

수중에서 광대역 간섭 패턴 정합을 이용한 음원의 위치 추정 연구

A Study on Underwater Source Localization Using the Wideband Interference Pattern Matching

천 승 용*, 김 세 영**, 김 기 만**

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

*국방과학연구소, **한국해양대학교 전파공학과

(접수일자: 2007년 8월 3일; 수정일자: 2007년 8월 29일; 채택일자: 2007년 9월 28일)

본 논문에서는 간섭 패턴 정합을 이용한 수중 광대역 음원의 위치 추정법을 제안한다. 두 개의 센서 스펙트로그램에 나타나는 간섭 패턴의 정합을 통해 음원과 두 센서간의 상대적인 거리비를 추정하고 이를 아폴로니오스 원의 방정식에 적용하였다. 아폴로니오스의 원은 두 정점에 이르는 거리비가 일정한 값으로 운동하는 점의 자취로 정의되며, 음원의 위치로 추정 가능한 궤적을 나타낼 수 있다. 그러나 아폴로니오스의 원 하나만으로는 정확한 음원의 위치 추정이 어렵다. 그러므로 또 하나의 위치 궤적을 추정 할 수 있는 방정식이 필요하다. 따라서 음원과 두 센서간의 신호 도달 시간차이를 이용한 쌍곡선의 방정식을 도입하여 최종적인 음원의 위치는 두 방정식의 교점의 좌표로 추정하였다. 제안된 방법의 성능 평가를 위하여 모의실험을 통해 위치 추정 오차율을 분석하고, 해상실험을 통하여 실제 적용 가능성을 분석하였다. 모의실험 및 해상실험 결과 본 논문에서 제안된 위치 추정 알고리즘이 오차율 10% 이내의 성능을 나타내었다.

핵심용어: 음원 위치 추정, 도파관 불변 파라미터, 간섭 패턴 정합, 아폴로니오스 원, 쌍곡선 방정식

투고분야: 수중음향 분야 (5,6)

This paper proposes a method of underwater source localization using the wideband interference patterns matching. By matching two interference patterns in the spectrogram, it is estimated a ratio of the range from source to sensors, and then this ratio is applied to the Apollonius circle. The Apollonius circle is defined as the locus of all points whose distances from two fixed points are in a constant value so that it is possible to represent the locus of potential source location. The Apollonius circle alone, however, still keeps the ambiguity against the correct source location. Therefore another equation is necessary to estimate the unique locus of the source location. By estimating time differences of signal arrivals between source and sensors, the hyperbola equation is used to get the cross point of the two equations, where the point being assumed to be the source position. Simulations are performed to get performances of the proposed algorithm. Also, comparisons with real sea experiment data are made to prove applicability of the algorithm in real environment. The results show that the proposed algorithm successfully estimates the source position within an error bound of 10%.

Key words: Source localization, Wavoguide invariant parameter, Interference pattern matching, Circle of apollonius, Hyperbola equation

ASK subject classification: Underwater Acoustic (5,6)

I. 서론

천해에서 은밀하게 접근하는 수중 표적의 탐지 및 위치 추정은 NCW (Network Centric Warfare)에서 중요한 문제이다. 천해는 대양과 달리 환경이 복잡하여 음파의 다중경로 현상으로 인해 정확한 위치 추정이 어렵다. 특

히 긴 관측 시간을 요구하는 수동소나의 경우 관측 시간 동안 발생하는 표적의 이동으로 인하여 신호의 에너지가 여러 개의 빔에 걸쳐 나뉘지고 신호의 크기가 낮아져서 탐지 및 위치 추정 성능 저하가 발생한다.

일반적인 위치 추정기법에는 음파를 평면파로 가정하여 표적 신호의 입사각을 추정하는 고전적인 빔형성 (Conventional Beamforming) 기법, MUSIC (Multiple Signal Classification) 등이 있다 [1-2]. 이와 같은 위치 추정 기법은 해양 도파관에서 발생하는 음파의 다중경로 현상을 고려하지 않아 실제 해양에 적용될 경우 배열 이득의 저하 및 위치 추정 오차가 발생한다 [3].

지난 수십년 동안 천해에서 표적의 탐지 및 위치 추정 성능의 향상을 위해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 최근 들어 수중에서 음파전달 특성을 이해하고, 신호처리에 직접 적용하여 위치 추정 성능을 높이고자 하는 시도들이 이루어지고 있다 [4-5]. 특히 1982년 S. D. Chuprov가 발표한 도파관 불변성 (WI : Waveguide Invariant)을 위치 추정에 적용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 도파관 불변성은 음파전달시 모드간의 상호간섭에 의해 나타나는 광대역 간섭 패턴의 기울기가 시간과 주파수 평면에서 음원의 거리에 비례하여 나타난다는 이론이다 [6-7]. 일정한 음속구조를 가지는 이상적인 Pekeris 도파관에서 도파관 불변 파라미터 β 는 모드 수, 주파수 및 음원과 수신기의 수심에 대해 불변이다. 그러나 실제 해양에서는 음파전달 환경에 따라 β 가 변하므로 β 에 대한 특성 연구와 이를 적용한 표적의 위치 추정 연구가 동시에 이루어지고 있다.

G. L. D'Spain 등은 단일 센서에서 측정된 스펙트로그램으로부터 도파관 불변특성을 확인하였으며, 표적의 위치 추정을 위해서는 환경에 따라 β 의 값을 다르게 적용하여야 함을 확인하였다 [8]. 또한 D. Rouseff 는 β 의 변화에 따른 빔형성의 지향 방위와 표적의 방위에 대한 오차를 로파그램 (LOFARGRAM)을 통하여 분석하였다 [9]. T. C. Yang 은 수평 배열 센서를 이용하여 도파관 불변성 이론을 관측 시간 내에 발생하는 표적 이동 보상 (motion compensation)에 적용하였다 [10-11]. 이 기법을 통하여 탐지 성능을 6dB 이상 향상시킬 수 있었으나, 관측 시간 내의 데이터에 대하여 β 를 변화시키며 정합도가 높은 것을 찾아야 하는 단점이 있다. J. S. Kim 등은 정합장 처리 (Matched Field Processing)에 도파관 불변성을 적용하여 거리방향으로 영을 넓히는 시도를 하였고, J. S. Park 은 도파관 불변성을 표적의 이동에 따른 이동

