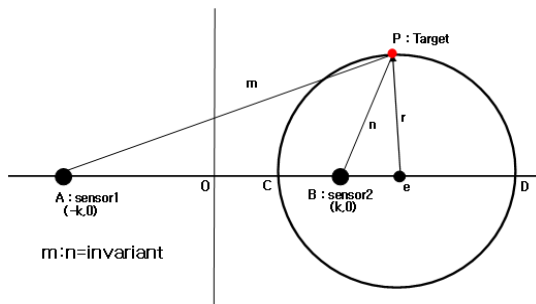


그림 6. 아폴로니오스의 원
Fig. 6. Circle of Apollonius.

에 대한 위치추정을 수행하였다. 음원에서 세 개의 센서에 이르는 수평거리는 각각 다르며 센서 1을 기준으로 센서 2와의 거리비는 1.046, 센서 3과의 거리비는 1.095의 값을 가진다. 그림 8 (a)는 센서 1,2 그리고 센서 1,3이 이루는 두 개의 아폴로니오스 원의 교점을 나타낸다. 두 개의 원이 x-y평면에서 교점을 형성하여 좌표 중심으로 부터 음원의 거리와 방향을 추정할 수 있다. 그러나 간섭패턴 정합을 통해 추정된 거리비는 음원의 수심에 대하여 일정하므로 3차원 좌표를 가지는 음원의 실제 위치는 그림 8 (b)와 같이 교점을 중심으로 수직 궤적상에 존재한다. 따라서 음원의 수심을 추정할 수 있는 또 다른 방정식이 요구되며 본 논문에서 TDOA (Time Difference Of

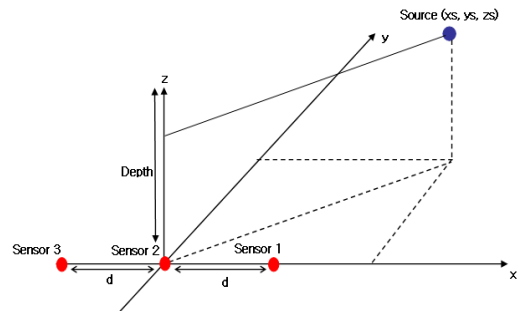


그림 7. 3차원 위치 추정의 기하학적 모델
Fig. 7. Geometric model for 3-Dimensional localization.

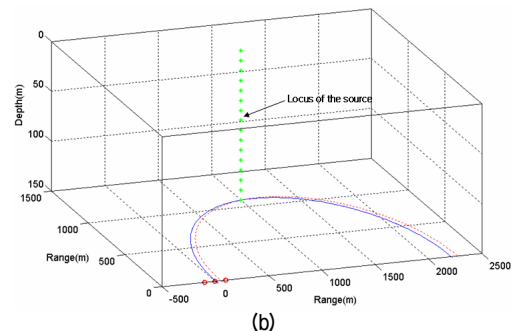
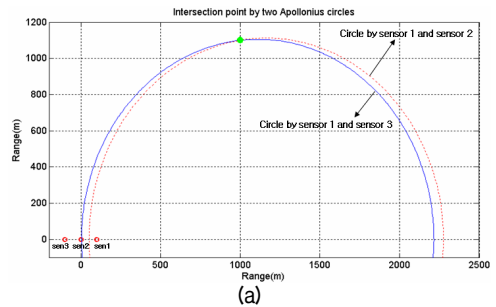


그림 8. 아폴로니오스의 원을 이용한 음원의 위치추정
(a) 두 개의 원이 이루는 교점 (b) 실제 음원이 존재하는 궤적
Fig. 8. Source localization using circle of apollonius.
(a) Intersection point by two circles (b) Locus of the true source

Arrival)에 기반한 위치 추정법을 적용하였고 다음 절에서 설명한다.

3.2. 3차원 위치 추정기법

음원과 두 센서간의 신호 도달 시간차 (TDOA)를 거리로 환산하면 2차원 공간에서 음원의 궤적은 두 센서에서 거리차가 일정한 쌍곡선에 대응한다.

