Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2016) 22(10):788-796
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2016.16.0166 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

누적 일괄추정 기법을 이용한 수동 선배열 소나 방위-주파수 표적기동분석 연구

Study on Bearing and Frequency Target Motion Analysis for Passive Line Array SONAR Using Accumulative Batch Estimation

김 인 수*
(In-Soo Kim[1,*])
[1]Agency for Defense Development

Abstract: Bearing and frequency measurements of TMA (Target Motion Analysis) in passive line array SONAR have lower bearing rate and frequency doppler, and are not detected or tracked continuously because of various ocean environments. This is a main reason to effect the TMA performance and it takes a long time to get TMA solutions. We propose the bearing and frequency TMA(BFTMA) using accumulative batch estimation to solve the TMA problem of line array passive SONAR. The accumulative batch estimation structure is based on MLE (Maximum Likelihood Estimation) but used accumulative measurements. The accumulative batch estimation is applied for the BFTMA with nonlinear Kalman filter to estimate the target range, speed and course. Simulation and sea data analysis were carried out to verify the performance and applicability of the proposed techniques.

Keywords: target motion analysis, passive SONAR, accumulative batch estimation

I. 서론

표적기동분석(TMA: Target Motion Analysis)은 소나에서 탐지한 표적정보 및 자함 기동정보를 이용하여 표적의 거리, 속력, 침로를 추정하는 기술이다. TMA는 소나를 탑재한 수상 함정 및 수중 함정에 적용되어 있으며, 각 함정에 탑재된 소나의 종류에 따라 TMA 기법은 다양하다. 수동 선배열 소나에 적용되는 TMA 방법으로는 TMA에 사용하는 측정치 종류에 따라 표적 방위 정보를 이용하는 방위 TMA(BOTMA, Bearings Only TMA) [1-3], 표적 방위 및 표적 주파수 정보를 이용하는 방위-주파수 TMA(BFTMA, Bearing and Frequency TMA) [4-7]가 있다. 그리고 측정치 적용 방법에 따라 일괄추정(batch estimation) 기법과 순차추정(sequential estimation) 기법으로 구분된다. 일괄추정 기법은 정해진 일정 시간동안 획득한 측정치 집합을 이용하여 표적 초기 기동정보를 추정하는 방법이며, 순차추정은 시스템 처리시간(processing time)마다 획득되는 측정치와 함께 필터링 기법을 적용하여 표적 정보를 추정하는 방법이다. 순차추정의 필터링 기법으로는 비선형 시스템에 적합한 확장칼만필터(EKF: Extended Kalman Filter), 수정이득 확장칼만필터(MGEKF: Modified Gain EKF) [8], 다중모델(multiple model)에 기반한 IMM (Interacting Multiple Model) [9] 등이 적용되고 있다. 순차추정을 위해서는 필터 초기치가 필요하지만, 수동 선배열 소나의 경우 거리 정보가 없으므로 표적 초기 기동정보를 알 수 없다. 따라서 순차추정 필터 초기치를 위하여 일괄추정을 결합한 순차추정 방법이 적용되고 있으며, 이는 일괄추정에서 추정한 표적 초기 정보를 순차추정 필터의 초기치로 설정하는 방법이다. 일괄추정을 결합한 순차추정 방법에 관한 연구로는 수동 소나 TMA에서 일괄추정과 결합하여 IMM 기반 MGEKF 필터의 순차추정 기법[10], 다중 주파수 측정치를 가지는 수동 소나 TMA에 대해 MGEKF 필터 기반의 series 구조의 순차추정 기법[11] 등 연구가 진행되어 왔다.

수동 선배열 소나의 주요 탐지대상은 원거리(long range)에서 저속으로 기동하는 표적으로써, 기술적 발전으로 인해 표적은 점점 더 저소음화 되는 추세이며, 장거리 탐지시 음영구역 존재 등의 수중환경의 변화로 표적을 지속적으로 탐지 및 추적하기가 어렵다. 즉, 복잡한 수중환경으로 인해 표적 정보인 표적 방위 및 표적 주파수가 빈번히 소실(loss)된다. 또한, 수동소나에서 TMA를 수행하기 위해서는 측정치 정보의 가관측성(observability) 확보가 필수 조건이며, 이를 위하여 자함의 기동이 필수적으로 요구되나 선배열 센서의 기동 특성으로 인해 자함의 변침 또는 변속 등 함 기동에 많은 제약이 있다. 이러한 자함 기동 제한 특성과 원거리 저속 표적으로 인해 표적 방위 변화율이 적고 표적 주파수 도플러 또한 미미하다. 이는 수동 선배열 소나에서의 TMA 성능을 저하시키고 표적 거리, 속력, 침로 산출 소요시간을 증가시키는 주 요인이 된다.

수동 선배열 소나의 열악한 TMA 운용 환경 하에서 TMA 성능을 향상시키기 위하여 다양한 연구가 진행되어 왔다. TMA 성능향상을 위한 표적 주파수 정보 처리에 관한

* Corresponding Author
Manuscript received August 24, 2016 / revised September 14, 2016 / accepted September 20, 2016
김인수: 국방과학연구소(kis171@add.re.kr)

Copyright© ICROS 2016

연구로써, 수중환경 특성으로 인해 빈번히 소실되는 표적 방위 및 표적 주파수에 대해 TMA 성능향상을 위한 전처리 기법 연구[10], 수동소나 TMA의 미약한 주파수 도플러 환경에 대해 도플러 추정을 통해 표적 주파수 도플러를 보상함으로써 BFTMA 성능을 향상시키는 연구가 수행되었다[12].

또한 수동 선배열 소나 TMA 해(solution) 산출시간을 줄이는 방안으로 음파의 다중경로 전달특성이 존재하는 환경하에서 다중경로 탐지방위를 이용하여 표적 거리를 추정하는 방법이 제안되었다[13]. 이는 음파의 다중경로가 존재하는 조건하에서 선배열 빔 특성으로부터 표적 거리를 산출하는 방법으로 TMA의 일괄추정을 적용하지 않고 표적기동을 추정할 수 있음을 제안하였다.

수동 선배열 소나는 표적의 거리정보가 탐지되지 않으므로 TMA 추적 필터의 초기값인 초기위치 및 초기속도 정보를 알 수가 없다. 이러한 이유로 표적 방위 및 표적 주파수 정보를 이용하여 일괄추정을 수행하여 TMA 추적 필터 초기값을 추정하게 된다. 자함 기동 제한, 원거리 저속 표적, 표적 정보 소실 등의 복합적인 TMA 운용환경 특성 때문에 일괄추정을 통한 필터 초기치를 추정하기 위해서는 많은 양의 표적 방위 및 표적 주파수 정보가 필요하다. 이는 일괄추정을 수행하는데 많은 시간이 소요된다는 것을 의미하며, 이는 곧 TMA 해 산출시간 역시 많이 소요된다는 것을 가리킨다.

