

## 해조류 속도 오차 추정을 통한 속도보정항법 알고리즘

# Velocity Aided Navigation Algorithm to Estimate Current Velocity Error

최 윤 혁

국방과학연구소 제3기술연구본부

Yun-Hyuk Choi

The 3<sup>rd</sup> Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

### [요 약]

관성항법장치는 시간 경과에 따라 관성센서 및 초기정렬 오차로 인해 항법 오차가 발생한다. 이를 보상하기 위한 방법으로 위성 항법시스템 및 속도계 등을 이용하여 보정항법을 수행한다. 수중 환경에서는 GNSS 신호가 통하지 않기 때문에, 수중운동체에 탑재한 관성항법장치는 주로 속도계 보조센서를 이용하여 보정항법을 수행한다. 속도계 보조센서는 DVL, EM-Log, RPM이 있으며, 시스템 환경에 따라서 센서 종류가 적용된다. 본 논문은 고속 및 심해 환경에서 운용되는 관성항법장치의 RPM 속도보정항법을 설계하였다. 또한 직진 방향의 성분을 갖는 RPM 속도계의 한계를 보완하며, 해조류 속도 오차를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 통해 성능을 입증하였다.

### [Abstract]

Inertial navigation system has navigation errors because of the error of inertial measurement unit (IMU) and misalignment over time. In order to solve this problem, aided navigation system is performed using global navigation satellite system (GNSS), speedometer, etc. The inertial navigation system equipped with underwater vehicle mainly uses speedometer and performed aided navigation because satellite signals do not pass through underwater. There are DVL, EM-Log, and RPM in the speedometer, and the sensors are applied according to the system environment. This paper describes velocity aided navigation using RPM of inertial navigation system operating in high speed and deep water environment. In addition, we proposes an algorithm to compensate the limit of RPM with straight direction and the current velocity error. There are results of monte-calco simulation to prove performance of the proposed algorithm.

**Key word** : Inertial navigation system, Integrated navigation, Kalman filter, Current velocity error, Revolution per minute, Monte-calco simulation.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.3.245>



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 4 June 2019; Revised 6 June 2019

Accepted (Publication) 25 June 2019 (30 June 2019)

\*Corresponding Author; Yun-Hyuk Choi

Tel: +82-42-821-2384

E-mail: yh\_choi@add.re.kr

## I. 서론

관성항법장치 (INS; inertial navigation system)는 관성센서인 자이로스코프(gyroscope)와 가속도계(accelerometer)에서 측정된 가속도 및 각속도 정보를 이용하여 외부의 도움 없이 항법 정보를 제공하는 시스템이다. 관성항법장치가 제공하는 항법 정보는 각속도와 가속도 성분을 적분하여 구하기 때문에, 시간 경과에 따라 센서 오차 및 초기정렬 오차가 누적되어 항법해가 슬러주기를 가지면서 발산하게 된다. 따라서 장시간 운용되는 관성항법장치의 항법 오차를 줄이기 위해서는 초기자세 오차를 줄이고, 외부센서를 이용한 보정항법 알고리즘을 사용하여 주요 오차를 추정하고 보상해야 한다 [1].

관성항법장치의 보정을 위한 보조센서로 일반적으로 GPS (global positioning system)를 사용하지만, 수중환경에서는 GPS 신호를 수신할 수 없기 때문에 DVL, EM-Log, RPM을 보조센서로 사용하고 있다. DVL (doppler velocity log)은 수중에서 음파를 이용하여 대지속도를 측정하기 때문에 보조센서로 사용 시 관성항법장치의 속도 해가 발산하는 것을 방지하여 향상된 항법 정보를 도출할 수 있으나, 센서의 측정 범위가 수심에 따라 결정되기 때문에 수중 운항 중에 수심이 급격히 깊어지게 되면 속도를 측정하지 못하는 단점이 있다. EM-Log (electro magnetic log)는 자기장을 발생시키는 센서로 해수가 통과될 때 속도에 비례하는 전류를 발생시켜 운동체의 대수 속도를 측정하는 비관성 센서이나, 가감속 또는 회전 시 오차가 발생하는 단점을 가지고 있다. RPM(revolution per minute) 속도는 프로펠러의 분당 회전수를 환산식을 이용하여 계산할 수 있지만, 환산 계수 오차와 비정렬 자세 오차를 포함하기 때문에 추정 및 보상 없이는 정확한 속도 정보로 사용하기 어려운 단점이 있다. 또한 항체의 항진속도가 변화할 때 회전속도계로서는 감지할 수 없는 가속도의 발생, 유체 계수의 비선형성, 해조류 속도(current velocity) 오차로 인하여 속도추정치로 사용하는데 어려움이 있다.