보상에 적용하여 향상된 탐지 성능을 가지는 정합장 처리 기법을 제시하였다 [12-13]. A. M. Thode 등은 알고 있는 음원의 측정 결과를 토대로 도파관 불변성을 적용한 가상 수신기 (Virtual Receiver) 개념을 도입하여 표적 위치 추정 기법을 제시하였다 [14]. 상기 기술된 기법들은 기존의 위치 추정 기법에 도파관 불변특성을 적용하여 향상된 위치 추정 성능을 나타내었으나 실제 해양에서 음파 전달환경에 따라 변하는 β 와 환경변수의 영향이 여전히 존재하는 한계점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 동일한 음파 전달환경에 존재하는 두 개의 센서를 이용하여 β 와 환경정보에 무관하게 표적의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 표적과 두 센서간의 음파전달 환경이 같다고 가정하면 표적과 각 센서 사이에 적용되는 β 도 동일하다. 도파관 불변이론에 따르면 간섭패턴의 주파수 특성은 표적의 거리에 따라 비례하므로 두 센서간의 간섭패턴 주파수 비율을 추정하면 두 센서로부터 일정한 거리비를 가지는 표적의 궤적을 유추할 수 있다. 표적과 두 센서간의 상대적인 거리 비 즉, 간섭패턴의 주파수 비율은 간섭 패턴 정합 (IPM : Interference Pattern Matching) 알고리즘을 통해 추정하고, 추정된 거리비는 두 정점에서 이르는 거리의 비가 일정한 점의 자취로 정의되는 아폴로니오스 원의 방정식에 적용된다. 세 개의 센서를 이용하여 표적의 위치를 추정할 경우 두 개의 아폴로니오스 원이 형성하는 교점이 표적의 위치가 됨을 확인하였다 [15]. 그러나 세 개의 센서를 이용하면 최소 2개 이상의 원으로부터 교점을 구할 수 있지만, 두 개의 센서를 이용하면 추정 가능한 원이 하나이므로, 상대적인 표적의 궤적만 나타낼 수 있다. 따라서 표적의 정확한 위치를 추정하고자 이미 잘 알려진 TDOA (Time Difference Of Arrival)를 이용한 위치 추정법을 도입하였다. TDOA에 의한 표적과 두 센서간의 거리차는 두 정점에서 일정한 거리차를 가지며 운동하는 점의 궤적인 쌍곡선의 방정식에 대응한다 [16]. 최종적인 표적의 정확한 위치는 아폴로니오스 원과 쌍곡선의 교점으로 추정한다. 제안된 위치 추정 알고리즘은 표적과 두 센서간의 상대적인 거리를 적용한 두 개의 방정식을 이용하므로 기존의 위치 추정 기법들에 비해 계산상 간단하고, 두 센서에 미치는 β 의 영향이 동일하므로 β 와 무관하게 표적의 위치를 추정할 수 있는 장점을 가진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 도파관 불변 이론과 간섭패턴의 특성에 대해 설명하고 3장에서는 IPM 및 TDOA에 기반한 제안된 위치 추정 알고리즘을 나타낸

다. 4장에서는 모의실험 결과를 분석하고 해상실험에서 획득한 데이터를 적용하여 성능을 확인하였다. 마지막으로 5장의 결론에서는 연구결과 정리 및 향후 연구 방향에 대해 기술하였다.

II. 도파관 불변 이론과 광대역 간섭 패턴

스펙트로그램에 나타나는 간섭패턴의 기울기와 도파관 불변 파라미터 β 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{dw/w}{dr/r} = \left(\frac{k_m - k_n}{w} \right) \left(\frac{dk_m}{dw} - \frac{dk_n}{dw} \right) \quad (1)$$

$$= - \left(\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_n} \right) \left(\frac{1}{u_m} - \frac{1}{u_n} \right) = \beta_{mn}$$

여기서 k_m 과 k_n 은 각각 m 번째 모드와 n 번째 모드의 파수를 의미하며 주파수 w 의 함수이고, $v_m = w/k_m$, $v_n = w/k_n$ 및 $u_m = dw/dk_m$, $u_n = dw/dk_n$ 는 각각 m 번째 모드와 n 번째 모드의 위상속도와 군속도를 나타낸다. 평탄한 해저면에 균일한 음속구조를 가지는 이상적인 Pekeris 도파관에서 도파관 불변 파라미터 β 는 모든 모드에 대하여 같다.

$$\beta_{mn} = \beta = 1. \quad (2)$$

민약 음속이 수심에 따라 선형적으로 증가함으로써 굴절 계수의 제곱 특성을 보이는 음향 도파관에서 β 는 다음과 같다.

$$\beta_{mn} = \beta = -3. \quad (3)$$

음향 도파관에서 간섭패턴의 기울기와 β 의 관계는 식 (1)로부터 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{dw}{w} = \beta \frac{dr}{r}. \quad (4)$$

식 (4)에서 간섭패턴의 기울기가 β 에 비례하고 주파수 및 음원과 수신기의 수심에 대하여 불변임을 알 수 있다. 그러나 식 (4)를 통해 실제 스펙트로그램으로부터 dw 와 w 를 계산하여도 음원의 거리는 기울기 β 와 연관되어 있어 음원의 위치 추정은 어렵다. 그림 1과 그림 2는 음원으로

부터 2개의 센서에 전달되는 신호에 대하여 도파관 불변 특성에 의한 관계를 표현하고 있다. 그림 1은 동일한 음파 전달 환경내의 두 센서에 수신되는 신호는 기울기 β 가 변하더라도 동일한 β 의 영향을 받고 있는 것을 나타낸다.

그림 2는 음원과 각 센서간의 거리에 따라 대응되는 주파수 특성을 $\beta = 1$ 인 경우에 대하여 나타낸 그림으로 음원의 거리가 멀수록 선형적으로 대응되는 주파수는 증가함을 알 수 있다. 그림 1과 그림 2로부터 2개의 센서를 이용하여 이동하는 음원의 광대역 신호를 수신했을 때, 스펙트로그램의 최대 음압이 발생하는 줄무늬의 기울기와 주파수축에서 천이된 비율이 음원과 두 센서들 간의 거리에 따라 각각 다르게 나타남을 알 수 있다. 그러므로 두 센서의 간섭 패턴을 상호 비교하면 도파관 불변성의 기울기는 두 개의 센서에 동일한 영향을 미치기 때문에 서로 상쇄가 가능하다. 도파관 불변특성에 기반으로 두 센서의 간섭패턴에 대한 주파수 및 거리에 대한 특성을 살펴보았다. 먼저 음원의 위치가 (x_s, y_s) 이고, 두 센서의 위치를 각각 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 라고 가정하면 각 센서에서 음원까지의 거리는 다음과 같다.

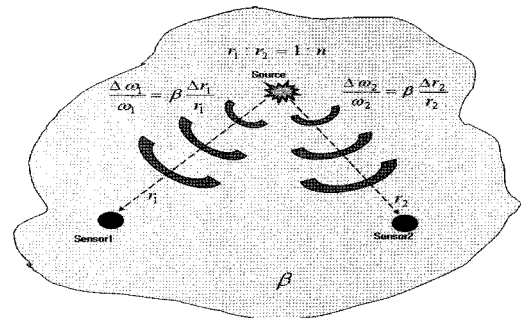


그림 1. 동일한 음장내의 음원과 두 센서간의 도파관 불변 특성
Fig. 1. The characteristic of waveguide invariant from a target to two sensors.