3차원 공간에서 음원과 두 센서간의 거리차를 적용한 궤적을 그림 9에 나타내었다. 이때 3차원 공간내의 음속은 일정하다고 가정한다. 일정한 거리차를 가지는 음원의 궤적은 B와 같은 쌍곡면이 된다. 만일 음원과 두 센서간의 거리차가 0이면 음원은 두 센서 사이의 중심에 있는 평면 A상에 존재하고 거리차가 두 센서의 거리와 동일하면 음원은 C와 같은 X축상에 존재한다.

TDOA추정을 이용한 2차원 쌍곡선을 그림 9의 B와 같은 3차원 쌍곡면으로 확장하기 위해서는 수중환경에서 쌍곡면상에 위치하는 모든 음원의 TDOA가 일정해야 한다. 수중에서 원거리 음원의 경우 음파 전달시 해수면 및 해저면에 의한 반사파의 영향이 크기 때문에 센서에 수신되는 신호로부터 정확한 TDOA를 추정하는데 어려움이 따른다. 그러나 근거리 음원의 경우에는 직접파의 영향이 반사파에 비해 크므로 상대적으로 정확한 TDOA추정이 가능하다.

그림 10은 수심이 150 m인 천해환경에서 센서로부터 거리가 1 km인 근거리 음원의 음파 전달경로를 나타낸다. 그림 10 (a)는 음원의 수심이 50 m인 경우이고, 그림 10 (b)는 음원의 수심이 100 m인 경우이다. 두 경우 모두 해수면 및 해저면에 의한 다중경로 현상이 나타나지만 수심에 따른 음원의 도달시간을 나타내는 직접파를 확인할 수 있다.

그림 11은 음원과 두 센서간의 TDOA가 0.1323s인 쌍곡면상에 존재하는 음원의 위치를 나타내며 각 위치별 음원

에 대한 TDOA 추정을 수행하였다. 이때 음원의 거리는 센서 1을 기준으로 1000 m이며 곡면을 따라 수심이 10 m에서 110 m까지 20 m 간격으로 변화한다고 가정한다.

수심이 50 m인 음원과 센서간의 임펄스 응답의 상호상관 함수를 이용한 TDOA 추정을 그림 12에 나타내었다. 그림 12의 (a)와 (b)는 센서 1의 임펄스 응답과 센서 2의 임펄스 응답을 각각 나타낸다. 센서 1의 경우 0.673s부근에서 직접파가 확인되며 시간에 따른 반사파의 영향도 볼 수 있다. 센서 2의 경우는 0.805s부근에서 직접파가 확인되며 센서 1에 비해 음원으로부터 상대적인 거리가 크기 때문에 반사파의 영향이 큰 것으로 나타난다.

그림 12 (c)의 상호상관 함수의 최대값을 이용하여 추정된 TDOA는 0.1323s로 실제 TDOA를 정확히 추정하고

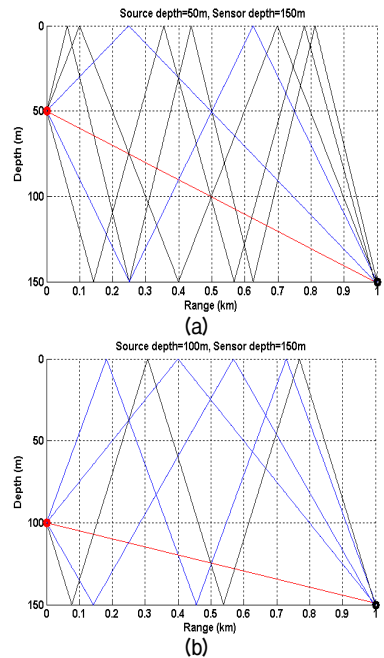


그림 10. 천해에서 음원의 전달경로
(a)음원의 수심=50 m (b)음원의 수심=100 m
Fig. 10. Propagation paths of the source in shallow water.
(a)Source depth=50m (b)Source depth=100m

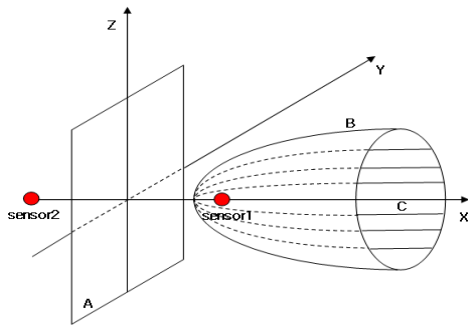


그림 9. TDOA를 적용한 음원의 3차원 궤적
Fig. 9. 3-Dimensional locus of the source from TDOA.

