

3개 센서의 광대역 신호 스펙트로그램에 나타나는 간섭패턴을 이용한 수중 표적의 위치 추정

Underwater Target Localization Using the Interference Pattern of Broadband Spectrogram Estimated by Three Sensors

김 세 영*, 천 승 웅**, 김 기 만*

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

*한국해양대학교 전파공학과, **국방과학연구소

(접수일자: 2007년 4월 11일, 수정일자: 2007년 5월 28일, 채택일자: 2007년 5월 30일)

본 논문에서는 음향 스펙트로그램을 이용하여 수중 이동표적의 위치를 추정하기 위한 방법을 연구하였다. 주파수와 시간의 2차원 평면으로 표현되는 스펙트로그램은 수중 운동체의 이동 정보를 제공한다. 음원과 수신 센서간의 거리가 충분히 멀 경우 스펙트로그램의 넓은 주파수에 걸쳐 발생하는 줄무늬들은 해수면 및 해저면에 의해 반사된 모드간의 간섭을 의미하고, 이때 최대 음압이 발생하는 줄무늬의 기울기는 음향 도파관 불변인자 β 와 표적과 센서간의 거리에 의해 영향을 받는다. 2개 이상의 센서를 사용하여 이동하는 선박의 광대역 방사 소음을 측정할 경우 스펙트로그램에 나타나는 최대 음압이 발생하는 줄무늬의 기울기와 줄무늬가 주파수축에서 천이된 비율이 표적과 센서간의 거리에 따라 각각 다르게 나타난다. 두개의 센서를 두 정점으로 가정하여 표적에 이르는 거리의 비가 일정한 값을 가지면서 운동하는 점의 자취인 아폴로니오스의 원을 형성하고, 3개의 센서를 사용할 경우 두 개의 원이 서로 교점을 형성 하는데, 이 교점의 좌표를 표적의 위치라 추정 한다. 제안된 위치 추정 기법의 성능을 평가하기 위해 음파 전달 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

핵심용어: 표적 위치 추정, 음향 도파관 불변 인자, 광대역 간섭 패턴, 아폴로니오스의 원

투고분야: 수중음향 분야 (5,6)

In this paper, we propose a moving target localization algorithm using acoustic spectrograms. A time-versus-frequency spectrogram provide a information of trajectory of the moving target in underwater. For a source at sufficiently long range from a receiver, broadband striation patterns seen in spectrogram represents the mutual interference between modes which reflected by surface and bottom. The slope of the maximum intensity striation is influenced by waveguide invariant parameter β and distance between target and sensor. When more than two sensors are applied to measure the moving ship-radited noise, the slope and frequency of the maximum intensity striation are depend on distance between target and receiver. We assumed two sensors to fixed point then form a circle of apollonios which set of all points whose distances from two fixed points are in a constant ratio. In case of three sensors are applied, two circle form an intersection point so coordinates of this point can be estimated as a position of target. To evaluates a performance of the proposed localization algorithm, simulation is performed using acoustic propagation program.

Key words: Target localization, Waveguide invariant parameter, Broadband interference pattern, ircle of appollonios

ASK subject classification: Underwater Acoustic (5,6)

I. 서론

해양에서 표적의 위치를 탐지하고 환경정보를 얻기 위한 음향 탐지 시스템 (SONAR)은 중요한 연구 분야이며, 현재 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 음향 탐지 시스템은 능동형 소나 (Active Sonar)와 수동형 소나 (Passive Sonar)로 나눌 수 있고, 일반적으로 수심보다 충분히 먼 원거리의 표적을 추정하기 위해서는 수동형 소나가 사용된다. 환경변수의 영향이 큰 해양에서 수동소나를 운용할 경우 해저 지형, 수심, 수온, 음속 등 시공간적으로 변하는 환경변수의 영향을 감소시키고 정확히 음원의 위치를 추정하는 것이 중요하다. 특히 한반도 인근 해양은 수심 200m 이하의 천해환경으로 원거리 음파 전달 시 해수면과 해저면에 의한 다중경로 현상 때문에 신호의 감쇠가 일어나 표적을 탐지하기 어려운 환경이다. 따라서, 효율적인 소나 신호처리 기법에 대한 연구가 필요하며, 최근 수중 음파 전달 특성을 이해하고 직접 신호처리에 적용하여 탐지 성능을 높이고자 하는 많은 시도들이 이루어지고 있다 [1-5].

수중 원거리 표적의 위치 추정법에는 빔형성 기법 (beamforming method)을 이용한 입사각 추정법, 다중경로를 갖는 수중환경에서 음파 전달 모델*심사위원님의 심사 소견에 깊은 감사의 말씀 드립니다. 지적 사항에 대한 부족했던 점을 수정을 통해 보다 나은 논문 작성을 할 수 있었고, 게재 가능하게 해주신 점 감사합니다.에 근거한 정합장 처리 (matched field processing)[2-3], 최근 Lee에 의해 알려진 배열불변 (array invariant) 이론에 기반한 위치 추정 기법 등이 있다 [4-5]. 선배열 센서를 사용하여 음원의 위치를 추정할 경우 배열 이득을 충분히 활용하는 장점이 있으나 많은 수의 센서가 필요하며 많은 계산량이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 거리 독립 해양 환경에서 3개의 센서를 사용하여 이전의 위치 추정기법들에 비해 적은 계산량으로 운용상의 비용을 절감할 수 있는 위치 추정기법에 대해 연구하였다.

시간에 따른 음향 신호의 주파수 변동성을 나타내는 스펙트로그램은 광대역 표적에 대한 이동 정보를 포함하고 있으며, 수중음향 분야에서 음향 도파관 특성 분석 또는 Tonal성 신호 추출을 위해 자주 사용되는 분석 방법이다 [6]. 이동 선박의 광대역 방사 소음을 측정하면 스펙트로그램의 넓은 주파수 대역에 걸쳐 발생하는 줄무늬들을 볼 수 있는데, 이는 음파가 거리에 따라 전달 할 때, 해수면 및 해저면에 의해 반사된 모드간의 상호간섭을 의미한다.