일괄추정 소요시간이 증가할수록 초기치 추정 결과는 좋아지지만 TMA 해를 산출하는 시간이 증가하므로 TMA 시스템 운용성, 표적 방위 및 표적 주파수 정보 특성, 추적 필터 성능 등을 고려하여 일괄추정 소요시간이 결정된다. TMA 소요시간을 줄이기 위한 방법으로 표적 방위 및 표적 주파수 정보가 획득될 때마다 누적된 표적 방위 및 표적 주파수를 이용하여 일괄추정을 수행하여 추적 필터의 초기치를 추정하고, 추적 필터를 통해 현재 시간에서의 표적 거리, 속력, 침로를 산출하는 방법이 제안되었다[14].

본 논문에서는 이러한 누적 일괄추정 개념을 수동 선배열 소나 BFTMA 시스템에 적용하여 누적 일괄추정 알고리즘의 실용성을 확인하였다. 이를 위하여 우선 수동 선배열 소나 시스템을 모사한 시뮬레이터 기반 하에 누적 일괄추정 BFTMA 시뮬레이션을 수행하여 제안 알고리즘 성능을 분석하였고, 수동 선배열 소나에서 획득한 해상실험 데이터를 적용하여 누적 일괄추정 BFTMA 기법의 실용 가능성을 확인하였다.

II. BFTMA 시스템 모델링

수동 선배열 소나 BFTMA를 위해서 표적은 그림 1과 같이 자함과 동일한 2차원 평면상에서 일정한 속력과 침로로 기동한다고 가정한다. 이러한 가정 하에 BFTMA 시스템 모델링을 위한 상태벡터(state vector)는 자함과 표적의 상대거리, 상대속도, 표적주파수로 정의한다.

$$x(t)=\begin{bmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\\x_3(t)\\x_4(t)\\x_5(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_x(t)\\R_y(t)\\V_x(t)\\V_y(t)\\f_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_{tx}(t)-R_{ox}(t)\\R_{ty}(t)-R_{oy}(t)\\V_{tx}(t)-V_{ox}(t)\\V_{ty}(t)-V_{oy}(t)\\f_0\end{bmatrix} \quad (1)$$

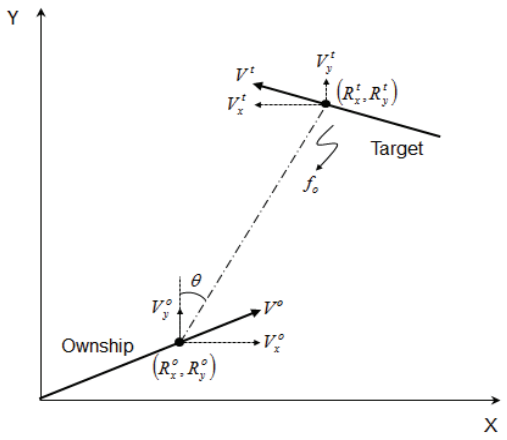

그림 1. 방위-주파수 표적기동분석 시스템.

Fig. 1. Bearing and frequency target motion analysis system.

여기서 $R_x(t)$, $R_y(t)$와 $V_x(t)$, $V_y(t)$는 각각 X, Y축 방향의 상대거리와 상대속도이며, f_0는 표적에서 방사되는 표적 주파수이다. $R_{tx}(t)$, $R_{ty}(t)$와 $V_{tx}(t)$, $V_{ty}(t)$는 각각 X, Y축 방향의 표적위치와 표적속도이며, $R_{ox}(t)$, $R_{oy}(t)$와 $V_{ox}(t)$, $V_{oy}(t)$는 각각 X, Y축 방향의 자함 위치와 자함 속도이다.

자함을 기준으로 하는 표적의 상대거리, 표적속력, 표적침로를 추정하는 모델을 유도하기 위하여 식 (1)의 상태변수를 시간에 대하여 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t)=\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\\dot{x}_2(t)\\\dot{x}_3(t)\\\dot{x}_4(t)\\\dot{x}_5(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}V_x(t)\\V_y(t)\\A_x(t)\\A_y(t)\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_3(t)\\x_4(t)\\A_{tx}(t)-A_{ox}(t)\\A_{ty}(t)-A_{oy}(t)\\0\end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $A_x(t)$, $A_y(t)$는 각각 X, Y축 방향의 상대가속도이며, $A_{tx}(t)$, $A_{ty}(t)$와 $A_{ox}(t)$, $A_{oy}(t)$는 각각 X, Y축 방향의 표적가속도와 자함 가속도이다.

식 (2)로부터 BFTMA 시스템의 상태방정식(state equation)은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Ba(t) \quad (3)$$

여기서 행렬 A와 B는 다음과 같이 표현된다.

$$A=\begin{bmatrix}0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}0&0\\0&0\\1&0\\0&1\\0&0\end{bmatrix} \quad (4)$$

입력성분 $a(t)$는 $a(t)=[A_x(t)\ A_y(t)]^T$로 표현되며 자함과 표적의 상대가속도를 나타낸다.

BFTMA를 위한 측정방정식(measurement equation)은 표적 방위 $\theta(t)$와 도플러 효과가 포함된 표적주파수 $f(t)$로서 다음과 같이 상대거리($R_x(t)$, $R_y(t)$)와 상대속도($V_x(t)$, $V_y(t)$)의 비선형 함수로 표현된다.

$$z(t)=\begin{bmatrix}\theta(t)\\ f(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\tan^{-1}\dfrac{R_x(t)}{R_y(t)}+\nu_\theta(t)\\ f_0\left(1-\dfrac{V_x(t)\sin\theta(t)+V_y(t)\cos\theta(t)}{c}\right)+\nu_f(t)\end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 c는 음속을 나타내며, $\nu_\theta(t)$와 $\nu_f(t)$는 각각 표적 방위와 표적 주파수에 대한 측정잡음이다. $\nu_\theta(t)$와 $\nu_f(t)$는 평균이 0이고, 분산이 각각 $\sigma_\theta^2(t)$와 $\sigma_f^2(t)$인 백색 가우시안 잡음으로 가정한다.

III. 일괄추정

수동소나 BFTMA에서 표적 방위와 주파수를 이용하여 표적의 거리, 속력, 침로를 예측하기 위하여 일반적으로 필터링 기법이 적용된다. 그러나 수동소나 시스템이므로 거리와 속력에 대한 정보를 알 수 없으며 따라서 필터링 기법을 적용하기 위해서는 필터 초기값이 필요하다. TMA 성능은 적용되는 필터링 기법에 직접적으로 좌우되며 필터의 성능 및 수렴성은 필터의 초기조건에 영향을 받으므로 필터의 초기치 설정 즉, 표적의 초기 기동정보 추정은 TMA에 있어 매우 중요한 문제이다.

표적의 초기 기동정보 추정을 통한 필터의 초기치를 설정하기 위하여 확률이론에서 도입한 MLE(Maximum Likelihood Estimation) 기법을 적용하여 선배열 소나로부터 탐지되는 표적 방위와 표적 주파수로부터 표적의 위치, 속도, 주파수의 초기 기동정보를 추정하는 일괄추정 기법을 적용한다. 초기치 추정을 위한 MLE는 일정한 시간동안 획득한 표적 측정치에 대한 확률밀도함수(probability density function)를 최대로 하는 값이 초기 추정치로 귀결되는 문제로서 표적 측정치인 방위와 주파수가 비선형방정식으로 표현되므로 Newton 방법 등과 같은 수치적인 반복 계산을 통해 MLE을 통한 초기 추정치를 산출한다.