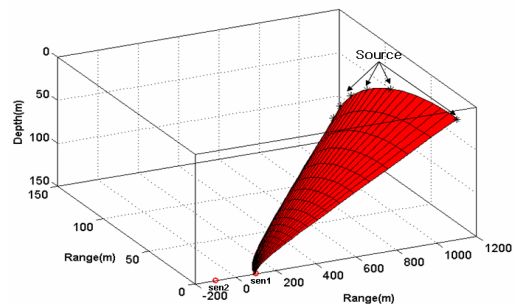


그림 11. TDOA가 0.1323s인 쌍곡면상에 위치하는 음원
Fig. 11. The sources on hyperboloid whose TDOA is 0.1323s.

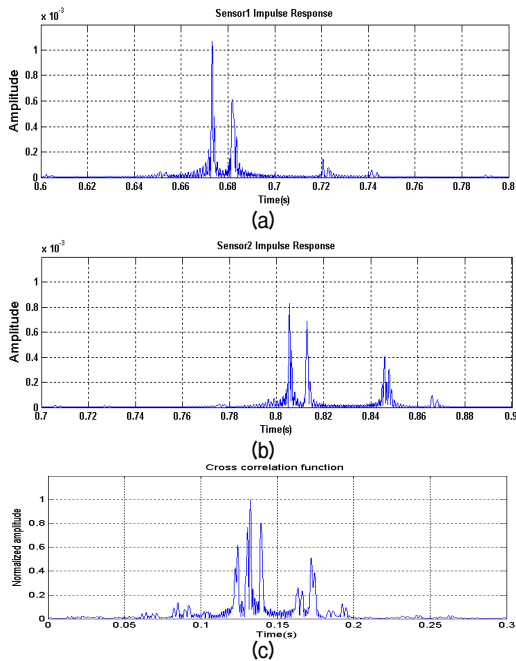


그림 12. 상호상관 함수를 이용한 TDOA추정
 (a) 센서 1 임펄스 응답 (b) 센서 2 임펄스 응답 (c) 상호상관 함수
 Fig. 12. TDOA estimation using cross correlation function.
 (a) Impulse response of sensor 1 (b) Impulse response of sensor 2 (c) Cross correlation function

있다. 만약 수중환경에서 반사파의 영향이 커서 그림 12 (c)와 같이 단순히 상호상관 함수의 최대값만으로 TDOA를 정확히 추정 할 수 없는 경우에는 [18]의 방법을 통해 정확도를 높일 수 있다.

표 2는 그림 11의 쌍곡면상에 있는 위치별 음원에 대한 TDOA 추정치를 나타낸다.

음원의 수심이 10 m, 30 m 일 때를 제외한 나머지 위치에서 실제 TDOA 0.1323s를 정확히 추정하고 있고, 오차가 있는 10 m와 30 m의 경우에 0.2 ms의 오차가 나타난다. 표 2의 결과를 통해 직접파의 영향이 상대적으로 큰 근거리 음원의 경우 두 센서와의 TDOA를 추정하면 이를 3차원 공간에서 일정한 거리차를 가지는 쌍곡면의 궤적으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

따라서 음원의 3차원 위치는 앞 장에서 언급한 두 개의 아폴로니오스의 원이 이루는 음원의 수직 궤적과 쌍곡면

표 2. 쌍곡면상의 음원에 대한 TDOA 추정결과
 Table 2. Results of TDOA estimation for sources on the hyperboloid.

수심	TDOA 추정치					
	10 m	30 m	50 m	70 m	90 m	110 m
TDOA (s)	0.1321	0.1321	0.1323	0.1323	0.1323	0.1323

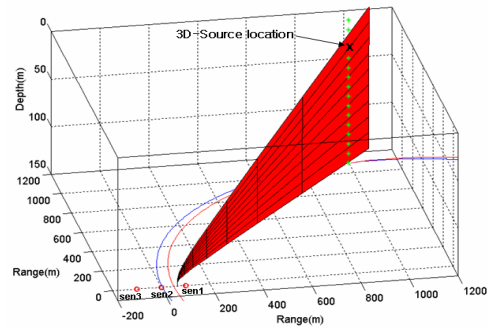


그림 13. 수심에 따른 음원의 궤적과 쌍곡면의 교점
 Fig. 13. Intersection point between the source locus with depth and hyperboloid.