모드간의 상호 보강 (constructive) 또는 상쇄 (destructive) 간섭으로 인해 거리에 따른 음파 전달 손실이 피크와 골의 형태로 나타나고 주파수에 따라 연속적으로 나타내면 임의의 음압을 가지는 줄무늬가 형성된다. 이때 최대 음압이 발생하는 줄무늬의 기울기와 주파수축에서 천이된 비율은 음향 도파관 불변인자 β 와 표적과 센서간의 거리에 의해 영향을 받는다 [6].

표적의 위치 추정시 간격이 수 km이내인 2개 또는 3개의 센서를 사용할 때, 표적과 각 센서 사이의 음파전달 환경이 같다고 가정하면 표적과 각 센서간에 영향을 미치는 음향 도파관 불변인자 β 는 동일하다고 할 수 있다. 결국 각 센서 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬의 기울기와 줄무늬가 주파수축에서 천이된 비율은 표적과 센서간의 거리에 의해 영향을 받는다. 센서 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬에 대응하는 주파수를 추정하면 표적과 두 센서간의 거리비를 알 수 있고, 센서를 두 정점으로 가정하여 표적에 이르는 거리의 비가 일정한 점의 자취인 아폴로니오스의 원을 형성할 수 있다. 3개의 센서를 사용하면 2개의 아폴로니오스 원이 서로 교점을 형성하는데, 이 교점의 좌표를 표적의 위치라 추정한다. 각 센서 스펙트로그램에서 획득한 표적과 두 센서간의 거리비를 아폴로니오스의 원에 적용하여 표적에 대한 거리 정보를 획득하는 것이 가능한지 시뮬레이션을 통해 성능 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 광대역 신호의 간섭패턴에 대해 설명하고, 3장에서는 제안된 위치추정 알고리즘에 대해 나타내었다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 나타내고 위치 추정 성능에 대하여 고찰하였다.

II. 광대역 신호의 간섭 패턴

2.1. 모드 간섭과 음향 도파관 불변 이론

해양에서 원거리 음파 전달 특성을 나타낼 경우 정상모드 (Normal mode)이론이 효율적인 방법으로 잘 알려져 있다. 음파가 거리에 따라 전달할 때, 전달 손실은 모드간의 상호 보강 간섭과 상쇄 간섭으로 인해 피크와 골의 형태로 나타난다. 광대역 신호의 경우 에너지가 모드의 군속도별로 전달되고 심해에서는 저속 군속도를 갖는 저차 모드만으로 구성된 단일 모드군이 형성되는 반면, 천해 도파관에서는 반대의 현상이 나타나며 저차 모드가 빠르게 전달되어 고차 모드보다 일찍 도달한다 [9-10].

단일 센서에서 관측한 광대역 신호의 시간과 주파수의 함수로 나타나는 스펙트로그램을 통해 개별적인 모드의 도달 구조는 구분하기 어렵지만 모드의 상호 간섭구조를 볼 수 있다. 따라서 단일 센서에서 관측한 시간의 함수로 나타낸 스펙트로그램으로부터 모드 간섭 강도의 최대와 최소의 줄무늬의 밴드를 볼 수 있으며 줄무늬의 기울기는 음원의 거리에 비례한다. 단일 센서 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬 형태의 기울기는 빔형성 결과에서도 동일하고, 정상모드의 보강간섭 및 상쇄간섭 현상과 일치한다 [7]. 이 때, 줄무늬의 기울기는 음향 도파관에서 불변하다고 밝혀져 왔고, 스칼라 변수인 β 로써 기술하며, 도파관 불변성 (Waveguide invariant)이라 정의한다. 수심에 따른 음속구조와 밀도가 균일하고 거리에 따라 수심이 일정한 이상적인 Pekeris 도파관에서는 간섭 줄무늬의 기울기가 모드의 수, 주파수, 음원의 수심과 무관하다. 그러나, 실제 해양의 음속구조에서는 줄무늬의 기울기가 모드의 수, 주파수 음원과 수신기의 수심에 따라 변한다. 거리 r 과 수심 h 에 위치한 센서에 수신되는 음장을 주파수의 함수로써 정상 모드로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$P(w) = \sum_{m=1}^Q A_m \exp(-jk_m r) \tag{1}$$

여기서 모드 진폭 A_m 와 모드파수 k_m 은 주파수 w 의 함수이다. 음압의 강도는 다음과 같다.

$$I(w) = |G(w)|^2 = \sum_{m=1}^Q |A_m|^2 + \sum_{m \neq n} A_m^* A_n \exp(j(k_m(w) - k_n(w))r) \tag{2}$$

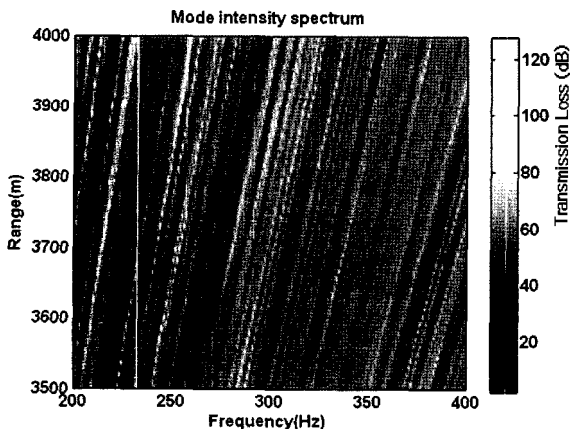


그림 1. Pekeris 도파관에서 모드의 강도 스펙트럼
Fig. 1. Mode intensity spectrum in Pekeris waveguide.