식 (5)와 같이 주어지는 BFTMA 시스템의 측정방정식에 대해 이산 시간 k에서의 방정식은 다음과 같다.

$$\bar{z}_k=\begin{bmatrix}\theta_k\\ f_k\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\tan^{-1}\dfrac{R_x(k)}{R_y(k)}+\nu_\theta(k)\\ f_0\left(1-\dfrac{V_x(k)\sin\theta(k)+V_y(k)\cos\theta(k)}{c}\right)+\nu_f(k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\tan^{-1}\dfrac{R_x}{R_y}+\nu_\theta\\ f_0\left(1-\dfrac{R_xV_x+R_yV_y}{c\sqrt{R_x^2+R_y^2}}\right)+\nu_f\end{bmatrix}\Bigg|_k\equiv\begin{bmatrix}G_1(x)\\ G_2(x)\end{bmatrix}\Bigg|_k+\bar{\nu}_k \quad (6)$$

일괄추정을 위해 획득한 N개의 측정치 데이터 집합을 Z_N이라고 하고 이를 식 (7)과 같이 표현한다.

$$Z_N=\left[\bar{z}_1\ \bar{z}_2\cdots\bar{z}_N\right] \quad (7)$$

주어진 N개의 측정치를 이용하여 식 (1)의 BFTMA 시스템 상태변수 $X(t)$의 초기치 $X(t_0)$는 식 (8)과 같으며, $X(t_0)$가 주어졌다고 가정 하에서 Z_N의 조건부 확률밀도함수 $f(Z_N|x(t_0))$을 구하면, MLE는 $f(Z_N|x(t_0))$을 최대값이 되도록 하는 $X(t_0)$를 추정하는 문제로 주어진다.

$$X(t_0)=\left[R_x\ R_y\ V_x\ V_y\ f\right]^T\Big|_{t_0} \quad (8)$$

식 (6)에서 측정잡음 $\bar{\nu}_k=\left[\nu_\theta\ \nu_f\right]_k^T$는 시간에 대해서 서로 독립적인 백색 잡음으로 가정하였으므로 이를 이용하면 조건부 확률밀도함수 $f(Z_N|x(t_0))$는 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$f(Z_N|x(t_0))=\prod_{i=1}^{N}f(\bar{z}_i|x(t_0)) \quad (9)$$

식 (8)의 $X(t_0)$가 주어지면 시스템 상태방정식으로부터 $X(t_k)$를 구할 수 있고 $X(t_k)$가 주어지면 $\bar{z}_i$의 확률적 특성은 측정잡음 $\bar{\nu}_k$의 특성에 의해 결정되므로 $f(\bar{z}_i|x(t_0))$는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$f(\bar{z}_i|x(t_0))=\frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_f}\cdot e^{-\gamma_i} \quad (10)$$

$$\gamma_i=\frac{1}{2}\left(\frac{(\theta_i-G_1(x_i(x(t_0))))^2}{\sigma_\theta^2}+\frac{(f_i-G_2(x_i(x(t_0))))^2}{\sigma_f^2}\right) \quad (11)$$

γ_i는 식 (6)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_i=\frac{1}{2}\left(\bar{z}_i-\bar{G}(x_i(X(t_0)))\right)^T\Psi\left(\bar{z}_i-\bar{G}(x_i(X(t_0)))\right) \quad (12)$$

$$\bar{G}(\cdot)=\left[G_1(\cdot)\ G_2(\cdot)\right]^T \quad (13)$$

$$\Psi=\begin{bmatrix}\sigma_\theta^{-2} & 0\\ 0 & \sigma_f^{-2}\end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (9)~(11)로부터 $f(Z_N|X(t_0))$을 최대로 하는 $X(t_0)$을 구하는 문제는 다음과 같이 정의한 성능지수 함수를 최소화하는 $X(t_0)$을 구하는 문제로 귀결된다.

$$J=\sum_{i=1}^{N}\gamma_i \quad (15)$$

식 (6)의 측정방정식은 비선형방정식으로 표현되므로 본 논문에서는 식 (15)의 J를 최소화하는 $x(t_0)$를 구하기 위하여 수치해석 기법인 Newton 방법을 적용하여 J를 최소화하는 $x(t_0)$을 계산하였다. J를 $x(t_0)$에 대하여 편미분을 취한 후 $x(t_0)$을 Newton 방법으로 계산하면 k번째 반복 계산에 의해 산출된 해 $\tilde{x}^k(t_0)$는 다음과 같다.

$$\tilde{x}^k(t_0)=\tilde{x}^{k-1}(t_0)+\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial\bar{G}(x_i(t))}{\partial x_i(t)}\frac{\partial x_i(t)}{\partial x(t_0)}\right)^T\Psi\left(\frac{\partial\bar{G}(x_i(t))}{\partial x_i(t)}\frac{\partial x_i(t)}{\partial x(t_0)}\right)\right]^{-1}\cdot\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial\bar{G}(x_i(t))}{\partial x_i(t)}\frac{\partial x_i(t)}{\partial x(t_0)}\right)^T\Psi\left(\bar{z}_i(t)-\bar{G}(x_i(t))\right)\right]\Bigg|_{x(t_0)=\tilde{x}^{k-1}(t_0)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \overline{G}(x_i(t))}{\partial x_i(t)} = \begin{bmatrix} -\frac{R_y}{R^2} & \frac{R_x}{R^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{f_0}{c}\left(\frac{R_x P - V_x R}{R^2}\right) & \frac{f_0}{c}\left(\frac{R_y P - V_y R}{R^2}\right) & -\frac{f_0}{c}\frac{R_x}{R} & -\frac{f_0}{c}\frac{R_y}{R} & 1-\frac{P}{c} \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\frac{\partial x_i(t)}{\partial x(t_0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T: sampling\ time \tag{18}$$

IV. 누적 일괄추정을 이용한 BFTMA

기존의 수동 선배열 소나 BFTMA에서는 III장에서 서술한 일괄추정을 이용하여 표적 초기치를 추정하고, 일괄추정에서 추정한 초기치를 이용하여 비선형 필터기법 등의 추적필터를 이용하여 현재 시점의 표적 거리, 속력, 침로를 구하는 방식이다. 일괄추정을 위해서는 일정한 양의 표적 측정치 획득 시간이 필요하며 TMA 시스템 운용성, 자함과 표적의 기동조건, 추적 필터 성능에 따라 일괄추정을 위한 표적 측정치 수가 좌우된다. 일괄구간이 길수록 표적 초기치 추정 결과의 정확도는 증가하나 TMA 소요시간이 길어지게 되며 일괄구간을 줄일수록 TMA 소요시간은 줄일 수 있으나 표적 초기치 추정결과가 나빠질 가능성이 존재한다. 또한 일괄추정을 위한 최적의 표적 측정치 수가 결정되더라도 표적 방위 및 표적 주파수 특성 등에 따라 일괄추정 결과에 영향을 받으며, 이는 곧 추적 필터 성능을 좌우하므로 결론적으로 TMA 소요시간에 영향을 주게 된다.