기존의 연구는 속도계(speedometer) 측정오차를 중점적으로 고려한 바이어스 분리 추정기법을 사용하였고, 가감속 구간에서 속도 척도계수의 측정오차가 발생했을 때 일반적인 칼만필터 설계보다 우수한 성능을 보였다 [3]. 또한 수중운동체의 보조센서를 이용하여 속도 보정항법 필터를 설계하였고, 보조센서가 가용하지 않은 경우 속도 추정필터를 사용한 보정항법을 제시하였다. 기존의 연구는 수중운동체가 발생시키는 속도에 비해 해조류 속도가 무시할 만한 크기의 값을 갖는다고 가정하였고 이를 배제한 연구 결과를 제시하였다 [4], [5]. 따라서 수중운동체의 선회 및 해조류에 의해 나타나는 측정오차가 발생할 경우 기존의 기법으로 오차를 추정하는데 한계가 있으며, 이를 보완하는 해조류 속도 오차 추정 방법에 대한 필요성이 제기되었다.

본 논문에서는 위성항법시스템(GNSS; global navigation satellite system)을 운용할 수 없는 수중에서 넓은 운용반경을

가지는 수중운동체의 항법 성능을 향상시키기 위해서, 관성항법장치의 속도보정항법 알고리즘과 해조류 속도 오차 추정에 대한 연구를 수행하였다. 고속 및 심해에서 운용되는 수중운동체는 RPM 속도 정보를 보조센서로 사용하였고, 속도 정보의 오차 요소인 해조류 속도 오차를 추정하는 칼만필터를 설계하여 기존의 속도보정항법에서 취약했던 부분을 보완하는 연구 결과를 제시하였다.

또한 시뮬레이션을 통해 알고리즘 검증을 수행하였으며, 최종적으로 순수항법과 RPM 속도보정항법, 그리고 해조류 속도 오차를 추정한 속도보정항법 결과로 비교 분석하였다.

## II. 속도보정항법 알고리즘

### 2-1 항법 방정식

스트랩다운 관성항법장치(SDINS; strapdown inertial navigation system)의 항법계산 알고리즘은 속도 및 자세 미분 방정식의 해를 구하는 것이다. 속도계산은 가속도계 출력인 속도변화량과 초기좌표변환 행렬을 포함하는 자이로스코프의 자세변화량을 이용하여 이루어지며, 자세계산은 동체각속도  $w_{ib}^b$ 의 자세변화와 항법좌표계각속도  $w_{in}^n$ 의 자세변화로 구한다.

동체좌표계에서 측정된 비힘(specific force) 또는 선형가속도  $f^b$ 는 자세계산 알고리즘에 의해 계산된 좌표변환행렬  $C_b^n$ 을 이용하여 항법좌표계에서의 선형가속도  $f^n$ 으로 변환시킨다.

$$\begin{aligned} \dot{V}^n &= C_b^n f^b - (w_{ie}^n + w_{in}^n) \times V^n + g^n \\ &= C_b^n f^b - (2w_{ie}^n + w_{en}^n) \times V^n + g^n \end{aligned} \quad (1)$$

