

# 확률적 방향각 추정에 기반한 수중 음원의 위치 인식 기법

## Underwater Acoustic Source Localization based on the Probabilistic Estimation of Direction Angle

최진우<sup>1</sup>, 최현택<sup>†</sup>

Jinwoo Choi<sup>1</sup>, Hyun-Taek Choi<sup>†</sup>

**Abstract** Acoustic signal is crucial for the autonomous navigation of underwater vehicles. For this purpose, this paper presents a method of acoustic source localization. The proposed method is based on the probabilistic estimation of time delay of acoustic signals received by two hydrophones. Using Bayesian update process, the proposed method can provide reliable estimation of direction angle of the acoustic source. The acquired direction information is used to estimate the location of the acoustic source. By accumulating direction information from various vehicle locations, the acoustic source localization is achieved using extended Kalman filter. The proposed method can provide a reliable estimation of the direction and location of the acoustic source, even under for a noisy acoustic signal. Experimental results demonstrate the performance of the proposed acoustic source localization method in a real sea environment.

**Keywords:** Acoustic Source Localization, Bayesian update, Generalized Cross Correlation (GCC), EKF

### 1. 서론

최근 심해 자원에 대한 개발과 수중 작업에 대한 다양한 요구가 증대됨에 따라, 수중 로봇의 활용도 또한 높아지고 있다. 수중 로봇은 심해 환경 탐사, 수중 작업, 해상 구조 등 다양한 분야로의 적용 가능성을 확대해가고 있다. 이러한 수중 로봇의 활용을 위해서는 수중 환경 인식, 자기 위치 인식, 자율 주행 기술의 개발이 필수적이다. 하지만, 지상 로봇과는 달리 수중 환경에서는 GPS, 레이저 스

캐너, 광학 카메라 등의 센서 정보를 활용하기 어렵다. GPS는 수중 로봇이 수면 위를 주행할 때에만 적용 가능하며, 광학 카메라 역시 탁도 등에 따른 영향으로 매우 제한적으로만 사용 가능하다. 따라서, 수중 환경에서의 로봇 시스템 적용을 위해서는 음향 신호가 매우 유용하게 사용된다<sup>1)</sup>. 음향 신호는 수중 환경에서 비교적 빠른 전달 속도를 가지며, 또한 낮은 감쇄율로 인해 LBL(Long Baseline), SBL(Short Baseline), USBL (Ultra Short Baseline), GIB(GPS Intelligent Buoys) 등의 위치 인식 시스템에 적용될 뿐만 아니라, 어뢰 탐지, 수중 무선 통신 등의 다양한 분야에 적용되고 있다<sup>2-5)</sup>.

수중 음향 신호를 수중 로봇의 자율 주행에 적용하기 위해서는 음원의 위치 인식이 필수적이다. 수중 로봇은 음원 위치 인식 기술을 통해 수중 음향 환경을 인식할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 통해 자기 위치 인식을 수행할 수 있다.

음원 위치 인식 기술은 수중 및 지상의 로봇 시스템에

Received : Aug. 15. 2014; Reviewed : Sep. 9. 2014; Accepted : Oct. 2. 2014

※ This work has been done by "Development of technologies for an underwater robot based on artificial intelligence for highly sophisticated missions." funded by Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO) and "Development of an autonomous swimming technology with less than 1.0m position error for underwater robot operating in man-made structural environment" funded by Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE).

<sup>†</sup> Corresponding author: Ocean System Engineering Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea (htchoi@kriso.re.kr)

<sup>1</sup> Ocean System Engineering Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (jwchoi@kriso.re.kr)

적용을 위해 다양한 기법들이 제안되어 왔다. 가장 기본적인 방법은 음원에서 발신된 신호가 수신기에 도달하는 도달시간의 측정을 통해 위치 인식을 수행할 수 있다. 하지만 이 방법은 수신기와 발신 음원 간의 시간 동기화가 필요하다. 다른 방법으로는 서로 다른 수신기 간의 도달시간 지연을 측정하고 이로부터 발신 음원의 위치를 추정하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 도달시간지연 측정을 위해서는 수신 센서 신호 간의 상호상관계수를 측정하는 방법이 기본이 된다. 상호상관계수 분석은 주파수 영역에서 가중치 함수를 곱해주는 일반화된 상호상관분석 방법으로 확장되어, 지금까지 다양한 시스템에 적용되어 왔다<sup>6,8)</sup>. 또한, 수중 소음 환경에서의 소음원 위치 추적을 위해 상호스펙트럼 분석을 통한 도달시간지연 추정 방법이 이용되기도 하였으며<sup>9)</sup>, 수신 신호를 subspace로 변환하여 도달시간 지연 추정을 수행하는 방법도 사용되어 왔다<sup>10)</sup>. 이 외에도, 수신 센서 간의 거리가 좁은 경우에는 신호의 위상차를 이용한 음원 위치 추정 방법이 제안되기도 하였다<sup>11)</sup>.

확률 기반의 음원 위치 추정으로는 파티클 필터를 이용한 방법이 제안되기도 하였으나<sup>12)</sup>, 파티클 필터는 그 특성 상 실제 수중 로봇 자율 주행 적용 시 실시간 구현이 쉽지 않다. 뿐만 아니라, 해당 방법은 상호상관계수 분석으로부터 미리 정해진 수의 최대값을 이용하는 특성 상 잘못된 방향각 추정의 가능성이 존재한다.