누적 일괄추정은 이러한 일괄추정 소요시간에 따른 TMA 소요시간 증가, 일괄추정 성능에 따른 TMA 성능 영향을 최소화하기 위한 방법으로써, 표적 방위 및 표적 주파수 정보가 획득될 때마다 표적 방위 및 표적 주파수를 누적하여 일괄추정을 수행하여 순차적으로(sequentially) 표적 초기치를 추정하는 개념이다. 누적 일괄추정의 초기치 추정 결과를 순차추정 필터에 연계함으로써 순차추정에서는 현재 시점의 표적 정보를 추정하게 된다.

누적 일괄추정을 이용한 BFTMA 흐름도는 그림 2와 같다. 식 (19)와 같이 현재 시간 k까지 획득한 k개의 표적 방위 및 표적 주파수 측정치 데이터 집합 Z_k에 대해 식 (16)을 이용하여 표적 초기값 $x(t_0)$를 산출하고 BFTMA 추적필터를 이용하여 현재 시간 t_k에서의 표적 거리, 속력, 침로를 추정한다.

BFTMA 시스템 처리시간(processing time)마다 누적 일괄추정 및 순차추정 과정을 반복하여 TMA를 수행한다.

$$Z_k = \left[\bar{z}_1\ \bar{z}_2 \ldots \bar{z}_k\right],\ k = 1, 2, \ldots, \tag{19}$$

기존의 BFTMA와 비교할 때 누적 일괄추정 BFTMA에서는 일괄추정 성능에 따라 TMA 성능이 좌우되는 영향을 줄일 수 있으며, 표적 측정치가 누적될 때마다 TMA 성능이 향상된다. 또한 일괄추정이 완료될 때까지는 TMA 결과가 존재하지 않는 기존 BFTMA와는 달리 누적 일괄추정

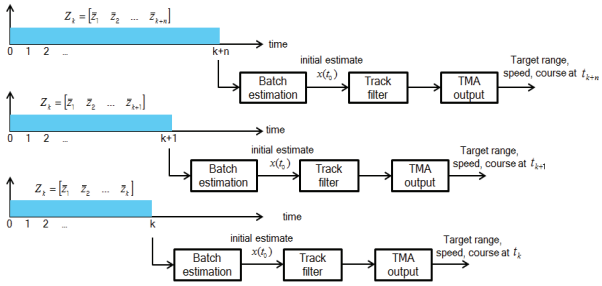

그림 2. 누적 일괄추정 BFTMA.

Fig. 2. BFTMA with accumulative batch estimation.

BFTMA는 표적 측정치가 누적될 때마다 TMA 결과가 갱신(update)되어 제시되므로 매우 실용적인 기법이라 할 수 있다.

누적 일괄추정 BFTMA에서 누적 일괄추정에 연계되는 순차추정의 추적필터로 수동 소나 TMA에 적용되어 실용성이 우수한 MGEKF [10-12]를 적용하였다.

BFTMA 시스템에 적용된 MGEKF의 상태 추정치와 오차 공분산의 전파식은 각각 다음과 같다.

$$\overline{X}_k = F_{k-1}\left(\hat{X}_{k-1} + X^o_{k-1}\right) - X^o_k \tag{20}$$

$$\overline{P}_k = F_{k-1}\hat{P}_{k-1}F^T_{k-1} + \Gamma_{k-1}Q_{k-1}\Gamma^T_{k-1} \tag{21}$$

상태 추정치와 오차 공분산의 쇄신치는 측정치 z_k 그리고 필터 이득 K_k는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{X}_k = \overline{X}_k + K_k\left(z_k - \overline{G}(\overline{X}_k)\right) \tag{22}$$

$$\hat{P}_k = \left(I - K_k M(z_k, \overline{X}_k)\right)\overline{P}_k\left(I - K_k M(z_k, \overline{X}_k)\right)^T + K_k R_k K_k^T \tag{23}$$

$$K_k = \overline{P}_k C^T(\overline{X}_k)\left(C(\overline{X}_k)\overline{P}_k C^T(\overline{X}_k) + R_k\right)^{-1} \tag{24}$$

$$C(\overline{X}_k) = \left.\frac{\partial h(X_k)}{\partial X_k}\right|_{X_k = \overline{X}_k} \tag{25}$$

V. 시뮬레이션

제안한 누적 일괄추정 BFTMA 알고리즘의 성능 확인을 위하여 수동 선배열 소나 시스템을 모사한 시뮬레이터를 이용하여 알고리즘 성능을 확인하였다. 시뮬레이터는 그림 3과 같이 모의신호생성기, 신호처리기, 표적추적기, 표적기동분석기로 구성된다. 모의신호생성기는 자함 및 표적 기동, 표적신호, 해양환경을 모사하여 모의 센서신호를 생성하는 장치이다. 그리고 신호처리기, 표적추적기, 표적기동분석기는 수동 선배열 소나 시스템과 동일한 하드웨어 및 소프트웨어로 구성된 장치이다. 즉, 센서신호를 제외한 나머

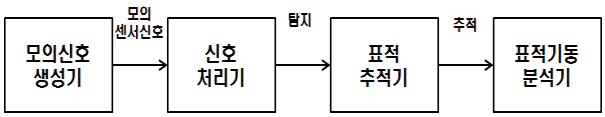

그림 3. BFTMA 시뮬레이션을 위한 시뮬레이터 구성도.

Fig. 3. Simulator structures for BFTMA simulation.

지 처리장치는 실 시스템과 동일한 사양을 가지므로 가상의 해양환경 하에서 다양한 모의신호를 이용한 TMA 시뮬레이션이 가능하므로 TMA 성능 검증에 활용된다.

시뮬레이터를 이용한 누적 일괄추정 BFTMA 시뮬레이션 절차는 다음과 같다. 모의신호생성기에서 시나리오 기반 자함 및 표적 기동을 수행하여 표적신호 및 센서신호를 생성하여 신호처리기에 신호를 제공한다. 신호처리기에서는 센서신호를 이용하여 신호처리 및 표적을 탐지하고 표적추적기에서 탐지 정보를 이용하여 표적추적을 수행한다. 표적기동분석기에서는 표적추적 정보를 입력받아 누적 일괄추정 BFTMA를 수행한다.

시뮬레이션을 위한 알고리즘 파라미터값으로 누적 일괄추정의 Newton 방법에서의 $\widetilde{x}^0(t_0)$은 초기 방위 측정치 및 초기 주파수 측정치를 이용하여 초기거리 및 속도를 가변하면서 식 (16)을 반복 계산하였다. MGEKF 필터 오차 공분산 초기값은 다음과 같이 설정하였다.

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1000^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01^2 \end{bmatrix} \tag{26}$$

TMA 결과의 수렴 여부 판단은 거리, 속력, 침로 각각에 대해 허용오차 범위가 주어지며, 주어진 허용오차 범위 내에서 추적이 되면 TMA가 수렴되었다고 판정한다. 그리고 TMA 소요시간은 기존 일괄추정 BFTMA 소요시간을 기준으로 얼마나 단축되었는지를 표현하였다.