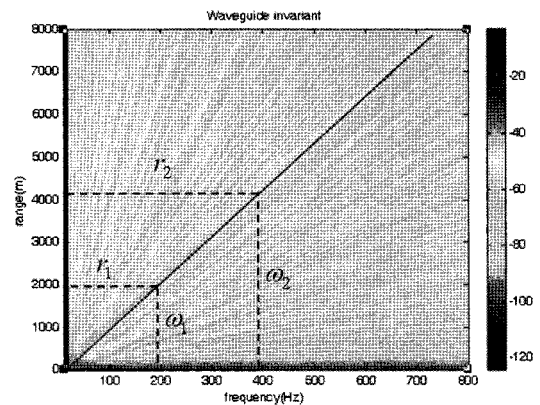


그림 2. 음원과 센서간의 거리에 따른 주파수 특성
Fig. 2. Characteristics of the frequency according to the range between target and sensors.

$$r_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2} \quad (5)$$

$$r_2 = \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2}.$$

식 (5)의 r_1, r_2 는 각 센서에서 음원까지의 거리로써, 다음과 같은 식을 만족한다.

$$r_1 = nr_2. \quad (6)$$

식 (6)에서 n 은 임의의 실수 값이다. 그림 1과 그림 2로부터 음원의 거리에 따른 각 센서 간섭패턴의 주파수 특성은 비례하므로 다음과 같은 식을 적용 할 수 있다.

$$\omega_1 = n\omega_2. \quad (7)$$

각 센서에 수신되는 신호에 대하여 도파관 불변성을 적용하면 β 에 대한 센서별 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{d\omega_1}{\omega_1} = \beta \frac{dr_1}{r_1}. \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_2}{\omega_2} = \beta \frac{dr_2}{r_2}. \quad (9)$$

두 개의 센서가 동일한 음파전달환경에 존재한다고 가정하면 β 는 동일한 값으로 적용되므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{r_1}{dr_1} \frac{d\omega_1}{\omega_1} = \frac{r_2}{dr_2} \frac{d\omega_2}{\omega_2}. \quad (10)$$

거리와 주파수에 대한 연관 관계를 알아보기 위하여 식 (10)을 재정리하면 다음과 같다.

$$\frac{r_1}{r_2} \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{dr_1}{dr_2} \frac{d\omega_2}{d\omega_1}. \quad (11)$$

식 (11)에서 거리와 주파수에 대한 관계식과 거리 변화량과 주파수 변화량에 대한 관계식으로 구분하여 적용 가능하다. 이를 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$n = \frac{r_2}{r_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (12)$$

$$n = \frac{dr_2}{dr_1} = \frac{d\omega_2}{d\omega_1}. \quad (13)$$

식 (12)에서 2개의 센서를 이용하여 측정된 간섭패턴의 주파수 비율을 구하면 도파관 불변성 이론에 따라 센서로부터 거리 비율을 추정할 수 있다. 식 (13)은 간섭패턴의 주파수 변화량을 구하면 상대적 거리 변화량을 추정할 수 있으나, 본 논문은 음원의 위치 추정이 목적이므로 적용하지 않았다.

III. 제안된 위치 추정 기법

3.1. 간섭 패턴 정합 (IPM)에 의한 위치 추정

본 논문에서는 2개의 센서에 나타나는 간섭 패턴으로부터 음원과 두 센서간의 상대적인 거리 비율을 추정하기 위하여 간섭 패턴 정합을 제안한다. 간섭 패턴 정합의 기본 개념은 그림 3을 이용하여 설명할 수 있다. 그림 3에 나타난 간섭 패턴은 2개의 센서 사이를 5 kts로 지나가는 음원의 대한 결과이며, KRAKEN 정상 모드 모델을 이용하였다 [19]. 두 개의 센서 중에서 2번 센서의 간섭패턴을 기준으로 정하고 1번 센서의 간섭 패턴을 일정 크기만큼 조정하면 2번 센서의 간섭 패턴과 일치한다. 이때 조정된 크기 값은 센서로부터의 거리 비율 값이 된다. 본 논문에서 제안한 간섭 패턴 정합은 관측시간마다 두 개의 센서 중에서 한 개의 센서를 기준 센서로 선정하고, 나머지 센서의 스펙트로그램의 크기를 조정하면서 정합도가 가장 높은 값을 찾아 비율을 추정하는 기법이다.

매 관측 시간마다 수행하는 이유는 관측 시간이 길수록 관측 시간 내에 식 (13)의 변화량을 포함하게 되어 선형적 관계를 유지하지 못하므로 관측 시간에 의해 변화량의 영향을 최소화하기 위해서이다. 또한 광대역 간섭 패턴을 적용한 이유는 하나의 토널 주파수를 사용하는 경우 비교하고자하는 주파수가 매우 많아 정합도의 추정이 어렵고, 도파관 불변성의 특성은 가 언급한 바와 같이 스펙트로그램의 주파수 전반에 걸쳐 나타나는 간섭 패턴에 대한 것이므로 광대역 스펙트럼 신호에 대하여 적용하여야 하기 때문이다.

임의의 관측시간 t_0 에서 기준센서의 신호를 $S_1(\omega, r_1, t_0)$, 나머지 센서의 신호를 $S_2(\omega, r_2, t_0)$ 라 두면 각 센서에 나타나는 스펙트럼은 식 (14)과 같이 나타낼 수 있으며, 이들의 비율은 식 (15)와 같다.

$$S_1(\omega, r_1, t_0) = nS_2(\omega, r_2, t_0). \quad (14)$$

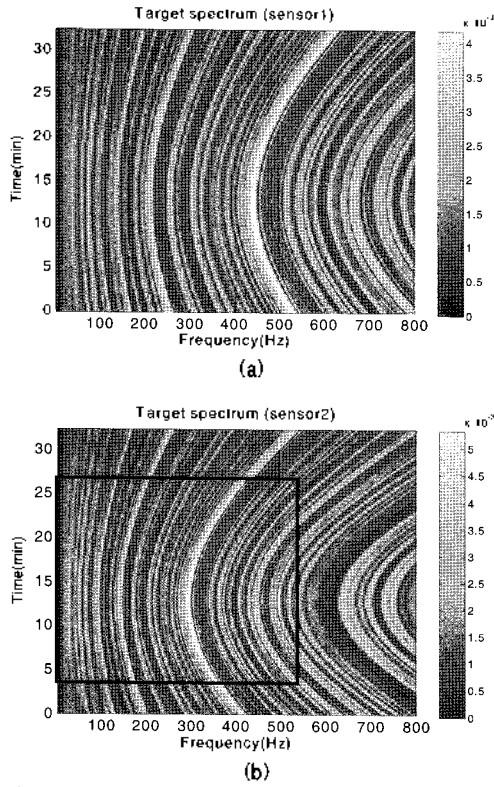


그림 3. IPM의 기본 개념
 (a) 센서 1 스펙트로그램 (b) 센서 2 스펙트로그램과 매칭된 결과
 Fig. 3. Basic concept of the IPM
 (a) Sensor 1 spectrogram (b) Sensor 2 spectrogram and matching result.

$$n = \frac{S_1(\omega, r_2, t_0)}{S_2(\omega, r_1, t_0)} \quad (15)$$

본 논문에서는 거리 비율 값인 n 을 추정하기 위하여 기준 센서의 스펙트럼에 대하여 $S_2(\omega, r_2, t_0)$ 의 스펙트럼에 대한 크기를 그림 4와 같이 조정하는 과정을 거쳐 정합도가 가장 높은 비율 값을 추정하였다.