의 궤적이 이루는 교점으로 최종 추정 가능하다. 그림 8의 결과에 TDOA를 적용한 쌍곡면의 방정식을 추가하여 음원의 수심을 추정한 결과를 그림 13에 나타내었다.

수심이 150 m인 수중환경에서 음원의 TDOA를 적용한 쌍곡면의 궤적은 그림 13에서와 같이 음원 추정이 가능한 범위인 한 단면으로 제한된다. 이 때 음원의 3차원 좌표 (x_s, y_s, z_s) 는 다음과 같이 두 개의 원의 방정식과 하나의 쌍곡면의 방정식을 연립하여 구한다.

$$(x - e_{12})^2 + y^2 = r_{12}^2 \tag{8}$$

$$(x - e_{13})^2 + y^2 = r_{13}^2 \tag{9}$$

$$\frac{x^2}{\Delta r^2} - \frac{y^2}{d^2 - \Delta r^2} - \frac{z^2}{d^2 - \Delta r^2} = \frac{1}{4} \tag{10}$$

여기서 e_{12} 와 r_{12} 은 센서 1,2가 형성하는 아폴로니오스 원의 중심과 반지름을 의미하고, e_{13} 와 r_{13} 은 센서 1,3이 형성하는 아폴로니오스 원의 중심과 반지름을 의미한다. 식 (10)은 센서 1,3이 이루는 쌍곡면의 방정식을 나타내고 Δr 는 음원과 두 센서간의 거리차, d 는 두 센서의 간격을 각각 의미한다.

IV. 모의 실험

제안된 3차원 위치추정 기법의 성능분석을 위해 모의 실험을 수행하였다. 수중환경은 수심이 150 m이며 해저면이 평탄하고 음속구조가 일정한 Pekeris 음향 도파관으로 가정한다. 수신 센서의 음장은 KRAKEN음파전달 모델을 사용하여 모의하였다 [19-20]. 세 개의 센서는 해저면에 100 m 간격으로 배치하였고, 음원의 이동경로는 그림 14와 같다. 음원의 수심에 따른 위치 추정성능을 분

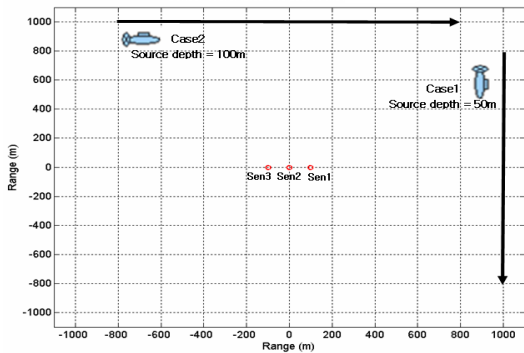


그림 14. 음원의 이동 경로에 대한 2가지 case
Fig. 14. Two cases of the source trace.

석하기 위해 case 1은 음원이 50 m의 수심으로 이동하고 case 2는 100 m의 수심으로 이동한다고 가정한다.

음원의 이동속도는 5 Kt로 일정하며 1~800 Hz의 광대역 소음을 방사한다. 스펙트로그램은 약 2초 간격으로 모의음장을 통해 구현하였고, 간섭패턴 정합 및 3차원 위치추정은 음원의 이동 시작점부터 100 m 간격으로 수행하였다. 센서 1,2와 센서 1,3이 이루는 두 개의 아폴로니오스 원을 이용하여 음원의 수직 궤적을 구하고 센서 1,3이 형성하는 쌍곡면과의 교점을 음원의 위치로 추정하였다.

두 가지 case에 대하여 제안된 3차원 위치추정 알고리즘을 적용한 결과가 그림 15에 나와있다. 음원의 이동 시작점부터 100 m 간격으로 프레임별 실제 음원의 위치와 위치 추정 결과를 함께 나타내었다. 센서의 위치가 좌표 중심을 기준으로 등간격인 대칭을 이루므로 추정된 음원의 이동 궤적 또한 CPA (Closest Point Approach)를 중심으로 대칭된 형태를 가진다. 두 가지 case 모두 이동 시작점부터 7번째 프레임까지는 실제 궤적과 유사하게 음원을 추정하고 있으나 CPA 부근에서는 상대적으로 추정오차가 큰 것으로 나타난다.