제안하는 누적 일괄추정 및 MGEKF 순차추정 구조의 BFTMA 알고리듬의 성능을 비교하기 위하여 기존 일괄추정 BFTMA 이외에 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA 성능과 비교 분석하였다.

제안 알고리즘의 성능 검증을 위한 시뮬레이션 시나리오로 표 1과 같이 표적은 초기 방위 235도, 초기 거리 Rkm에서 침로 0도, 속력 4노트로 기동하고, 자함은 침로 180도에서 가변 속력으로 기동하는 시나리오를 구성하였다. 표적은 임의의 신호인 190Hz 주파수 신호를 방사하면서 정해진 침로/속력으로 기동하도록 설정하였다. 따라서 표적과 자함간 거리 및 상대적인 기동에 따른 도플러 효과가 반영된 주파수 신호를 가지고 TMA를 수행하게 된다.

그림 4와 5는 시뮬레이션 시나리오 I의 모의 센서신호에 대해 신호처리기 및 표적추적기를 통해 탐지/추적한 표적방위 및 표적주파수이며, 그림 6~8은 누적 일괄추정 BFTMA의 거리, 속력, 침로 추정결과이다.

표 1. 시뮬레이션 시나리오 I.

Table 1. Simulation scenario I.

	자함	표적
침로[deg]	180	0
속력[kts]	변속기동	4
초기방위[deg]	235	
초기거리[km]	R	
표적주파수[Hz]	190	

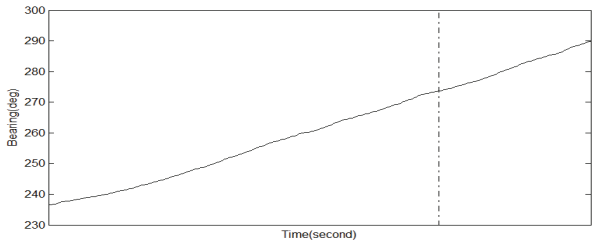

그림 4. 표적방위 측정치(시뮬레이션 1).

Fig. 4. Target bearing measurement(simulation 1).

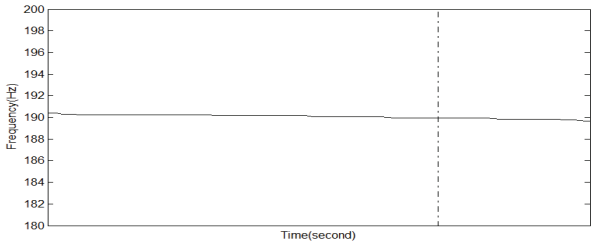

그림 5. 표적주파수 측정치(시뮬레이션 1).

Fig. 5. Target frequency measurement(simulation 1).

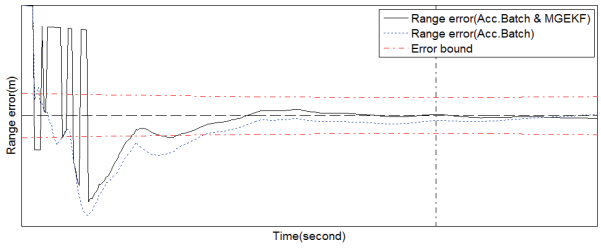

그림 6. 거리 추정 오차(시뮬레이션 1).

Fig. 6. Range estimate error(simulation 1).

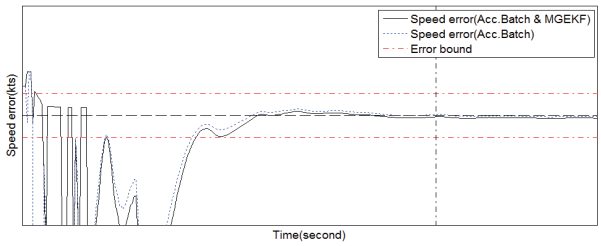

그림 7. 속력 추정 오차(시뮬레이션 1).

Fig. 7. Speed estimate error(simulation 1).

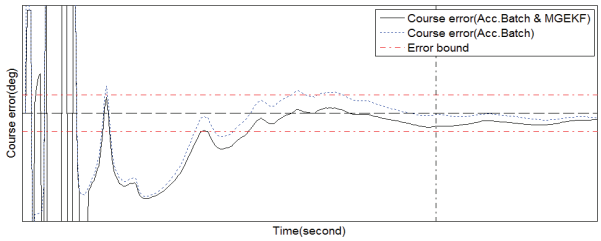

그림 8. 침로 추정 오차(시뮬레이션 1).

Fig. 8. Course estimate error(simulation 1).

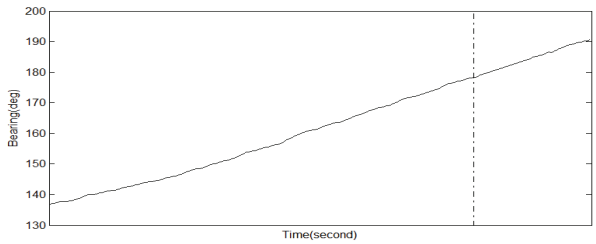

그림 9. 표적방위 측정치(시뮬레이션 2).

Fig. 9. Target bearing measurement(simulation 2).

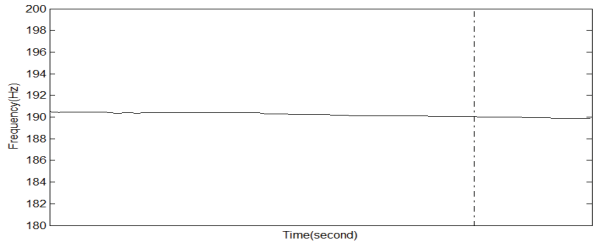

그림 10. 표적주파수 측정치(시뮬레이션 2).

Fig. 10. Target frequency measurement(simulation 2).

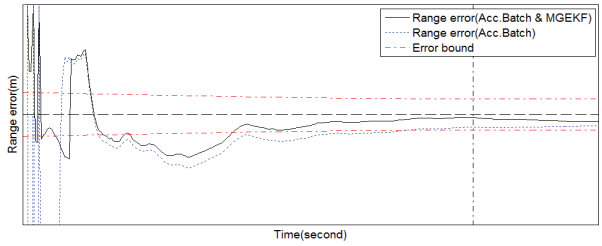

그림 11. 거리 추정 오차(시뮬레이션 2).

Fig. 11. Range estimate error(simulation 2).

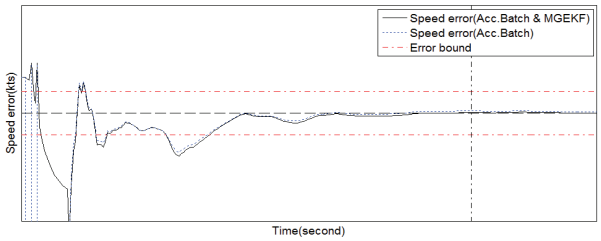

그림 12. 속력 추정 오차(시뮬레이션 2).

Fig. 12. Speed estimate error(simulation 2).