주파수와 거리에 따른 A_m 의 느린 변화를 무시하면 최대 음압의 강도는 다음과 같이 결정된다.

$$\delta I(w) \approx j \sum_{m \neq n} A_m^* A_n \exp(j(k_m(w) - k_n(w))r) \times \delta((k_m(w) - k_n(w))r) = 0 \tag{3}$$

식 (3)에서 동일 위상(stationary phase) 조건은 다음과 같다.

$$\delta((k_m(w) - k_n(w))r) = \left(\frac{dk_m(w)}{dw} - \frac{dk_n(w)}{dw} \right) r dw + (k_m(w) - k_n(w))r = 0 \tag{4}$$

식 (4)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dw/w}{dr/r} &= \left(\frac{k_m(w) - k_n(w)}{w} \right) \left(\frac{dk_m(w)}{dw} - \frac{dk_n(w)}{dw} \right) \\ &= - \left(\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_n} \right) \left(\frac{1}{u_m} - \frac{1}{u_n} \right) \\ &= \beta_{mn} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $v_m = w/k_m(w)$ 은 위상 속도이고 $u_m = dw/dk_m(w)$ 는 m 번째 모드의 군속도이다. 평탄한 해저면 위에 일정한 음속구조를 가지는 이상적인 Pekeris 도파관에서 음향 도파관 불변 파라미터 β 는 모든 모드에서 같다 [8].

$$\beta_{mn} = \beta = 1 \tag{6}$$

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

$$\beta_{mn} = \beta = -3 \tag{7}$$

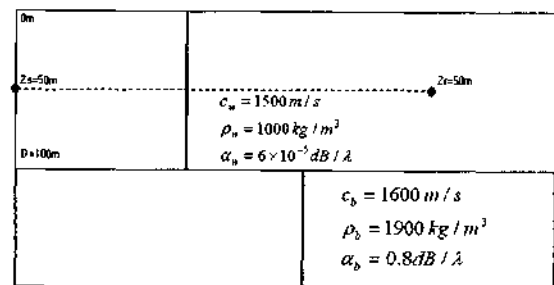


그림 2. Pekeris 도파관
Fig. 2. Pekeris waveguide.

음향 도파관에서 간섭패턴의 기울기와 β 의 관계는 식 (5)를 통해 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{dw}{w} = \beta \frac{dr}{r} \quad (8)$$

식 (8)을 통해 스펙트로그램에 나타나는 모드의 간섭 줄무늬의 기울기가 β 에 비례하며 주파수 및 음원과 수신기의 수심에 대하여 불변임을 알 수 있다. 그림 1은 수심이 100m이고, 수층과 해저의 음속 구조가 각각 1500m/s, 1600m/s로 균일한 Pekeris 도파관에서 음원과 수신기의 수심이 50m일 때, 주파수와 거리에 따른 음압 강도의 스펙트럼을 나타낸다. 강도의 줄무늬가 거리에 따라 일정한 기울기를 보이며, 일정한 주파수 폭에서는 인접 기울기가 거의 일치한다고 볼 수 있다. 인접한 두 줄무늬 사이의 거리는 모드의 순환 거리를 의미한다.

2.2. 음원의 거리에 따른 간섭 패턴

앞 절의 식 (8)과 그림 1을 통해 Pekeris 도파관에서 β 는 주파수 음원과 수신기의 수심에 불변하며 간섭 줄무늬의 기울기는 음원의 거리에 따라 비례함을 알 수 있다. 임의의 간격을 가지는 3개의 센서를 이용하여 광대역 신호를 측정할 경우 간섭 줄무늬의 기울기와 주파수 변화 특성은 표적과 센서들간의 거리에 따라 각각 다르게 나타난다. 거리에 따른 간섭 줄무늬의 주파수 변화 특성을 확인하기 위해 그림 2의 Pekeris 도파관 환경에서 3개의 센서를 이용하여 그림 3과 같은 이동경로를 가지는 광대역 신호에 대한 스펙트로그램을 형성하였다.

센서간의 거리는 3km이고 표적은 5knot의 속도로 이동하며 1~800Hz의 광대역 신호를 방사한다고 가정한다. 표적이 10분 동안 이동하면서 방사하는 광대역 신호를 약

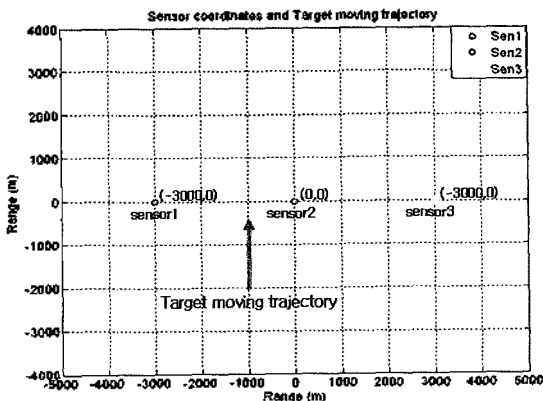


그림 3. 센서 좌표와 표적의 이동궤적
Fig. 3. Sensor coordinates and target moving trajectory.

2초 간격으로 획득하여 스펙트로그램을 형성한 결과가 그림 4에 나와 있다.

표적의 이동경로는 시간에 따라 점점 3개 센서에 가까워지는 궤적이며 그림 4에 나와 있는 각 센서 스펙트로그램의 간섭 줄무늬의 기울기도 시간에 따라 주파수 축에 반비례하여 음의 형태를 보이고 있다. 상대적으로 표적이 가깝게 이동하는 센서 2의 경우 줄무늬 기울기의 변화가 센서 1과 센서 3에 비해 크게 나타나는데 이는 표적이 가깝게 이동함에 따라 시간에 따른 센서 2와의 거리 변화율이 상대적으로 센서 1과 센서 3보다 크기 때문이다. 또한, 상대적으로 표적과 거리가 가장 먼 센서 3의 경우 최대 강도 줄무늬가 센서 1, 센서 2에 비해 주파수축에서 높은 쪽으로 천이된 것을 볼 수 있으며, 천이된 비는 시간에 따라 변하는 거리에 비례하여 각기 다른 것을 확인할 수 있다. 결국 3개 센서 스펙트로그램에 나타나는 최대 강도 줄무늬의 시간에 따른 주파수의 비는 표적과 각 센서간의 거리비를 의미하며 표적에서 임의의 두 센서에 이르는 거리는 다음과 같은 관계식을 가진다.