위치 추정 오차를 분석하기 위해 추정된 음원의 수평거리와 방위각 및 깊이에 대한 오차를 그림 16에 나타내었다. 그림 16 (a)에 나와 있는 거리 추정 오차를 살펴보면 case 1과 case 2의 경우 프레임별 거리 추정오차가 50 m 이내인 결과를 나타낸다. 그러나 음원의 위치가 CPA근처인 경우 상대적으로 오차가 크게 나타나며 case 2의 경우 CPA부근의 7번째 프레임부터 11번째 프레임까지 100 m 이상의 오차가 나타나기도 한다. 또한 음원의 CPA지점인 9번째 프레임에서는 위치추정이 불가능하므로 오차가 무한대로 나타난다. Case 2의 경우 CPA지점의 음원은 두 센서에 이르는 거리비가 1:1이 되어 음원의 궤적은 원이 아닌 두 센서를 반으로 가르는 수직 이동분선과 유사하다. 따라서 두 개의 아폴로니오스의 원을 이용한 교점 형

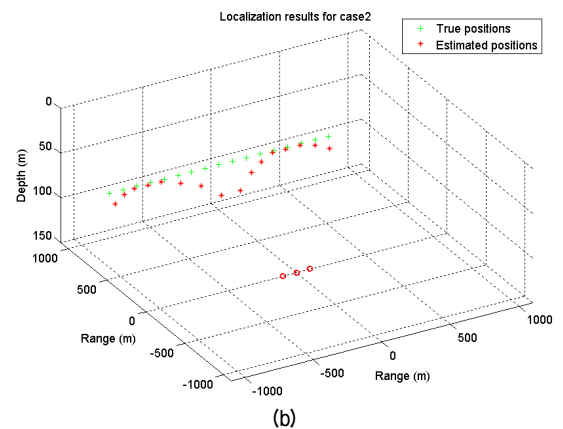
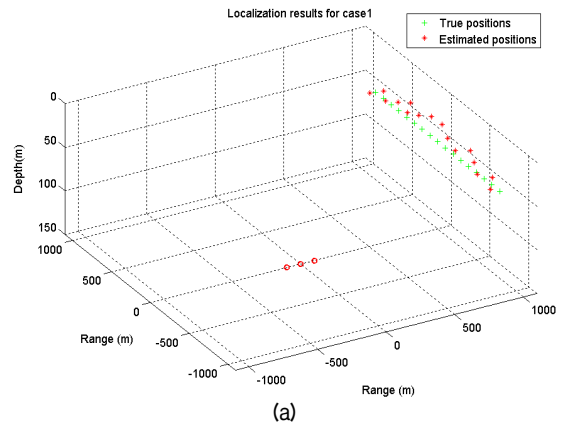


그림 15. 실제 음원의 위치와 추정된 음원의 위치
(a) Case 1 (b) Case 2

Fig. 15. True source positions and estimated source positions.
(a) Case 1 (b) Case 2

성이 불가능하며 거리비가 1:1에 근접한 CPA부근의 음원 또한 두 개의 아폴로니오스 원이 접면 형태와 유사하게 교점을 형성하므로 다른 지점에 비해 상대적인 추정 오차가 크게 나타난다. 또한 case 1의 경우에는 CPA지점에서 음원과 두 센서간의 거리차가 센서간격과 동일하여 그림 9의 C와 같은 궤적을 가지므로 쌍곡면의 형성이 불가능하다. 그러므로 CPA지점의 음원에 대해서는 제안된 3차원 위치추정 기법을 직접 적용하기 어려운 단점이 있다.

그림 16 (b)의 방위각 추정 오차와 그림 16 (c)의 깊이 추정 오차에서도 거리 추정오차와 동일하게 9번째 프레임에서 위치추정이 불가능하므로 오차가 무한대로 나타난다. 따라서 위치 추정 결과 분석에서 9번째 프레임의 추정치는 제외하기로 한다.