$$R(n) = S_1(\omega, r_1, t_0) - nS_2(\omega, r_2, t_0) \quad (16)$$

식 (16)에서 $R(n)$ 은 두 스펙트럼의 진폭 차이이며 $R(n)$ 이 최소가 되는 n 의 값이 정합도가 가장 높은 값이 된다. 그림 4는 스펙트럼 크기 조정 과정을 표현한 것으로 조정된 스펙트럼은 기준 스펙트럼과 정확하게 일치하지는 않는다. 그 이유는 음파 전달 모델을 사용하지 않고 선형적으로 조정하였기 때문이며, 이로 인한 오차가 나타난다 하더라도 간섭 패턴의 주요 주파수 성분은 그대로 유지하고 있으므로 조정 비율이 거리의 비율과 일치하면 오차 크기는 최소가 된다. 간섭 패턴 정합을 통해 추정된 거리

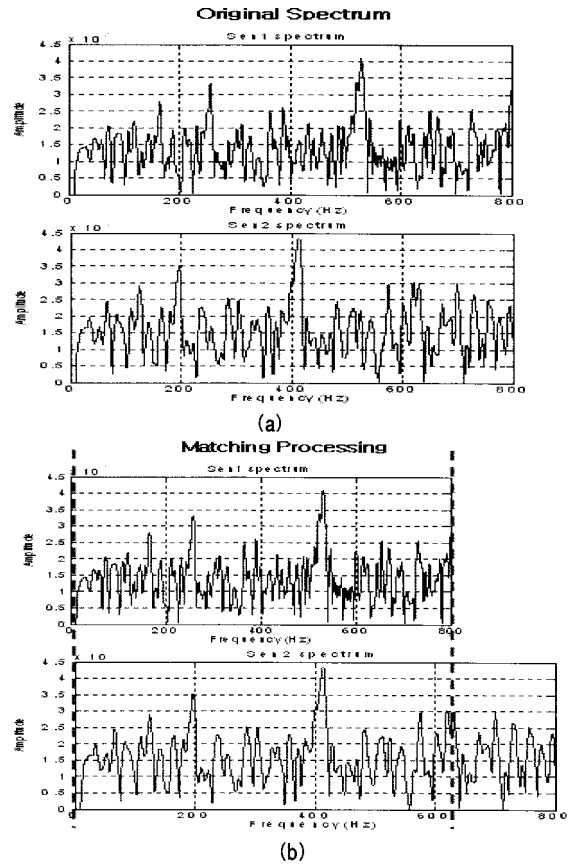


그림 4. 간섭 패턴 정합 과정
 (a) 센서 1과 센서 2의 스펙트럼 (b) 매칭 결과
 Fig. 4. Interference pattern matching process
 (a) Spectrum of sensor 1 and sensor 2 (b) Matching result.

비율은 두 센서의 위치를 두 정점으로 하여 음원에 이르는 거리의 비가 일정한 궤적이 된다.

아폴로니오스의 원은 음원에서 두 센서에 이르는 거리 간의 비를 이용하여 음원의 거리를 유추할 수 있는 방정식을 제공한다. 아폴로니오스의 원은 두 정점에 이르는 거리의 비가 일정한 값을 가지며 운동하는 점의 자취로 정의된다 [17-18], 즉 그림 5와 같이 추정된 거리의 비를 이용하여 중심이 e , 반지름이 r 인 원의 방정식으로 변환 가능하다. 제안한 기법은 센서의 위치와 간섭 패턴 정합에 의해 추정된 거리 비율을 알고 있으므로, 아폴로니오스의 원에 적용하여 상대적 거리를 원의 방정식으로 변환하면 식 (17)이 된다.

$$(x-c)^2 + y^2 = r^2 \quad (17)$$

$$c = \frac{(m^2 + n^2)a}{(m^2 - n^2)}, \quad r = \frac{(2mna)}{(m^2 - n^2)}$$

그림 6은 두 개의 센서에 수신된 간섭 패턴에 대하여 간섭 패턴 정합을 적용하여 추정한 음원의 궤적 추정 결

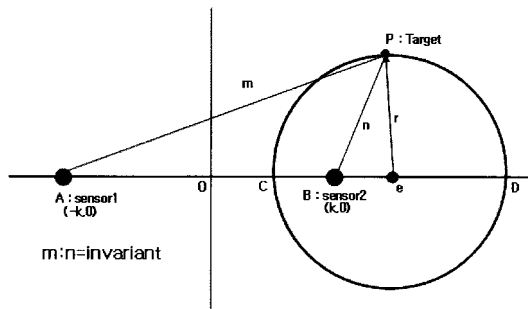


그림 5. 아폴로니오스의 원
Fig. 5. The Apollonius circle.

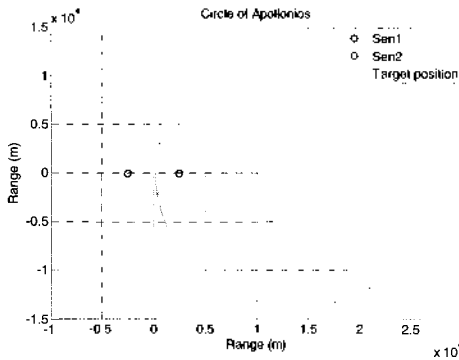


그림 6. 아폴로니오스 원의 결과
Fig. 6. The result of Apollonius circle.

과의 한 예를 나타내며 음원의 실제 위치가 아폴로니오스의 원상에 존재하고 있다.

3.2. 2개의 방정식을 이용한 위치 추정

간섭 패턴 정합에 의해 추정된 아폴로니오스의 원은 한 개의 방정식을 제공하기 때문에 음원의 위치 궤적을 추정할 수 있으나, 정확한 음원의 위치는 추정하기 어렵다. 그러므로 또 하나의 위치 궤적을 구할 수 있는 방정식이 필요하다. TDOA에 기반한 위치 추정 기법은 다수의 센서를 사용하는 빔형성 기법이나 MUSIC 기법에 비해 적은 센서와 계산량을 요구하므로 현재 많은 응용분야에 적용되고 있다 [16]. 앞 절에서 설명한 아폴로니오스의 원은 음원에서 두 센서에 이르는 거리의 비가 일정한 궤적인 원의 방정식이지만, 음원과 두 센서간의 TDOA를 이용하면 음원의 궤적은 두 센서에서 거리차가 일정한 쌍곡선이 된다. 결국 최종적인 음원의 정확한 위치는 아폴로니오스 원의 방정식과 쌍곡선 방정식의 교점의 위치로 추정된다. 음원의 위치 (x, y)를 구하기 위해 적용되는 원의 방정식과 쌍곡선의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{(x-c)^2}{1} + \frac{y^2}{4} = r^2 \tag{18}$$

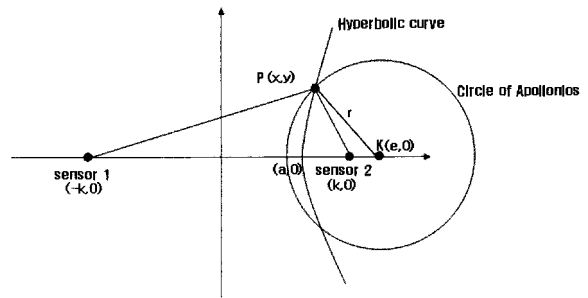


그림 7. 아폴로니오스의 원과 쌍곡선의 교점
Fig. 7. Cross point of the Apollonius circle and the hyperbolic curve.