본 논문에서는 수중 로봇의 자율 주행에 적용하기 위한 수중 음원 위치 추정 기법을 제안한다. 제안된 방법은 두 개의 하이드로폰을 장착한 수중 로봇 시스템을 대상으로 하며, 도달시간지연 기반의 위치 추정을 수행한다. 일반적으로 수중 음원의 위치를 결정하기 위해서는 3개 이상의 하이드로폰이 필요하지만, 본 논문에서는 방향각 정보와 함께 로봇의 모션 정보를 활용하여 다양한 위치에서 얻어진 방향각 정보를 누적하여 수중 음원의 위치 인식이 가능하도록 한다.

제안된 방법은 크게 두 단계로 구성된다. 먼저, 연속적인 음향 신호를 이용하여 베이저안 확률 기반의 도달시간 지연 추정을 수행한다. 다음으로, 다양한 위치에서 얻어진 방향각 정보로부터 음원의 위치를 추정한다. 이 때, 위치 추정은 EKF (Extended Kalman filter)를 통해 이루어진다. 제안된 방법은 베이저안 확률 프로세스<sup>13)</sup>를 통해, 잡음 정보

혹은 잘못된 음향 신호 추출 등으로 인해 음향 신호 정보가 일시적으로 왜곡된 경우에도 비교적 안정적인 도달시간지연 추정이 가능하도록 한다. 또한, 이렇게 얻어진 방향각 정보를 누적한 수중 음원 위치 인식을 통해 수중 로봇이 수중 음원 정보를 자율 주행에 활용할 수 있도록 하는 기반을 제공한다.

이러한 과정으로 구성되는 본 논문이 기여하는 바는 다음과 같다. 먼저, 일반적으로 3개 이상의 하이드로폰을 통해 음원의 위치가 결정되는 기존 방법들과는 달리, 본 논문은 두 개의 하이드로폰을 이용해 음원의 방향각을 추정하고, 수중 로봇의 이동 정보를 이용한 음원의 위치 인식 방법을 제안한다. 두 번째로, 현재 시점에서 얻어진 음향 신호 정보만을 이용해 음원의 방향각을 결정하는 기존의 방법들과는 달리, 제안된 방법은 과거부터 얻어진 모든 음향 신호 정보를 이용해 확률적으로 음원의 방향각을 추정한다. 마지막으로, 본 논문은 음향 신호의 추출, 확률적 방향각 추정, 그리고 EKF를 이용한 음원 위치 인식 과정을 하나의 구조에 담아 실험 환경에서 실험적으로 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 도달시간지연 기반의 음원위치인식 방법에 대한 문제정의와 함께, 제안된 방법의 전체 구조를 설명한다. 3장은 확률 기반의 수중 음원 방향각 추정을 제안하고, 4장에서는 방향각 누적을 통한 음원 위치 인식 방법을 설명한다. 5장은 실험 결과를 보여주며, 6장의 결론이 뒤따른다.

## 2. 문제 정의

### 2.1 수중 음향 신호

수중 환경은 생물체에 의한 음향 신호, 선박 등의 장치에 의해 발생하는 음향 신호, 이 외에도 다양한 잡음 정보의 음향 신호가 존재한다. 이들 음향 신호는 그 특성에 따라 아래와 같이 구분될 수 있다.

- 발신 신호의 특성에 따른 구분: 인공음, 자연음
- 발신 주기에 따른 구분: 주기적, 비주기적, 일회성 신호
- 사전정보 유무에 따른 구분: 주파수 성분, 신호의 길이 등이 알려진 신호, 미지의 신호

수중 음원 위치 인식 관점에서 보았을 때, 이들 신호 중

가장 추정이 어려운 음향 신호는 미지의 자연음이 비주기적 혹은 일회성으로 발생하는 것이다. 반면, 상대적으로 위치 인식이 쉬운 신호는 이미 알려진 인공음이 주기적으로 발생하는 것이다. 본 논문에서는 미리 주파수 대역을 알고 있는 인공음을 수중 음파 발생기를 통해 발생시켜 줌으로써, 해당 신호의 음원 위치를 추정하도록 한다. 수중 음향 신호의 발생주기는 주기적, 비주기적 신호 모두를 대상으로 하였으나, 연속적인 시간에서 얻어지는 음향 신호를 이용한 확률 기반 방향각 추정을 위해 일회성 발신 신호는 고려하지 않는다.

2.2 도달시간지연 기반 방향각 추정

도달시간지연을 이용한 수중 음원의 방향각 추정은 Fig. 1과 같이 서로 다른 두 개의 하이드로폰을 이용하여 동일한 음원의 신호를 인식하여 이루어진다. 동일한 음향 신호를 두 하이드로폰으로 취득하였을 때, 취득된 두 신호 사이에는 도달시간지연차( $\delta_t$ )가 존재한다. 도달시간지연 값이 정해졌을 때, 이로부터 얻어지는 음원의 위치  $S(x_s, y_s)$ 는 식 (1)로부터 결정된다.

$$dist(H_1, S) - dist(H_2, S) = C \cdot \delta_t \quad (1)$$

여기에서  $dist(H_1, S)$ 와  $dist(H_2, S)$ 는 두 하이드로폰과 음원 사이의 거리를 나타내며,  $C$ 는 수중 음속이다.