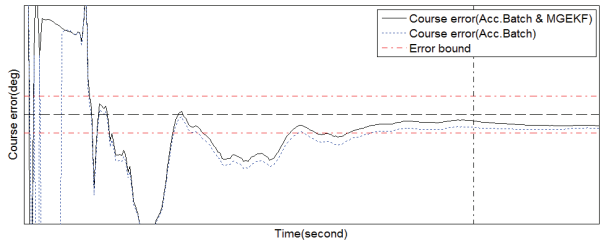

그림 13. 침로 추정 오차(시뮬레이션 2).

Fig. 13. Course estimate error(simulation 2).

거리, 속력, 침로 추정 오차 그림에서 실선은 누적 일괄추정 및 순차추정 구조의 BFTMA 결과이며, 점선은 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA 결과를 가리킨다. 가로 점선은 각각 거리, 속력, 침로 허용오차를 의미하며, 수직 실선은 기존 일괄추정 BFTMA의 소요시간을 의미한다. 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA 결과는 기존 일괄추정 BFTMA 소요시간 대비 거리는 22분 2초에 앞서서 허용오차 범위 내에 진입하였으나 이후 약 80초 동안 허용오차를 벗어나다가 18분 40초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적되었다. 속력과 침로는 각각 17분 22초, 13분 36초 앞서서 허용오차 범위 내에 진입하여 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적됨을 알 수 있다. 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA의 경우 거리, 속력, 침로 각각 기존 일괄추정 BFTMA 소요시간 대비 16분 48초, 17분 40초, 17분 26초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 수렴하였고, 침로는 이후 약 4분 동안 허용오차를 벗어나다가 6분 42초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 수렴하였다. 누적 일괄추정 및 순차추정 구조의 BFTMA와 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA를 비교하면 속력, 침로의 경우 거의 유사한 추정 성능을 보이며, 거리는 누적 일괄추정 및 순차추정 구조의 BFTMA가 더 빠른 수렴과 안정된 추적 성능을 보임을 알 수 있다. 이는 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA의 경우 초기 거리, 침로, 속력 추정 결과로부터 현재 거리를 산술적으로 산출하게 되는데 이 과정에서 속력, 침로 추정 오차가 누적되어 현재 거리 추정 오차를 유발하기 때문이다.

다음은 표 2와 같이 표적은 초기 방위 135도, 초기 거리 Rkm에서 침로 270도, 속력 5노트로 기동하고, 자함은 침로 90도에서 가변 속력으로 기동하는 시나리오를 구성하였다. 표적은 시나리오 I과 마찬가지로 190Hz의 주파수 신호를 방사하면서 정해진 침로/속력으로 기동하도록 설정하였다.

그림 9와 10은 시뮬레이션 시나리오 II의 모의 센서신호에 대해 신호처리기 및 표적추적기를 통해 탐지/추적한 표적방위 및 표적주파수이며, 그림 11~13은 누적 일괄추정 BFTMA의 거리, 속력, 침로 추정결과이다. 누적 일괄추정 및 순차추정 구조의 BFTMA 결과에 있어서, 거리는 기존 BFTMA 소요시간 대비 16분 2초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적되었다. 속력은 기존 BFTMA 소요시간 대비 24분 18초 앞서서 허용오차 범위에 진입하였으나 약 3분 동안 허용오차를 벗어났다가 17분 28초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적되었다. 침로는 기존 BFTMA 소요시간 대비 20분 4초 앞서서 허용오차 범위에 진입하여 8분 20초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적됨을 알 수 있다. 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA

표 2. 시뮬레이션 시나리오 II.

Table 2. Simulation scenario II.

	자함	표적
침로[deg]	90	270
속력[kts]	변속기동	5
초기방위[deg]	135	
초기거리[km]	R	
표적주파수[Hz]	190	

결과는 기존 BFTMA 소요시간 대비 거리, 속력, 침로 각각 4분 28초, 24분 20초, 20분 앞서서 허용오차 범위 내에 진입하여 거리는 지속 추적되고 속력 및 침로는 각각 17분 36초, 6분 50초 앞서서 지속 추적되었다. 시뮬레이션 시나리오 I과 마찬가지로 거리 추적 결과에 있어서, 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA가 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA에 비해 수렴시간 및 추적 안정성이 우수함을 알 수 있다.

VI. 해상데이터 적용 결과

제안한 누적 일괄추정 BFTMA 알고리즘에 대하여 수동 선배열 소나 시스템에서 획득한 해상데이터를 이용하여 알고리즘 성능을 확인하였다.

해상데이터 획득 과정은 다음과 같다. 우선 표적함으로는 모의 표적신호를 발생시키는 장치인 모의 음원장치를 일반 수상함에 탑재하여 표적함을 모의하였고, 주어진 기동 시나리오를 유지하면서 표적신호를 방사하도록 하였다. 수동 선배열 소나가 탑재된 자함에서는 표적신호를 수신하여 그림 3과 같은 신호처리기 및 표적추적기에서 신호처리, 표적 탐지/추적하여 표적기동분석기의 입력데이터인 표적방위 및 표적주파수 정보를 생성하였다. 이렇게 획득한 표적방위 및 표적주파수 측정치를 누적 일괄추정 BFTMA 알고리즘에 적용하여 성능을 분석하였다.

알고리즘 파라미터 조건은 시뮬레이션 시나리오와 동일한 조건으로 설정하였다. 해상데이터를 위한 시나리오는 표 3과 같이 모의 표적함은 초기 방위 235도, 초기 거리 Rkm에서 침로 0도, 속력 5노트로 기동하고, 자함은 침로 180도에서 가변 속력으로 기동하는 시나리오이다. 표적신호로는 임의 신호인 190Hz의 주파수 신호를 모의 음원장치에서 방사하면서 정해진 침로/속력으로 모의 표적함이 기동하였다.

표 3의 시나리오에 대해 서로 다른 시점과 환경에서 2회에 걸쳐 데이터를 획득하였고, 각 해상데이터에 대해 누적 일괄추정 BFTMA 결과를 분석하였다.

그림 14와 15는 첫 번째 해상데이터의 표적방위 및 표적주파수 측정치이며, 그림 16~18은 누적 일괄추정 BFTMA의 거리, 속력, 침로 추정결과이다. 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA는 기존 BFTMA 소요시간 대비 거리는 9분 38초, 속력은 9분 58초, 침로는 7분 41초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적되었다. 그림 14의 표적방위 측정치에서 알 수 있듯이 초반 방위 바이어스로 인해 특히 이 구간에 대해 거리 및 침로 추적 결과가 불량함을 확인할 수 있다. 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA는 기존 BFTMA 소요시간 대비 거리는 10분 41초, 속력은 9분 51초, 침로는 7분 47초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적되었다.

표 3. 해상데이터 시나리오.

Table 3. Sea data scenario.

	자함	표적
침로[deg]	180	0
속력[kts]	변속기동	5
초기방위[deg]	235	
초기거리[km]	R	
표적주파수[Hz]	190	

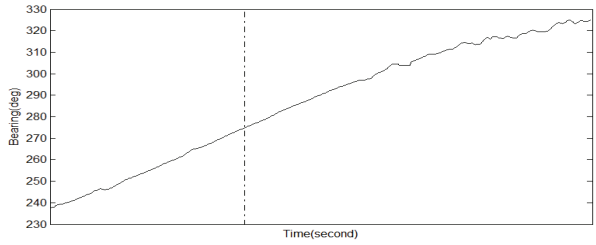

그림 14. 표적방위 측정치(해상데이터 1).

