

해상환경용 EM-Log 보정항법 필터 설계

A EM-Log Aided Navigation Filter Design for Maritime Environment

조민수

국방과학연구소

Minsu Jo

Agency for Defence Development, Daejeon, 34186, Korea

[요약]

본 논문에서는 GNSS (global navigation satellite system)이 가용하지 않는 상황에서 시간이 지남에 따라 오차가 누적되는 특성을 가진 관성항법장치(inertial navigation system)의 항법 오차를 보상하기 위한 EM-Log (electromagnetic-log) 보정항법 필터를 설계하였다. EM-Log는 해상에서 운동체의 이동 속도를 측정하여 속도 오차를 보정하여 주나 측정된 속도에는 해조류가 포함되어 있기 때문에 적절한 해조류 모델 설계와 추정이 필요하다. 본 논문에서는 해조류 추정을 위해 단일 모델 필터와 IMM (interacting multiple model) 모델 필터 방법론을 제시하고 설계된 필터의 해조류 추정 성능을 확인한 후 해조류 모델 설계가 필터 성능에 어떤 영향을 주는지 분석하였다. 설계된 보정항법 필터의 성능은 시뮬레이션을 이용하여 검증하고 순수항법 대비 필터 성능 향상률을 비교 분석하였다. 단일 모델 필터는 해조류 모델이 동일한 경우 성능이 좋지만 해조류 모델이 동일하지 않을 경우 성능이 저하되는 것을 확인 할 수 있었다. 반면, IMM 모델 필터의 경우 다양한 해조류 모델을 사용하기 때문에 단일 모델 필터 대비 안정적인 성능을 유지하는 것을 확인하였다.

[Abstract]

This paper designs a electromagnetic-log (EM-Log) aided navigation filter for maritime environment without global navigation satellite system (GNSS). When navigation is performed for a long time, Inertial navigation system (INS)'s error gradually diverges. Therefore, an integrated navigation method is used to solve this problem. EM-Log sensor measures the velocity of the vehicle. However, since the measured velocity from EM-Log contains the speed of the sea current, the aided navigation filter is required to estimate the sea current. This paper proposes a single model filter and interacting multiple (IMM) model filter methods to estimate the sea current and analyzes the influence of the sea current model on the filter. The performance of the designed aided navigation filter is verified using a simulation and the improvement rate of the filter compared to the pure navigation is analyzed. The performance of single model filter is improved when the sea current model is correct. However, when the sea current model is incorrect, the performance decreases. On the other hands, IMM model filter methods show the stable performance compared to the single model.

Key word : Navigation, Aided navigation, Kalman filter, EM-log (Electromagnetic-log), Sea current.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.3.198>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 6 May 2020; Revised 27 May 2020
Accepted (Publication) 23 June 2020 (30 June 2020)

Corresponding Author; Minsu Jo

Tel: +82-42-821-2199

E-mail: bistrue@add.re.kr

I. 서 론

관성 항법 시스템은 시간이 지남에 따라 오차가 누적되는 문제를 해결하기 위해 일반적으로 INS./GPS 통합항법 시스템을 사용한다[1],[2]. 하지만 해상에서 항해를 하는 운동체의 경우 GPS 신호를 사용할 수 없는 경우가 생기기 때문에 INS/GPS 통합항법을 사용할 수 없다. EM-Log (electromagnetic-log) 보정항법은 시간이 지남에 따라 누적되는 관성항법장치의 오차를 보상해주기 위해 전자기유도를 이용하여 해상 운동체의 이동 속도를 측정하여 항법 오차를 줄여준다. EM-Log 센서는 직진 방향으로 최대 -15에서 +60 kts 속도를 측정하며 출력과 속도가 선형적으로 비례함으로써 다양한 운용환경에서 사용할 수 있는 장점이 있다. 하지만 측정된 속도는 대수 속도를 측정하기 때문에 해조류가 포함된 속도가 측정되며 이는 잘못된 해조류 추정 시 속도오차를 유발할 수 있다. 또한, 해상 운동체의 가감속 또는 회전 시 오차가 발생할 수 있으므로 EM-Log를 사용 시 적절한 유효성 판단이 필요하다 [3],[4]. 본 논문에서는 항법 성능 향상을 위해 정확한 해조류 추정을 위한 다양한 해조류 모델을 사용하는 IMM (interacting multiple model) 기반 필터를 설계하였으며, 설계된 필터는 단일 해조류 모델을 사용하는 단일 기반 필터와 성능 비교 분석을 수행하였다.