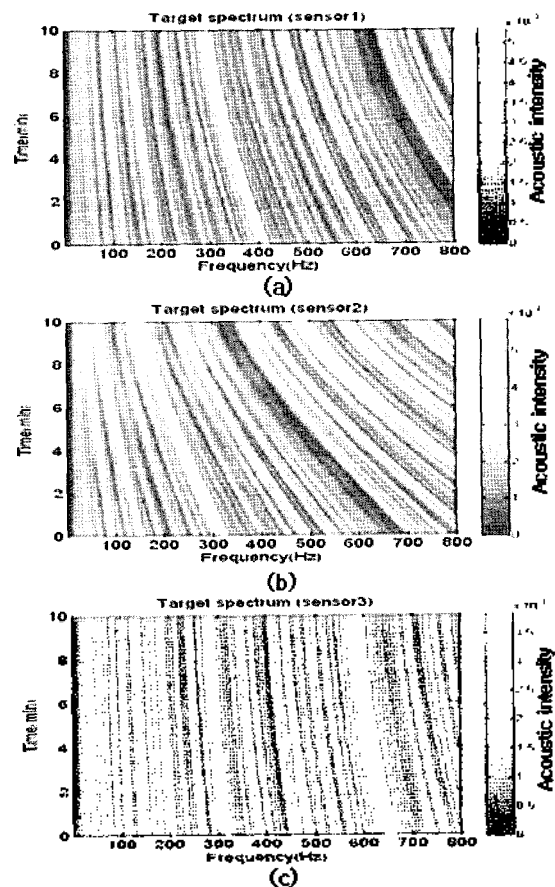


그림 4. (a) 센서 1 스펙트로그램 (b) 센서 2 스펙트로그램
(c) 센서 3 스펙트로그램
Fig. 4. (a) Sensor1 spectrogram (b) Sensor2 spectrogram
(c) Sensor3 spectrogram.

$$r_1 = nr_2 \tag{9}$$

r_1 과 r_2 는 표적과 두 센서간의 거리를 의미하고 n 은 임의의 실수값으로 거리비를 나타낸다. 그림 4에서 각 센서 스펙트로그램의 최대 강도 줄무늬의 주파수 특성은 표적과 센서간의 거리에 비례하므로 식 (9)와 동일하게 다음과 같이 적용 할 수 있다.

$$w_1 = nw_2 \tag{10}$$

각 센서 스펙트로그램에 대하여 식 (8)을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{dw_1}{w_1} = \beta \frac{dr_1}{r_1}, \quad \frac{dw_2}{w_2} = \beta \frac{dr_2}{r_2} \tag{11}$$

앞 절에서 언급했듯이 이상적인 Pekeris 도파관에서 β 는 불변하지만, 실제 해양환경에서 β 는 더 이상 불변성을 유지하지 못한다. β 가 변하더라도 표적과 센서 간격이 수 km이내인 두 센서 사이의 음파 전달환경이 동일하다고 가정하면 식 (11)의 두 센서에 영향을 미치는 β 도 같으므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{r_1}{dr_1} \frac{dw_1}{w_1} = \frac{r_2}{dr_2} \frac{dw_2}{w_2} \tag{12}$$

거리항과 주파수항에 대하여 재정리 하면 다음과 같다.

$$\frac{r_1}{r_2} \frac{w_2}{w_1} = \frac{dr_1}{dr_2} \frac{dw_2}{dw_1} \tag{13}$$

식 (9)와 식 (10)을 식 (13)에 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$n = \frac{r_1}{r_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad \frac{dr_2}{dr_1} = \frac{dw_2}{dw_1} \tag{14}$$

두 개의 센서에 나타나는 최대 강도 줄무늬의 주파수 비율은 표적에서 두 센서에 이르는 상대적인 거리비가 되고 이를 통해 본 논문에서는 표적의 위치를 기하학적으로 추정하고자 한다.

III. 제안된 위치 추정 알고리즘

본 논문에서는 3개의 센서를 사용하여 계산상으로 간단하고 실제 해양환경에서 환경 변수에 따라 변하는 β 와 무관하게 표적의 위치를 추정 할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 표적과 각 센서 사이의 음파 전달 환경이 같을 경우 식 (11)과 식 (12)에서 표적과 각 센서에 대한 β 의 영향은 서로 같으므로 각 센서 스펙트로그램에 나타나는 최대 강도 줄무늬의 기울기와 주파수 특성을 비교하여 표적과 센서들간의 상대적인 거리비를 추정 할 수 있다. 표적이 이동할 시 임의의 시점에서 표적과 두 센서간의 상대적인 거리비를 구하면 두 센서에서 거리의 비가 일정한 표적의 자취를 유추 할 수 있는데 본 논문에서는 아폴로니오스 원의 이론을 적용하였다. 아폴로니오스의 원은 두 정점에서 이르는 거리의 비가 일정한 값을 가지는 점의 자취로 정의되며, 단 두 정점에서 이르는 거리의 비가 1이 될 때는 두 정점을 잇는 선분의 수직 이등분선이 된다. 그림 5는 아폴로니오스 원을 나타내며 표적에서 두 센서에 이르는 거리비 $m:n$ 은 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$m:n = AP:BP = AC:BC = AD:BD \tag{15}$$