식 (1)을 만족시키는 음원의 위치는 2차 함수로 표현되는 쌍곡선 상에 존재한다. 이렇게 2차 함수로 표현되는 쌍곡선은 하이드로폰과 음원의 거리가 멀어짐에 따라, 쌍곡선의 점근선으로 수렴하게 되며, 방향각 역시 수렴하게 된

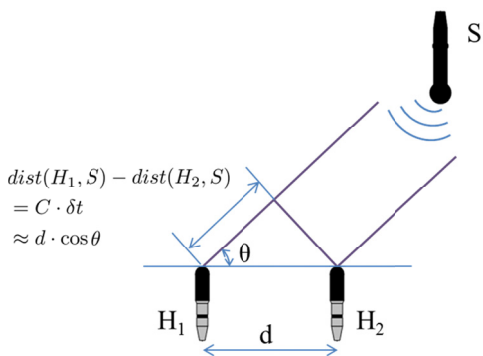


Fig. 1. Time difference of arrivals using two hydrophones

다. 따라서, 도달시간지연차로부터 얻어지는 음원의 방향각은 식 (2)와 (3)으로 단순화하여 얻어질 수 있다.

$$d \cdot \cos\theta = C \cdot \delta_t \quad (2)$$

$$\theta = \arccos(\delta_t \cdot C/d) \quad (3)$$

여기에서  $d$ 는 두 하이드로폰 사이의 거리이다.

2.3 확률적 방향각 추정 기반 음원 위치 인식 기법 구조

Fig. 2는 제안된 수중 음원 위치 인식 기법의 알고리즘 순서도이다. 두 하이드로폰을 통해 취득된 음향 신호는 대역통과필터를 적용하여 잡음을 제거한다. 다음으로 잡음이 제거된 음향 신호로부터 위치 인식 대상이 되는 신호의 추출을 수행한다. 이 과정은 대역통과필터 후 음향 신호의 세기를 측정하여, 특정 값 이상이 될 때 해당 신호를 음원 위치 인식에 사용하게 되는 것이다.

$$E_{signal} > E_{th} \quad (4)$$

만약, 위의 조건을 만족시키지 못하는 경우에는, 음원으로부터 신호가 발생되지 않은 것으로 간주하여 방향각 추정 및 위치 인식 과정을 수행하지 않고 계속적으로 음향 신호 취득을 수행한다.

취득된 음향 신호로부터의 음원 위치 인식은 일반화된 상호상관분석을 통한 초기 방향각 추정, 베이저안 프로세

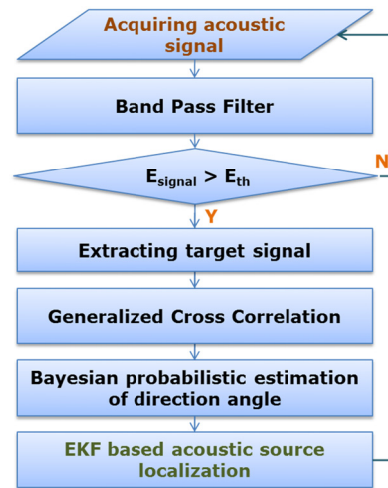


Fig. 2. A flowchart of the proposed acoustic source localization

스를 통한 최종 방향각 추정, 방향각 정보의 누적을 통한 위치 인식 수행의 과정을 통해 이루어진다. 3장과 4장에서 이에 대한 설명을 한다.

### 3. 수중 음원의 확률적 방향각 추정

앞 장에서 언급한 바와 같이, 수중 음원의 방향각 추정은 도달시간지연 기법을 통해 얻어진다. 따라서, 정확한 도달시간지연의 획득이 방향각 추정의 핵심이다. 제안된 방법에서는 정확한 도달시간지연 획득을 위해 베이지안 확률 추정을 이용한다. 연속적인 시간에서 얻어지는 센서 정보를 베이지안 확률 업데이트에 적용하여, 잡음 정보와 일시적으로 잘못된 음향 신호의 추출에도 안정적인 방향각 정보를 제공해 주도록 한다.

#### 3.1 일반화된 상호상관분석

베이지안 확률 업데이트를 위해서는 먼저 현재 음향 신호 정보를 이용한 도달시간지연의 추정값이 필요하다. 이를 위해 일반화된 상호상관분석을 이용한다. 두 하이드로폰에서 측정된 음향신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_1(t) = s(t) + n_1(t) \quad (5)$$

$$x_2(t) = a \cdot s(t - \delta_t) + n_2(t) \quad (6)$$

여기에서  $s(t)$ 는 음원으로부터 발신된 신호이며,  $a$ 는 두 하이드로폰 간의 신호감쇄율,  $n(t)$ 는 잡음 신호,  $\delta_t$ 는 도달시간지연이다. 두 신호를 이용한 상호상관분석은 (7)이 최대가 되는  $\tau$ 를 도달시간지연으로 간주하는 것이다.

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t - \tau)] \quad (7)$$

$$\delta_t = \operatorname{argmax}_{\tau} R_{x_1x_2}(\tau) \quad (8)$$

두 수신 신호 간의 상호상관계수  $R_{x_1x_2}$ 는 푸리에 변환을 이용하여 구할 수 있다. 즉, 푸리에 변환을 통해 두 신호의 상호스펙트럼함수를 얻고, 이를 다시 역푸리에 변환을 통해 상호상관계수를 얻을 수 있는 것이다.