식 (22)의 두 방정식을 연립하여 해를 구하면 음원의 좌표 (x, y)는 다음과 같다.

$$x = \frac{a^2k + a\sqrt{a^2k^2 - (a^2 + b^2)(e^2 - b^2 - r^2)}}{a^2 + b^2} \tag{19}$$

$$y = \pm \sqrt{\frac{b^2}{a^2}e^2 - b^2}, \text{ if } r^2 > a^2.$$

여기서 $a = \Delta d^2/4, b = (4k^2 - \Delta d^2)/4$ 이며, Δd 는 음원과 두 센서간의 거리차를 나타내고, k는 센서의 x축 좌표를 의미한다. 그림 7은 아폴로니오스의 원과 쌍곡선의 교점을 나타내며 위치 추정 알고리즘의 흐름도는 그림 8과 같다.

IV. 실험 및 고찰

4.1. 모의실험 및 분석

제안된 알고리즘의 성능 검증을 위하여 그림 9와 같은 Pekeris waveguide에서 거리독립 모델인 KRAKEN을 이용한 모의실험을 수행하였다 [19]. 모의실험은 그림 10과 같은 3가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 두 센서간의 간격은 5 km이고, 음원은 3가지 경우에 대하여 동일하게 5 kts의 속도로 이동하면서 1~800 Hz의 광대

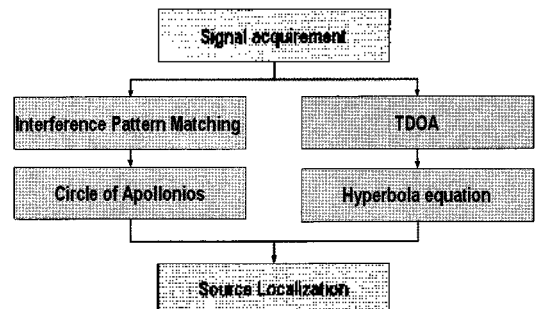


그림 8. 제안된 위치추정 알고리즘의 절차
Fig. 8. Procedure of proposed localization algorithm.

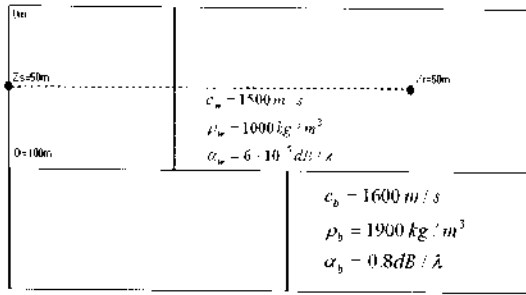


그림 9. Pekeris 도파관
Fig. 9. Pekeris waveguide.

역 소음을 방산한다고 가정하였다. 센서에 수신되는 스펙트로그램 자료는 약 2초 간격으로 모의신호를 생성하여 이용하였으며, 간섭 패턴 매칭 및 음원 위치 추정은 3가지 case에 대하여 음원의 이동 시작점으로부터 250 m 간격으로 수행하였다. 오차를 분석하기 위하여 음원의 위치는 센서의 중간 지점인 (0, 0)을 기준으로 하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 case 1은 음원이 센서 사이를 기동하는 경우이며, 이동거리는 5 km이다. Case 2는 음원이 두 센서의 밖으로 기동하는 경우이며, 총 이동거리는 case 1과 동일하다. Case 3은 음원이 두 센서가 이루는 축과 나란한 방향의 궤적을 가지며 센서 사이의 중심을 기점으로 해서 서로 대칭되는 형태로 기동하며, 총 이동거리는 8 km이다. Case 1에 대한 결과를 살펴보면 그림

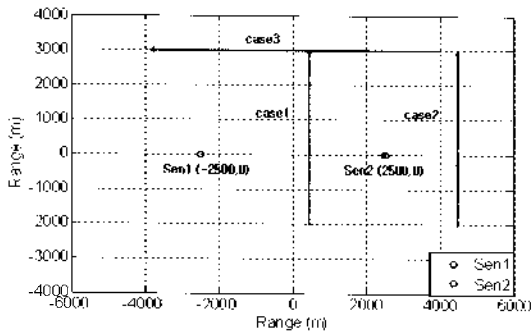


그림 10. 음원의 이동 궤적에 대한 3가지 case
Fig. 10. Three cases of source trajectory.

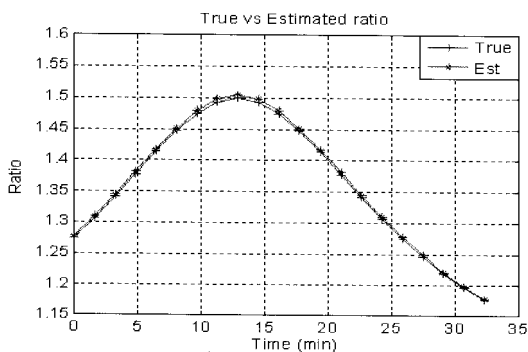


그림 11. 실제 거리비와 IPM을 통해 추정된 거리비간의 비교 (case 1)
Fig. 11. A comparison of the true ratio and the estimated ratio using the IPM (case 1).

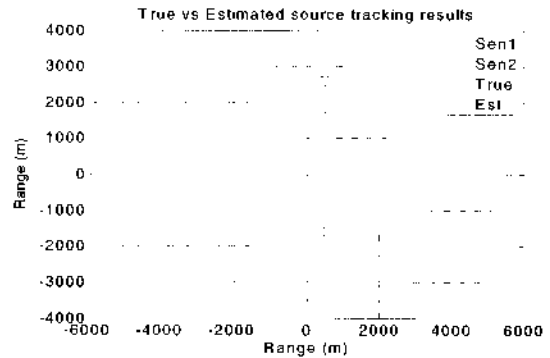


그림 12. 실제 음원의 위치와 추정된 음원의 위치간의 비교 (case 1)
Fig. 12. A comparison of the true position and the estimated position using a source localization (case 1).

11은 간섭 패턴 매칭을 이용하여 음원과 두 센서간의 거리 비율을 추정한 결과이며, 추정 오차가 1% 이내이다.

그림 12는 추정된 음원의 위치에 대한 결과와 실제 음원의 위치에 대한 결과를 나타낸 그림이며, 추정된 음원의 위치가 실 음원의 궤적과 매우 유사함을 확인할 수 있다. Case 2의 경우 추정된 거리비의 결과는 그림 13과 같다. Case 2의 간섭패턴정합의 최소 추정 오차 결과인 적색 원의 경우 CPA부근의 지점에서 0.5의 큰 오차가 발생한다. 따라서 해양에서는 시간에 따른 표적의 기동변화가 적으므로 다음과 같은 조건을 두었다.

$$n(t_m) = n(t_{m-1}). \tag{24}$$

식 (24)에 의해 흑색 원과 같이 음원 기동 특성을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 그림 14는 해양에서의 음원 기동 특성을 고려한 최종 위치 추정 결과이며, 실 음원 위치와 매우 유사하게 음원의 위치를 추정하고 있다. Case 3의 경우 간섭 패턴 정합 결과는 그림 15와 같으며, 추정된 거리 비율은 실제 거리 비율에 대하여 1%이내의 오차로 실제 거리 비율과 거의 일치함을 알 수 있다. 위치 추정 결과는 그림 16에 나와 있고, 음원의 위치 추정 결과는 간섭 패턴 정합 결과와 마찬가지로 실제 음원 위치와 거의 일치한다.