항법 방정식은 식 (1)과 같으며, 위 식을 계산하여 항체의 위치와 속도해를 구할 수 있다. 관성항법장치의 일반화 된 속도 미분 방정식  $\dot{V}^n$ 을 적분하면 식(2)와 같이 표현되며 그 성분은 ENU frame에 대해 정의한다. 코리올리스 성분은 식 (4), (5), (6)과 같고,  $\Omega$ 는 지구회전각속도 상수,  $w_{ie}^n$ 은 지구회전각속도,  $w_{en}^n$ 은 이동각속도,  $g^n$ 은 위도에 대한 중력,  $L$ 은 위도를 나타낸다 [1], [2].

$$V^n = \int_0^t \dot{V} dt + V^n(0) \quad (2)$$

$$V^n = [V_E \ V_N \ V_U]^T \quad (3)$$

$$w_{ie}^n = [0 \ \Omega \cos L \ \Omega \sin L]^T \quad (4)$$

$$w_{en}^n = \left[ -\frac{V_N}{R_\phi + h} \quad \frac{V_E}{R_\lambda + h} \quad \frac{V_E}{R_\lambda + h} \tan L \right]^T \quad (5)$$

$$w_{in}^n = w_{ie}^n + w_{en}^n \quad (6)$$

$$g^n = g - w_{ie} \times w_{ie} \times R \quad (7)$$

항체의 위치는 미분 방정식 (8)과 (9)로 정의하며, 각각 위도와 경도를 구하는 식이다. 아래 식에 쓰이는 변수의 정의는 다음과 같다.

$$\dot{L} = \frac{V_N}{R_\varphi + h} \quad (8)$$

$$\dot{i} = \frac{V_E}{(R_\lambda + h) \cos L} \quad (9)$$

$$R_\varphi = \frac{R_0(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 L)^{3/2}} \quad (10)$$

$$R_\lambda = \frac{R_0}{(1-e^2 \sin^2 L)^{1/2}} \quad (11)$$

$R_\varphi$ ,  $R_\lambda$ 는 지구 타원형 모델의 단반경과 장반경이며,  $R_0$ 는 적도에서의 지구반경,  $e$ 는 이심률,  $h$ 는 심도를 나타낸다.

항법좌표계와 동체좌표계 사이의 방향코사인 행렬(DCM; direction cosine matrix)  $C_b^n$ 을 계산하는 자세 미분 방정식은 식 (12)와 같다. 시변성을 고려하는 자세를 계산하기 위해 poisson equation을 이용하였으며, 최초의  $C_b^n$ 은 자체정렬 또는 전달정렬을 통해 구한다.  $\Omega_{ib}^b$ 는 자이로 측정치의 왜대칭행렬이고,  $\Omega_{in}^n$ 은 항법좌표계각속도의 왜대칭행렬이므로 시간에 대한 자세 미분 방정식을 적분하여 현재의 자세를 구할 수 있다.

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^n C_b^n \quad (12)$$

### 2-2 오차 방정식

SDINS 항법 알고리즘의 오차 모델을 유도하기 위해서 보편적으로 섭동법(perturbation method)을 사용한다. 섭동법은 항법 알고리즘으로 얻어진 각각의 변수와 실제 값의 차를 오차변수로 두어 시스템을 해석하는 것으로 비선형 시스템에서는 오차의 크기가 작은 경우에 적용될 수 있으며, 이로 인해 선형화된 오차 방정식을 얻을 수 있다 [3].

$$\delta \dot{f}^n = \delta \dot{V}^n + (\delta w_{ie}^n + \delta w_{in}^n) \times V^n + (w_{ie}^n + w_{in}^n) \times \delta V^n + \delta g^n \quad (13)$$

$$\delta \dot{V}^n = [f^n \times] \Phi + C_b^n \delta f^b - (w_{ie}^n + w_{in}^n) \times \delta V^n - (\delta w_{ie}^n + \delta w_{in}^n) \times V^n + \delta g^n \quad (14)$$

$$\dot{\Phi} = -w_{in}^n \times \Phi - C_b^n \delta w_{ib}^b + \delta w_{in}^n \quad (15)$$

$$\delta \dot{p} = \delta V^n \quad (16)$$

식 (13)~(16)은 섭동법이 적용된 선형 오차 방정식이고, 위치에 대한 항법 오차 모델은 속도 오차 방정식을 적분하여 식 (17), (18)로 유도된다. 유도된 위치 오차 방정식은 단방경의 미