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_1x_2}(w)e^{jw\tau} dw \quad (9)$$

$$S_{x_1x_2}(w) = X_1 \cdot X_2^* \quad (10)$$

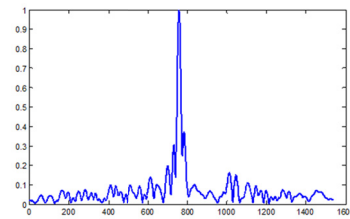
여기에서  $X_1$ 는  $x_1$ 의 푸리에 변환,  $X_2^*$ 는  $x_2$ 의 푸리에 변환의 복소켈레함수이다. 일반화된 상호상관분석 방법에서는 (9)의 과정에서 추가적으로 가중치 함수를 곱해줌으로써 더욱 정확한 도달시간지연 추정이 가능하도록 한다. 제안된 방법에서는 음원위치추정에 비교적 많이 사용되는 식 (11)의 PHAT 가중치 함수를 사용한다<sup>[4]</sup>.

$$\Psi(w) = \frac{1}{|X_1 \cdot X_2^*|} \quad (11)$$

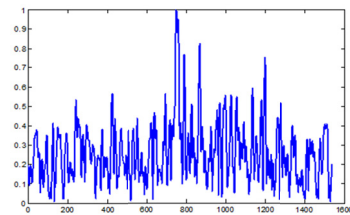
#### 3.2 확률적 방향각 추정

일반화된 상호상관분석에 의한 방향각 추정은 비교적 간단하게 구현되어 정확한 도달시간지연의 획득 및 방향각 추정이 가능하다는 장점이 있다. 하지만, 수중 음향 신호는 다양한 잡음 정보, 잔향 음향 신호, 반사파 등의 요인에 따라 왜곡될 수 있다. 뿐만 아니라, 음향 신호 추출 과정에서 대상 음원에서 발신된 음향 신호가 아닌 잘못된 신호의 추출이 이루어질 수 있다. 이러한 경우, 일반화된 상호상관분석 방법은 현재의 센서 정보만으로 방향각 추정을 수행하여 잘못된 결과를 야기할 수 있다.

Fig. 3은 일반화된 상호상관분석 방법이 성공적으로 수행된 경우와 음향 신호의 왜곡으로 인해 정확하지 않은 결과를 얻게 된 결과를 비교하여 보여준다. Fig. 3(a)는 두 음



(a) Reliable estimation of generalized cross-correlation



(b) Unreliable estimation of generalized cross-correlation

Fig. 3. Examples of the generalized cross-correlation

향 신호 간의 상호상관분석이 정확하게 이루어져, 최대값이 현저하게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 3(b)는 음향 신호의 왜곡 등으로 인해 상호상관분석의 최대값이 두드러지게 나타나지 않아, 이로부터 정확한 도달시간지연을 추정하기 어렵다. 이러한 상호상관분석 방법의 단점을 보완할 수 있도록 제안된 방법은 베이지안 확률 업데이트를 통해, 일시적인 음향 신호의 왜곡 및 잘못된 신호 추출에도 안정적인 방향각 추정이 가능하도록 한다.

도달시간지연 획득을 위한 베이지안 업데이트 과정은 (12)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(\delta_t = \tau | z_{1:t}, u_{1:t}) &= \eta \cdot P(z_t | \delta_t = \tau, z_{1:t-1}, u_{1:t}) P(\delta_t = \tau | z_{1:t-1}, u_{1:t}) \\
 &= \eta \cdot P(z_t | \delta_t = \tau) P(\delta_t = \tau | z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기에서  $P(\delta_t = \tau)$ 는 t 시점에서 두 하이드로폰 사이의 도달시간지연이  $\tau$ 일 확률이고,  $z_{1:t}$ 와  $u_{1:t}$ 는 신호 취득 시간 1부터 t까지에서 얻어진 음향 신호 정보와 모션정보이다. 식 (12)의 오른쪽 항은 세 부분으로 구성된다. 첫 번째 부분은 normalization 계수이며, 두 번째 부분은 likelihood로 현재 음향 신호로부터 얻어진 도달시간지연 측정값이다. 세 번째 부분은 prior information으로 직전 시간까지의 정보를 통해 얻어진 도달시간지연 확률 값이다.

앞에서 얻어진 초기 방향각 추정 결과인 상호상관계수 분석 결과 (9)는 (12)의 likelihood 부분으로 사용될 수 있다. 다음으로, prior information 부분은 직전 시간에서 얻어진 도달시간지연 확률값으로부터 아래와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 P(\delta_t = \tau | z_{1:t-1}, u_{1:t}) &= \sum_{\kappa} P(\delta_t = \tau | \delta_{t-1} = \kappa, z_{1:t-1}, u_{1:t}) \\
 &\quad \cdot P(\delta_{t-1} = \kappa | z_{1:t-1}, u_{1:t-1}) \quad (13)
 \end{aligned}$$

식 (13)의 오른쪽 항은 도달시간지연의 모션 모델과 t-1 시간의 도달시간지연 확률값으로 구성된다. 도달시간지연의 모션 모델은 일반적인 수중 로봇의 이동 및 회전 속도가 크지 않고, 음향 신호의 취득 주기가 비교적 빠른 것을 고려하여 정규분포를 이용한 확률값 확산을 이용하였다. 이로부터, 확률값 확산 모델과 직전 확률 정보, 그리고 현

재 시간의 측정 값을 이용하여 현재 시간에서의 도달시간지연을 확률적으로 얻을 수 있다.

제안된 방법은 위의 과정을 통해 연속적인 시간에서 얻어진 음향 정보를 이용하여 안정적인 도달시간지연 정보의 획득이 가능하며, 이로부터 최종적인 수중 음원의 방향각 추정이 가능하다.

#### 4. 수중 음원 위치 인식

수중 음원 위치 인식은 베이지안 확률 기반으로 추정된 방향각 정보를 누적하여 수행된다. 즉, 삼각법 기반으로 서로 다른 위치에서 얻어진 방향각 정보의 누적을 통해 수중 음원의 위치를 추정한다 (Fig. 4).