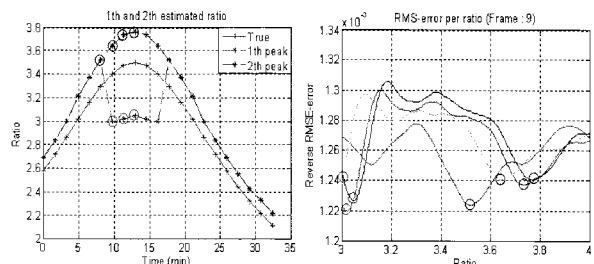


그림 13. 해상에서의 기동 특성을 고려한 IPM 결과 (case 2)
Fig. 13. The result of IPM considering the sourcemanuever characteristic in the ocean (case 2).

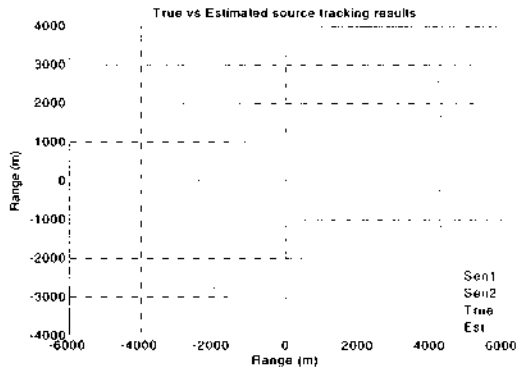


그림 14. 실제 음원의 위치와 추정된 음원의 위치간의 비교 (case 2)
 Fig. 14. A comparison of the true position and the estimated position using a source localization (case 2).

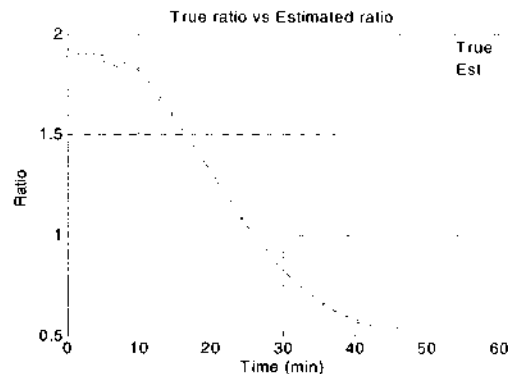


그림 15. 실제 거리비와 IPM을 통해 추정된 거리비간의 비교 (case 3)
 Fig. 15. A comparison of the true ratio and the estimated ratio using the IPM (case 2).

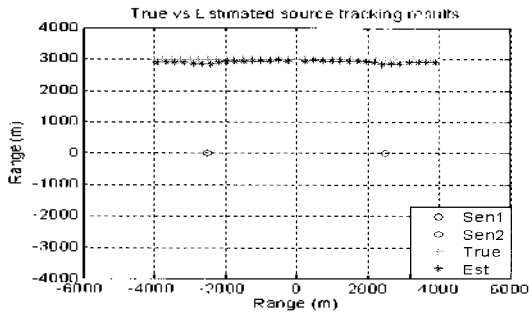


그림 16. 실제 음원의 위치와 추정된 음원의 위치간의 비교 (case 3)
 Fig. 16. A comparison of the true position and the estimated position using a source localization (case 3).

세 가지 경우에 대한 모의실험에서 제안한 간섭 패턴 정합 및 위치 추정 알고리즘은 각각 5% 및 10%이내의 오차율을 가지는 양호한 결과가 나타났으며, 표 1에 나타난 바와 같이 각 case별 평균 위치 추정 오차율은 5% 이내로 우수한 성능을 보였다. 단 case 2의 경우 일정한 bias에 의해 10% 이상의 오차를 가지지만 음원의 거리비를 추정 경향은 실제 거리 비율 경향을 유지하고 있다.

센서거리와 음원 거리비에 대한 간섭 패턴 정합 및 위치 추정 성능을 분석하기 위하여 센서의 위치를 고정하고, 음원의 위치를 변화하면서 모의실험을 수행하였다.

표 1. 3가지 case에 대한 결과 분석

Table 1. Analysis of simulation for 3 cases.

	IPM error	거리추정 평균 오차 (m)	거리추정 평균오차 (%)
Case 1	0.0031	47.37	4.14
Case 2	0.1787	210.87	4.39
Case 3	0.0133	96.91	2.46

센서의 위치는 좌표 (0,0)기준으로 각각 (-2000,0), (2000,0)이며, 센서 간격은 4km이다. 추정하고자 하는 음원은 x축으로 200 m에서 4000 m까지 100 m간격으로 하였으며, y축은 200 m에서 5000 m까지 100 m간격으로 하였다. 그림 17의 (a)는 센서 위치와 음원의 위치를 나타내며, (b)는 위치 추정 결과이다. 그림 17에 나와있는 원은 음원에서 두 센서에 이르는 거리 비율을 1~10까지 표현한 것으로 위치 추정 결과를 살펴보면 거리비가 커질수록 위치 추정 오차가 커지는 경향을 볼 수 있다. 이는 음원과 두 센서간의 거리 차가 커져서 음장 특성이 동일하게 유지되지 못하여 간섭 패턴 정합 과정에서 오차가 크기 때문인 것으로 판단된다.

그림 18은 간섭 패턴 정합의 오차율 분포이며, 오차율 분포를 5%간격으로 나타내었다. 그림 18에서 오차율 분포는 전반적으로 10%이내에 분포하고, 전체 샘플 수의 85% 이상이 10%이내의 오차율을 가지고 있으므로 제안 알고리즘의 성능이 우수함을 확인 할 수 있다.

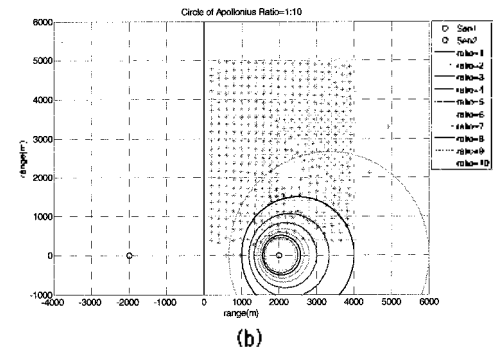
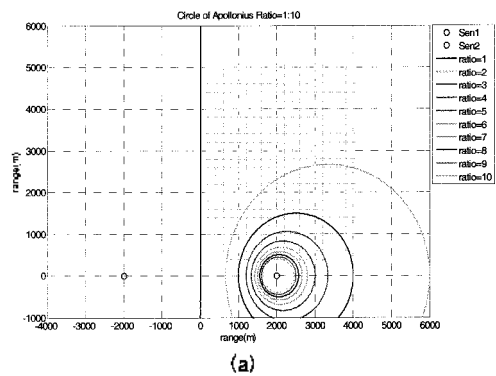


그림 17. (a) 실제 음원의 위치 (b) 위치 추정 결과
 Fig. 17. (a) True source positions (b) Localization results for each position.