Fig. 14. Target bearing measurement(sea data 1).

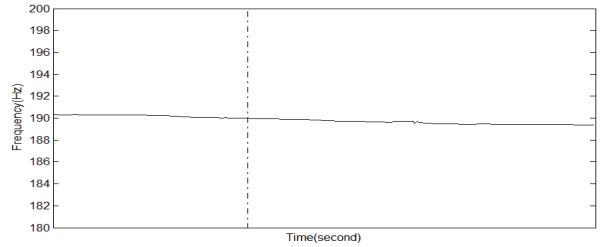

그림 15. 표적주파수 측정치(해상데이터 1).

Fig. 15. Target frequency measurement(sea data 1).

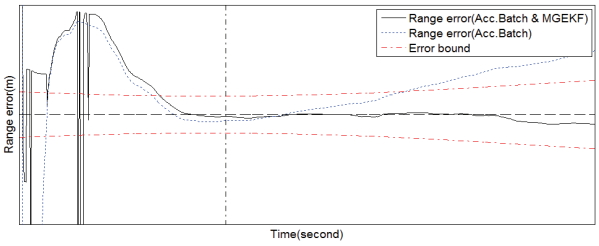

그림 16. 거리 추정 오차(해상데이터 1).

Fig. 16. Range estimate error(sea data 1).

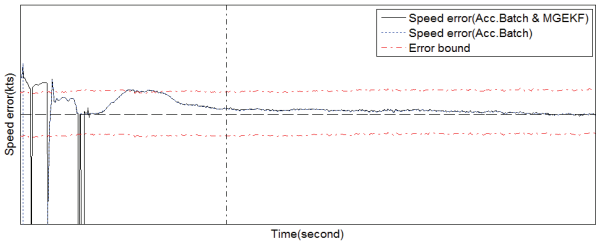

그림 17. 속력 추정 오차(해상데이터 1).

Fig. 17. Speed estimate error(sea data 1).

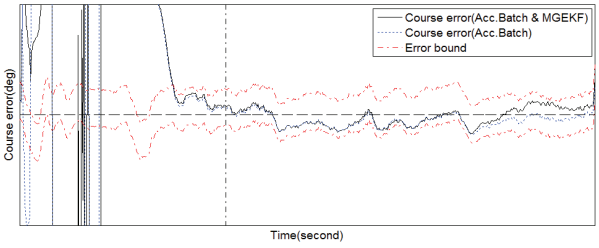

그림 18. 침로 추정 오차(해상데이터 1).

Fig. 18. Course estimate error(sea data 1).

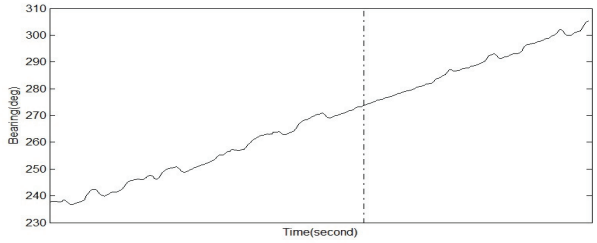

그림 19. 표적방위 측정치(해상데이터 2).

Fig. 19. Target bearing measurement(sea data 2).

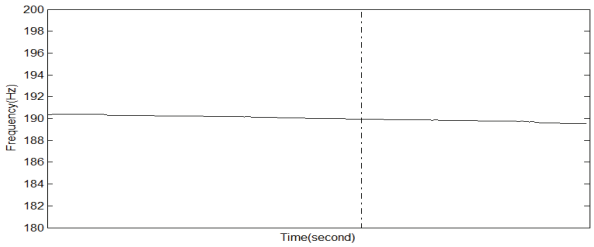

그림 20. 표적주파수 측정치(해상데이터 2).

Fig. 20. Target frequency measurement(sea data 2).

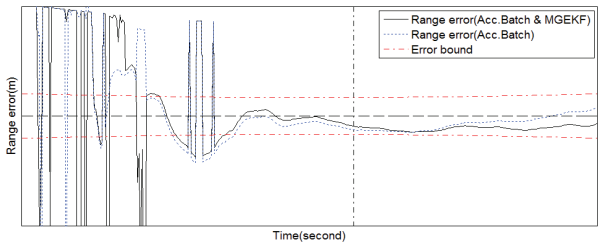

그림 21. 거리 추정 오차(해상데이터 2).

Fig. 21. Range estimate error(sea data 2).

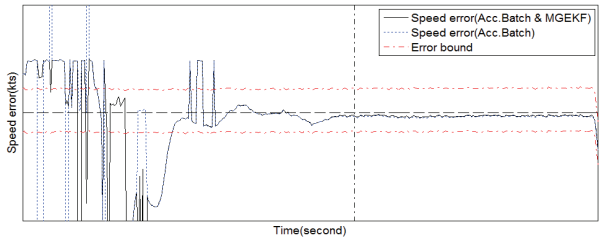

그림 22. 속력 추정 오차(해상데이터 2).

Fig. 22. Speed estimate error(sea data 2).

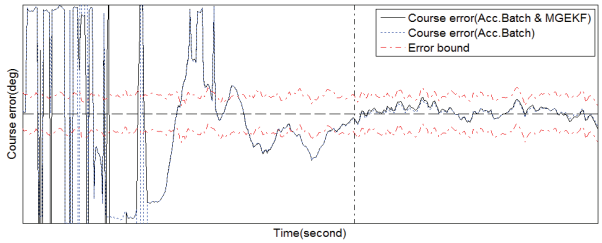

그림 23. 침로 추정 오차(해상데이터 2).

Fig. 23. Course estimate error(sea data 2).

그러나 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA의 거리 결과는 기존 BFTMA 소요시간 이후 시점이지만 약 38분부터 거리 추적 오차가 점점 증가하다가 약 56분부터 허용오차를 초과하였다. 그림 18에서 침로 허용오차 범위(bound)가 그림 8 및 그림 13의 침로 허용오차 범위에 비해 흔들리는 이유는 모의 표적함이 침로 0도를 유지하였으나 너울, 조류 등 해상상태의 영향으로 모의 표적함 침로가 일정하지 않기 때문이다.

두 번째 해상데이터의 표적방위와 표적주파수 측정치 및 누적 일괄추정 BFTMA 결과는 그림 19~23과 같다. 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA는 기존 BFTMA 소요시간 대비 거리는 11분 41초, 속력은 16분 33초, 침로는 16분 21초 앞서서 허용오차 범위 내에서 진입하였고, 속력 및 침로의 경우 12분 40초 및 2분 2초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적되었다. 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA는 기존 BFTMA 소요시간 대비 거리는 10분 56초, 속력은 16분 33초, 침로는 16분 21초 앞서서 허용오차 범위 내에서 진입하였고, 속력 및 침로의 경우 12분 40초 및 2분 2초 앞서서 허용오차 범위 내에서 지속적으로 추적되었다. 속력과 침로의 경우 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA와 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA가 추적 결과가 유사했으며, 거리는 앞서 시뮬레이션 시나리오 및 첫 번째 해상데이터와 마찬가지로 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA가 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA보다 수렴시간 및 추적 안정성이 우수함을 알 수 있다. 거리, 속력, 침로 모두 허용오차 범위 내에 진입 후 일시적으로 허용오차를 벗어난 이유는 동 시점에서의 표적방위 측정치의 바이어스로 인해 추정오차가 발생한 것으로 판단된다.