본 논문의 구성으로는 2장에서 단일 모델 기반 필터와 interacting multiple model (IMM) 모델 기반 EM-Log 보정항법 필터 구성을 설명하며 3장에서 설계된 필터를 검증하기 위한 시뮬레이션 환경을 설명하며 4장에서 각 필터의 성능을 검증 비교하였다. 마지막으로 4에서 결론을 맺는다.

II. EM-Log 보정항법 필터 설계

EM-Log는 패러데이의 법칙에 의해서 해상에서 운동체가 움직이면서 발생하는 유도 기전력을 해수에 대한 항체 이동 속도에 비례하는 원리를 이용해서 속도를 측정하고 식은 아래와 같다.

$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} = \mathbf{B}(V - V_C) \quad (1)$$

여기서 ε 는 유도 기전력의 크기, Φ_B 는 자속의 크기, B 는 자기장의 세기, l 은 자기장 단면의 높이를 나타내고, V 와 V_C 는 각각 운동체의 이동 속도와 해조류 속도를 의미한다. 기전력에는 바이어스 오차 b_ε 와 잡음 오차 η_ε 이 포함될 수 있고, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon + b_\varepsilon + \eta_\varepsilon \quad (2)$$

2-1 EM-Log 보정항법 기본 필터 구성

EM-Log 센서는 해조류에 대한 상대 속도를 측정하기 때문에 보정항법 필터의 상태변수를 관성항법 관련 15차 상태변수 (위치, 속도, 자세, 가속도 바이어스, 자이로 바이어스)에 해조

류 2차 상태변수(동축, 북축)를 추가하여 아래와 같이 상태변수를 정의한다.

$$x = [x_p(3), x_v(3), x_c(3), x_{Ab}(3), x_{Cb}(3), x_{VC}(2)] \quad (3)$$

EM-Log의 속도 측정치는 동체 좌표계에서의 y축 속도 측정치를 의미하며 측정방정식은 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} Z^b &= \hat{V}_{INS}^b - \hat{V}_{EM}^b \\ &= \hat{V}_{INS}^b - (\bar{V}^b - \hat{V}_c^b) \\ &= \hat{C}_n^b \hat{V}_{INS}^n - (\bar{V}^b - \hat{C}_n^b \hat{V}_c^n) \\ &\approx C_n^b \delta V_{INS}^n - C_n^b (\bar{V}^n(\times) + V_c^n(\times))\phi^n + C_n^b V_c^n \\ &= C_n^b \delta V_{INS}^n - C_n^b (V^n + V_c^n)(\times)\phi^n + C_n^b V_c^n \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \hat{V}_{INS}^b , \hat{V}_{EM}^b 은 동체 좌표계에서 측정된 INS와 EM-Log 각각의 속도이고, \hat{V}_{INS}^n , \hat{V}_c^n 는 항법 좌표계에서 측정된 INS와 해조류 속도이다. \bar{V}^b , \bar{V}^n 는 대지 속도 참값이다. 위의 측정방정식을 이용해 측정행렬은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$H = [0(3), C_n^b(3), -C_n^b(V_{INS}^n + V_c^n)(3), 0(6), C_n^b(2)] \quad (5)$$

2-2 1차 Markov모델을 이용한 해조류 모델링

EM-Log 보정항법의 경우 해조류를 직접 추정하기 때문에 해조류 모델링이 필요하다. 해조류를 추정하는 방법은 ACDIRC, CH3D, ROMS등 여러 가지 방법이 있으나 실제 구현이 어려워 많은 문헌에서 해조류를 아래와 같은 1차 Markov 형태로 모델링한다.

$$V_c(k+1) = (1 - \frac{1}{T_c} \Delta t) V_c(k) + \Delta t \sqrt{2 \frac{1}{T_c} \sigma_c^2} \omega_c(k) \quad (6)$$

여기서 T_c , Δt , σ_c , ω_c 는 각각 1차 Markov 모델의 시상수, 갱신 시간, 잡음 표준 편차, 그리고 표준정규분포를 따르는 백색 잡음을 나타낸다. 해조류 모델에서 시상수와 잡음 표준 편차는 필터를 설계할 때 정해주며 다양한 데이터를 통해 적절한 값을 설정 한다.