분  $\dot{R}_\varphi$ 과  $w_{en}^n$ 의 성분인  $\rho$ 로 표현되고, 고도  $h$ 를 고려하여 식 (17)~(19)와 같이 정리할 수 있다 [2].

$$\delta \dot{L} = \frac{\rho_E \dot{R}_\varphi}{R_\varphi + h} \delta L + \frac{1}{R_\varphi + h} \delta V_N + \frac{\rho_E}{R_\varphi + h} \delta h \quad (17)$$

$$\delta \dot{i} = \frac{\rho_N}{\cos L} \left( \tan L - \frac{\dot{R}_\varphi}{R_\varphi + h} \right) \delta L + \frac{1}{(R_\varphi + h) \cos L} \delta V_E - \frac{\rho_N}{(R_\varphi + h) \cos L} \delta h \quad (18)$$

$$\delta \dot{h} = \delta V_U \quad (19)$$

### 2-3 상태 방정식

칼만필터는 상태변수의 최적 추정치를 구하는 알고리즘으로써, 구조가 선형적이고 실제값의 평균치와 추정값의 평균치 사이에 바이어스가 없으며, 상태변수와 상태 추정치 사이의 오차공분산을 최소화 하는 특징을 가진다. 사용된 칼만필터는 항법오차를 시스템 상태변수로 사용하고, 추정된 오차를 관성항법장치에 피드백하여 보상하는 간접 피드백 칼만필터(indirect feedback kalman filter)를 사용하였다. 이 때, 외부센서를 통해 출력된 속도정보와 SDINS의 속도해의 차이를 추정치로 사용한다 [6].

본 연구 모델은 통합필터를 사용하기 위해 총 24차의 상태변수로 구성하였고, 전달정렬과 보정항법 모드에 따라 각각의 상태변수가 영향을 받지 않도록 설계하였다. 상태변수는 위치 오차 3차, 속도 오차 3차, 자세 오차 3차, 가속도계와 자이로 센서의 바이어스 각 3차, RPM 속도의 환산계수 1차 및 비정렬 자세 오차 2차, 해조류 속도 오차 2차, 장착 비정렬각 오차 3차, 시간 지연 오차 1차로 구성하였다.

$$X = [X_p \ X_v \ X_\phi \ X_{Ab} \ X_{Gb} \ X_{RPM} \ X_C \ X_\mu \ X_T]^T \quad (20)$$

24차의 상태변수로 정의된 선형 상태 방정식과 측정 방정식은 칼만필터를 구현하기 위해 다음과 같이 이산형으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + G(t)w(t) \quad (21)$$

$$x(t+1) = \Phi(t)x(t) + G(t)w(t) \quad (22)$$

$$\Phi(t) = I + F\Delta t + \frac{1}{2}(F\Delta t)^2 \quad (23)$$

$$z(t) = H(t)x(t) + \nu(t) \quad (24)$$

$x$ 는 상태변수,  $F$ 는 시스템 행렬,  $G$ 는 시스템 잡음 이득행렬,  $w$ 는 시스템 백색잡음이고,  $z$ 는 측정치 벡터,  $H$ 는 측정치 행렬,  $\nu$ 는 측정치 잡음이다.  $\Phi(t)$ 는 상태전이행렬로써 행렬  $F(t)$ 의 멱급수로 나타내어 식 (23)과 같이 표현되며 2차항 이후의 변수는 생략한다.

2-4 측정 방정식

상태 방정식과 측정 방정식은 칼만필터를 구성하기 위해서 상태변수의 추정 가능성과 칼만필터의 공칭안정도를 분석해야 한다. 이는 가관측성을 분석하여 시변시스템으로 고려할 수 있는 관성항법장치의 운동, 즉 자세운동과 가속도운동 등을 기준으로 분석한다.