음원의 위치 인식을 위해서는 다양한 알고리즘들이 적용될 수 있다. 가장 기본적인 방법으로는 여러 위치에서 얻어진 방향각 정보들의 조합으로부터 얻어지는 교점들의 최소사승법 해를 구하는 방식이 있다. 또한, 확률적 추정 방법으로는 파티클 필터와 EKF 방법 등이 대표적으로 사용될 수 있다. 파티클 필터는 선형화 과정이 없어 비선형적인 특성을 알고리즘적으로 반영할 수 있는 장점이 있으나, 파티클의 수에 따라 성능이 결정되는 단점이 있고, 너무 많은 파티클의 사용은 계산량의 증가로 실시간 구현상의 어려움을 가진다. EKF 기반의 위치 인식은 센서 정보를 백색 잡음의 정규분포로 가정하고, 비선형 식을 매 시점에서 얻어지는 추정값을 기준으로 선형화하는 과정을 통해 얻어진다. 백색잡음 및 정규분포 가정으로 인해, 센서 정보가 bias된 경우 정확한 결과를 얻지 못할 수 있고, 또한, 비선형 식의 선형화 과정으로 인해 오차가 존재할 수 있다. 하지만, 수중 로봇의 특성 상 허용 오차범위가 비

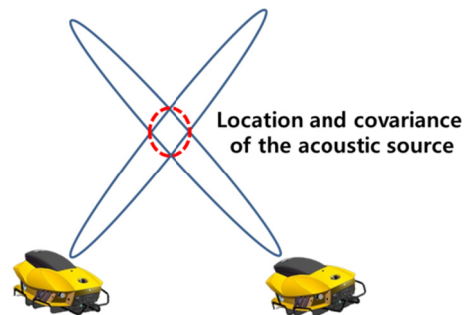


Fig. 4. Underwater acoustic source localization using EKF

교적 크고, 위치 추정에 사용되는 상태벡터의 크기가 크지 않은 점, 그리고 알고리즘 구현의 간편성으로 인한 실시간 구현 상의 장점을 고려하여 본 논문에서는 EKF 기반의 위치 인식을 이용하였다.

음원의 위치인식을 위해 필요한 수중 로봇의 위치는 다른 센서 정보들로부터 제공된다고 가정한다. 수중 음원 위치 인식을 위한 EKF에서 사용되는 상태벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_s(t) \\ y_s(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

위 식에서,  $x_s(t)$ 와  $y_s(t)$ 는 시간  $t$  에서 추정된 기준좌표계 상에서의 수중 음원의 위치이다.

#### 4.1 초기 음원 위치 설정

EKF를 통한 수중 음원의 위치 인식을 위해서는 처음으로 얻어진 음원의 방향각 정보로부터 음원의 위치를 초기화하여야 한다. 이때, 수중 음원까지의 거리값이 사용 가능하지 않으므로 방향각 만을 이용한 초기 음원 위치 설정이 필요하다. 이를 위해, 본 논문에서는 임의의 초기 거리값과 함께 충분히 큰 초기 거리 불확실성(covariance)을 설정함으로써 음원 위치를 초기화하였다.

$$\begin{aligned} X(0) &= \begin{bmatrix} x_s(0) \\ y_s(0) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_v(0) + r_{init} \cos(\theta_v(0) + \theta(0)) \\ y_v(0) + r_{init} \sin(\theta_v(0) + \theta(0)) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

여기에서  $\theta(0)$  는 처음으로 얻어진 음원의 방향각이며,  $x_v(0)$ ,  $y_v(0)$ ,  $\theta_v(0)$ 는 이 때의 로봇 위치와 heading 정보이고,  $r_{init}$ 은 음원 위치의 초기화를 위해 미리 주어진 임의의 초기 거리값이다. 이에 대한 초기 공분산은 (16)으로 표현된다.

$$P(0) = J \cdot \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix} \cdot J^T \quad (16)$$

여기에서  $\sigma_r$ 과  $\sigma_\theta$ 는 거리와 각도에 대한 분산값이며,  $J$ 는  $r$ 과  $\theta$ 에 대한 (15)의 Jacobian 행렬이다.

#### 4.2 EKF 기반 음원 위치 추정

EKF를 이용한 상태벡터의 추정은 크게 두 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 prediction 단계이며, 두 번째 단계는 correction 단계이다. Prediction 단계는 식 (17)과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{X}(t) = f(X(t-1), t) \quad (17)$$

여기에서, 상태 벡터가 수중 음원의 위치로 표현되었기 때문에 prediction 단계의 Jacobian matrix  $F$ 는 identity 행렬로 나타낼 수 있다.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Correction 단계는 식 (19)로 표현되는 측정 모델과 실제로 측정된 센서 값을 통해 상태 벡터를 보정하는 단계이다.

$$z(t) = h(X(t)) \quad (19)$$

여기에서 측정 모델은 음원의 방향각 정보에 대한 식으로 (20)과 같이 표현된다.

$$h(X(t)) = \tan^{-1} \left( \frac{y_s(t) - y_v(t)}{x_s(t) - x_v(t)} \right) - \theta_v(t) \quad (20)$$

$x_v(t)$ ,  $y_v(t)$ ,  $\theta_v(t)$ 는 수중 로봇의 위치 정보로, 언급한 바와 같이 외부 센서 정보로부터 제공된다고 가정하였으며, 수중 로봇의 위치에 대한 부정확성은 고려하지 않았다.