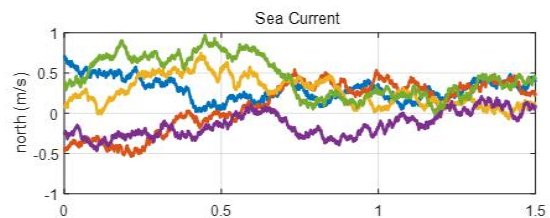


그림 1. 1차 Markov 모델로 생성된 해조류 모델 예제
Fig. 1. Example of Sea Current made by 1st-order Markov Model

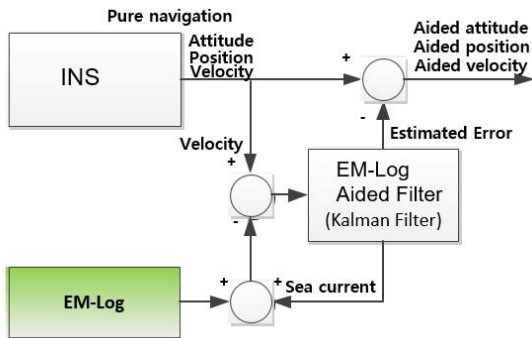


그림 2. 단일 모델 기반 EM-Log 보정항법 구성도
 Fig. 2. EM-Log filter structure based on a single model

2-3 단일 모델 칼만 필터 기반 EM-Log 보정 필터

EM-Log 보정항법을 구성함에 있어서 단일 모델 기반 필터는 일반적으로 17차 모델로 구성되어 있으며 그림 2는 단일 모델 칼만 필터 기반 EM-Log 보정항법 구성도를 나타낸다. 먼저 관성항법장치에서 측정된 속도와 EM-Log에서 측정된 속도의 차분을 측정치로 사용해 칼만필터를 구성하고 추정된 오차를 순수항법에 보상하는 방식으로 구성하였다. 관성항법장치와 달리 EM-Log가 측정된 속도에는 해조류 속도가 포함되어있기 때문에 필터에서 추정된 해조류로 속도를 보상해 주어야 한다. EM-Log 가 해상 운동체의 진행축과 측면축으로 설치되어 있다면 해조류 추정에 이점이 많으나, 실제 운동체에 설치된 EM-Log 센서는 대부분 진행축에만 장착되어 진행축 속도만 측정한다. 이처럼 센서가 진행축만 측정할 경우 해조류 추정에 어려움이 있기 때문에 본 논문에서는 EM-Log가 진행축 속도만 측정하더라도 더 정확한 해조류 추정을 위해 지상에서 자동차와 같은 운동체에 사용될 수 있는 운동제한 조건 (NHC : non-holonomic constants)을 해상 운동체에 적용하는 방법을 사용했다. NHC는 진행축으로 운동하는 운동체는 측면축으로 속도가 0에 가깝다는 원리를 이용한 기법으로 이를 해상 운동체에 적용하면 진행축으로 운동하는 해상 운동체의 측면축으로 측정된 속도는 운동체가 물에서 상대적으로 움직인 속도는 0에 가깝고 물과 같이 움직인 속도만이 항법장치에서 측정되는 것으로 판단할 수 있어 측면 속도는 대부분 해조류의 속도로 판단할 수 있다. 이처럼 운동체에 NHC를 사용할 경우 EM-Log 하나만으로 진행축과 측면축을 측정할 수 있는 장점이 있다.

$$\text{측정치} = \begin{cases} \text{진행축 항법장치 속도} - \text{EM-Log 속도} \\ \text{측면축 항법장치 속도} \end{cases} \quad (7)$$

단일 모델 필터 기반 EM-Log 보정항법의 순서도는 아래와 같다. 시스템은 필터 초기화 후 보정필터 전파 및 측정치 행렬이 갱신되고 유효성 판단을 통해 측정치가 유효한 경우 보정필터를 갱신하고 유효하지 않을 경우 보정필터 갱신 없이 이전에 유효한 값을 이용해 순수항법을 보정한다.

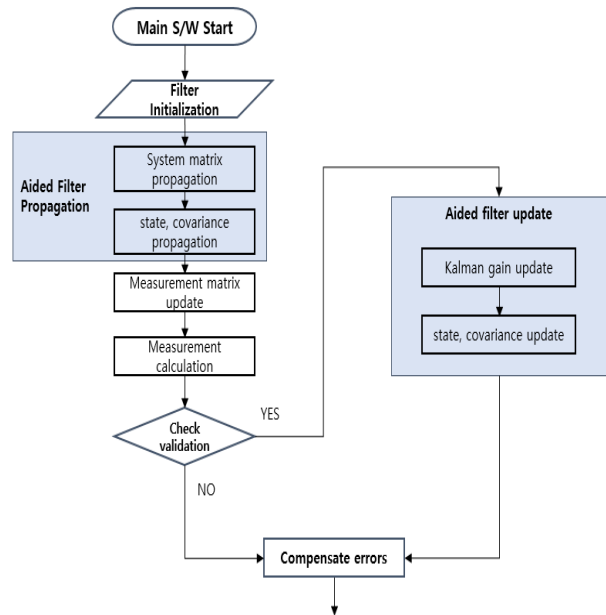


그림 3. 단일 모델 기반 EM-Log 보정항법 순서도
 Fig. 3. Diagram of EM-Log filter based on a single model