관성항법장치의 가관측성 분석은 운동 상태에 따라 자세운동과 가감속 운동이 동시에 발생할 때 속도보정 오차모델이 완전 관측 가능하고, 방위각 변화나 가감속 운동이 발생할 때 방위각 오차 성분이 관측 가능하게 된다. 결론적으로 모델이 자세운동을 하며, 방위각 변화 또는 가감속 운동을 할 때 칼만필터의 추정 성능을 보장할 수 있다.

수중에서 RPM 속도계의 정보를 제공받는 관성항법장치는 지상의 운동과는 달리 유향 및 유속을 갖는 환경에서 운동한다. 여기서 유향은 해조류의 방향이고, 유속은 해조류의 속력을 의미한다. 따라서 수중운동체는 그림 1과 같이 RPM 속도 외에 수평 성분을 띄는 해조류 속도의 영향을 받는다.

해조류를 추정하기 위해서, 대지속도를 측정하는 관성항법장치의 속도와 대수속도를 측정하는 RPM 속도계의 정보의 차를 구하면 해조류의 속도를 구할 수 있다. 해조류 속도 추정 방법은 먼저 정속 직진 운동을 하는 수중운동체에 측면속도가 발생하지 않는다고 가정한다. 해조류가 RPM 속도계와 동일한 x 축 방향으로 유입된다면, x 축에서 측정되는 속도는 환산계수를 보정한 RPM 속도계의 출력 값과 해조류 속도의 합이고 이때의 y 축의 속도는 0이라고 정의한다. 만약 해조류가 RPM 속도계와 직교하는 y 축 방향으로 유입된다면, x 축에서 측정되는 속도는 RPM 속도계의 출력 값이고, 이때의 y 축의 속도는 온전한 해조류의 속도라고 정의한다.

그림 1과 그림 2의 알고리즘 설계에 따라 속도 측정 방정식  $Z_{rpm}$ 은 식 (25)로 정의되며 이를 유도하면 식 (26)으로 정리되고, 유도된 측정 방정식을 이용하여  $H_{rpm}$  행렬식을 구한다.

$\hat{V}$ ,  $\hat{C}$ 는 참값과 오차값을 포함하는 속도, 자세 측정치를 의미하며,  $C_n^b$ 는 동체좌표계를 기준으로 하는 항법좌표계의 자세,  $\Phi^n$ 은 항법좌표계의 비정렬각 왜대칭행렬,  $\delta m^v$ 는 Roll 축

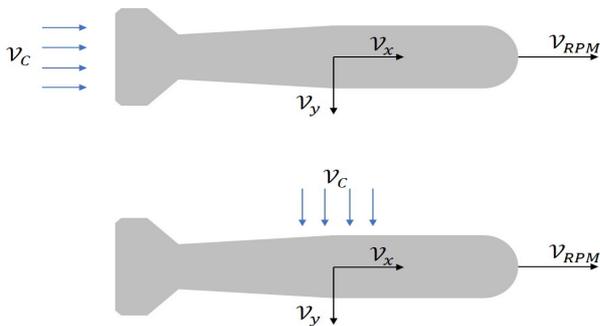


그림 1. 해조류 속도의 추정 원리  
Fig. 1. Principles of estimation of a current velocity.

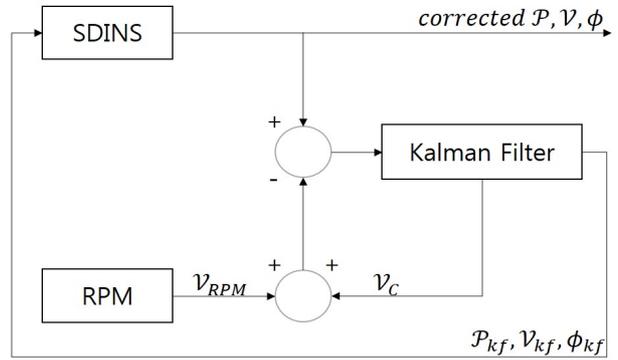


그림 2. 해조류 속도 오차를 추정하는 칼만필터 알고리즘  
Fig. 2. Kalman filter algorithm for estimating current velocity error.