상기 시뮬레이터를 이용한 시뮬레이션 결과 및 해상데이터 적용 결과를 종합하면, 표 4 및 표 5와 같다. 표 4는 누적 일괄추정 및 순차추정(MGEKF)을 이용한 BFTMA 결과이며, 표 5는 누적 일괄추정을 이용한 BFTMA 결과이다. 각 표에서 음수의 의미는 기존 BFTMA 소요시간 대비 줄어든 시간을 의미하며, 1차는 최초 허용오차 범위 내에 진입한 시간, 2차는 허용오차 범위 내에 진입했다가 허용오차를 벗어나서 허용오차 범위 내에 재 진입하여 지속적으로 추적시작한 시간을 각각 의미한다. 시뮬레이션 및 해상데이터 결과를 종합적으로 분석할 때, 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA 및 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA 모두 기존 일괄추정 BFTMA 대비 빠른 수렴시간을 가지며 추적됨

표 4. 누적 일괄추정 및 순차추정(MGEKF) 결과

Table 4. Results of sequential filter(MGEKF) with accumulative batch estimation.

	거리		속력		침로	
	1차	2차	1차	2차	1차	2차
시뮬레이션1	-22분 2초	-18분 40초	-17분 22초	-	-13분 36초	-
시뮬레이션2	-16분 2초	-	-24분 18초	-17분 28초	-20분 4초	-8분 20초
해상데이터1	-9분 38초	-	-9분 58초	-	-7분 41초	-
해상데이터2	-11분 41초	-	-16분 33초	-12분 40초	-16분 21초	-2분 2초

표 5. 누적 일괄추정 결과.

Table 5. Results of accumulative batch estimation.

	거리		속력		침로	
	1차	2차	1차	2차	1차	2차
시뮬레이션1	-16분 48초	-	-17분 40초	-	-17분 26초	-6분 42초
시뮬레이션2	-4분 28초	-	-24분 20초	-17분 36초	-20분 0초	-6분 50초
해상데이터1	-10분 41초	-	-9분 51초	-	-7분 47초	-
해상데이터2	-10분 56초	-	-16분 33초	-12분 40초	-16분 21초	-2분 2초

을 확인할 수 있다. 또한 누적 일괄추정 및 순차추정 BFTMA가 누적 일괄추정만을 이용한 BFTMA보다 거리 추적결과에 있어서 수렴시간 및 추적 안정성이 좋음을 확인하였다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 누적 일괄추정 BFTMA 알고리즘은 기존 일괄추정 BFTMA에 비하여 TMA 소요시간이 단축됨을 시뮬레이션 및 해상데이터를 통해 확인하였다. TMA 수렴 성능은 표적 측정치 조건, 해양환경 조건 등에 따라 좌우되므로 특히 두 번째 해상데이터와 같이 표적 방위 측정치의 바이어스가 존재하지 않는다면 거리 및 침로 추적성능이 더 향상될 것으로 예상된다.

VII. 결론

본 논문에서는 수동 선배열 소나의 누적 일괄추정을 이용한 BFTMA 알고리즘을 제안하고 실용성을 확인하였다. 수동 선배열 소나 시스템을 모사한 시뮬레이터 기반 하에 누적 일괄추정 BFTMA 시뮬레이션을 수행하여 TMA 성능을 분석하였고, 수동 선배열 소나 시스템에서 획득한 해상실험 데이터를 적용하여 누적 일괄추정 BFTMA 기법의 성능 및 실용 가능성을 확인하였다.

TMA 수렴에 소요되는 시간은 표적 거리에 좌우되어 달라지며, TMA 성능은 표적 측정치, 해양환경 조건 등에 따라 좌우되므로 향후 다양한 시나리오에 대한 해상실험을 통하여 누적 일괄추정 BFTMA 알고리즘의 성능 검증이 요구된다.

REFERENCES

[1] A. G. Lindgren and K. F. Gong, “Position and velocity estimation via bearing observations,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 14, pp. 564-577, Jul. 1978.

[2] V. J. Aidala, “Kalman filter behavior in bearings-only tracking applications,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 29-39, Jan. 1979.

[3] S. C. Nardone and V. J. Aidala, “Observability criteria for bearings-only target motion analysis,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 162-166, Mar. 1981.

[4] C. Kent, *Algorithms for Tracking a Sound Source Using Frequency and Bearings*, Report DREV 4199, 1981.

[5] M. W. Ockeloen and G. A. Willemsen, *Target Motion Analysis with an Extended Kalman-filter Using Bearing and Frequency Measurements*, LEOK TR 1982-02, 1982.

[6] C. Jauffret and D. Pillon, “New observability criterion in target motion analysis,” *Underwater Acoustic Data Processing*, pp. 479-484, 1989.

[7] C. Jauffret and D. Pillon, “Observability in passive target motion analysis,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 1290-1300, Oct. 1996.

[8] T. L. Song and J. L. Speyer, “A stochastic analysis of a modified gain extended Kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 30, no. 10, pp. 940-949, Oct. 1985.

[9] H. A. P. Blom and Y. Bar-Shalom, “The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficients,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 33, no. 8, pp. 780-783, Aug. 1988.

[10] M. H. Lee, J. H. Moon, I. S. Kim, C. S. Kim, and J. W. Choi, “Pre-processing faded measurements for bearing-and-frequency target motion anaysis,” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 424-433, Jun. 2008.

[11] W. C. Kim, D. S. Kim, T. L. Song, S. G. Han, and I. S. Kim, “A study on TMA performance improvement using bearing and multi-frequency measurements in fading-measurement environments,” *Proc. of 40th Anniversary Agency for Defense Development*, pp. 235-238, Aug. 2010.

[12] I. S. Kim, S. H. Cho, H. M. Kim, H. U. Lee, and D. H. Chang, “A study on frequency doppler compensation of target motion analysis for passive sonar,” *Proc. of 2009th the Korea Institute of Military Science and Technology*, pp. 735-738, Aug. 2009.

[13] I. S. Kim, S. I. Kim, W. C. Oh, D. H. Chang, and S. M. Choi, “Target motion analysis using multipath bearing detection in towed array sonar,” *Proc. of 2011th the Korea Institute of Military Science and Technology*, pp. 1052-1055, Jun. 2011.

[14] I. S. Kim, C. M. Lee, S. W. Kim, and H. U. Lee, “Study on the reduction technique of TMA analysis time for passive sonar using consecutive batch estimation,” *Proc. of 2015th the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 10, pp. 112-113, Nov. 2015.

김 인 수

1997년 부산대학교 제어기계공학과 졸업. 1999년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(박사). 2001년~현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 표적기동분석, 정보처리 및 정보융합.