2-4 IMM기반 EM-Log 보정 필터

단일 모델 필터 기반 EM-Log 보정항법은 특정한 하나의 해조류 모델을 고려한다. 하지만 해조류의 정확한 모델을 알 수 없고 수시로 변하기 때문에 하나의 해조류 모델을 사용하는 것은 필터의 성능을 저하시킬 수 있다. 이러한 해조류의 불확실성을 줄일 수 있는 방법으로 필터의 개수를 늘려 다양한 해조류 모델을 구성할 수 있는 IMM기반 EM-Log 보정항법 필터를 구성하였다. IMM 필터는 기존에 air traffic control (ATC) 등 Target을 추정하는 기법에도 이미 많이 사용되고 있다 [5][6]. 아래의 그림은 IMM기반 EM-Log 보정항법 필터 구성도를 나타낸다. 기존 단일 필터 기반 보정항법과 다르게 필터의 개수가 늘어났으며 Mixing과 Combination 과정이 추가되었다. 이 두 과정을 통해 각 필터에서 계산된 확률을 통해서 서로 다른 필터를 적절히 혼합해 최종 출력으로 오차를 보정한다.

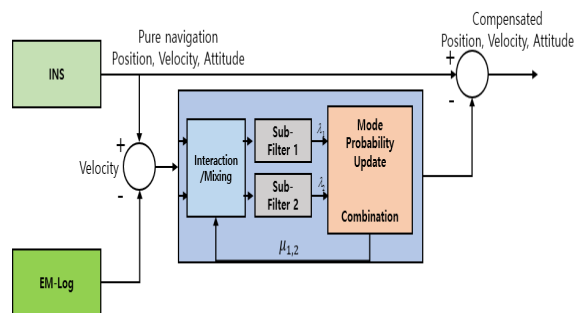


그림 4. IMM 모델 기반 EM-Log 보정항법 구성도
 Fig. 4. EM-Log filter structure based on IMM model

각 필터는 서로 다른 해조류 모델을 구성하고 외부 환경에 따라 적절한 해조류 모델을 선택해 필터를 계산한다. IMM필터를 구성할 때 전이행렬과 모델 확률 초기 값 설정이 필요하다.

$$M = \begin{bmatrix} P_{ii} & P_{ji} \\ P_{ij} & P_{jj} \end{bmatrix}; \mu_0 = \begin{bmatrix} \mu_{1,0} \\ \mu_{2,0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 M은 전이행렬로 필터 모델 i 가 필터 모델 j 로 변환될 확률을 나타내며, μ_0 는 각 필터 모델의 모델 확률을 나타낸다. 초기 설정 후 필터는 모델 확률과 전이확률의 곱을 통해 혼합 확률을 구한다.

$$\begin{bmatrix} m_{11,k} & m_{21,k} \\ m_{12,k} & m_{22,k} \end{bmatrix}, m_{ij,k} = \frac{1}{c_j} p_{ij} \mu_{i,k} \quad (8)$$

where, $c_j = \sum_{i=1}^2 p_{ij} \mu_{i,k}$

위의 식을 통해 계산된 혼합 확률을 이용해 각 부 필터들의 추정치와 공분산을 서로 혼합한다.

$$\hat{x}_{j,k}^m = \sum_{i=1}^2 \hat{x}_{i,k} m_{ij,k} \quad (9)$$

$$P_{j,k}^m = \sum_{i=1}^2 P_{i,k} + [\hat{x}_{i,k} - \hat{x}_{j,k}^m][\hat{x}_{i,k} - \hat{x}_{j,k}^m]^T m_{ij,k}$$

혼합된 각 부 필터들은 일반 필터와 동일하게 각각 보정필터 전파 및 시스템 행렬 갱신을 하고 각 필터의 우도비율(Likelihood Ratio)을 계산한다.

$$\Lambda_k = \begin{bmatrix} \lambda_{1,k} \\ \lambda_{2,k} \end{bmatrix}, \lambda_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \|C_{j,k}\|}} \exp - \frac{1}{2n_{i=k-n+1}} r_{j,i}^T C_{j,i}^{-1} r_{j,i}$$

where,

$$r_{j,i} = z_i - \hat{z}_{j,i}$$

$$C_{j,i} = H_{j,i} P_{j,i}^- H_{j,i}^T + R_{j,i} \quad (10)$$

계산된 우도비율을 이용해 초기에 설정된 모델 확률을 갱신시켜준다.

$$\mu_{j,k} = \frac{1}{\hat{c}_{j,k}} \lambda_{i,k} \bar{c}_{j,k-1}, j = 1, 2$$

where,

$$\hat{c}_{j,k} = \sum_{i=1}^2 \lambda_{i,k} \bar{c}_{i,k-1} \quad (11)$$

갱신된 모델 확률은 혼합된 각 부 필터들에 곱해져 하나의 추정치와 공분산을 생성하고 생성된 추정치는 순수항법 오차를 보상해준다.