### 5. 실험 결과

제안된 수중 음원 위치 추정 기법의 성능을 검증하기 위해, 한국해양과학기술원 남해연구소 내의 실험역에서 실험이 수행되었다. 실험을 위한 수중 음원은 B&K 8105 하이드로폰을 통해 20~30 kHz의 주파수 대역을 가지는 신호를 발신하였고, 음향 신호의 취득은 B&K 8103 두 개의 하이드로폰을 통해 수행되었다 (Fig. 5). 두 개의 수신 하이드로폰은 100kHz의 속도로 음향 신호를 취득하고 음원의 위치 인식을 수행하였다. 실험의 편의성을 위해 하이드로폰

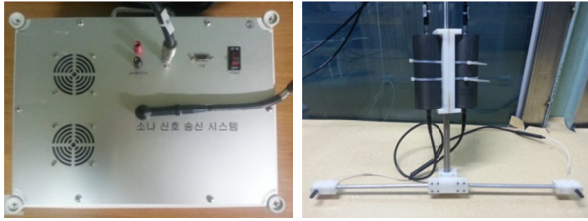


Fig. 5. Acoustic signal transmission system and the receiving hydrophones

은 수면에서 이동하였으며, 수중 음원 위치 인식에 필요한 수신부의 위치 정보는 DGPS와 magnetic compass로부터 획득하였다.

Fig. 6은 실험을 위해 설치된 음원의 위치와 수신 하이드로폰의 이동경로를 나타낸다. 수신 하이드로폰은 경로의 왼쪽 위에서부터 오른쪽 아래로 이동하여, 해당 경로를 1회 왕복하며 음원 위치 인식을 수행하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 수중 음원의 방향각 추정 결과를 보여준다. Fig. 7은 상호상관분석을 이용한 방향각 추정 결과이며, Fig. 8은 제안된 베이지안 확률 기반의 방향각 추정 결과이다. 방향각 추정의 성능 검증을 위해, DGPS와 magnetic compass 정보로부터 기준 각도를 얻고 추정된 각도와 비교하였다. 상호상관분석을 이용한 방향각 추정은 전체적으로 기준 각도와 유사한 경향을 보이나, 잡음 정보 등의 원인으로 인해 일부 구간(0~20초, 75~85초, 120~125초)에서 방향각 정보가 안정적인 결과를 보여주지 못한다(Fig. 7(a)). 이로 인해, 기준각도와와의 오차가 10도 이상인 구간이 상당수 존재함을 확인할 수 있다(Fig. 7(b)). 반면, Fig. 8(a)를 보면 제안된 확률적 방향각 추정을 통해 얻어진 각도값이 기준 각도와 경향 및 값에서 큰 차이가 없는 것을 확인할

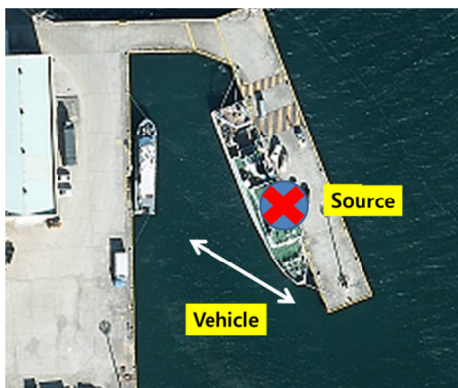
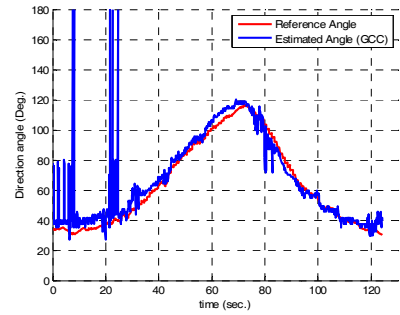
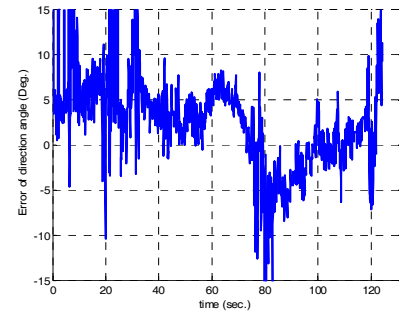


Fig. 6. Experimental setup



(a) Estimated direction angle using generalized cross-correlation



(b) Error of the estimated direction angle

Fig. 7. Experimental result of the direction estimation of underwater acoustic source using generalized cross-correlation

수 있다. Fig. 8(b)는 기준각도와 추정각도의 오차를 보여준다. 얻어진 오차는 대체적으로  $\pm 5$ 도 범위 내에 존재하며, 최대 오차는 약 9도로 늘어났다. 오차에 대한 원인은 다음과 같이 분석될 수 있다. 1) 기준 각도 자체의 오차: DGPS의 신호취득 속도가 음향신호취득 속도에 비해 비교적 느린 점으로 인해 기준 각도 자체의 오차원인이 될 수 있다. 또한, magnetic compass의 각도 정보가 외부 자기장의 영향으로 왜곡되어 기준 각도에 오차가 포함될 수 있다. 이는 방향각 오차의 경향성으로부터도 확인할 수 있다. 경로의 오른쪽 아래 부분의 구조물 근처에서 오차가 크게 나타난 것으로 보아, magnetic compass 정보의 왜곡 가능성을 보여준다. 2) 각도추정의 오차: 도달시간지연은 음향 신호취득 주기(sampling time)에 영향을 받으므로 이에 따른 추정 오차가 존재한다. 이 외에도 잡음과 잔향 신호에 대한 영향 등의 각도 추정오차 원인이 존재할 수 있다.