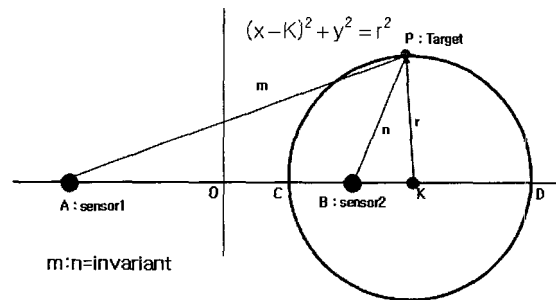


그림 5. 아폴로니오스의 원
Fig. 5. Circle of Apollonios

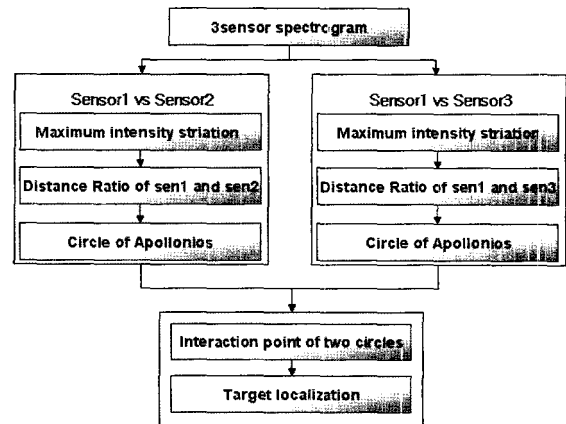


그림 6. 제안된 위치추정 알고리즘의 절차
Fig. 6. Procedure of proposed localization algorithm.

센서 1과 센서 2에 대응하는 A와 B의 좌표를 각각 $(-a, 0)$, $(a, 0)$ 라 두면 원의 중심과 반지름은 다음과 같다.

$$K = \frac{(m^2 + n^2)a}{(m^2 - n^2)}, \quad r = \frac{2mna}{(m^2 - n^2)} \quad (16)$$

두 개의 센서를 이용할 경우 그림 5의 아폴로니오스 원을 이용하여 거리비가 일정한 표적의 자취는 구할 수 있지만 정확한 표적의 위치는 추정 할 수 없다. 그러므로 3 개의 센서를 사용하여 표적과 각 센서간의 거리비에 대응하는 두 개의 아폴로니오스 원을 형성한 후 두 원의 교점을 표적의 위치로 추정하였다. 제안된 위치추정 알고리즘의 절차가 그림 6에 나와 있다. 표적과 각 센서간의 상대적인 거리비를 구하기 위해서는 최대 강도 줄무늬의 주파수를 구하여 이를 거리비로 환산하는데 다음과 같은 피크 검출식을 통하여 추정하였다.

$$w_{\max}(t) = \arg \max_w S(w, t) \quad (17)$$

여기서 $S(w, t)$ 는 시간 t 에서 신호의 스펙트럼을 나타낸다. 식 (17)을 이용하여 그림 4의 3개 센서 스펙트로그램에 대한 최대 강도 줄무늬의 주파수 변화를 나타낸 결과가 그림 7에 나와 있다. 표적이 가장 가깝게 이동하는 센서 2의 경우 줄무늬가 상대적으로 가장 작은 주파수에서 발생하고 시간에 따른 거리 변화율이 크므로 이에 비례하여 줄무늬 패턴의 변화도 크다. 이에 비해 표적이 가장 멀게 이동하는 센서 3의 경우 줄무늬가 상대적으로 가장 큰 주파수에서 발생하며 거리 변화율이 작은 만큼 줄무늬 패턴의 변화도 작다. 그림 7에 나와 있는 줄무늬의 주파수 추정치를 각각 센서 1과 센서 2, 센서 1과 센서 3에 대한 상대적인 거리비로 환산한 결과가 그림 8에 나와 있

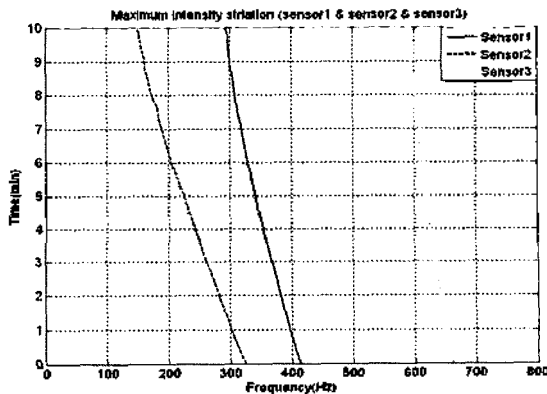


그림 7. 센서 1, 센서 2, 센서 3에 대한 최대 강도 줄무늬의 주파수 변화
Fig. 7. Frequency variation of maximum intensity striation for sensor 1, sensor 2 and sensor 3.

다. 센서 1과 센서 3의 거리비를 나타내는 그림 8 (b)의 경우 실제 거리비와 추정된 거리비가 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 반면에 센서 1과 센서 2의 거리비를 나타내는 그림 8(a)의 경우에는 시간에 따라 실제 거리비와 추정된 거리비 간의 오차가 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 4의 센서 2 스펙트로그램에 나타나 있듯 표적이 점점 가까워짐에 따라 최대 강도 줄무늬의 폭이 넓어져 식 (17)을 이용한 주파수 검출 과정에서 오차가 발생했기 때문이다. 비록 오차는 발생하지만 전체적으로 오차 0.1이내의 정확한 거리비를 추정하고 있고, 시간에 따른 실제 거리비와 유사한 패턴을 나타내고 있으므로 추정된 거리비를 위치 추정 알고리즘에 적용하였다. 그림 8의 추정된 거리비 min을 그림 5의 아폴로니오스 원에 적용시켜 표적의 위치를 추정하는 것이 가능함을 확인하기 위해 0분에서 위치 추정 결과가 그림 9에 나와 있다. 센서 1, 센서 2의 거리비에 대한 아폴로니오스 원과 센서 1, 센서