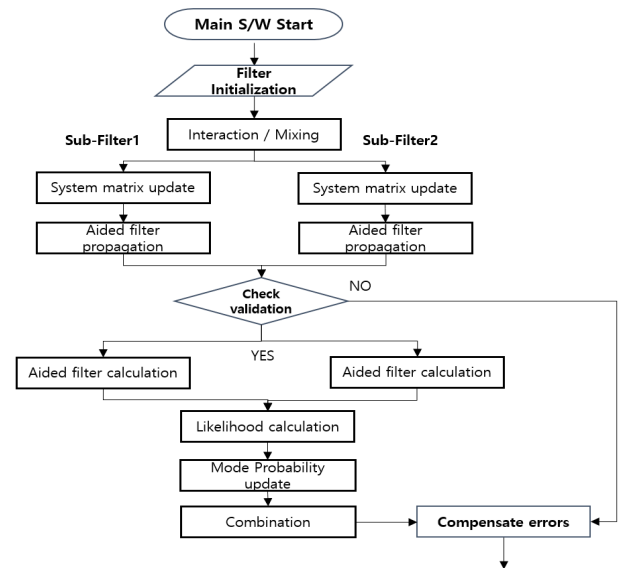


그림 5. IMM 모델 기반 EM-Log 보정항법 구성도
Fig. 5. EM-Log filter structure based on IMM model

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^2 \hat{x}_{i,k} \mu_{i,k} \quad (11)$$

$$P_k = \sum_{j=1}^2 P_{j,k} + [\hat{x}_{j,k} - \hat{x}_k][\hat{x}_{j,k} - \hat{x}_k]^T \mu_j$$

위에 설명된 계산 과정을 그림 5와 같이 순서대로 나타내었다. 순서도에서 유효성 판단 부분에서 기존의 단일 모델 기반 보정항법 필터와 동일하게 측정치가 유효한 경우 보정필터 갱신, 우도 비율 계산, 모델 확률 갱신 그리고 최종 조합 과정을 수행하고 그렇지 않을 경우 시스템 행렬 갱신과 보정필터 전파만 수행한 후 최종 출력은 기존에 유효했던 값으로 순수항법을 보상한다.

2-5 EM-Log 보정 필터 유효성 판단 기능 설계

EM-Log 센서는 패러데이의 법칙에 따라 유도 기전력을 생성하게 되며 생성된 기전력의 크기와 운동체의 이동 속도 사이에는 선형적인 비례 관계가 성립하여 운동체의 이동 속도를 계산할 수 있다. 측정된 속도가 필터 성능에 영향을 미치고 적절하지 않은 측정치가 필터에 사용되었을 경우 잘못된 추정치를 계산하며 이는 곧 항법 오차로 야기될 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같이 4가지 경우에 대한 유효성 판단을 실시한다.

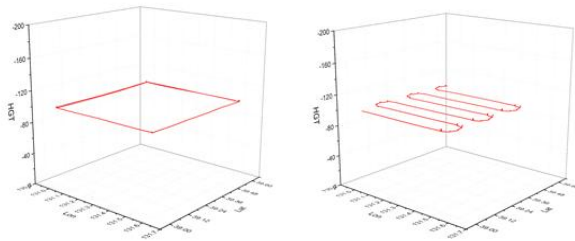
표 1. 유효성 판단 조건
Table 1. Conditions for validation

Condition 1	Acceleration based validation
Condition 2	Attitude based validation
Condition 3	Residual based validation
Condition 4	Data repeatability based validation

표 2. 시뮬레이션 조건

Table 2. Conditions for validation

	Simulation condition
Sea current	$T_c = 2\text{Hr}, \sigma_c = 0.5\text{m/s}$
Random noise[m/s]	0.1 m/s
Num of Monte Carlo	32
Trajectory	Square, S
Simulation time	16Hr



Square trajectory

S trajectory

그림 6. M&S로 생성한 시뮬레이션 궤적

Fig. 6. Simulation trajectory provided by M&S

III. 시뮬레이션 환경 구성

먼저 항법센서 모델링 M&S를 통해 사각형 궤적과 S자 궤적 두 가지 궤적을 생성하였다. M&S 검증에 위한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같이 설정하였다. 위의 조건으로 생성한 시뮬레이션 사각형 궤적과 S형 궤적 형태는 그림6과 같다.