과 RPM 속도 방향 사이의 비정렬 자세 오차,  $\delta K$ 는 RPM 속도 척도계수,  $V_{ins}^n$ 은 항법좌표계에 대한 INS속도,  $V_c^n$ 은 항법좌표계에 대한 해조류 속도,  $V_{rpm}^n$ 는 Roll축에 대한 RPM 속도이다.

$$\begin{aligned} Z_{rpm} &= \hat{V}_{ins}^b - (\hat{V}_{rpm}^b + \hat{V}_c^b) \\ &= \hat{C}_n^b \hat{V}_{ins}^n - (\hat{V}_{rpm}^b + \hat{C}_n^b \hat{V}_c^n) \\ &= \hat{C}_n^b \hat{V}_{ins}^n - (\hat{C}_v^b (I + \delta K) V_{rpm}^n + \hat{C}_n^b \hat{V}_c^n) \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} Z_{rpm} &= C_n^b \delta V_{ins}^n - C_n^b [V_{ins}^n + V_c^n] \Phi^n \\ &\quad + V_{rpm}^v \delta m^v - V_{rpm}^v \delta K - C_n^b \delta V_c^n \\ &= H_{rpm} x + v_v \end{aligned} \tag{26}$$

$$H_{rpm} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & | & C_n^b & | & -C_n^b [V_{ins}^n + V_c^n] & | & 0_{3 \times 3} & | & 0_{3 \times 3} \\ & & 0 & & 0 & & V_{rpm}^v & & \\ & & | & -V_{rpm}^v & & 0 & & 0 & | & -C_n^b & | & 0_{3 \times 4} \\ & & 0 & & -V_{rpm}^v & & 0 & & \end{bmatrix} \tag{27}$$

III. 시뮬레이션

3-1 시뮬레이션 개요

본 연구의 장에서는 RPM 속도계를 통해 계산되는 출력속도가 오차를 포함하지 않은 값일 때, 척도계수 오차와 비정렬 자세 오차를 추정하여 RPM 속도를 보정하고, 이를 이용하여 속도보정항법을 수행하는 관성항법장치의 시뮬레이션 결과를 분석한다. 또한 해조류 속도 오차를 추정하여 기존의 속도보정항법과 본 연구에서 제시하는 해조류 오차 추정 모델이 위치오차 성능 결과가 어떻게 다른지 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다.

몬테카를로 시뮬레이션은 모델에서 가정한 난수를 이용하고 반복적 계산을 통해 확률론적 값을 구하는 모형을 의미한다. 본 논문은 표준편차가 1-sigma 값을 갖는 관성항법장치의 센서 사양 및 표 2의 시뮬레이션 초기 조건을 적용하여 100회

표 1. 관성항법장치의 센서 사양

Table 1. Sensor specifications of the inertial navigation system.

|                | Accelerometer         | Gyro                 |
|----------------|-----------------------|----------------------|
| Bias Error     | 100 $\mu$ g           | 0.1 deg/hr           |
| Scale Factor   | 100 PPM               | 100 PPM              |
| Random Walk    | 1 $\mu$ g/hr $^{1/2}$ | 0.01 deg/hr $^{1/2}$ |
| Misalign Error | 5 arcsec              | 5 arcsec             |

표 2. 몬테카를로 시뮬레이션 초기 조건

Table 2. Inertial condition of the monte-carlo simulation.

| Inertial condition                      | Value   |
|---|---------|
| Horizontal axis attitude error          | 1 mil   |
| Azimuth error                           | 3 mil   |
| Velocity error                          | 0.1 m/s |
| RPM scale factor                        | 2 %     |
| RPM misalignment                        | 0.1 deg |
| Depth bias                              | 2 m     |
| Error covariance about current velocity | 0.3 m/s |

의 모의시험을 수행하였다.