그림 16에서 CPA부근을 제외한 나머지 지점에서 거리 및 방위각, 깊이 추정 오차를 살펴보면 음원의 수심이 깊은 case 2의 경우 전반적으로 오차가 작게 나타난다.

Case2의 경우 case1에 비해 센서와 수평선상에 가깝게 음원이 이동하므로 각 센서의 간섭패턴이 동일한 특성을

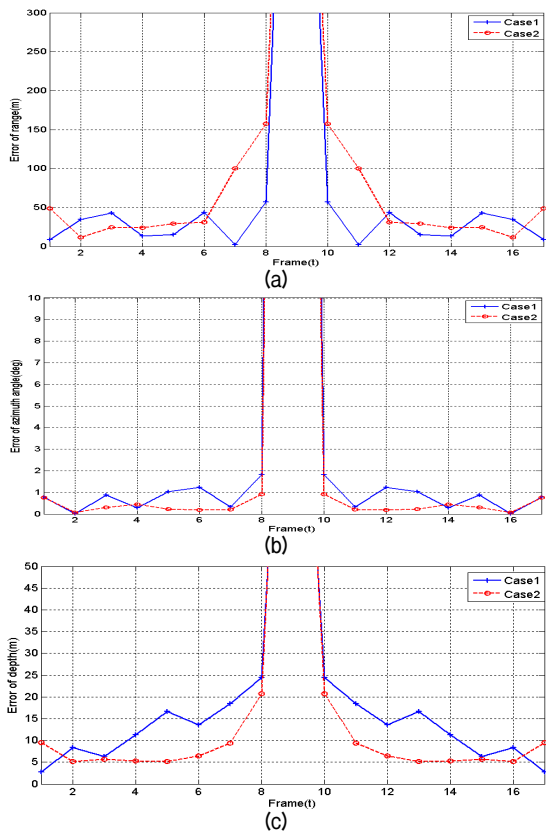


그림 16. 프레임별 위치 추정 오차
 (a) 거리 추정 오차 (b) 방위각 추정 오차 (c) 깊이 추정 오차
 Fig. 16. Localization error over the frame.
 (a) Error of estimated range (b) Error of estimated azimuth angle (c) Error of estimated depth

표 3. 두 가지 case에 대한 위치추정 결과 분석
 Table 3. Analysis of localization results for two cases.

	거리 추정 평균오차 (m)	방위각 추정 평균오차 (°)	깊이 추정 평균오차 (m)
Case 1	27.07	0.8	12.7
Case 2	53.17	0.4	9.4
Total	40.12	0.6	11.05

유지한다. 그러므로 스펙트럼을 선형적으로 크기 조정하여 정합을 수행하더라도 표적과 센서간의 거리비를 정확하게 구할 수 있어 나은 성능을 보여준다.

표 3은 위치추정 평균 오차를 나타내며 위치추정이 불가능한 CPA지점의 추정오차는 제외하였다. 거리추정 평균 오차의 경우 50m이내의 결과를 나타내며 방위각 추정 평균 오차는 1° 이내이다. 그리고 음원의 깊이 추정 평균 오차는 15m 이내의 결과를 나타낸다. Case2의 경우 CPA 부근에서의 거리추정 오차가 크기 때문에 평균오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 추정된 음원의 위치 변화가 급격한 CPA근처의 음원에 대하여 해상에서 운동체의 이

동특성을 감안한 추적필터를 적용한다면 성능 개선에 도움이 될 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 천해환경에서 근거리 광대역 음원의 3차원 위치를 간섭패턴 정합 및 쌍곡면을 이용하여 기하학적으로 추정하는 방법을 제안하였다. 간섭패턴을 통해 추정된 거리비를 아폴로니오스 원에 적용한 음원의 궤적과 TDOA를 적용한 쌍곡면의 궤적을 서로 연결하여 음원의 3차원 위치를 추정하였고, 모의실험을 통하여 성능을 확인하였다.

모의실험 결과 제안된 방법을 적용하여 위치추정이 불가능한 CPA부근을 제외한 나머지 지점에서 음원의 거리 및 방위각, 깊이에 대한 추정 오차는 각각 50 m, 1°, 15 m이내임을 확인하였다. 해상에서 음원의 이동특성을 감안한 추적필터와 음원과 센서의 위치에 따른 음파전달 특성을 고려한 간섭패턴 정합 기법을 적용한다면 위치 추정성능이 개선될 것으로 판단된다.