M&S를 통해 생성한 해조류는 표 2와 같이 1차 마코프 형태의 해조류로 모델링 하였으며 해조류 방향은 북측 동측 모두 45° 방향으로 진행하도록 설정하였다. 생성된 해조류는 아래 그림과 같고 V_{c_n} 과 V_{c_e} 는 각각 북측 동측 방향의 해조류 크기를 나타낸다.

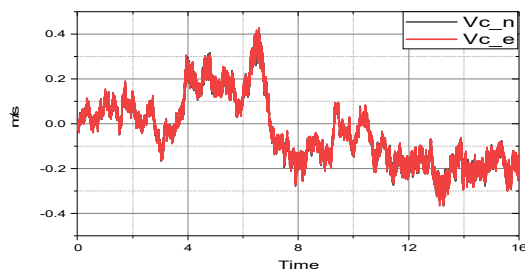


그림 7. M&S로 생성된 기준 해조류 모델

Fig. 7. Reference Sea current model provided by M&S

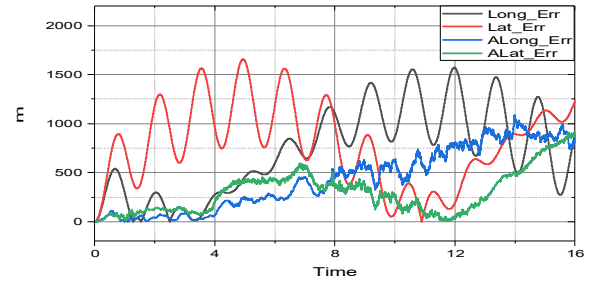


그림 8. 순수항법 대비 IMM 기반 보정항법 위도 경도 오차

Fig. 8. Latitude and longitude error for pure navigation and IMM based aided navigation

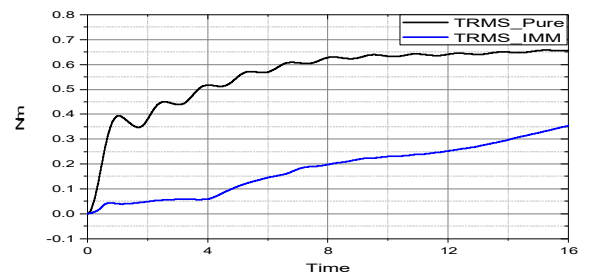


그림 9. 순수항법 대비 보정항법 TRMS 오차

Fig. 9. TRMS error for pure navigation and aided navigation

IV. EM-Log 보정항법 필터 검증

EM-Log 보정항법 필터는 단일 모델 기반과 IMM 모델 기반 보정항법 필터를 검증하였고 단일 모델 기반 필터는 해조류 모델을 각각 $T_c 7200, \sigma 0.25$ 과 $T_c 7200, \sigma 0.5$ 로 설정하였고, IMM 모델 기반은 두 개의 해조류 모델을 모두 사용하였다. 그림 8은 순수항법 대비 IMM 모델 기반 EM-Log 보정항법의 위도 경도 오차를 나타낸다. 슬러주기를 가지는 순수항법과 달리 보정항법은 슬러주기를 보이지 않으며 오차의 크기 또한 순수항법 대비 많이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 위도 경도 오차를 시간 제곱평균 제곱근 TRMS (time root mean square)로 구하면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 16시간 기준으로 순수항법의 경우 0.66Nm이며 보정항법의 경우 0.35Nm을 확인할 수 있다. 아래표는 IMM기반 EM-Log 보정항법이 추정한 해조류와 M&S로 생성된 기준 해조류 모델의 오차를 RMS 구해 정리한 값이다. 동측, 북측 해조류 RMS 오차가 0.1m/s 이내의 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

표 3. 사각형 궤적 해조류 RMS 오차

Table 3. RMS sea current error for square trajectory

	RMS Error
East sea current	0.056
North sea current	0.066

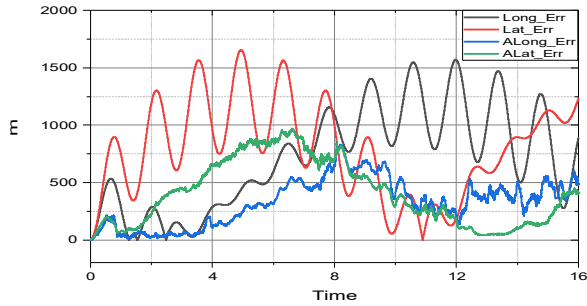


그림 10. 순수항법 대비 IMM 기반 보정항법 위도 경도 오차
 Fig. 10. Latitude and longitude error for pure navigation and IMM based aided navigation