제안된 방법은 일부 구간을 제외하고 전체적으로  $\pm 5$ 도 이내의 오차를 나타내고 있다. 또한, 상호상관분석 결과가

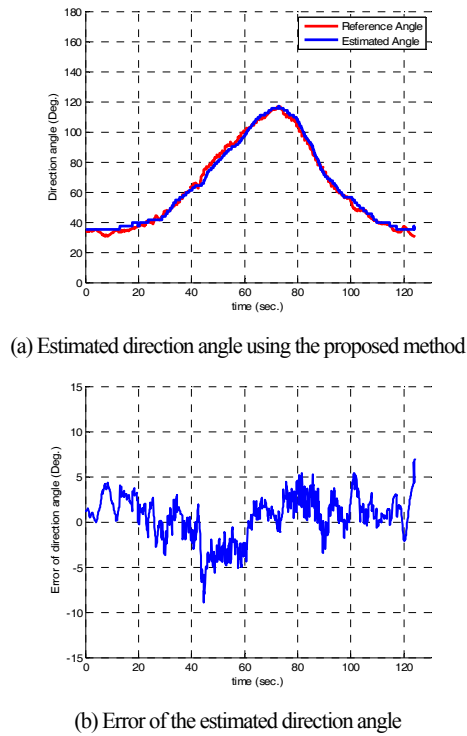


Fig. 8. Experimental result of the direction estimation of underwater acoustic source using the proposed method

안정적인 결과를 제공하지 못하는 경우에도 확률 기반의 추정을 통해 비교적 정확한 방향각을 얻을 수 있었다. 이러한 실험 결과는 제안된 방법이 수중 음원에 대한 안정적인 방향각 정보를 제공해 줄 수 있음을 검증한다.

Fig. 9는 추정된 방향각 정보를 이용해 수중 음원 위치 인식을 수행한 결과이다. Fig. 9에서 파란색 사각형은 DGPS로 측정된 실제 음원의 위치이며, 빨간색 십자가와 타원은 추정된 음원의 위치와 이에 대한 공분산을 나타낸다. 음원 위치의 초기화를 위해 식 (15)와 (16)의  $r_{init}$  은 50m,  $\sigma_r$ 은 25m,  $\sigma_\theta$ 는 10도가 사용되었다. 이러한 초기 거리값 및 공분산이 사용된 이유는 음원의 초기 공분산의  $2\sigma$  범위가 수신 하이드로폰으로부터 최대 100m 거리를 포함할 수 있도록 하기 위함이다.

Fig. 9(a)에서 보이는 바와 같이 음원의 초기 추정 위치는 매우 큰 공분산 범위를 포함하도록 설정된 것을 확인할 수 있다. 이렇게 크게 설정된 공분산의 범위는 시간이 지남에 따라 축소되어 최종적으로 Fig. 9(d)와 같이 추정되었으며, 최종 위치 오차는 0.5m로 줄어들었다.

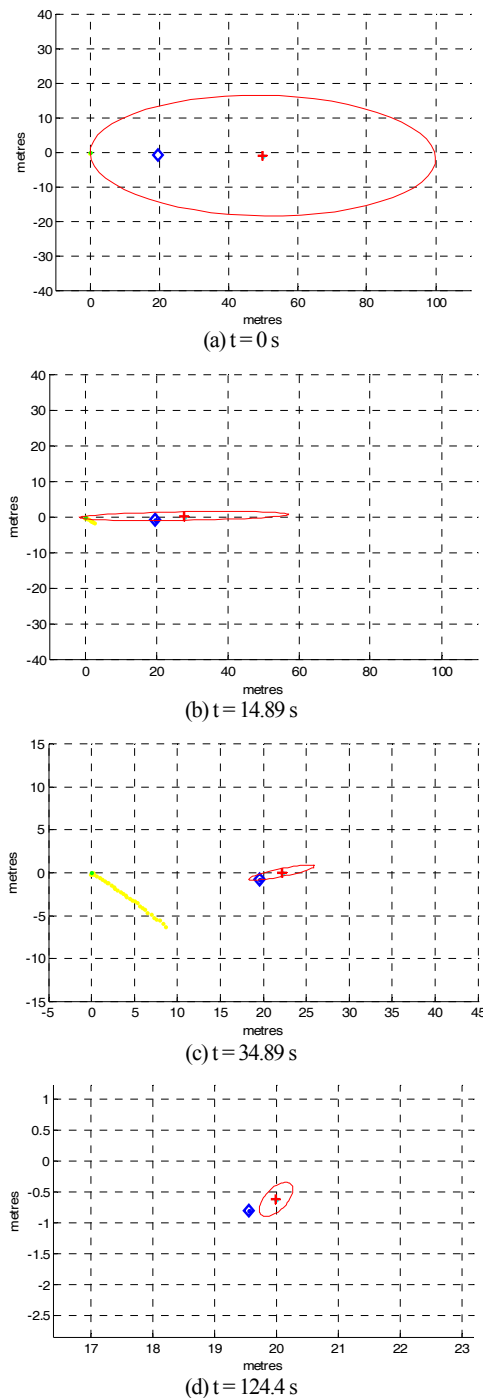


Fig. 9. Experimental result of acoustic source localization

Table 1은 초기 거리값과 공분산의 변화에 따른 최종 위치 오차를 보여준다. 네 가지 경우 모두 거리의 분산값  $\sigma_r$  은  $r_{init}$ 의 1/2로 설정하여, 초기 공분산의  $2\sigma$  범위가  $r_{init}$ 의 2배 범위를 포함할 수 있도록 하였다. 표에서 보이는