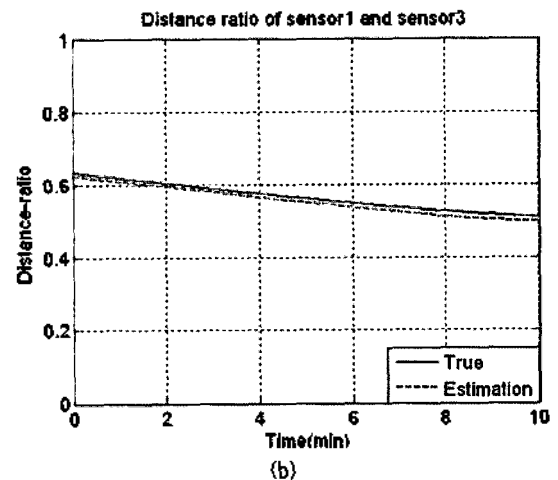
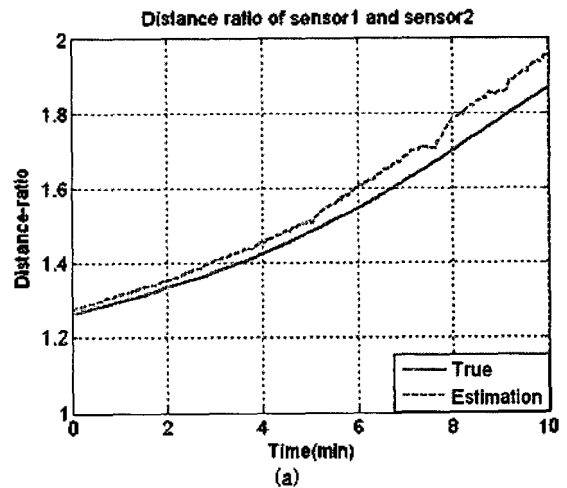


그림 8. (a) 센서 1과 센서 2에 대한 거리비
(b) 센서 1과 센서 3에 대한 거리비
Fig. 8. (a) Distance ratio of sensor1 and sensor 2
(b) Distance ratio of sensor1 and sensor 3.

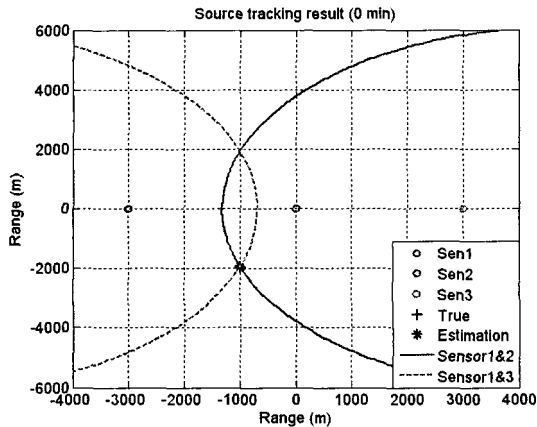


그림 9. 0분에서 표적 추정결과
Fig. 9. Source tracking result at 0 minute.

3의 거리비에 대한 아폴로니오스 원이 서로 교점을 형성하고 있다. 그림 9에 나타난 두 원의 교점은 x 축을 대칭으로 두 개가 나타나는데, 본 논문에서는 초기 표적의 위치를 알고 있다는 가정하에 해상에서의 기동 특성을 고려하여 한쪽의 교점만 표적의 위치로 간주하였다. 교점이 실제 표적의 위치와 유사한 지점에서 형성됨을 확인 할 수 있다. 실제 표적의 좌표는 (-1000m, -2000m), 추정된 표적의 좌표는 (-1001m, -1936m)로 좌표중심 (0m,0m)에서의 x-y 좌표에 대한 거리 추정 오차율은 2.85%의 정확한 결과를 나타내었다. 표적과 센서간의 거리비를 적용한 아폴로니오스 원을 이용하여 표적의 위치 추정이 가능하며 4장에서 다양한 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안된 위치 추정기법의 성능을 분석하기 위해 그림 2와 같은 거리독립 음향 도파관에서 시뮬레이션이 수행되었다. 표적과 센서의 수심은 각각 50m이며, 1~800Hz의 광대역 신호를 수신한다고 가정한다. 수중과 해저의 음속 구조는 각각 1500m/s, 1600m/s로 균일하며 도파관의 수심은 100m이다. 수신단의 음장은 KRAKEN 정상모드 프로그램을 이용하여 모의하였다 [11]. 위치추정 시뮬레이션은 그림 10과 같이 총 3가지 표적의 이동경로에 대하여 이루어졌다. 센서간의 간격은 3km이고 각 case에 대하여 표적은 5knot의 속도로 약 32.4분 동안 총 5km를 이동한다.

식 (17)을 이용하여 센서별 최대 강도 줄무늬의 주파수를 검출한 후 이를 센서 1과 센서 2, 센서 1과 센서 3에

대한 거리비를 추정하였다. 표적이 이동을 시작해서 약 1.6분 간격으로 아폴로니오스 원이 형성하는 교점의 좌표를 추정 하였다. 3가지 case에 대한 표적의 위치 추정 결과가 각각 그림 11, 그림 12, 그림13에 나와 있고 추정된 위치에서 3개 센서에 대한 거리가 그림 14, 그림 15, 그림 16에 나와 있다. 표 1의 Sensor1, Sensor2, Sensor3은 각 case별 추정된 표적 위치에서 3개 센서에 이르는 평균 거리 오차율을 나타낸다. Tracking

error는 좌표 중심 (0,0)에서 추정된 표적의 위치가 실제 표적의 위치에서 벗어난 정도를 나타내는 평균 오차율을 의미한다. Case1에 대한 추정결과를 보면 실제 표적의 위치와 비교해서 오차가 발생하지만 전체적으로 정확한 지점의 좌표를 추정함을 확인 할 수 있다. 표적과 각 센서간의 평균 거리 추정 오차율은 4% 이내로 표적이 가깝게 이동하는 센서 2의 경우 시간에 따른 거리 변화율이 커서 센서 1과 센서 3에 비해 오차율이 크다. 센서 3의 경우 표적이 가장 멀게 이동하고 시간에 따른 거리 변화율이 작으므로 상대적인 오차율도 작은 것을 볼 수 있다. 좌표 (0,0)에서 표적에 대한 평균 거리추정 오차율은 6.47%이다. 그림 12의 case2에 대한 위치 추정 결과의 경우 case1에 비해 다소 오차가 크고, 특히 표적과 센서간의 거리가 가장 가까운 지점 CPA (Closest Point of Approach)부근에서 큰 오차가 나고 있다. 이는 실제 CPA 부근 표적의 지점은 두 개의 아폴로니오스 원이 거의 접선형태로 교점을 형성해야 하므로 거리비 추정오차에 의한 민감도가 크기 때문이다. 이 때, 거리비 추정오차가 커서 교점을 형성하지 못하는 경우에는 sensor2와 sensor3의 거리비를 적용한 아폴로니오스 원을 추가하여 표적의 위치를 추정 한다. 단, 세 개의 원이 모두 교점을 형성 하지 못할 경우에는 실제 교점이 형성된 지점은 아니지만 두 개의 원이 가장 근접한 위치의 중간지점을 표