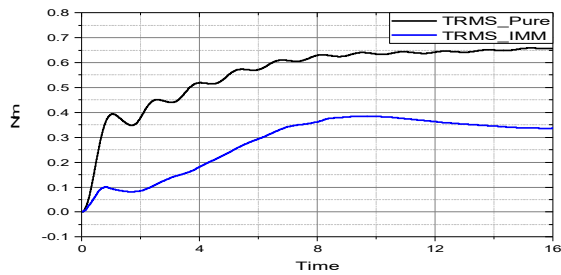


그림 11. 순수항법 대비 보정항법 TRMS 오차
 Fig. 11. TRMS error for pure navigation and aided navigation

동일한 방법으로 S자 궤적에서 해조류 모델을 각각 T_c 7200, σ 0.25과 T_c 7200, σ 0.5로 설정하여 EM-Log 보정항법 필터를 검증하였다. 사각형 궤적과 유사하게 슬러주기가 줄어들었으며 위도 경도 오차도 순수항법 대비 감소한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 사각형 궤적과 비교했을 때 위도 경도, 경도 오차는 조금 증가하였다.

사각형 궤적과 유사하게 M&S에서 생성된 해조류와 EM-Log 보정항법이 추정된 해조류의 RMS 오차는 동축, 북축 모두 0.1m/s 이내의 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 각 궤적별로 해조류 모델을 변경하여 성능 점검을 수행하였으며 각 필터별 모델 정리는 표 5로 정리하였다. 단일 모델과 IMM 기반 필터 모델로 나뉘었으며 각 모델별로 해조류 모델의 파라미터만 변경하였으며 IMM 필터 2,3번의 경우 필터의 개수와 해조류 모델을 3,4개로 증가시켜 검증 수행하였다. 표 6,7은 각 궤적별 필터의 TRMS 성능을 나타낸다. TRMS의 기준은 16Hr을 기준으로 계산되었으며 순수항법 대비 성능 향상률도 계산하였다.

표 4. S형 궤적 해조류 RMS 오차
 Table 4. RMS sea current error for S trajectory

	RMS Error
East sea current	0.068
North sea current	0.074

표 5. 필터별 해조류 모델

Table 5. Seacurrent model for each filter

	Sea current model
Single model 1	$T_c: 7200, \sigma: 0.25$
Single model 2	$T_c: 7200, \sigma: 0.5$
IMM model 1	$T_c: 7200, \sigma: 0.25, T_c: 7200, \sigma: 0.5$
IMM model 2	$T_c: 7200, \sigma: 0.25, T_c: 7200, \sigma: 0.5$
	$T_c: 7200, \sigma: 0.1$
IMM model 3	$T_c: 7200, \sigma: 0.25, T_c: 7200, \sigma: 0.5$
	$T_c: 7200, \sigma: 0.1, T_c: 7200, \sigma: 0.3$

표 6. 사각형 궤적 TRMS 오차

Table 6. TRMS error for square trajectory

	TRMS Error[16Hr]	Improvement rate compared to Pure
Pure navigation	0.66	-
Single model 1	0.48	27.3%
Single model 2	0.29	56.1%
IMM model 1	0.35	46.9%
IMM model 2	0.41	37.8%
IMM model 3	0.41	37.8%

표 7. S형 궤적 TRMS 오차

Table 7. TRMS error for S trajectory

	TRMS Error[16Hr]	Improvement rate compared to Pure
Pure navigation	0.66	-
Single model 1	0.43	34.8%
Single model 2	0.31	53.0%
IMM model 1	0.34	48.5%
IMM model 2	0.37	43.9%
IMM model 3	0.38	42.4%

표 6,7에서 정리된 결과와 같이 두 궤적 모두 단일 모델을 사용했을 때 해조류 모델이 동일한 모델은 순수항법 대비 향상률이 크게 증가하였으나 해조류 모델이 다른 경우 향상률은 상대적으로 적게 증가했다. 이는 필터 성능에 정확한 해조류 모델이 영향을 미친다는 것을 말해준다. IMM 필터 1번의 경우 해조류 모델이 정확한 단일 필터만큼의 향상률은 보여주지 못했지만 비슷한 향상률을 보여준다. 이는 실제 해상에서 예측할 수 없는 해조류 모델을 단일 필터보다는 불확실성을 줄여줄 수 있게 2개의 모델을 사용하는 IMM 필터 기반 모델을 사용하는 것이 유용하다. 필터 3, 4개를 늘렸을 경우는 필터 2개를 사용했을 때 보다 성능이 향상 될 것이라 생각했지만 오히려 성능 향상률이 감소한 결과를 볼 수 있었다. 이는 보통 IMM 필터의 경우 확연히 다른 두 모델을 사용하나 본 논문에 사용된 IMM의 경우는 다른 해조류 모델로 사용한 경우이기 때문에 이는 필터간 모델이 크게 다르지 않기 때문에 필터 모델 개수의 증가가 크게 효과적이지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