시뮬레이션을 위한 수중운동체의 기동 모델링은 약 8분의 항법 시간이 소요되며 약 6.8 km의 주행을 표본으로 궤적을 생성한다. 생성된 궤적에 따라 자세, 속도, 위치가 계산되며 센서 오차가 포함된 가속도 및 각속도 데이터와 보정항법 데이터를 이용하여 SDINS의 자세, 속도, 위치를 계산할 수 있다.

### 3-2 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션 결과는 순수항법, RPM 속도보정항법 그리고 해조류 오차 추정기법을 적용한 속도보정항법에 대해 각각 총 100회의 모의시험을 수행한 후, 시뮬레이션 결과를 RMS(root mean square)로 취하여 최종 분석을 수행하였다.  $N$ : 시험횟수,  $x_i = m_i - M_i$ :  $i$ 번째 측정값 오차,  $m_i$ 는  $i$ 번째 측정값,  $M_i$ 는  $i$ 번째 참값이다.

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (28)$$

시뮬레이션 결과 해조류 속도는 시간에 따라 E축과 N축에 대해 그림 3과 같이 추정되었으며, 속도 측정 방식에서 관성항법장치의 측정 속도 대비 RPM 속도계와 추정된 해조류 속도의 차를 이용하여 칼만필터에 적용하였다.

시뮬레이션의 최종 위치오차는 참값과 비교하여 경도 및 위

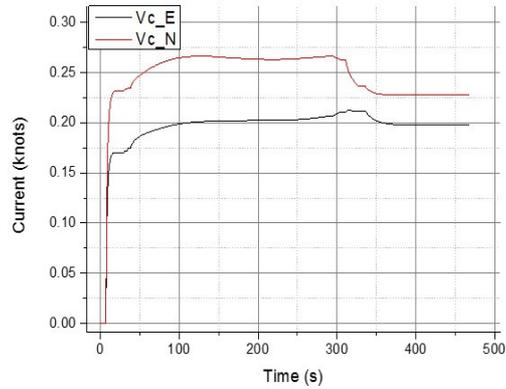


그림 3. 해조류 속도의 추정

Fig. 3. The estimation of current velocity.

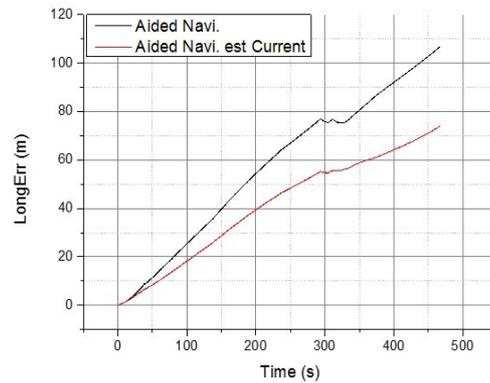


그림 4. 시뮬레이션을 이용한 경도 오차의 RMS 결과

Fig. 4. The RMS results of the longitude errors using simulation.

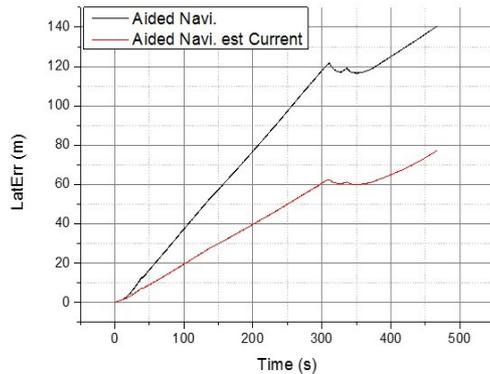


그림 5. 시뮬레이션을 이용한 위도 오차의 RMS 결과

Fig. 5. The RMS results of the latitude errors using simulation.

표 3. 몬테카를로 시뮬레이션 결과

Table 3. Results of the monte-carlo simulation.

| Navigation mode                                   | DT CEP <sub>50</sub> |
|---|----------------------|
| Pure navigation                                   | 12.572%              |
| Aided navigation                                  | 1.581%               |
| Aided navigation estimated current velocity error | 0.957%               |

도 오차를 구할 수 있으며 그 결과는 그림 4, 5와 같다. 그림에서 Aided Navi.는 RPM 속도보정항법이고, Aided Navi. est Current는 해조류 속도 오차 추정기법의 속도보정항법이다. 모의시험 결과 순수항법은 시간이 지남에 따라 위치 오차해가 기하급수적으로 나타났으며 그 결과는 표 3에서 확인할 수 있다.