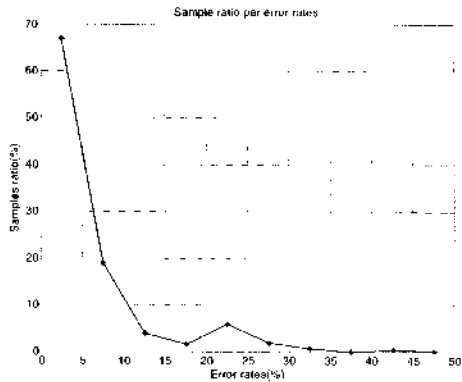


그림 18. 간섭 패턴 정합의 오차율 분포
Fig. 18. Error sample distribution of IPM.

4.2. 해상실험 및 분석

본 논문에서 제안한 간섭 패턴 정합 알고리즘과 위치추정 알고리즘의 실제 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 그림 19와 같은 환경에서 획득한 실험 자료를 이용하였다. 실험은 L형 선배열 센서 1조를 수심 180m 해역에 설치하고, 예인함은 약 4 Kts 속력으로 수심 약 50m로 저주파 고출력 수중음원을 예인하였다. 이때 수중 음원은 160dB의 광대역 100~400Hz신호를 송신하였다. 설치된 L형 선배열 센서의 구조는 그림 20과 같으며, 수직 배열의 센서 간격은 2.5m이며, 수평 배열의 센서 간격은 11m이다. 그림 19의 실험 환경에서 예인함은 등심으로 기동하였으므로 기울기 β 는 1에 가까울 것으로 판단된다. 본 논문에 적용한 실험 자료는 수평배열센서에서 측정된 센서별 스펙트로그램을 분석하여 동일 음장으로 판단되는

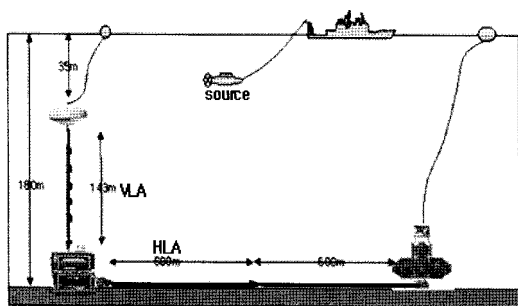


그림 19. 해상 실험 환경
Fig. 19. Experimental environment.

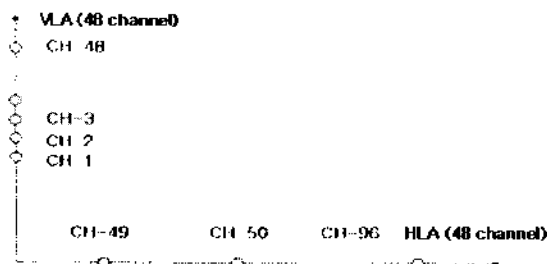


그림 20. L형 선배열 센서의 구조
Fig. 20. The configuration of L type line array.

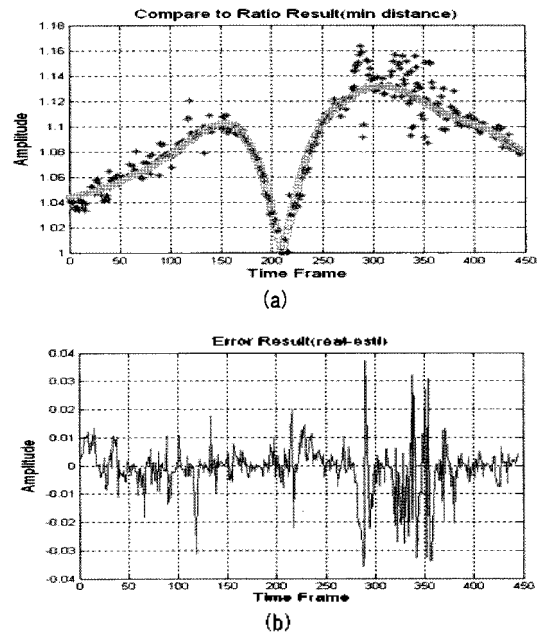


그림 21. (a) 실제 거리비와 추정된 거리비의 비교 (b) 추정된 결과의 에러비율
Fig. 21. (a) Comparison of ratio between real and estimation result (b) Error ratio of estimation result.

가장 거리가 먼 49번과 55번 센서를 각각 센서 1, 센서 2로 선정하였으며, 두 센서의 간격은 66 m이다.

그림 21은 해상에서 음원의 기동 특성을 고려하여 추정된 간섭 패턴 정합의 결과인 음원과 두 센서간의 거리비와 실제 거리 비율간의 오차를 나타낸 그림이다. 제안된 간섭 패턴 정합 알고리즘은 실제 해상 실험 데이터에 대해서도 오차를 5%이내의 오차를 가지는 우수한 성능을 보였다. 그림 22는 최종 추정된 음원의 위치 값과 실제 음원의 위치 값을 좌표에 나타낸 것이며, 서로 비교하여 보면 매우 유사하게 음원의 위치가 추정되고 있다. 그림 23은 위치 추정 결과와 실제 위치에 대하여 시간에 따른 오차 거리와 오차율을 나타낸 그림이며, 표 2는 평균 오차거리와 평균 오차율을 나타낸 표이다. 대부분의 오차는 50m 이내의 오차 거리와 10% 이내의 오차율을 나타내고

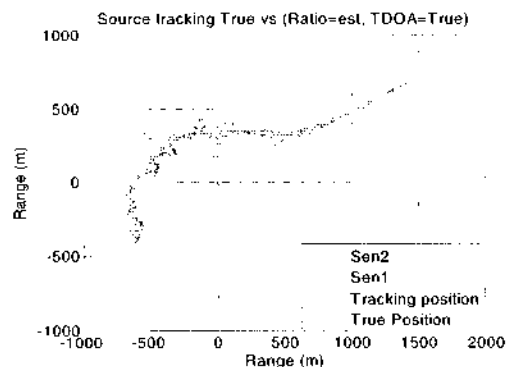


그림 22. 음원의 위치 추정 결과
Fig. 22. Estimation results of source position.

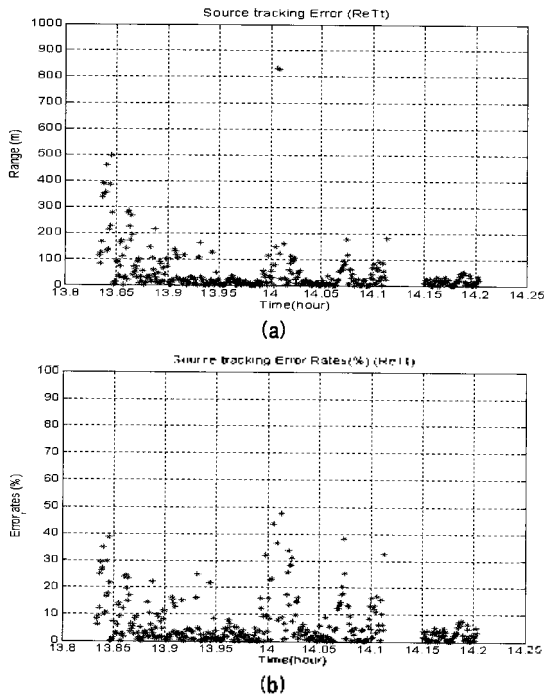


그림 23. (a) 거리 추정 오차 분포 (b) 거리 추정 오차율 분포
Fig. 23. (a) Range error distribution (b) Error ratio distribution.