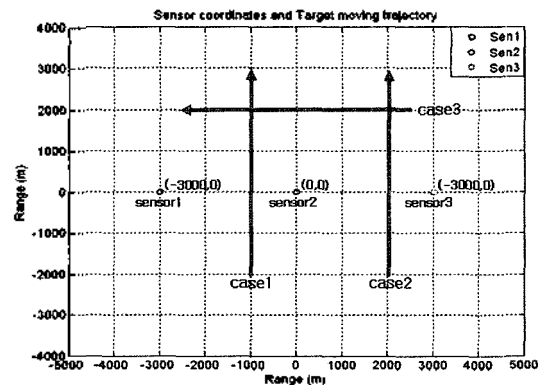


그림 10. 시뮬레이션 환경
Fig. 10. Simulation environment.

적의 위치라 가정한다. 표 1의 표적과 각 센서간의 거리 추정 오차율은 case1과 동일하게 표적이 가장 가까운 센서 3의 경우 오차율이 가장 크고 가장 먼 센서 1의 경우 오차율이 작은 특징을 보이고 있다. 좌표 (0,0)에서 표적에 대한 거리 추정 오차율은 10.17%로 case1에 비해 높으며 이는 아플로니오스 원에 적용되는 거리비 추정 오차에

의한 것이다. 결국 최대강도 줄무늬의 주파수 검출 과정에서 발생한 오차 때문이며, 줄무늬의 정확한 주파수 변화를 구하기 위해 시뮬레이션 수행시 모의신호의 주파수 분해능을 높이면 개선될 것으로 판단된다. case3의 경우에도 표적과 센서간의 거리 추정 오차율은 case1과 case2와 동일한 특징을 보이고 있음을 표 1을 통해 확인 할 수

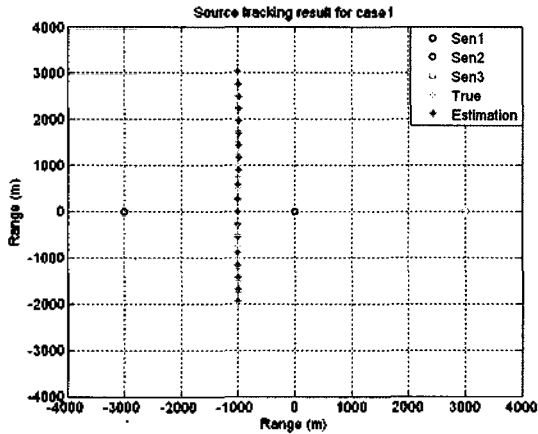


그림 11. Case1에 대한 표적 위치추정 결과
Fig. 11. Source tracking result for case 1.

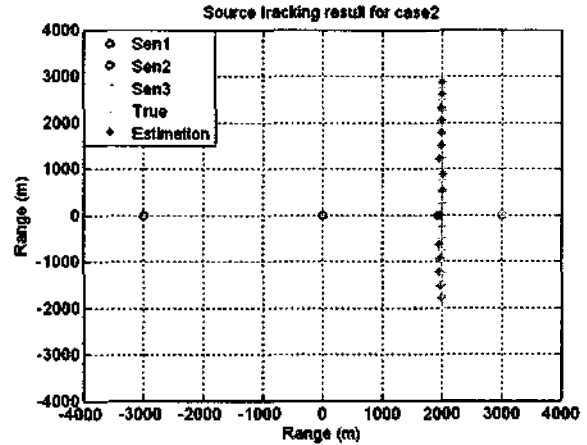


그림 12. Case2에 대한 표적 위치추정 결과
Fig. 12. Source tracking result for case 2.

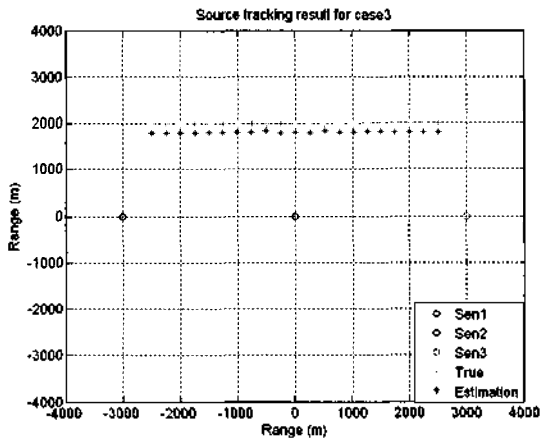


그림 13. Case3에 대한 표적 위치추정 결과
Fig. 13. Source tracking result for case 3.

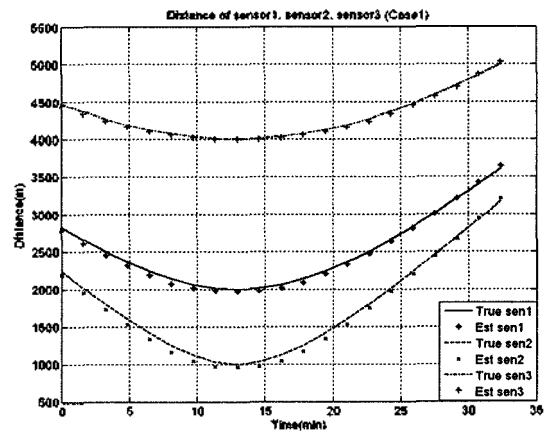


그림 14. Case1에 대한 표적과 3개 센서와의 거리
Fig. 14 Distance of source and three sensors for case 1.