본 논문에서는 이상적인 음향 도파관 환경을 가정하였으나 제시된 결과를 토대로 거리종속 도파관 환경에서의 적용성 검토가 필요하고 향후 실제 해상 실험 데이터를 적용한 성능 분석이 필요하다.

참고 문헌

1. J. C. Hassab, *Underwater Signal Processing and Data Processing*, CRC Press, Florida, 1989.
2. S. K. Oh and C. K. Un, "Improved MUSIC Algorithm for High Resolution Array Processing," *Electronics Letters*, vol. 25, no. 22, pp. 1523-1525, 1989.
3. A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, "Matched field processing: source localization in correlated as an optimum parameter estimation problem," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, no. 2, pp. 571-587, 1988.
4. C. Feuillade, D. R. DelBalzo, and M. M. Rowe, "Environmental mismatch in shallow-water matched-field processing: Geoacoustic parameter variability," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, no. 6, pp. 2354-2364, 1989.
5. A. Tolstoy, *Matched-field processing for underwater acoustics*, World Scientific Pub., Singapore, 1993.
6. S. Lee and N. C. Makis, "The array invariant," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 1, pp. 336-351, 2006.
7. S. D. Chuprove, "Interference structure of a sound field in a layered ocean," in *Acoustics of the Ocean*, edited by L. M. Brekhovskikh and I. B. Andreevov, pp. 71-91, Nauka, Moscow, 1982.

8. L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of ocean acoustics*, AIP Press, 2003.
9. G. L. D'Spain and W. A. Kuperman, "Application of wave-guide invariants to analysis of spectrograms from shallow environments that vary in range and azimuth," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 106, no. 5, pp. 2454-2468, 1999.
10. T. C. Yang, "Beam intensity striations and applications," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 3, pp. 1342-1352, 2003.
11. T. C. Yang, "Motion compensation for adaptive horizontal line array processing," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 1, pp. 245-260, 2003.
12. A. M. Thode, "Source Ranging with minimal environmental information using a virtual receiver and waveguide invariant theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108, no. 4, pp. 1582-1594, 2000.
13. 김세영, 천승용, 김기만 "3개 센서의 광대역 신호 스펙트로그램에 나타나는 간섭패턴을 이용한 수중 표적의 위치 추정," *한국음향학회지*, 26권, 4호, 173-181쪽, 2007.
14. 천승용, 김세영, 김기만 "수중에서 광대역 간섭 패턴 정합을 이용한 음원의 위치 추정 연구," *한국음향학회지*, 26권, 8호, 415-425쪽, 2007.
15. Wolfram Mathworld, <http://mathworld.wolfram.com/ApolloniusCircle.html/>, 2009.
16. J. Hoshen, "The GPS equations and the problem of Apollonius," *IEEE Trans., Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 1116-1124, 1996.
17. B. G. Ferguson, "Improved time-delayed estimated of underwater acoustic signal using beamforming and prefiltering techniques," *IEEE J. Oceanic. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 238-244, 1989.
18. J. L. Spiesberger, "Linking auto- and cross-correlation functions with correlation equations: Application to estimating the relative travel times and amplitudes of multipath," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, no. 1, pp. 300-312, 1998.
19. M. B. Porter, The KRAKEN Normal Mode program, SACLANT Undersea Research Centre, 1994.
20. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, AIP, New York, 1994.

저자 약력

● **김 세 영 (Se-Young Kim)**



2005년 : 한국해양대학교 전파공학과 졸업(공학사)
 2007년 : 한국해양대학교 전파공학과 졸업(공학석사)
 2007년 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 대학원 (박사과정)
 ※주관심분야: 소나 신호처리, 어레이 신호처리

● **천 승 용 (Seung-Yong Chun)**

한국음향학회지 제16권 제6호 참조

● **손 윤 준 (Yoon-Jun Son)**

한국음향학회지 제22권 제6호 참조

● **김 기 만 (Ki-Man Kim)**

한국음향학회지 제22권 제5호 참조