Table 1. Position error

	$r_{init} = 10$ $\sigma_r = 5$	$r_{init} = 30$ $\sigma_r = 15$	$r_{init} = 50$ $\sigma_r = 25$	$r_{init} = 70$ $\sigma_r = 35$
Error (m)	0.7792	0.5334	0.5007	0.4862

바와 같이, 네 가지 경우 모두 오차의 범위가 1m 내로 얻어졌다. 이러한 결과는 최종 오차가 초기 설정값에 민감하게 영향을 받지 않고 얻어질 수 있음을 보여준다. 이러한 수중 음원 위치 인식 결과는 제안된 방법이 실제 수중 로봇 시스템의 자율 주행에 적용될 수 있는 가능성을 검증해준다고 할 수 있다.

## 6. 결론 및 향후 계획

본 논문은 확률적 방향각 추정에 기반한 수중 음원 위치 인식 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 연속된 시간에서 얻어진 음향 신호 정보를 이용하여 확률 기반의 방향각 추정을 수행하였다. 베이저안 업데이트 과정을 이용한 확률적 방향각 추정을 통해 일시적인 잘못된 음향 신호의 추출과 잡음 정보에도 안정적인 수중 음원의 방향각 추정이 가능하도록 하였다. 이를 통해 얻어진 방향각 정보는 EKF 기반의 음원 위치 인식에 적용되었다. 서로 다른 위치에서 얻어진 방향각 정보의 누적을 통해 음원의 위치 인식이 가능하도록 하였다.

향후 계획은 관성 센서 기반의 수중 로봇 위치 인식 기법과 음원 위치 인식의 통합을 통해 수중 로봇의 자율 주행 기술 개발에 적용될 예정이다.

## References

- [1] H. T. Choi, S. M. Kim, S. H. Byun, and K. Kim, "Development of Underwater Robot & Underwater Acoustic Signal Recognition System," in Proceedings of the Conference on Information and Control Systems, pp. 53-54, 2010.
- [2] Y. Choi, J. Park, and Y. Lim, "An Adaptive Decision Feedback Equalizer for Underwater Acoustic Communications," Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 13, no. 4, pp. 645-651, 2009.
- [3] H. Kim, and Y. Kim, "Torpedo defense system research using HMS(Hull Mount Sonar) of PCC(Patrol Combat Corvette)," Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 16, no. 11, pp. 229-234, 2012.
- [4] A. Alcocer, P. Oliveira, and A. Pascoal, "Underwater Acoustic Positioning Systems based on Buoys with GPS," in Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 2006.
- [5] T. G. Kim, and N. Y. Ko, "Localization of an Underwater Robot Using Acoustic Signal," Journal of Korea Robotics Society, vol. 7, no. 4, pp. 270-274, 2012.
- [6] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal processing, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976.
- [7] P. B. Park, K. D. Ban, K. C. Kwak, and H. S. Yoon, "Performance analysis of GCC-PHAT-based sound source localization for intelligent robots," Journal of Korea Robotics Society, vol. 2, no. 3, pp. 270-274, 2007.
- [8] H. I. Ahmed, P. Wei, I. Memon, Y. Du, and W. Xie, "Estimation of Time Difference of Arrival (TDOA) for the Source Radiates BPSK Signal," International Journal of Computer Science Issues, Vol. 10, Issue 3, No. 2, pp. 163-171, 2013.
- [9] B. K. Ahn, Y. J. Go, Wook Rhee, J. S. Choi, and C. S. Lee, "Localization of Underwater Noise Sources Using TDOA (Time Difference of Arrival) Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 48, no. 2, pp. 121-127, 2011.
- [10] K. B. Smith, S. D. Koutreas, and C. W. Therrien, "Underwater Target Tracking Using Signal Subspace TDOA and Differential Doppler," Annual Conference of the Australian Acoustical Society, 2002.
- [11] R. Shimoyama and K. Yamazaki, "Acoustic source localization using phase difference spectrum images," Acoustic Science and Technology, vol. 24, no. 4, pp. 161-171, 2003.
- [12] J. W. Shin, J. Song, H. T. Choi, and P. G. Park, "Direction and Location Estimating Algorithm for Sound Sources with Two Hydrophones in Underwater Environment," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 19, no. 8, pp. 676-681, 2013.
- [13] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. Probabilistic Robotics. MIT Press, Cambridge, MA, 2005.
- [14] G. C. Carter, A. H. Nuttall, and P. G. Cable, "The smoothed coherence transform (SCOT)," in Proceedings of the IEEE, vol. 61, pp. 1497-1498, 1973.



**최진우**

2003 포항공과대학교 기계공학과 (학사)  
2005 포항공과대학교 기계공학과 (석사)  
2011 포항공과대학교 기계공학과 (박사)

2013~현재 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양시스템연구부 선임연구원

관심분야 : 수중 로봇, 위치인식, SLAM



**최현택**

1991 한양대학교 전자공학 (학사)  
1993 한양대학교 전자공학 (석사)  
2000 한양대학교 전자공학 (박사)  
1993~1995 KT 연구개발원 소프트웨어 연구소 전임연구원  
1996~2000 한양대학교 컴퓨터 교육위원회 강사

2000~2003 하와이 주립대학교 Autonomous System Lab. 후기 박사

2003~현재 한국 해양연구원 책임연구원

관심분야 : 수중 로봇, 해양 시스템, 강인 제어