표 2. 위치 추정 결과의 애러분석

Table 2. Error analysis of the localization.

	위치추정 평균 오차 (m)	위치추정 평균 오차율 (%)
추정 결과	41.00	7.3529

있으며, 평균 오차 거리는 41m, 평균 오차율은 7.3%로 10% 이내의 오차 성능을 가졌다. 또한 그림 22의 결과에 대하여 5% 오차 간격으로 오차율에 대한 샘플 분포를 알아 보았으며, 분석한 결과는 각각 그림 23과 표 3에 나타 내었다. 10% 이내의 오차율을 가지는 샘플 수는 전체 396개 샘플에 대하여 80% 이상인 318개로 나타났다.

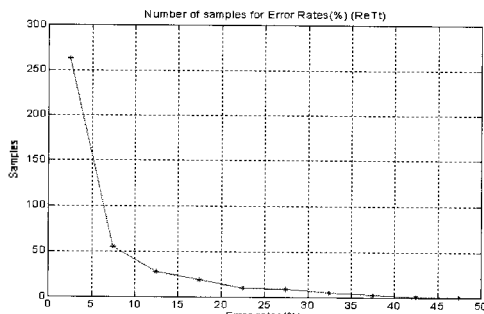


그림 24. 추정 애러율에 따른 샘플 분포
Fig. 24. Sample distributions of localization error.

표 3. 추정 오차율에 대한 샘플 분석

Table 3. Sample analysis results for localization.

	~5	~10	~15	~20	~25	~30	~35	~40	~45	~50	50~
샘플	263	55	28	19	10	9	5	3	1	1	2

V. 결론

본 논문에서는 도파관 불변성의 특성을 이용하여 기울기와 무관하게 적용 가능한 간섭 패턴 정합 알고리즘과 두 개의 방정식으로부터 교점을 구하여 음원의 위치를 간단하게 추정하는 기법을 제안하였다. 아플로니오스 원의 방정식은 간섭 패턴 정합의 결과인 거리 비율로부터 구했고, 쌍곡선의 방정식은 기존의 TDOA 기법에 의한 시간 지연 값으로부터 구하였다. 모의실험과 해상 실험 결과에서 간섭 패턴 정합 알고리즘의 성능은 오차가 5% 이내였고, 위치 추정 알고리즘은 오차가 10%이내의 성능을 나타내었다. 그러므로 제안한 간섭 패턴 정합 알고리즘과 위치 추정 알고리즘은 오차 10% 이내의 우수한 성능을 보유하고 있으며, 또한 해상 실험 결과로부터 실제 적용성 또한 우수함을 알 수 있었다. 향후 연구 내용으로 간섭 패턴 정합 과정에서 나타난 최소값 분포에 대하여 해양 및 음원의 기동 특성을 고려한 추적 기법 등을 적용하면 위치 추정의 정확도가 향상될 것으로 기대된다. 또한 거리 종속 (range dependant) 환경 및 음속 구조 변화 등의 다양한 시나리오를 통하여 간섭 패턴 정합 알고리즘의 성능 분석이 필요하다. 본 논문에서는 두 개의 센서를 이용하여 깊이 정보가 없는 음원의 위치 추정법을 제안하였으나, 3개의 센서를 이용하여 깊이 정보를 포함한 3차원의 위치 추정 기법 연구도 향후 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

1. J. C. Hassab, *Underwater Signal Processing and Data Processing*, (CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1989)
2. S. K. Oh and C. K. Un, "Improved MUSIC Algorithm for High Resolution Array Processing," *Electronics Letters*, 25, 1523-1525, Oct. 1989.
3. 박정수, 천승용, 이성근, 심태모, "다중경로 음파전달이 HLA의 근거리 방위 탐지에 미치는 영향," *한국음향학회지* 16 (6), 100-105, 1997.
4. 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.*, 83 (2), 571-587, 1988.
5. C. Feuillade, D. R. DelBalzo, and M. M. Rowe, "Environmental mismatch in shallow-water matched-field processing: Geoacoustic parameter variability," *J. Acoust. Soc. Am.*, 85 (6), 2354-2364, 1989.
6. L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of ocean acoustics*, (AIP Press, 2003)
7. S. D. Chuprova, "Interference structure of a sound field in a layed ocean," *Acoustics of the ocean: Current Status*, edited by L. M. Brekhovskikh and I. B. Andreevov Nauka, Moscow,

- 71-91, 1982
8. G. L. D'Spain and W. A. Kuperman, "Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow environments that vary in range and azimuth," *J. Acoust. Soc. Am.*, 106 (5), 2454-2468, 1999.
 9. D. Rouseff and C. V. Leigh, "Using the waveguide invariant to analyze Lofargrams," *MTS Oceans Conference, IEEE Oceanic Eng.*, 4, 2239-2243, 2002.
 10. T. C. Yang, "Beam intensity striations and applications," *J. Acoust. Soc. Am.*, 113 (3), 1342-1352, 2003.
 11. T. C. Yang, "Motion compensation for adaptive horizontal line array processing," *J. Acoust. Soc. Am.*, 113 (1), 245-260, 2003
 12. J. S. Kim, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, and H. C. Song, "Null-broadening in a waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.*, 112 (1), 189-197, 2002.
 13. 박장수, "이동하는 다중음원의 정합장처리," 한국해양대학교, 박사학위논문, 2006.
 14. A. M. Thode, "Source Ranging with minimal environmental information using a virtual receiver and waveguide invariant theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, 108 (4), 1582-1594, 2000.
 15. 김세영, 천승용, 김기만 "3개 센서의 광대역 신호 스펙트로그램에 나타나는 간섭패턴을 이용한 수중 표적의 위치 추정," *한국음향학회지*, 26 (4), 173-181, 2007.
 16. B. G. Ferguson, "Improved time-delayed estimated of underwater acoustic signal using beamforming and prefiltering techniques," *IEEE J. Oceanic. Eng.*, 14, 238-244, 1989.
 17. E. W. Weisstein. *Apollonius Circle*. (From MathWorld-A Wolfram Web Resource)
 18. J. Hoshen. "The GPS equations and the problem of Apollonius," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 32, 1116. 1996.
 19. M. B. Porter. *The KRAKEN Normal Mode program*, (SACLANT Undersea Research Centre, 1994)

저자 약력

- 천 승 용 (Seung-Yong Chun)

한국음향학회지 제16권 6호 참조

- 김 세 영 (Se-Young Kim)

한국음향학회지 제26권 4호 참조

- 김 기 만 (Ki-Man Kim)

한국음향학회지 제22권 5호 참조