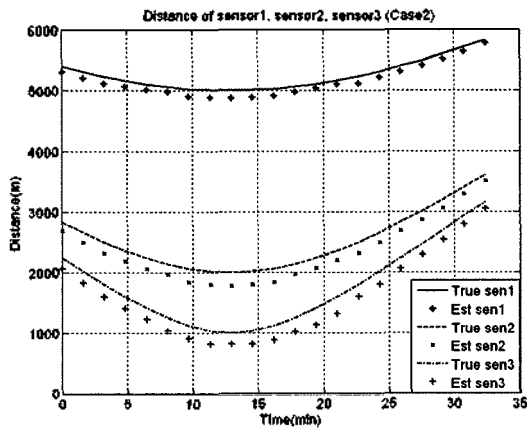


그림 15. Case2에 대한 표적과 3개 센서와의 거리
Fig. 15 Distance of source and three sensors for case 2.

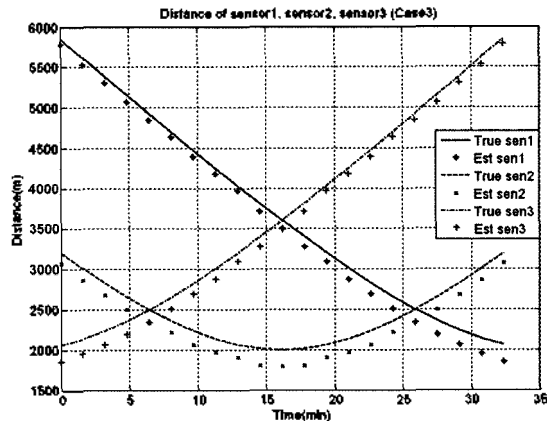


그림 16. Case3에 대한 표적과 3개 센서와의 거리
Fig. 16 Distance of source and three sensors for case 3.

표 1. 위치추정 오차율

Table 1. Error rates of target localization.

	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Tracking error(%)
Case1	1.54%	3.78%	0.56%	6.47%
Case2	1.51%	5.8%	10.48%	10.17%
Case3	3.88%	6.76%	3.88%	8.16%
Mean	2.3%	5.45%	4.97%	8.27%

있다. 표적의 거리 변화율이 가장 큰 센서 2의 오차율이 크며 상대적으로 변화율이 작은 센서 1과 센서 2는 상대적으로 오차율이 작다. 좌표 (0,0)에서 표적에 대한 평균 거리 추정 오차율은 8.16%이다.

3가지 case에 대한 각 센서별 평균 거리 오차율은 5% 내외로 case1과 case3에서 오차율이 높은 센서 2의 경우 가장 큰 오차율을 나타내고 있다. 3가지 case의 좌표 (0,0)에서 표적에 대한 평균 거리 오차율은 8.27%로 오차율 10% 이내의 위치 추정 성능을 가지므로, 제안된 위치추정 알고리즘을 이용하여 표적의 위치를 추정하는 것이 가능함을 확인 하였다.

V. 결론

본 논문에서 제안된 간섭 줄무늬의 기술기 변화를 이용한 거리 추정 기법은 표적과 센서의 거리비를 아폴로니오스의 원에 적용시켜 적은 센서의 수로도 음원의 위치를 추정할 수 있었다. 거리와 주파수의 함수로 나타나는 스펙트로그램의 간섭 줄무늬의 기술기는 표적의 거리에 비례하며 두 센서에 나타나는 줄무늬의 주파수 비율이 표적과 두 센서간의 거리비에 대응함을 이용, 3개의 센서를 사용하여 기하학적으로 표적의 위치를 추정 할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 위치를 추정한 결과 표적의 3가지 이동경로에 대하여 표적과 각 센서간의 평균 거리 오차율 5%내외, 좌표 (0,0)에서 평균거리 추정오차율 10%이내의 정확한 추정 결과를 보여 주었다. 결과를 통해 수중 광대역 신호의 위치 추정에 적용 할 수 있는 가능성을 확인하였다. 위치 추정 오차율을 줄이기 위해서는 줄무늬의 정확한 주파수 변화를 검출하는 기법 및 교차점 추정 기법에 관한 연구가 필요하다. 또한, 향후 실제 해상 실험 데이터에 적용시켜 성능의 분석이 필요하다. 본 논문에서는 거리독립 해양환경에 대한 성능을 분석하였지만 거리중속 환경에 대한 성능 분석이 필요하며, 음원의 종류 및 외부 잡음의 영향에 대한 연구도 병행 되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 나영남, 박정수, 정문섭, 최진혁 "전해 내부파에 의한 음파의 모드 간섭," 한국음향학회 학술대회지 17 (2) 125~128, 1998.
2. A. Tolstoy, *Matched-field processing for underwater acoustics*, (World Scientific, Singapore 1993).
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.*, 83, 571-587 (1988).
4. S. Lee and N. C. Makis, "The array invariant," *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (1) 336~351, Jan. 2006.
5. 김세영, 천승용, 김부일, 김기만 "Array Invariant를 이용한 수중 광대역 음원의 거리 추정성능 분석," 한국음향학회지, 25 (6) 305-311, 2006
6. 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)
7. T. C. Yang, "Beam intensity striations and applications," *J. Acoust. Soc. Am.* 113 (3), 1342-1352 (2003)
8. 박정수, "이동하는 다중표적의 정합장처리," 한국해양대학교 박사학위논문 (2006)
9. L. M. Brekhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, (3rd ed. springer, New York, 2003)
10. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, (AIP, New York, 1994)
11. M. B. Porter, *The KRAKEN Normal Mode program*, (SACLANT Undersea Research Centre, 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

• 김 기 만 (Ki-Man Kim)

한국음향학회지 제22권 제5호 참조