시뮬레이션 결과는 총 이동거리(DT; distance)의 CEP<sub>50</sub> 계산으로 정리할 수 있다. Lat<sub>RMS</sub>는 위도 오차의 RMS 값이고, Long<sub>RMS</sub>는 경도 오차의 RMS 값이다.

$$CEP_{50} = 0.5887 \times [Lat_{RMS} + Long_{RMS}] \quad (29)$$

$$DT CEP_{50} = \frac{CEP_{50}}{DT_{RMS}} \times 100\% \quad (30)$$

그 결과 순수항법 수행 시 12.572% of DT CEP<sub>50</sub> (1σ), RPM 속도보정항법 수행 시 1.581% of DT CEP<sub>50</sub> (1σ), 해조류 속도 오차 추정기법을 적용한 속도보정항법 수행시 0.957% of DT CEP<sub>50</sub> (1σ)의 오차를 보였다.

#### IV. 결 론

관성항법장치의 속도계를 이용한 복합보정항법에 대해서 기존에 많은 연구가 진행되어왔으나, 수중에서 속도계를 이용한 보정항법은 센서 및 환경으로부터 손실되는 오차가 있으며, 그 중 해조류 속도 오차에 대한 문제가 야기되었다. 해조류 속도 오차로 인해 수중운동체에 미치는 영향은 미미할 것으로 가정되어 왔고, 그에 따른 연구 결과도 부족하였다. 따라서, 본 논문은 해조류 속도 오차를 추정하여 속도보정항법에 대한 연구

를 수행하였고, 해조류 속도 오차가 항법 위치해 결과에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다.

해조류를 추정하기 위해서 대지속도를 측정하는 관성항법 장치의 속도와 대수속도를 측정하는 RPM 속도계의 차를 이용하여 해조류 속도 오차의 측정 방정식을 설계하였고, 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 알고리즘 검증을 하였다. 그 결과 보조 센서만을 이용한 속도보정항법보다 본 연구에서 제안한 해조류 속도 오차를 추정한 속도보정항법이 위치오차 결과에 있어서 약 39.4% 향상된 성능을 구할 수 있었다.

따라서, 본 논문은 수중운동체의 속도보정항법에 있어서 기존의 단점을 보완하였고, 비선형성을 유발하는 실제 환경에서 적용 가능한 해조류 오차 속도를 추정하는 속도보정항법 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

#### References

- [1] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, London, UK: Peter Peregrinus Ltd, 1997.
- [2] O. S. Salychev, *Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions*, Moscow, Russia: BMSTU Press, 2004.
- [3] C. B. Jeon and J. Lyou, "Measurement of error estimation for velocity-aided SDINS using separate-bias kalman filter," *Journal of Control, Automation and System Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 56-61, Feb. 1998.
- [4] T. S. Yoo and S. I. Yoon, "DVL-RPM base velocity filter design for a performance improvement underwater integrated navigation system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 19, No. 9, pp. 774-781, June 2013.
- [5] Y. H. Lee, W. S. Ra, K. H. Kim, M. H. Ahn and B. J. Lee, "Gertler-Hagen hydrodynamic model based velocity estimation filter for long-term underwater navigation without external position fix", *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*. Vol. 65, No. 11, pp. 1868-1878, Nov. 2016.
- [6] A. Gelb, *Applied Optimal Estimation*, Cambridge, US: M.I.T. Press, 1974.



최 윤 혁 (Yun-Hyuk Choi)

2011년 8월 : 홍익대학교 조선해양공학과 (공학사)

2013년 8월 : 부산대학교 조선해양공학과 (공학석사)

2013년 8월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원

※ 관심분야 : 관성항법시스템, 위성항법시스템, 복합보정항법, 칼만필터