일반적으로 관성항법장치는 시간이 지남에 따라 누적 오차가 발생하게 되어 항법 성능이 저하된다. 누적 오차를 보정하기 위하여 외부 센서를 이용하여 항법 오차를 보정해주며 일반적으로 정확한 위치정보를 제공해주는 GPS가 활용된다. 하지만 해상에서는 GPS의 정보가 가용하지 않을 경우가 생기기 때문에 해상에서 관성항법장치를 보정할 수 있는 외부 정보가 필요하며 본 논문에서는 대수 속력을 측정할 수 있는 EM-Log 센서를 이용한 보정항법 필터를 설계하였다. EM-Log 센서는 패러데이의 법칙에 따라 유도 기전력을 생성하게 되며 생성된 기전력의 크기와 항체의 이동 속도 사이에는 선형적인 비례 관계가 성립하여 항체의 이동 속도를 계산할 수 있다. 그러나 관성항법 장치에 비해 성능이 낮은 보조센서를 사용하는 경우 오히려 항법 성능을 저하시킬 수 있기 때문에 가감속, 회전, 측정치 잔차, 센서 BIT와 같은 정보를 이용한 유효성 판단 또한 성능 향상에 중요한 요소가 된다. EM-Log 보정항법은 센서에서 측정되는 속도를 이용하여 속도 보정을 하도록 설계되어 있으나 센서에서 측정되는 속도는 해조류의 속도가 포함되어 있기 때문에 해조류 모델을 설계하여 해조류 추정 기능이 필요하다. 일반적으로 해조류는 1차 Markov 모델로 모델링을 하며 모델의 시상수 및 잡은 표준 편차에 의해서 해조류의 모델의 크기가 결정된다. 해상에서 수시로 변화하는 해조류를 하나의 모델을 사용할 때 해조류의 불확실성이 크기 때문에 본 논문에서는 1개 이상의 해조류를 고려하는 IMM 기반 보정항법을 설계하였다. 단일 모델 필터의 경우 해조류 모델이 정확한 경우 순수항법 대비 56.1%, 53%의 성능 향상률을 보여줬으나 해조류 모델이 달라졌을 경우 27.3%, 34.8% 정도의 성능 향상률이 있었다. 이처럼 해조류의 모델이 성능에 영향을 미치는 것을 고려하여 실제 바다에서 해조류의 불확실성을 줄이기 위해 IMM 기반 모델의 보정항법을 사용하는 것이 더 효과적이고 안정적인 성능을 확보할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. IMM 기반 모델의 보정항

법 필터의 개수를 3,4개로 늘렸을 경우 오히려 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있었는데 이는 확연히 차이 나는 필터 모델이 아닌 해조류와 같이 유사한 모델의 필터 개수 증가했을 경우 필터의 개수 증가는 크게 효과적이지 않은 것으로 확인되었다.

References

- [1] D. B. Park, D. H. Shin, S. H. Oh, and H. S. Kim, "Development of a INS/GPS system for precision GPS guided bomb," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 27, No. 3, pp. 31-39, 2012.
- [2] S. H. Oh, D. H. Hwang, C. S. Park, and S. J. Lee, "Attitude determination GPS/INS integrated navigation system with FDI algorithm for a UAV," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 1529-1543, Aug.2005.
- [3] I. B. Vaisgant,, Yu A. Litvinenko, and V. A. Tupysev, "Verification of EM log data in marine inertial navigation system correction," *Gyroscopy and Navigation*, Vol. 2, No. 1, pp. 34-38, 2011.
- [4] S. P. Dmitriev, N. V. Kolesov and A.V. Osipov, *Information Reliability, Monitering and Diagnostics of Navigation Systems*, 1ST ed. Russia: Elektropribor, 2003.
- [5] H. Wang, T. Kirubarajan , and Y. Bar-Shalom, "Large scale air traffic surveillance using IMM estimator with assignment," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 35, No. pp. 255-266, Jan. 1999.
- [6] M. Yeddanapudi, Y. Bar-Shalom, and K. R. Pattipati, "IMM estimation for multitarget-multisensor air traffic surveillance," *IEEE Porceeding*, Vol. 85, No. pp. 80-94, Jan. 1997.



조 민 수 (Min-Su Jo)

2014년 2월: 경상대 전기전자공학부(공학사)
 2017년 2월: 대구경북과학기술원 정보통신융합(공학석사)
 2017년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 3본부 4부 연구원
 ※관심분야: 관성항법시스템, 위성항법시스템, 오류검출, 필터링